バージョン 11

# 信頼性 / 生存時間分析

「真の発見の旅とは、新しい風景を探すことではなく、新たな視点を持つことである。」

マルセル・プルースト

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

11.2

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. 2014.
『JMP® 11 信頼性 / 生存時間分析』Cary, NC: SAS Institute Inc.

**JMP® 11 信頼性 / 生存時間分析**

Copyright © 2014, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA

ISBN 978-1-61290-756-7

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。

**U.S. Government Restricted Rights Notice**: Use, duplication, or disclosure of this software and related documentation by the U.S. government is subject to the Agreement with SAS Institute and the restrictions set forth in FAR 52.227-19, Commercial Computer Software-Restricted Rights (June 1987).

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

2014 年 7 月、第 1 刷

SAS® Publishing provides a complete selection of books and electronic products to help customers use SAS software to its fullest potential. For more information about our e-books, e-learning products, CDs, and hard-copy books, visit the SAS Publishing Web site at support.sas.com/publishing or call 1-800-727-3228.

SAS® and all other SAS Institute Inc. product or service names are registered trademarks or trademarks of SAS Institute Inc. in the USA and other countries. ® indicates USA registration.

Other brand and product names are registered trademarks or trademarks of their respective companies.

## 技術ライセンスに関する通知

- Scintilla - Copyright © 1998-2012 by Neil Hodgson <neilh@scintilla.org>.

  All Rights Reserved.

  Permission to use, copy, modify, and distribute this software and its documentation for any purpose and without fee is hereby granted, provided that the above copyright notice appear in all copies and that both that copyright notice and this permission notice appear in supporting documentation.

  NEIL HODGSON DISCLAIMS ALL WARRANTIES WITH REGARD TO THIS SOFTWARE, INCLUDING ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS, IN NO EVENT SHALL NEIL HODGSON BE LIABLE FOR ANY SPECIAL, INDIRECT OR CONSEQUENTIAL DAMAGES OR ANY DAMAGES WHATSOEVER RESULTING FROM LOSS OF USE, DATA OR PROFITS, WHETHER IN AN ACTION OF CONTRACT, NEGLIGENCE OR OTHER TORTIOUS ACTION, ARISING OUT OF OR IN CONNECTION WITH THE USE OR PERFORMANCE OF THIS SOFTWARE.

- Telerik RadControls: Copyright © 2002-2012, Telerik. Usage of the included Telerik RadControls outside of JMP is not permitted.
- ZLIB Compression Library - Copyright © 1995-2005, Jean-Loup Gailly and Mark Adler.
- Made with Natural Earth. Free vector and raster map data @ naturalearthdata.com.
- Packages - Copyright © 2009-2010, Stéphane Sudre (s.sudre.free.fr). All rights reserved.

  Redistribution and use in source and binary forms, with or without modification, are permitted provided that the following conditions are met:

  Redistributions of source code must retain the above copyright notice, this list of conditions and the following disclaimer.

  Redistributions in binary form must reproduce the above copyright notice, this list of conditions and the following disclaimer in the documentation and/or other materials provided with the distribution.

  Neither the name of the WhiteBox nor the names of its contributors may be used to endorse or promote products derived from this software without specific prior written permission.

  THIS SOFTWARE IS PROVIDED BY THE COPYRIGHT HOLDERS AND CONTRIBUTORS “AS IS” AND ANY EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE DISCLAIMED. IN NO EVENT SHALL THE COPYRIGHT OWNER OR CONTRIBUTORS BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, INCIDENTAL, SPECIAL, EXEMPLARY, OR CONSEQUENTIAL DAMAGES (INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, PROCUREMENT OF SUBSTITUTE GOODS OR SERVICES; LOSS

OF USE, DATA, OR PROFITS; OR BUSINESS INTERRUPTION) HOWEVER CAUSED AND ON ANY THEORY OF LIABILITY, WHETHER IN CONTRACT, STRICT LIABILITY, OR TORT (INCLUDING NEGLIGENCE OR OTHERWISE) ARISING IN ANY WAY OUT OF THE USE OF THIS SOFTWARE, EVEN IF ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGE.

- iODBC software - Copyright © 1995-2006, OpenLink Software Inc and Ke Jin (www.iodbc.org). All rights reserved.

  Redistribution and use in source and binary forms, with or without modification, are permitted provided that the following conditions are met:

  – Redistributions of source code must retain the above copyright notice, this list of conditions and the following disclaimer.

  – Redistributions in binary form must reproduce the above copyright notice, this list of conditions and the following disclaimer in the documentation and/or other materials provided with the distribution.

  – Neither the name of OpenLink Software Inc. nor the names of its contributors may be used to endorse or promote products derived from this software without specific prior written permission.

  THIS SOFTWARE IS PROVIDED BY THE COPYRIGHT HOLDERS AND CONTRIBUTORS "AS IS" AND ANY EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE DISCLAIMED. IN NO EVENT SHALL OPENLINK OR CONTRIBUTORS BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, INCIDENTAL, SPECIAL, EXEMPLARY, OR CONSEQUENTIAL DAMAGES (INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, PROCUREMENT OF SUBSTITUTE GOODS OR SERVICES; LOSS OF USE, DATA, OR PROFITS; OR BUSINESS INTERRUPTION) HOWEVER CAUSED AND ON ANY THEORY OF LIABILITY, WHETHER IN CONTRACT, STRICT LIABILITY, OR TORT (INCLUDING NEGLIGENCE OR OTHERWISE) ARISING IN ANY WAY OUT OF THE USE OF THIS SOFTWARE, EVEN IF ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGE.

- bzip2, the associated library "libbzip2", and all documentation, are Copyright © 1996-2010, Julian R Seward. All rights reserved.

  Redistribution and use in source and binary forms, with or without modification, are permitted provided that the following conditions are met:

  Redistributions of source code must retain the above copyright notice, this list of conditions and the following disclaimer.

  The origin of this software must not be misrepresented; you must not claim that you wrote the original software. If you use this software in a product, an acknowledgment in the product documentation would be appreciated but is not required.

Altered source versions must be plainly marked as such, and must not be misrepresented as being the original software.

The name of the author may not be used to endorse or promote products derived from this software without specific prior written permission.

THIS SOFTWARE IS PROVIDED BY THE AUTHOR "AS IS" AND ANY EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE DISCLAIMED. IN NO EVENT SHALL THE AUTHOR BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, INCIDENTAL, SPECIAL, EXEMPLARY, OR CONSEQUENTIAL DAMAGES (INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, PROCUREMENT OF SUBSTITUTE GOODS OR SERVICES; LOSS OF USE, DATA, OR PROFITS; OR BUSINESS INTERRUPTION) HOWEVER CAUSED AND ON ANY THEORY OF LIABILITY, WHETHER IN CONTRACT, STRICT LIABILITY, OR TORT (INCLUDING NEGLIGENCE OR OTHERWISE) ARISING IN ANY WAY OUT OF THE USE OF THIS SOFTWARE, EVEN IF ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGE.

- R software is Copyright © 1999-2012, R Foundation for Statistical Computing.
- MATLAB software is Copyright © 1984-2012, The MathWorks, Inc. Protected by U.S. and international patents. See www.mathworks.com/patents. MATLAB and Simulink are registered trademarks of The MathWorks, Inc. See www.mathworks.com/trademarks for a list of additional trademarks. Other product or brand names may be trademarks or registered trademarks of their respective holders.

# 目次
## 信頼性 / 生存時間分析


## 1 JMP の概要

マニュアルとその他のリソース ..... 13
表記規則 ..... 15
JMP のマニュアル ..... 15
JMP ドキュメンテーションライブラリ ..... 16
JMP ヘルプ ..... 20
JMP を習得するためのその他のリソース ..... 20
チュートリアル ..... 20
サンプルデータテーブル ..... 21
統計用語と JSL 用語の習得 ..... 21
JMP を使用するためのヒント ..... 21
ツールヒント ..... 21
JMP User Community ..... 22
JMPer Cable ..... 22
JMP 関連書籍 ..... 22
「JMP スターター」ウィンドウ ..... 22

## 2 信頼性 / 生存時間分析について

寿命と故障の分析 ..... 23

## 3 寿命の一変量

寿命データに確率分布をあてはめる ..... 25
「寿命の一変量」プラットフォームの概要 ..... 27
「寿命の一変量」プラットフォームの例 ..... 27
「寿命の一変量」プラットフォームの起動 ..... 30
「寿命の一変量」レポート ..... 31
イベントプロット ..... 31
「分布の比較」レポート ..... 33
「統計量」レポート ..... 34

「競合原因分析」レポート . . . . . 37
「寿命の一変量」プラットフォームのオプション . . . . . 39
「寿命の一変量」プラットフォームの別例 . . . . . 40
競合原因の除去 . . . . . 40
スケールの変更 . . . . . 42
統計的詳細 . . . . . 43
ノンパラメトリックな推定値 . . . . . 44
パラメトリックな分布 . . . . . 44

## 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 . . . . . 57**
「寿命の二変量」プラットフォームの概要 . . . . . 59
「寿命の二変量」プラットフォームの例 . . . . . 59
「寿命の二変量」プラットフォームの起動 . . . . . 62
「寿命の二変量」レポート . . . . . 64
データの要約 . . . . . 64
散布図 . . . . . 64
ノンパラメトリック . . . . . 67
比較 . . . . . 68
結果 . . . . . 72
カスタム関係式 . . . . . 80
「寿命の二変量」プラットフォームのオプション . . . . . 82
「寿命の二変量」プラットフォームのその他の例 . . . . . 83
「Capacitor」サンプル . . . . . 83
カスタム関係式の例 . . . . . 84

## 5 再生モデルによる分析

**時間経過に伴う繰り返しイベントの度数やコストをモデル化する . . . . . 87**
「再生モデルによる分析」の概要 . . . . . 89
「再生モデルによる分析」プラットフォームの例 . . . . . 89
「再生モデルによる分析」プラットフォームの起動 . . . . . 92
「再生モデルによる分析」プラットフォームのオプション . . . . . 93
モデルのあてはめ . . . . . 94
「再生モデルによる分析」プラットフォームのその他の例 . . . . . 97
ぼうこう癌の再発の例 . . . . . 97

船舶用ディーゼルエンジンの例 . . . . . 100

## 6 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 . . . . . 105**

「劣化データ分析」プラットフォームの概要 . . . . . 107

「劣化データ分析」プラットフォームの例 . . . . . 107

「劣化データ分析」プラットフォームの起動 . . . . . 109

「劣化データ分析」レポート . . . . . 110

モデルの指定 . . . . . 112

単純線形経路 . . . . . 112

非線形経路 . . . . . 115

逆推定 . . . . . 124

予測グラフ . . . . . 125

「劣化データ分析」プラットフォームのオプション . . . . . 127

モデルのレポート . . . . . 129

モデルリスト . . . . . 130

レポート . . . . . 130

破壊劣化試験 . . . . . 131

安定性試験 . . . . . 134

## 7 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 . . . . . 137**

「信頼性予測」プラットフォームの概要 . . . . . 139

「信頼性予測」プラットフォームの使用例 . . . . . 139

「信頼性予測」プラットフォームの起動 . . . . . 142

「信頼性予測」レポート . . . . . 144

「観測データ」レポート . . . . . 145

「寿命の一変量」レポート . . . . . 146

「予測」レポート . . . . . 146

「信頼性予測」プラットフォームのオプション . . . . . 149

## 8 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 . . . . . 151**

「信頼性成長」プラットフォームの概要 . . . . . 153

「信頼性成長」プラットフォームの使用例 . . . . . 153

「信頼性成長」プラットフォームの起動 . . . . . 157
イベントまでの時間 . . . . . 157
タイムスタンプ . . . . . 158
イベント度数 . . . . . 158
フェーズ . . . . . 158
By . . . . . 158
データの種類 . . . . . 159
「信頼性成長」レポート . . . . . 161
「観測データ」レポート . . . . . 161
「信頼性成長」プラットフォームのオプション . . . . . 163
モデルのあてはめ . . . . . 163
スクリプト . . . . . 164
［モデルのあてはめ］のオプション . . . . . 164
Crow AMSAA . . . . . 164
Crow AMSAA 修正最尤法 . . . . . 170
パラメータ指定 Crow AMSAA . . . . . 172
区分 Weibull-NHPP . . . . . 173
再初期化 Weibull-NHPP . . . . . 177
区分 Weibull-NHPP 変化点検出 . . . . . 179
「信頼性成長」プラットフォームのその他の例 . . . . . 180
区間打ち切りデータに対する区分 NHPP-Weibull モデル . . . . . 180
区分 Weibull-NHP 変化点検出モデル . . . . . 183
「信頼性成長」プラットフォームの統計的詳細 . . . . . 185
「Crow-AMSAA」レポートの統計的詳細 . . . . . 185
「区間 Weibull-NHPP 変化点検出」レポートの統計的詳細 . . . . . 186

## 9 信頼性ブロック図

**システム全体の信頼性を計算する . . . . . 187**
「信頼性ブロック図」プラットフォームの概要 . . . . . 189
「信頼性ブロック図」プラットフォームの使用例 . . . . . 189
部品の追加 . . . . . 191
図の整列 . . . . . 192
図形の接続 . . . . . 193
部品の設定 . . . . . 194
「信頼性ブロック図」ウィンドウ . . . . . 195

プレビューウィンドウ . . . . . 196
「信頼性ブロック図」プラットフォームのオプション . . . . . 197
「デザイン」と「ライブラリ」の赤い三角ボタンのメニュー . . . . . 200
ワークスペースのオプション . . . . . 201
部品の「分布」プロパティ . . . . . 201
設定内容 . . . . . 202
ノンパラメトリック分布のデータの入力 . . . . . 203
「信頼性ブロック図」で表示できるプロファイル . . . . . 204
「分布」プロファイル . . . . . 205
「平均余寿命」プロファイル . . . . . 205
「信頼性」プロファイル . . . . . 206
「分位点」プロファイル . . . . . 206
「密度」プロファイル . . . . . 207
「ハザード」プロファイル . . . . . 207
「Birnbaum 要素重要度」プロファイル . . . . . 208
余寿命 Birnbaum 要素重要度 . . . . . 209
平均故障時間 . . . . . 209
信頼度の代数式の出力 . . . . . 210

## 10 生存時間分析

**生存時間データを分析する . . . . . 211**
生存時間分析の概要 . . . . . 213
生存時間分析の例 . . . . . 214
「生存時間分析」プラットフォームの起動 . . . . . 215
生存分析プロット . . . . . 216
「生存時間分析」プラットフォームのオプション . . . . . 216
指数、Weibull、対数正規プロットとあてはめ . . . . . 219
あてはめた分布のグラフ . . . . . 222
競合する原因 . . . . . 222
生存時間分析のその他の例 . . . . . 223
競合する原因の例 . . . . . 225
区間打ち切りの例 . . . . . 227
生存時間分析の統計レポート . . . . . 229

## 11 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** ..... 233
「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」の概要 ..... 235
「生存時間（パラメトリック）のあてはめ」の例 ..... 235
「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 ..... 237
「生存時間のあてはめ(パラメトリック)」レポート ..... 238
「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」のオプション ..... 239
「非線形回帰」プラットフォームによる分析 ..... 241
「生存時間（パラメトリック）のあてはめ」のその他の例 ..... 241
Arrhenius加速寿命の対数正規モデル ..... 241
区間打ち切りデータに対する加速故障時間モデル ..... 244
「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 ..... 246
「Right-Censored」データ ..... 247
「非線形回帰」プラットフォームでのWeibull回帰モデル ..... 247
「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 ..... 250
「生存時間(パラメトリック)のあてはめ」の統計的詳細 ..... 252
生存時間分布の損失計算式 ..... 252

## 12 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** ..... 255
「比例ハザードのあてはめ」の概要 ..... 257
「比例ハザードのあてはめ」プラットフォームの例 ..... 257
2水準におけるリスク比 ..... 259
「比例ハザードのあてはめ」プラットフォームの起動 ..... 260
「比例ハザードモデルのあてはめ」レポート ..... 261
「比例ハザードモデルのあてはめ」のオプション ..... 262
効果や水準が複数あるモデルの例 ..... 262
3水準以上のときのリスク比 ..... 265

## A 参考文献

## 索引

**信頼性/生存時間分析** ..... 269

# 第 1 章

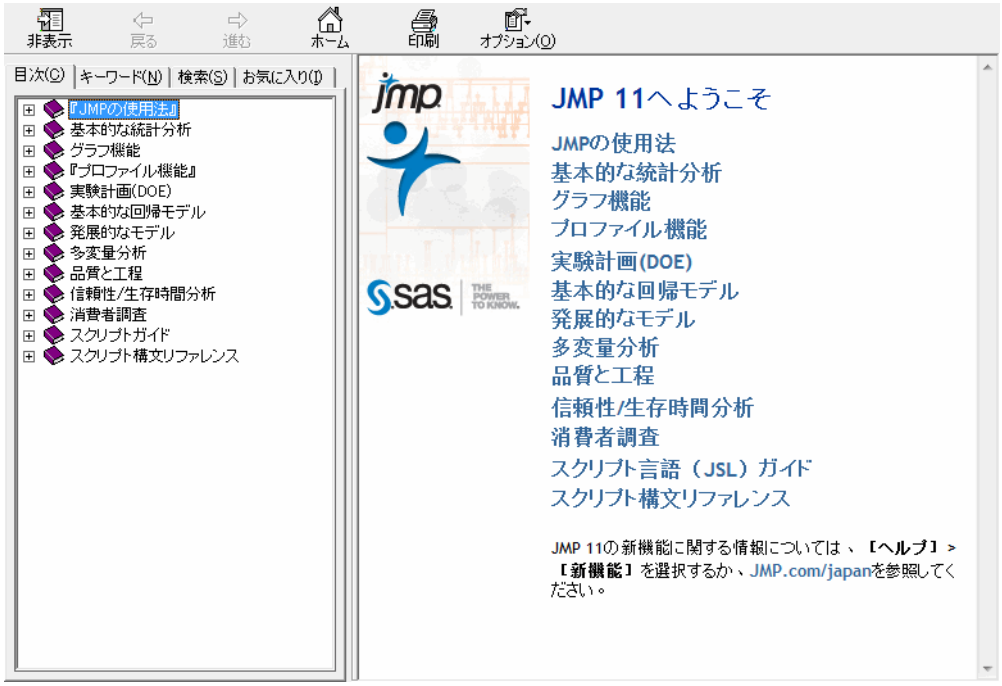
# JMP の概要

## マニュアルとその他のリソース

この章には以下の情報が記載されています。

- 本書の表記法
- JMP のマニュアル
- JMP ヘルプ
- その他のリソース
  - その他の JMP のドキュメンテーション
  - チュートリアル
  - 索引
  - Web リソース

**図 1.1** JMP ヘルプのホームウィンドウ（Windows）



# 目次

表記規則 . . . . . 15
JMP のマニュアル . . . . . 15
JMP ドキュメンテーションライブラリ . . . . . 16
JMP ヘルプ . . . . . 20
JMP を習得するためのその他のリソース . . . . . 20
チュートリアル . . . . . 20
サンプルデータテーブル . . . . . 21
統計用語と JSL 用語の習得 . . . . . 21
JMP を使用するためのヒント . . . . . 21
ツールヒント . . . . . 21
JMP User Community . . . . . 22
JMPer Cable . . . . . 22
JMP 関連書籍 . . . . . 22
「JMP スターター」ウィンドウ . . . . . 22

# 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`*（斜体）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
- 次の項目は太字で表記しています。
  - 重要な単語や句、JMPに固有の定義を持つ単語や句
  - マニュアルのタイトル
  - 変数名
- JMP Proのみの機能にはJMP Proアイコン JMP PRO がついています。JMP Proの機能の概要については http://www.jmp.com/software/pro/ をご覧ください。

**注：**特別な情報および制限事項には、この文のように「注:」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には、印刷版、PDF版、電子本など、さまざまな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。
- 電子本は Amazon、Safari Books Online、および Apple iBookstore でお求めになれます。

## 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 |
| 『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 | ［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：<br>• 一変量の分布<br>• 二変量の関係<br>• 対応のあるペア<br>• 表の作成<br>ブートストラップを使用した標本分布の近似方法も含まれています。 |

| 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 | ［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：<br>• グラフビルダー<br>• 重ね合わせプロット<br>• 三次元散布図<br>• 等高線図<br>• バブルプロット<br>• パラレルプロット<br>• セルプロット<br>• ツリーマップ<br>• 散布図行列<br>• 三角図<br>• チャート<br>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。 |
| 『プロファイル機能』 | 対話式のプロファイルツールの使い方を学ぶ。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。誤差因子の分析が、ランダム入力を使用したシミュレーションの実行とともに含まれています。 |
| 『実験計画 (DOE)』 | 実験の計画方法と適切な標本サイズの決定方法を学ぶ | **［実験計画（DOE）］**メニューのすべてのトピックについて。 |
| 『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 | ［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：<br>• 標準最小 2 乗<br>• ステップワイズ<br>• 正則化回帰<br>• 混合モデル<br>• MANOVA<br>• 対数線形 - 分散<br>• 名義ロジスティック<br>• 順序ロジスティック<br>• 一般化線形モデル |

| マニュアル | 目的 | 内容 |
|---|---|---|
| 『発展的なモデル』 | 付加的なモデリング手法について学ぶ | ［分析］>［モデリング］メニューで使用できる以下のプラットフォームの説明：<br>• パーティション<br>• ニューラル<br>• モデルの比較<br>• 非線形回帰<br>• Gauss 過程<br>• 時系列分析<br>• 応答スクリーニング<br>［分析］>［モデリング］メニューの「スクリーニング」プラットフォームについては『実験計画 (DOE)』で説明しています。 |
| 『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 | ［分析］>［多変量］メニューで使用できる以下のプラットフォームの説明：<br>• 多変量の相関<br>• クラスター分析<br>• 主成分分析<br>• 判別分析<br>• PLS |
| 『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 | ［分析］>［品質と工程］メニューで使用できる以下のプラットフォームの説明：<br>• 管理図ビルダーと個々の管理図<br>• 測定システム分析<br>• 変動性図 / 計数値用ゲージチャート<br>• 工程能力<br>• パレート図<br>• 特性要因図 |

| 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 | ［分析］>［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：<br>• 寿命の一変量<br>• 寿命の二変量<br>• 再生モデルによる分析<br>• 劣化分析<br>• 信頼性予測<br>• 信頼性成長<br>• 信頼性ブロック図<br>• 生存時間分析<br>• 生存時間(パラメトリック)のあてはめ<br>• 比例ハザードのあてはめ |
| 『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 | ［分析］>［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：<br>• カテゴリカル<br>• 因子分析<br>• 選択モデル<br>• アップリフト<br>• 項目分析 |
| 『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。 |

**注：**［**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。
- http://jmp.com/support/help/ でヘルプを検索します（英語のみ）。

# 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（「チュートリアル」（20ページ）を参照）
- サンプルデータ（「サンプルデータテーブル」（21ページ）を参照）
- 索引（「統計用語とJSL用語の習得」（21ページ）を参照）
- 使い方ヒント（「JMPを使用するためのヒント」（21ページ）を参照）
- Webリソース（「JMP User Community」（22ページ）を参照）
- 専門誌『JMPer Cable』（「JMPer Cable」（22ページ）を参照）
- JMPに関する書籍（「JMP関連書籍」（22ページ）を参照）
- JMPスターター（「「JMPスターター」ウィンドウ」（22ページ）を参照）

## 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、円グラフの作成、グラフビルダーの使用など、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。次の操作はすべて［**ヘルプ**］>［**サンプルデータ**］で表示されるウィンドウで行えます。

- サンプルデータディレクトリを開く。
- すべての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。
- カテゴリ別に整理されたリストからサンプルデータテーブルを見つける。

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¥<バージョン番号>¥Samples¥Data

Macintoshの場合: \Library\Application Support\JMP\<バージョン番号>\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。

## 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。詳細については、『JMPの使用法』を参照してください。

## 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：**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**］（Macintosh の場合は［**JMP**］>［**環境設定**］>［**一般**］）を選択し、［**メニューのヒントを表示**］のチェックを外します。

## 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ページ構成のガイド、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**］を選択します。

## JMPer Cable

JMPer Cableは、JMPユーザを対象とした年刊の専門誌です。JMPer Cableは次のJMP Webサイトで閲覧可能です。

http://www.jmp.com/about/newsletters/jmpercable/（英語）

## 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/japan/academic/books.shtml

## 「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。

- 「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。

# 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」は、説明変数が 1 つある場合の寿命データを分析します。加速寿命試験のようなデータを、さまざまな変換式でモデル化できます。変換式を独自に定義することもできます。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。
- 「再生モデルによる分析」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扱います。たとえば、故障したユニットを修理してまた稼動させる場合などです。詳細については、第 5 章「再生モデルによる分析」を参照してください。
- 「劣化分析」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。さらに、予測された疑似的な故障時間データをもとに、通常の寿命分析を行えます。詳細については、第 6 章「劣化データ分析」を参照してください。
- 「信頼性予測」は、製品の故障数を予測します。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 7 章「信頼性予測」を参照してください。
- 「信頼性成長」は、修理や再生できるシステムの故障を分析します。1 つのシステムの信頼性が、設計などの改善により、どのように変化するかを調べます。詳細については、第 8 章「信頼性成長」を参照してください。
- 「信頼性ブロック図」は、複数の部品から構成されているシステムの信頼性を求めます。指定された各部品の寿命分布に基づき、全体の信頼性を求めます。詳細については、第 9 章「信頼性ブロック図」を参照してください。
- 「生存時間分析」は、グループごとに生存曲線を求めます。また、グループ間の生存曲線を比較する検定を行います。また、いくつかの寿命分布を、グループごとにあてはめることができます。詳細については、第 10 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」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 11 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」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 12 章「比例ハザードのあてはめ」を参照してください。

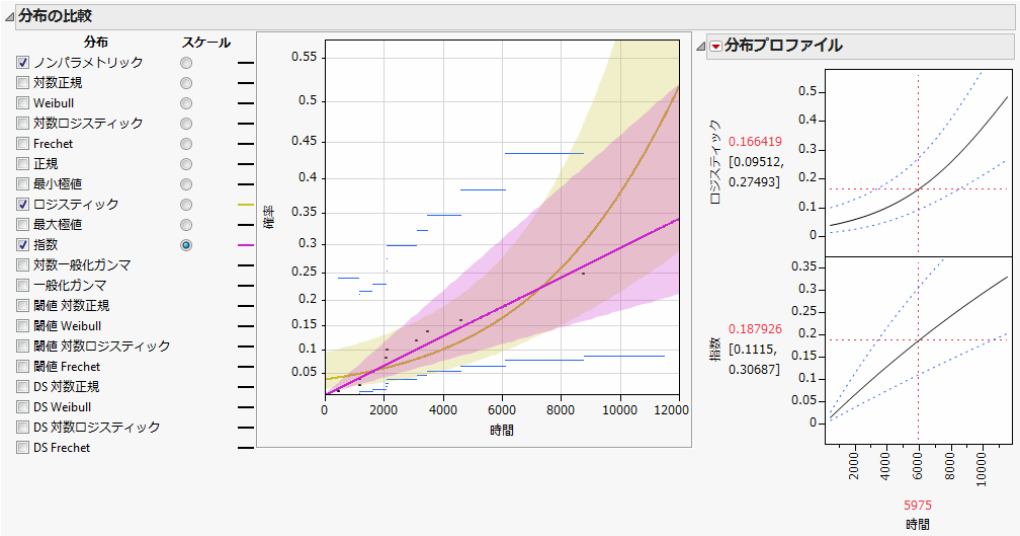
# 第 3 章

# 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」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。Weibull、Fréchet、極値などの良く使われている寿命分布が用意されています。それらの分布を比較し、データに最も良くあてはまっているものを特定できます。競合原因や打ち切りデータも、分析できます。

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 . . . . . 27
「寿命の一変量」プラットフォームの例 . . . . . 27
「寿命の一変量」プラットフォームの起動 . . . . . 30
「寿命の一変量」レポート . . . . . 31
イベントプロット . . . . . 31
「分布の比較」レポート . . . . . 33
「統計量」レポート . . . . . 34
「競合原因分析」レポート . . . . . 37
「寿命の一変量」プラットフォームのオプション . . . . . 39
「寿命の一変量」プラットフォームの別例 . . . . . 40
競合原因の除去 . . . . . 40
スケールの変更 . . . . . 42
統計的詳細 . . . . . 43
ノンパラメトリックな推定値 . . . . . 44
パラメトリックな分布 . . . . . 44

## 「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、信頼性の向上のために、製品・部品・システムなどの寿命を分析します。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。寿命データ分析は、品質や信頼性を向上するのに、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（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。これらは、［**実験計画 (DOE)**］ > ［**標本サイズ / 検出力**］に用意されています。

## 「寿命の一変量」プラットフォームの例

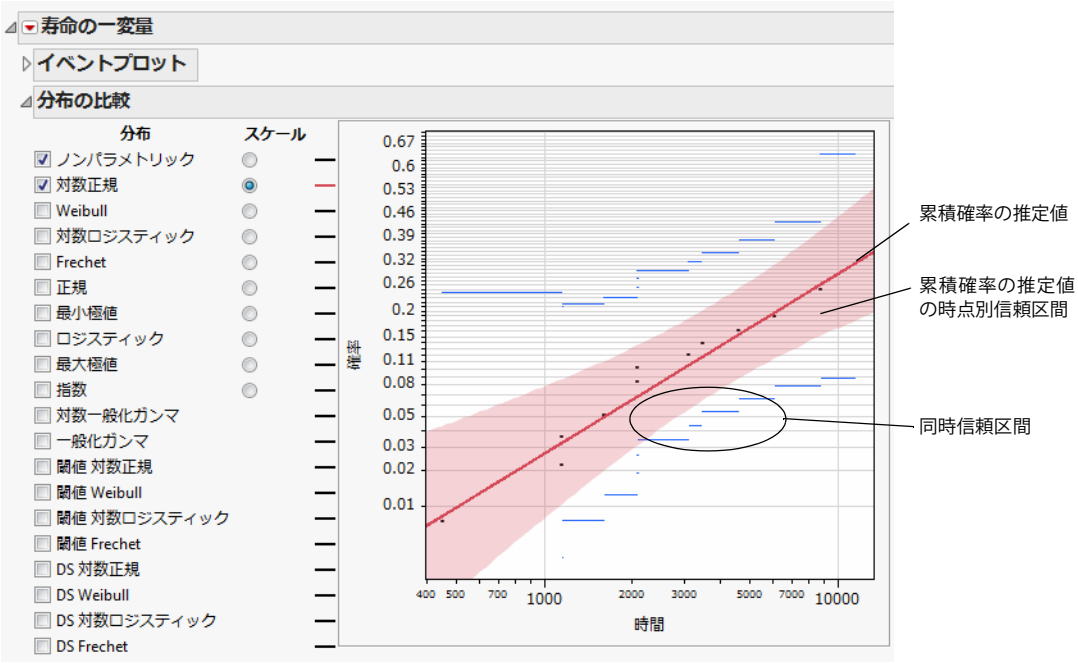
この例では、70 基のエンジンファンを使った試験で得られた、故障時間のデータを取り上げます。データには、故障前に打ち切られたものも含まれています。このデータに寿命分布をあてはめ、信頼性に関するさまざまな指標を求めていきます。

1. 「Reliability」フォルダにある「Fan.jmp」サンプルデータを開きます。
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。

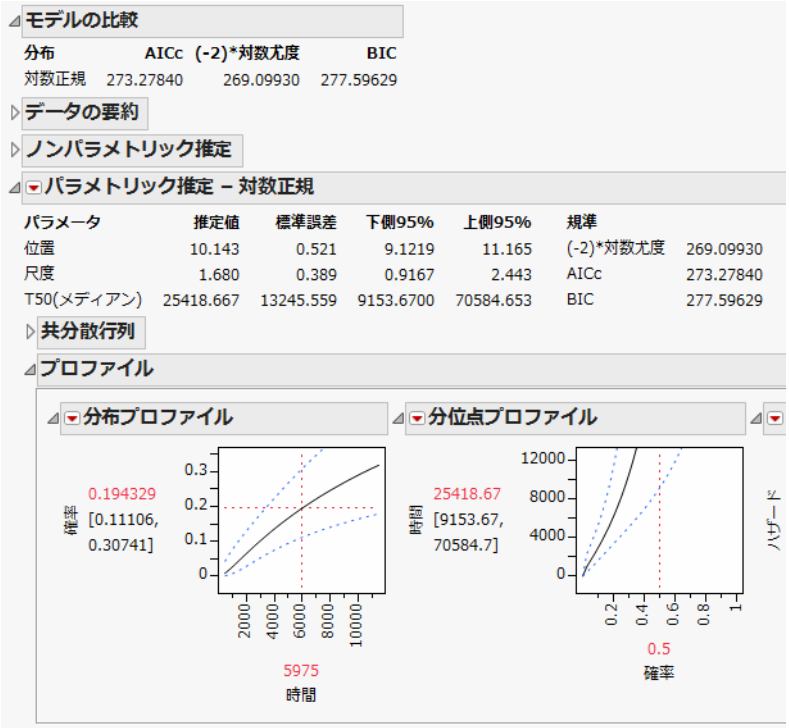
図 **3.2** 確率プロット




確率プロットの赤い線は、データ点によくあてはまっています。

「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、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



**モデルの比較**

| 分布 | AICc | (-2)*対数尤度 | BIC |
|---|---|---|---|
| 対数正規 | 273.27840 | 269.09930 | 277.59629 |

**データの要約**

**ノンパラメトリック推定**

**パラメトリック推定 – 対数正規**

| パラメータ | 推定値 | 標準誤差 | 下側95% | 上側95% | 規準 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 位置 | 10.143 | 0.521 | 9.1219 | 11.165 | (-2)*対数尤度 | 269.09930 |
| 尺度 | 1.680 | 0.389 | 0.9167 | 2.443 | AICc | 273.27840 |
| T50(メディアン) | 25418.667 | 13245.559 | 9153.6700 | 70584.653 | BIC | 277.59629 |

**共分散行列**

**プロファイル**

**分布プロファイル**



**分位点プロファイル**

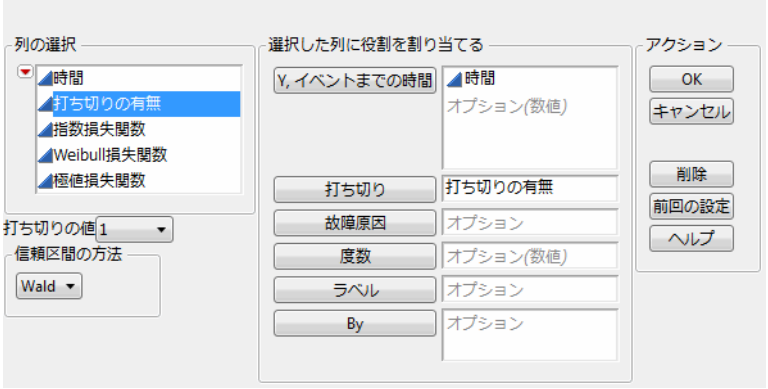


「パラメトリック推定」のレポートでは、あてはめた分布のパラメータ推定値が表示されます。また、あてはめた分布の情報をグラフで表した「プロファイル」も表示されます。「プロファイル」は、累積確率や分位点を知るのに役立ちます。この例の「分位点プロファイル」を見ると、中央値の推定値は 25,418.67 時間であるのが分かります。

# 「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




「寿命の一変量」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（故障が生じるまでの時間）、または打ち切りまでの時間。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、「イベントプロット」（31 ページ）を参照してください。

**打ち切り**　観測値が打ち切られているかどうかを示します。ここには、たとえば、打ち切りの場合には 1 を、打ち切りでない場合には 0 を含んでいる列を指定してください。

**故障原因**　故障原因が含まれた列を指定してください。この分析は、影響が強い原因を特定するのに役立ちます。［**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、閾値分布、DS 分布、パラメータ指定分布、または Bayes 推定モデルを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）、ベイズ情報量規準（BIC）、または、「-2 × 対数尤度」を選択できます。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（「モデルの比較」（34 ページ）を参照）。

– ［**故障原因**］列が、打ち切りを示すデータ値を含んでいる場合には、［**故障原因の列で打ち切りを表す値**］オプションを選択してください。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、打ち切りを示すデータ値を入力してください。

競合原因の分析については、Meeker and Escobar（1998、第15章）を参照してください。また、「競合原因の除去」（40ページ）でも解説しています。

**度数**　複数のユニットがある場合の観測値の度数。複数のユニットが記録されている場合に、値が0または正の整数であるとき、その値は各行の観測値の度数（個数）を表します。

**ラベル**　イベントに、行番号以外の識別子がついている場合に使います。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。

**打ち切りの値**　［打ち切り］列を選択した後、リストで打ち切りを示す値を選択します。欠測値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。

**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。「カスタム推定」レポートで［Wald］法を選択した場合、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。なお、グラフやプロファイルに表示される信頼区間は、常に、（変換を伴う）Wald法によって求められています。また、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。詳細については、「統計的詳細」（43ページ）を参照してください。

# 「寿命の一変量」レポート

レポートウィンドウは、主に3つのセクションに分かれています。


- 「イベントプロット」（31ページ）
- 「「分布の比較」レポート」（33ページ）
- 「「統計量」レポート」（34ページ）

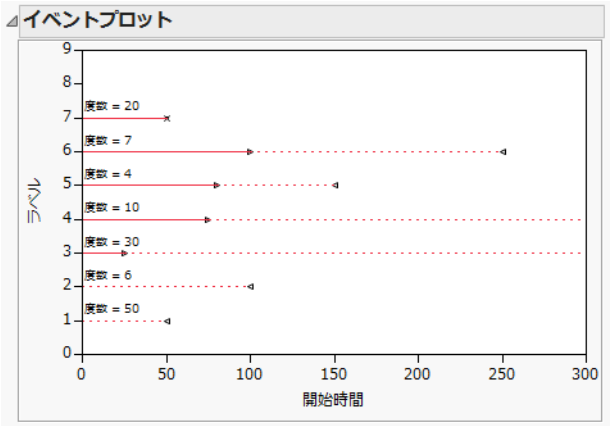

起動ウィンドウで［故障原因］列を選択した場合は、次のレポートも表示されます。


- 「「故障原因の組み合わせ」レポート」（37ページ）
- 「「原因ごとの分析」レポート」（38ページ）


## 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表したグラフです。次のイベントプロット（図3.5）は、「Censor Labels.jmp」データを用いたものです。このデータには、3種類の打ち切りが含まれています。

図 **3.5** 打ち切りデータのイベントプロット




故障（上の 1 本）

区間打ち切り（次の 2 本）

右側打ち切り（中央の2本）

左側打ち切り（下の 2 本）

「イベントプロット」の各点は時間を表しています。——→ は、右端の時間において、ユニットが故障したことを示しています。

他の線種は、異なる打ち切りの種類を示します。

## 右側打ち切りデータ

——→····· は、試験期間中には、ユニットが故障しなかったことを示しています。試験期間が十分に長ければ、このユニットも故障したかもしれませんが、現在の試験では、故障時間が観測されていません。

右側打ち切りを表すには、時間を含む列を 1 列、および、打ち切り値を含む列を 1 列、データテーブルに用意してください。または、時間を含む列を 2 列、用意してください。

## 左側打ち切りデータ

·····◁ は、試験期間中にユニットが故障したが、いつ故障したかは不明な状態を示します（ユニットを調査した時点で、すでにユニットが故障していた場合など）。

左側打ち切りを表すには、時間値を含む列を 2 列、用意してください。そして、左側の列には欠測値、右側の列は、ユニットを調査をした時点を含めてください。

## 区間打ち切りデータ

——→·····◁ は、ユニットが故障した期間だけがわかっていることを示します。区間打ち切りでも、左側打ち切りと同じように、ある時点以前で、故障が生じたことがわかっています。ただし、区間打ち切りでは、故障が生じた時点が、ある程度の幅をもってわかっています。一方、左側打ち切りは、どの時点以前にユニットが故障したかしか明らかになっておらず、どの時点以降で故障が生じたかは不明です。

図 3.6 は、各種の打ち切りデータが混じったデータテーブルです。

図 **3.6** 打ち切りデータの種類

| | 開始時間 | 終了時間 | 度数 | 打ち切り |
|---|---|---|---|---|
| 1 | • | 50 | 50 | 1 |
| 2 | • | 100 | 6 | 1 |
| 3 | 25 | • | 30 | 1 |
| 4 | 75 | • | 10 | 1 |
| 5 | 80 | 150 | 4 | 1 |
| 6 | 100 | 250 | 7 | 1 |

左側打ち切り（行1と2）

右側打ち切り（行3と4）

区間打ち切り（行5と6）

## 「分布の比較」レポート

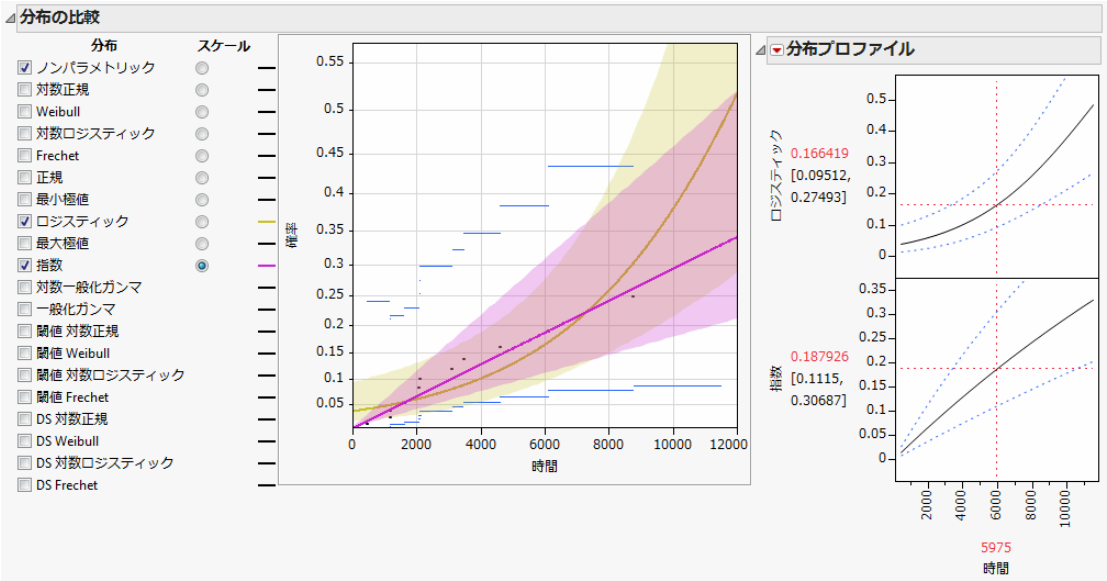
「分布の比較」レポートでは、いくつかの分布をあてはめて、また、それらを比較できます。グラフには、ノンパラメトリックな推定値（Kaplan-Meier 推定値、もしくは、Turnbull 推定値）と、その信頼区間がデフォルトで表示されます。

分布を選択すると、次のような処理が行われます。

- 分布のあてはめが行われ、「パラメトリック推定」レポートが表示されます。「パラメトリック推定」（35 ページ）を参照してください。
- 確率プロットに、推定された累積故障確率の曲線（累積分布関数）が表示されます（図 3.7 では、赤紫と黄色の線）。
- デフォルトでは、ノンパラメトリックな推定値が点で表示されています（青色の水平線に切り替えることもできます）。なお、右側打ち切りの行はプロットされません。
- 色のついた陰影の領域は、累積故障確率（累積分布関数）の信頼区間を示します。
- 「分布プロファイル」では、指定した時間の累積故障確率を知ることができます。

図 3.7 は、「分布の比較」レポートの一例です。

図 **3.7** 分布の比較




## 「統計量」レポート

「統計量」レポートには、オブザベーションの個数、ノンパラメトリック推定値、パラメトリック推定値などの統計量が表示されます。

### モデルの比較

「モデルの比較」レポートには、あてはめた分布ごとにモデル選択規準が表示されます。「AICc」、「BIC」、もしくは、「(-2)* 対数尤度」によって、分布が良い順に並べることができます。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。なお、どの規準でも大小関係が同じであれば、このコマンドを実行しても並び順は変わりません。このオプションの詳細は、「「寿命の一変量」プラットフォームのオプション」(39 ページ)を参照してください。

### データの要約

「データの要約」レポートには、オブザベーションの個数、打ち切りではないデータの個数、打ち切りの種類別に、打ち切りデータ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。データが右側打ち切りの場合には、中間点調整を行った Kaplan-Meier 推定値、および通常の Kaplan-Meier 推定値が求められます。また、1 時点ごとに算出した信頼区間（以下、「時点別信頼区間」と呼ぶ）、およびすべての期間を考慮して算出した同時信頼区間が求められます。

データが区間打ち切りの場合には、Turnbull推定値が求められます。また、Turnbull推定値に対する、時点別信頼区間と同時信頼区間も求められます。

時点別信頼区間は、「下側95%」列と「上側95%」列に表示されます。この時点別信頼区間は、ある1時点だけを考慮して算出した、累積故障確率の信頼区間です。

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」（44ページ）を参照してください。

## パラメトリック推定

「パラメトリック推定」レポートには、あてはめた分布ごとに、推定結果が表示されます。

パラメータ推定値、標準誤差、信頼区間が表示されます。それらの下の「共分散行列」レポートでは、パラメータ推定値の分散共分散行列が表示されます。また、モデル選択規準の統計量も表示されます。

### 「共分散行列」レポート

「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。

### 「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**　対数尤度関数の等高線図に対して、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**　対数尤度関数のプロファイルに対して、表示／非表示を切り替えます。

**分布パラメータの指定**　パラメータを、指定された値に固定します。位置パラメータや尺度パラメータの値を入力し、固定したいパラメータのチェックボックスをオンにして、［**更新**］をクリックしてください。それらのパラメータを指定された値に固定して、他のパラメータを再推定します。再推定されたパラメータ推定値、共分散行列、プロファイルが表示されます。

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。

**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］）に基づいて、分布のパラメータを、Bayes 法により推定します。このオプションは、一部の分布でのみ使用できます。「Bayes 推定」の赤い三角ボタンのメニューからいずれかの事前分布を選択すると、関連するパラメータが表示されます。

– **位置と尺度の事前分布**: 事前分布のパラメータを指定します。「事前分布」列の赤い三角ボタンをクリックし、各パラメータの事前分布を選択てください。また、事前分布に対して、適当なハイパーパラメータ値を入力してください。計算に用いる乱数シミュレーションに対して、反復回数と乱数シード値を指定し（1 より大きい正の整数にする必要があります）、事前分布の散布図を表示するかどうかを選択できます。

– **分位点とパラメータの事前分布**: 分位点と尺度の範囲を指定します。「事前分布」列の赤い三角ボタンをクリックし、各パラメータの事前分布を選択てください。確率と信頼限界の新しい値を入力できます。計算に用いる乱数シミュレーションに対して、反復回数と乱数シード値を指定し（1 より大きい正の整数にする必要があります）、事前分布の散布図を表示するかどうかを選択できます（Meeker and Escobar 1998）。

– **故障確率の事前分布**: 故障確率を、推定値、推定誤差（%）、範囲で指定します。故障確率、確率推定値、推定誤差の新しい値を入力できます。事前故障確率関数と時間のプロットが表示されます。計算に用いる乱数シミュレーションに対して、反復回数と乱数シード値を指定し（1 より大きい正の整数にする必要があります）、事前分布の散布図を表示するかどうかを選択できます（Kaminskiy and Krivtsov 2005）。

［**モデルのあてはめ**］をクリックすると、乱数シミュレーションによって事後分布が求められ、「Bayes 推定」というレポートが作成されます。このレポートでは、パラメータごとに、事後分布の要約統計量が表示されます。また、事後分布の散布図が描画されます。その他にも、事後分布の中央値によって、累積故障確率と分位点のプロファイルが描画されます。

故障ゼロのデータでも、Bayes 推定を実行できます。環境設定の［**故障ゼロの場合のみに WeiBayes 分析**］をオンにすると、故障ゼロのデータを分析する場合に WeiBayes 法が使用されます。この環境設定は、デフォルトでオンになっています（以前のリリースと同様）。故障ゼロのデータに対して完全な Bayes 推定を実行するには、この環境設定をオフにします。この環境設定は、［**ファイル**］>［**環境設定**］>［**プラットフォーム**］>［**寿命の一変量**］を選択すると表示されます。

**カスタム推定**　指定された時間に対して、累積故障確率（および、生存確率）を計算します。また、指定された累積故障確率に対して、時間を計算します。インターフェイスは、累積故障確率を求めるセクションと、時間を求めるセクションに分かれています。累積故障確率、または、時間を入力して、**Enter** キーを押すと、それに対する推定値が計算されます。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。

**平均余寿命**　あてはめた分布に基づき、平均余寿命を求めます。時間を入力して Enter キーを押すと、その時間からの平均余寿命が計算されます。「カスタム推定」と同様、プラス記号をクリックすると、値を追加できます。この統計量は、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、指数分布の場合に表示されます。

パラメータ推定値で使用される分布については、「パラメトリックな分布」（44 ページ）を参照してください。

## 「競合原因分析」レポート

「寿命の一変量」起動ウィンドウで、［故障原因］列を指定すると、競合原因分析が実行されます。「競合原因分析」レポートに、「故障原因の組み合わせ」、「統計量」、「原因ごとの分析」といった結果が表示されます。

### 「故障原因の組み合わせ」レポート

競合原因分析では、故障原因ごとに、分布をあてはめます。「故障原因の組み合わせ」のグラフは、故障原因ごとの確率プロットです。グラフのスケールには、デフォルトでは、線形スケールが使われています。

このグラフには、全体における累積故障確率も描画されます。以下のような操作によって、全体の累積故障確率をどのように改善できるかを、対話的に調べられます。

- グラフのスケールを変更するには、**「スケール」**列で分布を選択します。「スケールの変更」（42 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。
- 特定の故障原因を除去した時の、全体の累積故障確率を見たい場合には、除去する故障原因の［**除去**］チェックボックスを選択します。選択すると、グラフが直ちに更新されます。

  ある原因の「除去」チェックボックスを選択すると、その原因によって故障することはなくなると仮定されます。このオプションは、影響が大きい故障原因を特定する場合や、特定の故障原因がすでに存在していない場合などに有用です。

  「競合原因の除去」（40 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。
- 故障原因において、分布の種類を変更するには、**「分布」**リストから該当する分布を選択します。［**モデルの更新**］をクリックすると、選択した分布があてはめられ、グラフが更新されます。

## 競合原因の「統計量」レポート

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

「故障原因の要約」レポートには、故障原因ごとに、故障数と、分布のパラメータ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。

- 「原因」列には、故障原因、または、打ち切り値を表すラベルが表示されます。
- 2 つ目の列は、分布の推定が行えるほどの故障が生じているかどうかが示されます。故障個数が 2 未満の故障原因は、単に右側打ち切りとして処理されます。つまり、その故障原因で故障したユニットはないものとして分析が行われます。なお、「除去」されている故障原因に対しては、この列に「除去」と表示されます。
- 「度数」列には、故障原因ごとの故障個数が表示されます。
- 「分布」列には、その故障原因に対してあてはめられた分布の名前が表示されます。
- 「Parm*n*」列には、その故障原因に対してあてはめられた分布のパラメータ推定値が表示されます。

