



博士学位論文

MEMS 開発における
概念設計支援手法の提案とその応用

Study on Concept Design Support Methodology
for MEMS Development and Its Application

2005 年 9 月

指導教官：于 強 助教授

横浜国立大学 大学院 工学府
システム統合工学 専攻

石川 浩嗣



博士学位論文

MEMS 開発における
概念設計支援手法の提案とその応用

Study on Concept Design Support Methodology
for MEMS Development and Its Application

2005 年 9 月

指導教官：于 強 助教授

横浜国立大学 大学院 工学府
システム統合工学 専攻

石川 浩嗣

Copyright ©2005 by Koji Ishikawa

All rights reserved for this thesis, including all pictures, figures and tables. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, without prior permission in writing from the copyright holder.

The copyrights for the appended journal papers belong to the publishing houses of journals concerned. The copyrights for the appended manuscripts belong to their authors.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy at Yokohama National University, Japan 2005.

ABSTRACT

In recent years, microelectromechanical systems (MEMS) have attracted attention in various fields such as automobile, information, communication and biology industries. Using combination of electrical and mechanical components, MEMS can sense, control and actuate on the micro scale. MEMS have provided new solutions with many applications thanks to their inherent cost and size advantage, and electro-mechanical combined functions. MEMS are also used as cutting-edge technology tools to establish next generation high-performance products.

Development of MEMS devices, however, still relies on knowledge and experience of MEMS experts due to the design and fabrication complexity. In addition, MEMS design standard has not yet been established. Therefore, it is difficult to understand the design trade-offs existing in the system and obtain an optimal structure without any MEMS-related insights. The development speed of MEMS products is typically slow because iterative structural analysis, layout and testing are necessary to achieve complete structures. Furthermore, MEMS engineers need to design structures under some MEMS fabrication limitations. Thus MEMS engineers tend to pursue just a few primary characteristics without consideration of the total system performance. This is another reason that time-consuming product developing process is unavoidable to bring MEMS to market.

In this thesis, a new MEMS design support method is proposed in order to increase the efficiency of MEMS development. After investigating the problems in MEMS and computer aided engineering (CAE) technologies, it is concluded that MEMS engineers need not only to understand of principles between system and system behavior but also to evaluate and optimize the "concept (design capacity)" at the early-stage of development for decrease of development time and cost. The new CAE method called MEMS early-stage analysis (MESA) enables a concept analysis and evaluation at the upstream design stage before considering design interaction or tolerance of the system. In the MESA, the sensitivity, which indicates the effect of design factor to system performance, is defined as simplified relation between design factors and system performances. The sensitivities are arranged on the MESA matrix and visually inform both the effect of design parameters against system performance and design trade-offs to MEMS designers. A weight function is also defined and used to evaluate the system characteristics with designer's demand and system requirement. Moreover, the system score, which is calculated from sensitivities and weight function, shows MEMS engineers the system design capacity. Therefore numerical evaluation of the total system performance is possible in the MESA.

The MESA is applied to MEMS devices and its validity is examined. Piston micromirrors and actuators are analyzed respectively by using the MESA. The analysis results show the design trade-offs and effects of design factors as useful design information. Each system evaluation result is consistent with actual system behavior. Numerical comparison and characterization of different systems can be carried out in early design phase. It is proved that the MESA has good capability to evaluate design capacity as a promising concept design support methodology.

Applying the MESA, new RF MEMS switches with high mechanical reliability are designed. Analyzing a conventional cantilever-shape RF MEMS switch, the design trade-offs and structural problems are defined. Based on the MESA analysis information, two kinds of new RF MEMS switch concepts, a tri-state multi contact switch and a push-pull switch, are created with the release of the existing trade-offs. In the new switches, better mechanical and RF switching performances are expected from MESA evaluation results. It is proved that enhanced structural design can be possible at the early development stage by utilizing the MESA for concept designs.

概 要

近年、自動車・通信など様々な分野において MEMS (Microelectromechanical Systems) と呼ばれる機械機構、電子電気機能などを融合したマイクロスケールデバイスの実用化が進みつつある。次世代の高機能製品を創出する、あるいは技術課題を解決するツールとして MEMS への産業界の期待は大きい。しかし、MEMS 設計開発には多岐にわたる分野の高度な知識・製造ノウハウなどが必要であるため MEMS 開発熟練者に依存する部分の大きさと同時に、アイデアの試作・検証のために試行錯誤を繰り返す行いが避けられないため、従来製品に比べて開発時間・コストがかかり、市場投入が遅れてしまうといった現状がある。

そこで、本論文では MEMS 設計開発の効率化を目的とした新しい設計開発支援手法の提案を行った。まず、MEMS 開発の現状と問題点を抽出すると共に、従来 CAE (Computer Aided Engineering) 技術の課題を明確にすることで、MEMS 設計開発者が必要とする設計情報とは何か、設計者が望むことは何かを調査した。そして MEMS 設計熟練者の感覚に近い設計を全ての設計者が開発初期の段階で行える環境を整備することが、開発時間の短縮・コストの削減につながるの指針を得た。また、そのためには単純に最適解を得るだけではなく、開発対象のシステムとそのシステムが示す現象の間に存在する原理原則を理解すること、及び設計開発初期の段階における概念的な最適設計、本来定性的であるアイデア (又はコンセプト) 領域の数値評価・最適化が不可欠と判断し、MEMS に適用可能な新しい設計支援手法の検討を行った。

本研究で提案する MEMS の概念設計支援手法 (MEMS Early-Stage Analysis : MESA) では、概念設計としての”あたり”をつける設計を可能とするために、物理関係の干渉やばらつきを考慮する前段階において、設計因子と性能との関係を簡便な数式として表現し、「感度」という形式で導き出すこととした。そして設計因子と各システム性能に対する感度をマトリックス形式で視覚化し、システムに存在する設計因子間のトレードオフや感度の大小 (影響度) などの設計情報を明確に設計者に伝達する手法を確立した。また、設計者が必要とする情報を得るために、あるいは意思・価値観を設計に反映させるために「重み関数」を用いてシステム全体としての性能を比較検討できる手法を MESA に盛り込んだ。さらに、システムのトータル的な性能を数値化するために、感度と重みから計算される「システム評価点」という考えを導入し、システム性能 (設計キャパシティ) の向上の検討及び異なるシステム間の比較検討など、従来定性的で漠然としていたコンセプト設計領域の数値的評価が可能となる環境を整えた。

また、MESA を具体的な MEMS デバイスに適用し、手法の妥当性について検証を行うと共に、異なるデバイス間の性能比較検討を実施した。駆動方法の異なるピストンミラー及びアクチュエータについて MESA による解析を実施して各々構造的に存在する設計トレードオフ、物理現象を把握し、システムとしての問題点が何かを明確にした。また、重み関数を変化させることで異なる設計状況におけるシステム評価を行い、駆動方法の違いによる各々の構造的特徴について分析を行った。MESA による分析結果はこれまで報告されているデバイスの特徴と一致し、MESA によるコンセプト

設計に妥当性があることを確認できた。

さらに、高周波 (RF) スイッチ開発の概念設計段階に MESA を適用し、信頼性を向上させた新規コンセプトを創出するための設計支援について実用化検討を行った。まず従来のカンチレバー型 RF MEMS スイッチの構造的問題点を MESA によって分析し、設計上のトレードオフを抽出した。その後、得られた設計情報を基に、カンチレバー型で存在していたトレードオフを解消する新しいスイッチ構造として三相マルチコンタクト式及びプッシュプル式の二種類の新規スイッチ構造を考案した。MESA を用いることによって、システムの設計キャパシティ評価を行い、新しいスイッチングコンセプトを連続的に創出できることを確認した。

本論文で提案する概念設計支援手法の略称：MESA はスペイン語で table の意。頂上が平らで周囲に急な崖をもつ地形を示すもので北米中西部によく見られる。この地形で最も有名なものの一つに、米国コロラド州の Mesa Verde 国立公園がある。北米原住民が急峻な崖側面に洞穴を掘り居住していた痕跡があり、ユネスコの世界遺産にも指定されている。

Dedication

To my wife and daughter

The important thing is not stop questioning.
大切なことは、問いつづけることである。

— *A. Einstein*
アインシュタイン

目 次

Abstract	i
概要	iii
Dedication	v
第 1 章 序 論	1
1.1 研究背景と目的	3
1.2 論文構成	4
参考文献	6
第 2 章 MEMS	7
2.1 MEMS とは	9
2.2 マイクロマシニング	12
2.2.1 表面マイクロマシニングとバルクマイクロマシニング	12
2.2.2 Poly MUMPs と Metal MUMPs	15
2.3 MEMS 技術動向	17
2.3.1 マイクロアクチュエータ	17
2.3.1.1 静電駆動アクチュエータ	17
2.3.1.2 電熱駆動アクチュエータ	18
2.3.2 マイクロミラーシステム	20
2.3.2.1 ピストンマイクロミラー	20
2.3.2.2 ステアリングマイクロミラー	23
2.3.3 RF MEMS	26
2.3.3.1 RF MEMS とは	26
2.3.3.2 RF MEMS スイッチ	27
参考文献	31
第 3 章 設計支援手法	35
3.1 MEMS 設計開発の課題	37
3.2 概念設計	38
3.3 既存の設計支援手法	42
3.3.1 下流設計段階における CAE 技術	42
3.3.1.1 応答曲面法 (Response Surface Method)	42
3.3.1.2 遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm)	43
3.3.1.3 ニューラルネットワーク (Neural Network)	44
3.3.2 上流設計段階における CAE 技術	45
3.3.2.1 トップダウン設計手法 (Top-Down Design Method)	45
3.3.2.2 FOA (First Order Analysis)	46

3.3.2.3 機能モデル(Functional Model)	46
3.3.3. その他の設計支援手法.....	47
3.3.3.1 体系的アプローチ(Systematic Approach)	47
3.3.3.2 TRIZ(Теори Решения Изобретательски Задач)	48
3.4 結論.....	50
参考文献	52
 第 4 章 MESA(MEMS Early-Stage Analysis)	55
4.1 アプローチ	57
4.2 設計因子と性能	58
4.3 MESA の基本概念.....	59
4.3.1 MESA 感度	59
4.3.2 MESA マトリックスと重みづけ	62
4.3.3 システム評価点.....	63
4.4 結論.....	64
参考文献	66
 第 5 章 MESA の検証.....	67
5.1 ピストンマイクロミラーシステムへの MESA の適用	69
5.1.1 静電駆動ミラーの解析.....	69
5.1.1.1 静電駆動ミラー設計因子と要求システム性能	69
5.1.1.2 静電駆動ミラーの MESA 感度算出.....	70
5.1.1.3 静電駆動ミラーの MESA マトリックスとシステム評価点	72
5.1.2 電熱駆動マイクロミラーの解析.....	75
5.1.2.1 電熱駆動ミラー設計因子と要求システム性能	75
5.1.2.2 電熱駆動ミラーの MESA 感度算出.....	76
5.1.2.3 電熱駆動ミラーの MESA マトリックスとシステム評価点	78
5.1.3 システム評価点によるマイクロミラーシステムの比較検証.....	80
5.2 マイクロアクチュエータへの MESA の適用.....	81
5.2.1 静電櫛型アクチュエータの MESA による評価	81
5.2.2 水平駆動電熱アクチュエータの MESA による評価	85
5.2.3 システム評価点によるアクチュエータの比較検証.....	88
5.3 結論.....	89
参考文献	90
 第 6 章 MESA の実用化(RF MEMS スイッチ開発への適用)	91
6.1 概念設計による MEMS 開発の高効率化	93
6.2 RF MEMS スイッチの課題と改善アプローチ	94
6.2.1 RF MEMS スイッチの現状と課題点	94
6.2.2 新規 RF MEMS スイッチの開発目的とアプローチ	96

6.3 MESA によるカンチレバー型スイッチの性能解析	96
6.3.1 カンチレバー型スイッチの設計因子とシステム性能	96
6.3.2 カンチレバー型スイッチコンセプトの MESA による評価	98
6.4 三相マルチコンタクトラテラルスイッチ(第一世代)の概念設計	102
6.4.1 カンチレバー型スイッチからの改善のアプローチ	102
6.4.2 三相マルチコンタクト式スイッチングコンセプト	103
6.4.3 スイッチ特性	105
6.4.4 三相マルチコンタクト式スイッチの MESA による評価	107
6.5 プッシュプル式スイッチ(第二世代)の概念設計	108
6.5.1 第一世代からの改善アプローチ	108
6.5.2 プッシュプルスイッチングコンセプト	109
6.5.3 プッシュプルスイッチの MESA による評価	111
6.6 結論	112
参考文献	113
 第7章 総括	 115
7.1 結論	117
7.2 貢献	117
7.3 推奨する今後の研究項目	118
 付録 A MUMPs	 119
A.1 Poly MUMPs	121
A.2 Metal MUMPs	123
参考文献	126
 付録 B RF 解析	 127
B.1 FEM による解析	129
B.2 理論式による解析	130
参考文献	133
 公表一覧	 134
依頼／招待講演一覧	136
 謝辞	 137

What are the possibilities of small but movable machines?

— They may or may not be useful, but surely would be fun to make.

小さいが動かすことのできる機械の可能性とは何か？

— それは使い物になろうがなかろうが、きっと作ることが楽しいことだ。

— *R. Feynman*

ファインマン

第 1 章

序 論

*I am always doing what I cannot do yet,
in order to learn how to do it.*
私は常に、私がまだできないことに取り組む。
それをいかにすべきかを学ぶために。

— V. V. Gogh
ゴッホ

1.1 研究背景と目的

半導体の集積回路製作技術であるフォトリソグラフィ(Photolithography)を基本した微細加工技術はマイクロマシニング(Micromachining)と呼ばれ、シリコン基板などへセンサやアクチュエータ、回路などを形成するために利用されている。このマイクロマシニング技術によって作られた様々な要素を組み合わせで構築された高度な働きをする小型システムは、MEMS (Micro-electro-mechanical Systems)、あるいはマイクロマシン(Micromachine)、マイクロシステム(Micro-systems)と呼ばれ、自動車や情報・通信、医療・バイオ、家電といった幅広い分野での実用化が進みつつある^[1,2]。MEMS は、従来技術では達成できなかった優れた特性や新しい性能を実現するためのツールとして、また問題解決のソリューションのひとつとして有望視されており、企業や研究機関において研究開発が活発に行われている。

しかしながら、MEMS デバイスを研究開発段階から量産製品として市場へ展開するためには、従来の機械装置や電子部品の製品化にかかる以上の開発時間とコストを必要としているのが現状である。これは材料、製造プロセス、構造設計といった複合知識を兼備する MEMS 研究開発者の人口が少ないことや MEMS の歴史がまだ浅いため、設計開発技術の標準化や再利用可能な形での設計データの蓄積が進んでいないことが主要因としてあげられる。熟練技術者の知識や経験、ノウハウ、それらに基づく勘などに MEMS の設計開発を依存する状況は、設計開発情報の蓄積が進まない、及び知識を包括的に活用できる新しい MEMS 研究者が育たないといった悪循環を招き、MEMS 産業の停滞感を作り出している。また、標準化が遅れている MEMS デバイス開発においては、仮に MEMS 開発熟練者であっても試行錯誤的な開発プロセスを完全に回避することは難しい状況にある。加えて MEMS 独特の複合的知識の必要性からプロジェクトの専門分業化が進み、各専門分野における技術者間の開発品に対する考え方の違いや意思疎通の不足が試行錯誤の回数を多くする一因ともなっている。

したがって、知識や経験の浅いエンジニアでも熟練者に迫る感覚の情報をもとに設計開発を行える環境を整え、必要な情報を的確に設計者が把握して設計開発に展開できるようにすることは MEMS 設計開発における重要課題といえる。同時に、要求性能を満足するためにどのような概念(コンセプト:Concept)に基づいて、どのようなデバイス開発を行うべきかという製品開発の“フィロソフィ(Philosophy)”を開発の初期段階で明確にすることは、MEMS 開発における試行錯誤のプロセスを排除するために最も必要とされていることである。

このような点を考慮するために、コンピュータを利用することによって人間の思考をサポートし、設計開発の効率化を図る CAE (Computer Aided Engineering) 技術の MEMS への適用が進んでいる^[3]。特に、マイクロスケール特有の物理現象や寸法効果などを考慮した高度な設計と、数値情報に基づく最適解の導出では CAE 技術は大きな効果をあげている。しかし、設計者の思考を発展させる、あるいは支援することを目的とした CAE 手法はこれまであまり報告されていない。開発コンセプト自体を評価し、製品の良し悪しを開発プロセス初期の段階で定量的に判断することは、設計

開発の流れを決定する重要なことであるにも関わらず、その領域で利用できる CAE 技術の確立は遅れている状況にある。

そこで本研究では上述した背景に鑑み、MEMS 開発を高効率化させ且つ新しい価値を生み出すための新しい設計支援手法を提案する。設計支援手法は MESA (MEMS Early-Stage Analysis) と呼称され、MEMS デバイス設計開発の初期段階において設計者に必要となる設計情報を提供して設計支援を行うとともに、“システム”としての MEMS デバイス開発コンセプトの数値的評価を可能とすることを目的とする。MESA ではシステムにおける「設計因子」とシステムに要求される「性能」の関係に着目し、特に設計因子間のトレードオフ (Trade-off)、すなわち同時に満足できない諸因子間の取捨選択の有無が、システムの設計開発の優劣に影響するとした基本評価概念に基づいている。システムに内在する構造上のトレードオフの解析に基づく設計キャパシティの評価によってマクロ的な“あたり”をつけるための概念設計を可能とし、新規コンセプトの創出を支援する。本論文では MESA の基本的概念について詳細を述べるとともに、既存の MEMS デバイスの性能分析に MESA を適用し、手法の妥当性を検証する。また、MESA を実際に MEMS デバイス開発に適用し、新しいコンセプトの設計支援について実用化検討を実施した結果について議論する。

1.2 論文構成

本論文の構成概略を以下に示す。

第2章では、まず MEMS とその製造技術であるマイクロマシニングについて概略を説明する。特に製造技術では、本論文中の MEMS デバイス設計開発に適用した汎用プロセスの Poly MUMPs (Multi User MEMS Process) 及び Metal MUMPs について、その層構成、設計制約などについて詳述する。また、MEMS の技術動向として、本論文内で議論対象となっている静電駆動アクチュエータ、電熱駆動アクチュエータ、マイクロミラーシステム、及び RF (Radio Frequency) スイッチについてそれらの構造、及び駆動原理、特徴などについて説明をする。

第3章では、MEMS 設計開発の現状と問題点を分析し、その特異性について述べると共に、現行 CAE 技術の課題を明確にすることで、MEMS 設計者が製品開発上で必要とする設計情報とは何か、設計者が CAE に求める設計支援とは何かを議論する。また、CAE 技術については、設計開発プロセスの上流段階と下流段階に適用されるものに分類し、各領域における代表的な手法の特徴について詳述する。そして、MEMS デバイス開発の時間短縮、コスト低減のためには、単純に最適解を求めるだけではなく、システムに内在する物理現象の原理原則を理解することと、設計初期の段階における概念設計、すなわち本来定性的である設計領域の定量的評価・最適化が重要であることを述べる。

第4章では、本論文の骨格となる新規概念設計支援手法の MESA について、そのアプローチ及び支援手法の概念を説明する。MESA ではシステムにおける設計因子と性能に注目し、その関係を「感度」という形で数式化する。感度からシステムに存在する設計トレードオフや設計因子の性能への影響度などが把握でき、設計キャパシティの評価が可能になることを示す。また、「マトリックス」

形式での設計情報の視覚化、「重み関数」「システム評価点」を用いたコンセプトの定量的評価方法について言及する。

第5章では、MESA を MEMS デバイス設計に適用して手法の妥当性の検証を行うと共に、異なるシステム間の性能について比較検討を行う。駆動方法の異なるピストンマイクロミラー及びマイクロアクチュエータについて MESA による性能解析を実施して、各々構造的に存在する設計トレードオフ、物理現象を把握し、システムの設計キャパシティを明確にする。また、重み関数を変化させることで異なる設計状況におけるシステム評価を行い、駆動方法の違いによるそれぞれの構造的特徴について分析を行う。

第6章では、RF MEMS スイッチ開発の概念設計段階に MESA を適用し、新規スイッチングコンセプトの設計支援について実用化の検討を行う。まず従来のカンチレバー型 RF MEMS スイッチにおける構造的問題点を MESA によって分析し、設計上のトレードオフを抽出する。その後、獲得した設計情報をもとに機械的信頼性を向上させる新規スイッチングコンセプト及び構造を提案する。MESA によって明確化された設計上の問題点を解消することによって連続的に新しいコンセプトを創出することができ、開発中期・後期における無駄な繰り返し作業が省かれて設計開発の高効率化がなされることを議論する。

第7章では、本論文で提案する MESA の特徴と有効性及び貢献性について総括するとともに、今後の研究課題について述べ本論文を締めくくる。

参考文献

- [1] 木浦成俊編, マイクロマシン/MEMS 技術大全, 電子ジャーナル, 2003.
- [2] J. A. Pelesko and D. H. Bernstein, *Modeling MEMS and NEMS*, Chapman & Hall/CRC, 2003.
- [3] 財団法人マイクロマシンセンター編, MEMS 設計・解析支援シミュレーションシステムに関する調査研究報告書, 機械システム振興協会, 2003.

第 2 章

MEMS

*Don't care what people say.
Just follow your own way.
Don't give up and use the chance to return to innocence.
That's not the beginning of the end.
That's the return to yourself.*
他人が何をどう言おうと
自分の思うままに進め。
諦めず、機会に乘じ、無垢への回帰を図る
それは終焉の始まりではなく、
自分への回帰である。

— *Enigma*
エニグマ

2.1 MEMS とは

MEMS とは Microelectromechanical Systems の略称であり、IEC (International Electrotechnical Commission) では以下のように定義されている。

MEMS : micro-sized electromechanical systems, in which sensors, actuators and/or electric circuits are integrated on a chip using semiconductor process

すなわち、MEMS とは、半導体プロセスによってセンサ、アクチュエータ、電気回路が集積化された電気と機械の機能を兼備したマイクロスケールのシステムである。また、半導体プロセスにおけるフォトリソグラフィを基本した微細加工技術はマイクロマシニングと呼ばれ、この技術によって MEMS 特有の電気機械システムの製作がなされている。近年では、シリコン基板をベースとした MEMS に限らず、高機能ポリマーやセラミックス等を基材とし、フォトリソグラフィ以外のレーザ加工、電気鋳造、ブラストといった加工成形技術を用いて MEMS 構造体を製作する研究開発も活発であり、MEMS の定義域は拡大しつつある。MEMS は従来技術では達成できなかった優れた特性や新しい性能を実現するためのツールとして、また技術課題解決のソリューションのひとつとして有望視されており、自動車や情報・通信、医療・バイオ、家電といった幅広い分野での実用化が進みつつある (Table 2.1、2.2 参照)^[1,2]。

MEMS の特徴としては、第一に小型・軽量であることが挙げられる。マイクロスケールになることで空間的分解能が高くなると同時に、構造体の慣性や熱容量が小さく、蓄積するエネルギーが微小となるため、高感度なセンシングや高速・高精度での駆動などが可能となる。自動車における高感度の加速度センサやジャイロ、インクジェットプリンタにおけるマイクロインジェクション機構などはこの MEMS の特徴を示す実施例である^[3-5]。第二に、MEMS では電気回路、アクチュエータ、光部品、磁気部品、流体機構など、多機能をひとつのチップ上に集積化することが容易であり、従来技術では実現しえない高度なシステムの構築が可能である。複合集積化された MEMS によって自律制御のマイクロロボットやマイクロ人工衛星なども実現されつつある^[6,7]。第三の特徴としては、フォトリソグラフィ等のバッチ (一括) 処理による多数個のデバイス製作、組立てが短時間で可能であるため、複雑な微細構造体であっても低コストで大量に生産できることが挙げられる。この「量が質を制す」例としては、数十万個からなるマイクロミラーアレイを利用した DMD (Digital Micro Display) や、光通信において 1,000 チャンネルの信号を同時にスイッチングできる OXCs (Optical Crossconnects) と呼ばれるマトリックス光スイッチなどがある^[8,9]。

一方、MEMS の欠点としては、処理可能なエネルギー量が小さい、出力が小さいなどの主にスケールの要因のものが多い。また、MEMS が未だ進化し続けている技術であるため、設計開発、製品開発における標準化の遅れ、材料やプロセスのデータベース未整備に起因する欠点もある。これらについては第3章にて取り上げ詳細な議論を行なう。

Table 2.1 Classification of MEMS [1].

種別	応用分野	技術の特徴
センサMEMS	圧力センサ、加速度センサ等、各種センサ	最も早く開発された分野で、自動車用を中心に実用化が進んでいる。
アクチュエータMEMS	静電モータ、マイクロポンプ等、各種アクチュエータ	静電、電磁、圧電等の駆動力を活用する。他のMEMSでも部分的にアクチュエータを内蔵している場合が多い。
光MEMS	光ファイバー通信用スイッチ、プロジェクタ用マイクロミラー	マイクロミラーとその制御系により光ファイバースイッチやプロジェクタの反射光制御を行なう。
RF MEMS	マイクロ波スイッチ、フィルタ等無線通信用部品	マイクロ波スイッチ、バ拉克タ、インダクタやその組み合わせでチューナブルフィルタ等の各種可変回路を構成。
マイクロTAS	超小型化学システム、分析システム	ガラス基板上に数十～数百 μm の微細な流路を形成し、その流路内で混合、反応、分離、検出などを行なう。 集積化化学システム、Lab-on-a-Chip(ラボオンチップ)などとも呼ばれる。
バイオMEMS	遺伝子機能解析、蛋白質解析	遺伝子機能解析のためのDNA チップや蛋白質を検出する蛋白質チップなど、ポストゲノムのバイオ分子の機能解析技術である。
パワーMEMS	超小型発電機、燃料電池等	1 cm以下の寸法の発電機や燃料電池を開発して、10～100 Wクラスの発電を目指す。まだ研究開発の段階。

Table 2.2 MEMS applications [2].

分野	応用	MEMS技術の事例
情報・通信	印刷表示	インクジェットプリンタヘッド DMD (Digital Micromirror Device) FED (Field Emission Display) 平板マイクロレンズ
	記録	薄膜磁気ヘッド 集積化光ヘッド ヘッド用アクチュエータ
	光通信	光スイッチ 光コネクタ 光変調器 光フィルタ
	無線通信	RFフィルタ (振動子) 可変キャパシタ ミリ波部品 (アンテナなど) RFスイッチ (リレー)
	入力機器	マウス (電子ペン) マイクロフォン 光スキャナ 個人識別センサ (指紋センサ)
	電源	燃料電池 燃料改質器
	実装部品	コネクタ マイクロクーラー
運輸・家電	機械量センサ	圧力センサ 加速度センサ ジャイロ
	エンジン制御	燃料噴射ノズル 流量センサ
	外界検知電源	赤外線イメージャ マイクロエンジン発電機
製造・計測	顕微鏡	走査型プローブ顕微鏡
	分析機器	光スペクトロメータ
	検査	LSIプローブ用ヘッド
	リソグラフィ	電子線制御 シャドーマスク
	流体制御	マイクロバルブ・ポンプ マスフローコントローラ
医療・バイオ	メンテナンス	狭所作業・マイクロツール
	宇宙機器	マイクロスラスタ
	センサ	血圧モニタ 成分モニタ
	低侵襲医療	内視鏡用光スキャナ 能動カテーテル・ガイドワイヤ 超音波内視鏡 微細作業ツール 飲込カプセル
	体内埋め込み	人工内耳 埋め込み型認識タグ
	検体検査	DNAチップ オンチップ化学分析 オンチップ粒子分析
	試薬合成	マイクロリアクタ
	注入採取	ドラッグデリバリーシステム 注入・採取プローブ
	細胞操作	細胞融合チップ
環境・防災	監視	赤外線イメージャ
	ガス分析	同時分光用赤外線センサ
	地震	加速度センサ

2.2 マイクロマシニング

マイクロマシニングは、加工プロセスとその適用領域の違いによって表面マイクロマシニング (Surface Micromachining) とバルクマイクロマシニング (Bulk Micromachining) に分けられる。本節では各々の特徴について説明した後、本論文におけるMEMSデバイス群の設計・製作に使用する汎用ファンドリプロセスについて詳述する。

2.2.1 表面マイクロマシニングとバルクマイクロマシニング

表面マイクロマシニングは、Figure 2.1 に示すように機能層 (Structural Layer) と犠牲層 (Sacrificial Layer) を、化学気相堆積法 (Chemical Vapor Deposition : CVD) や、蒸着法 (Evaporation)、スパッタリング法 (Sputtering) などの成膜プロセスとフォトリソグラフィによって基板表面に形成し、エッチングによって犠牲層を除去することで機械的に可動となる機能層を露出させる加工方法である。

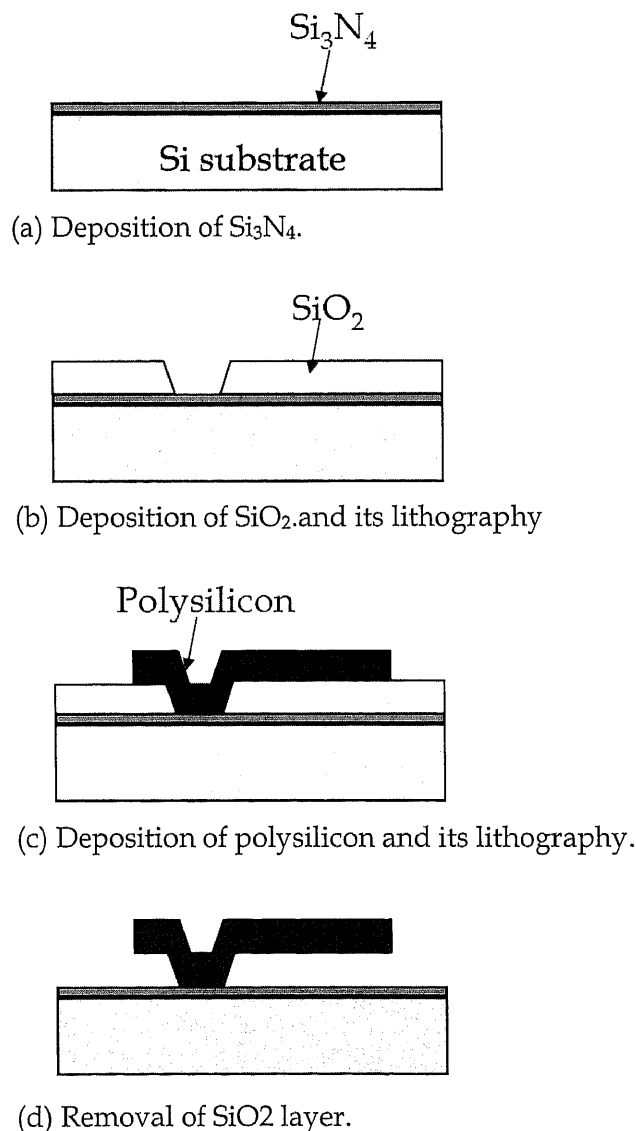


Figure 2.1 Example of surface micromachining.

Figure 2.1 におけるプロセスは例では、(a)シリコン基板上に窒化珪素(Si_3N_4)膜を形成後、(b)酸化珪素(SiO_2)膜をその上部に積層し、フォトリソグラフィによってパターンニング、(c)さらに三層目として多結晶(ポリ)シリコン(Polysilicon)膜を成膜し、フォトリソグラフィによってパターンニング、(d)最後に SiO_2 の犠牲層除去といった順で実行され、最終的にポリシリコンの独立機能層が基板上に形成される。この表面マイクロマシニング技術は CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 集積回路の製作技術とコンパクトで利用することが可能であるため、MEMS 構造と制御回路の集積化に適用しやすいなどの利点がある。また、Figure 2.2 に示すような蝶番(ヒンジ)やベアリング、ラッチング構造を形成し組み合わせることで、三次元的な表面領域外立体構造や、複雑で多機能なシステムの構築も実現可能である^[8]。ただし、現行の表面マイクロマシニング技術における成膜効率・エッチング効率は低い(数 $\mu\text{m}/\text{min}$)ため、バルク構造体の製作に長時間を必要とすること、熱膨張率の異なる材料を積層した際の成膜温度と使用環境温度との違いに起因する残留応力の制御が必要であること、及び犠牲層をエッチングによって除去し乾燥する場合の表面張力によるスティクション(Stiction)を抑制することなど、設計開発段階で留意すべき点も多い。

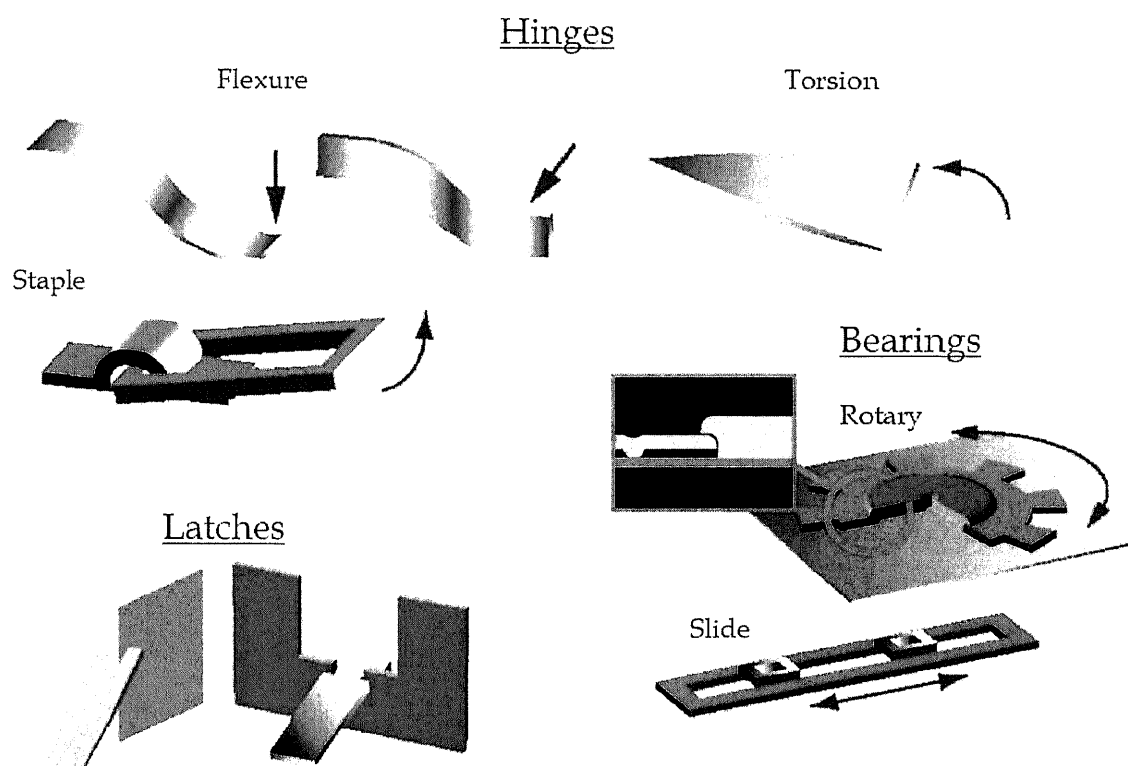


Figure 2.2 Structures of hinges, latches, and bearings [8].

一方、バルクマイクロマシニングは、深堀エッチングや接合などによって立体的な微細加工を行うもので、表面マイクロマシニングよりも空間自由度の高い構造体を実現できる製造技術である。バルクエッチングには、結晶異方性エッチング (Anisotropic Etching) などのウェットエッチング (Wet Etching) と、深堀反応性イオンエッチング (Deep Reactive Ion Etching : DRIE) などのドライエッチング (Dry Etching) が用いられる。

ウェットエッチングはエッチング液を用いて化学反応により基材を溶解する方法であり、基板材質、エッチング液の種類によって等方性あるいは結晶異方性エッチングが可能である。Figure 2.3 にシリコンの等方性及び異方性エッチングの例を示す^[10,11]。シリコンのエッチングにおいて弗酸 (HF) と硝酸 (HNO₃) の混合水溶液を用いた場合、エッチング液に接触している部分から溶解が進み、(a) に示すような形状で等方的なエッチングが行なわれる。また、水酸化カリウム (KOH) 水溶液などのシリコンに関して溶解選択性のあるエッチャントを用いると、(b) に示すような結晶異方性を持った構造を得ることができる。これはシリコン結晶面の結合の強さや見かけの原子密度の違いによるもので、シリコンの場合 {100} 面が最もエッチングされやすく、次に {110} 面、{111} 面の順になる ({111} 面と {100} 面のエッチング速度比はおおよそ 1:35^[12])。そのため、エッチングの基準面によって材料独特の角度を持った形状を得ることができる。

また、ドライエッチングでは高アスペクト比を得ることができる DRIE が主に用いられる。DRIE ではイオンを基板に照射することで垂直な加工が可能である。特にシリコンの場合、フッ素イオンのような反応性イオンを用いることで、高速で、垂直且つ高深度のマシニングが行なえる。Figure 2.4 に示すようなエッチング用のガス (SF₆) と、側面保護膜形成用のガス (C₄F₈) を交互に導入することで垂直方向を選択的に掘り下げていく手法 (ボッシュプロセス) では、アスペクト比が 50 以上となる加工結果も報告されている^[2,10]。

以上のようなマイクロマシニング技術を汎用プロセスとして提供するファウンドリ (Foundry) サービスは現在数多くある。次節ではその代表例として、本研究で使用する MEMSCAP 社の MUMPs (Multi User MEMS Process) について述べる。

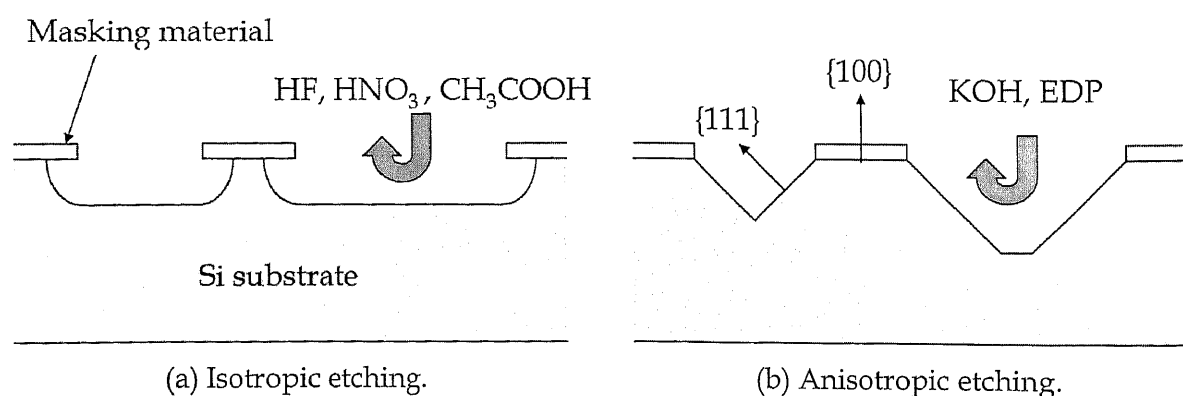


Figure 2.3 Isotropic and anisotropic etching of silicon [10,11].

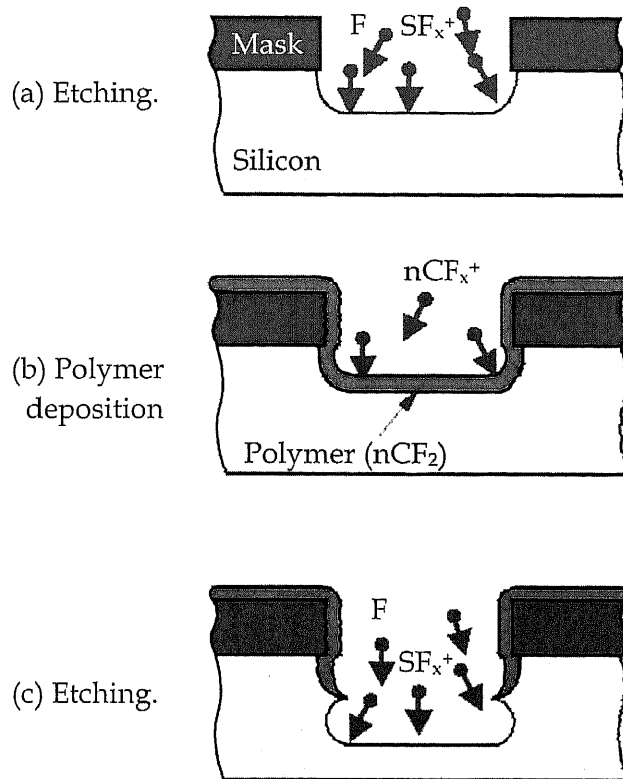


Figure 2.4 Schematic of reactive ion etching (Bosch process) [10].

