確率・統計から始める エンジニアのための信頼性工学

身近な故障から宇宙開発まで

山本 久志

秋葉 知昭・竹ヶ原春貴 深津 敦・古井 光明 _(共著)

【執筆者一覧】

山本 久志 (東京都立大学) 1,5章

秋葉 知昭 (千葉工業大学) 2, 3章

竹ヶ原春貴 (東京都立大学)4章

深津 敦 (宇宙航空研究開発機構) 7,8章

古井 光明 (東京工科大学)6章

まえがき

本書は、大学の工学系統の学部の信頼性工学の授業のテキストとして用いられることを想定し作成しました。信頼性工学は信頼性の向上を目指す工学です。信頼性向上の取組みは対象の製品やシステムにより千差万別であり、信頼性工学の技術を有効に活用するためには、対象となる製品やシステムなどについての固有の技術や知識に精通することが重要です。また、信頼性工学は実学ですので、理論から実務まで幅広く学ぶことが大事です。

本書の執筆者は、長年、経営工学系の学科、電子情報システム工学科、機械 工学科、航空宇宙工学科、化学工学科など複数の学科にて信頼性工学の授業を 行ってきた教員や企業において信頼性向上の実務を経験してきた技術者であ り、信頼性工学の理論から実務までを対象としたテキストを執筆するのに適し た陣容と考えます。

信頼性工学の手法をうまく使用するためには、①その手法の背景にある考え (理論)を知り、②どのようにして実際の現場に使用されているかを知ること が重要です。そのことを踏まえ、本書は大きく理論編 $(2, 3, 4, 5 \hat{\tau})$ と実 務編 $(6, 7, 8 \hat{\tau})$ に分けています。

2章は、理論編の基礎的な事項について紹介していますが、すでに確率の基本的なことを理解している読者にとっては、必要に応じて読み返してもよい内容となっています。3章は、故障データの解析を行うために有用な統計手法について、理論を交え実務での使い方を重点に紹介しています。4章は、システムの信頼度とシステムを構成する要素の信頼度の関係を明らかにし、高信頼性システムの設計方法について紹介しています。5章では、修理を伴うシステムの評価方法について述べています。

6章以降は実務編として構成しています。6章では、信頼性設計と評価のた

めに有用な FMEA (故障モード・影響解析) などの手法について紹介しています。7章は、信頼性工学と深い関係にある安全工学の概要、そして、8章では、本書で述べた手法の適用事例として日本の宇宙開発における安全、信頼性設計の取組みを紹介しています。

本書の構成は、理論から実務まで広い内容を網羅するという少し欲張りな内容となっています。本書で信頼性や安全性に興味を持っていだいた読者は一歩進んでほかの専門書に進んでいただければと思います。また、製品やシステムの信頼性の向上のためには対象となる製品やシステム固有の技術や知識を持ったうえで、本書で紹介した信頼性工学の技術や知識がより有用となります。ぜひとも工学系統の多くの分野の学生に読んでいただき、高信頼度の製品やシステムの開発の一助になることを期待します。また、本書が信頼性工学への入門書として読者の一助となれば幸いです。

最後に、著者の遅筆にもかかわらず最後までお付き合いいただいたコロナ社の皆さん、また忙しい研究時間を割いて、本書の原稿、おもに 2 章、4 章と 5 章の設問を確認していただいた、東京都立大学博士研究員 周 蕾氏に感謝します。

2021年5月

著者一同

目 次

1. 信頼性と信頼性工学

	<u> [性工学を学ぶことの重要性</u>
1.2 信賴	§性とその三つの要素 ·······2
コラム	1:総合信頼性
1.3 信賴	賃性と品質管理・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
1.4 信賴	賃性と固有分野の技術
1.5 本	書 の 構 成
章末	問 題
	2. 信頼性工学の基礎数理
2.1 確	率 の 基 礎10
	事象と標本空間10
	確率の公理
2.1.3	確率の公理
2.1.3	確率の公理
2.1.3 2.1.4	確率の公理
2.1.3 2.1.4 2.2 密度	確 率 の 公 理
2.1.3 2.1.4 2.2 密度 2.2.1	確 率 の 公 理 ·········· 13 加 法 定 理 ········ 13 条件付き確率と乗法定理 ······ 14 E関数と分布関数 ······ 17
2.1.3 2.1.4 2.2 密度 2.2.1 2.2.2	確 率 の 公 理
2.1.3 2.1.4 2.2 密度 2.2.1 2.2.2 2.2.3	確 率 の 公 理
2.1.3 2.1.4 2.2 密度 2.2.1 2.2.2 2.2.3 2.2.4	確 率 の 公 理

