

# MEMS用設計・解析支援システム 開発プロジェクト

## 「(2)機構解析シミュレータの開発」

### 詳細説明

2007年11月7日  
みずほ情報総研株式会社

## 開発の背景

- MEMSプロセス/デバイス設計の複雑さ
- MEMS産業への新規参入拡大



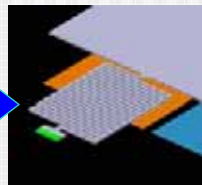
- 電磁駆動、静電駆動、熱型駆動を数値的に評価したい
- プロセス時の応力状態を確認したい
- MEMS設計新規参入研究者のための設計効率化支援
- MEMSデバイスの最適化支援



MEMSデバイス構造やMEMS加工構造のCADモデルに対して、駆動機構や動作機構評価からプロセス時の応力評価まで、総合的に検証、評価するシステムが必要



CADによる表現



数値的な評価



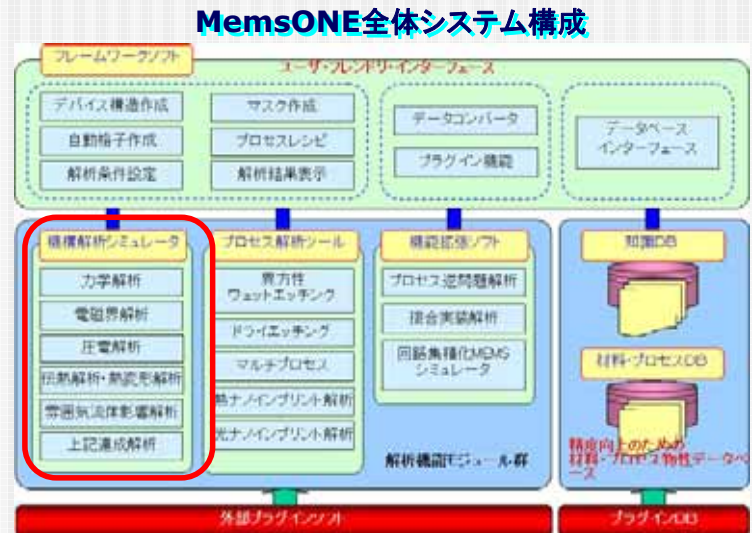
構造最適化

構造変更、プロセス変更

## 研究開発の最終目標

機構解析シミュレータの開発について、以下を開発する。

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)
2. 電磁界解析
3. 圧電解析
4. 伝熱解析、熱変形解析
5. 雰囲気流体の影響解析
6. 連成解析



## 目標値の設定理由

開発技術	目標値	目標値設定理由
機構解析シミュレータの開発	MEMSの設計・解析において重要な数値解析機能を実現する。「フレームワークソフトの開発」、「プロセス解析ツールの開発」の機能を用いて作製した3次元MEMSデバイス構造に対して機構解析シミュレータを用いて解析し、 <b>試作実測した結果と比較して解析精度50%以上を実現する。</b>	MEMS設計に関わるユーザが検討するMEMSデバイスの機構的な検証を実現できるシミュレータとした。

## 研究開発成果 機構解析シミュレータの開発

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)

### 研究開発の概要

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。

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

【事業原簿 p.ii-1】

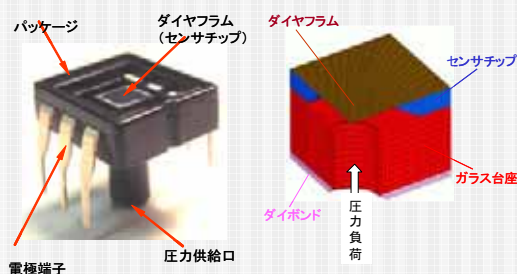
## 研究開発成果 機構解析シミュレータの開発

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)