2.2.2 Poly MUMPs と Metal MUMPs

本論文における MEMS デバイスは、全て MUMPs を基準として設計製作されている。MUMPs は汎用ファンドリサービスとして提供されている MEMS プロセスのひとつであり、三層ポリシリコンを機能層とする Poly MUMPs、ニッケルの厚膜めっき層を機能層とする Metal MUMPs などがある。

Figure 2.5 に Poly MUMPs、Figure 2.6 に Metal MUMPs の層構成と各層の厚さを示す^[13,14]。Poly MUMPs は、n 型 <100> シリコンウェハ上に、二層のポリシリコン機能層 (Poly-1、Poly-2) 及び一層のポリシリコンアンカー層 (Poly-0)、二層の PSG (Phosphosilicate Glass : リンがドーピングされた SiO_2) 犠牲層、 Si_3N_4 層、及びメタル層で構成されている。ポリシリコン機能層は、犠牲層を除去後にシリコン基板から独立した浮遊層となるため、フォトリソグラフィによって層の重ね合わせやアンカー処理を行なうことで機械的な機能層として利用できるようになる。また、PSG にドーピングされているリン (P) が、成膜工程中の高温処理時にポリシリコン層へ拡散するため、ポリシリコン機能層は電気伝導性を帯びることになる。

一方、Metal MUMPs は電気めっき法によって形成される厚さ $20\mu\text{m}$ のニッケル層を主機能層として利用するプロセスである。ニッケル (Ni)、金 (Au) といった電気抵抗率の小さい金属材料による構造体形成及び配線が可能であるため、電氣的なスイッチングやリレーなどの MEMS デバイス製作に適用される。各プロセスの成膜工程詳細は付録 A として説明する。

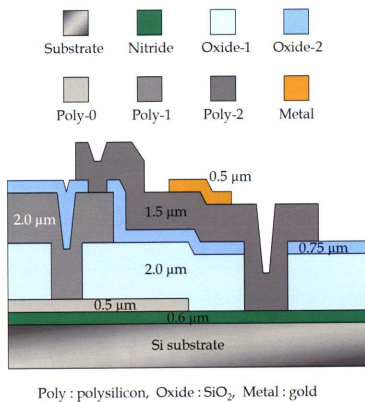


Figure 2.5 Cross sectional view of Poly MUMPs [13].

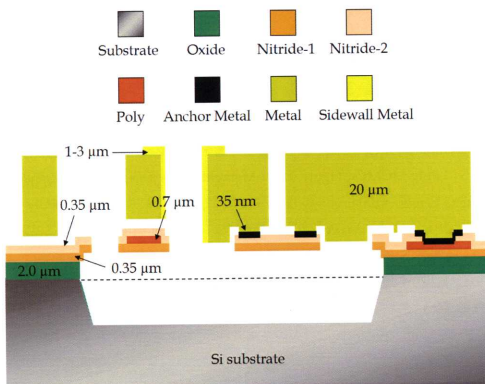


Figure 2.6 Cross sectional view of Metal MUMPs [14].

2.3 MEMS 技術動向

2.1 節で述べたように、MEMS は様々な産業分野での応用展開が進んでおり、デバイスの実用化がなされている。本節では MEMS デバイスの技術動向として、本論文で議論対象となるアクチュエータ、それを利用したマイクロミラーシステム及び RF MEMS スイッチについて詳述する。

2.3.1 マイクロアクチュエータ

MEMS アクチュエータは、駆動原理によって静電方式、電磁方式、圧電方式、電熱方式などに分類され、また運動形態も直動型、回転型、伸縮型など多様な種類に分けることができる。各方式で変位量、パワー、消費電力、サイズなどに一長一短があるため、用途によって最適な方式を選定し MEMS デバイ스에組み込む必要がある。ここでは、後述するミラーシステムと RF MEMS スイッチにおいて適用される静電方式と電熱方式の二方式について述べる。

2.3.1.1 静電駆動マイクロアクチュエータ

マイクロアクチュエータの駆動力として最も幅広く利用されているものは静電気力である。代表的な静電気力駆動のアクチュエータとして水平駆動櫛型 (Electrostatic Comb-drive) アクチュエータを Figure 2.7 に示す^[15]。櫛型形状の固定電極と可動プレートの上に電圧を印加することによって発生する静電気力と、基板に接続されているコの字型ばねの復元力との釣り合いによって可動プレートの変位量が決定する。図のアクチュエータ構成では上下対向する形で櫛型電極が配置されているため、周期電圧を上下電極部に付加することによって、可動プレートを振幅させることが可能となる。可動プレートに接続されているコの字型のばね形状や櫛歯電極の数、幅などが構造の設計因子としてあり、それらを調節することによって所望の印加電圧、変位量、応答性などの特性を変えることが可能である。また、駆動源は静電気力のみであり電流は流れないため、理論上電力消費は発生しないことを特徴としている。

但し、マイクロスケールであるため出力は小さいとともに、一般的に高電圧での駆動が必要となるため、組み込むデバイスによっては昇圧回路が別途必要となる場合もある。また、静電アクチュエータは、非線形の静電気力と線形ばね力の均衡で成立しているため、そのバランスが崩れ静電気力がばね力を上回った場合 (初期の電極間距離の $1/3$ の変位量が発生した状態) には、スナップスルー (Snap-through) と呼ばれる電極同士が急激に密着する現象が生じる。そのため、自由駆動可能な変位を確保するためには電極間距離を予め大きくとる必要があるが、アクチュエータサイズが大きくなったり、必要電圧が高くなるなどの設計トレードオフが存在する。

静電気力を用いたものでは、櫛型アクチュエータ以外に、メンブレン (Membrane) 型、バイモルフ (Bimorph) 型、スクラッチドライブ (Scratch-drive) アクチュエータなど、多様な形状が報告されている^[10,16,17]。メンブレン型についてはピストンマイクロミラーの節にて別途記述する。

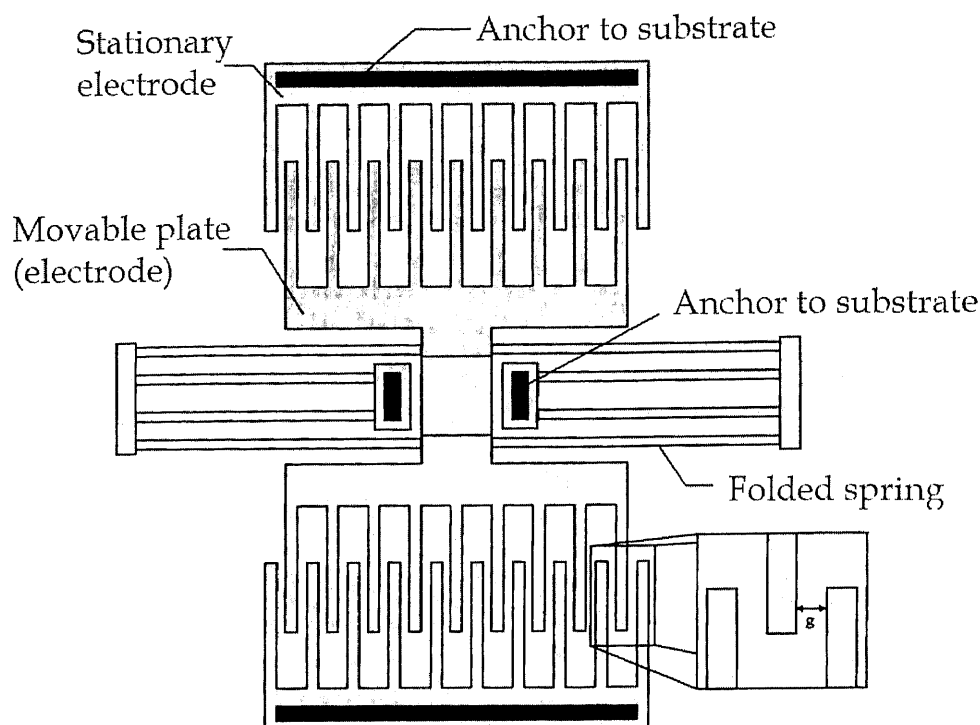


Figure 2.7 Schematic of electrostatic comb-drive actuator [15].

2.3.1.2 電熱駆動マイクロアクチュエータ

次に、熱膨張による変形を利用した電熱駆動 (Electro-thermal) アクチュエータの例として、水平駆動型 (Lateral) を Figure 2.8 に、垂直駆動型 (Vertical) を Figure 2.9 に示す^[18,19]。Figure 2.8 に示す水平駆動型アクチュエータは、先端部が基板上を水平方向に変位するものである。幅の異なる二本のアーム (ホットアームとコールドアーム) から構成されており、先端部で両者が接続されている。電圧を二本のアーム端部に印加した場合、電流が図中点線のようにアーム内部を流れるが、二本のアームの電気抵抗が異なるため、電気伝導率差に起因する温度差が発生する。ホットアームがコールドアームに比べて選択的に高温になるため熱膨張差が生じてホットアームがより伸長するため、アクチュエータ先端部は図中下方向へ変位する。Figure 2.9 における垂直駆動型アクチュエータは、Poly MUMPs に基づいて設計されたものである。水平駆動型と同様の原理で駆動するが、ホットアーム (Poly-1) がコールドアーム (Poly-2) よりも下層に配置されており、ホットアームが伸びた場合にアクチュエータ先端部を垂直上方へ突き上げるような形で基板に対し垂直方向に変形する。

これら電熱駆動アクチュエータは、前節で述べた静電アクチュエータと比較して構造が単純且つ小型であり、他の要素構造体とアセンブリして容易に駆動システムを構築することが可能といった特徴がある。また、マイクロスケールであるため熱容量と放熱性の比が小さく、応答性も悪くない。しかしながら、原理的にはジュール熱を利用しているため、使用環境の温度によって駆動特性が変化する可能性があること、アクチュエータ自体の熱量が他の構造に伝達し悪影響を及ぼすこと、熱エ

ネルギーロスによる電力消費があることなどが欠点として挙げられ、連続的に駆動させるような MEMS デバイスではあまり使用されていない。

電熱駆動を用いたものでは、他にバイモルフ構造に電流を流し、その発熱による反り変形を利用するタイプがあるが、その詳細はマイクロミラーシステムの節で説明を行なう。

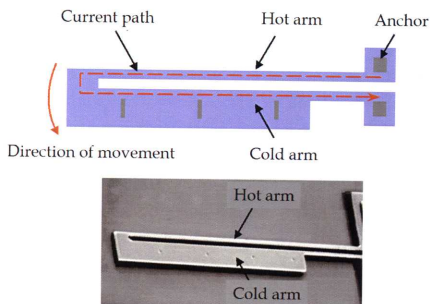


Figure 2.8 Schematic and photo of lateral electro-thermal actuator [18].

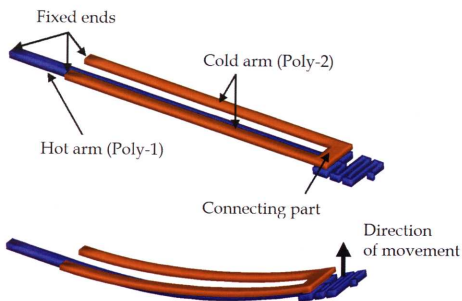


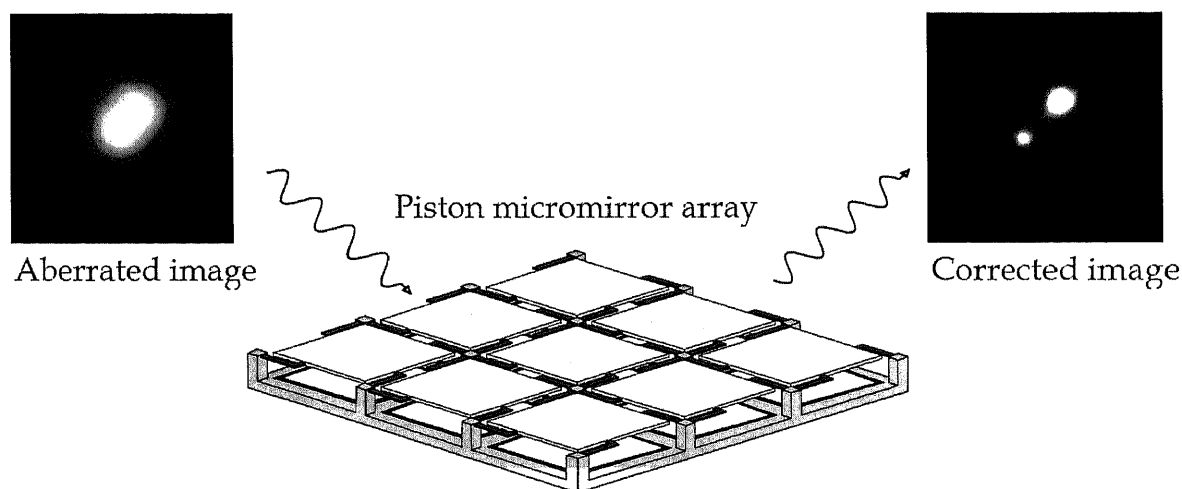
Figure 2.9 Schematic and vertical electro-thermal actuator [19].

2.3.2 マイクロミラーシステム

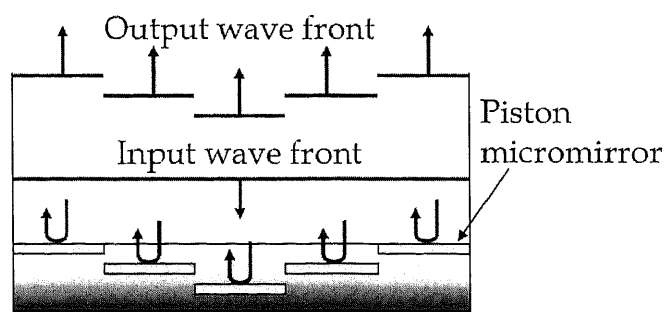
前節で説明したアクチュエータなどの駆動システムを組み込んだスキャンニングやスイッチングを行なうためのマイクロミラーシステムがこれまでに数多く報告されている。本節ではマイクロミラーシステムの中で、前節で取り上げた静電駆動方式と熱電駆動方式のアクチュエータを用いたミラー構造例をあげ、各々のシステムの特徴について述べる。

2.3.2.1 ピストンマイクロミラー

ピストンマイクロミラー (Piston Micromirror) は、光学的な補正 (Adaptive Optics) を行なうシステムに適用されるものである。ピストンミラーで構成された二次元アレイによって乱れを含む光を受光し、ミラー面の高低差を利用して波面の調整を行なう収差補正などに利用される (Figure 2.10 参照)^[20,21]。高解像度・高分解能の必要性から MEMS マイクロミラーアレイが天体望遠鏡などの画像イメージングコントロール、光通信などに採用されつつある。重要な要求性能としては、ミラーの駆動量、ミラーの小型化、駆動応答性など共に、ミラー反射部が占有する面積比 (Fill Factor) やミラーのフラットネスも光学特性を決定する上で考慮する必要がある。



(a) Image of aberration correction.

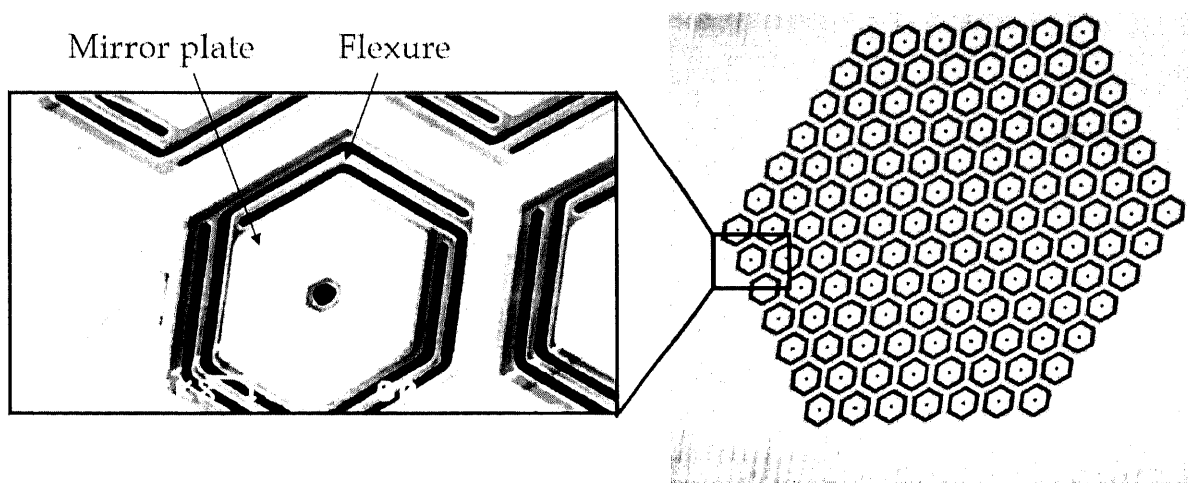


(b) Cross sectional image of wave front adjustment with piston micromirror array.

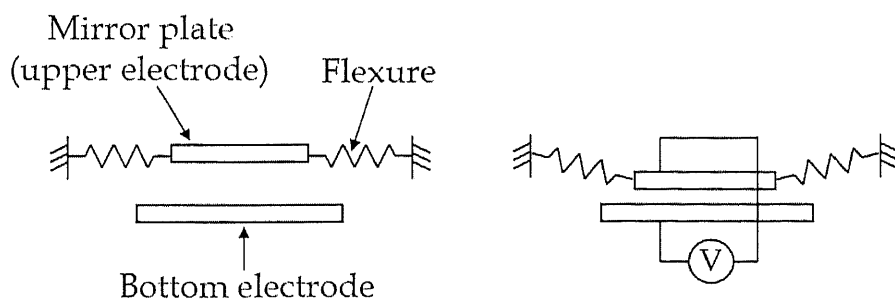
Figure 2.10 Aberration correction by using piston micromirror array [20, 21].

Figure 2.11 に光学補正に適用される静電駆動型ピストンマイクロミラーの例を示す^[11]。ミラー構造は Poly MUMPs により製作されたものであり、ミラー板と鏡面メタル層、ミラー板を支持するフレキシヤ及び下部電極(図中では表示されていない)から成る。上部電極に相当するミラー板と下部電極の間に電圧を印加することによって静電気力が発生し、フレキシヤのばね力とのバランスによって上下方向のミラー板位置が定まる。静電気力駆動では高応答性、電力消費が無いといった特徴があり、またミラー面を平行維持した上下駆動も容易であるため、安定した光学特性を得ることができる。但し、図で示した構造ではミラー板とフレキシヤが同一面内にあるため、ミラー占有面積は大きくない。また、Poly MUMPs の層構成ではミラー板と基板上の下部電極との最大間隔は数 μm であり、ミラー駆動量が制限される欠点がある。

次に、電熱駆動型のピストンマイクロミラーシステムを Figure 2.12 に示す^[21]。このミラーシステムはポスト及びミラー板をバイモルフ型のカンチレバーによって懸架する構造になっており、各ミラー板下部には異方性バルクエッチングによってマイクロピットが形成されている。バイモルフカンチレバーは Si_3N_4 層と Au 層によって電流パスとなるポリシリコン層をサンドイッチした構造になっており、ポリシリコン層に電流を印加することによってカンチレバーが発熱し、 Si_3N_4 と Au の熱膨張差によってカ



(a) Photos of electrostatic piston micromirror array.



(b) Behavior schematics of electrostatic piston micromirror.

Figure 2.11 Photos and behavior schematics of electrostatic piston micromirror array [11].

ンチレバーが反り変形を示す。本構造では電熱アクチュエータ構造の小型且つ単純であるという特徴を活かし、フリップチップ (Flip Chip) プロセスによって駆動構造体上にミラー板を別途実装しており、前述した静電駆動型ミラーシステムよりも大きなミラー占有面積を確保している。また、アクチュエータ下部にピットを設けたことによって上下方向の駆動領域が拡大し、変位量を大きくする工夫がされている。一方、電熱駆動では駆動時の熱量がミラー板や他の構造に伝達し、システム全体が熱膨張する、あるいは一部のみが偏った変形をする現象が懸念され、光学特性に悪影響を及ぼす可能性がある。また、駆動毎の発熱による電力消費や、応答性を向上するためにはシステム全体としての放熱性を確保する必要があるなど、設計上で考慮すべき点は多い。

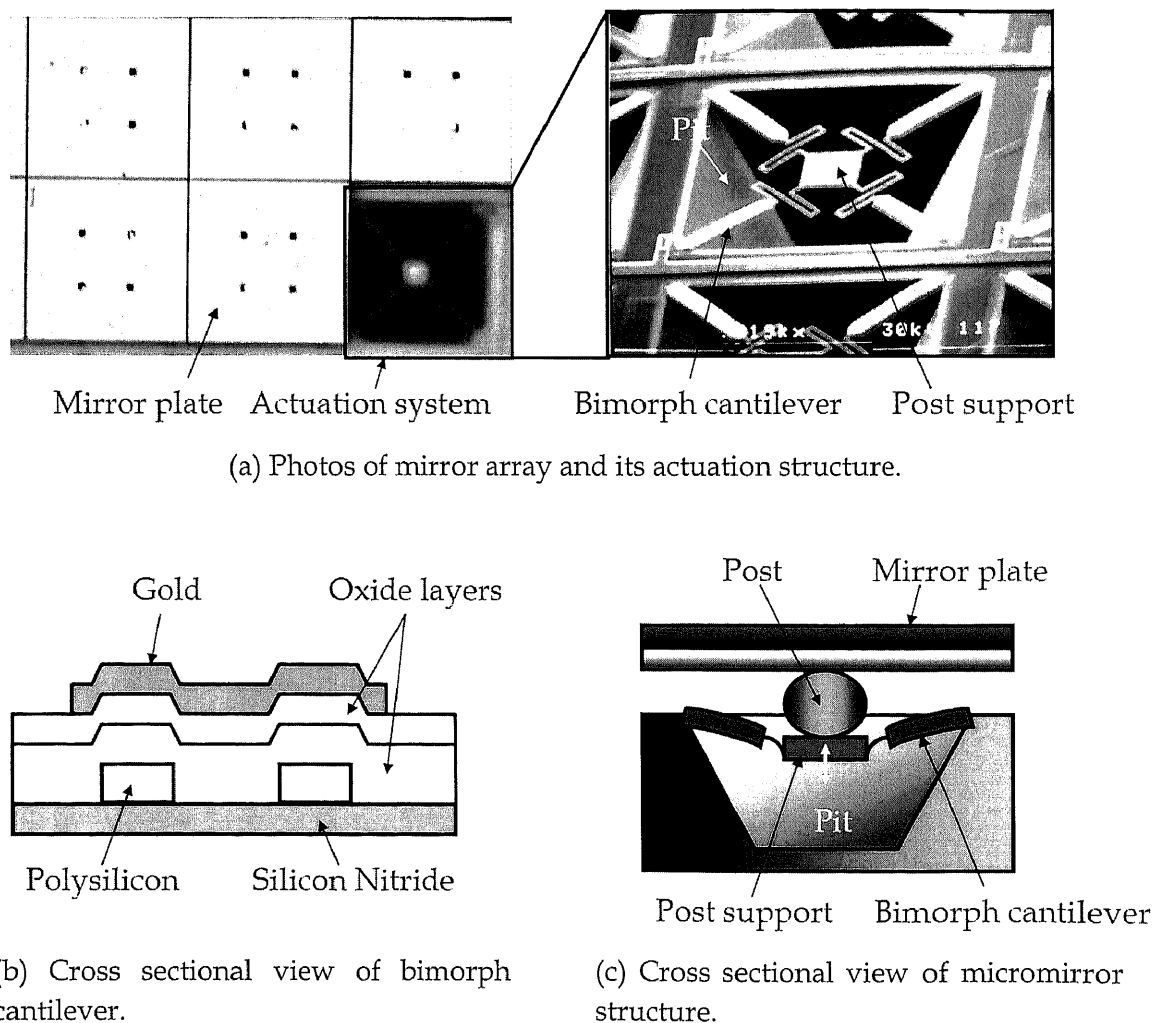


Figure 2.12 Photos and behavior schematics of electro-thermal piston micromirror array [21].

2.3.2.2 ステアリングマイクロミラー

ピストンマイクロミラーが一次元的な挙動のみであるのに対し、二次元的な駆動や連続的な角度調整が可能な行なえるものをステアリングマイクロミラー (Steering Micromirror) と呼ぶ。用途はスキャンニングやディスプレイ、光通信における光スイッチや光アッテネータ、光軸調整などに幅広く利用されている。用途や大操舵角度・高応答性といった要求仕様に合わせて、様々な駆動方式、ミラーの角度調整機構及びサスペンション機構などが報告されており、DMD の様に実用化され量産されているものもある^[8,9]。ここでは、その中から本研究の一環として研究開発した静電駆動方式と電熱駆動方式のステアリングマイクロミラーについて述べる。

Figure 2.13 に静電駆動式の一次元ステアリングミラーを示す^[22]。このミラーアレイは光通信ネットワーク中の大規模スイッチングシステムに適用されるミラー原理構造であり、ミラーによってレーザ光を受け所望の角度で反射して光信号の切り替えを行なうものである。本システムは、ミラー板(上部電極)、ミラー板を指示するトーションばね、及び下部電極から構成されており、Poly MUMPs によって設計製作されている。また、大きなミラー角度を得るためにはんだバンプを利用して基板上にフリップ実装されており、はんだバンプの高さを必要性能に応じて変えることによって、操舵角度、駆動電圧などを可変することができるため設計自由度は高い。実験ではサイズ $250 \times 250 \mu\text{m}$ の大型ミラーを使用し、印加電圧 60V で変位角 5 度のレーザ光操舵性能を実現している。静電型ステアリングミラーは、静電型ピストンミラーと同様に消費電力が無い、安定した光学特性を持つといった長所があるが、ミラーを操舵するための駆動機構及びそのサポート構造が多規模化・複雑化しやすく、限られた空間に組み込むような形では使用が難しいと考えられる。

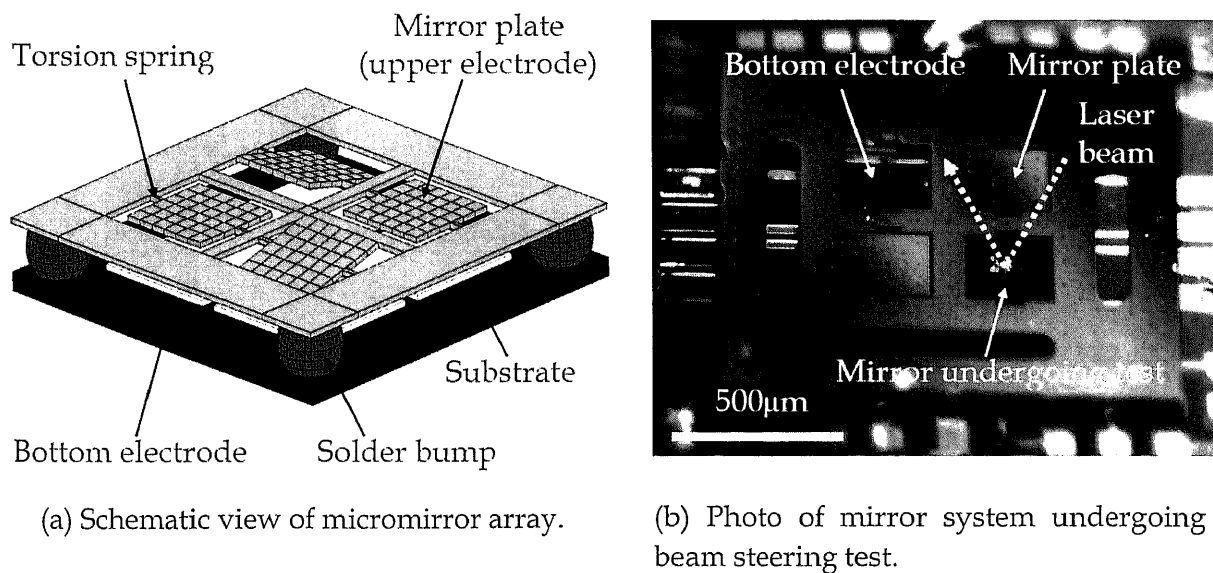


Figure 2.13 Photo and schematic of electrostatic steering micromirror system for optical switching [22].

また、Figure 2.14 に示したミラーは熱電駆動型の二次元ステアリングミラーシステムであり、レーザチップからのレーザ光をアクティブに調整し、光ファイバへ低挿入損失での調芯を行なうものである^[23]。ミラー板とその4隅に接続した4本の垂直駆動型電熱アクチュエータのみで構成された、小型且つ単純なシステムであり、実際のモジュールではレーザチップと光ファイバの間に挿入する形で使用される。Figure 2.15 に示すように、4本の電熱アクチュエータを独立制御することによって二次元的な可変操舵を可能としており、小スペースにも関わらず操舵角度 2.5 度のミラー制御性能を実現している。電熱駆動ミラーシステムの場合、発熱の影響がミラー板やその他接続されている構造体に及んで反りや歪みが発生し、光学的特性が低下する懸念がある。しかし、本システムではレーザ光の調芯を終了した時点でミラーの位置を機械的に固定するコンセプトになっており、アクチュエータ駆動による熱の影響を排除する設計思想となっている。但し、スイッチングやスキャンニングなど連続的にミラーを操舵する必要があるデバイスに適用する場合には、熱による影響を考慮した設計が必要となる。

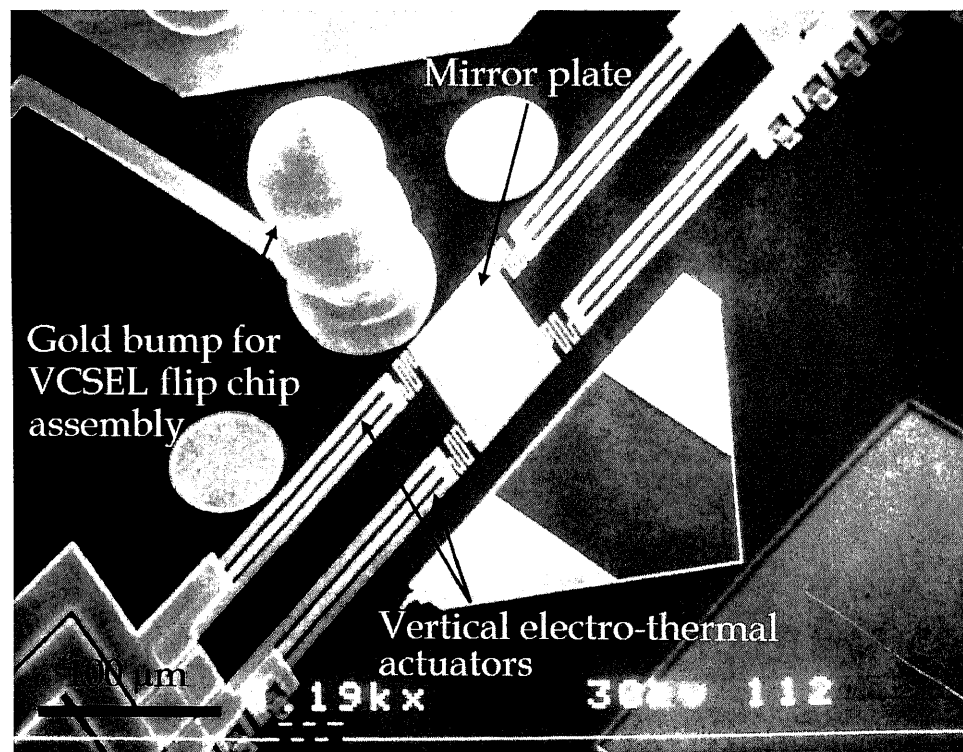


Figure 2.14 Photo of electro-thermal micromirror for VCSEL laser to fiber coupling [23].

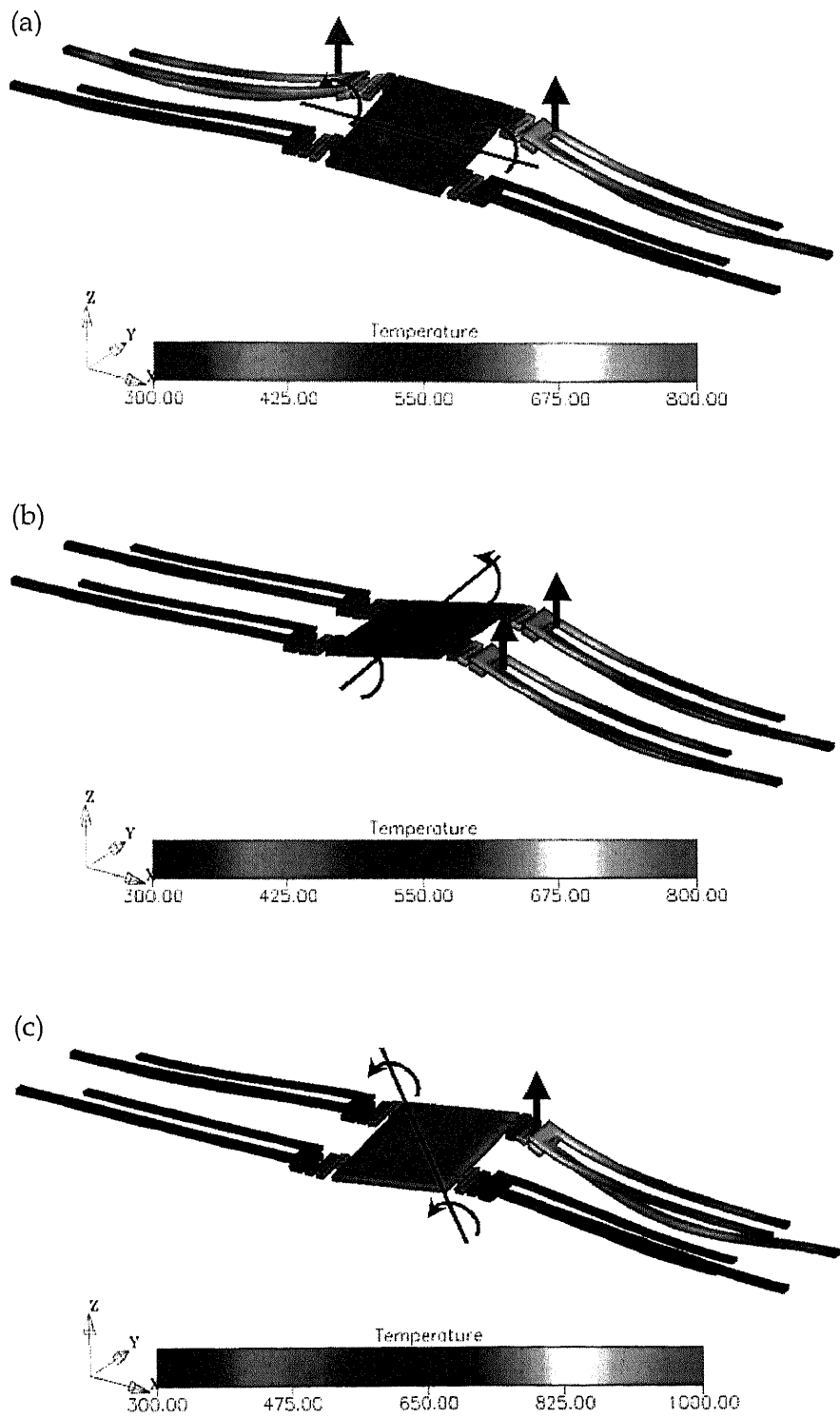


Figure 2.15. Schematics of the electro-thermal micromirror motion with temperature distribution (a) vertical tilting by two upper actuators (b) lateral tilting by two side actuators (c) diagonal tilting by one actuator [23].

2.3.3 RF MEMS

本節では、第6章で議論する新規 RF MEMS スイッチの開発の背景として、RF MEMS の概要及び RF スイッチの技術動向について述べる。

2.3.3.1 RF MEMS とは

RF MEMS とは Radio Frequency MEMS の略称であり、IEC (International Electrotechnical Commission) では以下のように定義されている。

RF MEMS : application of MEMS technology in the field of wireless communication using radio frequency bands

すなわち RF MEMS とは無線周波数帯を利用した通信分野への MEMS の応用である。MEMS の電気機械的機能と RF 制御回路との一体集積化が可能という特徴を活かし、スイッチ、インダクタ、バククタなどの要素機能をチップ上に形成し、チューナブルフィルタ、フェーズシフタなどの可変 RF デバイスを実現している^[1,24]。RF MEMS の一例として、DC コンタクト型の RF スイッチの構造を Figure 2.16 に示す。スイッチの上部電極はカンチレバー構造であり、端部はポストを介して基板に固定されており、先端部はオープン信号線上に宙に浮いた形で保持されている。上部電極と下部電極の間に電圧を印加することで静電気力が発生し、カンチレバーが下側に引き下げられることによって先端部が信号線と接触し、スイッチは ON の状態となる。電圧印加を解除すると、カンチレバーは機械的な復元力によって元の OFF 状態に戻る。この電気機械的動作は MEMS 特有のものであり、従来の電子デバイスと本質的に異なる。

RF MEMS の利点には二つの側面がある。第一の利点は従来部品の置き換えによるシステム改善である。例えば、半導体回路をひとつの MEMS デバイスによって置き換えることにより、挿入損失 (Insertion Loss) 及びアイソレーション (Isolation) といった信号伝搬のロスや劣化に影響する特性が向上するため、大幅な電力効率の改善が期待できる。また、従来ではスイッチ、インダクタなどの部品はディスクリートの外付けであったが、MEMS によってモノリシックの集積化が可能であり、全体的なサイズの縮小、コスト低減の効果も大きい。第二の利点は回路・システムの高機能化であり、MEMS によって従来技術では実現が困難であったチューナブル機能や、周波数特性の可変性、あるいはマルチ化といった機能を容易に達成することができる。

一方、RF MEMS の欠点は長期信頼性である。これは MEMS に共通する問題であるが、特に RF MEMS では技術開発の歴史がわずか 10 年程であり、実用化されているデバイスもスイッチのみということから、機械的疲労寿命などを含む耐久信頼性の評価・改善は遅れていると言わざるを得ない。また、従来技術に対して MEMS の RF 特性の優位性のみに注目が集まり、機械的耐久強度や接触・摩擦といった現象を考慮した設計が開発初期段階から為されていないことも原因のひとつと考えられる。現在の RF MEMS 分野では信頼性向上が最重要課題であり、多くの研究機関・企業で研

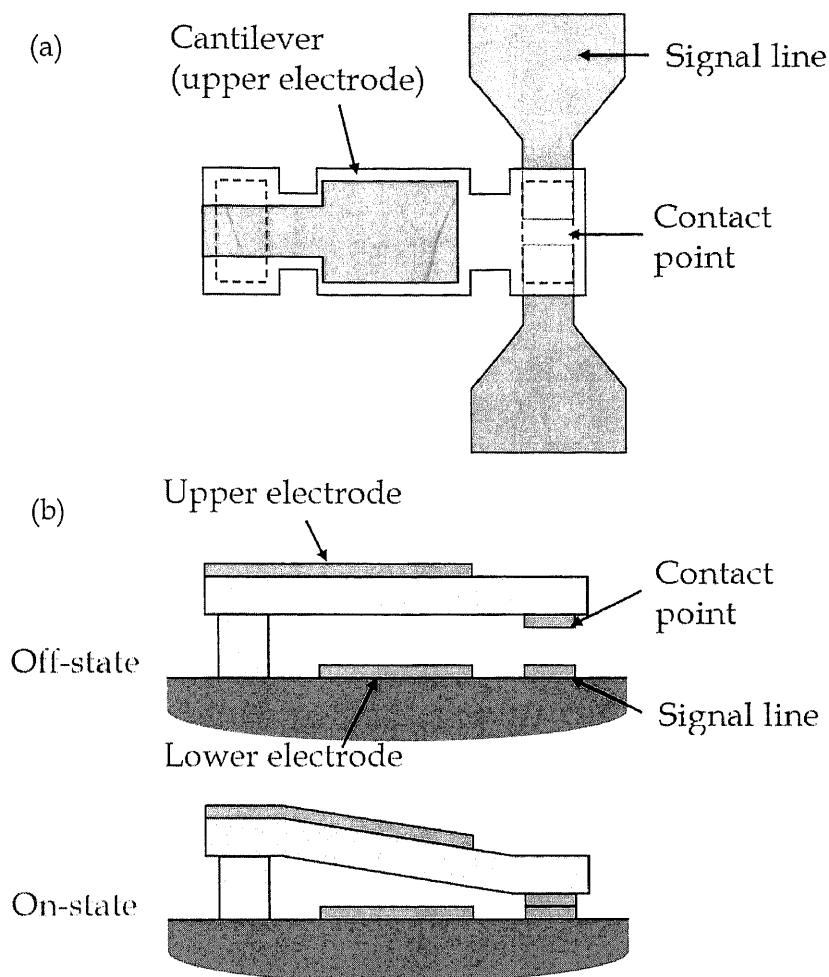


Figure 2.16 Schematics of DC-contact RF MEMS switch (a) Top view (b) Cross sectional view with off-state and on-state.

究開発が為されている。RF 特性と信頼性の両立が、RF MEMS デバイスの市場投入の可否を決定するキーポイントとなっている。

2.3.3.2 RF MEMS スイッチ

RF MEMS スイッチは、RF MEMS の中で最も実用化が進んでいるデバイスである。例えば、衛星通信システムにおける多重通信用途のフィルタや、軍事レーダシステムにおけるフェーズシフタやスイッチ、携帯電話などの無線通信における送受信切替スイッチなど、幅広い分野に要素デバイスとして適用されている^[25]。

これまでに報告されている RF MEMS スイッチは、その構成、スイッチングの結合方式、伝送路との位置関係などの違いによって Figure 2.17 のように 6 種類に分類することができる^[1]。シリーズスイッチ (Series Switch) は伝送路に直列に配置されるもので、コンタクト時に ON ステートで伝送路はショートし、コンタクトしていない状態では OFF ステートとなり、伝送路はオープンになる方式のスイッ

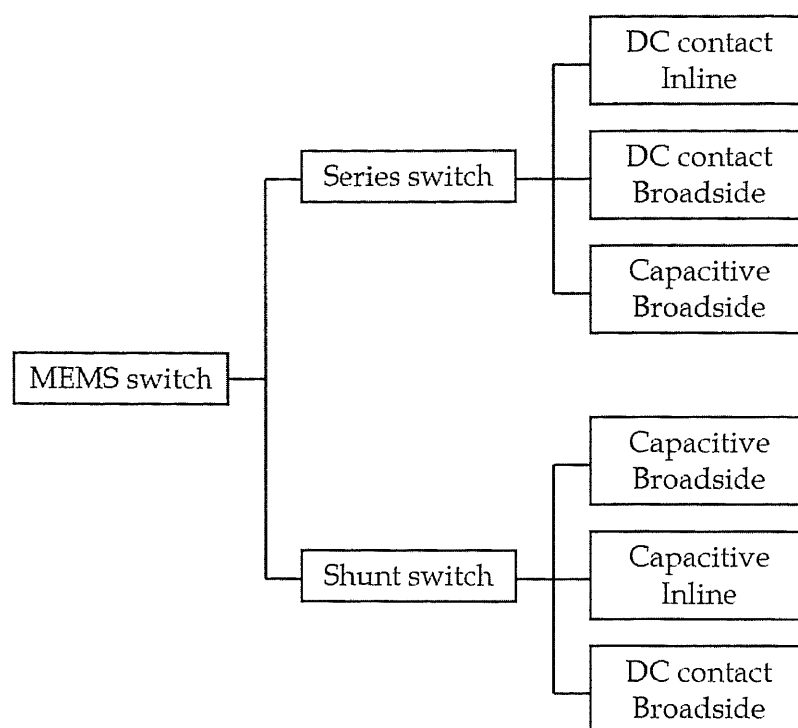


Figure 2.17 Classification of RF MEMS switches [1].

