

6

リスク工学シリーズ

確率論的リスク解析の 数理と方法

工学博士 金野 秀敏 著

コロナ社

「リスク工学シリーズ」編集委員会

編集委員長 岡本 栄司 (筑波大学)

委 員 内山 洋司 (筑波大学)

(五十音順) 遠藤 靖典 (筑波大学)

鈴木 勉 (筑波大学)

古川 宏 (筑波大学)

村尾 修 (筑波大学)

(所属は 2008 年 2 月現在)

刊行のことば

世界人口は現在 65 億人を超え、わずか 100 年で 4 倍にまで増加し、今も増え続けています。この間の経済成長は、日本を例にとると 44 倍にまで達しています。現代社会は約 80 万年の人類史上から見ると凄まじい成長を遂げており、その成長はグローバル化の進展と技術革新によって加速されています。

膨張し続ける社会の人間活動によって世界の持続可能な発展が懸念されています。地球規模ではエネルギーの大量消費による地球環境問題や資源ナショナリズムが台頭し始めています。一方、国レベルでは都市化の進展によって交通渋滞、地震や洪水被害の拡大、水・環境汚染といった問題が発生しています。また、変化の速さがあまりにも速いために経済や技術の格差が社会にもたらされています。そういったひずみは世界各国にさまざまなリスクを生み出しています。グローバル経済による金融リスク、グローバル化した人や物の移動による BSE や鳥インフルエンザなどの感染症リスク、情報化によるサイバーリスクなど人為的なリスクも広がっています。リスクの不確実性と影響の大きさは増大する傾向にあり、それぞれが複雑に絡み合っています。

世界が持続可能な発展を遂げていくためには、地球規模かつ地域で直面しているさまざまなリスクを解決していくための処方箋を何枚も何枚もつくり、解決に向けて行動していかなければなりません。また、多様なリスクを科学的・工学的な方法により解明できる能力をもった研究者や技術者の養成も求められています。

そういった社会のニーズに応えるために、筑波大学では 2002 年に全国の大学で初めてリスク工学専攻を設置しました。専攻の教育目標として、① リスク工学の解析と評価のための基礎理論と情報処理技術の習得、② 現実のリスク問題

についての豊富な知識の習得，③ リスク問題に対して広い視野と強いリーダーシップをもって問題設定から解決までの一連のプロセスを理解し，具体的な解決手段を考案・開発する能力育成，を掲げています。設立から6年が経ちカリキュラムも次第に充実してきており，これを機会に，本専攻で実施されている教育内容を本学以外の多くの学生や研究者にも役立たせたいと考えました。

本シリーズ発行の目的は，社会のリスク問題を工学の立場から解決していくことに関心のある人々に役立つテキストを世に出すことです。本シリーズは全10巻から構成されています。1巻から4巻まではリスク問題を総論的に捉えており，リスク工学の勉強を登山に例えれば，1巻は「登山の楽しさ」，2巻は「どんな山があるのか」，3巻は「山に登るための道具」，そして4巻は「実際に登るときの道具の使い方」に対応しています。5巻から10巻までは各論として，「トータルリスクマネジメント」，「環境・エネルギーリスク」，「サイバーリスク」，「都市リスク」の四つの専門分野からリスク工学の基礎と応用を幅広く紹介しています。

本シリーズは，大学生や大学院修士課程の学生はもとより，リスクに関心のある研究者や技術者，あるいは一般の人々にも興味をもっていただけるよう工夫した画期的なものです。このシリーズを通じて，読者がリスクに関する知識を深め，安全で安心した社会をどのように築いていけばよいかを考えていただければ幸いです。

