

## 3.2 機構解析シミュレータの開発

MEMS における電磁駆動、静電駆動、熱型駆動等の駆動機構や動作機構を総合的に検証、評価するシステムを開発した。具体的には、力学解析、電磁界解析、圧電解析、伝熱解析、熱変形解析、雰囲気流体の影響解析およびその連成解析の基本的な数値解析を有限要素法等の技術により実現した。

### 3.2.1 片持ち梁、両持ち梁、ダイヤフラム構造等の力学解析(構造・振動、積層薄膜も含む)

#### (1) 研究開発の概要

MEMS は特定の機械的動作を機構として実現する。そのため MEMS の機構設計を行う上で、MEMS デバイス構造の挙動（振動・変形・応力特性等）を精度良く予測することが重要である。また、プロセス時の熱応力の問題等においても同様に扱うことが可能である。これらに対応するため、MEMS 構造体の固有な振動モードを解析するモード解析、動的過渡応答を解析する時刻歴応答解析および定常調和応答を解析する周波数応答解析の動的特性解析機能、および変形・ひずみを解析する静的解析機能を開発した。

以下に目標に対応する研究開発成果を示す。

#### <目標>

- 片持ち梁、両持ち梁、ダイヤフラム構造等の力学解析の開発内容を確定し、概念設計、詳細設計・プログラム設計を完了する。
- 設計作業を踏まえ、本機能単体の開発を完了する。
- フレームワークソフトへの結合およびシステム統合を実現させ、結合検証テストおよび統合検証テストを完了する。

#### <成果>

- 概念設計では本解析シミュレータの機能、システム構成を策定した。詳細設計・プログラム設計ではモジュールの構成、モジュールの機能、モジュール間のインターフェイス、有限要素解析の基礎式、物理・力学モデル、数値解法、モジュールの処理フローの設計およびモジュール検証テスト計画を検討した。
- MEMS 構造体の固有な振動モードを解析する固有値解析、動的過渡応答を解析する時刻歴応答解析および定常調和応答を解析する調和応答解析、および静的弾塑性解析について、各種要素の整備、プログラム開発を完了した。また、開発したプログラムを用いて力学解析の機能検証を行い、良好な結果が得られた。
- 力学解析の機能について、フレームワークソフトとの結合を完了し、結合検証テストおよび統合検証解析を完了した。検証解析では実験結果および商用コードの解析結果と比較し十分良く一致することを確認することで目標を達成できた。

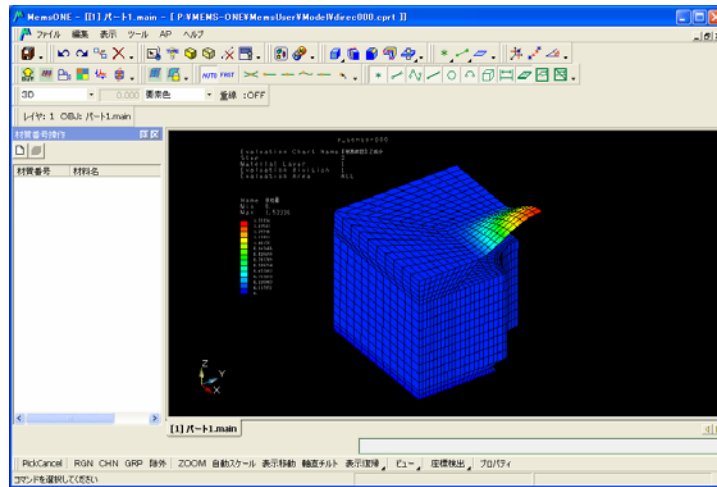


図 3-2-1：力学解析の解析表示例(圧力センサのダイヤフラム変形)

## (2) 研究開発成果の詳細

概念設計では本解析シミュレータの機能、システム構成を策定する。詳細設計・プログラム設計ではモジュールの構成、モジュールの機能、モジュール間のインターフェイス、有限要素解析の基礎式、物理・力学モデル、数値解法、モジュールの処理フローの設計およびモジュール検証テスト計画を検討した  
力学解析における要件抽出から、機能は以下の通りとした。

表 3-2-1：力学解析の機能概要一覧

解析モジュール	<ul style="list-style-type: none"> <li>・静的弾塑性解析</li> <li>・固有値解析、時刻歴応答解析、調和応答解析機能</li> </ul>
材料および変形特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・弾性</li> <li>・弾塑性</li> <li>・直交異方性</li> <li>・微小ひずみ大たわみ大変形</li> </ul>
要素タイプ	<ul style="list-style-type: none"> <li>－ 2次元要素： <ul style="list-style-type: none"> <li>・三角形 3 節点平面応力要素</li> <li>・四角形 4 節点平面応力要素</li> <li>・三角形 3 節点平面ひずみ要素</li> <li>・四角形 4 節点平面ひずみ要素</li> </ul> </li> <li>－ 軸対称要素： <ul style="list-style-type: none"> <li>・三角形 3 節点軸対称要素</li> <li>・四角形 4 節点軸対称要素</li> </ul> </li> <li>－ 3次元要素： <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 4 節点四面体要素</li> <li>・ 8 節点六面体要素</li> </ul> </li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>– シェル要素：・ 4 節点積層シェル要素</li> </ul>
解析手法	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 数値解法：・ 有限要素法</li> <li>– 連立方程式解法：・ 直接法</li> <li>– 非線形解析手法：・ Newton-Raphson 法</li> <li>– 直接積分法：・ Newmark-β 法</li> <li>– モード解析手法：・ subspace 法</li> </ul>
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>– 降伏条件：・ Von mises 降伏条件</li> <li>– 境界条件：・ 変位拘束・ 節点荷重、分布荷重、自重、体積力</li> </ul>

- 静的弾塑性解析

微小ひずみ大たわみ問題を考慮し、更新ラグランジュ法を用いて解析することとした。有限変形における速度形釣合式および弾塑性構成式を以下に示す。ここで、公称応力  $\Pi_{ij}$ 、 $\rho$  は密度、 $\rho b_i$  は体積力である。

$$\frac{\partial \dot{\Pi}_{ij}}{\partial x_j} + \rho \dot{b}_j = 0, \tau_{ij} = D_{ijkl}^{ep} \dot{\epsilon}_{kl}, D_{ijkl}^{ep} = 2G \left[ \delta_{ik} \delta_{jl} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \delta_{kl} - \alpha \frac{9G \sigma'_{ij} \sigma'_{kl}}{2\bar{\sigma}^2 (H' + 3G)} \right]$$

$G$  はせん断弾性係数、 $\nu$  はポアソン比、 $H'$  はひずみ硬化率、 $\sigma'$  は偏差応力、 $\delta$  は Kronecker のデルタである。以上の基礎方程式系に対して時刻  $t$  における配置を基準とした速度形仮想仕事の原理による有限要素法を用いて離散化した。

- 固有値解析

減衰がない多自由度系の自由振動方程式を固有値問題に帰着させ、固有値問題の解析方法に関して Subspace 法を用いた。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0, (-\omega^2[M] + [K])\{x\} = \{0\}$$

- 時刻歴応答解析

減衰のある多自由度系の自由振動方程式に関して、時間方向の直接積分法として Newmark  $\beta$  法を用いた。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\}$$

- 調和応答解析

定常振動外力による動的挙動を表す構造物全体の運動方程式を用いた。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f(t), (-\omega^2 M + i\omega C + K)u = f$$

以上の基礎方程式系を有限要素法によって離散化し、力学解析のプログラム開発を完了した。尚、積層シェル要素に対しては、シヤアロッキングとアワーグラスモードを回避するために仮定ひずみに基づいた定式化を採用した。

開発した力学解析プログラムに対し、単体機能検証を実施した。さらに、フレームワーク開発と共同して入出力接続部の開発・試験を行った。以下に、力学解析各機能の機能検

証について示す。

固有値解析に関しては RF-MEMS(オムロン株式会社)を模した形状に対して商用コード ABAQUS と4次までの固有値について比較した。両者の固有値の誤差は4%未満であり、よく一致した結果が得られた。

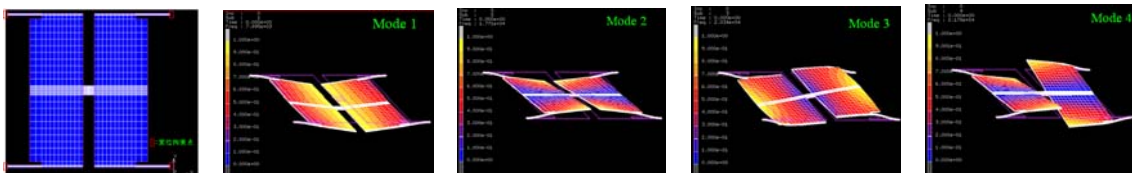


図 3-2-2 : 固有値解析の機能検証モデルと解析結果

調和応答解析では図 3-2-33-2-3 に示すカンチレバーを対象として固有値を計算し、理論解と商用コード MARC の計算結果のそれぞれと比較し、図 3-2-43-2-4、3-2-5 に示すように良好な結果を得た。

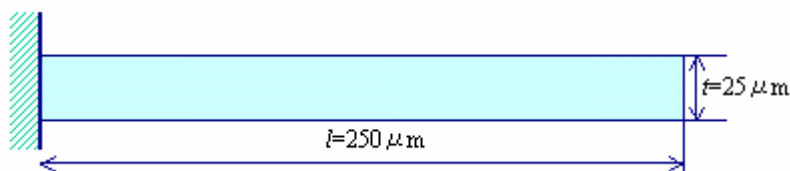


図 3-2-3 : 機能検証解析モデル

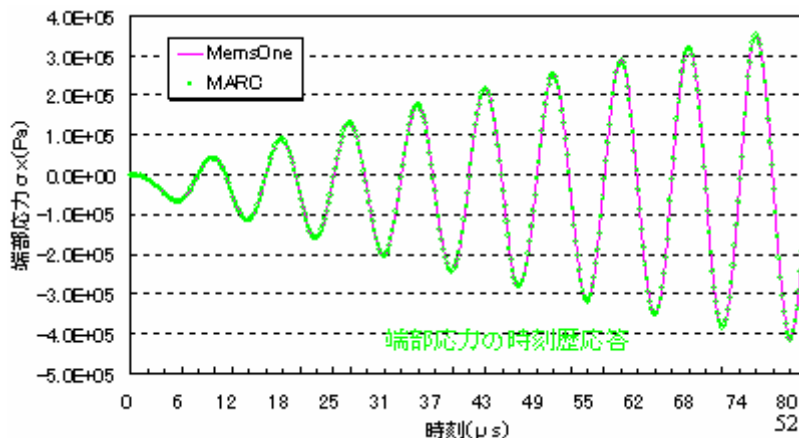


図 3-2-4 : 固有値解析機能検証結果(端部応力)

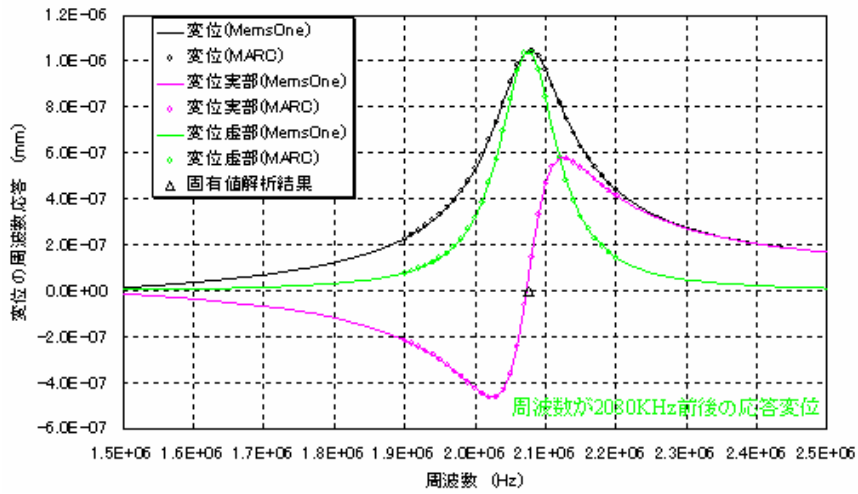


図 3-2-5 : 調和応答解析機能検証結果(変位の周波数応答)

静弾塑性解析では微小変形弾塑性問題と大たわみ問題について機能検証を実施した。微小変形弾塑性解析については、図 3-2-63-2-6 に示す円孔を持つ平面ひずみモデルを用いて、商用コード MARC と比較し、良好な一致を得た。

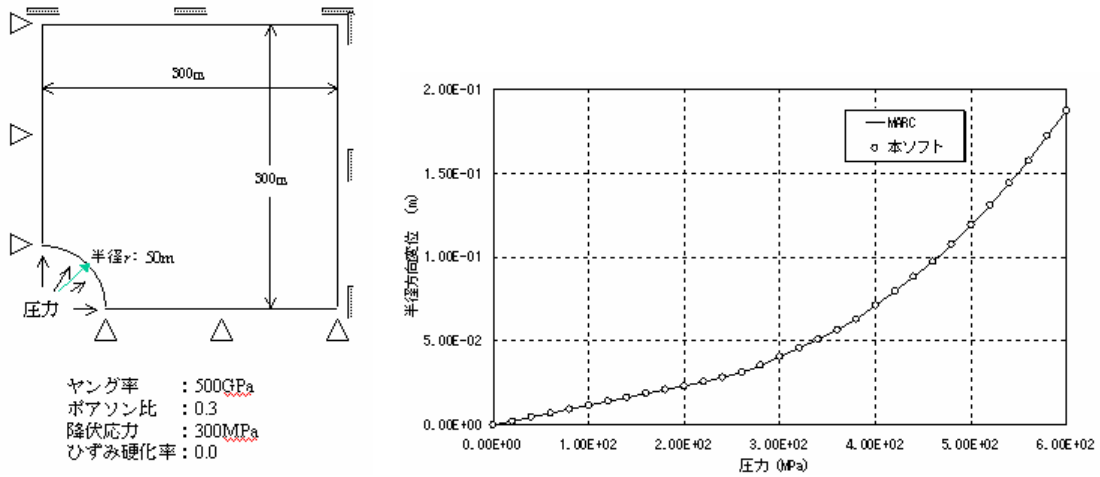


図 3-2-6 : 静弾塑性解析機能検証モデルと機能検証結果(半径方向変位)

大たわみ問題弾塑性解析については、異方性のシリコン材料のカンチレバーを対象とした計算を実施し、商用コード ABAQUS との比較を行い、良好な一致を得た。

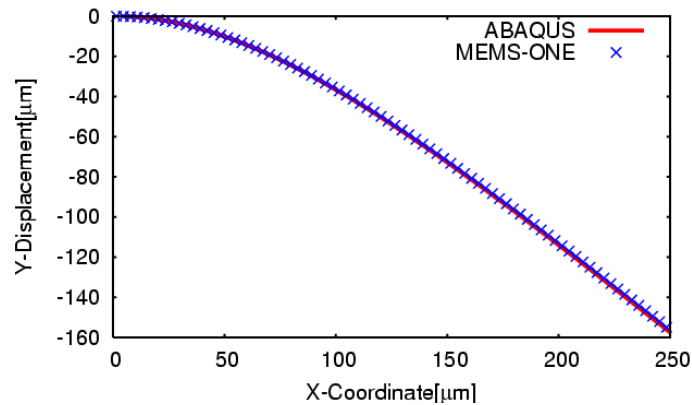


図 3-2-7：大たわみ問題弾塑性解析の機能検証結果(垂直方向変位)

次に検証解析として圧力センサと光スキャナを対象とした評価検証を実施した。  
 圧力センサ(図 3-2-83-2-8：松下電工株式会社)を解析対象とした弾塑性解析を実施した。

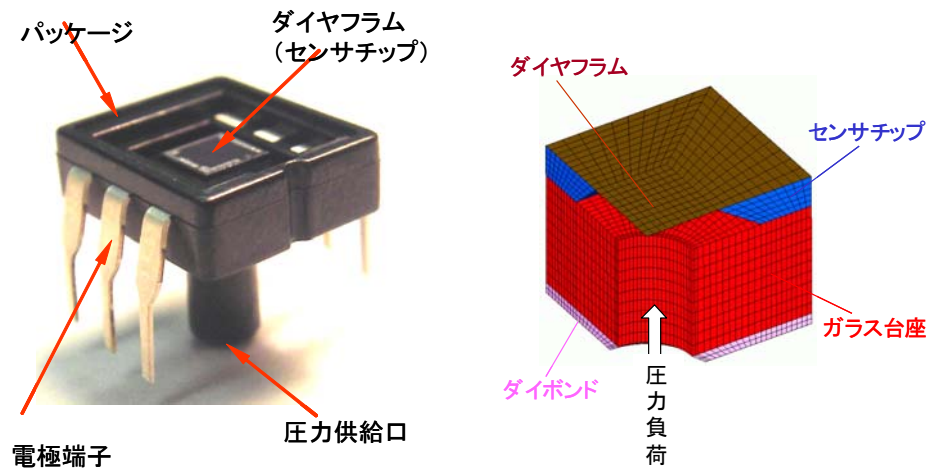


図 3-2-8：検証で使用した圧力センサとメッシュ分割

圧力センサのダイアフラムを中心に、対称性を考慮した 1/4 解析モデルを作製し、解析モデルとした。圧力を入力として実験結果から得られたダイアフラムの変位で評価を行った。図 3-2-93-2-9 に示すように、実験結果のダイアフラム変位と解析結果は良好に一致した。また、図 3-2-10 より商用コード ABAQUS の結果とも一致した。

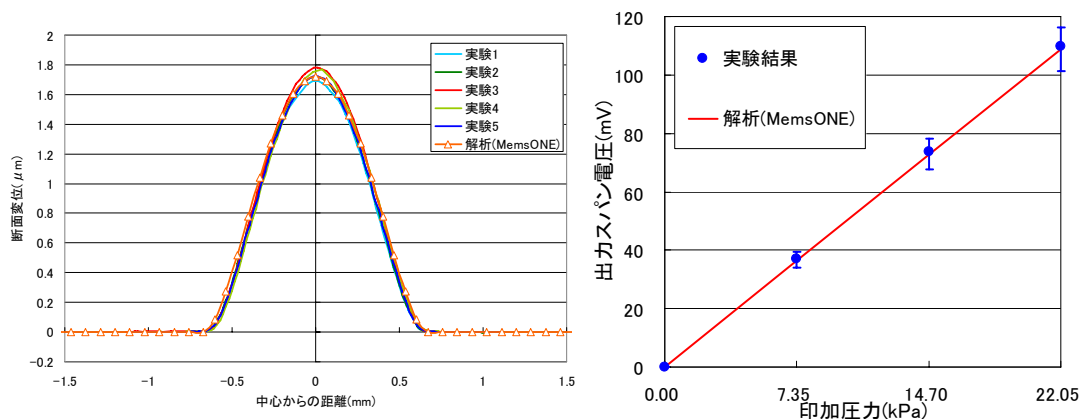


図 3-2-9 : ダイアフラムの変位(実験結果と解析結果)

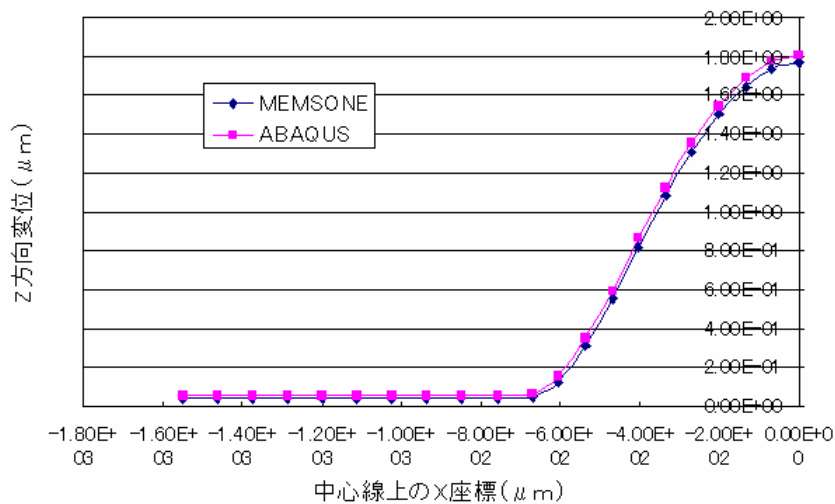


図 3-2-10 : ダイアフラムの変位(商用コードとの比較)

次に、光スキャナ(図 3-2-11 : オリンパス株式会社)のトーションバー型ミラー構造の可動部中央をロードセルによって押圧し、その荷重と変位の関係を実験および商用コード ANSYS と比較した。解析結果と実験結果の誤差は 2% 未満であり、一致した結果が得られ、目標を達成した。

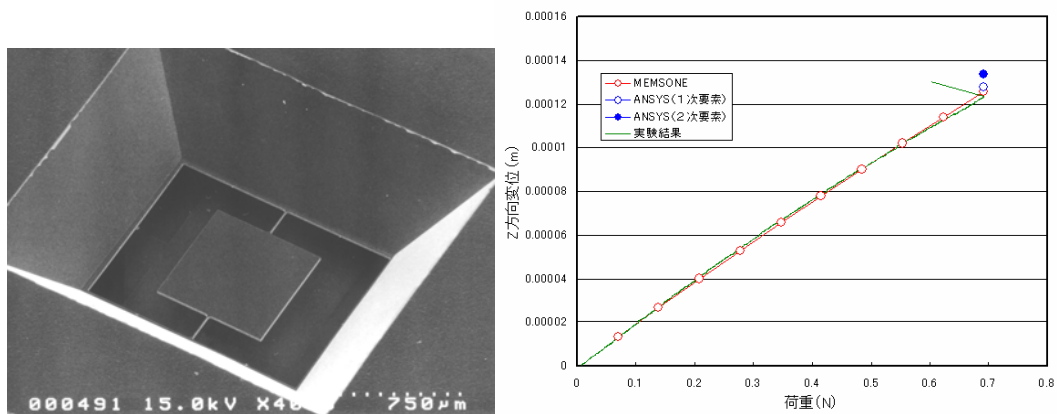


図 3-2-11：検証解析で使した光スキャナ構造と検証結果(ミラーの Z 方向変位)

また、静電駆動型光スキャナをねじり偏向させるように駆動電圧を加え（オフセット電圧とこれに正弦波状で逆位相の電圧を二電極に重畳）、周波数応答を測定することにより、振動モードごとの共振周波数を実験で求めた。商用コード CoventorWare の解析結果と比較した。結果は誤差 5 % 未満であり、一致した結果が得られた。また、表 3-2-2 に示すように実験結果として得られた Mode1、Mode3、Mode5 の周波数とも良い相関が得られ、目標を達成した。

表 3-2-2：共振周波数解析検証結果

	Mode1[Hz]	Mode3[Hz]	Mode5[Hz]
実験結果	4428	22555	64537
CoventorWare	4425	27656	64875
MEMSONE	4478	26983	64449

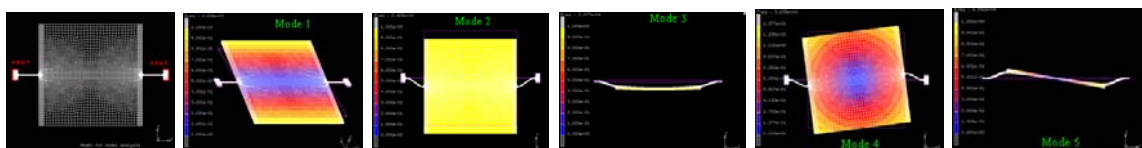


図 3-2-12：解析から得られた共振モード

### (3) 研究開発成果の意義

開発された力学解析を用いることで、MEMS デバイス構造の挙動（振動・変形・応力特性等）を精度良く予測することが可能となり、MEMS デバイスの構造設計に対して効率化が図れる。

## 3.2.2 電磁界解析

### (1) 研究開発の概要

光 MEMS や RF-MEMS の駆動や検出機構等、多くの MEMS 構造の設計、評価において



磁界解析、静電界解析はデバイスの構造を決定する重要なポイントである。このような問題に対応するため、電界解析、線形交流定常磁界解析、非線形静磁界解析、非線形過渡磁界解析、非線形定常時間周期磁界解析、電流解析、周波数応答解析電磁界解析の機能を開発した。

以下に目標に対応する研究開発成果を示す。

<目標>

- 電磁界解析シミュレータの概念設計および詳細設計・プログラム設計を完了する。
- 設計作業を踏まえ、電磁界解析シミュレータ単体の開発を完了する。
- 電磁界解析シミュレータのフレームワークソフトへの結合およびシステム統合を実現させ、結合検証テストおよび統合検証テストを完了する。

<成果>

- 概念設計では要件抽出、モジュールの入力項目、出力項目、機能、システム構成を決定した。詳細設計・プログラム設計ではフレームワークソフトとの入出力形式、モジュールの機能の実装となる解析モデル、数値解法、プログラム構成、処理およびデータフローの策定、およびモジュール検証テスト計画を検討した。
- 設計に従い、電磁界解析のプログラム開発を完了した。また、開発したプログラムを用いて電磁界解析の機能検証を行い、良好な結果が得られた。
- 電磁界解析の全種類の機能について、フレームワークソフトとの結合を完了し、結合検証テストおよび統合検証解析を完了した。

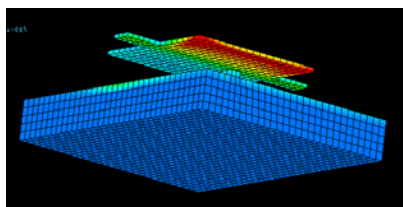


図 3-2-13 : 電界解析例(RF-MEMS の電界分布)

## (2) 研究開発成果の詳細

概念設計では要件抽出、モジュールの入力項目、出力項目、機能、システム構成を決定した。詳細設計・プログラム設計ではフレームワークソフトとの入出力形式、モジュールの機能の実装となる解析モデル、数値解法、プログラム構成、処理およびデータフローの策定、およびモジュール検証テスト計画を検討した。

電磁界解析における要件抽出から、機能は以下の通りとした。

- 電界解析 (3次元)

外部からある導体領域に電位を与えたとき、導体の周辺に分布する電位および電界を3次元で解析する。(図 3-2-14)

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \phi) = -\rho$$

- 非線形静磁界解析 (2次元/軸対称3次元)

直流電流の周囲に発生する磁界を2次元で解析する。電流は解析面に垂直方向とし、磁界は解析面に平行な向きとする。(図)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_{22} \frac{\partial A}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_{21} \frac{\partial A}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_{12} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_{11} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J_0(x, y)$$

- 非線形過渡磁界解析 (2次元/軸対称3次元)

時間変化する電流の周囲に発生する磁界を2次元で解析する。磁気ヒステリシスのモデルには **Potter-Schulian** モデルを用いる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_{22} \frac{\partial A}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_{21} \frac{\partial A}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_{12} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_{11} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

- 線形交流定常磁界解析 (2次元/軸対称3次元)

正弦的に時間変化する電流の周囲に発生する磁界を2次元で解析する。対応する材料磁気特性は線形とする。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_{22} \frac{\partial \tilde{A}}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \nu_{21} \frac{\partial \tilde{A}}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_{12} \frac{\partial \tilde{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \nu_{11} \frac{\partial \tilde{A}}{\partial y} \right) = j\omega\sigma\tilde{A} + \sigma \frac{d\tilde{\phi}}{dz}$$

- 非線形定常時間周期磁界解析 (2次元/軸対称3次元)

非線形過渡磁界解析に対し、時間方向の周期性を考慮して閉じた時間領域に対しての解析を行う。時間方向の境界条件としては  $A(t) = -A(t+T/2)$  が全ての時刻に対して成立するという条件を仮定する。

- 電流解析 (3次元)

有限な電気抵抗率を持つ導体内部における電流分布を3次元有限要素法で求める。導体表面の複数の点において電位を指定したとき、導体内部を流れる電流ベクトルと静電ポテンシャルを求める。

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) = \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

- 周波数応答解析電磁界解析 (2次元/軸対称3次元)

線形交流定常磁界解析の機能について、周波数をある下限値から上限値までステップ毎に増加させ、指定した点における周波数応答を調べるための機能である。

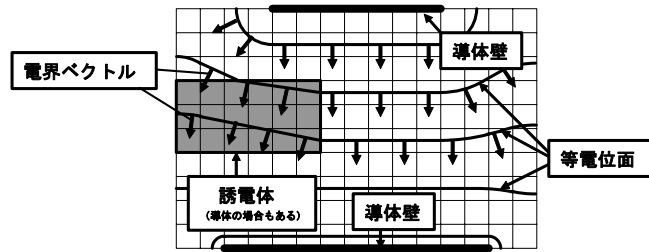


図 3-2-14 : 電界解析の概要

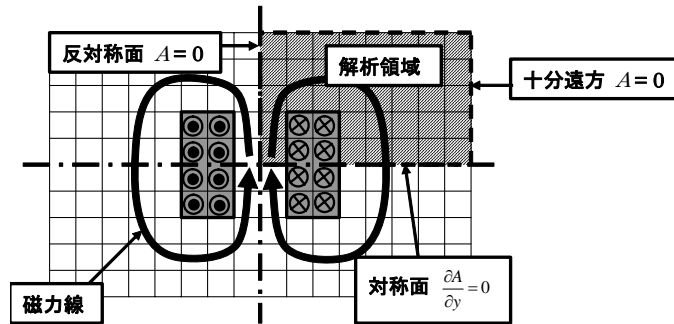


図 3-2-15 : 静磁界解析の概要

以上の基礎方程式系を有限要素法によって離散化し、電磁界解析のプログラム開発を完了した。

開発した電磁界解析プログラムに対し、単体機能検証を実施した。さらに、フレームワーク開発と共同して入出力接続部の開発・試験を行った。電界解析の単体機能検証として図 3-2-16 に示す無限長円筒形電極内部の静電ポテンシャルについて、理論解と解析解との比較を実施した。

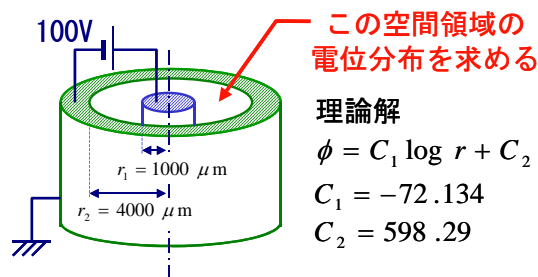


図 3-2-16 : 電界解析機能検証モデル

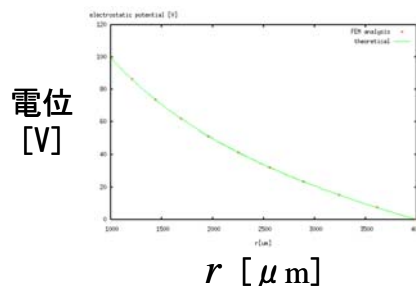


図 3-2-17：電界解析機能検証結果

理論解と数値解析解と比較した結果を図 3-2-17 に示す。図 3-2-17 より  $10^{-3}$  程度の精度で両者は一致していることが確認できた。電界解析については他に無限大平板コンデンサ内部の電界と電極に加わる静電力についても機能検証を実施し、良好な解の一致を確認した。

磁界解析の単体機能検証として、交流電流の周囲にできる定常磁界解析を実施した。図 3-2-18 に解析モデルを図 3-2-19 に解析結果を示す。

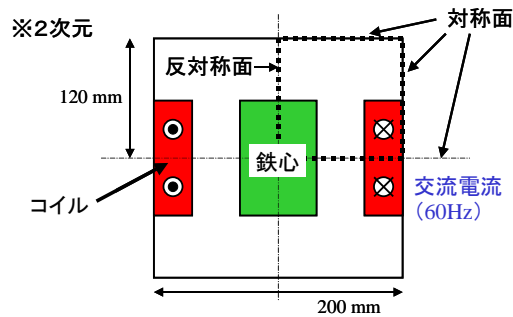


図 3-2-18：磁界解析機能検証モデル

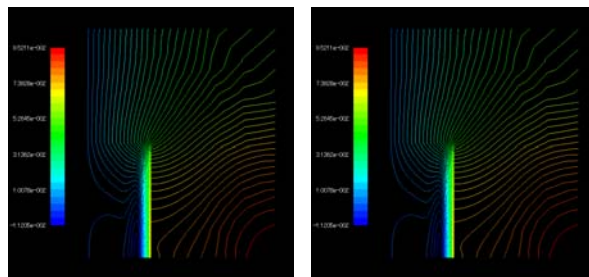


図 3-2-19：磁界解析機能検証結果

電流の周辺に磁界が発生するが、渦電流が発生する鉄心表面周辺において磁力線が密集し、導電性の鉄心内部には磁力線があまり入り込まない様子が分かる。

次に検証解析を実施した。磁界解析の検証解析として、図 3-2-20 に検証解析で用いた RF-MEMS のモデル構造を示す。RF-MEMS の信号線に交流電流を流し、デバイス近傍に発生した磁界強度を実測(オムロン株式会社)と解析結果を比較することで実施した。入力電流は 10mW、周波数は 1.8GHz とした。

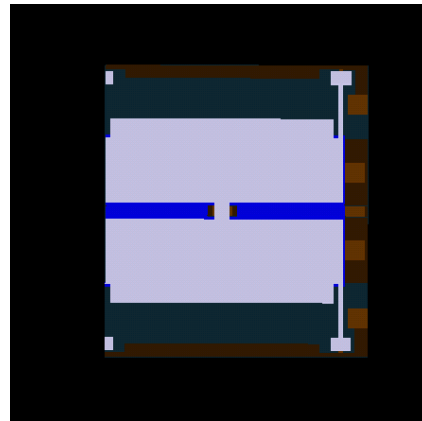
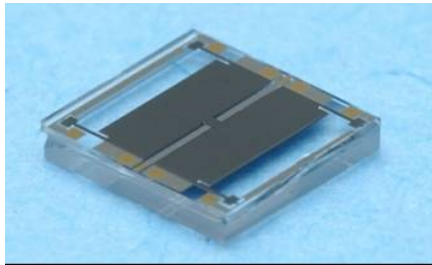


図 3-2-20 : 検証解析デバイス(オムロン株式会社)と解析 CAD モデル

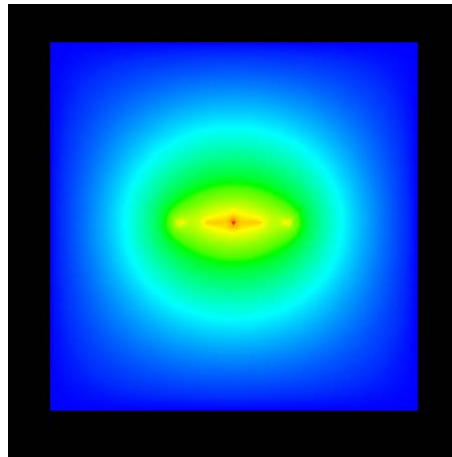


図 3-2-21 : ベクトルポテンシャル分布

実験結果におけるループプローブ出力電圧  $78.4\text{dB}\mu\text{V}$  に対し、電磁界解析で計算した解析結果はループプローブ中心位置で  $95.3\text{dB}\mu\text{V}$  であり、両者は 22%の乖離であり目標を達成できた。

尚、電界解析に対する検証解析は連成解析にて実施した。

### (3) 研究開発成果の意義

開発された電磁界解析を用いることで、光 MEMS や RF-MEMS の駆動や検出機構等、多くの MEMS 構造の設計、評価を数値的に予測することが可能となり、MEMS デバイスの構造設計に対して効率化が図れる。

## 3.2.3 圧電解析

### (1) 研究開発の概要

圧電材料は電圧が負荷されるとひずみ、荷重が加えられると電位が発生する特性をもっている。この特性を利用して圧電駆動による圧力センサ、発振器等の MEMS デバイスが開

発されている。圧電材料を用いた MEMS デバイスに対応するため、圧電応力定数テンソルを用いた圧電解析の基本方程式により電界と 0 力学解析（応力-ひずみ）との連成解析を行う機能を開発した。

以下に目標に対応する研究開発成果を示す。

<目標>

- 圧電解析シミュレータの開発内容を確定し、概念設計、詳細設計・プログラム設計を完了する。
- 設計作業を踏まえ、圧電解析シミュレータの開発を完了する。
- 圧電解析シミュレータのフレームワークソフトへの結合およびシステム統合を実現させ、結合検証テストおよび統合検証テストを完了する。

<成果>

- 概念設計では圧電解析シミュレータの機能、システム構成を策定し、詳細設計・プログラム設計では圧電解析シミュレータを構成するモジュールの構成、モジュールの機能、モジュール間のインターフェイス、有限要素解析の基礎式、物理・力学モデル、数値解法、モジュールの処理フローの設計およびモジュール検証テスト計画を検討した。
- 設計に従い圧電応力定数テンソルを用いた圧電解析の基本方程式を用いた力学解析と電界解析の連成解析機能の開発を行った。また、機能検査用圧電デバイスモデルによるサンプルデータを用いて圧電解析機能における機能検査、検証を行い、ソフトウェアの動作、解析結果の確認を行った。
- 圧電解析シミュレータに関してフレームワークソフトとの結合検証テストおよび統合検証テストを完了した。検証解析では実験結果と解析結果の比較から十分良く一致していることを確認した。

## (2) 研究開発成果の詳細

概念設計では圧電解析シミュレータの機能、システム構成を策定し、詳細設計・プログラム設計では圧電解析シミュレータを構成するモジュールの構成、モジュールの機能、モジュール間のインターフェイス、有限要素解析の基礎式、物理・力学モデル、数値解法、モジュールの処理フローの設計およびモジュール検証テスト計画を検討した。

圧電解析は、連続体の中の応力場と電場の連成解析として実施される。したがって、その基礎方程式も応力場と電場の二つの方程式の連立方程式となる。

$$\frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} + b_i = 0 \quad \text{on } V, \quad \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + Q = 0 \quad \text{on } V.$$

ここで、 $\sigma_{ij}$  は真応力テンソル、 $b_i$  は単位体積当たりの物体力、 $q_i$  は電気変位ベクトル、 $Q$  は電気流束である。また、応力構成式と電気変位構成式には次式を用いた。

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\} + [e]\{\nabla\phi\}, \{q\} = [e]^T\{\varepsilon\} - [S]\{\nabla\phi\}.$$

[C]は応力-ひずみマトリクス、[e]は圧電応力マトリクス、[S]は誘電率マトリクス、 $\phi$ は静電ポテンシャルである。

以上の基礎方程式系を材料非線形と幾何学的非線形の両方の非線形性を考慮するために、増分形による有限要素法によって離散化し、圧電解析のプログラム開発を完了した。

開発した圧電解析プログラムに対し、単体機能検証を実施した。さらに、フレームワーク開発と共同して入出力接続部の開発・試験を行った。単体機能検証は、検証対象として文献 (Journal of Sound and Vibration, 1999, 266(3), 519-547) におけるラミネートプレートを解析対象とした逆圧電効果と圧電効果について実施した。図 3-2-22 に機能検証で用いたラミネートプレートの構造と境界条件を示す。図 3-2-23 から理論解と解析結果は十分良く一致していることが確認できた。

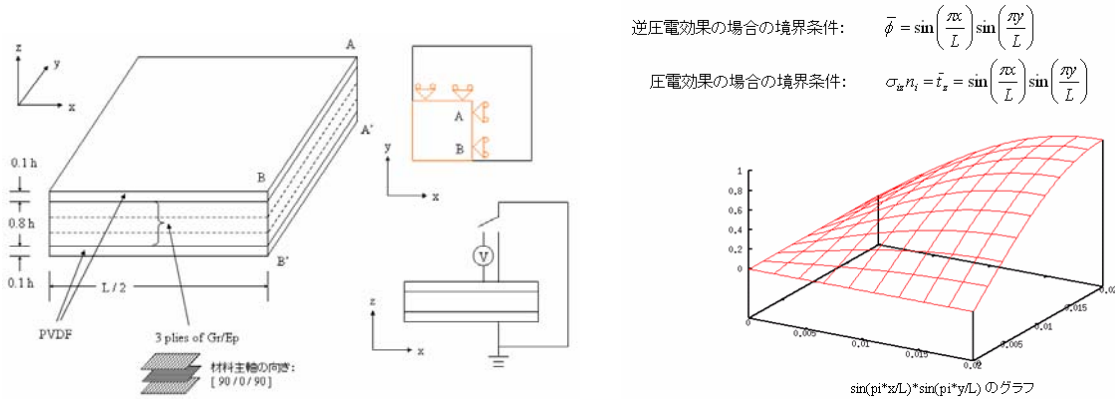
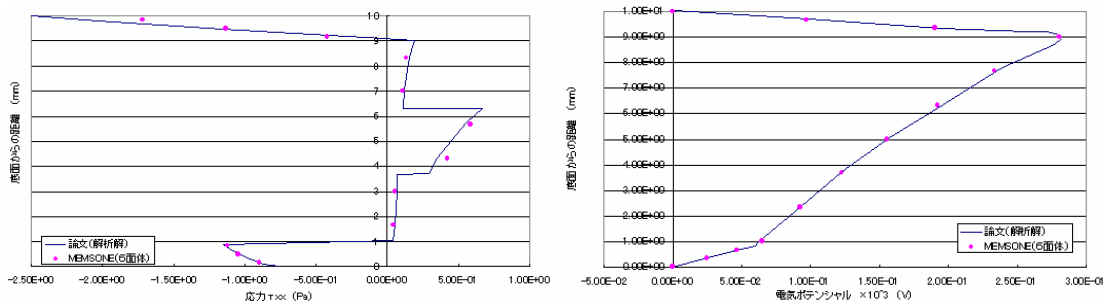


