

令和2年度

長岡技術科学大学大学院工学研究科

博士後期課程 博士論文

## **Proposal and Practice of Failure Mode Analysis Methods for Materials at Conceptual Design Stages of Products**

製品の構想設計段階に於ける材料に関する故障モード解析手  
法の提案とその実践

令和3年1月29日

長岡技術科学大学大学院工学研究科

情報・制御工学専攻

学籍番号 14504590

岡部 知行

指導教員 大塚 雄市准教授

Supervisor Associate Professor OTSUKA Yuichi



Graduate School of Engineering  
Nagaoka University of Technology

# Abstract

**Student ID: 14504590**

**Name: TOMOYUKI OKABE**

近年、科学技術の目覚ましい発展により、それまでに実現できなかった多様な機能を有する製品が開発・製造され、世界中で広く販売されている。そのような製品の機能を決定付けるのは、半導体、磁性体、光学ガラス等に代表される材料の特性を利用した機能性材料である。しかし最近、製造段階での材料の意図しない変更による不具合（サイレントチェンジ）の発生や、材料の損傷や破壊、経年劣化等を原因とした、原材料・部品起因による製品事故が多発している。これらのことは、製造事業者に於ける製品の生産・販売計画を狂わせ、利益低下や機会損失等の経営に大きな影響を与え得ることに繋がる。その為、材料の変更に関するリスクマネジメントや材料に関する故障モード解析（リスクアセスメント）を、製品の構想設計段階からフロントローディングにて実施し、未然防止することが重要である。そこで本研究では、材料に関する故障モード解析手法「修正 DRBFM」及び「設計偏差法」を提案する。

修正 DRBFM は、品質・安全性・信頼性問題未然防止手法として広く用いられている DRBFM に、リスクアセスメントに於ける制限仕様の概念を導入して DRBFM の論理を拡張し、設計変更/環境変化と材料の損傷/破壊メカニズムとの対応を効果的に導出する故障モード解析手法である。修正 DRBFM の有効性は、仮想的なレーザ光学系の対物レンズを対象とした故障モード解析比較演習（FMEA と修正 DRBFM）に適用し、修正 DRBFM によって材料特性に起因する損傷/破壊メカニズム及び故障モードを、効果的に抽出できるかを検証した。

設計偏差法は、修正 DRBFM の検証を通じて明らかになった課題に対応できる材料に対する故障モード解析手法である。設計偏差法は、「制限仕様に於ける設計偏差の偏差パターンを設定」、「設計偏差パターンと応力-強度モデル（SSM）に於ける応力/強度変数の偏差パターンを対応表により対応付ける」、「SSM 偏差パターンから材料の損傷/破壊モードを導出し、機能の故障メカニズムとして導出」の手順から成る。想定される制限

仕様の変化から、材料の損傷/破壊による故障モードを論理的に導出可能である。設計偏差法の有効性は、仮想的なレーザ治療システムを対象とした故障モード解析比較演習（FMEA・DRBFM・設計偏差法）に適用し、設計偏差法が従来手法よりも合理的・論理的に材料特性に起因する損傷・破壊メカニズム及び故障モードを効果的に抽出できるかどうかで検証された。

また材料の損傷/破壊に関する故障モード解析に於いて、故障モード解析者の材料強度等の知識に依存して結果が変化する可能性や、選択ミスなどにより不合理な結果となる課題が存在する。この課題の解決の為、予め用意した対応表と故障モード解析者の入力結果との類似度解析によって、導出した損傷・破壊モードの妥当性を判別する手法を構築する。具体的には、設計偏差法の設計偏差/SSM 偏差が疎行列で表現できることに着目し、設計偏差法と機械学習手法のサポートベクターマシン（Support Vector Machine:SVM）を組合せた、故障モード判別分析手法を構築する。SVMを用いた故障モード判別分析手法を、設計偏差法の演習結果に適用し、当該演習結果を分析することによって、判別分析結果の妥当性について考察した。

In recent years, due to the remarkable development of science and technology, products with various functions that could not be realized until then have been developed and manufactured, and are widely sold all over the world. It is the functional materials that utilize the characteristics of materials such as semiconductors, magnetic materials, and optical glass that determine the functions of such products. However, recently, product accidents caused by raw materials and parts have frequently occurred due to the occurrence of defects (silent changes) due to unintended changes in materials at the manufacturing stage, damage/fracture of materials, and deterioration over time. These things can upset the production and sales plans of products at the manufacturer, and can have a great impact on organizational management such as profit decline and opportunity loss. Therefore, it is important to carry out risk management related to material changes and failure mode analysis related to materials by front loading from the concept design stages of products to prevent them. Therefore, in this study, we propose the failure mode analysis (risk assessment) methods "modified DRBFM" and "design deviation method" for materials.

The modified DRBFM is a method that extends the logic of DRBFM by introducing the concept of restriction specifications in risk assessment into DRBFM, which is widely used as a method for preventing quality, safety and reliability problems. The modified DRBFM makes it possible to effectively derive the correspondence between design changes/environmental changes and damage/fracture mechanisms of materials. The modified DRBFM is applied to the failure mode analysis comparison exercise (FMEA and modified DRBFM) for the objective lens of the virtual laser optical system, we verified whether the failure mode could be extracted effectively for effectiveness of modified DRBFM.

The design deviation method (DDM) is the failure mode/risk evaluation method for materials that can deal with the problems clarified through the verification of the modified DRBFM. For the DDM, "set the deviation patterns of design deviation in the restriction specifications", "correspond the deviation patterns of the stress/strength parameters in the design deviation patterns and the stress-strength model (SSM) by the correspondence table", "It consists of the procedure of "deriving the damage/fracture modes of materials from the SSM deviation patterns and deriving it as the failure mechanisms of the functions". The DDM can logically derive the failure modes due to damage/fracture of

materials from the expected changes in the restriction specifications. The DDM is applied to failure mode analysis comparison exercises (FMEA, DRBFM, DDM) for a virtual laser treatment system. The effectiveness of DDM was verified whether the damage/fracture mechanisms and failure modes caused by material properties could be effectively extracted.

In addition, in the failure modes based on damage/fracture of materials, there is a possibility that the results may change depending on the knowledge of the failure mode analysts such as material strength, and problems in due to selection mistakes etc. In order to solve this problem, we will construct a method to determine the validity of the derived damage/fracture modes by analyzing the similarity between the correspondence table prepared in advance and the input result of the failure mode analysts. Specifically, we focus on the fact that the design deviation/SSM deviation of the design deviation method can be expressed by a sparse matrix, and combine the DDM and the Support Vector Machine (SVM) of the machine learning method. The validity of the discriminant analysis results was considered by applying the failure mode discriminant analysis method using SVM to the exercise results of DDM and analyzing the exercise results.

# Table of Contents

<b>Table of Contents</b>	<b>1</b>
<b>List of Figures</b>	<b>5</b>
<b>List of Tables</b>	<b>7</b>
<b>Chapter1 緒論</b>	<b>1</b>
1.1 研究の背景	1
1.2 製品の安全性確保の実現	3
1.3 従来故障モード解析手法とその課題	8
1.3.1 リスクアセスメント	8
1.3.2 FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)	10
1.3.3 FTA (Fault Tree Analysis)	11
1.3.4 HAZOP (Hazard and Operability Study)	12
1.3.5 STAMP/STPA (System Theoretic Accident Model and Processes/System Theoretic Process Analysis)	12
1.3.6 DRBFM (Design Review Based on Failure Mode)	13
1.3.7 従来故障モード解析手法を材料に関する故障モード解析に適用 する場合の課題	13
1.4 機械学習手法と故障モード解析	14
1.4.1 機械学習について	14
1.4.2 サポートベクターマシン (Support Vector Machine)	16
1.4.3 機械学習を用いた故障モード解析支援	18

1.5 本研究の独自性 . . . . .	19
1.6 本研究の適用範囲と使用対象 . . . . .	22
1.7 本論文で使用する用語の定義 . . . . .	22
1.8 本研究の目的 . . . . .	23
1.9 本論文の構成 . . . . .	25
<b>Chapter2 材料に関する故障モード解析を可能とする「修正 DRBFM」の提案</b>	<b>31</b>
2.1 はじめに . . . . .	31
2.2 修正 DRBFM (Modified DRBFM) . . . . .	33
2.3 対物レンズを対象とした故障モード解析比較演習 . . . . .	38
2.3.1 故障モード解析比較演習内容 . . . . .	38
2.3.2 故障モード解析比較演習結果 . . . . .	41
2.4 考察 . . . . .	46
2.5 まとめ . . . . .	49
<b>Chapter3 設計偏差法及び機械学習手法を用いた故障モード判別分析手法の提案</b>	<b>51</b>
3.1 はじめに . . . . .	51
3.2 設計偏差法 (Design Deviation Method) . . . . .	54
3.3 仮想的なレーザ治療装置を対象とした故障モード解析比較演習 . . . . .	61
3.3.1 FMEA による故障モード解析 . . . . .	63
3.3.2 DRBFM による故障モード解析 . . . . .	64
3.3.3 設計偏差法による故障モード解析 . . . . .	66
3.4 SVM を用いた故障モード判別分析 . . . . .	68
3.5 故障モード解析比較演習結果 . . . . .	69
3.6 SVM を用いた故障モード判別分析結果 . . . . .	74
3.7 考察 . . . . .	76
3.8 まとめ . . . . .	79

---

<b>Chapter4 結論</b>	<b>81</b>
4.1 結論 . . . . .	81
4.2 本研究の課題 . . . . .	82
4.3 今後の展望 . . . . .	83
<b>Acknowledgement</b>	<b>85</b>
<b>References</b>	<b>87</b>



# List of Figures

1.1	Product realization processes . . . . .	2
1.2	System of international safety standards for machine safety . . . . .	4
1.3	Risk definition . . . . .	5
1.4	Relationship between risk and safety . . . . .	5
1.5	Concept of risk communication . . . . .	7
1.6	Flow of risk assessment and risk reduction . . . . .	9
1.7	Examples of risk assessment indicators (risk matrix) . . . . .	9
1.8	Implementation example of FTA . . . . .	11
1.9	Flow of DRBFM . . . . .	13
1.10	Concept of SVM . . . . .	17
1.11	Flowchart for overall structure of doctoral dissertation . . . . .	29
2.1	Proposed failure mode analyses procedure caused by damage/fracture of materials retrieved from deviation patterns in design specifications . . . . .	34
2.2	Risk matrix for experiment . . . . .	36
2.3	An optical objective lens with a laser irradiation system for the case study . . . . .	39
3.1	Flow chart of proposed design deviation method for modeling failure modes . . . . .	55
3.2	System of failure mode analysis target . . . . .	62
3.3	Recall and precision for the classification . . . . .	76
3.4	Flowchart for selecting the proposed methods . . . . .	79



# List of Tables

1.1	Example of safety-related laws and regulations in each country . . . . .	7
1.2	Confusion matrix in machine learning . . . . .	16
1.3	Kind of kernel functions of SVM . . . . .	18
1.4	Example of SVM multi-class discriminant analysis results using one-to-one method . .	18
2.1	Table2.1 Excerpt table used for failure mode analyses by damage/fracture of materials (a)	
	Design specifications table for material property and environmental conditions . . . . .	36
2.2	Example of modified DRBFM worksheet . . . . .	38
2.3	Retrieved damage/fracture modes, mechanisms by the groups of FMEA or modified DRBFM . . . . .	42
2.4	Comparison in the ratio of persons who could retrieve failure modes caused by dam- age/fracture of materials . . . . .	43
2.5	Retrieved failure modes caused by damage/fracture of materials . . . . .	44
2.6	Rationality of relations from design specifications, damage/fracture mechanisms and fail- ure modes for both methods . . . . .	46
3.1	Deviation patterns for the design specifications and its sparse matrix expression . . . . .	57
3.2	Example of the deviation types for the stress/strength factors and the corresponding dam- age/fracture modes of the materials . . . . .	59
3.3	Example of the association table between the deviation patterns with the damage/fracture modes . . . . .	60
3.4	Questionnaire list of subjects interview . . . . .	62
3.5	The information for each person's major and work experience for each exercise group .	62

---

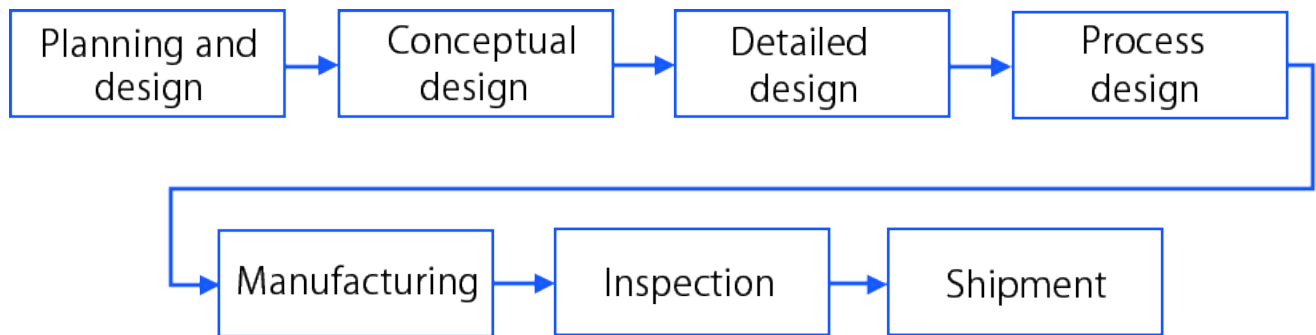
3.6	Example of the failure mode analysis results (material-induced) in FMEA . . . . .	70
3.7	Example of the failure mode analysis results (material-induced) in the DRBFM . . . . .	71
3.8	Example of the failure mode analysis results (material-induced) in the DDM . . . . .	72
3.9	Determining the damage/fracture modes of the materials by the three methods . . . . .	73
3.10	Questionnaire results from the interview . . . . .	73
3.11	Failure mode discriminant analysis results by LIBSVM . . . . .	75
3.12	Classification of the damage/fracture modes using the SVM . . . . .	75

# Chapter 1 緒論

## 1.1 研究の背景

近年，科学技術の目覚ましい発展により，それまでに実現できなかった多様な機能を有する製品が開発・製造され，世界中で広く供給することによって我々は便利な生活を享受できている．そのような製品の機能を決定付けるのは，半導体・磁性体・光学ガラス等に代表される材料の特性を利用した機能性材料である．機能性材料は，情報映像機器に用いられる液晶ディスプレイ，光学機器に用いられるレンズやプリズム，IoT（Internet of Things）を下支えするセンサー，機械学習の処理能力を決定付ける半導体デバイス等の機能性部品の原材料として，製品を構成する部品やモジュール品等に組み込まれている．材料の特性に基づいて，機能を発現し，高い品質・安全性・信頼性を有する製品の実現に寄与している．また高度情報技術社会に於いて，多様な機能を有する製品は，大人だけではなく，子供や高齢者等の製品のリスクに関するリテラシーや判断能力が十分ではないユーザーの使用の割合も高くなっている．更には，製造現場へのスマートファクトリーや協働ロボットの導入，自動運転システム等の新しい技術システムの社会浸透が進んでおり，今まで以上に製品の安全性を確保することが求められている．

製品のリスクは，製品実現化プロセス（企画設計・構想設計・詳細設計・工程設計・製造・検査・出荷）の各プロセスにて実施した故障モード解析（リスクアセスメント）結果並びに当該リスクの低減対策の妥当性を，設計審査（デザインレビュー）にて複数の専門家（設計開発・生産技術・品質保証等）による多角的な検証によって，品質・安全性・信頼性という製品の仕様や特性の形にて評価される．故障モード解析（リスクアセスメント）に基づいた設計審査の実践により，製品事故の未然防止が図られている [1, 2]．図 1.1 は，製品実現化プロセスの例を示している．



**Fig. 1.1** Product realization processes

材料は、製品の原材料として、社会や経済の発展を支えていることを上述した。しかし最近、製品の原材料（部品）の損傷や破壊、経年劣化等を原因とした、材料起因の製品事故が多く発生し、社会や製造事業者の経営に大きな影響を与えている。材料起因の製品事故事例として、製造段階での材料の意図しない変更による不具合（サイレントチェンジ）[3]によるリチウムイオンバッテリーの発火事故や、タカタ製エアバックのリコール問題[4]があげられる。また過去に発生した大惨事をもたらした技術システムの事故（リバティ船の脆性破壊事故や御巣鷹山のJAL航空機墜落事故等）[5]に於いて、事故原因が材料であることが判明している。米国では、原材料・部品起因で発生した製品事故に対するPL訴訟に於いて、部品メーカーに応分の瑕疵責任（例えば、完成品への部品の組み込みに於いて、部品メーカーの実質的な設計の関与が認められ、結果として完成品に欠陥が生じた場合）が問われ、賠償請求が認定される事例も見られている[6]。

これらのことは、製造事業者に於ける製品の生産・販売計画を狂わせ、利益低下や機会損失等の経営に大きな影響を与え得ることに繋がる。その為、材料の変更に關するリスクマネジメントや材料に關する故障モード解析（リスクアセスメント）[4]について、材料起因の製品事故（品質・安全性・信頼性問題）を未然防止する目的で製品の構想設計段階から実施することが、技術経営[7, 8]や技術リスクマネジメント[9, 10, 11, 12]の観点からも求められる。

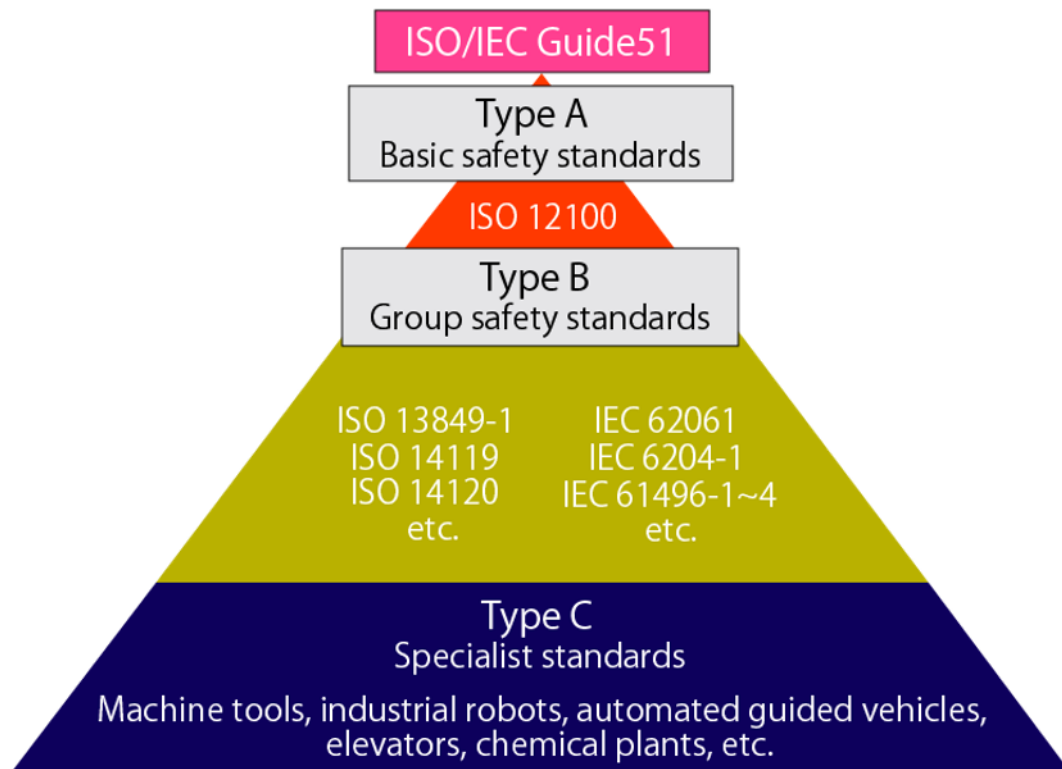
しかし現実的には、安全性の確保が厳しく求められる航空機や自動車等の複雑な技術システムの場合、部品点数が数千～数万個に及び、又それらの入手経路が構成要素毎に異なっている可能性がある。当該システムの構成要素に關する故障モードやリスクにつ

いて、従来の故障モード解析（リスクアセスメント）や設計審査の枠組みで漏れなく評価することが難しく、材料起因の製品事故に対する未然防止対策は十分とはいえない状況にあり、問題であると考えられる。

## 1.2 製品の安全性確保の実現

製品の安全性は、ISO（International Organization for Standardization：国際標準化機構）や IEC（International Electrotechnical Commission：国際電気標準会議）等の国際安全規格、各国の法規制（欧州指令、電気用品安全法等）によって定められた安全（技術）基準に加え、業界団体や製造事業者が定めた安全設計基準を満たす安全設計の遂行によって実現する。しかし国際規格や法規制の要求は、最低限遵守すべき水準であり、それらを満たしたことを以て、製品の安全性が保証されたことにはならない。顧客に対して、安全な製品の供給責任を果たす為には、製品の構想設計段階から、想定され得る故障モードやリスクを正しく評価し、漏れなく安全設計を遂行する必要がある。

図 1.2 は、機械安全に関する国際安全規格の体系を示す。機械安全に関する国際安全規格は、ISO と IEC の共同開発規格である ISO/IEC Guide 51 を頂点に、全ての機械類に適用すべき安全要求事項を示す基本安全規格（A 規格）、非常停止やインターロックといった機械に共通する安全関連装置等の要求事項を示すグループ安全規格（B 規格）、個々の機械類に適用が必要な安全要求事項を示す個別安全規格（C 規格）の 3 階層から成る [13]。



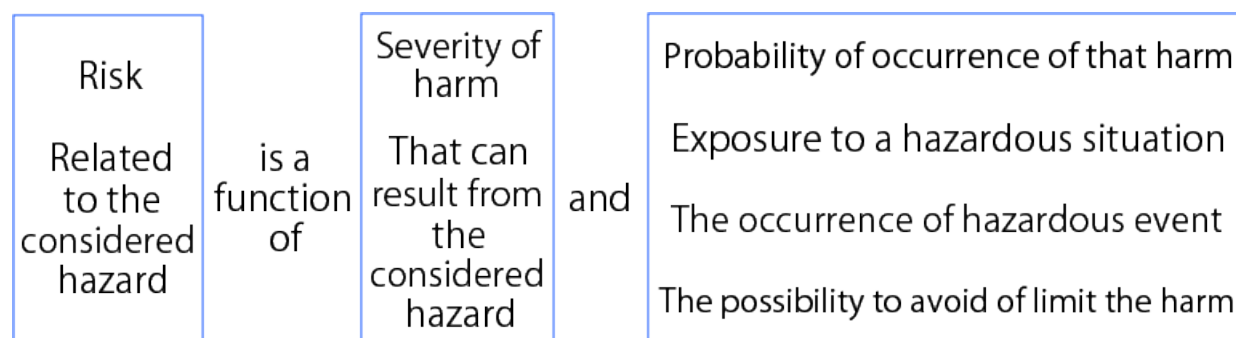
**Fig. 1.2** System of international safety standards for machine safety

ISO/IEC Guide 51[13] は、安全性に関する規定の導入に必要な事項が示されているガイドラインであり、多くの国際安全規格がこの内容をベースにしている。また本ガイドラインでは、リスクを「危害の発生確率と危害のひどさの組合せ」として定義し、安全を「受け入れ不可能なリスクが無いこと」として定義している。尚、危害については、「人の受ける身体的障害もしくは健康障害、または財産もしくは環境の受ける害」と定義している。受け入れ不可能なリスクが無いことの意味は、「安全でもリスクがゼロになることは無い」ということである。図 1.3 はリスクの定義を示し、図 1.4 はリスクと安全の関係を示す。

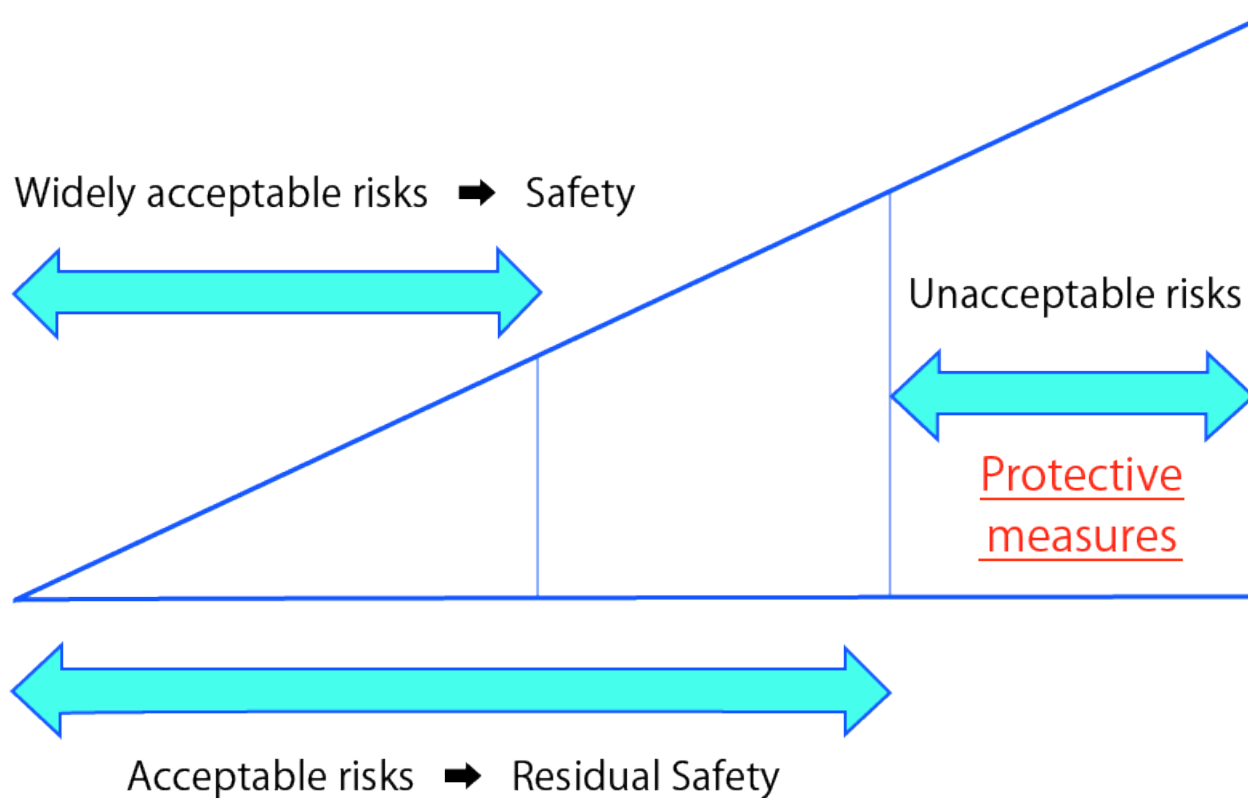
図中の残留リスクとは、リスクアセスメントの結果として残留するリスクのことを意味している。ISO 12100 で規定された 3 ステップメソッドに則り、リスクアセスメントは、当該リスクが許容可能なレベルになるまで繰り返し実施することになる。

基本安全規格である ISO 12100[14] は、製品（機械類）の安全性確保を実現する為に必要なリスクアセスメントに関する要求事項（リスクアセスメントの実施手順、リスク評

価指標等)を示し, 安全設計を遂行していく上で必要不可欠な規格である。



**Fig. 1.3** Risk definition



**Fig. 1.4** Relationship between risk and safety

本節の始めに, 製品の安全性を確保する為には, 各国の法規制を順守する必要があると述べた. 表 1.1 は, 各国の法規制として, 日本・米国・欧州に関する安全関連の法規制の例をまとめたものである.