2008年2月

リスク工学専攻長 内山 洋司

ま え が き

本書は確率論的リスク解析の概論を学んだ読者がさらに進んで、定量的なりスク解析を実行するための数理的な方法を提供すべく企画した。

従来の確率論的リスク解析の標準的な教科書には、確率過程としてポアソン過程のみが紹介されている。しかし、現実のデータを眺めてみると、ポアソン過程でうまく記述される典型例はむしろ少ない。「大きな地震の発生後に余震の発生率が時間とともに低くなっていくこと」、「株や為替の取引数や価格変動が休日明けと週末では異なること」などを考えてもわかるように、事象の発生率が、時間変化する非定常ポアソン過程となっている例が多い。また、「インフルエンザの患者数の発生頻度が罹患者の個体数と発生からの時間の両方に依存すること」や、「混雑しているインターネットサイトではアクセスしている人の数や時間帯によってアクセス頻度が変化すること」から、一般化ポリア過程などで記述すべき状況が数多く存在することにも気が付く。

そこで本書では、積極的にこのような非定常性や記憶効果のある場合の解析法を紹介して、現代的なりスク解析と今後の方向性を示す試みをしている。また、数理科学的なアプローチを用いて、統計科学の解析に物理的な中身を入れるべく、非線形確率過程との対応関係も盛り込むように心掛けた。日本の人口の超長期的記述や超長期予測を考えてみても、定数係数のモデルではなく、変数係数のモデルを使って環境変動の経年（経時）変化を取り入れることが必要不可欠である。

リスク評価を、損失余命や絶滅確率を使って定量評価することが日常的に行われるようになってきたが、これらの定量評価の基礎となるのは生成・死滅過程である。今後の展開を予想して、これらの数学的な基礎も記載してある。

さらに、従来、確率変数の独立性を前提とした議論が数多くなされてきてい

るが、現実の問題では変数間に従属性が存在することが多いので、従属解析の試みが数多く検討されるようになってきている。このような事象を数理的に明確に扱うために多変量の非正規分布や裾の厚い非正規分布をはじめ、コンピュータなどの裾従属性を明瞭^{めいりょう}に取り扱える数学的な道具が必要になってくる。本書ではこれらの解析のための基礎や関連した「極値統計の考え方」も紹介している。また、数式の導出がすこし難解と思われる箇所は、付録に導出法を説明してある。

本書がリスク解析を志す若い方の理解を助け、リスク解析の今後の発展に少しでも寄与することを期待する。

2010年8月

金野 秀敏

目 次

《第1部 基礎編》

1. 数理的基礎概念との関係

1.1 確率論的リスク解析	1
1.2 非線形, 非定常, 非正規, 非マルコフ	2
1.3 数理モデル構造	2
1.4 逆問題の解法	2
1.5 リスク解析で使われる変数	3
1.6 本書の目的	3

2. 離散変数の確率過程

2.1 均一ポアソン過程	5
2.2 不均一ポアソン過程	6
2.3 複合ポアソン	6
2.4 その他のさまざまなポアソン過程	7
2.5 一般化ポリア過程	7
2.5.1 ユール・ファリー過程	8
2.5.2 ポリア過程	9
2.6 さまざまな生成過程の平均と分散	9
2.7 生成過程から生成・死滅過程へ	11

3. 連続変数の確率過程

3.1 正規過程	12
3.2 対数正規過程	13
3.3 超ガンマ過程	14
3.3.1 ガンマ過程	15
3.3.2 ワイブル過程	15
3.3.3 ガンベル過程	16
3.4 指数過程	16
3.5 一般化コーシー過程	17
3.6 レビー過程	18
3.7 確率過程の多様性	22
3.8 累積分布関数と密度関数	23

4. 確率分布とパラメータ推定

4.1 分布を情報エントロピーと変分原理で定める	26
4.1.1 正規分布	26
4.1.2 一般化コーシー分布	28
4.1.3 その他の分布	30
4.2 ベイズの定理とベイズ推定	30
4.2.1 ベイズの定理	30
4.2.2 ベイズ推定	31
4.3 尤度と最尤推定	32
4.4 モーメント法	34
4.5 混合分布とパラメータ推定	35