図 3-2-22 : 圧電解析の機能検証モデルと境界条件



(a) 逆圧電効果の理論解と MemsONE 解析結果の (b) 圧電効果の理論解と MemsONE 解析結果

図 3-2-23 : 圧電解析の機能検証結果

次に検証解析を実施した。検証解析としては、基板上に成膜された圧電膜を用いた圧電駆動のカンチレバーを解析対象とし、実験 (オリンパス株式会社、京都大学) により得られた圧電定数と印加電圧を与えてカンチレバーが変形するという逆圧電効果を解析した。

検証解析で用いたカンチレバーの構造と解析結果の変形図を図 3-2-24 に示す。また、実験結果と解析結果の比較を図 3-2-25 に示す。

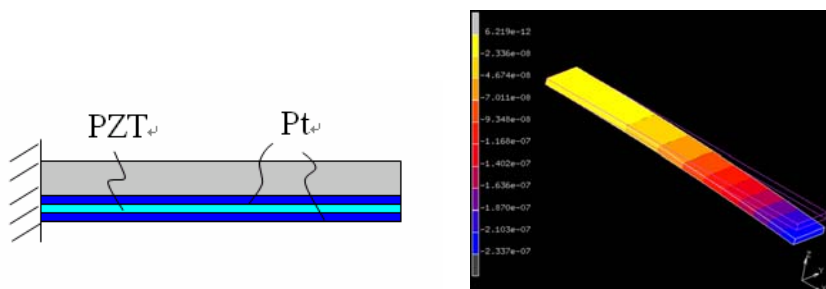


図 3-2-24 : 圧電解析の検証解析モデルと変形図

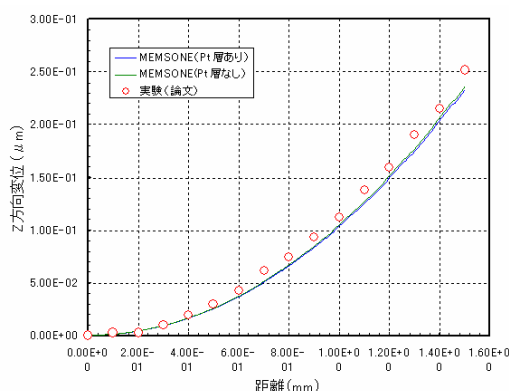


図 3-2-25 : 圧電解析の検証解析結果(実験値と解析結果比較)

実験結果と解析結果における Z 方向変位は十分良く一致しており、目標を達成できた。

### (3) 研究開発成果の意義

開発された圧電解析を用いることで、圧電材料を用いた圧力センサ、発振器等の MEMS デバイスの機構を数値的に予測することが可能となり、MEMS デバイスの構造設計に対して効率化が図れる。

## 3.2.4 伝熱解析、熱変形解析

### (1) 研究開発の概要

MEMS プロセスにおける熱処理や熱駆動時の環境下では、構造体の熱伝導やそれに伴う構造体材料の熱膨張或いは熱収縮による変形が顕著になり、デバイス性能がばらつく等の信頼性に影響を与える可能性がある。このような現象を把握するためには、構造体中の温度分布の時間変化とそれに伴う構造体の熱変形を解析することが必要である。本研究開発では、非常常熱伝導方程式による熱伝導解析と熱ひずみが引き起こす熱応力解析を連成して、構造体中の温度分布の時間変化とそれに連動した熱変形を解析する機能を開発した。

以下に目標に対応する研究開発成果を示す。



<目標>

- 伝熱解析シミュレータと熱変形解析シミュレータの開発内容を確定し、概念設計、詳細設計・プログラム設計を完了する。
- 設計作業を踏まえ、伝熱解析シミュレータと熱変形解析シミュレータ単体の開発を完了する。
- フレームワークソフトへの結合およびシステム統合を実現させ、結合検証テストおよび統合検証テストを完了する。

<成果>

- 概念設計では機能構成、システム構成を策定し、詳細設計・プログラム設計ではモジュール構成、モジュールの機能、モジュール間のインターフェイス、有限要素解析の基礎式、物理・力学モデル、数値解法、モジュールの処理フローの設計およびモジュール検証テスト計画を検討した。
- 実施した設計に従い、非定常熱伝導方程式による熱伝導解析と熱ひずみが引き起こす熱応力解析を連成して、構造体中の温度分布の時間変化とそれに連動した熱変形を解析する機能の開発を行った。また、機能検査用簡易モデルによるサンプルデータを用いて伝熱解析、熱変形解析機能における機能検査、検証を行い、ソフトウェアの動作、解析結果の確認を行った。
- 伝熱解析および熱変形解析の機能検証を実施し、解析解と理論解、実験値との比較により、十分良く一致していることを確認した。また、フレームワークソフトとの結合検証テストを完了した。

(2) 研究開発成果の詳細

MEMS プロセスにおける熱処理や熱駆動時の環境下では、構造体の熱伝導やそれに伴う構造体材料の熱膨張或いは熱収縮による変形が顕著になり、デバイス性能がばらつく等の信頼性に影響を与える可能性がある。このような現象を把握するためには、構造体中の温度分布の時間変化とそれに伴う構造体の熱変形を解析することが必要である。本研究開発では、非定常熱伝導方程式による熱伝導解析と熱ひずみが引き起こす熱応力解析を連成して、構造体中の温度分布の時間変化とそれに連動した熱変形を解析する機能を開発した。

伝熱解析、熱変形解析に必要な基礎方程式、物理モデルを検討し、以下の機能を検討し、モデルを構築した。

表 3-2-3 : 伝熱解析、熱変形解析の機能

解析	種類	概要
伝熱	単体	・ 固体中の温度分布の時刻歴を計算する。
	連成	・ 温度分布とその変化を熱応力モジュールの入力として与える。

熱応力	単体	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 固体中の温度分布とその変化に伴う熱ひずみ増分と応力増分を計算。</li> <li>・ 熱ひずみ増分による節点荷重増分を計算する。</li> <li>・ 物性値の温度変化による節点荷重増分を計算する。</li> </ul>
	連成	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 伝熱解析で得られた温度分布を補間する。</li> <li>・ 等価節点荷重増分を力学解析モジュールの入力として与える。</li> </ul>

伝熱解析、熱変形解析の機能検討から、伝熱解析、熱変形解析の基礎方程式は以下のようになる。

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial q_i}{\partial x_i} = \dot{Q}, q_i = -\lambda_{ji} \frac{\partial T}{\partial x_j}$$

$$\frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} + b_i = 0$$

ここで、 $c$ は比熱、 $\rho$ は質量密度、 $\dot{Q}$ は内部発熱量、 $T$ は温度、 $\lambda_{ij}$ は熱伝導率テンソル、 $q$ は熱流束である。また、 $\sigma_{ij}$ は真応力テンソル、 $b_i$ は単位体積当たりの物体力である。

二つの基礎方程式を連成させるために、線膨張係数を用いて熱ひずみをモデル化することで、次式の熱ひずみ増分による等価節点荷重を付加する機能を開発した。

$$\{\Delta \varepsilon^T\} = \{\varepsilon^T\} \Delta t$$

以上のモデル化に対して、空間方向には有限要素法、時間方向には差分法を用いることにより離散化し、伝熱解析、熱変形解析のプログラム開発を完了した。

伝熱解析および熱変形解析の機能検査および機能検証を実施した。伝熱解析の機能検査としては、シリコン円板の非定常熱伝導解析を実施した。図はシリコン円板のモデルの概要と解析条件を示している。図から理論解と解析解は十分良く一致している。

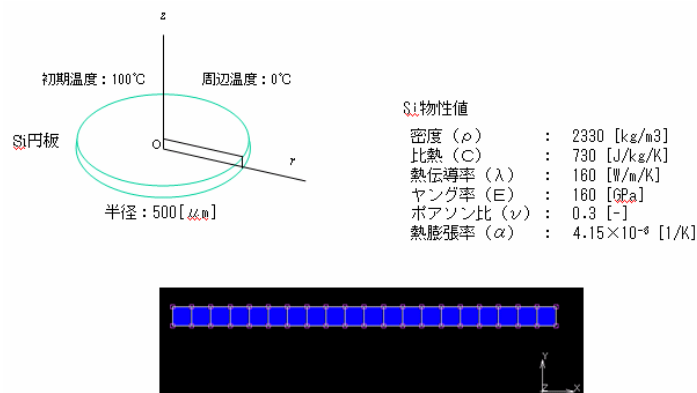


図 3-2-26 : 伝熱解析の機能検査 (モデル概要と解析条件)

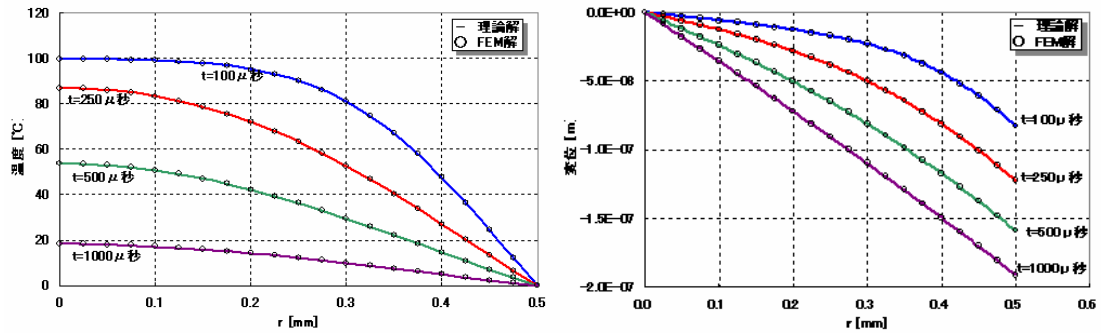


図 3-2-27：伝熱解析の機能検査（理論解と MemsONE 解析結果との比較）

次に検証解析として RF-MEMS と圧力センサを対象とした評価検証を実施した。

RF-MEMS(図 3-2-28：オムロン株式会社)を解析対象とした熱弾性解析を実施した。測定システムの分解能が  $0.1\mu\text{m}$  より大きく、変形量の絶対評価には十分でないが、傾向分析には耐えるレベルであり、これを基に熱弾性解析について評価した。絶縁膜の物性値が必ずしも十分な精度で評価されているとはいえないために計算結果と実験結果には一定の相違があるものの、図 3-2-28 に示すように目標範囲内で一致している。また、解析結果と商用コード CoventorWare の解析結果は良く一致している。さらに、基板ガラスの変位は測定分解能以下でほとんど変位しないが、シミュレーションの結果も同様であった。

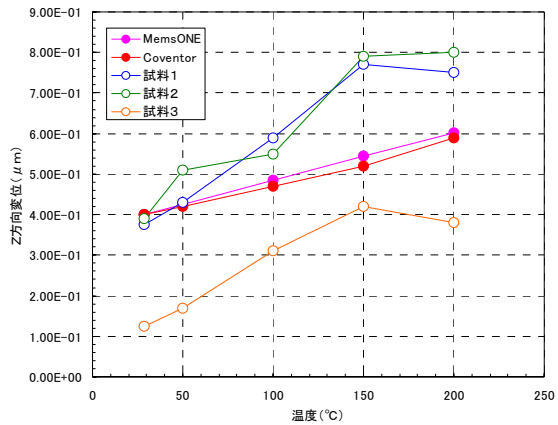
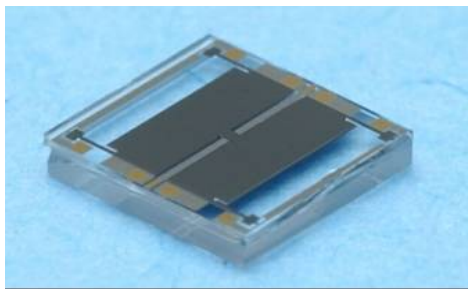


図 3-2-28：検証で使用した RF-MEMS と検証結果

また、圧力センサ(図 3-2-29：松下電工株式会社)を解析対象とした熱弾性解析を実施した。

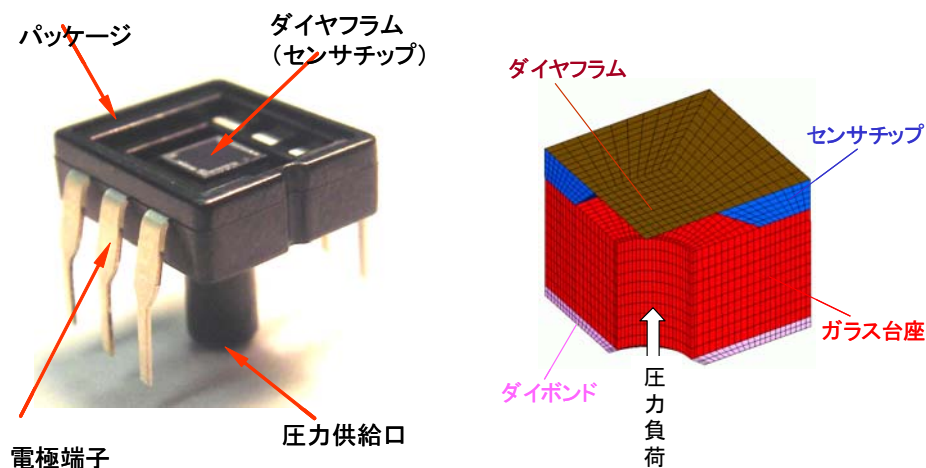


図 3-2-29：検証で使用了した圧力センサとメッシュ分割

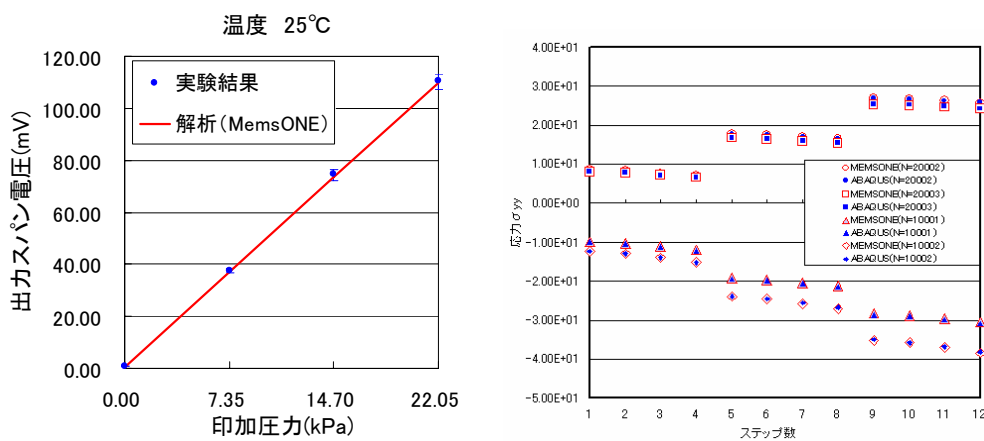


図 3-2-30：熱変形解析の機能検証(実験結果と MemsONE 解析結果の比較、商用コードの解析結果と MemsONE 解析結果の比較)

図 3-2-30 に示すようにダイヤフラム部分と台座部分から構成される圧力センサをシェル要素と 6 面体ソリッド要素で分割し、センサ内部に圧力荷重を負荷すると同時に、圧力センサ全体に温度増分を与えて熱変形を加えたものである。実験(松下電工株式会社)は各温度環境における圧力によるダイヤフラムの変形をピエゾ抵抗変化として捉え、出力電圧を計測することで実施した。図 3-2-30 より実験結果と解析結果は十分良く一致しており、また、商用コードの解析結果と MemsONE の解析結果は十分良く一致しており、本プロジェクトの目標を達成した。

### (3) 研究開発成果の意義

開発された伝熱解析、熱変形解析を用いることで、MEMS プロセスにおける熱処理や熱駆動時の環境下における、構造体の熱伝導やそれに伴う構造体材料の熱膨張或いは熱収縮

による変形を数値的に予測することが可能となり、MEMS デバイスのプロセス・構造設計に対して効率化が図れる。

### 3.2.5 雰囲気流体の影響解析

#### (1) 研究開発の概要

高速に振動する構造を持つ MEMS デバイスにおいて、その振動部分は相似則から構造周囲の流体粘性により大きな振動抵抗を受け、振動特性に大きく影響を及ぼす。本研究開発では Reynolds 方程式を用いて構造物のスプリング係数および減衰率を求めるシミュレータを開発した。

以下に目標に対応する研究開発成果を示す。

<目標>

- 雰囲気流体の影響解析シミュレータの開発内容を確定し、概念設計、詳細設計・プログラム設計を完了する。
- 設計作業を踏まえ、雰囲気流体の影響解析シミュレータ単体の開発を完了する。
- フレームワークソフトへの結合およびシステム統合を実現させ、結合検証テストおよび統合検証テストを完了する。

<成果>

- 概念設計では、機能・システム構成等を検討し確定した。詳細設計・プログラム設計においては、雰囲気流体の影響解析に必要な基礎方程式、物理モデルおよび数値解法を検討し、MEMS の設計において必要となる物理量の計算を可能とする解析モデルを検討した。
- 雰囲気流体の影響解析のために必要な入出力機能、Reynolds 方程式の求解機能、および、得られた解析結果からの減衰率抽出機能の開発を行い、本個別モジュール単体の機能検査・機能検証を実施した。
- 雰囲気流体の影響評価解析に関して、機能開発を完了し、フレームワークソフトとの結合検証テストおよび統合検証テストを完了した。

#### (2) 研究開発成果の詳細

高速に振動する構造を持つ MEMS デバイスにおいて、その振動部分は相似則から構造周囲の流体粘性により大きな振動抵抗を受け、振動特性に大きく影響を及ぼす。そのときの構造物のスプリング係数および減衰率について Reynolds 方程式を用いて求めるシミュレータを開発した。

構造物内微小隙間における流体抵抗の解析を行い、振動構造を持つ MEMS の構造設計が可能とするため、トライボロジー分野で標準的に用いられるレイノルズ方程式をベースとして開発を行った。雰囲気流体の影響解析に必要な基礎方程式、物理モデルを検討し、以下の現象的な仮定を設定し、モデルを構築した。

- 構造物内微小隙間の流体は Newton 流体である。
- 重力や体積力は粘性力・圧力に比べて小さい。
- 厚さ方向には圧力は一様である。
- 流れは層流である。
- 構造物の大きさに比べて厚さは十分に薄い。
- 流体は壁面でスリップしない。

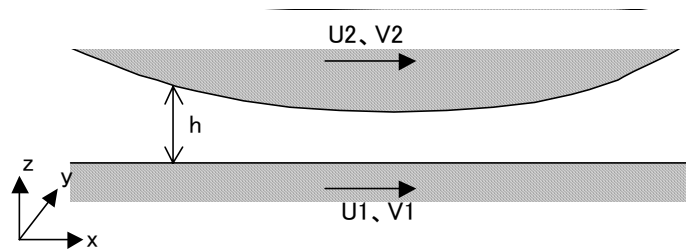


図 3-2-31 : 雰囲気流体の影響解析の解析モデル

上記の仮定、および図 3-2-31 から、次の雰囲気流体の影響を解析するための非定常の Reynolds 方程式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\rho h^3}{12\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \frac{1}{2} \frac{\partial [\rho h (U_1 - U_2)]}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial [\rho h (V_1 - V_2)]}{\partial y} + \frac{\partial (\rho h)}{\partial t}$$

ここで、 $\rho$  と  $\mu$  は流体の密度と粘性係数、 $x$  と  $y$  は座標、 $t$  は時間、 $h$  は隙間厚さ、 $U_1$ 、 $U_2$ 、 $V_1$ 、 $V_2$  は物体の移動速度、 $p$  は流体圧力を表す。

レイノルズ方程式を境界条件の基で解くことにより構造物表面にかかる流体力を評価し、その時系列からにより、減衰率  $c$ 、スプリング係数  $k$  を求める。

$$c = -\frac{1}{AT\omega} \operatorname{Im} \left[ \int_{t_0}^{t_0+T} F(t) e^{-i\omega t} dt \right] = \frac{1}{AT\omega} \int_{t_0}^{t_0+T} F(t) \sin \omega t dt$$

$$k = -\frac{1}{AT} \operatorname{Re} \left[ \int_{t_0}^{t_0+T} F(t) e^{-i\omega t} dt \right] = -\frac{1}{AT} \int_{t_0}^{t_0+T} F(t) \cos \omega t dt$$

ここで、 $A$ 、 $T$ 、 $\omega$  は構造物の振動振幅、周期、および角振動数、 $F(t)$  は流体力の時系列である。尚、構造物の振動様式としては上下振動および水平振動を考慮している。以上の

モデル化に対して有限体積法により離散化しプログラム開発を完了した。

開発したプログラムに対し、単体機能検証を実施した。さらに、フレームワーク開発と共同して入出力接続部の開発・試験を行った。単体機能検証は、検証対象としては図 3-2-32 に示す  $500\ \mu\text{m}$  角の平板を隙間が  $2\ \mu\text{m}$  の状態から振幅  $1\ \mu\text{m}$ 、周波数  $1\text{kHz}$  で振動させて行った。また、隙間には大気圧の空気が存在するものとした。圧力分布について計算結果と理論解とを比較し、図 3-2-34 に示すように良好な一致を得ることができ、開発したプログラムの単体機能検証を完了した。

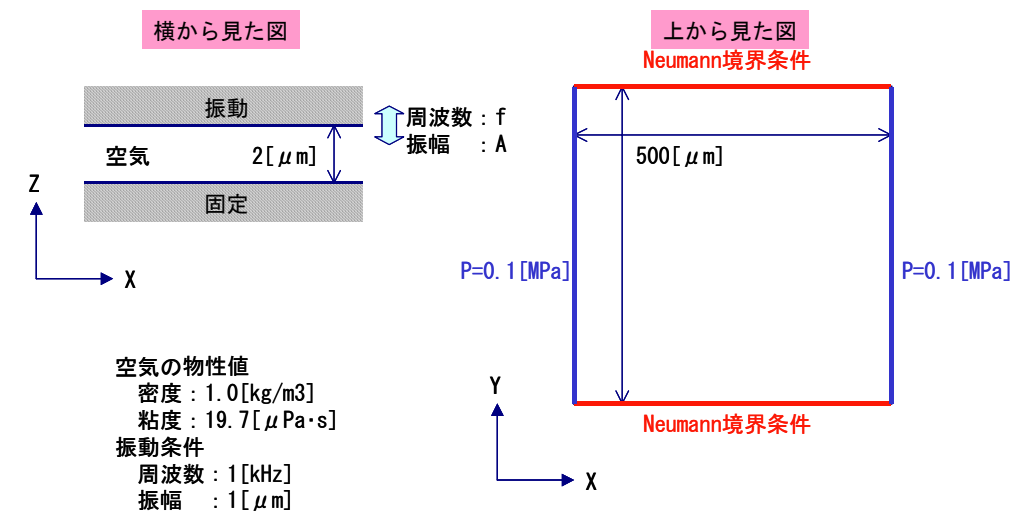


図 3-2-32 : 雰囲気流体の影響解析単体機能検証モデル

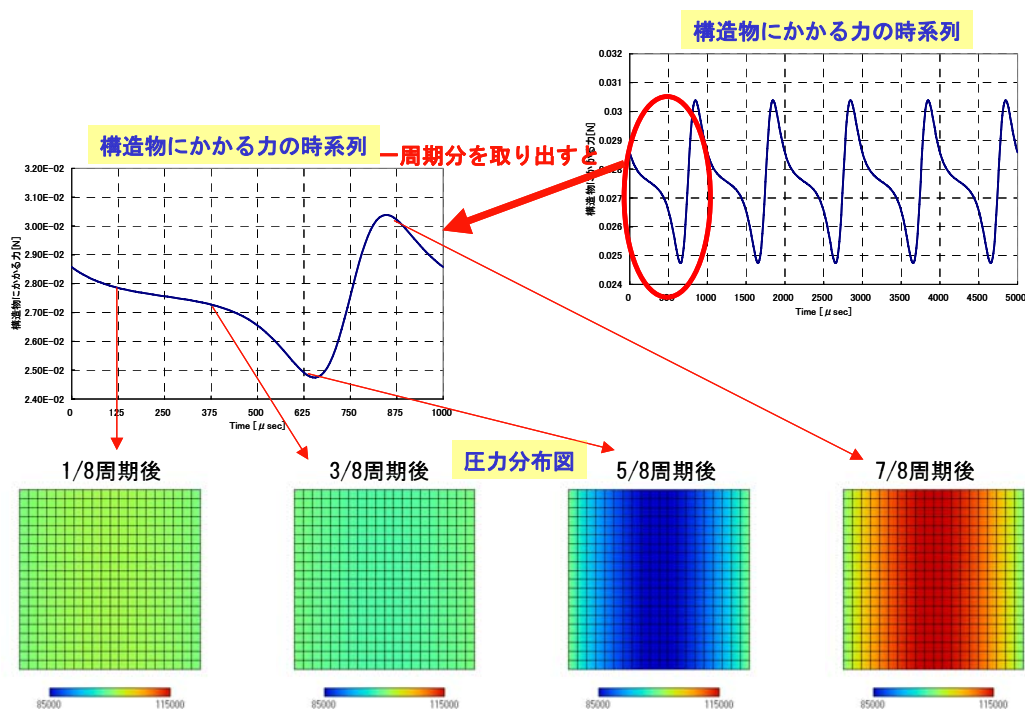


図 3-2-33 : 構造物にかかる力の時系列および雰囲気流体の圧力分布

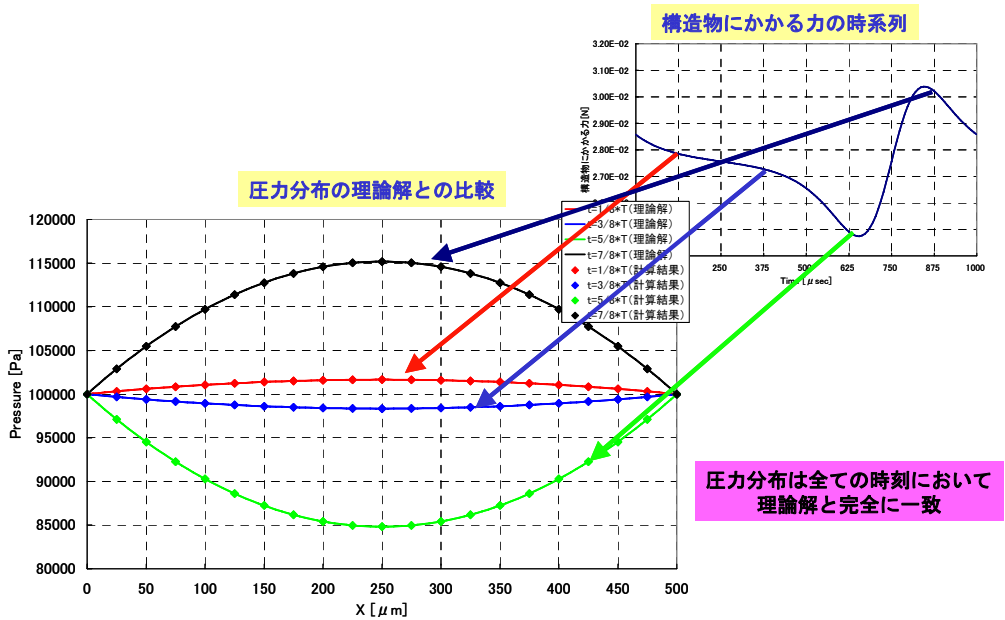


図 3-2-34 : 圧力分布の理論解との比較

次に検証解析を実施した。評価検証方法は、静電駆動型光スキャナ(図 3-2-35 : オリンパス株式会社)を圧力雰囲気に変化可能な環境で、ねじり共振(Mode1)させた時の雰囲気圧力と共振の  $Q$  値の関係を大気から 0.1Pa 以下までを測定し、雰囲気流体解析で算出した減衰係数を適用して調和応答解析を実施した結果から得られた  $Q$  値と比較した。

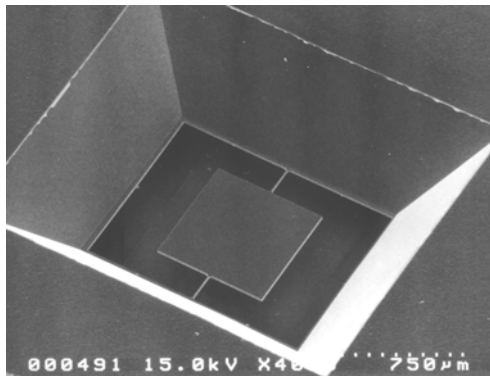


図 3-2-35 : 検証で使した光スキャナ



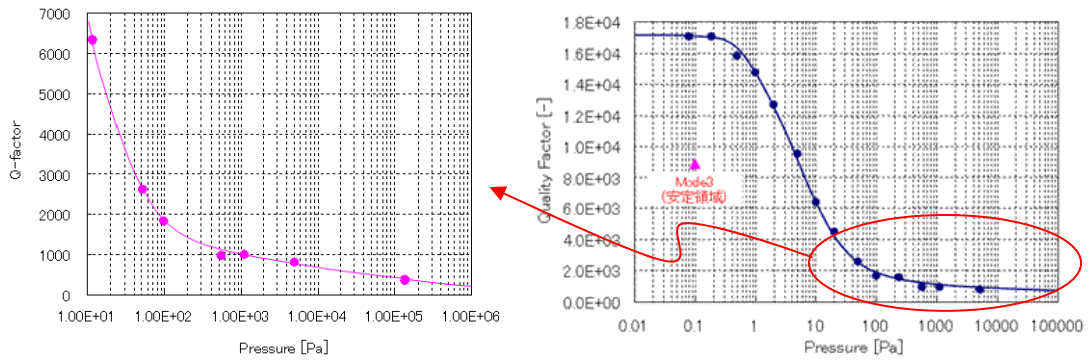


図 3-2-36 : Q 値測定結果

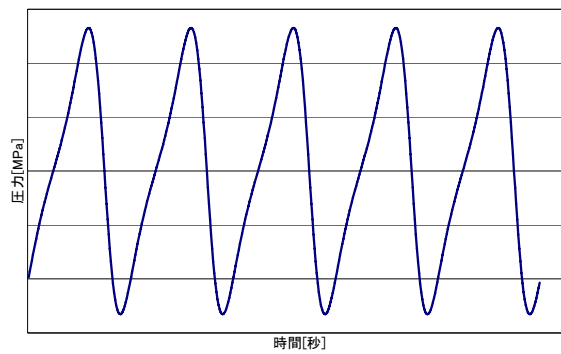


図 3-2-37 : 構造物表面にかかる圧力の時系列(解析結果)

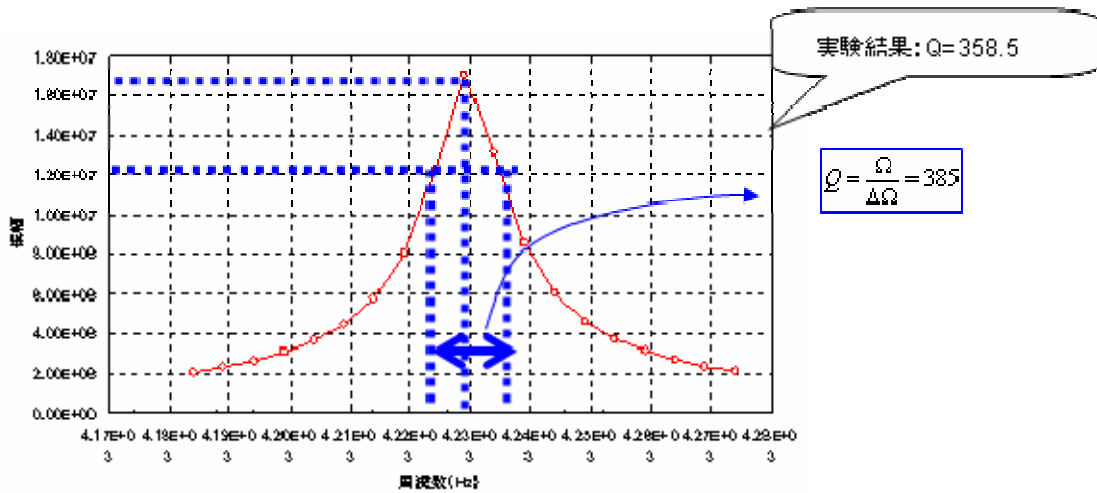


図 3-2-38 : 調和応答解析結果

光スキャナの構造物表面にかかる圧力の時系列を図 3-2-37 に示す。その時、時系列から減衰率を求めたところ  $1.2 \times E-10[N/m]$  となった。この減衰率を入力とし、調和応答解析を行った結果を図 3-2-38 に示す。その結果、本解析から得られた Q 値は 385 であった。実験 (図 3-2-36) では 358.6 が得られており、解析ではミラーが水平な状態で上下に振動しており、実際のミラーとは動きが異なっているが、7.4%の精度で Q 値が予測できた。

実験から得られた Q 値と解析から得られた Q 値を比較した結果、同程度のオーダーの結果が得られ、目標を達成できた。

### (3) 研究開発成果の意義

開発された雰囲気流体の影響解析を用いることで、高速に振動する構造を持つ MEMS デバイスにおいて、その振動部分は相似則から構造周囲の流体粘性により大きな振動抵抗を数値的に予測が可能となり、振動部分を有する MEMS デバイスの構造設計に対して効率化が図れる。

## 3.2.6 連成解析

### (1) 研究開発の概要

連成解析により機構解析シミュレータの機能が大幅に拡大し、電磁アクチュエータ、静電アクチュエータ、熱型アクチュエータ等の MEMS の構造的な応力-ひずみ、振動問題、静電場、磁場、圧電等の駆動機構や動作機構を検証、評価を総合的に行うことが可能となる。機構解析シミュレータの機能について、以下の連成解析を実現させた。

- 力学解析と熱伝導解析の連成
- 力学解析と電磁場解析の連成
- 力学解析と圧電解析の連成
- 力学解析と雰囲気流体影響解析の連成

以下に目標に対応する研究開発成果を示す。

#### <目標>

- 機構解析シミュレータの連成方式を確定し、概念設計、詳細設計・プログラム設計を完了する。
- 設計作業を踏まえ、連成解析に必要なモジュールまたはインターフェイスの開発を完了する。
- 連成解析のフレームワークソフトへの結合およびシステム統合を実現させ、結合検証テストおよび統合検証テストを完了する。

#### <成果>

- 連成解析方式の決定、システム構成等の概念設計、およびモジュールの構成、モジュール間のインターフェイス、有限要素解析の基礎式、物理・力学モデル、数値解法、連成フロー等の詳細設計・プログラム設計およびモジュール検証テスト計画を検討した。
- 連成解析に必要なモジュールまたはインターフェイスの開発、並びに機能検査を行った。力学と電磁界解析の連成解析では両者を反復計算するための制御機能、

等価材料定数の計算機能、および静電力と電磁力の計算機能を開発した。尚、力学解析と熱伝導解析の連成、力学解析と圧電解析の連成についてはそれぞれ 0 伝熱解析、熱変形解析および 0 圧電解析において実現した。

- 開発した連成解析について、フレームワークソフトとの結合検証テストおよび機構解析シミュレータや材料・プロセス・データベースとの統合検証テストを実施した。

## (2) 研究開発成果の詳細

要件抽出およびソフトウェア委員会による議論より、下記に示す連成解析機能仕様を策定した。

- 力学解析と熱伝導解析の連成については、熱伝導解析を実施し、温度の解析結果を力学解析ソフトに渡し、熱変形解析を実施する弱連成とする。
- 力学解析と電磁場解析の連成については電磁場解析を実施し、静電力の解析結果を力学解析ソフトに渡し、変形解析を実施する弱連成とする。
- 力学解析と圧電解析の連成については電位と変形解析を同時に実施する強連成とする。
- 力学解析と雰囲気流体影響解析の連成については雰囲気流体影響解析から得られる減衰を力学の動解析で用いる弱連成とする。

電磁場解析と力学解析の連成解析の開発を完了し、フレームワークソフトとの統合検証テストおよび材料・プロセス・データベースとの統合検証テストを行った。

電磁場解析と力学解析の連成解析の検証解析として、RF-MEMS(オムロン株式会社)および光スキャナ(オリンパス株式会社)を対象に実施した。

図 3-2-39 に RF-MEMS デバイス構造と解析 CAD モデルを、図 3-2-40 にメッシュ構造を示す。

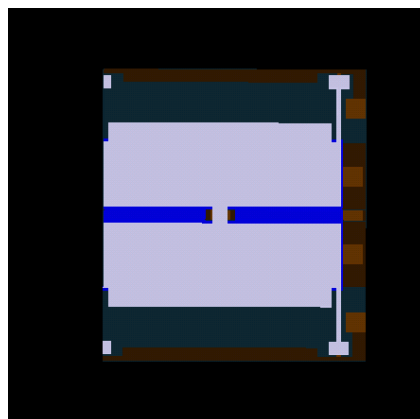
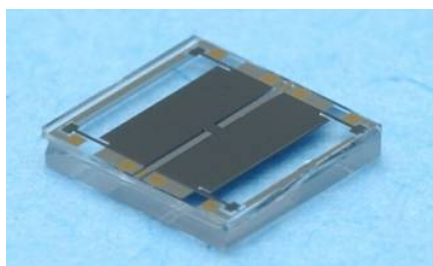


図 3-2-39 : 検証解析 RF-MEMS デバイスと解析 CAD モデル

図 3-2-40 のメッシュ図において、色は解析結果の変位の大きさを表している。電界解析で求めた静電力を力学解析に自動的に引渡し、変形後の電界を再計算、収束するまで反復計算した結果である。

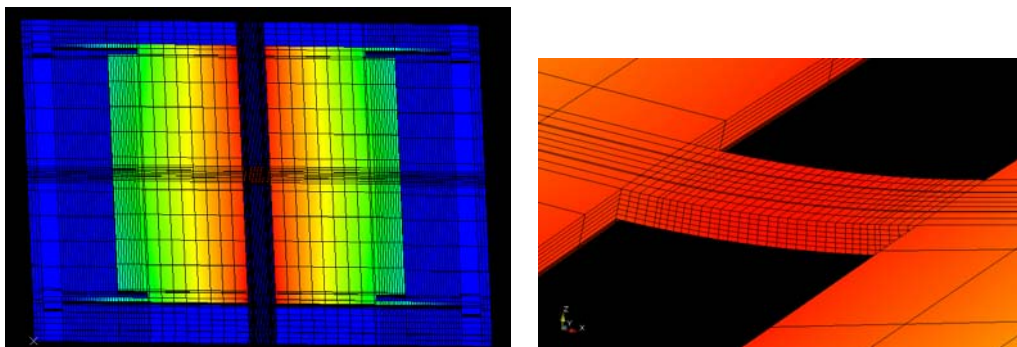


図 3-2-40 : 連成解析結果変位(全体表示と可動部中心架橋部拡大表示)

ガラス基板全体を力学的に固定し、駆動電極を接地、可動部を 0～6V の範囲で 1V 刻みに電位を印加し、可動部中心の z 方向変位を実測(オムロン株式会社)と解析で比較した。図 3-2-41 に可動部中心の z 方向変位の実測と解析結果を示す。

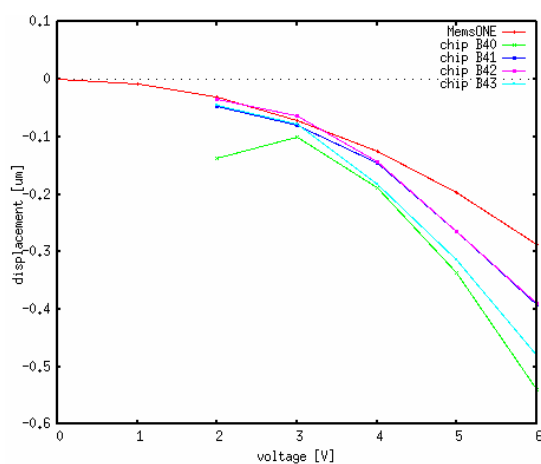


図 3-2-41 : 駆動電圧と可動部中心の z 方向変位 (実測と計算の比較)

駆動電圧 6V の場合において、z 方向変位は実測では  $0.39 \mu\text{m}$ 、解析では  $0.29 \mu\text{m}$  あり、実験との乖離は 26% となり、目標を達成できた。尚、解析結果における z 方向変位はメッシュ数に大きく依存して、適正なメッシュ分割により精度が向上する傾向が見られた。

次に静電駆動型光スキャナの 2 つの駆動電極に対し、同じオフセット電圧の印加と両電極に正負反転した電圧を印加して駆動し、駆動電圧 (オフセット電圧およびこれに重畳された正弦波半周期分の電圧) と光スキャナ可動部の機械振れ角との関係を、実験および解析にて比較した。図 3-2-42 に RF-MEMS デバイス構造と解析 CAD モデルを示す。

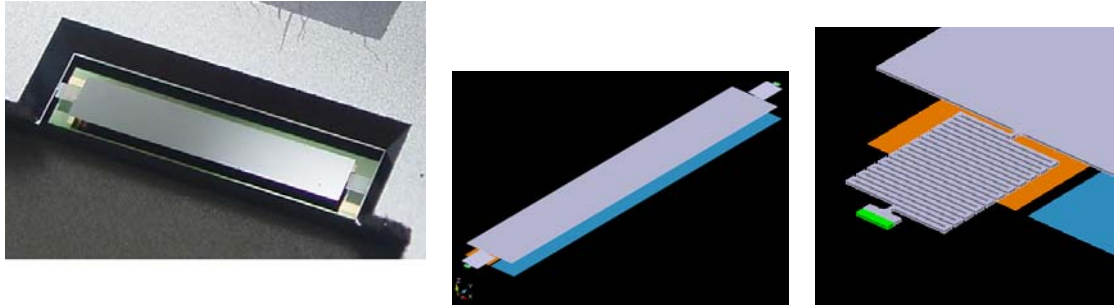


図 3-2-42 : 検証解析光スキャナデバイスと解析 CAD モデル

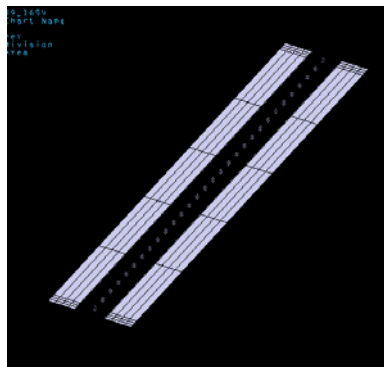


図 3-2-43 : メッシュ分割(212,976 節点,196,528 要素 (電界))

