

平成18年度成果報告書

MEMS用設計・解析支援システム開発プロジェクト

成果報告書

平成19年3月

(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構

委託先 財団法人マイクロマシンセンター
日本ユニシス・エクセリューションズ株式会社
みずほ情報総研株式会社
株式会社日立製作所
三菱電機株式会社
株式会社数理システム

目 次

序

第1章 研究開発の目的	1
第2章 研究開発の内容と実施体制	2
2.1 研究開発の内容	2
2.2 研究開発の実施体制	2
第3章 研究開発成果の報告	6
3.1 はじめに	6
3.2 機能グループ別成果の概要	6
3.3 「①フレームワークソフトの開発」	11
3.4 「②機構解析シミュレータの開発」	32
3.5 「③プロセス解析ツールの開発」	52
3.6 「④機能拡張ソフトの開発」	63
3.6.1 「④-1 プロセス逆問題解析ソフトの開発」	63
3.6.2 「④-2 接合実装解析ソフトの開発」	69
3.7 「⑤知識データベースの開発」	76
3.8 「①材料・プロセスデータベースの構築」	83
3.9 「①熱・光ナノインプリント加工解析システムの開発」	84
3.10 「②データベースの構築」	97
3.11 「①シミュレータの開発」	101
3.12 「②検証用デバイスの製作・評価」	106
3.13 「プロジェクト推進業務」	115
3.14 「達成目標の評価」	118

序

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems : 微小電気機械システム) 技術はマイクロマシン技術、半導体微細加工技術を応用して、センサー、アクチュエータなどの要素デバイスをシリコン上に作製したもので、電気機械製品の小型化、高機能化、更には省エネルギー化に優れた高付加価値デバイスの創生に寄与するものであり、わが国の製造業を支える新たな基盤技術としての期待が大きい。

MEMS技術は、近年、加速度センサーや圧力センサーなどの各種センサー、磁気ヘッド、プリンターヘッド、光学部品などが情報・精密機器、自動車、アミューズメント、バイオなどの製品に広く採用されてきているが、今後も一層の研究開発が進み、高機能化や構造の複雑化等を組み込んだ高精度3次元MEMSデバイスが光通信や高速無線通信、環境対応商品などに活用されると考えられる。

近年、経済のグローバル化に伴う製造拠点の海外移転と、その結果として製造業の空洞化が大きな懸念となっているが、MEMS技術はわが国産業の競争力強化にとって極めて重要なものと位置づけられており、先般の産業構造審議会産業技術分科会においてもその更なる発展が謳われているところである。

こうした状況を背景に、政府においても近年、MEMS研究開発に対する積極的な取り組みが開始されており、その一つが平成15年度から3ヶ年事業として進められた「MEMSプロジェクト」である。「MEMSプロジェクト」は、比較的短期間に大きな市場形成が期待される光MEMS、RF-MEMS、MEMSセンサーの実用化に必要な製造技術(ハード技術)を開発するとともに、その製造技術をファンドリー事業に展開することによりMEMS製品の開発・生産が活発化する環境を構築することを目的として実施されたものである。

一方、本「MEMS用設計・解析支援システム開発プロジェクト(MEMS-ONE)」は、多岐に亘る分野の技術者やMEMSプロセスに精通していない技術者が機構の解析や製造プロセスのシミュレーション及び最終機能の確認評価までの一連の解析をストレスなく行うことを可能とする支援システム(ソフト技術)を開発することを目的としている。このシステムの実現は、多くの技術者がMEMS分野に抵抗無く参加することを可能とし、その結果、MEMS分野の裾野が拡大強化され、ひいてはMEMS技術の高度化ならびにMEMS産業の飛躍的発展を促すものである。

本プロジェクトは、かかる狙いの下に新エネルギー・産業技術総合開発機構度において平成16年度から3ヶ年事業として開始されたもので、本報告は、本プロジェクトの委託を受けた財団法人マイクロマシンセンターを始めとする8企業、13大学、産総研からなるプロジェクトチームの最終年度の研究開発成果をまとめたものである。

本プロジェクトには先端的MEMS研究開発に従事する多くの企業、大学、産総研の技術者、研究者が結集しており、それぞれの得意分野の開発のみならずメンバー間の共同研究や各種委員会を核とする有機的な繋がりを以って推進され、当初計画どおりの成果が得られている。

本報告において最終年度の事業活動成果を概観戴き、ご示唆ご助言を賜るとともに、3ヶ年に亘る研究開発の推進に対し、関係各位の多大なるご支援ご協力に厚くお礼申し上げる次第である。また、今後の成果普及に対してもご支援ご協力を承りたくお願い申し上げます次第である。

平成19年3月

MEMS用設計・解析支援システム開発プロジェクト
プロジェクト推進委員会 委員長

東京大学 生産技術研究所 教授

藤田 博之

第1章 研究開発の目的

本プロジェクトは、わが国産業の牽引役としての役割が期待されているMEMSの効率的な設計・開発の実現を目指し、新エネルギー・産業技術総合開発機構が3年計画（平成16～18年度）で推進するプロジェクトである。

本プロジェクトが実現するシステムの目標は、最先端の習熟したMEMS研究者・技術者に利用されるのみならず、初心者や経験の乏しい多分野の研究者・技術者であってもMEMSに関する高度な知見やデータをストレスなく利用することが可能なシステムを創出することにある。

本プロジェクトの成果が広く国内に普及することにより、MEMS研究の裾野の拡大と高度化、MEMS開発の効率化による新製品開発の促進、科学技術シミュレーションソフトビジネスの発展などの大きな経済効果が期待される。

本報告書は、財団法人マイクロマシンセンター、日本ユニシス・エグゼリューションズ株式会社、みずほ情報総研株式会社、株式会社日立製作所、三菱電機株式会社、および株式会社数理システムの6社が連名により本プロジェクトを受託し、実施した研究成果の概要について取りまとめたものである。

第2章 研究開発の内容と実施体制

2. 1 研究開発の内容

本プロジェクトの目標を達成するシステムを開発するため、以下の内容の研究開発を行った。

- [1] MEMS用設計・解析支援ソフトの開発
 - ①フレームワークソフトの開発
 - ②機構解析シミュレータの開発
 - ③プロセス解析ツールの開発
 - ④機能拡張ソフトの開発
 - ④-1 逆問題解析ソフトの開発
 - ④-2 接合実装解析ソフトの開発
 - ⑤知識データベースの開発
- [2] MEMS用材料・プロセスデータベースの開発
 - ①材料・プロセスデータベースの構築
- [3] ナノインプリント加工・解析システムの開発
 - ①熱・光ナノインプリント加工解析システムの開発
 - ②データベースの構築
- [4] 回路集積化MEMSシミュレータの開発
 - ①シミュレータの開発
 - ②検証用デバイスの製作・評価

2. 2 研究開発の実施体制

NEDOの指名するプロジェクト・リーダーの下に、企業、大学、公的研究機関からなるプロジェクトチームを組織するとともに独立行政法人との共同実施体制を敷き、一方、研究開発の的確かつ円滑な推進を目的とした各種委員会を設置し、実施した。

<プロジェクト・リーダー>

東京大学生産技術研究所 藤田博之教授
京都大学 小寺秀俊教授（サブリーダー）

<プロジェクトメンバー>

財団法人マイクロマシンセンター、日本ユニシス・エクセリョーションズ株式会社、みずほ情報総研株式会社、株式会社日立製作所、三菱電機株式会社、株式会社数理システム、株式会社（以上6社）

（再委託先）オムロン株式会社、オリンパス株式会社、松下電工株式会社（以上3社）
大阪府立大学、岡山大学、香川大学、京都大学、群馬大学、首都大学東京、
東京大学、東京工業大学、豊橋技術科学大学、名古屋大学、新潟大学、
兵庫県立大学、北海道大学（以上13大学）

<共同実施>

独立行政法人産業技術総合研究所

<委員会構成>

[プロジェクト推進委員会]（順不同、敬称略）

委員長	藤田 博之	東京大学 生産技術研究所 センター長・教授
委員	小寺 秀俊	京都大学 大学院工学研究科 マイクロエンジニアリング専攻 教授
	三原 孝士	オリンパス株式会社 未来創造研究所 上席研究員
	前田龍太郎	産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 グループ長
	渡辺 秀明	オムロン株式会社 技術本部 先端デバイス研究所 技術担当課長
	宮島 博志	オリンパス株式会社 研究開発センター グループリーダー
	水田 千益	株式会社数理システム 科学技術部 部長
	前田 幸久	日本エシス・エケリュションズ株式会社 KC推進部 担当部長
	原田 武	株式会社日立製作所 機械研究所 第2部 主任研究員
	富井 和志	松下電工株式会社 生産技術研究所 微細プロセス開発センター 主担当
	入江 康郎	みずほ情報総研株式会社 科学技術部 MEMS室 室長
	福本 宏	三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 センシング技術部 部長

[ソフトウェア委員会] (順不同、敬称略)

委員長	三原 孝士	オリンパス株式会社 未来創造研究所 上席研究員
委員	藤田 博之	東京大学 生産技術研究所 センター長・教授
	小寺 秀俊	京都大学 大学院工学研究科 マイクロエンジニアリング専攻 教授
	平井 義彦	大阪府立大学 大学院工学研究科 電子・数物系専攻 教授
	藤原 耕二	岡山大学 大学院自然科学研究科 産業創成工学専攻 助教授
	藤森 和博	岡山大学 大学院自然科学研究科 産業創成工学専攻 助手
	宮崎 則幸	京都大学 大学院工学研究科 機械理工学専攻 教授
	早乙女康典	群馬大学 大学院工学研究科 ナノ材料システム工学専攻 教授
	楊 明	首都大学東京 大学院工学研究科 機械工学専攻 助教授
	佐藤 一雄	名古屋大学 大学院工学研究科 マイクロ・ナノシステム工学専攻 教授
	大橋 修	新潟大学 大学院自然科学研究科 材料生産システム専攻 教授
	安藤 泰久	産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 グループ長
	森口 誠	オムロン株式会社 技術本部 先端デバイス研究所 主事
	村上 賢治	オリンパス株式会社 研究開発センター MEMS 開発本部 チームリーダー
	鈴木 康哲	株式会社数理システム 科学技術部 主任研究員
	前田 幸久	日本エシス・エケリュションズ株式会社 KC推進部 担当部長
	原田 武	株式会社日立製作所 機械研究所 第2部 主任研究員
	桃井 義宣	松下電工株式会社 先行技術開発研究所 機械技術研究室 主担当
	入江 康郎	みずほ情報総研株式会社 科学技術部 MEMS室 室長
	横山 吉典	三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 センシング技術部 主席研究員

[知識データベース委員会] (順不同、敬称略)

委員長	小寺 秀俊	京都大学 大学院工学研究科 マイクロエンジニアリング専攻 教授
委員	藤田 博之	東京大学 生産技術研究所 センター長・教授
	平井 義彦	大阪府立大学 大学院工学研究科 電子・数物系専攻 教授
	藤原 耕二	岡山大学 大学院自然科学研究科 産業創成工学専攻 助教授
	藤森 和博	岡山大学 大学院自然科学研究科 産業創成工学専攻 助手
	橋口 原	香川大学 工学部知能機械システム工学科 教授
	北村 隆行	京都大学 大学院工学研究科 機械理工学専攻 教授
	中部 主敬	京都大学 大学院工学研究科 機械理工学専攻 教授
	北條 正樹	京都大学 大学院工学研究科 機械理工学専攻 教授

宮崎 則幸	京都大学	大学院工学研究科	機械理工学専攻	教授
池田 徹	京都大学	大学院工学研究科	機械理工学専攻	助教授
神野 伊策	京都大学	大学院工学研究科	マイクロエンジニアリング専攻	助教授
早乙女康典	群馬大学	大学院工学研究科	ナノ材料システム工学専攻	教授
楊 明	首都大学東京	大学院工学研究科	機械工学専攻	助教授
肥後 矢吉	東京工業大学	精密工学研究所	先端材料部門	教授
年吉 洋	東京大学	生産技術研究所		助教授
高尾 英邦	豊橋技術科学大学	工学部電気・電子工学系		助教授
佐藤 一雄	名古屋大学	大学院工学研究科	マイクロ・ナノシステム工学専攻	教授
大橋 修	新潟大学	大学院自然科学研究科	材料生産システム専攻	教授
生津 資大	兵庫県立大学	大学院工学研究科	機械系工学専攻	助手
高木 秀樹	産業技術総合研究所	先進製造プロセス研究部門		主任研究員
佐藤 正武	オムロン株式会社	技術本部	先端デバイス研究所	
三原 孝士	オリンパス株式会社	未来創造研究所		上席研究員
大田 亮	オリンパス株式会社	研究開発センター	グループリーダー	
水田 千益	株式会社数理システム	科学技術部		部長
前田 幸久	日本エシス・エクセリジョンズ株式会社	KC推進部		担当部長
原田 武	株式会社日立製作所	機械研究所	第2部	主任研究員
桃井 義宣	松下電工株式会社	先行技術開発研究所	機械技術研究室	主担当
入江 康郎	みずほ情報総研株式会社	科学技術部	MEMS室	室長
藤井 善夫	三菱電機株式会社	先端技術総合研究所	センシング技術部	グループリーダー

[材料・プロセスデータベース委員会] (順不同、敬称略)

委員長	前田龍太郎	産業技術総合研究所	先進製造プロセス研究部門	グループ長
委員	藤田 博之	東京大学	生産技術研究所	センター長・教授
	小寺 秀俊	京都大学	大学院工学研究科	マイクロエンジニアリング専攻 教授
	佐藤 一雄	名古屋大学	大学院工学研究科	マイクロ・ナノシステム工学専攻 教授
	大橋 修	新潟大学	大学院自然科学研究科	材料生産システム専攻 教授
	高木 秀樹	産業技術総合研究所	先進製造プロセス研究部門	主任研究員
	後藤 博史	産業技術総合研究所	先進製造プロセス研究部門	特別研究員
	若林 秀一	オムロン株式会社	技術本部	先端デバイス研究所 主事
	三原 孝士	オリンパス株式会社	未来創造研究所	上席研究員
	神谷 宜孝	オリンパス株式会社	研究開発センター	MEMS 開発本部 課長代理
	水田 千益	株式会社数理システム	科学技術部	部長
	前田 幸久	日本エシス・エクセリジョンズ株式会社	KC推進部	担当部長
	原田 武	株式会社日立製作所	機械研究所	第2部 主任研究員
	富井 和志	松下電工株式会社	生産技術研究所	微細プロセス開発センター 主担当
	入江 康郎	みずほ情報総研株式会社	科学技術部	MEMS室 室長
	藤井 善夫	三菱電機株式会社	先端技術総合研究所	センシング技術部 グループリーダー

[普及活動検討委員会] (順不同、敬称略)

委員長	佐藤 淳史	みずほ情報総研株式会社	科学技術部	MEMS室 シニアコンサルタント
委員	藤田 博之	東京大学	生産技術研究所	センター長・教授
	小寺 秀俊	京都大学	大学院工学研究科	マイクロエンジニアリング専攻 教授
	小西 聡	立命館大学	理工学部マイクロ機械システム工学科	助教授

池原	毅	産業技術総合研究所	先進製造プロセス研究部門	研究員
森口	誠	オムロン株式会社	技術本部 先端デバイス研究所	主事
宮島	博志	オリンパス株式会社	研究開発センター MEMS 開発本部	グループリーダー
水田	千益	株式会社数理システム	科学技術部	部長
前田	幸久	日本エニス・エグゼキュションズ株式会社	KC 推進部	担当部長
原田	武	株式会社日立製作所	機械研究所 第2部	主任研究員
富井	和志	松下電工株式会社	生産技術研究所 微細プロセス開発センター	主担当
岩崎	拓也	みずほ情報総研株式会社	科学技術部 MEMS 室	シニアコンサルタント
藤井	善夫	三菱電機株式会社	先端技術総合研究所 センシング技術部	グループリーダー

[知的財産権委員会] (順不同、敬称略)

委員長	前田	幸久	日本エニス・エグゼキュションズ株式会社	KC 推進部	担当部長
委員	小寺	秀俊	京都大学	大学院工学研究科	マイクロエンジニアリング専攻 教授
	池原	毅	産業技術総合研究所	先進製造プロセス研究部門	研究員
	森口	誠	オムロン株式会社	技術本部 先端デバイス研究所	主事
	宮島	博志	オリンパス株式会社	研究開発センター MEMS 開発本部	グループリーダー
	水田	千益	株式会社数理システム	科学技術部	部長
	原田	武	株式会社日立製作所	機械研究所 第2部	主任研究員
	桃井	義宣	松下電工株式会社	先行技術開発研究所 機械技術研究室	主担当
	佐藤	淳史	みずほ情報総研株式会社	科学技術部 MEMS 室	シニアコンサルタント
	横山	吉典	三菱電機株式会社	先端技術総合研究所 センシング技術部	主席研究員

第3章 研究開発成果の報告

3.1 はじめに

平成18年度はプロジェクトの最終年度であるため、研究開発成果物の完成と達成目標に対する評価が主な研究開発課題であった。ソフト開発では最終段階となる、各解析機能とフレームワークとの結合検証および統合検証を重点的に実施するとともに、検証用デバイスによる計測結果と解析結果の比較も実施し、良好な結果が得られている。また、今年度新たに回路集積化MEMSシミュレータ機能を追加したが、この機能についても計画通りの成果が得られている。一方、初心者支援の要であるデータベース構築においては、ソフト開発を完了し、知識データ1750件、材料・プロセスデータ（ナノインプリント用を含む）435件を蓄積することができた。

研究開発と並行し、本プロジェクトの成果（MemsONE：メムスワンと呼ぶ）普及の一環として、成果発表会の開催や各種展示会へ出展、α版と呼ぶ評価版の配布、等の活動を実施してMemsONEを広く紹介し、多くのユーザを獲得した。