4.6 EM アルゴリズム	36
---------------	----

5. 寿命の数理

5.1 ワイブル解析	37
5.2 さまざまな方法	38
5.3 打ち切りがあるときの取扱い	39
5.4 さまざまな寿命分布	40
5.4.1 正規寿命	40
5.4.2 対数正規寿命	40
5.4.3 ガンマ寿命	40
5.4.4 超ガンマ寿命	41
5.4.5 混合分布	42
5.5 信頼度関数, 危険度関数, 生存関数	43
5.6 損失余命	44
5.7 絶滅確率	46

6. 極値の理論

6.1 極値理論と応用の背景	49
6.2 最大/最小値の分布と期待値	50
6.2.1 標本最大値の分布と期待値	51
6.2.2 最小値の分布と期待値	52
6.2.3 m 番目の順序統計量の分布と期待値	53
6.2.4 確率表現関数	55
6.3 極値の極限分布	55
6.3.1 最大値の極限分布	56

6.3.2	最小値の極限分布	58
6.4	一般化極値分布	58
6.5	一般化パレート分布	60
6.6	m 番目の順序統計量の超過確率	61
6.7	ま と め	63

7. ロジスティック回帰分析

7.1	多重リスク因子の概念	64
7.2	多重ワイブル解析	65
7.3	多重ロジスティック回帰分析	67
7.4	解析理論の発展可能性	70

8. 多変量リスク因子の従属性

8.1	リスク因子の従属性	71
8.2	2変量分布と従属性	72
8.3	従 属 故 障	75
8.3.1	ベータ因子モデル	76
8.3.2	多重ギリシャ文字モデル	77
8.3.3	アルファ因子モデル	77
8.3.4	数値確率評価	78
8.3.5	パラメータの推定	78
8.4	競合リスク解析	79
8.5	コピュラ	79
8.5.1	コピュラの定義	80
8.5.2	コピュラの性質 (1) 裾依存性	81

8.5.3	コピュラの性質 (2) 順位相関	82
8.5.4	コピュラのいくつかの例と裾依存性	82
8.5.5	パラメータ推定	85
8.5.6	コピュラの適用例	88

《第2部 応用編》

9. 感染症の流行過程とリスク解析

9.1	感染症流行の力学モデル	89
9.1.1	SIR モデルの変数の縮約	90
9.1.2	ロジスティック近似	91
9.1.3	流行の動態の厳密解	94
9.1.4	力学モデルの精緻化	94
9.2	確率 SIR モデルと最尤推定	94
9.2.1	確率 SIR モデル	94
9.2.2	初期段階での単純生成・死滅過程	95
9.2.3	単純伝染過程	96
9.2.4	マルチンゲール理論と計数過程	97
9.3	現実問題に適用するための拡張	99
9.3.1	潜伏期	99
9.3.2	2次感染パタンの異質性	99
9.3.3	年齢構成	99
9.3.4	実効再生産数	99
9.3.5	individual-based model (ibm)	100
9.4	今後の展開	100

10. 発がんの数理モデルとリスク評価

10.1	研究の背景	101
10.1.1	年齢別がん死亡率	101
10.1.2	発がん過程のモデル	102
10.2	アーミテージ・ドールモデルとその一般化	103
10.2.1	一般論	103
10.2.2	大量一時被曝	105
10.2.3	事故後の継続的長期被曝	106
10.2.4	喫煙, アスベスト, 化学物質被曝	106

11. 突然死のリスクとモデルおよび予知

11.1	突然死の背景	107
11.2	突然死のマーカー	108
11.3	心室頻脈・細動のモデル	110
11.3.1	アルキメデスのらせん	110
11.3.2	興奮波の不安定性と非線形モード	110
11.3.3	回転らせん運動の動的モデル	111
11.4	今後の展開	113

