



Title	故障率評価に基づくハザードベース安全評価手法の提案
Author(s)	原田, 泰男
Citation	大阪大学, 2016, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/55964
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博士学位論文

故障率評価に基づく

ハザードベース安全評価手法の提案

原 田 泰 男

2016年1月

大阪大学大学院工学研究科

目次

第1章	緒論	1
1-1.	製品安全確保の現状と課題	1
1-1-1.	製造者における製品品質保証体制	1
1-1-2.	製品事故の現状	3
1-1-3.	製品事故の評価手法の現状と課題	5
1-2.	国際標準規格策定の現状	8
1-2-1.	国際電気標準化会議（IEC）における安全規格策定状況	8
1-2-2.	国際標準規格適合について	11
1-3.	国内外の行政の動向	14
1-3-1.	国内行政の動向	14
1-3-2.	国外行政の動向	14
1-4.	製品安全性に関わる研究動向と課題	15
1-4-1.	研究動向	15
1-4-2.	解決すべき問題点	17
1-5.	本研究の目的と研究手順	18
1-5-1.	目的	18
1-5-2.	研究手順	19
1-6.	本論文の構成	21
第2章	ハザードベース FTA	23
2-1.	緒言	23
2-2.	従来の FTA 図	28
2-3.	ハザードベース FTA に基づく製品安全評価手法の提案	31
2-3-1.	ハザードベース FTA による安全評価	31
2-3-2.	ハザードに基づく手法の提案	34
2-3-3.	リスクレベルの設定	36
2-4.	家電製品への製品安全評価手法の適用	42
2-4-1.	解析モデル	42
2-4-2.	HB-FTA の適用	43
2-4-3.	製品安全評価	52
2-5.	結言	53

第3章	事故報告データベースに基づく故障率の評価手法の提案	54
3-1.	緒 言	54
3-2.	長期使用と特定部品に集中する事故の実態	55
3-3.	事故報告データベースに基づく故障率の導出手法の提案	60
3-3-1.	事故報告データベースを用いた故障率の算出手法	60
3-3-2.	IEC TR 62380 の適用による故障率	62
3-4.	IEC TR 62380 の故障率の HB-FTA への適用	65
3-5.	結 言	66
第4章	故障率の確率分布特性評価	68
4-1.	緒 言	68
4-2.	家電製品事故報告データベースから故障率の推定	68
4-3.	等価故障率の提案	69
4-4.	等価故障率の確率分布の推定	74
4-5.	IEC TR 62380 による故障率への故障率確率分布の適用	79
4-6.	エアコン製品事故におけるコンデンサの故障率	82
4-7.	結 言	83
第5章	製品安全品質マネジメントシステムとその展望	84
5-1.	緒 言	84
5-2.	製品安全品質管理の在り方	84
5-3.	安全品質保証組織体制	86
5-4.	結 言	92
第6章	総括	93
	参考文献	98
	付録-1.	103
	付録-2.	106
	研究業績	113
	謝辞	114

第 1 章 緒 論

1-1. 製品安全確保の現状と課題

1-1-1. 製造者における製品品質保証体制

消費者に対する信頼を得るには、製品の品質管理は重要である。一般に製造者には、製造物責任法 (Product Liability Law) [1] や品質管理・品質保証の国際規格の ISO 9000 シリーズ [2] などによって、消費者に対する品質保証が求められている。一方、品質管理を顧客の要求にかなった品質を有する製品やサービスを経済的に生み出すための管理活動の一つとする経営者側面の考え方もある [3]。我が国の品質管理は、ISO 9000 シリーズに代表される国際標準規格の適用に加えて、製造現場における QC サークル活動などを包含した、TQC, TQM [4] とよばれる全社的な活動に発展しているのが現状である。

製造工程における TQC 活動に支えられる活動の一例として、日本の製造業の代表であるトヨタ自動車のトヨタ生産システム方式 (TPS) [5] が挙げられる。

製造者は、製造者の生産管理システム [5] の中で、製品の品質を確保することを考えている。品質を確保するために、製造過程における部品の不具合、製造工程上の人的ミス、組み立て誤りなどによる製品品質レベルの劣化を防ぎ、一定の品質レベルの保証を目指した生産管理システムを組み込んでいる。

こうした生産管理システムは、製品の開発、設計、試作、量産、販売といった製品に関わる製品ライフサイクル [6] の中で実行されている。具体的には、図 1-1 に示すように、製造に関わるプロセス毎のデザインレビュー (DR) で実施されている。デザインレビュー (DR) とは、システム・製品の規格、設計品質およびこれらを具現する能力を、必要な分野の専門家の参画のもとに検討し、品質の改善、向上を図るとともに、次の段階に移行できる状態にあるかを評価する体系的活動であるとされている [6]。

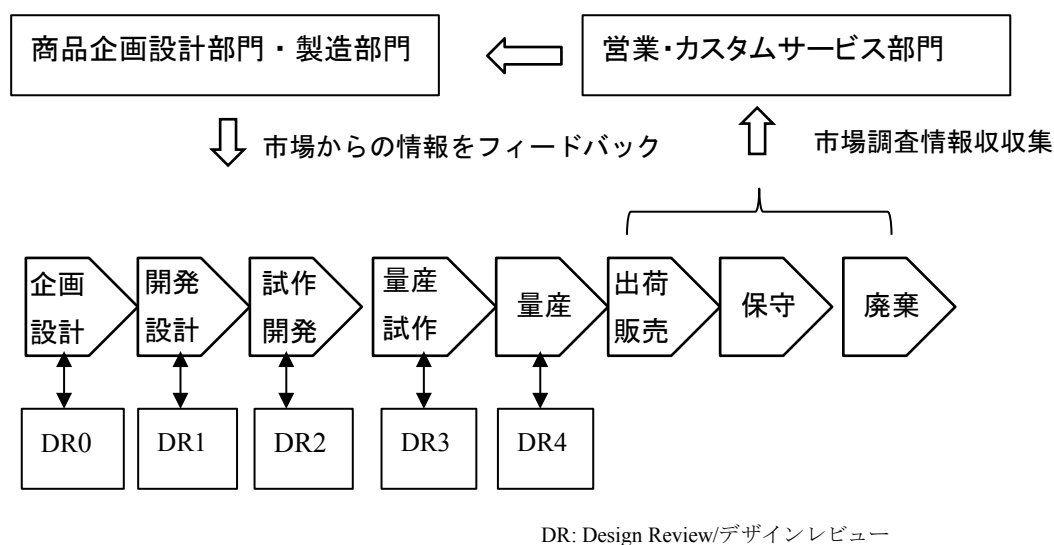


図 1-1 製品ライフサイクルにおける品質保証

特に、製造者が自社製品の品質を管理できるのは、製品が市場に出るまでの過程であるので、多くの製造企業では製品の設計、開発、製造、販売の各プロセスにおいて、担当責任部門を設置し、品質を管理する手法を採用している。

生産管理システムの国際標準化に関しては、ISO(International Standard Organization)が、国際標準規格 ISO 9000 を 1987 年に制定している。国内では、この国際標準規格を基にした JIS Q 9000 が制定されている。国際標準規格 ISO 9000 の中で、品質保証体系が関係する部門と製品の生産プロセス段階ごとに、どのように品質保証の活動が実施されるべきかを示している [4]。規格は、一貫した品質マネジメントを実施することで、製品品質の確保を目指しているものである。プロセス毎に生産者が意図した製品の品質を実現するために、製造工場の管理体制や設計開発プロセスについて、目的、進捗管理、文書管理などが詳細に示されている。このような生産管理システムでは、各過程において、製品品質に影響を与える要因に対する監視が強化され、製品の品質低下の軽減を図ることになる。

一方、製品の安全性を確保するためには、従来の ISO 9000 を基にした品質管理体制に加えて、製品安全に対する要求が十分に考慮される新たな社内活動が必要であると考えられる。製品不安全事故を契機に、製造者への責任追及や、企業の社会的責任に対する意識が高まっている [7]。このような背景の中、各企業においては、製品安全の確保に対する取り組みが一層強化されてきている。しか

し、製品の事故は後を絶たずに、リコール報告も数多く見受けられるのが現状であり、近年、車載用安全装置の問題でリコールと賠償問題を含め経営危機に至る例も見受けられる。このことは、従来の顧客要求視点の現状の製品生産管理システムでは不十分であり、リスクマネジメントも考慮した管理システムの必要性があると考ええる。一般に、製品安全マネジメントを担当する部門を品質管理部門に設置することが多いが、この場合、従来から適用されている国際規格 ISO 9000 の品質マネジメントシステムによって、製品の安全性も同時に管理・確保できることを過剰に期待し、ともすれば、製品安全品質確保に対する対応が遅れ、市場で製品の不安全品質問題に繋がる恐れがあるなどの問題点もある。

生産管理システムを国際規格に適合させることに加えて、国際規格の適合対象範囲で不十分と判断した領域については、製造者自らの改善活動が展開されなければならないと考える。そのためには、製品安全マネジメントの視点での行政の強化が必要である。

1-1-2. 製品事故の現状

日本国内では、独立行政法人製品評価技術基盤機構(NITE)が、経済産業省の製品安全行政として、事故情報を収集し、それらを製品事故データベース [8] として公開している。2007 年 11 月に、消費生活用製品安全法の一部を改正する法律(平成 19 年法律第 117 号)が成立し、重大製品事故の発生を知り得た製造・輸入事業者は、国へ報告することが義務づけられている。製品事故データベースには、経済産業省、および消費者庁に報告された製品事故を重大事故報告と非重大事故報告に分類され公開されている。したがって、この製品事故データベースから製品事故の実態を調査することができる。

NITE 製品事故データベースでは、これらのデータを年度ごとにまとめられている。例えば、平成 23 年度の第 1 四半期から第 3 四半期までに報告された事故情報の分析が生活安全ジャーナル [9] に示されている。年度ごとに受け付けられた事故件数は、2009 年は 3824 件、2010 年は 4267 件、2011 年は 3195 件である。このデータは登録日をベースにしてカウントされているので、データベース(2015 年 8 月 1 日現在)検索を利用し、2005 年から 2014 年の製品事故件数を検索し、事故の発生年別に整理した結果を表 1-1、図 1-2 に示す。

表 1-1 製品事故データベースにおける発生年毎の事故件数

事故発生年	総件数(件)	家庭用電気製品(件)	その他(件)
2005	2284	884	1400
2006	3343	1364	1979
2007	4819	2321	2498
2008	4874	2509	2365
2009	4091	2290	1801
2010	3498	1863	1635
2011	3172	1614	1558
2012	2844	1292	1552
2013	2905	1280	1625
2014	1544	753	791

2006 年に、日本の消費者安全法の改定により、長期使用報告に関する規制が設けられ、報告制度の義務化が導入された。その結果、表 1-1 から明らかなように、2007 年に急激に件数増加になったと考える。2013 年の事故件数は 2005 年に比して増加傾向にある。2008 年から減少の傾向はみられるが、件数は 3000 件に及ぶ。2014 年の件数は、調査・分析中の件数が含まれていないので、ここ
で示された件数より増加することが考えられる。

この様に、製品安全適合認証制度などが実施され、行政も強化されているが、前述のように事故の件数は減少されていないため、製造者は、更なる事故件数の減少を図る必要がある。このためには、製造者、積極的に製品安全レベルの向上、維持のために社内マネジメントシステムの改善を行うことも重要と考える。

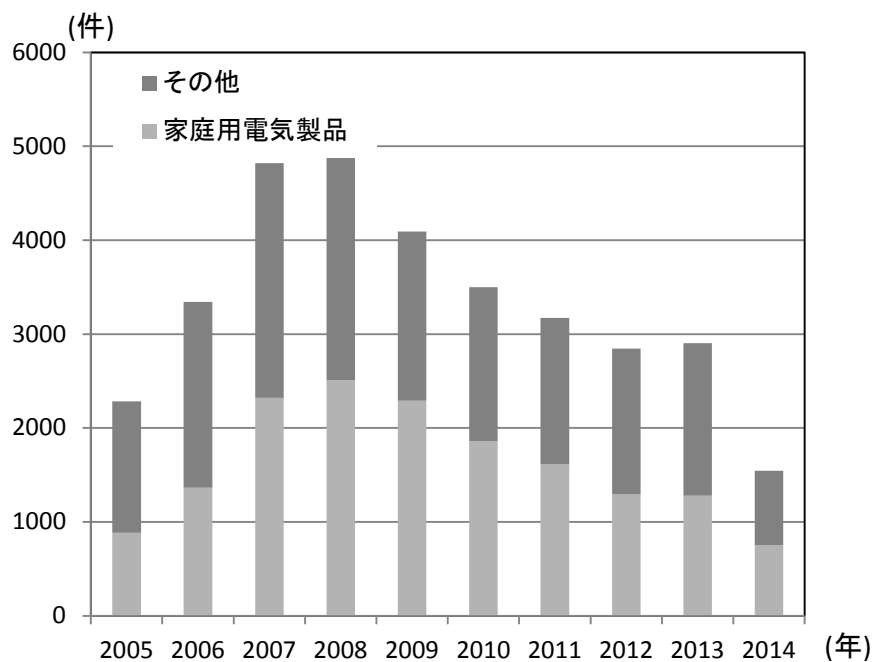


図 1-2 国内の製品事故の年毎の件数

1-1-3. 製品事故の評価手法の現状と課題

製品の故障率の時間的变化は、図 1-3 に示すようにバスタブカーブで表わされることが知られている [4]。図中の領域Ⅰ，Ⅱ，Ⅲについて、Ⅰは初期故障領域で、DFR(Decreasing failure rate)型と呼ばれ、初期製造不良や設計問題など早期に見受けられる事象で調整や対処により故障率が時間とともに減少する領域である。

Ⅱは、CFR(Constant failure rate)型と呼ばれ、初期不良などが排除された後、故障率が時間に関わらず一定になる領域である。Ⅲは、IFR(Increasing failure rate)型と呼ばれ、故障率が時間と共に増加する領域である。領域Ⅱと領域Ⅲの境界点は、製品を廃棄する限界寿命と考えることができる。

バスタブカーブで示す初期故障領域は、製造者の製造過程での不良によるものと考えることができ、生産過程において、偶発故障領域における故障率まで低減することが必要であり、その対策に多くの時間が費やされている。

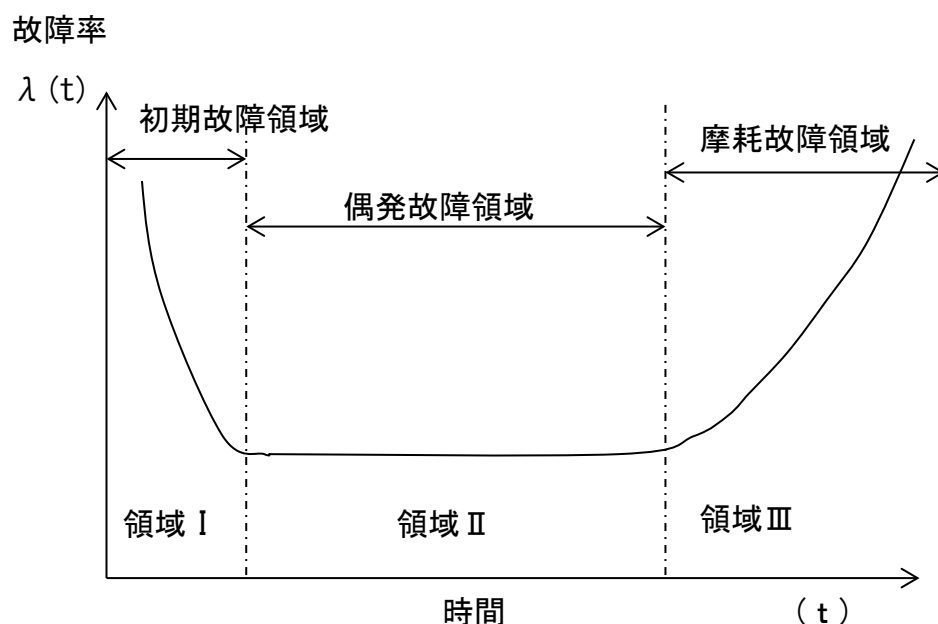


図 1-3 製品の故障率の時間推移

限界寿命を超えて使用することは、製品の故障確率は急激に高まることが予測され、設計時に想定されるものの、フィールドデータからその寿命を判定することは、次期設計に反映する上でも極めて重要なことである。又、市場において製品起因による事故の件数を低減するためには、バスタブカーブで示した偶発故障率と製品の廃棄事象を意味する限界寿命をあらかじめ明らかにし、設計・製造過程において、製品の安全品質を制御することが有用な手法であると考えられる。しかし、PCや携帯電話などに代表される様に意匠と使い易さが主流になっている近年ではこれらの研究は数少ない。

一方、製品事故の件数を減少させるために、国の機関が製品事故の報告を義務化し、これらの報告を公開している。製品事故の再発防止を主目的に使用されている。その手順は、製品事故は消費者庁への報告、報告された製品事故はNITEにより事故原因分析が行われて製品起因の事故の原因が解析され公開される。製品事故の主原因を解析し、どのように事故が生じたかの分析、評価が実施される。これらの結果から、関係省庁や工業会への通知や注意喚起が施される。事例によっては解析結果から得られる対策内容を法規制の基準に作り込む作業を実施しなければならない。このように再発防止に向けた国際規格基準の

改定や法規制強化などの行政改善，製造者への周知，製造者自らの社内安全設計基準の改定などに利用されている．製造者においては，これらの事故情報に従って社内基準の見直しや，設計改変などが行われる．特に，故障原因だけでなく，その製品の故障率分布が得られれば，製品設計に有用な情報となる．しかし，これらについての研究は無いのが現状である．

以上述べたように，フィールドデータにより製品の偶発故障率と限界寿命の情報が得られれば，特定事象の製品事故の再発防止の効果に留まらず，より効果的な製品安全品質の制御が可能になると考える．したがって，フィールドデータから偶発故障領域における故障率と限界寿命を得ることは重要であるが，これらのデータを用いた例は示されていないのが現状である．その理由の一つは，複雑化されている製品に対し，故障を予測できる統一的な手法が見出されていないことによると考える．したがって，現状では，実製品による実験手法となっており，国際競争力低下につながっている．国際競争力向上には，機能や意匠に特化した設計方法だけではなく，信頼性評価などを含めた製品の安全性評価にこれらの既存のデータを有効に利用できる手法の確立が課題であり，早急な取り組みが求められる．例えば，製品は複数の部品で構成され，同時に製品開発期間の短縮化のために製品故障率が構成される部品に依存すると考えることができる．その考え方を基に，製品とそれを構成する部品毎に部品ブロック解析手法を提案できれば，フィールドデータの情報を製品評価に適用することが可能であると考えられる．

1-2. 国際標準規格策定の現状

1-2-1. 国際電気標準化会議（IEC）における安全規格策定状況

製品の安全規格は国際標準化会議(IEC)によって推進 [10]され、国際規格となった規格は、各国の法制化当局により、法律に組み込まれる（付録-1）ため、IEC での国際標準規格策定の枠組を知ることは重要となる。以下にその概要を述べる。

IEC の標準規格は、図 1-5 に示すように、タイプ A 規格、タイプ B 規格、タイプ C 規格の 3 つの階層に分かれている [11]。タイプ A 規格は、基本安全規格とよばれるものでリスクアセスメントなどの基本概念、原則、要求事項を規定した規格であり、ISO/IEC Guide 51, ISO 12100, ISO 14121 [12]などがこれに該当する。タイプ B 規格にはグループ安全規格と呼ばれ、プロセス、製品群に対しての安全規格があり、この規格には、機能安全を規定した IEC 61508, ISO 12100 がこれに該当する。タイプ C 規格は、個別製品毎に IEC 60335 [13], IEC 60065 [14], IEC 60950 [15]などの製品規格が制定されている。

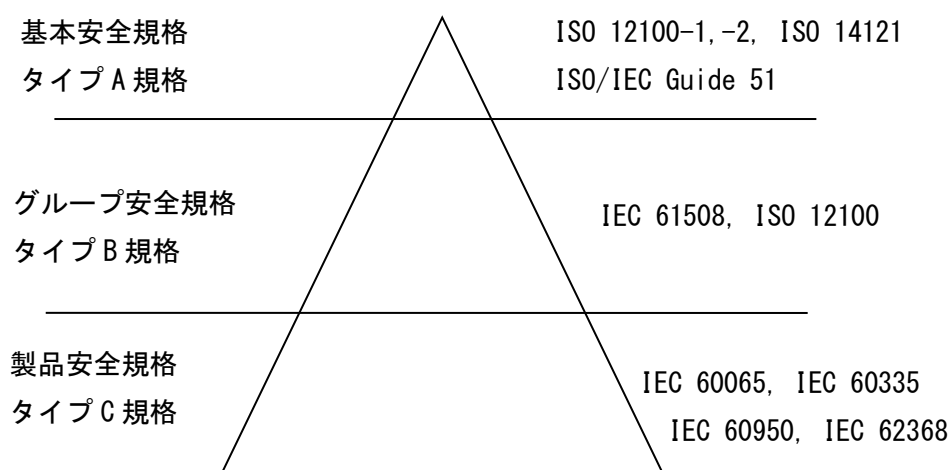


図 1-5 ISO/IEC 標準規格の階層構造

タイプ C 規格のなかで、次世代のマルチメディア機器である AV, IT 機器に対して、これまでの製品個別規格に代えて、ハザードベース安全工学をベースと

した新たな安全規格，IEC 62368-1 [16]が議論されている．ハザードベース安全工学は，ヒューレットパッカード社のリチャード ニュート氏が提唱した製品安全に関するコンセプトであり，エネルギーが人体や財産にどのように影響を与えるかを科学的に追及したものであり，危険源と防護策と人体の3要素からなる安全評価モデルを基にしている [17]．

国際安全規格は，ISO/IEC が発行する ISO/IEC Guide51 [18]に推奨された要求内容を基に規格化が進められる．ISO/IEC Guide51 は，製品安全規格策定を行う上での指針を与えるものである．

この ISO/IEC Guide51 では，製品に内在するリスクを許容できるレベルに抑え，リスクアセスメントを実施することを推奨している．この過程は，図 1-6 に示すように，製品に内在するハザードを列挙し，ハザードが内在する場合は，ハザードのレベルを低減する可能性を図り，また，セーフガードを供給しリスク軽減を図る．残留するリスクの軽減を図る目的で，当該の製品のリスクアセスメントが行われる [11]．

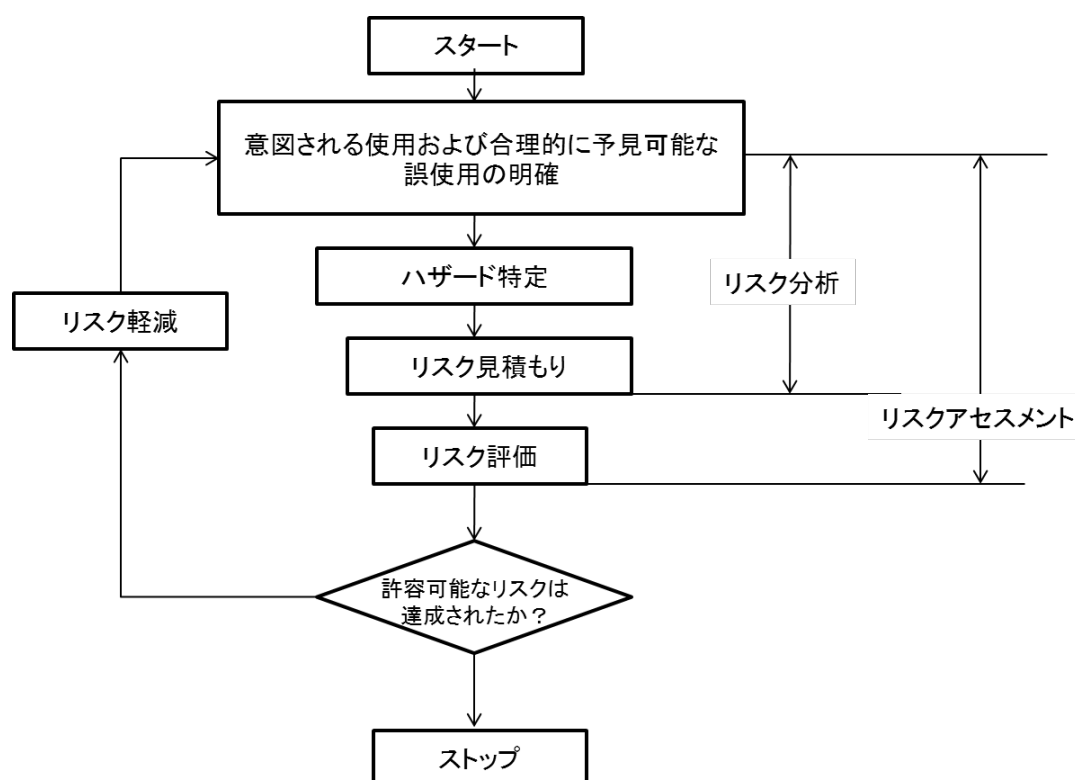


図 1-6 リスクアセスメントの例 [11]

ISO/IEC Guide 51 では、リスクアセスメントは製品の使用期間にわたり、その製品のリスクを評価しなければならない。製品の使用期間は、販売され設置された後、メンテナンスがなされる場合も含め当該使用期間を経て、継続使用される場合もあるが、最終的に廃棄される。リスクは、製品使用サイクルのなかで評価する必要がある。この期間において、不安全事故の発生や、許容できないリスクが顕在化することがないように製造者は製品設計とメンテナンスを行わなければならないと規定している。

製品ライフサイクルの中で内在するハザードを列挙して、その低減を実施することが製品安全の確保には重要となる。製品の開発、設計、製造のプロセスの中で、製造者は列挙したハザードの低減を行うために、設計にその低減策を盛り込む必要がある。加えて、製造過程により、新たなリスクが生じないように施策をとることも必要である。

過去に発生した問題で、最も多い例は、従来から構築されていた安全性確認の基準に対する確認から漏れる場合などである。例えば、設計変更が製造部門で行われる場合、設計変更が実施されると、新たにリスクが加わるために、この時点でのリスクの再評価が必要となる。

製造者が上記のようなリスク軽減を行うためには、リスク評価チームを構成し、設計、開発、出荷のプロセスの中で評価がなされる。この場合は、規模によっては、設計、製造、販売、メンテナンスの部門の責任分担が明確になっており、製品に対するハザード列挙を担当する設計者、開発者が、その製品に内在する危険因子を列挙し、プロセス毎にハザードの変化に対して、適切に評価されていることが製品安全マネジメントシステムによって確認される必要がある。行政部門が実施するチェックシートなど、検査の実施がなされているかどうかだけの判断では、表層上に管理に留まることが懸念されるため、設計、開発の製品のハザードを熟知した担当者を加えたハザード検証が必要である。さらに、加えて設計者に安全設計の基礎的教育を実施する必要がある。理想的には、リスク評価責任者を設置し、製品のハザード評価をする専任者を常駐させることが重要である。最終的には、製品安全性を確保する視点で、製品自体のリスク軽減方法を構築する段階と製造者の組織行動の視点での管理手法が構築され、製品安全の管理が実施される。

ISO/IEC で制定される安全規格は ISO/IEC Guide51 においてリスクアセスメン

トの実施を前提とし、それに基づく規格策定を推奨している。この考え方の中で、IEC Guide104 では製品安全評価として製品に内在するハザードを列挙することを求めている。IEC 62368-1 [16]ではハザードをこれまでの様々な経験知からハザードの種類について危険源として、「電気エネルギー、熱エネルギー、機械エネルギー、化学エネルギー、放射エネルギー」に大別され、列挙されている。従来の製品安全規格は、従来の事故例などを基にして、製品の毎の危険源に対して安全規格が策定されてきた [19]。近年の製品のカテゴリが、従来の単一機能製品から、マルチメディア化が進み、複合機能製品に変化してきている。

このような流れの中で、ハザードをベースに、危険源を全て網羅し、その危険源を低減する機能を盛り込んだフィードフォワードの考え方に基づく安全規格の策定が緊急の課題と考える。

1-2-2. 国際標準規格適合について

製品安全の確保には、製造者は各国の法令に従った規則に適合させることが必須である。各国の法令に組み込まれる規格は、IEC で策定された国際標準規格が基になることが大半である。しかしながら、国際標準化の策定プロセスと製品安全規格には、次のような2つの課題がある。

- ・第1の課題は、国際標準規格化は製品の変革期間に比べて時間を要すること、
- ・第2の課題は、製品の技術変化に伴い、規格のメンテナンスとのずれが生じること、

である。

第1の課題は、家電製品の開発期間が短くなり、1年毎に製品モデルが変更され、製品構成部品、機能が新しく追加される。一方、IECの国際標準規格は、前述したように、階層構造に従い、タイプA規格に定められる規格策定の基本指針に従い策定される。また、タイプB規格のグループ規格に整合した製品毎にもタイプC規格が策定される。各国の法制化において参照されるのは、製品毎のタイプC規格の場合が多い。この場合、規格の階層構造に従い、関連の規格との整合性が求められる。国際標準化においては、新たな規格策定提案が提出されると、この階層構造で定められて策定要求に従い、他の規格との整合を図りながら、審議が進められていく。IECでは、規格策定期間の最長期限を5年

と定めている。これは、5年の策定期間を過ぎたプロジェクトは再考するための基準であり、従来この年限は7年であったが2003年に5年に改定されている[10]。この基準が変更された背景には、規格策定が5年を超えて遅延するケースが多かったことにある。このような例は、工場電設備防爆指令でも示されている[20]。

このように規格策定に5年も要するので、当初の規格の内容とその後の改良が加えられた製品設計内容が整合しなくなる恐れがある。また、製品毎に策定されたタイプCの製品安全規格は、規格策定時点での発行されているタイプCの部品規格と整合するように策定されている[21]。

製品規格は規格維持のために、新しい要求があれば、IECでは審議により、規格改定は行うものの他の技術委員会との調整などが必要となり、時間を要するケースがある。さらに、国際規格が制定されたとしても、その国際規格を国内の法律が参照する規格に取り込むために、相当の時間を要することが予測される。

第2の課題は、既存の製品カテゴリではなく、新たに製品の機能が変化したことに起因し、生じる問題がある。一例を挙げると、従来の放送が通信との融合によりテレビジョン受信機にインターネット機能が加えられ製品が登場している。また、FAXや電話、コピー機などでは従来の単一製品ではなく、それらを統合したマルチ機能機器に変化している。タイプC規格では、それらに対応して、それぞれを製品毎に規格が制定されているため、どの製品カテゴリに対応させるかなどの問題が生じる。このような状況の下、解決策として、AVとIT機器に関する統合製品安全規格 IEC62368-1 が策定されている。今後も製品のカテゴリは、製品のシステム化や機器機能の統合が進むなかで、白物製品に通信機能が搭載されるなどの新しい変化が生じている。従来の製品規格であるタイプC規格ではこのような場合、対象となる機能範囲がずれる可能性がある。また、新たな部品、材料も変化する場合に、製品規格でカバーしきれない場合が生じる。

このような背景から、製造者自ら、国際規格適合に頼らず製品安全を確保するための製品安全マネジメントシステムを構築することが必要となる。例えば、宮村らは事後対策を実現するための品質保証体制の各段階における役割を論じ、製品安全保障体系として商品企画から出荷、市場対応、品質情報収集などの各

段階における安全品質保証体制系を構築する必要性を示している [7].

ISO 9000 がマネジメントシステムの国際標準規格として広く運用されてきたため、製造者は ISO 9000 規格の中で制定された内容を基本に生産管理システムを構築している場合が多い。ISO 9000 は製造工程で製品実現を果たすために組織に要求される管理体制の基本フレームワークであり、その内容は顧客重視、品質方針、計画、組織コミュニケーション、マネジメントレビューに関する経営者の責任が明記されている。また、人的資源、作業環境の運用管理、製品実現に向けた製造ステップの在り方、測定、分析、改善が規定されている。フレームワークとは、製造者の基本的なあるべき姿の標準化であり、その詳細の実現方法については言及されず各社に委ねられている。例えば、トヨタカイゼン方式や、ゼネラルモータース社(GM)のリーン方式などは、製品品質の実現にむけ各社内で構築されたトータルクオリティマネジメント(TQM)として紹介されている [3].