以上の活動により、本プロジェクトの完遂と目標を達成することができた。以降に本研究開発成果を実施計画書に基づいて機能別に報告する。

3.2 機能グループ別成果の概要

[1] MEMS用設計・解析支援ソフトの開発

①フレームワークソフトの開発における成果概要

フレームワークを構成する、1) マスク作成、2) デバイス構造作成、3) 自動格子作成、4) プロセスレシピ、5) 解析条件設定、6) 解析結果表示、7) 解析ソフト、CADソフトとのデータコンバータ、8) データベースインターフェース、9) プラグイン機能とスーパーバイザ機能の9機能項目の開発作業および検証作業をすべて完了した。

マスク作成機能に関しては、基盤機能（ファイル、表示、編集など）、セル構造の定義・編集機能、GDSII 入出力機能、プロセス解析ソフトと連携するための機能の開発を終了した。

デバイス構造作成機能に関しては、基盤機能（ファイル、表示、編集など）およびモデリング機能（立体、点線、検査）の開発を終了した。

自動格子作成機能は、6面体メッシュ自動分割と、4角形および3角形メッシュ自動分割機能、デバイス構造作成との連携機能の開発を終了した。

プロセスレシピに関しては、プロセスレシピのエディタ機能およびプロセスエミュレータとの連携機能の開発を終了した。

解析条件設定機能は、全解析種類の解析条件設定および再利用機能、ウェットエッチングシミュレータ・ドライエッチングシミュレータの解析条件設定・再利用機能および、ウェットエッチングシミュレータ・ドライエッチングシミュレータとの連携機能の開発・検証作業を終了した。

解析結果表示に関しては、解析結果の評価図と物理量の選択 GUI、等高線図、変位図、ベクトル図、テンソル図、評価領域の材質限定、グラフ出力、アニメ用画像出力、断面図、リスト出力機能の開発を終了した。また、機構解析ソフトの解析結果データによる検証作業を終了した。

CADソフト、解析ソフトとのデータコンバータに関してはCADデータに関するIGES入出力、DXF入出力、解析格子データに関するABAQUS、MARC、NASTRANとの入出力機能の開発を終了した。

データベースインターフェースとしては、知識データベースおよび材料・プロセスデータベースとのインターフェース用のライブラリ分の開発を終了した。

プラグイン機能とスーパーバイザ機能に関しては、プラグインのためのインターフェースファイル形式仕様の取り纏め、および、インターフェースファイルとの入出力機能の開発を終了した。

②機構解析シミュレータの開発における成果概要

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の各機能に関して、理論解や論文との比較、商用コードとの比較を含めて、3種類のMEMSデバイス(圧力センサ、RFスイッチ、静電駆動ミラー)を検証デバイスとして、フレームワークソフトへの結合検査および検証テストを実施した。解析結果の検証については、実験結果、理論解、商用コードと解析結果は十分良く一致しており、解析結果の妥当性を確認するとともに、本プロジェクトの目標を達成できた。また各機能の連成解析においては熱伝導解析と熱弾塑性解析、圧電解析(静電場解析と弾塑性解析の強連成)、電界解析と弾塑性解析、磁界解析と弾塑性解析の連成解析を開発し、解析結果の検証を検証デバイスを用いて実施し、結果の妥当性を確認することができた。

③プロセス解析ツールの開発における成果概要

検証デバイスとして圧力センサを用いて、異方性ウェットエッチングプロセス解析シミュレータとフレームワークソフト(以下FWS)との結合動作検証を行い、解析結果の妥当性を確認した。ドライエッチングプロセス解析シミュレータとFWSとの結合動作検証を行い、産業技術総合研究所より提供された実測値に対して解析結果の妥当性を確認した。3種類の検証デバイスについて成膜プロセスを含むマルチプロセスエミュレータとFWSとの結合動作検証を実施し、デバイス構造形成結果の妥当性を確認した。

④-1 逆問題解析ソフトの開発における成果概要

(1) ソフト開発

プロセス逆問題解析ソフトウェアを完成し、フレームワークとの結合と統合テストを完了させた。主に初心者向けのツールとしてGUI操作の簡素化を行い、逆問題解析の開始から、エミュレータによるプロセス解析までを簡単に行えるようにした。また、利便性を考え逆問題解析中の画面に、目的形状と確定フローの表示を行うようにした。更にユーザによる環境設定機能により、ユーザが保有するプロセス、材料を考慮した解析が行えるようにした。

プロセス逆問題解析ソフトにより得られたプロセスフローを反映して、設計形状からマスク形状への形状変化を図形データとして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・マスクを解析により求めることができることが分かった。

(2) プロセスデータ採取

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、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。

④-2 接合実装解析ソフトの開発における成果概要

接合解析モジュールとして5種類の機能を実装し、各機能に関して動作検証を実施した。接合強度評価機能においてはダイシユア試験結果との比較を行い解析結果の妥当性を確認した。また、陽極接合強度試験片を検証デバイスとして、接合強度が試験片形状・負荷モードによらず一定で、接合条件

に依存することを示し、解析結果の妥当性を確認した。陽極接合とはんだ接合に関し、接合強度・封止性データの採取を完了し、データベースに登録した。

⑤知識データベースの開発における成果概要

(1) 知識データベース設計と実装

大学の知識を集約し、知識データとして700件を超えるデータを登録した。知識データについては、プロセス、デバイス、材料特性、解析の大分類毎に定めた中分類で整理し、データベースへの格納を実施した。知識データが登録された知識データベースを用いて、フレームワークとの連携による知識データベースシステムの機能実装および統合検証テストを実施した。また、知識データの蓄積・検索・可視化する編集機能を実装し、動作の確認を実施した。

(2) 知識データの作成、整理・蓄積

大学研究者の専門性を発揮して、MEMS設計（デバイス）、プロセス、材料特性、解析の4分野に関連する研究から、初心者向けのMEMS技術解説や熟練者向けの先端研究成果を知識データとして編集・作成して登録した。総数にして約800件（ナノインプリント関連、企業作成分を含む）である。分野別ではプロセス分野と材料特性分野が30%強と多く、デバイス分野20%強、解析分野が10%弱と少ないが、全分野を網羅しており、知識データベースとしての有効性を発揮できるものである。

マイクロマシンセンターにおいては、MEMS関連の主要な国際学会・シンポジウムから収集した論文を基にして熟練者向けの知識データを作成した。3ヶ年の活動により総数約110件の知識データを登録した。また、マイクロマシンセンターにおける調査・普及活動資料を編集して初心者向けの知識データ（専門用語：約200件）として登録した。

[2] MEMS用材料・プロセスデータベースの開発

①材料・プロセスデータベースの構築における成果概要

MEMS設計に関連する材料データの収集に関しては、産業技術総合研究所が計測または収集するほか、知識データベース構築に参画する大学研究者からの提供があるが、更にこれらを補完する意味から材料メーカの保有するデータや、MEMS関連技術文献、国内外の学会発表資料等からもデータの探索・収集を行い、合計約230件の材料データを収集した。更に当初計画には入っていなかった接合強度解析の評価に有用な破壊じん性値56件を関係企業と協力して収納した。一方、プロセスデータに関しては、産業技術総合研究所が計測または収集した135件を収納した。

[3] ナノインプリント加工・解析システムの開発

①熱・光ナノインプリント加工解析システムの開発における成果概要

(1) 熱・光ナノインプリント加工解析システムの開発

光ナノインプリントプロセス解析モデルに基づいたシステムをフレームワークへ結合し、ライン&スペース構造を用いて統合検証テストを行い、妥当性を確認した。熱ナノインプリント解析の解析モデル構築し、実装したシステムの評価検証を大阪府立大学と共同で行い、成型形状比較による実験結果との比較を行い解析結果の妥当性を確認した。

(2) フレームワークソフトの改修

「MEMS用設計・解析支援システムの開発」におけるフレームワーク機能の熱・光ナノインプリント加工解析システム向けの改修作業として、1) プロセス解析シミュレータの解析条件設定、2) データベースインターフェース、3) 電磁波解析プログラムのプレ機能、4) 電磁波解析プログラムのポスト機能、5) システム全体への組み込み、に関する開発および検証を終了した。特に、光ナノインプリント解析用及び電磁波解析用の固有機能である、FDTD法解析シミュレータ向けの構造格子の定義・変更・確認機能、放射パターン図とスミスチャート出力に関わる解析結果表示機

能の開発を完了した。

②データベースの構築における成果概要

(1) 代表的樹脂のデータベース構築

ナノインプリント成形材料としてレジスト用、光学素子用、金型用成形材料に対する機械的・熱的物性データを複数種類の評価装置を用いて収集・採取した。

レジスト用成形材料としてはMEMSで多用される薄膜材料であるPMMA、感光性ポリイミド(PI)、SU-8について、光学素子用成形材料としては、低融点ガラスについて、金型材料としてはNiおよびSiについて、機械的特性(ヤング率、残留応力)と熱的特性(熱膨張率)を、レーザ表面弾性波法、ナノインデンテーション法、光てこ法を用いて測定した。また、これらの結果を材料データベースに組み込んだ。

(2) 知識・材料データの整理および入力

(独)産業技術総合研究所および(株)日立製作所が採取する代表的な樹脂および金型材料の材料物性値データ、並びに用途に応じて使用される複数種類のナノインプリント用樹脂に対する材料物性値データを整理して所定の形式で蓄積した。収集・登録した材料データ数は14件である。

[4] 回路集積化MEMSシミュレータの開発

①シミュレータの開発における成果概要

MEMSを構成している機構部分の機械系素子モデルの定式化を行い、プログラムモジュールを作成した。構築を行った素子モデルは、アンカ、ビーム、プレート、ギャップと呼ばれる4種類である。これら素子モデルを用いれば、カンチレバー、櫛歯アクチュエータ、トーションミラーなど、種々のMEMSを構成することができ、その機構部分の特性を解析することが可能になった。

エンジン部分は、SPICE3をベースにして開発した。機械系素子(アンカ、ビーム、プレート、ギャップ)をSPICE3に追加実装することによって、MEMSを構成する機械素子と電気素子を同時に扱うことが可能になった。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且つ、高速に行うことが可能になった。また、ユーザが実デバイスを作成する感覚でモデルを構築すると、内部で回路ネットワークを自動的に作成するGUIも備えた。

②検証用デバイスの製作・評価における成果概要

東京大学において、静電アクチュエータチップを作製し、計装アンプと共にプリント基板上に実装した。このテストデバイスを用いて、(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せた。数理システムにおいて、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。

[5] プロジェクト推進業務

本プロジェクトの目的・目標達成に向け、プロジェクトを円滑に推進するために、進捗管理・調整、技術的課題の検討・対策、ユーザ要求の収集と機能仕様への反映、等を目的とした各委員会活動の企画・サポートを行った。また企業間の技術調整及び成果普及に関する業務を実施して効果的な委員会運営を図った。各委員会の開催状況は、下記の通りである。特に普及活動検討委員会関連では開発成果の評価版(α版)をリリースし、試用を促すためのイベント活動等を積極的に実施した。

(1) 委員会開催実績

- | | |
|----------------|------|
| 1) プロジェクト推進委員会 | 開催4回 |
|----------------|------|

2) ソフトウェア委員会	開催10回(ワーキング含む)
3) 知識DB委員会	開催7回(ワーキング含む)
4) 材料・プロセスDB委員会	開催6回(ワーキング含む)
5) 普及活動検討委員会	開催16回(ワーキング含む)
6) 知的財産権委員会	開催0回

研究開発項目「MEMS用設計・解析支援ソフトの開発（知識データベースを含む）」

3. 3 「①フレームワークソフトの開発」

担当：日本ユニシス・エクセリョーションズ(株)

(1) マスク作成

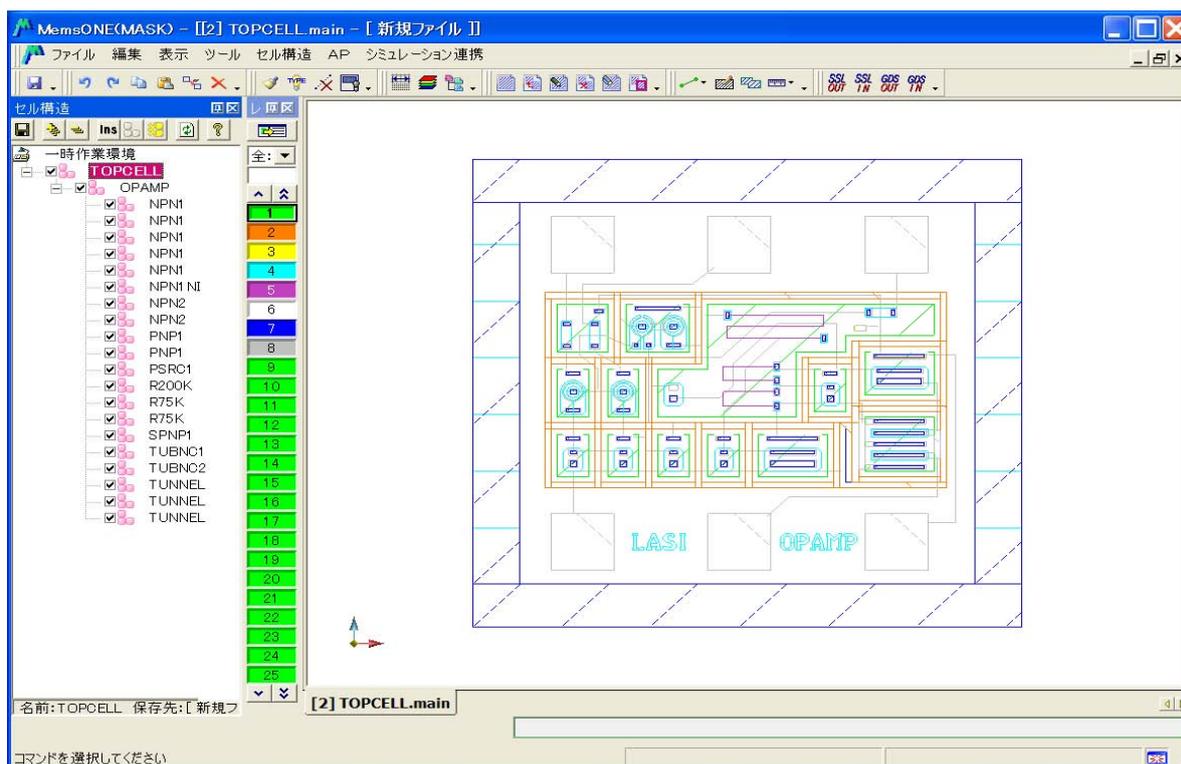
MEMS製造工程ではフォトリソグラフィ製法が重要な役割を果たす。この製法におけるマスクレイアウトデータを作成する機能を開発する。

これらの開発作業のうち、平成18年度の研究開発では下記の成果を得た。

<成果>

平成17年度の開発作業を踏まえて、ファイル、表示、編集などの基盤機能、および、マスク領域定義・編集機能、マスク領域定義補助機能、GDSII形式データとの入出力機能など、マスクCADとしての主要機能およびプロセス解析ソフトと連携するためのマスクレイアウト形状に関わる主要機能の開発を終了した。

マスク作成用CAD画面の全体イメージおよびGDSII形式データから読み込んだマスクデータの例を図①-(1)-1で示す。また、開発されたマスク作成機能を表①-(1)-1で示す。



図①-(1)-1 マスク作成CAD画面

表①-(1)-1 マスク作成機能一覧表

MEMS メニューバー	MEMSツールバー			機能概要
ファイル			保存	開始はメイン画面で指示

			終了	CAD 画面のクローズ
編集			元に戻す	コマンド単位のキャンセル(UNDO)
			やり直し	UNDO を元に戻す (REDO)
			コピー	貼り付け用の線またはマスク領域の指示
			貼り付け	コピー図形の貼り付け
			移動複写・拡大縮小	幾何要素の移動・複写
			削除	幾何要素の削除
表示			リペイント	画面再表示
			タイプ別表示 ON/OFF	点、線、マスク領域の 3 タイプ
			一時図形削除	一時図形削除
			REG_表示削除	検査コマンドの表示値の削除
ツール			グリッド	グリッドのサイズ変更、表示、丸め設定
			レイヤ操作	レイヤ操作パレットの表示
			セル構造表	セル構造を示すパレットの表示
セル構造			セル作成	マスクデータの単位であるセル名を定義
			セル構造定義	セル間の親子関係を定義する
			セル配置位置編集	親子関係での子セルの位置を変更する
			セル構造解除	セル間の親子関係を解除する
			セル削除	セルを削除する
			創生セル切り替え	新規定義図形の所属セルの切り替え
AP	点・線・編集	点	点_座標値	座標値
			点_2 点中点	2 点の中点座標
			点_線分分割点	線分の N 分割点
			点_垂点	垂点
		線	線_2 要素	2 点
			線_ポリライン	N 点
			線_長方形	長方形
			円_中心と 2 点	中心と 2 点による円
			円_3 点	3 点による円
			円_2 点と径	2 点と径による円
			円弧_中心と 2 点	中心と 2 点による円弧
			円弧_3 点	3 点による円弧
			円弧_2 点と径	2 点と径による円弧
		線編集	面取り	角部を線分でカット
			オフセット	線列の一定値オフセット

			フィレット	ポリラインの角の R 掛け
			ストレッチ	線列の指示頂点座標値の移動
		トリム延長	トリム延長__2線	2線の交点での切り取り、または、交点まで延長
			トリム延長__連続線	トリム延長_2線の連続線機能
			トリム延長__分割	線を他の線の交点で切り取り
			トリム延長__中抜き	他の2線との交点区間を中抜き
	マスク領域 定義編集			マスク領域の定義および、定義済み領域の変更
	マスク領域 集合演算			2つのマスク領域を和集合領域
	検査		座標値	座標値を調べる
			長さ	線の長さを調べる
			角度	2線の角度を調べる
			微小要素検出	指示大きさ以下の幾何要素を検査する。
シュミレーション連携	SSL 出力			プロセス解析の解析条件として使用する標準マスクデータ(SSL データ形式)出力
	SSL 入力			SSL 形式データの入力
	GDS 出力			GDSII 形式データの出力
	GDS 入力			GDSII 形式データの入力
	DXF 出力			DXF 形式データの出力
	DXF 入力			DXF 形式データの入力