12. 認知症の発症過程とリスク解析

12.1	認知症脳波の数理モデル	114
12.2	局所標本エントロピー	115
12.3	位相速度の分布	118

12.4 今後の展開	120
------------	-----

13. 余震の発生過程とリスク解析

13.1 地震の発生度数	121
13.2 宇津の公式	122
13.3 余震活動の数学的記述	123
13.4 ETASモデル	125

14. スペースシャトル事故のリスク解析

14.1 事故の背景	130
14.2 ロジスティック回帰分析	133
14.3 モデル選択による結果の違い	134
14.4 今後の展開	135

15. 海洋構造物の極値応答の推定

15.1 荒れた海のモデル	136
15.2 海洋構造物の振動モデル	138
15.3 極値応答の推定と予測	140
15.4 今後の展開	143

16. 原子炉出力の発振現象とリスク解析

16.1 研究の背景	144
16.2 ゆらぎ信号の解析方法	145

16.2.1	確率複素ギンスブルグ・ランダウ方程式	145
16.2.2	動力学パラメータの推定	147
16.2.3	雑音源強度の推定	149
16.2.4	独立成分の分離	149
16.3	中性子ゆらぎへの適用	150
16.3.1	振幅の空間従属性	150
16.3.2	位相の従属性	151
16.3.3	独立な非線形基準モード	153
16.4	非線形基準モードに関する議論	154
付	録	156
引用・参考文献		167
索	引	171

《第1部 基礎編》

1

数理的基礎概念との関係

ここでは、本書で述べられている確率論的リスク解析が、どのような数理的な基礎概念と関係しているかを簡単に紹介する。これらの基礎概念は、第1部 基礎編（1章～8章）と第2部 応用編（9章～16章）の随所に表れる。

1.1 確率論的リスク解析

確率論的リスク解析 (probabilistic risk analysis, PRA) に関連した従来の工学における分野は、安全工学 (safety engineering), 信頼性工学 (reliability engineering), 品質管理 (quality control), オペレーションズ・リサーチ (OR) などであろう。システムの巨大化や複雑化に伴い事故や故障の重度が増したために、これらの名称に代えた現代流の名称としてリスク解析 (risk analysis) やリスク工学 (risk engineering) という言葉が好んで使われるようになった。

特に、重大事故、災害や故障が発生する割合はまれであり、ニュートン力学や単相の流体力学のように精緻な予測をすることはできない。これは多くの不確定要素があり、その不確定性の穴を要素還元論的に埋めることは本質的にできないからである。それゆえ、できるだけ客観的な判断をする助けとなる確率論や統計学の知識を総動員することが必要であり、実際、これらは定量化にとって不可欠な道具となっている。

1.2 非線形, 非定常, 非正規, 非マルコフ

確率論的リスク解析が対象にするのは、さまざまな分野における複雑な現実の問題（複雑系と総称される明確に定義できない系）である。通常、学部講義では、記憶がなく、線形性、定常性、正規性を持つ独立な現象や事象の解析方法が教えられている。しかし、現実の問題は、記憶があり、非線形性、非定常性、非正規性を持ち、従属性のある現象や事象の範疇^{ちゅう}に分類されることが多い。

1.3 数理モデル構造

本書では、第1部で確率論的リスク解析に現れるさまざまなモデルの理論的背景や数理構造の基本事項を整理して提示する。第2部で応用解析として現代的なトピックを取り上げ、具体的な応用にかかわる諸問題について解説していく。本書には数式がたくさん出てくるが、それはリスクを計算するための公式集を与えるためではなく、「リスクを発見」するための道具とその使い方を示すためである。

1.4 逆問題の解法

確率論的リスク解析の問題には、順問題と逆問題の二種類がある。順問題（forward problem）とはモデルや基本法則を基礎として演繹^{えんぎ}的に問題を解くアプローチをさす。一方、逆問題（inverse problem）とは観測データをもとにモデルや法則を推定する帰納的な推論のアプローチをさす^{1)†}。

通常広く行われているのは後者の逆問題を解くアプローチであり、昔から知られている例は、地震の観測データから震源地や震度などを推定したり、放射線CTのデータから人体の内部構造を推定する問題などであろう。現実のデー