AV 機器や IT 機器などの複合の部品の構成では、製造過程においてデザインレビューが行われ、各過程の確認から、製品の品質確保を行うことを目指している。製造の分業が進み、部品の品質信頼度の合成が完成製品の品質となるため、部品納入における品質保証は、製品品質維持には欠かせない重要な項目である。現在、完成品製造者にとっては、部品の供給会社から納入される際に、安全重要部品に関しては、第 3 者認証試験場から認証結果を得ることを要求することがある [22]。このことは、規格認証制度や認証登録制度が第 3 者機関を中心に制度化され運用されている結果だと考えられる。

製造者が製品の安全を担保するための生産管理システムを構築する場合、単に既存の ISO 9000 シリーズを導入するだけでは、製品安全を保障、管理することが難しい。つまり、文書化と設計確認(DR)を中心に実施される従来の品質管理システムより安全品質を管理した場合は、設計品質を生産過程で損なわれていないかの管理の徹底を図ることに重点が置かれ、本質的に製品安全を保証する仕組みとして不十分である。

製造者は、製品安全レベルを基準化することにより、製造者が供給を対象とする全ての製品に共通した安全水準の評価方法を導入して、その指標を基に生産管理が必要となる。

1-3. 国内外の行政の動向

1-3-1. 国内行政の動向

製品安全に対する取り組みは、各国の行政機関を中心に整備が進められてきた [23]。国内では、1962 年に家庭用品品質表示法が制定され、1967 年に消費者保護基本法、1972 年に消費者生活用製品安全法の制定があり、製品安全に対する行政が整備された。

1970 年後半には、製品安全 4 法の政府認証品目と自己確認制度の件数比は自己確認品目が割合を高めて、製造者自身の責任で製品安全を確認する方向で推移してきている。国際品質管理システム認証 (ISO 9000) が普及したことや、PL 法制定 [1] への対応が事業者の自主的安全への取り組みが促進されたと考えられた。

1997 年の産業構造審議会及び、消費経済審議会の製品安全合同小委員会の報告書 (1997 年 12 月) では、製品安全の確保は、事業者が実施することと位置づけられ製品安全規則は、それを実現するための基本ルールとされた。また、第 3 者による適合性評価には、民間企業の参入を認めることが示されている。また、1998 年、製品安全関係 4 法の改正が行われ、製品安全行政の新たな体制を整備することになった。2006 年には、製品事故情報の報告公表制度や、長期使用製品の法定点検制度が開始された。この様にして今日の電気製品認証協議会の安全認証制度の制定に繋がっている。しかしながら、製品の経年劣化による対策が必ずしも十分ではなく、益々、製造者の責任において安全対策の強化を図ることの必要性が高まってきた。

国内政策の対応として経済産業省は、消費生活用製品安全法に基づく製品事故の報告・公表制度の運用を行い、2012 年に製品リスクアセスメントのガイドブック [24] を発行し、製造者が自ら製品安全対策を強化できるように図っている。

1-3-2. 国外行政の動向

欧州では、ニューアプローチ指令のもとに、CE マークを製品に貼付し、自己適合宣言を行う制度が運用されている。EU の一般製品安全指令にもとづきリスクアセスメントと自己適合宣言制度の徹底強化が図られている [25]。日本は規格基準に適合することを製品安全の担保にしているが、欧州は安全必須要求条件が指令で指定されているので、製品毎の規格適合の前提条件として必須要求

項目の実現をめざすようになっている。

米国では、CPSC は、CPSA(連邦法)によって 1972 年に設立された。CPSC により 1972 年より、製品事故情報の公開を行い、事故軽減を図っている [26]。

1-4. 製品安全性に関わる研究動向と課題

1-4-1. 研究動向

1) 宮村の研究

宮村 [27]は、欧州のような CE マーク制度にみられる製造者の主体的な取組が必要と言及している。また、宮村らは、製品責任の事例解析に基づく製品責任予防のための品質保証課題に関する研究 [7]では、品質保証体制の中で、製品欠陥に関わる事象を集めて、これらの対応策を体系的に調査研究し、品質保証体制に結びつけることが重要と述べている。また、製品の経年劣化に伴う事故の解析 [28]を行っている。品質保証体制の中で製品安全を製品の欠陥と損害発生モデル化を示唆しているが、製品安全評価方法の提案がなされていない。さらに、製品安全への取り組みと進め方をまとめている [27]が、1995 年に製造物責任法が施行された後、企業の製品安全に対する取り組みは強化されてきている一方、使用環境が異なるため、それを設計で考慮しておくことの重要性の指摘にとどまっている。

2) 野口の研究

機械システムやプラント分野における安全確保の取り組みは、リスクアセスメントを中心に行われている。ISO 31000 は、リスクマネジメント規格であり、野口 [29]は、安全性確保のために、このリスクマネジメント規格の適用について報告をしている。また、生産管理マネジメントの重要性を示唆し、プロセス構築時に参考とすることができる。ISO 31000 では、リスクマネジメントのプロセスが定義され、プラント安全管理や製品安全管理に適用することができる。しかし、リスクアセスメントの家電製品への適用を考えると、複数の製品カテゴリに共通するリスクアセスメントを実施しなければならず、適用性に問題がある。機械設備の信頼性と安全性については人的リスクについての研究もなされている [30]。

3) システムに対する研究

製品の品質に対する取り組みは、経営リスクにも着目されているのが現状で

ある [31]. また, Photo Voltaic/太陽光発電(PV)システムのように, 一定期間の使用期間にわたってのシステムの信頼性と持続性についての研究例もある [32]. Stember は, PV システムを Reliability, Availability, Maintainability の観点からエネルギー効率を評価した [33]. Garro は, PV システムにおける信頼性評価に FMEA (Failure Mode Effect Analysis) と FTA (Fault Tree Analysis) をベースにソフトウェアの開発をしている [34].

4) 益田の研究

信頼性アセスメントについて, 事後的信頼性技術に基づいていたが, 益田らは, 予防的信頼性技術が重視されたことを報告している [19]. そこでは, 製品安全のためのリスクアセスメントと製品ライフサイクルにわたる信頼性の影響を組み合わせることによるシナジー効果を説明している. 信頼性アセスメントは事前に影響を総合的に査定することとし, また, 製品アセスメントは, 製品製造の段階で適切に行われるべきと述べている. 製品企画段階, 開発設計段階, 生産段階, 取り付け工事段階, 運用, 保全段階, 撤去・廃棄段階. 開発設計段階の信頼性アセスメントは, FMEA/FTA で実施するとしている. また, FMEA 手法を人・環境・装置の三要素の視点でまとめる改善提案をしている [35]. さらに, リスクアセスメント手法について製造者独自の活動が報告されている. これらに関連をしてパナソニック電工のリスクアセスメントの社内への展開活動が報告されている [36]

5) 事故要因の解析手法の研究

事故要因の解析方法として, 従来から FTA や FMEA の手法が用いられる [37]. また, 清水は, 製品安全解析技法の実施事例として製造者が実施している製品安全解析技法について, FMEA, FTA, ETA, PDPC, FMECA をまとめ, 信頼性, 故障解析に関していずれもチェックシートが重要であることを報告している [38]. FTA と FMEA を結合するベーズモデル [39]による手法も報告されている. 応用例として製品のサプライチェーンにおける信頼性データのモニタリングについての報告 [40]がある.

柴田らは, 製品安全のためのリスク解析は, システムの同定から, リスク推定までを包含するとして, FTA に危険事象を割り付けてリスク解析に用いたものを紹介している [41]. また, プリント・電子機器分野 [42]に対する FMEA, FTA の応用を報告している. 和田は, 製品安全確保のための解析技法の開発と活用

として、FMEA と FTA の組み合わせによる製品安全評価への適用方法を提案している。いずれもイベントを中心にまとめられている [43]。さらに、システムの信頼性データを計算する方法としては、ランダムノイズ発生手法を取り入れたモンテカルロシミュレーションが利用できる [44]。

信頼性についてはこれまでいくつかのデータブックが発行されている [45]。その代表的な例として MIL 規格 HDBK-217 があり、これは米国防衛省の電気製品に関するハンドブックであり、部品の過去の故障件数から故障確率をまとめたものである。しかし、2000 年代にデータブックが古いため改定が求められている。

6) ハザードベース安全工学の研究

ハザードに基づく安全工学の基本概念を採用した IEC62368-1 の国際規格策定が進んでいる [46]。ハザードベース安全工学は、ヒューレットパッカード社のリチャード ニュート氏が提唱した製品安全に対する基本概念である [47]。ハザード、すなわち危険源にエネルギーが存在し、そのエネルギーが人体や財産に伝達することにより傷害や火災などの損害を生じさせるという考え方である。電気エネルギーの場合、電流が人体を流れることによって心室細動を引き起こし生命の危険にさらす。この人体に流れる電流は、10mA から 200mA では、接触した体の部位を離脱することが不可能となる。この例のように、エネルギーレベルがどのように身体に影響を与えるかが考慮されている。よって、危険源のエネルギーを外に伝達することを防護することによって危険性を許容できるレベルまで低減を図るという考え方である。米国認証機関である UL Inc. では、この概念であるハザードベースエンジニアリングを発展させたリスクアセスメント手法を提案している [48]。しかしながら、世界各国への普及には至っていない。その理由はアセスメント例に焦点があり、製品の故障の改善まで考慮されていないことにあると考える。

1-4-2. 解決すべき問題点

製品安全性評価の在り方として、従来の事故発生の変因を解析し、その事故変因に対する対策を講じるというフィードバック方式で管理するだけでは不十分である。事故発生軽減をはかるためには、事故の変因となるハザードを事前に特定し、そのハザードが製品設計においてどのように、防護され安全性が

確保できているかの視点が必要である。しかしながら様々な製品に共通する製品安全性レベルを定量化し、その定量化された安全性レベルに従って、製品の安全品質を統括的管理が議論されていないが問題である。

これらの問題解決のため従来から関連する産業会、工業会、経済産業省を中心に、家電製品の事故例を分析し、データベースとして蓄積し、重要な要因について解析を行い、その結果を、製品設計や行政にフィードバックが行われてきた。主な工業会は、対象製品カテゴリ毎に、一般社団法人 電子情報技術産業協会(JEITA)、一般社団法人 日本電機工業会(JEMA)、一般社団法人 ビジネス機械・情報システム産業協会(JBMIA)、一般社団法人 情報通信ネットワーク産業協会(CIAJ)などがある。これらの機関では製品安全の確保に向けての活動が注目されている。この活動の中では、畑村の失敗学で代表されるように不安全事故原因の系統図を作成し、さまざまな角度から不安全事故の原因を探求し、設計プロセスにその経験知を盛り込むことが行われてきている [49]。しかし、製品の使用期間経過による事故があとを絶たないのが現状である。

一方、湯沸器、石油温風器、加湿器の事故は、記憶に新しく、製造者の責任は追及され、賠償費用は、莫大な額になる。ガス湯沸器の事故の例では、東京地裁が製造者へ1億2千万円の賠償を命じた例もある。このように、製品事故が発生すると、製品のリコールに加えて賠償責任が生じ、製造者の経営に大きく打撃を与える。

したがって、製品事故の例を分析して、その原因を探り、事故の再発防止を図る従来の事後管理方式ではなく、製品事故に結びつくハザードを事前に評価する事前管理方式の製品安全マネジメントが求められるが、この方面の研究の数少ないのが現状である。

1-5. 本研究の目的と研究手順

1-5-1. 目的

製品の品質の向上は、設計、製造段階における品質管理で実現され、それ故に品質の造り込みが重要と表現されることが多い。家電製品の不安全事故の軽減のために、品質の造り込みの重要であることを理解した上で、製品の製造過程の上流プロセスである開発・設計段階において、製品の安全レベルを一定レベルに確保することが必要である。製品は、多くの部品が構成されているため、

また、設計段階において設定された安全性のレベルが採用された部品が時間経過後に性能劣化、故障などにより、設計時レベルから低下することにより、不安全事故が発生すると考えることができる。たとえば、製造過程において、低品質な部品の採用や、一定時間経過後に製品不良による事故が発生する例があり、このように、不安全事故件数の低減実現には、時間経過を考慮した製品安全性の確保が重要である。

本研究の目的は、市場における製品の不安全事故件数を低減するために、家電製品に関する製品安全評価手法を提案することにある。その提案手法を、家電製品全体に適用し、製造者が製品製造現場や設計現場にフィードバックできる製品安全評価基準を提供し、製造者の製品安全マネジメントシステムを提案する。

1-5-2. 研究手順

1) 安全性の定量化

製品の不安全事故は、ハザードのエネルギーが人体や製品の近傍の家財などに伝わることにより傷害や火災を引き起こし発生する。エネルギーは電気、機械、化学、放射、熱などその製品を機能させるために存在し、製品安全はこれらのエネルギーを防護するようにセーフガード部品を供給することによって担保されていると考える。この製品のセーフガードが故障することにより、エネルギーが外部に伝わり不安全事故に繋がっていると考えることができる。この考えの基に、製品の安全性評価のために製品に内在する可能な限りのハザードを網羅し、そのエネルギーを保護するセーフガード部品の信頼性を評価することを試みる。そのために、製品のハザードのリスクアセスメントを効率的に実施するハザードベース FTA (HB-FTA) 手法を提案し、製品の安全性の定量化を行う。

エネルギー源ごとに定義された安全指標レベルと、セーフガードの故障率から導かれる信頼度により製品の安全性レベルを数値化することにより製品の安全性レベルを評価する。このハザードベース FTA 手法は、従来の製品機能の故障解析である FTA 手法に替え、ハザードのエネルギーレベルとセーフガードの強度レベルとセーフガードの信頼性に注目しているところに特徴がある。ハザードのエネルギー源をカテゴリ毎に FTA を展開し、製品内の危険源を抽出し、ハザードを封じ込めるセーフガードの部品の信頼度を計算できれば、製品の安

全レベルを定量化することができる。ハザードのエネルギーレベルを設定し、セーフガード部品の信頼性を考慮することにより製品安全性基準を数値化し、生産管理システムに導入しやすくすることも可能となる。

2) 故障率の算定と妥当性の検討および、製品寿命の考え方

製品事故は、1-1-3. で示したようにバスタブカーブに代表される故障率により発生することが知られている。製品の安全性レベルは出荷される時点から、市場において使用される期間において、個々の部品の信頼度の劣化、つまり故障現象により、その安全性が損なわれる。そのために、製品安全評価手法の確立のためには、市場における製品の安全性レベルの定量化を行うことと、製品の寿命を知る必要がある。製品の安全性を担保している個々の部品の信頼度が、製品の安全水準を決定づける。製品の安全性レベルの定量化のために製品を構成する部品の故障率の入手が必要となるが、一般的に故障率の入手が困難な場合が多い。製品事故のフィールドデータを活用することにより、事故に繋がる部品を安全重要部品と位置づけて、その部品毎の故障率をフィールドデータから得る評価手法を確立する。

国際標準規格にある IEC TR 62380 のプリント基板とその部品の故障率のテクニカルレポートが発行されている。過去の事故例のフィールドデータから部品の故障率を求め IEC TR 62380 の偶発故障率との比較することにより、フィールドデータから得られる部品の故障率の適用性を確認し、提案手法の妥当性を明らかにする。

また、このテクニカルレポートは、電気製品の主要な部品の信頼性を評価したものであるが、偶発領域と摩耗領域の境界である製品の限界寿命が考慮されておらず、また、信頼度の確率分布が示されていないなどの問題がある。本研究では、このフィールドデータから得られた製品の故障率について偶発故障領域における故障率と、摩耗故障領域との境界点を明らかにし、製品の寿命について算出手法を提案する。

3) 製品安全品質マネジメントシステムの提案

製品安全水準の確率分布を明らかにすることで、製品評価マネジメントシステムで定義される製品安全限度値の確率分布を考慮した適用を可能にするものである。

部品の個々の故障率データのフィールドデータからの算出手法により、製品

を構成する部品の故障率を求め、ハザードベース FTA により実施する製品安全評価手法により、製品安全レベルを得られることを示し、さらに、この故障率の確率分布を考慮した製品安全評価手法を、製造者の生産管理マネジメントシステムに導入することの有効性を明らかにする。

以上のように、製品は多くの部品が構成されているため、また、設計段階において設定された安全性のレベルが採用された部品が時間経過後に性能劣化、故障などにより、設計時レベルから低下することにより、不安全事故が発生すると考えることができる。たとえば、製造過程において低品質な部品を採用したために、一定時間経過後に製品不良による事故が発生する例があり、このように、不安全事故件数の低減実現には、時間経過を考慮した製品安全性の確保が重要である。これまで、家電製品全体に適用できる製品安全評価手法がないので、本研究においては、その評価手法を提案し、製造者が製品製造現場や設計現場にフィードバックできる製品安全評価基準を提供し、製造者の製品安全マネジメントシステムについて記述する。

1-6. 本論文の構成

第 1 章は、本章であり、研究背景として、製品安全の重要性を記述するとともに、その安全性を確保するための、法律、行政、規格、製造者の視点で現状をまとめた。特に、製品安全の国際標準化の現状について述べ、その課題をまとめた。また、本研究に関連する分野におけるこれまでに実施されている研究について概括し、その解決すべき課題を記述し、それらに対応するために、本研究の目的と研究手順について記述した。

第 2 章では、製品不安全事故を低減させるために、製造者みずから事前管理が可能な生産管理システムの実現にむけて、製品安全評価手法の提案を行う。製品で共通に適用できる製品のリスクレベルの定量化をおこない、組織内に展開しやすい簡易なツールを提供する。従来の FTA (Fault Tree Analysis) にハザードのエネルギー伝達モデルを導入してハザードとセーフガードを抽出してハザードベース FTA (HB-FTA) の提案し、家電製品へ適用しその有用性を示す。

第 3 章では、市場における事故報告データベースによる製品を構成する部品の故障率の評価手法を提案し、その手法を詳細説明すると共に、家電製品へ適用す

第4章では、故障率の確率分布特性を評価するために、新たに等価故障率の概念を提案し、偶発故障領域と摩耗故障領域を分離し製品寿命を明らかにする。さらに、この各故障領域の故障率とその分布特性を評価する。その結果を IEC 故障率データブックと比較し、故障率の分布を考慮した基準選定が可能であることを記述する。

各章の関係性を図 1-7 に示す。



第2章 ハザードベース FTA

2-1. 緒 言

製品の不安全事故の対策は、従来、過去の事故例を分析し再発防止のために設計要求事項を基準化や、法律の技術基準の改定などを行っている。しかしながら、それには、次のような課題がある。製品の開発フェーズが非常に短く、製品を構成する部品、素材が変更になり、製品が進化し、過去の再発防止のために準備される施策だけでは十分でない。また、法律の基準改定には、国際標準策定のために時間がかかる。製品事故が発生した後に、その事故の再発防止策を考えるだけでは、本来の製品安全対策とは言えず、不安全事故をなくすためには、事故が予防できるような手法を導入する必要がある。これらの問題を解決するために、製造者が自ら運用できる製品安全評価手法を確立する必要がある。製品安全評価手法は、製品カテゴリに依存しない統一的な安全基準を導入し、製造者の生産管理システムに組み込むことを目的とする。生産管理システムに組み込むために、製品安全の基準を設定するという目的がより明確になるように評価手法は製品の不安全事故を引き起こす危険源に焦点をおき、簡素なツールを用い提案する。

FTA(Fault Tree Analysis)は、製品を構成する部品を対象に製品故障にいたる状況について、故障事象を最上位事象に置き、その事象に繋がる事象を解析する代表的な手法の一つである。この手法では、最上位事象から要因に分析するトップダウン的な手順で実施される。FMEA (Failure Mode Effect Analysis)は故障の結果が、どのような影響になるかをボトムアップ型の解析を行う手法である。これらの手法は、故障原因の解析と故障がどのような結果をもたらすかを整理すること利用されている。

本研究においては、この FTA の考え方を採用し、研究目的で記述した観点から製品の安全確保の視点で、セーフガードの信頼性と、人的行動誤りを考慮し、特定の単一製品に限らず、汎用に家電製品に適用が可能な安全評価手法を提案する。

感電、火災、爆発などの事故例では、その事故の原因となったエネルギー源が存在し、また、そのエネルギー源を防護している部品の故障や、手や指の挿入など人間の行動により潜在するエネルギーに接触することにより事故になる。

このことは、エネルギーを特定し、そのエネルギーに関係する部品、部位を

整理することにより、製品の安全に関係する構成部品が網羅的に抽出できると考える。つまり、エネルギー源がもたらすハザードを基に、安全に関連する部品の故障を分析することにより、製品の安全性が評価できると考える。そこで、従来の FTA 手法にハザードを設定し、危険な状況が生じる故障事象を集約することで製品の安全性を評価するために、その基準を決定することを目的とする。

従来の故障解析は、製品の機能が動作しなくなることをトップ事象におき、その事象に結びつく事象を、FTA を作成することにより整理される。本研究の目的は、製品安全評価水準を決定することにある。そのため、危険な状況が顕れる事象（ハザード）のみを FTA 図を利用して整理する。言い換えると何らかの機能上の故障により、機能が停止しても、危険がなければ製品安全評価指標に反映するものではないことになる。本研究では、この FTA をハザードベース FTA と定義する。

本論文では、家庭用電気製品（家電製品）を対象とする。家電製品のエネルギー源は、機械的エネルギー、電気的エネルギー、化学エネルギー、放射エネルギーに分類する。この分類は、ISO/IEC Guide 51 安全規格策定ガイドラインに準拠するものである。

エネルギー源ごとに、部品の故障を関連づけることで、すべての事故につながる故障事象を抽出することができるため、製品全体の長期的な使用期間内での製品安全を評価することが可能になると考える。

家電製品の事故の情報は、独立行政法人製品技術評価機構（NITE）の事故報告データベースで確認ができる [50]。NITE の事故データベースの家電製品の事故には、電気ストーブ、テレビ、冷蔵庫、電子レンジ、扇風機、エアコンなどがあげられる。NITE の事故報告データベースより、それぞれの品目の事故の詳細内容として件数を検索した。その結果を品目ごとに表 2-1、図 2-1 に示す。表 2-1 は、1996 年から 16 年間のデータである。これらの結果から、家電製品の内、電気ストーブ、パソコン、テレビ、エアコンで約 75%以上を占めることがわかる。

表 2-1 品目毎の事故件数（1996 年～2012 年）

品目	品目別事故件数
電気ストーブ	1944
パソコン	1890
テレビ	1098
エアコン	691
冷蔵庫	642
照明器具	483
扇風機	479

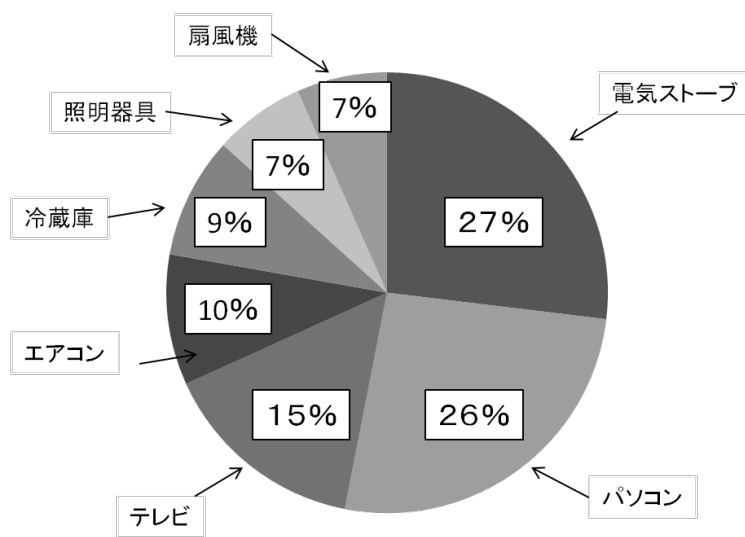


図 2-1 品目別事故件数割合

表 2-2 は、NITE において 1996 年～2012 年の 16 年間の事故要因とされる構成部品と発生件数である。これらの内、ヒータとヒューズは、発熱に関係する部品として事故要因としては挙げられる [51]。構成部品の中には、直接、熱源となるヒータがあるが、この場合は、ヒータの電流制御不良がその主原因となる。

図 2-2 は、家電製品の構成を主要な機能ブロック、構成部品を想定し一般的な家電製品の構成モデルである。家電製品は、主電源(100V)に電源プラグと電源コードにより接続され、そのプラグは、電線を埋設し栓刃を固定する絶縁筐体などがある。一般的に、筐体が充電部と人体の絶縁を保証し、感電から保護する役割を果たしている。この筐体の内部に、電源回路と製品の主要機能を果たすための構成部品で構成されている。この筐体を外郭、またはエンクロージャと呼ぶことが多い。

表 2-2 事故要因(1996 年～2012 年)

事故要因	事故件数	事故要因	事故件数
ヒータ	3036	外郭	1197
ヒューズ	2099	ダイオード	751
抵抗	1774	電池	686
電源コード	1766	プリント基板	188
トランス	1744	LED	70
コンデンサ	1665	バリスタ	39
スイッチ	1664	音圧	3
モータ	1287	光源	2

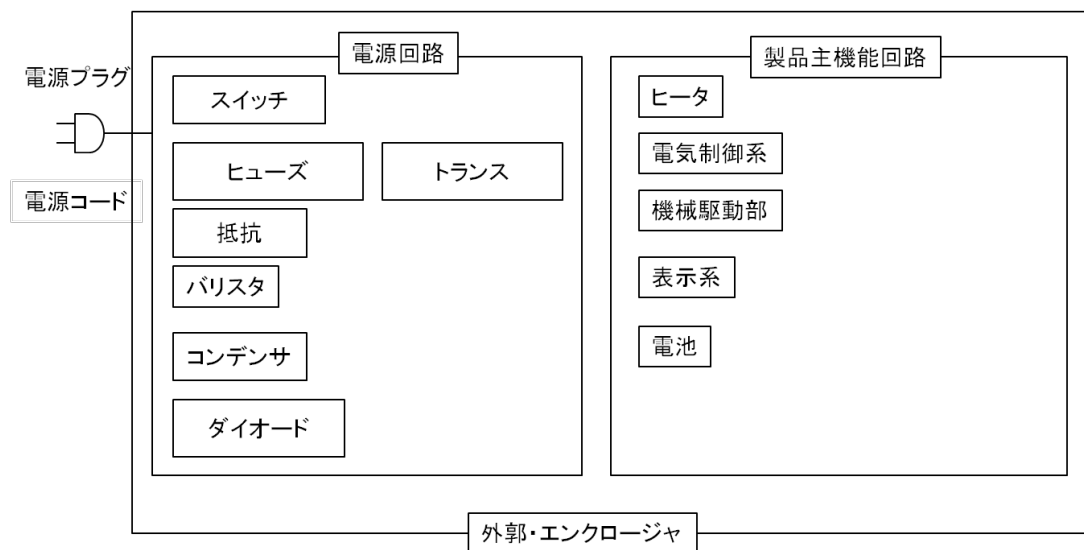


図 2-2 家電製品の構成

これらの構成とその内蔵される部品を考えて、実際の事故例(付録-2)と照らし合わせ、故障事象を抽出した。構成される部品の故障事象を表 2-3 のように整理し、家電製品の事故の内容を概観する。

表 2-3 製品の構成部品と故障事象

主要な機能ブロック	構成部品	故障事象
電源回路	主電源供給 ケーブル	繰り返し曲げによる線材の 破損・劣化によるアーク
	トランス	巻き線の破損・劣化による 絶縁不良
	1次・2次巻き線間 絶縁コンデンサ	長期的使用，外乱による 絶縁機能部品の損傷
	コンセント	埃によるトラッキング
表示系	光源放射 音圧レベル	規定値の超過
機械駆動部	ドア（ヒンジ） 回転モータ 回転ドラム	重量部品の落下・転倒 モータの過負荷による発熱 回転部へのアクセスによる 人体の損傷
電気制御	コンデンサ ダイオード 抵抗	絶縁破壊によるか電流による 部品発熱と被覆の炭化
ヒータ	接続部 サーモスタット	セーフガード部品の 故障による発熱
CRT	ガラス管	破損・劣化による爆縮
外郭/エンクロージャ	外装	外部からの異物の混入
電池	化学物質	液漏れや落下による内部短絡 による発火

2-2. 従来の FTA 図

FTA は、故障のトップ事象を決定し、故障事象の原因を特定するために用いられてきた。FTA 図を作成するために、まず、製品の構成を分解し、その構成要素がどのように接続されているかを明らかにする。このシステムの信頼性ブロック図は、図 2-3 のモデルのように各要素がどのように関係しているかをブロック図で示し、各要素の関係を明らかにするものである。

このように、FTA 図を作成する場合、回路構成を理解し、トップ事象に対して各構成部がどの様に影響しているかを考える。FTA 図のトップ事象には、一般的に、製品の意図される主機能の故障が取り扱われる。家電の多くは、モータが使用されており、この機能故障が製品の故障につながる。そこで、モータやその利用の代表的な扇風機を例に説明する。モータのような単機能の製品を考える。この場合は、モータが起動しないというトップ事象を選定し、その事象に関わる内容を FTA 図の第 2 階層以下に展開していく。

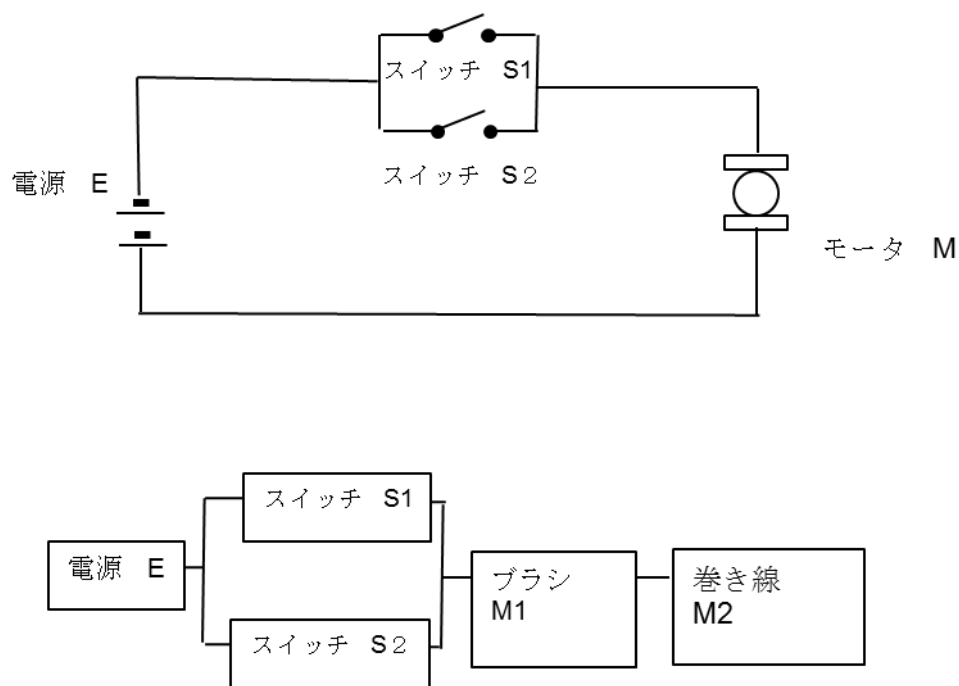


図 2-3 製品の構成図と信頼性ブロック図

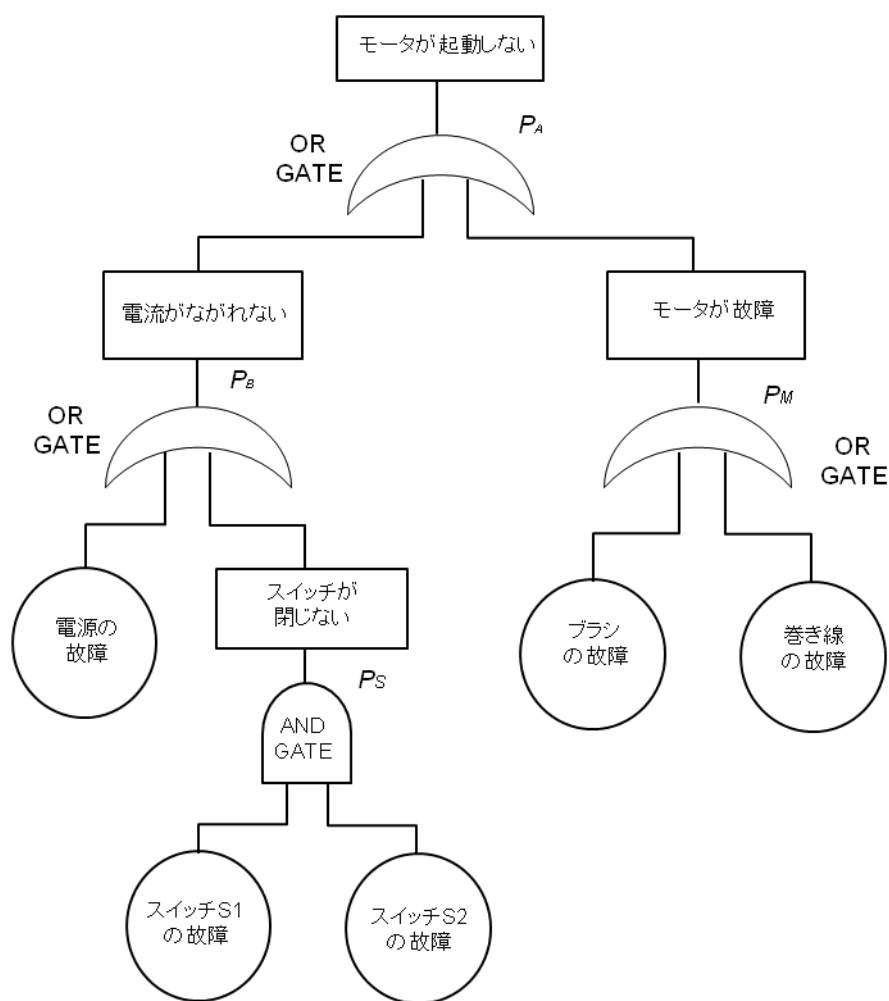


図 2-4 電動モータの FTA 図

モータが起動しない事象の一次要因として、モータの故障，電流の不導通に対し，図 2-4 の様に分析をすることができる．このように，各要因をさらに詳細に展開していくことにより故障要因の特定をすることができる．

従来の FTA においては，製品の機能に従い，事故の要因を展開していくことになる．このように，故障の要因を FTA 図により展開していくためには，製品の機能と構造に対する知識と部品の接続などの設計情報が必要になる．また，事象毎に確率が付与されれば全体の製品の故障確率を計算することが可能になる．

図 2-4 において確率 P がそれぞれの事象に与えられ，それぞれの事象と関係づけた AND，OR の論理式に従い，全体の故障確率はブール代数により計算ができる [52]．

