



バージョン 14

## 信頼性 / 生存時間分析

「真の発見の旅とは、新しい風景を探ることではなく、新たな視点を持つことである。」  
マルセル・ブルースト

JMP, A Business Unit of SAS  
SAS Campus Drive  
Cary, NC 27513

このマニュアルを引用する場合は、次の正式表記を使用してください: SAS Institute Inc. 2018.  
『JMP® 14 信頼性/生存時間分析』 Cary, NC: SAS Institute Inc.

## **JMP® 14 信頼性/生存時間分析**

Copyright © 2018, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA

All rights reserved. Produced in the United States of America.

**印刷物の場合:** この出版物のいかなる部分も、出版元である SAS Institute Inc. の書面による許可なく、電子的、機械的、複写など、形式や方法を問わず、複製すること、検索システムへ格納すること、および転送することを禁止します。

**Web からのダウンロードや電子本の場合:** この出版物の使用については、入手した時点で、ベンダーが規定した条件が適用されます。

この出版物を、インターネットまたはその他のいかなる方法でも、出版元の許可なくスキャン、アップロード、および配布することは違法であり、法律によって罰せられます。正規の電子版のみを入手し、著作権を侵害する不正コピーに関与または加担しないでください。著作権の保護に関するご理解をお願いいたします。

**米国 政府のライセンス権利、権利の制限:** 本ソフトウェアとそのマニュアルは、私的な費用負担の下に開発された商業的コンピュータソフトウェアであり、米国政府に対して権利を制限した上で提供されます。米国政府による本ソフトウェアの使用、複製または開示は、該当する範囲で FAR 12.212, DFAR 227.7202-1(a), DFAR 227.7202-3(a), DFAR 227.7202-4 に従った本合意書のライセンス条件に従うものとし、米国連邦法の下で求められる範囲において、FAR 52.227-19（2007 年 12 月）で規定されている制限された最小限の権利に従うものとします。FAR 52.227-19 が適用される場合、この条項は、その (c) 項に基づく通告の役目を果たし、本ソフトウェアまたはマニュアルにその他の通告を添付する必要はありません。本ソフトウェアおよびマニュアルにおける政府の権利は、本合意書で規定されている権利に限られます。

SAS Institute Inc., SAS Campus Drive, Cary, North Carolina 27513-2414.

2018 年 3 月

SAS® と、SAS Institute Inc. の他の製品名およびサービス名は、米国および他の国における SAS Institute Inc. の登録商標または商標です。® は、米国において登録されていることを示します。

他のブランド名および製品名は、それぞれの会社の商標です。

SASソフトウェアは、オープンソースのソフトウェアを含むがそれに限らない、特定のサードパーティ製ソフトウェアと共に提供される場合があります。かかるソフトウェアは、適用されるサードパーティソフトウェアライセンス契約に基づいてライセンスを得たものです。SASソフトウェアと共に配布されるサードパーティ製ソフトウェアに関する情報は、<http://support.sas.com/thirdpartylicenses>を参照してください。

### テクノロジーライセンスに関する通知

- Scintilla - Copyright © 1998-2017 by Neil Hodgson <neilh@scintilla.org>.

All Rights Reserved.

何らかの目的でこのソフトウェアとそのマニュアルを手数料なしで使用、コピー、変更および配布することは、これをもって許可されます。ただし、すべてのコピーに上記の著作権に関する通知が記載されていること、および補助的なマニュアルに著作権に関する通知とこの許可に関する通知の両方が記載されていることを条件とします。

NEIL HODGSONは、商業性および適合性の黙示的な保証を含め、このソフトウェアに関するすべての保証を放棄します。NEIL HODGSONは、いかなる場合においても、それが契約、過失、もしくは他の不法行為のどれであれ、このソフトウェアの使用もしくは性能から生じた、もしくはそれに関連して生じた使用、データ、もしくは利益の損失の結果として生じる特別損害、間接損害、もしくは付随的損害を始めとするいかなる損害に対しても責任を負いません。

- Telerik RadControls: Copyright © 2002-2012, Telerik. 含まれている Telerik RadControlsをJMP以外で使用することは許可されていません。
- ZLIB 圧縮ライブラリ - Copyright © 1995-2005, Jean-Loup Gailly and Mark Adler.
- Natural Earthを使用して作成。無料のベクトルおよびラスター地図データ @ [naturalearthdata.com](http://naturalearthdata.com).
- パッケージ - Copyright © 2009-2010, Stéphane Sudre ([s.sudre.free.fr](mailto:s.sudre.free.fr)). All rights reserved.

ソースおよびバイナリの形で、そのまま、もしくは変更を加えて再配布および使用することは、次のような条件を満たす限り、許可されます。

再配布するソースコードには、上記の著作権に関する通知、この条件リスト、これに続く放棄声明が記載されていなければなりません。

バイナリ形式で再配布する場合は、共に提供されるマニュアルなどの資料に上記の著作権に関する通知、この条件リスト、これに続く放棄声明が記載されていなければなりません。

事前に書面による許可を得ることなく、このソフトウェアから派生した製品の推奨または宣伝のために WhiteBox の名前やその貢献者の名前を使用することはできません。

このソフトウェアは、著作権保有者および貢献者によって「現状のままで」提供され、商業性および特定の目的に対する適合性に関する黙示的な保証を含むがそれに限らない、いかなる明示的もしくは黙示的な保証も行われません。いかなる場合においても、著作権保有者または貢献者は、損害の原因が何であれ、そして法的責任の根拠が何であれ、つまり、契約、厳格責任、不法行為（過失その他を含む）の

どれであれ、かかる損害の発生する可能性を事前に知らされていたとしても、このソフトウェアをどのように使用して生じた損害であれ、いかなる直接損害、間接損害、付随的損害、特別損害、懲罰的損害、もしくは結果損害（代替品または代替サービスの調達、使用機会、データもしくは利益の損失、業務の中断を含むがそれに限らない）に対しても責任を負いません。

- iODBCソフトウェア - Copyright © 1995-2006, OpenLink Software Inc and Ke Jin (www.iodbc.org). All rights reserved.

ソースおよびバイナリの形で、そのまま、もしくは変更を加えて再配布および使用することは、次のような条件を満たす限り、許可されます。

- 再配布するソースコードには、上記の著作権に関する通知、この条件リスト、これに続く放棄声明が記載されていなければなりません。
- バイナリ形式で再配布する場合は、共に提供されるマニュアルなどの資料に上記の著作権に関する通知、この条件リスト、これに続く放棄声明が記載されていなければなりません。
- 事前に書面による許可を得ることなく、このソフトウェアから派生した製品の推奨または宣伝のためにOpenLink Software Inc.の名前やその貢献者の名前を使用することはできません。

このソフトウェアは、著作権保有者および貢献者によって「現状のままで」提供され、商業性および特定の目的に対する適合性に関する黙示的な保証を含むがそれに限らない、いかなる明示的もしくは黙示的な保証も行われません。いかなる場合においても、OPENLINKまたは貢献者は、損害の原因が何であれ、そして法的責任の根拠が何であれ、つまり、契約、厳格責任、不法行為（過失その他を含む）のどれであれ、かかる損害の発生する可能性を事前に知らされていたとしても、このソフトウェアをどのように使用して生じた損害であれ、いかなる直接損害、間接損害、付随的損害、特別損害、懲罰的損害、もしくは結果損害（代替品または代替サービスの調達、使用機会、データもしくは利益の損失、業務の中断を含むがそれに限らない）に対しても責任を負いません。

- bzip2、関連ライブラリの「libbzip2」、およびすべてのマニュアル: Copyright © 1996-2010, Julian R Seward. All rights reserved.

ソースおよびバイナリの形で、そのまま、もしくは変更を加えて再配布および使用することは、次のような条件を満たす限り、許可されます。

再配布するソースコードには、上記の著作権に関する通知、この条件リスト、これに続く放棄声明が記載されていなければなりません。

このソフトウェアの供給源は正しく表記しなければならず、使用者が元のソフトウェアを記述したと主張することはできません。ある製品の中でこのソフトウェアを使用する場合は、その製品のマニュアルに謝辞を記載してもらえるとありがたいですが、必須ではありません。

ソースに変更を加えたバージョンには、その旨を明記しなければならず、元のソフトウェアとは違うものであることを明確にしてください。

事前に書面による許可を得ることなく、このソフトウェアから派生した製品の推奨または宣伝のために作成者の名前を使用することはできません。

このソフトウェアは、作成者によって「現状のままで」提供され、商業性および特定の目的に対する適合性に関する黙示的な保証を含むがそれに限らない、いかなる明示的もしくは黙示的な保証も行われません。いかなる場合においても、作成者は、損害の原因が何であれ、そして法的責任の根拠が何であれ、つまり、契約、厳格責任、不法行為（過失その他を含む）のどれであれ、かかる損害の発生する可能性を事前に知らされていたとしても、このソフトウェアをどのように使用して生じた損害であれ、いかなる直接損害、間接損害、付随的損害、特別損害、懲罰的損害、もしくは結果損害（代替品または代替サービスの調達、使用機会、データもしくは利益の損失、業務の中断を含むがそれに限らない）に対しても責任を負いません。

- Rソフトウェア: Copyright © 1999-2012, R Foundation for Statistical Computing.
- MATLABソフトウェア: Copyright © 1984-2012, The MathWorks, Inc. は米国特許法および国際特許法によって保護されています。 [www.mathworks.com/patents](http://www.mathworks.com/patents) を参照してください。 MATLAB および Simulink は、The MathWorks, Inc. の登録商標です。  
他の商標については、 [www.mathworks.com/trademarks](http://www.mathworks.com/trademarks) を参照してください。他の製品名やブランド名は、それぞれの所有者の商標または登録商標である可能性があります。
- libopc: Copyright © 2011, Florian Reuter. All rights reserved.

ソースおよびバイナリの形で、そのまま、もしくは変更を加えて再配布および使用することは、次のような条件を満たす限り、許可されます。

- 再配布するソースコードには、上記の著作権に関する通知、この条件リスト、これに続く放棄声明が記載されていなければなりません。
- バイナリ形式で再配布する場合は、共に提供されるマニュアルなどの資料に上記の著作権に関する通知、この条件リスト、これに続く放棄声明が記載されていなければなりません。
- 事前に書面による許可を得ることなく、このソフトウェアから派生した製品の推奨または宣伝のために Florian Reuter の名前やその貢献者の名前を使用することはできません。

このソフトウェアは、著作権保有者および貢献者によって「現状のままで」提供され、商業性および特定の目的に対する適合性に関する黙示的な保証を含むがそれに限らない、いかなる明示的もしくは黙示的な保証も行われません。いかなる場合においても、著作権保有者または貢献者は、損害の原因が何であれ、そして法的責任の根拠が何であれ、つまり、契約、厳格責任、不法行為（過失その他を含む）のどれであれ、かかる損害の発生する可能性を事前に知らされていたとしても、このソフトウェアをどのように使用して生じた損害であれ、いかなる直接損害、間接損害、付随的損害、特別損害、懲罰的損害、もしくは結果損害（代替品または代替サービスの調達、使用機会、データもしくは利益の損失、業務の中断を含むがそれに限らない）に対しても責任を負いません。

- libxml2 - ソースコードに特に記載がある場合を除く（たとえば、使用しているライセンスは類似しているが、著作権の通知が異なる `hash.c`、`list.c` ファイルや `trio` ファイル）、すべてのファイル:

Copyright © 1998 - 2003 Daniel Veillard. All Rights Reserved.

これをもって、このソフトウェアのコピーと関連する文書ファイル（「本ソフトウェア」）を入手した人すべてに対し、無料で本ソフトウェアを使用、コピー、変更、マージ、パブリッシュ、配布、サブライセンスする、もしくはコピーを販売する権利を含むがそれに限定せず、本ソフトウェアを制限なく取り扱う権利、および本ソフトウェアの供給相手に対してそうすることを許可する権利が付与されます。ただし、以下の条件を満たさなければなりません。

上記の著作権に関する通知とこの許可に関する通知が、本ソフトウェアのコピーのすべてまたは大部分に記載されていること。

このソフトウェアは、「現状のままで」提供され、商業性および特定の目的に対する適合性、および非侵害の保証を含むがそれに限らない、いかなる明示的もしくは黙示的な保証も行われません。DANIEL VEILLARDは、いかなる場合においても、それが契約、過失、もしくは他の不法行為のどれであれ、本ソフトウェアから、もしくは本ソフトウェアに関連して、または本ソフトウェアの使用もしくは他の取り扱いに関連して生じた申し立て、損害賠償もしくは他の義務に対し、責任を負いません。

この通知に含まれているものを除き、Daniel Veillardから事前により書面による許可を得ることなく、本ソフトウェアの広告、またはその他の手段による本ソフトウェアの販売、使用もしくは他の取り扱いの宣伝にDaniel Veillardの名前を使用することはできません。

- UNIX ファイルに使用された解凍アルゴリズムについて：

Copyright © 1985, 1986, 1992, 1993

カリフォルニア大学評議員。All rights reserved.

このソフトウェアは、評議員および貢献者によって「現状のままで」提供され、商業性および特定の目的に対する適合性に関する黙示的な保証を含むがそれに限らない、いかなる明示的もしくは黙示的な保証も行われません。いかなる場合においても、評議員または貢献者は、損害の原因が何であれ、そして法的責任の根拠が何であれ、つまり、契約、厳格責任、不法行為（過失その他を含む）のどれであれ、かかる損害の発生する可能性を事前に知らされていたとしても、このソフトウェアをどのように使用して生じた損害であれ、いかなる直接損害、間接損害、付随的損害、特別損害、懲罰的損害、もしくは結果損害（代替品または代替サービスの調達、使用機会、データもしくは利益の損失、業務の中断を含むがそれに限らない）に対しても責任を負いません。

1. 再配布するソースコードには、上記の著作権に関する通知、この条件リスト、これに続く放棄声明が記載されていなければなりません。
2. バイナリ形式で再配布する場合は、共に提供されるマニュアルなどの資料に上記の著作権に関する通知、この条件リスト、これに続く放棄声明が記載されていなければなりません。
3. 事前により書面による許可を得ることなく、このソフトウェアから派生した製品の推奨または宣伝のために大学の名前や貢献者の名前を使用することはできません。

- Snowball - Copyright © 2001, Dr Martin Porter, Copyright © 2002, Richard Boulton.

All rights reserved.

ソースおよびバイナリの形で、そのまま、もしくは変更を加えて再配布および使用することは、次のような条件を満たす限り、許可されます。

1. 再配布するソースコードには、上記の著作権に関する通知、この条件リスト、これに続く放棄声明が記載されていなければなりません。
2. バイナリ形式で再配布する場合は、共に提供されるマニュアルなどの資料に上記の著作権に関する通知、この条件リスト、これに続く放棄声明が記載されていなければなりません。
3. 事前に書面による許可を得ることなく、このソフトウェアから派生した製品の推奨または宣伝のために著作権保有者の名前や貢献者の名前を使用することはできません。

このソフトウェアは、著作権保有者および貢献者によって「現状のままで」提供され、商業性および特定の目的に対する適合性に関する黙示的な保証を含むがそれに限らない、いかなる明示的もしくは黙示的な保証も行われません。いかなる場合においても、著作権保有者または貢献者は、損害の原因が何であれ、そして法的責任の根拠が何であれ、つまり、契約、厳格責任、不法行為（過失その他を含む）のどれであれ、かかる損害の発生する可能性を事前に知らされていたとしても、このソフトウェアをどのように使用して生じた損害であれ、いかなる直接損害、間接損害、付随的損害、特別損害、懲罰的損害、もしくは結果損害（代替品または代替サービスの調達、使用機会、データもしくは利益の損失、業務の中断を含むがそれに限らない）に対しても責任を負いません。



# 目次

## 信頼性/生存時間分析

---

<b>1</b>	<b>JMPの概要</b>	17
	マニュアルとその他のリソース	
	表記規則	19
	JMPのマニュアル	19
	JMPドキュメンテーションライブラリ	20
	JMPヘルプ	26
	JMPを習得するためのその他のリソース	26
	チュートリアル	26
	サンプルデータテーブル	26
	統計用語とJSL用語の習得	27
	JMPを使用するためのヒント	27
	ツールヒント	27
	JMP User Community	28
	JMP関連書籍	28
	「JMPスターター」ウィンドウ	28
	テクニカルサポート	28
<b>2</b>	<b>信頼性/生存時間分析について</b>	29
	寿命と故障の分析	
<b>3</b>	<b>寿命の一変量</b>	31
	寿命データに確率分布をあてはめる	
	「寿命の一変量」プラットフォームの概要	33
	「寿命の一変量」プラットフォームの例	33
	「寿命の一変量」プラットフォームの起動	35
	「寿命の一変量」レポート	39
	イベントプロット	40
	分布の比較	42
	寿命の一変量: 統計量	46
	「寿命の一変量」レポートのオプション	53
	混合分布のあてはめ	55
	競合リスク混合分布のあてはめ	60

Weibayes レポート .....	61
「競合原因分析」レポート .....	63
競合原因分析の操作手順 .....	63
競合原因分析モデル .....	64
故障原因の組み合わせ .....	64
競合原因分析: 統計量 .....	65
原因ごとの分析 .....	66
「競合原因分析」レポートのオプション .....	67
「寿命の一変量 - グループの比較」レポート .....	68
グループの比較: 統計量 .....	69
各グループの結果 .....	69
「寿命の一変量 - グループの比較」レポートのオプション .....	70
「寿命の一変量」プラットフォームの別例 .....	71
競合原因の除去 .....	71
スケールの変更 .....	73
グループ間で同じ分布を調べる .....	74
Weibayes 推定 .....	76
「寿命の一変量」プラットフォームの統計的詳細 .....	79
確率分布 .....	79
競合原因分析の詳細 .....	93

## 4 寿命の二変量 .....

### 寿命データに1因子モデルをあてはめる

「寿命の二変量」プラットフォームの概要 .....	101
「寿命の二変量」プラットフォームの例 .....	101
「寿命の二変量」プラットフォームの起動 .....	104
「寿命の二変量」レポート .....	106
散布図 .....	107
ノンパラメトリック .....	109
比較 .....	110
結果 .....	113
カスタム関係式 .....	123
「寿命の二変量」プラットフォームのオプション .....	124
「寿命の二変量」プラットフォームの別例 .....	125
コンデンサの加速寿命試験 .....	126
カスタム関係式の例 .....	127

## 5 累積損傷 .....

### 時間とともにストレスを変化させる試験の分析

「累積損傷」プラットフォームの概要 .....	133
-------------------------	-----

「累積損傷」プラットフォームの例 .....	133
「累積損傷」プラットフォームの起動 .....	136
イベントまでの時間 .....	138
ストレスパターン .....	139
「累積損傷」レポート .....	141
「累積損傷」プラットフォームのオプション .....	143
「累積損傷」プラットフォームの別例 .....	145
<b>6 再生モデルによる分析 .....</b>	<b>147</b>
<b>再発するイベントの度数やコストをモデル化する</b>	
「再生モデルによる分析」プラットフォームの概要 .....	149
「再生モデルによる分析」プラットフォームの例 .....	149
「再生モデルによる分析」プラットフォームの起動 .....	151
「再生モデルによる分析」プラットフォームのオプション .....	153
モデルのあてはめ .....	154
「再生モデルによる分析」プラットフォームの別例 .....	157
ぼうこう癌の再発の例 .....	158
船舶用ディーゼルエンジンの例 .....	161
<b>7 劣化データ分析 .....</b>	<b>165</b>
<b>時間経過に伴う製品の劣化をモデル化する</b>	
「劣化データ分析」プラットフォームの概要 .....	167
「劣化データ分析」プラットフォームの例 .....	167
「劣化データ分析」プラットフォームの起動 .....	169
「劣化データ分析」レポート .....	170
モデルの指定 .....	173
単純線形経路 .....	173
非線形経路 .....	175
逆推定 .....	183
予測グラフ .....	185
「劣化データ分析」プラットフォームのオプション .....	186
モデルのレポート .....	189
モデルリスト .....	189
レポート .....	190
破壊劣化 .....	190
安定性試験 .....	195
<b>8 破壊劣化 .....</b>	<b>199</b>
<b>破壊試験データから製品の劣化ををモデル化する</b>	
「破壊劣化」プラットフォームの例 .....	201

「破壊劣化」プラットフォームの起動 .....	207
2つのY列の指定 .....	208
「破壊劣化」プロットのオプションとモデル .....	209
プロットのオプション .....	210
モデル .....	210
「破壊劣化」レポート .....	214
モデルのアウトライン .....	215
「破壊劣化」プラットフォームのオプション .....	217
破壊劣化モデルの統計的詳細 .....	218

## 9 信頼性予測 ..... 219

### 製造と故障履歴のデータから製品故障数を予測する

「信頼性予測」プラットフォームの概要 .....	221
「信頼性予測」プラットフォームの例 .....	221
「信頼性予測」プラットフォームの起動 .....	224
「信頼性予測」レポート .....	227
「予測」レポート .....	228
「信頼性予測」プラットフォームのオプション .....	232

## 10 信頼性成長 ..... 235

### システム改善による信頼性の変化をモデル化する

「信頼性成長」プラットフォームの概要 .....	237
「信頼性成長」プラットフォームの例 .....	238
「信頼性成長」プラットフォームの起動 .....	241
起動ウィンドウの役割 .....	242
データの種類 .....	244
「信頼性成長」レポート .....	246
「観測データ」レポート .....	246
「信頼性成長」プラットフォームのオプション .....	249
モデルのレポート .....	250
Crow-AMSAA モデル .....	251
Crow-AMSAA 修正最尤法 .....	258
パラメータ指定 Crow-AMSAA .....	259
区分 Weibull-NHPP .....	260
再初期化 Weibull-NHPP .....	264
区分 Weibull-NHPP 変化点検出 .....	267
「信頼性成長」プラットフォームの別例 .....	268
区間打ち切りデータに対する区分 NHPP-Weibull モデル .....	268
区分 Weibull-NHPP 変化点検出モデル .....	270
「信頼性成長」プラットフォームの統計的詳細 .....	272

「Crow-AMSAA」レポートの統計的詳細 .....	272
「区間 Weibull-NHPP 変化点検出」レポートの統計的詳細 .....	274
<b>11 信頼性ブロック図</b> .....	<b>275</b>
<b>システム全体の信頼性を計算する</b>	
「信頼性ブロック図」プラットフォームの概要 .....	277
「信頼性ブロック図」プラットフォームの使用例 .....	277
部品の追加 .....	279
図形の整列 .....	281
図形の接続 .....	282
部品の設定 .....	283
「信頼性ブロック図」ウィンドウ .....	284
プレビューウィンドウ .....	286
「信頼性ブロック図」プラットフォームのオプション .....	286
ワークスペースのオプション .....	289
設定内容 .....	290
ノンパラメトリックな分布の指定 .....	291
デザイン項目とライブラリ項目のオプション .....	293
プロファイル .....	294
要素重要度や平均故障時間のグラフ .....	296
要素プロット .....	298
信頼度を求める代数式の表示 .....	301
複製と削除 .....	301
<b>12 修理可能システムのシミュレーション</b> .....	<b>303</b>
<b>複雑なシステムの停止時間を推定する</b>	
「修理可能なシステムのシミュレーション」プラットフォームの概要 .....	305
「修理可能なシステムのシミュレーション」プラットフォームの例 .....	305
「修理可能システムのシミュレーション」ウィンドウ .....	307
システムダイヤグラム .....	308
図形ツールバー .....	309
「設定」パネル .....	310
「イベントの追加」パネル .....	312
「アクションの追加」パネル .....	313
「修理可能なシステムのシミュレーション」のオプション .....	316
ブロック項目のオプション .....	316
[ノンパラメトリック] または [推定] 分布の指定 .....	317
イベントの設定 .....	319
アクションの設定 .....	319
修理可能システムのシミュレーション結果 .....	320

結果のテーブル .....	320
結果のエクスプローラ .....	321
「修理可能システムのシミュレーションの結果」のオプション .....	323
結果レポートにおける点推定プロファイル .....	324

## 13 生存時間分析 ..... 325

### 生存時間データを分析する

「生存時間分析」プラットフォームの概要 .....	327
生存時間分析の例 .....	328
「生存時間分析」プラットフォームの起動 .....	329
生存分析プロット .....	330
「生存時間分析」プラットフォームのオプション .....	330
指数分布・Weibull分布・対数正規分布のプロットとあてはめ .....	333
あてはめた分布のグラフ .....	337
競合する原因 .....	338
「生存時間分析」プラットフォームの別例 .....	338
生存時間分析の例 .....	338
競合原因分析の例 .....	340
区間打ち切りの例 .....	342
生存時間分析の統計レポート .....	344

## 14 生存時間(パラメトリック)のあてはめ ..... 347

### 生存時間データに回帰モデルをあてはめる

「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」プラットフォームの概要 .....	349
「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」の例 .....	349
「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」プラットフォームの起動 .....	351
「生存時間のあてはめ(パラメトリック)」レポート .....	353
「パラメトリックな生存時間分析 - すべての分布」レポート .....	354
「パラメトリックな競合原因分析」レポート .....	355
「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」のオプション .....	356
「非線形回帰」プラットフォームによる分析 .....	357
「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」の別例 .....	358
Arrhenius加速寿命の対数正規モデル .....	358
区間打ち切りデータに対する加速故障時間モデル .....	361
「非線形回帰」プラットフォームでの打ち切りデータの分析 .....	363
左側打ち切りデータの分析例 .....	364
「非線形回帰」プラットフォームでのWeibull回帰モデル .....	365
「非線形回帰」プラットフォームでの単純な生存時間分布のあてはめ .....	368
「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」プラットフォームの統計的詳細 .....	370

<b>15 比例ハザードのあてはめ</b>	373
生存時間データにセミパラメトリックな回帰モデルをあてはめる	
「比例ハザードのあてはめ」プラットフォームの概要	375
「比例ハザードのあてはめ」プラットフォームの例	375
2水準におけるリスク比	377
「比例ハザードのあてはめ」プラットフォームの起動	378
「比例ハザードモデルのあてはめ」レポート	379
「比例ハザードモデルのあてはめ」のオプション	380
効果や水準が複数あるモデルの例	381
<b>A 参考文献</b>	385
<b>索引</b>	389
信頼性/生存時間分析	



# 第 1 章

## JMP の概要 マニュアルとその他のリソース

---

この章には表記規則、各JMPドキュメンテーションの説明、ヘルプシステムなど、JMPマニュアルの詳細と、他のサポートの記載場所が掲載されています。


## 目次

表記規則 .....	19
JMP のマニュアル .....	19
JMP ドキュメンテーションライブラリ .....	20
JMP ヘルプ .....	26
JMP を習得するためのその他のリソース .....	26
チュートリアル .....	26
サンプルデータテーブル .....	26
統計用語と JSL 用語の習得 .....	27
JMP を使用するためのヒント .....	27
ツールヒント .....	27
JMP User Community .....	28
JMP 関連書籍 .....	28
「JMP スターター」ウィンドウ .....	28
テクニカルサポート .....	28

---

## 表記規則

マニュアルの内容と画面に表示される情報を対応付けるために、次のような表記規則を使っています。

- サンプルデータ名、列名、パス名、ファイル名、ファイル拡張子、およびフォルダ名は「」で囲んで表記しています。
- スクリプトのコードはLucida Sans Typewriterフォントで表記しています。
- スクリプトコードの結果（ログに表示されるもの）はLucida Sans Typewriterフォントで表記し、先に示すコードよりインデントされています。
- クリックまたは選択する項目は □ で囲んで太字で表記しています。これには以下の項目があります。
  - ボタン
  - チェックボックス
  - コマンド
  - 選択可能なリスト項目
  - メニュー
  - オプション
  - タブ名
  - テキストボックス
- 次の項目の表記規則は下記のとおりです。
  - 重要な単語や句、JMPに固有の定義を持つ単語や句は太字または「」で囲んで表記
  - マニュアルのタイトルは『』で囲んで表記
  - 変数名は「」で囲んで太字で表記
- JMP Proのみの機能にはJMP Proアイコン  がついています。JMP Proの機能の概要については [https://www.jmp.com/ja\\_jp/software/predictive-analytics-software.html](https://www.jmp.com/ja_jp/software/predictive-analytics-software.html) をご覧ください。

---

**メモ:** 特別な情報および制限事項には、この文のように「メモ」という見出しがついています。

---

---

**ヒント:** 役に立つ情報には「ヒント」という見出しがついています。

---

---

## JMPのマニュアル

JMPでは、PDF形式のマニュアルが用意されています。

- PDF版は[ヘルプ] > [ドキュメンテーション] メニューまたはJMPオンラインヘルプのフッタから開くことができます。

- 検索しやすいようにすべてのドキュメンテーションが1つのPDFファイルにまとめられた『JMPドキュメンテーションライブラリ』と呼ばれるファイルがあります。『JMPドキュメンテーションライブラリ』のPDFファイルは [ヘルプ] > [ドキュメンテーション] メニューから開くことができます。

## JMP ドキュメンテーションライブラリ

以下の表は、JMP ライブラリに含まれている各ドキュメンテーションの目的および内容をまとめたものです。

マニュアル	目的	内容
『はじめてのJMP』	JMP をあまりご存知ない方を対象とした入門ガイド	JMP の紹介と、データを作成および分析し始めるための情報や、結果の共有方法についても学びます。
『JMP の使用法』	JMP のデータテーブルと、基本操作を理解する	一般的な JMP の概念と、データの読み込み、列プロパティの変更、データの並べ替え、SAS への接続など、JMP 全体にわたる機能の説明
『基本的な統計分析』	このマニュアルを見ながら、基本的な分析を行う	<div>[分析] メニューからアクセスできる以下のプラットフォームの説明：</div> <ul style="list-style-type: none"><li>• 一変量の分布</li><li>• 二変量の関係</li><li>• 表の作成</li><li>• テキストエクスプローラ</li></ul> <div>[分析] &gt; [二変量の関係] で二変量分析、一元配置分散分析、分割表分析を実行する方法の説明。ブートストラップを使用した標本分布の近似やシミュレーションの機能を使用したパラメトリックな標本再抽出の説明も含まれています。</div>

マニュアル	目的	内容
『グラフ機能』	データに合った理想的なグラフを見つける	<p>[グラフ] メニューからアクセスできる以下のプラットフォームの説明：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• グラフビルダー</li> <li>• 三次元散布図</li> <li>• 等高線図</li> <li>• バブルプロット</li> <li>• パラレルプロット</li> <li>• セルプロット</li> <li>• 散布図行列</li> <li>• 三角図</li> <li>• ツリーマップ</li> <li>• チャート</li> <li>• 重ね合わせプロット</li> </ul> <p>このマニュアルには背景マップやカスタムマップの作成方法も記載されています。</p>
『プロファイル機能』	プロファイルの使い方を学ぶ。任意の応答曲面の断面を表示できるようになります。	[グラフ] メニューに表示されるすべてのプロファイルについて。誤差因子（ランダムな入力値）がある状況のシミュレーションについても説明されています。
『実験計画 (DOE)』	実験計画と標本サイズ設計を学ぶ	[実験計画 (DOE)] メニューと [分析] > [発展的なモデル] メニューの「発展的な実験計画モデル」に関するすべてのトピックについて。

マニュアル	目的	内容
『基本的な回帰モデル』	「モデルのあてはめ」プラットフォームとその多くの手法について学ぶ	<div>[分析] メニューの「モデルのあてはめ」プラットフォームで使用できる、以下の手法の説明：</div> <ul style="list-style-type: none"><li>標準最小2乗</li><li>ステップワイズ</li><li>一般化回帰</li><li>混合モデル</li><li>MANOVA</li><li>対数線形-分散</li><li>名義ロジスティック</li><li>順序ロジスティック</li><li>一般化線形モデル</li></ul>

マニュアル	目的	内容
『予測モデルおよび発展的なモデル』	さらなるモデリング手法について学ぶ	<p>[分析] &gt; [予測モデル] メニューで使用できる以下のプラットフォームの説明：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>モデル化ユーティリティ</li> <li>ニューラル</li> <li>パーティション</li> <li>ブートストラップ森</li> <li>ブースティングツリー</li> <li>K近傍法</li> <li>単純Bayes</li> <li>モデルの比較</li> <li>計算式デボ</li> </ul> <p>[分析] &gt; [発展的なモデル] メニューで使用できる以下のプラットフォームの説明：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>曲線のあてはめ</li> <li>非線形回帰</li> <li>関数データエクスペローラ</li> <li>Gauss過程</li> <li>時系列分析</li> <li>対応のあるペア</li> </ul> <p>[分析] &gt; [スクリーニング] メニューで使用できる以下のプラットフォームの説明：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>応答のスクリーニング</li> <li>工程のスクリーニング</li> <li>説明変数のスクリーニング</li> <li>アソシエーション分析</li> <li>プロセス履歴エクスペローラ</li> </ul> <p>[分析] &gt; [発展的なモデル] &gt; [発展的な実験計画モデル] で使用できるプラットフォームについては、『実験計画 (DOE)』に説明があります。</p>


マニュアル	目的	内容
『多変量分析』	複数の変数を同時に分析するための手法について理解を深める	<p>[分析] &gt; [多変量] メニューで利用できる以下のプラットフォームの説明：</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• 多変量の相関</li><li>• 主成分分析</li><li>• 判別分析</li><li>• PLS</li><li>• 多重対応分析</li><li>• 因子分析</li><li>• 多次元尺度構成</li><li>• 項目分析</li></ul> <p>[分析] &gt; [クラスター分析] メニューで利用できる以下のプラットフォームの説明：</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• 階層型クラスター分析</li><li>• K Means クラスター分析</li><li>• 正規混合</li><li>• 潜在クラス分析</li><li>• 変数のクラスタリング</li></ul>
『品質と工程』	工程を評価し、向上させるためのツールについて理解を深める	<p>[分析] &gt; [品質と工程] メニューで利用できる以下のプラットフォームの説明：</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• 管理図ビルダーと個々の管理図</li><li>• 測定システム分析</li><li>• 計量値/計数値ゲージチャート</li><li>• 工程能力</li><li>• パレート図</li><li>• 特性要因図</li><li>• 仕様限界の管理</li></ul>

マニュアル	目的	内容
『信頼性/生存時間分析』	製品やシステムにおける信頼性を評価し、向上させる方法、および人や製品の生存時間データを分析する方法について学ぶ	<p>[分析] &gt; [信頼性/生存時間分析] メニューで 使用できる以下のプラットフォームの説明：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 寿命の一変量</li> <li>• 寿命の二変量</li> <li>• 累積損傷</li> <li>• 再生モデルによる分析</li> <li>• 劣化分析と破壊劣化</li> <li>• 信頼性予測</li> <li>• 信頼性成長</li> <li>• 信頼性ブロック図</li> <li>• 修理可能システムのシミュレーション</li> <li>• 生存時間分析</li> <li>• 生存時間(パラメトリック)のあてはめ</li> <li>• 比例ハザードのあてはめ</li> </ul>
『消費者調査』	消費者選好を調査し、その洞察を使用してより良い製品やサービスを作成するための方法を学ぶ	<p>[分析] &gt; [消費者調査] メニューで 使用できる以下のプラットフォームの説明：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• カテゴリカル</li> <li>• 選択モデル</li> <li>• MaxDiff</li> <li>• アップリフト</li> <li>• 多重因子分析</li> </ul>
『スクリプトガイド』	パワフルなJMPスクリプト言語（JSL）の活用方法について学ぶ	スクリプトの作成やデバッグ、データテーブルの操作、ディスプレイボックスの構築、JMPアプリケーションの作成など。
『スクリプト構文リファレンス』	JSL 関数、その引数、およびオブジェクトやディスプレイボックスに送信するメッセージについて理解を深める	JSL コマンドの構文、例、および注意書き。

**メモ：** [ドキュメンテーション] メニューでは、印刷可能な2つのリファレンスカードも用意されています。『メニューカード』はJMPのメニューをまとめた表で、『クイックリファレンス』はJMPのショートカットキーをまとめた表です。

## JMP ヘルプ

JMP ヘルプは、一連のマニュアルの簡易版です。JMP のヘルプは、次のいくつかの方法で開くことができます。

- Windows では、F1 キーを押すとヘルプシステムウィンドウが開きます。
- データテーブルまたはレポートウィンドウの特定の部分のヘルプを表示します。[ツール] メニューからヘルプツール  を選択した後、データテーブルやレポートウィンドウの任意の位置でクリックすると、その部分に関するヘルプが表示されます。
- JMP ウィンドウ内で [ヘルプ] ボタンをクリックします。
- Windows の場合、[ヘルプ] メニューの [ヘルプの目次]、[ヘルプの検索]、[ヘルプの索引] の各オプションを使用して、JMP ヘルプ内を検索し、目的の内容を表示します。Mac の場合、[ヘルプ] > [JMP ヘルプ] を選択します。

---

## JMP を習得するためのその他のリソース

JMP のマニュアルと JMP ヘルプの他、次のリソースも JMP の学習に役立ちます。

- [「チュートリアル」](#)
- [「サンプルデータテーブル」](#)
- [「統計用語と JSL 用語の習得」](#)
- [「JMP を使用するためのヒント」](#)
- [「ツールヒント」](#)
- [「JMP User Community」](#)
- [「JMP 関連書籍」](#)
- [「「JMP スターター」ウィンドウ」](#)

## チュートリアル

[ヘルプ] > [チュートリアル] を選択して、JMP のチュートリアルを表示できます。[チュートリアル] メニューの最初の項目は [チュートリアルディレクトリ] です。この項目を選択すると、すべてのチュートリアルをカテゴリ別に整理した新しいウィンドウが開きます。

JMP に慣れていない方は、まず [初心者用チュートリアル] を試してみてください。JMP のインターフェースおよび基本的な使用方法を学ぶことができます。

他のチュートリアルでは、実験の計画、標本平均と定数の比較など、JMP の具体的な活用法を学習できます。

## サンプルデータテーブル

JMP のマニュアルで取り上げる例は、すべてサンプルデータを使用しています。サンプルデータディレクトリを開くには、[ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択します。

サンプルデータテーブルを文字コード順に並べた一覧を表示する、またはカテゴリごとにサンプルデータを表示するには、[ヘルプ] > [サンプルデータ] を選択します。

サンプルデータテーブルは次のディレクトリにインストールされています。

Windows の場合: C:\Program Files\SAS\JMP\14\Samples\Data

Macintosh の場合: \Library\Application Support\JMP\14\Samples\Data

JMP Pro では、サンプルデータが (JMP ではなく) JMPPRO ディレクトリにインストールされています。シングルユーザーライセンス版の JMP (JMP シュリンクラップ) では、サンプルデータが JMPSW ディレクトリにインストールされています。

サンプルデータの使用例を参照するには、[ヘルプ] > [サンプルデータ] を選択し、教育用セクションから検索してください。教育用リソースについては、<http://jmp.com/tools> にも情報があります。

## 統計用語と JSL 用語の習得

[ヘルプ] メニューには、次の索引が用意されています。

**統計の索引** 統計用語が説明されています。

**スクリプトの索引** JSL 関数、オブジェクト、ディスプレイボックスに関する情報を検索できます。スクリプトの索引からサンプルスクリプトを編集して実行することもできます。

## JMP を使用するためのヒント

JMP を最初に起動すると、「使い方ヒント」ウィンドウが表示されます。このウィンドウには、JMP を使う上でのヒントが表示されます。

「使い方ヒント」ウィンドウを表示しないようにするには、[起動時にヒントを表示する] のチェックを外します。再表示するには、[ヘルプ] > [使い方ヒント] を選択します。または、「環境設定」ウィンドウで非表示に設定することもできます。

## ツールヒント

次のような項目の上にカーソルを置くと、その項目を説明するツールヒントが表示されます。

- メニューまたはツールバーのオプション
- グラフ内のラベル
- レポートウィンドウ内の結果 (テキスト) (カーソルで円を描くと表示される)
- 「ホームウィンドウ」内のファイル名またはウィンドウ名
- スクリプトエディタ内のコード

---

ヒント: Windowsでは、JMP環境設定でツールヒントを表示しないよう設定できます。[ファイル] > [環境設定] > [一般] を選択し、[メニューのヒントを表示] の選択を解除します。このオプションは、Macintoshでは使用できません。

---

## JMP User Community

JMP User Communityでは、さまざまな方法でJMPをさらに習得したり、他のSASユーザとのコミュニケーションを図ったりできます。ラーニングライブラリには1ページガイド、チュートリアル、デモなどが用意されており、JMPを使い始める上でとても便利です。また、JMPのさまざまなトレーニングコースに登録して、自己教育を進めることも可能です。

その他のリソースとして、ディスカッションフォーラム、サンプルデータやスクリプトファイルの交換、Webcastセミナー、ソーシャルネットワークグループなども利用できます。

WebサイトのJMPリソースにアクセスするには、[ヘルプ] > [JMP User Community] を選択するか、<https://community.jmp.com/>をご覧ください。

## JMP 関連書籍

JMP 関連書籍は、次のJMP Web ページで紹介されています。

[http://www.jmp.com/ja\\_jp/academic/books-for-jmp-users.html](http://www.jmp.com/ja_jp/academic/books-for-jmp-users.html)

## 「JMP スターター」 ウィンドウ

JMPまたはデータ分析にあまり慣れていないユーザは、「JMP スターター」ウィンドウから開始するとよいでしょう。カテゴリ分けされた項目には説明がついており、ボタンをクリックするだけで該当の機能を起動できます。「JMP スターター」ウィンドウには、[分析]、[グラフ]、[テーブル]、および [ファイル] メニュー内の多くのオプションがあります。また、JMP Proの機能やプラットフォームのリストも含まれています。

- 「JMP スターター」ウィンドウを開くには、[表示] (Macintoshでは [ウィンドウ]) > [JMP スターター] を選択します。
- WindowsでJMPの起動時に自動的に「JMP スターター」を表示するには、[ファイル] > [環境設定] > [一般] を選び、「開始時のJMPウィンドウ」リストから [JMP スターター] を選択します。Macintoshでは、[JMP] > [環境設定] > [起動時にJMP スターターウィンドウを表示する] を選択します。

---

## テクニカルサポート

JMPのテクニカルサポートは、JMPのエンジニアが担当し、その多くは、統計学などの技術的な分野の知識を有しています。


<http://www.jmp.com/japan/support> には、テクニカルサポートへの連絡方法などが記載されています。

# 第2章

## 信頼性/生存時間分析について 寿命と故障の分析

---

このマニュアルでは、故障時間や生存時間を分析する機能について説明します。これらの機能は、製品の信頼性や、人々の生存時間を分析します。

- 「寿命の一変量」は、製品の寿命や故障時間を分析します。製品の品質改善や信頼性向上に役立ちます。詳細については、[第3章「寿命の一変量」](#)を参照してください。
- 「寿命の二変量」プラットフォームでは、加速因子が1つの場合の加速寿命試験データを分析します。寿命と加速因子との関係を、さまざまな変換式でモデル化できます。データの変換式を独自に定義することも可能です。詳細については、[第4章「寿命の二変量」](#)を参照してください。
- 「累積損傷」プラットフォームは、加速寿命試験のなかでも、製品に与えるストレスを時間とともに変化させる加速寿命試験を扱います。詳細については、[第5章「累積損傷」](#)を参照してください。
- 「再生モデルによる分析」プラットフォームは、1つのユニットやシステムで故障が繰り返し起こるデータを分析します。たとえば、故障したユニットを修理してまた稼働させる場合などです。詳細については、[第6章「再生モデルによる分析」](#)を参照してください。
- 「劣化分析」プラットフォームは、製品の劣化データを分析します。その分析の結果から、故障時間の予測値を求めることができます。「劣化分析」プラットフォームで計算された疑似的な故障時間の予測値を他の信頼性プラットフォームで分析することで、故障分布を推定できます。「劣化分析」プラットフォームでは、因子（説明変数）を1つ含めることもできます。また、安定性試験のデータを分析して、製品の有効期間を設定することもできます。ほかにも、独自の破壊劣化モデルをあてはめることもできます。詳細については、[第7章「劣化データ分析」](#)を参照してください。
- 「破壊劣化」プラットフォームは、製品が劣化している程度を調べる際に製品を破壊しなければならない試験を扱います。このような破壊試験では、製品ユニットごとに、1つの観測値しか得られません。「破壊劣化」プラットフォームでは、加速因子を1つ含めることもできます。数多くの一般的な劣化モデルを作成できます。詳細については、[第8章「破壊劣化」](#)を参照してください。
- 「信頼性予測」プラットフォームは、製品の故障数を予測するプラットフォームです。製造日・生産数・故障発生日・故障数のデータから、寿命分布を推定します。詳細については、[第9章「信頼性予測」](#)を参照してください。
- 「信頼性成長」プラットフォームでは、修理や再生できるシステムの故障を分析します。単一のシステムにおいて、設計などが改善されたことにより、信頼性がどのように変化するかを調べます。詳細については、[第10章「信頼性成長」](#)を参照してください。
-  「信頼性ブロック図」プラットフォームは、システムを構成する部品と、その関係性を図に表したものです。そして、各部品に確率分布を指定することにより、システム全体の信頼性がどれぐらいになるかを計算できます。詳細については、[第11章「信頼性ブロック図」](#)を参照してください。

- **JMP PRO** 「修理可能システムのシミュレーション」プラットフォームでは、修理可能なシステムにおける部品間の関係を対話的に定義でき、そして、システムが停止している期間を乱数シミュレーションで推定できます。詳細については、[第12章「修理可能システムのシミュレーション」](#)を参照してください。
- 「生存時間分析」プラットフォームは、グループごとに生存曲線を求めます。生存曲線を Kaplan-Meier 推定するだけで1つの分析として完結することもあります。より複雑なモデルをあてはめる前の探索的な分析としても活用できます。詳細については、[第13章「生存時間分析」](#)を参照してください。
- 「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」プラットフォームは、故障時間の分布における位置パラメータと尺度パラメータを、回帰モデルでモデル化します。いくつかの寿命分布が用意されています。詳細については、[第14章「生存時間\(パラメトリック\)のあてはめ」](#)を参照してください。
- 「比例ハザードのあてはめ」プラットフォームでは、Cox の比例ハザードモデルをあてはめます。このモデルは、ハザード関数に関して比例ハザード性を仮定しています。詳細については、[第15章「比例ハザードのあてはめ」](#)を参照してください。

# 第3章

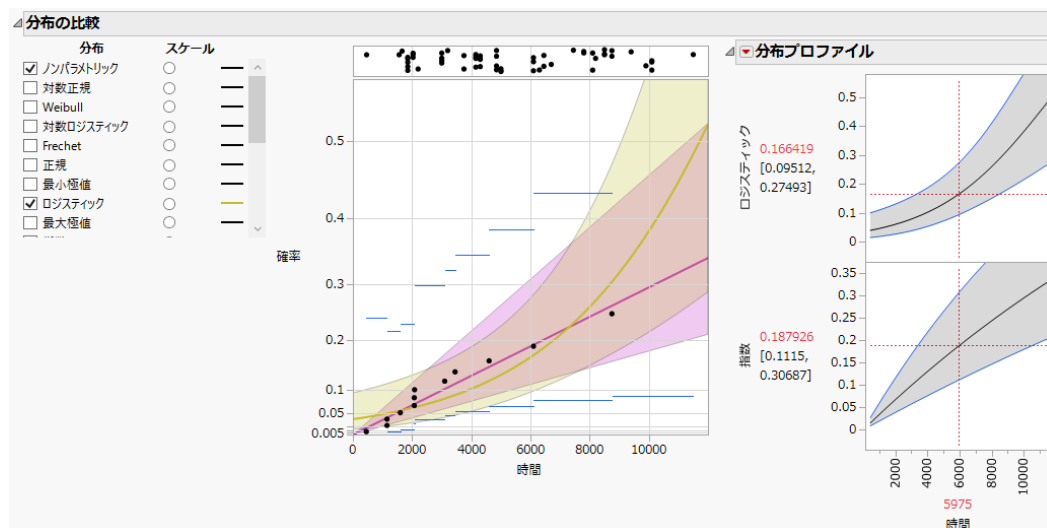
## 寿命の一変量

### 寿命データに確率分布をあてはめる

「寿命の一変量」プラットフォームは、故障時間・寿命・生存時間といったデータを分析するプラットフォームです。右側打ち切りデータと区間打ち切りデータの両方を分析できます。「寿命の一変量」プラットフォームは次のような場合に使用します。

- 複数の分布のあてはめを比較し、データに最も良くあてはまる分布を特定する
- Bayes 推定を行う
- 故障が1つも生じなかったデータをモデル化する
- 複数のグループを比較する
- 複数の故障原因を分析する
- 混合分布を推定し、各観測値が特定の分布に属する確率を推定する
- 競合リスク混合分布を推定し、各観測値が特定の分布に属する確率を推定する

図3.1 分布のあてはめと比較



## 目次

「寿命の一変量」プラットフォームの概要	33
「寿命の一変量」プラットフォームの例	33
「寿命の一変量」プラットフォームの起動	35
「寿命の一変量」レポート	39
イベントプロット	40
分布の比較	42
寿命の一変量: 統計量	46
「寿命の一変量」レポートのオプション	53
混合分布のあてはめ	55
競合リスク混合分布のあてはめ	60
Weibayes レポート	61
「競合原因分析」レポート	63
競合原因分析の操作手順	63
競合原因分析モデル	64
故障原因の組み合わせ	64
競合原因分析: 統計量	65
原因ごとの分析	66
「競合原因分析」レポートのオプション	67
「寿命の一変量 - グループの比較」レポート	68
グループの比較: 統計量	69
各グループの結果	69
「寿命の一変量 - グループの比較」レポートのオプション	70
「寿命の一変量」プラットフォームの別例	71
競合原因の除去	71
スケールの変更	73
グループ間で同じ分布を調べる	74
Weibayes 推定	76
「寿命の一変量」プラットフォームの統計的詳細	79
確率分布	79
競合原因分析の詳細	93

---

## 「寿命の一変量」プラットフォームの概要

**寿命データ分析**は、製品・部品・システムなどの寿命（故障時間）をモデル化し、予測します。たとえば、いつ頃、コンピューターの部品が故障するのかを予測するために用います。寿命データを分析することにより、製品の材料や製造工程を比較でき、製品の品質や信頼性を向上させることができます。また、製品の保証期間や広告内容を決めるのに、役立つでしょう。

「寿命の一変量」プラットフォームでは、**打ち切りデータ**（censored data; 正確な故障時間が観測されていないデータ）も扱えます。また、競合する故障原因があるデータも扱えます。**競合原因**（competing causes）の分析では、故障原因のなかで、どの原因が強い影響を与えているかを分析できます。

「**信頼性試験計画**」と「**信頼性実証**」を使えば、信頼性試験に適した標本サイズを求めることができます。これらの機能は、**実験計画(DOE)** > **標本サイズ/検出力** に用意されています。『実験計画(DOE)』の「検出力と標本サイズ」章を参照してください。

---

## 「寿命の一変量」プラットフォームの例

この例では、70基のエンジンファンを使った試験で得られた、故障時間のデータを取り上げます。データには、故障前に打ち切られたものも含まれています。このデータに寿命分布をあてはめ、信頼性に関するさまざまな指標を求めていきます。

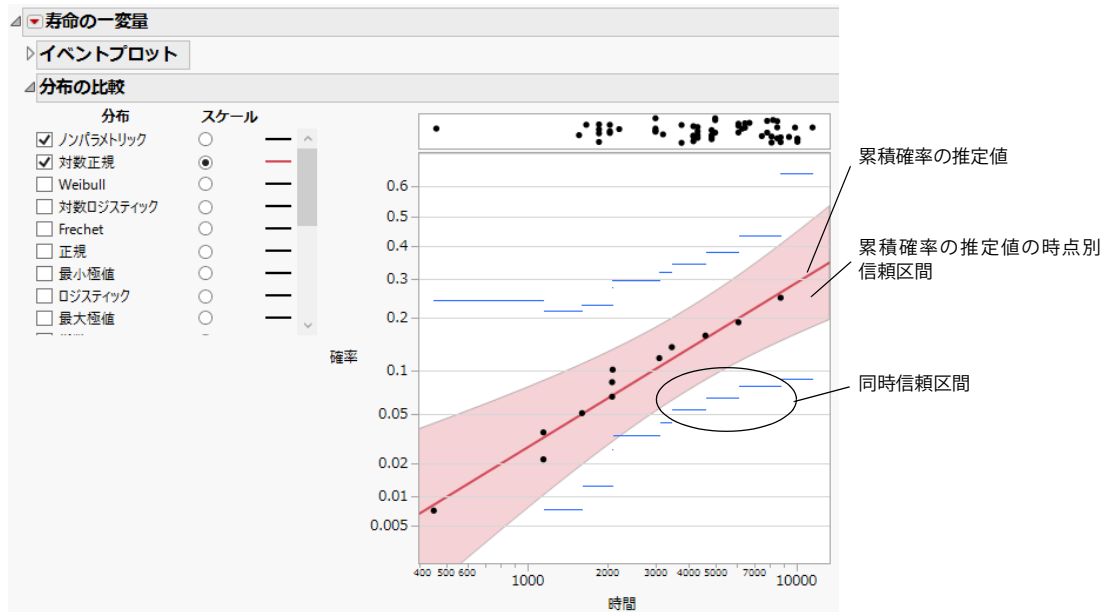
1. **ヘルプ** > **サンプルデータライブラリ** を選択し、「Reliability」フォルダにある「Fan.jmp」を開きます。
2. **分析** > **信頼性/生存時間分析** > **寿命の一変量** を選択します。
3. **時間** を **[Y, イベントまでの時間]** に指定します。
4. **打ち切りの有無** を **[打ち切り]** に指定します。
5. **[OK]** をクリックします。

「寿命の一変量」レポートウィンドウが表示されます。

6. 「分布の比較」レポートで **[対数正規]** 分布を選択します。また、隣にある「**スケール**」のラジオボタンでも、**[対数正規]** を選択します。

確率プロット（図3.2）がレポートウィンドウに表示されます。

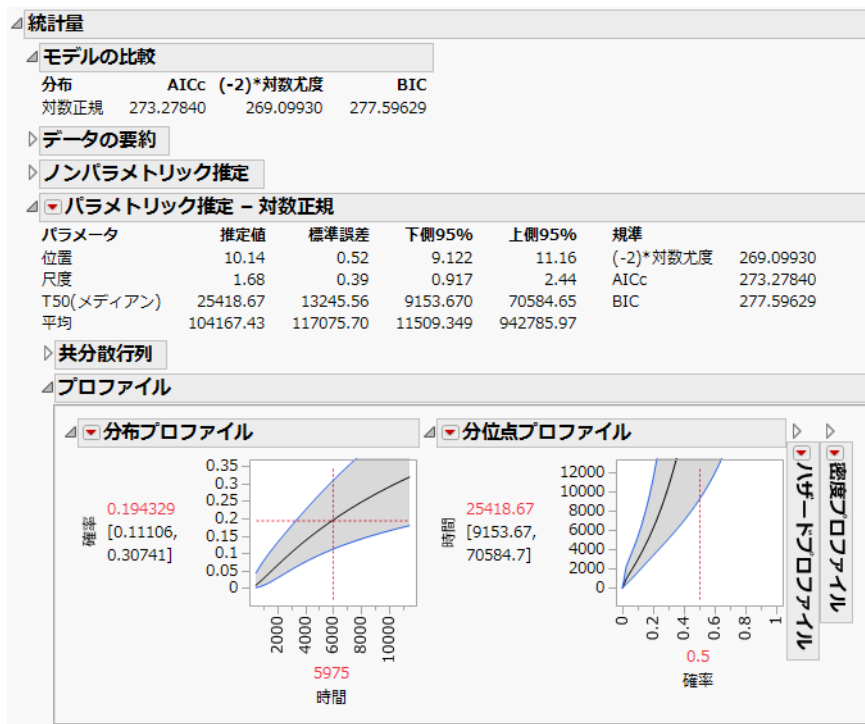
図3.2 確率プロット



この例の確率プロットでは、データ点は赤色の領域内にプロットされています。これは、対数正規分布がデータによくあてはまっていることを示唆しています。

「分布の比較」レポートの下に「統計量」レポート（図3.3）が表示されています。このレポートには、「モデルの比較」レポート、ノンパラメトリック推定、パラメトリック推定、プロファイルなどが表示されます。

図3.3 「統計量」レポート



このレポートには対数正規分布のパラメータ推定値が表示されています。また、あてはめた分布の情報をグラフで表した「プロファイル」も表示されています。「プロファイル」は、累積確率や分位点を知るのに役立ちます。たとえば、「分位点プロファイル」からは、故障時間の中央値に対する推定値が25,418.67時間であることがわかります。

## 「寿命の一変量」プラットフォームの起動

「寿命の一変量」プラットフォームを起動するには、[分析] > [信頼性/生存時間分析] > [寿命の一変量] を選択します。

図 3.4 「寿命の一変量」起動ウィンドウ

### 起動ウィンドウのタブ

起動ウィンドウには次の2つのタブがあります。

- 「寿命の一変量」タブでは、グループ化していないデータをモデル化します。このタブを用いた場合、次のようなレポートが結果として表示されます。
  - 「故障原因」の役割を割り当てなかった場合、「寿命の一変量」レポートが表示されます。このレポートでは、さまざまな寿命分布を比較したり、統計量を調べたりできます。「[「寿命の一変量」レポート](#)」(39 ページ) を参照してください。
  - データにおいて故障が1つもない場合、Weibayes のレポートが表示されます。「[Weibayes レポート](#)」(61 ページ) を参照してください。
  - 「故障原因」の役割を割り当てた場合、「競合原因分析」レポートが表示されます。「寿命の一変量」の標準的なレポートに加えて、故障原因ごとにあてはめた分布についての情報が表示されます。「[「競合原因分析」レポート](#)」(63 ページ) を参照してください。

---

**メモ:** 「寿命の一変量」や「故障原因」のレポートでは、分布パラメータを任意の値に指定したり、Bayes 推定を行ったりもできます。

---

- 「グループの比較」タブでは、グループ変数を指定します。「グループの比較」タブで実行される分析では、指定されている1つの確率分布をもとに複数のグループを比較します。たとえば、「異なる業者から供給された部品の寿命を調べるのに、Weibull 分布で業者を比較する」といった分析が行えます。一方、「寿命の一変量」タブで実行される分析では、1つだけのグループに関して複数の確率分布を比較します。「[「寿命の一変量 - グループの比較」レポート](#)」(68 ページ) を参照してください。

## 起動ウィンドウのオプション

起動ウィンドウには、次のようなオプションがあります。

**Y, イベントまでの時間** 寿命・故障時間もしくは打ち切り時間が含まれた1つ以上の列を指定します。データにおける打ち切りの種類によって、いくつのY列を指定するかが異なってきます。

- Y 列が 1 列しか指定されなかった場合、その列に含まれている値は、イベントが発生するまでの時間（つまり故障時間）、または右側打ち切りの時間（つまり、その時間までは故障がなかったとだけ分かっている時間）とみなされます。この場合、「打ち切り」列を用いて、どのデータ行の時間が右側打ち切りであるかを示します。右側打ち切りデータの詳細は、「1つの「イベントまでの時間」列」（40 ページ）を参照してください。
- 2つのY列が指定された場合、区間打ち切りであるとみなされます。区間打ち切りデータの場合は、各ユニットに対して、最初のY列を上限、二番目のY列を下限とみなします。図3.5に、2つのY列によって、右側打ち切り（Right）・左側打ち切り（Left）・区間打ち切り（Interval）を表す例を示しています。2つのY列を用いた打ち切りについての詳細は、「2つの「故障までの時間」列」（41 ページ）を参照してください。

図3.5 2つのY列で表される打ち切りの種類

	Start Time	End Time	Count	Censoring Type
1	•	50	50	Left
2	•	100	6	Left
3	25	•	30	Right
4	75	•	10	Right
5	80	150	4	Interval
6	100	250	7	Interval

- 3つ以上のY列が指定された場合、指定された各変数をイベントまでの時間データとして、Y列ごとに個別の分析が行われます。

**グループ変数** （このオプションは、[グループの比較] タブにのみ表示されます。）比較するグループを含む列。例として、「グループ間で同じ分布を調べる」（74 ページ）を参照してください。

**打ち切り** 観測値が右側打ち切りであるかどうかを示す列。「列の選択」リストの下に「打ち切りの値」メニューから右側打ち切りを示すデータ値を選択してください。「打ち切り」列は、Y列に対して1つの列を指定した場合にのみ使用できます。

**故障原因** 故障原因が含まれた列を指定します。[故障原因] に列を指定すると、次に述べる設定パネルが、起動ウィンドウに追加されます。

- 原因ごとの故障分布として、ZI分布（ゼロ強調分布）、閾値分布、DS分布（故障部分母集団分布）、パラメータ指定の分布も使用するかどうか、また、Bayes推定モデルも使用するかどうかを、それぞれ該当するチェックボックスを使って指定できます。
- 「分布」には、それぞれの故障原因にあてはめる最初の分布を指定します。すべての原因に同じ分布をあてはめたい場合は、その分布名を選択してください。原因ごとに最適な分布を自動選択させたい場合

は、**「個々の最適な分布」**を選択してください。「寿命の一変量」のレポートを作成した後、故障原因ごとに分布を手動で選択したい場合は、**「手動による選択」**を選択してください。なお、後から、「寿命の一変量」のレポートでも、分布は自由に変更できます。

- **「比較の規準」**は、**「個々の最適な分布」**を選択した場合のみ表示されます。最適な分布を選択する規準として、修正済みの赤池の情報量規準 (AICc)、バイズ情報量規準 (BIC)、または、「 $-2 \times$  対数尤度」を選択できます。詳細については、『基本的な回帰モデル』の付録「統計の詳細」を参照してください。これらの選択規準は、後から、「モデルの比較」のレポートでも変更できます。詳細は、**「モデルの比較」** (46 ページ) の節を参照してください。
- **「故障原因の列で打ち切りを表す値」**は**「故障原因の列」**において右側打ち切りであったことを示すデータ値を指定します。このオプションを選択した後、表示されたテキストボックスに、右側打ち切りを示すデータ値を入力してください。ボックスの右側にあるリストから、該当のデータ値を選択することもできます。

競合原因の分析については、Meeker and Escobar (1998, ch. 15) を参照してください。また、**「競合原因の除去」** (71 ページ) でも解説しています。

**度数** データテーブルにおける1行が複数のユニットを表している場合に、その度数（すなわち、観測値の個数）を含んでいる列。この列の値が0または正の整数であるとき、その値は該当するデータ行の観測値の度数を表しています。

**ラベル** 行番号以外のIDを含む列。これらのラベルは、イベントプロットのY軸に表示されます。

**By** (オプション) 指定した列の水準ごとに個別のモデルが作成されます。

**打ち切りの値** [打ち切り] 列のデータ値のうち、右側打ち切りであることを示すデータ値を指定します。[打ち切り] 列を選択すると候補となるデータ値が、自動的にコンボボックスに表示されます。データ値を変更するには、赤い三角ボタンをクリックして、値のリストから選択してください。テキストボックスに値を入力することもできます。[打ち切り] 列に「値ラベル」列プロパティが設定されている場合、その値ラベルがコンボボックスに表示されます。なお、[打ち切り] 列が欠測値となっている行は、分析から除外されます。

**信頼区間の方法** パラメータ推定値に対する信頼区間を計算する方法を選択します。デフォルトでは、[Wald] 法によって計算されます。別の計算方法として、[尤度] 法も用意されています。ただし、プロファイルに表示されるすべての信頼区間は Wald 法に基づきます。プロファイルの信頼区間には Wald 法しか使わないのは、計算時間を短縮するための措置です。詳細については、**「推定値と信頼区間」** (80 ページ) を参照してください。

**原因ごとの故障分布** 「寿命の一変量」タブで**「故障原因」**を指定した場合のみ表示されます。原因ごとの寿命をモデル化するために使用する故障分布を指定します。「分布」メニューから、任意の最初の分布、**「個々の最適な分布」**、または**「手動による選択」**を選択します。詳細は、**「故障原因」** (37 ページ) を参照してください。

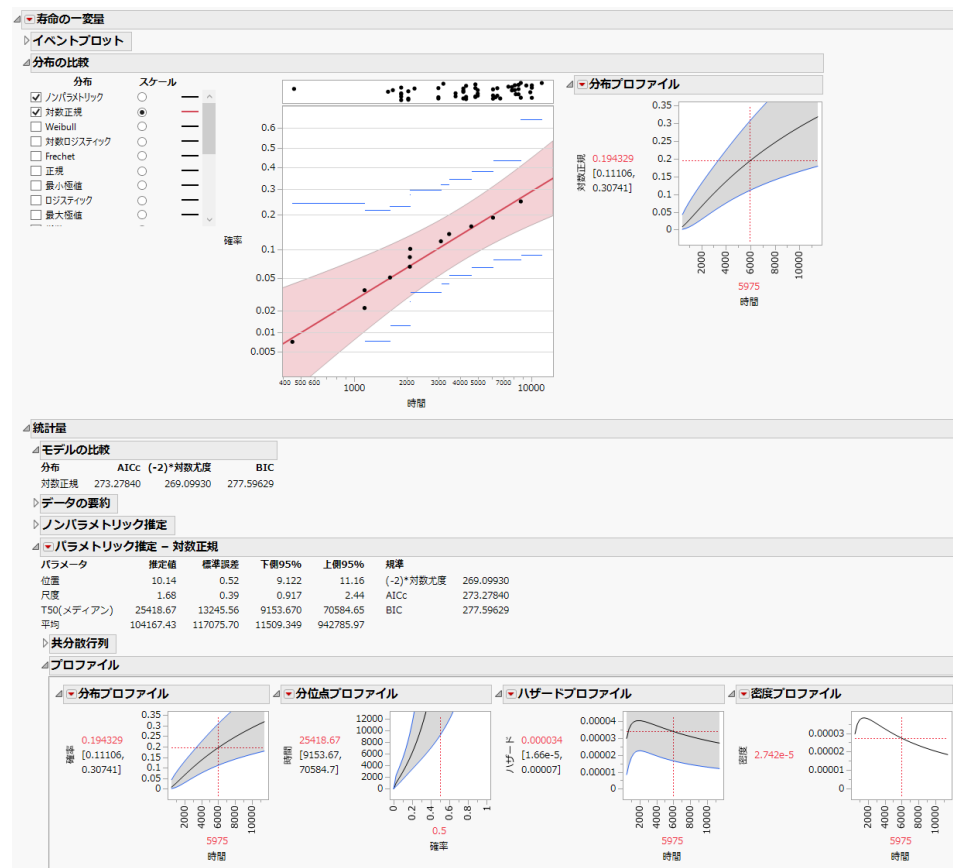
## 「寿命の一変量」レポート

ヒント: レポートウィンドウが長すぎる場合は、赤い三角ボタンのメニューから「タブ形式で結果を表示」を選択してください。

起動ウィンドウで「故障原因」を選択しなかった場合、「寿命の一変量」レポートが表示されます。このレポートによって、打ち切りがある寿命データを分析できます。「寿命の一変量」レポートには、次のような要素とオプションがあります。

- ・「イベントプロット」(40ページ)
- ・「分布の比較」(42ページ)
- ・「寿命の一変量: 統計量」(46ページ)
- ・「「寿命の一変量」レポートのオプション」(53ページ)

図3.6 「Fan.jmp」の「寿命の一変量」レポートの例



## イベントプロット

「イベントプロット」の開閉ボタンをクリックすると、イベントプロットが表示されます。イベントプロットは、故障時間や打ち切り時間を描いたグラフです。イベントプロットには、データテーブルの行ごとに線分や半直線が描かれ、ユニットが打ち切られたかどうかを示されています。ユニットが打ち切られている場合、半直線の右部分で打ち切りの種類が示されます。打ち切りの情報は次のように示されます。

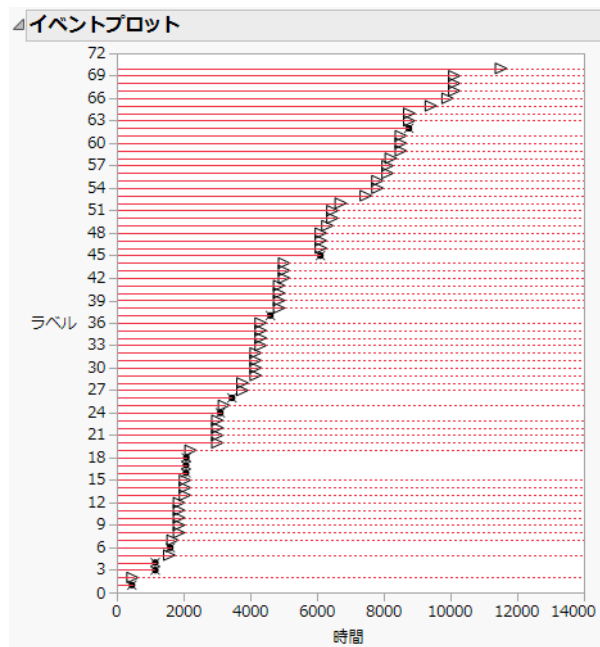
- ユニットが故障していないと分かっている期間は実線となっています。
- ユニットが故障していないか、故障しているか**不明**の期間は点線で示されます。
- ユニットが故障したと確認された時点で、線分は終了します。

### 1つの「イベントまでの時間」列

「Fan.jsp」サンプルデータには、故障時間を示す「時間」列が1つあります。故障が生じる前に観測が打ち切られたものには、「打ち切りの有無」列に「Censored」という値が記録されています。このデータにおける打ち切りは、すべて右側打ち切りになっています。図3.7は、このデータのイベントプロットです。

メモ: 図3.7のプロットを作成するには、まず、[ヘルプ]>[サンプルデータライブラリ]を選択し、「Reliability」フォルダにある「Fan.jsp」を開きます。「寿命の一変量(指数分布)」スクリプトの横の緑の三角をクリックします。そして、「イベントプロット」の開閉ボタンをクリックします。

図3.7 右側打ち切りデータのイベントプロット



行3のユニットは「時間」が1150のときに故障しています。「時間」が1150の位置までしか線分が伸びていないことから、このユニットは1150時間で故障したことがわかります。ユニットが故障した場合、マーカーがバツ印「×」になっています。

行5のユニットは右側打ち切りです。このユニットは、「時間」が1560のときまでは故障していなかったことが確認されています。ユニットが故障していないと分かっている期間は実線で描かれていますが、1560時間以降は点線になっています。1560時間において、右矢印が描かれています。1560時間で実線は点線に変わり、故障時間は不明で、試験や観測を続けると1560時間以降のいずれかの時点で故障するであろうことが示されています。

## 2つの「故障までの時間」列

「Censor Labels.jsp」サンプルデータには、「開始時間」と「終了時間」があります。「開始時間」は、該当するユニットが故障していないことが最後に確認された時間です。「終了時間」は、ユニットが故障していることが最初に確認された時間です。

「開始時間」と「終了時間」の値は、ユニットに関して次のような情報を示しています。

- 行1と行2のユニットは左側打ち切りです。これらは、「終了時間」列の時間以前に故障したことが確認されていますが、正確な故障時間は不明です。
- 行3と行4のユニットは右側打ち切りです。これらは、「開始時間」列の時間には故障していないことが最後に確認されていますが、正確な故障時間は不明です。
- 行5と行6のユニットは区間打ち切りです。どちらも、「開始時間」と「終了時間」で定義される区間内に故障したことが確認されています。
- 行7と行8のユニットは打ち切られていません。このユニットでは、「開始時間」および「終了時間」列の値が同じになっています。

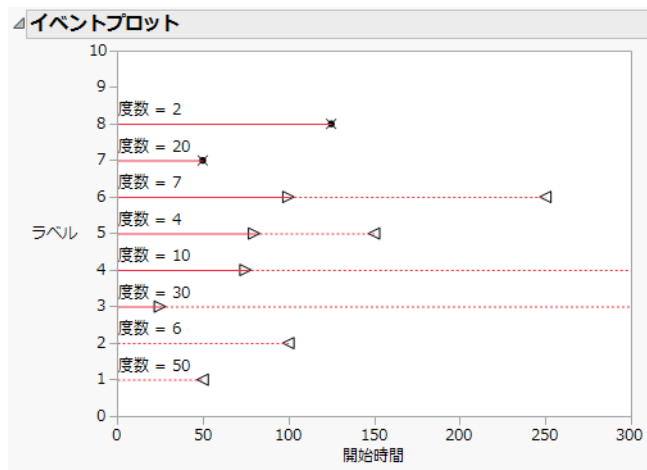
図3.8は、このデータのイベントプロットです。

---

メモ: 図3.8のプロットを作成するには、まず、[ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Censor Labels.jsp」を開きます。そして、「寿命の一変量」スクリプトの横にある緑の三角をクリックします。

---

図3.8 打ち切りデータのイベントプロット



各種打ち切りは、次のように表されます。

- は、右側打ち切りを表します。最後の時間以降にユニットが故障することを意味します。
- .....△ は、左側打ち切りを表します。これらのユニットは、最後の時間以前には故障していることは分かっていますが、それまでのどの時点で故障したかは不明です。
- .....△ は、2つの矢じりで挟まれた期間にユニットが故障したことを表します。
- x は、打ち切りなしを表します。ユニットは、xでマークされている時間で故障したことを意味します。

## 分布の比較

「分布の比較」レポートでは、複数の寿命分布をあてはめ、それらを比較できます。このレポートでは、次に示す2つの一覧が表示されています。

**分布** このオプションでは、故障時間の確率分布を選択します。使用できる分布の詳細については、「[使用するパラメトリックな分布](#)」(43 ページ) を参照してください。

**スケール** このオプションでは、軸に対する確率スケールを選択します。各確率スケールは、それらの「スケール」ボタンの左側に表示されている分布名に対応しています。各分布は、該当するスケールでは直線で描かれます。ある分布をあてはめ、その分布の確率スケールを軸に設定したとします。そのときに点が直線に沿っているならば、その分布はデータに良くあてはまっていることを示します。

初めのグラフでは、故障が観測された時間に対して、ノンパラメトリックな推定値 (Kaplan-Meier 推定値もしくは Turnbull 推定値) がプロットされます。また、それらに対する信頼区間が、青色の横線で表されます。

ヒント：ノンパラメトリックな推定量のプロットをカスタマイズするには、[ファイル] > [環境設定] > [プラットフォーム] > [寿命の一変量] を選択し、[時点別区間を塗る]、[同時区間を塗る]、あるいは[階段関数を描く] といった環境設定を選択します。

デフォルトでは、プロットの最上部に、右側打ち切りされた時間に点がプロットされています。

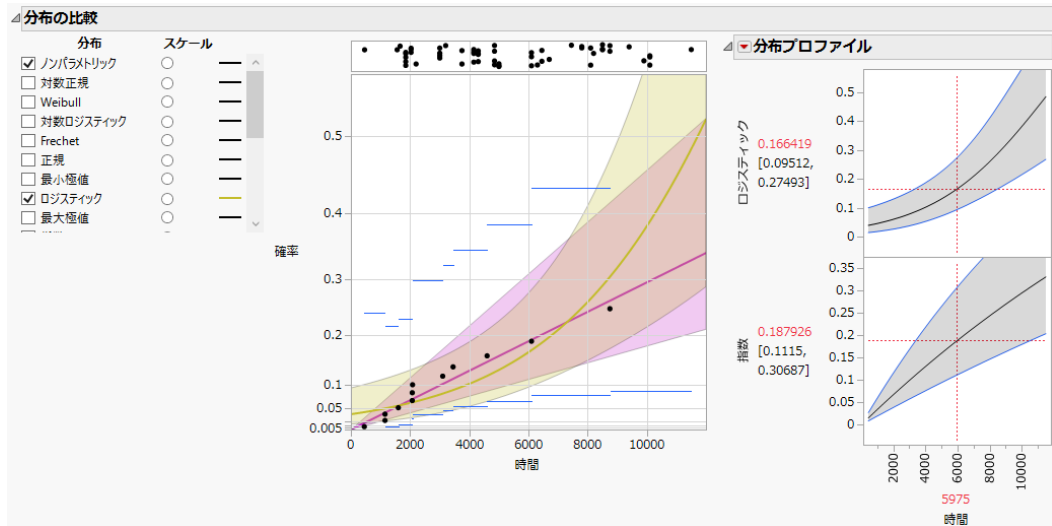
ヒント：この右側打ち切りを示すプロットを非表示にするには、[ファイル] > [環境設定] > [プラットフォーム] > [寿命の一変量] を選択し、[右側打ち切りのマーカを表示する] のチェックボックスをはずしてください。

「分布の比較」レポートには、選択した各分布の情報が次のように示されます。

- 確率プロットに、推定された累積分布関数の曲線が描かれる
- 確率プロットに、累積分布関数に対する信頼区間が陰影つきの領域で描かれる
- 特定の時点における累積確率を示す分布プロファイルが描かれる

図3.9は、「分布の比較」レポートの一例です。ロジスティック（黄色）と指数（赤紫）の累積分布関数が描かれています。なお、このプロットの軸には、指数分布の確率スケールが使われています。

図3.9 「分布の比較」レポートと「分布プロファイル」



### 使用できるパラメトリックな分布

ここでは、「分布の比較」レポートで使用できる分布について説明します。

メモ：「競合する原因」レポートの分布については、「故障原因ごとの分布の比較に使用できる分布」（66ページ）を参照してください。

使用できる分布については、「[パラメトリックな分布](#)」(80ページ)に一覧と説明があります。これらのパラメトリックな分布は、主に以下の4つに分類できます。

- 「[基本的な分布](#)」(44ページ)
- 「[閾値分布](#)」(45ページ)
- 「[故障部分母集団分布](#)」(45ページ)
- 「[ゼロ強調分布](#)」(45ページ)

---

ヒント: デフォルトで使用可能な分布を設定するには、[ファイル] > [環境設定] > [プラットフォーム] > [寿命の一変量] を選択し、不要な分布のチェックボックスをオフにします。すると、閾値、DS (故障部分母集団)、ZI (ゼロ強調)、対数一般化ガンマ、一般化ガンマといった分布が一覧表示されます。デフォルトでは、すべての分布がチェックされ、使用可能になっています。

---

「分布の比較」パネルにどの分布が表示されるかは、状況によって異なります。「環境設定」で無効にされておらず、かつ、状況に適している分布が表示されます。

### 基本的な分布

基本的な分布は、データ中のすべての故障時間が正である場合、常に使用できます。基本的な分布は次のとおりです。

- 対数正規
- Weibull
- 対数ロジスティック
- Fréchet
- 正規
- 最小極値
- ロジスティック
- 最大極値
- 指数
- 対数一般化ガンマ
- 一般化ガンマ

---

メモ: データに負またはゼロが含まれている場合には、上記のなかからは、正規・最小極値・ロジスティック・最大極値・対数一般化ガンマだけが使用できます。

---

### 閾値分布

閾値 (TH; Threshold) をもついくつかの分布が用意されています。閾値パラメータをもつ確率分布は、対数-位置-尺度型の確率分布に、閾値パラメータを加えたものです。閾値パラメータをもつ分布では、分布の最小値が0でなくなります。これらの閾値分布は、すべてのユニットが閾値までは生存していると仮定します。このような閾値分布は、中程度もしくは高程度に、分布がシフトしている場合に適しています。閾値分布は次のとおりです。

- 閾値 対数正規
- 閾値 Weibull
- 閾値 対数ロジスティック
- 閾値 Fréchet

### 故障部分母集団分布

故障部分母集団 (DS; Defective Subpopulation) の分布は、すべての故障時間が正の場合にのみ使用できます。これらの DS 分布は、故障をもたらす不具合がごく一部のユニットにしか生じない場合に適しています。一部の部分母集団だけに故障が生じる状態を表現したい場合には、これらの DS 分布を用いてください。用意されている DS 分布は次のとおりです。

- DS 対数正規
- DS Weibull
- DS ロジスティック
- DS Fréchet

### ゼロ強調分布

「寿命の一変量」プラットフォームでは、[イベントまでの時間] データの最小値がゼロである場合に、次のゼロ強調 (ZI; Zero-Inflated) の分布を使用できます。

- ゼロ強調 対数正規 (ZI 対数正規)
- ゼロ強調 Weibull (ZI Weibull)
- ゼロ強調 対数ロジスティック (ZI 対数ロジスティック)
- ゼロ強調 Fréchet (ZI Fréchet)

ゼロ強調分布は、ユニットの一部がゼロ時点で故障する場合に適しています。通常の分布で想定されるよりもゼロ時間での故障個数が多いデータに対して、ゼロが発生する確率を追加してモデル化します。

### 故障がまったく生じなかったデータ

故障がまったく生じなかったデータを分析する場合、前述した分布はいずれもデフォルトでは使用できません。[Bayes 推定] オプションが利用可能な場合に Bayes 推定を行うには、[ファイル] > [環境設定] > [プラットフォーム] > [寿命の一変量] を選択し、[故障ゼロの場合は WeiBayes 分析のみ] のチェックボックスを外します。「故障がまったくないデータに対する WeiBayes 分析」(51 ページ) を参照してください。

### Bayes推定が行えるパラメトリックな分布

次のパラメトリックな分布ではBayes推定が使用できます。

- 対数正規
- Weibull
- 対数ロジスティック
- Fréchet
- 正規
- 最小極値
- ロジスティック
- 最大極値

これらの分布における事前分布のハイパーパラメータの指定方法については、「[Bayes推定の事前分布](#)」(92ページ)を参照してください。

## 寿命の一変量: 統計量

「統計量」レポートには、次のサブレポートがあります。

- 「[モデルの比較](#)」(46ページ)
- 「[データの要約](#)」(46ページ)
- 「[ノンパラメトリック推定](#)」(47ページ)
- 「[パラメトリック推定 - <分布の名前>](#)」(47ページ)（「分布の比較」レポートで選択した各分布に対して表示されるレポート）

### モデルの比較

「モデルの比較」レポートには、AICc、BIC、および、対数尤度をマイナス2倍したものが、あてはめた分布ごとに表示されます。これらの統計量は、値が小さいほどあてはまりが良いことを示します。これらの統計量の詳細については、『基本的な回帰モデル』の付録「統計的詳細」を参照してください。

初期状態では、行は「AICc」によって並べ替られています。並べ替えに用いる規準を変更するには、「寿命の一変量」の赤い三角ボタンをクリックし、**[比較の規準]**を選択します。このオプションの詳細は、「[「寿命の一変量」レポートのオプション](#)」(53ページ)を参照してください。

### データの要約

「データの要約」レポートは、観測されたユニットの総数、非打ち切りの個数、右側打ち切りの個数、左側打ち切りの個数、および区間打ち切りの個数が表示されます。

## ノンパラメトリック推定

「ノンパラメトリック推定」レポートでは、累積故障確率のノンパラメトリックな推定値が、時点ごとに求められています。「イベントまでの時間」列に1列だけを指定し、右側打ち切りデータを分析した場合には、次の統計量が求められます。

**中間点推定値** 中間点の調整を行った Kaplan-Meier 推定値。

**下側 95%、上側 95%** 時点別 95% 信頼区間。信頼水準は、レポートオプションから「信頼水準の変更」を選択することによって変更できます。

**同時下側 95%(Nair)、同時上側 95%(Nair)** 同時 95% 信頼区間。信頼水準は、レポートオプションから「信頼水準の変更」を選択することによって変更できます。Nair (1984) および Meeker and Escobar (1998) を参照してください。

**Kaplan-Meier 推定値** 通常の Kaplan-Meier 推定値。

「イベントまでの時間」列に2つの列を指定した場合には、「推定値」という列に) Turnbull 推定値、時点別信頼区間、(Nair の) 同時信頼区間が表示されます。

ノンパラメトリックな推定値については、「[ノンパラメトリックな推定値](#)」(80 ページ) を参照してください。

## パラメトリック推定 - <分布の名前>

あてはめられた各分布に対して、「パラメトリック推定 - <分布の名前>」というレポートが表示されます。このレポートには、あてはめた確率分布のパラメータ推定値、および、それらに対する標準誤差と信頼区間が表示されます。また、「モデルの比較」レポートに表示されている情報量規準が、このレポートでも「規準」の下に表示されます。

---

**メモ:** なお、平均に対する信頼区間は常に Wald 法によって計算されます。起動ウィンドウの「信頼区間の方法」で「尤度」を選んだ場合でも、平均に対する信頼区間には Wald 法が使われます。「尤度」を選んだ場合、「パラメータ」列の「平均」は「平均(Wald 信頼区間)」と表記され、平均に対する信頼区間が Wald 法で算出されたことが示されます。

---

それぞれの確率分布のパラメータ表現については、「[パラメトリックな分布](#)」(80 ページ) を参照してください。

「パラメトリック推定値」レポートには、次のレポートが含まれます。

- 「[共分散行列](#)」(48 ページ)
- 「[プロファイル](#)」(48 ページ)
- 「パラメトリック推定値」の赤い三角ボタンメニューからオプションを選択することで、レポートを追加できます。追加できるレポートは、「分布パラメータの指定」、「Bayes 推定」、「カスタム推定」(確率推定、分位点推定)、および「平均余寿命」です。詳細は、「[パラメトリック推定のオプション](#)」(48 ページ) を参照してください。

## 共分散行列

「共分散行列」レポートには、パラメータ推定値の分散共分散行列が表示されます。

## プロファイル

分布ごとに4種類のプロファイルが表示されます。

- 「分布プロファイル」は、X軸が時間、Y軸が累積故障確率を表しています。
- 「分位点プロファイル」は、X軸が累積故障確率、Y軸が時間を表しています。
- 「ハザードプロファイル」は、X軸が時間、Y軸がハザード（瞬間故障率）を表しています。
- 「密度プロファイル」は、X軸が時間、Y軸が密度を表しています。

プロファイルには、次の赤い三角ボタンのオプションがあります。

**信頼区間** 分布、分位点、ハザードの各プロファイルの曲線には、Wald法による信頼区間も描かれます。このオプションは、信頼区間を示す曲線の表示／非表示を切り替えます。

**因子グリッドのリセット** 因子を設定するためのウィンドウが表示されます。因子の現在の設定に特定の値を指定したり、その設定をロックしたり、プロット点の数を変更したりできます。詳細については、『プロファイル機能』の「プロファイル」章を参照してください。

**因子設定** いくつかのオプションがあります。詳細については、『プロファイル機能』の「プロファイル」章を参照してください。

---

**メモ:** プロファイルに表示される信頼区間は、起動ウィンドウの「信頼区間の方法」で「尤度」を選んだ場合でも、常にWald法によって計算されます。プロファイルで信頼区間の計算にWald法しか使わないのは、計算時間を短縮するための措置です。

---

## 「パラメトリック推定」のオプション

「パラメトリック推定」の赤い三角ボタンをクリックすると、次のようなオプションが表示されます。

**確率推定値の保存** 累積故障確率の推定値と信頼区間を、データテーブルに保存します。

**分位点推定値の保存** 分位点の推定値と信頼区間を、データテーブルに保存します。

**ハザード推定値の保存** ハザードの推定値と信頼区間を、データテーブルに保存します。

**尤度等高線の表示** 対数尤度関数を描いた等高線図の表示／非表示を切り替えます。Weibull分布の場合は、位置と尺度についての等高線図に加えて、 $\alpha$ と $\beta$ についての等高線図も描画されます。なお、このオプションが使えるのは、2パラメータの分布に対してだけです。

**尤度プロファイルの表示** 対数尤度関数を描いたプロファイルの表示／非表示を切り替えます。このオプションは、閾値分布（TH分布）では使用できません。

**分布パラメータの指定** このオプションを選択するとレポートが開き、そこで分布パラメータの値を指定できます。パラメータを指定し、適切なチェックボックスにチェックを入れた後、**[更新]** をクリックしてください。すると、新しく指定されたパラメータ値に基づいて、他のパラメータ値、共分散、およびプロファイルが再推定され、それらの結果が「分布パラメータの指定」レポートに表示されます。非制約モデルの分布プロファイルは、固定パラメータモデルの分布プロファイルの下に示されます。競合する原因の例については、「[競合原因分析でのパラメータ指定](#)」(93 ページ) を参照してください。

Weibull 分布に対しては、この **[分布パラメータの指定]** オプションにおいて、Weibayes 分析も行えます。例として、「[Weibayes 推定](#)」(76 ページ) を参照してください。Weibayes 分析のオプションは、区間打ち切りデータに対しては使用できません。

**Bayes 推定** 3 種類の事前分布（[位置と尺度の事前分布]、[分位点とパラメータの事前分布]、[故障確率の事前分布]）のいずれかに基づいて、Bayes 法により分布パラメータの事後分布を求めます。「[Bayes 推定 - <分布の名前>](#)」(49 ページ) を参照してください。この Bayes 推定のオプションは、対数正規分布・Weibull 分布・対数ロジスティック分布・Fréchet 分布・正規分布・最小極値分布・ロジスティック分布・最大極値分布に対してのみ利用できます。

**カスタム推定** 特定の分位点（時間）における故障確率と生存確率、および、特定の故障確率に対する分位点を計算します。また、これらに対する両側または片側の信頼区間も算出されます。「[確率の推定](#)」と「[分位点の推定](#)」の 2 つのレポートが表示されます。「[カスタム推定](#)」(52 ページ) を参照してください。

**平均余寿命** あてはめた分布に基づいて平均余寿命を求めます。「平均余寿命の計算」で「時間」を入力して **Enter** キーを押すと、推定値が表示されます。複数の平均余寿命を計算したい場合には、プラス記号をクリックしてください。この [平均余寿命] オプションは、対数正規分布・Weibull 分布・対数ロジスティック分布・Fréchet 分布・正規分布・最小極値分布・ロジスティック分布・最大極値分布・指数分布に対してのみ利用できます。

## Bayes 推定 - <分布の名前>

一部の分布では、Bayes 推定を行えます。この機能では、Markov 連鎖モンテカルロ (MCMC; Markov Chain Monte Carlo) アルゴリズムが使われています。ここで使われている MCMC アルゴリズムは、独立連鎖サンプラーを用いた Metropolis-Hastings 法です。Robert and Casella (2004) を参照してください。

「パラメトリック推定 - <分布の名前>」レポートの赤い三角ボタンから、**[Bayes 推定]** を選択してください。そうすると、「Bayes 推定 - <分布の名前>」というアウトラインが開きます。レポートは最初、コントロールパネルになっているので、そこで事前分布パラメータや乱数シミュレーションに関するオプションを指定します。

作業手順は次のとおりです。

- 「Bayes 推定」の赤い三角ボタンメニューから事前分布の種類を選択し、事前分布のパラメータ値を設定します。「[Bayes 推定の赤い三角ボタンのオプション](#)」(50 ページ) を参照してください。
- シミュレーションに関するオプションを指定します。「[Bayes 推定 - 結果 <N>](#)」(51 ページ) を参照してください。
- [モデルのあてはめ] をクリックしてモデルをあてはめます。「[Bayes 推定 - 結果 <N>](#)」(51 ページ) を参照してください。

## Bayes 推定の赤い三角ボタンのオプション

「Bayes 推定」の赤い三角ボタンのメニューには、次の事前分布が用意されています。

**位置と尺度の事前分布** 分布パラメータ（位置パラメータと尺度パラメータ）に対して、事前分布を指定できます。「事前分布」の赤い三角ボタンのメニューから、各分布パラメータに対する事前分布を選択してください。また、選択した事前分布に対する適当なハイパーパラメータ値を設定してください。最初に設定されている値は、最尤推定の結果に基づいています。詳細は、「[Bayes 推定の事前分布](#)」（92 ページ）を参照してください。

**分位点とパラメータの事前分布** 分位点と尺度パラメータ（または、Weibull 分布においては  $\beta$ ）に対して、事前分布を指定できます。分位点は、「確率」の値に対応したものです。デフォルトの「確率」の値は 0.10 ですが、関心のある分位点に変更できます。このオプションでは、分位点と尺度パラメータの事前分布における 99% 下側限界と 99% 上側限界を指定します。詳細については、Meeker and Escobar (1998) を参照してください。最初に設定されている値は、最尤推定の結果に基づいています。詳細は、「[Bayes 推定の事前分布](#)」（92 ページ）を参照してください。

**故障確率の事前分布** 異なる 2 時点における故障確率に対して、事前分布を指定できます。故障確率を求める 2 つの時点指定できます。各時点での故障確率に対する事前分布は、ベータ分布です。次のいずれかの方法で、事前分布を指定してください。

1. 「故障確率の事前分布を、推定値と推定誤差 (%) で指定」。このオプションでは、事前分布であるベータ分布を、確率推定値とその推定誤差で指定します。Kaminskiy and Krivtsov (2005) を参照してください。
2. 「故障確率の事前分布を、範囲で指定」。このオプションでは、事前分布であるベータ分布の 99% を含む範囲を、次の方法で入力します。
  - 各故障時間に対して、99% の上下限を入力します。
  - グラフに描かれている縦の線分の端をドラッグすることにより、2 つの時点を変更できます。また、線分の長さを変更して、99% の上下限を変更できます。

## シミュレーションのオプション

「Bayes 推定」の赤い三角ボタンのメニューで事前分布の手法を選んだ場合、パネルの最下部に次のオプションが表示されます。

**モンテカルロ反復数** バーンイン (burn-in) を行った後に、事後分布から生成する標本サイズを指定します。

**乱数シード値** シミュレーションにおいて生成される乱数のシード値を設定します。デフォルトでは、現在の時刻に設定されています。この値は、1 より大きい正の整数でなければなりません。1 を指定すると、現在の時刻が使用されます。

**事前分布の散布図を表示** 事前分布からの乱数を生成し、その結果を散布図にプロットしたい場合には、このオプションを選択します。このオプションを選択すると、[モデルのあてはめ] をクリックした後、「Bayes 推定値 - 結果 <N>」レポートの「事前散布図」というアウトラインに散布図が表示されます。

**尤度等高線の重ね合せ** 「Bayes 推定値 - 結果」レポート内の散布図に、尤度等高線を重ね合わせて描きます。

**モデルのあてはめ** 指定された設定の事前分布に基づき、事後分布を求めます。「Bayes推定 - 結果 <N>」という名前のレポートが表示されます。ここで、Nは、Bayes推定の結果に対する通し番号です。

### Bayes推定 - 結果 <N>

赤い三角ボタンのオプションのいずれかを選択し、事前分布を指定したら、[モデルのあてはめ] をクリックしてください。指定された事前分布に基づいて、「Bayes推定 - 結果 <N>」レポートが作成されます。このレポートには次のようなアウトラインがあります。

**事前確率** Bayes推定に関して「Bayes推定」レポートで指定した設定が表示されます。また、乱数シード値も表示されます。

**事後推定値** 分布パラメータ（位置パラメータと尺度パラメータ）の事後分布に関して、周辺分布に関する5つの統計量と、同時分布に関する1つの統計量が表示されます。モンテカルロ標本から計算された周辺分布に関する統計量は、「中央値」、「下側境界」（2.5パーセント点）、「上側境界」（97.5パーセント点）、「平均」、「標準偏差」です。「同時最高事後密度」の下に表示されているパラメータ値は、同時事後密度が最高になるパラメータ値です。事後推定値が「分位点とパラメータの事前分布」仕様を用いて生成されるとき、この表はまた、分位点（およびWeibull分布の場合には $\beta$ ）の事後推定を含みます。

分布パラメータの事後分布におけるその他のさまざまな統計量を計算するには、[モンテカルロ標本データの作成] をクリックしてください。

**事前分布の散布図** この散布図は、[事前分布の散布図を表示] を選択した状態で、[モデルのあてはめ] をクリックすると表示されます。指定された事前分布の分布パラメータに対して、もしくは事前分布に関連するパラメータに対して、事前分布の散布図を描きます。

**事後分布の散布図** 指定された事前分布に基づいて計算された、パラメータに関する事後分布の散布図を表示します。

**プロファイル** 事後分布からの標本に基づく2つのプロファイルを表示します。

「分布プロファイル」で描かれている曲線は、指定の時間を $t$ とすると、次のように求められます。

- － 事後分布の標本における各パラメータ値に対して、時間 $t$ における累積分布関数の値が計算されます。
- － 予測値は、このようにして求めた関数値の中央値です。
- － 上側信用限界（上側信頼限界）と下側信用限界（下側信頼限界）は、このようにして求めた関数値の2.5パーセント点と97.5パーセント点です。

「分位点プロファイル」に示されるプロットと信用限界（信頼限界）も、同様の方法で求められます。与えられた確率 $p$ に対して、 $p$ に対応する分位点が、パラメータの事後分布から計算されます。

### 故障がまったくないデータに対するWeiBayes分析

試験によっては故障がまったく生じず、すべての観測値が右側打ち切りになる場合があります。故障がまったくないデータに対しては、Bayes推定やWeibaye推定を行えます。「[Weibayesレポート](#)」（61ページ）を参照してください。

メモ: デフォルトでは、故障がまったくないデータは Weibayes 推定で分析されます。故障がまったくないデータに対し、より汎用的な Bayes 推定を行いたい場合は、[ファイル] > [環境設定] > [プラットフォーム] > [寿命の一変量] を選択し、[故障ゼロの場合は WeiBayes 分析のみ] のチェックボックスを外します。

## カスタム推定

[カスタム推定] を選択すると、「確率の推定」と「分位点の推定」の2つのレポートが表示されます。「確率の推定」レポートでは、特定の時間（分位点）に対して、故障確率と生存確率の推定値を計算します。「分位点の推定」レポートでは、特定の故障確率に対して、分位点の推定値を計算します。各分位点の推定値には、Wald 法に基づく信頼区間と尤度に基づく信頼区間の両方が表示されます。これらの信頼区間の信頼水準は、「寿命の一変量」の赤い三角ボタンメニューの [信頼水準の変更] オプションを使って変更できます。

### 確率の推定

「確率の推定」レポートには、「時間」の値を入力します。そして、**Enter** をクリックすると、故障確率と生存確率、および、それらの信頼区間が表示されます。複数の確率の推定値を計算したい場合には、プラス記号をクリックします。新しいボックスが表示されるので、そこに値を入力して **Enter** キーを押します。最後の入力を削除するにはマイナス記号をクリックします。

「確率の推定」には [信頼区間の方法] オプションがあり、区間の形式を変更できます。次のいずれかのオプションが用意されています。

**両側** 故障確率と生存確率の両側信頼区間が計算されます。

**上側故障確率** 片側信頼区間（故障確率の上側信頼区間と、生存確率の下側信頼区間）が計算されます。

**下側故障確率** 片側信頼区間（故障確率の下側信頼区間と、生存確率の上側信頼区間）が計算されます。

### 分位点の推定

「分位点の推定」レポートには、「故障確率」の値を入力します。**Enter** をクリックすると、分位点とその信頼区間が表示されます。複数の分位点の推定値を計算したい場合には、プラス記号をクリックします。新しいボックスが表示されるので、そこに別の故障確率の値を入力して **Enter** キーを押します。最後の入力を削除するにはマイナス記号をクリックします。

「分位点の推定」には [信頼区間の方法] オプションがあり、区間の形式を変更できます。次のオプションが用意されています。

**両側** 分位点の両側信頼区間が計算されます。

**下側** 分位点の下側信頼区間が計算されます。

**上側** 分位点の上側信頼区間が計算されます。

## 「寿命の一変量」レポートのオプション

「寿命の一変量」の赤い三角ボタンをクリックすると、次のようなオプションが表示されます。

**すべての分布のあてはめ** 閾値分布以外のすべての分布をあてはめます。あてはめた分布は、「モデルの比較」レポート内で比較できます。詳細は、「[分布の比較](#)」(42 ページ)を参照してください。

---

**ヒント:** 最適な分布を選ぶ規準を変更するには、[\[比較の規準\]](#)を選択します。

---

**すべての非負分布のあてはめ** 非負データに対するすべての分布(指数・対数正規・対数ロジスティック・Fréchet・Weibull・一般化ガンマ分布)をあてはめます。あてはめた分布は、「モデルの比較」レポート内で比較できます。「[分布の比較](#)」(42 ページ)を参照してください。次の点に注意してください。

- このオプションでは、DS 分布と閾値分布はあてはめません。
- データに負の値がある場合は、何も起こりません。
- このオプションを選択すると、いくつかのユニットがゼロ時間で故障している場合には、ゼロ強調(ZI; Zero-Inflated)分布をあてはめます。ゼロ強調分布には、ZI 対数正規・ZI Weibull・ZI 対数ロジスティック・ZI Fréchet の4つが用意されています。ゼロ強調分布については、「[ゼロ強調分布](#)」(91 ページ)を参照してください。

**すべてのDS分布のあてはめ** すべての故障部分母集団(DS; Defective Subpopulation)の分布をあてはめます。DS 分布には、DS 対数正規・DS Weibull・DS ロジスティック・DS Fréchet の4つが用意されています。DS 分布の詳細は、「[故障部分母集団の分布 \(DS 分布\)](#)」(90 ページ)を参照してください。

**混合分布のあてはめ** いくつかの分布を組み合わせた混合分布をあてはめます。なお、混合させる分布には、閾値分布(TH 分布)は含まれていません。「[混合分布のあてはめ](#)」(55 ページ)を参照してください。

**競合リスク混合分布のあてはめ** 競合リスク混合分布をあてはめます。「[競合リスク混合分布のあてはめ](#)」(60 ページ)を参照してください。

**点の表示** 確率プロットにおける点の表示/非表示を切り替えます。確率プロット上に Kaplan-Meier 曲線を点でプロットする場合には、中間点が使われます。一方、[\[点の表示\]](#)を解除して点でプロットしない場合には、中間点ではなく、通常の Kaplan-Meier 推定値が使われます。

**イベントプロットで度数を表示** (このオプションは「度数」変数を指定した場合のみ表示されます。)イベントプロットにおいて「度数」ラベルの表示/非表示を切り替えます。

**生存曲線の表示** 「分布の比較」の確率プロットと「分布プロファイル」プロットに表示される曲線を、故障確率の曲線にするか、生存確率の曲線にするかを切り替えます。

**分位点関数の表示** 選択した確率分布の分位点関数を重ね合わせて描いた「分位点プロファイル」の表示/非表示を切り替えます。この「分位点プロファイル」では、故障が生じた時点に対して点がプロットされます。この「分位点プロファイル」は「分布の比較」レポートの下に表示されます。「分布の比較」・「分位点プロファイル」・「ハザードプロファイル」のいずれか1つ分布を選択すると、その分布に関する曲線が他の2つのプロットにも描かれます。

**ハザード関数の表示** 選択した確率分布のハザード関数を重ね合わせて描いた「ハザードプロファイル」の表示／非表示を切り替えます。この「ハザードプロファイル」は「統計量」レポートの上に表示されます。「分布の比較」・「分位点プロファイル」・「ハザードプロファイル」のいずれか1つで分布を選択すると、その分布の曲線が他の2つのプロットにも描かれます。

**統計量の表示** 「統計量」レポートの表示／非表示を切り替えます。詳細は、「[寿命の一変量: 統計量](#)」(46ページ)の節を参照してください。

**タブ形式で結果を表示** タブ形式でレポートを表示します。デフォルトでは、アウトライン形式で表示されています。

**信頼領域の表示** グラフにおいて、色のついた信頼領域の表示／非表示を切り替えます。

**区間の種類** 「分布の比較」プロットにおいて、ノンパラメトリックな推定値に対して描かれる信頼区間の種類を指定します。[同時]と[時点別]のいずれかを選択してください。

**信頼水準の変更** プラットフォーム全体で使われる信頼水準を変更します。信頼水準を変更すると、すべてのプロットとレポートが更新されます。

**比較の規準** 「モデルの比較」レポートにおけるモデルの並び替えに使用される規準を選択します。どの規準でも、互いに比較したときに規準が小さくなっている確率分布が良いモデルと判断されます。AICは、Akaike (1974)で説明されています。また、Burnham and Anderson (2002)は、AICcとBICによるモデル選択について述べています。詳細については、『基本的な回帰モデル』の付録「統計的詳細」を参照してください。

以下のオプションについて詳しくは、『JMPの使用法』の「JMPのレポート」章を参照してください。

**ローカルデータフィルタ** 現在のレポートにおいて、データをフィルタリングするローカルデータフィルタの表示／非表示を切り替えます。

**やり直し** 分析を繰り返したり、やり直したりするオプションを含みます。また、[自動再計算]オプションに対応しているプラットフォームにおいては、[自動再計算]オプションを選択すると、データテーブルに加えた変更が、該当するレポートに即座に反映されるようになります。

**スクリプトの保存** レポートを再現するためのスクリプトを保存するオプションが、保存先ごとに用意されています。

**By グループのスクリプトを保存** By 変数の全水準に対するレポートを再現するためのスクリプトを保存するオプションが、保存先ごとに用意されています。起動ウィンドウでBy変数を指定した場合のみ使用可能です。

By変数を指定した場合、By変数の水準ごとに個別の「寿命の一変量」レポートが表示されます。

**By グループの結果を保存** By グループごとに、「パラメータ推定値」に表示されるパラメータ推定値を、新しいデータテーブルの行に保存します。

**すべてのグループに同じ分析を実行** 現在のグループに対して選択されたすべてのオプションを、すべてのByグループに適用します。

## 混合分布のあてはめ

[混合分布のあてはめ] オプションを選択すると、混合分布をあてはめるための「混合」アウトラインが表示されます。

混合分布の累積分布関数 $F(x)$ は、次のように定義されます。

$$F(x) = \sum_{i=1}^k w_i F_i(x)$$

ここで、 $F_i(x)$  は混合する確率分布の累積分布関数、 $k$ は混合する確率分布の個数、 $w_i$ は合計が1になる正の重みです。[混合分布のあてはめ] オプションで実行される推定では、各クラスター（かたまり）における分布がそれぞれ累積分布関数 $F_i(x)$ で表され、それらのクラスターを混合したものからデータが生成された、と仮定しています。混合分布のパラメータを推定するだけでなく、ある観測値が特定のクラスターから生成された確率も算出できます。

### 混合分布の推定における開始値

混合分布を推定するためには反復計算が使われていますが、その反復計算の開始値の求め方は、「開始値の手法」のオプションで変更できます。ここでは $k$ 個で構成された混合分布を推定するとします。次の3つの手法があります。

- ・ [単一のクラスター] は、すべての分布がすべての観測値にある程度の影響を与えていると仮定します。一部の観測値だけに影響している分布はないと仮定されます。
- ・ [分離できるクラスター] は、各分布は一部の観測値に対して他の観測値よりもより強く影響していると仮定します。[分離できるクラスター] の場合、 $k$ 個の分布における密度関数がそれぞれ識別可能な最頻値を持ち、クラスターを形成していると仮定されます。
- ・ [重なったクラスター] は、[単一のクラスター] と [分離できるクラスター] の中間的な状況を仮定します。つまり、あるクラスターに対して、密度関数が大きくなっている分布もありますが、その他の分布も一緒に影響していると仮定します。このオプションでは、データに  $m$  個のクラスターがあると仮定されます。ここで  $m$  は、分布の個数  $k$  より少ない数です。

次のようなアルゴリズムで開始値は求められ、混合分布が推定されます。

1. 観測値のクラスターが定義されます。
2. 指定された「開始値の手法」によって、クラスターの密度への割り当てが行われます。
  - － [分離できるクラスター] の場合、分離されているクラスターと異なる確率分布との組み合わせがすべて考慮され、そのなかで最も尤度が大きいものがパラメータの開始値とされます。
  - － [重なったクラスター] の場合、いくつかの併合されているクラスターと異なる確率分布との組み合わせがすべて考慮され、そのなかで最も尤度が大きいものがパラメータの開始値とされます。