対象となる製品の分野によっては, 複数の法規制を順守する必要がある. 法規制に違反すると, 輸出先国の法規制を知らなかったでは済まされることはなく, 市場から締め

出されて大きな（機会）損失が発生し、且つ企業の存続に関わる程のペナルティ（罰金や事業活動停止等）が課される為、製品そのものの安全性確保と併せて、法規制の改正等の動向をモニタリングする必要がある。

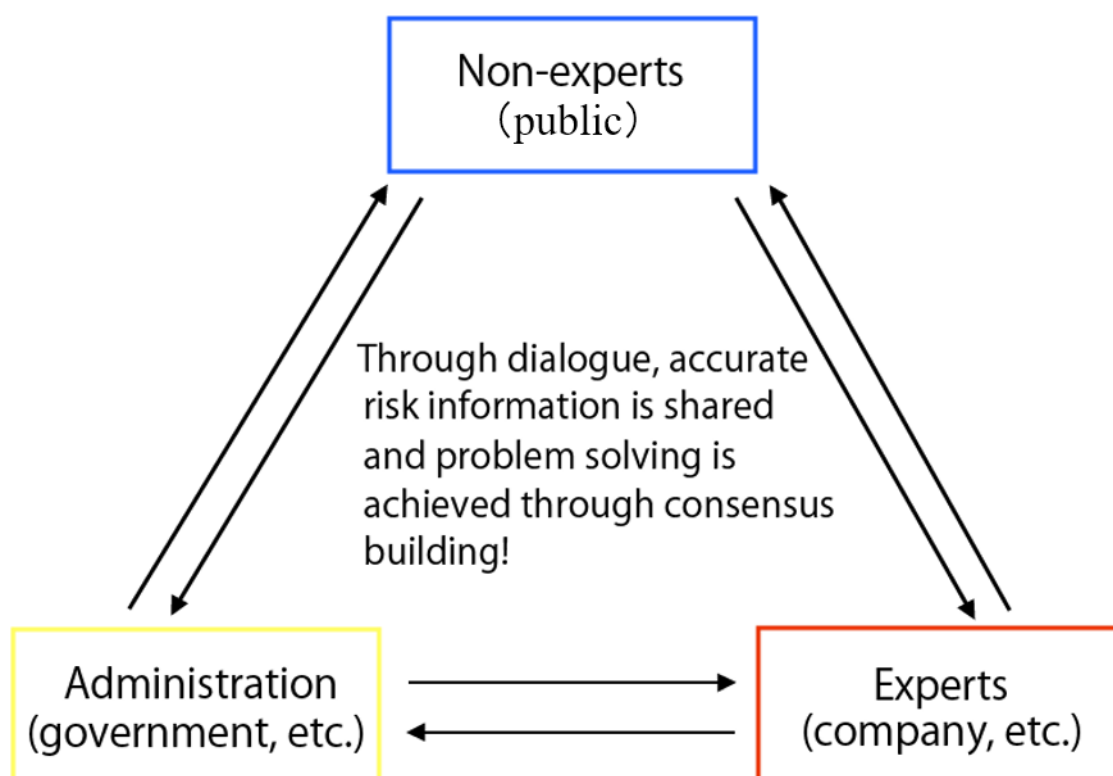
他に製品の安全性を確保する手段として、リスクコミュニケーション [15, 16, 17, 18, 19] がある。リスクコミュニケーションとは、科学技術・食品・災害や環境問題等、社会に影響を及ぼし得るリスクに関する正しい情報を、行政・専門家（科学者等）・非専門家（公衆）等のステークホルダー間で問題意識を共有し、意思疎通を図った上で当該リスクの解決に向けて合意形成を実現するプロセスのことである。図 1.5 は、リスクコミュニケーションの概念を示す。

我々は、様々なチャネル（テレビやインターネット等）を通じて、数多くの情報にリアルタイムで触れている。その情報がどの様なリスクをもたらす影響を与えるかについて、経験や知識に基づいて判断しているが、知らない内に思い込みや偏った思考等（認知バイアス）によって誤った判断をしている可能性がある。また認知心理学の分野に於いては、欠如モデル [16] と呼ばれる、非専門家のリスク（科学技術）リテラシー不足を専門家が補い高めるという、価値観の押し付け的な考え方も存在し、リスクに関する正しい知識を伝えたとしても受け手が伝え手の意図を 100%理解することは難しい。

このことを製品安全の分野に当て嵌めてみると、全ての顧客が当該製品に関するリスクリテラシーを十分に兼ね備えた上で使用することは有り得ないので、製造事業者が取扱説明書や警告表示等で製品のリスクを説明することが重要となる。リスクコミュニケーションの成功が、社会全体を通じた製品の安全性確保の実現に繋がっていくものと考えられる。

**Table 1.1** Example of safety-related laws and regulations in each country

Country name	Legal regulation	Jurisdiction
Japan	Electrical appliance material safety law	Ministry of Economy, Trade and Industry
	Consumer product safety act	Ministry of Economy, Trade and Industry
	Product liability law	Cabinet Office
USA	Federal law governing consumer products	Consumer Product Safety Commission (CPSC)
	Federal law that regulates products (including machinery) used in offices	Occupational Safety and Health Administration (OSHA)
	Product liability law	By state and region
EU	Low voltage directive	European Commission
	Machinery directive	European Commission
	General product safety directive	European Commission

**Fig. 1.5** Concept of risk communication

## 1.3 従来故障モード解析手法とその課題

本項では，代表的な故障モード解析（リスクアセスメント）手法，並びに当該手法群を材料に関する故障モード解析に適用する場合の課題について述べる．

### 1.3.1 リスクアセスメント

リスクアセスメント [10, 13, 14, 20, 21, 22] とは，リスクの事前評価のことである．製品のライフサイクル（製品企画～設計開発～製造～検査～出荷～輸送～設置～使用～保守・サービス～廃棄）の各段階について，製品事故に繋がるリスクを網羅的に洗い出して重み付けを行ない，リスクを評価する．評価したリスクが受け入れられない場合，リスク低減方策を検討し，受け入れ可能なレベルとなるまでリスク評価を行う．受け入れ可能なレベルまでリスクを低減できなかった場合は，残留リスクとして，顧客にリスクアセスメント結果や使用説明書等で説明する必要がある．図 1.6 は，リスクアセスメント及びリスク低減方策のフローを示す．図 1.7 は，リスク評価指標の例としてリスクマトリクスを示す．

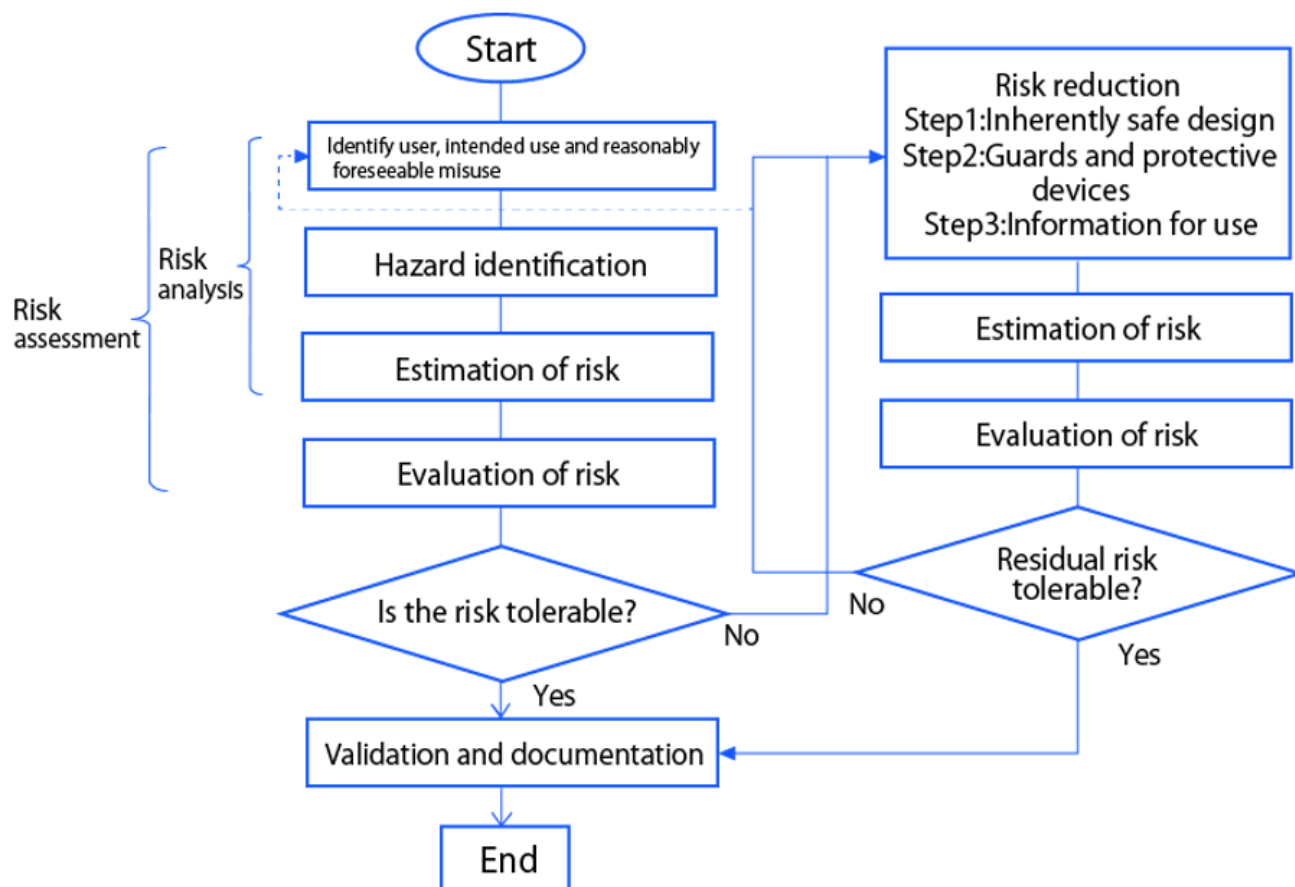


Fig. 1.6 Flow of risk assessment and risk reduction

Risk Matrix		Possibility (probability of occurrence)					
		A Frequent	B Almost certain	C There is a possibility	D Rare	E Almost no possibility	F No possibility to foresee
Severity (degree of harm)	1. Catastrophic	Very High	High	Medium	Low	Very Low	Very Low
	2. Severe	Very High	High	Medium	Low	Very Low	Very Low
	3. Moderate	High	Medium	Low	Very Low	Very Low	Very Low
	4. Minor	Low	Very Low	Very Low	Very Low	Very Low	Very Low

Very High

High

Medium

Low

Very Low

Fig. 1.7 Examples of risk assessment indicators (risk matrix)

次にリスク低減方策の詳細について述べる。リスク低減方策[13, 14]は3ステップメソッドとも呼ばれ、「1. 本質的安全設計方策, 2. 安全防護・追加の方策, 3. 使用上の情報」の3

つの方策を以て，リスクアセスメントにて重み付けしたリスクレベルを受け入れ可能なレベルまで低減させるプロセスのことである．全てのリスクに対し，「本質的安全設計方策⇒安全防護・追加の方策⇒使用上の情報」の優先順位でリスクを低減しなければならない．

本質的安全設計方策は，危険源そのものを除去する，危険エネルギーを安全なレベルまで下げるという方策によって，リスクを低減させる方策のことである．安全防護方策は，ガード（物理的に製品使用者を隔離する＝隔離の原則）や安全インターロック（安全が確保されるまで製品を停止させる＝停止の原則）等を用いて，危険源から製品使用者のアクセスを防ぐことでリスクを低減させる方策のことである．尚，安全防護方策を実施しても受け入れ可能なレベルまでリスクを低減できない場合には，追加の方策（非常停止ボタン等）を実施して受け入れ可能なレベルまでリスクを低減する．使用上の情報は，製品の取扱い説明書への警告文，製品への警告表示，保護具や製造事業者の要員・顧客・使用者等への教育・訓練を通じて，製品の残留リスクの情報を漏れなく伝達する方策である．

### 1.3.2 FMEA（Failure Mode and Effect Analysis）

FMEA（故障モード・影響度解析）[22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32] は，システムの構成品目（サブシステムや部品）とシステムの設計図面を元に，対象とした全ての構成品目に於ける製品やプロセスに関する（潜在的な）リスクを故障モードに基づいて抽出し，（構想）設計段階でそのリスクを可能な限り除去することを目的とした手法である．

FMEA は，構成品目毎に故障モードが明らかになるので，その影響の評価や故障モード毎の対策が立てやすい．また定性的評価に適しており，数式等による計算を必要としない．一方で，各故障モード間の繋がりや相互作用のような関連性を把握することは困難である．

また FMEA には，FMEA の概念を論理的に拡張した FMECA（Failure Mode Effect and Criticality Analysis：故障モード・影響度・致命度解析）[22, 33, 34, 35] という関連評価手法

が存在する。FMECAは、故障モードの発生頻度から影響の程度を定量的に表す致命度を算出し、システムの安全性を定量的に評価する故障モード解析（リスクアセスメント）手法である。

### 1.3.3 FTA（Fault Tree Analysis）

FTA（故障木解析）[22, 24, 33, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47]は、システムの望ましくない欠陥事象（トップ事象）を下方に向かって（トップ事象⇒中間事象（トップ事象に繋がる事象）⇒基本事象の流れ）、木構造として論理展開（論理記号にて表現）し、網羅したリスク要因の中から重大な要因を抽出する方法のことである。

FTAは、ソフトウェアを含む多重故障モード解析（リスクアセスメント）に適している他、トップ事象・中間事象・基本事象の因果関係が論理記号によって展開されていることから、トップ事象に無関係な中間事象・基本事象について評価されることが無い。図1.8はFTAの実施例を示す。

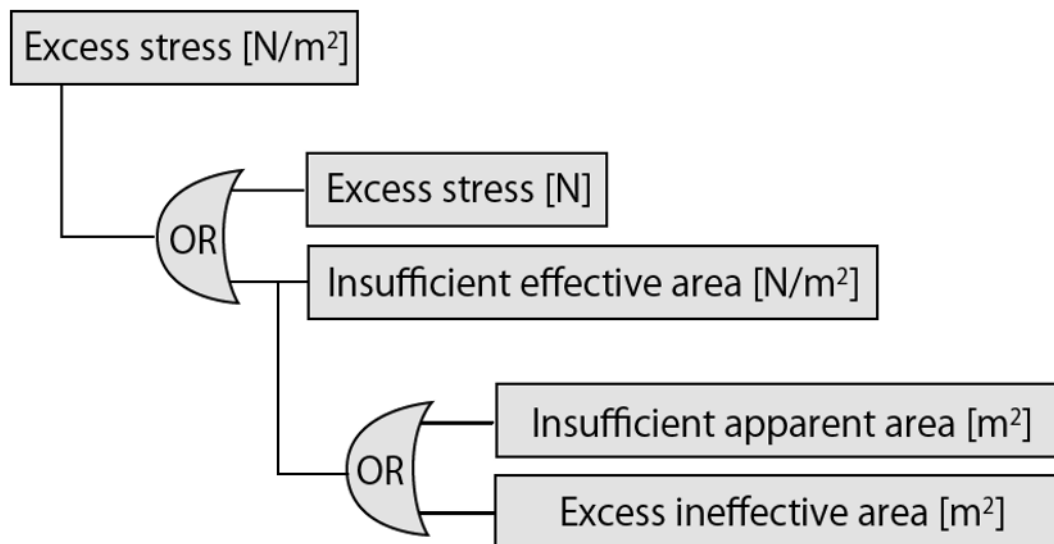


Fig. 1.8 Implementation example of FTA

### 1.3.4 HAZOP (Hazard and Operability Study)

HAZOP (ハザード・運転性解析) [22, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57] は, 化学プラント等の大規模 (複雑な) システムに於ける潜在的危険や運転上の問題点について, 起こり得るプロセス異常 (正常状態からの偏差) としてガイドワード (No, Less, More, Reverse, As Well As, Part of, Other than) によって洗い出し, その原因やシステムへの影響を踏まえて安全対策を立案し, 安全対策の妥当性の評価・検証を行う方法のことである.

HAZOP は, 対象システムの構成する 1 つのラインや機器に着目して解析することから, 網羅的な故障モード解析 (リスクアセスメント) が可能である他, 各分野の専門家 (プロセス・制御・運転・安全) から構成されるチームで評価を行なう為, 多角的な評価が可能である.

### 1.3.5 STAMP/STPA (System Theoretic Accident Model and Processes/System Theoretic Process Analysis)

STAMP/STPA (システム理論に基づく事故モデル及びプロセス/システム理論的プロセス分析) [58, 59, 60, 61, 62, 63] は, STAMP (システム理論事故モデル及びプロセス) と STPA (システム理論的プロセス分析) の 2 つのプロセスから成る, 複雑なシステムに於ける構成要素間の相互作用で発生するハザード分析に重きを置いた故障モード解析 (リスクアセスメント) 手法のことである.

STAMP は, 事故がシステム構成要素の単独故障ではなく, システム安全制約に違反するシステム構成要素の間の相互作用から生じると考える (複雑化したシステムの問題点を発見). 構想設計段階から, 複雑なシステムを対象としたハザード分析が実施できる為, コスト削減を含む効果的な解析を可能とする. STPA は, STAMP で得られたシステムの安全コントロール構造を対象に, ハザード分析を行ない, 事故の原因に対する措置や低減策を明確にする.

STPA は, 従来故障モード解析 (リスクアセスメント) 手法 (FMEA や FTA) と比較して, ソフトウェア要求事項エラー, 構成要素の相互作用による事故, 複雑な人間の意思

決定エラー，複数のコントローラ間の不十分な調整等，従来手法では考慮されない要因（システムに於ける不適切な制御行動）を含んだ形でシステムの構想設計段階から故障モード（リスク）の評価が可能である．

### 1.3.6 DRBFM (Design Review Based on Failure Mode)

DRBFM[64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71]は、「良い設計」・「良い議論」・「良い設計審査」を意味するGD<sup>3</sup>概念を元にトヨタ自動車に於いて開発された，品質・安全性・信頼性問題を未然防止する為の故障モード解析（リスクアセスメント）手法である．図 1.9 は DRBFM のフローを示す．

DRBFM は，製品の構想設計段階から，設計変更（変更点）及び環境変化（変化点）を考慮した故障モード解析（リスクアセスメント）並びに関係部門による設計審査を行うことで，製造時や製品販売後の品質・信頼性・安全性問題の発生を抑えることが可能である．

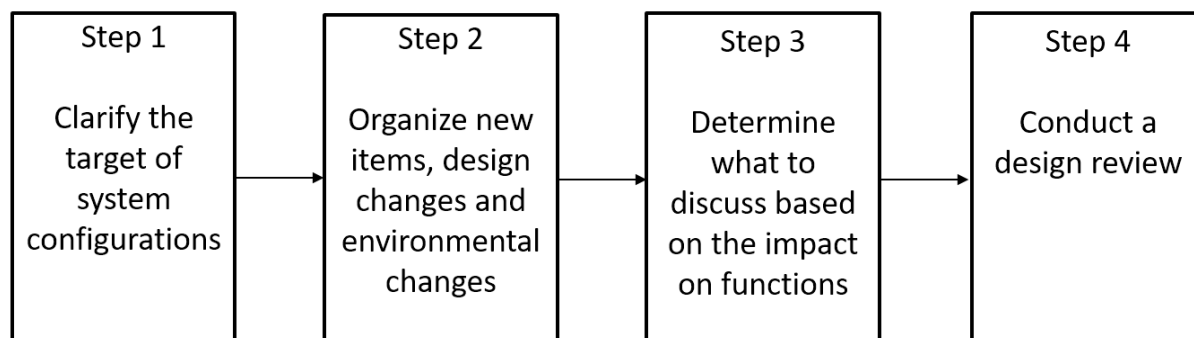


Fig. 1.9 Flow of DRBFM

### 1.3.7 従来故障モード解析手法を材料に関する故障モード解析に適用する場合の課題

従来故障モード解析手法を材料に関する故障モード解析に適用する場合，次の様な課題が存在する．FMEA に於いては，材料の損傷/破壊に関する故障モードの導出プロ

セスがFMEA実施プロセスに含まれていない。FTAに於いては、システムの故障要因解析を目的としており、材料の損傷/破壊に関する故障モード解析を目的とはしていない。HAZOPに於いては、原材料のハザードの評価が可能であるが、材料の損傷/破壊に関する故障モードは解析対象としていない。STAMP/STPAに於いては、複雑なシステムの構成要素間の相互作用として発生するハザードの評価が可能であるが、材料の損傷/破壊に関する故障モード解析に特化した手法では無い。DRBFMに於いては、制限仕様における設計変更/環境変化から故障メカニズムとして導出するが、材料の損傷/破壊に関する故障モード解析に特化した手法では無い。

上述した従来故障モード解析手法を材料に関する故障モード解析に適用する場合の課題を踏まえ、以下の2つの課題を設定する。1.1項で述べた材料に関する故障モード解析（リスクアセスメント）を、製品の構想設計段階から実施する為には、

- 課題1. 従来故障モード解析手法の論理を拡張し、材料に関する故障モード解析に適用できる故障モード解析手法が構築されていない
- 課題2. 製品に組み込まれる原材料の機能に着目した材料の損傷/破壊に関する故障モードを解析（予測）する故障モード解析手法が構築されていない