「故障原因の要約」の赤い三角ボタンには、全体に対する推定値を保存するオプションが用意されています。すべての故障原因を組み合わせて計算した、累積故障確率、分位点、ハザード、密度を保存するオプションが用意されています。

### 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。他のプラットフォームと同様、これらのプロファイルによって、対話的に結果を検討できます。

### 原因ごとの部分分布

部分分布（sub-distribution）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。プロファイルの下に「原因ごとの部分分布」レポートが表示されます。コンボボックスにて故障原因を選択すると、その故障原因の部分分布関数のプロファイルが描画されます。

## 「原因ごとの分析」レポート

「原因ごとの分析」では、故障原因ごとにあてはめた分布について、要約や適合度がレポートされています。この結果は、次の節で説明している結果と同じです。

- 「「分布の比較」レポート」（33 ページ）
- 「「統計量」レポート」（34 ページ）

# 「寿命の一変量」プラットフォームのオプション

「寿命の一変量」プラットフォーム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**　すべての分布をあてはめて、そのなかから、最良の分布を選択します。最良の分布を決めるための規準は、[**比較の規準**] オプションで変更できます。

**すべての非負分布のあてはめ**　非負データに対する分布（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）だけをあてはめて、そのなかから、最良の分布を選択します。このオプションでは、DS 分布または TH 分布は使用されません。データに負の値がある場合は、何も起こりません。データに 0 の値がある場合は、ゼロ強調（zero-inflated）の分布だけがあてはめられます。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」（54 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 DS 分布をあてはめます。DS 分布（Defective Subpopulation distribution: 故障部分母集団分布）の詳細は、「故障部分母集団の分布」（54 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時には、中間点が使われます。[**点の表示**] を解除したときは、中間点ではなく、通常の Kaplan-Meier 推定値が使われます。

**生存曲線の表示**　「分布の比較」の確率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**　「分位点プロファイル」の表示／非表示を切り替えます。

**ハザード関数の表示**　「ハザードプロファイル」の表示／非表示を切り替えます。

**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、「「統計量」レポート」（34 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**　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を切り替えます。

**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**　分布を比較するときの規準が変更されます。

表 **3.1** 比較の規準

| 規準 | 計算式[a] | 説明 |
|---|---|---|
| **(-2)* 対数尤度** | （省略） | 対数尤度をマイナス 2 倍したもの |

表 **3.1** 比較の規準（続き）

| 規準 | 計算式[a] | 説明 |
|---|---|---|
| **BIC** | $\text{BIC} = -2\text{loglikelihood} + k\ln(n)$ | Schwarz のベイズ情報量規準 |
| **AICc** | $\text{AICc} = -2\text{loglikelihood} + 2k\left(\frac{n}{n-k-1}\right)$<br>$\text{AICc} = \text{AIC} + \frac{2k(k+1)}{n-k-1}$ | 修正済みの赤池の情報量規準 |

a. これらの式において、$k$ は推定されるパラメータ数、$n$ は標本サイズです。

どの規準でも、値が最小となる分布が良いモデルと判断されます。どの規準を選択するかは、個人的な好みもあるかもしれませんが、データに関する知識に基づいたほうがよいでしょう。AIC は、Akaike（1974）で説明されています。また、Burnham and Anderson（2004）は、AICc と BIC によるモデル選択を述べています。

# 「寿命の一変量」プラットフォームの別例

ここでは、まず、競合原因分析にて、原因を除去する例を述べます。次に、確率プロットのスケールを変更する例を述べます。

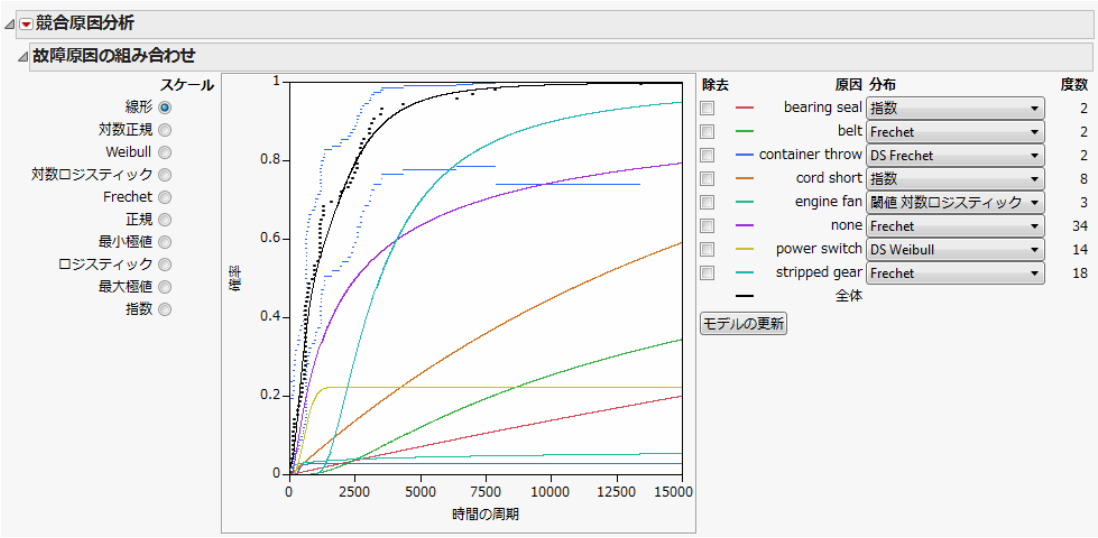
## 競合原因の除去

次の例では、故障原因ごとに、最適な分布を選択します。

1. 「Reliability」フォルダにある「Blenders.jmp」サンプルデータを開きます。
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。

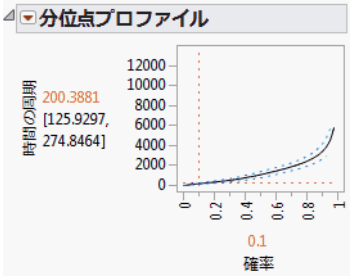
図 **3.8**「競合原因分析」レポート




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。

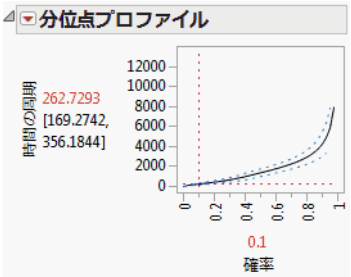
図 **3.9** ユニットが 10% だけ故障する時間




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。

    10% のユニットが故障するまでの時間は、263 まで延びます。

図 **3.10** 更新後の故障時間



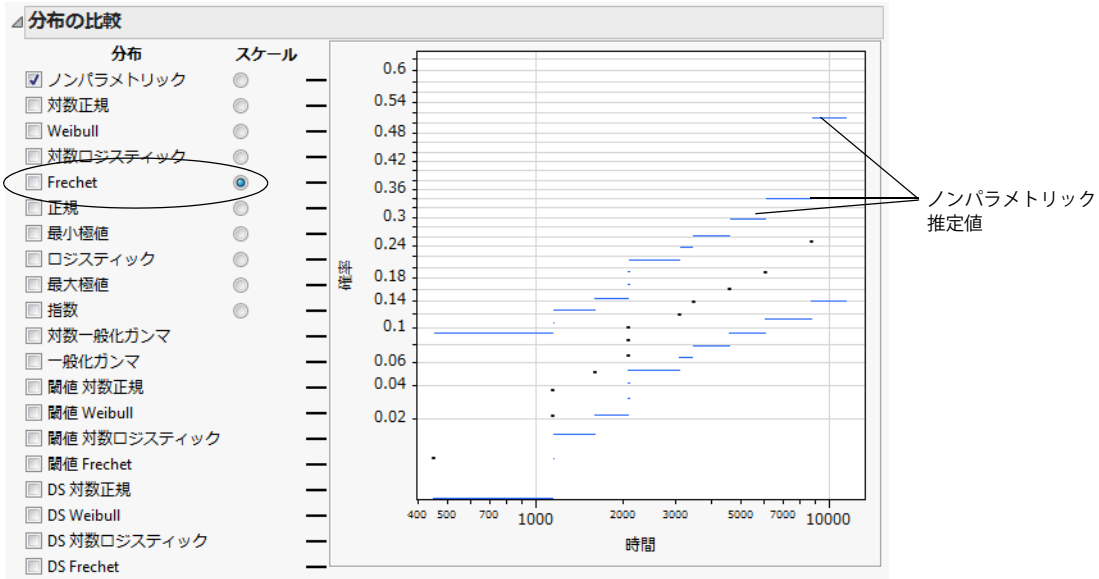

言い換えると、これらの原因が除去できたら、10% のユニットが故障するまでの時間は、約 31% も延びます。

## 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。[1]

1. 「「寿命の一変量」プラットフォームの例」（27 ページ）の手順ステップ 1 からステップ 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、［**Frechet**］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 **3.11** Fréchet のスケールで表示したノンパラメトリック推定値



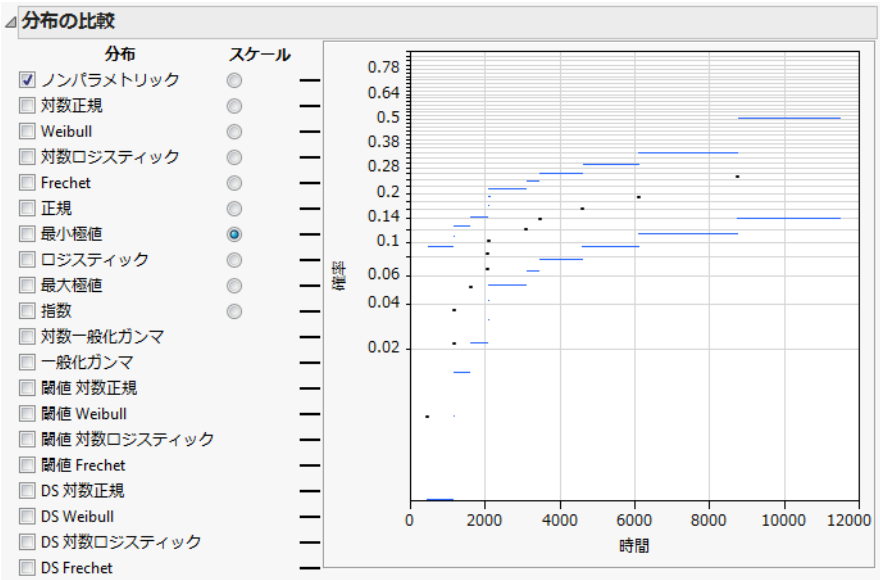

1. 異なるスケールを使用することは、さまざまな種類の「確率紙」に分布を描く作業といえます。

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 3.12）。つまり、最小極値分布は適切でないことがわかります。

図 **3.12** 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




# 統計的詳細

ここでは、「寿命の一変量」で行われる分析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の詳細については、Meeker and Escobar（1998、2 章から 5 章）に優れた説明が述べられています。

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として、Wald法とプロファイル尤度法の2つが用意されています。「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, pp. 332-333 および pp. 346-347）。 そのほかの信頼区間は、(変換を伴う)Wald法によって求められています(Meeker and Escobar, 1998、第7章)。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、第8章)。

## 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。推定方法として、データが非打ち切りと右側打ち切りだけの場合には、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。

**注：**JMPでは、多くの分布を、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、掛け合わすことにより導出されます。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 損失関数

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（「高度な一変量の分析」の章にある「モデルのあてはめ」を参照）。Weibull の確率密度関数と累積分布関数は、次式のとおりです。

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

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

$\alpha$ 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 $\beta = 1$ 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、位置パラメータ $\mu = \log(\alpha)$ と尺度パラメータ $\sigma = 1/\beta$ によって、対数変換の最小極値分布として表すこともできます。

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

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

この式で、

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

および

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

は、それぞれ、μ=0 および σ=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

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、μ=0 および σ=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、次式のとおりです。

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

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

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。

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

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

この式で、

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

および

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

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。

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

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

この式で、

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

および

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

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（SEV）

最小極値分布は、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、μに比べてσ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μ=0およびσ=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。

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

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

この式で、

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

および

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

は、それぞれ、μ=0 および σ=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（LEV）

最大極値分布は、右に歪んでいる非対称な分布です。μ>0 と比べて σ 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。

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

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

この式で、

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

および

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

は、それぞれ μ=0 および σ=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、θ は尺度パラメータ、γ は閾値パラメータです。信頼性分析では、γ = 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（LogGenGamma）

対数一般化ガンマ分布には、最小極値、最大極値、正規数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。

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

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

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

$$-\infty < \mu < \infty, \quad -12 < \lambda < 12, \text{ and } \sigma > 0.$$

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。

---

**注：** 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（GenGamma）

拡張一般化ガンマ分布には、一般化ガンマ、Weibull、対数正規、Fréchet、ガンマ、指数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。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。確率密度関数と累積分布関数は、次式のとおりです。

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

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

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

$$-\infty < \mu < \infty,\quad -12 < \lambda < 12,\ \text{and}\ \sigma > 0.$$

また、

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

$$\Phi_{\mathrm{lg}}(z;\kappa) = \Gamma_{\mathrm{I}}[\exp(z);\kappa]$$

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は、Meeker and Escobar（1998、第5章）で詳しく説明されています。

---

**注：**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 γ 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、分布の開始点が 0 でなくなります。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、分布の確率密度関数と累積分布関数です。Weibull、対数正規、Fréchet、対数ロジスティックの各分布の閾値分布は以下のとおりです。確率密度関数と累積分布関数を、それぞれの分布のものに置き換えることにより、導出されます。

## 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 $\sigma = 1/\beta$、ここで

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

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。

## 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、次式のとおりです。

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

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

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、μ=0 および σ=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、次式のとおりです。

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

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

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 μ=0 および σ=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、次式のとおりです。

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

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

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、μ=0 および σ=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

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を生じる状態をモデル化するには、DS 分布（Defective Subpopulation distribution; 故障部分母集団の分布）が適しています。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

## ゼロ強調分布

ゼロ強調分布（zero-inflated distribution）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、次の式で計算されます。

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

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

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、標準分布の密度分布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。

$\phi(z) = \exp(z\text{-}\exp(z))$、$\Phi(z) = 1 - \exp(-\exp(z))$

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。

また、追加の情報として、Tobias and Trindade（1995、p. 232）も参照してください。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）のパラメータ化において、$\alpha = p$、$F_d(t) = 1$、$F_N(t) = \Phi(t)$ を代入すると、上の式が得られます。

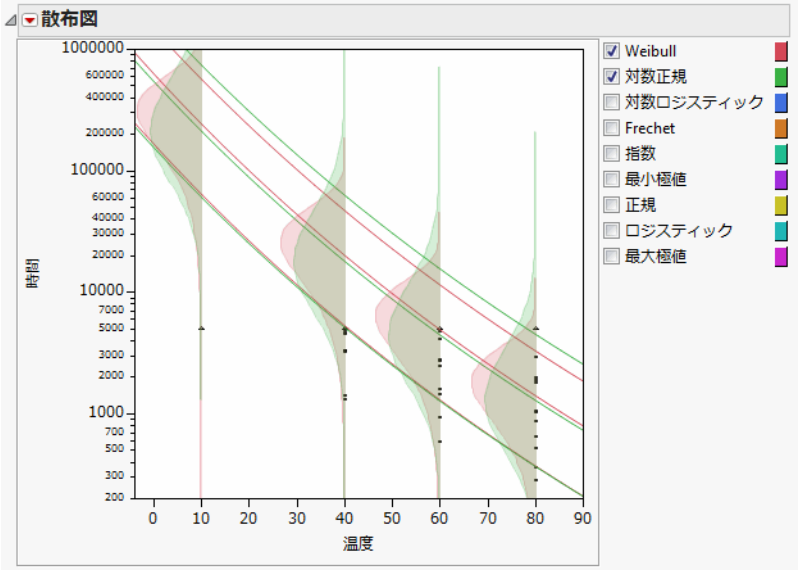
# 第 4 章

# 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、因子が1つの場合の寿命データを分析します。寿命と因子の関係を、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を行うこともできます

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 . . . . . 59
「寿命の二変量」プラットフォームの例 . . . . . 59
「寿命の二変量」プラットフォームの起動 . . . . . 62
「寿命の二変量」レポート . . . . . 64
データの要約 . . . . . 64
散布図 . . . . . 64
ノンパラメトリック . . . . . 67
比較 . . . . . 68
結果 . . . . . 72
カスタム関係式 . . . . . 80
「寿命の二変量」プラットフォームのオプション . . . . . 82
「寿命の二変量」プラットフォームのその他の例 . . . . . 83
「Capacitor」サンプル . . . . . 83
カスタム関係式の例 . . . . . 84

# 「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、気圧、使用率があります。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・化学的関係をモデル化するのに広く使われているものです。Arrhenius（摂氏、華氏、ケルビン）の関係式や、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。

［**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）』ガイドを参照してください。

Meeker and Escobar（1998、p.495）は、加速寿命データの分析に有効な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用いる。
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

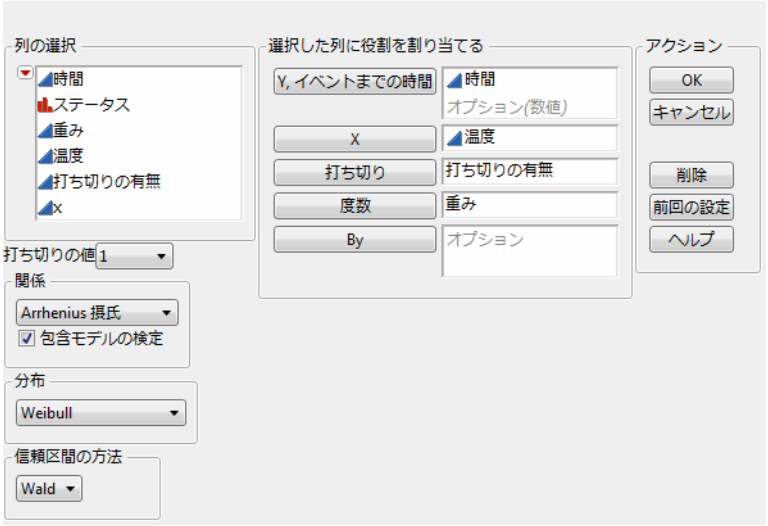
この例では、サンプルデータフォルダ内の「Reliability」フォルダにある「Devalt.jmp」データを使用します。このデータテーブルには、ある装置の温度加速試験データが保存されています。実際の操業温度は 10 ℃ですが、温度加速を施し、40 ℃、60 ℃、80 ℃で試験は行われました。データには、故障時間、または、打ち切り値が記録されています。

1. 「Devalt.jmp」データテーブルを開きます。
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. **「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




11. ［**OK**］をクリックします。

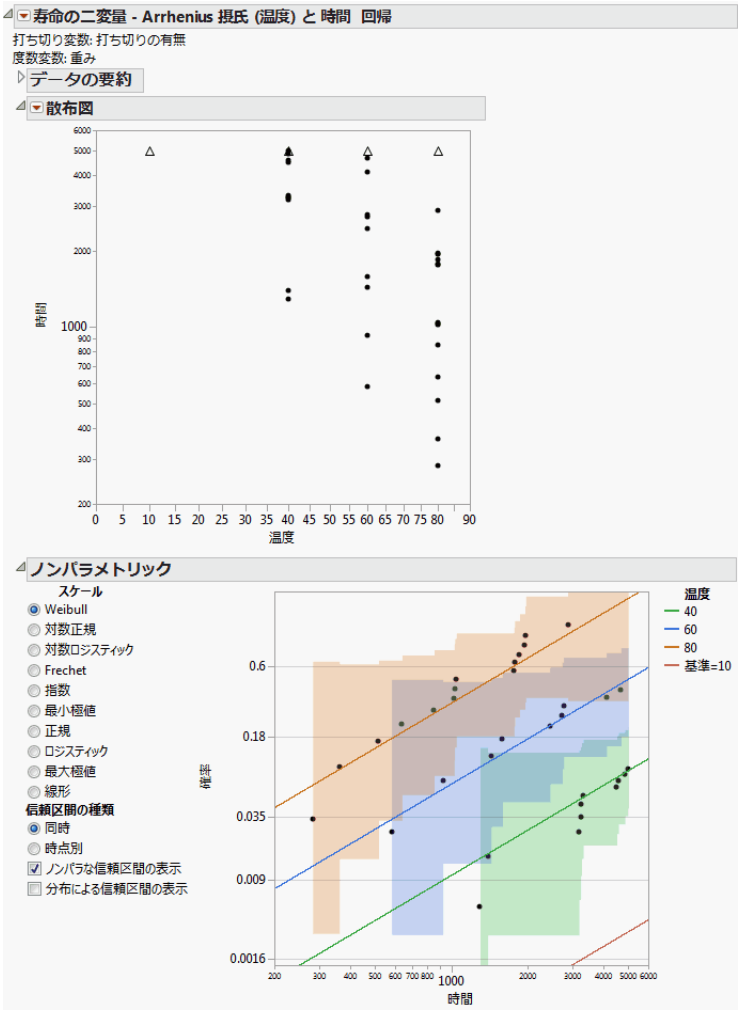
    図 4.3 には、「寿命の二変量」レポートウィンドウの上部半分が表示されています。

---

**注：**「「包含モデルの検定」を行うために、すべてのデータが右側打ち切りであるグループを、分析から除外します。分析を続行しますか？」というメッセージが表示される場合があります。その場合は、［**はい**］をクリックして分析を続けます。右側打ち切りのグループとは、すべての観測値が右側打ち切りであるグループを指します。今回の例で言えば、「温度」= 10 のグループには 1 行しかなく、それは、右側打ち切りになっています。「はい」を選ぶと、包含モデルの検定を行うために、このグループを除外します。右側打ち切りデータしかないグループがデータにない場合は、このメッセージは表示されません。

---

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

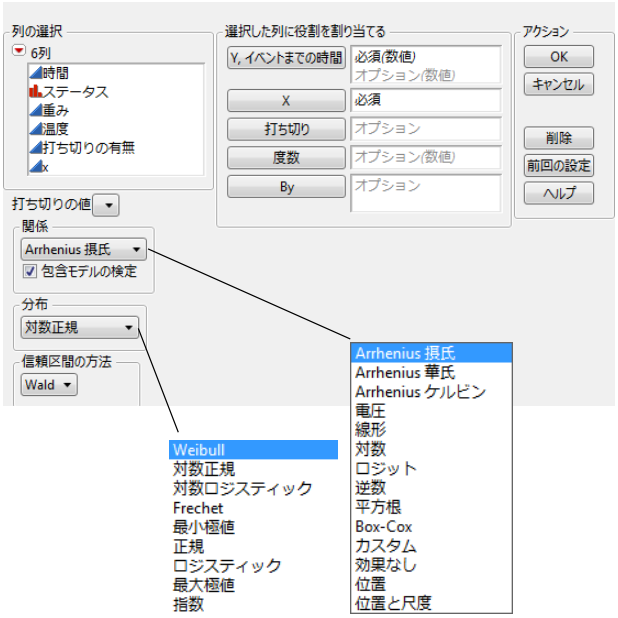



レポートウィンドウには、データの要約情報、診断プロット、比較したデータとその結果、具体的な統計量や予測プロファイルなどが表示されます。結果は、選択した分布ごとに表示されます。指定した分布ごとに、「分布プロファイル」、「分位点プロファイル」、「ハザードプロファイル」、「密度プロファイル」、「加速係数プロファイル」があります。

# 「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。打ち切りの詳細については、このマニュアルの「寿命の一変量」の章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します。デフォルトでは、1 が打ち切りのある観測値、0 が非打ち切りの観測値を示します。

**度数**　複数のユニットがある場合の観測値の度数が含まれている列を指定します。複数のユニットが記録されている場合に、値が 0 または正の整数であるとき、その値は各行の観測値の度数（個数）を表します。

**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］列を選択した後、リストで打ち切りを示す値を選択します。欠測値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。

**関係**　イベントと加速因子との関係を指定します。たとえば、**次のような**加速モデルの変換式を指定できます。

- Arrhenius 摂氏: μ = b0 + b1 * 11605 / (X+273.15)
- Arrhenius 華氏: μ = b0 + b1 * 11605 / ((X + 459.67)/1.8)
- Arrhenius ケルビン: μ = b0 + b1 * 11605/X
- 電圧: μ = b0 + b1 * log (X)
- 線形: μ=b0 + b1* X
- 対数: μ = b0 + b1 * log(X)
- ロジット: μ = b0 + b1 * log(x/(1-x))
- 逆数: μ = b0 + b1/X
- 平方根: μ = b0 + b1 * sqrt(x)
- Box-Cox: μ = b0 + b1 * Boxcox(X)
- 位置: 平均μが、Xの水準ごとに異なる。
- 位置と尺度: 平均μとσ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）。

［**位置**］または［**位置と尺度**］を選択した場合は、「「包含モデルの検定」を行うために、すべてのデータが右側打ち切りであるグループを、分析から除外します。分析を続行しますか?」というメッセージが表示される場合があります。その場合は、［**はい**］をクリックして分析を続けます。［**はい**］を押すと、すべての観測値が右側打ち切りであるグループを分析から除外して処理を進めます。右側打ち切りデータしかないグループがデータにない場合は、このメッセージは表示されません。

自分自身で独自の関係式を定義したい場合は、「カスタム関係式」（80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。

**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。

# 「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」（64 ページ）
- 「散布図」（64 ページ）
- 「ノンパラメトリック」（67 ページ）
- 「比較」（68 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、モデルの比較規準が表示されます。
- 「結果」（72 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。

## 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、左側、区間）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 | 135 |
| 非打ち切りの個数 | 33 |
| 右側打ち切りの個数 | 102 |

## 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 4.1 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表示するには、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の中から 1 つ選択します。

図 **4.6**「時間」と「温度」の散布図

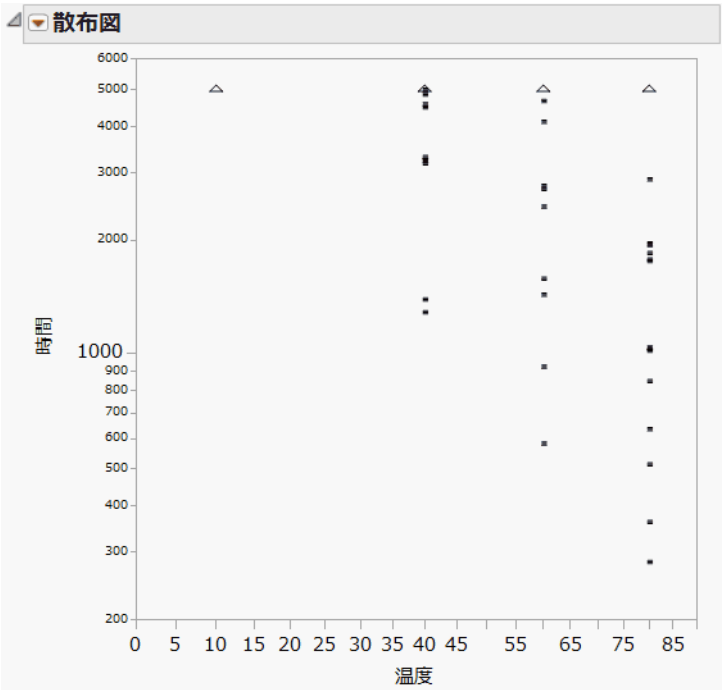



表 **4.1** 散布図における故障データと打ち切りデータの表示

| 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**　密度曲線の表示／非表示を切り替えます。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。

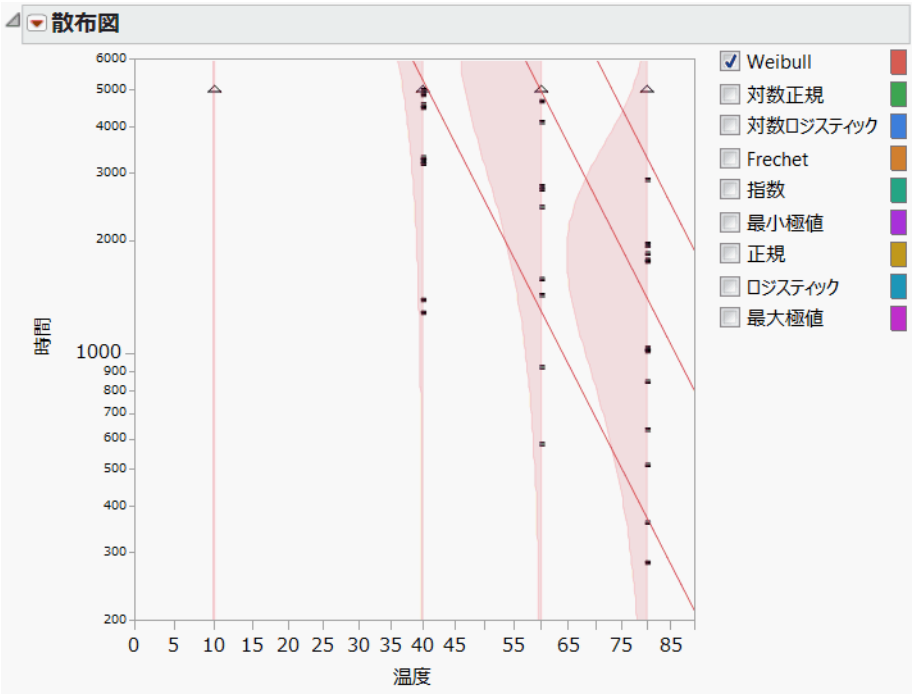
**分位点曲線の削除**　これまでに入力した分位点の値が表示されます。適切なチェックボックスにチェックを入れると、該当する曲線が削除されます。

**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、X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。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

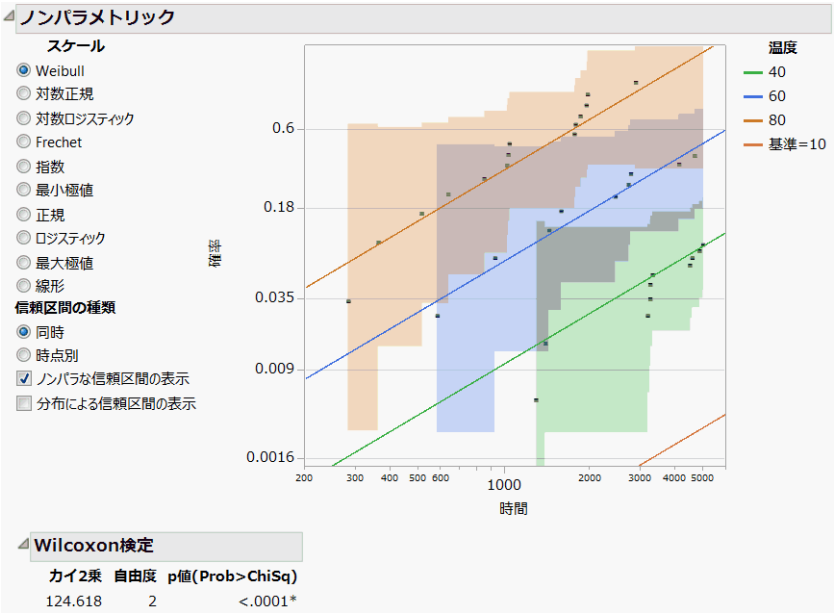
散布図の下には、「ノンパラメトリック」重ね合わせプロットが表示されます。このプロットでは、グループ間の差を視覚的に見ることができます。「Devalt.jmp」サンプルデータの場合、**「時間」**の差を検討するために、さまざまなスケールを指定できます。また、確率プロットのノンパラメトリック推定に対する信頼区間の種類として、［**同時**］と［**時点別**］のいずれかを指定し（結果は［**ノンパラな信頼区間の表示**］がオンの場合に表示されます）、［**分布による信頼区間の表示**］と［**ノンパラな信頼区間の表示**］を選択できます。

「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。時点別信頼区間および同時信頼区間については、Meeker and Escobar（1998、第3章）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、グループ間に何らかの差があることを示しています。カイ2乗値が高く、$p$ 値が低い事実は、「ノンパラメトリック」プロットで**「温度」**グループ間に差が見られることと一致しています。

図**4.8**「Devalt.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。

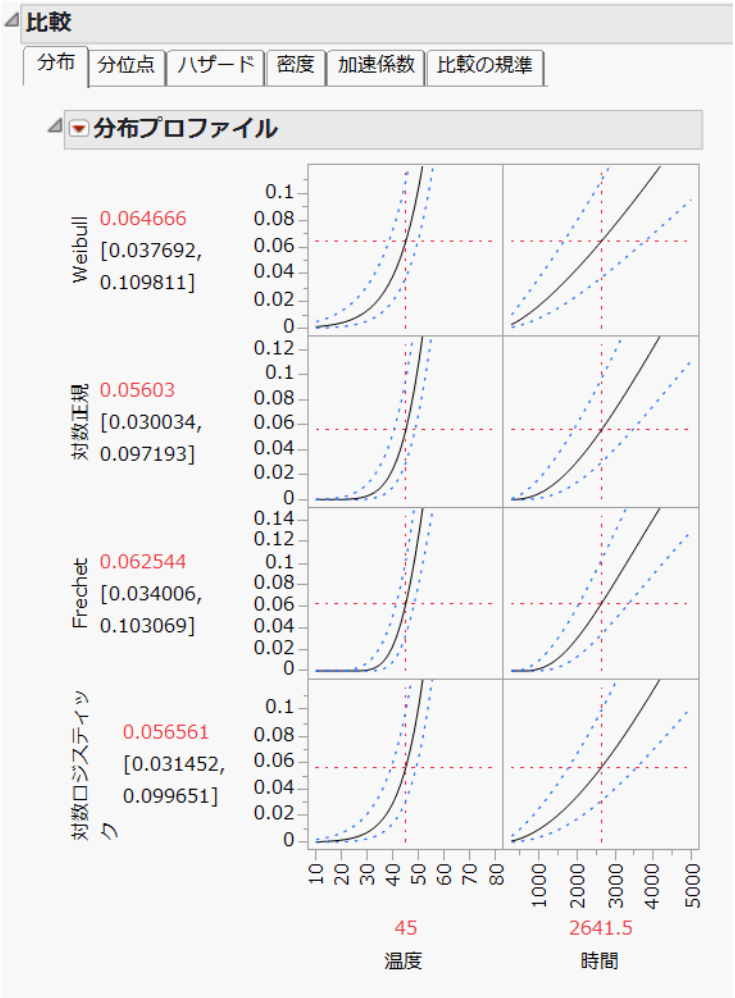
- 分布
- 分位点
- ハザード
- 密度
- 加速係数
- 比較の規準

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分布の「分布プロファイル」です。

図 **4.9** 分布プロファイル

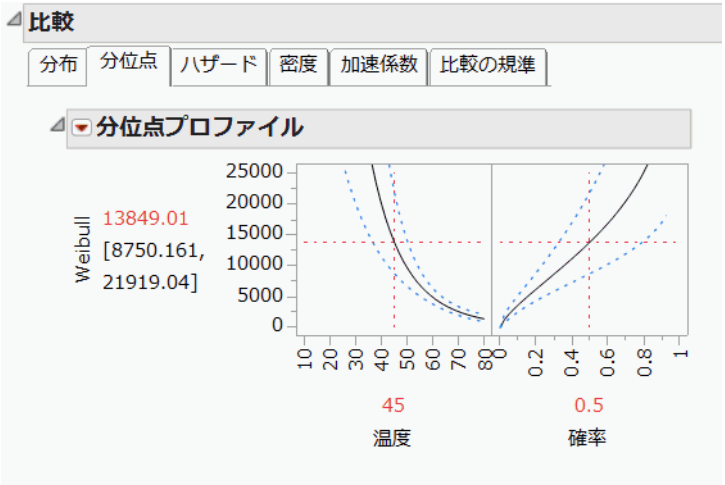



[**分位点**]、[**ハザード**]、[**密度**] の各タブにも同様の結果が表示されます。「分布プロファイル」、「分位点プロファイル」、「ハザードプロファイル」、「密度プロファイル」、「加速係数プロファイル」は、他のプラットフォームで作成される予測プロファイルと似ています。たとえば、**「温度」**と**「時間」**の縦の線をドラッグすれば、温度と時間を変更したときの分布の値の変化を調べることができます。予測プロファイルについては、『プロファイル機能』に詳しい説明があります。

### 分位点

「分位点プロファイル」は推定に役立ちます。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、基準温度が 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 × 17.18683 = 約 238021 時間であると推定できます。

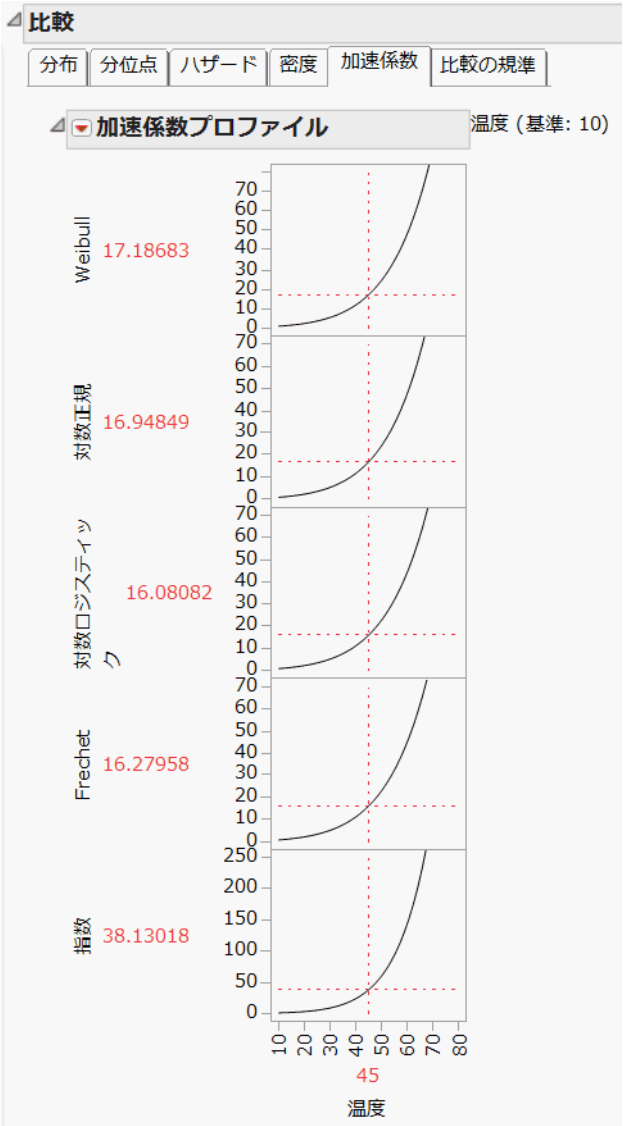
図 **4.10**「Devalt.jmp」の Weibull 分布の分位点プロファイル




### 加速係数

［**加速係数**］タブを選択すると、指定した分布ごとに、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基準値を変更するには、「寿命の二変量」の赤い三角ボタンのメニューから［**時間加速の基準を設定**］を選択して、任意の値を入力します。説明変数と基準値は、プロファイルタイトルの横に表示されます。

図 **4.11**「Devalt.jmp」の加速係数プロファイル




加速係数プロファイルでは、パラメトリックな分布を仮定した場合の、基準条件と比較したときの加速試験条件での故障時間を推定することができます。時間加速プロットは、一般に基準条件における $p$ パーセント点と加速試験条件における $p$ パーセント点の比として解釈されます。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、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。なお、正規分布、最小極値分布、ロジスティック分布、最大極値分布では、このような関係は成立しません。

**注：**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・最小極値・ロジスティック・最大極値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、分布の(-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の各分布の値を示します。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 | 643.40173 | 649.58494 | 658.11755 |
| 対数ロジスティック | 644.11284 | 650.29605 | 658.82866 |
| Weibull | 647.06279 | 653.24600 | 661.77862 |
| Frechet | 647.56676 | 653.74997 | 662.28258 |

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分布であると結論できます。規準については、「寿命の一変量」（25ページ）の章の表3.1（39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。結果は、選択した分布ごとに表示されます。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。

指定した各分布の統計結果、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、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**「Devalt.jmp」データの Weibull 分布に対する「包含モデルの検定」

**Weibull 結果**

統計量 | 分布 | 分位点 | ハザード | 密度 | 加速係数 | カスタム推定

**統計量**

**推定値**

| パラメータ | 推定値 | 標準誤差 | 下側95% | 上側95% |
|---|---|---|---|---|
| β0 | -13.21350 | 3.3229796 | -19.72642 | -6.700580 |
| β1 | 0.63079 | 0.0971452 | 0.44039 | 0.821194 |
| σ | 0.70844 | 0.1033211 | 0.50593 | 0.910941 |

$$\mu = -13.2135 + \frac{(0.6307929 * 11605)}{(\text{温度} + 273.15)}$$

**共分散行列**

**包含モデルの検定**

**モデル**

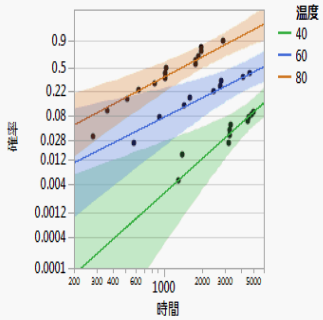
| 診断統計量 | モデル | (-2)*対数尤度 | AICc | BIC | パラメータ数 |
|---|---|---|---|---|---|
| ☐ | 効果なし | 711.5191 | 715.6101 | 721.3297 | 2 |
| | 回帰 | 647.0628 | 653.246 | 661.7786 | 3 |
| ☑ | 別々の位置 | 646.8374 | 655.1451 | 666.4585 | 4 |
| ☑ | 別々の位置と尺度 | 644.6868 | 657.3431 | 674.1185 | 6 |

**モデル比較の検定**

| 説明 | 尤度比カイ2乗 | 自由度 | p値(Prob>ChiSq) |
|---|---|---|---|
| 効果なし vs. 回帰 | 64.45635 | 1 | <.0001* |
| 回帰 vs. 別々の位置 | 0.225405 | 1 | 0.6350 |
| 別々の位置 vs. 別々の位置と尺度 | 2.150544 | 2 | 0.3412 |

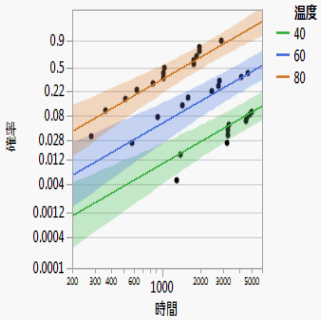
**診断 - 別々の位置と尺度**

**複数群の確率プロット**



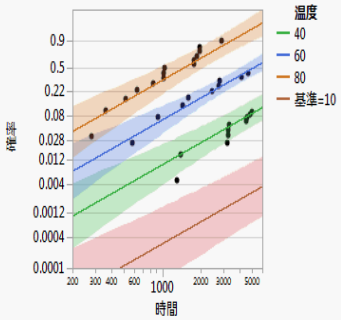

**診断 - 別々の位置**

**複数群の確率プロット**




**診断 - 回帰**

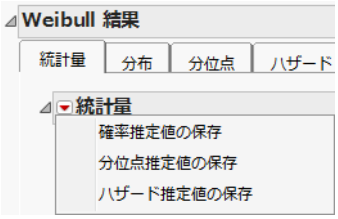
**複数群の確率プロット**



## 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、**「別々の位置と尺度」**、**「別々の位置」**、**「回帰」**、**「効果なし」**の各モデルの統計量と診断プロットが表示されます。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。包含モデルについては、表4.2に説明があります。「Devalt.jmp」にあてはめたWeibull分布の**「別々の位置と尺度」**、**「別々の位置」**、**「回帰」**、**「効果なし」**の各モデルを図4.15、図4.16、図4.17、図4.18に示します。

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。

表**4.2** 包含モデルの検定

| 包含モデル | 説明 | 例 |
|---|---|---|
| **別々の位置と尺度** | 位置パラメータと尺度パラメータが説明変数の全水準で異なると仮定したモデルで、説明変数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 |

表 **4.2** 包含モデルの検定（続き）

| 包含モデル | 説明 | 例 |
|---|---|---|
| **別々の位置** | 位置パラメータは説明変数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 |
| **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 |
| **効果なし** | 説明変数が応答に影響を与えないものと仮定したモデルで、すべてのデータ値に対して、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 |

## 診断統計量

「複数群の確率プロット」（図4.13）では、各群に対する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、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、第19.2.2節）を参照してください。

「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できます。Cox-Snell残差P-Pプロットについては、Meeker and Escobar（1998、第17.6.1節）を参照してください。

図 **4.15**「Devalt.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

**Weibull 結果**

統計量 | 分布 | 分位点 | ハザード | 密度 | カスタム推定

**統計量**

**推定値**

| パラメータ | 推定値 | 標準誤差 | 下側95% | 上側95% |
|---|---|---|---|---|
| μ0 | 9.526 | 0.3486 | 8.8432 | 10.210 |
| σ0 | 0.448 | 0.1399 | 0.1737 | 0.722 |
| μ1 | 8.910 | 0.3123 | 8.2980 | 9.522 |
| σ1 | 0.801 | 0.2466 | 0.3176 | 1.284 |
| μ2 | 7.462 | 0.2104 | 7.0493 | 7.874 |
| σ2 | 0.762 | 0.1554 | 0.4576 | 1.067 |
| Weibull α 0 | 13716.733 | 4781.2324 | 6927.0440 | 27161.481 |
| Weibull β 0 | 2.233 | 0.6974 | 1.3847 | 5.758 |
| Weibull α 1 | 7405.867 | 2312.6626 | 4015.7575 | 13657.913 |
| Weibull β 1 | 1.249 | 0.3845 | 0.7788 | 3.149 |
| Weibull α 2 | 1740.226 | 366.2081 | 1152.0764 | 2628.633 |
| Weibull β 2 | 1.312 | 0.2675 | 0.9374 | 2.185 |

**共分散行列**

**包含モデルの検定**

**モデル**

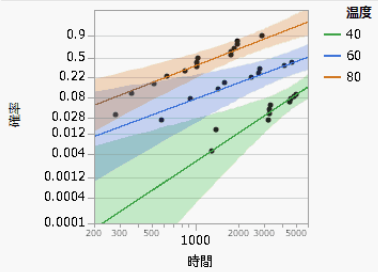
| 診断統計量 | モデル | (-2)*対数尤度 | AICc | BIC | パラメータ数 |
|---|---|---|---|---|---|
| ☐ | 効果なし | 711.5191 | 715.6101 | 721.3297 | 2 |
| ☐ | 回帰 | 647.0628 | 653.246 | 661.7786 | 3 |
| ☐ | 別々の位置 | 646.8374 | 655.1451 | 666.4585 | 4 |
| | 別々の位置と尺度 | 644.6868 | 657.3431 | 674.1185 | 6 |

**モデル比較の検定**

| 説明 | 尤度比カイ2乗 | 自由度 | p値(Prob>ChiSq) |
|---|---|---|---|
| 効果なし vs. 回帰 | 64.45635 | 1 | <.0001* |
| 回帰 vs. 別々の位置 | 0.225405 | 1 | 0.6350 |
| 別々の位置 vs. 別々の位置と尺度 | 2.150544 | 2 | 0.3412 |

**診断 - 別々の位置と尺度**

**複数群の確率プロット**




**Cox-Snell残差P-Pプロット**

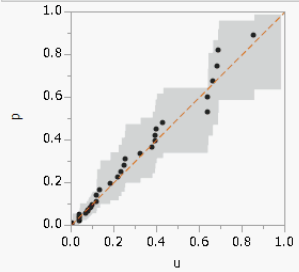


図 **4.16**「Devalt.jmp」データにあてはめたWeibull分布の「別々の位置」モデル

**Weibull 結果**

統計量 | 分布 | 分位点 | ハザード | 密度 | カスタム推定

**統計量**

**推定値**

| パラメータ | 推定値 | 標準誤差 | 下側95% | 上側95% |
|---|---|---|---|---|
| μ0 | 10.103 | 0.3232 | 9.470 | 10.737 |
| μ1 | 8.845 | 0.2425 | 8.370 | 9.321 |
| μ2 | 7.485 | 0.1918 | 7.109 | 7.861 |
| σ | 0.701 | 0.1029 | 0.499 | 0.902 |
| Weibull α 0 | 24420.467 | 7893.6446 | 12960.224 | 46014.574 |
| Weibull α 1 | 6942.342 | 1683.4767 | 4316.132 | 11166.506 |
| Weibull α 2 | 1780.374 | 341.5443 | 1222.413 | 2593.012 |
| Weibull β | 1.427 | 0.2097 | 1.108 | 2.004 |

**共分散行列**

**包含モデルの検定**

**モデル**

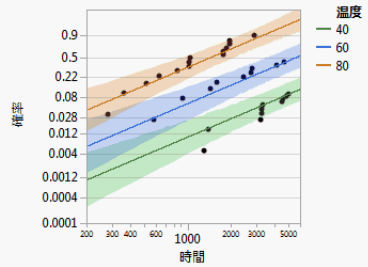
| 診断統計量 | モデル | (-2)*対数尤度 | AICc | BIC | パラメータ数 |
|---|---|---|---|---|---|
| | 効果なし | 711.5191 | 715.6101 | 721.3297 | 2 |
| | 回帰 | 647.0628 | 653.246 | 661.7786 | 3 |
| | 別々の位置 | 646.8374 | 655.1451 | 666.4585 | 4 |
| | 別々の位置と尺度 | 644.6868 | 657.3431 | 674.1185 | 6 |

**モデル比較の検定**

| 説明 | 尤度比カイ2乗 | 自由度 | p値(Prob>ChiSq) |
|---|---|---|---|
| 効果なし vs. 回帰 | 64.45635 | 1 | <.0001* |
| 回帰 vs. 別々の位置 | 0.225405 | 1 | 0.6350 |
| 別々の位置 vs. 別々の位置と尺度 | 2.150544 | 2 | 0.3412 |

**診断 - 別々の位置**

**複数群の確率プロット**




**Cox-Snell残差P-Pプロット**

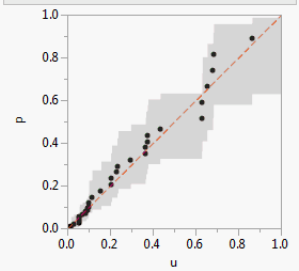


図 **4.17**「Devalt.jmp」データにあてはめた Weibull 分布の「回帰」モデル

**Weibull 結果**

**統計量**

**推定値**

| パラメータ | 推定値 | 標準誤差 | 下側95% | 上側95% |
|---|---|---|---|---|
| β0 | -13.21350 | 3.3229796 | -19.72642 | -6.700580 |
| β1 | 0.63079 | 0.0971452 | 0.44039 | 0.821194 |
| σ | 0.70844 | 0.1033211 | 0.50593 | 0.910941 |

$$\mu = -13.2135 + \frac{(0.6307929 * 11605)}{(\text{温度} + 273.15)}$$

**共分散行列**

**包含モデルの検定**

**モデル**

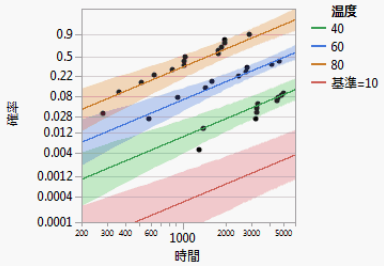
| 診断統計量 | モデル | (-2)*対数尤度 | AICc | BIC | パラメータ数 |
|---|---|---|---|---|---|
| | 効果なし | 711.5191 | 715.6101 | 721.3297 | 2 |
| | 回帰 | 647.0628 | 653.246 | 661.7786 | 3 |
| | 別々の位置 | 646.8374 | 655.1451 | 666.4585 | 4 |
| | 別々の位置と尺度 | 644.6868 | 657.3431 | 674.1185 | 6 |