**メモ:** ある「開始値の手法」を使用し、続いて別の「開始値の手法」を選択したとします。その場合、以前の尤度よりも、現在の尤度がより大きくならなかった場合は、新しい推定結果は追加されません。

## 「混合」コントロールパネル

「混合」コントロールパネルには、次の3つの要素があります。

**成分** 混合分布の成分として使用できる分布（混合する分布）が一覧表示されています。

**個数** 混合分布において、該当の分布をいくつ混合するかを指定します。この「個数」を合計すると、混合分布で使われる分布の総数（ $k$ 個）になります。

**開始値の手法** 反復計算の開始値を求める手法を選択します。「[混合分布の推定における開始値](#)」（55ページ）を参照してください。

**重ね合わせ** このグラフには、故障が観測された時間に対して、ノンパラメトリックな推定値（Kaplan-Meier 推定値もしくはTurnbull 推定値）がプロットされています。混合分布をあてはめると、グラフには、その累積分布関数と95%信頼区間も描かれます。なお、「寿命の一変量」の赤い三角ボタンのメニューの「信頼水準の変更」を選択しても、信頼区間の信頼水準には影響しません。グラフの右側には凡例が表示されます。

**実行** **【実行】**をクリックすると、指定されている混合分布があてはめられます。「モデルリスト」にはあてはめた混合分布が追加され、また、混合分布の名前をもつレポートが追加されます。

## 「混合分布のあてはめ」のレポート

### モデルリスト

「モデルリスト」レポートには、あてはめた混合分布が一覧表示されます。また、パラメータの個数、観測値の個数、AICc、対数尤度の-2倍、BICといった統計量が混合分布ごとに表示されます。これらの統計量の詳細については、『基本的な回帰モデル』の付録「統計の詳細」を参照してください。

次の点に注意してください。

- これらの統計量は、値が小さいほど適合度が良いことを示します。
- 行は「AICc」によって並べ替られています。
- 「**比較の規準**」オプションは、「モデルリスト」のモデルの順序には影響しません。
- 「モデルの比較」表には、AICc、対数尤度をマイナス2倍したもの、BICの各統計量も表示されます。これにより、複数の混合分布を比較できます。「[モデルの比較](#)」（46ページ）を参照してください。

### 「混合」レポート

「モデルリスト」レポートの下には、あてはめた各混合分布に関するレポートが表示されます。各レポートのタイトルには、混合されている分布名とその個数が示されます。このレポートには、各パラメータに対して、推定値、標準偏差、Wald法による95%信頼区間が表示されます。ここでの信頼区間は、起動ウィンドウの「信頼区間の方法」で「尤度」を選択しても影響を受けず、Wald法の信頼区間のままです。

パラメータ推定値は、混合されている各分布に対して求められます。「パラメータ」列には、「割合  $\langle i \rangle$ 」というパラメータも含まれます。ここで、 $i = 1, 2, \dots, k-1$ です。これらは、混合分布における重み  $w_i$  の推定値です。重みの合計は1なので、 $k$ 番目の重みは  $k-1$  個の重みから計算できます。

### 密度の重ね合わせプロット

「密度の重ね合わせ」プロットには、混合されている各分布の密度関数が描かれます。プロットの右側の凡例で、表示させる密度関数を選択できます。

### 「混合」レポートのオプション

赤い三角ボタンのメニューには、次のようなオプションがあります。

**削除** モデルレポートと、「モデルリスト」内のモデルの項目を削除します。

**プロファイルの表示** 組み合わせた混合分布  $F$  の4種類のプロファイルを表示します。赤い三角ボタンのオプションについては、「[混合プロファイルのオプション](#)」(57ページ)に説明があります。

- 「分布プロファイル」は、X軸が時間、Y軸が累積故障確率を表しています。
- 「分位点プロファイル」は、X軸が累積故障確率、Y軸が時間を表しています。
- 「ハザードプロファイル」は、X軸が時間、Y軸がハザード（瞬間故障率）を表しています。
- 「密度プロファイル」は、X軸が時間、Y軸が密度を表しています。

**予測の保存** 混合されている各分布に対して、観測値がその分布に属する事後確率を含む列をデータテーブルに保存します。使用される計算式については、「[\[混合分布のあてはめ\]での予測式の保存](#)」(97ページ)を参照してください。

### 混合プロファイルのオプション

各混合レポートのプロファイルには、次のような赤い三角ボタンのオプションがあります。

**信頼区間** 分布・分位点・ハザードの各プロファイルには、プロットされた関数に対して、Wald 法による95%信頼区間が描かれます。このオプションは、信頼曲線の表示／非表示を切り替えます。信頼水準は、「寿命の一変量」赤い三角ボタンメニューから「[信頼水準の変更](#)」をクリックしても影響を受けません。

---

**メモ:** 計算時間を短くするために、プロファイルに表示される信頼区間は、起動ウィンドウの「[信頼区間の方法](#)」で「[尤度](#)」を選んだ場合でも、常にWald 法によって計算されます。

---

**因子グリッドのリセット** 因子を設定するためのウィンドウが表示されます。因子の現在の設定に特定の値を指定したり、その設定をロックしたり、プロット点の数を変更したりできます。詳細については、『プロファイル機能』の「プロファイル」章を参照してください。

**因子設定** プロファイル設定、スクリプト、プロファイルの連動に関連するオプションが用意されています。詳細については、『プロファイル機能』の「プロファイル」章を参照してください。

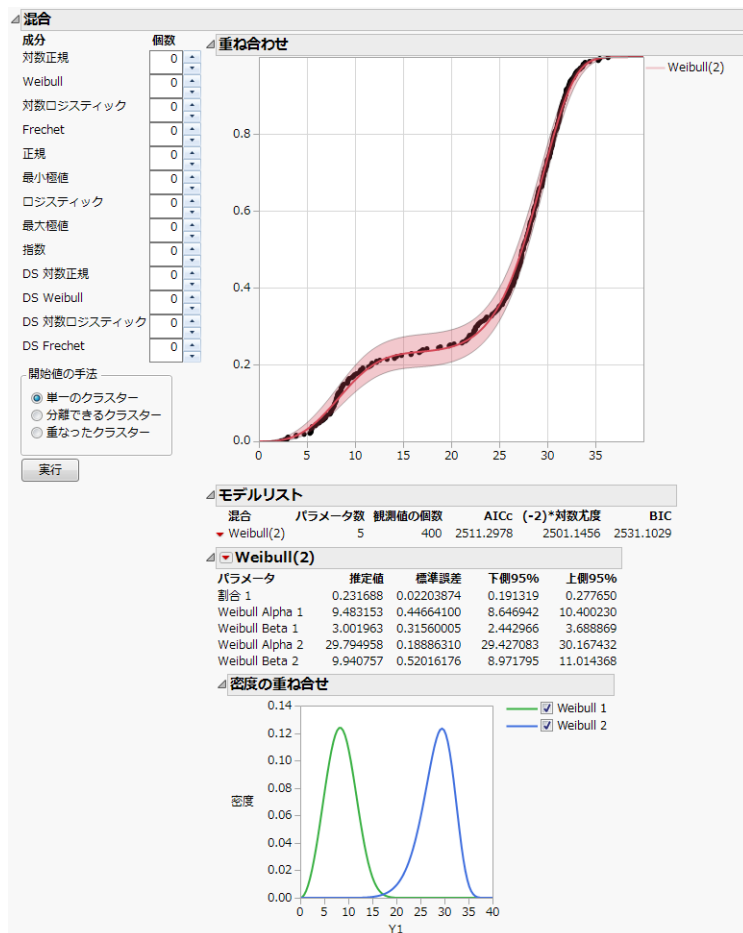
### [混合分布のあてはめ] の例

この例では、2つの分布を混ぜ合わせた、2種類の混合分布をあてはめます。また、2番目の混合分布の例においては、一方のクラスターに属する確率が高い観測値を選び出します。

## 2つの混合分布のあてはめ

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「Mixture Demo.jmp」を開きます。
2. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [寿命の一変量] を選択します。
3. 「Y1」を「[Y, イベントまでの時間]」に指定します。
4. [OK] をクリックします。
5. 「寿命の一変量」の赤い三角ボタンメニューから、[混合分布のあてはめ] を選択します。
6. 「Weibull」の横の「個数」ボックスに「2」とタイプします。
7. 「開始値の手法」パネルで「分離できるクラスター」を選択します。
8. [実行] をクリックします。

図3.10 「Weibull (2)」の混合分布のあてはめ

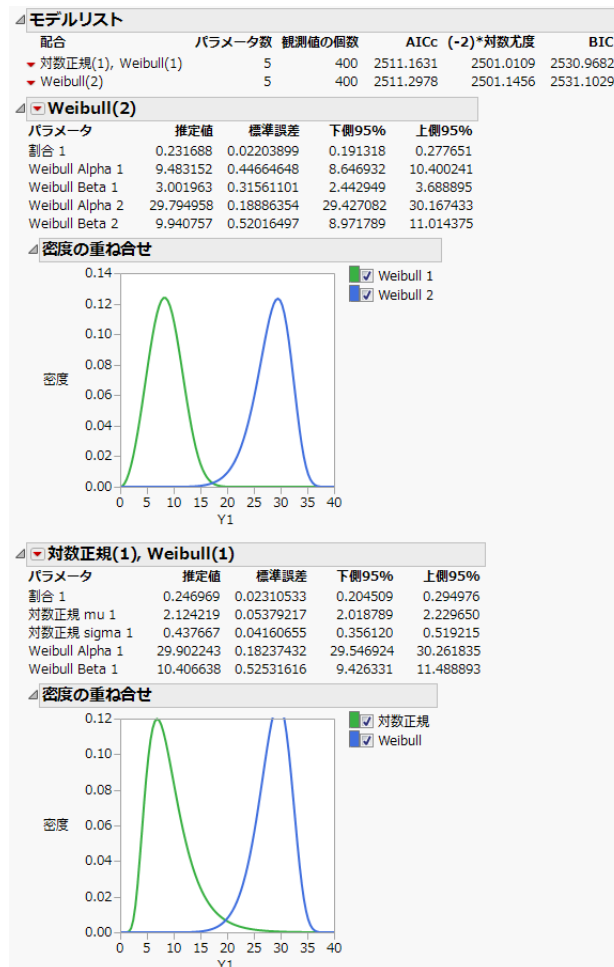


JMPは2つのWeibull分布から成る混合分布をあてはめます。「割合1」の推定値である0.231688は、観測値の約23%が $\text{Alpha} = 9.483153$ と $\text{Beta} = 3.001963$ のWeibull分布に従うことを意味します。残りの77%は、2番目のWeibull分布から得られたと推定されます。

このモデルを別のモデルと比較するために、「成分」の選択と成分の「個数」を変更します。

9. 「対数正規」の横に「1」と、また、「Weibull」の横に「1」と入力します。
10. 「実行」をクリックします。

図3.11 「Lognormal(1), Weibull(1)」の混合分布のあてはめ

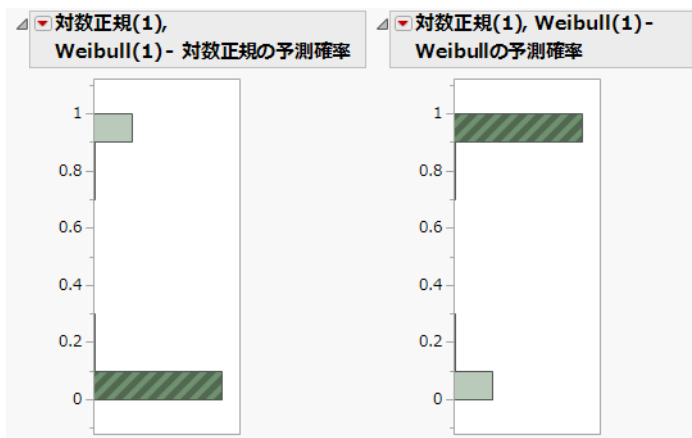


「重ね合わせ」プロットが更新され、2つの混合分布の結果が表示されます。描かれているプロットや「モデルリスト」の統計量を見ると、「対数正規1(1), Weibull(1)」の混合分布は、「Weibull(2)」の混合分布と、適合度の良さは似ているようです。

### クラスターに属する観測値の識別

1. 「対数正規(1), Weibull(1)」というアウトラインにある赤い三角ボタンのメニューから、[予測の保存]を選択します。  
データテーブルに次の2つの列が追加されます。
  - 対数正規(1), Weibull(1) - 対数正規の予測確率
  - 対数正規(1), Weibull(1) - Weibull の予測確率
2. [分析] > [一変量の分布] を選択します。
3. 「列の選択」リストからこの2つの列を選択し、[Y, 列] をクリックします。
4. [ヒストグラムのみ] にチェックマークをつけます。
5. [OK] をクリックします。
6. 「対数正規(1), Weibull(1) - Weibull の予測確率」のヒストグラムで、1に近い値に対応する棒をクリックします。

図3.12 混合確率のヒストグラム



データテーブルで、対応する 297 個の行が選択されます。これらの観測値は、Alpha = 29.90 および Beta = 10.41 のパラメータを持つ Weibull 分布から得られたものと考えられます。

### 競合リスク混合分布のあてはめ

[競合リスク混合分布のあてはめ] オプションは、競合リスク混合分布 (competing risk mixture distribution) をあてはめます。競合リスク混合分布は、いくつかの故障原因のそれぞれを確率分布で表し、それらの原因のいずれかで故障が生じている、と仮定したときの分布です。

競合リスク混合分布の確率関数  $F(x)$  は、次のように定義されます。

$$F(x) = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - F_i(x))$$

ここで、 $F_i(x)$ は*i*番目の潜在的な故障原因（リスク）に対する累積分布関数、*k*は混合されている分布の個数です。[競合リスク混合分布のあてはめ] オプションは、各成分の分布 $F_i(x)$ に基づいて、各観測値がどのクラスターから生成されたものかの判別も行えます。つまり、混合されている分布のパラメータを推定するだけでなく、ある観測値が特定のクラスターから生成された確率も算出できます。

「競合リスク混合分布」レポートの構成は、「混合」レポートと同様です。「混合分布のあてはめ」（55ページ）を参照してください。ただし、「競合リスク混合分布」レポートには「密度の重ね合わせ」プロットは表示されません。代わりに「分布関数プロットの重ね合わせ」というグラフが表示されます。

#### 「分布関数プロットの重ね合わせ」グラフ

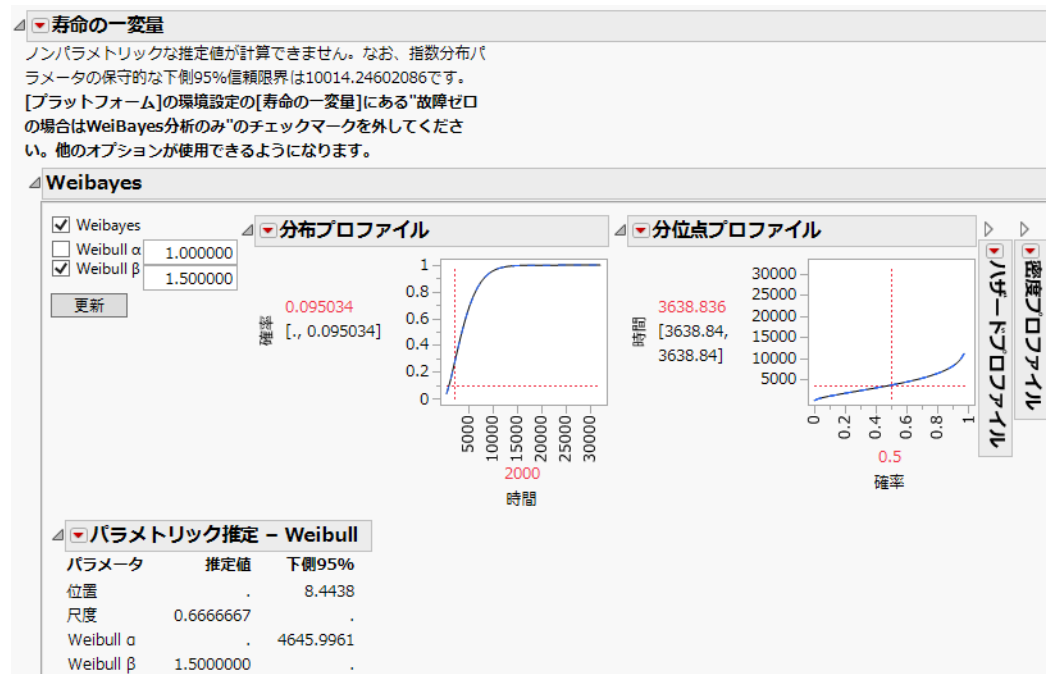
「分布関数プロットの重ね合わせ」グラフには、混合されている各分布の累積分布関数と、それらの分布を組み合わせた全体の累積分布関数が表示されます。プロットの右側の凡例で、表示する累積分布関数を選択することができます。

---

## Weibayes レポート

[故障ゼロの場合はWeiBayes分析のみ] の環境設定をオフにしていない場合、故障がまったくない右側打ち切りデータを分析対象とすると、Weibayes分析のレポートが表示されます。図3.13は、「Reliability」フォルダにある「Weibayes No Failures.jmp」サンプルデータに対するWeibayes分析のレポートです。

図3.13 Weibayes レポート



このレポートの最上部では、指数モデルが仮定されています。そして、そのレポートの最上部では、指数分布のパラメータに対する下側信頼限界が表示されています。この下側信頼限界は、Meeker and Escobar (1998, sec. 7.7) に記述されている手法を使って計算されています。

レポートの「Weibayes」の部分で、Weibayes分析を実行します。分析の手順については、Nelson (1985) を参照してください。

Weibayes 推定値を得るには、[Weibayes] および [Weibull  $\beta$ ] オプションを必ず選択してください。[Weibull  $\beta$ ] の値を変更して[更新]をクリックします。すると、推定値とプロファイルが更新されます。プロファイルに表示される値は、保守的な信頼区間を使用しています。例として、「故障がまったくないデータに対する Weibayes 分析の例」(76 ページ) を参照してください。

**メモ:** [Weibayes] オプションの選択を解除した場合は、(いくつかのパラメータが固定された) 最尤推定が行われます。

データテーブルに少なくとも1つの故障がある場合、完全な「寿命の一変量」レポートが表示されますが、最尤法による推定では役立つ結果が導かれない場合があります。この場合、Weibayes 分析の方が有効かもしれません。例として、「故障が1個しかないデータに対する Weibayes 分析の例」(78 ページ) を参照してください。

---

**メモ:** 故障ゼロのデータに対して「寿命の一変量」オプションを使用してBayes推定を実行するには、分析を起動する前に、[ファイル] > [環境設定] > [プラットフォーム] > [寿命の一変量] を選択し、[故障ゼロの場合はWeiBayes分析のみ] のチェックボックスを外します。

---

## 「競合原因分析」レポート

---

**ヒント:** 結果が多くてレポートのウィンドウが長くなりすぎた場合は、赤い三角ボタンのメニューから [タブ形式で結果を表示] を選択してください。

---

起動ウィンドウで、[故障原因] 列を割り当てた場合は、「競合原因」レポートが表示されます。このレポートでは、どの故障原因が特に影響しているかを調べるための競合原因分析を行えます。このレポートの例については、「[競合原因の除去](#)」(71 ページ) を参照してください。技術的な詳細については、「[競合原因分析の詳細](#)」(93 ページ) を参照してください。

「競合原因分析」レポートには、次のような要素とオプションがあります。

- 「[故障原因の組み合わせ](#)」(64 ページ)
- 「[競合原因分析: 統計量](#)」(65 ページ)
- 「[原因ごとの分析](#)」(66 ページ)
- 「[「競合原因分析」レポートのオプション](#)」(67 ページ)

## 競合原因分析の操作手順

「競合原因分析」レポートにおいて、分析を進めていくには、次の手順に従います。

1. 結果を見やすくするため、「競合原因分析」の赤い三角ボタンから [タブ形式で結果を表示] オプションを選択します。
2. [原因ごとの分析] タブを選択します。各故障原因について、それぞれの「寿命の一変量」アウトラインを見て、どの確率分布のあてはまりがよいのかを検討します。「[原因ごとの分析](#)」(66 ページ) を参照してください。
3. [故障原因の組み合わせ] タブを選択します。各故障原因について、「分布」ドロップダウンリストから適当な確率分布を指定します。「[故障原因の組み合わせ](#)」(64 ページ) を参照してください。
4. [モデルの更新] をクリックします。
5. [統計量] タブを選択して、モデルの結果を調べて保存します。「[競合原因分析: 統計量](#)」(65 ページ) を参照してください。

---

**メモ:** モデルを変更して [モデルの更新] をクリックすると、「統計量」アウトラインの結果も更新されますので、それまでの結果が失われてしまう可能性があります。

---

## 競合原因分析モデル

故障原因が競合している状況では、全体の累積分布関数は次のように表されます。

$$F(x) = 1 - \prod_{i=1}^k [1 - F_i(x)]$$

ここで、 $F_i(x)$ は*i*番目の故障原因に対する累積分布関数で、*k*は故障原因の総数です。関数 $F_i(x)$ は、故障原因ごとに個別に仮定されています。各関数は、*i*番目の故障原因による故障確率だけを考慮しており、原因*i*以外の原因による故障を考慮していません。

全体の累積分布関数は、次のようにも表すこともできます。

$$F(x) = \sum_{i=1}^k \tilde{F}_i(x)$$

ここで、各 $\tilde{F}_i$ は、値域が $[0, 1]$ である単調増加関数です。関数 $\tilde{F}_i$ は、部分分布（subdistribution）と呼ばれています。部分分布によって表された累積分布関数は、当該の故障原因以外による故障も一緒に考慮しています。そのため、部分分布は、各原因による故障の割合を予測するのに使えます。

## 故障原因の組み合わせ

「故障原因の組み合わせ」レポートでは、異なる故障原因の累積分布関数 ( $F_i(x)$ ) を比較できます。このレポート上で指定できる分布は、起動ウィンドウでの選択に応じて異なります。なお、ゼロ以下の故障時間データは扱えません。

デフォルトのプロットは「線形」スケールで描かれており、また、次のものを表示します。

- 故障が観測された時間に対して、ノンパラメトリックな推定値（Kaplan-Meier 推定値もしくは Turnbull 推定値）がプロットされます。また、その信頼区間が、青色の横線で表されます。
- 各原因の累積分布関数 ( $F_i(x)$ ) が描かれます。最初にあてはめられる分布は、起動ウィンドウで選択した分布です。[個々の最適な分布] を選択した場合、各原因に対する最適な分布が描かれます（この分布の自動選択には、計算時間がかかる場合があります）。[手動による選択] を選択した場合は、すべての原因に対してノンパラメトリックな推定値が描かれます。プロットの右側には凡例が表示されます。
- 全体の累積分布関数 ( $F(x)$ )。全体の累積分布関数は、選択した各原因の累積分布関数を組み合わせて算出されます。故障原因としてノンパラメトリックな分布を指定した場合、全体の累積故障分布は、ある1つの原因において最後に観測された時点までしか延びません。

レポート上での対話的な操作によって、全体の累積故障確率をどのように改善できるかを調べられます。

「故障原因の組み合わせ」レポートには、次の要素があります。

**スケール** プロットの縦軸の確率スケールを選択します。「[スケールの変更](#)」(73 ページ) は、スケールを変更すると、見栄えがどのように変わるかを示しています。

**除去** このチェックボックスを選択すると、選択された原因を除去したときの全体の累積分布関数が計算されます。該当する故障原因を除去したときの影響を見たい場合には、このチェックボックスを使用してください。チェックボックスのチェックを外すと、該当の故障原因が除去されたという仮定のもとでの全体の累積分布関数が再計算されます。「競合原因の除去」(71 ページ) で、故障原因を除去した結果について説明しています。

**原因** 「故障原因」列に含まれているデータ値をリストします。

**分布** 各故障原因にあてはめることができる分布をリストします。各故障原因に対する分布を変更するには、まず「分布」リストから分布を選択します。そのあと【モデルの更新】をクリックすると、プロットに新しい分布が描かれます。このとき「故障原因の要約」レポートも更新されます。

**度数** 当該の故障原因が生じている個数。

**モデルの更新** 選択された分布をプロットに描画します。そして、「故障原因の要約」を更新します。また、選択された分布の結果を、「原因ごとの分析」レポートに新たに追加します。

## 競合原因分析: 統計量

競合原因の「統計量」レポートには、次のような情報が表示されます。

- 「「故障原因の要約」レポート」(65 ページ)
- 「プロファイル」(66 ページ)

### 「故障原因の要約」レポート

「故障原因の要約」レポートは、現在、選択されている「分布」に対応した結果になっています。故障原因ごとに、故障個数と、分布パラメータの推定値が表示されます。「故障原因の組み合わせ」レポートで分布を変更し、[モデルの更新] をクリックすると、「故障原因の要約」レポートが更新されます。

次の情報が表示されます。

- 「原因」列には、各故障原因もしくは打ち切りを表すデータ値が表示されます。
- 「度数」列には、故障原因ごとの故障個数が表示されます。
- 「度数」列に整数が表示されている原因は、分析で考慮できるだけの十分な故障が生じていることを示しています。一方、故障個数が2未満の原因は、単に右側打ち切りとして処理されます。なお、除去された原因は、左から2番目の列に「除去」と表示されます。
- 「分布」列は、各原因に対して選択されている確率分布を示します。
- 選択されている確率分布に応じて、分布パラメータを表示するさまざまな列があります。
  - 「位置」列には、あてはめた確率分布の位置パラメータの推定値が表示されます。
  - 「尺度」列には、あてはめた確率分布の尺度パラメータの推定値が表示されます。「Weibull  $\alpha$ 」および「Weibull  $\beta$ 」列には、Weibull 分布のアルファとベータに対する推定値が表示されます。
  - その他の列には、選択されている分布のその他のパラメータが表示されます。

- 反復計算の収束に問題がある場合は、「収束」列が表示されます。

「故障原因の要約」の赤い三角ボタンのメニューから、全体の故障分布に関して、累積故障確率・分位点・ハザード・密度の推定値を保存できます。

## プロファイル

「分布プロファイル」・「分位点プロファイル」・「ハザードプロファイル」・「密度プロファイル」は、全体の故障分布を表すものです。「分布プロファイル」・「分位点プロファイル」・「ハザードプロファイル」には95%水準の信頼区間が描かれます。詳細は、「[プロファイル](#)」(48ページ)を参照してください。

---

**メモ:** 故障原因にノンパラメトリックな分布が指定されている場合、「ハザードプロファイル」と「密度プロファイル」は描かれませんが、また、その場合は「分布プロファイル」と「分位点プロファイル」には信頼限界が描かれませんが、

---

## 原因ごとの分析

「原因ごとの分析」レポートには、原因ごとの「寿命の一変量 - 故障原因:<分布名>」レポートが含まれています。「寿命の一変量 - 故障原因:<分布名>」レポートには、レポートのタイトルに示されている各原因に対して、分布のプロットと適合度統計量が表示されます。

「故障原因の組み合わせ」レポートの[モデルの更新]をクリックするたびに、新しく選択された分布が、「寿命の一変量 - 故障原因:<分布名>」レポートに追加されます。「寿命の一変量 - 故障原因:<分布名>」レポートは、次のような状態になっています。

- 「分布の比較」レポートでは、該当する分布が選択された状態になっています。
- 「モデルの比較」レポートに、該当する分布の結果が追加されます。
- 該当する確率分布の「パラメトリック推定」のレポートが追加されます。

「寿命の一変量 - 故障原因:<分布名>」レポートは、「寿命の一変量: 統計量」レポート（「[寿命の一変量: 統計量](#)」(46ページ)を参照）の1つです。ただし、すべての信頼区間はWald法で計算されています。これらの区間は、起動ウィンドウの「信頼区間の方法」で[尤度]を選択しても影響を受けません。

## 故障原因ごとの分布の比較に使用できる分布

起動ウィンドウで[故障原因]を指定すると、「分布の比較」レポートで指定できる分布群を設定できるようになります。ここで設定できる分布群は、ZI（ゼロ強調; Zero-Inflated）・閾値・DS（故障部分母集団; Defective Subpopulation）です。また、パラメータ指定のモデルとBayes推定モデルも選択できます。

---

**メモ:** ただし、「環境設定」で無効にした分布は表示されません。「寿命の一変量」と同じルールに従って利用できる分布が決まっています。「[使用できるパラメトリックな分布](#)」(43ページ)を参照してください。

---

## 「競合原因分析」レポートのオプション

「競合原因分析」の赤い三角ボタンをクリックすると、次のオプションが表示されます。

**タブ形式で結果を表示** タブ形式でレポートを表示します。デフォルトでは、アウトライン形式で表示されています。

**タブ形式で「原因ごとの分析」結果を表示** 「寿命の一変量 - 故障原因:<分布名>」レポートを、「寿命の分布」レポートの積み重ねではなく、タブ形式で表示します。

**点の表示** 「故障原因の組み合わせ」プロットにおける点の表示／非表示を切り替えます。このプロット上にKaplan-Meier 曲線を点でプロットするときには、中間点が使われます。[**点の表示**] を解除して点でプロットしないときには、中間点ではなく、通常のKaplan-Meier 推定値が使われます。

**部分分布の表示** 原因ごとの部分分布 (subdistribution)  $\tilde{F}_i$  のプロファイルを表示します。[「原因ごとの部分分布」](#) (68 ページ) を参照してください。

**余寿命分布プロファイル** 余寿命 (remaining life) の累積分布関数を描いたプロファイルを表示します。これは、一定の時間を生存したユニットに対する累積分布関数です。

**平均余寿命** 指定された時間における平均余寿命 (mean remaining life) を推定します。「平均余寿命の計算」で時間を入力してEnter キーを押すと、平均余寿命の推定値が表示されます。複数の推定値を計算したい場合には、プラス記号をクリックしてください。最後の入力削除するにはマイナス記号をクリックしてください。

信頼区間を求めるには、まず、「平均余寿命の計算」で[**設定**] オプションを選択します。[**ブートストラップ法により信頼区間も求める**] にチェックマークをつけます。計算にかかる時間を考えて、適切な値を入力してください。詳細は、[「競合原因分析での平均余寿命の計算」](#) (97 ページ) を参照してください。

**ブートストラップ結果の書き出し** このコマンドは、Bayes 推定を選択し、[**モデルの更新**] を適用した場合にのみ表示されます。

**ブートストラップ標本サイズ** Bayes 推定やWeibayesによって故障原因の分析を行った場合、「分布プロファイル」に表示される累積確率に対する信頼限界は、パラメトリックなブートストラップによって算出されます。このオプションは、ブートストラップの標本サイズを指定します。[「競合原因分析でのBayes 推定」](#) (96 ページ) を参照してください。

以下のオプションについて詳しくは、『JMPの使用法』の「JMPのレポート」章を参照してください。

**ローカルデータフィルタ** 現在のレポートにおいて、データをフィルタリングするローカルデータフィルタの表示／非表示を切り替えます。

**やり直し** 分析を繰り返したり、やり直したりするオプションを含みます。また、[**自動再計算**] オプションに対応しているプラットフォームにおいては、[**自動再計算**] オプションを選択すると、データテーブルに加えた変更が、該当するレポートに即座に反映されるようになります。

**スクリプトの保存** レポートを再現するためのスクリプトを保存するオプションが、保存先ごとに用意されています。

**By グループのスク립トを保存** By 変数の全水準に対するレポートを再現するためのスク립トを保存するオプションが、保存先ごとに用意されています。起動ウィンドウでBy 変数を指定した場合のみ使用可能です。

## 原因ごとの部分分布

「原因ごとの部分分布」には、時間 $t$ までにおいて各原因によって故障する累積確率の推定値 $\tilde{F}_i$ が示されます。この故障確率は、競合する他の原因による故障も考慮して算出されています。「[競合原因分析モデル](#)」(64 ページ)を参照してください。

部分分布 (subdistribution) のグラフを表示するには、「競合原因分析」の赤い三角ボタンをクリックし、**部分分布の表示**を選択します。選択すると、プロファイルの下に「原因ごとの部分分布」レポートも表示されます。このレポートは、プロファイルと、計算のためのパネルで構成されています。

---

**メモ:** **部分分布の表示**を選択すると、「故障原因の組み合わせ」プロットも更新されて、すべての原因の部分分布関数が描画されます。

---

「原因ごとの部分分布」レポートにおいて、プロファイルの右側のドロップダウンリストから故障原因を選択すると、その故障原因の部分分布関数が描画されます。なお、「原因ごとの部分分布」の赤い三角ボタンには、プロファイルに適用できるいくつかのオプションがあります。「[プロファイル](#)」(48 ページ)を参照してください。

特定の時間における部分分布関数の値を求めるには、「部分分布関数値の計算」パネルを使用します。まず、時間を入力します。そして、Enter キーを押す (またはテキストボックスの外をクリックする) と、結果が更新されます。時間を追加するには、+記号をクリックします。最も新しい値を削除するには、-記号をクリックします。

---

## 「寿命の一変量 - グループの比較」レポート

---

**ヒント:** 結果が多くてレポートのウィンドウが長すぎる場合は、赤い三角ボタンのメニューから **タブ形式で結果を表示** を選択してください。

---

起動ウィンドウで **グループの比較** タブを選択した場合、「寿命の一変量 - グループの比較」レポートが表示されます。「グループの比較」タブで実行される分析では、指定されている1つの確率分布をもとに、複数のグループを比較します。たとえば、「異なる業者から供給された部品の寿命を調べるのに、Weibull 分布で業者を比較する」といった分析が行えます。一方、「寿命の一変量」タブで行える分析は、1つだけのグループに関して、複数の確率分布を比較します。

グループ間で比較できる関数は、累積分布関数・分位点関数・ハザード関数・密度関数です。また、各グループの累積故障確率と分位点を、一度の操作で求めることもできます。

このレポートの例については、「[グループ間で同じ分布を調べる](#)」(74 ページ)を参照してください。

「グループの比較」のレポートには、次のような要素とオプションが表示されます。

- 「[分布の比較](#)」(42 ページ) (分布プロファイルなし)
- 「[グループの比較: 統計量](#)」(69 ページ)
- 「[各グループの結果](#)」(69 ページ)
- 「[「寿命の一変量 - グループの比較」レポートのオプション](#)」(70 ページ)

## グループの比較: 統計量

[グループの比較] の「統計量」レポートには、次のような情報が含まれます。

- 「[要約](#)」(69 ページ)
- 「[Wilcoxon 検定](#)」(69 ページ)
- 「[モデルの比較](#)」(46 ページ)
- 「[パラメータ推定値](#)」(69 ページ)

### 要約

「要約」レポートには、各グループに対する結果と、全体に対する結果が表示されています。故障個数と、左側打ち切り・区間打ち切り・右側打ち切りの個数が表示されます。また、平均と標準誤差も表示されます。平均と標準誤差の計算方法についての詳細は、「生存時間分析」章の「[生存時間分析の統計レポート](#)」(344 ページ) を参照してください。

### Wilcoxon 検定

このレポートには、故障分布がグループ間で異なっているかどうかを調べる Wilcoxon 検定の結果が表示されます。カイ2乗値、その自由度、カイ2乗近似に基づく p 値が表示されます。p 値が小さければ、グループ間に差があることを得られたデータは示唆しています。例として、「寿命の二変量」章の「[Wilcoxon 検定](#)」(109 ページ) を参照してください。打ち切りデータに対する Wilcoxon 検定と、それを一般化したいくつかの検定については、Kalbfleisch and Prentice (1980) で取り上げられています。

### パラメータ推定値

「パラメータ推定値」アウトラインには、あてはめた分布ごとに、「パラメトリック推定 - <分布名>」という名前のレポートが作成されます。この「パラメトリック推定 - <分布名>」レポートには、分布パラメータの推定値とその95%信頼区間がグループごとに表示されます。この信頼区間の信頼水準は、「寿命の一変量 - グループの比較」の赤い三角ボタンのメニューから[信頼水準の変更] オプションを選択しても変更できません。

## 各グループの結果

「各グループの結果」レポート内のタブには、各グループの「寿命の一変量」レポートがあります。これらのレポートの詳細については、「[「寿命の一変量」レポート](#)」(39 ページ) および「[「寿命の一変量」レポートのオプション](#)」(53 ページ) を参照してください。

## 「寿命の一変量 - グループの比較」レポートのオプション

「グループの比較」の赤い三角ボタンのメニューで用意されているオプションの多くは、「寿命の一変量」の赤い三角ボタンのメニューと共通しています。[「寿命の一変量」レポートのオプション](#)（53ページ）を参照してください。

ただし、次のオプションは、「グループの比較」に固有のものです。

**分位点関数の表示** 「分位点の比較」レポートの表示／非表示を切り替えます。レポート内で、1つの確率分布を選択してください。グループごとに、故障時間の分位点を示す曲線が描かれます。また、それらの信頼区間も描かれます。プロットの右側には凡例が表示されます。このレポートでは、確率分布を一度に1つだけ指定できます。

**ハザード関数の表示** 「ハザードの比較」レポートの表示／非表示を切り替えます。レポート内で、確率分布を選択してください。グループごとに、ハザード関数を示す曲線が描かれます。また、それらの信頼区間も描かれます。プロットの右側には凡例が表示されます。このレポートでは、確率分布を一度に1つだけ指定できます。

**密度関数の表示** 「密度の比較」レポートの表示／非表示を切り替えます。レポート内で、確率分布を選択してください。グループごとに、密度関数とその信頼区間を示す曲線が描かれます。プロットの右側には凡例が表示されます。このレポートでは、確率分布を一度に1つだけ指定できます。

**確率の推定** 最も新しく選択された確率分布に基づいて、「分布の比較」の下に、「確率の推定」レポートを追加します。テキストボックスに時間の値を入力して、**Enter** キーを押してください。時間を追加するには、+記号をクリックします。最も新しい値を削除するには、-記号をクリックします。詳細は、[「確率の推定」レポート](#)（70ページ）を参照してください。

**分位点の推定** （このオプションは「分位点の比較」が選択されている場合のみ表示されます。）最も新しく選択された確率分布に基づいて、「分位点の比較」の下に、「分位点の推定」レポートを追加します。テキストボックスに確率を入力し、**Enter** キーを押してください。新しい確率を追加するには、+記号をクリックします。最も新しい値を削除するには、-記号をクリックします。グループおよび確率ごとに、分位点（故障時間）と、Wald 法と尤度法による95%信頼区間が表示されます。

---

**メモ：** [ローカルデータフィルタ] オプションは、[グループの比較] の赤い三角ボタンのメニューでは使用できません。

---

### 「確率の推定」レポート

このレポートには、グループおよび時間の値ごとに、次の情報が表示されます。

**中間点推定値** 指定の時間までに故障する確率の、中間点調整を行ったKaplan-Meier 推定値。

**下側95%、上側95%** 指定の時間までに故障する累積確率の時点別95% 信頼区間。

**同時下側95%(Nair)、同時上側95%(Nair)** 指定の時間までに故障する累積確率の同時95% 信頼区間。Nair (1984) および Meeker and Escobar (1998) を参照してください。

**生存確率** 指定の時間を超えて生存する確率の、中間点調整を行った推定値。

**生存確率 下側95%、上側95%** 指定の時間を超えて生存する確率の時点別95%信頼区間。

**生存確率 同時下側95%(Nair)、同時上側95%(Nair)** 指定の時間を超えて生存する確率の同時95%信頼区間。Nair (1984) および Meeker and Escobar (1998) を参照してください。

---

## 「寿命の一変量」プラットフォームの別例

- 「[競合原因の除去](#)」
- 「[スケールの変更](#)」
- 「[グループ間で同じ分布を調べる](#)」
- 「[Weibayes 推定](#)」

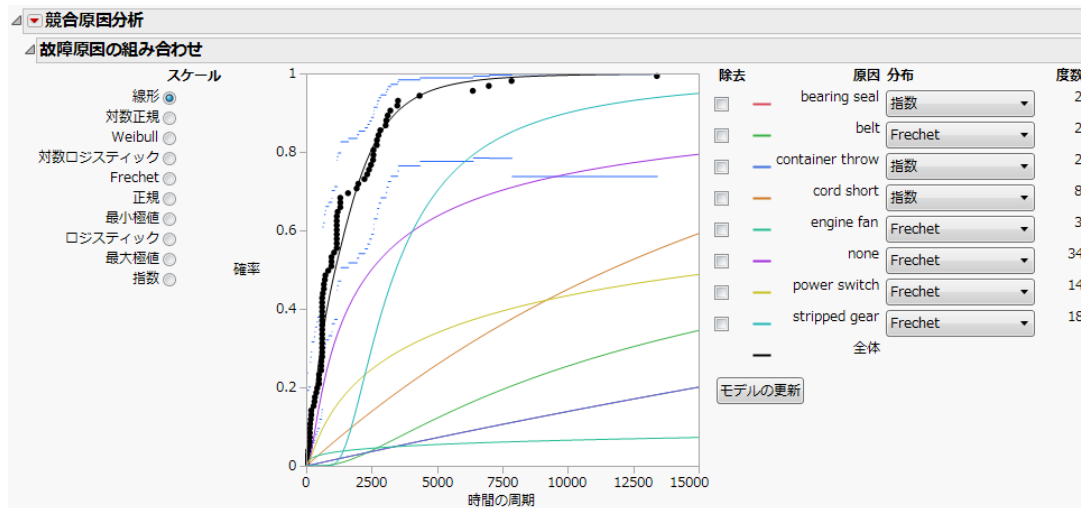
### 競合原因の除去

次の例では、故障原因ごとに、最適な分布を選択します。

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「Blenders.jmp」を開きます。
2. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [寿命の一変量] を選びます。
3. 「時間の周期」を [Y, イベントまでの時間] に指定します。
4. 「原因」を [故障原因] に指定します。
5. 「打ち切りの有無」を [打ち切り] に指定します。
6. 「分布」として [個々の最適な分布] を選びます。
7. 「比較の規準」で [AICc] が選択されていることを確認します。
8. [OK] をクリックします。

「競合原因分析」レポートでは、故障原因ごとに選択された最適な分布が表示されます。

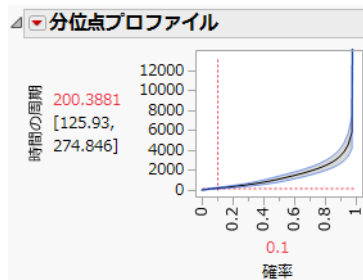
図3.14 「競合原因分析」レポート



9. 「分位点プロファイル」で、「確率」に「0.1」と入力します。

10%のユニットが故障するまでの時間は、200と推定されます。

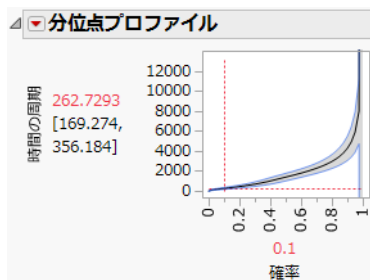
図3.15 ユニットが10%だけ故障する時間



10. 故障個数の少ない原因を除去したときの影響を調べましょう。「除去」列で、「bearing seal」、「belt」、「container throw」、「cord short」、「engine fan」のチェックボックスをオンにしてください。

この場合、10%のユニットが故障するまでの時間は、263と推定されます。

図3.16 更新後の故障時間



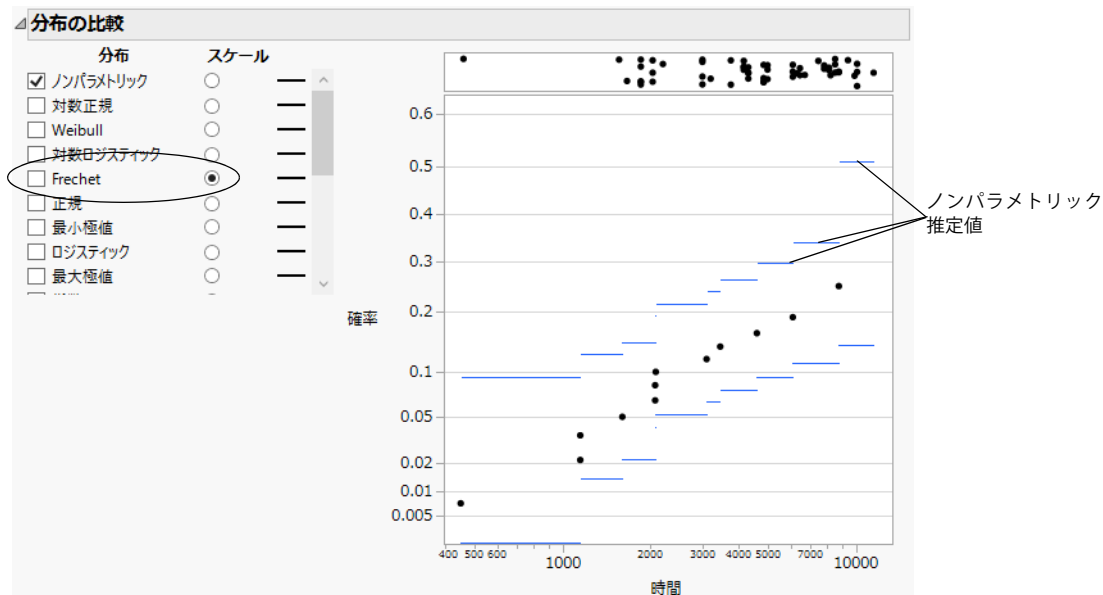
言い換えると、これらの原因が除去できたら、10%のユニットが故障するまでの時間は、約31%も延びます。

## スケールの変更

「分布の比較」のグラフで、デフォルトで使われているスケールは、線形スケールです。ここでは、Fréchet 分布のスケールに変更してみましょう。<sup>1</sup>

1. 「寿命の一変量」プラットフォームの例」(33 ページ) の手順1から手順5を実行します。
2. 「分布の比較」レポートにおける「スケール」列で、[Fréchet] を選択してください。
3. プラットフォームの赤い三角ボタンをクリックし、[区間の種類] > [時点別] を選択します。

図3.17 Fréchet のスケールで表示したノンパラメトリック推定値



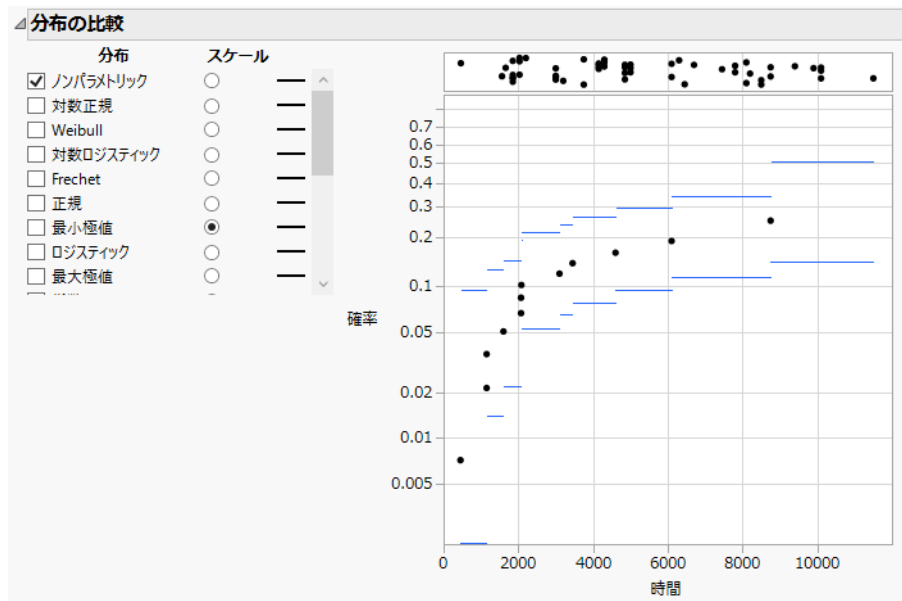
1. 異なるスケールを使用することは、さまざまな種類の確率紙に分布を描く作業といえます。

Fréchetのスケール上では、ノンパラメトリック推定値がほぼ直線に近くなっています。このことから、「データはFréchet分布に従っている」と仮定するのは妥当でしょう。

#### 4. 「スケール」列の【最小極値】を選択します。

ノンパラメトリック推定値が直線に沿わなくなります（図3.18）。つまり、最小極値分布は適切でないことがわかります。

図3.18 最小極値のスケールで表示したノンパラメトリック推定値

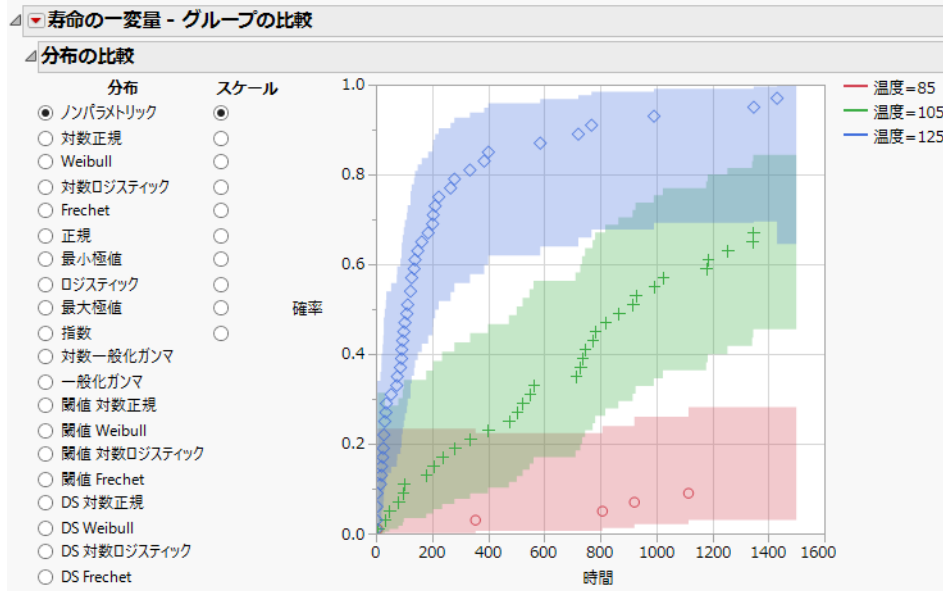


## グループ間で同じ分布を調べる

同じ種類の分布を用いて、グループ間の比較を行ってみましょう。3つの異なる温度におけるコンデンサの故障を調べます。

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「Capacitor ALT.jmp」を開きます。
2. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [寿命の一変量] を選びます。
3. [グループの比較] タブをクリックします。
4. 「時間」を[Y, イベントまでの時間]に指定します。
5. 「温度」を[グループ変数]に指定します。
6. 「打ち切り」を[打ち切り]に指定します。
7. 「度数」を[度数]に指定します。
8. [OK] をクリックします。

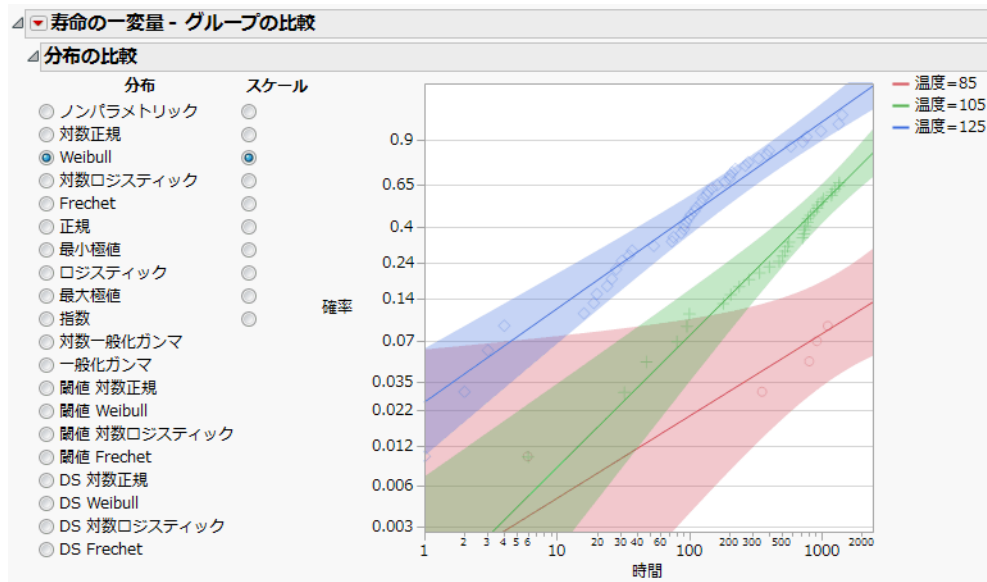
図3.19 分布の群間比較



デフォルトのグラフには、ノンパラメトリックな推定値がプロットされています。グラフから、コンデンサは温度が高いほど故障する確率が高いことがわかります。では、パラメトリックな確率分布をあてはめてみましょう。

9. 「分布」と「スケール」に [Weibull] を選択します。

図 3.20 Weibull 分布のグループ間比較



Weibull 確率スケールにプロットした場合、点は3つの直線にほぼ沿っています。これは、Weibull 分布が、「温度」の各グループのデータに良くあてはまっていることを示します。

## Weibayes 推定

Weibayes 分析を行う方法は2つあります。

- 故障がまったくないデータの場合には（すべての観測値が右側打ち切りデータである場合には）、[故障ゼロの場合は **Weibayes 分析のみ**] の環境設定がオンになっていると、Weibayes レポートが表示されます。[「故障がまったくないデータに対する Weibayes 分析の例」](#)（76ページ）を参照してください。
- 故障が少ないデータに対しては、通常の「寿命の一変量」レポートが表示されます。まず、そのレポートで、Weibull 分布をあてはめます。次に、「パラメトリック推定値 - Weibull」レポートで、[分布パラメータの指定] オプションを選択します。そして、「分布パラメータの指定」レポートで、[Weibayes] オプションを選択します。[「故障が1個しかないデータに対する Weibayes 分析の例」](#)（78ページ）を参照してください。

### 故障がまったくないデータに対する Weibayes 分析の例

ここに、信頼性の高い製品のデータがあります。30個を1,000時間にわたってテストしましたが、故障はありませんでした。このデータから、2,000時間における故障確率を予測してみましょう。

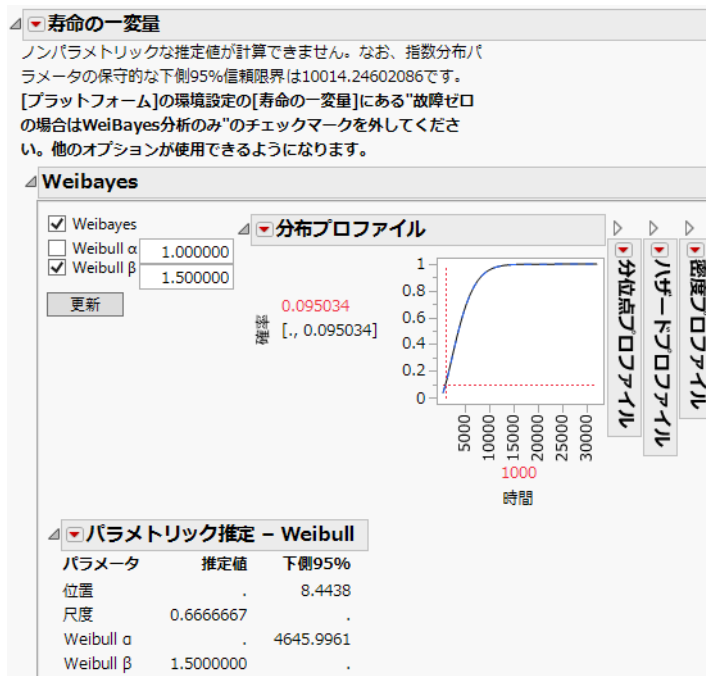
- [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「Weibayes No Failures.jmp」を開きます。
- [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [寿命の一変量] を選びます。

3. 「時間」を[Y, イベントまでの時間]に指定します。
4. 「打ち切りの有無」を[打ち切り]に指定します。
5. 「度数」を[度数]に指定します。
6. 「信頼区間の方法」を[尤度]にします。
7. [OK] をクリックします。

特別な「寿命の一変量」レポートが表示されます。[Weibayes]と[Weibull  $\beta$ ]が選択されているはずです。

8. Weibull分布の $\beta$ が既知だとして、その値に「1.5」を入力します。  
この例では、この1.5を適切な値とみなして分析を進めます。
9. [更新] をクリックします。
10. 「分布プロファイル」の「時間」の値を「2000」とします。

図3.21 故障ゼロのデータの「寿命の一変量」レポート



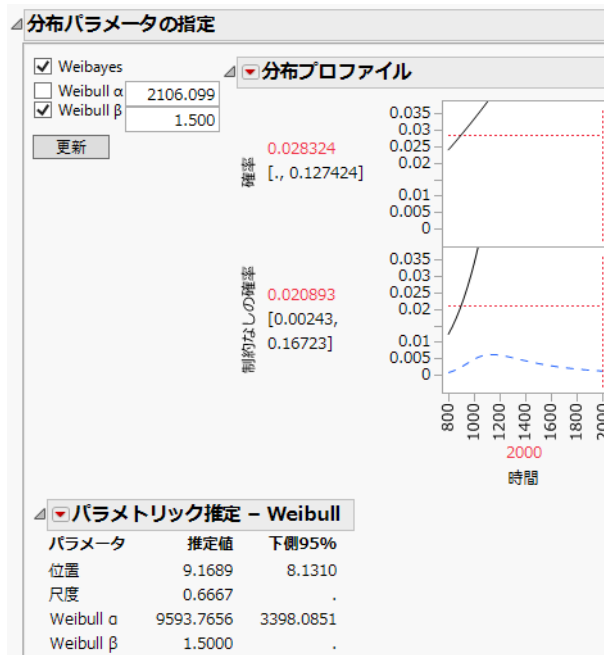
「分布プロファイル」から、2,000時間のときの保守的な故障確率が24.6058%であることがわかります。つまり、故障確率に対する片側95%信頼限界の上限は24.6058%です。

## 故障が1個しかないデータに対する Weibayes 分析の例

前述と同様のデータで、今回は、800時間の時点で1個が故障した場合を検討してみましょう。ここでも、2,000時間での故障確率を予測します。

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「Weibayes One Failures.jmp」を開きます。
2. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [寿命の一変量] を選びます。
3. 「時間」を [Y, イベントまでの時間] に指定します。
4. 「打ち切りの有無」を [打ち切り] に指定します。
5. 「度数」を [度数] に指定します。
6. 「信頼区間の方法」を [尤度] にします。
7. [OK] をクリックします。  
「寿命の一変量」レポートが表示されます。
8. 「分布の比較」レポートで、[Weibull] 分布を選択します。
9. 「パラメトリック推定値 - Weibull」の赤い三角ボタンのメニューから、[分布パラメータの指定] を選択します。
10. 「分布パラメータの指定」レポートで [Weibayes] と [Weibull  $\beta$ ] を選択します。
11. 既知の Weibull  $\beta$  値として「1.5」を入力します。
12. [更新] をクリックします。
13. 「分布プロファイル」の「時間」の値を「2000」とします。
14. カーソルを Y 軸の一番上に置きます。カーソルが手のひらツールに変わります。最上部の目盛りが 0.5 になるまで、手のひらツールを下にドラッグします。

図3.22 故障数1のデータの「寿命の一変量」レポート



「分布プロファイル」の実線は最尤推定値です。点線は、Weibayes 分析による保守的な信頼限界です。2,000 時間のときの保守的な故障確率が 12.7424% であることがわかります。つまり、故障確率に対する片側 95% 信頼限界の上限は 12.7424% です。

## 「寿命の一変量」プラットフォームの統計的詳細

この節では次の内容を扱っています。

- 「寿命の一変量」プラットフォームで用意されている確率分布。[「確率分布」](#) (79 ページ) を参照してください。
- 「競合原因分析」レポートに関する技術的な情報。[「競合原因分析の詳細」](#) (93 ページ) を参照してください。

## 確率分布

ここでは、「寿命の一変量」で用意されている確率分布や計算の詳細を説明します。理論や応用、そして以下で紹介するノンパラメトリックおよびパラメトリックな推定については、Meeker and Escobar (1998, ch. 2-5) に優れた説明があります。

## 推定値と信頼区間

閾値パラメータをもつ分布以外は、最尤法で推定されます。閾値パラメータをもつ分布で、最小の観測値が、打ち切りデータではなく、厳密な故障時間を示す値であった場合、ごく短い区間に含まれる区間打ち切りデータとして、その最小の観測値を処理します。そして、このような微調整をした後、最尤法を適用します。このような微調整をしないと、尤度が無限大となり、最尤法が行えない場合があります。このアプローチは、Meeker and Escobar (1998, p. 275) が提唱している方法とほぼ同じです。ただし、JMPでは、最小の厳密な故障時間だけを区間打ち切りにします。このような微調整をすると、閾値パラメータをもつ分布の尤度関数も、確実に有界になります。

「寿命の一変量」プラットフォームには、分布パラメータの信頼区間を計算する方法が2つ用意されています。「寿命の一変量」プラットフォームの起動ウィンドウで、それぞれ [Wald] または [尤度] を選択することにより、2つの方法のいずれかを選ぶことができます。デフォルトの設定は [Wald] です。累積分布関数の信頼区間は、標準化した変数に対して Wald 法に基づく信頼区間を計算し、それを累積分布関数に変換することで算出されます (Nelson, 1982, p. 332-333 および p. 346-347)。そのほかの信頼区間は、(変数変換を伴う) Wald 法によって求められています (Meeker and Escobar, 1998, ch. 7)。対数尤度の等高線図には、2パラメータに対する信頼領域が表示されます。この等高線は、尤度比から計算されています (Meeker and Escobar, 1998, ch. 8)。

## ノンパラメトリックな推定値

ノンパラメトリック法で推定された累積確率の曲線は、どのような分布をしているのかを知るのに有用です。データが非打ち切りと右側打ち切りだけの場合には、推定方法として Kaplan-Meier 法が使われます。区間打ち切りや左側打ち切り、または、各種の打ち切りが混じったデータに対しては、Turnbull 法が使われます。すべてのデータが右側打ち切りである場合、ノンパラメトリックな推定値は計算できないことを示すメッセージがレポートに表示されます。

確率プロット上に、Kaplan-Meier 曲線を点でプロットする時には、中間点が使われます。ここで、「中間点」とは、1時点前の Kaplan-Meier 推定値と、現時点の Kaplan-Meier 推定値との中間値 (平均値) のことです。

## パラメトリックな分布

ノンパラメトリック法で推定された累積確率の曲線は角ばっていますが、パラメトリック法の曲線は、よりシンプルで滑らかです。また、パラメトリック法では、分布の裾のほうの累積確率も、外挿により、算出できます。

---

**メモ:** JMP では、多くの確率分布を、位置パラメータと尺度パラメータで表現します。対数正規分布の場合は、メディアン (中央値) もレポートに表示します。また、閾値をもつ分布は、位置と尺度のほかに、閾値パラメータも含んでいます。次節での数式において、位置パラメータを  $\mu$ 、尺度パラメータを  $\sigma$ 、閾値パラメータを  $\gamma$  と記します。

---

### 対数正規

ばらつき具合が指数的に決められているデータに対しては、対数正規分布がよく使用されます。対数正規分布は、同一で独立した、小さな正の値をとる確率変数を多数、掛け合わせることで導出されます。対数正規分布の変数を対数変換したものは、正規分布に従います。対数正規分布が適用されるデータ例としては、医療費、金属疲労による亀裂の進展、殺菌剤が適用されてからの菌の生存時間などが挙げられます。確率密度関数の曲線は、右に大きく歪んでいます（右側の裾が長い）。対数正規分布の確率密度関数と累積分布関数は、次式のとおりです。

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma} \phi_{\text{nor}} \left[ \frac{\log(x) - \mu}{\sigma} \right], \quad x > 0$$

$$F(x; \mu, \sigma) = \Phi_{\text{nor}} \left[ \frac{\log(x) - \mu}{\sigma} \right],$$

これらの式で、

$$\phi_{\text{nor}}(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right)$$

および

$$\Phi_{\text{nor}}(z) = \int_{-\infty}^z \phi_{\text{nor}}(w) dw$$

は、それぞれ、 $\mu=0$  および  $\sigma=1$  の標準正規分布の確率密度関数と累積分布関数です。

### Weibull

Weibull分布は、ハザードが時間とともに上昇または低下する故障時間データに適しています。形状パラメータ  $\beta$  の値に基づいて、さまざまな種類のデータを非常に柔軟にモデル化できるため、信頼性分析で広く使われています。Weibull分布は、たとえば、電子部品、ローラーベアリング、キャパシタ（コンデンサ）、セラミックなどの故障時間データに使われてきました。尺度パラメータ  $\alpha$  と形状パラメータ  $\beta$  を変更することで、さまざまな形の Weibull 分布を作成できます。Weibullの確率密度関数と累積分布関数は、次式のとおりです。

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{\beta}{\alpha} x^{(\beta-1)} \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta\right]; \quad x > 0, \alpha > 0, \beta > 0$$

$$F(x; \alpha, \beta) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta\right],$$

$\alpha$ は尺度パラメータ、 $\beta$ は形状パラメータです。Weibull分布は、 $\beta$ の値を変更することにより柔軟に形状が変わり、特に $b = 1$ のときは指数分布になります。このようなパラメータ化のほかにも、多くの文献で使用され、JMPでも採用している方法として、位置パラメータ $\mu$ 、および尺度パラメータ $\sigma$ によってWeibull分布を表す方法もあります。これらは次式で簡単に $\alpha$ と $\beta$ に変換できます。

$$\alpha = \exp(\mu)$$

および

$$\beta = \frac{1}{\sigma}$$

Weibull分布の確率密度関数と累積分布関数は、このパラメータ表現においては、位置パラメータ $\mu = \log(\alpha)$ と尺度パラメータ $\sigma = 1/\beta$ をもつ最小極値分布に対数変換したデータが従うものとして表すことができます。

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma} \phi_{\text{sev}} \left[ \frac{\log(x) - \mu}{\sigma} \right], \quad x > 0, \sigma > 0$$

$$F(x; \mu, \sigma) = \Phi_{\text{sev}} \left[ \frac{\log(x) - \mu}{\sigma} \right]$$

これらの式で、

$$\phi_{\text{sev}}(z) = \exp[z - \exp(z)]$$

および

$$\Phi_{\text{sev}}(z) = 1 - \exp[-\exp(z)]$$

は、それぞれ、 $\mu=0$ および $\sigma=1$ の標準最小極値分布の確率密度関数と累積分布関数です。

### 対数ロジスティック

対数ロジスティック分布の確率密度関数は、対数正規分布のそれと形状が似ていますが、裾がより重いという特徴があります。がん患者の生存時間や財産データなど、非単調なハザード関数をもつデータにたびたび使われています。対数ロジスティック分布の確率密度関数と累積分布関数は、次式のとおりです。

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma} \phi_{\text{logis}} \left[ \frac{\log(x) - \mu}{\sigma} \right]$$

$$F(x; \mu, \sigma) = \Phi_{\text{logis}} \left[ \frac{\log(x) - \mu}{\sigma} \right],$$

これらの式で、

$$\phi_{\logis}(z) = \frac{\exp(z)}{[1 + \exp(z)]^2}$$

および

$$\Phi_{\logis}(z) = \frac{\exp(z)}{[1 + \exp(z)]} = \frac{1}{1 + \exp(-z)}$$

は、それぞれ、 $\mu=0$  および  $\sigma=1$  の標準ロジスティック分布の確率密度関数と累積分布関数です。

### Fréchet

Weibull 分布に従う確率変数の逆数をとったものは、Fréchet 分布に従います。対数最大極値分布、または Fréchet の最大値分布とも呼ばれています。Fréchet 分布は、一般に、金融データに適用されます。確率密度関数と累積分布関数は、次式のとおりで。

$$f(x;\mu,\sigma) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{\log(x)-\mu}{\sigma}\right)\right]\exp\left(-\frac{\log(x)-\mu}{\sigma}\right)\frac{1}{x\sigma}$$

$$F(x;\mu,\sigma) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{\log(x)-\mu}{\sigma}\right)\right]$$

また、より一般的なパラメータ表現を用いて、次式のようにも表わされます。

$$f(x;\mu,\sigma) = \frac{1}{x\sigma}\phi_{\text{lev}}\left[\frac{\log(x)-\mu}{\sigma}\right]$$

$$F(x;\mu,\sigma) = \Phi_{\text{lev}}\left[\frac{\log(x)-\mu}{\sigma}\right]$$

これらの式で、

$$\phi_{\text{lev}}(z) = \exp[-z - \exp(-z)]$$

および

$$\Phi_{\text{lev}}(z) = \exp[-\exp(-z)]$$

は、それぞれ  $\mu=0$  および  $\sigma=1$  の標準最大極値分布の確率密度関数と累積分布関数です。

## 正規

正規分布は、比較的単純であるため、中心極限定理が適用できる多くの領域で最も広く使われています。しかし、信頼性分析ではほとんど利用されません。故障時間データでも、 $\mu > 0$ で、かつ、変動係数 ( $\sigma/\mu$ ) が小さい場合には、正規分布があてはまるときもあります。ハザード関数の増加に上限がないことから、摩耗故障のデータに特に適しています。そのようなデータの例としては、白熱電球、トースターの電熱線、ワイヤーの機械的強度などが挙げられます。確率密度関数と累積分布関数は、次式のとおりです。

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma} \phi_{\text{nor}}\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right), \quad -\infty < x < \infty$$

$$F(x; \mu, \sigma) = \Phi_{\text{nor}}\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)$$

これらの式で、

$$\phi_{\text{nor}}(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right)$$

および

$$\Phi_{\text{nor}}(z) = \int_{-\infty}^z \phi_{\text{nor}}(w) dw$$

は、それぞれ、 $\mu=0$  および  $\sigma=1$  の標準正規分布の確率密度関数と累積分布関数です。

## 最小極値

最小極値分布 (SEV 分布; Smallest Extreme Value distribution) は、左に歪んでいる非対称な分布です。2つのケースに適しています。1つは、短時間で故障するユニットが少ない（多数の観測値のうちごく少数が左裾にあるような）場合です。もう1つは、 $\mu$  に比べて  $\sigma$  が小さいデータです（その場合、最小極値分布でゼロ以下になる確率が小さいため）。最小極値分布は、時間の経過とともにハザードが上昇するデータに適しています。データ例としては、高齢者の死亡率や、干ばつの間の降水量などが挙げられます。この分布は、Gumbel 分布と呼ばれることもあります。確率密度関数と累積分布関数は、次式のとおりです。

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma} \phi_{\text{sev}}\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right), \quad -\infty < \mu < \infty, \quad \sigma > 0$$

$$F(x; \mu, \sigma) = \Phi_{\text{sev}}\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)$$

これらの式で、

$$\phi_{\text{sev}}(z) = \exp[z - \exp(z)]$$

および

$$\Phi_{\text{sev}}(z) = 1 - \exp[-\exp(z)]$$

は、それぞれ $\mu=0$ および $\sigma=1$ の標準最小極値分布の確率密度関数と累積分布関数です。

### ロジスティック

ロジスティック分布は、形状が正規分布に似ていますが、裾が長いという特徴があります。推定される故障時間が負となっても構わない場合に使用されます。なお、二値応答や順序応答に対するロジスティック回帰モデルでは、ロジスティック分布が潜在的な分布として仮定されています。確率密度関数と累積分布関数は、次式のとおりです。

$$f(x;\mu,\sigma) = \frac{1}{\sigma} \phi_{\text{logis}}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right), \quad -\infty < \mu < \infty \text{ および } \sigma > 0$$

$$F(x;\mu,\sigma) = \Phi_{\text{logis}}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$$

これらの式で、

$$\phi_{\text{logis}}(z) = \frac{\exp(z)}{[1 + \exp(z)]^2}$$

および

$$\Phi_{\text{logis}}(z) = \frac{\exp(z)}{[1 + \exp(z)]} = \frac{1}{1 + \exp(-z)}$$

は、それぞれ、 $\mu=0$ および $\sigma=1$ の標準ロジスティック分布の確率密度関数と累積分布関数です。

### 最大極値

最大極値分布（LEV 分布; Largest Extreme Value distribution）は、右に歪んでいる非対称な分布です。 $\mu>0$ と比べて $\sigma$ が小さい故障時間データに使える可能性があります。この分布は、信頼性分析では一般的ではありませんが、大規模な洪水や極端な風速など、極端な自然現象の推定に役立ちます。確率密度関数と累積分布関数は、次式のとおりです。

$$f(x;\mu,\sigma) = \frac{1}{\sigma} \phi_{\text{lev}}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right), \quad -\infty < \mu < \infty \text{ および } \sigma > 0$$

$$F(x;\mu,\sigma) = \Phi_{\text{lev}}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$$

これらの式で、

$$\phi_{\text{lev}}(z) = \exp[-z - \exp(-z)]$$

および

$$\Phi_{\text{lev}}(z) = \exp[-\exp(-z)]$$

は、それぞれ $\mu=0$ および $\sigma=1$ の標準最大極値分布の確率密度関数と累積分布関数です。

### 指数

信頼性分析では、1パラメータと2パラメータの指数分布が使われています。2パラメータ指数分布の確率密度関数と累積分布関数は、次式のとおりです。

$$f(x;\theta, \gamma) = \frac{1}{\theta} \exp\left(-\frac{x-\gamma}{\theta}\right), \quad \theta > 0.$$

$$F(x;\theta, \gamma) = 1 - \exp\left(-\frac{x-\gamma}{\theta}\right)$$

上の式で、 $\theta$ は尺度パラメータ、 $\gamma$ は閾値パラメータです。信頼性分析では、 $\gamma=0$ の1パラメータ指数分布を頻繁に使います。JMPでは、1パラメータ指数分布だけが用意されています。指数分布は、平均寿命をはるかに超えてからも、一定して故障が起こるような部品の故障時間データによくあてはまります。ハザード（瞬間故障率）が一定であり、ユニットの年齢に依存しません。そのため、材質疲労や腐食、短期的摩耗が生じる機械部品の寿命データには適していません。ただし、ある種の頑健な電子部品のデータには適しています。絶縁油と誘電性流体の寿命を記述する例では、効果的に使われています（Nelson, 1990, p. 53）。

### 対数一般化ガンマ

対数一般化ガンマ分布には、最小極値分布・最大極値分布・正規分布などの多数の分布が含まれています。確率密度関数と累積分布関数は、次式のとおりです。

$$f(x;\mu, \sigma, \lambda) = \begin{cases} \frac{|\lambda|}{\sigma} \phi_{\text{lg}}[\lambda\omega + \log(\lambda^{-2}); \lambda^{-2}] & \lambda \neq 0 \text{ の場合} \\ \frac{1}{\sigma} \phi_{\text{nor}}(\omega) & \lambda = 0 \text{ の場合} \end{cases}$$

$$F(x;\mu, \sigma, \lambda) = \begin{cases} \Phi_{\text{lg}}[\lambda\omega + \log(\lambda^{-2}); \lambda^{-2}] & \lambda > 0 \text{ の場合} \\ \Phi_{\text{nor}}(\omega) & \lambda = 0 \text{ の場合} \\ 1 - \Phi_{\text{lg}}[\lambda\omega + \log(\lambda^{-2}); \lambda^{-2}] & \lambda < 0 \text{ の場合} \end{cases}$$

ここで、 $-\infty < x < \infty$ ,  $\omega = [x - \mu]/\sigma$

$-\infty < \mu < \infty$ ,  $-12 < \lambda < 12$ , および  $\sigma > 0$

です。また、

$$\phi_{lg}(z; \kappa) = \frac{1}{\Gamma(\kappa)} \exp[\kappa z - \exp(z)]$$

$$\Phi_{lg}(z; \kappa) = \Gamma_I[\exp(z); \kappa]$$

は、それぞれ対数ガンマ分布の確率密度関数と累積分布関数です。 $\kappa > 0$ は形状パラメータです。上記の標準分布は、形状パラメータ $\kappa$ に依存します。

---

**メモ:** JMPでは、数値計算を安定させるために一般化ガンマ分布の形状パラメータ $\lambda$ が取りうる範囲を $[-12, 12]$ に制限しています。

---

### 拡張一般化ガンマ

拡張一般化ガンマ分布には、一般化ガンマ分布・Weibull分布・対数正規分布・Fréchet分布・ガンマ分布・指数分布などの多数の分布が含まれています。拡張一般化ガンマ分布は、打ち切りがほとんどないか、まったくないデータに特に適しています。この分布は、人間におけるガンの予後をモデル化するのに使われています。確率密度関数と累積分布関数は、次式のとおりです。

$$f(x; \mu, \sigma, \lambda) = \begin{cases} \frac{|\lambda|}{x\sigma} \phi_{lg}[\lambda\omega + \log(\lambda^{-2}); \lambda^{-2}] & \lambda \neq 0 \text{ の場合} \\ \frac{1}{x\sigma} \phi_{nor}(\omega) & \lambda = 0 \text{ の場合} \end{cases}$$

$$F(x; \mu, \sigma, \lambda) = \begin{cases} \Phi_{lg}[\lambda\omega + \log(\lambda^{-2}); \lambda^{-2}] & \lambda > 0 \text{ の場合} \\ \Phi_{nor}(\omega) & \lambda = 0 \text{ の場合} \\ 1 - \Phi_{lg}[\lambda\omega + \log(\lambda^{-2}); \lambda^{-2}] & \lambda < 0 \text{ の場合} \end{cases}$$

上の式で、 $x > 0$ ,  $\omega = [\log(x) - \mu]/\sigma$

$-\infty < \mu < \infty$ ,  $-12 < \lambda < 12$ , および  $\sigma > 0$

です。また、

$$\phi_{lg}(z; \kappa) = \frac{1}{\Gamma(\kappa)} \exp[\kappa z - \exp(z)]$$

$$\Phi_{lg}(z; \kappa) = \Gamma_1[\exp(z); \kappa]$$

は、それぞれ標準対数ガンマ分布の確率密度関数と累積分布関数です。 $\kappa > 0$ は形状パラメータです。

上記の標準分布は、形状パラメータ $\kappa$ に依存します。拡張一般化ガンマ分布についての詳細は、Meeker and Escobar (1998, ch. 5) で詳しく説明されています。

---

**メモ:** JMPでは、数値計算を安定させるために一般化ガンマ分布の形状パラメータ $\lambda$ が取りうる範囲を $[-12, 12]$ に制限しています。

---

### 閾値パラメータをもつ分布

閾値パラメータをもつ分布は、対数-位置-尺度型の分布に、閾値パラメータを加えたものです。Weibull分布などを、閾値パラメータ $\gamma$ を追加することで一般化した分布です。閾値パラメータを追加すると、分布の左端がシフトして0から離れます。閾値パラメータは、シフトパラメータ、最小値パラメータとも呼ばれ、すべてのユニットが閾値を超えて生存することから、保証パラメータと呼ばれることもあります。閾値パラメータを追加すると、分布が時間軸上でシフトしますが、分布の形状と広がりは変化しません。このような閾値分布は、中程度もしくは高程度に、分布がシフトしている場合に適しています。閾値パラメータがある対数-位置-尺度型の分布の確率密度関数と累積分布関数は、一般的に、次式のように表わされます。

$$f(x; \mu, \sigma, \gamma) = \frac{1}{\sigma(x-\gamma)} \phi \left[ \frac{\log(x-\gamma) - \mu}{\sigma} \right], \quad x > \gamma$$

$$F(x; \mu, \sigma, \gamma) = \Phi \left[ \frac{\log(x-\gamma) - \mu}{\sigma} \right]$$

上の式で、 $\phi$ と $\Phi$ は、それぞれ、各分布の標準分布における確率密度関数と累積分布関数です。Weibull分布・対数正規分布・Fréchet分布・対数ロジスティック分布の閾値分布は以下のとおりです。上記の確率密度関数と累積分布関数を、各分布のものに置き換えることにより、導出されます。

---

**メモ:** 最小の観測値が厳密な故障時間の場合（つまり、最小の観測値が打ち切りデータではない場合）、JMPはその点の周りに小さな区間を設定し、その観測値を区間打ち切りとして扱います。このように厳密な故障時間のデータにおける最小値を区間打ち切りデータに変換すると、対数尤度関数を有界にし、推定が行えるようになります。最小の観測値が打ち切りデータである場合には、このような処理は行われません。

---

### 閾値 Weibull

3パラメータ Weibull 分布の確率密度関数と累積分布関数は、次式のとおりです。

$$f(x; \mu, \sigma, \gamma) = \frac{1}{(x-\gamma)\sigma} \phi_{\text{sev}} \left[ \frac{\log(x-\gamma) - \mu}{\sigma} \right], \quad x > \gamma, \sigma > 0$$

$$F(x; \mu, \sigma, \gamma) = \Phi_{\text{sev}}\left(\frac{\log(x - \gamma) - \mu}{\sigma}\right) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x - \gamma}{\alpha}\right)^\beta\right], \quad x > \gamma$$

上の式で、 $\mu = \log(\alpha)$ 、および  $\sigma = 1/\beta$  です。また、

$$\phi_{\text{sev}}(z) = \exp[z - \exp(z)]$$

および

$$\Phi_{\text{sev}}(z) = 1 - \exp[-\exp(z)]$$

は、それぞれ  $\mu=0$  および  $\sigma=1$  の標準最小極値分布の確率密度関数と累積分布関数です。

### 閾値 対数正規

3パラメータ対数正規分布の確率密度関数と累積分布関数は、次式のとおりで。

$$f(x; \mu, \sigma, \gamma) = \frac{1}{\sigma(x - \gamma)} \phi_{\text{nor}}\left[\frac{\log(x - \gamma) - \mu}{\sigma}\right], \quad x > \gamma$$

$$F(x; \mu, \sigma, \gamma) = \Phi_{\text{nor}}\left[\frac{\log(x - \gamma) - \mu}{\sigma}\right]$$

これらの式で、

$$\phi_{\text{nor}}(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right)$$

および

$$\Phi_{\text{nor}}(z) = \int_{-\infty}^z \phi_{\text{nor}}(w) dw$$

は、それぞれ、 $\mu=0$  および  $\sigma=1$  の標準正規分布の確率密度関数と累積分布関数です。

### 閾値 Fréchet

3パラメータ Fréchet 分布の確率密度関数と累積分布関数は、次式のとおりで。

$$f(x; \mu, \sigma, \gamma) = \frac{1}{\sigma(x - \gamma)} \phi_{\text{lev}}\left[\frac{\log(x - \gamma) - \mu}{\sigma}\right], \quad x > \gamma$$

$$F(x; \mu, \sigma, \gamma) = \Phi_{\text{lev}} \left[ \frac{\log(x - \gamma) - \mu}{\sigma} \right]$$

これらの式で、

$$\phi_{\text{lev}}(z) = \exp[-z - \exp(-z)]$$

および

$$\Phi_{\text{lev}}(z) = \exp[-\exp(-z)]$$

は、それぞれ  $\mu=0$  および  $\sigma=1$  の標準最大極値分布の確率密度関数と累積分布関数です。

### 閾値 対数ロジスティック

3パラメータ対数ロジスティック分布の確率密度関数と累積分布関数は、次式のとおりで。

$$f(x; \mu, \sigma, \gamma) = \frac{1}{\sigma(x - \gamma)} \phi_{\text{logis}} \left[ \frac{\log(x - \gamma) - \mu}{\sigma} \right], \quad x > \gamma$$

$$F(x; \mu, \sigma, \gamma) = \Phi_{\text{logis}} \left[ \frac{\log(x - \gamma) - \mu}{\sigma} \right]$$

これらの式で、

$$\phi_{\text{logis}}(z) = \frac{\exp(z)}{[1 + \exp(z)]^2}$$

および

$$\Phi_{\text{logis}}(z) = \frac{\exp(z)}{[1 + \exp(z)]} = \frac{1}{1 + \exp(-z)}$$

は、それぞれ、 $\mu=0$  および  $\sigma=1$  の標準ロジスティック分布の確率密度関数と累積分布関数です。

### 故障部分母集団の分布（DS分布）

信頼性試験では、故障につながる不具合がごく一部のユニットにしか生じないケースがあります。すべてのユニットが故障するわけではないため、通常の故障分布を使用すると、不適切な結果になる恐れがあります。一部の部分母集団だけに故障が生じる状態を表現したい場合には、これらのDS分布(Defective Subpopulation distribution; 故障部分母集団分布)を用いてください。次のようなDS分布が用意されています。

- DS 対数正規
- DS Weibull

- DS ロジスティック
- DS Fréchet

DS分布の確率密度関数と累積分布関数は、次のとおりです。

$$f(t) = \left[ p \frac{1}{t\sigma} \right] \phi \left[ \frac{(\log(t) - \mu)}{\sigma} \right]$$

$$F(t) = p \Phi \left[ \left( \frac{(\log(t) - \mu)}{\sigma} \right) \right]$$

ここで、

$p$ は、全体に占める故障部分母集団の割合です

$t$ は寿命（故障時間）です

$\mu$ および $\sigma$ は、位置と尺度を表すパラメータです。元のデータからゼロ値を除外した後、通常の最尤法で推定されます。

$\phi(z)$ および $\Phi(z)$ は、それぞれ、標準分布の密度関数と累積分布関数です。たとえばWeibull分布の場合、次のようになります。

$$\phi(z) = \exp(z - \exp(z)), \quad \Phi(z) = 1 - \exp(-\exp(z))$$

DS分布のより詳細な情報については、Tobias and Trindad (2012, p. 321) を参照してください。

DS分布はMeeker and Escobar (1998, ch. 11) では、「限定故障母集団 (limited failurer population) モデル」と呼ばれています。

### ゼロ強調分布

ゼロ強調分布 (Zero-Inflated distribution; ZI分布) は、 $t = 0$ において一定の割合 ( $p$ ) が故障しているデータに使用します。通常の分布で想定されるよりもゼロ時間での故障個数が多いデータに対して、ゼロが発生する確率を追加してモデル化します。「寿命の一変量」プラットフォームでは、[イベントまでの時間] データの最小値がゼロである場合に、次の4つのゼロ強調分布を使用できます。

- ゼロ強調 対数正規 (ZI 対数正規)
- ゼロ強調 Weibull (ZI Weibull)
- ゼロ強調 対数ロジスティック (ZI 対数ロジスティック)
- ゼロ強調 Fréchet (ZI Fréchet)

ゼロ強調分布の確率密度関数と累積分布関数は、次のとおりです。

$$f(t) = \left[ (1-p) \frac{1}{t\sigma} \right] \phi \left[ \frac{(\log(t) - \mu)}{\sigma} \right]$$

$$F(t) = p + (1-p)\Phi\left[\left(\frac{(\log(t)-\mu)}{\sigma}\right)\right]$$

ここで、

$p$ は、ゼロ値の割合です。

$t$ は、寿命（故障時間）です。

$\mu$ および $\sigma$ は、位置と尺度を表すパラメータです。元のデータからゼロ値を除外した後、通常の最尤法で推定されます。

$\phi(z)$ および $\Phi(z)$ は、それぞれ、標準分布の密度関数と累積分布関数です。たとえばWeibull分布の場合、次のようになります。

$$\phi(z) = \exp(z - \exp(z)), \quad \Phi(z) = 1 - \exp(-\exp(z))$$

ゼロ強調分布の詳細については、Lawless (2003, p. 34) を参照してください。 $p = 1 - p$ および $S_1(t) = 1 - \Phi(t)$ を代入すると、上の式が得られます。

詳細については、Meeker and Escobar (1995, p. 232) を参照してください。そこでは、一般的な混合分布の式が記載されています。Tobias and Trindade (1995) で述べられている計算式において、 $\alpha = p$ 、 $F_d(t) = 1$ 、 $F_N(t) = \Phi(t)$ を代入すると、上の式が得られます。

## Bayes推定の事前分布

位置パラメータと尺度パラメータの事前分布には、次の分布が使用できます。

- 正規分布と対数正規分布。これらの事前分布は、ハイパーパラメータとして、位置 ( $\mu$ ) と尺度 ( $\sigma$ ) を持ちます。これらの事前分布の詳細については、「[対数正規](#)」(81ページ) および「[正規](#)」(84ページ) を参照してください。
- 一様分布。ハイパーパラメータとして、下限と上限を持ちます。これらの下限と上限は、事前分布である一様分布が分布する範囲を決めます。
- ガンマ分布。ハイパーパラメータとして、形状と尺度を持ちます。 $k$  と  $\theta$  をパラメータとしたガンマ分布が使用されます。
- 一点に固定された分布。ハイパーパラメータとして、位置を持ちます。これは退化した事前分布です。この事前分布では、パラメータは1つの値に固定されています。その1つの固定された値には、位置ハイパーパラメータに入力した値が使われます。

分位点パラメータの事前分布には、次の分布が使用できます。

- 正規分布と対数正規分布。99%を網羅するように範囲が設定されます。0.5パーセント点と99.5パーセント点で事前分布を指定します。このオプションが選択された場合、JMPは前述の位置ハイパーパラメータと尺度ハイパーパラメータに対する指定を取り消します。
- 一様分布。ハイパーパラメータとして、下限と上限を持ちます。下限と上限は、一様分布が分布する範囲を決めます。

- 対数一様分布。ハイパーパラメータとして、下限 (a) と上限 (b) を持ちます。この分布は、 $\text{Log}(a)$  から  $\text{Log}(b)$  までの対数スケール上に一様に分布します。
- 一点に固定された分布。ハイパーパラメータとして、位置を持ちます。これは退化した事前分布です。この事前分布では、パラメータは1つの値に固定されています。その1つの固定された値には、位置ハイパーパラメータに入力した値が使われます。

故障確率の事前分布には、次の分布が使用できます。

- ベータ分布。次のいずれかの方法で、その確率密度関数を設定することができます。
  - 推定値と推定誤差を指定することにより、それに対応した平均と分散を持つベータ分布を設定する。平均は「推定値」に入力された数値と同じで、分散は  $(\text{推定誤差} / 100 \times \text{推定値})^2$  と同じです。
  - ベータ分布の0.5パーセント点および99.5パーセント点を指定することにより、それに対応したベータ分布を設定する。こちらで指定すると、JMP は以前に指定されたハイパーパラメータの設定を取り消します。

## 競合原因分析の詳細

競合原因モデル (competing cause model) では、全体の累積分布関数が次のように定義されます。

$$F(x) = 1 - \prod_{i=1}^k [1 - F_i(x)]$$

ここで、 $F_i(x)$ ,  $i = 1, \dots, k$  は、個々の原因における累積分布関数です。信頼限界も簡単に計算できます。関係する推定値がすべて最尤推定値だからです。

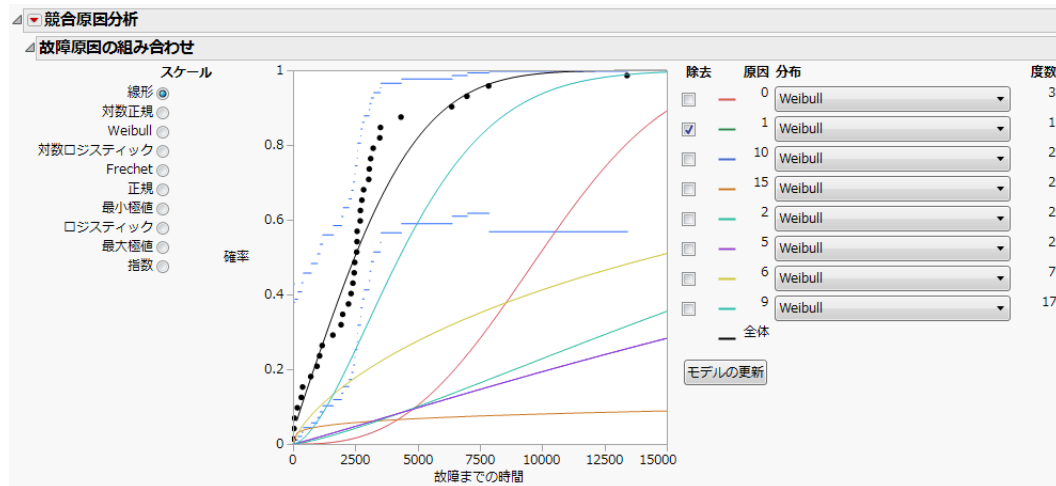
## 競合原因分析でのパラメータ指定

競合原因分析で、ある故障原因の分布パラメータを特定の値に固定したい場合は、その故障原因の「原因ごとの分析」レポートにてパラメータ値を指定します。「寿命の一変量 - 故障原因:<名前>」レポートにおける「パラメトリック推定」レポートでパラメータ値を指定してください。[モデルの更新] をクリックすると、指定したパラメータ値が設定され、全体の分布に反映されます。

次の例では、競合原因分析でパラメータを指定する方法を説明しています。

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「Appliance.jmp」を開きます。
2. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [寿命の一変量] を選びます。
3. 「故障までの時間」を [Y, イベントまでの時間] に指定します。
4. 「原因コード」を [故障原因] に指定します。
5. 「信頼区間の方法」を [尤度] にします。
6. [パラメータ指定の分布も使用する] を選択します。
7. [OK] をクリックします。

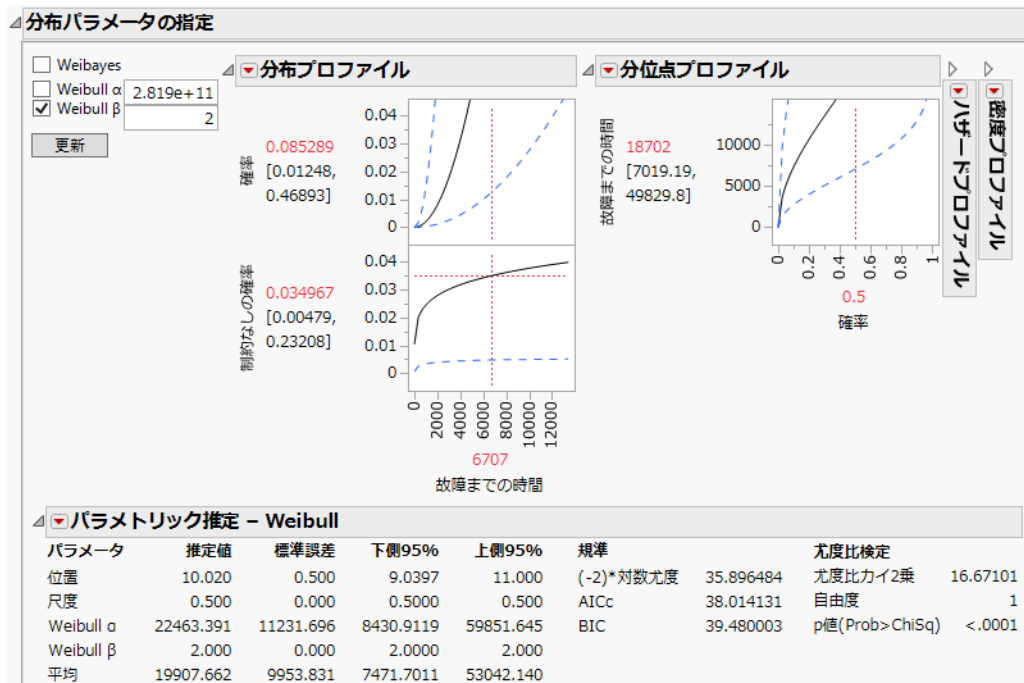
図 3.23 原因 1 を削除したパラメータ指定モデル



デフォルトでは、原因1にはデータが十分ないので、「除去」されています。ここでは、この原因を「除去」として処理したくないとします。

8. 原因1の「原因ごとの分析」レポートを開きます。「寿命の一変量 - 故障原因: 1 度数: 1」という名前のレポートです。
9. 「パラメトリック推定 - Weibull」の赤い三角ボタンから「分布パラメータの指定」を選択します。
10. [Weibull  $\beta$ ] を選択して、「2」を入力します。
11. [更新] をクリックします。

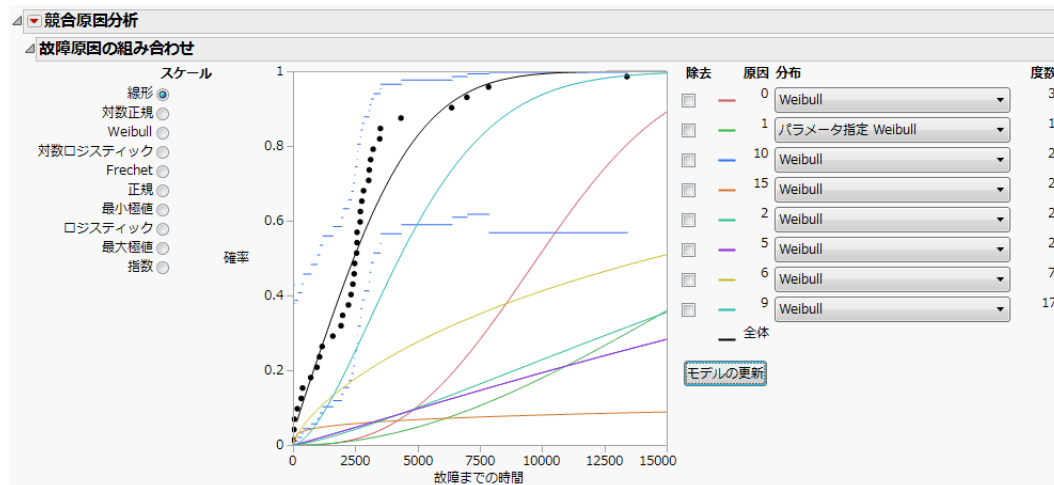
図3.24 Weibull  $\beta$  を指定したパラメータ指定モデル



「パラメトリック推定値 - Weibull」レポートで、 $\beta$ を2と仮定すると、パラメータ $\alpha$ は22463.391と推定されます。以下の操作により、この分布を原因1の故障分布に使用します。

12. レポートウィンドウの最上部の「故障原因の組み合わせ」が表示されるまで上にスクロールします。
13. 原因1の「除去」ボタンを選択解除します。
14. 原因1の分布に、[パラメータ指定 Weibull] を選択します。
15. [モデルの更新] をクリックします。

図 3.25 原因 1 が表示された更新モデル



これらの操作により、パラメータが指定された Weibull 分布を原因 1 に適用して、全体のモデルが計算されました。

## 競合原因分析での Bayes 推定

故障原因に Bayes モデルを指定するには、「競合原因分析でのパラメータ指定」(93 ページ) の手順と同じような手順に従います。各原因に対する「寿命の一変量」の「統計量」の「パラメトリック推定」における「Bayes 推定」レポートで、Bayes モデルを指定します。「Bayes 推定 - <分布の名前>」(49 ページ) を参照してください。

ある原因に対して Bayes 推定が適用された場合、全体の累積分布関数を求めるのに乱数シミュレーションが利用されます。たとえば、2 つの故障原因があるとします。1 つ目の原因には通常の Weibull 分布を最尤推定し、2 つ目の原因では Weibull 分布を Bayes 推定したものをを用いるとします。このとき、1 つ目の原因においては、パラメータベクトル  $\theta_1$  を推定するのに最尤法が使われます。一方、2 つ目の原因においては、パラメータベクトル  $\theta_2$  の事後分布を求めるのに Bayes 推定が使われます。

この場合、全体における累積分布関数  $F(x, \theta_1, \theta_2)$  の中央値や分位点は、次のように求められます。

- 1 つ目の原因に対してはパラメトリックなブートストラップを実行します。最尤推定値  $\hat{\theta}_1$  の漸近分布から標本を乱数で生成します。 $\hat{\theta}_1$  に対する漸近分布から生成された値を  $\theta_1^*$  とします。
- 一方、2 つ目の原因に対しては、Bayes 推定の枠組みで、 $\theta_2$  の事後分布に従う乱数を生成します。これを  $\theta_2^*$  とします。
- 生成された  $\theta_1^*$  と  $\theta_2^*$  の各セットに対して、 $F(x, \theta_1, \theta_2)$  に対する推定値  $F^*(x, \theta_1, \theta_2)$  を求めます。
- $F^*(x, \theta_1, \theta_2)$  から、全体の累積分布関数における中央値や分位点を求めます。これらの中央値や分位点が、分布プロファイルにおいて、対応する  $x$  値のところにプロットされます。

## 競合原因分析でのWeibayes分析

故障原因にWeibayesモデルを指定する手順は、「競合原因分析でのパラメータ指定」(93ページ)の手順と同様です。まず、各原因に対する「寿命の一変量」の「統計量」の「パラメトリック推定 - Weibull」レポートで、「分布パラメータの指定」を選択してください。そして、「分布パラメータの指定」レポートで、「Weibayes」オプションにチェックを入れてください。競合原因分析においてはWeibayesモデルがBayesモデルとして処理され、パラメータ $\alpha$ の事後分布からブートストラップ標本が抽出されます。Liu and Wang (2013) を参照してください。

## 競合原因分析での平均余寿命の計算

競合原因分析での平均余寿命は、故障時間を乱数シミュレーションで生成することにより計算されています。赤い三角ボタンのメニューの「設定」オプションにより生成される乱数の個数を変更できます。この乱数の個数を、ここでは $m$ とします。

時間 $t$ での平均余寿命の推定値を求めるために、「時間 $t$ まで生存していたもの」という条件付けをした分布から $m$ 個の乱数を生成します。そして、これらの乱数の平均を計算します。

平均余寿命に対する信頼区間をJMPに計算させるには、「設定」ウィンドウのチェックボックスを選択する必要があります。そのチェックボックスにチェックすると、ブートストラップ標本の回数(ブートストラップ標本の標本数)を設定するためのオプションが表示されます。この回数を $n$ とします。

信頼区間を計算するために、最尤推定値の漸近分布、またはBayes推定における事後分布のどちらかに基づいて、シミュレーションが $n$ 回、行われます。1回のシミュレーションごとに $m$ 個の乱数が生成され、その $m$ 個の乱数から平均余寿命が計算されます。そして、 $n$ 個の平均余寿命から、信頼区間が計算されます。

## 「混合分布のあてはめ」での予測式の保存

ここでは、「混合分布」レポートの「予測の保存」オプションによって保存される式を説明します。

次の記号を用います。

$\hat{p}_i$  は、混合の割合 $w_i$ に対する推定値です。

$\hat{F}_i$  は、累積分布関数 $F_i$ に対する推定値です。

$\hat{f}_i$  は、 $F_i$ に対応した確率密度関数に対する推定値です。

- 観測値 $y$ が打ち切りデータではない場合、保存される値は次のように求められます。

$$\frac{\hat{p}_i \hat{f}_i(y)}{\sum_{i=1} \hat{p}_i \hat{f}_i(y)}$$

- 観測値が打ち切りデータの場合には、打ち切りがなかった場合における上式の確率密度値を、以下に述べるものに置き換えて求められます。

$$\hat{F}_i(y) \text{ (右側打ち切りの場合)}$$

$$1 - \hat{F}_i(y) \text{ (左側打ち切りの場合)}$$

$$\hat{F}_i(y_{high}) - \hat{F}_i(y_{low}) \text{ (区間打ち切りの場合)}$$

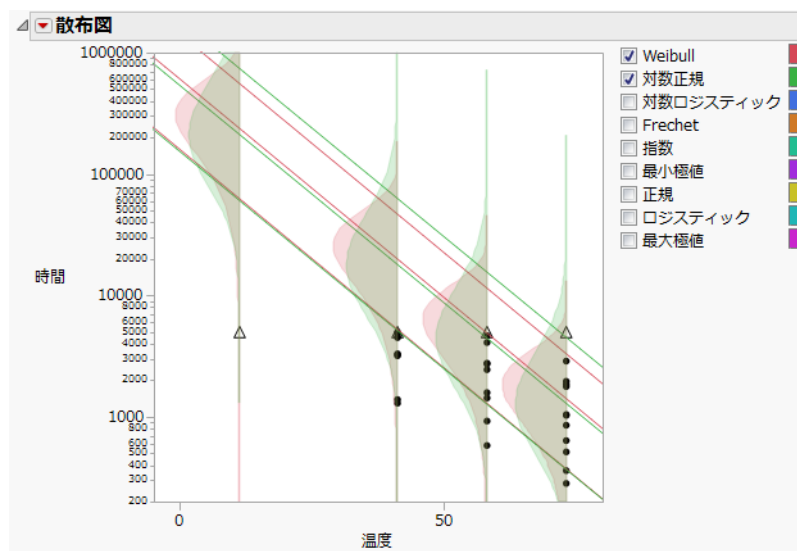
# 第4章

## 寿命の二変量

### 寿命データに1因子モデルをあてはめる

「寿命の二変量」プラットフォームでは、加速因子が1つの場合の加速寿命試験データを分析します。寿命と加速因子との関係を、さまざまな変換式でモデル化できます。データの変換式を独自に定義することも可能です。複数の確率分布をあてはめることができます。また、因子の水準間での比較も行えます。

図4.1 さまざまな分布と因子水準を示す散布図



目次

「寿命の二変量」プラットフォームの概要 ..... 101

「寿命の二変量」プラットフォームの例 ..... 101

「寿命の二変量」プラットフォームの起動 ..... 104

「寿命の二変量」レポート ..... 106

    データの要約 ..... 106

    散布図 ..... 107

    ノンパラメトリック ..... 109

    比較 ..... 110

    結果 ..... 113

    カスタム関係式 ..... 123

「寿命の二変量」プラットフォームのオプション ..... 124

「寿命の二変量」プラットフォームの別例 ..... 125

    コンデンサの加速寿命試験 ..... 126

    カスタム関係式の例 ..... 127

## 「寿命の二変量」プラットフォームの概要

「寿命の二変量」は、加速寿命試験データを分析するためのプラットフォームです。加速寿命試験は、比較的短い時間で製品の故障時間データを得るために、製造業において日常的に行われています。よく使われる加速因子には、温度・電圧・圧力・使用率などがあります。試験結果を外挿することにより、ストレスがかかっていない通常の状態での故障時間が推定されます。推定された値をもとに、信頼性の評価、故障原因の検出と改善、製造メーカーの比較、製品の信頼性保証を行います。

「寿命の二変量」プラットフォームに用意されている変換式は、故障時間と加速因子との物理的・化学的關係をモデル化するのに広く使われているものです。Arrheniusの關係式（温度の単位として摂氏・華氏・ケルビンのいずれも指定可能）や、電圧による加速の式が用意されています。また、線形・対数・ロジット・逆数・平方根・Box-Cox・位置・位置と尺度・カスタムといった式も用意されています。

なお、[実験計画(DOE)] > [加速寿命試験計画] プラットフォームでは、加速寿命試験の計画を作成できます。詳細については、『実験計画(DOE)』の「加速寿命試験計画」章を参照してください。

Meeker and Escobar (1998, p. 495) は、加速寿命試験データの分析に対して以下の手順を提唱しています。

1. グラフに描いて、データを検討する。加速因子に対して故障時間をプロットした散布図などを描く。
2. 加速因子の水準ごとに確率分布をあてはめる。この時、確率分布をいろいろ変えてみて、あてはまりを確認する。
3. 故障時間と加速因子との間に分析者が想定できる関係をもとに、全体モデルをあてはめる。
4. ステップ3で作成したモデルを、ステップ2で行った個別の分析と比較し、全体モデルのあてはまりを評価する。
5. 残差分析と各種の診断分析を行ってモデルの仮定を検証する。
6. 推論を行うのに、データが十分妥当なものであるか検討する。

## 「寿命の二変量」プラットフォームの例

この例では、サンプルデータフォルダ内の「Reliability」フォルダにある「Devault.jmp」データを使用します。このデータは、Meeker and Escobar (1998) から引用したものです。このデータテーブルには、ある装置の温度加速試験データが保存されています。実際の操業温度は10℃ですが、温度加速を施し、40℃、60℃、80℃で試験は行われました。データには、故障時間、または、打ち切り値が記録されています。

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「Devault.jmp」を開きます。
2. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [寿命の二変量] を選択します。
3. 「時間」を [Y, イベントまでの時間] に指定します。
4. 「温度」を [X] に指定します。
5. 「打ち切りの有無」を [打ち切り] に指定します。
6. 「打ち切りの値」は [1] をそのまま使います。

7. 「重み」を〔度数〕に指定します。
8. 「関係」ドロップダウンリストで〔Arrhenius 摂氏〕が選択され、〔包含モデルの検定〕チェックボックスがオンになっていることを確認します。
9. 「分布」のドロップダウンリストから〔Weibull〕を選びます。
10. 「信頼区間の方法」は〔Wald〕のままにしておきます。  
設定後の起動ウィンドウは図4.2のようになります。

図4.2 「寿命の二変量」起動ウィンドウ

列の選択

▼ 6列

- ▲ 時間
- ▲ ステータス
- ▲ 重み
- ▲ 温度
- ▲ 打ち切りの有無
- ▲ x

打ち切りの値: 1 ▼

関係

Arrhenius 摂氏 ▼

☒ 包含モデルの検定

使用条件: .