シリコン可動部は接地、駆動電極部に  $100 \pm 10V \sim 65V$  の電圧を印加、力学の固定境界条件はミアンダヒンジ端部および下部電極を固定して解析を実施した。図 3-2-44 に機械振れ角の電圧依存性の実測値と解析結果を示す。

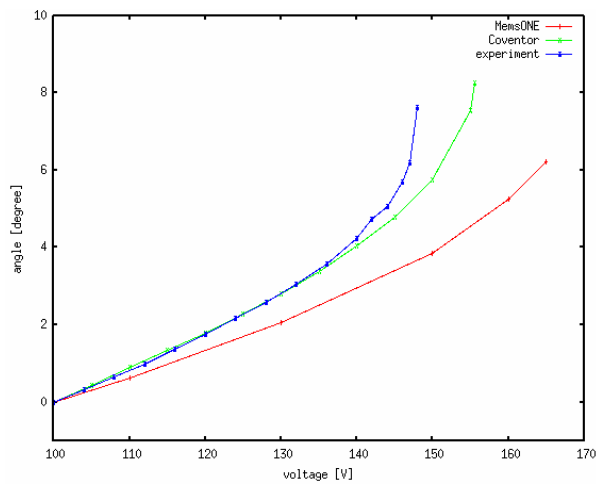


図 3-2-44 : 機械振れ角の電圧依存性(実測値と解析結果)

機械振れ角の実測値と解析結果を比較すると全体的に解析結果が小さい値になっている。しかしながら、130V のとき 27%の乖離であり、目標を達成した。

次に図 3-2-45 に示す電磁力で変形する構造について、磁界解析と力学解析の連成解析を実施した。

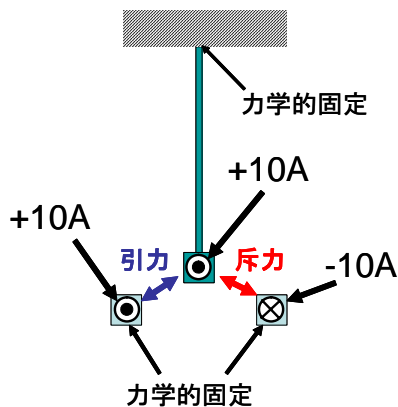


図 3-2-45：磁界解析と力学解析の連成解析モデル

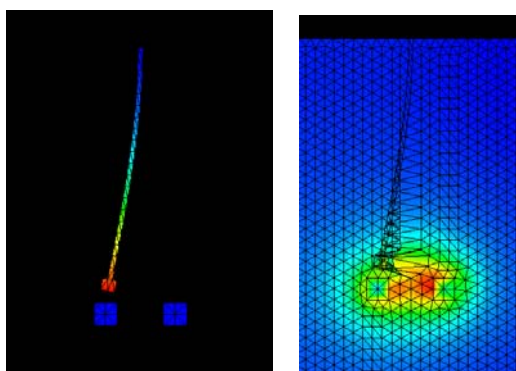


図 3-2-46：磁界解析と力学解析の連成解析結果

図 3-2-46 に計算結果を示す。2 本の反平行電流と、部材の先端に取り付けられた 3 個目の電流の相互作用で部材が変形する。反平行の電流に対して反発しており、物理的に妥当な結果が得られている。

尚、力学解析と熱伝導解析の連成および力学解析と圧電解析の連成については前出のとおり検証を実施し、良好な結果が得られている。

以上について同時に、フレームワークソフトと統合して動作することをも確認した。

### (3) 研究開発成果の意義

開発された連成解析により機構解析シミュレータの機能が大幅に拡大し、電磁アクチュエータ、静電アクチュエータ、熱型アクチュエータ等の MEMS の構造的な応力・ひずみ、振動問題、静電場、磁場、圧電等の駆動機構や動作機構を検証、評価を総合的に行うことが可能となり、MEMS デバイスの構造設計に対して効率化が図れる。

### 3.3 プロセス解析ツールの開発

材料・プロセス・データベース、知識データベースに連携したシステムとして利用者が安心して設計・解析できる環境を提供できることを特徴とし、MEMS プロセスシミュレータもしくはエミュレータにより MEMS 加工構造を実現し、総合的に検証、評価するシステムを開発した。

MEMS 製造で用いられる以下のプロセスに応じたモジュール（シミュレータまたはエミュレータ）を開発した。

- 1) 異方性ウェット・エッチング・プロセス・シミュレータの開発
- 2) ドライエッチング・プロセス・シミュレータの開発
- 3) 成膜プロセス・エミュレータの開発
- 4) マルチプロセス・エミュレータの開発

#### 3.3.1 異方性ウェット・エッチング・プロセス・シミュレータの開発

##### (1) 研究開発の概要

材料・プロセス・データベースのエッチングデータ（各面方位のエッチングデータ）を基に 3 次元エッチング・プロファイルの過渡変化を予測する異方性ウェット・エッチング・プロセス解析シミュレータを開発した。

以下に目標に対応する研究開発成果を示す。

<目標>

- 異方性ウェット・エッチング・プロセスに関する概念設計、詳細設計・プログラム設計を完了する。
- 設計作業を踏まえ、異方性ウェット・エッチング・プロセス単体の開発を完了する。
- 異方性ウェット・エッチング・プロセス解析シミュレータ単体とフレームワークソフトへの結合およびシステム統合を実現させ、結合検証テストおよび統合検証テストを完了する。

<成果>

- 概念設計では、要件抽出、システム構成（入力・機能・出力）をまとめた。詳細設計・プログラム設計では、インターフェース、モジュールの構成・機能、処理、プログラム構成、モジュール検証テスト計画を検討した。
- 異方性ウェットエッチングプロセスシミュレータのプログラムの開発を行った。開発したプログラムに対し、単体機能検証を実施した。さらに、フレームワーク開発と共同して入出力接続部の開発・試験を行った。
- 異方性ウェット・エッチング・プロセス解析シミュレータのモジュール単体とフレームワークソフトとの統合作業を実施し、フレームワークソフトを用いて、解

析条件設定および結果表示が可能となった。

- 検証解析結果により、シミュレーション結果が妥当であることを確認した。

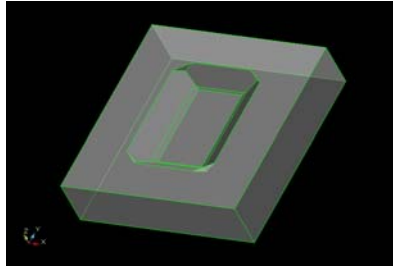


図 3-3-1 : ウェット・エッチング・シミュレータを用いた圧力センサのダイヤフラム形成

## (2) 研究開発成果の詳細

開発した異方性ウェット・エッチング・シミュレータは、シリコン単結晶の全方位のエッチング・レート・データを基に、設定したマスクパターンに対して、3次元エッチング・プロファイルの時間変化を解析する機能を有する。以下に内容を示す。

- エッチング条件

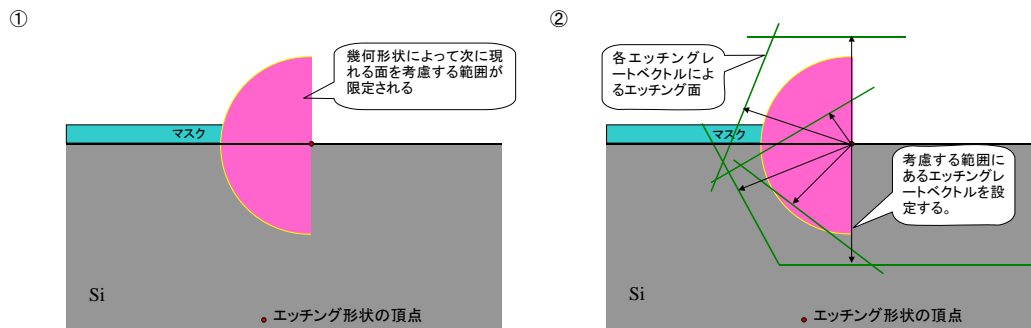
エッチング液の種類・温度・濃度、エッチング時間、使用するウエハの面方位、オリエンテーションフラットの方向をエッチング条件ファイルから読み込み設定する。

- マスクレイアウト

フレームワークのマスクエディタで作成したマスクレイアウトをファイルから読み込み設定する。

- 頂点の軌跡ベクトルの計算方法

本シミュレータで用いているマスク直下にある頂点の軌跡ベクトルの形状計算方法について、図 3-3-2 に 2次元空間モデルを用いて示す。





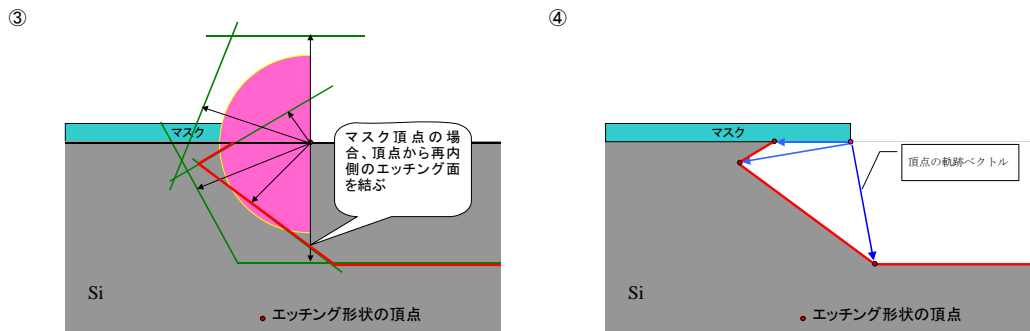
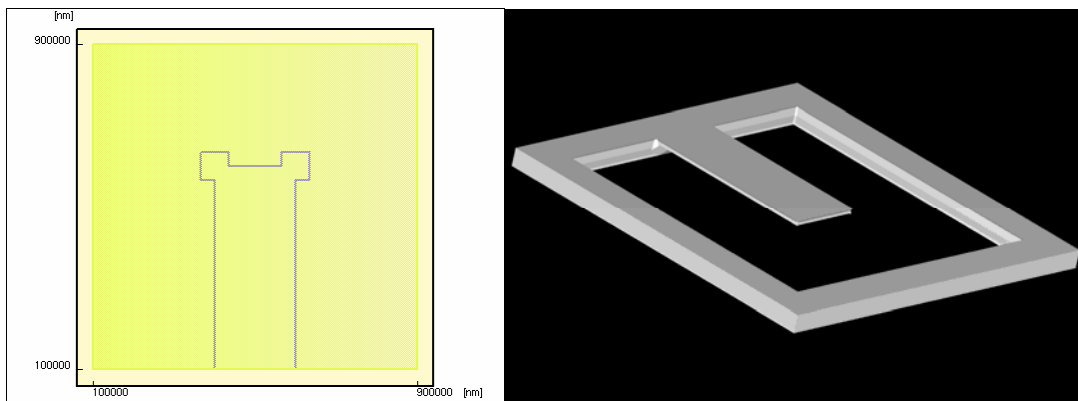


図 3-3-2 幾何形状の計算方法

- ①頂点の幾何形状によって、次に現われる面の考慮範囲を決める
- ②考慮範囲にあるエッチング・レート・ベクトルによって形成されるエッチング面を決める。
- ③マスク（凹）頂点の場合、最内側（エッチング速度の遅い方）のエッチング面によって形成される面が、次のエッチング面となる。尚、凸頂点の場合は再外側となる。
- ④頂点の軌跡ベクトルとして、データを保存する。この頂点の軌跡ベクトルをベースに次の時刻の形状を構築する。

以上の計算方法に従って、異方性ウェット・エッチング・プロセス・シミュレータのプログラムの開発を行った。開発したプログラムに対し、単体機能検証を実施した。さらに、フレームワーク開発と共同して入出力接続部の開発・試験を行った。単体機能検証は、検証対象デバイスとして、カンチレバーおよびダイヤフラム(図 3-3-3)を対象に実施した。実際のデバイス形状と比較して、ほぼ一致した結果が得られた。



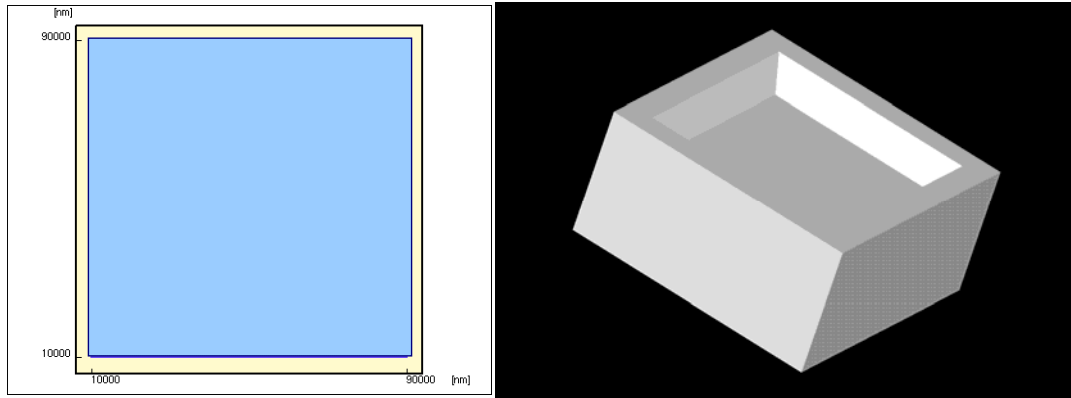
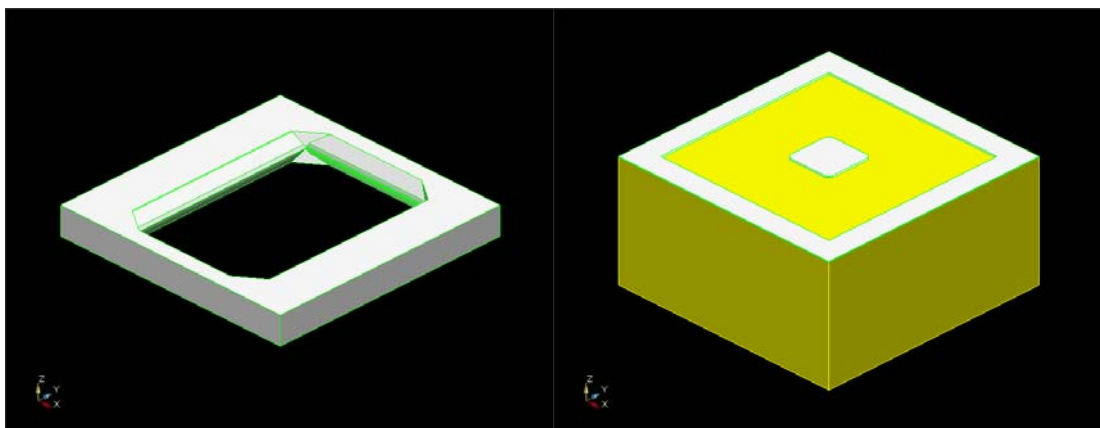


図 3-3-3 : 異方性ウェット・エッチング・プロセス・シミュレータの単体機能検証結果 ((カ  
ンチレバーとダイヤフラム))

以下に検証解析結果を示す。

ウエハ上下面にマスクを設定し、ウエハ中央で貫通するエッチング・プロファイルを解  
析した結果を図 3-3-4(a)に示す。このように、ウエハ中央で貫通した後のエッチング・プロ  
ファイルを解析することも可能である。



(a)

(b)

図 3-3-4 : 検証解析結果(a) ウエハ上下面にマスクを設定し、ウエハ中央で貫通  
(b) エッチストップ層でエッチングの進行が停止

次に、単結晶シリコン基板にエッチストップ層を設けて、エッチストップ層でエッチン  
グ進行が止まる解析結果を図 3-3-4(b)に示す。ここでは、エッチストップ層を明確にするた  
め、エッチストップ層領域を黄色で示した。

異方性ウェット・エッチング・プロセス・シミュレータの解析結果を機構解析シミュレ  
ータで利用するため、解析結果形状にメッシュ生成を行った結果を図 3-3-5 に示す。これよ  
り、生成したメッシュを用いて力学解析や伝熱解析等が行える。

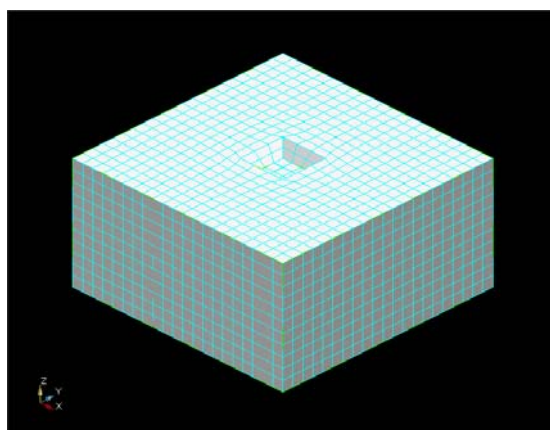


図 3-3-5 : 解析形状にメッシュ生成を行った結果

マルチプロセス・エミュレータの検証素子モデルの一つである圧力センサの基板部分を異方性ウェット・エッチング・プロセス・シミュレータで形成した結果を図 3-3-6 に示す。この形状は、実際のデバイス形状（再委託先：松下電工株式会社）とよく一致していることを確認した。

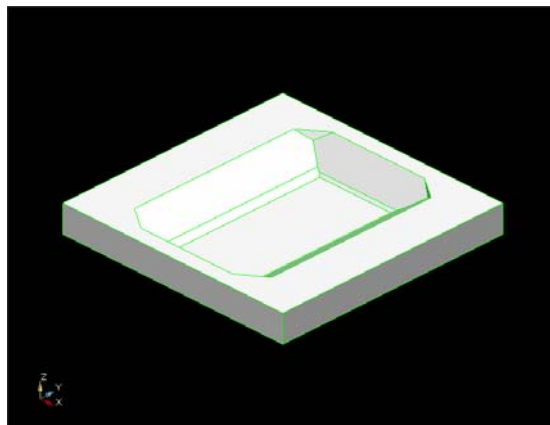


図 3-3-6 : 異方性エッチングで作成した圧力センサの基板

### (3) 研究開発成果の意義

開発された異方性ウェット・エッチング・プロセス・シミュレータを用いることで 3 次元エッチング・プロファイルの過渡変化を予測すること可能であり、結晶異方性エッチングを用いた形状作製プロセスにおける補償マスク等のマスク設計の効率化や、プロセス最適化が図れる。

また、予測したプロファイルを後述マルチプロセス・エミュレータに接続することで、MEMS デバイスの機械的、電気的な特性を解析する時に必要となる MEMS デバイスの CAD モデルへの変換が可能となり、MEMS の機械的、電気的な特性評価の効率化が図られるものと期待される。

### 3.3.2 ドライエッチング・プロセス・シミュレータの開発

#### (1) 研究開発の概要

ドライエッチング・プロセスによる被エッチング材料上の表面反応と形状変化を2次元で解析し、2次元断面におけるエッチング形状を確認することを可能とするドライエッチング・プロセス・シミュレータを開発した。3次元構造への拡張については、2次元断面形状の解析結果および2次元マスクデータに基づき、フレームワークソフトの機能であるソリッド・モデラ（立体モデル生成機能）を用いて3次元形状を構築した。

以下に目標に対応する研究開発成果を示す。

##### <目標>

- ドライエッチング・プロセス・シミュレータの概念設計および詳細設計・プログラム設計を完了する。
- 設計作業を踏まえ、ドライエッチング・プロセス・シミュレータ単体の開発を完了する。
- 3次元構造への拡張およびマルチプロセスからの呼び出しの実装を完了し、本個別モジュール単体とフレームワークソフトとの結合検証テスト、および本個別モジュールと機構解析シミュレータや材料・プロセス・データベースとの統合検証テストを完了する。

##### <成果>

- 概念設計ではモジュールの入力項目、出力項目、機能を決定した。詳細設計・プログラム設計ではフレームワークソフトとの入出力形式、モジュールの機能の実装となる解析モデル、数値解法、プログラム構成、処理およびデータフロー、モジュール検証テスト計画を検討した。
- ドライエッチング・プロセスによる被エッチング材料上の表面反応と形状変化を2次元で解析する機能を開発した。また、エッチング深さ・側壁角・サイドエッチ量をドライエッチング・プロセス・シミュレータの解析結果から抽出する機能を開発した。
- ドライエッチング・プロセス・シミュレータのモジュール単体とフレームワークソフトとの統合作業を実施し、フレームワークソフトを用いて、解析条件設定および結果表示が可能となった。
- ドライエッチング・プロセス・シミュレータとフレームワークとの統合検証テストおよび検証解析を完了した。また、検証解析結果により、シミュレーション結果の妥当性を示した。

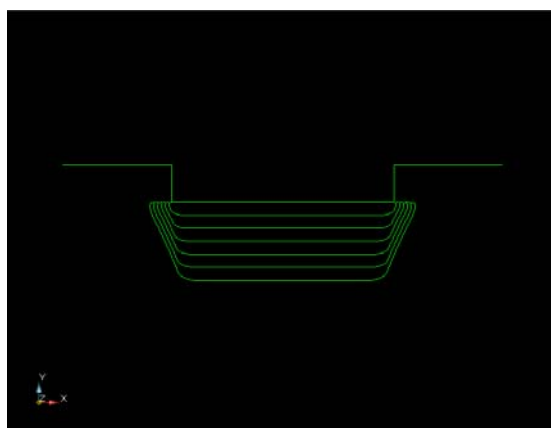


図 3-3-7 : エッチング形状の過渡変化

## (2) 研究開発成果の詳細

ドライエッチング・プロセスによる被エッチング材料上の表面反応と形状変化を 2 次元で解析し、2 次元断面におけるエッチング形状を確認することを可能とするドライエッチング・プロセス・シミュレータを開発した。以下に内容を示す。

ドライエッチング・プロセス・シミュレータでは基板の 2 次元断面プロファイルの時間変化を解析する。解析領域はプラズマシース領域下部の基板表面周辺のみを考える。基板の断面形状は微小線分（ストリング）で分割する。ストリングごとにエッチング速度を算出し、これらの速度に応じて各ストリングを移動させることにより基板断面形状変化を解析する。各時間ステップにおいて以下の物理量を時間に関する未知関数とし、連立常微分方程式を積分することによりシミュレーションを行う。

- ストリングの座標（2 次元断面形状）
- 各ストリング位置におけるイオンの流束
- 各ストリング位置におけるラジカルの流束
- 各ストリング位置における全ラジカルの表面被覆率

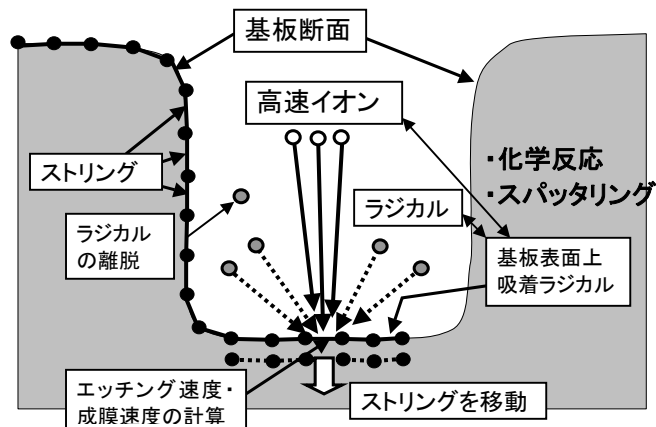


図 3-3-8 : ドライエッチング・プロセス・シミュレータの解析モデル

開発したプログラムに対し、単体機能検証を実施した。単体機能検証ではシリコン酸化膜をマスクとして、マスク開口部からフッ素ラジカルとアルゴンイオンがシリコン表面に入射し、熱励起型化学反応およびイオンアシスト反応によりシリコンが除去され、エッチングが進行する解析モデルを採用した。

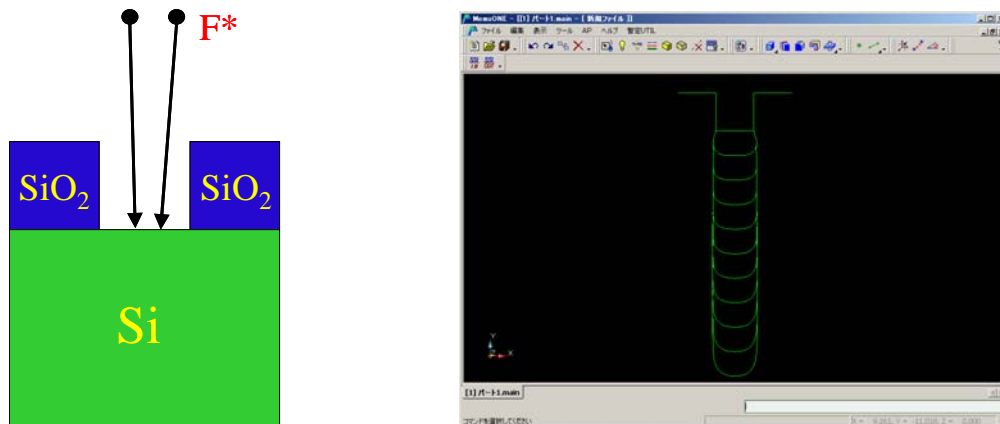


図 3-3-9 : ドライエッチング・プロセス・シミュレータの単体機能検査

マルチプロセス・エミュレータへの形状パラメータの抽出方法は以下の手法を用いた。

エッチング深さの計算は、初期状態におけるエッチング対象材料の表面位置から最終状態における最深部までの高低差とした。次に、側壁角度とサイドエッチング量は、初期表面とエッチング底面の規定領域にある側面座標を最小 2 乗法によって、直線近似して求める。

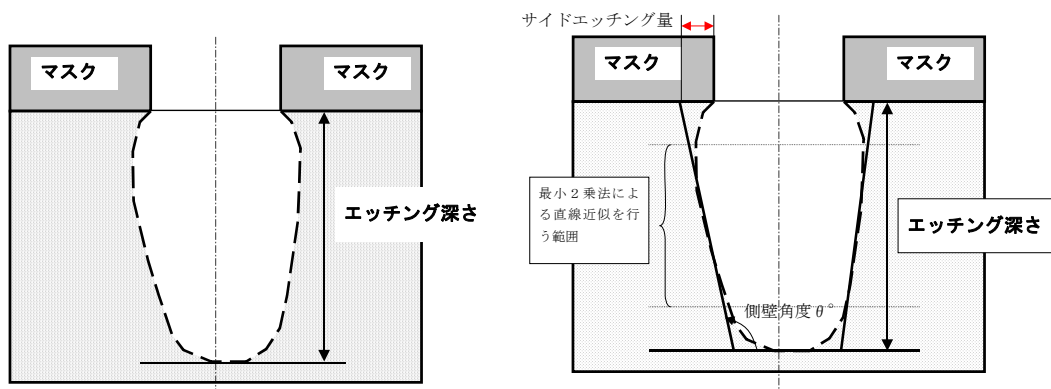


図 3-3-10 : マルチプロセス・エミュレータとの接続データの抽出方法

ドライエッチング・プロセス・シミュレータによる2次元断面形状の解析結果、およびユーザが作成した2次元マスクレイアウトに基づき、マルチプロセス・エミュレータと連携して3次元へ拡張することができる。

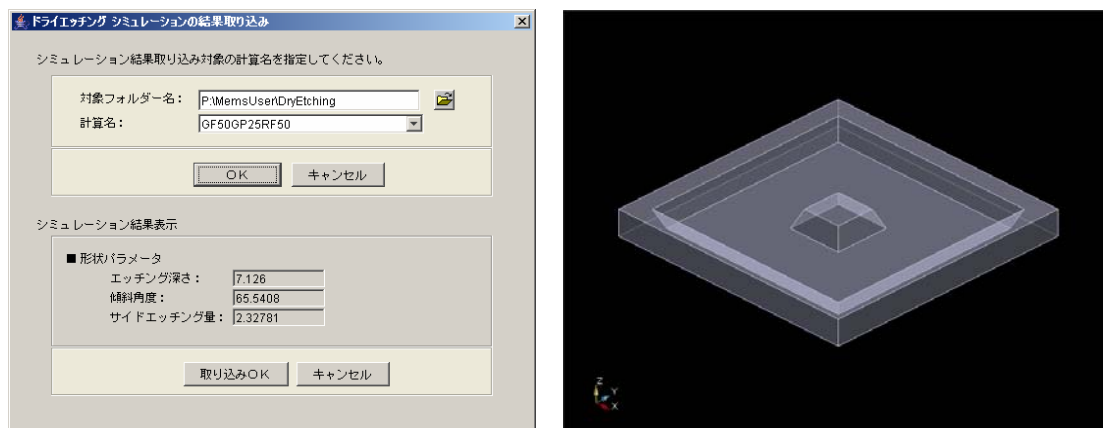


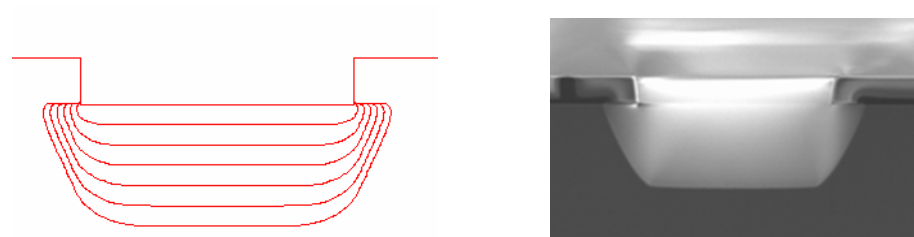
図 3-3-11 : マルチプロセス・エミュレータにおけるドライエッチング・プロセス・シミュレータ結果の取り込み画面（左）と3次元形状の構築結果（右）

検証解析として、独立法人産業技術総合研究所の協力による実測値（放電パワー75W、圧力20Pa、流量50sccm）とシミュレーション結果の比較検証を行った。

計算パラメータを抽出のためにフィッティング解析を実行した。各測定条件において形状フィッティングした結果例を図3-3-12に示す。これらのフィッティング形状は実測値と比較し、～8%程度の誤差でよく一致した。



(a) 流量 50sccm,放電パワー50W,圧力 5Pa



(b) 流量 50sccm,放電パワー50W,圧力 15Pa

図 3-3-12 : ドライエッチング・プロセス・シミュレータのフィッティング結果

次に抽出した計算パラメータを用いて、装置条件を変えて形状予測シミュレーションを行った結果、実測値と比較して数%程度の誤差で一致することが確認できた。

表 3-3-1 : シミュレーション予測値と実測値の比較 (75W, 20Pa, 50sccm)

	実測値 (23分)	予測値	乖離
上部幅	32.5 $\mu$ m	33.1 $\mu$ m	1.5%
下部幅	18.2 $\mu$ m	18.7 $\mu$ m	2.7%
深さ	13.0 $\mu$ m	13.25 $\mu$ m	1.9%

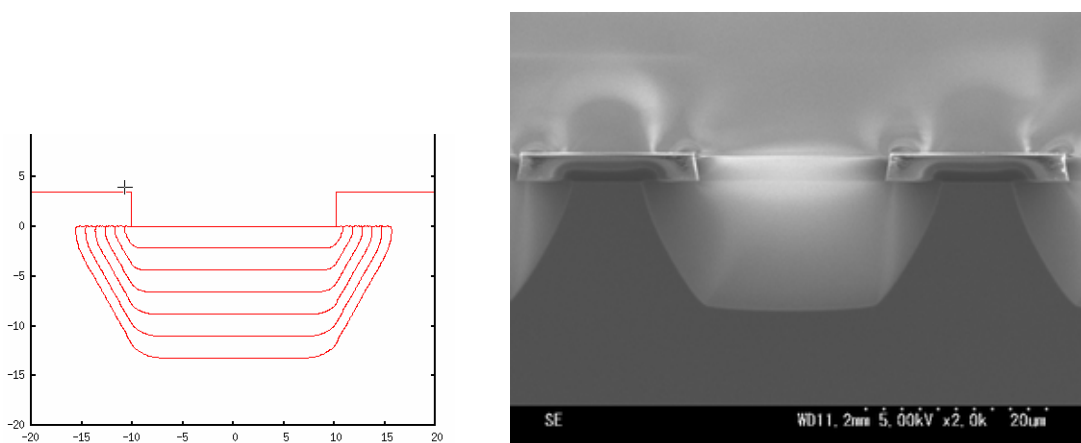


図 3-3-13 : シミュレーション予測形状 (左) と実測形状 (右) の比較



### (3) 研究開発成果の意義

開発されたドライエッチング・プロセス・シミュレータを用いることで 2 次元エッチング・プロファイルの過渡変化を予測することが可能であり、ドライエッチング・プロセスを用いた形状作製プロセスにおけるプロセス最適化が図れる。

また、予測した断面形状を後述マルチプロセス・エミュレータに接続することで、MEMS デバイスの機械的、電気的な特性を解析する時に必要となる MEMS デバイスの CAD モデルへの変換が可能となり、MEMS の機械的、電気的な特性評価の効率化が図られるものと期待される。

### 3.3.3 マルチプロセス・エミュレータの開発(成膜プロセス・エミュレータを含む)

#### (1) 研究開発の概要

フレームワークソフトの機能であるプロセスレシピ、材料・プロセス・データベース、知識データベース等の情報を基に、幾何学的手法を用いて 3 次元構造および 2 次元断面形状を作製するマルチプロセス・エミュレータ(成膜プロセスを含む)を開発した。以下にマルチプロセス・エミュレータで取り扱うプロセス工程を示す。

#### ーエッチング

- ・犠牲層およびエッチストップ層を含む異方性ウェット・エッチング・プロセス
- ・プラズマ、イオンビームによるドライ・エッチング
- ・等方性エッチング

#### ー成膜

- ・物理気相法(Physical Vapor Deposition)
- ・化学気相法(Cheical Vapor Deposition)

#### ー接合

- ・基板、あるいは部品の陽極接合

#### ーリソグラフィ

- ・レジスト塗布、マスク転写、現像等の工程

#### ー切削

- ・マイクロ穴加工
- ・基板の切削

システムは全体コントロールと個別プロセスモジュールから構成される。各プロセスをモジュール化し、他のプロセス解析ツールとのデータ互換、プロセス工程の置換、および他のプロセスの追加が容易になるように構築した。

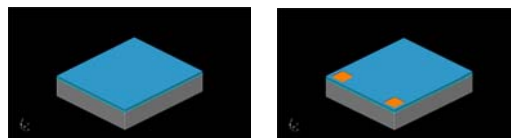
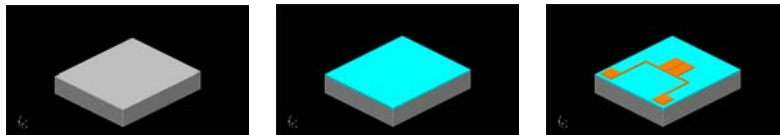
以下に目標に対応する研究開発成果を示す。

<目標>

- マルチプロセス・エミュレータに関する概念設計、詳細設計・プログラム設計を完了する。
- 設計作業を踏まえ、マルチプロセス・エミュレータの開発を完了する。
- マルチプロセス・エミュレータのフレームワークソフトへの結合およびシステム統合を実現させ、結合検証テストおよび統合検証テストを完了する。

<成果>

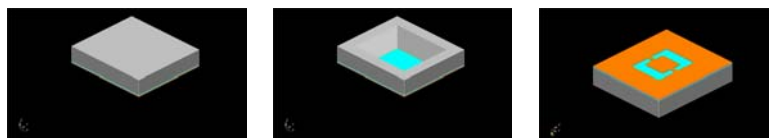
- 概念設計では、ソフトウェア委員会における議論を経て、要件抽出、システム構成（入力・機能・出力）を、詳細設計・プログラム設計では、インターフェース、モジュールの構成・機能、処理およびデータフロー、入出力形式、解析モデル、数値解法、関数や変数等のプログラム構成を決定し完了した。
- フレームワークから引き渡されるプロセスレシピ定義ファイルおよびマスク定義ファイルを読み込み、それらのデータに従って 3 次元 CAD データおよび 2 次元セルデータを生成するプログラムを開発した。
- 検証モデルに対して、実際のプロセスに即したレシピにてモデル形状を作製し、測定形状とよく一致することを確認した。また、マルチプロセス・エミュレータのモジュール単体とフレームワークソフトとの結合テストを実施し、動作確認を完了した。



基板→成膜→電極生成→成膜→エッチング



SOI 基板→GND 電極用金属成膜→可動部・ヒンジ形成→エッチング





裏返し→支持層除去エッチング→裏返し→ミラー可動部形成エッチング

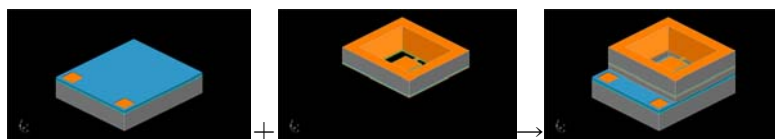


図 3-3-14 : 3次元マルチプロセス・エミュレータの計算結果

## (2) 研究開発成果の詳細

マルチプロセス・エミュレータは3次元エミュレータと2次元エミュレータから構成される。3次元マルチプロセス・エミュレータは幾何学的手法を用いて3次元ソリッドモデルを作製するツールである。一般的な3次元CADツールと異なる点は、プロセスレシピに基づき実際のMEMS製造プロセスと同じ手順で立体を作製することである。すなわち、プロセスレシピに含まれるマスク形状やプロセス種類に関する情報を基に、材料・プロセス・データベース、知識データベース等を参照しながら基板表面の形状変化を決定する。作製された3次元モデルに対する自動メッシュ分割の機能がフレームワークソフトに用意されており、機構解析シミュレータを用いた性能評価が可能である。

3次元エミュレータは曲面を扱わず多面体近似を行う。したがって、成膜やエッチング後のコーナー部分は平面を突き合わせた形状となる。一方、2次元エミュレータは空間格子法により、3次元エミュレータより複雑な形状を表現することが可能であり、断面形状をより高精度にエミュレーションする機能を有する。

開発したマルチプロセス・エミュレータで取り扱うプロセス工程を以下に示す。

### ーエッチング

- ・犠牲層およびエッチストップ層を含む異方性ウェット・エッチング・プロセス
- ・プラズマ、イオンビームによるドライ・エッチング
- ・等方性エッチング

### ー成膜

- ・物理気相法(Physical Vapor Deposition)
- ・化学気相法(Cheical Vapor Deposition)

### ー接合

- ・基板、あるいは部品の陽極接合

### ーリソグラフィ

- ・レジスト塗布、マスク転写、現像等の工程

### ー切削

- ・マイクロ穴加工
- ・基板の切削

プロセスレシピの内容に基づき、3次元ソリッドモデルまたは2次元断面形状をエミュレーションする。3次元エミュレータの概要を以下に示す。

- MEMS 作成の各プロセスにより作成される 3 次元立体を、プロセスレシピに基づいた形状変化エミュレーションによりソリッドモデルとして作成する。
- プロセス後の形状は多面体で表される。
- エミュレーション形状を決定するパラメータ（以下、形状近似パラメータ）は次の通りである。
  - ◆ 成膜・フォトリソグラフィ時の膜厚
  - ◆ 成膜時の SCF(Surface Conformal Factor)
  - ◆ エッチング時のエッチング深さ
  - ◆ 異方性ドライ・エッチング時の側壁角度
  - ◆ 異方性ウェット・エッチング時の Si 結晶面ごとのエッチング量

2次元断面エミュレータの概要を以下に示す。

- 3次元エミュレータは、エミュレーション形状を多面体モデルで表す。そこで、等方性エッチング等の実際には曲面となる形状において、3次元エミュレーション形状の精度を補うため、2次元エミュレータを導入する。
- 2次元エミュレーションは指定された断面のマスクレイアウトおよびプロセスレシピを基に行う。また、3次元エミュレーションとは独立したエミュレーションを行う。
- 形状表現には空間格子法を用いる。平面を格子に分割し、各セルの材質によって形状を表現する。
- 3次元エミュレーションで用いる等角投影法に比べ装置の特性を反映した断面形状を作成する。

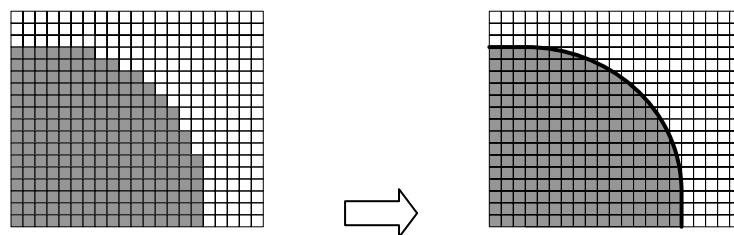


図 3-3-15 : 2次元断面形状エミュレータの概要(空間格子法)

## ① 成膜プロセス

成膜装置は次の3種類のいずれかに分類される。

表 3-3-2：成膜装置とエミュレーション近似形状の対応

成膜の種類	成膜装置	3次元近似形状	2次元断面近似形状
絶縁材料の成膜	常圧/減圧CVD装置	コンフォーマル	曲面コンフォーマル
	プラズマCVD装置	コンフォーマル	曲面コンフォーマル
	スパッタ装置	コンフォーマル	コンフォーマル
	EB蒸着装置	サーフェース	サーフェース
電極材料の成膜	減圧CVD装置	コンフォーマル	曲面コンフォーマル
	スパッタ装置	コンフォーマル	曲面コンフォーマル
	EB蒸着装置	サーフェース	サーフェース
	真空蒸着装置	サーフェース	サーフェース
熱酸化	拡散炉	コンフォーマル	曲面コンフォーマル
スピコート	ポリイミドコート	プレイナ	プレイナ
	SOG+CMP	プレイナ	プレイナ

