

開発項目「高集積・複合MEMS製造技術開発事業 高集積・複合MEMSシステム化設計  
プラットフォームの開発」 平成19年度～平成20年度のうち平成19年度分中間年報

作成者 財団法人マイクロマシンセンター

1. 研究開発の内容及び成果

MEMS技術は、高付加価値・研究開発型産業へと転換が迫られているわが国の製造業において、製品機能の技術的な差別化を図るキーデバイスを創出するものとして今後の更なる高度化、拡大化が期待されている。

このような中、近年の米国を中心として設計プラットフォームを用いた表面集積化の動きが活発化し、高集積MEMSに関わる製造技術、設計技術の両面を備えたトータルな研究開発により高集積MEMS製品の成功事例が増加してきている。

一方、わが国においては、高集積・複合MEMS製造技術の研究開発項目であるMEMS/ナノ機能の複合、MEMS/半導体の一体形成技術、MEMS/MEMSの高集積結合技術に共通する統一的な設計手法の開発は殆ど行われていない。

したがって国際競争力の優位性を保ちつつ、市場規模の拡大を図るためには、本研究開発を加速化し、製造技術だけではなく設計技術を含めたこれらの新しい技術を早期に実用化レベルまで引き上げることが求められる。

そこで、高集積MEMSに係わるさまざまなデバイスに対応した統一的な設計プラットフォームとしての等価回路モデルの開発を行い、それを蓄積して閲覧できるライブラリを構築しわが国産業界に広く公開する。

以下、平成19年度における、実施内容について、具体的に報告する。

(1) ファインMEMS等価回路モデルの構築

MEMSは、微小機械要素の能動的あるいは受動的な運動を電気回路で制御することを基本としており、電気回路側から見た特性がMEMSシステムの特性となる。そのためMEMSの設計にはおいては、機械要素を個別に設計するだけではなく、電気回路側からみた特性を予め設計にフィードバックすべくファインMEMSプロジェクトに関するデバイスを中心に、以下のデバイスに関する等価回路モデルを開発した。また、ファインMEMSプロジェクトで優先度の高いデバイスの等価回路モデルについても追加し、合計12デバイスの等価回路モデルを開発した。

CMOS一体プロセス圧力センサのモデル化

本圧力センサは、ダイアフラムを機械要素とする平行平板型キャパシタンス構造を基本としている。ダイアフラムの変位と電気回路素子であるキャパシタンスの間の相互作用を担う媒体は電界であり、電界強度によってMEMSとしての特性は変化する。ここではダイアフラム型平行平板キャパシタンスを、エネルギー変換論の立場から定式化し、電気回路素子として等価回路表現した。これにより回路シミュレータを用いて、CMOS回路と結

合した MEMS システムとしての特性評価が可能となった。また、ダイアフラムが多層膜の場合の技術ノートを追加した。

#### ナノ Si 効果のモデル化

ナノ構造の特異的な特性を等価回路表現するため、ナノ構造の電気、機械特性を測定した。具体的には、立命館大学鳥山研究室で実施した、当該「新たな MEMS センシング原理の探求」における研究成果と本研究開発に必要な要件を検討した結果としてのナノ Si ピエゾ抵抗効果の歪と抵抗の関係を反映した 3 次元加速度センサデバイス、及びナノメカニカル構造の寸法に対する弾性係数を反映した共振構造デバイスの等価回路モデルを開発した。

#### 磁気回路デバイスのモデル化

東京大学下山研究室でデバイス化を検討中の磁気回路デバイスを等価回路表現するための電磁気駆動型片持ち梁（カンチレバー）の特性評価を行った。具体的には、一定の磁場に対する変位と電流の関係、微小振幅交流に対する共振周波数を測定した。これらのデータを基に、その特性に関するシミュレーションを行い当該デバイスの等価回路の妥当性に対する評価を実施した。

#### CNT MEMS のモデル化

）CNT 複合体の機械特性測定法の開発(京都大学 田畑・土屋研究室)

カーボンナノチューブ複合体を構造体として用いる新規な MEMS デバイス構造の創成のための設計、解析、評価手法の確立を目指して、これらの設計、シミュレーションの際に必要な機械的特性、特に弾性定数（ヤング率、ポアソン比）の計測手法の開発を実施した。特に CNT が面内方向に配向しているため、面内方向の強い異方性を評価する手法を検討した。

機械的特性の測定手法として、複合体メンブレンの共振振動特性測定（バルジ法）によるヤング率、ポアソン比を抽出する手法を検討した。弾性定数の異方性測定のため、矩形メンブレンのアスペクトが異なる試料を作製し、圧電素子による加振、レーザドップラ振動計を用い共振振動の周波数や変形モードを計測した。この結果から、カーボンナノチューブ複合体のヤング率（約 40～50GPa）を計測した。