分布

Weibull ▼

信頼区間の方法

Wald ▼

選択した列に役割を割り当てる

Y: イベントまでの時間	▲ 時間 オプション(数値)
X	▲ 温度
打ち切り	打ち切りの有無
度数	重み
By	オプション

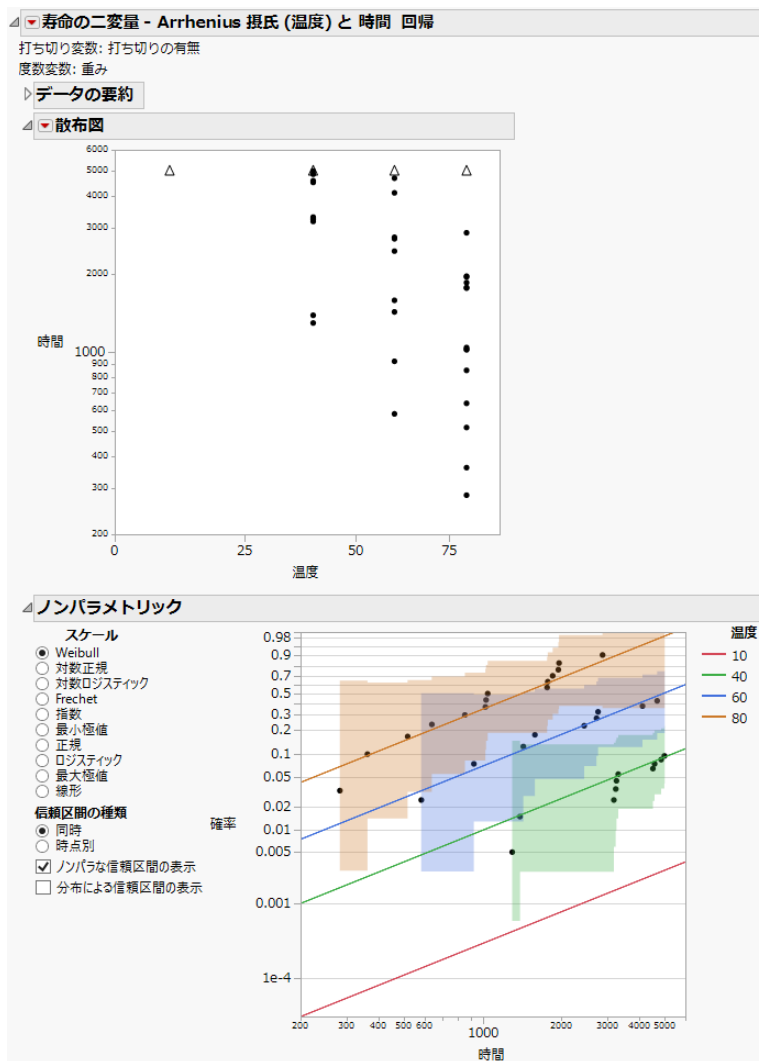
アクション

OK  
キャンセル  
削除  
前回の設定  
ヘルプ

11. [OK] をクリックします。

図4.3には、「寿命の二変量」レポートウィンドウの上半分が表示されています。

図 4.3 「DevAlt.jmp」データの「寿命の二変量」レポートウィンドウ



レポートウィンドウには、データの要約情報・診断プロット・モデルの比較結果・パラメータ推定値・プロファイルなどが表示されます。また、指定した分布ごとに、推定値などの結果や、「分布プロファイル」・「分位点プロファイル」・「ハザードプロファイル」・「密度プロファイル」・「加速係数プロファイル」が表示されます。

## 「寿命の二変量」プラットフォームの起動

「寿命の二変量」プラットフォームを起動するには、[分析] > [信頼性/生存時間分析] > [寿命の二変量] を選択します。

図4.4 「寿命の二変量」起動ウィンドウ

「寿命の二変量」起動ウィンドウには、次のオプションがあります。

**Y, イベントまでの時間** イベントが発生するまでの時間（故障が生じるまでの時間）、または打ち切りまでの時間の列を指定します。区間打ち切りデータの場合は、上限と下限として2つのY変数を指定します。打ち切りの詳細は、「寿命の一変量」章の「[イベントプロット](#)」（40ページ）を参照してください。

**X** 加速因子を指定します。

**打ち切り** 観測値が打ち切られているかどうかを示す列を指定します。「列の選択」リストの下「打ち切りの値」メニューから右側打ち切りを識別する値を選択してください。「打ち切り」列は、Y列に対して1つの列を指定した場合にのみ使用できます。

**度数** 1行のデータが複数のユニットを表している場合に、その度数（すなわち、観測値の個数）を含んでいる列を指定します。この列の値が0または正の整数であるとき、その値は該当する行の観測値の度数（個数）を表しています。

**By** 指定した列の水準ごとにレポートが作成されます。

**打ち切りの値** [打ち切り] 列のデータ値のうち、右側打ち切りであることを示すデータ値を指定します。[打ち切り] 列を選択すると候補となるデータ値が、自動的にコンボボックスに表示されます。これを変更するには、赤い三角ボタンをクリックして、データ値のリストから選択します。テキストボックスに異なる値を入力することもできます。[打ち切り] 列に「値ラベル」列プロパティが設定されている場合、値ラベルが値リストに表示されます。なお、[打ち切り] 列が欠測値となっている行は、分析から除外されます。

**関係** 故障分布と加速因子との関係を指定します。表 4.1 に、各関係のモデルの定義を示します。

表 4.1 「関係」オプションのモデル

関係	モデル
Arrhenius 摂氏	$\mu = b_0 + b_1 * 11605 / (X + 273.15)$
Arrhenius 華氏	$\mu = b_0 + b_1 * 11605 / ((X + 459.67) / 1.8)$
Arrhenius ケルビン	$\mu = b_0 + b_1 * 11605 / X$
電圧	$\mu = b_0 + b_1 * \log(X)$
線形	$\mu = b_0 + b_1 * X$
対数	$\mu = b_0 + b_1 * \log(X)$
ロジット	$\mu = b_0 + b_1 * \log(X / (1 - X))$
逆数	$\mu = b_0 + b_1 / X$
平方根	$\mu = b_0 + b_1 * \sqrt{X}$
Box-Cox	$\mu = b_0 + b_1 * \text{BoxCox}(X)$
位置	平均 $\mu$ が、X の水準ごとに異なる
位置と尺度	平均 $\mu$ と $\sigma$ が両方とも、X の水準ごとに異なる（「寿命の一変量」で X を [By] 変数として指定した場合と同じ）
カスタム	ユーザーが定義した $\mu$ と $\sigma$

[Box-Cox] を選択した場合、[使用条件] オプションの下にテキスト編集ボックスが表示されます。このボックスを使用して、 $\lambda$  の値を特定します。特定の  $\lambda$  における BoxCox(X) 変換は次の式で定義されます。

$$x_i^{(\lambda)} = \begin{cases} \frac{x_i^\lambda - 1}{\lambda} & \lambda \neq 0 \text{ の場合} \\ \ln(x_i) & \lambda = 0 \text{ の場合} \end{cases}$$

なお、カスタムの機能（自分自身で独自の関係式を定義する機能）については、「[カスタム関係式](#)」（123 ページ）を参照してください。

**包含モデルの検定** レポートウィンドウに、ノンパラメトリックな確率プロット・「包含モデルの検定」・モデルに基づく「複数群の確率プロット」を追加します。

**使用条件** 加速因子Xの使用条件での値を入力するダイアログが開きます。プラットフォームを起動してから、「寿命の二変量」の赤い三角ボタンのメニューから「使用条件の設定」オプションを選択して使用条件を設定することもできます。

**分布** [Weibull]・[対数正規]・[対数ロジスティック]・[Fréchet]・[最小極値]・[正規]・[ロジスティック]・[最大極値]・[指数]の中から分布を1つ選択します。[対数正規]がデフォルトの設定です。

**信頼区間の方法** パラメータ推定値の信頼区間を計算する方法を選択します。デフォルトでは、[Wald]法によって信頼区間は計算されます。別の計算方法として、[尤度]法も用意されています。Wald法のほうが尤度法よりも計算時間が短いです。尤度比法のほうが、近似は良いですが、計算時間は長くなります。

---

**メモ:** 環境設定における「信頼区間の方法」において、信頼区間を計算するデフォルトの方法を[尤度]法に変更することもできます。この環境設定は、[環境設定] > [プラットフォーム] > [寿命の二変量]で変更できます。

---

## 「寿命の二変量」レポート

最初に表示されるレポートウィンドウは、次のセクションで構成されています。

- 「データの要約」(106ページ)
- 「散布図」(107ページ)
- 「ノンパラメトリック」(109ページ)
- 「比較」(110ページ)

「分布プロファイル」・「分位点プロファイル」・「ハザードプロファイル」・「密度プロファイル」・「加速係数プロファイル」にはグラフが描かれます。「比較の規準」には、モデルを比較するための情報量規準が表示されます。

- 「結果」(113ページ)

選択した分布ごとに、パラメータ推定値・共分散行列・包含モデルの検定統計量・診断プロットが表示されます。カスタム推定を行って、分布パラメータのBayes推定値を得ることもできます。

### データの要約

「データの要約」セクションには、オブザベーション全部の個数、打ち切られていない値の個数、打ち切り（右側打ち切り・左側打ち切り・区間打ち切り）の個数が表示されます。図4.5は、「Devalt.jmp」サンプルデータの「データの要約」です。

図4.5 「データの要約」の例

データの要約	
使用されたオブザベーション	165
非打ち切りの個数	33
右側打ち切りの個数	132

## 散布図

レポートウィンドウの冒頭に故障時間と説明変数の散布図が表示されます。「DevAlt.jmp」サンプルデータの例では、「時間」と「温度」の散布図が表示されます。表4.2は、レポートウィンドウの「散布図」で各種の故障がどのように表示されるかを示しています。図上のマーカーを大きくするには、図を右クリックして[マーカーサイズ]を選択し、リストに表示されるマーカーサイズで大きいものを選択してください。

図4.6 「時間」と「温度」の散布図

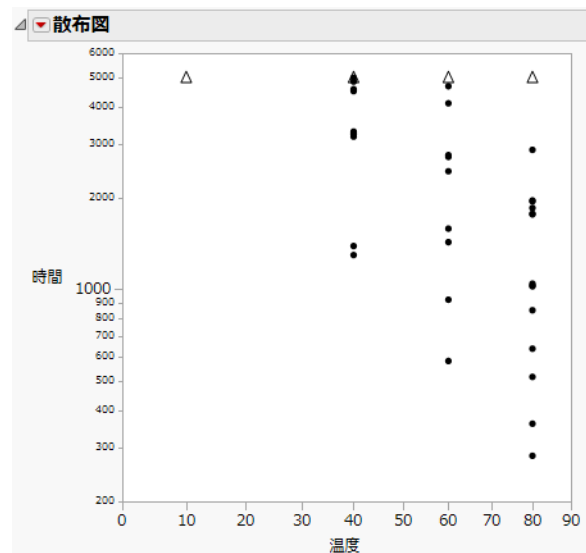


表4.2 散布図における故障データと打ち切りデータの表示

イベント	散布図上の表示
故障	点
右側打ち切り	上向きの三角
左側打ち切り	下向きの三角
区間打ち切り	下向きの三角と上向きの三角を実線でつないだもの

## 「散布図」のオプション

「散布図」の赤い三角ボタンをクリックすると、次のオプションが表示されます。

**密度曲線の追加** 加速因子の任意の値における密度曲線を、1つずつ追加できます。曲線が追加された後で表示されるチェックボックスを使用して、さまざまな確率分布を選択できます。

**密度曲線の削除** これまでに入力した密度曲線の値が表示されます。適切なチェックボックスにチェックを入れると、該当する曲線が削除されます。

**密度曲線の表示** 密度曲線を表示します。起動ウィンドウで【位置】または【位置と尺度】の関係を選択した場合、または【包含モデルの検定】をオンにした場合は、説明変数の全水準に対して密度曲線が表示されます。密度曲線をいったん描画した後は、【密度曲線の表示】で曲線の表示／非表示を切り替えることができます。

**分位点曲線の追加** 分位点曲線を3つずつ指定します。分位点曲線をさらに追加するには、再度【分位点曲線の追加】を選択します。デフォルトの分位点の値は、0.1、0.5、0.9です。欠測値など、無効な値は無視されます。必要なら、分位点の値を1つだけ入力し、残りのテキストボックスを空白にしてもかまいません。

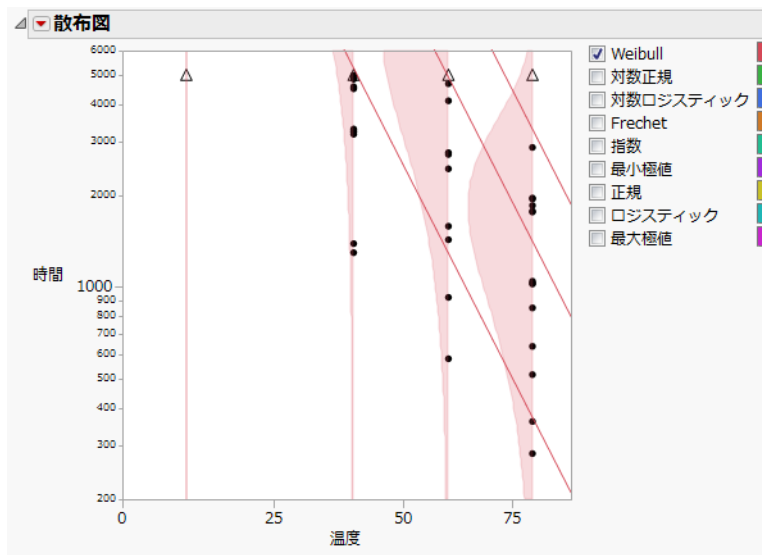
**分位点曲線の削除** これまでに入力した分位点の値が表示されます。適切なチェックボックスにチェックを入れると、該当する曲線が削除されます。

**軸の転置** X軸とY軸を入れ替えます。

**変換スケールの使用** デフォルトの散布図では、変換式に対応したスケールが使われています。このオプションを選択すると、水平軸のスケールが線形と非線形の間で切り替わります。

図4.6は、初期状態の散布図です。図4.7は、【密度曲線の表示】と【分位点曲線の追加】を選択した後の散布図です。密度曲線と分位点曲線はWeibull分布のもので、密度曲線は「温度」の水準ごとに描かれています。他の分布の密度曲線や分位点曲線を表示することもできます。確率分布名の左隣にあるチェックボックスをオンにして選択すると、その確率分布の曲線が散布図に追加されます。1つずつ選択しても、同時に複数を選択してもかまいません。

図4.7 密度曲線と分位点曲線のオプションを指定した後の散布図



## ノンパラメトリック

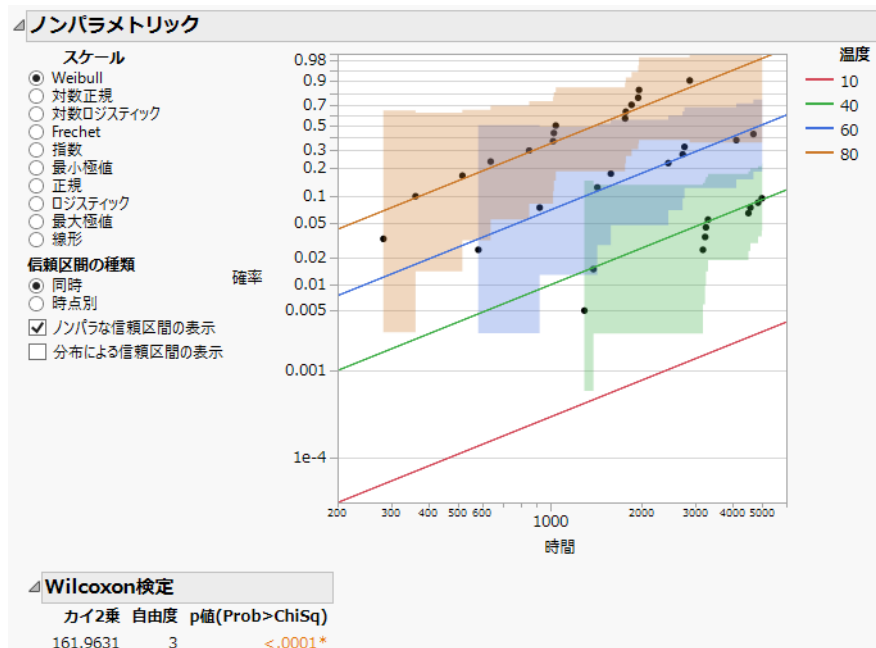
散布図の下には、ノンパラメトリックな累積分布関数を重ね合わせて描いたプロット（「ノンパラメトリック」プロット）が表示されます。このプロットでは、グループ間の違いを視覚的に見ることができます。「Devault.jp」サンプルデータの場合、「時間」の違いを検討するために、さまざまなスケールを指定できます。また、確率プロットのノンパラメトリック推定に対する信頼区間の種類として、[同時] と [時点別] のいずれかを選択できます（この結果は [ノンパラな信頼区間の表示] がオンの場合に表示されます）。さらに、[分布による信頼区間の表示] と [ノンパラな信頼区間の表示] のいずれかを選択できます。

「時点別」信頼区間は、時点ごとに計算した95%信頼区間をプロットに表示します。一方、「同時」信頼区間は、すべての時点を考慮した同時信頼区間をプロットに表示します。寿命分析における時点別信頼区間および同時信頼区間、そして同時信頼区間の意味についてはMeeker and Escobar (1998, ch. 3) を参照してください。

## Wilcoxon 検定

この例の「Wilcoxon 検定」(図4.8) は、統計的に有意であり、いずれかのグループの確率分布は他のグループのものと何らかの違いがあることを示しています。この例ではカイ2乗値が大きく、 $p$  値が小さいですが、「ノンパラメトリック」プロットにおいても「温度」間で差があることが視覚的に分かります。

図4.8 「Deval.jmp」の「ノンパラメトリック」プロットと「Wilcoxon検定」



## 比較

「比較」レポートセクション（図4.9）には、「ノンパラメトリック」重ね合わせプロットのセクションで選択した分布の各種プロファイルが表示されます。次のタブがあります。

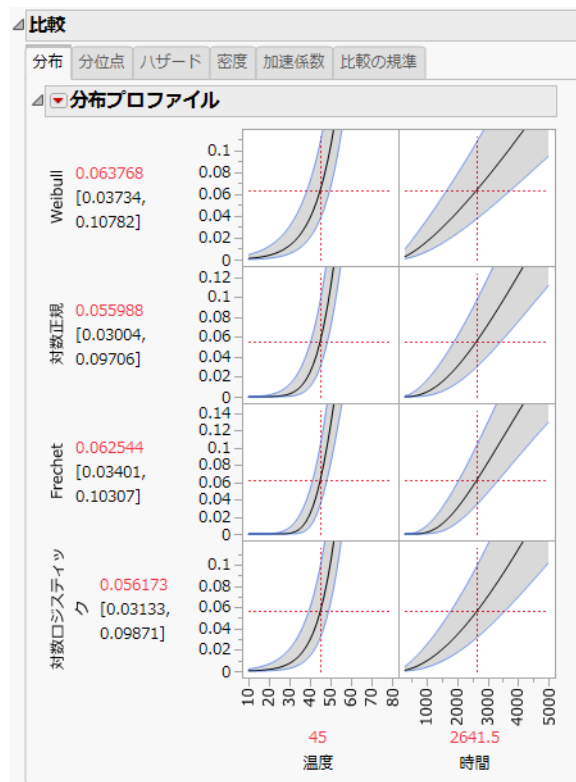
- 分布
- 分位点
- ハザード
- 密度
- 加速係数
- 比較の規準

ある確率分布のプロファイルを表示するには、「ノンパラメトリック」セクションで、その確率分布のチェックボックスをオンにします。

## プロファイル

最初の5つのタブには、選択した確率分布のプロファイルが表示されています。最初の4つのプロファイルに表示される曲線は、それぞれ故障時間と説明変数に対応しています。なお、[加速係数] タブの曲線は、加速因子（説明変数）だけの関数です。図4.9は、Weibull・対数正規・Fréchet・対数ロジスティックの各確率分布に対する「分布プロファイル」です。

図4.9 分布プロファイル

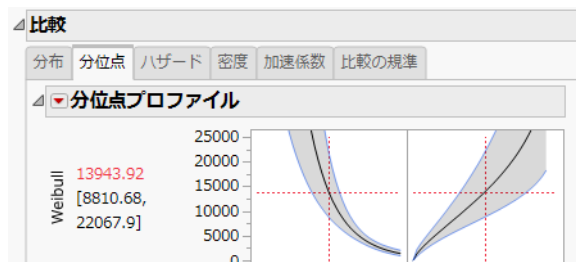


「分位点」・「ハザード」・「密度」の各タブにも同様の結果が表示されます。「分布プロファイル」・「分位点プロファイル」・「ハザードプロファイル」・「密度プロファイル」・「加速係数プロファイル」は、他のプラットフォームで作成される予測プロファイルと似ています。たとえば、「温度」と「時間」の縦の線をドラッグすれば、温度と時間を変更したときの分布の値の変化を調べることができます。予測プロファイルについては、『プロファイル機能』の「プロファイル」章に詳しい説明があります。

## 分位点

「分位点プロファイル」は、故障時間を外挿するのに役立ちます。データに Weibull 分布をあてはめた場合を考えてみましょう。図4.11の Weibull 分布の加速係数プロファイルを見ると、使用条件の温度が10℃のときの45℃における加速係数は17.18683であることがわかります。【分位点】タブを選択して、Weibull 分布の「分布プロファイル」を表示します。プロットでは、確率が0.5になる位置に縦線があります。図4.10では、確率が0.5に設定されており、45℃における故障確率0.5の分位点は、13849.01時間であることがわかります。これらのことから、温度が10℃の場合、ユニットのうち50パーセントが故障する時間は、 $13849.01 \times 17.18683 = \text{約} 238021$ 時間であると推定できます。

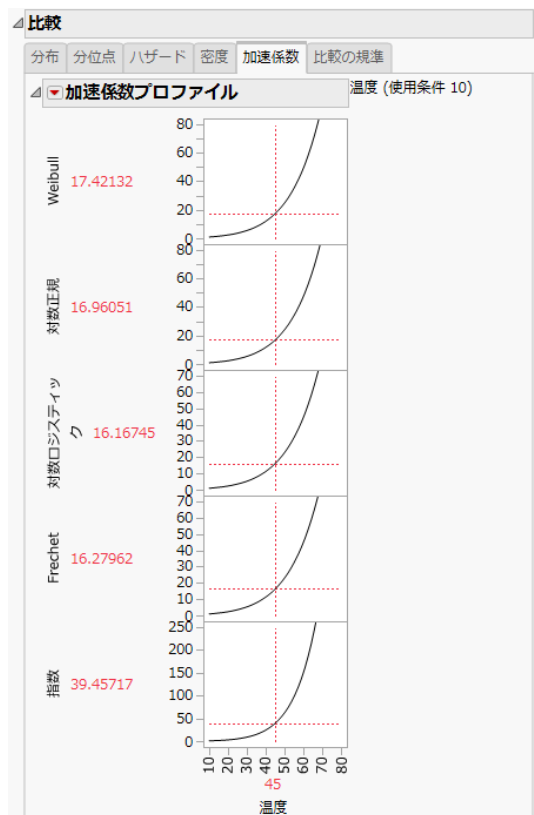
図4.10 「Devait.jmp」のWeibull分布の分位点プロファイル



### 加速係数

【加速係数】タブを選択すると、あてはめたすべての確率分布において、故障時間に対する「加速係数プロファイル」が表示されます。図4.11を表示するには、「寿命の二変量」の赤い三角ボタンのメニューから【すべての分布のあてはめ】を選択します。加速係数を求めるときの説明変数の使用条件の値を変更するには、「寿命の二変量」の赤い三角ボタンのメニューから【使用条件の設定】を選択して、任意の値を入力します。説明変数と使用条件の値は、「加速係数プロファイル」というタイトルの横に表示されます。

図4.11 「Devait.jmp」の加速係数プロファイル



加速係数プロファイルでの数値をもとに、パラメトリックな分布を仮定した場合の、使用条件と比較したときの加速試験条件での故障時間を算出することができます。「加速係数」は、多くの場合、使用条件における  $p$  パーセント点と加速試験条件における  $p$  パーセント点の比です。対数正規分布・Weibull 分布・対数ロジスティック分布・Fréchet 分布において、加速因子のどの水準でも尺度パラメータが同じである場合に、このような関係が成立します。確率分布についての詳細は、「寿命の一変量」章の「[確率分布](#)」(79 ページ) を参照してください。

**メモ:** 説明変数が離散値を取る場合や離散変数として扱われた場合、または、カスタマイズした計算式によって一定でない尺度パラメータが指定された場合、または、分布として正規分布・最小極値分布・ロジスティック分布・最大極値分布が指定された場合には、加速係数プロファイルは表示されません。

## 比較の規準

[**比較の規準**] タブには、あてはめた分布に対して、(-2)\* 対数尤度・AICc・BIC の各規準が表示されます。図 4.12 に、Weibull・対数正規・対数ロジスティック・Fréchet の各分布に対する結果を示します。データへのあてはまりの良い分布が「比較の規準」表の一番上に表示されます(「AICc」を基準に並べ替えられます)。

図 4.12 分析レポートの「比較の規準」タブ

比較				
分布	分位点	ハザード	密度	加速係数
比較の規準				
分布	(-2)*対数尤度	AICc	BIC	
対数正規	643.40556	649.55462	658.72339	
対数ロジスティック	644.17962	650.32868	659.49745	
Weibull	647.23742	653.38649	662.55526	
Frechet	647.56676	653.71583	662.88460	

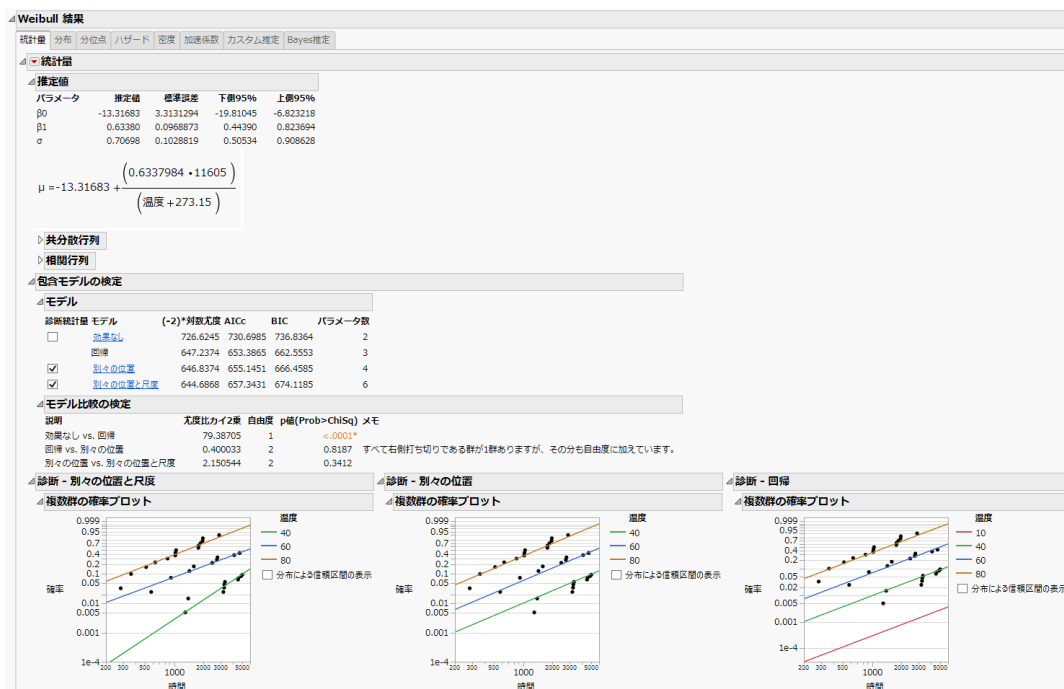
このレポートを見ると、対数正規分布と対数ロジスティック分布の規準値が小さいことから、最もよくあてはまっている分布はこれらの確率分布であると結論できます。これらの規準の詳細については、「寿命の一変量」章の「[パラメトリックな分布](#)」(80 ページ) を参照してください。

## 結果

レポートウィンドウの「結果」セクションには、詳細な統計量と、「比較」レポートに表示されるものよりもサイズが大きな予測プロファイルが表示されます。これらの結果は、あてはめた確率分布ごとに求められます。図 4.13 は、「Devalt.jmp」の「Weibull 結果」の一部、「包含モデルの検定」、「診断」プロットを示しています。

あてはめた確率分布ごとに、統計量、診断プロット、分布・分位点・ハザード・密度・加速係数の各プロファイルが表示されます。[カスタム推定] タブでは、故障確率と分位点を推定できます。この [カスタム推定] タブでは、信頼区間の計算方法として、Wald 法、もしくは、プロファイル尤度法のいずれかを選択できます。プラットフォームの起動ウィンドウの「関係」で [Box-Cox] を選択した場合は、[感度] タブが表示されます。このタブには、相対対数尤度および B10 (寿命の 10% 分位点) の変化が Box-Cox のラムダの関数として表示されます。

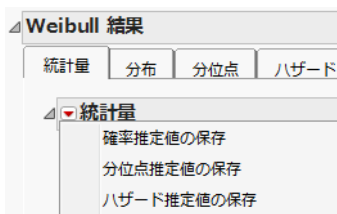
図4.13 「Devait.jmp」データのWeibull分布に対する「包含モデルの検定」



## 統計量

パラメトリックな分布ごとに「統計量」セクションがあり、パラメータ推定値・共分散行列・信頼区間・要約統計量・診断プロットが表示されます。確率推定値・分位点推定値・密度推定値を保存するには、パラメトリックな各分布の「統計量」タイトルバーの赤い三角ボタンをクリックし、該当するオプションを選択します。推定値と、対応する信頼限界が、データテーブルの列に保存されます。図4.14に、それらを保存するオプションのメニューを示します。

図4.14 パラメトリックな分布の保存オプション



## 包含モデルの検定

プラットフォームの起動ウィンドウで「包含モデルの検定」チェックボックスをオンにした場合は、「包含モデルの検定」セクションが表示されます。「包含モデルの検定」には次のモデルの統計量と診断プロットが表示されます。

**別々の位置と尺度** 位置パラメータと尺度パラメータが加速因子（説明変数）の全水準で異なると仮定したモデルで、加速因子の水準ごとに分布をあてはめるのと同じです。「別々の位置と尺度」モデルには、複数の位置パラメータと複数の尺度パラメータが含まれます。図4.15を参照してください。

**別々の位置** 位置パラメータは加速因子の全水準で異なるが、尺度パラメータは同じであると仮定したモデルです。「別々の位置」モデルには、位置パラメータが複数、尺度パラメータが1つ含まれます。図4.16を参照してください。

**回帰** 「寿命の二変量」レポートウィンドウに表示されるデフォルトのモデルです。図4.17を参照してください。

**効果なし** 加速因子が故障時間に影響を与えないものと仮定したモデルで、すべてのデータに対して、同じ1つの分布をあてはめたのと同じです。「効果なし」モデルには、位置パラメータが1つ、尺度パラメータが1つ含まれます。図4.18を参照してください。

デフォルトでは、「別々の位置と尺度」、「別々の位置」、「回帰」の結果が表示されます。「回帰」パラメータ推定値と位置パラメータの計算式が「推定値」セクションの下にデフォルトで表示されます。「効果なし」のモデル（加速因子がまったく影響していないモデル）に対する診断プロットを表示するには、「包含モデルの検定」のタイトルの下にある「効果なし」のチェックボックスをオンにします。

各モデルの結果を個別に表示するには、「包含モデルの検定」の下で目的のモデルの下線付きの名前をクリックし、他のモデルのチェックボックスをオフにします。

起動ウィンドウで「包含モデルの検定」チェックボックスをオフにした場合は、「別々の位置と尺度」モデルと「別々の位置」モデルは評価されません。この場合、回帰モデルの推定値と、回帰モデルに対する「Cox-Snell 残差 P-P プロット」だけが表示されます。

---

**メモ:** 図4.15や図4.16の場合のように、「別々の位置と尺度」モデルあるいは「別々の位置」モデルでWeibull分布を仮定した場合、Weibull分布のパラメータも「推定値」表に示されます。Weibull分布のパラメータについての詳細は、「生存時間分析」章の「Weibull分布」（335ページ）を参照してください。

---

## 診断統計量

「複数群の確率プロット」（図4.13）では、各群（各グループ）に対する確率分布の仮定を検証することができます。各群の直線が、それに属する群の点を通っていない場合は、確率分布や関係式の仮定が妥当でない可能性があります。診断プロットは横に並べて表示されるので、各モデルの妥当性を視覚的に比較できます。「複数群の確率プロット」については、Meeker and Escobar（1998, sec. 19.2.2）を参照してください。「各複数群の確率プロット」には、凡例の下に、塗りつぶされたパラメトリックな信頼区間の表示／非表示を切り替えるオプションがあります。

「Cox-Snell 残差 P-P プロット」でも、モデルの仮定をチェックすることができます。データ点が対角線から大きく逸れている場合は、モデルの仮定が満たされていない可能性があります。「Cox-Snell 残差 P-P プロット」の赤い三角ボタンのメニューには「残差の保存」というオプションがあり、これを使用して残差データをデータテーブルに保存することもできます。Cox-Snell 残差については、Meeker and Escobar（1998, sec. 17.6.1）を参照してください。

図4.15 「Devait.jmp」データにあてはめた Weibull 分布の「別々の位置と尺度」モデル

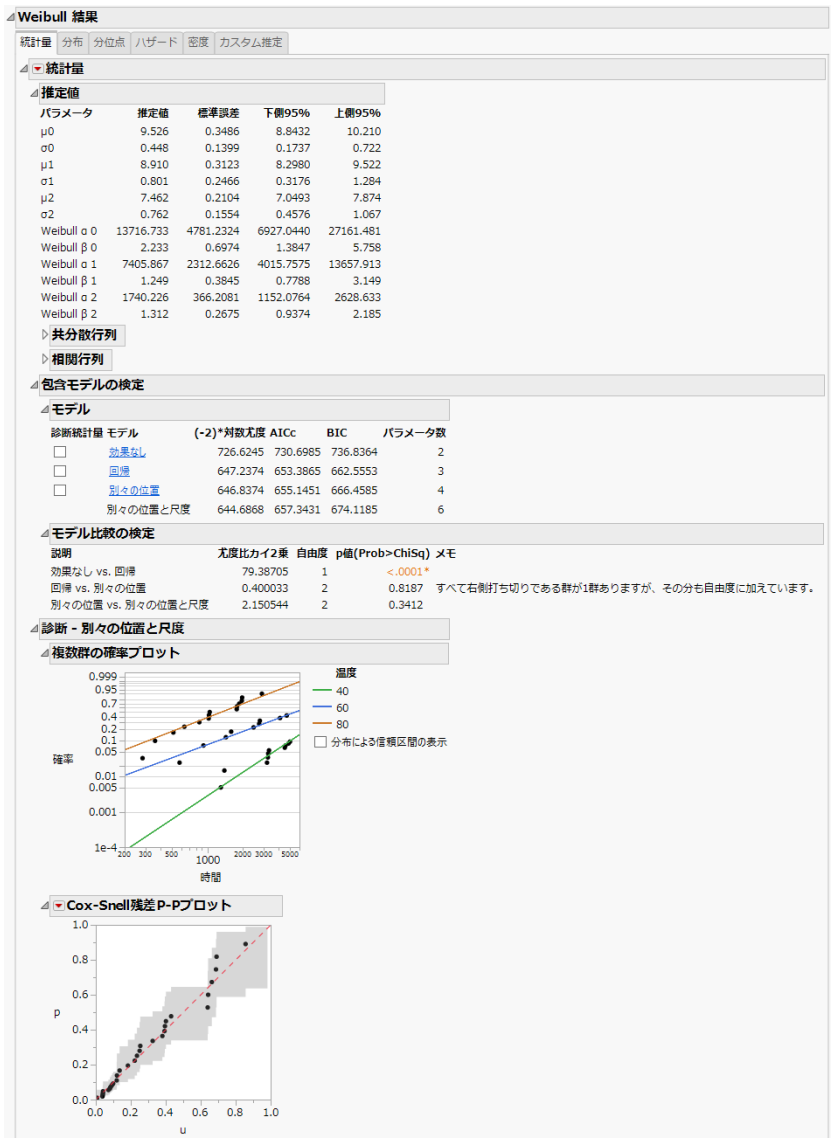


図4.16 「Devait.jmp」データにあてはめたWeibull分布の「別々の位置」モデル

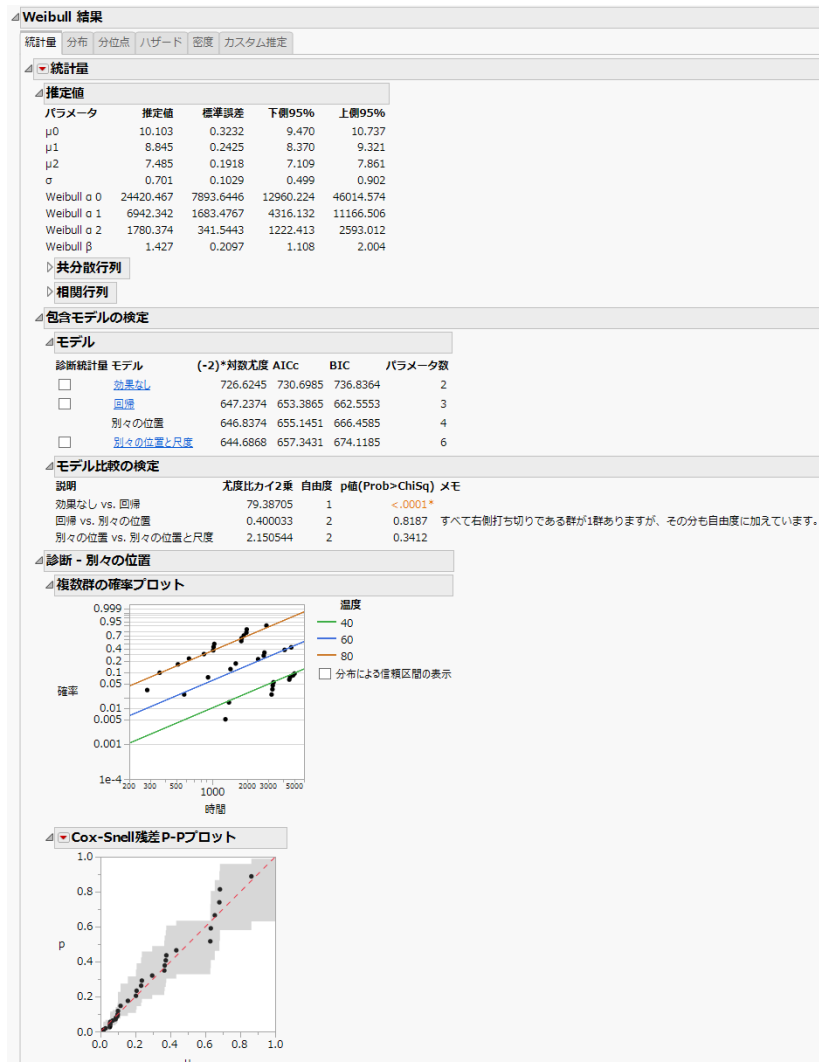


図4.17 「Devait.jmp」データにあてはめたWeibull分布の「回帰」モデル

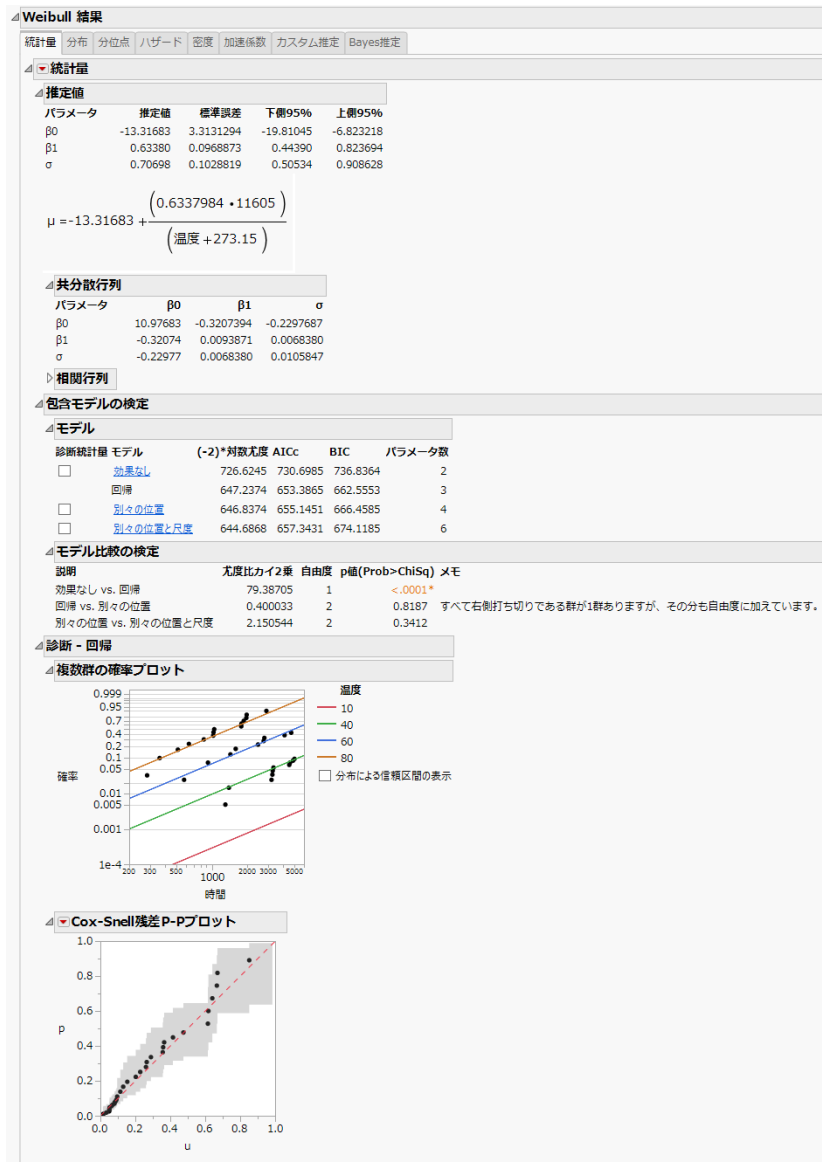


図4.18 「Devait.jmp」データにあてはめたWeibull分布の「効果なし」モデル

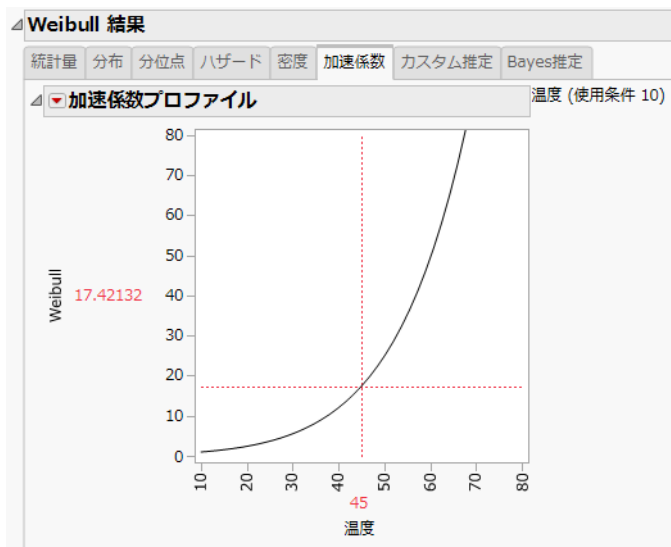


## プロファイルと曲面プロット

「寿命の二変量」レポートウィンドウには、統計量の要約と診断プロットに加え、各確率分布のプロファイルと曲面プロットも表示されます。Weibull分布の累積分布関数について、加速因子に対するプロファイルを見るには、「Weibull 結果」の「分布」タブをクリックします。また、曲面プロットを見るには、(プロファイルの下)「Weibull」タイトルの左隣にある開閉ボタンをクリックします。プロファイルと曲面プロットは、他のプラットフォームにあるものと同じように機能します。『プロファイル機能』の「プロファイル」章および「曲面プロット」章を参照してください。

レポートウィンドウには[加速係数]というタブもあります。[加速係数]タブをクリックすると、「加速係数プロファイル」が表示されます。このグラフは、「比較」セクションの[加速係数]タブに表示されているグラフを大きくしただけです。図4.19は、「Devault.jmp」サンプルデータに対して、Weibull分布をあてはめたときの「加速係数プロファイル」です。加速係数を求めるときに使われる加速因子（説明変数）の使用条件は、「寿命の二変量」の赤い三角ボタンのメニューにある[使用条件の設定]で変更することができます。

図4.19 「Devault.jmp」におけるWeibull分布の加速係数プロファイル



## カスタム推定

各パラメトリック分布には、「分位点の推定」と「確率の推定」の2つのレポートを含む「カスタム推定」セクションがあります。「分位点の推定」レポートでは、特定の故障確率に対して、分位点の推定値を計算します。「確率の推定」レポートでは、特定の時間値（分位点）に対して、故障確率と生存確率の推定値を計算します。各分位点の推定には、Wald法に基づく信頼区間と尤度に基づく信頼区間の両方が用いられます。これらの信頼区間の信頼水準は、「寿命の二変量」の赤い三角ボタンメニューの[信頼水準の変更]オプションを使って変更できます。

### 分位点の推定

「分位点の推定」を行うには、「確率」と加速因子（説明変数）の値を入力します。**Enter**キーを押すと、分位点とその信頼区間が表示されます。複数の分位点の推定値を計算したい場合には、プラス記号をクリックします。新しいボックスが表示されるので、そこに確率や加速因子の値を入力して**Enter**キーを押します。最後の入力を削除するにはマイナス記号をクリックします。いずれかの列に複数の値を入力すると、表には「確率」の値と加速因子の値のすべての組み合わせが含まれます。

デフォルトではWald法に基づいた信頼区間が表示されます。「信頼区間の種類」アウトラインの「尤度信頼区間」をクリックすると、尤度に基づく信頼区間に切り替わります。

## 確率の推定

「分位点の推定」を行うには、「時間」と加速因子の値を入力します。**Enter**を押すと、故障確率の推定値とその信頼区間が表示されます。複数の故障確率の推定値を計算したい場合には、プラス記号をクリックします。新しいボックスが表示されるので、そこに「時間」や加速因子の値を入力して**Enter**キーを押します。最後の入力を削除するにはマイナス記号をクリックします。いずれかの列に複数の値を入力すると、表には「時間」の値と加速因子のすべての組み合わせが含まれます。

デフォルトではWald法に基づいた信頼区間が表示されます。「信頼区間の種類」アウトラインの「**尤度信頼区間**」をクリックすると、尤度に基づく信頼区間に切り替わります。

## Bayes推定

指数分布以外のパラメトリックな分布においては、Bayes推定を実行するための「Bayes推定」のセクションが用意されています。もし、「寿命の二変量」の起動ウインドウにおける関係が起動ダイアログにおいて「カスタム」・「効果なし」・「位置」・「位置と尺度」を選択した場合は、「Bayes推定」のセクションは利用できません。

「寿命の二変量」プラットフォームでのBayes推定には、Markov連鎖モンテカルロ(MCMC; Markov Chain Monte Carlo) アルゴリズムが使われています。ここで使われているMCMCアルゴリズムは、独立連鎖サンプラーを用いたMetropolis-Hastings法です。Robert and Casella (2004) を参照してください。

レポートは最初、コントロールパネルになっているので、そこでパラメータの事前分布や乱数シミュレーションに関するオプションを指定します。パラメータの事後分布を得るには、事前分布を指定し、シミュレーションに関するオプションを指定してから、[モデルのあてはめ] をクリックします。

パラメータの事前分布を指定するには、確率分布の分位点、傾き $\beta_1$ 、および尺度パラメータ $\sigma$ に関数する情報を指定する必要があります。(Weibull分布の場合は、尺度 $\sigma$ ではなくWeibull $\beta$ を指定します。) 分位点は、累積確率と加速因子の値という、2つの数値によって定義されます。デフォルトの「確率」の値は0.10ですが、関心のある分位点に変更できます。仮定する事前分布を決めるには、事前分布範囲についての情報を指定します。事前分布が「正規」分布と「対数正規」分布の場合、「99% 下限」と「99% 上限」という範囲で事前分布を指定されます。事前分布が「一様」分布と「対数一様」分布の場合、「下限」と「上限」という範囲で事前分布を指定します。詳細については、Meeker and Escobar (1998) を参照してください。初めに設定されているデフォルト値は、レポートの「統計量」セクションの最尤推定値に対応した値になっています。

事前分布を指定するオプションの下に、以下のシミュレーションに関するオプションが表示されます。

**モンテカルロ反復数** バーンイン (burn-in) を行った後に、事後分布から生成する標本サイズを指定します。

**乱数シード値** シミュレーションにおいて用いる乱数のシード値を設定します。デフォルトでは、現在の時刻に設定されています。この値は、1より大きい正の整数でなければなりません。1を指定すると、現在の時刻が使用されます。

### Bayes 推定 - 結果 <N> レポート

事前分布とシミュレーションに関するオプションを指定したら【モデルのあてはめ】をクリックしてシミュレーションを実行します。指定された事前分布に基づいて、それぞれのシミュレーションに対して「Bayes 推定 - 結果 <N>」レポートが作成されます。このレポートには次のような見出しがあります。

**事前確率** シミュレーションを実行するために「Bayes 推定」レポートに入力した事前分布の設定が表示されています。また、ここでは乱数シード値も表示されています。

**事後推定値**  $\beta_0$ 、 $\beta_1$ 、 $\sigma$  と分位点の事後分布に関して、周辺分布に関する5つの統計量と、同時分布に関する1つの統計量が表示されます。モンテカルロ標本から計算された周辺分布に関する統計量は、「中央値」・「下側境界」（2.5 パーセント点）・「上側境界」（97.5 パーセント点）・「平均」・「標準偏差」です。「同時最高事後密度」の下に表示されているパラメータ値は、同時事後密度が最高になるパラメータ値です。Weibull 分布が指定されている場合、この表には  $\sigma$  の代わりに Weibull  $\beta$  の事後推定値が含まれます。

分布パラメータの事後分布におけるその他のさまざまな統計量を自分で計算するには、[モンテカルロ標本データの作成] をクリックしてください。

**事後分布の散布図** モンテカルロシミュレーションによる2つの散布図を示します。左の散布プロットは、「事前確率」セクションにおいて事前分布を指定したパラメータについての事後分布を描いています。右の散布プロットは、「事後推定値」セクションで表示されているパラメータについての事後分布を描いています。

**プロファイル** 事後分布からの標本に基づく2つのプロファイルを表示します。プロファイルに表示される値は、加速因子および「時間」変数の指定された値で次のように計算されます：

- － 事後分布からのサンプリングされたパラメータ値の各セットについて、累積分布関数および分位関数の値が、加速因子および「時間」変数の指定された値で計算されます。
- － 累積分布関数と分位関数の予測値は、それらの計算された値の中央値です。
- － 上側信頼限界と下側信頼限界は、それらの計算された値の2.5 パーセント点と97.5 パーセント点です。これらの信頼区間（信用区間）の信頼水準は、「寿命の二変量」の赤い三角ボタンメニューの【**信頼水準の変更**】オプションを使って変更できます。

**分布プロファイル** パラメトリックな確率分布の累積分布関数を、加速因子と「時間」の関数として示します。

**「分位点」プロファイル** パラメトリックな確率分布の分位点関数を、加速因子と累積確率の関数として示します。

### Bayes 推定 - 結果 <N> オプション

「Bayes 推定 - 結果 <N>」の赤い三角ボタンをクリックすると、次のようなオプションが表示されます。

**削除** 「寿命の二変量」レポートから現在の「Bayes 推定」のレポートを削除します。

**モンテカルロ標本データの作成** モンテカルロシミュレーションの結果を新しいデータテーブルに保存します。このデータテーブルは事後分布に関する統計量を自分で計算するのに用いることができます。

## カスタム関係式

加速因子と故障時間との関係を表す変換式を自分自身で定義してモデル化したい場合は、起動ウィンドウの「関係」にあるドロップダウンリストから、**カスタム**を選択します。この**カスタム**オプションは、起動ウィンドウの「関係」にあるリストから選択します。**カスタム**の関係式を指定するには、位置パラメータ( $\mu$ )と尺度パラメータ( $\sigma$ )の入力フィールドに、列をカンマ区切りで指定します。「Devalit.jmp」のサンプルデータの例では、たとえば、 $\mu$ に「1, log(:温度), log(:温度)^2」、 $\sigma$ に「1, log(:温度)」などと指定できます。ここで、1は、モデルに切片が含まれることを示します。**指数関数を使用** チェックボックスをオンにすると、 $\sigma$ パラメータが常に正になるように設定できます。

図4.20 「寿命の二変量」起動ウィンドウでの**カスタム**関係の指定

[OK] をクリックした後、位置と尺度に対して指定した変換式をもつモデルがあてはめられ、その変換式が「推定値」レポートセクションの下部に表示されます。

図 4.21 [カスタム] 関係を指定した場合の Weibull 分布の推定値と計算式

推定値				
パラメータ	推定値	標準誤差	下側95%	上側95%
β0	-0.603333	9.9924940	-20.18826	18.98160
β1	8.047095	4.8377341	-1.43469	17.52888
β2	-1.412340	0.5989816	-2.58632	-0.23836
λ0	-2.317331	2.0821317	-6.39823	1.76357
λ1	0.474054	0.5015868	-0.50904	1.45715

$$\mu = -0.6033328 + 8.047095 \cdot \text{Log}(\text{温度}) + -1.41234 \cdot \text{Log}(\text{温度})^2$$
$$\sigma = \text{Exp}\left(-2.317331 + 0.4740541 \cdot \text{Log}(\text{温度})\right)$$

カスタム変換式の作成例については、「[カスタム関係式の例](#)」(127 ページ) を参照してください。分析結果の解釈などは、「関係」で [Arrhenius 摂氏] を選択した「[「寿命の二変量」プラットフォームの例](#)」(101 ページ) と同じように行ってください。

## 「寿命の二変量」プラットフォームのオプション

レポートウィンドウで「寿命の二変量」の赤い三角ボタンをクリックすると、次のオプションがメニューに表示されます。

**対数正規のあてはめ** データに対数正規分布をあてはめます。

**Weibull のあてはめ** データに Weibull 分布をあてはめます。

**対数ロジスティックのあてはめ** データに対数ロジスティック分布をあてはめます。

**Fréchet のあてはめ** データに Fréchet 分布をあてはめます。

**指数のあてはめ** データに指数分布をあてはめます。

**最小極値のあてはめ** データに最小極値分布をあてはめます。

**正規のあてはめ** データに正規分布をあてはめます。

**ロジスティックのあてはめ** データにロジスティック分布をあてはめます。

**最大極値のあてはめ** データに最大極値分布をあてはめます。

**すべての分布のあてはめ** データに、上記の分布をすべてあてはめます。

**使用条件の設定** 加速係数を求める際の説明変数の使用条件の値を入力するダイアログが開きます。

**信頼水準の変更** プロットと統計量に使用する信頼水準を入力するためのダイアログが開きます。デフォルトの信頼水準は0.95です。

**タブ形式で結果を表示** レポートウィンドウの表示形式を変更することができます。オプションは、[レポート全体をタブ形式に]と[個別のレポートをタブ形式に]の2つです。デフォルトでは、[個別のレポートをタブ形式に]がオンになっています。いずれか片方または両方を選択するか、どちらも選択しなくてもかまいません。

**曲面プロットの表示** レポートにある各確率分布のセクションで、曲面プロットの表示／非表示を切り替えます。曲面プロットは、デフォルトでオンになっており、「分布」・「分位点」・「ハザード」・「密度」セクションにおいて確率分布ごとに描かれています。

**点の表示** 「ノンパラメトリック」プロットと「複数群の確率プロット」上でデータ点の表示／非表示を切り替えます。デフォルトではデータ点が表示されています。このオプションをオフにすると、データ点の代わりにステップ関数が表示されます。

**散布図** 故障時間と加速因子（説明変数）の散布図を表示します。

以下のオプションについて詳しくは、『JMPの使用法』の「JMPのレポート」章を参照してください。

**ローカルデータフィルタ** 現在のレポートにおいて、データをフィルタリングするローカルデータフィルタの表示／非表示を切り替えます。

**やり直し** 分析を繰り返したり、やり直したりするオプションを含みます。また、[自動再計算] オプションに対応しているプラットフォームにおいては、[自動再計算] オプションを選択すると、データテーブルに加えた変更が、該当するレポートに即座に反映されるようになります。

**スクリプトの保存** レポートを再現するためのスクリプトを保存するオプションが、保存先ごとに用意されています。

**By グループのスクリプトを保存** By 変数の全水準に対するレポートを再現するためのスクリプトを保存するオプションが、保存先ごとに用意されています。起動ウィンドウでBy 変数を指定した場合のみ使用可能です。

---

## 「寿命の二変量」プラットフォームの別例

- [「コンデンサの加速寿命試験」](#)
- [「カスタム関係式の例」](#)

## コンデンサの加速寿命試験

この例では、サンプルデータフォルダ内の「Reliability」フォルダにある「Capacitor ALT.jmp」を使用します。これは、仮想的な信頼性試験データで、3水準の温度に対して故障数と打ち切り数を乱数シミュレーションしたものです。データは、摂氏85度・105度・125度の温度で、右側打ち切りで試験したものになっています。

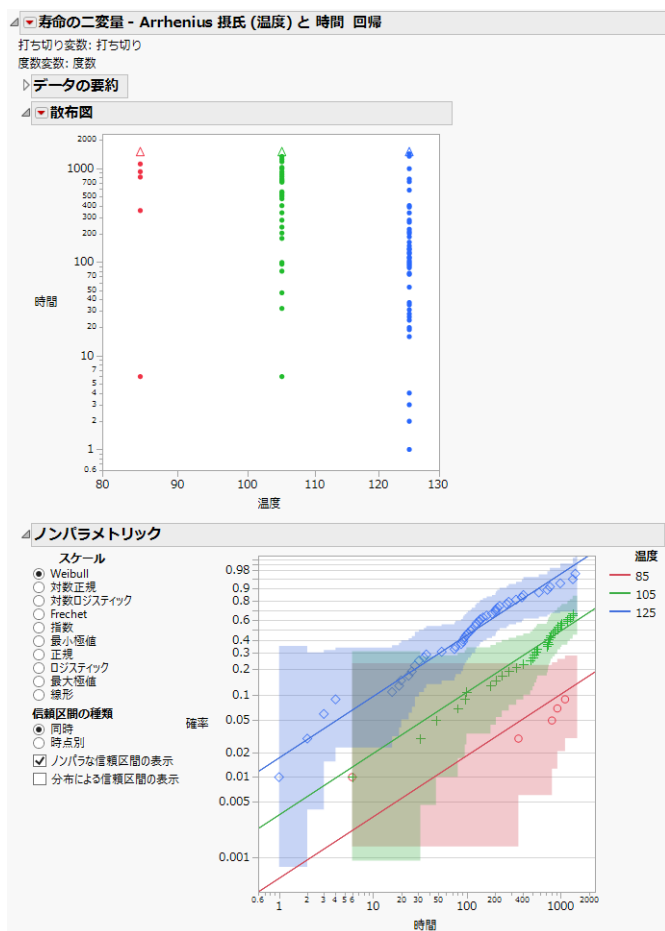
1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「Capacitor ALT.jmp」を開きます。
  2. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [寿命の二変量] を選択します。
  3. 「時間」を [Y, イベントまでの時間] に指定します。
  4. 「温度」を [X] に指定します。
  5. 「打ち切り」を [打ち切り] に指定します。
  6. 「打ち切りの値」は [1] をそのまま使います。
  7. 「度数」を [度数] に指定します。
  8. 「関係」ドロップダウンリストで [Arrhenius 摂氏] が選択され、[包含モデルの検定] チェックボックスがオンになっていることを確認します。
  9. 「分布」のドロップダウンリストから [Weibull] を選びます。
  10. 「信頼区間の方法」は [Wald] のままにしておきます。
- 設定後の起動ウィンドウは図4.22のようになります。

図4.22 「寿命の二変量」起動ウィンドウ

11. [OK] をクリックします。

図4.23には、「寿命の二変量」レポートウィンドウの上半分が表示されています。

図 4.23 「Capacitor ALT.jmp」データの「寿命の二変量」レポートウィンドウ



レポートウィンドウには、データの要約情報・診断プロット・モデルの比較結果・パラメータ推定値・プロファイルなどが表示されます。また、あてはめた確率分布ごとに、推定値などの結果や、「分布」・「分位点」・「ハザード」・「密度」・「加速係数」のプロファイルが表示されます。

## カスタム関係式の例

Weibull分布において、位置パラメータが温度の対数値の2次関数、尺度パラメータが温度の対数値の1次関数で表されるモデルを作成してみましょう。

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「Devault.jmp」を開きます。
2. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [寿命の二変量] を選択します。
3. 「時間」を選択し、[Y, イベントまでの時間] をクリックします。
4. 「温度」を [X] に指定します。

5. 「打ち切りの有無」を[打ち切り]に指定します。
6. 「重み」を[度数]に指定します。
7. 「関係」のリストから[カスタム]を選択します。
8. 「 $\mu$ 」の入力フィールドに「 $1, \log(:\text{温度}), \log(:\text{温度})^2$ 」と入力します  
(1は、モデルに切片が含まれることを示します)。
9. 「 $\sigma$ 」の入力フィールドに「 $1, \log(:\text{温度})$ 」と入力します。
10. [指数関数を使用] チェックボックスをオンにします。
11. [包含モデルの検定] のチェックボックスをオフにします。
12. 「使用条件」の入力フィールドに「10」と入力します。
13. 「分布」のドロップダウンリストから[Weibull]を選びます。

図4.24は、[カスタム] オプションを選択して設定した起動ウィンドウです。

メモ: 尺度パラメータが、水準間で一定でないモデルの場合は、[包含モデルの検定] チェックボックスはオフにしてください。「包含モデルの検定」の統計的結果は、ここで説明したカスタム変換には対応していません。

14. [OK] をクリックします。

図4.24 「寿命の二変量」起動ウィンドウでの[カスタム]関係の指定

The screenshot shows the 'Two-Variable Lifetime' software interface. On the left, under '列の選択' (Select Columns), a list of 6 columns is shown: 時間 (Time), ステータス (Status), 重み (Weight), 温度 (Temperature), 打ち切りの有無 (Censoring Status), and x. Below this, '打ち切りの値' (Censoring Value) is set to 1. The '関係' (Relationship) section shows 'カスタム' (Custom) selected in the dropdown. The '包含モデルの検定' (Include Model Test) checkbox is unchecked. The '使用条件' (Usage Condition) is set to 10. The  $\mu$  field contains the formula  $1, \log(:\text{Temp}), \log(:\text{Temp})^2$ . The  $\sigma$  field contains the formula  $1, \log(:\text{Temp})$ . The '指数関数を使用' (Use Exponential Function) checkbox is checked. The '分布' (Distribution) dropdown is set to 'Weibull'. The '信頼区間の方法' (Confidence Interval Method) dropdown is set to 'Wald'. On the right, the '選択した列に役割を割り当てる' (Assign Roles to Selected Columns) section shows a table with columns for the role and the variable. The roles assigned are: 時間 (Time) to 'Y, イベントまでの時間' (Y, Time to Event), 温度 (Temperature) to 'オプション(数値)' (Option (Numerical)), 打ち切りの有無 (Censoring Status) to '打ち切り' (Censoring), 重み (Weight) to '度数' (Frequency), and x to 'By'. The 'アクション' (Action) section on the far right contains buttons for OK, キャンセル (Cancel), 削除 (Delete), 前回の設定 (Previous Settings), and ヘルプ (Help).

図4.25を見ると、位置と尺度の変換式が作成され、「推定値」レポートセクションの下部に表示されています。

分析結果の解釈などは、「関係」で[Arrhenius 摂氏]を選択した「[「寿命の二変量」プラットフォームの例](#)」(101 ページ)と同じように行ってください。

図4.25 [カスタム] 関係を指定した場合のWeibull分布の推定値と計算式

推定値				
パラメータ	推定値	標準誤差	下側95%	上側95%
$\beta_0$	-0.603333	9.9924940	-20.18826	18.98160
$\beta_1$	8.047095	4.8377341	-1.43469	17.52888
$\beta_2$	-1.412340	0.5989816	-2.58632	-0.23836
$\lambda_0$	-2.317331	2.0821317	-6.39823	1.76357
$\lambda_1$	0.474054	0.5015868	-0.50904	1.45715

$$\mu = -0.6033328 + 8.047095 \cdot \text{Log}(\text{温度}) + -1.41234 \cdot \text{Log}(\text{温度})^2$$
  

$$\sigma = \text{Exp} \left( -2.317331 + 0.4740541 \cdot \text{Log}(\text{温度}) \right)$$



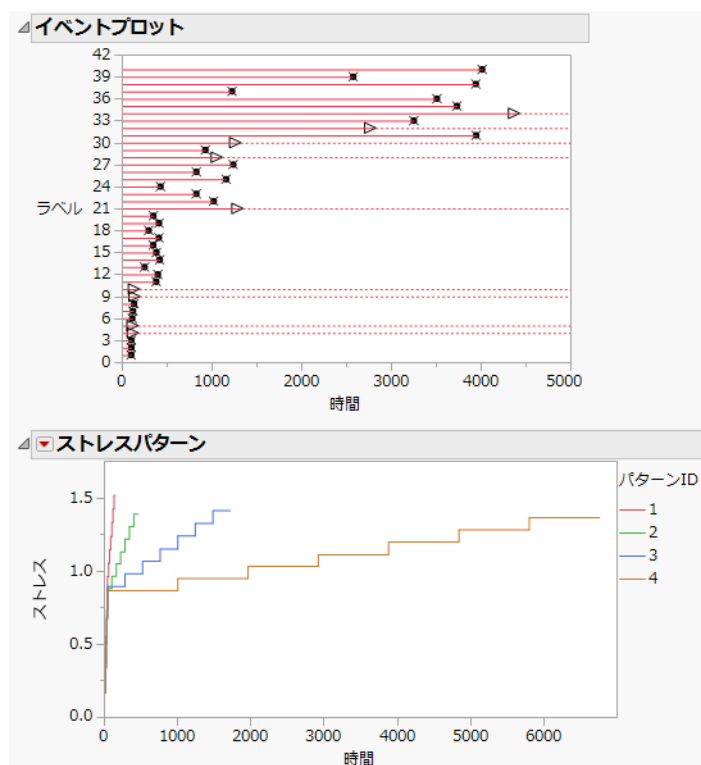
# 第5章

## 累積損傷

### 時間とともにストレスを変化させる試験の分析

「累積損傷」プラットフォームでは、ステップストレス試験（負荷を段階的に変化させる試験）などの、ストレスの大きさを時間とともに変化させる加速寿命試験を分析します。試験で与えるストレスには、荷重・温度・圧力などがあります。多くのストレス試験では、複数のユニットを試します。各ユニットに対して、ある水準のストレスから試験を始めて、試験を進めていく過程で、そのストレスの大きさを変化させます。分析対象となる応答は、故障時間（特定のイベントが生じるまでの時間）です。「累積損傷」プラットフォームでは、故障イベントをプロットしたり、複数の確率分布をあてはめたりできます。

図5.1 累積損傷レポートの例



## 目次

「累積損傷」プラットフォームの概要.....	133
「累積損傷」プラットフォームの例.....	133
「累積損傷」プラットフォームの起動.....	136
イベントまでの時間.....	138
ストレスパターン.....	139
「累積損傷」レポート.....	141
イベントプロット.....	141
「ストレスパターン」レポート.....	142
モデルリスト.....	142
モデルの結果.....	142
「累積損傷」プラットフォームのオプション.....	143
「ストレスパターン」のオプション.....	143
「累積損傷」プラットフォームの別例.....	145
新しいデータのシミュレーション例.....	145

## 「累積損傷」プラットフォームの概要

累積損傷実験 (cumulative damage experiment) は変動ストレス試験 (varying-stress experiment) とも呼ばれ、ストレスの大きさを時間とともに変化させる加速寿命試験です。試験で与えるストレスには、荷重・温度・圧力などがあります。多くのストレス試験では、複数のユニットを試します。各ユニットに対して、ある水準のストレスから試験を始めて、試験を進めていく過程で、そのストレスの大きさを変化させます。

累積損傷試験で最も一般的なものは、ステップストレス実験です。ステップストレス試験では、複数のユニットに対してストレスを段階的に変化させます。ストレスとしては、温度・圧力・電圧などが使われます。各ユニットに対して、あるストレスの水準から試験を始めて、特定の時点において、一斉にストレスの水準を変更します。その変更する時点から次の変更する時点までは、ストレスの水準を一定に保ちます。

「累積損傷」プラットフォームには、ストレスのパターンとして、ステップ関数以外にも3つのパターンが用意されています。

- ・ ランプストレス試験では、ある水準から開始して、その後、時間とともに、指定された傾きで線形にストレスを増加させていきます。
- ・ 正弦ストレス試験では、ストレス水準は正弦関数（サイン関数）で定義されたパターンで変動させます。
- ・ 区分ランプストレス試験では、ステップストレス試験と同様、ストレス水準は区間ごとに定義されます。ただし、ステップストレス試験のように時点と時点の間で一定に保つ必要はなく、始点のストレス水準から終点のストレス水準まで、時点と時点の間で線形に変化させます。始点と終点のストレス水準が同じ場合には、ステップストレスのパターンと同じになります。

変動ストレス試験やステップストレス試験のデータに対するモデルの詳細は、Nelson (2004, ch. 10) を参照してください。

## 「累積損傷」プラットフォームの例

40個の試験ユニットに対して、ストレスの条件を時間とともに変化させるステップストレス試験が行われました。この試験の目的は、0.75のストレスを与えたときに10,000分後にどれだけのユニットが故障するのか、その累積故障確率を予測することです。これらのデータテーブルは、Nelson (2004, ch. 10) のデータを参考にして作成しています。

「Reliability」フォルダにある「CD Step Stress Pattern.jmp」データテーブルには「パターンID」という列があり、ストレスに関して4つのパターンが用意されています。ストレスは、「電圧」÷「厚み」（厚みあたりの電圧）です（データテーブルにおいて、「電圧」と「厚み」は非表示になっています）。各ストレスパターン内において、「厚み」は一定ですが、「電圧」は変化させており、時間とともに増加させています。

「Reliability」フォルダ内の「CD Step Stress.jmp」データテーブルには、故障までの時間のデータが含まれています。

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「CD Step Stress.jmp」と「CD Step Stress Pattern.jmp」を開きます。

「CD Step Stress.jmp」データテーブルには故障時間のデータが含まれています。

- 「時間」列は故障時間もしくは打ち切った時間を示す。
- 「パターンID」列はストレスパターンを示す。
- 「打ち切りの有無」列は、観測された時間が、正確な故障時間か、打ち切ったときの時間なのかを示す。

データテーブルの各行は1つの試験ユニットに対応しています。

「CD Step Stress Pattern」テーブルには、ストレスに関して4つのパターン（1～4）が含まれています。「ストレス」の値は、「パターンID」列の値ごとに違うパターンになっています。「ストレスの期間」列の数値は、ストレス因子の水準を同水準に保っている期間を示しています。

2. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [累積損傷] を選択します。

起動ウィンドウには、故障時間のデータ（「イベントまでの時間」）とストレスパターンのデータ（「ストレスパターン」）の2つのセクションがあります。

3. 「イベントまでの時間」パネルの[テーブルの選択]をクリックします。

故障時間データのデータテーブルを指定するための「「イベントまでの時間」データテーブル」ウィンドウが表示されます。

4. 「CD Step Stress」を選択して[OK]をクリックします。

「イベントまでの時間」パネルの「列の選択」リストにこのデータテーブル内の列が一覧されます。

5. 「時間」を[イベントまでの時間]に指定します。

6. 「打ち切りの有無」を[打ち切り]に指定します。

7. 「パターンID」を[パターンID]に指定します。

8. 「ストレスパターン」パネルの[テーブルの選択]をクリックします。

9. 「CD Step Stress Pattern」を選択して[OK]をクリックします。

「ストレスパターン」パネルの「列の選択」リストにこのデータテーブル内の列が一覧されます。

10. 「ストレスの期間」を[ストレスの期間]に指定します。

11. 「ストレス」を[ストレス]に指定します。

12. 「パターンID」を[パターンID]に指定します。

13. [OK]をクリックします。

図5.2 イベントとストレスパターン

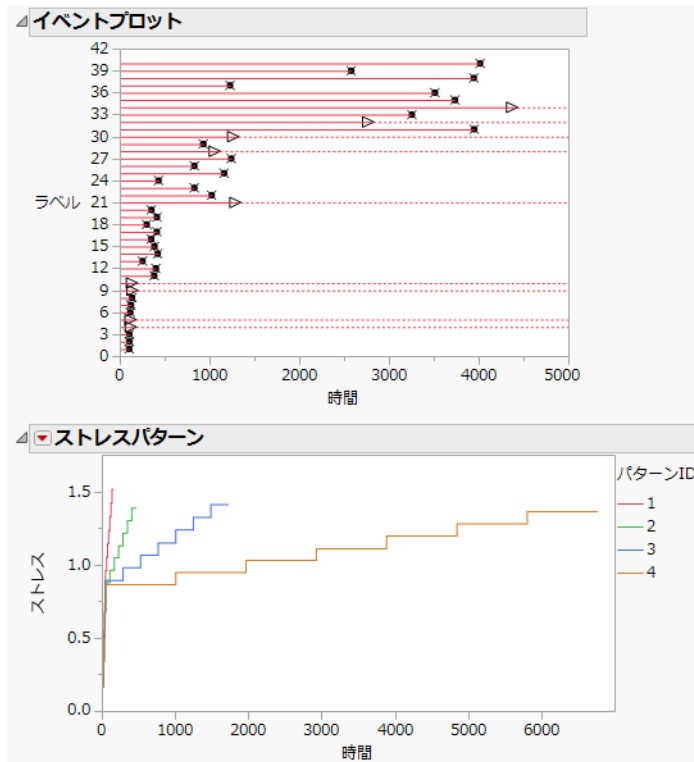


図5.2のようなレポートに、イベントプロットと、定義されたストレスパターンを描いたプロットが表示されます。4つのストレスパターンのいずれでも最初の40分でストレスを急激に増加させ、そして、40分後にはそれぞれ異なる速さで増加させています。

14. 「累積損傷」の赤い三角ボタンをクリックし、メニューから「すべてをあてはめ」を選択します。

図5.3 「モデルリスト」レポート

モデルリスト				
分布	(-2)*対数尤度	パラメータ数	AICc	BIC
指数	398.48312	2	402.80745	405.86088
Weibull	398.4822	3	405.14887	409.54884
対数ロジスティック	400.93264	3	407.59931	411.99928
対数正規	402.3488	3	409.01547	413.41544
Frechet	410.92577	3	417.59243	421.99241

図5.3は、「モデルリスト」レポートです。このレポートから、AICcおよびBICが最小である分布は指数分布であることがわかります。

15. 「結果」レポートで、「指数」レポートまでスクロールします。
16. 「分布プロファイル」レポートで、「ストレス」の現在値を0.75に設定します。

17. 「時間」の現在値を10000に設定します。

図5.4 指定された設定における指数分布の分布プロファイル

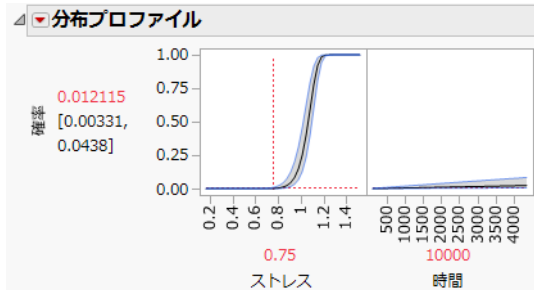


図5.4を見ると、0.75のストレスを与え続けた場合、10000分後に試験ユニットが故障する確率は0.007233と予測されます。また、その95%の信頼区間は0.00137～0.03776であることがわかります。

## 「累積損傷」プラットフォームの起動

「累積損傷」プラットフォームを起動するには、[分析] > [信頼性分析/生存時間分析] > [累積損傷] を選択します。「累積損傷」プラットフォームでは、入力元となるデータテーブルが2つが必要です。1つ目のデータテーブルは、試験対象の各ユニットについて、特定のイベントが生じるまでの時間を含んだデータです。2つ目のデータテーブルは、各ユニットに適用されたストレスパターンを定義しているデータです。

図5.5 「累積損傷」プラットフォームの起動ウィンドウ

ステップストレス ランプストレス 正弦ストレス 区分ランプストレス

イベントまでの時間

テーブルの選択

列の選択

☒ オプション

選択した列に役割を割り当てる

イベントまでの時間	必須 連続変数(数値)
	オプション 連続変数(数値)
打ち切り	オプション
度数	オプション 連続変数(数値)
パターンID	必須

打ち切りの値:

関係

逆べき乗

分布

Weibull

アクション

OK

キャンセル

削除

前回の設定

ヘルプ

ストレスパターン

テーブルの選択

列の選択

☒ オプション

選択した列に役割を割り当てる

ストレスの期間	必須 連続変数(数値)
ストレス	必須 連続変数(数値)
パターンID	必須

パターンの延長

☒ 終了する

☐ 延長する

☐ 反復する

起動ウィンドウには、ストレスの各パターンに対して個別のタブがあります。ストレスのさまざまなパターンの詳細については、「[ストレスパターン](#)」(139ページ)を参照してください。

ストレスの各パターンに対するタブには、モデルの変数を指定するための2つのパネルがあります。

- 「イベントまでの時間」パネルは、すべてのパターンに共通です。このパネルは「寿命の二変量」プラットフォームの起動ウィンドウに似ています。
- 「ストレスパターン」パネルは、ストレスのパターンを設定します。そのため、パネルの形式は、選択したパターンによって異なります。

イベントまでの時間

「累積損傷」起動ウィンドウの「イベントまでの時間」パネルには次のオプションがあります。

**イベントまでの時間** イベントが発生するまでの時間（故障が生じるまでの時間）、または打ち切りまでの時間を含んでいる列を指定します。データが区間打ち切りの場合には、各区間の上限と下限を含んだ2つの列を指定する必要があります。区間打ち切りの場合には、それら2つの列を「イベントまでの時間」に指定します。打ち切りの詳細は、「寿命の一変量」章の「イベントプロット」(40ページ)を参照してください。

**打ち切り** 観測値が右側打ち切りかどうかを示します。「列の選択」リストの下の「打ち切りの値」メニューから右側打ち切りを示すデータ値を選択してください。[打ち切り]列は、Y列に対して列を1つだけ指定した場合にのみ使用できます。

**度数** 1行のデータが複数のユニットを表している場合に、その度数（すなわち、観測値の個数）を含んでいる列を指定します。この列の値が0または正の整数であるとき、その値は該当する行の観測値の度数（個数）を表しています。

**パターンID** 各行に使用されたストレスのパターンを特定するための列です。「ストレスパターン」のデータテーブルでの値と対応していなければいけません。

**打ち切りの値** [打ち切り]列のデータ値のうち、右側打ち切りであることを示すデータ値を指定します。[打ち切り]列を選択すると候補となるデータ値が、自動的にコンボボックスに表示されます。これを変更するには、赤い三角ボタンをクリックして、データ値のリストから選択します。テキストボックスに異なる値を入力することもできます。[打ち切り]列に「値ラベル」列プロパティが設定されている場合、値ラベルがリストに表示されます。なお、この[打ち切り]列が欠測値となっている行は、分析から除外されます。

**関係** ストレス因子と故障時間との関係を示します。表5.1に、各関係のモデルの定義を示します。

表5.1 「関係」オプションのモデル

関係	モデル
Arrhenius 摂氏	$\mu = b_0 + b_1 * 11605 / (X + 273.15)$
Arrhenius 華氏	$\mu = b_0 + b_1 * 11605 / ((X + 459.67) / 1.8)$
Arrhenius ケルビン	$\mu = b_0 + b_1 * 11605 / X$
逆べき乗（デフォルト）	$\mu = b_0 + b_1 * \log(X)$
線形	$\mu = b_0 + b_1 * X$
対数	$\mu = b_0 + b_1 * \log(X)$
ロジット	$\mu = b_0 + b_1 * \log(X / (1 - X))$
逆数	$\mu = b_0 + b_1 / X$
平方根	$\mu = b_0 + b_1 * \text{sqrt}(X)$

表 5.1 「関係」オプションのモデル（続き）

関係	モデル
Box-Cox	$\mu = b_0 + b_1 * \text{BoxCox}(X)$
カスタム	ユーザ定義（「ステップストレス」パネルでのみ有効）

BoxCox( X )変換は次の式で定義されます。

$$x_i^{(\lambda)} = \begin{cases} \frac{x_i^\lambda - 1}{\lambda} & \lambda \neq 0 \text{ の場合} \\ \ln(x_i) & \lambda = 0 \text{ の場合} \end{cases}$$

【カスタム】を選択した場合、分析者独自の変換式を指定するコントロールが表示されます。そこで、モデルにおける、故障時間とストレス因子との関係式を指定できます。

なお、カスタムの機能（自分自身で独自の関係式を定義する機能）については、「寿命の二変量」章の「[カスタム関係式](#)」（123ページ）を参照してください。

**分布** 故障時間に対する確率分布を指定します。指定できる確率分布は、[Weibull]・[対数正規]・[対数ロジスティック]・[Fréchet]・[指数] です。Weibull分布がデフォルトの確率分布になっています。各確率分布の詳細については、「寿命の一変量」章の「[確率分布](#)」（79ページ）を参照してください。

## ストレスパターン

2つ目のパネルを使って、試験で用いたストレスのパターンを指定します。

### ステップストレス

「ステップストレス」パターンは、ある特定の時点でストレスの水準が変化するパターンです。なお、データテーブルにおいて、各ステップの期間と、その期間で与えたストレスの大きさは、時間の昇順で保存しておく必要があります。

「ステップストレス」タブの「ストレスパターン」パネルには、次のようなオプションがあります。

**ストレスの期間** どれぐらい継続して定義されている大きさのストレスが与えられたか、その期間を含む列を指定します。

**ストレス** 与えたストレスの大きさを含む列を指定します。

**パターンID** ストレスのパターンを識別するための一意のIDを含む列。この列は、「ストレスパターン」のデータテーブルと、「イベントまでの時間」のデータテーブルを対応させるために使用されます。

**パターンの延長** 定義されたストレスパターンの最終時点を過ぎてから発生する故障をどのように扱うかを指定します。このパネルには次のようなオプションがあります。

**終了する** 定義されたストレスパターンの最終時点を過ぎてから故障したデータがある場合、エラーとなり、分析が行われません。

**延長する** 定義されたストレスパターンの最終時点を過ぎてから発生する故障は、最後の期間におけるストレス水準と同じ大きさのストレスが与えられたと仮定されます。

**反復する** 定義されたストレスパターンの最終時点を過ぎてから発生する故障に対して、ストレスパターンが反復されます。たとえば、ストレスパターンの最終時点から10時間が過ぎて故障が生じているとします。その故障に対しては、試験開始から10時間後におけるストレスと同じ大きさのストレスが与えられた、と仮定します。

---

**メモ:** ステップストレスパターンの「パターンの延長」のデフォルト設定は「終了する」です。

---

## ランプストレス

「ランプストレス」パターンは、時間の線形関数としてストレスを定義します。各パターンは切片（時間が0のときのストレス水準）と傾き（時間が1単位だけ増加したときのストレス水準の増加分）によって定義されます。各パターンを、「ストレスパターン」のデータテーブルの1行、1行に定義してください。

**切片** 各パターンの切片を含む列を指定します。

**傾き** 各パターンの傾きを含む列を指定します。

**パターンID** ストレスのパターンを識別するための一意のIDを含む列。この列は、「ストレスパターン」のデータテーブルと、「イベントまでの時間」のデータテーブルを対応させるために使用されます。

## 正弦ストレス

「正弦ストレス」パターンは、ストレスを周期関数として定義します。このパターンは、水準・振幅・周期・フェーズによって定義されます。各パターンを、「ストレスパターン」のデータテーブルの1行、1行に定義してください。「正弦ストレス」パターンの定義は次のとおりです。

$$S(t) = \text{水準} + \text{振幅} \times \sin(\text{フェーズ} + (2 \times \pi \times t) / \text{周期})$$

**水準** 各パターンの水準を含む列を指定します。

**振幅** 各パターンの振幅を含む列を指定します。

**周期** 各パターンの周期を含む列を指定します。

**フェーズ** 各パターンのフェーズを含む列を指定します。

**パターンID** ストレスのパターンを識別するための一意のIDを含む列。この列は、「ストレスパターン」のデータテーブルと、「イベントまでの時間」のデータテーブルを対応させるために使用されます。

## 区分ランプストレス

「区分ランプストレス」パターンは、区分線形関数によってストレスを定義します。各区間でのストレスの線分は、連続していても、非連続であっても構いません。また、ストレスの線分は、傾きがゼロであっても構いません（傾きがゼロの場合は、ステップストレスを表します）。線分は、「ストレスパターン」のデータテーブルにおいて、期間、および、ストレスの大きさの始点と終点によって定義されます。

**ストレスの期間** どれぐらい継続して定義されているパターンのストレスが与えられたか、その期間を含む列を指定します。

**ストレスランプ** 該当の期間における始点と終点のストレス水準を含む2つの列を指定します。

**パターンID** ストレスのパターンを識別するための一意のIDを含む列。この列は、「ストレスパターン」のデータテーブルと、「イベントまでの時間」のデータテーブルを対応させるために使用されます。

**パターンの延長** 定義されたストレスパターンの最終時点を過ぎてから発生する故障をどのように扱うかを指定します。このパネルには次のようなオプションがあります。

**終了する** 定義されたストレスパターンの最終時点を過ぎてから故障したデータがある場合、エラーとなり、分析が行われません。

**延長する** 定義されたストレスパターンの最終時点を過ぎてから発生する故障は、最後の期間におけるストレス水準と同じ大きさのストレスが与えられたと仮定されます。

**反復する** 定義されたストレスパターンの最終時点を過ぎてから発生する故障に対して、ストレスパターンが反復されます。たとえば、ストレスパターンの最終時点から10時間が過ぎて故障が生じています。その故障に対しては、試験開始から10時間後におけるストレスと同じ大きさのストレスが与えられた、と仮定します。

---

**メモ:** 区分ランプストレスパターンの「パターンの延長」のデフォルト設定は「終了する」です。

---

## 「累積損傷」レポート

[OK] をクリックすると、「累積損傷」レポートウィンドウが開きます。デフォルトでは、「累積損傷」レポートには、「イベントプロット」・「ストレスパターン」・「モデルリスト」・「結果」が含まれます。

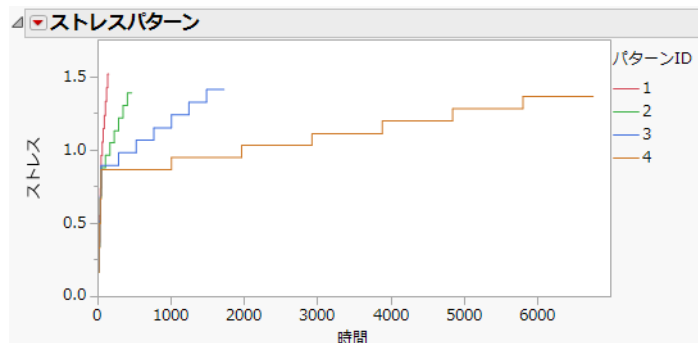
## イベントプロット

累積損傷の「イベントプロット」には故障時間または打ち切りまでの時間が描かれます。詳細は、「寿命の一変量」章の「[イベントプロット](#)」(40ページ)を参照してください。

## 「ストレスパターン」レポート

「ストレスパターン」のグラフには、ストレスの各パターンについて、時間に対してストレス水準がプロットされます。このレポートにある[シミュレーション]オプションを使うと、新しいデータを乱数によって生成できます。図5.6は、「ストレスパターン」プロットの一例です。「[「ストレスパターン」のオプション](#)」(143ページ)を参照してください。

図5.6 「ストレスパターン」レポート



## モデルリスト

「モデルリスト」レポートには、対数尤度をマイナス2倍したもの、パラメータの個数、AICc、BICが、あてはめた分布ごとに表示されます。これらの統計量は、(パラメータの個数を除いて)値が小さいほど適合度が良いことを示します。これらの統計量の詳細については、『基本的な回帰モデル』の付録「統計的詳細」を参照してください。

## モデルの結果

「結果」レポートには、あてはめられた分布ごとに、分析結果が表示されます。各レポートには次のような結果が含まれます。

**パラメータ推定値** この表には、パラメータ推定値、および、標準誤差とWald法に基づいた95%信頼区間が表示されます。

「パラメータ推定値」表の下にはモデル式が表示されます。このモデル式は、起動ウィンドウで指定された関係式のパラメータに、推定値を代入したものです。

**分布プロファイル** X軸が時間、Y軸が累積故障確率を表しています。

**分位点プロファイル** X軸が累積故障確率、Y軸が時間を表しています。

**ハザードプロファイル** X軸が時間、Y軸がハザード(瞬間故障率)を表しています。

**密度プロファイル** X軸が時間、Y軸が密度を表しています。

**標準化残差の確率プロット** 確率尺度軸上に標準化されたモデル残差をプロットしたグラフです。

「標準化残差の確率プロット」の赤い三角ボタンのメニューには、[残差の保存] というオプションがあります。このオプションを選択すると、分析に用いた故障時間のデータテーブルに3つの新しい列が作成され、それらに標準化された残差データが保存されます。3つの列とは、「左側残差」・「右側残差」・「残差 重み」です。

**Cox-Snell 残差 P-P プロット** この残差プロットでは、モデルの仮定をチェックすることができます。

「Cox-Snell 残差 P-P プロット」の赤い三角ボタンのメニューには、[残差の保存] というオプションがあります。このオプションを選択すると、分析に用いた故障時間のデータテーブルに3つの新しい列が作成され、それらにCox-Snell残差データが保存されます。3つの列とは、「左側残差」・「右側残差」・「残差 重み」です。Cox-Snell 残差については、Meeker and Escobar (1998, sec. 17.6.1) を参照してください。

---

## 「累積損傷」プラットフォームのオプション

「累積損傷」の赤い三角ボタンのメニューには、次のようなオプションがあります。

**すべてをあてはめ** すべての分布をあてはめます（起動ウィンドウで選択されていない、まだあてはめられていないすべての分布をあてはめます）。[「分布」](#) (139ページ) で述べられている、すべての分布をあてはめます。

以下のオプションについて詳しくは、『JMPの使用法』の「JMPのレポート」章を参照してください。

**ローカルデータフィルタ** 現在のレポートにおいて、データをフィルタリングするローカルデータフィルタの表示／非表示を切り替えます。

**やり直し** 分析を繰り返したり、やり直したりするオプションを含みます。また、[自動再計算] オプションに対応しているプラットフォームにおいては、[自動再計算] オプションを選択すると、データテーブルに加えた変更が、該当するレポートに即座に反映されるようになります。

**スクリプトの保存** レポートを再現するためのスクリプトを保存するオプションが、保存先ごとに用意されています。

**By グループのスクリプトを保存** By 変数の全水準に対するレポートを再現するためのスクリプトを保存するオプションが、保存先ごとに用意されています。起動ウィンドウでBy 変数を指定した場合のみ使用可能です。

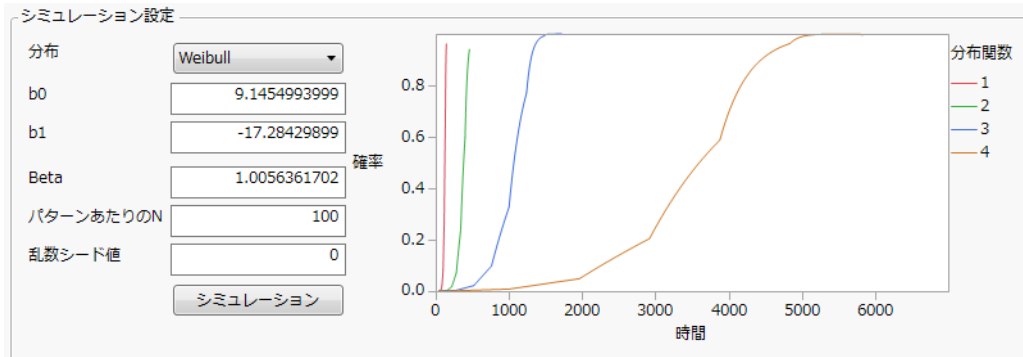
## 「ストレスパターン」のオプション

「ストレスパターン」の赤い三角ボタンのメニューには [シミュレーション] オプションがあります。これは、「シミュレーション設定」パネルの表示／非表示を切り替えます。

## シミュレーション設定パネル

図5.7は、「シミュレーション設定」パネルです。最初の状態では、「分布」には「累積損傷」起動ウィンドウで指定された確率分布が、また、パラメータ値にはパラメータ推定値が代入されています。グラフには、「ストレスパターン」データテーブルで定義されたストレスパターンごとに、故障時間の累積分布関数が描かれます。

図5.7 「シミュレーション設定」パネル



「シミュレーション設定」パネルでは、設定されている確率分布とストレスパターンに基づいて、故障時間の乱数データを生成できます。このシミュレーションでは、プラットフォームの起動ウィンドウで指定した「ストレスパターン」データテーブルによって定義されたストレスパターンが使用されます。このパネルには次のようなオプションがあります。

**分布** シミュレーションに使用する確率分布を指定します。使用可能な確率分布は、「累積損傷」の起動ウィンドウで指定できるものと同じです。各確率分布の詳細については、「寿命の一変量」章の「[確率分布](#)」(79ページ)を参照してください。

**b0** 確率分布の位置パラメータに対する切片。

**b1** 確率分布の位置パラメータに対する傾き。

**$\lambda$**  (BoxCox 関係の場合のみ有効) BoxCox 関係の  $\lambda$  の値。

**b2, s0, s1 など** (カスタム関係の場合のみ有効) 「累積損傷」の起動ウィンドウの [カスタム] 関係で定義したその他のパラメータ。

**Beta** (Weibull 分布の場合のみ) Weibull 分布のベータパラメータ。

**sigma** (対数正規分布・対数ロジスティック分布・Fréchet 分布の場合のみ) 確率分布のシグマパラメータ。

**パターンあたりの N** 各ストレスパターンあたりの、シミュレーションで生成される点の数。

**乱数シード値** (オプション) 乱数シード値。ゼロ以外の同じ整数をここに指定すると、シミュレーション結果を何回も再現できます。

終了（「累積損傷」の起動ウィンドウの「パターンの延長」で「終了する」を指定していない場合のみ）この時間を過ぎると、残っている試験ユニットは打ち切られます。

## シミュレーション

「シミュレーション設定」パネルのプロットは、各ストレスパターンについて、故障時間の累積分布関数が描かれます。シミュレーションの結果を含む新しいJMPデータテーブルを生成するには、「シミュレーション」ボタンをクリックします。

## 「累積損傷」プラットフォームの別例

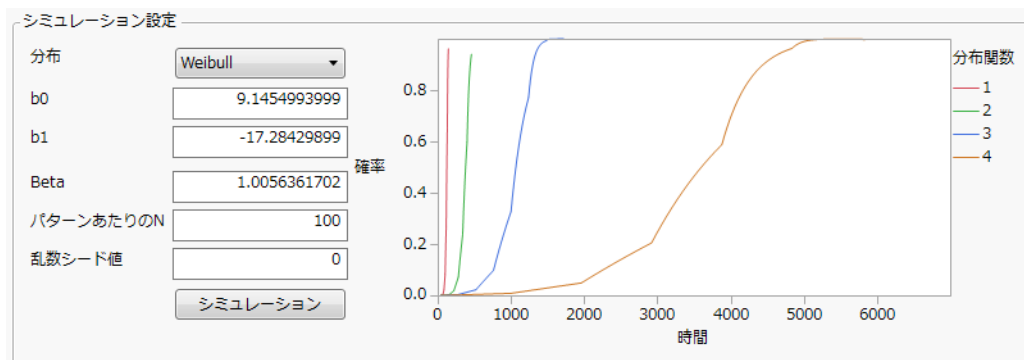
ここでは、「累積損傷」プラットフォームを使った例をさらに紹介します。

### 新しいデータのシミュレーション例

この例では、「累積損傷」の「シミュレーション設定」パネルを使って、乱数データを生成します。「[「累積損傷」プラットフォームの例](#)」（133ページ）の例と同じデータを使用します。

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「CD Step Stress.jmp」と「CD Step Stress Pattern.jmp」を開きます。
2. 「CD Step Stress」データテーブルで「累積損傷」スクリプトを実行します。
3. 「ストレスパターン」の赤い三角ボタンメニューから「シミュレーション」を選択します。

図5.8 「シミュレーション設定」パネル



「ストレスパターン」レポートに「シミュレーション設定」パネルが表示されます。シミュレーションの設定として、初期の設定状態では、「分布」には「Weibull」が選択されています。また、「b0」と「b1」には、推定値が代入されています。

4. 「分布」で「指数」を選択します。
5. 「b0」に「10」と入力します。

- 6. 「b1」に「-18」と入力します。
- 7. (オプション)「乱数シード値」に「14678」と入力します。
- 8. [シミュレーション] をクリックします。

図5.9 シミュレーションの結果 (一部)

	時間 左	時間 右	パターンID
1	140.67948106	140.67948106	1
2	139.34770497	139.34770497	1
3	136.95430716	136.95430716	1
4	136.30050091	136.30050091	1
5	145	•	1
6	118.5123739	118.5123739	1
7	119.03562567	119.03562567	1
8	145	•	1
9	127.19420127	127.19420127	1
10	118.48391055	118.48391055	1
11	103.54004804	103.54004804	1
12	145	•	1
13	121.04292162	121.04292162	1
14	136.15486483	136.15486483	1
15	143.65666248	143.65666248	1
16	123.04501594	123.04501594	1
17	145	•	1
18	124.26692664	124.26692664	1
19	120.96407573	120.96407573	1

図5.9は、シミュレーションされたデータテーブルの一部です。「パターンID」が「1」であるデータでは、すべてのデータが145分以下となっています。起動ウィンドウの「パターンの延長」で[終了する]を選択したため、「パターンID」が「1」である条件に関しては、145分を越えたデータは右側打ち切りになっています。

# 第6章

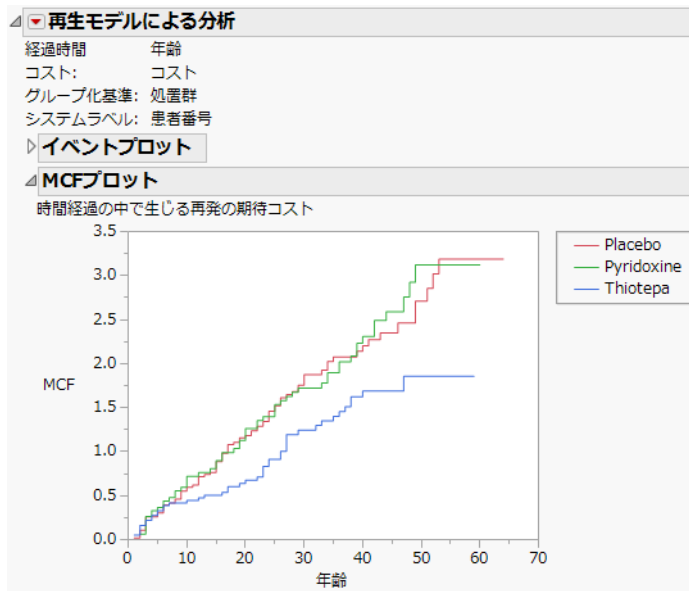
## 再生モデルによる分析 再発するイベントの度数やコストをモデル化する

「再生モデルによる分析」は、ユニットやシステムにおいて故障が繰り返し起こる場合や、人において同じ疾患が再発するデータを分析します。たとえば、製造業において、故障したユニットを修理して、また稼働させる場合などです。ユニットがまったく使えなくなるまで修理を繰り返すと、故障が複数回起こることになります。

腫瘍が再発するぼうこう癌患者の治療プロセスなど、医療分野における長期にわたる疾病の継続的治療のデータなども再生モデルで分析できます。

再生モデルに基づく分析では、ユニットあたりの合計コストを時間の関数として示したMCF（mean cumulative function; 平均累計関数）が計算されます。コストとは、修理の回数を指すだけのこともあれば、実際に修理にかかった費用を指すこともあります。

図6.1 「再生モデルによる分析」の例



目次

「再生モデルによる分析」プラットフォームの概要 ..... 149

「再生モデルによる分析」プラットフォームの例 ..... 149

「再生モデルによる分析」プラットフォームの起動 ..... 151

「再生モデルによる分析」プラットフォームのオプション ..... 153

    モデルのあてはめ ..... 154

「再生モデルによる分析」プラットフォームの別例 ..... 157

    ぼうこう癌の再発の例 ..... 158

    船舶用ディーゼルエンジンの例 ..... 161

## 「再生モデルによる分析」プラットフォームの概要

再生性のあるイベント（recurrent event）の分析では、分析対象のユニットが古くなるにつれて生じる修理回数や修理コストに主眼が置かれます。JMPでは、「再生モデルによる分析」プラットフォームで再生性のあるイベントのデータを分析できます。

「再生モデルによる分析」プラットフォームで扱うデータは、観測されたイベントごとに1行ずつとなっており、また、それに加えて最後に観測されたユニットの年齢を示す最終行が必要です。ユニットやシステムの個数はいくつでもかまいません。また、1ユニットあたりに生じたイベントの回数にも制限はありません。

## 「再生モデルによる分析」プラットフォームの例

分析対象のユニットとしては、システム（エンジンや機器などから構成されたもの）が通常、挙げられます。例として、サンプルデータフォルダの「Reliability」フォルダにある「Engine Valve Seat.jmp」データテーブルを見てみましょう。これには、機関車のエンジンにおけるバルブシートの交換が記録されています。Meeker and Escobar（1998, p. 395）およびNelson（2003）を参照してください。図6.2はそのデータの一部です。「エンジンID」列は個々のユニットのID番号です。また、「期間」は、エンジンのバルブシートが実際に使われはじめてから交換されるまでの日数です。場合によっては1つのエンジンIDで期間とコストの値の行が複数あることもありますが、これは修理が複数回、行われたことを意味します。「コスト」が0になっている行は、最後に観測されたときの機関車の日齢を示します。

図6.2 「エンジンバルブシート」データテーブル（一部）



エンジンID	期間	コスト
1	251	761
2	252	759
3	327	667
4	327	98
5	328	667
6	328	326
7	328	653
8	328	653

起動ダイアログボックスに、図6.5のとおりに入力を行います。

[OK] をクリックすると、図6.3と図6.4のようなレポートが表示されます。MCFプロットに描かれているのは平均累計関数（MCF; Mean Cumulative Function）です。これは、1ユニットあたりの平均累計コストまたは平均累計イベント数を、ノンパラメトリックに推定したものです。ユニットが古くなるにつれて合計コストは必ず大きくなっていくので、この平均累計関数は単調増加の関数です。図6.3のプロットを見ると、1回目の修理が行われるときの期間が平均およそ580日であることがわかります。

図 6.3 再生モデルによる分析のMCF プロットと表の一部

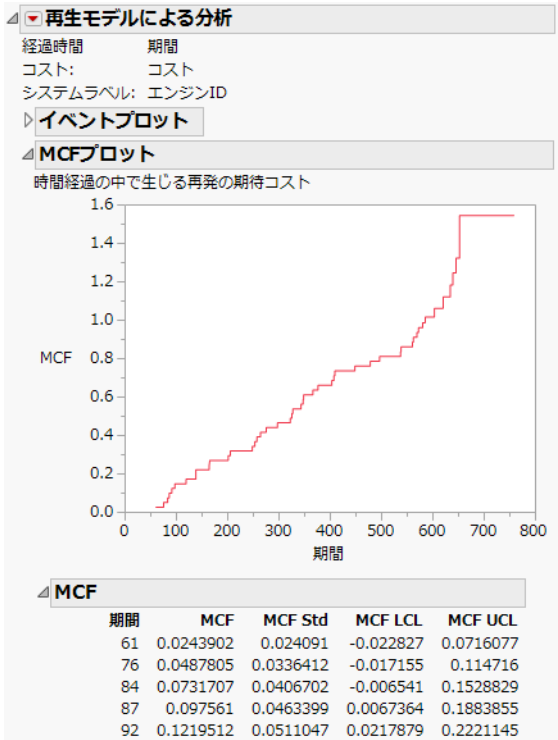
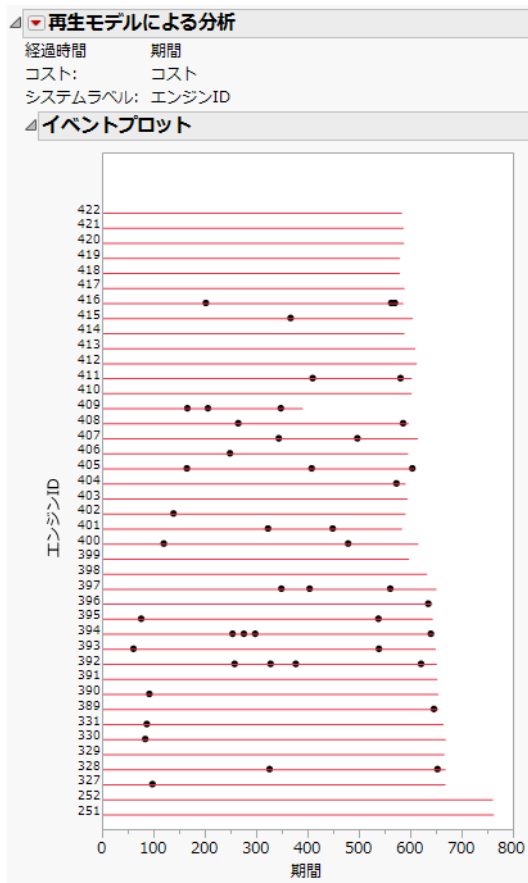