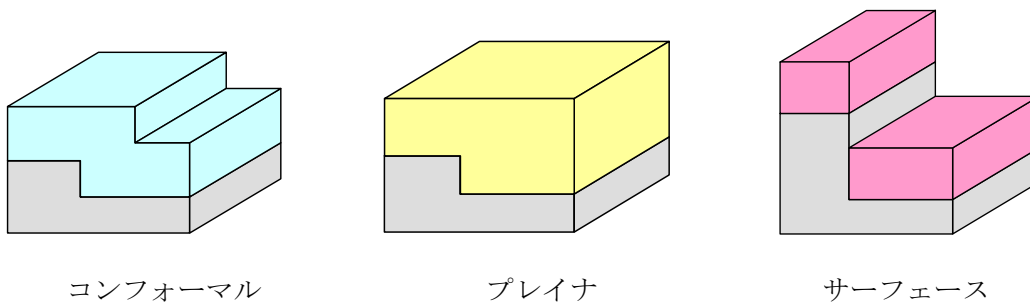


図 3-3-16：成膜工程における3次元形状エミュレーション

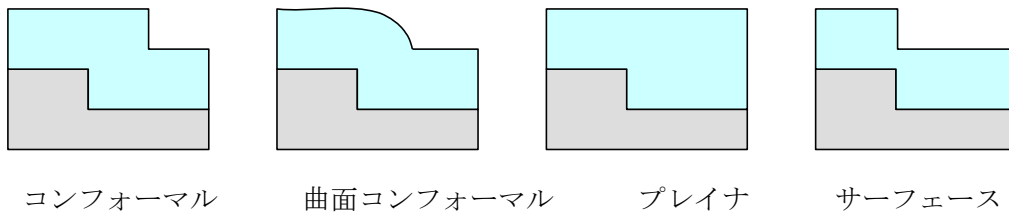


図 3-3-17：成膜工程における2次元形状エミュレーション

## ② フォトリソグラフィ工程

- マスクパターンに従いレジストをウエハ上に形成する。
- リソグラフィ内部でのプロセス(レジスト塗布・露光・現像処理等)はエミュレータ上では省略して最終形状のみ出力することも可能とする。
- レジストは溶液状のものをコーティングするものと仮定し、レジスト塗布前のウエハ表面形状に依らずレジスト上面は基板面から等距離の平面(成膜のプレイナに相当)とする。

### ③ ドライ・エッチング工程

表 3-3-3：ドライ・エッチング装置とエミュレーション近似形状の対応

エッチングの種類	エッチング装置	近似形状(2次元・3次元共通)
シリコンエッチング	D-RIE装置	異方性(側壁角付)
	XeF <sub>2</sub>	等方性
絶縁材料エッチング	プラズマエッチング装置	等方性
	RIE装置	異方性(側壁角付)
金属材料エッチング	RIE装置	異方性(側壁角付)
有機材料エッチング	O <sub>2</sub> アッシング	等方性

### ④ ウェット・エッチング工程

表 3-3-4：ウェット・エッチング装置とエミュレーション近似形状の対応

成膜の種類	成膜装置	近似形状
シリコンエッチング	KOHドラフト	異方性
	TMAHドラフト	異方性
SiO <sub>2</sub> エッチング	フッ酸ドラフト	等方性
金属材料エッチング	ドラフト	等方性
エッチング一般	ドラフト	等方性

### ⑤ 犠牲層エッチング(材料除去)

- 指定した材料を完全に除去する

### ⑥ 接合工程

- 異なる部材を接合する。
- 接合面は±Z面とする。

### ⑦ 拡散工程

- 拡散工程による形状変化は無視できるものとする。

### ⑧ 切削工程

- 孔加工では、切削孔の底面と深さをユーザ指定し、穴加工および切断を行う。

以上のエミュレーション・ルールに従い、マルチプロセス・エミュレータを構築した。

図 3-3-18 にフレームワークソフトで記述作成したプロセスレシピを示す。このようなプロセスレシピを基に、フレームワークソフトを利用して、エミュレーションの実行および結果表示ができる。

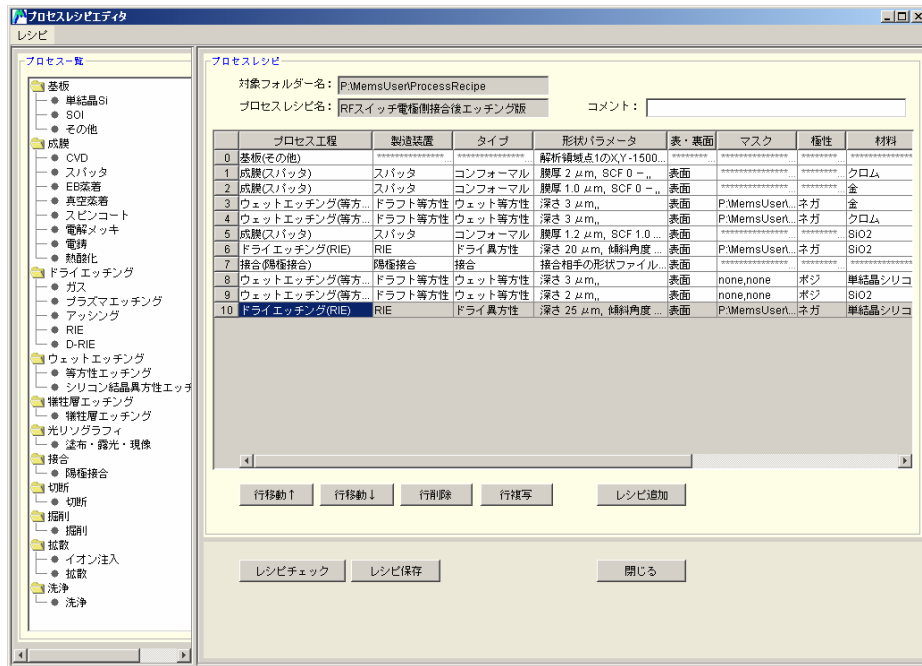
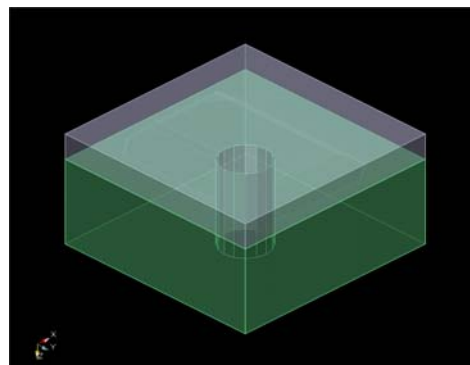
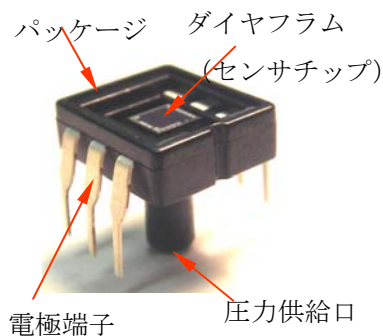
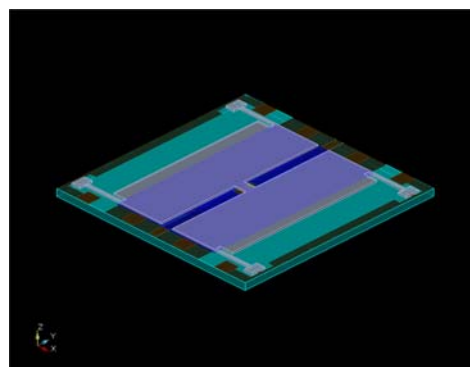
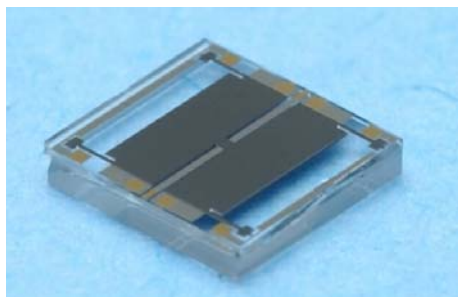


図 3-3-18 : プロセスレシピ作成画面

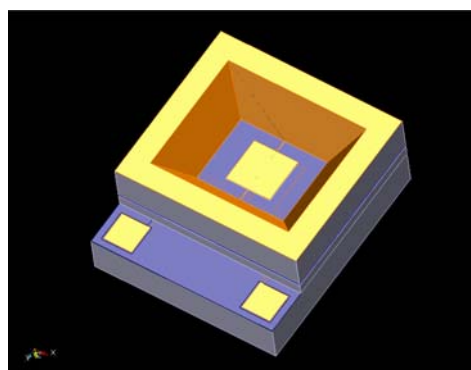
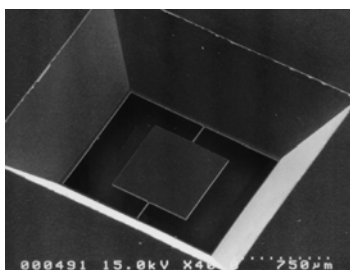
検証モデル（圧力センサ、RF スイッチ、静電駆動ミラー）に対しマルチプロセス・エミュレータを用いて作製した結果を示す。各検証モデルともに、実際のプロセスに即したレシピにてモデル形状を作成し、測定形状とよく一致することを確認した。ここで、圧力センサの基板部分は、異方性ウェット・エッチング・プロセス・シミュレータで形成した結果をマルチプロセス・エミュレータで取り込んだ結果であり、異方性エッチング・プロセス・シミュレータとの連携結果である。



圧力センサ(松下電工株式会社)



RF スイッチ(オムロン株式会社)



静電駆動ミラー(オリンパス株式会社)

図 3-3-19 : マルチプロセス・エミュレータの検証モデルの計算結果

また、マルチプロセス・エミュレータで作成した形状に対して、メッシュを生成し、電界と力学の連成解析を行った結果を図 3-3-20 に示す。

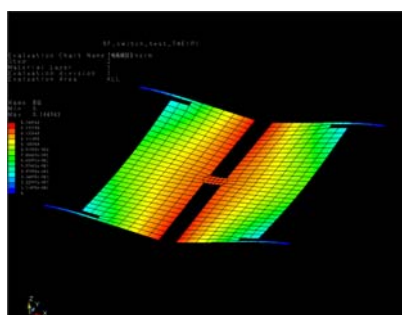


図 3-3-20 : マルチプロセス・エミュレータで作成した形状を用いて、電界・力学の連成解析を行った結果（静電力による変形図）

以上より、マルチプロセス・エミュレータの開発およびマルチプロセス・エミュレータのモジュール単体とフレームワークソフトとの結合テストを実施し、動作確認を完了した。また、機構解析シミュレータや異方性ウェット・エッチング・プロセス・シミュレータおよびドライエッチング・プロセス・シミュレータとの連携テストを行い、マルチプロセス・



エミュレータを中心として計算結果を受け渡しできることを確認した。

### (3) 研究開発成果の意義

開発されたマルチプロセス・エミュレータを用いることでプロセスレシピとマスクデータから MEMS デバイスの機械的、電気的な特性を解析する時に必要となる MEMS デバイスの CAD モデルが容易に 3 次元 CAD モデル、2 次元断面を作製することが可能となり、MEMS の機械的、電気的な特性評価の効率化が図られるものと期待される。

## 3.3.4 ナノインプリント加工・解析システムの開発

### (1) 研究開発の概要

MEMS の加工において近年急速に加工方法が構築され、研究開発および技術開発に利用されてきている、熱および光を利用したナノインプリント加工について、シミュレーション的なアプローチからの解析システムを開発した。以下に目標に対応する研究開発成果を示す。

#### ① 熱ナノインプリント加工解析システムの開発

<目標>

- 熱ナノインプリント・プロセス解析に対応する解析モデル構築を完了する。具体的には熱ナノインプリント・プロセス各工程を有限要素法に対応する数値解析モデルにブレイクダウンし、定式化する。
- 熱ナノインプリント・プロセス解析に対応した解析モデルに基づく、熱ナノインプリント・プロセス解析シミュレータの開発を完了する。
- 構築された解析モデルに基づく、熱ナノインプリント・プロセス解析シミュレータの総合的な評価検証を完了する。

<成果>

- 加熱→押込→保持→冷却→離型のプロセスを連続して解析する、熱ナノインプリント・プロセス各工程を有限要素法に対応する数値解析モデルの構築を完了した。
- 熱ナノインプリント・プロセス解析に対応する 5 つの解析プロシージャと粘弾性、剛体、弾塑性体の各材料モデルに加えて、各種要素、接触アルゴリズム、マトリックスソルバー、自動増分調整、フレームワークとの結合機能の開発を完了した。
- 実験検証を公立大学法人大阪府立大学、独立法人産業技術総合研究所と共同で実施し、成型形状比較により、解析結果と実験結果が良く一致している事を確認した。

#### ② 光ナノインプリント加工解析システムの開発

<目標>

- 光ナノインプリント・プロセス解析に対応した電磁波解析プログラムのモデル構

築を完了する。具体的には光ナノインプリント・プロセスに対応する現象を数値解析モデルにブレイクダウンし、定式化する。

- 光ナノインプリント・プロセス解析に対応する解析モデルに基づき、光ナノインプリント加工解析シミュレータに対応する電磁波解析プログラム(FDTD法:Finite Difference Time Domain 法)の単体モジュールの開発を完了する。
- 構築された解析モデルに基づく、光ナノインプリント加工解析シミュレータの評価検証を試行する。

<成果>

- 光ナノインプリント加工解析シミュレータの解析モデルの構築を行うにあたり、ナノインプリント・プロセス解析技術や知識を体系化し、光ナノインプリント・プロセスに対応した FDTD 法による電磁波解析プログラムの解析モデル構築、および検証モデルの検討を完了した。
- 構築された光ナノインプリント・プロセス解析モデルに基づいた FDTD 法による電磁波解析プログラムの開発、およびフレームワークを通じた組込みのためのインターフェースの設計、入出力データ変換機能開発、エラーチェック機能開発、実行制御機能開発を完了した。
- 構築された解析モデルに基づいた基本解析機能の検証評価を国立大学法人岡山大学と共同で実施し、単体モジュールとしての動作、機能確認を実施した。さらに国立大学法人大阪府立大学と共同で、検証モデルを用いて、FDTD 法による電磁波解析プログラムのシミュレーション結果を評価し、モールド設計やプロセス条件の最適化に利用できることを確認した。

## (2) 研究開発成果の詳細

### ① 熱ナノインプリント加工解析システムの開発

熱ナノインプリント解析では、例えば加熱→押込→保持→冷却→離型のように複数のプロセスを連続して解析する必要がある。そこで本解析システムでは「静的微小変形」、「静的大変形」、「準静的微小変形」、「準静的大変形」、「定常熱伝導」の5つの解析プロシージャを開発し、それぞれを任意の順番で任意のプロセス数の実行が可能となるよう、熱ナノインプリント・プロセス各工程を有限要素法に対応する数値解析モデルを構築した。また、境界条件もプロセス毎に独立して設定することが可能とした。

また、材料に対するモデルとして、樹脂材料モデルと金型材料モデルを構築し、各々の相互作用モデルについても考慮した。

樹脂材料モデルとしては「一般化マクスウェルモデルに基づく粘弾性体」(以下粘弾性モデル)を採用した。採用した粘弾性モデルのせん断方向の挙動を表すモデルの概略を図3-3-21に示す。材料の静的な状態を決定する横弾性係数  $G_{\infty}$ 、および準静的な状態を決定する複数のマクスウェル要素(横弾性係数  $G_i$  と時定数  $\tau_i$  のペア)から成るモデルであり、ダ

ダッシュポットの影響で粘性、すなわちひずみ速度依存性を持つ材料モデルである。解析の入力物性値としては各横弾性係数を全ての横弾性係数の和で割って無次元化した値とした。

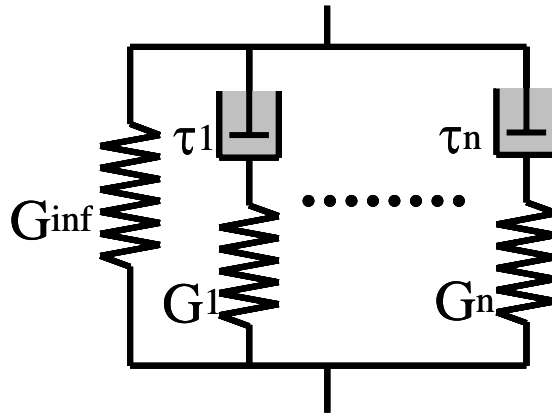


図 3-3-21：粘弾性モデルのせん断挙動モデル図

樹脂材料モデルについて簡単に説明する。偏差成分に対してのみ Wiechert モデルを適用し、体積弾性率を一定と仮定した、以下の構成方程式を採用した。

$$[T] = P[I] + [S] = KE_{vol}[I] + 2G_0 \left( [E'] - \sum_{i=1}^n g_i [E'_v]_i \right)$$

ここで、 $[T]$ は応力、 $K$ は体積弾性率、 $E_{vol}$ は体積ひずみ、 $G_0$ は即時横弾性率、 $[E']$ は偏差ひずみ、 $g_i$ は無次元化横弾性率、 $[E'_v]_i$ は偏差粘性ひずみを表す。偏差粘性ひずみは Wiechert モデルの各 Maxwell 要素のダッシュポットのひずみの時間更新式から求められる。粘性ひずみの時間発展計算の際には WLF 則に基づく温度-時間の変換を行う。解析の入力に用いる材料物性は、基準温度での長期ヤング率  $E_{\infty}$ およびポアソン比  $\nu_{\infty}$ 、無次元化横弾性率  $g_i$ および時定数  $\tau_i$ の組、WLF 則の基準温度  $\theta_0$ および定数  $C_1$ と  $C_2$ 、熱膨張率  $\alpha$ である。

金型材料モデルとして剛体モデルおよび弾塑性体モデルを採用した。実際の熱ナノインプリント・プロセスでは、多くの場合金型は樹脂と比較して十分に硬いとみなせる上、塑性域に至る程の荷重は通常かからない。本システムではラグランジュの未定係数法を用いて剛体要素の定式化を行い、金型材料モデルとして剛体モデルを使用することを可能にした。

要素としては3次元では六面体要素・三角柱要素・四面体要素を、2次元（軸対象、平面歪み、平面応力）では四角形要素・三角形要素に対応した。ここで、大変形を伴うインプリント解析を行うことを主目的としていることから、要素はすべて一次要素を採用した。

相互作用モデルとしての接触アルゴリズムとしてはラグランジュの未定係数法に基づく手法を組み込んだ。接触の定義は、接触を考慮する表面集合と節点集合のペアを定義することで行うこととした。

また、マトリックスソルバーとしてヤコビ前処理付き MINRES 法による反復解法をデフォルト解法として組み込んだ。さらには非線形解析、特に広範囲にわたる接触を扱う熱ナ

ノインプリント解析で必要不可欠となる自動増分調整機能を導入した。

以上のモデル化に基づき熱ナノインプリント・プロセス解析に対応したモジュールの開発を実施した。

構築された解析モデルに基づく、熱ナノインプリント・プロセス解析シミュレータの総合的な評価検証として、粘弾性モデルの精度検証および実験検証を実施した。

粘弾性モデルの精度検証としては汎用有限要素解析ソフトである ABAQUS との精度比較を行った。精度検証例題モデルを図 3-3-22 に示す。材料物性値は独立法人産業技術総合研究所測定 of PMMA の値を用いた。140°C と 120°C における 1 [Hz] および 100 [Hz] の強制振動を与えた場合の荷重時刻暦を図 3-3-23 に示す。いずれのケースでも本システムと ABAQUS で精度良く一致している。この検証により、本システムの粘弾性材料モデルが正しく組み込まれていることが確認できた。

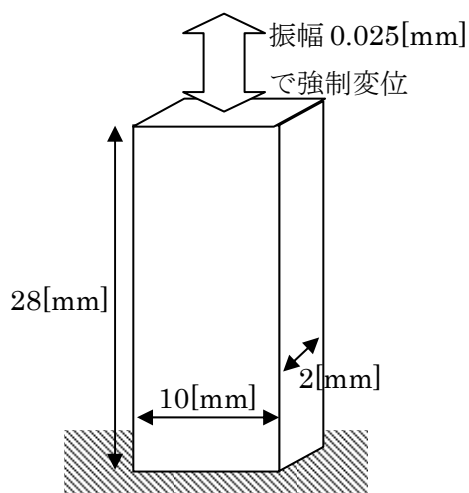
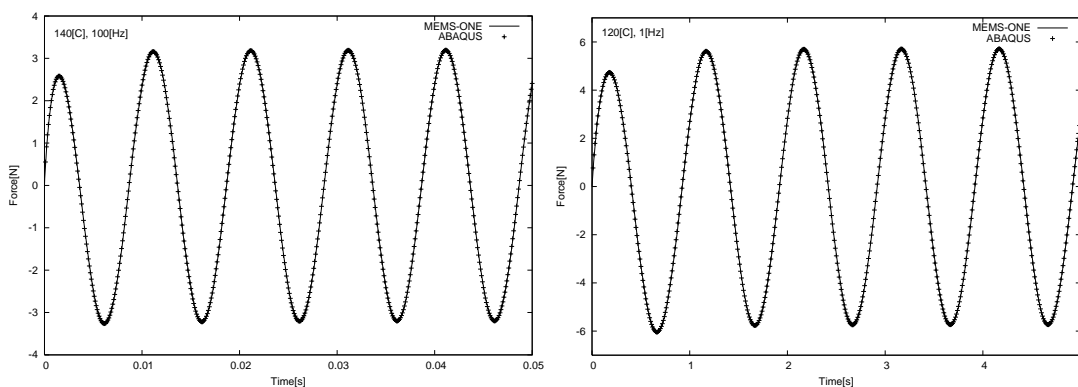


図 3-3-22 : 精度検証例題モデル



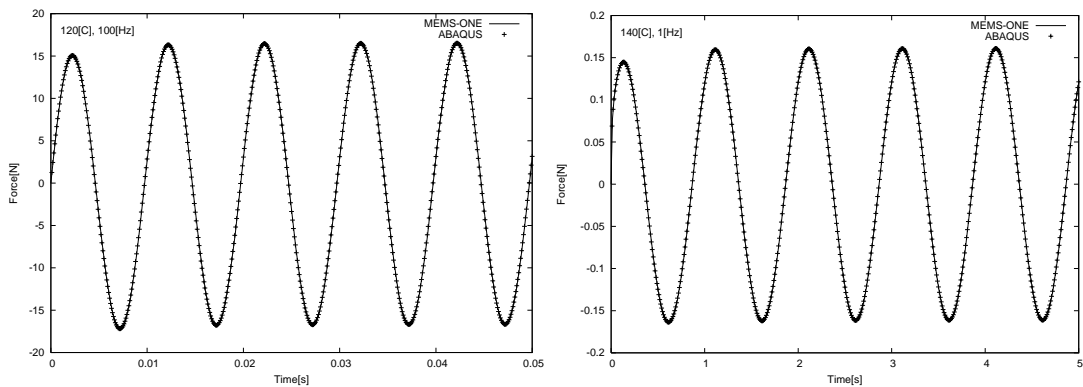


図 3-3-23 : 粘弾性モデルの精度検証(ABAQUS との比較結果)

実際的なインプリントプロセスに対しての実験検証については公立大学法人大阪府立大学と共同で実施した。実験検証例題のモデルを図 3-3-24 に示す。圧力一定の境界条件の下で押込時間を変化させ、粘性の影響により時間と共に充填率が上がって行く様子を図 3-3-25 に示す。成型形状比較により、解析結果と実験結果が良く一致している事が確かめられた。

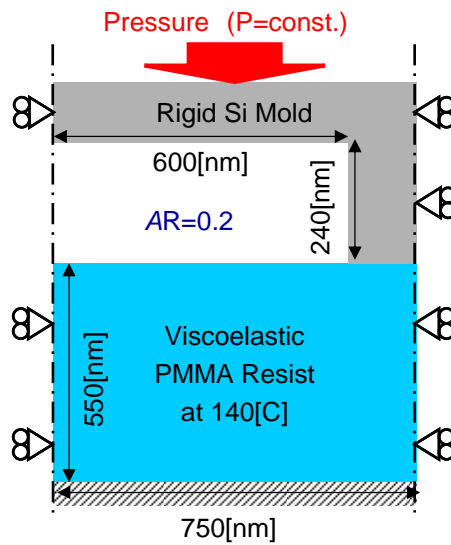


図 3-3-24 : 実験検証モデル

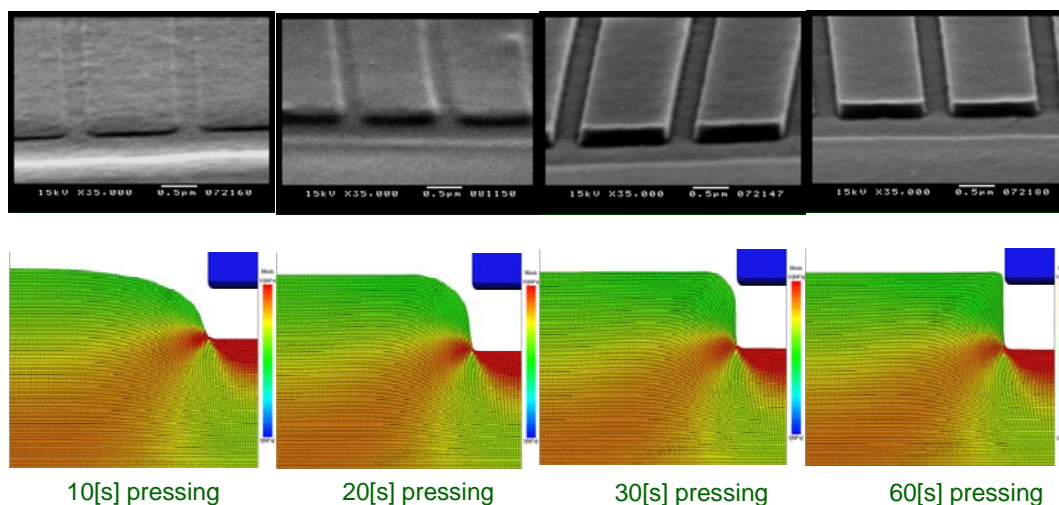


図 3-3-25：実験検証例題の比較結果

また、押込時間を変化させた際の樹脂の張り出し量をプロットしたものを図 3-3-26 に示す。厳密な材料物性値を用いた解析(黄色線)結果が実験値(右図の赤色棒)と実験誤差の範囲で一致していることが確認できた。

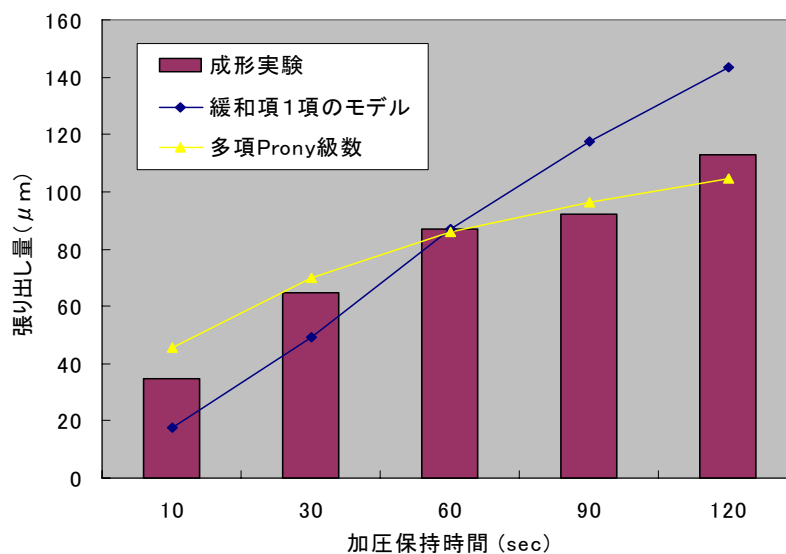


図 3-3-26：変形量への加圧保持時間の影響に関する成形実験および解析の結果

## ② 光ナノインプリント加工解析システムの開発

構築された光ナノインプリント・プロセス解析モデルに基づいた FDTD 法による電磁波解析プログラムの開発、およびフレームワークを通した組込みのためのインターフェースの設計、入出力データ変換機能開発、実行制御機能開発を完了した。

光ナノインプリント解析では、FDTD 法を用いて光硬化樹脂内の電磁界分布を求める。

FDTD 法は次式のマクスウェル方程式を空間および時間について差分化して求める。空間分割は図 3-3-27 のような単位格子を用いて行う。

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{i}$$

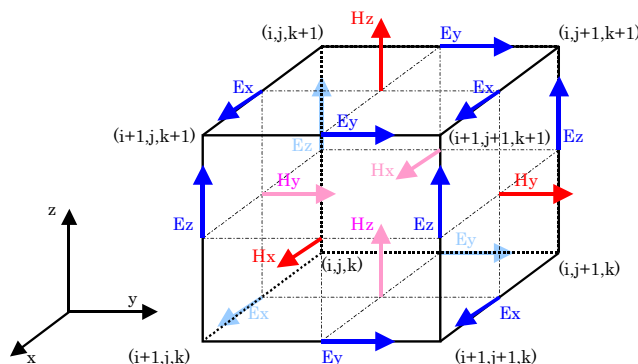


図 3-3-27 : FDTD 法の計算格子とベクトル

解析領域の境界条件は吸収境界(PML または Mur)とした。入射波は、平面波とし、そのスペクトルは正弦波の重ね合わせで定義する。解析結果出力として、時間/周波数領域の電磁界分布の他に、観測点の電圧・電流値変化、放射パターン、入力インピーダンス、S パラメータ等の出力を用意し、電磁波解析ツールとしての利用も可能とした。

完了した FDTD 法による電磁波解析プログラムの単体モジュールとしての機能評価を実施した。解析モデルとして図 3-3-28 のパッチアンテナ解析モデルを例題として解析を行った。図 3-3-29 に電界分布と磁界分布を示す。国立大学法人岡山大学作製の電磁波解析プログラムの解析結果との比較を実施した結果、良好な一致を得た。これにより単体モジュールとしての FDTD 法による電磁波解析プログラムの有効性を確認した。

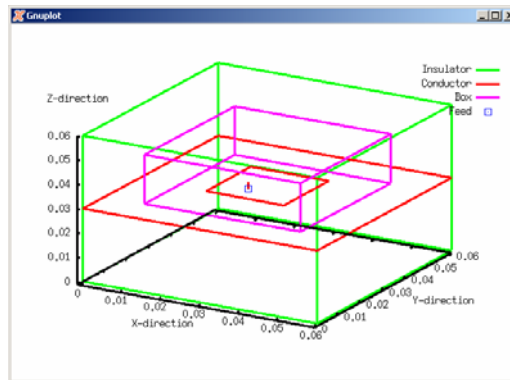
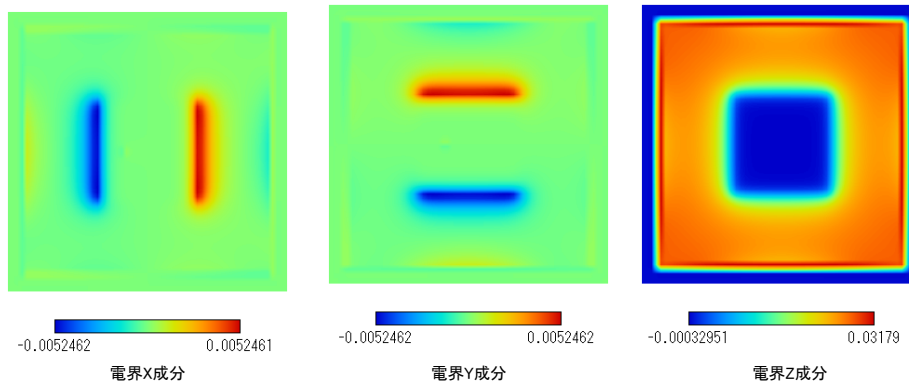
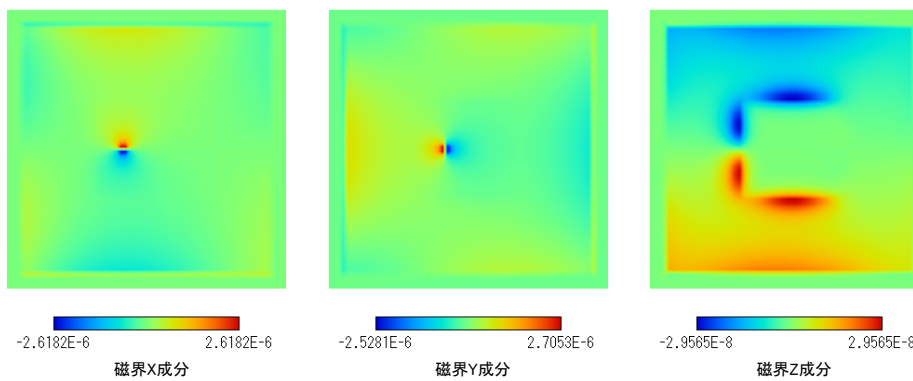


図 3-3-28 : パッチアンテナ解析モデル



$z=0.031$  の面 6000step(1.15434E-08sec)の電界成分



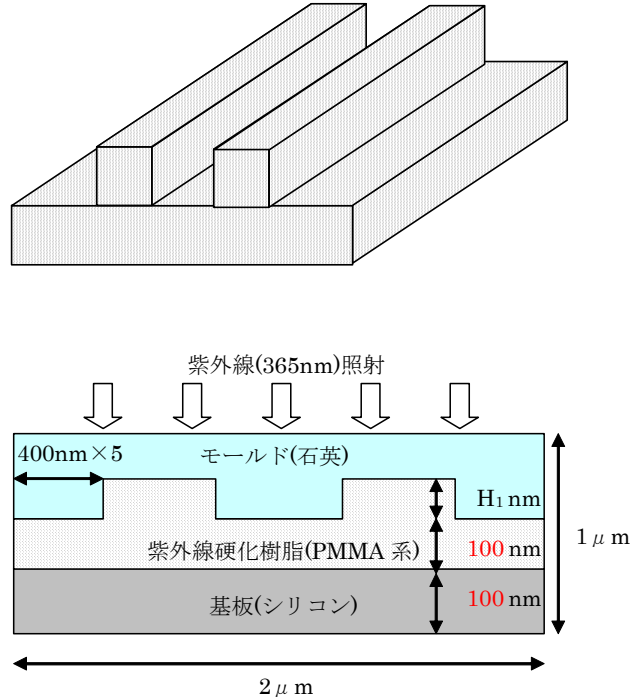
$z=0.031$  の面 6000step(1.15434E-08sec)の磁界成分

図 3-3-29 : パッチアンテナの解析結果

ライン&スペース構造の検証モデル(図 3-3-30)を用いて、光ナノインプリント・シミュレータのシミュレーション結果を文献 (M. Wissen, et. al, “Impact of residual layer uniformity on UV stabilization after embossing”, American Vacuum Society, 2004.)



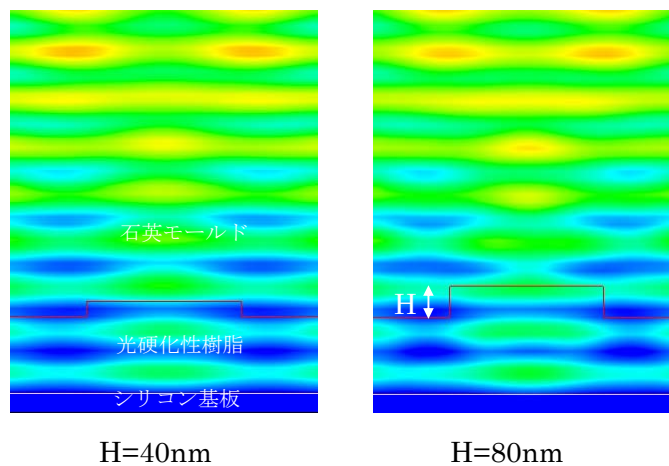
との比較検証により評価した。



$$H_1 = 40, 80, 120, 160, 200 \text{ nm}$$

図 3-3-30 : 400nm ライン&スペース検証モデル

ライン&スペース構造の検証モデルに波長 365nm の単色光が入射したときの、石英モールド、光硬化性樹脂、シリコン基板内の電界強度分布を FDTD 法による電磁波解析プログラムで解析した。このとき、ライン高さを 40nm, 80nm, 120nm, 160nm, 200nm と変化させ、電界強度分布を求めた結果を図 3-3-31 に示す。



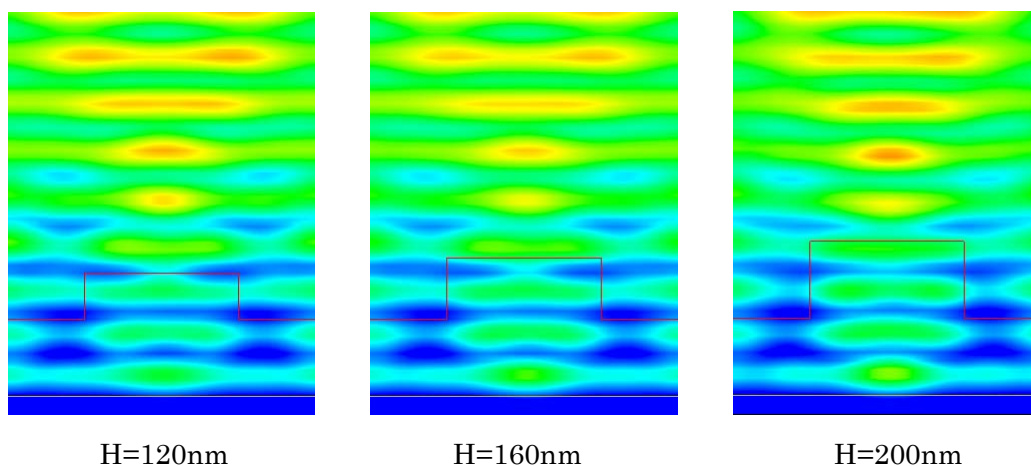


図 3-3-31 : 高さ H を変えたときの電界強度分布

電界強度は、青（弱）→黄（中）→赤（強）で強度を現している。高さ H の違いにより、光硬化性樹脂の上面が、電界強度の強い領域にある場合（例えば H=200nm）と弱い領域（例えば H=120nm）にある場合とに分かれる。このような電界強度分布の違いが、前出の文献で示されるとおり、現像後のラインエッジ形状がシャープになるか、丸みを帯びるかの違いとして現れることが予想できることが確認できた。これより、モールド設計やプロセス条件の最適化に利用できることを確認した。

### (3) 研究開発成果の意義

開発されたナノインプリント加工解析システムより、ナノインプリント・プロセスの各種条件の検討が、ナノインプリント用樹脂材料の粘弾性特性のデータベースを利用した熱ナノインプリント加工解析システム、光ナノインプリント加工解析システムによる解析からも可能となり、ナノインプリント・プロセス開発の効率化が図られるものと期待される。

## 3.4 機能拡張ソフトの開発

### 3.4.1 プロセス逆問題解析

#### 3.4.1.1 研究開発の概要

##### (1) ユーザ要求仕様と解析手法の導出

プロセス逆問題解析に有効であると思われる解析手法と解析に必要なデータベース及び解析結果のガイダンス方法についてユーザの立場から調査・検討を行った。その結果、解析対象をニーズの高い特定のMEMSデバイスに限定し、プロセスデータに含まれる図形データに基づくDP (Dynamic Programming、動的計画法) マッチングと知識データベース検索によるガイダンス機能を利用したプロセス設計手法を選択して開発を進めた。

平成16年度の研究開発では、まず、従来のMEMS設計用のマスク作図ツールについて、プロセスレシピ・マスクレイアウトエディタ機能を分析し、プロセス設計・マスク作成ツールとしての問題点・開発課題を抽出した。その結果、プロセスレシピエディタはプロセスとマスクデータによる3次元モデラであり、マスクレイアウトエディタではMEMS特有の設計思想が考慮されていないなど、いわゆるMEMS用プロセス・マスク設計ツールではないことを確認した。

以上の分析結果を踏まえ、ユーザの立場からのマスクレイアウトエディタ機能に対する要求仕様とマスクデータのインターフェース機能の仕様を策定した。マスクレイアウトエディタ機能では、単なる解析モデル作成のための図形入力機能だけではなく、マスク設計ユーザにとって使い勝手のよい図形選択表示法、曲線データ近似法などのマスク図形編集機能を検討して、その要求仕様書を作成した。マスクデータのインターフェース機能では、フレームワークメイン画面からの呼び出し機能、データベース参照機能、図形データの入出力・変換フォーマット等を策定した。

平成17年度の研究開発では、プロセス逆問題解析手法の導出のまとめとして、前年度提案したプロセス逆問題解析のユーザ要求仕様を総合的に比較評価・分析して、プロセス・マスク設計を支援するための最適な手法を導出した。具体的には、プロセス・マスク設計に有効な加工形状・図形データのDPマッチングによるデータマイニング手法、知識データベースに基づくプロセスガイダンス手法、及び図形データからホトマスクデータへの編集・変換機能について、プロセス逆問題解析手法に関する仕様書としてまとめた。