チである。一方、シャントスイッチ (Shunt Switch) は伝送路とグラウンドの間の分路に配置されるスイッチで、コンタクトの状態では伝送路がグラウンドに接続され OFF ステートとなり、コンタクトしていない状態では、伝送路をそのまま維持することになり ON ステートとなる。また、結合方式として、静電容量比の違いによってスイッチングする静電容量 (Capacitive) 型、金属の直接結合による DC コンタクト (DC Contact) 型がある。さらに、伝送路の位置関係としては、伝送路上にスイッチが配置されスイッチ自体が伝送路の一部となるインライン (Inline) 型と、伝送路とスイッチを分離したブロードサイド (Broadside) 型に分類される。以上のような組み合わせに加えて、静電気力や電熱駆動、電磁気駆動、圧電駆動などの駆動機構の違い、垂直又は水平といった駆動方向の違いによって様々な種類の RF MEMS スイッチがこれまでに研究開発されてきた^[24-32]。

ここで、これまでに報告されている典型的な RF MEMS スイッチを三例紹介する。Figure 2.18 は米国ロックウェル社で開発した DC コンタクト型ブロードサイド・シリーズスイッチである^[30]。スイッチは両持ち梁構造になっており、折り曲げ構造のばねの使用及び電極面積を大きく取る設計によって、60V という低印加電圧で静電駆動スイッチングをする。また、上部電極にはダンピングを抑制する格子状の空隙を設け、電極が大きいにも関わらず 8-10 μ s といったスイッチング時間を実現している。50GHz 以下の信号周波数領域で挿入損失 0.1dB、アイソレーション 30dB という良好な RF 特性は DC コンタクト型の特徴といえる。次に、インライン型の DC コンタクトシリーズスイッチ構造を Figure 2.19 に示す^[31]。このスイッチは OFF ステートでカールする単純な片持ち梁構造になっており、全長

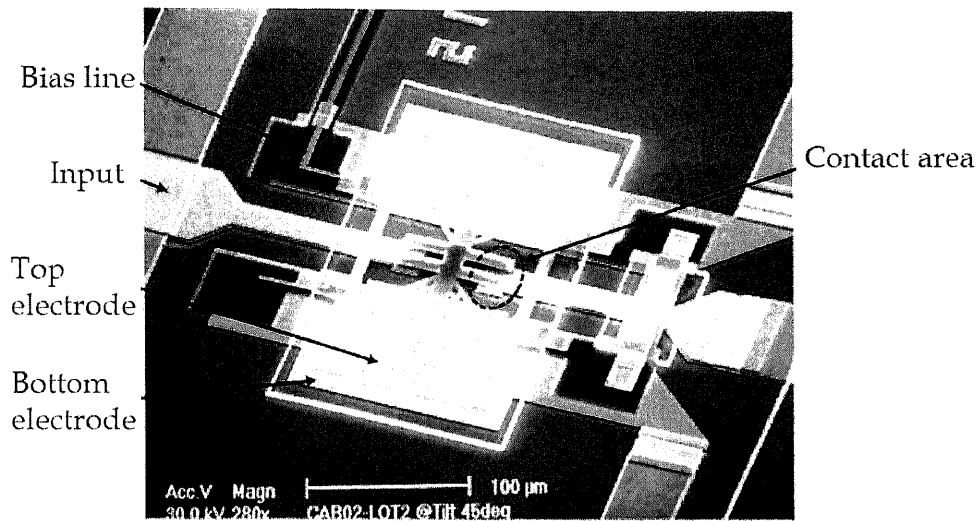


Figure 2.18 Photo of DC contact broadside series switch [30].

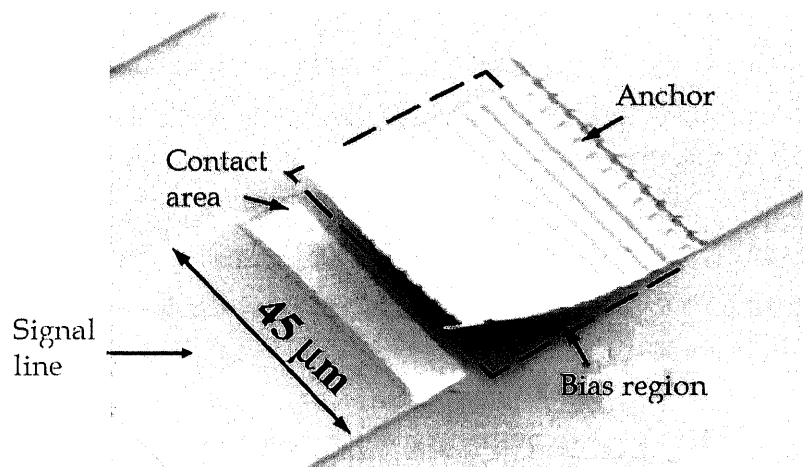


Figure 2.19 Photo of DC contact inline series switch [31].

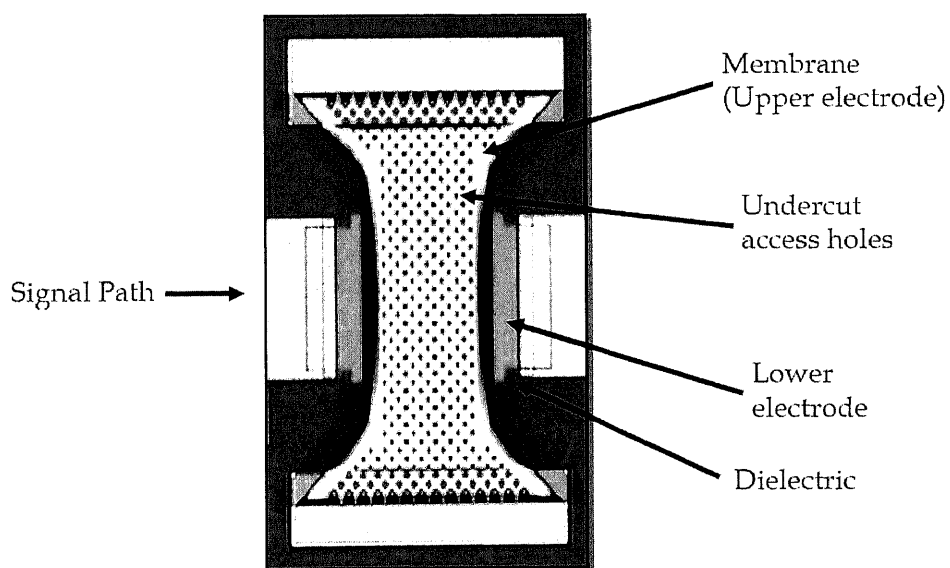


Figure 2.20 Photo of capacitive shunt switch [32].

50 μm と小型ではあるが、OFF ステートにおける静電駆動に必要な電極間距離として 15 μm を確保している。前述したスイッチと同様、30GHz 以下で挿入損失 0.15dB、アイソレーション 22dB といった良好な RF 特性を実現している。最後に、典型的な静電容量型シャントスイッチの例を Figure 2.20 に示す^[32]。両持ち梁構造の静電駆動型で、スイッチ部は伝送路の 5 μm 上に配置されている。下部電極の誘電体層に Si_3N_4 を使用し、表面を平滑にすることによって 80~120 という高い静電容量比を達成している。静電容量型は DC から低 RF 周波数レンジでは使用できないが、10~40GHz の周波数領域においては挿入損失 0.07dB、アイソレーション 20dB と極めて高い RF 特性を示す。

以上のように、RF MEMS スwitchは低挿入損失・高アイソレーションといった良好な RF 特性を示し、従来の電界効果型トランジスタ (Field Effect Transistor : FET) スwitchや機械式スイッチでは実現できなかったスイッチ性能を期待されている。しかし、Table 2.3 の性能比較表が示すように、RF 特性以外のスイッチング速度、動作電圧、疲労寿命といった点では FET 型スイッチより性能は劣っており、改良しなければならない課題は多い^[24]。特に疲労寿命は MEMS の機械式スイッチング構造に起因するものであり、繰り返し接触によるコンタクト部の損傷、及び電極のチャージアップや信号伝搬時の発熱によるマイクロ溶接現象による電極同士の吸着がコンタクト部を劣化させスイッチング不良を引き起こす主要因と考えられる。そのため、接触表面の材料改質や特殊処理による保護、製造プロセスの高精度化など、信頼性を向上させるための対策がいくつか報告されているが、局所的な改善に偏っているアプローチが多い^[33-37]。大幅な性能改善のためには、スイッチング機構やシステム全体の見直しによる疲労寿命向上対策を検討する必要があるのではないかと考えられる。

Table 2.3 Performance comparison of RF switches [24].

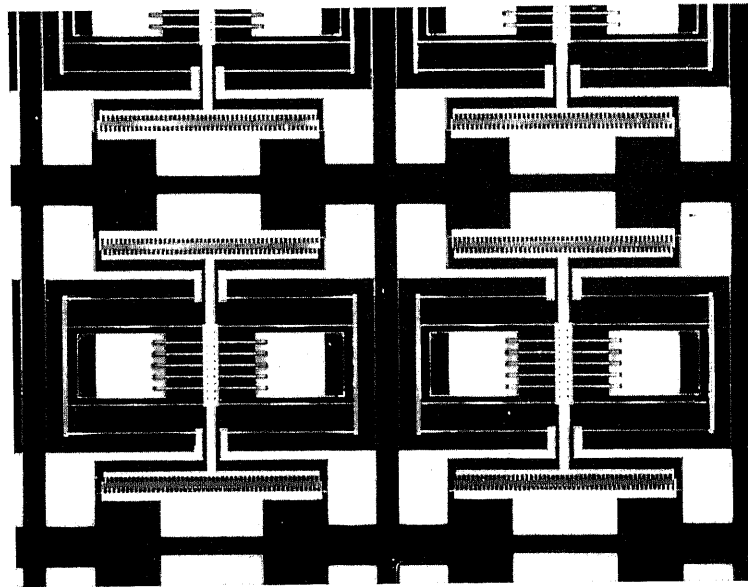
Parameter	Unit	FET switch	Mechanical switch	MEMS switch
actuation voltage	V	3-5	3-24	20-80
actuation current	mA	0	150-14	0
power consumption	mW	0.05-0.1	<400	0.05-0.1
switching time	μs	0.001-0.1	>1,000	2-100
power handling	W	<5	10	<0.5
RF isolation (1-10GHz/>10GHz)	dB	15-25 / <20	>40 / N.A.	>40 / 25-40
insertion loss (1-10GHz/ >10GHz)	dB	0.4-2 / >2	<0.3 / N.A.	0.05-0.2 / 0.1-0.2
size		very small	large	small
cost	US\$	0.3-4.5	0.85-12	8-20
life cycles	billion	>10	0.0005-0.005	0.1-10

参考文献

- [1] 大和田邦樹, RF MEMS とその応用, ケイラボ出版, 2004.
- [2] 木浦成俊編, マイクロマシン/MEMS 技術大全, 電子ジャーナル, 2003.
- [3] National Research Council, *Microelectromechanical Systems: Advanced Materials and Fabrication Methods*, National Academy Press, Washington DC, 1997.
- [4] D. Morrison, "Sensors measure up to emerging automotive safety standards," *Electric Design*, pp. 129-138, 2000.
- [5] R. Nayve, M. Fujii, A. Fukugawa, and M. Murata, "High resolution long array thermal ink jet printerhead fabricated by anisotropic wet etching an deep Si RIE," *Proc. of IEEE MEMS 2003*, pp. 456-461, 2003.
- [6] S. Hollar, A. Flynn, C. Bellew, and K. J. Pister, "Solar powered 10mg silicon robot," *Proc. of IEEE MEMS 2003*, pp. 706-711, 2003.
- [7] H. Helvajian and E. Y. Robinson, The Aerospace Corp., Report No. ATR-93 (8349)-1, 1993.
- [8] G. A. Magel, "Micromachining in optics," *Tutorial M001, OSA Annual Meeting*, 1996.
- [9] D. Bishop, "Silicon micromachines for lightwave networks: Can little machines make it big?," *Integrated Photonics Research & Photonics in Switching (IPR/PS)*, 2001.
- [10] V. M. Bright, *MEMS I Lecture Notes*, University of Colorado at Boulder, 2001.
- [11] J. H. Comtois, "Structures and techniques for implementing and packaging complex, large scale microelectromechanical systems using foundry fabrication processes," Ph. D. Thesis, AFIT, 1995.
- [12] L. J. Ristic, *Sensor Technology and Devices*, Artech House, 1994.
- [13] D. Koester, A. Cowen, R. Mahadevan, M. Stonefield, and B. Hardy, *PolyMUMPs Design Handbook Rev. 10.0*, MEMSCAP 2003.
- [14] A. Cowen, B. Dudley, E. Hill, M. Walters, R. Wood, S. Johnson, H. Wynands, and B. Hardy, *MetalMUMPs Design Handbook Rev. 1.0*, MEMSCAP, 2002.
- [15] W. C. Tang, T. Nguyen, and R. Howe, "Laterally driven polysilicon resonant microstructures," *Sensors and Actuators*, vol. 2, pp. 25-32, 1989.
- [16] D. C. Miller, W. Zhang and V. M. Bright, "Micromachined, flip-chip assembled, actuatable contacts for use in high density interconnection in electronics packaging," *Sensors and Actuators*, A-89, pp. 76-87, 2001.
- [17] P. Langlet, D. Collard, T. Akiyama, and H. Fujita, "A quantitative analysis of scratch drive actuation for integrated X/Y motion system," *Proc. of TRANSDUCER '97, International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, 1997.
- [18] D. M. Burns, "Microelectromechanical optical beam steering systems," Ph. D. Thesis, AFIT, 1998.
- [19] K. Ishikawa, "MEMS-adjusted laser-to-fiber coupling," MS Thesis, University of Colorado at Boulder, 2001.

- [20] R. K. Tyson, *Principles of Adaptive Optics*, Academic Press, 1998.
- [21] A. Tuantranont and V. M. Bright, "Bulk-etched surface micromachined and flip-chip integrated micromirror array for infrared applications," *Proc. of IEEE/LEOS Optical MEMS 2000*, pp. 71-72, 2000.
- [22] 石川浩嗣, 三木隆弘, 間宮宏樹, 于 強, "はんだフリップチップ実装と電熱熔解式支持梁を用いた静電マイクロミラーアレイの開発," *エレクトロニクス実装学会誌*, vol. 8, no. 2, pp. 108-115, 2005.
- [23] K.Ishikawa, J.Zhang, A.Tuantranont, V.M.Bright, and Y.C.Lee, "An integrated micro-optical system for VCSEL-to-fiber active alignment," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 103, pp. 109-115, 2003.
- [24] G. M. Rebeiz, *RF MEMS theory, design and technology*, Wiley, 2003.
- [25] G. M. Rebeiz and J. B. Muldavin, "RF MEMS switches and switch circuits," *IEEE microwave magazine*, pp. 59-71, December 2001.
- [26] J. J. Yao, "RF MEMS from a device perspective," *J. of Micromechanics and Microengineering*, vol. 10, pp. R9-R38, 2000.
- [27] J. Oberhammer, "Novel RF MEMS switch and packaging concepts," Ph. D. Thesis, Royal Institute of Technology, Sweden, 2004.
- [28] R. Ramadoss, "Design, modeling, and characterization of RF MEMS capacitive switches based on flexible printed circuit technology," Ph. D. Thesis, University of Colorado at Boulder, 2003.
- [29] I. Schele and B. Hillerich, "Comparison of lateral and vertical switches for application as microrelays," *J. of Micromechanics and Microengineering*, vol. 9, pp. 146-150, 1999.
- [30] R. E. Mihailovich, M. Kim, J. B. Hacker, E. A. Sovero, J. Studer, J. A. Higgins, and J. F. DeNatale, "MEMS relay for reconfigurable RF circuits," *IEEE Microwave Wireless Comp. Lett.*, vol. 11, no. 2, pp. 53-55, 2001.
- [31] C. Bozler, R. Drangmeister, S. Duffy, M. Gouker, J. Knechet, R. Parr, S. Rabe, and L. Travis, "MEMS microswitch arrays for reconfigurable distributed microwave components," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pp. 153-156, 2000.
- [32] Z. J. Yao, S. Chen, S. Eshelman, and C. L. Goldsmith, "Micromachined low-loss microwave switches," *IEEE J. of Microelectromechanical Systems*, vol. 8, pp. 129-134, 1999.
- [33] L. L. Mercado, S. -M. Kuo, T.-Y. T. Lee, and L. Liu, "A mechanical approach to overcome RF MEMS switch stiction problem," *Proc. of IEEE Electronic Components and Technology Conference 2003*, pp. 377-384, 2003.
- [34] C. Cabuz, E. I. Cabuz, T. R. Ohnstein, J. Neus, and R. Maboudian, "Factors enhancing the reliability of touch-mode electrostatic actuators," *Sensors and Actuators A*, vol. 79, pp. 245-250, 2000.

- [35] D. Hyman and M. Mehregany, "Contact physics of gold microcontacts for MEMS switches," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technology*, vol. 22, no. 3, pp. 357-364, 1999.
- [36] R. Maboudian, "Anti-stiction coating for surface micromachines," *Proc. of SPIE*, vol. 3511, pp. 108-113, 1998.
- [37] J. Schimkat, "Contact materials for microrelays," *Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems 1998*, pp. 190-194, 1998.



The beauty of MEMS

The picture shows being fabricated tri-state multi-contact RF MEMS switches.

第 3 章

設計支援手法

I hear and I forget.

I see and I remember.

I do and I understand.

私は聞いて、そして忘れる。

私は見て、そして憶える。

私は行動して、そして理解する。

— *Confucius*

孔子

3.1 MEMS 設計開発の課題

第2章で詳述したように、電気的・機械的特性を兼備したMEMSを用いることによって、従来では実現不可能であった新しい付加価値を持つデバイスや複数機能の高度集積化が実現可能である。先端技術としてMEMSは多様な産業分野に適用され製品としての実用化が進みつつあるが、一般的な工業製品に比べて多大な開発工数と予算を必要とするのが現状である。これは、MEMSの設計開発において試行錯誤的なプロセスを回避することが難しいためであるが、その主要因を大別すると以下の4項目が挙げられる。

- 1) 多岐の専門分野にわたる複合知識の必要性
- 2) 寸法効果の考慮
- 3) 製造プロセスの考慮
- 4) 材料や構造のデータベース化及び標準化が未完成

様々な技術の融合であるMEMSにおいては、電気的特性及び機械的特性の両方を設計段階で考慮することだけでなく、金属、誘電体、半導体といった材料の知識、機構の制御及び電子回路の知識、接合や拡散などの表面・界面工学的な知識などを必要とする。また、デバイス用途によっては光学、流体、熱伝導、電磁気、生体などの専門知識が求められるため、包括的にシステム全体を把握できる能力が求められる。しかし、現状のMEMS開発では、各分野を複数の専門家で分担するか、もしくは熟練設計者の経験・知識・洞察力に委ねる状況が多く、デバイス開発のコンシステンシー(Consistency)が曖昧になり易い。

また、MEMSに関連する専門的知識の中でも、寸法効果と製造プロセスの考慮は重要である。まず寸法効果であるが、マイクロスケールでは通常のマクロスケールにおける事象をそのまま適用できないという特殊性がある。例えば、一般的に大きさが1mm以上では慣性力が、それ以下では粘性力が支配的になるため、設計上で考慮すべき物理現象の着目点が異なってくる。また、熱化学現象の高速化、加工精度の低下による相対的な表面粗さの増大、巨大歪の許容が可能になるなど、マイクロスケール特有の効果に配慮した設計開発が必要となってくる。さらに、MEMSでは製造プロセスと構造が密接に関係しており、第2章で述べた表面マイクロマシニング、バルクマイクロマシニングの加工プロセス、ポストプロセス、それら工程で使用する材料などを理解しなければMEMS構造の設計をすることは不可能である。

最後に材料や構造のデータベース化・標準化という点であるが、MEMS技術は歴史が浅いためデータの蓄積が少なく、設計開発に必要な情報を技術者が共通で利用できる環境が整備されていない。MEMSにおいて使用される材料や設計要素は他の産業分野と比較して限定されているにも関わらず、プロセスや形状によって物性値が異なっていたり、評価手法の違いによって特性にずれが生じたりする状況は少なくない。

MEMS は知識集約的な産業技術であり、上述したような高度な設計開発技術や特有のノウハウが必要となるため、MEMS に関する知識や経験の浅いエンジニアが熟練技術者と同等の設計開発を行なうことは困難と考えられる。例えば、前章で述べたマイクロミラーという MEMS 要素を利用したシステムの開発を行なう場合、その用途や要求仕様によって最適なマイクロミラーの形状と材質、ミラーの駆動原理とアクチュエートの方法及びその製作プロセスを検討し決定する必要がある。MEMS 設計開発熟練者であれば各設計開発事項の長所短所を認識し、設計開発段階において要求性能を満足させるミラーシステムを短時間で選択できると考えられる。一方、未熟な技術者*の場合には的確な判断ができないため、情報不足・経験不足による試行錯誤的開発プロセスに陥り易く、時間とコストの浪費をする恐れがある。MEMS に関する非熟練者あるいは初心者が、MEMS 熟練者の感覚に迫る設計開発を行なえるようになるためには、結局熟練者と同様の時間をかけて経験を積まなければならないことになるが、それでは MEMS 技術者人口の増加にはつながらず、産業界における MEMS 技術競争力の向上は見込めない。

よって、非熟練技術者が熟練者のレベルに近い設計を行なえる、あるいは熟練者と対等に議論できるような設計開発環境を確立することが MEMS 開発において重要であると考えられる。すなわち、人間の思考をサポートする手段(設計支援手法)が必要であり、熟練していない技術者でも使いこなせる汎用性がなくてはならない。近年の設計支援手法あるいは CAE (Computer Aided Engineering) 技術の躍進によって設計開発の効率化・高精度化は進んでおり、MEMS におけるマイクロスケール特有の物理現象や寸法効果などを考慮した高度な設計や、数値情報に基づく最適解の導出では大きな効果をあげている。しかし、熟練者主導によって経験的な設計開発が行なわれている MEMS のような技術領域に適用でき、設計者の思考を発展させる、あるいは支援するといった CAE 手法は殆ど無い。よって、MEMS の設計開発に適用可能である、新しいアプローチに基づいた支援手法の確立こそが、上述した MEMS の設計開発における課題を解決することができると考えられる。

3.2 概念設計

前述したように、MEMS の設計開発では MEMS 特有の技術や知識が必要であり、熟練設計者に依存する部分が大きい。しかし、仮に熟練者であっても、詳細設計に至る前の段階において開発コンセプト自体を評価し製品の良し悪しを判断すること、すなわち“概念設計”は、設計開発の流れを決定する重要なことである。また、初期の段階における設計開発の高度化は、全体的な開発時間及びコストの削減につながると考えられる。ここで Figure 3.1 に初期段階における設計開発の判断の意義についてイメージした系統図を示す。ある MEMS デバイス開発における開発方針の選択肢と、最終的に得られるデバイスの性能を、優れている(Good)、大変優れている(Very Good)で表現

*本論文における「未熟な技術者」「非熟練者」「初心者」という言葉の定義は、エンジニアとしては中流以上のレベルにあるが、MEMS に関する知識は浅い技術者のことを指す。

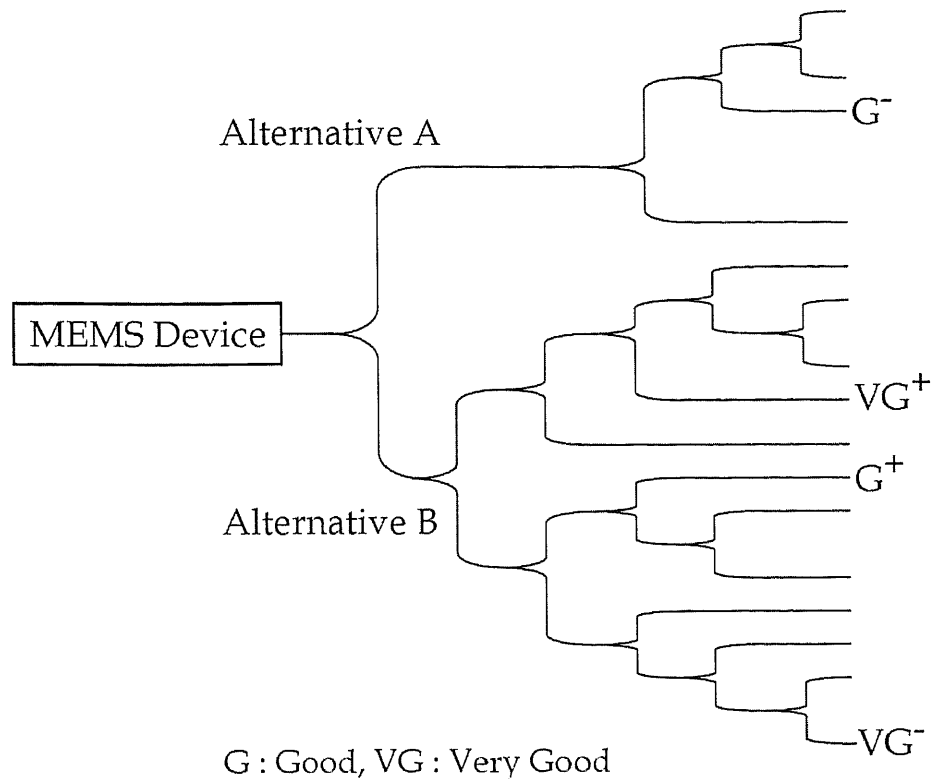


Figure 3.1 Image tree of MEMS design and development.

し、設計開発上で選択する構造や材料、製造プロセスの違いによって製品の最終形態が異なることを図示化してある。開発上流側、すなわち初期の段階において、開発コンセプトが選択肢 A と B に大きく分かれているケースを考えている。選択肢 A における開発思想では、下流の詳細設計開発段階における機構・材料・プロセスなどの選択や設計変更の自由度が低く、高い最終性能を得られないことが図示されている。一方、選択肢 B 側は下流における設計開発の自由度が高いため、最終的に得られる性能も優れ、最適なシステム選択の数も A と比較して多くなっている。

開発初期の段階で MEMS のシステムとしての完成度が明瞭に判断できない場合、選択肢 A が最適と判断される可能性がある。この場合、設計開発の自由度が低いために性能向上の行き詰まりが生じ、無駄な試行錯誤の開発プロセスを繰り返すか、もしくは上流まで戻り全く別の製品コンセプトを選択することになるため、開発効率は著しく悪い。しかし、MEMS 設計開発初期の段階において開発のコンセプトを評価し、設計のキャパシティ・自由度が大きいものを判断することができるならば、選択肢 B を最適と判断して選択することができるため、開発時間やコストの浪費を回避することができると考えられる。ここで言う設計キャパシティは、設計者がどの程度自由度を持って新しい意思や価値観をシステムに修正・追加・変更できるかということであり、そのシステムの設計開発拡張性を示すものである。上流段階で設計キャパシティを判断できることは、開発の高効率化に大きな影響を与える。

上述した議論を開発のフローに置き換えて考えてみる。Figure 3.2 に上流における開発コンセプトの評価が可能である場合と、不可能な場合の MEMS 製品開発の流れを示す。従来の MEMS 開発のように上流における開発コンセプトの評価が行われていない場合には、最適なシステムに到達するまでに設計解析、試作、評価といった各段階における試行錯誤の手戻りプロセスが避けられない。これに対し、初期の段階で設計キャパシティの十分な検討・評価を行い、設計開発のコンセプトが明確にされているならば、下流における詳細設計は下流方向へのみ進行することになり、時間的且つ工数的浪費となる逆行作業を回避することができる。製品の“概念(コンセプト)”を評価することができ、概念に基づいた製品のフィロソフィが明確になっていれば、設計開発は効率的に行なわれ製品の最終形状はより良い方向へ自ずと変化することになると考えられる。

また、コンセプトの評価及び設計が可能になることは、開発の上流において新しい概念を創出することが可能になることと同等であると考えられる。Figure 3.3 に概念設計が(a)未実施の場合と、(b)実施されている場合の、MEMS 開発における開発時間とシステムの成熟度の関係を示す。図中におけるブロックは、ひとつのコンセプトに基づく開発プロセスを表している。概念設計が行なわれな

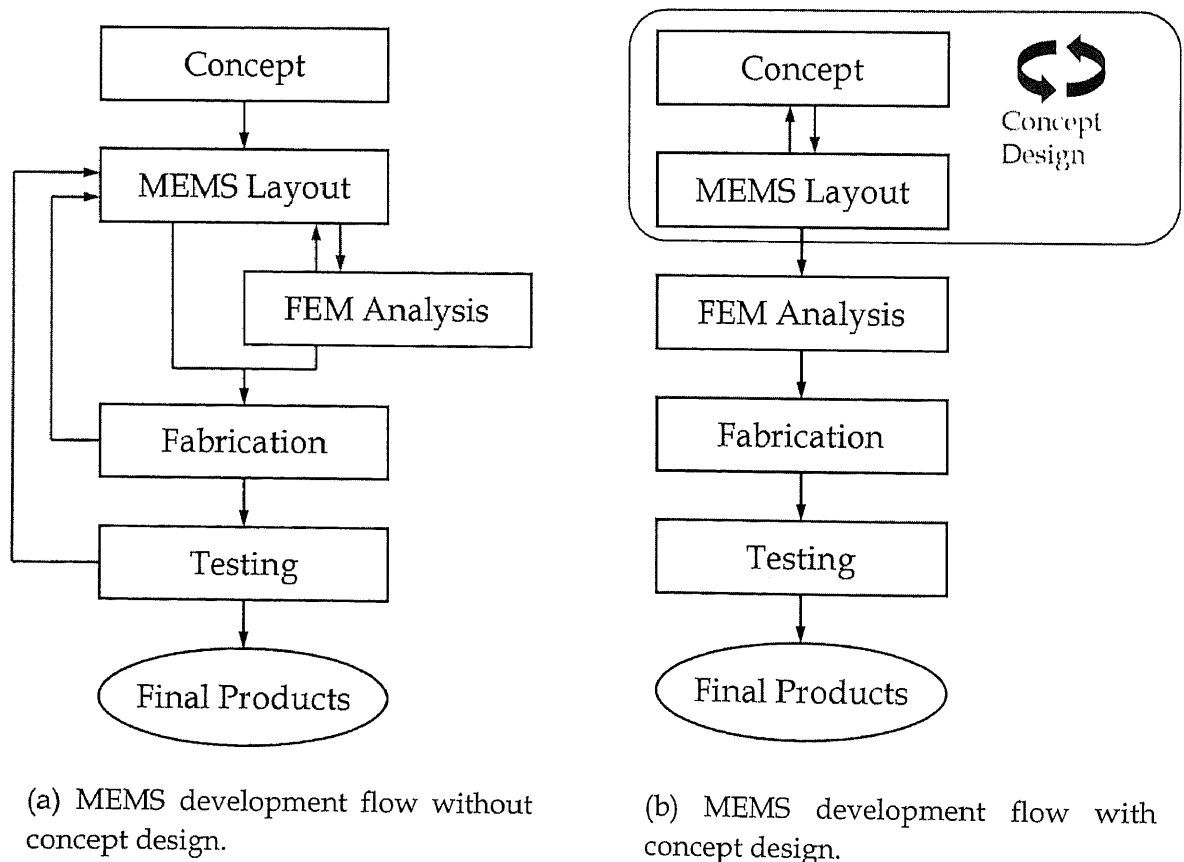
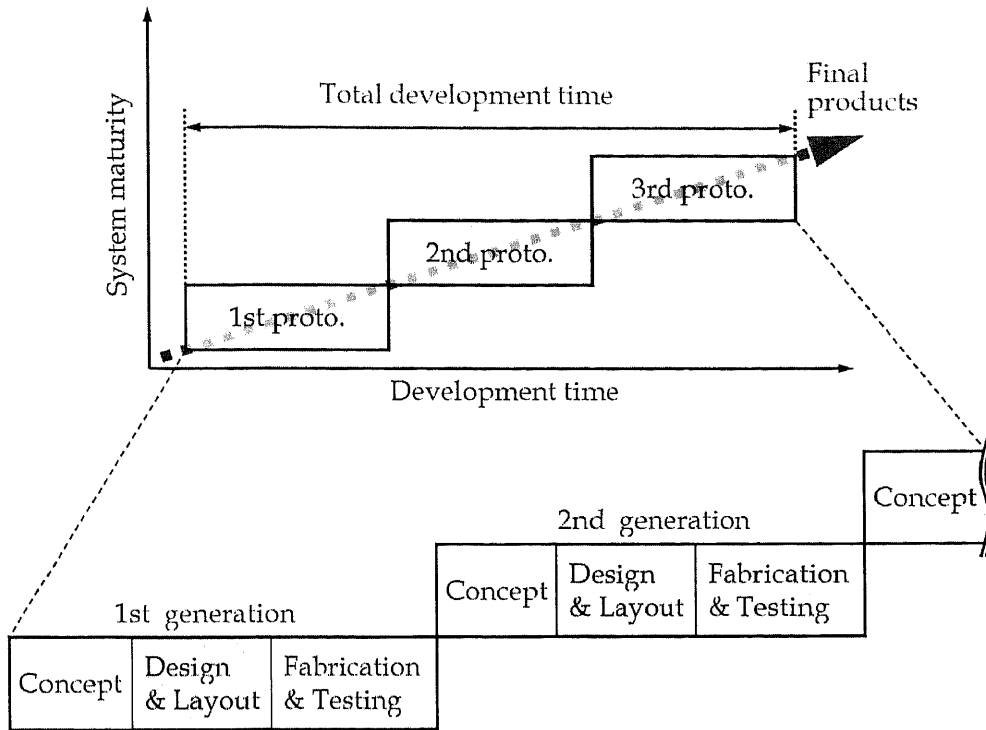
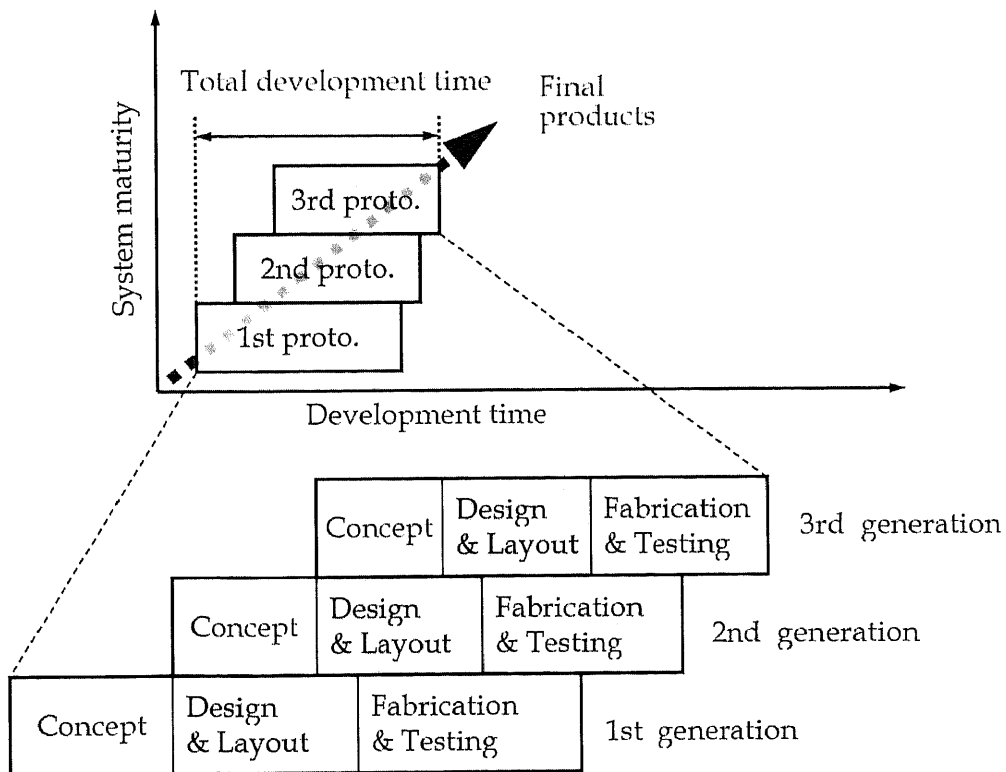


Figure 3.2 Comparison of conventional MEMS development flows with and without concept design.



(a) System maturity without concept design.



(b) System maturity with concept design.

Figure 3.3 Comparison of system maturities with and without concept design.

い場合、詳細設計に基づいた試作品を製作して性能評価まで行わなければコンセプトの評価が終了しないため、次世代の新しい製品コンセプトへの移行が行われない。また、前述したように試行錯誤的な開発プロセスを各世代で取る必要があるため、システムが成熟して最適な形になるまでには相当な時間がかかってしまう。一方、概念評価を開発初期の段階で行うことができる場合、その評価結果を分析することによってコンセプトの問題点を抽出し、それを解消する新たなコンセプトを創出することが可能となる。概念設計を十分に行なうことで連続的に次世代概念を発想できると同時に、開発下流は手戻りの無いプロセスとして簡素化されるため、システムの成熟は短時間に達成される。すなわち、各世代のコンセプトを基にして性能の向上した製品を次々と商品化することが可能であると考えられる。

以上の述べたように、概念設計は MEMS が持つ設計開発の特異性から重要な役割を果たすと考えられる。また前節で説明した設計者が必要とする設計情報を提供し、思考をサポートする手法を確立して概念設計と融合することによって MEMS の設計開発が持つ問題点を解消し、より高度な製品開発及び開発の効率化が可能となると考える。そして、このようなニーズは MEMS だけではなく、全ての産業分野に共通のものであると考えられる。次節以降では、CAE 技術を含む既存の設計支援手法について調査を行って特徴及び問題点を明確にするとともに、本論文で提案する新しい概念設計支援手法のとりべきアプローチを導き出す。

3.3 既存の設計支援手法

本論文では、MEMS 設計を大きく“上流”段階と“下流”段階に分けて議論する。上流とは MEMS 製品のコンセプトとその概略構造を決定する段階である。下流は上流で決定されたコンセプトを具現化するために、解析・試作・評価も必要に応じて行なう詳細設計の領域である。ここでは各段階における既存の CAE 技術について詳細を述べる。また、CAE とは異なる“設計する”行為を支援する手法についても分析を行なう。

3.3.1 下流設計段階における CAE 技術

3.3.1.1 応答曲面法(Response Surface Method)

応答曲面法は、問題を曲面近似することで連続関数により解空間を近似する手法である^[1-3]。近似した連続関数を用いて設計因子の感度計算を容易に行なうことができるため、最適化手法として利用されている。Figure 3.4 に応答曲面法による曲面近似の概略イメージを示す。応答曲面近似式は、設計因子と性能の関係を示す近似関数を解析もしくは実験によってサンプリングを行い導き出す。近年では、効率よくサンプリングを行なうために実験計画法と組み合わせた手法も提案されており、計算効率も向上し研究開発における最適設計に適用されている^[4-6]。応答曲面法を用いた最適化では、この応答曲面近似式を用いてある設計制約条件のもとで目的関数を満たす最適な設計変数を求める。

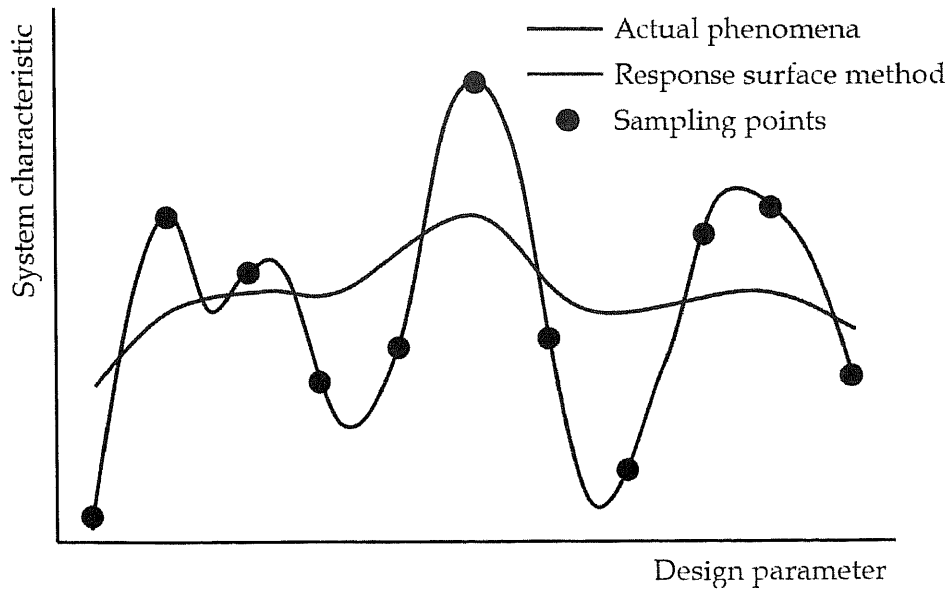


Figure 3.4 Image of surface approximation by response surface method [3].