図6.4のイベントプロットは、各ユニットの時間軸に沿ったイベント発生を表しています。マーカーは修理時点を表し、そのユニットにおいて最終的に観測された年齢まで線は延びています。たとえばユニット 409 を見ると、389 日の最終観測時点までにバルブが3回交換されていることがわかります。

図6.4 バルブシートの交換を示したイベントプロット



## 「再生モデルによる分析」プラットフォームの起動

「再生モデルによる分析」プラットフォームを起動するには、[分析] > [信頼性/生存時間分析] > [再生モデルによる分析] を選択します。

図 6.5 「再生モデルによる分析」の起動ダイアログボックス

再生性のあるデータを分析

列の選択

▼ 3列

- エンジンID
- 期間
- コスト

☐ 最初のイベントが記録開始時刻

時間の単位 単位なし ▼

デフォルトの記録終了時刻

選択した列に役割を割り当てる

Y, 経過時間, イベント発生時刻	▲ 期間
ラベル, システムID	▲ エンジンID
コスト	コスト
グループ変数	オプション
原因	オプション
記録開始時刻	オプション(数値)
記録終了時刻	オプション(数値)
By	オプション

●Y列が、開始時刻からの経過時間(=年齢)ではなく、イベント発生時刻の場合、経過時間の算出に必要な情報を指定する必要があります。  
 ●開始時刻からの経過時間(=年齢)は、「Y」から「記録開始時刻」を引いて求める。最初の行が、記録開始時点の場合は、[最初のイベントが記録開始時刻]を選択すること。  
 ●JMPでは、通常、日付時間データは秒単位、[時間の単位]で、時間の単位を選択できる。  
 ●分析には、終了時間を示す必要がある。通常、データのコスト列の値を0にして、システムが終了したことを示す。終了時間の列がデータにある場合は、[記録終了時刻]列で指定することもできる。また、終了時刻が全ユニットで共通の場合、[デフォルトの記録終了時刻]でも指定できる。

アクション

OK

キャンセル

削除

前回の設定

ヘルプ

**Y, 経過時間, イベント発生時刻** イベントが発生したときのユニットの年齢（開始時刻からの経過時間）、または、イベントが発生した時刻を指定します。Y列に指定したものがイベント発生時刻の場合、経過時間を算出できるように、記録開始時刻と記録終了時刻も指定する必要があります。

**ラベル, システムID** 各イベントと打ち切り年齢がどのユニットのものかを示す列です。

**コスト** 次のいずれかの値を含んだ列を指定します。

- 故障・修理・交換・修正などのイベントが発生したことを示す「1」。この場合、MCF (Mean Cumulative Function; 平均累計関数) は、ユニットあたりの平均累計度数になります。
- イベントのコスト（修理・交換・修正などにかかった費用）。コストを指定した場合、MCF は、1 ユニットあたりの平均累計コストになります。
- 稼働やサービスが終了した、または調査対象から外されたことを示す「0」。どのユニット（システムID）にも0を含んだ行が必ず1つ必要で、その行の[Y, 経過時間, イベント発生時刻]列には最後に観測された年齢が含まれていなければなりません。データにおいてユニットの最終観測年齢（「コスト」列のセルが0のもの）が存在しない場合、エラーメッセージが表示されます。

---

**メモ:**「再生モデルによる分析」のコストを示す指示変数は、「寿命の一変量」や「生存時間分析」で使用される打ち切りの指示変数の反対と考えることができます。コスト変数の場合、1は修理などのイベントを示し、0はユニットの使用が終了したことを示します。打ち切り変数の場合は、通常、1が打ち切りのある値を示し、0は打ち切りのない値、つまりユニットのイベント（故障）を示します。

---

**グループ変数** グループ別にMCF（平均累計関数）の推定値を計算させるときに指定する列です。

**原因** いくつかの故障原因を含んだ列を指定します。

**記録開始時刻** 開始時刻を含む列を指定します。最初の行が、記録開始時点の場合は、「最初のイベントが記録開始時刻」チェックボックスをオンにします。開始時刻からの経過時間（=年齢）は、「Y」からこの列の値を引いて求めます。

**記録終了時刻** サービスの終了時刻を含む列を指定します。終了時刻の列がデータにある場合は、その列をここに指定します。終了時刻が全ユニットで共通の場合は、「デフォルトの記録終了時刻」で指定することもできます。コスト列が0のデータ行がある場合は、そのデータ行が終了時刻として使用されるため、この役割を用いる必要はありません。

**時間の単位** モデル化に使用する時間の単位を指定します。たとえば、データが秒単位で記録されている場合、用いる時間単位を秒に変更できます。

---

## 「再生モデルによる分析」プラットフォームのオプション

プラットフォームの赤い三角ボタンのメニューには、次のオプションが表示されます。

**MCFプロット** MCFプロット（平均累計関数プロット）の表示／非表示を切り替えます。

**MCF信頼限界** MCF（平均累計関数）の約95%信頼限界を示す線の表示／非表示を切り替えます。

**イベントプロット** イベントプロットの表示／非表示を切り替えます。

**カレンダーイベントプロット** （イベントの発生が時間ではなく時刻で記録されている場合のみ）。「カレンダーイベントプロット」の表示／非表示を切り替えます。これは時刻を横軸にしてイベントをプロットしたグラフです。このプロットはイベントプロットの隣にあり、同じユニットは縦軸の同じ位置にプロットされています。

**経過時間と故障間隔のプロット** 経過時間に対して故障間隔をプロットしたグラフの表示／非表示を切り替えます。これは、縦軸がイベントとイベントの間隔、横軸がイベントの発生した時刻となっているグラフです。このグラフを使って、データ内の故障間隔時間に変化があるかどうかを判断できます。再生モデルによる分析では、故障間隔時間は独立に分布している必要があります。経過時間と故障間隔のプロットについての詳細は、Tobias and Trindade（2012, p. 420）を参照してください。

**MCFの差のプロット**（グループ変数を指定した場合のみ）。MCFの差のプロットの表示／非表示を切り替えます。プロットには、差の95%信頼区間も描かれます。信頼区間の線が0の線と交差していないときは、MCFが有意に異なることを示しています。このオプションは、グループ変数を指定した場合のみ使用できます。

**グループごとのMCFプロット**（グループ変数を指定した場合のみ）。グループ変数の各水準に対するMCFプロットの表示／非表示を切り替えます。

[ラベル, システムID] 変数と [グループ変数] に同じ列が指定されている場合、このオプションを使用すれば各ユニットのMCFプロットを表示できます。

**モデルのあてはめ** 強度関数や累計関数に対するモデルをあてはめます。「[モデルのあてはめ](#)」(154ページ)を参照してください。

## モデルのあてはめ

[モデルのあてはめ] オプションは、強度関数（intensity function）や累計関数（cumulative function）に関するモデルをあてはめます。強度関数や累計関数をモデル化するのに、4つのモデルが用意されています。パラメータが一定であるモデルだけでなく、パラメータが説明変数の関数であるモデルもあてはめることができます。

プラットフォームの赤い三角ボタンをクリックし、[モデルのあてはめ] を選択すると、「再生性モデルの指定」ウィンドウ（図6.6）が表示されます。

図6.6 「再生性モデルの指定」ウィンドウ

再生性モデルの指定

べき乗非同次Poisson過程

列の選択

3列

- エンジンID
- 期間
- コスト

尺度効果

追加

交差

核分かれ

マクロ

次数 2

変換

モデルの実行

ヘルプ

削除

形状効果

追加

交差

核分かれ

マクロ

次数 2

変換

尺度または形状が一定のモデルを指定するには、効果を空白のままにしておく。

強度関数  $I(t)$  や累計関数  $C(t)$  に対するモデルとして、次の4つのモデルが用意されています。

#### べき乗非同次 Poisson 過程

$$I(t) = \left(\frac{\beta}{\theta}\right) \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta-1}$$

$$C(t) = \left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}$$

#### 比例強度 Poisson 過程

$$I(t) = \delta t^{\delta-1} e^{\gamma}$$

$$C(t) = t^{\delta} e^{\gamma}$$

#### 対数線形非同次 Poisson 過程

$$I(t) = e^{\gamma + \delta t}$$

$$C(t) = \frac{I(t) - I(0)}{\delta} = \frac{e^{\gamma + \delta t} - e^{\gamma}}{\delta}$$

#### 同次 Poisson 過程

$$I(t) = e^{\gamma}$$

$$C(t) = t e^{\gamma}$$

上式において、 $t$ は、ユニットや製品などの年齢です。

表6.1では、これらの式におけるパラメータを説明しています。各モデルにおいて、それぞれのパラメータは尺度と形状を定義しています。

表6.1 尺度パラメータと形状パラメータ

モデル	尺度パラメータ	形状パラメータ
べき乗非同次 Poisson 過程	$\theta$	$\beta$
比例強度 Poisson 過程	$\gamma$	$\delta$
対数線形非同次 Poisson 過程	$\gamma$	$\delta$
同次 Poisson 過程	$\gamma$	なし

次の点に注意してください。

- 「再生性モデルの指定」ウィンドウ（図 6.6）で「尺度効果」や「形状効果」を指定した場合、表 6.1 で示した尺度と形状のパラメータが、それらの指定された効果（説明変数）の関数として、モデル化されます。尺度や形状のパラメータが一定であるモデルをあてはめたい場合は、「尺度効果」と「形状効果」に何も指定しないでください。
- 同次 Poisson 過程は、他のモデルの特殊な場合になっています。べき乗非同次 Poisson 過程と比例強度 Poisson 過程は、説明変数がない場合には、等価なモデルです。説明変数を含む複雑なモデルでは、比例強度モデルの方が、べき乗非同次 Poisson 過程よりも、反復計算での問題が生じにくいと考えられます。

[モデルの実行] をクリックすると、モデルがあてはめられ、レポート（図 6.7）が表示されます。

図 6.7 モデルのレポート

再生性モデルのあてはめ		
べき乗非同次 Poisson 過程		
パラメータ推定値		
パラメータ	推定値	標準誤差
$\theta$ 切片	553.64302	57.863577
$\beta$ 定数	1.3995793	0.2005022
(-2)*対数尤度 692.9806		
勾配で収束しました, 8回の反復		
推定値の共分散		
共分散		
	$\theta$ 切片	$\beta$ 定数
$\theta$ 切片	3348.19	1.88248
$\beta$ 定数	1.88248	0.0402
相関		
	$\theta$ 切片	$\beta$ 定数
$\theta$ 切片	1.0000	0.1623
$\beta$ 定数	0.1623	1.0000

レポートの赤い三角ボタンをクリックすると、次のオプションが表示されます。

**プロファイル** 強度関数と累計関数を表示した「予測プロファイル」の表示／非表示を切り替えます。

**全水準の推定値** 他の効果を中立的な値に固定したときの、カテゴリカルな効果の各水準に対するパラメータ推定値を求めます。カテゴリカルな効果における水準間の違いを見るのに役立ちます。このオプションは、カテゴリカルな効果を指定した場合のみ表示されます。

**同次性の検定** 同次性を検定します。このオプションは、[同次 Poisson 過程] モデルを選択した場合は表示されません。

**効果の尤度比検定** モデルの各効果に対して尤度比検定を実行します。このオプションは、モデルに効果が指定されている場合にのみ表示されます。

**強度と累計の指定** 指定された時間と効果の値に対する、強度と累計の推定値を求めます。プロファイル尤度法による信頼区間も算出されます。

**累計に対する時間の推定** 指定されたイベントの累計数と効果の値に対する、時間の推定値を求めます。

**強度計算式の保存** 強度の計算式をデータテーブルに保存します。

**累計計算式の保存** 累計の計算式をデータテーブルに保存します。

**モデルに基づくシミュレーション** 推定された再生性モデルから、乱数のデータを生成します。このオプションは、「モデルに基づくシミュレーション」ウィンドウで指定されたオプションに基づいて生成された乱数を含む新しいデータテーブルを作成します。[「モデルに基づくシミュレーション」](#) (157 ページ) を参照してください。

**あてはめの削除** あてはめたモデルのレポートを削除します。

## モデルに基づくシミュレーション

「再生性モデルのあてはめ」の赤い三角ボタンのメニューから [モデルに基づくシミュレーション] オプションを選択すると、「モデルに基づくシミュレーション」ウィンドウが表示されます。このウィンドウでは、シミュレーションに対する以下のようなオプションを指定できます。

**イベントの最大発生回数** システム ID の各水準でシミュレートするイベントの最大発生数を指定します。

**最大経過時間** シミュレートされるイベントの最大経過時間を指定します。

**ユニット数** システム ID の各水準でシミュレートするユニット数を指定します。

---

**メモ:** モデルに「切片」および「定数」以外の項が含まれている場合、シミュレートされたデータテーブルには、説明変数の水準のすべての組み合わせにおいて、このユニット数が含まれます。なお、説明変数が連続尺度の場合、5水準に分けられます。

---

[OK] をクリックすると、結果を含む新しいデータテーブルが作成されます。このデータテーブルには「再生モデルによる分析」プラットフォームでシミュレートされた観測値を分析するためのスクリプトが含まれています。

---

## 「再生モデルによる分析」プラットフォームの別例

- [「ぼうこう癌の再発の例」](#)
- [「船舶用ディーゼルエンジンの例」](#)

ぼうこう癌の再発の例

サンプルデータの「Bladder Cancer.jmp」には、退役軍人局協力泌尿器研究グループ(Veterans Administration Cooperative Urological Research Group)が収集した癌性のぼうこう腫瘍の再発に関するデータが含まれています。Andrews and Herzberg (1985; table 45) を参照してください。表在性膀胱腫瘍を発症した患者が対象で、試験の開始前に腫瘍が取り除かれています。各患者は、プラシボ薬の投与、ピリドキシン(ビタミンB6)の投与、チオテパを使った定期的化学療法の3つの処置群に分類されます。次に行う腫瘍の再発分析では、病気の進行を調べ、3つの処置に差があるかどうかを調べます。

起動ダイアログボックスで図6.8に従って入力を行います。

図6.8 「ぼうこう癌」データを使った起動ダイアログボックス

再生性のあるデータを分析

列の選択

▼ 7列

患者番号

処置群

死因

初期腫瘍数

初期腫瘍サイズ

年齢

コスト

☐ 最初のイベントが記録開始時刻

時間の単位 

単位なし ▼

デフォルトの記録終了時刻

選択した列に役割を割り当てる

Y, 経過時間, イベント発生時刻	▲ 年齢
ラベル, システムID	■ 患者番号
コスト	コスト
グループ変数	処置群
原因	オプション
記録開始時刻	オプション(数値)
記録終了時刻	オプション(数値)
By	オプション

● Y列が、開始時刻からの経過時間 (=年齢) ではなく、イベント発生時刻の場合、経過時間の算出に必要な情報を指定する必要がある。

● 開始時刻からの経過時間(=年齢)は、「Y」から「記録開始時刻」を引いて求める。最初の行が、記録開始時点の場合は、[最初のイベントが記録開始時刻]を選択すること。

● JMPでは、通常、日付時間データは秒単位、[時間の単位]で、時間の単位を選択できる。

● 分析には、終了時間を示す必要がある。通常、データのコスト列の値を0にして、システムが終了したことを示す。終了時間の列がデータにある場合は、[記録終了時刻]列で指定することもできる。また、終了時刻が全ユニットで共通の場合、[デフォルトの記録終了時刻]でも指定できる。

アクション

OK

キャンセル

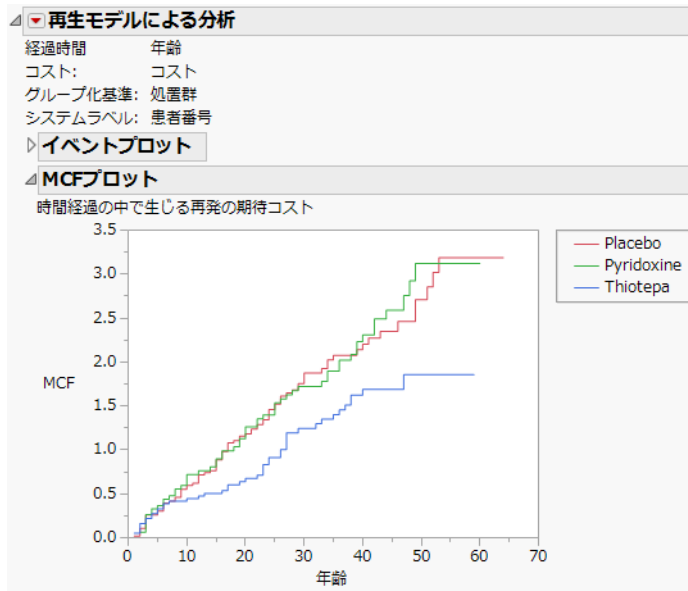
削除

前回の設定

ヘルプ

図6.9は、3つの処置のMCDプロットです。

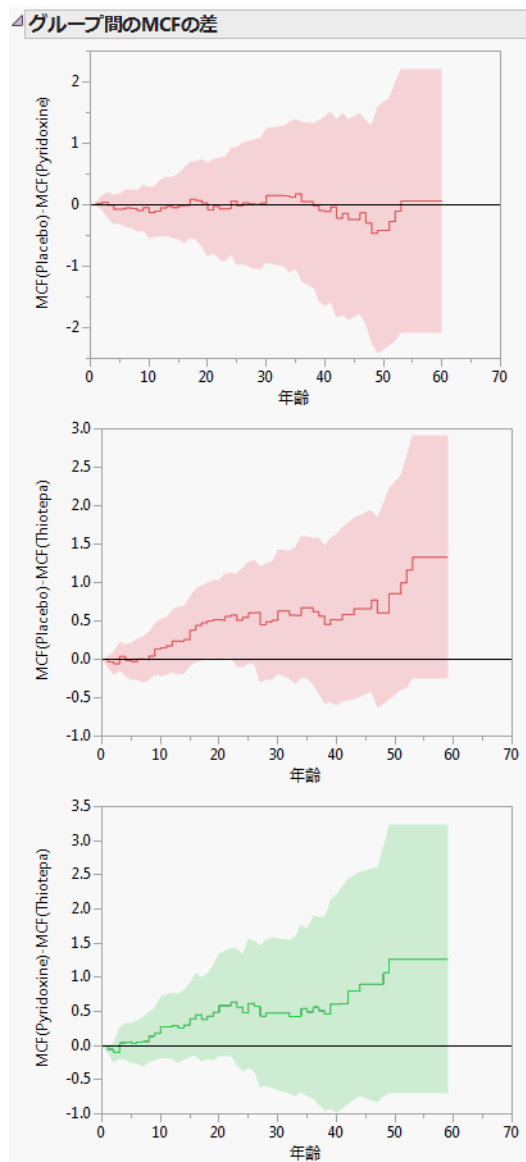
図6.9 「ぼうこう癌」のMCFプロット



MCF 曲線を見ると、どれもほぼ直線になっています。時間が経過しても傾き（再発率）が一定であることは、病気が進行しても、症状が悪化したり改善したりはしないことを示唆しています。

処置によって差があるかどうかを調べるには、プラットフォームの赤い三角ボタンのメニューから **[MCFの差のプロット]** コマンドを選択し、次のようなプロットを作成します。

図6.10 MCFの差



異なる処置の間に統計的に有意な差があるかどうかは、差のプロットで信頼区間を調べるとわかります。0が信頼区間に入っていない年齢においては、処置間に有意な差があります。図6.10のグラフは、処置間に有意な差がないことを示しています。

## 船舶用ディーゼルエンジンの例

サンプルデータの「Diesel Ship Engines.jmp」には、長期就航した2隻の船舶（Grampus4とHalfbeak4）のエンジンの修理時間が記録されています。詳細については、Meeker and Escobar（1998）を参照してください。修理の履歴を確認し、今後どの程度の頻度で修理が必要になるかを予測してみましょう。分析結果から、エンジンの交換時期を判断することができます。

1. [ヘルプ]>[サンプルデータライブラリ]を選択し、「Reliability」フォルダにある「Diesel Ship Engines.jmp」を開きます。
2. 57行目と129行目が「除外されている行」として設定されていることを確認してください。

メモ：「除外されている行」として設定されていない場合は、57行目と129行目を選択して、[行] > [除外する/除外しない] を選択します。

3. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [再生モデルによる分析] を選択します。
4. 起動ウィンドウに、図6.11のとおりに入力を行います。

図6.11 「Diesel Ship Engines.jmp」の起動ウィンドウ

再生性のあるデータを分析

列の選択

7列

- ユニット
- 時間(kHours)
- コスト
- システムID
- 開始時刻
- イベント時刻
- 終了時刻

☐ 最初のイベントが記録開始時刻

時間の単位 時間

デフォルトの記録終了時刻

選択した列に役割を割り当てる

Y, 経過時間, イベント発生時刻	イベント時刻
ラベル, システムID	システムID
コスト	オプション(数値)
グループ変数	システムID
原因	オプション
記録開始時刻	開始時刻
記録終了時刻	終了時刻
By	オプション

•Y列が、開始時刻からの経過時間(=年齢)ではなく、イベント発生時刻の場合、経過時間の算出に必要な情報を指定する必要があります。

•開始時刻からの経過時間(=年齢)は、「Y」から「記録開始時刻」を引いて求める。最初の行が、記録開始時点の場合は、[最初のイベントが記録開始時刻]を選択すること。

•JMPでは、通常、日付時間データは秒単位。[時間の単位]で、時間の単位を選択できる。

•分析には、終了時間を示す必要がある。通常、データのコスト列の値を0にして、システムが終了したことを示す。終了時間の列がデータにある場合は、[記録終了時刻]列で指定することもできる。また、終了時刻が全ユニットで共通の場合、[デフォルトの記録終了時刻]でも指定できる。

アクション

OK

キャンセル

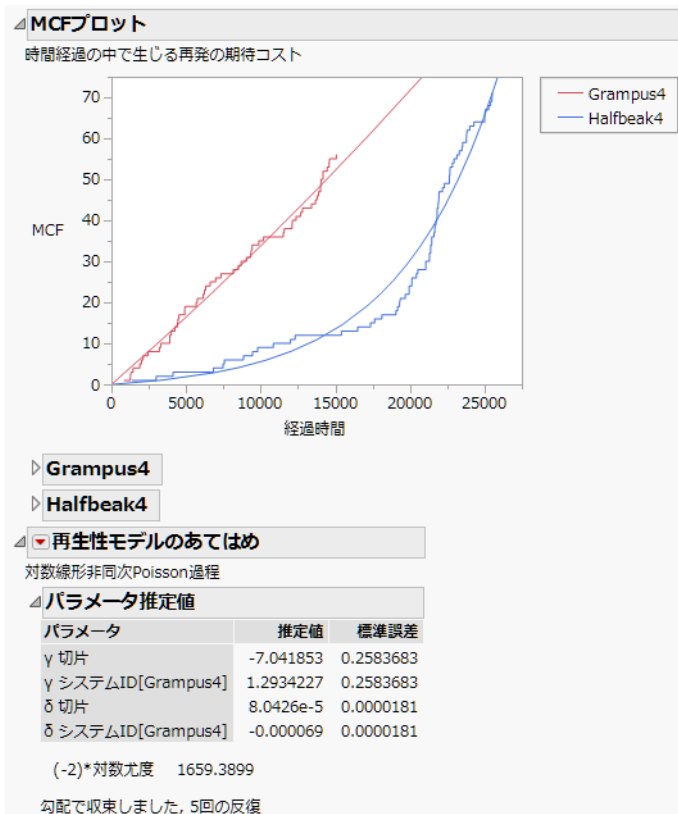
削除

前回の設定

ヘルプ

5. [OK] をクリックします。

図6.12 「Diesel Ship Engines.jmp」のレポート

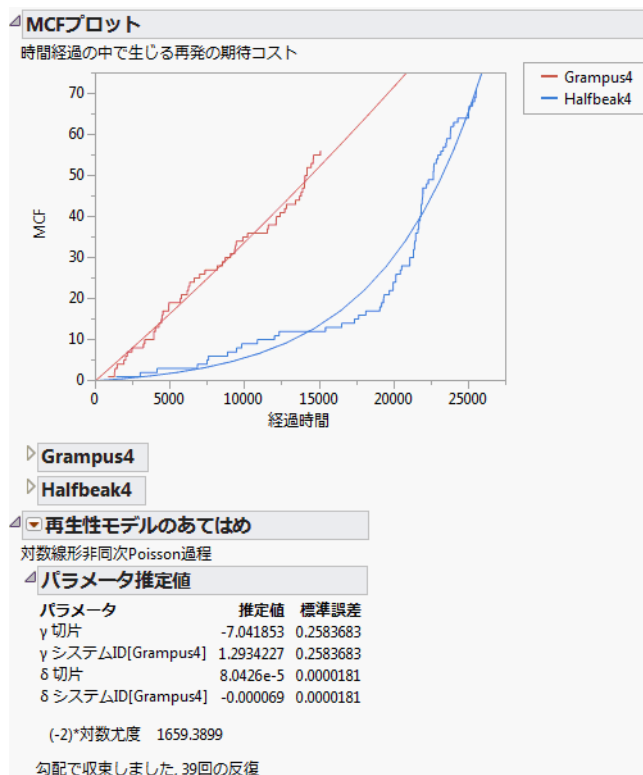


「イベントプロット」を見ると、Grampus4において、エンジン修理が生じた頻度は、時間を通じて一定だと分かります。一方、Halfbeak4の修理はより散発的で、「19,000」時間前後で修理回数が急増しています。この増加は、「MCFプロット」を見ると、すぐに分かります。

修理回数を予測するモデルを構築するため、パラメトリックなモデルをあてはめてみましょう。

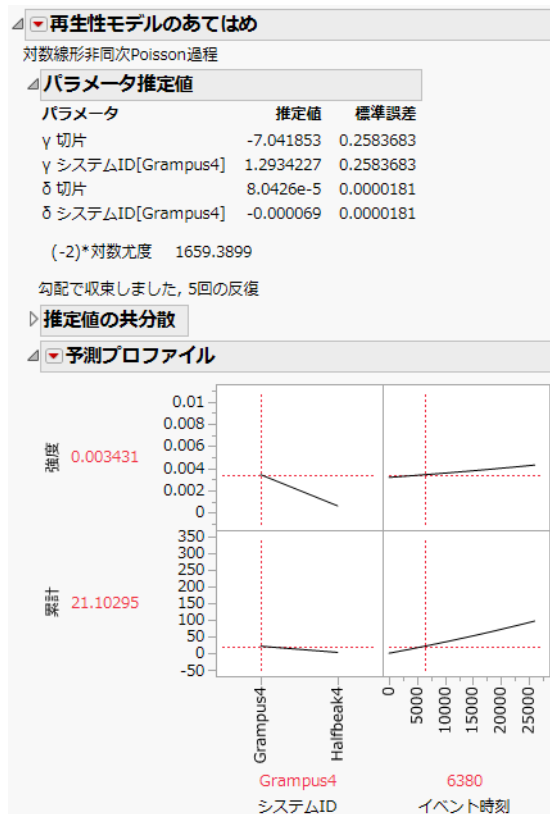
6. 「再生モデルによる分析」の赤い三角ボタンをクリックし、[モデルのあてはめ]を選択します。
7. 「再生性モデルの指定」で、[対数線形非同次Poisson過程]を選択します。
8. 「システムID」列を「尺度効果」と「形状効果」の両方に指定します。
9. [モデルの実行]をクリックします。

図6.13 「Diesel Ship Engines.jmp」にあてはめたモデル



10. 「再生性モデルのあてはめ」の赤い三角ボタンをクリックし、[プロファイル] を選択します。

図 6.14 「Diesel Ship Engines.jmp」のプロファイル



将来における修理回数を予測してみましょう。プロファイルにおける「イベント時刻」の数値を変更すれば、将来の累計修理回数がどのように変化するかを確認できます。

- 時間が「30,000」となるまでに必要な修理の回数の予測値を見るには、「イベント時刻」の数値として「30000」と入力します。Grampus4は114回の修理が必要と予測されます。Halfbeak4の修理回数を見るには、点線をクリックして「Grampus4」から「Halfbeak4」にドラッグします。Halfbeak4エンジンの場合、140回の修理が必要です。
- 時間が「80,000」となるまでに必要な修理の回数の予測値を見るには、「イベント時刻」の数値として「80000」と入力します。Halfbeak4エンジンの場合、248,169回の修理が必要です。点線をクリックしてHalfbeak4からGrampus4にドラッグしてください。Grampus4は418回の修理が必要と予測されます。

したがって、将来的には、Halfbeak4の方が、Grampus4よりも、頻繁に修理しなければならないことがわかります。

# 第7章

## 劣化データ分析

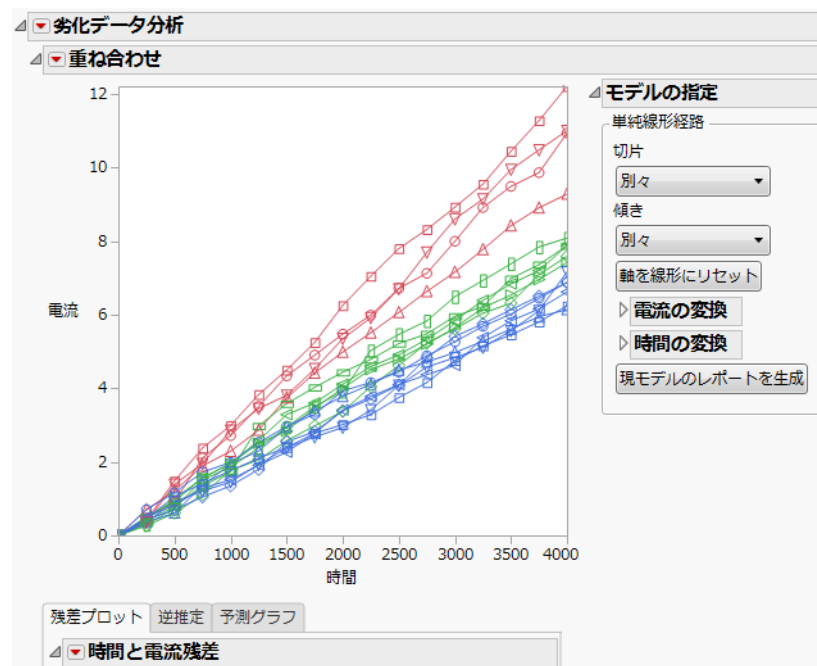
### 時間経過に伴う製品の劣化をモデル化する

「劣化データ分析」プラットフォームは、製品の劣化を記録したデータを分析し、故障時間を予測します。「劣化データ分析」プラットフォームで故障時間の予測値を求めて、その疑似的な故障時間を他の信頼性プラットフォームで分析することで、故障分布を推定できます。

劣化経路のモデルとして、線形および非線形のいずれも用意されています。加速因子を指定して、加速劣化データを分析することができます。

また、医薬品の有効期限の設定に役立つ安定性試験の分析も実行できます。

図7.1 「劣化データ分析」の例



目次

「劣化データ分析」プラットフォームの概要 ..... 167

「劣化データ分析」プラットフォームの例 ..... 167

「劣化データ分析」プラットフォームの起動 ..... 169

「劣化データ分析」レポート ..... 170

モデルの指定 ..... 173

    単純線形経路 ..... 173

    非線形経路 ..... 175

逆推定 ..... 183

予測グラフ ..... 185

「劣化データ分析」プラットフォームのオプション ..... 186

モデルのレポート ..... 189

    モデルリスト ..... 189

    レポート ..... 190

破壊劣化 ..... 190

安定性試験 ..... 195

---

## 「劣化データ分析」プラットフォームの概要

信頼性分析では、製品の故障時間がモデル化されます。多くの場合、製品は時間が経つにつれて劣化し、最後には故障します。しかし、故障までは至らないこともあります。製品の劣化をモデル化すれば、故障までには至らない状況でも、故障時間を予測することができます。データに加速因子が含まれている場合には、加速劣化モデルをあてはめることもできます。

「劣化データ分析」プラットフォームは、線形や非線形の劣化経路に従うデータをモデル化できます。経路が非線形の場合に対して、線形関係にするため、変数変換を行うオプションが用意されています。また、線形モデルへ変換できない場合でも、非線形モデルをあてはめることができます。

「劣化データ分析」プラットフォームでは、安定性試験データの分析も行えます。その分析では、3種類の線形モデルをあてはめて、有効期間を推定します。安定性試験データの分析は、医薬品の有効期間を設定する際に使われているものです。

---

## 「劣化データ分析」プラットフォームの例

この例では、「GaAs Laser.jmp」データテーブルを使用します。これは、Meeker and Escobar (1998) によるデータで、ガリウムヒ素レーザーの電流の上昇率(%)を記録しています。上昇率が10%に達したレーザーを、故障品と判断します。

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「GaAs Laser.jmp」を開きます。
2. [分析] > [信頼性分析/生存時間分析] > [劣化分析] を選択します。
3. 「電流」を選択し、[Y, 目的変数] をクリックします。
4. 「時間」を選択し、[時間] をクリックします。
5. 「ユニット」を選択し、[ラベル, システムID] をクリックします。
6. 「上側仕様限界」のテキストボックスに「10」とタイプします。
7. [OK] をクリックします。

図7.2 最初の「劣化データ分析」レポート

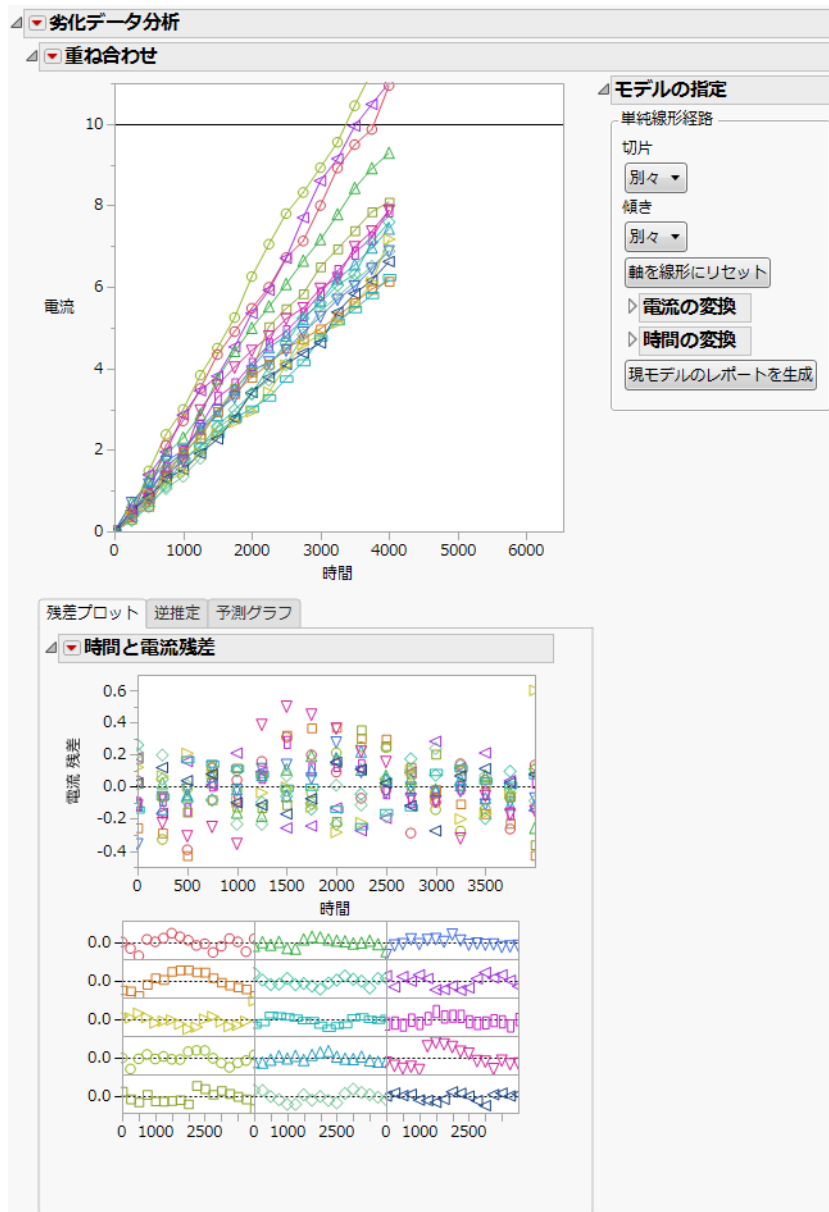


図7.2のような「劣化データ分析」レポートが作成されます。「重ね合わせ」プロットは、データ内の各ユニットの「電流」と「時間」の関係を示しています。「電流」が10の位置に描かれた横線は、10%の上側仕様限界に対応しています。この限界を上回る値のユニットは、故障したと判断されます。15ユニット中の3ユニットが、調査期間の終了時までには故障しています。なお、「逆推定」タブにおいて、指定されたモデルによって予測された各ユニットの故障時間が描かれています。

デフォルトのモデルでは、線形変換を使用して、各ユニットに個別の傾きと切片をあてはめます。「モデルの指定」アウトラインを使用すれば、他のモデルをあてはめることができます。

「残差プロット」タブ（図7.2）には、指定されたモデルの残差が描かれます。上側のプロットは、すべてのユニットを重ね合わせて描いた残差プロットです。下側のプロットは、ユニットごとに別々に描いた残差プロットです。

## 「劣化データ分析」プラットフォームの起動

「劣化データ分析」プラットフォームを起動するには、[分析] > [信頼性/生存時間分析] > [劣化分析] を選択します。図7.3は、「Reliability」フォルダにある「GaAs Laser.jmp」データテーブルを使用した「劣化データ分析」起動ウィンドウです。

図7.3 「劣化データ分析」起動ウィンドウ

### 分析の種類

起動ウィンドウは、分析の種類に合わせて3つのタブに分かれています。

**反復測定劣化** 線形または非線形の劣化分析を実行します。[Y, 応答] に指定できる変数は1つだけです。このオプションでは、打ち切りのあるデータは分析できません。

**破壊劣化** 測定プロセスの途中でユニットが破壊される場合は、この種類の分析を選択します。このオプションでは、打ち切りのあるデータを分析できます。詳細については、「[破壊劣化](#)」（190 ページ）を参照してください。

**メモ:** なお、このオプションとは別に、「破壊劣化」プラットフォームにおいて、破壊試験のための基本的なモデルが予め用意されています。このオプションを用いた破壊試験データの分析については、「[破壊劣化](#)」章（199 ページ）を参照してください。

**安定性試験** 安定性試験に対する分析を実行します。医薬品の有効期間を設定する場合に使用します。[Y, 応答] に指定できる変数は1つだけです。安定性試験の分析については、「[安定性試験](#)」(195ページ)を参照してください。

### 起動ウィンドウのオプション

起動ウィンドウには、次のようなオプションがあります。

**Y, 目的変数** 劣化の程度を示す測定データを含む列を指定します。

**時間** 時間値を含む列を指定します。

**X** ([反復測定劣化] タブと [破壊劣化] タブのみ)。説明変数を指定します。この役割を使って、加速劣化モデルにおける加速因子を指定します。

**ラベル, システム ID** ([反復測定劣化] タブと [安定性試験] タブのみ)。ユニットの ID を示す列を指定します。

**度数** 各行の度数を含む列を指定します。

**打ち切り** ([破壊劣化] タブのみ)。ユニットの打ち切りの有無を示す列を指定します。

**By** ここで指定した変数の水準ごとに分析が実行されます。

**打ち切りの値** ([破壊劣化] タブのみ)。[打ち切り] 列のデータ値のうち、右側打ち切りであることを示すデータ値を指定します。[打ち切り] 列を選択すると候補となるデータ値が、自動的にコンボボックスに表示されます。これを変更するには、赤い三角ボタンをクリックして、データ値のリストから選択します。テキストボックスに異なる値を入力することもできます。[打ち切り] 列に「値ラベル」列プロパティが設定されている場合、値ラベルが値リストに表示されます。なお、[打ち切り] 列が欠測値となっている行は、分析から除外されます。

**上側仕様限界** 上側仕様限界を指定します。([安定性試験] タブ以外のオプション)

**下側仕様限界** 下側仕様限界を指定します。([安定性試験] タブ以外のオプション)

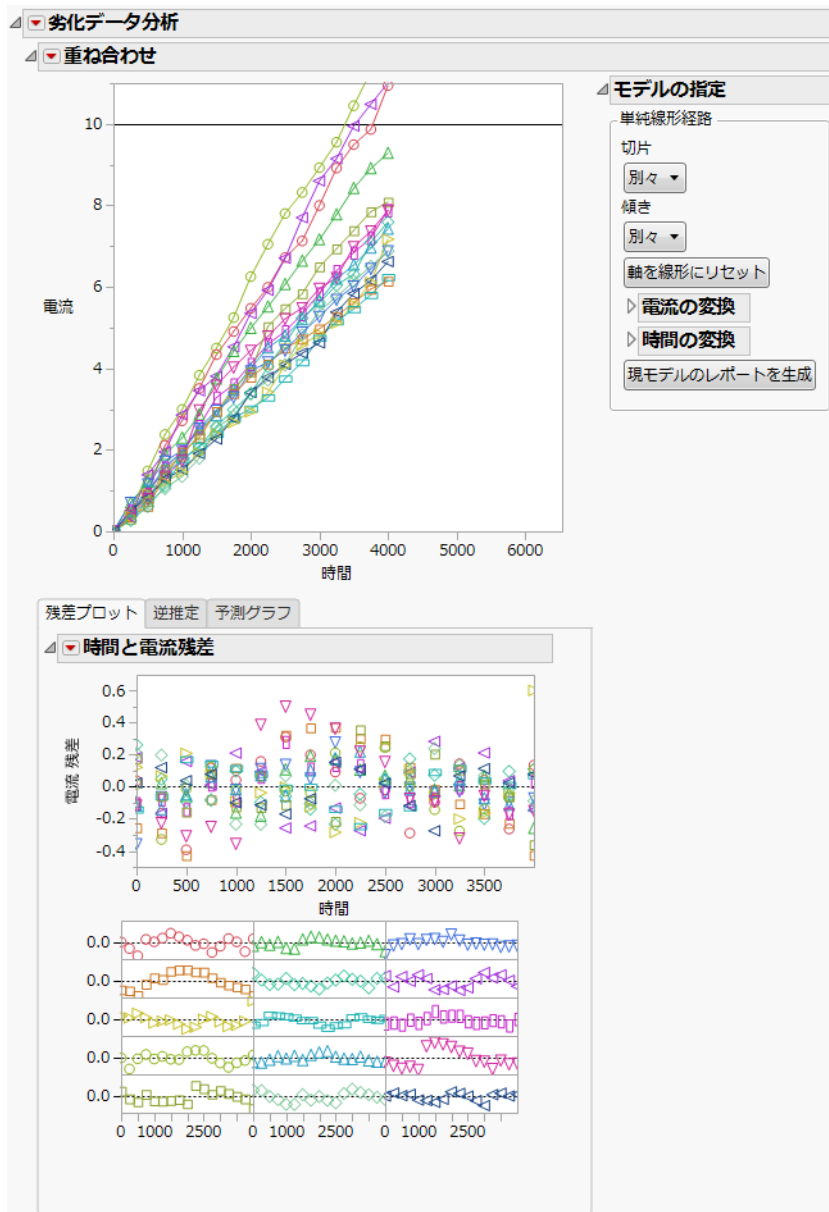
**打ち切り時間** ([反復測定劣化] タブと [安定性試験] タブでのみ)。[逆推定] における擬似故障時間に関して、打ち切りとみなす時間を指定します。「[逆推定](#)」(183ページ)を参照してください。

---

## 「劣化データ分析」レポート

[反復測定劣化] と [破壊劣化] の手法では、デフォルトの線形モデルをあてはめた結果が最初に表示されます。このデフォルトのモデルは、図7.4の「モデルの指定」アウトラインのように、応答変数と時間のあいだに、ユニットごとに別々の切片と傾きをもつ線形式を仮定しています。このデフォルトのモデルは、「システム ID」変数の値ごとに、別々の切片と傾きを仮定しています。なお、X変数だけを指定した場合は、X変数の水準ごとに、別々の切片と傾きを仮定します。一方、[安定性試験] の手法では、3つの線形モデルをあてはめます。

図7.4 変換のアウトラインが表示された最初の「反復測定劣化」レポート



この例を再現するには、「[「劣化データ分析」プラットフォームの例](#)」(167ページ)を参照してください。

「反復測定劣化」・「破壊劣化」・「安定性試験」のレポートは、次のような要素で構成されています。

### 重ね合わせ

「時間」に対して「Y, 目的変数」をプロットした重ね合わせプロット。この例では、「時間」に対して「電流」がプロットされています。重ね合わせプロットの赤い三角ボタンのメニューから「[推定値の保存](#)」オプションを選択すると、すべてのユニットの傾きと切片の推定値を含む新しいデータテーブルが作成されます。

### モデルの指定

モデルを指定して、そのモデルのレポートを生成できます。「[モデルの指定](#)」(173ページ)を参照してください。(「反復測定劣化」手法と「破壊劣化」手法のみ)

### 「安定性試験」アウトライン

「安定性試験」手法を選択すると、3つの線形モデルを比較し、有効期間を予測する分析が実行されます。「[安定性試験](#)」(195ページ)を参照してください。(「安定性試験」手法のみ)

### レポート

「安定性試験」を選んだときは、3つの線形モデルに対する分析結果が表示されます。「[安定性試験](#)」(195ページ)を参照してください。(このレポートは「安定性試験」手法を選んだときはデフォルトで表示されます。「反復測定劣化」と「破壊劣化」の手法では、「[現モデルのレポートを生成](#)」をクリックすると、現在のモデルに対するレポートが表示されます。)

### タブのレポート

**残差プロット** 「残差プロット」タブには、すべてのユニットの残差を重ね合わせた残差プロット、および、ユニットごとに別々に描いた残差プロットが描かれます。残差プロットにある赤い三角ボタンをクリックすると、次のオプションが表示されます。

**残差の保存** 現在のモデルの残差を新しいデータテーブルに保存します。

**点をずらす** 時間の方向に点をランダムにずらしします。多数の点が混み合っている場合にデータをわかりやすく表示でき、便利です。

**グループごとにずらす** グループを区別できるようにグループ間に隙間を入れます。このオプションは、プラットフォームの起動ウィンドウでX変数を指定した場合のみ表示されます。

**点をずらす幅** 点をずらす幅やグループごとにずらす幅を変更できます。このオプションは「点をずらす」が選択されている場合のみ表示されます。

**逆推定** 「逆推定」タブでは、Y変数が特定の値に達する時間を予測できます。「[逆推定](#)」(183ページ)を参照してください。

**予測グラフ** 「予測グラフ」タブでは、特定の「時間」の値に対する、Y変数の値を予測できます。「[予測グラフ](#)」(185ページ)を参照してください。

## モデルの指定

「モデルの指定」アウトラインでは、劣化データにあてはめるモデルが指定できます。「モデルの指定」には2つの形式があります。

**単純線形経路** 劣化経路が、線形の場合、または非線形であっても線形に変換できる場合に使用します。詳細については、「[単純線形経路](#)」(173 ページ) を参照してください。

**非線形経路** 非線形の劣化経路（特に線形に変換できない経路）をモデル化するときに使用します。詳細については、「[非線形経路](#)」(175 ページ) を参照してください。

形式を切り替えるには、プラットフォームの赤い三角ボタンをクリックし、[劣化経路の種類] サブメニューから経路を選択します。

### 単純線形経路

線形の劣化経路をモデル化する場合は、プラットフォームの赤い三角ボタンをクリックし、[劣化経路の種類] > [単純線形経路] を選択します。

「モデルの指定」の「単純線形経路」パネルにおいて、劣化経路を表す線形モデルの種類を指定します。ここでは、劣化経路が線形の場合、または非線形であっても線形に変換できる場合を扱えます。図7.5を参照してください。

図7.5 「モデルの指定」の「単純線形経路」

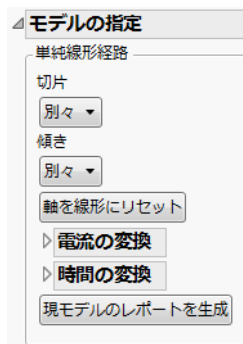


表7.1 では、「単純線形経路」のオプションについて説明します。

表7.1 「単純線形経路」のオプション

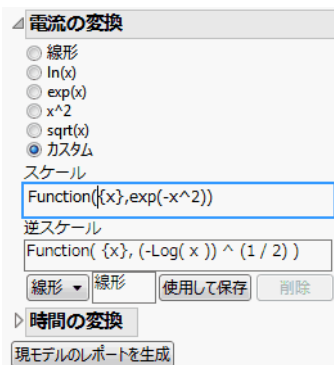
オプション	説明
切片	<p>このメニューから、切片の形式を選びます。</p> <p><b>別々</b> IDごとに別々の切片をあてはめます。</p> <p><b>グループ内で共通</b> 各IDの切片を、X変数が同水準の場合には等しく、異なる場合には異なるものにします。</p> <p><b>共通</b> すべてのIDに同じ切片をあてはめます。</p> <p><b>ゼロ</b> すべてのIDの切片をゼロに固定します。</p>
傾き	<p>このメニューから、傾きの形式を選びます。</p> <p><b>別々</b> IDごとに別々の傾きをあてはめます。</p> <p><b>グループ内で共通</b> 各IDの傾きを、X変数が同水準の場合には等しく、異なる場合には異なるものにします。</p> <p><b>共通</b> すべてのIDに同じ傾きをあてはめます。</p>
軸を線形にリセット	重ね合わせプロットの軸を初期設定に戻す場合は、このボタンをクリックします。
<Y, 目的変数>の変換	Y変数を変数変換して劣化経路を線形にできる場合は、ここで変換式（[線形]・[ln(x)]・[exp(x)]・[x^2]・[sqrt(x)]・[カスタム]）を選択します。[カスタム] オプションの詳細については、「 <a href="#">カスタム変換</a> 」（174ページ）を参照してください。
<時間>の変換	時間変数を変数変換して劣化経路を線形にできる場合は、ここで変換式（[線形]・[ln(x)]・[x^2]・[sqrt(x)]・[カスタム]）を選択します。[カスタム] オプションの詳細については、「 <a href="#">カスタム変換</a> 」（174ページ）を参照してください。
現モデルのレポートを生成	現在のモデル設定でレポートを作成します。「モデルの要約」レポートと、パラメータ推定値をまとめた「推定値」レポートが作成されます。詳細については、「 <a href="#">モデルのレポート</a> 」（189ページ）を参照してください。

## カスタム変換

選択肢にない変数変換を行う必要がある場合は、[カスタム] オプションを使用します。たとえば、応答変数を  $\exp(-x^2)$  と変換する場合は、図7.6のとおり「スケール」ボックスに入力します。このとき、場合によっては「逆スケール」ボックスにおいて変換式の逆関数も入力してください。

メモ: JMPは自動的に逆関数を求めようとします。自動的に求まった場合は、その式が「逆スケール」ボックスに入力されます。自動的に求まらない場合は、手動で入力しなければなりません。

図7.6 [カスタム] 変換のオプション



テキストボックスに変換の名前を入力します。入力が終わったら、[使用して保存] ボタンをクリックして変換を適用します。複数のカスタム変換を保存している場合には、メニューからそれらの変換を選択することもできます。[削除] ボタンをクリックすると、該当のカスタム変換が削除されます。

## 非線形経路

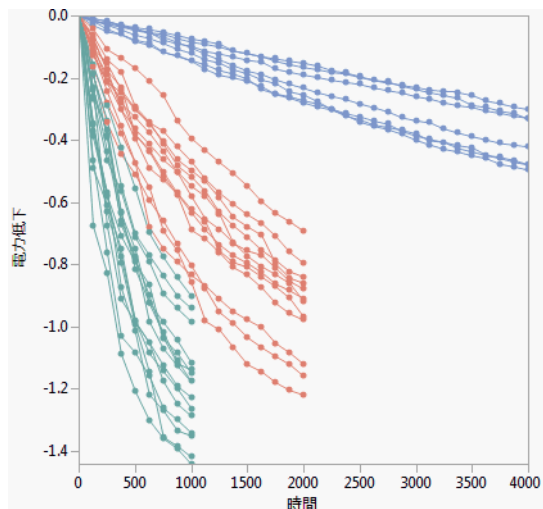
非線形の劣化経路をモデル化する場合は、プラットフォームの赤い三角ボタンをクリックし、[劣化経路の種類] > [非線形経路] を選択します。自分が興味をもっている劣化経路が線形モデルに変換できず、自分自身で非線形モデルを定義したい場合は、このオプションを使用します。

ここでは、「Device B.jmp」データテーブルを例にとり、「モデルの指定」の「非線形経路」について説明します。このデータテーブルには、4つの温度条件下における34個のユニットの電力低下が記録されています。次の手順を行います。

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「Device B.jmp」を開きます。
2. [分析] > [信頼性分析/生存時間分析] > [劣化分析] を選択します。
3. 「電力低下」を選択し、[Y, 目的変数] をクリックします。
4. 「時間」を選択し、[時間] をクリックします。
5. 「摂氏温度」を選択し、[X] をクリックします。  
この試験においての温度の設定は、加速因子です。
6. 「デバイス」を選択し、[ラベル, システム ID] をクリックします。
7. [OK] をクリックします。

図7.7は、最初に表示される重ね合わせプロットです。

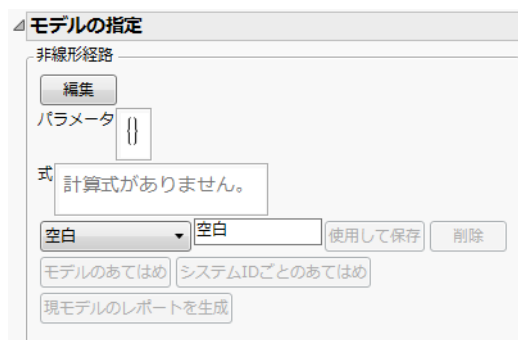
図7.7 「Device B」の重ね合わせプロット



最初の数百時間は劣化経路が線形に推移しているようですが、その後、湾曲し始めています。非線形モデルをあてはめるには、プラットフォームの赤い三角ボタンをクリックし、[劣化経路の種類] > [非線形経路] を選択して「モデルの指定」アウトラインに「非線形経路」を表示します。図7.8を参照してください。

メモ: 図7.8に示されている [編集] ボタンを表示するには、[ファイル] > [環境設定] > [プラットフォーム] > [劣化分析] > [対話式的計算式エディタを使用] チェックボックスをオンにしておく必要があります。

図7.8 「モデルの指定」アウトラインの初期状態の「非線形経路」



まず、「空白」と表示されたメニューからオプションを選択します。

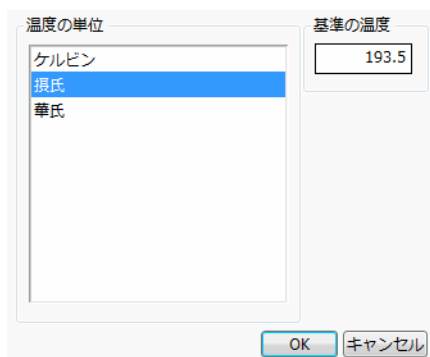
- [反応速度] モデルについては、「[反応速度モデル](#)」(177 ページ) を参照してください。
- [定率] モデルについては、「[定率モデル](#)」(177 ページ) を参照してください。
- [予測列] の使用方法については、「[予測列](#)」(178 ページ) を参照してください。

## 反応速度モデル

「[反応速度] オプションは、ある単一の化学反応によって劣化過程が表され、その反応速度（変化率）が温度のみの関数である場合に使用します。図7.8に表示されているメニューから「**反応速度**」または「**反応速度 タイプI**」を選択します。「**反応速度 タイプI**」は「**反応速度**」と似ていますが、オフセット項があるため、応答値の符号に関する基本前提が異なります。

「設定」ウィンドウが表示されるので、温度の単位と基準の温度を選択します。ここで指定した基準の温度が、初期パラメータ推定値の計算に使用されます。そのため、データの中で標準的といえる値を指定する必要があります。

図7.9 温度の単位と基準の温度の選択



The dialog box is titled "Temperature Unit and Reference Temperature". It contains two main sections. The first section, "Temperature Unit", features a list box with three options: "Kelvin", "Celsius", and "Fahrenheit". "Celsius" is currently selected and highlighted in blue. The second section, "Reference Temperature", contains a text input field with the value "193.5". At the bottom of the dialog, there are two buttons: "OK" and "Cancel".

この例では、「**反応速度**」を選択し、「温度の単位」として「**摂氏**」を選択します。「**OK**」をクリックすると、レポートウィンドウに戻ります。「モデルの指定」の各機能については、「[「モデルの指定」の詳細](#)」（179ページ）を参照してください。

## 定率モデル

「定率」オプションは、時間に対して線形な（あるいは、変換した応答または時間に対して線形になる）劣化経路で、反応速度（変化率）が温度のみの関数であるときに使用します。

図7.8のメニューから「**定率**」を選択します。「定率モデルの設定」ウィンドウが表示されます。ここで、経路・率・時間の変換を指定します。

図7.10 定率モデルの変換

経路の変換

無変換  
Exp  
Log  
カスタム

率の変換

無変換  
Arrhenius ケルビン  
Arrhenius 摂氏  
Arrhenius 華氏  
べき乗  
指数

時間の変換

無変換  
Sqrt  
カスタム

経路の定義

$$\text{電力低下} = \text{Beta0} + \text{Exp} \left[ \text{Beta1} + \text{Beta2} * \left( \frac{-11605}{\text{Celsius} + 273.15} \right) \right] * \text{時間} + e$$

OK キャンセル

それぞれの変換セクションで選択肢を選ぶと、左下隅（図7.10）に計算式が表示されます。

すべての選択が終わったら、[OK] をクリックしてレポートウィンドウに戻ります。「モデルの指定」の各機能については、「[「モデルの指定」の詳細](#)」（179ページ）を参照してください。

## 予測列

[予測列] オプションでは、データテーブルの列に計算式として保存した、ユーザ自身が定義したモデルを使用できます。一番簡単な方法は、「劣化データ分析」プラットフォームを起動する前に計算式列を作成しておくことです。また、非線形モデルライブラリに用意されているモデルを利用することもできます。その場合、「劣化データ分析」プラットフォームで計算式列を作成します。

独自のモデル式を作成し、それを計算式として列に保存する方法については、「[「ユーザ自身がモデルを定義する場合](#)」（181ページ）または『予測モデルおよび発展的なモデル』の「非線形回帰」章を参照してください。

図7.8の「式」領域の下に表示されるリストから[予測列]を選択します。すると、「モデルの指定」アウトラインで、モデルを含む列を選択できるようになります。

図7.11 列の選択

モデルの指定

非線形経路

予測式列の選択

電力低下  
デバイス  
時間  
摂氏温度

モデルライブラリ

OK キャンセル

この時点で、次のいずれかの作業を行います。

- 使用するモデルがすでに計算式としてデータテーブルの列に保存されている場合は、ここでその列を選択して **[OK]** をクリックします。「モデルの指定」の「非線形経路」が再び表示されます。「モデルの指定」の各機能については、「**「モデルの指定」の詳細**」(179ページ)を参照してください。
- 使用するモデルがデータテーブルの列にない場合は、**[モデルライブラリ]** ボタンをクリックして、用意されているモデルの中から選ぶことができます。**[モデルライブラリ]** ボタンの使い方については、「**モデルライブラリ**」(182ページ)または『予測モデルおよび発展的なモデル』の「非線形回帰」章を参照してください。モデルが作成されたら、「劣化データ分析」の赤い三角ボタンから **[やり直し]** > **[分析のやり直し]** を選択します。すると、列の選択に戻ります(図7.11)。その後、作成されたモデルを含む列を選択し、**[OK]** をクリックします。そうすると、「モデルの指定」の「非線形経路」が再び表示されます。「モデルの指定」の各機能については、「**「モデルの指定」の詳細**」(179ページ)を参照してください。
- 使用するモデルがデータテーブルになく、用意されたモデルも使用しない場合は、「モデルの指定」を使用できません。まずモデルを作成してから、「劣化データ分析」プラットフォームを再起動して、列の選択画面(図7.11)に戻ってください。その後、作成されたモデルを含む列を選択し、**[OK]** をクリックします。そうすると、「モデルの指定」の「非線形経路」が再び表示されます。「モデルの指定」の各機能については、「**「モデルの指定」の詳細**」(179ページ)を参照してください。

## 「モデルの指定」の詳細

モデルの種類を選び、必要な情報を入力すると、「モデルの指定」の「非線形経路」が再び表示されます。

---

**メモ:** 図7.12に示されている **[編集]** ボタンを表示するには、**[ファイル]** > **[環境設定]** > **[プラットフォーム]** > **[劣化分析]** > **[対話式的計算式エディタを使用]** チェックボックスをオンにしておく必要があります。

---

スクリプトボックスに、**Parameter** ステートメントを使用したモデルが表示されます。パラメータの初期値はデータに基づいて推定されています。パラメータを使用するモデルの作成方法については、『予測モデルおよび発展的なモデル』の「**ユーザ自身がモデルを定義する場合**」(181ページ)、または「非線形回帰」章を参照してください。

必要に応じて、テキストボックスにモデルの名前を入力します。この例では、「Device RR」と入力します。その後、**[使用して保存]** ボタンをクリックしてモデルを登録します。すると、他のボタンや機能が使用可能になります。図7.12は、**[使用して保存]** をクリックした後の「モデルの指定」ウィンドウです。

図7.12 モデルの指定

**モデルの指定**

非線形経路

編集

パラメータ { DInf = -1.4423 , Ru = 0.00049462330664 , Ea = 0.68228682827231 }

式

$$DInf * \left[ 1 - \exp \left[ -Ru * \exp \left[ Ea * \left( \frac{11605}{193.5 + 273.15} - \frac{11605}{\text{摂氏温度} + 273.15} \right) \right] \right] * \text{時間} \right]$$

Device RR Device RR 使用して保存 削除

モデルのあてはめ システムIDごとのあてはめ

現モデルのレポートを生成

パラメータ	推定値	最小値	最大値	固定
DInf	-1.4423	-1.5865	-1.2981	<input type="checkbox"/>
Ru	0.00049	0.00045	0.00054	<input type="checkbox"/>
Ea	0.68229	0.61406	0.75052	<input type="checkbox"/>

- [モデルのあてはめ] ボタンは、指定のモデルをデータにあてはめます。
- [システムIDごとのあてはめ] は、指定したモデルを[ラベル, システムID]変数の水準ごとにあてはめます。
- [削除] ボタンは、モデルのメニューからモデルを削除するときに使います。
- [現モデルのレポートを生成] をクリックすると、現在のモデル設定でレポートが作成されます。「[モデルのレポート](#)」(189ページ)を参照してください。

パラメータの初期値が下部に表示されます。スライダを使ってパラメータ値を変えると、モデルにどのような影響があるかを目で確認することができます。それには、まずプラットフォームの赤い三角ボタンのメニューから[グラフオプション] > [あてはめ線の表示] を選択し、あてはめ線をプロットに表示しておく必要があります。その後、パラメータ値のスライダを移動し、値の変化によるあてはめ線への影響を確認します。

以下は、[反応速度] モデルのパラメータです (Meeker and Escobar, 1998)。

- $D_{\infty}$  ( $D_{\infty}$ ) - 長時間経ったときの劣化度 (時間が無限大になったときの漸近値)
- $R_U$  ( $R_U$ ) - 使用温度 ( $\text{temp}_U$ ) における反応速度
- $E_a$  ( $E_a$ ) - 反応の活性化エネルギー

[反応速度] モデルは、次式のとおりです。

$$D(t; \text{temp}) = D_{\infty} \times \{1 - \exp[-R_U \times AF(\text{temp}) \times t]\}$$

ここで、 $R_U$  は、使用温度  $\text{temp}_U$  における反応速度です。そして、 $R_U \times AF(\text{temp})$  が、特定の温度  $\text{temp}$  における反応速度です。また、 $\text{temp} > \text{temp}_U$  のときには、 $AF(\text{temp}) > 1$  となっています。

この部分は次のように定義されます。

$$AF(temp) = \frac{R(temp)}{R(temp_U)} = \exp \left[ Ea \left( \frac{11605}{(temp_U K)} - \frac{11605}{(temp K)} \right) \right]$$

ここで、 $temp_U K$ と $temp K$ は、ケルビン単位で示した温度です。

パラメータの最適値を求めるには、[モデルのあてはめ] ボタンまたは [システムIDごとのあてはめ] ボタンをクリックします。

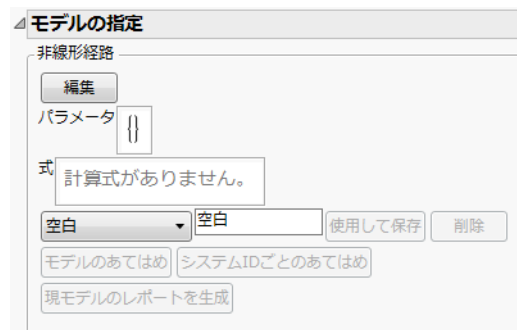
パラメータの値を固定するには、「固定」列の下で、該当するパラメータのチェックボックスをオンにします。固定したパラメータは、モデルをあてはめる際に値が変化しません。

## 計算式エディタを使用したモデル式の入力

環境設定にて [対話式の計算式エディタを使用] チェックボックスをオンにしている場合は、計算式エディタを使用してモデルの式を入力できます。[編集] ボタンをクリックして計算式エディタを開き、パラメータとモデルの式を入力します。計算式エディタでのパラメータと式の入力方法については、『JMPの使用法』の「計算式エディタ」章を参照してください。

メモ: 図7.13に示されている [編集] ボタンを表示するには、[ファイル] > [環境設定] > [プラットフォーム] > [劣化分析] > [対話式の計算式エディタを使用] チェックボックスをオンにしておく必要があります。

図7.13 「モデルの指定」 レポート



## ユーザ自身がモデルを定義する場合

分析者が独自に考えた非線形モデルを推定するには、まず、計算式を含んだ列を作成する必要があります。この計算式で、パラメータとその初期値も設定します。この方法では、手順が少し複雑になりますが、どのような非線形モデルでもあてはめることができます。また、損失関数をユーザ自身で定義したり、反復計算に関する詳細なオプションを選択したりすることもできます。

1. データテーブルを開きます。
2. データテーブルに新しい列を作成します。

3. 新しい列で計算式エディタを開きます。
4. 左下隅にあるリストから **【パラメータ】** を選択します。
5. **【パラメータの新規作成】** をクリックします。
6. パラメータの名前を入力します。
7. パラメータの初期値を入力します。

手順4～6を繰り返し、モデルに含めるすべてのパラメータを作成します。

8. データテーブル列、パラメータ、および計算式エディタの関数を使用してモデル計算式を構築します。
9. **【OK】** をクリックします。

### グループ変数を含むモデルのパラメータ

計算式エディタでパラメータを追加するときに、**【選択された列をカテゴリに展開する】** というチェックボックスを使用できます。このオプションは、カテゴリカルな変数の水準ごとのパラメータを一度に作成するものです（複数のパラメータが一度に追加されます）。このオプションを選択すると、列を選択するためのウィンドウが開きます。列の選択が完了すると、パラメータのリストに「**D\_列名**」という名前の新しいパラメータが表示されます。「**D**」の部分は、パラメータの名前です。計算式にこのパラメータを使用すると、グループ変数の水準ごとに個別のパラメータを含んだ **Match** 式が挿入されます。

## モデルライブラリ

モデルライブラリは、パラメータおよびその初期値が設定された計算式を作成するのに便利です。ライブラリを開くには、「モデルの指定」の下にある **【モデルライブラリ】** をクリックします。リストでモデルを選択すると、その計算式が「**計算式**」ボックスに表示されます。

**【グラフの表示】** をクリックすると、モデルに説明変数が1つしかない場合は2次元上に曲線を、2つある場合は3次元上に曲面プロットを表示します。説明変数（X）が3つ以上あるモデルでは、グラフが作成されません。パラメータのデフォルトの初期値を変更するには、スライダバーを使用するか、値をクリックして新しい値を直接入力します。

**【リセット】** ボタンを押すと、パラメータの初期値がデフォルトの値に戻ります。

プロットに実際のデータ点を表示するには、**【点の表示】** をクリックします。ウィンドウが開いたら、任意の列に [X] と [Y] の役割を割り当て、オプションの **【グループ】** 変数を指定します。**【グループ】** に列を指定すると、カテゴリカル変数の水準ごとにモデルをあてはめることができます。

ほとんどのモデルの場合、初期値は定数です。データ点を表示することにより、モデルがどれほどデータにあてはまるかを確認しながら、パラメータ値を調整することができます。

**【計算式の作成】** をクリックすると、データテーブル内に新しい列が作成されます。この列には、指定された X 変数の関数としての計算式が含まれ、グラフウィンドウ内で指定されたパラメータ値を使用します。

**メモ:** [グラフの表示] ボタンまたは [点の表示] ボタンをクリックする前に [計算式の作成] をクリックした場合は、 $X$  と  $Y$  の役割と、オプションとしてグループ変数を指定するよう求められます。変数を指定するとプロットに戻り、必要に応じてパラメータの初期値を調整することができます。そこでパラメータの初期値を設定した後、もう一度 [計算式の作成] をクリックして新しい列を作成してください。

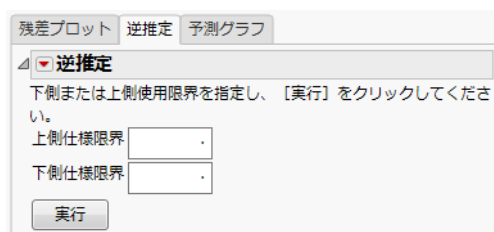
データテーブル内に計算式列が作成されたら、「劣化データ分析」の赤い三角ボタンから [やり直し] > [分析のやり直し] を選択します。すると、列の選択に戻ります (図7.11 (178ページ))。その後、作成されたモデルを含む列を選択し、[OK] をクリックします。そうすると、「モデルの指定」の「非線形経路」が再び表示されます。「モデルの指定」の各機能については、「[「モデルの指定」の詳細](#)」(179ページ) を参照してください。

**メモ:** 非線形モデルライブラリに含まれているモデルは、「NonlinLib.jsl」というビルトインスクリプトを変更することでカスタマイズできます。このスクリプトは、JMPのインストールフォルダ (Windowsの場合) またはアプリケーションパッケージ (Macintoshの場合) にある「Resources/Builtins」フォルダに含まれています。

## 逆推定

[逆推定] タブでは、指定された値に  $Y$  変数が達するときの時間を予測できます。この予測された時間は、疑似故障時間 (pseudo failure time) と呼ばれることがあります。図7.14に [逆推定] タブを示します。

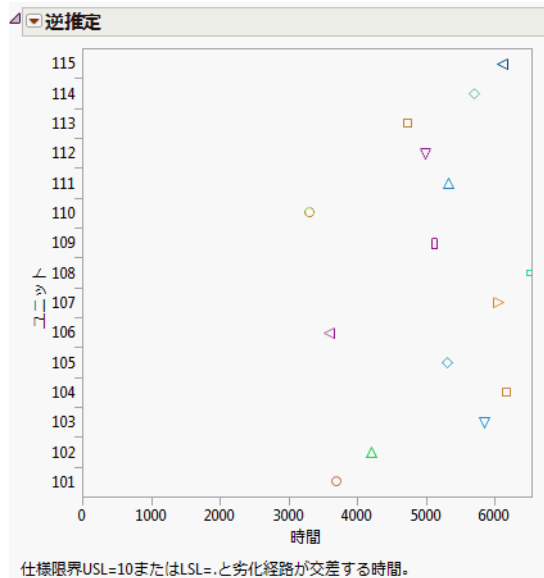
図7.14 [逆推定] タブ



「下側仕様限界」または「上側仕様限界」に値を入力します。一般に、 $Y$  変数が時間経過に伴って減少する場合は、下側仕様限界を入力します。 $Y$  変数が増加する場合は、上側仕様限界を入力します。

「GaAs Laser」サンプルデータを使用した例で、「上側仕様限界」に「10」と入力し、[実行] をクリックしてください。ユニットの電流上昇が10%になる推定時間を示すプロットが作成されます。図7.15を参照してください。

図7.15 「逆推定」プロット



「逆推定」の赤い三角ボタンをクリックすると、次のようなオプションが表示されます。

**交差時間の保存** 疑似故障時間を新しいデータテーブルに保存します。このテーブルには、「寿命の一変量」または「寿命の二変量」スクリプトが含まれています。このスクリプトを用いて、疑似故障時間に確率分布をあてはめることができます。[逆推定 区間] でどちらかの区間を選択した場合は、その区間もテーブルに含まれます。

**上側仕様限界の設定** 上側仕様限界を設定します。

**下側仕様限界の設定** 下側仕様限界を設定します。

**打ち切り時間の設定** 打ち切り時間を設定します。プロットが更新されて、打ち切り時間が縦の点線で描かれます。[逆推定 区間] > [区間なし] を選択した場合、打ち切り時間を超えた観測値は、打ち切り時間から開始される横線で描かれます。[信頼区間] または [予測区間] を選択した場合、上側信頼限界が打ち切り時間を超えたときには、横線が描かれます。設定された打ち切り時間は、[交差時間の保存] と [疑似故障データの生成] を使って作成されたデータテーブルにも反映されます。

**データによる補間の使用** あてはめたモデルではなく、線形補間によって点間を補間して、各ユニットが仕様限界と交差する時間を予測します。線形補間の方法は、ユニットの最後の観測値が仕様限界を超えているかどうかによって、次のように異なります。

- － 仕様限界を超える観測値があるユニットに対しては、仕様限界を挟んでいる観測値を用いて、線形補間により逆推定値を求めます。
- － 仕様限界を超える観測値がないユニットに対しては、逆推定値を右側打ち切りとします。「そのユニットは、最終時間において、仕様限界に達していない」という情報だけを使います。

**逆推定 区間** 「逆推定」プロットにおける疑似故障時間に対して、信頼区間または予測区間を表示します。どちらかの区間を選択すると、その区間が「交差時間の保存」オプションで作成されるデータテーブルにも保存されます。

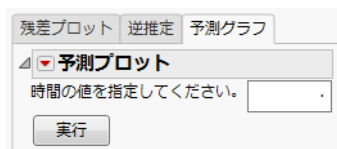
**逆推定 有意水準** 区間で使用する有意水準を指定します。

**逆推定 方向** 区間が片側か両側かを指定します。

## 予測グラフ

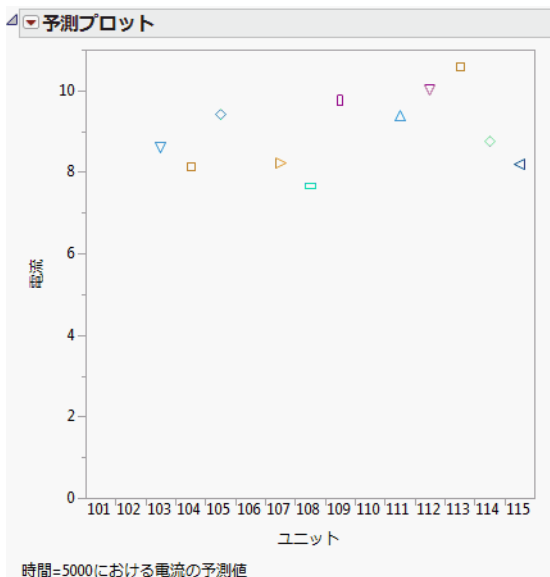
「予測グラフ」タブでは、指定の時間値に対する、Y変数の予測値を求めます。図7.16は「予測グラフ」タブです。

図7.16 「予測グラフ」タブ



「GaAs Laser」サンプルデータの例では、4000時間以降のデータは収集されていません。5000時間後における電流上昇率を予測するには、「5000」と入力して【実行】をクリックします。5000時間後における電力低下率の推定値を示すプロットが作成されます。図7.17を参照してください。

図7.17 予測グラフ



「予測グラフ」の赤い三角ボタンをクリックすると、次のようなオプションが表示されます。

**予測の保存** Yの予測値をデータテーブルに保存します。[縦軸予測 区間] でどちらかの区間を選択した場合は、その区間もデータテーブルに含まれます。

**縦軸予測 区間** 「予測プロット」におけるYの予測値に対して、信頼区間または予測区間を表示します。どちらかの区間を選択すると、その区間値が、[予測の保存] オプションで作成されるデータテーブルにも保存されます。

**縦軸予測 時間** Yの予測値を求めたい時間の値を指定します。

**縦軸予測 有意水準** 区間で使用する有意水準を指定します。

## 「劣化データ分析」プラットフォームのオプション

「劣化データ分析」の赤い三角ボタンをクリックすると、表7.2に示すオプションが表示されます。

表7.2 「劣化データ分析」プラットフォームのオプション

オプション	説明
経路の定義	ある時間におけるY変数が、特定の確率分布に従うものと仮定されます。そして、その確率分布の平均・位置パラメータ・メディアン（中央値）のいずれかをモデル化することができます。
平均経路	平均をモデル化します。
位置パラメータ経路	位置パラメータをモデル化します。
メディアン経路	分布のメディアン（中央値）をモデル化します。
	[位置パラメータ経路] または「メディアン経路」オプションを選択した場合は、「モデルの指定」にメニューが表示されます。このメニューから応答の確率分布を選択します。図7.18を参照してください。

図7.18 分布の指定

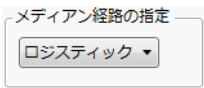


表 7.2 「劣化データ分析」プラットフォームのオプション（続き）

オプション	説明
劣化経路の種類	<p>あてはめる劣化経路の種類をサブメニューから選択します。</p> <p><b>単純線形経路</b> 線形の経路、または線形に変数変換できる非線形の経路をあてはめる際に使用します。詳細については、「<a href="#">単純線形経路</a>」（173 ページ）を参照してください。</p> <p><b>非線形経路</b> 非線形の経路をあてはめる際に使用します。詳細については、「<a href="#">非線形経路</a>」（175 ページ）を参照してください。</p>
グラフオプション	<p>サブメニューが開き、プラットフォームのグラフを変更するためのオプションが表示されます。</p> <p><b>データマーカーをつなぐ</b> 重ね合わせプロット上の点をつなぐ折れ線の表示／非表示を切り替えます。</p> <p><b>あてはめ線の表示</b> 重ね合わせプロット上のあてはめ線の表示／非表示を切り替えます。</p> <p><b>仕様限界の表示</b> 重ね合わせプロット上の仕様限界の表示／非表示を切り替えます。</p> <p><b>残差プロットの表示</b> 残差プロットの表示／非表示を切り替えます。</p> <p><b>逆推定プロットの表示</b> 逆推定プロットの表示／非表示を切り替えます。</p> <p><b>曲線区間の表示</b> 重ね合わせプロット上のあてはめ線に対する信頼区間の表示／非表示を切り替えます。</p> <p><b>曲線区間の有意水準</b> あてはめ線に対する信頼区間の有意水準を変更することができます。</p> <p><b>メディアン曲線の表示</b> 〔経路の定義〕で〔位置パラメータ経路〕が選択されている場合に、プロット上の中央値を示す線の表示／非表示を切り替えます。</p> <p><b>凡例の表示</b> 重ね合わせプロットで使用するマーカーの凡例の表示／非表示を切り替えます。</p> <p><b>タブなし</b> 「残差プロット」・「逆推定」・「予測グラフ」をタブ形式で表示するか、縦に重ねて表示するかを切り替えます。</p>

表7.2 「劣化データ分析」プラットフォームのオプション（続き）

オプション	説明
予測の設定	モデルの予測で使用する設定を変更できます。  <b>上側仕様限界</b> 上側仕様限界を指定します。  <b>下側仕様限界</b> 下側仕様限界を指定します。  <b>打ち切り時間</b> 打ち切り時間を指定します。「 <a href="#">逆推定</a> 」（183ページ）を参照してください。  <b>基準</b> X変数における通常の使用条件を指定します。非線形経路をあてはめるときに、指定したX値のあてはめ線が、重ね合わせプロットに描かれます。この値の経路が通常、「重ね合わせ」プロットに表示されます。  <b>逆推定</b> 逆推定について、区間の種類、有意水準、区間が片側か両側かを指定します。逆推定を行うには、下側または上側の仕様限界も指定する必要があります。  逆推定については、「 <a href="#">逆推定</a> 」（183ページ）を参照してください。  <b>縦軸予測</b> 縦軸予測について、時間値・区間の種類・有意水準を指定します。  縦軸予測については、「 <a href="#">予測グラフ</a> 」（185ページ）を参照してください。
適用分野	劣化データのさらなる分析方法をメニューから選択できます。  <b>疑似故障データの生成</b> 各ユニットが仕様限界と交差する時間の予測値（疑似故障時間）をデータテーブルにまとめます。このテーブルには、「寿命の一変量」または「寿命の二変量」スクリプトが含まれています。このスクリプトを用いて、疑似故障時間に分布をあてはめることができます。  <b>安定性試験</b> 安定性試験の分析を実行します。詳細については、「 <a href="#">安定性試験</a> 」（195ページ）を参照してください。

以下のオプションについて詳しくは、『JMPの使用法』の「JMPのレポート」章を参照してください。

**ローカルデータフィルタ** 現在のレポートにおいて、データをフィルタリングするローカルデータフィルタの表示／非表示を切り替えます。

**やり直し** 分析を繰り返したり、やり直したりするオプションを含みます。また、[自動再計算] オプションに対応しているプラットフォームにおいては、[自動再計算] オプションを選択すると、データテーブルに加えた変更が、該当するレポートに即座に反映されるようになります。

**スクリプトの保存** レポートを再現するためのスクリプトを保存するオプションが、保存先ごとに用意されています。

**By グループのスクリプトを保存** By 変数の全水準に対するレポートを再現するためのスクリプトを保存するオプションが、保存先ごとに用意されています。起動ウィンドウでBy 変数を指定した場合のみ使用可能です。

## モデルのレポート

[**現モデルのレポートを生成**] ボタンをクリックすると、次の2か所に要約が表示されます。

- 「モデルリスト」に情報が追加されます。詳細については、「[モデルリスト](#)」(189 ページ) を参照してください。
- 「レポート」に情報が追加されます。詳細については、「[レポート](#)」(190 ページ) を参照してください。

## モデルリスト

「モデルリスト」レポートには、あてはめたモデルの要約統計量と、その他のオプションが表示されます。図 7.19 は「モデルリスト」の一例で、3つのモデルの要約統計量が表示されています。

図 7.19 モデルリスト

モデルリスト										
表示	モデルの種類	レポート	パラメータ数	-2対数尤度	AICc	BIC	SSE	自由度	説明	
<input type="radio"/>	1 単純線形経路	<input checked="" type="checkbox"/>	30	-179.299	-110.995	-13.0606	7.39094	225	切片:別々; 傾き:別々; Y:線形; X:線形	
<input type="radio"/>	2 単純線形経路	<input checked="" type="checkbox"/>	16	-115.57	-81.2841	-26.9096	9.489362	239	切片:共通; 傾き:別々; Y:線形; X:線形	
<input checked="" type="radio"/>	3 単純線形経路	<input checked="" type="checkbox"/>	2	756.146	760.1936	767.2286	289.6476	253	切片:共通; 傾き:共通; Y:線形; X:線形	

**表示** 重ね合わせプロット・残差プロット・逆推定プロット・予測グラフに表示するモデルを選択します。

**モデルの種類** 経路の種類（線形もしくは非線形）が表示されます。

**レポート** チェックボックスをオンにすると、該当するモデルのレポートが表示されます。レポートの詳細については、「[レポート](#)」(190 ページ) を参照してください。

**パラメータ数** 推定されたモデルパラメータの個数。

**-2対数尤度** 対数尤度をマイナス2 倍したもの。『基本的な回帰モデル』の付録「統計的詳細」を参照してください。

**AICc** 修正済みの赤池の情報量規準。『基本的な回帰モデル』の付録「統計的詳細」を参照してください。

**BIC** ベイズ情報量規準。『基本的な回帰モデル』の付録「統計的詳細」を参照してください。

**SSE** モデルの誤差平方和 (Sum of Squaree Errors)。

**自由度** 誤差の自由度。

**説明** モデルの説明。

## レポート

レポートには、あてはめたモデルの詳細が表示されます。「モデルの要約」レポートや「推定値」レポートが表示されます。

「モデルの要約」レポートには、次の情報が表示されます。

**<Y, 目的変数>のスケール** 応答変数を変数変換した式。

**<時間>のスケール** 時間変数を変数変換した式。

**SSE** 誤差平方和 (Sum of Squared Errors)。

**パラメータ数** 推定されたモデルパラメータの個数。

**自由度** 誤差の自由度。

**R2乗** R2乗値 (決定係数、寄与率)。

**MSE** 誤差の平均平方 (Mean Squared Error)。

「推定値」レポートには、次の情報が表示されます。

**パラメータ** パラメータの名前。

**推定値** パラメータの推定値。

**標準誤差** パラメータ推定値の標準誤差。

**t値** 推定値÷標準誤差で求めた、パラメータに対するt統計量。

**p値 (Prob>|t|)** パラメータに対する両側検定のp値。

---

## 破壊劣化

製品の特性を調べる際、製品を破壊しなければならない場合があります。たとえば、破壊強度を調べるときは、破壊に至るまで製品に圧力を加えます。こうしたケースには、通常の劣化分析は適用できません。次のいずれかの方法を使用します。

- 仮定する故障時間モデルが標準的なものであれば、「破壊劣化」プラットフォームで分析できます。[「破壊劣化」](#) 章 (199ページ) を参照してください。
- 時間または応答のカスタム変換や、カスタムの非線形モデルを使用する場合は、「劣化データ分析」プラットフォームを使用します。「劣化データ分析」プラットフォームの起動ウィンドウで、[破壊劣化] タブを選択してください。

### 加速破壊劣化の例

ここでの例では、独自の非線形モデルを自分で指定します。このデータテーブルには、接着剤の強度に関する測定データが記録されています。接着剤がはがれるまで製品に圧力を加え、必要な破壊応力を記録しました。通常の使用条件下ではユニットが破壊することは稀なので、加速因子（温度）でいくつかの水準を設定して試験しました。25°Cの状態では52週間（1年間）使用した後のユニットの強度（単位はニュートン）を推定してみましょう。

### 起動ウィンドウへの入力

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「Adhesive Bond.jmp」を開きます。
2. [分析] > [信頼性分析/生存時間分析] > [劣化分析] を選択します。
3. [破壊劣化] タブを選択します。
4. 「強さ」を選択し、[Y, 目的変数] をクリックします。
5. 「週数」を選択し、[時間] をクリックします。
6. 「温度」を選択し、[X] をクリックします。
7. 「打ち切りの有無」を [打ち切り] に指定します。

図7.20 設定後の起動ウィンドウ

The screenshot shows the 'Accelerated Degradation Analysis' dialog box. It has three tabs: '反復測定劣化' (Repeated Measures Degradation), '破壊劣化' (Degradation), and '安定性試験' (Stability Test). The '破壊劣化' tab is selected. The '列の選択' (Select Columns) section on the left shows a list of columns: '温度' (Temperature), '週数' (Weeks), '打ち切りの有無' (Censoring Status), and '強さ' (Strength). The '打ち切りの有無' column is highlighted. Below this list, there are fields for '打ち切りの値' (Censoring Value) set to 'Right', '上側仕様限界' (Upper Specification Limit), '下側仕様限界' (Lower Specification Limit), and '打ち切り時間' (Censoring Time). The '選択した列に役割を割り当てる' (Assign Roles to Selected Columns) section in the center shows the following assignments: 'Y, 目的変数' (Y, Response) is '強さ' (Strength); '時間' (Time) is '週数' (Weeks); 'X' is '温度' (Temperature); '度数' (Degrees) is 'オプション(数値)' (Option (Numeric)); '打ち切り' (Censoring) is '打ち切りの有無' (Censoring Status); and 'By' is 'オプション' (Option). The 'アクション' (Actions) section on the right contains buttons for 'OK', 'キャンセル' (Cancel), '削除' (Delete), '前回の設定' (Previous Settings), and 'ヘルプ' (Help).

8. [OK] をクリックします。

### モデルの定義とあてはめ

1. 「モデルの指定」アウトラインにある「位置パラメータ経路の指定」パネルのメニューから [対数正規] を選択します。

これにより、応答「強さ」に対数正規変換が指定されます。

2. 「劣化データ分析」の赤い三角ボタンのメニューから、[劣化経路の種類] > [非線形経路] を選択します。

これにより、スクリプトウィンドウがレポートに追加されます。このウィンドウに、モデルを指定するスクリプトを挿入します。

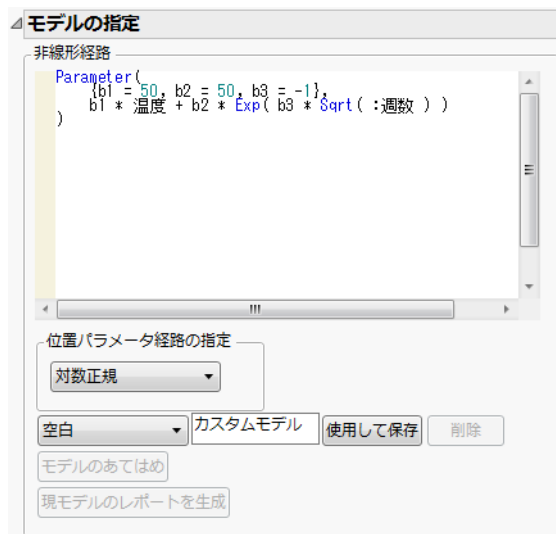
3. 次のJSL式をコピーし、「非線形経路」の下のスクリプトウィンドウに貼り付けます。

```
Parameter(  
  {b1 = 50, b2 = 50, b3 = -1},  
  b1 * :温度 + b2 * Exp( b3 * Sqrt( :週数 ) )  
)
```

このスクリプトは、b1、b2、b3 というパラメータをもつモデルを定義し、また、それらのパラメータの初期値を設定しています。

4. レポートの下部にあるテキストボックスの「空白」という文字を「カスタムモデル」に変更します。

図7.21 非線形経路スクリプト



5. [使用して保存] をクリックします。

図7.22 更新された「モデルの指定」アウトライン

カスタムモデル

カスタムモデル

使用して保存

削除

モデルのあてはめ

現モデルのレポートを生成

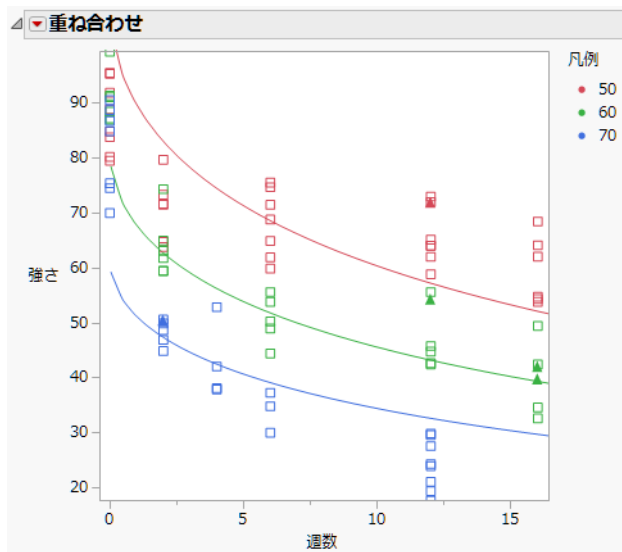
$$b1 * \text{温度} + b2 * \text{Exp} \left( b3 * \sqrt{\text{週数}} \right)$$

パラメータ	推定値	最小値	最大値	固定
b1	50	45	55	<input type="checkbox"/>
b2	50	45	55	<input type="checkbox"/>
b3	-1.1	-1.1	-0.9	<input type="checkbox"/>
Sigma	1	0.9	1.1	<input type="checkbox"/>

レポートが更新され、パラメータの初期値を変更するためのコントロールが表示されます。パラメータの初期値は、スクリプトエディタ内で指定した値に設定されます。

6. [モデルのあてはめ] をクリックします。

図7.23 あてはめたモデルのプロット



「モデルの指定」アウトラインのパラメータパネルが更新され、あてはめたモデルのパラメータ推定値が表示されます。「重ね合わせ」プロットには、モデルのあてはめ結果が表示されます。軸をドラッグすると、見えていない点を表示できます（図7.23）。図の右上側にある凡例において、各曲線がどの温度に対応しているかが示されています。

### 予測値と予測区間を求める

次に、25°Cを基準として52週間使用した後の「強さ」の予測値と予測区間を求めましょう。

1. 「劣化データ分析」の赤い三角ボタンのメニューから、[予測の設定] を選択します。
2. 「予測の設定」ウィンドウで：
  - － 「基準」に「25」と入力します。
  - － 「縦軸予測」パネルの「時間」に「52」と入力します。
  - － 「縦軸予測」パネルのメニューから [予測区間] を選択します。

図7.24 予測の設定

上側仕様限界 .

下側仕様限界 .

打ち切り時間 .