##### (2) プロセスデータ採取

プロセス逆問題解析において検索・抽出の対象となるプロセスデータを、実験および技術調査により採取した。

平成16年度の研究開発では、プロセス逆問題解析に必要なプロセスデータのデータ仕様を決め、実験的にプロセスデータを採取した。

解析の対象とするデバイス構造としては、ニーズの高いセンサ、光・RF-MEMSデバイスなどに共通的な形状を典型モデルとして選定し、一般に公表されている成膜、露光、エッチング工程などの標準MEMSプロセスを想定して、それらのプロセス設計のために特に必要とするプロセスデータ項目を抽出してプロセスデータ仕様書としてまとめた。ダイアフラム構造、メサ構造、

ブリッジ構造、カンチレバー構造などについて、溝の幅、段差、傾斜角度など、そのプロセスにおいて重要ポイントとなる形状データ項目と加工速度、加工マスクとの選択比などの加工特性データ項目を選定した。

プロセスデータ採取においては、加工材料として、一般的な MEMS 材料である Si・SOI 基板に、SiO<sub>2</sub> や金属薄膜のパターンをプロセスマスクとして形成したものを対象にして、ウェットエッチング（等方性、異方性）とドライエッチング（Deep-RIE(Reactive Ion Etching)）により一定深さ加工した場合の加工前と加工後の断面形状とその寸法を SEM 観察により測定し、プロセスデータとしてまとめた。

平成17年度のプロセスデータ採取においては、Si・SOI基板に加えて、SiO<sub>2</sub>・ガラス基板と、SiO<sub>2</sub>・金属薄膜を対象にして、主にウェットエッチング（等方性、異方性）とドライエッチング（Deep-RIE、ICP(Inductively Coupled Plasma)-RIE) におけるエッチング用マスク及び加工溝の幅、深さ、傾斜角度など、加工前後の断面及び平面形状の変化をプロセスデータとして採取した。

平成18年度のプロセスデータ採取においては、昨年度までの材料及び加工方法に加え、レジストを代表とする有機材料のエッチングデータを採取した。また、異方性エッチングやドライエッチングにおける補償パターンを含む異形状の加工特性について、実験的にプロセスデータを採取し、プロセス逆問題解析ソフトに搭載するとともに、知識データベースにも組み入れた。

### (3)ソフトの設計及び開発

MEMS 設計技術者が知識として所有する MEMS プロセス・マスク設計ノウハウと実験的に採取した実プロセスデータを電子化し、それらをもとに適切なプロセスを検索・抽出するデータマイニング手法と組み合わせ、ノウハウを持たないプロセス設計者にその道筋をガイダンスする、世界初となるプロセス逆問題解析ソフトウェアを開発した。本ソフトウェアは、センサ、光デバイス、RF デバイスなど、ニーズの高い典型的な MEMS デバイスを主な対象とし、MEMS 分野に新規に参入した技術者が、それらのデバイスを製作するためのプロセスとマスクを容易に設計できるようにする MEMS 開発支援ツールある。

平成16年度はソフトウェア仕様の検討および、基本設計を中心に行った。特に解析手法と解析に必要なデータベース、簡単な操作性及び解析結果のガイダンス方法について検討を行った。またソフトウェアのイメージを検討するために、プロトタイプの作成を行い、問題点を洗い出した。

平成17年度は平成16年度の成果をもとに、詳細設計とソフトウェア本体の開発を行った。またフレームワークとの連携動作についての検討も行った。

平成18年度はソフトウェアのテストを行い、それを完成させた。ソフトウェアのテスト段階でフレームワークとの連携も行った。またソフトウェアに必要なプロセスデータの収集と、それらの取り込みを行った。

#### (4)妥当性の検討

平成 18 年度の研究開発項目として、プロセス逆問題解析ソフトの機能の検証を実施した。逆問題解析により得られたプロセスレシピを反映して、設計形状からマスク形状の図形データを求めることが可能であることを確認した。さらに、実験的検証として、光 MEMS（ミラー）デバイスを想定し、そのデバイス部品を製作するためのマスクをプロセス逆問題解析ソフトで求め、そのマスクを用いて光 MEMS デバイス部品を製作し、設計形状に対する解析結果としてのプロセス及びマスクの妥当性を評価した。その結果、設計形状に対し同様な梁幅を有するミラーデバイスを製作するプロセス・マスクデータを解析により求めることができることが分かった。

### 3.4.1.2 研究開発成果の詳細

#### (1)ユーザ要求仕様と解析手法の導出

＜平成 16 年度成果＞

プロセス逆問題解析ソフトの開発にあたり、従来の MEMS 設計用のマスク作図ツールについて、プロセスレシピ・マスクレイアウトエディタほかの機能を分析し、プロセス設計・マスク作成ツールとしての問題点・開発課題を抽出した。

既存の MEMS 用設計ツールに組み込まれたプロセスレシピエディタは、プロセスとマスクデータによる積層構造を生成する 3 次元モデラで、構造解析・連成解析のための構造データを作成するためのソフトであり、必ずしもプロセス設計を目的としたものではないことを確認した。

既存の MEMS 用設計ツールに組み込まれたマスクレイアウトエディタは一般的な CAD であり、また、海外メーカー開発ソフトであるために、ユーザの要望が反映されるのに時間がかかるという問題がある。半導体用ツールの場合、OS として Windows を使用しているものは稀のようである。その理由は、あるメーカーによると、マスクデータが膨大なデータになることが多く、Windows の信頼性には不安があるとのことである。MEMS においてマスクデータが比較的簡単であれば、新規参入技術者用途としては、ソフト操作の点でなじみの深い OS を使用するほうが良いと判断される。ただし、Windows の不安定性には注意を怠らないようにすべきである。

さらに、半導体用設計ツールと一般の設計ツールを導入して、マスク編集機能について評価した結果、いずれも一般的な作図ツールとしての利用の範囲では問題なかったが、MEMS 設計ノウハウが含まれていないので、MEMS 特有のノウハウを適宜追加する必要がある。そのほか共通的な問題点として、DXF、GDSII、ガーバーデータ全ての互換性を持つソフトは高価なものに限定されることが分かった。

次に、マスクレイアウトエディタ機能に対するユーザ要求仕様とマスクデータのインターフェース機能の仕様を策定した。

表 3-4-1 に、マスク・プロセスエディタ機能に対するユーザ要求仕様書を示す。本仕様書は、マスクレイアウトエディタが、単なる解析モデル作成のための図形入力機能だけではなく、マスク設計ユーザにとって使い勝手のよい編集機能を備えることができるよう検討してまとめた仕様書である。表の最右列の欄は、フレームワークソフト設計・製作担当である日本ユニシス・エクスリョーションズ(株)と討議して判定した採否を示している。

マスクレイアウトエディタには、マスクを設計する際に必ず必要になる寸法シフト補正とマスク角部での補償パターン編集機能は必須で、さらに、頻繁に用いられる図形をテンプレートとして備えることが望ましい。また、CAD データの互換フォーマットである DXF 形式と GDSII ストリームデータ形式は必須で、プリント基板編集でよく用いられるガーバーデータ形式にも対応できることが望ましい。

マスク設計と表裏一体の関係にあるプロセス設計については、各ユーザのプロセス環境において実際にデバイスが製作できるようなプロセスレシピの組立・編集にカスタマイズされた機能が必要である。特に、禁則プロセス選択時の警告機能や、プロセス環境ごとの標準レシピのライブラリ装備が重要である。

表 3-4-1 マスクレイアウトエディタ機能に対するユーザ要求仕様書

	ユーザ要求仕様	備考	採否
1	<b>マスクレイアウトエディタ</b>		
	フレームワーク固有のマスク編集機能	在来ソフト利用ではない独自開発	○
	作図エリア:300×300mm 程度		○
	単位系: $\mu\text{m}$	最小座標値:0.01 $\mu\text{m}$ 以下	○
	円形・曲線図形データの取り扱い	多角形近似	○
	微小図形を選択中であることの明確な表示法	使い勝手の良い編集機能の一例	
	マスクパターン領域の集合演算(和、差)	多角形 or 折れ線(補償パターン)の付加・編集	○
	パターンデータの配置(移動、回転)、拡大・縮小		○
	寸法シフト補正機能	各辺にオフセット寸法と方向を指定して図形変形	○
	図形コピーのリンク付きマトリクス配置	コピー図形と元図形のリンク機能	×
	テンプレート図形装備	アライメント、オリフラ合わせマーク 結晶方位出し、マスク補償パターン	×
	データ変換・入出力	DXF入出力、GDS II 入出力 ガーバーデータ入出力	○ ×
	図形面積算出機能	インピーダンス計算機能	×
グレーマスク設計機能	普及していない先端技術のため対象外とする。	×	
2	<b>プロセスレシピエディタ</b>		
	3Dモデリング・表示とプロセスレシピ入力・編集機能	3Dモデリングを重視する。	○
	標準レシピのライブラリ化	サブレシピの集合体としてレシピを構成	○
	全製造プロセスをレシピに登録		○
	モニタ・評価機能が望ましい。	禁則プロセスの設定・チェック	○
	ファンドリ情報の非表示化	プロテクトキー設定によるノウハウ保護	×
	材料データベースセットのユーザ編集・管理機能		○

表 3-4-2 に、プロセス逆問題解析ソフトとのインターフェース機能に対するユーザ要求仕様書を示す。本仕様書は、フレームワークメイン画面からの呼び出し機能、データベース参照機能、図形データの入出力・変換フォーマット等、プロセス逆問題解析ソフトとのインターフェース部分をまとめた仕様書である。また、インターフェースに関するユーザとソフトベンダの討議の中で、重要と考えられる項目についても記載した。

プロセス逆問題解析ソフトがフレームワークソフト上で問題なく機能するように、フレームワークのメイン画面からプロセス逆問題解析ソフトが呼び出されるようにすること、逆問題解析の結果得られたマスク形状をホトマスク図形として仕上げるためにマスクレイアウトエディタにデータを渡すことが必要で、プロセス逆問題解析ソフトが必要に応じてプロセス・知識データベースにアクセスしてデータを読み込めるようにできることが望ましい。

他のソルバとのインターフェースについては、特に構造解析シミュレータとのデータの受け渡しが必要である。また、マン・マシンインターフェースとして、解析結果をアニメーションで表現できることも必須の機能である。

表 3-4-2 逆問題解析ソフトとのインターフェース機能に対するユーザ要求仕様書

	ユーザ要求仕様	備考	採否
1	プロセス逆問題解析ソフトとのインターフェース		
	メイン画面からの逆問題ソフト呼び出し機能		○
	プロセス・知識データベースの取り込み	逆問題解析におけるデータ参照機能	×
	逆問題解析プロセスレシビ・マスク形状データの取込み		○
	問題解析とプロセスシミュレータの相互切り替え	ショートカットはないが、部分的には可能。	○
	プロセス途中での内部応力による構造体変形解析	同上	×
2	他のソルバとのインターフェース		
	既存の専用ソフトとのシームレスなインターフェース	例: NASTRAN、ANSYS、ABAQUS	○
	流体解析ソフト・プラグイン機能		×
	解析結果の断面コンター図		○
	アニメーション表示	既存の主要シミュレータには付属。可能な範囲で。	○
	解析時間概算値表示	目安にする程度の概算値でよい。	○

次に、逆問題解析機能について、ユーザの立場から、解析機能、入力表示機能、インターフェース機能等について、ユーザ要求仕様書としてまとめた。

表 3-4-3 に、プロセス逆問題解析機能に対するユーザ要求仕様書を示す。表の最右列の欄は、プロセス逆問題解析ソフトの設計・製作担当である(株)数理システムと討議して判定した採否を示している。

解析機能では、対象とするデバイスを、ダイアフラム（圧力センサ）やミラージンバル（光スイッチ）、ブリッジ（RF スイッチ）、カンチレバー（プローブ）など、ニーズの高いセンサ・光・

RF-MEMS でよく用いられる構造に限定し、特にエッチングデータをもとに加工形状からマスク形状にさかのぼる機能とした。また、ユーザの環境に極力近い条件で検索できるようにするために、初期設定や優先順位設定機能を持たせることが必要である。入力・表示機能では、三次元表示（解析）が理想であるが、正面図と断面図の二次元表示（解析）とした。また、解析過程でのプロセス選択肢と解析結果のツリーを表示させることとした。初期形状テンプレートでは、上述の3種類の MEMS デバイスを選定し、その構造についてプロセス・マスク設計ができる機能とした。

表 3-4-3 プロセス逆問題解析機能に対するユーザ要求仕様書

	ユーザ要求仕様	備考	採否	
1	解析機能			
	対応プロセス	エッチングプロセス(ウェット、ドライ)主体	○	
	逆問題解析で取扱う形状・パターン	ジンバル、カンチレバー、ダイアフラム、くし歯	○	
	初期設定(ユーザカスタマイズ)	プロセス装置・条件・性能、ウェハ材料、コスト配慮	○	
	解析エンジン	DP マッチングによるデータマイニング	○	
	検索の優先順位指定	装置依存、精度重視 or コスト重視を反映させる。	○	
	外部データベース参照機能	検索結果に反映させる。	×	
	逆問題解析マスクデータに基づくホトマスク作図機能	フレームワークソフト内	○	
2	入力・表示機能			
	初期形状データの図形入力・数値入力	二次元表示(正面図と断面図)	○	
	初期形状データから解析用形状データへの抽出機能	推奨形状として具備	○	
	解析結果(プロセス)のツリー表示・スクロール		○	
	プロセス選択肢の並列表示	選択判断保留の場合への対応	○	
3	インターフェース機能			
	マスク形状データの入出力データフォーマット	DXF、GDS II	○	
	外部加工データの取込み	プロセス・知識データベース参照のみ	○	
4	初期形状テンプレート			
	光 MEMS	光スイッチ、アッテネータ(ミラージンバル)	○	
	RF-MEMS	RF スイッチ(ブリッジ、カンチレバー)	○	
	センサ MEMS	圧力センサ(ダイアフラム)、加速度センサ(くし歯)	○	

<平成 17 年度成果>

プロセス逆問題解析手法の導出のまとめとして、前年度提案したプロセス逆問題解析のユーザ要求仕様を総合的に比較評価・分析して、プロセス・マスク設計を支援するための最適な手法を導出した。

表 3-4-4 にプロセス逆問題解析手法に関する仕様書の抜粋を示す。本ソフトは加工前の初期形



状と加工後の形状の図形及びプロセス情報テキストからなるプロセスデータをデータベースとして蓄積し、形状図形の類似したプロセスデータを DP マッチングにより図形検索して、プロセスを繋げ組み立てていくソフトである。プロセスデータは、実験により採取した加工データと、それらの間を補完する理論的な推測によるデータからなる。組み立てたプロセスのうち、各プロセス階層でのエッチング加工前のデータがマスク情報に相当し、加工データの寸法情報をもとにマスクデータを生成する。

表 3-4-4 プロセス逆問題解析手法に関する仕様書（抜粋）

1	<b>基本機能</b>	
	プロセスデータに基づき加工プロセスを遡り、初期形状図形からマスク形状図形生成。	
	解析形状はデバイスチップ範囲内、そのマスク図形データを出力。	
	ユーザに推奨加工形状・プロセスの選択肢を提示し、場合に応じて選択してもらう。	
2	<b>解析モデル代表例</b>	
	光 MEMS、RFMEMS、センサ MEMS	
3	<b>プロセスデータ</b>	
	加工後の形状図形(平面図、断面図)と寸法情報、及び加工プロセス情報から構成。	
	実験での採取データと理論的推定データ及び内・外挿データの組み合わせ	
4	<b>プロセス逆問題解析手法</b>	
	プロセスデータの加工プロセスで製作可能な推奨形状を検索する。	
	形状の近い順に、選択肢として表示する。	
	検索とユーザによる選択を繰り返し、加工プロセスを順次遡る。	
マスク形状図形を生成する。		
5	<b>操作画面全般</b>	
	フレームワークから起動し、逆問題ソフトに移動する。	
	操作ダイアログ、レシピ、マスクデータは、フレームワークと共通。	
6	<b>入力画面</b>	
	初期形状入力	ユーザ指定(フレームワーク CAD でベクトル図形直接入力)
	構造・形状入力	層構造、材質、寸法
7	<b>プロセス逆問題解析画面</b>	
	推奨加工形状表示	製作デバイス選択
	プロセス逆問題	推奨加工形状をもとにプロセスを遡る。知識 DB 参照も可能。
	ツリー表示	推奨加工形状の選択肢を断面図表示して横に並べる。
8	<b>知識データベース参照機能(フレームワーク機能)</b>	
	データ内容画面のポップアップ表示	
	ユーザへのアドバイス機能	

9	条件付き検索機能	
	構造・形状入力	寸法 ⇒ 数値をマスクに反映。
		公差 ⇒ 精度指定によってエッチング方法を決定。
		厚さ ⇒ 成膜・加工方法をプロセスデータで分類。
10	出力画面・機能	
	完成加工プロセスレシピをチャート表示、レシピファイルの生成。	
	マスク形状表示、ファイルとして図形データ生成。	

## (2) プロセスデータ採取

### <平成 16 年度成果>

プロセス逆問題解析に必要なプロセスデータのデータ仕様を決め、実験的にプロセスデータを採取した。典型的な MEMS デバイスについて一般に公表されている成膜、露光、エッチング工程などの標準 MEMS プロセスを想定して、それらのプロセス設計のために特に必要とするプロセスデータ項目を抽出してプロセスデータ仕様書としてまとめた。MEMS デバイス構造について、そのプロセスにおいて重要ポイントとなる形状データ項目と加工特性データ項目を選定した。

プロセスデータ採取においては、加工材料として、一般的な MEMS 材料である Si・SOI 基板に、SiO<sub>2</sub> や金属薄膜のパターンをプロセスマスクとして形成したものを対象にして、ウェットエッチング（等方性、異方性）とドライエッチング（Deep-RIE）により一定深さ加工した場合の加工前と加工後の断面形状とその寸法を SEM 観察により測定し、プロセスデータとしてまとめた。

表 3-4-5 にドライエッチングのプロセスデータの一例を、表 3-4-6 に異方性ウェットエッチングのプロセスデータの一例を示す。いずれのプロセスデータについても、加工前のプロセス（エッチング）マスクの断面寸法と加工後のプロセスマスクと基板 Si の断面寸法を数値化した。

表 3-4-5 ドライエッチングのプロセスデータの一例

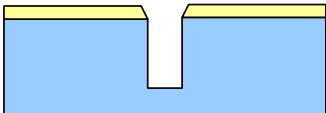
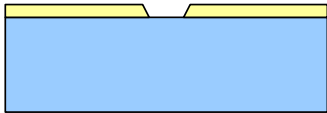
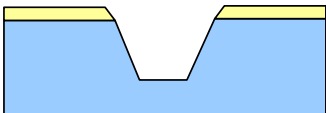

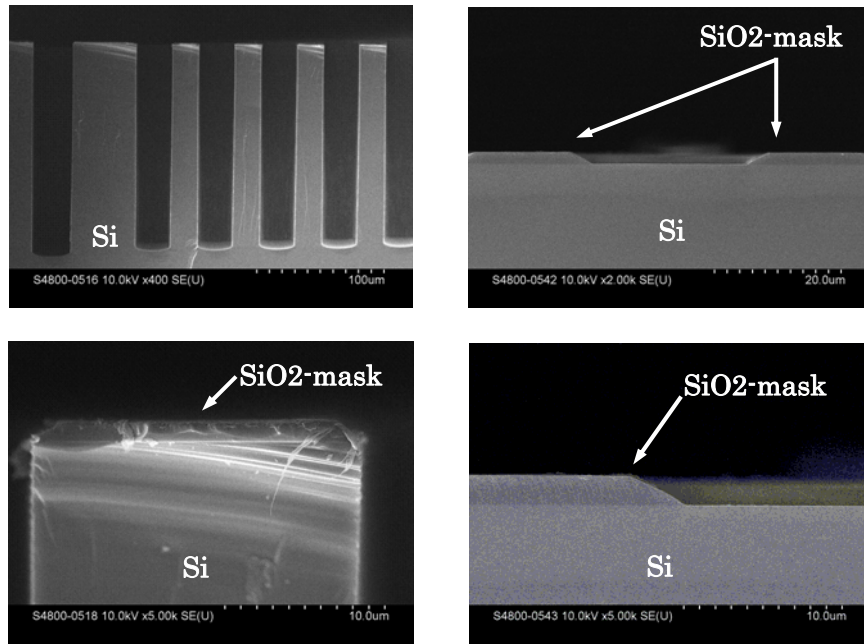
	加工後	加工前
断面形状		
マスク溝幅	50 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$
マスク厚さ	1.0 $\mu\text{m}$	2.0 $\mu\text{m}$
エッチング溝幅	51 $\mu\text{m}$	
エッチング深さ	150 $\mu\text{m}$	
	プロセス条件	
マスク材	SiO <sub>2</sub>	
エッチング材	Si, SOI (100)	
エッチング方法	Deep-RIE (Bosch-process)	

表 3-4-6 異方性ウェットエッチングのプロセスデータの一例

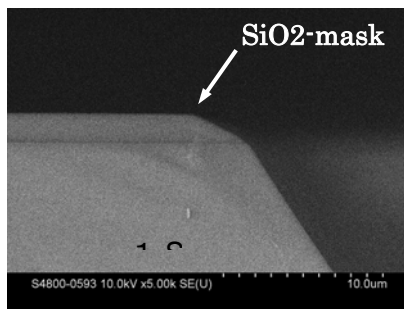
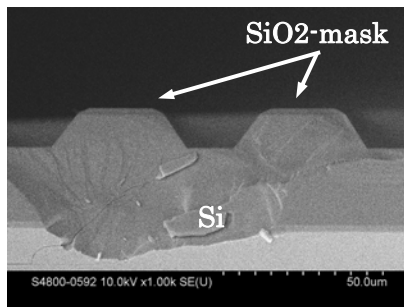
	加工後	加工前
断面形状		
マスク溝幅	500 $\mu\text{m}$	500 $\mu\text{m}$
マスク厚さ	1.5 $\mu\text{m}$	3.0 $\mu\text{m}$
エッチング溝幅	500 $\mu\text{m}$	
エッチング深さ	300 $\mu\text{m}$	
	プロセス条件	
マスク材	SiO <sub>2</sub>	
エッチング材	Si, SOI (100)	
エッチング方法	異方性ウェットエッチング	

上記プロセスデータのもとにした加工断面形状の SEM 観察像の実例を、図 3-4-1 に示す。加工前の SiO<sub>2</sub> マスクは等方性ウェットエッチングによって加工したので、その側壁はかなりなだらかな傾斜面になっている。しかし、そのマスクによってドライエッチング (Deep-RIE) 加工した Si の側壁はほぼ垂直であり、Deep-RIE の特長が発揮されている。異方性ウェットエッチングの場合は、結晶方位に沿った加工断面形状が認められる。



ドライエッチング後  
(150 μ m 加工)

ドライエッチング前  
マスク形状



異方性ウェットエッチング後  
(10 μ m 加工)

図 3-4-1 加工断面形状の実例 (SEM 観察像)

<平成 17 年度成果>

前年度に引き続いてプロセスデータを採取した。逆問題解析の対象とするデバイス構造としては、ニーズの高いセンサ、光・RF-MEMS デバイスなどに共通的なダイアフラム構造、メサ構造、

ブリッジ構造、カンチレバー構造などの形状をモデルとした。そして、溝の幅、段差、傾斜角度など、そのプロセスにおいて重要ポイントとなる形状データ項目と加工速度、加工マスクとの選択比などの加工特性データを採取した。加工材料としては、一般的な MEMS 材料である Si・SOI 基板に加えて SiO<sub>2</sub>・ガラス基板と、SiO<sub>2</sub>・金属薄膜を対象にしている。加工方法としては、主にウェットエッチング（等方性、異方性）とドライエッチング（Deep-RIE、ICP-RIE）を対象にして、それらの加工における断面形状に加えて平面形状及び加工特性についてプロセスデータを採取した。

図 3-4-2 に等方性ウェット・ドライエッチング溝加工のプロセスデータを示す。時間の経過に従って、一定のエッチング速度（例：0.1 μm/分）で溝が深くなっていく。同時に、マスクも基板の選択比分の 1 の低い速度で薄くなる。また、ほぼ全方向に同じ速度でエッチングが進み、横方向に寸法シフトが発生し、マスクの下側に大きくアンダーカットが入る。基板とマスクの密着性が悪い場合は寸法シフト量がさらに大きくなる。また、側壁には、大きな R 面が形成される。エッチング方法としては、加工対象材料に応じた多様な酸性水溶液やフッ素・塩素系化合物ガスが用いられ、主に薄膜の加工に利用される。

【等方性ウェット・ドライエッチング、溝加工】

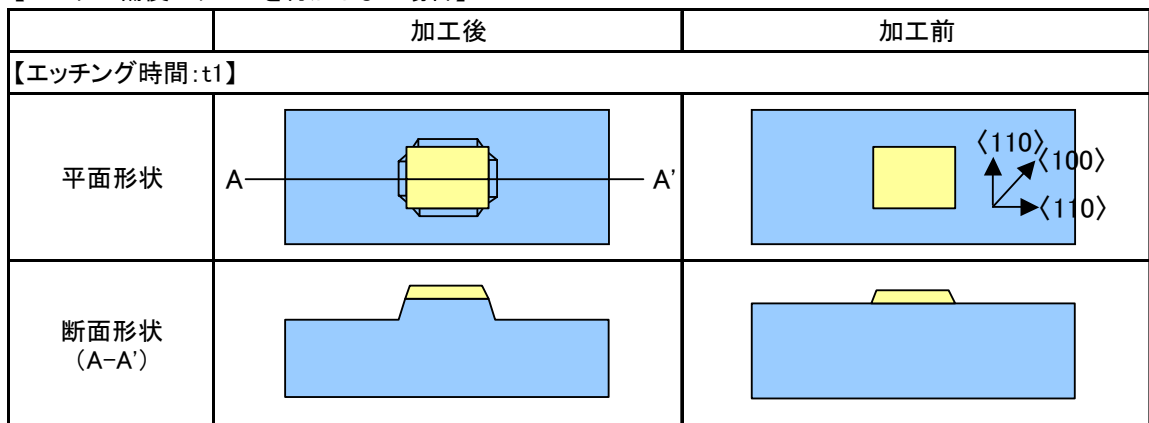
	加工後	加工前
【エッチング時間:t】		
平面形状		
断面形状 (A-A')		
【エッチング時間:2t】		
平面形状		
断面形状 (A-A')		

図 3-4-2 等方性ウェット・ドライエッチングデータ

図 3-4-3 に(100)Si の異方性ウェットエッチングメサ形状加工のプロセスデータを示す。時間の経過に従って、一定のエッチング速度（例： $0.5\mu\text{m}/\text{min}$ ）で溝が深くなっていく。同時に、マスクも基板の選択比の 1 の低い速度で薄くなっていく。また、マスクの下側にえぐれるように、僅かにアンダーカットが入り、横方向に寸法シフトが発生する。加工溝エッジは結晶方位  $\langle 110 \rangle$  に沿うように形成される。側壁には結晶面(111)が形成され、傾斜角は  $54.74^\circ$  となる。さらに、マスク角部の下側に特に大きくアンダーカットが入る、いわゆる「角落ち現象」が起こるため、これを防ぐために、マスクに補償パターンが必要になる。エッチング方法としては、KOH や TMAH 水溶液を用いたウェットエッチングで、水溶液の組成、濃度、温度によって多様なエッチング特性を示す。

【Si(100)のKOHによる異方性ウェットエッチング、メサ加工】

【マスクに補償パターンを付加しない場合】



時間	溝深さ	側壁後退	マスク減少
min	um	um	um
192	100	0.8	0.5
385	200	1.6	1.0
577	300	2.3	1.4
769	400	3.1	1.9
962	500	3.9	2.4

図 3-4-3 (100)Si の異方性ウェットエッチングデータ

図 3-4-4 に Al をマスクとした Si 基板の Deep-RIE 溝加工のプロセスデータを示す。時間の経過に従って、一定のエッチング速度（例： $4\mu\text{m}/\text{分}$ ）で溝が深くなっていく。同時に、マスクも基板との選択比の 1 の低速度で薄くなっていく。エッチング時間が長時間にわたる場合、加工溝エッジの平面形状は、ほぼマスクの形状に沿った形になるが、マスクの下側にえぐれるように、僅かにアンダーカットが入り、横方向に寸法シフトが発生する。側壁の表面には細かい周期的な凹凸が形成される。また、溝の底面の側壁近傍に R 面が発生する。さらに、平面方向寸法が狭い

場所では、広い場所に比べてエッチング速度が低下する。

エッチング方法としては、フッ素系化合物ガス（SF<sub>6</sub>、C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>）を用いるボッシュプロセスが有名である。また、基板をマイナス数十度に冷却する低温エッチングも知られている。

【SiのDeep-RIE, 溝加工】

	加工後	加工前
【エッチング時間:t】		
平面形状		
断面形状 (A-A')		
【エッチング時間:2t】		
平面形状		
断面形状 (A-A')		

時間	Al厚さ	アンダーカット	開口断面	Si深さ	Alエッチ量	選択比
min	um	um	um	um	um	Si/Al
0	1.44		26.44			
16	1.43	0.00	26.40	63.32	0.0079	8015
37	1.43	0.60	24.06	143.01	0.0079	18103
80	1.37	2.48	29.08	287.81	0.0675	4264

図 3-4-4 Si 基板の Deep-RIE データ

<平成 18 年度成果>

プロセスデータ採取については、昨年度までの材料及び加工方法に加え、有機材料のエッチングデータを採取した。また、異方性エッチングやドライエッチングにおける補償パターンを含む異形状の加工特性について、実験的にプロセスデータを採取した。

有機材料としては、ポリイミド (PI) とレジストを、その他の材料として、熱酸化 SiO<sub>2</sub> 膜、SOI (Si) 基板及びガラス基板を用いた。加工方法としては、等方性ウェットエッチング、異方性ウェットエッチング、ICP-RIE、及び Deep-RIE を用いた。さらに、異形状の加工特性として、数種類の補償マスクパターンに対する平面形状変化についてデータを採取した。

表 3-4-7 に採取したプロセスデータ例として、エッチング速度を示す。数値の下にプロセス情報を括弧付きで示した。

表 3-4-7 採取したプロセスデータ例 (エッチング速度)

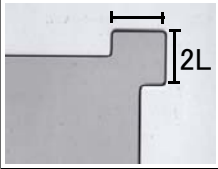
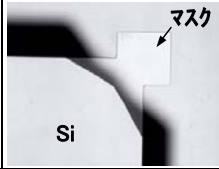
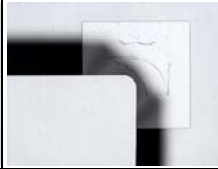
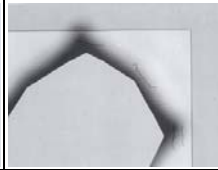
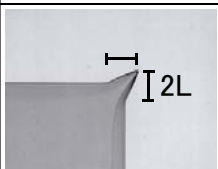
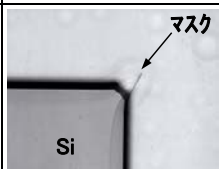


	等方性ウェット エッチング	異方性ウェット エッチング	ICP-RIE	Deep-RIE
PI	—	—	0.1~0.3 (O <sub>2</sub> -RIE)	—
レジスト	—	—	~0.01 (C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> +Ar)	~0.01 (SF <sub>6</sub> /C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> )
熱酸化 SiO <sub>2</sub>	~0.01 (BHF)	0.001~0.002 (40wt%KOH)	0.2~0.4 (C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> +Ar)	~0.01 (SF <sub>6</sub> /C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> )
Si	—	0.5~1.2 (40wt%KOH)	—	2~4 (SF <sub>6</sub> /C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> )
ガラス	—	—	0.1~0.3 (C <sub>4</sub> F <sub>8</sub> +Ar)	—

(単位 :  $\mu$  m/分)

図 3-4-5 に、Si を異方性ウェットエッチングする場合の補償マスクパターンに対するエッチング平面形状を一例として示す。図において、補償マスクにより、Si メサ (凸型台形) 形状のエッチングで発生する角部のアンダーカットを防止する効果が示されている。矩形補償マスクの場合は、その寸法 (2L) がエッチング深さ (D) の 1.2 倍のとき、角形補償マスクの場合は、2.7 倍のとき、アンダーカットがほぼ防止でき、鋭角的な角を持つメサ形状が形成される。

得られたプロセスデータは、MEMS-ONE のプロセス逆問題解析ソフトに搭載するとともに、知識データベースにも組み入れた。



補償マスク形状	エッチング形状		
矩形	$L = 0.62 \times D$	$L = 1.2 \times D$	$L = 2.5 \times D$
			
角形	$L = 1.8 \times D$	$L = 2.7 \times D$	$L = 4.8 \times D$
			

(L:補償マスク寸法, D:エッチング深さ)

図 3-4-5 Si 異方性ウェットエッチング形状と補償マスクパターンとの関係

### (3) ソフトの設計及び開発

#### <平成 16 年度成果>

平成16年度はソフトウェア仕様の検討および、基本設計を中心に行った。特に解析手法と解析に必要なデータベース及び解析結果のガイダンス方法について検討を行った。またソフトウェアのイメージを検討するために、プロトタイプを作成を行い、問題点を洗い出した。

表 3-4-3 に表される「プロセス逆問題解析機能に対するユーザ要求仕様書」に対する実装の可否を検討し、(株)日立製作所とともに表を完成させた。ソフトウェアの機能および、画面構成について検討を行い、以下のような機能を実装することとした。

- 形状の指定 (上面、断面による形状指定)
- デバイス指定 (推奨デバイスの表示)
- 半自動的解析 (自動解析と対話的ガイダンス[遡れるプロセスが複数ある場合にユーザが選択可能])
  - ※ 解析はDPマッチングによる形状比較
- レシピ出力 (プロセスエミュレータで実行可能なもの)
- ユーザの環境設定 (利用精度重視、コスト重視)

※ 上記詳細については平成 18 年度成果参照

#### <平成 17 年度成果>

平成17年度は平成16年度の成果をもとに、詳細設計とソフトウェア本体の開発を行った。またフレームワークとの連携動作についての検討も行った。画面については複数回レビューを行い改

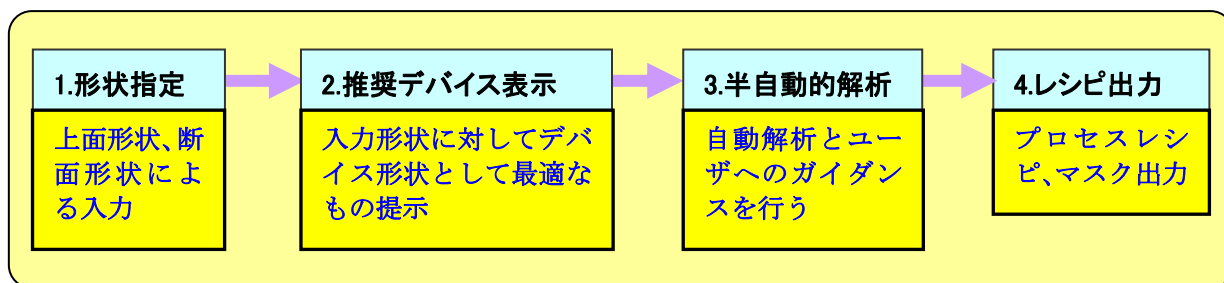
良を行った。

## <平成 18 年度成果>

平成18年度はソフトウェアのテストを行い、それを完成させた。ソフトウェアのテスト段階でフレームワークとの連携も行った。またソフトウェアに必要なプロセスデータの収集と、それらの取り込みを行った。以下に完成したソフトウェアの説明を示す。

### ①主機能および操作

プロセス逆問題解析ソフトウェアは主にMEMS新規参入技術者をターゲットとしているので、操作を単純化するために GUI の簡素化を行った。操作フローは以下のような4段階で行うようにし、最低でもこの4段階を行えばプロセスレシピを作成することができるようにした。



以降、上記段階について順次説明する。

#### 1. 形状指定

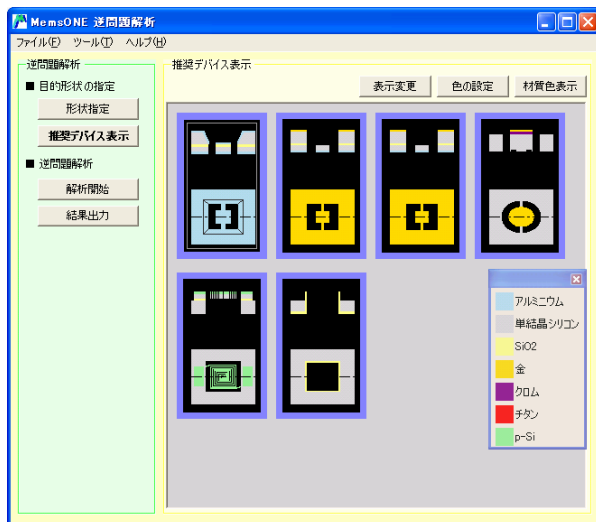
ユーザが解析を行う形状（作りたい形状）を入力するため機能である。入力は断面形状、上面形状の2つを指定する（下図参照）。



何を作りたいかがわかっている場合は、ミラー、RF、センサにチェックを入れることで次に挙げる推奨デバイスを絞り込むことができる。また精度を指定することで、入力形状に近い形状のみを推奨するのか、あまり近くななくてもなるべく多く推奨するのかを制御することができる。

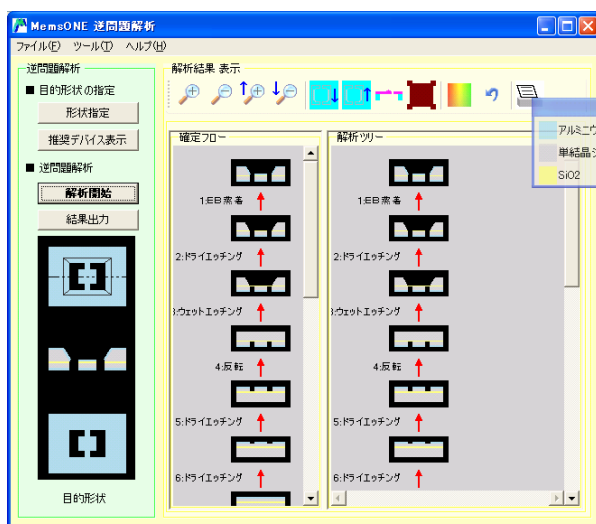
## 2. 推奨デバイス表示

逆問題解析ソフトウェアは、1.で行われたユーザ入力に対して（形状的に）最も近いデバイスの表示を行う。ユーザはその中から自分作成したい形状と最も近い形状を選択することができる。ユーザは提示されたデバイスから解析したいデバイスを選択する（下図参照）。



## 3. 半自動的解析

逆問題解析ソフトウェアは、選択された推奨デバイスについて、半自動的な解析を行う。プロセスを1ステップ毎に遡って行きその状況をユーザに提示する（対話的ガイダンス）。遡る段階で1つしか選択肢がない場合はそのまま遡り、遡る段階で複数の選択肢が発生した場合は、ユーザはどちらを使って遡るかを選択する。このようにして、解析は基板（ウェハ）まで到着すると終了する。なお対話的ガイダンス中にも、ユーザがプロセスフローを一目で確認できるように、確定フローとデバイス形状を以下のように表示するようにした。



## 4. レシピ出力

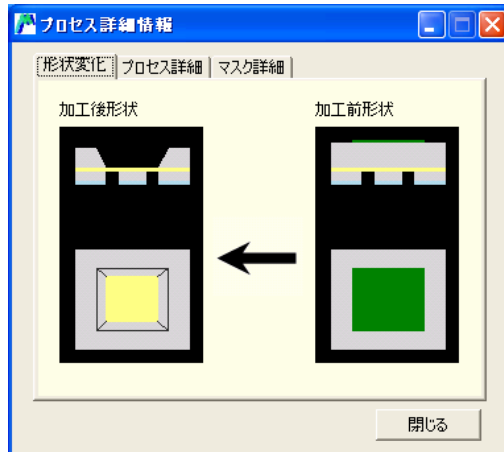
解析結果をプロセスエミュレータで実行できる形式でファイル出力する機能である。解析が終了

した時点で、結果の出力が可能となる。

## ②その他の機能

### ・レシピ詳細表示機能

解析中に途中のプロセスの詳細が見たい場合にそれを表示する機能である。表示内容は形状、プロセスの種類、マスク形状である（下図参照）。



### ・ユーザ環境設定機能

ユーザが保有しているプロセス、材料などの条件を設定する機能である。解析中に条件に適合しないプロセスを見つけた場合は、警告を表示する。また解析中に表示されている凡例（材料の種類を示す）の色を設定することもできる（下図参照）。



#### (4)妥当性の検討

<平成 18 年度成果>

プロセス逆問題解析ソフトの機能の検証として、設計形状を入力とした逆問題解析により、プロセスフローが得られることと、それを反映したマスク形状の図形データを求めることが可能であることを確認した。さらに、実験的検証として、光 MEMS (ミラー) デバイスを想定し、そのデバイス部品を製作するためのプロセスレシピとマスクのデータをプロセス逆問題解析ソフトで求め、そのマスクを用いて光 MEMS デバイス要素を製作した。

図 3-4-6 に検証モデル初期形状を示す。デバイスの構造としては、静電駆動 1 軸マイクロミラーを選定し、最小限の構成要素のみ指定した。本モデルに対し逆問題解析を実施した結果を以下に示す。

i) 構造設計されたマイクロミラーの初期形状を入力として逆問題解析した結果、初期形状に対し、図 3-4-7 に示す SOI ウェハを用いる推奨形状がガイダンスされ、推奨形状のプロセスレシピが CSV ファイルで、マスクデータがファイルで出力されることを確認した。

ii) 出力されたプロセスレシピとマスクデータがフレームワーク上で認識されてプロセス表と CAD 図に展開・表示されることを確認し、開発目標が 100%達成されたことを実証した。

iii) マスクデータをもとにマスクを製作し、それを用いて、図 3-4-8 に示す検証用マイクロミラー要素を製作した。

iv) 製作したマイクロミラー要素に対し、初期形状と製作要素の梁幅寸法データを比較した結果を表 3-4-8 に示す。マイクロミラー初期形状に対し、それを SOI ウェハのデバイス層で支持する構造が逆問題解析によりガイダンスされ、加工プロセスにおける寸法シフト量で補正されたマスクデータをもとにドライエッチング加工により製作したマイクロミラー要素の梁幅は  $7.4\sim 7.6\ \mu\text{m}$  となった。

