

## ま え が き

ものをつくるのに最も基となるのは「つくりたいものの機能（アイデア）」とそれを「具体化するための手段」であろう。また新しい材料や手段が現れるとそれまで空想であったアイデアが実現し、世界が変わり、世の中の仕組みまでも変わってしまう。だからこそその時代を支えた材料の名前が、時代を代表するものとしてその時代の名称となっている（石器時代、青銅器時代など）。これらの材料は最初から時代を支えてきたわけではない。材料は選択と改良を繰り返されて役に立つ優れたものへと変貌<sup>へんぼう</sup>し、時代を支えるまでになった。例えば石器時代でもいろいろな石をたたいて割り、ハンマや矢尻に適した種類の石と加工法を探し出していた。このように目的にかなった性質をもつ材料を選択し、改良していく作業が材料評価である。

この本は、肉眼では見にくい、あるいは見えないほど小さな、しかも動く機械をつくる目的に適した材料を選び出し、評価を行う方法について述べている。この小さなものをつくるためのプロセスはおおよそ以下のように考えられる。

- (1) どのような機能のものをつくりたいか目的を明確化し、設計する。
- (2) シミュレーションを行い机上で改善や設計変更、材料選択を行う。
- (3) 候補材料が仕様を満たすか実際の作製プロセスを用いて特性を調べる。
- (4) 作製されたものの精度、寸法が設計と違わないか調べる。
- (5) 作製されたものを動かして運動機能が設計と違わないかを調べる。
- (6) 作製されたものを実用するために組み上げる接合やパッケージングを行う。

本書はこのプロセスに従って主な評価方法を以下の各章で述べる。

1章では、アイデアを実現するために書かれた設計図が実際に機能するか、材料や加工法が適切か、などをコンピュータ上で機能させ、改善や設計変更を机上で行うシミュレーションについて述べる。

2章では、機械を構成する微細な材料の弾性定数の評価方法について述べる。材料が微細になると体積に比べて表面積が非常に大きくなり、一般に知られている性質とは異なってくる寸法効果が表れる。この章では、ナノメートル寸法の膜や部品の弾性定数をどのように測るかについて、例を挙げて述べる。

3章では、2章と同様に微細化による寸法効果と、製造プロセスに大きく依存する強度の評価方法について述べる。

4章では、小さなものの寸法の測り方について述べる。被測定物が微細になれば測定誤差が全体の寸法に占める割合も非常に大きくなる。一般的に使われている小さなものの寸法を測る方法は必ずしも完全ではなく、その計測によって発生する形状や寸法の誤差について、例を挙げて述べていく。

5章では、目に見えないような機械の高速微細運動を正確に測定する方法について述べる。小さなものの運動は一般に小さくなるほど非常に早く、しかも小さくなっていく。特に、振動はkHzからGHz以上、変位はナノメートル以下になるものの評価法について述べる。

6章では微細なものを作製する過程で多く用いられる接着・接合の評価法をISO規格やJIS規格を参照しながら、力のかかり方で分類して述べていく。また、パッケージングや接合強度の求め方とともに、接合がデバイスの機能に及ぼす影響についても述べる。

本書では紙面の都合で最も基本的で限られた評価方法しか示せないが、他にも重要な評価方法として、3DナノX線CT（コンピュータトモグラフィ）、走査プローブ顕微鏡、電子顕微鏡、ナノインデンテーションなどがある。

本書が小さなもののものつくりの参考に少しでもお役に立てれば幸いである。

本書を刊行するにあたってコロナ社の方々には企画・編集など多大なご苦勞をおかけし心よりお礼を申し上げる。また、陰ながら多大なご助力をいただいた企業、大学の先生方、特に本書出版を提案いただいた曾根正人氏（東京工業大学）、および学生の方々に感謝申し上げます。

2015年5月

# 目 次

## 1. シミュレーション

1.1 はじめに	1
1.2 MEMS 研究でのシミュレーション	2
1.2.1 ダイアフラム型圧力センサ	2
1.2.2 MEMS デバイス	4
1.3 有限要素法とシミュレータ	4
1.3.1 有限要素法	4
1.3.2 シミュレータ	6
1.4 シミュレーション例	9
1.4.1 フィッシュボーン型共振器	9
1.4.2 MEMS スイッチ	13
1.4.3 評価用電子回路のシミュレーション	21
1.5 シミュレーションでの留意事項	23
1.5.1 ファイル保存の重要性	23
1.5.2 解析結果の検証	24
1.5.3 2次元モデルと3次元モデル	25
1.5.4 周波数解析での留意点	27
1.5.5 解析結果の活用	28
1.5.6 練習問題の活用	28
1.6 おわりに	28
引用・参考文献	29