iv		
コラム	、2: ワイブル分布の特徴・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	. 28
2.3 信	頼性の評価指標・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	30
2.3.1	アイテムの修理を考えない場合における信頼性評価	. 30
2.3.2	故障率関数、累積ハザード関数とバスタブ曲線	
2.3.3	アイテムの修理を考える場合における信頼性評価	• 37
章末	問 題	· 38
	3. 信頼性データの統計的解析	
3.1 信	頼性データの特徴・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	- 40
3.1.1	データの母集団とサンプリング	·41
3.1.2		
3.1.3		
3.1.4	信頼性データの特徴と種類	•46
3.2 信	頼性試験の種類	. 47
3.3 取	得した信頼性データの整理方法	. 49
3.4 基	本的な信頼性データの構造とデータ解析方法	. 50
3.4.1	信頼性データの構造・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	50
3.4.2	故障率と平均故障寿命の推定(指数分布の場合)	
3.4.3	信頼度の推定 (ノンパラメトリック推定)	54
3.5 ワ	イブル確率紙の仕組みと使い方	. 55
3.5.1	ワイブル確率紙の仕組み	. 56
3.5.2	プロットの手順	58
3.6 加	速 試 験	·· 64
3.7 バ	ーンインとスクリーニング,デバキング	-67
章末	問 題	· 68

4. システム信頼性

4.1 信	言頼性ブロック図と直列システム,並列システム	70
4.1.1	直列システムの信頼度	71
4.1.2	2 直列システムの故障率	72
4.1.3		
4.1.4		
4.1.5	5 複雑な構造での信頼度	77
4.2 €	· ステム信頼性設計 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	80
4.2.1		
4.2.2	k-out-of- n 冗長システム $(k/n$ 冗長システム)	82
4.3 Л	己長システム設計の留意点	83
4.3.1	257/11/24 FE-261	
4.3.2		
4.3.3	W-24	
4.3.4		
4.3.5	,	
	ム 3:福島第一原発事故と共通原因故障	
コラ	ム 4:H-IIA 6 号機と共通原因故障 ······	
章 末	問 題	91
	5 . 保全性とアベイラビリティ	
	R 全 方 法······	
	【 保全の方法と選択	
	ム 5:予防保全の重要性	
5.1.2	2 保全性設計	95
5.2 侈	呆全性の評価尺度	96
5.2.1	保全性と保全度関数・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	96

vi		次
5.2.2	アベイラビリティ	98
5.3 シ	/ステムのアベイラビリ	ティ解析100
5.4 保	早全方策の数理モデル…	108
5.4.1	年齢取替え方策	108
5.4.2	ブロック取替え方策…	111
5.4.3	小修理を伴う取替え方	策112
5.5 核	夏雑な保全方策計画に向]かって114
章末	問 題	114
	_	
	6.	信頼性設計と評価
6.1 信	言頼性を担保する設計:	信頼性設計 116
6.2 h	ラブルを未然に防止す	- るボトムアップ信頼性解析:FMEA117
6.2.1	FMEA の 概 要	118
		119
6.2.3	FMEA の注意事項	122
6.3 h	ラブルを未然に防止す	- るトップダウン信頼性解析:FTA ······ 123
6.3.1	FTA の 概 要·······	124
6.3.2	論理記号と事象記号…	125
6.3.3	FTA の実施手順 ······	127
		·別な数学!?—ブール代数— · · · · · · · · · · · · 127
		128
6.3.5	FTA による定量的解析	······129
6.4 h	ラブルを未然に防止す	る信頼性評価:DR ······131
		132
6.4.2	DRの実施手順	133
コラム	、7:一貫した設計・生産・	信頼性活動―コンカレントエンジニアリング― ····· 134
6.5 h	ラブルを未然に回避する	信頼性概念:フェールセーフ,フールプルーフ135
6.5.1	フェールセーフ	136
6.5.2	フールプルーフ	136

