

無断使用をお断りします。日科技連出版社

信頼性物理

物理・化学モデルに基づく
信頼性検証技術

木村忠正 監修
門田 靖・藤本直伸 著

日科技連

監修のことは

信頼性物理とは？ 読者の皆さんは故障物理(Physics of Failure : PoF)の用語のほうに親しみが深いのではと思います。さて、故障物理という用語からはどのようなイメージを浮かべますか？ 一般的には、製品、デバイス、材料の劣化、故障(機能不全)がどうして起こるかの原因を究明し、それを抑制する方法・対策を考え、品質を維持し、かつ低コストで要求される故障率・寿命を達成する方法を判断するための基礎となる物理(化学、その他も含めて)と理解されていると思います。従来の知見などの経験的な、しかし限られたサンプル数、古い製品のデータに基づく新規材料、デバイス、製品の故障率算出方法が実情にそぐわなくなり、「故障物理」に基づく劣化、故障の評価方法が採用されるようになりました。このように、現在では「故障物理」はデバイスの信頼性向上に多大な貢献をしています。

ここで、故障物理の重要性は十分認識されているとしても、「故障物理」という用語には注意が必要です。それは、「故障」という用語からは、「故障」のあることが前提で、「故障(劣化)した」材料、デバイス、製品の原因、劣化の物理的メカニズムを追究し、物理法則に基づいて劣化、故障を抑える対策を考える、と理解され、その評価と対策に限られたローカルな部署・技術者への課題となる可能性があるからです。

しかし、今日の新しいテクノロジーは、これまで使われていなかった新しい材料の採用、ナノメータサイズの縮小化と複雑な構造、新しい製造プロセスが導入され、また、さまざまな新たな使用環境など、製品の信頼性に関する要因は複雑化し、信頼性の確保も厳しいものになってきています。したがって、信頼性については、単なる故障対策ではなく、企画から設計、材料の選択、製造プロセス、評価、性能、安全性、コスト、法的適合性、販売、顧客満足度、保全といった一貫したシステムに対する組織全体での取り組みが必要です。新し

いテクノロジーの場合、過去のデータ、経験では必ずしも対応できません。物理的な解析を基本とする「信頼性物理」の共通の理解が、組織的な取組みを進めるうえで有効かつ必須です。ここに、「故障物理」という限定的なイメージの概念ではなく、「信頼性物理」という幅広い概念が重要となります。

本書の著者である門田氏と藤本氏は、長年、企業において信頼性関連分野で活躍してきた方々ですが、『信頼性物理』というタイトルの著作を世に出そうと考えたのは、上に述べたように、近年の新しいテクノロジー採用が進む状況と、長年の信頼性に従事してきた経験から、新規製品の開発にあたる技術者が、ものの信頼性に関わる物理(化学、熱、力学、電気/電子など)の基本的理解の下に開発を進めることが重要と考えたからです。「信頼性物理」の基本は「故障物理」がベースではありますが、単に「故障」の物理的解析、対策だけに注目するのではなく、幅広い物理的視野のもとで、信頼性技術者が、いや、組織の技術者全員が、信頼性確保、向上に取り組んでいく必要があるとの考えからです。本書は、信頼性物理を支えるベースとして、特に、物理的故障解析、信頼性試験、統計的データ解析に注力し、さらに、信頼性技術者にとって有益な信頼性に関する幅広い内容が含まれています。近年、信頼性物理の信頼性設計(Design for Reliability : DfR)への適用が世界的に注目され、物理に基づいた信頼性を設計プロセスの一部とする組織的な取組みが始まっています。また、信頼性物理をベースにすることで、サプライチェーンとの共通の理解の下に、故障メカニズム予測、故障率軽減などの対策を進めることも可能となります。

ぜひ、本書により、信頼性に従事している技術者はもちろん、新しいテクノロジー採用による新規デバイス・製品開発にあたる幅広い技術者の方々が、信頼性物理を基礎知識として身につけ、信頼性技術に取り組まれることを期待いたします。