**モデル比較の検定**

| 説明 | 尤度比カイ2乗 | 自由度 | p値(Prob>ChiSq) |
|---|---|---|---|
| 効果なし vs. 回帰 | 64.45635 | 1 | <.0001* |
| 回帰 vs. 別々の位置 | 0.225405 | 1 | 0.6350 |
| 別々の位置 vs. 別々の位置と尺度 | 2.150544 | 2 | 0.3412 |

**診断 - 回帰**

**複数群の確率プロット**




**Cox-Snell残差P-Pプロット**

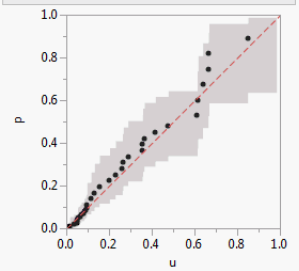
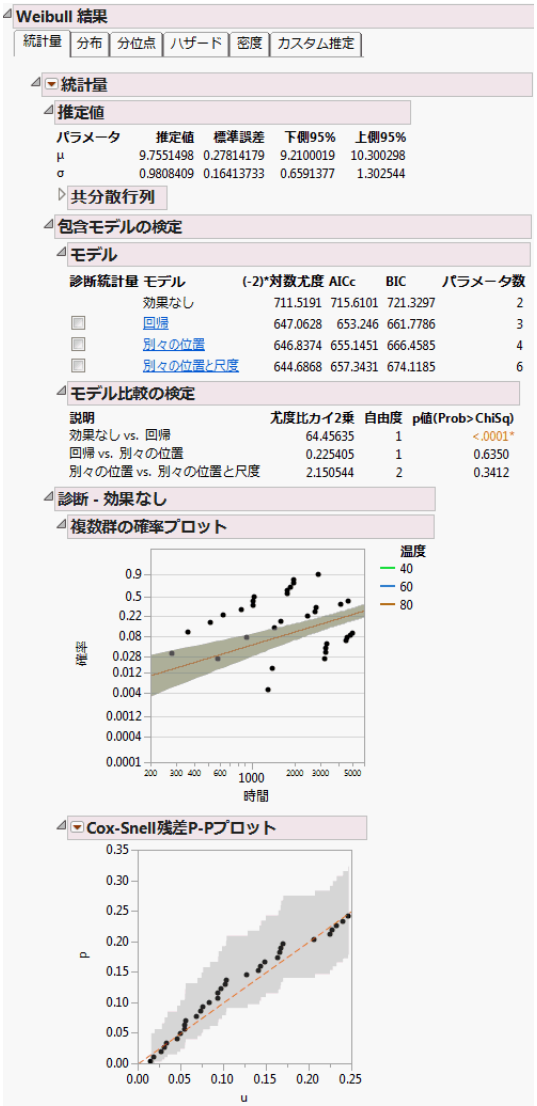


図 **4.18**「Devalt.jmp」データにあてはめたWeibull分布の「効果なし」モデル

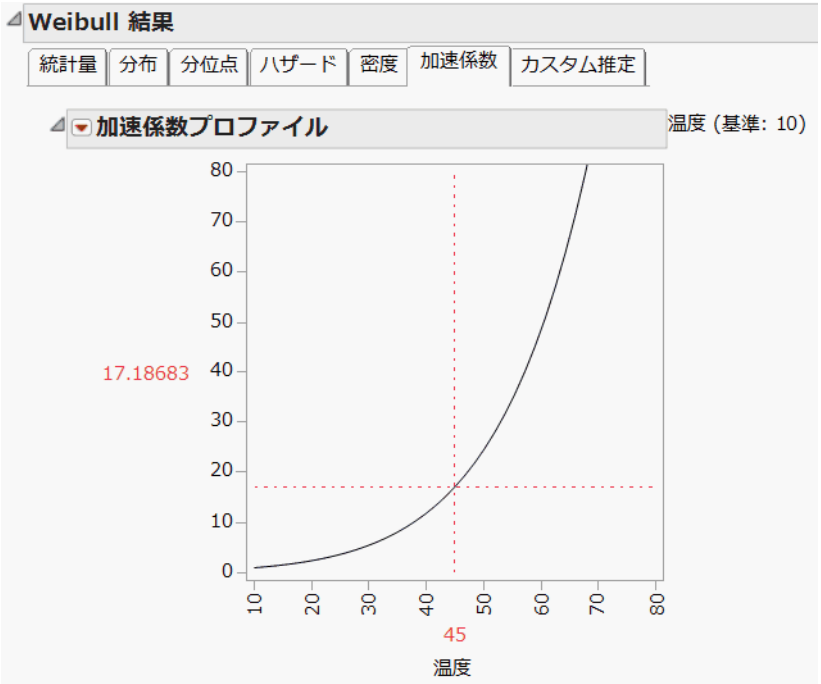



## プロファイルと曲面プロット

「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の、説明変数に対するプロファイルを見るためには、「Weibull結果」の［**分布**］タブをクリックします。曲面プロットを表示するには、（プロファイルの下の）「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。詳細は、『プロファイル機能』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、「Devalt.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説明変数の基準値は、「寿命の二変量」の赤い三角ボタンのメニューにある［**時間加速の基準を設定**］で変更することができます。

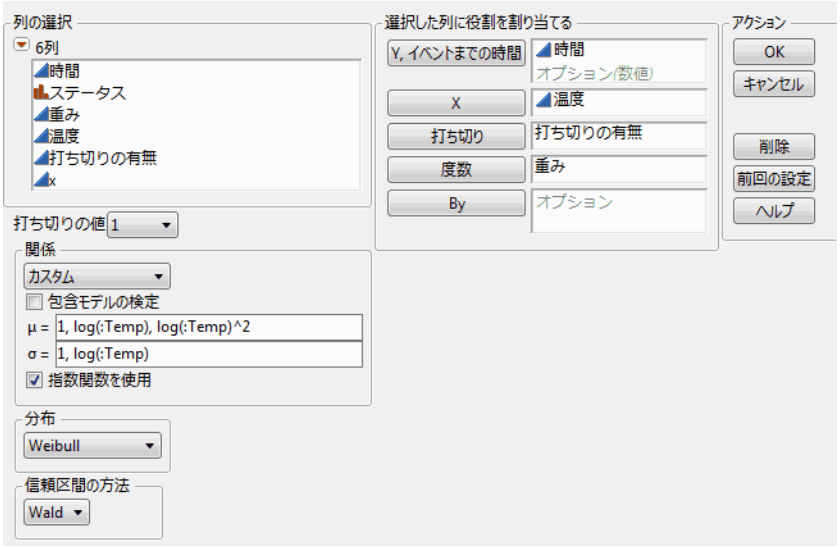
図**4.19**「Devalt.jmp」にあてはめたWeibull分布の加速係数プロファイル




## カスタム関係式

加速因子と寿命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、［**カスタム**］オプションを使用します。このオプションは、起動ウィンドウの「関係」にあるリストから選択します。位置パラメータ（μ）と尺度パラメータ（σ）の入力フィールドに、列をカンマ区切りで指定します。「Devalt.jmp」サンプルデータの場合、μの入力例は「1, log(:Temp), log(:Temp)^2,」、σの入力例は「1, log(:Temp),」となります。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した場合、σパラメータは正になります。

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 | -43.26872 | 40.747409 | -123.1322 | 36.594740 |
| β1 | 29.06453 | 20.182520 | -10.4925 | 68.621543 |
| β2 | -3.99152 | 2.491490 | -8.8747 | 0.891713 |
| λ0 | -3.32704 | 2.329357 | -7.8925 | 1.238413 |
| λ1 | 0.71065 | 0.559950 | -0.3868 | 1.808129 |

$$\mu = -43.26872 + 29.06453 * \mathrm{Log}(\text{温度}) + -3.991517 * \mathrm{Log}(\text{温度})^2$$

$$\sigma = \mathrm{Exp}(-3.327043 + 0.7106461 * \mathrm{Log}(\text{温度}))$$

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」（84 ページ）を参照してください。その分析の解釈などは、「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」（59 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。

**時間加速の基準を設定** 加速係数を求める際の説明変数の基準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** レポートにある各分布のセクションで、分布の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、各分布の「分布」、「分位点」、「ハザード」、「密度」セクションに表示されます。

**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** 故障時間と説明変数の散布図を表示します。

**スクリプト** このメニューには、すべてのプラットフォームに共通するスクリプト関連のコマンドが表示されます。詳細については、『JMPの使用法』を参照してください。

# 「寿命の二変量」プラットフォームのその他の例

ここでは、「寿命の二変量」プラットフォームを使った例をさらに紹介します。

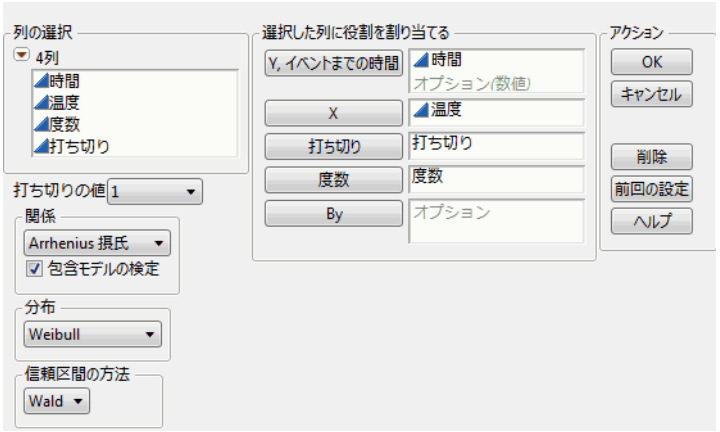
## 「Capacitor」サンプル

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. 「Capacitor ALT.jmp」サンプルデータを開きます。
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。

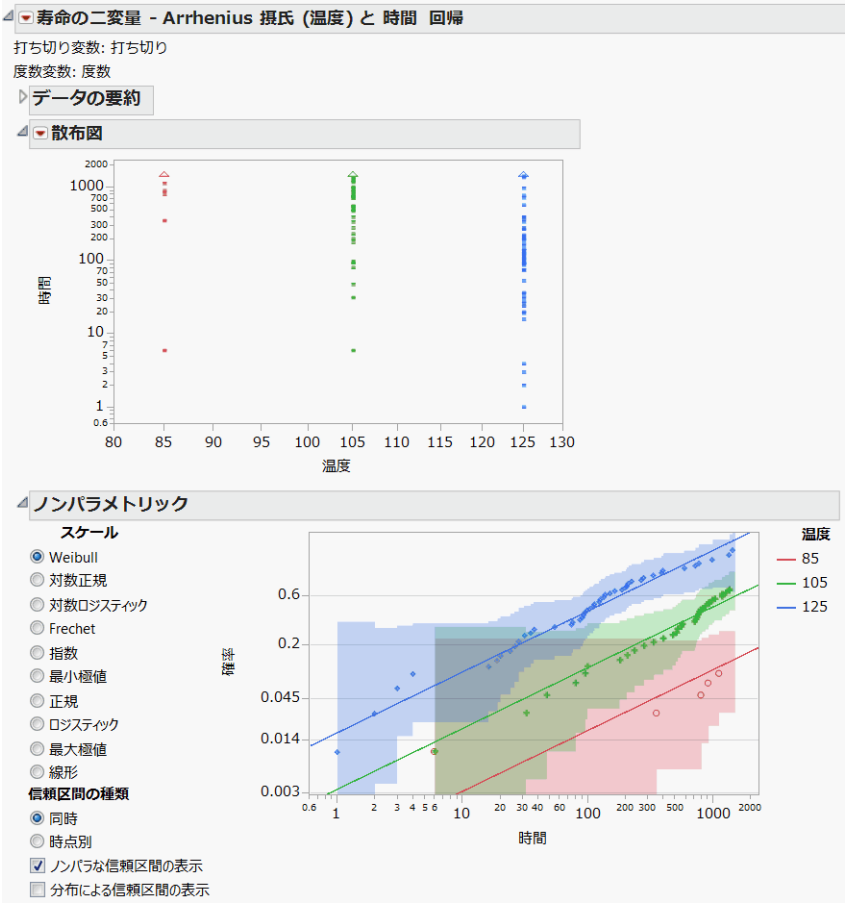
図**4.22**「寿命の二変量」起動ウィンドウ




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部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、パラメータ推定値や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」は表示されます。

## 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. 「Devalt.jmp」データテーブルを開きます。
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、**「温度」**を［**X**］に、**「打ち切りの有無」**を［**打ち切り**］に、**「重み」**を［**度数**］にそれぞれ指定します。
4. 「関係」のリストから［**カスタム**］を選択します。
5. 「μ」の入力フィールドに「1, log(:温度), log(: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)。
6. 「σ」の入力フィールドに「1, log(:温度)」と入力します。
7. ［**指数関数を使用**］チェックボックスをオンにします。
8. 「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。

---

**注：**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。

---

9. ［**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

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」（59 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% |
|---|---|---|---|---|
| β0 | -43.26872 | 40.747409 | -123.1322 | 36.594740 |
| β1 | 29.06453 | 20.182520 | -10.4925 | 68.621543 |
| β2 | -3.99152 | 2.491490 | -8.8747 | 0.891713 |
| λ0 | -3.32704 | 2.329357 | -7.8925 | 1.238413 |
| λ1 | 0.71065 | 0.559950 | -0.3868 | 1.808129 |

$$\mu = -43.26872 + 29.06453 * \mathrm{Log}\left(\text{温度}\right) + -3.991517 * \mathrm{Log}\left(\text{温度}\right)^2$$

$$\sigma = \mathrm{Exp}\left(-3.327043 + 0.7106461 * \mathrm{Log}\left(\text{温度}\right)\right)$$

# 第 5 章

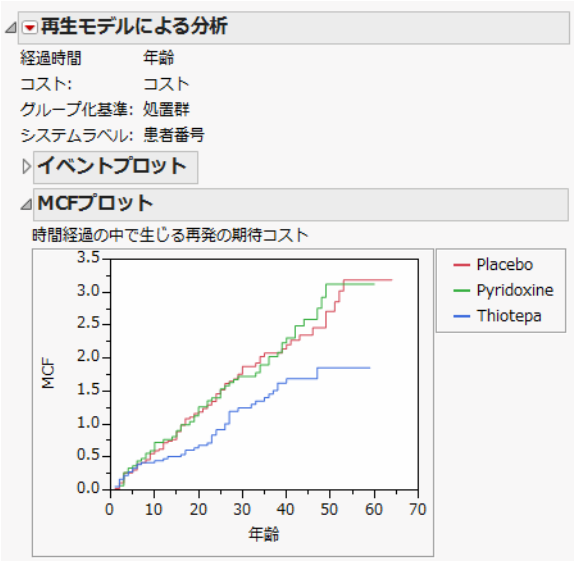
# 再生モデルによる分析

## 時間経過に伴う繰り返し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」プラットフォームも、信頼性分析や生存時間分析のようにイベントまでの時間を分析しますが、1つのユニット（個体）で繰り返し生じるイベントを扱います。たとえば、故障したユニットを修理してまた稼動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これを繰り返すと、故障というイベントが複数回起こることになります。同様に、腫瘍が再発したぼうこう癌患者の治療プロセスなど、長期にわたる疾病の継続的治療なども再生モデルで分析できます。分析の目標は、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）を計算することです。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 **5.1**「再生モデルによる分析」の例



# 目次

「再生モデルによる分析」の概要 . . . . . 89
「再生モデルによる分析」プラットフォームの例 . . . . . 89
「再生モデルによる分析」プラットフォームの起動 . . . . . 92
「再生モデルによる分析」プラットフォームのオプション . . . . . 93
モデルのあてはめ . . . . . 94
「再生モデルによる分析」プラットフォームのその他の例 . . . . . 97
ぼうこう癌の再発の例 . . . . . 97
船舶用ディーゼルエンジンの例 . . . . . 100

# 「再生モデルによる分析」の概要

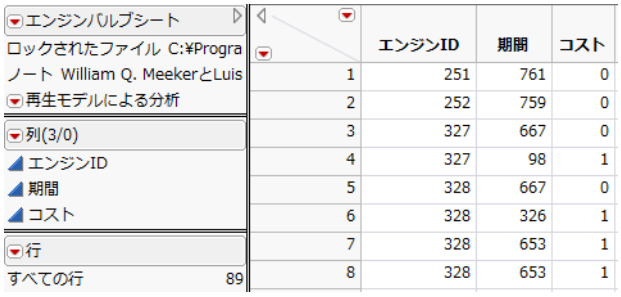
再生性のあるイベントの分析では、分析対象のユニットが古くなるにつれて生じる修理回数や修理コストに主眼が置かれます。JMP では、「再生モデルによる分析」プラットフォームで再生性のあるイベントのデータを分析します。

再生モデルによる分析に使うデータは、観測イベントごとに行が 1 つと、最後に観測されたユニットの年齢を含む最終行が必要です。ユニットまたはシステムの数はいくつでもかまいません。また、ユニットまたはシステムにおける再生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 5.2 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、**「期間」**は、エンジンバルブシートのサービス開始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 になっているものが、機関車の最終観測年齢を示します。

図 **5.2**「エンジンバルブシート」データテーブル（一部）

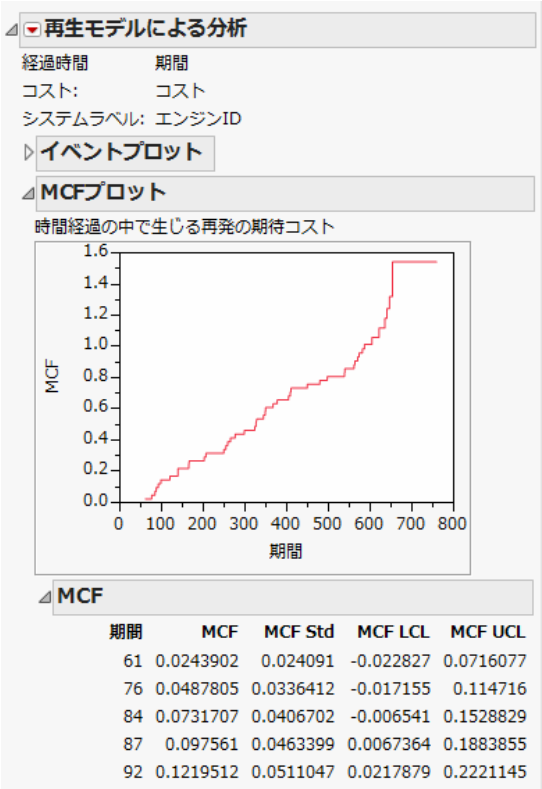



| | エンジンID | 期間 | コスト |
|---|---|---|---|
| 1 | 251 | 761 | 0 |
| 2 | 252 | 759 | 0 |
| 3 | 327 | 667 | 0 |
| 4 | 327 | 98 | 1 |
| 5 | 328 | 667 | 0 |
| 6 | 328 | 326 | 1 |
| 7 | 328 | 653 | 1 |
| 8 | 328 | 653 | 1 |

起動ダイアログボックスに、図 5.5 のとおりに入力を行います。

［**OK**］をクリックすると、図 5.3 と図 5.4 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（Mean Cumlative 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。この関数は、ユニットが古くなり合計コストがかさむにつれて、増加します。図 5.3 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。

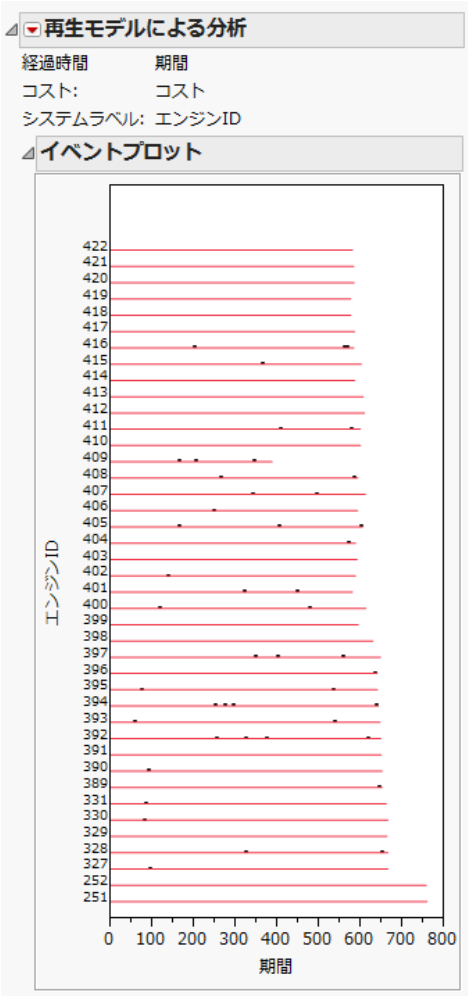
図 **5.3** 再生モデルによる分析の MCF プロットと表の一部




| 期間 | MCF | MCF Std | MCF LCL | MCF UCL |
|---|---|---|---|---|
| 61 | 0.0243902 | 0.024091 | -0.022827 | 0.0716077 |
| 76 | 0.0487805 | 0.0336412 | -0.017155 | 0.114716 |
| 84 | 0.0731707 | 0.0406702 | -0.006541 | 0.1528829 |
| 87 | 0.097561 | 0.0463399 | 0.0067364 | 0.1883855 |
| 92 | 0.1219512 | 0.0511047 | 0.0217879 | 0.2221145 |

図 5.4 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、線はそのユニットの最終観測年齢まで延びています。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。

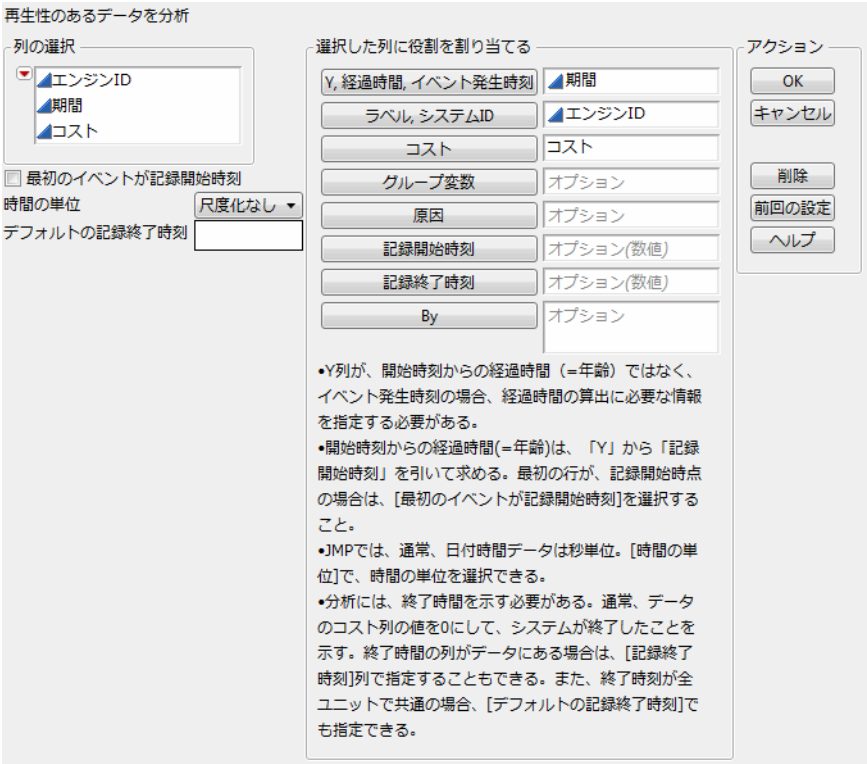
図 **5.4** バルブシートの交換を示したイベントプロット



# 「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 **5.5**「再生モデルによる分析」の起動ダイアログボックス




**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。

– 「故障した」・「修理された」・「交換された」・「修正された」などのイベントが発生したことを示す「1」。この場合、MCF（Mean Cumlative 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。

– 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。

**注：「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、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のレコードがある場合は、そのレコード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、時間単位に変更できます。

## 「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プロットの表示／非表示を切り替えます。

**MCF信頼限界**　MCFの近似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。

**MCFの差のプロット**　グループ変数を使っているときは、このコマンドでMCFの差がプロットされます。プロットには差の95%信頼区間も表示されます。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**　グループ変数の水準ごとにMCFプロットを表示します。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。

［**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」（94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、強度関数や累計関数に対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、パラメータが効果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5.6）が表示されます。

図**5.6**「再生性モデルの指定」ウィンドウ

強度関数（intensity function）や累計関数（cumulative function）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 5.1 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 5.1** 尺度パラメータと形状パラメータ

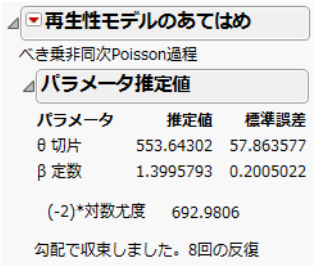
| モデル | 尺度パラメータ | 形状パラメータ |
|---|---|---|
| べき乗非同次 Poisson 過程 | $\theta$ | $\beta$ |
| 比例強度 Poisson 過程 | $\gamma$ | $\delta$ |
| 対数線形非同次 Poisson 過程 | $\gamma$ | $\delta$ |
| 同次 Poisson 過程 | $\gamma$ | なし |

次の点を念頭に置いてください。

- 「再生性モデルの指定」ウィンドウ（図 5.6）で「**尺度効果**」や「**形状効果**」を指定した場合、表 5.1 で示した尺度と形状のパラメータが、各効果の関数として、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5.7）が表示されます。

図**5.7** モデルのレポート




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」が開きます。

**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のパラメータ推定値を求めます。グループ間の差を確認できます。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。

**あてはめの削除**　モデルレポートを削除します。

# 「再生モデルによる分析」プラットフォームのその他の例

以降では、「再生モデルによる分析」プラットフォームを使った例をさらに紹介します。

## 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、表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5.8に従って入力を行います。

図**5.8**「ぼうこう癌」データを使った起動ダイアログボックス

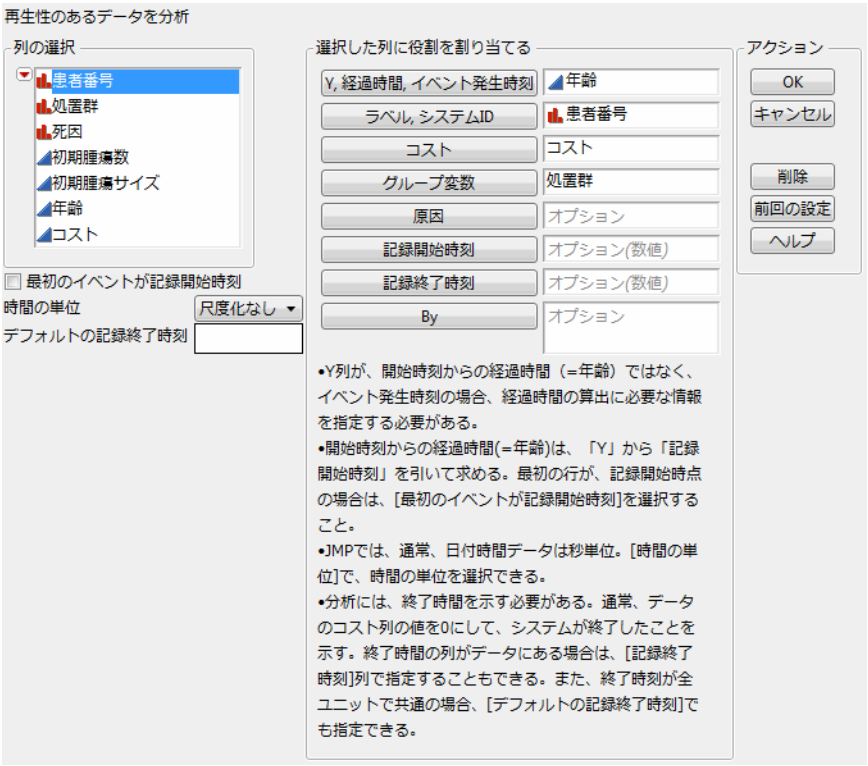
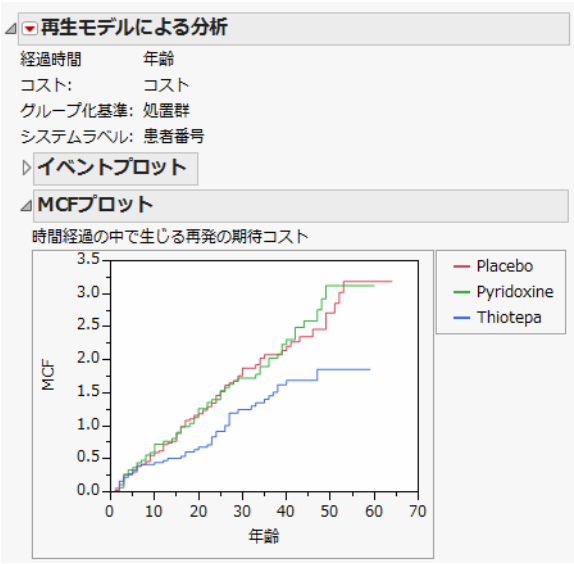


図 5.9 は、3 つの処置の MCD プロットです。

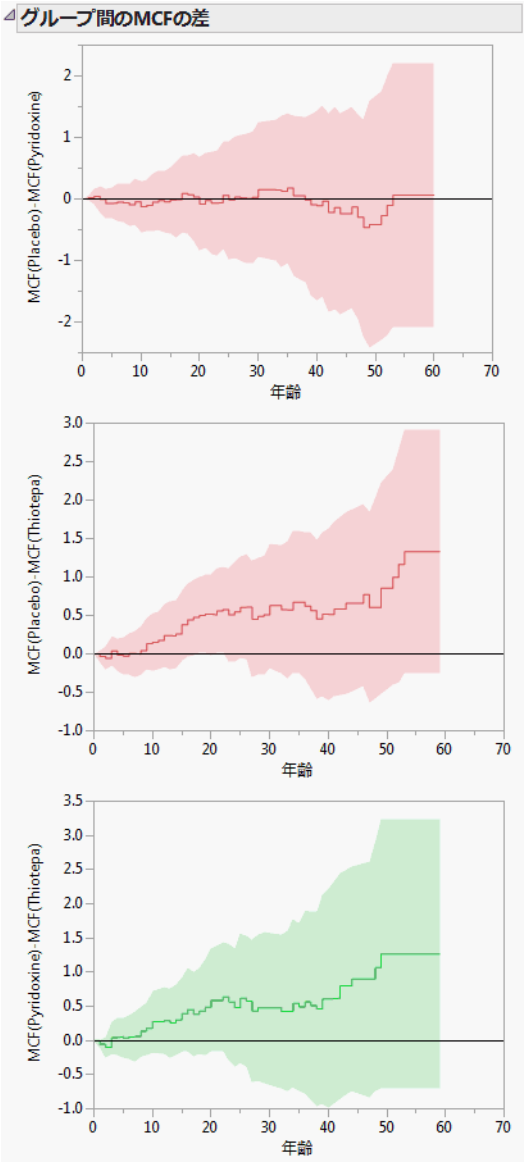
図 **5.9**「ぼうこう癌」の MCF プロット




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、病気の進行が特に症状の悪化もしくは改善と結びつか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 **5.10** MCF の差



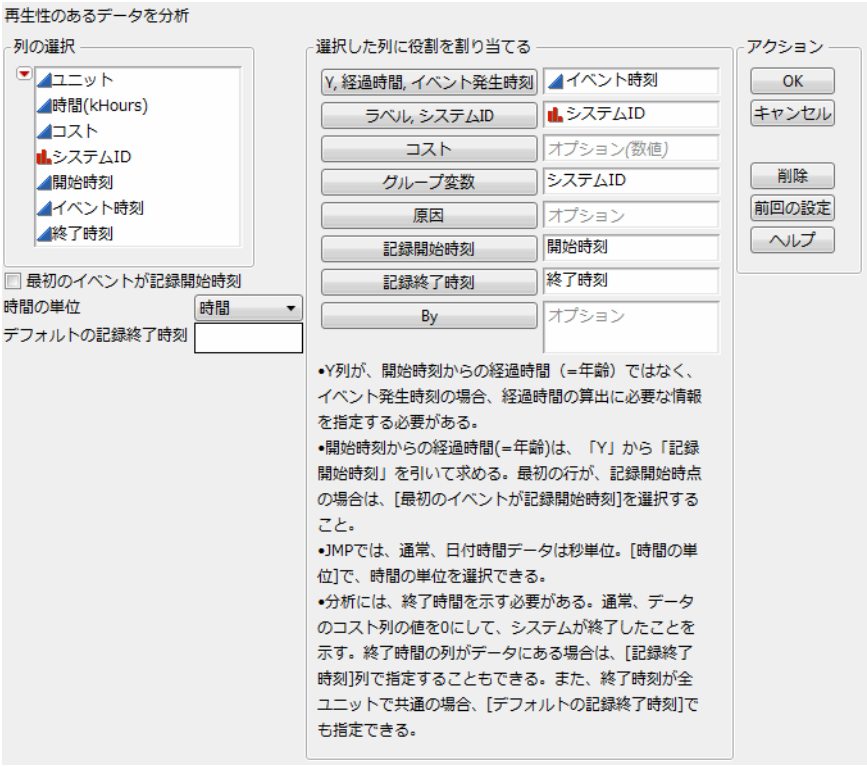

異なる処置の間に統計的に有意な差があるかどうかは、差のプロットで信頼区間を調べるとわかります。0 が信頼区間に入っていない年齢においては、処置間に有意な差があります。図 5.10 のグラフは、処置間に有意な差がないことを示しています。

## 船舶用ディーゼルエンジンの例

サンプルデータフォルダにある「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。Meeker and Escobar（1998）を参照してください。修理の進行状況を確認し、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。観察結果から、エンジンの交換時期を判断することができます。

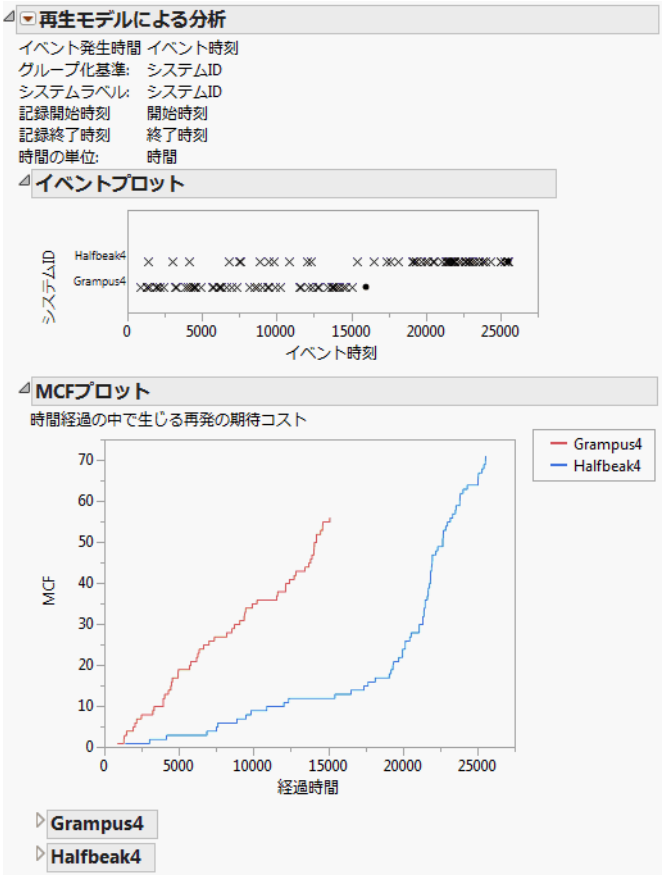
1. 「Reliability」フォルダにある「Diesel Ship Engines.jmp」データテーブルを開きます。
2. ［**分析**］>［**信頼性/生存時間分析**］>［**再生モデルによる分析**］を選択します。
3. 起動ウィンドウに、図5.11のとおりに入力を行います。

図**5.11**「Diesel Ship Engines.jmp」の起動ウィンドウ




4. ［**OK**］をクリックします。

図 **5.12**「Diesel Ship Engines.jmp」のレポート

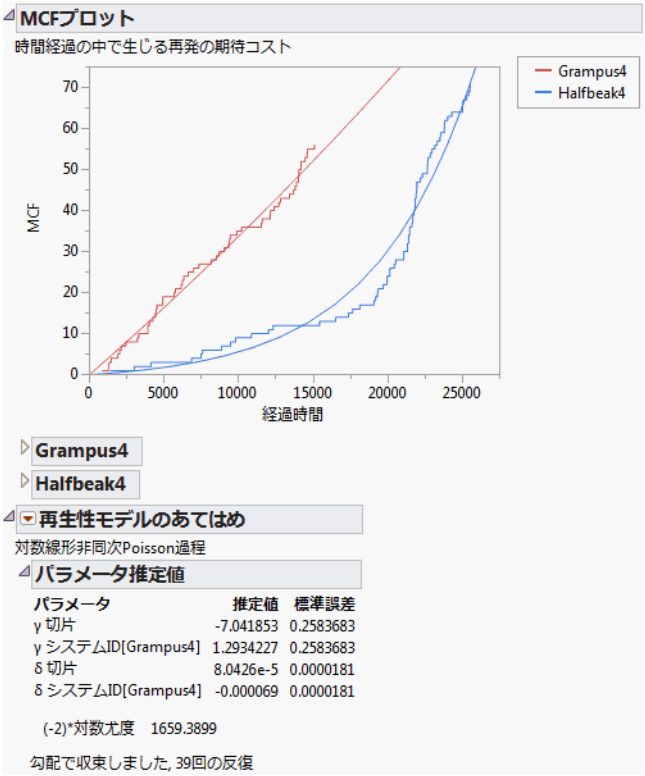



「イベントプロット」を見ると、Grampus4において、エンジン修理が生じた頻度は、時間を通じて一定だと分かります。一方、Halfbeak4では、時間が「19」ぐらいの時から修理回数が急増しています。これらの傾向は、「MCFプロット」を見ると、すぐに分かります。

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。

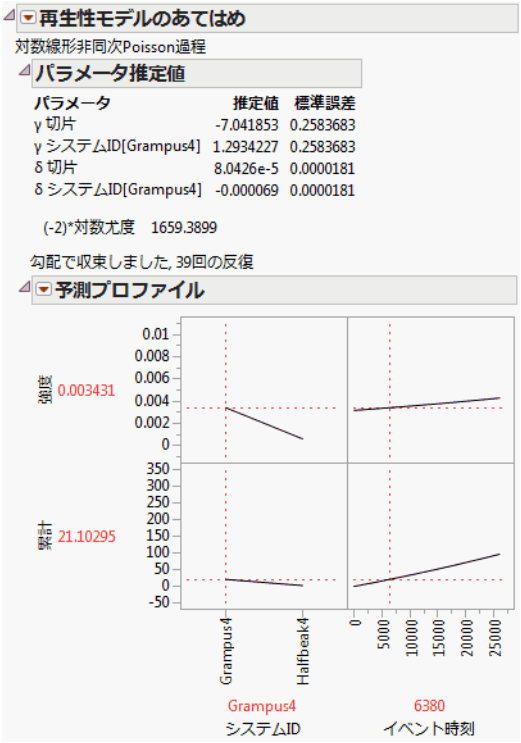
5. 「再生モデルによる分析」の赤い三角ボタンをクリックし、［**モデルのあてはめ**］を選択します。
6. 「再生性モデルの指定」で、［**対数線形非同次 Poisson 過程**］を選択します。
7. **「システム ID」**列を「尺度効果」と「形状効果」の両方に指定します。
8. ［**モデルの実行**］をクリックします。

図 **5.13**「Diesel Ship Engines.jmp」にあてはめたモデル




9. 「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 **5.14**「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「30」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「80」と入力します。Halfbeak4 は、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 6 章

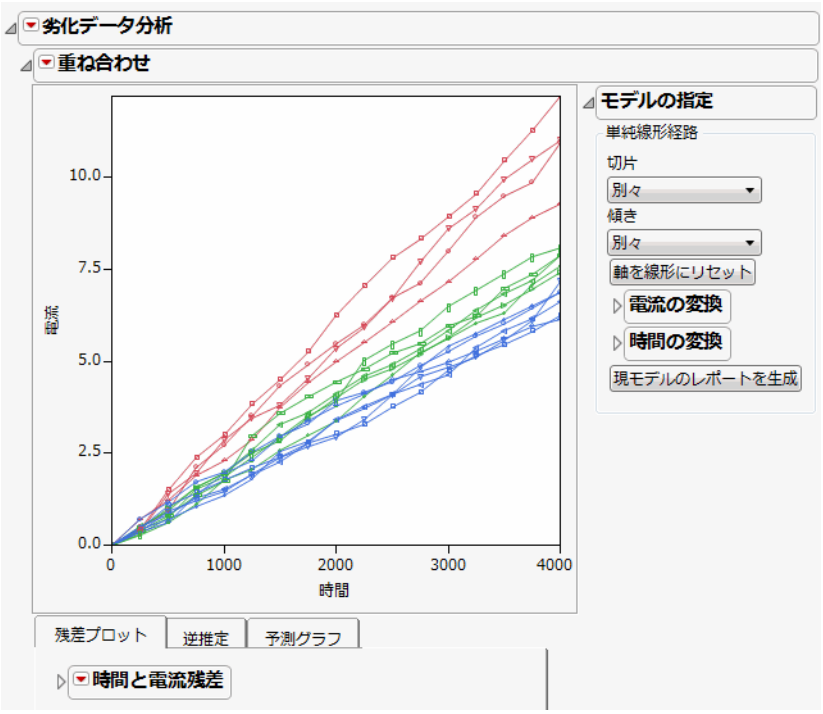
# 劣化データ分析

## 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。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。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 **6.1**「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 . . . . . 107
「劣化データ分析」プラットフォームの例 . . . . . 107
「劣化データ分析」プラットフォームの起動 . . . . . 109
「劣化データ分析」レポート . . . . . 110
モデルの指定 . . . . . 112
単純線形経路 . . . . . 112
非線形経路 . . . . . 115
逆推定 . . . . . 124
予測グラフ . . . . . 125
「劣化データ分析」プラットフォームのオプション . . . . . 127
モデルのレポート . . . . . 129
モデルリスト . . . . . 130
レポート . . . . . 130
破壊劣化試験 . . . . . 131
安定性試験 . . . . . 134

## 「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。

「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。

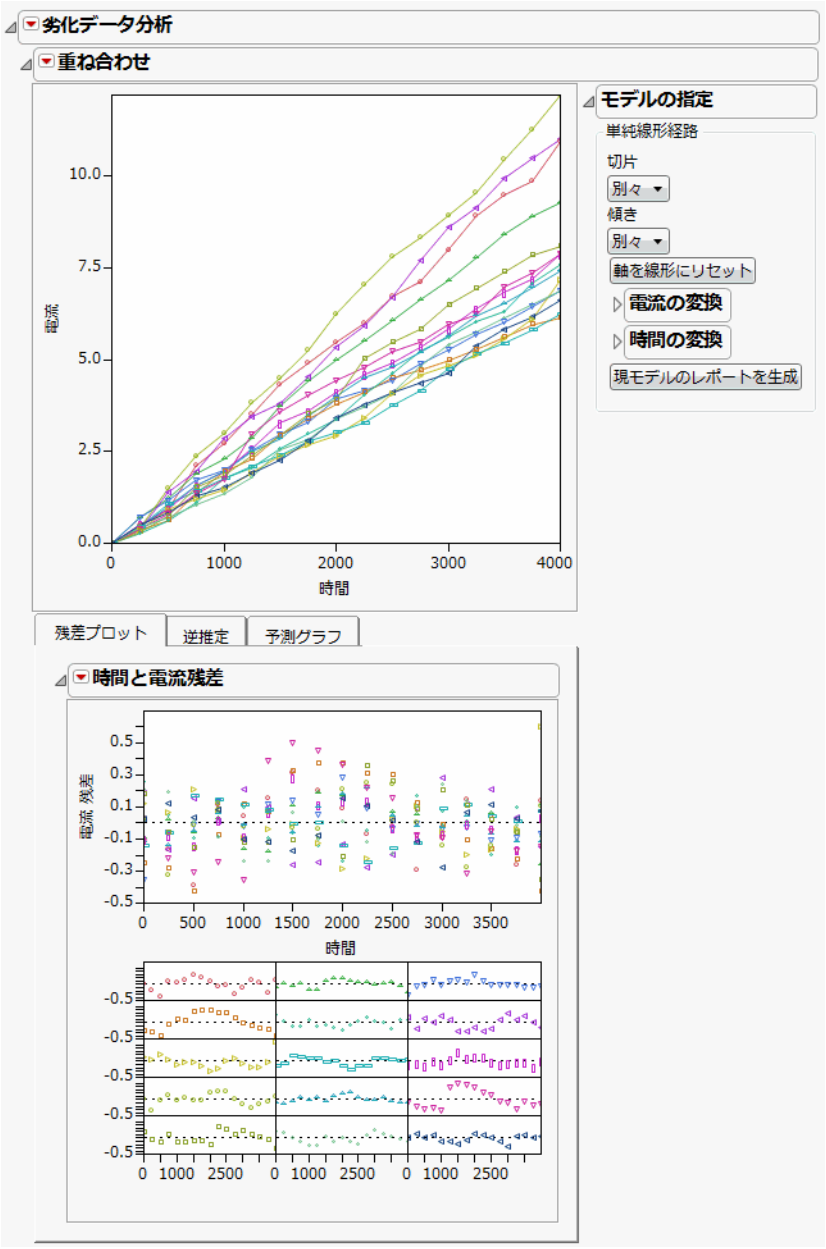
また、「劣化データ分析」プラットフォームでは、安定性試験データの分析も行えます。3 種類の線形モデルをあてはめて、有効期間を推定します。安定性試験データの分析は、医薬品の有効期間を設定する際に行います。

## 「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. サンプルデータフォルダの「Reliability」フォルダにある「GaAs Laser.jmp」データテーブルを開きます。
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. ［**OK**］をクリックします。

図 **6.2** 最初の「劣化データ分析」レポート




デフォルトのモデルが自動的にあてはめられます。レポートには次の情報が表示されます。

- ［時間］変数と［Y, 目的変数］変数の重ね合わせプロット。この例では、**「時間」**と**「電流」**のプロットが表示されます。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」アウトライン。
- ［残差プロット］タブ。すべてのユニットを重ね合わせた残差プロットと、各ユニットの残差プロットが表示されます。赤い三角ボタンのメニューから［**残差の保存**］を選択すると、現在のモデルの残差が新しいデータテーブルに保存されます。

## 「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**］>［**信頼性分析/生存時間分析**］>［**劣化分析**］を選択します。図 6.3 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 6.3**「劣化データ分析」起動ウィンドウ

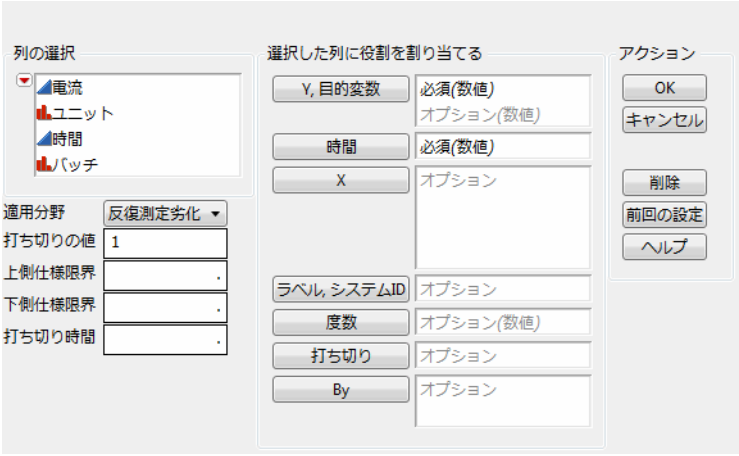



表 6.1 では、「劣化データ分析」起動ウィンドウの機能について説明します。

**表 6.1**「劣化データ分析」起動ウィンドウの説明

| 役割 | 説明 |
|---|---|
| Y, 目的変数 | 劣化の度合い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 | 共変量変数を指定します。 |
| ラベル, システム ID | ユニット ID を含む列を指定します。 |
| 度数 | 各行の度数を含む列を指定します。 |
| 打ち切り | 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。 |

**表 6.1**「劣化データ分析」起動ウィンドウの説明（**続き**）

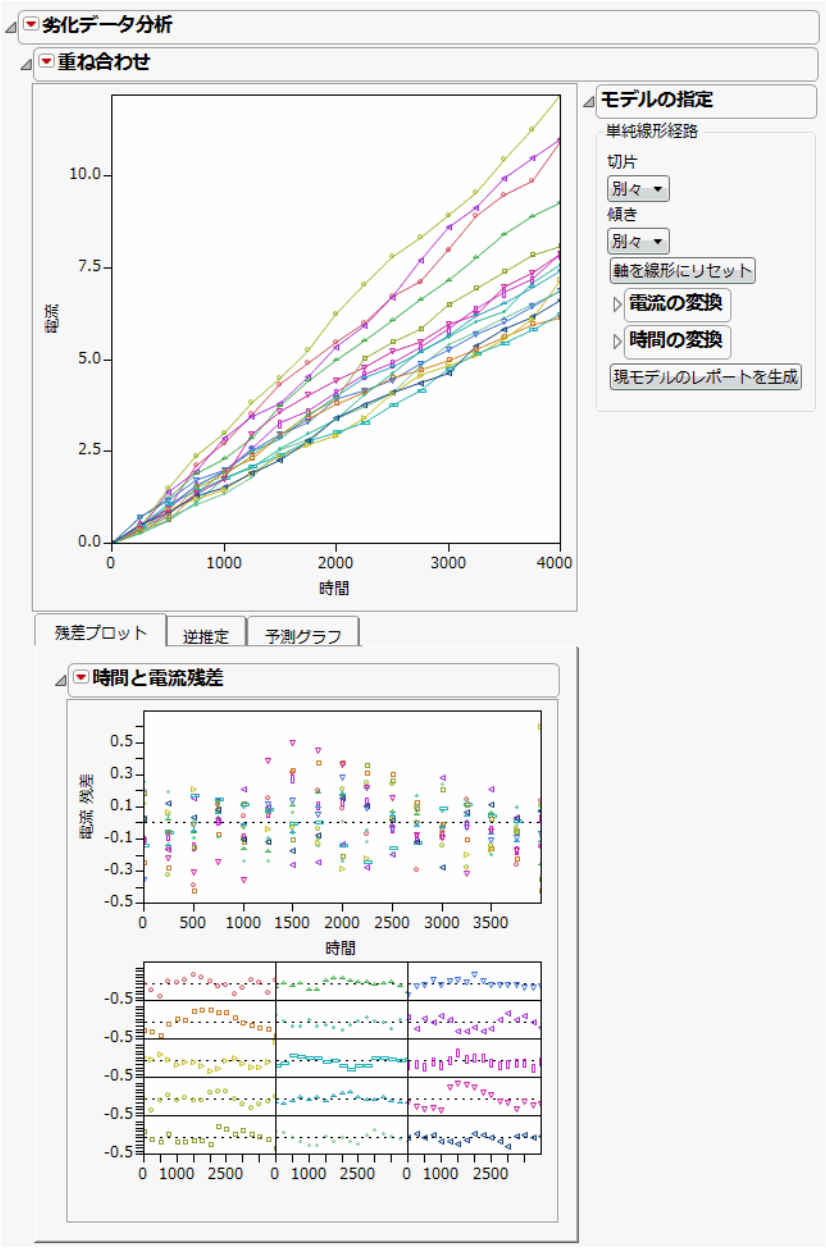
| 役割 | 説明 |
|---|---|
| 適用分野 | 次の解析手法の中から1つ選択します。<br><br>**反復測定劣化**　線形または非線形の劣化分析を実行する場合に使用します。このオプションでは、打ち切りのあるデータは分析できません。打ち切りのあるデータには［破壊劣化］オプションを使用してください。<br><br>**安定性試験**　安定性試験に対する分析を実行します。医薬品の有効期間を設定する場合に使用します。安定性試験の分析については、「安定性試験」（134ページ）を参照してください。<br><br>**破壊劣化**　測定するためにユニットが破壊される場合や打ち切りがある場合に使用します。詳細については、「破壊劣化試験」（131ページ）を参照してください。 |
| 打ち切りの値 | ［打ち切り］列で打ち切りを示す文字列または値を指定します。デフォルトの値は1です。 |
| 上側仕様限界 | 上側仕様限界を指定します。 |
| 下側仕様限界 | 下側仕様限界を指定します。 |
| 打ち切り時間 | 打ち切りの時間を指定します。 |