コラム8:信頼性の安全設計思想―フェールセーフとフールプルーフ―…	137
章 末 問 題	138
7. 安全工学	
7.1 安全工学の役割	139
7.1.1 安全の定義	
7.1.2 システム安全	
7.1.3 安全性と信頼性	
7.2 リスクアセスメント	
7.2.1 リスクアセスメントの基本的な考え方	
7.2.2 ハザードの識別・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
7.2.3 リスクの見積りと評価	
7.2.4 リスク低減方策・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	
7.2.5 安全に関する国際規格	
7.3 安全解析と設計手法	
7.3.1 安全解析手法	
7.3.2 安全設計手法	
7.3.3 ソフトウェア安全	161
7.3.4 安全性の検証	161
7.4 危 機 管 理	163
コラム 9: 事故のきっかけ	164
7.5 リスクの受容性	165
章 末 問 題	166
· · · · · · · · · · · ·	
8. 宇宙における安全・信頼性確保の取組み	
8.1 宇宙開発の特徴・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	167
8.2 宇宙開発手法	
	100

viii	I	次	

8.3	宇	宙開	発に	おけ	る多	安全・	信頼	性…					 		. 171	
8.	3.1	安	全	設	計・	• • • • • •							 		171	
8.	3.2	信	頼性	主設	計・	• • • • • •		• • • • • •					 		172	2
8.	3.3	ソフ	フトウ	ウエア	7信東	頁性・・			• • • • • • •	• • • • • •	• • • • •		 		175	<u>, </u>
8.	3.4	安全)・信	言頼性	性管理	里技術	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •		• • • • • • •				 		176	5
8.	3.5	部		管	理·	• • • • • •		• • • • • • •					 		177	7
8.	3.6	試	験	検	証・								 		178	3
8.	3.7	品	質	保	証・	• • • • • •	•••••	• • • • • • •	• • • • • • •		•••••	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	 	• • • • • •	179)
8.4	宇	宙開	発に	おけ	る多	安全・	信頼	性設計	計の具	体例	J		 		.180)
8.	4.1	口	ケ	ツ	١.	• • • • • •							 		180)
8.	4.2	人	工	衛	星·								 		182	2
8.	4.3	有。	人シ	ステ	٠ 4 .	• • • • • •							 		187	7
8.5	今	後の	信賴	性向	上の)取組	み…						 		. 191	
引	刊・	参表	学文	献									 	• • • • •	·· 192)
章	末間	引題	解	答·				• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •					 	• • • • •	·· 197	7
索				引.									 		·· 207	7

信頼性と信頼性工学

本章では、信頼性工学を学ぶことの重要性を述べたあと、広い意味での 信頼性に言及し、信頼性と関連深い品質の関係について解説する。

1.1 節では、信頼性工学を学ぶことの重要性について議論し、1.2 節では信頼性を明確に定義・議論し、信頼性を構成する三つの要素について述べる。また、信頼性と品質は切っても切れない関係であり、1.3 節では信頼性と品質管理の関係について、それらの発展の歴史とともに述べる。1.4 節では、信頼性と固有分野の技術と題し、信頼性を向上させるためには信頼性工学だけではなく対象となるシステムや製品の背景にある固有技術が重要であることを述べる。そして、1.5 節では本書の各章の概要と関連性を述べる。

1.1 信頼性工学を学ぶことの重要性

現代では、科学技術の成果は社会の隅々にまで浸透しており、新たな製品や技術の開発を通じて、社会にさまざまな便益をもたらすとともに、新産業の創出や市場の拡大にもつながり、われわれは過去に見られない豊かな生活を享受している。全国を網羅する高速道路、新幹線や空路により、われわれは前時代から見ると"瞬時の移動"も可能となっている。インターネットを通じIoT (Internet of Things)技術を使い、また 2000 年代後半に登場したスマートフォンやタブレット端末の普及とともに、従来よりはるかに身近にシステムの利便性を享受している。その反面、科学技術の高度化によりわれわれの社会や生活を支えるシステムは複雑化大規模化しており、それらシステムが突発的な故障や不具合によりシステムの機能や安全性が損なわれた場合、社会におけるわれ