基準 25

逆推定

区間なし ▼

縦軸予測

時間 52

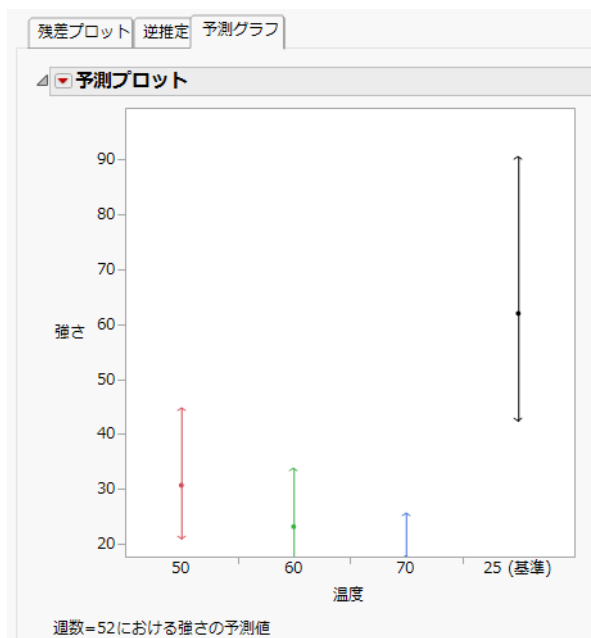
予測区間 ▼

Alpha 0.05

OK キャンセル

3. [OK] をクリックします。
4. レポートの [予測グラフ] タブを選択します。

図7.25 週数52の予測プロット



「予測プロット」には、25（基準）という軸ラベルの上に、予測値と95%水準の予測区間が表示されます。

5. 「予測プロット」の赤い三角ボタンのメニューから、[予測の保存] を選択します。

「温度」の3つ値（50度・60度・70度）と、基準値である25度に対して、予測値がデータテーブルに保存されます。25°Cの環境下で1年間使用した接着剤の予測強度は61.96で、予測区間は42.42～90.50です。

## 安定性試験

安定性試験データの分析は、医薬品の有効期間を設定する際に使われているものです。JMPでの処理は、FDAのガイドラインの統計分析部分に基づき作成されたChow（2007）の付録Bに従い、3種類の線形劣化データ分析モデルから1つのモデルを選び、有効期間を推定します。3種類の線形モデルは、次のとおりです。

モデルⅠ 傾きと切片がバッチごとに別々

モデルⅡ 傾きは共通だが、切片はバッチごとに別々

モデルⅢ 傾きと切片がすべてのバッチで共通

次のような手順によって、モデルが選択されます。

1. 上記の「モデルⅠ」をあてはめます。時間効果・バッチ効果・交互作用効果の順でモデルに含め、タイプⅠ平方和（逐次平方和）を計算します。タイプⅠ平方和によって、傾きの同一性に対する検定を行います（この検定は、レポートでは「要因C」に対する検定として出力されます）。
  - －  $p$  値が0.25未満の場合、傾きはバッチ間で異なると判断します。そして、「モデルⅠ」によって、有効期間を推定します。
  - －  $p$  値が0.25以上の場合、傾きはすべてのバッチで等しいと判断し、手順2に進みます。
2. 手順1で傾きはすべて同じであると判断した場合、次に、切片の同一性に対する検定を行います。先ほどと同様、モデルⅡで得られたタイプⅠ平方和を用いて検定します（この検定は、レポートでは「要因B」に対する検定として出力されます）。
  - －  $p$  値が0.25未満の場合、切片はバッチ間で異なると判断します。そして、上記の「モデルⅡ」によって有効期間を推定します。
  - －  $p$  値が0.25以上の場合、切片はすべてのバッチで等しいと判断します。そして、上記の「モデルⅢ」によって有効期間を推定します。

なお、「傾きと切片が別々」である「モデルⅠ」によって有効期間を推定する時に、JMPでは、各バッチの誤差平方和をプールしないことにご注意ください。バッチごとに別々に求められたそれぞれの誤差平方和によって、バッチごとに信頼区間を計算し、それらのなかで最初に仕様限界と交差している時点を、有効期間とします。

---

**注意：**「劣化データ分析」レポートにおける残差プロットの下モデルの番号付けは、必ずしも「安定性試験」レポートのモデルの順序に対応していません。デフォルトでは、「劣化データ分析」レポートにおける残差プロットの下にある「モデル1」はプールされた誤差平方和を使用しており、「安定性試験」レポートにおける交差時間の計算には使われません。「モデル2」は、「安定性試験」レポートのモデルⅡと同じものです。「モデル3」は、「安定性試験」レポートのモデルⅢと同じものです。「モデル4」は、「安定性試験」レポートのモデルⅠと同じものです。また、「安定性試験」オプションを行う前後に他のモデルをあてはめた場合、上記のモデル番号の対応は成立しない可能性があります。

---

## 例

「Stability.jmp」サンプルデータを分析してみましょう。このテーブルには、4つのバッチの医薬品で測定した化学濃度が記録されています。濃度が95になった時点で、医薬品は有効ではないと判断します。このデータをもとに、新規の医薬品の有効期間を設定します。

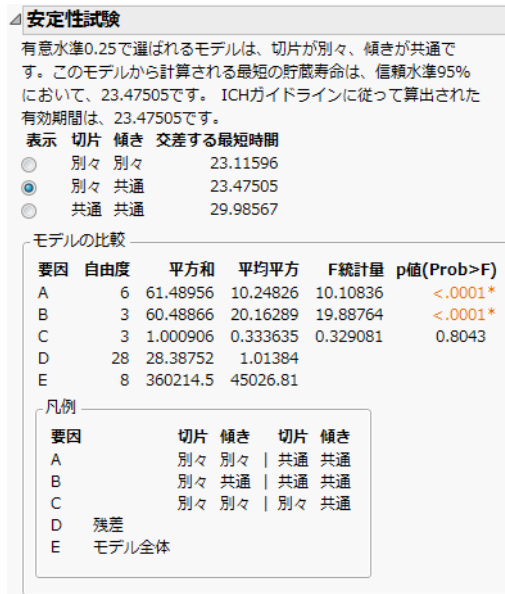
安定性解析を実行するには、次の手順に従ってください。

1. [ヘルプ]>[サンプルデータライブラリ]を選択し、「Reliability」フォルダにある「Stability.jmp」を開きます。
2. [分析]>[信頼性分析/生存時間分析]>[劣化分析]を選択します。
3. [安定性試験] タブを選択します。
4. 「濃度(mg/Kg)」を選択し、[Y, 目的変数] をクリックします。
5. 「時間」を選択し、[時間] をクリックします。

6. 「バッチ番号」を選択し、[ラベル, システムID] をクリックします。
7. 「下側仕様限界」に「95」と入力します。
8. [OK] をクリックします。

最初に表示されるレポートの一部を図7.26に示します。

図7.26 安定性試験のモデル



共通の傾きに対する検定は、 $p$  値が0.8043です。有意水準の0.25より大きい値であるため、この検定は棄却されません。そこで、傾きは等しいと判断します。

共通の切片に対する検定は、 $p$  値が0.0001より小さくなっています。有意水準の0.25より小さい値であるため、この検定は棄却され、切片がバッチ間で異なると判断します。

共通の傾きに対する検定は棄却されず、共通の切片に対する検定は棄却されたため、「切片」が「別々」で「傾き」が「共通」のモデルが妥当であろうと判断します。レポートではこのモデルが選択され、有効期間の推定値として23.475と表示されています。



# 第8章

## 破壊劣化

### 破壊試験データから製品の劣化をモデル化する

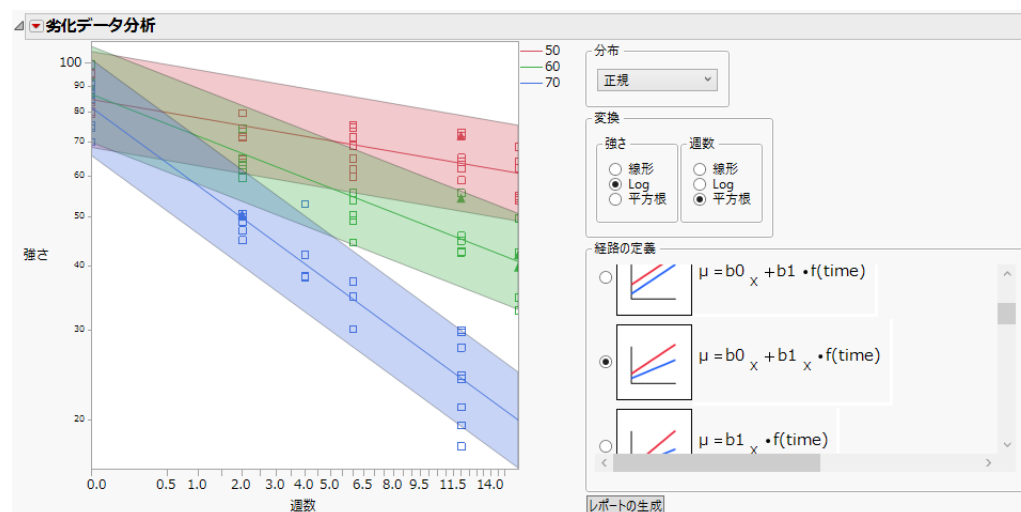
製品における劣化の程度を調べる際、製品を破壊しなければならない場合があります。たとえば、製品の強度を調べるときは、製品に圧力を加え、破壊したときの圧力を測定します。このような破壊試験では、測定において製品が破壊されるために、どの製品ユニットにも測定値は1つしかありません。「破壊劣化」プラットフォームは、このような破壊試験データを分析し、製品の信頼性を調べます。

「破壊劣化」プラットフォームには、応答変数（通常は非負のデータ）の経時的変化を表すモデルが用意されています。それらのモデルでは、破壊して測定したときの測定値や故障時間は互いに独立と仮定されます。このプラットフォームでは、様々なモデルが予め用意されています。それらのモデルには、位置パラメータが時間の関数となっている位置-尺度分布や対数-位置-尺度分布があります。モデルには、説明変数やその他のパラメータを追加できます。「破壊劣化」プラットフォームで説明変数を指定することにより、加速破壊劣化モデルをあてはめることができます。

**メモ:** このプラットフォームで用意されているモデルの中に希望しているものがない場合は、「劣化データ分析」プラットフォームを使用してください。「劣化データ分析」章の「破壊劣化」（190ページ）を参照してください。

破壊劣化モデルや信頼性モデルについての詳細は、Escobar et al. (2003) および Meeker and Escobar (1998) を参照してください。

図8.1 「Adhesive Bond.jmp」の破壊劣化モデルの例



目次

「破壊劣化」プラットフォームの例..... 201

「破壊劣化」プラットフォームの起動..... 207

    2つのY列の指定..... 208

「破壊劣化」プロットのオプションとモデル..... 209

    プロットのオプション..... 210

    モデル..... 210

「破壊劣化」レポート..... 214

    モデルリスト..... 214

    モデルのアウトライン..... 215

「破壊劣化」プラットフォームのオプション..... 217

破壊劣化モデルの統計的詳細..... 218

## 「破壊劣化」プラットフォームの例

本節で述べる加速破壊劣化モデルの例は、Escobar et al. (2003) の例を参考にしています。このデータテーブルには、接着剤の強度（単位はニュートン）に関する測定値が記録されています。この試験では、加速因子として温度が使われています。接着剤がはがれるまで製品に圧力を加え、強度を記録しました。通常の使用条件下ではユニットが故障することは稀なので、加速因子でいくつかの水準を設定して試験しました。強度が50ニュートン以下の場合、故障とみなされます。摂氏35度の使用条件下で260週間（5年間）経過後、強度が50ニュートンを下回る割合を推定します。

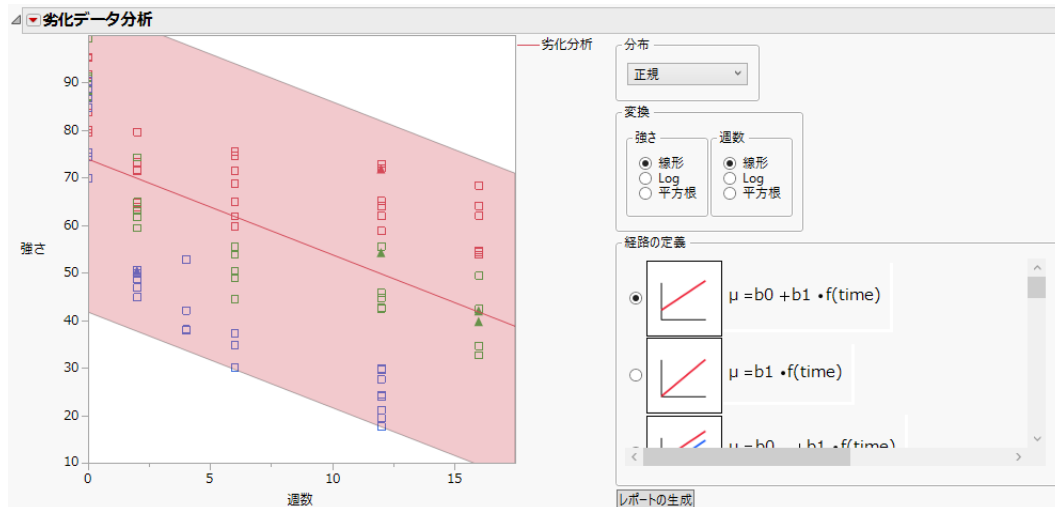
この例の分析には3つの段階があります。

- 「最初の分析を行う」(201 ページ)
- 「モデルを変更してレポートを生成する」(202 ページ)
- 「予測プロファイルの使用」(205 ページ)

### 最初の分析を行う

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「Adhesive Bond.jmp」を開きます。
2. [分析] > [信頼性分析/生存時間分析] > [破壊劣化] を選択します。
3. 「強さ」を選択し、[Y, 目的変数] をクリックします。
4. 「週数」を選択し、[時間] をクリックします。
5. 「温度」を選択し、[X] をクリックします。  
温度は、この実験における加速因子です。
6. 「打ち切りの有無」を [打ち切り] に指定します。  
[打ち切りの値] が「Right」（右側）になっていることを確認してください。
7. [OK] をクリックします。

図8.2 最初の劣化プロット



プラットフォームによってデフォルトのモデルが指定されます。デフォルトのモデルは、位置パラメータが時間の線形関数となっている正規分布です。

#### モデルを変更してレポートを生成する

1. Y（「強度」）の変換に [Log] を選択します。
2. 時間（「週数」）の変換に [平方根] を選択します。
3. 「経路の定義」において  $\mu = b0_x + b1_x * f(\text{time})$  を選択します。

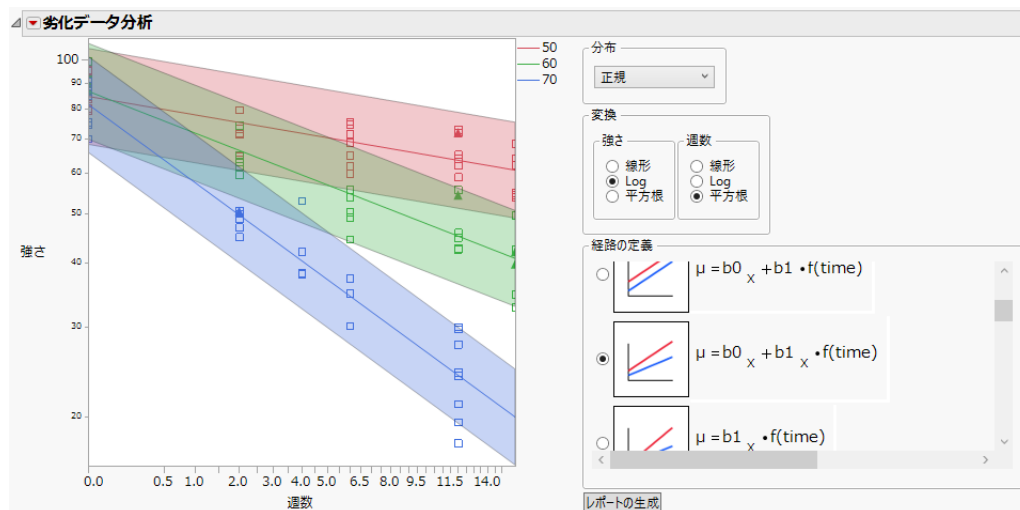
添え字の「x」は加速因子を表し、この例では「温度」です。

---

メモ: このモデルはすべてのパラメータにおいて線形です。

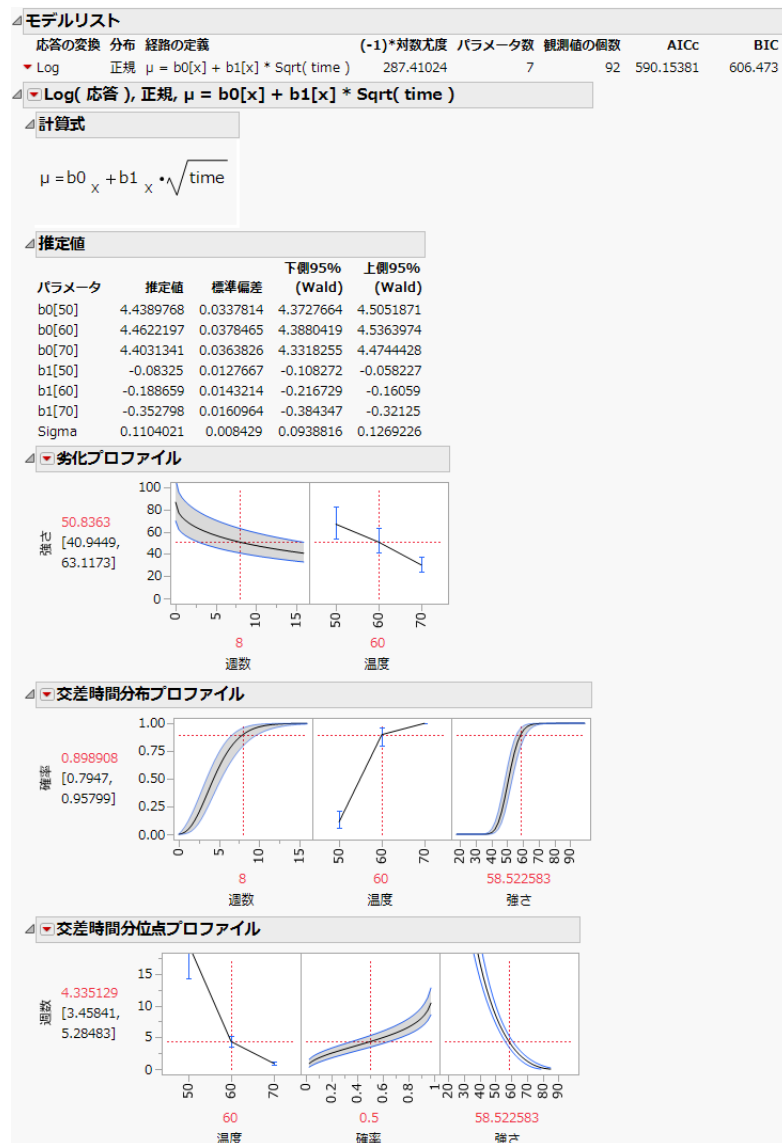
---

図8.3 モデルを表示したプロット



4. [レポートの生成] をクリックします。

図8.4 基本的なモデルのレポート



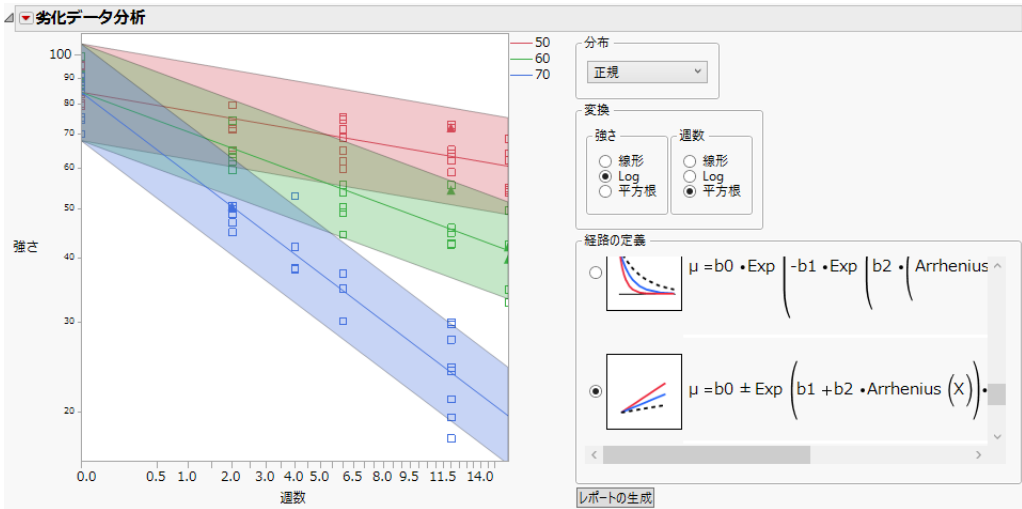
「温度」の3つの水準における傾き  $b1$  の推定値を見ると、温度が高いほど劣化が早く起こっていることがわかります。化学反応に左右される故障のメカニズムは、多くの場合、温度に関する Arrhenius モデルを使うとうまくモデル化できます。そのため、ここで「温度」(摂氏)に Arrhenius 変換を適用したモデルをあてはめましょう。

5. 「経路の定義」に  $\mu = b0 \pm \text{Exp}(b1 + b2 * \text{Arrhenius}(X)) * f(\text{time})$  を選択します。

メモ: このモデルはパラメータにおいて線形ではありません。

6. [摂氏] を選択して [OK] をクリックします。

図8.5 Arrhenius変換を行ったモデルを表示したプロット



7. [レポートの生成] をクリックします。

図8.6 Arrhenius変換を行った2番目のモデルを含んだレポート

モデルリスト

応答の変換	分布	経路の定義	(-1)*対数尤度	パラメータ数	観測値の個数	AICc	BIC
▼ Log	正規	$\mu = b0[x] + b1[x] * \text{Sqrt}(\text{time})$	287.41024	7	92	590.15381	606.473
▼ Log	正規	$\mu = b0 - \text{Exp}(b1 + b2 * \text{Arrhenius}(X)) * \text{Sqrt}(\text{time})$	288.09559	4	92	584.65095	594.27834

▼ Log( 応答 ), 正規,  $\mu = b0[x] + b1[x] * \text{Sqrt}(\text{time})$

▼ Log( 応答 ), 正規,  $\mu = b0 - \text{Exp}(b1 + b2 * \text{Arrhenius}(X)) * \text{Sqrt}(\text{time})$

計算式

$$\mu = b0 - \text{Exp}\left(b1 + b2 * \text{Arrhenius}(X)\right) * \sqrt{\text{time}}$$

推定値

パラメータ	推定値	標準偏差	下側95% (Wald)	上側95% (Wald)
b0	4.4354686	0.0205347	4.3952214	4.4757158
b1	22.825503	1.4029332	20.075805	25.575202
b2	-0.704728	0.0414658	-0.786	-0.623457
Sigma	0.1114956	0.0085011	0.0948337	0.1281574

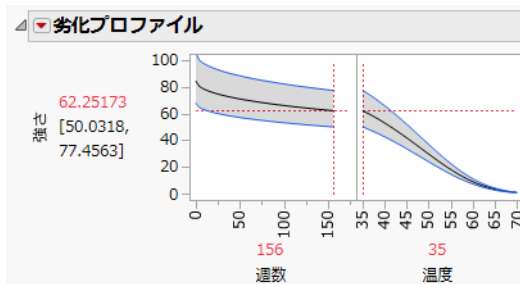
### 予測プロファイルの使用

Arrheniusモデルの方がAICcとBICの値が小さく、あてはまりが良いことがわかります(図8.6)。このモデルを使って分析を進めましょう。

この例では、接着の強度が50ニュートン以下なら故障とみなすということでした。摂氏35度である環境で156週間（3年間）経つと、強度がどれぐらいになるかを確かめてみます。プロファイルの設定をこれらの値に変更します。各プロットで、横軸の下に赤字の値をクリックし、新しい値を入力します。

1. Arrheniusモデルの「劣化プロファイル」で、「週数」を156、「温度」を35とします。

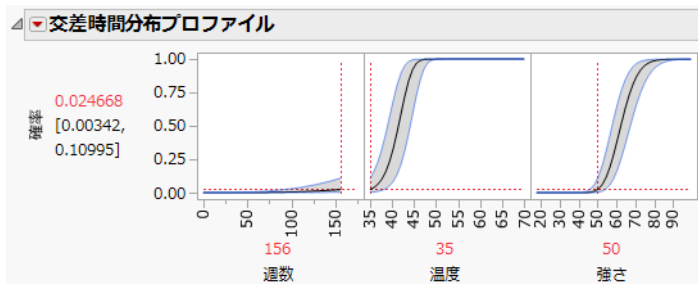
図8.7 劣化プロファイル



以上の設定の「強さ」は62.25173、95%予測区間は50.0318～77.4563です。この温度と経過時間においてはあまり故障しないと考えられます。

2. 「交差時間分布プロファイル」で、「週数」を156、「温度」を35、そして「強さ」を50とします。

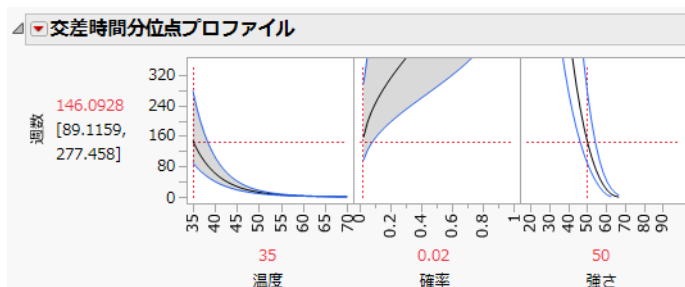
図8.8 交差時間分布プロファイル



摂氏35度で156週間使用したとき、「強さ」の値が50以下になる確率は0.024668です。95%信頼区間は0.00342～0.10995です。つまり、この設定において故障する確率は約2%です。

3. 「交差時間分位点プロファイル」で、「温度」を35、「確率」を0.02、そして「強さ」を50とします。
4. 「交差時間分位点プロファイル」の縦軸を、最大値がたいだい350になるように調整します。

図8.9 交差時間分位点プロファイル



摂氏35度で2%のユニットが故障する週数は、146.0928週と予測されます。95%信頼区間は89.1159～277.458です。

## 「破壊劣化」プラットフォームの起動

「破壊劣化」プラットフォームを起動するには、[分析] > [信頼性分析/生存時間分析] > [破壊劣化] を選択します。図8.10は、「Reliability」フォルダにある「Adhesive Bond.jmp」データテーブルを使用した「破壊劣化」起動ウィンドウです。

図8.10 「破壊劣化」起動ウィンドウ

「破壊劣化」起動ウィンドウには、次のようなオプションがあります。

**Y, 目的変数** 劣化の測定値を含む列を指定します。なお、測定値が区間打ち切りである場合には、2つの列を指定してください。[「2つのY列の指定」](#) (208ページ) を参照してください。

**時間** 時間値を含む列を指定します。

**X (オプション)** 説明変数を指定します。劣化に関する測定値 (Y) 分布が、時間による変化だけでなく他の変数にも影響を受ける場合、その追加の変数をXに指定してください。指定されたX変数は、加速破壊劣化モデルにおける加速因子として使われます。

**度数** 1行のデータが複数のユニットを表している場合に、その度数（すなわち、観測値の個数）を含んでいる列を指定します。この列の値が0または正の整数であるとき、その値は該当する行の観測値の度数（個数）を表しています。

**打ち切り**（オプション）測定値が右側打ち切りであるかどうかを示す列を指定します。Yの役割に指定された列が1つだけの場合、Yの値は、正確な故障時間か右側打ち切りデータかのいずれかです。右側打ち切りデータとは、正確な故障時間は不明ですが、それがYの値より大きいことはわかっているデータのことです。

[打ち切りの値] において右側打ち切りであることを示すデータ値を選択してください。選択されたもの以外の[打ち切り]列の値は、非打ち切りデータ（正確な測定値が分かっているデータ）として処理されます。なお、[打ち切り]列の値が欠測値である行は、分析から除外されます。打ち切り列の値は、コンボボックスに表示されます。

**By**（オプション）By変数を指定します。指定した列の水準ごとの分析が行われます。

**打ち切りの値** [打ち切り]列のデータ値のうち、右側打ち切りであることを示すデータ値を指定します。[打ち切り]列を選択すると候補となるデータ値が、自動的にコンボボックスに表示されます。これを変更するには、赤い三角ボタンをクリックして、値のリストから選択します。テキストボックスに異なる値を入力することもできます。[打ち切り]列に「値ラベル」列プロパティが設定されている場合、値ラベルが値リストに表示されます。なお、[打ち切り]列が欠測値となっている行は、分析から除外されます。

## 2つのY列の指定

区間打ち切りや左側打ち切りの場合は、Y列を2つ指定してください。Y列が2つ指定された場合は次のように処理されます。

- 2つのY値が同じで、どちらも欠測値ではない場合、その共通なY値は正確な値が測定されたデータとみなされます。
- 2つのY値が同じではなく、どちらも欠測値ではない場合、データは区間打ち切りとみなされます。実際の値は2つのY値の間にあるとみなされます。
- 最初のY値だけが欠測値の場合、データは左側打ち切りとみなされます。実際の値は2番目のY値以下であるとみなされます。
- 2番目のY値だけが欠測値の場合、データは右側打ち切りとみなされます。実際の値は1番目のY値以上であるとみなされます。

---

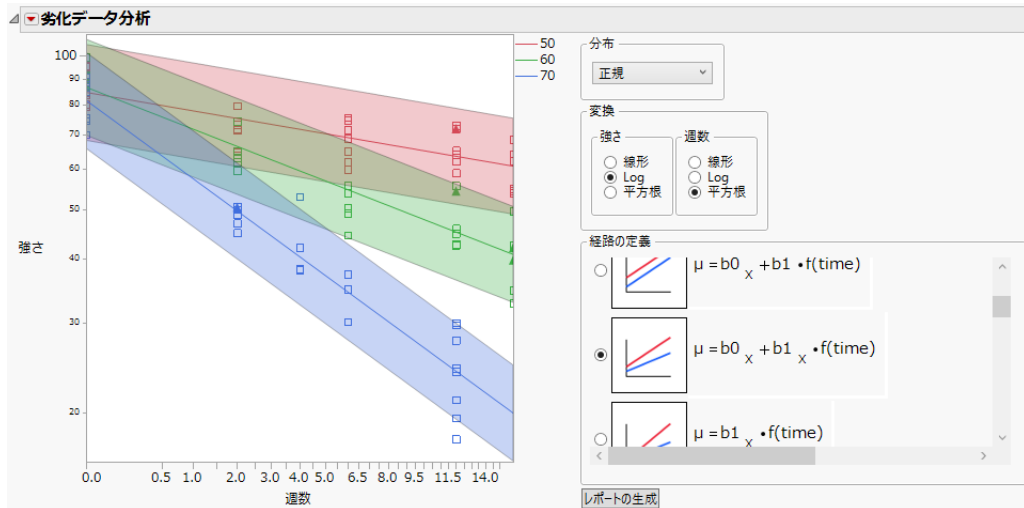
**メモ:**「破壊劣化」プラットフォームで左側打ち切りデータを扱うには、2つのY列を用いるしかありません。

---

## 「破壊劣化」プロットのオプションとモデル

「劣化データ分析」プロットには、「分布」・「変換」・「経路の定義」での現在の設定に基づいたデータとグラフが表示されます。図8.11のプロットは「Adhesive Bond.jmp」データテーブルのもので、オプションであるX変数も指定しています。

図8.11 破壊劣化のプロットとオプション



プロットについて次の点を確認してください。

- データ値はマーカーで表されます。

表8.1 マーカーの説明

アイコン	説明
□	正確な値が測定されたユニット。
▼	左側打ち切りのユニット。実際の値は三角の下側であることを示しています。  <b>メモ:</b> 「劣化データ分析」プラットフォームで左側打ち切りのデータを分析するには、区間打ち切りの形式としてデータを保存しておく必要があります。 <a href="#">「2つのY列の指定」</a> (208 ページ) を参照してください。
▲	右側打ち切りのユニット。実際の値は三角の上側であることを示しています。
▼ ▲	区間打ち切りの観測値。実際の値は指定の区間内であることを示しています。

---

**メモ:** デフォルトでは、マーカーに色は塗られていません。モデルと同じ色をマーカーに塗りたい場合には、まず、[行] > [列の値による色/マーカー分け] を選択します。次に、X列を選択します。[連続的な色] を選択解除します。そして、「色」のメニューから [JMP 標準] を選択します。

---

- プロットでは、Xの水準ごとに、色が付いた帯が描かれます。ただし、モデルにX変数が指定されていない場合は、描かれる帯は1つだけです。この帯の下限と上限は、その「時間」値における、Yに対してあてはめた確率分布の5%点と95%点です。帯の色はXの値に対応しており、その対応はプロットの右上側にある凡例で示されています。

---

**メモ:** マーカーの色は、データテーブルで割り当てられている色に対応しています。

---

- 帯の中央に描かれている実線の曲線は、X値ごとの、各時点におけるYの中央値（メディアン）です。なお、モデルにX変数を指定しなかった場合は、各時点におけるYの中央値です。

## プロットのエプション

**分布** 位置-尺度型または対数-位置-尺度型の確率分布を選択します。

**変換** 応答変数Yと時間変数を変数変換する式を選択します。

---

**メモ:** 正でない値を含む列にLog変換やSqrt変換を適用した場合、正でない値を含む行は、モデルのあてはめから除外されます。

---

**経路の定義** 劣化経路に対するモデルとして線形モデルや非線形モデルを選択します。各モデルの詳細については、「モデル」(210ページ)を参照してください。

**レポートの生成** 指定したモデルのレポートを作成します。[レポートの生成]を最初にクリックした際には、「モデルリスト」アウトラインが新たに作成されます。また、新たなモデルをあてはめた後に[レポートの生成]をクリックすると、「モデルリスト」アウトラインが更新され、また、そのモデルの結果が追加されます。

## モデル

次の表は、「経路の定義」リストに表示される各モデルの式を示しています。各モデルの説明については、リンクをクリックしてください。

---

**メモ:** 各式の左側に表示されるサムネールは、位置パラメータ $\mu$ の経時的変化を示したイメージ図です。実際にモデルをあてはめた結果は、これらのサムネールのイメージ図とはだいぶ異なる場合があります。

---

表 8.2 モデル式

モデル	式
「共通の経路 切片あり」	$\mu = b0 + b1 * f(\text{time})$
「共通の経路 切片なし」	$\mu = b1 * f(\text{time})$
「共通の傾き」	$\mu = b0_X + b1 * f(\text{time})$
「別々の経路 切片あり」	$\mu = b0_X + b1_X * f(\text{time})$
「別々の経路 切片なし」	$\mu = b1_X * f(\text{time})$
「共通の切片」	$\mu = b0 + b1_X * f(\text{time})$
「1次反応速度 タイプ1」	$\mu = b0 - b1 * \text{Exp}[-b2 * \text{Exp}[b3 * [\text{Arrhenius}(X_0) - \text{Arrhenius}(X)]] * f(\text{time})]$
「1次反応速度 タイプ2」	$\mu = b0 * [1 - \text{Exp}[-b1 * \text{Exp}[b2 * [\text{Arrhenius}(X_0) - \text{Arrhenius}(X)]] * f(\text{time})]]$
「1次反応速度 タイプ3」	$\mu = b0 + b1 * \text{Exp}[-b2 * \text{Exp}[b3 * [\text{Arrhenius}(X_0) - \text{Arrhenius}(X)]] * f(\text{time})]$
「1次反応速度 タイプ4」	$\mu = b0 * \text{Exp}[-b1 * \text{Exp}[b2 * [\text{Arrhenius}(X_0) - \text{Arrhenius}(X)]] * f(\text{time})]$
「Arrhenius 速度」	$\mu = b0 \pm \text{Exp}[b1 + b2 * \text{Arrhenius}(X)] * f(\text{time})$
「べき乗速度」	$\mu = b0 \pm \text{Exp}[b1 + b2 * \text{Log}(X)] * f(\text{time})$
「指数速度」	$\mu = b0 \pm \text{Exp}[b1 + b2 * X] * f(\text{time})$

## 変数変換した時間に対して線形になるモデル

### 共通の経路 切片あり

このモデルでは、変数変換した時間の線形関数で位置パラメータが表されています。このモデルでは、X 変数があるかどうかにかかわらず、すべての線形関数が、共通の切片と共通の傾きになっています。

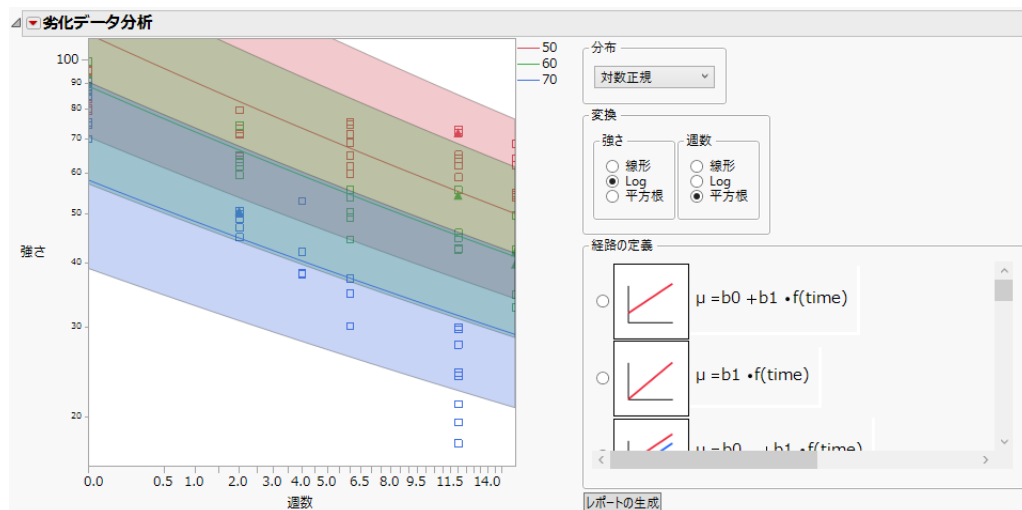
### 共通の経路 切片なし

このモデルでも、変数変換した時間の線形関数で位置パラメータが表されています。ただし、時間の変換値が 0 のときに位置パラメータが 0 になっています。「分布」と「変換」の選択によっては、中央値の曲線は直線ではなく、また、原点を通りません。このモデルでは、X 変数があるかどうかにかかわらず、すべての線形関数が、切片がなく、かつ、共通の傾きになっています。

### 共通の傾き

このモデルでも、変数変換した時間の線形関数で位置パラメータが表されています。ただし、傾きは共通ですが、切片は X 値ごとに異なっているモデルです。「分布」と「変換」の選択によっては、関係式は曲線になる場合があります。たとえば、対数正規分布の場合には、図 8.12 のプロットのようになります。

図8.12 対数正規分布を使用した共通の傾きを持つモデル



### 別々の経路 切片あり

このモデルでも、変数変換した時間の線形関数で位置パラメータが表されています。ただし、X値ごとに、異なった切片と異なった傾きとなっています。

### 別々の経路 切片なし

このモデルでも、変数変換した時間の線形関数で位置パラメータが表されています。ただし、切片がゼロで、傾きがX値ごとに異なっています。

### 共通の切片

このモデルでも、変数変換した時間の線形関数で位置パラメータが表されています。ただし、切片は共通ですが、傾きはX値ごとに異なっています。

## 1次反応速度モデル

4つの1次反応速度モデルが用意されています。これらのモデルでは、温度のArrhenius変換に関係している非線形関数で位置パラメータが表されています。これらのモデルは、オプション指定の説明変数Xの値ごとに位置パラメータが異なるモデルになっています。

これらのモデルのいずれかを最初を選択したとき、温度の単位と、通常の使用状況における温度 ( $X_0$ ) を指定するよう求められます。 $X_0$ の値は、加速因子における基準に使用されます (Meeker and Escobar 1998)。続いて別の1次反応速度モデルまたはArrhenius速度モデル (「Arrhenius速度」(214ページ) を参照) を指定したときも、これらの設定に関しては、最初に指定したものが使用されます。

### 1次反応速度 タイプ1

このモデルでは、 $b1$ と $b2$ は正の値です。線形スケールにおいて、時間が無限に近づくにつれて、上側の漸近線 $b0$ に曲線は漸近します。

### 1次反応速度 タイプ2

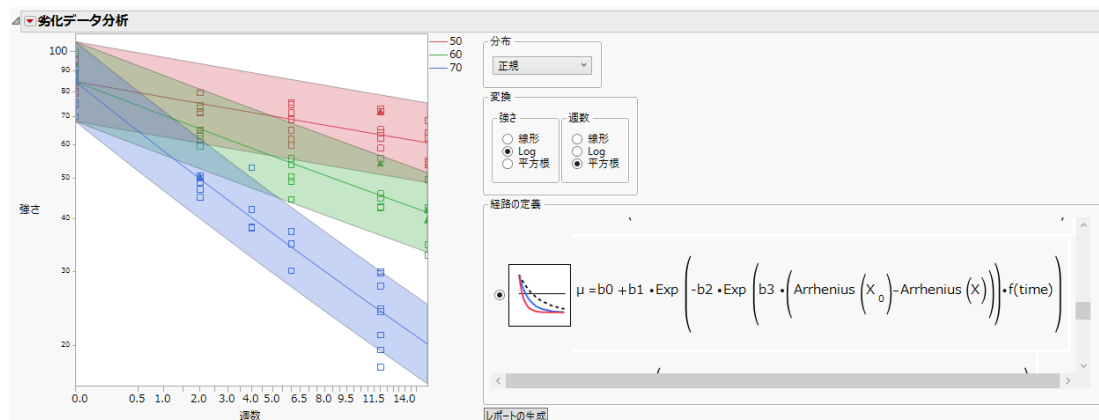
このモデルでは、時間ゼロのときに位置パラメータがゼロになっています。このモデルでも、 $b0$ と $b1$ は正の値です。線形スケール上で、時間が無限に近づくにつれて、上側の漸近線 $b0$ に曲線は漸近します。タイプ2のモデルは、タイプ1のモデルを垂直方向にずらしたものです。

### 1次反応速度 タイプ3

このモデルでも、 $b1$ と $b2$ は正の値です。 $b1$ に対する符号がタイプ1モデルのものと逆になっているので、このモデルはタイプ1モデルを逆にしたものです。線形スケール上で、時間が無限に近づくにつれて、下側の漸近線 $b0$ に曲線は漸近します。

時間の経過にともなって減少しているデータにこのモデルをあてはめた場合、図8.13のようなプロットになります。この図は、「Adhesive Bond.jmp」を使用しています。また、温度の単位には摂氏を、通常の使用状況での温度は35度と設定しました。

図8.13 1次反応速度 タイプ3の例



### 1次反応速度 タイプ4

このモデルは、タイプ3のモデルを垂直方向にずらしたものです。線形スケール上で、時間が無限に近づくにつれて、下側の漸近線 $0$ に曲線は漸近します。

## 速度モデル

変数変換されたX変数の指数関数に位置パラメータがなっている3つのモデルが用意されています。それぞれのモデルは、切片が共通で、オプションで指定された説明変数Xの値ごとに傾きが異なります。これらのモデルでは、線形スケール上において、位置パラメータは変数変換した時間に対しては線形になっています。

Arrhenius 速度

このモデルでは、「X の Arrhenius 変換」の線形関数を指数変換したものに、変数変換した時間を掛けます。  
このモデルを選択したときに、温度の単位をまだ指定していない場合は、指定するよう求められます。

べき乗速度

このモデルでは、「X の対数」の線形関数を指数変換したものに、変数変換した時間を掛けます。

指数速度

このモデルでは、X の線形関数を指数変換したものに、変数変換した時間を掛けます。

「破壊劣化」レポート

「破壊劣化」レポートには、あてはめた各モデルの結果が含まれます。モデルをあてはめると、「モデルリスト」にそのモデルの行が追加されます。

メモ: すべてのモデルは最尤法によって推定されます。

図8.14 モデルリストとモデルのアウトライン

▲モデルリスト						
応答の変換	分布	経路の定義	(-1)*対数尤度	パラメータ数	観測値の個数	AICc BIC
▼ Log	正規	$\mu = b0[x] + b1[x] * \text{Sqrt}(\text{time})$	287.41024	7	92	590.15381 606.473
▼ Log	正規	$\mu = b0 - \text{Exp}(b1 + b2 * \text{Arrhenius}(X)) * \text{Sqrt}(\text{time})$	288.09559	4	92	584.65095 594.27834
▶ Log( 応答 ), 正規, $\mu = b0[x] + b1[x] * \text{Sqrt}(\text{time})$						
▶ Log( 応答 ), 正規, $\mu = b0 - \text{Exp}(b1 + b2 * \text{Arrhenius}(X)) * \text{Sqrt}(\text{time})$						

モデルリスト

「モデルリスト」における先頭の3列には、プロット横で選択したオプションに関する情報が表示されています。また、(-1)\*対数尤度・AICc・BICは、モデルを比較するための統計量です。これらの統計量については、『基本的な回帰モデル』を参照してください。

これらの「モデルリスト」に表示されている3つの統計量は、「観測値の個数」(標本サイズ)が同じである限り、異なるモデルで比較できます。そうでない場合は、異なるデータが使用されているので注意が必要です。この「観測値の個数」は、確率分布や変数変換によって少なくなることがあります。たとえば、対数-位置-尺度型の分布を選択した場合、正でないY値が計算から除外されます。また、対数変換(Log)や平方根変換(Sqrt)も、正でないY値を計算から除外します。

「モデルリスト」表の各行には、次のオプションを含む赤い三角ボタンのメニューがあります。

スクロール レポートウィンドウをスクロールして、対応するモデルのアウトラインを表示します。

削除 「モデルリスト」からモデルを削除し、対応するモデルのアウトラインをサポートから削除します。

## モデルのアウトライン

各モデルのアウトラインには、次のオプションを含む赤い三角ボタンのメニューがあります。

**削除** モデルのアウトラインをレポートから削除し、「モデルリスト」からモデルを削除します。

各モデルのアウトラインには、次のレポートが含まれます。

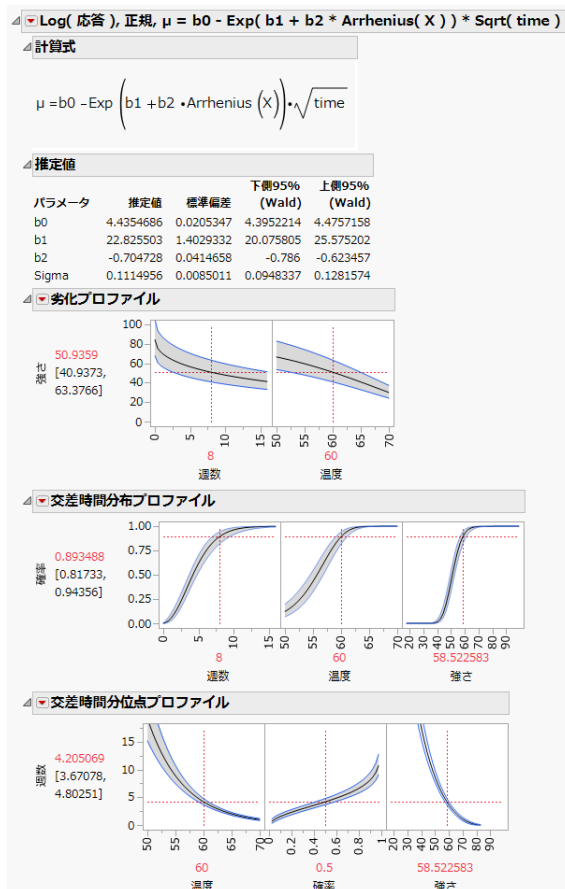
**計算式** 位置パラメータに対するモデル式を表示します。

**推定値** パラメータ推定値とその標準誤差を表示します。また、各パラメータに対するWald法による95%信頼区間も表示します。

**劣化プロファイル・交差時間分布プロファイル・交差時間分位点プロファイル** プロファイルの詳細については、「[プロファイル](#)」(216ページ)を参照してください。

**残差プロット** 残差プロットの詳細については、「[残差プロット](#)」(216ページ)を参照してください。

図8.15 各モデルに対するレポート



## プロファイル

各モデルのレポートには3つのプロファイルが表示されます。

### 劣化プロファイル

「劣化プロファイル」は、該当するモデルの「劣化データ分析」プロットをプロファイルとして描いたものです。Y軸は、劣化に関する応答変数（Y変数）になっています。劣化プロファイルは、「時間」に対するプロットと、（説明変数Xが指定されている場合には）説明変数Xに対するプロットから構成されています。劣化プロファイルには、Yの分布における中央値が実線の曲線で描かれます。また、Yの分布における2.5%点と97.5%点が点線で描かれます。

### 交差時間分布プロファイル

「交差時間分布プロファイル」は、劣化に関する測定値が、ある時点で一定の閾値を超える確率を描いています。

このプロファイルは、時間・X変数（オプション）・Y変数に対して、累積分布関数を描きます。このプロファイルには、Wald法による信頼区間も描かれます。

### 交差時間分位点プロファイル

「交差時間分位点プロファイル」を見ると、どの時点で特定の割合の測定値が閾値を超えるかがわかります。

このプロファイルは、X変数（オプション）・確率（分位点の累積確率）・Y変数の関数に対して、時間をプロットします。このプロファイルには、Wald法による信頼区間も描かれます。

## 残差プロット

モデルレポートには、4つの残差プロットが表示されます。これらのプロットを使用して、あてはめたモデルの妥当性を検証できます。標準化した残差の詳細については、「[破壊劣化モデルの統計の詳細](#)」（218ページ）を参照してください。

### Cox-Snell 残差 P-P プロット

点が対角線から大きく逸れている場合は、モデルの仮定が満たされていない可能性があります。「Cox-Snell 残差 P-P プロット」の赤い三角ボタンのメニューには「[残差の保存](#)」というオプションがあり、これを使用して残差データをデータテーブルに保存できます。Cox-Snell 残差については、Meeker and Escobar（1998, sec. 17.6.1）を参照してください。

### 標準化残差の確率プロット

点が対角線から大きく逸れている場合は、モデルの仮定が満たされていない可能性があります。「標準化残差の確率プロット」の赤い三角ボタンのメニューには「[残差の保存](#)」というオプションがあり、これを使用して残差データをデータテーブルに保存できます。

### 時間と標準化残差

「時間と標準化残差」プロットを使用して、時間の経過に伴うばらつきの変化を調べることができます。「時間と標準化残差」の赤い三角ボタンのメニューには**「残差の保存」**というオプションがあり、これを使用して残差データをデータテーブルに保存できます。

### 予測値と標準化残差

「予測値と標準化残差」プロットを使用して、予測値によってばらつきが変化しているかどうかを調べることができます。「予測値と標準化残差」の赤い三角ボタンのメニューには**「残差の保存」**というオプションがあり、これを使用して残差データをデータテーブルに保存できます。

---

## 「破壊劣化」プラットフォームのオプション

「劣化データ分析」の赤い三角ボタンをクリックすると、次のオプションが表示されます。

**グラフオプション** サブメニューが開き、プラットフォームのグラフを変更するためのオプションが表示されます。

**分位点区間の濃淡表示** 分位点を示す区間に対する濃淡表示のオン/オフを切り替えます。各濃淡領域の下限と上限は、デフォルトでは、Yの確率分布における2.5%点と97.5%点です。

**分位点区間の確率** 「分位点区間の濃淡表示」がオンのとき、濃淡領域の確率を指定できます。

以下のオプションについて詳しくは、『JMPの使用法』の「JMPのレポート」章を参照してください。

**ローカルデータフィルタ** 現在のレポートにおいて、データをフィルタリングするローカルデータフィルタの表示/非表示を切り替えます。

**やり直し** 分析を繰り返したり、やり直したりするオプションを含みます。また、[自動再計算] オプションに対応しているプラットフォームにおいては、[自動再計算] オプションを選択すると、データテーブルに加えた変更が、該当するレポートに即座に反映されるようになります。

**スクリプトの保存** レポートを再現するためのスクリプトを保存するオプションが、保存先ごとに用意されています。

**By グループのスクリプトを保存** By 変数の全水準に対するレポートを再現するためのスクリプトを保存するオプションが、保存先ごとに用意されています。起動ウィンドウでBy 変数を指定した場合のみ使用可能です。

---

## 破壊劣化モデルの統計的詳細

破壊劣化モデルは次のように表されます。

$$g(Y) \sim F(\mu, \sigma)$$

$$\mu = h(f(\text{Time}), X)$$

ここで、

- $g(Y)$  は、変数変換した  $Y$  変数です。
- $F$  は、分析者によって仮定された確率分布です。
- $\mu$  は、 $h$  で定義される位置パラメータです。
- $h$  は、変数変換された時間変数と説明変数  $X$  に関する関数です。
- $\sigma$  は、確率分布の尺度パラメータです。
- $f(\text{Time})$  は、変数変換した時間変数です。
- $X$  は、オプションの説明変数です。

標準化残差は、次のように求められます。

- 位置 - 尺度型の確率分布においては  $(y - \mu)/\sigma$ 。
- 対数 - 位置 - 尺度型の確率分布においては  $(\log(y) - \mu)/\sigma$ 。

# 第9章

## 信頼性予測

### 製造と故障履歴のデータから製品故障数を予測する

「信頼性予測」は、製品の故障数を予測するプラットフォームです。まず、製造日・生産数・故障発生日・故障数のデータから、寿命分布を推定します。

そして、対話的なグラフによって、将来の生産数や契約期間などを変更したときの、将来の故障数を予測します。修理費用を考慮すれば、修理費用の総額も予測できます。

図9.1 信頼性予測の例



## 目次

「信頼性予測」プラットフォームの概要 .....	221
「信頼性予測」プラットフォームの例 .....	221
「信頼性予測」プラットフォームの起動 .....	224
「信頼性予測」レポート .....	227
「観測データ」レポート .....	227
「寿命の一変量」レポート .....	228
「予測」レポート .....	228
「信頼性予測」プラットフォームのオプション .....	232

---

## 「信頼性予測」プラットフォームの概要

「信頼性予測」は、製品の故障数を予測するプラットフォームです。まず、製造日・生産数・故障発生日・故障数のデータから、寿命分布を推定します。そして、対話的なグラフによって、将来の生産数や契約期間などを変更したときの、将来の故障数を予測します。修理費用を考慮すれば、修理費用の総額も予測できます。

---

## 「信頼性予測」プラットフォームの例

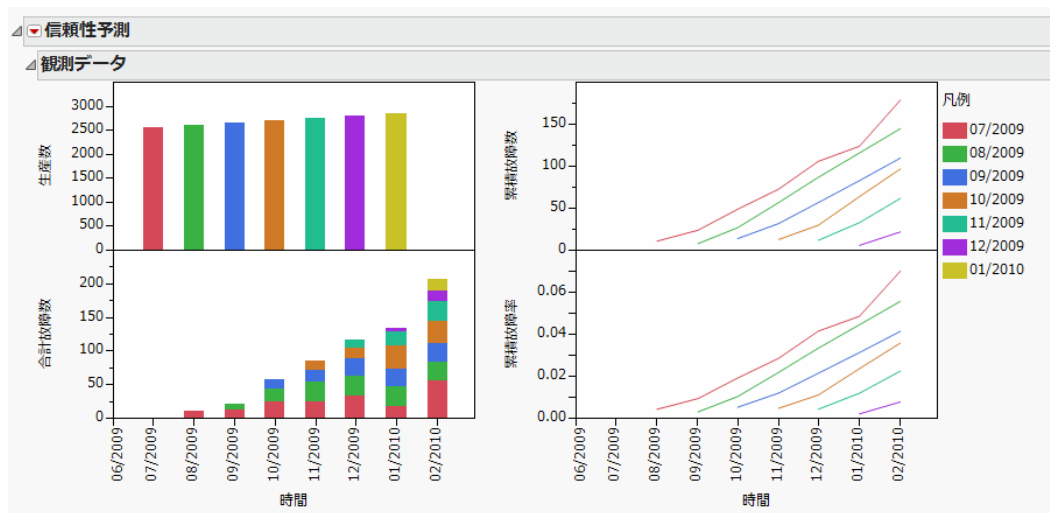
7か月間の生産数と故障数を記録したデータがあります。このデータから、2011年2月に修理のために返品されるユニットの総数を予測します。製品の保証期間は12か月です。

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「Small Production.jmp」を開きます。
2. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [信頼性予測] を選択します。
3. [ネバダ形式] タブで、「販売数」を[生産数]に指定します。
4. 「販売月」に[タイムスタンプ]の役割を割り当てます。
5. その他の列をすべて[故障数]に指定します。
6. [OK] をクリックします。

「信頼性予測」レポートが表示されます（図9.2）。

「観測データ」レポートの左側に、過去の故障数の棒グラフが表示されます。累積故障数は折れ線グラフに表示されます。生産数にはほぼ変化がなかったことが見て取れます。市場に流通する製品は蓄積していき、故障リスクのある製品も増えるため、累積故障率は時間とともに徐々に上昇しています。また、生産数がほぼ一定であるため、累積故障数と累積故障率のグラフは似通っています。

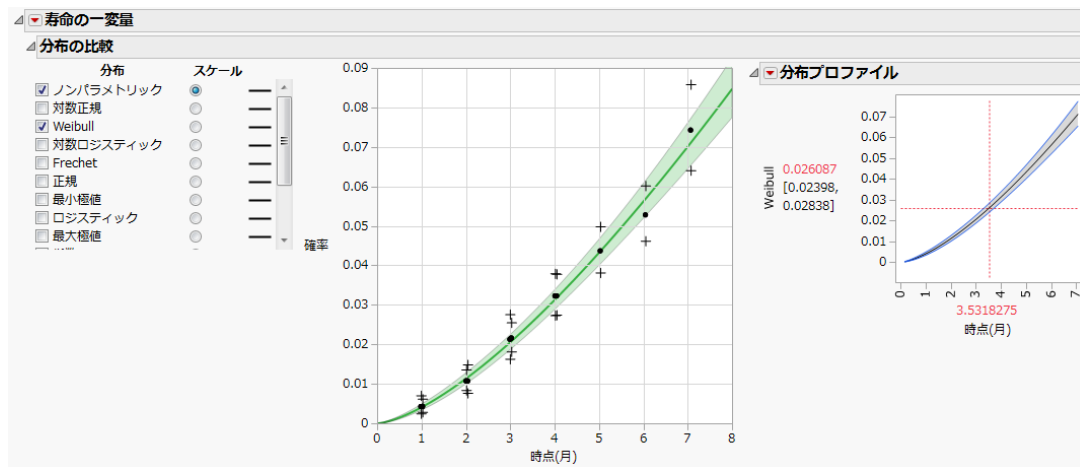
図9.2 「観測データ」レポート



7. 「寿命の一変量」の開閉ボタンをクリックします。

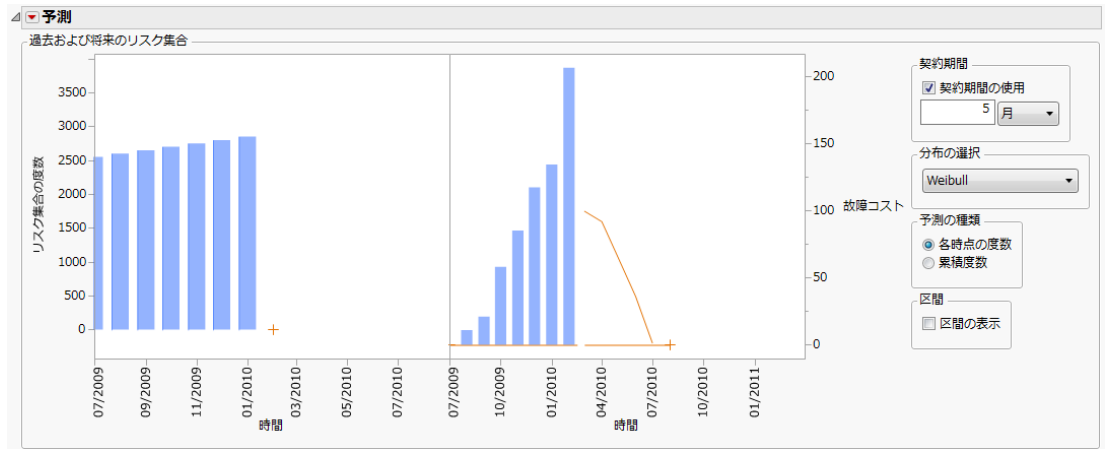
「寿命の一変量」プラットフォームによって、生産数と故障数のデータに対して、Weibull 分布があてはめられています（図9.3）。このWeibull 分布にもとづき、次の5か月間における返品数を予測します（図9.4）。

図9.3 「寿命の一変量」レポート



「予測」レポートにおいて、左側のグラフには、過去の生産数が表示されています（図9.4）。右側のグラフには、過去の故障数が表示されています。故障数は、時間が経過するにつれ単調に増加しています。

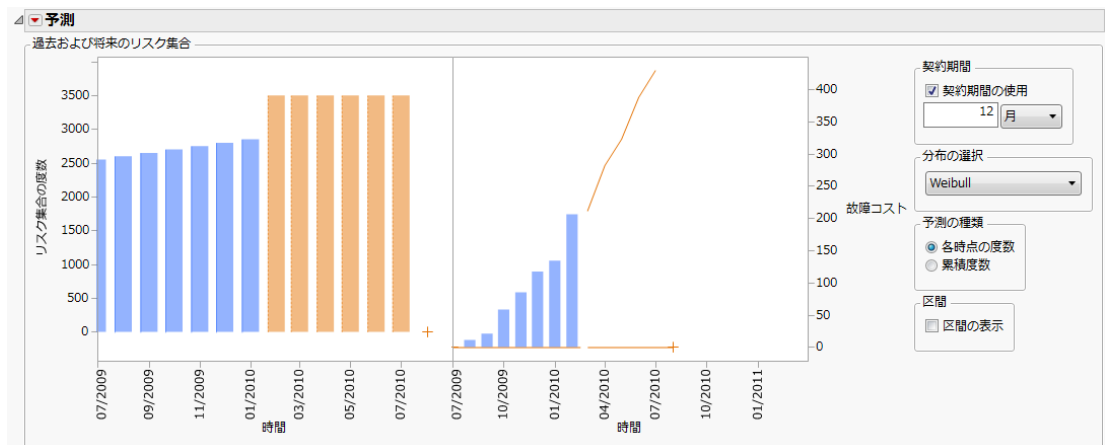
図9.4 「予測」レポート



8. 「予測」レポートで、「契約期間」に「12」と入力します。これは、修理を保証している契約期間の長さです。
9. 「予測」レポートの左側のグラフにおいて、アニメーション表示されているホットスポットを、X軸方向を2010年7月まで、Y軸方向を約3500の位置までドラッグします。

左側のグラフに、今後の生産数を示すオレンジ色の棒が表示されます。右側のグラフでは、月々の故障返品数が2010年の8月まで徐々に増加しています（図9.5）。

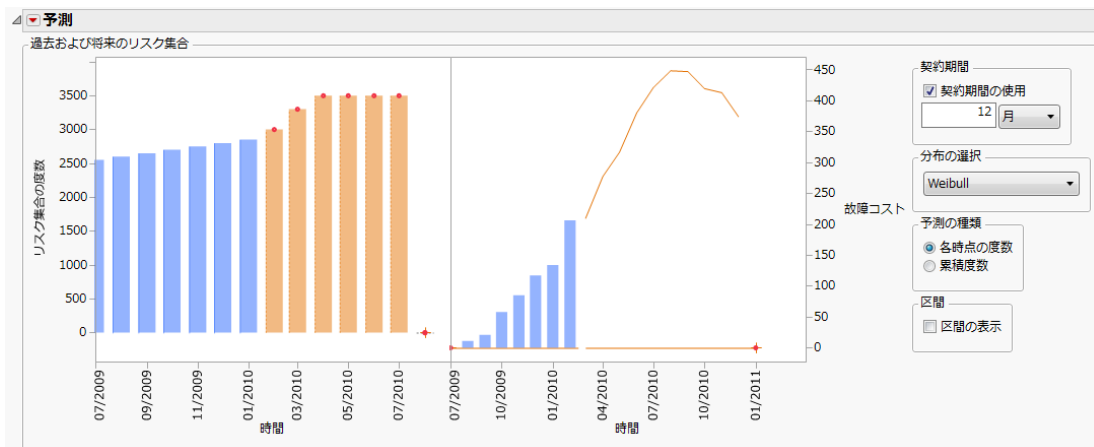
図9.5 生産数と故障数の推定



10. 2010年2月のホットスポットを、約3000にまでドラッグしてください。また、2010年3月のホットスポットを約3300にまでドラッグしてください。
11. 右側のグラフで、右端のホットスポットを2011年2月にドラッグします。

故障により返品される製品は、2010年8月までは徐々に増加していき、その後は減少していくという予測結果が表示されます（図9.6）。

図9.6 将来の生産数と予測される故障数



## 「信頼性予測」プラットフォームの起動

「信頼性予測」プラットフォームを起動するには、[分析] > [信頼性/生存時間分析] > [信頼性予測] を選択します。

図9.7 「信頼性予測」起動ウィンドウ

Figure 9.7 is a screenshot of the "Reliability Prediction" startup window. It shows tabs for "ネバダ形式" (Nevada Form), "日付形式" (Date Form), and "イベントまでの時間の形式" (Form of time until event). The "ネバダ形式" tab is selected. The window includes a list of data series (販売数, 販売月, 故障数, etc.), a section for assigning roles to selected series (生産数, 販売数, タイムスタンプ, 故障数, グループID), and an "アクション" (Action) section with buttons like OK, キャンセル, 削除, 前回の設定, and ヘルプ. There are also checkboxes for "データの区間打ち切り" and a dropdown for "寿命単位".

「信頼性予測」プラットフォームは、3つのデータ形式をサポートしています。起動ウィンドウには、それら3つのデータ形式ごとに、[ネバダ形式]・[日付形式]・[イベントまでの時間の形式] というタブが用意されます。以下で、それぞれのデータ形式について解説します。

## ネバダ形式

「ネバダ形式」は、信頼性予測のデータ形式として、良く使われています。製造日と生産数、および、特定の期間における故障数が、1つのデータに含まれています。データの形状が、ネバダ州のような形になるため、「ネバダ形式」と呼ばれています。図9.8は、「Small Production.jmp」サンプルデータです。

図9.8 ネバダ形式の例

	販売数	販売月	08/2009	09/2009	10/2009	11/2009	12/2009	01/2010	02/2010
1	2550	07/2009	11	13	25	24	33	18	55
2	2600	08/2009	0	8	19	30	30	29	29
3	2650	09/2009	0	0	14	18	25	26	27
4	2700	10/2009	0	0	0	13	17	34	33
5	2750	11/2009	0	0	0	0	12	21	29
6	2800	12/2009	0	0	0	0	0	6	16
7	2850	01/2010	0	0	0	0	0	0	17

「ネバダ形式」タブには、次のようなオプションがあります。

**データは区間打ち切り** 故障数を、区間打ち切りのデータとみなします。この時、各区間を、その前の時刻から現在の時刻までとみなします。デフォルトでオンになっています。

**寿命単位** 時刻や日時の単位を指定します。生産日、および、故障数を含む列の名前といった、すべての時刻の形式を決めます。ここで設定した時刻や日時の単位で、予測が行われます。

**生産数** 生産された製品の個数

**タイムスタンプ** 生産日

**故障数** 故障した製品の個数

**グループID** データのグループ分けに使用される列。グループごとに別々の確率分布をあてはめて、予測が行われます。また、それらの結果を組み合わせ、全体に対する予測も行われます。

## 日付形式

日付形式のデータは、生産数を含むデータテーブルと、故障数を含むデータテーブルの2つで構成します。一方のデータテーブルには、生産日ごとに生産数を保存します。もう一方のデータテーブルには、故障日・故障数・生産日を保存します。

図9.9は、「Small Production part1.jmp」サンプルデータと「Small Production part2.jmp」サンプルデータです。

図9.9 日付形式の例

生産数データ			故障数データ			
	販売数	販売月		返品月	返品数	販売月
1	2550	07/2009	1	08/2009	11	07/2009
2	2600	08/2009	2	09/2009	13	07/2009
3	2650	09/2009	3	10/2009	25	07/2009
4	2700	10/2009	4	11/2009	24	07/2009
5	2750	11/2009	5	12/2009	33	07/2009
6	2800	12/2009	6	01/2010	18	07/2009
7	2850	01/2010	7	02/2010	55	07/2009

[日付形式] タブは、「生産数データ」と「故障数データ」のセクションに分かれています。

### 生産数データ

**テーブルの選択** 製品の生産日と生産数を記録したデータテーブル

### 故障数データ

**テーブルの選択** 故障数・故障日・生産日などの、故障に関するデータを記録したデータテーブル

**左側打ち切り** 観測値が打ち切りであるかどうかを示す列

**タイムスタンプ** 生産数データの行と、故障数データの行とを対応付けるための列。故障した製品が、どの生産バッチに含まれるかを示します。

**打ち切りの値** [打ち切り] 列のデータ値のうち、打ち切りであることを示すデータ値を指定します。[打ち切り] 列を選択すると候補となるデータ値が、自動的にコンボボックスに表示されます。これを変更するには、赤い三角ボタンをクリックして、値のリストから選択します。テキストボックスの中に異なる値を入力することもできます。[打ち切り] 列に「値ラベル」列プロパティが設定されている場合、値ラベルが値リストに表示されます。なお、[打ち切り] 列が欠測値となっている行は、分析から除外されます。

その他のオプションは、[ネバダ形式] タブと同じです。詳細は、「[ネバダ形式](#)」(225 ページ) の節を参照してください。

## イベントまでの時間の形式

「イベントまでの時間」の形式は、生産されてから故障するまでの時間を表しています。ネバダ形式や日付形式では、生産日や故障日などの日時が含まれていますが、「イベントまでの時間」の形式には、日時は含まれておらず、故障までの時間しか含まれていません。また、この形式では、データにおける打ち切りの種類を任意に設定できます。「[「イベントまでの時間」データでリスク集合を定義する方法](#)」(230 ページ) を参照してください。

図9.10は、「Small Production Time to Event.jmp」サンプルデータです。

図9.10 「イベントまでの時間の形式」の例

区間の始まり 区間の終わり 故障数			
	時点(月)	時点 右側	度数
1	0	1.0184804928	11
2	1.0184804928	2.0369609856	13
3	2.0369609856	3.022587269	25
4	3.022587269	4.0410677618	24
5	4.0410677618	5.0266940452	33
6	5.0266940452	6.045174538	18
7	6.045174538	7.0636550308	55
8	7.0636550308	•	2371

「イベントまでの時間の形式」タブには、次のオプションがあります。

**予測の開始時間** 予測を始める時点や日付。指定された値が、グラフにおいて、予測区間の最初に表示されます。

**打ち切りの値** 打ち切りであることを示す値。**「打ち切り」**の列を指定したときだけ、指定できます。

その他のオプションは、「ネバダ形式」タブと同じです。詳細は、「[ネバダ形式](#)」（225ページ）の節を参照してください。

## 「信頼性予測」レポート

「信頼性予測」の結果には、「観測データ」・「寿命の一変量」・「予測」といったレポートがあります。「観測データ」レポートでは、現在のデータを確認できます。「寿命の一変量」レポートでは、データによくあてはまる確率分布を選ぶことができます。「予測」レポートでは、予測のための設定を変更できます。予測結果は、データテーブルに保存できますので、Microsoft Excelなどで読み込むこともできます。レポートの例については、[図9.1 「信頼性予測の例」](#)（219ページ）を参照してください。

「信頼性予測」の赤い三角ボタンをクリックすると、日付によってフィルタ処理するオプションや、データを別形式で保存するオプションが表示されます。詳細は、「[「信頼性予測」プラットフォームのオプション](#)」（232ページ）を参照してください。

## 「観測データ」レポート

「観測データ」レポートでは、ネバダ形式と日付形式のデータに対して、グラフが表示されます（[図9.11](#)）。

- 棒グラフには、それぞれの期間ごとに、生産数および故障数が示されています。
- 折れ線は、観測期間における累積故障数を示しています。

**メモ：**「イベントまでの時間」形式のデータには、生産日や故障日などの日時情報が含まれていないため、「観測データ」レポートは作成されません。

## 「寿命の一変量」レポート

「寿命の一変量」レポートでは、確率プロットによって、データによくあてはまっている確率分布を選ぶことができます。「予測」レポートにおいて分布を選択すると、それに応じて、「寿命の一変量」レポートが更新されます。このレポートの詳細は、「[寿命の一変量](#)」章（31ページ）を参照してください。「寿命の一変量」章で説明しているオプションの一部は、「信頼性予測」プラットフォームの「寿命の一変量」レポートには表示されません。

## 「予測」レポート

「予測」レポートでは、故障数の予測値を表すグラフが描かれています。グラフは対話的で、予測のための設定を変更できます。グラフにおいて、ホットスポットをドラッグすると、将来の生産数を設定できます。将来、生産数によって、故障数がどのように変化するかを確認できます。

### リスク集合の調整

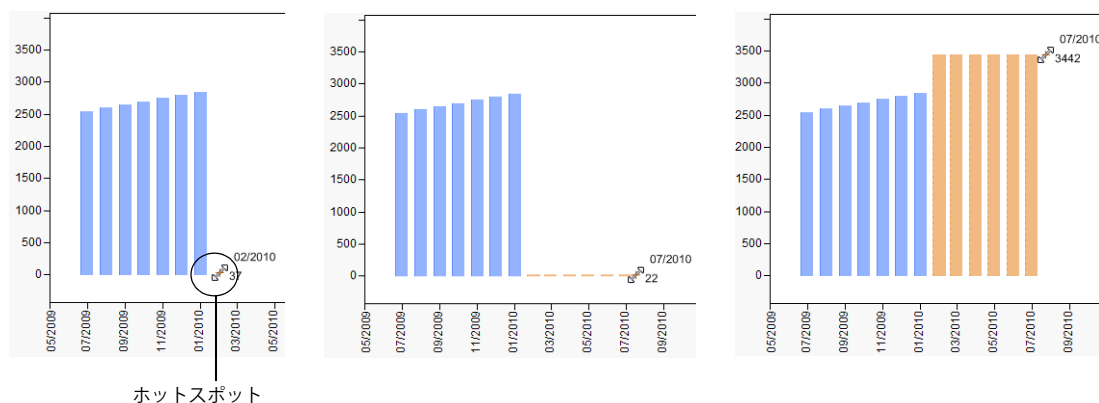
#### 将来の生産数

左側のグラフで描かれている青い棒は、過去の生産数を示します。想定される将来の生産数を追加するには、次の手順に従います。

1. ホットスポットを右方向にドラッグし、1つまたは複数の生産期間を追加します（図9.11）。

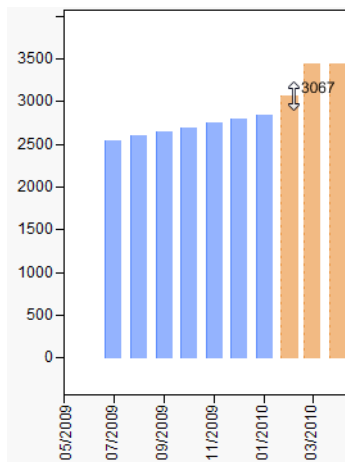
想定される将来の生産数がオレンジ色の棒で示されます。

図9.11 生産期間の追加



2. 各棒を上下にドラッグして各期間の生産数を変更します（図9.12）。

図9.12 生産数の調整



ヒント: 将来の生産数を数値で入力するには、「予測」レポートの赤い三角ボタンメニューから「**リスク集合のスプレッドシートによる設定**」を選択します。「[リスク集合のスプレッドシートによる設定](#)」(231 ページ)を参照してください。

### 既存の生産数

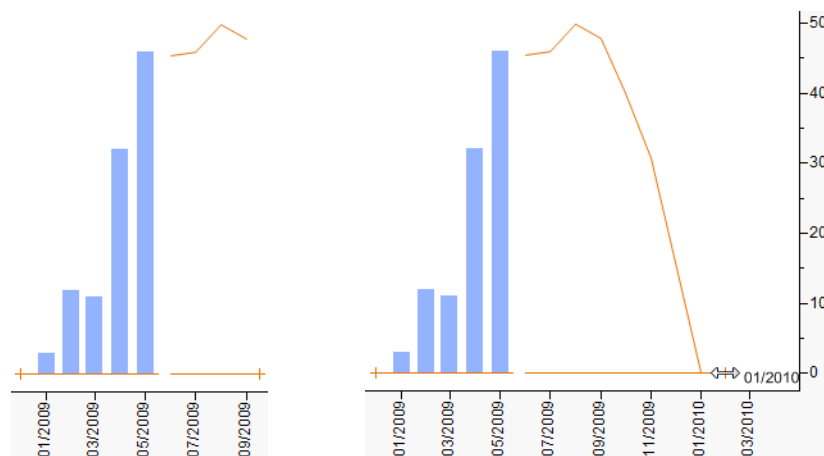
青い棒を右クリックし、**[除外する]**を選択すると、該当するリスク集合を除外して予測値が求められます。棒を右クリックして**[含める]**をクリックすれば、該当するデータが、再び、予測の計算に含まれます。

ヒント: 将来の生産数を数値で入力するには、「予測」レポートの赤い三角ボタンメニューから「**リスク集合のスプレッドシートによる設定**」を選択します。「[リスク集合のスプレッドシートによる設定](#)」(231 ページ)を参照してください。

### 故障数の予測

左側のグラフで将来の生産数を指定すると、右側のグラフが更新され、将来の故障数が推定されます(図9.13)。ホットスポットをドラッグして予測期間を変更できます。変更に応じて、オレンジ色の折れ線グラフ(故障数の予測値を表すグラフ)の区間が短くなったり、長くなったりします。

図9.13 予測期間の調整



### 「イベントまでの時間」データでリスク集合を定義する方法

起動ダイアログにて「イベントまでの時間」タブを使用した場合も、リスク集合を定義できます。ただし、その場合、起動ダイアログの「イベントまでの時間」タブで、「寿命単位」は「数値」に、「予測の開始時間」は「0」に設定されている必要があります。そして、適切な列を、「イベントまでの時間」・「打ち切りの有無」・「グループID」に指定してください。

「予測」アウトラインにある左側のプロットでは、生産数が棒グラフで示されています。既存のリスク集合を定義するには、「0」の位置にあるホットスポットを左にドラッグしてください。一方、将来のリスク集合を定義するには、「1」の位置にあるホットスポットを右にドラッグしてください。

「リスク集合のスプレッドシートによる設定」オプションによって、既存および将来のリスク集合を定義することもできます。「イベントまでの時間の形式」タブを使ってプラットフォームを起動した場合、既存のリスク集合は、「将来のリスク」のスプレッドシートにおいて、時間値が負である行に入力しなければなりません。このスプレッドシートについては、「[リスク集合のスプレッドシートによる設定](#)」(231ページ)を参照してください。

### 「予測」グラフのオプション

「予測」レポートのグラフに対して、契約期間や、分布の種類といった設定も変更できます。

- 契約期間の設定を変更して、故障数を予測したい場合には、「**契約期間の使用**」の下に数値を指定します。また、必要に応じて、時間の単位を変更します。
- あてはめる確率分布を変更するには、「**分布の選択**」のドロップダウンリストから確率分布を選択します。選択した確率分布が、データにあてはめられ、予測に使われます。また、「寿命の一変量」レポートにおいて、選択した確率分布のグラフが追加されます。なお、「寿命の一変量」レポートの方で確率分布を変更しても、「予測」グラフ上の確率分布は変更されません。

- グラフ上に表示される故障数に関して、累積総数を表示したい場合は、[累積度数] ラジオボックスを選択します。デフォルトでは、各時点での故障数が表示されています。各時点での故障数のほうが、傾向を把握しやすいかもしれません。
- 予測故障数の信頼区間を表示するには、[区間の表示] を選択します。

## 「予測」レポートのオプション

赤い三角ボタンをクリックすると、次のようなオプションが表示されます。

**アニメーション** ホットスポットを点滅表示するかどうかを指定します。この[アニメーション]は、既存のリスク集合の青い棒を右クリックすることでも選択や解除を行えます。

**リスク集合の対話式設定** ホットスポットをドラッグ可能にするかどうかを指定します。

**リスク集合のスプレッドシートによる設定** 生産数と期間を（対話式のグラフで追加する代わりに）数値で指定できます。スプレッドシートでの設定においては、将来に予定されている生産数を、グラフで対話的に追加するのではなく、数値で指定できます。また、過去の特定の時点における生産数を、予測の計算に含めないように設定することもできます。

- 過去の特定の時点における生産数を予測の計算から除外するには、「過去のリスク」領域でその時点を選択し、「生産量」列のセルをクリックして[除外する]を選択します。除外した時点を、再び、予測の計算に含めるには、[含める]を選択します。
- 将来に予定されている生産数をスプレッドシートで入力するには、「将来のリスク」の該当するフィールドをダブルクリックし、新しい値を入力します。
- 予測に用いる生産数の時点を追加する場合は、「将来のリスク」領域内を右クリックし、[追加] オプションのいずれかを選択します（[行の追加] を選択すると1行追加されます。[N行の追加] を選択した場合は、追加する行数を指定できます）。

スプレッドシートで変更した値は、グラフに反映されます。

---

**メモ：** [イベントまでの時間の形式] タブを使ってプラットフォームを起動した場合、既存のリスク集合は、「将来のリスク」のスプレッドシートにて、時間値が負である行に入力しなければなりません。

---

**将来のリスク集合の読み込み** 将来の生産数データを、開いている別のデータテーブルから読み込みます。読み込んだデータが、将来に予定されている生産数として、グラフに表示されます。このデータには、生産日（タイムスタンプ）と生産数の列が必要です。

**区間の表示** グラフ上に描かれている信頼区間の表示／非表示を切り替えます。このオプションを選択した場合と、グラフの横の[区間の表示]を選択した場合の動作は同じです。

[区間の表示] を選択すると、メニューに[予測区間の種類]が表示されます。区間の種類として次のいずれかを選択します。

- [プラグイン区間] は、分布のパラメータを推定値に固定して、予測誤差を計算します。この方法では、推定誤差は考慮されていません。
- [予測区間] では、推定されたパラメータの推定誤差を考慮しながら、予想誤差を求めます。

「予測区間」が選択されている場合には、メニューに「**予測区間の設定**」オプションが表示されます。「予測区間」は、デフォルトでは近似法によって計算されています。「**モンテカルロ標本サイズ**」や「**乱数シード値**」を選択し、モンテカルロ法で求めることもできます。なお、乱数シード値として、システムクロックを使用する場合には、欠測値を入力してください。

**契約期間の使用** 予測の際に指定の契約期間を考慮するかどうかを指定します。このオプションを選択した場合と、グラフの横の「**契約期間の使用**」を選択した場合の動作は同じです。

**故障コストの使用** 将来のリスクグラフに、故障数ではなく、故障コストが表示されます。

「**故障コストの使用**」を選択すると、メニューに「**故障コストの設定**」オプションが表示されます。このオプションを使えば、各故障のコストを設定できます。起動ウィンドウでグループ変数を指定した場合、「**故障コストの設定**」ウィンドウで各グループに対して別々のコストを指定できます。

**予測データテーブルの保存** 累積返品数と各時点での返品数を、新しいデータテーブルに保存します。起動ウィンドウで選択した変数のデータも、一緒に保存されます。グループ変数を指定した場合、それぞれのグループIDのデータと、「全体」というデータが作成されます。これらのデータテーブルには、将来の予測される返品数とともに、過去の返品数も含まれています。

---

## 「信頼性予測」プラットフォームのオプション

「信頼性予測」レポートの赤い三角ボタンをクリックすると、次のようなオプションが表示されます。

**イベントまでの時間の形式でデータを保存** ネバダ形式や日付形式のデータを、「イベントまでの時間」形式に変換して、データテーブルに保存します。

**凡例の表示** 「観測データ」レポートの凡例の表示／非表示を切り替えます。このオプションは、「イベントまでの時間」形式のデータでは使用できません。

**グラフフィルタの表示** グラフフィルタの表示／非表示を切り替えます。グラフフィルタを使用すると、「観測データ」グラフを特定の生産期間に限定することができます。選択されていない期間の棒は淡色表示になります。期間の選択を解除すると、グラフが元の状態で表示されます。このオプションは、「イベントまでの時間」形式のデータでは使用できません。

以下のオプションについて詳しくは、『JMPの使用法』の「JMPのレポート」章を参照してください。

**やり直し** 分析を繰り返したり、やり直したりするオプションを含みます。また、「自動再計算」オプションに対応しているプラットフォームにおいては、「自動再計算」オプションを選択すると、データテーブルに加えた変更が、該当するレポートに即座に反映されるようになります。

**スクリプトの保存** レポートを再現するためのスクリプトを保存するオプションが、保存先ごとに用意されています。

**By グループのスクリプトを保存** By 変数の全水準に対するレポートを再現するためのスクリプトを保存するオプションが、保存先ごとに用意されています。起動ウィンドウでBy 変数を指定した場合のみ使用可能です。





# 第10章

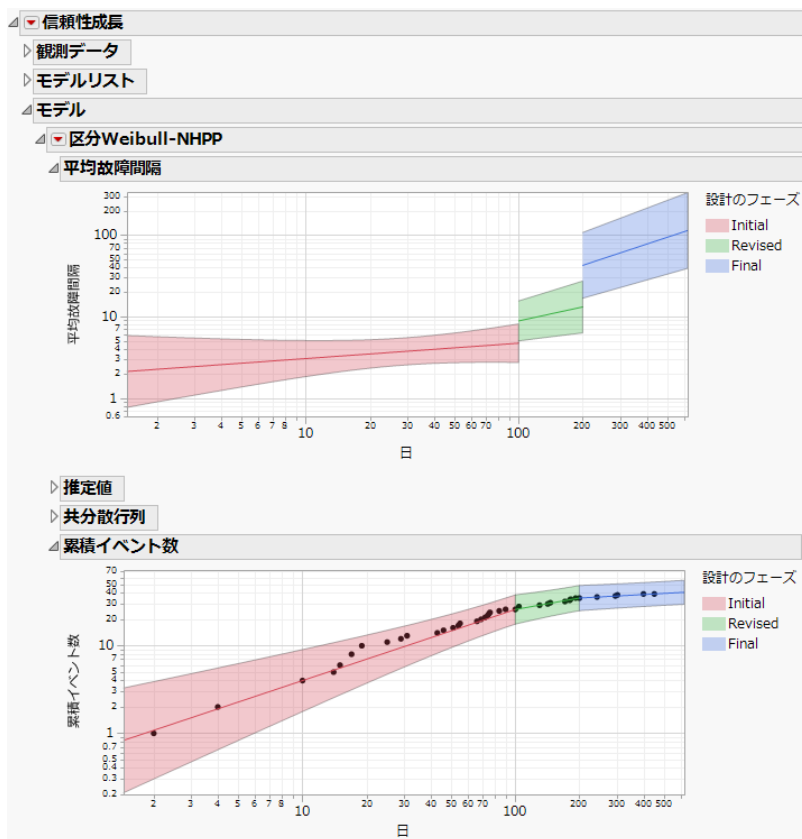
## 信頼性成長

### システム改善による信頼性の変化をモデル化する

「信頼性成長」プラットフォームでは、修理や再生できるシステムの故障を分析します。単一のシステムにおいて、設計などが改善されたことにより、信頼性がどのように変化するかを調べます。信頼性成長分析の目的は、システムを修理しながら設計を改良していったときに、平均故障間隔が長くなっているのを確かめることです。

「信頼性成長」プラットフォームは、Crow-AMSAAモデルをあてはめます。このモデルは、非同次Poisson過程モデルの1つで、強度関数がWeibull型の関数になっています。なお、「信頼性成長」プラットフォームでは、フェーズごとに、個別のCrow-AMSAAモデルをあてはめることもできます。また、複数のシステムにモデルをあてはめることもできます。

図10.1 フェーズが3つある信頼性成長モデルの例



## 目次

「信頼性成長」プラットフォームの概要	237
「信頼性成長」プラットフォームの例	238
「信頼性成長」プラットフォームの起動	241
起動ウィンドウの役割	242
データの種類	244
「信頼性成長」レポート	246
モデルの説明と使用可否	246
「観測データ」レポート	246
「信頼性成長」プラットフォームのオプション	249
モデルのレポート	250
Crow-AMSAA モデル	251
Crow-AMSAA 修正最尤法	258
パラメータ指定 Crow-AMSAA	259
区分 Weibull-NHPP	260
再初期化 Weibull-NHPP	264
区分 Weibull-NHPP 変化点検出	267
「信頼性成長」プラットフォームの別例	268
区間打ち切りデータに対する区分 NHPP-Weibull モデル	268
区分 Weibull-NHPP 変化点検出モデル	270
「信頼性成長」プラットフォームの統計的詳細	272
「Crow-AMSAA」レポートの統計的詳細	272
「区間 Weibull-NHPP 変化点検出」レポートの統計的詳細	274

## 「信頼性成長」プラットフォームの概要

「信頼性成長」プラットフォームでは、MIL-HDBK-189 (1981) で述べられている Crow-AMSAA モデルをあてはめます。Crow-AMSAA モデルは、非同次 Poisson 過程モデル (NHPP モデル; non-homogeneous Poisson process models) の1つです。Crow-AMSAA モデルの強度関数は、2パラメータで、Weibull 型の関数となっています。Crow-AMSAA モデルは、「べき乗則」モデルとも呼ばれています。このようなモデルは、故障強度（故障が発生する頻度）の経時的変化を表現します。Crow-AMSAA モデルの故障強度は、 $\beta$  と  $\lambda$  の2つのパラメータによって表されます。

このプラットフォームでは、単一のシステムにおけるデータに対しては、4種類のモデルが用意されています。また、変化点を自動検出する機能もあります。単一のシステムに対しては、次のようなモデルが用意されています。

- 単純な Crow-AMSAA モデル。2パラメータのモデルです。両方のパラメータを、最尤法で推定します。
- Crow-AMSAA 修正最尤法。 $\beta$  の最尤推定値がバイアスに対して修正されます。
- いずれかのパラメータを固定した Crow-AMSAA モデル。2パラメータのうちの片方（もしくは両方）を指定された値に固定して、残りのパラメータを最尤法で推定します。
- 区分 Weibull-NHPP モデル。フェーズごとに、Crow-AMSAA モデルのパラメータを推定します。ただし、このモデルは、隣り合うフェーズにおいて連続性を仮定します。
- 再初期化 Weibull-NHPP モデル。フェーズごとに、Crow-AMSAA モデルのパラメータを推定します。ただし、このモデルは、過去のフェーズにおける履歴をすべて無視します。
- 変化点を自動検出した区分 Weibull-NHPP モデル。この分析は、未知の2つのフェーズにおいて、故障の発生が異なっている場合に適しています。

複数のシステムに対しては、次のようなモデルが用意されています。

- 「区分 Weibull-NHPP」。このモデルでは、すべてのシステムが同じ区分 Weibull-NHPP モデルに従うと仮定します。このモデルでは、「システム間でのデータの違いは誤差だけが原因である」と仮定されます。このモデルには、各フェーズに1つずつの  $\beta$  パラメータと、全体で1つの  $\lambda$  パラメータがあります。
- 「区分 Weibull-NHPP (異なる切片)」。このモデルでは、各システムにおいて切片が異なる区分 Weibull-NHPP モデルを仮定します。このモデルには、各フェーズに1つずつの  $\beta$  パラメータと、各システムに1つずつの  $\lambda$  パラメータがあります。
- 「フェーズ別 Weibull-NHPP」。このモデルでは、フェーズごとに、システムで共通の Crow-AMSAA モデルを仮定します。このモデルには、各フェーズに1つずつの  $\beta$  パラメータと1つずつの  $\lambda$  パラメータがあります。
- 「個別 Weibull-NHPP」。このモデルでは、各フェーズのシステムごとに、異なる Crow-AMSAA モデルを仮定します。このモデルには、システムとフェーズの組み合わせごとに1つずつの  $\beta$  パラメータと1つずつの  $\lambda$  パラメータがあります。
- 「システム別 Weibull-NHPP」。このモデルでは、各システムが異なる Crow-AMSAA モデルに従います。
- 「同一システム Weibull-NHPP」。このモデルでは、各システムが同一の Crow-AMSAA モデルに従います。このモデルでは、「システム間でのデータの違いは誤差だけが原因である」と仮定されます。

プロファイルによって、平均故障間隔・強度・累積故障数といった統計量の経時的変化を、対話的に見ることができます。試験期間中に、不明な時点において故障の発生頻度が変化したと考えられる場合には、変化点を検出するオプションが役立ちます。このオプションは、変化点を見つけ出し、区切られた期間ごとにモデルを推定します。

---

## 「信頼性成長」プラットフォームの例

たとえば、新型のタービンエンジンの試作品を試験しているとしましょう。試験は1年以上にわたって実施され、これまでに3つのフェーズが終了しています。

サンプルデータの「Reliability」フォルダにある「TurbineEngineDesign1.jmp」データテーブルを開いてください。発生した故障ごとに、試験開始日からの経過日数が、「日」列に記録されています。また、各日の故障数（修理件数）が、「修正」列に記録されています。

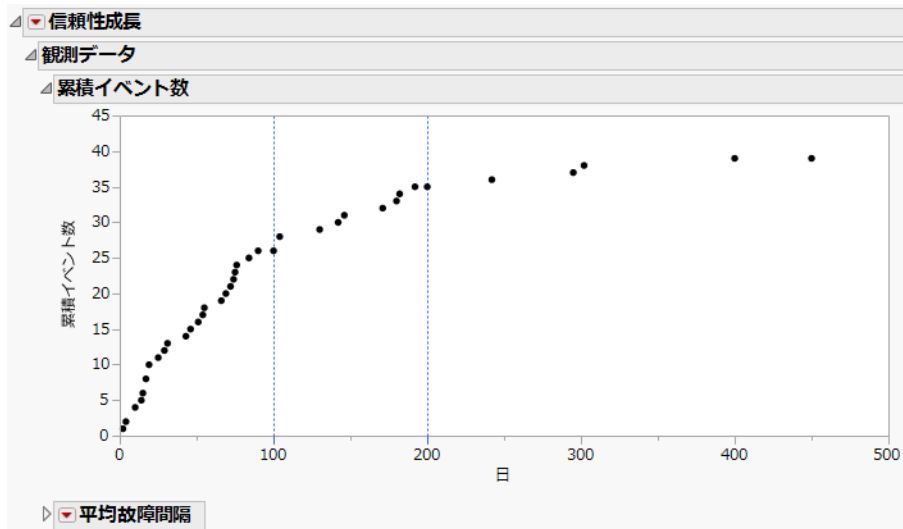
最初の100日間のフェーズは、初期段階（「Initial」）です。初期段階では、故障が起きるたびに、積極的に設計変更を行いました。次の100日間のフェーズ（「Revised」）では、サブシステムの設計変更だけで、故障に対処しました。最終フェーズ（「Final」）は250日間で、故障が起きた場合、局所的にだけ設計を変更していきしました。

各フェーズは、指定の日数で終了しており、定時打ち切りです。各フェーズは、次のフェーズの開始日で打ち切られていると判断されます。それ以外の故障時間データは、（打ち切りのない）正確な故障時間を表しています。

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「TurbineEngineDesign1.jmp」を開きます。
2. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [信頼性成長] を選択します。
3. [イベントまでの時間の形式] タブで、「日」を[イベントまでの時間] に指定します。
4. 「修正」を[イベント度数] に指定します。
5. 「設計のフェーズ」を[フェーズ] に指定します。
6. [OK] をクリックします。

「信頼性成長」レポートが表示されます（図10.2）。「累積イベント数」グラフに、日別の累積故障数が表示されます。青い縦の点線は、3つのフェーズ間の区切りを示しています。

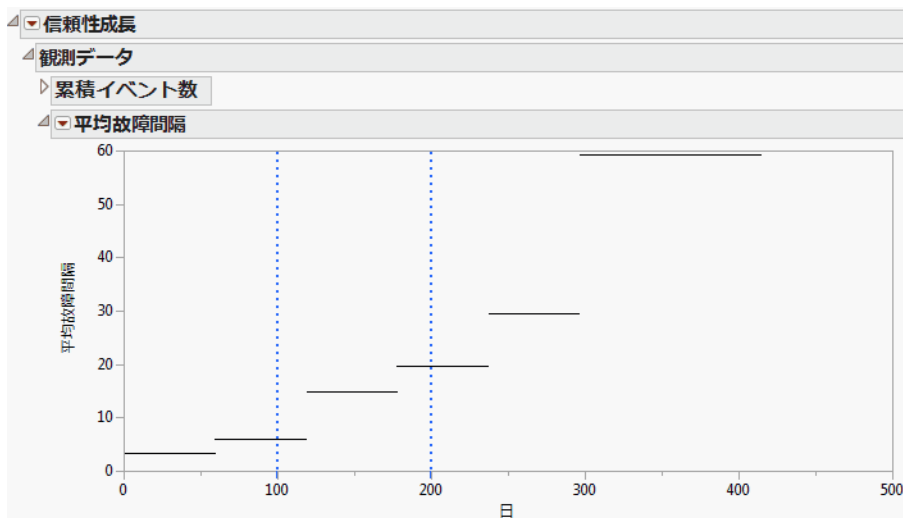
図10.2「観測データ」レポート



7. 「平均故障間隔」の開閉ボタンをクリックします。

平均故障間隔のグラフが表示されます(図10.3)。このグラフでは、特定の期間ごとに、平均故障間隔が水平線で表されています。なお、平均故障間隔を計算するための期間の長さは、赤い三角ボタンのメニューに用意されているオプションで、変更できます。

図10.3「平均故障間隔」グラフ

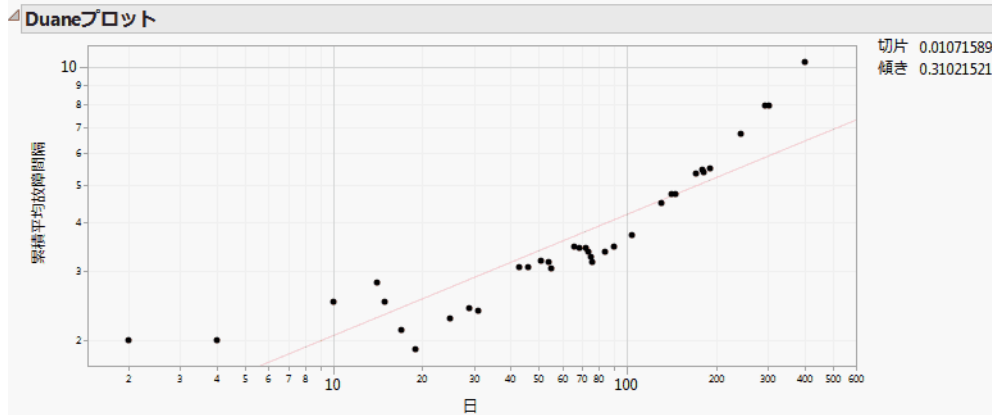


8. 「Duane プロット」の開閉ボタンをクリックします。

累積平均故障間隔の推定値を縦軸、故障時間を横軸としたプロットが表示されます。

データがCrow-AMSAAモデルに従っている場合は、両対数軸上にプロットすると、点が直線に沿います(図10.4)。

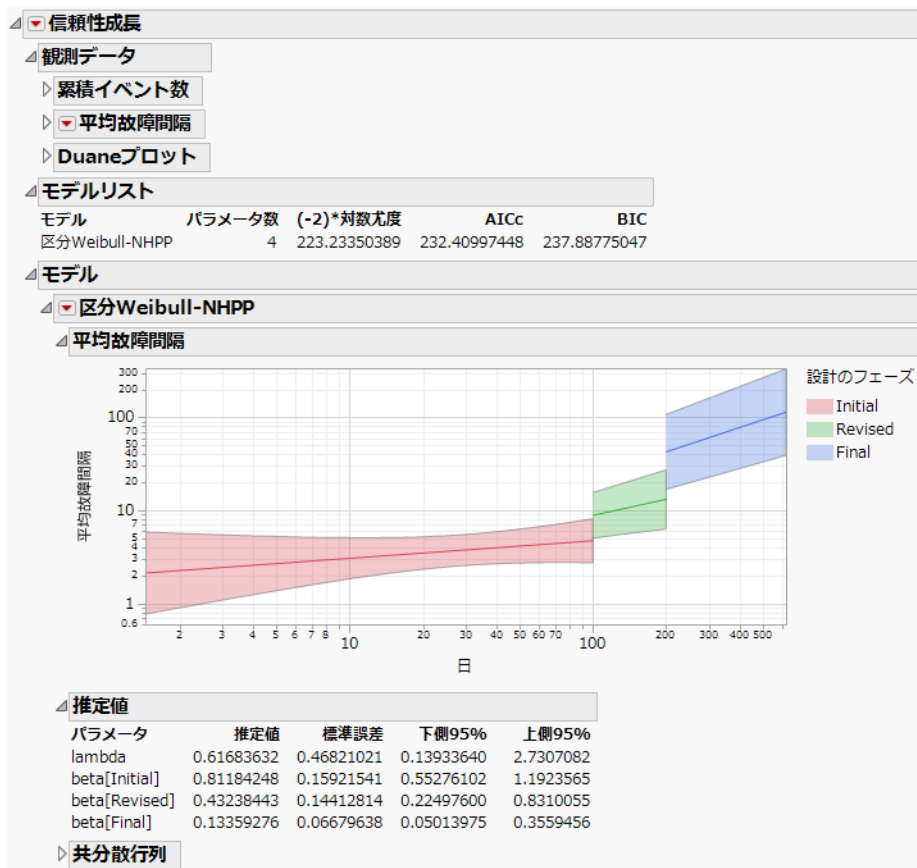
図10.4 Duaneプロット



9. 「信頼性成長」の赤い三角ボタンをクリックし、[モデルのあてはめ]>[区分 Weibull-NHPP]を選択します。

3つのフェーズごとに、Weibull-NHPP モデルがあてはめられます (図10.5)。この例のモデルでは、3つの開発段階があると想定しています。「区分 Weibull-NHPP」の赤い三角ボタンをクリックすると、グラフやレポートを作成するオプションが表示されます。

図10.5 「区分Weibull-NHPP」レポート



## 「信頼性成長」プラットフォームの起動

「信頼性成長」プラットフォームを起動するには、[分析] > [信頼性/生存時間分析] > [信頼性成長] を選択します。図10.6は、「TurbineEngineDesign1.jmp」サンプルデータに対する起動ウィンドウです。

図10.6 「信頼性成長」起動ウィンドウ

起動ウィンドウには、4つのデータ形式に対応する「イベントまでの時間の形式」、「日付形式」、「並行システム」、「並列システム」の4つのタブがあります。

- 「日付形式」のデータは日時です。日付や時刻など、日時で記録されているデータです。このタブでは、日時の列に「タイムスタンプ」の役割を割り当ててください。
- 他の3つのデータ形式は、試験の開始時点から、故障が生じた時点までの時間です。「イベントまでの時間の形式」タブでは、ゼロ時点からの時間が含まれている列に、「イベントまでの時間」の役割を割り当ててください。

「イベントまでの時間」・「タイムスタンプ」・「イベント度数」・「フェーズ」・「システムID」のいずれかの列が欠測値となっている行は、分析から除外されます。

**メモ：**「信頼性成長」プラットフォームのいずれのデータ形式でも、時間や日時のデータは昇順で並んでいなければなりません。

## 起動ウィンドウの役割

「信頼性成長」起動ウィンドウ内の変数に指定できる役割は、指定したデータ形式タブによって決定されます。この節では、役割について説明します。

### イベントまでの時間

「イベントまでの時間（time to event）」とは、試験の開始時から、イベントの発生時（故障発生時または試験終了時）までに経過した時間のことです。ここでの「時間」は、試験の開始時点进行をゼロとします。データが「イベントまでの時間」形式の場合は、「イベントまでの時間の形式」タブを選んでください。

指定方法には次の2つがあります（詳細は、「[正確な故障時間と区間打ち切りデータ](#)」（244ページ）を参照してください）。

- 1つの列だけが指定されている場合、データは、イベントが発生するまでの正確な時間を表しているものとして処理されます。
- 2つの列が指定されている場合、データは、区間打ち切りを表しているものとして処理されます。この時、2つの列は、各区間の開始時間と終了時間を表しています。開始時間と終了時間が異なる区間は、その区間内のいずれかの時点で、イベントが発生したとみなされます。このようなデータは、「区間打ち切り」と呼ばれています。開始時間と終了時間が同じ区間は、その特定の時点でイベントが生じたものとして処理されます。つまり、(打ち切りのない) 正確な時間として処理されます。

時間の列は、昇順に並んでいる必要があります。区間の開始時間と終了時間を示す2列を指定する場合、区間が重複してはいけません(区間の端点を除く)。イベントの度数がゼロである区間が1つのフェーズ内に収まっている場合、それらの区間は尤度に影響しないため、省略してかまいません。

## タイムスタンプ

[日付形式] タブにおける「タイムスタンプ」は、日付や時刻などの日時を表します。[イベントまでの時間]と同様、[タイムスタンプ]にも、1つ、または、2つの列を指定できます。データが日付や時刻などの日時を表している場合は、[日付形式] タブを用いてください。

日時の列を[タイムスタンプ]に指定した場合、データテーブルの最初の行に記録されている日時が、試験開始の日時だとみなされます。

- 1つの列で日時を指定する場合、データテーブルの最初の行のタイムスタンプの列に試験開始日時が、また、イベント度数の列に0が保存されている必要があります。
- 区間を示す2列で日時を指定する場合でも、データテーブルの最初の行のタイムスタンプの最初の列に試験開始日時が記録されている必要があります(詳細は、「フェーズ」(244ページ)を参照してください)。

その他の詳細は、「イベントまでの時間」(242ページ)の[イベントまでの時間の形式]タブに関する解説を参照してください。また、「正確な故障時間と区間打ち切りデータ」(244ページ)も参照してください。

## イベント度数

[イベント度数]は発生したイベントの度数を表します。通常は、特定の時点や区間で生じた、再生や修理が必要な故障数を指します。[イベント度数]の列を指定しない場合、各行のイベント度数は1に設定されます。

## システムID

[システムID]には、複数のプロトタイプやシステムなどが並行もしくは並列している場合に、それらを区別する値を含んでいる列を指定します。この[システムID]の役割は、[並行システム]および[並列システム]データ形式だけで指定できます。また、この役割は、これら2つのデータ形式において必須です。

## フェーズ

信頼性成長試験では、多くの場合、複数の試験段階（フェーズ）があります。こうしたフェーズを、オプションの「フェーズ」列で指定できます。データ形式が「イベントまでの時間」および「日付形式」の場合、「フェーズ」列はどのようなデータまたは尺度でもかまいません。データ形式が「並列システム」の場合、「フェーズ」変数のデータタイプは数値でなければなりません。フェーズがあるデータについては、「試験のフェーズ」(245ページ)を参照してください。例として、「区間打ち切りデータに対する区分NHPP-Weibullモデル」(268ページ)を参照してください。

## By

ここで指定した列の値ごとに、個別に分析が行われます。

## データの種類の

「イベントまでの時間の形式」タブと「日付形式」タブでは、「イベントまでの時間」または「タイムスタンプ」として1つまたは2つの列を指定します。「並行システム」および「並列システム」では、「システムID」列の水準ごとに1つの列を入力できます。「Sample Data」フォルダの「Reliability」フォルダ内には、並行システムや並列システムのデータテーブルが用意されています。並行システムの例としては「Concurrent Systems.jmp」、並列システムの例としてはファイル名が「Parallel Systems」で始まる4つのテーブルが用意されています。

次に、1列のデータと、2列のデータの違いについて説明します。

## 正確な故障時間と区間打ち切りデータ

一部の試験では、試験対象のシステムを定期的に点検して、故障が生じているかどうかを確認します。その場合、ある期間内で故障が生じたことはわかりますが、正確な発生時刻はわかりません。このようなデータを、**区間打ち切り**と言います。

「信頼性成長」プラットフォームでは、区間打ち切りではない正確な故障時間のデータと、区間打ち切りデータの両方を扱うことができます。「イベントまでの時間」または「タイムスタンプ」に、1列だけを指定した場合、その列に含まれているデータは、(打ち切りのない) 正確な故障時間とみなされます。

2つの列を指定した場合、それぞれの列は、区間の開始時点と終了時点であるとみなされます。開始時点と終了時点が異なる場合、区間打ち切りとみなされます。この時、故障は、その区間内における、いずれかの時点で生じているとみなされます。開始時点と終了時点が同じ場合、それらは正確な故障時間とみなされます。このように、2つの列によって、正確、および、区間打ち切りの両方を表すことができます。

**正確な故障時間**は、1列だけでも指定できますし、開始時点と終了時点を同じにした2列でも指定できます。

「信頼性成長」プラットフォームで、モデルを推定するときには、最尤法が使われています。この最尤法の尤度関数では、区間打ち切りも考慮されますので、正確なデータと区間打ち切りデータが混在していても問題ありません。

## 定数打ち切りと定時打ち切り

試験を途中で終了する方法には、主に、2種類があります。特定の故障数に達した時点で打ち切る場合と、特定の期間が過ぎた時点で打ち切る場合です。たとえば、前者は、50件の故障が生じた時点で、後者は、6か月が経った時点で試験を終了します。

故障数に基づいて終了することを**定数打ち切り**といいます。一方、所定の期間に基づいて終了することを、**定時打ち切り**といいます。「信頼性成長」プラットフォームでは、各フェーズが、定数と定時のいずれの打ち切りであるかを判断し、尤度に反映させます。

## 試験のフェーズ

信頼性成長試験では、複数の**フェーズ**があるのが普通です。たとえば、開発中のシステムやプログラムに、ある時点で大幅な変更が加えられた場合には、その前後でフェーズが異なると考えられます。分析に用いるデータテーブルには、以下に説明するように、各フェーズが開始される時間と、各フェーズが定数と定時のいずれの打ち切りかを示す情報を含めてください。

### 単一のフェーズ

フェーズが1つだけの場合、データテーブルの最終行における、時間とイベント度数の値によって、定数と定時のいずれの打ち切りであるかが判断されます。

- データテーブルの最終行が正確な故障時間であり、かつ、そのイベント度数が0より大きい場合、試験は定数打ち切りとみなされます。
- 最終行の時間が正確なもので、かつ、最終行のイベント度数がゼロである場合は、定時打ち切りとみなされます。
- 2列で指定されており、最終行の区間幅がゼロでない場合は、定時打ち切りとみなされます。この時、最終行における区間の右側の値が、試験の終了時間とみなされます。

---

**メモ:** 定時打ち切りでは、データテーブルの最終行で試験終了時間を示す必要があります。[イベントまでの時間] または [タイムスタンプ] の列に1列だけを指定した場合、定時打ち切りを示すためには、最終行のイベント度数がゼロでなければいけません。[イベントまでの時間] または [タイムスタンプ] の列に2列を指定した場合は、最終行における区間の右側の値が試験終了時間とみなされます。このとき、最終行の区間において故障が生じなかったときは、イベント度数にゼロを入力してください。

---

### 複数のフェーズ

データが「イベントまでの時間」形式の場合には、第2フェーズ以降の全フェーズにおいて、時間の列にフェーズの開始時間を含めてください。データが「日付」形式の場合には、全フェーズにおいて、日付（タイムスタンプ）の列にフェーズの開始日付を含めてください。フェーズの開始時間にイベントが発生していない場合、[イベント度数] 列のセルにゼロを入力してください。なお、時間の列が2列のときにも、両側の端点が同じ値になっている擬似的な区間を、各フェーズの先頭に追加し、また、そのイベント度をゼロにして、フェーズの開始時間を示す必要がある場合もあります。

最終フェーズを除く各フェーズが定数と定時のいずれの打ち切りであるかは、直前のフェーズにおける最終行のデータで判断されます。例として、フェーズAが終了し、フェーズBが開始する時間が $t_B$ であるとしましょう（この場合、フェーズBの第1行は、時間 $t_B$ におけるデータでなければいけません）。

- フェーズAの最終行が正確な故障時間であり、かつ、その故障時間が $t_B$ と異なる場合、フェーズAは、時間 $t_B$ で打ち切られた定時打ち切りとみなされます。
- フェーズAの最終行が正確な故障時間であり、かつ、その故障時間が $t_B$ と等しい場合、フェーズAは、定数打ち切りとみなされます。
- フェーズAの最終行が区間を表している場合、フェーズAは、時間 $t_B$ で打ち切られた定時打ち切りとみなされます。

最終フェーズが定数と定時のいずれの打ち切りであるかは、最終行のデータで判断されます。

- データテーブルの最終行が正確な故障時間であり、かつ、そのイベント度数が0より大きい場合、試験は定数打ち切りとみなされます。
- データテーブルの最終行が、正確な時間であるがイベント度数がゼロの場合、もしくは、幅をもつ区間の場合には、試験は定時打ち切りとみなされます。

---

## 「信頼性成長」レポート

「観測データ」レポートはデフォルトで表示されます。起動ウィンドウで「並列システム」データ形式を指定した場合は、「モデルの説明と使用可否」レポートもデフォルトで表示されます。

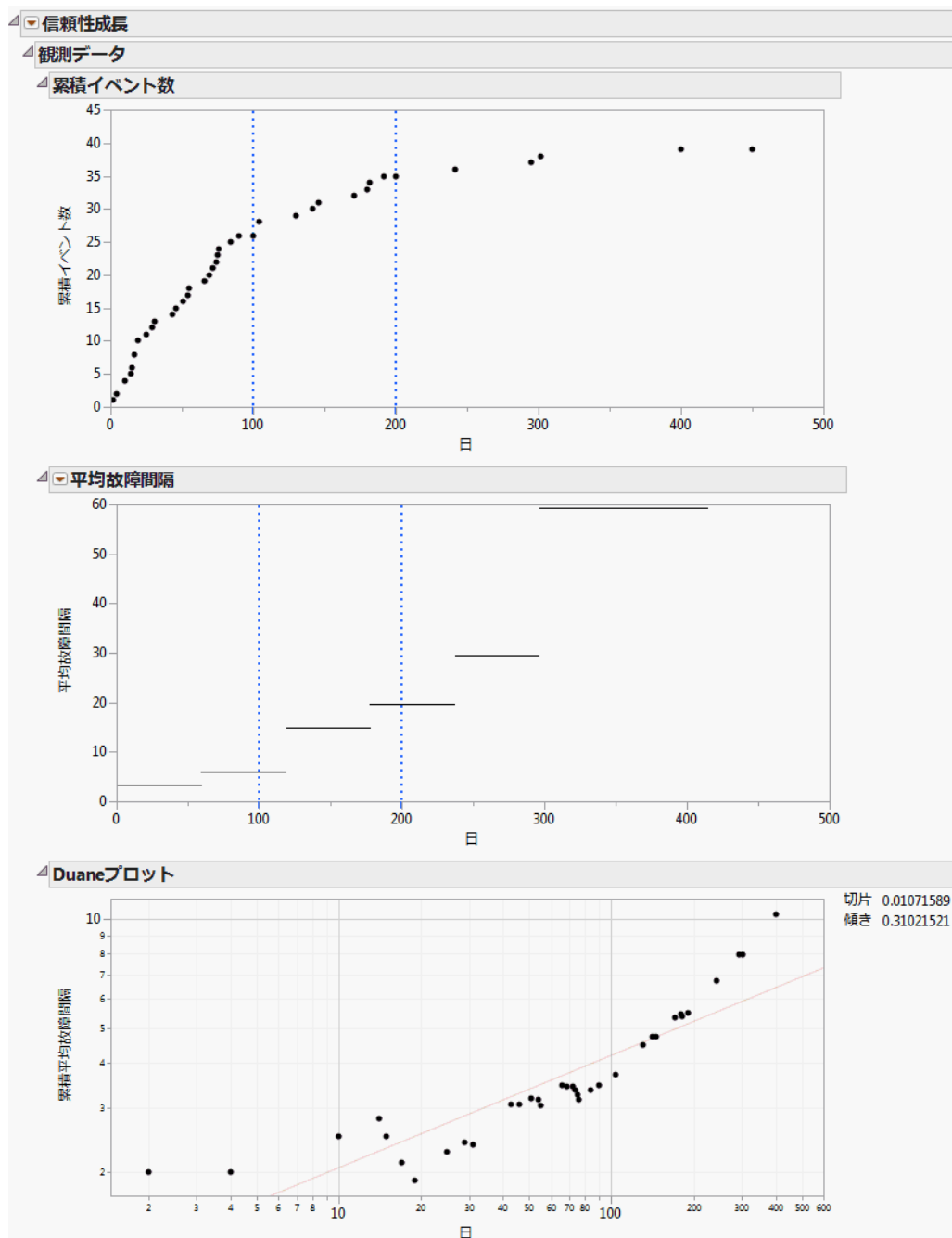
### モデルの説明と使用可否

「モデルの説明と使用可否」レポートには、並列システムモデルの名前と説明がリストされます。また、現在のデータテーブルにモデルを使用できるかどうかを示す列も表示されます。使用できないモデルの場合、このデータテーブルの右端にその理由が示されます。

### 「観測データ」レポート

「観測データ」レポートには、デフォルトで、「累積イベント数」グラフ・「平均故障間隔」グラフ・「Duaneプロット」が含まれます。図10.7は、「平均故障間隔」グラフと「Duaneプロット」を開いた状態のレポートです。このレポートを作成するには、「[「信頼性成長」プラットフォームの例](#)」(238ページ)の手順に従います。

図10.7 「観測データ」レポート



## 「累積イベント数」グラフ

「累積イベント数」グラフでは、時間に対して、累積イベント数がプロットされます。各点のY座標は、X座標が示す時点までに発生したイベントの総数です。

モデルをあてはめると、そのモデルの曲線が、「累積イベント数」グラフに追加されます。累積イベント数の推定値は曲線で、また、その95%信頼区間は色のついた帯で示されます。グラフの右側にあるチェックボックスによって、これらの曲線と帯の表示/非表示を切り替えることができます。

[並列システム] データ形式の場合、「累積イベント数」グラフには「システムID」変数の水準ごとに個別のパネルがあります。また、グラフの最下部のパネルには、「システムID」変数のすべての水準の累積イベント数を重ね合わせたプロットが表示されます。「システムID」変数の水準は色分けされています。

## 「平均故障間隔」グラフ

「平均故障間隔」グラフには、一定の長さの期間ごとに求められた平均故障間隔(MTBF; Mean Time Between Failures) が示されます。平均故障間隔を求めるのに使われる期間は、フェーズとは別に設定されます。この期間は、デフォルトでは、行数によって決められています。

### 「平均故障間隔」グラフのオプション

「平均故障間隔」の赤い三角ボタンをクリックし、[オプション] をクリックすると、ウィンドウが開き、平均故障間隔の計算に使う期間を指定できます。

計算方法には、次の2種類があります。

- [等しい時間幅の期間ごと] では、平均故障間隔を求める期間の長さを指定します。
- [指定された期間ごと] では、平均故障間隔を求める期間の区切りとなる時点を指定します。
  - 区切りとなる時点を変更するには、テーブル内のセルをダブルクリックします。
  - また、テーブル内で右クリックすると、開いたメニューから、行を追加または削除できます。

## Duane プロット

Duane プロットには、時間に対して累積平均故障間隔がプロットされます。両軸で、log10 スケールが使われます。データが Crow-AMSAA モデルに従っている場合は、両対数軸上にプロットすると、点が直線に沿います。

---

**メモ:** Duane プロットを使用できるのは、故障時間データが正確で、データ形式が「イベントまでの時間」形式である場合のみです。このプロットを、区間打ち切りデータや、日付形式で入力されたデータに使用することはできません。

---

プロットに表示される直線は、説明変数を常用対数スケールの時間、応答変数を常用対数スケールの累積平均故障間隔とした回帰モデルを、最小2乗推定したものです。

---

**メモ:** Duane プロットではフェーズ変数は考慮されません。「イベントまでの時間」変数においてフェーズの変化を定義するためだけに存在しているデータは、Duane プロットの描画やそこの回帰直線の計算では無視されます。

---

### 「切片」と「傾き」

プロットの右側には「切片」と「傾き」の値が表示されます。

- 表に表示されている「切片」の値は、解釈しやすいように、**自然対数スケール**で推定したときの切片となっています。具体的に言えば、説明変数を自然対数スケールの時間、応答変数を自然対数の累積平均故障間隔としたときの回帰モデルです。「切片」の値は、 $\log(1) = 0$ における回帰式の予測値です。ここで、**log**は自然対数です。常用対数で変換したデータでの切片を求めるには、この「切片」の値を $\log(10)$ で割ります。詳細については、Tobias and Trindade (2012, ch. 13) を参照してください。
- 一方、対数がもつ性質により、自然対数と常用対数のどちらの変換を用いても、「傾き」の値は同じです。

---

## 「信頼性成長」プラットフォームのオプション

「信頼性成長」の赤い三角ボタンをクリックすると、次のようなオプションが表示されます。

**モデルのあてはめ** 起動ウィンドウで「イベントまでの時間の形式」・「日付形式」・「並行システム」を指定した場合、このメニューには、以下で説明しているさまざまな非同次 Poisson 過程モデル (NHPP models; Non-Homogeneous Poisson Process models) が含まれます。起動ウィンドウで選択した内容に応じて、以下のモデルをあてはめることができます。

- 「Crow-AMSAA モデル」(251 ページ)
- 「Crow-AMSAA 修正最尤法」(258 ページ)
- 「パラメータ指定 Crow-AMSAA」(259 ページ)
- 「区分 Weibull-NHPP」(260 ページ)
- 「再初期化 Weibull-NHPP」(264 ページ)
- 「区分 Weibull-NHPP 変化点検出」(267 ページ)