の2つの課題を解決することが必要である。

## 1.4 機械学習手法と故障モード解析

本項では、機械学習並びに機械学習手法の一つであるサポートベクターマシンについて述べた後、機械学習手法を用いた故障モード解析支援について述べる。

### 1.4.1 機械学習について

機械学習 [72, 73] とは、生まれつき持ち得ている学習能力と同様の機能（データから反復的に学習し、そこに潜むパターンを探し出す）をコンピュータで実現しようとする理論や技法のことである。機械学習は、主に予測・クラス分類・クラスタリング等の用途

に使用され、種類としては、「教師あり学習」、「教師なし学習」等がある。「教師あり学習」は、学習データと呼ばれる正解付きのデータから予測モデルを作成し、その予測モデルを用いて、評価データと呼ばれる未知のデータとの比較を行ない、予測を行う方法であり、最も一般的な機械学習である。「教師なし学習」は、学習データが得られず、評価データしか存在しない場合に予測を行なう方法である。

機械学習には複数のモデルが存在するが、その性能を評価する為には、正しいと判断（予測）したデータと、誤って判断（予測）したデータの定量化が必要である。その定量化には混同行列と呼ばれる概念が用いられる。表 1.2 は、混同行列を示している。TP は「True Positive」の略であり、データが正しく陽性（正）として判断されたことを意味する。TN は「True Negative」の略であり、データが正しく陰性（負）として判断されたことを意味する。FP は「False Positive」の略であり、データが誤って陽性（正）として判断されたことを意味する。FN は「False Negative」の略であり、データが誤って陰性（負）として判断されたことを意味する。

上記で述べた混同行列の各要素から、次に示す機械学習に於けるモデル性能の評価を可能とする指標が求められる。

#### 〈 検出率 (Recall) 〉

検出率 (Recall) は、ある損傷・破壊モードを正しくその損傷・破壊モードとして検出できた割合である。検出率は、「 $TP/(TP+FN)$ 」の関係から求められる。

#### 〈 適合率 (Precision) 〉

適合率 (Precision) は、ある損傷・破壊モードと予測した結果のうち、その損傷・破壊モードである割合である。適合率は、「 $TP/(TP+FP)$ 」の関係から求められる。

#### 〈 特異度 (Specificity) 〉

特異度 (Specificity) は、誤っている損傷・破壊モードを、正しく陰性であると予測した割合である。特異度は、「 $TN/(TN+FP)$ 」の関係から求められる。

### 〈偽陽性 (False positive rate) 〉

偽陽性 (False positive rate) は、誤っている損傷・破壊モードを、誤って陽性であると予測した割合である。偽陽性は、「 $FP/(TN+FP)$ 」の関係から算出する。

本研究では、上記の指標のうち、「検出率」と「適合率」を使用することとする。また「検出率」と「適合率」について、本論文では「機械学習性能指標」と定義する。

**Table 1.2** Confusion matrix in machine learning

Confusion matrix		Predicted value	
		Positive	Negative
Measured value	Positive	TP : True Positive	FN : False Negative
	Negative	FP : False Positive	TN : True Negative

## 1.4.2 サポートベクターマシン (Support Vector Machine)

サポートベクターマシン (以後 **SVM** と表記) [74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81] は、教師あり学習に分類される方法であり、入力されたデータを識別する面 (分離超平面) と各データ点との距離であるマージンが最大となるように分離超平面を動かすことで、学習データを学習する手法のことである。図 1.10 は、**SVM** の概念を示す。

**SVM** は、他の機械学習手法と比較して、過学習 (学習データへの適合性を高め過ぎてしまい、評価データに対する予測精度が低下してしまうこと) の生じ難さを表す汎化性能が高い特徴がある。表 1.2 は、**SVM** で用いられるカーネル関数 (2つの評価データの間 に於ける類似度を表す関数) の例を示している。代表的なカーネル関数として、ガウシアンカーネル (ガウス関数で表現されたカーネル関数)、線形カーネル (線形判別を行うカーネル関数)、多項式カーネル (定数の項と  $d$  次の項を持つカーネル関数)、双曲線正

接カーネル（双曲線正接関数で表現されたカーネル関数）がある．パラメータは，カーネル関数によって異なり，交差検証等を用いて，パラメータをチューニングすることで SVM モデルの判別性能が向上する．本研究では，設定パラメータの数が少なく，汎化性能の高いとされるガウシアンカーネルを採用する．

SVM は，2 クラス判別により評価データの予測を行うが，本研究に於いては，2 クラス判別を多クラス判別に拡張した 1 対 1 手法を用いている [74]．表 1.3 は，1 対 1 手法を用いた多クラス判別分析結果の例を示している．クラスを「○ ( $F(x)=1$ )・△ ( $F(x)=2$ )・□ ( $F(x)=3$ )」の 3 種類，判別基準として「△のクラスを  $F(x)$  と判別する SVM モデルの数」とした場合，「3 クラスの組合せから構築した SVM モデル（6 個）の判別値を数え，数えた結果 ( $F(x)$ ) を比較（多数決）」し，最も SVM モデルの数の多い△が判別結果として出力される．尚，本研究では SVM 関数として，統計解析言語 R3.4.2 の e1071 パッケージに実装された LIBSVM（台湾大学にて開発された SVM ライブラリのこと）を用いる．

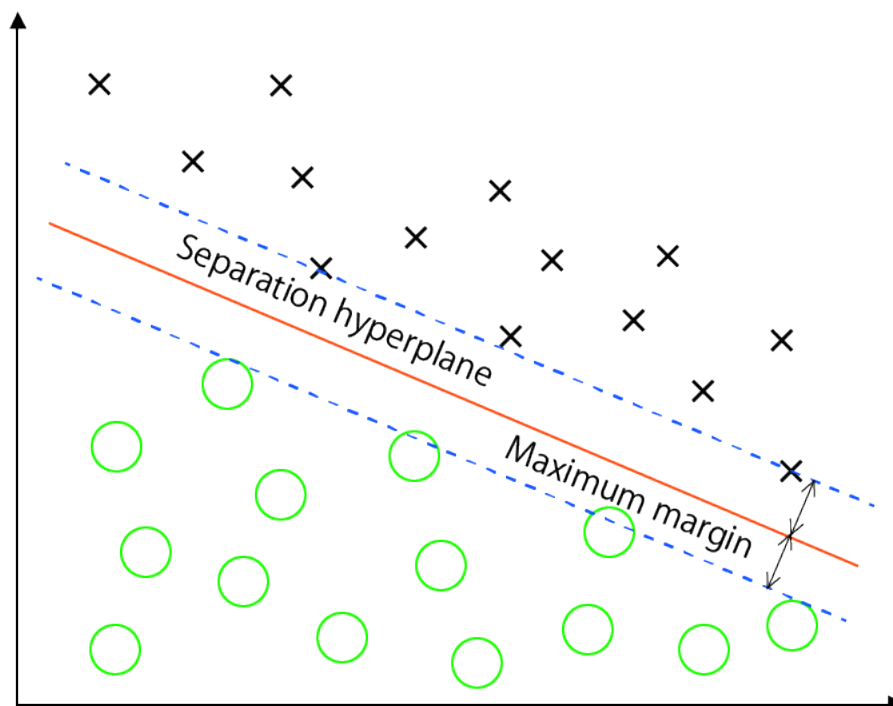


Fig. 1.10 Concept of SVM

**Table 1.3** Kind of kernel functions of SVM

Name	Formula	Characteristic	Parameter
Gaussian kernel	$K(x, x') = \exp(-\gamma \ x - x'\ ^2)$	A kernel function expressed by a Gaussian function. It is used when the type and format of data are unknown. It has highly generalization performance (ability to correctly discriminate data other than teacher data).	$\gamma$
Linear kernel	$K(x, x') = x^T x'$	A kernel function that performs linear discrimination. It is often used for data such as text data, in which most columns are 0.	None
Polynomial kernel	$K(x, x') = (scale \cdot x^T x' + offset)^d$	A kernel function with constant term and a term of d order. It is often used for discrimination of image data.	d, scale, offset
Hyperbolic tangent kernel	$K(x, x') = \tanh(scale \cdot x^T x' + offset)$	A kernel function expressed by hyperbolic tangent function. It is used for neural network.	scale, offset

**Table 1.4** Example of SVM multi-class discriminant analysis results using one-to-one method

Class x	SVM model			The discrimination results F (x)
○(1)	-	$SVM_{1,2}=+1$	$SVM_{1,3}=-1$	1
△(2)	$SVM_{2,1}=+1$	-	$SVM_{2,3}=+1$	2
□(3)	$SVM_{3,1}=-1$	$SVM_{3,2}=+1$	-	1

$SVM_{a,b}(F(x))$ : If the class is a, it returns +1, and if it is b it returns -1.

### 1.4.3 機械学習を用いた故障モード解析支援

サイレントチェンジや原材料起因の事故が多発している現状を鑑みると、故障モード解析者の専門性に依存した材料に関する故障モード解析は、次の観点から設計審査等での抜け漏れを生じさせ、製品の原材料や部品起因の故障モードやリスクに対する未然防止対策の実施の妨げになる可能性がある。

### 〈材料・部品メーカーの立場〉

最終製品メーカーから材料に関する詳細な仕様の開示が無いことから、最終製品に於ける材料起因の故障モードの予測が困難であることが考えられる。

### 〈完成品メーカーの立場〉

材料の損傷/破壊に関する専門的知識を有する設計者等の要員が十分でない為、材料の特性変化から、最終製品に於ける材料起因の故障モードの予測が困難であることが考えられる。

### 〈故障モード解析者の立場〉

材料の損傷/破壊に関する専門的知識が無い設計者が、材料の損傷/破壊や意図的変更に起因して生じる製品の故障モード解析が簡単に実施できるように支援する手法が無いことから、材料の特性変化から最終製品に於ける材料起因の故障モードの予測が困難であることが考えられる。

そこで詳細は1.5項で述べるが、機械学習手法であるサポートベクターマシンに材料に関する故障モード解析を組合せることによって、故障モード解析者（製品設計者等）の材料強度の知識に依存せずに、合理的・論理的に材料段階での故障モードやリスクの評価が可能となることが期待される。

## 1.5 本研究の独自性

1.3.7項に於いて、従来故障モード解析手法を材料に関する故障モード解析に適用する場合の課題、並びに当該課題を解決し、製品の構想設計段階から材料に関する故障モード解析を実施する為には材料に関する故障モード解析手法を新たに構築する必要があることを述べた。そこで本項では、これまでの故障モード解析やリスクアセスメントに関する研究について述べ、本研究で提案する材料に関する故障モード解析手法と従来故障

モード解析手法の差異や提案手法の意義を示し、本研究の独自性を主張する。

故障モード解析やリスクアセスメントに関する研究として、次に示すものがある。故障モードを自動的に同定する、形式表現や SysML (Systems Modeling Language) を用いた手法 [82, 83, 84], 不具合事象の次元解析 [85], 故障確率の推定 [86] や HAZOP を援用した本質的安全設計に基づく故障モード同定手法 [49, 87, 88, 89] が提案されている。故障モード予測手法として、ストレス-故障メカニズム-故障モードの流れをまとめたトラブル予測表を用いた手法 [90], 製品不具合の因果連鎖に着目し, SSM の考え方に基づき, 部品等の故障モードを同定する手法 [91, 92] や, SSM に於ける想定される損傷/破壊メカニズム及び負荷形態と環境因子の変化を, ガイドワード表を用いて導出する手法 [67, 68] が提案されている。HAZOP 支援手法として, HAZOP データエラーの可能性を診断するコンピュータ支援システム [55], HAZOP 分析で可能な偏差を自動的に適用してバッチシステムの操作性をチェックする CHECKOP ツール [53] や, 故障木の現象の考えられる原因を特定するシステム [39, 44] が提案されている。FTA 支援手法として, 故障現象を物理量次元によって表現し, 当該故障事象の上位事象の物理量次元と下位事象の物理量次元を比較することで, 論理的に FT 図を作成する手法 (物理量次元インデクシング) [36, 41, 42, 43] が提案されている。その他, 医療施設に於ける患者の転倒転落事故を防止する為, 患者の転倒転落リスクについて, 深層学習を用いてリアルタイムで評価するリアルタイム・リスクアセスメント手法の提案 [93] や, 深層学習を機械の故障診断に適用した事例 [94] が報告されている。

1.1 項に於いて, 原材料・部品起因の製品事故が社会や経営等に与える影響を鑑みて, 製品の構想設計段階から, 材料に関する故障モード解析を実施し, 当該事故を未然防止することの必要性を述べた。しかし現状, 数多の故障モード解析手法が存在しているが, 製品の構想設計段階から, 材料に関する故障モード解析を実施し, 材料起因の製品事故を未然防止したという事例や研究成果は報告されていない。これは, 1.3.7 項で述べた従来故障モード解析手法を材料に関する故障モード解析に適用する場合の課題が, 関連研究に於いて解決されていない為である。そこで本研究では, 材料に関する故障モード解析手法「修正 DRBFM」を提案する。

修正 DRBFM は、品質・安全性・信頼性問題の未然防止手法として広く用いられている従来故障モード解析手法の DRBFM に、リスクアセスメントに於ける制限仕様の概念を導入することで DRBFM の論理を拡張し、製品仕様に於ける設計変更/環境変化と材料の損傷/破壊メカニズムとの対応を効果的に導出する手法である。しかし修正 DRBFM は、従来故障モード解析手法である DRBFM をベースにしている為、DRBFM に精通している設計者や技術者は問題無く使用できたとしても、「DRBFM に精通していないあるいは材料の損傷/破壊に関する知識や経験が不足している設計者等が修正 DRBFM を実施する場合、不合理的・非論理的な結果となる可能性がある（修正 DRBFM の問題）」．そこで修正 DRBFM とは別に、機械の故障診断等に用いられている機械学習手法との親和性を高めた「設計偏差法」及び故障モード解析結果の妥当性を確認する「機械学習手法を用いた故障モード判別分析手法」を提案する。

設計偏差法は、製品仕様に於ける設計変更/環境変化を、材料の特性変化と対応付け、関連する材料に関する損傷/破壊（故障）モードを論理的に導出する手法である。機械学習手法を用いた故障モード判別分析手法は、後述する設計偏差法の設計偏差並びに SSM 偏差が疎行列によって表現されることに着目し、機械学習手法の一種であるサポートベクターマシン（SVM:Support Vector Machine）を用いて、故障モード解析結果の故障モードの妥当性を判定する。材料の損傷/破壊に関する知識や経験が少ない設計者等が設計偏差法を用いて故障モード解析を実施する場合、その解析支援を可能とする。

これまでに従来故障モード解析手法や、関連研究にて提案された手法について、1.3.7 項で述べた課題を解決できていない為、当該手法群を材料に関する故障モード解析に適用することが難しいことを述べた。本研究で提案する故障モード解析手法は、製品に組み込まれたコンポーネントや部品に於いて、その原材料の変更や特性変化が発生した場合、材料の機能が失われる事象と製品の設計仕様や使用環境を、材料強度学の応力-強度モデル（SSM）の援用により結び付けることによって、製品の設計仕様から材料の特定の損傷/破壊メカニズムに対応する故障モードの論理的な導出が可能となる。このことを本研究の独創性として主張する。また設計プロセスに於ける変更のリスクは、設計段階の早期である程より効果的に対処できる為 [67]、構想設計段階に於いて、材料の変更・特

性変化がどのような損傷・破壊メカニズムと対応し、結果としてどのような故障モードをもたらすのかを評価できることは経済的なコスト低減に繋がる。

## 1.6 本研究の適用範囲と使用対象

本研究で提案する「修正 DRBFM」と「設計偏差法」及び「SVMを用いた故障モード判別分析」の適用範囲として、図 1.1 に示した製品実現化プロセスである、「企画設計」、「構想設計」、「詳細設計」、「製造」、「検査」、「出荷」に加え、「輸送（運搬や保管等）」、「設置（組付けや調整等）」、「使用（起動や停止等）」、「保守・サービス（修理やメンテナンス等）」、「廃棄（解体や撤去等）」を含むものとする。

提案手法の使用対象として、材料メーカーの技術者（開発・設計・生産技術・品質保証）や、完成品メーカーの技術者（開発・設計・生産技術・品質保証・調達）等を想定している。

## 1.7 本論文で使用される用語の定義

本項では、本論文全体に渡って使用される用語のうち、「材料」、「機能」、「故障」、「故障モード」、「リスク」、「安全」を対象に定義を示す。

### 〈材料〉

材料は、「製品（モジュール品や部品も含む）を実現する為に必要となる、機能を持ったもの（原料）」として定義する。

### 〈機能〉

機能は、「材料や製品（モジュール品や部品も含む）が持っている働き」として定義する。

### 〈故障〉

故障は、「材料や製品（モジュール品や部品も含む）の機能が正常に働かなくなること」として定義する。

### 〈故障モード〉

故障モードは、「製品（モジュール品や部品も含む）で発生する故障状態の形式による分類（例：部品の焼損，材料の疲労破壊）」として定義する。

### 〈リスク〉

リスクは，ISO/IEC Guide51[13]に基づき，「危害の発生確率とその危害のひどさの組合せ」として定義する。

### 〈安全〉

安全は，ISO/IEC Guide51[13]に基づき，「受け入れ不可能なリスクが無いこと」として定義する。

## 1.8 本研究の目的

前項までに述べた内容や課題を踏まえ，本研究では，材料に関する故障モード解析（リスクアセスメント）解析手法（修正 DRBFM 及び設計偏差法），並びに機械学習に用いた材料の故障モード解析支援方法を提案する。

1.3.7 項で述べた課題 1 を解決する為，DRBFM にリスクアセスメントに於ける制限仕様の概念 [5] を導入することで，設計変更/環境変化と材料の損傷/破壊メカニズムとの対応を効果的に導出する「修正 DRBFM」を構築することを目指す。初めに，制限仕様を定義した上で，制限仕様に於ける設計/環境変数の変化を導出する。DRBFM の概念を応用し，正常状態と異常状態との比較を実施し，材料の損傷/破壊メカニズムの体系的リスト [5] を活用して損傷・破壊メカニズムを抽出し，材料の損傷/破壊に起因する故障モード

を同定する．提案した手法を仮想的なレーザ光学系の対物レンズの故障モード解析比較演習（FMEAと修正DRBFM）に適用し，提案手法によって材料特性に起因する損傷/破壊メカニズム及び故障モードを，効果的に抽出できるか検証した．

更に，1.3.7項で述べた課題2，及び1.5項で述べた「DRBFMに精通していない，あるいは材料の損傷/破壊に関する知識や経験が不足している設計者等が修正DRBFMを実施する場合，不合理的・非論理的な結果となる可能性がある」という問題を解決する為，「設計偏差法」を提案する[95, 96, 97, 98, 99]．設計偏差法に於いては，制限仕様に於ける設計/環境変数を予め指定し，設計変数/環境変数に於ける偏差パターンを設定する．そして，設計偏差パターンと応力-強度モデル（Stress-Strength model）（以降SSMと表記）に於ける応力/強度変数の偏差パターンを対応表により対応付ける．そして，SSM偏差パターンから材料の損傷/破壊モードを導出し，機能の故障メカニズムとして導出する．その結果，想定される制限仕様の変化から，材料の損傷/破壊による故障モードを論理的に導出することができる．一方で，制限仕様及びSSM偏差パターンと材料の損傷/破壊との対応に於いては複数の可能性が存在する為，最終的な選択は評価者が知識や経験に基づき選択する．設計偏差法によって，より合理的・論理的に材料特性に起因する損傷/破壊メカニズム及び故障モードを，効果的に抽出できるか検証した．

機械学習手法を用いた材料の故障モード解析支援手法については，材料の損傷/破壊に基づく故障モードの導出に於いて，故障モード解析者の材料の損傷/破壊に関する知識や経験に依存して結果が変化する可能性や，選択ミス等により不合理な結果となる課題が存在する．そこで，設計偏差法の設計偏差並びにSSM偏差が疎行列によって表現されることに着目し，機械学習手法の一種であるSVMを用いて，設計偏差/SSM偏差パターンと材料の損傷/破壊モードとの対応について，予め用意した対応表と，故障モード解析者が入力した結果の類似度を分析することで，設計偏差法より導出した故障（損傷/破壊）モードを判別分析する手法の構築を目指す．設計偏差法の故障モード解析比較演習結果[95, 96, 97, 98, 99]を分析し，故障モード判別分析結果の妥当性について考察した．

従来故障モード解析手法の応用である修正DRBFMの実践に加え，材料の損傷/破壊に関する知識や経験が少ない設計者や技術者が未知の機能や環境に対する故障モード解析

を実施する場合について，機械学習手法を援用した故障モード解析手法及び故障モード判別分析手法等の製品安全設計を支援する実践的な手法を構築することが，本研究の最終的な目的である．

## 1.9 本論文の構成

本項では，本論文の構成について述べる．尚，図 1.11 は，本論文の全体構成に関するフローチャートを示す．

### 〈1章：緒論〉

#### 1.1 研究の背景

近年発生している材料起因の製品事故（品質・安全性・信頼性問題）や，海外に於ける材料起因事故の損害賠償等を取り上げ，製品の構想設計段階から材料に関する故障モード解析（リスクアセスメント）の必要性が高まっていることを述べる．

また製品開発の現場に於いて，材料の損傷/破壊に関する知識や経験を十分に持った設計者が安全設計を行っている状況でないことを述べ，製造物責任事故等の製品安全問題の未然防止体制が十分でないことを述べる．

#### 1.2 製品の安全性確保の実現

製品の安全性確保の考え方，国際安全規格，関連法規制，リスクコミュニケーションについて述べる．

#### 1.3 従来故障モード解析手法及びその課題

本項では，製品の故障モードやリスクを評価する基本的な考え方であるリスクアセスメント，及び代表的な故障モード解析手法として，FMEA・FTA・HAZOP・STAMP/STPA・DRBFMについて述べる．その上で，従来故障モード解析手法を材料に関する故障モード解析に適用する場合の課題について述べる．

## 1.4 機械学習手法と故障モード解析

機械学習の概要，サポートベクターマシン（SVM），SVMのカーネル関数，SVMの多クラス判別分析について述べた後，機械学習手法を故障モード解析手法に組合せることによって，故障モード解析者の材料強度等の知識や経験に依存せず，合理的・論理的に製品の構想設計段階での故障モードやリスクの評価が可能となることを述べる．

## 1.5 本研究の独自性

故障モード解析/リスクアセスメント手法に関する従来研究について述べた後，材料に関する故障モード解析手法として，従来故障モード解析手法が前提条件無しに，材料に関する故障モード解析評価に適用できない理由を述べる．その上で本研究にて提案する材料に関する故障モード解析手法の特徴と有効性を述べ，従来故障モード解析手法との差異を明確にし，本研究の独自性を主張する．

## 1.6 本研究の適用範囲と使用対象

本研究で提案する手法の適用範囲，並びに提案手法の使用対象について述べる．

## 1.7 本論文で使用する用語の定義

本論文で使用する用語のうち、代表的な用語の定義について述べる．

## 1.8 本研究の目的

本研究の目的について述べる．

## 1.9 本論文の構成

本論文の構成について述べる．

〈2章:材料に関する故障モード解析を可能とする「修正 DRBFM」の提案〉

### 2.1 はじめに

修正 DRBFM に関する背景や先行研究, 2章の目的と内容について述べる.

### 2.2 修正 DRBFM

材料に関する故障モード解析手法として, 従来故障モード解析手法である DRBFM の論理を拡張した修正 DRBFM の内容について述べる.

### 2.3 対物レンズを対象とした故障モード解析比較演習

仮想的なレーザ光学系の対物レンズを対象に実施した FMEA と修正 DRBFM の故障モード解析比較演習内容について述べる.

### 2.4 考察

故障モード解析比較演習から得られた結果に関する考察を述べる.

### 2.5 まとめ

2章の研究で得られた結果・考察を総括する.

〈3章:設計偏差法及び機械学習手法を用いた故障モード判別分析手法の提案〉

### 3.1 はじめに

設計偏差法及び故障モード判別分析手法等に関する背景や先行研究, 3章の目的と内容について述べる.

### 3.2 設計偏差法

修正 DRBFM で得られた知見・課題を踏まえて設計偏差法を提案したこと, 及びその内容について述べる.