(2) デバイス構造作成

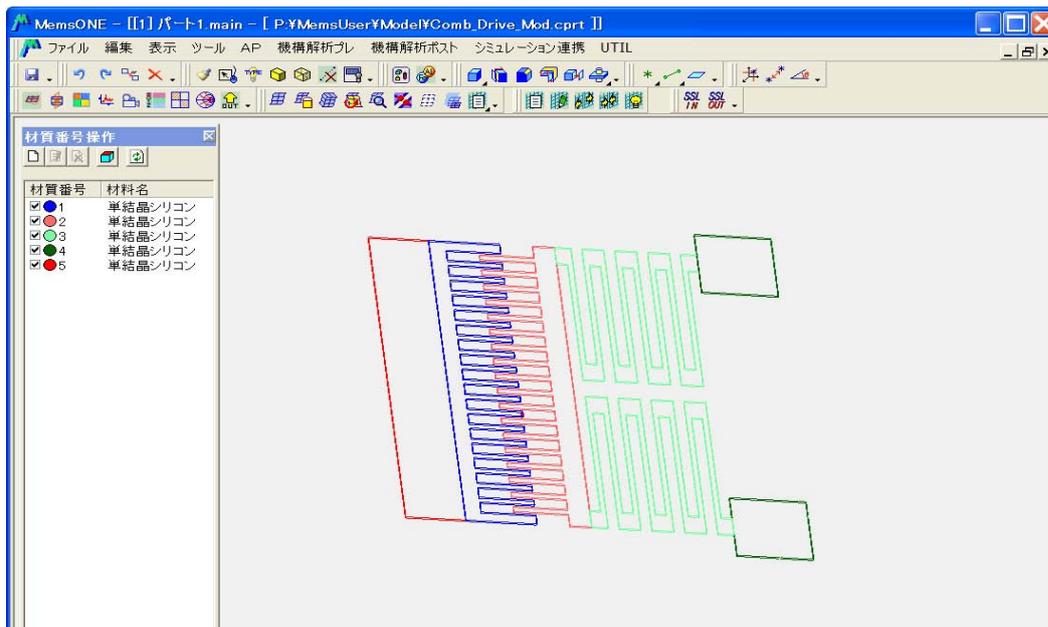
MEMS デバイスの概念設計段階では、製造プロセスとは独立にデバイス構造の形状を直接定義し、機能解析などのシミュレーションを行う必要がある。このニーズに対応するためのデバイス構造作成機能を開発する。

これらの開発作業のうち、平成 18 年度の研究開発では下記の成果を得た。

<成果>

平成 17 年度の開発作業を踏まえて、ファイル、表示、編集などの基盤機能、およびソリッド立体定義、ソリッド立体定義補助、ソリッド形状の集合演算、検査機能など、デバイス構造作成に関わるモデリング機能の開発を終了した。

デバイス構造作成用 CAD 画面の全体イメージおよび、デバイス構造作成機能を使用して作成した 3 次元歯車モデルの例を図①-(2)-1 で示す。また、開発されたデバイス構造作成機能を表①-(2)-1 で示す。



図①-(2)-1 デバイス構造作成 CAD 画面

表①-(2)-1 デバイス構造作成機能一覧表

MEMS メニュー バー	MEMSツールバー			機能概要
ファイル		保存		開始はメイン画面で指示
		終了		CAD 画面のクローズ
編集		元に戻す		コマンド単位のキャンセル(UNDO)
		やり直し		UNDO を元に戻す(REDO)
		移動複写拡大縮小		幾何要素の移動・複写
		削除		幾何要素の削除
表示		リペイント		画面再表示
		マウスビュー		マウスによる表示制御メニュー
		タイプ別 ON/OFF		図形タイプ別の表示制御
		シェーディング ON/OFF		シェーディング ON/OFF
		半透明		半透明シェーディング
		一時図形削除		一時図形削除
		REG_表示消去		検査コマンドの表示値の削除
ツール		グループ操作		グループ化機能
		材質操作		幾何要素、FEM 要素への材質設定

				と材質番号単位の表示 ON/OFF
AP	立体	基本立体	直方体	直方体
			勾配体	勾配体。指定テーパ角
			円筒・円錐	円筒形状・円錐形状
		平行掃引体		平面領域の SWEEP
		面取り		面取り
		面オフセット		一定オフセット
		構成面取り出し		立体の構成面を面として取り出す
		集合演算	集合演算_和	和集合
			集合演算_差	差集合
			集合演算_積	積(共通)集合
			集合演算_一括和	複数立体の和集合
			集合演算_切断分離	面による立体の分割
			複合面結合	位相結合による開複合面の作成
	点線面	点	座標値	座標値
			N 分割点	N 分割点
		線	線_2要素	2点指示
			線_ポリライン	ポリライン
			線_長方形2点	長方形2点
			断面線	立体の面による切断線
		面		単面(平面)
	検査	座標値		座標値を調べる
		距離		2点間距離を調べる
		角度		線・面間の角度を調べる
なし	FEMプレ	メッシュ分割		シェル要素、6面体ソリッド要素 立体要素表面からシェル要素抽出
		メッシュの削除		節点、有限要素の削除
		シェル要素の掃引		シェル要素の SWEEP から立体作成
		シェル要素の表裏反転		シェル要素の表裏反転
		メッシュ検査		メッシュの検査
		重複節点除去		近接している節点の間引き
		メッシュ非表示		指示有限要素の表示 OFF
		表示スケール変更		有限要素の表示スケールの変更。 立体要素のシュリンク表示
		直交格子	直交格子_解析領域定義	FDTD 法直交格子の初期定義

			直交格子_格子数変更	直交格子の格子数(間隔)の変更
			直交格子_基準線分離	格子数定義用の基準線区間の分離
			直交格子_基準線結合	格子数定義用の基準線区間の結合
			直交格子_表示 ON/OFF	直交格子に関連した表示 ON/OFF
なし	FEMポ スト	物理量・評価図選 択		物理量(応力など)と評価図(等高線 図、変位図など)の選択
		評価領域の材質 限定		評価図の対象領域を材質番号によ り限定する
		断面図		等高線、ベクトル図の断面図
		リスト出力		ステップ量などの数値表出力
		グラフ出力		XY グラフ出力
		放射パターン、ス ミスチャート		電磁波解析結果の特殊図表示
		接合強度解析		接合強度解析機能
		材料構成図		材質番号による自動色分け図
		2D アニメーション		ステップ番号を変更して連続実行
		ポスト終了		ポスト処理の終了
シミュレ ーション 連携	SSL 出力			回路シミュレーションで参照する立体 データ(SSL データ形式)の作成
	SSL 入力			SSL 形式データの取り込み
UTIL	CAD コン バータ	IGES	IGES 出力	IGES 形式データの出力
			IGES 入力	IGES 形式データの入力
	メッシュコ ンバータ	ABAQUS	ABAQUS 出力	ABAQUS メッシュデータ出力
			ABAQUS 入力	ABAQUS メッシュデータ入力
		MARC	MARC 出力	MARC メッシュデータ出力
			MARC 入力	MARC メッシュデータ入力
		NASTRAN	NASTRAN 出力	NASTRAN メッシュデータ出力
			NASTRAN 出力	NASTRAN メッシュデータ入力

(3) 自動格子作成

機構解析ソフトの入力となる形状データは一般的に格子データの形式であるため、デバイス構造データを格子データに変換する機能を開発する。

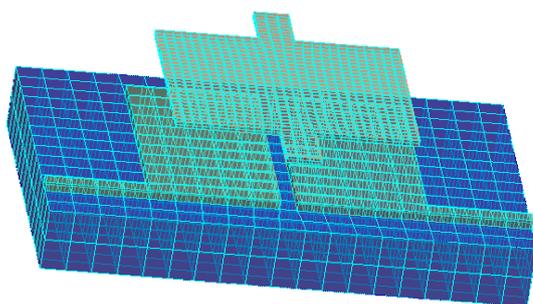
これらの開発作業のうち、平成 18 年度の研究開発では下記の成果を得た。

<成果>

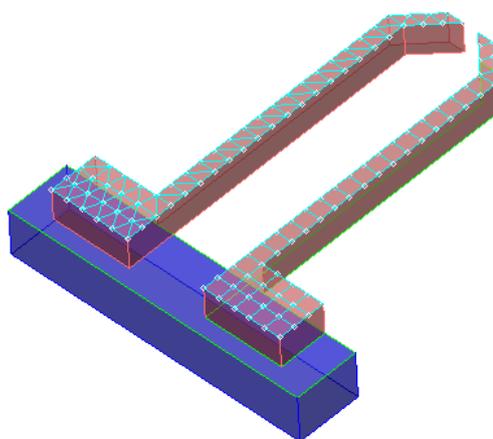
平成 17 年度の開発作業を踏まえて、格子データの表示、格子データのファイル保存機能、6 面体格子自動分割および 4 角形・3 角形格子自動分割機能、デバイス構造作成との連携機能の開発を終了した。北海道大学に再委託した 6 面体自動格子作成機能に関しては、積層の薄膜構造や比較的矩形的な形状が多いなどの特徴を持つ MEMS デバイス構造を考慮した自動格子作成機能の開発を完了した。

図①-(3)-1 はミラー部品の電磁界解析用モデルを 6 面体格子に自動分割した結果を示す。

図①-(3)-2 は、ツインプローブの左右の上表面をそれぞれ 4 角形 (右側プローブ) と 3 角形 (左側プローブ) の格子により自動分割した結果を示す。



図①-(3)-1 ミラー部品の電磁界解析用モデルの 6 面体格子への自動分割結果



図①-(3)-2 ツインプローブの 3 角形格子および 4 角形格子への自動分割結果

(4) プロセスレシピ

ウェハ、フォトリソグラフィ、エッチング等からなるマルチプロセスの順序とそのプロセス内容を定義・変更するためのプロセスレシピ機能を開発する。本機能には、知識データベースおよび材料・プロセスデータベースとの連携も含まれる。

これらの開発作業のうち、平成 18 年度の研究開発では下記の成果を得た。

<成果>

平成 17 年度の開発作業を踏まえて、マルチプロセスに関するプロセス工程、使用製造装置、マ

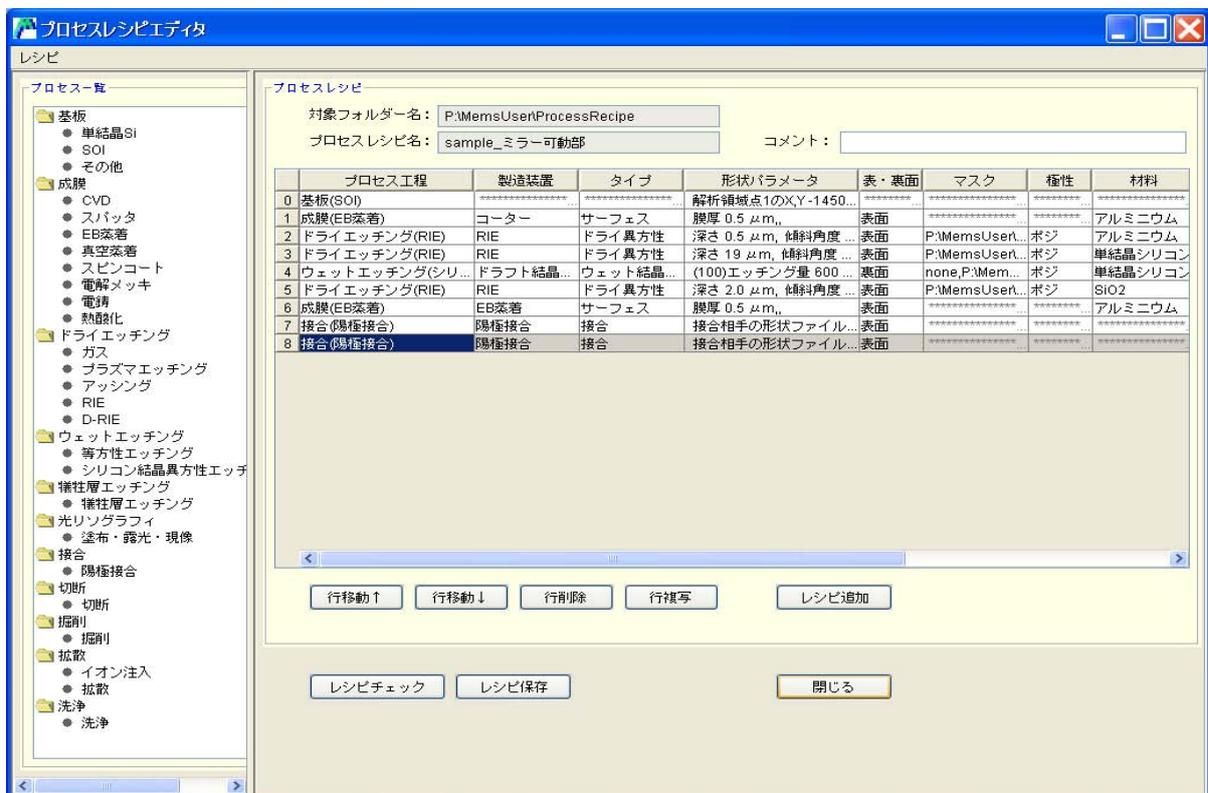
スクデータ、装置条件、形状近似パラメータなどのレシピ項目を定義・変更する機能、プロセスレシピのチェック機能、ファイル保存・参照機能など、プロセスレシピ機能全般にかかわる機能の開発およびプロセスエミュレータとの連携機能の開発を終了した。

図①-(4)-1 はプロセスレシピの定義・編集の画面例を示す。プロセスレシピファイルの保存、編集操作もこの画面で可能である。

図①-(4)-2 はプロセスレシピのチェック機能の出力メッセージ例を示す。

図①-(4)-3 はプロセスレシピの実行指示と最終結果の3Dモデル形状の例を示す。

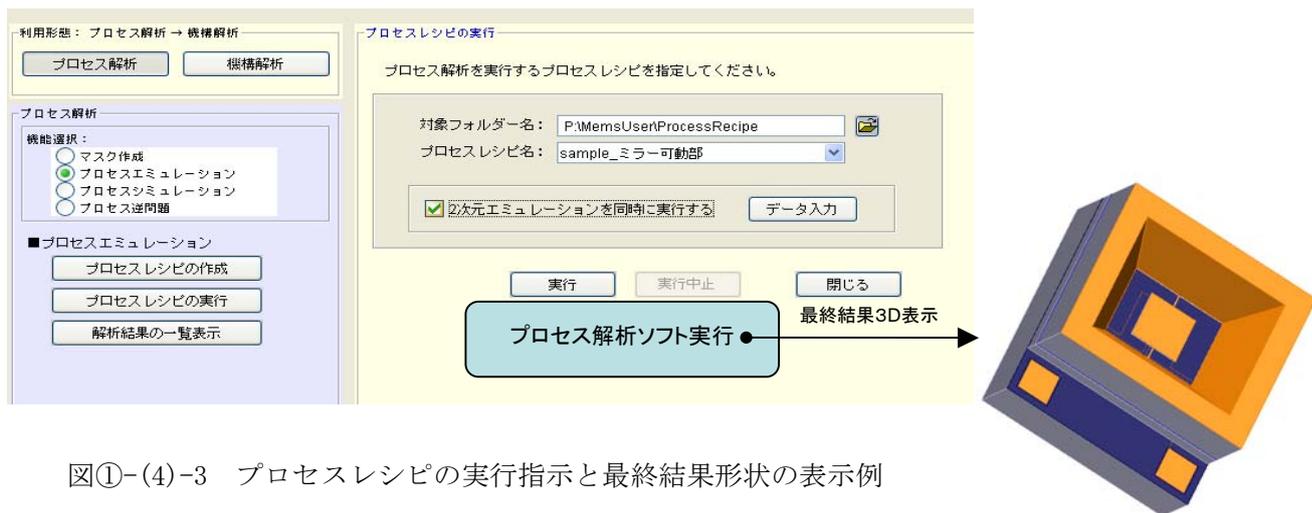
図①-(4)-4 は、プロセス実行の結果をプロセス途中および2Dエミュレータ結果も含めて表示確認する操作画面例を示す。