ただし、応答曲面近似式を最適化計算に使用する場合、その最適解は近似精度に大きく依存する。精度を高めるためには多くのサンプル点数を必要とするため、解析や実験の回数が増大することになる。また、サンプル点はあくまでも離散的な数値情報であって、設計因子と性能との因果関係を明確に示すものではない。そのため、技術者が設計段階で得られる情報はあくまでも最適解のみであり、その解に至る経緯が不明のままである。応答曲面法は、機構や材料など詳細が確定した下流における構造体の詳細設計に適用することは可能であるが、基本的な概念設計に適用するコンセプトは具備していない。

3.3.1.2 遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm)

遺伝的アルゴリズムは、生物の進化を工学的にモデル化した確率的な最適設計アルゴリズムである^[3,7,8]。解の候補をコード化して遺伝子に見立て、その集まりを個体集団と呼び、ある世代を形成している個体群のうち環境への適応度が高い個体ほど、高い確率で生き残るように選択される。この手法における評価値は適応度であり、与えられた課題の制約条件は自然界で言う所の環境条件に相当する。個体間の交叉 (Crossover) や突然変異 (Mutation) によって新しい遺伝子を作成し、同様に評価を何世代も繰り返すことによって最適な解に近づけていく (Figure 3.5 参照)。設計変数のコード化、ブラインドサーチ及び確率的オペレーションというコンセプトのため、応用範囲が広く複雑系の最適化に優れているが、逆に計算負荷が大きい、コード化に誤りがある場合には良好な結果が得られないといった問題点もある。また、確率的なアプローチであるため、設計者が必要と考える設計情報を的確に得ることができない。構造と構造が示す物理現象の因果関係が不明のままになってしまうため、本論文で検討すべき設計支援手法への応用は難しい。

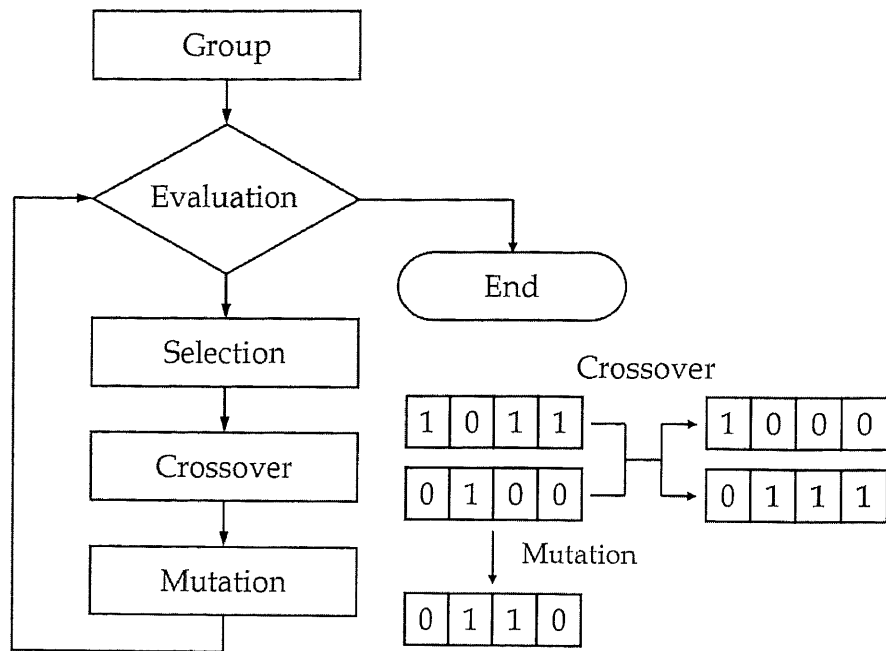


Figure 3.5 Genetic algorithm flow and images of crossover and mutation [7, 8].

3.3.1.3 ニューラルネットワーク(Neural Network)

ニューロコンピューティングとは、人間の神経回路網を手本とし、それに類似した並列情報処理機構に基づいて情報処理を行なおうとするものである^[3,9,10]。Figure 3.6 に示すニューロンモデルと複数のニューロンから構成されるニューラルネットワークは、脳の神経細胞とそのつながりをモデル化したものである。ニューロン単体では簡単な処理しかできなくとも、その接続によって複雑な事象に対応することが可能である。その数理モデルはいくつか提案されているが、基本的には複数の入

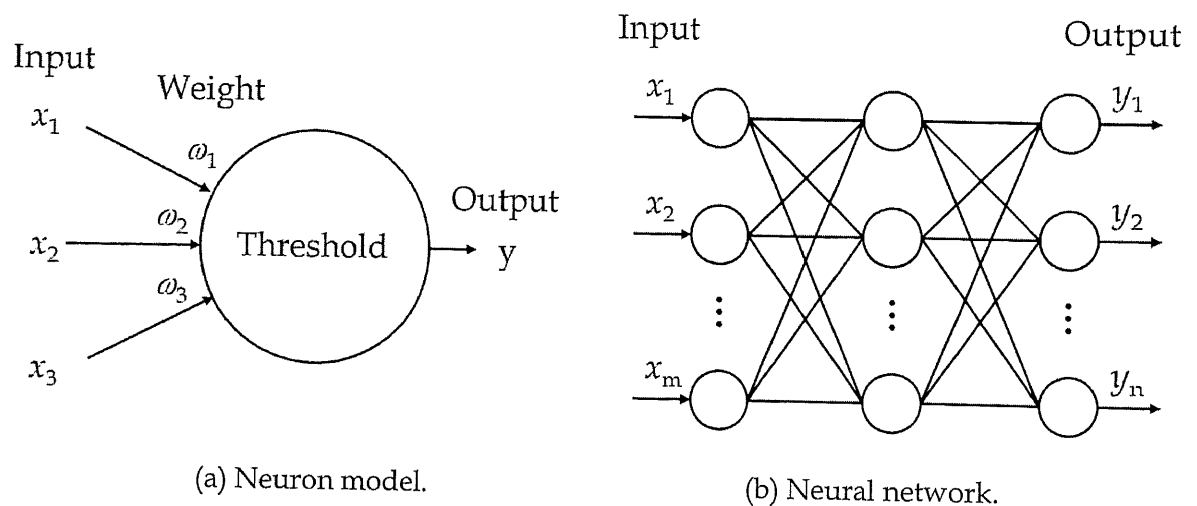


Figure 3.6 Schematics of neuron model and neural network [9,10].

力信号に対し、あるしきい値を越えた場合に他のニューロンに出力信号を送り出す仕組みになっている。ネットワーク全体としてのエネルギーが最小あるいは安定になった状態を、システムが最適化されたと判断する。

この手法は信号の並列処理が可能であり、複雑な最適化問題を短時間で処理することが可能である。しかし、現行のニューラルネットワークでは最適解を得るために詳細部を重点的に調査することしかできないため、概念設計段階の漠然とした状態では入力信号が不足しており、最適化をすることができないと考えられる。また、前述した 2 つの手法と同様、概念設計のために利用できる設計情報を得ることができないため、設計者の思考を発展させるような支援手法としては利用できない。

3.3.2 上流設計段階における CAE 技術

3.3.2.1 トップダウン設計手法 (Top-Down Design Method)

トップダウン設計手法は、Figure 3.7 に示すようなビヘイビアモデル (Behavior Model) を使用し、システム全体として MEMS の構成部品と周辺システムがどのように連携作用し、影響を与え合うかを評価するものである^[11-13]。剛体部品、梁、電極などの要素の特性を解析式で表現し、6 つの自由度によって要素間を接続し動作を記述してある。設計者は寸法、構造などの設計情報を入力・修正

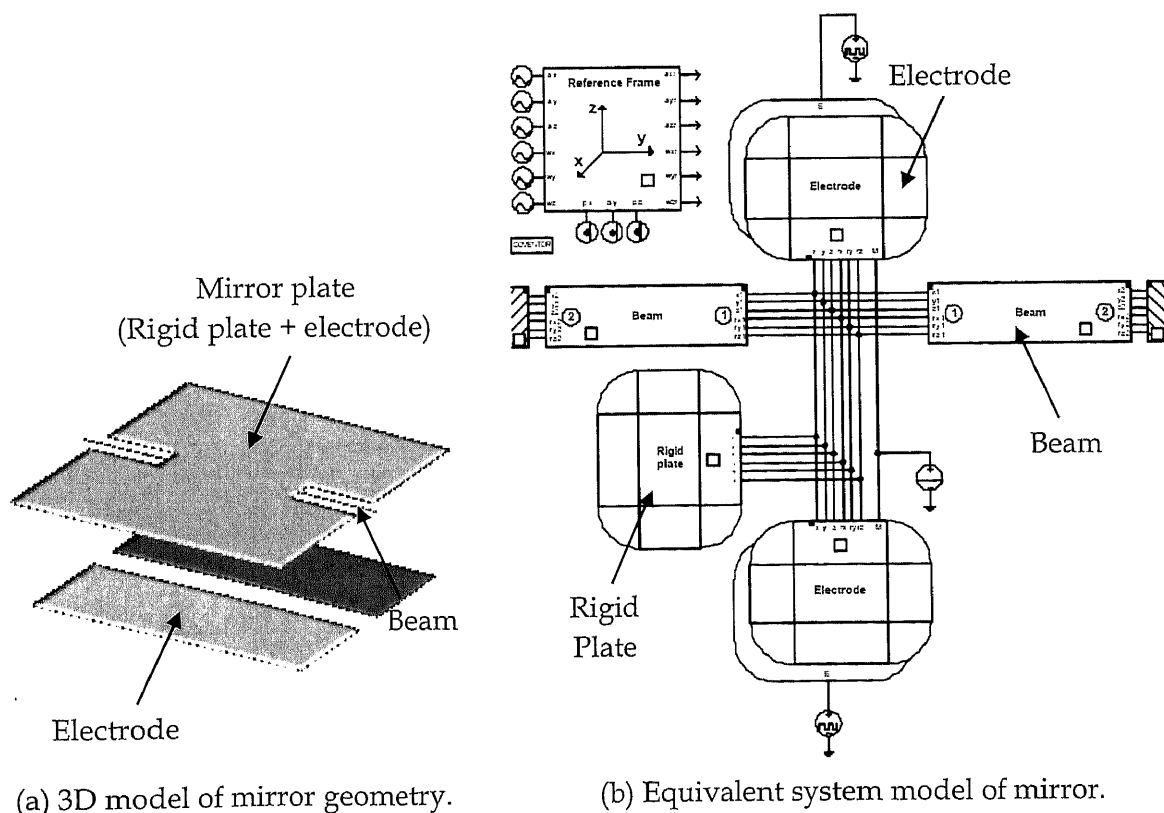


Figure 3.7 Schematics of neuron model and neural network [13].

しながら最適構造を求める。光学系や流体系など様々な要素の特性を予め FEM (Finite Element Method) 解析や実験によって求めデータを蓄積することによって多様な設計状況に対応することができるため、要素部品の融合的デバイスが多い MEMS 分野の上流設計で本手法は有効である。

上流におけるマクロ的モデルから詳細設計へ進むという考え方は、下流における設計及び試作の手戻りの繰返しによって最適解に近づくボトムアップ形式と対象的である。しかし、この手法が適用されるのは概念設計が終了した段階の、構造がある程度確定した基本設計段階であり、システムのコンセプト評価には適用できない。また、モデルの作成、設計情報の入力設計者の判断に大きく依存しており、熟練度によって結果が異なる。加えて、物理現象はブラックボックスとなっている要素データをもとに数値解析を行なうため、未熟な設計者がこの手法から熟練設計者に近づく知識を得ることは不可能である。

3.3.2.2 FOA (First Order Analysis)

FOA は、構造を構成する個々の部品をトップダウン設計手法と同様に梁要素やパネル要素といった構成要素を用いて材料力学的な理論に基づき表現するものである^[3,14-17]。材料力学的な理論により表現された部品を階層的に結合させることで全体の構造を表現し、個々の部品および全体の構造に働くおおよその力やモーメント分布、断面特性値、降伏関数値などの評価特性値を容易に求めることができるため、力学的な見地から多くの対策案を検討することが可能である。また、理論式により表現されていることから、評価特性値と設計変数となる形状や物性値などを対比させながら手軽に変更を行い、さまざまな設計案を検討することができる。設計対象を階層的な情報構造とすることにより、個々の部品が全体の構造に与える影響を把握することが可能となる。

FOA は設計上流において構造とそれが示す現象の関係を把握することが可能であり、新しいコンセプトを創出することは可能であるが、設計者が必要とする「何故そのような現象になるか」、「新しいコンセプトが既出のものと比較して効果があるのか」などの情報は導出されない。すなわち、設計者の意思によって対策は変化するため、試行錯誤が生じることになる。あるシステムの特性を手軽に評価する上では優れた手法であるが、設計者の思考支援及び設計キャパシティを含む概念評価の面で改善の余地がある。

3.3.2.3 機能モデル (Functional Model)

機能モデルは機能表現し、特性作用、状態、エネルギー流れを視覚的に理解する為のブロック線図を基本とし、解析や処理を行なう為の数学モデルを使用する^[3,18,19]。ブロック線図と数学モデルは、分野に無関係な基準化された表現方法で統一され、モデルは機能要素から構成される。機能モデルの例を Figure 3.8 に示す。モデルには機能の条件としての性能、ならびに機能の詳細としての機構を表現または指定する為の図表、データなどを付随させる事が出来る。また、システム全体と構成部品についてそれらの機能特性が正確に導入されており、性能、特性、機能、機構、構造別に再現できる。さらに、モデルは階層構造を持ち、上位モデルは抽象的な機能、性能、要求品質

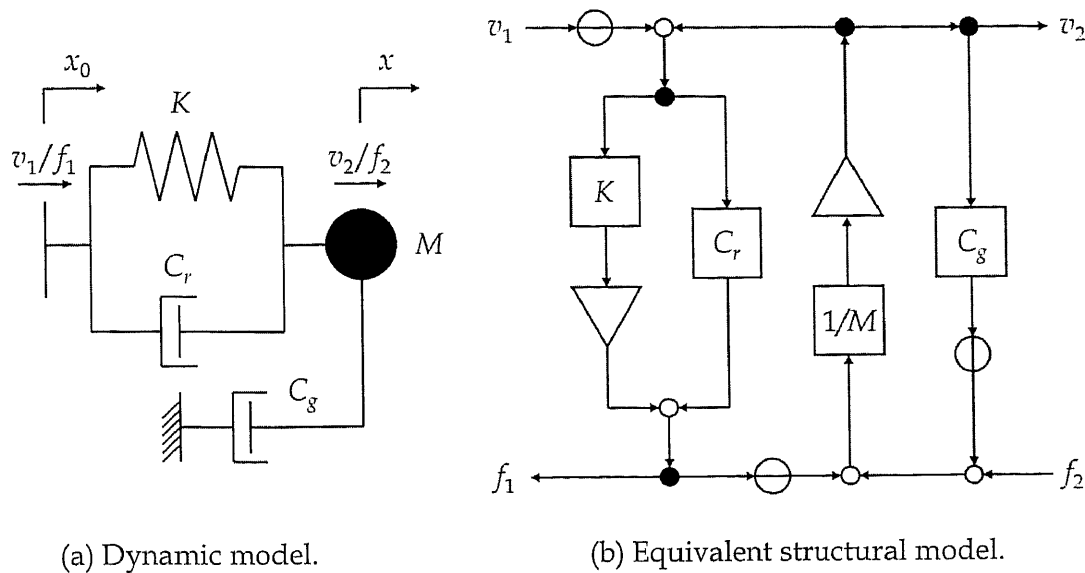


Figure 3.8 Dynamic model and its equivalent structural model [18].

を表現し、下位モデルは具体的で機構、及び構造との対比が可能であり、上位モデルの要素となる。異なる物理単位系同士の連結、及び水平展開と、垂直統合を可能とする為に入出力が標準化されており、物理的な関係やエネルギーの流れ、階層化などが可能となっている。

ただし、機能モデルではシステムの設計因子と性能の関係を予め理解した状態でなければ Figure 3.8 (b)に示すようなブロック線図や数学モデルを作成することが不可能である。したがって、設計者がシステムの特徴を把握しておく必要があるため、熟練設計者でなければ取り扱うことができない。また、モデル作成のために試行錯誤を必要とする可能性があり、システムの概略を把握する必要がある上流設計の段階において、下流における詳細最適設計のような煩雑さを伴う。機能だけではない設計上のトレードオフといった情報の取扱いや、設計キャパシティの評価ができないため、概念的設計支援の面で利用できるとは考えにくい。

3.3.3 その他の設計支援手法

3.3.3.1 体系的アプローチ (Systematic Approach)

技術システムはエネルギー、物質、信号の3要素全て、あるいはそれらのいずれかを入力し、何らかの手段によって変換し、別の形で出力する装置であるという基本概念に基づき、その設計手順に重点を置く概念設計支援手法である^[20,21]。設計プロセスを「製品企画、役割の明確化」「概念設計」「実体設計」「詳細設計」というフェーズに分解し、それぞれの段階で何を行なうべきかを定義している。フローチャートに従って情報収集を行い整理・分析することによって、極力もれの少ない設計を可能にする流れになっている。特に概念設計段階では、物性的要素、機能的要素、生産的要

素など設計者が問題点を探し出して要約することによって、問題の本質を確認していく。また、概念評価の面では、システム性能への官能的重みづけが可能である AHP (Analytic Hierarchy Process) と組み合わせることによって、人間の主観的な評価やあいまいな判断を分析にうまく取り込むこともでき、概念設計案の客観的な評価をすることも可能である^[22]。

しかし、本手法はあくまでも設計作業を体系的に行なう枠組みを設計開発者に提供するものであり、発想、経験、知識、ノウハウは全て設計者の能力に期待する手法である。よって、システムの原理原則を分析して技術者に設計情報を提供し、技術者の創造性を引き出せるほど、より具体的な設計支援はしない。いわば、設計手順指向の支援、あるいは設計行為の支援を行なうアプローチである。また、AHP 等を利用した概念評価においても、設計案の定性的評価にすぎないため、設計者がその評価結果から具体的に次のアプローチをエンジニアリング的に導き出すことはできないと考えられる。

3.3.3.2 TRIZ (Теори Решения Изобретательски Задач)

TRIZ は、基本的に技術システムの進化は客観的な法則群に従っているという考え方から成り立っており、過去から現在に至る多分野の技術発展を支えた創造的問題解決の考え方、法則性を抽出・体系化し、その結果を新たな問題解決に役立てるアプローチである^[20,23,24]。TRIZ 単独ではない総合的な活用として、前節の体系的アプローチや AHP と組み合わせた総合的な概念設計支援システムとして利用する例も報告されている^[25,26]。

現在の TRIZ は、思考プロセス、プロセスで使用するテクニック、テクニックと併せて使う知識データベースの 3 つから構成されている。思考プロセスは、どのような手順で判断し、考えたかを進めていくか設計者を導くものであり、このプロセスにおける最大の特徴は「最大・最小問題」の概念である。最小問題とは、システム全体に大きな変化を加えることなく改善・改良を施すもので、変化の範囲を限定した問題といえる。システムに内在するトレードオフを見出し、対象とするシステムの根本的問題に迫ることを目的とする。これに対し、最大問題は、制約を加えずに考えられる全ての変更を試みるものであり、既存のシステムとは全く異なるシステムへの変更を可能とする。TRIZ のプロセスでは、まず最小問題として捉えて問題解決を図り、そこで解決できない場合に、最大問題として捉える流れを取る。

TRIZ プロセスで使う最も特徴的なテクニックは、「技術的矛盾・物理的矛盾」である。トレードオフを解消することによって、システムの特性を向上させる手法である。そして、そのための技術的課題解決の足がかりを提供するツールとして、知識データベースが用意されている。これは膨大な過去の特許を統計的に分析し体系化された 40 通りの発明原理、76 通りの物質-場分析 (物理学、化学、幾何学に関する効果や法則) による問題解決決定石集 (Figure 3.9 技術的矛盾マトリックス^[23] 参照) であり、これらによって要求仕様を満足するような機能展開を行い、概念を再構築する分解・組立の流れによって設計者支援を行なう。

Figure 3.9 TRIZ technical tradeoff matrix [23].

TRIZ はシステムの根本的な問題を解決するための設計支援手法としては有効であると考えられる。しかし、新しいコンセプトを確立する点においては、TRIZ では設計者が知識データベースを利用し、自らの知識と経験に基づいて判断する所が大きく、技術者の熟練度によって成果が異なる可能性がある。また、トレードオフの評価は、あくまでも存在を認識させるのみであって、トレードオフがシステムの性能に関してどの程度重要なものなのか判断が不可能である。つまり、特性の定量的な評価ができないため、新しいコンセプトの特性が既存コンセプトよりも優れていることが客観的に判断することが不可能である。

3.4 結論

MEMS 設計開発では、多様な専門分野にわたる複合知識が必要であると同時に、マイクロスケール効果や特殊な製造プロセスを考慮する必要がある。また、設計データの蓄積・標準化が不十分であり、知識や経験の浅い技術者が熟練者と同等の設計開発を行なうことは困難な環境にある。そのため、試行錯誤的な設計開発プロセスを回避することが難しく、開発時間・コストの浪費につながっている。よって初心者でも熟練者の感覚に近づく設計を行なえる設計環境を確立することが重要である。人間の思考をサポートし発展させるためには、単純に最適解を設計者に提供するだけの手法ではなく、システムとシステムが示す物理現象の関係を把握し、何故そのような挙動を示すのかという解を得る経緯を理解できる手法が必要である。

また、熟練技術者であっても MEMS 開発の初期段階において開発のコンセプトを評価し、その設計キャパシティを判断することは開発の効率化の点で重要である。設計開発の上流において製品のフィロソフィが明確になれば、設計開発は下流の詳細設計においても効率的に進み、製品の最終形状が自ずと良い方向へ進化する。さらに、概念設計が可能になれば、既存のコンセプトの問題点を抽出しそれを解消することで、新しいコンセプトを創出する設計支援が行なえる。次世代コンセプトの連続的な発想は、システムが成熟し製品化するまでの時間を短縮することに結びつく。

設計段階を上流と下流に大別し、代表的な手法についてレビューを実施した。既存の CAE 技術及び設計支援手法の躍進によって設計開発の効率化・高精度化は進んでおり、MEMS 分野においても高度な設計や数値情報に基づく最適解の導出では大きな効果をあげている。しかし、下流段階における CAE 技術では最適解を技術者に提示するのみで、設計者に必要となる設計情報を提供し、どのような設計をすべきか示唆する、あるいは支援するといった手法はほとんど無い。一方、設計上流における CAE 技術及び概念設計手法では、的確な設計情報を提供するものの、その抽出には設計者の経験や知識が必要であり、全ての設計者に対し汎用性があるとは言えない。また、概念の評価はあくまでも定性的であり、客観的な定量評価ができないため設計者の能力によって判断が異なってしまう。すなわち、熟練者によって経験的な設計開発が行なわれている領域に適用し、設計開発の初期段階において設計者の発想をより発展させる、あるいは支援するといった設計手法は確立されていないのが現状である。

以上のように、本章では MEMS 設計開発の現状と課題点を把握すると共に、概念設計の必要性を説いた。そして、現行 CAE 技術、設計支援手法の課題点・不足点を明確にし、以下の点が新しい MEMS 設計支援手法に必要であると結論づけた。

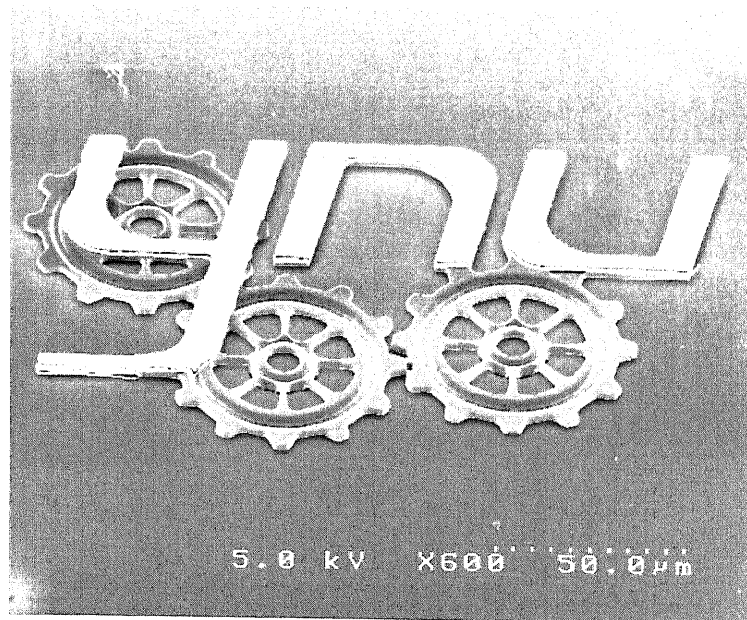
- ・ システムの最適解を得るだけでなく、何故その解が最適なのかを把握し、システムの原理原則を理解できる設計情報を提供できる技術
- ・ 設計開発初期の段階においてコンセプトの定量的評価ができる技術

ひとつめの技術によって、全ての設計者が熟練者に近い設計を行なえるようになる。設計情報を獲得するために、設計者の経験や知識に委ねる判断を必要としない汎用性があれば、設計情報は共通化し蓄積することが可能となるため、設計のデータベース化、標準化への発展性もある。ふたつめの技術では、本来定性的である開発概念の定量評価により、そのコンセプトが持つ設計キャパシティを客観的に判断することが可能となる。すなわち、製品の良し悪しを設計開発の初期段階で評価することが可能となり、開発下流における無駄な戻りや試行錯誤を省くことができるため、開発効率が向上する。また、両技術が兼備されていることによって、新しいコンセプトの創出を工学的に定量的判断に基づいて行なうことができる。概念設計段階における次世代コンセプトの発想プロセスは、トータル的な開発時間の短縮につながると考えられる。次章では、本論文で提案する MEMS の新規概念設計支援手法について、そのアプローチ及び手法について詳述する。

参考文献

- [1] R. H. Myers, D. C. Montgomery, *Response Surface Methodology Process and Product Optimization Using Design Experiments*, Wiley, 1995.
- [2] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, Wiley, 1996.
- [3] 影山雄介, "CAE 技術を用いたコンセプト設計情報の高度化に関する研究," 横浜国立大学, 2004.
- [4] 柏村孝義, "統計的設計支援システムの開発とその応用," 博士学位論文, 横浜国立大学, 1997.
- [5] 柏村孝義, 白鳥正樹, 于強, 実験計画法による非線形問題の最適化, 朝倉書店, 1998.
- [6] Design Director Plus ver. 1.0 ユーザーズマニュアル, 日本発条株式会社, 2001.
- [7] 古河知成, 矢川元基, "連続探索空間のための遺伝的アルゴリズムとその非線形逆問題への応用," 日本機械学会論文集(A編), vol. 61, no. 586, pp. 1409-1415, 1998.
- [8] 玉置久, 荒井俊彦, 阿部重夫, "遺伝的アルゴリズムによる不確実な最適化問題の解法," システム制御情報学会論文誌, vol. 12, no. 5, pp. 297-303, 1999.
- [9] 矢川元基, ニューラルネットワーク, 培風館, 1992.
- [10] 臼井士郎, 基礎と実践ニューラルネットワーク, コロナ社, 1995.
- [11] R. Cerruto, "MEMS デバイスの設計手法と開発環境," *Design Wave Magazine*, pp. 91-96, Nov., 2001.
- [12] G. K. Fedder, "Top-down design of MEMS," *Proc. of Modeling and Simulation of Microsystems Semiconductors, Sensors and Actuators (MSM '00)*, pp. 7-10, 2000.
- [13] G. Lorenz, A. Morris, and I. Lakkis, "A design flow of MOEMS," *Proc. of SPIE*, vol. 4408, pp. 126-137, 2001.
- [14] 小島芳生, "設計者 CAE としてのファーストオーダーアナリシス," 豊田中央研究所 R&D レビュー, 2002.
- [15] 西垣英一, "Excel を用いたボデー構造の初期設計ツール FOA," 豊田中央研究所 R&D レビュー, 2002.
- [16] 鶴見康昭, 中川稔章, 森信行, "振動低減のための縮退技術を利用した簡便な計算法," 豊田中央研究所 R&D レビュー, 2002.
- [17] 西脇眞二, "離散化要素に基づいた構造最適化," 豊田中央研究所 R&D レビュー, 2002.
- [18] 長松昌男, 角田鎮男, 長松昭男, "製品開発のための新しいモデル化手法(機能モデルの基本概念)," 日本機械学会論文集(C編), vol. 64, no. 622, pp. 1997-2004, 1998.
- [19] 長松昭男, "機械力学における新しいモデル化手法," 日本機械学会誌, vol. 104, no. 986, pp. 41-45, 2001.
- [20] 川面恵司, 須賀雅夫, 創造的工学設計の方法, 養賢堂, 2003.
- [21] G. Pahl, W. Beitz, *Engineering Design, A Systematic Approach*, Springer-Verlag, 1977.

- [22] T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, 1980.
- [23] TRIZ の理論とその展開, 産能大学出版部, 2003.
- [24] 中尾政之, 畑村洋太郎, 服部和隆, 設計のナレッジマネジメントー創造設計原理とTRIZ, 日刊工業新聞社, 1999.
- [25] 河野匠, 中島常光, 川面恵司, "TRIZと体系的工学設計法を融合した設計法を支援するシステムの開発," 日本機械学会講演論文集 (V), pp. 173-174, 2002.
- [26] 川面恵司, 石川直之, 馮富久, "体系的アプローチによる工学設計法と TRIZ による概念設計," 設計工学, vol. 35, no. 4, pp. 119-126, 2000.



*Logo of MEMS group at Yokohama National University
Designed and fabricated by using MUMPs.*

第 4 章

MESA (MEMS Early-Stage Analysis)

In three words I can sum up everything I've learned about life

— *It goes on.*

私は三つの単語に、私が学んだ人生の全てを要約できる。

つまり、「人生はつづく」ということ。

— *R. Frost*

フロスト

4.1 アプローチ

本論文で提案する新しい MEMS 設計支援手法は、これまで述べてきたように下記の二つの大きな技術を盛り込むことに重点を置いている。

- ・ システムの最適解を得るだけでなく、何故その解が最適なのかを把握し、システムの原理原則を理解できる設計情報を提供できる技術
- ・ 設計開発初期の段階においてコンセプトの定量的評価ができる技術

これら技術を具体的に MEMS 設計手法に組み込むために、本論文では大きく4つのアプローチとして、「簡易評価」「定量的評価」「情報の視覚化」「自在性」の検討を行う。

第一のアプローチは、「簡易評価」である。概念設計段階では、考えうる構造や設計因子も漠然としており、下流における詳細設計のようにパラメータを細かく設定することは出来ない。また、物理現象の干渉や、設計因子のばらつき・交互作用の有無といったことも判断が不可能であるため、それらを考慮しない、簡易的な概念評価の検討を行う。“あたり”をつけるための概念設計及び設計キャパシティの評価という点で、複雑な構造であってもシステム性能を簡便に推測できることが重要である。また、全ての設計者が同じように利用でき、熟練者と同様の結果を導き出せる単純な評価形式にすることが必要と考える。

第二のアプローチは、「定量的評価」の導入である。TRIZ のような概念設計支援手法ではコンセプトの定性的な評価しかできず、設計者に最終的判断が委ねられている^[1-3]。コンセプトや発想とは、本来漠然とした定性的にしか表現できない領域であるが、本論文における新しい手法では概念の客観的数値評価について検討を行う。概念の定量的評価及び設計が可能になれば、構造の変更による改善の度合いや異なるシステムの相対的な数値比較を実施することができ、MEMS における開発コンセプトの良し悪しを概念設計段階で明確に把握することができると考えられる。

第三のアプローチである「情報の視覚化」は、設計手法を用いることによって導かれる設計情報を全ての設計者に理解しやすい明確な形式で提供することである。前章で述べた既存の CAE 技術や設計支援手法では、技術者の経験や知識の深さの違いによって取捨選択される設計情報に偏りが生じてしまう可能性があるが、本手法では MEMS に関する知識が浅い技術者であっても、熟練者と同様の評価結果が得られる設計評価環境を確立することを目的とする。また、情報の視覚化は情報のブレイクダウンであるため、熟練度の異なる複数のエンジニアが情報を共有するうえで最も効果的な表現方法であると考えられる。

第四のアプローチは、「自在性」である。設計者が手法によって提供される一元的な設計情報だけではなく、パラメータを自ら変更することによって必要とする情報を得ることが可能なシステムを構築する。設計者によって調節可能な要素が多すぎる手法の場合、設計者の経験や意思、価値観・ノウハウを反映することができる一方、設計者の熟練度の違いによって得られる結果に大きな差が生じてしまう可能性がある。しかし、可変できるパラメータを簡素化し且つ適切な自由度を設定すること

ができるならば、ノウハウなどの独自情報を盛り込む自在性を損なうことなく、MEMS 初心者であっても利用することが可能で、且つ熟練者に迫る設計情報収集が行なえる手法になると考えられる。また、MEMS 初心者の場合、熟練者と同様の結果を得るまでには設計・評価の繰り返し作業が必要になると考えられるが、それは概念設計段階においては発展的試行錯誤であると捉え、熟練者に近づくために必要な知識及び設計データを蓄積するプロセスとして容認できるような形式にする。

MEMS デバイスのように複雑で高度なシステムの場合、上流での簡易的な概念設計ではその評価精度が低く、上流での誤った評価結果がそのまま詳細設計に影響を及ぼすことが懸念される。そこで本手法では入力としての「設計因子」と、出力として「性能」に着目し、詳細設計においても普遍となるシステムの原理原則の評価に重点を置いた。特にシステム内におけるトレードオフ、すなわち技術的な対立の存在がシステムの性能を低下させると考え、トレードオフを評価することによって、設計開発コンセプトを評価できるアルゴリズムを構築した。

4.2 設計因子と性能

ここで、本手法におけるシステム概念設計の重要な役割をする「設計因子」と「性能」の関係について述べる。Figure 4.1 にシステムにおける設計因子と性能の関係模式図を示す。ここで言う設計因子及び性能とは、あくまでも概念設計段階で考えるものである。図に示すようにシステムに要求

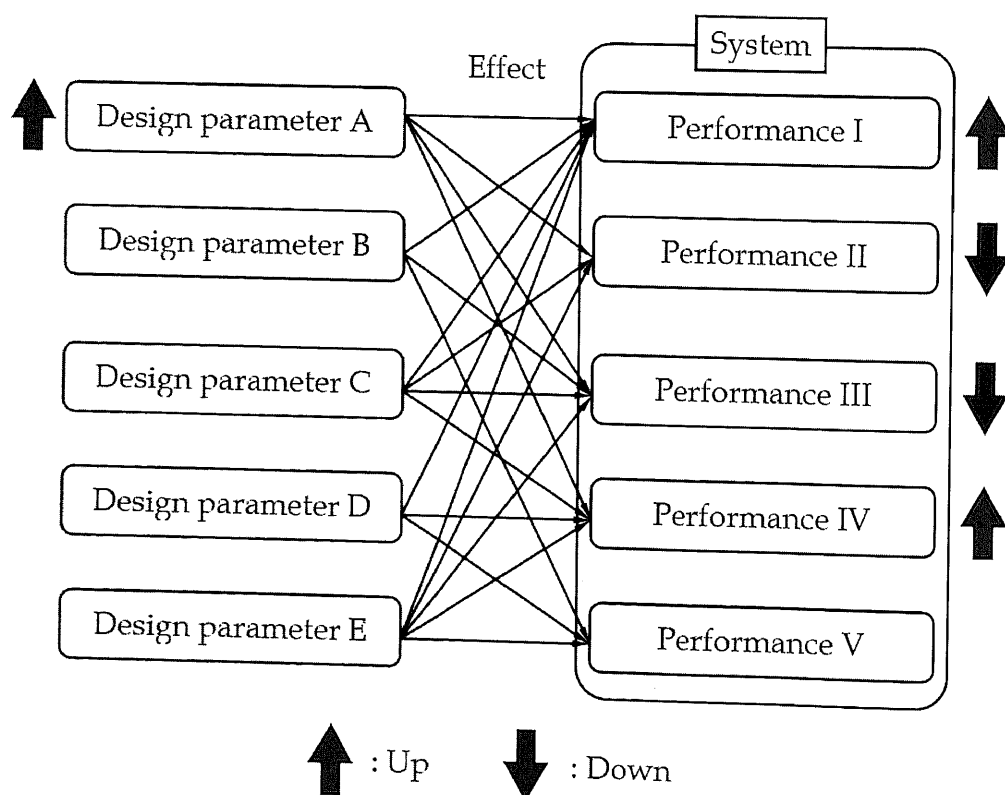


Figure 4.1 Relation between design parameters and system performances.

される性能はひとつだけとは限らない。MEMS においては、例えば変位量、応答性、応力などの機械特性に加え、消費電力や信頼性、コストなども同時に要求される。そして、全体としてのシステム性能は、要求される全ての性能の良し悪しによって総合的に決定されると考えることができる。これら性能はシステムの設計因子の値によって変化するが、例えば長さや幅といった寸法や、重量、材料物性、あるいは抵抗や印加電圧、電流、磁束などの設定により性能は変ってくる。すなわち、設計因子が入力であり、性能が出力の関係にある。Figure 4.1 で示したように、設計因子と性能は一對一関係にあるとは限らないため、ある設計因子を変化させた場合、性能が向上するものと低下するものが現れる可能性がある。これはシステム内における機能の対立であり、設計のトレードオフとなる。ひとつの設計因子の変化によって複数の性能が相反する方向へ変化する場合、その設計因子の値を調整することのみで全体的なシステム性能を向上させることは難しい。すなわち、設計のトレードオフが多ければ多いほど、そのシステムは設計の自由度が低く、改良の余地が無いと判断できる。また、トレードオフはシステムに内在する事象であり、開発下流における詳細設計段階の設計パラメータの最適化によって簡単に解消できるものではない。トレードオフの存在はシステムの最適化を妨げることになるため可能な限り解消されるべきであり、そしてその評価は概念設計の段階で行なわれるべきであると考えられる。

そこで、本論文では設計因子と性能、そして性能の対立関係を示すトレードオフを基準として設計コンセプトの評価をすることとした。システムにおけるトレードオフを定量的に評価することによってその設計キャパシティを判断し、システム全体性能の総合的な判定を行なう。設計キャパシティが大きければ、詳細設計の段階において性能を改善するために可変できる設計因子の数が多くなり、設計者の意思をより自由に反映できることになる。この手法の呼称を MESA (MEMS Early-Stage Analysis) とし、次節以降でそのアルゴリズム詳細に触れる。

4.3 MESA の基本概念

4.3.1 MESA 感度

MESA においては入力を設計因子 (Design Parameter) とし、出力が性能という関係で定義している。すなわちシステム性能 (System Performance) を C_i ($i=1,2,3,\dots,m$)、概念設計段階で考える設計因子を d_j ($j=1,2,3,\dots,n$) としてその関係を表現する関数を f と定義すると

$$C_i = f(d_1, d_2, \dots, d_j, \dots, d_n) \quad (4.1)$$

となり、性能は設計因子を変数とする関数として表すことができる。ここで、あるひとつの設計因子 d_j に着目し、その設計因子のみを任意の値 $d_{j,1}, d_{j,2}$ に変化させた場合のシステム性能 $C_{ij,1}, C_{ij,2}$ を次のように定義する。

$$C_{ij,1} = f(d_1, d_2, \dots, d_{j,1}, \dots, d_n) \quad (4.2)$$

$$C_{ij,2} = f(d_1, d_2, \dots, d_{j,2}, \dots, d_n) \quad (4.3)$$

ここで、上述した関係を図示したものをFigure 4.2に示す。ある設計因子二点間におけるシステム性能の変化を実線にて表現してある。実際のシステムでは設計因子に対するシステム性能の変化が線形か非線形かという予測は、概念設計の段階において不可能な場合が多い。そこで、MESAでは設計因子に対するシステム性能の変化を図示したように線形近似し、ある基準値内変化における初期値と最終値のみを議論の対象とした単純化を行なっている。そして設計因子のシステム性能に対する影響度を感度 (Sensitivity) という形式で表現する。MESAにおける感度 (MESA Sensitivity) s_{ij} を下式のように定義する。

$$s_{ij} = [\pm] \frac{\log(C_{ij,2}/C_{ij,1})}{\log(d_{j,2}/d_{j,1})} \quad (4.4)$$

但し、 $C_{ij,1}, C_{ij,2} \neq 0$,
 $C_{ij,1} \leq C_{ij,2} \leq 0$, または $C_{ij,2} \leq C_{ij,1} \leq 0$
 $d_{j,1}, d_{j,2} \neq 0$,
 $d_{j,1} \leq d_{j,2} \leq 0$, または $d_{j,2} \leq d_{j,1} \leq 0$

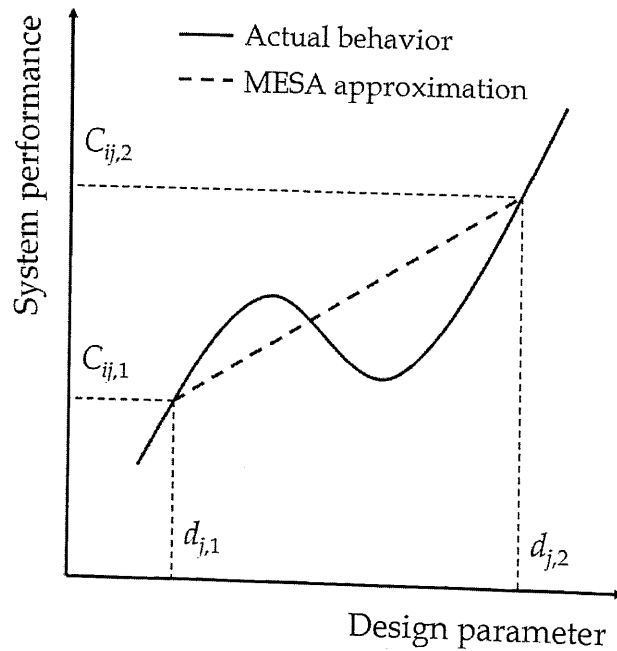


Figure 4.2 System performance vs. design parameter.