次に、扇風機については、図 2-5 の様に構成を抽出できる。その構成内容は、主電源コード、制御基板(コントロール基板)とファンに接続されたモータである。

扇風機の故障について、図 2-5 に従い、故障することを想定する部位ごとに故障要因を列挙して FTA 図を完成させる。図 2-6 は、一次要因として、モータ、制御基板、電源の故障を挙げ、その下の層にその故障の原因になった部品の故障を列挙した図である。

このように、従来の FTA は製品の機能ベースにより各部の故障評価が実施される。このために製品の機能に関連する故障の評価は十分可能である。しかしながら、エネルギーが人体へ伝達することによって生じる傷害を見落としてしまう可能性がある。このことは、従来の FTA は、製品の機能が不全なることを評価しているために、製品の機能に関係なく出現するハザードの評価が見落とされる可能性がある。例えば、シュレッダーによる指の裂傷事故は製品の機能不全に無関係にハザードが発生し、従来の FTA ではこのようなハザードは評価から見落とされる。従って、製品内のハザードのエネルギー源の存在を網羅的に評価する手法が必要である。

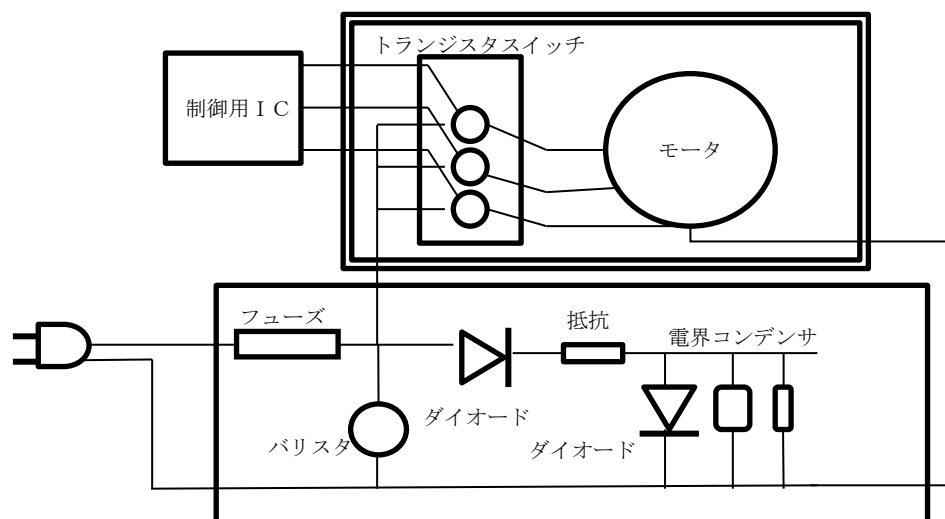


図 2-5 扇風機の回路構成

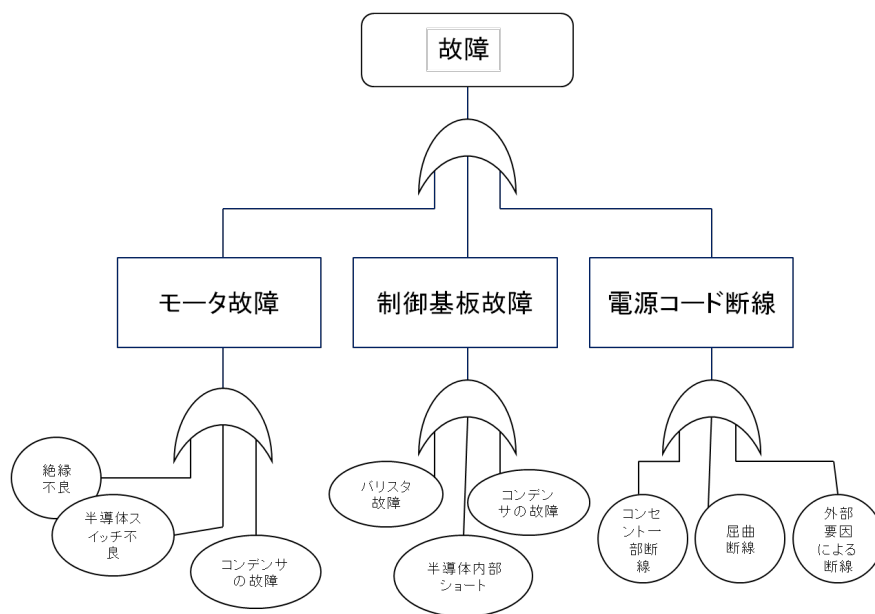


図 2-6 扇風機の従来の FTA 図

2-3. ハザードベース FTA に基づく製品安全評価手法の提案

2-3-1. ハザードベース FTA による安全評価

市場における事故例は前述の NITE 以外に，CPSC [53]（北米），RAPEX [54]（欧州）など報告されているので，このデータを分析することにより，事故原因を知り製品のハザードの特定が可能となると考える．一方，近年の家電製品では，競争激化から，新機能やシステムを短期間に導入しなければならない状況にある．製品安全性は最重要課題であり，安全性の規格は機種毎に規格化され，設計時に適用できるものの，寿命については，加速試験を用いたとしても評価するには時間を要する課題がある．現在，IEC における製品安全規格としては，生活電化機器の標準規格 IEC 60335，テレビジョン機器の標準規格 IEC 60065，情報機器の標準規格 IEC 60950 などが代表例である．

これらの規格標準化には製品の安全性について規定されているが，製品サイクルを考慮して規格開発期間は最大 5 年とされている．この期間は，製品開発期間に比して長いが，製品寿命に対しては短いので，製品特有の標準規格は製品動向に合わせて規格の改訂作業を継続することが求められる．ISO/IEC Guide 51 では，リスクアセスメントを行い，内在するハザードを考慮して安全規格を制定することを推奨している．また，IEC Guide 104 は，製品安全規格が取り扱うハザードを電氣的ハザード，機械的ハザード，その他のハザードと細分化し

評価することを推奨している。これらをベースに国際安全規格である IEC 62368-1 が開発中である。この規格では、ハザードは「傷害の危険源」と定義がされている。また、ハザードと成り得る「エネルギー源」のカテゴリとして電氣的、機械的、化学的、熱的、放射的エネルギー源の各カテゴリが定義されている。

本論文では、このハザードの定義とエネルギー源のカテゴリを採用する。これらのガイドに基づき、マルチメディア機器対応の製品安全規格 IEC 62368-1 第1版 [16]、電気、機械、化学、放射、熱のエネルギーのハザードに対する安全規格を制定している。図 2-7 は、ハザードベース安全工学に基づいた IEC 62368-1 の3ブロック安全モデルである [16]。ハザードのエネルギー（第1ブロック）が、人体（第3ブロック）に伝達することがセーフガード（第2ブロック）により、阻止されることにより安全が保たれる。ハザードのエネルギーが、セーフガードの破壊や劣化により、人体へ伝達することにより、傷害をもたらすとする考え方が3ブロック安全モデルである。この考え方は、IEC の規格となっており、各製品にとっては安全性を評価する上で重要な指針を与えるので、本論文についてもこれに従うものとする。また、セーフガード（安全防護策）は、インターロックのように防護機能を専用目的として追加された防護策に加えて、感電を防護する絶縁空間や、絶縁のための外郭などの製品の基本構造体を含めて広義に取り扱う。

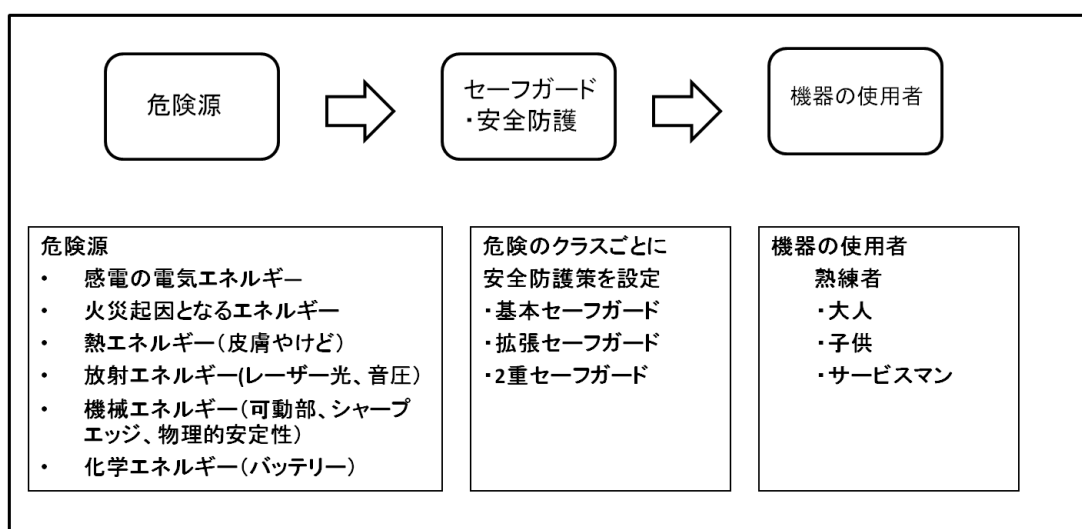


図 2-7 IEC 62368 の3ブロック安全モデル

この考え方に基づき、これらのハザードのカテゴリに従い事故例を分類することを考える。製品に内在するハザードを列挙するには、事故例から抽出されるハザードに加えて、製品内でエネルギーが存在する部位を特定し、そのエネルギーがハザードと成り得ることを想定して内在されるハザードを評価することが必要となる。

表 2-4 傷害の程度による危険源の区分

	クラス1	クラス2	クラス3
傷害の程度	検出可能、痛みをともなわない、傷害はない 火災の起因とならない	痛みをともなうが、怪我、外傷はない。火災起因の可能性、延焼は伴わない	傷害をともない、火災起因となり、延焼する
電気エネルギー	DC 60V AC 30V rms or 0.5 mA rms以下	DC 120V AC 50 V rms or, 5mA rms以下	DC 120 V AC 50 V rms or, 5mA rms以上
電力エネルギー	15watts以下	100watts以下	100watts以上
機械エネルギー	荷重 7kg 以下	荷重 25kg 以下	荷重 25kg 以上
熱エネルギー	48度 以下	58度 以下	58度 以上

表 2-4 に、IEC 62368-1 [16]で使用されている危険源の区分と傷害の程度を示す。危険源のエネルギーの形態は電気、熱、機械、化学、放射と異なるが、人体に与える影響や財産に与える損害の程度によりクラス 1 からクラス 3 の 3 つのクラスに区分している。クラス 1 は、ほぼ人体や火災の発生に影響しない安全なエネルギーの状態としている。クラス 2 は生命の危険までは到達しないが痛みのある傷害を与える、また、延焼する火災に到達しないが炎が生じる可能性があるエネルギーである。クラス 3 のエネルギーは、生命を危険にさらし、火災による延焼を引き起こすエネルギーである。このように傷害のレベルでエネルギーレベルを傷害の程度で 3 区分できる。この障害の程度に応じて安全性レベルの基準値を割り当てることにより、製品に共通化した安全性レベルの定量化が図られると考える。感電の危険に関しては IEC TS 60479-1 [55]で心室細

動を引き起こす電流値を基に基準が定められている。また、やけどの危険に関しては、製品の表面温度を規定した IEC GUIDE 117 [56]に基づき基準値を採用することができる。製品に内在するエネルギー毎に人体への影響を科学的根拠に基づき決定しているため、多くの製品に共通した安全性レベルが評価できる。このように本論文では、ハザードのエネルギー源が製品機能に依存せず、エネルギーの与える影響を科学的根拠により広範囲な対象製品で共通することを利用し、製品安全性評価手法を提案する。

2-3-2. ハザードに基づく手法の提案

NITE の事故報告書によれば、扇風機での、多くの火災事故の主原因は、コンデンサの故障とされている。事故を防ぐには、製品の不安全な事故を引き起こす危険源に対する安全性評価が重要である。安全性評価は、火災や人体へ傷害を与える可能性のあるハザードに基づき実施する。従来の故障解析は、FTA や FMEA などを用い、故障に至る要因を抽出し実施されている。本論文では、前節の通り、エネルギー源から感電や火災など支障をきたすエネルギーが外部へ伝達され、事故を発生させると考える。提案する手法は製品の中にあるハザードとそのハザードを防護する安全部品に着目した製品全体の安全性水準評価を目的とするところに特徴がある。便宜上、本論文では、ハザードに基づく故障木解析(Hazard based Fault Tree Analysis, HB-FTA)と称する。

一般には、製品のハザードを保護するセーフガード部品が付属されているので、それを含めて評価する。IEC リスクアセスメント手法 [57]に示されているように、危険源がどこに存在するかの同定が最初に行うべき項目である。これは、危険源には何らかのエネルギーが存在するので、保護部品(例えば、ケーシングなどのエンクロージャ)の破壊を経て、エネルギーが人体に伝達されて不安全事故に繋がることによる。

電気製品のエネルギー源は、電気エネルギー、機械エネルギー、化学エネルギー、熱エネルギー、放射エネルギーなどに分類できる、

従来の FTA は、図 2-8 a)に示すように、製品の「機能」に着目した製品構成要素を基に作成されるので、潜在的ハザード源が含まれるものの、製品の安全性評価においては、そのハザードの評価が見過ごされる可能性がある。本論文では、製品の「ハザード」に関係する事象を列挙するために、図 2-8 b)に示す

ようにハザード・カテゴリーを第2階層に配置する。エネルギーを内在する部品とセーフガードを要素に加えて、HB-FTAに基づいて、それぞれの事象に応じた解析を実施するところに本手法の特徴がある。

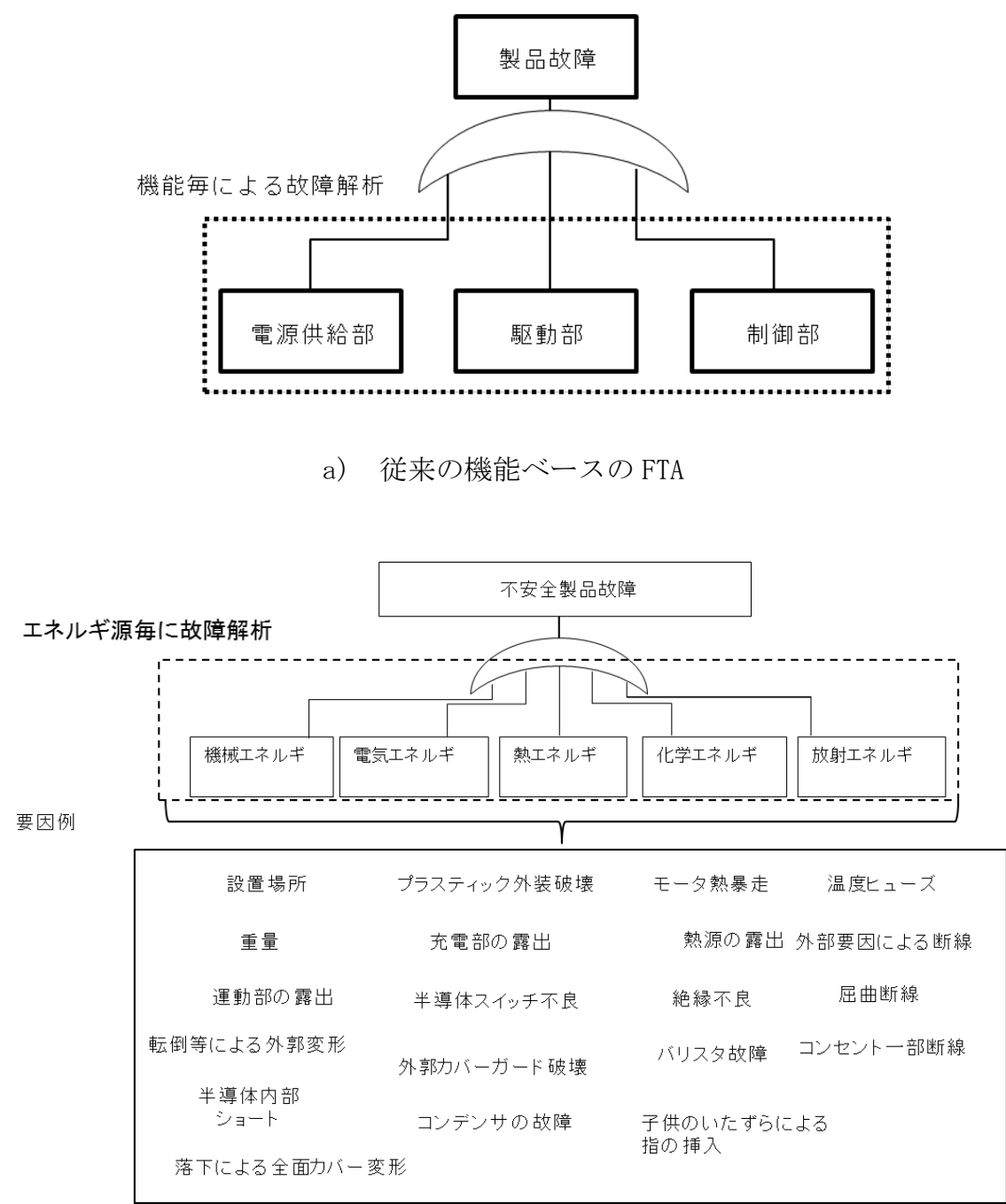


図 2-8 従来の FTA と提案する FTA の相違

2-3-3. リスクレベルの設定

製品寿命までの期間、製品の安全性を担保するために、設計者にとっては、使用年数に応じた製品安全水準を評価できる手法が重要である。現行では、安全性の評価は、従来製品の市場データならびに耐久試験を基に実施されている。この手法では、過去のデータ解析では同一製品の存在がなく実試験に依らなければならないので、製品開発短期化に対応できない問題点がある。そこで、製品が予め設定した安全水準の範囲にあるかどうかを評価できれば、有用な手法となる。

IEC 62368-1 ではリスクレベルについて、各エネルギーレベルのクラス分けがされているが、その基準化まで言及されていない。本論文では、IEC 62368-1 の電気エネルギーのクラス分けに用いられた電圧の閾値をもとにハザードレベルを決定する。IEC 62368-1 では、感電の危険に関しては、人体に流れる電流が心室細動を引き起こすしきい値を IEC TS 60479-1 に基づき決定している [55]。直流の場合においては約 2mA を超えると知覚できるが人体に影響がないとされる。25mA を超えると心室細動の危険の可能性が高くなる。また、同様に接触する電圧に対しては、接触する電圧により人体の抵抗が変化し、直流電圧では、120V を超えると心室細動がおり人命に関わる。IEC 62368-1 では、人体の影響を考慮し、電気エネルギーを、クラス 1 を電圧 60V 以下、クラス 2 を電圧 120V 以下、クラス 3 を電圧 120V 以上と定義している。つまり、60V 以下においては安全な電圧、60V から 120V は命には関わらないがなんらかの傷害の可能性はある。120V を超えると命に危険が生じる。本論文では便宜上、ハザードレベルを IEC 62368-1 の電気エネルギーのクラス分けに従い、60, 120, 180 の値を割り当てる。ハザードレベルの 3 区分を代表する数値を割り当てるのが目的であるため、電圧単位を外した数値を利用しているがこの値に限るものではない。IEC 62368-1 では他のエネルギーによるハザードも同様に 3 クラスで扱われているので、この手法を用いれば、その他のエネルギーによるハザードも同様に扱うことが可能となる。

製品の不安全事故は、ハザードが存在した時にそのハザードのエネルギーが外部へ放出され人体へ影響を及ぼす時に生じる。一般的に、製品には、電圧が印加される感電の危険源となる部位があるが、この部位に人体が触れることを防ぐために製品には保護策（セーフガード）が設けられている。この保護策は、

感電を防ぐための空隙，外郭や保護接地（感電防止のアース）などがある。

IEC 62368-1 においては，電氣的エネルギーを外部と遮断する絶縁するための空間距離を次のように規定している．製品の使用環境に応じて決められている過電圧カテゴリの 1500V における絶縁空間距離は，次の 2 通りで設定する．一つは，基礎セーフガードと称される場合で，空間距離は 0.5mm，他は，強化セーフガードと称される場合で，1.5mm が要求されている．また，クラス 1 レベルの電気エネルギーに対しては感電に対するセーフガードの要求がないが，製品の機能を動作させるための機能的な絶縁は設けられる．エネルギーのクラスがクラス 2 レベルに対しては，基礎セーフガードの空間距離 0.5mm が要求されている．また，エネルギークラス 3 の空間距離は，強化セーフガードの空間距離 1.5mm と規定されている．このことは，クラス 2 の電気エネルギーは，0.5mm の絶縁空間距離を設けることによりクラス 1 のエネルギーレベルまで減衰させ，また，クラス 3 のエネルギーレベルからクラス 1 のエネルギーレベルまで減衰させて，危険源から人体を保護するという考え方に基づいている．

空間距離は，人体が危険な活電部への接触を防ぐために設ける．たとえば，製品の外郭（エンクロージャー）の開口部を通じ人体が活電部への接触が防護するために安全設計を施す．この外郭（エンクロージャー）の故障によって防護策が機能しなくなる場合が想定する．そのためにこのセーフガード部品の故障率を明らかにする必要がある．同様に，上述の製品内部の部品配置の空間距離が破壊される場合を考える．製品を構成する数々の部品のなかで，セーフガードの条件を維持する部品はその部品が故障した場合，当該のセーフガードが機能を失う．この関連する部品が故障することでセーフガード機能が失われる．そのために，本論文においては，セーフガード機能喪失に係わる製品内の部品や構造の故障に着目する．具体的には，家電製品では，主電源電圧（100 ボルト）が制御回路を動作させるためにトランス，抵抗器，コンデンサにより低電圧に変換される．このために，製品を構成する部品が故障することにより，設計時に想定した空間距離が保てなくなり製品の安全性が担保できなくなる．

このように IEC 62368-1 で採用されているエネルギーのクラス分けとセーフガードの考え方に従い製品安全評価のリスクレベルを定義する．すなわち，製品のリスクレベルを，エネルギーレベルとセーフガードの信頼度の関数で定義する．換言すると絶縁保護のセーフガードで保護されている状態において，セ

ーフガードの信頼度，不信頼度に応じエネルギーが人体に伝達され，そのエネルギーレベルにより感電を起こすリスクレベルが決定できると考える．感電に対するリスクレベルは，ハザードの電気エネルギーに，セーフガードの正常動作状態のエネルギー伝達割合と故障状態でのエネルギー伝達割合をそれぞれの発生確率を乗じて，それらを足し合わせたエネルギーレベルを感電リスクレベルの期待値として求めることができる．

危険源のエネルギー源とセーフガードの関係を明確にするために，HB-FTA のシンボルとして図 2-9 を新たに定義する．

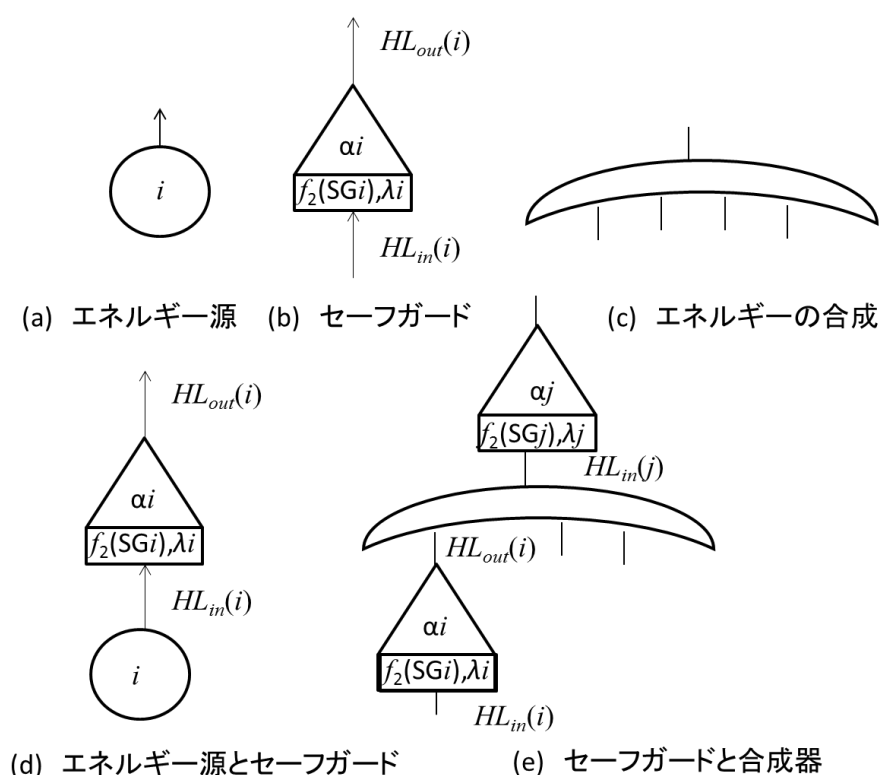


図 2-9 HB-FTA における主なシンボル

潜在するエネルギー源を図 2-9(a) を割り当てる．さらに，セーフガードは(b)，エネルギー合成は(c)のシンボルを割り当てる．エネルギー源は，出力されるエネルギーレベルを明確にする．エネルギー源は通常は潜在化されていると想定しセーフガードが故障することによってエネルギーが顕在化する．このことは，エネルギー源を防護しているセーフガードの故障のためにエネルギーが伝達することを示し(d)のシンボル記述を用いる．製品内の複数のエネルギー源の合成およびその出力にセーフガードを設ける場合の例を(e)の記述を用いる．

故障率については、バスタブ曲線において、時間経過に伴い一定であるとする、その信頼度は指数関数となる。エネルギー源が複数存在し、それぞれのセーフガードを想定した図 2-10 の場合は製品のリスクレベルは次のように評価ができる。この故障率一定となる期間については、ハザード毎の事象が独立であること、セーフガードの故障率は一定と仮定できるので、セーフガードの信頼度と不信頼度を指数関数で表現し、式(2-1)のようにリスクレベルが定義できる。

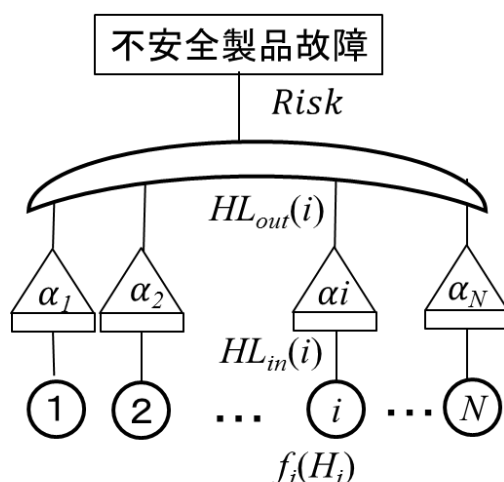


図 2-10 セーフガードとエネルギー源を考慮した HB-FTA

本研究においては、製品安全評価の基準値の設定を目的としているため相対評価を中心とし、絶対評価を目的とするものではない。すなわち、製品安全評価の基準値としてリスクレベルを設定し、基準値は複数の製品群で共通化し、相対的に比較することで、製品安全評価管理の目的には有効であると考え。セーフガード機能をエネルギーの減衰としてとらえ、セーフガードのクラス分けとして基礎セーフガードと強化セーフガードを定義する。セーフガードが機能しない場合は、エネルギーが全て伝達されると仮定する。基礎セーフガードは、クラス 2 のエネルギー 120 をクラス 1 のエネルギー 60 に変換するという考えから、エネルギー減衰係数を 0.50 とする。強化セーフガードは、クラス 3 からクラス 2 にエネルギーレベル減衰させる減衰係数 0.33 を割り当てることとする。

ハザード毎の事象は独立と仮定し、また、前述のように、市場に出荷されている製品について初期不良は取り除かれているので、故障率については時間経

過によらず一定と仮定すると、リスク *Risk* は(2-1)式で求められる。(2-1)式において、セーフガードが故障時には、ハザードのエネルギーが 100%伝達され、正常動作には、セーフガードのクラス分けに応じ減衰されることを表している。セーフガードの信頼度と不信頼度を故障率 λ と時間 t の指数関数で表現する。ハザード毎の事象が、独立でない場合は、別途、故障事象の関係に基づき、式(2-1)を修正してリスクレベルを計算する必要がある。しかし、家電製品の安全性を評価する目的では、正常動作状態のエネルギー源が、故障事象に基づいて顕れ人体に伝達される場合を評価するために、製品の機能上、あらかじめ変換されたエネルギー源は、その変換の過程は考慮せず、独立して存在するエネルギー源とみなしている。故障の過程でエネルギー変換される場合は本論文では考慮していない。このことは、家電製品では、多くの場合、電気エネルギーが製品の内部で機械エネルギーに変換される過程が存在するが、電気エネルギーと機械エネルギーが独立して存在することを前提としている。このように、ハザード毎の事象が独立であることと、セーフガードの故障率を指数分布と仮定し、エネルギー源 i のセーフガード i の信頼度 R_i を故障率 λ_i と時間 t の指数関数で表現し、エネルギー源の総数を N とする。

$$Risk = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_1(H_i) \times \alpha_i \quad (2-1)$$

ここで、式(2-1)の α_i は次の通りである。

$$\alpha_i = 1 \times F_i + f_2(SG_i) \times R_i$$

$$R_i = \exp(-\lambda_i t)$$

$$F_i = 1 - \exp(-\lambda_i t)$$

N は、評価するエネルギー源の総数である。

エネルギー源ごとにエネルギーレベル $f_1(H_i)$ と、そのハザードを保護しているセーフガードのエネルギーの減衰係数 α_i を乗じたものの総和をリスクレベルと定義する。この減衰係数 α_i は、セーフガードの故障時における減衰係数と、正常動作時における減衰係数の平均値とし、故障時には、100%エネルギーが伝達すると仮定し、係数 1 (減衰がない事を示す) に不信頼度 F_i を乗じ、正常動作時は、セーフガードの等級に応じた初期減衰係数 $f_2(SG|SG=1 \text{ or } 2)$ に信頼度を乗じ減衰係数の期待値として求める。この減衰係数は、クラス 3 のエネルギーレベルが強化セーフガードによりクラス 1 のエネルギーレベルに減衰するように、

また、クラス 2 エネルギーレベルが、基礎セーフガードによりクラス 1 エネルギーレベルに減衰するように、セーフガードの初期減衰係数を f_2 ($SG|SG=2$) $=0.33$, f_2 ($SG|SG=1$) $=0.50$ とする。初期減衰係数は、時間 $t=0$ におけるセーフガードの減衰係数を示す。

また、市場に出荷されている製品について初期不良は取り除かれているので、故障率については時間経過によらず一定と仮定する。

ここで、 $Risk$ はリスクレベル、 H はエネルギークラス、 SG はハザードを封じ込めているセーフガードの等級である。また、式中の $f_1(H_i)$ は、前述したエネルギーレベルであり、表 2-5 の値を用いる。

表 2-5 ハザードの区分係数

ハザードのエ ネルギー係数	Class 1 ($H_i=1$)	Class 2 ($H_i=2$)	Class 3 ($H_i=3$)
$f_1(H_i)$	60	120	180

表 2-6 は、各セーフガードの信頼度を $R=0.9$ として、IEC 62368-1 によるハザードクラスとセーフガードからリスクレベルの計算結果である。

表 2-6 ハザードのクラスに基づいたリスク評価の例

ハザードの種類	ハザードエネルギー レベル		セーフガード		リスクレベル $Risk$ $R=0.9$ (R:信頼度)
	クラス H	$f_1(H)$	クラス SG	$f_2(SG)$	
感電	3	180	Electric Double Insulator		71.46
			2	0.33	
やけど	1	60	Enclosure		23.82
			2	0.33	
転倒	1	60	Inter lock system		36.96
			1	0.50	
火災	2	120	Thermal Fuse		66.00
			1	0.50	
			Enclosure		66.00
			1	0.50	

表 2-6 から，以下のことがわかる．

- 1) 最も人体に与える影響が高い「感電」のハザードについては， $H=3$ ， $f_1=180$ と高いが，セーフガード（二重絶縁）の効用が高いため（ $SG=2$ ， $f_2=0.33$ ），リスクレベル *Risk* は 71.46 となる．クラス 2 とクラス 1 のしきい値を 90 とした場合は，リスクレベルはクラス 1 の安全なレベルに防護されている
- 2) 「火災」については $H=2$ ， $f_1=120$ と低い，セーフガード（温度ヒューズによる予防）により（ $SG=1$ ， $f_2=0.50$ ），リスクレベル *Risk* は 66.00 となる．クラス 2 とクラス 1 のしきい値の 90 より低くなり安全レベルに防護されている

このように，IEC 62368-1 での定性的な評価ではなく，定量的に数値として取り扱うことができる．すなわち，ハザード間の比較ならびにセーフガードの効果の確認等が客観的に行えるものとする．このことは，製品の設計，開発のプロセスの中でこのリスクレベルを基準と比較することにより製品の安全性の改善が可能になる．但し，相対的比較をするために導入初期段階ではいくつかの製品を評価して目標とする安全性レベルの基準値を決定する必要がある．

2-4. 家電製品への製品安全評価手法の適用

2-4-1. 解析モデル

家電製品の殆どは，汎用性から共通した部品が多く用いられている．従って，これらの共通部品の評価を行うことにより，各製品の評価が可能であることが推定できる．部品に対して共通化した安全基準を設定する際の重要な事項は，事故対策を検討するのではなく，ハザードの特定や安全セーフガードを構成する部品の信頼度であり，製品安全部品の信頼度を明確化することにある．