† 肩付き番号は巻末の引用・参考文献を示す。

タに根ざした逆問題は情報が得にくかったり、喪失したり、雑音に汚染されたりして、ほとんどが、いわゆる**不適切問題**となっている。すなわち、不確実性存在下で、「失われた情報を補完するさまざまな仮定の下に」問題が解かれている。

また、リスク解析でも順問題的なアプローチを行う場合もあるが、対象となるシステムはきわめて複雑で多くの不確定要素を含んでいる。したがって、ニュートン力学やシュレディンガー方程式を基礎とした第一原理計算アプローチは実行可能でなく、順問題的なアプローチは限定的であることが多い。

よって本書では、逆問題的なアプローチに主眼をおき、逆問題の解法と帰納的推論を支援する道具としての確率論的リスク解析の、数理的基礎と応用のつながりを解説する。

1.5 リスク解析で使われる変数

リスク解析で使用される変数は、不確実性を含む変数であり確率的な取扱いが必須となる。この確率変数の時間変動は、数学の分野では確率過程と呼ばれる。リスク解析では、**リスク要因** (risk factor) と呼ばれることが多い。また、**危険要因** (hazardous factor) とリスク要因とを明確に区別して認識しておく必要がある。すなわち、危険要因があれば、それが、ただちにリスク要因になるわけではなく、危険要因がどのように働いたときにリスク要因となるかは、危険要因が置かれている環境に依存して決まる。

1.6 本書の目的

本書の目的は「リスク解析の哲学的な基礎」をベッドフォードとクックによる『確率論的リスク解析』^{2), 3)} や中西準子による『環境リスク学』⁴⁾、『環境リスク論』⁵⁾ などで学んだ読者のために、リスク解析で使われている確率過程、確率論、統計学のモデルの数理物理的応用への橋渡しをすることである。本書を通読し、モデル化の考え方や使われているモデルの再検討の際の参考にしてい

ただきたい。執筆中につねに意識したのは物理学者リチャード・ファインマン (Richard P. Feynman) によるつぎの言葉である。

When using a mathematical model, careful attention must be given to uncertainties in the model. (数理モデルを使うときには、そのモデルの不確定性に細心の注意を払うべきである。) (Personal observations of the reliability of the Shuttle, Rogers-commission, Appendix F, 1988).

2

離散変数の確率過程

工業プラントや機械システムなどで発生する事故や故障，地震や台風などの自然災害，生体システムでの病気発症などの，事象の発生数や発生時刻を記録することによって，解析対象の特性を定量的に推定したいとき，本章で述べる離散変数の確率過程が使われる。

2.1 均一ポアソン過程

確率論的リスク解析（PRA）でよく用いられる最も基本的な確率過程は，つぎのポアソン過程（Poisson process）である。

$$\frac{d}{dt}p(n, t) = \lambda p(n-1, t) - \lambda p(n, t) \quad (2.1)$$

ここで， $p(n, t)$ は時刻 t に n 個の個体（事象）が存在する確率を表す。発生率 λ は定数となっている。空間的な不均一性は考えておらず，システム全体の個体数や事象数を問題にしているので点過程（point process）に分類される。下記に示されるポアソン過程の変種との違いを明確にするため，均一ポアソン過程（homogeneous Poisson process）とも呼ばれる。この微差分方程式の初期条件 $p(n, 0) = \delta_{n,0}$ の下での解は，次式で与えられる。

$$p(n, t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} \exp(-\lambda t) \quad (2.2)$$

これは最も基本的かつ重要な式なので，標準的教科書には必ず記述がある。リスク解析でもランダムな稀少事象の発生を端的に表す数理モデルの一つとして重要である。しかし，現実のデータを詳細に解析してみると，短い時間スケー