(4.4)式によるMESA感度の符号は、設計因子 d_j の変化に対してシステム性能 C_{ij} が上昇(Ascent)、すなわち向上する場合には正(+)とし、降下(Descent)すなわち悪化する場合には負(-)と定義する*。これにより、MESA感度の符号によって設計因子の性能に対する影響方向を判断できる。MESAではFigure 4.2における近似された傾きを、単純な微分によって求めてそれを感度とは定義していない。log対数により表記することによって、設計因子の変化に対するシステム性能の変化が無い場合にMESA感度を0とすることが可能になると同時に、真値で計算を行なった場合の評価に使用する絶対値の影響を排除することができるためである。また、概念設計段階で具体的な設計因子と性能の数値を入力できない場合に、理論式などから導かれる関係によっても表現が可能となる。さらに、(4.4)式で注記したように、設計因子及びシステム性能が0または正負にわたって変化する場合、MESA感度を計算することはできない。しかし、MESA感度は基本的に設計因子のシステム性能に対する傾きであるから、例えば変位の場合には絶対値をシフトする、温度では摂氏(°C)を絶対温度(K)に変更する等の数値計算条件となる基準を変更することで、この定義によって対応できる範囲は拡大することが可能である。

次に、システム性能間の統一及び設計因子の影響度の比較を容易にするために、サブシステム性能ごとに、関与する設計因子のMESA感度の和を1として規格化を行なう。ゆえに設計因子のシステム性能に対する規格化されたMESA感度(Normalized MESA Sensitivity) s_{ij}^* は下式のように表現される。

$$s_{ij}^* = \frac{s_{ij}}{\sum_j^n |s_{ij}|} \quad (-1 \leq s_{ij}^* \leq 1) \quad (4.5)$$

$$\sum_j^n |s_{ij}^*| = 1 \quad (4.6)$$

この規格化によって次節以降のシステム性能の重みづけ、全体性能の定量評価時の関係表現が容易になる。また、設計因子や評価対象となるシステム性能の数に制限を設ける必要がなくなる。さらに規格化によって、設計因子とシステム性能数が異なる複数のシステム群を、同一評価基準のもとに相対評価することが可能となる。

ひとつの設計因子が複数のサブシステム性能に影響を与える可能性があり、設計因子の変化によってそれら性能が相反する方向へ変化する場合、設計上のトレードオフが存在することとなる。トレードオフの関係をMESA感度によって表すと、

$$s_{i_1j}^* \cdot s_{i_2j}^* < 0 \quad (4.7)$$

*本論文では最降急下法(Steepest Descent Method)と同様に、設計因子及びシステム性能の変化の方向を示す表現を、向上の場合を上昇(Ascent)、悪化の場合を降下(Descent)と表現する^[4]。

となり、この時システム性能 C_{i_1} と C_{i_2} は、設計因子 d_j に対してトレードオフの関係にある。よって、本手法では、システム性能間の MESA 感度の正負符号を比較することによって、トレードオフの存在を容易に判断することが可能である。

4.3.2 MESA マトリックスと重みづけ

前節で導出された規格化済みの MESA 感度 s^*_{ij} を、システム性能 C_{ij} を行方向、設計因子 d_j を列方向に配置した二次元マトリックス内に配列する。これによって設計因子のシステム性能に対する影響度と、設計上の対立の生じている部分を視覚的に（容易に）判断することができる。Table 4.1 に MESA 感度の配列を行なった MESA マトリックス (MESA Matrix) を示す。MESA 感度を列方向に比較することによって、ひとつのシステム性能内における各設計因子の影響度を確認することができる。また、行方向に MESA 感度を比較することによって、ひとつの設計因子に対するトレードオフの存在を視覚的に把握できる。

ここで新たに重み (MESA Weight) ω_i を定義する。

$$0 \leq \omega_i \leq 1 \quad (4.8)$$

$$\sum_i^m \omega_i = 1 \quad (4.9)$$

重みは各サブシステム性能に対し付加される。重みの総和を1として各システム性能に配分され、コンセプトの特徴づけを別途行なう場合に利用される。重みづけの計算は、そのサブシステム性能の MESA 感度に行なわれ、次章以降では MESA マトリックスとして感度を表現する場合に重みを掛けた数値を MESA 感度として表記し直す場合もある。システム性能間で重みづけに差を持たせること

Table 4.1 MESA matrix.

	C_1	C_2	C_3	\dots	C_m
	w_1	w_2	w_3	\dots	w_m
d_1	s^*_{11}	s^*_{21}	s^*_{31}	\dots	s^*_{m1}
d_2	s^*_{12}	s^*_{22}	s^*_{32}	\dots	s^*_{m2}
d_3	s^*_{13}	s^*_{23}	s^*_{33}	\dots	s^*_{m3}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\dots	\vdots
d_n	s^*_{1n}	s^*_{2n}	s^*_{3n}	\dots	s^*_{mn}

によって、全体的なシステム評価におけるシステム性能の優先順位をつけることが可能となる。また、AHPのように重みを関数とし、要求性能に基づいた重みの割付けを決定するアルゴリズムを用意することも考えられるが、本手法ではあえて重みづけを設計者の判断に委ねる自由度を残してある。設計者が自由に重み数値の設定を変更できる仕組みにすることによって、設計キャパシティの大きさを判断する上で必要となる設計情報を獲得し学習できる自在性を持たせた^[5]。

4.3.3 システム評価点

前節までに、規格化された MESA 感度と重みによって、各々のシステム性能に対して設計因子が及ぼす影響を数値的に表記する定義を行なった。ここで、システム全体、すなわちシステム概念の定量評価を行うために、新たにシステム評価点 (System Score) S を下式のように定義する。

$$S = \sum_i^m \omega_i \sum_j^n s_{ij} \quad (-1 \leq S \leq 1) \quad (4.10)$$

システム評価点は各サブシステム性能における規格化された MESA 感度の和に、そのシステム性能に重みづけされたウェイトをかけたものの総和である。本手法は概念設計の段階で用いられ、交互作用や物理的干渉が把握していないため全ての因子が独立と仮定しており、MESA 感度の加法性が成立する。MESA では、このシステム評価点によってトータル的なシステムの概略評価が可能になると考えた。システム評価点は規格化された MESA 感度の合計であるため、MESA 感度が全て正であれば最大で 1、全て負であれば最小値として -1 をとる。よって、(4.7)式でも示したようにシステム内にトレードオフが存在すればするほど、システム評価点は低くなる。MESA においてはトレードオフの有無をシステム評価の基準としており、トレードオフが存在しないシステムほど良いシステムと判断されることになる。

システムにおけるトレードオフの定量的な評価が可能になることによって、経験や知識の浅い MEMS 技術者であってもコンセプトの設計キャパシティを判断し、そのシステム全体性能の総合的な判定を行なうことができる。システム評価点は、設計因子を変化させる方向 (上昇または降下) と重みによって可変となる。ゆえに設計者は設計因子を調整する方向を調査すると同時に、サブシステム性能の重みを可変することによってシステムの全体性能の概念設計を行い、システム評価点によってシステム性能が向上するのか低下するのかを判断できる。例えば、Table 4.2 (a) (b) に示すように、 $\omega_1 > \omega_2 > \omega_3$ という重みづけによってシステム性能 C_1 基本特性として重要と設定した場合、Table 4.2 (a) に示す設計因子を全て上昇方向に設定した状態から、Table 4.2 (b) に示すように C_1 に優先順位 (Priority) をおいて、設計因子の変化方向を変えて C_1 における MESA 感度を全て正の値に調節することによって、システム評価点を向上させることができる。このような作業から設計者は設計因子を設定する方向を把握できる。

また、複数の異なるコンセプトについてそれぞれ MESA を適用して特性解析を行い、システム評価点によって定量的なコンセプトの比較設計をすることが可能となる。システム評価点の高いシステ

Table 4.2 MESA matrices with and without change of design parameter directions.

(a) Ascent setup of design parameters.

		C_1	C_2	C_3
Ascent		w_1	w_2	w_3
d_1	\nearrow	s_{11}^*	s_{21}^*	$-s_{31}^*$
d_2	\nearrow	$-s_{12}^*$	$-s_{22}^*$	s_{32}^*
d_3	\nearrow	$-s_{13}^*$	s_{23}^*	$-s_{33}^*$

$$\omega_1 > \omega_2 > \omega_3$$

(b) After the direction change of design parameters with C1 priority setup.

		C_1	C_2	C_3
		w_1	w_2	w_3
d_1	\nearrow	s_{11}^*	s_{21}^*	$-s_{31}^*$
d_2	\searrow	s_{12}^*	s_{22}^*	$-s_{32}^*$
d_3	\searrow	s_{13}^*	$-s_{23}^*$	s_{33}^*

priority : C_1

ムがより優れたコンセプトであり、設計キャパシティが大きいと判断される。すなわち、設計因子及び重みを調整することによって既存コンセプトの改善を検討し、ローカル的な評価をすることも可能であるが、新しい設計因子の導入と既存の設計因子の削除などを行なうことによって別アプローチの改善を加えた新たなコンセプトを創出し、それを旧コンセプトと比較評価することも可能である。MESA を用いることによって MEMS の概念設計段階における新規コンセプトの創出、設計及び評価が可能になると考えられる。

4.4 結論

MESA では概念設計段階における設計因子とシステム性能に着目し、両者間の存在する設計トレードオフを明確にすることでコンセプトの定量的評価を可能にした。MESA の特徴及び MESA によって得られる設計情報を総括すると下記ようになる。

- ・ MESA 感度 s_{ij}^* の値は、設計因子 d_j がシステム性能 C_{ij} に与える影響度を示す。
- ・ MESA 感度の正負符号により、設計因子の変化がシステム性能に与える影響方向を示し、正の場合は上昇(向上)、負の場合は降下(悪化)を意味する。また、複数のシステム性能間で符号が異なる場合、それらは設計因子に対しトレードオフの関係であることを示す。
- ・ 重み ω_i によってシステム性能の優劣を設計者が設定できると同時に、自由に可変することで設計者が必要とする設計情報を得ることが可能である。
- ・ システム評価点 S は、コンセプトの数値的評価である。
- ・ 上記の情報を MESA マトリックスという形式で視覚的表現を行い、設計者が容易に設計情報を把握できる。

漠然とした概念設計領域の評価を、設計因子と性能の関係を感度によって簡易的に数値化することにより、設計因子の影響度、トレードオフなど必要な設計情報を全ての設計者が明確に把握することができる。MESA の利点を下記に示す。

- ・ 設計因子の変化方向及び重みを調整することによって、トレードオフを最小限に抑え、システムを向上させる設計改善の検討を概念設計段階で定量的に実施することが可能である。
- ・ MESA マトリックス上において新しい設計因子の導入及び既存の設計因子の削除が容易に可能であり、トレードオフの有無を判断することによって新規コンセプト設計の検討が可能である。
- ・ システム評価点は異なるシステムの比較評価する場合にも適用でき、複数のコンセプトの優劣を定量的客観的に判断することができる。

以上述べてきたように、MESA によって MEMS の概念設計段階におけるコンセプト評価が可能となる。コンセプトを明確にすることができれば、設計開発の流れは確立されてロバストなものになり、下流における詳細設計での手戻りは解消される。また、MESA による設計支援は、単純に最適解を提供する設計手法ではなく、人間の発想・思考をサポートして設計者に新しいコンセプトを創出するヒントを与える手法である。次章以降では既存の MEMS デバイスによって MESA の検証を行うとともに、新しいコンセプトの創出について議論を行なう。

参考文献

- [1] 川面恵司, 須賀雅夫, 創造的工学設計の方法, 養賢堂, 2003.
- [2] TRIZ の理論とその展開, 産能大学出版部, 2003.
- [3] 中尾政之, 畑村洋太郎, 服部和隆, 設計のナレッジマネジメントー創造設計原理とTRIZ, 日刊工業新聞社, 1999.
- [4] G. Subbarayan, *Optimal Design Lecture Notes*, University of Colorado at Boulder, 2001.
- [5] T. L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, 1980.

第 5 章

MESA の検証

*Freedom is not worth having
if it does not include the freedom to make mistakes.*
失敗を許す自由が無ければ、自由である価値が無い。

— M. Ganghi
ガンジー

5.1 ピストンマイクロミラーシステムの性能比較検証

第5章では MESA を具体的な MEMS デバイスに適用し、その妥当性の検証を行う。本節で扱うピストンマイクロミラーは、2 章で詳述したようにミラーで光を受光し、ピストン(上下)駆動するミラー面の高低差を利用して反射光の波面を調整して収差などの工学的補正に利用されるものである^[1,2]。静電駆動と電熱駆動の2種類のピストンマイクロミラーシステムに MESA を適用し、そのコンセプトの評価及び性能比較検討をする。

5.1.1 静電駆動ミラーの解析

5.1.1.1 静電駆動ミラーの設計因子と要求システム性能

静電駆動型ピストンマイクロミラーの構造を Figure 5.1 に示す。ピストンマイクロミラーは、上部電極を兼ねるミラー板とその上に形成された鏡面メタル層、ミラー板を支持する片持ち梁構造のフレキシヤ、及び下部電極から構成されている。ミラー板と下部電極間への電圧印加によって静電気力が発生し、その静電気力とフレキシヤのばね力との力学的釣り合いによってミラー板の挙動が決定される。ここで、MESA のシステム性能にあたる静電駆動型ピストンミラーの要求性能として次の5つを挙げる。

- a) 変位 (Displacement)
- b) 駆動電圧 (Driving Voltage)
- c) 応答速度 (Response)
- d) 反り変形 (Warpage)
- e) ミラー占有面積比 (Fill Factor)

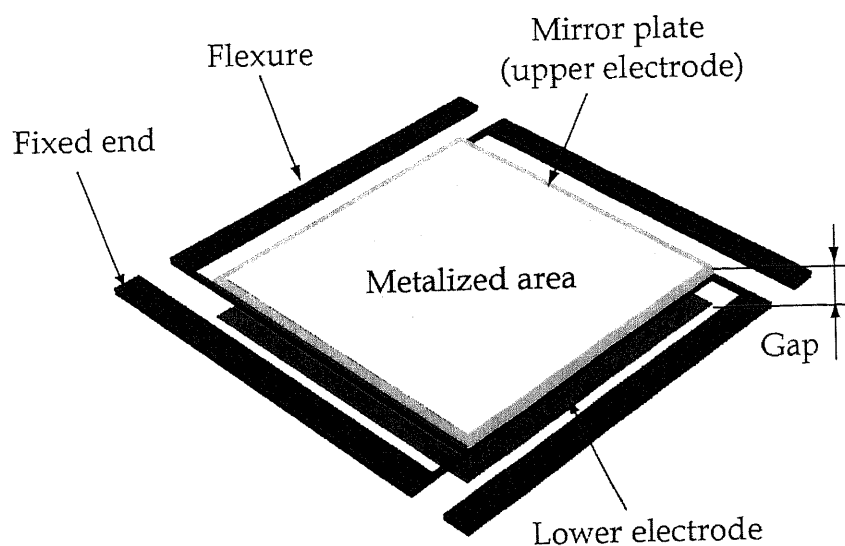


Figure 5.1 Schematic of electrostatic piston micromirror.

「変位」は、ピストン駆動による光学的収差能力を決定する最も重要な機械性能である。大きな変位を確保できる程、ピストンミラーとしての駆動域が拡大してシステムとしての自由度が増す。「駆動電圧」は駆動及び制御回路構造の複雑さに影響を及ぼすので、低いことが好ましい。「応答速度」は、入力に対するミラーの駆動追従性を決定するものであり、応答速度が速い(小さい)程タイムラグ無く出力をすることが可能となる。ミラーの「反り変形」及び「占有面積」は光学的な入出力比に影響を与える。反り変形が小さく占有面積が大きい程、反射効率が高くなり光学的な損失が小さくなる。

次に、概念設計段階で考えうる MESA の設計因子として下記に示すように 8 つのパラメータを選択し、設計水準を割り振った。Figure 5.1 に示す構造は Poly MUMPs ルールに従って設計されており、下部電極が Poly-0、フレキシヤが Poly-1、ミラー板が Poly-1、Poly-2、Metal 層から構成されている^[3]。よって因子の水準値は MUMPs の層構成により制約を受けている。また、後述する電熱駆動型ミラーと同条件で設計キャパシティの比較を行なうために、ミラー全体の大きさに 250×250μm という制限を設けた。

1) フレキシヤ数(The Number of Flexures)	: 2-4
2) フレキシヤ幅(Flexure Width)	: 15-30μm
3) フレキシヤ厚(Flexure Thickness)	: 1.5-2.0μm
4) フレキシヤ長さ(Flexure Length)	: 100-200μm
5) ミラー板サイズ(Mirror Area)	: 180×180-200×200μm
6) ミラー厚(Mirror Thickness)	: 1.5-2.0μm
7) 反射領域面積(Metal Area)	: 80×80-160×160μm
8) 電極間距離(Electrode Distance)	: 2-6μm

5.1.1.2 静電駆動ミラーの MESA 感度の算出

本検証例における MESA 感度の計算は、理論式計算とともに、MEMS 用の汎用 FEM 解析ソフト CoventorWare を併用して行なった^[4]。まず構造の挙動を示す理論式群を、これまでに報告されている構造式を用いて導出する^[5]。本構造のフレキシヤによるばね力 F_k は、 n をフレキシヤ数、 k をばね定数、 x を変位とするとフックの法則 (Hooke's Law) より下式のようになる。

$$F_k = nkx \quad (5.1)$$

また、フレキシヤは矩形断面で、先端上下駆動を水平方向で拘束された片持ち梁構造であるから、ばね定数 k は下記のように表すことができる。

$$k = \frac{12EI}{l^3} = \frac{Ebt^3}{l^3} \quad (5.2)$$

ここで E はフレキシヤ材料のヤング率、 I は断面二次モーメント、 l はフレキシヤ長さ、 B はフレキシヤ幅、 t はフレキシヤ厚である。よって、ばねに蓄えられる弾性力は下記ようになる。

$$F_k = n \frac{Ebt^3}{l^3} x \quad (5.3)$$

次に、静電容量 C は、真空の誘電率を ϵ_0 、電極間物質の比誘電率を ϵ_r 、初期状態の電極間距離を g_0 、上下電極のオーバーラップ面積を A とすると

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{g_0} \quad (5.4)$$

と表記できる。また、印加電圧を V とすると、蓄えられる静電エネルギーは下記ようになる。

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{g_0} V^2 \quad (5.5)$$

よって、変位 x による静電力 F_e は、(5.5)式に示すエネルギーを微分して

$$F_e = \nabla U = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{(g_0 - x)^2} V^2 \quad (5.6)$$

と表される。

静電駆動型ピストンミラーは、(5.3)式で示すばね力と、(5.6)式で示す静電気力のバランスによって挙動が決定される。ゆえに、ミラーの変位、駆動電圧は下記関係式群によって求められる。

$$F_e = F_k \quad (5.7)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{(g_0 - x)^2} V^2 = n \frac{Ebt^3}{l^3} x \quad (5.8)$$

$$V = (g_0 - x) \sqrt{\frac{2nEbt^3}{\epsilon_0 \epsilon_r A l^3} x} \quad (5.9)$$

CoventorWare による静電駆動型ピストンミラーの FEM 解析は、MEMCap と呼ばれる静電容量解析と、MEMmech と呼ばれる機械解析の連成解析である CoSolve という解析オプションで可能である^[6]。CoventorWare の CoSolve による解析と、上述した理論解析及び実験結果と整合性は確認

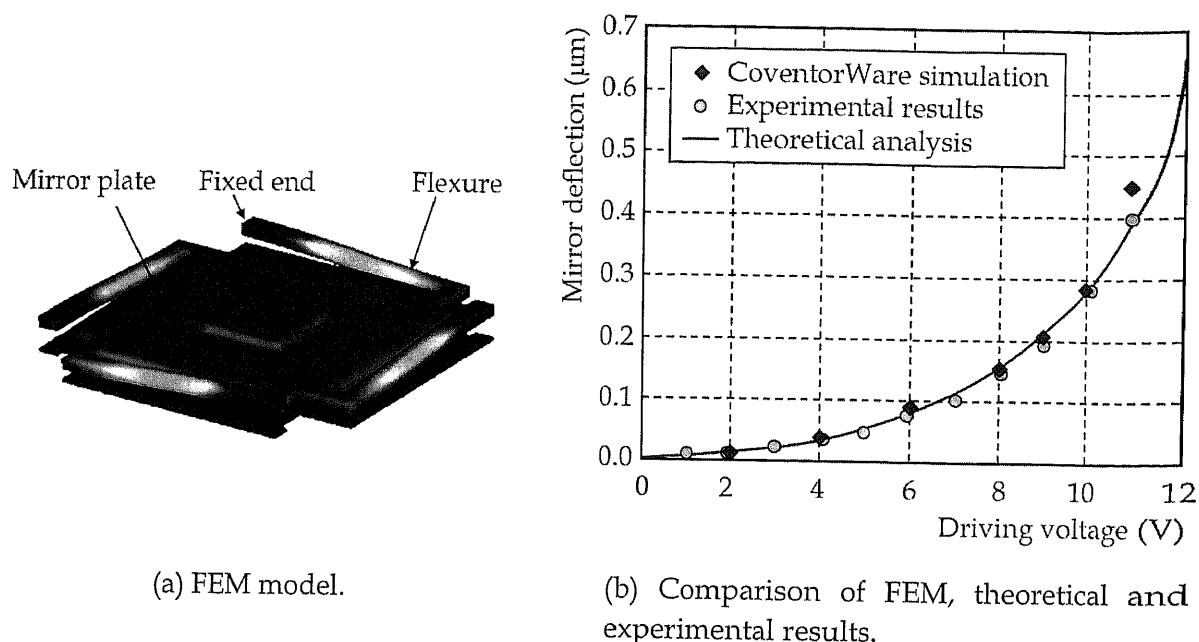


Figure 5.2 CoventorWare FEM model and comparison of FEM, theoretical and experimental results [7].

され報告されている^[7]。Figure 5.2 に示すように、FEM 解析結果は理論値及び実験結果とほぼ一致しており、CoventorWare を静電駆動解析に適用して問題ないと判断できる。よって、システム性能のうち「変位」、「駆動電圧」、「応答速度」及び「反り変形」は CoventorWare から導出した。なお、応答速度は、ミラーの駆動周波数の範囲を駆動電圧とミラー変位が同位相である領域に限定し、最大応答周波数はミラーシステムの共振周波数と仮定した。また、反り変形はミラー板面内における上下方向の変位量の最大最小の差と定義する。最後にミラー反射部の「占有面積比」であるが、ミラー反射部の占有面積とミラーシステム全体の面積の比として求められる。システム性能に対する各設計因子の MESA 感度は、標準のシステムモデルを基準として計算対象となる設計因子のみを変化させ、それによるシステム性能の変化量を調査することにより導かれる。すなわち、概念設計段階では交互作用は判定しないとの前提に基づいた調査方法といえる。

5.1.1.3 静電駆動ミラーの MESA マトリックスとシステム評価点

理論式及び CoventorWare によって計算された MESA 感度を正規化し、5つの要求性能と8つの設計因子に基づいてレイアウトし作成された静電駆動マイクロミラーシステムの MESA マトリックスを Table 5.1 に示す。この表では全ての設計因子を上昇方向に変化させた場合の MESA 感度を示している。表において 0 が表示されている場合は、設計因子が性能に関与しないことを示す。また、この段階ではシステム性能に対して重みを設定しておらず、各システム性能を均一に評価している状態に相当する。

この MESA マトリックスより、前章で述べた設計情報が視覚的に把握可能であることが確認できる。例えば、システム性能の「変位」に着目すると、設計因子ごとに感度数値が異なり、影響度に差があることが確認できる。「変位」に関しては、特にフレキシヤの厚さ及び長さの影響が大きく、フレキシヤに関連する以外の設計因子は無関係もしくは影響度が小さいことがわかる。すなわち、変位量をコントロールするためには、フレキシヤの寸法を変更することが設計上の重要なポイントであることが確認できる。また、フレキシヤに関連する 4 つの設計因子において、「変位」と「駆動電圧」は同方向にその性能が変化するが、「応答速度」については全く逆方向の性能変化を示すことが表より把握できる。つまり、静電駆動型ピストンミラーシステムはフレキシヤに関して設計トレードオフを有しており、フレキシヤ構造を変更すると性能変化が対立してしまう、すなわち構造的矛盾を有するシステムであると判断できる。このように、トレードオフが存在する場合、その設計因子の値のみを調節することによって全てのサブシステム性能を向上させ、システムとしての総合的な特性を向上させることは不可能である。

次に、Table 5.1 の MESA マトリックスをもとに、各システム性能に重みづけを行ってシステム評価点の導出を行う。ここでの重みづけは「変位」をピストンミラーで最も重要な性能と位置づけてその値を $\omega_1=0.7$ と大きく設定し、他の重みについては $\omega_2=0.1$ 、 $\omega_3=0.1$ 、 $\omega_4=0.05$ 、 $\omega_5=0.05$ とする。さらに、重みの大きい「変位」を第一優先性能と考え、「変位」に関連する全ての設計因子について MESA 感度が正となるように設計因子の変化方向を調整する。Table 5.2 に重みづけを行ない、設計因子の変化方向を調節した MESA マトリックスを示す。フレキシヤに関わる 3 つの設計因子については、その数値を降下方向に変更した。表における MESA 感度は、既に重みをかけた値を表示している。この表からシステム評価点が MESA 感度の和として算出されることになり、静電駆動型マイクロミラーのシステム評価点は、 $S_{electro}=0.750$ となる。この点数は「変位」を優先性能と考えて重みを大きく設定しており、他のシステム性能で存在する降下方向の MESA 感度の影響をあまり受けていない結果であるため、「変位」のみに注目したシステム評価点といえる。

Table 5.1 MESA matrix of electrostatic piston mirror.

Ascent		displace ment	driving voltage	response	warpage	fill factor
		w_1	w_2	w_3	w_4	w_5
the number of flexures	↗	-0.120	-0.070	+0.060	0	-0.040
flexure width	↗	-0.089	-0.080	+0.080	0	-0.080
flexure thickness	↗	-0.320	-0.240	+0.250	0	0
flexure length	↗	+0.436	+0.180	-0.330	0	-0.040
mirror size	↗	+0.001	0	-0.010	0	+0.040
mirror thickness	↗	0	0	-0.090	+0.760	0
metalized area	↗	0	0	-0.190	-0.240	+0.800
electrode gap	↗	+0.004	+0.430	0	0	0

Table 5.2 Weighted MESA matrix of electrostatic piston mirror.

		displace ment	driving voltage	response	warpage	fill factor
		0.7	0.1	0.1	0.05	0.05
the number of flexures	↘	+0.084	+0.007	-0.006	0	+0.002
flexure width	↘	+0.062	+0.008	-0.008	0	+0.004
flexure thickness	↘	+0.224	+0.024	-0.025	0	0
flexure length	↗	+0.305	+0.018	-0.033	0	-0.002
mirror size	↗	+0.001	0	-0.001	0	+0.002
mirror thickness	↗	0	0	-0.009	+0.038	0
metalized area	↗	0	0	-0.019	-0.012	+0.040
electrode gap	↗	+0.003	+0.043	0	0	0

Priority : displacement

5.1.2 電熱駆動マイクロミラーの解析

5.1.2.1 電熱駆動ミラーの設計因子と要求システム性能

電熱駆動型ピストンミラーに関する MESA による解析を、静電駆動型ピストンマイクロミラーの場合と同様の流れで行なう。Figure 5.3 に解析に使用した電熱駆動型ミラーの構造概略図を示す。上部電極を兼ねるミラー板とその上に形成された鏡面メタル層は静電駆動型と同じ構造である。静電駆動型ミラーにおけるフレキシヤに代わり、本構造では垂直駆動型サーマルアクチュエータがミラー板を支持する形で接続されている。サーマルアクチュエータに電流を印加することによって、アクチュエータが初期状態から上方向へ駆動し、ミラー板の変位が発生する。システム性能は静電駆動型ミラーと同じ 5 つの性能を設定するが、ここではアクチュエート方式の違いから「駆動電圧」に代えて「消費電力」を設定した。「消費電力」は電熱駆動のための印加電流と印加電圧が小さいほど抑制されるが、電流経路や熱伝導などによってエネルギーロスの違いが発生するため、構造的な影響を受けるシステム性能といえる。

- a) 変位 (Displacement)
- b) 消費電力 (Power Consumption)
- c) 応答速度 (Response)
- d) 反り変形 (Warping)
- e) ミラー占有面積比 (Fill Factor)

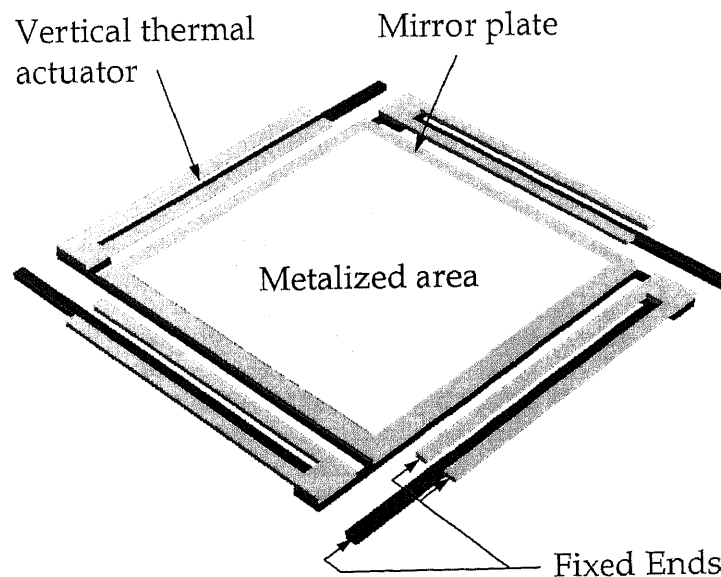


Figure 5.3 Schematic of electro-thermal piston micromirror.

また、MESA の設計因子としては、下記に示す 6 つのパラメータを選択した。本構造も静電駆動型同様、Poly MUMPs 設計ルールに準拠しており、ミラー板が Poly-1、Poly-2、Metal 層から構成され、アクチュエータのホットアーム(中央)が Poly-1、コールドアーム(両サイド)が Poly-2 でそれぞれ成り立っている^[3]。アクチュエータの設計因子をより詳細に設定することは可能であるが、システムとしての全体性能を把握するために、本 MESA 解析ではアクチュエータ全体の幅と長さのみに限定し、各アームの寸法は全体寸法に比例して変化させる。なお、アクチュエータ全体の長さが 200 μm 、幅が 30 μm の設定において、ホットアームとコールドアームの長さは各々 200 μm 、160 μm であり、アーム幅及びアーム間隔は全て 6 μm とする。

1) アクチュエータ数(The Number of Actuators)	: 2-4
2) フレキシャ幅(Actuator Width)	: 15-30 μm
3) アクチュエータ長さ(Actuator Length)	: 100-200 μm
4) ミラー板サイズ(Mirror Area)	: 180 \times 180-210 \times 210 μm
5) ミラー厚(Mirror Thickness)	: 1.5-2.0 μm
6) 反射領域面積(Metal Area)	: 80 \times 80-160 \times 160 μm

5.1.2.2 電熱駆動ミラーの MESA 感度算出

電熱駆動型ミラーの MESA 感度は、CoventorWare における MEMETherm と呼ばれるジュール熱＝熱伝導＝機械連成解析オプションにより計算する^[6]。CoventorWare の電熱解析と理論解析の整合性は、理論式によってアクチュエータの温度分布を求めて変位量を導出することは非常に複雑であるため、熱伝導解析のみを行ってジュール熱による発熱とその発熱位置により検証を行なった。Figure 5.4 に理論解析に用いた電熱アクチュエータの展開モデルを示す^[8]。アクチュエータの定常熱伝導式は下記によって表される。

$$\frac{dT^2}{dx^2} + \frac{q'''}{k} = 0 \quad (5.10)$$

T は温度、 x は位置、 q''' は発熱量、 k は熱伝導係数である。ここで発熱量 q''' はジュール熱であり、電気抵抗率を ρ 、長さを L 、断面積を A 、電流を I とすると

$$q''' = \frac{\rho L}{A} I^2 / AL = \frac{\rho}{A^2} I^2 \quad (5.11)$$

となる。また、各アームの境界条件として、熱量 q は保存されると仮定する。その場合の熱量は、

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (5.12)$$

と表される。上述3式を用い、各アーム及び境界条件にて Figure 5.4 に示す寸法値を代入し、温度分布の式を求める。温度が最も高いと想定されるホットアームにおける温度分布は、

$$T_{hot}(x) = -\frac{1}{2} \times 5.824 \times 10^{10} x + 9.055 \times 10^6 x + 300 \quad (\text{K}) \quad (5.13)$$

となる。(5.13)式を微分し最高温度とその位置を求めると、ホットアーム左端部より155.5 μm の位置において1005Kとなる。同一寸法により、CoventorWare を利用して FEM 解析した温度分布結果を Figure 5.5 に示す。ホットアーム端部より152 μm の位置において最高温度 950K という結果となった。CoventorWare ではホットアームとコールドアームの厚さ方向の高低差があり、理論モデルとは完全に一致していないことが約 5% 誤差の原因と考えられるが、本検証では許容できる範囲と判断する。ゆえに電熱型ピストンミラーにおいても CoventorWare を用いてシステム性能に関する MESA 感度を求める。静電駆動型ミラーにおける MESA 感度計算と同様に、標準モデルから計算対象となる設計因子のみを変化させることによって、システム性能の変化量を導出する。

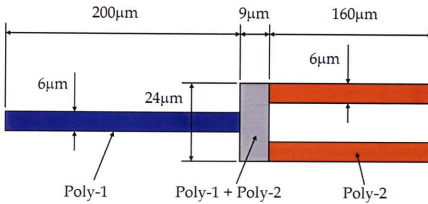


Figure 5.4 Theoretical model of electro-thermal actuator [8].

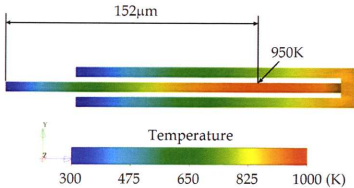


Figure 5.5 Temperature distribution of electro-thermal actuator calculated by CoventorWare.

5.1.2.3 電熱駆動ミラーの MESA マトリックスとシステム評価点

電熱駆動型ピストンミラーに関する MESA マトリックスを Table 5.3 に示す。表中の MESA 感度は全ての設計因子を上昇方向に変化させた場合の数値で、既に正規化された状態にある。この表から確認できる電熱駆動型ミラーの特徴のひとつは、システム性能の「変位」と「反り変形」が全ての設計因子においてトレードオフの関係にあることである。すなわち、変位量を増加させるために設計因子を調節すると、反り変形が増大してしまう現象が生じる。これは、アクチュエータが熱エネルギーによって駆動することが原因であり、アクチュエータからミラー板へ伝達した余剰熱エネルギーによってミラー板が熱的な変形をするためと推測される。また、ミラー板厚が「変位」に大きく影響しており、ミラー板の熱容量によって熱エネルギーの移動量に変化していることが考えられる。さらに、「反応速度」については静電駆動型と同様、アクチュエータに関する設計因子について「変位」とトレードオフの関係にあり、制御が困難な状況にあることが理解できる。

Table 5.4 に静電駆動型ミラーと同じく「変位」を重要視する重みづけを行なった MESA マトリックスを示す。同時に、「変位」については MESA 感度が正となるように、設計因子の変化方向を調節している。ここではアクチュエータ幅とミラー板サイズについては降下方向へ数値を変化させる。この重みづけされた MESA マトリックスより計算される電熱駆動型ピストンミラーのシステム評価点は、 $S_{thermal}=0.745$ となる。この評価点は静電駆動型とほぼ同じ値であり、設計観点を「変位」に置いて、他のシステム性能についてあまり考慮しない場合には、両者にシステム性能として差が無いという結論が得られる。

Table 5.3 MESA matrix of electro-thermal piston mirror.

		displacement	power consumption	response	warpage	fill factor
Ascent		w_1	w_2	w_3	w_4	w_5
the number of actuator	↗	+0.021	-0.020	-0.050	0	-0.060
actuator width	↗	-0.059	-0.960	+0.110	+0.020	-0.100
actuator length	↗	+0.321	+0.030	-0.100	-0.020	-0.020
mirror size	↗	-0.019	0	-0.150	+0.020	-0.020
mirror thickness	↗	+0.421	0	-0.320	-0.660	0
metalized area	↗	+0.076	0	+0.270	-0.280	+0.800

Table 5.4 Weighted MESA matrix of electro-thermal piston mirror.

		displacement	power consumption	response	warpage	fill factor
		0.7	0.1	0.1	0.05	0.05
the number of actuator	↗	+0.015	-0.002	-0.005	0	-0.003
actuator width	↘	+0.041	+0.096	-0.011	-0.001	+0.005
actuator length	↗	+0.225	+0.003	-0.010	-0.001	-0.001
mirror size	↘	+0.013	0	+0.015	-0.001	+0.001
mirror thickness	↗	+0.295	0	-0.032	-0.033	0
metalized area	↗	+0.053	0	+0.027	-0.014	+0.040

Priority : displacement

5.1.3 システム評価点によるマイクロミラーシステムの比較検証

MESA の大きな特徴のひとつは、異なるシステムを定量的に比較評価できることである。前節までにおいて、静電駆動型ミラーと電熱駆動型ミラー各々について MESA によるシステム解析を行った。「変位」に重みを置いたシステム評価点の比較では、静電駆動型において $S_{electro}=0.750$ 、電熱駆動型において $S_{thermal}=0.745$ と両者に差が無いことがわかった。つまり、「変位」のみが必要なシステムには両コンセプトとも性能差が無い状態で適用できると判断できる。例えば、2 章で述べたレーザからの光信号の伝搬方向をミラーによって可変させて光ファイバに挿入し、最終的にミラーの位置を最適位置で固定するような調芯デバイスでは、応答性や消費電力などは重要な特性ではなく、大きなミラー変位量が必要となる。ミラーを設置する空間的な制限等も考慮すると、調芯デバイスでは電熱駆動型ミラーが適切な選択であるといえる。光学 MEMS (MOEMS : Micro-opto-electro-mechanical systems) 分野では熱の取扱いが嫌忌され、電熱駆動型ミラーを光学システムに適用した例は少ない。しかし、ミラー変位量という点においては電熱駆動型と静電駆動型で大きな性能差が無く、両者が同等の性能を示すことが MESA による概念評価によって認識できる。

次に、システム性能としての「変位」を優先した全体性能の評価基準はそのままの状態、重みの割付けのみを変更したときのシステム評価点を算出し、比較検討を行なった。Table 5.5 に前述の重みづけによる評価点とともに、異なる重みづけをした場合の結果を示す。重み設定 2 はピストンミラーの光学特性として、「変位」と併せて重要となる「反り変形」と「ミラー占有面積比」につき重みを増加したケースである。この場合の比較では、システム評価点は静電駆動型において $S_{electro}=0.687$ 、電熱駆動型において $S_{thermal}=0.431$ と数値に差が生じた。つまり、光を反射して使用するピストンミラーにおいて、電熱駆動型は熱の影響によって光学特性が悪化すると推測される。特に、この MESA 解析においては「変位」の優先順位を高く設定し、アクティブに変位が発生することを前提と

Table 5.5 Comparison of system scores of electrostatic and electro-thermal piston micromirror with different weight types.

	Weights for System Performances					System Scores	
	displacement	driving voltage/ power consumption	response	warpage	fill factor	Electrostatic	Electro-thermal
Weight type 1	0.7	0.1	0.1	0.05	0.05	0.750	0.745
Weight type 2	0.4	0.1	0.1	0.2	0.2	0.687	0.431
Weight type 3	0.3	0	0.3	0.2	0.2	0.288	0.220

0.3 : Priority

しているため、「変位」と「反り変形」及び「ミラー占有面積」の間に存在する設計トレードオフが電熱駆動型コンセプトの評価を悪くする結果につながっていると考えられる。一般的に、ピストンミラー以外の光スイッチや、スキャンニングミラー等の連続的にミラーを駆動させて利用するシステムにおいては、静電駆動型のミラーシステムコンセプトが多く適用されており、この MESA 解析からもそのトレードオフが理解できる結果となった。

また、両者のシステム性能のうち「変位」と「反応速度」は、設定した設計因子についてはトレードオフの状態にあった。Table 5.5 における重み設定 3 のように、「変位」と「反応速度」の重みを増加させた場合、互いにその評価点を打ち消し合ってしまうため、静電駆動型において $S_{electro}=0.288$ 、電熱駆動型において $S_{thermal}=0.220$ というシステム評価点になり、評価の絶対値が悪化する結果となった。MESA はトレードオフを評価することによってシステムのコンセプト及び設計キャパシティを評価する手法であるから、このようなトレードオフを解消しない以上、全体性能の向上は認められない。設計のキャパシティを拡大するためには設計因子の調節のみで実現することは不可能であり、両システムともに内在する設計のトレードオフを排除するための新しい発想が必要となる。

5.2 マイクロアクチュエータへの MESA の適用

MESA 解析を実施したピストンミラーの駆動源として、静電力とジュール熱の 2 つを取り上げた。本節では、それら駆動機構のコンセプトをより詳細に評価するために、設計因子をアクチュエータの細部にまで拡大して MESA 解析を行なう。ここでは、2 章で詳述した静電駆動櫛型アクチュエータと、水平駆動の電熱駆動型アクチュエータについて、その性能評価及び比較を行なう。

5.2.1 静電櫛型アクチュエータの MESA による評価

Figure 5.6 に MESA 評価に使用する静電櫛型アクチュエータの概略構造と設計因子を示す。アクチュエータは、櫛型の固定電極と、可動電極及び可動電極を支持する 2 本の片持ち梁ばねから成り立っている。固定電極と可動電極と間に電圧を印加することによって静電気引力が発生し、可動電極が固定電極側に駆動する。電圧を低下もしくは解除することにより、可動電極はフレキシヤの復元力によって初期状態の位置へ戻る。

MESA に使用するシステム性能は、電熱アクチュエータとの比較検討のために共通性を考えて、下記の 4 性能を設定することとした。いずれもアクチュエータとして等しく重要な性能である。

- a) 変位 (Displacement)
- b) 駆動電圧または消費電力 (Driving Voltage/Power Consumption)
- c) 応答速度 (Response)
- d) トルク (Torque)

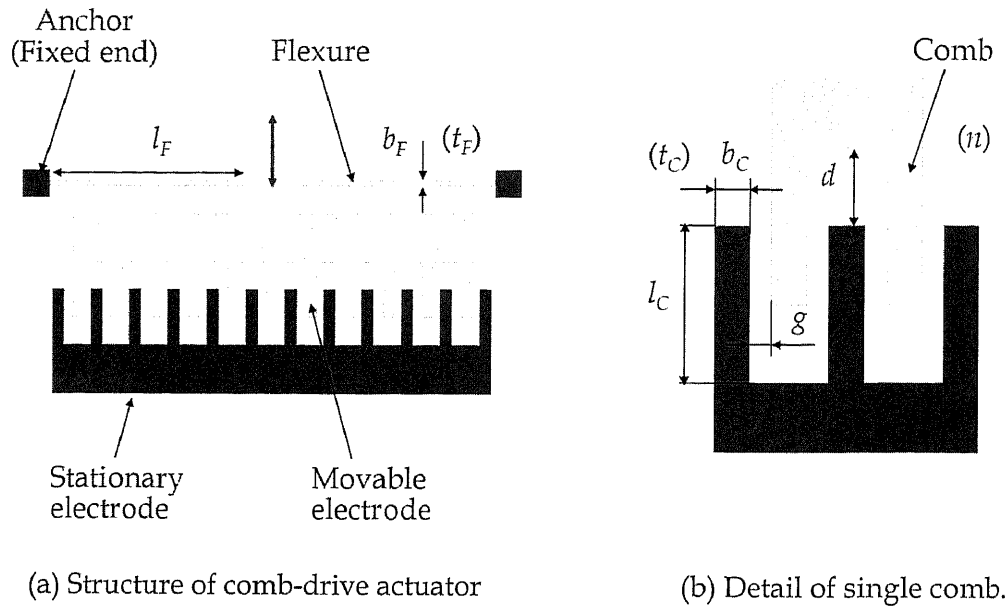


Figure 5.6 Schematics of electrostatic comb-drive actuator.