2022年4月

電気通信大学名誉教授

木村 忠正

はじめに

信頼性工学はエレクトロニクスの技術革新とともに進展し、かつ時代とともにさまざまな技術分野や工学分野の分野との関わりが強固になったため、さまざまな分野の技術・考え方が取り入れられ続けている。例えば信頼性分野に「リスク」の考え方が導入されたのは、製品安全性からの影響である。特に安全性設計と信頼性設計は技法面では多くの共通性があり、さらに機器設計面ステージにおいて、設計技術者は信頼性と安全性を同時に創り込むことが日常である。元來信頼性工学は、冗長設計や保全性設計などに代表されるシステム工学的なアプローチと、信頼性設計、信頼性試験や故障解析などに代表される物理的なアプローチがあった。システム工学的なアプローチは、大学においても研究されているが、物理的アプローチは、一部の先端研究テーマを除いて、主に民間企業のものづくり現場において実施されている。この理由は、企業において研究開発や製品、工程設計に携わっている技術者にとって、信頼性試験や物理的故障解析といった物理的検証技術と、ディレーティングや熱設計といった設計技術のような、物理的なアプローチがより重要で現実的であるからである。信頼性物理はこの物理的アプローチの基本を構成しており、分布統計学やヒューマンファクターズなどとともに、信頼性工学そのものの基本理論といって過言ではない。

信頼性物理は、物理的故障解析結果から解明した故障メカニズムや、個々の信頼性試験条件により再現される故障メカニズムを説明する理論として位置づけられてきた。特に近年は開発期間の短縮などの影響で、技術者もじっくり学習する時間がなくなり、実際に発生した故障に対する回答や解決手法をといった必要な知識をすぐに吸収したいと要望している。つまり多くの技術者にとって、現在の信頼性物理は「定性的に故障メカニズムが説明できればよい」と考えられている。

しかし、世の中の市場や工程で発生した故障の事例は膨大であり、一人の技

術者もしくは組織として多くの知識を保有し、再発・未然防止に活用するのは困難であると考えられる。筆者らはこの大きな課題に対する対応策の一つとして、「信頼性物理ベースでのアプローチ」が有効であると考えている。例えば温度と熱応力による故障メカニズムは、はんだの疲労破断、高分子材料の破断などがあり、さらに腐食環境が加わると、カーケンダルボイドの生成や応力腐食割れなどが発生する可能性がある。つまりある素子・デバイス・構造にどのような欠陥があり、マクロ的・ミクロ的にどのようなストレスがかかり、どのような反応が起きるかということをベースに考察するのが、信頼性物理の範疇である。本書の執筆にあたってじっくり考えてみたが、信頼性物理の体系は20世紀に発表された論文から最新の報告まで、すでに明確になっている理論の積み重ねであることを再認識させられた。

共著者である藤本直伸氏は長年セットメーカーの立場から、電子部品の信頼性向上や、故障解析による問題の早期解決に努めてきた技術者であり、筆者と同様、技術者が信頼性物理に関心をもってもらいたいという気持ちで一致し、力を合わせて本書を執筆することになった。本書では信頼性工学から信頼性技術、さらに物理的信頼性検証技術の範疇に信頼性物理があり、信頼性工学の中で位置づけを明確にした。本書は技術者が信頼性技術を見つめ直し、技術者として飛躍する機会になっていただければ、著者として幸いである。

最後に、監修をいただいた木村忠正先生は、長年集積回路の故障物理に対して日本一造詣の深い方であり、監修のお立場を超えて、我々にご指導いただきました。厚く御礼申し上げます。また執筆に関して私の読み難い原稿を編集いただいた日科技連出版社の鈴木兄宏氏、石田新氏に御礼申し上げます。

2022年4月

著者を代表して 門田 靖

目 次

監修のことば *iii*

はじめに *v*

序章 これからの技術課題に立ち向かう信頼性物理…………… 1

1. 信頼性物理の基礎となった2つの研究と発展経過 2
 2. 本書の目的 3
 3. 本書の構成 6
 4. 本書内での記号の取扱い 7
- 序章の引用・参考文献 8