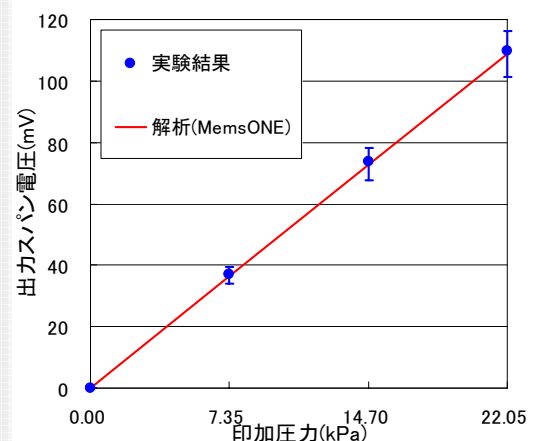
**検証解析** 圧力センサと光スキャナを対象とした評価検証を実施した

圧力センサ(松下電工株式会社)

- 弾塑性解析を実施
- 1/4対称解析モデル
- 圧力を入力としてダイヤフラムの変位で評価
- 実験結果のダイヤフラム変位と解析結果は良好に一致



検証で使用した圧力センサとメッシュ分割



ダイヤフラムの変位(実験結果と解析結果)

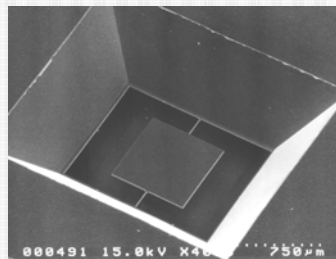
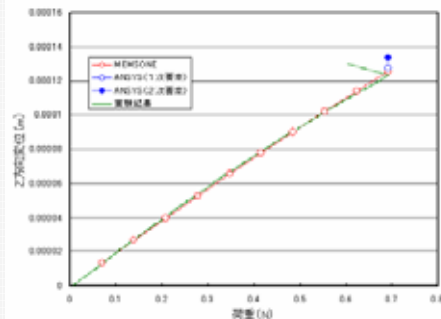
【事業原簿 p.ii-6】

## 研究開発成果 機構解析シミュレータの開発

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)

光スキャナ(オリンパス株式会社)

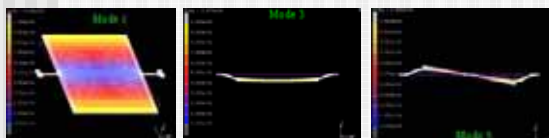
- トーションバー型ミラー構造の可動部中央をロードセルによって押圧
- 荷重と変位の関係を実験および商用コードANSYSと比較
- 解析結果と実験結果の誤差は2%未満



検証で使用した光スキャナ

検証結果(ミラーのZ方向変位)

- 静電駆動型光スキャナの振動モードごとの共振周波数を比較
- 実測と解析結果は誤差5%未満



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

【事業原簿 p.ii-7】

## 研究開発成果 機構解析シミュレータの開発

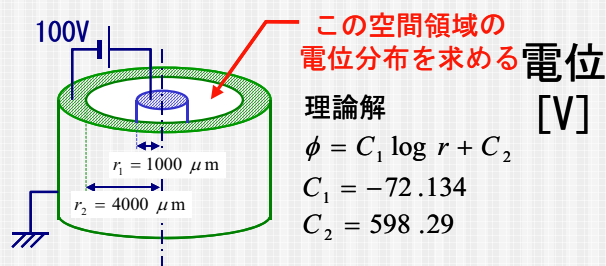
### 電磁界解析

#### 研究開発の概要

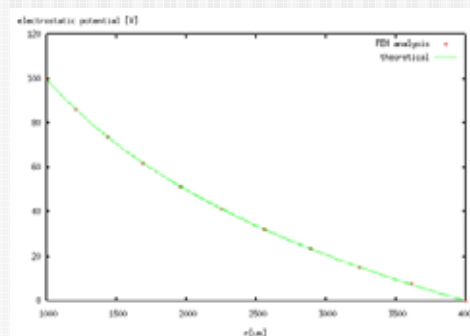
電界解析、線形交流定常磁界解析、非線形静磁界解析、非線形過渡磁界解析、非線形定常時間周期磁界解析、電流解析、周波数応答解析電磁界解析の機能を開発した。