### 3.3 機械学習手法を用いた故障モード判別分析

機械学習手法である SVM を用いた故障モード判別分析を提案したこと，及びその内容について述べる．

### 3.4 仮想的なレーザ治療装置を対象とした故障モード解析比較演習

従来手法である FMEA 及び DRBFM，設計偏差法の 3 手法による故障モード解析比較演習内容について述べる．

### 3.5 SVM を用いた故障モード判別分析

3.4 の故障モード解析比較演習結果（設計偏差法）に，SVM を用いた故障モード判別分析を適用した結果について述べる．

### 3.6 考察

3.4, 3.5 から得られた結果について考察する．

### 3.7 まとめ

3 章の研究で得られた結果・考察を総括する．

## 〈4 章:結論〉

### 4.1 結論

2 章～3 章のまとめを元に本研究に於ける結論を述べる．

### 4.2 本研究の課題

本研究の課題について述べる．

### 4.3 今後の展望

本研究の今後の展望について述べる．

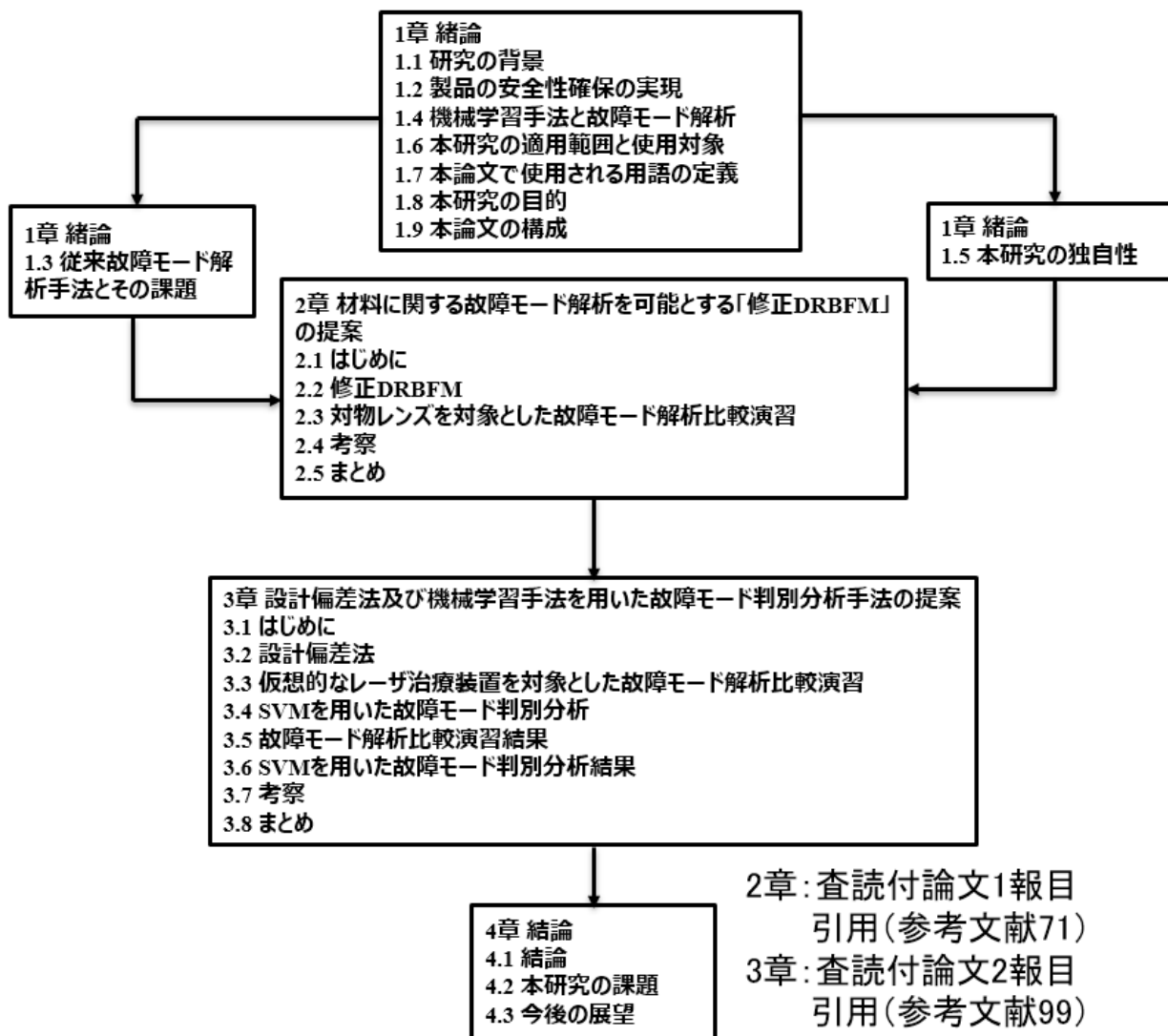


Fig. 1.11 Flowchart for overall structure of doctoral dissertation



## Chapter 2 材料に関する故障モード解析を可能とする「修正DRBFM」の提案

### 2.1 はじめに

製品安全に関する最近の報告に於いて、最終製品の製造事業者が意図せず、設計及び製造段階で実施された材料特性の設計変更（サイレントチェンジ）は、最終製品の故障モードに繋がることが示されている [100]. この様な欠陥は、製造物責任法 [4] を始めとする安全関連法規制に違反する可能性がある．従って、設計及び製造段階で発生する可能性のある材料特性の設計変更に対処する為には、故障モード解析手法を開発する必要がある．材料特性の設計変更は、材料の損傷/破壊メカニズムをモデル化する応力-強度モデル（SSM）の意図しない変更と見なすことができる [101]. しかし、材料の故障モードを引き起こす材料の損傷/破壊モードと材料特性の設計変更を論理的に関連付ける方法はまだ確立されていない．

HAZOP[22]・FMEA[22, 31, 32]・FTA[22, 33] は、リスク分析に広く使用されている．HAZOP は、ガイドワード [31, 32] を使用して機能の故障状態を想定することによりハザードのタイプを指定するが、このアプローチでは、機能プロセス変数又はコンポーネント材料の破壊モードの異常を明示的に処理できない．同様に、STAMP/STPA は、ハザードを抽出する為に制御システム内の関数変数の関係を管理する手法である [33, 51, 53, 58, 59]. 但し、コンポーネント材料の破壊モードとの関係は論理的に表されていない．FMEA は、機能の故障状態に繋がる様々なモードを抽出し、それらの影響の程度を評価する．但し、FMEA は、専門家の知識がなければ、特定の種類の損傷/破壊メカニズムを特定することはできない [59, 60, 61]. 他の研究では、正式表現と SysML を使用して故障モードを自動的に特定している [24, 25, 62]. それらは材料の損傷/破壊メカニズムとは関係が無い為、材料の損傷/破壊によって引き起こされる故障モードを論理的に決定することはできない．FTA に於いても、上部の故障現象から特定の損傷/破壊材料モデルを取得するための論理

的な手順は確立されていない。物理量の異常な変化を想定した故障木の開発を支援する故障イベントの次元分析も提案された。提案された方法は、故障木の物理的一貫性を検証する為の有用な方法として報告された [82]。更に、参考文献 [83, 84] は、リスク評価に於ける故障モード抽出の手法について説明し、HAZOP [85, 86, 88] を使用した本質的安全設計に基づく故障確率と故障モード識別の推定を提案した。しかし、材料の損傷/破壊の特定のメカニズムと材料特性の変化との間の論理的対応を表現する方法は確立されていない。設計変更に伴うリスクは設計プロセスの初期段階でより効果的に処理できる為 [49], 「(1) 構想設計段階での材料又は特性の変化に関連する損傷/破壊メカニズム」, 「(2) 設計変更・材料特性変化による故障モード」を解析する方法を開発する必要がある。

FMECA [22, 35, 102] は、FMEA の概念を論理的に拡張するもう 1 つの方法である。故障モードの発生頻度から、影響の程度を定量的に表す致命度を用いてシステムの安全性を評価する。FMEA と同様に、材料の損傷/破壊メカニズムを導き出すプロセスはなく、専門家の知識に依存する。階層分析法 (AHP : Analytic Hierarchy Process) [34, 50, 103, 104] は、階層構造を使用して複数の定性的情報を評価する意思決定方法である。複数レベルの評価要素の定性情報 (知識や経験等) を定量化・測定することにより、提案された定性情報の優劣を比較・評価する。定性的な情報の内容と材料の損傷/破壊メカニズムは無関係である為、材料の損傷/破壊による故障モードを論理的に導き出すことはできない。DRBFM は、製品仕様の設計変更及び環境変化による損傷/破壊メカニズムに焦点を当てることにより、故障モードを導出する [64, 65, 66]。更に、他の研究では、ガイドワード表を使用して負荷要因と環境要因の変化を取得し、それらを SSM を使用して考えられる損傷/破壊メカニズムに関連付けることにより、より多くの故障メカニズムを取得できることが報告された [67, 68]。SSM の概念と DRBFM を適用することで、材料特性の変化によって引き起こされる故障モードを、製品の構想設計段階からより効果的に決定できる。しかし、材料特性の変化に伴う製品仕様の設計変更や環境変化を考慮したプロセスはまだ確立されていない。

そこで、リスク評価における設計仕様の概念を DRBFM に導入することにより、「(1) 設計変更と環境変化」、及び「(2) 材料の損傷/破壊メカニズム」の関係を決定する効果的

なプロセスを開発することが必要となる [105]. 提案プロセスには, 次のステップが含まれる. 最初のステップは, 設計仕様の設計及び環境変数の変更/変化を決定することである. 次のステップは, DRBFM の概念を適用し, 正常状態と異常状態 (設計及び環境変数の変更/変化) が比較され, 損傷/破壊メカニズムリスト [105] を使用して損傷/破壊メカニズムが抽出され, 故障モード結果が決定される.

本章では, 1.3.7 項で述べた従来故障モード解析手法を材料に関する故障モード解析に適用する場合の課題「従来故障モード解析手法の論理を拡張し, 材料に関する故障モード解析に適用できる故障モード解析手法が構築されていない (課題 1)」を解決する為, リスクアセスメントに於ける制限仕様の概念を DRBFM に導入し, DRBFM の論理を拡張した故障モード解析手法 (以降修正 DRBFM とする) を提案する. レーザ照射システムを備えた対物レンズに提案手法を適用し, その有効性を FMEA との故障モード解析比較演習によって検証する.

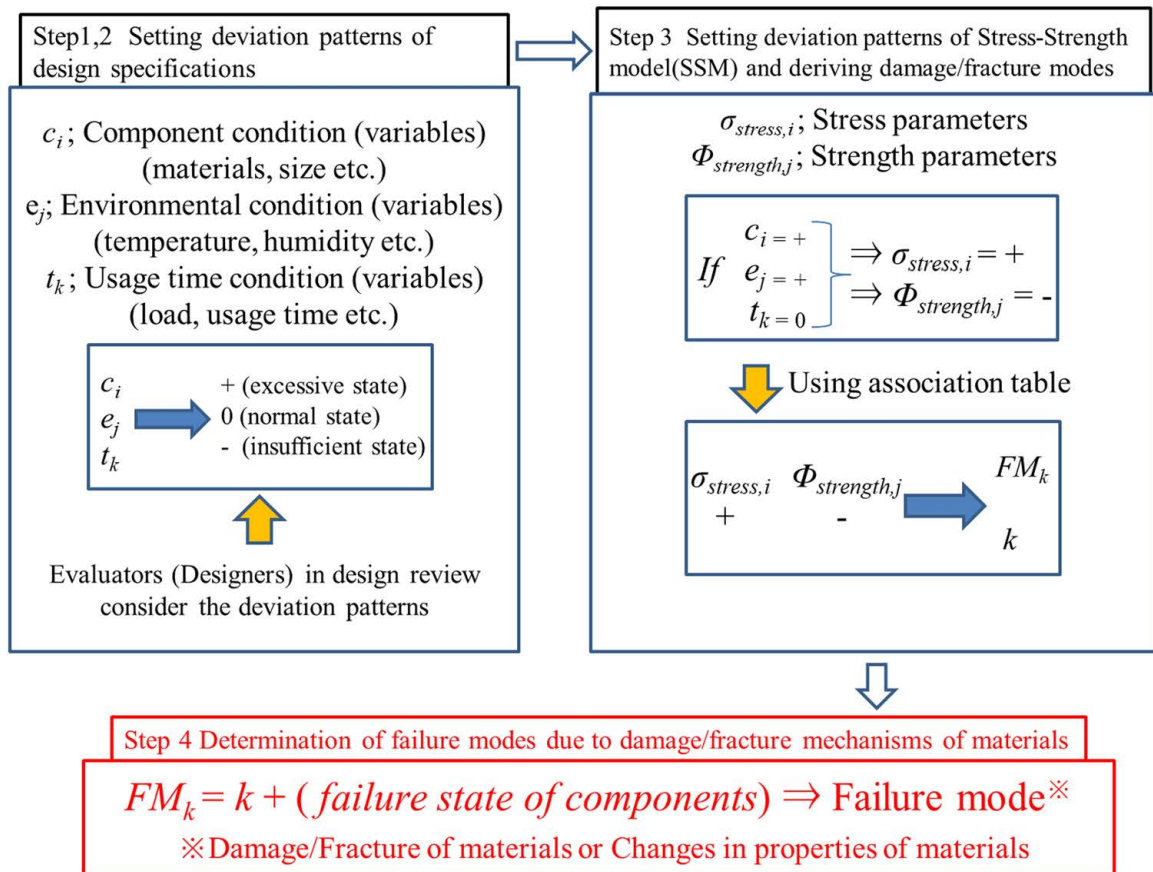
## 2.2 修正 DRBFM (Modified DRBFM)

1 章に於いて, DRBFM は, 製品の構想設計段階から, 変更点 (設計変更) 及び変化点 (環境変化) を考慮した故障モード解析 (リスクアセスメント) 並びに関係部門による設計審査を行うことで, 製造時や製品上市後の品質・安全性・信頼性問題の未然防止を可能にする故障モード解析手法であると述べた. しかし, 材料起因の製品事故を未然防止するという観点からは, 製品に於ける設計変更/環境変化が, 製品に組み込まれたサブシステム・アセンブリー品・モジュール品・部品に用いられている (機能性) 材料の損傷/破壊モード或いは特性変化との論理的な対応付けが保証される訳では無い為, 企画設計段階や構想設計段階での設計審査に於いて, 材料起因の故障モードやリスクを予測することは困難である.

そこで本章では, DRBFM にリスクアセスメントに於ける制限仕様の概念を導入し, DRBFM の概念を拡張することによって, 設計変更・環境変化と材料の損傷/破壊メカニズ

ムとの対応を効果的に導出する故障モード解析手法（修正 DRBFM）を提案する [70, 71].

修正 DRBFM は、「仮想的な設計仕様の想定」、「設計仕様への偏差パターンの導入」、「設計仕様の偏差パターンに関連する材料の損傷/破壊モードの決定」、「材料の損傷/破壊に関する故障モードの決定」のプロセスから成る．図 2.1 は，修正 DRBFM のフローを示す．



**Fig. 2.1** Proposed failure mode analyses procedure caused by damage/fracture of materials retrieved from deviation patterns in design specifications

次に修正 DRBFM の手順の詳細を示す．修正 DRBFM は，以下に示す 4 つの手順から成る．

- 手順 1. 仮想的な設計仕様の想定
- 手順 2. 設計仕様への偏差パターンの導入
- 手順 3. 設計仕様の偏差パターンに関連する材料の損傷/破壊モードの決定

- 手順4. 材料の損傷/破壊に関する故障モードの決定

#### 手順1. 仮想的な設計仕様の設定

本手順では、仮想的な設計仕様として、構成要素条件（材料，形状，組立方法等），環境条件（温度，湿度，使用場所の大気条件等），及び時間に関連する条件（保守/検査間隔，予想使用期間等）を設定する．この例では，表 2.1（a）に示す対物レンズの想定設計仕様を使用した．

#### 手順2. 設計仕様の偏差パターンの導入

本手順では，設計仕様の偏差パターンを設定する．設計仕様の偏差パターンは，対応表（表 2.1(b)）[5]を作成することによって，材料の特性変化に関連付けられる．

#### 手順3. 設計仕様の偏差パターンに関連する材料の損傷/破壊モードの決定

本手順では，手順2から得られた設計仕様の偏差パターンと材料特性変化の対応関係から，表 2.1（c）に示す対応表を使用の上，設計仕様の偏差パターンに関連する材料の損傷/破壊モードを選択する．

#### 手順4. 材料の損傷/破壊に関する故障モードの決定

本手順では，手順3から得られた材料の損傷/破壊モードに，（対象材料が原材料として使用が想定される製品の）機能の故障状態の表現を追加することで，所望の材料の損傷/破壊に関する故障モードを決定できる．得られた結果は，表 2.2 に示す様に修正 DRBFM ワークシートに記入される．図 2.2 は，リスクマトリクスを示す．材料の損傷/破壊に関する故障モードのリスクについて，リスクマトリクスの重大度及び発生頻度からリスクレベルが決定される．

提案手法のフローチャートに従って故障モード解析を実行すると，リスク方策の導出に不可欠な要素である損傷/破壊メカニズムが修正 DRBFM にて既に指定されている為，

故障モードがもたらすリスクに対する方策を論理的に導出できる。

Occurrence frequency \ Severity of damage	Catastrophic (Ⅰ)	Severe (Ⅱ)	Moderate (Ⅲ)	Minor (Ⅳ)
Frequent (Ⅰ)	1	3	7	13
Likely (Ⅱ)	2	5	9	16
Possible (Ⅲ)	4	6	11	18
Rare (Ⅳ)	8	10	14	19
Unlikely (Ⅴ)	12	15	17	20

Correspondence standard	Risk level
Unacceptable (Ⅰ)	1～5
Undesirable (Ⅱ)	6～9
Acceptable after checking (Ⅲ)	10～17
Acceptable (Ⅳ)	18～20

Fig. 2.2 Risk matrix for experiment

**Table 2.1** Table2.1 Excerpt table used for failure mode analyses by damage/fracture of materials (a) Design specifications table for material property and environmental conditions

Design specifications										
Component condition				Environmental condition			Service condition			
Material	Size	Strength	Assembly	Temperature	Humidity	Ambience	Load	Time for a single use	Service period	Inspection period
Glass	φ40mm t10mm	100 MPa	Built in the lens barrel	0～ 40℃	30～ 70%	Medical site	100 mW	15 minutes at once	5000 hours	Every 1000 hours

Table2.1 Excerpt table used for failure mode analyses by damage/fracture of materials (b) Deviation patterns in design specifications and changes in material properties

Function	Change in related material properties	Design specifications										
		Component condition				Environmental condition			Service condition			
		Material	Size	Strength	Assembly	Temperature	Humidity	Ambience	Load	Time	Service period	Inspection period
Transmission	Transmittance reduction	Not equal	Not applicable	Not applicable	Deviate	High Low	High Low	Wrong	High	Long	Not applicable	Long

Table 2.1 Excerpt table used for failure mode analyses by damage/fracture of materials (c)

Association table between the deviation patterns with damage/fracture modes of materials

Function	Change in design specifications		Failure mechanism		Failure mode (mechanism+ failure state)	Seriousness	Cause of failure modes in design, evaluation or production
	Design change	Environmental change	Fracture type	Changes in material property			
Transmission	Laser load is high	Not applicable	Degradation of material	Not applicable	Degradation of material failed transmission of light	Serious	Misevaluation of durability of glass by irradiation
Transmission	Long-term irradiation of laser	Not applicable	Not applicable	Reduction in Transmittance	The transmittance decreases due to defect	Serious	Misevaluation of Long-term laser irradiation

Table 2.2 Example of modified DRBFM worksheet

Part	Function	Failure mode	Mechanism	Cause (design, manufacturing, evaluation)	Effects Assessment		
					Frequ ency	Dam age	Rank
Opti cal lens	Light trans mission	Not transmitted cracked	Fall from the desk	Do not install on a flat location	IV	III	14
		Not irradiated condensation	Transportation equipment storage indoors below freezing chamber	Condensation due to the temperature difference (near the humidifier)	IV	IV	19
		Not transmitted material deteriorates	Aging	Do not have the parts replacement	IV	III	14
			Excessive laser irradiation	High power laser irradiation in the 200V input	IV	II	10
	Optical axis retention	It cannot be irradiated to the target point	Immature operation	19-years old less than inexperienced person	IV	II	10

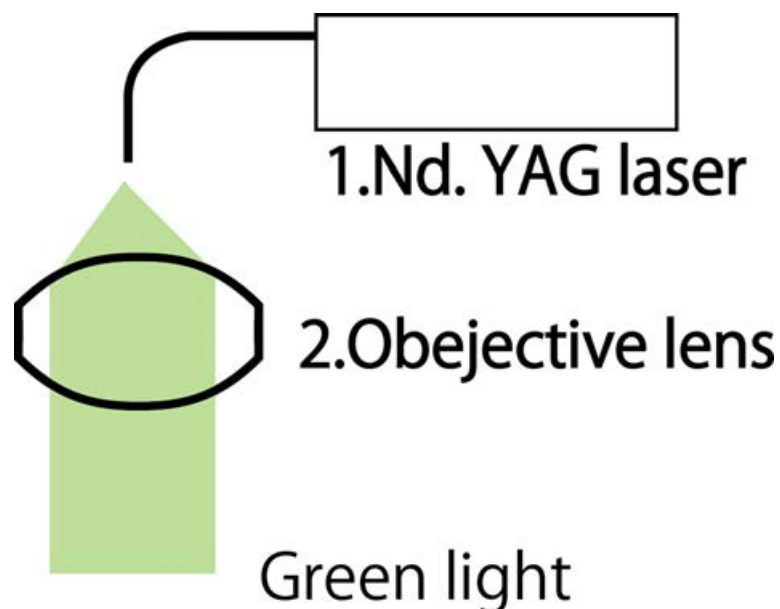
## 2.3 対物レンズを対象とした故障モード解析比較演習

### 2.3.1 故障モード解析比較演習内容

図 2.3 に示す仮想的なレーザ照射システムを備えた対物レンズを使用して、FMEA 及び修正 DRBFM を使用した故障モード解析比較演習を 16 人の協力を得て実施した（所要時

間：90分）。演習を実施する前に、「協力頂きたい内容」,「各手法（FMEAと修正DRBFM）の概要と実施手順」を演習参加者に説明し、この研究にデータを使用する同意を得た。尚、演習参加者には、比較演習の目的が、修正DRBFMの有効性の評価であることは伝えていない。

演習参加者はまずFMEAを実施し、その後、修正DRBFMを実施した。評価指標として、「1.材料の損傷/破壊メカニズムの事例件数」,「2.材料の損傷/破壊メカニズムの抽出率(%)」の2つの指標を使用した。t検定を使用して、提案された修正DRBFMが材料の損傷/破壊メカニズムのより多くの事例を導き出すことができるかどうかを分析した。



**Fig. 2.3** An optical objective lens with a laser irradiation system for the case study

本演習のFMEAは、以下の手順に従って実施した。

- 1. 材料機能の設定
- 2. 材料に起因する故障モードの判別
- 3. 材料に起因する故障モードの原因の特定
- 4. リスクマトリクスを用いた故障事象の発生頻度、損傷度、リスクレベルの決定
- 5. リスク低減方策の決定

本演習の修正 DRBFM は、以下の手順に従って実行した。

- 1. 材料機能の設定
- 2. 材料に起因する故障モードの判別
- 3. 材料に起因する故障モード生成メカニズムの特定
- 4. 材料に起因する故障モードの原因の特定
- 5. リスクマトリクスを用いた故障事象の発生頻度，損傷度，リスクレベルの決定
- 6. リスク低減方策の決定

次に故障モード解析比較演習結果の比較基準について説明する。評価指標として、「1. 材料に起因する損傷/破壊メカニズムの事例件数」と「2. 材料に起因する損傷/破壊メカニズムの抽出率（％）」を用いることは既に述べた。この2つの指標を当て嵌めた故障モード比較演習結果が、表 2.3（材料に起因する損傷/破壊メカニズムのタイプ数比較）及び表 2.4（材料に起因する損傷/破壊メカニズムのケース数及びその抽出率の比較）である。

次に表 2.3 の材料に起因する損傷/破壊メカニズムのタイプ数の計算方法について説明する。論理的におかしい材料に起因する損傷/破壊モードについては、事前確認の上で削除し、FMEA と修正 DRBFM の両方について、材料に起因する損傷/破壊メカニズムの数を以下の様に計算した。