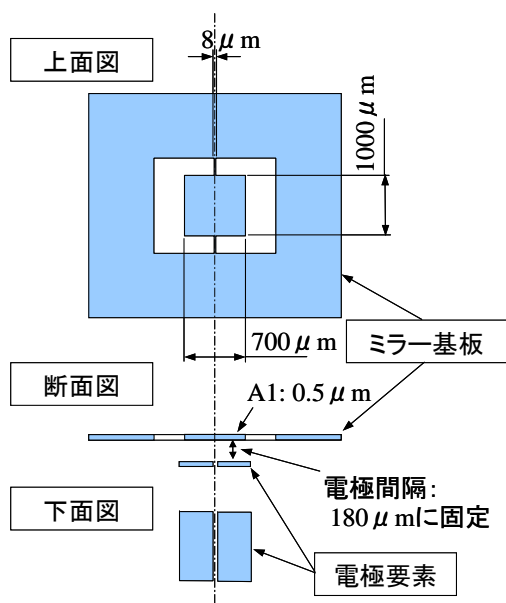


図 3-4-6 検証モデル初期形状

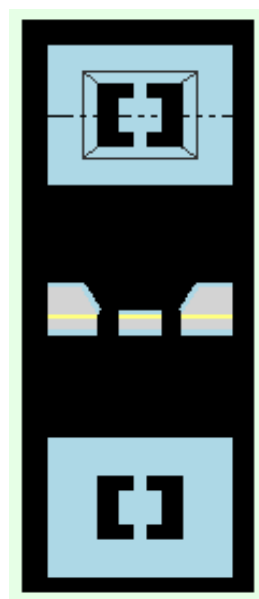


図 3-4-7 逆問題解析推奨形状

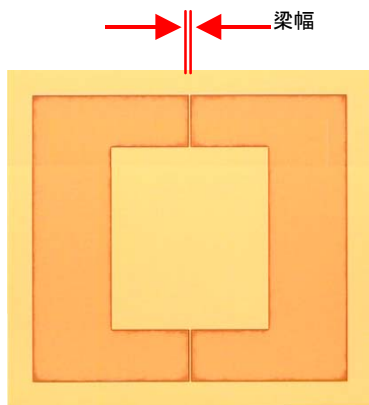


表 3-4-8 寸法・形状比較表

検証項目	梁幅( $\mu\text{m}$ )	ガイド内容
初期形状	8.0	—
加工(推奨)形状	8.0	SOI 支持ミラー
マスク形状	9.5	寸法シフト補償
製作形状	7.4~7.6	ドライエッチング

図 3-4-8 検証用に製作した  
マイクロミラー要素

### 3.4.1.3 研究開発成果の意義

#### (1) ユーザ要求仕様と解析手法の導出

既存のプロセス・マスク設計ツールの問題点を分析し、MEMS分野への新規参入技術者（ユーザ）が必要とする仕様をその解決策として求め、プロセス逆問題解析手法を世界初の試みとして考案・導出した。

本解析手法により、設計した MEMS デバイスに対し、MEMS プロセスで実現しやすい形状を推奨デバイスとしてガイドンズすることで、MEMS 新規参入ユーザが陥りやすいパターンである、作れない構造を設計してしまうという失敗を回避することが可能になる。さらに、ある程度 MEMS 開発を経験した技術者に対しても、MEMS プロセスに関する経験が少ない場合ほど、マスク設計における失敗を犯す確率を低くする効果が期待できる。

MEMS デバイスの開発においては、新しい構造のデバイスを試作する場合、プロセス設計から製作までの工程が 1 回で成功することはほとんどない。MEMS プロセスは半導体プロセスと異なり、三次元形状の加工を実現する特殊なプロセスであるので、プロセスで失敗を犯すリスクが高い。開発者は失敗したプロセスを修正しながら、2~3 サイクル工程を繰り返し、そのたびにマスクを作り直す。したがって、開発に多大な時間とコストを要することになる。MEMS とそのプロセスに関して経験が浅いほど、この失敗を犯す確率が高く、MEMS 分野に対する新規参入を阻害する大きな要因のひとつにもなっている。

本解析手法は、MEMS に関して経験の浅い新規参入ユーザが MEMS のプロセスとマスクを設計する際に便利な支援ツールを提供するもので、MEMS 産業自体の振興にも寄与できるものと考えられる。

#### (2) プロセスデータ採取

加工工程前後の形状データと工程のテキスト情報から構成される独自のデータベースを構築し、プロセス逆問題解析を可能にした。

MEMS技術者が知識として所有する成膜工程、エッチング・メッキ工程での各工程前後の形状変化や寸法シフト量補正などの設計・加工ノウハウをデータベースに体系化したことにより、逆問題解析でのデータマイニングに基づくプロセスレシピの組立機能と設計したMEMSデバイスの形状データをマイクロ加工用マスクパターンに変換する機能を持たせることが可能になった。これらの機能により、転写パターンずれの修正（マスク修正）を含めた総合的な設計時間が短縮されるので、MEMS開発の飛躍的な高効率化が実現できると考える。

本プロセスデータに集約した加工ノウハウの詳細は以下の通りである。エッチング加工においては、パターンの角部はエッチング液が多方向からアタックされるので、パターン形状が大きく変化する。そこで、マスク設計段階で、それを見込んだ補償パターンを付加する。特に異方性ウェットエッチングにおいては、各種の補償パターンが考案されており、本データベースには代表的なパターンを搭載した。さらに、角部以外でもマスクパターンに対してその周辺から内部にえぐられるようにエッチングが進行するアンダーカット（寸法シフト）が発生する。この量はエッチング設備、エッチング方法やエッチング深さなどによって変化する。以上のように、マスク設計段階では、その形状変化を見込んで寸法を決定する必要がある、技術者の経験に委ねられている。

本データベースを使用することにより、MEMSプロセスに関して経験の浅い技術者でもプロセスにおいて失敗するリスクの少ないマスクを設計することができるようになると期待される。

### (3) ソフトの設計及び開発

プロセス逆問題解析ソフトウェアは、作りたい形状からそれに対応するプロセスレシピ、マスク形状を半自動的に作成する世界初の機能を持ったソフトウェアである。これを利用することで、MEMS初心者でも簡単にプロセスレシピを作成することができることなどから、MEMS世界への新規開発者の増加・育成を促進することが期待される。

また、上級者はマスク形状を自動的に生成する機能を利用して、ラピッドプロトタイピング等における作業コストを軽減することが期待される。

以上のことから本ソフトウェア開発は十分に意義のあったものだと言える

### (4) 妥当性の検討

検証モデルを設定して逆問題解析によりプロセスレシピとマスクデータを求め、それに基づいて製作したデバイス要素と検証モデルを照合した結果、概ね近い寸法のデバイスが得られ、本ソフトの妥当性が実証された。

設計形状（検証モデル）を入力とした逆問題解析により、プロセスレシピが得られることと、それを反映したマスク形状の図形データを求めることが可能であることを確認し、開発目標が100%達成されたことを確認した。さらに、実験的検証として、マスクデータを用いてデバイス要素を製作し、検証モデルとの寸法の差異を評価した。本評価においては、検証モデルとして設定した光MEMS（ミラー）デバイスの梁幅に着目した。評価モデルで設定した梁幅 $8\mu\text{m}$ に対し、逆問題解析の結果としてのマスク梁幅が $9.5\mu\text{m}$ と求められた。そのマスクを用いて製作したデバイス要素では梁幅 $7.4\sim 7.6\mu\text{m}$ が得られた。両者の寸法のずれは、プロセスデータに反映できていないプロセスの再現性とウェハ内均一性によるものと推測されるが、概ね良好な解析精度と評価

できる。

なお、本開発では解析対象を光・RF-MEMS 及びセンサ MEMS の典型的なデバイス形状に限定したため、ユーザがごく一般的な形状を入力した場合は、それに近い形状を有する推奨形状が選択肢としてガイダンスされプロセスレシピが求められるが、入力した初期形状の情報がガイダンスに沿って逐一変換されることはなく、推奨形状は入力した初期形状と異なるものとなる。この問題に対しては、プロセスデータを追加していくことにより、より一般的な形状に対しても類似の形状をガイダンスすることが可能になる。また、画面上の形状は推奨形状に変わっていくが、入力した初期形状（たとえばミラーや梁の形状）の図形データは保存されているので、単一プロセスの場合はプロセス前後の平面形状変化を反映して初期形状をマスク形状の図形データに変換することが可能で、現在(株)数理システムで検討されている。



### 3.4 機能拡張ソフトの開発

#### 3.4.2 「接合実装解析」

##### 3.4.2.1 研究開発の概要

###### (1) ソフトの開発

接合技術は MEMS プロセス、実装に用いられる技術である。異種材料が接合される場合、異種材料間のヤング率、ポアソン比、熱膨張係数等の物性値の相違および接合端部の幾何学的形状、中間層の材料・寸法等の影響で、接合界面・端部での破損を生じることがある。このような問題に対応し、MEMS の設計・開発を支援する以下の機能を含めた接合実装解析ソフトを開発した。

- 材料データベースを生かした異種材料接合親和性の評価機能
- 温度変化に対応した応答解析機能
- 力学的信頼性解析機能

以下に目標に対応する研究開発成果を示す。

###### <目標>

- 接合実装解析ソフトの各解析機能の開発内容を確定し、概念設計、詳細設計・プログラム設計を完成させる。
- 概念設計および詳細設計・プログラム設計を踏まえ、本解析機能単体の開発を完了する。
- 接合実装解析ソフトのフレームワークソフトへの結合およびシステム統合を実現させ、統合検証テストを完了する。

###### <成果>

- 本解析ソフトの各機能、システム構成等の概念設計、およびモジュールの構成、モジュールの機能、モジュール間のインターフェイス、基礎式、物理・力学モデル、数値解法、モジュールの処理フロー等の詳細設計・プログラム設計を検討した。
- 設計に従い異種材料接合親和性の評価機能、温度変化に対応した応答解析機能および力学的信頼性解析機能の各機能モジュールの開発を実施した。
- 開発した接合実装解析ソフトについて、フレームワークソフトとの結合検証テストおよび検証解析を実施し、良好な結果を確認した。

###### (2) 妥当性の検証

MEMS の設計・開発を支援する接合実装解析ソフトの解析の妥当性検証を目的として実施した。以下に目標に対応する研究開発成果を示す。

###### <目標>

陽極接合された接合強度試験片を検証デバイスとして、取得した強度データを用いて、解析の妥当性検証を完了する。

〈成果〉

陽極接合部の接合強度を接合条件ごとに破壊じん性値を用いて体系的に整理し、破壊強度が試験片形状や負荷モードに依存せず、接合条件に依存することを示し、解析の妥当性を確認した。

### (3)接合・封止データ採取

MEMS の設計・開発を支援する接合強度・封止性データの採取を進め、データを体系的に整理しデータベース構築することを目的として実施した。以下に目標に対応する研究開発成果を示す。

〈目標〉

陽極接合と半田接合に関し、接合強度・封止性データの採取を進め、その基本データのデータベースへの登録を完了する。

〈成果〉

陽極接合及びはんだ接合試験サンプルの強度試験および封止性試験を行ない、基本データを体系的に整理し、知識データベースに登録した。さらに、陽極接合部の接合強度を接合条件ごとに破壊じん性値を用いて体系的に整理し、材料・プロセスデータベースに登録した。

## 3.4.2.2 研究開発成果の詳細

### (1)ソフトの開発

接合技術は MEMS プロセス、実装に用いられる技術である。異種材料が接合される場合、異種材料間のヤング率、ポアソン比、熱膨張係数等の物性値の相違および接合端部の幾何学的形状、中間層の材料・寸法等の影響で、接合界面・端部での破損を生じることがある。このような問題に対応し、MEMS の設計・開発を支援する以下の機能を含めた接合実装解析ソフトを開発した。

- 材料データベースを生かした異種材料接合親和性の評価機能
- 温度変化に対応した応答解析機能
- 力学的信頼性解析機能

具体的には以下の機能に分類される。

- 材料親和性評価
- 応力履歴継承解析
- 温度履歴継承解析
- 接合強度評価
- 疲労強度評価

材料親和性評価機能では、異種材料がある接合界面を境界にして接合しているようなデバイスの変形時における力学特性の評価として、接合界面端部の応力特異性の指数を直接算出する。以下に概要を示す。

- 理論的に応力特異性の指数が満足すべき特性方程式を解くことによって、その解として応力特異性の指数を算出する。
- 応力特異性の指数が満足すべき特性方程式として、切欠き（フリーエッジ）モデルでは **Bogy** の特性方程式を、埋め込みモデルでは陳・西谷らの特性方程式を用いた。
- 特性方程式は非線形で、複数個の複素数が解となり得るので、これらの解を漏れなく求めるために挟み込み法を採用した。

材料親和性評価機能の機能検証として、ダイシユア試験を解析した。図 3-4-9 にフレームワークソフトによる材料親和性評価のパラメータ入力画面と応力特異性の指数の計算結果表示画面を示す。本機能による **Bogy** の特性方程式の理論解は、公開文献値および前述の接合強度評価による結果と十分良く一致している。

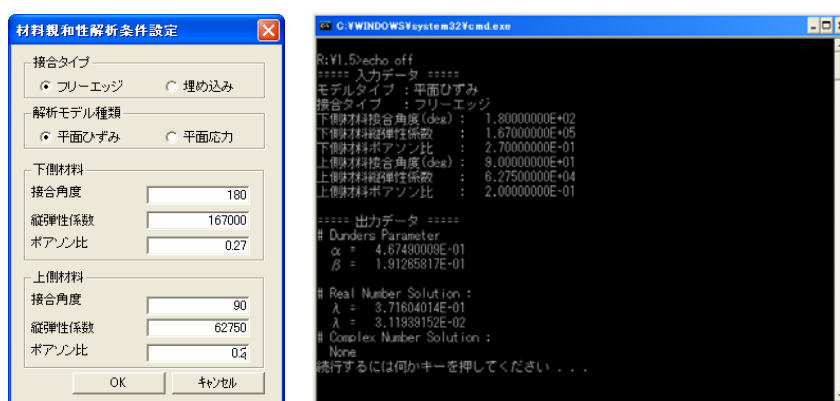


図 3-4-9 材料親和性評価のパラメータ入力画面と結果出力画面

温度変化に対応した応答解析機能として、応力履歴継承解析機能と温度履歴継承解析機能の 2 つ機能を開発した。

- 応力履歴継承解析  
解析対象の形状が大きく変化するような加工プロセス前後のデバイス構造に対して、加工直前の応力分布を加工直後のメッシュ上にマッピングし、新たに生じた境界面の等価節点荷重を解放する。
- 温度履歴継承解析  
解析対象の形状が大きく変化するような加工プロセス前後のメッシュに対して、加工直前の温度分布を加工直後のメッシュ上にマッピングし、新たに生じた境界面の熱流束を相殺する。
- 応力・温度のマッピング処理  
加工プロセス前後の異なるメッシュ間の近傍探索処理としてバケット法を採用した。

応力履歴継承解析の検証解析として、加工プロセスのある段階で残留応力等の応力分布を伴ったデバイス構造に対して、次の段階の加工プロセスとしてエッチングを実施した時のデバイス構造の変形挙動について解析を実施した。

図 3-4-10 にエッチング直前のデバイス構造のメッシュとエッチング直後のデバイス構造のメッシュを示す。また、図 3-4-11 にエッチング直前のデバイス上の応力分布+変形とエッチング直後のデバイス上の応力分布+変形を示す。エッチングによって取り除かれた部分が支えていた内力がなくなって、エッチング直後にその分の変形が生じる結果を示しており、物理的に妥当な結果が得られている。

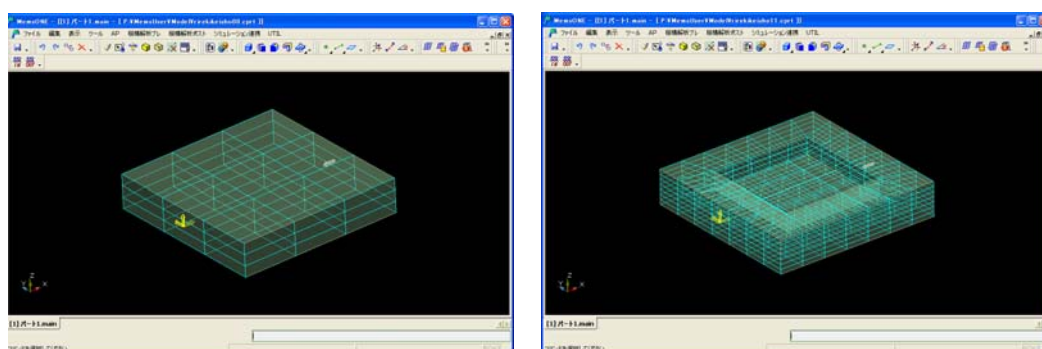


図 3-4-10 エッチング前後のデバイス構造とメッシュ

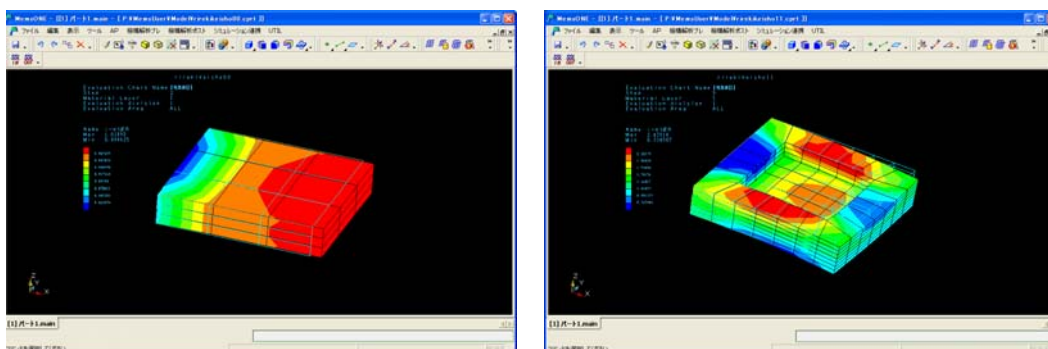


図 3-4-11 エッチング前後の応力分布と変形

力学信頼性解析機能では、接合強度評価と疲労評価の 2 つの機能を開発した。

接合強度評価では、接合端部の近傍に注目し、ある接合端部を通る直線における極座標系の応力と端部からの距離のデータ(N 個)をから、以下の手順を用いて、接合強度の評価パラメータを評価する機能を実現した。

- N 個のデータに対して、距離が、指定された評価対象領域（図 3-4-12）の範囲外であるデータを除外する。
- 残ったデータに対して、応力、距離ともに  $\log$  をとったうえで、重み付きの最小 2 乗法を適用し、近似直線を算出する。
- 近似直線を用いて、指定された外挿位置における接合強度の評価パラメータ  $K$  を計算する。

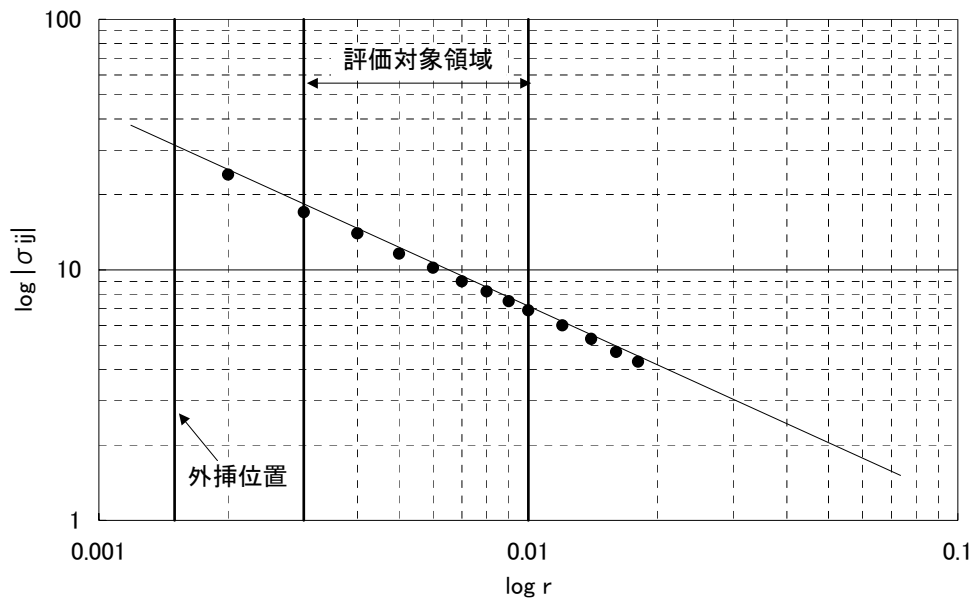


図 3-4-12 接合強度の評価

接合強度評価の検証解析として、シリコンとガラスがそれぞれ接合角度  $180^\circ$  と  $90^\circ$  で接合している状態で、ガラス側に荷重を与えるというダイシェア試験を解析した。

図 3-4-13 にダイシェア試験の解析検証用モデルと接合端部の応力場の両対数グラフと直線によるカーブフィッティングの結果を示す。接合端部の応力分布の解析結果は本機能と商用コードとで十分一致しており、両対数グラフの直線によるカーブフィッティングの結果から得られた応力特異性も、切欠きの場合の応力特異性についての **Bogy** の特性方程式の理論解と十分良く一致している。

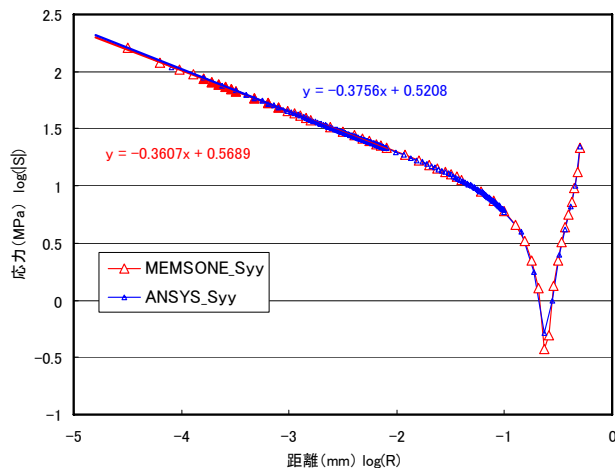
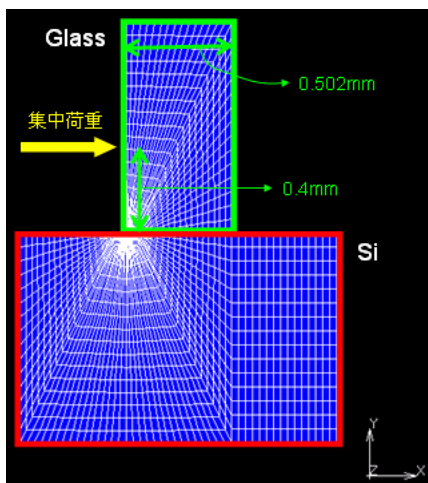


図 3-4-13 ダイシエア試験のモデルと接合端部の応力分布の両対数グラフ

疲労評価機能では疲労強度を FEM による応力解析結果および材料・プロセス・データベースで整備される S-N 曲線に基づいて、以下の手順で評価する機能を実現した。

- 対象となる部材の S-N 曲線を材料データベースから選定する。
- 指定された応力における破壊繰返し数 N を S-N 曲線から計算する。
- 入力された応力繰返し数が破断繰返し数よりも大きい場合は、疲労破壊が発生すると見なす。

図 3-4-14 に疲労評価機能の SN 曲線を特定するためのパラメータと実際に適用する応力振幅とサイクル数を指定するフレームワークソフトの入力画面と結果出力画面を示す。フレームワークソフトから疲労強度評価が正しく実行されており、フレームワークソフトとの結合検証テストの目標を達成できた。

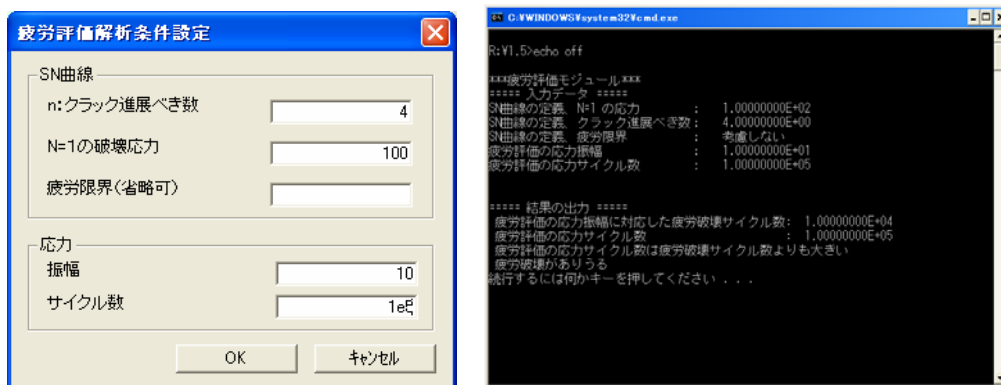


図 3-4-14 疲労強度評価のパラメータ入力画面と結果出力画面

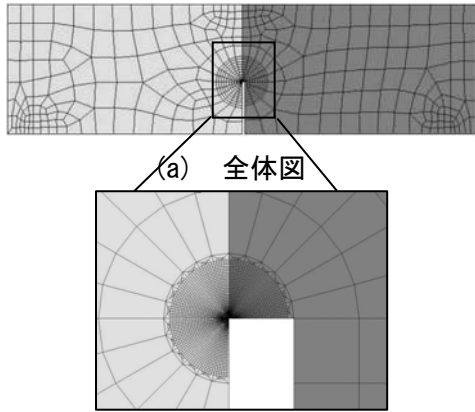
## (2)妥当性の検証

三点曲げ試験およびダイシエア試験による接合強度試験結果をもとに、陽極接合された接合強度試験片を検証デバイスとして数値解析の妥当性の検証および接合条件が接合強度に及ぼす影響を調査した。表 3.4.2.2-1 に陽極接合条件とロット番号および破壊モードを示す。接合強度のロット間ばらつきを調べるため接合条件 1 と 6 については複数のロットで試験片を作製した。陽極接合条件と破壊モードの関係を表 3-4-9 に示す。三点曲げ試験とダイシエア試験ともに接合温度 300℃以上で接合した陽極接合試験片はガラス母材が破壊し、接合温度 200℃で接合した陽極接合試験片は主に接合界面が破壊した。

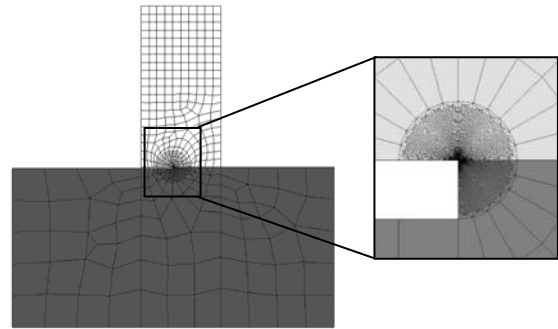
表 3-4-9 陽極接合条件と破壊モードの関係

接合条件	接合温度 (°C)	接合電圧 (V)	接合時間 (hour)	ロット番号		破壊モード	
				三点曲げ試験	ダイシエア試験	三点曲げ試験	ダイシエア試験
1	400	1000	1	1,2	1	ガラス	ガラス
2		700	1	1	1	ガラス	ガラス
3		600	1	1	1	ガラス	ガラス
4		400	1	1	1	ガラス	ガラス
5		300	1	1	1	ガラス	ガラス
6	300	1000	1	1,2	1	ガラス	ガラス
7		700	1	1	1	ガラス	ガラス
8		600	1	1	1	ガラス	ガラス
9		400	1	1	1	ガラス	ガラス
10		300	1	1	1	ガラス	ガラス
11	200	1000	3	1	1	接合界面	接合界面
12		700	3	1	1	ガラス	接合界面
13		400	3	1	1	接合界面	接合界面
14		300	3	1	1	接合界面	接合界面

3 点曲げ試験およびダイシエア試験において接合部に負荷される応力状態を明確にするため、数値解析を行なった。解析には汎用有限要素解析ソフトウェア ANSYS Ver. 7.1 を用いた。FEM モデルの一例（非接合部長さ 0.2mm）を図 3-4-15 および図 3-4-16 に、物性値を表 3-4-10 に示す。強度試験の結果、破壊起点であったガラスとシリコンの接合端部近傍を細分化してモデル化した。2次元平面ひずみ状態とし、8 節点 2 次要素を用いた。実サンプルの接合端部の形状は理想状態と異なり、非接合部が存在するため、解析モデルの非接合部の長さ  $a$  は実サンプルの寸法とした。負荷条件は、荷重負荷点に  $1\mu\text{m}$  の強制変位を与えた。なお、接合に用いたガラスは、常温において熱応力がゼロに近くなるようにシリコンの線膨張係数と一致させているため、数値解析に熱応力は考慮していない。ラマン分光法による実測および数値解析により、3 点曲げによって非接合部先端に作用する応力に対して熱応力は 0%~5%程度であることを確認している。



(b) 非接合部先端拡大図



(a) 全体図 (b) 非接合部先端拡大図

図3-4-15 3点曲げ試験の数値解析モデル

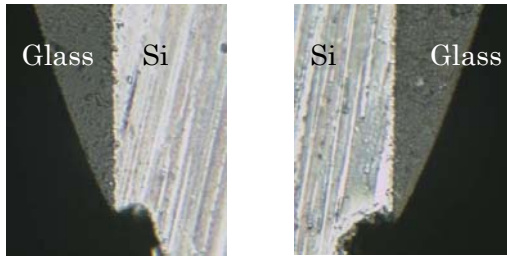
図3-4-16 ダイシエア試験の数値解析モデル

表3-4-10 解析に用いた物性値

	弾性率 [GPa]	ポアソン比
Glass	62.75	0.20
Si	167.0	0.27

図 3-4-17 に破断サンプルの断面を、図 3-4-18 にき裂進展方向 (の定義を示す。破壊起点を座標の原点としている。図 3-4-17 より、接合面に対するき裂の進展方向は、き裂進展とともに界面と平行な方向に近づくように曲がるのがわかる。また、両側面で観察されるき裂の進展角度はほぼ同じである。非接合長さが  $200\ \mu\text{m}$  の場合の原点から  $0.3\ \mu\text{m}$  離れた位置における周方向応力  $\sigma_\theta$  の分布を図 3-4-19 に示す。非接合長さが  $200\ \mu\text{m}$  の場合、周方向応力  $\sigma_\theta$  が最大となる角度は  $33^\circ$  であった。図 3-4-20 にき裂進展方向と非接合部長さの関係を示す。実験結果のき裂進展角度は、非接合部先端と非接合部先端から  $5\ \mu\text{m}$  離れた領域を顕微鏡で観察して求めた。FEM 解析結果でのき裂進展角度は、周方向応力が最大となる方向とした。実験結果にばらつきはあるが、実験結果と解析結果が良く一致した。このことから、数値解析結果は妥当であると判断した。





(a) 破壊起点の拡大図 (b) (a) の反対面

図3-4-17 破断サンプルの断面

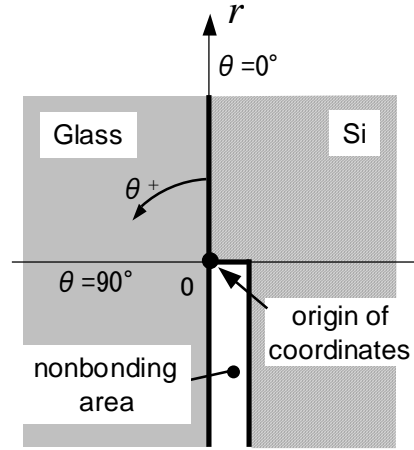


図3-4-18 き裂進展方向の定義

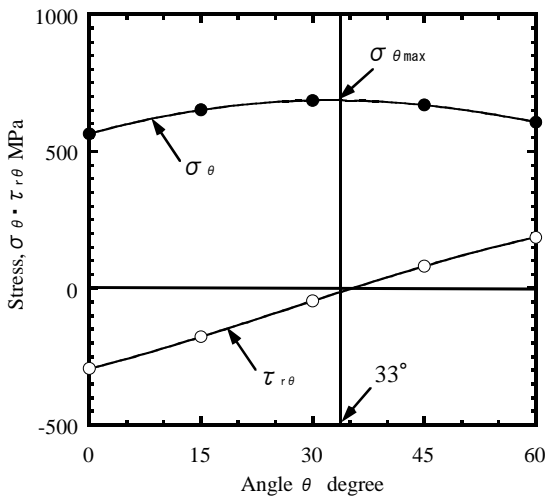


図3-4-19 周方向応力と角度の関係

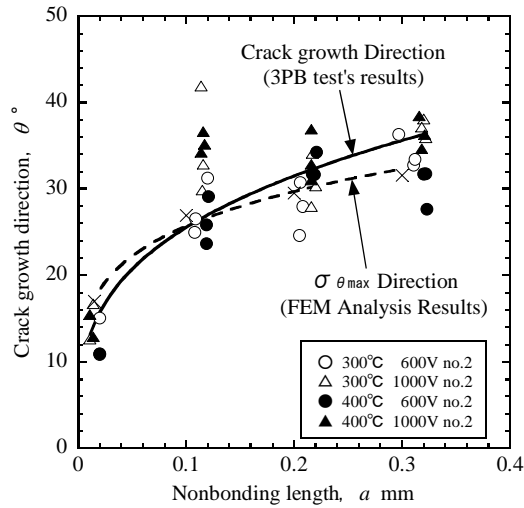


図3-4-20 き裂進展方向と非接合部長さの関係

図 3-4-21,3-4-22 に非接合部長さ  $200\mu\text{m}$  について、周方向応力が最大の方向 ( $\theta = 33^\circ$ ) および界面方向における応力と非接合部先端からの距離の関係を示す。図 3-4-21,3-4-22 より、3点曲げ試験およびダイシエア試験において非接合部先端には、応力  $\sigma_\theta$  および  $\tau_{r\theta}$  と非接合部先端からの距離  $r$  の間にほぼ  $r^{-1/2}$  の応力特異性が存在するため、陽極接合部の強度は応力拡大係数で評価可能であると考えられる。そこで、非接合部先端をき裂と同様にみなし  $r = 0.1\text{mm} \sim 0.3\text{mm}$  の間の値を外挿して非接合部先端のガラス破壊方向の応力拡大係数  $k_{\text{I}}$  および非接合部先端の界面方向の応力拡大係数  $k_{\text{i}}$  を算出した。ガラス方向の応力拡大係数  $k_{\text{I}}$  は FEM 解析結果より、周方向応力  $\sigma_\theta$  が最大の方向について応力外挿法を用い、式(3.4.2.2-1)によって算出した。接合界面の応力拡大係数  $k_{\text{i}}$  は式(3.4.2.2-2)を用いて算出した。

$$k_{\text{I}} = \lim_{r \rightarrow 0} \sigma_\theta \sqrt{2\pi r} \cdots (3.4.2.2-1)$$

$$k_{\text{i}} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r (\sigma_\theta^2 + \tau_{r\theta}^2)} \cdots (3.4.2.2-2)$$

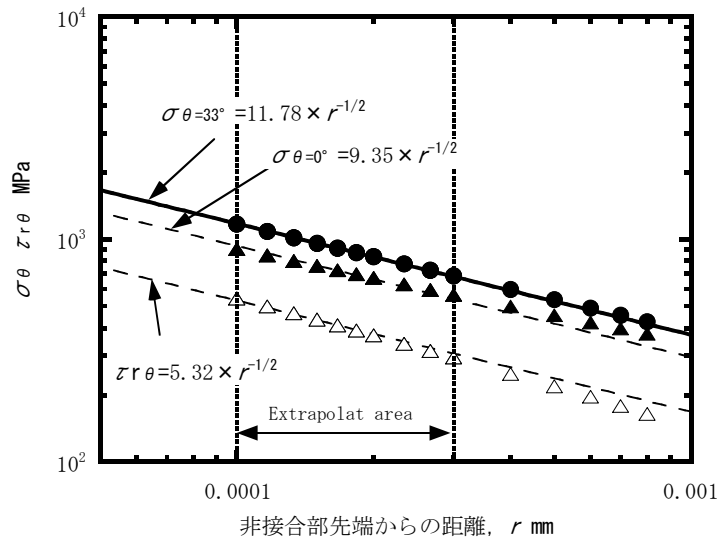


図3-4-21 応力と非接合部先端からの距離の関係（三点曲げ試験）

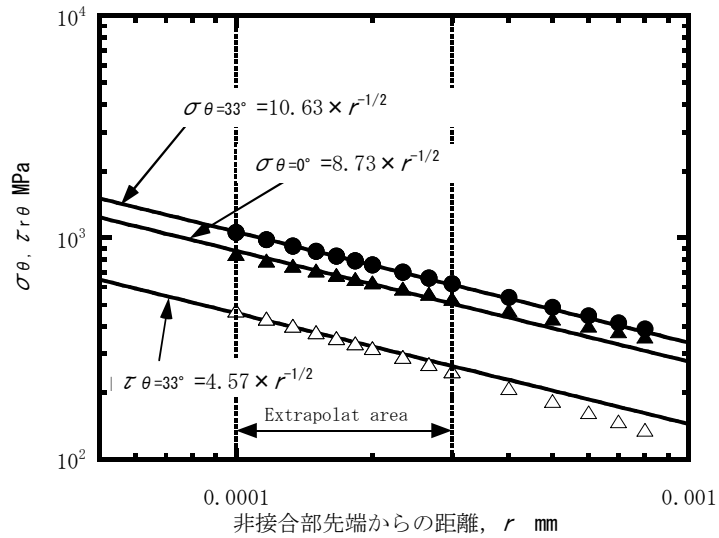


図3-4-22 応力と非接合部先端からの距離の関係（ダイヤモンド試

図 3-4-23 に接合条件 1 と接合条件 11 について破壊じん性値と非接合長さの関係を示す。破壊じん性値は数値解析によって得られた応力拡大係数  $k_{IC}$  および  $k_{IC}$  と試験によって得られた破断荷重から算出した。接合温度が  $200^{\circ}\text{C}$  の場合における接合界面の破壊じん性値はガラスの破壊じん性値よりも低いことから、陽極接合部の接合強度は接合温度の依存性が高いことがわかる。非接合長さおよび試験方法によらず破壊じん性値は一定値を示し、解析の妥当性を確認した。

全接合条件の破壊じん性値を図 3-4-24 に示す。平均破壊じん性値をポイントで、標準偏差をエラーバーで示した。試験方法によらず平均破壊じん性値および標準偏差はほぼ一定であることがわかり、接合強度は負荷モードによらず接合条件に依存することが明らかとなった。

- 3点曲げ試験結果 接合条件1 ロット1 (ガラス破壊モード)
- ダイシエア試験結果 接合条件1 ロット1 (ガラス破壊モード)
- ▲ 3点曲げ試験結果 接合条件11 ロット1 (界面破壊モード)
- △ ダイシエア試験結果 接合条件11 ロット1 (界面破壊モード)

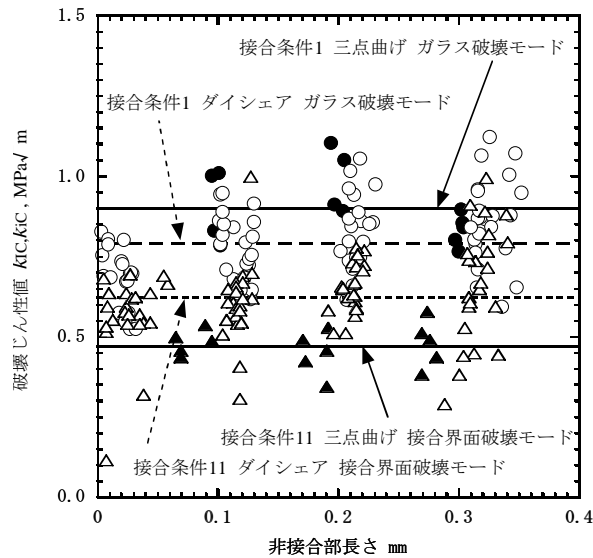


図 3-4-23 破壊じん性値と非接合長さの関係

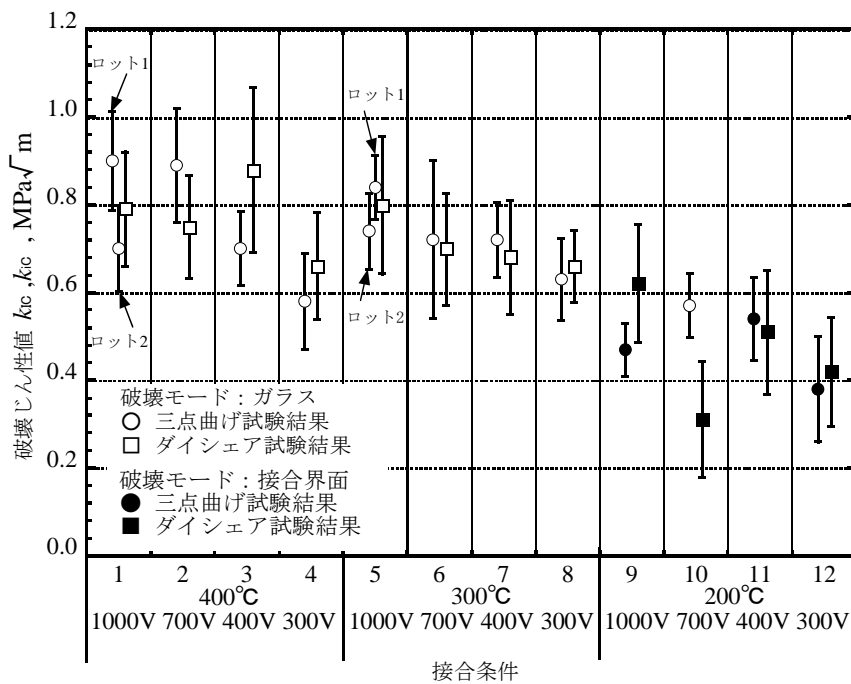


図 3-4-24 破壊じん性値と接合条件の関係

接合温度が 200℃ の場合は主に接合界面が破壊し、接合強度が低くなるため、接合を行う際は、接合界面破壊が起こらない条件下で確実に接合を行うことが重要であると考えられる。試験を行なった接合条件では、ガラスが破壊する場合の陽極接合部の平均破壊じん性値は 0.57 MPa√m から 0.91 MPa√m であった。また、ロットの違いにより接合強度が 15% 程度変化しており製品設計時には注意する必要がある。