2-3. で記述したように IEC 62368-1 では，ハザードを電氣的ハザード，機械的ハザード，熱的ハザード，化学ハザード，放射ハザードに分類している．これらのハザードごとに，部品の故障，人的扱いエラー，セーフガード故障事象を分類する．部品の故障については，製品安全を確保する期間にあっては，部品の信頼度は設計段階で想定されているが，精度ある信頼度を求めるには，製品の使用期間中に部品の信頼度が減少していくことが考慮されていない問題点がある．使用期間中の製品の信頼度を求めるには，時間的変化を加味した評価

を行うが必要となる。

家電機器の典型的な例として扇風機を抽出し，信頼度の時間的変化を考慮した場合，この考えに基づく評価の有効性を検討する．図 2-11 は，扇風機の構成図であり，その構成は主電源コード，制御基板とファンに接続されたモータである．

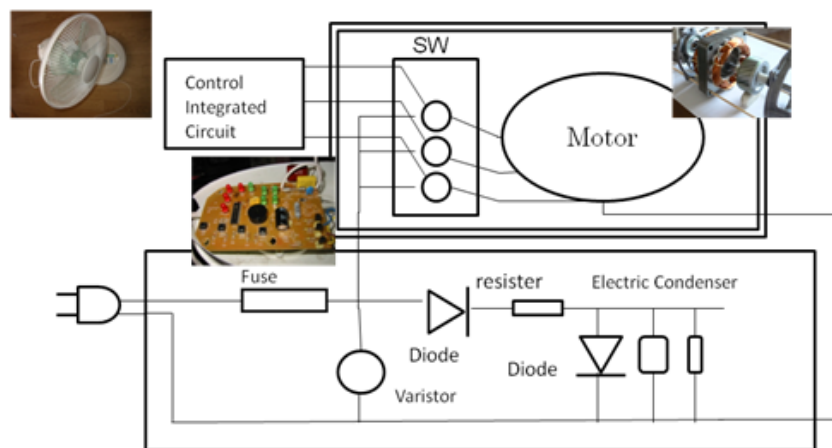


図 2-11 扇風機の構成図

2-4-2. HB-FTA の適用

製品の初期故障は，開発時に取り除かれることが多いので，使用期間中における故障は偶発的，摩耗的故障に大別される．偶発故障とされる期間は，故障率一定なので，偶発故障を考慮すると信頼度は，指数関数で表現される．例えば，製品の使用寿命を 10 年と想定すると，各部品の故障率が計算できるので，製品全体の故障率が算出できる．電気製品に用いられる主要部品の故障率は，北川 [58]や酒井 [59]らにより報告されている．表 2-7 は，それらの文献から引用した主要部品の故障率である．このように，各々の部品の故障率が既知であれば，この値を用いて，これらの部品から構成されている製品の故障率を計算することが可能である．この考えを基に，扇風機を例に故障率の評価を試みる．

表 2-7 製品に使用される部品の故障率 [58] [59]

部品名称	故障率 (1/hour)
バリスター	6. 00E-07
電源用コネクタ	1. 50E-07
半導体 I C	5. 0E-07
コンデンサー	1. 50E-07
電動モータ	1. 0E-05
ヒューズ	2. 00E-07
モータ外郭	1. 00E-04
マグネトロン	1. 00E-06

電気エネルギーに着目したハザードを中心としたセーフガードに関係する部品の故障率から、扇風機のリスクレベルを計算する。なお、計算に際し、式(2-1)における各ハザードのエネルギーレベル値を決定する必要がある。これには IEC 62368-1 で適用されている危険源の 3 段階の分類に従い、 $H=1, 2, 3$ を用いることとする。すなわち、 $H=1$ は、軽度な危険源であり、傷害を想定した場合は痛みの生じない傷害である。 $H=2$ は痛みの生じる傷害であり、 $H=3$ は、生命の危険に関わる傷害である。HB-FTA にセーフガードを取り込むことにより、ハザードの伝達経路を明確に整理ができるので、比較的容易にセーフガードの故障率とハザードレベルによりリスクレベルの計算ができる。

セーフガードの効用を明確にするために、図 2-9(b) のセーフガードのシンボルを HB-FTA に使用する。

故障事象により、セーフガード i に、顕在化されたハザードエネルギー $HL_{in}(i)$ が入力され、ハザードエネルギー $HL_{out}(i)$ となり出力されることを次のように表現する。

$$HL_{out}(i) = HL_{in}(i) \times \alpha_i \quad (2-2)$$

ここで、 α_i は、セーフガード i の減衰係数で、以下のとおりである。

$$\alpha_i = 1 \times F_i + f_2(SG_i) \times R_i$$

$$F_i = 1 - \exp(-\lambda_i t), \quad R_i = \exp(-\lambda_i t)$$

$HL_{out}(i)$ は、 $HL_{in}(i)$ に減衰係数 α_i を乗じたものである。 α_i は、セーフガードの故障率を λ_i として、セーフガードが故障している場合を想定して不信頼度 F_i に対して 1 を乗じたものと、また、セーフガードが正常に機能している場合を想

定して信頼度 R_i に対して初期減衰係数 $f_2(SG_i)$ を乗じたものの和とする。このように、セーフガードの信頼性に応じたエネルギーの伝達する期待値として定義した。

次に、扇風機の安全性を評価するために設計開発過程では、その設計データに基づき扇風機製品内のハザードを想定し、ハザードのエネルギー源を同定する。すなわち、故障が生じることでエネルギーが顕在化されるエネルギー源を考える。また、製品内で顕在化したハザードのエネルギー源を防護するためのセーフガードを同定する。ハザードの同定においては故障を想定し決定する。過去の製品事故事例として想定される代表的な故障事象は以下の内容である。

- 1: モータ/コイルの絶縁不良, 2: I C スイッチの故障, 3: コンデンサ故障,
- 4: 外部からの異物混入, 5: 半導体 I C の内部短絡, 6: 電源プラグの間欠短絡,
- 7: 異物混入による間欠短絡, 8: コード屈曲による断線と間欠短絡,
- 9: 絶縁物の破壊, 10: スパーク発生, 11: ヒューズ故障 12: 外郭の損傷,
- 13: バリスタの故障

これらの事象を中心に部品故障時にハザードのエネルギーが顕在化する部分をエネルギー源、ハザードと決定する。実際の評価は、製品の設計データ、試作器を基にハザードのエネルギー源とセーフガードの特定を行う。例えば、モータ・コイルの絶縁不良の事象は、絶縁不良が生じると、その部分に主電源の 100V が導電部に顕れる。この例の場合に、正常時には、クラス 2 のエネルギー源が、基礎セーフガードにより保護されていると考える。このように安全を担保している部品、構造、材料をセーフガードとして定義している。同様に、主電源電圧と可触導電部（人が接触ができる導体）との間に設置されたスイッチやコンデンサが短絡故障を起こすとクラス 2 のエネルギー源から故障したセーフガードを介してエネルギーが可触部に出力すると考える。このようにエネルギー源を同定する。また、直接、エネルギー源を防護していない部分であるが、潜在化したエネルギーが出現した場合に防護するセーフガードを特定する。言い換えれば、故障時に顕れるエネルギーを防護する防護策を特定する。例えば、外郭として電気部品やモータを覆う部品であり、人が導電部に接触をすることを防いでいる部品がセーフガードとなる。このような部分を標準セーフガードとする。このように、ハザードとセーフガードを評価することにより図 2-12 に示すように HB-FTA を構成することができる。

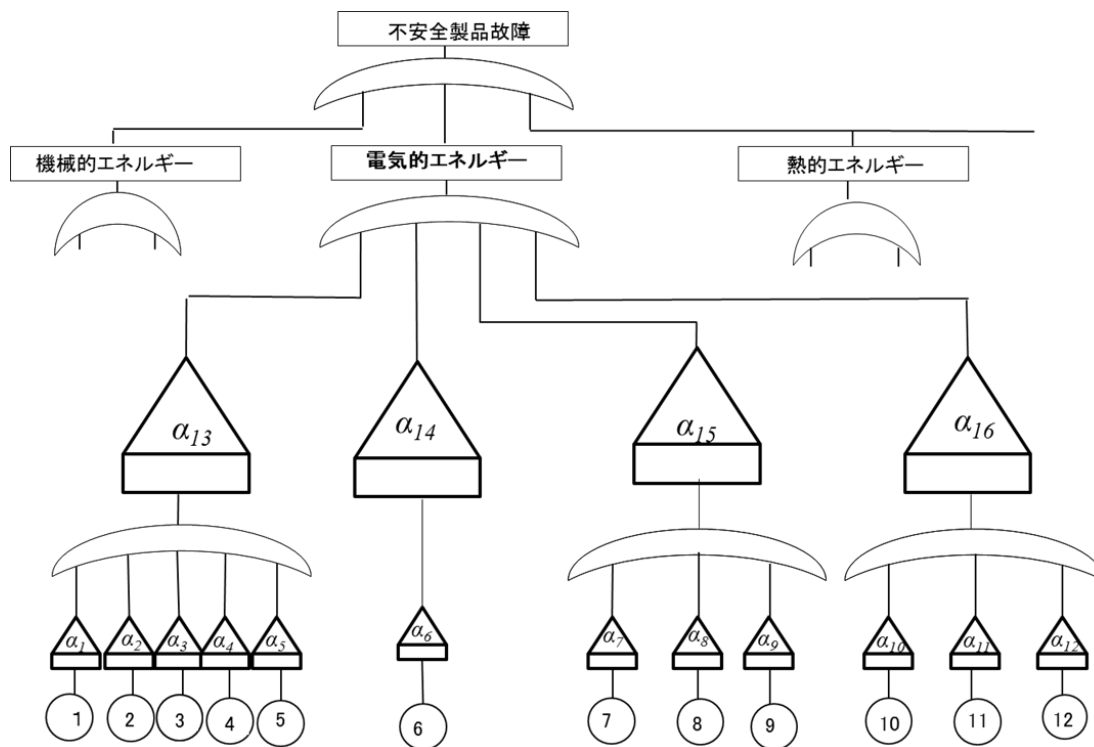


図 2-12 扇風機の手ザードベース FTA

図 2-12 は、扇風機の手電氣エネルギーに関する手ザードに手目した HB-FTA (Hazard Based Fault Tree Analysis) を手す。この例では、先に手した故障事象により手定したエネルギー源を①～⑫に手ザードクラス H_i に手じたエネルギーレベル $f_1(H_i)$ を手り手て。エネルギー源の①～⑫は、故障による手れる電圧は手電源電圧の 100V であるために $H=2$ でクラス 2 を手り手て。各エネルギー源に接続されるセーフガードの故障率は、以下のとおり手り手て。セーフガード 1 はエナメル絶縁を手定し表 2-7 の電動モータの故障率を手り手て。同様に各エネルギー源に直接接続されるセーフガードの故障率は、表 2-7 の値を採用する。セーフガード 2 と 3 の制御用 IC の故障率は手導体 IC の故障率、手電源電圧と可触導電部を手リッジしているセーフガード 3 のコンデンサーはコンデンサーの故障率、外部からの異物混入に対するセーフガード 4, 7 は、モータ外部の故障率を、セーフガード 6 はヒューズの故障率をそれぞれ採用した。セーフガード 8, 9, 11, 12 はコード屈曲による被覆の故障率を手ーク発生やコード被覆の破壊についてのセーフガードの故障率は 1.75×10^{-5} を手り手て。

これらのセーフガードの故障率を表 2-8 に示す。

次に、標準セーフガードとして、セーフガード 13, 14, 15, 16 を同定する。セーフガード 13 は、扇風機の樹脂外郭とし、 $SG_3=2$, $f_2(SG_3)=0.33$ を割り当てる。セーフガード 14 はヒューズと直列に接続されるバリスタとする。バリスタは過電圧が印加される場合に印加電圧を降下させる役割があり $SG_4=2$, $f_2(SG_4)=0.33$ を採用する。表 2-7 のバリスタの故障率 $6 \times 1.0e-7$ を適用する。セーフガード 15 は扇風機の外郭が感電を防止しており $SG_5=1$, $f_2(SG_5)=0.5$, 故障率は外郭の故障率 1.0×10^{-4} を適用する。また、セーフガード 16 は $SG_6=1$ として、絶縁被覆の屈曲に対する故障率 1.7×10^{-5} を割り当てた。但し、電源プラグ短絡、コード屈曲の故障率は、表 2-7 に存在しないため加速試験のデータで代替した。この場合は、1 日 2 回の屈曲耐性を前提に MTBF=60000 時間（故障が起こるまでの時間）として、故障率を 1.7×10^{-5} を使用して数値計算を実施した。選択した故障率を表 2-8 にまとめる。

以上のように、製品の設計データにより部品構成を把握することによりエネルギー源を特定し、部品の故障によりエネルギーが外部に伝達する可能性を評価する。

セーフガード 1 からセーフガード 12 の出力は、式(2-2)で与えられる。例としてエネルギー源①に関してセーフガード 1 の出力 $HL_{out}(1)$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} HL_{out}(1) &= HL_{in}(1) \times \alpha_1 \\ &= f_1(H_1)\{1.0 \times [1 - \exp(-\lambda_1 t)] + f_2(SG_1) \times \exp(-\lambda_1 t)\} \end{aligned} \quad (2-3)$$

ここで、故障率 λ_1 は、表 2-7 より $\lambda_1=1.0 \times 10^{-5}$ (1/hour) とする。また、エネルギー源①の出力エネルギーは、モータに電圧 100V が印加されるのでクラス 2 に分類し $f_1(H_1)=120$ とする。次にセーフガードは、モータの絶縁に対する絶縁巻線が基礎セーフガードを構成し、セーフガードの等級を $SG_1=1$ とし $f_2(SG_1) = 0.5$ を割り当てている。出力エネルギーレベル $HL_{out}(1)$ は、時間 t (hour) の関数で、図 2-13 に示すように算出できる。図 2-13 に示すように、信頼度は使用年数とともに低下しエネルギーレベルが上昇する様子が観察できる。

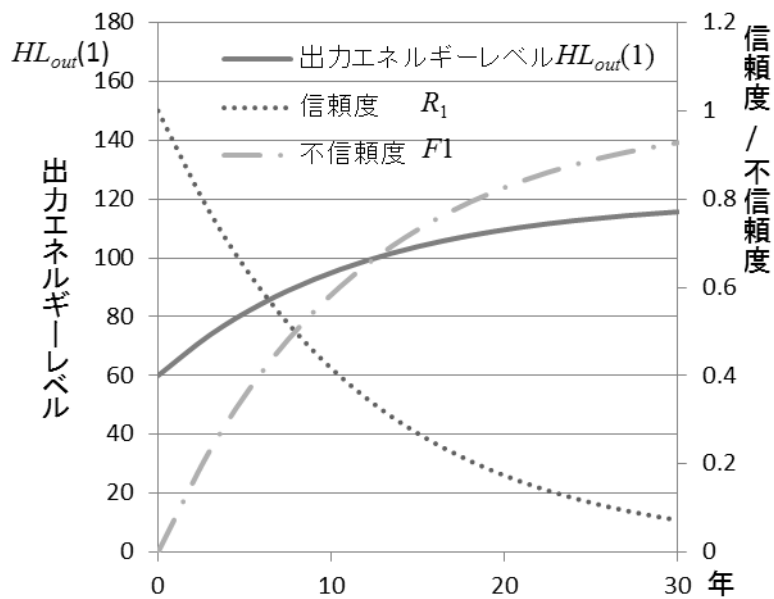


図 2-13 モータの故障による伝達されるエネルギー期待値の経時変化
 $(HL_{in}(1)=120, \lambda_1=1.0 \times 10^{-5})$

同様に、各エネルギー源についても同様に $HL_{out}(i)$ を計算する。このとき、ハザードクラスは 2, $f_1(H_i)=120$ とし、セーフガードの初期減衰係数は基礎セーフガードを想定し 0.5, 故障率は表 2-7 より選択する。

このように求めた各エネルギー源のエネルギーレベルを次式により合成し、セーフガード 13, 14, 15, 16 の入力エネルギーに割り当てる。

表 2-8 エネルギー源に直接接続されるセーフガードの故障率

エネルギー源	$HL_{in}(i)$	$f_2(SG)$	故障率 λ_i
①	120	0.5	1.00E-05
②	120	0.5	5.00E-07
③	120	0.5	1.70E-07
④	120	0.5	1.10E-04
⑤	120	0.5	5.00E-07
⑥	120	0.5	5.00E-07
⑦	120	0.5	1.10E-04
⑧	120	0.5	1.70E-05
⑨	120	0.5	1.70E-05
⑩	120	0.5	1.10E-04
⑪	120	0.5	1.70E-05
⑫	120	0.5	1.70E-05

$$HL_{in}(13) = HL_{out}(1) + HL_{out}(2) + HL_{out}(3) + HL_{out}(4) + HL_{out}(5) \quad (2-4)$$

$$HL_{in}(14) = HL_{out}(6) \quad (2-5)$$

$$HL_{in}(15) = HL_{out}(7) + HL_{out}(8) + HL_{out}(9) \quad (2-6)$$

$$HL_{in}(16) = HL_{out}(10) + HL_{out}(11) + HL_{out}(12) \quad (2-7)$$

セーフガード 13, 14, 15, 16 のハザードエネルギーレベルは、 HL_{out} (番号)の関数、式(2-2)に従い計算される。

製品全体のリスクレベル(*Risk*)は、これらの独立したセーフガード毎に計算されたハザードレベルを全て足し合わせるにより、式(2-8)で得られる。

$$Risk = \frac{1}{12} (HL_{out}(13) + HL_{out}(14) + HL_{out}(15) + HL_{out}(16)) \quad (2-8)$$

ここで、 $HL_{out}(i)$ はセーフガード i の出力エネルギーレベルである。図 2-14 に、その計算結果を「標準セーフガード有」として示した。図 2-10 の HB-FTA で、セーフガード 13, 14, 15, 16 がある場合を「標準セーフガード有」と付した。また、これらのセーフガードがない場合を「標準セーフガード無し」と付して次式(2-9)に基づきプロットしている。

$$Risk = \frac{1}{12} (HL_{in}(13) + HL_{in}(14) + HL_{in}(15) + HL_{in}(16)) \quad (2-9)$$

HB-FTA を使用することにより，従来の基本設計に対してセーフガードを追加した場合にも安全性能の評価ができる．また，安全性の改善を目的とした設計変更に対しても，変更したセーフガード，温度ヒューズ，モータの絶縁特性を考慮したリスクレベルが算出できるので，製造者の設計基準の評価項目に利用できる．

また，設計時の改善検討として新たなセーフガード部品を追加する検討を行う場合も本手法を用いると追加方法を検討するのに効果的である．例として図 2-15 に示す A, B, C, D の追加セーフガードの改善効果を図 2-14 に示す．

追加セーフガードは，さらにエネルギーを減衰させるセーフガードを実装することにエネルギーレベルを改善させる．設計時に標準セーフガードを評価したが，さらに，追加セーフガードを A, B, C, D を割り当てる．故障時に電源を遮断するためにセーフガード i ($i=A, B, C, D$) は，強化セーフガードの温度ヒューズを想定し， $SG_i=2$ ， $f_2(SG_i)=0.33$ ($i=A, B, C, D$)， $\lambda_i=5.0e-5$ ($i=A, B, C, D$) とした．セーフガード A, B, C, D 全てを追加する場合は次式により製品安全リスクレベルが計算できる．

$$HL'_{in}(13)=HL_{in}(13) \times \alpha_A \quad (2-10)$$

$$HL'_{in}(14)=HL_{in}(14) \times \alpha_B \quad (2-11)$$

$$HL'_{in}(15)=HL_{in}(15) \times \alpha_C \quad (2-12)$$

$$HL'_{in}(16)=HL_{in}(16) \times \alpha_D \quad (2-13)$$

$$HL_{out}(i) = HL'_{in}(i) \times \alpha_i \quad (i=13, 14, 15, 16) \quad (2-14)$$

$$Risk = \frac{1}{12} (HL_{out}(13) + HL_{out}(14) + HL_{out}(15) + HL_{out}(16)) \quad (2-15)$$

同様に，セーフガード A とセーフガード B のみを追加した場合を「追加セーフガード A+B」，セーフガード A とセーフガード C のみを追加した場合を「追加セーフガード A+C」，セーフガード A とセーフガード D のみを追加した場合を「追加セーフガード A+D」と付した．追加セーフガード A は，①～⑤のエネルギー源からのエネルギーの伝達を防護するために有効となる．追加セーフガード A+B は，エネルギー源 6 からのエネルギー抑圧にはあまり効果がない．追加セーフ

ガード A+C, および A+D はハザードのエネルギー源 7, 8, 9, および 10, 11, 12 に対する強化セーフガードを追加した効果を示している。

このように, HB-FTA を用いることで, 設計時の安全性レベルの改善などの検討に用いることが可能になる。

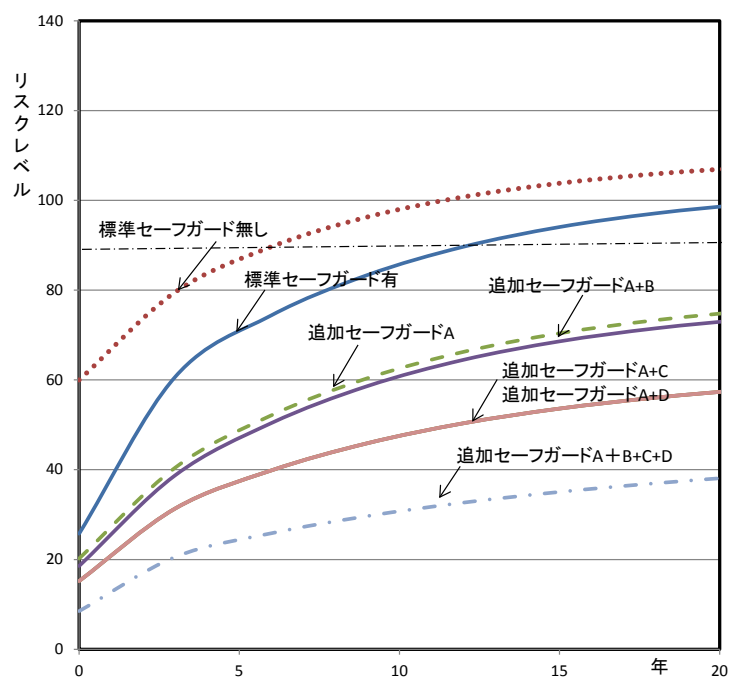


図 2-14 合成された製品全体の電気エネルギー期待値によるリスクレベルとセーフガードによるエネルギーレベルの抑制効果

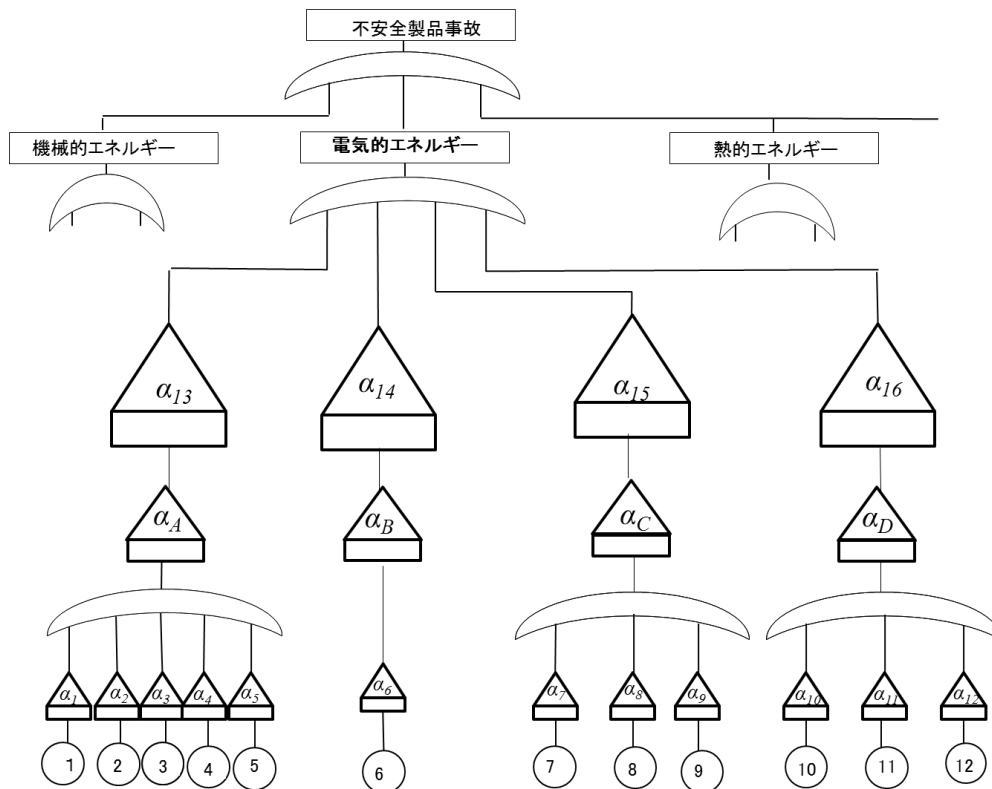


図 2-15 追加セーフガード

2-4-3. 製品安全評価

従来製品の生産管理では製品の品質向上のために事故の再発防止を目的として事故の原因調査のために FTA が用いられ製品設計改善を果たしている．これに対し本論文で提案した手法は，次のような手順で安全レベルを算出すると，製品の安全性を定量的に評価できるところに特徴がある．まず，製品に内在するハザードを特定し，そのハザードの大分類に従って製品の構成要素を分析し，セーフガードを同定し，故障事象に従い HB-FTA (図 2-12) を作成する．さらに，ハザードを軽減するために設けられているセーフガード，防護部品の故障率を計算し，関連するハザードのレベル値に対し，その結果を製品のリスクレベルを求める．HB-FTA を用いて製品安全水準の評価を行う．かかることより，市場へ製品を投入する製造者の事前管理として適用することができる．例えば，製品の安全水準を設け，その水準を満たすように改善や設計変更する製品の安全性管理が実施できる．

従来，市場事故の解析 [60]による製品安全の改善活動は事故の再発防止がその主な目的であるが，本節の提案手法では，製品安全性評価に，ハザードを組

入れ製品安全評価が従来の事故の再発防止による製品安全改善に比べ、製品安全水準の管理の改善が期待できる。

なお、表 2-7 の例では、セーフガード部品の既知の故障率を適用することを前提としたが、これ以外にセーフガード部品の故障率が既知でない場合、あるいは容易に入手が不可能な場合も考える必要がある。そのような場合に対応するために、事故報告のフィールドデータを利用する。この場合の故障率の算出については、次章で記述する。

2-5. 結 言

設計者は、設計段階において安全性レベルの基準を設定し、製造者は、それを基に製品リスク評価を行い、それらの低減化を図ることで、製品の安全性が担保されている。安全基準は、設計と製造段階において適用され、製品が十分安全レベルであることを保証できる基準とされる。しかし、その精度が重要であることは言及するまでもない。過去の報告データを基に、基準を評価し、データを更新することにより機器全体の安全性評価基準の精度向上を図る必要がある。

この考えに基づき、本章では、部品ごとの故障率データから、その部品を使用した製品の安全評価を行う手法として、HB-FTA を用い、危険源のエネルギーの区分とセーフガードの強度の定量化を行い、セーフガード部品の信頼性を考慮し、製品のリスクレベルの算出方法を提案した。これにより、新たな部品が使用された新製品でも新たな部品のみの評価を行えば、製品の安全性評価が可能となる。このように従来部品データを用いて新製品の安全性レベルが算出できるので、提案手法は、実用的なものと考ええる。

第3章 事故報告データベースに基づく故障率の評価手法の提案

3-1. 緒 言

製品は複数の部品により構成される。製品の故障率や安全性は構成される部品により決定される。本章ではその部品の故障率の評価手法の提案を行う。部品の信頼性データは部品供給会社から提供される場合があるが、信頼性工学の視点からストレス試験などの加速試験を行いその結果信頼性データとして算出していることが多い。これらの信頼性データから部品の故障率を得られる場合は、第2章での製品安全評価手法に利用することができるが、加速試験の条件が実際の環境から大きく異なる場合や、入手そのものが企業間競争の関係において簡単ではない場合がある。

また、製品の部品の信頼性は、故障物理、信頼性工学の分野で紹介されている。特に、電子・電気系の故障率データには次に示す代表例 [58]がある。

(a) Earles の故障率

アーレスは、よく整備された環境で使用する電子計算機を基準にとり、それに使用する部品の故障率 λ_0 とその平均寿命を基本期待寿命 L_0 で表わし、環境過酷度係数 K で補正する方法で、部品の故障率をまとめている。

(b) MIL-HDBK-217

アメリカの軍用ハンドブック (MIL-HDBK-217B) として、集積回路、半導体、抵抗器、コンデンサ、インダクタ、電子管、レーザー、回転機器、リレー、スイッチ、コネクタ、電線、プリント配線基板、マイクロ波素子などの故障率データが収録されている。

(c) RAC の信頼性ハンドブック

アメリカの RAC が収録したマイクロエレクトロニクス部品の故障率データを信頼性データブックとして出版したものである。

(d) IEC TR 62380 [61]

IEC の Technical Report として電子部品、プリント配線基板の信頼性データをまとめたものがある。

これらのハンドブックのデータにより、部品の故障率を計算し、HB-FTA による安全評価手法に適用することは有用である。

しかし、部品の改善、技術の進歩などの結果、その具体的な数字は、部品によっては、改定が必要と考えられる。これについては、部品毎の加速試験など

の信頼性試験により，データの更新が必要となる．さらには，偶発故障領域の一定の故障率を扱っている場合が多く，製品の摩耗故障領域において急激に安全性が劣化することを安全評価水準に反映することが難しい．

本章では，市場における製品事故報告から，その製品に使用されている部品の故障率を計算する手法を提案し，その手法が実設計への展開が図れることを明らかにする．また，IEC TR 62380 に基づいた偶発故障領域の故障率と比較し，そのフィールドデータによる故障率計算の適用性を検証する．

3-2. 長期使用と特定部品に集中する事故の実態

故障した部品，構成，設計内容を分析し，不安全事故の真因を抽出するのは重要なことであり，その結果，製品の設計に反映すべき要求事項を決定し，基準とすることも可能となる．このことは，過去の事故例を多数分析し，判断基準を設置し安全性をチェックする生産管理システムを構成する手法が提案されていることから理解できる [38]．また，品質改善の取り組み活動では，過去の事例を積み重ね，再発防止のための事例集 [62] などが発刊されている．

特定された故障部品に関しては，事故原因を追及することで，再発防止の対策を実施することが可能と考える．電気製品の現状を把握するために，独立行政法人製品評価技術基盤機構 (NITE) の事故報告書より，電気製品に関して過去に起きた事故の要因を整理し，その故障率の算出をする．

表 3-1 は，2005 年 (平成 17 年) から 2009 年 (平成 21 年) にかけて NITE が経年劣化による事故が多かった品目をまとめたものである．この結果から，扇風機が 71 件と最大件数である．

NITE によれば経年劣化による事故を「製造後，長期間経過による，あるいは長期間の使用により性能が劣化したと考えられるもの」と定義している．

表 3-1 製品品目別事故件数

						(件)
品目 \ 年度	17年度	18年度	19年度	20年度	21年度	合計
扇風機	2	8	39	16	6	71
ブラウン管型テレビ	10	14	24	11	11	70
照明器具	2	2	10	9	9	32
ガス給湯器	1	6	13	2	2	24
ガスふろがま	2	10	5	4	1	22
電気カーペット	3	3	8	7	1	22
石油給湯機	11	7	2	1	0	21
電子レンジ	1	7	6	3	2	19
エアコン	4	6	4	2	1	17
換気扇	1	3	4	4	2	14
冷蔵庫	5	5	2	1	1	14

製品安全ジャーナル No. 10, 表 5 p. 6 より筆者が作成

2001 年から 2007 年の経年劣化による製品事故の発生件数の 254 件数のうちコンデンサによる事故の総数は 59 件である [63]。この事故の中で、扇風機が 16 件で最も多く、カラーテレビとエアコンが 9 件、インターホン 8 件であり、これら全てが、コンデンサの経年劣化による事故であった。

図 3-1 は我が国における扇風機とエアコンの出荷台数であり、図 3-2 はそれらの事故件数である。製品安全適合認証制度などが導入されているにも関わらず、事故件数は 10 年前に比べて増えており、製造者は今後とも社内にマネジメントシステムの見直しや製品安全レベル確認など、安全性に関する一層の努力が求められる。扇風機の故障事例について主な故障原因はコンデンサに起因することが NITE の報告書 [51] で示されているが、これらの事故データの中から扇風機とエアコンの事故から部品に関する件数を抽出し、事故の要因を調査し確認を実施した。表 3-2, 表 3-3 はその結果である。また、図 3-2, 3-3 は、事故に占める要因割合である。これらの結果からもコンデンサが事故要因として支配的であることがわかる。