# 「劣化データ分析」レポート

図6.4のレポートを作成するには、「GaAs Laser.jmp」データテーブルを使用して次の手順を行います。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. サンプルデータフォルダの「Reliability」フォルダにある「GaAs Laser.jmp」データテーブルを開きます。
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. ［**OK**］をクリックします。

図 **6.4** 最初の「劣化データ分析」レポート




デフォルトのモデルが自動的にあてはめられます。レポートには次の情報が表示されます。

- ［時間］変数と［Y, 目的変数］変数の重ね合わせプロット。この例では、**「時間」**と**「電流」**のプロットが表示されます。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」アウトライン。詳細については、「モデルの指定」（112ページ）を参照してください。
- ［残差プロット］タブ。すべてのユニットを重ね合わせた残差プロットと、各ユニットの残差プロットが表示されます。赤い三角ボタンのメニューから［**残差の保存**］を選択すると、現在のモデルの残差が新しいデータテーブルに保存されます。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**］は、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**］は、時間の方向に点をランダムにずらします。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**］は、グループを区別できるようにグループ間にスペースを表示します。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**］を使用して、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。
- ［逆推定］タブ。詳細については、「逆推定」（124ページ）を参照してください。
- ［予測グラフ］タブ。詳細については、「予測グラフ」（125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」（112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」（115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6.5を参照してください。

図 **6.5**「モデルの指定」の「単純線形経路」

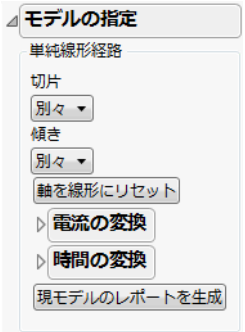



表 6.2 では、「単純線形経路」のオプションについて説明します。

**表 6.2**「単純線形経路」のオプション

| オプション | 説明 |
|---|---|
| 切片 | このメニューから、切片の形式を選びます。<br>**別々**　ID ごとに別々の切片をあてはめます。<br>**グループ内で共通**　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。<br>**共通**　すべての ID に同じ切片をあてはめます。<br>**ゼロ**　すべての ID の切片をゼロに固定します。 |
| 傾き | このメニューから、傾きの形式を選びます。<br>**別々**　ID ごとに別々の傾きをあてはめます。<br>**グループ内で共通**　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。<br>**共通**　すべての ID に同じ傾きをあてはめます。 |
| 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 変数を変換して劣化経路を線形にできる場合は、ここで変換方法（[線形]、[ln(x)]、[exp(x)]、[x^2]、[sqrt(x)]、または [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、「カスタム変換」（114 ページ）を参照してください。 |

表 6.2「単純線形経路」のオプション（続き）

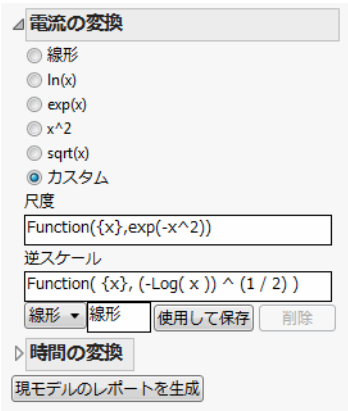
| オプション | 説明 |
|---|---|
| <時間>の変換 | 時間変数を変換して劣化経路を線形にできる場合は、ここで変換方法（[線形]、[ln(x)]、[x^2]、[sqrt(x)]、または［カスタム］）を選択します。［カスタム］オプションの詳細については、「カスタム変換」（114 ページ）を参照してください。 |
| 現モデルのレポートを生成 | 現在のモデル設定でレポートを作成します。「モデルの要約」レポートと、パラメータ推定値をまとめた「推定値」レポートが作成されます。詳細については、「モデルのレポート」（129 ページ）を参照してください。 |

## カスタム変換

選択肢にない変換を実行する必要がある場合は、［カスタム］オプションを使用します。たとえば、応答変数を $\exp(-x^2)$ を使用して変換する場合は、図 6.6 のとおりに「スケール」ボックスに入力します。さらに、「逆スケール」ボックスで逆変換を指定します。

**注：**JMP は自動的に逆変換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 6.6［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作成した場合は、メニューから目的の変換を選択します。［**削除**］ボタンをクリックすると、カスタム変換が削除されます。

## 非線形経路

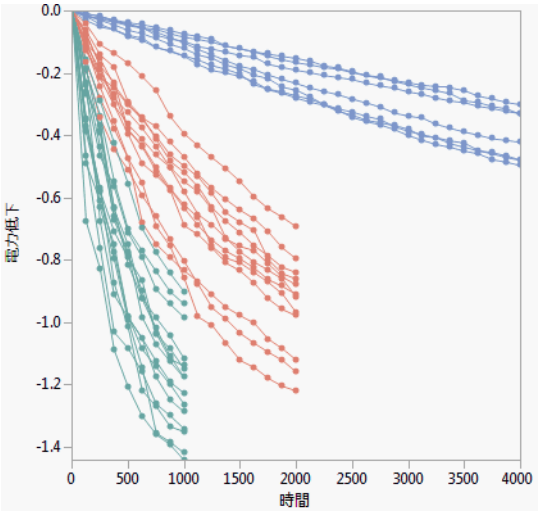
非線形の劣化経路をモデル化する場合は、プラットフォームの赤い三角ボタンをクリックし、［**劣化経路の種類**］>［**非線形経路**］を選択します。劣化経路を線形に変換できないので、自分自身で定義した非線形モデルをデータにあてはめたい場合は、このオプションを使用します。

ここでは、「Device B.jmp」データテーブルを例にとって、「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. サンプルデータフォルダの「Reliability」フォルダにある「Device B.jmp」データテーブルを開きます。
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。
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6.7は、最初に表示される重ね合わせプロットです。

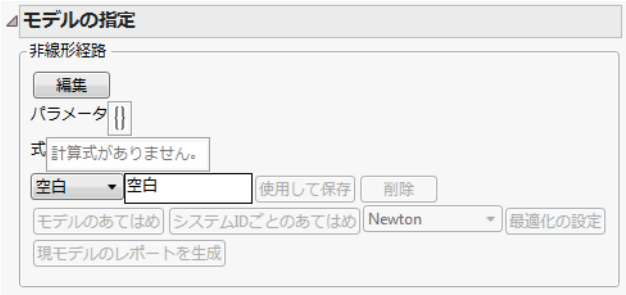
図**6.7**「Device B」の重ね合わせプロット




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6.8を参照してください。

**注：**図6.8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**6.8**「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。

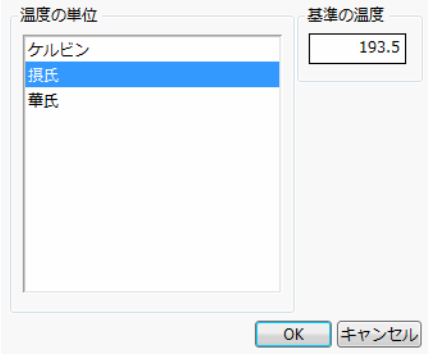
- ［反応速度］モデルについては、「反応速度モデル」（116ページ）を参照してください。
- ［定率］モデルについては、「定率モデル」（117ページ）を参照してください。
- ［予測列］の使用方法については、「予測列」（117ページ）を参照してください。

## 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6.8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**6.9** 温度の単位と基準の温度の選択



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」（118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6.8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**6.10** 定率モデルの変換

それぞれの変換セクションで選択肢を選ぶと、左下隅（図6.10）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」（118ページ）を参照してください。

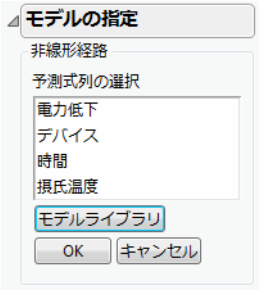
## 予測列

［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モデル列を作成しておくことです。また、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モデル列を作成します（図6.11）。

モデルを作成し、列として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」（121ページ）または『発展的なモデル』の「非線形回帰」の章を参照してください。

この機能を用いるには、まず、図6.8のメニューから［**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 **6.11** 列の選択




この時点で、次のいずれかの作業を行います。

- 使用するモデルがデータテーブルの列にすで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」（118 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」（122 ページ）または『発展的なモデル』の「非線形回帰」の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」プラットフォームを再起動し、図 6.11 の列の選択画面を再び表示します。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。「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」（118 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 6.11）に戻ってください。作成されたモデルを含む列を選択して［**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」（118 ページ）を参照してください。［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」（122 ページ）または『発展的なモデル』の「非線形回帰」の章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。図 6.12 は、図 6.9 で［**OK**］をクリックした後に表示される「モデルの指定」です。

---

**注：**図 6.12 および図 6.13 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 **6.12** 初期値が表示された「モデルの指定」

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、「ユーザ自身がモデルを定義する場合」（121 ページ）または『発展的なモデル』の「非線形回帰」の章を参照してください。ボタンが並ぶ下に、モデルの式が表示されます。

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 6.13 を参照してください。

図 **6.13** モデルの指定

- ［**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。
- 最適化手法のメニューには、3つの手法（［**Newton**］、［**準 Newton BFGS**］、［**準 Newton SR1**］）が表示されます。
  - ［**Newton**］を選択すると、最適化手法として Gauss-Newton 法（通常の最小 2 乗法の場合）または Newton-Raphson（損失関数のあるモデルの場合）が使われます。
  - ［**準 Newton SR1**］は、最適化方法として準 Newton SR1 を選択します。
  - ［**準 Newton BFGS**］は、最適化方法として準 Newton BFGS を選択します。
- ［**最適化の設定**］ボタンは、最適化の設定を変更するときに使います。
- ［**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」（129 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）。

- **Dinf** ($D_\infty$) - 漸近的な劣化度
- **Ru** ($R_U$) - 使用温度（$temp_U$）における反応速度
- **Ea** (Ea) - 反応の活性化エネルギー

次式で求められます。

$$D(t; temp) = D_\infty \times \{1-\exp[-R_U \times AF(temp) \times t]\}$$

ここで、$R_U$ は、使用温度 $temp_U$ における反応速度、$R_U \times AF(temp)$ は、通常温度 temp における反応速度です。また、$temp > temp_U$ のとき、$AF(temp) > 1$ が成り立ちます。

および

$$AF(temp, temp_U, Ea) = \frac{R(temp)}{R(temp_U)} = \exp\left[Ea\left(\frac{11605}{(temp_U K)} - \frac{11605}{(temp K)}\right)\right]$$

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。

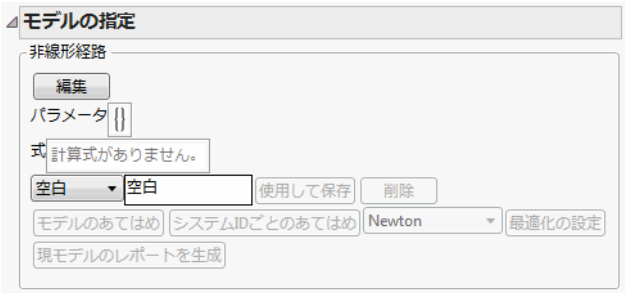
パラメータの値を固定するには、「**固定**」列の下で、該当するパラメータのチェックボックスをオンにします。固定したパラメータは、モデルをあてはめる際に値が変化しません。

## 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なっている場合は、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』を参照してください。

**注：**図 6.14 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 **6.14**「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

モデルを独自に作成し、列として保存する場合は、まず、パラメータの初期値を含む計算式を含んだ列を作成する必要があります。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. モデル式の列を、データテーブルに作成します。この列には、パラメータを含むモデルの計算式を設定してください。また、パラメータには、反復計算の初期値を設定してください。パラメータを含む計算式の作成方法については、「モデル列の作成」（122 ページ）を参照してください。
3. ［**分析**］>［**モデル化**］>［**非線形回帰**］を選択します。
4. Y 変数に［**Y, 応答変数**］の役割を割り当てます。
5. モデル式の列に［**X, 予測式列**］の役割を割り当てます。
6. 必要に応じて、その他の役割を割り当てます。
7. ［**OK**］をクリックします。
8. 設定パネルの［**実行**］ボタンをクリックします。

## モデル列の作成

モデルパラメータと初期値を使って計算式列を作成するには、次の手順に従います。

1. データテーブルに新しい列を作成します。
2. 新しい列で計算式エディタを開きます。
3. 列のリストの上にあるポップアップメニューから［**パラメータ**］を選択します。
4. ［**パラメータの新規作成**］をクリックします。
5. パラメータの名前を入力します。
6. 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。
7. 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。
8. ［**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、カテゴリカル変数の各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。ウィンドウの［**モデルライブラリ**］をクリックすると、ライブラリが開きます。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。グラフウィンドウでは、スライダを使うか値を入力することによって、パラメータの初期値を変更できます。

［**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。このウィンドウで［グループ］の列を指定した場合は、プラットフォームの起動ウィンドウでも［グループ化］の列を指定してください。

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。

この時点（［**点の表示**］を使用した後）で［**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。列には計算式が含まれ、そのパラメータ値は最後に設定した初期値になっています。

**注：**［**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。そこで再び［**計算式の作成**］をクリックすると、新しい列が作成されます。

データテーブルで計算式が作成されたら、起動ウィンドウで新しい列を指定して、分析を続けます。

## 非線形モデルライブラリのカスタマイズ

モデルライブラリは、「NonlinLib.jsl」というビルトインスクリプトによって作成されます。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。このスクリプトを変更すると、非線形回帰モデルライブラリをカスタマイズできます。

モデルを追加するには、`Listofmodellist#` というリストに 3 つの行を加える必要があります。この 3 つの行は次のような情報であり、これらをリスト内に指定します。

- モデル名（引用符で囲んだ文字列）
- モデルの計算式（式）
- モデルのスケール（範囲）

たとえば、次の式で表される「単純な指数成長モデル」というモデルを追加するとしましょう。

$$y = b_1 e^{kx}$$

この場合、「NonlinLib.jsl」スクリプトの Listofmodellist# リストに以下の行を挿入します。

```
{// 単純な指数成長モデル
      " 単純な指数成長モデル ",
      Expr(Parameter({b1=2, k=0.5}, b1*exp(k * :X))),
      lowx = -1; highx = 2; lowy = 0;  highy = 2},
```

以下の点に注意してください。

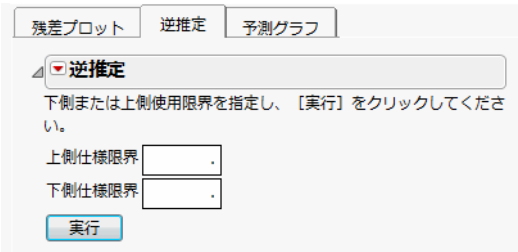
- 第 1 行は、リストの開始を意味する開く括弧とコメント（オプション）から成ります。第 2 行に入力した文字列がモデル名としてモデルライブラリウィンドウに表示されます。
- `lowx`、`highx`、`lowy`、および `highy` は、表示されるグラフの範囲を表します。
- 上記の例では最後にカンマがついていますが、`Listofmodellist#` リストの最後のエントリになる場合には、カンマは必要ありません。
- 説明変数が 3 つ以上あるモデルでは、最後の行（グラフの範囲を指定する行）に "Not Available" という文字列を引用符で囲んで入力します。

  モデルライブラリにあるモデルを削除するには、`Listofmodellist#` リストから該当する行を削除します。

# 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6.15に［逆推定］タブを示します。

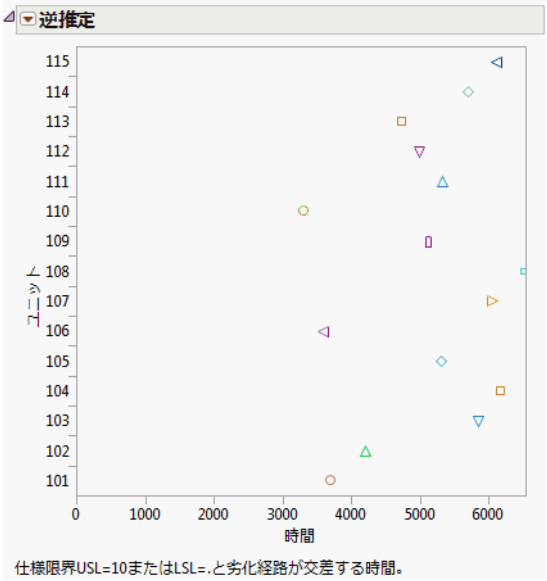
図**6.15**［逆推定］タブ




「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6.16を参照してください。

図**6.16**「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。

**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、その区間値が、［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。

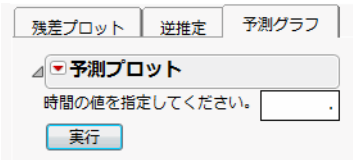
**逆推定 有意水準**　区間で使用する有意水準を指定します。

**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

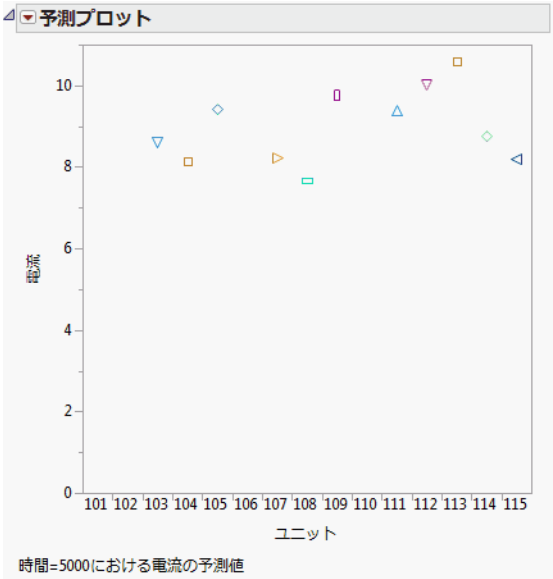
［予測グラフ］タブでは、指定の時間値におけるＹ変数を予測します。図6.17は［予測グラフ］タブです。

図**6.17**［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時間経過後の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時間経過後の電力低下率の推定値を示すプロットが作成されます。図6.18を参照してください。

図**6.18** 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6.3に示すオプションが表示されます。

**表6.3**「劣化データ分析」プラットフォームのオプション

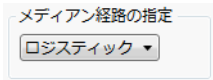
| オプション | 説明 |
|---|---|
| 経路の定義 | ある時間におけるY変数が、特定の分布に従うものと仮定されます。そして、その分布の平均、位置パラメータ、またはメディアンをモデル化することができます。<br><br>**平均経路**　平均をモデル化します。<br><br>**位置パラメータ経路**　位置パラメータをモデル化します。<br><br>**メディアン経路**　分布のメディアンをモデル化します。<br><br>［位置パラメータ経路］または「メディアン経路］オプションを選択した場合は、「モデルの指定」にメニューが表示されます。このメニューから応答の分布を選択します。図6.19を参照してください。<br><br>**図6.19** 分布の指定<br><br>  <br> |
| 劣化経路の種類 | 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。<br><br>**単純線形経路**　線形の経路、または線形に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、「単純線形経路」（112ページ）を参照してください。<br><br>**非線形経路**　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、「非線形経路」（115ページ）を参照してください。 |

**表 6.3**「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 |
|---|---|
| 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。<br><br>**データマーカーをつなぐ**　重ね合わせプロット上の点をつなぐ線の表示／非表示を切り替えます。<br><br>**あてはめ線の表示**　プロット上のあてはめ線の表示／非表示を切り替えます。<br><br>**仕様限界の表示**　プロット上の仕様限界の表示／非表示を切り替えます。<br><br>**残差プロットの表示**　残差プロットの表示／非表示を切り替えます。<br><br>**逆推定プロットの表示**　逆推定プロットの表示／非表示を切り替えます。<br><br>**曲線区間の表示**　重ね合わせプロット上のあてはめ線の信頼区間の表示／非表示を切り替えます。<br><br>**曲線区間の有意水準**　あてはめ線の信頼区間で使用する有意水準を変更することができます。<br><br>**メディアン曲線の表示**　［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。<br><br>**凡例の表示**　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。<br><br>**タブなし**　「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。 |

**表 6.3**「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。<br><br>**上側仕様限界**　上側仕様限界を指定します。<br><br>**下側仕様限界**　下側仕様限界を指定します。<br><br>**打ち切り時間**　打ち切り時間を設定します。<br><br>**基準**　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たときに、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。<br><br>**逆推定**　逆推定の区間の種類、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。<br><br>逆推定については、「逆推定」（124 ページ）を参照してください。<br><br>**縦軸予測**　縦軸予測の時間値、区間の種類、有意水準を指定します。<br><br>縦軸予測については、「予測グラフ」（125 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。<br><br>**疑似故障データの生成**　各ユニットが仕様限界と交差するときの予測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。<br><br>**安定性試験**　安定性試験の分析を実行します。詳細については、「安定性試験」（134 ページ）を参照してください。 |
| スクリプト | すべてのプラットフォームに共通なオプションが表示されます。詳細については、『JMP の使用法』を参照してください。 |
| By グループでまとめてスクリプト化 | ［スクリプト］メニューと同様のオプションが表示されますが、By 変数が指定されている場合に使用できます。 |

# モデルのレポート

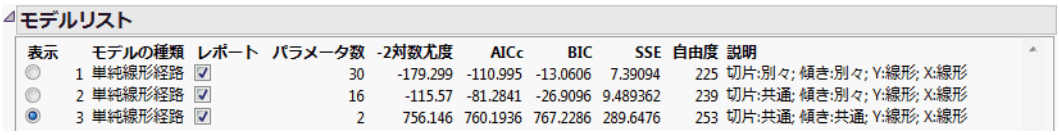
［**現モデルのレポートを生成**］ボタンをクリックすると、次の 2 か所に要約が表示されます。

- 「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」（130 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」（130 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 6.20 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。表 6.4 に、「モデルリスト」レポートに表示される情報をまとめます。

図 **6.20** 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 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ○ | 1 | 単純線形経路 | ☑ | 30 | -179.299 | -110.995 | -13.0606 | 7.39094 | 225 | 切片:別々; 傾き:別々; Y:線形; X:線形 |
| ○ | 2 | 単純線形経路 | ☑ | 16 | -115.57 | -81.2841 | -26.9096 | 9.489362 | 239 | 切片:共通; 傾き:別々; Y:線形; X:線形 |
| ◉ | 3 | 単純線形経路 | ☑ | 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 **6.4**「モデルリスト」レポート

| 機能 | 説明 |
|---|---|
| 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。 |
| モデルタイプ | 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」(130 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数。 |
| -2 対数尤度 | 対数尤度をマイナス 2 倍した値。 |
| AICc | 修正済みの赤池の情報量規準。 |
| BIC | ベイズ情報量規準。 |
| SSE | モデルの誤差平方和。 |
| 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。

表 **6.5**「モデルの要約」レポート

| 機能 | 説明 |
|---|---|
| <Y, 目的変数>のスケール | 応答変数の変換方法。 |
| <時間>のスケール | 時間変数の変換方法。 |

**表 6.5**「モデルの要約」レポート（**続き**）

| 機能 | 説明 |
|---|---|
| SSE | 誤差平方和。 |
| パラメータ数 | 推定されたモデルパラメータの数。 |
| 自由度 | 誤差の自由度。 |
| R2 乗 | R2 乗の値。 |
| MSE | 誤差の平均平方。 |

**表 6.6**「推定値」レポート

| 機能 | 説明 |
|---|---|
| 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、パラメータの t 統計量。 |
| p 値 (Prob>\|t\|) | パラメータの両側検定の *p* 値。 |

# 破壊劣化試験

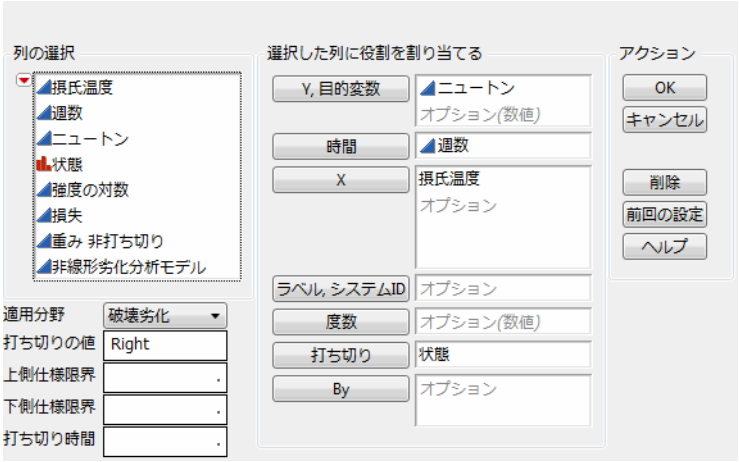
製品の特性を調べる際、製品を破壊しなければならない場合があります。たとえば、破壊強度を調べるときは、破壊に至るまで製品に圧力を加えます。こうしたケースには、通常の劣化分析は適用できません。このような場合は、プラットフォームの起動ウィンドウで「適用分野」メニューから［破壊劣化］を選択します。

サンプルデータフォルダの「Reliability」フォルダにある「Adhesive Bond B.jmp」データテーブルを例に、破壊劣化分析を見ていきましょう。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、加速因子でいくつかの水準を設定して試験しました。25°C の使用条件下で 260 週間（5 年間）経過後、強度が 40 ニュートンを下回るユニットの割合を推定します。次の手順に従い、破壊劣化分析を実行してみましょう。

1. 「Reliability」フォルダにある「Adhesive Bond B.jmp」サンプルデータを開きます。
2. ［**行**］>［**行の属性をクリア**］を選択し、除外されている行をクリアします。
3. ［**分析**］>［**信頼性分析 / 生存時間分析**］>［**劣化分析**］を選択します。
4. 「**ニュートン**」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. 「**摂氏温度**」を選択し、［**X**］をクリックします。

7. 「**状態**」を選択し、［**打ち切り**］をクリックします。
8. 「打ち切りの値」ボックスに「**Right**」と入力します。これは、［打ち切り］列で、データが打ち切られていることを示す値です。
9. 「適用分野」メニューから［**破壊劣化**］を選びます。

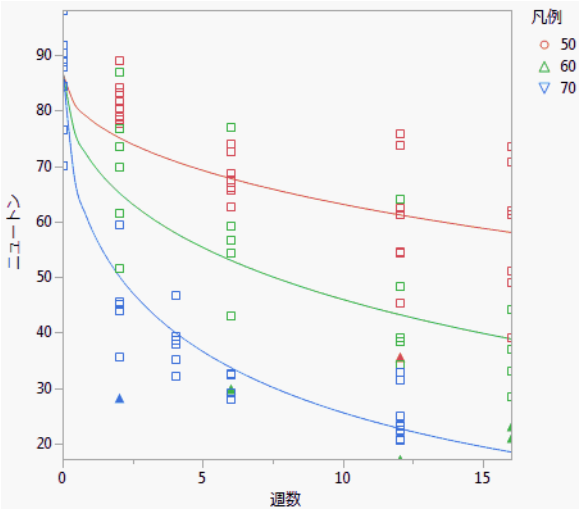
図 **6.21** 設定後の起動ウィンドウ




［**ラベル , システム ID**］の役割を持つ変数は指定しません。この役割は、通常の劣化分析で同じユニットに対して繰り返し測定する場合に使用します。破壊劣化分析では、各ユニットは一度ずつしか測定されません。データテーブルの各行がそれぞれ別のユニットに対応するため、ID 変数は不要です。

10. ［**OK**］をクリックします。
11. 分布の選択メニュー（「位置パラメータ経路の指定」の下）から［**対数正規**］を選択します。
12. 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。
13. ［**対数正規**］が選択されているセクションの下にあるメニューから［**定率**］を選択します。
14. 次の変換方法を選択します。
    - 「経路の変換」= ［**無変換**］
    - 「率の変換」= ［**Arrhenius 摂氏**］
    - 「時間の変換」= ［**Sqrt**］
15. ［**OK**］をクリックします。
16. ［**使用して保存**］をクリックします。
17. ［**モデルのあてはめ**］をクリックします。モデルがあてはめられ、その曲線が表示されます（図 6.22）。

図 **6.22** モデルのプロット




18. ［**現モデルのレポートを生成**］をクリックします。

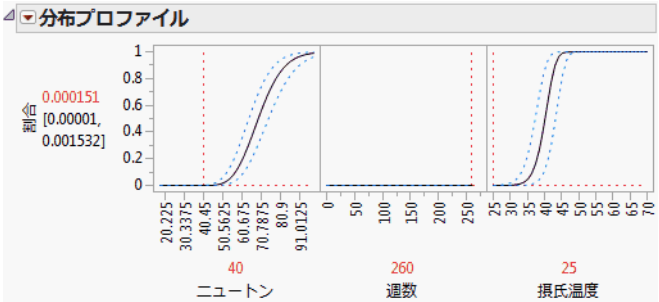
19. レポートの下部の「分布プロファイル」で、次の値を入力します。

– 「ニュートン」=「40」

– 「週数」=「260」

– 「摂氏温度」=「25」

図 **6.23** 結果の「分布プロファイル」




260 週経過後に 40 ニュートンを下回るユニットの推定割合は 0.000151、信頼区間は 0.00001 ～ 0.00153 という結果が得られました。

# 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行います。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 Appendix B に従い、3 種類の線形モデルから 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 1**　傾きと切片がバッチごとに別々

**モデル 2**　傾きは共通だが、切片はバッチごとに別々

**モデル 3**　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 1」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 1」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 1 で得られたタイプ I 平方和を用います検定します（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 2」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 3」によって有効期間を推定します。

「傾きと切片が別々」である「モデル 1」によって有効期間が推定する時に、JMP では、各バッチの誤差平方和をプールしない点にご注意ください。バッチごと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。

## 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. サンプルデータフォルダの「Reliability」フォルダにある「Stability.jmp」サンプルデータを開きます。
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. 「**濃度 (mg/Kg)**」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. 「**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。
6. 「適用分野」メニューから［**安定性試験**］を選択します。
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 6.24 に示します。

図 **6.24** 安定性試験のモデル

**安定性試験**

有意水準0.25で選ばれるモデルは、切片が別々、傾きが共通です。このモデルから計算される最短の貯蔵寿命は、信頼水準95%において、23.47505です。 ICHガイドラインに従って算出された有効期間は、23.47505です。

| 表示 | 切片 | 傾き | 交差する最短時間 |
|---|---|---|---|
| ○ | 別々 | 別々 | 23.11596 |
| ◉ | 別々 | 共通 | 23.47505 |
| ○ | 共通 | 共通 | 29.98567 |

モデルの比較

| 要因 | 自由度 | 平方和 | 平均平方 | F統計量 | p値(Prob>F) |
|---|---|---|---|---|---|
| A | 6 | 61.48956 | 10.24826 | 10.10836 | <.0001* |
| B | 3 | 60.48866 | 20.16289 | 19.88764 | <.0001* |
| C | 3 | 1.000906 | 0.333635 | 0.329081 | 0.8043 |
| D | 28 | 28.38752 | 1.01384 | | |
| E | 8 | 360214.5 | 45026.81 | | |

凡例

| 要因 | | 切片 | 傾き | | 切片 | 傾き |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A | | 別々 | 別々 | \| | 共通 | 共通 |
| B | | 別々 | 共通 | \| | 共通 | 共通 |
| C | | 別々 | 別々 | \| | 別々 | 共通 |
| D | 残差 | | | | | |
| E | モデル全体 | | | | | |

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 .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 7 章

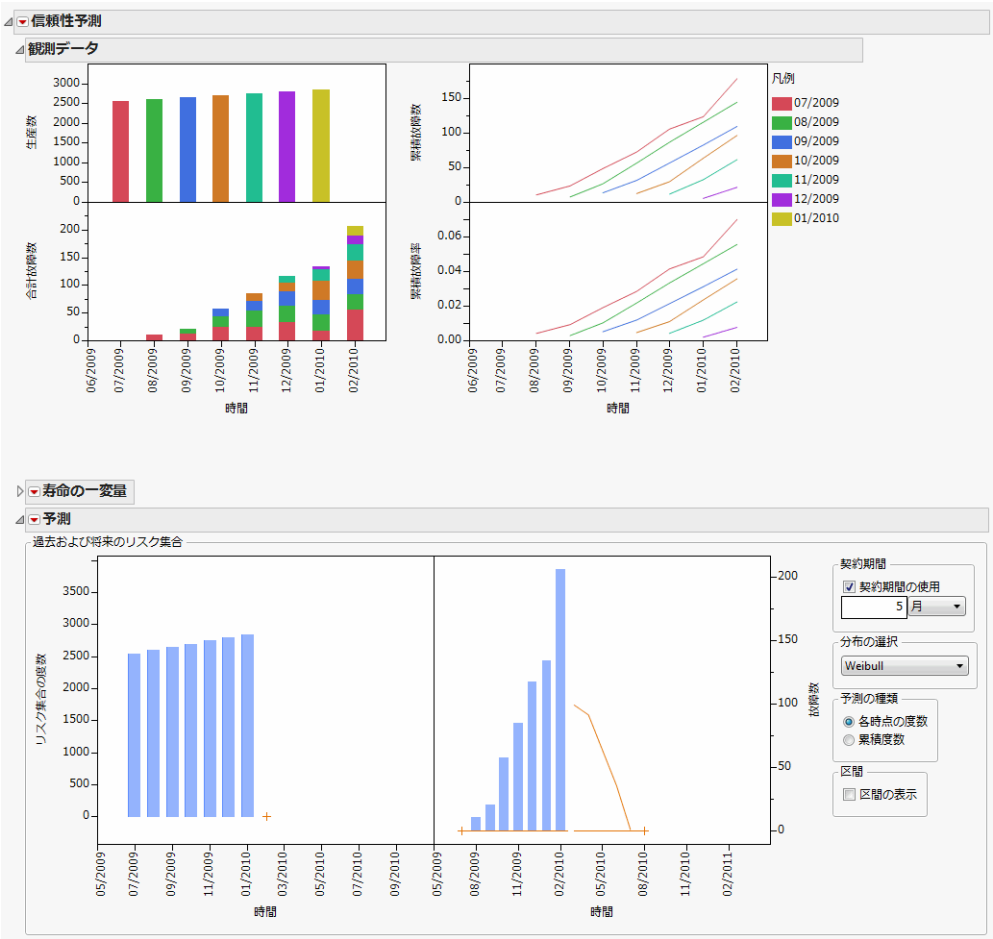
# 信頼性予測

## 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 **7.1** 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 . . . . . 139
「信頼性予測」プラットフォームの使用例 . . . . . 139
「信頼性予測」プラットフォームの起動 . . . . . 142
「信頼性予測」レポート . . . . . 144
「観測データ」レポート . . . . . 145
「寿命の一変量」レポート . . . . . 146
「予測」レポート . . . . . 146
「信頼性予測」プラットフォームのオプション . . . . . 149

# 「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使用例

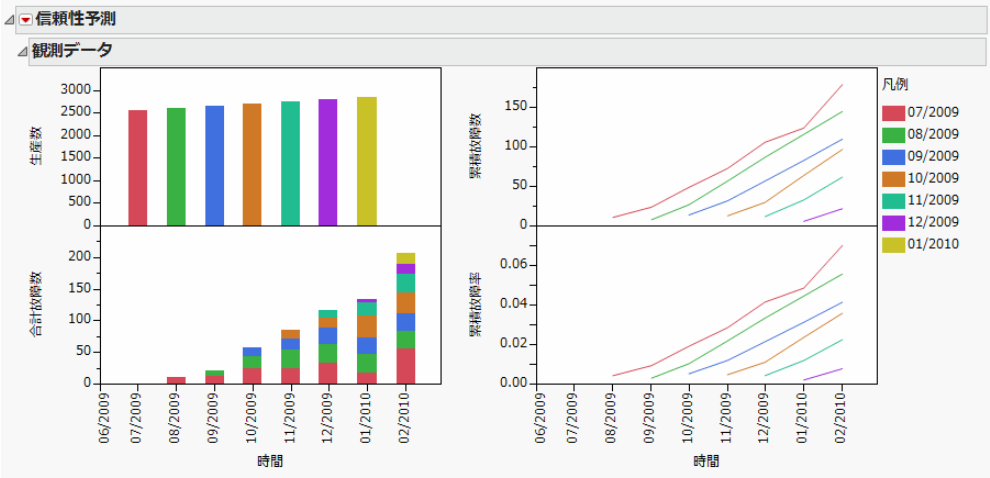
7か月間の生産数と故障数を記録したデータがあります。このデータから、2011年2月に修理のために返品されるユニットの総数を予測します。製品の保証期間は12か月です。

1. 「Reliability」フォルダにある「Small Production.jmp」サンプルデータを開きます。
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7.2）。

   「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。

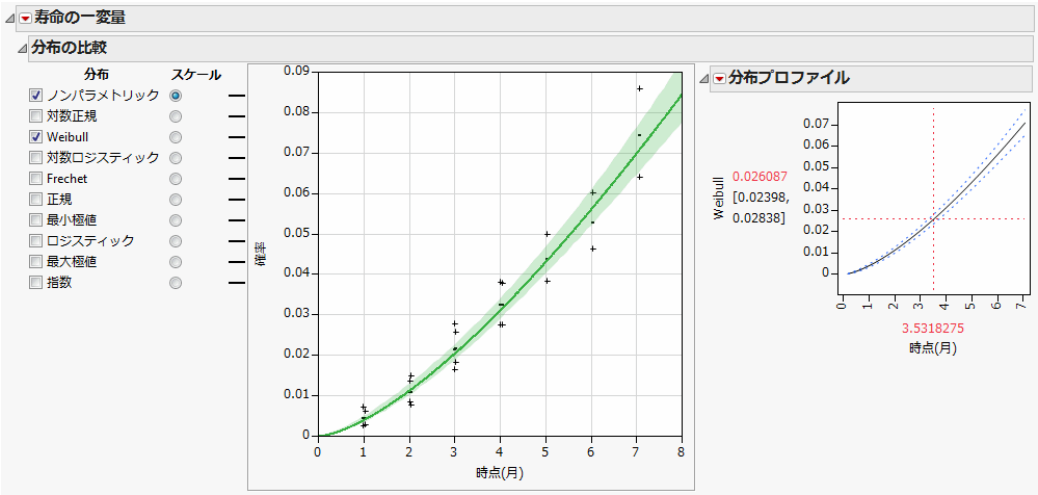
図 **7.2**「観測データ」レポート



7. **「寿命の一変量」**の開閉ボタンをクリックします。

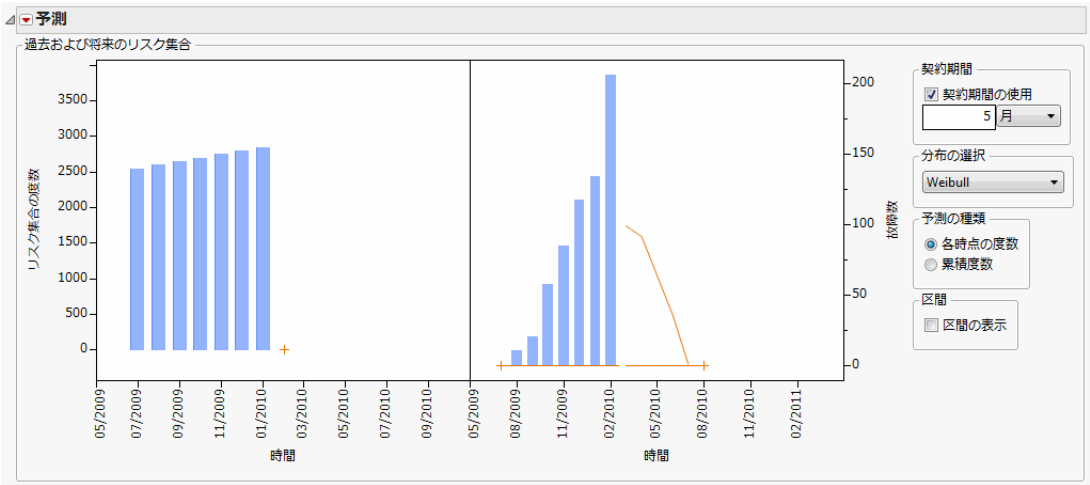
「寿命の一変量」プラットフォームによって、生産数と故障数のデータに対して、Weibull分布があてはめられています（図7.3）。このWeibull分布にもとづき、次の5か月間における返品数を予測します（図7.4）。

図**7.3**「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7.4）。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**7.4**「予測」レポート

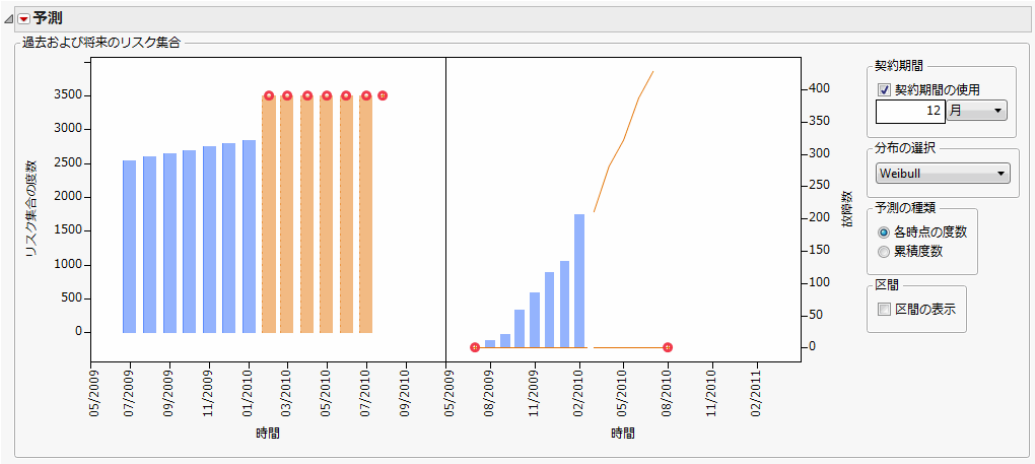



8. 「予測」レポートで、「契約期間」に「12」と入力します。これは、修理を保証している契約期間の長さです。

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新しい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 7.5）。

図 **7.5** 生産数と故障数の推定

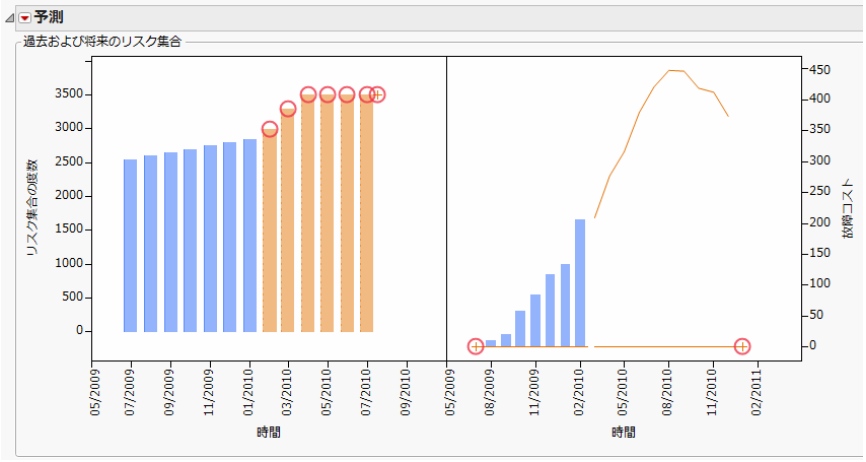



10. 2010 年 2 月のホットスポットを、約 3000 にまでドラッグしてください。また、2010 年 3 月のホットスポットを約 3300 にまでドラッグしてください。

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 7.6）。

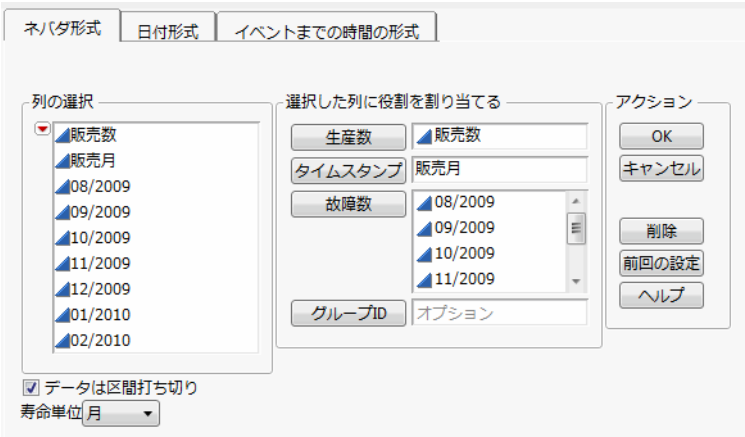
図 **7.6** 将来の生産数と予測される故障数



# 「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7.7のようなウィンドウが開きます。

図**7.7**「信頼性予測」起動ウィンドウ




「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］（故障発生までの時間）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つのデータに含められています。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7.8は、「Small Production.jmp」データテーブルです。

図**7.8** 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。ここで設定した時間の単位で、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分布をあてはめ、予測が行われます。また、それらの結果を組み合わせて、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、生産日と故障日を軸にして構成されています。日付形式では、1 つのデータテーブルに、生産日ごとに生産数を保存します。そして、別のデータテーブルに、故障日、故障数、生産日を保存します。

図 7.9 は、「SmallProduction part1.jmp」データテーブルと「SmallProduction part2.jmp」データテーブルです。

図 **7.9** 日付形式の例

生産数データ

| | 販売数 | 販売月 |
|---|---|---|
| 1 | 2550 | 07/2009 |
| 2 | 2600 | 08/2009 |
| 3 | 2650 | 09/2009 |
| 4 | 2700 | 10/2009 |
| 5 | 2750 | 11/2009 |
| 6 | 2800 | 12/2009 |
| 7 | 2850 | 01/2010 |

故障データ

| | 返品月 | 返品数 | 販売月 |
|---|---|---|---|
| 1 | 08/2009 | 11 | 07/2009 |
| 2 | 09/2009 | 13 | 07/2009 |
| 3 | 10/2009 | 25 | 07/2009 |
| 4 | 11/2009 | 24 | 07/2009 |
| 5 | 12/2009 | 33 | 07/2009 |
| 6 | 01/2010 | 18 | 07/2009 |
| 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。

打ち切りデータの詳細は、「寿命の一変量」の章の「イベントプロット」（31 ページ）を参照してください。

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」（142 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、図7.10のように、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。

**図 7.10** 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 |

［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。

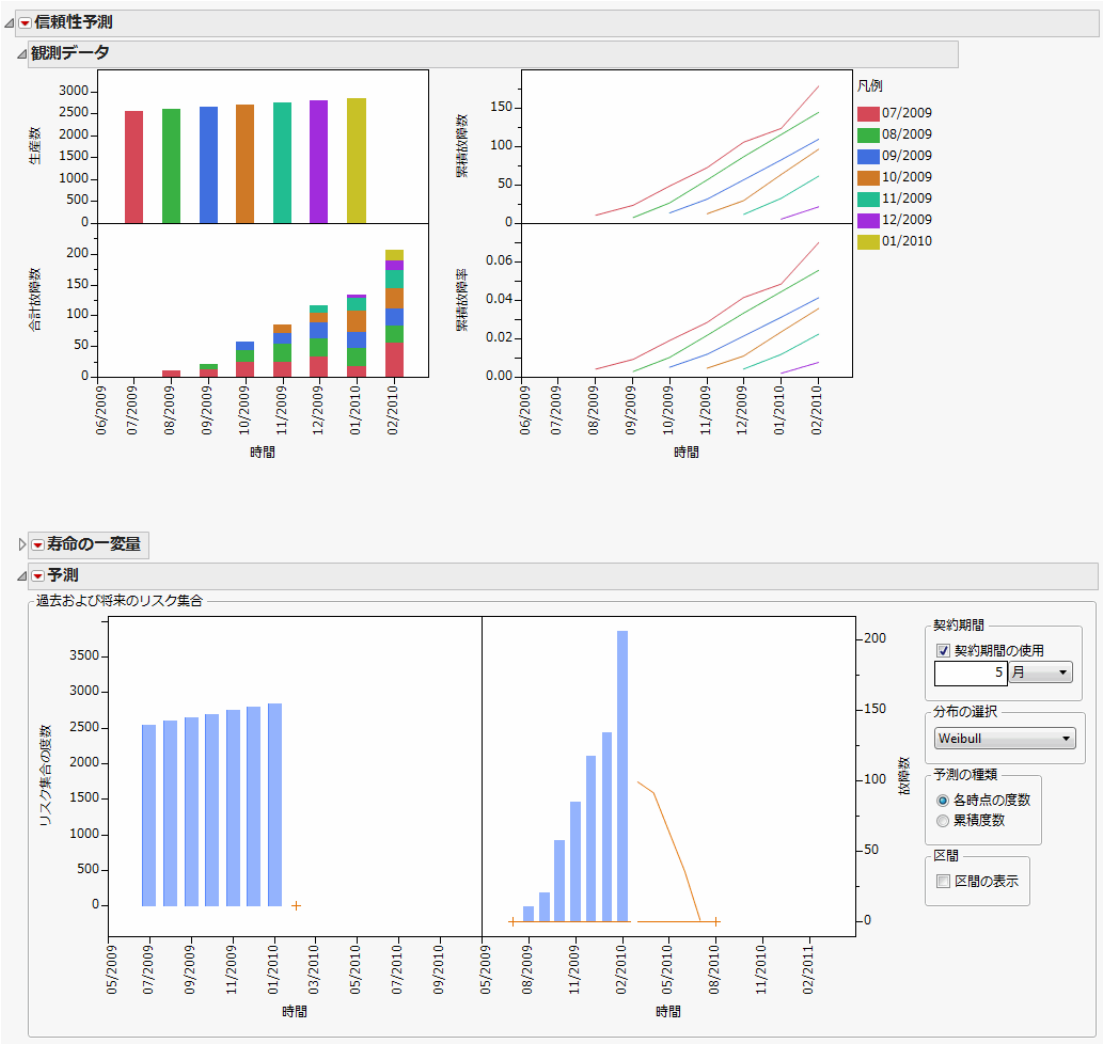
その他のオプションは、［ネバダ形式］タブと同じです。詳細は、「ネバダ形式」（142 ページ）の節を参照してください。