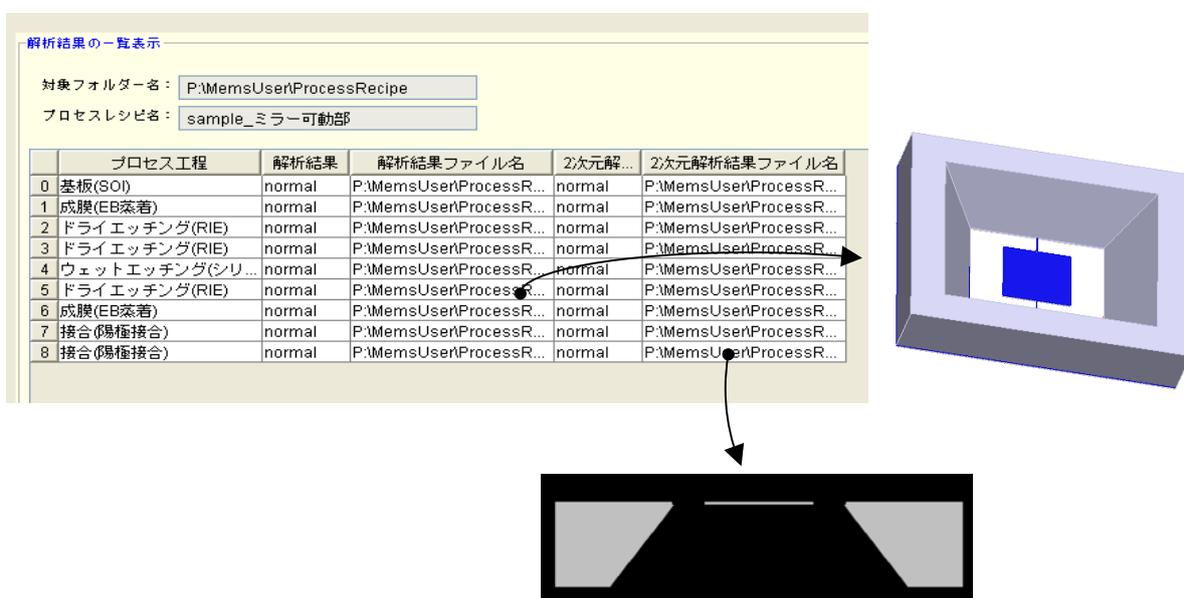
図①-(4)-1 プロセスレシピ定義・編集画面

○プロセスNO.4: ウェットエッチング(シリコン結晶異方性エッチング)
 ・エッチング液に金属不純物を混入しないこと。エッチング表面が荒れます。
 ・TMAHエッチングでは、エッチング前のシリコン表面にある自然酸化膜をかるくエッチング除去してから、TMAHエッチングを始めましょう。理由は、酸化膜はTMAHではほとんど溶けないので、エッチングのムラの原因になります。KOHでは無視できたこともTMAHでは問題になるので気を付けましょう。

図①-(4)-2 プロセスレシピチェック結果の例



図①-(4)-3 プロセスレシピの実行指示と最終結果形状の表示例



図①-(4)-4 解析結果データの一覧表示とプロセス途中結果および2Dエミュレータ結果の例

(5) 解析条件設定

材料物性データや境界条件など各種解析ソフトの解析条件を定義・変更する機能を開発する。これらの開発作業のうち、平成18年度の研究開発では下記の成果を得た。

<成果>

平成17年度の開発作業を踏まえて、機構解析の解析機能種類の選択、解析条件データの再利用にかかわる指示、対象モデルファイルの選択、材料物性パラメータ値の設定、拘束条件や荷重条件などの境界条件の設定、数値計算制御パラメータの設定からなる、機構解析種類の解析条件設定GUI、ウェットエッチングシミュレータおよびドライエッチングシミュレータの解析条件設定GUIの開発を終了した。

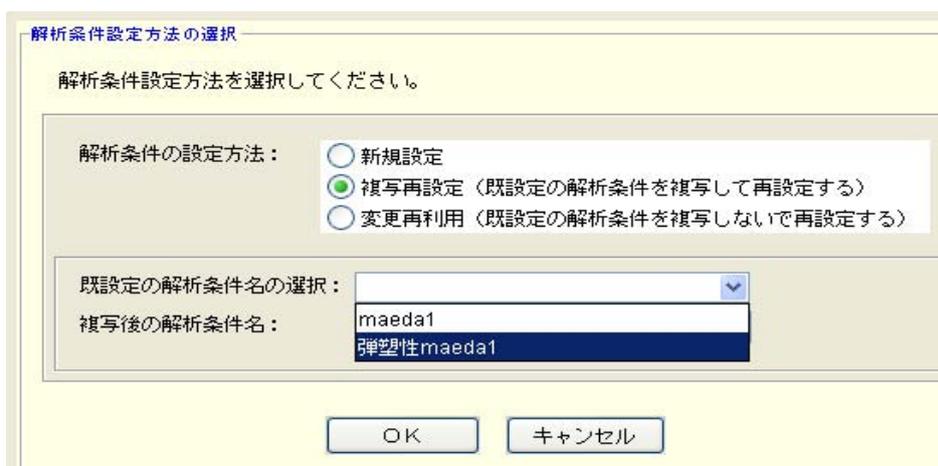
図①-(5)-1 は機構解析の操作の流れと、解析種類の選択画面メニューを示す。

図①-(5)-2 は解析条件の設定方法（新規設定、複写再設定、変更再設定）の選択画面を示す。

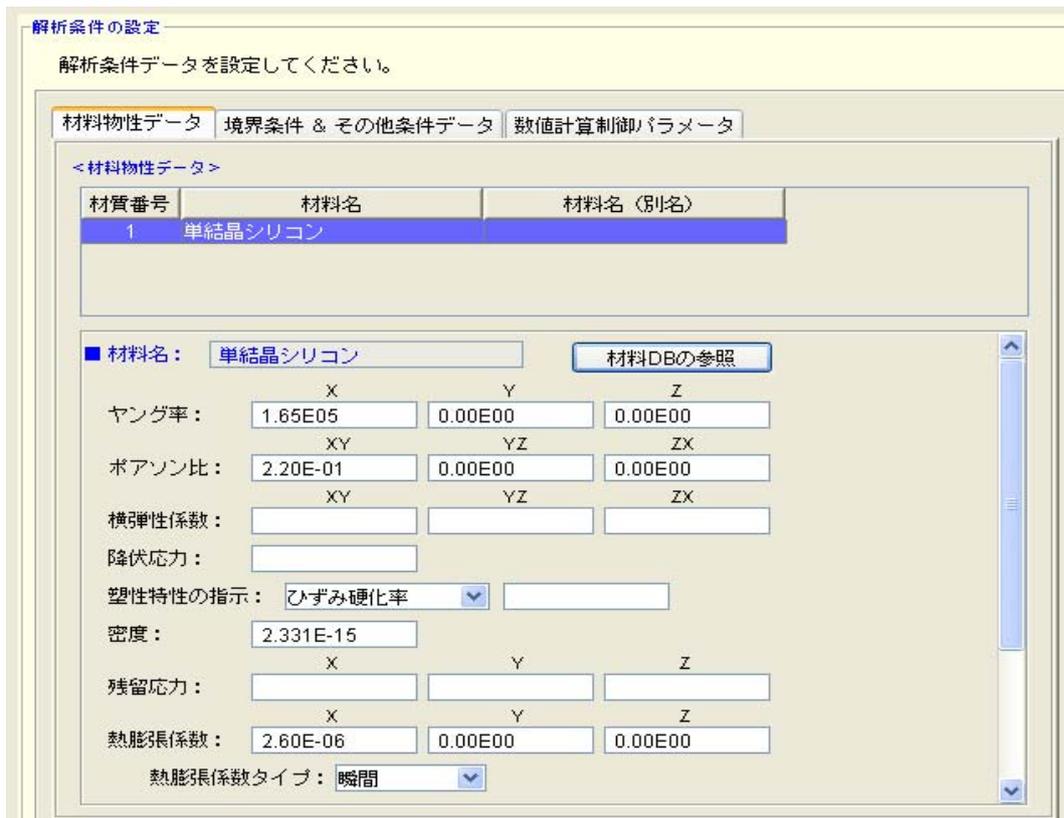
図①-(5)-3 は選択された解析種類で使用する材料物性パラメータの設定画面の例を示す。
 図①-(5)-4 は選択された解析種類で指示される境界条件の設定画面例を示す。
 図①-(5)-5 は選択された解析種類で指示される計算制御パラメータの設定画面例を示す。
 図①-(5)-6 はウェットエッチングシミュレータの解析条件設定画面を示す。
 図①-(5)-7 はドライエッチングシミュレータの解析条件設定操作画面の一部を示す。



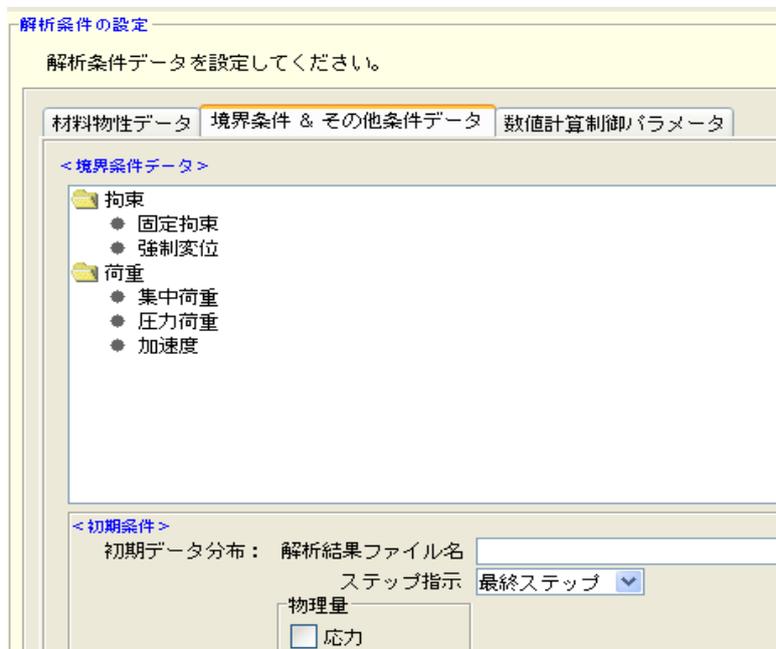
図①-(5)-1 機構解析の操作の流れと解析種類選択画面



図①-(5)-2 解析条件設定方法の選択画面



図①-(5)-3 解析条件の材料物性データの設定画面



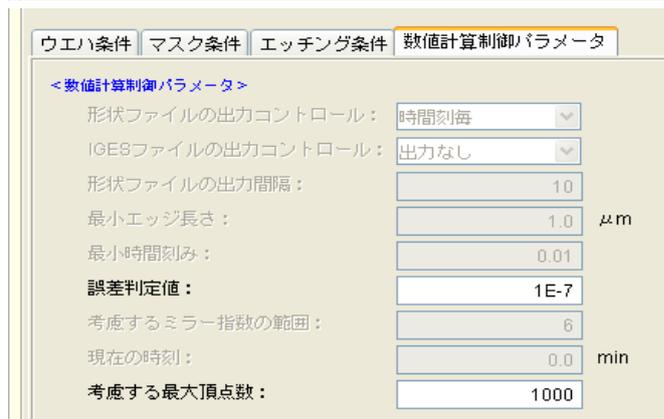
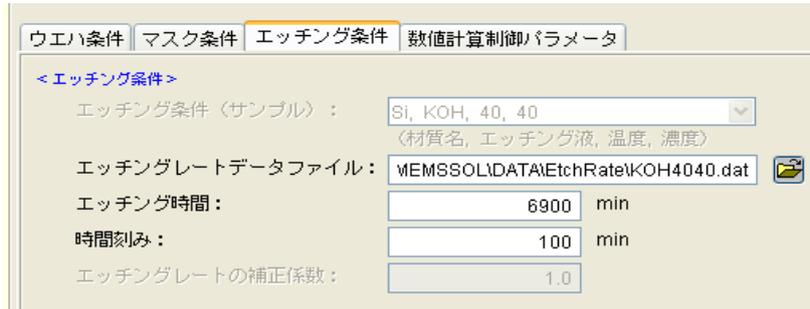
図①-(5)-4 解析条件の境界条件設定画面

解析条件の設定

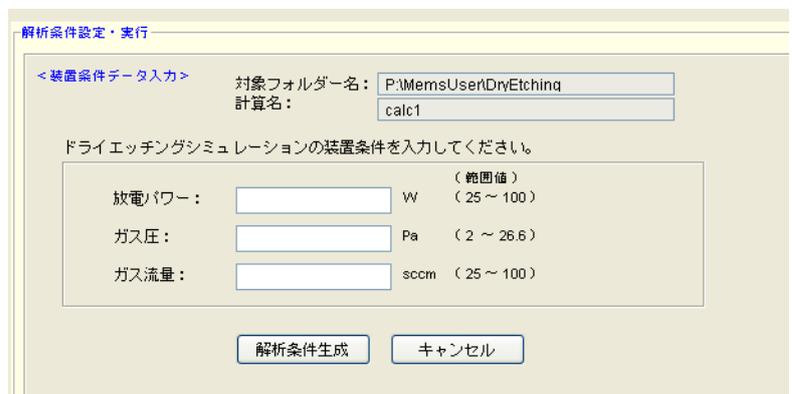
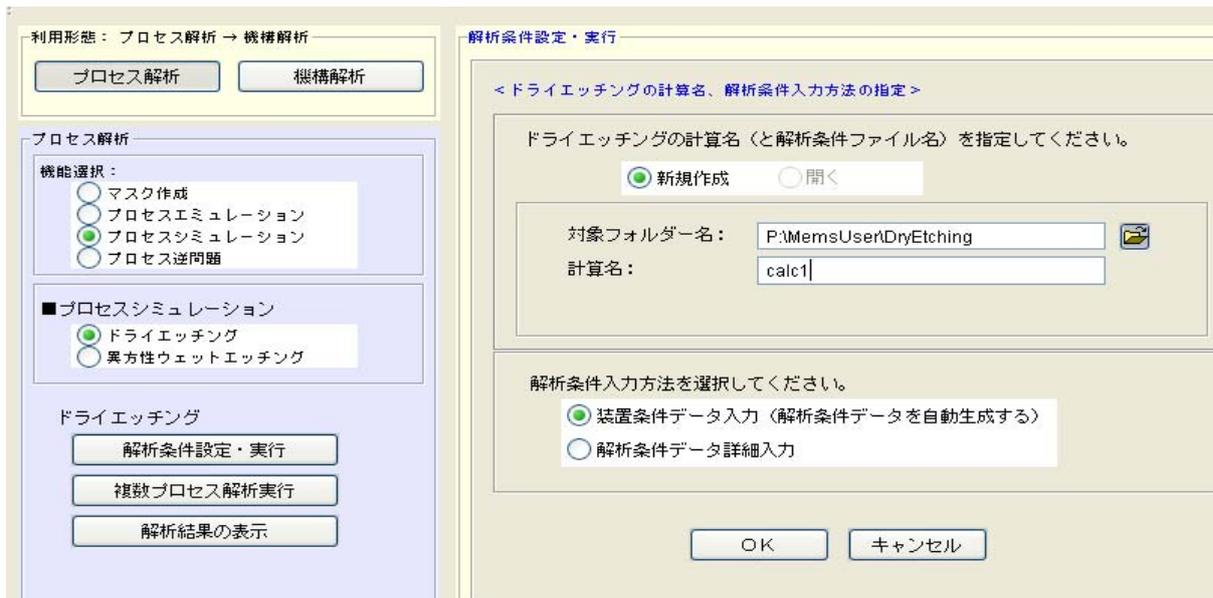
解析条件データを設定してください。

材料物性データ	境界条件 & その他条件データ	数値計算制御パラメータ
<数値計算制御パラメータ>		
時刻依存のステップ数指示:	時刻依存テーブル	(時刻依存の解析ではテーブル入力が必要です!)
重力考慮指示:	考慮しない	
オプション		
ステファンボルツマン定数:	1.3806503E-11	
重力 大きさ:	9.80665E6	方向: X 0 Y 0 Z -1
絶対零度:	273.15	
シェル仮想剛性:	0.001	
連立方程式ソルバー:	スカイライン法	
バンド幅最小化:	RCM法	
非線形解析手法:	Newton-Raphson法	
幾何学的非線形(大変形)の有無:	あり	
収束判定方法:	残差の相対値	
収束判定条件:	0.001	
収束計算最大反復回数:	50	

図①-(5)-5 解析条件の計算制御パラメータの設定画面



図①-(5)-6 ウェットエッチングシミュレータの解析条件設定画面



図①-(5)-7 ドライエッチングシミュレータの解析条件設定画面

(6) 解析結果表示

解析ソフトの出力データを形状、ベクトル表現、グラフ、等高線により表示する機能を開発する。これらの開発作業のうち、平成 18 年度の研究開発では下記の成果を得た。

〈成果〉

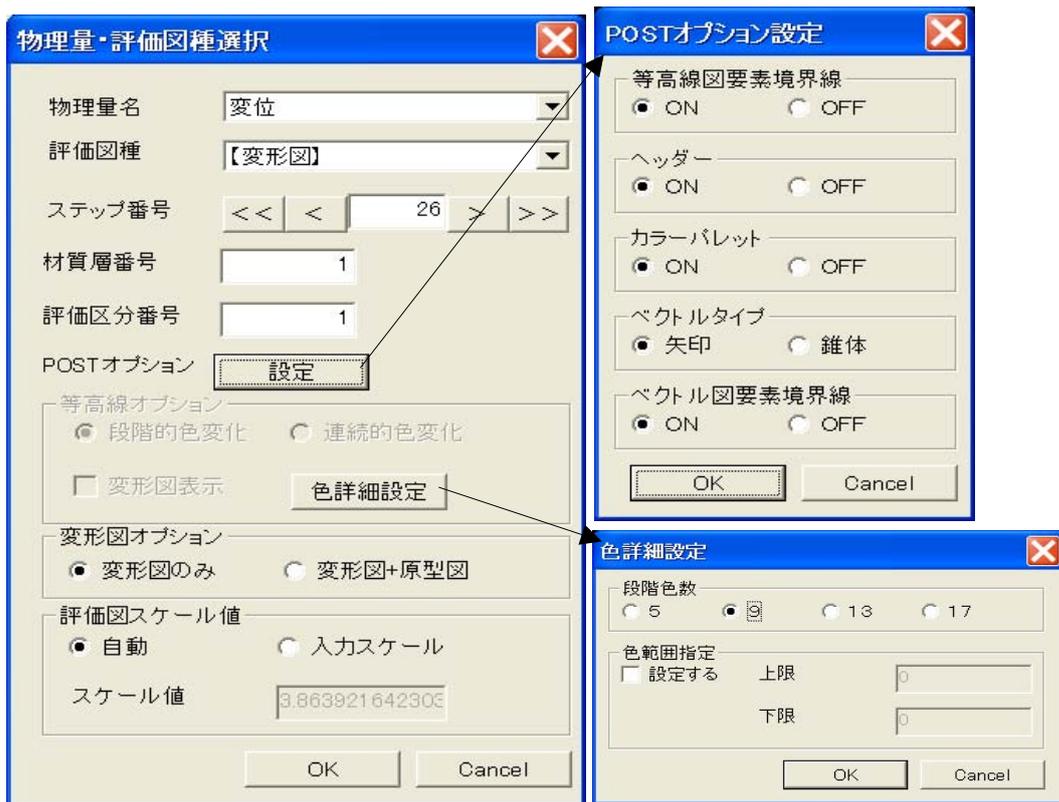
平成 17 年度の開発作業を踏まえて、解析結果の評価図と物理量の選択 GUI、等高線図、変位図、ベクトル図、テンソル図、評価領域の材質番号限定、材料構成図、リスト出力、グラフ出力、アニメ用画像出力機能、の開発を終了した。また、機構解析ソフトとのインターフェース機能の開発を終了した。