#### 検証解析(電界解析)

- 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
- 理論解と数値解析解は一致



電界解析機能検証モデル



$r$  [μm]

電界解析機能検証結果

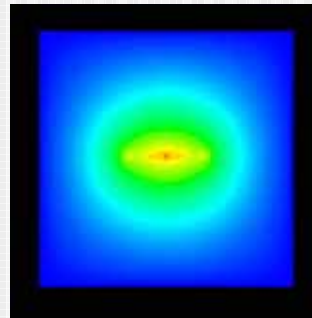
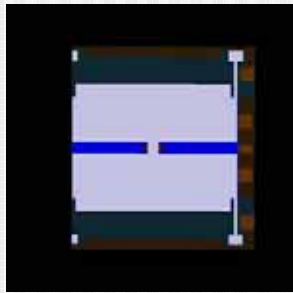
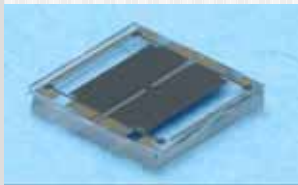
【事業原簿 p.ii-8】

## 研究開発成果 機構解析シミュレータの開発

### 電磁界解析

#### 検証解析(磁界解析)

- 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)と解析結果を比較を実施
- 入力電流は10mW、周波数は1.8GHz
- ループプローブ出力電圧は実験結果78.4dB  $\mu$ V、解析結果95.3dB  $\mu$ V であり、誤差22%



検証解析デバイス(オムロン株式会社)と解析CADモデル      ベクトルポテンシャル分布

【事業原簿 p.ii-12】

## 研究開発成果 機構解析シミュレータの開発

### 圧電解析

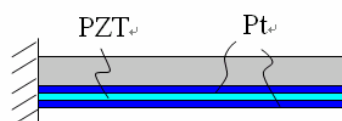
#### 研究開発の概要

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3.2.1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。

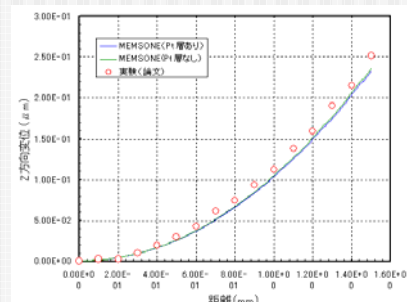
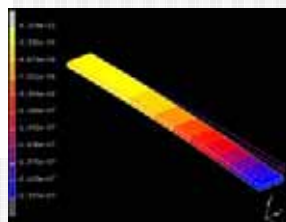
増分形による有限要素法によって離散化

#### 検証解析

- 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
- 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を使用
- 印加電圧を与えてカンチレバーの逆圧電効果を解析して評価
- 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



圧電解析の検証解析モデル



圧電解析の検証解析結果(実験値と解析結果比較)