**並列システムモデルのあてはめ** 起動ウィンドウで「並列システム」のデータ形式を指定した場合、このメニューのオプションを使って、並列システムのデータにさまざまなモデルをあてはめることができます。このメニューのオプションは、起動ウィンドウでの設定内容によって異なります。

以下のオプションについて詳しくは、『JMPの使用法』の「JMPのレポート」章を参照してください。

**やり直し** 分析を繰り返したり、やり直したりするオプションを含みます。また、「自動再計算」オプションに対応しているプラットフォームにおいては、「自動再計算」オプションを選択すると、データテーブルに加えた変更が、該当するレポートに即座に反映されるようになります。

**スクリプトの保存** レポートを再現するためのスクリプトを保存するオプションが、保存先ごとに用意されています。

**By グループのスクリプトを保存** By 変数の全水準に対するレポートを再現するためのスクリプトを保存するオプションが、保存先ごとに用意されています。起動ウィンドウで By 変数を指定した場合のみ使用可能です。

### モデルリスト

モデルをあてはめると、「モデルリスト」レポートが作成されます。このレポートには、あてはめたモデルに関する統計量が表示されます。モデルをあてはめるときに、それが「モデルリスト」にも追加されるため、モデルの比較が簡単にできます。モデルは、AICcが最小のものから順に並べられています。「モデルリスト」レポートには、次の統計量が表示されます。

**パラメータ数** モデル内のパラメータの個数。

**(-2)\*対数尤度** 観測データを所与としたときの、モデルパラメータに対する確率密度を、「尤度」と呼びます。一般には、尤度が大きいほど、モデルの適合度が良いと考えられます。つまり、対数尤度をマイナス2倍した値  $(-2) \times \text{対数尤度}$  が小さいほど、モデルの適合度が良いことを示します。

**AICc** 修正済み赤池の情報量規準。

**BIC** ベイズ情報量規準。

(-2)\*対数尤度、AICc、BICについては、『基本的な回帰モデル』の付録「統計的詳細」を参照してください。

---

## モデルのレポート

ここでは、使用可能なモデルをあてはめたときに生成されるレポートと、それらのモデルレポート内で使用できるオプションについて説明します。

- 「Crow-AMSAA モデル」
- 「Crow-AMSAA 修正最尤法」
- 「パラメータ指定 Crow-AMSAA」
- 「区分 Weibull-NHPP」
- 「再初期化 Weibull-NHPP」
- 「区分 Weibull-NHPP 変化点検出」

## Crow-AMSAA モデル

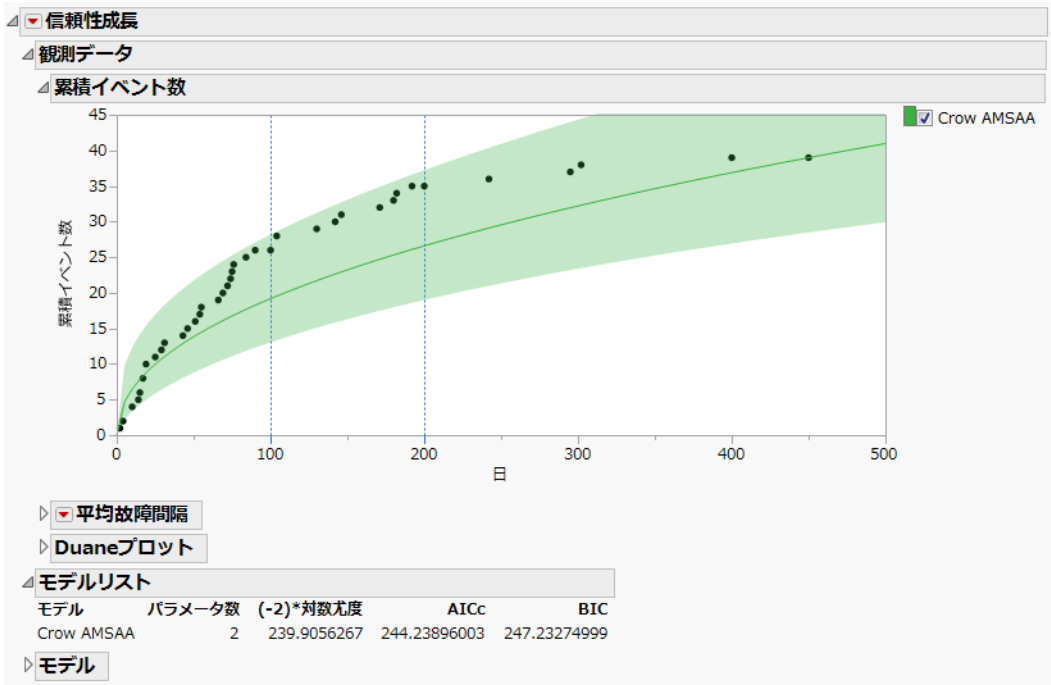
このコマンドを選択すると、Crow-AMSAA モデル (MIL-HDBK-189, 1981) があてはめられます。Crow-AMSAA モデルは、時間を  $t$  としたときの強度関数が  $\rho(t) = \lambda\beta t^{\beta-1}$  である非同次 Poisson 過程モデルです。ここで、 $\lambda$  は尺度パラメータ、 $\beta$  は成長パラメータ、 $t$  は時間です。この強度関数は、「Weibull 強度 (Weibull intensity)」とも呼ばれています。Crow-AMSAA モデルは、「べき乗則モデル」と呼ばれることもあります (Rigdon and Basu, 2000; Meeker and Escobar, 1998)。「再生モデルによる分析」プラットフォームでサポートされている「べき乗非同次 Poisson 過程モデル」は、この Crow-AMSAA モデルと同じモデルですが、異なるパラメータ表現が使われています。詳細は、「再生モデルによる分析」章の「[モデルのあてはめ](#)」(154 ページ) の節を参照してください。

「強度関数」は、修理可能なシステムに対して使われる数学的な概念です。時間  $t$  における強度関数は、 $t$  の周りのごく短い時間間隔で故障が生じる確率を、時間間隔で割ったもので、その短い時間間隔をゼロに近づけていった時に収束する極限值として定義されます。強度関数は、特定の時点においてシステムが故障する「密度」を表していると解釈できます。 $\beta < 1$  の場合、時間経過とともに故障は少なくなっており、システムは徐々に向上しています。 $\beta > 1$  の場合、時間経過とともに故障が多くなっており、システムは徐々に悪くなっています。 $\beta = 1$  の場合、故障が生じる頻度は一定です。

[Crow AMSAA] オプションを選択すると、「累積イベント数」グラフが更新され、Crow-AMSAA モデルで推定された累積イベント数の曲線が描かれます。曲線を囲む色のついた帯は、その時点における累積イベント数の 95% 信頼区間を示します。「モデルリスト」レポートも同様に更新されます。

図 10.8 は、「TurbineEngineDesign1.jmp」データの「観測データ」レポートです。

図10.8 Crow AMSAAの「累積イベント数」グラフと「モデルリスト」レポート



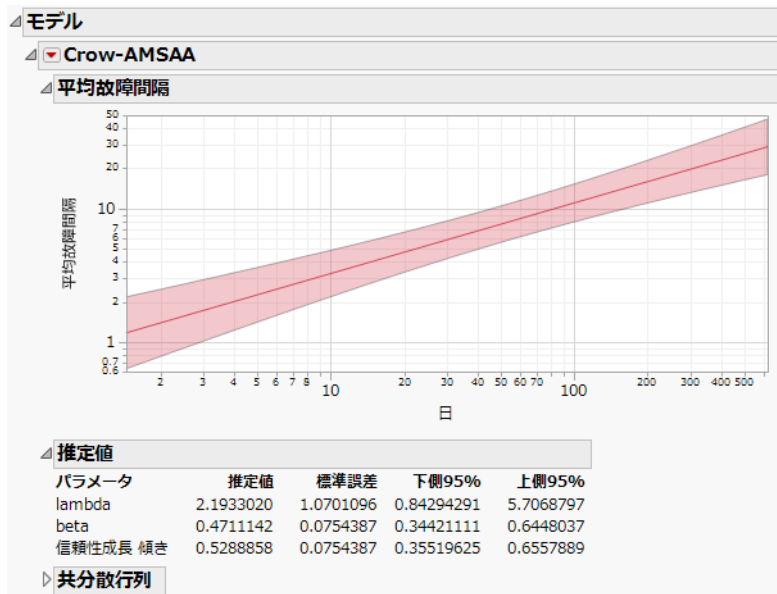
「Crow-AMSAA」レポート

「Crow-AMSAA」レポートは「モデル」レポートの中に表示されます。[イベントまでの時間の形式] を使用した場合、「Crow-AMSAA」レポートの「平均故障間隔」グラフは両対数グラフになります。[「平均故障間隔」グラフ](#) (252 ページ) を参照してください。

「平均故障間隔」グラフ

「平均故障間隔」グラフはデフォルトで表示されます (図10.9)。各時点で、色のついた帯状の部分が、時間  $t$  における平均故障間隔の95%信頼区間を示します。データの形式が [イベントまでの時間の形式] である場合、「平均故障間隔」グラフの両軸には、対数スケールが使われます。Crow-AMSAA モデルの平均故障間隔は、両対数グラフに描くと、直線になります。なお、[日付形式] を使用した場合は、対数スケールではなく、通常の線形スケールが使われます。

図10.9「平均故障間隔」グラフ



両対数グラフで、Crow-AMSAAモデルの平均故障間隔が直線になる理由を考えてみましょう。平均故障間隔は、強度関数の逆数です。Crow-AMSAAモデルの強度関数の逆数は、 $1/(\lambda\beta t^{\beta-1})$ です。ここで、 $t$ は試験開始時点からの時間です。この式の対数をとると、平均故障間隔の対数は、 $\log(t)$ の線形関数になっているのが分かります。この時、 $\log(t)$ に対する傾きは $1 - \beta$ です。平均故障間隔の推定値は、単純に、パラメータ $\lambda$ と $\beta$ に、推定値を代入して求めています。したがって、平均故障間隔の対数は、推定値においても、 $\log(t)$ の線形関数となっています。

### 推定値

「lambda」( $\lambda$ )、「beta」( $\beta$ )、「信頼性成長 傾き」( $1 - \beta$ )の最尤推定値が、グラフの下に「推定値」レポートに表示されます（図10.9を参照）。 $\lambda$ 、 $\beta$ 、 $1 - \beta$ の標準誤差と95%信頼区間も表示されます。計算方法については、「Crow-AMSAAモデルのパラメータ推定値」（272ページ）を参照してください。

### 共分散行列

あてはめたモデルのパラメータ推定値間の共分散行列を推定したものの。このレポートはデフォルトでは表示されません。

## Crow-AMSAAモデルのオプション

ここでは、Crow-AMSAAモデルをあてはめた場合の「Crow-AMSAA」アウトラインの赤い三角ボタンメニューについて説明します。

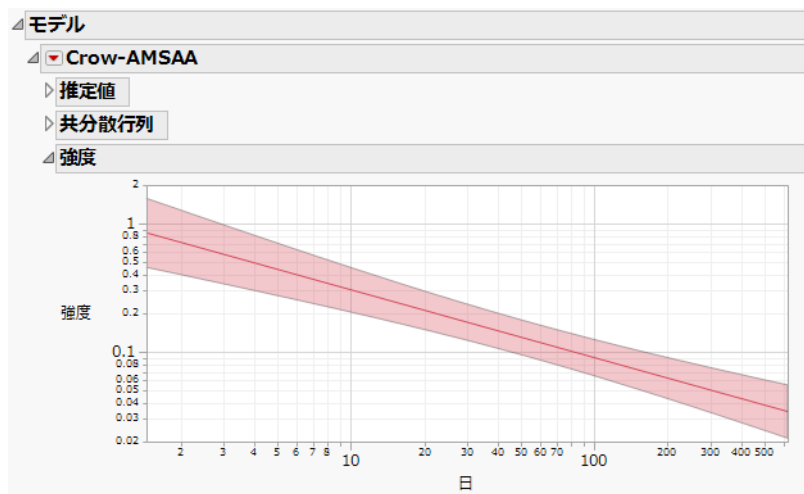
### 平均故障間隔グラフの表示

このオプションは、「平均故障間隔」グラフの表示／非表示を切り替えます。「[「平均故障間隔」グラフ](#)」(252ページ)を参照してください。

### 強度グラフの表示

「強度」グラフには、強度関数の推定値が表示されます(図10.10)。Weibull強度関数は $p(t) = \lambda \beta t^{\beta-1}$ で求められるため、 $\log(\text{強度})$ は $\log(t)$ の線形関数となります。データの形式が、「イベントまでの時間の形式」である場合は、このグラフの両軸には対数スケールが使われます。

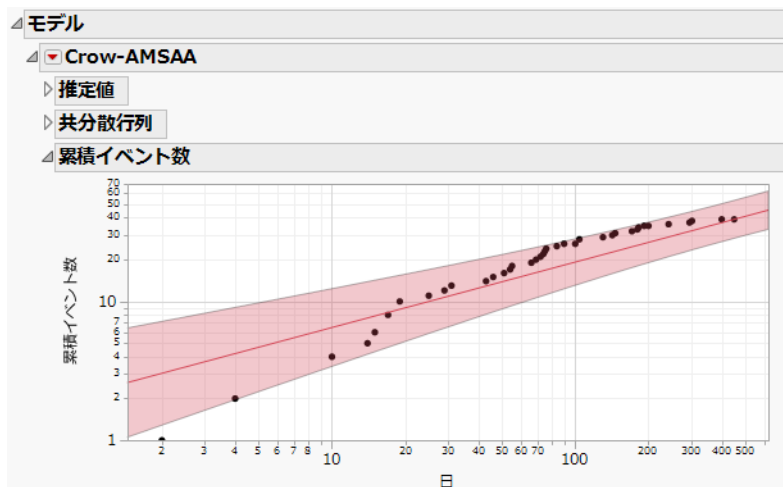
図10.10 強度グラフ



### 累積イベント数グラフの表示

このコマンドを実行すると、累積イベント数の推定値がプロットされたグラフが表示されます(図10.11)。グラフ上には累積イベント数の実測値も表示されます。データの形式が、「イベントまでの時間の形式」である場合は、このグラフの両軸には対数スケールが使われます。

図10.11 「累積イベント数」グラフ



Crow-AMSAA モデルの場合、時間  $t$  における累積イベント（の期待値）は  $\lambda t^B$  です。これの対数を取った式は、 $\log(t)$  の線形関数になっています。よって、Crow-AMSAA モデルの累積イベント数は、両対数グラフに描くと、直線になります。

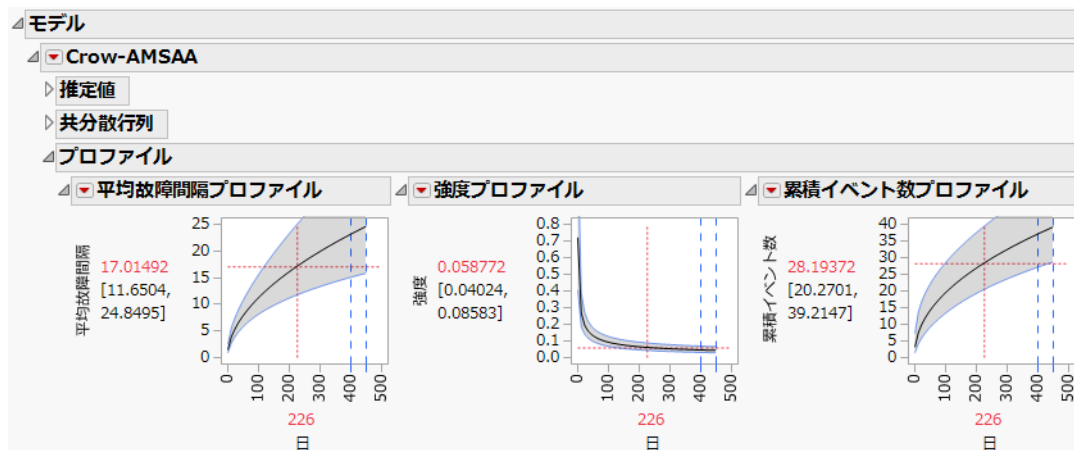
### プロファイルの表示

このコマンドを実行すると、平均故障間隔・強度・累積イベント数を描いた3つのプロファイルが表示されます（図10.12）。プロファイルでは対数スケールは使用されません。赤い縦の点線をドラッグすることで、さまざまな時点における、これら3つの特性値を知ることができます。時点の値（赤い縦の点線のX座標）は、グラフの下に、赤色の数字で表示されています。また、Ctrlキーを押しながらプロファイル内をクリックすると、ウィンドウが開き、時点の数値をキーボードから入力できます。なお、青い縦の点線は、最後に観測された故障の時点を示しています。

プロファイルには、95%信頼区間を示す帯も表示されます。指定された時点における点推定値（赤字）と95%信頼区間（黒字）は、数値としても、プロファイルの左側に表示されます。詳細は、「[プロファイル](#)」（273ページ）を参照してください。

いずれかのプロファイルの赤い三角ボタンをクリックし、**[因子設定] > [すべてのプロファイルを連動]** を選択すると、プロファイルを連動させることができます。プロファイルの使用方法和解釈については、『基本的な回帰モデル』の「標準的な最小2乗法モデル」章を参照してください。『プロファイル機能』の「プロファイル」章も参照してください。

図10.12 プロファイル



## 最終時点の平均故障間隔

分析者は、試験終了時点における平均故障間隔の信頼区間に、たびたび興味があります。このコマンドを実行すると、データが区間打ち切りでない場合、最終時点における平均故障間隔の推定値と、その95%信頼区間が計算されます。「Alpha」に数値を入力して、有意水準を変更し、信頼水準が $100 \times (1 - \alpha)\%$ の信頼区間を求めることができます。図10.13のようなレポートが作成されます。なお、データが区間打ち切りの場合は、推定値だけが計算され、信頼区間は計算されません。

図10.13 「最終時点の平均故障間隔」レポート

モデル					
Crow-AMSAA					
推定値					
共分散行列					
最終時点の平均故障間隔					
日	平均故障間隔	Alpha	下側	上側	
450	24.49186	0.05	15.73486	40.32432	

非同次Poisson過程 (NHPP) から生成される故障のパターンは無数にあり、観測データはそのうちの1つに過ぎません。試験が定数打ち切りで、 $n$ 回目の故障で打ち切るとします。「最終時点の平均故障間隔」レポートの信頼区間は、 $n$ 個の故障時間が確率変数であることを考慮して、計算しています。しかし、試験が定時打ち切りの場合、故障時間だけでなく故障数も確率変数になります。「最終時点の平均故障間隔」の信頼区間を求める計算方法は、「平均故障間隔プロファイル」の信頼区間と異なります。詳細は、Crow (1982) や Lee and Lee (1978) を参照してください。

データが定数打ち切りの場合、「最終時点の平均故障間隔」の信頼区間は正確です。しかし、データが定時打ち切りの場合、正確な信頼区間を求めることができません。データが定時打ち切りの場合、計算された信頼区間は保守的になっています。つまり、実際には、 $1 - \alpha$  よりも大きな確率の信頼区間になっています。

## 適合度

「適合度」レポートでは、「Weibull型強度関数の非同次Poisson過程（Crow-AMSAAモデル）に、データは従っている」という帰無仮説に対する検定を行います。起動ダイアログで指定した時間の列が1列である場合には、Cramér-von Mises 検定（「打ち切りのない故障時間データに対するCramér-von Mises 検定」（「[打ち切りのない故障時間データに対するCramér-von Mises 検定](#)」（257ページ）））が実行されます。また、時間の列が2列の場合には、カイ2乗検定（「区間打ち切りの故障時間に対するカイ2乗適合度検定」（「[区間打ち切りの故障時間に対するカイ2乗適合度検定](#)」（257ページ）））が実行されます。

### 打ち切りのない故障時間データに対するCramér-von Mises 検定

起動ウィンドウにおける「イベントまでの時間」または「タイムスタンプ」に指定された列が1列である場合には、Cramér-von Mises 検定が実行されます。この検定は、検定統計量が大いだと帰無仮説が棄却され、モデルの適合度は不十分であると結論されます。この検定に使用するベータの不偏推定値が、レポートに表示されます。また、「Cramer von Mises」という見出しの下に、検定統計量が表示されます。

「 $p$  値」の列には、データがWeibull型NHPPモデル（Crow-AMSAAモデル）に従っている場合に、実際に観測された検定統計量よりも大きな検定統計量が得られる確率が示されます。このレポートでは、0.25以上の $p$ 値は計算されません。検定統計量が、 $p$ 値が0.25のときの検定統計量よりも小さい場合には、「 $\geq 0.25$ 」とレポートされます。この検定の詳細は、Crow（[1975](#)）を参照してください。

図10.14は、「TurbineEngineDesign1.jmp」のデータにCrow-AMSAAモデルをあてはめた場合の適合度検定を示します。計算された検定統計量の $p$ 値は、0.01未満です。つまり、Crow-AMSAAモデルの適合度は悪いと結論できます。

図10.14 「適合度」レポート - Cramér-von Mises 検定

モデル			
Crow-AMSAA			
推定値			
共分散行列			
適合度			
Cramer			
ベータ	不偏推定	von Mises	$p$ 値
0.459034	0.546322	< 0.01	

### 区間打ち切りの故障時間に対するカイ2乗適合度検定

起動ウィンドウにおける「イベントまでの時間」または「タイムスタンプ」に指定された列が2列である場合には、カイ2乗適合度検定が実行されます。この検定は、検定統計量が大いだと帰無仮説が棄却され、モデルの適合度は不十分であると結論されます。検定統計量は、各区間において、実際に観測された故障数と、モデルから推定された故障数との差に基づき、算出されます。

このようなカイ2乗適合度検定は、データテーブルに記録されている時間の区間が、試験期間全体を網羅していなければいけません。つまり、各区間の開始時間は、直前の区間の終了時間と一致していなければ、カイ2乗適合度検定が妥当なものでなくなります。そのため、試験において故障が観測されなかった区間も、データテーブルに含めておく必要があります。連続していない区間や、開始時間と終了時間が一致しない区間がある場合は、JMPによって自動的に補完されます。しかし、検定結果の近似精度は悪くなります。

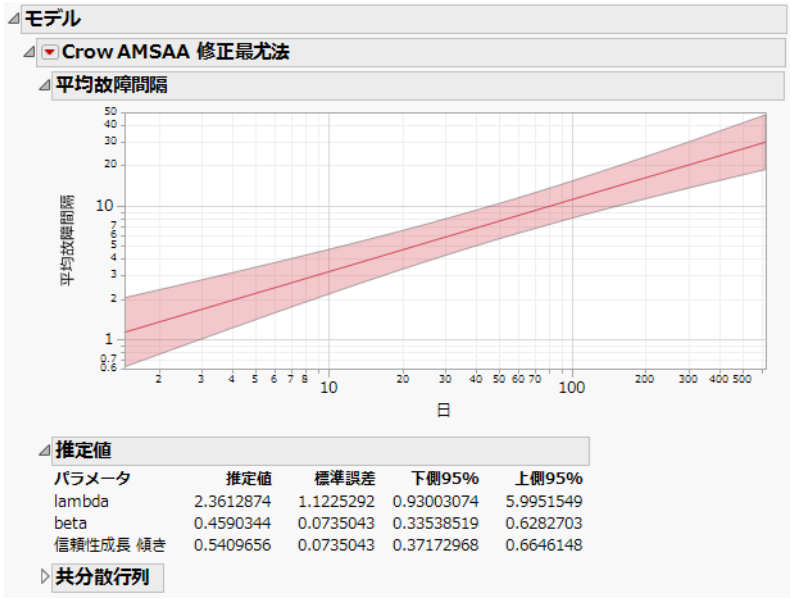
Crow-AMSAA 修正最尤法

Crow-AMSAA モデルを通常的最尤法で推定した場合、 $\beta$  の最尤推定値はバイアスを持ちます。このオプションは、 $\beta$  の最尤推定値におけるバイアスを調整した推定値を求めます。

メモ: このオプションを使用できるのは、データが単一の「イベントまでの時間」列または「タイムスタンプ」列として起動ウィンドウに入力された場合のみです。区間打ち切りデータに対しては使用できません。

図10.15は、「TurbineEngineDesign1.jmp」のデータに対する Crow-AMSAA 修正最尤法のあてはめを示しています。

図10.15 「Crow-AMSAA 修正最尤法」レポート



$\beta$  のバイアス修正済み推定値の式は、試験が定数打ち切りであるか、定時打ち切りであるかによって異なります。詳細は、「[「Crow-AMSAA 修正最尤法」のパラメータ推定値](#)」(273 ページ) の節を参照してください。

[Crow-AMSAA 修正最尤法] オプションを選択すると、「累積イベント数」グラフにこのモデルの結果が追加されます。このオプションを選択すると、「モデルリスト」も更新されます。また、「Crow-AMSAA 修正最尤法」レポートが開き、Crow-AMSAA 修正最尤法の「平均故障間隔」グラフ・「推定値」・「共分散行列」が表示されます。「平均故障間隔」グラフについては、「[「平均故障間隔」グラフ](#)」(265 ページ) 節で説明しています。

[平均故障間隔グラフの表示] のほかに、[強度グラフの表示]・[累積イベント数グラフの表示]・[プロファイルの表示]・[最終時点の平均故障間隔]・[適合度] のオプションがあります。これらのレポートについては、「[Crow-AMSAA モデル](#)」(251 ページ) で説明しています。修正最尤法による推定値については、「[「Crow-AMSAA 修正最尤法」のパラメータ推定値](#)」(273 ページ) を参照してください。Crow-AMSAA 修正最尤法における「適合度」および「最終時点の平均故障間隔」レポートの詳細については、以下を参照してください。

### 適合度

[Crow-AMSAA 修正最尤法] オプションはデータが単一の [イベントまでの時間] 列または [タイムスタンプ] 列として入力された場合にしか使用できないため、適合度検定には常に Cramér-von Mises 検定が使われます。この検定で使用する推定値  $\beta$  はバイアスが修正されています。通常の Crow-AMSAA モデルの「適合度」における結果もバイアスが修正されており、両者は同じ結果になります。

### 最終時点の平均故障間隔

最終時点の平均故障間隔は、修正最尤法を使用して推定されます。ただし、最終時点の平均故障間隔に対する信頼区間は通常の最尤推定値を使用しています。よって、ここでの信頼区間は、Crow-AMSAA モデルを通常の最尤法で推定した結果における信頼区間と同じになります。

## パラメータ指定 Crow-AMSAA

このオプションを選択すると、Crow-AMSAA モデルのいずれかのパラメータを、指定した値に固定できます。[パラメータ指定 Crow-AMSAA] オプションを選択する前に「Crow-AMSAA」レポートが作成されていない場合は、これら両方のレポートが作成されます。

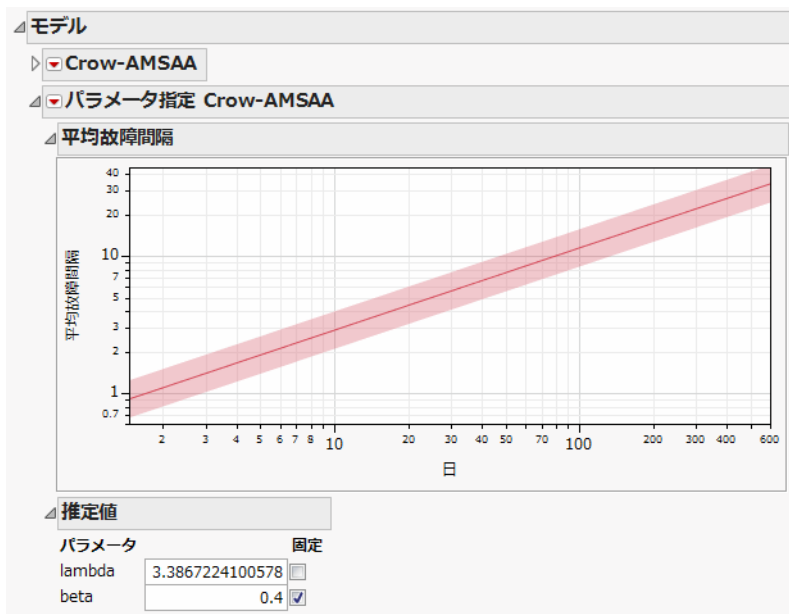
[パラメータ指定 Crow-AMSAA] オプションを選択すると、「累積イベント数」グラフに、パラメータを指定した Crow-AMSAA モデルの結果が追加されます。また、このオプションを選択すると、「モデルリスト」も更新されます。そして、「パラメータ指定 Crow-AMSAA」レポートが開き、Crow-AMSAA モデルの「平均故障間隔」グラフが表示されます。このグラフについては、「[「平均故障間隔」グラフ](#)」(265 ページ) で説明しています。

[平均故障間隔グラフの表示] オプションの他に、[強度グラフの表示]・[累積イベント数グラフの表示]・[プロファイルの表示] の各オプションがあります。これらのグラフの作成方法と解釈については、「[Crow-AMSAA モデル](#)」(251 ページ) を参照してください。

## 推定値

最初に表示されるパラメータ推定値は、通常のCrow-ASMAAモデルの最尤推定値です。いずれのパラメータも、[固定] チェックボックスをオンにした後、隣のテキストボックスに任意の数値を入力すると、パラメータがその数値に固定されます。そして、指定された値にパラメータを固定しながらモデルが再推定され、「平均故障間隔」グラフが更新されます。図10.16は、「TurbineEngineDesign1.jmp」のデータにパラメータ指定Crow-AMSAAモデルをあてはめ、「beta」の値を0.4に固定した結果です。

図10.16 「パラメータ指定 Crow AMSAA」 レポート

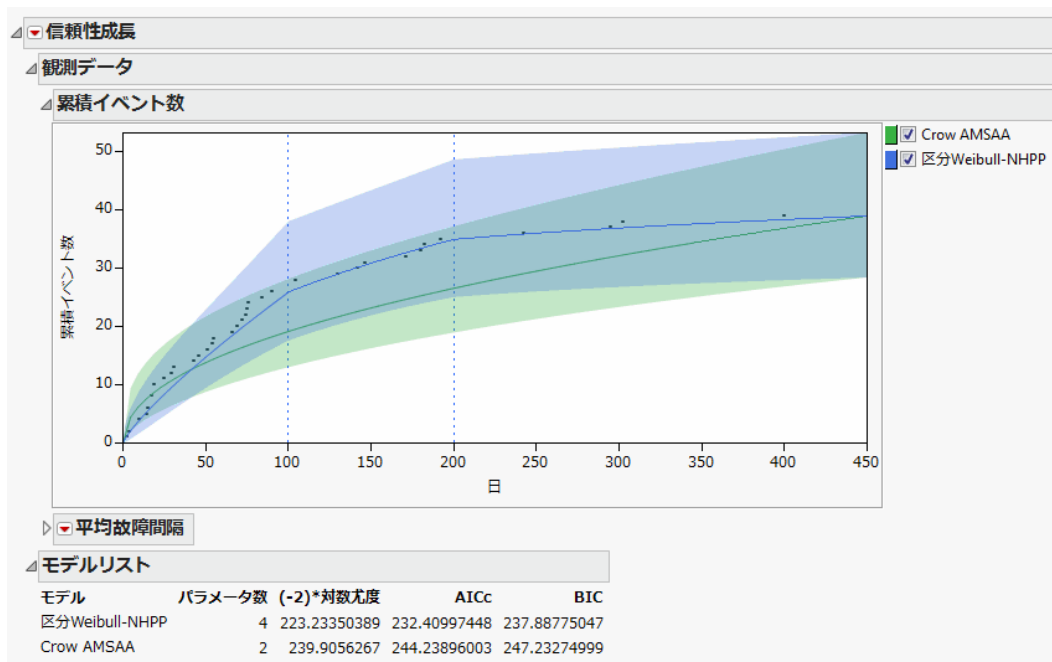


## 区分Weibull-NHPP

起動ウィンドウで「フェーズ」に指定した列に、少なくとも2つの値がある場合は、「区分Weibull-NHPPモデル」をあてはめることができます。このモデルは、「累積イベント数の関数は、各フェーズの境界においても連続である（つまり、各フェーズの開始時間における累積イベント数は、その前のフェーズの最終時間における累積イベント数と等しい）」という制約のもとで、フェーズごとに異なるCrow-AMSAAモデルをあてはめます。このコマンドは、各フェーズが時間的に連続していることを前提としています。そのため、データテーブルにおいて、初めのフェーズを除いて、各フェーズは、そのフェーズの開始時間を含んでいなければいけません。「複数のフェーズ」(245ページ)を参照してください。

このオプションを実行すると、「累積イベント数」グラフに区分モデルの結果が追加されます。青い縦の点線は、フェーズ間の境界を示します。また、このオプションを選択すると、「モデルリスト」も更新されます。図10.17では、「TurbineEngineDesign1.jmp」のデータに、Crow-AMSAAモデルと、区分Weibull-NHPPモデルをあてはめています。「モデルリスト」レポートには、両モデルのモデル選択規準が示されています。

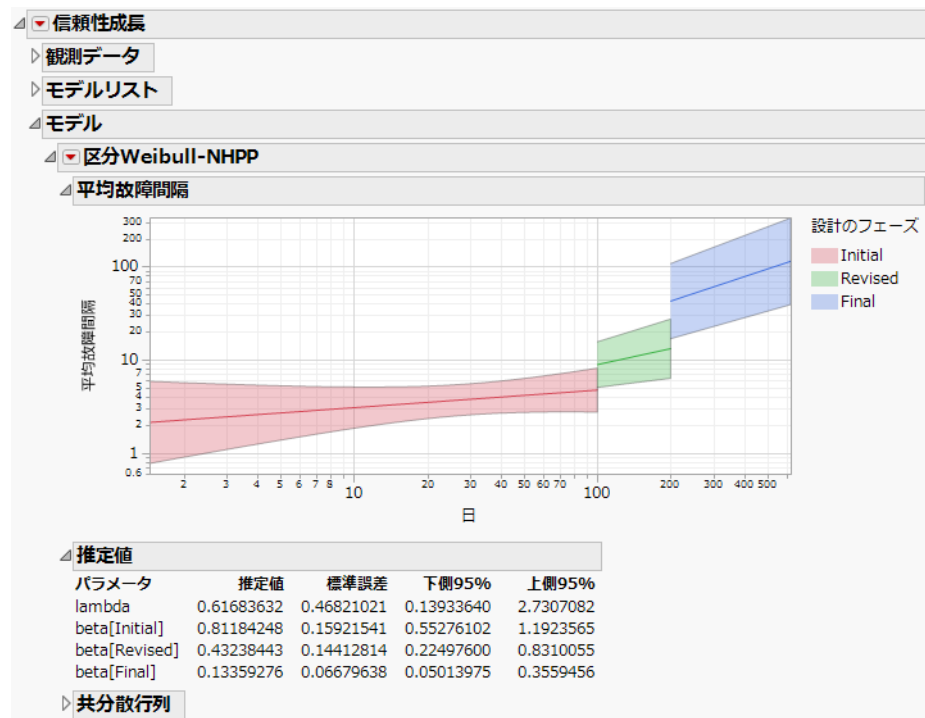
図10.17 「累積イベント数」グラフと「モデルリスト」レポート



## 「区分Weibull-NHPP」レポート

デフォルトでは、「区分Weibull-NHPP」レポートには、推定された「平均故障間隔」グラフが表示されます。フェーズは色分けされています。このグラフの下に、「推定値」および「共分散行列」レポートが表示されます。(図10.18を参照)。

図10.18 「区分Weibull-NHPP」レポート



### 「平均故障間隔」グラフ

[区分Weibull-NHPP] オプションを選択すると、デフォルトで「平均故障間隔」グラフと「推定値」レポートが表示されます（図10.18）。データの形式が、[イベントまでの時間の形式] である場合、このグラフの両軸には、対数スケールが使われます。このグラフの詳細は、「[「平均故障間隔」グラフ](#)」（252ページ）を参照してください。

### 推定値

「推定値」レポートには、モデルパラメータの推定値が表示されます。ただし、 $\lambda$ の推定値は、最初のフェーズにおける推定値しか表示されません。区分モデルでは、「累積イベント数の関数は、フェーズの境界においても連続である」という制約が課せられています。この制約によって、最初のフェーズにおける $\lambda$ と、各フェーズにおける $\beta$ から、各フェーズの $\lambda$ は一意に決められます。

区分モデルの推定値・標準誤差・信頼区間でも、単純なCrow-AMSAAモデルと同じように、最尤推定の枠組みが使われます。詳細は、「[Crow-AMSAAモデルのパラメータ推定値](#)」（272ページ）を参照してください。この節で説明したような区分モデルに基づき、累積イベント数に関する制約のもとで、追加のパラメータが最尤推定されます。

## 共分散行列

あてはめたモデルのパラメータ推定値間の共分散行列を推定したもの。このレポートはデフォルトでは表示されません。

## 「区分Weibull-NHPP」のオプション

ここでは、「区分Weibull-NHPP」の赤い三角ボタンのメニューにあるオプションについて説明します。

### 平均故障間隔グラフの表示

このオプションは、「平均故障間隔」グラフの表示／非表示を切り替えます。「[「平均故障間隔」グラフ](#)」(252ページ)を参照してください。

### 強度グラフの表示

「強度」グラフには、フェーズごとに、強度関数の推定値と信頼区間が表示されます。区分モデルの強度関数は、通常、フェーズの境界において不連続になります。なお、グラフは、フェーズごとに色分けされているので、簡単に区別できます。データの形式が、「イベントまでの時間の形式」である場合、このグラフの両軸には、対数スケールが使われます。詳細は、「[強度グラフの表示](#)」(254ページ)を参照してください。

### 累積イベント数グラフの表示

「累積イベント数」グラフには、フェーズごとに、累積イベント数の推定値と信頼区間が表示されます。区分モデルでは、「累積イベント数の関数は、フェーズの境界においても、連続である」という制約が課せられています。なお、グラフは、フェーズごとに色分けされているので、簡単に区別できます。データの形式が、「イベントまでの時間の形式」である場合、このグラフの両軸には、対数スケールが使われます。詳細は、「[累積イベント数グラフの表示](#)」(254ページ)を参照してください。

### プロファイルの表示

このコマンドを実行すると、平均故障間隔・強度・累積イベント数を描いた3つのプロファイルが表示されます(図18.11)。プロファイルでは対数スケールは使用されません。プロファイルの解釈と使用方法については、「[プロファイルの表示](#)」(255ページ)を参照してください。

区分モデルにおいては、平均故障間隔と強度は、フェーズの境界において不連続です。しかし、プロファイルにおいて、デフォルトの解像度では、その不連続性が正確には描画されていないかもしれません。「平均故障間隔プロファイル」と「強度プロファイル」において、フェーズの境界における曲線は、ほぼ垂直ながらやや傾斜しています(図10.19を参照)。このようなフェーズの境界部分の数値結果は、正確ではないので、推定結果として用いないでください。なお、これらの部分を、より正確に描画するために、曲線を描くポイントを増やすことができます。それには、Ctrlキーを押しながらプロファイル内をクリックし、ダイアログが開いたら、「プロット点の数」に大きい値を入力してください(図10.20では「プロット点の数」を「500」に指定しています)。

図10.19 プロファイル

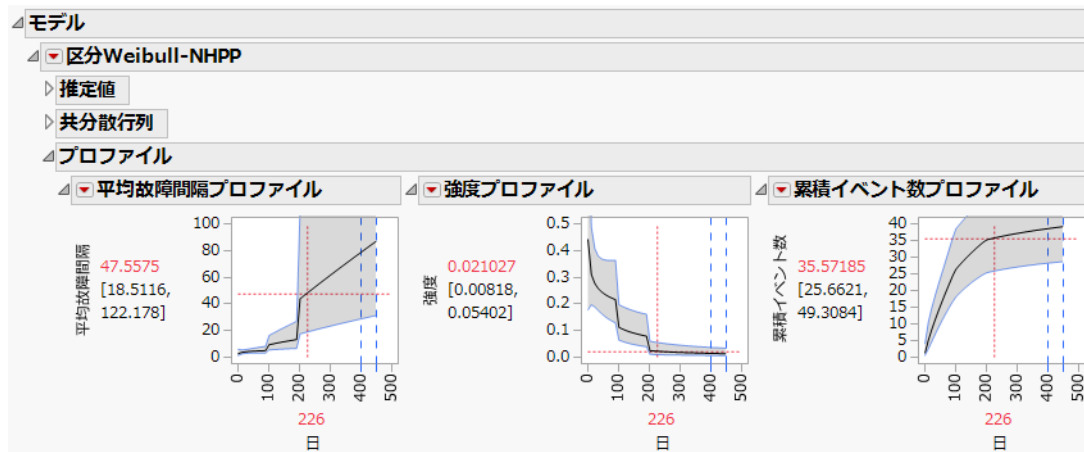


図10.20 「因子設定」ウィンドウ

Figure 10.20 shows the '因子設定' (Factor Settings) window. The settings are as follows:

- 因子 (Factor): 日 (Days)
- 現在の値 (Current Value): 226
- 最小値の設定 (Minimum Value Setting): 2
- 最大値の設定 (Maximum Value Setting): 450
- プロット点の数 (Number of Plot Points): 500
- 表示 (Display): ☒
- 因子設定のロック (Lock Factor Settings): ☐

Buttons: OK, キャンセル (Cancel)

## 再初期化 Weibull-NHPP

このオプションを選択すると、フェーズごとに、別々の独立した Crow-AMSAA モデルが当てはめられます。このようなモデルは、故障に影響を与えている因子が、フェーズ間で大きく変化した場合に役立ちます。そのような状況では、フェーズごとに、個別に検討する必要があるからです。起動ウィンドウで「フェーズ」に指定した列に少なくとも2つの値がある場合、この「再初期化 Weibull-NHPP モデル」を当てはめることができます。

この方法でも、分析対象のデータテーブルにおいて、各フェーズは、フェーズの開始時間を含んでいなければいけません。

- 「イベントまでの時間」または「タイムスタンプ」に指定する列が1列の場合、各フェーズの最初の行は、その開始時間と、0 のイベント度数を含んでいなければいけません。例として、サンプルデータの「Reliability」フォルダにある「ProductionEquipment.jmp」を参照してください。

- 2列を指定する場合、各フェーズの最初の行において、区間の開始時間（2列のうちの小さいほうの値）が、フェーズの開始時間を表していなければなりません。例としては、「Reliability」フォルダの「TurbineEngineDesign2.jmp」データテーブルを参照してください。また、「[区間打ち切りデータに対する区分NHPP-Weibullモデル](#)」（268ページ）も参照してください。

詳細は、「[複数のフェーズ](#)」（245ページ）を参照してください。

このオプションを選択すると、フェーズごとに、別々の独立したCrow-AMSAAモデルをあてはめます。そして、「累積イベント数」グラフに、その結果が追加されます。なお、「累積イベント数」グラフの青い縦の点線は、フェーズ間の境界を示します。また、このオプションを選択すると、「モデルリスト」も更新されます。

## 「再初期化Weibull-NHPP」レポート

デフォルトでは、「再初期化Weibull-NHPP」レポートには、推定された「平均故障間隔」グラフが表示されます。フェーズは色分けされています。このグラフの下に、「推定値」および「共分散行列」レポートが表示されます。（図10.21参照してください。この図には、「Reliability」フォルダにある「ProductionEquipment.jmp」サンプルデータを使っています）。

図10.21 「再初期化Weibull-NHPP」レポート



## 「平均故障間隔」グラフ

[再初期化Weibull-NHPP] オプションを選択すると、「平均故障間隔」グラフも描かれます。このグラフのアウトラインは、デフォルトで開いています。このグラフの詳細は、「[「平均故障間隔」グラフ](#)」（252ページ）を参照してください。

## 推定値

「推定値」レポートには、各フェーズの $\lambda$ と $\beta$ の推定値が表示されます。このモデルでは、各フェーズの $\lambda$ と $\beta$ は、そのフェーズに属するデータだけから推定されます。このとき、各フェーズは0時間から開始されるものとして、パラメータが推定されます。なお、推定にあたっては、各フェーズが定数と定時のいずれの打ち切りであるかも考慮します（「[試験のフェーズ](#)」(245ページ)を参照）。また、標準誤差と95%信頼区間も計算されます。これらの値の計算方法については、「[Crow-AMSAAモデルのパラメータ推定値](#)」(272ページ)に説明があります。

## 共分散行列

あてはめたモデルのパラメータ推定値間の共分散行列を推定したもの。このレポートはデフォルトでは表示されません。

## 「再初期化Weibull-NHPP」のオプション

ここでは、「再初期化Weibull-NHPP」の赤い三角ボタンのメニューにあるオプションについて説明します。

### 平均故障間隔グラフの表示

このオプションは、「平均故障間隔」グラフの表示／非表示を切り替えます。「[「平均故障間隔」グラフ](#)」(252ページ)を参照してください。

### 強度グラフの表示

「強度」グラフには、フェーズごとに、強度関数の推定値と信頼区間が表示されます。再初期化モデルは、フェーズごとに独立して推定されるため、その強度関数も、通常、フェーズの境界において不連続になります。なお、グラフは、フェーズごとに色分けされているので、簡単に区別できます。詳細は、「[強度グラフの表示](#)」(254ページ)を参照してください。

### 累積イベント数グラフの表示

「累積イベント数」グラフには、フェーズごとに、累積イベント数の推定値と信頼区間が表示されます。再初期化Weibull-NHPPモデルでも、「累積イベント数」グラフにおける横軸の時間は、試験が開始されてからの経過時間を表しています。再初期化モデルは、フェーズごとに独立して、各フェーズの開始時間を0として推定されます。しかし、このグラフでは、各フェーズの開始からの経過時間ではなく、**一番最初のフェーズが開始してからの経過時間**を、横軸の座標として描画しています。

再初期化モデルにおける元々の累積イベント数関数は、フェーズの開始時点をもとに、フェーズごとに推定されます。「累積イベント数」グラフで描かれている曲線は、直前のフェーズの終了時における累積イベント数に、現フェーズの推定された累積イベント数関数を足し合わせて求めていきます。なお、グラフは、フェーズごとに色分けされているので、簡単に区別できます。

### プロファイルの表示

このコマンドを実行すると、平均故障間隔・強度・累積イベント数を描いた3つのプロファイルが表示されます（図18.11）。「累積イベント数プロファイル」の曲線は、前節で説明した方法で求められていますので、フェーズの境界でも連続になっています。詳細は、「[プロファイルの表示](#)」(263ページ)を参照してください。

## 区分Weibull-NHPP 変化点検出

「区分Weibull-NHPP 変化点検出」オプションは、モデルが変化した時点を検出します。このオプションは、試験期間中のある時点において、故障の頻度が変化したと考えられる場合に役立ちます。なお、JMPでは、1つの変化点（言い換えると、1つの変化点を挟んだ2つのフェーズ）しか検出しない点に留意してください。

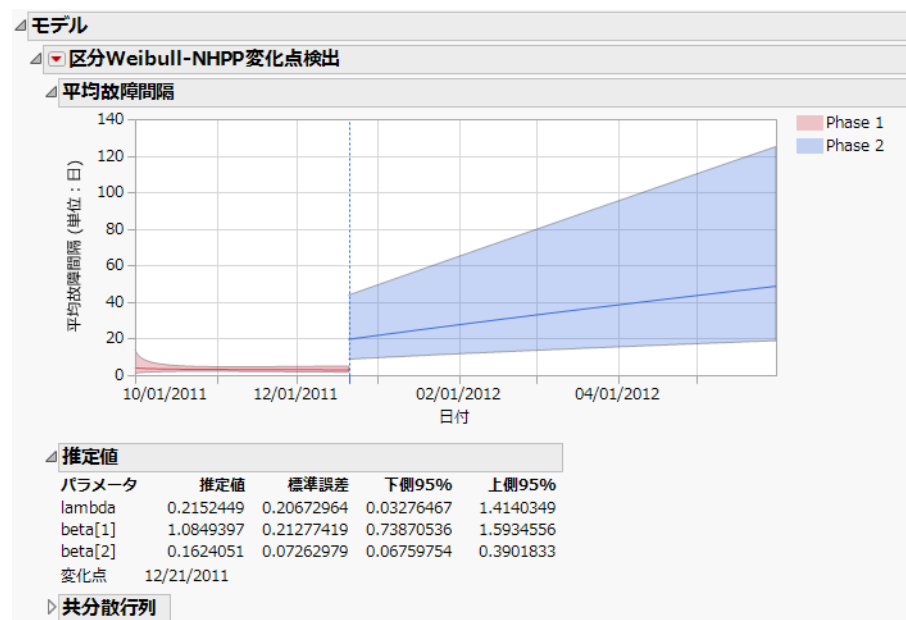
このオプションは、起動ウィンドウで「フェーズ」を指定しなかった場合で、次のいずれかの条件を満たす場合に使用可能となります。

- 起動ウィンドウで「イベントまでの時間」または「タイムスタンプ」に指定した列が、1列である（つまり、故障時間が正確な値である）。
- 起動ウィンドウの「並行システム」タブで、「イベントまでの時間」に指定した列が、2列である。

「区分Weibull-NHPP 変化点検出」オプションを選択した場合、推定されたモデルのプロットと信頼区間が「観測データ」の「累積イベント数」レポートに追加されます。「モデルリスト」が更新され、推定された変化点に基づく統計量が表示されます。「モデル」の下には、「区分Weibull-NHPP 変化点検出」レポートが表示されます。

デフォルトの「区分Weibull-NHPP 変化点検出」レポートには、「平均故障間隔」グラフ・「推定値」・「共分散行列」が表示されます。図10.22は、「Reliability」フォルダの「BrakeReliability.jmp」サンプルデータを用いたときのものです。この例では、「推定値」レポートの下部の「変化点」に「12/21/2011」と表示されていますので、変化点は2011年12月21日であると推測されます。なお、標準誤差や信頼区間は、変化点が既知であるという前提で算出されています。このグラフと「推定値」レポートについては、「区分Weibull-NHPP」（260ページ）に説明があります。

図10.22 「区分Weibull-NHPP 変化点検出」レポート



[平均故障間隔グラフの表示]・[強度グラフの表示]・[累積イベント数グラフの表示]・[プロファイルの表示]の各オプションを選択できます。これらのオプションについては、「[「再初期化 Weibull-NHPP」のオプション](#)」(266 ページ)に説明があります。

変化点の検出方法については、「[「区間 Weibull-NHPP 変化点検出」レポートの統計的詳細](#)」(274 ページ)で解説しています。

---

## 「信頼性成長」プラットフォームの別例

- [「区間打ち切りデータに対する区分 NHPP-Weibull モデル」](#)
- [「区分 Weibull-NHPP 変化点検出モデル」](#)

### 区間打ち切りデータに対する区分 NHPP-Weibull モデル

サンプルデータの「Reliability」フォルダにある「TurbineEngineDesign2.jmp」データテーブルは、信頼性成長試験のデータです。3つの試験フェーズにおけるタービンエンジンの故障数が記録されています。最初の2列は、故障が生じた期間を示しています。この期間は、試験開始から数えた日数で記録されています。故障が生じた正確な時点は不明で、期間内のいずれかの時点で起こったとしかわかっていません。

この例では、故障数は週ごとに報告されます。故障が1件も発生しなかった週は、データテーブルに記録されていません（たとえば、106日目から112日目の週はデータテーブルに記録されていません）。故障数がゼロの週の情報は、尤度に寄与しないため、モデルパラメータの推定にも必要ありません。

ただし、「区分 Weibull-NHPP モデル」または「再初期化 Weibull-NHPP モデル」をあてはめるには、すべてのフェーズにおいて、フェーズの開始時間は、[イベントまでの時間] 列または [タイムスタンプ] 列に記録されていなければなりません。

この例では、3つのフェーズは、それぞれ、0日目（「Initial」）、91日目（「Revised」）、200日目（「Final」）から始まっています。「Initial」および「Revised」のフェーズでは、それらの第1週で、故障が生じています。しかし、196日目から231日目までの間は、故障が発生していません。「Final」フェーズの開始時間が200日目であることを示すため、2つの時間列の値が両方とも200で、故障件数が0である行が、23行目に追加されています。この行は、「Final」フェーズの開始時間を、JMPに認識させるために必要です。

試験は385日目で終了しています。この例は、データが区間打ち切りで、かつ、定時打ち切り試験の例です。

---

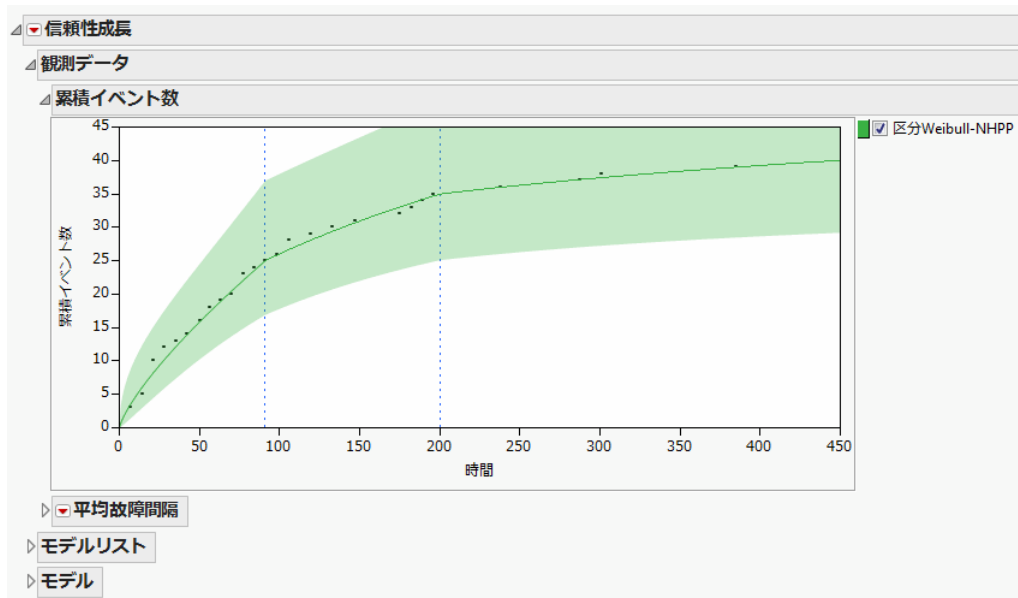
**メモ：** 分析対象のデータテーブルにおいて、各フェーズに開始時間が記録されていることは、区間 Weibull-NHPP モデル、および、再初期化 Weibull-NHPP モデルにおいて重要です。区間打ち切りデータの場合、各フェーズの最初の行に記録されている時間が、そのフェーズの開始時間とみなされます。この例で、23行目がデータテーブルに記録されていなかったとすると、「Final」フェーズの開始時間は、200日目ではなく、231日目と判断されてしまいます。

---

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「TurbineEngineDesign2.jmp」を開きます。
2. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [信頼性成長] を選択します。
3. [イベントまでの時間の形式] タブで、「開始日」列と「終了日」列を [イベントまでの時間] に指定します。
4. 「修正」を [イベント度数] に指定します。
5. 「設計のフェーズ」を [フェーズ] に指定します。
6. [OK] をクリックします。
7. 「信頼性成長」の赤い三角ボタンをクリックし、[モデルのあてはめ] > [区分 Weibull-NHPP] を選択します。

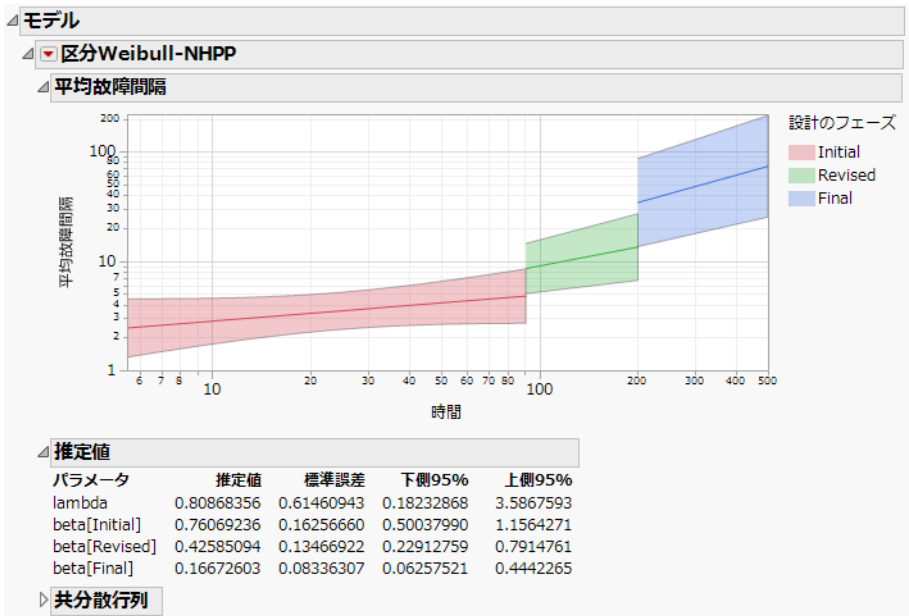
図10.23は、「観測データ」の「累積イベント数」グラフです。青い縦の点線は、フェーズの境界を示しています。「Revised」フェーズの最初のデータは、14行目です。14行目の「開始日」列の値は「91」ですので、「Revised」フェーズの開始時間は、91日目と認識されています。同様に、「Final」フェーズの最初のデータは、23行目です。23行目の「開始日」列の値は「200」ですので、「Final」フェーズの開始時間は、200日目と認識されています。

図10.23 「累積イベント数」グラフ



「区分 Weibull-NHPP」レポートが、「モデル」アウトラインノードの下に表示されます（図10.24）。平均故障間隔は、3つのフェーズを経て、徐々に延びていることがわかります。また、「推定値」レポートを見ると、betaの推定値は徐々に減少しています。

図10.24 「平均故障間隔」グラフ



## 区分 Weibull-NHPP 変化点検出モデル

「Reliability」フォルダの「BrakeReliability.jmp」サンプルデータは、ブレーキシステムの修理件数に関するデータです。「日付」列には、修理を行った日付が含まれています。また、2列目の「修正」列には、修理件数が含まれています。このデータの日付は、正確な故障時点を表しています。なお、この例の「日付」列のデータは、昇順に並んでいなければなりません。

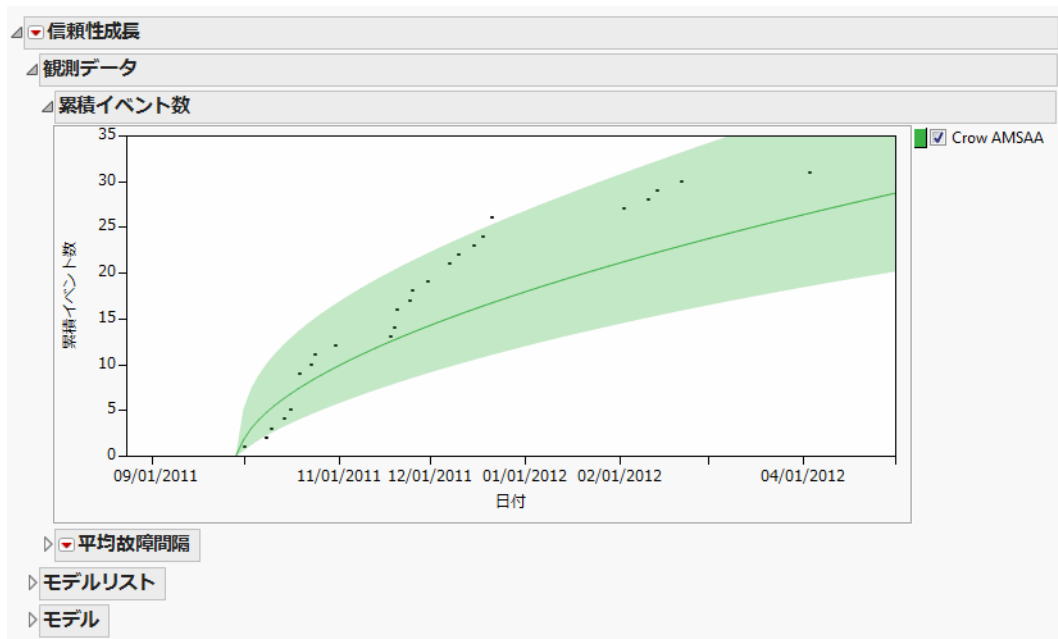
データテーブルの1行目の日付が「09/29/2011」であることから、試験開始日は「2011年9月29日」と認識されます。この行の「修正」列の値が、0となっているのに注目してください。この1行目は、試験開始日を認識させるために必須です。たとえ、1行目の「修正」列にゼロ以外の値が含まれていたとしても、その値を強制的にゼロと置き換えて、1行目の日付を試験開始日として分析が行われます。

データテーブルの最終行が「05/31/2012」となっているため、試験終了日は「2012年5月31日」です。また、最終行の「修正」列の値が0となっているため、試験は定数打ち切りです。なお、もし、最終行の「修正」列がゼロ以外になっていたなら、試験は定数打ち切りとみなされます。

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「BrakeReliability.jmp」を開きます。
2. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [信頼性成長] を選択します。
3. [日付形式] タブを選択します。
4. 「日付」を [タイムスタンプ] に指定します。
5. 「修正」を [イベント度数] に指定します。

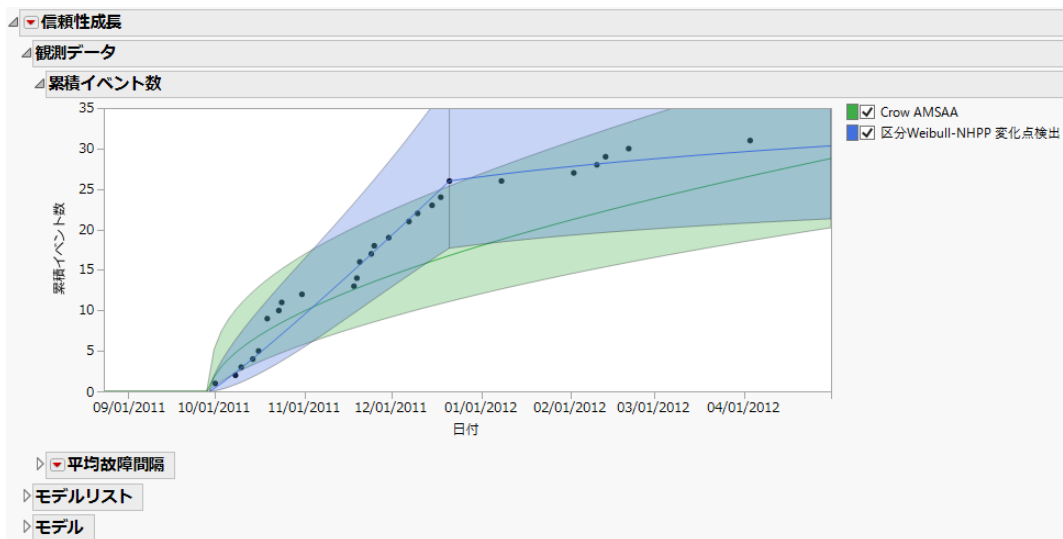
6. [OK] をクリックします。
7. 「信頼性成長」の赤い三角ボタンをクリックし、[モデルのあてはめ] > [Crow AMSAA] を選択します。  
「観測データ」レポートの「累積イベント数」グラフが更新され、モデルが表示されます（図10.25）。モデルはあまりよくあてはまっていないようです。

図10.25 AMSAAモデルをあてはめた場合の「累積イベント数」グラフ



8. 「信頼性成長」の赤い三角ボタンをクリックし、[モデルのあてはめ] > [区分Weibull-NHPP 変更点検出] を選択します。  
「観測データ」レポートの「累積イベント数」グラフに、変化点検出を行った区分モデルの結果が追加されます。図10.26には、2つのモデルの結果が描画されています。データ数が少ないのではっきりとしたことはわかりませんが、区分モデルの方が良さそうです。

図 10.26 2つのモデルを割り当てた場合の「累積イベント数」グラフ



## 「信頼性成長」プラットフォームの統計的詳細

- 「[Crow-AMSAA](#)」レポートの統計的詳細」
- 「[区間Weibull-NHPP 変化点検出](#)」レポートの統計的詳細」

### 「Crow-AMSAA」レポートの統計的詳細

ここでは、「Crow-AMSAA」レポートに表示されるパラメータ推定値とプロファイルの詳細について説明します。

#### Crow-AMSAA モデルのパラメータ推定値

[Crow AMSAA 修正最尤法] オプションを例外として、 $\lambda$ と $\beta$ の推定値は最尤推定値であり、以下のようにして計算されます。Crow-AMSAA モデルの尤度は、Meeker and Escobar (1998) で説明されている非同次Poisson 過程モデルの尤度から導出できます。なお、JMP では、最適化の反復計算を行うにあたって、 $\text{param}_1 = \log(\lambda)$ と $\text{param}_2 = \log(\beta)$ というパラメータ変換を施しています。このような変換を行うのは、無制約の最適化問題にするためです（ここで、「無制約」とは、最適化するパラメータの範囲が、 $-\infty$ から $+\infty$ になっていることを指します）。対数尤度を最適化すると、 $\text{param}_1$ と $\text{param}_2$ の最尤推定値が得られます。

$\lambda$ と $\beta$ の標準誤差はFisherの情報量行列から算出されます。 $\text{param}_1$ と $\text{param}_2$ の信頼区間は、Wald統計量を使用し、最尤推定値の漸近分布に基づいて計算されます。最後に、それらの結果を指数変換して、元のスケールにおける推定値と信頼区間が求められます。

## 「Crow-AMSAA 修正最尤法」のパラメータ推定値

〔Crow-AMSAA 修正最尤法〕 オプションの場合、 $\beta$ の推定値はバイアスに対して修正されます。 $\beta$ のバイアス修正済み推定値の式は、試験が定数打ち切りであるか、定時打ち切りであるかによって異なります。

$\beta$ の通常の最尤推定値を $\hat{\beta}$ で表し、 $n$ を標本サイズ、 $T$ を全体の試験時間とします。

$\beta$ のバイアス修正済み推定値（修正最尤推定値）を $\bar{\beta}$ とします。次式により、修正最尤推定値は計算されます。

$$\bar{\beta} = \left(\frac{n-2}{n}\right)\hat{\beta}, \text{ 定数打ち切り試験の場合}$$

$$\bar{\beta} = \left(\frac{n-1}{n}\right)\hat{\beta}, \text{ 定時打ち切り試験の場合}$$

$\lambda$ の修正済み最尤推定値である $\bar{\lambda}$ は、次式のように、最尤法の計算式に従って計算されますが、その式において修正済みの $\beta$ を代入します。

$$\bar{\lambda} = n/T^{\bar{\beta}}$$

パラメータの共分散行列はFisherの情報量行列を使用して推定されます（「Crow-AMSAAモデルのパラメータ推定値」（272ページ）を参照）。ただし、その式において、 $\lambda$ と $\beta$ のバイアス修正済みの推定値が最尤推定値の代わりに用いられます。プロット内の信頼区間を示す帯や、レポート内の信頼区間はすべて、この手順に基づいています。

## プロファイル

Crow-AMSAAの場合、プロファイルなどで表示されている平均故障間隔・強度・累積イベント数の推定値は、理論式におけるパラメータ $\lambda$ と $\beta$ に、それらの最尤推定値を代入して求めています。ただし、〔Crow-AMSAA 修正最尤法〕オプションの場合は、バイアス修正済みの最尤推定値が使用されます。また、信頼区間は、該当パラメータを対数変換したものに對し、デルタ法を適用して求めています。

累積イベント数関数を例にとって説明します。Crow-AMSAAモデルにおいて、時間 $t$ における累積イベント数の理論式は、 $N(t) = \lambda t^{\beta}$ です。両辺を対数変換すると、 $\log(N(t)) = \log(\lambda) + \beta \log(t)$ です。この式のパラメータ $\lambda$ と $\beta$ に、それぞれの最尤推定値（または修正済みの最尤推定値）を代入すると、 $\log(N(t))$ の推定値が得られます。また、この式にデルタ法を適用することで、 $\log(N(t))$ の分散推定値が求められます。そうして得られた分散推定値から、Wald法によって漸近的な信頼区間が計算できます。最後に、この信頼区間を指数変換すれば、時間 $t$ における累積イベント数の信頼区間が求められます。

## 「区間 Weibull-NHPP 変化点検出」レポートの統計的詳細

変化点の検出は、次のように行われます。

- 故障が発生した時点を、データから昇順にピックアップし、それらの時点を境界値とした、互いに素な区間を構築します。
- 変化点ごとに、2フェーズの区分 Weibull-NHPP モデルをあてはめていきます。1つの変化点によって分割された2つのフェーズが、両方とも、2件以上の故障イベントを含んでいれば、モデルの対数尤度、および、パラメータの最尤推定値が計算できます。
- 変化点で区切られた区間から、対数尤度を最大化します。
- それらの変化点のなかで、その対数尤度が最大になっているものが、大域的な変化点として選ばれます。

このような変化点の推定方法は、Guo et al. (2010) で説明されているグリッドベースのアプローチとは異なります。

# 第11章

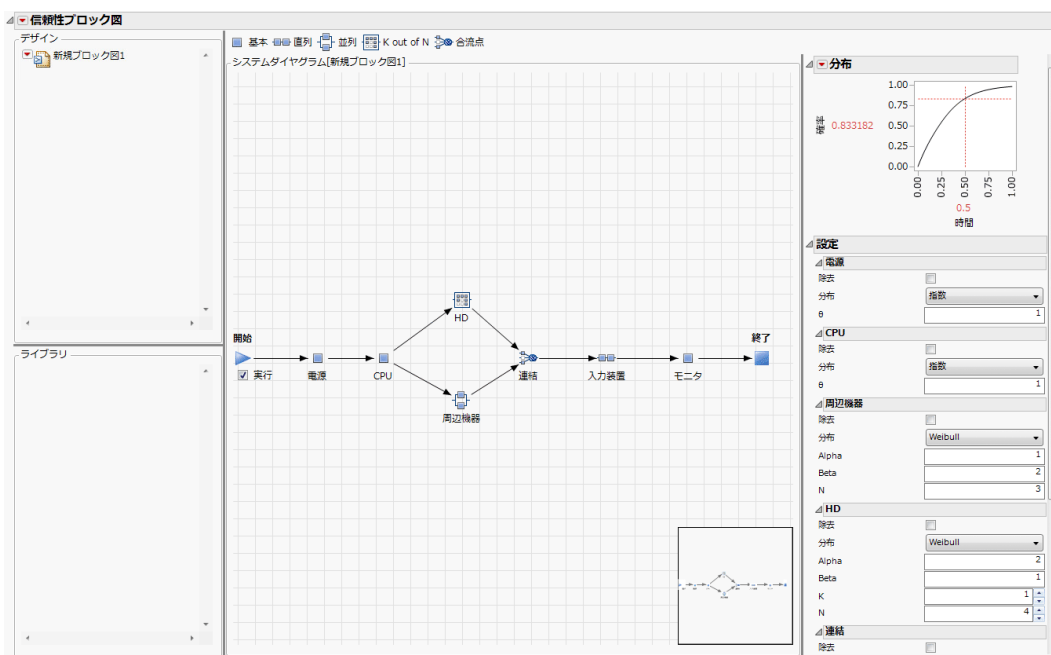
## JMP PRO 信頼性ブロック図

### システム全体の信頼性を計算する

「信頼性ブロック図」プラットフォームは、JMP Proのみで利用できる機能です。

「信頼性ブロック図」は、システムを構成する部品と、その関係性を図にしたものです。そして、各部品の確率分布を指定することにより、システム全体の信頼性が求められます。信頼性ブロック図は、依存関係図（dependence diagram）とも呼ばれており、各部品の信頼性が、システム全体の正常稼働や故障にどのように影響するかを調べるのに使われています。

図11.1 信頼性ブロック図の例



## 目次

「信頼性ブロック図」プラットフォームの概要.....	277
「信頼性ブロック図」プラットフォームの使用例.....	277
部品の追加.....	279
図形の整列.....	281
図形の接続.....	282
部品の設定.....	283
「信頼性ブロック図」ウィンドウ.....	284
プレビューウィンドウ.....	286
「信頼性ブロック図」プラットフォームのオプション.....	286
ワークスペースのオプション.....	289
設定内容.....	290
分布の設定.....	290
ノンパラメトリックな分布の指定.....	291
デザイン項目とライブラリ項目のオプション.....	293
プロファイル.....	294
要素重要度や平均故障時間のグラフ.....	296
要素プロット.....	298
信頼度を求める代数式の表示.....	301
複製と削除.....	301

---

## JMP PRO 「信頼性ブロック図」プラットフォームの概要

「信頼性ブロック図」は、システムの部品を図示し、各部品の信頼性がシステム全体の正常動作にどの程度影響するかを確認するための図です。図における各ブロックが、システムの各部品を表します。また、矢印によって、各部品の接続状態を表します。

信頼性ブロック図は、直列系（部品を直列に接続）と並列系（部品を並列に接続）で構成されます。直列系では、部品のどれか1つでも故障すると、システム全体の機能が損なわれます。一方、並列系（冗長）のシステムでは、部品がすべて故障しない限り、システム全体の機能は損なわれません。また、*K-out-of-N*系のシステム（*N*個中*K*個の部品が機能していれば、システムは正常動作するシステム）も図に表すことができます。

信頼性ブロック図の初期画面では、左側に「開始」ブロック、右側に「終了」ブロックが配置されています。図形ツールを使用して、自分が調べたいシステムを図に表します。「開始」ブロックから各部品を接続していき、最後に「終了」ブロックまで接続します。

---

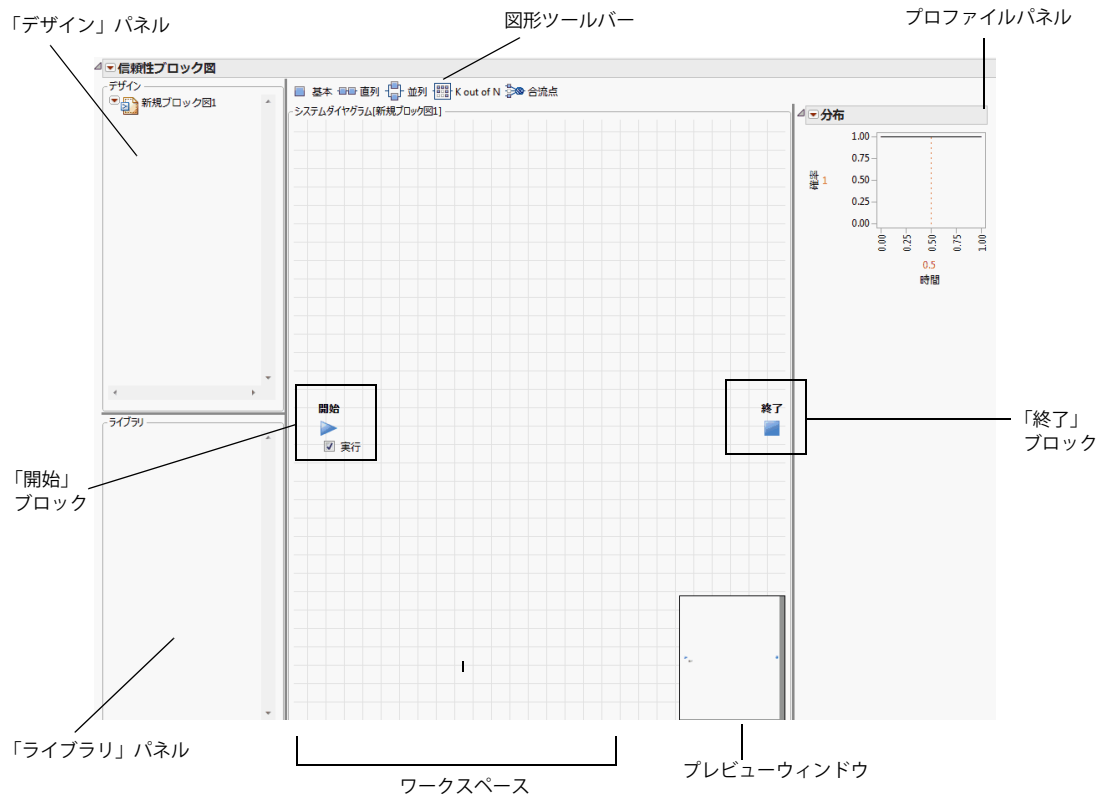
## JMP PRO 「信頼性ブロック図」プラットフォームの使用例

この例では、信頼性ブロック図を描く方法を学びましょう。

1. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [信頼性ブロック図] を選択します。

空の「信頼性ブロック図」ウィンドウが開きます。

図11.2 新しい信頼性ブロック図



メモ: 「分布」プロファイルはデフォルトで表示されます。

2. 「デザイン」パネルで、「新規ブロック図1」を選択し、名前を「コンピュータ」に変更します。

ワークスペースのタイトル部が「システムダイアグラム [コンピュータ]」に変化します。

3. 開始ブロックの下にある **【実行】** チェックボックスをオフにします。

**【実行】** をオンにしていると、たとえば、部品の追加・削除、部品構成の変更、接続線の追加・削除など、「システムダイアグラム」を変更するたびに、図上の信頼性データが更新されます。

**【実行】** をオフにしている場合は、設定を変更しても信頼性データは更新されません。

**ヒント:** 大規模なシステムの図を作成する際は **【実行】** をオフにしておき、図が完成してから **【実行】** をオンにするとよいでしょう。

4. 「[部品の追加](#)」(279ページ)に進みます。

## JMP PRO 部品の追加

信頼性ブロック図のツールバーに用意されている描画要素をここでは「図形」と呼びます。また、各図形に対応したシステムの要素のことを「部品」と呼びます。


1. 図形ツールバーの「基本」アイコン（ 基本）をクリックし、それを「システムダイアグラム」の「開始」ブロックの右側にドラッグします。
2. ラベルを選択して、「新規基本1」を「電源」に変更し、Enter キーを押します。

図11.3 基本図形



ラベルまたは図形をクリックすると、接続矢印が表示されます。テンプレート内の任意の場所をクリックすると矢印は消えます。

3. 「基本」アイコンをクリックし、それを「電源」図形の右側にドラッグします。
4. ラベルを選択して「CPU」と入力します。

図11.4 「システムダイアグラム」の例



---

メモ: 図形の整列は後ほど、「図形の整列」(281ページ)の節で行います。

---



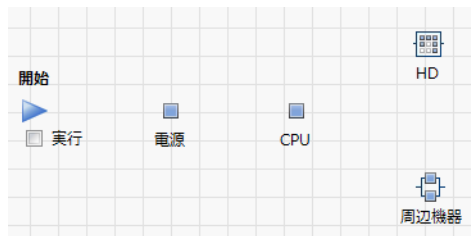
5. 「並列」アイコン（ 並列）をクリックし、「CPU」図形の右下にドラッグします。
6. ラベルを選択して「周辺機器」と入力します。
7. 「K out of N」アイコン（ K out of N）をクリックし、「CPU」図形の右上にドラッグします。
8. ラベルを選択して「HD」と入力します。

図11.5 システムダイアグラムの一部





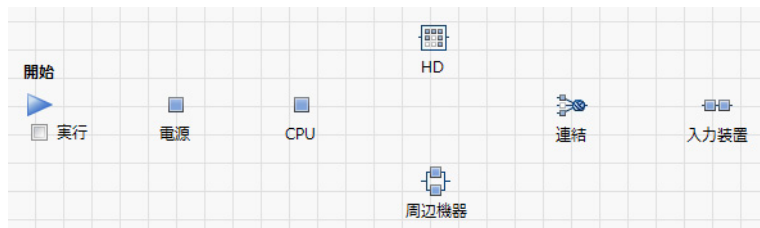
9. [合流点] アイコン (  合流点 ) をクリックし、前述の図形の右側にドラッグします。
10. ラベルを選択して「連結」と入力します。
11. [直列] アイコン (  直列 ) をクリックし、先の合流点図形の右側にドラッグします。
12. ラベルを選択して「入力装置」と入力します。

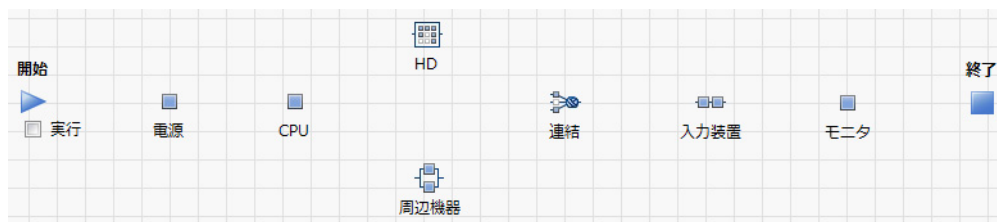
図11.6 システムダイアグラムの一部



13. [基本] アイコンをクリックし、「入力装置」図形の右側にドラッグします。
14. ラベルを選択して「モニタ」と入力します。

図11.7は、すべての図形が入力された状態のダイアグラムです。

図11.7 すべての図形が表示されたシステムダイアグラム



15. 「[図形の整列](#)」(281ページ)に進みます。

## JMP PRO 図形の整列

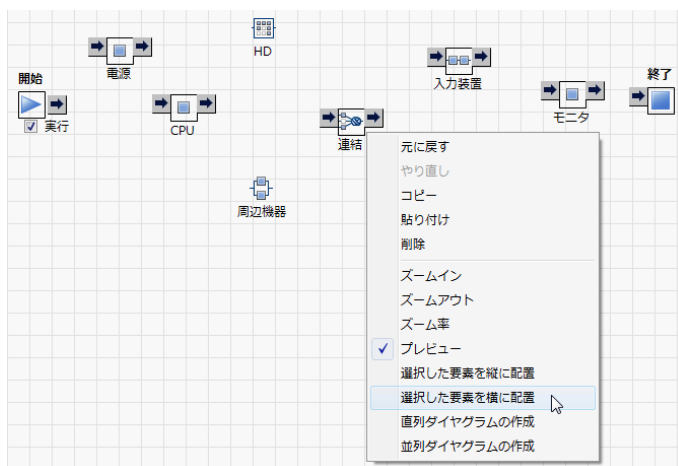
1. 「HD」図形と「周辺機器」図形を縦方向に揃えるために、これらを選択します。

- HD
- 周辺機器

ヒント: 複数の図形を選択するには、カーソルをドラッグしながら図形を囲むか、Shift キーを押しながら各図形をクリックしていきます。

2. これらの図形を選択した状態で、そのうち1つの図形を右クリックし、[選択した要素を縦に配置]を選択します。
3. 残りの図形を横方向に揃えるために、次の部品を選択します。
  - 開始
  - 電源
  - CPU
  - 連結
  - 入力装置
  - モニタ
  - 終了
4. これらの図形を選択した状態で、そのうち1つの図形を右クリックし、[選択した要素を横に配置]を選択します。

図11.8 図形を横に整列



5. 「図形の接続」(282 ページ)に進みます。

## JMP PRO 図形の接続

図形を接続するには、図形を選択して接続矢印を表示します。図形Aと図形Bを接続したいとします。それには、まず、図形Aを選択します。図形Aが図形Bに先行していることを示すには、右矢印を図形Bまでドラッグします。図形Bが図形Aに先行していることを示すには、左矢印を図形Bまでドラッグします。ダイアグラム内の図形を接続するには、このように、右矢印を選択し、後続させたい次の図形に接続します。


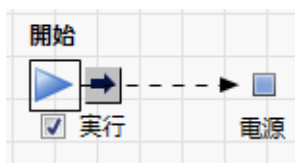
1. 「開始」ブロック（青い矢印）を選択し、接続矢印を表示します。
2. 1つの接続矢印（）を選択し、「電源」部品までドラッグします。

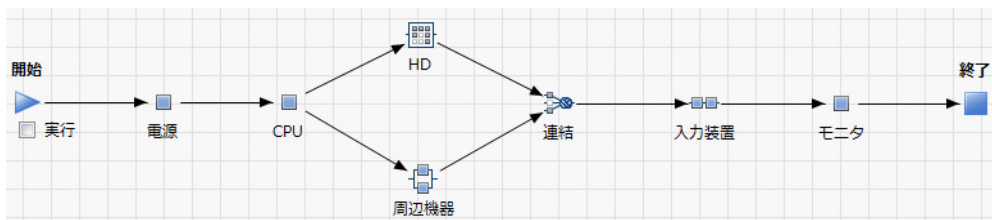
図11.9 図形の接続



3. 次の各部品について、まず最初の部品をクリックし、次にその右矢印を選択して次の部品までドラッグします。
  1. 電源 → CPU
  2. CPU → HD
  3. CPU → 周辺機器
  4. HD → 連結
  5. 周辺機器 → 連結
  6. 連結 → 入力装置
  7. 入力装置 → モニタ
  8. モニタ → 終了ブロック

図11.10は、すべての図形が接続された状態のダイアグラムです。

図11.10 完成したシステムダイアグラム



4. 「部品の設定」（283ページ）に進みます。

## JMP PRO 部品の設定

1. 「設定」パネルで、部品の設定内容を入力します。詳細は、「[設定内容](#)」(290ページ)の節を参照してください。

表11.1 設定内容

部品	設定
電源	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 分布 — 指数</li> <li>• <math>\Theta-1</math></li> </ul>
CPU	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 分布 — 指数</li> <li>• <math>\Theta-1</math></li> </ul>
周辺機器	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 分布 — Weibull</li> <li>• Alpha-1</li> <li>• Beta-2</li> <li>• N-3</li> </ul>
HD	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 分布 — Weibull</li> <li>• Alpha-2</li> <li>• Beta-1</li> <li>• K-1</li> <li>• N-4</li> </ul>
連結	可動最小要素数 -1
入力装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 分布 — Fréchet</li> <li>• 位置 -0</li> <li>• 尺度 -1</li> <li>• N-2</li> </ul>
モニタ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 分布 — 指数</li> <li>• <math>\Theta-1</math></li> </ul>

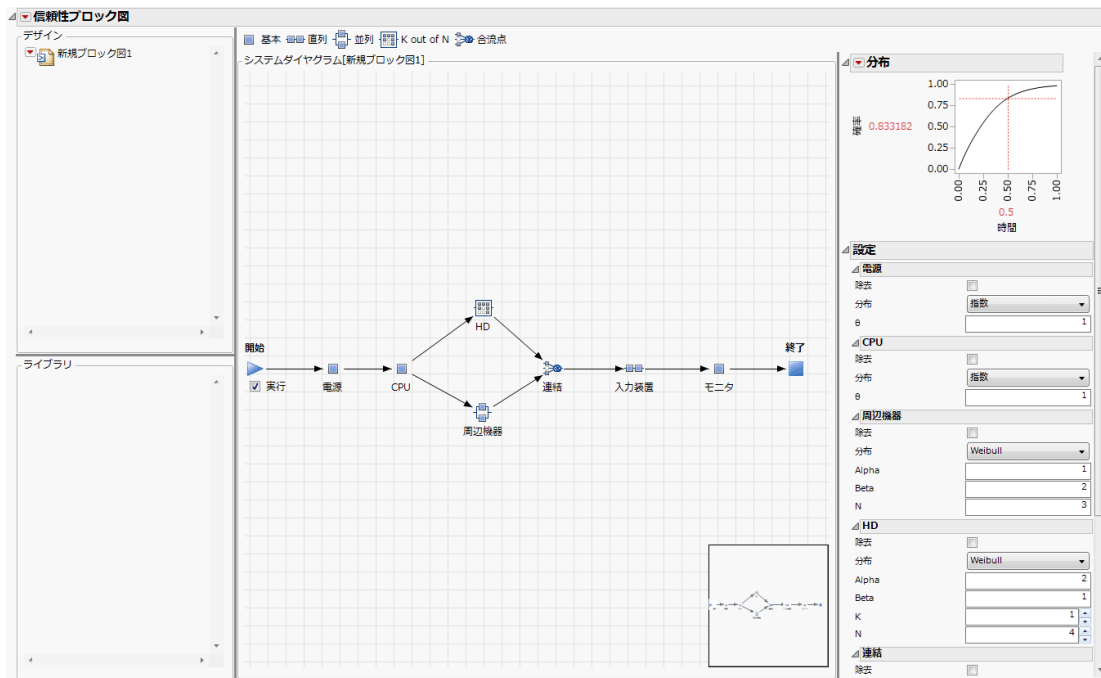
信頼性ブロック図の完成です (図11.11)。

2. **〔実行〕** を選択します。

システムの信頼性情報が更新されます。プロファイルパネルの「分布」プロットに反映されます。

3. 信頼性ブロック図を JMP スクリプト言語 (JSL) ファイルとして保存するには、**〔ファイル〕** > **〔上書き保存〕** を選択し、「exampleRBDcomplete.jsl」などの適当な名前を付けて保存してください。

図11.11 信頼性ブロック図の例



## JMP PRO 「信頼性ブロック図」ウィンドウ

「信頼性ブロック図」ウィンドウは、次のパネルに分割されています。

- デザイン: 「信頼性ブロック図」プラットフォームで作成されたシステムダイアグラム（ブロック図）が一覧表示されます。
- ライブラリ: サブシステムのデザインが一覧表示されます。これは、新しいシステムダイアグラムの作成時に再利用できます。

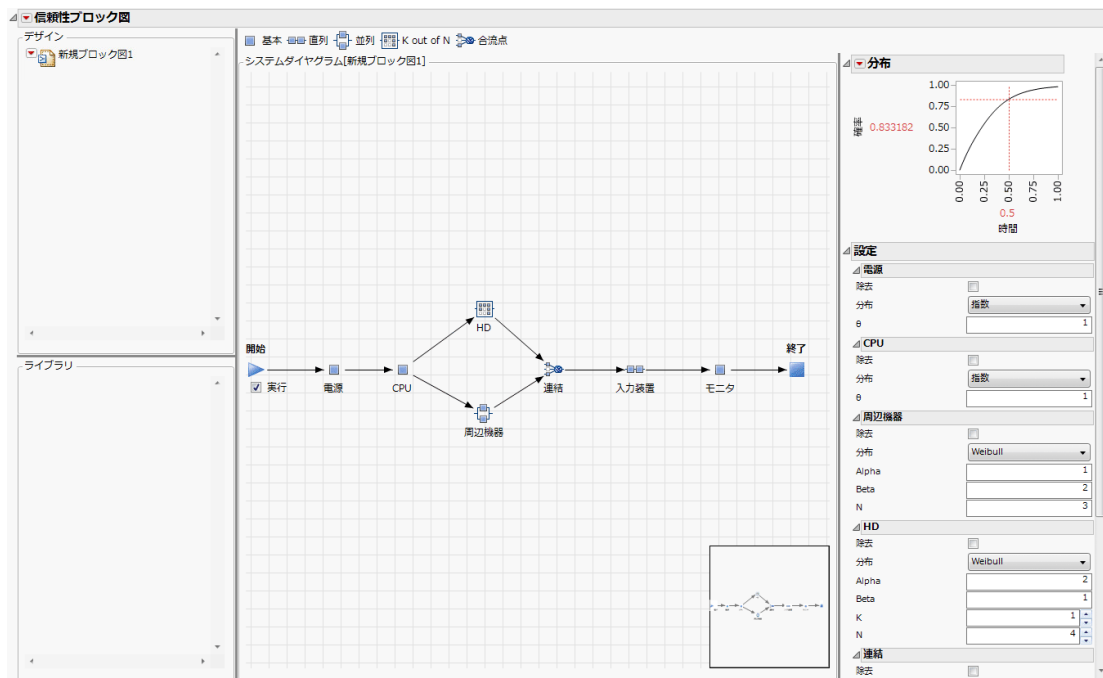
**メモ:** 「デザイン」パネルと「ライブラリ」パネルに表示されるシステムダイアグラムには、それぞれ赤い三角ボタンメニューがあります。このメニューのオプションについては、「[デザイン項目とライブラリ項目のオプション](#)」(293ページ)で説明しています。

- ワークスペース: 図形ツールバー、システムダイアグラム、プレビューウィンドウが表示されます。

**ヒント:** プレビューウィンドウを非表示にするには、ワークスペースを右クリックして「[プレビュー]」の選択を解除します。

- プロファイルパネル: 分布プロファイル、設定内容、さまざまなシステムプロファイルおよび部品プロファイルを表示します。また、「ダイアグラム」の赤い三角ボタンメニューから選択されたプロットを表示します。

図11.12 信頼性ブロック図の例



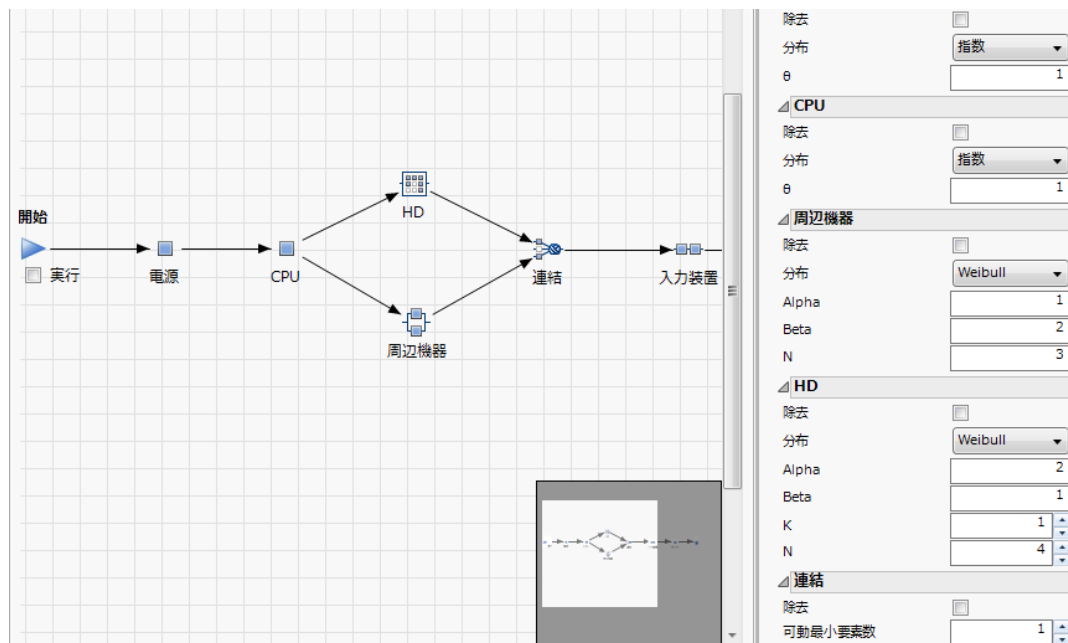
図形ツールバーには、次の描画ツールがあります。

- 基本** 1つのブロック図形をシステムダイアグラムに追加します。
- 直列** 直列ブロック図形（直列で接続した部品のグループ）を追加します。システムが正常に動作するには、すべての部品が機能しなければなりません。
- 並列** 並列ブロック図形（並列で接続した部品のグループ）を追加します。少なくとも1つの部品が機能すれば、システムは正常に動作します。
- K out of N** K-out-of-Nブロック図形を追加します。この図形については、KとNを指定します。N個のうちK個以上の部品が機能すれば、システムは正常に動作します。
- 合流点** 合流点図形をシステムダイアグラムに追加します。「分布」プロパティの設定が異なる並列部品またはK-out-of-N部品を連結できます。

## JMP PRO プレビューウィンドウ

システムダイアグラムが大きすぎてワークスペース内に表示できない場合、プレビューウィンドウを使うと、ワークスペースに表示する部分の位置を調整できます。プレビューウィンドウで白色になっている領域をドラッグすると、システムダイアグラムの該当の領域に移動し、その領域がワークスペースに表示されます。

図11.13 プレビューウィンドウの白い領域がダイアグラムに表示される



## JMP PRO 「信頼性ブロック図」プラットフォームのオプション

「信頼性ブロック図」の赤い三角ボタンのメニューには、「信頼性ブロック図」ウィンドウに作用する次のオプションがあります。

**保存／名前を付けて保存** 信頼性ブロック図を新規保存するか、既存の信頼性ブロック図を新しい名前で保存します。このオプションで保存されたスクリプトは、JMPで開くと自動的に実行され、保存された信頼性ブロック図が描かれます。自動的に実行されるスクリプトについては、『スクリプトガイド』の「始めましょう」章を参照してください。

**メモ:** 赤い三角ボタンメニューの「保存」と「名前を付けて保存」オプションは、[ファイル] > [保存] および [ファイル] > [名前を付けて保存] と同じです。簡単に使えるよう、赤い三角ボタンのメニューに含まれています。

**ブロック図の表示** [デザインの比較を表示] が選択されている場合に、ワークスペース内のシステムダイアグラムの表示／非表示を切り替えます。

**デザインの比較を表示** 選択されているシステムダイアグラムの「分布関数プロットの重ね合わせ」と「余寿命分布関数プロットの重ね合わせ」を表示します。詳細は、「[デザインの比較を表示](#)」(287ページ)の節を参照してください。

**デザイン項目の新規作成** 「デザイン」パネルに新しいシステムダイアグラムを追加します。詳細は、「[新しいデザイン項目の追加](#)」(288ページ)の節を参照してください。

**ライブラリ項目の新規作成** 「ライブラリ」パネルに新しい項目を追加します。「ライブラリ」パネルでは、複数のシステムデザインに流用可能なサブシステムダイアグラムを作成できます。詳細は、「[新しいライブラリ項目の追加](#)」(289ページ)の節を参照してください。

---

**メモ:** ライブラリ項目は、「デザイン」パネルに表示されているダイアグラムでのみ使用できます。他のスクリプトファイルに保存されているダイアグラムには使用できません。

---

## **JMP PRO** デザインの比較を表示

[[デザインの比較を表示](#)] オプションは、「分布関数プロットの重ね合わせ」プロットと「余寿命分布関数プロットの重ね合わせ」プロットを表示します。プロットは、システムダイアグラムの下ワークスペースに表示されます。図11.14および図11.15を参照してください。

- 「分布関数プロットの重ね合わせ」プロットは、「デザイン」パネルにある各デザインについて、それらの故障確率を描いたものです。
- 「余寿命分布関数プロットの重ね合わせ」プロットは、特定の時間まで生存したという条件のもとでの、条件付きの故障確率を描いたものです。プロットの右側のボックスに「生存時間」を入力してください。または、原点にある小さな長方形を右方向にドラッグすることにより、「生存時間」をマウス操作で変更することもできます。

チェックボックスを使用すると、プロットに表示するデザインを選択できます。これにより、複数のデザインのうちのいくつかだけを比較することができます。

---

**ヒント:** 「信頼性ブロック図」の赤い三角ボタンのメニューで [[ブロック図の表示](#)] の選択を解除すると、ワークスペースのシステムダイアグラムが非表示になり、プロファイルの表示範囲が広がります。また、横方向の分割線を上側に移動しても、プロファイルの表示範囲は広がります。

---

図11.14 「分布関数プロットの重ね合わせ」の例

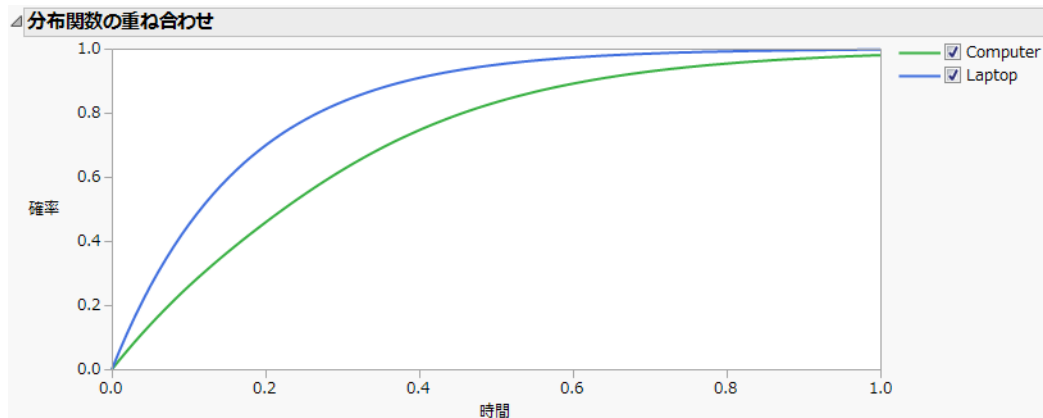
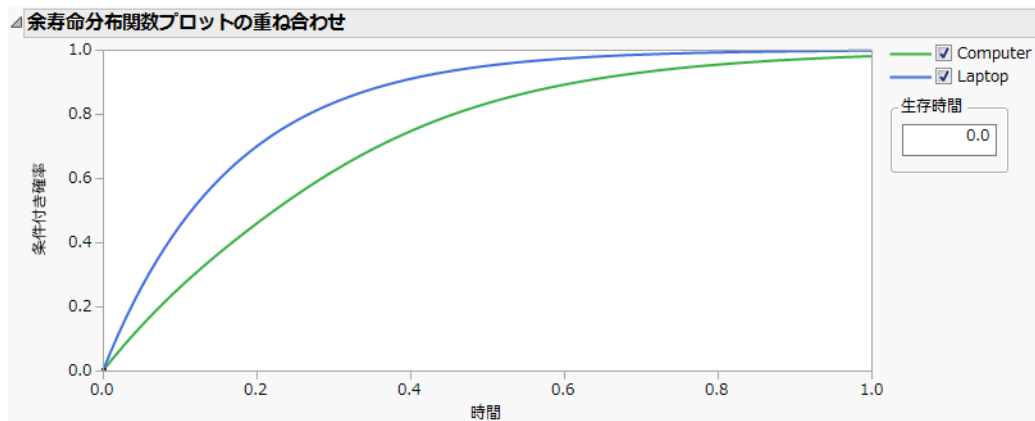


図11.15 「余寿命分布関数プロットの重ね合わせ」の例



## JMP PRO 新しいデザイン項目の追加

【デザイン項目の新規作成】オプションは、新しいデザインを「デザイン」パネルのリストに追加します。

- 「信頼性ブロック図」の赤い三角ボタンのメニューから【デザイン項目の新規作成】を選択します。
- 「新規ブロック図X」(Xはダイアグラム名を示す番号)という名前のデザインが「デザイン」パネルに追加されます。
- 別の名前を付ける場合は、ラベルをクリックして新しい名前を上書き入力します。
- 図形ツールバーを使用して、ブロック図を描画します(「[「信頼性ブロック図」プラットフォームの使用例](#)」(277ページ)を参照)。

---

**ヒント:** 別のデザインから、ブロック図をコピーして貼り付けることもできます。ただし、このとき、「開始」と「終了」の図形はコピーされません。ブロック図を貼り付けた後、「開始」と「終了」の図形を接続してください。

---

- 部品の設定を行います。
- ファイルを保存します。

「デザイン」パネルにあるデザインのアイコンをダブルクリックすると、そのデザインのブロック図が「システムダイアグラム」に表示され、また、そのデザインの「プロファイル」が表示されます。

## **JMP PRO** 新しいライブラリ項目の追加

【ライブラリ項目の新規作成】オプションは、新しいサブシステムを「ライブラリ」パネルのリストに追加します。

---

**ヒント:** 「デザイン」パネルからデザインを「ライブラリ」パネルにドラッグすると、そのデザインが「ライブラリ」に追加されます。

---

- 「信頼性ブロック図」の赤い三角ボタンのメニューから【ライブラリ項目の新規作成】を選択します。
- 「新規ブロック図 X」(X はダイアグラム名を示す番号) というサブシステムが「ライブラリ」パネルに追加されます。
- サブシステムに別の名前を付ける場合は、ラベルをクリックして新しい名前を上書き入力します。
- 図形ツールバーを使用して、サブシステムのダイアグラムを描画します。
- 部品の設定を行います。
- 「開始」ブロックから「終了」ブロックまで接続線をつなげます。
- ファイルを保存します。

## **JMP PRO** ワークスペースのオプション

ワークスペースパネルで右クリックすると、パネルの表示方法を調整するコマンドがいくつか表示されます。その一部を以下に紹介します。

**ズームイン** システムダイアグラムを拡大表示します。

**ズームアウト** システムダイアグラムを縮小表示します。

**ズーム率** 「ズーム尺度の設定」ウィンドウが開き、ズームの倍率を設定できます。0.75 (75%) から 5.0 (500%) の間で指定します。

**プレビュー** ワークスペースパネルでのプレビューウィンドウの表示／非表示を切り替えます。

**選択した要素を縦に配置** 図形を縦に揃えて整列します。

**選択した要素を横に配置** 図形を横に揃えて整列します。

**直列ダイヤグラムの作成** ダイヤグラムのノードを使用して、直列ダイヤグラムを作成できます。直列の順序は、ノード作成の順序によって決まります。このオプションは、ダイヤグラムに矢印がない場合にのみ使用できます。

**並列ダイヤグラムの作成** ダイヤグラムのノードを使用して、並列ダイヤグラムを作成できます。このオプションは、ダイヤグラムに矢印がない場合にのみ使用できます。

**JMP PRO 設定内容**

信頼性ブロック図の各部品には、故障分布をそれぞれ1つ指定できます。使用可能な分布は、[表11.2](#) (290ページ) にリストしているものです。これらの故障分布の密度関数・累積分布関数や、それらのパラメータ表現については、「寿命の一変量」章の「[確率分布](#)」(79ページ) を参照してください。

**JMP PRO 分布の設定**

ダイヤグラムに部品を追加すると、「設定」アウトラインの下にその部品のアウトラインが表示されます。

**メモ:** 「除去」の横のボックスにチェックを入れると、部品を分析から除外できます。

「分布」で任意の分布を選択して、必要なパラメータ値を入力します。

表11.2 分布とパラメータ

プロパティの種類	入力必須項目
指数	$\theta$
Weibull 損失関数	Alpha、Beta
対数正規	位置、尺度
対数ロジスティック	位置、尺度
Fréchet	位置、尺度
一般化ガンマ	$\mu$ 、 $\sigma$ 、 $\lambda$
DS Weibull	Alpha、Beta、故障確率
DS 対数正規	位置、尺度、故障確率
DS ロジスティック	位置、尺度、故障確率
DS Fréchet	位置、尺度、故障確率
ノンパラメトリック	データまたはデータファイル

選択したデザインまたはサブシステム内の部品の設定内容を見るには、次のようにします。

- 特定の部品の設定内容を見るには、部品の図形を選択します。
- 複数の部品の設定内容を見るには、矢印ツールを使用するか、Ctrl キーを押しながらクリックして複数の部品の図形を選択します。
- すべての部品の設定内容を見るには、ワークスペース内の空白の部分をクリックして、図形の選択をすべて解除します。

ダイアグラム内の各部品について、「除去」の横のボックスにチェックを入れると、その部品を計算から除外できます。計算から除外しない場合には、次のような設定を行ってください。

- 「分布」リストから適切な分布を選択します。[ノンパラメトリック] 以外の分布を選択した場合、分布におけるパラメータ値を入力します。[ノンパラメトリック] を選択した場合については、「[ノンパラメトリックな分布の指定](#)」(291 ページ) を参照してください。
- 直列部品および並列部品の場合、「N」(直列図形または並列図形を構成する部品の総数) も入力する必要があります。
- K out of N 部品の場合は、「K」(正常に動作するのに必要な最低限の構成部品数) と「N」(その図形の構成部品の総数) を入力します。
- 合流点部品の場合は、「可動最小要素数」を入力します。[合流点] アイコンは、「分布」プロパティの設定が異なる図形に対し、K-out-of-N ブロック図形を設定できます。「可動最小要素数」( $k$ ) は、合流点に繋がれている経路のうち、システムが正常に動作するために必要な経路の最小個数です。