図①-(6)-1 は物理量と評価図選択 GUI 画面を示す。

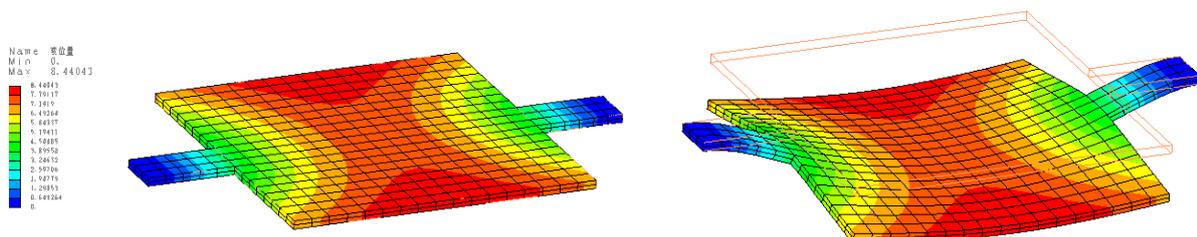
図①-(6)-2 は 3 次元応力解析結果の等高線図例を示す。

図①-(6)-3 は 3 次元応力解析結果の変形図およびベクトル図の例を示す。

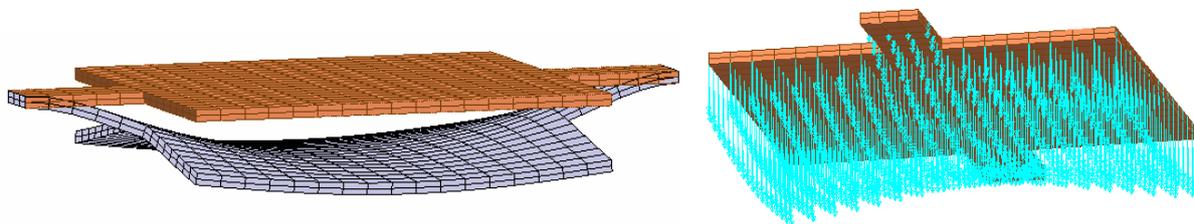
図①-(6)-4 は電解解析結果の等高線の断面評価図の例を示す。



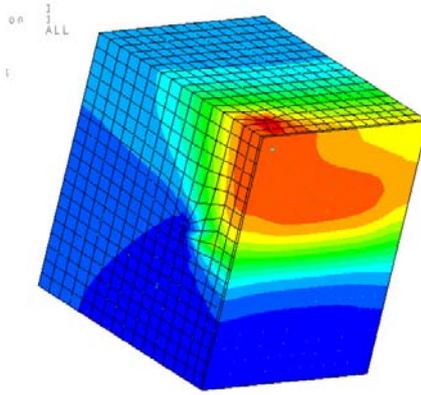
図①-(6)-1 物理量と評価図選択 GUI 画面



図①-(6)-2 応力解析結果の等高線評価図 (右図は変形図上の等高線表示)



図①-(6)-3 応力解析結果の変形図とベクトル図



図①-(6)-3 電解解析結果の等高線断面評価図

(7) 解析ソフト、CADソフトとのデータコンバータ

MEMS開発において使用される他の解析ソフトやCADソフトとのデータ交換機能を開発する。

これらの開発作業のうち、平成18年度の研究開発では下記の成果を得た。

<成果>

平成17年度の開発作業を踏まえて、CADの形状データおよび解析用メッシュデータのデータコンバータ機能に関しては、IGES入出力機能、GDSII入出力機能、DXF入出力機能、ABAQUS入出力機能、MARC入出力機能、NASTRAN入出力機能の開発を終了した。

図①-(7)-1はミラー可動部形状データをIGES出力機能により出力したテキストデータの例を示す。

図①-(7)-2はミラー可動部形状の格子データをABAQUS出力機能により出力したテキストデータの例を示す。

```

This IGES file is generated by IGES(Nihon Unisys Excelutions, Ltd.).      S0000001
1H,,1H;,4Hcdgt,7Hunknown,37HNihon Unisys Excelutions Ltd. MemsONE,      G0000001
19HEXCHANGE 2R1-11F.PC,32,38,7,38,14,7Hunknown,1.00000000000000,9,2HUM, G0000002
4,1.00000000000000,13H070501.134334,0.01000000000000,500.000000000000, G0000003
7Hunknown,7Hunknown,8,7,13H070501.134334;                                G0000004
  108      1      0      5      1      217      0      00000000D0000001
  108      1      3      1      1      0      0      D0000002
  110      2      0      1      1      217      0      00001000D0000003
  110      1      3      1      0      0      0      D0000004
  . . . 略 . . .
  102      1      3      1      0      0      0      D0000210
  102     106      0      5      1      217      0      00001000D0000211
  102      1      3      1      0      0      0      D0000212
  102     107      0      5      1      217      0      00001000D0000213
  102      1      3      1      0      0      0      D0000214
  102     108      0      5      1      217      0      00001000D0000215
  102      1      3      1      0      0      0      D0000216
  410     109      0      0      0      0      0      00000010D0000217
  410      0      0      1      0      0      0      D0000218
  406     110      0      0      0      0      0      00000000D0000219
  406      0      0      1      15     0      0      D0000220
108,0.,-.1D+1,0.,-.725D+3,181,-.25D+2,.725D+3,.2905D+3,0.,.0,0;    0000001P0000001
110,.25D+2,.725D+3,.2905D+3,.25D+2,.725D+3,.3D+3,0,0;              0000003P0000002
110,.25D+2,.725D+3,.3D+3,-.25D+2,.725D+3,.3D+3,0,0;              0000005P0000003
110,-.25D+2,.725D+3,.3D+3,-.25D+2,.725D+3,.2905D+3,0,0;          0000007P0000004
  . . . 略 . . .
  110,.175D+3,.825D+3,.3D+3,.175D+3,.1175D+4,.3D+3,0,0;            0000175P0000088
  110,.175D+3,.1175D+4,.3D+3,-.175D+3,.1175D+4,.3D+3,0,0;          0000177P0000089
  110,-.175D+3,.1175D+4,.3D+3,-.175D+3,.825D+3,.3D+3,0,0;          0000179P0000090
  102,4,3,5,7,9,0,0;                                                  0000181P0000091
  102,4,13,15,17,19,0,0;                                              0000183P0000092
  . . . 略 . . .
  102,4,163,165,167,169,0,0;                                          0000213P0000107
  102,4,173,175,177,179,0,0;                                          0000215P0000108
  410,0,.1D+1,0,0,0,0,0,0,0,1,219;                                    0000217P0000109
  406,1,1H1,0,0;                                                       0000219P0000110
S0000001G0000004D0000220P0000110                                    T0000001

```

図①-(7)-1 IGES データの出力リスト例

```

*HEADING
ミラー可動部
*NODE
1, 1.0714289665222168E+001, 7.3676470947265625E+002, 2.9050000000000000E+002
2, -1.0714289665222168E+001, 7.3676470947265625E+002, 2.9050000000000000E+002
3, 1.0714289665222168E+001, 7.3676470947265625E+002, 3.0000000000000000E+002
. . .略. . .
4823, 3.5999729156494141E+001, 1.1680080566406250E+003, 2.9875790405273437E+002
4824, 3.5699218750000000E+001, 1.1687230224609375E+003, 2.9807751464843750E+002
*ELEMENT,TYPE=C3D8
1,19,21,22,20,35,36,37,38
2,21,9,10,22,36,31,33,37
3,20,22,11,12,38,37,27,29
. . .略. . .
3606,2412,2424,2677,2658,2007,2408,2669,2643
3607,2424,2422,2678,2677,2408,2407,2671,2669
3608,2658,2677,2680,2660,2643,2669,2670,2644
3609,2677,2678,2679,2680,2669,2671,2672,2670
*ELSET,ELSET=SOLID_1
1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,
17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,
33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,
. . .略. . .
3544,3545,3546,3547,3548,3549,3550,3551,3552,3553,3554,3555,3556,3557,3558,
3559,3560,3561,3562,3563,3564,3565,3566,3567,3568,3569,3570,3571,3572,3573,
3574,3575,3576,3577,3578,3579,3580,3581,3582,3583,3584,3585,3586,3587,3588,
3589,3590,3591,3592,3593,3594,3595,3596,3597,3598,3599,3600,3601,3602,3603,
3604,3605,3606,3607,3608,3609
*MATERIAL,NAME=MAT_1
*ELASTIC
2.1000000000000000E+004, 3.0000001192092896E-001, 3.5000000000000000E+004
*SOLID SECTION,ELSET=SOLID_1,MATERIAL=MAT_1

**MAT_1=単結晶シリコン

```

図①-(7)-2 ABAQUS データの出力例

(8) データベースインターフェース

材料・プロセスデータベースおよび知識データベースとのインターフェース機能を開発する。
これらの開発作業のうち、平成 18 年度の研究開発では下記の成果を得た。

<成果>

平成 17 年度の開発作業を踏まえて、材料・プロセスデータベースおよび、知識データベースとのインターフェース用ライブラリの開発を終了した。

図①-(8)-1 は機構解析の解析条件設定にて利用される、材料名毎の物性値の参照 GUI 例を示す。



図①-(8)-1 材料名毎の物性値の参照 GUI 例

(9) プラグイン機能とスーパーバイザー機能

外部ソフトやユーザが独自に開発したソフトを本プロジェクトの解析ソフトとして追加することを可能とするプラグイン機能を研究・開発する。また、上述のフレームワーク機能、および解析ソフトを総合的に管理し、実行を制御するためのスーパーバイザー機能を開発する。

これらの開発作業のうち、平成 18 年度の研究開発では下記の成果を得た。

<成果>

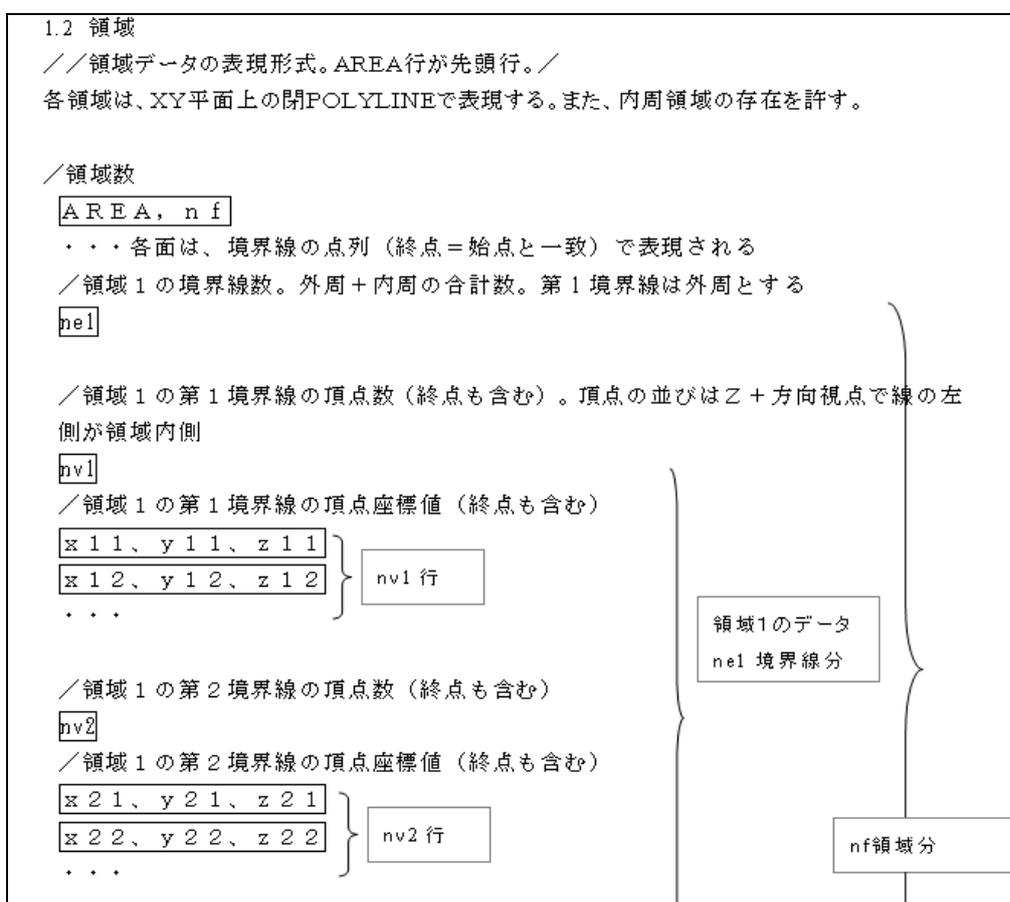
平成 17 年度の開発作業を踏まえて、プラグイン機能に関しては、プラグインとして公開される

主要インターフェースファイル形式の詳細仕様を決定し、スーパーバイザー機能に関しては、MemsONE メイン画面を主とするフレームワーク機能と各種解析ソフトを連携させる全体制御にかかわる骨子機能の開発を終了した。

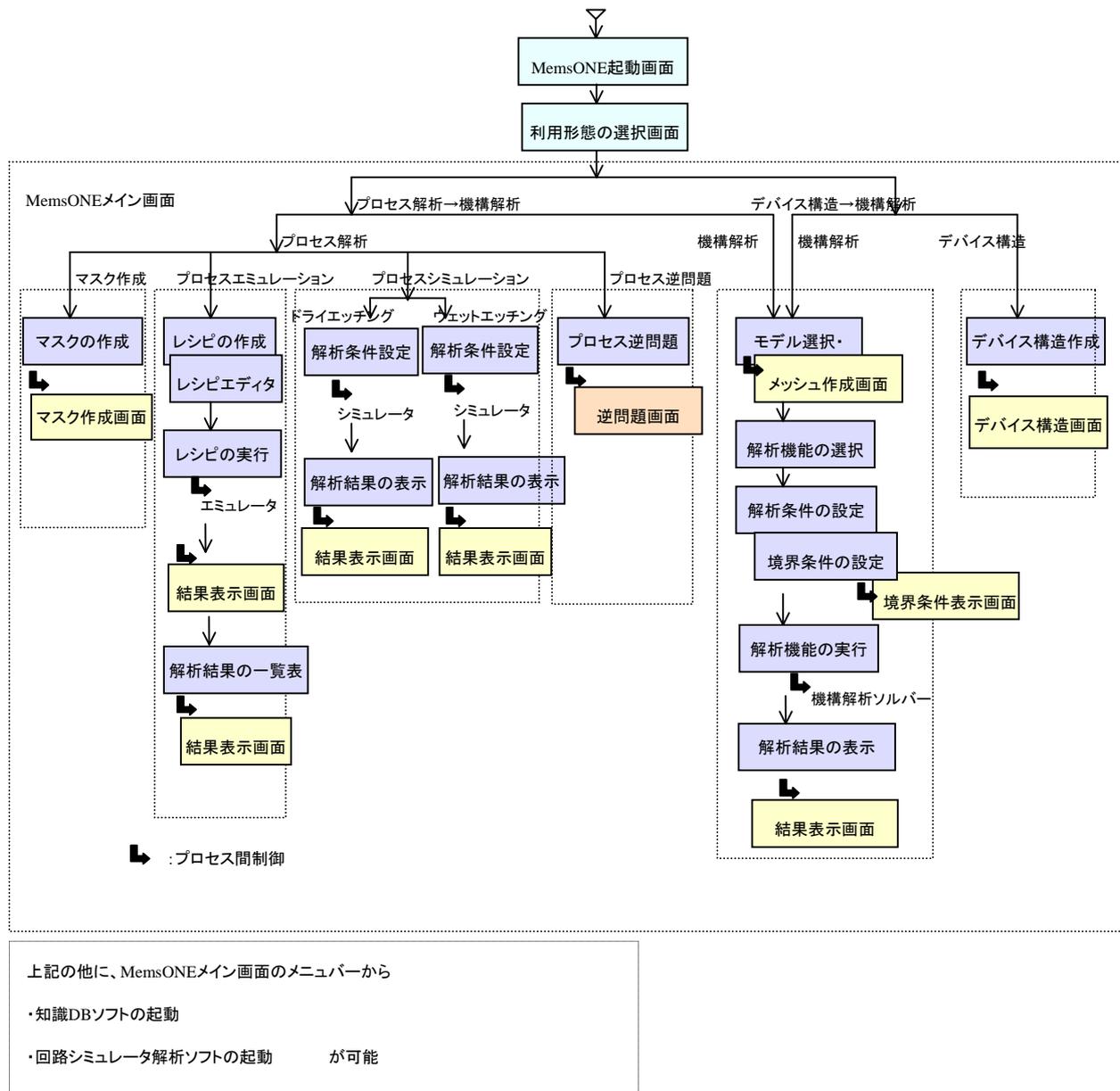
公開予定インターフェースファイルとしては、機構解析ソフトおよびプロセス解析ソフトの解析結果ファイルに関し、それぞれ、「MemsONE 標準 解析結果ファイル解説書」および「MemsONE 機構解析 解析データファイル解説書」としてインターフェース仕様書を取りまとめた。また、プロセス解析ソフトにおけるマスクデータ、および、回路シミュレータにおけるソリッドデータをフレームワークと受け渡しするデータ形式（SSL形式）も公開する。