## 2. 薄膜の弾性定数の精密計測法

2.1 はじめに	31
2.2 弾性定数の基礎	33
2.2.1 応力	33
2.2.2 ひずみ	35
2.2.3 弾性コンプライアンスと弾性定数	36
2.2.4 対称性と弾性定数マトリックス	37
2.2.5 工学弾性定数	39
2.2.6 薄膜の弾性定数マトリックス	41
2.3 従来の薄膜の弾性定数の測定法	44
2.3.1 マイクロ引張試験法	45
2.3.2 マイクロ曲げ試験法	46
2.3.3 振動リード法	47
2.3.4 表面超音波法	48
2.4 薄膜の弾性定数を正確に測定する方法	49
2.4.1 共振超音波スペクトロスコピー法 (RUS 法)	50
2.4.2 ピコ秒超音波法	54
2.4.3 膜厚を正確に測る：X線反射率測定	61
2.5 さまざまな薄膜の弾性定数の測定例	63
2.5.1 薄膜の弾性定数はかなり小さい	63
2.5.2 単結晶薄膜	64
2.5.3 薄膜の欠陥を癒す低温加熱処理	65
2.5.4 弾性定数がバルク値を超える薄膜・ナノ材料	66
2.5.5 薄膜の弾性異方性の観測例	70
2.6 おわりに	71
引用・参考文献	73

### 3. 微小材料や薄膜の材料強度評価法

3.1 はじめに	75
3.2 MEMS用薄膜の材料特性評価法標準規格	76
3.3 共通項目	77
3.3.1 寸法範囲	77
3.3.2 荷重	77
3.3.3 伸び・変形	78
3.3.4 試験片作製法	80
3.4 引張試験	81
3.4.1 試験方法	81
3.4.2 装置	83
3.4.3 試験片	84
3.4.4 試験条件	85
3.5 標準試験片	85
3.6 疲労試験	86
3.7 共振振動を用いたデバイス構造の疲労試験	87
3.7.1 試験機	87
3.7.2 試験片	89
3.7.3 試験条件	90
3.7.4 初期測定	90
3.7.5 疲労試験	91
3.8 おわりに	91
引用・参考文献	92

## 4. 3次元マイクロ構造体の形状計測法 および信頼性評価

4.1 はじめに	93
4.2 形状特性評価に関する標準規格	94
4.2.1 形状特性評価のためのJIS規格	94
4.2.2 形状特性評価のための国際標準規格	96
4.3 3次元マイクロ構造体の幾何形状計測	98
4.3.1 計測試料	99
4.3.2 電界放射型走査電子顕微鏡による計測例	102
4.3.3 走査型白色干渉計による計測例	108
4.3.4 共焦点走査型レーザ顕微鏡による計測例	112
4.3.5 触針式形状測定機による計測例	114
4.3.6 原子間力顕微鏡による計測例	118
4.4 計測値の不確かさ評価	122
4.4.1 基本的な考え方	122
4.4.2 平均トレンチ深さの不確かさ評価	125
4.5 おわりに	127
引用・参考文献	128

## 5. 動特性計測：微細なものの動的変形と振動評価

5.1 はじめに	129
5.2 MEMS共振器	131
5.2.1 機械振動	131
5.2.2 電気機械変換効率	132
5.3 レーザドップラー振動計を利用した振動測定	133

5.3.1	レーザドップラー振動計 (LDV) .....	133
5.3.2	振動測定評価装置 .....	134
5.3.3	面内外の振動モード測定 .....	137
5.3.4	ねじり振動モード測定 .....	139
5.4	移動電極 MEMS 共振器の動特性 .....	141
5.4.1	移動電極の原理 .....	142
5.4.2	シリコン梁共振器 .....	143
5.4.3	12 MHz ラメモード MEMS 共振器 .....	144
5.5	振動特性の電氣的評価 .....	147
5.5.1	インピーダンス測定 .....	147
5.5.2	狭ギャップ測定 .....	150
5.5.3	測定比較 .....	152
5.6	機械連結ジャイロスコープの動特性 .....	152
5.6.1	振動型ジャイロスコープ .....	153
5.6.2	振動測定法 .....	154
5.6.3	2×2 ジャイロスコープアレイ .....	155
5.7	おわりに .....	157
	引用・参考文献 .....	158

## 6. 微細なものの接着・接合強度評価

6.1	はじめに .....	159
6.2	微小構造物作製と接着・接合技術について .....	160
6.2.1	接着, 接合, 密着, 付着 .....	160
6.2.2	微細なものの接着・接合とは .....	161
6.3	接着・接合強度を支配する因子 .....	163
6.3.1	内的因子 .....	163
6.3.2	外的因子 一欠陥に伴う場合— .....	165

6.3.3	接着・接合部の形状による場合	165
6.4	従来の接着・接合強度評価の規格	167
6.4.1	接着・接合部に加わる力の様式	167
6.4.2	従来の寸法に対する接着・接合強度評価	168
6.5	微細なものの接着・接合強度評価	173
6.5.1	薄膜（1次元の微細化）の接着・接合強度評価	174
6.5.2	微細なもの（3次元の微細化）の接着・接合強度評価	180
6.5.3	異種材料の接合によるデバイスへの影響	189
6.6	おわりに	192
	引用・参考文献	192
索 引		193