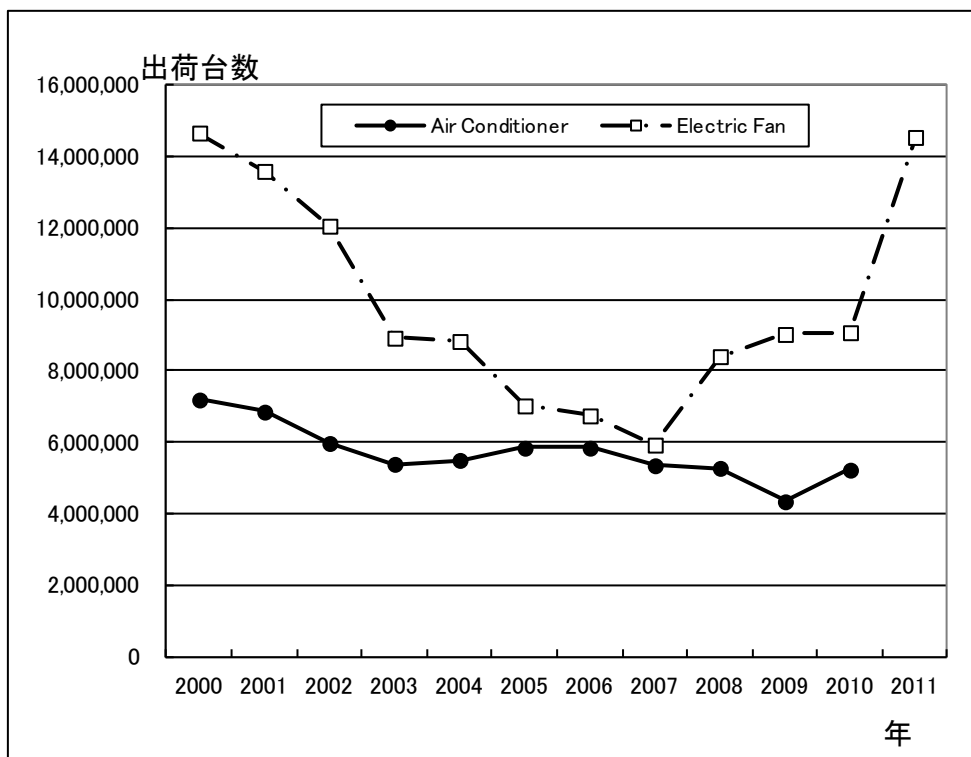


図 3-1 エアコンと扇風機の出荷台数

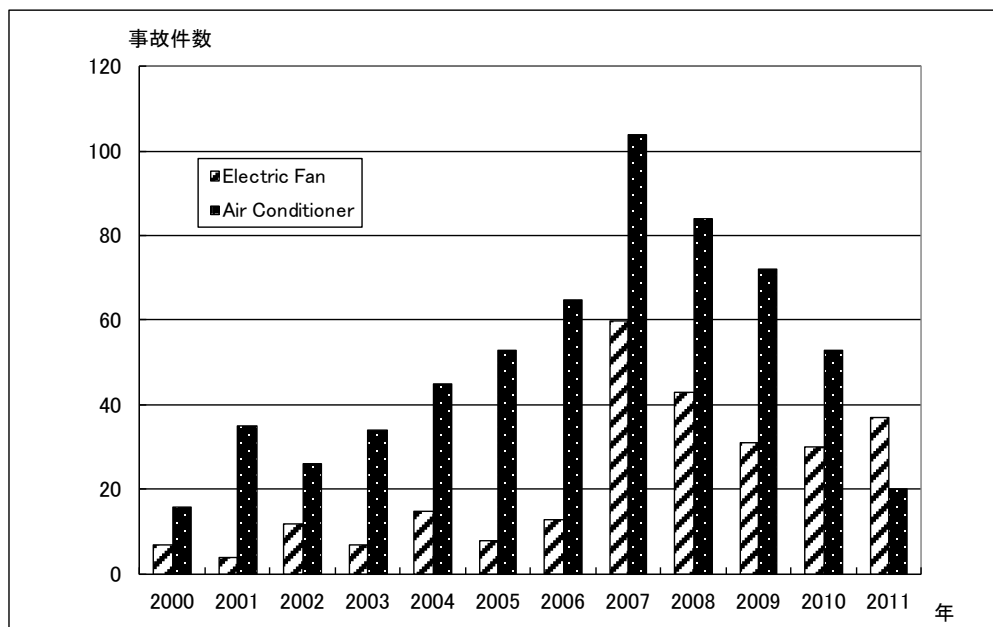


図 3-2 エアコンと扇風機の事故件数

表 3-2 扇風機の事故要因の調査

事故要因	扇風機の事故要因別件数
コンデンサー	113
モータ(除くコンデンサ)	77
スイッチ	55
電源コード	31
抵抗	11
ダイオード	5
ヒューズ	4
トランス	4
ヒータ	4
バリスタ	0

表 3-3 エアコンの事故要因の調査

事故要因	エアコンの事故要因別件数
電源コード	107
モータ(除くコンデンサ)	102
コンデンサー	95
スイッチ	54
ダイオード	43
抵抗	19
ヒューズ	16
ヒータ	16
トランス	9
バリスタ	2

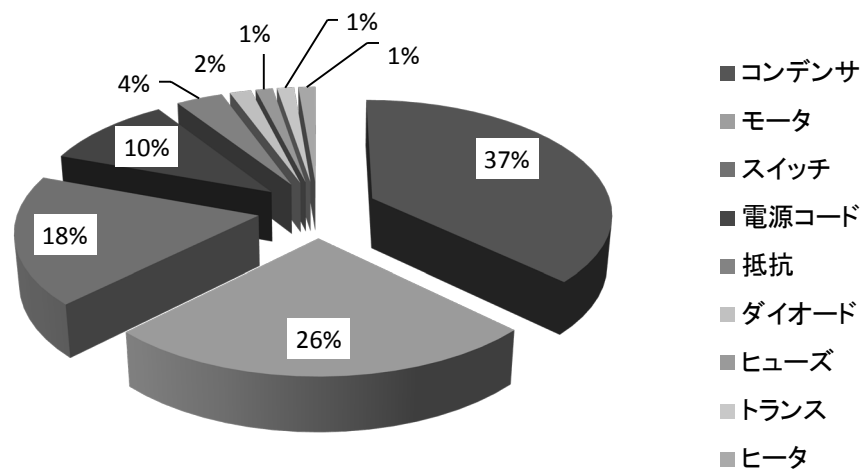


図 3-2 扇風機の事故要因の割合

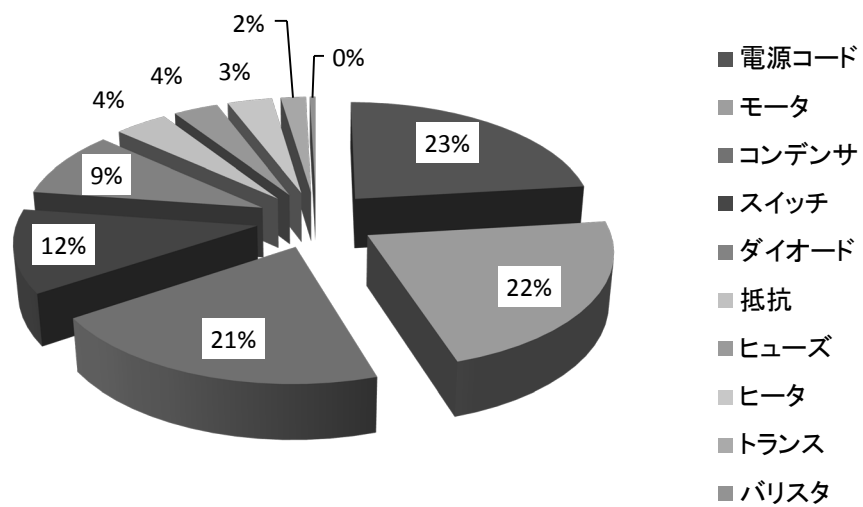


図 3-3 エアコンの事故要因の割合

3-3. 事故報告データベースを用いた故障率の導出手法の提案

3-3-1. 事故報告データベースを用いた故障率の算出手法

NITE の製品事故データベースから，扇風機やエアコンの事故報告ではコンデンサが要因となる事故が多いことが判明した．そこで NITE の製品事故データベースより，扇風機の事故の中で，コンデンサが関係する事故例を抽出する．事故の製品使用期間ならびに製造年度から，その年の製品出荷台数を統計データより得ることができるので故障率が算出できる．ここで，故障率は，ある時点まで稼働状態にあった製品が，単位時間内に故障が発生する確率となる [64]．したがって，時刻 t_i (ただし， $i=1, 2, \dots$) において残存している未故障の稼働製品数を $N(t_i)$ ，時刻 t_i における微小単位時間を $\Delta t=t_{i+1}-t_i$ ，その間に生じる総故障件数を $n(t_i)$ とするとき， $n(t_i)/N(t_i)=\lambda(t_i)\Delta t$ の定義より，故障率 $\lambda(t_i)$ は，次式で表される．故障率の次元は，(1/hour) となる．

$$\lambda(t_i) = \frac{n(t_i)}{N(t_i)\Delta t} \quad (3-1)$$

表 3-4 は，NITE の事故データベースをもとに，各年度における出荷台数，事故件数，出荷からの使用期間を求めた結果である．事故データベースから，事故例に対して出荷年 (Year shipment) と使用経過期間 (elapsed Year) を明らかにする．故障率を使用経過期間の単位時間を 5 年とし，式 (3-1) により代表値として求めた．ここで， $\Delta t=5 \times 880$ とした．

表 3-5 は，(3-1) 式に基づいて算出した故障率である．ただし，扇風機は夏季に使用されているので，その稼働時間については，JIS 規格に基づき算出した．すなわち，一年のうちで夏期に使用するとし，年間の日数と動作時間は 110 日，8 時間の動作を想定した．

表 3-4 総出荷数と使用期間毎に故障件数

Year of shipment		1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976
number of shipment		563292	630149	702602	780870	865176	955741	1052786	1156534	1267206	1385023
Elapsed Year	0~5year	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5~10year	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10~15year	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	15~20year	0	0	0	2	1	1	0	0	0	0
	20~25year	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0
	25~30year	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
	30~35year	0	1	1	2	1	1	1	3	4	0
	35~40year	0	4	10	8	4	3	0	1	0	1
	40~45year	3	5	0	0	0					
total incident		3	11	12	14	6	6	1	5	4	1
Year of shipment		1977	1978	1979	1982	1986	1990	1992	2003	2004	2005
number of shipment		1510207	1642979	1783561	2254382	3004923	3682270	3679991	1852169	1671585	-
Elapsed Year	0~5year	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	5~10year	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0
	10~15year	0	0	1	0	0	0	0			
	15~20year	0	0	0	0	0	0	1			
	20~25year	0	1	0	0	1	1				
	25~30year	0	0	0	1	0					
	30~35year	1	0	0							
	35~40year										
	40~45year										
total incident		1	1	1	1	1	1	1	2	1	1

表 3-5 事故報告から計算した出荷期間毎の扇風機の故障率

Year of shipment		1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976
Elapsed year	0										
	5										
	10			3.23E-10							
	15				5.82E-10	2.63E-10	2.38E-10				
	20				5.82E-10		2.38E-10				
	25		3.61E-10						1.97E-10		
	30		3.61E-10	3.23E-10	5.82E-10	2.63E-10	2.38E-10	2.16E-10	5.9E-10	7.17E-10	
	35		1.44E-09	3.23E-09	2.33E-09	1.05E-09	7.13E-10		1.97E-10		1.64E-10
	40	1.21E-09	1.8E-09								
Year of shipment		1977	1978	1979	1982	1986	1990	1992	2003	2004	2005
Elapsed year	0										
	5								2.45E-10	1.36E-10	
	10			1.27E-10							
	15							6.18E-11			
	20		1.38E-10			7.56E-11	6.17E-11				
	25				1.01E-10						
	30	1.5E-10									
	35										
	40										

図 3-4 は、製品の使用年と、式(3-1)より求めた故障率の関係である。図から、故障率は、使用年数に対しある使用年度からばらつきがあるものの、30 年位まではほぼ同一であり、その後、故障率が大きく上昇している。このことは、偶発故障と摩耗故障のために発生したものと考える。すなわち、故障率一定の領域である偶発故障期間と故障率が上昇する摩耗故障期間に大別できる。また、これらの結果から、摩耗故障発生が期間が推定され得ると考えられる。このことについては、次章で記述する。

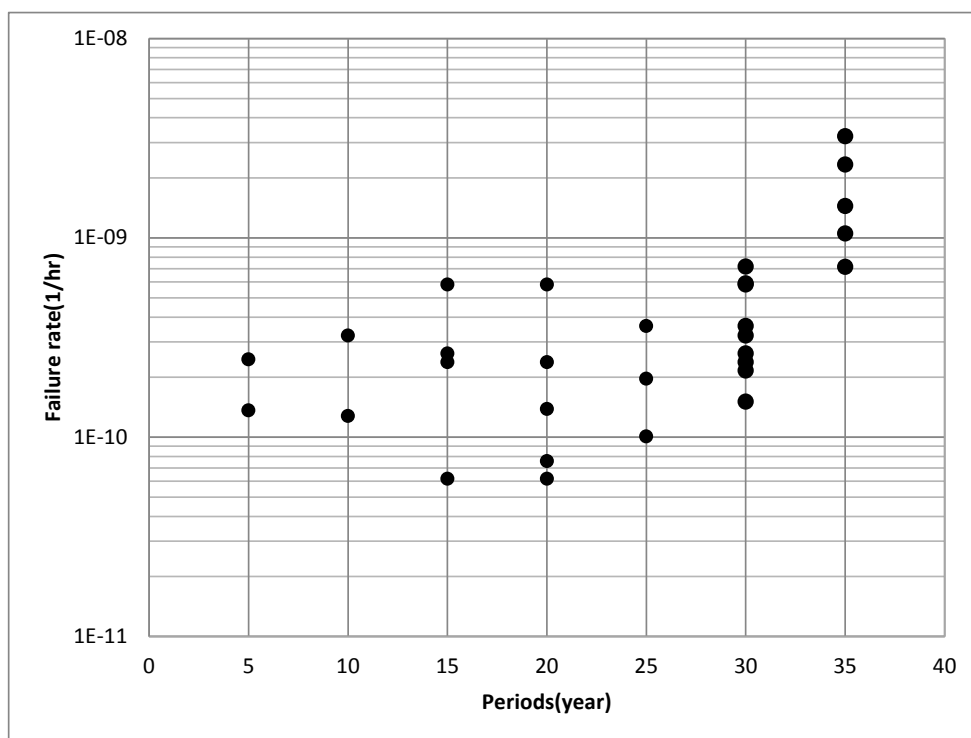


図 3-4 事故報告例から計算された扇風機の故障率

3-3-2. IEC TR 62380 の適用による故障率

我が国では、データ提供は企業間競争力や事故の裁判対応問題から容易ではなく、各データを取りまとめることも困難な状況であるので、海外のデータを利用せざるを得ない。IEC TR 62380 では、電気機器の機器や、プリント基板、電気部品などの信頼度を信頼性データハンドブックとしてまとめられ公表されている。IEC TR 62380 で故障率の推定法が設定されているので、その方法による故障率と本論文で提案している手法により得られた値と比較し、実用品に対する有効性を調査する。

なお、使用時間や温度などの使用環境条件には JIS 規格で定められた標準仕様の環境を適用し故障率の導出を試みる。

IEC TR 62380 における故障率算出では、環境温度、部品に課されるストレス、動作時間比率が考慮されている [61]。なお、動作時間比率に応じた係数は、動作環境ごとのミッションプロファイルとして定義されている [61]。寿命は部品の使用環境をアレニウス信頼性モデル [4]により式(3-2)として考慮されている。

$$L = A' \cdot \exp(E_a / kT) \quad (3-2)$$

ここで、 L は寿命 (hour)、 A' 、 E_a 、 k は定数、 T は環境温度 (°C) である。

コンデンサは、アレニウスモデルの E_a に 0.15~0.4 が適用され、故障率 λ はミッションプロファイルの動作状態番号を i として式(3-3)が与えられている。電源のオンオフにより、その温度差が部品にストレスを与えることを考慮している。

$$\lambda = 0.1 \cdot \left[\frac{\sum_{i=1}^y (\pi_t)_i \cdot \tau_i}{\tau_{on} + \tau_{off}} \right] + 1.4 \times 10^{-3} \cdot \left[\sum_{i=1}^j (\pi_n)_i \cdot (\Delta T_i)^{0.68} \right] \times 10^{-9} \quad (3-3)$$

$$\pi_n = (n_i)^{0.76} \quad (3-4)$$

$$\pi_t = \exp \left\{ 2900 \cdot \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{273 + t_{ac}} \right) \right\} \quad (3-5)$$

ここで、 $\Delta T_i = t_{ac} - t_{ae}$ 、 t_{ae} は使用環境の周辺温度 (°C)、 t_{ac} はプリント基板の温度 (°C) である。また、 τ_i は動作状態 i の時間比率、 τ_{on} はトータル動作比率 (コンデンサに電圧が印加されている時間比率)、 τ_{off} は非動作比率 (コンデンサに電圧が印加されていない時間比率) である。また、 π_n は式(3-4)で求めるサイクル影響指数であり、 π_t は式(3-5)で求めるキャパシターのミッションプロファイルの接合温度に関連する温度係数、 n_i はサイクル数である。

本論文では、扇風機のコンデンサにおける動作環境として、運転と休止の2段階とする。また、解析に際し、扇風機のその他の動作環境として、扇風機の動作時の内部温度 (t_{ac}) を 57°C、常時環境温度 (t_{ae}) を 30°C (温度差 ($\Delta T_1 = 27^\circ\text{C}$)) とした。動作時間は前述の JIS 規格より、110 日、8 時間の動作、1 日 5

回の電源のオンオフを想定した．表 3-6 はこれらに基づく各係数の値である．

表 3-6 環境パラメータと動作プロファイル

t_{ac} (°C)	τ_1	τ_{on}	τ_{off}	Phase		
				n_1 (cycle/year)	t_{ae} (°C)	ΔT_1 (°C)
57	0.1	0.1	0.9			
				550	30	27

これらの値を用いて，IEC TR 62380 の計算手法を用いると，故障率は， 2.35×10^{-10} (/hour) となる．

図 3-5 に IEC TR 62380 による故障率の計算結果を図中の点線に示す．IEC TR 62380 の手法で求めた値とフィールドデータから得られた故障率の平均値では，使用年数 30 年までの値は良い一致を示していることが分かる．これらのことから，IEC TR 62380 では，偶発故障（故障率一定）を求めていると想定される．フィールドデータを用いた本論文の手法により，偶発事象と摩耗故障も求め得ることが図 3-5 の結果から想定される．このことについては，次章で記述する．

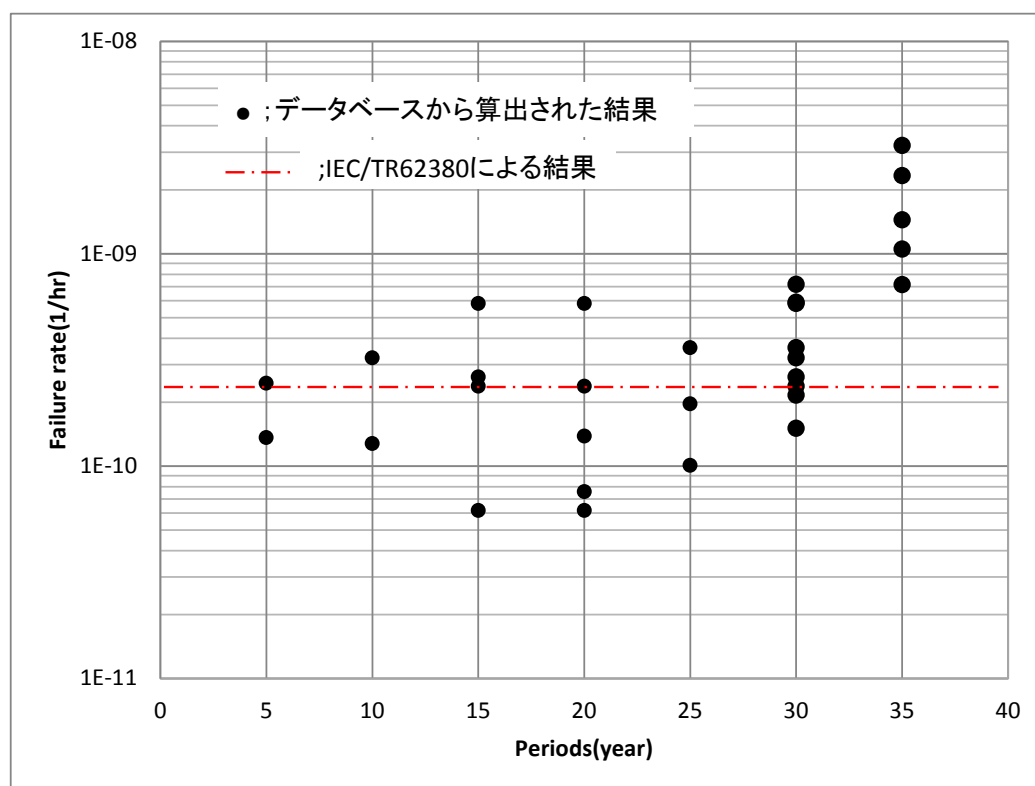


図 3-5 IEC TR 62380 から求めた故障率と事故データから求めた故障率の比較

3-4. IEC TR 62380 の故障率の HB-FTA への適用

故障率の算出方法を提案し新たにフィールドデータから算出した故障率の平均値が IEC TR 62380 から求めた故障率と一致したことにより，IEC TR 62380 から求める故障率は実使用環境での故障率を示すものとする。このように事故事例より算出された故障率に近い数値を得られた IEC TR 62380 から算出された故障率を用いて 2 章の HB-FTA の扇風機のリスクレベル評価に適用する。

表 3-6 の環境パラメータを適用し主要の部品を IEC TR 62380 により求められる故障率の算出データを以下の表にまとめる。表中のセーフガード番号は図 2-12 の FTA 図のセーフガード番号を示す。セーフガード 1, 3, 6, 14 と 16 の部品の故障率を IEC TR 62380 で求められた故障率と置き換えている。

表 3-7 IEC TR 62380 から求めた部品の故障率の更新

セーフガード番号	主要部品	故障率(1/hour)
1	モータ	7.2×10^{-9}
2, 5	IC	5.0×10^{-7}
3	コンデンサ	2.3×10^{-10}
4, 7, 13, 15	外郭，絶縁物	1.0×10^{-4}
6	ヒューズ	1.0×10^{-10}
11, 12	絶縁被覆	1.7×10^{-5}
14	バリスタ	1.0×10^{-10}
16	コネクタ	1.6×10^{-10}

置き換えた故障率により，製品のリスクレベルは式(2-2)に基づき図 3-6 に示すように算出することができる。構成する部品レベルが設計時の評価で 10^{-9} から 10^{-10} レベルに確保されると設計時に設定される安全レベルで製品の使用期間 20 年ではほぼ設計時の安全レベルが確保できると考えられる。

このように，事故例の故障率データを用い，新たに故障率を算出することで，IEC TR 62380 のデータブックを参照することの妥当性が示すことができた。第 2 章の故障率データは，1975 年の RSS 出展，あるいは 1962 年アークスの故障率表の抜粋になり相当古いデータである。故障例の観測期間を考えるとさらに古いデータとなる。今回の事故データは 2005 年以前のデータを分析したもので，より新しく，信頼性，故障率も改善されている。

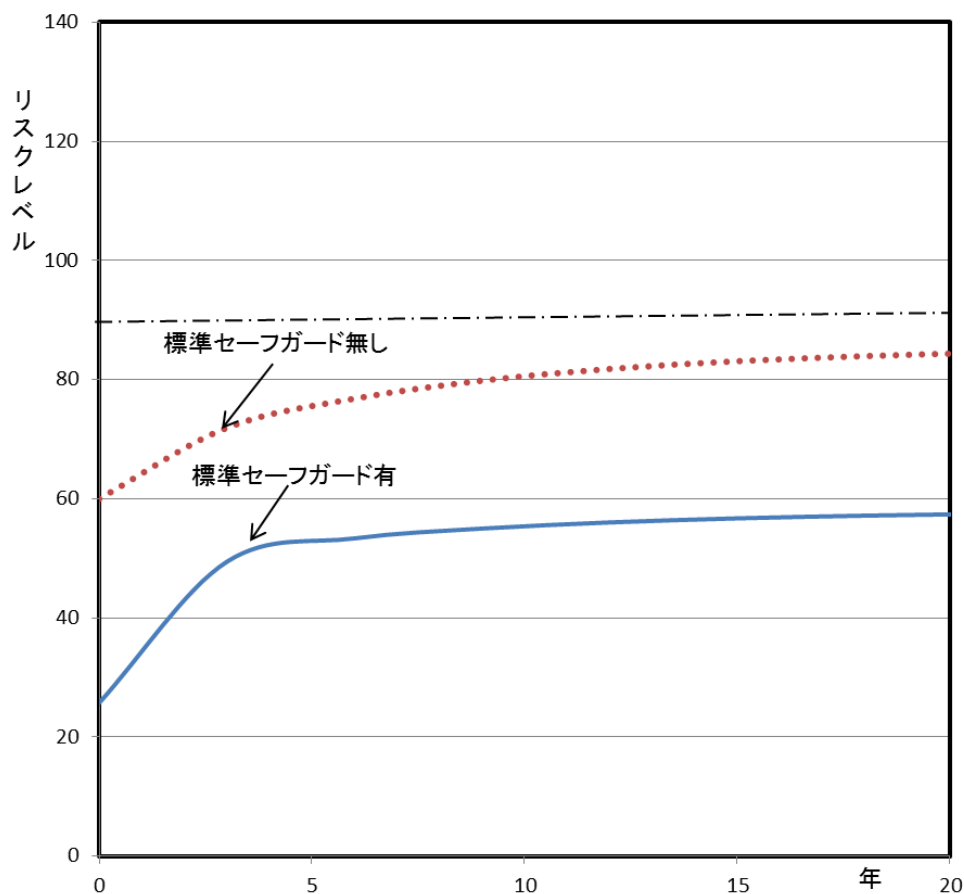


図 3-6 扇風機のリスクレベル

3-5. 結 言

設計者は設計段階において安全性レベルの基準を設定し、製造者はそれを基に製品リスク評価を行い、可能な限りをリスクの低減化を図ることで、製品の安全性が担保されているのが現状である。安全基準は、設計と製造段階において使用され、製品が十分安全レベルであることを決定する基準とされるが、その精度が重要であることは言及するまでもない。そこで、そのためには、過去の報告データを基に、正しく評価することが重要と考えられる。これに基づき、本論文では、部品ごとの故障率データからそれらの部品を使用した新規製品の安全評価を行う手法として、HB-FTA を用い、製品安全設計のセーフガードも考慮した故障率を算出し、その製品の安全性評価手法を提案した。

第 3 章においては、NITE に報告される事故例の分析結果から、製品事故に関連する部品の故障率の算出を行った結果、これらの故障率の平均値は、IEC

TR 62380 のテクニカルレポートで求められる故障率と近似する値となること
が判った。このことより、IEC TR 62380 のテクニカルレポートが与える部品の
故障率を同じ環境パラメータを使用し求めることができる。部品ごとの故障率
を、データベース化を図ることにより、新製品に新たな部品が使用されていれ
ば、その部品のみの評価を行えば、従来の部品データを用いて新製品のリスク
レベルが算出でき、設計評価時間の短縮が図れると考える。

製品ライフサイクルは設計、製造、販売、設置、保守、廃棄からなり、これ
らの期間で、製品安全性は保障される必要がある。各製品ライフサイクルにお
ける組織機能ごとに異なる要件を抽出する。その要件を、製品安全の設計、製
造のステージへフィードバックすることにより、それに基づく製品安全評価の
改善を継続することが可能となると考える。また、生産者は、NITE のデータを
部品別に解析するなど、安全指標設定を一元的に管理し、そのデータを製品安
全評価に適用すれば、効率的な評価ができるなどの利点となる。

第4章 故障率の確率分布特性評価

4-1. 緒 言

製造者の製品の安全品質を管理するためには、設計段階、出荷前に製品の出荷判断基準として、リスクレベルの明確化が必要である。第2章で製品安全評価手法として、HB-FTAを用いて、ハザードの同定とセーフガードの故障率を考慮したリスクレベルの算出方法を示しそのリスクレベルを基準に設定する安全性評価手法を提案した。第3章の方法では、内在するハザードを防護している部品の故障率を求めた。その故障率と使用期間の関係から、偶発故障領域と摩耗故障領域の二つの領域が存在する結果を得た。また、その結果を IEC TR 62380 で示される故障率算出結果と比較して両者の一致を確認し、提案手法の適用性を示せたと考える。しかしながら、製造者が製品のリスクレベルを出荷判断基準に設定し、より詳細な品質管理を行うためには、故障率の確率分布を明確にすることが重要となる。また、偶発故障領域と摩耗故障領域の境界である製品寿命を明らかにすることは重要である。そこで、偶発故障領域と摩耗故障領域に分けられた故障率の分布を求める手法について述べる。

さらに、IEC TR 62380 の故障率の計算を適用するにあたり、決定した確率分布を考慮することで、故障率の確率分布の形状が分かり、環境パラメータが変化した場合の故障率が、確率分布の何%にあたるかを知ることが可能となる。このことは、製品の使用される環境を考慮した基準値の設定を可能にするものであり、今後の評価に指針を与えるものと考ええる。

4-2. 家電製品事故報告データベースから故障率の推定

前章で家電製品の中でもコンデンサが事故要因の中で支配的である扇風機の事件事例報告 [50] [65] を分析し、故障率を計算した。その計算結果の図 3-4 では、25 年を超えて故障率が上昇するのが見受けられる。約 25 年を超えるデータと、それ以前の期間のデータを 2 つの故障領域とに分類できることが推察できる。25 年以前の故障率は一定値で偶発的故障領域と考える。初期不良が出荷前に十分取り除かれていることを考えると、出荷後、ある一定期間は、故障率は一定と考えることができるので、約 25 年以前のデータの平均値で故障率を代表することができる。すると、25 年以降の故障率は、摩耗故障領域と判断できる。

この故障率は、約 25 年を超えるデータから、最小 2 乗誤差法を用いて求められると考える。

4-3. 等価故障率の提案

故障率の分布を推定するため座古らが疲労寿命推定法提案されている手法 [66] を、時間－故障率図において各時間における故障率を任意の時間における「等価故障率」への換算に適用を試みる。図 4-2(a) に示すように、摩耗故障域において数点の故障率のデータが得られ、ばらつきを有する場合、まず、最小 2 乗法により直線回帰を行う。次に、図 4-2(b) に示すように、時間 N_f で故障した故障率 f_1 の製品を N_c で故障する製品と考えると、故障率 f_2 であるものと等価となる。すなわち、使用時間を移動させることは、故障率を移動させることと捉える。便宜上、これらを等価故障率とする。

摩耗期の故障率の変化は、次の様に理解できる。 N 年の故障率を λ とする製品については、 $N + \Delta N$ 年では、故障する製品が多くなり $\lambda + \Delta \lambda$ となることが推定される。また、 $N - \Delta N$ 年は、 λ よりも故障する製品が少なくなり $\lambda - \Delta \lambda$ となると推定される。

図 4-2(c) に示すように、他のデータについても同様に処理をする。このようにして時間 N_c における等価故障率のデータに図 4-2(d) に示す確率分布を推定し、摩耗故障域における故障率の分布を推定することができる。等価故障率の概念を用いれば、異なる時間における故障率のデータを一つの分布にまとめられ、比較的少数のデータからでも故障率の分布を推定することが可能となる。

同様の処理を図 4-2(e) における偶発故障域におけるデータに関しても行う。偶発故障域と摩耗故障域の境界となる N_c の値を変えて偶発・摩耗の両領域の確率分布を求め、両領域の確率分布の相関が最も高くなる場合の N_c を採用する。このように求められる故障率分布を等価故障率分布と定義する。