また、これらの計測データを反映するシステム化設計プラットフォームの構築に協力した。

測定素材である CNT-構造体は、産総研ナノカーボン研究センターにおいて CNT メンブレンの試作を試み、その試料の提供を受けた。

）CNT MEMS 等価回路のモデル化

片持ち梁（カンチレバー）構造の等価回路モデルを開発した。上記共振周波数測定用などから得られた機械物性値の妥当性およびモデル化について確認した。

## コムドライブ（櫛歯）アクチュエータのモデル化

MEMSの静電アクチュエータの中で特に多用される櫛歯アクチュエータのうち2電極ストレート1軸型について等価回路モデルを開発した。また実際に櫛歯アクチュエータを製作して等価回路モデルの妥当性について検証した。特に櫛歯アクチュエータを利用した自励発振器を構成し、等価回路モデルによるシミュレーションとの波形比較を行い、等価回路モデルの有用性を実証できた。

また、同じ2電極ストレート1軸型においてバネ構造をダブルフォールディッド型に關してもモデル化を実施した。

## ファイン MEMS プロジェクトで優先度の高いデバイスの等価回路モデル化

ファイン MEMS プロジェクト参加機関に対するニーズ調査の結果から有用な MEMS デバイスとして、静電駆動櫛歯3電極ストレート1軸型、そのバネ構造のダブルフォールディッド型、静電駆動櫛歯2電極ストレート2軸型、櫛歯加速度センサ、粘性考慮の平行平板型の5デバイスに關し、その等価回路モデルを開発した。

### (2) MEMS 等価回路モデルの収集・登録

2005年以降を中心としたIEEE MEMS、Transducers、電気学会センサシンポジウム等の論文集からデバイスの種類、構造、駆動源（静電力、磁場、圧電）に關する調査、整理を行い、等価回路モデルの導出に活用した。具体的には、等価回路データ（MEMS デバイス構造、等価回路図、ネットリストデータ）を整理、これらのデータに対して、ネットリストの確認とともに、データを(3)MEMS 等価回路モデル閲覧用 Web ライブラリの登録内容に活用した。プロジェクト参加機関に対しニーズ調査において、参考資料として主要 MEMS 関連論文の調査結果を各参加機関に提示し、有用な MEMS 等価回路モデルの選定に活用した。

### (3) MEMS 等価回路モデル閲覧用 Web ライブラリの構築

前述(1)ファイン MEMS 等価回路モデルの構築および(2) MEMS 等価回路モデルの収集・登録にて登録した等価回路モデル、加えて後述(4)単位要素モデル、MEMS 構成要素モデルの検討を通して得られたモデルの解説を掲載、閲覧可能とする Web システムを構築した。具体的には掲載するデータとして、MEMS デバイス構造、等価回路図、回路モデルに対応するネットリストデータを一組のデータとして Web システム上にて閲覧、利用できるシステムを開発した。加えて、ネットリストデータを SPICE 等の回路シミュレータで利用可能にするため、機械構造パラメータの入力を考慮したデータのダウンロード機能を準備した。また、(4)単位要素モデル、MEMS 構成要素モデルのモデル解説を文書として閲覧可能な機能をも搭載した。

### (4) 単位要素モデル、MEMS 構成要素モデルによるパラメータ抽出ソフトウェア開発

Web ライブラリに登録するデバイス構造に対して、等価回路モデルにおける各電気素子の回路定数を計算するための MEMS 機械構造の力学パラメータ抽出ソフトウェアを開発した。具体的には、本研究開発事業に關わるダイアフラム、梁、ブリッジの3構造に加え、汎用性

の高い折り返しばね等の構造を対象とし、その機械構造パラメータを抽出するために必要な機械要素モデルを構築した。構築した機械要素モデルを用いて、ライブラリ登録された構造の機械構造パラメータ及び電気的パラメータを抽出するソフトウェアを作成し、等価回路モデル Web ライブラリシステムに実装しデータを提供できるようにした。さらに追加実施するファイン MEMS プロジェクト参加機関に対するニーズ調査の中から得られた有用な MEMS デバイスに関するパラメータ抽出ソフトウェアを追加作成した。

#### (5) 等価回路モデル・3次元 CAD モデル相互生成技術調査

高集積 MEMS の設計・開発においてシミュレーション・ソフトウェアの活用は不可欠である。そこで、等価回路解析と機構解析やプロセス解析を主目的とした MEMS 用設計・解析が連携して利用できる仕組み作りのための技術的調査を行った。

具体的には、CAD モデルにおける 3 次元形状データと等価回路モデルにおける形状パラメータの双方向生成技術、および、CAD モデルにおける材料データと等価回路モデルの材質物性パラメータの双方向生成技術に関し、市販のシミュレーション・ソフトウェアの機能および CAD 分野における形状データの近似技術の調査実施、課題の抽出を行い、抽出課題に対する技術的な対処方法を分析・検討した。この結果を踏まえ、等価回路モデル・3次元 CAD モデル相互生成機能開発の課題が整理できた。