# 1

## シミュレーション

### 1.1 はじめに

本章では、微小構造体や MEMS (micro electro mechanical systems, 微小電気機械システム) の動作解析, 設計のツールとして用いられるシミュレーション技術について解説する。コンピュータの飛躍的な発展により誰もが簡単にシミュレーション技術を利用できる環境になっている。解析対象のモデルと設定条件が適切であると解析解が得られる。しかし, シミュレーションの原理, シミュレータのアルゴリズム, 解析の限界, そして個々のシミュレータの得失などについての知識が乏しいと, 得られた解が物理的に妥当かどうかを判断することが困難になる。得られた解を鵜呑みにすることは危険であり, つねに解の検証が重要である。

その名称が示すように, MEMS デバイスでは電気工学と機械工学が合体されている特徴がある。このため, 構造力学を対象とした古典的なシミュレータでは解析に限界がある。近年, 複数分野の物理を連結して解析できるマルチフィジックスと呼ばれるシミュレータが登場している。機械, 電気, 回路, 音響, 電熱, 化学反応, めっきなどの現象を単一のシミュレータ内で解析できるので, MEMS 分野では強力なツールになると期待できる。

本章では, MEMS デバイスでのシミュレーションの実例を紹介するとともに, シミュレーションを行う上での留意事項をまとめた。

## 1.2 MEMS 研究でのシミュレーション

### 1.2.1 ダイアフラム型圧力センサ

1970 年ごろから研究開発が活発化した半導体センサは多くの分野で実用化が進んでいる<sup>1)†</sup>。中でもダイアフラム型圧力センサ（図 1.1）<sup>2)</sup> は、工業計測や自動車への応用を目指して、設計技術や製造プロセスの開発が進んでいた。このセンサはシリコンチップの中央部に形成された薄肉領域（ダイヤフラム）と、ここに配置された拡散抵抗（ピエゾ抵抗）で構成されている。図 1.2 に示すようにダイアフラムに圧力（主として空気圧）が印加されるとダイアフラムが変形し、誘起された圧縮・引張応力により拡散抵抗値が変化する（ピエゾ抵抗効果）ことを動作原理としている。ダイアフラムの形状は円形あるいは正方形であり、(1) 印加圧力による変形（応力解析）、(2) 抵抗値の変化（応力・電気変換の解析）、が解析対象であった。

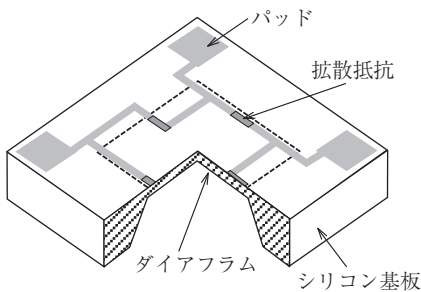


図 1.1 シリコンダイアフラム型圧力センサの構造

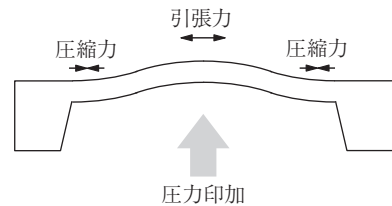


図 1.2 シリコンダイアフラム型圧力センサの動作原理

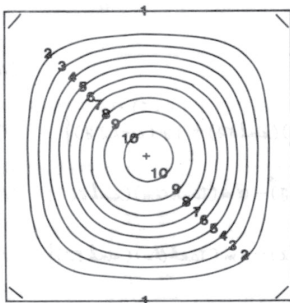
円形ダイアフラムの応力解析では数式による理論解<sup>3)</sup>が知られており、設計も比較的容易であった。一方、ダイアフラムの形状を正確に作製できる利点がある正方形ダイアフラムの場合には、理論解がないといわれていたが、板の理論<sup>4)</sup>を拡張することにより得られることが報告<sup>5)</sup>された。

<sup>†</sup> 肩付番号は章末の引用・参考文献の番号を表す。

これらの理論解では、(1) ダイアフラムの周辺は完全に固定、(2) ダイアフラム厚さは一定、(3) 機械物性は等方性、といった仮定が含まれている。実センサではこれらの仮定が成立せず（例えば、周辺領域も印加圧力に応じて変形する）、理論解と実測値との対応づけには限界があった。この結果、設計技術の高度化のために有限要素法を用いたシミュレーションが行われるようになった<sup>5),6)</sup>。