図11.16 K out of N 図形のWeibull 構成例

除去	<input type="checkbox"/>
分布	Weibull
Alpha	2
Beta	1
K	1
N	4

## JMP PRO ノンパラメトリックな分布の指定

「分布」を [ノンパラメトリック] に設定した場合、指定されたデータのノンパラメトリックな経験的分布が使われます。データを手入力するか、(データが大量の場合は) データファイルを読み込みと、そのデータを使って、分布が近似されます。


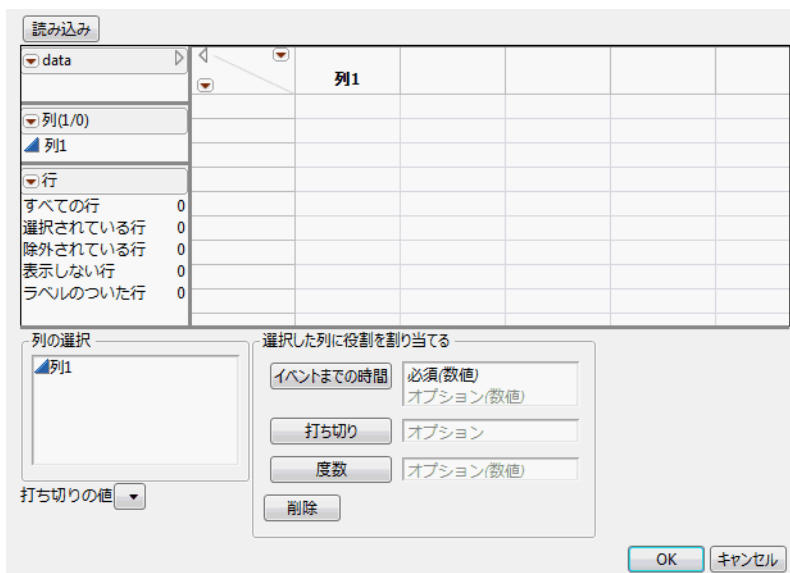
[ノンパラメトリック] を選択した後、「データ」の横の  アイコンをクリックします。「データの指定」ウィンドウが表示されます。ここで、データを入力するか、データファイルを読み込むことができます。読み込んだデータまたは入力したデータは、その部品のノンパラメトリックな分布を計算するのに使用されます。

図11.17 「データの指定」ウィンドウ



ファイルからデータを読み込むには、次の手順を行います。

1. 読み込むデータのある JMP データテーブルを開きます。
2. 次に、「データの指定」ウィンドウで、**[読み込み]** をクリックします。  
「データテーブルの選択」ウィンドウが表示されます。
3. データテーブルのリストから、データテーブルを選択します。
4. **[OK]** をクリックします。
5. データグリッドの下のパネルで、**[イベントまでの時間]** に列を指定し、必要に応じて、**[打ち切り]** と **[度数]** にも列を指定します。
6. 「データの指定」ウィンドウで、**[OK]** をクリックします。

データを手動で入力するには、次の手順を行います。

1. **[イベントまでの時間]**、**[打ち切り]**、**[度数]** の列を必要に合わせて作成します。
2. 作成した列にデータを入力します。
3. データグリッドの下のパネルで、**[イベントまでの時間]** に列を指定し、必要に応じて、**[打ち切り]** と **[度数]** にも列を指定します。
4. 「データの指定」ウィンドウで、**[OK]** をクリックします。

## JMP PRO デザイン項目とライブラリ項目のオプション

デザイン項目とライブラリ項目のオプションには、以下のようなものがあります。

- 「[設定の表示] オプションは、「設定」アウトラインの表示／非表示を切り替えます。「[設定内容](#)」(290 ページ) を参照してください。
- さまざまなプロファイルを表示するオプション。「[プロファイル](#)」(294 ページ) および以下のページを参照してください。
  - 「[分布プロファイル](#)」(294 ページ)
  - 「[余寿命分布プロファイル](#)」(294 ページ)
  - 「[信頼性プロファイル](#)」(295 ページ)
  - 「[分位点プロファイル](#)」(295 ページ)
  - 「[密度プロファイル](#)」(295 ページ)
  - 「[ハザードプロファイル](#)」(295 ページ)
  - 「[累積ハザードプロファイル](#)」(295 ページ)
- 部品の重要度や故障までの平均時間を描くオプション。「[要素重要度や平均故障時間のグラフ](#)」(296 ページ) および以下のページを参照してください。
  - 「[Birnbaum 要素重要度](#)」(296 ページ)
  - 「[余寿命 Birnbaum 要素重要度](#)」(297 ページ)
  - 「[総合要素重要度](#)」(297 ページ)
  - 「[平均故障時間](#)」(298 ページ)
- ダイアログラムにある複数の部品について、重ね合わせプロットを描くオプション。「[要素プロット](#)」(298 ページ) および以下のページを参照してください。
  - 「[要素の分布関数](#)」(298 ページ)
  - 「[要素の信頼性関数](#)」(299 ページ)
  - 「[要素の密度関数](#)」(299 ページ)
  - 「[要素のハザード関数](#)」(300 ページ)
  - 「[要素の累積ハザード関数](#)」(300 ページ)
- 「[信頼度を求める代数式の表示](#)」(301 ページ)
- 「[複製と削除](#)」(301 ページ)

## JMP PRO プロファイル

システムの信頼性を解釈するのに役立つさまざまなプロファイルが用意されています。「デザイン」パネルと「ライブラリ」パネルに一覧表示されているダイアグラムごとに、プロファイルを表示できます。ここでは、それらのプロファイルについて説明します。なお、プロファイルは、「プロファイル」パネルに表示されます。

### 「プロファイル」の赤い三角ボタンのメニューオプション

各プロファイルにある赤い三角ボタンをクリックすると、次のようなコマンドを含むメニューが開きます。

**因子グリッドのリセット** 因子グリッドを変更するためのダイアログを表示します。因子グリッドの設定の詳細については、『プロファイル機能』の「プロファイル」章を参照してください。

**因子設定** プロファイルの設定やリンクを行うには、このオプションを選択します。因子設定の詳細については、『プロファイル機能』の「プロファイル」章を参照してください。

---

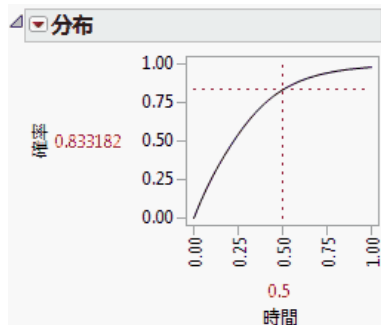
**メモ:** プロファイルにおいて目的の部分が見えにくい場合は、X軸とY軸を調整してください。

---

## JMP PRO 分布プロファイル

分布プロファイルは、システムにおける故障確率を時間の関数として描いたものです。分布プロファイルはデフォルトで表示されます。

図11.18 分布プロファイル

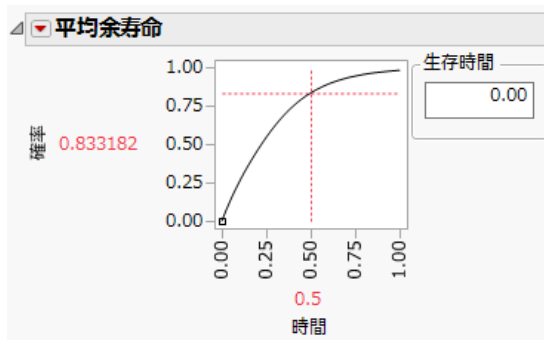


## JMP PRO 余寿命分布プロファイル

余寿命分布プロファイルは、「生存時間」に指定した時間が経過した後まで生存していた（稼働していた）という条件のもとで、その後にシステムが故障する確率を描いたものです。デフォルトでは、「生存時間」は0に設定されており、余寿命分布関数は分布関数と同じです。

「生存時間」に値を入力して、システムが故障せずに経過した時間を指定します。数値を入力する代わりに、原点にある小さな長方形を右方向にドラッグすることにより、「生存時間」をマウス操作で変更することもできます。

図11.19 余寿命分布



### JMP PRO 信頼性プロファイル

信頼性プロファイルは、特定の時間までシステムが機能している確率を描いたものです。この信頼性関数は「生存関数」とも呼ばれます。

### JMP PRO 分位点プロファイル

分位点プロファイルは、故障時間を故障確率の関数として描いたものです。分位点関数は分布関数の逆関数です。

### JMP PRO 密度プロファイル

密度プロファイルは、システムの故障に関する確率密度関数を描いたものです。

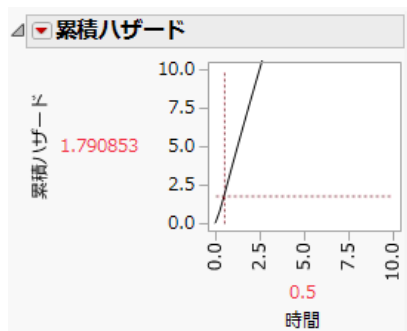
### JMP PRO ハザードプロファイル

ハザードプロファイルは、ある特定の時点における瞬間故障率（ハザード）を描いたものです。

### JMP PRO 累積ハザードプロファイル

累積ハザードプロファイルは、累積ハザードを時間の関数として描いたものです。

図11.20 累積ハザード



## JMP PRO 要素重要度や平均故障時間のグラフ

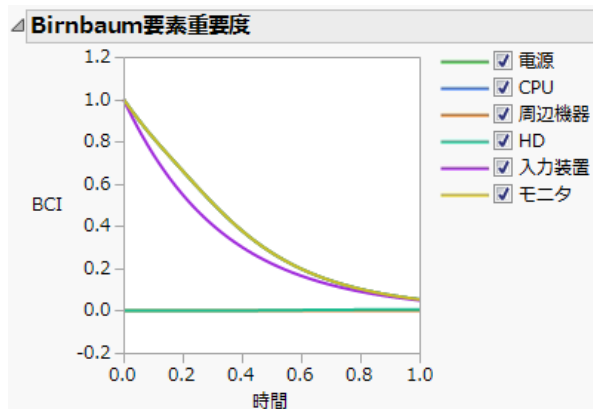
「デザイン」パネルや「ライブラリ」パネルに一覧表示されている各システムダイアグラムにおいて、要素重要度や平均故障時間のグラフを表示できます。以下に、要素重要度と平均故障時間のグラフについて説明します。これらのグラフや統計量は、ウィンドウ右側のパネルに表示されます。

**メモ:** 各要素重要度プロットの凡例にあるボックスにチェックを入れることで、プロットに表示する部品を選択できます。

## JMP PRO Birnbaum要素重要度

【Birnbaum要素重要度の表示】を選択すると、システムダイアグラムでの各要素に対して、Birnbaum要素重要度（BCI; Birnbaum's Component Importance）を重ね合わせたプロットが表示されます。ある時間におけるある部品のBCIは、その部品が故障してシステム全体が動作しなくなる確率です。BCIが大きい部品は、システムの信頼性に大きな影響を与えます。

図11.21 Birnbaum要素重要度のグラフ

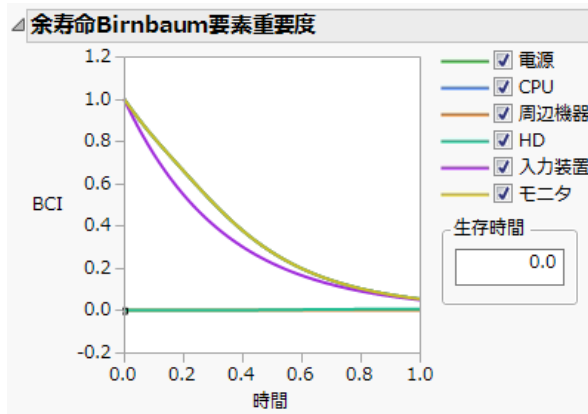


## JMP PRO 余寿命 Birnbaum 要素重要度

「余寿命 Birnbaum 要素重要度の表示」を選択すると、余寿命の Birnbaum 要素重要度の重ね合わせプロットが表示されます。余寿命 BCI は、「生存時間」で指定された一定の時間が経過した後、該当の部品が故障してシステムが故障する確率です。デフォルトでは、「生存時間」は 0 に設定されており、余寿命 BIC は単なる BCI と同じです。

「生存時間」に値を入力して、システムが故障せずに経過した時間を指定してください。数値を入力する代わりに、原点にある小さな長方形を右方向にドラッグすることにより、「生存時間」をマウス操作で変更することもできます。

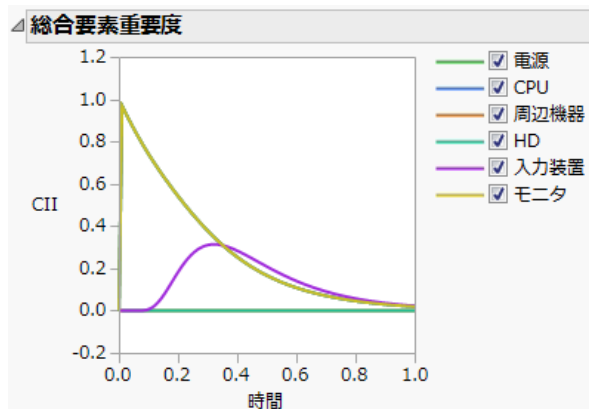
図11.22 余寿命 Birnbaum 要素重要度



## JMP PRO 総合要素重要度

「総合要素重要度の表示」を選択すると、信頼性ブロック図における要素に対して、総合要素重要度 (integrated importance measures) の重ね合わせプロットが表示されます。要素ごとの総合要素重要度は、要素ごとの瞬間故障率 (ハザード) と信頼性も考慮しています。詳細については、Si et al. (2012) を参照してください。

図11.23 総合要素重要度



### JMP PRO 平均故障時間

[平均故障時間の表示] を選択すると、システムの平均故障時間 (MTTF; Mean Time To Failure) が表示されます。

メモ: 平均故障時間は、システムの各部品に指定された「分布」と、「設定」の内容に基づいて計算されます。

### JMP PRO 要素プロット

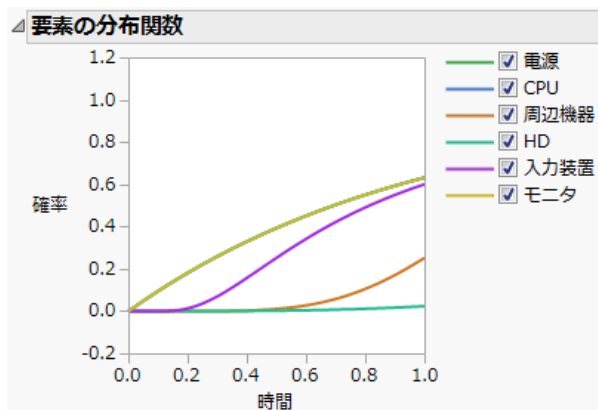
多くの場合、システムは数多くの部品で構成されています。それらの各部品の信頼性に関するさまざまな関数を、重ね合わせプロットに描くことができます。「デザイン」や「ライブラリ」のパネルに保存されているシステムダイアグラムごとに、いろいろな重ね合わせプロットを描けます。以下で、それらの重ね合わせプロットについて説明します。重ね合わせプロットは、ウィンドウ右側のパネルに描かれます。

メモ: 各要素プロットの凡例にあるボックスにチェックを入れることで、プロットに表示する部品を選択できます。

### JMP PRO 要素の分布関数

[要素の分布関数の表示] を選択すると、信頼性ブロック図にある各要素の累積分布関数を重ね合わせたプロットが表示されます。

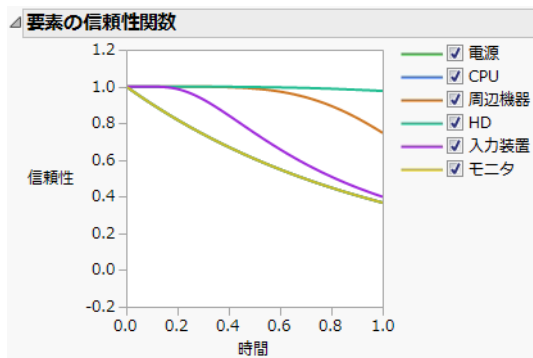
図11.24 要素の分布関数



### JMP PRO 要素の信頼性関数

[要素の信頼性関数の表示] を選択すると、信頼性ブロック図にある各要素の信頼性関数を重ね合わせたプロットが表示されます。

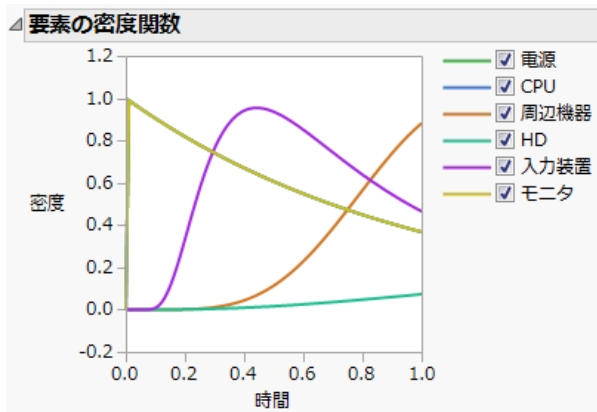
図11.25 要素の信頼性関数



### JMP PRO 要素の密度関数

[要素の密度関数の表示] を選択すると、信頼性ブロック図にある各要素の密度関数を重ね合わせたプロットが表示されます。

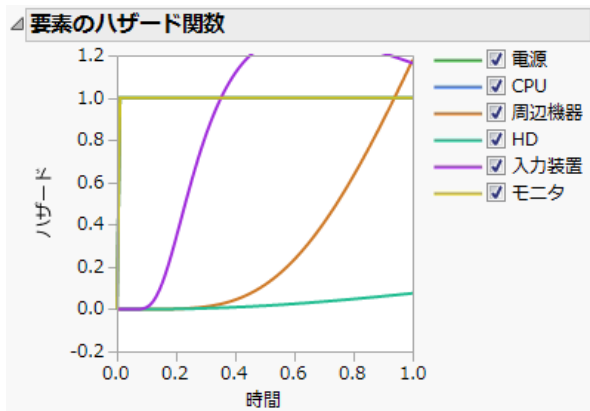
図11.26 要素の密度関数



### JMP PRO 要素のハザード関数

「要素のハザード関数の表示」を選択すると、信頼性ブロック図にある各要素のハザード関数を重ね合わせたプロットが表示されます。

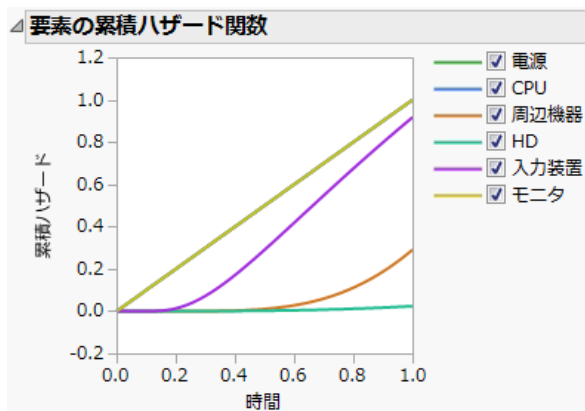
図11.27 要素のハザード関数



### JMP PRO 要素の累積ハザード関数

「要素の累積ハザード関数の表示」を選択すると、信頼性ブロック図にある各要素の累積ハザード関数を重ね合わせたプロットが表示されます。

図11.28 要素の累積ハザード関数



## JMP PRO 信頼度を求める代数式の表示

【信頼度の代数式をログウィンドウに表示】 コマンドは、選択されているシステムダイアグラムの信頼度を求める代数式をログウィンドウに出力します。

1. ログウィンドウを表示するには、Windows版では【表示】>【ログ】を選択します。  
Macintosh版では【ウィンドウ】>【ログ】を選択します。
2. 作成したシステムダイアログを開きます。
3. 「デザイン」パネルにおいてシステムを選択します。(先ほどの例であれば【コンピュータ】を選択します)。
4. システム(先ほどの例であれば【コンピュータ】)の赤い三角ボタンのメニューから【信頼度の代数式をログウィンドウに表示】を選択します。

「ログ」ウィンドウに、選択したブロック図の信頼度の代数式が表示されます。

図11.29 「ログ」ウィンドウに表示された信頼度の代数式

信頼性ブロック図[] 信頼度の代数式:

```
R["Power Supply"] * R["CPU"] * R["Peripherals"] * R["Input Devices"] * R["Monitor"]
+ R["Power Supply"] * R["CPU"] * F["Peripherals"] * R["Hard Drives"] * R["Input Devices"] * R["Monitor"]
```

メモ: 信頼度の代数式では、「R」は部品の信頼度を表し、「F」は部品の故障確率を表します。

## JMP PRO 複製と削除

「デザイン」や「ライブラリ」のパネルに一覧表示されているシステムダイアグラムには、デザイン項目とライブラリ項目を管理するのに役立つオプションがあります。ここでは、【複製】と【削除】について説明します。

**JMP<sup>®</sup> PRO** デザイン項目またはライブラリ項目の複製

【複製】オプションは、選択されたシステムデザインまたはライブラリサブシステムを複製し、まったく同じシステムデザインまたはライブラリサブシステムを新しく作成します。

- 複製するデザイン項目またはライブラリ項目の赤い三角ボタンメニューから、【複製】オプションを選択します。  
新しいデザイン項目またはライブラリ項目が、「デザイン」リストまたは「ライブラリ」リストに追加されます。
- ファイルを保存します。

**JMP<sup>®</sup> PRO** デザイン項目またはライブラリ項目の削除

【削除】オプションは、選択したシステムデザインまたはライブラリサブシステムを該当するパネルから削除します。

- 削除するデザイン項目またはライブラリ項目の赤い三角ボタンメニューから、【削除】オプションを選択します。  
デザイン項目またはライブラリ項目が、「デザイン」リストまたは「ライブラリ」リストから削除されます。
- ファイルを保存します。

# 第12章

## JMP PRO 修理可能システムのシミュレーション 複雑なシステムの停止時間を推定する

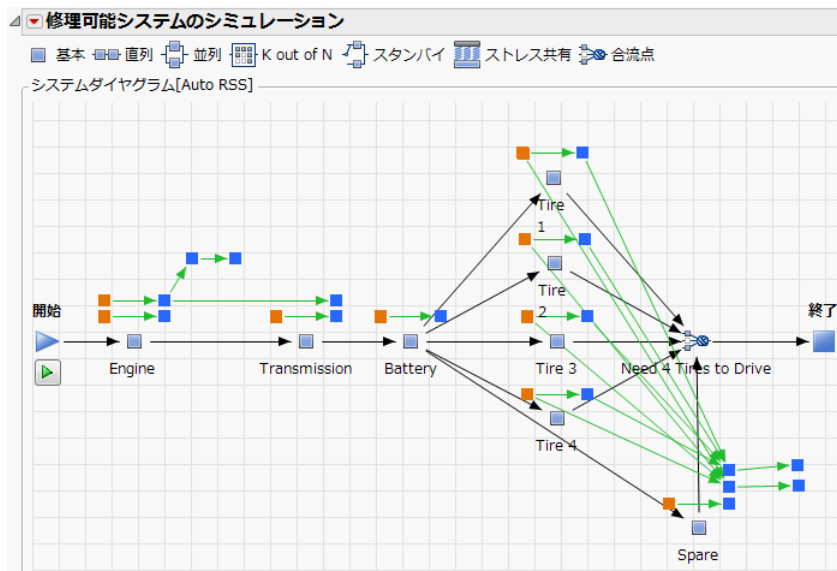
「修理可能システムのシミュレーション」プラットフォームは、JMP Proのみで利用できる機能です。

「修理可能システムのシミュレーション」プラットフォームは、修理可能なシステム（repairable system）の信頼性をシミュレーションで求めます。「修理可能なシステム」とは、経年劣化するためメンテナンスが必要な部品で構成されたシステムのことです。修理可能なシステムは、部品が故障したり、修理されたりして、その状態が変化すると考えられます。

修理可能なシステムは、現代生活のさまざまな側面で使用されています。冷蔵庫・住宅・発電所・通信ネットワークなど、規模もさまざまです。

「修理可能システムのシミュレーション」プラットフォームでは、修理可能なシステムを最適化するために、さまざまなシステム構成をシミュレーションできます。たとえば、安全なシステム運用を行いながら、高価な部品の使用寿命を延ばしたり、製品の生産を最適化したりできます。

図12.1 修理可能なシステムのシミュレーションダイアグラム



## 目次

「修理可能なシステムのシミュレーション」プラットフォームの概要	305
「修理可能なシステムのシミュレーション」プラットフォームの例	305
「修理可能システムのシミュレーション」ウィンドウ	307
システムダイアグラム	308
図形ツールバー	309
「設定」パネル	310
「イベントの追加」パネル	312
「アクションの追加」パネル	313
「修理可能なシステムのシミュレーション」のオプション	316
ブロック項目のオプション	316
分布のオプション	317
[ノンパラメトリック] または [推定] 分布の指定	317
イベントの設定	319
アクションの設定	319
修理可能システムのシミュレーション結果	320
結果のテーブル	320
結果のエクスプローラ	321
「修理可能システムのシミュレーションの結果」のオプション	323
結果レポートにおける点推定プロファイル	324

## JMP PRO 「修理可能なシステムのシミュレーション」プラットフォームの概要

「修理可能システムのシミュレーション」プラットフォームは、修理可能なシステムをシミュレーションし、その**停止時間**（outage time）を分析するためのプラットフォームです。「停止時間」とは、計画されたメンテナンスや予想外の故障によって、システムが稼動していない時間（システムが「オフ」になっている時間）の合計です。

修理可能なシステムの状態は、ダイアグラムで描かれます。ダイアグラムにおけるブロック図形は1つまたは複数の部品（component; 要素）を示し、それらの部品は矢印で繋がれています。部品が稼動できる状態（故障していない状態）にあることは、「**使用できる状態**」（functional）と言います。部品は、直列または並列に接続できます。部品が直列に接続されている場合、いずれかの部品が故障するとシステム全体は使用できない状態になります。部品が並列に接続されている場合、すべての部品が故障したときに限り、システム全体は使用できない状態になります。

「開始」と「終了」を繋ぐ経路のうち、少なくとも1つの経路が繋がっている状態を、「**経路が遮断されていない**」（uninterrupted）と言います。経路が遮断されていない場合、システム全体は使用できる状態にあります。経路が遮断された場合、システム全体は使用できない状態になります（「ダウン」の状態になります）。いずれかのブロックが故障しても、経路が遮断されなければ、システムは使用できる状態になっています。

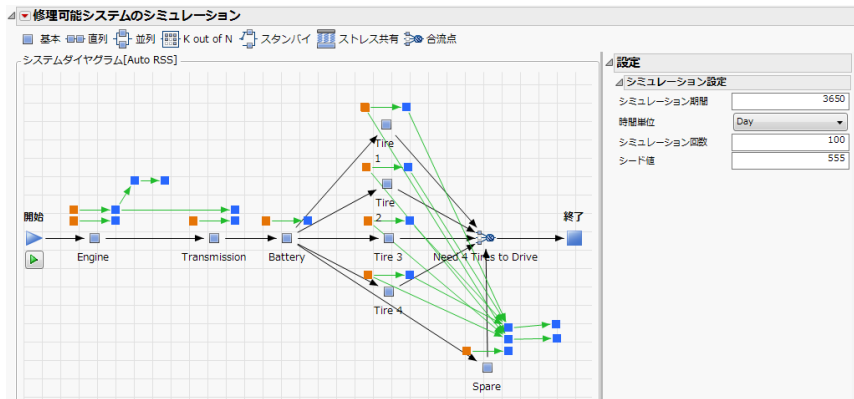
各部品の特性を設定するために、イベントやアクションを各部品に追加できます。「**イベント**」とは、「部品が故障した」・「予定されていたメンテナンス作業が行われた」・「システムの運用が開始された」など、システムにおいて発生する事象です。一方、「**アクション**」とは、特定のイベントが生じた後にどのように対応するかを表すものです。1つまたは複数のアクションを各イベントに定義することにより、あるイベントが起こった後に、個々の部品やシステム全体をどうするかを決めます。

## JMP PRO 「修理可能なシステムのシミュレーション」プラットフォームの例

この例では、自動車が動かない状態になる時間を、100回のシミュレーションで算出します。

1. [ヘルプ] > [サンプルデータ] を選択し、[サンプルスクリプトディレクトリを開く] をクリックし、「Car Repair Simulation.jsl」を開きます。

図12.2 車の修理システムのダイアグラム



自動車部品の故障と修理をダイアグラムで描いた「修理可能なシステムのシミュレーション」ウィンドウが開きます。ダイアグラムの左端にある最初のブロックは「開始」ブロックです。「修理可能なシステムのシミュレーション」ウィンドウの左側にある「設定」パネルを見るとわかりますが、シミュレーションは3650日間実行されるように設定されています。

2. (オプション)「シード値」に「555」と入力します。

シミュレーションにおける故障は乱数によって発生しますので、実行ごとに結果は変わります。この乱数シード値 (555) を指定することで、下図と同じ結果を得ることができます。

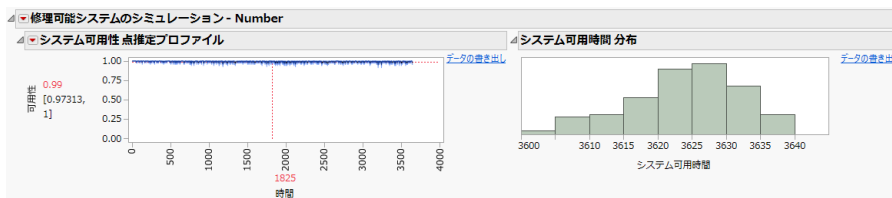
3. 「開始」ブロックの下にある緑の三角をクリックして自動車故障のシミュレーションを実行します。

シミュレーションの結果を示すデータテーブルが表示されます。

4. 「Launch Repairable Systems Simulation Results Explorer」スクリプトの横にある緑の矢印をクリックします。

「修理可能システムのシミュレーション結果」レポートを含むウィンドウが表示されます。これらの結果の解釈方法の詳細については、「[修理可能システムのシミュレーション結果](#)」(320ページ)を参照してください。

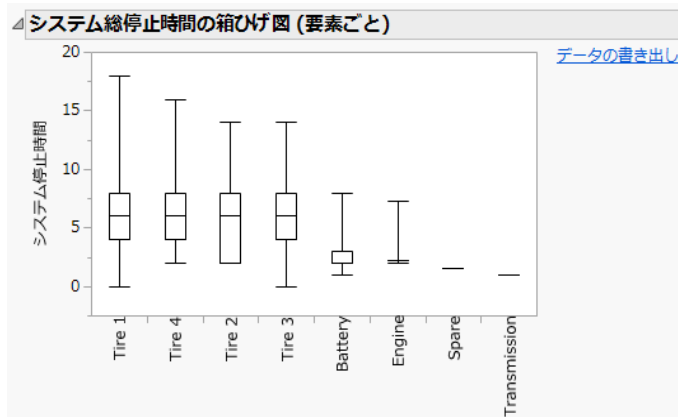
図12.3 「修理可能なシステムのシミュレーション」レポートの一部



対象の車は、今後10年間にわたり3,600～3,640日間使用可能であると予測されます。「システム可用性の点推定」グラフに示された値は1に近いので、この車は今後10年間にわたって運転できる可能性が高いと結論付けられます。では、どの部品がシステム停止の主な原因なのでしょう。

5. 「修理可能システムのシミュレーション結果 - Number」の隣の赤い三角ボタンをクリックし、[システム総停止時間の箱ひげ図(要素ごと)] を選択します。

図12.4 「システム総停止時間の箱ひげ図(要素ごと)」レポートの一部



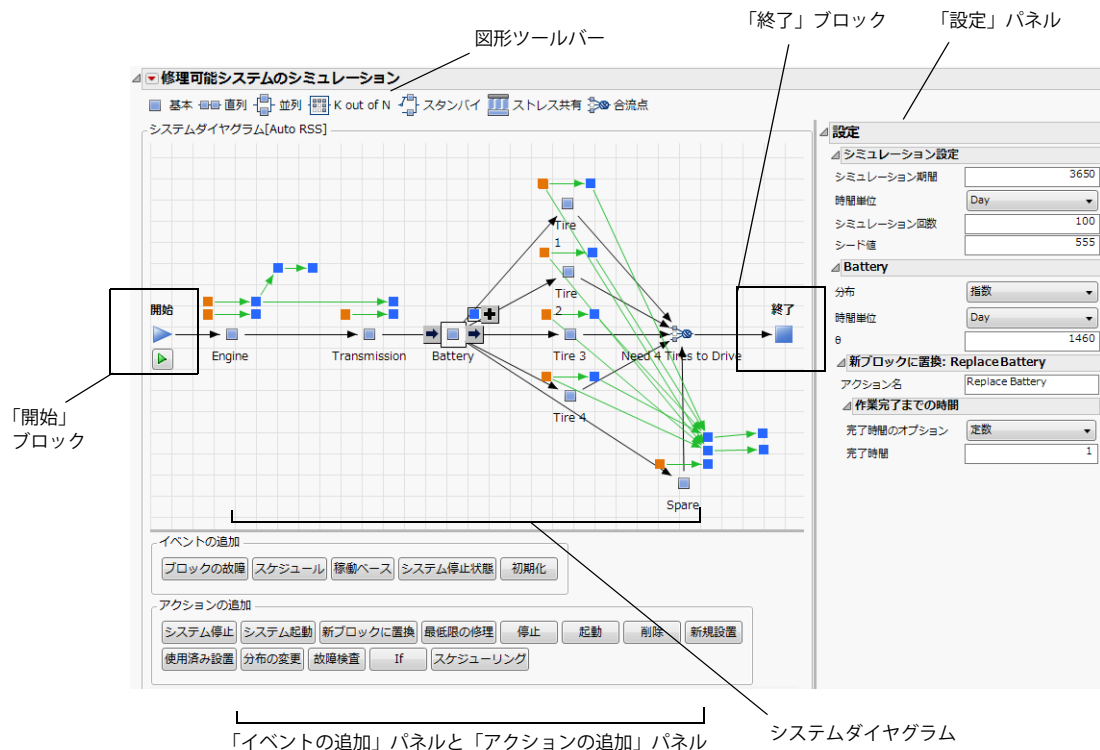
この結果より、「自動車が使えない状態になる主な原因は、タイヤである」と言えます。自動車の稼働率を向上させるには、「耐久性の高いタイヤを使用する」、あるいは「スペアタイヤを積む」などの対策が考えられます。

## JMP PRO 「修理可能システムのシミュレーション」ウィンドウ

「修理可能システムのシミュレーション」プラットフォームを起動するには、[分析] > [信頼性/生存時間分析] > [修理可能システムのシミュレーション] を選択します。「修理可能システムのシミュレーション」ウィンドウは、次のパネルに分割されています。

- 「システムダイヤグラム」(308 ページ)
- 「図形ツールバー」(309 ページ)
- 「設定」パネル(310 ページ)
- 「イベントの追加」パネル(312 ページ)
- 「アクションの追加」パネル(313 ページ)

図12.5 「修理可能システムのシミュレーション」ウィンドウ



## JMP PRO システムダイアグラム

システムダイアグラムでは、修理可能システムのダイアグラムを作成できます。新規のシステムダイアグラムには、「開始」ブロックと「終了」ブロックが表示されます。

システムダイアグラムを右クリックすると、ポップアップメニューに次のオプションが表示されます。

**シミュレーション実行** 「設定」パネルにある現在の「シミュレーション設定」を実行します。「シード値」にゼロ以外の値を指定してシミュレーションを繰り返した場合、同じ結果を得ることができます。

**マルチスレッドでシミュレーション実行** マルチスレッドでシミュレーションを実行します。マルチスレッドでシミュレーションを実行した場合、シミュレーションの結果は再現できません。

**ダイアグラムの操作** ダイアグラムの外観を変更するためのオプションが含まれています。

**削除** (ブロック・イベント・アクションのいずれかが選択されたときのみ) ダイアグラムから選択された項目を削除します。

**ブロック名の表示** ダイアグラム内のブロックの下にある名前の表示／非表示を切り替えます。

**ズームイン** 1.111倍でズームインします。

**ズームアウト** 0.9倍でズームアウトします。

**ズーム率** 0～10,000の尺度でズーム率を設定できます。元のズーム率は1です。元のシステムダイアログを基準にして、どれだけのズーム率にするかを指定してください。

**プレビュー** システムダイアグラムの右下隅にある「プレビュー」ウィンドウの表示／非表示を切り替えます。

**ブロック間の矢印を表示** ブロック間にあるアクションリンクを表す緑色の矢印の表示／非表示を切り替えます。このオプションをオフにしても、選択したイベントとアクション間のアクションリンクは引き続き表示されます。

**選択した要素を縦に配置** (複数のブロックが選択されている場合にのみ利用可能) 選択したブロックが横方向で同じ位置になるように整列します。


**選択した要素を横に配置** (複数のブロックが選択されている場合にのみ利用可能) 選択したブロックが縦方向で同じ位置になるように整列します。


システムダイアグラムの項目を右クリックすると、追加のサブメニューのオプションがポップアップメニューに表示されます。項目の種類によって、表示されるサブメニューのオプションは異なります。これらのオプションを使用すると、ブロック項目に関連付けられたイベントやアクションを追加・削除・変更できます。


## JMP PRO 図形ツールバー


図形ツールバーには、部品 (component; 要素) を表すブロック図形が用意されています。これらのブロック図形をダイアグラムに追加するには、ブロック図形のアイコンをクリックした後、ダイアグラム上にドラッグします。ブロック図形として、以下のものが用意されています。


 **基本** 基本ブロック図形を追加します。このブロック図形は、1つの部品を表します。

 **直列** 直列ブロック図形 (直列に接続した同一部品のグループ) を追加します。ブロック内のすべての部品が故障していないときに限り、このブロックは使用できる状態です。

 **並列** 並列ブロック図形 (並列に接続した同一部品のグループ) を追加します。ブロック内の少なくとも1つの部品が故障していなければ、このブロックは使用できる状態です。

 **K out of N** K-out-of-Nブロック図形 (並列に接続した $n$ 個の同一部品のグループ) を追加します。ブロック内の $n$ 個の部品のうち $k$ 個が故障していなければ、このブロックは使用できる状態です。

 **スタンバイ** スタンバイブロック図形 (並列に接続した同一の $n$ 個の部品のグループ) を追加します。このブロックでは、ブロック内の $k$ 個の部品のみが稼動します。残りの稼動していない部品はスタンバイの状態になっており、稼動している $k$ 個の部品のいずれかが故障した場合に、代わりに稼動します。ブロック内で使用できて、かつ、稼動している部品が少なくとも $k$ 個あれば、このブロックは使用できる状態です。

 **ストレス共有** ストレス共有ブロック図形を追加します。このブロックは、並列に接続された同一の $n$ 個の部品です。各部品は一度に1つずつ故障します。そして、稼動している部品の個数が少なくなると、より短い間隔で故障するようになります。少なくとも1つの部品が使用できる状態で、かつ、それらの使用できる部品にストレスを割り当てることが成功したなら、このブロックは使用できる状態です。

**合流点**

合流点ブロック図形（合流点を示すブロック図形の組み合わせ）を追加します。合流点に繋がれているブロック図形のうち、少なくとも指定した個数のものが故障していなければ、このブロックは使用できる状態です。

ブロック図形に使用できる設定の詳細については、「[設定](#) パネル」（310 ページ）を参照してください。

**JMP PRO 「設定」 パネル**

「設定」パネルの最上部には、「シミュレーション設定」レポートが表示されます。「シミュレーション設定」アウトラインの下には、選択したすべての部品の設定が表示されます。選択したイベントとアクションの設定内容は、そのイベントまたはアクションの対象となるブロック図形の下に表示されます。

**JMP PRO シミュレーション設定**

シミュレーション設定は、「設定」パネルの「シミュレーション設定」レポートで変更できます。次のような設定が可能です。

**シミュレーション期間** 各反復でシミュレーションする時間の長さ。

**時間単位** シミュレーションに使用する時間の単位。

---

**メモ:** イベントやアクションでの時間（たとえば、あるイベントが起こる間隔）に、この「シミュレーション設定」の「時間単位」で指定した単位が使用されます。

---

**シミュレーション回数** シミュレーションの反復回数。

**シード値** （オプション）シミュレーションによる結果を再現するための乱数シード値。デフォルトでは、「シード値」は0で、同じ結果を再現しません。分析をスクリプトに保存すると、入力したシード値がスクリプトに保存されます。

---

**注意:** 右クリックして「[マルチスレッドでシミュレーション実行](#)」を選択し、シミュレーションを実行した場合、「シード値」を指定しても同じ結果を再現できません。

---

**JMP PRO ブロックの設定**

システムダイアグラムでブロック図形を選択すると、「設定」パネルに設定内容が表示されます。

「合流点ブロック」を除くすべてのブロック図形には、部品（component; 要素）が含まれています。そして、それぞれの部品には、故障する様子を示す確率分布（故障分布）が定義されています。「基本ブロック」は1つの部品だけを表します。よって、「基本ブロック」では、部品の故障分布がブロック全体の故障分布を示します。故障分布のオプションの詳細については、「[分布のオプション](#)」（317 ページ）を参照してください。

## 直列および並列

直列のブロックは、部品が1つでも故障すると、ブロックも故障します。並列のブロックは、すべての部品が故障したときに限り、ブロックが故障します。直列ブロックおよび並列ブロックには次のオプションがあります。

**N** ブロックに含まれる同一部品の個数を指定します。

## K-out-of-N

K-out-of-Nブロックには $n$ 個の同一部品が含まれます。故障していない部品が $k$ 個未満になると、このブロックは故障します。K-out-of-Nブロックには次のオプションがあります。

**K** ブロックが正常に使用できる状態にあるために必要な部品の最小個数を指定します。

**N** ブロックに含まれる同一部品の個数を指定します。

## スタンバイ

スタンバイブロックには、「スタンバイ部品」と呼ばれる補助的な部品があります。スタンバイ部品は、アクティブになっていません。「アクティブ」とは、その部品が稼働している状態（動作している状態）を指します。アクティブでない部品は、スタンバイブロック内で稼働しておらず、アクティブな部品が故障したときに1つずつアクティブ化されます。スタンバイ部品は、開始時には稼働していませんが、アクティブな部品が故障したときに、順に稼働されていきます。時には、アクティブにする処理がうまくいかない場合もあります。スタンバイ部品をアクティブにするときに、部品のスイッチが故障している場合などがあるためです。 $n$ 個の同一部品のうちアクティブな部品が $k$ 個未満の場合、スタンバイブロックは故障します。スタンバイブロックには次のオプションがあります。

**K** 開始時に稼働する部品の個数を指定します。この数は、ブロックが使用できる状態にあるために必要なアクティブな部品の最小個数でもあります。

**N** ブロック内にある同一部品の総個数を指定します。 $n$ から $k$ を引いた差は、スタンバイ部品の個数です。

**スイッチの種類** アクティブな部品のいずれかが故障した場合に1つのスタンバイ部品をアクティブ化するためのメカニズムを指定します。

**単一のスイッチ** ブロックにスイッチが1つだけあります。スイッチが機能せずスタンバイ部品をアクティブにできなかった場合、ブロックも故障します。

**個別のスイッチ** 各スタンバイ部品に、それぞれスイッチがあります。ある1つのスイッチが機能せず、該当のスタンバイ部品をアクティブにできなかった場合、そのスタンバイ部品は稼働しません。しかし、スタンバイブロックは、いずれか1つのスタンバイ部品がアクティブになるまで、順次、スタンバイ部品をアクティブにしようとしていきます。いずれのスイッチも機能せず、稼働している部品の個数が $k$ 個未満になると、ブロックは故障します。

**スイッチの信頼性** アクティブな部品のいずれかが故障したときに、スタンバイ部品をアクティブな状態にしようと試みます。その処理が成功する確率を指定します

**スタンバイの種類** スタンバイ部品の故障確率の状態を指定します。

**コールド** この種類の部品は、アクティブになっていないときは、経年劣化しません。

**ウォーム** この種類の部品は、アクティブになっていない期間でも、副次的な故障分布（スタンバイ状態における故障分布）に従って経年劣化します。アクティブになったスタンバイ部品は、主の故障分布（稼動状態における故障分布）に従って経年劣化します。稼動していない部品（アクティブになっていない部品）は、ストレスが小さいと考えられます。そのときの故障分布を表すために、副次的な故障分布を使用します。

### ストレス共有

ストレス共有ブロックは、ストレスを部品間に等しく分配します。部品が故障すると、機能している部品のストレスが増加し、その結果、故障率が高まります。

**N** ブロックに含まれる同一部品の総個数を指定します。

**スイッチの信頼性** 機能している残りの部品間でストレスを適切に再割り当てできる確率を指定します。ストレスの再割り当てに失敗した場合、ブロックは故障します。

**ストレス共有の種類** 機能している部品間でストレスを共有する方法を指定します。

**基本（デフォルト）** 機能している残りの部品間でストレスが等しく共有されるよう指定します。この種のストレス共有は**負荷分散**と呼ばれます。各部品の特性寿命は、負荷を共有する部品の個数に比例します。

**カスタム** 「共有計算式」オプション内に表示されたJSLコードに従って、部品間でストレスが共有されるよう指定します。「共有計算式」は、部品が故障した場合のストレスの変化を定義します。

### 合流点

合流点ブロックには故障分布は指定できません。合流点ブロックに接続されているブロック図形のうち、使用できる状態になっているものの個数が、指定されている最小個数を下回ると合流点ブロックは故障したとみなされます。合流点ブロックには次のオプションがあります。

**可動最小要素数** 合流点ブロックが使用できる状態であるために必要な、合流点に繋がれている、使用できる状態にあるブロックの最小個数を指定します。

## 「イベントの追加」パネル

イベント（部品の故障など）は、シミュレーションにおいて不連続に発生する事象です。また、あるイベントが発生したときに取る特定のアクション（部品の交換など）を定義できます。1つのイベントに対して定義できるアクションの数に制限はありません。「イベントの追加」パネルには次のオプションがあります。

---

**メモ:** 一部のイベントは、いくつかのブロック図形には設定できません。

---

**ブロックの故障** 該当のブロックが故障したことを示すイベントです。なお、ブロックの故障により、「開始」から「終了」までの経路が遮断された場合、システム全体が使用できない状態（「ダウン」の状態）になります。

**スケジュール** 指定した間隔で反復的に発生するイベントです。「最大回数」オプションで、シミュレーションでこのイベントが発生する回数の上限を設定します。デフォルトでは、「最大回数」は0に設定されており、この場合、イベントはシミュレーションの最後まで何回でも発生し続けます。「[イベントの設定](#)」(319ページ)を参照してください。

**稼働ベース** 指定した累積稼働時間に達したことを示すイベントです。「累積稼働時間」とは、部品が使用できる状態にあり、かつ、実際に動作していた期間を累積したものです。部品やブロックが停止した時点（「オフ」になった状態）で累積はクリアされます。「最大回数」は、シミュレーションにおいて、このイベントが発生する回数の上限を設定するものです。デフォルトでは、イベントはシミュレーションの最後まで何回でも発生し続けます。「[イベントの設定](#)」(319ページ)を参照してください。

**システム停止状態** システムが使用できない状態（「ダウン」の状態）または停止した状態（「オフ」の状態）になったことを示すイベントです。システムの停止には、意図的なものも、意図的でないものも、含みます。

**初期化** シミュレーションの各反復が始まったことを示すイベントです。この「初期化」イベントを利用すれば、システム全体を起動させる前に行われるアクションを設定できます。

### イベントの作成

1. イベントを作成するには、システムダイアグラム内でブロック図形を選択します。すると、システムダイアグラムの最下部に「イベントの追加」パネルと「アクションの追加」パネルが表示されます。
2. 「イベントの追加」パネルでいずれかのオプションを選択すると、選択したブロック図形にそのイベントが定義されます。

図12.6 「ブロックの故障」イベント



イベントを追加すると、部品の上に、追加したイベントを示すオレンジ色の正方形が表示されます。このオレンジ色の正方形の右側には接続矢印が表示されます。

## JMP PRO 「アクションの追加」パネル

「アクション」によって、特定のイベントやアクションの後に実行する処理を定義できます。あるイベントに接続されたアクションは、そのイベントが生じた後に実行されます。「アクションの追加」パネルには次のオプションがあります。

---

**メモ:** 一部のアクションは、いくつかのブロック図形には設定できません。

---

表12.1 アクションのオプション

アクション名	このアクションを 使用できるブロック	開始時の処理	終了時の処理
システム停止	すべて		すべてのブロックを停止（オフ）します。システム全体も、すでに使用できない状態（ダウン）になっている場合を除き、停止します。
システム起動	すべて		故障していないブロックをすべて起動（オン）します。経路が遮断されていなければ、システムも起動されます。
新ブロックに置換	すべて	元のブロックを停止します。そのとき、経路が遮断された場合は、使用できない状態（ダウン）にシステムをします。	ブロックを新しいものに置換した後、ブロックを起動します。このとき、経過時間はリセットされます。経路が遮断されていなければ、システムも起動されます。
最低限の修理	基本、直列	開始時の処理は、「新ブロックに置換」アクションとまったく同じです。	ブロックを起動します。このとき、ブロックの経過時間はリセットされません。経路が遮断されていなければ、システムも起動されます。
ブロック起動	すべて	該当のブロックが故障している場合、またはシステムから除去されている場合には、このアクションは実行されません。	ブロックを起動します。そして、「カウント」を1つ増やします。
ブロック停止	すべて		ブロックを停止（オフ）します。経路が遮断された場合は、システムを使用できない状態（ダウン）にします。
ブロック削除	すべて		ブロックをシステムから削除します。経路が遮断された場合は、システムを使用できない状態（ダウン）にします。
新規設置	すべて	開始時の処理は、「新ブロックに置換」アクションとまったく同じです。	ブロックを停止します。そして、経過時間（年齢）がゼロのブロックを設定します。

表 12.1 アクションのオプション（続き）

アクション名	このアクションを 使用できるブロック	開始時の処理	終了時の処理
使用済み設置	基本	開始時の処理は、「新ブロックに置換」アクションとまったく同じです。	ブロックを停止します。そして、指定された経過時間（年齢）と故障分布のブロックを設置します。
分布の変更	基本	ブロックを停止します。経路が遮断された場合は、システムを使用できない状態（ダウン）にします。	ブロックの故障分布を変更します。このオプションを使って、運用の変更や経年劣化による変化を表すことができます。
故障検査	すべて		ブロックが故障した場合、またはシステムから取り外された場合に、接続されたアクションを呼び出します。
If	すべて		スクリプトで指定した条件が真の場合、接続されたアクションを呼び出します。
スケジューリング	すべて		指定した間隔で、接続されたアクションを呼び出します。アクションを実行する回数を指定することも、最後まで何回もアクションを実行することもできます。

## アクションの作成

1. アクションを作成するには、システムダイアグラム内でブロック図形を選択します。すると、システムダイアグラムの最下部に「イベントの追加」パネルと「アクションの追加」パネルが表示されます。
2. ブロック図形をクリックし、その後、「アクションの追加」パネルでいずれかのアクションを選択すると、そのアクションがブロック図形に定義されます。

アクションを定義すると、ブロック図形の上に、青の正方形が表示されます。その青の正方形にイベントからの矢印を接続すると、そのイベントが発生したときに該当のアクションが呼び出されます。以下では、イベントとアクションの定義方法と接続方法を説明します。

3. 「イベントの追加」パネルでいずれかのオプションを選択すると、そのイベントがブロック図形に定義されます。

そして、ブロック図形の上に、オレンジ色の正方形が表示されます。この正方形の右側には接続矢印が表示されています。イベントの右側に接続矢印が表示されます。

4. その接続矢印をクリックして、手順2で作成した青の正方形（アクションを示す正方形）までドラッグします。  
オレンジの正方形（イベントの正方形）と、青の正方形（アクションの正方形）が、緑の矢印で接続されます。この接続により、シミュレーションでこのイベントが発生すると、接続されたアクションが呼び出されます。
5. 手順2で作成した青の正方形（アクションの正方形）を選択します。  
前のアクションが終了した後に、さらに実行されるアクションを追加するには、選択したアクションの右側に表示されるプラス記号（+）を使用します。
6. プラス記号をクリックし、システムダイアグラムの空白の領域までドラッグします。  
すると、使用可能なアクションの一覧が表示されます。
7. 一覧からいずれかのアクションを選択し、最初のアクションが終わった後に実行するアクションを定義します。

図12.7 アクションの作成



2つのアクションが緑の矢印で接続されます。二番目のアクションは最初のアクションが終了した時点で呼び出されます。

## JMP PRO 「修理可能なシステムのシミュレーション」のオプション

「修理可能なシステムのシミュレーション」の赤い三角ボタンのメニューには、次のようなオプションがあります。

**保存／名前を付けて保存** 「修理可能なシステムのシミュレーション」を JMP スクリプト言語 (JSL) のスクリプトで保存します。保存されたスクリプトは、JMP で開くと自動的に実行されます。自動的に実行されるスクリプトについては、『スクリプトガイド』の「始めましょう」章を参照してください。

**メモ:** 赤い三角ボタンメニューの [保存] と [名前を付けて保存] オプションは、それぞれ [ファイル] > [保存] および [ファイル] > [名前を付けて保存] と同じです。簡単に使えるよう、赤い三角ボタンのメニューに含まれています。

## JMP PRO ブロック項目のオプション

システムダイアグラムに置かれている各部品の設定内容を見るには、次のような操作を行ってください。

- ブロック図形の設定内容を見るには、システムダイアグラムでブロック図形を選択します。

- 複数のブロック図形の設定内容を見るには、Ctrlキーを押しながら矢印ツールで複数のブロック図形を選択します。

## JMP PRO 分布のオプション

各ブロックは、指定されている故障分布に従ってランダムに故障します。このとき、これらの分布における故障時間の単位を指定することもできます。ブロックごとに、故障時間の単位に、シミュレーション全体で指定している時間単位とは異なるものも設定できます。「カウント」オプションは、時間ではなくて、ブロックが起動された回数を数えます。

使用可能な故障分布は、表 12.2 にリストしているものです。

表 12.2 故障分布とその他のパラメータ

プロパティの種類	入力必須項目
指数	$\theta$
Weibull	Alpha、Beta
対数正規	位置、尺度
対数ロジスティック	位置、尺度
Fréchet	位置、尺度
一般化ガンマ	$\mu$ 、 $\sigma$ 、 $\lambda$
DS Weibull	Alpha、Beta、故障確率
DS 対数正規	位置、尺度、故障確率
DS ロジスティック	位置、尺度、故障確率
DS Fréchet	位置、尺度、故障確率
ノンパラメトリック	データまたはデータファイル
推定	推定された分布、データまたはデータファイル

これらの故障分布の確率密度関数については、「寿命の一変量」章の「[確率分布](#)」(79 ページ) を参照してください。

## JMP PRO [ノンパラメトリック] または [推定] 分布の指定

「分布」を [ノンパラメトリック] または [推定] に設定した場合、指定されたデータのノンパラメトリックな経験的分布が使われます。データは手動で入力することも、データを含んだファイルを読み込むこともできます。そのデータを使って、故障分布が近似されます。


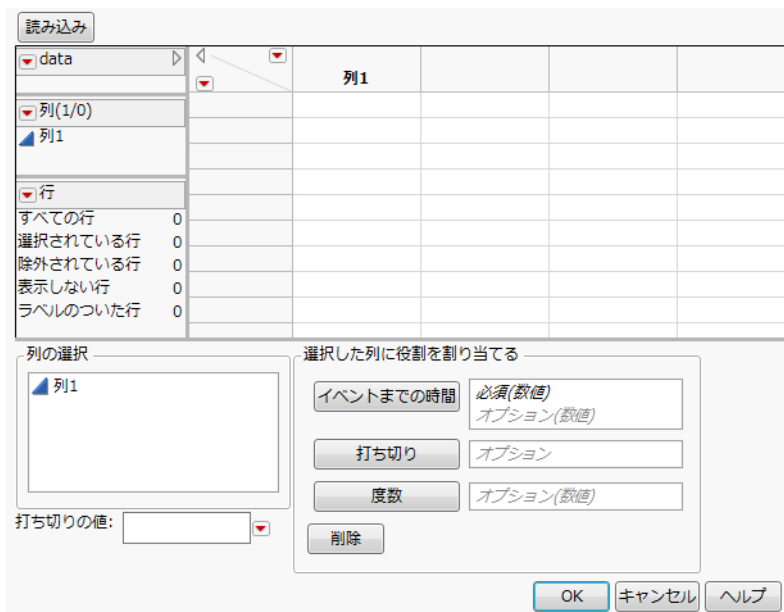


「ノンパラメトリック」または「推定」を選択した後、「データ」の横の  アイコンをクリックします。「データの指定」ウィンドウが表示されるので、ここで、データを入力するか、データファイルを読み込みます。読み込んだデータまたは入力したデータは、その部品の故障分布を求めるのに使用されます。

図12.8 「データの指定」ウィンドウ



ファイルからデータを読み込むには、次の手順を行います。

1.  アイコンをクリックする前に、読み込むデータのある JMP データテーブルを開きます。
2. 「データ」の横の  アイコンをクリックします。
3. 次に、「データの指定」ウィンドウで、**「読み込み」**をクリックします。  
「データテーブルの選択」ウィンドウが表示されます。
4. データテーブルのリストから、データテーブルを選択します。
5. **「OK」**をクリックします。
6. データグリッドの下のパネルで、**「イベントまでの時間」**に列を指定します。
7. 必要に応じて、**「打ち切り」**と**「度数」**に列を指定します。
8. 「データの指定」ウィンドウで、**「OK」**をクリックします。

データを手動で入力するには、次の手順を行います。

1. 「イベントまでの時間」に使用する列を作成します。
2. 必要に応じて、「打ち切り」と「度数」の列を作成します。
3. 作成した列にデータを入力します。

4. データグリッドの下のパネルで、[イベントまでの時間] に列を指定し、必要に応じて、[打ち切り] と [度数] にも列を指定します。前述の手順5および手順6を参照してください。
5. 「データの指定」ウィンドウで、[OK] をクリックします。

## JMP PRO イベントの設定

システムダイアグラムでイベントを選択すると、「設定」パネルにその設定内容が表示されます。イベント名は、他のイベントと区別しやすいように変更できます。スケジュールされたイベントと稼働ベースのイベントに関しては、以下に示すような設定が追加で行えます。

### スケジュール

スケジュールされたイベントには次のオプションがあります。

**スケジュール間隔** イベントが実行される時間間隔を指定します。

**最大回数** このイベントが発生する最大回数を指定します。

### 稼働

稼働ベースのイベントには次のオプションがあります。

**稼働** このイベントが発生するまでの、該当の部品が稼働している時間間隔を指定します。

---

**メモ:** 部品の稼働時間は、システムが稼働状態にあり、かつ、部品が使用できる状態にある場合にのみ累積されます。

---

**最大回数** このイベントが発生する最大回数を指定します。

## JMP PRO アクションの設定

システムダイアグラムでアクションを選択すると、「設定」パネルにその設定内容が表示されます。アクション名は、他のアクションと区別しやすいように変更できます。デフォルトでは、アクションは即時に完了します。「完了時間のオプション」で、デフォルトの [即時] 以外のオプションを選択することができます。

図12.9 アクションの設定

新ブロックに置換: Replace Engine	
アクション名	Replace Engine
作業完了までの時間	
完了時間のオプション	定数
完了時間	0

「完了時間のオプション」には次のオプションがあります。

**即時 (デフォルト)** これを指定すると、アクションは開始したと同時に完了します。

**定数** アクションを開始してから完了するまでの間隔が、指定された定数の間隔に設定されます。

**選択** カンマで区切って指定した値から、ランダムに間隔が選択されます。

**一様** 指定した最小値と最大値の一様分布からの乱数によって、ランダムに間隔が生成されます。

**三角** 指定した最小値・最頻値・最大値の三角分布からの乱数によって、ランダムに間隔が生成されます。

**正規** 指定した平均値と標準偏差の正規分布からの乱数により、ランダムに間隔が生成されます。

---

## **JMP PRO** 修理可能システムのシミュレーション結果

- [「結果のテーブル」](#)
- [「結果のエクスプローラ」](#)
- [「「修理可能システムのシミュレーションの結果」のオプション」](#)
- [「結果レポートにおける点推定プロファイル」](#)

### **JMP PRO** 結果のテーブル

「開始」ブロックの下の子の矢印をクリックすると、シミュレーションが実行され、結果がデータテーブルに表示されます。このテーブルは、シミュレーションの反復ごとに発生したイベントとそれによって引き起こされたアクションを説明しています。

結果のテーブルは、次のような列で構成されます。

**Sim ID** イベントまたはアクションが属するシミュレーションの反復を識別するID。

**時間** シミュレーションにおいてイベントやアクションが発生した時間。

**要素** イベントやアクションが生じたブロック図形の名前を含みます。ただし、システム全体に対しては、「システム」という文字列になっています。

**動作** 発生したイベントまたはアクションの名前。

**状態** その時間における要素の状態。各アクションの始まりと終わりは、それぞれ「開始」と「終了」と記述されます。

**メモ** アクションに対する追加の説明。シミュレーションの各反復における最後は、「終了」と記述されます。

図12.10 修理可能システムのシミュレーションの結果テーブル

	Sim ID	時間	要素	動作	状態	メモ
1	1	0	Spare	Initialization Spare in Trunk	開始	
2	1	0	Spare	Initialization Spare in Trunk	オフ	
3	1	0	Spare	Initialization Spare in Trunk	終了	
4	1	65.024584796	Tire 2	Tire 2 is unrepairable	ダウン	
5	1	65.024584796	システム	システムダウン	ダウン	Unintended
6	1	65.024584796	Tire 2	Replace Tire 2	削除	
7	1	65.024584796	Tire 2	Replace Tire 2	開始	
8	1	65.024584796	Spare	Use Spare	開始	
9	1	65.024584796	Spare	Use Spare	オン	
10	1	65.024584796	Spare	Use Spare	終了	
11	1	65.024584796	Spare	Drive with Spare	開始	
12	1	65.024584796	システム	システム起動	オン	Manual
13	1	65.024584796	Spare	Drive with Spare	終了	

図12.10の最初は、「Initialization Spare in Trunk」（トランクにスペアタイヤを準備する）というアクションが実行されています。これは「即時」のアクションです。「Spare」を停止する（「オフ」にする）というアクションを、「時間」が0で完了させています。

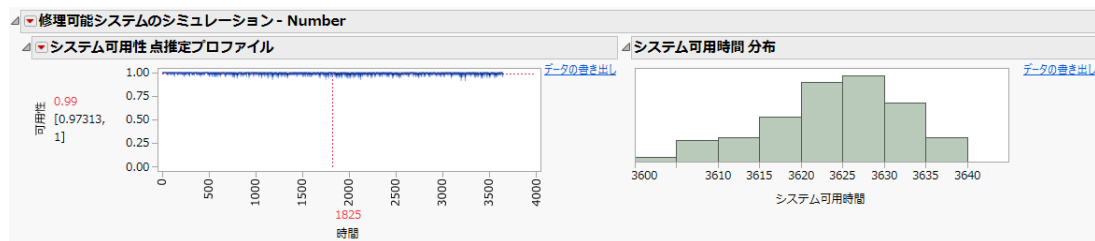
最初のシミュレーション反復では、次に、約65日後に「Tire 2 is Unrepairable」（タイヤ2が故障）というイベントが生じています。この故障によりタイヤが3本しかなくなったので、5行目において、システムは意図せずに使用できない状態（「システムダウン」の状態）になります。ダイヤグラムの「Need 4 Tires to Drive」（運転には4本のタイヤが必要）合流点によって、少なくとも4本のタイヤが使用できる状態になればシステム全体は動かないと設定されています。「Tire 2 is Unrepairable」（タイヤ2が故障）イベントは、「Replace Tire 2」（タイヤ2を交換）アクションと「Use Spare」（スペアを使用）アクションを同時に呼び出します。11行目で「Drive with Spare」（スペアで運転）アクションが呼び出され、システムが起動されます。

タイヤ2が故障すると同時に、スペアタイヤに交換されています。システムが使用できない状態（「システムダウン」の状態）になってから再起動されるまでの時間はゼロです。これは、アクションの完了時間が「即時」に設定されているからです。そのため、「Tire 2 is Unrepairable」（タイヤ2が修理不可能）イベントによってシステムが停止している時間はゼロです。シミュレーションでいろいろな設定を確かめれば、「即時」以外のアクションであった場合にシステムの累積停止時間がどのように変化するかを調べることができます。

## JMP PRO 結果のエクスプローラ

結果のテーブルにある「Launch Repairable Systems Simulation Results Explorer」スクリプトの横にある緑の三角をクリックすると、シミュレーション結果を分析したレポートが表示されます。

図12.11 修理可能システムのシミュレーションの結果レポートの一部



デフォルトでは、レポートには、大まかに分けて2種類のグラフが描かれます。1種類目のグラフは、時点ごとの折れ線グラフです（図12.11の左側）。このグラフは、時点を横軸に、そして、その時点においてシステムが特定の状態（可用・稼動・計画外停止）になっている確率を縦軸にプロットしています。横軸の範囲は、シミュレーションで設定した時間の範囲です。ある時点において、システムが特定の状態となっている確率が、縦軸の左横に赤字で示されます。点推定の下には、その95%信頼区間が表示されます。

**ヒント:** シミュレーションの繰り返しで特定の時点でのシステム点推定を見るには、横軸の下に表示されている赤字の数値をクリックしてください。そして、数値を入力して、Enterキーを押してください。

2種類目のグラフは、シミュレーションの各反復から得られた結果をまとめたヒストグラムです（図12.11の右側）。ヒストグラムの棒は、次のいずれかを表しています。

- システムが該当の状態になっている総累積時間
- シミュレーションの全期間に占める、システムが該当の状態になっている総累積時間の割合

**ヒント:** グラフに使用されているデータをデータテーブルにまとめるには、グラフの横にある「データの書き出し」をクリックします。

デフォルトでは、このレポートには以下のグラフが含まれます。

**システム可用性 点推定プロファイル** システムが使用できる状態となっている確率（システムが「オン（稼動）」もしくは「オフ（停止）」になっていて、「ダウン」にはなっていない状態である確率）の推定値を、時点に対してプロファイルグラフにしたものです。

**システム可用時間 分布** 各シミュレーション反復で求められた、システムが使用できる状態になっている総累積時間を、ヒストグラムで描いたものです。

**システム可用性 分布** システムが使用できる状態になっている総累積時間を、シミュレーションの総期間で割ったものの分布を、ヒストグラムで表したものです。このヒストグラムは、前述の「システム可用時間 分布」と同じですが、シミュレーション期間に対する割合となっています。

**システム稼働性 点推定プロファイル** システムが稼動している確率（システムが「オン（稼働）」になっている確率）の推定値を、時点に対してプロファイルグラフにしたものです。

**システム稼働時間 分布** 各シミュレーション反復で求められた、システムが稼動している総累積時間を、ヒストグラムで描いたものです。

**システム稼働性 分布** システムが稼働している総累積時間を、シミュレーションの総期間で割ったものを、ヒストグラムで描いたものです。このヒストグラムは、前述の「システム稼働時間 分布」と同じですが、シミュレーション期間に対する割合となっています。

**システム計画外停止 点推定プロファイル** システムがダウンしている確率（システムが使用できない状態となっている確率）の推定値を、時点に対してプロファイルグラフにしたものです。

**システム計画外停止時間 分布** 各シミュレーション反復で求められた、システムがダウンしている総累積時間を、ヒストグラムで描いたものです。

**システム計画外停止割合 分布** システムがダウンしている総累積時間を、シミュレーションの総期間で割ったものの分布を、ヒストグラムで描いたものです。このヒストグラムは、前述の「システム計画外停止時間 分布」と同じですが、シミュレーション期間に対する割合で分布が描かれます。

## **JMP PRO** 「修理可能システムのシミュレーションの結果」のオプション

「修理可能システムのシミュレーションの結果」の赤い三角ボタンのメニューには、次のようなオプションがあります。

**要素可用性の点推定** システムダイアグラム内の各ブロック図形について、次のレポートを表示します。

- － 可用性 点推定プロファイル
- － 可用性 時間 分布
- － 可用性 分布
- － 計画外停止プロファイルの点推定
- － 計画外停止時間 分布
- － 計画外停止割合 分布

**システム可用性 (一定の間隔ごと)** 指定された各期間における平均システム可用性を求めた棒グラフが描かれます。「一定の間隔ごと」パネルでは、時間の間隔によって各期間が定義されます。一方、「特定のイベントごと」パネルでは、特定のイベントが発生した回数によって各期間が定義されます。**[実行]** をクリックすると、レポートには、各期間の平均システム可用性が棒グラフで描かれます。

**システム総停止時間の箱ひげ図 (要素ごと)** 原因となった部品別に、システムが停止している総累積時間（システムがダウンしているか、もしくは、オフになっている総累積時間）が箱ひげ図で描かれます。パレート図と同様に、各部品は、停止時間に最も大きく影響したものから降順に並べて描かれます。

**システム計画外停止時間の箱ひげ図 (要素ごと)** 原因となった部品別に、システムがダウンしている総累積時間が箱ひげ図で描かれます。パレート図と同様に、各部品は、停止時間に最も大きく影響したものから降順に並べて描かれます。

以下のオプションについて詳しくは、『JMPの使用法』の「JMPのレポート」章を参照してください。

**やり直し** 分析を繰り返したり、やり直したりするオプションを含みます。また、[自動再計算] オプションに対応しているプラットフォームにおいては、[自動再計算] オプションを選択すると、データテーブルに加えた変更が、該当するレポートに即座に反映されるようになります。

**スクリプトの保存** レポートを再現するためのスクリプトを保存するオプションが、保存先ごとに用意されています。

**By グループのスクリプトを保存** By 変数の全水準に対するレポートを再現するためのスクリプトを保存するオプションが、保存先ごとに用意されています。起動ウィンドウでBy 変数を指定した場合のみ使用可能です。

## 結果レポートにおける点推定プロファイル

「修理可能システムのシミュレーション」の結果レポートにある各点推定プロファイルには、赤い三角ボタンのメニューがあり、次のオプションが含まれています。

**信頼区間** プロファイルにおいて、95% 信頼区間の表示／非表示を切り替えます。

**因子グリッドのリセット** 「因子設定」ウィンドウを表示します。ここで、プロファイルの設定を変更できます。因子グリッドの設定の詳細については、『プロファイル機能』の「プロファイル」章を参照してください。

**因子設定** 因子グリッドに関するその他のオプションを表示します。因子設定の詳細については、『プロファイル機能』の「プロファイル」章を参照してください。

# 第13章

## 生存時間分析

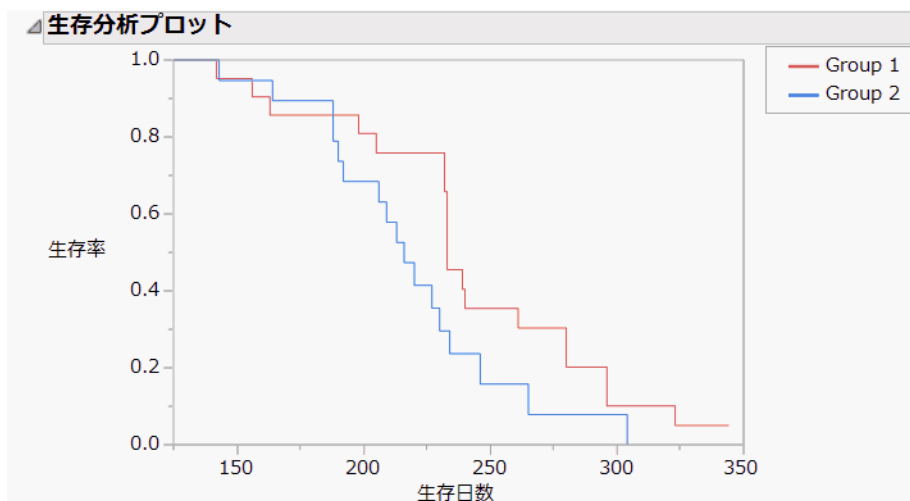
### 生存時間データを分析する

生存時間データは、特定のイベントが発生するまでの時間を記録したもので、イベント-時間応答データ (event-time response data) とも呼ばれます。通常は、エンジンの故障や、患者の死亡などの「故障」をイベントとします。観測期間が終了するまでに故障が発生しなかったデータは、打ち切りのあるデータと呼ばれます。

「生存時間分析」プラットフォームは、イベントが発生するまでの時間（「故障」が生じるまでの時間）の分布を調べます。生存時間を単変量で分析するときに、このプラットフォームを用いてください。

ヒント：生存時間データを単変量で分析するのではなく、説明変数のあるモデルをあてはめたい場合には、「生存時間 (パラメトリック) のあてはめ」や「比例ハザードのあてはめ」プラットフォームを使ってください。

図13.1 「生存分析プロット」の例



## 目次

「生存時間分析」プラットフォームの概要 .....	327
生存時間分析の例 .....	328
「生存時間分析」プラットフォームの起動 .....	329
生存分析プロット .....	330
「生存時間分析」プラットフォームのオプション .....	330
指数分布・Weibull分布・対数正規分布のプロットとあてはめ .....	333
あてはめた分布のグラフ .....	337
競合する原因 .....	338
「生存時間分析」プラットフォームの別例 .....	338
生存時間分析の例 .....	338
競合原因分析の例 .....	340
区間打ち切りの例 .....	342
生存時間分析の統計レポート .....	344

## 「生存時間分析」プラットフォームの概要

生存時間データは、次の2つの理由から、特別な手法で分析する必要があります。

1. 生存時間の分布は、指数分布・Weibull分布・対数正規分布のように、特殊な非正規分布になるのが普通です。
2. また、データの一部が打ち切られている場合もあります。

打ち切りのないデータや右側打ち切りデータに対しては、「Kaplan-Meier法」と呼ばれているノンパラメトリックな推定方法で生存関数を推定するのが一般的です。「打ち切りのないデータ」とは、死亡や故障などのイベントが観測されたデータのことです。一方、「右側打ち切りデータ」では、故障や死亡などのイベントが観測されなかったため、はっきりとした生存時間が記録されず、ただ、特定の時間よりも前には死亡や故障が起きなかったことしか分かっていません。右側打ち切りは、製造業の寿命試験で試験終了時に故障していない製品が残っている場合や、臨床試験にて患者が途中で脱落した場合に生じます。分析に偏り（バイアス）が出ないようにするためには、打ち切りも考慮して分析しなければいけません。一般的な生存時間分析に用いるデータは、次のような変数から構成されます。

- 故障や死亡などのイベントが、製品や患者に生じた時間。または、打ち切りの時間。なお、生存時間に対する回帰モデルの場合、応答変数（Y）が時間となります。
- データが、イベントが生じたものなのか、打ち切られたものなのかを示すコード。JMPのデフォルトでは、打ち切りの場合に1、イベントが生じた場合に0というコードが使用されます。
- 生存時間に対する回帰モデルでは、何らかの説明変数をモデルに含めます。
- データが区間打ち切りの場合は、区間の下限と上限を表す2つの変数が必要です。「区間打ち切り」とは、ある区間のいずれかの時点でイベントが生じたことしか分かっていないデータを指します。

信頼性分析や生存時間分析における時間データは、「寿命」・「生存時間」・「故障時間」・「イベントまでの時間」・「持続時間」などと呼ばれています。

「生存時間分析」プラットフォームでは、グループごとにKaplan-Meier法（product-limit: 積-極限法とも呼ばれる）による生存率の推定値が計算されます。Kaplan-Meier推定はそれだけで分析として完結してはいますが、より複雑なモデルをあてはめる前の探索的な分析としても活用できます。Kaplan-Meier推定を行ったときの「生存時間分析」プラットフォームには、次のような機能があります。

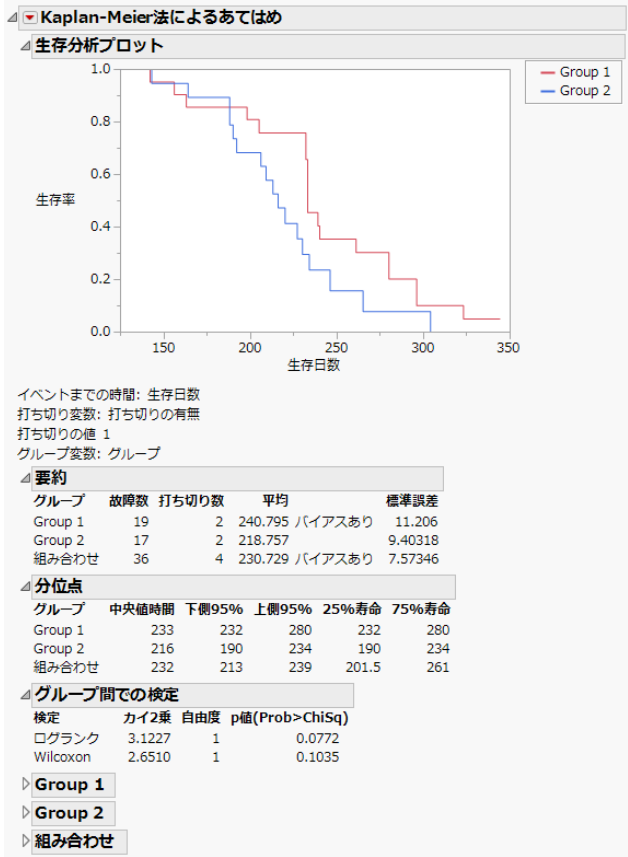
- グループごとに推定された生存関数や、(オプション指定によって)標本全体で推定された生存関数を描く。
- 各グループおよび標本全体に対し、生存率の推定値を計算し、表にまとめる。
- 指数分布・Weibull分布・対数正規分布の確率プロットを作成する。また、それらの分布をあてはめて、パラメータ推定値も算出する。
- ログランク検定と一般化 Wilcoxon 検定。これらの検定は、グループごとの生存関数が同じかどうかを、カイ2乗値によって検定します。
- 故障原因を含んだ変数を指定した場合、競合原因（competing causes）の分析。競合原因分析では、各原因ごとに、Weibull分布を推定します。

生存時間分析の例

2群に分けたラットを発ガン性物質にさらし、生存時間の差を調べる試験を行いました。データは、「Rats.jmp」サンプルデータにまとめられています。この例でのイベントは死亡で、この試験の目的は、2群におけるラットの生存関数を比べることです。

- 1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Rats.jmp」を開きます。  
「生存日数」列のデータが生存時間です。この中には打ち切りデータもあります。
- 2. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [生存時間分析] を選択します。
- 3. 「生存日数」を [Y, イベントまでの時間] に指定します。
- 4. 「グループ」を [グループ変数] に指定します。
- 5. 「打ち切りの有無」を [打ち切り] に指定します。
- 6. [OK] をクリックします。

図13.2 「Rats.jmp」データの「生存分析プロット」



生存関数の見た目では、「Group 1」のラットの方が、「Group 2」のラットよりも生存日数が長ったことがうかがえます。

## 「生存時間分析」プラットフォームの起動

「生存時間分析」プラットフォームを起動するには、[分析] > [信頼性/生存時間分析] > [生存時間分析] を選択します。

図13.3 「生存時間/信頼性分析」起動ウィンドウ

「生存時間分析」起動ウィンドウには、次のようなオプションがあります。

**Y, イベントまでの時間** イベントが発生するまでの時間と、打ち切りまでの時間を含んだ列を指定します。なお、区間打ち切りデータの場合は、上限と下限の2つのY変数を指定してください。

**グループ変数** データをグループごとに分けて個別の生存関数を推定したい場合に、その基準となる列を指定します。

**打ち切り** 打ち切りを示す値が含まれている列を指定します。[打ち切り] 列を指定した場合、[打ち切りの値] ボックスに、打ち切りを示す値を入力してください。[打ち切り] の列には2つの値を含む場合がありますが、以下のような場合は、異なる値を3つ以上含むことができます。

- 打ち切りデータのすべての行は、[打ち切りの値] ボックスで指定した値になっている
- そして、打ち切りでないデータの行は、[打ち切りの値] 以外の値になっている

**度数** 同時点で故障したユニットの個数など、観測値の度数が含まれている列を指定します。値が0または正の整数であるとき、その値は行の観測値の度数（個数）を表します。

**By** 指定された分類変数（グループ変数）の水準ごとに、個別に分析を行います。

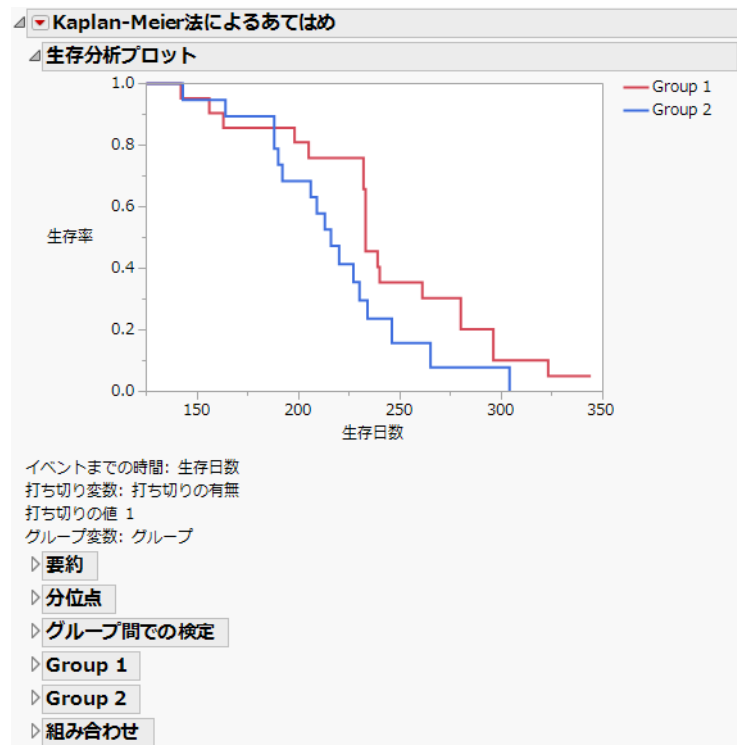
**生存率のかわりに故障率をプロット** 生存率プロット（生存確率のプロット）のかわりに、故障率プロット（累積故障確率のプロット）を表示します。

**打ち切りの値** 「打ち切り」列のデータ値において右側打ち切りを示すデータ値を指定します。デフォルトの値は1です。

## 生存分析プロット

「生存時間分析」プラットフォームでは、グループごとの生存関数の推定値をグラフにした階段プロットが表示されます。凡例に各グループの色と線種が表示されています。

図13.4 生存分析プロット



プロットの下にあるレポートには、生存時間の要約統計量と分位点、グループごとに計算した生存率のリスト、グループを組み合わせで標本全体から計算した生存率のリストが表示されます。グループが2つ以上ある場合は、生存曲線を比較する統計的検定も計算されます。

## 「生存時間分析」プラットフォームのオプション

「Kaplan-Meier法によるあてはめ」の赤い三角ボタンをクリックすると、次のようなオプションが表示されます。

**生存時間プロット** グループごとの生存率のプロット（生存時間プロット）を重ねて表示します。

**故障率プロット** 信頼性分析の文献でよく使用されている、故障率プロット（累積故障確率、つまり、下側累積確率のプロット）を作成します。故障率プロットは、生存率プロットの縦軸を逆転させたもので、生存率ではなく故障率（累積故障確率）を描いたものです。

---

**メモ：** [故障率プロット] は、JMPの旧バージョンにあった [Y軸の逆転] オプションに代わるものです ([Y軸の逆転] (Reverse Y Axis) は現在もスクリプトでは利用できます)。

---

**プロットのオプション** 次のオプションが表示されます。

---

**メモ：** 最初の7つのオプション（[点の表示]・[Kaplan-Meier曲線を表示]・[組み合わせの表示]・[信頼区間の表示]・[同時信頼区間を表示]・[信頼区間を塗る]・[同時信頼区間を塗る]）と最後の2つのオプション（[生存率の信頼曲線]・[故障率の信頼曲線]）は、デフォルトの生存時間プロットとオプションの故障率プロットに関連します。一方、残りの5つのオプション（[分位点の中間ステップ]・[分位点をつなぐ]・[分位点のあてはめ線]・[分位点の信頼曲線]・[分位点の信頼区間を塗る]）は確率プロットのみに関連します。

---

**点の表示** 生存時間プロットや故障率プロットに、データ点を表示します。故障が観測されたデータは曲線の下端に、打ち切りデータは曲線の少し上に点で表示されます。

**Kaplan-Meier曲線を表示** 生存時間プロットや故障率プロットに、Kaplan-Meier曲線を表示します。このオプションは、デフォルトでオンになっています。

**組み合わせの表示** 生存時間プロットや故障率プロットに、データ全体のKaplan-Meier曲線を表示します。

**信頼区間の表示** 生存時間プロットや故障率プロットに、時点ごとに計算した95%信頼区間を表示します。[組み合わせの表示] オプションがオンになっているときは、組み合わせプロットの信頼区間も表示されます。

**点の表示、組み合わせの表示** [点の表示] と [組み合わせの表示] の両方をオンにすると、標本全体（組み合わせ）のプロットが点線で表示され、また、グループ別の曲線だけに点が表示されます。

**同時信頼区間を表示** 生存時間プロットや故障率プロットに、95%同時信頼区間を表示します。[組み合わせの表示] オプションがオンになっているときは、組み合わせプロットの同時信頼区間も表示されます。同時信頼区間、および、時点ごとの信頼区間については、Meeker and Escobar (1998, ch. 3) を参照してください。

**分位点の中間ステップ** Weibullプロット・対数正規プロット・指数プロットにおいて、点の位置を調整したKaplan-Meier推定値にします。この調整したKaplan-Meier推定値は、Kaplan-Meier曲線のステップの底ではなく、中間の値をプロットします。これは推奨するオプションなので、デフォルトでオンになっています。

**分位点をつなぐ** Weibullプロット・対数正規プロット・指数プロットにおいて、折れ線を表示します。このオプションは、デフォルトでオンになっています。

**分位点のあてはめ線** Weibullプロット・対数正規プロット・指数プロットにおいて、直線（あてはめ線）を表示します。このオプションは、デフォルトでオンになっています。

**分位点の信頼曲線** Weibullプロット・対数正規プロット・指数プロットにおいて、95%信頼区間を表示します。

**分位点の信頼区間を塗る** Weibullプロット・対数正規プロット・指数プロットにおいて、95%信頼区間を塗りつぶして表示するか、点線だけで表示するかを切り替えます。

**生存率の信頼曲線** あてはめた分布から算出される生存率とその信頼区間を、生存時間プロットに表示します。

**故障率の信頼曲線** あてはめた分布から算出される故障率とその信頼区間を、故障率プロットに表示します。

**指数プロット** グループごとの指数プロットが作成されます。指数プロットのX軸は時間で、Y軸は指数分布の累積確率です。折れ線が直線に近い場合、指数モデルがデータにあてはまっていると判断できます。たとえば、図13.5を見ると、指数プロットの折れ線は「Group1」も「Group2」も曲がっていて直線とは言えないことから、このデータに指数分布は適切ではありません。「[指数分布・Weibull分布・対数正規分布のプロットとあてはめ](#)」(333ページ)を参照してください。

**指数のあてはめ** データに指数分布があてはめられます。「指数パラメータ推定値」表が作成されます。また、「指数プロット」に、あてはめた結果の直線が描かれます。図13.5を参照してください。θパラメータは平均故障時間に該当します。「[指数分布・Weibull分布・対数正規分布のプロットとあてはめ](#)」(333ページ)を参照してください。

**Weibullプロット** グループごとのWeibullプロットが作成されます。WeibullプロットのX軸は時間の対数で、Y軸はWeibull分布の累積確率です。Weibullプロットの線が直線で、平行に近い場合は、Weibull回帰モデルが適切だと判断できます。「[指数分布・Weibull分布・対数正規分布のプロットとあてはめ](#)」(333ページ)を参照してください。

**Weibullのあてはめ** データにWeibull分布があてはめられます。プロットには、あてはめた結果の直線が描かれます。Weibull分布のパラメータ表現として一般的である「極値パラメータ推定値」表と「Weibullパラメータ推定値」表が作成されます。図13.5を参照してください。尺度パラメータ(α)の値は、Weibull分布の0.632%点に相当します。「極値パラメータ推定値」表には、同じ推定結果を別のパラメータ表現で表したものが表示されます。 $\lambda = \ln(\alpha)$ で $\delta = 1/\beta$ です。「[指数分布・Weibull分布・対数正規分布のプロットとあてはめ](#)」(333ページ)を参照してください。

**対数正規プロット** グループごとの対数正規プロットが作成されます。対数正規プロットのX軸は時間の対数で、Y軸は対数正規分布の累積確率です。対数正規プロットの線が直線で、平行に近い場合は、対数正規回帰モデルが適切だと判断できます。「[指数分布・Weibull分布・対数正規分布のプロットとあてはめ](#)」(333ページ)を参照してください。

**対数正規のあてはめ** データに対数正規分布があてはめられます。プロットには、あてはめた結果の直線が描かれます。また「対数正規パラメータ推定値」表(図13.5)が作成されます。μとσは、時間変数の自然対数の平均および標準偏差を示します(対数変換後の時間変数が、正規分布に従うと仮定されています)。「[指数分布・Weibull分布・対数正規分布のプロットとあてはめ](#)」(333ページ)を参照してください。

**あてはめた分布のグラフ** 分布をあてはめた後でこのオプションを選択すると、生存率・確率密度・ハザードの3つのプロットが作成されます。分布をあてはめていない場合は、プロットは表示されません。「[あてはめた分布のグラフ](#)」(337ページ)を参照してください。

**競合する原因** Weibullモデルの推定が行われます。競合原因モデルでは、1つ1つの原因ごとに、当該の原因における故障は故障イベントとして、その他の原因における故障は打ち切りとして扱われます。あてはめた分布は、生存時間プロット上で点線として表示されます。「[競合する原因](#)」(338ページ)を参照してください。

**生存率の推定** 指定した時間値に対し、生存率が推定されます。

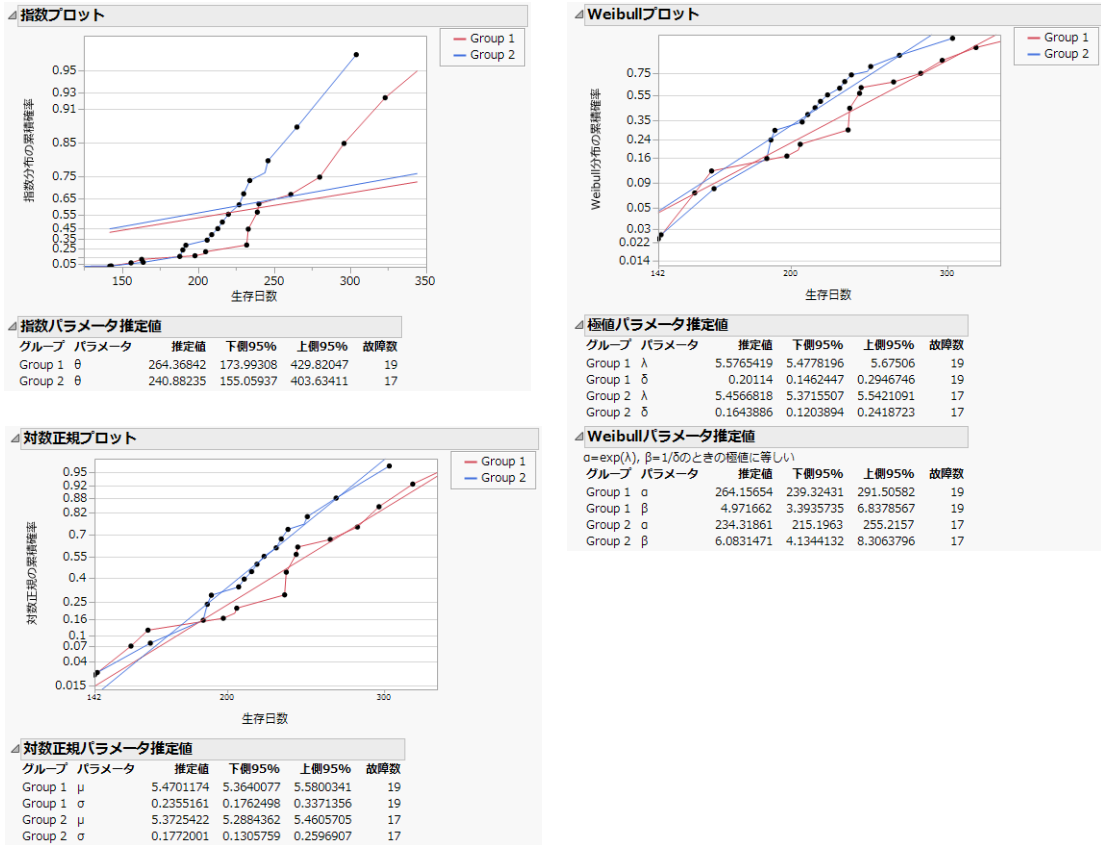
**時間分位点の推定** 指定したそれぞれの生存率に対し、時間分位点が推定されます。

**推定値の保存** 生存率と故障率の推定値、信頼区間、その他の統計量を含むデータテーブルが作成されます。

## 指数分布・Weibull分布・対数正規分布のプロットとあてはめ

「生存時間分析」プラットフォームでJMPがサポートしている3つの確率分布のそれぞれに、プロットとあてはめに関するコマンドが用意されています。まずプロットのコマンドを実行し、イベントを示す点が直線に沿うかどうか、つまり、その確率分布がよくあてはまっているかどうかを確かめてください。次にあてはめのコマンドを実行すると、パラメータの推定値が計算されます。

図13.5 指数プロット・Weibull・プロット・対数正規プロット



次の表では、何をプロットすれば確率分布が直線になるかを示しています。

表13.1 プロットが直線となる変換

確率プロット	横軸	縦軸	解釈
指数分布	時間	$-\log(S)$	傾きは $1/\theta$
Weibull分布	$\log(\text{時間})$	$\log(-\log(S))$	傾きは $\beta$
対数正規分布	$\log(\text{時間})$	$\text{Probit}(1-S)$	傾きは $1/\sigma$

メモ: Sは、Kapler-Meier 法に基づく生存率の推定値です。

## 指数分布

指数分布は、イベントまでの時間データをモデリングするための最も単純な分布です。指数分布は $\theta$ というパラメータだけを持ちます。指数分布はハザードが一定で、どれだけの時間を生存していたかがイベントの起こりやすさに影響しない分布です。パラメータ $\theta$ は寿命の期待値を表します。

## Weibull 分布

Weibull 分布は、イベントまでの時間データをモデリングするための最もよく使われている分布です。Weibull 分布としては、2パラメータの Weibull 分布と、3パラメータの Weibull 分布が有名です。「生存時間分析」プラットフォームは2パラメータの Weibull 分布をあてはめます。Weibull 分布の確率密度を表す式は、人によってさまざまです（表13.2を参照）。JMPのレポートには2種類のパラメータ表現による結果が表示されます。1つは Alpha ( $\alpha$ ) と Beta ( $\beta$ ) を使った「Weibullパラメータ推定値」、もう1つは最小極値分布に基づく「極値パラメータ推定値」です。

「Weibullパラメータ推定値」レポートに示されている $\alpha$ と $\beta$ パラメータ化は、信頼性分析の文献で広く使用されています（Nelson 1990）。 $\alpha$ パラメータは、63.2%のユニットが故障する分位点を示します。 $\beta$ パラメータは、時間の経過と共にハザード（瞬間故障率）がどのように変化するかを決定します。**Beta**が1より大きい場合、ハザードは時間の経過とともに増加します。**Beta**が1より小さい場合、ハザードは時間の経過とともに減少します。**Beta**が1の場合、ハザードは一定になります。ハザードが一定である Weibull 分布は指数分布に等しくなります。

$\lambda$ と $\delta$ を使った極値パラメータ化は、「極値パラメータ推定値」レポートに示されています。このパラメータ化は、Weibull 分布を位置パラメータと尺度パラメータで表現しているため、統計的な意味で望ましい場合があります（Meeker and Escobar 1998, p. 86を参照）。位置パラメータは $\lambda$ 、尺度パラメータは $\delta$ です。前述の $\alpha$ と $\beta$ を用いたパラメータ表現との関係では、 $\lambda$ は $\alpha$ の自然対数に等しく、 $\delta$ は $\beta$ の逆数に等しくなっています。したがって、 $\delta$ パラメータは、時間の経過と共にハザードがどのように変化するかを決定します。**Delta**が1より大きい場合、ハザードは時間の経過とともに減少します。**Delta**が1より小さい場合、ハザードは時間の経過とともに増加します。**Delta**が1の場合、ハザードは一定になります。ハザードが一定である Weibull 分布は指数分布に等しくなります。

表13.2 Weibull分布のさまざまな表し方

JMPにおける Weibull 分布	Alpha	Beta
Wayne Nelson	alpha=alpha	beta=beta
Meeker and Escobar	eta=alpha	beta=beta
Tobias and Trindade	c = alpha	m = beta
Kececioglu	eta=alpha	beta=beta
Hosmer and Lemeshow	exp(X beta)=alpha	lambda=beta
Blishke and Murthy	beta=alpha	alpha=beta
Kalbfleisch and Prentice	lambda = 1/alpha	p = beta

表 13.2 Weibull分布のさまざまな表し方（続き）

JMPにおける極値分布	$\lambda = \log(\alpha)$	$\delta = 1/\beta$
Meeker and Escobar s.e.v.	$\mu = \log(\alpha)$	$\sigma = 1/\beta$

対数正規分布

対数正規分布は、イベントまでの時間データをモデリングするための最も単純な分布です。対数正規分布では、値の対数をとったときの分布が正規分布になる分布です。つまり、データを指数変換したものに対数正規分布をあてはめれば、元データに正規分布をあてはめたことになります。「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」章の「「生存時間 (パラメトリック) のあてはめ」の別例」(358 ページ) を参照してください。

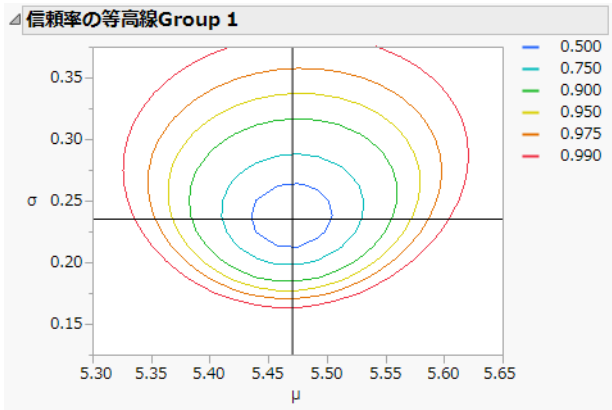
追加のオプション

追加のオプションを表示するには、指数分布・Weibull 分布・対数正規分布の各分布をあてはめるときに、Shift キーを押しながら「Kaplan-Meier 法によるあてはめ」タイトルバーの赤い三角ボタンをクリックし、希望のあてはめをクリックします。

次のような追加のオプションがあります。

- 信頼限界の信頼水準を指定する。
- $\theta$  (指数分布の場合)、 $\sigma$  (対数正規分布の場合)、 $\beta$  (Weibull 分布の場合) を特定の値に固定する。  
「WeiBayes 分析」(337 ページ) を参照してください。
- Weibull 分布および対数正規分布のあてはめの場合は、信頼領域を表す等高線図を描くことができます (固定値がない場合)。図 13.6 を参照してください。

図 13.6 信頼率の等高線図



## WeiBayes 分析

JMP では、指数分布をあてはめるときは  $\theta$ 、Weibull 分布をあてはめるときは  $\beta$ 、対数正規分布をあてはめるときは  $\sigma$  の各値を、特定の値に固定することができます。この機能は、以下のような **WeiBayes** と呼ばれる状況で利用できます。

- 故障がまったくないか、ごく少ない
- 既知の Beta の値がある
- (さらに) Beta は既知だが、Alpha の値は推定する必要がある

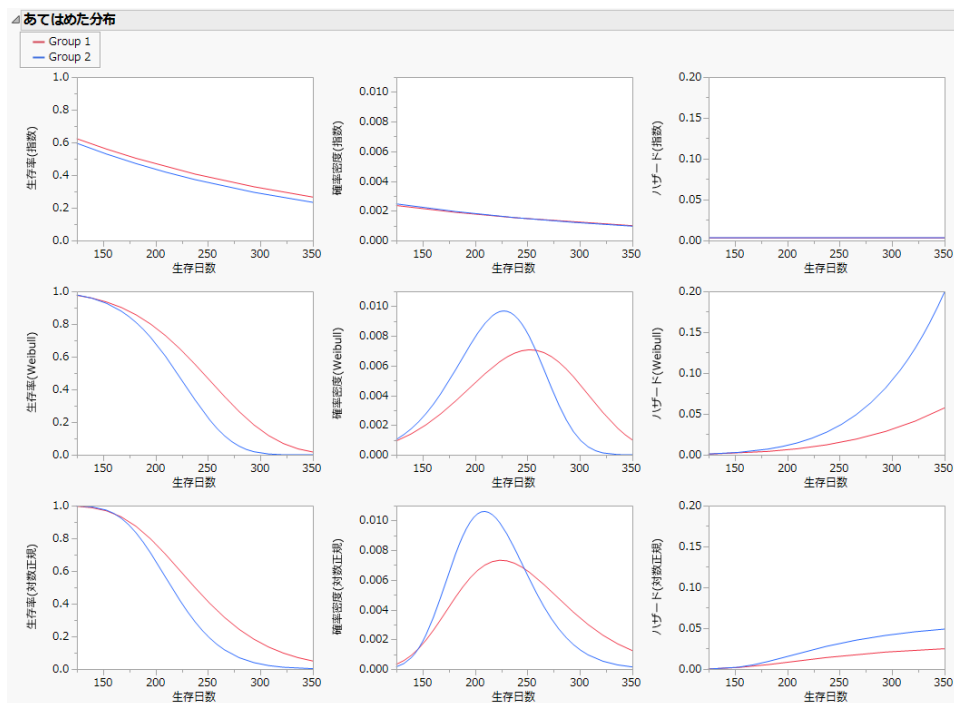
WeiBayes 状況の詳細については、Abernethy (1996) を参照してください。

故障がまったくない場合、伝統的な古い手法では最後に故障データを加えて推定を行います。このように最後に故障を追加する方法は、ある種の下限值にはなっていますが、Alpha 値に対する妥当な推定方法ではありません。JMP の WeiBayes 分析は、より妥当な推定方法となっています。

## あてはめた分布のグラフ

[あてはめた分布のグラフ] オプションを選択すると、指数分布・Weibull 分布・対数正規分布の生存率・密度・ハザードのプロットが表示されます。すべての確率分布において軸のスケールが同じになっているため、分布を簡単に比較できます。

図13.7 3つの分布のグラフ



グラフィックスクリプトを使えば、プロットを別のグラフにコピーすることができます。グラフをコピーするには、コピー対象のプロットを右クリックして、[編集] > [フレーム内容のコピー] を選択します。コピー先のプロットを右クリックし、[編集] > [フレーム内容の貼り付け] を選択します。

## 競合する原因

システム内に、故障の原因が2つ以上存在することがあります。たとえば、製造工程にいくつかの段階があり、どの段階で生じた故障でもシステム全体の故障につながる場合などです。異なる原因での故障が互いに独立している場合、各原因の分布を推定した結果から、システム全体の故障時間をモデル化することができます。このモデル化では、各原因の分布を推定するのに、該当する原因以外の故障を打ち切りデータとして扱います。

「競合する原因」の赤い三角ボタンをクリックすると、次のオプションが表示されます。

**原因の削除** 指定した原因を除去した場合の、生存率の推定値を算出します。

**原因座標の保存** テーブルに「 $\log(-\log(\text{生存率}))$ 」という新しい列が追加されます。この統計量は、原因ごとに時間変数に対してプロットするときに使うことができます。

**Weibull 線** Weibull 線をプロットに追加します。

**ハザードプロット** ハザードプロットを追加します。

**シミュレーション** データから推定された各 Weibull 分布をもとにシミュレートされた故障時間と故障原因が、新しいデータテーブルに作成されます。

---

## 「生存時間分析」プラットフォームの別例

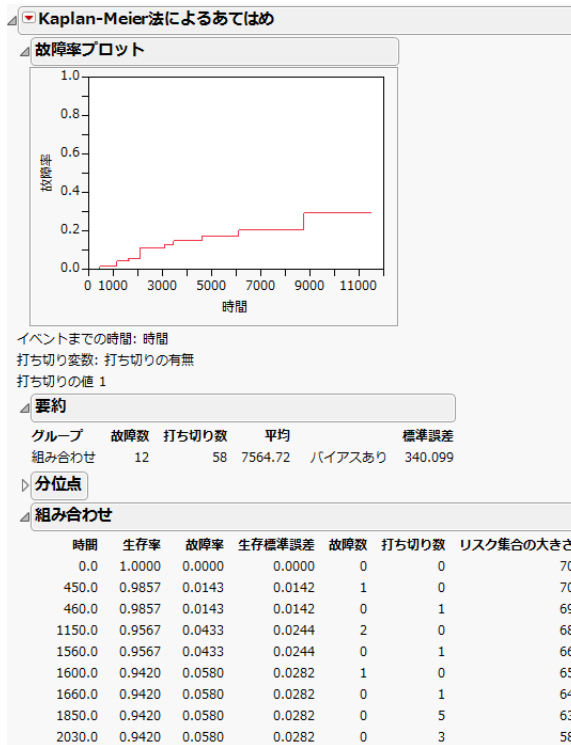
- 「[生存時間分析の例](#)」
- 「[競合原因分析の例](#)」
- 「[区間打ち切りの例](#)」

## 生存時間分析の例

Nelson (1982, p. 133) と Meeker and Escobar (1998, app. C1) の著作では、ディーゼル発電機のファンの故障に関する調査が取り上げられています。

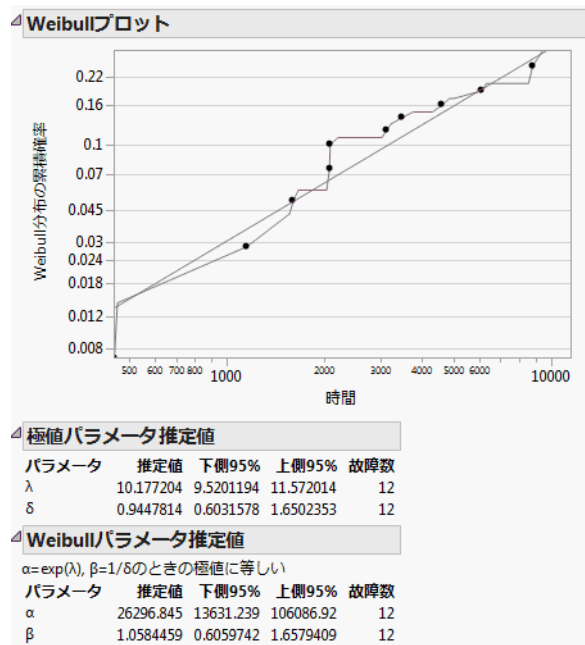
1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「Fan.jmp」を開きます。
2. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [生存時間分析] を選択します。
3. 「時間」を [Y, イベントまでの時間] に指定します。
4. 「打ち切りの有無」を [打ち切り] に指定します。
5. [生存率のかわりに故障率をプロット] チェックボックスをオンにします。
6. [OK] をクリックします。