第 I 部 信頼性の基礎と物理的信頼性検証技術…………… 9

第 1 章 信頼性の基礎…………… 11

- 1.1 信頼性のはじまりと現在までの流れ 11
 - 1.2 信頼性、保全性、安全性の基礎 15
 - 1.3 デイペンダビリティ(総合信頼性)の基礎 18
- 第 1 章の引用・参考文献 23

第 2 章 信頼性工学体系と妥当性検証技術…………… 25

- 2.1 信頼性工学体系 25
 - 2.2 基盤プロセスにおける信頼性創り込み技術 31
 - 2.3 支援技術 35
 - 2.4 技術目標立案プロセス 43
 - 2.5 信頼性妥当性検証技術 47
- 第 2 章の引用・参考文献 48

第 3 章 物理的信頼性検証技術…………… 49

- 3.1 信頼性検証技術における物理的信頼性検証技術 49
- 3.2 故障解析技術 52

3.3 信頼性試験	55
第3章の引用・参考文献	58
第II部 故障に至る代表的な因子	59
第4章 信頼性物理に基づく信頼性創り込み	61
4.1 システム仕様からの信頼性評価計画の立案	62
4.2 信頼性試験の結果のデータ解析の注意点	70
4.3 初期故障型に対するスクリーニングの基本的な考え方	72
4.4 信頼性加速モデルと劣化反応	74
第4章の引用・参考文献	78
第5章 温度	79
5.1 物理的な面からの温度	79
5.2 温度依存性を表すモデル	85
5.3 温度加速モデルとプロット解析	91
5.4 温度加速モデル間の比較	99
5.5 温度計測法と試験時の温度変動の影響	103
5.6 熱的特性(温度の伝導)	107
第5章の引用・参考文献	111
第6章 湿度	113
6.1 水および水蒸気の気相、液相での物理的性質	113
6.2 湿度の表現方法	116
6.3 湿度(水蒸気)による反応	119
6.4 湿度による劣化メカニズムと劣化モデル	126
6.5 湿度計測法	130
第6章の引用・参考文献	131
第7章 応力	133
7.1 応力による破壊現象に関する基本的な考え方	133
7.2 基本的な材料特性	136
7.3 原子間の結合力	145

7.4 S-N 線図	149
7.5 応力による寿命加速モデル	152
第7章の引用・参考文献	158
第Ⅲ部 故障メカニズムを説明する物理的・化学的反応	161
第8章 故障メカニズム解明に対する故障解析と信頼性試験の役割	163
8.1 故障メカニズムに対する物理的信頼性検証技術	163
8.2 故障解析の役割や使い分け方	164
8.3 主な信頼性試験	166
8.4 信頼性物理の構築から見た故障解析と信頼性試験の役割	168
第9章 表面・界面の特性と拡散による断線・劣化現象	169
9.1 物質の表面状態とエネルギー	169
9.2 界面の安定性と結合エネルギー	177
9.3 拡散	182
9.4 固体間の拡散による故障事例	185
9.5 水分の拡散による故障	200
9.6 イオンの拡散による故障	202
第9章の引用・参考文献	203
第10章 化学的酸化・腐食による劣化現象	205
10.1 酸化・腐食の基礎	205
10.2 腐食による故障現象	210
10.3 電気機器・部品における腐食反応による故障	212
10.4 信頼性試験法	216
第10章の引用・参考文献	218
第11章 電氣的絶縁破壊現象	219
11.1 金属, 半導体, 誘電体の基礎的電気伝導	220
11.2 絶縁破壊の基礎	243
11.3 経時絶縁破壊に関するモデル	250
11.4 経時絶縁破壊の信頼性試験技術と故障解析技術	263