2 1. 信頼性と信頼性工学

われの生活に多大な影響を及ぼすことになる。

科学技術は、われわれに多くの成果をもたらしたと同時に、解決すべき課題、いわば"影"とも言える側面をもたらしたことも否定できない^{1).†}。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震およびこれに伴う福島第一原子力発電所事故により、われわれの生活に多大な影響が出たことは記憶に新しい。また、新型コロナウイルス感染症(COVID-19)は、2019年12月に中華人民共和国湖北省武漢市での発生が報告され、わずか数か月ほどの間にパンデミックと言われる世界的な流行となった。わずかな間に世界中に拡大した今回の新型コロナウイルス感染症の流行は、人々の活動が、国境を越え、グローバルにつながっているという現実を明らかにするとともに、この流行の克服のために、早急な診断法や治療法、ワクチンの開発などが求められ、今後は、新しい日常をサポートする信頼性の高いシステムが要求される¹⁾。

インターネットでシステム障害を検索すると銀行・証券会社関係システム, 交通関係システムなど、毎日のように多くのニュースが検索される。

同時に、われわれを取り巻く"システム"の**信頼性**(reliability)の向上、維持を考えることの重要性がますます高まってきている。

このような背景のもと、**信頼性工学** (reliability engineering) は、各種製品とシステムの**品質** (quality) と信頼性を向上し保証するとともに、種々の信頼性・安全性上の問題を再発防止・未然防止するという目的としている。信頼性工学を学び、その成果を社会全体の向上に役立てるように努めなければならない。

1.2 信頼性とその三つの要素

信頼性という用語は、われわれは日常生活において自然に使用している。その状況で使用される信頼性はかなり広範囲な意味で漠然としている。信頼性を意味するものとして、第一に、耐久性(durability)を思い浮かべる人も多い

[†] 肩付き数字は、巻末の引用・参考文献を示す。

だろう。JIS[†] Z 8115:2019によると、信頼性は "アイテムが与えられた条件の下で、与えられた期間、故障せずに、要求どおりに遂行できる能力"と定められている。ここで、アイテムとは対象とするシステムやそれを構成する部品、コンポーネント、サブシステムを指す。システムの機能がどんなに素晴らしくても、長持ちしなければ信頼性が良いとは言えない。すなわち、耐久性が重要である。しかし、長持ち(耐久性)というのは、永遠ではなく、JISに記載されているように要求された時間内ということであり、要求時間外には故障していてもよいことを意味する。

機器やシステムを使用している場合、故障や不具合などの発生があるかどうかを常時監視し、故障などが発生したならすぐに使用・運用できるように修理可能ならば、機器やシステムの運用に障害はないと考えられる。このように機器やシステムを監視し、必要によっては修理・交換を実施する一連の活動を保全と呼ぶ。信頼性の第二の要素として、保全のしやすさを表す保全性(maintainability)がある。JIS において、保全性は"与えられた運用及び保全条件の下で、アイ

⇒コラム1:総合信頼性

信頼性というものを考えるときに、まず思い浮かべるのは、対象の製品やシステムの故障が少ないとか長く使えること(これを狭義の信頼性と呼ぶことがある)と思う。信頼性の発達の初期には、信頼性は、狭義の信頼性を指すことが多かった。しかし、われわれにとっては、対象の製品やシステムが希望するときに使用できればよいので、対象が故障してもすぐに修理可能、また故障兆候を検知可能で未然に故障を防止可能であればよい。すなわち、広い意味での信頼性は保全(詳細は5章)も含まれるようになった。最近では、総合信頼性(ディペンダビリティ)という言葉が一般的となってきている。総合信頼性は、"アイテムが、要求されたときに、その要求どおりに遂行するための能力"と定義(JIS Z 8115: 2019)され、信頼性は、依然と比べて、かなり広いこととして定義されている。これには、信頼性の概念が一般的に広まったことが背景にあると思われる。

[†] 日本産業規格 (Japanese Industrial Standards) 旧名称は日本工業規格(令和元年7月1日に改称)

4 1. 信頼性と信頼性工学

テムが要求機能を遂行できる状態に保持されるか、又は修復される能力"と定められている。

三つ目の信頼性の要素は、**設計信頼性**(design reliability)である。事故は、 再発防止はもちろんのこと未然に防止することが重要である。そのために、一 部の故障がシステム全体の重大事故に波及しないフェールセーフや、人間の過 失があっても、これがシステムの信頼性や安全性には波及しないフールプルー フなどの考え方に基づき、システムの設計段階で、システムの機能の維持や達 成を目指すことが重要である。