ルではポアソン過程のようにみえても、長い時間スケールではつぎの節に示す不均一ポアソン過程となっていることがよくある。

2.2 不均一ポアソン過程

不均一ポアソン過程 (inhomogeneous Poisson process) は発生率が定数でなく時間の関数になっている場合である⁶⁾。

$$\frac{d}{dt}p(n, t) = \lambda(t)p(n-1, t) - \lambda(t)p(n, t) \quad (2.3)$$

これは非定常ポアソン過程 (nonstationary Poisson process) とも呼ばれる。この微差分方程式の解としての確率密度関数は母関数法を用いて簡単に解くことができ、その初期条件 $p(n, 0) = \delta_{n,0}$ の下での解は、次式で与えられる。

$$p(n, t) = \frac{(\Lambda(t))^n}{n!} \exp(-\Lambda(t)) \quad (2.4)$$

ここで

$$\Lambda(t) = \int_0^t d\tau \lambda(\tau) \quad (2.5)$$

である。

バス・タクシー乗り場に来る客の到着率、株や為替の売買のタイミング、インターネットにおける到着リクエストなどは時間帯によって変わり、これらの事象も不均一（非定常）ポアソン過程に従うことが知られている。本書の第2部（応用編）において、発がん過程の数理モデル化との関連で（10章）、大地震発生後の余震現象の数学的記述と予測との関連で（13章）、海洋構造物の海洋状態に依存した極値応答との関連で（15章）、不均一ポアソン過程の応用例が示される。

2.3 複合ポアソン

単位期間 t 内の事象生成数 $N(t)$ はポアソン過程に従うとする。これと独立

索引

【あ】	ガンベル分布	最大値の期待値 51
赤池の情報量基準 124	16, 57, 58, 142	最大値の密度関数 51
アリエフ・バンフィロフ モデル 112	ガンマ分布 15, 40	【し】
アルキメデスのらせん 110	【き】	閾値条件 91
アルファ因子モデル 77, 78	危険度関数 44, 123	自己位相速度 151
安全工学 1	危険要因 3	事後確率 31
【い】	稀少事象近似 75	指数分布 35
位相速度 115	期待生存時間の短縮 44	事前確率 30
一様振動解 146	帰納的推論 3	実効再生産数 100
一般化極限分布 59	基本再生産数 92	従属故障 75
一般化コーシー過程 20	逆問題 2	寿命の数理 37
一般化コーシー分布 17, 35	極 値 16	順問題 2
一般化ポリア過程 7	——の理論 49	情報エントロピー 26
一般化レーリー分布 147	均一ポアソン過程 5	消滅確率 46
移流エックハウス不安定 111	【く】	印付きポアソン過程 7, 79
【う】	グーテンベルグ・リヒター則 121	浸 食 130
宇津の公式 122	クレイトンコピュラ 84	心電図 108
【お】	【け】	信頼性解析 37
オペレーションズ・リサーチ 1	ケンドールのタウ 82	信頼性工学 1
【か】	【こ】	信頼度関数 44
回転らせん波カオス 107	交互脈不安定 111	【す】
確率表現関数 50	コーシー分布 20	スーパースプレッダー 99
確率密度関数 12, 23	コピュラ 79, 81	スピアマンのロー 82
確率論的リスク解析 1	混合分布 35	【せ】
確率 SIR モデル 96, 97	混合ワイブル分布 42	正規過程 12
片側指数分布 17	ゴンベルツ方程式 13	正規コピュラ 82
感染症流行 89	【さ】	正規分布 13, 35, 40
ガンベルコピュラ 84	最小値の期待値 53	正規分布海洋モデル 18, 137
	最小値の分布 52	生成過程 11
		生成・死滅過程 11, 46
		生存関数 44
		絶対エックハウス不安定 111