「変位」は図中の赤い矢印で示すアクチュエータ端部における振幅である。また、「駆動電圧」は本節の静電アクチュエータ、「消費電力」は次節の電熱アクチュエータにおけるサブシステム性能である。「応答速度」は、前節のピストンミラーにおける評価と同様、共振周波数と仮定する。また、「トルク」は、ある一定量変位させた場合に発生するアクチュエータ端部の反発力を、そのアクチュエータのトルク(駆動力)と定義する。

次に、コンセプト設計段階で考える設計因子として9因子を選択する。また、本構造はMUMPsルールに従って設計されるものと仮定して、各因子の水準を下記のように割り付ける^[3]。

1) 櫛歯幅 (Comb Width) b_c	: 5–8 μm
2) 櫛歯長さ (Comb Length) l_c	: 22–35 μm
3) 櫛歯間隔 (Adjacent Comb Distance) g	: 3–5 μm
4) 電極間距離 (Electrode Distance) d	: 11–18 μm
5) 櫛歯厚 (Comb Thickness) t_c	: 2.0–3.2 μm
6) 櫛歯数 (The Number of Combs) n	: 10–16
7) フレキシャ幅 (Flexure Width) b_F	: 2.0–3.0 μm
8) フレキシャ長さ (Flexure Length) l_F	: 90–150 μm
9) フレキシャ厚 (Flexure Thickness) t_F	: 2.0–3.2 μm

MESA 感度の算出には、ピストンミラーの場合と同様に CoventorWare による FEM 解析、CoSolve オプションを使用した^[6]。基準解析モデルを作成し、設計水準内において各設計因子を単独で可変させた場合に生じるシステム性能の変化量を調査し、MESA マトリックスを作成する。Table 5.6 及び Table 5.7 に作成された静電櫛型アクチュエータの MESA マトリックス及び重みづけされた MESA マトリックスを示す。Table 5.6 に示す MESA 感度は重みづけ前の正規化された数値であり、Table 5.7 に示す数値は各システム性能の重みづけがなされた MESA 感度である。Table 5.7 では、「変位」をプライマリー性能と設定して重みを $\omega_1=0.5$ と高く割り付けるとともに、設計因子の変化方向を「変位」を基準として調節済である。また、「駆動電圧」「応答速度」に対しては重みを $\omega_2=0.1$ 、 $\omega_3=0.1$ 、「トルク」に対しては $\omega_4=0.3$ と設定することによって、パワー重視型アクチュエータの設計を想定したコンセプト評価を行った。Table 5.6 及び Table 5.7 において MESA 感度を比較することにより、以下のような項目が理解できる。

- ・ 静電櫛型アクチュエータは、そのシステム性能が櫛歯長さ以外の全ての設計因子に対して何らかのトレードオフ関係を有しており、設計キャパシティの改善が難しいシステムと言える。
- ・ 櫛歯の幅、長さ、櫛歯間隔などの櫛歯単独の設計因子は、選択した設計水準範囲においてはシステム性能への影響度が低い。
- ・ フレキシャは、関連する設計因子の各システム性能に対する影響度が大きいと同時に、トレードオフ因子でもあるため、設計上重要且つ注意を要するキーパーツである。
- ・ 電極間距離は「変位」と「トルク」に対し影響度が大きく、「駆動電圧」と「反応速度」に対しては影響度が低いことから、アクチュエータの変位量やパワーに関しては設計自由度の高い重要な設計因子である。

また、Table 5.7 より導出された静電櫛型アクチュエータのシステム評価点は $S_{comb}=0.606$ となった。システム評価点に関する考察は、電熱アクチュエータの評価結果も含めて異なる重み設定による評価結果の比較を 5.2.3 節にて行なう。

Table 5.6 MESA matrix of electrostatic comb-drive actuator.

Ascent		displacement	driving voltage	response	torque
		w_1	w_2	w_3	w_4
comb width	↗	-0.037	+0.034	+0.093	-0.041
comb length	↗	+0.013	+0.017	+0.083	+0.007
adjacent comb distance	↗	-0.024	-0.054	+0.030	-0.052
electrode distance	↗	+0.855	-0.024	0	+0.357
comb thickness	↗	-0.030	+0.041	+0.104	-0.008
number of combs	↗	+0.013	+0.116	+0.118	-0.004
flexure width	↗	-0.011	-0.253	-0.142	+0.116
flexure length	↗	+0.001	+0.349	+0.212	-0.317
flexure thickness	↗	+0.015	-0.122	-0.217	+0.096

Table 5.7 Weighted MESA matrix of electrostatic comb-drive actuator.

		displacement	driving voltage	response	torque
		0.5	0.1	0.1	0.3
comb width	↘	+0.019	-0.003	-0.009	+0.012
comb length	↗	+0.006	+0.002	+0.008	+0.002
adjacent comb distance	↘	+0.012	+0.005	-0.003	+0.016
electrode distance	↗	+0.427	-0.002	0	+0.107
comb thickness	↘	+0.015	-0.004	-0.010	+0.003
number of combs	↗	+0.007	+0.012	+0.012	-0.001
flexure width	↘	+0.006	+0.025	+0.014	-0.035
flexure length	↗	+0.000	+0.035	+0.021	-0.095
flexure thickness	↗	+0.007	-0.011	-0.022	+0.029

Priority : displacement

5.2.2 水平駆動電熱アクチュエータの MESA による評価

静電櫛型アクチュエータと同様に、水平駆動電熱アクチュエータについて MESA による解析を行った。水平駆動電熱アクチュエータの概略構造と設計因子を Figure 5.7 に示す。Figure 5.7 (a) に示すアクチュエータ単体構造は、ホットアーム、コールドアーム、それらを接続するブリッジで構成されており、アンカーによって各アームは基板上に接続されている。アクチュエータはアームに流れる電流によって生じるジュール熱を駆動源とする。すなわち、アンカー部両端に電圧を印加すると電流が各アームを流れるが、ホットアームとコールドアームの電気抵抗率に差があるため、ホットアームのみが選択的に発熱する。ホットアームが熱膨張で伸長することによって、アクチュエータ先端部（図中上端部）は右方向へ変位する形で駆動する。

このアクチュエータの MESA による評価は、設計面積を静電アクチュエータと同等にするために、Figure 5.7 (b) に示すように 2 機もしくは 4 機のアクチュエータを対向させる形でリンクによって接続した状態を基本構造とする。よって、アクチュエータ同士を接続するリンク部もシステム性能に影響を与えると考えられるため、リンクの形状についても設計因子として選択する。

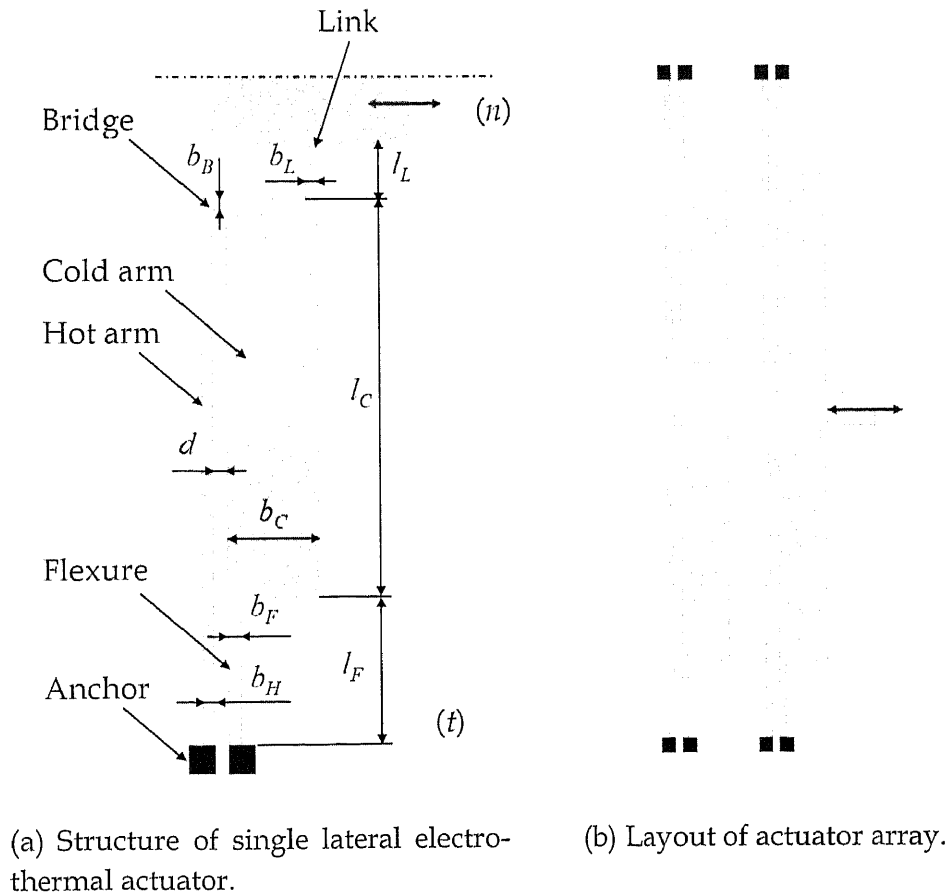


Figure 5.7 Schematics of lateral electro-thermal actuator.

MESA に使用するシステム性能は静電アクチュエータの場合と同じであるが、「駆動電圧」に代えてここでは「消費電力」を適用する。また、設計因子としては下記のように 11 因子を設定し、水準を割付した。

1) ホットアーム幅(Hot Arm Width) b_H	: 2–3 μm
2) アーム間距離(Arm Distance) d	: 2–3 μm
3) フレキシャ幅(Flexure Width) b_F	: 2–3 μm
4) フレキシャ長さ(Flexure Length) l_F	: 22–36 μm
5) コールドアーム幅(Cold Arm Width) b_c	: 14–23 μm
6) コールドアーム長さ(Cold Arm Length) l_c	: 60–96
7) ブリッジ幅(Bridge Width) b_B	: 2–3 μm
8) リンク幅(Link Width) b_L	: 2–3 μm
9) リンク長さ(Link Length) l_L	: 8–12 μm
10) 厚さ(Thickness) t	: 2.0–3.2 μm
11) アクチュエータ数(The Number of Actuators) n	: 2, 4

MESA 感度の算出は、CoventorWare の MEMETherm オプションによって、静電櫛型アクチュエータと同様に行なった^[6]。Table 5.8 及び Table 5.9 に作成された水平駆動電熱アクチュエータの MESA マトリックス及び重みづけされた MESA マトリックスを示す。重みの設定は静電アクチュエータの場合と同設定である。Table 5.8 及び Table 5.9 から、下記のようなシステムの特徴がわかる。

- ・ 電熱駆動アクチュエータは、各システム性能が全ての設計因子に対して何らかのトレードオフ関係を有しており、設計キャパシティの改善が非常に難しいシステムである。
- ・ コールドアームは、関係する設計因子群の各システム性能に対する影響度が大きく、その全てがトレードオフ因子でもあるため、設計上で重要且つ注意を要する部位である。
- ・ 特に、コールドアームとそれに接続されているフレキシャの設計因子は、システム性能の「変位」と「トルク」に関してトレードオフの関係にあり、その因子の調節によって両性能を同時に向上させることは不可能である。
- ・ ホットアームや、リンク、ブリッジなど、設計値の水準を大きく確保できない因子の影響は小さく、システム性能に関してはマイナー因子と考えられる。

また、Table 5.9 より導出された水平駆動電熱アクチュエータのシステム評価点は $S_{Internal}=0.451$ となり、静電櫛型アクチュエータの同一重み条件の評価結果との比較では、電熱型が劣るシステムであるとの結果を得た。

Table 5.8 MESA matrix of lateral electro-thermal actuator.

Ascent		displacement	power consumption	response	torque
		w_1	w_2	w_3	w_4
hot arm width	↗	+0.006	-0.060	-0.045	+0.023
arm distance	↗	-0.010	-0.012	-0.001	+0.008
flexure width	↗	-0.090	-0.061	-0.012	+0.171
flexure length	↗	+0.162	+0.124	-0.031	-0.286
cold arm width	↗	-0.298	-0.135	-0.259	+0.065
cold arm length	↗	+0.350	+0.245	-0.274	-0.105
bridge length	↗	+0.006	-0.005	-0.001	+0.004
link width	↗	+0.017	0	-0.005	+0.012
link length	↗	+0.042	+0.014	-0.005	-0.024
thickness	↗	0	-0.137	+0.366	+0.120
number of actuators	↗	+0.019	-0.207	0	+0.182

Table 5.9 Weighted MESA matrix of lateral electro-thermal actuator.

		displacement	power consumption	response	torque
		0.5	0.1	0.1	0.3
hot arm width	↗	+0.003	-0.006	-0.005	+0.007
arm distance	↘	+0.005	+0.001	+0.000	-0.002
flexure width	↘	+0.045	+0.006	+0.001	-0.051
flexure length	↗	+0.081	+0.012	-0.003	-0.086
cold arm width	↘	+0.149	+0.014	+0.026	-0.019
cold arm length	↗	+0.175	+0.024	-0.027	-0.031
bridge length	↗	+0.003	-0.001	-0.000	+0.001
link width	↗	+0.008	0	-0.000	+0.004
link length	↗	+0.021	+0.001	-0.000	-0.007
thickness	↗	0	-0.014	+0.037	+0.036
number of actuators	↗	+0.009	-0.021	0	+0.055

Priority : displacement

5.2.3 システム評価点によるアクチュエータの比較検証


MESA のシステム評価点を用いて、静電櫛型アクチュエータと水平駆動電熱アクチュエータのシステム性能の比較検証を行う。Table 5.10 に重み設定を変化させた4条件における各々のアクチュエータのシステム評価点を示す。各設定条件で優先するシステム性能を変え、第一優先性能の重みを0.5、それ以外の性能を0.1と割り付ける。但し、「変位」と「トルク」については第二、第三優先性能とし、第一優先性能では無い場合にはその重みを0.3とした。

重み設定1及び2では、静電櫛型アクチュエータが水平駆動電熱アクチュエータに対して優位性を持つ結果となっている。Table 5.6～5.9 の MESA マトリックスと併せて考察すると、電熱アクチュエータの「変位」と「トルク」に影響を及ぼす設計因子が他のシステム性能とトレードオフの関係にあり、設計キャパシティを悪化させるためと考えられる。逆に静電アクチュエータは、「変位」と「トルク」のみを優先的に考えるシステムにおいてその設計自由度が比較的高く、要求仕様を満足する構造を容易に構築できる可能性がある。

次に、「駆動電圧または消費電力」と「反応速度」を優先性能とした重み設定3及び4の場合、電熱アクチュエータが静電アクチュエータに対して優位性を示す結果となった。これは静電アクチュエータにおいて「変位」と「トルク」に大きく影響する設計因子が、「駆動電圧」と「反応速度」に対してトレードオフの関係になっていることが原因のひとつである。また、本検証で設定した設計水準内においては、電熱型の設計因子群の自由度が静電型と比較して高く、「消費電力」と「反応速度」については設計改善の幅が大きいと考えられる。但し、MESA においてはあくまでもトレードオフを基準とし

Table 5.10 Comparison of system scores of electrostatic comb-drive and lateral electro-thermal actuators with different weight types.

	Weights for System Performances				System Scores	
	displacement	driving voltage/ power consumption	response	torque	Electrostatic Comb-drive	Lateral Electro-thermal
Weight type 1	0.5	0.1	0.1	0.3	0.606	0.451
Weight type 2	0.3	0.1	0.1	0.5	0.615	0.164
Weight type 3	0.3	0.5	0.1	0.1	0.214	0.448
Weight type 4	0.3	0.1	0.5	0.1	0.244	0.636

 : Priority

たシステムのコンセプト評価であり、電熱型が静電型よりも応答性が高くなるという判断は下すことができない。実際のデバイスでは静電型の応答性は、電熱型よりも優れている。しかし、概念設計段階の MESA によるアクチュエータの比較では、応答性に関しては電熱型がより設計因子の変更許容度が大きく、詳細設計の段階で設計者が新しい発想・思考を追加して、最終的な性能を向上できる幅が広いと判断される。このような詳細設計までを考慮した性能の絶対値による概念設計評価については、MEMS の要素デバイスについて解析・実験を行い、得られる結果を蓄積して MESA 感度計算のためのデータベースとするような新たな工夫が必要であり、今後の MESA による概念設計支援の課題と言える。

5.3 結論

本章では MESA を実際の MEMS デバイスに適用し、MESA がコンセプト評価に関して妥当性があるかを検証した。まず、静電駆動型と電熱駆動型ピストンマイクロミラーシステムについて MESA を適用し、性能の比較検討を行った。各システムの MESA 感度を理論式及び FEM 解析を用いて算出し、システム性能に対する設計因子の影響度、システムに内在するトレードオフの有無を確認した。また、システム性能に対して重みづけを行ない、重みづけ設定を変化させて計算されたシステム評価点を用いて両システムの全体性能を比較した。ミラーの変位性能に関して両者に大きな差を確認できなかったが、光学特性を考慮した場合には、静電型が電熱型に対して優位であることが確認できた。実際の MEMS ミラーデバイスの駆動機構として、静電駆動が一般的に適用されており、電熱型が採用される例は少ない。これは駆動によって発生する熱エネルギーの処理が課題となっているためであるが、変位のみを必要としてミラーを最終的に固定するような熱エネルギーの処理を必要としないデバイスでは、電熱型コンセプトが採用されても問題は無いと考えられる。MESA によるピストンミラーの評価結果は、実デバイスにおいてミラーが示す振舞いとほぼ一致しており、MESA が概念設計段階におけるコンセプトの設計・評価に十分適用可能であると判断できる。

また、静電駆動型と電熱駆動型のアクチュエータについても MESA を適用し、設計因子をより詳細に設定することによって両者のシステム性能評価を行った。システムのコンセプトを特徴づける形式でシステム毎に可変の重みづけを行い、アクチュエータの特徴を導き出した。この MESA による解析評価では、これまで把握していなかった新しい設計因子とシステム性能の関係が明らかになったと同時に、要求されるシステム性能の違いによって大きくアクチュエータの概念評価が変化することを認識した。また、MESA 感度と MESA マトリックスによる設計情報だけではなく、設計者が自由に重みづけを設定して算出されたシステム評価点を用い、異なるシステムの全体特性を比較することによっても、新たな設計情報が得られることがわかった。

参考文献

- [1] R. K. Tyson, *Principles of Adaptive Optics*, Academic Press, 1998.
- [2] A. Tuantranont and V. M. Bright, "Bulk-etched surface micromachined and flip-chip integrated micromirror array for infrared applications," *Proc. of IEEE/LEOS Optical MEMS 2000*, pp. 71-72, 2000.
- [3] D. Koester, A. Cowen, R. Mahadevan, M. Stonefield, and B. Hardy, *PolyMUMPs Design Handbook Rev. 10.0*, MEMSCAP 2003.
- [4] Coventor Inc., 4000 CentreGreen Way, Suite 190, Cary, NC 27513 U.S.A.
- [5] V. M. Bright, *MEMS I Lecture Notes*, University of Colorado at Boulder, 2001.
- [6] *CoventorWare User Handbook*, Coventor Inc., 2005.
- [7] A. Tuantranont, "Optical phase modulation beam steering using silicon micromachined and hybrid integrated micro-electromechanical systems," Ph. D. Thesis, University of Colorado at Boulder, 2001.
- [8] K. Ishikawa, "MEMS-adjusted laser-to-fiber coupling," MS Thesis, University of Colorado at Boulder, 2001.

第 6 章

MESA の実用化 (RF MEMS スイッチ開発への適用)

*If, in engineering practice,
A safety factor is set through service experience at an ultimate value,
An ingenious idiot will promptly calculate a method to exceed said safety factor.*

経験則から、
安全率を最大値に設定しても、
常識はずれな馬鹿が、すぐにその安全率を超過する方法をひねり出す。

— Joseph Murphy
ジョセフ・マーフィー

6.1 概念設計による MEMS 開発の高効率化

MESAを用いることによってMEMS開発の上流段階におけるシステムのコンセプト評価及び設計が行なえる。そして開発プロセスにおいてコンセプトの詳細な検討ができると、開発効率が向上すると同時に、既存コンセプトから発展した新しいコンセプトの創出が可能になると考えられる。

ここで、第3章でも説明したMESAによって実現可能となるであろうMEMSの開発フローと、システム成熟度と開発時間の関係を、再度 Figure 6.1 及び Figure 6.2として示す。開発初期の段階で開発コンセプトの良し悪しの検討を行い、設計開発のフィロソフィーが明確になれば、下流における詳細設計、試作、評価における試行錯誤的なプロセスは排除され、開発時間及びコストを削減することが可能となる。また、MESAのMEMS設計支援の考え方は、コンセプトのどこに問題点があり、その問題が定量的にどの程度システムに対して影響を与えるものかを設計開発者に示すものである。MESAの結果を分析することによって、システム性能をそのコンセプトの範囲内において改善するアプローチを模索することともに、課題を解決するための全く異なるコンセプトの検討をすることも可能になる。すなわち、開発コンセプトの評価及び新規創出は、開発下流におけるコンセプトに基づいた詳細の設計製作を全て完了させる必要は無く、コンセプト設計の上流段階において実現される。Figure 6.2に示すように、MESAによるコンセプト評価をもとに次世代コンセプトが連続的に発想されると同時に開発下流のプロセスが簡略化されるため、システムは短時間に成熟し次々と製品が具現化されていくと考えられる。

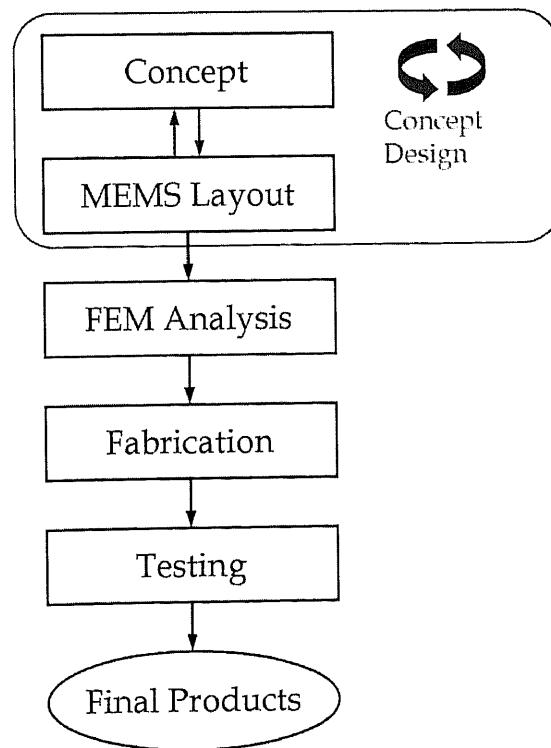


Figure 6.1 MEMS development flow with concept design.

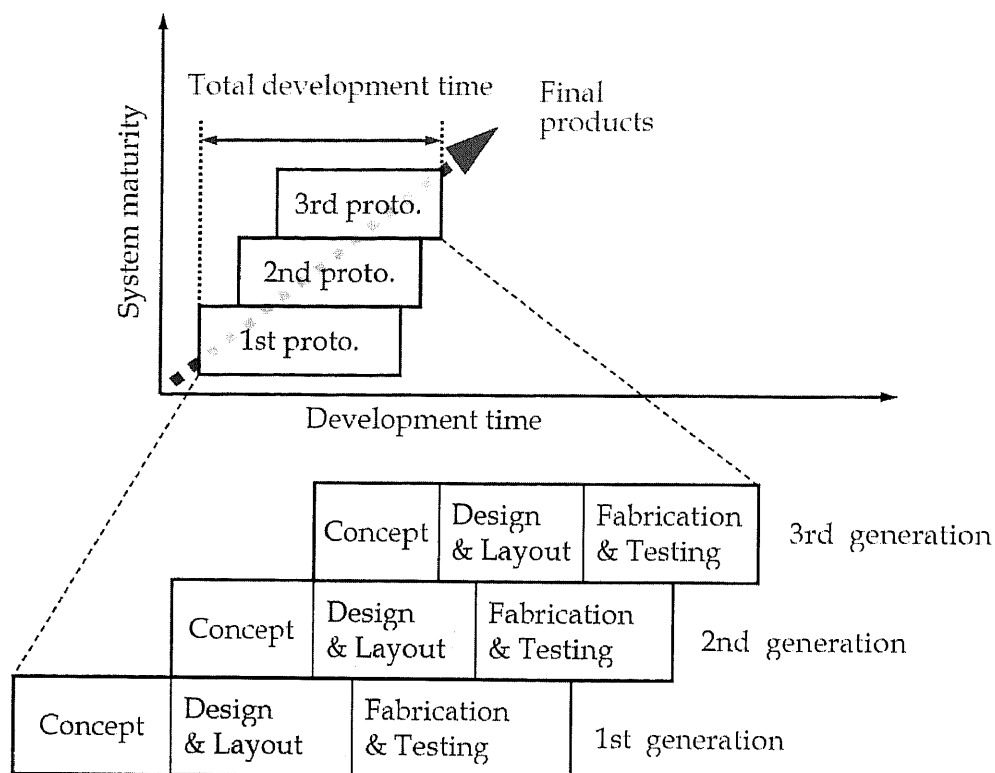


Figure 6.2 System maturity vs. development time with concept designs.

そこで本章では、MESA を RF MEMS スイッチ開発の概念設計段階に適用して新しいスイッチングコンセプトの創出を行ない、MESA による連続的な新規コンセプト設計が可能であることを示す。まず既存の RF MEMS スイッチの代表例としてカンチレバー型スイッチを取り上げ、MESA によってそのコンセプトを評価し、システムの問題点（設計トレードオフ）を調査する。そして MESA によって得られた設計情報をもとに、存在するトレードオフを解消して機械的信頼性を向上させた全く新しい RF MEMS スイッチ構造を提案する。

6.2 RF MEMS スイッチの課題と改善アプローチ

本節では新規 RF MEMS スイッチの開発にあたり、既存のカンチレバー型 RF MEMS スイッチにおける設計問題が何かを把握し、本研究における改善のアプローチを明確にする。

6.2.1 RF MEMS スイッチの現状と課題点

第2章で詳述したように、RF MEMS スイッチは従来の FET や機械式スイッチと比較して良好なスイッチング特性を示し、無線周波数帯を利用した通信分野における様々な RF デバイスへの応用が進んでいる^[1-4]。RF MEMS スイッチの主な特徴としては下記の点が挙げられる。

- ・低挿入損失:0.4dB 以下 (1~10GHz)
- ・高アイソレーション:20dB 以上 (1~10GHz)
- ・低消費電力
- ・軽量小型
- ・制御回路との集積化が容易

特に、挿入損失とアイソレーションは RF 信号の伝搬ロスやノイズ、劣化に影響するため、RF システムにおける最も重要な特性と考えられている。MEMS 技術を利用することによって、既存の RF スイッチよりも優れた RF 特性を実現することが可能であり、これまでに数多くの RF MEMS スイッチ構造が報告されている^[11-10]。しかし、RF MEMS スイッチでは、RF 特性以外の機械的性能や信号のパワーハンドリングなどの点で、性能が他のスイッチシステムより劣っている。特に、機械的信頼性(機械的スイッチングの疲労寿命)は製品としてのスイッチの長期的な品質に関わるものであり、改善しなければならない必須課題として現在でも多くの研究機関・企業にて研究開発が行なわれている。

RF MEMS スイッチはスイッチング時に機械的な接触を繰り返すため、長期に使用した場合のコンタクト部の劣化は避けられない。RF MEMS スイッチにおけるスイッチング不良の原因には大きく二つの要因があるとされている。ひとつはスティクション(Stiction)と呼ばれる吸着現象である。これは、信号伝搬や繰り返し接触によって発生する熱エネルギーによってコンタクト部同士がスティッキングを起こしてしまい、スイッチがクローズしたままの状態になることである。コンタクト部表面が荒れた状態でパワーの大きな信号が入力すると、瞬時の放電的な電気信号伝達によってマイクロ溶接が生じることもあり、スティッキング状態を解除するためには吸着面を引き剥すための大きなエネルギーを必要とする。逆に、表面状態が極端に平滑な場合には、コンタクト部の材質によっては表面がチャージした程度で強力に吸着してしまうこともあり、いまだにスティクションの現象・原因は正確に把握されていない^[11-14]。ふたつ目は、破壊(Degradation, 局所的表現では Crack)である。繰り返しの接触によりコンタクト部の表面状態及び形状が変化して、接触抵抗が大きくなり挿入損失が悪化する現象が発生する^[15-17]。また、破壊現象によるコンタクト部表面のクラックや粗面化による表面の凹凸が、信号伝搬時におけるマイクロ放電現象の起点となつて、マイクロ溶接を誘発するとも考えられている。

RF MEMS スイッチの信頼性を向上させるための対策案が、近年数多く報告されている。スイッチ構造の問題点を分析し、それを解決する様々な方法が提案されている。しかし、接触表面に特殊な処理や膜を形成し保護する方法や^[18,19]、材料の選定とその表面状態のコントロールによって理想的な接触を実現しようとするものが多く^[15,16,20]、改善のアプローチが本質的な解決策では無いものが多い。また、スイッチ構造の最適化とその挙動の最適制御によって長寿命化を図ることも検討されているが^[21-23]、既存構造の延長線上での改善によって RF 特性と機械的信頼性の性能的バランスをとる

ような妥協的な対処をする考え方であり、根本的なスイッチ特性の改善につながっておらず、RF 特性と機械特性の両立を考慮した研究例はほとんど無いと言える。

6.2.2 新規 RF MEMS スイッチの開発目的とアプローチ

これまで報告されているような、適切なスイッチング材料の選定や製造プロセスの最適化による信頼性向上のアプローチは、スイッチの構造に依らない共通的な改善方法であり、スイッチ構造が確定した詳細設計の段階においてもその改善アプローチを適用できる。また、スイッチ構造及びその挙動の最適化も、確定された設計パラメータを調節することによって為されるものであり、下流における最適設計の手法に他ならない。

そこで、本研究では RF MEMS スイッチの概念設計段階において機械的(または構造的)な改善アプローチによりスイッチングコンセプトの最適設計を行い、信頼性を向上させることを目的とする*。本論文では、概念設計による RF MEMS スイッチの改善構造の提案に主眼を置いているが、今後継続される研究も考慮して具体的な開発目標性能を下記の二点とした。

- ・コンタクト信頼性の向上 : 接触回数 10^{10} 回以上の疲労寿命の確保
- ・RF 特性の維持 : 挿入損失 0.4dB 以下、アイソレーション 20dB 以上
(10GHz 以下において)

対象とする RF MEMS スイッチは、疲労寿命が接触回数で $10^8 \sim 10^9$ 回と低い、金属同士の直接接触型である DC コンタクト型スイッチとし、その接触疲労寿命の改善を目指す。但し、信頼性の向上によって RF 特性が減衰することが無いように、疲労寿命の向上と RF 特性が両立するスイッチングコンセプトの設計を行なう。MESA を用いることによって構造上のトレードオフを抽出し、それを解決することによってスイッチ全体のシステムとしての最適化を目指す。

6.3 MESA によるカンチレバー型スイッチの性能解析

DC コンタクト型の新しいスイッチングコンセプトを創出するために、本節では既存の DC コンタクト型 RF MEMS スイッチの中で最も代表的な構造であるカンチレバー型シリーズスイッチに MESA を適用し、そのコンセプトの評価及び構造的な問題点の抽出を行なう。

6.3.1 カンチレバー型スイッチの設計因子とシステム性能

MESA を適用してコンセプト評価を行う DC コンタクトのカンチレバー型 RF MEMS スイッチの構造を Figure 6.3 に示す。スイッチの上部電極はカンチレバー構造で、その端部はポストを介して基

*新型 RF MEMS スイッチの開発に関する本研究は、米国防総省空軍科学技術研究所 (AFSOR) との共同研究である。研究の一部は DARPA grant#FA5209-04-T-0197 により研究開発費のサポートを受ける。

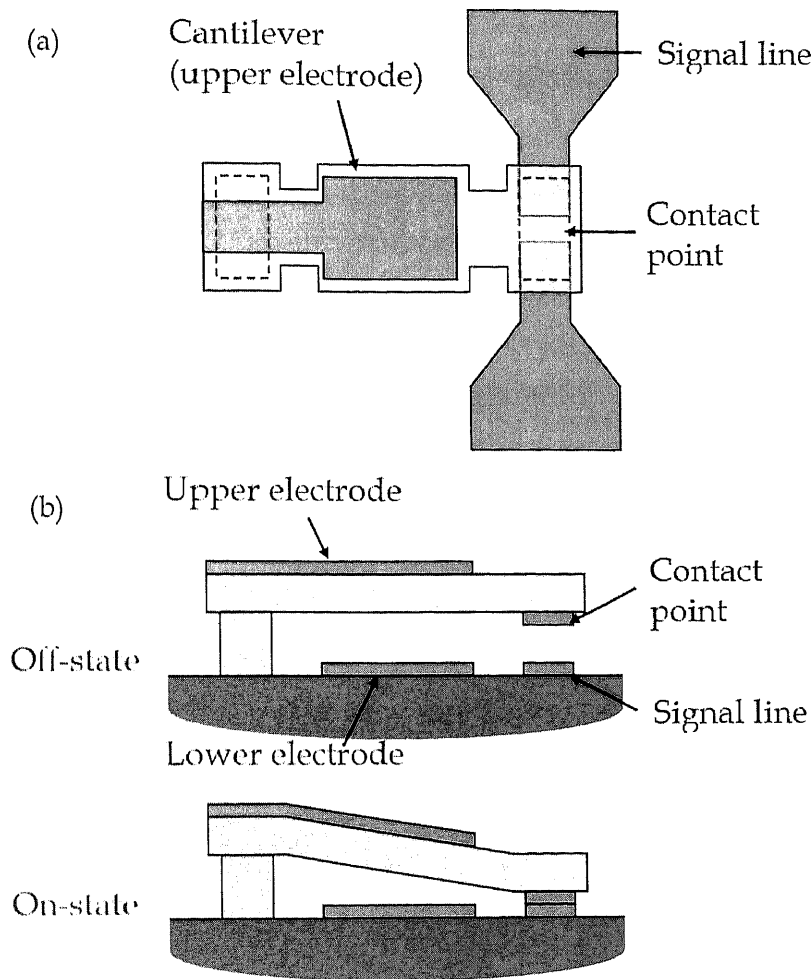


Figure 6.3 Schematics of DC-contact RF MEMS switch (a) Top view (b) Cross sectional view with off-state and on-state.

板に固定されており、先端部はオープンになった信号線上に宙に浮いた形で保持されている。上部電極と下部電極の間に電圧を印加することで静電気力が発生し、カンチレバーが下側に引き下げられることによって先端部が信号線と接触し、スイッチは ON の状態となる。電圧印加を解除すると、カンチレバーは機械的な復元力によって元の OFF 状態に戻る。ここで、この RF MEMS スイッチに MESA を適用するにあたり、必要となる要求システム性能を次の 6 つに設定する。

- a) 信頼性:スティクション(復元力) (Reliability : Stiction [Restoring Force]) F_R
- b) 信頼性:破壊(接触衝撃力) (Reliability : Degradation [Impact Force]) F_I
- c) コンタクト抵抗(Contact Resistivity) R
- d) 応答速度(Switching Time) v_s
- e) アイソレーション(RF Isolation) S_{21}
- f) サイズ(Size) SS

「信頼性」については、6.2.1 節で述べた疲労寿命を低下させる2要因に基づいて「スティクション」と「破壊」に分類し、それぞれの現象を決定する構造的な要因特性として「復元力」と「接触衝撃力」を設定した。「復元力」は、カンチレバーが ON の状態から OFF 状態へ復元する時に必要な力であり、吸着力がばねの復元力よりも大きい場合にはスイッチがクローズしたままになるため、復元力は大きい方が好ましい望大特性 (Larger-is better Characteristic) である。また、「接触衝撃力」は大きいほど、スイッチング毎にコンタクト表面に与えるエネルギーが大きくなるため、表面の劣化を促進する。よって小さい方が好ましい望小特性 (Smaller-is-better Characteristic) である。次に、これら信頼性の特性と同様に必要なスイッチング性能として、「コンタクト抵抗」「応答速度」「アイソレーション」「サイズ」を考慮する。「コンタクト抵抗」「応答時間」は望小特性、「アイソレーション」は望大特性であり、RF スイッチとしての信号処理特性、RF 特性に影響するものである。なお、挿入損失の値は「コンタクト抵抗」によって大きく左右される。また、「サイズ」は望小特性であり、スイッチの集積化、組立実装性などに重要な項目であるが、本研究では信頼性と RF 特性の両立を中心に考えるため、優先度を低く設定する。

次に、設計因子であるが、MESA はあくまでも概念設計であるため、スイッチ構造の詳細寸法が確定していない。そこで、概念設計段階で考えうる設計因子として、下記の5つを設けた。

- 1) ばね定数 (Spring Constant) k
- 2) 電極間距離 (Electrode Gap) g
- 3) 駆動電圧 (Actuation Voltage) V
- 4) 電極面積 (Electrode Area) A_E
- 5) コンタクト面積 (Contact Area) A_C

「ばね定数」は、ここではカンチレバーの構造によって決定されるものである。「電極間距離」は、上部電極と下部電極との間隔、「駆動電圧」はその電極間に印加されるスイッチングのために必要な電圧である。また、「電極面積」は上部電極と下部電極のオーバーラップする領域とし、「コンタクト面積」は、カンチレバー側のコンタクト部と信号線とが接触する面積と定義する。本章ではカンチレバー型スイッチのコンセプトを評価することに焦点を絞っているため、第5章における MESA の検証作業で設定したような設計制約は存在しない。したがって、各設計因子について水準割付けを行なうことは省略し、カンチレバー型スイッチ構造のシステム上の問題点を導出し、概念としてのマクロ的な評価を行う。

6.3.2 カンチレバー型スイッチコンセプトの MESA による評価

カンチレバー型 RF MEMS スイッチにおける MESA 感度の計算は、概念設計段階で考えうる理論式群から導出する。但し、設計因子水準が設定されていないため、システム性能と設計因子の物

理的關係を用い、設計因子の任意の代表値を入力することによって、MESA 感度の算出を行なった。ここで全てのシステム性能と設計因子の關係を定義する。

本構造における「復元力」 F_R は、ばねの復元力 F_k 、及びコンタクト界面で発生する吸着力を F_{ad} とすると、下式のように定義される^[5]。

$$F_R = F_k - F_{ad} \quad (6.1)$$

ここで、 F_k はカンチレバーによるばね力であるから、カンチレバーが電極間距離 g だけ撓んだときに発生する力は、

$$F_k = kg \quad (6.2)$$

となる。 F_{ad} については物理現象が未だに明確に解明されていない。材料やコンタクト部の形状によっても左右されるため、一般的な定義や予測が不可能な力である。ここでは静電気力によるコンタクト状態での接触力 F_c と、そのコンタクト面積 A_c に比例すると仮定する^[5,14,21]。完全な關係式として表すことができないため、下記のような關係の認識に留まる。

$$F_{ad} \propto F_c \propto V^2, A_E \quad (6.3)$$

$$F_{ad} \propto A_C \quad (6.4)$$

また、(6.3)式における F_c と V, A_E の關係は、下記のように表される。

$$F_c = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A_E}{(g-t)^2} V^2 - kg \quad (6.5)$$

ここで ϵ_0 は真空の誘電率、 ϵ_r は電極間物質の比誘電率、 t はコンタクト時の電極間距離である。

次に、「衝撃力」 F_I であるが、第5章(5.6)式に示す F_c によって決定される。但し、駆動電圧はカンチレバーのばね定数によって影響を受ける。すなわち、

$$F_I \propto F_c \propto V^2, A_E, \frac{1}{g^2} \quad (6.6)$$

$$V \propto \sqrt{k} \quad (6.7)$$

となる^[1,5]。また、コンタクト面積によって衝撃力は変化し、面積が大きいほど小さくなる。よって

$$F_l \propto \frac{1}{A_c} \quad (6.8)$$

と表すことができる。

「コンタクト抵抗」 R については、コンタクト表面部のマイクロな弾性変形、塑性変形のモードによって様々な関係式が報告されているが、本計算では下記式を使用する^[1]。

$$R \propto \frac{1}{\sqrt{A_c}} \quad (6.9)$$

$$R \propto \frac{1}{\sqrt{F_c}} \quad (6.10)$$

上2式及び(6.5)式より、コンタクト抵抗と各設計因子との関係が導かれる。

「応答速度」 v_s は、スイッチングによるカンチレバーの運動方程式において、支配的な項がダンピング項であり、速度がカンチレバーの変位量に従って変化すると仮定すると、

$$v_s \propto \frac{A_E V^2}{g^2} \quad (6.11)$$

という関係にある^[1,4]。上式は、応答速度がカンチレバーの変位量に依らず一定であると仮定した場合も成立する。

「アイソレーション」 S_{21} は、OFF 状態における静電容量に比例すると考える。第5章(5.4)式を用いることによって、下式のような関係が導出される^[1]。

$$S_{21} \propto C \propto \frac{A_E}{g} \quad (6.12)$$

最後に「サイズ」については、寸法に影響する三つの設計因子、電極間距離、電極面積、コンタクト面積について等しく感度を分散し、概算的な計算を行なうこととする。

以上の関係式をもとに MESA 感度を算出し、MESA マトリックスを作成する。Table 6.1 に作成されたカンチレバー型スイッチに関する MESA マトリックスを示す。MESA 感度は、設計因子を全て上昇方向に変化させた場合の数値であり、システム性能への重みづけは行なっていない。また、トレードオフの確認を容易にするために、設計因子によるシステム性能への影響が上昇方向か降下方向かを、MESA 感度の符号に合わせて矢印によって表示する。この MESA マトリックスより、次の様なカンチレバー型スイッチシステムの主な特徴がわかる。

Table 6.1 MESA matrix of cantilever switch.