以上,信頼性を広い意味で捉えると,耐久性,保全性,設計信頼性の三つの要素があるということになる²⁾。

信頼性に関連深い用語に安全性がある。信頼性と安全性という用語は多くの文献で見られる。安全も日常用語として使用される。信頼性は、前述したように、システムの機能・喪失を基準にして対象となる"もの"に向けて概念を定めている。対照的に、安全性は、人間側の視点より"もの"を囲む状態・状況によって判断される。

1.3 信頼性と品質管理3)

信頼性を論じる場合、品質とは切り離して議論はできない。いかに優れた技術を駆使して高品質の製品を設計しても、製造工程において、部品の加工精度が悪かったり、組立て工程においてミスが頻発しては、その製品の信頼性を保証することはできない。

品質管理(QC:quality control)は、統計的品質管理(SQC:statistical quality control)から総合的品質管理(TQC:total quality control)、そして TQC で唱えられてきた組織全体として統一された品質管理目標を経営戦略に適用した総合的品質マネジメント(TQM:total quality management)†と発展してきた。

[†] 総合的品質経営と呼ばれることもある。また TQC の和訳と同じ総合的品質管理と呼ぶこともある。

信頼性研究は、1940年代において米国においてレーダーシステム故障の多発問題を解決することから始まったと言われている。一方、統計的手法を活用して安定した工程を維持してばらつきの小さい良い品質を作り出すことを目指した SQC がシューハートにより提唱されたのが 1920年代の中ごろであった。当初、米国では信頼性は技術(engineering)の問題で、品質管理は製造(manufacturing)の問題と言われ、それぞれ独立な問題として考えられてきたが、日本では信頼性は、1960年代の後半に TQC の一環を形成する品質保証の進展において、事故・故障防止のための科学的管理技術として重要な役割を担うようになる²⁾。

われわれの日常生活において信頼性に関心が持たれるようになったのは 1970 年代以降と言われている。

信頼性の発達について, 遥籃期 (1940 年代, 1950 年代), 基礎確立期 (1960 年代), 発達期 (1970 年代とそれ以降) に分けて述べる³。

第二次世界大戦中に、当時のドイツではロケット V2 号を開発していたが、このときすでに現在の信頼性の考え方が一部で導入されていた³⁾。一方、同時期に、米国ではレーダーシステムに故障が多く発生していることから、高信頼性真空管などの研究が始まったと言われる。

本格的に信頼性の研究が始まったのは、米国において産業界、学界、政府の各界の専門家による信頼性研究グループ **AGREE** (Advisory Group on Reliability of Electronic Equipments) が 1952 年に発足してからであり、1957 年に AGREE 報告が発表された。この中には、信頼性の考え方や信頼性向上の方策が記述され、この報告が以降の信頼性研究の発端となったと言われている。そのあとに、米国は、ミサイルや宇宙開発の時代に入り、米ソの宇宙開発競争が信頼性の研究に一層の拍車をかけることとなった 4)。

日本においても AGREE 報告が 1958 年に品質管理資料として配布されて広く読まれるようになり、システム故障を少なくするために、故障を未然に防止することを目標として信頼性研究が始められた。

1960年代に入ると、理論面での研究が進み、信頼性管理の体系が確立され

索引

【あ】		【き	:]	コンフィギュレー 管理	-ション 176
アイリングモデル	66	幾何分布	21		
アベイラビリティ	98	危機管理	164	【さ】	
アレニウスモデル	66	危険優先数	121	最小カット集合	128
安 全	139	期待値	20	最小カットセット	·法 79
安全解析手法	152	機能安全	160	最小パスセット法	79
安全防護技術	159	共通原因故障	85, 88, 154	最適予防保全時間	110
[(1)]		緊急事後保全	94	最尤推定法	53
	00	[<	1	漸近アベイラビリ	
位置パラメータ	28 165		_	サンプリング サンプル	41 41
インシデント	100	空間冗長 偶発故障期	84, 88 34		
【か】		区間推定	52	【し】	
ガウス分布	25	区間データ	58	時間計画保全	94
確率	13			試行	10
確率過程	21	【け	[†]]	事後確率	17
確率関数	19	経時保全	94	事後保全	93
確率紙	55	形状パラメータ		事象	11
確率測度	13	計数値データ	46	事象の木解析	155
確率プロット	55	計量値データ	45	指数分布	24, 72
確率変数	18	検査のタイミン	グ 179	システム	70
確率密度関数	23	7-	1	システム安全	141, 171
加速係数	64	[2	. 1	事前確率	17
加速試験	64	故障許容	188	実測値データ	58
カット集合	128	故障許容設計	171	質的データ	40
稼働率	98	故障検出切替シ	ステム 81	尺度パラメータ	28
可動率	98	故障の木解析	123, 154, 174	修理系	37, 72
カプラン・マイヤー		故障分布関数	32	修理率	99
	55	故障モード	118	樹形図	124
加法定理	14	故障モード・影		寿命分布	31
可用性	98		117, 153, 172	瞬間アベイラビリ	
完全データ	51	故障率	33, 73, 99	条件付き確率	15, 79
ガンマ関数	27	故障率関数	33	条件付き信頼度	80
ガンマ分布	27	コンカレントエ		状態監視保全	94
管理技術	6	リング	134	状態遷移図	100
				冗長化	172, 189