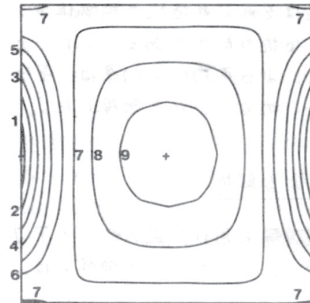
汎用の**構造解析プログラム**（例えば NASTRAN や SAP）は大型建造物の振動解析などのために実用化されてきた。実寸のモデルを製造しないで、計算で特性解析を行う **CAE**（computer aided engineering）であり、設計の信頼性と開発期間の短縮化に大きく寄与できた。MEMS はミリメートル以下の微小構造体で構成されているが、単にサイズが異なるだけであり、物性定数が同じと仮定すればこれらの構造解析プログラムが適用できる。この結果、ダイアフラムの実構造に対応した解析も可能となった。ただし、メッシュ作成も手作業であり、解析結果のビジュアル化もなく、すべてが手作業であった。また解析結果の妥当性については、理論解との比較検討により検証を行っていた。**図 1.3** に SAP で解析されたダイアフラムの変形と応力分布の例を示す<sup>7)</sup>。

応力解析と応力-電気変換解析とをリンクさせることにより、ピエゾ抵抗効果の異方性によるセンサ特性も解析された。さらに、ダイアフラムの大たわみ



最内周リングは  $8.55 \mu\text{m}$  の変形を表示

(a) ダイアフラム面の変形



最内周リングは  $9.2 \text{ kg/mm}^2$  の応力を表示

(b) 応力（横方向）の分布

**図 1.3** ダイアフラムの解析結果例

効果による非線形解析も報告<sup>8)</sup>され、シミュレーションによるセンサ設計が可能になった。

### 1.2.2 MEMS デバイス

1987年6月の国際会議で発表された可動機構を有するMEMS（当時はマイクロナシンと称されていた）は注目を集めた<sup>9),10)</sup>。シリコンを電子要素（トランジスタ）だけではなく機械要素としても利用<sup>11)</sup>することが特徴である。また、従来の機械製品は部品の製造後に組立工程が必要であったが、MEMSでは製造プロセスが終了した段階で組立ても完了しているという革新性もあった。

当初のMEMSは静電気力を駆動源としたモータ<sup>12)</sup>（回転や並進）が研究の中心であったが、その後、電磁力、圧電効果を組み合わせた機構も提案された。応用分野も機械から共振デバイス、スイッチ、プリンタヘッド、光走査のディスプレイに広がり、使用材料もシリコンから水晶、プラスチックまで広がっている。

この分野でも機械特性の把握や設計ツールとしてシミュレータが多用されている。ただし、構造体が小さくなると物性定数も変化するので、微小材料の試験法も併せて研究されている（3章参照）。また、製造工程に起因する寸法誤差（エッチング量の誤差など）は機械特性に大きく影響する。設計値からこの誤差を見込んだ実際の値を想定してシミュレーションすることも重要である。

## 1.3 有限要素法とシミュレータ

### 1.3.1 有限要素法

連続体の運動方程式は、外力  $F$ 、質量  $m$ 、減衰係数  $\zeta$ 、剛性（ばね定数） $k$  とすると

$$F = m \frac{d^2 x}{dt^2} + \zeta \frac{dx}{dt} + kx \quad (1.1)$$

この系のエネルギー保存則は

$$Fx = \frac{1}{2}m\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \frac{1}{2}kx^2 \quad (1.2)$$

一般に上式を解析的に解くことはできず、差分方程式に変換して有限要素法<sup>13)~15)</sup>などで解くことになる。

**有限要素法**では、構造体を小さなメッシュ（三角形あるいは四角錐<sup>すい</sup>など）に分割して、たがいに隣接するメッシュ間に差分方程式を適用する。構造体全体では大きなマトリックス演算を行うことになる。

図 1.4 にコンピュータで構造解析するときの手順を示す。

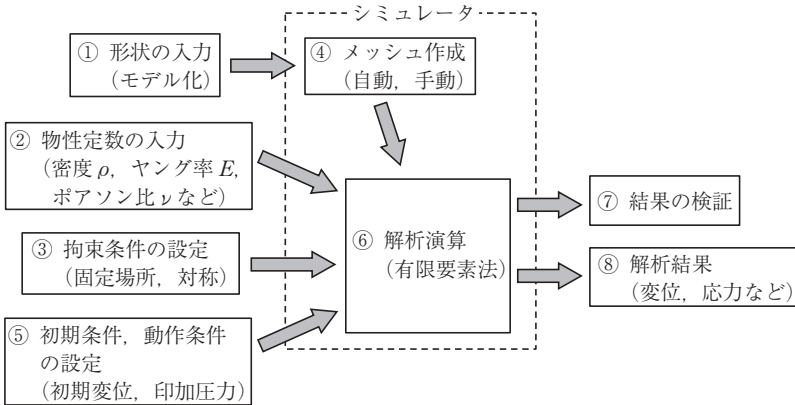


図 1.4 構造解析の手順

- ① **形状の入力** 解析対象のモデル化である。簡略化された構造から始め、順次複雑化するのがよい。また、構造体に対称性がある場合は半切断したモデルとし、③で対称性を付加する。
- ② **物性定数の入力** 既知のデータを入力する。
- ③ **拘束条件** 固定場所や構造対称の条件などを設定する。
- ④ **メッシュ作成** 有限要素法で最もキーになる作業であるが、シミュレータの自動作成機能を利用することが多い。三角形あるいは四角錐要素でメッシュを作成するのが一般的である。解析精度を上げるために四角形