Performance Design parameters		reliability		contact resistivity	switching speed	RF isolation	size
		stiction (restoring force)	degradation (impact force)				
spring constant	↗	↑ +0.17	↓ -0.14	↓ -0.13	↑ +0.00		
electrode distance	↗	↑ +0.17	↓ -0.29	↓ -0.25	↓ -0.40	↑ +0.5	↓ -0.33
actuation voltage	↗	↓ -0.33	↓ -0.29	↑ +0.25	↑ +0.40		
electrode area	↗	↓ -0.17	↓ -0.14	↑ +0.13	↑ +0.20		↓ -0.33
contact area	↗	↓ -0.17	↑ +0.14	↑ +0.25		↓ -0.5	↓ -0.33

↑ : desirable ↓ : undesirable

- ・システム性能が、全ての設計因子に対して何らかのトレードオフ関係を有しており、カンチレバー型スイッチは設計キャパシティの改善が非常に難しいシステムである。
- ・信頼性に影響する「復元力」と「衝撃力」の間において、「ばね定数」「電極間距離」「コンタクト面積」の3つ設計因子に関してトレードオフが存在する。
- ・「復元力」と「衝撃力」は、設計因子の「駆動電圧」「電極面積」に関してトレードオフの関係に無いが、システム性能「コンタクト抵抗」「応答速度」とは逆行する性能変化を示す。

以上のように、カンチレバー型スイッチには複数の構造的対立が存在しており、設計因子の調節だけによってシステム性能全体を向上させることは不可能であることがわかる。このコンセプトでは、仮に材料や製造プロセスを最適化することができたとしても、システムに内在するトレードオフは解消することはできない。よってスイッチングコンセプトの大幅な変更、あるいは全く新しいコンセプトが必要であると考えられる。

ここで、MESA マトリックスからカンチレバー型スイッチのシステム評価点を算出した。システム性能の「サイズ」については重みづけをせずに、他の5つのシステム性能に対して均等な重み付け ($\omega=0.2$) を行なった場合、本スイッチングコンセプトのシステム評価点は、 $S_0=-0.16$ となる。仮に、システム評価点が最大となるように設計因子の変化方向を調節したとしても、 $S_0'=0.14$ であり、増加幅はほとんど無く、コンセプトの設計キャパシティが非常に小さいことがわかった。

既存の RF MEMS スイッチは、片持ち梁式もしくは両持ち梁式の構造が主流である。このスイッチ構造における RF 特性は従来の FET スイッチと比較して大変優れており、RF 特性を優先する形で

の研究開発が進められてきた。しかし、製品開発の下流段階における信頼性向上は、あくまでもコンセプト及び構造を固定した状態の限られた設計領域の変更によって実施されるに過ぎない。今回の MESA によるコンセプト評価によって、カンチレバー型スイッチ構造には多くのトレードオフが存在することがわかった。設計キャパシティの小さい本構造において RF 特性を維持したまま信頼性を向上させる対策を検討することは難しいと考えられる。

6.4 三相マルチコンタクトラテラルスイッチ(第一世代)の概念設計

前述したように、カンチレバー型スイッチ構造の延長線で考える設計変更だけでは、トレードオフを解消することができない。そこで、本節では MESA によるカンチレバー型スイッチの分析結果をもとに、その問題を解決する新たなスイッチングコンセプトを提案する。

6.4.1 カンチレバー型スイッチからの改善のアプローチ

第一世代における改善のメインアプローチとして着目した点は、信頼性として要求性能に挙げている「復元力」と「衝撃力」である。復元力は望大特性であり、衝撃力は望小特性であるため、それぞれの絶対値を大きく又は小さくすることで、信頼性の向上を図ることができる。また、両者間に存在するトレードオフの解消によって、設計の自由度を大きくすることが可能と考えられる。そのためには、復元力と衝撃力を設計因子群に対してそれぞれ独立の性能にするか、もしくは性能の変化方向を一致させる構造にする必要がある。

本研究では、復元力をまず増加させることから検討した。復元力は(6.1)式に示したようにカンチレバーのばね構造にのみ依存しており、印加電圧によって制御が可能な衝撃力とは異なり、構造が決定した後では制御することが不可能な性能である。そこで、復元力をアクティブに制御するための別の力 F_a を導入することによって、(6.1)式は下式のようになり、 F_R を常に正にするような制御ができるならば、スティクションという問題を解消できると考えた。

$$F_R = F_k - F_{ad} + F_a > 0 \quad (6.13)$$

つまり、スイッチのクローズ時に、熱による融着やマイクロ溶接など如何なる原因でコンタクト部のスティッキング現象が発生したとしても、そのスティクションの力 F_{ad} に対して逆方向に働き、それをキャンセルするだけの大きさがあれば、スティクションによる不良を防ぐことが可能である。そして、新しいコンセプトの導入によって復元力を自在にコントロールできるようになれば、既存の設計因子の復元力に対する影響は殆ど無くなると仮定できるため、復元力と衝撃力との間にある設計トレードオフの解除にもつながると考えられる。

さらに、アクティブな復元力を実現するためにアクチュエータ等を設けてスイッチング駆動とは逆方向に変位させることが必要となるが、その逆駆動自体を新たなスイッチング機能として使うことができるのではないかと考えた。すなわち、静電駆動のスイッチにおいて、電圧が印加されない中立の

状態を OFF 状態とし、2 機の対向したアクチュエータによってそれぞれの方向に変位した 2 状態を ON 状態(ON-OFF-ON の 3 相)と設定することができる。これは、復元力の増大及びトレードオフの解消を検討する段階で得られた派生的発想ではあるが、ON 状態を 2 相設けることによって実質的なスイッチング回数の半減と、コンタクト部への熱エネルギー集中の回避に寄与すると考えられる。

また、3 相スイッチングコンセプトを具現化するためには、垂直駆動式のカンチレバー構造の発展型では MEMS プロセスの層構成が複雑になり、層数も増加する必要が生じる。そこで本研究ではスイッチの駆動方向を水平方向に置換することを考えた。但し、水平駆動にする場合、表面マイクロマシニングにおいては層の厚さが数十 μm 程度しか確保できないため、コンタクト部の面積を大きく取ることが難しい。そこでコンタクト部の面積を拡大する構造の検討を行ったが、その検討過程において、複数のコンタクト部を設けて面積を大きくすると同時に、エネルギーの集中を分散させることが可能なマルチコンタクトスイッチングの発想を導き出すことができた。そして、マルチコンタクトではコンタクトの一部が不良になっても、他のコンタクトで不良を補償できるフェイルセーフ機能が働くのではないかと派生的アイデアを得ることができた。

以上、Table 6.1 に示したカンチレバー型スイッチの MESA マトリックスと、カンチレバーを支配する関係式群から得られるシステム情報をもとに、直接的・間接的に導出された信頼性向上のためのアプローチをまとめると下記ようになる。

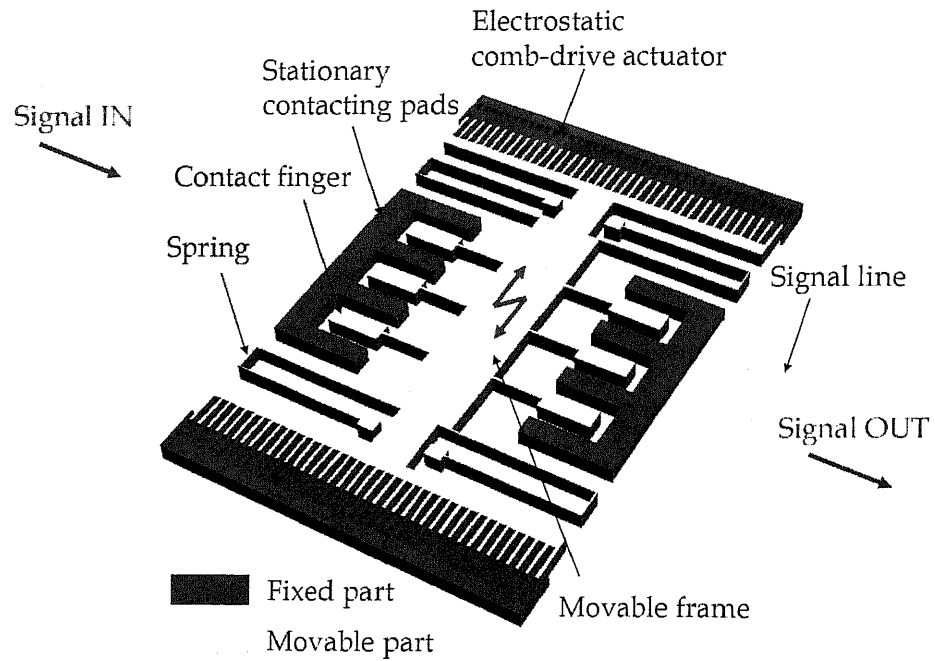
- ・ アクティブな復元力の導入による復元力の増大と、衝撃力とのトレードオフの解消
- ・ スwitching 駆動を 3 相にすることによるコンタクト回数の低減とエネルギー分散
- ・ マルチコンタクトによるエネルギー分散とフェイルセーフ機能の追加

次節以降において、これらアプローチに従った新しいコンセプトの具体化について詳述する。改善案を盛り込んだ新しいスイッチ構造の設計・解析と、スイッチング特性の基礎的な評価結果について報告する。

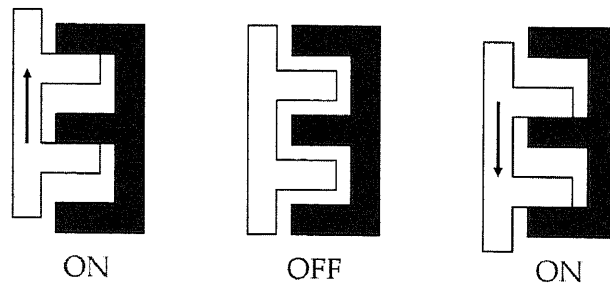
6.4.2 三相マルチコンタクト式スイッチングコンセプト

Figure 6.4 に前述したスイッチングコンセプトを具現化した三相マルチコンタクト式スイッチの構造と、スイッチング状態を示す概略図を示す。スイッチは対向して配置された 2 機の静電櫛型アクチュエータと、その可動部を支持するコの字型ばね、可動部に接続された複数の接触子、及び信号線に配置された固定接触パッドから構成される。スイッチは二分された信号線上に配置されており、接触子が移動して固定接触パッドと接続することによってスイッチがクローズとなって信号が伝搬される、インライン型の DC コンタクトスイッチである。

このスイッチは、電圧印加をするアクチュエータを変えることによって、図中上下の二方向にそれぞれ独立駆動させることができる。よって、仮にスイッチング時に接触子が接触パッドと吸着する現象が発生したとしても、逆方向に駆動させることによる強制的復元力を利用し、スティクションによる



(a) Overview of switch structure.



(b) Tri-state switching concept.

Figure 6.4 Schematics of tri-state lateral multi-contact RF MEMS switch.

不良を防ぐことが可能である。また、2つのアクチュエータに交互に電圧を印加することで、接触子を周期駆動させることが可能である。Figure 6.4(b)に示すように、電圧を負荷しない状態を OFF とすると、駆動させるアクチュエータによって ON 状態が二相存在する。よって、スイッチング時に接触する接触子の表面として2面を交互に利用できるため、寿命は理論上2倍になる。また、接触及び衝撃によるエネルギーや、信号伝搬によるエネルギーも $1/2$ になると推測できるため、この点においても疲労寿命の向上が期待できる。さらに、接触子を複数個並列に設けることによってコンタクト面積を確保すると同時に、接触子の一部が損傷した場合でも、残りの接触子によってスイッチング機能を維持できる可能性があると考えられる。次節では、具体的な MEMS プロセス沿って本スイッチ構造の設計を行い、その機械的特性及び RF 特性について評価した結果を示す。

6.4.3 スイッチ特性

三相マルチコンタクトスイッチをMetal MUMPsルールに従って設計を行なった^[24]。Figure 6.5にCoventorWareを用いて設計解析を行なったスイッチモデル概略を示す^[25]。スイッチの中心駆動部は全て厚さ $20\mu\text{m}$ のNi層で構成されており、固定電極、固定パッド及びばねアンカー部のみが基板に接続された構造である。スイッチ外形サイズは電極及び信号入出力パッドも含めるとおよそ $3\text{mm}\times 3\text{mm}$ である。幅 $30\mu\text{m}$ \times 長さ $100\mu\text{m}$ の接触子は、信号入出力側それぞれに固定接触パッドと $10\mu\text{m}$ の間隔を持って5端子設けられている。このモデルを用いてFEM解析を実施した結果、駆動電圧およそ 140V にてスイッチングに必要な変位量 $10\mu\text{m}$ を得られることがわかった。また、応答速度は $125\mu\text{sec}$ 、接触力は $280\mu\text{N}$ となり、従来のRF MEMSスイッチと同等の機械特性であることを確認した。

また、CoventorWareにおけるMEMElectro及びMEMSHenryと呼ばれる解析オプションを用いて、本スイッチのRF特性の解析を実施した^[25](RF解析詳細については付録B参照)。Figure 6.6に、解析結果として信号周波数に対するスイッチがONステート時の挿入損失と、OFFステート時のアイソレーションを示す。挿入損失は 5GHz 以下の領域で 0.5dB 以下、アイソレーションは 10GHz 以下の領域で 20dB 以上の特性であることがわかり、スイッチが性能目標をほぼ満足する良好なRF特性を持つことを確認できた。さらに、マルチコンタクトによるスイッチングのフェイルセーフ機能を確認するために、接触子の数が減少した場合の挿入損失の変化を調査した。Figure 6.7に接触子の

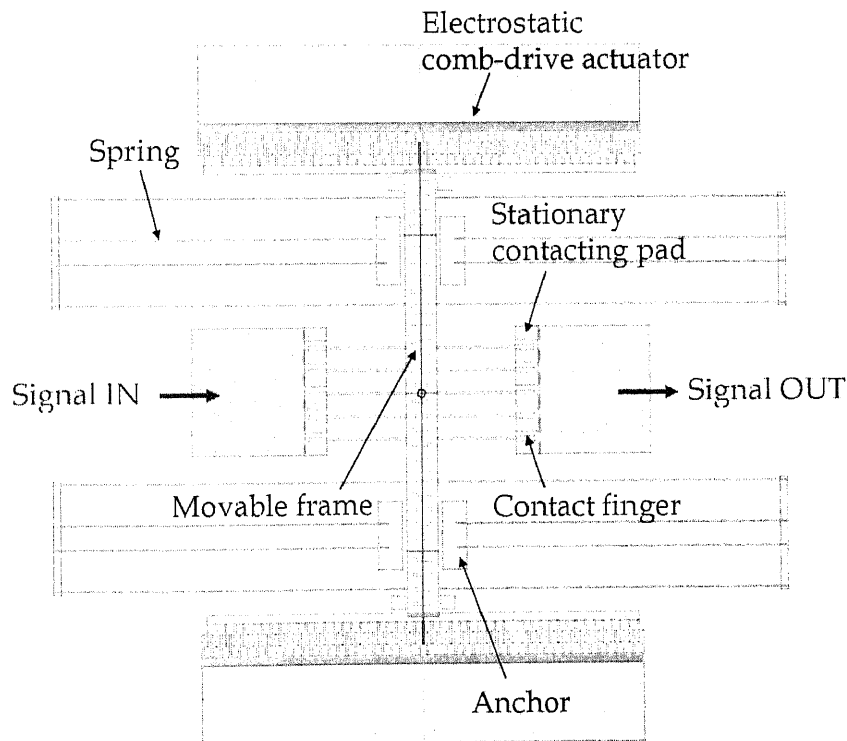


Figure 6.5 FEM model of tri-state lateral multi-contact RF MEMS switch.

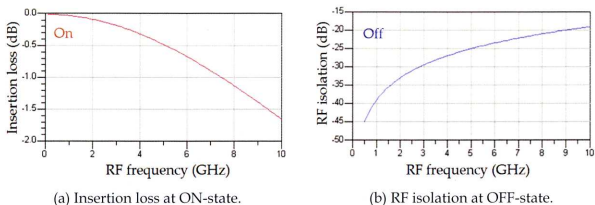


Figure 6.6 RF simulation results of tri-state multi-contact RF MEMS switch.

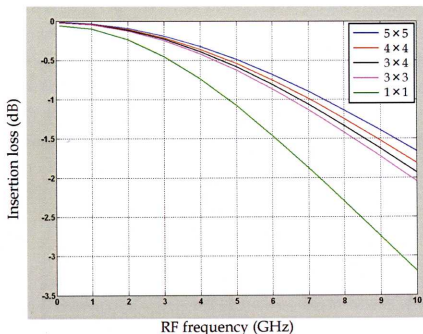


Figure 6.7 Insertion loss at ON-state for different finger configuration.

数を初期の 5×5 ケの状態から、 1×1 ケの状態まで変化させた時の挿入損失の変化を示す。図示されているように初期状態から、 3×3 ケと接触子の 60%が残っている状態までは、10GHz 以下における挿入損失の劣化はほとんど無く、5GHz における損失の増加はわずか 0.1dB 程度である。よってマルチコンタクト構造が、スイッチング不良のフェイルセーフ機能として働くことを確認できた。

以上、詳細設計によるスイッチ性能の評価によって、MESA を利用することによって創出された新規コンセプトは実現性があり、三相マルチコンタクトスイッチが機械的信頼性の向上及び良好な RF 特性の維持という開発目標を満足するものであることを確認できた。

6.4.4 三相マルチコンタクト式スイッチの MESA による評価

カンチレバー型スイッチにおける MESA のシステム評価の結果に基づいて、新しいスイッチングコンセプトを提案し、具体的な詳細設計を行なって特性の確認を行った。ここでは、三相式スイッチングコンセプトに改めて MESA を適用し、そのコンセプトの評価を行う。

Table 6.2 に三相式マルチコンタクトスイッチの MESA マトリックスを示す。スイッチ構造はカンチレバー型と比較して複雑になったが、基本的にはアクチュエータが増えたのみであり、駆動形態は同様と考えられる。そこでシステムコンセプト上の設計因子に追加は無いものとして、カンチレバー型と同じ行列配置の MESA マトリックスを作成した。ここで、第一世代とした本スイッチにおける「復元力」のシステム性能は、アクティブな復元力の追加により安定した力が得られるため、構造的な設計因子による影響を受けないと考えた。よって「復元力」に関する MESA 感度を全ての設計因子について 0 と設定し、「衝撃力」との間に存在した設計トレードオフは解消されたと判断した。このトレードオフの解消によって設計キャパシティが大きくなり、設計因子の変化方向を調節する自由度が生まれた。そこで、システム全体としての性能を向上させるために、ばね定数と電極間距離について設計因子の変化方向を変え、システム評価点の計算を行なった。算出された三相マルチコンタクトスイッチングコンセプトのシステム評価点は $S_1=0.285$ となり、カンチレバー型スイッチと比較して、システムとしての性能が向上したと判断できる。

ただし、MESA マトリックスからわかるように、このスイッチコンセプトにおいてもトレードオフを全て解除できたわけではなく、「衝撃力」と「アイソレーション」については性能が悪化する設計因子の変化設定になったままである。そこで、この MESA による分析結果を参考に、更なる改善を加えた第二世代の新しいスイッチングコンセプトについて検討を行うこととした。

Table 6.2 MESA matrix of tri-state lateral multi-contact switch.

Performance Design parameters		reliability		contact resistivity	switching speed	RF isolation	size
		stiction (restoring force)	degradation (impact force)				
spring constant	↘		↑ +0.14	↑ +0.13			
electrode distance	↘		↑ +0.29	↑ +0.25	↑ +0.40	↓ -0.5	↑ +0.33
actuation voltage	↗		↓ -0.29	↑ +0.25	↑ +0.40		
electrode area	↗		↓ -0.14	↑ +0.13	↑ +0.20		↓ -0.33
contact area	↗		↑ +0.14	↑ +0.25		↓ -0.5	↓ -0.33

↑ : desirable ↓ : undesirable

6.5 プッシュプル式スイッチ(第二世代)の概念設計

本節では MESA による三相マルチコンタクトスイッチのシステム性能評価で得た情報を用い、残った設計トレードオフを解消するための新しいスイッチングシステム(第二世代)を提案する。

6.5.1 第一世代からの改善のアプローチ

第一世代においては、信頼性として要求性能に挙げている「復元力」と「衝撃力」に着目した。両者間に存在するトレードオフを解消することを目的に新しいスイッチ構造の検討を開始し、その考えから創造される派生的なアイデアを更に盛り込むことによって、最終形状を得るに至った。第二世代では、第一世代で課題点として残った「衝撃力」と「アイソレーション」における設計トレードオフの解消に重点を置く。Table 6.2 から分かるように、「衝撃力」と「アイソレーション」は設計因子の電極間距離とコンタクト面積に関してトレードオフの関係にある。また、「衝撃力」は設計因子の駆動電圧、及び電極面積に関して、他のシステム性能とトレードオフを有している。そのため、これらのシステム性能については設計因子を調節して全体性能を変えることができない状況にある。

そこで、新しいスイッチの検討では、まず十分なアイソレーションを確保するために電極間距離を大きくする必要があると考えた。第一世代の構造を維持したまま、接触子と固定接触パッドの距離を拡大することによってアイソレーションを向上させることは可能である。しかし、静電駆動アクチュエータでは、第2章で述べたように印加電圧の上昇に伴って急激な変位を生じる“スナップスルー”と呼ばれる挙動を示すため、スイッチング時の衝撃力が著しく大きくなる可能性がある。そこで、このトレードオフを回避するために、対向したアクチュエータを同時駆動させることで衝撃力を緩和制御し、接触子をソフトランディングさせることが可能であると考えた。ただし、このコンセプトでは電極間距離が広がってしまうため、第一世代と同様の復元変位力を得るためには数百 V といった常用的ではない高電圧が必要となる可能性があり、アクチュエータの制御も複雑なものになってしまう。

そこで、接触子をランディングさせるためのスイッチングアクチュエータと、復元力を発生させるためのアクチュエータをそれぞれ分離させることを考えた。そして、これは一次元的な駆動のみでは実現困難であると判断し、二次元的な駆動を検討した。Figure 6.8 に考案した駆動コンセプトを示す。

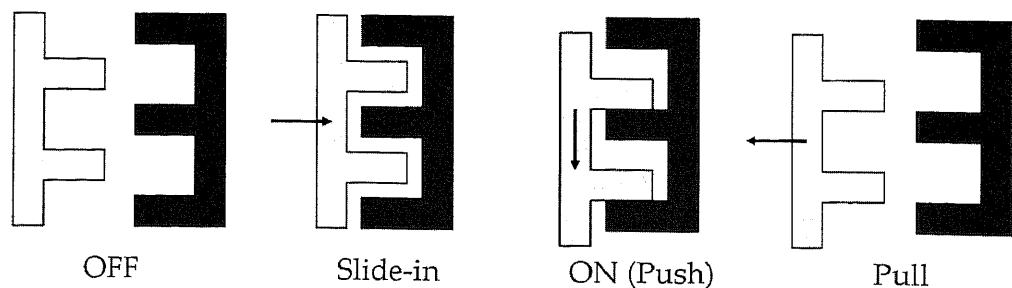


Figure 6.8 Push-pull switching concept.

スイッチが OFF の状態では、高アイソレーションを得るために、接触子とコンタクトパッドはその間隔を大きく取った位置に配置されている。この OFF ステートから、図中左右方向のアクチュエータ機能により、接触子をコンタクト部へ挿入 (Push) して固定パッドとの距離を短縮し、その後駆動方向を図中上下方向に変え、接触子を固定パッドへランディングさせる形でスイッチを ON 状態にする。また、この状態から左右方向に駆動させて接触子を固定パッドから引き抜くような (Pull) 動作により、OFF ステートへ復帰する。このスイッチング動作では、OFF ステートで大きな静電容量を確保でき、且つスイッチング時には接触子と固定パッドの距離が短縮されているため、衝撃力を減少させることが可能である。また、第一世代においては、復元力は吸着面に対して引張方向に働く力であったが、本コンセプトでは復元力は剪断方向の力になる。よって、スティッキング現象を解消するための復元力を小さく抑えることができ、アクチュエータに必要となる駆動電圧も低下することが可能となる。

以上、Table 6.2 に示した第一世代の三相マルチコンタクトスイッチの MESA マトリックスから得られるシステム情報をもとに導かれた新しいアプローチをまとめると下記のようになる。

- ・アイソレーションの増大とそれに伴う設計トレードオフを、アクチュエータ機能をスイッチングと復元力に二分化することによって解消
- ・スイッチング駆動時は接触子の距離を小さくし、ソフトランディングさせることによって衝撃力を減少
- ・復元力を専断方向へ転換することにより、アクチュエータ駆動電圧を低減

6.5.2 プッシュプルスイッチングコンセプト

前述した第二世代のコンセプトに基づいて、スイッチ構造の基礎設計を行い、スイッチング機能の性能評価を行った。Figure 6.9 にプッシュプルスイッチの OFF ステート及び ON ステートにおける構造概略図を、Figure 6.10 にコンタクト部における接触子のスイッチング駆動を示す。本構造は、第二世代のコンセプトをコンパクトで単純な形で実現するために、プッシュプルの二次元駆動を水平方向と垂直方向に分割する機構を採用した。第一世代型と同様に、スイッチは対向して配置された 2 機の静電櫛型アクチュエータから構成されており、可動電極部がばねを介して基板に接続されている。ただし、接触子はアクチュエータの駆動と同方向に配置されており、接触子側のアクチュエータを駆動させることによって、接触子がアクチュエータ外部に配置された信号線へスライドするような動きで近づく。このアクチュエータの櫛型電極部を 2 層構造にすることによって、接触子は水平方向だけではなく、垂直方向に回転するような動きを示すため、ON ステートへ DC コンタクトスイッチングをする。OFF ステートへ戻る場合には、電圧印加を除去すると同時に、対向するアクチュエータを復元駆動させることによって、接触子は剪断方向に引き抜かれるような形で動く。

よって、本スイッチは初期の OFF ステートでは接触子とパッドがオフセットして配置された状態であり、静電容量を大きく取ることができるため高アイソレーションを確保することができる。また、スイッチング時には、2 段階のアクチュエータ駆動によって接触時のコンタクト距離を小さくし、衝撃力を小

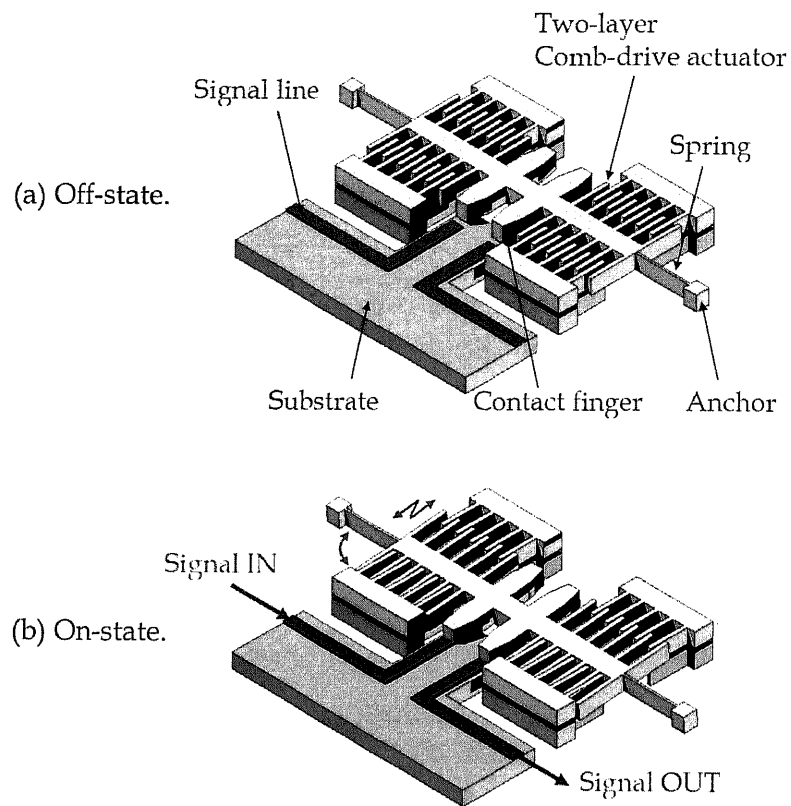


Figure 6.9 Schematics of push-pull switch with off and on states.

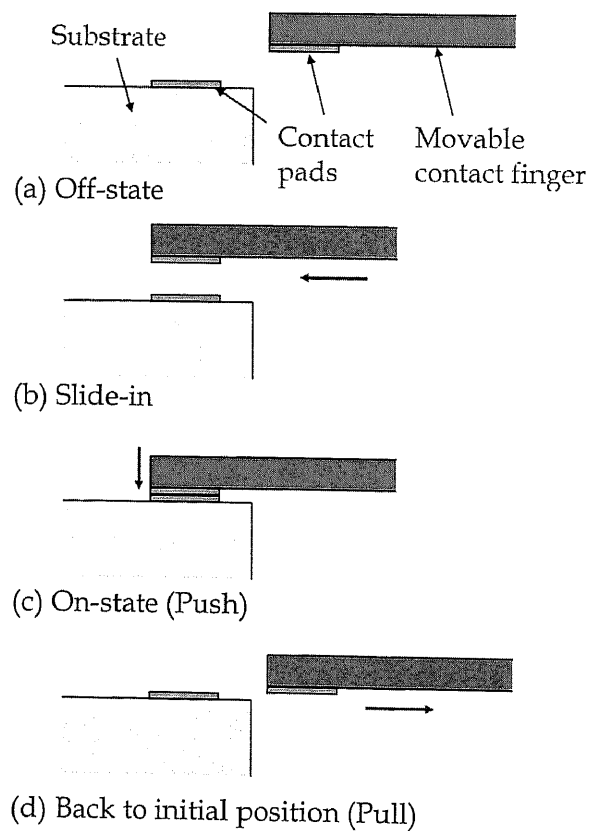


Figure 6.10 Contact finger behavior of push-pull switching concept.

さく抑えることができる。さらに、第一世代と同様にアクティブな復元力を持つが、剪断挙動では小さな力でスティクションを解除できるため、高い駆動電圧を必要としないといった特徴を持つ。これらのシステム構造の変更及び追加によって第一世代における課題点を克服し、信頼性と RF 特性の両立が実現されることが考えられる。

6.5.3 プッシュプルスイッチの MESA による評価

カンチレバー型スイッチ、三相マルチコンタクトスイッチと同様に、プッシュプル型スイッチについても MESA を用いてスイッチングコンセプトの評価を行った。Table 6.3 にプッシュプル型に関する MESA マトリックスを示す。表ではアクチュエータの駆動方向を 2 段階にしたため、プッシュ挙動に相当するスイッチング駆動に関連した設計因子については既存のアクチュエータ因子を割り当て、プル挙動に関連する設計因子として、新たに「プッシュプル駆動距離」と「プッシュプル駆動電圧」を追加した。

第一世代同様、プッシュプルスイッチにおいても強制的な復元力が存在するため、「復元力」は設計因子群に依存しないと仮定できる。また、アクティブな復元力に必要な電圧は第一世代と比較して低くすることができるので、プッシュプル電圧は上昇感度を持つと考えることも可能である。第一世代で降下感度が割り付けられていた「アイソレーション」は、スイッチング駆動の設計因子から独立し

Table 6.3 MESA matrix of push-pull switch.

Performance Design parameters		reliability		contact resistivity	switching speed	RF isolation	size
		stiction (restoring force)	degradation (impact force)				
spring constant	↘		↑ +0.14	↑ +0.13			
electrode distance	↘		↑ +0.29	↑ +0.25	↑ +0.22		
actuation voltage	↗		↓ -0.29	↑ +0.25	↑ +0.22		
electrode area	↗		↓ -0.14	↑ +0.13	↑ +0.11		↓ -0.33
contact area	↗		↑ +0.14	↑ +0.25			↓ -0.33
push-pull distance	↗				↓ -0.22	↑ +1.00	↓ -0.33
push-pull voltage	↗	(↑)			↑ +0.22		

↑ : desirable ↓ : undesirable

たシステム性能となり、プッシュプル距離にのみ依存すると考えられる。よって、「衝撃力」との間にあったトレードオフは解消され、設計の分離を図ることができた。駆動が2段階になったことで、応答速度が遅くなる、あるいはサイズが大きくなるなどの懸念はMESAマトリックスより読み取ることはできるが、システム評価点は設計トレードオフの減少によって $S_2=0.67$ （「サイズ」は評価から除外）となり、本システムの設計キャパシティは旧世代と比較して高いと判定することができる。すなわち、プッシュプル型は、独立な設計因子を多く持ち、詳細設計段階において設計因子の最適化や新たな改善の追加が容易なシステムであると考えられる。

6.6 結論

本章ではMESAをRF MEMSスイッチ開発の概念設計段階に適用し、得られた設計情報に基づいて新しいスイッチングコンセプトの連続的な創出を行なった。概念設計を繰り返し実施することによってスイッチのシステム性能を向上させることができ、MESAに実用性があることを確認した。

まず、既存の代表的なRF MEMSスイッチであるカンチレバー型スイッチについて、そのシステムが持つ設計キャパシティをMESAにより分析・調査した。カンチレバー型における全てのシステム性能が、設計因子に対してトレードオフを持っており、システムの設計自由度が低いことがわかった。そこで、カンチレバーに関するMESAの設計情報を参考に、システムに内在する問題点を克服する新しいコンセプトとして、三相マルチコンタクトスイッチ（第一世代）を考案した。新しいスイッチでは、カンチレバー型における信頼性に関係する二つのシステム性能の間のトレードオフを解消できたと同時に、その改善検討途上で産まれた派生的なアイデアを盛り込んで、システム性能の全体的な向上を図ることができた。

更に、第一世代で未解決であった設計上の問題点についてMESAを再度適用して分析し、プッシュプル型の新しいスイッチ（第二世代）を考案した。プッシュプルスイッチでは、新たなスイッチング駆動機構を導入し、RF特性のアイソレーションに関連したトレードオフの解消を図った。第一世代のアイデアを踏襲しつつ、新たな2段階式駆動のアクチュエート機能を盛り込むことでコンセプトに基づいたシステムの基礎設計を行なうことができ、信頼性を向上させた新しいRF MEMSスイッチを提案することができた。本章におけるRF MEMSスイッチの概念設計に関する検討によって、MESAがMEMSの新規コンセプト設計及び評価に適用可能であり、開発プロセスの高効率化に貢献できることを確認できた。

参考文献

- [1] G. M. Rebeiz, *RF MEMS theory, design and technology*, Wiley, 2003.
- [2] G. M. Rebeiz and J. B. Muldavin, "RF MEMS switches and switch circuits," *IEEE microwave magazine*, pp. 59-71, December 2001.
- [3] J. J. Yao, "RF MEMS from a device perspective," *J. of Micromechanics and Microengineering*, vol. 10, pp. R9-R38, 2000.
- [4] 大和田邦樹, RF MEMS とその応用, ケイラボ出版, 2004.
- [5] J. Oberhammer, "Novel RF MEMS switch and packaging concepts," Ph. D. Thesis, Royal Institute of Technology, Sweden, 2004.
- [6] R. Ramadoss, "Design, modeling, and characterization of RF MEMS capacitive switches based on flexible printed circuit technology," Ph. D. Thesis, University of Colorado at Boulder, 2003.
- [7] I. Schele and B. Hillerich, "Comparison of lateral and vertical switches for application as microrelays," *J. of Micromechanics and Microengineering*, vol. 9, pp. 146-150, 1999.
- [8] R. E. Mihailovich, M. Kim, J. B. Hacker, E. A. Sovero, J. Studer, J. A. Higgins, and J. F. DeNatale, "MEMS relay for reconfigurable RF circuits," *IEEE Microwave Wireless Comp. Lett.*, vol. 11, no. 2, pp. 53-55, 2001.
- [9] C. Bozler, R. Drangmeister, S. Duffy, M. Gouker, J. Knechet, R. Parr, S. Rabe, and L. Travis, "MEMS microswitch arrays for reconfigurable distributed microwave components," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pp. 153-156, 2000.
- [10] Z. J. Yao, S. Chen, S. Eshelman, and C. L. Goldsmith, "Micromachined low-loss microwave switches," *IEEE J. of Microelectromechanical Systems*, vol. 8, pp. 129-134, 1999.
- [11] W. Merlijin van Spengen, R. Puers, R. Mertens, and I. De Wolf, "Experimental characterization of stiction due to charging in RF MEMS," *Proc. of IEEE Int. Electron Devices Meeting IEDM 2002*, pp. 901-904, 2002.
- [12] R. Maboudian and R. T. Howe, "Critical review: Adhesion in surface micromechanical structures," *J. of Vacuum Science and Technology B*, vol. 15, no. 1, pp. 1-20, 1997.
- [13] N. Tas, T. Sonnenberg, H. Jansen, R. Legtenberg, and M. Elwenspoek, "Stiction in surface micromachining," *J. of Micromechanics and Microengineering*, vol. 6, no. 4, pp. 385-397, 1996.
- [14] J. Schimkat, "Contact measurement providing basic data for microrelay actuators," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 73, pp. 138-143, 1999.
- [15] S. Majumder, N. E. McGruer, G. G. Adams, A. Zavracky, P. M. Zavracky, R. H. Morrison, and J. Krim, "Study of contacts in an electrostatically actuated microswitch," *Proc. of IEEE Electrical Contacts*, pp. 127-132, 1998.

- [16] D. Hyman and M. Mehregany, "Contact physics of gold microcontacts for MEMS switches," *IEEE Trans. on Components and Packaging Technology*, vol. 22, no. 3, pp. 357-364, 1999.
- [17] D. Becher, R. Chan, M. Hattendorf, and M. Feng, "Reliability study of low-voltage RF MEMS switches," *Proc. of GaAs MANTECH Conference*, pp. 54-57, 2002.
- [18] R. Maboudian, "Anti-stiction coating for surface micromachines," *Proc. of SPIE*, vol. 3511, pp. 108-113, 1998.
- [19] C. Cabuz, E. I. Cabuz, T. R. Ohnstein, J. Neus, and R. Maboudian, "Factors enhancing the reliability of touch-mode electrostatic actuators," *Sensors and Actuators A*, vol. 79, pp. 245-250, 2000.
- [20] J. Schimkat, "Contact materials for microrelays," *Proc. of IEEE Micro Electro Mechanical Systems 1998*, pp. 190-194, 1998
- [21] L. L. Mercado, S. -M. Kuo, T.-Y. T. Lee, and L. Liu, "A mechanical approach to overcome RF MEMS switch stiction problem," *Proc. of IEEE Electronic Components and Technology Conference 2003*, pp. 377-384, 2003.
- [22] J. -M. Huang, K. M. Liew, C. H. Wong, S. Rajendran, M. J. Tan, A. Q. Liu, "Mechanical design and optimization of capacitive micromachined switch," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 93, pp. 273-285, 2001.
- [23] H. F. Schlaak, "Potentials and limits of micro-electromechanical systems for relays and switches," *Proc. of IEEE Electrical Contacts*, pp. 19-30, 2002.
- [24] A. Cowen, B. Dudley, E. Hill, M. Walters, R. Wood, S. Johnson, H. Wynands, and B. Hardy, *MetalMUMPs Design Handbook Rev. 1.0*, MEMSCAP, 2002.
- [25] *CoventorWare User Handbook*, Coventor Inc., 2005.