11.5 絶縁破壊をとりまく社会環境	268
第11章の引用・参考文献	271
第12章 機械的ストレスによる破断・摩耗・劣化現象	273
12.1 疲労と疲労破壊	273
12.2 疲労のメカニズム	274
12.3 疲労破壊の発生条件	277
12.4 トライボロジー	287
12.5 各種の部品における疲労破壊の発生事例	293
12.6 ウィスカ	296
第12章の引用・参考文献	297
第13章 複合環境による故障メカニズム	299
13.1 複合環境による信頼性検証	299
13.2 HALT	303
13.3 連続試験	305
第13章の引用・参考文献	307
終章 まとめと今後必要となる物理的検証技術	309
1. 信頼性技術課題に対する物理的検証技術の課題	309
2. 故障解析, 信頼性試験と信頼性物理のさらなる融合	313
3. 機器の信頼性向上への寄与	315
付録 主な重複記号と物理定数	317
索引	319

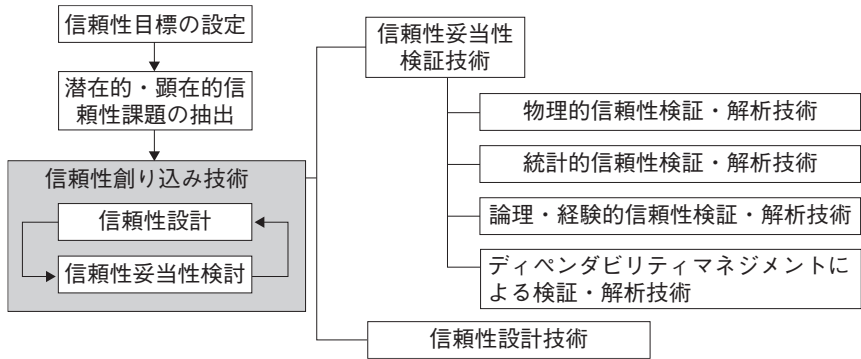


図 2.5.1 信頼性創り込みの体系図

創り込みを実施する。そのときには品質保証ステップごとに各検証・解析技術 (Verification) を応用して、信頼性妥当性検討 (Validation) を実施し、信頼性を第三者に証明する。このような信頼性設計とともに信頼性創り込みの全体体系を図 2.5.1 に示す。

信頼性妥当性検討技術には、以下の 4 種類が位置づけられる。

- 物理的信頼性検証・解析技術
- 統計的信頼性検証・解析技術
- 論理・経験的信頼性検証・解析技術
- ディペンダビリティマネジメントによる検証・解析技術

第2章の引用・参考文献

- [1] 日本信頼性学会編：『新版 信頼性ハンドブック』，日科技連出版社，2014年。
- [2] IEC 60300-1：“Dependability management Part 1：Dependability management systems”
- [3] ISO 9001：2015：「品質マネジメントシステム－要求事項 Quality management systems－Requirements」
- [4] 信頼性技術叢書編集委員会監修，門田靖著：『信頼性と安全性』，日科技連出版社，2012年。
- [5] 久保拓弥：『データ解析のための統計モデリング入門—一般化線形モデル・階層ベイズモデル・MCMC(確率と情報の科学)』，岩波書店，2012年。

第3章 物理的信頼性検証技術

本章では、第2章までで説明した信頼性検証技術の中で、物理的信頼性検証技術を構成する物理的故障解析(以後故障解析と呼ぶ)、信頼性試験と信頼性物理の位置づけについて述べる。信頼性を専門とする技術者の中で、物理的信頼性検証技術に携わる技術者は最も多く、各種学会やシンポジウムにおいて研究報告されている。