## 「信頼性予測」レポート

図7.11のレポートを作成するには、「「信頼性予測」プラットフォームの使用例」（139 ページ）の手順に従います。

「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。

図 **7.11**「信頼性予測」レポート




「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」（149 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7.11）。

- 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、累積故障数の予測値を示しています。

**注：**「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」（25ページ）の章を参照してください。

## 「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。

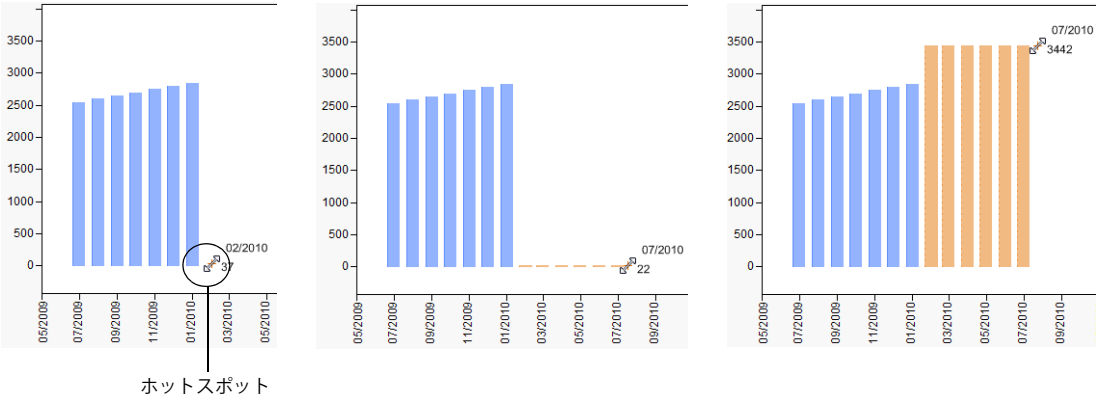
### 予測期間の調整

左側のグラフの青い棒は、過去の生産数を示します。予測される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7.12）。

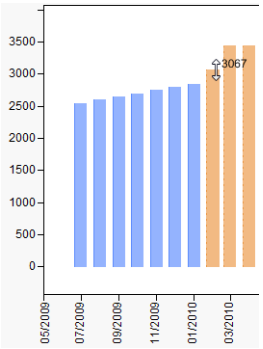
   将来の予測値がオレンジ色の棒で示されます。

図 **7.12** 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7.13）。

図 **7.13** 生産数の調整




**ヒント：**棒を移動させる代わりに具体的な数値を入力したい場合は、「予測」レポートの赤い三角ボタンをクリックし、［**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。この機能については、「リスク集合のスプレッドシートによる設定」（148 ページ）に説明があります。

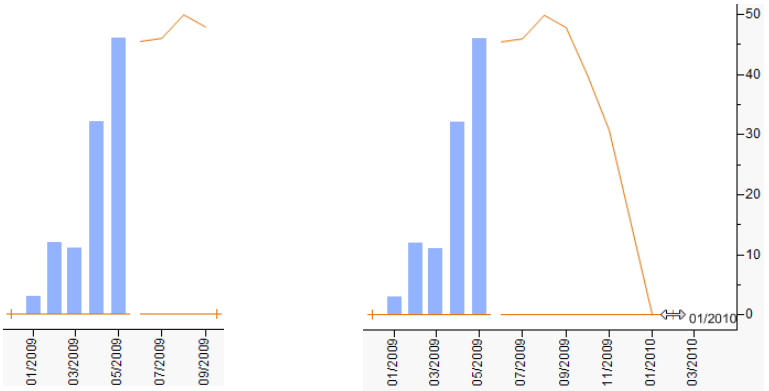
### 既存のリスク集合の調整

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。

### 故障数の予測

左側のグラフで生産数を調整すると、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7.14）。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 **7.14** 予測期間の調整



## 「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分布を選択します。選択した分布が、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」レポートの方で分布を変更しても、「予測」グラフ上の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**　生産量と期間を（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。将来に予定されている生産数は、グラフで対話的に追加するのではなく、数値でも指定できます。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設定するには、「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。

**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**　グラフ上の信頼限界の表示／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**　将来の故障を示すグラフにおいて、故障数ではなく、故障コストを表示します。

**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。

**スクリプト**　このメニューで表示されるオプションは、すべてのプラットフォームで共通です。詳細は、『JMP の使用法』を参照してください。

# 第 8 章

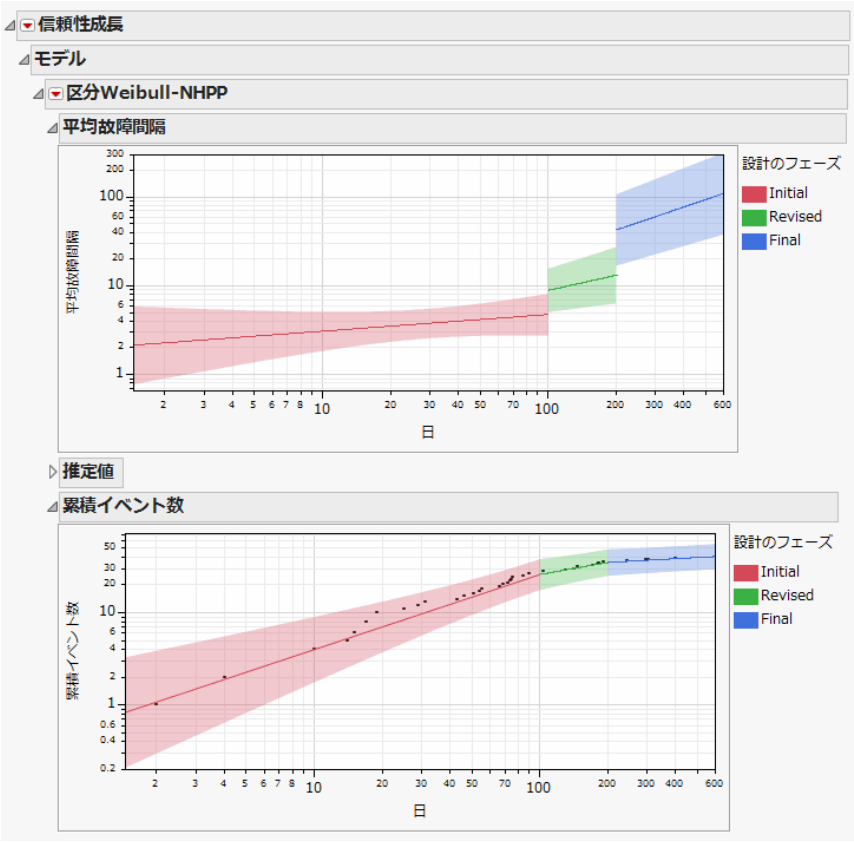
# 信頼性成長

## 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（MTBF）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。

図 **8.1** 3 フェーズの信頼性成長モデルのグラフの例



# 目次


「信頼性成長」プラットフォームの概要 . . . . . 153

「信頼性成長」プラットフォームの使用例 . . . . . 153

「信頼性成長」プラットフォームの起動 . . . . . 157

イベントまでの時間 . . . . . 157

タイムスタンプ . . . . . 158

イベント度数 . . . . . 158

フェーズ . . . . . 158

By . . . . . 158

データの種類 . . . . . 159

「信頼性成長」レポート . . . . . 161

「観測データ」レポート . . . . . 161

「信頼性成長」プラットフォームのオプション . . . . . 163

モデルのあてはめ . . . . . 163

スクリプト . . . . . 164

［モデルのあてはめ］のオプション . . . . . 164

Crow AMSAA . . . . . 164

Crow AMSAA 修正最尤法 . . . . . 170

パラメータ指定 Crow AMSAA . . . . . 172

区分 Weibull-NHPP . . . . . 173

再初期化 Weibull-NHPP . . . . . 177

区分 Weibull-NHPP 変化点検出 . . . . . 179

「信頼性成長」プラットフォームのその他の例 . . . . . 180

区間打ち切りデータに対する区分 NHPP-Weibull モデル . . . . . 180

区分 Weibull-NHP 変化点検出モデル . . . . . 183

「信頼性成長」プラットフォームの統計的詳細 . . . . . 185

「Crow-AMSAA」レポートの統計的詳細 . . . . . 185

「区間 Weibull-NHPP 変化点検出」レポートの統計的詳細 . . . . . 186

## 「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NHPPモデルは、故障が発生する頻度の経時的変化を表現します。

このプラットフォームでは、以下に述べる5種類のモデルが用意されています。そのうちの一つは、変化する時点を自動検出します。

- 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。β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、過去のフェーズにおける履歴を考慮しています。
- 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。
- 変化点と関連する区分 Weibull-NHPP モデルの自動推定。2 つの異なる試験フェーズが、異なる故障強度に対応している場合に適しています。

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。試験期間中の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使用例

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。

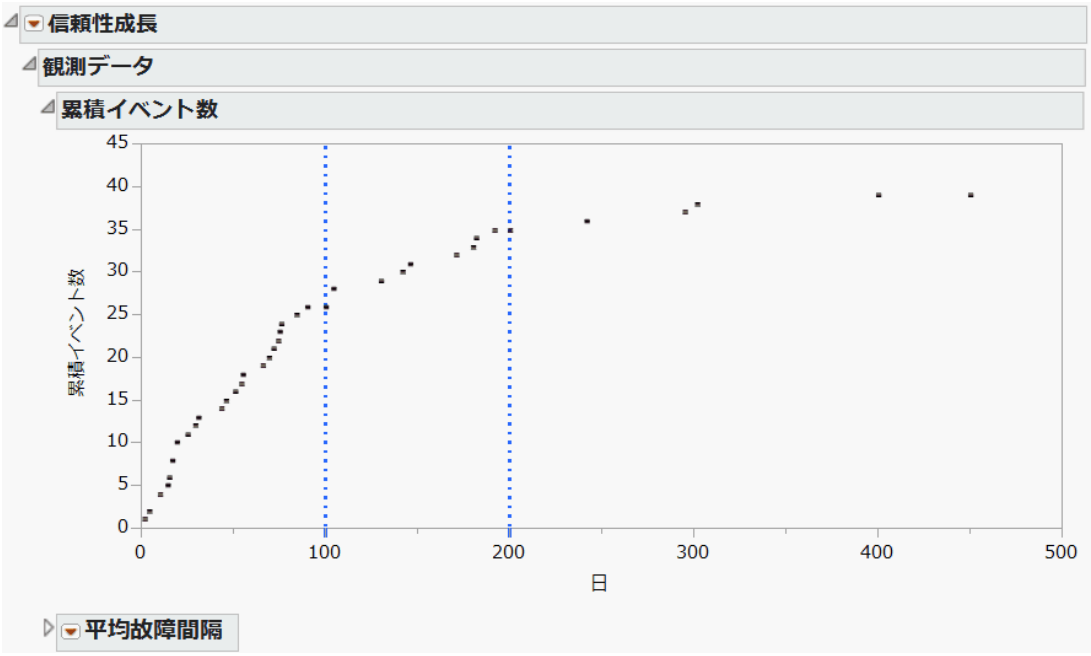
最初の100日間のフェーズは、初期段階（「Initial」）です。初期段階では、故障が起きるたびに、積極的に設計変更を行いました。次の100日間のフェーズ（「Revised」）では、サブシステムの設計変更だけで、故障に対処しました。最終フェーズ（「Final」）は250日間で、故障が起きた場合、局所的にだけ設計を変更していきました。

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. 「TurbineEngineDesign1.jmp」データテーブルを開きます。
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8.2）。「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。

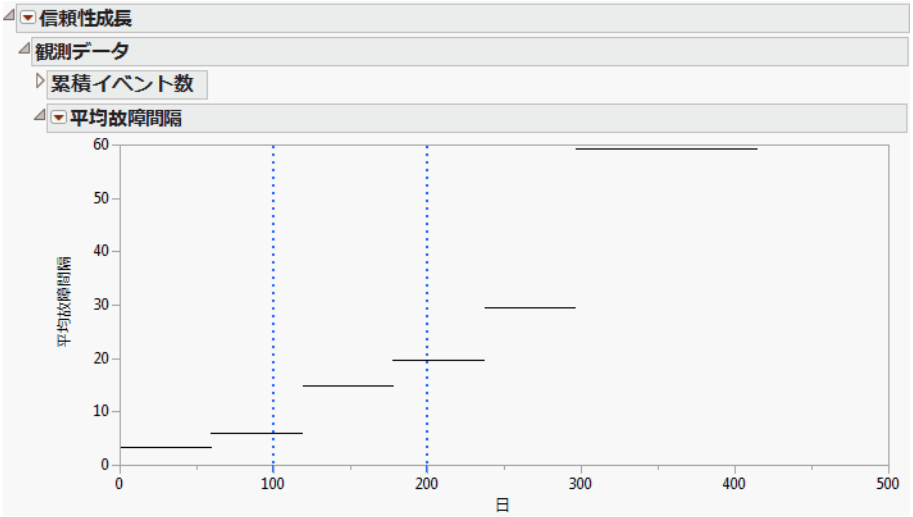
図**8.2**「観測データ」レポート




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8.3）。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。

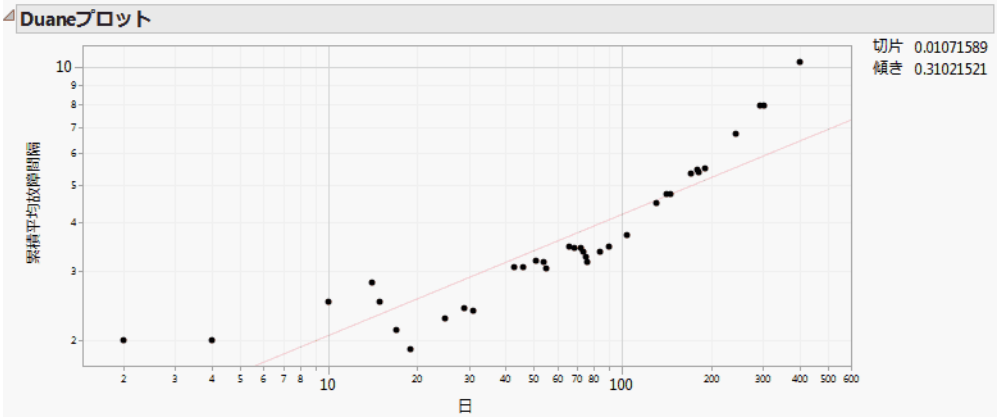
図 **8.3**「平均故障間隔」グラフ




8. **「Duane プロット」**の開閉ボタンをクリックします。

   累積平均故障間隔をY軸、イベントまでの時間変数をX軸としたプロットが表示されます。データがDuane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8.4）。

図 **8.4** 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8.5）。なお、3つのフェーズは、同一の試験内における開発段階として扱われています。「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 **8.5**「区分 Weibull-NHPP」レポート

**信頼性成長**

**観測データ**

**累積イベント数**

**平均故障間隔**

**Duaneプロット**

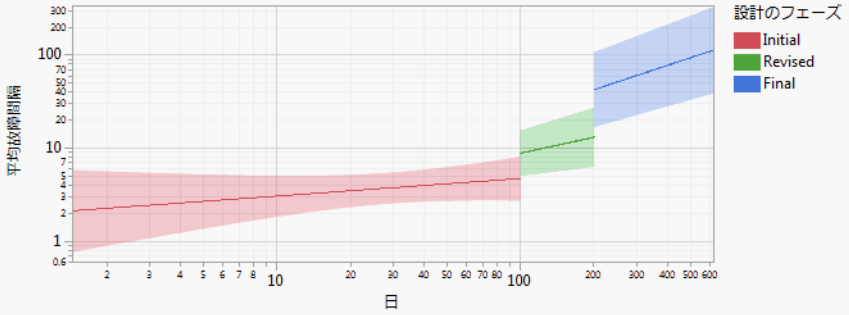
**モデルリスト**

| モデル | パラメータ数 | (-2)*対数尤度 | AICc | BIC |
|---|---|---|---|---|
| 区分Weibull-NHPP | 4 | 223.23350389 | 232.40997448 | 237.88775047 |

**モデル**

**区分Weibull-NHPP**

**平均故障間隔**



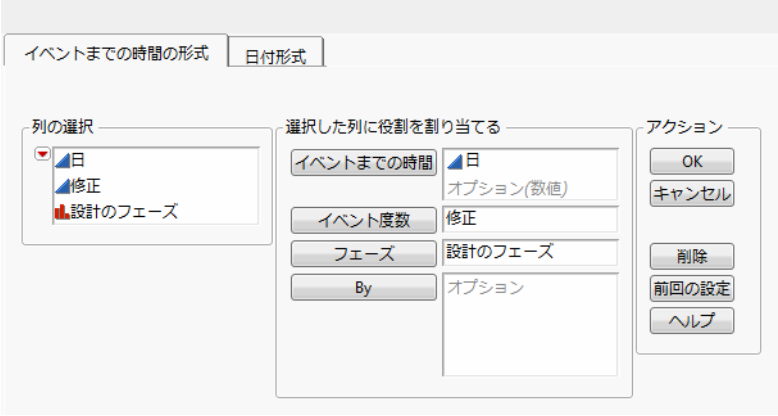

**推定値**

| パラメータ | 推定値 | 標準誤差 | 下側95% | 上側95% |
|---|---|---|---|---|
| lambda | 0.61683632 | 0.46821021 | 0.13933640 | 2.7307082 |
| beta[Initial] | 0.81184248 | 0.15921541 | 0.55276102 | 1.1923565 |
| beta[Revised] | 0.43238443 | 0.14412814 | 0.22497600 | 0.8310055 |
| beta[Final] | 0.13359276 | 0.06679638 | 0.05013975 | 0.3559456 |

# 「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 8.6 は、「TurbineEngineDesign1.jmp」のデータに対する起動ウィンドウです。

図 **8.6**「信頼性成長」起動ウィンドウ




起動ウィンドウには、2 つのデータ形式に対応する［イベントまでの時間の形式］タブと［日付形式］タブがあります。

- ［イベントまでの時間の形式］のデータは、試験の開始時点から、故障が生じた時点までの時間です。この形式では、試験の開始時点をゼロとします。このタブでは、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。
- ［日付形式］のデータは、日時です。絶対的な日付や時刻など、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。

［イベントまでの時間］、［タイムスタンプ］、または［イベント度数］の列に欠測値がある行も、分析の対象になります。

**注：**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。

## 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。なお、試験の開始時刻を、ゼロの時点とします。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」（159 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ものとして処理されます。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、区間が重複していてはいけません（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、日付などの絶対的な時刻や日時を表します。［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。データが時刻や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、最初の行において、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が記録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は、最初の行において、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」（158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」（157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」（159ページ）も参照してください。

## イベント度数

発生したイベントの度数を表します。通常は、特定の時点や区間内で生じた、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。

## 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。［フェーズ］には、数値・文字、名義・順序・連続といった、いずれの列も指定できます。フェーズがあるデータについては、「試験のフェーズ」（159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」（180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

［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。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、打ち切りのない正確なデータと、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想定されます。開始時点と終了時点が同じ場合、それらは正確な時点とみなされます。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、区間打ち切りと正確な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。

#### 単一の試験フェーズ

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。

**注：**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。

### 複数の試験フェーズ

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が含めてください。データが「日付」形式の場合には、全フェーズにおいて、時間の列にフェーズの開始時間を含めてください。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。時間の列が 2 列の場合には、両側の端点が一緒の区間を、各フェーズの先頭に追加し、また、そのイベント度数をゼロにして、フェーズの開始時間を示す必要があります。

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。

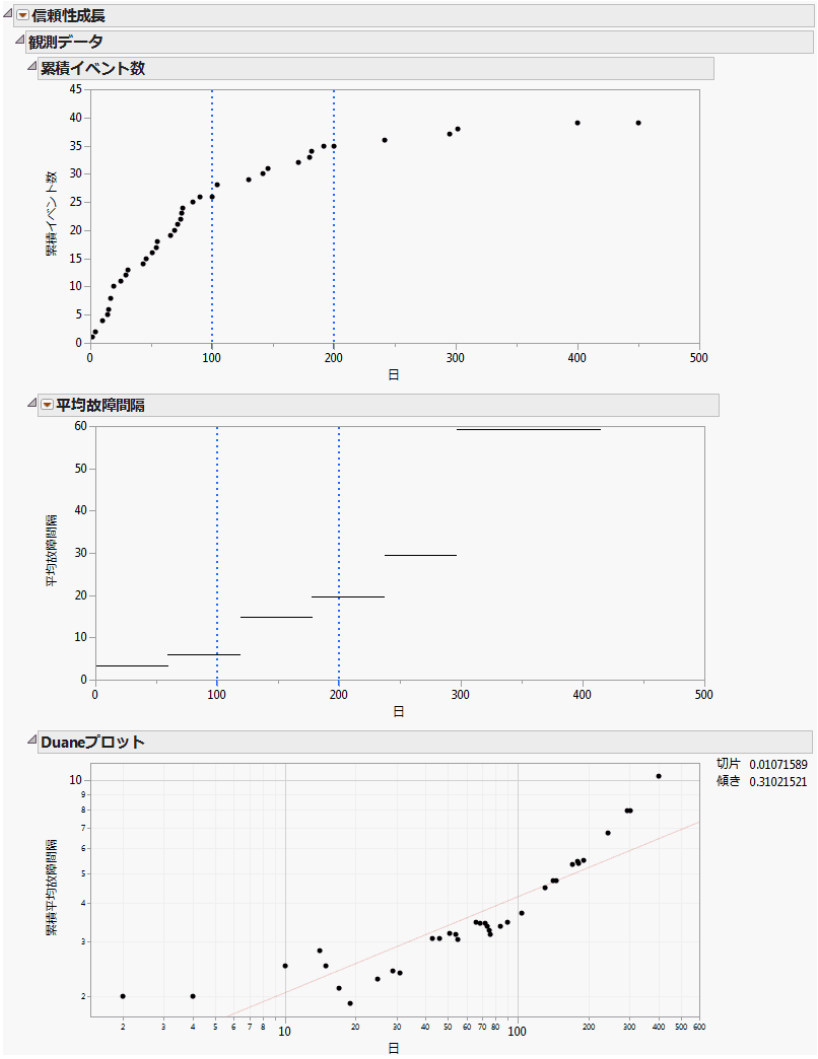
- データテーブルの最終行が正確な故障時間であり、かつ、そのイベント度数が 0 より大きい場合、試験は定数打ち切りとみなされます。
- データテーブルの最終行が、正確な時間であるがイベント度数がゼロの場合、もしくは、幅をもつ区間の場合には、試験は定時打ち切りとみなされます。

# 「信頼性成長」レポート

## 「観測データ」レポート

「信頼性成長」の結果として、「観測データ」レポートが表示されます。このレポートには、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、および「Duane プロット」が表示されます。「平均故障間隔」グラフは、初期状態では閉じた状態で表示されますが、図 8.7 では、それを開いています。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使用例」（153 ページ）の手順に従います。

図 **8.7**「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。

## 「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、期間の時間幅を指定します。
- ［指定された期間ごと］では、期間の区切りとなる時点を指定します。
  - テーブル内のセルをダブルクリックし、値を変更します。
  - テーブル内で右クリックし、開いたメニューから、行を追加または削除するオプションを選択します。

## 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 Duane 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。

---

**注：**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。

---

**注：**Duane プロットはフェーズ変数を反映しません。フェーズの変化がイベントまでの時間変数によって定義される行は、プロットの作成時および回帰直線へのあてはめ時に無視されます。

---

**「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 での回帰方程式により予測された値です。ここで、log は自然対数です。常用対数でのあてはめの切片を取得するには、この「切片」の値を log(10) で割ります。Tobias and Trindade (2012) の第 13 章を参照してください。
- 一方、「傾き」の値は、自然対数スケールのときのものでもあり、また、常用対数スケールのときのものにもなっています。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、同じ値となります。

# 「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、［モデルのあてはめ］と［スクリプト］の 2 つのオプションが表示されます。

## モデルのあてはめ

このオプションによって、いくつかの非同次 Poisson 過程モデル（NHPP models; non-homogeneous Poisson process models）をあてはめることができます。詳細についてはこの後、説明します。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
- 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

### 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たびに、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びます。「モデルリスト」レポートには、次のような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**　尤度関数は、モデルパラメータの推定値が与えられているときに、観測データが出現する確率を示します。一般には、尤度が大きいほど、モデルのあてはまりが良いと考えられます。つまり、「(-2)* 対数尤度」の値が小さいほど、モデルの適合度が高くなります。

**AICc**　修正済みの赤池の情報量規準。次の式で求められます。

AICc = -2 対数尤度 + $2k + 2k(k + 1)/(n - k - 1)$

上の式で、k はモデル内のパラメータ数、n は標本サイズです。AICc が小さいほど、良いモデルだと考えられます。AICc では、対数尤度に対し、パラメータ数によって罰則（ペナルティ）を課しています。その罰則は、後述する BIC におけるものほど大きくはありません。

**BIC**　ベイズ情報量規準。次の式で求められます。

BIC = -2 対数尤度 + $k\ln(n)$

上の式で、k はモデル内のパラメータ数、n は標本サイズです。BIC が小さいほど、良いモデルだと考えられます。BIC では、パラメータ数に対して AICc よりも大きいペナルティが課されます。

## スクリプト

このメニューで表示されるオプションは、すべてのプラットフォームで共通です。これらのオプションについては、『JMP の使用法』を参照してください。

# ［モデルのあてはめ］のオプション

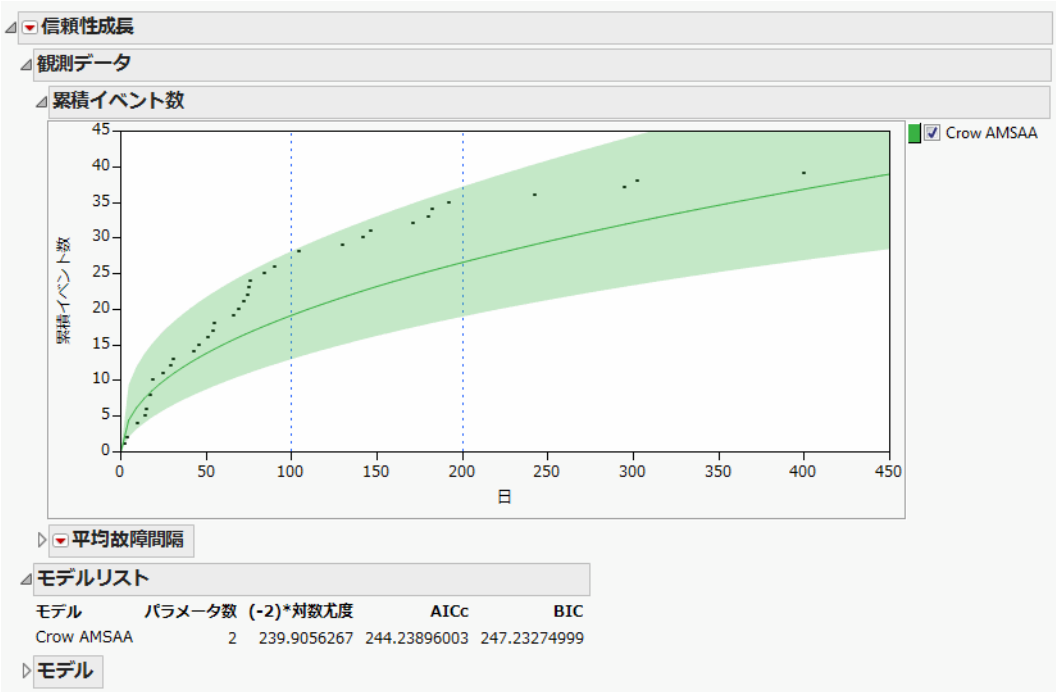
## Crow AMSAA

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、λ は尺度パラメータ、β 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」とも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」の章の「モデルのあてはめ」（94 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値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が曲線として表示されます。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8.8 は、「TurbineEngineDesign1.jmp」データの「観測データ」レポートです。

図**8.8** Crow AMSAAの「累積イベント数」グラフと「モデルリスト」レポート

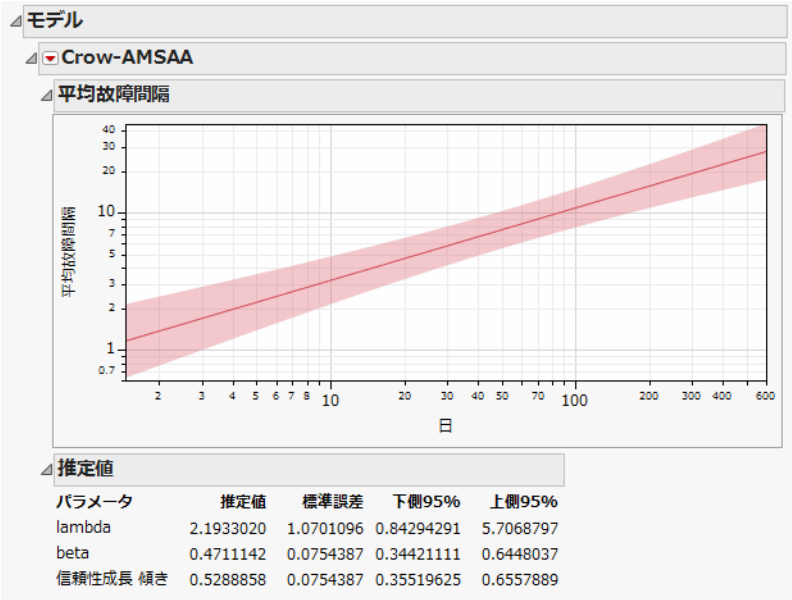



「Crow-AMSAA」レポートは「モデル」レポートの中に表示されます。［イベントまでの時間の形式］を使用した場合、「Crow-AMSAA」レポートの「平均故障間隔」グラフは両対数グラフになります。「平均故障間隔グラフの表示」（165 ページ）を参照してください。

## 平均故障間隔グラフの表示

「平均故障間隔」グラフはデフォルトで表示されます（図8.9）。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 **8.9**「平均故障間隔」グラフ




| パラメータ | 推定値 | 標準誤差 | 下側95% | 上側95% |
|---|---|---|---|---|
| lambda | 2.1933020 | 1.0701096 | 0.84294291 | 5.7068797 |
| beta | 0.4711142 | 0.0754387 | 0.34421111 | 0.6448037 |
| 信頼性成長 傾き | 0.5288858 | 0.0754387 | 0.35519625 | 0.6557889 |

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 - β です。平均故障間隔の推定値は、単純に、パラメータ λ と β 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。

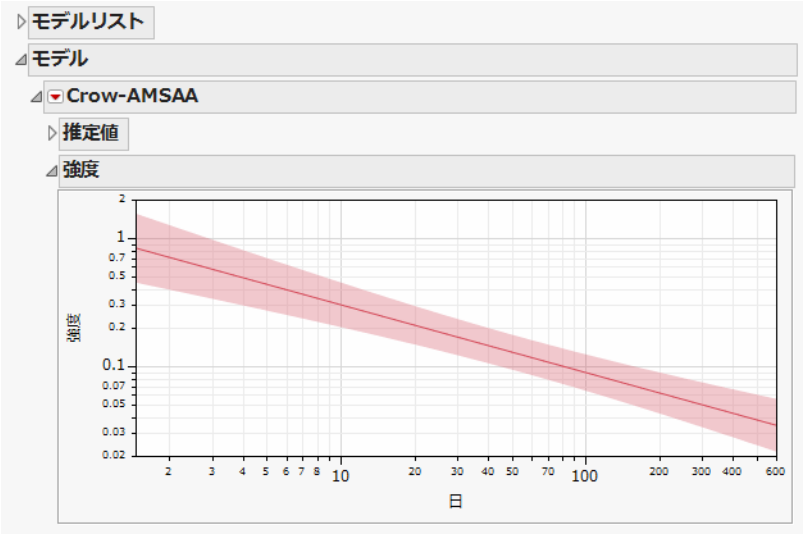
### 推定値

「lambda」（λ）、「beta」（β）、「信頼性成長 傾き」（1 - β）の最尤推定値が、グラフの下の「推定値」レポートに表示されます （図 8.9 を参照）。λ、β、1 - β 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」（185 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 8.10）。Weibull 強度関数は $\rho(t) = \lambda\beta t^{\beta-1}$ で求められるため、log( 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。

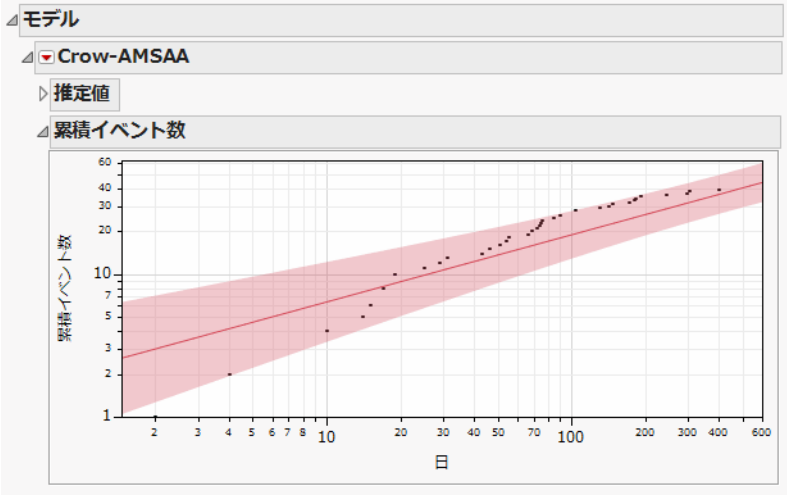
図 **8.10** 強度グラフ




## 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8.11）。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 **8.11**「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 $\lambda t^{\beta}$ 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。

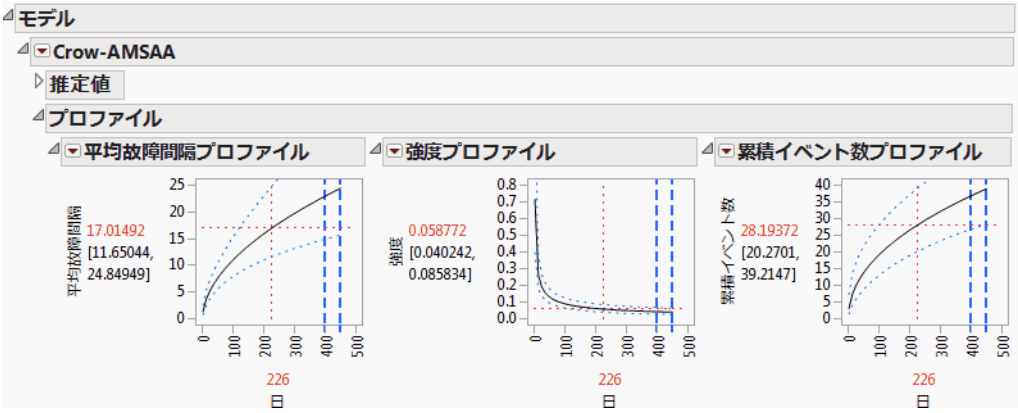
## プロファイルの表示

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 8.12）。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% 信頼限界（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」（186 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と解釈については、『基本的な回帰モデル』で「標準的な最小 2 乗法モデル」の「因子プロファイル」を参照してください。『プロファイル機能』も参照してください。

図 **8.12** 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×(1-α)% の信頼区間を求めることができます。図 8.13 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 **8.13**「最終時点の平均故障間隔」レポート

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-α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（NHPP）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」（169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」（170ページ）））が実行されます。

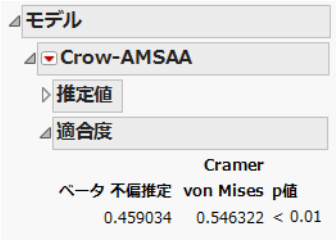
## 打ち切りのない故障時間データに対するCramér-von Mises検定

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、検定統計量が大きい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、「>=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8.14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 **8.14**「適合度」レポート - Cramér-von Mises 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

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、検定統計量が大きい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。

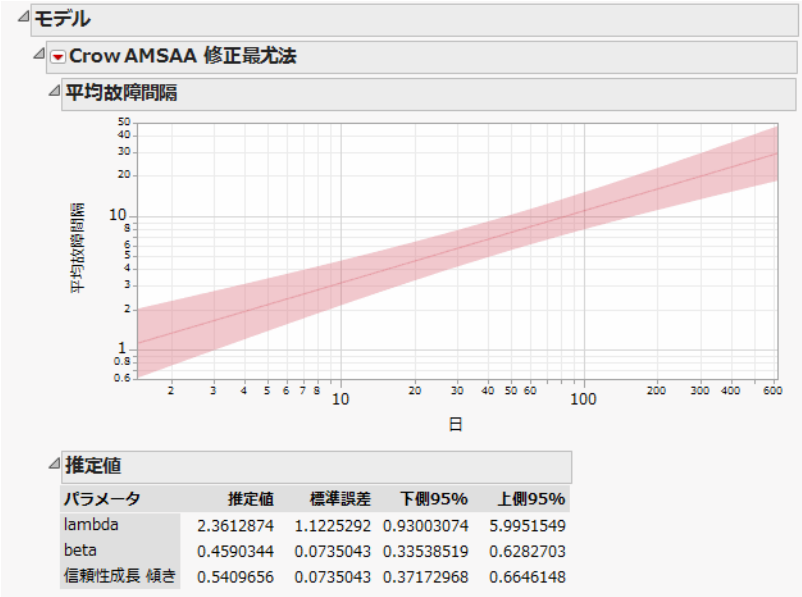
## Crow AMSAA 修正最尤法

Crow-AMSAA モデルを通常の最尤法で推定した場合、β の最尤推定値はバイアスを持ちます。このオプションは、β 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。

**注：**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 8.15 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 **8.15**「Crow AMSAA 修正最尤法」レポート




| パラメータ | 推定値 | 標準誤差 | 下側95% | 上側95% |
|---|---|---|---|---|
| lambda | 2.3612874 | 1.1225292 | 0.93003074 | 5.9951549 |
| beta | 0.4590344 | 0.0735043 | 0.33538519 | 0.6282703 |
| 信頼性成長 傾き | 0.5409656 | 0.0735043 | 0.37172968 | 0.6646148 |

β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。詳細については、「Crow AMSAA 修正最尤法のパラメータ推定値」（185ページ）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。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。「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プロットが表示されます。このプロットについては、「平均故障間隔グラフの表示」（178ページ）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］、および［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」（164ページ）で説明しています。修正最尤法を使用してこれらのレポートを作成する方法の詳細については、「Crow AMSAA 修正最尤法のパラメータ推定値」（185ページ）を参照してください。修正最尤法オプションに特有の「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、適合度検定はCramér-von Mises検定です。この検定で使用される推定値βはバイアスが修正されていています。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の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、通常のCrow AMSAAの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。

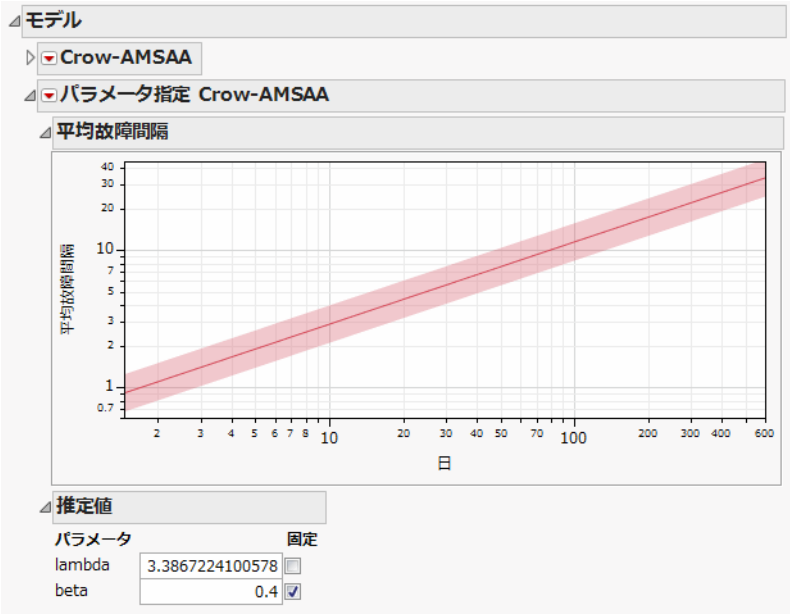
［パラメータ指定 Crow AMSAA］オプションを選択すると、「累積イベント数」グラフに、Crow-AMSAAモデルの結果が追加されます。また、このオプションを選択すると、「モデルリスト」も更新されます。そして、「パラメータ指定 Crow AMSAA」レポートが開き、Crow-AMSAAモデルの「平均故障間隔」グラフが表示されます。このグラフについては、「平均故障間隔グラフの表示」（178ページ）で説明しています。

［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」（164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8.16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に固定した結果を示します。

図 **8.16**「パラメータ指定 Crow AMSAA」レポート

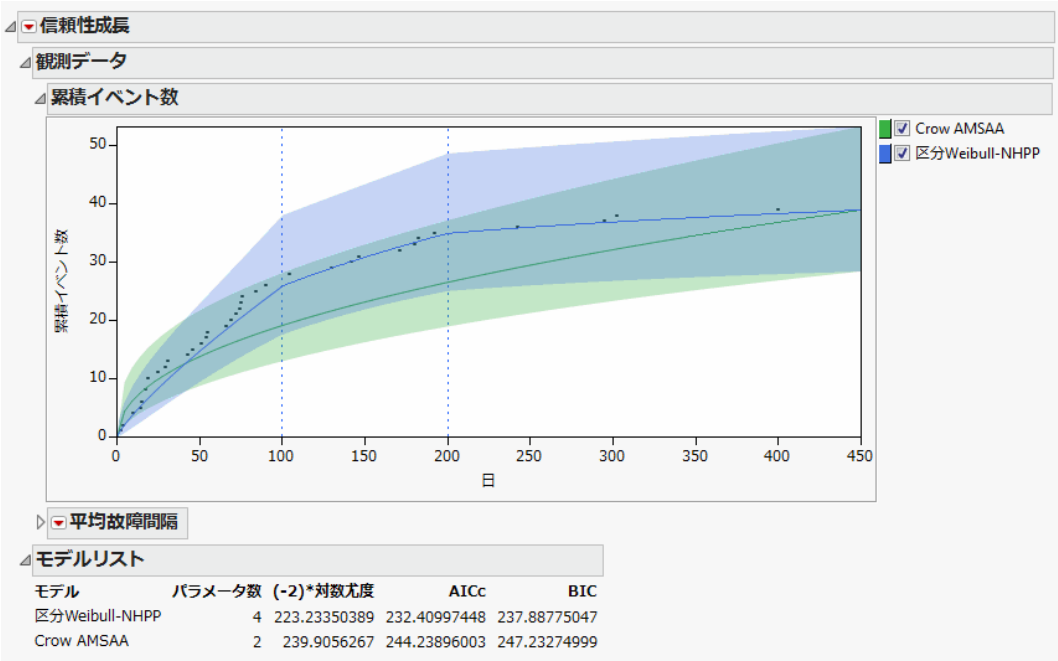



## 区分 Weibull-NHPP

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。「複数の試験フェーズ」（160 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 8.17 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。

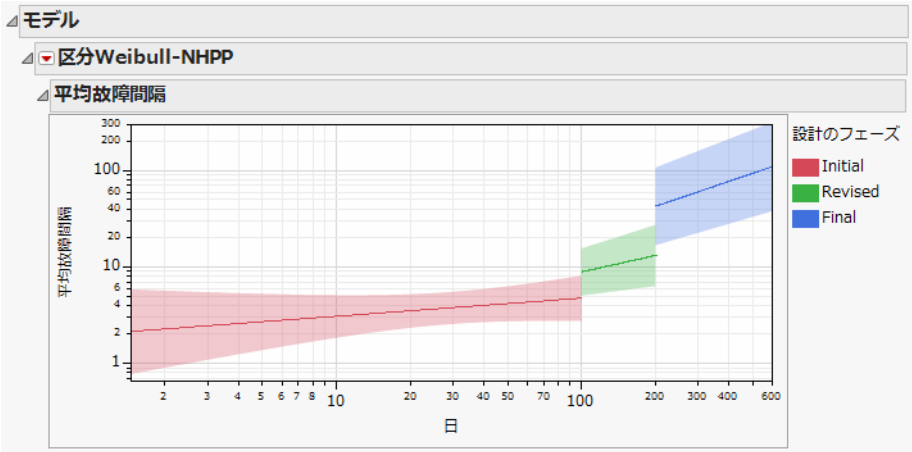
図 **8.17**「累積イベント数」グラフと「モデルリスト」レポート




| モデル | パラメータ数 | (-2)*対数尤度 | AICc | BIC |
|---|---|---|---|---|
| 区分Weibull-NHPP | 4 | 223.23350389 | 232.40997448 | 237.88775047 |
| Crow AMSAA | 2 | 239.9056267 | 244.23896003 | 247.23274999 |

デフォルトでは、「区分 Weibull-NHPP」レポートの「平均故障間隔」グラフに、平均故障間隔の推定値が、フェーズごとに色分けして描画されます。グラフの下には、「推定値」がレポートされます（図8.18を参照）。

図 **8.18**「区間 Weibull-NHPP」レポート




**推定値**

| パラメータ | 推定値 | 標準誤差 | 下側95% | 上側95% |
|---|---|---|---|---|
| lambda | 0.61683632 | 0.46821021 | 0.13933640 | 2.7307082 |
| beta[Initial] | 0.81184248 | 0.15921541 | 0.55276102 | 1.1923565 |
| beta[Revised] | 0.43238443 | 0.14412814 | 0.22497600 | 0.8310055 |
| beta[Final] | 0.13359276 | 0.06679638 | 0.05013975 | 0.3559456 |

## 平均故障間隔グラフの表示

［区間 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」レポートが開きます（図 8.18）。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の表示」（165 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、λ 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 λ と、各フェーズにおける β から、各フェーズの λ は一意に決められます。

区分モデルの推定値・標準誤差・信頼限界でも、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」（185 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。

## 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、フェーズの境界の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」（166 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」（167 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」（168 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 8.19 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 8.20 では「プロット点の数」を「500」に指定しています）。

図 **8.19** プロファイル

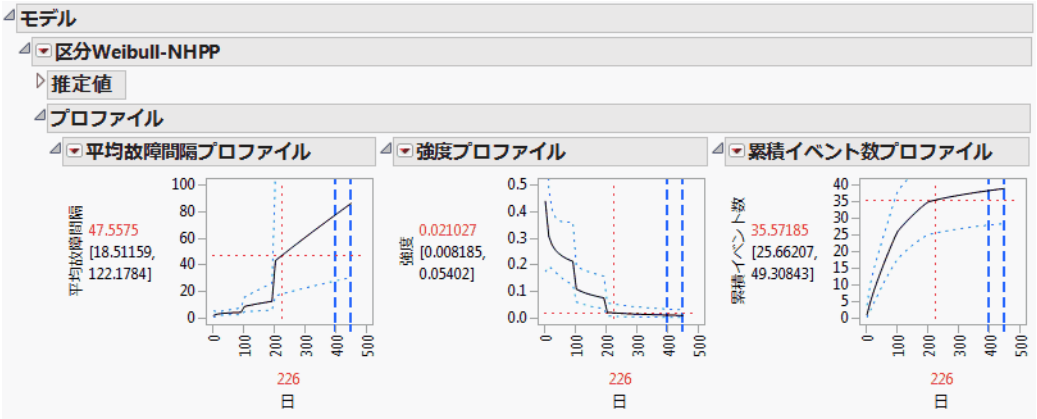
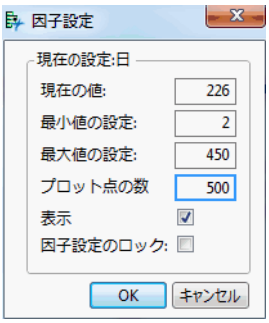


図 **8.20**「因子設定」ウィンドウ




## 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 モデルがあてはめられます。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」をあ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。

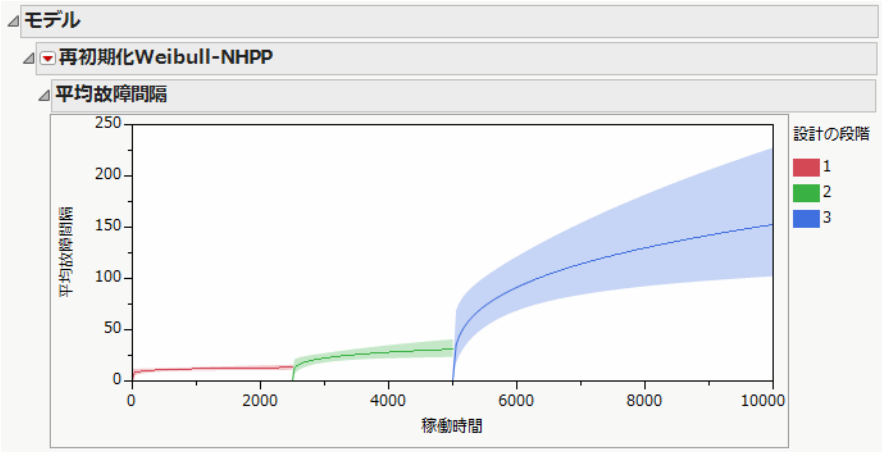
- ［イベントまでの時間］または［タイムスタンプ］に指定する列が 1 列の場合、各フェーズの最初の行は、その開始時間と、0 のイベント度数を含んでいなければいけません。例として、サンプルデータの「Reliability」フォルダにある「ProductionEquipment.jmp」を参照してください。
- 2 列を指定する場合、各フェーズの最初の行において、区間の開始時間（2 列のうちの小さいほうの値）が、フェーズの開始時間を表していなければなりません。例としては、「Reliability」フォルダの「TurbineEngineDesign2.jmp」データテーブルを参照してください。また、「区間打ち切りデータに対する区分 NHPP-Weibull モデル」（180 ページ）も参照してください。

詳細は、「複数の試験フェーズ」（160 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。

デフォルトでは、「再初期化 Weibull-NHPP」レポートの「平均故障間隔」グラフに、平均故障間隔の推定値が、フェーズごとに色分けして描画されます。グラフの下には、「推定値」がレポートされます（図 8.21 を参照。これは「Reliability」フォルダにある「ProductionEquipment.jmp」サンプルデータを使用）。

図 **8.21**「再初期化 Weibull-NHPP」レポート




推定値

| パラメータ | 推定値 | 標準誤差 | 下側95% | 上側95% |
|---|---|---|---|---|
| lambda[1] | 0.20709254 | 0.09943607 | 0.08080861 | 0.5307271 |
| beta[1] | 0.88648273 | 0.06074080 | 0.77508068 | 1.0138966 |
| lambda[2] | 0.19871135 | 0.12477954 | 0.05803848 | 0.6803452 |
| beta[2] | 0.79639390 | 0.07924416 | 0.65528497 | 0.9678892 |
| lambda[3] | 0.14380622 | 0.12237934 | 0.02712712 | 0.7623452 |
| beta[3] | 0.68220709 | 0.09846811 | 0.51410978 | 0.9052668 |