【事業原簿 p.ii-13】



## 研究開発成果 機構解析シミュレータの開発

### 伝熱解析、熱変形解析

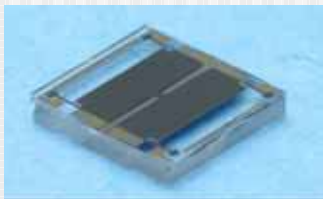
#### 研究開発の概要

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。

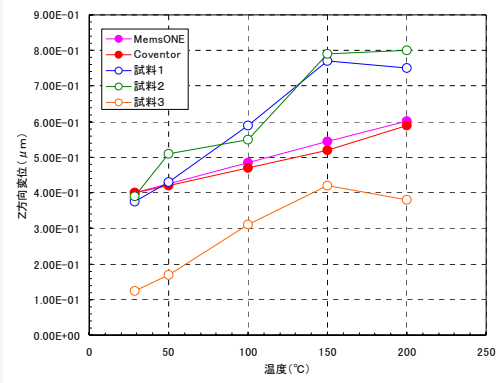
#### 検証解析 ■RF-MEMSと圧力センサを対象とした評価検証を実施

##### RF-MEMS(オムロン株式会社)

- 解析結果と商用コードCoventorWareの解析結果は良く一致
- 測定システムの分解能が $0.1 \mu\text{m}$ のため絶対値評価は厳しい
- 計算結果と実験結果には一定の相違があるものの、試料のばらつきを考慮すると目標範囲内で一致



検証で使用したRF-MEMSと検証結果



【事業原簿 p.ii-16】

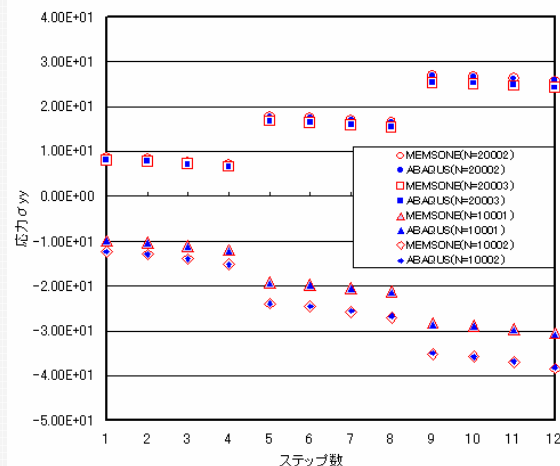
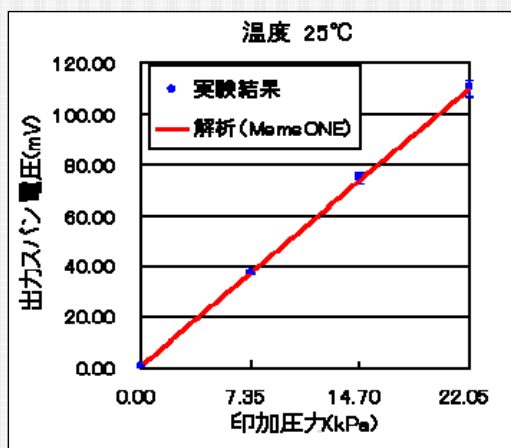
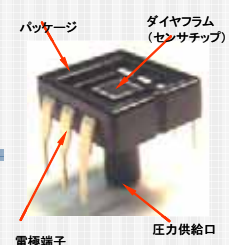
## 研究開発成果 機構解析シミュレータの開発

### 伝熱解析、熱変形解析

#### 検証解析

##### 圧力センサ(松下電工株式会社)

- 実験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
- 実験結果と解析結果は十分良く一致
- 商用コードの解析結果とMemsONEの解析結果は十分良く一致



熱変形解析の機能検証(実験結果とMemsONE解析結果、商用コードとMemsONE解析結果の比較)

【事業原簿 p.ii-19】

## 研究開発成果 機構解析シミュレータの開発

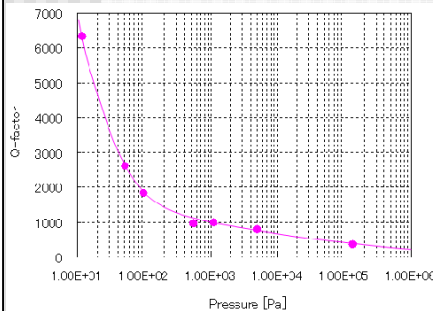
### 雰囲気流体の影響解析

#### 研究開発の概要

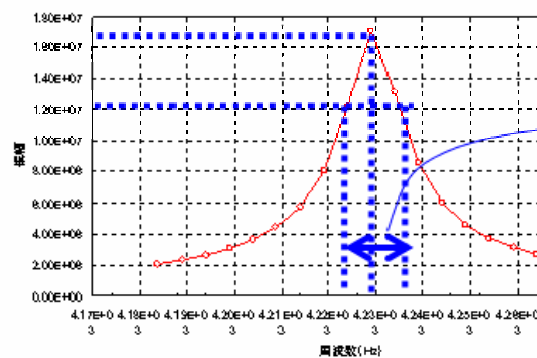
Reynolds方程式を用いて構造物のスプリング係数および減衰率を求めるシミュレータを開発