3.1 信頼性検証技術における物理的信頼性検証技術

図3.1.1に企業における信頼性創り込みの中での、物理的信頼性検証技術の位置づけを示した。信頼性創り込み技術は信頼性設計技術と信頼性妥当性検証

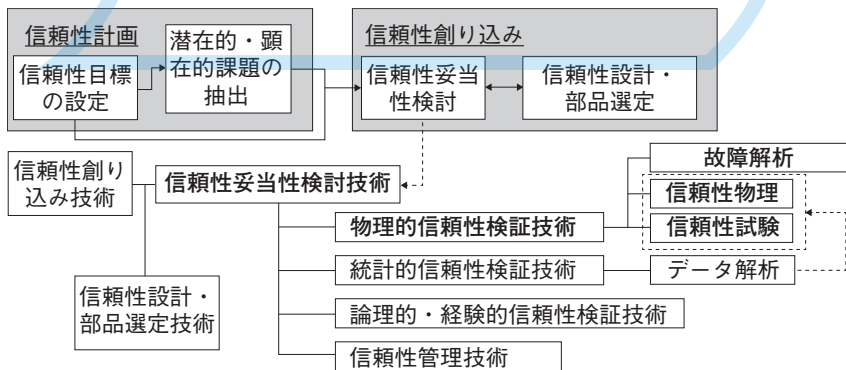


図3.1.1 企業における信頼性創り込みの中での物理的信頼性検証技術の位置づけ

表 4.4.1 代表的な信頼性物理の加速モデル

モデル種別		モデル名と通称	特徴	参照章
温度加速	化学反応速度論	アレニウスモデル	$L = A \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right)$	第 5 章
	絶対反応速度論	アイリングモデル	$L = A T^{-n} \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right) \exp(S)$	
	経験的温度加速モデル	θ 度則	$L = A \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot T}{\theta}\right)$	
応力加速	累積損傷モデル型 (Miner 則)	バスキン則	$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b$	第 7 章
	疲労劣化量が累積して、閾値に達して寿命が尽きる考え方。劣化曲線は n 乗則などに基づいている場合が多い。	コフィン-マンソン則	$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2N_f)^c$	
		モローの式	$\frac{\Delta \varepsilon_f}{2} = \frac{\sigma'_f - \sigma_m}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c$	
		ラルソン-ミラー則	$P = T(C + \ln L)$	
湿度加速	経験的モデル	ハキムモデル	$L = A \exp[-B(T + RH)]$	第 6 章
	拡張アレニウス型	ベックモデル	$L = A (RH)^n \exp\left(\frac{E_a}{k_B T}\right)$	
	拡張アイリング型	ライコーデスモデル	$L = A \exp\left(\frac{E_a}{k_B T}\right) \cdot \exp\left(\frac{B}{RH}\right) \cdot \frac{1}{V}$	
	水蒸気圧モデル	Sinnadurai モデル	$L = A (V_p)^{-n}$	
電圧加速	ホットキャリアモデル	Nch HCl 劣化モデル	$L = A \left(\frac{I_{sub}}{W}\right)^{-n} \exp\left(\frac{E_a}{k_B T}\right)$	第 11 章
		Pch HCl 劣化モデル	$L = A \left(\frac{I_{gate}}{W}\right)^{-n} \exp\left(\frac{E_a}{k_B T}\right)$	
	ゲート酸化膜破壊モデル	exp(E) モデル あるいは E モデル	$L = A \exp\left(\frac{\Delta H}{kT}\right) \cdot \exp(-\beta E_{ox})$	
		exp(1/E) モデル あるいは 1/E モデル	$L = C \exp\left(\frac{B+H}{E_{ox}}\right)$	

表 4.4.1 代表的な信頼性物理の加速モデル(つづき)

モデル種別		モデル名と通称	特 徴	参照章
電圧加速	ゲート酸化膜破壊モデル	V^n モデルあるいは V モデル	$L = B(T) \cdot V^{-n}$	第 11 章
	層間膜破壊モデル	$\exp(\sqrt{E})$ モデル あるいは \sqrt{E} モデル	$L = C(T) \cdot \exp(-\alpha\sqrt{E})$	
経験的モデル		n 乗則 - 電圧加速	$L = A \cdot V^{-n}$	第 7 章
		n 乗則	$L = A \cdot S^{-n}$	
		材料力学的モデル ストレス-強度モデル (破壊強度テスト, 安全余裕テストなど)		
主なパラメータの意味				
L : 寿命(時間) T : 絶対温度(K) E_a : 活性化エネルギー RH : 相対湿度 S : 温度以外のストレス ε_{xx} : ひずみ N_{xx} : 回数 V_p : 水蒸気圧 I_{xx} : 電流 V : 電圧 E_{xx} : 電界 σ_{xx} : 応力 H : エンタルピー A, B, C, P : 定数 θ, n, b, c : 指数 $C(T), B(T)$: 関数				