## 平均故障間隔グラフの表示

［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の表示」（165 ページ）を参照してください。

「推定値」レポートには、各フェーズの λ と β の推定値が表示されます。このモデルでは、各フェーズの λ と β 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」（159 ページ）を参照）。また、標準誤差と 95% 信頼限界も計算されます。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」（185 ページ）に説明があります。

## 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、フェーズの境界の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」（166 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 0 として、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いって求めています。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。

### 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」（176 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。

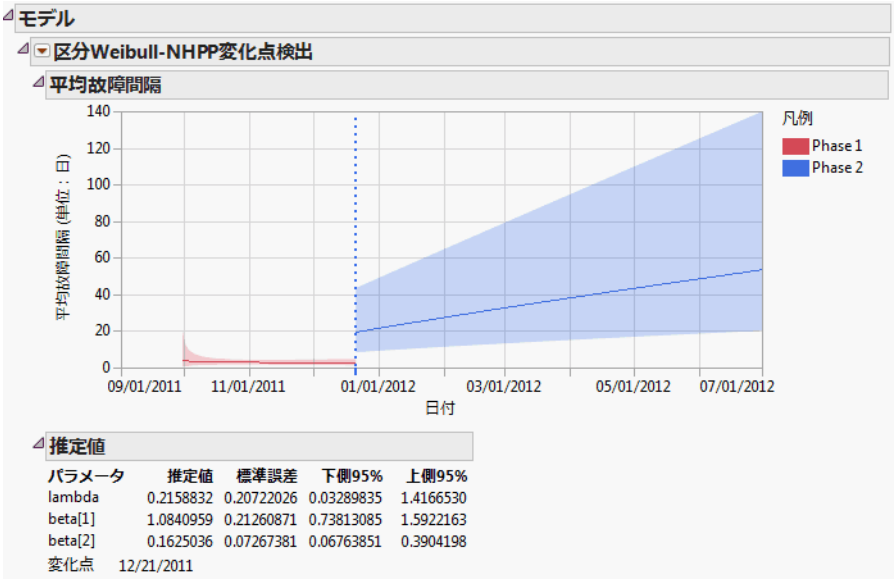
このオプションは、次のような場合に選択できます。

- 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）。
- かつ、起動ウィンドウで［フェーズ］列を**指定していない**。

［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」グラフと「推定値」レポートが表示されます。図 8.22 は、「Reliability」フォルダの「BrakeReliability.jmp」データテーブル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「11/12/21」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」（173 ページ）に説明があります。

図 **8.22**「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、「区分 Weibull-NHPP」（173 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」（186 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その他の例

ここでは、「信頼性成長」プラットフォームの使用例を、2 つ紹介します。1 つ目の例では、区間打ち切りデータを用いています。2 つ目の例では、日付形式の正確な故障時間データを用いています。

## 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が、［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、ソフトウェア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。

---

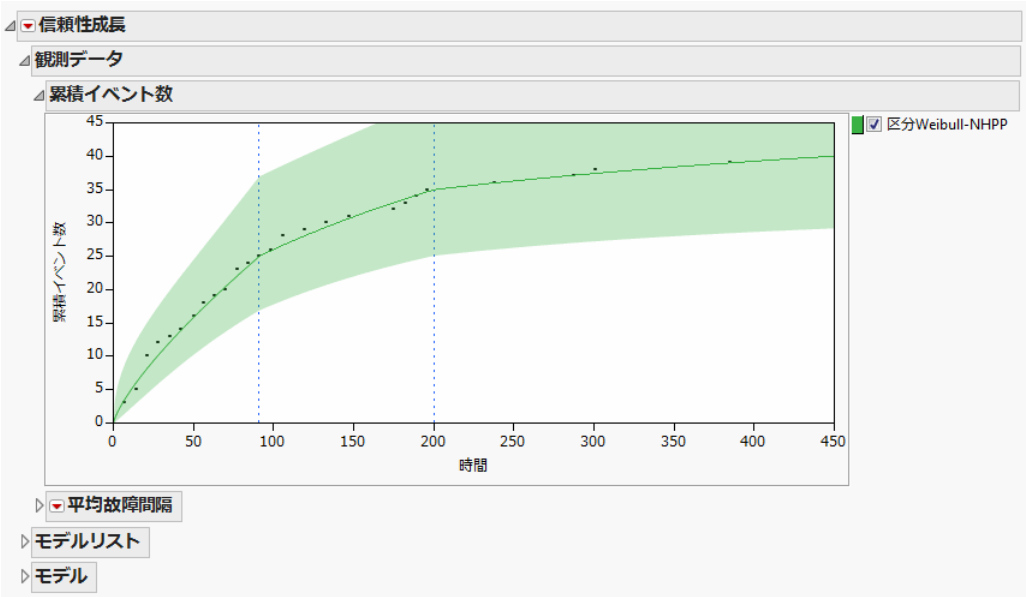
**注：**分析対象のデータテーブルにおいて、各フェーズに開始時間が記録されていることは、区間 Weibull-NHPP モデル、および、再初期化 Weibull-NHPP モデルにおいて重要です。区間打ち切りデータの場合、各フェーズの最初の行に記録されている日付が、そのフェーズの開始時間とみなされます。この例で、23 行目がデータテーブルに記録されていなかったとすると、「Final」フェーズの開始時間は、200 日目ではなく、231 日目と判断されてしまいます。

---

1. 「TurbineEngineDesign2.jmp」データテーブルを開きます。
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。

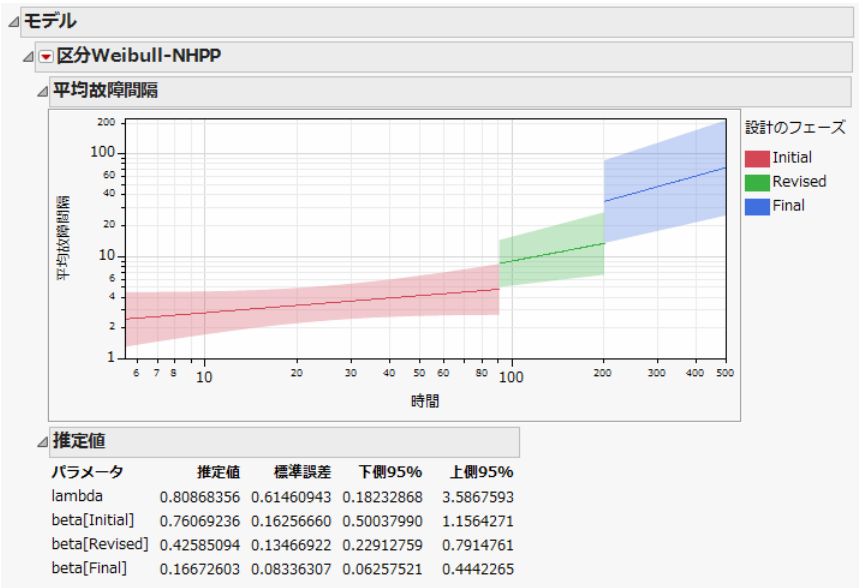
図 8.23 は、「観測データ」の「累積イベント数」グラフです。青い縦の点線は、フェーズの境界を示しています。「Revised」フェーズの最初のデータは、14 行目です。14 行目の**「開始日」**列の値は「91」ですので、「Revised」フェーズの開始時間は、91 日目と認識されています。同様に、「Final」フェーズの最初のデータは、23 行目です。14 行目の**「開始日」**列の値は「200」ですので、「Final」フェーズの開始時間は、200 日目と認識されています。

図 **8.23**「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 8.24）。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 **8.24**「平均故障間隔」グラフ




| パラメータ | 推定値 | 標準誤差 | 下側95% | 上側95% |
|---|---|---|---|---|
| lambda | 0.80868356 | 0.61460943 | 0.18232868 | 3.5867593 |
| beta[Initial] | 0.76069236 | 0.16256660 | 0.50037990 | 1.1564271 |
| beta[Revised] | 0.42585094 | 0.13466922 | 0.22912759 | 0.7914761 |
| beta[Final] | 0.16672603 | 0.08336307 | 0.06257521 | 0.4442265 |

## 区分 Weibull-NHP 変化点検出モデル

「Reliability」フォルダの「BrakeReliability.jmp」データテーブルは、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、正確な故障時間を表しています。なお、この例の**「日付」**列のデータは、故障時間は、昇順に並んでいなければなりません。

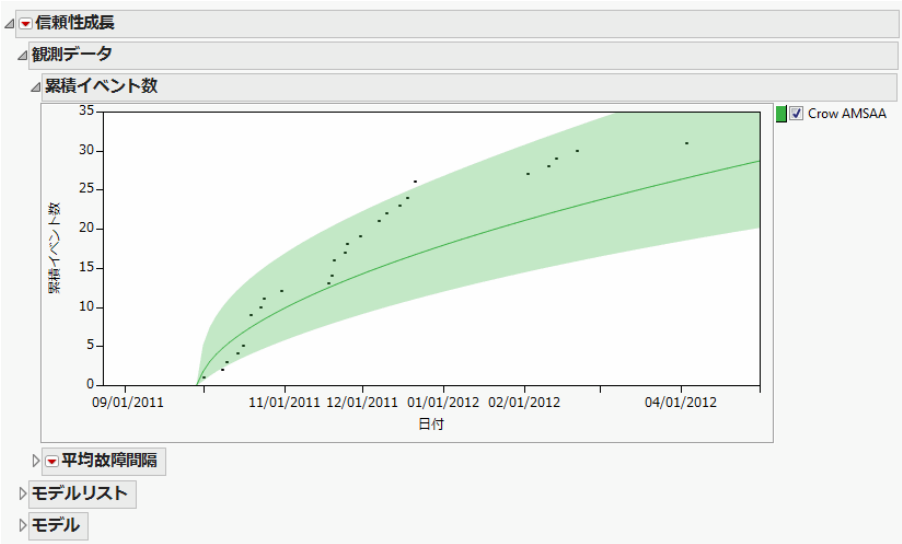
データテーブルの 1 行目の日付が「09/29/2011」であることから、試験開始日は「2011 年 9 月 29 日」と認識されます。この行の**「修正」**列の値が、0 となっているのに注目してください。この 1 行目は、試験開始日を認識させるために必須です。たとえ、1 行目の**「修正」**列にゼロ以外の値が含まれていたとしても、その値を強制的にゼロと置き換えて、1 行目の日付を試験開始日として分析が行われます。

データテーブルの最終行が「05/31/2012」となっているので、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 になっているので、試験は定時打ち切りです。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. 「BrakeReliability.jmp」データテーブルを開きます。
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 8.25）。モデルはあまりよくあてはまっていないようです。

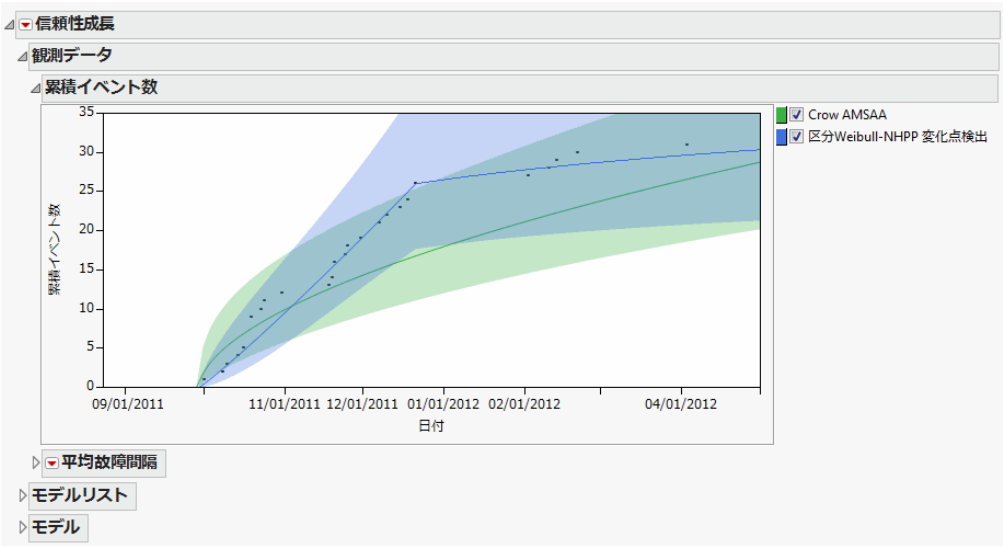
図 **8.25** Crow AMSAA モデルをあてはめた場合の「累積イベント数」グラフ




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 8.26 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 **8.26** 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

### 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、λ と β 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、$param_1 = \log(\lambda)$ と $param_2 = \log(\beta)$ 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、-∞ から +∞ になっていることを指します）。対数尤度を最適化すると、$param_1$ と $param_2$ の最尤推定値が得られます。

λ と β の標準誤差は Fisher の情報量行列から算出されます。$param_1$ と $param_2$ の信頼限界は、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、β の推定値はバイアスに対して修正されます。β 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。

β 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。

β 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。ここで、

$$\bar{\beta} = \left(\frac{n-2}{n}\right)\hat{\beta}$$ 、定数打ち切り試験の場合

$$\bar{\beta} = \left(\frac{n-1}{n}\right)\hat{\beta}$$ 、定時打ち切り試験の場合

λ の修正済み最尤推定値である $\bar{\lambda}$ は、下の式のように、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 β 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」（185 ページ）を参照）。ただし、その式において、λ と β 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 λ と β に、それらの最尤推定値を代入して求めています。[Crow AMSAA 修正最尤法] オプションの場合は、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対し、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 λ と β 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、それらの時点を上下限値とした、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 9 章

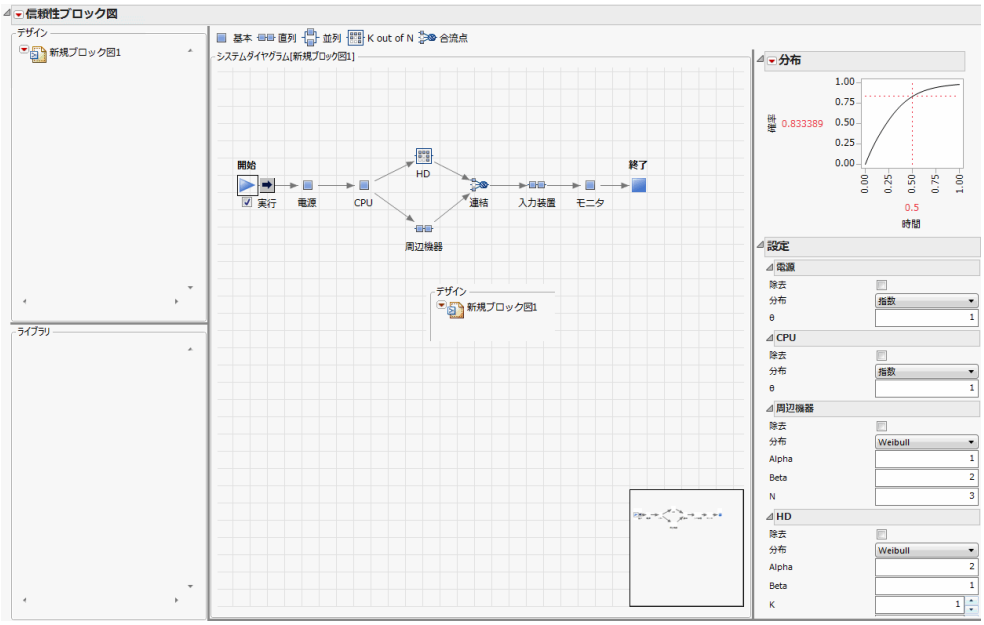
# 信頼性ブロック図

## システム全体の信頼性を計算する

JMP PRO

「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。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 **9.1** 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 . . . . . 189

「信頼性ブロック図」プラットフォームの使用例 . . . . . 189

部品の追加 . . . . . 191

図の整列 . . . . . 192

図形の接続 . . . . . 193

部品の設定 . . . . . 194

「信頼性ブロック図」ウィンドウ . . . . . 195

プレビューウィンドウ . . . . . 196

「信頼性ブロック図」プラットフォームのオプション . . . . . 197

「デザイン」と「ライブラリ」の赤い三角ボタンのメニュー . . . . . 200

ワークスペースのオプション . . . . . 201

部品の「分布」プロパティ . . . . . 201

設定内容 . . . . . 202

ノンパラメトリック分布のデータの入力 . . . . . 203

「信頼性ブロック図」で表示できるプロファイル . . . . . 204

「分布」プロファイル . . . . . 205

「平均余寿命」プロファイル . . . . . 205

「信頼性」プロファイル . . . . . 206

「分位点」プロファイル . . . . . 206

「密度」プロファイル . . . . . 207

「ハザード」プロファイル . . . . . 207

「Birnbaum 要素重要度」プロファイル . . . . . 208

余寿命 Birnbaum 要素重要度 . . . . . 209

平均故障時間 . . . . . 209

信頼度の代数式の出力 . . . . . 210

## 「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把握するための図です。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。信頼性ブロック図の各ブロックがシステムの各部品を表し、システム内の別の部品との接続状態が図示されます。

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。

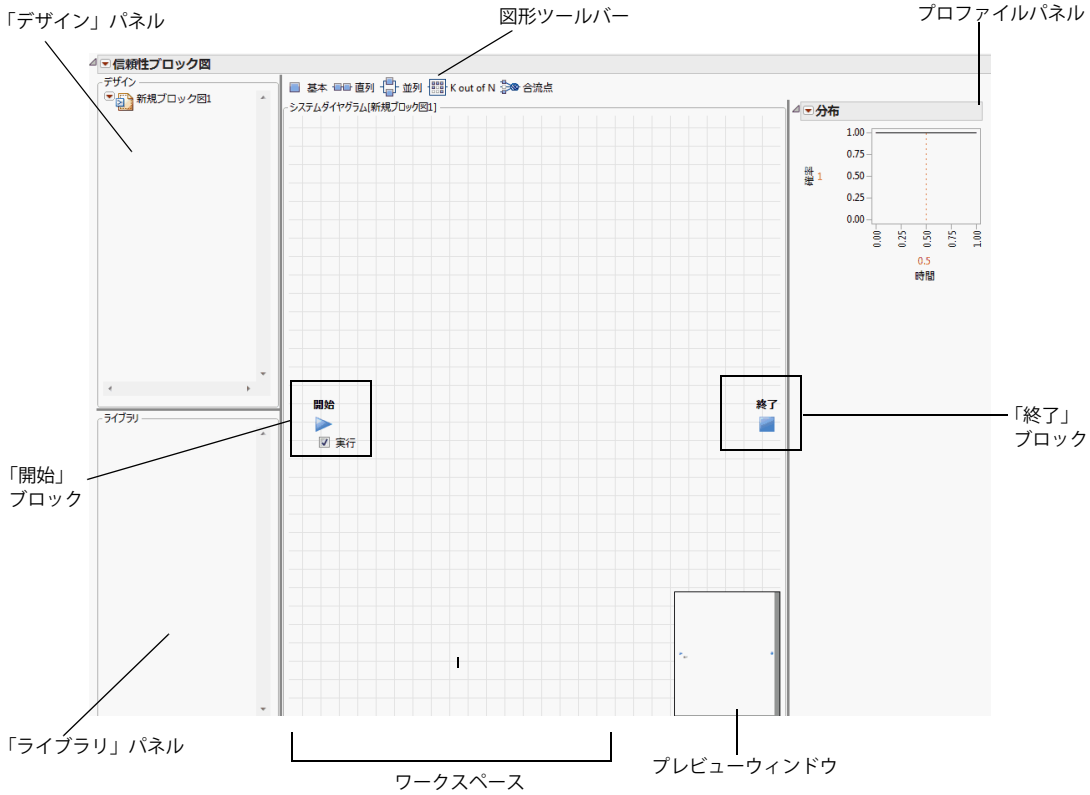
## 「信頼性ブロック図」プラットフォームの使用例

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」プラットフォームウィンドウが開きます。

図 **9.2** 新しい信頼性ブロック図




**注：**「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「システムダイヤグラム [ 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、部品の追加や削除、部品構成の変更、接続線の追加または削除など、「システムダイヤグラム」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。

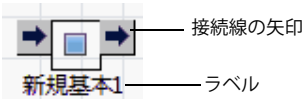
4. 「部品の追加」（191 ページ）に進みます。

## 部品の追加

この章では、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「図形」と呼びます。「部品」は、「システムダイヤグラム」の図形が表す具体的な部品を指します。

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「システムダイヤグラム」の「開始」ブロックの右側にドラッグします。

図 **9.3** 基本図形

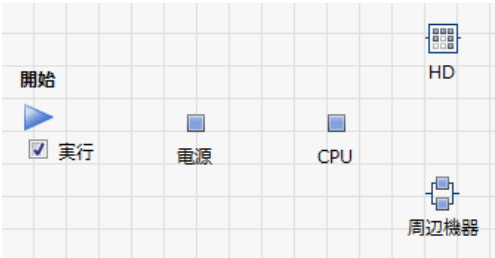



2. ラベルを選択して「電源」と入力します。
3. ［基本］アイコンをクリックし、それを「電源」図形の右側にドラッグします。
4. ラベルを選択して「CPU」と入力します。

図 **9.4**「システムダイヤグラム」の例

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。

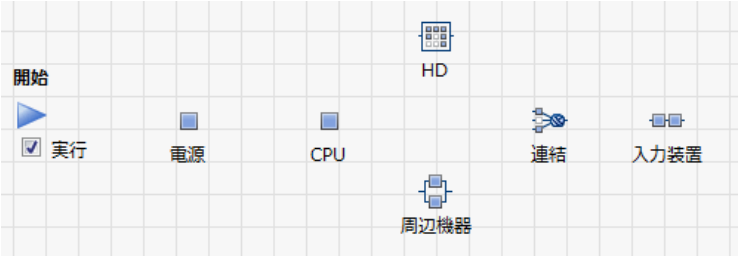
図 **9.5**「システムダイヤグラム」の例




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。

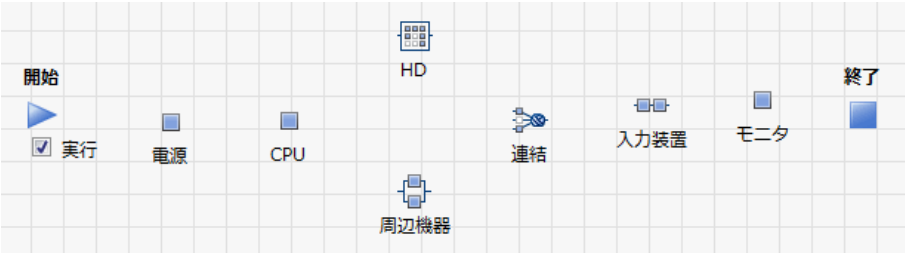
図 **9.6**「システムダイヤグラム」の例




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。

    ダイヤグラムは図 9.7 のようになるはずです。

図 **9.7** 新しい信頼性ブロック図




15. 「図の整列」（192 ページ）に進みます。

## 図の整列

1. 図形を縦方向に揃えるため、次の部品を選択します。
   - HD
   - 周辺機器

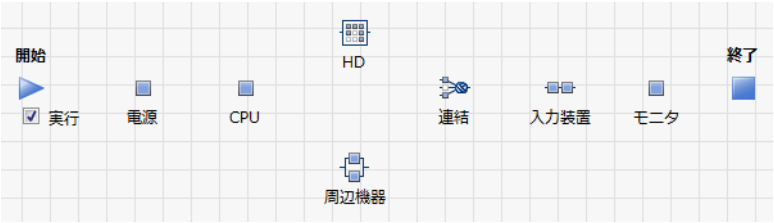
**ヒント：**整列対象の複数の図形を選択するには、カーソルをドラッグしながら図形を囲むか、Shift キーを押しながら各図形をクリックしていきます。

2. これらの図形を選択した状態で、右クリックして［**選択した要素を縦に配置**］を選択します。
3. 図形を横方向に揃えるため、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、右クリックして［**選択した要素を横に配置**］を選択します。

図 **9.8** 図の整列




5. 「図形の接続」（193 ページ）に進みます。

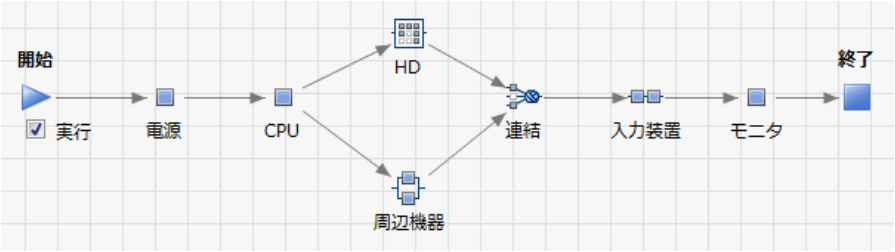
## 図形の接続

1. 図形を接続していきます。まず、「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. 接続矢印（➡）を選択し、「電源」部品までドラッグします。

図 **9.9** 図形の接続

3. 「電源」を「CPU」に接続します。
4. 「CPU」を「HD」と「周辺機器」の両方に接続します。
5. 「HD」を「連結」に接続します。
6. 「周辺機器」を「連結」に接続します。
7. 「連結」を「入力装置」に接続します。
8. 「入力装置」を「モニタ」に接続します。
9. 「モニタ」を「終了」ブロックに接続します。例については、図 9.11 を参照してください。

図 **9.10**「システムダイヤグラム」の例




10. 「部品の設定」（194 ページ）に進みます。

## 部品の設定

1. プロファイルパネルの「設定」で、表 9.1 のとおりに各部品を設定します。設定の操作方法については、「設定」（201 ページ）の節を参照してください。

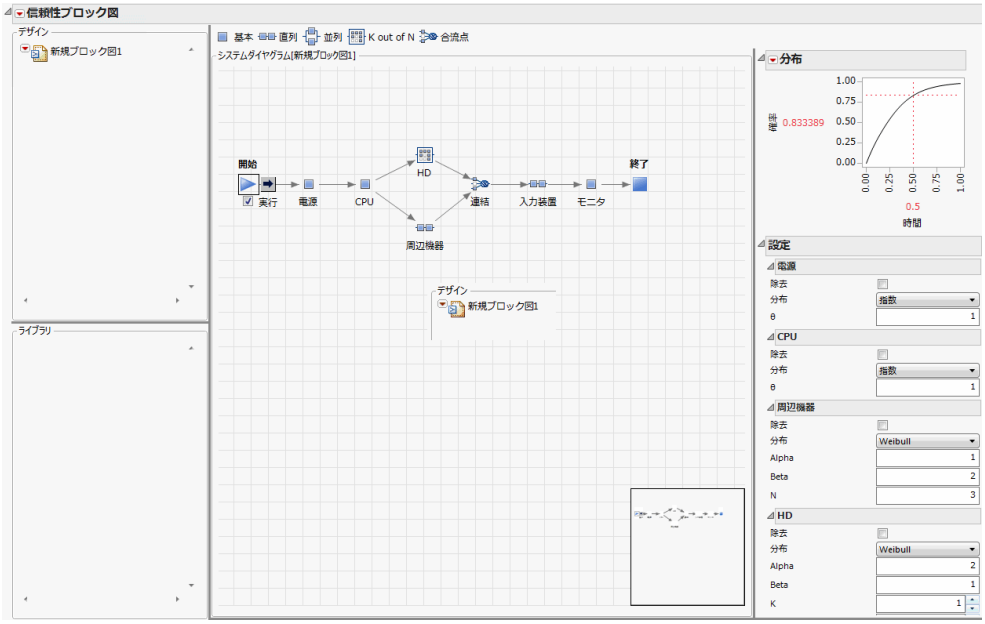
表 **9.1** サンプル部品の設定内容

| 部品名 | 設定内容 | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 分布 | θ | Alpha | Beta | 位置 | 尺度 | K | N | 可動最小要素数 |
| 電源 | 指数 | 1 | | | | | | | |
| CPU | 指数 | 1 | | | | | | | |
| 周辺機器 | Weibull | | 1 | 2 | | | | 3 | |
| HD | Weibull | | 2 | 1 | | | 1 | 4 | |
| 連結 | | | | | | | | | 1 |
| 入力装置 | Fréchet | | | | 0 | 1 | | 2 | |
| モニタ | 指数 | 1 | | | | | | | |

信頼性ブロック図の完成です（図 9.11）。

2. ［**実行**］をオンにして、情報を更新します。
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 **9.11** 信頼性ブロック図の例




## 「信頼性ブロック図」ウィンドウ

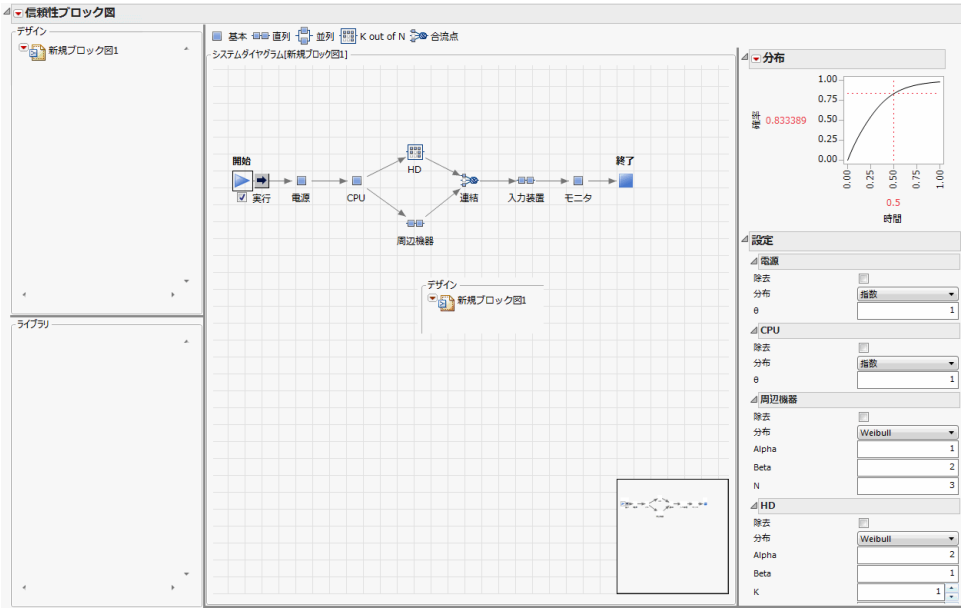
「信頼性ブロック図」ウィンドウは、次のパネルに分割されています。

- 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ヤグラム（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ヤグラムの作成時に再利用できます。
- ワークスペース：図形ツールバー、システムダイヤグラム、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：「分布」プロファイル、「設定」、およびその他の選択されているプロファイル情報が表示されます。

図 **9.12** 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ヤグラムに追加します。

直列 直列ブロック図形（直列で接続したブロックのグループ）を追加します。

並列 並列ブロック図形（並列で接続したブロックのグループ）を追加します。

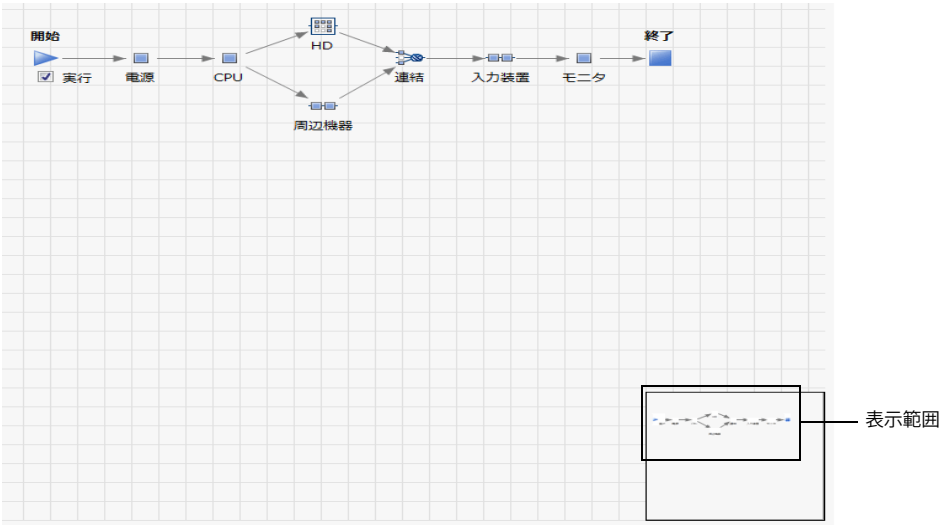
K out of N *K*-out-of-*N* ブロック図形を追加します。この図形については、「*K*」と「*N*」を指定します（*N* 個中 *K* 個以上が機能していれば、このブロック全体は正常動作する）。

合流点 合流点図形をシステムダイヤグラムに追加します。「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。

## プレビューウィンドウ

ダイヤグラムを拡大表示している場合は、プレビューウィンドウでダイヤグラム全体を把握し、移動できます。表示領域をドラッグして、システムダイヤグラムの別の場所をワークスペースに表示できます。

図 **9.13** プレビューウィンドウの例




## 「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。詳細は、『スクリプトガイド』の節を参照してください。

**ヒント：**［**ファイル**］> ［**保存**］および［**名前を付けて保存**］コマンドでも、信頼性ブロック図を保存できます。

**計画図の表示**　［**計画の比較を表示**］が選択されている場合に、このオプションを使って、ワークスペース内のシステムダイヤグラムの表示／非表示を切り替えることができます。

**計画の比較を表示**　選択されているシステムダイヤグラムの「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、「計画の比較を表示」（199 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」パネルに新しいデザインダイヤグラムを追加できます。詳細は、「新しいデザイン項目の追加」（198 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できます。「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ヤ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」（198 ページ）の節を参照してください。

**注：**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ヤ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ヤグラムには使用できません。

## 新しいデザイン項目の追加

［**デザイン項目の新規作成**］コマンドは、新しいシステムデザインを「デザイン」パネルのリストに追加します。

1. 「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1」が「デザイン」パネルのリストに追加されます。
2. 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。
3. 図形ツールバーを使用して、システムダイヤグラムを描画します（「「信頼性ブロック図」プラットフォームの使用例」（189ページ）を参照）。
4. 「信頼性ブロック図」の赤い三角ボタンのメニューから［**保存**］または［**名前を付けて保存**］を選択して、変更点をスクリプトに保存します。

## デザイン項目またはライブラリ項目の削除

［**削除**］コマンドは、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。

1. 削除対象のデザイン項目またはライブラリ項目を選択します。
2. 「デザイン」または「ライブラリ」内の該当項目の赤い三角ボタンのメニューから［**削除**］を選択します。

   選択したデザイン項目またはライブラリ項目が「デザイン」パネルまたは「ライブラリ」パネルから削除されます。
3. 「信頼性ブロック図」の赤い三角ボタンのメニューから［**保存**］または［**名前を付けて保存**］を選択して、変更点をスクリプトに保存します。

## 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**］コマンドは、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」パネルからシステムデザインを「ライブラリ」パネルにドラッグして、「ライブラリ」にサブシステムとして追加できます。

1. 「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1」が「ライブラリ」パネルのリストに追加されます。
2. 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。
3. 図形ツールバーを使用して、部品をサブシステムダイヤグラムに追加します。
4. 「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。
5. 「信頼性ブロック図」の赤い三角ボタンのメニューから［**保存**］または［**名前を付けて保存**］を選択してファイル名を入力し、変更点をスクリプトに保存します。

## 計画の比較を表示

［計画の比較を表示］コマンドは、パネルに表示されているすべてのデザインについて、分布関数プロットと余寿命分布関数プロットを重ね合わせて表示します。一部のデザインだけを選択して比較し、重ね合わせプロットで差を確認できます。

1. 「信頼性ブロック図」の赤い三角ボタンのメニューから［**計画の比較を表示**］を選択します。

   「分布関数プロットの重ね合わせ」プロファイルと「余寿命分布関数プロットの重ね合わせ」プロファイルが、ワークスペースのシステムダイヤグラムの下に表示されます。

2. 「余寿命分布関数プロットの重ね合わせ」では、**「生存時間」**の数値を入力します。

**ヒント：「生存時間」**を入力する代わりに、原点にある小さな長方形を選択し、そのまま右方向にドラッグして、生存時間を動的に設定することもできます。

**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［**計画図の表示**］の選択を解除すると、ワークスペースのシステムダイヤ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。

**注：**プロファイルには、システムダイヤグラムごとにグラフが表示されます。各プロファイルで、システムダイヤグラムの選択を解除し、該当するグラフを非表示にすることができます。図 9.14 および図 9.15 を参照してください。

図 **9.14**「分布関数プロットの重ね合わせ」の例

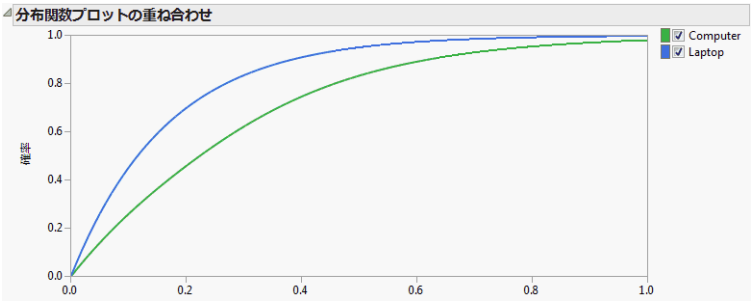
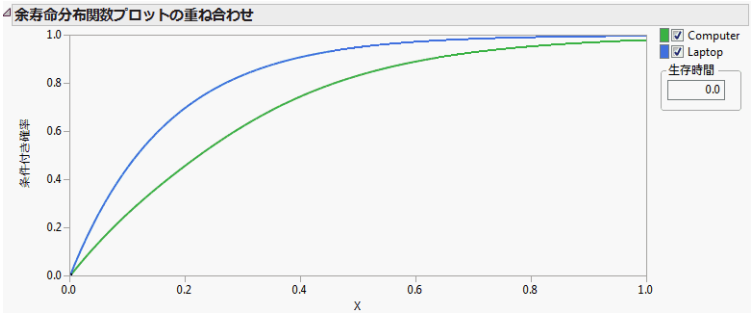


図 **9.15**「余寿命分布関数プロットの重ね合わせ」の例




## 「デザイン」と「ライブラリ」の赤い三角ボタンのメニュー

「信頼性ブロック図」では、各種のプロファイルを使ってシステムの特性を分析できます。「デザイン」パネルと「ライブラリ」パネルのリストに表示されているシステムダイヤグラムごとに、次のプロファイルを使用できます。

**分布プロファイルの表示** 「分布」プロファイルを表示します。このプロファイルは、時間に対して、故障確率（下側累積確率）をプロットしたものです。

**余寿命分布プロファイルの表示** 「平均余寿命」プロファイルを表示します。このプロファイルは、時間に対して、指定された生存時間が経過した後からの故障確率（下側累積確率）をプロットしたものです。興味がある**「生存時間」**の数値を入力してください。

**信頼性プロファイルの表示** 「信頼性」プロファイルを表示します。このプロファイルは、時間に対して、信頼性（上側累積確率）をプロットしたものです。

**分位点プロファイルの表示** 「分位点」プロファイルを表示します。このプロファイルは、故障確率（下側累積確率）に対して、時間をプロットしたものです。

**密度プロファイルの表示** 「密度」プロファイルを表示します。このグラフは、時間に対して、密度関数をプロットしたものです。

**ハザードプロファイルの表示** 「ハザード」プロファイルを表示します。このグラフは、時間に対して、瞬間故障率（ハザード）をプロットしたものです。

**Birnbaum 要素重要度の表示** 部品ごとに、「Birnbaum 要素重要度」（BCI; Birnbaum's Component Importance）のプロファイルを表示します。ある時間におけるある部品の BCI は、その部品が故障したことによってシステムが故障する確率です。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。

**余寿命 Birnbaum 要素重要度の表示** 部品ごとに、「余寿命 Birnbaum 要素重要度」プロファイルを表示します。余寿命 Birnbaum 要素重要度は、ある時間が経過した後、該当の部品が故障したことによってシステムが故障する確率です。「生存時間」テキストボックスに時間を指定してください。

**平均故障時間の表示** 「平均故障時間」の計算結果を表示します。

上記のプロファイル以外に、「デザイン」パネルと「ライブラリ」パネルには、次のオプションもあります。

**設定**　システムダイヤグラムの部品とその設定のリストを表示します。この「設定」において、部品ごとに設定を行う必要があります。詳細は、「設定内容」（202 ページ）の節を参照してください。

**信頼度の代数式をログウィンドウに表示**　信頼性ブロック図で表されている代数式をログウィンドウに出力します。「信頼度の代数式の出力」（210 ページ）を参照してください。

**削除**　「デザイン」パネルまたは「ライブラリ」パネルで選択されている項目を削除します。

## 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**　システムダイヤグラムを拡大表示します。

**ズームアウト**　システムダイヤグラムを縮小表示します。

---

**ヒント：**マウスのホイールを使って、ダイヤグラムを拡大縮小できます。

---

**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。

# 部品の「分布」プロパティ

信頼性ブロック図の各部品には、「分布」プロパティをそれぞれ 1 つ指定できます。ここで使われている確率分布については、『基本的な統計分析』と、特に、「寿命の一変量」の章の「統計的詳細」（43 ページ）を参照してください。

「分布」プロパティには、次の分布を指定できます。

- 指数
- Weibull
- 対数正規
- 対数ロジスティック
- Fréchet
- 一般化ガンマ

- DS Weibull（故障部分母集団 Weibull）
- DS 対数正規（故障部分母集団対数正規）
- DS 対数ロジスティック（故障部分母集団対数ロジスティック）
- DS Fréchet（故障部分母集団 Fréchet）
- ノンパラメトリック

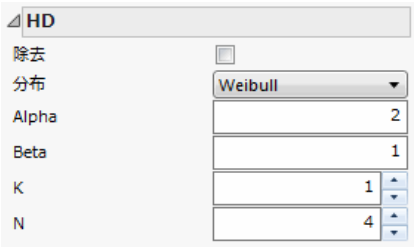
## 設定内容

プロファイルパネルの「設定」はデフォルトで表示されます。設定プロパティの種類ごとに、必須項目を入力する必要があります。

表 **9.2**「設定」のプロパティと指定内容

| プロパティの種類 | 入力必須項目 | | |
|---|---|---|---|
| 指数 | θ | | |
| 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 | μ | σ | λ |
| 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 | | |

図 **9.16** 構成例 - Weibull



- ダイアグラムである部品をクリックすると、「設定」にその部品だけの設定項目が表示されます。
- ダイアグラムで特定の部品を選択していない状態にすると、「設定」にすべての設定項目が表示されます。
- ダイヤグラムの部品ごとに、次のような設定を行ってください。
  - 特定の部品について、[**除去**] チェックボックスをオンにすると、その部品は無効になります（つまり、その部品は故障している状態になります）。
  - **「分布」**のドロップダウンリストから、適切なプロパティを選択します。詳細は、「部品の「分布」プロパティ」（201 ページ）の節を参照してください。
  - 部品ごとに、「分布」で選択したプロパティに対するパラメータ値を入力します。
  - 直列系と並列系の部品の場合、**「N」**（その部品の構成部品の総数）を入力します。
  - 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」**（その部品の構成部品の総数）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。

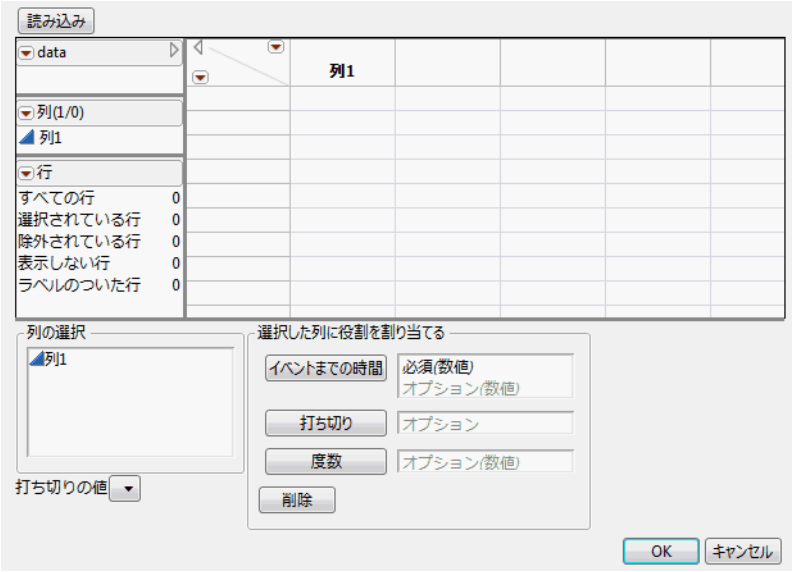
## ノンパラメトリック分布のデータの入力

「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。

1. 「分布」で［ノンパラメトリック］を選択した後、[...] 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。

図 **9.17**「データの指定」ウィンドウ




2. データを読み込む場合には、まず、JMP でそのデータを開きます。
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. 「データの指定」ウィンドウで、［**OK**］をクリックします。

   ノンパラメトリック分布データが読み込まれ、「分布」プロファイルの計算に使用されます。

## 「信頼性ブロック図」で表示できるプロファイル

「デザイン」パネルの「システムダイヤグラム」ごとに、1つまたは複数のプロファイルが「プロファイル」パネルに表示できます。プロファイルの一般的な操作方法（X 軸と Y 軸の設定方法など）については、『JMP の使用法』を参照してください。

**ヒント：**「プロファイル」パネルのプロファイルを非表示にするには、該当するデザインの赤い三角ボタンのメニューで、プロファイルの選択を解除します。

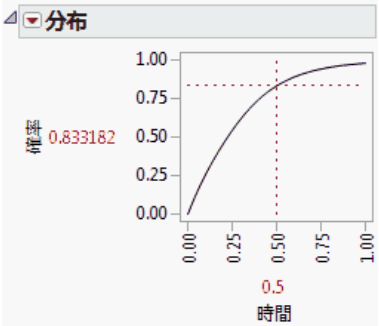
**注：**「分布」プロファイルと「設定」の情報は、デフォルトで表示されます。

## 「分布」プロファイル

「分布」プロファイルはデフォルトで表示されます。

**注：**「分布」プロファイルを非表示にするには、該当するシステムデザインを選択し、そのデザインの赤い三角ボタンのメニューで、［**分布プロファイルの表示**］の選択を解除します。

図**9.18** 分布




### 「分布」の赤い三角ボタンのメニューオプション

プロファイルパネルの「分布」の赤い三角ボタンのメニューには、次のコマンドがあります。

**因子グリッドのリセット**　このオプションを選択するとダイアログボックスが開き、現在の設定について具体的な値を指定できます。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』を参照してください。

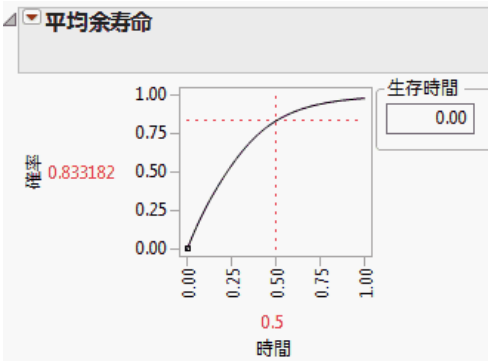
**因子設定**　このオプションを選択して、プロファイルの設定を行います。因子設定の詳細については、『プロファイル機能』を参照してください。

## 「平均余寿命」プロファイル

「平均余寿命」プロファイルを表示するには、該当するシステムデザインを選択し、そのデザインの赤い三角ボタンのメニューから［**余寿命分布プロファイルの表示**］を選択します。

選択すると、「平均余寿命」プロファイルが「プロファイル」パネルに表示されます。

図 **9.19** 余寿命分布




- **「生存時間」**に、ゼロより大きな数値を指定してしてください。指定された生存時間より後の故障確率（下側累積確率）がプロットされます。

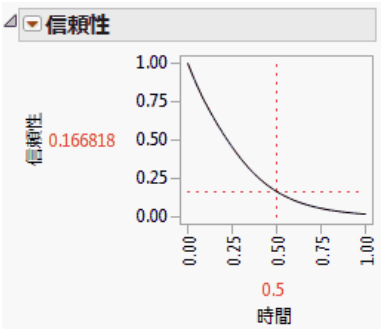
**ヒント：「生存時間」**を入力する代わりに、原点にある小さな長方形を選択し、そのまま右方向にドラッグして、生存時間を動的に設定することもできます。

## 「信頼性」プロファイル

「信頼性」プロファイルを表示するには、該当するシステムデザインを選択し、そのデザインの赤い三角ボタンのメニューから［**信頼性プロファイルの表示**］を選択します。

選択すると、「信頼性」プロファイルが、「プロファイル」パネルに表示されます。

図 **9.20** 信頼性

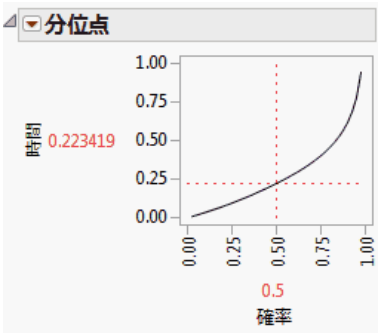



## 「分位点」プロファイル

「分位点」プロファイルを表示するには、該当するシステムデザインを選択し、そのデザインの赤い三角ボタンのメニューから［**分位点プロファイルの表示**］を選択します。

選択すると、「分位点」プロファイルが「プロファイル」パネルに表示されます。

図**9.21** 分位点

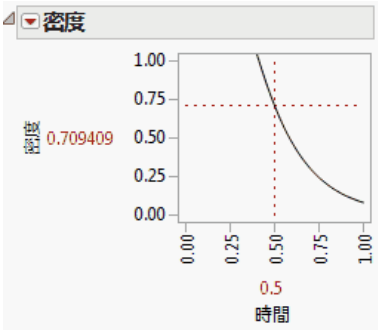



## 「密度」プロファイル

「密度」プロファイルを表示するには、該当するシステムデザインを選択し、そのデザインの赤い三角ボタンのメニューから［**密度プロファイルの表示**］を選択します。

選択すると、「密度」プロファイルが「プロファイル」パネルに表示されます。

図**9.22** 密度



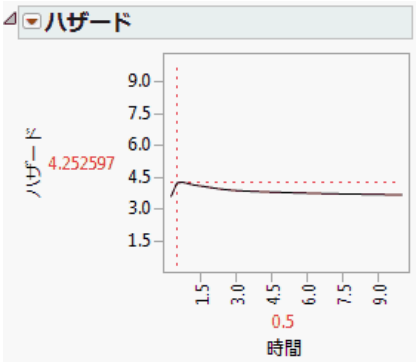

**注：**プロファイルにおいて目的の部分が見えずらい場合は、X 軸と Y 軸を調整してください。

## 「ハザード」プロファイル

「ハザード」プロファイルを表示するには、該当するシステムデザインを選択し、そのデザインの赤い三角ボタンのメニューから［**ハザードプロファイルの表示**］を選択します。