図①-(9)-1 は SSL 形式の仕様書の一部を示す。

図①-(9)-2 はスーパーバイザーの制御対象となる MemsONE の全体画面遷移図を示す。



図①-(9)-1 SSLデータのインターフェース仕様の一部



図①-(9)-2 MemsONE 主要画面遷移図

3. 4 「②機構解析シミュレータの開発」

担当：みずほ情報総研(株)

(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)

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、作製プロセス時の熱応力の問題等においても力学解析は必要な解析機能である。

解析機能としては、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する。また、材料物性の等方性、異方性、金属薄膜に良くある弾塑性等の材料特性、温度依存性を考慮する。

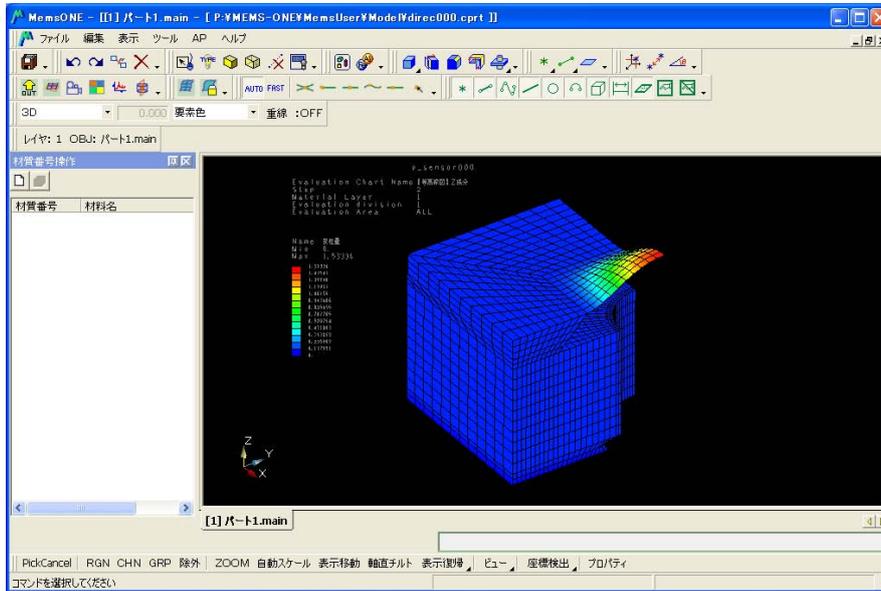
これらの開発作業のうち、平成18年度の研究開発では下記の成果を得た。

〈成果〉

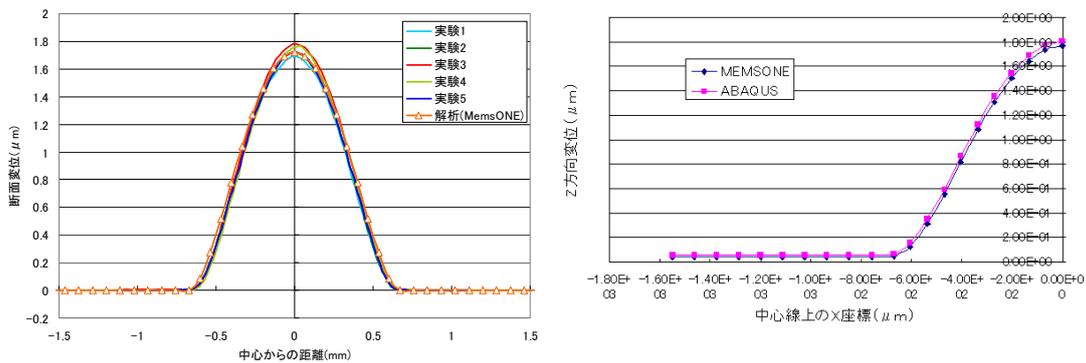
力学解析モジュールとして、1)弾塑性解析、2)熱弾塑性解析、3)モード解析、4)調和応答解析、5)時刻歴応答解析のそれぞれの解析機能の開発を完了した。弾塑性解析における材料非線形モデルでは、Prandtl-Reuss 構成式 (Mises 降伏関数を塑性ポテンシャルとする流れ則) を採用し、大変形解析における幾何学的非線形モデルでは、更新ラグランジュ形式の定式化を採用した。弾塑性のモデルとしては、本件で採用したひずみ増分理論 (流れ則モデル) の他に全ひずみ理論に基づいたモデルが知られているが、増分理論の方が適用範囲は広く、MEMS デバイスの加工プロセスのような複雑な荷重を受ける塑性変形の記述に適していると考えられる。また、大変形の定式化としては、本件で採用した更新ラグランジュ形式の他にトータルラグランジュ形式が知られているが、ひずみが大きい場合は更新ラグランジュ形式の方が適しており、また増分理論に基づいた定式化が容易なために、本件で採用した弾塑性のモデルとの組み合わせに適していると考えられる。構成式の時間積分については後退オイラー法を基本とした弾性予測子・半径修正子法を採用し、材料非線形および幾何学的非線形の解法では Newton-Raphson 法を採用した。後退オイラー法による構成式の時間積分は、前進オイラー法に比べて増分ステップ終了時点でより高精度に構成式を満足していると言え、Newton-Raphson 法の収束性の向上に適していると考えられる。時刻歴応答解析における時間発展の解法については Newmark の β 法を採用した。時刻歴応答解析および調和応答解析における減衰モデルとして、比例粘性減衰 (レイリー減衰) を基本とした。マトリクスソルバーについては、弾塑性解析において非常に薄い構造物の剛性マトリクスのような悪条件の行列に対する対応という観点で安定している直接法であるスカイライン法を採用し、固有値解析ではサブスペース法を採用した。マトリクスソルバーに関連したメモリ節約と高速化のための前処理機能として、RCM 法による節点番号の付け替え (リナンバリング・リオーダーリング) 機能を付加した。全ての解析機能に適用可能な要素タイプとして、6面体ソリッド要素、4面体ソリッド要素、4節点積層シェル要素、3角形平面ひずみ要素、4角形平面ひずみ要素、3角形平面応力要素、4角形平面応力要素、3角形軸対称要素、4角形軸対称要素のそれぞれの要素モデルの開発を完了した。積層シェル要素では、シェ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。

力学解析モジュールの機能検査および機能検証を実施し、またフレームワークソフトとの結合検証テストを実施した。機能検証として、例えば圧力センサの弾塑性解析を実施した。図②-(1)-1は圧力センサの弾塑性解析の計算結果についてフレームワークソフトを適用して表示したものであり、変形図の上に相当応力のコンター図を重ねたものである。フレームワークソフトから検証計算の結果表示が正しく実現できており、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。本例題では、圧力センサのダイヤフラム部分と台座部分をシェル要素と6面体ソリッド要素のそれぞれでモデル化し、センサ内部に圧力荷重を課してダイヤフラムが変形するという例題を解析した。図②-(1)-2に示すように力学解析モジュールの解析結果は実験結果および商用

コードの解析結果のそれぞれと十分良く一致しており、本プロジェクトの目標を達成できた。(実験結果および商用コードの解析結果は松下電工殿から提供された)



図②-(1)-1 圧力センサの弾塑性解析 (フレームワークソフトによる解析結果の表示)



図②-(1)-2 圧力センサの弾塑性解析 (左図：実験と MemsONE 解析の比較、右図：商用コード解析と MemsONE 解析の比較)

(2) 電磁界解析

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、静電界解析等の電磁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、周波数応答解析磁界解析の機能を開発する。

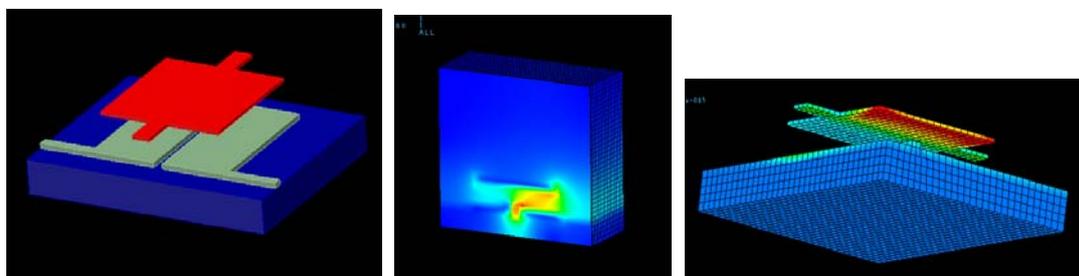
これらの開発作業のうち、平成18年度の研究開発では下記の成果を得た。

〈成果〉

電磁界解析の全8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、結合検証テスト及び統合検証テストを完了した。

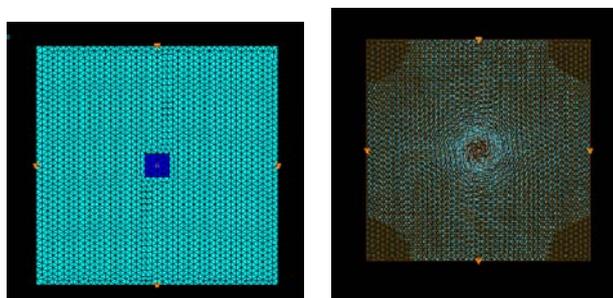
フレームワークの機能を用いて電界解析を実行した結果を図②-(2)-1に示す。この解析ではマ

ルチプロセスエミュレータで作成したソリッドモデル（ミラーデバイス）にフレームワークのメッシュ生成機能を使用してメッシュを作成し、電界解析を実行した計算結果を表示したものである。これにより電界解析の機能がフレームワークと統合して動作することを確認した。またここで用いた材料物性値（誘電率）は材料データベースから検索した値を用いており、材料・プロセスデータベースと統合させた動作も確認した。

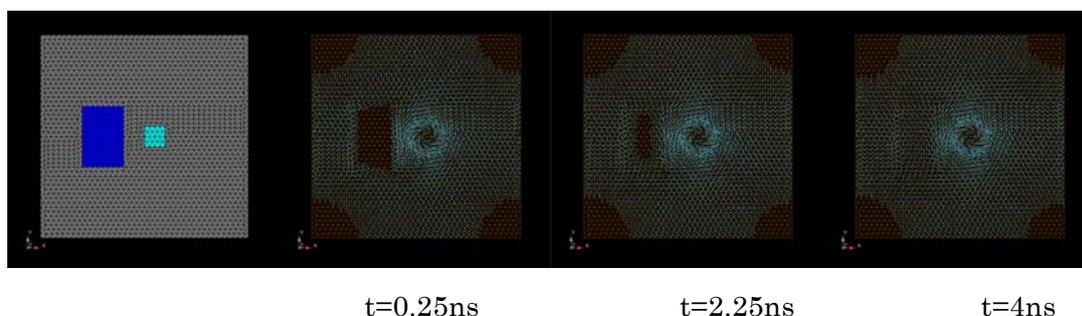


図②-(2)-1 電界解析の計算例（左から計算体系、電界強度断面図、静電力）

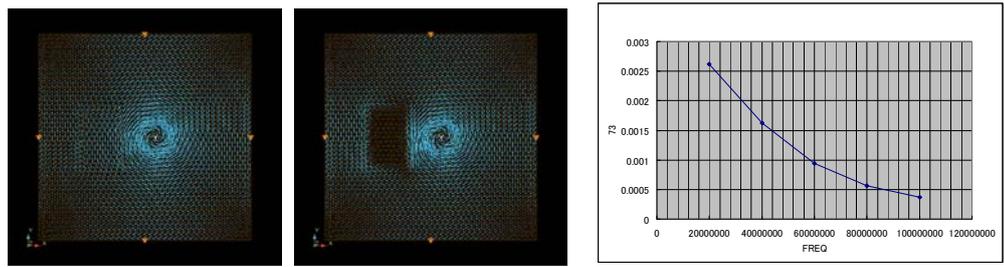
また非線形静磁界解析、非線形過渡磁界解析、線形交流磁界解析、周波数応答解析磁界解析、非線形定常時間周期磁界解析、電流解析（線形交流）の計算例をそれぞれ図②-(2)-2～図②-(2)-6に示す。過渡磁界解析ではステップ状の電流を印加した直後の導体内部への磁束密度の浸透の様子を示してある。線形交流磁界解析と周波数応答解析は導体内部の磁束密度の様子を周波数を変化させて示した。非線形時間周期磁界解析はステップ状の時間周期電流によって発生する周囲の磁束密度を示してある。電流解析（線形交流解析）は2枚の電極の接点部に交流電圧を印加したときの静電ポテンシャルと電流密度ベクトルの振幅の様子を示してある。いずれも物理的に妥当な結果である。これらはフレームワークソフトから起動した実行結果を示しており、フレームワークソフトと統合して動作することを確認した。



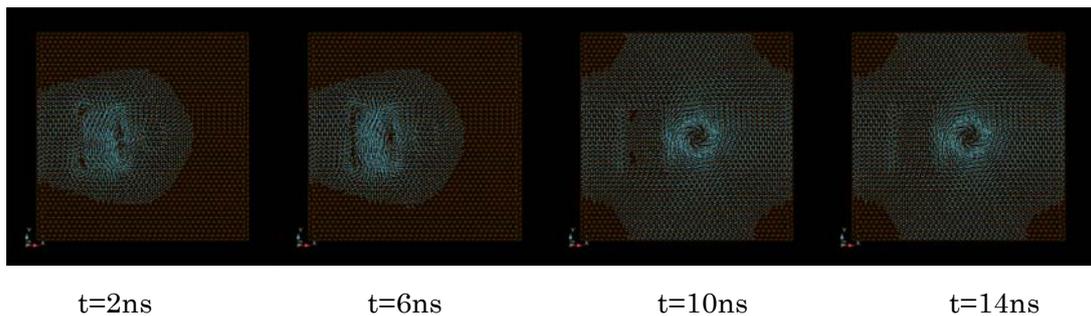
図②-(2)-2 非線形静磁界解析の計算例（材質分布と磁束密度ベクトル）



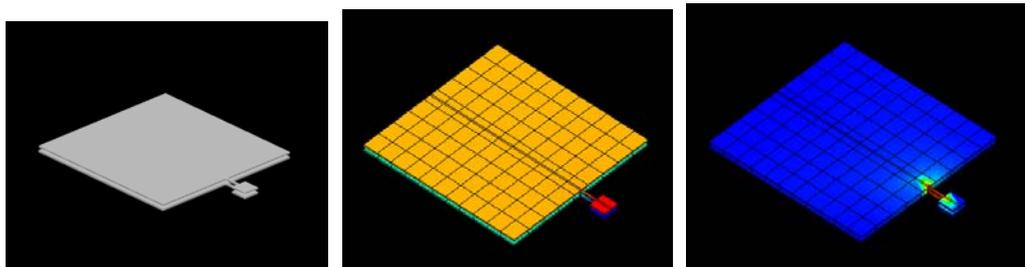
図②-(2)-3 非線形過渡磁界解析の計算例（材質分布と各時間ステップの磁束密度ベクトル）



1MHz 1GHz 導体内部の磁束密度強度の周波数応答
 図②-(2)-4 線形交流磁界解析・周波数応答解析の計算例



t=2ns t=6ns t=10ns t=14ns
 図②-(2)-5 非線形定常時間周期磁界解析の計算例



図②-(2)-6 電流解析（線形交流）の計算例（左から計算体系、静電ポテンシャル、電流密度）

(3) 圧電解析

圧電材料は電圧が負荷されると歪み、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、発振器などのMEMSデバイスが開発されている。

圧電材料を用いたMEMS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1) 力学解析（応力・ひずみ）の静的解析機能との連成解析を行う機能を開発する。

これらの開発作業のうち、平成18年度の研究開発では下記の成果を得た。

<成果>

圧電解析モジュールでは、圧電方程式（応力・ひずみ・電気変位・電場の相互作用を記述した方程式）を通じて、②-(1)で説明した弾塑性解析機能と静電場解析機能とを組み合わせた強連成解析機能の開発を完了した。応力場と静電場の強連成解析については、以下の応力場の基礎方程式系と静電場の基礎方程式を同時に離散化している。

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

$$\frac{\partial d_i}{\partial x_i} = 0$$

応力場と静電場の連成による相互作用は、応力 σ_{ij} とひずみ ε_{ij} と電気変位 d_i と電場 $-\partial\phi/\partial x_i$ の間に成り立つ関係を圧電定数 e_{ijk} と誘電率 s_{ij} を用いて以下のように記述した構成式によってモデル化した。