や多面体要素を使うこともあるが、演算時間が長くなる。自動作成機能には、他の領域よりも微細な構造をもつ領域に対しては自動的にメッシュを小さくする機能もある。少ないメッシュ数で解析精度を上げるために、応力が集中する領域のメッシュを小さくする手法も用いられる。ただし、応力は境界条件として与えられるのでメッシュの自動作成機能は利用できない。メッシュ作成では、解析精度と演算時間という相反する要因を両立させることが重要である。

- ⑤ **初期条件、動作条件** 基準時刻での変形、応力などの初期条件と、構造体に外部から印加される力、圧力などを設定する。
- ⑥ **解析演算** シミュレータのソルバで演算が実行される。シミュレータによっては演算途中での誤差が大きくなると演算を停止することもある。この場合は、設定誤差を大きくして解を得てから、解の妥当性を検証する必要がある。
- ⑦ **結果の検証** ソルバは、物理的な意味とは無関係に単純に演算するだけであるから、与えられた条件下で必ず解を出力する。このため、解が妥当かどうか、物理的に正しいかどうかの検証は必須である。
- ⑧ **解析結果** 解析結果のデータ容量は数百 MB にも達することがある。これは、各メッシュでのすべての情報を含んでいるためである。変位や応力が必要な情報であるが、メッシュ接点の速度、加速度、反力なども解析後に得ることができる。

### 1.3.2 シミュレータ

現在では多くの汎用解析シミュレータが利用できる。ANSYS<sup>16)</sup>、ABAQUS<sup>17)</sup>、ADINA などである。これらの多くは他の機械系 CAD (AutoCAD, Pro/Engineer, SolidWorks など) とのデータ交換が可能な機能をもっている。機械系 CAD で作成したモデルデータを解析シミュレータへ取り込み、解析した結果を CAD へ反映させることができる。このため、設計から製造までデータを共有しながら一貫した流れを構築できる。近年では MEMS に特化したシミュレータも提

供されている<sup>18)</sup>。経済産業省の支援を受けて開発された国産の MemsONE シミュレータ<sup>19)</sup>もある。従来の構造解析シミュレータは機械構造体の解析に適していたが、MEMS では機械量以外に電気量、化学量なども解析対象とすることが要求されている。複数の物理量（マルチフィジックス）を解析対象としたシミュレータである。

本項では静電駆動型 MEMS を例としてマルチフィジックスシミュレータの有効性を述べる。図 1.5 は固定電極とばねで支持された可動電極で構成されるアクチュエータの例である。固定電極に電圧を印加して接地された可動電極を動かす。電極間に発生する静電気力は  $F_p$  と  $F_b$  と  $F_c$  である。 $F_p$  と  $F_b$  は平行平板間に作用する力であり、 $F_c$  は電極対向面積を大きくするように作用する力（comb drive force）である。

$$F_p, F_b = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A}{d_0^2} V^2 \tag{1.3}$$

$$F_c = \frac{\epsilon_0 t}{d_0} V^2 \tag{1.4}$$

$\epsilon_0$  は真空の誘電率、 $A$  は電極が対向する面積、 $d_0$  は電極間ギャップ、 $t$  は電極が対向する面の厚さ、 $V$  は印加電圧である。ANSYS などのシミュレータで解析するときは、構造と駆動条件から三つの力を算定し、この力に相当する圧力

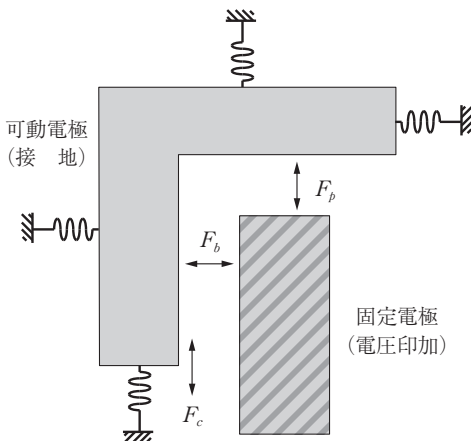


図 1.5 静電型 MEMS の構造例

(空気圧) を作用面に加えている。もし構造体表面に凹凸がある ( $d_0$  が場所によって異なる) 場合には、それぞれの  $d_0$  に対応した圧力を、それぞれの表面に垂直に与える必要がある。特に、丸みを帯びた凹凸の場合は圧力印加が複雑になる。

また、式 (1.3) と式 (1.4) では電極端部での電場の広がりがない。いずれも対向する電極の長さが無限大であり、その一部を切り出して表現したものである。実際の MEMS では、電極の端部では電場の 2 次元的な広がりがあるため、作用する力は式 (1.3) や式 (1.4) よりも大きな値となる。換算した圧力を印加するシミュレーション手法ではこれらの効果を考慮できない。このため、解析精度を上げるためには、印加する電圧から電場分布を計算し、この分布から力を計算する必要がある。ここにマルチフィジクスシミュレータを利用する利点がある。