#### 検証解析

- 静電駆動型光スキャナ(オリンパス株式会社)をねじり共振(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
- 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
- 解析結果のQ値は385、実験では358.6が得られており、解析精度は7.4%



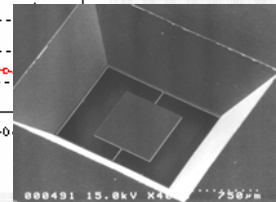
Q値測定結果



調和応答解析結果

実験結果: Q=358.5

$$Q = \frac{\omega}{\Delta\omega} = 385$$



【事業原簿 p.ii-21】

## 研究開発成果 機構解析シミュレータの開発

### 連成解析

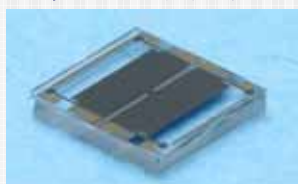
#### 研究開発の概要

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。

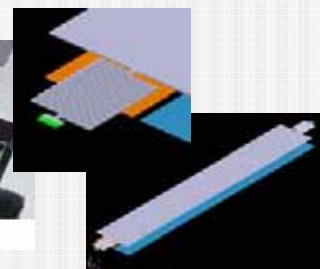
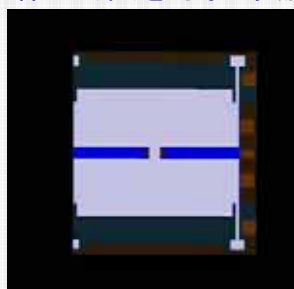
- ・力学解析と熱伝導解析の連成
- ・力学解析と電磁場解析の連成
- ・力学解析と圧電解析の連成
- ・力学解析と雰囲気流体影響解析の連成

#### 検証解析

- 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



RF-MEMSデバイス  
と解析CADモデル



光スキャナデバイスと解析CADモデル

【事業原簿 p.ii-26】

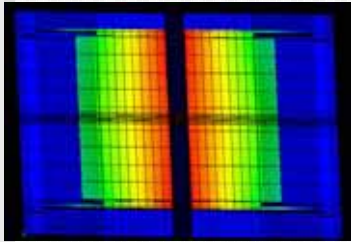
## 研究開発成果 機構解析シミュレータの開発

### 連成解析

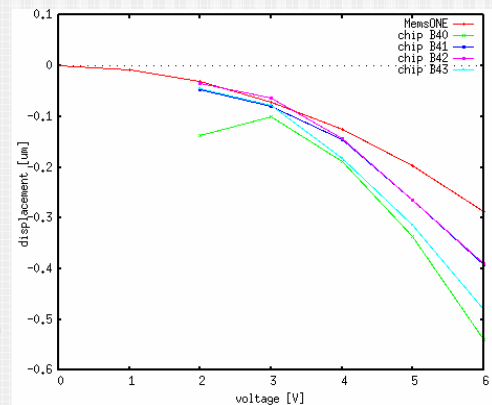
#### 検証解析

##### RF-MEMS

- ガラス基板全体を力学的に固定
- 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
- 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
- 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 $0.29\mu\text{m}$ より解析精度は26%
- 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。



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)



駆動電圧と可動部中心のz方向変位(実測と計算の比較)