- ① 劣化モデル：故障に至る一連の物理的・化学的反応をモデル化したもの。
- ② 加速モデル：上記劣化反応を，短時間もしくは少頻度で実現性を定量的に説明したモデル式。一般には，4.1節で述べたように，律速過程の反応速度式で近似できる。
- ③ 寿命予測モデル：単に信頼性物理で考えた寿命予測は，劣化モデルに基づく反応で，アイテムがもつ特性が劣化し故障するまでの時間を予測するモデルである。物理的劣化に基づき加速された特性値変動により，故障（アイテム（=必要とされるもの）が要求機能達成能力を失うこと（JIS Z 8115：2019））に至る時間を推定することを目的とし，ばらつきを考慮するために統計的技術も活用する。したがって極力以降の章では，疲労寿命予測や破壊寿命予測という形で，「〇〇寿命予測」と表現する。

第8章 故障メカニズム解明に対する故障解析と信頼性試験の役割

信頼性物理、故障解析、信頼性試験の大局的関連は、第3章で述べた。しかし故障メカニズムによっては、信頼性試験によって再現できても寿命の保証が困難なことや、逆に信頼性試験によって寿命が保証できたとしても、故障解析が困難であることもある。本章では具体的な故障メカニズムを通じて、信頼性物理、故障解析、信頼性試験の具体的な関係について概説し、特に故障解析の役割について解説する。

8.1 故障メカニズムに対する物理的信頼性検証技術

信頼性物理は、信頼性試験や故障解析により、故障メカニズムを明確にすることが基本となる。この関係を表8.1.1に示す。なお、表中の故障メカニズムについては第4章を参考されたい。

故障メカニズムが明らかになると、信頼性試験の実施はほぼ可能となるが、故障解析が有効かどうかは、故障メカニズムによって大きく異なるため、検討が必要である。主な故障メカニズムは以下の4種類の故障モードに分類できる。これらの故障モードに対する故障解析の有効性は8.2節で解説する。

- ① 電氣的オープン故障：エレクトロマイグレーション、ストレスマイグレーション、(場合により)電荷蓄積や腐食(湿食)
- ② 電氣的ショート故障：経時絶縁破壊、(場合により)電荷蓄積
- ③ 機械的な破断・劣化：疲労破断、摩耗
- ④ 物性・化学的な変化：界面拡散、酸化劣化、放射線損傷、多くの腐食

表 8.1.1 故障メカニズムに関する信頼性物理, 信頼性試験, 故障解析の一覧

信頼性試験		故障解析							
加速寿命試験	再現信頼性試験 欠陥検出試験	・ 処理	試 料 加 工	状 態 解 析	表 面 断 面 解 析	結 晶 構 造 解 析	分 子 状 態 解 析	元 素 分 析	元 素 二 次
信頼性物理	故障メカニズム								
化学反応速度論 $k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$	経時絶縁破壊	二次故障で根本要因消失							
	電荷蓄積	電子・正孔の分析手段なし							
	エレクトロマイグレーション	○	○	●				○	
	腐食(湿食)	○	○						●
	界面拡散	○	●	○					●
	酸化劣化	○	○				●		○
応力加速モデル $N_f = C f^n (\Delta \epsilon_{in})^{-n}$	ストレスマイグレーション	○	○	●					○
	疲労破断	○		○					
個別の信頼性物理 モデル	摩耗	○					●		
	異物付着	○	○				●		●
	放射線損傷	○	●	○					

●：故障解析で有効な情報が得られる ○：故障解析で一部有効な情報が得られる

8.2 故障解析の役割や使い分け方

8.2.1 故障解析が有効な故障モード

(1) 電氣的オープン故障

①電氣的オープン故障は、電氣的接続部や配線(電気回路パターンを含む)などが断線する故障モードであり、故障発生部位のエネルギーレベルが下がるため、一次故障の痕跡にダメージがそのまま保存される。したがって断線部を詳細に観察し、分析を行うことが有効である。例えばエレクトロマイグレーションやストレスマイグレーションでは、結晶方位や微小な介在物および不純物を微細に分析することが有効である。