近年、マルチフィジクスを謳ったシミュレータが登場してきているが、対象とする物理量には制限がある。COMSOL MEMS モジュール<sup>20), 21)</sup> は比較的広い対象でマルチフィジクス環境を提供している。図 1.6 は、空気中に図 1.5 の構造体を置き、固定電極に 10 V を印加、可動電極を接地した条件で解析し

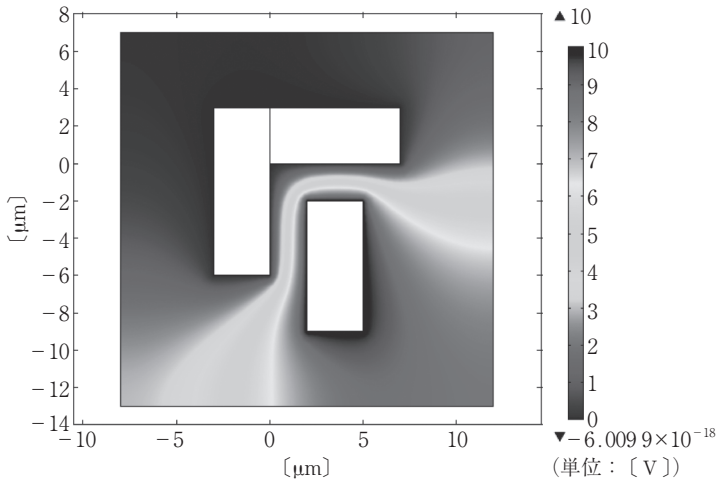


図 1.6 静電型 MEMS での電場分布 (カラー図をコロナ社 Web ページに掲載)



# 索引

<b>【あ】</b>	音響インピーダンス	58	金継ぎ	161	
圧縮せん断試験	172	音響デバイス	32	<b>【く】</b>	
アモルファス薄膜	41, 43	音速	44	空気ダンピング	136
アモルファス SiO <sub>2</sub> 薄膜	67	<b>【か】</b>		クロスカット法	176
粗さ曲線	95	開口数	110	<b>【け】</b>	
<b>【い】</b>	外的因子	163	けい線試験	179	
一定応力制御	88	界面転位	44	結合ばね	153
一定ひずみ制御	88	界面破壊	163	研削試験	177
移動電極	142	外力	33	原子間力顕微鏡	78, 119
陰極電解試験	179	開ループ法	89	<b>【こ】</b>	
イントリンジック因子	163	回路シミュレータ	21	工学弾性定数	40
インピーダンスアナライザ	21	拡張不確かさ	125	工学ひずみ	36
<b>【う】</b>	荷重針法	176	合成標準不確かさ	125	
薄板同士の T 形剥離試験	171	画像処理	79	剛性率	40
うねり曲線	95	片持ち梁	48	構造解析プログラム	3
<b>【え】</b>	割裂試験	170	硬度	31	
エクストリンジック因子	163	過渡特性	14	小型真空槽	136
エピタキシャル薄膜	41	<b>【き】</b>	国際電気標準会議	75	
エリクセン試験	178	機械インピーダンス	133	国際標準化	75
<b>【お】</b>	機械系 CAD	6	国際標準化機構	94	
オイラー・ベルヌーイ梁	131	機械式チャック	82	固有角振動数	131
モデル	131	幾何特性仕様	94	混合破壊	163
応力	33	基準強度	90	混合モード	167
応力集中	84	狭ギャップ効果	141	コンピュータシミュレーション	157
応力テンソル	34	凝集破壊	163	<b>【さ】</b>	
押し出し試験	178	共焦点走査型レーザ顕微鏡	112	最良推定値	123
オシロスコープ	21	共振子	87	材料特性評価	76
		共振周波数	47	材料破壊	163
		共振超音波スペクトロスコーピー法	50	サンプル支持台	134
		截金	161		
		切金	161		