- 1. 解析結果から機能別に材料に起因する損傷/破壊モードをグループ化する。
- 2. 材料に起因する損傷/破壊モードの種類を計数する。
- 3. 各タイプの材料に起因する損傷/破壊モードのメカニズムの数を計数する。
- 4. 手順3で計数されたメカニズムの内、内容が重複しているものは共通項として計数する。

次に表 2.4 の材料に起因する損傷/破壊メカニズムのケース数の計算方法について説明する。FMEA と修正 DRBFM の両方について、材料の損傷/破壊メカニズムの数を以下のように計算した。

- 1. 評価結果から材料に起因する損傷/破壊モードを特定する。
- 2. 演習参加者の評価結果毎に、ステップ 1 で特定した材料に起因する損傷/破壊モードのメカニズムの数を計数する。

最後に材料に起因する損傷/破壊メカニズムの抽出率（％）の計算方法について説明する。FMEA と修正 DRBFM の両方について、材料に起因する損傷/破壊メカニズムの抽出率（％）を以下の関係式から計算した。

「抽出率(%) = (材料に起因する損傷/破壊メカニズムの合計数(評価者毎のケース数の総和)/ 材料に起因する損傷/破壊メカニズムの合計数) \* 100」

### 2.3.2 故障モード解析比較演習結果

表 2.5 は、FMEA または修正 DRBFM を使用した場合の損傷/破壊モードの件数と損傷/破壊メカニズムのタイプを示している。「光透過」と「光軸保持」の 2 つの機能について、事例件数と損傷/破壊メカニズムのタイプは、修正 DRBFM の方が FMEA のものよりも高かった。これは、材料の損傷/破壊モードをより詳細に特定出来る修正 DRBFM の有効性の為であることを示唆する。

表 2.6 は、各演習参加者が回答した材料の損傷/破壊メカニズムの事例件数を示している。材料の損傷/破壊メカニズムを決定できる演習参加者の割合は、FMEA で 56.3 %，修正 DRBFM で 87.5 % であった。両方の方法の比率は、t 検定によって有意差が認められた ( $t = 2.0$ ,  $P = 0.025$ )。修正 DRBFM は、FMEA よりも材料の損傷/破壊メカニズムの決定について、より効果的な手法であるといえる。

表 2.6 は、FMEA 及び修正 DRBFM で決定された故障モードと、対応する損傷/破壊メ

カニズムの例を示している。演習参加者 No.1 の場合、両方の方法で材料の損傷/破壊メカニズムを特定できなかった。データシートには、おそらく故障モード解析手法の理解が不十分である為、SSM が考慮されていない非合理的な材料の損傷/破壊メカニズムのみが含まれていた。演習参加者 No.16 の場合、FMEA で材料の損傷/破壊メカニズムを特定できなかったが、熱疲労等の材料の特定の損傷/破壊メカニズムは修正 DRBFM で正しく導出された。演習参加者 No.5 は、修正 DRBFM よりも FMEA を使用して材料の損傷/破壊メカニズムをより多く決定できた唯一の演習参加者であった。FMEA ワークシートには、異常な振動等による疲労等の特定のメカニズムが含まれており、製品設計又は破壊に関する十分な知識や経験が示されていた。その結果、修正 DRBFM は、材料の損傷/破壊メカニズムを決定する際に専門家を支援できるといえる。表 2.6 は、本演習で得られた、全ての回答に関する合理的/非合理的な回答の数及び合理的な回答の割合を示している。FMEA の一部の演習参加者は合理的な回答率の 0 % を示したが、修正 DRBFM では、その様な低い比率を示した演習参加者はいなかった。

**Table 2.3** Retrieved damage/fracture modes, mechanisms by the groups of FMEA or modified DRBFM

Function	Type of damage/fracture modes	Type of mechanisms (FMEA)	Type of mechanisms (Modified DRBFM)	The number of mechanisms (FMEA)	The number of mechanisms (Modified DRBFM)	The number of mechanisms (common)
Light transmission	7	9	11	11	20	6
Optical axis retention	7	5	9	6	17	2
Total number	14	14	20	17	37	8

**Table 2.4** Comparison in the ratio of persons who could retrieve failure modes caused by damage/fracture of materials

Participant	The number of damage/fracture mechanisms	
	FMEA	Modified DRBFM
No.1	0	0
No.2	0	2
No.3	1	3
No.4	1	1
No.5	1	6
No.6	3	2
No.7	0	1
No.8	0	1
No.9	2	3
No.10	3	5
No.11	4	4
No.12	0	2
No.13	1	1
No.14	0	0
No.15	1	4
No.16	0	3
Ratio of person who retrieved failure modes by damage/fracture of materials	56.3	87.5

**Table 2.5** Retrieved failure modes caused by damage/fracture of materials

Functions	Failure modes	Mechanisms	Evaluation method
Transmission	Transmittance reduction	Generation of defects by long-term irradiation of laser	FMEA
Transmission	Transmittance reduction	Brittle fracture	FMEA
Transmission	Transmittance reduction	Generation of defects by long-term irradiation of laser beyond assumed	Modified DRBFM
Transmission	Transmittance reduction	Brittle fracture due to overstress from holding mechanism	Modified DRBFM
Transmission	Lens fracture	Oxidative degradation due to heat	FMEA
Transmission	Lens fracture	Cracking due to deterioration	FMEA
Transmission	Deterioration of lens (materials)	Ageing	Modified DRBFM
Transmission	Deterioration of lens (materials)	Fatigue due to repeated vibration	Modified DRBFM

Table 2.5 Retrieved failure modes caused by damage/fracture of materials (Continued)			
Functions	Failure modes	Mechanisms	Evaluation method
Optical axis holding	Optical axis misalignment	The table is deformed at high temperatures and the optical axis is shifted	FMEA
Optical axis holding	Optical axis misalignment	The lens breaks off due to the residual stress of the lens	FMEA
Optical axis holding	Optical axis misalignment	The table is distorted at high temperatures, the lens is displaced from the table, and the optical axis is shifted	Modified DRBFM
Optical axis holding	Optical axis misalignment	Fatigue failure due to shock and vibration during operation	Modified DRBFM
Optical axis holding	Optical axis misalignment	Lens dropout because of fatigue failure due to deterioration of holder materials	Modified DRBFM
Optical axis holding	Optical axis misalignment	Fatigue fracture	Modified DRBFM
Optical axis holding	Deformation	Exceeding product life	Modified DRBFM
Optical axis holding	Lens tilt	Corrosion at high temperature	Modified DRBFM

**Table 2.6** Rationality of relations from design specifications, damage/fracture mechanisms and failure modes for both methods

No.	Number of answers		Number of rational answers		Number of irrational answers		Ratio of rational answers in total[%]	
	FMEA	Modified DRBFM	FMEA	Modified DRBFM	FMEA	Modified DRBFM	FMEA	Modified DRBFM
1	13	7	7	7	6	0	53.8	100.0
2	14	6	11	6	3	0	78.6	100.0
3	6	11	6	10	6	1	100.0	90.9
4	14	8	11	6	3	2	78.6	75.0
5	8	7	6	7	2	0	75.0	100.0
6	9	4	7	4	2	0	77.8	100.0
7	5	7	0	5	5	2	0.0	71.4
8	6	6	4	3	2	3	66.7	50.0
9	6	5	3	4	3	1	50.0	80.0
10	8	7	4	4	4	3	50.0	57.1
11	6	8	4	8	2	0	66.7	100.0
12	5	5	4	4	1	1	80.0	80.0
13	8	4	5	4	3	0	62.5	100.0
14	10	3	5	3	5	0	50.0	100.0
15	6	8	5	5	1	3	83.3	62.5
16	7	6	5	6	2	0	71.4	100.0
mean	7.9	6.3	5.3	5.3	2.9	1.1	66.0	84.5
S.D.	3.1	2.0	2.7	1.9	1.6	1.2	22.4	17.7

## 2.4 考察

製品の構想設計段階から，材料の損傷/破壊に関する故障モード解析を実現する為，材料特性の変化に起因する故障モードを導出する修正 DRBFM を提案した．修正 DRBFM

は、材料特性の変化に起因する損傷/破壊メカニズムに起因する故障モードの決定に於いて、故障モード解析に熟練していないものの、実務経験が豊富な演習参加者を上手く支援した。この様な方法は、製造物責任を回避することや、様々な製品の品質・安全性・信頼性問題の予防や未然防止することに役立つ。

更に、表 2.5 の詳細な内容の合理性を分析し、設計仕様の変更、対応する損傷/破壊メカニズム、及び最終的な損傷/破壊モードが互いに合理的に関連しているかどうかを検証した。

#### 〈合理的なケース〉

設計仕様の変更：荷重値が増加

損傷/破壊メカニズム：疲労破壊

故障モード：破壊による光透過の損失

#### 〈不合理なケース〉

設計仕様の変更：温度が上昇

損傷/破壊メカニズム：破壊靱性の低下による脆性破壊

（工業材料の知識によると、破壊靱性は増加するが、周囲の温度が上昇する為に低下することは無い）

故障モード：破壊による光透過の損失

表 2.6 に示す様に、合理的/非合理的回答の数と、全ての回答に於ける合理的な回答の割合が示された。更に、一部の演習参加者は合理的な回答の割合が 0%であったが、修正 DRBFM は、材料の損傷/破壊メカニズムを決定するプロセスであった為、この様な低い比率を示した演習参加者は 2 人と少なかった。修正 DRBFM は、故障モード解析者の知識や経験に関係なく、材料の損傷/破壊メカニズムに関連する故障モードを決定する際に故障モード解析者を効果的に支援できる。これは、製品設計の初期段階で起こり得る破壊又は設計変更を減らすのに役立つ。

これらの結果から，提案手法には，以下の工業的価値があると考えられる．

〈材料・部品製造事業者に対する工業的価値〉

修正 DRBFM を使用すると，材料に関する故障モード解析が実施できる為，製造事業者が保証する材料安全性評価データを完成品製造事業者等に提供できる．完成品製造事業者等は，材料安全性評価データに基づいて，製品の構想設計段階から安全性の高い材料や部品を選択することができ，安全設計に関連するコストの抑制が期待できる．

〈完成品製造事業者に対する工業的価値〉

修正 DRBFM を使用すると，製品に組み込まれたモジュール品や部品の原材料による故障モード解析を事前に実施することが可能となる．製品の構想設計段階から高い安全性を確保する安全設計の遂行により，より安全な製品を市場に投入できる．更に，材料の損傷/破壊に関する知識や経験が殆ど無い設計者等を対象として，修正 DRBFM と従来故障モード解析手法を用いた比較演習を実施すると関連知識の習得やスキルの向上に繋がる．

この研究の貢献は，次の通りである．

- 1. DRBFM にリスクアセスメントに於ける制限仕様の概念を導入し，DRBFM の論理を拡張したこと．
- 2. 設計仕様の設計変更/環境変化と材料に関する損傷/破壊モードの対応付けを可能にしたこと．
- 3. 設計仕様の設計変更/環境変化と材料に関する損傷/破壊モードの関係に基づいて，製品の構想設計段階から，製品（部品，モジュール品等も含む）の原材料に起因する故障モードを特定（予測）する故障モード解析（リスクアセスメント）手法を構築したこと．
- 4. 故障モード解析者の材料の損傷/破壊に関する知識や経験に関係なく，材料に起

因する損傷/破壊メカニズム（材料に起因する損傷/破壊メカニズムの体系的リストの作成を含む）に関連する故障モードの判別の効果的な支援を可能にしたこと。

修正 DRBFM は、設計仕様の設計変更/環境変化と材料の損傷/破壊モードを対応付け、材料の損傷/破壊に関する故障モードの論理的な導出を可能にする。このことは、1.3.7 項で述べた課題 1 が解決されたことを意味し、修正 DRBFM の実践により、製品の構想設計段階から材料に関する故障モード解析が可能となった。

修正 DRBFM のプロセスでは、設計仕様の設計変更/環境変化の検討に関連する可能性のあるコンポーネントから特定の材料起因の損傷/破壊メカニズムを選択する必要がある場合、故障モード解析者の知識や経験に部分的に依存するプロセスが含まれている。この課題を解決する為には、例えば、機械学習等を用いて材料の損傷/破壊メカニズムを、より論理的且つ自動的に決定する方法の構築が考えられる。この研究の事例研究では、製品の機能として、材料の光学特性のみに焦点を当てているが、提案された方法は単一機能の場合に限定されない。多機能のコンポーネントの事例も検討する必要がある。

## 2.5 まとめ

本章では、DRBFM にリスクアセスメントに於ける制限仕様の概念を導入し、DRBFM の論理を拡張することによって、1.3.7 項にて述べた課題 1 を解決する、設計変更/環境変化と材料の損傷/破壊メカニズムとの対応を効果的に導出する故障モード解析手法（修正 DRBFM）を提案した。

仮想的なレーザ照射システムを備えた対物レンズを対象に、FMEA 及び修正 DRBFM を使用した故障モード解析評価比較演習（合計 16 人参加）を実施し、修正 DRBFM の有効性を検証した。故障モード解析比較演習結果の検証の結果、FMEA と比較して、修正 DRBFM の方が材料に起因する故障モード解析手法として有意であることを確認した。

修正 DRBFM の構築により、1.3.7 項で述べた課題 1 が解決された。



## Chapter 3 設計偏差法及び機械学習手法を用いた 故障モード判別分析手法の提案

### 3.1 はじめに

機能性材料は、レンズ・プリズム・センサー等の機能性部品の原料として広く使用されている。それらの物理的・化学的・機械的特性はコンポーネントの不可欠な機能であるが、材料の特性は、製造プロセスに於いては殆どチェックされない。誤った選択、意図しない変更又は劣化による材料特性の意図しない変化は、多くの場合、コンポーネント材料の損傷/破壊によるコンポーネントの故障を引き起こす[4]。コンポーネントの故障を予防的に防止する為には、材料の損傷/破壊モードによって引き起こされる機能コンポーネントの故障モードを包括的に決定する必要がある。応力強度モデル（SSM）の構造解析[64, 65, 69]は、通常、構造コンポーネント（伝達要素や耐力要素等）に対してのみ実行される。センサー等の機能部品については、信頼性試験のみが可能である為、損傷/破壊メカニズムに基づいて損傷/破壊モードは考慮されない。特定の試験環境でコンポーネントの機能が失われるかどうか試験される。信頼性試験の試験条件が保守的でない場合、部品の使用環境が変更された時に部品の損傷/破損が引き起こされる可能性がある。従って、損傷/破壊に関連する故障モードを予測する為の特定の解析手法が不可欠である。

従来故障モード解析手法には、HAZOP[22, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 106]、FMEA[22, 26, 28, 29, 66]、FTA[22, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 47]が含まれる。これらの方法は、材料の損傷/破壊によって引き起こされる故障モードを特定することを目的としていなかった。故障モードの決定プロセス中に材料の損傷/破壊を決定するための明確な手順はまだ開発されていない。DRBFM[64, 65, 69]は、設計パラメータ又は環境条件の可能な偏差による材料の損傷/破壊モードによって引き起こされる故障モードを決定する為に提案された。DRBFMプロセスの参加者には、材料の特定の損傷/破壊モードが提供されるが、設計仕様の偏差の可能性から、材料の損傷/破壊モード及びコンポーネントの結果として生じる故障モー

ドまでの合理的な決定プロセスは、構造的に調整されていない。

岡部と大塚は、参加者が設計又は環境パラメータの可能な偏差、応力-強度モデルの関連する劣化パターン、及び関連する材料の損傷/破壊モードを決定する様に導くことができる修正 DRBFM プロセスを提案した [71, 96]. 彼らの事例研究は、修正 DRBFM グループの参加者が、材料の損傷/破壊によって引き起こされる故障モードの数を大幅に増やすことができることを示した [71, 96]. 修正 DRBFM を使用しても、設計/環境条件の偏差パターンを考慮し、SSM の劣化に関連する固有の故障モードは、通常、複数の候補が考慮される為に決定できない。更に、専門家の判断がなければ、設計/環境条件の偏差パターンの誤った選択や SSM の状態の悪化から不合理な故障モードを決定するリスクが依然として残っている。故障モード解析結果の品質を向上させる為、故障モード解析結果の検証方法を実装する必要がある。事例研究では、FMEA は実際の故障モードの 17 % を特定できなかったが、これらはリスクが低いことが示唆された [28]. 検証は、故障モードとそのメカニズム、それらの重要度、及び対策の内容を決定する為に実施する必要がある。最も重要な要素は、故障モードとそのメカニズムの決定を検証することである。これは、対策の最終的な品質と、製品の故障を減らすことによる最終的な効果を決定できる為である [64, 65, 69]. 但し、その様な検証方法はまだ確立されていない。

機械学習手法は、故障モードとそのメカニズムの決定に関する検証の強力なツールになる。ファジー集合論は、ファジー IF-THEN ルールの統計分析に基づいてリスク優先度を推定する為にうまく適用された [107, 108, 109, 110]. Guimaraes らは、PWR (Pressurized Water Reactor) プラントの一次ループの過渡的挙動における RPN (Region Proposal Network) の定量化にファジー集合論を適用した [111, 112]. Wan らは、デンプスターシェーファー理論 (DST: Dempster-Shafer Theory) と理想解との類似性による選好の順序付け手法 (TOPSIS: Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) を提案した。TOPSIS 法は、様々な専門家の意見のデータセットに対する RPN の最尤推定を決定できる。HAZOP データで発生する可能性のあるエラーを診断するためのコンピューター支援システムも報告された [55]. Palmer と Chung は、バッチシステムの動作をチェックするために HAZOP 分析で起こりうる偏差を自動的に適用する CHECKOP ツールも提案した [53]. 故障木の現象の考

えられる原因を特定するシステムも提案された [39, 44]. 物理量次元インデクシングは, 故障木接続のエラーを提案し, 故障現象の次元解析によって考えられる原因又はイベントを提案する為に適用された [36, 42, 43]. サポートベクターマシン (SVM: Support Vector Machine) [77, 78, 79, 80, 81, 113] は, コンポーネントの故障状態を診断する為, 様々な種類のデータセットに適用されている. 一方, 参加者が統計的学習プロセスの複雑なプロセスに従うことは困難である. 提案された故障モードが参加者にとって懐疑的である場合, 専門家の考慮無しに認定することはできない. 従来のファジーアプローチは, RPN の定量化/検証のみを目的としている. 物理量次元インデクシングは, FTA プロセスについて説明されており, 故障モードとそのメカニズムの決定における検証プロセスに直接適用することはできない. その場合, 機械学習方法に定式化でき, 参加者の故障モード解析結果を合理的に読み取ることができる, 明示的に論理的な方法が必要である. この様なソリューションは, 設計/環境変数の偏差, 関連する応力強度係数の劣化, 及び関連する材料の損傷/破壊モード間の関連性を用いる疎行列式によって定式化できる [96]. 著者の知る限り, 材料の損傷/破壊によって引き起こされる故障モードの決定プロセスとその検証プロセスの明示的な手順はまだ開発されていない.

本章では, 1.3.7 項で述べた従来故障モード解析手法を材料に関する故障モード解析に適用する場合の課題「製品に組み込まれる原材料の機能に着目した材料の損傷/破壊に関する故障モードを解析 (予測) する故障モード解析手法が構築されていない (課題 2)」, 及び 1.5 項で述べた「DRBFM に精通していないあるいは材料の損傷/破壊に関する知識や経験が不足している設計者等が修正 DRBFM を実施する場合, 不合理的・非論理的な結果となる可能性がある」という問題を解決する為, 材料に関する故障モード解析 (リスクアセスメント) 手法として, 「設計偏差法 (DDM : Design Deviation Method)」を提案する. 設計偏差法を仮想的なレーザ治療システムに適用し, その有効性を FMEA 及び DRBFM との故障モード解析比較演習によって検証する.

更に, 機械学習手法の一種である SVM を用いた故障モード判別分析手法を提案する. SVM を用いた故障モード判別分析手法は, 設計偏差/SSM 偏差が疎行列によって表現されることに着目し, SVM の多クラス分類によって故障モード解析結果の故障モードの妥

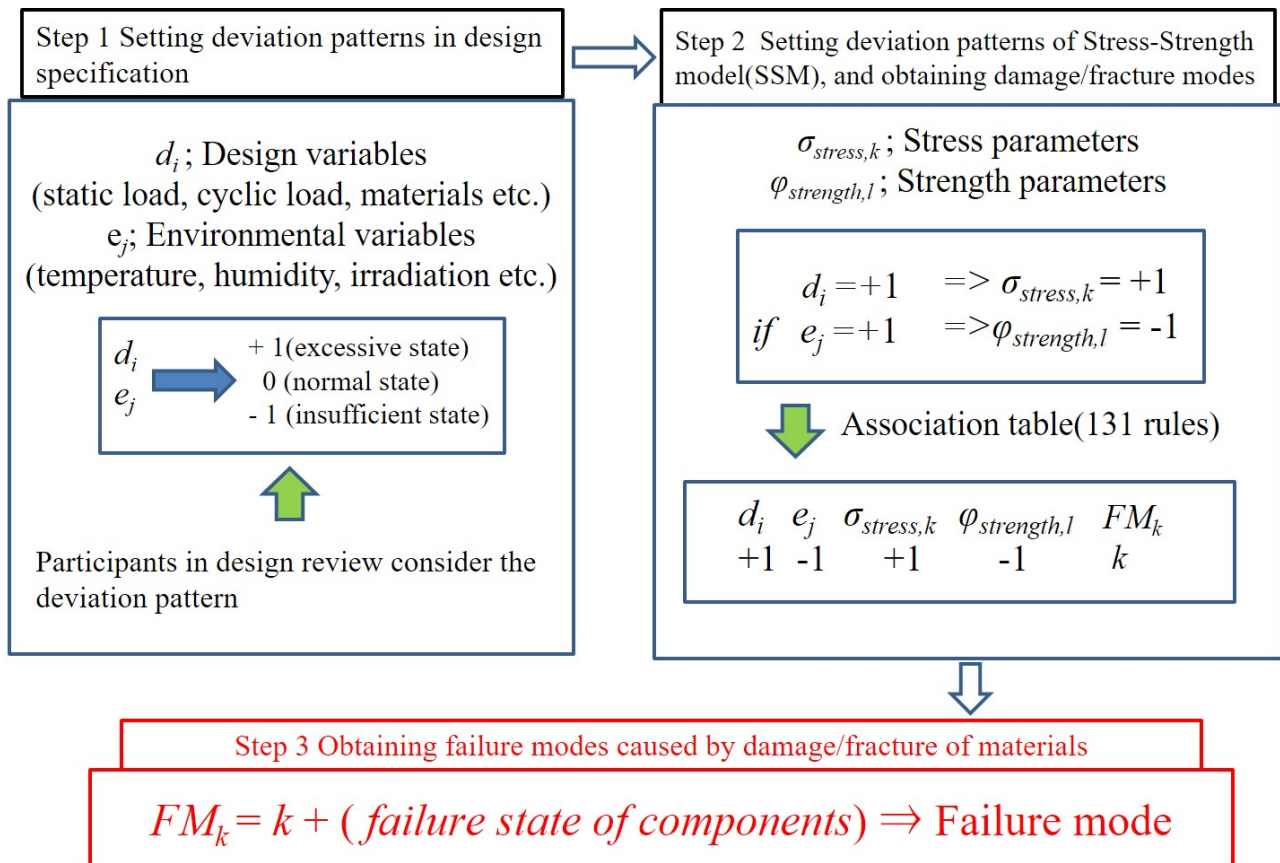
当性を判定し，材料の損傷/破壊に関する知識や経験が少ない設計者等が設計偏差法を用いて故障モード解析を実施する場合，その解析を支援し得る．

SVMを用いた故障モード判別分析が，材料に関する知識・経験が不足している故障モード解析者による合理的な材料起因の損傷/破壊（故障）モードの選定を支援できるかどうかについて，その有効性を，設計偏差法による故障モード解析結果への適用を通じて検証する．

## 3.2 設計偏差法（Design Deviation Method）

1.3.7 項に於いて，従来故障モード解析手法を材料に関する故障モード解析に適用する場合の課題を解決する為，製品に組み込まれる原材料の機能に着目した材料の損傷/破壊に関する故障モードを解析（予測）する故障モード解析手法を構築する必要があると述べた．本章では製品に組み込まれる原材料の機能に着目した材料の損傷/破壊に関する故障モードを解析（予測）する故障モード解析手法「設計偏差法 [95, 96, 97, 98, 99]」を提案する．