冗長設計	80	定常アベイラビリ		品質	2
乗法定理	16	定常確率	100	品質管理	4
初期故障期	34	定数打切りデータ	52	[ふ]	
信頼性	2	ディペンダビリテ			100 150
信頼性決定試験	47	マネジメント	131	フェールセーフ	136, 159
信頼性工学	2	デザインレビュー	131	フォールトトレラン	
信頼性試験	47	デバギング	67	アウヘ シ ト	135, 160
信頼性適合試験	48	点推定	52	不完全データ	51
信頼性ブロック図	70	(と)		不信頼度関数 ブール代数	32 127
【す】			4	フール代数	136. 159
推定	17	独立	15	プロアクティブ	130, 139
エクリーニング	67	独立試行	16	アプローチ	117
スリーステップメソッ ト		度数分布表	42	分散	20
	130	トップ事象	124	分布関数	18
【せ】		ドレニックの定理	35		10
正規分布	25			[^]	
積事象	12	【に】		平均故障間動作時間	37
設計審査 170,173	3, 176	二項分布	21	平均修理時間	38, 97
設計信頼性	4	7 do 1		平均寿命	31
接点故障	83	【ね】		平均保全時間	38, 97
【そ】		年齢取替え方策	109	ベイズの定理	17
[7]		[の]		並直列システム	77
総合信頼性	3	[0]		並列システム	75
総合的品質管理	4	ノンパラメトリッ	ク推定 54	並列冗長システム	81
総合的品質マネジメント	4	【は】		ベルヌーイ試行	20
【た】				【ほ】	
	0.4	ハインリッヒの法具			
待機冗長システム	81	ハザード	140, 171	ポアソン過程	21
耐久性	2 12	――の除去	158	ポアソン分布	21 41
互いに排反	12 82	――の制御 ハザード解析	153, 158	母集団	41 37
多数決系 妥当性確認	82 175	バスタブ曲線	153, 187 33	保 全 保全性	3. 93. 96
女ヨ圧唯認	1/5	バランス方程式	100	保全性設計	3, 93, 96 95
【ち】		バーンイン	67	保全度	96
中央演算処理装置	128	,	07	保全度関数	97
直並列システム	78	【ひ】		保全率関数	97
直列システム	71	非修理系	30	—	31
	, 1	ヒストグラム	42	【ま】	
[つ]		ヒヤリハット	164	摩耗故障期	35
通常事後保全	94	ヒューマンエラー	155, 175		
1-1		標準正規分布	26	【む】	
【て】		標本	41, 51	無記憶性	25
定期保全	94	標本空間	10		
定時打切りデータ	51	標本点	10		

【め】 メジアン寿命	32	離散確率変数 リスク 14 リスクアセスメント	18 10, 171	連続確率変数 【わ】	18
[ゆ]		141, 14 リスクグラフ法	14, 171 150	ワイブル確率紙 ワイブル係数	55 28
尤度【よ】	17	リスク低減方策 リスクマトリックス法		ワイブル分布 ワークシート	28 121
余事象 予備的ハザード解析	13, 75 153	量的データ 【る】	40	和事象 ワンショットシステム	12 30
予防保全 【り】	93	累積分布関数 【れ】	18		
離散確率分布	20	連続確率分布	24		