#### (6) プロジェクト推進並びに本開発事業の運営管理支援

本研究開発事業に係わる有識者により構成された「ファイン MEMS システム化設計プラットフォーム検討委員会」(委員長 藤田博之 東京大学教授、副委員長 橋口原 静岡大学教授、入江康郎 みずほ情報総研株式会社 次長、委員 3 名)を設置し、開発項目の具体的方針など重要事項を検討した。7 月、10 月、12 月、2 月に計 4 回開催した。加えて、具体的な設計・開発を行う「ファイン MEMS システム化設計プラットフォームワーキンググループ」(リーダー：橋口原 静岡大学教授、メンバ 5 名)を設置し、ファイン MEMS システム化設計プラットフォーム検討委員会の議論を反映させ、ファイン MEMS プロジェクト推進連絡会とも連携をとりながら効果的な開発設計を実施した。本ワーキンググループを毎月実施、必要に応じて開催した臨時ワーキンググループを含め計 17 回の会合をおこなった。

## 2. 成果

1) デバイス数 12 件に対応した等価回路モデル及び必要なパラメータ抽出ソフトウェア、それを収蔵する Web ライブラリ(下図)。



図1 Web ライブラリ トップページ



図2 収納デバイス 12種

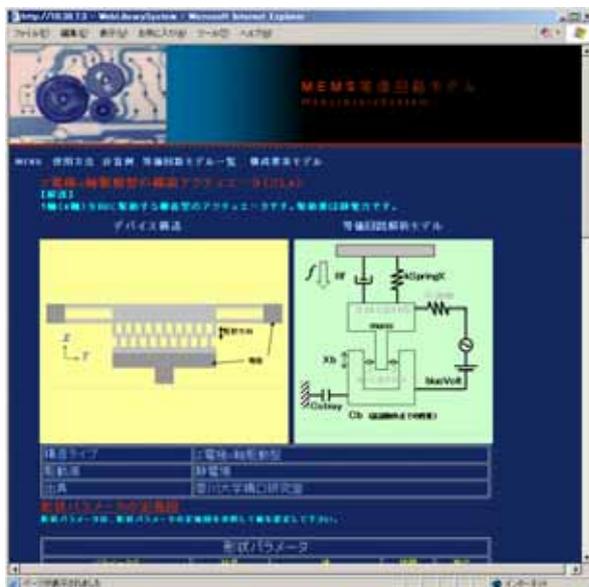


図3 等価回路モデル例(歯歯デバイス)

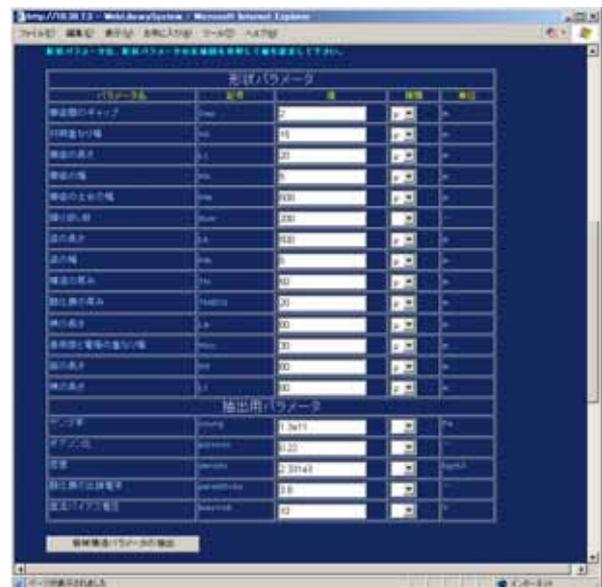


図4 パラメータ抽出ソフト入力画面

2 ) 研究発表・講演

- [1] 仮谷宗一郎、鈴木勝順、綾野賢次郎、橋口原；櫛歯アクチュエータの電子素子表現と自励発振回路への応用、機械学会年次大会、関西大学、2007年9月9日
  
- [2] Gen Hashiguchi “ Fine MEMS System Design Platform Project ” , Proceedings of The 24<sup>th</sup> Sensor Symposium, p. 119 (2007)
  
- [3] Katsuyori Suzuki, Maho Hosogi, Gen Hashiguchi “ A Measurement of displacement using comb drive actuator ” , Conference on Information, Intelligence and Precision Equipment (IIP2008), p. 251 (2008)
  
- [4] Mitsuri Aoyama, Katsuyori Suzuki, Gen Hashiguchi “ Operation of comb-drive actuator with an AC bridge circuit and its sensing application ” , Conference on Information, Intelligence and Precision Equipment (IIP2008), p. 256 (2008)