<b>【し】</b>	せん断剥離試験	184	電界放射型走査電子顕微鏡	102	
時間依存解析	16	せん断ひずみ	36	電気機械変換効率	132
試験機	87	<b>【そ】</b>	電子回路シミュレータ	14	
試験片	84, 89	走査型白色干渉計	108	<b>【と】</b>	
実表面の断面曲線	94	双晶	68	動インピーダンス	133
ジャイロスコープ	153	測定曲線	94	動的手法	44
集合組織	39, 41, 43, 66, 70	測定断面曲線	94	等方体	66
自由振動	52	<b>【た】</b>	等方体材料	39	
集束イオンビーム	46	ダイアフラム型圧力センサ	2	<b>【な】</b>	
周波数応答特性	91	対称性	37, 39, 44	内の因子	163
触針式表面形状測定機	114	体積弾性率	40	内力	33
ショットピーニング試験	178	タイプAの評価法	124	ナノ双晶多結晶ダイヤモンド	68
シリコンMEMS共振器	131	タイプBの評価法	124	<b>【に】</b>	
シリコンねじり振動共振器	139	ダイヤモンド	31, 68	日本工業規格	76
シリコン梁共振器	141	たがね打込試験	178	<b>【ね】</b>	
シールド4端子法	148	多結晶Ptナノ薄膜	66	ねじり振動モード	139
振動型ジャイロ	87	多結晶材料	39	熱試験	179
振動型ジャイロスコープ	153	多結晶薄膜	41, 71	熱処理	31
振動特性の計測	129	多層薄膜	41, 44	<b>【は】</b>	
振動パターン	54	単結晶薄膜	41, 64	白色光干渉	79
振動リード法	47	単軸応力状態	40	破面解析	188
<b>【す】</b>	弾性異方性	32, 70	バレル研磨試験	178	
垂直応力	35, 40	弾性コンプライアンス	36	反共振	150
垂直ひずみ	36, 40	弾性定数	31, 37	半導体微細加工技術	75
ストロボスコピック計測	79	弾性定数マトリックス	38	汎用解析シミュレータ	6
寸法誤差の影響	46	弾性波フィルタ	32	<b>【ひ】</b>	
<b>【せ】</b>	断面曲線	95	光硬化樹脂	82	
静的手法	44	<b>【ち】</b>	引きはがし試験	178	
接合	160	柱状組織	43	ピコ秒共振法	58
接着	160	稠密面	41	ピコ秒超音波	55
接着・接合強度	163, 164, 167	超音波	44	ピコ秒超音波法	54, 66, 70
接着・接合強度評価	168	超音波共振法	45	ピコ秒パルスエコー法	57
接着剤	82	超音波パルスエコー法	44	微小電気機械システム	1, 75
接着破壊	163	<b>【つ】</b>	ひずみ	35	
接着部の曲げ強さ試験	173	つかみ具	81	ひずみ速度	85
接着法	82	突合せ接着の引張試験	169		
繊維強化複合材料	38	<b>【て】</b>			
せん断応力	35, 40	低温加熱処理	65		

非接触測定	48
非線形応答	146
引っかき硬度	176
引張試験	81, 179
引張試験法	44
引張せん断試験	171
標準試験片	85
標準不確かさ	123
標 点	84
表面エネルギー	41
表面超音波法	48
表面波	48
疲労試験	86, 91

**【ふ】**

フィッシュボーン型 MEMS デバイス	9
フォトリソグラフィ	80
深掘反応性イオンエッチ ング	93
不完全結合部	44, 64, 66
負スティフネス	132
不確かさ	122
不確かさ要因	123
付 着	160
付着性	176
フックの法則	37
ブリルアン振動	61
ブリルアン振動法	60, 69
プルオフ法	176
プローブ光	56

**【へ】**

米国試験材料協会	96
閉ループ法	89

へらしごき試験	177
ベルチェ温度特性評価装置	136
ベルチェ素子	136
変位ベクトル	35

**【ほ】**

ポアソン比	40
包含係数	125
細 金	161
ポンプ光	56

**【ま】**

マイクロ引張試験法	45
マイクロ曲げ試験法	46
巻付け試験	179
膜厚計測	80
曲げ共振	47
曲げ試験	179
摩擦攪拌接合	160
マルチフィジックス	1
マルチメータ	21

**【み】**

ミックスモード	168
密 着	160

**【め】**

面外振動モード	134
面心立方格子	37, 41
面直弾性定数	50, 70
面内振動モード	135
面内弾性定数	50, 53, 70
面内等方性	44
面内等方体材料	39