設計偏差法は，設計仕様に於ける設計/環境変数の偏差である設計偏差と，SSM（応力/環境変数）偏差を対応付け，設計偏差に対応する材料の損傷/破壊モード及びそのメカニズムを決定し，当該損傷・破壊モードとコンポーネントの故障状態から材料起因の故障モードを導出する故障モード解析手法である．次に，設計偏差法の詳細フローについて説明する．図 3.1 は，設計偏差法のフローチャートを示している [95]．



**Fig. 3.1** Flow chart of proposed design deviation method for modeling failure modes

設計偏差法は、次の3つのステップから成る。

- ステップ1: 「設計偏差パターンの導出」
- ステップ2: 「SSM 偏差パターンの導出」
- ステップ3: 「材料の損傷/破壊に関する故障モードの導出」

ステップ1: 「設計偏差パターンの導出」

本手順は、以下の関係式（疎行列）に基づき、設計偏差の各変数に偏差を与えることで設計偏差パターンを導出する。

$D = \{\mathbf{d}_i, \mathbf{e}_j\}$  ; Design specifications

$$\mathbf{d}_i, \mathbf{e}_j \in \{-1, 0, +1\} \dots \dots \dots (3.1)$$

$\mathbf{d}_i$  : Design variables as design specifications

$$= [0, 0, \dots, -1, 0, \dots, 1](1 \times i)\text{vector}$$

$\mathbf{e}_j$  : Environmental variables as design specifications

$$= [0, 0, \dots, 1, -1, \dots, 1](1 \times j)\text{vector}$$

ここで、条件（0）は各変数の正常な状態、条件（-1）は各変数の不十分（過少）な状態、条件（+1）は各変数の過剰（過大）な状態を示す。ここで疎行列として、「-1」、「0」、「+1」の数値を用いているが、これは後述する SVM を用いた故障モード判別分析に於いて、当該数字を取り扱うことによって、処理がし易い為を用いている。

表 3.1 は、典型的な設計偏差の例を示している。

**Table 3.1** Deviation patterns for the design specifications and its sparse matrix expression

Design specifications	Design/Environmental variables	Deviation patterns		
		Excessive(+1)	Normal range(0)	Insufficient(-1)
Design variables ( $d_i$ )	Load amplitude	Large(+1)	Normal(0)	Small(-1)
	Magnitude of static load	Large(+1)	Normal(0)	Small(-1)
	Material	Major change(+1)	Normal(0)	Minor change(+1)
	Shape	Major change(+1)	Normal(0)	Minor change(+1)
	Current/Voltage	Large(+1)	Normal(0)	Small(-1)
	Weight	Large(+1)	Normal(0)	Small(-1)
	Processing Method	Major change(+1)	Normal(0)	Minor change(-1)
	Assembly method	Major change(+1)	Normal(0)	Minor change(-1)
	Test method	Major change(+1)	Normal(0)	Minor change(-1)
Environmental variables ( $e_j$ )	Temperature	High(+1)	Normal(0)	Low(-1)
	Humidity	High(+1)	Normal(0)	Low(-1)
	Vibration	Large(+1)	Normal(0)	Small(-1)
	Atomosphere pressure	Large(+1)	Normal(0)	Small(-1)
	Atomosphere gas type	Large(+1)	Normal(0)	Small(-1)
	Ultraviolet/Infrared/ Radiation	High(+1)	Normal(0)	Low(-1)
	Static electricity	High(+1)	Normal(0)	Low(-1)
	Electromagnetic wave/Noise	High(+1)	Normal(0)	Low(-1)
	Flow rate	High(+1)	Normal(0)	Low(-1)

## ステップ2. SSM 偏差パターンの導出

本手順は、以下の関係式（疎行列）に基づき、SSM 偏差の変数に偏差を与えることで SSM 偏差パターンを導出する。

$$S = \{\sigma_{\text{stress},k}, \varphi_{\text{strength},l}\} ; \text{Stress-Strength model}$$

$$\sigma_{\text{stress},k}, \varphi_{\text{strength},l} \in \{-1, 0, +1\} \dots\dots\dots (3.2)$$

$\sigma_{\text{stress},k}$  : Stress factor variables

$$= [0, 0, \dots, -1, 0, \dots, 1](1 \times k)\text{vector}$$

$\varphi_{\text{strength},l}$  : Strength factor variables

$$= [0, 0, \dots, 1, -1, \dots, 1](1 \times l)\text{vector}$$

ここで、 $\sigma_{\text{stress},k}$  は SSM の応力変数、 $\varphi_{\text{strength},l}$  は SSM の強度変数であり、条件（0：通常の状態）、条件（-1：不十分（過少）な状態）、または条件（+1：過剰（過大）な状態）の何れかを取り得る。

表 3.2 は、SSM 偏差パターンと材料の損傷/破壊モードの対応関係の例を示す。設計偏差パターンと SSM 偏差パターンの対応関係から、表 3.3 が示している様に、特定の材料に関する損傷/破壊モードを決定できる。

## ステップ3. 材料の損傷/破壊に関する故障モードの導出

ステップ2から得られた材料の損傷/破壊モードと（対象材料を原材料として使用することが想定されるコンポーネントの）故障状態を組合せることによって、関連する故障モードを導出する。表 3.3 は、設計偏差パターンと SSM 偏差パターン、並びに材料の損傷/破壊モードとの関係の例を示している。表 3.3 を使用すると、専門的知識が無くても、故障モード解析者は、合理的に設計偏差に対応する材料の損傷/破壊モードを決定できる。

**Table 3.2** Example of the deviation types for the stress/strength factors and the corresponding damage/fracture modes of the materials

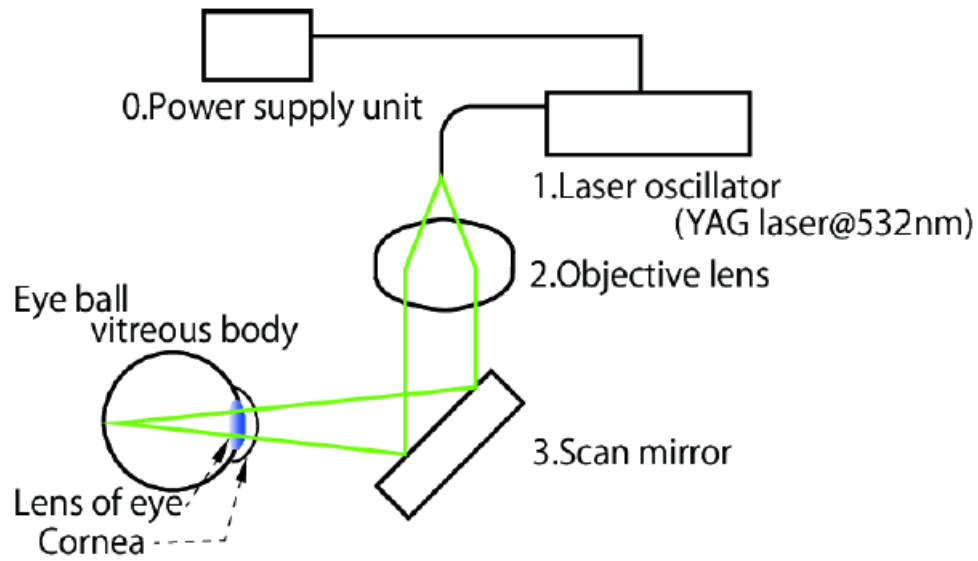
Stress-Strength model variables		Damage modes ( $FM_k$ )	Fracture modes ( $FM_k$ )
Stress factors ( $\sigma_{stress,k}$ )	Strength factors ( $\varphi_{strength,l}$ )		
Tensile stress/ Residual stress	Deformation	Deformation	Buckling
Compressive stress	Compressive strength	Deformation	Buckling
Stress intensity factor	Fracture toughness	Crack	Stress corrosion cracking
Stress amplitude	Fatigue strength	Crack	(Corrosion) fatigue fracture
Thermal stress/ Average stress	Creep limit	Creep void	Creep fracture
Thermal stress/ Average stress	Fatigue strength	Crack	(Corrosion) fatigue fracture
Pressure	Tensile strength	Plastic deformation	Ductile fracture
Pressure	Fracture toughness	Crack	Stress corrosion cracking
Pressure	Fatigue strength	Fatigue crack	(Corrosion) fatigue fracture
Pressure	Tensile strength/ Compressive strength	Wear/ Erosion	Penetration
Object temperature	Melting point	Deformation	Melting
Ambient temperature	Melting point	Deformation	Melting
Ambient temperature	Flash point	Combustion	Explosion
Solution concentration	Limiting solution	Oxidation discoloration concentration	Dissolution
Potential difference insolution	Corrosion potential	Corrosion potential	Dissolution
Electric load	Dielectric strength	Installation deterioration	Dielectric breakdown
Dose	Marginal dose	Irradiation embrittlement	(Irradiation) brittle fracture
Particle size	Critical particle size	Damage to living tissue	Death of living tissue

**Table 3.3** Example of the association table between the deviation patterns with the damage/fracture modes

Deviations of design variables ( $d_i, e_j$ )	Deviations of SSM stress factors ( $\sigma_{stress,k}$ )	Deviations of SSM strength factors ( $\varphi_{strength,l}$ )	Damage/Fracture modes ( $FM_k$ )
High temperature (+1)	High object temperature (+1)	Lower melting point (-1)	Deformation (Damage mode) Dissolution (Fracture mode)
Low temperature (-1)	Stress intensity factor (0)	Lower fracture toughness (-1)	Crack (Damage mode) Brittle fracture (Fracture mode)
High humidity (+1)	High potential (+1)	Lower corrosion potential (-1)	Corrosion (Damage mode) Dissolution (Fracture mode)
Large vibration (+1)	Large stress amplitude (+1)	Lower fatigue strength (-1)	Crack(Damage mode) (Corrosion) fatigue fracture(Fracture mode)
Large repetitive load (+1)	Large tensile stress/ residual stress (+1)	Lower tensile strength (-1)	Deformation (Damage mode) Buckling (Fracture mode)
Large vibration (+1)  Large cyclic load (+1)	Large stress amplitude (+1)	Lower fatigue strength (-1)	Crack(Damage mode) (Corrosion) fatigue fracture(Fracture mode)
Large magnitude of static load (+1)  Large loading speed (+1)	Large stress amplitude (+1)	Fatigue strength (0)	Crack(Damage mode) (Corrosion) fatigue fracture(Fracture mode)
Low temperature (-1)  Low Humidity (-1)	Stress intensity factor (0)	Lower fracture toughness (-1)	Crack(Damage mode)  Brittle fracture (Fracture mode)
Major change of material (+1)  Major change of shape (+1)	Large residual stress (+1)	Tensile strength (0)	Deformation (Damage mode)  Buckling (Fracture mode)

### 3.3 仮想的なレーザー治療装置を対象とした故障モード解析比較演習

図 3.2 に示す仮想的なレーザー治療装置（0. 電源ユニット，1. レーザー発振器，2. 対物レンズ，3. スキャンミラー）を対象に，故障モード解析比較演習を実施した．演習参加者は 3 つのグループに分けた（グループ 1：FMEA，グループ 2：DRBFM，グループ 3：設計偏差法）．開発・設計・品質保証部門から合計 21 人が比較演習に参加した．表 3.4 に示す様に，3 つの方法の効果に関するアンケートも実施した．各質問は，「良くない」から「良い」までの 5 段階の範囲とした．平均スコアは，アンケートの回答を 1 から 5 までの範囲で評価することで得られた（1：最低～5：最高）．質問の内容は，修正 DRBFM の比較演習内容 [71] に基づいて選定された．比較演習は 2018 年 2 月 22 日から 3 月 2 日まで行ない，各グループの演習時間を 150 分とした．演習開始前に，「演習の構成」，「協力頂きたい内容」，「演習の目的」，「前提となる知識」，「各手法（FMEA・DRBFM・設計偏差法）の概要と実施手順」，「演習の流れ」について，全ての参加者に説明した．また全ての参加者に対して，本比較演習のデータが本研究に使用されることを予め伝え，合意を得ている．図 3.2 の表は，比較演習の内容を示している．表 3.5 は，演習参加者の属性として，演習参加者の学生時代の専攻と実務経験の例を示している．



**Fig. 3.2** System of failure mode analysis target

**Table 3.4** Questionnaire list of subjects interview

Questionnaire No.	Questionnaire items
Q1	Does the exercise content seem to be useful for your work?
Q2	Is it possible to practice these exercises in your workplace?
Q3	Can you recommend the exercise content that would be used in the workplace?
Q4	Did you understand the content of the exercise?
Q5	Were the exercise examples appropriate?

**Table 3.5** The information for each person's major and work experience for each exercise group

Group name	Major	Work experience
DDM	Chemistry,	Product design,
FMEA	Mechanical engineering,	Production technology
DRBFM	Physics etc.	Quality assurance etc.

### 3.3.1 FMEA による故障モード解析

本比較演習のFMEAは、次の9つのステップから成る。

- ステップ1. 故障モード解析の対象項目と必要な機能の決定
- ステップ2. 想定される故障モードの選択
- ステップ3. 故障モードの影響とその影響度の評価
- ステップ4. 故障モードの原因の想定
- ステップ5. 故障モードの発生頻度の想定
- ステップ6. 故障モードによる損害の重大度の想定
- ステップ7. 故障モードのリスクレベルの決定
- ステップ8. 故障モードのリスク低減方策の決定
- ステップ9. リスク低減方策実施後の影響評価

#### ステップ1. 故障モード解析の対象項目と必要な機能の決定

このステップでは、設計仕様に基づいて、故障モード解析の対象項目と必要な機能を決定する。

#### ステップ2. 想定される故障モードの選択

このステップでは、対象項目とステップ1で決定された必要な機能に基づいて、考えられる故障モードを選択する。

#### ステップ3. 故障モードの影響とその影響度の評価

このステップでは、故障モードの影響とその影響度を評価する。

#### ステップ4. 故障モードの原因の推定

このステップでは，故障モードの原因を想定する．

#### ステップ5. 故障モードの発生頻度の想定

このステップでは，故障モードの発生頻度を想定する．

#### ステップ6. 故障モードによって引き起こされる故障の重大度の評価

このステップでは，故障モードによって引き起こされる故障の重大度を評価する．

#### ステップ7. 故障モードのリスクレベルの決定

このステップでは，故障モードのリスクレベルを，リスクマトリクス等を用いて決定する．

#### ステップ8. 故障モードのリスク低減方策の決定

このステップでは，故障モードのリスクを低減するための対策を決定する．

#### ステップ9. リスク低減方策実施後の影響評価

このステップでは，リスク低減方策を実施後の影響を評価する．

### 3.3.2 DRBFM による故障モード解析

本比較演習の DRBFM は，次の 10 のステップから成る．

- ステップ1. 故障モード解析の対象項目と必要な機能の決定
- ステップ2. 想定される設計変更と環境変化の選択
- ステップ3. 設計変更と環境変化からの故障モードの決定

- ステップ4. 故障モードのメカニズムの決定
- ステップ5. 故障モードの原因の推定
- ステップ6. 故障モードの発生の想定
- ステップ7. 故障モードによる損傷の重大度評価
- ステップ8. 故障モードのリスクレベルの決定
- ステップ9. 故障モードのリスク低減方策の決定
- ステップ10. リスク低減策を実施後の影響評価

#### ステップ1. 故障モード解析の対象項目と必要な機能の決定

このステップでは、製品の仕様などに基づいて、故障モード解析の対象項目と必要な機能を決定する。

#### ステップ2. 想定される設計変更と環境変化の選択

このステップでは、対象項目とステップ1で決定された必要な機能に基づいて、想定される設計変更と環境変化を選択する。

#### ステップ3. 設計変更と環境変化からの故障モードの決定

このステップでは、設計変更と環境変化から発生する故障モードを決定する。

#### ステップ4. 故障モードのメカニズムの決定

このステップでは、故障モードのメカニズムを決定する。

#### ステップ5. 故障モードの原因の想定

このステップでは、故障モードの原因を想定する。

#### ステップ6. 故障モードの発生の想定

このステップでは，故障モードの発生を想定する．

#### ステップ7. 故障モードによる損害の重大度評価

このステップでは，故障モードによって引き起こされる損害の重大度を評価する．

#### ステップ8. 故障モードのリスクレベルの決定

このステップでは，故障モードのリスクレベルを，リスクマトリクス等を使用して決定する．

#### ステップ9. 故障モードのリスク低減方策の決定

このステップでは，故障モードのリスク低減方策を決定する．

#### ステップ10. リスク低減方策実施後の影響評価

このステップでは，リスク低減方策実施後の影響を評価する．

### 3.3.3 設計偏差法による故障モード解析

設計偏差法は，次の5つのステップから成る．

- ステップ1. 設計偏差パターンの導出
- ステップ2. SSM（応力/強度変数）偏差パターンの設定
- ステップ3. 設計/SSM 偏差パターン-材料の損傷/破壊モードの対応表作成
- ステップ4. 対応表から SSM 偏差パターンに関連する材料に関する損傷/破壊モードの選択

- ステップ5. 材料に関する損傷/破壊モードから関連故障モードの導出とそれらの評価

#### ステップ1. 設計偏差パターンの導出

本ステップでは，市場や他社製品等のマーケティング情報，過去製品の実績等を考慮した上で，当該製品の制限仕様に於ける設計偏差を，設計変数と環境変数の偏差パターンとして設定する．

#### ステップ2. SSM（応力/強度変数）偏差パターンの設定

本ステップでは，当該製品に組み込まれるモジュール品や部品等の原材料の機能に着目し，SSMに基づいて当該材料の応力/強度変数の偏差パターンを設定する．

#### ステップ3. 設計/SSM 偏差パターン-材料の損傷/破壊モードの対応表作成

本ステップでは，ステップ1で設定した設計偏差（設計/環境変数の偏差）パターンと，ステップ2で設定したSSM偏差（応力/強度変数の偏差）パターンの情報を元に（2）式の関係を用いて，表3.3に示す設計/SSM偏差パターン-材料の損傷/破壊モードを作成する．

この対応表を作成することで，SSM偏差パターンを介して，設計偏差パターンと材料の損傷/破壊モードが対応付けられる．

#### ステップ4. 対応表からSSM偏差パターンに起因する材料に関する損傷/破壊モードの選択

本ステップでは，ステップ3で作成した対応表からSSM偏差パターンに関連する材料に関する損傷/破壊モードを選択する．

#### ステップ5. 材料に関する損傷/破壊モードから関連故障モードの導出とそれらの評価

本ステップでは，ステップ4で選択した材料に関する損傷/破壊モードと当該材料を，原材料として組み込まれる製品の故障状態を組合せることによって，関連故障モードを導出する．そして導出した材料の損傷/破壊に関する故障モードについて，リスクマトリクス等を用いて故障モード解析を実施する．

### 3.4 SVMを用いた故障モード判別分析

SVMを用いた故障モード判別分析 [97, 98, 99] は、次の5つのステップから成る。

- ステップ1. 学習データの準備
- ステップ2. 評価データの準備
- ステップ3. 学習データと評価データをSVMに取り込む
- ステップ4. SVMによって予測された材料の故障（損傷/破壊）モードを，故障モード解析結果の故障（損傷/破壊）モードと比較する
- ステップ5. 故障モード毎に Recall（検出率）と Precision（適合率）を算出し，当該故障モードの妥当性を評価する

#### ステップ1. 学習データの準備

SVMに取り込む為の学習データとして，材料強度学に関する文献や過去の故障モード解析結果等を参考に，設計偏差やSSM偏差を疎行列にて表現する。

#### ステップ2. 評価データの準備

SVMに取り込む為の評価データとして，故障モード解析結果から得られた設計偏差やSSM偏差を疎行列にて表現する。

#### ステップ3. 学習データと評価データをSVMに取り込む

ステップ1と2で準備した学習データと評価データをSVMに取り込み，故障モード判別分析を行う。

ステップ4. SVMによって予測された材料の故障（損傷/破壊）モードを，故障モード解析結果の故障（損傷/破壊）モードと比較する

SVMの故障モード判別分析結果を，故障モード解析結果（本研究の場合は設計偏差法

による故障モード解析結果)と比較する。

ステップ5. 故障モード毎に **Recall** (検出率) と **Precision** (適合率) を算出し, 当該故障モードの妥当性を評価する

**SVM** の故障モード判別分析結果の故障モード毎に, **Recall** と **Precision** を算出し, 故障モード解析者が選定した故障モードの妥当性を評価する。

学習データは, 材料強度学に関する文献[5]より選定した表3.3の合計131条件とした。評価データは, 設計偏差法の故障モード解析より得られた合計50の故障モード解析結果とした。**SVM** のプログラムとして, 統計解析言語 **R3.4.2** のマルチクラス判別 **SVM** 関数パッケージ **e1071**[113]を使用した。尚, 統計解析言語 **R3.4.2** に於ける **SVM** を用いた故障モード判別分析を実施するに当たって, 予めサンプルデータを用いた **SVM** の精度検証を実施している。

### 3.5 故障モード解析比較演習結果

表3.6は, **FMEA** による故障モード解析結果から得られた, 材料に起因する故障モードとその故障メカニズムの例を示している。表3.7は, **DRBFM** による故障モード解析結果から得られた, 材料に起因する故障モードとその故障メカニズムの例を示している。表3.8は, 設計偏差法による故障モード解析結果から得られた, 材料に起因する故障モードとその故障メカニズムの例を示している。表3.9は, **FMEA**, **DRBFM**, 設計偏差法の3つの方法を使用して決定された損傷/破壊モードを要約している。

故障モード解析者に於ける材料起因の故障メカニズムの回答率は, 設計偏差法による割合が86.3%と最も高かった。設計偏差法のグループは, 3つのグループの中で最も多くの故障モード(合計107件)を導出できた。多重比較検定では, 設計偏差法の評価者が, 他の方法の評価者よりも多くの故障モードを決定できることが明らかになった(設

計偏差法対 FMEA  $t = 4.51$  ( $p = 0.0011$ ), 設計偏差法対 DRBFM  $t = 5.49$  ( $p = 0.0009$ )), 対照的に, 表 3.10 として示している質問票の結果は, 設計偏差法の詳細なプロセスに評価者が従うことがやや困難であることを示唆した.