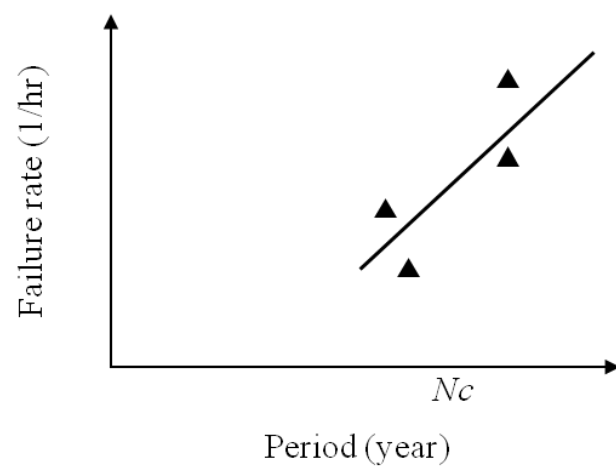


図 4-2 (a) 摩耗故障の場合の等価故障率への換算

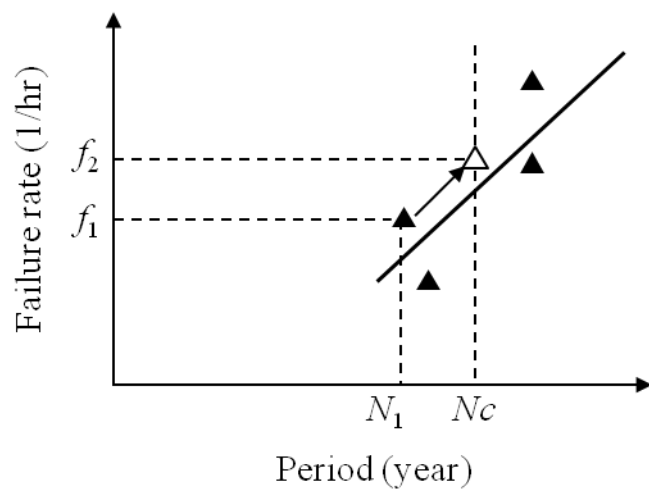


図 4-2 (b) ①のデータを N_c に対する等価故障率への移動

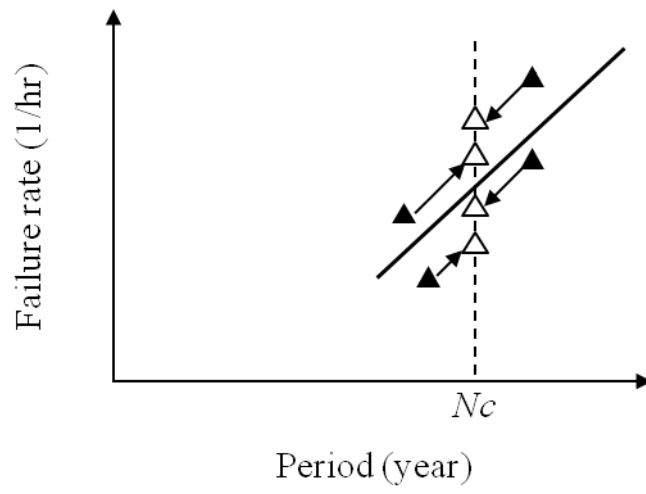


図 4-2(c) 全データを N_c に対する等価故障率への移動

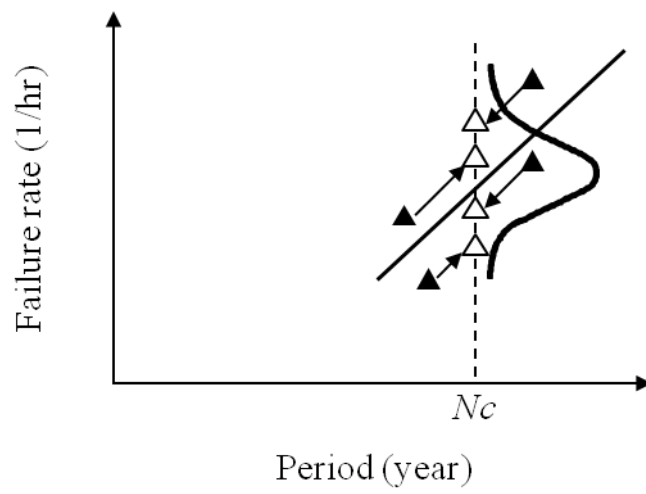


図 4-2(d) N_c における等価故障率分布

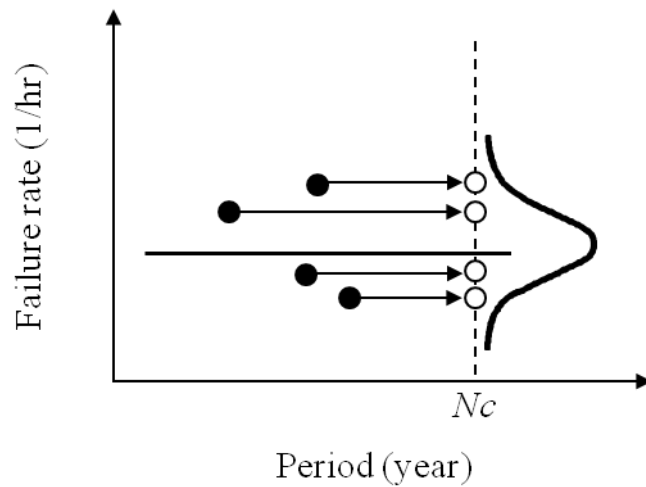


図 4-2(e) 偶発故障領域の場合の等価故障率分布

図 4-2 等価故障率の確率分布の求め方

図 4-3 は N_c を、(a) 22.5 年、(b) 27.5 年、(c) 32.5 年として、上述の方法により得られた結果である。各故障率データを求めた近似式に従い境界点に平行移動を行ったグラフである。この様に、故障率を基に偶発事象と摩耗事象に分離しても、摩耗事象とされた時点において分布の連続性が保障されなければならない事を考えると、摩耗事象開始点を寿命と判断することができる。判定の問題点は、分布の連続性をどのように判定するかである。これについては次節で記述する。

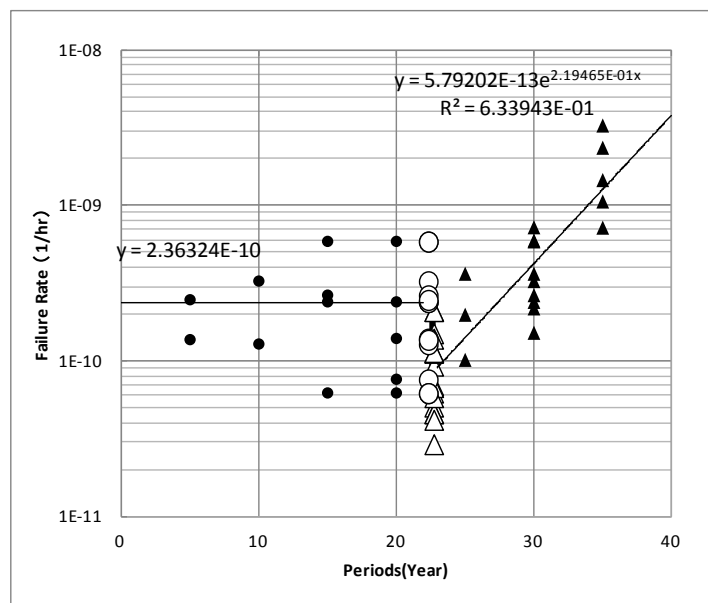


図 4-3(a) 観測点 $N_c = 22.5$ 年における等価故障率

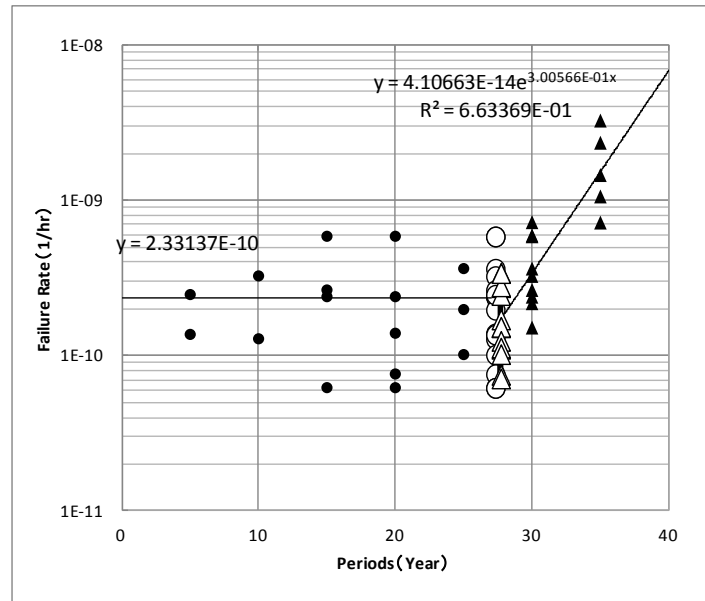


図 4-3 (b) 観測点 $N_c = 27.5$ 年における等価故障率

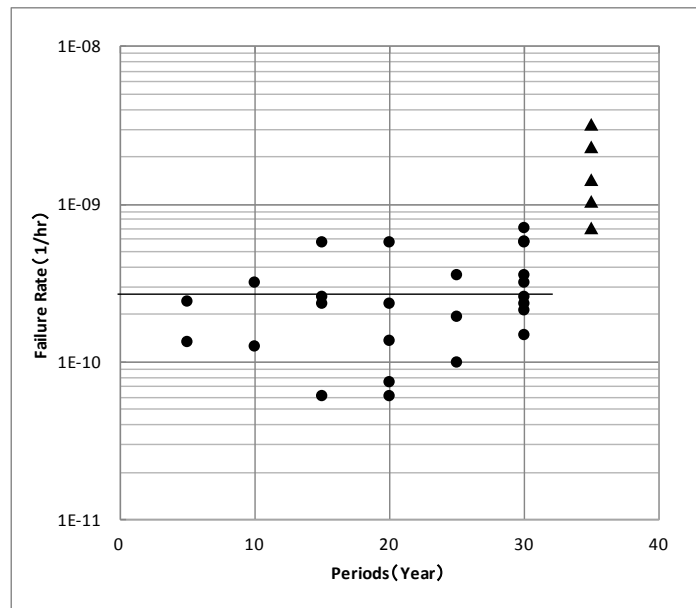


図 4-3 (c) 観測点 $N_c = 32.5$ 年における等価故障率

図 4-3 観測点における等価故障率

4-4. 等価故障率の確率分布の推定

偶発故障と摩耗故障の分岐点 (N_c) では、双方の分布は等しくなる必要性から、 N_c を変化させ、偶発と摩耗故障率を算出し、双方の分布形状の比較を行った。比較には、分布を予め決定しておく必要があるが、物理現象で一般に使用されている正規分布、ワイブル分布、対数正規分布を想定した。次いで、分布の比較をそれぞれの分布図で実施する。

図 4-4 は $N_c = 22.5$ 年と仮定した場合の偶発故障と摩耗故障の比較であり、(a) は、正規分布、(b) はワイブル分布、(c) は対数正規分布における比較である。いずれも双方の分布は一致していない事がわかる。すなわち、22.5 年は、寿命としないと判定ができる。

同様に図 4-5 は、 $N_c = 27.5$ 年として、解析し、それぞれの分布の解析結果である。これらの図からいずれの分布においても一致していないことが判る。

また、図 4-3(c) から明らかなように、32.5 年とすると 32.5 年以降のデータは一群のみでありその分布とそれまでの分布は明らかに異なるので寿命とすることはできない。

このようなことから、27.5 年近傍が寿命と判断できる。このことを明らかにするためには、分布特性を同定する。

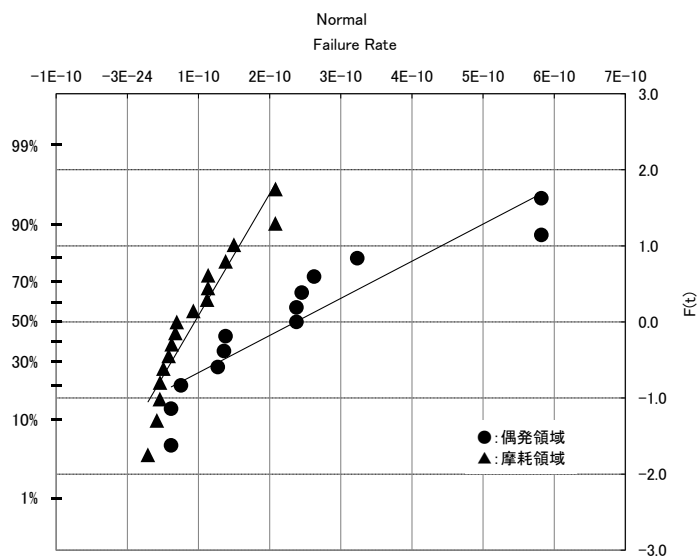


図 4-4(a) $N_c = 22.5$ 年とした場合の等価故障率（正規分布）

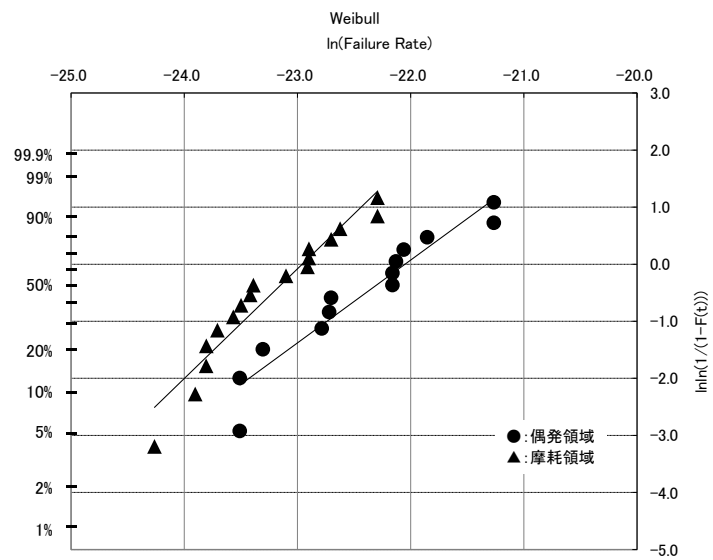


図 4-4(b) $N_c = 22.5$ 年とした場合の等価故障率分布 (ワイブル分布)

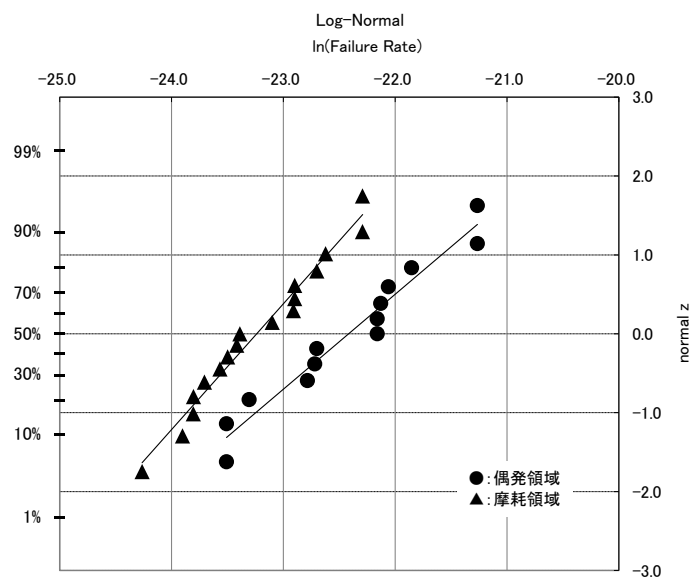


図 4-4(c) $N_c = 22.5$ 年とした場合の等価故障率分布 (対数正規分布)

図 4-4 等価故障率の各分布適合状態 ($N_c = 22.5$)

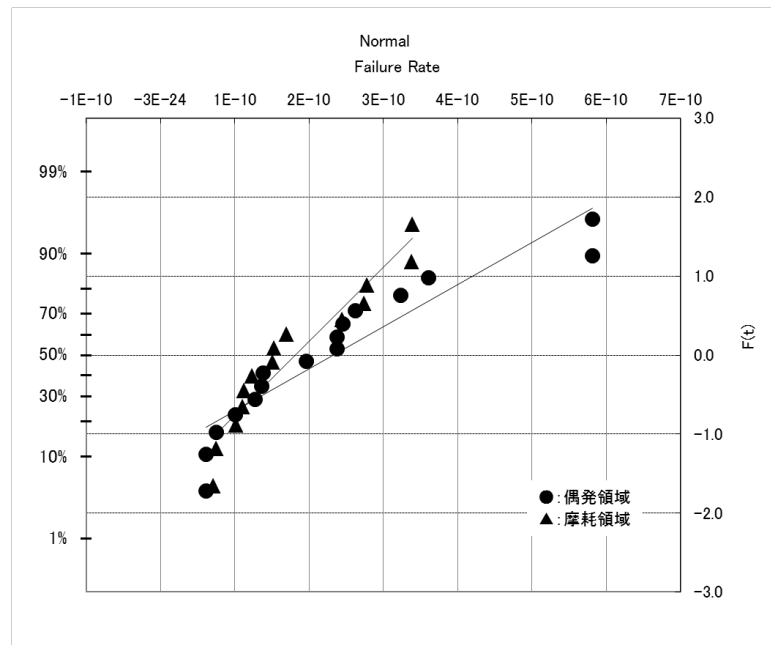


図 4-5(a) $N_c = 27.5$ 年とした場合の等価故障率分布（正規分布）

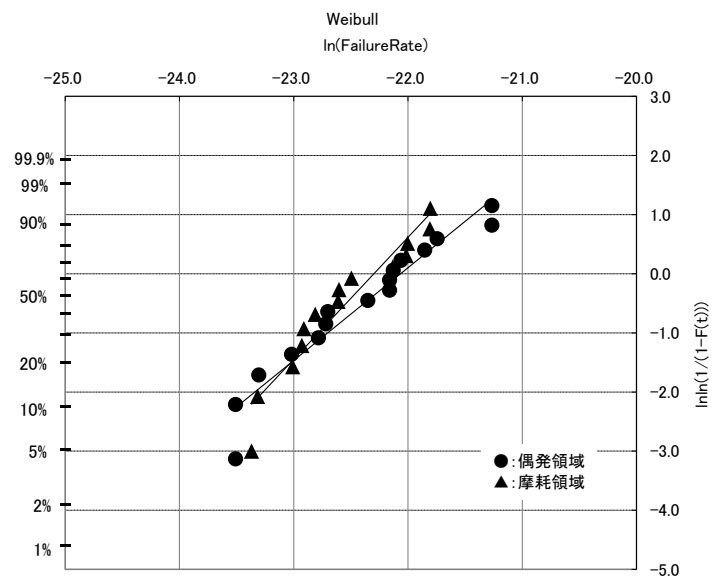


図 4-5(b) $N_c = 27.5$ 年とした場合の等価故障率分布（ワイブル分布）

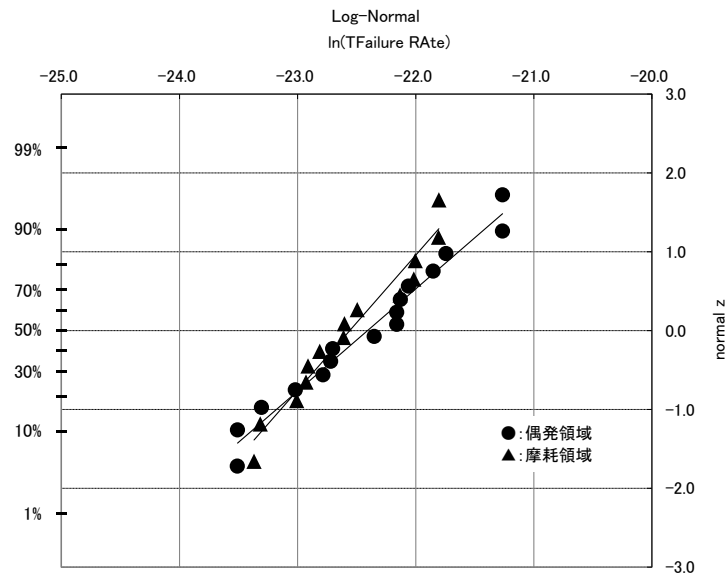


図 4-5(c) $N_c = 27.5$ 年における等価故障率分布（対数正規分布）

図 4-5 等価故障率の各分布適合状態 ($N_c = 27.5$)

27.5 年期間で観測した等価故障率の確率分布に関して、正規分布、ワイブル分布、対数正規分布のどの分布が適当であるかを比較するために、再度、すべての故障率サンプルを観測時刻へ移動変換し、分布状態を調査した。図 4-6 にその結果を示す。図中には相関係数も合わせて記載した。

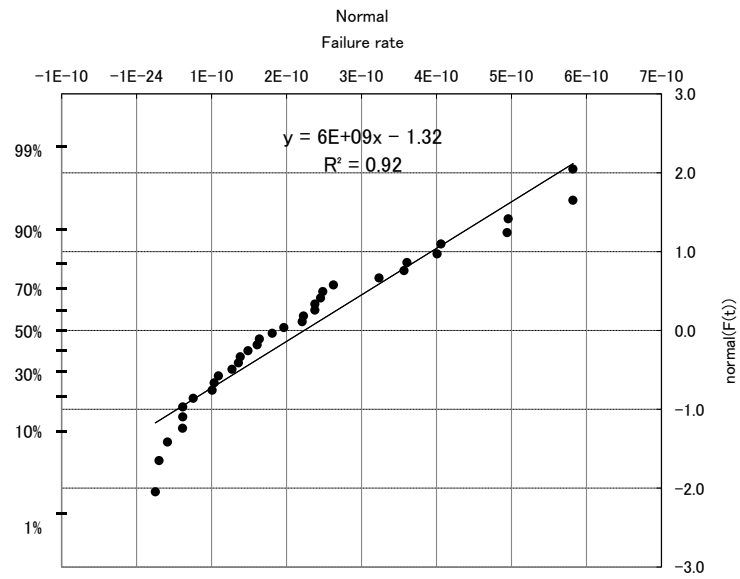


図 4-6(a) 観測点 27.5 年における等価故障率分布

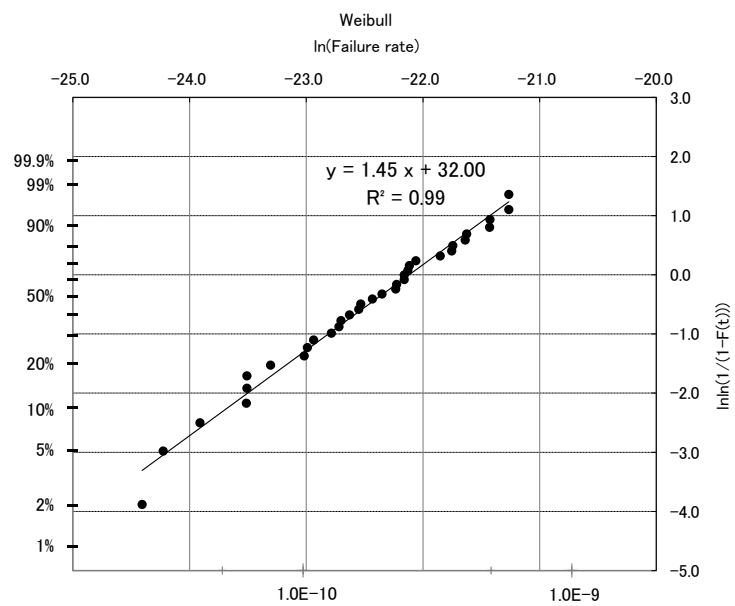


図 4-6(b) 観測点 27.5 年における等価故障率分布

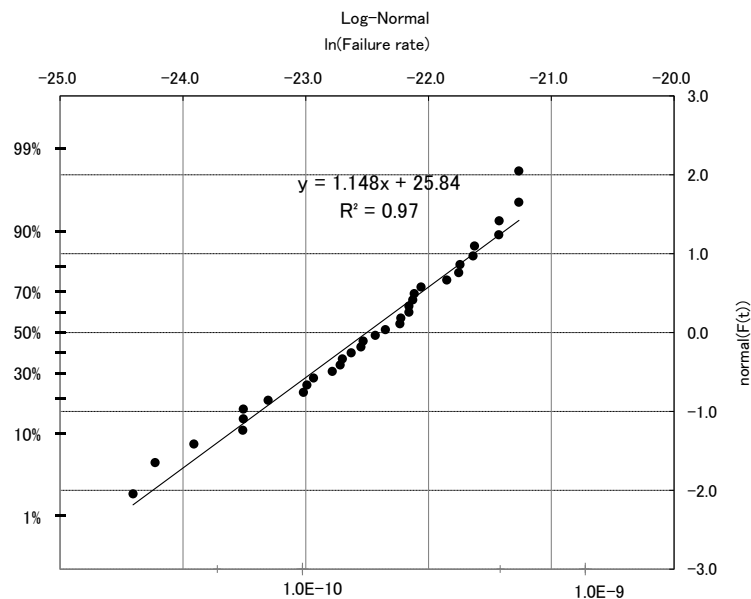


図 4-6(c) 観測点 27.5 年における等価故障率分布

図 4-6 等価故障率分布

図 4-6 に示すように，正規分布，ワイブル分布，対数正規分布に対する相関係数は，それぞれ，92%，99%，97%であり，分布形状としては，これらの中でワイブル分布の適用性が高いことが確認できる．

4-5. IEC TR 62380 による故障率への故障率確率分布の適用

製品の故障率を左右する部品の故障率の分布形状を求め得ることが明確であるので，生産管理システムに提案手法を導入することで，より詳細な管理が可能になると考える．生産者が長期使用の製品の故障率を考慮した出荷安全基準を設定するとき，故障率の確率分布が既知であれば，設定する基準値に適合する故障率を考慮することができる．つまり，市場での長期使用期間の使用を想定したとき，図 4-7 のように，故障率の累積確率分布において，平均値，10%，90%の場合の基準値を知ることができ，これに応じ，部品の信頼度の向上策や生産施設の整備などの対策を図る根拠となる．

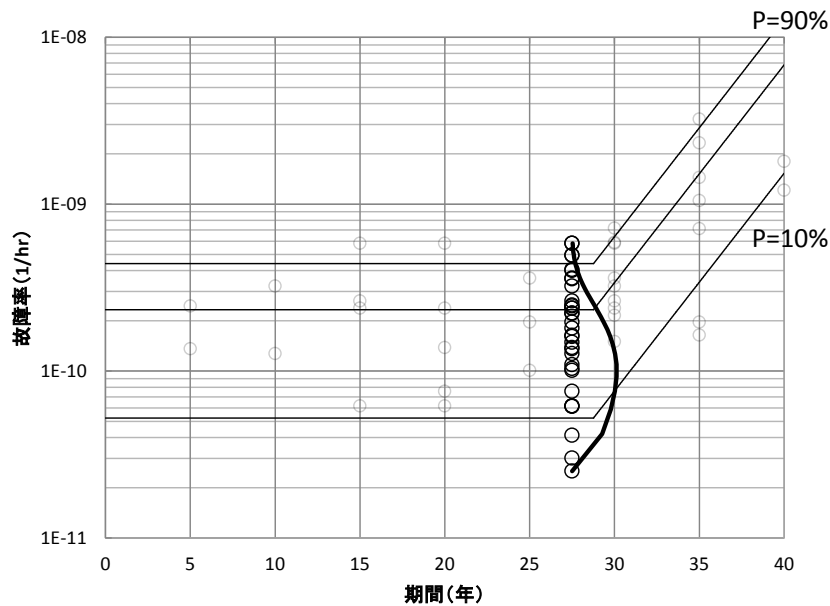


図 4-7 製品出荷時における故障率の分布の基準値の決定

IEC TR 62380 は、信頼性データハンドブックとして主に、プリント基板、部品の信頼性データをまとめている。このハンドブックにまとめられているコンデンサの信頼性から求める故障率を、事故報告データベースから求めた故障率の確率分布と比較することにより、手法の妥当性ならびに有用性を調査する。

IEC TR 62380 のデータベースで計算した値が、事故報告データベースから解析し得た故障率と一致したことは報告した。この一致した環境条件は、国内の使用環境温度 30℃ (JIS C9601:2007) を用いて、表 4-1(a) に示すプロファイル Case-1 を想定した時である。表 4-1(a) は、表 3-6 の再掲したものである。また、表 4-1(b) は、使用環境を厳しく設定したプロファイル case-2 である。誘電体コンデンサの故障率計算式を適用すると、case-1 のプロファイルでは、周囲温度が 30℃ とした場合、故障率は、 2.35×10^{-10} (/hour) である。事故報告データベースから得た故障率 2.33×10^{-10} (/hour) の値に類似している。

使用条件を厳しい場合のプロファイル Case-2 を適用した場合、IEC TR 62380 による計算では 3.22×10^{-10} (/hour) となる。この値は、前章で求めた累積確率 69.5% に相当する。図 4-8 中には、case-1, case-2 の使用状態での故障率を示した。

表 4-1(a) 環境パラメータと動作プロファイル case-1 (日本の環境)

t_{ac} (°C)	τ_1	τ_{on}	τ_{off}	Phase		
57	0.1	0.1	0.9	n_1 (cycle/year)	t_{ae} (°C)	T_1 (°C)
				550	30	27

表 4-1(b) 環境パラメータと動作プロファイル case-2 (劣悪な使用環境)

t_{ac} (°C)	τ_1	τ_{on}	τ_{off}	Phase		
80	0.1	0.1	0.9	n_1 (cycle/year)	t_{ae} (°C)	T_1 (°C)
				550	30	50

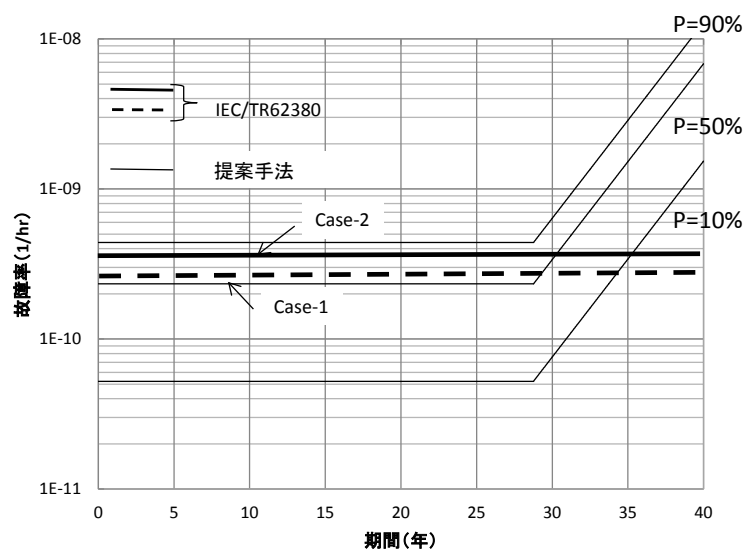


図 4-8 事故例データベースより得られた故障率と IEC TR 62380 により導出された故障率の比較

4-6. エアコン製品事故におけるコンデンサの故障率

扇風機と同様に、構成する部品のうちコンデンサが故障要因を占める製品があれば、扇風機の故障率データがその他の製品にも適用ができることが期待できる。そこで、エアコン機器における製品事故のデータベースが独立行政法人製品評価技術基盤機構(NITE)の事故報告データを扇風機の事故と同様に分析する。図4-9は、分析結果である。図中の白丸印は扇風機の結果、黒丸印(●)はエアコンの結果である。扇風機の事故率の偶発事故モードに比較して、10%以下の領域にプロットされている。解析に際し、エアコンの動作時間は、一年中としたために、全体的に低い故障率となったと考える。いずれにしても、30年位までは、偶発故障の特徴である故障率一定となっていることがあきらかである。このことは、製品の故障率はその製品を構成する部品の故障率から求め得ることができることを示している。言い換えれば、製品を構成する部品の故障率を調査することでその製品の故障率の推定をすることができ、製品安全評価において、その主要部品の故障率を基準にすることで、製品の故障率を評価することが可能になると考える。

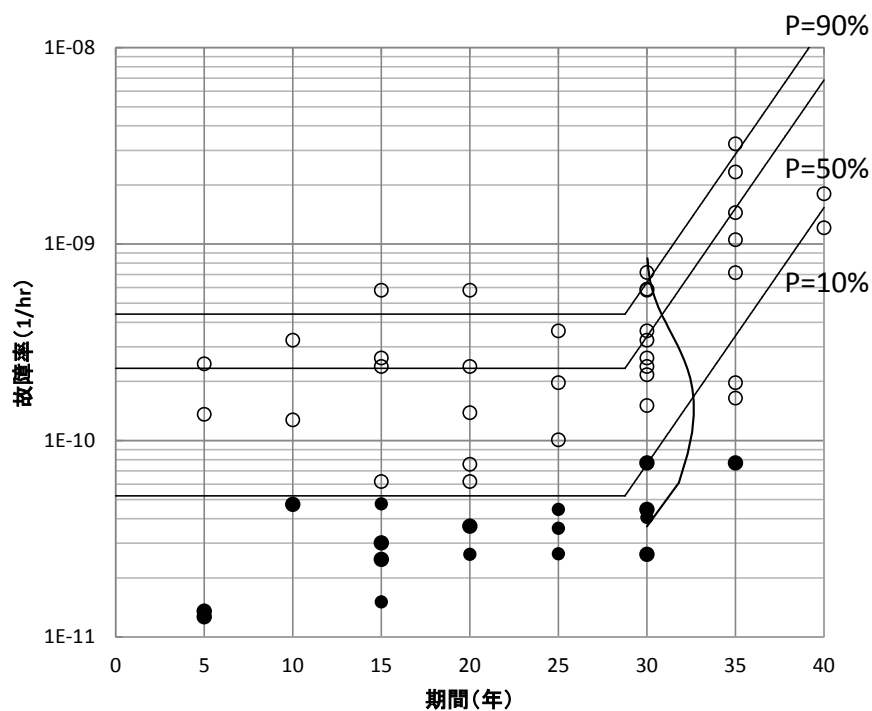


図 4-9 エアコンの事故報告による故障率のばらつき

4-7. 結 言

製品の事故報告データベースから求めた製品の構成部品の故障率データを偶発故障領域と摩耗故障領域に分け、その境界点の決定方法と、それぞれの領域データから故障率の確率分布の決定方法を示した。

さらに、IEC TR 62380 で算出される故障率と事故報告データベースより求めた故障率を比較した結果、IEC TR 62380 で求められる故障率は、NITE の報告データの平均値を与えていることが判明した。製品設計において重要な点は、平均値だけでなく、それがどの程度分布するかを明確にすることである。IEC TR 62380 の手法では、平均値が得られるもののその分布状態が不明であることに設計への適用に問題がある。本論で提案した手法では、確率(p)を設定することにより、その確率をもとにした故障率が求められることに有用性がある。特に、確率を 50%にすると平均値が得られるので、IEC TR 62380 の結果も包含していることに有用性がある。提案手法は、IEC TR 62380 よりも有用であることが明確になった。

実フィールドにおける故障率の確率分布が使用環境により生じることと仮定すると、IEC TR 62380 の平均値の故障率算出条件を典型的な使用環境とした場合に case2 の使用環境での故障率は、累積確率分布として 70%となる故障率になるワイブル分布と言える。つまり、温度上昇 27℃に対して 50℃まで上昇した場合の使用環境変化がどれだけの確率分布の広がりに対応するのかが比較することができる。このことは、故障率の確率 50%で 2.33×10^{-10} を設計の基準値に設定すれば、case-2 の使用環境に相当する故障率が、故障率の確率分布の 70%までに包含する分布となり、使用環境変化を想定した故障率の変化と対比することができる。