**【も】**

モード I	167
モード II	167
モード III	167
モード特定	51, 52

**【や】**

焼入れ	31
ヤング率	40, 43, 44

**【ゆ】**

有限要素法	5
-------	---

**【ら】**

ラメモード	144
-------	-----

**【り】**

リッツ法	53
立方晶系材料	38
臨界角	62
輪郭曲線	94

**【れ】**

レイリー減衰	16
レーザドップラー干渉計測	52
レーザドップラー振動計	79, 133
レーザドップラー変位計	21
連結ビーム	154

**【ろ】**

六方晶系材料	39
ロードセル	78, 83

**【A】**

ABAQUS	6
ADINA	6
ADS	14

AFM	119
After Pull-in	150
ANSYS	6
ASTM International	96
ASTM 規格	96

**【B】**

AutoCAD	6
Before Pull-in	149
BVD モデル	132

	<b>[C]</b>		<b>[L]</b>		<b>[S]</b>
CAE	3	LDV	133	SAP	3
CLSM	112	LTSpice	21	SAW	129
COMSOL MEMS モジュール	8, 16			SEMI	98
		<b>[M]</b>		SEMI 規格	98
CSI	108	MEMS	1, 75	SolidWorks	6
		MemsONE シミュレータ	7	SONNET	14
<b>[D]</b>		MEMS 共振器	131	Sonnet Lite	14
Deep-RIE	93	MEMS スイッチ	13	SPICE	21
				<b>[T]</b>	
<b>[F]</b>		<b>[N]</b>		TINA	21
FE-SEM	102	NA	110	T 形 90 度剥離試験	171
FIB	46	NASTRAN	3		
		NEMS	129	<b>[X]</b>	
<b>[G]</b>				X 線回折法	41
GPS	94	<b>[P]</b>		X 線反射率測定	58, 61
GUM	122	Pro/Engineer	6		
		<b>[Q]</b>		<b>[数字]</b>	
<b>[I]</b>		Q 値	90	180 度剥離試験	172
IEC	75			1 次元の微細化	174
IEC/JIS 規格	76	<b>[R]</b>		2 × 2 ジャイロスコープ	
ISO	94	Release	151	アレイ	155
		RUS/LDI 法	52, 53, 70	2 次元解析	25
<b>[J]</b>		RUS 法	50	3 次元解析	25
JCGM	122			3 次元の微細化	180
JIS	76				

—— 編著者・著者略歴 ——

**肥後 矢吉** (ひご やきち) : 6章

1968年 東京工業大学工学部金属工学科卒業  
1974年 東京工業大学大学院博士課程修了  
(金属工学専攻)  
工学博士  
1974年 東京工業大学精密工学研究所助手  
1987年 東京工業大学精密工学研究所助教授  
1993年 東京工業大学精密工学研究所教授  
2010年 東京工業大学名誉教授  
2010年 立命館大学客員教授  
2015年 立命館大学上席客員研究員  
現在に至る

**鈴木 健一郎** (すずき けんいちろう) : 5章

1980年 京大物理学部物理学専攻卒業  
1982年 京都大学大学院博士課程前期課程修了  
(原子核工学専攻)  
1982年 日本電気株式会社  
1993年 工学博士 (東北大学)  
2004年 立命館大学教授  
現在に至る

**荻 博次** (おぎ ひろつぐ) : 2章

1991年 大阪大学基礎工学部機械工学科卒業  
1993年 大阪大学大学院博士前期課程修了  
(物理系専攻)  
1993年 大阪大学助手  
1997年 博士 (工学) (大阪大学)  
1998年 米国標準技術研究所招聘研究員  
~99年  
2000年 大阪大学助教授  
2007年 大阪大学准教授  
2007年 科学技術振興機構さきがけ研究員 (兼任)  
~11年  
現在に至る  
2012年 日本学術振興会賞受賞

**石山 千恵美** (いしやま ちえみ) : 6章

1991年 横浜国立大学工学部物質工学科卒業  
1992年 東京工業大学技官  
1998年 東京工業大学助手  
2003年 博士 (工学) (東京工業大学)  
2007年 東京工業大学助教  
現在に至る

**谷川 紘** (たにがわ ひろし) : 1章

1968年 東京工業大学理工学部電子工学科卒業  
1970年 東京工業大学大学院修士課程修了  
(電気工学専攻)  
1970年 日本電気株式会社中央研究所  
2000年 NECロジスティクス株式会社  
2006年 株式会社ザイキューブ 顧問  
2007年 立命館大学客員教授  
現在に至る

**磯野 吉正** (いその よしただ) : 4章

1989年 立命館大学理工学部機械工学科卒業  
1991年 立命館大学大学院博士課程前期課程修了  
(機械工学専攻)  
1991年 三菱重工工業株式会社  
1993年 立命館大学助手  
1998年 博士 (工学) (立命館大学)  
1999年 立命館大学助教授  
2005年 立命館大学教授  
2008年 神戸大学教授  
現在に至る

**土屋 智由** (つちや としゆき) : 3章

1991年 東京大学工学部精密機械工学科卒業  
1993年 東京大学大学院修士課程修了  
(精密機械工学専攻)  
1993~ 株式会社豊田中央研究所  
2004年  
2002年 名古屋大学大学院博士後期課程修了  
(マイクロシステム工学専攻)  
博士 (工学)  
2004年 京都大学助教授  
2007年 京都大学准教授  
現在に至る

## 小さなものをつくるためのナノ/サブミクロン評価法

—  $\mu\text{m}$  から  $\text{nm}$  寸法のものをつくるための材料, 物性, 形状, 機能の評価法 —

Materials Evaluation Methods for Micro/nano Structures and Devices — Simulation of dynamic functions, and shape and mechanical property measurement methods including elastic, tensile, fatigue, vibration and bonding —

© Higo, Tanigawa, Suzuki, Isono, Ogi, Tsuchiya, Ishiyama 2015

2015年7月17日 初版第1刷発行

★

検印省略

編著者	肥後 矢吉
著者	谷川 紘
	鈴木 健一郎
	磯野 吉正
	萩博 次
	土屋 智由
	石山 千恵美
発行者	株式会社 コロナ社
	代表者 牛来真也
印刷所	萩原印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 **コロナ社**

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03) 3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-04643-4

(金) (製本: 愛子製本所)

Printed in Japan



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

落丁・乱丁本はお取替えいたします