【事業原簿 p.ii-27】

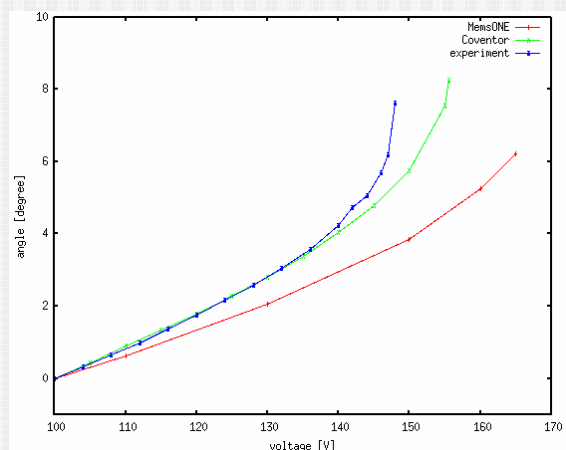
## 研究開発成果 機構解析シミュレータの開発

### 連成解析

#### 検証解析

##### 光スキャナ

- 駆動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
- シリコン可動部は接地、駆動電極部に $100\pm 10\text{V}\sim 65\text{V}$ の電圧を印加
- 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
- 130Vのとき光スキャナ可動部の機械振れ角の解析結果の解析精度は27%



機械振れ角の電圧依存性(実測値と解析結果)

【事業原簿 p.ii-28】



## (1) 目標の達成度

研究項目	目標	成果	達成度
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)	力学解析の開発を完了し、結合検証テストおよび統合検証テストを完了する。	力学解析を開発し、検証解析では圧力センサと光スキャナを対象として、圧力センサでは実験結果のダイヤフラム変位と解析結果は良好に一致した。光スキャナではトーションバー型ミラー構造の荷重と変位の関係を比較し、解析結果と実験結果の誤差は2%未満となり良好な一致を確認した。	○
電磁界解析	電磁界解析の開発を完了し、結合検証テストおよび統合検証テストを完了する	電磁界解析の開発を完了し、RF-MEMSを対象に検証解析では実測(オムロン株式会社)磁界強度と解析結果を比較し、解析結果の精度は22%であることを確認した。	○
圧電解析	圧電解析の開発を完了し、結合検証テストおよび統合検証テストを完了する。	圧電解析の開発を完了し、検証解析では、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を用いてカンチレバーの逆圧電効果を解析し、実験結果と解析結果のZ方向変位は良く一致することを確認した。	○
伝熱解析、熱変形解析	伝熱・熱変形解析の開発を完了し、結合検証テストおよび統合検証テストを完了する。	伝熱・熱変形解析の開発を完了し、検証解析では、RF-MEMSと圧力センサを対象とし、RF-MEMSでは実験結果との比較において良好な結果を確認した。圧力センサでは実験結果と解析結果は良く一致していることを確認した。	○
雰囲気流体の影響解析	雰囲気流体の影響解析の開発を完了し、結合検証テストおよび統合検証テストを完了する。	雰囲気流体の影響解析開発を完了し、検証解析では静電駆動型光スキャナを対象とし、Q値の実験値との比較を実施し、同程度のオーダーの結果が得られることを確認した。	○
連成解析	連成解析の開発を完了し、結合検証テストおよび統合検証テストを完了する。	連成解析の開発を完了し、RF-MEMSの検証解析では、可動部のz方向変位について実測と解析結果の解析精度は26%であることを確認した。光スキャナの検証解析では、駆動電圧と可動部の機械振れ角との関係について実測値と解析結果の解析精度は27%であることを確認した。	○

## (2) 成果の意義

研究項目	成果の意義
片持ち梁、両持ち梁、ダイヤフラム構造等の力学解析	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点で意義がある。
電磁界解析	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点で意義がある。
圧電解析	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点で意義がある。
伝熱解析、熱変形解析	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点で意義がある。
雰囲気流体の影響解析	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、振動抵抗を数値的に予測することが可能となり、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点で意義がある。
連成解析	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点で意義がある。