選択すると、「ハザード」プロファイルが「プロファイル」パネルに表示されます。

図 **9.23** ハザード



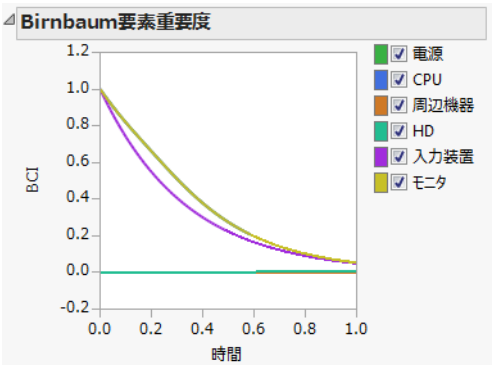

**注：**プロファイルにおいて目的の部分が見えづらい場合は、X 軸と Y 軸を調整してください。

## 「Birnbaum 要素重要度」プロファイル

「Birnbaum 要素重要度」プロファイルを表示するには、該当するシステムデザインを選択し、そのデザインの赤い三角ボタンのメニューから［**Birnbaum 要素重要度の表示**］を選択します。

選択すると、「Birnbaum 要素重要度」プロファイルが「プロファイル」パネルに表示されます。

図 **9.24** Birnbaum 要素重要度



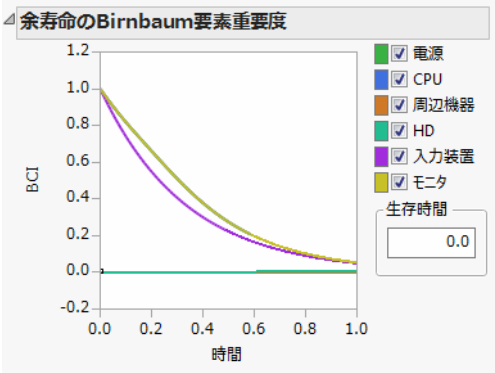

**注：**グラフにおいて部品の曲線が重なって見えづらくなる場合があります。グラフ右側にある部品のチェックボックスの選択を解除すると、一部の部品の曲線だけが描画されます。

## 余寿命 Birnbaum 要素重要度

「余寿命 Birnbaum 要素重要度」プロファイルを表示するには、該当するシステムデザインを選択し、そのデザインの赤い三角ボタンのメニューから［**余寿命 Birnbaum 要素重要度の表示**］を選択します。

選択すると、「余寿命 Birnbaum 要素重要度」プロファイルが「プロファイル」パネルに表示されます。

図 **9.25** 余寿命の Birnbaum 要素重要度




**注：**グラフにおいて部品の曲線が重なって見えづらくなる場合があります。グラフ右側にある部品のチェックボックスの選択を解除すると、一部の部品の曲線だけが描画されます。

- 「**生存時間**」に、ゼロより大きな数値を指定してしてください。

**ヒント：「生存時間」**を入力する代わりに、原点にある小さな長方形をクリックし、そのまま右方向にドラッグして、生存時間を動的に設定することもできます。

## 平均故障時間

平均故障時間（MTTF; Mean Time To Failure）を表示するには、該当するシステムデザインを選択し、そのデザインの赤い三角ボタンのメニューから［**平均故障時間の表示**］を選択します。

平均故障時間が計算され、その結果が「プロファイル」パネルに表示されます。

**注：**平均故障時間の計算に使用される計算式は、各部品の「分布」プロパティと「設定」の設定内容によって決まります。

図 **9.26** 平均故障時間

# 信頼度の代数式の出力

［**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ヤグラムの信頼度の代数式をログウィンドウに出力します。