監修者・著者紹介

監修者

木村 忠正(きむら ただまさ)

1943年生まれ。1970年、東京大学大学院工学系研究科電子工学専攻博士課程終了、工学博士(東京大学)。

1970年～2009年、電気通信大学専任講師、助教授、教授、理事(兼副学長)、電気通信大学名誉教授。2010年～2016年、科学技術振興機構プログラム主管、オプトエレクトロニクス、CVDダイヤモンド、シリコンフォトニクス、半導体故障物理などの研究に従事。応用物理学会フェロー。

現在、信頼性関連では、日本電子部品信頼性センター故障物理研究委員会委員長、RCJ信頼性シンポジウム委員長、日本科学技術連盟RQ研究会運営委員、日本信頼性学会編集委員を務める。

主な著書・翻訳書に、『電子材料ハンドブック』(編集・共著、朝倉書店、2006年)、『電子デバイス』(朝倉書店、2001年)、『固体物理学 改訂新版』(共訳、丸善出版、2008年)、『新版 信頼性ハンドブック』(共著、日科技連出版社、2014年)などがある。

著者

門田 靖(かどた やすし)

1959年生まれ。東京都立大学理学部物理学科卒業。電子通信大学大学院博士課程修了。博士(工学)。

1981年、(株)リコー入社。本社QA部門において信頼性・製品安全・環境安全・品質戦略関連部署長を歴任。

現在、R&D部門において新規デバイスの信頼性技術開発に携わる。

日本信頼性学会会長(元副会長、監事)、電子情報通信学会信頼性専門委員会副委員長、日本科学技術連盟信頼性創り込み、信頼性試験、基礎コース講座、技術小委員会運営小委員長、信頼性・保全性・安全性シンポジウム組織委員会副委員長、ビジネス機械・情報システム産業協会ASEANタスクフォース委員長。

主な著書に、“Roadmap 2005 of Scanning Probe Microscopy”(共著、Springer、2006年)、“Probe Methods X-Biomimetics and Industrial Applications”(共著、Springer、2008年)、『信頼性と安全性』(日科技連出版社、2012年)などがある。

藤本 直伸(ふじもと なおのぶ)

1955年生まれ。1973年、三菱電機㈱入社。品質保証部門・LSI研究所(太陽電池開発など)において、部品の品質保証(信頼性試験、故障解析など)を実施。高信頼性電子機器(防衛・車載・宇宙)に使用される部品の品質保証のために国内外の部品メーカーの工場サーベイと品質改善を行った。

現在、内藤電誠工業㈱技術顧問として、宇宙用ロケット(H-3、イプシロンなど)開発支援やJAXA関連の技術支援を行っている。

日本信頼性学会評議員、(一社)日本科学技術連盟故障解析委員会運営委員長、信頼性委員会運営委員、信頼性・保全性・安全性シンポジウム組織委員会委員。

主な著書に、『信頼性ハンドブック』(日科技連出版社、共著、1997年)、『最新電子部品・デバイス実装技術便覧』(R&Dプランニング、共著、2002年)、『新しい信頼性技術と管理手法』(日刊工業新聞社、共著、2011年)などがある。



無断使用をお断りします。日科技連出版社

信頼性物理

物理・化学モデルに基づく信頼性検証技術

2022年5月30日 第1刷発行

監修者 木村忠正
著者 門田靖
藤本直伸
発行人 戸羽節文

検印
省略

発行所 株式会社 日科技連出版社
〒151-0051 東京都渋谷区千駄ヶ谷5-15-5
DSビル
電話 出版 03-5379-1244
営業 03-5379-1238

Printed in Japan

印刷・製本 東港出版印刷

© Yasushi Kadota, Naonobu Fujimoto 2022

ISBN 978-4-8171-9759-7

URL <https://www.juse-p.co.jp/>

本書の全部または一部を無断でコピー、スキャン、デジタル化などの複製をすることは著作権法上での例外を除き禁じられています。本書を代行業者等の第三者に依頼してスキャンやデジタル化することは、たとえ個人や家庭内での利用でも著作権法違反です。