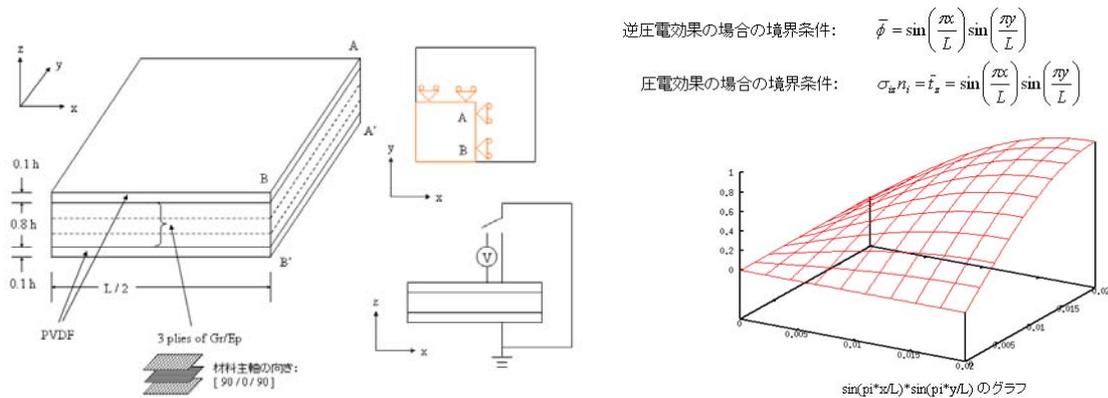
$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} + e_{ijk} \frac{\partial \phi}{\partial x_k}$$

$$d_i = e_{kli} \varepsilon_{kl} - s_{ij} \frac{\partial \phi}{\partial x_j}$$

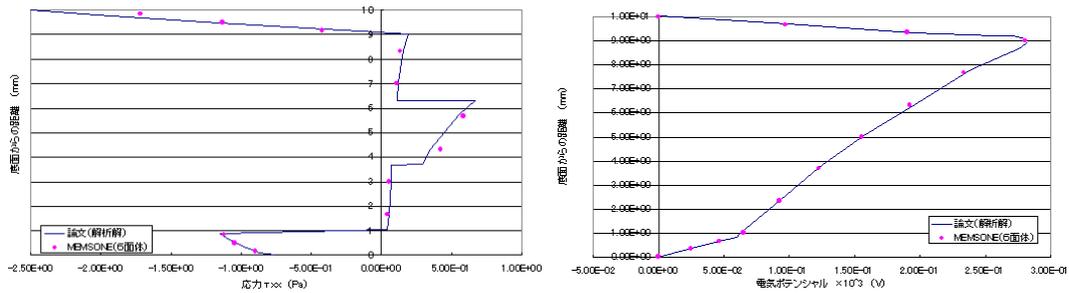
構成式のモデル化は上述のようなE形式を基本としているが、入力データとして圧電定数を与える場合は、E形式の他にD形式による入力にも対応した。上述の構成式を適用した強連成解析では、圧電材料に電圧が印加されると応力が生じて変形するという逆圧電効果と、荷重を負荷して変形させると電気変位が生じて電位が励起されるという圧電効果を同時に解析することができ、圧電セラミクスを用いたセンサやアクチュエータなどの MEMS デバイスの解析に適していると考えられる。

応力場の解析モデルや解析手法、要素タイプは②-(1)の力学モジュールの場合と同様である。

圧電解析モジュールの機能検査および機能検証を実施した。機能検査としては、論文 (Journal of Sound and Vibration, 1999, 266 (3), 519-547) で実施された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のそれぞれの例題を実施した。図②-(3)-1 は本件の機能検査で用いたラミネートプレートの構造と境界条件を示している。図②-(3)-2 から理論解と解析結果は十分良く一致している。

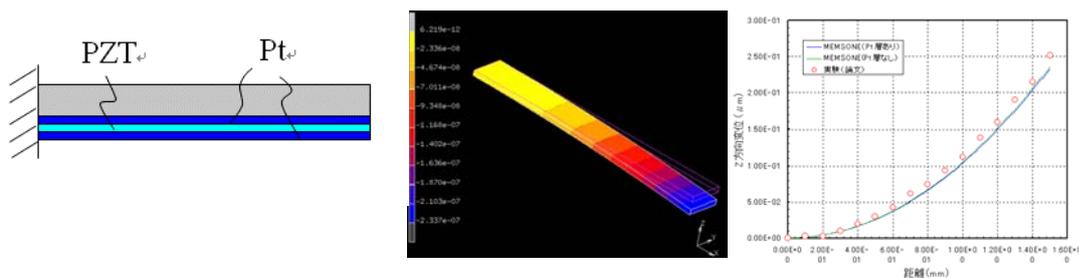


図②-(3)-1 圧電解析の機能検査その1 (左: ラミネートプレートの構造、右: 境界条件)



図②-(3)-2 圧電解析の機能検査その2 (左：逆圧電効果の理論解と MemsONE 解析結果の比較、
右：圧電効果の理論解と MemsONE 解析結果の比較)

また機能検証としては、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。図②-(3)-3 は本件の機能検証で用いたカンチレバーの構造と解析結果の変形図、実験結果と解析結果の比較を示している。実験結果と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できた。(実験結果は京都大学の神野先生の論文から引用した)



図②-(3)-3 圧電解析の機能検証 (左：カンチレバーの構造、中央：解析結果、
右：実験結果と MemsONE 解析結果の比較)

(4) 伝熱解析、熱変形解析

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などの信頼性に影響を与える可能性がある。これは、MEMSが単なるシリコンの構造体ではなく、表面に形成される薄膜や接合される異種材料の熱膨張係数の相違や接合状態によって、構造体に複雑な熱応力が加わるためである。また、MEMSスケールでは熱時定数が小さくなるために熱変化が非常に速い現象となり、構造体中の温度分布の時間変化が構造体の変形をより複雑にしている。

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。したがって、本モジュールでは、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する。

これらの開発作業のうち、平成18年度の研究開発では下記の成果を得た。

<成果>

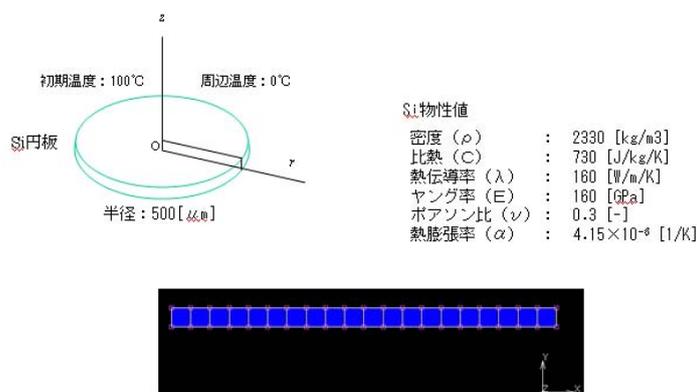
熱伝導解析モジュールとして、1)定常熱伝導解析、2)非定常熱伝導解析のそれぞれの解析機能の開発を完了した。定常解析の場合も非定常解析の場合もともに熱伝導率 λ_{ij} と比熱 c の温度依存性を考慮しており、また Neumann 型境界条件の一つとして熱放射を考慮している。このため、

熱伝導マトリクス、熱容量マトリクス、熱流束ベクトルが未知自由度である温度の関数になるという非線形性を有するが、この非線形問題の解法では Newton-Raphson 法を採用した。非定常解析における時間発展の解法についてはパラメタを含む一般化 Crank-Nicolson 法を採用した。

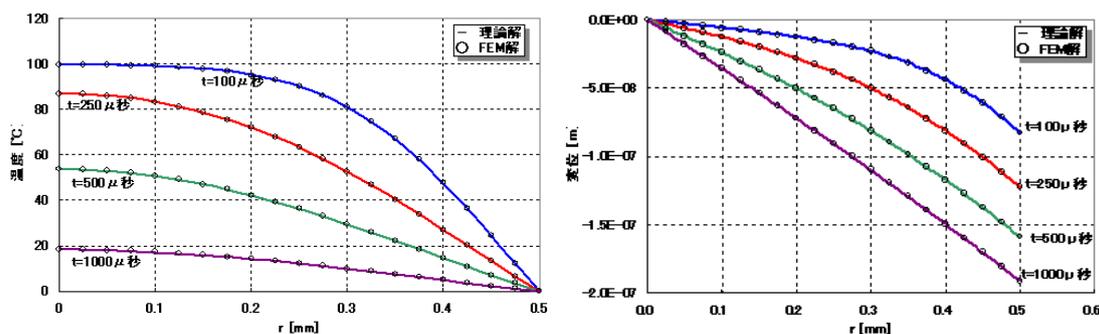
熱変形解析機能では、物性値の温度依存性と併せて熱弾塑性解析の機能の一部を開発した。具体的には、線膨張係数を用いて熱歪みをモデル化することで、熱ひずみによる等価節点荷重を付加する機能を開発した。線膨張係数としては、 $\alpha = d\epsilon/dT$ で定義される瞬間熱膨張係数と

$\alpha = (\epsilon - \epsilon_{REF}) / (T - T_{REF})$ で定義される平均熱膨張係数の二つがあるが、入力データとしてはどちらの定義の熱膨張係数を指定しても対応できるようにした。

熱伝導解析モジュール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。熱伝導解析モジュール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②-(4)-1 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②-(4)-2 から理論解と解析解は十分良く一致している。

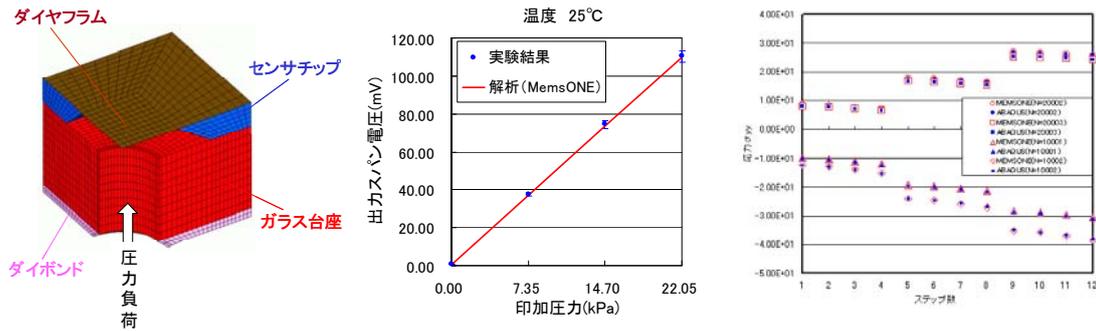


図②-(4)-1 熱伝導解析の機能検査その1 (モデル概要と解析条件)



図②-(4)-2 熱伝導解析の機能検査その2 (理論解と MemsONE 解析結果との比較)

また熱変形解析の機能検証としては、②-(1)と同様に圧力センサを解析対象とした熱弾性解析を実施した。本検証例題は、図②-(4)-3の左図のようにダイア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。図②-(4)-3の中央から実験結果と解析結果は十分良く一致しており、右図からも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。(実験結果および商用コードの解析結果は松下電工殿から提供された)



図②-(4)-3 熱変形解析の機能検証 (左：モデル概要、中央：実験結果と MemsONE 解析結果の比較、右：商用コードの解析結果と MemsONE 解析結果の比較)

(5) 雰囲気流体の影響解析

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する。

以上より、MEMS 構造物内微小隙間における流体抵抗の解析が可能となる。また、得られた減衰率を1) 力学解析の機能である振動解析に連成させることで振動構造を持つMEMSの構造設計が可能となる。

これらの開発作業のうち、平成18年度の研究開発では下記の成果を得た。

〈成果〉

雰囲気流体の影響評価解析モジュールに関して、本個別モジュールの機能開発を完了し、フレームワークソフトとの結合検証テスト及び統合検証テストを完了した。

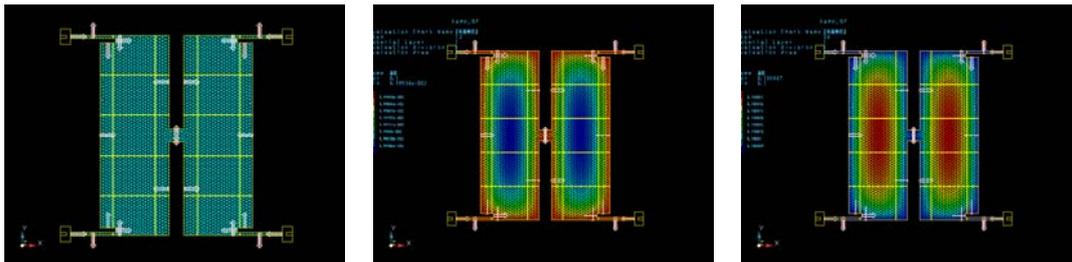
本個別モジュールでは、構造物内微小隙間における流体抵抗の解析を行い、振動構造を持つMEMSの構造設計が可能とするため、トライボロジー分野で標準的に用いられるレイノルズ方程式をベースとして開発を行った。レイノルズ方程式を解くことにより構造物表面にかかる流体力を評価し、その時系列から

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

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

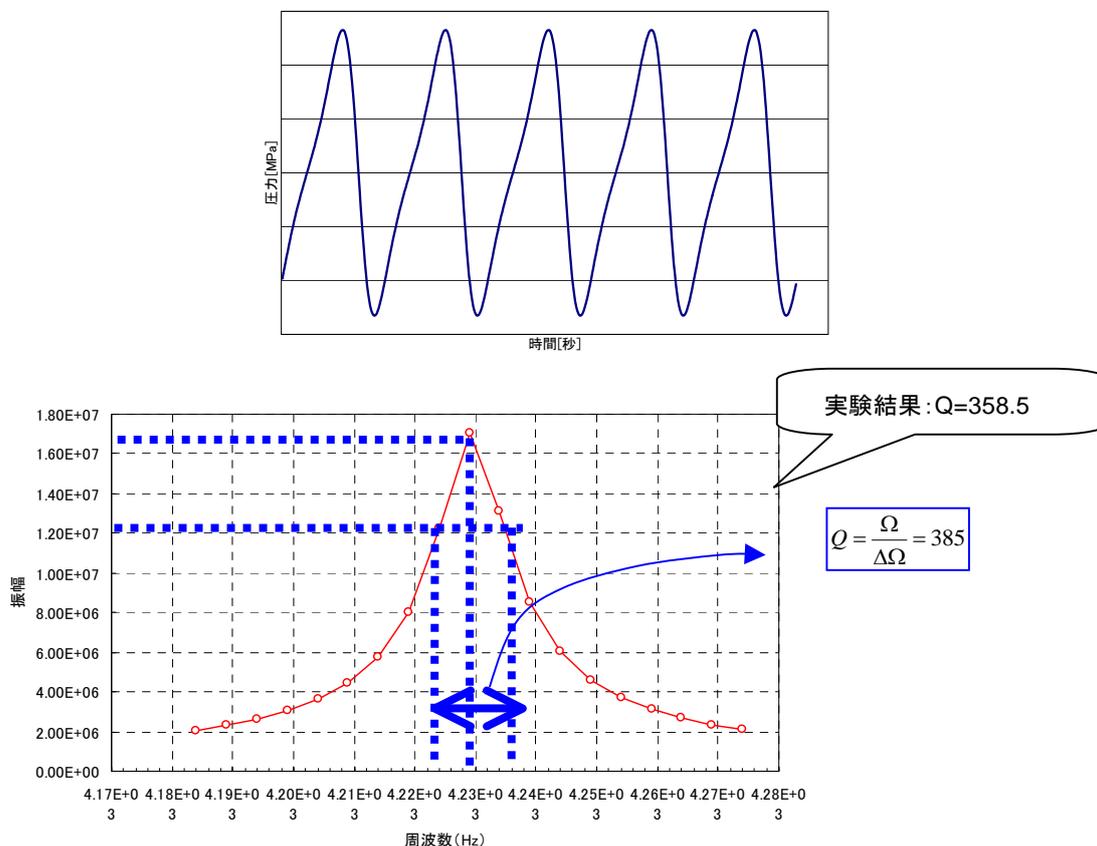
により、減衰率(c)、スプリング係数(k)を求める。ここで、A：振動振幅、T：周期、 ω ：角振動数、 $F(t)$ ：流体力の時系列である。本モジュールはレイノルズ方程式を基礎方程式としているため、連続体近似が可能(クヌッセン数が0.01以下)であり、構造物の大きさに比べて厚さが十分に薄い場合に適用が可能である。また、構造物の振動様式としては上下振動及び水平振動を考慮している。

図②-(5)-1にRFスイッチの解析例を示す。デバイスが上下に振動した場合の流体力(圧力)分布が評価できる。



図②-(5)-1 RFスイッチ（オムロン）解析例
 (左：メッシュ図、中：1/8周期後の圧力分布、右：3/8周期後の圧力分布)

図②-(5)-2にはミラーデバイスを対象とした解析例を示す。上図は構造物表面にかかる圧力の時系列である。この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が下図である。本解析から得られた Q 値は 385 であった。オリンパス殿の実験では 358.6 が得られており、7.4%の精度で Q 値が予測できた。但し、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。



図②-(5)-2 ミラーデバイス（オリンパス）解析例
 (上：流体圧力時系列、下：調和応答解析結果)

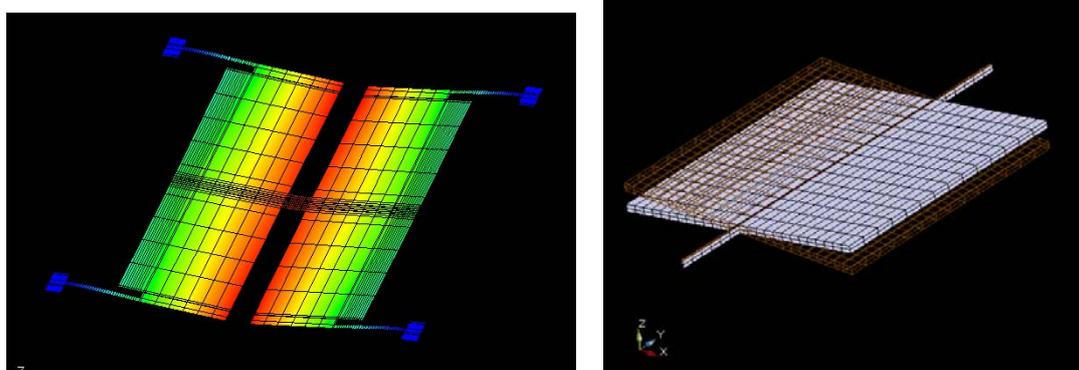
(6) 連成解析

前述 1) ～ 5) で開発した機構解析シミュレータの機能の連成解析を実現させる。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。