### (3) 接合・封止データ採取

陽極接合の接合強度の試験方法としては、取得データの汎用性から、三点曲げ試験、およびダイシエア試験を採用し、異なる負荷モードにおける接合強度を採取する。試験片のサイズは、寸法効果を考慮して、実デバイスに近い値とした。実際の接合時には、接合角部近辺にダイシングなどによる欠陥が存在し、また、この欠陥寸法は安定しないため、今回の試験では、人為的に非接合部を設けた試験片も同時に用意し、非接合部分を欠陥寸法となるように設計した。図 3-4-25 に三点曲げ試験方法の概要及び試験片仕様を示す。接合後の基板材 (Si) と接合材 (Glass) を支持し、接合部に試験装置にて荷重を負荷することで三点曲げ試験を行った。図 3-4-25 にダイシエア試験方法の概要及び試験片仕様を示す。基板材 (Si) を支持し、接合後の接合材 (Glass) にダイシエアテストによる荷重を負荷することでダイシエア試験を行った。また、実デバイスの実装を想定し、一方の基板に掘り込みを設け、他方の基板と真空中で接合した試験片を用い、封止性の評価を行うこととした。図 3-4-27 に封止性評価法を示す。封止性が良好であれば、内部空洞の真空が保持され、掘り込みにより薄板化した上面 (ダイヤフラム) の反りに変形が生じる。この変形量を経時的に測定することにより封止性を評価した。なお、ダイヤフラムの厚み ( $20\ \mu\text{m}$ ) のばらつきをなくすために、SOI 基板を用い、SOI 層をダイヤフラムとした。陽極接合の条件は、接合温度、接合電圧を  $400, 300, 200^\circ\text{C}$  と、 $1000, 700, 400, 300\text{V}$  の組み合わせとした。接合時間は  $400, 300^\circ\text{C}$  を 1 時間とし、 $200^\circ\text{C}$  は 3 時間とした。

三点曲げ試験、およびダイシエア試験ともに、同様のプロセスで作製した試料を、ダイシング方法を変えることにより、試験片を作製した。図 3-4-26 に試験片作製プロセスを示す。まず、ICP-RIE により Si 基板に人為的な非接合部となる  $2\ \mu\text{m}$  の窪みを加工する。所定の非接合幅となるようにポスト形成位置をレジストのパターニングにより設定し、さらに  $10\ \mu\text{m}$  の深さまで掘り込み、ポストを形成する。ポスト先端部とパイレックスガラスとの接合後、ハーフカット及びフルカットのダイシングにより、個々の試験片に分離する。

図 3-4-27 に封止性評価試験片作製プロセスの概要を示す。まず、接合部形成のために、Si を  $2\ \mu\text{m}$  エッチングする。次にダイヤフラム形成のために、埋め込み酸化層が見えるまで、Si 基板を  $400\ \mu\text{m}$  ウエットエッチングする。最後に埋め込み酸化層をウエットエッチングし、パイレックスガラスと真空中で陽極接合を行う。

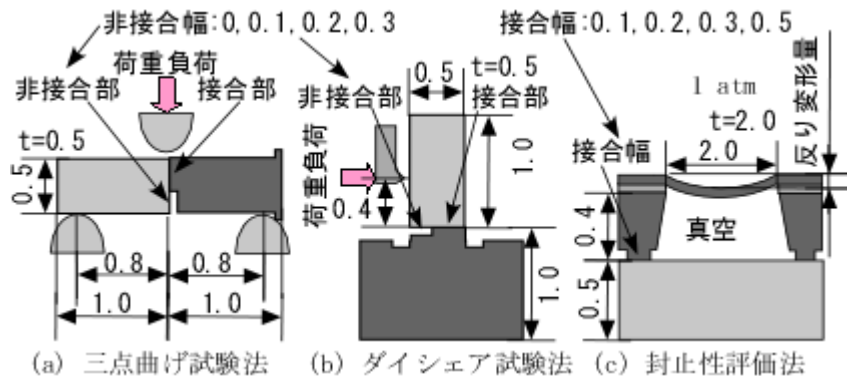


図3-4-25 陽極接合部の強度試験方法の概要及び試験片仕様

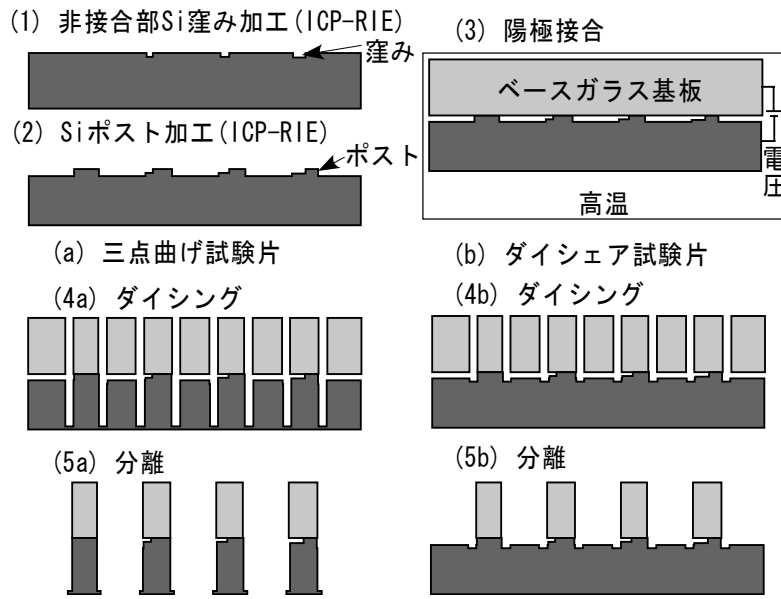


図3-4-26 陽極接合試験片作製プロセス

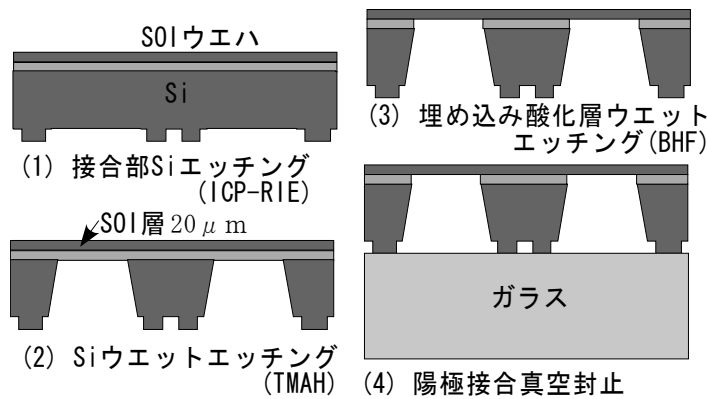


図3-4-27 陽極接合封止性評価試験片作製プロセス

はんだ接合の接合強度の試験方法としても、取得データの汎用性から、三点曲げ試験、およびダイシヤ試験を採用し、異なる負荷モードにおける接合強度を採取する。陽極接合試験片とは試験片製作方法が異なるのみである。図3-4-28に三点曲げ、ダイシヤ試験方法の概要及び試験片仕様及び封止性評価法を示す。はんだ接合の条件は、はんだ物性としては、Sn-37Pb、Sn-3.5Ag、Sn-0.7Cuの3種類、はんだ下地膜の成膜方法としては、スパッタ、電気めっき、無電解めっきの3通りの組み合わせとした。はんだ接合の温度としては融点+50°Cとして、各々233、271、277°Cとした。

三点曲げ試験、およびダイシヤ試験ともに、同様のプロセスで作製した試料を、ダイシング方法を変えることにより、試験片を作製した。図3-4-29に試験片作製プロセスを示す。まず、ベースガラス基板、Si基板ともに下地金属膜を所定の非接合幅が得られるようにパターンニングする。下地金属膜の構成は、スパッタリング法では基板側からCr 0.05 μm、Ni 2 μm、Au 0.05 μmと

した。また、電解めっき法ではめっき下地をスパッタリング法でまず基板側からCr  $0.05\mu\text{m}$ 、Cu  $0.1\mu\text{m}$ を形成し、その上にCu  $0.4\mu\text{m}$ 、Ni  $2\mu\text{m}$ 、Au  $0.05\mu\text{m}$ を電解めっきで形成した。また、無電解めっき法では、めっき下地をスパッタリング法でまず基板側からCr  $0.05\mu\text{m}$ 、Cu  $0.1\mu\text{m}$ を形成し、その上にNi-P無電解めっき $2\mu\text{m}$ 、Au無電解めっき $0.05\mu\text{m}$ とした。接合部に溶融はんだ吐出装置を用い、はんだをライン状に搭載し、ベースガラス基板とアライメントし接合後、ハーフカット及びフルカットのダイシングにより、個々の試験片に分離する。

図 3-4-30 に封止性評価試験片作製プロセスの概要を示す。まず、ベースガラス基板、Si 基板ともに接合部形成のために下地金属膜を所定の幅が得られるようにパターンニングする。下地金属膜の構成は、三点曲げ及びダイシエア試験片と同様である。次にダイヤフラム形成のために、埋め込み酸化層が見えるまで、Si 基板を  $400\mu\text{m}$  ウェットエッチングする。最後に埋め込み酸化層をウェットエッチングし、ベースガラス基板とアライメントし真空中ではんだ接合を行う。

試作した試験片の外観を図 3-4-31 に示す。三点曲げ試験片・ダイシエア試験片ともに、端面にダイサーのブレード痕が見られる。ダイシエア試験片では、ハーフダイシングを行った後の切れ込みが Si 上に見られる。各試験片とも、接合面の寸法、非接合幅などは設計値通りに作製できた。また、はんだ接合の場合の封止性評価サンプルの外観を図 3-4-32 に示す。(a)はダイヤフラム面の状態で、測定基準位置マークが形成され、ダイヤフラム面に反り変形が見られ、内部が減圧状態である。また、(b)はガラス面側からの状態で、封止部と Si ウェットエッチングで形成したテーパ面を確認することができる。

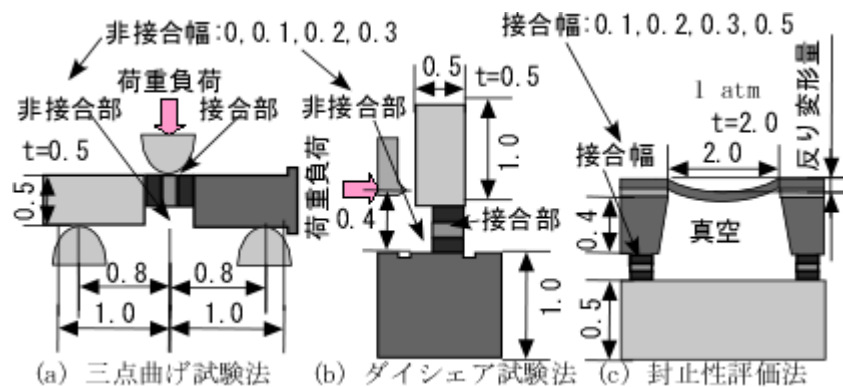


図3-4-28 はんだ接合部の強度試験方法の概要及び試験片仕様

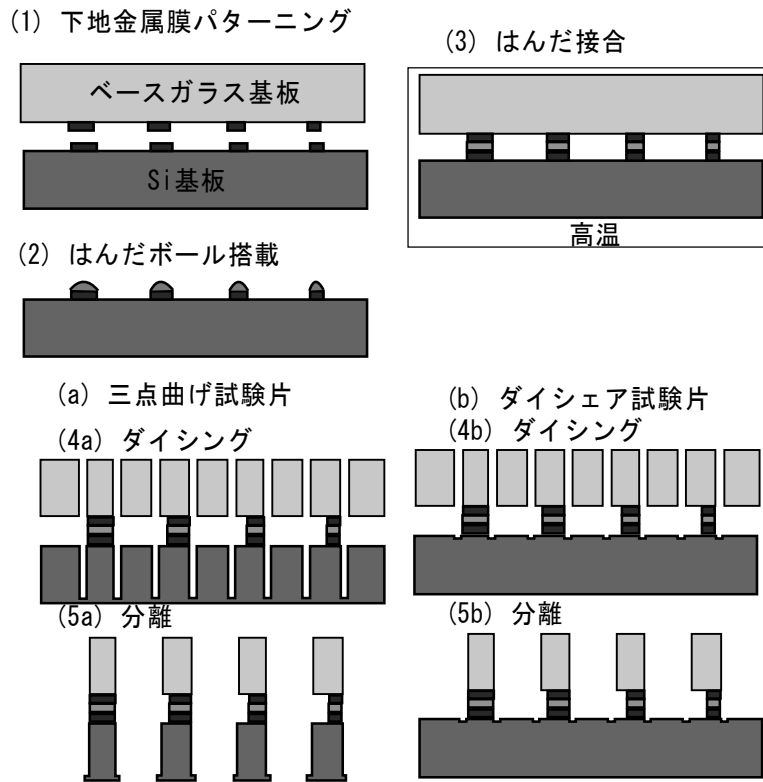


図3-4-29 はんだ接合試験片作製プロセス

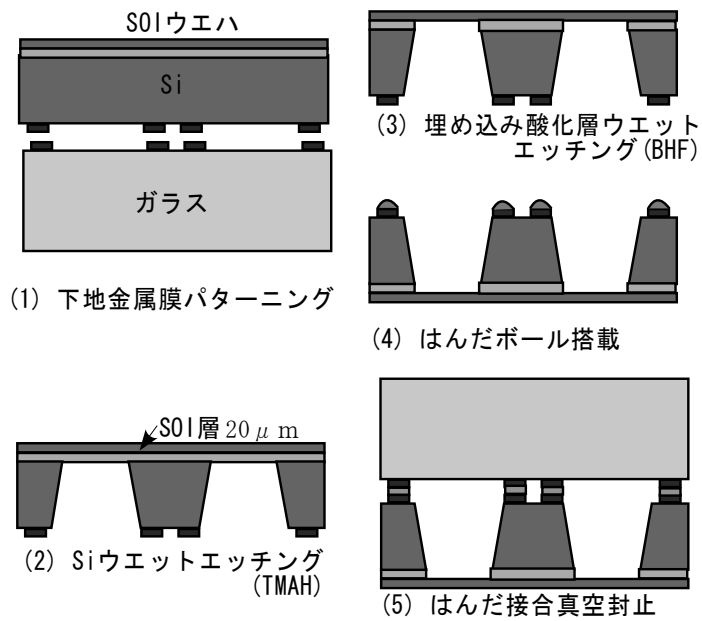


図3-4-30 はんだ接合封止性評価試験片作製プロセス

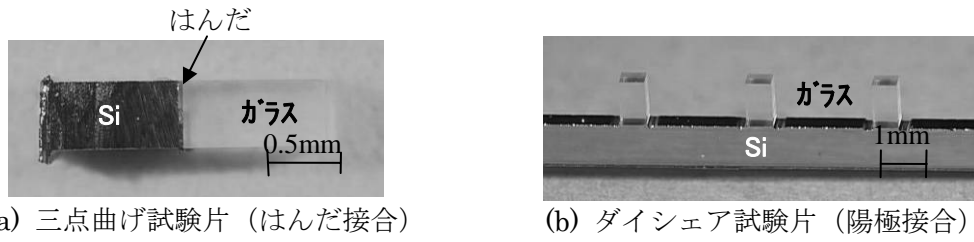


図 3-4-31 各試験片の作製結果

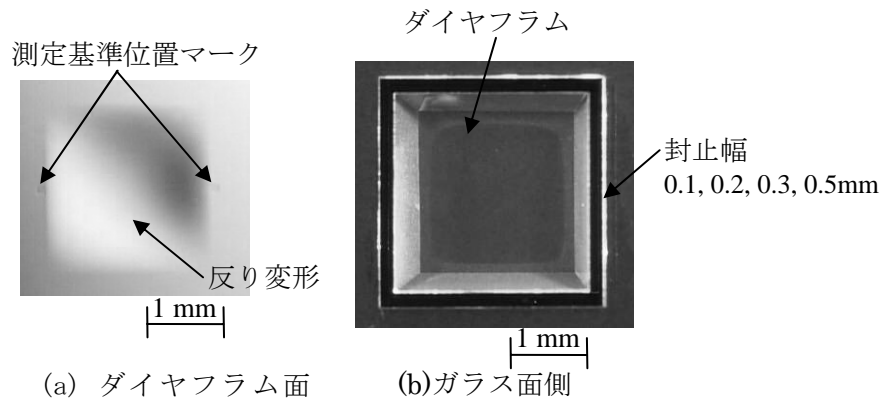
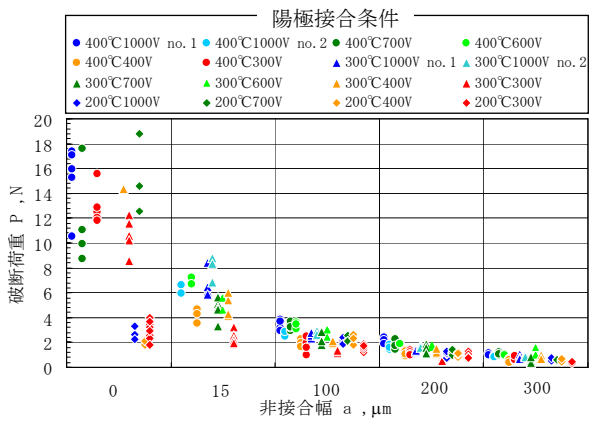


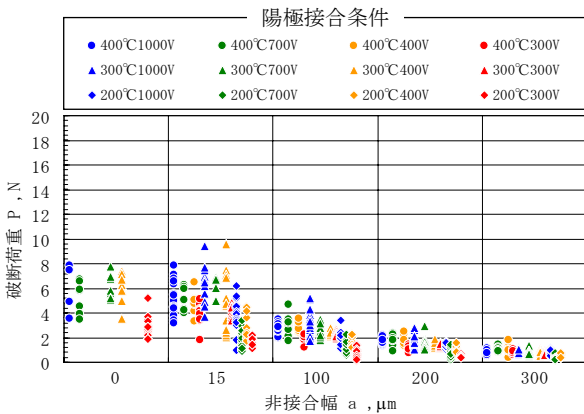
図 3-4-32 封止性評価サンプル作製結果 (はんだ接合)

三点曲げ試験には株式会社島津製作所製容量 20 kN 引張試験機 (AG2000-B) を用い、試験速度は 0.1 mm/min とした。試験治具には支持部および押し治具の曲率半径が 0.3 mm である株式会社島津製作所製微小三点曲げ試験治具 (346-53947) を支持スパン 1.6 mm として用い、光学顕微鏡で位置決めを行なった。ダイシエア試験にはアークテック製万能ボンドテスターシリーズ 4000 を用い、固定した Si 基板から負荷治具までの距離を 0.4 mm とし、荷重負荷速度は 1 μm/s とした。位置決めは実体顕微鏡を用いて行なった。三点曲げ試験とダイシエア試験はともに、試験環境は大気中、常温、常湿として実施し、破断荷重を計測した。試験結果を図 3-4-33, 3-4-34 に示す。陽極接合試験片およびはんだ接合試験片の試験結果を破断荷重と非接合長さにより体系的に整理した結果、非接合長さが長くなると破断荷重が低下することが明らかになった。



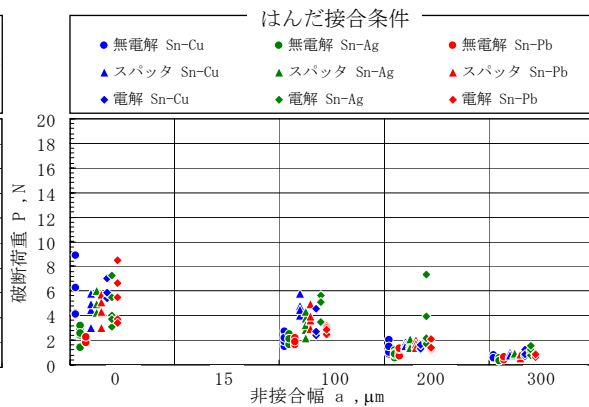


(a) 三点曲げ試験結果

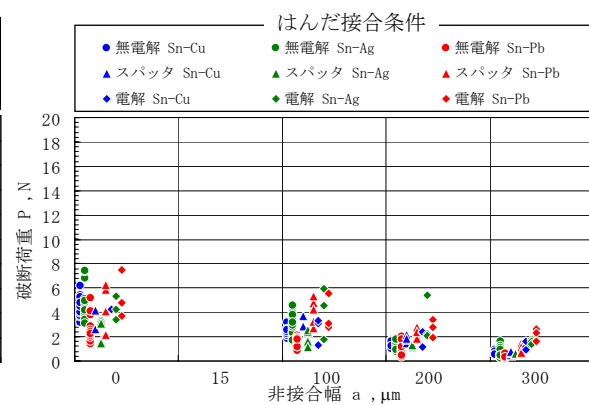


(b) ダイシエア試験結果

図 3-4-33 陽極接合試験結果



(a) 三点曲げ試験結果



(b) ダイシエア試験結果

図 3-4-34 はんだ接合試験結果

封止性の評価は、真空封止後のサンプルを、大気圧中でヒートサイクル試験 ( $-40^{\circ}\text{C}$  30 分 $\leftrightarrow$  $125^{\circ}\text{C}$  30 分) に投入し、ダイヤフラムの反りで封止性の劣化を評価した。封止性評価サンプルは  $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 、厚み  $20\text{ }\mu\text{m}$  の Si のダイヤフラムであり、真空封止を行っているので、大気圧により変形し、接合端部に応力負荷が作用する。そこで、陽極接合部に負荷される応力状態を明確にするために数値解析を行った。解析には汎用有限要素解析ソフトウェア ANSYS Ver. 7.1 を用いた。2次元軸対称モデルとし、8 節点 2 次要素を用いた。数値解析の結果 (FEM モデルの一例 (封止幅  $0.1\text{ mm}$ )) を図 3-4-35, 3-4-36 に示す。また、封止幅と反り、破壊じん性値を求めた結果を表 3-4-11 に示す。どの結果でも、破壊じん性値は、妥当性の検証で求めた結果よりも低くなるので、接合部は破壊せず、真空封止状態を維持するものと考えられる。

図 3-4-35 に示すように封止性評価サンプルは、ダイヤフラム面が反っている。また、測定した陽極接合の反りの平均値とその標準偏差  $\sigma$  について表 3-4-12 に示す。反りに関しては、数値解析で算出した値と同様の値となっており、数値解析による破壊じん性値の算出結果は妥当であると考えられる。

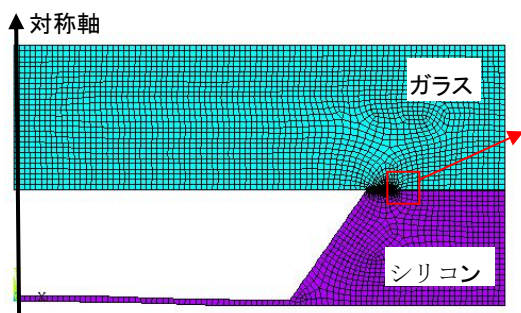


図3-4-35 変形図

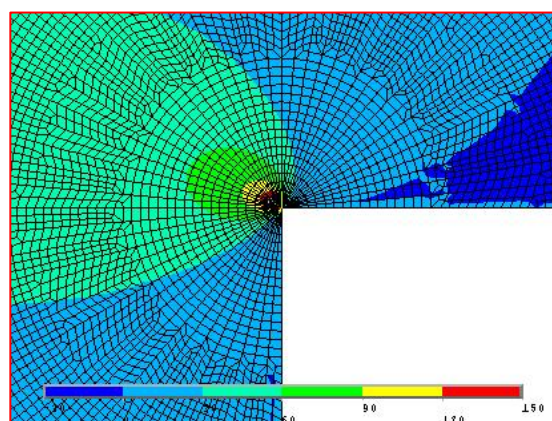


図3-4-36 周方向応力分布図

表3-4-11 封止幅反りと破壊じん性値  
(数値解析結果)

封止幅 mm	反り μm	破壊じん性値 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$	
		ガラス方 向 $k_{IC}$	界面方向 $k_{IC}$
0.1	19.3	0.13	0.12
0.2	19.3	0.13	0.13
0.3	19.3	0.10	0.10

表3-4-12 封止幅反り (実測値)

封止幅 mm	反り平均 値 $\mu\text{m}$	標準偏 差 $\sigma$	サンプル 数 $K_0$
0.1	19.2	1.58	389
0.2	19.2	1.55	395
0.3	19.2	1.50	407
0.5	19.2	1.46	401

作製したサンプルをヒートサイクル試験 ( $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \Leftrightarrow 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、各 30 分、1000 回) に投入した結果、陽極接合サンプルでは、初期接合不良 (異物などの影響) を除けば、どの接合サンプル ( $n=1592$ ) にも封止の劣化は認められなかったことを確認した。はんだ接合に関しても、封止接合直後に反りがなく接合不良と判断されたもの以外をヒートサイクル試験に投入した。陽極接合と異なり下地金属膜同士のはんだ接合となるため、ウエハ同士を接合する際にアライメントを行う必要があり、アライメント誤差も封止性に影響する。接合面の状態を直接詳細に観察できないため、試験投入後に気密性が劣化したサンプル ( $n=42$ ) が認められたが、下地金属膜やはんだ組成、封止幅による傾向の違いは認められなかった。また、それ以外のサンプル ( $n=803$ ) でヒートサイクル試験の結果、気密性を維持していたことを確認した。

### (3) 研究開発成果の意義

#### (1) ソフトの開発

開発された接合実装解析ソフトにより接合実装プロセスの異種材料接合親和性、力学的信頼性を検証、評価、および複数のプロセスをまたぐ力学特性・熱特性の評価を数値的に行うことが可能となり、MEMS デバイスの構造設計に対して効率化が図れる。

#### (2) 妥当性の検証

ウエハプロセスを用いて作製した MEMS の実デバイス寸法の試験片を用いた強度試験を行い、陽極接合部の接合強度を破壊じん性値を用いて体系的に整理した。その結果、破壊強度が試験片

形状や負荷モードによらず、接合条件に依存することを示し、本解析の妥当性が実証された。

### (3) 接合・封止データ採取

MEMS の接合でよく使用される陽極接合およびはんだ接合の接合強度データを体系的に整理しデータベースを構築した。さらに陽極接合では、破壊じん性値を用いた接合強度データベースを構築し、数値解析を用いた接合部の破壊判定を可能としたことで、MEMS デバイスの構造設計に対して高効率化が図れる点で意義がある。

### 3.4.3 「回路集積化 MEMS シミュレータの開発」

#### 3.4.3.1 研究開発の概要

MEMS(微小電気機械系)の機構部と電気回路を集積化した MEMS の動作を予測する為の、電気・機械にわたる統合的シミュレーションを行う回路集積化 MEMS シミュレータを開発した。本ソフトウェアは、電気回路シミュレーションの手法を基にしており、電気素子に加えて、歯車アクチュエータ、トーシヨンミラー等の典型的な MEMS デバイスをモデル化できる機械素子を新たに導入することによって、電気回路部分と機構部分の解析が同時に行なえる為、集積化 MEMS の特性を短時間で計算することが可能である。更に、MEMS デバイスを実際に組み立てる感覚でモデル化することが可能な使いやすい操作画面を備え、MEMS 初心者でも簡便に集積化 MEMS の特性を解析できる。本シミュレータを利用することで、集積化 MEMS の特性を試作前にあらかじめ予測することが可能となり、開発期間の短縮、新機能の予測等、集積化 MEMS の可能性を飛躍的に向上させられるものと期待できる。

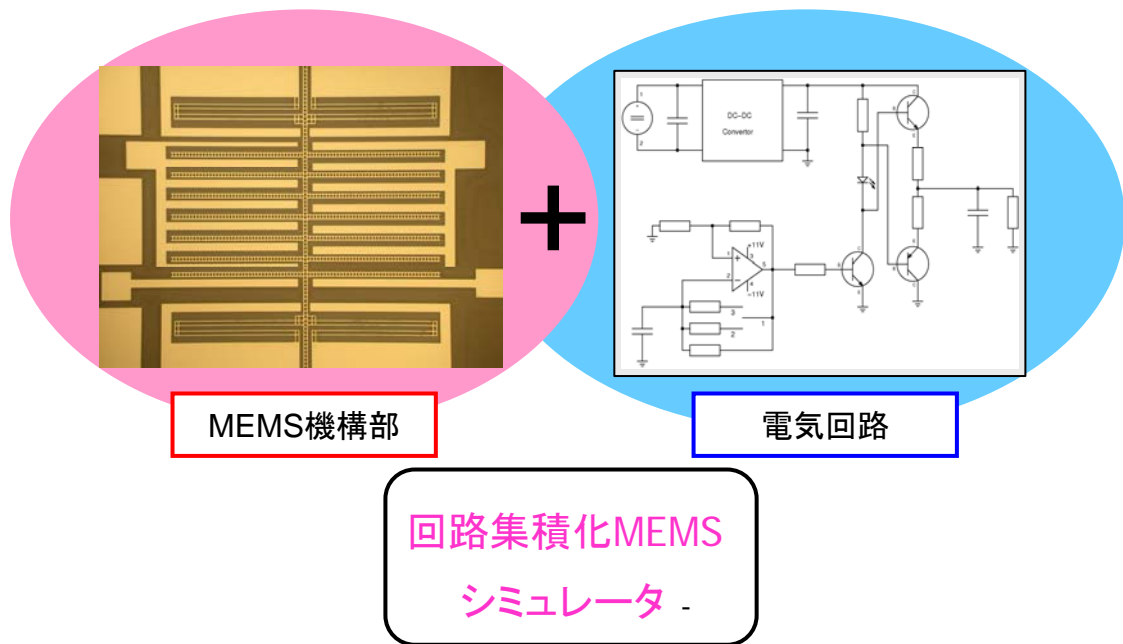


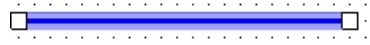
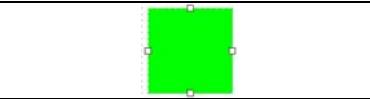

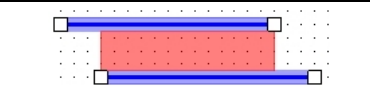
図 3-4-37 回路集積化 MEMS シミュレータの対象

### 3.4.3.2 研究開発成果の詳細

#### (1) 機械素子のモデル構築

電気回路シミュレーションの手法を基にした電気・機械の連成解析を可能にする為に、MEMS 機構部を構成する機械素子モデルを構築した。作成した素子モデルは、表 3-4-13 に示した 4 種類である。この素子モデルにより、櫛歯アクチュエータ、トーションミラー等の MEMS を構成し、その機構部分を解析することが可能になった。以下で、各モデルについて説明を行う。

表 3-4-13 機械素子モデルの種類

素子名	説明	シミュレータの表示
ビーム	棒状の線形弾性体	
プレート	剛体平板	
アンカ	固定端	
ギャップ	Beam 又は Rigid Plate に静電引力を加える為の素子	

#### (a) アンカ

アンカは、ビームやプレートの節点を固定するための素子モデルである。節点上にアンカを配置すると、その節点の変位、速度はゼロになる。

#### (b) ビーム

ビームは、棒状の線形弾性体に相当する素子モデルである。図 3-4-38 に示すように、両端に一つずつ節点を持ち、これを介して他の素子と接続することができる。このモデルでは、ビームは一樣な材質で構成されており、断面も四角形で一定であると仮定した。また、ビームの変位が時間変化する場合、ビームには粘性抵抗力が働く。本モデルでは、粘性抵抗力として **Quette** 粘性抵抗力を導入した。これは、Beam 素子の運動に伴って、Beam 素子と基板の間の空気層にずり(速度の勾配)が生じることによって生じる抵抗力である。ビームは、表 3-4-14 に示すパラメータを有する。これらを用いて、「節点の変位または速度」と「節点に働く外力」を関係付ける行列が得られた。この行列は、剛性行列、質量行列、粘性行列で構成されている。

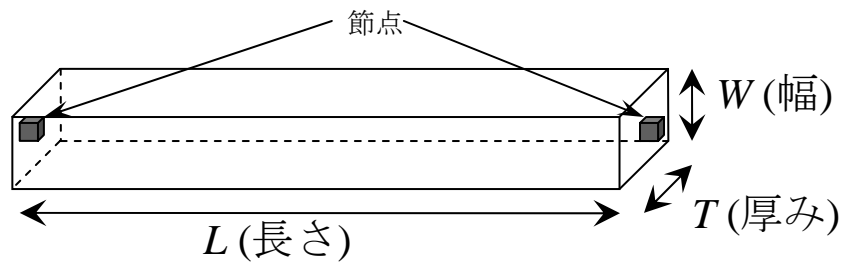


図 3-4-38 ビームの模式図

表 3-4-14 ビームのパラメータ

サイズパラメータ	幅
	長さ
	厚み
初期配置パラメータ	オイラー角
物性パラメータ	密度
	ヤング率
	ポアソン比
粘性抵抗パラメータ	エアギャップ (ビームと基板間の空気層の厚み)
	粘度

### (c) プレート

プレートは、剛体平板に相当する素子モデルである。図 3-4-39 に示したように、側面の重心に 1 つずつ、計 4 個の節点を持つ。本素子の変形をせず、並進運動と回転運動だけを行う。プレートの運動に伴って働く粘性抵抗力としては、ビームと同じく、**Quette** 粘性抵抗力を考慮した。プレートは、表に示したパラメータを有する。これらのパラメータを用いて、回路シミュレータに組み込み可能な形の行列を構成した。この行列は、質量行列、慣性行列、そして 4 節点間の束縛条件の行列からなる。

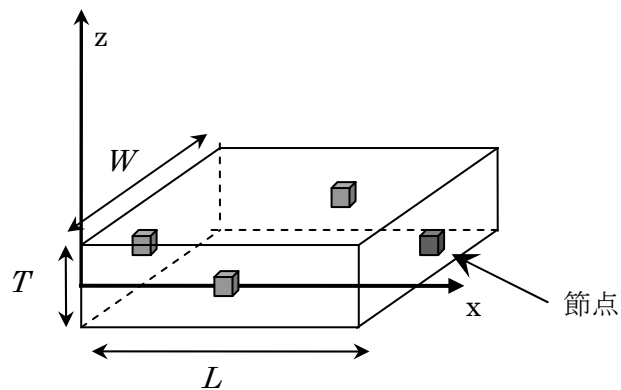


図 3-4-39 プレートの模式図

表 3-4-15 プレートのパラメータ

サイズパラメータ	幅
	奥行き
	厚み
初期配置パラメータ	オイラー角
物性パラメータ	密度
粘性抵抗パラメータ	エアギャップ (プレートと基板間の空気層の厚み)
	粘度

(d) ギャップ

ギャップは、ビーム-ビーム間、またはプレート-プレート間に構成され、ビームまたはプレートに静電引力を与える素子モデルである。また、ギャップは、機械素子ネットワークと電気回路をつなぐ機能も有する。図 3-4-40 に示したように、ビームもしくはプレートとの境界に1つずつ電気端子を持ち、それを介して、電気回路に接続することができる。このとき、ギャップはキャパシタとしても振舞い、その容量はビームの変形の程度、もしくはプレートの移動の程度によって決まる。ギャップは、表 3-4-16 ギャップのパラメータに示すパラメータを有する。これらを用いて、回路シミュレータに組み込み可能な形式で、静電引力、キャパシタンスを導出した。

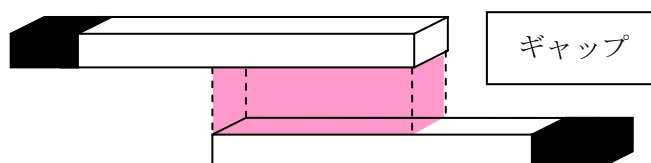


図 3-4-40 (ビーム間)ギャップの模式図

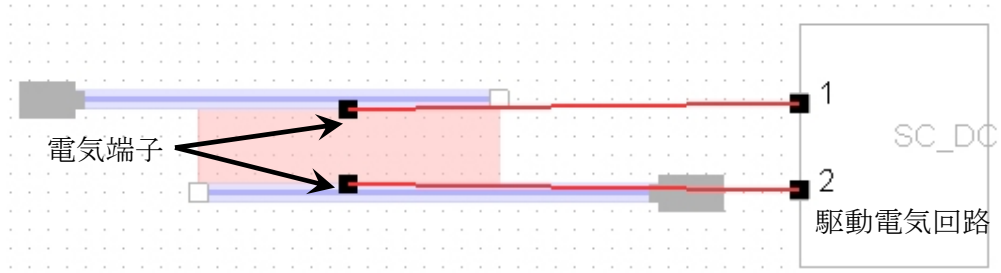


図 3-4-41 電気回路との接続

表 3-4-16 ギャップのパラメータ

初期ギャップ距離	初期状態における素子間の距離
初期ズレ距離	初期状態における一方の素子モデルの他方に対するズレ距離
誘電率	Beam 間の誘電率



(2) 汎用的な回路集積化MEMSシミュレータエンジンの開発

回路集積化 MEMS シミュレータのエンジン部分は、回路設計者のデファクトスタンダードである SPICE3 をベースにして開発した。上記(1)において構築した機械素子モデルを SPICE3 に追加実装することによって、電気素子のネットワーク(=電気回路)と機械素子のネットワーク(=MEMS 機構部)を同時に扱うことができるようになった(図 3-4-42)。この機能拡張によって、電気成分の解析と機械成分の解析が同時に行なうことができ、FEM 等の手法に比べて解析時間を大幅に短縮できる。また、SPICE3 をベースに開発したエンジンなので、メーカーから公開されているネットリスト(回路の素子構成を記したファイル)や、設計者が他の回路エディタ等で作成した電気回路のネットリストをそのまま解析に用いることができる。

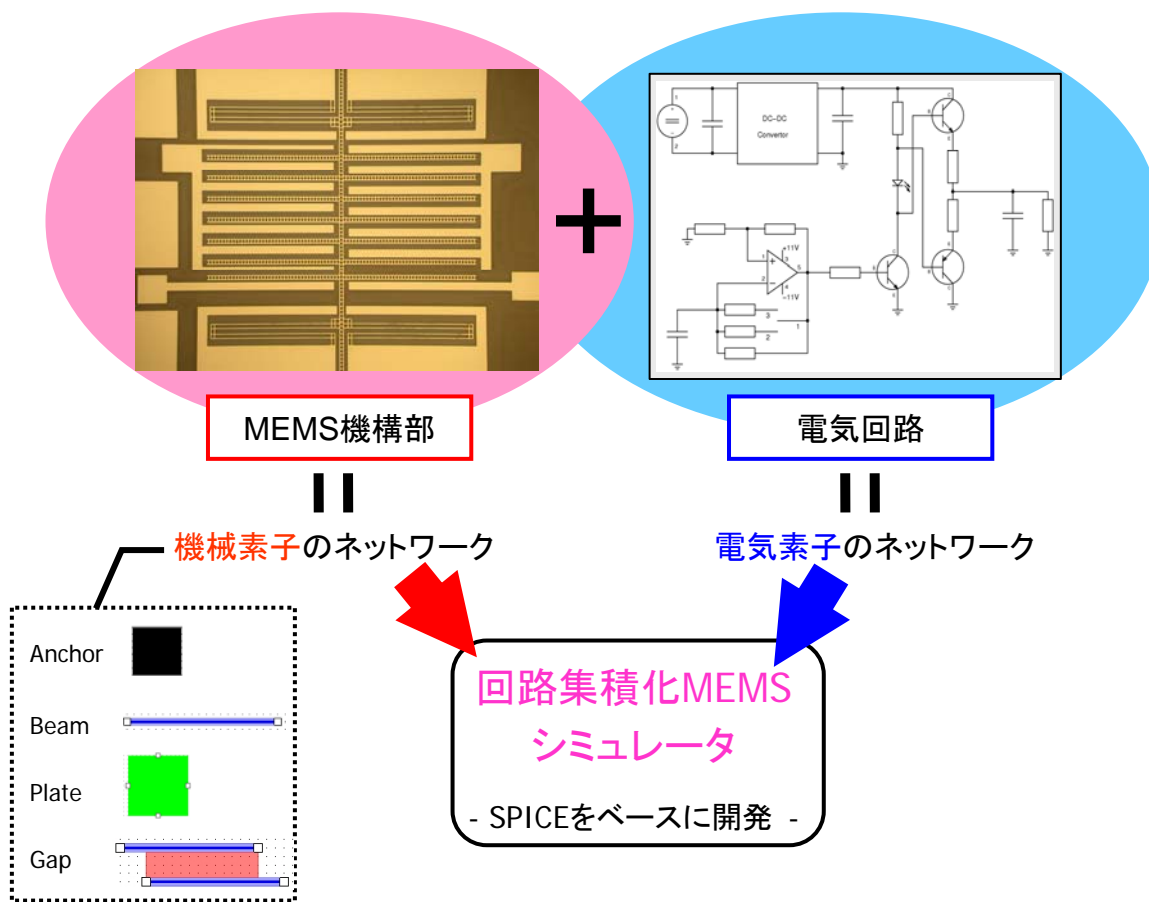


図 3-4-42 回路集積化 MEMS シミュレータのコンセプト

エンジンへの入力形式は、回路シミュレーションにおいて標準的なネットリストのフォーマットに準じた形式になっており、その形式で記述されたファイルを読み込んで解析を行う。ネットリストの拡張分となる機械素子モデルのフォーマットは、電気素子の記述に準じて定めた。図 3-4-43 に、MEMS デバイスのネットリストの記述例を示す。