また、このように確率分布が既知の場合に、故障率を設計基準値として設定する場合に、確率(p)を設定し、確率分布を決定することが可能になる。例えば、70%の確率で基準値を設定する場合は得られたワイブル確率分布において、70%の値を基準設定と指定する。さらに、より厳しい基準値を想定する場合、確率 90%の値を基準値と指定することができる。

第5章 製品安全品質マネジメントシステムとその展望

5-1. 緒言

製品安全評価のため、製品のリスクレベルを定量化することを目的に、ハザードの危険レベルとその危険を封じ込めている機器のセーフガードの信頼性により、製品の安全性レベルの評価を試みた。その結果、定量化の精度は、ハザードの危険レベル、セーフガードの信頼性の精度で決定されることが判明した。製品安全レベルは、製品を構成する複数の部品の信頼性で決定され、製品の使用期間、ライフサイクルによっても変化し、統計的なデータとして捉えなければならない。第1章に述べたように、製品のライフサイクルの中で生産者が品質を直接管理できる過程は、製品の出荷前の設計、製造過程であり、製品のリスク低減の生産管理が最も有効に実現ができることを明らかにした。しかし、その基準値設定をどのようにして決定するのかが課題であったが2章で、製品安全性レベルの定量化を行い、製品安全性評価手法を提案した。そこで、提案した製品安全性基準を生産管理システムの中でその適用が図れるものとする。製品の設計、製造、出荷に対する事前要求として設定できることを明らかにする。このことは、製品安全基準を品質管理システムの基準に加えて品質管理システムに製品安全管理として組み込みができるので、製造者の製品安全品質確保がより容易となると考える。

これらのことより、本章では、提案した製品安全評価基準を用い、製造者が製品安全を確保するためのマネジメント手法への応用とその展望についてまとめる。

5-2. 製品安全品質管理の在り方

製品安全品質管理の構築として、製品ライフサイクル上でのリスク対応要件を設計、生産者へフィードバックする仕組みを取り入れることが重要である。加えて、製品安全の追求には、製品のライフサイクルにおいて製品の信頼性、安全性に影響を与える環境要因を設計、製造プロセスで考慮することが有効である。

生産者における製品安全品質管理は、製品ライフサイクルにおいて、製品の安全性指標に影響を与えることがあるか、否かを常に各部署にフィードバック

をし、安全指標の更新が行えることが重要である。フィードバックする仕組みの実現化には、製品ライフサイクルの各ステージで、生産者、消費者、行政の職能を果たす組織単位に情報フィードバックの方法が重要である。

製品事故が市場で発生すると、通常、その市場事故分析が独立行政法人製品評価技術基盤機構(NITE)や生産者の事故解析部門で行われる。この場合、事故データベースの解析を通じて部品の信頼性データの更新が行われる。主要な安全に係わる部品の故障データが日々、更新されることにより製品安全レベルの精度が改善される。

設計、部品調達、顧客サービスの各部門が、製品情報を把握することができるため、生産者は、安全指標設定の一元的管理が可能となり、よりよい製品安全品質が追求することができる。

製品ライフサイクルは、設計、製造、販売、設置、保守、廃棄からなっている。生産者は廃棄までの期間で、製品安全性を把握することが必要である。また、製品ライフサイクルにおける組織機能ごとに異なる要件を抽出して、その要件を製品安全の設計、製造の各プロセスへフィードバックすることも重要である。図 5-1 は、この考え方を具現化したシステムである。ここで得られたデータ蓄積により、設計段階の FTA に基づく製品安全評価が可能となり、改善や改良など、継続が可能となる。

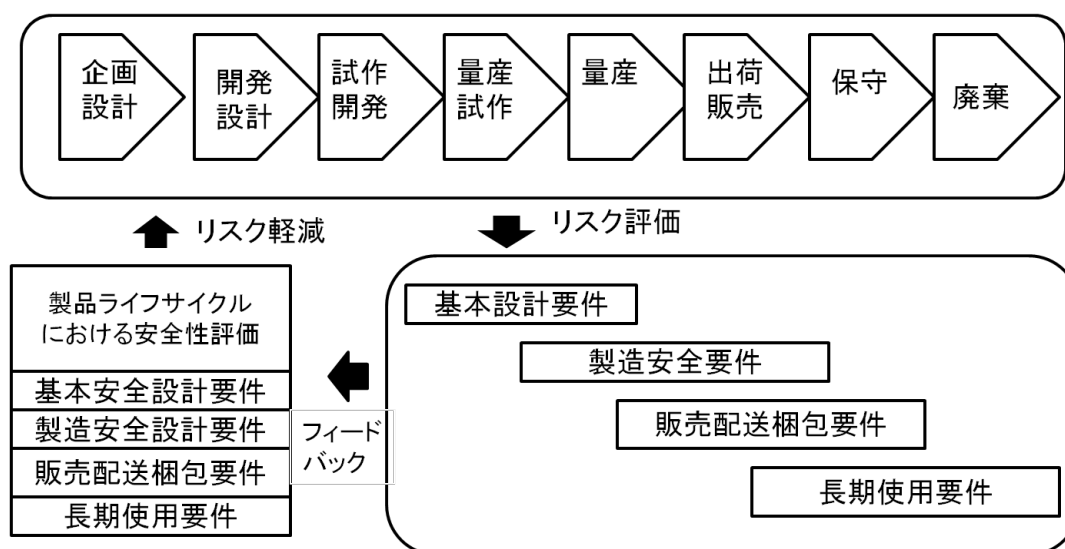


図 5-1 製品ライフサイクルにおける安全要件の抽出とそれによるリスク軽減

5-3. 安全品質保証組織体制

製品品質、製品安全を把握するには、生産者における組織を考えることも重要である [67]。一般的には、組織機能としては、人事部門、生産部門、開発部門、販売部門に分けられる。企業経営の視点において、経営管理を実施するためには事業単位ごとにその経営責任を明確し、事業場単位にその経営権限を与えている。会社経営のポートフォリオ経営が重視される今日、企業における組織形態は単一事業場経営から複数の事業場形態が多く採用されている [68]。このような状況下では、各事業部が製品の開発、製造、販売を進めるうえで、製品の品質と安全の確保においても基本的に事業責任を担う事業場が責任を持って推進することが要求される。

製品品質の管理には、設計開発にかかわる技術者に対する品質、安全教育が重要である。一方、製造部門における生産管理するうえで、リスクアセスメントが実施できる人材育成と教育が重要である [69]。リスクアセスメントの考え方は、ISO/IEC Guide 51 ガイドに記述されているので容易に適用ができる。製造者が自ら運用する製品安全管理システムに安全規格基準を制定することにより、複数の製品に共通した製品安全レベルの標準化が可能である。問題は、製品安全レベル基準を制定し、その製品安全レベルを把握することになる。この様な考え方を基に、まず、設計開発において、リスクアセスメントをハザードのリストアップから開始する。次いで、製品に関係する生産者活動のアセスメントを行う。これらの実施には、これらを実施できる人材が重要となることは言及するまでもない。

製品のライフサイクルは、開発、設計、製造、販売、設置、保全、廃棄の各段階において、それを取り扱う人と関連する活動が発生する。開発、設計、製造においては、製品が市場に出る事前に、製品安全に関係し、次のように関わる。

製品は、製品の使われ方、製品の使用目的、製品の開発設計思想などから、安全設計がどのように実施されたかをチェックすることが製品の安全設計に重要になる。製品のハザードを分析し、ハザードに対して、リスクを十分軽減されているか製品のセーフガードが施されているか、実施されているかを検証する過程を生産管理システムの中に組入れることが重要である。この作業は第3者認証機関で実施される製品安全適合検査の過程で置き換えることが可能であ

る。

次に、製品が市場に出荷された後の製品に製品安全レベルの変動に関する活動を考える。製品に対して、顕在化するハザードを取り除く作業や、リスクを軽減する作業は、市場へ出荷後は難しく、生産者が把握できる回収、修理の保全の活動によってのみ実施され、その作業によりハザードレベルの変更が実施される。消費者の意思による製品仕様の改変による製品安全レベルの変動も生産者からは、想定外の安全レベル変動になる。

この保全活動以外の製品に係る活動において、製品出荷後の評価として、製品の梱包、配送、設置に対して消費者、関係者が介在して、その製品を取扱う活動において、安全要求を評価することが重要と考える。製品出荷後の評価内容は、製品安全管理のアセスメント項目に、盛り込むことが可能であり、それらは過去の事例などを参考にして決定することができる。このことは、事後評価は事故の発生により、発生原因を製品設計、製造へフィードバックすることにより、製品安全レベル基準の改変を行うことが重要である。また、NITEによる製品事故のデータベース化において、事故原因、製品出荷日、事故発生日を特定し、製品安全性基準値の精度を向上させることができる。

生産者における製品安全確保の実現にむけて、組織体制に応じた、安全品質評価体制の構築も重要である [70]。この組織体制として、家電製品の製造者組織体制を例に挙げ説明をする。図 5-2 に製造者における全社製品安全統括体制の例を示す。製品カテゴリ別に、事業責任を持つ事業場と、それら複数の事業場に対する共通サービスを提供する職能サービス部門に大別できる [68]。これには、共通技術開発を行う R&D 部門、人材の有効利用を行う人事部門、情報インフラ、顧客サービス部門、品質部門、環境部門などが設置されている場合が多い。これらの部門は、基本的に、事業責任を持つ事業部毎に設置され、自己責任経営を推進する考え方もある。

しかし、事業部門ごとに共通する部分は、シェアードサービスとして、本社傘下のサービス提供部門に設置した方が社内全体での統一を実現でき、また、コスト低減の効果が大きい。それ故、製品安全水準を把握する部門は、本社傘下に設置し、製造者が市場に送り出す製品の品質の標準化を推進することが重要と考える。

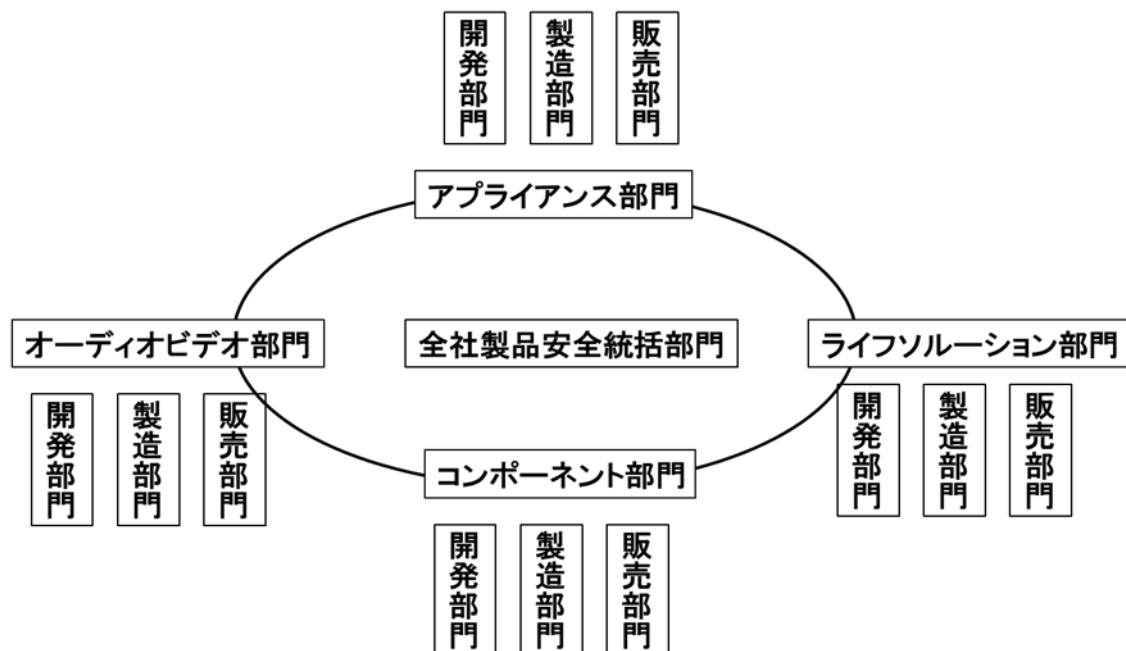


図 5-2 製造者における全社製品安全統括体制の例

この場合、製品の事業責任を持つ部門が、開発、製造、販売部門に対して、製品安全確保を行うためのツールを提供する必要がある。

全社の製品安全統括部門では、製品安全に対する知見を集約し、エキスパートの人材を配置する。これらの全社製品安全統括部門においては、そのエキスパートを中心に、事業責任部門に対して、行政、牽制、人材の育成の役割を提供する。

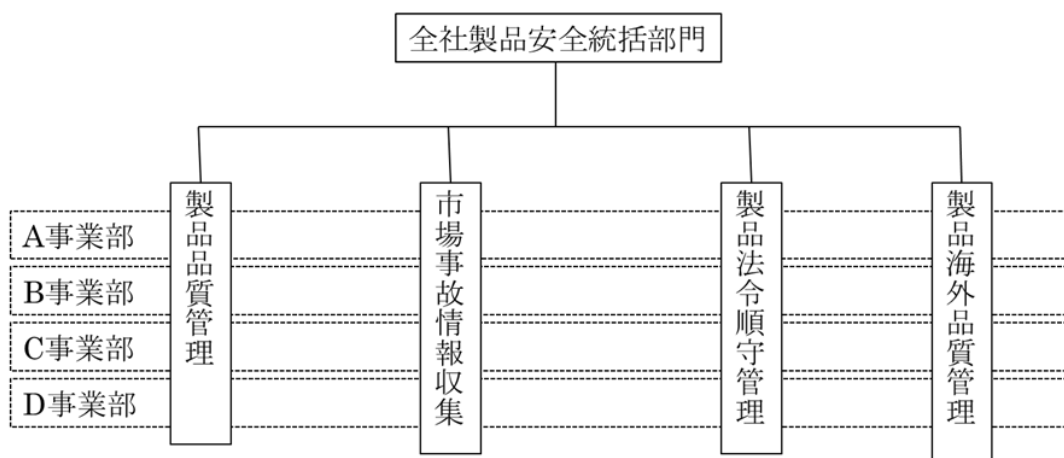


図 5-3 全社の製品安全統括体制

全社、製品安全統括部門を中心に、全社の製品安全推進を行う必要があり、社内基準の制定が不可欠である。品質基準の ISO 9001 制定の過程のなかに、製品安全品質の項目を加えることにより、ISO 9001 の基準プロセスの中に製品安全マネジメントを組み込みができる。このことで、製品安全の実現が可能になる。

このことから、全社の製品安全を統括するために必要なツールについて提案を行う。このツールとして、第 2 章で提案した HB-FTA 製品安全評価手法を取り入れ製品安全基準を設定する。図 5-4 に示すように、HB-FTA により、製品のハザードとセーフガード部品を特定しエネルギーレベルを計算し製品の安全性レベルを決定する。そして、設計や出荷基準に、製品安全レベルが当該の基準に達していない場合は、設計、開発、製造の過程での品質の見直しを行うしくみとして運用する。また、社内の製品事故情報や部品の故障率解析をデータベース化し製品安全基準の標準化を図る。

製品安全を確保するためには、設計、開発部門、製品安全行政部門との連携によって行われる。

製品安全行政部門から全社の設計部門に対する安全品質の取り組みに対する指示がもれなく実行されることが不可欠となる。この場合に、先に提案した製品安全評価手法を共通に使うための組織体制が必要である。これには全社の製品品質を担当する責任者のもとに、各事業責任者を構成員とした製品安全統括委員会を設置し、その委員会を通じて行政指導を行うことが有効である。図 5-3 は、その製品安全統括体制の一例である。行政部門の傘下に、各事業場の責任者が委員となる委員会を設定し、社内基準の周知を図り、また、その運用にかかわる課題をフィードバックする。これに加えて、市場における製品事故の詳細情報をフィードバックし、社内基準の改定に役立てる。製品法令への遵守は、製造者としては求められる領域であるが、その情報の周知徹底に統括行政機関の業務ミッションとして任にあたる。製品の販売地域からの情報もフィードバックが必要となり、これらは、地域販売の責任部署が情報収集と、社内基準の徹底を図ると共に、社内基準の改定に寄与する。

以上のような社内体制を強化することで、図 5-1 に示した製品ライフサイクルにおける製品安全確保が可能になると考える。

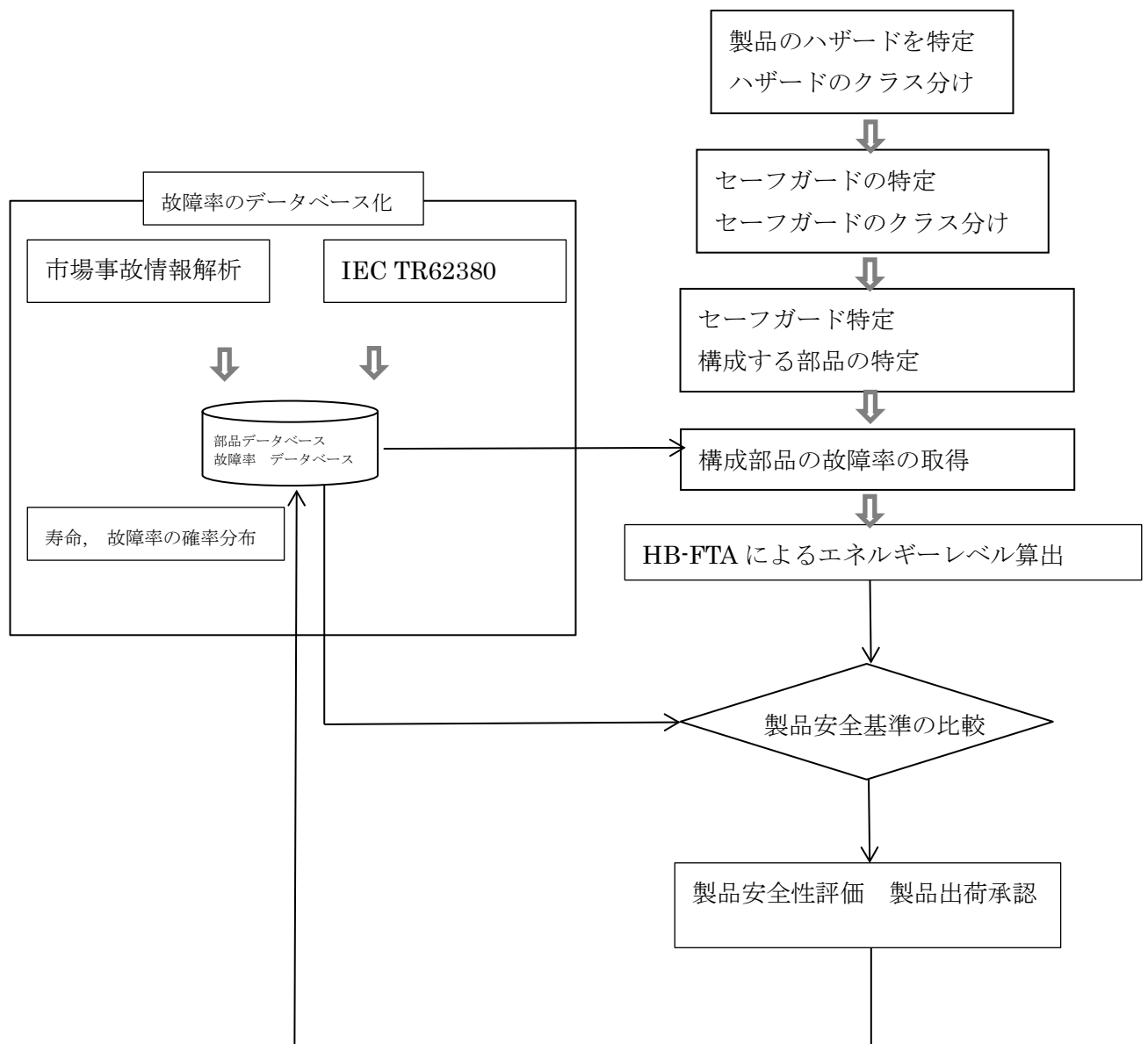


図 5-4 ハザードベース FTA を取り入れた製品安全データベース化

さらに、本論文の序文で指摘した、国際標準化の不整合を課題として、製造者の製品安全管理システムの構築を論じてきた。このことが実現できれば、さらに、さまざまな企業内における社内基準の共通する部分を、国際基準化をして、知見を共通化する必要がある。図 5-5 は、国際基準化を行う方法の一例である。図に示したように、二つの視点から進めていくことが必要と考える。各企業内に設置された製品安全管理システムで行われた結果や手法を基に手法の知見を、工業会でまとめ国際標準化へ報告とともに新たな知見を公表する。国内で各企業を取りまとめまとめる工業会としては、一般社団法人 電子情報技術産業協会 (JEITA)、一般社団法人 日本電機工業会 (JEMA)、一般社団法人 ビジネス機械・情報システム産業協会 (JBMIA)、一般社団法人 情報通信ネットワーク産業協会 (CIAJ) などがある。また、同時に第 3 者認証機関である一般財団法人 電気安全環境研究所 (JET)、一般財団法人 日本品質保証機構 (JQA)、Underwriters Laboratories (UL)、TuV Rheinland、Intertek などを通じた、国際認証基準の標準化を進めていくことも重要である。これらの活動により、我が国の製品安全性向上だけでなく、国際競争力向上が得られることとなると考える。

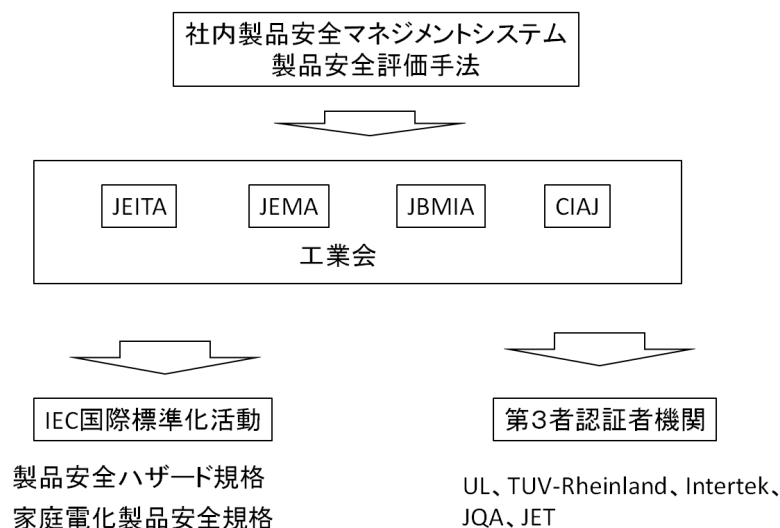


図 5-5 国際標準化と第 3 者認証機関への提案

5-4. 結言

生産管理システムは製品品質に重点をおき従来からの過去事例から管理する手法と第2章で提案した科学的な根拠から整理された HB-FTA 手法を組み合わせることでより多くのハザードが評価することが可能となる。これにより、市場での製品の不安全事故が未然に防止することが可能となると考える。本章では、企業内のマネジメントシステムを組織体系からの視点と人的資源からの視点で企業経営というひとつの目的を達成するために必要要件をまとめ、世界での安全性評価手法とそこから得られた知見を世界に公表することにより、各界における世界的先駆を図り、国際競争力の向上を目指せることを記述した。今後、各社の個別的な活動だけではなく世界的には国内の同業各社が一つにまとまり、工業会を通じ、基準化、標準化などに協力、促進することが産業発展のために重要である。

第6章 総括

家電製品の不安全事故の実態を調査する過程で、行政や国際標準化、産業会の自主的な取り組みや、経済産業省の製品安全に対する取り組みなどが強化されていることを示した。また、その取り組みには規制制定があるが、制定に時間がかかる課題があり、製品を構成する技術進歩が速く、産業立国を目指す我が国においては法律規制による行政主導の取締まりは、国際競争力の上で課題となることが明確である。これらの課題に解決するために、不安全事故を発生させる根本的なハザードを特定して、製品のライフサイクルの中で、製品を構成する部品の信頼度より、製品のライフサイクルの任意の時刻における製品安全レベルを数値化することで、製品リスク水準を決定する手法を提案した。

この製品リスク水準を製造者の出荷基準に定め、製品安全評価を実施することを生産管理システムに組み込むことにより製造者自らが長期にわたる製品安全施策を構築することが可能であることを示した。

第2章では、全ての製品に適用可能な製品安全基準の定量化を実現し製品安全性評価手法を提案した。人体や家財への影響は、危険源のエネルギーレベルに依存し全ての製品で共通であることに着目し、その危険源のエネルギーレベルが製品を構成するセーフガードの信頼性により防護され傷害や火災事故から守られているというハザードベース安全評価モデルを採用し、危険源のエネルギーレベルとセーフガードの信頼性から製品安全基準の定量化を図り家電製品への適用性を示した。

製品安全性評価手法においては、製品リスクレベルの基準化が、すべての製品に対して、共通した基準によりリスクレベルの定義が必要である。このリスクレベルがある一定の基準を満たす場合に出荷を許可するように製造者の生産管理システムで規定をすることにより、市場における製品安全レベルは一定の基準で管理することができる。これにより、市場にある製品の安全レベルが管理され、不安全事故をなくすことが期待できる。さらに、ハザードベースの安全水準の共通化は、国際標準化をはかることで国際市場全体において、製品の安全水準、リスクレベルの標準化が可能となる。

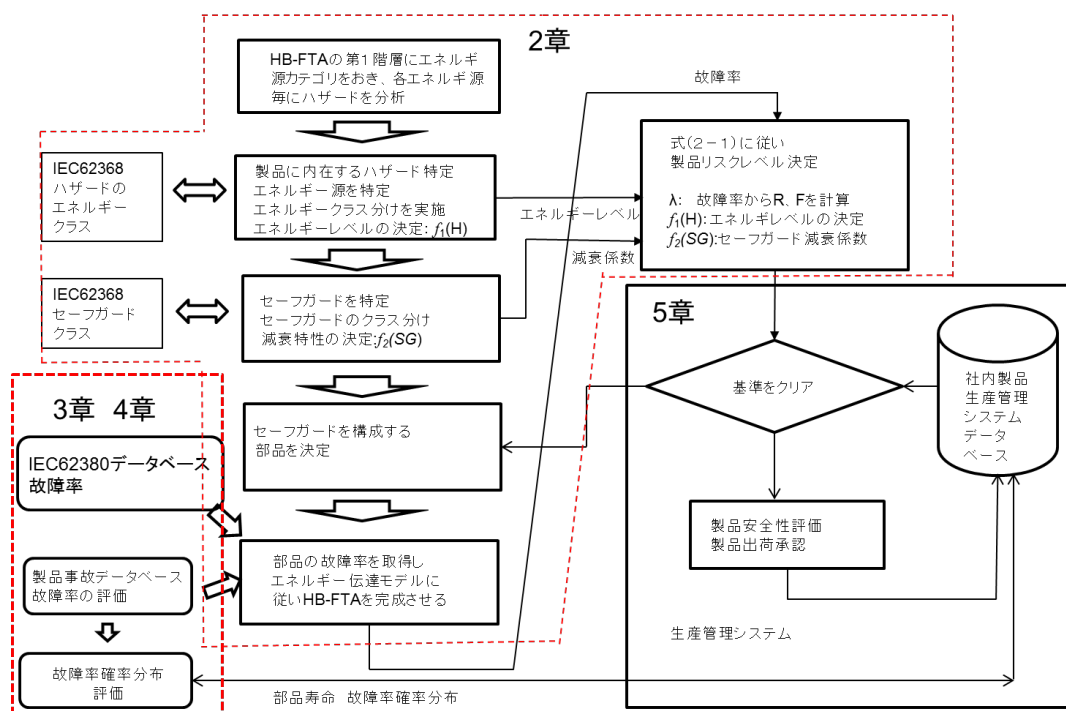


図 6-1 HB-FTA を適用した製品安全評価手法

製品安全評価手法の提案においては、ハザードに着目した家電製品のリスク評価手法としてHB-FTAを提案した。図6-1にHB-FTAによる製品安全評価手法の全体像を示す。ハザードベース安全評価手法においては、HB-FTAの第2階層にエネルギー源のカテゴリ毎に分け、ハザードを分析し特定する。そのハザードのエネルギーは、IEC 62368規格で用いられているクラス分けを参照しエネルギーレベルを決定する。そのハザードを防護しているセーフガードを特定し、その防護レベルからクラスを決定する。セーフガードは、多くの部品で構成されることが多い。つまり、これらの部品が故障したときに、セーフガードの機能が失われるという考えに基づき、これらの部品をセーフガードとして認識し、減衰率を与えた。このように、HB-FTAにより、可能な限りハザードとセーフガードおよびその関連部品を網羅し、故障率から信頼性を計算し、製品の全体の製品安全性評価が可能となったことを示した。ハザードレベルの決定、セーフガードの信頼性、事象の確率により、製品全体のリスクレベルに関して、すべての製品に対して共通した基準の設定が可能となった。この手法により、表6-1に示すように従来のFTAでは実現できなかった安全性評価が設計段階で行うことができようになった。家電製品を構成する部品の故障率とハザードレベルの演算

によるリスクレベルの定量化を実現し家電製品安全評価が可能になることを示した。

表 6-1 HB-FTA による効果

	従来のFTA	ハザードベースFTA
問題点	機能ベース 潜在するハザードの評価が抜ける 可能性がある	セーフガードを構成する部品の 故障率が必要
必要なデータ	設計データ	ハザードのクラス分け セーフガードの等級 故障率
セーフガード の考慮	特定ができない	セーフガードに関係する部品の 故障によるエネルギー伝達が考慮 されている
新製品への 適用	事故の再発防止が対策となる	設計段階での安全性評価がで きる。セーフガードの必要性、効 果の評価ができる

第 3 章では，製品を構成する部品の信頼性データの入手が困難である課題に対して，製品事故のフィールドデータの解析手法を提案し故障率を算出しその有効性を示した。

基準を決定する要素の中で重要であるセーフガードの信頼性を明確にするが必要ある。これまでに，部品のデータベースは種々存在するが，どのデータベースをどのように利用するのがよいか，適当な指針は現在までに得られていなかったが，本研究において，製品事故の主要要因であるコンデンサに注目し，扇風機とエアコンの事故例から，コンデンサによる製品事故を分析し，その製品事故のデータベースからコンデンサの故障率を計算する手法を提案した。

この故障率を，コンデンサの故障率と想定することとし，IEC TR 62380 と比較検討し，両者を比較したところ，ほぼ一致することを確認した。つまり，国際競争のなかで，部品の故障率の実態をあらわにすることは，製造者責任の観点からも非常に難しい問題である。しかし，実際の事故例データベースを用い，本論文で提案する手法を，用いれば特定の部品の故障率を推定することは可能であることを示した。また，故障率のデータベース化を進めることにより，より新しいセーフガードの故障率により 2 章で提案した HB-FTA への展開も期待できる。

第 4 章では，さらに発展的研究として，IEC TR 62380 では故障率のばらつき

を示す確率分布が示されていない課題について、フィールドデータからサンプル数が限られる故障率から、等価故障率を提案することにより、その確率分布を導出することを可能にした。

表 6-2 製品事故データベースによる等価故障率による評価の特徴

	従来の部品データベース: IEC TR 62380	事故データベースと等価故障率 による評価
問題点	故障率のばらつき 確率分布がわからない すべての部品データがない	事故データサンプルが少ない
必要なデータ	環境温度、製品温度、温度サイク ル条件	出荷時期、使用年数
摩耗故障領域	特定ができない	等価故障率により特定が可能 製品寿命の推定も可能
新製品への 適用	故障率の平均値を与える	故障率の分布を明らかにすること より、製品使用環境に応じた 製品安全基準の設定が可能と なる

この過程では、偶発故障と摩耗故障領域から求められる故障率の確率分布が境界点において連続であることから製品寿命を求め得ることを示した。

特に、サンプル数が限られている条件下で、故障率分布を求めるために、等価故障率を新たに定義し、等価故障率分布を算出する手法を示した。

最も特記すべき点は、表 6-2 に示すように、本論文で提案した手法は IEC TR 62380 で求められていない故障率分布が推定できることにある。すなわち、確率を基に故障率を算出すれば、製造工程の改善が、故障率向上にどの様に役立ったかを定量的に評価ができる。このことは、本手法で求められた値が製造技術目標となり国際競争力向上を図れることになる考える。

第 5 章では、HB-FTA により得られる製品安全基準を企業組織の中で効果的に運用するという課題に対して、生産管理システムと組織体制の在り方を示した。HB-FTA は、製品不安全事故を防ぐために、製品の安全設計に埋め込まれたセーフガードの信頼性データからその故障率を算出し、その製品の安全評価水準を設けることを提案した。これらをリスクアセスメントの基準に取り入れて、製造者の社内管理システムに構築し、製品ライフサイクルの中から要求される安

全要件を製造，設計へフィードバックさせて，組織連携や人材教育，国際標準化を考慮した製品安全品質管理行政が効果的に実現できる．

今後の展望として製品安全の水準を維持するために製品安全評価手法を組み込んだ生産マネジメントシステムが考えられる．

参 考 文 献

引用文献

- [1] 小松原明哲, “製品安全化へのプロセス PL 法という通常の使い方をめぐって,” REAJ, Vol 20.,No2 1998.
- [2] 中條 武志, ISO9000 の知識, 東京: 日本経済新聞出版社, 2008.
- [3] 経営能力開発センター, 経営学の基本, (株) 中央経済社, 2006.
- [4] 真壁 肇, 信頼性工学入門, 日本規格協会, 2010.
- [5] 藤本 隆宏, 日本のもの造り哲学, 日本経済新聞社, 2008.
- [6] 真壁 肇、鈴木和幸、益田昭彦, 品質保証のための信頼性入門, 日科技連, 2012.
- [7] 宮村 鐵夫 真壁 肇, “製品責任の事例解析に基づく製品安全のための品質保証課題関する研究,” 品質, Vol. 24, No3, 1994.
- [8] NITE 独立行政法人 製品評価技術基盤機構, 製品安全・事故情報 , <http://www.nite.go.jp/> (アクセス日 2013/8/3).
- [9] 独立行政法人 製品評価技術基盤機構, “生活安全ジャーナル,” Vol 13, 2012.
- [10] IEC 活動推進会議, IEC 事業概要 2013, 日本規格協会, 2013.
- [11] 向殿 政男、宮崎 浩一, 安全の国際規格 第1巻 安全設計の基本概念, 日本規格協会, 2009.
- [12] 越山建彦, “ISO におけるリスク概念と新しい安全設計ガイドの関係に関する考察,” JCROSSAR, A 論文 2015.
- [13] IEC, IEC 60335-1:Household and similar electrical appliances - Safety - Part 1: General requirements, IEC, 2010.
- [14] IEC, IEC 60065:Audio, video and similar electronic apparatus safety requirements, IEC, 2011.
- [15] IEC, IEC 60950-1: Information technology equipment - Safety - Part 1: General requirements, IEC, 2013.
- [16] IEC, IEC62368-1: Audio/video, information and communication technology equipment - Part 1: Safety requirements, IEC, 2010.
- [17] R. Nute, “Injury from thermal energy,” Product Compliance Engineering (ISPCE), 2014 IEEE Symposium, IEEE, 2014.
- [18] IEC, ISO/IEC Guide 51:Safety aspects - Guidelines for their inclusion in standards, IEC, 1999.