1. （Windowsのみ）［**表示**］>［**ログ**］を選択します。

   または

   （Macintoshのみ）［**ウィンドウ**］>［**ログ**］を選択します。
2. 作成した「exampleRBDcomplete.jsl」ファイルを開きます。
3. 「デザイン」パネルで、［**コンピュータ**］を選択します。
4. ［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 **9.27**「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"]
```

**注：**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。

# 第 10 章

# 生存時間分析

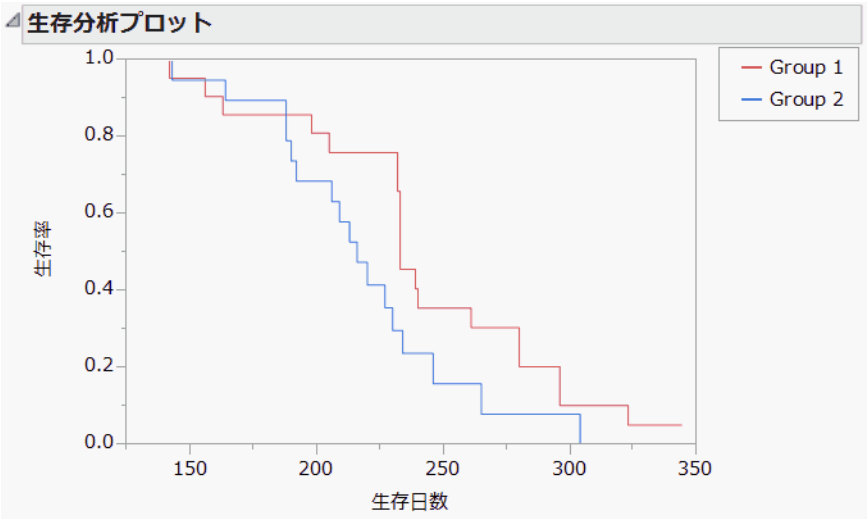
## 生存時間データを分析する

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」プラットフォームでは、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）を表す単一の変数における分布を調べます。故障時間の分布を調べます。

**ヒント：**単一の変数における分析を調べるのではなく、説明変数のあるモデルをあてはめるには、「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 **10.1**「生存分析プロット」の例



# 目次

生存時間分析の概要 . . . . . 213
生存時間分析の例 . . . . . 214
「生存時間分析」プラットフォームの起動 . . . . . 215
生存分析プロット . . . . . 216
「生存時間分析」プラットフォームのオプション . . . . . 216
指数、Weibull、対数正規プロットとあてはめ. . . . . 219
あてはめた分布のグラフ . . . . . 222
競合する原因 . . . . . 222
生存時間分析のその他の例 . . . . . 223
競合する原因の例. . . . . 225
区間打ち切りの例. . . . . 227
生存時間分析の統計レポート . . . . . 229

# 生存時間分析の概要

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、特定の時間よりも以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。
- 「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。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。

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。この処理はそれだけで分析としても使えますが、複雑なモデルをあてはめるときには、さらに情報を得るための探索的な分析としても活用できます。Kaplan-Meier法の「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と、標本全体で推定された生存関数（オプション）のプロットが作成されます。
- 各グループおよび標本全体に対し、生存率の推定値が計算され、リストにまとめられます。
- 指数分布、Weibull分布、対数正規分布の確率プロットを作成されます。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されます。
- ログランク検定と一般化Wilcoxon検定が行われます。この検定では、グループごとの生存関数が同じかどうかが、カイ2乗値によって検定されます。
- 故障原因を含んだ変数を指定すると、競合原因（competing causes）の分析が実行されます。この分析では、各原因ごとに、Weibull分布が推定されます。

# 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実験を行いました。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、調査の目的は、2 群におけるラットの生存関数を比べることです。

1. 「Rats.jmp」サンプルデータを開きます。

   「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。

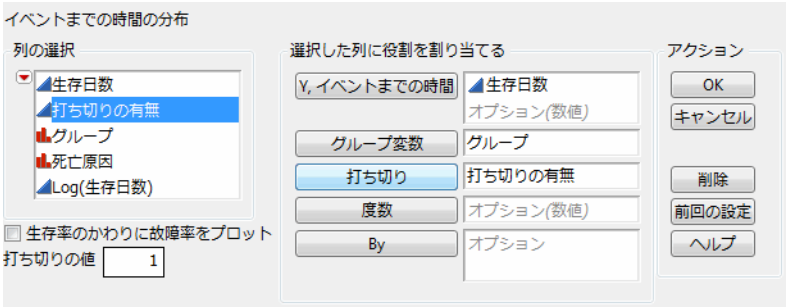
図 **10.2**「Rats.jmp」データの「生存分析プロット」

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 **10.3**「生存時間/信頼性分析」起動ウィンドウ




**Y, イベントまでの時間**　（必須）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む列を指定します。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。

**グループ変数**　データをグループに分類して個別にあてはめる場合に、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。**「打ち切りの値」**ボックスに、打ち切りを示す値を入力します。以下のような場合は、［打ち切り］の列に異なる値が 3 つ以上あってもかまいません。

– 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、その値は各行の観測値の度数（個数）を表します。

**By**　分類変数またはグループ変数の水準ごとに、個別に分析を行います。

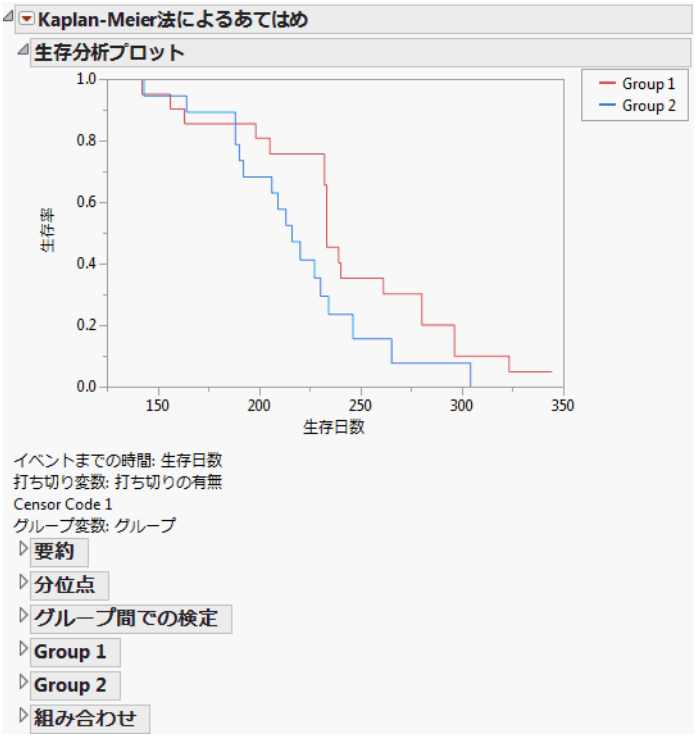
**生存率のかわりに故障率をプロット**　生存率プロット（生存確率のプロット）のかわりに、故障率プロット（累積故障確率のプロット）を表示します。

**打ち切りの値**　値が打ち切られていることを示すコードを指定します。

# 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 **10.4** 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て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Y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。

---

**注：**［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の形で存在しています）。

---

**プロットのオプション**　次のオプションが表示されます。

---

**注：**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、デフォルトの生存分析プロットに関連するものです。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**］）は分布プロットのみに関連します。

---

- ［**点の表示**］は、生存時間プロット上で、各ステップの標本点を表示します。故障が観測されたデータはステップの下端、打ち切りデータはステップの少し上に点で表示されます。
- ［**Kaplan-Meier 曲線を表示**］は、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**］は、生存時間プロット上にデータ全体の生存曲線を表示します。
- ［**信頼区間の表示**］は、グループの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**］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、グループ別プロットのステップの角に点が表示されます。
- ［**同時信頼区間を表示**］は、グループの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。時点ごとの信頼区間および同時信頼区間、生存時間分析における同時信頼区間の意味については、Meeker and Escobar（1998、第3章）を参照してください。
- ［**分位点の中間ステップ**］は、Weibullプロット、対数正規プロット、指数プロットにおける点の位置を、**調整したKaplan-Meier推定値**にします。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、中間の値になっています。これは推奨オプションなので、デフォルトでオンになっています。
- ［**分位点をつなぐ**］は、Weibullプロット、対数正規プロット、指数プロットにおいて線を表示します。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**］は、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**］は、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**］は、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**］は、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**］は、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。線が直線に近い場合、経験的に、指数モデルを使った分析が適切だと判断できます。たとえば、図10.5を見ると、指数プロットの線は「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、Weibull、対数正規プロットとあてはめ」（219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10.5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、Weibull、対数正規プロットとあてはめ」（219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回帰モデルを使ってさらに分析を続けることが適切だと判断できます。「指数、Weibull、対数正規プロットとあてはめ」（219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10.5を参照してください。尺度パラメータ（$\alpha$）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、同じあてはめを別の方法でパラメータ化したものが表示されます。$\lambda$=In(a) で $\delta$=1/b です。「指数、Weibull、対数正規プロットとあてはめ」（219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を使ってさらに分析を続けることが適切だと判断できます。「指数、Weibull、対数正規プロットとあてはめ」（219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10.5）が作成されます。$\mu$と$\sigma$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は、正規分布に従うと仮定されます）。「指数、Weibull、対数正規プロットとあてはめ」（219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」（222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。各モデルでは、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」（222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。

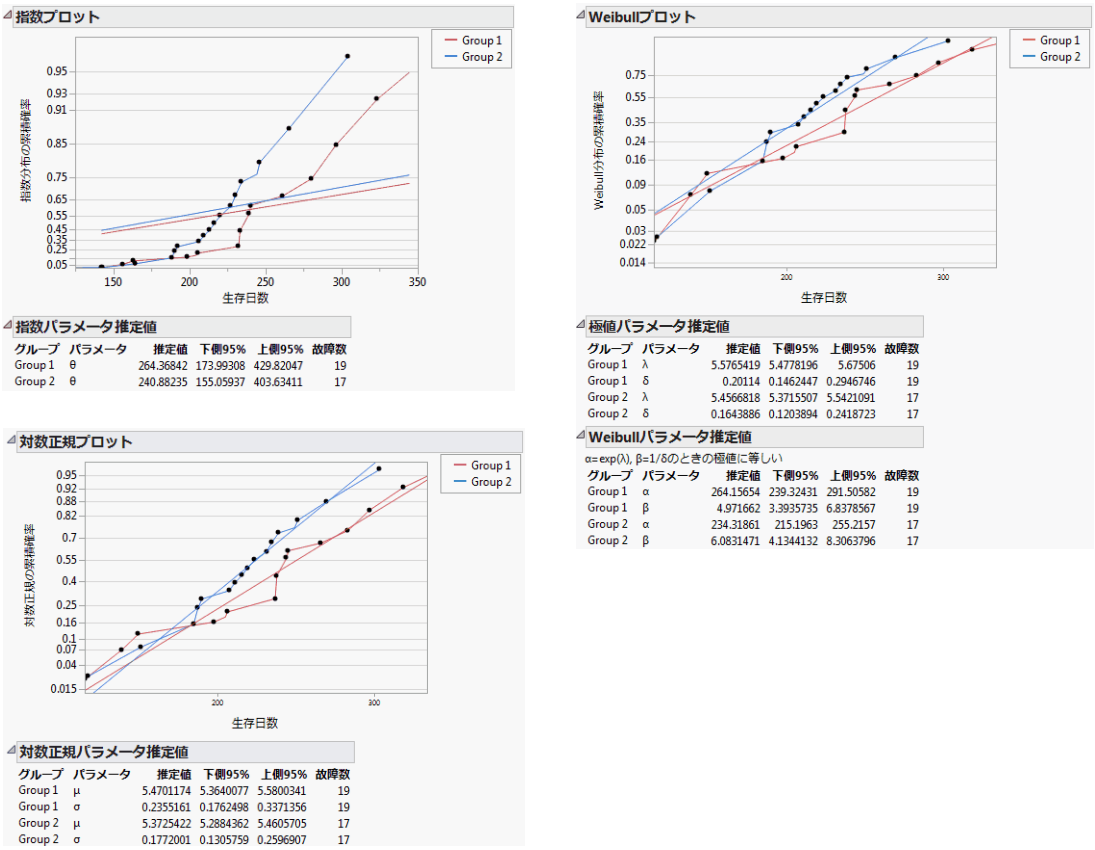
**時間分位点の推定**　指定したそれぞれの生存率に対し、時間分位点が推定されます。

**推定値の保存**　生存率と故障率の推定値、信頼区間、その他の分布の統計量を含むデータテーブルが作成されます。

## 指数、Weibull、対数正規プロットとあてはめ

JMPがサポートしている3つの分布には、それぞれプロットコマンドとあてはめコマンドが用意されています。まずプロットコマンドを実行し、イベントを示す点が直線に沿うかどうか、つまり、その分布がよくあてはまっているかどうかを確かめます。次にあてはめ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 **10.5** 指数、Weibull、対数正規プロットとレポート



次の表は、何をプロットすれば分布が直線になるかを示します。

表 **10.1** 分布への直線のあてはめ

| 分布プロット | X 軸 | Y 軸 | 解釈 |
|---|---|---|---|
| 指数 | 時間 | -log(S) | 傾きは 1/θ |
| Weibull 損失関数 | log( 時間 ) | log(-log(S)) | 傾きは β |
| 対数正規 | log( 時間 ) | Probit(1-S) | 傾きは 1/σ |

**注：**S は、Kapler-Meier 法に基づく生存率の推定値です。

指数分布は、パラメータが 1 つだけ（θ）なので最も単純です。指数分布はハザードが一定で、どれだけの時間生存し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 θ は寿命の期待値を表します。

Weibull 分布は、故障時間データの解析に最も良く使われている分布です。Weibull 分布は、いろいろな統計学者が異なる方法でパラメータ化しています（表 10.2）。JMP のレポートには 2 種類のパラメータ化による結果が表示されます。1 つは Lambda（λ）と Delta（δ）を使った「極値パラメータ推定値」、もう 1 つは Alpha（α）と Beta（β）を使った「Weibull パラメータ推定値」です。「Weibull パラメータ推定値」は信頼性分析の文献で使用されます。Nelson（1990）を参照してください。Alpha は、63.2% のユニットが故障する分位点を示します。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=1 の場合、ハザードが一定な指数分布になります。

表 **10.2** JMP の Alpha と Beta に該当する Weibull パラメータ

| **JMP Weibull** | 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 |
| **JMP 極値** | lambda=log(alpha) | delta=1/beta |
| Meeker and Escobar s.e.v. | mu=log(alpha) | sigma=1/beta |

対数正規分布も一般に広く普及しています。この分布では、値の対数が正規分布に従います。正規分布に従っているデータを、指数変換すると対数正規分布になります。「生存時間 ( パラメトリック ) のあてはめ」の章の「「生存時間（パラメトリック）のあてはめ」のその他の例」（241 ページ）を参照してください。

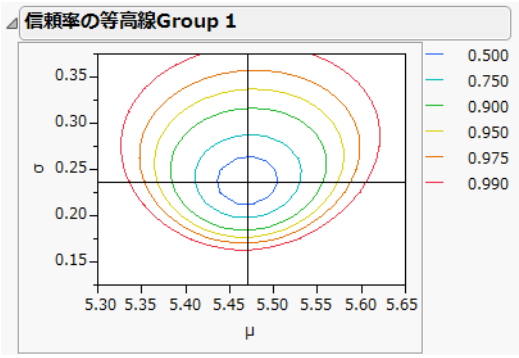
## 追加オプション

追加のオプションを表示するには、指数、Weibull、対数正規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。

これらのオプションは、次の用途に使えます。

- 信頼限界の信頼水準を指定する。
- θ（指数分布の場合）、σ（対数正規分布の場合）、β（Weibull 分布の場合）を特定の値に固定する。「WeiBayes 分析」（221 ページ）を参照してください。
- Weibull および対数正規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 10.6 を参照してください。

図 **10.6** 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 θ、Weibull 分布をあてはめるときは β、対数正規分布をあてはめるときは σ 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 と呼ばれる状況で必要です。

- 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

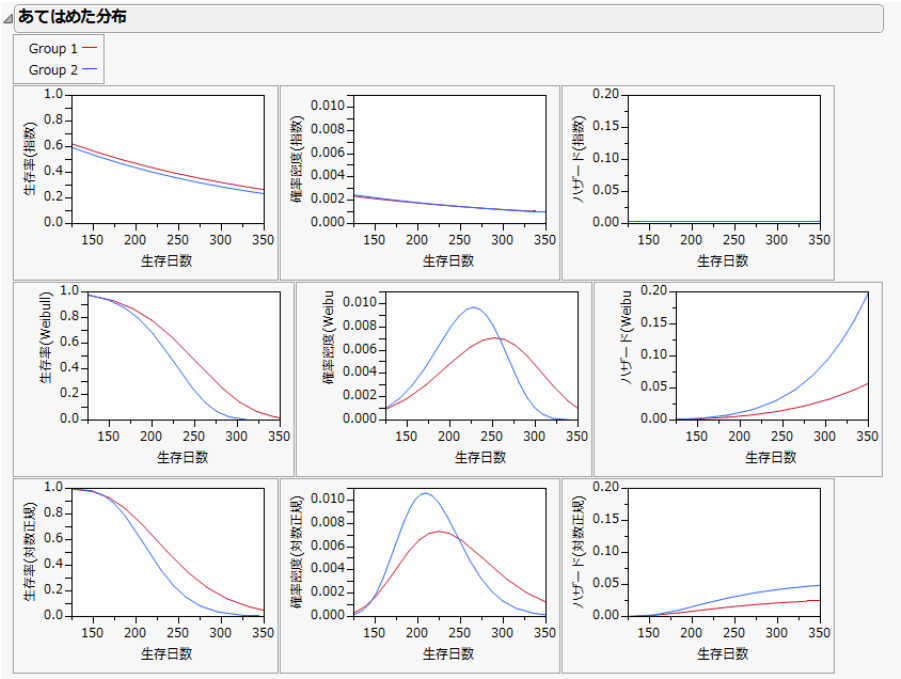
WeiBayes 状況の詳細については、Abernethy（1996）を参照してください。

故障がまったくない場合、標準的な手法では最後に故障データを加えて推定を行います。このような手法では、Alpha 値の真の推定値ではなく、ある種の下限値が推定されます。JMP の WeiBayes 分析機能なら真の推定値を計算できます。

## 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、および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。すべてのプロットで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 **10.7** 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。各原因の分布の推定においては、該当する原因以外の故障は打ち切りデータとして扱われます。

「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**　指定した原因の値を削除し、生存率の推定値を再計算します。

**原因座標の保存**　テーブルに「**log(–log( 生存率 ))**」という新しい列が追加されます。この情報は、故障の種類を表すコードなどのグループ変数を使い、時間変数に対してプロットするときによく使われます。

**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 Weibull 分布をもとにシミュレートされた生存日数と原因が、新しいデータテーブルに作成されます。

## 生存時間分析のその他の例

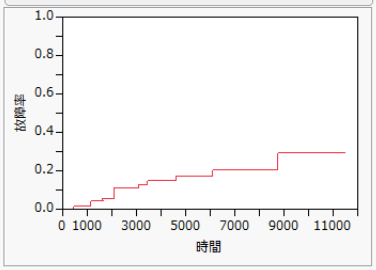
Nelson（1982 p. 133）と Meeker and Escobar（1998, appendix C1）の著作では、ディーゼル発電機のファンの故障に関する調査が取り上げられています。

1. 「Reliability」フォルダにある「Fan.jmp」サンプルデータを開きます。
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 **10.8**「Fan」データのレポート

**Kaplan-Meier法によるあてはめ**

**故障率プロット**




イベントまでの時間: 時間
打ち切り変数: 打ち切りの有無
打ち切りの値 1

**要約**

| グループ | 故障数 | 打ち切り数 | 平均 | | 標準誤差 |
|---|---|---|---|---|---|
| 組み合わせ | 12 | 58 | 7564.72 | バイアスあり | 340.099 |

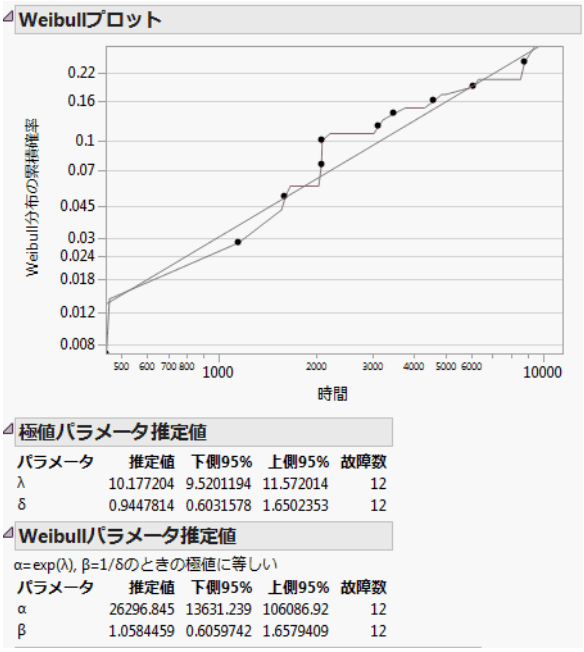
**分位点**

**組み合わせ**

| 時間 | 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 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.0 | 1.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0 | 0 | 70 |
| 450.0 | 0.9857 | 0.0143 | 0.0142 | 1 | 0 | 70 |
| 460.0 | 0.9857 | 0.0143 | 0.0142 | 0 | 1 | 69 |
| 1150.0 | 0.9567 | 0.0433 | 0.0244 | 2 | 0 | 68 |
| 1560.0 | 0.9567 | 0.0433 | 0.0244 | 0 | 1 | 66 |
| 1600.0 | 0.9420 | 0.0580 | 0.0282 | 1 | 0 | 65 |
| 1660.0 | 0.9420 | 0.0580 | 0.0282 | 0 | 1 | 64 |
| 1850.0 | 0.9420 | 0.0580 | 0.0282 | 0 | 5 | 63 |
| 2030.0 | 0.9420 | 0.0580 | 0.0282 | 0 | 3 | 58 |

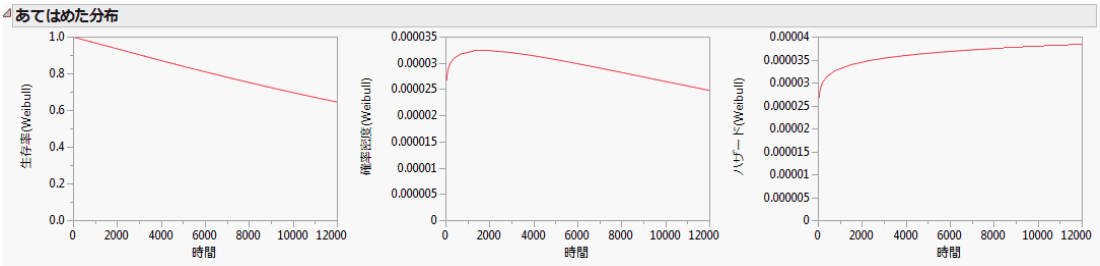
故障率は時間の経過につれて高くなっています。通常は、この次に Weibull 分布などをあてはめ、検討します。赤い三角ボタンのメニューから［**Weibull プロット**］と［**Weibull のあてはめ**］を選択します。

図 **10.9**「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 **10.10** あてはめた分布のグラフ



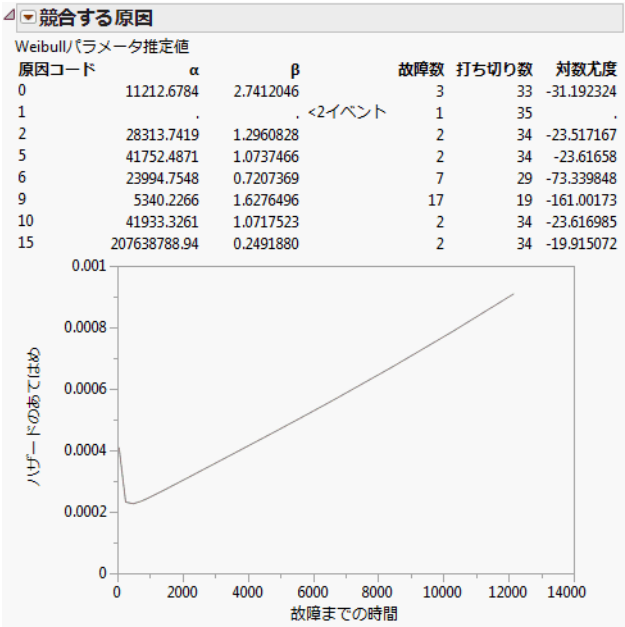

## 競合する原因の例

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. 「Reliability」フォルダにある「Appliance.jmp」サンプルデータを開きます。
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 **10.11**「競合する原因」レポートとハザードプロット



競合する原因

Weibullパラメータ推定値

| 原因コード | α | β | | 故障数 | 打ち切り数 | 対数尤度 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 11212.6784 | 2.7412046 | | 3 | 33 | -31.192324 |
| 1 | . | . | <2イベント | 1 | 35 | . |
| 2 | 28313.7419 | 1.2960828 | | 2 | 34 | -23.517167 |
| 5 | 41752.4871 | 1.0737466 | | 2 | 34 | -23.61658 |
| 6 | 23994.7548 | 0.7207369 | | 7 | 29 | -73.339848 |
| 9 | 5340.2266 | 1.6276496 | | 17 | 19 | -161.00173 |
| 10 | 41933.3261 | 1.0717523 | | 2 | 34 | -23.616985 |
| 15 | 207638788.94 | 0.2491880 | | 2 | 34 | -19.915072 |

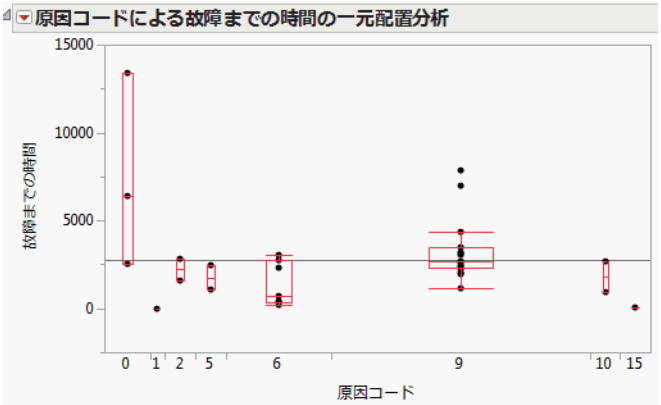


システム全体の生存時間分布は、各故障原因の生存率の積で表わされます。「競合する原因」表には、各故障原因ごとの、Weibull 分布パラメータ（α と β）の推定値が表示されます。

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、α が大きく、β が小さくなっています Weibull 分布の α 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、α 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 10.12 は、分位点オプションがオンになっている状態で「故障までの時間」と「原因コード」を「二変量の関係」でプロットしたものです。このプロットを見ると、α と β がどのように故障時間分布に関連するかがわかります。

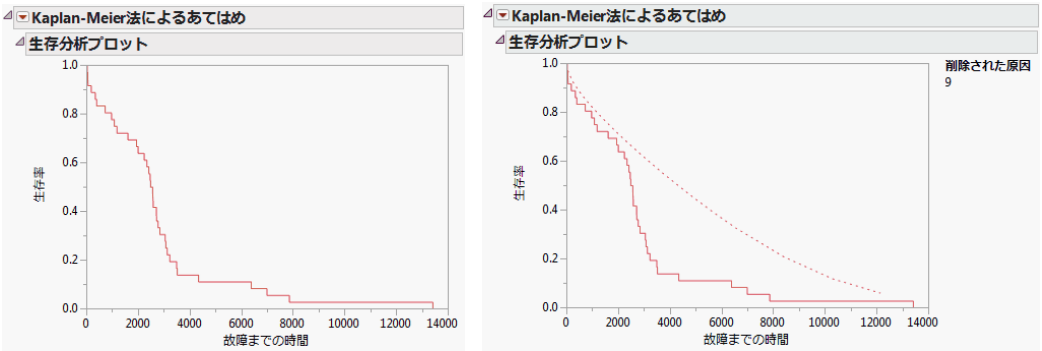
図 **10.12**「二変量の関係」で作成した「故障までの時間」と「原因コード」




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 10.13 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 **10.13** 原因を削除したときの生存時間分布プロット



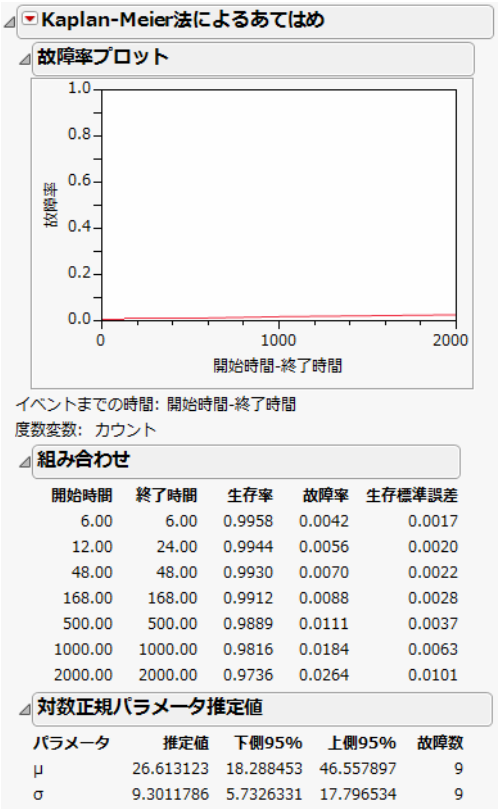

## 区間打ち切りの例

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. 「Reliability」フォルダにある「Microprocessor Data.jmp」サンプルデータを開きます。
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 **10.14** 区間打ち切りのレポート




| 開始時間 | 終了時間 | 生存率 | 故障率 | 生存標準誤差 |
|---|---|---|---|---|
| 6.00 | 6.00 | 0.9958 | 0.0042 | 0.0017 |
| 12.00 | 24.00 | 0.9944 | 0.0056 | 0.0020 |
| 48.00 | 48.00 | 0.9930 | 0.0070 | 0.0022 |
| 168.00 | 168.00 | 0.9912 | 0.0088 | 0.0028 |
| 500.00 | 500.00 | 0.9889 | 0.0111 | 0.0037 |
| 1000.00 | 1000.00 | 0.9816 | 0.0184 | 0.0063 |
| 2000.00 | 2000.00 | 0.9736 | 0.0264 | 0.0101 |

| パラメータ | 推定値 | 下側95% | 上側95% | 故障数 |
|---|---|---|---|---|
| μ | 26.613123 | 18.288453 | 46.557897 | 9 |
| σ | 9.3011786 | 5.7326331 | 17.796534 | 9 |

「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。レポートにあ、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 10.15）。「要約」データには、故障数と打ち切り数をグループごとにまとめたもの（グループがある場合）と、調査全体での数が表示されています。他には、打ち切りに合わせて調整を加えた平均と標準偏差があります。これらの統計量の計算方法については、『SAS/STAT User's Guide』（2001）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、故障時間に関する統計量が表示されています。これらの統計量には、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があります。「中央値時間」とは、個体のうち半数が故障したときの時間です。また、4 分位数（生存時間の 25% および 75%）も表示されています。

図 **10.15** 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。

$$\hat{\mu} = \sum_{i=1}^{D} \hat{S}(t_{i-1})(t_i - t_{i-1})\text{、標準誤差 } \hat{\sigma}(\hat{\mu}) = \sqrt{\frac{m}{m-1}\sum_{i=1}^{D-1}\frac{A_i^2}{n_i(n_i-d_i)}}\text{、}$$

$$\text{上の式で、}\hat{S}(t_i) = \prod_{j=1}^{i}\left(1-\frac{d_j}{n_j}\right)\text{、}A_i = \sum_{j=i}^{D-1}\hat{S}(t_j)(t_{j+1}-t_j)\text{、および } m = \sum_{j=1}^{D} d_j \text{ です。}$$

$\hat{S}(t_i)$ は時間 $t_i$ における生存時間分布

$D$ は個々のイベントの時間の数

$n_i$ は $t_i$ 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

$t_0$ 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」テーブルに、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、第1章）、Hosmer and Lemeshow（1999、第2章）、Klein and Moeschberger（1997、第7章）で取り上げられています。

図 **10.16** 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。

**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きに、カイ2乗値が偶然によって現在の値よりも大きくなる確率。

図10.17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 **10.17**「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 |

**注：**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をもち、過小評価されます。

# 第 11 章

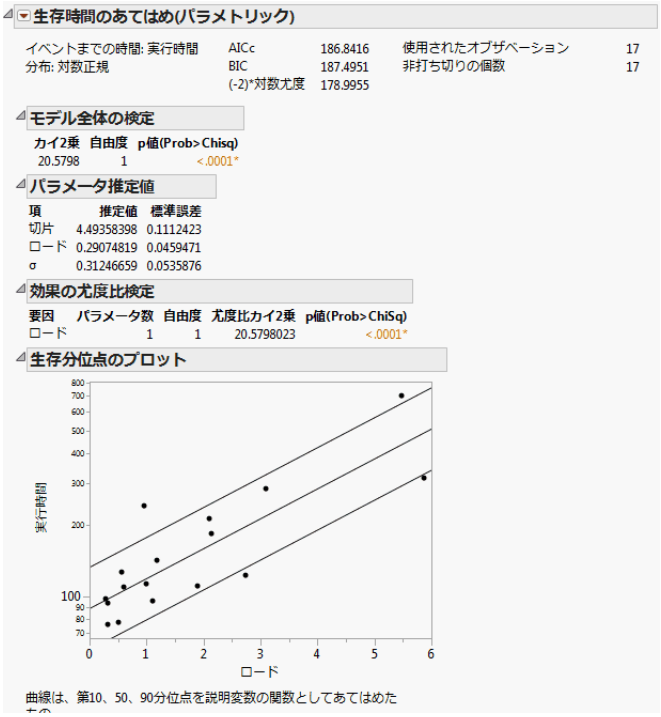
# 生存時間 (パラメトリック) のあてはめ

## 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のあてはめます。このプラットフォームでは、イベントまでの時間（Y 変数）の分布における位置と尺度に対して、回帰モデルをあてはめます。Weibull、対数正規、指数、Fréchet、対数ロジスティックの各分布を使ったあてはめが実行されます。

**注：**「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 **11.1**「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」の概要 . . . . . 235
「生存時間（パラメトリック）のあてはめ」の例 . . . . . 235
「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 . . . . . 237
「生存時間のあてはめ ( パラメトリック )」レポート . . . . . 238
「生存時間 ( パラメトリック ) のあてはめ」のオプション . . . . . 239
「非線形回帰」プラットフォームによる分析 . . . . . 241
「生存時間（パラメトリック）のあてはめ」のその他の例 . . . . . 241
Arrhenius 加速寿命の対数正規モデル . . . . . 241
区間打ち切りデータに対する加速故障時間モデル . . . . . 244
「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 . . . . . 246
「Right-Censored」データ . . . . . 247
「非線形回帰」プラットフォームでの Weibull 回帰モデル . . . . . 247
「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 . . . . . 250
「生存時間 ( パラメトリック ) のあてはめ」の統計的詳細 . . . . . 252
生存時間分布の損失計算式 . . . . . 252

## 「生存時間 (パラメトリック) のあてはめ」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のあてはめます。このプラットフォームでは、イベントまでの時間（Y 変数）の分布における位置と尺度に対して、回帰モデルをあてはめます。Weibull、対数正規、指数、Fréchet、対数ロジスティックの各分布を使ったあてはめが実行されます。

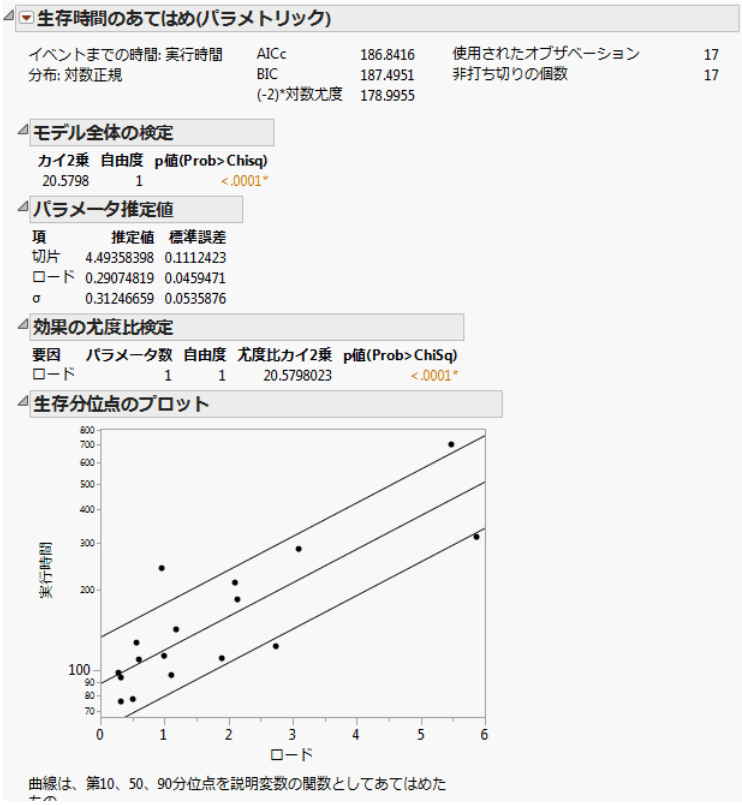
## 「生存時間（パラメトリック）のあてはめ」の例

「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説明変数「**ロード**」に依存していると仮定して分析を行います。

**注：**「Comptime.jmp」のデータは、Meeker and Escobar（1998 p.434）から引用したものです。

1. 「Reliability」フォルダにある「Comptime.jmp」サンプルデータを開きます。
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 **11.2**「Comptime」のレポート




説明変数が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、説明変数の関数として表示されます。

システムのロードを5とし、ジョブの90%が完了したときの時間分位点を求めます。Meeker and Escobar（p.438）を参照してください。

7. 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。
8. 「**ロード**」として「5」と入力します。
9. 「**生存率**」として「0.1」と入力します。
10. ［**実行**］をクリックします。

図 **11.3** 時間分位点の推定値

時間分位点の推定値

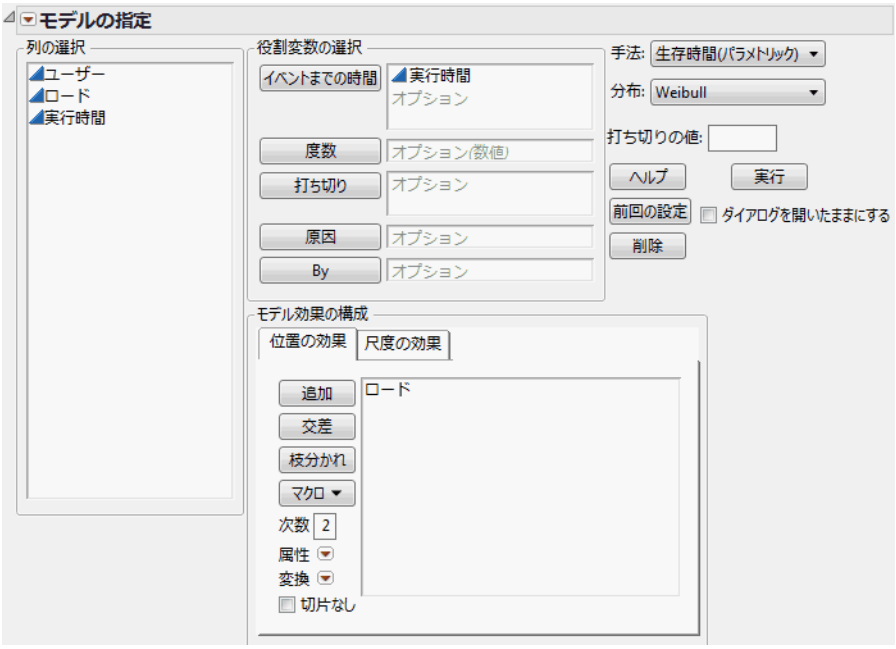
| ロード | 生存率 | 時間 | 下側95% | 上側95% |
|---|---|---|---|---|
| 5 | 0.1 | 571.21576 | 401.29076 | 813.09483 |

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 **11.4**「生存時間 ( パラメトリック ) のあてはめ」の起動ウィンドウ




**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。

**イベントまでの時間**　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示します。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**　観測値が打ち切られているかどうかを示す値を含む列を指定します。デフォルトでは、［打ち切り］列の「0」以外の値が、打ち切りデータを表します。通常、打ち切りは「1」に設定してください。デフォルトでは、「0」が打ち切りでないデータと認識されます。

**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。故障イベントは数値でもカテゴリカル（ラベル）値でもかまいません。

**By**　分類変数または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、位置と尺度の効果を指定します。「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』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** データに適した希望の応答分布を選択します。［すべての分布］オプションを選択すると、すべての分布があてはめられ、適合度が比較されます。

**打ち切りの値** ［打ち切り］列を選択した後、リストで打ち切りを示す値を選択します。欠測値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。

## 「生存時間のあてはめ(パラメトリック)」レポート

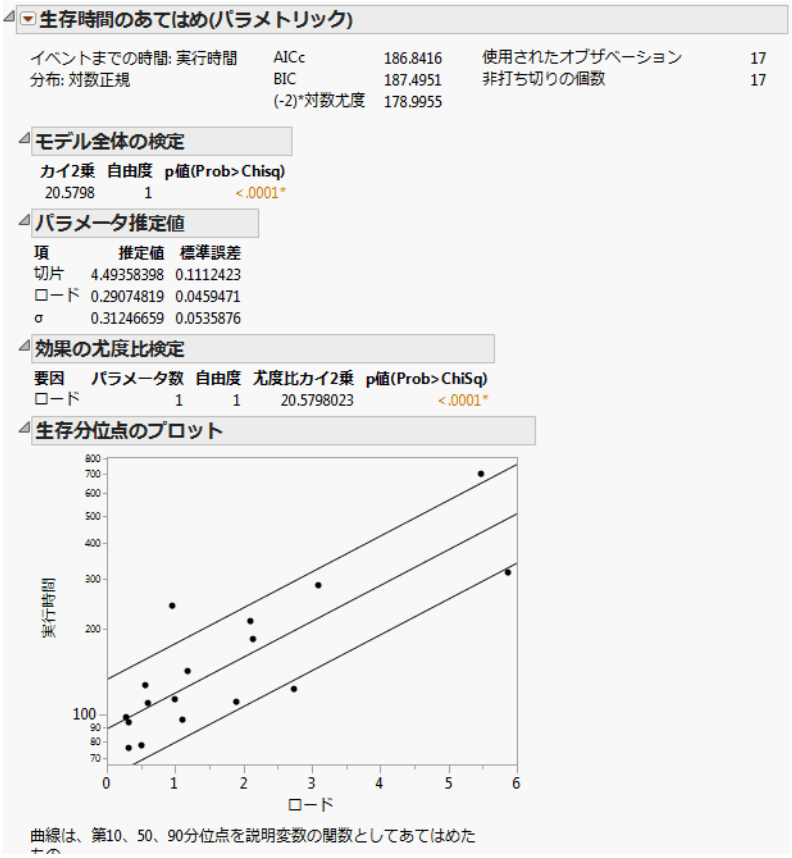
「生存時間のあてはめ(パラメトリック)」レポートには、次の情報が表示されます。

- レポートの上部には、あてはめたモデルに関する情報が表示されます。「イベントまでの時間」には、指定したY列の名前、「分布」には、あてはめられた分布が表示されます。「AICc」、「BIC」、「(-2)* 対数尤度」はすべて、モデル適合度の指標です。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」は、すべての説明変数を含むモデルをあてはめた場合と、説明変数がない切片項だけのモデルをあてはめた場合を比較したものです。

**注：**切片項しかない場合は、「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」レポートには、回帰パラメータの推定値が表示されます。
- 「効果の尤度比検定」では、あてはめたモデルの対数尤度を、モデルから該当する項を削除したときの対数尤度と比較しています。
- 「生存分位点のプロット」には、データ点と0.1、0.5、0.9分位点が表示されます。

図 **11.5**「生存時間のあてはめ(パラメトリック)」レポート



**生存時間のあてはめ(パラメトリック)**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| イベントまでの時間: 実行時間 | AICc | 186.8416 | 使用されたオブザベーション | 17 |
| 分布: 対数正規 | BIC | 187.4951 | 非打ち切りの個数 | 17 |
| | (-2)*対数尤度 | 178.9955 | | |

**モデル全体の検定**

| カイ2乗 | 自由度 | p値(Prob>Chisq) |
|---|---|---|
| 20.5798 | 1 | <.0001* |

**パラメータ推定値**

| 項 | 推定値 | 標準誤差 |
|---|---|---|
| 切片 | 4.49358398 | 0.1112423 |
| ロード | 0.29074819 | 0.0459471 |
| σ | 0.31246659 | 0.0535876 |

**効果の尤度比検定**

| 要因 | パラメータ数 | 自由度 | 尤度比カイ2乗 | p値(Prob>ChiSq) |
|---|---|---|---|---|
| ロード | 1 | 1 | 20.5798023 | <.0001* |

**生存分位点のプロット**



曲線は、第10、50、90分位点を説明変数の関数としてあてはめた

## 「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、モデルから該当する項を削除したときの対数尤度と比較されます。

**信頼区間**　プロファイル尤度法によって各パラメータの95%信頼区間が計算され、結果が「パラメータ推定値」表に表示されます。

---

**注：**有意水準は起動ウィンドウから変更可能です。95%がデフォルトの設定です。

---

**推定値の相関**　パラメータ推定値間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** パラメータ推定値間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** 説明変数（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（故障の累積確率）、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** 説明変数（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。

---

**注：**［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95%から変更できます。

---

**残差分位点プロット** $x$軸が残差、$y$軸がKaplan-Meier推定値の分位点を表すプロットが作成されます。区間打ち切りデータの場合は、中間点が使用されます。残差はCox-Snell残差の最も簡単なもので、観測された時間を、打ち切りデータも含めて、標準分布（たとえば、標準Weibull分布など）へと変換したものです。

**残差の保存** 残差を保存する新しい列が作成されます。

**分布プロファイル** 個々の説明変数と応答変数に対する故障率（故障の累積確率）の応答曲面を表示します。『プロファイル機能』を参照してください。

**分位点プロファイル** 説明変数と故障率（故障の累積確率）に対する応答変数の応答曲面を表示します。『プロファイル機能』を参照してください。

**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」**には、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が表示されます。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」**には、位置パラメータも、尺度パラメータも異なるモデルの確率プロットが表示されます。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」**には、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が表示されます。

**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、目的の分位点の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。

# 「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、対数正規、指数、Frechet、対数ロジスティック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、最尤法モデルをあてはめるための強力なツールとして使用できます。「非線形回帰」プラットフォームの詳細については、『発展的なモデル』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」のその他の例

ここでは、「生存時間（パラメトリック）のあてはめ」プラットフォームを使った例をさらに紹介します。

## 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するできません。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。

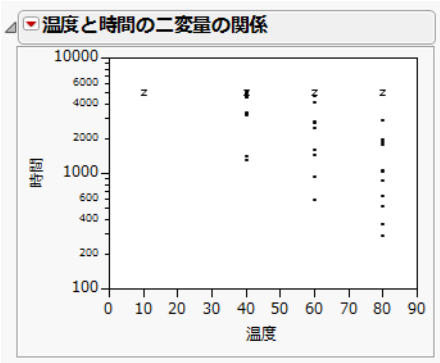
**注：**この「Devalt.jmp」サンプルデータは、Meeker and Escobar（1998 p. 493）から引用したものです。

1. 「Reliability」フォルダにある「Devalt.jmp」サンプルデータを開きます。

   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。

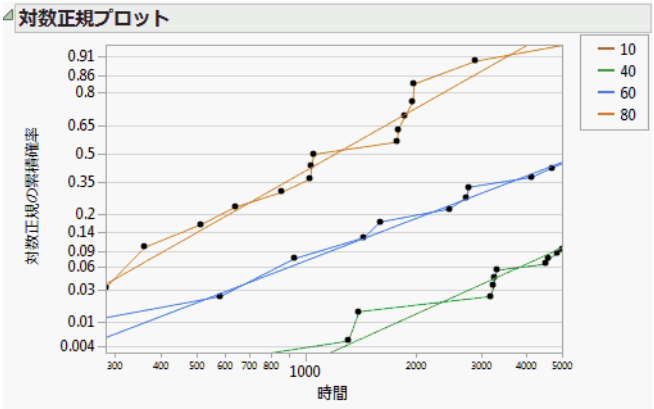
図 **11.6**「温度と時間の二変量の関係」プロット




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。

図 **11.7** 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、温度の説明変数を使ってモデルをあてはめます。

13. ［**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。

14.「**時間**」を［**イベントまでの時間**］に指定します。

15.「**x**」を選択し、［**追加**］をクリックします。

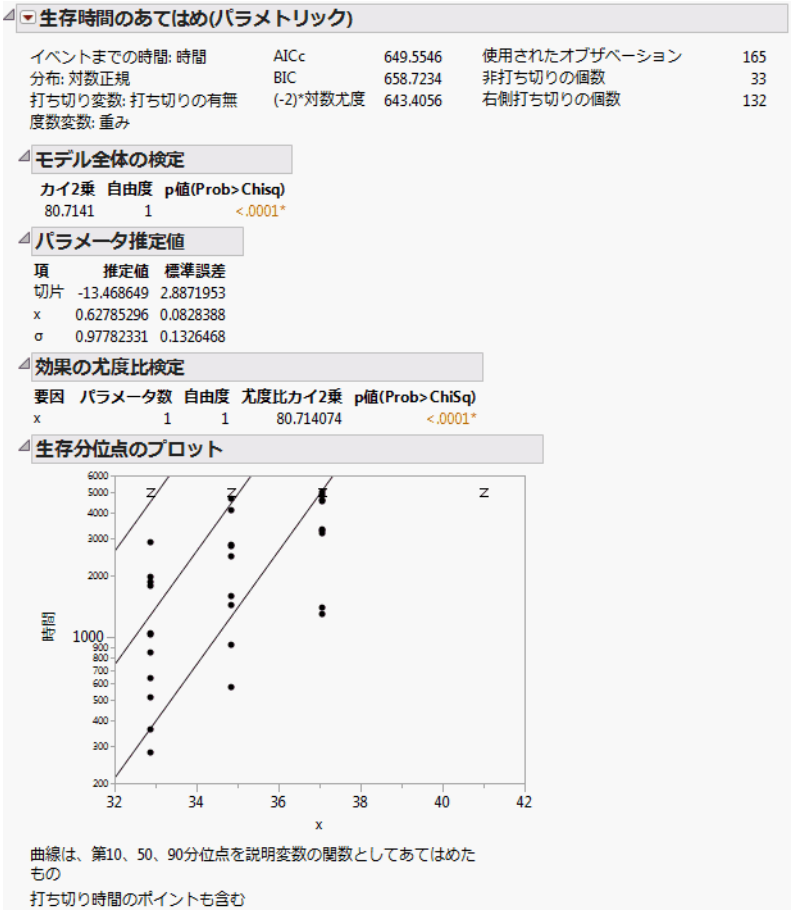
16.「**打ち切りの有無**」を［**打ち切り**］に指定します。

17.「**重み**」を［**度数**］に指定します。

18.「**分布**」を［**対数正規**］に変更します。

19.［**実行**］をクリックします。

図 **11.8**「Devalt」の生存時間のあてはめ（パラメトリック）レポート



**生存時間のあてはめ(パラメトリック)**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| イベントまでの時間: 時間 | AICc | 649.5546 | 使用されたオブザベーション | 165 |
| 分布: 対数正規 | BIC | 658.7234 | 非打ち切りの個数 | 33 |
| 打ち切り変数: 打ち切りの有無 | (-2)*対数尤度 | 643.4056 | 右側打ち切りの個数 | 132 |
| 度数変数: 重み | | | | |

**モデル全体の検定**

| カイ2乗 | 自由度 | p値(Prob>Chisq) |
|---|---|---|
| 80.7141 | 1 | <.0001* |

**パラメータ推定値**

| 項 | 推定値 | 標準誤差 |
|---|---|---|
| 切片 | -13.468649 | 2.8871953 |
| x | 0.62785296 | 0.0828388 |
| σ | 0.97782331 | 0.1326468 |

**効果の尤度比検定**

| 要因 | パラメータ数 | 自由度 | 尤度比カイ2乗 | p値(Prob>ChiSq) |
|---|---|---|---|---|
| x | 1 | 1 | 80.714074 | <.0001* |

**生存分位点のプロット**



曲線は、第10、50、90分位点を説明変数の関数としてあてはめたもの
打ち切り時間のポイントも含む

回帰によるあてはめのレポートが表示されます。

– 説明変数が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説明変数の関数として表したプロットが作成され、生存率0.1、0.5、0.9を示す線が表示されます。

– この例のように、説明変数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」データの説明変数は「**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。

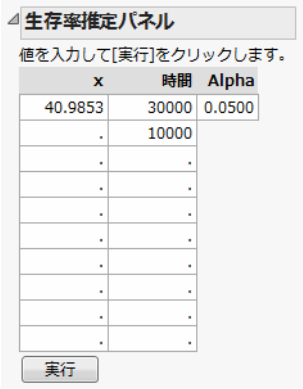
最後に、30000時間と10000時間に対し、温度を「10」度にした場合の生存率の推定値を計算します。

20. 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。

21.「生存率推定パネル」に図11.9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 **11.9** 生存率の推定




22.［**実行**］をクリックします。

図 **11.10** 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 | 0.02278 | 0.00243 | 0.11839 | 0.97722 |
| 40.9853 | 10000 | 0.00090 | 0.00004 | 0.01012 | 0.99910 |

「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

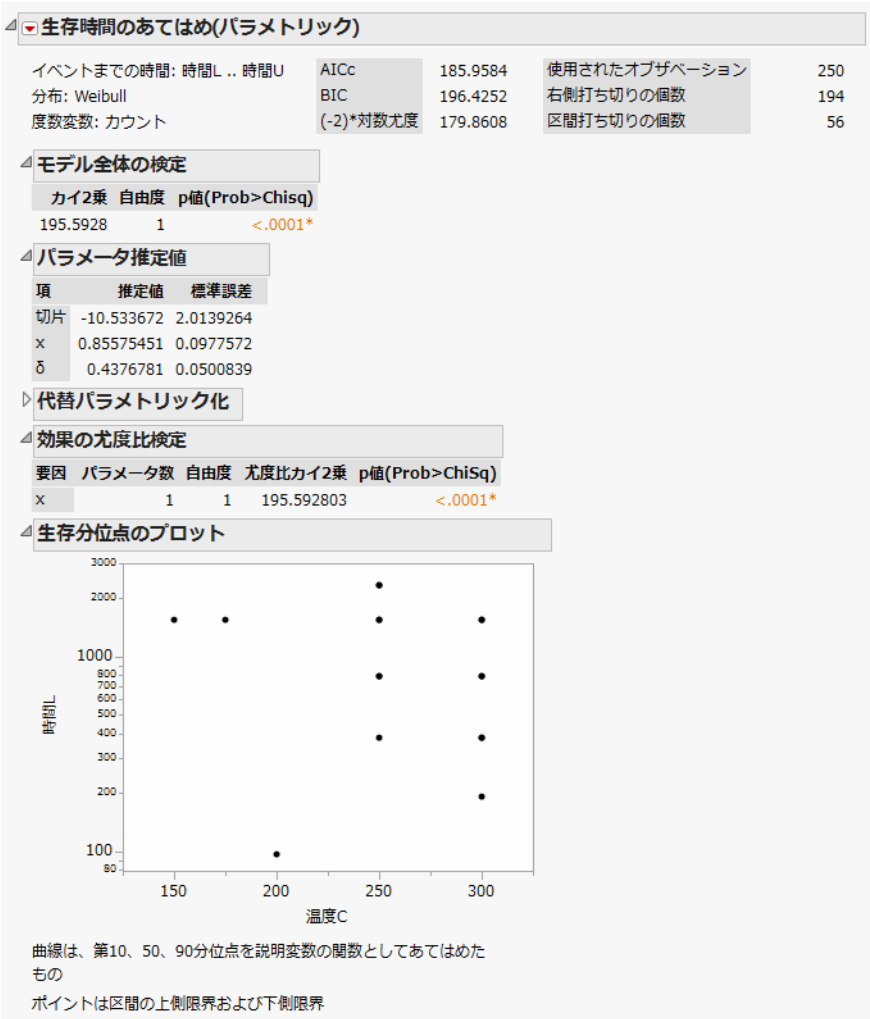
「ICdevice02.jmp」サンプルデータを取り上げて、区間打ち切りの例を見てみましょう。データには、各区間の下限と上限を表す2つのY変数があります。上限が欠測値になっている行は、右側打ち切りデータです。モデルには、故障時間の上限と下限を表す2つの*Y*変数を含めます。時間の上限が欠測値になっている行は、右側打ち切りデータです。

**注：**この「ICdevice02.jmp」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. 「Reliability」フォルダにある「ICdevice02.jmp」サンプルデータを開きます。

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 **11.11**「**ICDevice02**」のレポート



**生存時間のあてはめ(パラメトリック)**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| イベントまでの時間: 時間L .. 時間U | AICc | 185.9584 | 使用されたオブザベーション | 250 |
| 分布: Weibull | BIC | 196.4252 | 右側打ち切りの個数 | 194 |
| 度数変数: カウント | (-2)*対数尤度 | 179.8608 | 区間打ち切りの個数 | 56 |

**モデル全体の検定**

| カイ2乗 | 自由度 | p値(Prob>Chisq) |
|---|---|---|
| 195.5928 | 1 | <.0001* |

**パラメータ推定値**

| 項 | 推定値 | 標準誤差 |
|---|---|---|
| 切片 | -10.533672 | 2.0139264 |
| x | 0.85575451 | 0.0977572 |
| δ | 0.4376781 | 0.0500839 |

**代替パラメトリック化**

**効果の尤度比検定**

| 要因 | パラメータ数 | 自由度 | 尤度比カイ2乗 | p値(Prob>ChiSq) |
|---|---|---|---|---|
| x | 1 | 1 | 195.592803 | <.0001* |

**生存分位点のプロット**



曲線は、第10、50、90分位点を説明変数の関数としてあてはめたもの
ポイントは区間の上側限界および下側限界

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。

**注：**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 -(b0+b1*年齢+b2* 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. 「Reliability」フォルダにある「Tobit2.jmp」サンプルデータを開きます。
2. ［**分析**］>［**モデル化**］>［**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 **11.12**「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**

## 「Right-Censored」データ

前節で紹介したTobitモデルは、0以下の値が観測されていない正規分布モデルです。前節では、「非線形回帰」を使いましたが、ここでは「生存時間(パラメトリック)」を用います。「生存時間(パラメトリック)」でTobitモデルをあてはめるには、まず、データテーブルにて応答変数の指数をとって、かつ、左側打ち切りを表すために区間データとし、その後に、対数正規分布をあてはめます。

1. 「Reliability」フォルダにある「Tobit2.jmp」サンプルデータを開きます。
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. 「**YLow**」と「**YHigh**」を［**イベントまでの時間**］に指定します。
4. 「**年数**」と「**流動性**」を選択し、［**追加**］をクリックします。
5. 「**分布**」を［**対数正規**］に変更します。
6. ［**実行**］をクリックします。

図 **11.13** Tobitモデルの結果

**生存時間のあてはめ(パラメトリック)**

イベントまでの時間: YLow .. YHigh
分布: 対数正規

| | | | |
|---|---|---|---|
| AICc | 126.3186 | 使用されたオブザベーション | 20 |
| BIC | 127.6349 | 非打ち切りの個数 | 7 |
| (-2)*対数尤度 | 115.6519 | 左側打ち切りの個数 | 13 |

**モデル全体の検定**

| カイ2乗 | 自由度 | p値(Prob>Chisq) |
|---|---|---|
| 1.1325 | 2 | 0.5677 |

**パラメータ推定値**

| 項 | 推定値 | 標準誤差 |
|---|---|---|
| 切片 | 15.2771208 | 16.032721 |
| 年数 | -0.1340075 | 0.2189314 |
| 流動性 | -0.0451356 | 0.0582685 |
| σ | 5.56935051 | 1.7281446 |

**効果の尤度比検定**

| 要因 | パラメータ数 | 自由度 | 尤度比カイ2乗 | p値(Prob>ChiSq) |
|---|---|---|---|---|
| 年数 | 1 | 1 | 0.3931753 | 0.5306 |
| 流動性 | 1 | 1 | 0.57102176 | 0.4499 |

対数正規モデルの適合度と推定値がレポートに表示されます。

## 「非線形回帰」プラットフォームでのWeibull回帰モデル

この例では、「非線形回帰」プラットフォームを使って、Weibull分布、対数正規分布、指数分布をあてはめる方法を紹介します。なお、データには、名義変数「**セル**」などの説明変数もありますが、この例では、2つの説明変数しか用いない単純なモデルをあてはめます。

最尤推定の最適化は、モデルパラメータの初期値によって大きく左右されることがあります。最尤推定の良い初期値を求める1つの方法は、「非線形回帰」プラットフォームで、最小2乗推定値を求めてあげることです。以下では、まず、最小2乗推定値を求めています。

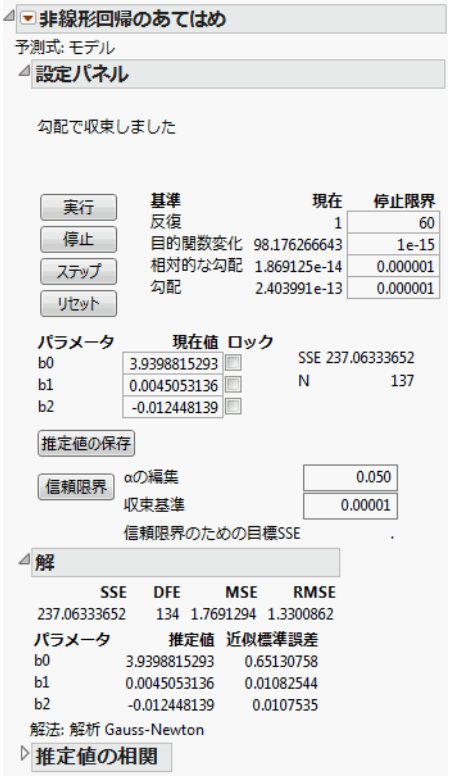
1. 「VA Lung Cancer.jmp」サンプルデータを開きます。

   モデル式と、各分布に対する損失関数はすでにデータテーブルに計算式として作成されています。**「モデル」**列には次のような残差を表すモデル式が入っています。

   Log(: 生存日数)-(b0+b1* 年齢 +b2* 月数)

2. ［**分析**］>［**モデル化**］>［**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. ［**OK**］をクリックします。
5. ［**実行**］をクリックします。

図 **11.14**「非線形回帰のあてはめ」設定パネルの初期パラメータ値




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 計算式が指定されています（「Weibull 損失関数」（253 ページ））。

最尤推定を行うには、次の手順に従います。

7. ［**分析**］>［**モデル化**］>［**非線形回帰**］を選択します。
8. 「**モデル**」を［**X, 予測式列**］に指定します。
9. 「**Weibull 損失関数**」を［**損失**］に指定します。
10. ［**OK**］をクリックします。

図 11.15 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 11.15 の右側のようになります。

図 **11.15** 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。

12. （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 **11.16**「解」レポート

**解**

| 損失 | DFE | 平均損失 | 平均損失平方根 |
|---|---|---|---|
| 227.61384948 | 133 | 1.7113823 | 1.3081981 |

| 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 | 5.613046552 | 0.67171997 | 4.31169667 | 6.96484024 |
| b1 | -0.012429709 | 0.01114031 | -0.0346969 | 0.00930037 |
| b2 | -0.01091692 | 0.010399 | -0.0289695 | 0.01220355 |
| sigma | 1.1599937996 | 0.07823465 | 1.0209347 | 1.33040517 |

解法: 解析 NR

**推定値の相関**

---

**注：**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、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、各分布の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**］変数に指定します。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。

### 指数損失関数、Weibull 損失関数、極値損失関数

「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「指数損失関数」、「Weibull 損失関数」、「極値損失関数」について解説します。これは、70 台のディーゼルファンを対象に、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。ファンは別々の時間に稼働し、応答は、ファンの故障時間か、打ち切りのある場合は稼働時間とします。

---

**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. 「Reliability」フォルダにある「Fan.jmp」データテーブルを開きます。

2. ［**分析**］>［**モデル化**］>［**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 **11.17** 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 |
|---|---|---|---|
| 135.17722247 | 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. 「Reliability」フォルダにある「Locomotive.jmp」サンプルデータを開きます。
2. ［**分析**］>［**モデル化**］>［**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. ［**実行**］をクリックします。
6. ［**信頼限界**］をクリックします。

図 **11.18**「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（自然対数）。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」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ケースの損失関数が定義されています。続いて、右側打ち切りの損失関数が`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」フォルダ内にあるテーブルからコピーして、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**」は故障時の年齢です。

### 指数損失関数

$$-\mathrm{If}\left(\begin{array}{ll} \text{打ち切りの有無}==0 & \Rightarrow -\mathrm{Log}(\mathrm{sigma})-\dfrac{\text{時間}}{\mathrm{sigma}} \\ \mathrm{else} & \Rightarrow -\left(\dfrac{\text{時間}}{\mathrm{sigma}}\right) \end{array}\right)$$

指数分布の特徴は、ある時点ごとの瞬間故障率（ハザード）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、ユニットのそれまでの試験参加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

$$-\mathrm{If}\left(\begin{array}{ll} \text{打ち切りの有無}==0 & \Rightarrow \dfrac{\text{モデル}}{\mathrm{sigma}}-\mathrm{Exp}\left(\dfrac{\text{モデル}}{\mathrm{sigma}}\right)-\mathrm{Log}(\mathrm{sigma}) \\ \mathrm{else} & \Rightarrow -\mathrm{Exp}\left(\dfrac{\text{モデル}}{\mathrm{sigma}}\right) \end{array}\right)$$

「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。ハザード関数は $t$=0 のときに 0 の値を取り、最大値まで増加した後、$t$ が大きくなるにつれて減少し、0 に近づきます。

### 対数正規損失関数

$$-\mathrm{If}\left(\begin{array}{ll} \text{打ち切りの有無}==0 & \Rightarrow -0.5*\left(\dfrac{\text{モデル}}{\mathrm{sigma}}\right)^2-0.5*\mathrm{Log}(2*\mathrm{Pi})-\mathrm{Log}(\mathrm{sigma}) \\ \mathrm{else} & \Rightarrow \mathrm{Log}\left(1-\mathrm{Normal\ Distribution}\left(\dfrac{\text{モデル}}{\mathrm{sigma}}\right)\right) \end{array}\right)$$

## 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。[**非線形回帰**] のダイアログボックスにて、これらの式を含んだ列を損失関数に指定してください。この損失関数における「モデル」の列は応答変数の残差です。この損失関数を用いる場合、[非線形回帰] のダイアログで、[$Y$, 応答変数] を指定する必要はありません。残差（「モデル」）の列を [予測式列] に、そして、この損失関数を含む列を [損失] に指定するだけで構いません。

### 対数ロジスティック損失関数

$$\mathrm{If}\left(\begin{array}{ll} \text{打ち切りの有無}==0 & \Rightarrow \dfrac{\text{モデル}}{\text{sigma}} - 2*\mathrm{Log}\left(1+\mathrm{Exp}\left(\dfrac{\text{モデル}}{\text{sigma}}\right)\right) - \mathrm{Log}(\text{sigma}) \\ \text{else} & \Rightarrow -\mathrm{Log}\left(1+\mathrm{Exp}\left(\dfrac{\text{モデル}}{\text{sigma}}\right)\right) \end{array}\right)$$

# 第 12 章

# 比例ハザードのあてはめ

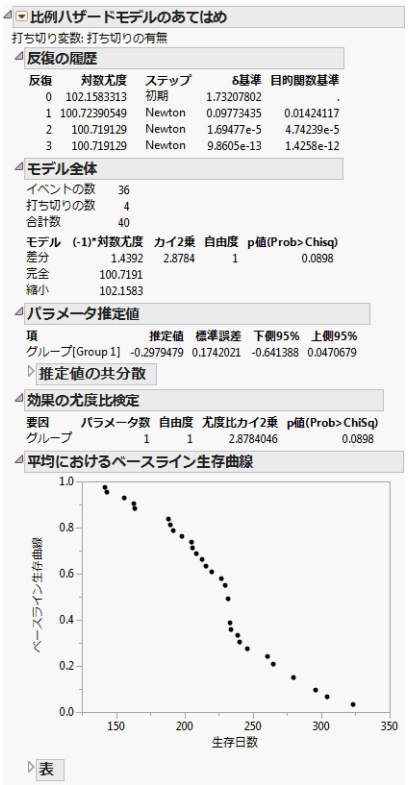
## 生存時間データにセミパラメトリックな回帰モデルをあてはめる

「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を扱うことはできません。

**注：**「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 **12.1**「比例ハザードのあてはめ」の例



**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

**反復の履歴**

| 反復 | 対数尤度 | ステップ | δ基準 | 目的関数基準 |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 102.1583313 | 初期 | 1.73207802 | . |
| 1 | 100.72390549 | Newton | 0.09773435 | 0.01424117 |
| 2 | 100.719129 | Newton | 1.69477e-5 | 4.74239e-5 |
| 3 | 100.719129 | Newton | 9.8605e-13 | 1.4258e-12 |

**モデル全体**

| | |
|---|---|
| イベントの数 | 36 |
| 打ち切りの数 | 4 |
| 合計数 | 40 |

| モデル | (-1)*対数尤度 | カイ2乗 | 自由度 | p値(Prob>Chisq) |
|---|---|---|---|---|
| 差分 | 1.4392 | 2.8784 | 1 | 0.0898 |
| 完全 | 100.7191 | | | |
| 縮小 | 102.1583 | | | |

**パラメータ推定値**

| 項 | 推定値 | 標準誤差 | 下側95% | 上側95% |
|---|---|---|---|---|
| グループ[Group 1] | -0.2979479 | 0.1742021 | -0.641388 | 0.0470679 |

**推定値の共分散**

**効果の尤度比検定**

| 要因 | パラメータ数 | 自由度 | 尤度比カイ2乗 | p値(Prob>ChiSq) |
|---|---|---|---|---|
| グループ | 1 | 1 | 2.8784046 | 0.0898 |

**平均におけるベースライン生存曲線**



**表**

# 目次

「比例ハザードのあてはめ」の概要 . . . . . 257
「比例ハザードのあてはめ」プラットフォームの例 . . . . . 257
2 水準におけるリスク比 . . . . . 259
「比例ハザードのあてはめ」プラットフォームの起動 . . . . . 260
「比例ハザードモデルのあてはめ」レポート . . . . . 261
「比例ハザードモデルのあてはめ」のオプション . . . . . 262
効果や水準が複数あるモデルの例 . . . . . 262
3 水準以上のときのリスク比 . . . . . 265

## 「比例ハザードのあてはめ」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。母集団の各メンバーの生存時間は、各メンバー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により求められると仮定されています（JMP では、時間に依存する説明変数は扱えません）。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（β）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。

$$\mathrm{H}(t) = \sum_{j:t_j < t} \frac{d_j}{\sum_{l \in R_j} e^{x_l \beta}}$$

応答に同じ値がある場合、つまりある時間イベントで 2 つ以上の故障がある場合は、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」（262 ページ）を参照してください。

1. 「Rats.jmp」サンプルデータを開きます。
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 **12.2**「Rats.jmp」データの「比例ハザードモデルのあてはめ」レポート

**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

**反復の履歴**

| 反復 | 対数尤度 | ステップ | δ基準 | 目的関数基準 |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 102.1583313 | 初期 | 1.73207802 | . |
| 1 | 100.72390549 | Newton | 0.09773435 | 0.01424117 |
| 2 | 100.719129 | Newton | 1.69477e-5 | 4.74239e-5 |
| 3 | 100.719129 | Newton | 9.8605e-13 | 1.4258e-12 |

**モデル全体**

| | |
|---|---|
| イベントの数 | 36 |
| 打ち切りの数 | 4 |
| 合計数 | 40 |

| モデル | (-1)*対数尤度 | カイ2乗 | 自由度 | p値(Prob>Chisq) |
|---|---|---|---|---|
| 差分 | 1.4392 | 2.8784 | 1 | 0.0898 |
| 完全 | 100.7191 | | | |
| 縮小 | 102.1583 | | | |

**パラメータ推定値**

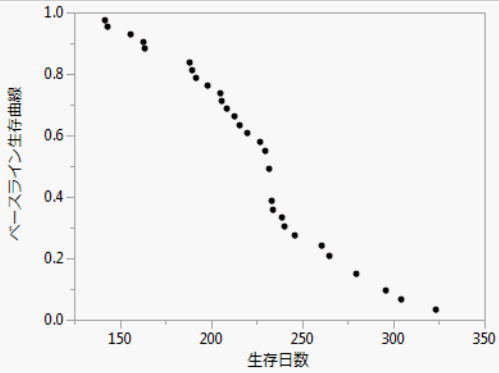
| 項 | 推定値 | 標準誤差 | 下側95% | 上側95% |
|---|---|---|---|---|
| グループ[Group 1] | -0.2979479 | 0.1742021 | -0.641388 | 0.0470679 |

**推定値の共分散**

**効果の尤度比検定**

| 要因 | パラメータ数 | 自由度 | 尤度比カイ2乗 | p値(Prob>ChiSq) |
|---|---|---|---|---|
| グループ | 1 | 1 | 2.8784046 | 0.0898 |

**平均におけるベースライン生存曲線**




**表**

「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」レポートでは、信頼区間にゼロが含まれていないことが、グループ間にα水準で有意な差があることを示します。また、「効果の尤度比検定」レポートでは、「モデル全体」表に表示されている、グループ間に差がないという帰無仮説は、**「グループ」**の回帰係数がゼロであるという帰無仮説と同じになります。

## 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」のリスク比が、「グループのリスク比」レポートに表示されます。図12.3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の指数を、「Group 1」のパラメータ推定値の指数で割った値が、リスク比となります。

次の点を念頭に置いてください。

- 「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12.2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。
- 「逆数」には、「1÷リスク比」で計算される値が表示されます。

**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、「Group2」/「Group1」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

このリスク比は、「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 **12.3**「グループのリスク比」表

**リスク比**

**グループのリスク比**

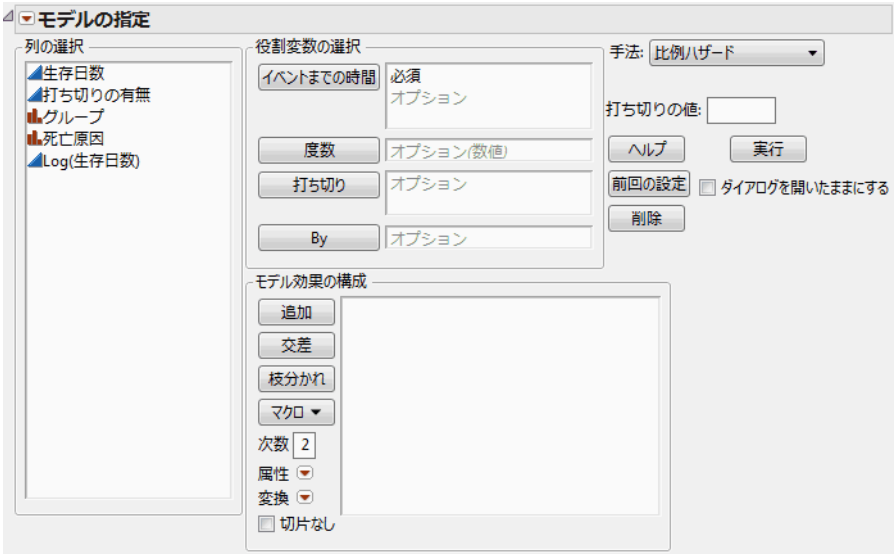
| 水準1 | /水準2 | リスク比 | p値(Prob>Chisq) | 下側95% | 上側95% |
|---|---|---|---|---|---|
| Group 2 | Group 1 | 1.8146558 | 0.0898 | 0.9101592 | 3.606635 |
| Group 1 | Group 2 | 0.5510687 | 0.0898 | 0.2772668 | 1.0987089 |

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」（265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 **12.4**「比例ハザードのあてはめ」の起動ウィンドウ




**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示します。

**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**　分類変数または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』を参照してください。

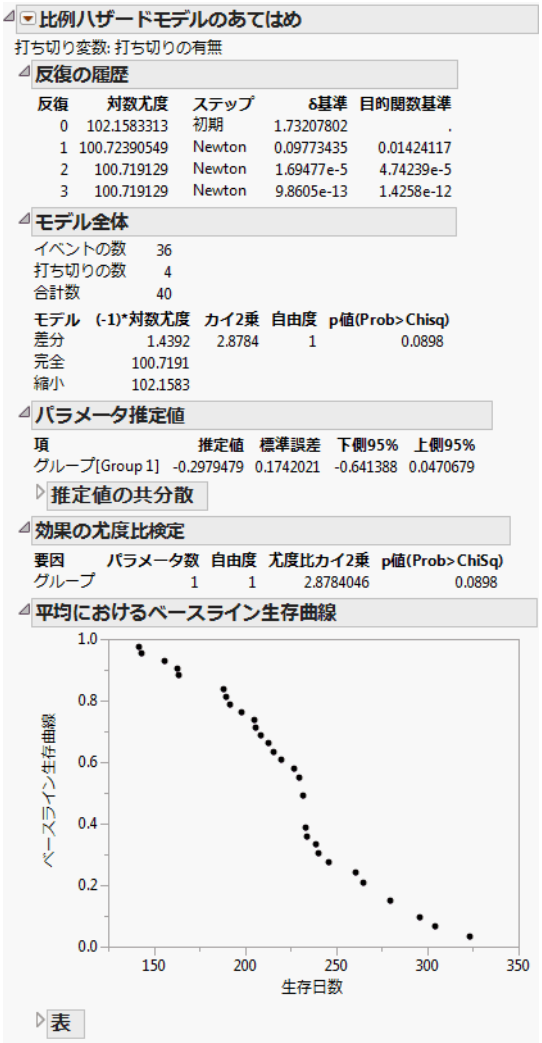
**手法**　あてはめ方法を指定します。この章の分析を行うには、必ず［比例ハザード］を選択してください。

**打ち切りの値**　［**打ち切り**］列の値の中で、打ち切りの観測値に相当する値を入力します。

# 「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12.5のようなレポートが表示されます。

図 **12.5**「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のあてはめ**

打ち切り変数: 打ち切りの有無

**反復の履歴**

| 反復 | 対数尤度 | ステップ | δ基準 | 目的関数基準 |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 102.1583313 | 初期 | 1.73207802 | . |
| 1 | 100.72390549 | Newton | 0.09773435 | 0.01424117 |
| 2 | 100.719129 | Newton | 1.69477e-5 | 4.74239e-5 |
| 3 | 100.719129 | Newton | 9.8605e-13 | 1.4258e-12 |

**モデル全体**

| | |
|---|---|
| イベントの数 | 36 |
| 打ち切りの数 | 4 |
| 合計数 | 40 |

| モデル | (-1)*対数尤度 | カイ2乗 | 自由度 | p値(Prob>Chisq) |
|---|---|---|---|---|
| 差分 | 1.4392 | 2.8784 | 1 | 0.0898 |
| 完全 | 100.7191 | | | |
| 縮小 | 102.1583 | | | |

**パラメータ推定値**

| 項 | 推定値 | 標準誤差 | 下側95% | 上側95% |
|---|---|---|---|---|
| グループ[Group 1] | -0.2979479 | 0.1742021 | -0.641388 | 0.0470679 |

**推定値の共分散**

**効果の尤度比検定**

| 要因 | パラメータ数 | 自由度 | 尤度比カイ2乗 | p値(Prob>ChiSq) |
|---|---|---|---|---|
| グループ | 1 | 1 | 2.8784046 | 0.0898 |

**平均におけるベースライン生存曲線**



**表**

**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)* 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、「グループ間には生存曲線の差がない」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**　データ内の各イベントの実行時間における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。

**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( 推定値 )、「範囲リスク比」は exp[ 推定値*($x_{Max}$ - $x_{Min}$)] 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おい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、無作為割付けの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。この試験の目的は、処置方法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**」）に着目して評価することです。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、「**セル**」、「**処置**」、「**前治療**」はカテゴリカル（名義尺度）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。

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、モデルがあてはめられ、また、リスク比が計算されます。

1. 「VA Lung Cancer.jmp」データテーブルを開きます。
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. 赤い三角ボタンのメニューから［**リスク比**］を選択します。
8. （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、「モデル全体」の開閉ボタンをクリックしてレポートを閉じます。

図 **12.6** 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

### 反復の履歴

### モデル全体

### 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 |

### 推定値の共分散

### 効果の尤度比検定

| 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* |

### 平均におけるベースライン生存曲線

### リスク比

#### 単位リスク比

連続変数が1単位だけ変化した場合

| 項 | リスク比 | 下側95% | 上側95% | 逆数 |
|---|---|---|---|---|
| 年齢 | 0.991487 | 0.9739 | 1.010136 | 1.0085861 |
| 月数 | 0.999908 | 0.979971 | 1.016244 | 1.000092 |
| KPS | 0.967905 | 0.957488 | 0.978403 | 1.0331596 |

#### 範囲リスク比

連続変数が範囲全体で変化した場合

| 項 | リスク比 | 下側95% | 上側95% | 逆数 |
|---|---|---|---|---|
| 年齢 | 0.669099 | 0.288517 | 1.606371 | 1.4945466 |
| 月数 | 0.992119 | 0.175518 | 3.998028 | 1.0079435 |
| KPS | 0.05484 | 0.020935 | 0.143244 | 18.23482 |

#### セルのリスク比

| 水準1 | /水準2 | リスク比 | p値(Prob>Chisq) | 下側95% | 上側95% |
|---|---|---|---|---|---|
| Large | Adeno | 0.4544481 | 0.0096* | 0.2502748 | 0.824169 |
| Small | Adeno | 0.7176217 | 0.2325 | 0.4199109 | 1.2418767 |
| Small | Large | 1.579106 | 0.0825 | 0.9433383 | 2.6898478 |
| Squamous | Adeno | 0.3047391 | <.0001* | 0.1683479 | 0.5501962 |
| Squamous | Large | 0.6705696 | 0.1591 | 0.3845788 | 1.1714599 |
| Squamous | Small | 0.4246514 | 0.0014* | 0.2444471 | 0.7213156 |
| Adeno | Large | 2.2004712 | 0.0096* | 1.2133433 | 3.9956087 |
| Adeno | Small | 1.3934918 | 0.2325 | 0.8052329 | 2.3814575 |
| Large | Small | 0.6332697 | 0.0825 | 0.3717682 | 1.060065 |
| Adeno | Squamous | 3.2814957 | <.0001* | 1.8175335 | 5.9400784 |
| Large | Squamous | 1.4912695 | 0.1591 | 0.8536357 | 2.600247 |
| Small | Squamous | 2.3548727 | 0.0014* | 1.3863557 | 4.090864 |

#### 処置のリスク比

| 水準1 | /水準2 | リスク比 | p値(Prob>Chisq) | 下側95% | 上側95% |
|---|---|---|---|---|---|
| Test | Standard | 1.3363418 | 0.1612 | 0.8907214 | 2.0096664 |
| Standard | Test | 0.7483115 | 0.1612 | 0.497595 | 1.1226855 |

#### 前治療のリスク比

| 水準1 | /水準2 | リスク比 | p値(Prob>Chisq) | 下側95% | 上側95% |
|---|---|---|---|---|---|
| Yes | No | 1.0750063 | 0.7562 | 0.6742989 | 1.6798514 |
| No | Yes | 0.9302271 | 0.7562 | 0.5952908 | 1.4830218 |

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。

## 3水準以上のときのリスク比

図12.6には、連続尺度の効果（「**年齢**」、「**月数**」、「**KPS**」）と名義尺度の効果（「**セル**」、「**処置**」、「**Prior**」）のリスク比が表示されています。ここでは、連続尺度の効果「**年齢**」と、4水準の名義尺度の効果（「**セル**」）に対する結果を説明します。

「VA Lung Cancer.jmp」サンプルデータの連続尺度の効果「**年齢**」のリスク比は、次式で計算されます。

**単位リスク比**

$$\exp(\beta) = \exp(-0.0085494) = 0.991487$$

**範囲リスク比**

$$\exp[\beta(\text{xmax} - \text{xmin})] = \exp(-0.0085494 \times 47) = 0.669099$$

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。

$$\text{Large/Adeno} = \exp(\beta_{\text{Large}})/\exp(\beta_{\text{Adeno}}) = \exp(-0.2114757)/\exp(0.57719588) = 0.4544481$$

$$\text{Squamous/Adeno} = \exp[-(\beta_{\text{Adeno}} + \beta_{\text{Large}} + \beta_{\text{Small}})]/\exp(\beta_{\text{Adeno}})$$

$$= \exp[-(0.57719588 + (-0.2114757) + 0.24538322)]/\exp(0.57719588) = 0.3047391$$

なお、「逆数」には、これらのリスク比の逆数（つまり、1÷リスク比）が表示されます。

# 付録 A

## 参考文献


Abernethy, Robert B. (1996) *The New Weibull Handbook*. Published by the author: 536 Oyster Road North Palm Beach, Florida 33408.

Akaike, H. (1974), "Factor Analysis and AIC," *Pschychometrika*, 52, 317–332.

Akaike, H. (1987), "A New Look at the Statistical Identification Model," *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19, 716–723.

Andrews, D.F. and A. M. Herzberg (1985), *Data: A Collection of Problems from Many Fields for the Student and Research Worker*. New York: Springer-Verlag.

Burnham and Anderson. (2004), *Model Selection And Multimodel Inference: A Practical Information Theoretic Approach*. Springer, New York.

Chow, Shein-Chung. (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-statistical Methodology*. 34 (2): 187–220, 1972.

Crow, L. H., (1975), "Reliability Analysis for Complex, Repairable Systems," AMSAA Technical Report No. 138, Dec. 1975, *U.S. 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*, Feb. 1982, 24:1, 67-72.

Guo, H., Mettas, A., Sarakakis, G., and Niu, P. (2010), "Piecewise NHPP Models with Maximum Likelihood Estimation for Repairable Systems," *Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, 25-28 Jan. 2010 Proceedings, San Jose, CA.

Kalbfleisch, J.D. and Prentice, R.L. (1980), *The Statistical Analysis of Failure Time Data*, New York: John Wiley and Sons.

Kalbfleisch, J.D. and Prentice, R.L. (2002), 2nd Edition, *The Statistical Analysis of Failure Time Data*, New York: John Wiley and Sons, pp 71-73.

Kaminskiy, Mark. P. and Krivtsov, Vasiliy. V., "A Simple Procedure for Bayesian Estimation of the Weibull Distribution," I*EEE Transactions on Reliability*, Vol. 54, No. 4, December 2005.

Lawless, J.F. (1982), *Statistical Models and Methods for Lifetime Data*, New York: John Wiley and Sons.

Lawless, J.F. (2003), *Statistical Models and Methods for Lifetime Data, 2nd Edition*, pp. 33–34. New York: John Wiley and Sons.

Lee, L. and Lee S. K., (1978), "Some Results on Inference for the Weibull Process," *Technometrics*, Feb. 1978, 20:1, 41-45.

Meeker, W. Q. and Escobar, L. A., (1998), *Statistical Methods for Reliability Data*, John Wiley & Sons.

MIL-HDBK-00189 (1981), *Military Handbook: Reliability Growth Management*, U.S. Department of Defense, Washington DC.

Nelson, W.B. (1982), *Applied Life Data Analysis*, New York: John Wiley and Sons.

Nelson, W.B. (1990), *Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data analysis*, New York: John Wiley and Sons.

Nelson, W.B. (2003), *Recurrent Events Data Analysis for Product Repairs, Disease Recurrences, and Other Applications*, Philadelphia: Society for Industrial Mathematics.

Prentice, R.L. (1973), "Exponential survivals with censoring and explanatory variables," *Biometrika*, 60:2, 279–288.

Rigdon, S. E. and Basu, A. P., (2000), *Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems*, John Wiley & Sons.

Tobias, P.A. and Trindade, D.C. (1995), *Applied Reliability, 2nd Edition.* New York: Van Nostrand Reinhold Company.

Tobias, P.A. and Trindade, D.C. (2012), *Applied Reliability, 3rd Edition.* Taylor and Francis Group, LLC, CRC Press.

# 索引
## 信頼性 / 生存時間分析


### 数字
-2 対数尤度 39

### A
AICc 40
Appliance.jmp 225
Arrhenius 華氏 63
Arrhenius ケルビン 63
Arrhenius 摂氏 63

### B
BCI 200
BIC 40
Bladder Cancer.jmp 97
Blenders.jmp 40
Box-Cox 63
BrakeReliability.jmp 183

### C
comptime.jmp 235
Cramér-von Mises 検定 169
Crow AMSAA モデル 164
Crow-AMSAA
　バイアス修正済み β 170
　パラメータ推定値 185
Crow-AMSAA 修正最尤法 170
　最終時点の平均故障間隔 172
　適合度 171
　パラメータ推定値 185

### D
Dependence Diagram（依存関係図）187
Devalt.jmp 241
DF 230
DS Fréchet 202
DS Weibull 202
DS 対数正規 202
DS ロジスティック 202
Duane プロット 162

### E
Engine Valve Seat.jmp 89

### F
Fan.jmp 250
Fréchet 46
Frechet のあてはめ 82

### I
icdevice02.jmp 244

### J
JMP スターター 22
JMP スターターウィンドウを閉じる 22
JMP チュートリアル 20

### K
Kaplan-Meier 曲線を表示 217
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 229
K 値 203

### L
Locomotive.jmp 251

### M
MCF 信頼限界 93

MCFの差のプロット 93, 98
MCFプロット 93

## N

Newton 120
Nonlinear Model Library（非線形モデルライブラリ）122
　カスタマイズ 123
Normal Distribution 253
N値 203

## P

p値(Prob>ChiSq) 230

## R

Rats.jmp 214, 257

## T

Tobit2.jmp 246, 247
Tobitモデルの例 246
TurbineEngineDesign1.jmp 153, 154
TurbineEngineDesign2.jmp 180

## W-Z

WeiBayes分析 222
Weibull
　損失関数 247, 250, 253
　統計的詳細 45
　パラメータ推定値表 218
　分布 213, 220
Weibullのあてはめ 82, 218
Weibullプロット 218
Wilcoxon 230
Xの役割 246, 248, 249
Y, イベント時の年齢 92
Y, イベントまでの時間の役割 30, 62
Y軸の逆転コマンド 217

## ア

あてはめた分布のグラフ 218
アレニウスモデル 241

## イ

位置 63
位置と尺度 63
一変量の分布プラットフォーム 252
イベント-時間応答データ 211, 213
イベント度数, 信頼性成長 158
イベントプロット 31, 90, 93
イベントまでの時間 237, 260
イベントまでの時間, 信頼性成長 157

## ウ

打ち切りデータ, 信頼性成長 159
打ち切りの値 31, 62
打ち切りのあるデータ 211, 213, 241, 246, 250

## オ

オプション
　信頼性ブロック図 197

## カ

カイ2乗 230, 262
開始ノード 189
拡張された一般化ガンマ（GenGamma）51
カスタム損失関数 249
加速寿命試験モデル 59
可動最小要素数 203
観測データレポート, 信頼性成長 161

## キ

逆数 63
競合する原因 219
共変量 247, 255
極値損失関数 250
極値パラメータ推定値表 218
曲面プロットの表示 82

## ク

区間打ち切りデータ, 定義 32
区間打ち切りのあるモデル 244
区間の種類 39
区分Weibull-NHPP変化点検出 179

組み合わせの表示 217
グループ間での検定テーブル 230
グループ変数 93

## ケ

計画図の表示 197
計画の比較を表示 197, 199
経済学モデル 246
計算式, 非線形回帰パラメトリック生存時間 248
原因 237
原因座標の保存 223
検定 230

## コ

効果の尤度比検定表 262
故障原因の役割 30
故障データ 211
故障率の信頼曲線 218
故障率プロット 217

## サ

最小極値（SEV）48
最小極値のあてはめ 82
再初期化 Weibull-NHPP 177
再生モデルによる分析 87, 89
最大極値（LEV）49
最大極値のあてはめ 82
最尤法 241, 250, 252
削除 198, 201
作成, 信頼性ブロック図 189
残差の保存 240
残差分位点プロット 240

## シ

時間加速の基準を設定 82
時間分位点の推定 219, 236, 240
閾値つき Frechet 53
閾値つき Weibull 52
閾値つき対数正規 52
閾値つき対数ロジスティック 53
閾値パラメータ 52
指数 49, 201
指数損失関数 247, 250, 253
指数パラメータ推定値表 218
指数プロット 218
指数分布 213
指数分布のあてはめ 218
システムの信頼性 187
実行 248, 249
終了ノード 189
寿命の一変量の統計的詳細 43
寿命の一変量プラットフォーム 25, 54
寿命の二変量 62
　変換 62
準 Newton BFGS 120
準 Newton SR1 120
条件リスク比 257
信頼区間 239
信頼区間の表示 217
信頼限界 249
信頼水準の変更 39, 82
信頼性, システム 187
信頼性成長
　オプション 163
　概要 153
　起動 157
　データ構造 159
　統計的詳細 185
　例 153, 180, 183
　レポート 161
信頼性成長の平均故障間隔 162
信頼性成長プラットフォーム 157
信頼性ブロック図 187
　新しいデザインの追加 198
　新しいライブラリ項目 198
　オプション 197
　削除 198
　作成 189
　部品の整列 192
　部品の接続 193
信頼性ブロック図ウィンドウ
　システムダイヤグラム 195
　図形ツールバー 195
　デザインパネル 195
　プレビューウィンドウ 195

プロファイルパネル 195
ライブラリパネル 195
ワークスペースパネル 195
信頼性ブロック図プラットフォーム 187
信頼性プロファイル 200
信頼性予測
オプション 149
起動 142
例 139, 141
レポート 144, 149
信頼度の代数式
ログに出力 210
信頼度の代数式をログウィンドウに表示 201
信頼領域の表示 39

## ス

ズームアウト 201
ズームイン 201
ズーム率 201
推定値の共分散 240
推定値の相関 239
推定値の保存 219, 248
すべてのDS分布のあてはめ 39
すべての非負分布のあてはめ 39
すべての分布のあてはめ 39, 82

## セ

正規 47
正規のあてはめ 82
正規分布 252, 253
生存曲線の表示 39
生存時間(パラメトリック)のあてはめ 233
生存時間プロット 216
生存時間分析プラットフォーム 89, 93
概要 213
再生モデルによる分析 89
パラメトリック 235
非線形パラメトリック 241, 252, 257
比例ハザード 257, 265
例 89, 214, 219, 225, 257, 265
生存率の信頼曲線 218
生存率の推定 219, 240, 244
設定 201
設定項目 202
設定項目
設定 202
線形変換 63
選択された列をカテゴリに展開する 122
選択した要素を縦に配置 192, 201
選択した要素を横に配置 193, 201

## ソ

損失 249, 250
損失関数 241, 250
損失率 230
損失列 254

## タ

対数正規 44
対数正規損失関数 247, 250, 253, 252
対数正規のあてはめ 82
対数正規プロット 218
対数正規分布 213
対数正規分布のあてはめ 218
対数変換 63
対数ロジスティック 46
対数ロジスティック損失関数 253
対数ロジスティックのあてはめ 82
タイムスタンプ, 信頼性成長 158
タブ形式で結果を表示 39, 82
ダミー変数への変換 247

## チ

チュートリアル 20
チュートリアルの例
Tobitモデル 246
一変量（Kaplan-Meier法）の生存時間分析 214, 219, 225
再生モデルによる分析 89
非線形パラメトリック生存時間 246, 252
比例ハザード生存時間 257, 265

## ツ

ツールヒント 21

## テ

テーブル内の打ち切りデータ 32
定数打ち切りと定時打ち切り, 信頼性成長 159
デザイン項目の新規作成 198
デザイン項目の追加 197
デザインパネル 195
電圧 63
点の表示 39, 82, 122, 217

## ト

統計量の表示 39
同時信頼区間を表示 217
度数の役割 31, 62, 215, 237, 260

## ネ

ネバダ形式の保証データ 142

## ノ

ノンパラメトリック 44, 203

## ハ

バイアスを持つ平均推定値 231
ハザード関数 257
　比例ハザードを参照
ハザード関数の表示 39
ハザード比 257
ハザードプロファイル 200
パラメータ推定値テーブル 262
パラメトリックな回帰 235
反復履歴レポート 261

## ヒ

比較
　分布関数プロットの重ね合わせ 199
　余寿命分布関数プロットの重ね合わせ 199
比較の規準 39
非線形 250
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 252, 257
　例 246, 250, 251
非線形回帰プラットフォーム 246, 248, 252, 254
　生存時間モデル 241
　例 247, 252
非線形テンプレートフォルダ 250
左側打ち切り 246
左側打ち切りデータ, 定義 32
非表示
　プレビューウィンドウ 195
開く
　JMP スターターウィンドウ 22
比例ハザード 257, 265
比例ハザードのあてはめ 255

## フ

部品
　K out of N 196
　基本 196
　合流点 196
　図形ツール 196
　直列 196
　分布プロパティ 201
　並列 196
部品の除去 203
部分分布プロファイル 38
プレビュー 201
プレビューウィンドウ 195
　非表示 195
プロットのオプション 217
プロファイルパネル 195
プロファイル, 部分分布 38
分位値表 229
分位点関数の表示 39
分位点のあてはめ線 217
分位点の信頼曲線 217
分位点の信頼区間を塗る 218
分位点の中間ステップ 217
分位点プロファイル 200
分位点をつなぐ 217
分布関数プロットの重ね合わせ 197, 199
分布の比較 33
分布プロパティ 201
　DS Fréchet 202
　DS Weibull 202
　DS 対数正規 202

DS ロジスティック 202
Fréchet 201
Weibull 201
一般化ガンマ 201
指数 201
対数正規 201
対数ロジスティック 201
ノンパラメトリック 202
分布プロファイル 200
分布プロファイルの表示 205

## ヘ

平均故障時間 200
平方根変換 63
変換
寿命の二変量 62

## ミ

右側打ち切り 213
右側打ち切りデータ, 定義 32
密度プロファイル 200

## メ

メニューのヒント 21

## モ

モデル全体表 258, 262
モデルライブラリ 122

## ヤ

役割
打ち切り 30, 215, 237, 260
グループ変数 215
予測変数 246, 248, 249

## ユ

尤度比検定 239

## ヨ

要約表 229
余寿命の Birnbaum 要素重要度 200
余寿命分布関数プロットの重ね合わせプロファイル 197, 199, 200
予測列 250, 254

## ラ

ライブラリ項目の新規作成 198
ライブラリ項目の追加 197
ライブラリパネル 195
ラベル, システム ID 93
ラベルの役割 31, 62

## ル

累積イベント数グラフ, 信頼性成長 162

## レ

劣化分析
安定性試験 110
破壊劣化試験 110
反復測定劣化 110
レポートの MCF プロット 90

## ロ

ログランク 230
ロジスティック 48
ロジスティックのあてはめ 82
ロジット変換 63

## ワ

ワークスペースパネル 195