---

```
_Beam0 n0 n3 modelBeam0 L=0.0005 W=2e-006 T=1e-005 AIRGAP=1
_Beam1 ANCHOR ANCHOR modelBeam0 L=0.00053 W=2e-006 T=1e-005 AIRGAP=1
_Beam2 n0 ANCHOR modelBeam0 L=2e-005 W=1e-005 T=1e-005
+AIRGAP=1 EULERANGLE=(0,0,270)
.MODEL modelBeam0 BEAM DENSITY=2330 YOUNG=1.65e+011 POISSON=0.177
+VISCOS=0

_Gap0 _Beam0 _Beam1 n4 0 modelGap0 GAP=-1.8e-005 SHIFT=0
.MODEL modelGap0 GAP LEVEL=2

.SUBCKT SC_2 1 2
v1 1 2 SIN(0 60 0.2)
.ENDS SC_2
x0 n4 0 SC_2

.TRAN 1 5

.SAVE n3$$y
.END
```

---

図 3-4-43 MEMS デバイスのネットリストの記述例

このようなネットリストを MEMS 設計者が手書きで記述するには負担が大きいので、入力モジュールとしてネットリストを自動生成する機能を有する GUI(グラフィカルユーザーインタフェース)を備えた。GUI の主な特徴は、以下の通りである。

- ・ 形のあるシンボル表記で、実際のデバイスに似た表現が可能
- ・ 素子モデルを隣接させて配置するだけで、回路ネットワークを自動的に構築
- ・ 基本的な素子（アンカー、ビーム、ギャップ）を組み合わせるだけで、MEMS デバイスの大部分を表現可能
- ・ ネットリストに準拠しているので、熟練者の細かい指定にも対応

以上のような特徴を備えた GUI を用いることによって、ユーザは MEMS デバイスを実際に組み立てる感覚で機械素子モデルを配置するだけで、モデル構築を行える。図 3-4-44 に、くし歯アクチュエータのモデル構築画面を示す。更に、複製機能、UNDO 機能(やり直し機能)、回転/拡大機能、素子自動分割機能などを備えることによって、モデル作成の簡便性を向上させた。

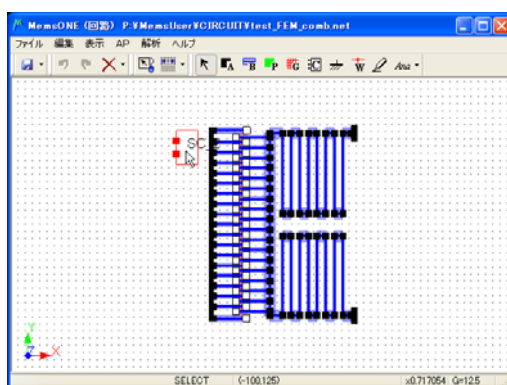


図 3-4-44 くし歯アクチュエータのモデル構築画面

回路集積化 MEMS シミュレータに備えた GUI は、他の商用シミュレータ (Architect [Coventor 社], SYNPLE [IntelliSense 社]) と比較して、以下の利点がある(図 3-4-45)。

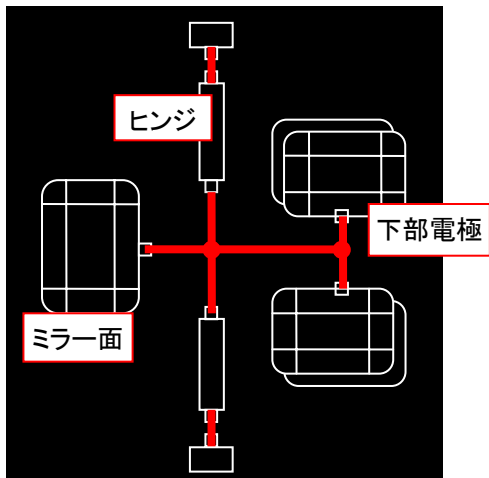
①機構部の作成の際に、煩雑な配線が不要である

他の商用シミュレータでは、機構部を構成するための要素シンボルを 2 次元的に配置し、その端点同士を配線する必要がある。一方、本シミュレータでは、要素シンボルの端点同士を隣接して配置すれば自動的に結合するため、機構部の構成においては一切配線の必要がない。

②側面図も参照でき、3 次元的なモデル化が可能である

他の商用シミュレータでは、1 つの平面上に全ての要素シンボルを配置する必要があり、3 次元的なデバイスのイメージを持ちにくい。一方、本シミュレータでは、上面図(xy 平面)と側面図(yz 平面、zx 平面)を参照して要素シンボルの配置を行えるため、3 次元の実デバイスの形状を組み立てる感覚でモデル構築が出来る。

他の商用シミュレータでの表示  
(概念図)



本シミュレータでの表示

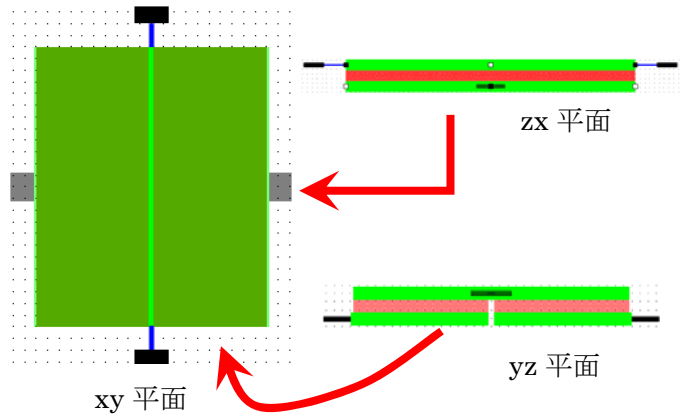


図 3-4-45 モデル構築 GUI における表示の比較

解析時には、ネットリストを自動生成し、シミュレータエンジンにて解析を行なう。解析結果（出力モジュール）は EXCEL を用いてグラフ化される（図 3-4-46）。

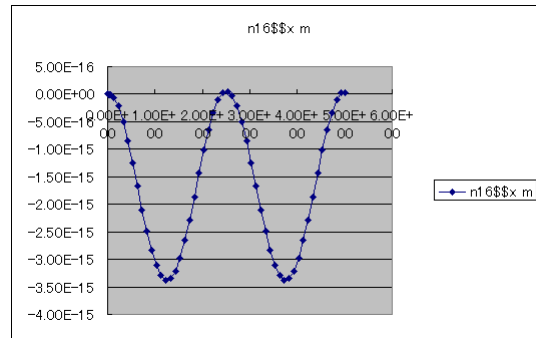


図 3-4-46 解析結果表示

### (3) 検証用デバイスの製作・評価

東京大学武田先端知スーパークリーンルームにおいて、 $100\mu\text{m}$ 厚 SOI 基板を用いて静電アクチュエータチップを作製し、電気街の量販店で容易に入手でき、かつ SPICE の電氣的なモデルがメーカーから公開されている計装アンプと共にプリント基板上に実装した。この検証用デバイスを用いて(1)力入力-電気出力、(2)静電引力入力-電気出力による電氣的な読み出し実験を各々行ない、加えた力に比例した変位、加えた静電引力に比例した変位を電氣的に読み出すことができた。得られた実験データを解析した後、数理システムにおいて開発した回路集積化 MEMS シミュレータを用いた電子・機械連成シミュレーションを行った。解析結果と実験データとの比較検証を行い、シミュレータの解析精度を実証した。以下で、検証用デバイスの作製と検証実験の詳細、及び解析結果と実験データとの比較検証の詳細を順に述べる。

#### (3-1) 検証用デバイスの作製および検証実験

$100\mu\text{m}$ 厚 SOI 基板を用い、東京大学武田先端知スーパークリーンルームにてアクチュエータを作製した。ダイシングの後 50%フッ酸によるウェットリリースを行った(IPA → 水 → HFE-7200 置換により乾燥)。計装アンプ INA103 (差分ゲイン 100 倍)LSI を搭載した自作プリント基板に実装し、アルミ線をワイヤボンディングした。読み出し回路は、図 3-4-47 に示す通り、電極 AC 間の読み出しキャパシタ(C1) と、電極 AB 間の読み出しキャパシタ(C2) に対して  $2.0V_{0-p}$ 、10kHz(実測 10.989kHz)、又は  $2.1V_{0-p}$ 、100kHz(実測 99.92kHz) のサイン波信号を与え、それぞれの出力を抵抗  $10\text{ k}\Omega$  ( $1/4\text{W}$  金属皮膜 1%) で AC グラウンドに落とし、ブリッジ出力を計装アンプ LSI のマイナス(16 番ピン、C2)、プラス(1 番ピン、C1) 入力に接続した。静電引力-電気出力による電氣的な読み出し実験では、高周波出力が高電圧源に流れないようにするために、 $1\text{M}\Omega$  の抵抗を挟んである。出力は INA103 の 11 番(負)-7 番(正) から取り出し、オシロスコープ TDS2024B に接続して波形を観測した。この際、配線の都合でプローブの正負を逆に接続している。

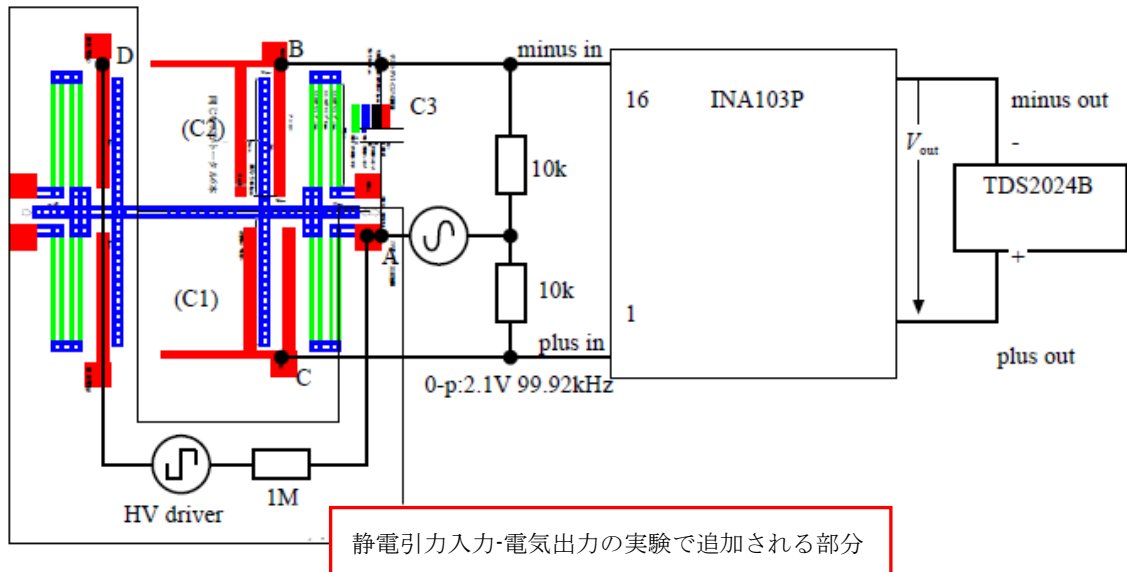


図 3-4-47 読み出し回路

本回路の最も大きな特徴は、

- PSPICE 用に計装アンプのマクロモデルが公開されており、制御電源部分の記述を書き直すだけで、Berkeley SPICE でシミュレーションできること
- 電気街の量販店で購入可能な、広く流通している部品を用いていること

である。

キャパシタンス読み出し専用VLSI 等、様々な回路を検討した結果、上記2点を満たすという点で他に無く、INA103 を用いた同回路が本実験にとって最適であると結論した。発振回路は MAX038 を用いた実験室用精密波形発振キットを利用した。このように、汎用部品で回路を構成しているので、低コストでそのまま学生実験等に利用可能である。

アクチュエータの構造は図 3-4-48 のとおりである。重なり幅  $663\mu\text{m}$ 、高さ  $100\mu\text{m}$  のシリコン可動部が電極 A とつながっており、これらが 6 本、ギャップ  $8\mu\text{m}$  で電極 B、電極 C とそれぞれカップリングしている。ばねは幅  $598\mu\text{m}$ 、高さ  $100\mu\text{m}$ 、厚み  $8\mu\text{m}$  を単位とする二重戻りばねで、アクチュエータの上下に 2 個取り付けた。ここで、数値は全て設計値である。

図3-4-49に作製したデバイスの顕微鏡写真を、図3-4-50に実装基板ならびにワイヤボンデン

グの実体顕微鏡写真を示す。

静電気力入力-電気出力実験で用いるデバイスでは、駆動のための電極を構造の端部に、駆動電極D と駆動電極E とを独立して作製した。配線の都合でこのうち電極D のみに高電圧を加えた。電圧源の最大電圧の制限により正確なプルイン電圧は計測できなかったが、135V の電圧を加え続けたところ軽い衝撃によって5 分間に1、2 度の頻度でプルインが起こったので、凡そ140V 程度と考えられる。

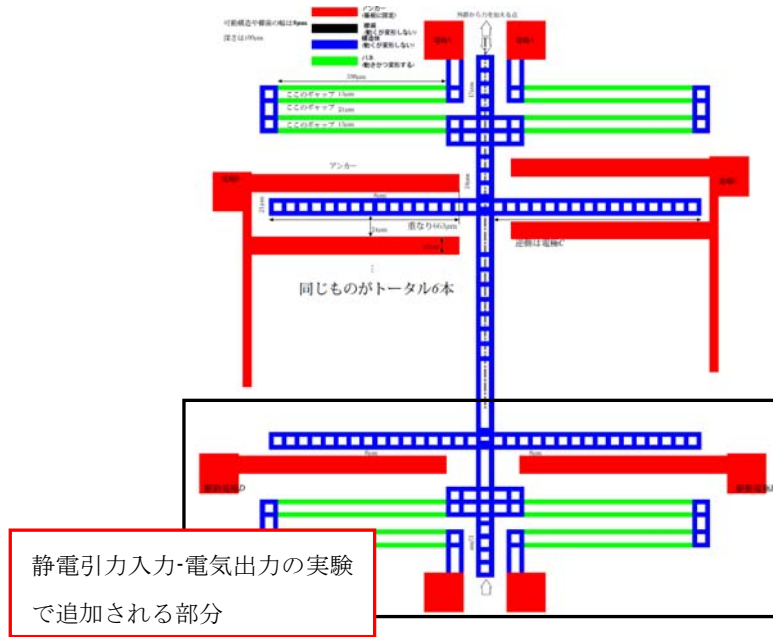


図 3-4-48 検証デバイスの構造

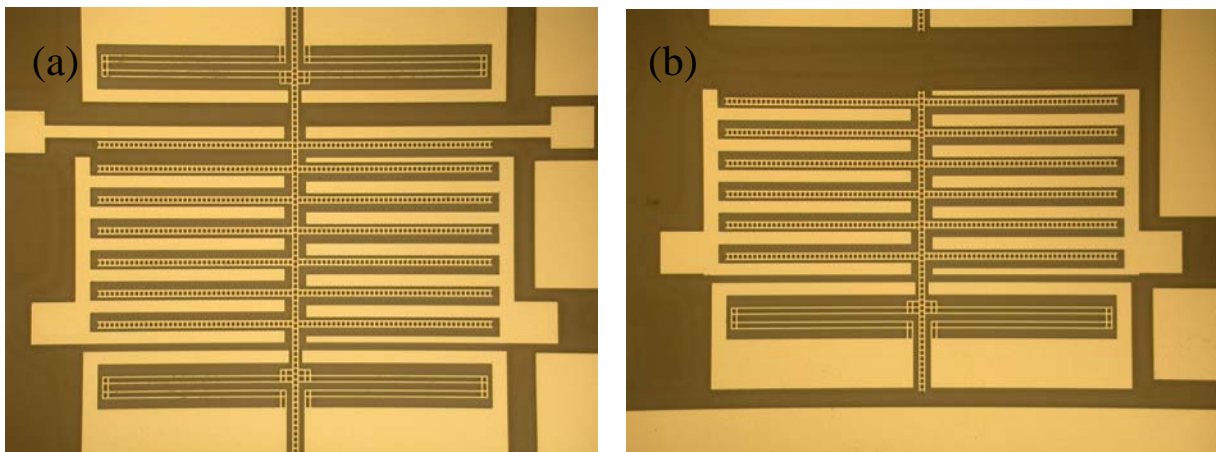


図 3-4-49 完成したテストデバイス。静電駆動電極付き (a)、無し (b)

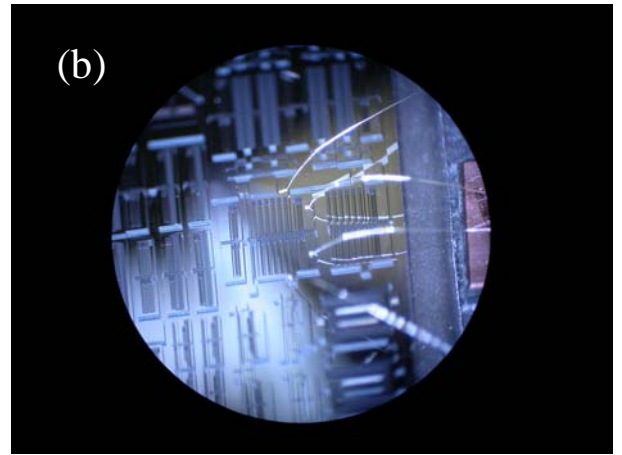
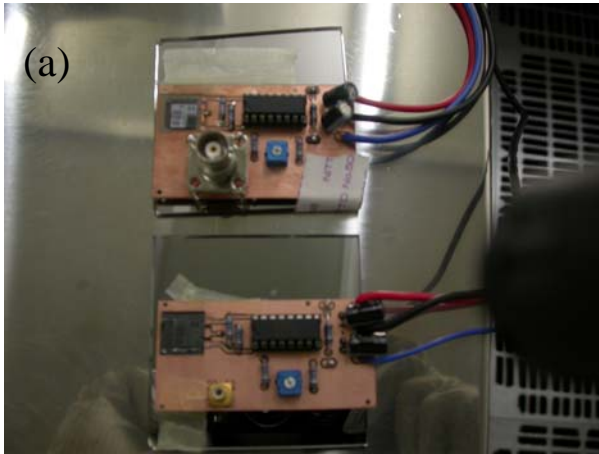


図 3-4-50 自作 INA103 計装アンプ基板(a)にアルミ線でウェッジボンディングした(b)。図(a)中上側(BNC コネクタ付)の基板には静電駆動電極の無いデバイスをボンディングした

作製した検証用デバイスを用いて、(1)力入力-電気出力、(2)静電引力入力-電気出力による電氣的な読み出し実験を各々行なった。図3-4-51に、測定系の写真を示した。



図 3-4-51 測定系の写真。プローバは 8 インチオートプローバー Süss Microtec PA200

「力入力-電気出力」による電氣的な読み出し実験では、検証用デバイスの中央梁上部から針で外力を加え、計装アンプからの出力波形をオシロスコープで観測した。ここで、入力信号は $2.0V_{0-p}$ 、 $10kHz$ (実測 $10.989kHz$ )のサイン波信号である。続いてデータをファイルに記録し、フーリエ分解によって基本波成分を取り出して解析を行った。

また、「静電引力入力-電気出力」による電氣的な読み出し実験では、測定系に $3Hz$ 、 $0\sim 130V$  の方形波を加え、「無駆動時」「 $0V \rightarrow 130V$  上昇時」「 $130V \rightarrow 0V$  下降時」のそれぞれについて波形をオシロスコープで観測した。ここで、入力信号は $2.1V_{0-p}$ 、 $100kHz$ (実測 $99.92kHz$ )のサイン波信号である。続いてデータをファイルに記録し、 $100kHz$ 成分のみを取り出して解析した。

実験結果の詳細は、次節以降で、シミュレーション結果との比較検討の際に述べる。



### (3-2) 「力入力-電気出力」による電氣的な読み出し実験との比較

検証デバイスの中央梁上部から針で外力を加えたときの計装アンプの出力について、実験結果とシミュレーション結果の比較を行った。まず、検証デバイスの構造データから、回路集積化MEMSシミュレータのGUIを用いて、検証デバイスの機構部を図3-4-52のようにモデル化した後、読み出し回路と合わせたMEMSデバイス全体のネットリストを生成し、回路集積化MEMSシミュレータのエンジンにより解析を行った。

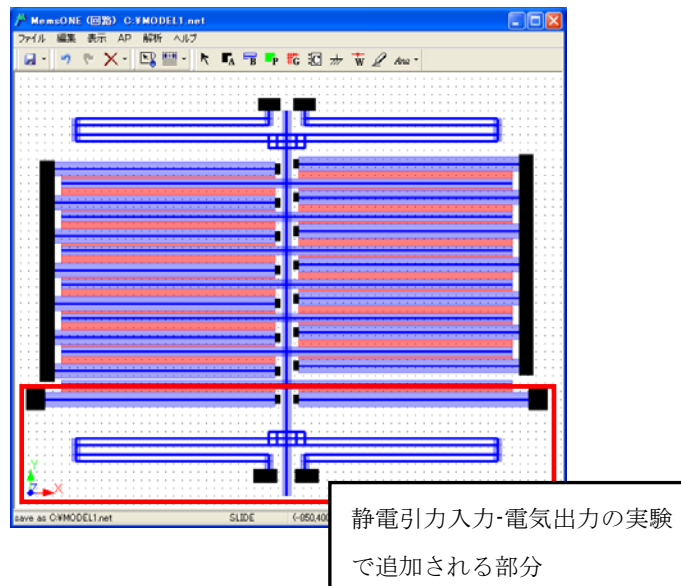


図 3-4-52 検証デバイスのモデル図

図3-4-53は、力入力-電気出力による電氣的な読み出し実験の結果である。ここでこれは、正方向(図の下向き)、負方向にそれぞれ針で外力を加えたときの計装アンプの出力波をフーリエ分解して、基本波成分を取り出してプロットしたものである。針を用いて動かす前、出力はほぼゼロであったが、正方向に外力を加えると49.9mVp-pの出力波が得られた。一方、負方向に外力を加えると、正方向とは逆位相で42.5mVp-pの出力波が得られた。ここで、Vp-pと容量アンバランスに線形な関係があること等を用いて、観測されたVp-pの値から、正方向に印加した外力は108.9uN、負方向に加えた外力は94.06uNと求まった。

一方、図3-4-54は、計装アンプの出力のシミュレーション結果である。実験と同様に、負方向に外力を加えた際の出力は、正方向に加えた場合とは逆位相であった。また、正方向に外力を加えた場合、51.5 mVp-pの出力が得られ、実験値との誤差は3.11%であることが分かった。一方、負方向に外力を加えた場合、43.8 mVp-pの出力が得られ、実験値との誤差は2.99%であることが分かった。

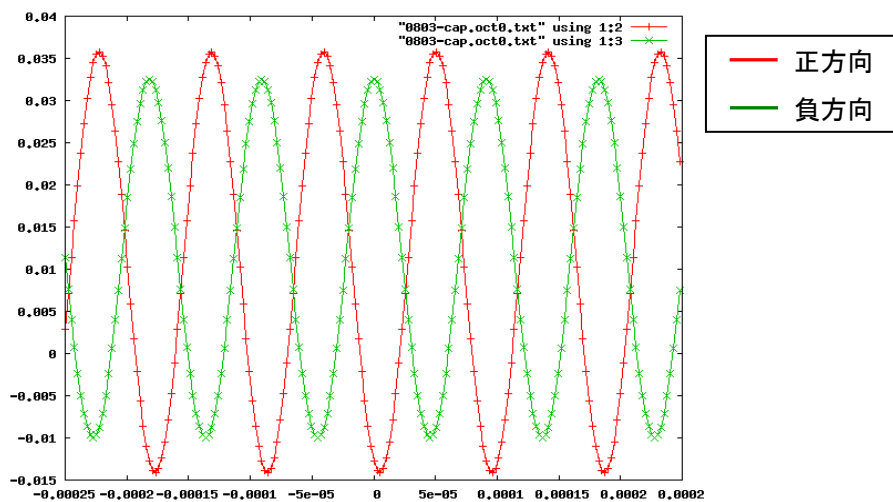


図 3-4-53 計装アンプの出力 (実験)

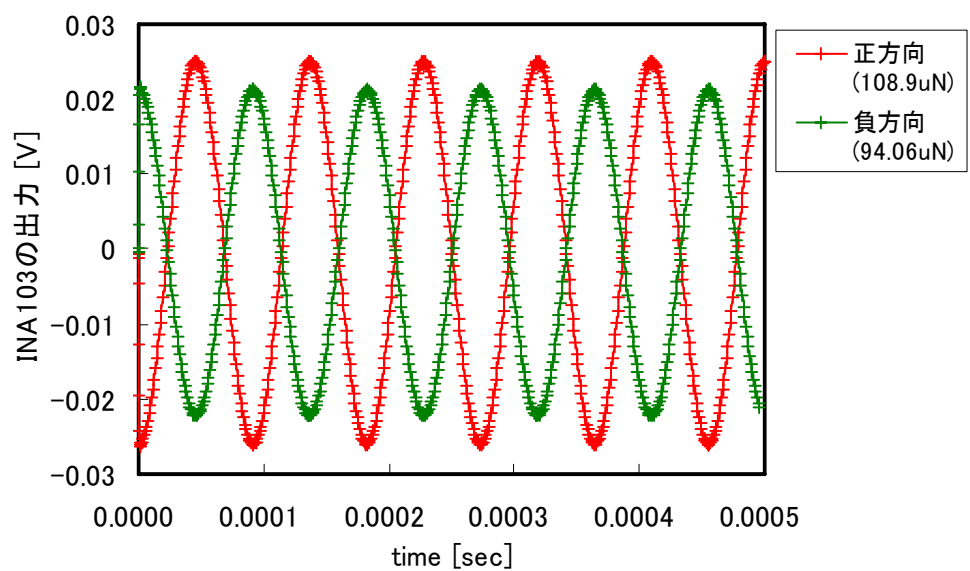


図 3-4-54 計装アンプの出力 (シミュレーション)

### (3-3) 「静電引力入力-電気出力」による電氣的読み出し実験との比較

アクチュエータ駆動回路に、3Hz、0~130V の方形波を加え、

- 無駆動時
- 0V → 130V 上昇時
- 130V → 0V 下降時

の各場合に対して、計装アンプからの出力波形をシミュレーションし、実験結果との比較を行った。

#### 無駆動時

無駆動時には、図 3-4-55 に示す実験結果が得られた。これを  $f = 100 \text{ kHz}$  でフィッティングすると、

$$V_{\text{out}} = -0.09 \sin(\omega t - \pi/2)$$

となり、入力波形より  $\pi/2$  遅れでかつ符号の逆転した  $-90 \text{ mV}_{0-p}$  の出力が得られた。これは、左右読み出しキャパシタ C1、C2 間に容量アンバランスがあることに対応している (図 3-4-47 の C3)。C3 = 68.8 fF の場合、シミュレーションで得られた出力波の  $V_{0-p}$  と位相の遅れは、実験結果に一致した(図 3-4-53)。以下のシミュレーションでは、無駆動時の容量アンバランスに相当するキャパシタ C3 を入れて計算を行った。

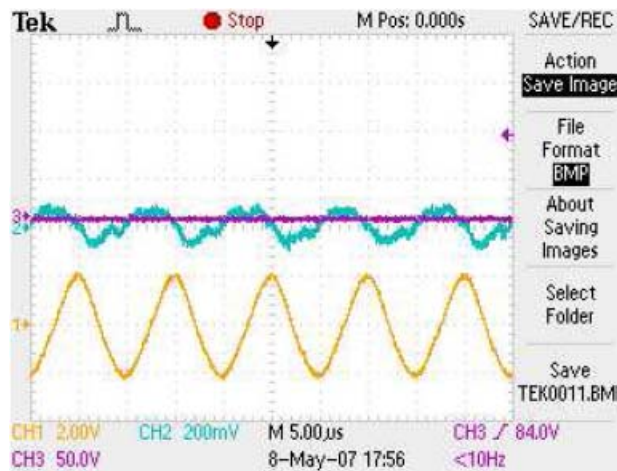


図 3-4-55 制御信号 0V 時の波形 (実験)

CH1:測定入力、CH2:測定出力(正負逆転)、CH3:駆動電圧

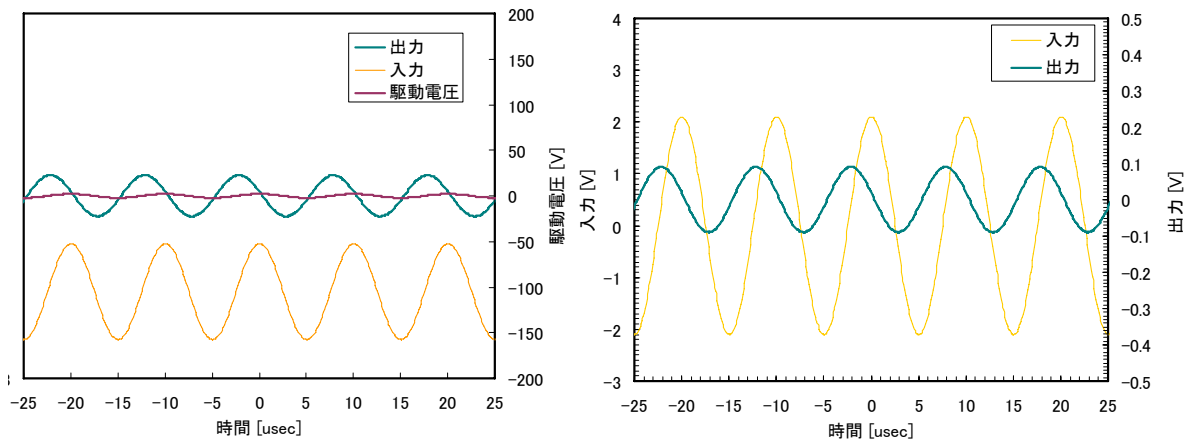


図 3-4-56 制御信号 0V 時の波形 (シミュレーション)

## 0→130V 上昇時

駆動回路に 130V の方形波(立ち上がり  $5\mu\text{s}$ 、周期 4Hz)を印加した際の計装アンプの出力を比較した。図 3-4-57 に、実験結果を示した。電圧上昇時に一瞬電位が上昇するが(図 3-4-57 の測定出力 CH2 は正負逆転していることに注意)、その後  $25\mu\text{s}$  までは、計装アンプの出力変化は観測されなかった。

一方、図 3-4-58 にシミュレーション結果を示した。電圧上昇後に計装アンプの出力が変化しない時間(シミュレーションでは  $12.5\mu\text{s}$ )が存在している点は、実験結果に一致した。ただし、その出力が変化しない時間が短い点、及び電圧上昇時に一瞬電圧が上昇する現象が見られない点で、実験結果との相違がある。この原因については考察の余地があるが、素子モデルの改良で克服できる可能性がある。

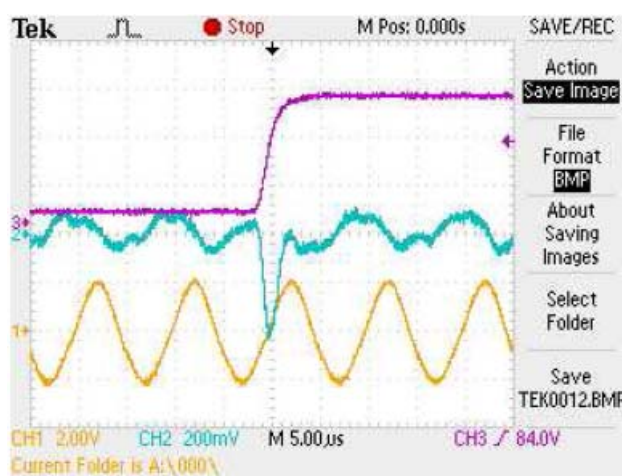


図 3-4-57 0V→130V 上昇時の波形 (実験)

CH1:測定入力、CH2:測定出力(正負逆転)、CH3:駆動電圧

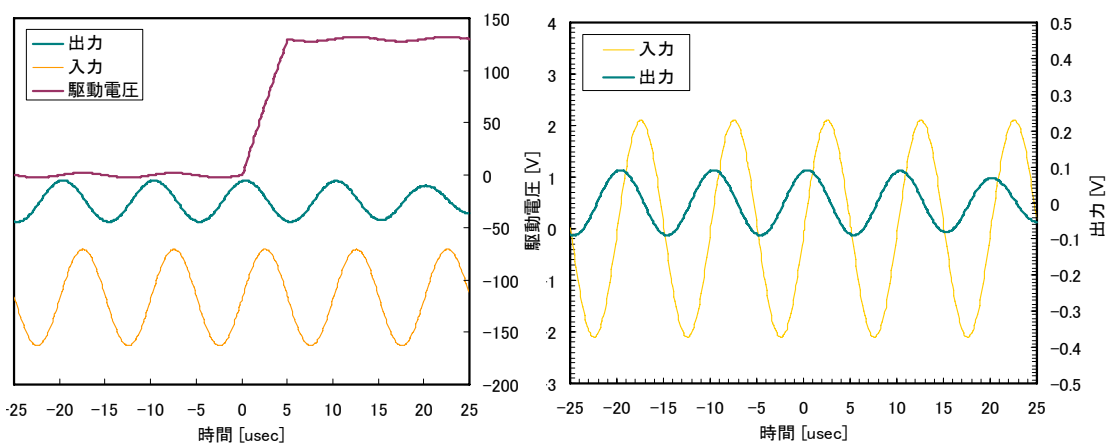


図 3-4-58 0V→130V 上昇時の波形 (シミュレーション)。

### 130→0V 下降時

トリガ方向を反転し、130V→0V 下降時の計装アンプの出力を比較した。図 3-4-59 に、実験結果を示した。電圧降下時に一瞬電位が下降する様子が観測されたが（図 3-4-59 の測定出力 CH2 は正負逆転していることに注意）、その前後では、フィッティングの結果、入力波より  $0.9\pi$  遅れで、かつ符号の逆転した  $V_{0-p} = -50\text{ mV}$  の出力が得られた。

一方、図 3-4-60 にシミュレーション結果を示した。電圧降下後  $10\mu\text{s}$  までの計装アンプからの出力は、入力波より  $1.5\pi$  遅れで、かつ符号の逆転した  $V_{0-p} = -54.6\text{ mV}$  の出力が得られた。出力波の  $V_{0-p}$  については実験結果にはほぼ一致した（誤差 8.4%）。ただし、位相の遅れが実験に比べて大きい点、及び電圧降下時に一瞬電圧が下降する現象が見られない点では、実験結果との相違がある。この原因については考察の余地があるが、 $0\rightarrow 130\text{V}$  上昇時と同じく、素子モデルの改良で克服できる可能性がある。

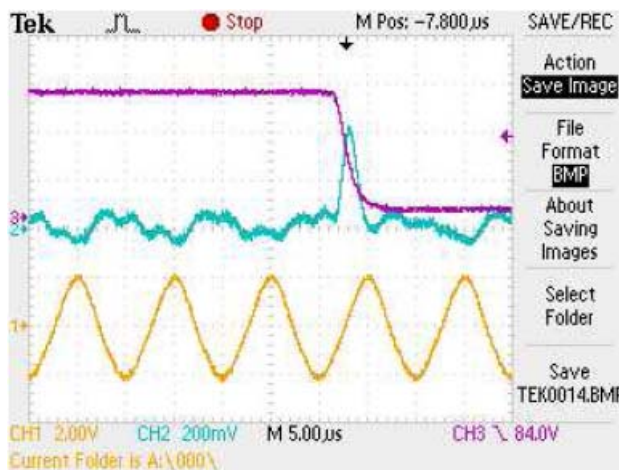


図 3-4-59 130V→0V 下降時の波形（実験）

CH1:測定入力、CH2:測定出力(正負逆転)、CH3:駆動電圧

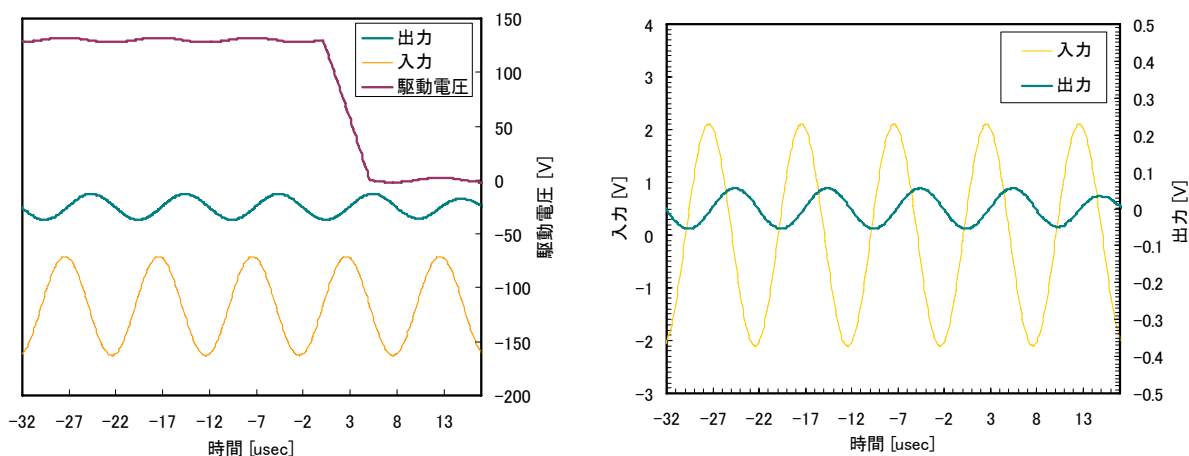


図 3-4-60 130V→0V 下降時の波形（シミュレーション）

#### (4) データベースへの登録

回路集積化MEMSシミュレータに関する知識・知見を整理し、初心者向け解説として集約した。この解説を知識データとしてデータベースシステムに登録した。この解説には、本シミュレータで用いられている電気回路シミュレータの解法に関する初心者向けの簡潔な解説を含む。登録した知識データの一部を図 3-4-61 に示す。

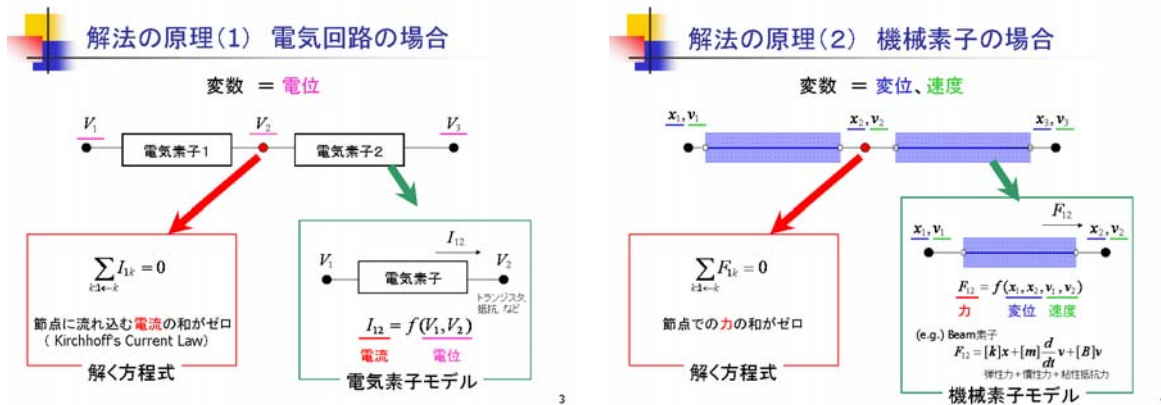


図 3-4-61 知識データの一部

#### 3.4.3.3 研究開発成果の意義

回路集積化 MEMS シミュレータは、MEMS デバイスと電子回路を集積化した MEMS の動作を予測可能な、電気・機械にわたる統合的シミュレータである。これを利用することによって、集積化 MEMS の特性を試作前にあらかじめ予測することが可能となり、開発期間の短縮、新機能の予測等、集積化MEMSの可能性を飛躍的に向上させられるものと期待できる。

また、MEMS デバイスを実際に組み立てる感覚でモデル化することが可能で、MEMS 初心者にも扱いやすいグラフィカルユーザーインターフェイスを活用すれば、MEMS 新規開発者の育成を促進することが期待される。

また、検証デバイス製作においては、電圧駆動、キャパシタンス読み出しのアクチュエータを作製し、マクロモデルがWEB で公開されている市販の計装アンプを利用したブリッジ読み出し回路を実装し、可動部分を静電引力で変位させてそのときの信号出力を観測した。読み出し回路は非常に汎用性の高い回路であり、部品は全て電気街の量販店で容易に手に入るものであるため、今後同期検波回路などを実装することで、リアルタイムに変位を読み出すセンサなどへの応用を比較容易に実現できる可能性が示された。

以上のことから本研究開発は十分に意義のあったものと言える。