絶滅確率	46	判別分析	67		
セミパラメトリック法	36			【め】	
潜伏期	99			メアングリング	111
		【ひ】		芽細胞発がんモデル	103
【そ】		ピアソンの相関係数	79		
		非線形基準モード	153	【ゆ】	
損失余命	44	非線形シュレディンガー		有色ポアソン過程	7, 79
		方程式	143	尤度	32
【た】		非線形プリンク	153	ユール・ファリー過程	8
対数正規分布	13, 14, 40	非定常の確率 SIR モデル			
多細胞モデル	103	非定常ポアソン過程	6, 104	【よ】	
多重ギリシャ文字モデル		標本エントロピー	115	横方向不安定	111
	77, 78	品質管理	1		
多重代入法	39			【ら】	
多重リスク因子	65	【ふ】		ラグランジュの未定乗数法	
多重リスク因子間の従属性		フィッツフー・南雲方程式			26
解析	71	フォッカー・プラנק方程式		ランジュバン方程式	12
多段階発がんモデル	103		12	【り】	
		吹き抜け	131	リスク解析	1
【ち】		不均一ポアソン過程	6	リスク工学	1
遅延電位	108	複合ポアソン過程	7	リスクの層別化	108
超過相対危険度	105	複合ワイブル分布	42	リスク要因	3
超ガンマ型分布	41	複素ギンスブルグ・ランダウ		理由不十分の原則	31
超ガンマ分布	14	方程式	145	両側指数分布	16
		不適切問題	3	【る】	
【て】		フラクタル次元	74, 115	累積故障確率	43
定常回転らせん波モード	111	フリーク波	143	累積ハザード関数	44
点過程	5	フリッシュ分布	58	累積分布関数	23, 50
		プロビット回帰モデル	68		
【と】		分枝過程	99	【れ】	
独立成分の分離	149			レビー拡散	18
		【へ】		レビー分布	21
【ね】		平均故障時間	38	【ろ】	
熱損傷	131	平均寿命	38	ロジスティック回帰モデル	
年齢別がん死亡率	101	平均余命	45		68, 133
		ベイズ統計学	31	ロジスティック近似	93
【の】		ベータ因子モデル	76, 78	ロジスティック分布	25
脳磁波	114			【わ】	
脳波	114	【ほ】		ワイブル解析	37
		ポアソン過程	5		
【は】		ポアソン分布	10		
パスカル分布	10	ポリア過程	9		
発症リスクの確率評価	67				
パレート分布	35				

ワイブル分布 15, 58

<p>【E】</p> <p>EM アルゴリズム 36</p> <p>ETAS モデル 125</p> <p>【I】</p> <p>ibm 100</p> <p>【M】</p> <p>m 番目の順序統計量 61</p> <p>【O】</p> <p>O-リング 130</p>	<p>【P】</p> <p>PR 間隔 108</p> <p>PR 部 108</p> <p>【Q】</p> <p>QRS 群 108</p> <p>QT 間隔 108</p> <p>【S】</p> <p>SIS モデル 96</p> <p>ST 部 108</p>	<p>【T】</p> <p>T-交互脈 109</p> <p>t コピュラ 83</p> <p>~~~~~</p> <p>2次元の一般化コーシー分布 126</p> <p>2重指数分布 16</p> <p>2変量対数正規分布 73</p> <p>2変量ベータ分布 73</p> <p>2変量 t 分布 74</p>
---	--	--

—— 著者略歴 ——

1973 年 北海道大学工学部原子工学科卒業
1975 年 北海道大学大学院工学研究科修士課程修了
1978 年 北海道大学大学院工学研究科博士課程単位取得退学
1980 年 工学博士（北海道大学）
1980 年 筑波大学助手
1983 年 筑波大学講師
1995 年 筑波大学助教授
2000 年 筑波大学教授
現在に至る

確率論的リスク解析の数理と方法

Methods of Mathematical Science in Probabilistic Risk Analysis

© Hidetoshi Konno 2010

2010 年 10 月 28 日 初版第 1 刷発行

検印省略

著者 こんのひでとし
金野秀敏
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 三美印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社
CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-07926-5 (河村) (製本: 愛千製本所)

Printed in Japan



無断複写・転載を禁ずる

落丁・乱丁本はお取替えいたします