図13.8 「Fan」データのレポート



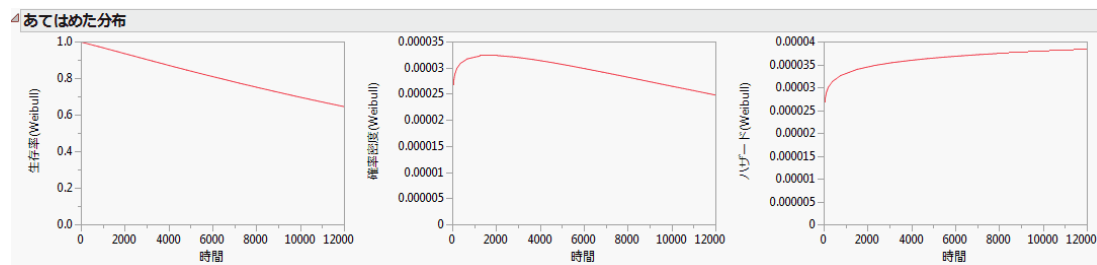
故障率（累積故障確率）は時間の経過につれて高くなっています。通常は、この次に Weibull 分布などをあてはめ、検討します。赤い三角ボタンのメニューから [Weibull プロット] と [Weibull のあてはめ] を選択します。

図13.9 「Fan」データのWeibullプロット



Weibull分布はデータに良くあてはまっており、また、Betaの推定値が1に近いので、瞬間故障率（ハザード）が一定な指数分布にデータは従っていると思われます。赤い三角ボタンのメニューから【あてはめた分布のグラフ】を選択します。あてはめたWeibull分布に基づく3種類のグラフが表示されます。

図13.10 あてはめた分布のグラフ



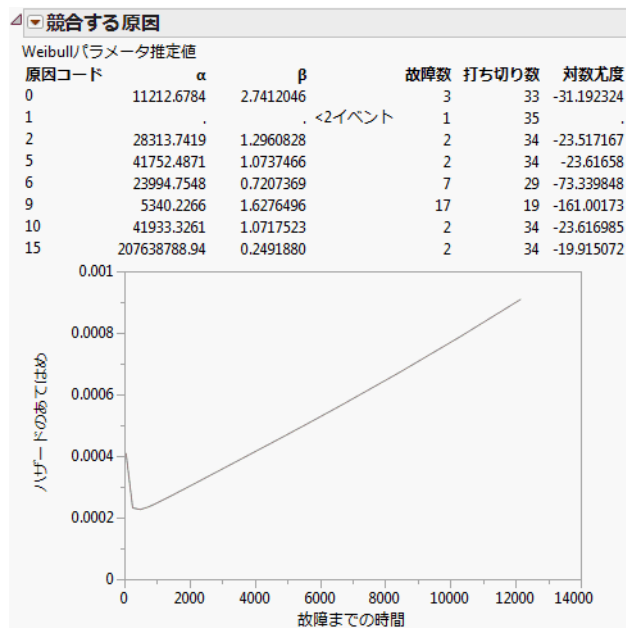
## 競合原因分析の例

Nelson (1982) は、複数の故障原因がある小さな電気製品の故障時間について分析を行いました。「Appliance.jmp」サンプルデータは、このうち、あるグループ（グループ2）だけのデータをまとめたものです。

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「Appliance.jmp」を開きます。

2. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [生存時間分析] を選択します。
3. 「故障までの時間」を[Y, イベントまでの時間]に指定します。
4. [OK] をクリックします。
5. 赤い三角ボタンのメニューから[競合する原因]を選択します。
6. 「原因コード」を選択し、[OK] をクリックします。
7. 「競合する原因」の横の赤い三角ボタンをクリックし、メニューから[ハザードプロット]を選択します。

図13.11 「競合する原因」レポートとハザードプロット

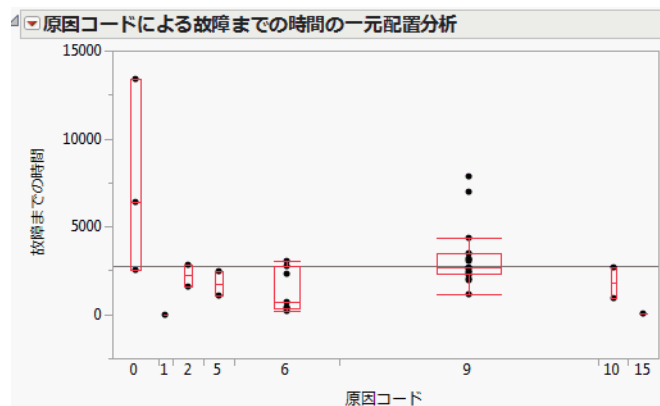


システム全体の生存時間分布は、各故障原因の生存率の積で表わされます。「競合する原因」表には、各故障原因ごとの、Weibull 分布パラメータ ( $\alpha$  と  $\beta$ ) の推定値が表示されます。

この例では、一番多い故障の原因が9であることがわかります。原因1は1回生じただけなので、適切な Weibull 推定値が計算されませんでした。原因15は非常に短い時間で生じたため、 $\alpha$  が大きく、 $\beta$  が小さくなっています。Weibull 分布の  $\alpha$  は尺度を表すパラメータで、累積故障確率が63.2%に達する故障時間に一致します。信頼性データ解析では、特性寿命とも言います。競合原因分析では、早い時点だけで故障が生じた原因は、 $\alpha$  が非常に大きくなります。このような原因による故障は、早い時点で生じなければ、それ以降で生じる可能性は低いと言えます。

図13.12は、「故障までの時間」と「原因コード」を「二変量の関係」でプロットして、分位点オプションを選択したものです。このプロットを見ると、 $\alpha$  と  $\beta$  がどのように故障時間分布に関連するかがわかります。

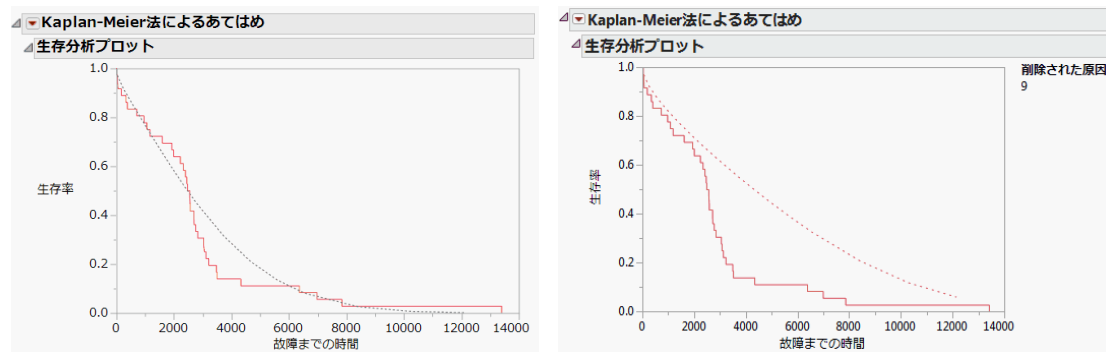
図13.12 「二変量の関係」で作成した「故障までの時間」と「原因コード」



この例では、一番多い故障の原因が9であることがわかります。原因9を除去した場合、他の原因による生存時間分布はどのような影響を受けるでしょうか。[原因の削除] オプションを選択して原因の値を削除し、生存率の推定値を再計算します。

図13.13は、競合する原因をすべて含めた生存時間プロットと原因9を除去した生存時間プロットです。原因9を除去したプロットを見ると、2,000時間までは生存率（点線）があまり改善されていませんが、その後は、10,000時間を超えても元のプロットよりずっと高い値を取り続けます。

図13.13 原因を削除したときの生存時間プロット



## 区間打ち切りの例

区間打ち切りのデータの場合、イベントが特定の時間範囲の間に起こったということしかわかりません。区間打ち切りデータの場合、生存関数のノンパラメトリックな推定値を計算するために、Turnbull法が使われます。

以下で紹介するNelson (1990, p. 147) のデータは、マイクロプロセッサのユニットを何度かにわたって検査し、故障しているユニットを数えたものです。いずれかの列に欠測値がある行は、上限または下限がわからず、イベントが右側または左側で打ち切られていることを示します。

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「Microprocessor Data.jmp」を開きます。
2. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [生存時間分析] を選択します。
3. 「開始時間」と「終了時間」を[Y, イベントまでの時間]に指定します。
4. 「カウント」を[度数]に指定します。
5. [生存率のかわりに故障率をプロット] チェックボックスをオンにします。
6. [OK] をクリックします。
7. 赤い三角ボタンをクリックし、メニューから[対数正規のあてはめ]を選択します。

図13.14 区間打ち切りのレポート



「組み合わせ」レポートにはTurnbull推定値が表示されています。生存率を推定できない時間範囲では、Turnbull推定値が抜けています。今回の例では6と12の間、24と48の間、48と168の間などがこれに該当します。

この例では対数正規分布をあてはめました。レポートには、その推定値が表示されています。なお、故障率プロットを見ると、データの故障率（累積故障確率）が非常に低いことがわかります。

## 生存時間分析の統計レポート

区間打ち切りでないデータの場合、初期状態のレポートには、「要約」と「分位点」のデータが表示されます（図13.15）。「要約」データには、グループごと（グループがある場合）、およびデータ全体に対する故障数と打ち切り数が表示されています。他には、打ち切りを考慮して計算した生存時間の平均と標準誤差があります。これらの統計量の計算方法については、『SAS/STAT User's Guide 14.3』（2017）を参照してください。

「分位点」データには、個々のグループごと、および、グループの組み合わせに対する生存時間（故障時間）に関する統計量が表示されています。これらの統計量としては、中央値時間（メディアン時間）と、その両側95%信頼区間の上限と下限も計算されています。「中央値時間」とは、ユニットや個体のうち半数が故障したときの時間です。また、四分位点（生存時間の25%および75%）も計算されます。

図13.15 一変量生存時間分析の要約統計量

Kaplan-Meier法によるあてはめ

イベントまでの時間: 生存日数

打ち切り変数: 打ち切りの有無

打ち切りの値 1

グループ変数: グループ

要約

グループ	故障数	打ち切り数	平均	標準誤差
Group 1	19	2	240.795	バイアスあり 11.206
Group 2	17	2	218.757	9.40318
組み合わせ	36	4	230.729	バイアスあり 7.57346

分位点

グループ	中央値時間	下側95%	上側95%	25%寿命	75%寿命
Group 1	233	232	280	232	280
Group 2	216	190	234	190	234
組み合わせ	232	213	239	201.5	261

「要約」レポートには、平均生存時間の推定値と、その標準誤差が表示されます。平均生存時間の推定値は、次の式で計算されます。

$$\hat{\mu} = \sum_{i=1}^D \hat{S}(t_{i-1})(t_i - t_{i-1})。また、標準誤差 \hat{\sigma}(\hat{\mu}) = \sqrt{\frac{m}{m-1} \sum_{i=1}^{D-1} \frac{A_i^2}{n_i(n_i - d_i)}} は、$$

$$\text{この式で、} \hat{S}(t_i) = \prod_{j=1}^i \left(1 - \frac{d_j}{n_j}\right), A_i = \sum_{j=i}^{D-1} \hat{S}(t_j)(t_{j+1} - t_j) \text{ および } m = \sum_{j=1}^D d_j \text{ です。}$$

$\hat{S}(t_i)$  は、時間  $t_i$  における生存率  
 $D$  は、イベントが発生した時間の時点数  
 $n_i$  は、 $t_i$  の直前に生存しているユニットの数  
 $d_i$  は、 $t_i$  において故障したユニットの数  
 なお、 $t_0$  は 0 と定義されています。

複数のグループがある場合、「グループ間での検定」表に、グループ間を比較する検定が表示されます。統計量や生存曲線の比較については、Kalbfleisch and Prentice (1980, ch. 1)、Hosmer and Lemeshow (1999, ch. 2)、Klein and Moeschberger (1997, ch. 7) で取り上げられています。

図13.16 グループ間での検定

グループ間での検定			
検定	カイ2乗	自由度	p値(Prob>ChiSq)
ログランク	3.1227	1	0.0772
Wilcoxon	2.6510	1	0.1035

**検定** 「すべてのグループの生存関数が同じである」という帰無仮説に対する2つの統計的検定。

**カイ2乗** 統計的検定のためのカイ2乗近似。

「ログランク」検定は、長い生存時間に対して、より大きな重みを置く検定で、比較されるグループのハザード関数の比がほぼ一定である場合に適しています。「ハザード」とは、ある特定の時点における瞬間故障率を指し、**死亡率** (mortality rate)、**死力** (force of mortality) とも呼ばれます。

「Wilcoxon」検定は、短い生存時間に対して、より大きな重みを置く検定で、誤差がロジスティック分布に従っている場合に最適な順位検定です。Kalbfleisch and Prentice (1980) を参照してください。

**自由度** 統計的検定の自由度。

**p値(Prob>ChiSq)** 生存関数がすべてのグループで同じであるという仮定のもとで、カイ2乗値が現在の値よりも大きくなる確率。

図13.17は、あるグループにおけるKaplan-Meier法による生存率の推定を行った結果です。

図 13.17 「生存率の推定」表の例

Group 1						
生存日数	生存率	故障率	生存標準誤差	故障数	打ち切り数	リスク集合の大きさ
0.000	1.0000	0.0000	0.0000	0	0	21
142.000	0.9524	0.0476	0.0465	1	0	21
156.000	0.9048	0.0952	0.0641	1	0	20
163.000	0.8571	0.1429	0.0764	1	0	19
198.000	0.8095	0.1905	0.0857	1	0	18
204.000	0.8095	0.1905	0.0857	0	1	17
205.000	0.7589	0.2411	0.0941	1	0	16
232.000	0.6577	0.3423	0.1053	2	0	15
233.000	0.4554	0.5446	0.1114	4	0	13
239.000	0.4048	0.5952	0.1099	1	0	9
240.000	0.3542	0.6458	0.1072	1	0	8
261.000	0.3036	0.6964	0.1031	1	0	7
280.000	0.2024	0.7976	0.0902	2	0	6
296.000	0.1012	0.8988	0.0678	2	0	4
323.000	0.0506	0.9494	0.0493	1	0	2
344.000	0.0506	0.9494	0.0493	0	1	1

メモ: 最後に記録された時間が打ち切りデータである場合、レポートの平均推定値はバイアス（偏り）をもち、過小評価されます。

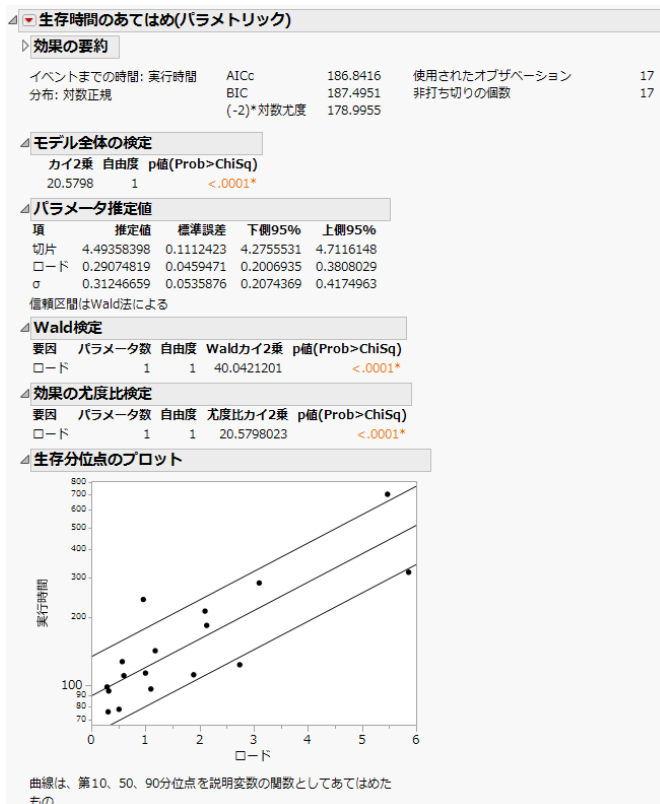
# 第14章

## 生存時間(パラメトリック)のあてはめ 生存時間データに回帰モデルをあてはめる

生存時間の確率分布が説明変数の関数として表せるときは、「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」プラットフォームを用いると良いでしょう。このプラットフォームでは、打ち切りを考慮しながら、生存時間の分布に対して回帰モデルをあてはめます。生存時間の確率分布における位置パラメータおよび尺度パラメータに対して、回帰モデルを指定できます。生存時間の分布としては、Weibull分布・対数正規分布・指数分布・Fréchet分布・対数ロジスティック分布・最小極値分布・正規分布・最大極値分布・ロジスティック分布が用意されています。

メモ:「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」は、「モデルのあてはめ」を若干カスタマイズしたものです。なお、「非線形回帰」プラットフォームでも、パラメトリックな生存時間モデルをあてはめることができます。

図14.1 「生存時間 (パラメトリック) のあてはめ」の例



## 目次

「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」プラットフォームの概要	349
「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」の例	349
「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」プラットフォームの起動	351
「生存時間のあてはめ(パラメトリック)」レポート	353
「パラメトリックな生存時間分析 - すべての分布」レポート	354
「パラメトリックな競合原因分析」レポート	355
「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」のオプション	356
「非線形回帰」プラットフォームによる分析	357
「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」の別例	358
Arrhenius加速寿命の対数正規モデル	358
区間打ち切りデータに対する加速故障時間モデル	361
「非線形回帰」プラットフォームでの打ち切りデータの分析	363
左側打ち切りデータの分析例	364
「非線形回帰」プラットフォームでのWeibull回帰モデル	365
「非線形回帰」プラットフォームでの単純な生存時間分布のあてはめ	368
「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」プラットフォームの統計的詳細	370
生存時間分布の損失計算式	370

---

## 「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」プラットフォームの概要

生存時間の確率分布が説明変数の関数として表せるときは、「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」プラットフォームを用いると良いでしょう。このプラットフォームでは、打ち切りを考慮しながら、生存時間の分布に対して回帰モデルをあてはめます。生存時間の確率分布における位置パラメータおよび尺度パラメータに対して、回帰モデルを指定できます。生存時間の分布としては、Weibull分布・対数正規分布・指数分布・Fréchet分布・対数ロジスティック分布・最小極値分布・正規分布・最大極値分布・ロジスティック分布が用意されています。

---

## 「生存時間（パラメトリック）のあてはめ」の例

「Comptime.jmp」サンプルデータは、コンピュータプログラムの実行時間を調査したデータです。実行時間の対数正規分布が効果「ロード」に依存していると仮定して分析を行います。

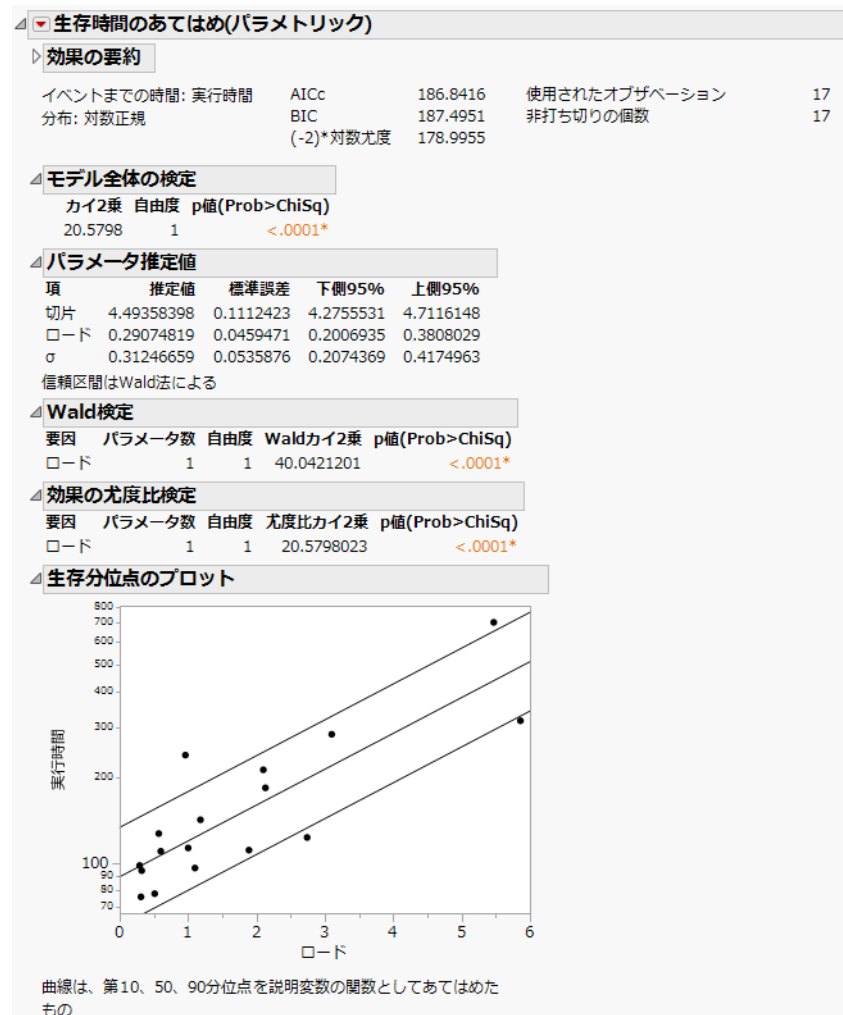
---

メモ：「Comptime.jmp」のデータは、Meeker and Escobar (1998 p. 434) から引用したものです。

---

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「Comptime.jmp」を開きます。
2. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [生存時間(パラメトリック)のあてはめ] を選択します。
3. 「実行時間」を選択し、[イベントまでの時間] をクリックします。
4. 「ロード」を選択し、[追加] をクリックします。
5. 「分布」を [Weibull] から [対数正規] に変更します。
6. [実行] をクリックします。

図14.2 「Comptime」のレポート



効果が1つしかないときのプロットには、3つの生存率に対応する生存時間の分位点が、効果の関数として表示されます。

システムのロードが5で、ジョブが90%完了したときの時間分位点を求めてみましょう。この計算の詳細については、Meeker and Escobar (1998, p. 438) を参照してください。

- 赤い三角ボタンのメニューから「時間分位点の推定」を選択します。
- 「ロード」として「5」と入力します。
- 「生存率」として「0.1」と入力します。
- 「実行」をクリックします。

図14.3 時間分位点の推定値

時間分位点の推定値				
ロード	生存率	時間	下側95%	上側95%
5	0.1	571.21576	401.29076	813.09483

システムのロードが5の場合、実行時間571秒でジョブの90%が完了すると推定されます。

## 「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」プラットフォームの起動

「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」プラットフォームを起動するには、[分析] > [信頼性/生存時間分析] > [生存時間(パラメトリック)のあてはめ] を選択します。

図14.4 「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」の起動ウィンドウ

The screenshot shows the 'モデルの指定' (Model Specification) window. It is divided into several sections:

- 列の選択** (Column Selection): A list of variables including 'ユーザー' (User), 'ロード' (Load), and '実行時間' (Execution Time). 'ロード' is selected.
- 役割変数の選択** (Role Variable Selection): A list of roles including 'イベントまでの時間' (Time to event), '実行時間' (Execution time), 'オプション' (Option), '度数' (Degree), '打ち切り' (Censoring), '原因' (Cause), and 'By'. '実行時間' is selected.
- 手法** (Method): A dropdown menu set to '生存時間(パラメトリック)' (Survival time (parametric)).
- 分布** (Distribution): A dropdown menu set to '対数正規' (Log-normal).
- 打ち切りの値** (Censoring value): A text input field.
- ヘルプ** (Help) and **実行** (Execute) buttons.
- 前回の設定** (Previous settings) checkbox and **ダイアログを開いたままにする** (Keep dialog open) checkbox.
- 削除** (Delete) button.
- モデル効果の構成** (Model effect composition): A section with tabs for '位置の効果' (Location effect) and '尺度の効果' (Scale effect). Under '位置の効果', there are buttons for '追加' (Add), '交差' (Interaction), '検分かれ' (Detection), and 'マクロ' (Macro). A '度数' (Degree) input field is set to 2. A '属性' (Attribute) dropdown is set to '変換' (Transformation). A '切片なし' (No intercept) checkbox is present.

ヒント: 有意水準を変更するには、赤い三角ボタンをクリックし、[有意水準の設定] を選択します。

「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」起動ウィンドウには、次のオプションがあります。

**イベントまでの時間** イベントが発生するまでの時間、または打ち切りまでの時間を含んだ列を指定します。区間打ち切りデータの場合は、上限と下限として2つのY変数を指定します。

**打ち切り** 右側で打ち切られているかどうかを示すデータ値を含んだ列を指定します。[打ち切りの値]において右側打ち切りを意味するデータ値を選択してください。[打ち切り]列は、[イベントまでの時間]に列を1つだけ指定した場合にのみ使用できます。

**度数** 同時点で故障したユニットの個数など、観測値の度数が含まれている列を指定します。

**原因** 複数の故障原因が含まれた列を指定します。この列を指定すると、競合原因 (competing causes) の分析が行われます。原因の値ごとに個別にパラメトリックのあてはめが行われます。故障原因を示すデータ値は数値でも文字値でもかまいません。

**By** 指定された分類変数 (グループ変数) の水準ごとに、個別に分析を行います。

**位置の効果と尺度の効果** これらのオプションを使用して、位置パラメータと尺度パラメータに対する効果を指定します。「モデル効果の構成」のオプションの詳細については、『基本的な回帰モデル』の「モデルの指定」章を参照してください。

**手法** あてはめ方法を指定します。この章の分析を行う場合には、必ず [生存時間(パラメトリック)] を選択してください。

**分布** データにあてはめたい確率分布を選択します。なお、[すべての分布] オプションを選択すると、用意されているすべての分布があてはめられ、各分布の適合度が計算されます。[すべての分布] オプションを選択すると、レポートに分布のあてはまりの比較が表示されます。「[「パラメトリックな生存時間分析 - すべての分布」レポート](#)」(354ページ) を参照してください。

---

**メモ:** [すべての分布] オプションを使用した場合、デフォルトでは、「分布」メニューで [すべての分布] より上にリストされている対数-位置-尺度型の確率分布があてはめられます。[すべての分布] オプションの動作を変更して位置-尺度型の確率分布も含めるには、[環境設定] > [プラットフォーム] > [生存時間(パラメトリック)のあてはめ] > [[すべての分布] に位置尺度分布も含める] を選択してください。

---

**打ち切りの値** [打ち切り] 列のデータ値のうち、右側打ち切りであることを示すデータ値を指定します。[打ち切り] 列を選択すると候補となるデータ値が、自動的にコンボボックスに表示されます。データ値を変更するには、赤い三角ボタンをクリックして、値のリストから選択してください。テキストボックスに値を入力することもできます。[打ち切り] 列に「値ラベル」列プロパティが設定されている場合、その値ラベルがコンボボックスに表示されます。なお、[打ち切り] 列が欠測値となっている行は、分析から除外されます。

## 「生存時間のあてはめ(パラメトリック)」レポート


起動ウィンドウで「すべての分布」を選択した場合、各確率分布に対する結果が表示されます。起動ウィンドウで「原因」に列を指定した場合、各原因に対する結果が表示されます。そうでない場合は、1つの結果だけが表示されます。これらの「生存時間のあてはめ(パラメトリック)」のレポートには、次のような結果が含まれます。

**効果の要約** モデルへの効果の追加や削除ができる対話式の「効果の要約」レポートを表示します。『基本的な回帰モデル』の「標準最小2乗」章を参照してください。

**モデルのあてはめの詳細** 「イベントまでの時間」には、指定したY列の名前、「分布」には、あてはめられた確率分布の名前が表示されます。「AICc」・「BIC」・「(-2)\*対数尤度」はすべて、モデルの適合度に関する指標です。これらの統計量を参考にして、他のモデルと適合度を比較できます。その右側には、「使用されたオブザベーション」と「非打ち切りの個数」が表示されます。

**モデル全体の検定** この検定は、すべての説明変数を含むモデルをあてはめた場合と、切片項だけのモデルをあてはめた場合を比較します。切片項だけのモデルに対する結果は、「生存時間分析」プラットフォームと同じ結果になります。

**パラメータ推定値** 回帰パラメータの推定値を表示します。

 「パラメータ推定値」表の下に、「一般化回帰」プラットフォームを起動できるリンクが表示されます。このリンクは、次のような場合に表示され、「一般化回帰」プラットフォームを使って変数の選択を実行することができます。

- モデルに尺度効果がない場合
- 起動ウィンドウで「原因」に列を指定しなかった場合
- 起動ウィンドウの「分析」で、「正規」・「対数正規」・「Weibull」を指定した場合

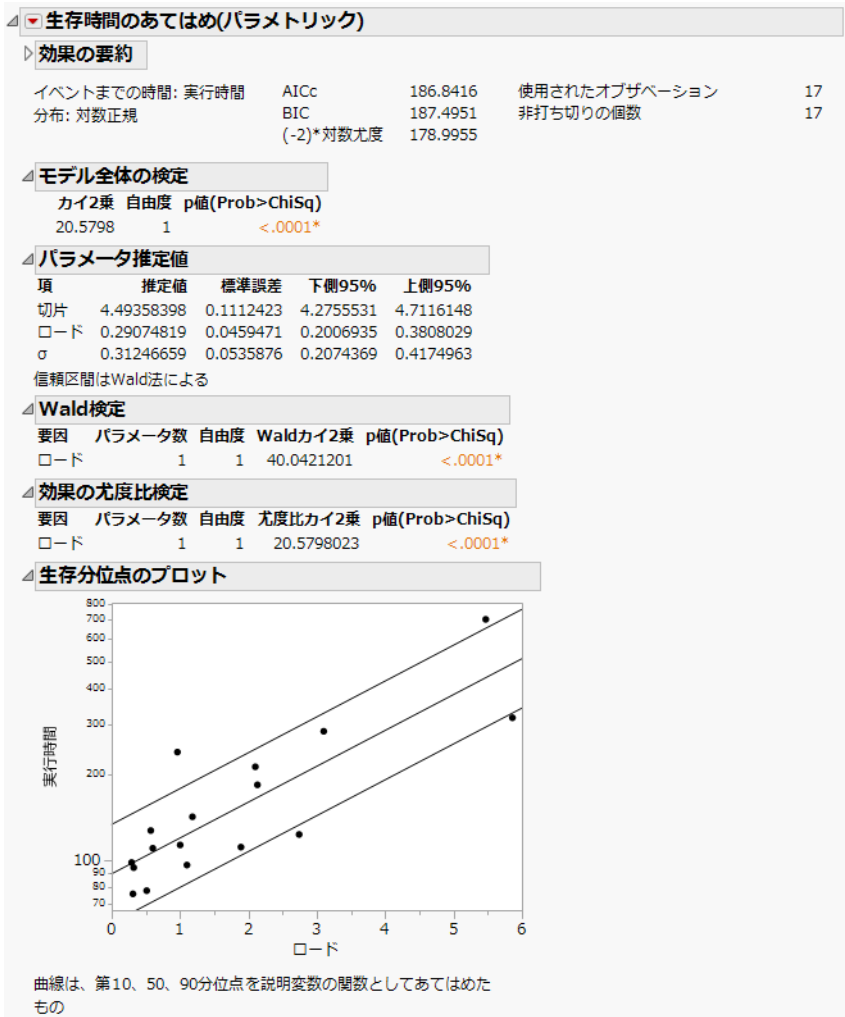
**代替パラメトリック化** (Weibull分布をあてはめたときだけ表示されます) Weibull分布の $\alpha$ および $\beta$ で表現したときのパラメータ推定値を示します。このパラメータ表現の詳細については、「寿命の一変量」章の「Weibull」(81ページ)を参照してください。

**Wald検定** モデルに含まれた項のWald検定のカイ2乗統計量を表示します。

**効果の尤度比検定** あてはめたモデルの対数尤度が、モデルから各項を削除したときの対数尤度と比較されます。

**生存分位点のプロット** データ点と、0.1、0.5、0.9における分位点を表示します。

図14.5 「生存時間のあてはめ(パラメトリック)」レポート



## 「パラメトリックな生存時間分析 - すべての分布」レポート

「パラメトリックな生存時間分析 - すべての分布」レポートは、起動ウィンドウで「すべての分布」を選択した場合にのみ表示されます。デフォルトでは、このレポートには「モデルの比較」レポートと「分布関数の重ね合わせ」プロットが表示されます。「分位点関数の重ね合わせ」プロットは、「パラメトリックな生存時間分析 - すべての分布」アウトラインの赤い三角ボタンのメニューから選択して表示できます。

**モデルの比較** あてはめた確率分布のモデル選択規準統計量（AICcとBIC）をリストした表。右端の列のラベルを見ると、AICcやBICが最小である確率分布がわかります。AICcとBICの両方が最小である確率分布には、「最良」と表示されます。デフォルトでは、最小のAICcを持つ確率分布に対応する「生存時間

のあてはめ(パラメトリック)」レポートが表示されます。これらの統計量の情報については、『基本的な回帰モデル』の付録「統計的詳細」を参照してください。

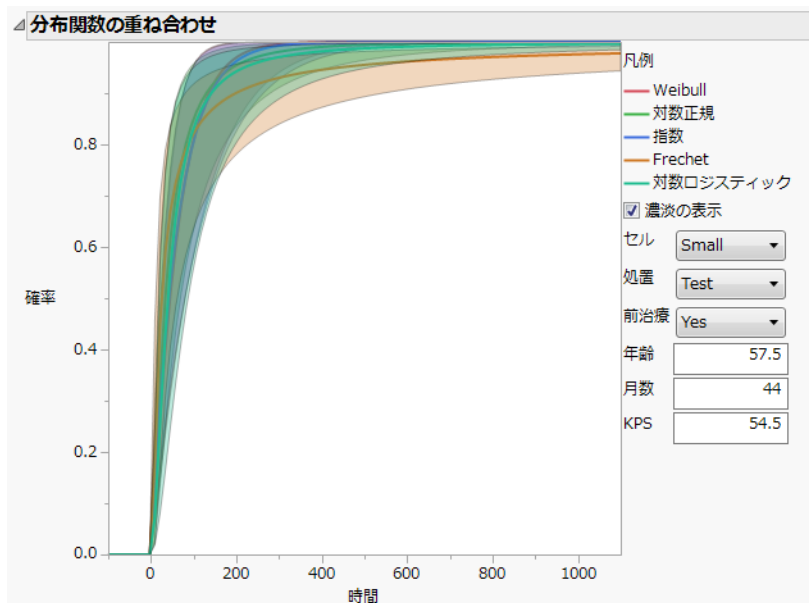
**分布関数プロットの重ね合わせ** 効果が指定した値となっているときの累積分布関数を重ね合わせたプロット。

**分位点関数の重ね合わせ** 効果が指定した値となっているときの分位点関数を重ね合わせたプロット。

「分布関数プロットの重ね合わせ」と「分位点関数の重ね合わせ」はどちらも、あてはめられた各確率分布の曲線を同じグラフに重ね合わせて表示したものです。デフォルトでは、各曲線に対して、Wald 法による信頼区間が濃淡で表示されます。プロットの右横には、凡例、信頼区間の濃淡を表示するオプション、効果の異なる値を指定するためのコントロールがあります。図14.6は、「分布関数プロットの重ね合わせ」の例です。

**メモ:**「モデルのあてはめ」起動ウィンドウの赤い三角ボタンメニューから「 $\alpha$ 水準の設定」を選択して、信頼区間の $\alpha$ 水準を変更することができます。デフォルトの $\alpha$ 水準は0.05です。

図14.6 「分布関数プロットの重ね合わせ」



## 「パラメトリックな競合原因分析」レポート

起動ウィンドウで「原因」に列を指定した場合、「パラメトリックな競合原因分析」レポートが表示されます。起動ウィンドウでさらに「すべての分布」も選択した場合は、このレポートが「パラメトリックな競合原因分析 - すべての分布」というタイトルになります。「パラメトリックな競合原因分析」レポートは、次のような要素で構成されます。

**原因ごとの要約** 原因ごとのモデル選択規準統計量（AICcとBIC）をリストした表。起動ウィンドウの「分布」オプションで「すべての分布」を選択した場合は、あてはめた確率分布ごとの各原因の適合度統計量が表示されます。

**モデルの比較**（起動ウィンドウの「分布」オプションで「すべての分布」を選択した場合のみ有効）あてはめた分布のモデル選択規準統計量（AICcとBIC）をリストした表。右端の列のラベルを見ると、AICcやBICが最小である分布がわかります。AICcとBICの両方が最小である分布には、「最良」と表示されます。デフォルトでは、最小のAICcを持つ分布に対応する「生存時間のあてはめ(パラメトリック)」レポートが表示されます。

AICcおよびBIC統計量の詳細については、『基本的な回帰モデル』の付録「統計的詳細」を参照してください。

---

## 「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」のオプション

「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」の赤い三角ボタンをクリックすると、次のようなオプションが表示されます。

**尤度比検定** あてはめたモデルの対数尤度が、モデルから各項を削除したときの対数尤度と比較されます。

**Wald 検定** 各パラメータが0かどうかを調べるWald 検定のカイ2乗値と $p$ 値を算出します。

**尤度信頼区間** 各パラメータの「パラメータ推定値」表に表示される信頼区間のタイプを切り替えます。このオプションを選択するとプロファイル尤度法による信頼区間が表示され、選択を解除するとWald法による信頼区間が表示されます。信頼区間のタイプは「パラメータ推定値」表の下に表示されます。プロファイル尤度法による信頼区間の計算時間が長くなる場合を除き、このオプションはデフォルトで選択されません。

---

**メモ:**「モデルのあてはめ」起動ウィンドウの赤い三角ボタンメニューから「 $\alpha$ 水準の設定」を選択して、信頼区間の $\alpha$ 水準を変更することができます。デフォルトの $\alpha$ 水準は0.05です。

---

**推定値の相関** パラメータ推定値の相関行列を表示します。パラメータには、各効果に対する回帰パラメータと、分布の形状パラメータがあります。

**推定値の共分散** パラメータ推定値の共分散行列を表示します。パラメータには、各効果に対する回帰パラメータと、分布の形状パラメータがあります。

**生存率の推定** モデル効果の値と、1つ以上の時間の値を指定します。生存率と故障率（累積故障確率）、およびその95%信頼区間が、入力した値のすべての組み合わせに対して計算されます。

**時間分位点の推定** モデル効果の値と、1つ以上の生存率の値を指定します。時間分位点とその95%信頼区間が、入力した値のすべての組み合わせに対して計算されます。

---

**メモ:**「生存率の推定」オプションと「時間分位点の推定」オプションについては、有意水準をデフォルトの0.05から変更できます。

---

**残差確率プロット** 標準化した残差の確率プロットを表示します。

**残差の保存** データテーブルに新しい列を追加し、残差を保存します。区間打ち切りの観測値の場合、残差が2列、データテーブルに保存されます。

**分布プロファイル** 個々の説明変数と応答変数に対して、故障率（累積故障確率）の応答曲面を描きます。

**分位点プロファイル** 説明変数と故障率（累積故障確率）に対して、応答変数の応答曲面を描きます。

**水準の組み合わせごとの分布プロット** モデルのあてはめを評価するための3つの確率プロットを表示します。プロットには、X水準の組み合わせごとに異なる線が表示されます。

**別々の位置** 尺度パラメータが同じで、位置パラメータが異なるモデルの確率プロットを表示します。平行性の仮定を評価するのに役立ちます。

**別々の位置と尺度** 尺度パラメータと位置パラメータの両方が異なるモデルの確率プロットを表示します。選択した確率分布がデータに適合しているどうかを評価するのに役立ちます。指数分布では、このプロットは表示されません。

**回帰** 分布パラメータがX変数の関数となっているモデルの確率プロットを表示します。

**確率の計算式の保存** データテーブルに新しい列を追加し、確率の推定値の計算式を保存します。

**分位点の計算式の保存** データテーブルに新しい列を追加し、分位点の推定値の計算式を保存します。このオプションを選択すると、求めたい分位点の累積確率値を入力するためのダイアログボックスが表示されます。

**モデルダイアログ** 起動ウィンドウを再度開きます。

**効果の要約** モデルに効果を追加または削除できる、対話式の「効果の要約」レポートを表示します。『基本的な回帰モデル』の「標準最小2乗のレポートとオプション」章を参照してください。

---

## 「非線形回帰」プラットフォームによる分析

次のような場合には、「生存時間(パラメトリック)」では分析できません。「非線形回帰」プラットフォームを用いてください。

- モデルが非線形である場合
- Weibull 分布・対数正規分布・指数分布・Frechet 分布・対数ロジスティック分布・最小極値分布・正規分布・最大極値分布・ロジスティック分布以外の分布を仮定する場合
- 通常の右側打ち切り・左側打ち切り・区間打ち切りとは違う特殊な打ち切りがある場合

「非線形回帰」プラットフォームは、指定した損失関数に基づくパラメータ推定ができることから、さまざまなモデルを最尤推定できます。「非線形回帰」プラットフォームの詳細については、『予測モデルおよび発展的なモデル』の「非線形回帰」章を参照してください。

打ち切りのあるデータに非線形モデルをあてはめるには、まず、計算式エディタにおいて、パラメータを含む損失関数の計算式を定義します。この時、打ち切りデータに対しては、それに適した式を定義します。次に、「非線形回帰」プラットフォームを使用して、最尤法でパラメータを推定します。

---

## 「生存時間 (パラメトリック) のあてはめ」の別例

- 「Arrhenius 加速寿命の対数正規モデル」
- 「区間打ち切りデータに対する加速故障時間モデル」
- 「「非線形回帰」プラットフォームでの打ち切りデータの分析」
- 「左側打ち切りデータの分析例」
- 「「非線形回帰」プラットフォームでの Weibull 回帰モデル」
- 「「非線形回帰」プラットフォームでの単純な生存時間分布のあてはめ」

### Arrhenius 加速寿命の対数正規モデル

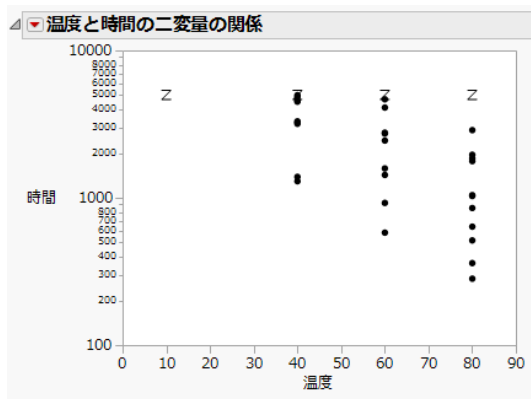
「DevAlt.jmp」サンプルデータは、加速寿命試験のデータです。通常の使用条件だと故障が非常に起こりにくい場合、通常の寿命試験のデータからは分布を推定できません。そこで、加速寿命試験では、早く故障するようにユニットに通常より強めのストレスを与えます。ここでは、熱を与えています。

---

メモ: この「DevAlt.jmp」サンプルデータは、Meeker and Escobar (1998, p. 493) から引用したものです。

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「DevAlt.jmp」を開きます。  
まず、「二変量の関係」プラットフォームを使い、「時間」を対数軸にして、「時間」と「温度」のプロットを作成します。
2. [分析] > [二変量の関係] を選びます。
3. 「時間」を選択し、[Y, 目的変数] をクリックします。
4. 「温度」を選択し、[X, 説明変数] をクリックします。
5. [OK] をクリックします。

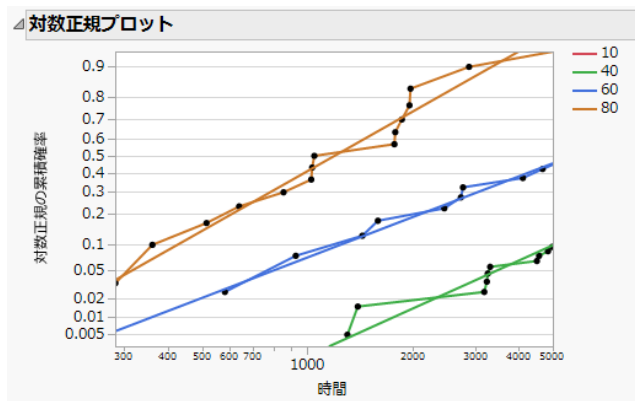
図14.7 「温度と時間の二変量の関係」プロット



次に、生存時間分析を行い、温度の値ごとに対数正規プロットを作成します。

6. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [生存時間分析] を選択します。
7. 「時間」を[Y, イベントまでの時間]に指定します。
8. 「打ち切りの有無」を[打ち切り]に指定します。
9. 「温度」を[グループ変数]に指定します。
10. 「重み」を[度数]に指定します。
11. [OK] をクリックします。
12. 赤い三角ボタンのメニューから[対数正規プロット]と[対数正規のあてはめ]を選択します。
13. [OK] をクリックします。

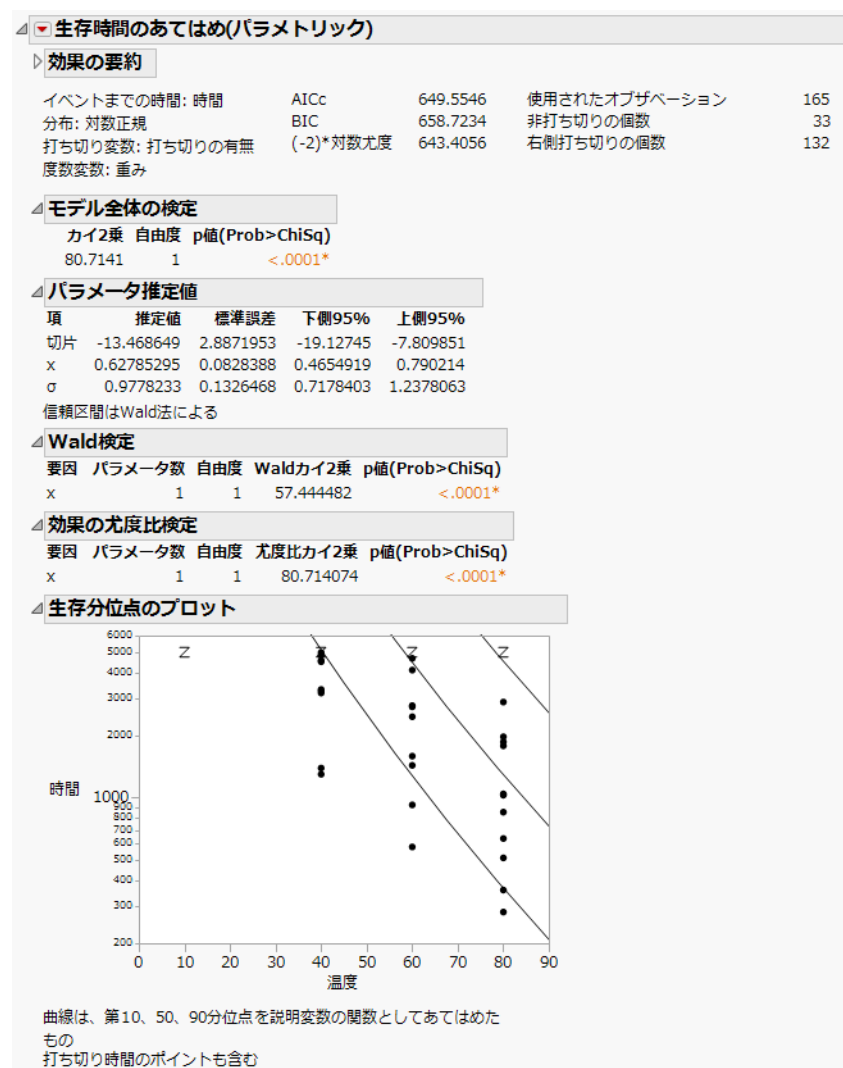
図14.8 対数正規プロット



次に、「生存時間 (パラメトリック) のあてはめ」プラットフォームで、温度の効果を使ってモデルをあてはめます。

14. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [生存時間(パラメトリック)のあてはめ] を選択します。
15. 「時間」を [イベントまでの時間] に指定します。
16. 「x」を選択し、[追加] をクリックします。
17. 「打ち切りの有無」を [打ち切り] に指定します。
18. 「重み」を [度数] に指定します。
19. 「分布」を [対数正規] に変更します。
20. [実行] をクリックします。

図14.9 「Devait」の生存時間のあてはめ (パラメトリック) レポート



回帰によるあてはめのレポートが表示されます。

- 効果が1つしかなく、それが連続尺度である場合、生存時間の分位点を効果の関数として表したプロットが作成され、生存率が0.1、0.5、0.9である分位点を示す線が表示されます。
- この例のように、効果の列にある計算式が別の列から成る場合、その列を考慮してプロットが作成されます。「Devalt」データの効果は「x」列ですが、「x」は「温度」の関数であるため、「温度」がプロットされます。

最後に、30000時間と10000時間に対し、温度を「10」度にした場合の生存率の推定値を計算します。

21. 赤い三角ボタンのメニューから【生存率の推定】を選択します。

22. 「生存率推定パネル」に図14.10のように値を入力します。

「x」に「40.9853」（温度に10に相当）を、「時間」に「10000」および「30000」を代入します。

図14.10 生存率の推定

**生存率推定パネル**

値を入力して[実行]をクリックします。

x	時間	Alpha
40.9853	30000	0.0500
.	10000	.
.	.	.
.	.	.
.	.	.
.	.	.
.	.	.
.	.	.
.	.	.

**実行**

23. 【実行】をクリックします。

図14.11 生存率

生存率の推定値					
x	時間	故障率	下側95%	上側95%	生存率
40.9853	30000	0.0227781	0.002432	0.118393	0.9772219
40.9853	10000	0.0008951	4.353e-5	0.0101183	0.9991049

「生存率の推定値」レポートには、推定値と信頼区間が表示されます。

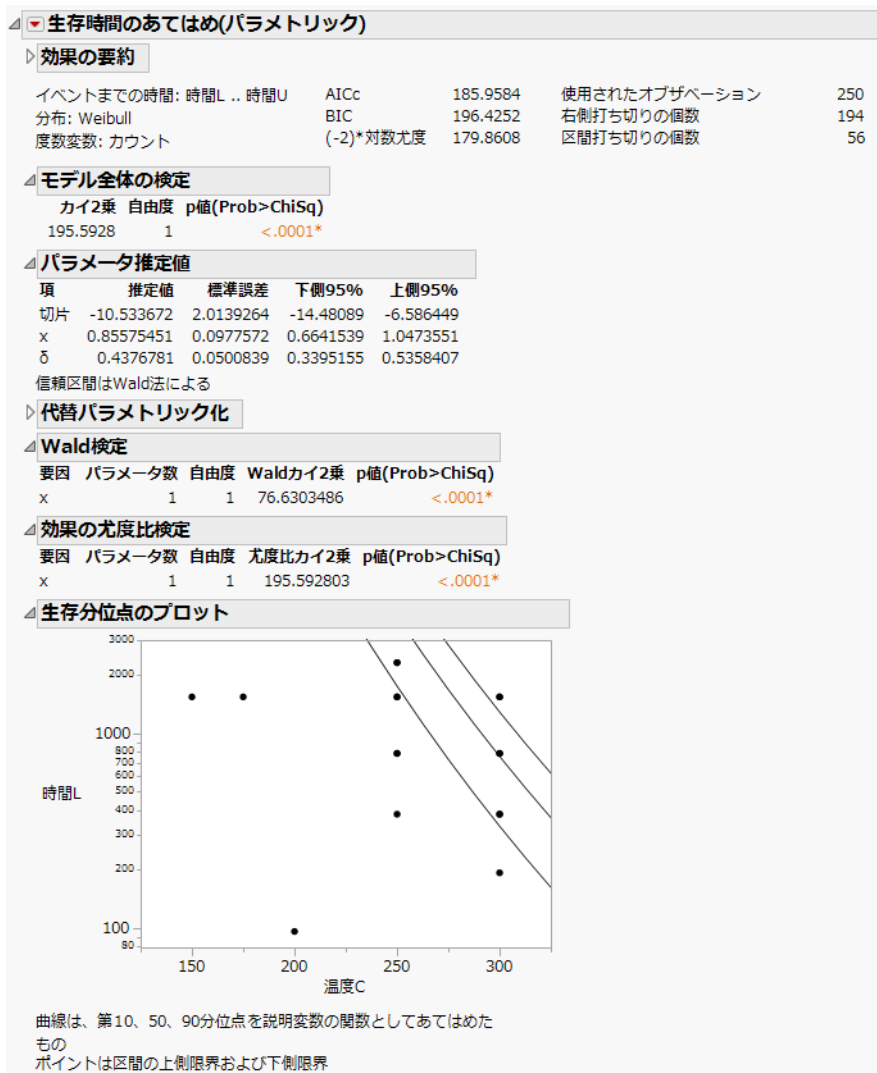
## 区間打ち切りデータに対する加速故障時間モデル

「ICdevice02.jsp」サンプルデータを取り上げて、区間打ち切りの例を見てみましょう。データには、各区間の下限と上限を表す2つのY変数があります。上限が欠測値になっている行は、右側打ち切りデータです。

メモ: この「ICdevice02.jsp」サンプルデータは、Meeker and Escobar(1998; p. 640)から引用したものです。

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「ICdevice02.jmp」を開きます。
2. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [生存時間(パラメトリック)のあてはめ] を選択します。
3. 「時間L」と「時間U」を[イベントまでの時間]に指定します。
4. 「カウント」を[度数]に指定します。
5. 「x」を選択し、[追加]をクリックします。
6. [実行]をクリックします。

図14.12 「ICDevice02」のレポート



回帰モデルを推定した結果と、時間と温度のプロットが表示されます。

## 「非線形回帰」プラットフォームでの打ち切りデータの分析

この節では、「非線形回帰」プラットフォームを用いて、左側打ち切りデータを分析する一例を紹介します。この例では、潜在的にはゼロ以下の応答が、データではゼロと観測されています。

**メモ:** 応答がゼロ以上の値しかとらず、ゼロで打ち切られているモデルは、Tobit (トービット) モデルと呼ばれており、経済学で広く使われています。

「Tobit2.jmp」サンプルデータには、次のような特徴があります。

- 応答変数(「耐用期間」)は、製品の耐用期間を示し、0より小さくなることはありません。つまり、0で左側打ち切りになっています。
- 「年齢」と「流動性」は説明変数です。
- データテーブルにはその他に、「モデル」と「Tobit 損失関数」という列があります。「モデル」列は残差を表しており、「耐用期間  $-(b_0 + b_1 * \text{年齢} + b_2 * \text{流動性})$ 」という式が含まれています。また、「Tobit 損失関数」の計算式は、列を右クリックして「計算式」を選択して見てください。

次の手順を行います。

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「Tobit2.jmp」を開きます。
2. [分析] > [発展的なモデル] > [非線形回帰] を選択します。
3. 「モデル」を [X, 予測式列] に指定します。
4. 「Tobit 損失関数」を [損失] に指定します。
5. [OK] をクリックします。
6. [実行] をクリックします。
7. [信頼限界] をクリックします。

図14.13 「解」レポート

解				
	損失	DFE	平均損失	平均損失平方根
	28.92596097	16	1.8078726	1.3445715
パラメータ	推定値	近似標準誤差	下側信頼限界	上側信頼限界
b0	15.277120063	16.0327167	-22.059913	54.7012259
b1	-0.134007501	0.21893135	-0.7365041	0.32841861
b2	-0.045135584	0.05826851	-0.1858906	0.09330941
Sigma	5.5693492202	1.72814365	3.31613117	11.5291865
解法: 解析 NR				
▷ 推定値の相関				

## 左側打ち切りデータの分析例

前節のTobitモデルは、ゼロで打ち切られた正規分布を仮定しています。データ値がゼロとなっている行は、左側打ち切りになっていると考えられます。前項では「非線形回帰」プラットフォームを追加しましたが、Tobitモデルは「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」プラットフォームでもあてはめることができます。それには2つのY列によって左打ち切りであることを表します。ここでの例では、まず、先ほどのデータテーブルに対して左側打ち切りを示す新しい列を追加します。その追加する新しい列は、左側打ち切りを示すデータ行には欠測値を含み、それ以外のデータ行には「耐用期間」の観測値を含むようにします。このようにデータを作成すれば、新しく追加した列を区間打ち切りの区間の下限に、既存の「耐用期間」の列を区間の上限として使うことができます

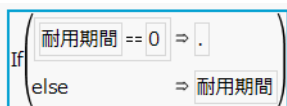
1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「Tobit2.jmp」を開きます。

### 左側打ち切りの列の作成

2. [列] > [列の新規作成...] を選択します。
3. 「列名」に「durable0」と入力します。
4. [列プロパティ] を選択して、[計算式] をクリックします。
5. [条件付き] > [If] を選択し、「耐用期間」を選択します。
6. [比較] > [a == b] を選択してから0と入力し、Enterキーを押します。
7. 「else節」と表示されたボックスを選択し、「耐用期間」を選択します。

完成した数式は次のように表示されます。

図14.14 「durable0」の列式



8. [OK] をクリックします。
9. [OK] をクリックします。

### Tobitモデルのあてはめ

10. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [生存時間(パラメトリック)のあてはめ] を選択します。
11. 「durable0」を選択し、[イベントまでの時間] をクリックします。
12. 「耐用期間」を選択し、[イベントまでの時間] をクリックします。

2つの応答列を用いて、左側打ち切りの観測値を特定しなければなりません。[イベントまでの時間] の役割には、区間打ち切りの下限の列を最初に、区間打ち切りの上限の列を最後に指定してください。

13. 「年数」と「流動性」を選択し、[追加] をクリックします。
14. 「分布」を[正規]に変更します。
15. [実行] をクリックします。



図 14.16 「非線形回帰のあてはめ」設定パネルの初期パラメータ値

▼ 非線形回帰のあてはめ

予測式: モデル

▲ 設定パネル

勾配で収束しました

	基準	現在	停止限界
実行	反復	1	60
停止	目的関数変化	98.176266643	1e-15
ステップ	相対的な勾配	1.869125e-14	0.000001
リセット	勾配	2.403991e-13	0.000001

パラメータ	現在値	ロック	SSE	N
b0	3.9398815293	<input type="checkbox"/>	237.06333652	137
b1	0.0045053136	<input type="checkbox"/>		
b2	-0.012448139	<input type="checkbox"/>		

推定値の保存

信頼限界

αの編集: 0.050

収束基準: 0.00001

信頼限界のための目標SSE: .

▲ 解

	SSE	DFE	MSE	RMSE
	237.06333652	134	1.7691294	1.3300862

パラメータ	推定値	近似標準誤差
b0	3.9398815293	0.65130758
b1	0.0045053136	0.01082544
b2	-0.012448139	0.0107535

解法: 解析 Gauss-Newton

▶ 推定値の相関

モデルパラメータの最小2乗推定値が計算されます。

6. [推定値の保存] をクリックします。

この操作により、最小2乗推定されたパラメータ推定値が、列の計算式に保存されます。

「Weibull 損失関数」列には、Weibull分布の損失関数の計算式が指定されています（「Weibull 損失関数」(371 ページ)）。

最尤推定を行うには、次の手順に従います。

- もう一度、[分析] > [発展的なモデル] > [非線形回帰] を選択します。
- 「モデル」を [X, 予測式列] に指定します。
- 「Weibull 損失関数」を [損失] に指定します。
- [OK] をクリックします。

図 14.17 の左側のような「非線形回帰のあてはめ」設定パネルが開きます。これを見ると、損失関数に「sigma」というパラメータが追加されているのがわかります。「sigma」は分数の分母に属するため、開始値を1とするのが適切です。デフォルト以外の損失関数を使っているときは、設定パネル上の「損失は負の対数尤度」チェックボックスはデフォルトでオンになります。

11. [実行] をクリックします。

あてはめ処理が収束し、図14.17の右側ようになります。

図14.17 損失関数を設定した非線形モデル



あてはめ処理では、Weibull分布の対数尤度の符号を逆にしたものを最大化するようなパラメータ推定値が計算されます。

- (オプション) [信頼限界] をクリックすると、パラメータの両側95%信頼区間の上限と下限が「解」表に表示されます。

図14.18 「解」レポート



**メモ:** この信頼区間は、普通の信頼区間 (Wald法による信頼区間) ではなく、プロファイル尤度法によって計算されています。そのため、計算に時間がかかることがあります。

サンプルデータには、指数分布や対数正規分布の損失関数も保存されています。それらの分布をあてはめることもできます。新しい分布をあてはめる前に、最小2乗推定値を初期値に設定しておかないと、反復計算が収束しないことがありますので注意してください。パラメータ推定値をリセットするには、次の手順に従います。

13. (オプション)「非線形回帰のあてはめ」の赤い三角ボタンをクリックし、[元のパラメータに戻す] を選択します。

## 「非線形回帰」プラットフォームでの単純な生存時間分布のあてはめ

次の例では、説明変数がない単なる打ち切りデータの場合に、最尤法で分布を推定する方法を紹介します。

なお、「Loss Function Templates」フォルダには、指数分布・極値分布（Weibull分布を最小極値分布で表現したもの）・対数ロジスティック分布・対数正規分布・正規分布・Weibull分布の損失関数を使ったテンプレートが用意されています。これらの損失関数を使うには、各確率分布に対する損失関数テンプレートの「**生存日数**」列と「**打ち切りの有無**」列に時間と打ち切りの値を入力してください。そして、[**非線形回帰**] を選択し、損失列を[**損失**] 変数に指定してください。この損失関数では生存時間や打ち切りが考慮されています。また、モデルには説明変数がありません。損失関数ですべて定義されているので、予測式の列（モデルの列）を定義する必要はありません。

### 指数分布・Weibull分布・極値分布の損失関数

「Fan.jmp」データテーブルを使って、Nelson（1982）の著作で説明されている、指数分布・Weibull分布・極値分布の損失関数について解説します。これは、70台のディーゼルフアンを対象に、累積合計344,440時間のサービスをデータにまとめたものです。ファンはさまざまな時間で稼働しています。そして、ファンが故障した時間か、観察を打ち切った時間が測定されています。

---

**ヒント：**損失関数の計算式を表示するには、「Fan.jmp」データテーブルで、「**指数損失関数**」、「**Weibull 損失関数**」、「**極値損失関数**」の各列を右クリックし、[**計算式**] を選択します。

---

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「Fan.jmp」を開きます。
2. [分析] > [発展的なモデル] > [非線形回帰] を選択します。
3. 「**指数損失関数**」を選択し、[損失] をクリックします。
4. [OK] をクリックします。
5. [損失は負の対数尤度] チェックボックスがオンになっていることを確認します。
6. [実行] をクリックします。
7. [信頼限界] をクリックします。
8. 上記の手順を、「**指数損失関数**」の代わりに「**Weibull 損失関数**」と「**極値損失関数**」を選択して繰り返します。

図 14.19 非線形回帰のあてはめ結果

▽ 非線形回帰のあてはめ

損失: 指数損失関数

設定パネル

解

損失	DFE	平均損失	平均損失平方根		
135.1772247	69	1.9590902	1.399675		
パラメータ	推定値	近似標準誤差	下側信頼限界	上側信頼限界	
sigma	28703.333333	8285.93861	17114.2092	53600.0963	
解法: 解析 NR					
推定値の相関					

▽ 非線形回帰のあてはめ

損失: Weibull損失関数

設定パネル

解

損失	DFE	平均損失	平均損失平方根		
135.15271994	68	1.98754	1.4098014		
パラメータ	推定値	近似標準誤差	下側信頼限界	上側信頼限界	
Alpha	26296.817205	12251.3882	13629.9746	106086.918	
Beta	1.0584462448	0.26825073	0.60609377	1.65792545	
解法: 解析 NR					

▽ 非線形回帰のあてはめ

損失: 極値損失関数

設定パネル

解

損失	DFE	平均損失	平均損失平方根		
42.247996552	68	0.6212941	0.7882221		
パラメータ	推定値	近似標準誤差	下側信頼限界	上側信頼限界	
lambda	3.2694489763	0.46588966	2.61236736	4.66416689	
delta	0.9447814453	0.23944403	0.60315891	1.6501854	
解法: 解析 NR					

## 対数正規損失関数

「Locomotive.jmp」サンプルデータを取り上げ、対数正規損失について説明します。対数正規分布は、データの誤差が指数的に分布している場合に適しています。

ヒント: 損失関数の計算式を表示するには、「Locomotive.jmp」データテーブルで、「対数正規損失関数」列を右クリックして【計算式】を選択します。

対数正規損失関数は、パラメータの初期値に大きく左右されます。対数正規分布は対数変換すれば正規分布なので、「時間」の自然対数である新しい変数を作成し、「一変量の分布」プラットフォームでその列の平均と標準偏差を求めます。次に、それらの値を「非線形回帰」プラットフォームで初期値として使います。この例では、「時間」の自然対数の平均は4.72で、標準偏差は0.35です。

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Reliability」フォルダにある「Locomotive.jmp」を開きます。
2. [分析] > [発展的なモデル] > [非線形回帰] を選択します。

- 3. 「対数正規損失関数」を選択し、[損失] をクリックします。
- 4. [OK] をクリックします。
- 5. 「Mu」の横のボックスに「4.72」と入力します。
- 6. 「Sigma」の横のボックスに「0.35」と入力します。
- 7. [実行] をクリックします。
- 8. [信頼限界] をクリックします。

図 14.20 「解」 レポート

解					
損失	DFE	平均損失	平均損失平方根		
237.09354534	94	2.5222718	1.5881662		
パラメータ	推定値	近似標準誤差	下側信頼限界	上側信頼限界	
Mu	5.1169247193	0.10416697	4.93735853	5.35966436	
sigma	0.7054940302	0.0932136	0.55446171	0.93294904	
解法: 数値 NR					
▷ 推定値の相関					

対数正規分布のパラメータの最尤推定値は、「Mu」が5.11692で、「Sigma」が0.7055です。対数正規分布のメディアン  
の推定値は、5.11692の真数 ( $e^{5.11692}$ ) で、およそ 167 です。これが機関車のエンジンの標準的な  
寿命ということになります。

## 「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」プラットフォームの統計的詳細

ここでは、「生存時間 (パラメトリック) のあてはめ」プラットフォームの統計的詳細について説明します。

### 生存時間分布の損失計算式

以下に挙げる損失関数は、良く使われる生存時間分布の「負の対数尤度」(対数尤度の符号を逆にしたもの)  
です。どの式も、計算式エディタの If 関数を使って表しています。If 関数の初めの節で、打ち切られていな  
いデータに対する損失関数が定義されています。続いて、右側打ち切りデータに対する損失関数が Else 節で  
定義されています。これらの計算式は、サンプルデータフォルダの「Loss Function Templates」フォルダ内  
にあるデータテーブルからコピーして、分析対象とするデータテーブルに貼り付けることができます。

### 指数損失関数

ここに示す指数損失関数では、「sigma」は指数分布の平均、「時間」は故障時間です。

## 指数損失関数

$$- \text{IfMZ} \begin{cases} \text{打ち切りの有無} == 0 \Rightarrow -\text{Log}(\text{sigma}) - \frac{\text{時間}}{\text{sigma}} \\ \text{else} \Rightarrow -\left(\frac{\text{時間}}{\text{sigma}}\right) \end{cases}$$

指数分布の特徴は、ハザード（瞬間故障率）が時間の経過に対して一定であることです。つまり、特定の期間にユニットが故障する確率は、ユニットがそれまでに経験した試験期間の長さに関係なく、常に一定です。

## Weibull 損失関数

Weibull 分布は、寿命データを分析するのに多くの場面で適した分布です。Weibull 損失関数がデータにとって適切かどうかを判断するには、[分析] メニューの [信頼性/生存時間分析] サブメニューの [生存時間分析] を用いることができます。

### Weibull 損失関数

$$- \text{IfMZ} \begin{cases} \text{打ち切りの有無} == 0 \Rightarrow \frac{\text{モデル}}{\text{sigma}} - \text{Exp}\left(\frac{\text{モデル}}{\text{sigma}}\right) - \text{Log}(\text{sigma}) \\ \text{else} \Rightarrow -\text{Exp}\left(\frac{\text{モデル}}{\text{sigma}}\right) \end{cases}$$

「Loss Function Templates」フォルダに、「モデル」列を使って定義する例（Weibull, 1 Parm.jmp）、2 パラメータで定義する例（Weibull, 2 Parm.jmp）、極値分布（Extreme Value.jmp）の例が含まれています。

## 対数正規損失関数

下に示している対数正規損失関数の式において、Normal Distribution（モデル/sigma）は標準正規分布の累積分布関数です。対数正規分布のハザード関数は  $t=0$  のときに 0 です。そして、 $t$  が大きくなるにつれて増加していき、最大値となるまで単調に増加します。最大値に達した後は、 $t$  が大きくなるにつれて単調に減少し、0 に近づきます。

### 対数正規損失関数

$$- \text{If} \begin{cases} \text{打ち切りの有無} == 0 \Rightarrow -0.5 * \left(\frac{\text{モデル}}{\text{sigma}}\right)^2 - 0.5 * \text{Log}(2 * \text{Pi}) - \text{Log}(\text{sigma}) \\ \text{else} \Rightarrow \text{Log}\left(1 - \text{Normal Distribution}\left(\frac{\text{モデル}}{\text{sigma}}\right)\right) \end{cases}$$

対数ロジスティック損失関数

Yがロジスティック分布に従う場合、exp(Y)は対数ロジスティック分布に従います。

対数ロジスティック損失関数

- IfMZ

$$\left[ \begin{array}{l} \text{打ち切りの有無} == 0 \Rightarrow \frac{\text{モデル}}{\text{sigma}} - 2 * \text{Log} \left[ 1 + \text{Exp} \left[ \frac{\text{モデル}}{\text{sigma}} \right] \right] - \text{Log}(\text{sigma}) \\ \text{else} \qquad \qquad \qquad \Rightarrow - \text{Log} \left[ 1 + \text{Exp} \left[ \frac{\text{モデル}}{\text{sigma}} \right] \right] \end{array} \right]$$

# 第 15 章

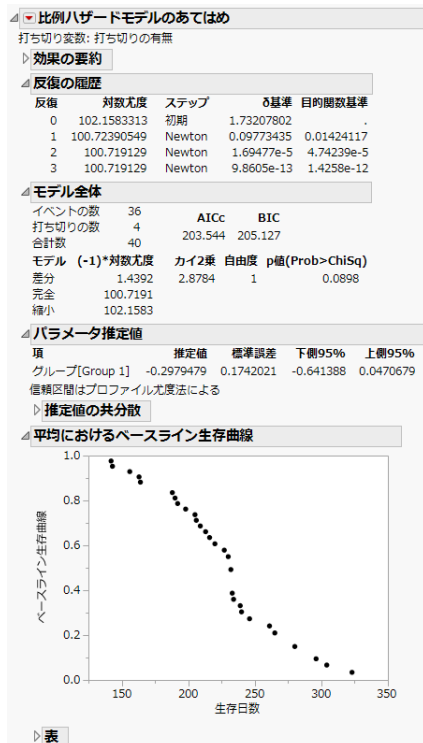
## 比例ハザードのあてはめ 生存時間データにセミパラメトリックな回帰モデルをあてはめる

「比例ハザードのあてはめ」プラットフォームは、Cox の比例ハザードモデルをあてはめます。このモデルは、複数の説明変数（共変量）とハザード関数との関係において、比例ハザード性が成立していることを前提としています。

比例ハザードモデルも、説明変数が生存時間に影響を与えているときによく使われている回帰モデルです。このモデルはセミパラメトリックで、線形モデルは推定されますが、ハザード関数の式は推定されません。JMP では、時間の経過に伴って変化する説明変数（時間依存性共変量; time varying covariate）を扱うことはできません。

メモ: 「比例ハザードのあてはめ」プラットフォームは、「モデルのあてはめ」プラットフォームを若干カスタマイズしたものです。

図 15.1 「比例ハザードのあてはめ」の例



## 目次

「比例ハザードのあてはめ」プラットフォームの概要 .....	375
「比例ハザードのあてはめ」プラットフォームの例 .....	375
2水準におけるリスク比 .....	377
「比例ハザードのあてはめ」プラットフォームの起動 .....	378
「比例ハザードモデルのあてはめ」レポート .....	379
「比例ハザードモデルのあてはめ」のオプション .....	380
効果や水準が複数あるモデルの例 .....	381
3水準以上のときのリスク比 .....	383

## 「比例ハザードのあてはめ」プラットフォームの概要

D. R. Cox (1972) によって考案された比例ハザードモデルは、特殊な形態をもつセミパラメトリックな回帰モデルで、説明変数が生存時間に及ぼす効果を調べるために使います。母集団において各個体の生存時間は、各個体自身のハザード関数に従うと仮定されます。

比例ハザードモデルは、ベースラインのハザード関数に対して特定の式を仮定しないという点ではノンパラメトリックで、説明変数に対してパラメトリックな式を仮定する点ではパラメトリックと言えます。比例ハザードモデルのうち、時間に依存する説明変数（時間依存性共変量; time varying covariate）を扱わない比例ハザードモデルでは、ある説明変数のハザード関数は、その説明変数の関数をベースラインのハザード関数に掛け合わせることで求められると仮定されています。なお、JMPでは、時間依存性共変量は扱えません。Kaplan-Meier法と異なり、比例ハザードモデルでは、パラメータ推定値と標準誤差が各説明変数に対して計算されます。説明変数の回帰パラメータ（ $\beta$ ）およびその標準誤差は、最尤法によって推定されます。条件付きリスク比（ハザード比）も、パラメータ推定値に基づいて計算されます。

JMPにおける比例ハザードモデルでの生存率の推定値は、経験法を使って一般化されたもので（Lawless 1982）、経験的累積ハザード関数推定値  $H(t)$  により、 $S(t) = \exp(-H(t))$  で求められます。ここでの累積ハザード関数推定値は、次のように求められています。

$$H(t) = \sum_{j: t_j < t} \frac{d_j}{\sum_{l \in R_j} e^{x_l \beta}}$$

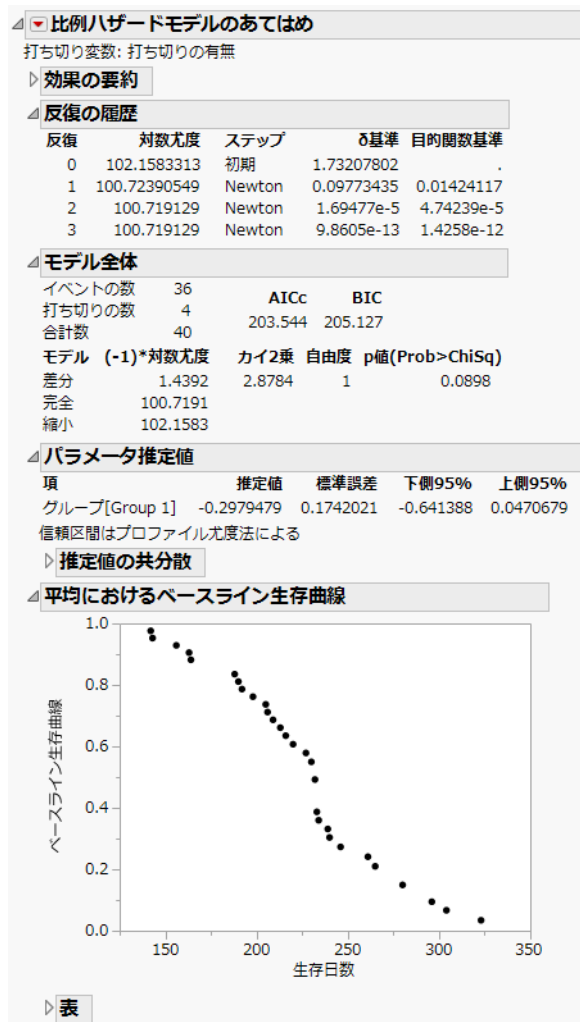
応答変数の値が同じデータにある場合、つまり、ある同一時点において2つ以上の故障や死亡が生じている場合は、Breslow尤度を使います。

## 「比例ハザードのあてはめ」プラットフォームの例

ここで、説明変数が1変数で、それが2水準の名義尺度である例を取り上げます。より複雑な例については、「効果や水準が複数あるモデルの例」（381ページ）を参照してください。

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「Rats.jmp」を開きます。
2. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [比例ハザードのあてはめ] を選択します。
3. 「生存日数」を[イベントまでの時間]に指定します。
4. 「打ち切りの有無」を[打ち切り]に指定します。
5. 「グループ」を選択し、[追加]をクリックします。
6. [実行] をクリックします。

図 15.2 「Rats.jmp」データの「比例ハザードモデルのあてはめ」レポート



「Rats.jmp」データにはグループが2つしかありません。そのため、「パラメータ推定値」レポートにおける信頼区間にゼロが含まれていないことは、グループ間に $\alpha$ 水準で有意な差があることを示します。また、効果が1つしかないので、「効果の尤度比検定」レポートの「グループ」に対する結果は、「モデル全体」表に表示されている結果と同じになります。

## 2水準におけるリスク比

効果のリスク比（ハザード比）を表示するには、赤い三角ボタンのメニューから「リスク比」オプションを選択します。この例では、「Group 1」に対する「Group 2」のリスク比と、「Group 2」に対する「Group 1」のリスク比とが、「グループのリスク比」レポートに表示されます。図 15.3 を参照してください。この例では、2水準しかないので、「Group 2」のパラメータ推定値を指数変換した値を、「Group 1」のパラメータ推定値を指数変換した値で割ったものが、「Group 1」に対する「Group 2」のリスク比となります。

次の点に注意してください。

- 「Group 1」のパラメータ推定値は、「パラメータ推定値」表に表示されています。図 15.2 を参照してください。
- 「Group 2」のパラメータ推定値は、「Group 1」のパラメータ推定値の符号を逆にしたものです。
- なお、「Group 2」に対する「Group 1」のリスク比は、「Group 1」に対する「Group 2」のリスク比の逆数になっています。

ヒント: 逆数を表示するには、「リスク比」レポートを右クリックして「列」>「逆数」を選択します。

この例では、「Group 1」に対する「Group 2」のリスク比を次の式で求めることができます。

$$\exp[-(-0.2979479)] / \exp(-0.2979479) = 1.8146558$$

この値 (1.81) は、「Group 2」のハザードが、「Group 1」のハザードの 1.81 倍であることを意味しています。

図 15.3 「グループのリスク比」表

リスク比						
グループのリスク比						
水準1	/水準2	リスク比	p 値(Prob>Chsq)	下側95%	上側95%	
Group 2	Group 1	1.8146558	0.0898	0.9101592	3.606635	
Group 1	Group 2	0.5510687	0.0898	0.2772668	1.0987089	

より複雑なモデルにおけるリスク比については、「3水準以上のときのリスク比」(383ページ)を参照してください。

## 「比例ハザードのあてはめ」プラットフォームの起動

「比例ハザードのあてはめ」プラットフォームを起動するには、[分析] > [信頼性/生存時間分析] > [比例ハザードのあてはめ] を選択します。

図15.4 「比例ハザードのあてはめ」の起動ウィンドウ

ヒント: 有意水準を変更するには、赤い三角ボタンをクリックし、[有意水準の設定] を選択します。

「比例ハザードのあてはめ」起動ウィンドウには、次のオプションがあります。

**イベントまでの時間** イベントが発生するまでの時間、または打ち切りまでの時間を含んだ列を指定します。

**打ち切り** デフォルトでは、[打ち切り] 列の「0」以外の値が、打ち切りを表します（打ち切りは通常は「1」で表されます）。デフォルトの設定を使う場合は、打ち切りでないものは、必ず「0」としてください。

**度数** 同時点で故障したユニットの個数など、観測値の度数が含まれている列を指定します。

**By** 指定された分類変数（グループ変数）の水準ごとに、個別に分析を行います。

**モデル効果の構成** モデルの効果を入力します。「モデル効果の構成」のオプションの詳細については、『基本的な回帰モデル』の「モデルの指定」章を参照してください。

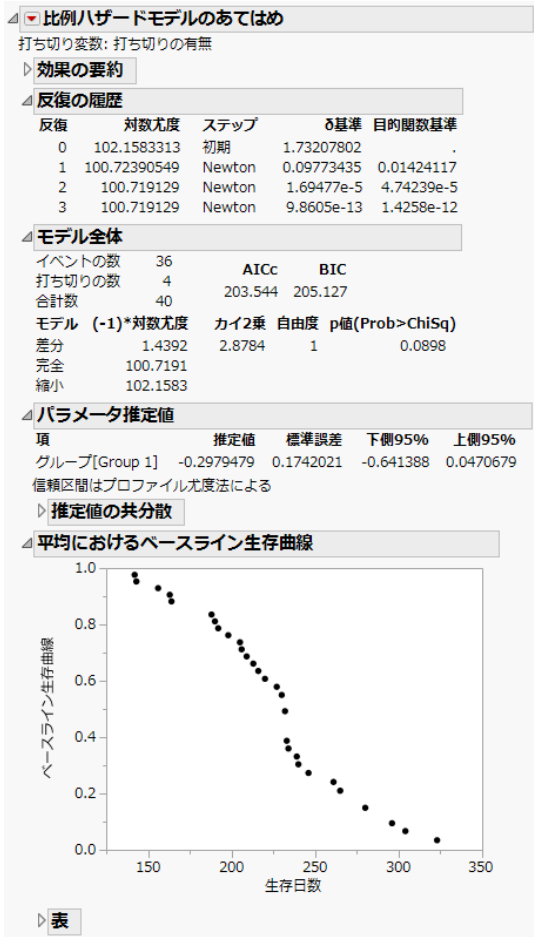
**手法** あてはめ方法を指定します。この章の分析を行うには、必ず「比例ハザード」を選択してください。

**打ち切りの値** [打ち切り] 列のデータ値のうち、右側打ち切りであることを示すデータ値を指定します。[打ち切り] 列を選択すると候補となるデータ値が、自動的にコンボボックスに表示されます。データ値を変更するには、赤い三角ボタンをクリックして、値のリストから選択してください。テキストボックスに値を入力することもできます。[打ち切り] 列に「値ラベル」列プロパティが設定されている場合、その値ラベルがコンボボックスに表示されます。なお、[打ち切り] 列が欠測値となっている行は、分析から除外されます。

## 「比例ハザードモデルのあてはめ」レポート

比例ハザードモデルにおけるパラメータ推定は、反復計算によって行われます。反復計算が終了した時点で、図15.5のようなレポートが表示されます。

図15.5 「比例ハザードモデルのあてはめ」レポート



**反復の履歴** パラメータを推定するために行われた反復計算の履歴がリスト形式で表示されます。

**モデル全体** 現在のモデルと、説明変数を1つも含めなかったモデルの両方について、対数尤度に-1を掛けたもの（ $(-1) \times \text{対数尤度}$ ）が表示されます。それらの対数尤度の差を2倍したものが、カイ2乗分布に近似される検定統計量です。この検定は、「モデルに含めたいずれの効果も生存曲線に違いを生じさせない」という帰無仮説に対する検定となっています。この検定統計量の「自由度」は、対数尤度の差を計算した2つのモデルのパラメータ数の差です。

**パラメータ推定値** パラメータ推定値、その標準誤差、両側95%信頼区間の下限と上限が表示されます。説明変数が連続尺度の場合、信頼区間にゼロが含まれていなければ、該当する効果は統計的に有意です。カテゴリカルな場合、その水準の信頼区間にゼロが含まれていなければ、その水準と全水準の平均との差が有意であることを意味します。

**効果の尤度比検定** 「効果のパラメータがすべてゼロである」という帰無仮説に対する尤度比検定が計算されます。

**平均におけるベースライン生存曲線** データのイベントが生じた時間に対して、ベースライン関数の推定値をプロットします。「表」レポートの値がここにプロットされます。

---

## 「比例ハザードモデルのあてはめ」のオプション

「比例ハザードモデルのあてはめ」の赤い三角ボタンのメニューには、次のようなオプションが表示されます。

**尤度比検定** あてはめたモデルの対数尤度が、モデルから各項を削除したときの対数尤度と比較されます。

**Wald検定** 各パラメータが0かどうかを調べるWald検定のカイ2乗値と $p$ 値を算出します。

**尤度信頼区間** 「パラメータ推定値」表に表示される信頼区間の種類を切り替えます。このオプションを選択するとプロファイル尤度法による信頼区間が表示され、選択を解除するとWald法による信頼区間が表示されます。信頼区間のタイプは「パラメータ推定値」表の下に表示されます。プロファイル尤度法による信頼区間の計算時間が長くなる場合を除き、このオプションはデフォルトで選択されます。

---

**メモ:** 「モデルのあてはめ」起動ウィンドウの赤い三角ボタンメニューから「 $\alpha$ 水準の設定」を選択して、信頼区間の $\alpha$ 水準を変更することができます。デフォルトの $\alpha$ 水準は0.05です。

---

**リスク比** 効果のリスク比（ハザード比）を表示します。連続尺度の列については、単位リスク比と範囲リスク比が計算されます。「単位リスク比」は $\exp(\text{推定値})$ 、「範囲リスク比」は $\exp[\text{推定値} \times (x_{\text{Max}} - x_{\text{Min}})]$ で求められます。「単位リスク比」には説明変数が1単位だけ変化した場合、「範囲リスク比」には説明変数が全範囲にわたって変化した場合のリスク比が表示されます。カテゴリカルな列の場合、効果ごとに個別のレポートに、水準のすべての組み合わせに対して、リスク比が表示されます。なお、水準数が $k$ 個のカテゴリカル変数に対して実際に推定されるパラメータ数は、 $k - 1$ 個です。

---

**ヒント:** 「リスク比」レポートにリスク比の逆数を表示するには、レポートを右クリックして [列] > [逆数] を選択します。

---

**モデルダイアログ** 現在の分析の起動ウィンドウを表示します。

**効果の要約** モデルへの効果の追加や削除ができる対話式の「効果の要約」レポートを表示します。『基本的な回帰モデル』の「効果の要約レポート」の節を参照してください。

---

## 効果や水準が複数あるモデルの例

この例では、「VA Lung Cancer.jmp」サンプルデータに対して、比例ハザードモデルをあてはめます。このデータテーブルは、ランダム化臨床試験によって得られたデータです。外科手術が難しい肺がんを患った男性患者を、標準的な化学療法の群（「Standard」）と、新しい化学療法を受ける処置群（「Test」）に割り付けました。これらのどちらの群に割り付けられたかは、「**処置**」列で示されています。この試験の目的は、処置によって生存時間に違いが生じるかどうかを、特に腫瘍の種類（「**セル**」）も考慮しながら評価することです。このデータの詳細については、Prentice (1973) および Kalbfleisch and Prentice (2002) を参照してください。

ここでは、以下のような説明変数をもつ比例ハザードモデルをあてはめます。

- 患者が以前治療を受けたことがあるかどうか（「**前治療**」）
- 患者の年齢（「**年齢**」）
- 肺がん診断から試験開始までの時間（「**月数**」）
- 一般全身状態の指標（「**KPS**」）

「**年齢**」・「**月数**」・「**KPS**」は連続尺度の測定値です。「**セル**」・「**処置**」・「**前治療**」はカテゴリカルな変数（名義尺度の変数）です。名義尺度の「**セル**」には、「Adeno」・「Large」・「Small」・「Squamous」の4つの水準があります。

つまり、このモデルには、複数の効果があり、そのうち1つの名義尺度の効果は複数の水準をもちます。次の操作によって、比例ハザードモデルがあてはめられ、また、リスク比が計算されます。

1. [ヘルプ] > [サンプルデータライブラリ] を選択し、「VA Lung Cancer.jmp」を開きます。
2. [分析] > [信頼性/生存時間分析] > [比例ハザードのあてはめ] を選択します。
3. 「生存日数」を[イベントまでの時間]に指定します。
4. 「打ち切りの有無」を[打ち切り]に指定します。
5. 「セル」・「処置」・「前治療」・「年齢」・「月数」・「KPS」を選択し、[追加]をクリックします。
6. [実行] をクリックします。
7. (オプション)「平均におけるベースライン生存曲線」の開閉ボタンをクリックしてプロットを閉じ、「効果の要約」の開閉ボタンをクリックしてレポートを閉じます。

図 15.6 効果や水準が複数ある比例ハザードモデルのレポート

比例ハザードモデルのあてはめ				
打ち切り変数: 打ち切りの有無				
▶ 効果の要約				
▶ 反復の履歴				
モデル全体				
イベントの数	128	AICc	BIC	
打ち切りの数	9	967.484	989.719	
合計数	137			
モデル	(-1)*対数尤度	カイ2乗	自由度	p値(Prob>ChiSq)
差分	30.7046	61.4091	8	<.0001*
完全	475.1794			
縮小	505.8840			
パラメータ推定値				
項	推定値	標準誤差	下側95%	上側95%
セル[Adeno]	0.57719588	0.1849861	0.2036319	0.9316196
セル[Large]	-0.2114757	0.1741197	-0.56618	0.1191116
セル[Small]	0.24538322	0.1592518	-0.070502	0.5550322
処置[Standard]	-0.1449679	0.1036051	-0.348984	0.0578618
前治療[No]	-0.0361633	0.1160663	-0.259353	0.1970409
年齢	-0.0085494	0.0093042	-0.026447	0.0100846
月数	-0.000092	0.0091251	-0.020233	0.016114
KPS	-0.0326217	0.0055052	-0.043442	-0.021834
信頼区間はプロファイル尤度法による				
▶ 推定値の共分散				
▶ 平均におけるベースライン生存曲線				
効果に対する尤度比検定				
要因	パラメータ数	自由度	尤度比カイ2乗	p値(Prob>ChiSq)
セル	3	3	18.6003364	0.0003*
処置	1	1	1.96251687	0.1612
前治療	1	1	0.09639285	0.7562
年齢	1	1	0.82813759	0.3628
月数	1	1	0.00010177	0.9920
KPS	1	1	34.616163	<.0001*

結果について次の点を確認してください。

- 「モデル全体」レポートで、「p 値 (Prob>ChiSq)」が小さい (<.0001) ことから、モデルにおける少なくとも1つの効果は、生存率に影響を与えているということがわかります。
- 「効果の尤度比検定」レポートで、「p 値 (Prob>ChiSq)」の値が小さいことから、「KPS」と「セル」の少なくとも1水準は、他の水準と異なると結論できます。一方、「処置」・「前治療」・「年齢」・「月数」の各効果は有意ではありません。

8. 赤い三角ボタンのメニューから「リスク比」を選択します。



名義尺度の効果「セル」に対しては、「セルのリスク比」表に、水準のすべての組み合わせに対するリスク比が表示されます。なお、水準数が  $k$  個のカテゴリカル変数に対して実際に推定されるパラメータ数は、 $k - 1$  個です。「セル」は4水準ですので、「パラメータ推定値」表には3つ（「Adeno」・「Large」・「Small」）のパラメータ推定値が表示されています。「Squamous」の推定値は計算されていませんが、他の推定値を合計し、その符号を逆にして求めることができます。下の式は、計算例として、「セル」の2つのリスク比を示しています。

$$\text{Large/Adeno} = \exp(\beta_{\text{Large}})/\exp(\beta_{\text{Adeno}}) = \exp(-0.2114757)/\exp(0.57719588) = 0.4544481$$

$$\begin{aligned}\text{Squamous/Adeno} &= \exp[-(\beta_{\text{Adeno}} + \beta_{\text{Large}} + \beta_{\text{Small}})]/\exp(\beta_{\text{Adeno}}) \\ &= \exp[-(0.57719588 + (-0.2114757) + 0.24538322)]/\exp(0.57719588) = 0.3047391\end{aligned}$$

なお、基準となる水準を逆にしたりリスク比は、これらのリスク比の逆数（つまり、 $1 \div$  リスク比）で計算できます。

- 
- Abernethy, R. B. (1996). *The New Weibull Handbook*. 2nd ed. North Palm Beach, FL: Robert B. Abernethy.
- Akaike, H. (1974). "A New Look at the Statistical Model Identification." *IEEE Transactions on Automatic Control* AC-19:716–723.
- Andrews, D. F., and Herzberg, A. M. (1985). *A Collection of Problems from Many Fields for the Student and Research Worker*. New York: Springer-Verlag.
- Burnham, K. P., and Anderson, D. R. (2002). *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach*. 2nd ed. New York: Springer-Verlag.
- Chow, S.-C. (2007). *Statistical Design and Analysis of Stability Studies*. Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC.
- Cox, D. R. (1972). "Regression Models and Life-Tables." *Journal of the Royal Statistical Society, Series B* 34:187–220.
- Crow, L. H. (1975). *Reliability Analysis for Complex, Repairable Systems*. Technical Report No. 138, December 1975, US Army Materiel Systems Analysis Activity, Aberdeen Proving Ground, MD.
- Crow, L. H. (1982). "Confidence Interval Procedures for the Weibull Process with Applications to Reliability Growth." *Technometrics* 24:67–72.
- Escobar, L. A., Meeker, W. Q., Kugler, D. L., and Kramer, L. L. (2003). "Accelerated Destructive Degradation Tests: Data, Models, and Analysis." In *Mathematical and Statistical Methods in Reliability*, edited by B. H. Lindqvist and K. A. Doksum, 319–338. London: World Scientific Publishing Company.
- Guo, H., Mettas, A., Sarakakis, G., and Niu, P. (2010). "Piecewise NHPP Models with Maximum Likelihood Estimation for Repairable Systems." In *2010 Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. New York: IEEE Press.
- Hosmer, D. W., Jr., and Lemeshow, S. (1999). *Applied Survival Analysis: Regression Modeling of Time-to-Event Data*. New York: John Wiley & Sons.
- Kalbfleisch, J. D., and Prentice, R. L. (1980). *The Statistical Analysis of Failure Time Data*. New York: John Wiley & Sons.
- Kalbfleisch, J. D., and Prentice, R. L. (2002). *The Statistical Analysis of Failure Time Data*. 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Kaminskiy, M. P., and Krivtsov, V. V. (2005). "A Simple Procedure for Bayesian Estimation of the Weibull Distribution." *IEEE Transactions on Reliability* 54:612–616.

- Klein, J. P., and Moeschberger, M. L. (1997). *Survival Analysis: Techniques for Censored and Truncated Data*. New York: Springer-Verlag.
- Lawless, J. F. (1982). *Statistical Models and Methods for Lifetime Data*. New York: John Wiley & Sons.
- Lawless, J. F. (2003). *Statistical Models and Methods for Lifetime Data*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons.
- Lee, L., and Lee S. K. (1978). "Some Results on Inference for the Weibull Process." *Technometrics* 20:41–45.
- Liu, P., and Wang, P. (2013). "Competing Failure Modes Modeling with Limited Wearout Failures." In *2013 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. New York: IEEE Press.
- Meeker, W. Q., and Escobar, L. A. (1998). *Statistical Methods for Reliability Data*. New York: John Wiley & Sons.
- Nair, V. N. (1984). "Confidence Bands for Survival Functions with Censored Data: A Comparative Study." *Technometrics* 26:265–275.
- Nelson, W. B. (1982). *Applied Life Data Analysis*. New York: John Wiley & Sons.
- Nelson, W. B. (1985). "Weibull Analysis of Reliability Data with Few or No Failures." *Journal of Quality Technology* 17:140–146.
- Nelson, W. B. (1990). *Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses*. New York: John Wiley & Sons.
- Nelson, W. B. (2003). *Recurrent Events Data Analysis for Product Repairs, Disease Recurrences, and Other Applications*. Philadelphia: Society for Industrial Mathematics.
- Nelson, W. B. (2004). *Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis*. New York: John Wiley & Sons.
- Prentice, R. L. (1973). "Exponential Survivals with Censoring and Explanatory Variables." *Biometrika* 60:279–288.
- Rigdon, S. E., and Basu, A. P. (2000). *Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems*. New York: John Wiley & Sons.
- Robert, C. P., and Casella, G. (2004). *Monte Carlo Statistical Methods*. 2nd ed. New York: Springer-Verlag.
- SAS Institute Inc. (2017). "The LIFETEST Procedure." In *SAS/STAT 14.3 User's Guide*. Cary, NC: SAS Institute Inc.  
<http://support.sas.com/documentation/onlinedoc/stat/143/lifetest.pdf>
- Si, S., Dui, H., Zhao, X., Zhang, S., and Sun, S. (2012). "Integrated Importance Measure of Component States Based on Loss of System Performance." *IEEE Transactions on Reliability*. 61:192–202.
- Tobias, P. A., and Trindade, D. C. (1995). *Applied Reliability*. 2nd ed. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Tobias, P. A., and Trindade, D. C. (2012). *Applied Reliability*. 3rd ed. Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC.

US Department of Defense (1981). *Military Handbook: Reliability Growth Management* (MIL-HDBK-00189). Washington, DC: US Department of Defense.



### A

Appliance.jmp 340  
Arrhenius 華氏 105  
Arrhenius ケルビン 105  
Arrhenius 摂氏 105

### B

Bladder Cancer.jmp 158  
Blenders.jmp 71, 76  
Box-Cox 105

### C

comptime.jmp 349  
Cramér-von Mises 検定 257  
Crow-AMSAA  
    バイアス修正済み  $\beta$  258  
    パラメータ推定値 272  
Crow-AMSAA 修正最尤法 258  
    最終時点の平均故障間隔 259  
    適合度 259  
    パラメータ推定値 273  
Crow-AMSAA モデル 251

### D

Devalt.jmp 358  
DF 345  
Duane プロット 248

### E

Engine Valve Seat.jmp 149

### F

Fan.jmp 368  
Fréchet

    閾値つき 89

    分布 83

Frechet のあてはめ 124

### I

icdevice02.jmp 361

### K

Kaplan-Meier 曲線を表示 331  
Kaplan-Meier 法（積-極限法）  
    生存時間、一変量を参照  
Kaplan-Meier 法によるあてはめ 344  
K 値 291

### L

Locomotive.jmp 369

### M

MCF 信頼限界 153  
MCF の差のプロット 154, 159  
MCF プロット 153

### N

Normal Distribution 371  
N 値 291

### P

p 値 (Prob>ChiSq) 345

### R

Rats.jmp 328, 375

## T

Tobit2.jmp 363–365

Tobit モデルの例 363

TurbineEngineDesign1.jmp 238

TurbineEngineDesign2.jmp 268

## W-Z

Weibayes、寿命の一変量 45, 52, 61

WeiBayes 分析 337

Weibull

閾値つき 88

損失関数 365–368, 371

パラメータ化 81

パラメータ推定値表 332

分布 81, 327, 335

Weibull のあてはめ 124, 332

Weibull プロット 332

Wilcoxon 345

X の役割 363, 365–366

Y, イベント時の年齢 152

Y, イベントまでの時間の役割 37, 104

Y 軸の逆転コマンド 331

## ア

あてはめた分布のグラフ 333

アレニウスモデル 358

## イ

依存関係図 275

位置 105

位置と尺度 105

位置パラメータ 80

一変量の分布プラットフォーム 369

イベント-時間応答データ 325, 327

イベント度数, 信頼性成長 243

イベントプロット 40, 150, 153

イベントまでの時間 352, 378

イベントまでの時間, 信頼性成長 242

## ウ

打ち切りデータ, 信頼性成長 244

打ち切りの値 38, 105

打ち切りのあるデータ 325, 327, 357, 363, 368

## オ

オプション

信頼性ブロック図 286

## カ

カイ2乗 345, 380

開始ノード 277

拡張一般化ガンマ (GenGamma)

分布 87

カスタム損失関数 367

加速寿命試験モデル 101

加速破壊劣化 191, 199, 201

加速劣化 167

可動最小要素数 291

「関係」オプションのモデル、累積損傷 138

観測データレポート, 信頼性成長 246

## キ

逆数 105

競合する原因 333

共変量 373

極値損失関数 368

極値パラメータ推定値表 332

曲面プロットの表示 125

## ク

区間打ち切りのあるモデル 361

区間の種類 54

区分 Weibull-NHPP 変化点検出 267

区分ランプストレス試験 133

組み合わせの表示 331

グループ間での検定テーブル 345

グループ変数 153

## ケ

経済学モデル 363

計算式, 非線形回帰によるパラメトリックな生存分  
析 365

形状パラメータ 80

原因 352

原因座標の保存 338  
検定 345

## コ

効果の尤度比検定表 380  
故障原因の役割 37  
故障データ 325  
故障率の信頼曲線 332  
故障率プロット 331

## サ

最小極値 (SEV)  
分布 84  
最小極値のあてはめ 124  
再初期化 Weibull-NHPP 264  
再生モデルによる分析 147, 149  
最大極値 (LEV)  
分布 85  
最大極値のあてはめ 124  
最尤法 357, 368, 370  
作成, 信頼性ブロック図 277  
残差の保存 357  
残差分位点プロット 357

## シ

加速因子の使用条件を設定 124  
時間分位点の推定 333, 350, 356  
閾値パラメータ 88  
指数  
分布 86  
指数損失関数 365-368, 370-371  
指数パラメータ推定値表 332  
指数プロット 332  
指数分布 327  
指数分布のあてはめ 332  
システムの信頼性 275  
実行 365-366  
「シミュレーション設定」パネル 144  
シミュレーションの設定、修理可能システムのシ  
ミュレーション 310  
尺度パラメータ 80  
終了ノード 277

寿命の一変量プラットフォーム 31-90  
寿命の二変量 104  
変換 105

条件リスク比 375  
信頼区間 356  
信頼区間の表示 331  
信頼限界 367  
信頼水準の変更 54, 125  
信頼性, システム 275  
信頼性成長

オプション 249  
概要 237  
起動 241  
データ構造 244  
統計的詳細 272  
例 238, 268, 270  
レポート 246

信頼性成長の平均故障間隔 248  
信頼性成長プラットフォーム 241  
信頼性ブロック図 275

新しいデザインの追加 288  
新しいライブラリ項目 289  
オプション 286  
削除 302  
作成 277  
複製 302  
部品の整列 281  
部品の接続 282

信頼性ブロック図ウィンドウ  
システムダイアグラム 284  
図形ツールバー 284  
デザインパネル 284  
プレビューウィンドウ 284  
プロファイルパネル 285  
ライブラリパネル 284  
ワークスペースパネル 284

信頼性ブロック図プラットフォーム 275  
信頼性予測

オプション 232  
起動 224  
例 221-224  
レポート 227-232

信頼度の代数式

ログに出力 301  
信頼領域の表示 54

## ス

ズームアウト 289  
ズームイン 289  
ズーム率 289  
推定値の共分散 356  
推定値の相関 356  
推定値の保存 333, 366  
ステップストレス試験 133  
すべてのDS分布のあてはめ 53  
すべての非負分布のあてはめ 53  
すべての分布のあてはめ 53, 124

## セ

正規  
分布 84  
正規のあてはめ 124  
正規分布 369, 371  
正弦ストレス試験 133  
生存曲線の表示 53  
生存時間(パラメトリック)のあてはめ 347  
生存時間プロット 330  
生存時間分析プラットフォーム 149–153  
概要 327  
再生モデルによる分析 149  
パラメトリック 349  
非線形パラメトリック 357, 370, 375  
比例ハザード 375–384  
例 149, 328–333, 340, 375–384  
生存率の信頼曲線 332  
生存率の推定 333, 356, 361  
設定  
設定項目 290  
設定項目  
設定 290  
線形変換 105  
選択された列をカテゴリに展開する 182  
選択した要素を縦に配置 281, 289  
選択した要素を横に配置 281, 290

## ソ

損失 366, 368  
損失関数 357, 368  
損失率 345

## タ

対数一般化ガンマ(LogGenGamma)  
分布 86  
対数正規  
閾値つき 89  
対数正規損失関数 365–368, 371–370  
対数正規のあてはめ 124  
対数正規プロット 332  
対数正規分布 81, 327  
対数正規分布のあてはめ 332  
対数変換 105  
対数ロジスティック  
閾値つき 90  
分布 82  
対数ロジスティック損失関数 371  
対数ロジスティックのあてはめ 124  
タイムスタンプ, 信頼性成長 243  
タブ形式で結果を表示 54, 67, 125  
ダミー変数への変換 365

## チ

チュートリアル の例  
Tobitモデル 363  
一変量(Kaplan-Meier法)の生存時間分  
析 328–333, 340  
再生モデルによる分析 149  
非線形パラメトリック生存時間 363, 365–370  
比例ハザード生存時間 375–384  
直列ダイアグラムの作成 290

## テ

定数打ち切りと定時打ち切り, 信頼性成長 245  
デザイン項目の新規作成 288  
デザイン項目の追加 287  
デザインの比較を表示 287  
デザインパネル 284  
電圧 105

点の表示 53, 67, 125, 182, 331

## ト

統計量の表示 54

同時信頼区間を表示 331

度数の役割 38, 105, 329, 352, 378

## ネ

ネバダ形式の保証データ 225

## ノ

ノンパラメトリック 80, 291

## ハ

破壊劣化

By 208

X 207

Y, 応答 207

Y列 208

打ち切り 208

打ち切りの値 208

起動ウィンドウ 207

グラフオプション 217

経路の定義 210

現モデルのレポートを生成 210

時間 207

度数 208

プロット 209

プロットオプション 210

プロファイル 216

分布 210

変換 210

モデル 210–214, 218

モデルリスト 214

例 201

ハザード関数 375

比例ハザードを参照

ハザード関数の表示 54

ハザード比 375

パラメータ推定値表 380

パラメトリックな回帰 349

反復履歴レポート 380

## ヒ

比較の規準 54

非線形 368

非線形回帰のあてはめプラットフォーム

生存時間モデル 370, 375

例 363, 368–369

非線形回帰プラットフォーム 363, 365–366, 368–369

生存時間モデル 357

例 365–370

非線形テンプレートフォルダ 368

非線形モデルライブラリ 182

左側打ち切り 363

非表示

プレビューウィンドウ 284

比例ハザード 375–384

比例ハザードのあてはめ 373

## フ

部品

K out of N 285

基本 285

合流点 285

図形ツール 285

直列 285

分布プロパティ 290

並列 285

部分分布プロファイル 68

プレビュー 289

プレビューウィンドウ 284

非表示 284

ブロック図の表示 286

ブロックの設定、修理可能なシステムのシミュレーション 310

プロットのオプション 331

プロファイルパネル 285

プロファイル, 部分分布 68

分位値表 344

分位点関数の表示 53

分位点のあてはめ線 331

分位点の信頼曲線 332

分位点の信頼区間を塗る 332

分位点の中間ステップ 331  
分位点をつなぐ 331  
分布関数プロットの重ね合わせ 287  
分布の比較 42  
分布プロパティ 290

## へ

平方根変換 105  
並列ダイヤグラムの作成 290  
変動ストレス試験 133

## ミ

右側打ち切り 327

## モ

モデル全体表 376, 380  
モデルライブラリ 182

## ヤ

役割  
打ち切り 37, 329, 352, 378  
グループ変数 329  
説明変数 363, 365–366

## ユ

尤度比検定 356

## ヨ

要約表 344  
余寿命分布関数プロットの重ね合わせプロファイル 287  
予測列 368

## ラ

ライブラリ項目の新規作成 289  
ライブラリ項目の追加 287  
ライブラリパネル 284  
ラベル, システムID 153  
ラベルの役割 38, 105  
ランブストレス試験 133

## ル

累積イベント数グラフ, 信頼性成長 248

## レ

劣化分析  
安定性試験 169  
破壊劣化試験 169  
反復測定劣化 169  
レポートのMCFプロット 150

## ロ

ログランク 345  
ロジスティック  
分布 85  
ロジスティックのあてはめ 124  
ロジット変換 105

## ワ

ワークスペースパネル 284