**Table 3.6** Example of the failure mode analysis results (material-induced) in FMEA

Functions	Failure modes	Failure mechanisms	Respondents
Supply power to the laser oscillator	Wiring resin deterioration	Heat generation of the power	No.1
Supply power to the laser oscillator	Destruction of housing ceramics	Falling	No.1
Generation of light	Wiring resin deterioration	Heat generation of the laser oscillator	No.1
Generation of light	Destruction of housing ceramics	Falling	No.1
Light transmitting	Light does not transmit	Split of the lenses	No.3
Light reflecting	Light does not reflect	Split of the lenses	No.3
Supply of laser light	Damage due to heat	Failure of the cooling system	No.5

**Table 3.7** Example of the failure mode analysis results (material-induced) in the DRBFM

Functions	Failure modes	Failure mechanisms	Respondents
Light emission	Deterioration of the mirrors	Aging deterioration	No.1
Supply voltage and current	Breakage of specification materials	Reduced temperature resistance	No.3
Exit the laser	Damage of the lenses and mirrors	Reduced laser resistance	No.3
Light transmitting	Split of the lenses	Decrease in strength	No.3
Supply voltage and current	Breakage of specification materials	Reduced temperature resistance	No.3
Energization	Short circuit due to wiring temperature rise	Unacceptable specification changes	No.5
Transmission	Lenses deteriorate and transmittance decreases	Aging deterioration	No.6

**Table 3.8** Example of the failure mode analysis results (material-induced) in the DDM

Functions	Failure modes	Failure mechanisms	Respondents
Vibration proof property	Loss of vibration isolation due to material damage	Brittle fracture	No.1
Insulation	Loss of insulation function due to fatigue failure	Fatigue fracture	No.2
Heat resistance	Decrease in heat resistance due to composition change	Component changes	No.3
Refraction	Light does not refract as designed	Heterogeneity of refractive index	No.4
Chemical resistance	Loss of chemical resistance due to material failure	Fatigue fracture	No.5
Load retention	Poor retention due to lens damage	Shock damage	No.6
Transmission	Non-uniform transmittance due to foreign matter mixed during manufacturing	Heterogeneity of transmittance	No.7

**Table 3.9** Determining the damage/fracture modes of the materials by the three methods

Respondents	Determining the damage/fracture of the materials		
	FMEA	DRBFM	Design deviation method
No.1	11	2	12
No.2	0	2	9
No.3	3	0	26
No.4	0	0	12
No.5	1	1	12
No.6	0	2	21
No.7	5	2	15
Percentage of participants [%] who could identify the mechanism	40.8	50.0	86.3*

\*  $p < 0.05$ **Table 3.10** Questionnaire results from the interview

Question No.	Questionnaire results		
	FMEA	DRBFM	Design deviation method
Q1	3.00 ± 0.76	4.00 ± 0.53	3.71 ± 0.70
Q2	3.29 ± 0.45	3.43 ± 0.90	3.00 ± 0.53
Q3	2.86 ± 0.83	3.86 ± 0.83	3.14 ± 0.83
Q4	4.14 ± 0.35	4.57 ± 0.49	3.57 ± 0.90
Q5	3.14 ± 1.12	3.57 ± 0.73	4.14 ± 0.83

### 3.6 SVMを用いた故障モード判別分析結果

表 3.11 は、LIBSVM により出力された故障モード判別分析結果を示している。表 3.12 は、SVM を用いた故障モードの判別分析結果を要約したものである。「Actual failure modes」の故障モードは、設計偏差法の故障モード解析結果（表 3.8）から決定され、「Actual failure modes」の故障モードは、SVM より予測（決定）された。図 3.3 は、表 3.12 の結果を元に計算した、機械学習の性能評価指標として検出率[%]（Recall：ある損傷・破壊モードを正しくその損傷・破壊モードとして検出できた割合）と適合率[%]（Precision：ある損傷・破壊モードと予測した結果のうち、その損傷・破壊モードである割合）を示している。

SVM により予測された故障モードのうち、「(Corrosion) fatigue fracture ((腐食)疲労破壊)」は、腐食環境下の元、材料に繰り返し負荷（応力）が印加されることで発生する破壊現象のことをいう。「(Irradiation) brittle fracture ((照射)脆性破壊)」は、紫外線等の照射により、材料内部の亀裂が進展し、脆性破壊に至る破壊現象のことをいう。「Stress corrosion cracking (応力腐食割れ)」は、腐食環境下の元、材料中の残留応力や材料に掛かる引張応力と腐食との相互作用によって発生する破壊現象のことをいう。「Melting (溶解)」は、材料の物体温度や周囲温度の上昇により、材料の融点を超えることで発生する破壊現象のことをいう。「Penetration (貫通)」は、材料への機械的な摩耗作用（浸食）と腐食との相互作用によって発生する破壊現象のことをいう。

（腐食）疲労破壊と（照射）脆性破壊では、検出率、適合率共に割合が 100%であったが、応力腐食割れでは、適合率が 100%であるのに対して、検出率が 77%と低い水準であった。これらの結果より、SVM を用いた故障モード判別分析は、正確な損傷/破壊モード（故障モード）の決定が可能であることを示唆した。

**Table 3.11** Failure mode discriminant analysis results by LIBSVM

Predicted	Actual		
	(Corrosion)_fatigue_ fracture	(Irradiation)_brittle_ fracture	Stress_corrosion_ cracking
(Corrosion)_fatigue_fracture	22	0	0
(Irradiation)_brittle_fracture	0	2	0
Stress_corrosion_cracking	0	0	20
Buckling	0	0	0
Creep_fracture	0	0	0
Death_of_living_tissue	0	0	0
Dielectric_breakdown	0	0	0
Dissolution	0	0	0
Ductile_fracture	0	0	0
Explosion	0	0	0
Melting	0	0	4
Penetration	0	0	2

**Table 3.12** Classification of the damage/fracture modes using the SVM

Predicted failure modes	Actual failure modes		
	(Corrosion) fatigue fracture	(Irradiation) brittle fracture	Stress corrosion cracking
(Corrosion) fatigue fracture	22	0	0
(Irradiation) brittle fracture	0	2	0
Stress corrosion cracking	0	0	20
Melting	0	0	4
Penetration	0	0	2

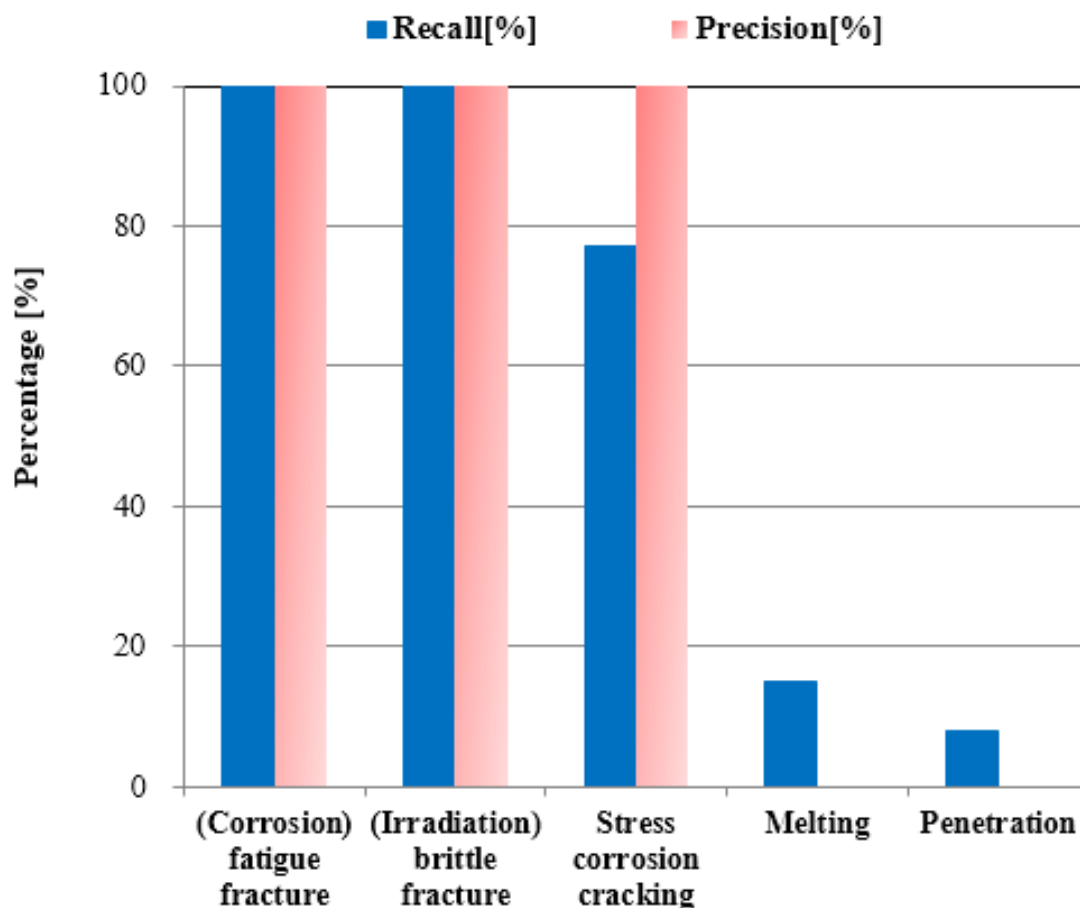


Fig. 3.3 Recall and precision for the classification

### 3.7 考察

仮想的なレーザ治療装置を対象とした故障モード解析比較演習（FMEA・DRBFM・設計偏差法）の実施結果より，設計偏差法のグループが材料の損傷/破壊によって引き起こされる故障モードの件数が最も多く，材料起因の故障モード解析手法として従来故障モード解析手法よりも適していることを実証した．比較演習参加者へのインタビューを通じて，比較演習参加者は，設計偏差法が最初はやや難しかったものの，有効な故障モード解析手法であることを示唆した．設計偏差法の構築により，1.3.7項で述べた課題2，及び1.5項で述べた修正DRBFMの問題が解決された．

SVMを用いた故障モード判別分析結果の合理性・有効性を検証する為，表3.12と図3.3の内容を分析した．応力腐食割れの精度は，6つの誤った分類（「融解」に関する2つと，「貫通」に関する4つ）の為に比較的低かった．2つの「融解」ケースに関して，実際の

評価では、設計偏差として「非常に高い圧力」が選択され、続いて「破壊靱性の低下」と「応力腐食割れ」が選択された。このような現象は非合理的であるが、表 3.3 の対応表には完全に一致するルールが無く、「破壊靱性」が部分的に一致する為、「融解」が選択された。更に、「貫通」の 4 つのケースでは、「応力腐食割れ」と共に、「高温」と「破壊靱性の低下」が SSM 偏差として選択された。材料の破壊靱性は温度と共に増加する為、「高温」と「破壊靱性の低下」との関係は非合理的である。このルールは表 3.3 にはリストされていなかった。SVM による予測では、高温のみに対応する「貫通」が示唆された。これらの誤った故障モードの判定は、SVM が設計偏差、SSM 偏差、及び対応する損傷/破壊モード間の誤った関連付けを決定できることを実証した。従って、設計偏差法と SVM を用いた故障モード判別分析は、材料強度と故障物理に関する十分な知識や経験を有していない故障モード解析者が、どの選択が間違っているかを示すことで材料に関する損傷/破壊モードを合理的に選択するのに役立つ。また「疲労破壊」と「脆性破壊」の検出率と適合率が共に 100% に達した理由は、単純な偏差パターンによるものである。

設計偏差法に於いて、特定の機能を有するコンポーネントの故障モードは、コンポーネントの原材料の損傷/破壊に起因するという概念に基づいているが、材料の損傷/破壊に関係しない故障モードは特定できない。設計偏差パターンと SSM 偏差パターン、及び材料の損傷/破壊モードを関連付ける対応表は単純なものである。3 つ以上の偏差の発生が同時に想定される場合、検証の精度が低下する可能性がある。これは今後の研究で考慮する必要がある。

設計偏差パターンから、特定の材料の損傷/破壊に関する故障モードを予測する SVM を用いた故障モード判別分析により、故障モード解析者は、合理的な材料の損傷/破壊モードを選択でき、最終的に材料の損傷/破壊に関する故障モードを決定できる。このような検証方法は、設計変更の可能性や、意図しない材料変更の場合の設計審査プロセスで効果的である。設計審査の品質向上により、製造工程での設計変更が回避され、製品故障の可能性が低減し、安全性と生産性の向上に貢献できる。

また SVM を用いた故障モード判別分析は、材料の損傷/破壊に関する知識や経験が浅い故障モード解析者の実施結果が不合理的な場合、その誤りを指摘することを検証した

が、SVMのデータ数が少なかった。学習データに於いては、対象とする材料の損傷/破壊に関する故障モードと設計偏差/SSM 偏差の対応関係を含め、なるべくシンプルな方がよいと考えられる。SVMのカーネル関数の選択やパラメータのチューニング等の影響によって、判別精度が低下する可能性が考えられる。評価データに於いては、材料の損傷/破壊に関する知識や経験が浅い故障モード解析者以外の専門家から取得した評価データを準備する必要がある。これらのデータをSVMモデルに入力し、適用されるSVMモデルのパラメータに対する詳細な調査やパラメータの最適化を通じて、より効果的な故障モード判別分析の実現が期待される。これは、今後の研究で検証する必要がある。

図 3.4 は、2 章の実験結果並びに本章の実験結果から得られた知見を基に作成した、故障モード解析初心者の力量（「材料の損傷/破壊に関する知識がある」、「故障モード解析の経験がある」の2種類）に応じて、どの提案手法（材料に関する故障モード解析手法）を使用すれば良いかを選択する為のフローチャートを示している。

本フローチャートでは、故障モード解析初心者が「材料の損傷/破壊に関する知識がある」、「故障モード解析の経験がある」場合に於いては、修正 DRBFM の使用を推奨する。「材料の損傷/破壊に関する知識がない」、「故障モード解析の経験がある」場合、あるいは「材料の損傷/破壊に関する知識がない」、「故障モード解析の経験がある」場合に於いては、設計偏差法の使用を推奨する。「材料の損傷/破壊に関する知識がない」、「故障モード解析の経験がない」場合に於いては、SVM を用いた故障モード判別分析の使用を推奨する。尚、本フローチャートでは、故障モード解析者の力量に応じた提案手法の使い分けを示しているが、故障モード解析を適用する状況も考慮する必要がある。修正 DRBFM を使用する場合には、使用実績のある材料を新規製品や改良製品に適用する場合での構想設計段階等が想定される。設計偏差法を使用する場合には、使用実績の少ない材料や新規（開発された）材料を製品に適用する場合での企画設計・構想設計段階等が想定される。SVM を用いた故障モード判別分析を使用する場合には、修正 DRBFM や設計偏差法の適用が想定される状況に加えて、新人や実務経験が少ない技術者の力量向上等の教育効果を目的とした適用や、材料の損傷/破壊に関する故障モード情報の蓄積を目的とした適用等が想定される。

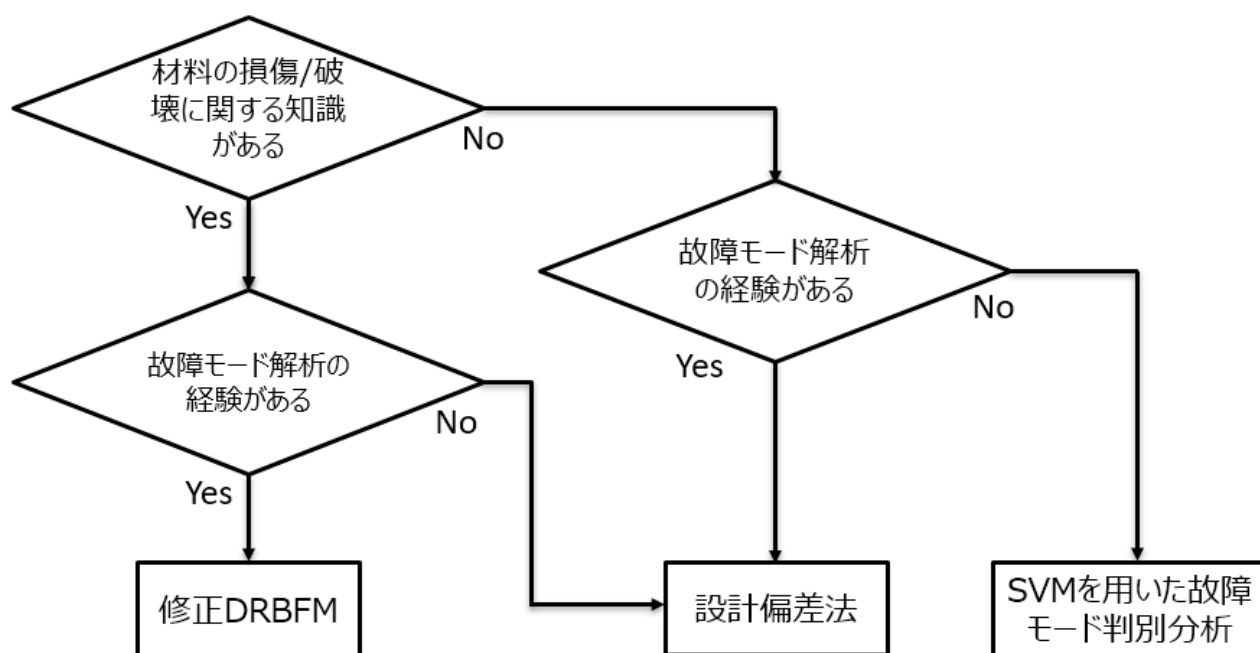


Fig. 3.4 Flowchart for selecting the proposed methods

### 3.8 まとめ

本章では，設計偏差，材料の損傷/破壊モード，材料の損傷/破壊に関する故障モードの3要素の合理的な関連付けを可能とする故障モード解析（リスクアセスメント）手法を構築した．設計偏差法を検証する為に実施された，仮想的なレーザ治療装置を対象とした故障モード解析比較演習の結果は，材料の損傷/破壊に関する知識や経験の少ない故障モード解析者が，従来故障モード解析手法を用いた故障モード解析者よりも多くの故障モードを決定できることを示した．設計偏差法の構築により，1.3.7項で述べた課題2及び1.5項で述べた修正DRBFMの問題が解決された．

SVMを用いた故障モード判別分析の結果より，材料の損傷/破壊に関する知識や経験の少ない故障モード解析者の評価結果が不合理な場合，その誤りを指摘することが示唆された．SVMを用いた故障モード判別分析は，設計変更の可能性や，意図しない材料変更の場合の設計審査プロセスで効果的である．設計審査の品質が向上し，製造工程での設計変更が回避され，製品故障の可能性が低減し，安全性と生産性の向上に貢献できる．



## Chapter 4 結論

### 4.1 結論

原材料・部品起因による製品事故が多発している状況を鑑みて、材料起因の製品事故を未然防止する為、従来故障モード解析手法を材料に関する故障モード解析に適用する場合の課題を、従来故障モード解析手法の特徴やそれらに関する研究調査結果を踏まえ、以下の内容で設定した。

- 課題1. 従来故障モード解析手法の論理を拡張し、材料に関する故障モード解析に適用できる故障モード解析手法が構築されていない
- 課題2. 製品に組み込まれる原材料の機能に着目した材料の損傷/破壊に関する故障モードを解析（予測）する故障モード解析手法が構築されていない

課題1を解決する為、2章に於いて、品質・安全性・信頼性問題未然防止手法として広く用いられている従来故障モード解析手法DRBFMに、リスクアセスメントに於ける制限仕様の概念を導入し、DRBFMの論理を拡張した「修正DRBFM」を提案した。修正DRBFMの有効性は、FMEA及びDRBFMとの故障モード解析比較演習にて検証した。検証結果から修正DRBFMが、材料特性に起因する損傷/破壊メカニズム及び故障モードの効果的な導出に有意であることが明らかとなった。修正DRBFMの構築により、課題1は解決された。

課題2及び修正DRBFMの問題を解決する為、3章に於いて、材料に関する故障モード解析手法「設計偏差法」を提案した。これは、SSMを用いて、設計偏差（制限仕様に於ける設計/環境変数）パターンとSSM偏差（応力/強度変数）パターンを対応表により対応付け、設計偏差/SSM偏差の対応関係から、対応する材料の損傷/破壊に関する故障モードを導出（予測）する手法である。設計偏差法の有効性は、FMEA及びDRBFMとの故障モード解析比較演習にて検証した。検証結果から設計偏差法が、材料の損傷/破壊に関す

る知識や経験の少ない故障モード解析者が、従来故障モード解析手法よりも多くの故障モードを決定できることを示した。設計偏差法の構築により、課題2及び修正DRBFMの問題が解決された。

更に本研究では、材料の損傷/破壊に関する知識や経験が少ない故障モード解析者の解析結果の妥当性や論理性を判定する為の故障モード解析支援手法として、機械学習手法であるSVMを用いた故障モード判別分析手法を構築した。故障モード判別分析手法の有効性は、設計偏差法の故障モード解析結果に適用し、故障モード判別分析結果から機械学習性能指標（検出率と適合率）を算出・比較することによって検証した。検証結果より、SVMを用いた故障モード判別分析は、材料の損傷/破壊に関する知識や経験が少ない故障モード解析者による解析結果の妥当性・論理性を正しく判定できることが明らかとなった。

また本研究で得られた結果より、「修正DRBFM」と「設計偏差法」について、故障モード解析比較演習等、材料の損傷/破壊に関する知識や経験が少ない製品設計者等を対象にした教育研修の教材に用いることによって、関連知識の習得やスキル向上に繋がること が示唆された。

## 4.2 本研究の課題

本研究で提案した「修正DRBFM」、「設計偏差法」、「SVMを用いた故障モード判別分析」について、次に示す課題が明らかとなった。

修正DRBFMに於いて、特定の材料の損傷/破壊に関する故障モードを導出する場合、故障モード解析者の知識や経験に部分的に依存するプロセスが含まれている。修正DRBFMの故障モード解析比較演習では、材料の機能として光学特性のみに焦点を当てていた。今後の研究に於いて、半導体や磁性材料等への適用や、多機能のコンポーネントへの適用並びに検証が必要である。

設計偏差法は、コンポーネントの故障モードがコンポーネントの原材料の損傷/破壊に起因するという概念に基づいているが、材料の損傷/破壊に関係しない故障モードは特定

できない．3つ以上の偏差の発生が同時に想定される場合，検証の精度が低下する可能性がある為，今後の研究で考慮する必要がある．

SVMを用いた故障モード判別分析に於いて，その有効性を検証する為に用いた SVM のデータ数が少なく，検証が不十分であった．学習データに於いては，対象とする材料の損傷/破壊に関する故障モードと設計偏差/SSM 偏差の対応関係を含め，なるべくシンプルな方が良いと考えられる．SVM のカーネル関数の選択やパラメータのチューニング等の影響によって，判別精度が低下する可能性が考えられる．評価データに於いては，材料の損傷/破壊に関する知識や経験が浅い故障モード解析者以外の専門家から取得した評価データを準備する必要がある．また材料の損傷/破壊に関する知識・経験が少ない製品設計者や技術者以外の専門家から取得した評価データを SVM モデルに入力し，適用される SVM モデルのパラメータの検討及びその最適化が必要である．

## 4.3 今後の展望

本研究にて提案した故障モード解析手法を社会実装していく為には，光学ガラス以外の機能性材料や副次的に機能性材料としての役割も担う構造材料にも適用範囲を広げることや，製造事業者等に於いて，材料を調達する際の判断材料として用いる等，製品の構想設計以外の製品実現化プロセスでの適用も事例研究として取り組んでいく必要があると考える．

設計偏差法の更なる高度化を目的として，設計偏差法に用いる設計偏差や SSM 偏差のパラメータについて，品質工学やロバスト設計等を用いた感度解析を行い，パラメータの最適化に関する研究も行う必要があると考える．更に設計偏差法を，新規材料（複合材料や多機能を有する材料等）の開発プロセスに適用することが考えられる．これは，材料の物性・特性や要求機能のインプットから，類似する物性・特性を有する材料と関連する故障モードが対応付けることから，特定の機能に対し材料に関する故障モードが予測可能となる．

機械学習や深層学習の更なる発展性を鑑みて，今後材料に関する故障モード解析は，

次に示す様な広がりが見込まれる。1つ目は、解析者が入力した製品機能・原材料の情報から、想定される不具合や故障モードを、原材料レベルから解析者に提示する故障モード予測システムである。これは、機械学習の学習機能及び設計偏差法を用いて、製品機能、設計偏差、原材料の物性/特性、故障（損傷/破壊）モードの4要素を対応付けたデータベースを整備し、解析者の入力情報と照合させることによって、実現可能である。当該故障モード予測システムの実装により、製品の構想設計段階から、製品機能の決定と併せて原材料の選定が実現し、材料起因の製品事故を予防する形で安全設計の遂行が可能となることが期待される。2つ目は、材料の損傷/破壊に関する知識や経験が浅い故障モード解析者が実施した解析結果について、リアルタイムで解析結果の誤りを修正する故障モード解析支援システムである。これは機械学習と深層学習を援用し、材料の損傷/破壊に関する知識や経験が浅い故障モード解析者の解析結果と所望の故障モード情報との照合並びに最適解の提示を、逐次故障モード解析結果修正対応者（専門家）が実施することによって、その実現が期待される。

# Acknowledgement

本論文は，筆者が株式会社ニコンに勤務する傍ら，長岡技術科学大学専門職大学院技術経営研究科 専門職学位課程 システム安全専攻の修了研究成果をベースに，長岡技術科学大学大学院工学研究科 博士後期課程 情報・制御工学専攻に於ける博士論文研究の成果をまとめたものです．システム安全専攻在籍時，光学ガラスの製造・販売に関する事業部門に属していた筆者の光機能性材料とリスクの関わりについて探求したいという申し出を快く引き受けて下さり，システム安全専攻修了研究から6年という長い期間に渡って，大変熱心に，また辛抱強くご高導頂きました長岡技術科学大学の大塚雄市准教授に心より御礼申し上げます．大塚先生より，工学者としての研究者の在り様や，システム安全に対する情熱，ビジネスにおける安全の重要性等，大変多くのことを学びました．今後工学に精通した高度専門職業人として，博士論文研究成果やシステム安全の概念を社会実装していく際の心構えにしていきたいと思います．本研究の副査として，それぞれのご専門の分野からご示唆・ご高導頂きました，長岡技術科学大学の湯川高志副学長（教授），三好孝典教授，村上健太准教授，労働安全衛生総合研究所 上席研究員の山際謙太博士に深く感謝の意を申し上げます．また大塚研究室の皆様，宮下幸雄教授並びに宮下研究室の皆様にも大変お世話になりました．特に2017年の秋にご一緒した研究室旅行は大変良い思い出となりました．ありがとうございました．