第 7 章

総 括

*Life is a tragedy when seen in close-up,
but a comedy in long-shot.*
人生はクローズアップで見ると悲劇だが、
ロングショットでは喜劇である。

— *Charles Chaplin*
チャールズ・チャップリン

7.1 結論

本論文ではMEMS設計開発の効率化を目的とした新しいコンセプト設計支援手法(MESA)を提案した。MESAの開発方針を決定するために、まずMEMS設計開発及び既存CAE技術の問題点を分析し、設計者がMEMS設計開発プロセスにおいて必要とする設計情報は何かを調査した。そして、全ての設計者が熟練者の感覚に近い設計を開発初期の段階において行なえる設計環境を構築することが、開発プロセスの高効率化につながると考えた。また、設計支援は概念設計の段階で行なわれるべきであり、単純に最適解を設計者にアウトプットするだけではなく、システムが示す現象及び原理原則を理解できる定量的設計情報を提供する必要があると判断した。

MESAでは、コンセプト設計の段階におけるシステムの設計因子と性能の関係を単純な数式として表し、MESA感度という形式で導出した。そしてMESA感度をマトリックス表記することによって視覚化し、設計因子の性能への影響度やシステムに存在する設計トレードオフなどの設計情報を明確に設計者に伝える手法を確立した。また、MESA感度への重みを設定し、設計者が重みを調節することによってシステム性能の自由な比較検討をすることを可能とした。さらに、コンセプトの定量的な評価を実現するために、感度と重みから算出されるシステム評価点という考えを導入し、設計キャパシティ向上の検討や異なるシステムの比較評価など、従来は定性的で漠然としていた概念の客観的評価を可能とした。

MESAをマイクロミラーとアクチュエータの概念設計に適用し、手法の妥当性について検証を実施した。MESAによってシステムに内在するトレードオフを抽出し、構造上の特徴及び問題点を明確にした。MESAによる評価結果は、報告されている各々のデバイスの特徴と一致し、MESAによる概念設計及び評価に実用性があることを確認できた。また、MESAをRF MEMSスイッチの機械的信頼性向上のための設計改善に適用した。MESAを用いて従来のRF MEMSスイッチにおける設計トレードオフを解消し、システムの設計キャパシティを評価することによって、二種類のスイッチングコンセプトを連続的に創出することができた。

7.2 貢献

本研究における主な貢献は下記の通りである。

- ・MEMSの概念設計に適用可能な新しい設計支援手法(MESA)を確立した。本設計支援手法を用いることによって、MEMS設計開発プロセスが効率化され、製品化までの開発コスト・時間の削減につながると考えられる。
- ・MESAではコンセプトを定量的に評価することが可能であり、設計因子と性能の関係、システムに存在するトレードオフなどを抽出することができる。単純な最適解を提供する設計手法とは異なり、MESAは設計者の思考を支援し、新しい発想の創出を補助する。よって、本手法はMEMS設計開発者の育成支援を可能とするものであると考えられる。

- ・ MESA を利用して新しい RF MEMS スイッチの概念設計を行い、性能を改善した構造を提案した。新規スイッチでは既存の RF MEMS スイッチと比較して設計上のトレードオフが少なく、設計自由度を高くすることができた。また、概念設計の段階において、良好な RF 特性を維持したまま、機械的信頼性を向上させることができた。

7.3 推奨する今後の研究項目

1) MESA の高度化

第4章で議論した MESA のコンセプト評価に関するアルゴリズムは、詳細な設計情報が無い漠然とした概念設計段階を考慮したものである。しかし、コンセプトやアイデアが既に詳細な設計制約や要求仕様を有する場合や、システムが任意の範囲における線形近似では誤差が大きくなってしまような複雑な挙動を示すことが判明している場合が考えられ、現行の MESA アルゴリズムがそのまま適用できない可能性がある。よって、MESA を更に複雑なシステムに適用して詳細設計時に得られる特性との整合性を検証するとともに、MESA によって得られる設計キャパシティの大小が、詳細設計におけるシステムの拡張性と一致するように MESA のアルゴリズムを高度化する必要がある。

2) MESA のデータベース化

MEMS では、梁や剛体板、ばね、アクチュエータ(櫛型静電駆動、電熱駆動)など、要素部品の組み合わせによって構成されているデバイスが多い。そこで、各要素部品について予め性能に対する設計因子の影響度を表す MESA 感度を算出しておき、データベース化することによって、類似したコンセプトの比較検討を行う時間を短縮することが可能である。マイクロスケールでは材料物性及び機械的電氣的挙動が特殊であるため、FEM 解析や実験によって要素データを収集することができれば、実デバイスの現象に近づいた評価が可能となる。また、データベースは詳細設計段階における最適化でも使用できるため、開発プロセス全体の効率化に有効であると考えられる。

3) RF MEMS スイッチの製作及び性能評価

本論文では MESA の実用性を評価することが主目的であったため、RF MEMS スイッチの開発については概念設計と、解析による基礎的性能評価をするに留まった。よって、カンチレバー型スイッチと比較して、新しく創出したスイッチの機械的信頼性が実際に向上していること、及び良好な RF 特性が維持されていることを確認するために、スイッチを製作し実験によって評価をする必要がある。目標とする疲労寿命は 10^{10} 回と長く信頼性評価にはかなり時間を必要(1日に 10^6 回のスイッチングを行なっても 10^4 日の試験時間が必要)とするため、試験方法及び疲労寿命の評価方法について予め十分な検討をする必要がある。

付 録 A

MUMPs

*The best way to have a good idea is
to have lots of ideas.*

良いアイデアを得る最上の方法は、
たくさんアイデアを持つことである。

— *Linus Carl Pauling*
ライナス・カール・ポーリング

A.1 Poly MUMPs

Poly MUMPs は米国カリフォルニア大学バークレー校 (University of California at Berkeley) のバークレーセンサー・アンド・アクチュエータ・センター (Berkeley Sensors and Actuators Center : BSAC) で開発された3層のポリシリコンを利用する表面マイクロマシニングプロセスである。プロセスをマルチユーザー対応化するために、設計自由度を改善、プロセスの修正及び高度化をこれまで進めてきた。ここで紹介する一般的なマイクロモータの製作プロセスフローは、表面マイクロマシニングに関して知識を持たないエンジニアでも理解できるよう構成されたものである。より細かな技術的情報については、MEMSCAP 社のウェブサイト等から入手できる Poly MUMPs ハンドブックに詳述されている^[1]。

プロセスでは、電気抵抗率が $1 \sim 2 \Omega \cdot \text{m}$ である 4 インチ <100> n 型シリコンウエハを基板として使用する。ウエハの表面には、ドーパント源としてオキシ塩化リン (POCl_3) を使用した標準的な熱拡散炉を用いて、リン (P) が高濃度でドーパ (拡散) されている。この処理は、静電駆動デバイスなどによるウエハ表面へのチャージの影響を減少あるいは防ぐ役目をする。このウエハ上に、低応力低压化学気相堆積法 (Low Pressure Chemical Vapor Deposition : LPCVD) によって、厚さ 600nm の窒化珪素 (Si_3N_4) が絶縁層として形成される。続いて LPCVD により厚さ 500nm のポリシリコン層 (Poly-0) が積層される。ここで、Poly-0 はフォトリソグラフィ工程を経て所望の形状にパターンニングされる。Poly-0 におけるフォトリソグラフィは、フォトレジストの塗布及びパターンニング用のマスクを用いたフォトレジストの露光及び現像を行う。最終的にフォトレジストをマスクとして、Poly-0 層の露出されている部分を反応性イオンエッチング (Reactive Ion Etching : RIE) によってエッチングする。Figure A.1 (a) が、ここまでの工程が終了した状態を示す^[2]。次に、厚さ $2.0 \mu\text{m}$ のリン珪酸ガラス (Phosphosilicate Glass : PSG) が犠牲層として LPCVD により形成される。この PSG 犠牲層 (Oxide-1) は、ポリシリコンを MEMS の機能層として働かせるための最終的なリリースプロセスで除去されるものである。Oxide-1 には、"ディンプル" (Dimple) と呼ばれる深さ 750nm のハーフエッチング処理を RIE によって施すことが可能である (Figure A.1 (b) 参照)。ディンプルを加工後、別のフォトマスクを使用して Oxide-1 はパターンニングされ、Anchor-1 と呼ばれる空隙部が形成される。この Anchor-1 は次工程で積層される Poly-1 によって充填されることになる。

Anchor-1 を形成後、第一の機能層となる厚さ $2.0 \mu\text{m}$ のポリシリコン層 (Poly-1) が堆積される。さらに、Poly-1 上に厚さ 200nm の PSG が積層され、この状態の基板に $1050^\circ\text{C} \times 1$ 時間のアニーリング (熱処理) が施される。アニーリングによって、Poly-1 層の上下に存在する PSG から P が Poly-1 層へ拡散する。また、アニーリングは、ポリシリコンの残留応力を緩和する働きもする。アニーリング後、Poly-1 と上部 PSG 層はパターンニング及びエッチングされ、Figure A.1 (c) に示す状態となる。この時、PSG 層がフォトレジストに代わり、Poly-1 をエッチングするためのマスク層として機能する。PSG は有機系のフォトレジストと比較して硬度が高く、且つ厚さも薄いいため、高いパターンニング精度を得ることができる。

Poly-1 をエッチング後、第二の PSG 層 (Oxide-2) が積層される。Oxide-2 は二種類のマスクに

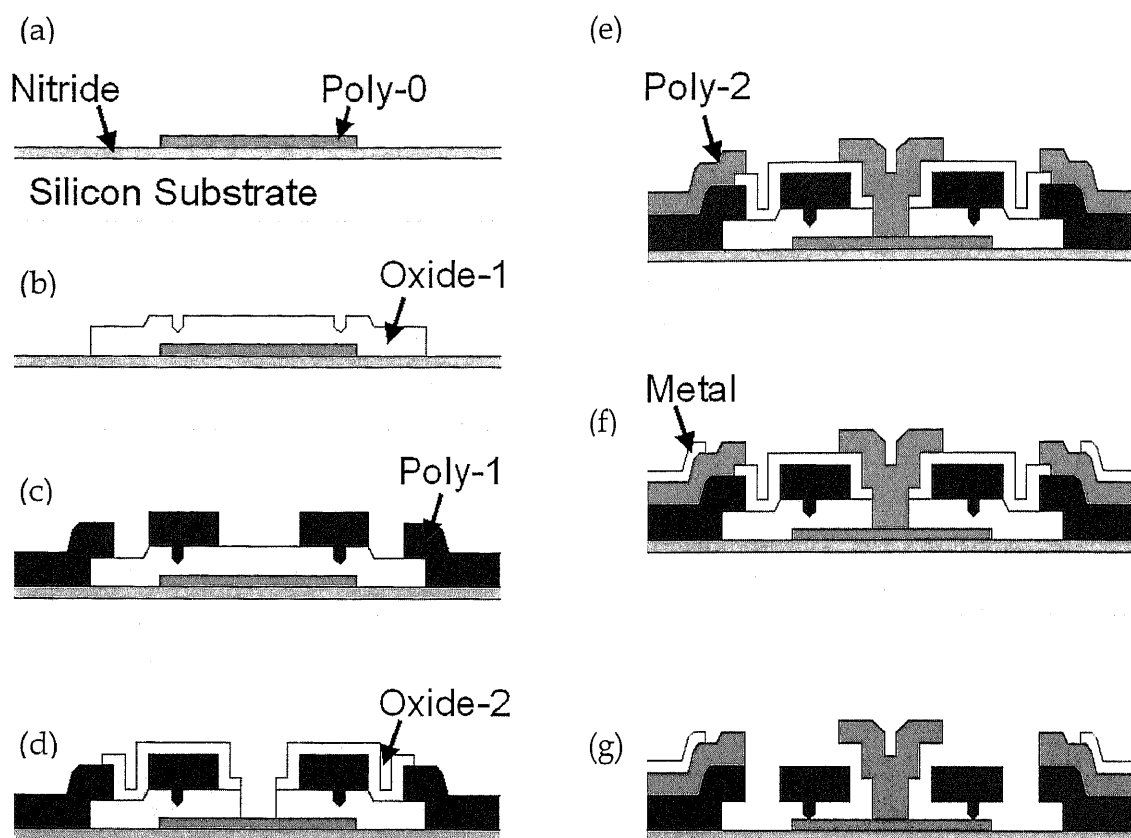


Figure A.1 Schematic cross-sectional views of the Poly MUMPs process-flow.

よってパターンニングされる。Poly-1 と Poly-2 の機械的電氣的接続のためのエッチング空隙部が Poly-12via であり、RIE によって Oxide-2 のみを除去することによって形成される。Oxide-2 と同時に Oxide-1 を除去することで形成される部分は Anchor-2 と呼ばれており、これによって Poly-0 もしくは Si_3N_4 層まで貫通することが可能となる。両構造ともに RIE によって形成され、Figure A.1 (d) の状態になる。

次に、第二のポリシリコン層として厚さ $1.5\mu\text{m}$ の Poly-2 が堆積され、上部を 200nm 厚の PSG によって覆われる。Poly-1 の場合と同様、PSG 層は P を Poly-2 へ拡散する目的と、高精度のマスク層として機能させるために設けられるものであり、堆積後 1050°C でアニール処理が施される。Poly-2 は PSG 層をマスクとしてフォトリソグラフィによりパターンニング及び RIE 加工をされる。その後、PSG 層は除去され、Figure A.1 (e) に示す状態になる。

Poly MUMPs における最終積層工程は厚さ $0.5\mu\text{m}$ の金属 (Au) 層の形成である。金属層はプローブやワイヤボンディング、電気信号線、光学的反射面などに利用されるものである。Au 層は、リフトオフ (Lift-off) と呼ばれるプロセスで形成される。これは、予めフォトリソレジストを塗布して金属を積層する部分にレジストの空隙部分を設け、レジストの上から金属を蒸着した後にレジストを除去すること

によって、不要な金属層をレジスト剥離と同時に行なうものである。この工程後、基板は Figure A.1 (f) の状態になる。Poly MUMPs では、この段階の犠牲層が除去されていないウエハをユーザーに提供することが可能である。Poly MUMPs を MEMS デバイスとして機能させるためには、半導体のチップと同様に、ダイシングや犠牲層を除去する工程を踏み、Figure A.1 (g) の状態にする必要がある。ただし、この状態では図中中央部の Poly-1 層が、他の層と接続されていないため、ハンドリングに注意を要する。

A.2 Metal MUMPs

Metal MUMPs は、MEMSCAP 社で 1990 年から開発が進められてきた、電解めっきによるニッケルをベースとしたマイクロマシニングプロセスである。ここで紹介するプロセスフローは、電熱アクチュエータを利用したマイクロリレー構造に関するものである。Poly MUMPs 同様、プロセスの詳細については、Metal MUMPs ハンドブックに詳述されている^[3]。

Figure A.2 (a) に示すように、 $\langle 100 \rangle$ n 型シリコンウエハを基板として、厚さ $2\mu\text{m}$ の SiO_2 (Oxide-0) 層が絶縁層として最初に堆積される。次に、厚さ $0.5\mu\text{m}$ の PSG 犠牲層が Oxide-1 として積層され、フォトリソグラフィによってパターンニング後、不要な PSG 層はウエットエッチングにより除去される。その後、厚さ $0.35\mu\text{m}$ の Si_3N_4 (Nitride-1) と、厚さ $0.7\mu\text{m}$ のポリシリコン (Poly) 層が連続して積層される。Poly はパターンニングされ、RIE によって所望の形状にエッチングされる (Figure A.2 (b) 参照)。次に、第二の Si_3N_4 層として、厚さ $0.35\mu\text{m}$ の Nitride-2 が積層される。この後のパターンニング工程では、マスクを二枚使用して Nitride-1 及び Nitride-2 を貫通する部位と、Nitride-2 のみを除去する部位に分ける。RIE によってエッチングがそれぞれ行なわれ、Figure A.2 (c) の状態になる。

Nitride 層をエッチング後、厚さ $1.1\mu\text{m}$ の PSG 層 (Oxide-2) が積層され、パターンニング後にウエットエッチングによって、不必要な部位は除去される。その後、同じフォトマスクを利用するリフトオフ工程により、厚さ 10nm のクロム (Cr) と厚さ 25nm の白金 (Pt) から構成される Anchor metal 層が形成される。リフトオフによって、Anchor metal は Oxide-2 が存在しない領域にのみ堆積されるため、ウエハは Figure A.2 (d) のような状態になる。

次に、ウエハ全面を厚さ 500nm の銅層 (Cu) と、 50nm のチタン層 (Ti) で覆い、それを電解めっきのシード層とする。この後、厚さ数十 μm のフォトレジストを塗布し、パターンニングによってめっき用のステンシルを作成する。そのステンシルに平均厚さ $20\mu\text{m}$ のニッケル (Ni) を電解めっきにより形成し、更にその表面に厚さ $0.5\mu\text{m}$ の金 (Au) をめっきすることで、Figure A.2 (e) に示すような Metal 層が形成される。この後、厚膜フォトレジストは除去され (Figure A.2 (f) 参照)、同じフォトレジストを利用して新たなパターンニングをするためのステンシルが設けられる (Figure A.2 (g) 参照)。ステンシルで作られた空隙部には、Figure A.2 (h) に示すような厚さ $1\sim 3\mu\text{m}$ の Au めっき層が構成される。この層は、Metal 層における Au 層が上部表面のみだったのに対し、Metal 層の側壁に形成されるため、側面に接点があるようなリレーでは電気接触抵抗の低減に効果がある。

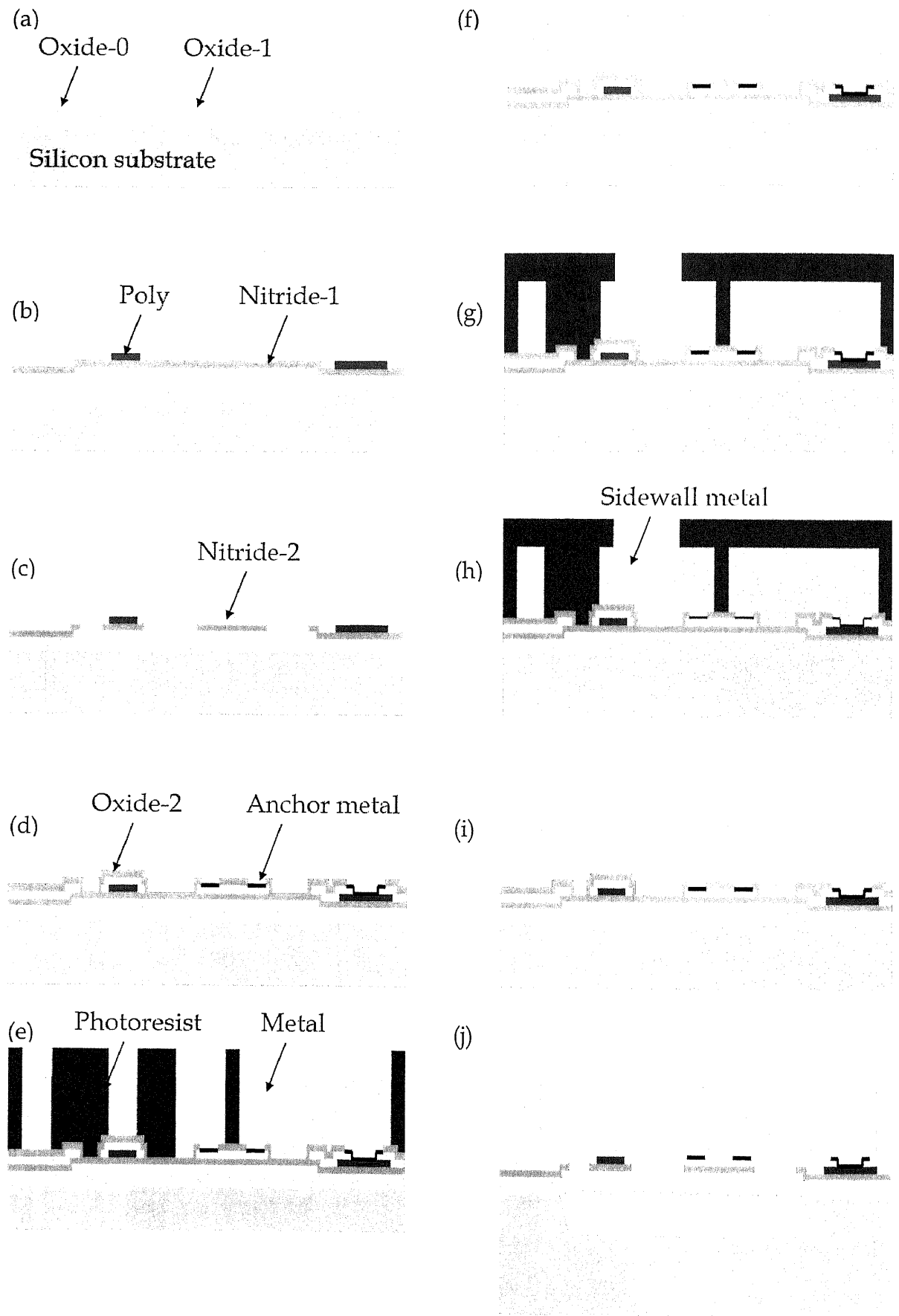


Figure A.2 Schematic cross-sectional views of the Metal MUMPs process-flow.

最終工程では、ステンシルとして使用したフォトリソは除去され、その後めっきのシード層として利用した金属薄膜層がリリースプロセスで除去される(Figure A.2 (i) 参照)。次に、犠牲層である PSG 層 (Oxide-1 と Oxide-2) と、絶縁層として設けた Oxide-0 が、49%フッ化水素水溶液を用いてウエットエッチングにより取り除かれる。また、シリコンウエハに空間層(トレンチ)が必要な場合には、水酸化カリウム水溶液(KOH)によるウエットエッチングによって、Figure A.2 (j) に図示するような形状で、深さ 25 μm の異方性エッチングを施すことが可能である。

参考文献

- [1] D. Koester, A. Cowen, R. Mahadevan, M. Stonefield, and B. Hardy, *PolyMUMPs Design Handbook Rev. 10.0*, MEMSCAP 2003.
- [2] K. Ishikawa, "MEMS-adjusted laser-to-fiber coupling," MS Thesis, University of Colorado at Boulder, 2001.
- [3] A. Cowen, B. Dudley, E. Hill, M. Walters, R. Wood, S. Johnson, H. Wynands, and B. Hardy, *MetalMUMPs Design Handbook Rev. 1.0*, MEMSCAP, 2002.

付 録 B

RF 解析

Million say the apple fell but Newton was the one to ask why.

何百万人もの人がりんごが落ちたというが、
なぜかとたずねたのはニュートンだけだった。

— *Bernard Balch*

バーナード・バルチ

B.1 FEM による解析

第 6 章における第一世代 RF MEMS スwitch の RF 特性解析は、まず CoventorWare の解析オプションである MEMElectro 及び MEMSHenry を用いて、キャパシタンス (Capacitance)、インダクタンス (Inductance)、レジスタンス (Resistance) を算出する^[1]。Figure B.1 に解析対象となる、三相マルチコンタクト式 Switch の解析モデルを示す。ここで、RF 解析に必要なのは入出力信号が伝搬する Switch 中央部の伝送線部 (パッド) と固定接触パッド、及び接触子とそれらが接続されている可動フレームの一部である。そこで、それらの部位を含む Switch 中央部のみを抜き取り、

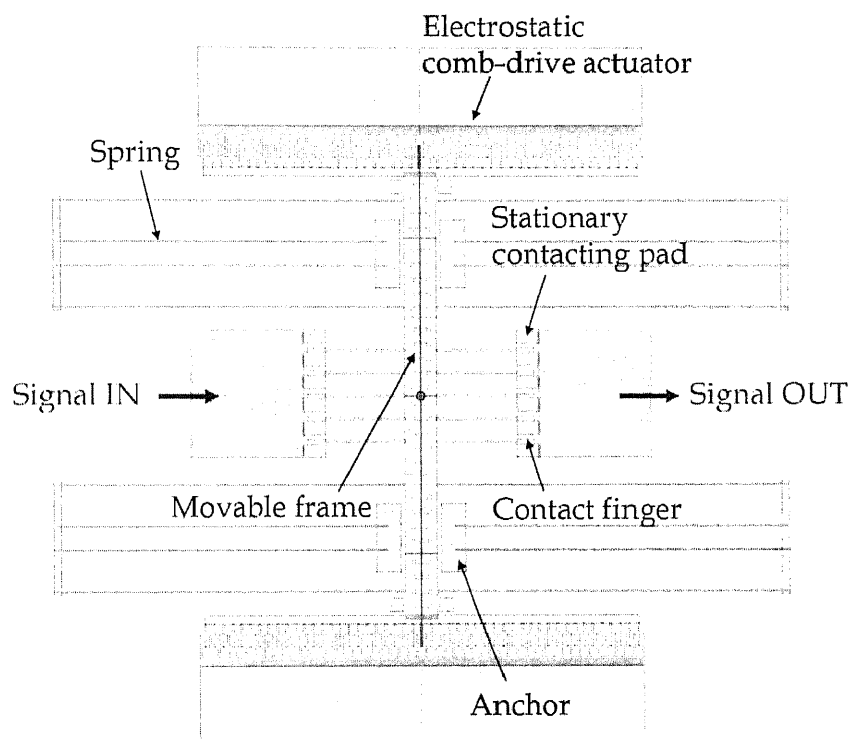


Figure B.1 FEM model of tri-state lateral multi-contact RF MEMS switch.

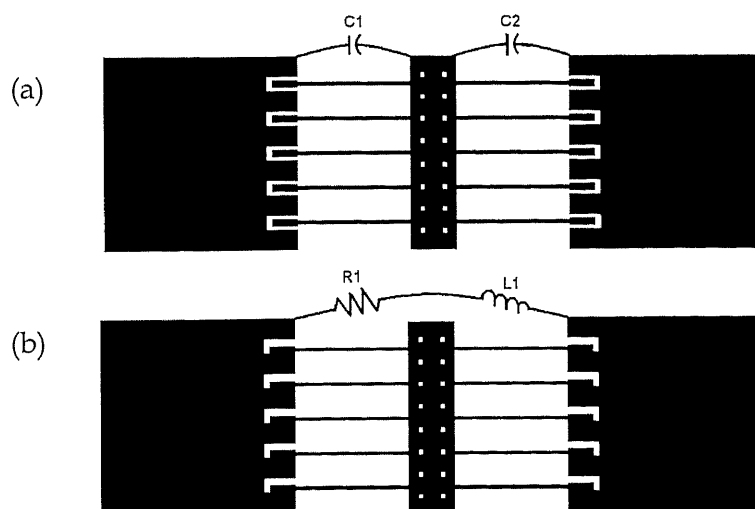


Figure B.2 Simplified FEM model of multi-contact switch (a) OFF state (b) ON state.

Figure B.2(a)(b)に示す簡易解析モデルを作成し解析を実施した。スイッチが OFF の場合、DC コンタクト型スイッチではスイッチ部がオープンの状態になっており、Figure B.2(a)に示すように、固定接触パッドと接触子の間に 2 つのキャパシタンス C_{off} を考えることができる。また、スイッチが ON ステートの場合、Figure B.2(b)に示すように固定接触パッドと接触子が接触した状態になるため、インダクタンス L_{on} とレジスタンス R_{on} がスイッチング部に発生することになる。これら解析モデルを用い、入出力接触子の数を変化させて算出した特性値を Table B.1 に示す。

Table B.1 Calculation results of switching characteristics.

Contact finger Configuration	OFF State	ON State	
	C_{off} (pF)	L_{on} (nH)	R_{on} (Ω)
5 × 5	0.076	1.082	0.158
4 × 4	0.061	1.141	0.188
3 × 4	0.055	1.187	0.214
3 × 3	0.049	1.230	0.240
1 × 1	0.027	1.650	0.650

B.2 理論式による RF 解析

ここでは、前節で算出したキャパシタンス、インダクタンス、レジスタンスをもとに挿入損失 (Insertion Loss) 及びアイソレーション (RF Isolation) を求める。三相マルチコンタクトスイッチはシリーズスイッチであり、その等価回路は Figure B.3 のように示される^[2-4]。

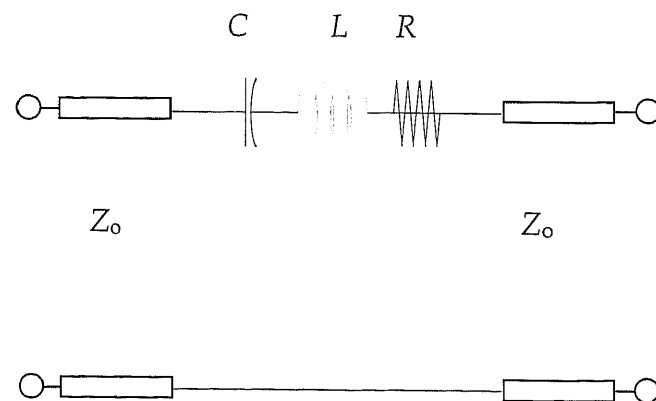


Figure B.3 Equivalent circuit model of series switch.

マイクロストリップライン構成におけるシリーズスイッチのインピーダンス (Impedance) Z は、次式のように近似表現することができる。

$$Z = R + jX = R + j(\omega L - 1/\omega C) \quad (B.1)$$

この式で ω は信号周波数である。このインピーダンスによる損失は、次式によって導出することが可能である。

$$Loss = \left| \frac{2Z + Z_0}{2Z} \right|^2 \quad (B.2)$$

ここで、 Z_0 は伝送線路の特性インピーダンス (Characteristic Impedance) である。ゆえに、損失は下式のようにになる。

$$Loss = 1 + \frac{R}{Z_0} + \frac{1}{4} \left(\frac{R}{Z_0} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{X}{Z_0} \right)^2 \quad (B.3)$$

(B.1)(B.3)式より、

$$Loss = 1 + \frac{R}{Z_0} + \frac{1}{4} \frac{R^2}{Z_0^2} + \frac{1}{4} \frac{\omega^2 L^2}{Z_0^2} + \frac{1}{4} \frac{1}{\omega^2 C^2 Z_0^2} - \frac{1}{2} \frac{L}{C Z_0^2} \quad (B.4)$$

と損失は表すことが出来る。この式は挿入損失やアイソレーションを計算するために用いられる損失の一般解の式であり、前節で導出した C 、 L 、 R の値を代入することによって、その回路の損失を計算することが可能となる。

OFF ステートの等価回路は Figure B.4 のようになり、この状態におけるアイソレーションはインダクタンスを無視することによって

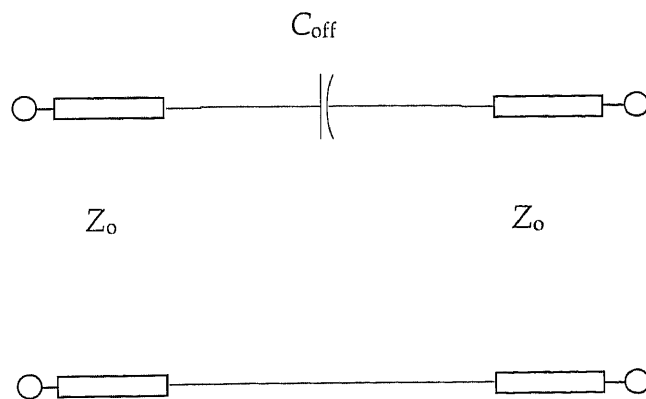


Figure B.4 Equivalent circuit model of OFF state.

$$IL = 1 + \frac{1}{4\omega^2 C_{off}^2 Z_0^2} \quad (B.5)$$

と表すことができる。

また、ONステートを示す等価回路はFigure B.5のようになる。この場合の挿入損失は、(B.4)式におけるキャパシタンスを無限大と設定することによって下式のようになる。

$$IL = 1 + \frac{R_{on}}{Z_0} + \frac{1}{4} \frac{R_{on}^2}{Z_0^2} + \frac{1}{4} \frac{\omega^2 L_{on}^2}{Z_0^2} \quad (B.6)$$

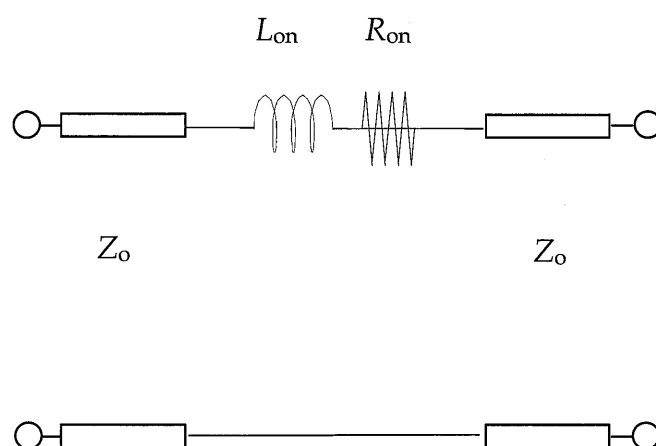


Figure B.4 Equivalent circuit model of ON state.

参考文献

- [1] *CoventorWare User Handbook*, Coventor Inc., 2005.
- [2] R. Ramadoss, "Design, modeling, and characterization of RF MEMS capacitive switches based on flexible printed circuit technology," Ph. D. Thesis, University of Colorado at Boulder, 2003.
- [3] G. M. Rebeiz, *RF MEMS theory, design and technology*, Wiley, 2003.
- [4] Personal talk and discussion with Prof. R. Ramadoss of Auburn University, from April to August, 2005.

公表一覧

学会誌学術論文

- [1] K. Ishikawa, J. Zhang, A. Tuantranont, V. M. Bright, and Y. C. Lee, "An integrated micro-optical system for VCSEL-to-fiber active alignment," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 103, pp. 109-115, 2003.
- [2] 石川浩嗣, 三木隆弘, 間宮宏樹, 于 強, "はんだフリップチップ実装と電熱熔解式支持梁を用いた静電マイクロミラーアレイの開発," *エレクトロニクス実装学会誌*, vol. 8, no. 2, pp. 108-115, 2005.

国際学会学術論文

- [1] K. Ishikawa, J. Zhang, A. Tuantranont, V. M. Bright, and Y. C. Lee, "An integrated micro-optical system for laser-to-fiber active alignment," *Proc. of 15th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2002)*, pp. 491-494, 2002.
- [2] K. Ishikawa, Q. Yu, and Y. C. Lee, "A MEMS-adjusted VCSEL-to-fiber optical coupling system," *Post-deadline Papers Technical Digest of 7th IEEE International OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2002)*, PD-2-6, 2002.
- [3] K. Ishikawa and Q. Yu, "8ch AWG multi/demultiplexer with MEMS variable optical attenuator," *Proc. of ASME InterPACK 2003*, No. 35145, 2003.
- [4] H. Mamiya, K. Ishikawa, and Q. Yu, "A research of actuators for micromirror control," *Proc. of ASME InterPACK 2003*, No.35123, 2003.
- [5] K. Ishikawa and Q. Yu, "An integrated AWG multi/demultiplexer with MEMS-VOA shutters," *Proc. of IEEE ITherm 2004*, pp. 523-528, 2004.
- [6] H. Mamiya, K. Ishikawa, Q. Yu, "A new optimal design method using CASE," *Proc. of IEEE ITherm 2004*, pp. 529-534, 2004.
- [7] T. Miki, K. Ishikawa, H. Mamiya, and Q. Yu, "Large displacement electrostatic micromirror fabricated using solder flip chip bonding," *Proc. of IEEE ITherm 2004*, pp. 535-540, 2004.
- [8] T. Miki, K. Ishikawa, H. Mamiya, and Q. Yu, "Early-stage analysis for MEMS structural optimization I : concept," *Proc. of ASME InterPACK 2005*, No. 73050, 2005.
- [9] K. Ishikawa, T. Miki, H. Mamiya, and Q. Yu, "Early-stage analysis for MEMS structural optimization II : its application to microrelay reliability," *Proc. of ASME InterPACK 2005*, No. 73049, 2005.

参考論文

- [1] K. Ishikawa and Y. C. Lee, "A MEMS-adjusted VCSEL-to-fiber coupling," 第16回エレクトロニクス実装学術講演大会講演論文集, pp. 295-296, 2002.
- [2] 石川浩嗣, "MEMSを利用したレーザ=ファイバアライメント," 平成14年8月度レーザ・量子エレクトロニクス研究会(LQE), 2002.
- [3] 石川浩嗣, 于強, Y.C.Lee, "はんだセルフアセンブリを利用した光軸調整用マイクロミラーの開発," MATE 2003 論文集, pp. 437-442, 2003.
- [4] 間宮宏樹, 石川浩嗣, 于強, "マイクロミラー駆動用アクチュエータの開発," MATE 2003 論文集, pp. 431-436, 2003.
- [5] 間宮宏樹, 石川浩嗣, 于強, "マイクロミラー駆動用アクチュエータの開発," 第17回エレクトロニクス実装学術講演大会講演論文集, pp. 301-302, 2003.
- [6] K. Ishikawa, Q. Yu, and Y. C. Lee, "VCSEL-to-fiber active alignment using MEMS technologies," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, SC-2-4, 2003. [招待講演]
- [7] 間宮宏樹, 石川浩嗣, 于強, "熱駆動トーションアルアクチュエータの挙動解析と最適設計," 日本機械学会平成15年度材料力学部門講演会(M&M'03)講演論文集, pp. 607-608, 2003.
- [8] 三木隆弘, 石川浩嗣, 間宮宏樹, 于強, "はんだフリップチップ実装を用いた大変位静電マイクロミラーの開発," 日本機械学会第16回計算力学講演会講演論文集, pp. 697-698, 2003.
- [9] 三木隆弘, 石川浩嗣, 間宮宏樹, 于強, "はんだフリップチップ実装を用いた大変位静電マイクロミラーアレイの開発," MATE 2004 論文集, pp. 295-300, 2004.
- [10] 間宮宏樹, 石川浩嗣, 于強, "CASE を用いた MEMS 最適設計手法の提案," 日本機械学会 2004 年度年次大会講演論文集, vol. 6, pp. 53-54, 2004.
- [11] 三木隆弘, 石川浩嗣, 間宮宏樹, 于強, "はんだバンプを用いたフリップチップマイクロミラーの挙動解析と最適設計," 日本機械学会平成16年度材料力学部門講演会(M&M'04)講演論文集, pp. 275-276, 2004.
- [12] 三木隆弘, 石川浩嗣, 間宮宏樹, 于強, "MESA を用いた MEMS 最適設計手法の提案," 日本機械学会第17回計算力学講演会講演論文集, pp. 797-798, 2004.

工業所有権

- [1] 右京強, 石川浩嗣, 間宮宏樹, 三木隆弘, "マイクロミラー素子及びその製造方法," 特願 2004-132586, Apr. 28, 2004.
- [2] 右京強, 石川浩嗣, 間宮宏樹, 三木隆弘, "マイクロマシンスイッチ," 特願 2004-161811, May 31, 2004.

依頼／招待講演一覧

- [1] 石川浩嗣, "MEMS for optical components," 日本機械学会 電子デバイス/電子実装における信頼性に関する研究分科会 RC202, 東京, Nov. 08, 2002.
- [2] K. Ishikawa, "MEMS in Japan," *Panel Session of ASME InterPACK 2003*, Maui, HI, July. 08, 2003.
- [3] 石川浩嗣, "MEMS optimal design using SDSS," 日本計算工学会 SDSS 研究分科会, 横浜, Sep. 08, 2003.
- [4] K. Ishikawa, "Micromachined RF switch with high mechanical reliability," *Interim Project Report at Air Force Institute of Technology*, WPAFB, OH, Oct. 07, 2004.
- [5] 石川浩嗣, "フリップチップ実装技術の MEMS への応用," エレクトロニクスフォーラム「鉛フリーはんだ実用化と高密度実装技術」, 神奈川産業総合技術研究所, Jan. 14, 2005.
- [6] 石川浩嗣, 三木隆弘, 于 強 "MESA ; MEMS early-stage analysis," 日本機械学会 エレクトロニクス実装における信頼性設計と熱制御に関する研究分科会 RC214, 東京, Apr. 20, 2005.
- [7] Session chair for the sessions: "Advanced packaging technologies" and "MEMS and nanoscale phenomena in electronics II," *ASME InterPACK 2003*, Maui, HI, 2003.

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、下記に紹介する方々をはじめとする多くの方の御指導、御助言、御援助を頂いたことに深く感謝いたします。

社会人学生として入学して以来三年間にわたり終始、研究に対して適切且つ丁寧な御指導を頂くと同時に研究以外についても多くを学ばせて頂いた于強助教授に心から感謝致します。また、白鳥正樹教授には、研究はもちろん論文作成にあたっても適切な御指導をして頂き感謝しております。両先生には横浜国立大学入学以前から、日本発条株式会社との共同研究、Colorado 大学修士課程への留学などにつきましても多大なる御協力を頂き、言葉だけでは感謝しきれません。また、研究室の澁谷忠弘助手、秘書の廣田光女史には、面倒なお願いをいつも快く引き受けて頂きました。心より感謝致します。

本論文を作成するにあたり、御教示を賜りました川井謙一教授、小豆島明教授、前川卓教授、丸尾昭二助教授に厚く御礼申し上げます。頂戴した御助言を反映させることによって、本論文をより良い形で完成させることができました。

また、本研究を行なうことに御理解を頂き、三年間にわたって御支援御指導をしてくださった日本発条株式会社人事部及び研究開発本部の全ての方々に深く感謝致します。会社における業務と大学院における研究の両立を心がけておりましたが、至らぬ所が多々有り多大な御迷惑をお掛けしたことを深くお詫び致します。

AFSOR の Mah Misoon 博士、宮崎隆雄博士には RF MEMS スイッチに関する研究の御提案を頂くとともに、研究内容に関して様々な御助言と御援助を頂き深く感謝しております。

Colorado 大学の Yung-Chang Lee 教授、Sporian Inc. の Kevin Harsh 博士、Auburn 大学の Ramesh Ramadoss 教授と Lia Almedia 女史、Air Force 工科大学の Paul Kladitis 教授には、本研究における MEMS デバイスの試作及び評価について、御助言と御協力を頂きました。心より御礼申し上げます。

本研究を共に行なって頂いた間宮宏樹氏（デンソー）、三木隆弘氏（住友電工）、山田昇平氏、池田勇人氏に深く感謝致します。彼らの協力なしでは本研究をまとめることは不可能でした。今後の研究の発展と御活躍を願っております。

最後に、週末における大学院での研究に理解を示し、様々な面で支えてくれた妻美穂子、娘心桃美に心より感謝致します。

2005 年 9 月 石川 浩嗣