- [19] 益田 昭彦, “信頼性アセスメントの復権,” 通信学会技術報告、電子情報通信学会, 1992.
- [20] 永石 治喜, “IEC60079 シリーズに適合した工場電気設備防爆指針が目指すもの,” 安全工学、Vol.48, No.6, 2009.
- [21] 杉本 旭, “確定論による安全原理と国際規格,” 品質, Vol., 28, No.3, 1998.
- [22] 一般社団法人 電気安全環境研究所, “CMJ 制度,” [オンライン]. Available: http://www.jet.or.jp/common/data/products/cmj/cmj_pamph_jp.pdf. [アクセス日: 1 8 2013].
- [23] 樋口一清, “製品安全行政の新たな展開と産業政策のパラダイムシフト,” 科学技術政策と政策論, 2007.
- [24] 経済産業省, “消費者生活製品向けリスクアセスメントのハンドブック,” 経済産業省, 2012.
- [25] 松田利浩, “欧州と日本における製品安全制度と背景の違いについて,” REAJ 誌, Vol.30, No. 6, 2008.
- [26] 中村 和雄, “アメリカの CPSC について ー公開情報の現状とその活用方法・動向を考える,” 信学技報 IEIEC Technical Report SS2008-6, 2008.
- [27] 宮村鐵夫, “製品安全への取り組みと進め方,” 日本品質管理学会, 品質, Vol.28, No.3 pp.287-294, 1998.
- [28] 宮村鐵夫, “製品の経年変化と製品安全,” 独立行政法人 製品評価技術基盤機構, 生活安全ジャーナル, Vol.13, 2012.
- [29] 野口 和彦, “リスクマネジメント規格 ISO 3 1 0 0 0 の安全への適用,” Vol. 48, No.6, 2009.
- [30] 堀田源治 他, “機械設備の信頼性と安全性に影響を与える人的リスクについての分析,” 日本材料学会, 第 28 回 信頼性シンポジウム pp. 75-80, 2014.
- [31] 北廣和雄、倉敷哲生、座古勝, “品質問題により形成される経営リスク評価の研究,” 日本機械学会論文集、77 巻 775 号、2011 年.
- [32] J. Z. Ma , T. Spyros, “Reliability and Maintainability in Photovoltaic Inverter Design,” IEEE, 2011.
- [33] M. L. H. Stember W. R. Huss, “A methodology for Photovoltaic System Reliability & Economic Analysis,” IEEE Transaction on Reliability, Vol., R-31, Aug 1982.
- [34] A. Garro , F. Barrara, “Reliability analysis of Residential Photovoltaic System,” International conference on Renewable Energies and power quality, European Association for the development of renewable energy, environment and power

quality 2011.

- [35] 益田昭彦、岩瀬智之、鈴木和幸, “信頼性・安全性解析のための人・環境・装置の三要素 FMEA 手法の開発,” 品質, VOL.29, No.1, 2000.
- [36] 福田淳、波多野浩二, “パナソニック電工の製品安全活動,” 品質, 1999.
- [37] Hessian R.T, Jr, B. Salter and E. Goodwin, "Fault -Tree Analysis for system design, Development modification and verification," IEEE Transaction on Reliability, Vol. 39, No.1, 1990.
- [38] 清水洋孝, “製品安全解析技法の実施事例として,” REAJ 誌 Vol19, No2, 1997.
- [39] S. Yang , M. LU, “A fault Diagnosis model for embedded software base on FMEA/FTA and Bayesian Network,” 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety, ICRMS 2009, IEEE, 2009.
- [40] J. Overstreet , S. Mahadevan, “Monitoring product reliabiity and supply chain logistics in warrantly data,” IEEE, 2012.
- [41] 柴田義文 佐藤吉信, “プリント: 電子機器分野のリスク・製品安全解析手法,” Real-J 誌, Vol. 20, No. 8, 1998.
- [42] 柴田義文、佐藤吉信, “製品安全のためのリスク解析 - A-FTA の提案と電気掃除機に対するケーススタディ -,” REAJ 誌, Vol. 25, No2, 2003.
- [43] 和田 浩, “製品安全確保のための解析技報の開発と活用,” 信学技報 SSS2007-18, 電子情報通信学会、(2007-08).
- [44] S. G. Gedam, “Optimizing R&M performance of a sysytem using Monte Carlo simulation,” IEEE, 2012.
- [45] James G. McLeish, “Enhancing MIL-HDBK-217 Reliability Predictions wiht Physics of Failure Methods,” Reliability and Maintainability Symposium(RAMS), 2010, IEEE.
- [46] T. Burke, “IEC 62368-1’ s Allowance for Application of,” IEEE Symposium on Product Compliance Engineering, 2011.
- [47] R. Nute, “HBSE and interlock scheme,” pp.41-44, IEEE Symposium on Product Compliance Engineering, 2015.
- [48] T. Lanzisero, “Applied Safety Science and Engineering Techniques,” International Symposium on Product Compliance Engineering, ISPCE 2011, IEEE, 2011.
- [49] 畑村洋太郎, 失敗学のすすめ, 講談社, 2005 年.
- [50] 独立行政法人 製品評価技術基盤機構, “製品安全・事故情報,” [オンライン]. Available: <http://www.jiko.nite.go.jp/php/jiko/index.html>. [アクセス日: 1 8 2013].

- [51] 独立行政法人 製品評価技術基盤機構, “経年劣化～終末期を見据える,” 製品安全ジャーナル Vol.10, 2010.
- [52] 鈴木順次郎 牧野鉄治 石坂茂樹, FMEA・FTA 実施法, 日科技連出版社, 2006 年.
- [53] CPSC, “Safer Product Government,” <http://www.saferproducts.gov/> (アクセス日 2012/8/1) .
- [54] EU, “RAPEX ”, <http://ec.europa.eu/consumers/safety/rapex> (アクセス日 2013/8/6) .
- [55] 竹谷 是幸, “IEC 規格による電気安全,” 理工図書株式会社, 2001 年.
- [56] IEC, “IEC Guide 117: Electrotechnical equipment - Temperatures of touchable hot surfaces,” 2010.
- [57] IEC, IEC/ISO Guide 51, "The preparation of safety publications and the use of basic safety publications and group safety publications", IEC, 2010.
- [58] 北川賢司, 信頼性工学入門, コロナ社, p. 144, 1997.
- [59] 酒井信介, 技術分野におけるリスクアセスメント, 森北出版, p. 86, 2003.
- [60] 井原惇行, “故障解析から安全性をみる,” 安全工学シンポジウム, 2012.
- [61] IEC, IEC TR 62380, "Reliability data handbook -Universal model for reliability prediction of electronics components, PCB s and equipments, IEC, 2004.
- [62] 日本電子機械工業会, “電子機器の製品事故における原因究明の考察,” 安全調査専門委員会.
- [63] 中津 晋, “経年劣化事故から学ぶ未然防止解析法ーライフエンド FMEA の施行,” KEC 情報, pp.. 31-35, No. 222, 2012.
- [64] 市川昌弘, 信頼性工学, 裳華房, 1998.
- [65] (独)製品評価技術基盤機構 (NITE), “エアコンおよび扇風機の事故の防止について (注意喚起) ,” NITE, 2012 年 6 月 24 日.
- [66] 大西健太, “繰り返し負荷に対する COF 寿命信頼性評価に関する研究,” 13rh, Symposium on "Micro-joining and assembly technology in Electronics", February 1-2,, 2007.
- [67] 吉永崇史, “経営組織論における質的研究とその意義,” 質的心理学フォーラム, Vol.3, pp.73-83、2011.
- [68] 木村幾也, “グループ企業における経営組織と管理会計情報 事業部制企業からグループ企業へ,” 日本管理会計学会誌, 第 7 巻 第 1・2 合弁号 1999 年.
- [69] 石原雄二, “製品安全に関する企業教育の取り組みとその将来に向けた提言,” 品質, Vol., 42, No.3, 2012.

- [70] 永原賢造, “リコーにおける製品安全性のつくり込み活動,” 品質, Vol.38, No.4, 2008.
- [71] 樋山泰亮, PSE 読本 電気用品安全法完全マスター, 東京: 株式会社 電波新聞社, 2007.
- [72] 財団法人 家電製品協会, The Product Safety PS(製品安全) ガイドブック総集編, 財団法人 家電製品協会, 2001.
- [73] 庄司克宏, EU 法 基礎編, 岩波書店, 2007.
- [74] 庄司克宏, EU 法 実務編, 岩波書店, 2008.
- [75] NFPA, NFPA 70 : National Electric Code, National fire protection association, 2014.
- [76] The European Parliament and of the Council, General Product Safety Directive 2001/95/EC, EU, 2001.
- [77] 田村裕之, “電気火災の動向と火災事例,” 安全工学、 Vol.48 No.6, 2009.

付録-1. 世界地域の安全規格適合システム

製品の安全性確保は、各国ともにその関心は高く、様々な視点で議論され国際標準化が進んでいる。電気製品安全規格の国際標準化は、図 1-4 に示すように、国際電気標準化会議(IEC)の下、進められている。さらに、この国際標準化と並行して、各国、各経済圏地域において、製品安全に向けた法制化が推進されている。この法制化は、法令や指令で安全基準を定め、さらに具現化施策として適合させるべき安全規格を定め、対象となる製品がその安全規格に適合することを義務づけるものである。安全規格に製品が適合していることを示す方法として、自己確認と第三者認証の二つの方法がある。製造者自身が製品の安全性を確認することを「自己確認」と称する [71]。また、民間の第三者試験機関が、製品の安全性に関する法規、および、規格、基準への適合性を確認し、認証を行うことを「第三者認証」と称する。各国は、いずれの方法かによって製品安全の適合性評価を実施している。

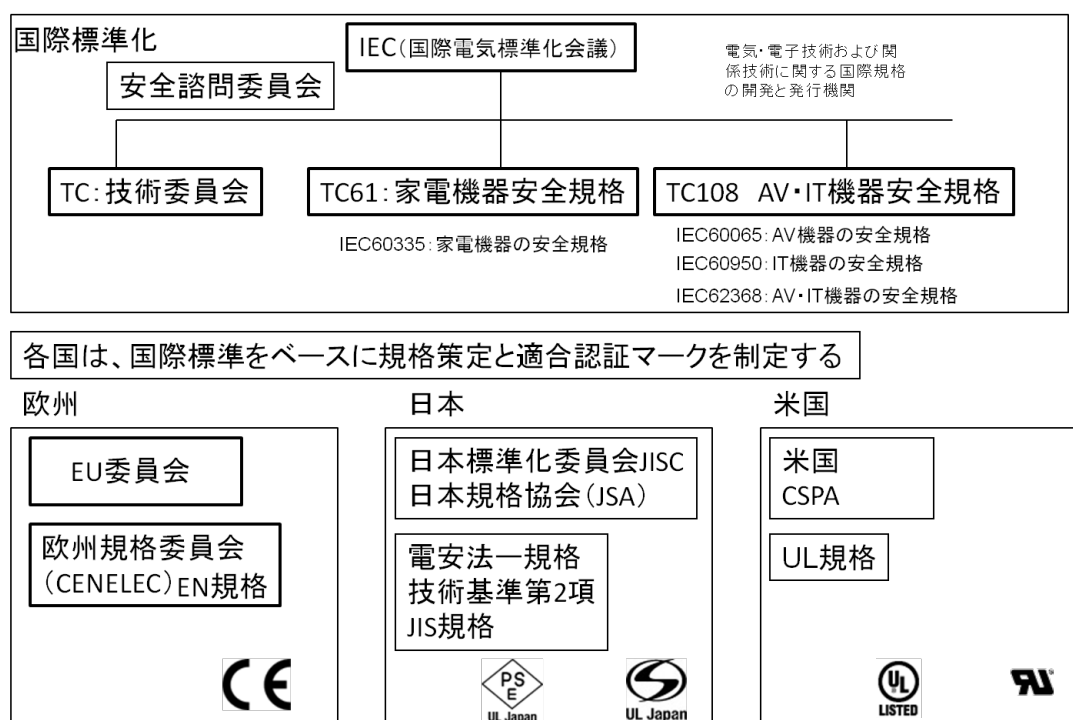


図 1-4 世界の製品安全のための国際標準規格の動き

日本、欧州、北米を例に法律、規制の違いについて、以下に記述する。

(a) 日本の場合

日本では、製品安全(PS)は、「製品の企画・設計、製造段階はもとより、製品を市場に供給してから廃棄されるまでの期間の安全性確保を図ること」と定義している [72].

日本国内では、製品安全に対する代表的な法律として、電気用品安全法がある [71]. この法律により、電気製品は、技術基準適合確認を行い、登録された第三者認証機関により認証適合検査を実施して認証マークを製品に貼付することを義務付けている. 適合証明のための技術基準には、火災、感電、傷害、爆発、毒性の危険に関する安全要求事項が含まれている. これらの技術基準は、省令第1項、2項に定められている. 第1項基準は、日本独自の安全基準、つまり電気用品取締法（電気用品安全法の前身）から引き継がれた要求事項を中心にまとめた日本独自の技術基準である. 第2項基準は、国際規格に整合した技術基準がまとめられている. この技術基準は、日本国内規格として IEC 規格に整合させ制定される JIS 規格を省令が引用する形式(J規格)で設定されている.

このように法律が定める技術基準に、国際規格ベースで策定された日本規格を引用することで、法律の要求により安全確保が試みられている.

(b) 欧州の場合

欧州では、EU が制定している EU 法 [73] [74]により規制されている. そのなかで、EU 域内の製品の自由と安全な流通を目的としたニューアプローチ指令に基づき、製品カテゴリ毎に必須要求条件が定められた指令 (Directives) を発令している [12].

これらには、家庭電化製品のほとんどを対象とした低電圧機器指令、機械関係の製品を対象とした機械指令等多岐にわたる指令がある. EU 内に製品を上市するためには、対象となる指令に適合していることを製造者自らが宣言することが要求されている. これは、自己適合宣言といわれ、適合宣言を実施したことを証明するために、製品に **CE** マークを貼付することが義務付けられている. この自己適合は、指令に定められる必須要求条件の適合を証明することで行われる. **EU** 委員会は、指令ごとに個別 **EN** 規格 (**CEN/CENELEC** 発行)を列挙した **EN** 規格リストを発行し、それらの個別 **EN** 規格に適合していることを証明することで、各指令に対して適合しているとみなすことを定めている. この規格を調和

規格と呼んでいる。このような自己適合宣言が実施されている。

(c) 米国の場合

米国では、CPSC (Consumer Product Safety Commission : 消費者製品安全委員会) が特定した品目に適用される消費者製品安全法 (CPSA) が制定されている

[53]。また、National Electrical Code 米国電気工事規定 [75]により電気製品の安全性が法律で要求されており、それらの規則の中で、UL/CSA 規格が引用されている。欧州とは異なり、自己宣言の法的要求はないが、法律が該当する製品の安全性を製造者に要求している。

上記に述べたように、欧米では製造者がみずから製品の安全を宣言する自己適合方式であり、その半面、市場での監視や製品事故報告の義務化などが強化されている。欧州では、ニューアプローチ指令の一連の指令の GPSD [76]、一般製品安全指令の中で、製品事故報告義務が課せられ、EU の RAPEX システム [54]で製品事故のデータベースが管理されている。北米では、CPSC 消費者製品安全委員会による製品安全事故のデータベース [53]がある。日本国内で NITE が製品安全に関する情報発信や製品事故のデータベースの管理を行っている。

このように国際的に市場監視や法整備により製品安全 [77]に対する取り組みが推進されているが、多くの場合、製品事故が実際に市場に起こり、行政機能が働き規格基準の策定が進められる。事故発生からその内容の再発防止対策を法律で規制するためには時間がかかるなどの課題があり事故を未然に防ぐためには根本的な対策が必要となる。

付録-2 製品事故例の実例

- 熱線の一部断線によるスパークの発生
- モータ部の巻き線絶縁不良による発煙，コンデンサの絶縁不良による発煙
- 洗濯機の回転部による指の裂傷
- 外部液剤の浸入によるショートによる火災
- 延長コード屈曲による断線
- 延長コード屈曲によるトラッキング
- 温風器の可燃物の燃焼
- 電気毛布の折り曲げによる断線から発生したスパークによる火災
- コンデンサの絶縁破壊，トラッキングで発熱，回転ロックがかかり負荷がオーバーし発熱し，モータからの発煙
- 洗濯機で小指の切断
- DVD デッキに芳香剤が侵入しショートによる火災
- 延長コード屈曲による内部ショートによる発熱
- 電気毛布のコードと延長コードのほこりによるトラッキング
- 蓄熱温風器の前の可燃物が燃焼
- ホットプレートの鉄板をはずした状態使用し火災発生
- ブレーキ摩耗による洗濯機で指を切断
- 温水便座のヒータ部トラッキング
- 電気カーペットのスパーク
- 接続コード改造のためのスパーク発生
- 照明器具の不適切な設置による内部の
- クローゼット内の電灯で火災
- 電気コタツによる低温やけど
- ポット転倒によるやけど（幼児）
- トラッキング
- 電気毛布のコードのストレスによる部分断線によるジュール熱で火災発生
- 延長コード改造によるトラッキングで火災
- コンセント破損状態で発火

- エアコンタイマを宙吊りして使用したためコードにストレスがかかり発火
- 電源コードが挟まり損傷をうけて断線，ショートして発火
- AC アダプタによる低温やけど
- 水槽と同じ位置に設置した延長コードに水がかかりトラッキング現象がおこり発火
- アロマオイルの酸化熱により電気衣類乾燥機が発火
- 窓のレールをまたいで設置電源コードに機械的負荷による短絡
- 電気剪定機ハンドルをはなして，手を骨折，裂傷，（インターロック機能の不備）
- セラミックファンヒータの電源コードの折り曲げストレスによるスパーク発生
- IH 調理のセンサー機能が働かず，焦げたなべで火災発生
- 電子レンジで加熱しすぎて発火
- エアコン捻じり接続で発火
- サーモスタットによる凍結防止ヒータが水没して発火
- 石油ストーブの石油漏れによる発火
- バーナー混合管による蜘蛛の巣，昆虫の卵による不完全燃焼による中毒
- 給油ロックが不完全状態で，開放して石油漏れによる延焼
- 機器の冠水による異常燃焼
- 調理油加熱防止装置のついていないガスコンロの消し忘れ
- ガス栓からのもれたガスに引火
- ガスコンロの消し忘れ
- 設置による，スイッチの半状態によるガス漏れ
- 石油ストーブに上に洗濯物が落下し火災
- 3 カセットコンロの鉄板をはずして網で使用，油が下の受け皿にたまり燃焼し，カセットボンベが爆発する温度で爆発
- 扇風機の長期使用のため保護チューブの端部に相当する電源リード 線が首振りによる繰り返しの屈曲の影響を受けた半断線状態となりスパークが生じ発火
- 電気コンロのスイッチが人体の接触により発生しその後タオルが落ち

て発火

- ブラウン管 TV 内部からの出火
- 電気ヒータの芯線の傷によるスパーク
- 冷凍食品の 15 分間解凍設定，解凍中に食品が発火し壁が燃焼損失
- 換気扇の長期使用によりコンデンサが劣化して絶縁不良が生じ火災
- クリップライトのプラチック材料発火
- 扇風機：スイッチ部からモータ部へ接続される配線及びモータ巻き線が長期間の使用と連続運転のために劣化し発火
- 電源回路のサーモスタットが故障し接点が溶着して連続通電状態になったため，ヒータの温度が上昇し続けさらに温度ヒューズが正常に作動せずに発火
- ポータブル DVD プレーヤリチウムイオン電池の発火：セル不良
- ヒータの接続端子から発火
- ワープロの回路基板でトラッキングが発生し火災
- 暖房便座（トラッキング）：部品燃焼，壁の焼損
- 照明器具のコンデンサの炭化
- 電気冷凍庫の電源コンセントのトラッキング
- 冷蔵庫の事故原因は，圧縮機用運転のコンデンサが長期使用によって劣化し内部電極間でショートし発火
- 電気コンロ，電磁誘導によるスイッチの誤動作でスイッチがオン状態になり火災
- CRT の異音と発火
- 扇風機の内部のコンデンサが長期使用の間に吸湿等で絶縁劣化を起こし，コンデンサの内部素子が絶縁破壊されショートが生じて発煙・発火
- 電気スタンド製造事業者が製品の一部に設計仕様外の部品（トランジスタ）を使用したため，当該部品が故障した際に，非不燃性の抵抗に過電流が流れ，製品の一部が焼損
- 扇風機から発火し周辺が焼損した．
- 安定器の一次巻線部分で製造時の巻線被覆の傷があったことから約 22 年の長期間の使用により，安定器の巻線層間の絶縁が不良となりアーク放電が発生し発火

- 扇風機の長期使用によるモータ潤滑油が劣化し、回転軸が摩擦により発熱し出火
- 除湿機の圧縮機のコンデンサ焼失
- 製品内部にあるフィルムコンデンサとトランス付近の基板の焼損による出火
- 電気カーペットの湿度コントローラ内部のリレー接点回路ショートによるコントローラのケースを焼損
- 衣類乾燥機の熱交換器のヒータのスイッチがついたままの状態ドラムファンが停止し、加熱された空気が逆流し、堆積していた糸くずが発火
- パソコン内部の電源ユニット基板のコネクタ接続はんだ部分に、亀裂が発生しスパーク放電が繰り返され、この熱によって基板の炭化が進行しトラッキング現象が発生し発煙・発火
- 布団乾燥機は送風用ファンモーターの作動不良により内部ヒータが過熱して発煙
- 電気洗濯乾燥機発火当該製品の操作基板から発火
- エアコンのトラッキングによる火災
- 電気カーペット当該製品のコントローラ内部のリレーケースが溶融
- 空気圧縮機モータ起動不良による発火
- 電気洗濯乾燥機乾燥の内ふたの上にこぼれた洗剤がヒーターリード線の被覆に付着し、リード線被覆部を伝わり芯線接続部に至り芯線が腐食し、脱水時等の振動により断線し、スパークが発生することにより、近傍の樹脂部品に着火し発火
- 延長コード除湿乾燥機を当該製品に接続していたところ火災が発生した。事故原因は、当該製品のコンセント刃受け内部が長期使用（約 27 年間）によって絶縁劣化し湿度の影響もあってトラッキングが生じ発火
- 電子レンジ製品の吸気口が埃等でふさがったまま 使用を続けたため、部品内部のはんだ部の劣化が進みスパークが発生し発煙・発火
- 加湿器当該製品の蒸発皿のパッキン取り付け不良により、内部に水が浸入し、トラッキング現象が発生して発煙
- 電気こたつ用コード当該製品の中間スイッチ内部の接点部に設計と異なるグリスを誤って塗布したために接点不良が生じて発熱し外郭樹脂に着火

- 電気掃除機（充電式）の充電電池のふたに圧着不具合により充電電池が破裂し、手のひらを負傷した。電子レンジ当該製品を使用したところ、底部から発煙した。
- 製造時の微少な異物の混入により、加熱を開始した 際に、回転台軸受けホルダー内の電界が強くなり、異物と回転軸間でスパークが発生し発煙
- デジタルフォトフレームに内蔵された蓄電池の内部に物理的損傷のために、リチウムイオン蓄電池が破裂
- テレビ（ブラウン管型）の内部高圧部品が温度変化の繰り返しや埃等の堆積により絶縁不良となって放電し、発煙・発火
- 電気ストーブ（ハロゲンヒーター）当該製品を使用中に製品から出火した。事故原因は、強弱切換の部品（ダイオード）に不具合があり、発熱し発煙・発火
- 電気洗濯乾燥機の電源と基板をつなぐ配線の接続端子部分に接続不良が生じる部品が混入し、当該製品を使用する際の振動により端子部に過大な電気抵抗が生じて発熱し発煙発火
- 蓄熱式電気暖房器の本体右側から発火し機器内部を焼損した。内部のコネクタ緩みが生じていたことを確認せずに設置したためにコネクタ接続部で接触不良となり発熱・発火
- コンセント付洗面台を長年使用している間にスイッチ部分に液体が浸入しトラッキングを起こした。
- 電気あんかから出火する火災が発生。電源コードの製造過程において、材料の混合比率ミスが生じたことから、コード被覆の柔軟性が通常より硬くなったため、コードが繰り返し屈曲した際に芯線が断線し発火に至った
- エアコンの取り付け部分が焼損した。パワーリレー部が激しく焼損しており配線の接続端子部に熔融痕がみられた。
- 電気ストーブ（ハロゲンヒーター）の強・弱、切替用ダイオードが不良品であったため、使用中に異常発熱し発火した。
- 電子レンジ、運転中に扉を開閉し電源の入切が繰り返されることでドアの開閉を検知するスイッチが接触不良となりスパークが発生し発煙・発火した。
- テレビ（ブラウン管）の回路基板のコイル端子部で、熱による膨張収縮

による半田クラックが生じたことにより、放電が発生し発煙

- 電子レンジの内部部品（ダイオードブリッジ）に製造上のばらつきがあり、部品内部のはんだ部の劣化が進みスパークが発生し、発煙・発火
- 充電器（電気シェーバー用）のトランス巻線に絶縁不良があり、巻線の一部が短絡して過電流が流れ、発熱、発火
- 電気ポンプ当該製品を使用中、当該製品から発煙した。長期使用（約31年）により、モータ起動用コンデンサに絶縁劣化が生じ内部短絡し発煙
- 電気洗濯機運転中の振動によってモーターリード線が断線してスパークが発生し、近傍の部材に類焼した
- 電気冷蔵庫のコンデンサの製造不良により、コンデンサ部の酸化が進行し、規定以上の電気抵抗が生じこれに伴い発熱し発煙
- 照明器具のスイッチを入れたところ電球と器具の一部が落下し、下にあったテーブルが焦げた。構造上の問題から器具内部が高温になり過ぎ当該製品を吊り下げる電源コードの本体 接続部付近の絶縁被覆が熱劣化しショートして電源コードが断絶落下
- 電気洗濯乾燥を運転したまま就寝したところ火災が発生し、ヒータ回路の接続端子とリード線のカシメ作業の不備により、当該接続部から発火
- テレビ（ブラウン管型）裏側から発火した。長期使用により高圧部品外郭に亀裂が発生しその部分から放電して発火
- 電気洗濯乾燥機で洗濯物を乾燥中に出火した。故障修理の再点検修理作業に不備（リード線の接続 作業の不備）があり発火
- ノートパソコンを使用中に製品から出火した。製造時にリチウムイオン電池の品質管理が不十分であったために、異物が混入したりリチウムイオン電池が使用され、充放電の繰り返しでセパレータが損傷、電池内部でショートが発生し異常発熱 が起きて発火
- 電気洗濯乾燥機で電源と基板をつなぐ配線の接続端子部分に接続不良が生じる部品が混入していたために、当該製品を使用する際の振動により、端子部に過大な電気抵抗が生じて発熱し発煙発火
- 電気カーペットのコントローラの一部を焼損した。湿度コントローラ内部のリレー接点回路には、リレーの寿命を延ばすために接点の溶着を回避する機能が内蔵されており、長期間の使用が可能となったが、リレー接点が開閉

を重ねることにより金属粉が湿度コントローラのリレー接点回路の内部に堆積し、湿気の影響も受け、ショートし、コントローラのケースを焼損した

- 電気洗濯乾燥機で、こぼれた液体洗剤が本体内に垂れて落ち、内部配線に付着した場合に、液体洗剤の成分によって内部配線の被覆（塩化ビニール）が侵されて絶縁が低下しショートしたことにより発火.
- 電気冷蔵庫当該製品の扉を開閉していたところ、扉が外れて落下
- 電気洗濯乾燥機から出火する火災が発生した。製品内部の洗剤ケース下部に配置されたヒータ配線に垂れ落ちた液体洗剤が付着し、液体洗剤の成分（界面活性剤）により、リード線被覆の絶縁が劣化し発火
- エアコン室内機のファンモーターのリード線接続部分に、エアコン洗浄液等の電気を通しやすい物質が付着し、さらに 室内機内部で発生した結露がリード線接続部分に回りこんだことによって、室内機の発煙・発火
- 電源部のダイオードブリッジの半田クラック
- 器具の水用の電磁弁コイルのレヤーショートによる発熱によりプランジャーガイドが熱変形し漏水し、制御基板が誤動作をして異常燃焼

以上

研究業績

学 術 誌 論 文

1. 原田泰男 倉敷哲生 「製品の事故データベースを利用した構成部品の故障率とその確率分布の決定」, 材料 第 64 巻 第 3 号 196～202 ページ 平成 27 年 3 月 (査読付き)

国 際 学 会 論 文

1. Yasuo Harada, Norakarntiansin Waris, Tetsusei Kurashiki, Masaru Zako, “A study on a management system for pursuing product safety of consumer electrical products using Hazard based assessment”, pp.33-38, IEEE Symposium on product compliance engineering, 2012, DOI:10.1109/ISPCE.2012.6398289 (査読付き)
2. Yasuo Harada, Tetsusei Kurashiki, Norakarntiansin Waris, Masaru Zako, “Estimation of failure rate of consumer products based on components failure rate and its product safety assessment”, pp.13-17, IEEE Symposium on product compliance engineering, 2013, DOI:10.1109/ISPCE.2013.6664161 (査読付き)

国 内 会 議 論 文

1. 原田 泰男 倉敷 哲生 「ハザードベース F T A に基づく製品安全性評価手法の提案」 pp.286-291, 第8回 構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム (JCOSSAR2015), A論文 (査読付き)

学 会 発 表

1. ○Yasuo Harada, Tetsusei Kurashiki, Masaru Zako, ”Hazard based safety assessment for consumer electric household products”, IEEE Symposium on product compliance engineering, pp.1-3, 2011 IEEE International Symposium on product safety compliance Engineering, DOI: 10.1109/PSES.2011.6088258
2. ○原田 泰男 倉敷 哲生 「製品事故データベースを利用した構成部品の故障率とその確率分布の決定」 第 28 回信頼性シンポジウム, 2014 年 11 月
3. ○原田 泰男 倉敷 哲生 「ハザードベース F T A に基づく製品安全性評価手法の提案」, 第 8 回 構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム JCOSSAR, 2015 年 10 月

謝辞

本研究は、大阪大学大学院 工学研究科 ビジネスエンジニアリング専攻 准教授 倉敷 哲生 博士のご指導・ご教示の下に遂行したものであります。倉敷准教授には研究活動全般に亘り有益なご指導・ご討論を賜りましたことをここに記し、心より感謝の意を表します。

本論文を作成にあたり有益なご指導・ご助言と貴重なご討論を賜りました、大阪大学 工学研究科 ビジネスエンジニアリング専攻 教授 大村 悦二 博士，同専攻 教授 上西 啓介 博士 ならびに，同研究科 マテリアル生産科学専攻 荒井 栄司 博士に対して厚く御礼申し上げます。

また、大阪大学 名誉教授 座古 勝 博士には，研究課題設定から論文作成に亘り多大なご指導と，貴重なご討論を賜り，厚く御礼を申し上げます。

本研究の背景である製品安全規格策定を担当する IEC TC108 委員会の方々には本研究の動機形成に多大な影響となった国際標準化会議へエキスパートとして派遣して頂いたことを深く感謝申し上げます。

本研究の機会を頂きましたパナソニック株式会社 環境・品質センター 所長 稲垣 道世様，同センター 部長 渡辺 善規様（現 日本規格協会）に感謝申し上げます。

最後に，本研究を推進するにあたり理解し支えてくれた家族に深く感謝します。