【数字】			[F]	MTBF MTTF		37 31, 98
1 次要因	127	FDS	81	MTTR		38, 97, 98
2次要因	127	FMEA	6, 117, 153, 172		[o]	
3次要因	127	FMECA	154, 173		[O]	
(A)		FTA	6, 123, 154, 174	OR ゲート		125, 127
A		FT 🗵	124		[P]	
AGREE	5		(H)		/T /	
ALARP	146		[11]	pdf		23
AND ゲート	125, 127	HAZOP	154		[Q]	
(C)			[1]	QC	1.61	4
cdf	18	IFR	35		[a]	
CFR	34	IoT	1		[S]	
CPU	127	IV&V	176	SQC		4
[D]			(K)		[T]	
DFR	34	k-out-of-	n 冗長システム 82	TQC		4
DR	131		(M)	TQM		4
(\mathbf{E})		MIP	179		[V]	
ETA	155	MLE	53	V&V		175

--- 編著者·著者略歴 ---

山本 久志 (やまもと ひさし)

- 1981年 東京工業大学工学部経営工学科卒業
- 1983年 東京丁業大学大学院丁学研究科修士課程修了(経営丁学専攻)
- 1983年 東京芝浦電気株式会社勤務
- 1990年 西東京科学大学講師
- 1996年 博士(丁学)(東京丁業大学)
- 1998年 東京都立科学技術大学助教授
- 2011年 首都大学東京(現東京都立大学)教授 現在に至る

秋葉 知昭 (あきば ともあき)

- 1995年 西東京科学大学理工学部経営工学科卒業
- 1997年 帝京科学大学大学院理工学研究科修士課程修了(経営情報システム専攻)
- 2004年 東京都立科学技術大学大学院工学研究科博士後期課程修了 (インテリジェントシステム専攻) 博士 (丁学)
- 1997年 山形県立産業技術短期大学校講師
- 2011年 山形県立産業技術短期大学校准教授
- 2012年 千葉工業大学准教授
- 2015年 千葉工業大学教授、現在に至る

竹ヶ原春貴 (たけがはら はるき)

- 1979年 東京大学工学部航空学科卒業
- 1985年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了(航空学専門課程) 工学博士
- 1985年 三菱電機株式会社勤務
- 1990年 湘南丁科大学講師
- 1992年 東京都立科学技術大学講師
- 1994年 東京都立科学技術大学助教授
- 1999年 東京都立科学技術大学教授
- 2005年 首都大学東京教授
- 2020年 首都大学東京名誉教授
- 2020年 東京都立大学客員教授, 非常勤講師, 現在に至る

深津 敦(ふかつ つとむ)

- 1987年 東北大学工学部材料加工学科卒業
- 1989年 東北大学大学院工学研究科修士課程修了(金属工学専攻)
- 1989年 宇宙開発事業団 (現宇宙航空研究開発機構) 勤務、現在に至る

国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟の開発、有人システムの安全・信頼性評価業務、および宇宙ステーション補給機「こうのとり」の開発を担当したのち、現職、第一宇宙技術部門 技術試験衛星 9 号機プロジェクトチームプロジェクトマネージャを務める。

古井 光明(ふるい みつあき)

- 1988年 長岡技術科学大学工学部創造設計工学課程卒業
- 1990年 長岡技術科学大学大学院修士課程修了(創造設計工学専攻)
- 1993年 長岡技術科学大学大学院博士課程修了(材料工学専攻)
 - 博士(工学)
- 1994年 豊橋技術科学大学助手
- 2006年 富山大学助教授
- 2014年 東京工科大学教授, 現在に至る

確率・統計から始める エンジニアのための信頼性工学

─ 身近な故障から宇宙開発まで ─

Reliability Engineering for Engineers Starting with Probability and Statistics

— From Familiar Failures to Space Development —

© Yamamoto, Akiba, Takegahara, Fukatsu, Furui 2021

2021 年 7 月 28 日 初版第 1 刷発行



検印省略

編著者 Ш 久 志 本 秋 葉 知 昭 竹ヶ原 表 貴 深 津 敦 古 # 光 明 コロナ社 発 行 者 株式会社 代表者 牛来真也 印刷所 新日本印刷株式会社 製本所 有限会社 愛千製本所 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 https://www.coronasha.co.jp

ISBN 978-4-339-02920-8 C3050 Printed in Japan

(松岡)



JCOPY <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、 出版者著作権管理機構 (電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or,jp)の許諾を 得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。 購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。 落丁・乱丁はお取替えいたします。