本研究は，株式会社ニコンの上司，同僚，諸先輩方のご理解やご協力が無ければ，成し遂げることが出来ませんでした．特に，博士後期課程にて研究する機会として，長岡技術科学大学への社費派遣や社内演習の実施をご快諾頂く等，多大なるご支援頂きました，株式会社ニコン 生産本部の長塚淳執行役員，服部修室長，平井彩部長，ガラス事業室の志水英文事業室長，藤原誠志部長，カスタムプロダクツ事業部の木村ゆき子事業部付，光ガラス株式会社の平岩弘之会長，神保宏樹社長，株式会社栃木ニコンの大村幸司

氏には深く感謝の意を申し上げます。また本研究を遂行するに当たり、故障モード解析比較演習にご協力頂きました、生産本部、ガラス事業室、社内有志の方々に深く感謝の意を申し上げます。皆様のお力添え無くして、本研究を成し遂げることは有り得ませんでした。また株式会社ニコンの藤井透博士、佐々木豊春博士、村田剛博士、大瀧達朗博士、杉崎敬博士、高橋顕博士には、論文博士や社会人ドクターのご経験を始めとして大変示唆に富んだご助言を頂きました。この場を借りて、深く感謝の意を申し上げます。

システム安全専攻修了生の皆様には、安全に関する議論等をさせて頂く等、博士論文研究のモチベーションを維持していく上で大変良い機会を頂きました。時には、学会発表の練習にお付き合い頂いたり等、公私に渡って大変お世話になりました。この場を借りて、深く感謝の意を申し上げます。

長岡技術科学大学 安全安心社会研究センター 客員研究員の川瀬健太郎氏には、長岡技術科学大学専門職大学院技術経営研究科 専門職学位課程 システム安全専攻の同期として、同専攻入学前から今日に至るまで、博士論文研究を含む安全に関する研究動向やビジネス等、幅広い分野に渡って議論・情報交換させて頂きました。博士号取得を目指していく上で、大変良い刺激を頂きました。この場を借りて、深く感謝の意を申し上げます。

長岡技術科学大学大学院工学研究科 博士後期課程 情報・制御工学専攻の川口昇氏には、システム安全専攻から情報・制御工学専攻に学内進学した同志として、大変良い刺激を頂きました。定期的に博士論文研究やビジネス等に関する議論・情報交換を通じて、切磋琢磨させて頂きました。この場を借りて、深く感謝の意を申し上げます。

早稲田大学大学院人間科学研究科 招聘研究員の岡崎善朗博士には、社会人ドクターとしてのご経験を踏まえたご助言を要所要所で頂いた他、博士論文研究成果をどの様に社会実装していくかについて、多くのご示唆を頂きました。この場を借りて、深く感謝の意を申し上げます。

最後に、これまでの研究生活を全面的に支えてくれた両親と弟、義妹、2人の甥に深く感謝の意を申し上げます。

# References

- 1) 日本品質管理学会中部支部産学連携研究会. 開発・設計に於ける”Qの確保”. 日本規格協会, 2010.
- 2) 寺倉修. 「設計力」を支えるデザインレビューの実際. 日刊工業新聞社, 2014.
- 3) 佐藤浩昭. 高分解能MALDI-TOF-MSを用いる工業用ポリマー材料の構造分析. *BUNSEKI KAGAKU*, 67:589–597, 2018.
- 4) F. Koark and C. Beul. Avoiding Safety Scandals by Controlling the Risk of Material Changes. *SAE Technical Paper*, 01:1–10, 2017.
- 5) 小林英男. 破壊事故一失敗知識の活用一. 共立出版, 2007.
- 6) 日本機械輸出組合海外PL委員会. 平成29年度海外PL関連動向調査報告書「米国に於ける製造物責任とリコールの最近の動向完成品製造者と部品製造者間の諸問題とその現状」. Technical report, 日本機械輸出組合, 2018.
- 7) Eduardo Bueno, Patricio Morcillo, and Jose Miguel Rodriguez Anton. Management of technology: Proposal for a diagnosis model. *The Journal of High Technology Management Research*, 8:63–87, 1997.
- 8) Anders Drejer. The discipline of management of technology, based on considerations related to technology. *Technovation*, 17:253–265, 1997.
- 9) Larry T. Lee and Jon D. Collins. ENGINEERING RISK MANAGEMENT FOR STRUCTURES. *Journal of the Structural Division*, 103:1739–1756, 1977.

- 10) P.J. Regan and M.E. Paté-Cornell. Normative engineering risk management systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 57:159–169, 1997.
- 11) P.J. James. Equipment management risk rating system based on engineering endpoints. *Biomedical Instrumentation and Technology*, 33:115–120, 1999.
- 12) N.M. Almeida, V. Sousa, L.A. Dias, and F. Branco. Engineering risk management in performance-based building environments. *Journal of Civil Engineering and Management*, 21:218–230, 2015.
- 13) *ISO/IEC Guide51:2014, Safety aspects-Guidelines for their inclusion in standards*.
- 14) *ISO12100:2010, Safety of machinery - General principles for design - Risk assessment and risk reduction*.
- 15) Vincent T. Covello, Detlof von Winterfeldt, and Paul Slovic. Risk Communication. *Carcinogen Risk Assessment*, 3:193–207, 1988.
- 16) 中谷地一也, 長谷和久, and 横山広美. 科学的基礎知識とハザードへの不安との関係. *心理学研究*, 89:171–178, 2018.
- 17) Ellen C. Haas and Jan B.F. van Erp. Multimodal warnings to enhance risk communication and safety. *Safety Science*, 61:29–35, 2014.
- 18) Terje Aven. Perspectives on the nexus between good risk communication and high scientific risk analysis quality. *Reliability Engineering and System Safety*, 178:290–296, 2018.
- 19) H. Veland and T. Aven. Risk communication in the light of different risk perspectives. *Reliability Engineering and System Safety*, 110:34–40, 2013.
- 20) M. Compare, E. Zio, E. Moroni, G. Portinari, and T. Zanini. Development of a methodology for systematic analysis of risk reduction by protective measures in tyre production machinery. *Safety Science*, 110:13–28, 2018.

- 21) Takashi Kabe, Kohichi Tanaka, Hiroyasu Ikeda, and Noboru Sugimoto. Perspectives on the nexus between good risk communication and high scientific risk analysis quality. *Safety Science*, 48:296–301, 2010.
- 22) M.G. Stewart and R.E. Melchers. *Probabilistic risk assessment of engineering systems*. Chapman and Hall, 1997.
- 23) Giuliana Faiella, Anam Parand, Bryony Dean Franklin, Prem Chana, Mario Cesarelli, Neville A. Stanton, and Nick Sevdalis. Expanding healthcare failure mode and effect analysis: A composite proactive risk analysis approach. *Reliability Engineering and System Safety*, 169:117–126, 2018.
- 24) J.F.W. Peeters, R.J.I. Basten, and T. Tinga. Improving failure analysis efficiency by combining FTA and FMEA in a recursive manner. *Reliability Engineering and System Safety*, 172:36–44, 2018.
- 25) H. Pang, T. Yu, and B. Song. Failure mechanism analysis and reliability assessment of an aircraft slat. *Engineering Failure Analysis*, 60:261–279, 2016.
- 26) J. Wang, T. Ruxton, and C. R. Labrie. Design for safety of engineering systems with multiple failure state variables. *International Journal of Safety*, 9:22–28, 1995.
- 27) Y. Otsuka, T. Yukawa, and Y. Mutoh. Development of web-based design review system for reliability and safety knowledge management. *International Journal of Safety*, 9:22–28, 2010.
- 28) F. Yang, N. Cao, L. Young, J. Howard, W. Logan, T. Arbuckle, P. Sponseller, T. Korssjoen, J. Meyer, and E. Ford. Validating fmea output against incident learning data: A study in stereotactic body radiation therapy. *Medical Physics*, 42:2777–2785, 2015.
- 29) Z. Wang, J.M. Gao, R.X. Wang, K. Chen, Z.Y. Gao, and Y. Jiang. Failure mode and effects analysis using dempster-shafer theory and topsis method: Application to the gas insulated metal enclosed transmission line (gil). *Applied Soft Computing*, 70:633–647, 2018.

- 30) IEC 60812:2018, Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA), 2018.
- 31) A. Mariajayaprakash and T. Senthilvelan. Optimizing Process Parameters of Screw Conveyor (Sugar Mill Boiler) Through Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) and Taguchi Method. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 14:772–783, 2014.
- 32) J.K. Chen. Utility priority number evaluation for FMEA. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 7:321–328, 2007.
- 33) I. Mzougui and Z. Elfelsoufi. Improvement of Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis by Using Fault Tree Analysis and Analytical Hierarchy Process. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 19:924–929, 2019.
- 34) L. Wang, Y. Gao, W. Xu, K. Hong, B. Wang, and X. Chen. An Extended FMECA Method and Its Fuzzy Assessment Model for Equipment Maintenance Management Optimization. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 19:350–360, 2019.
- 35) V. Thoppil, N.M. and Vasu and C.S.P. Rao. Failure Mode Identification and Prioritization Using FMECA: A Study on Computer Numerical Control Lathe for Predictive Maintenance. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 19:1153–1157, 2019.
- 36) 村上存 and 菊地洋輔. 物理量次元インデクシングに基づく故障木解析のマネジメント. 日本機械学会論文集 (C), 75:77–86, 2009.
- 37) 平岡洋二 and 山本克成. 物理量次元インデクシングによる知識マネジメントの製品設計への応用 (fta 支援ツールの開発と適応事例). 日本機械学会論文集 (C), 77:349–358, 2011.
- 38) 原田泰男. 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. PhD thesis, 大阪大学大学院工学研究科, 2016.
- 39) S.A. Lapp and G.J. Powers. Computer-aided Synthesis of Fault-trees. *IEEE Transactions on Reliability*, 26:2–13, 1977.

- 40) W.S. Lee, D.L. Grosh, F.A. Tillman, and C.H. Lie. Fault tree analysis, methods, and applications - a review. *IEEE Transactions on Reliability*, 34:194–203, 1985.
- 41) T. Murakami, Y. Kikuchi, and Y. Hiraoka. Knowledge Management for Fault Tree Analysis Based on Quantity Dimension Indexing. In *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference, Newyork*, 2008.
- 42) Y. Hiraoka, K. Yamamoto, T. Murakami, Y. Furukawa, H. Tokunaga, and H. Sawada. Method of Computer-Aided FTA (Fault Tree Analysis) in Reliability Design and Development; Using Knowledge Management Based on Quantity Dimension Indexing and Block Diagram. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 5:72–82, 2012.
- 43) Y. Hiraoka, T. Murakami, K. Yamamoto, Y. Furukawa, and H. Sawada. Method of Computer-Aided Fault Tree Analysis for High-Reliable and Safety Design. *IEEE Transactions on Reliability*, 65:687–703, 2016.
- 44) H. Fazlollahtabar and S.T.A. Niaki. Fault Tree Analysis for Reliability Evaluation of an Advanced Complex Manufacturing System. *IEEE Transactions on Reliability*, 67:170–183, 2018.
- 45) IEC 61025:2006, Fault tree analysis (FTA), 2006.
- 46) 平岡洋二. *Fault Tree Analysis* を用いた高信頼性設計およびその知識マネジメント. PhD thesis, 東京大学大学院工学系研究科, 2013.
- 47) J.R. Taylor. An algorithm for fault-tree construction. *IEEE Transactions on Reliability*, 31:137–146, 1982.
- 48) Bambang Suhardi, Pringgo Widyo Laksono, Andhika Ayu V.E., Jafri Mohd.Rohani, and Tan Shy Ching. Analysis of the Potential Hazard Identification and Risk Assessment (HIRA) and Hazard Operability Study (HAZOP): Case Study. *International Journal of Engineering and Technology*, 7:1–7, 2018.

- 49) Risza Rusli and Azmi Mohd Shariff. Qualitative Assessment for Inherently Safer Design (QAISD) at preliminary design stage. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23:157–165, 2010.
- 50) Carl Schmuland. Value-Added Medical-Device Risk Management. *IEEE Transactions On Device And Materials Reliability*, 5:488–493, 2005.
- 51) F. Mushtaq and P.W.H. Chung. A systematic Hazop procedure for batch processes, and its application to pipeless plants. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 13:41–48, 2000.
- 52) 鈴木和幸, 金田健, and 平野謙. 未然防止のための潜在的エラーモード抽出. 日本信頼性学会誌, 24:653–663, 2000.
- 53) C. Palmer and P.W.H. Chung. An automated system for batch hazard and operability studies. *Reliability Engineering and System Safety*, 94:1095–1196, 2009.
- 54) J. Dunjo, V. Fthenakis, J.A. Vilchez, and J. Arnaldos. Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review. *Journal of Hazardous Materials*, 173:19–32, 2010.
- 55) F. Wang, J. Gao, and H. Wang. A new intelligent assistant system for HAZOP analysis of complex process plant. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25:636–642, 2012.
- 56) P. Baybutt. Design Intent for Hazard and Operability Studies. *2014 American Institute of Chemical Engineers Process Safety Progress*, 35:36–40, 2016.
- 57) IEC 61882:2016, Hazard and operability studies (HAZOP studies) - Application guide, 2016.
- 58) Nancy Leveson. A systems approach to risk management through leading safety indicators. *Reliability Engineering and System Safety*, 136:17–34, 2015.
- 59) T. Bjerga, T. Aven, and E. Zio. Uncertainty treatment in risk analysis of complex systems: The cases of STAMP and FRAM. *Reliability Engineering and System Safety*, 156:203–209, 2016.

- 60) Yi Lu, Shu-Guang Zhang, Peng Tang, and Lei Gong. STAMP-based safety control approach for flight testing of a low-cost unmanned subscale blended-wing-body demonstrator. *Safety Science*, 74:102–113, 2015.
- 61) I.M. Dokas, J. Feehan, and S. Imran. EWaSAP: An early warning sign identification approach based on a systemic hazard analysis. *Safety Science*, 58:11–26, 2013.
- 62) Giuliana Faiella, Anam Parand, Bryony Dean Franklin, Prem Chana, Mario Cesarelli, Neville A. Stanton, and Nick Sevdalis. Expanding healthcare failure mode and effect analysis: A composite proactive risk analysis approach. *Reliability Engineering and System Safety*, 169:117–126, 2018.
- 63) 山口 晋一. システム理論に基づく安全解析手法 (STAMP/STPA) の要件定義工程への適用評価. PhD thesis, 慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント研究科, 2019.
- 64) H. Shimizu, Y. Otsuka, and H. Noguchi. Design Review Based on Failure Mode to Visualize Reliability Problems in the Development Stage of Mechanical Products. *International Journal of Vehicle Design*, 53:149–165, 2010.
- 65) Y. Otsuka, H. Shimizu, and H. Noguchi. Efficacious design review process including on-the job training in finding misunderstand errors. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 16:281–302, 2009.
- 66) Y. Otsuka, T. Yukawa, and Y. Mutoh. Development of Web-based Design Review System for Reliability and Safety Knowledge Management. *International Journal of Safety*, 9:22–28, 2010.
- 67) Y. Otsuka, T. Ishizaki, Y. Miyashita, and Y. Mutoh. Combined Analyses Procedure of Failure Modes and Risk Phenomena Using the Concept of Normal State Conditions. *Open Journal of Safety Science and Technology*, 2:84–88, 2012.

- 68) J.H. Saleh, K.B. Marais, E. Bakolas, and R.V. Cowlagi. Highlights from the literature on accident causation and system safety: Review of major ideas, recent contributions, and challenges. *Reliability Engineering and System Safety*, 95:1105–1116, 2010.
- 69) Y. Otsuka, S. Takiguchi, H. Shimizu, and Y. Mutoh. Empirical consideration of predicting chain failure modes in product structures during design review process. In *INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN, ICED11, Denmark*, 2011.
- 70) Tomoyuki Okabe and Yuichi Otsuka. Analyses Method for Hazards of Materials Relating to Failure Modes by Considering Simulated Design Specifications of Functional Model. In *The 5th International GIGAKU Conference in Nagaoka, (CD-ROM), Nagaoka*, 2016.
- 71) T. Okabe and Y. Otsuka. A method for determining failure modes associated with damage/fracture of materials in early design stages. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 20:302–314, 2020.
- 72) 大関真之. 機械学習入門. オーム社, 2016.
- 73) Chih-Fong Tsai, Yu-Feng Hsu, Chia-Yin Lin, and Wei-Yang Lin. Intrusion detection by machine learning: A review. *Expert Systems with Applications*, 36:11994–12000, 2009.
- 74) 巽啓司. 多目的最適化に基づくマルチクラスサポートベクトルマシン. オペレーションズ・リサーチ, 57:243–249, 2012.
- 75) 石田基広. *Rによるテキストマイニング入門（第2版）*. 森北出版, 2017.
- 76) 金森敬文, 竹之内高志, and 村田昇. *パターン認識（Rで学ぶデータサイエンス5）*. 共立出版, 2009.
- 77) F. Girosi. An Equivalence between Sparse Approximation and Support Vector Machines. *Neural Computation*, 10:1455–1480, 1998.
- 78) M. Pontil and A. Verri. Properties of Support Vector Machines. *Neural Computation*, 10:955–974, 1998.

- 79) G. Baudat and F. Anouar. Generalized discriminant analysis using a kernel approach. *Neural Computation*, 12:2385–2404, 2000.
- 80) V. Vapnik and O. Chapelle. Bounds on error expectation for support vector machines. *Neural Computation*, 12:2655–2684, 2000.
- 81) G. Yin, Y.T. Zhang, Z.T. Li, G.O. Ren, and H. B. Fan. Online fault diagnosis method based on Incremental Support Vector Data Description and Extreme Learning Machine with incremental output structure. *Neuro computing*, 128:224–231, 2014.
- 82) Geoffrey Biggs, Takeshi Sakamoto, and Tetsuo Kotoku. A profile and tool for modelling safety information with design information in SysML. *Software and Systems Modeling*, 15:147–178, 2016.
- 83) G. Uhlig, A. and Kurzbach, R. Hamann, Y. Papadopoulos, M. Walker, and B. Lühmann. Simulation model based risk and reliability analysis using extended simulation X system models to generate FMEA tables. *VDI Berichte*, 1984:225–239, 2007.
- 84) Chen. L., J. Jiao, Q. Wei, and T. Zhao. An improved formal failure analysis approach for safety-critical system based on MBSA. *Engineering Failure Analysis*, 82:713–725, 2017.
- 85) 堀口直樹, 大坪一紀, and 米山聡. 金型製造不具合を設計ノウハウに還元するための不具合分析手法に関する研究 (マトリクスを用いた比較分析法). *日本機械学会論文集*, 82:1–12, 2016.
- 86) Yasuo Harada and Tetsusei Kurashiki. Decision Method of Failure Rate and Its Probability Distribution for Composing of Products Using Incident Database of the Product. *Journal of the Society of Materials Science*, 64:196–202, 2015.
- 87) David H. Johnson, Martha W. Bidez, and Lawrence J. Delucas. Hazard Analysis and Risk Assessment in the Development of Biomedical Drug Formulation Equipment. *Annals of Biomedical Engineering*, 40:898–906, 2011.

- 88) R. Rusli, A.M. Shariff, and Khan F.I. Evaluating hazard conflicts using inherently safer design concept. *Safety Science*, 53:61–72, 2013.
- 89) Claudia M. Eckert, René Keller, Chris Earl, and P. John Clarkson. Supporting change processes in design: Complexity, prediction and reliability. *Reliability Engineering and System Safety*, 91:1521–1534, 2006.
- 90) 山崎雄大, 横川慎二, and 鈴木和幸. トラブル予測表を用いた故障モード予測手法と信頼性・安全性の作り込み評価指標の提案. *日本信頼性学会誌*, 38:271–283, 2016.
- 91) 田村泰彦 and 飯塚悦功. 不具合に関する設計知識の運用に関する研究－ストレス－ストレングスモデルによる知識獲得－. *品質*, 31:168–180, 2001.
- 92) 田村泰彦 and 飯塚悦功. 不具合に関する設計知識の運用に関する研究－不具合に至る因果連鎖の知識構造の構築. *品質*, 32:122–135, 2002.
- 93) 難波孝彰 and 山田陽滋. 病院内の患者の転倒転落事故防止のための深層学習を用いた一次スクリーニング自動化およびリアルタイム・リスクアセスメント方法. *日本機械学会論文集*, 85:1–19, 2019.
- 94) 朝倉俊行, 小林孝, 許宝傑, and 林庄司. ニューラルネットワークによる機械の故障診断システム. *日本機械学会論文集 C 編*, 65:1498–1504, 1999.
- 95) 岡部知行 and 大塚雄市. 機能モデルの仮想的設計偏差を考慮した材料に関連する故障モード解析手法の検討. In *日本機械学会 2017 年度年次大会, G1200103(CD-ROM)*, 2017.
- 96) Tomoyuki Okabe and Yuichi Otsuka. Development of the failure mode analysis method using deviation analyses of design specification with stress-strength model for functional materials in conceptual design stages. In *The Society for Risk Analysis, Asia Conference 2018(CD-ROM)*, Osaka, 2018.

- 97) 岡部知行 and 大塚雄市. 設計偏差パターンの類似度解析による故障モードの判別分析の試み. In 日本機械学会 2018 年度年次大会, *G1200204(CD-ROM)*, 2018.
- 98) Tomoyuki Okabe and Yuichi Otsuka. Development of Discriminant Analysis Method on Failure Modes Relating to Damage/Fracture Modes of Functional Materials Using Support Vector Machine. In *The 7th International GIGAKU Conference in Nagaoka, (CD-ROM)*, Nagaoka, 2018.
- 99) T. Okabe and Y. Otsuka. Proposal of a Validation Method of Failure Modes Analyses based on Stress-Strength Model with a Support Vector Machine. *Journal of Reliability Engineering and System Safety*, 205(107247):1–9, 2021.
- 100) Annual report for products safety. <https://www.nite.go.jp/jiko/event/houkoku/houkoku2016.html>.
- 101) R.C. Hibbeler. *Mechanics of Materials, 7th edn*. Prentice Hall, Upper Saddle River, 2008.
- 102) J. Wang, Y.M.and Liu and T.M.S. Elhag. An integrated AHP–DEA methodology for bridge risk assessment. *Comput. Ind. Eng*, 54:513–525, 2008.
- 103) David H. Johnson, Martha W. Bidez, and Lawrence J. Delucas. Hazard analysis and risk assessment in the development of biomedical drug formulation equipment. *Ann. Biomed. Eng.*, 40:898–906, 2011.
- 104) C.M. Claudia, R. Keller, C. Earl, and P.J. Clarkson. Supporting change processes in design: complexity, prediction and reliability. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 91:1521–1534, 2006.
- 105) H. Kobayashi. *Fracture Accident—Utilization of Failure Knowledge*. Kyoritsu Shuppan Co., Ltd., Bunkyo, 2007.
- 106) E. A. Mechhoud, M. Rouainia, and M. Rodriguez. A new tool for risk analysis and assessment in petrochemical plants. *Alexandria Engineering Journal*, 55:2919–2931, 2016.

- 107) K. Xu, L.C. Tang, M. Xie, S.L. Ho, and M.L. Zhu. Fuzzy assessment of fmea for engine systems. *Reliability Engineering and System Safety*, 75:17–29, 2002.
- 108) A. Pillay and J. Wang. Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning. *Reliability Engineering and System Safety*, 79:69–85, 2003.
- 109) R.K. Sharma, D. Kumar, and P. Kumar. Systematic failure mode effect analysis (fmea) using fuzzy linguistic modelling. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 22:986–1004, 2005.
- 110) Mohammad Yazdi, Sahand Daneshvar, and Hashem Setareh. An extension to fuzzy developed failure mode and effects analysis (fdfmea) application for aircraft landing system. *Safety Science*, 98:113–123, 2017.
- 111) A.C.F. Guimaraes and C.M.F. Lapa. Hazard and operability study using approximate reasoning in light-water reactors passive systems. *Nuclear Engineering and Design*, 236:1256–1263, 2006.
- 112) A.C.F. Guimaraes, C.M.F. Lapa, and M.D.L. Moreira. Fuzzy methodology applied to probabilistic safety assessment for digital system in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*, 241:3967–3976, 2011.
- 113) K. Alexandros, M. David, and H. Kurt. Support Vector Machines in R. *Journal of Statistical Software*, 15:1–28, 2006.