これらの開発作業のうち、平成 18 年度の研究開発では下記の成果を得た。

〈成果〉

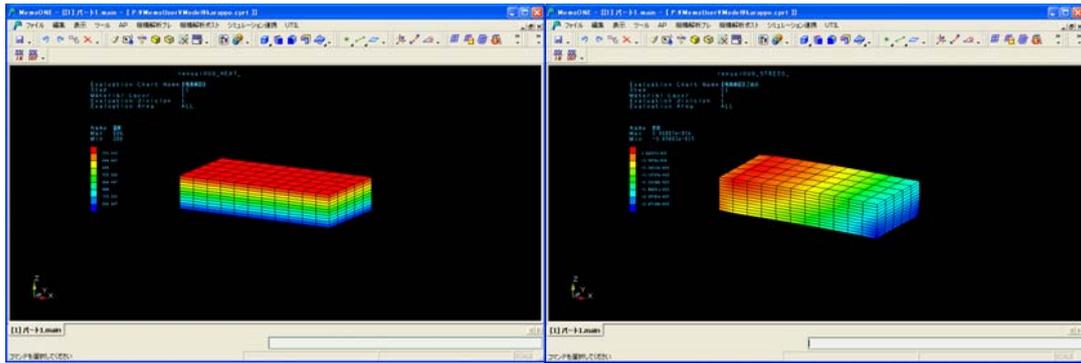
電界解析と弾塑性解析の連成解析の開発を完了し、フレームワークソフトとの統合検証テスト及び材料・プロセスデータベースとの統合検証テストを行った。図②-(6)-1 に RF スイッチとマイクロミラーに対する計算結果例を示す。いずれも電界解析ソフトで求めた静電力を弾塑性解析ソフトに自動的に引渡し、変形後の電界を再計算、収束するまで反復計算した結果である。いずれもフレームワークソフトと統合して動作することを確認した。



図②-(6)-1 電界解析と弾塑性解析の連成解析の計算例

磁界解析と弾塑性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及び材料・プロセスデータベースとの統合検証テストを行った。図②-(6)-1 に電磁力で変形する 2 次元問題の解析例を示す。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計算例を示している。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。この解析においてもフレームワークソフトとの統合動作が確認された。

連成解析モジュールとしては、1) 熱伝導解析と熱弾塑性解析のファイルを介した一方向連成解析、2) 圧電解析（静電場解析と弾塑性解析の強連成）の開発を完了した。熱伝導解析と熱弾塑性解析のファイルを介した一方向連成解析では、熱伝導解析で計算した温度分布の時刻歴データをファイルに出力し、逐次連続的に熱伝導解析の計算結果ファイルを入力データとして読み込みながら熱弾塑性解析を実施する機能を開発した。図②-(6)-2 は、熱伝導解析と熱弾塑性解析の連成解析として、端部を固定した初期温度 100°C の片持ち梁の上面を 800°C、下面を 200°C の一定温度に固定した場合に、熱伝導によって梁の厚さ方向に温度分布が生じ、熱ひずみの空間的な相違による応力発生に伴って片持ち梁が反るといふ熱変形を計算した結果をフレームワークソフトを適用して表示したものである。フレームワークソフトから検証計算の結果表示が正しく実現できており、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。また、前述の図②-(4)-2 は、シリコン円板の非定常熱伝導解析を実施して、引き続き熱伝導解析の計算結果をファイルから読み込みながら熱弾塑性解析を行った結果を示している。図②-(4)-2 から理論解と解析解は十分良く一致しており、本プロジェクトの目標を達成できた。



図②-(6)-2 熱伝導解析と熱弾塑性解析の連成解析結果（左：温度分布、右：厚さ方向変位）のフレームワークソフトによる表示

圧電解析では、弾塑性解析機能と静電場解析機能とを組み合わせた強連成解析機能の開発を完了した。前述の②-(3)-2 と②-(3)-3 は、それぞれラミネートプレートの圧電効果・逆圧電効果とカンチレバーの逆圧電効果の検証結果を示している。図②-(3)-2 と②-(3)-3 から MemsONE の解析結果は理論解および実験結果と良く一致しており、本プロジェクトの目標を達成できた。

(7) システム評価（再委託先：オリンパス(株)、オムロン(株)）

機構解析シミュレータの各機能における要件抽出、物理モデルの構築、選択、仕様等に対してデバイス開発の立場から検討を行うとともに、機構解析シミュレータの評価のための実証測定、パラメータ合わせこみ等のシステム評価・検討を行う。

これらの開発作業の内、平成 18 年度の研究開発では下記の成果を得た。

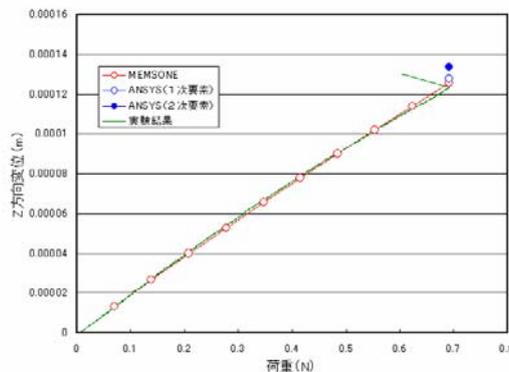
1) オリンパス(株)の評価作業

<成果>

(a) 力学解析

a) 静解析

トーションバー型ミラー構造の可動部中央を押圧し、その荷重と変位の関係を実験および解析で比較した。解析には商用コード (ANSYS) および MemsONE を使用した。MemsONE の解析結果と実験結果の誤差は 2% 未満であり、よく一致した結果が得られ、目標を達成した。



図②-(7)-1 静解析検証結果

b) 周波数応答解析

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

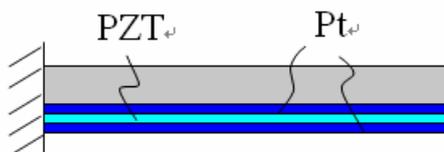
振周波数を実験で求めた。また、システム評価としては、MemsONE と商用シミュレータ (CoventorWare) の解析結果を比較した。結果は誤差 5%未満であり、よく一致した結果が得られた。また、実験結果として得られた Mode1、Mode3、Mode5 の周波数とも良い相関が得られ、目標を達成した。

表②-(7)-1 共振周波数解析検証結果

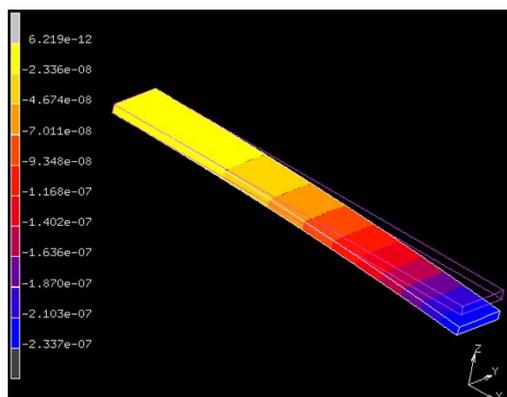
	Mode1[Hz]	Mode3[Hz]	Mode5[Hz]
実験結果	4428	22555	64537
CoventorWare	4425	27656	64875
MEMS ONE	4478	26983	64449

(b) 圧電解析

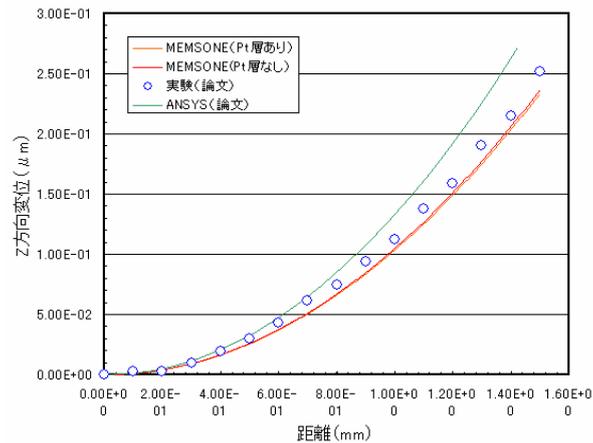
圧電解析については、平成 16 年度、17 年度にかけて圧電薄膜成膜条件を検討していたが、安定した結果が得られなかったため、並行して京都大学 小寺・神野研究室から圧電薄膜によるカンチレバーの特性評価結果の提供を受け、これを基に検証を行った。検証構造は、基板上に圧電薄膜を成膜したカンチレバー構造で、これを圧電駆動で変形させた際の印加電圧とカンチレバーの変形形状との関係を解析および実験で求め、比較した。実験データは京都大学より提供を受け、これを MemsONE による解析結果と比較した。



図②-(7)-2 検証構造断面図



図②-(7)-3 検証構造断面図

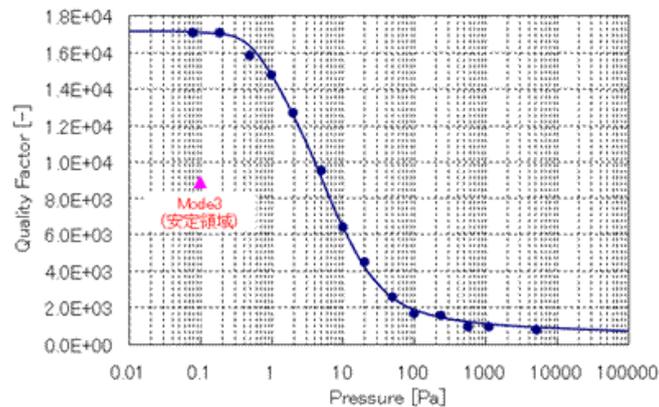


図②-(7)-4 圧電解析検証結果

MemsONE の解析結果と論文中の結果との誤差は 6%未満であり、よく一致した結果が得られ、目標を達成できた。

(c) 雰囲気流体解析

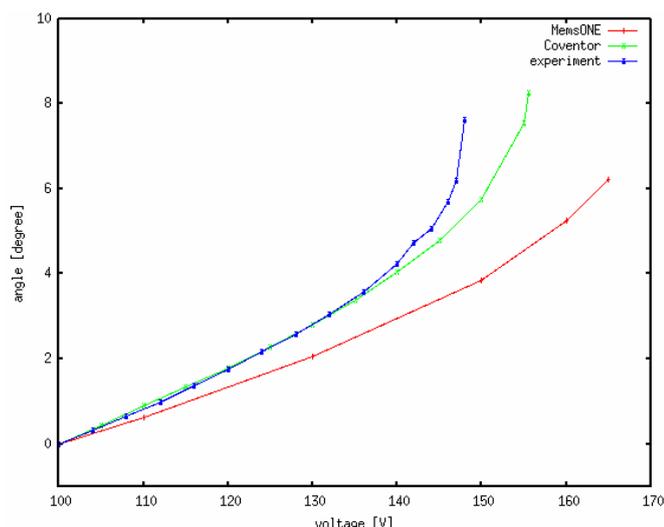
静電駆動型光スキャナを、雰囲気圧力が変化可能な環境でねじり共振 (Mode1) させる際の雰囲気圧力と共振の Q 値の関係を測定して、委託元 (みずほ情報総研) に提供した。



図②-(7)-5 Q 値の圧力依存性の実験検討結果

(d) 静電場連成解析

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、駆動電圧と光スキャナ可動部の機械振れ角との関係を、実験及び解析にて比較した。解析には MemsONE と商用コード CoventorWare (FEM) を使用して比較した。



図②-(7)-6 静電場連成実験及び商用コード解析検証結果

MemsONE の計算結果と実測との比較において、略線形関係の範囲においても Coventor ほどの一致は得られなかったが、達成目標である実測値からの 50%以内の乖離であり、目標を達成した。

2) オムロン(株)の評価作業

<成果>

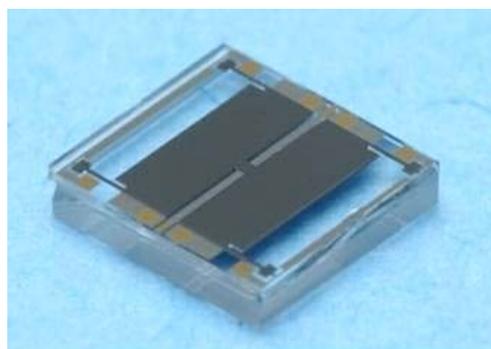
MEMS用設計・解析支援システム開発の「機構解析シミュレータの統合検証評価を完了する」という目標に対して、最終年度は以下の研究・開発を実施した。

- ・機構解析シミュレータの開発において各機能の、構造、仕様確認を行った。またデバイス開発の立場からソフトウェア委員会、知識 DB 委員会などの各委員会を通じて提言を実施した。
- ・シミュレータ機能の精度を評価するための検証用デバイスを用いて力学解析・熱解析・電磁波解析・連成解析についてデータを取得し、開発で得たシミュレータや項目・取得方法について調査・研究を実施し、これに基づき、それぞれのデータを取得した。具体的な検証方法および評価結果は以下の通りである。

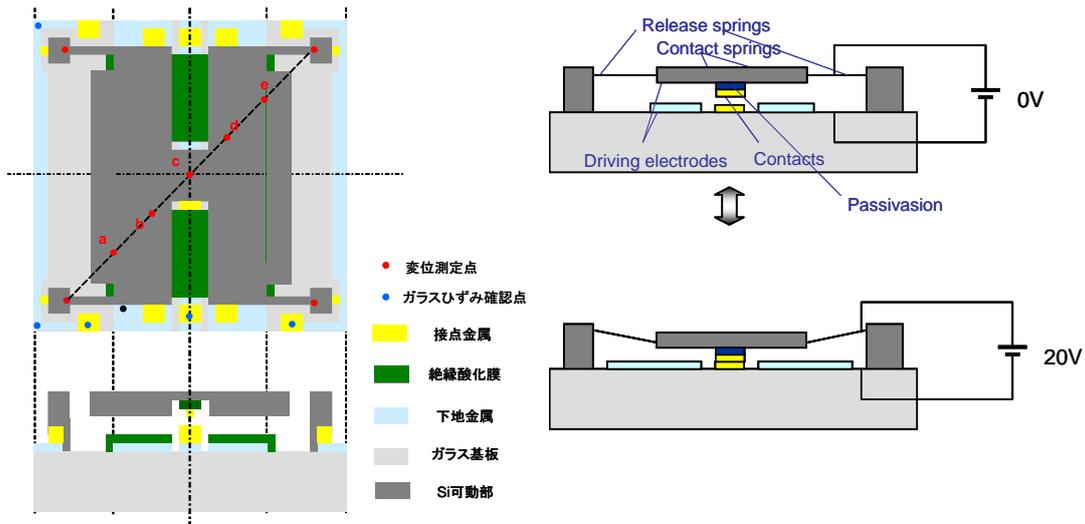
(a) 実験に使用した検証用デバイス

機構解析における実測データを測定するためのデバイス「RF-MEMS スイッチ」を作製し、実験に使用した。このデバイスを図②-(7)-7、図②-(7)-8 に示す。

サイズ :	3000×3000×500 um
梁厚さ :	21um
梁幅(b) :	約 50um
梁長さ(a) :	550um×2
電極 :	2500um×665um×2
電極間ギャップ :	約 3um
pull-in 電圧 (標準) :	20V



図②-(7)-7 RF-MEMS スイッチの写真



図②-(7)-8 RF-MEMS スイッチの断面図および動作の機構

(b) 測定データ一覧

下表のようなデータを測定し、検証に活用した。

表②-(7)-2 測定データ一覧

		入力	現象	出力	評価方法	出力分解能
電磁界	近傍電磁界	駆動電圧 V(DC) 入力信号 (10dBm 1.8GHz)		(A/m) or(dB μV)	電磁界プローブ	0.1(dB μV)
	高周波特性	駆動電圧(V) 駆動電流 (μ~mA DC~GHz) 入力信号 (-5dbm DC~6GHz)	高周波	挿入損失(dB) アイソレーション (dB) リターンロス (dB)	ネットワークアナライザ (高周波測定装置) 実装基板上	-60dB -60dB -60dB
伝熱解析	熱変形	熱 (常温~100°C)	熱歪み	変位データ (μm)	レーザー変位計	0.1 μm
連成解析	電磁界-力学	駆動電圧(V) 矩形波 駆動電流(mA)	動作後の変形解析		レーザー変位計	XY0.1 μm Z0.1 A
力学解析	調和応答	駆動電圧(V)	駆動SIN波によるアクチュエータ動作	変位データ (μm)	微小振動計 (レーザードップラー)	Z:50 Å 10 μsec以下
	時刻歴応答	駆動電流(mA)	動作開始から静止状態までの動作		微小振動計 (レーザードップラー)	Z:50 Å 10 μsec以下
	変形解析	DCorAC (kHz)	動作後の変形解析		微小振動計 (レーザードップラー)	Z:50 Å 10 μsec以下

(c) 測定検証

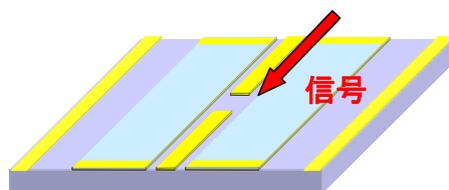
ソフトウェアの検証結果は最終的に再委託元であるみずほ情報総研株式会社で総括され、ま

とめられる。そこで、ここではその元となったデータや他のシミュレーションソフトを使った解析状況を記載する。

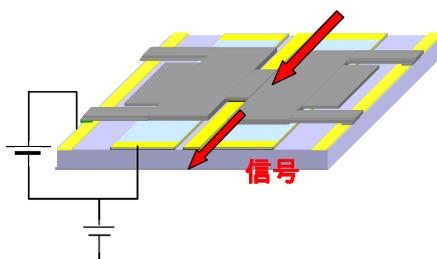
a) 電磁界解析

シミュレーションと実デバイスを現状の測定システムで計測した計測値との誤差量と、その要因、考え方を整理するという基本方針の下、既存の測定システムの中で、測定精度の高い測定機を持つ外部業者（アイカ工業株式会社：高周波基板の電磁界測定請負）を使い、実測テストを実施した。測定対象はMEMSスイッチ機能をもつ検証用デバイスであり、基準値用にSiアクチュエータ部をはずしたものとアクチュエータ部を駆動させ信号線を導通させたものを対象とした。

a. 測定対象



図②-(7)-9 Siアクチュエータ部をはずしたもの
(入力信号：10mW 周波数：1.8GHz)



図②-(7)-10 アクチュエータ部を駆動させ信号線を導通させたもの
(駆動電圧：DC20V 駆動電流： minimum 入力信号：10mW 周波数：1.8GHz)

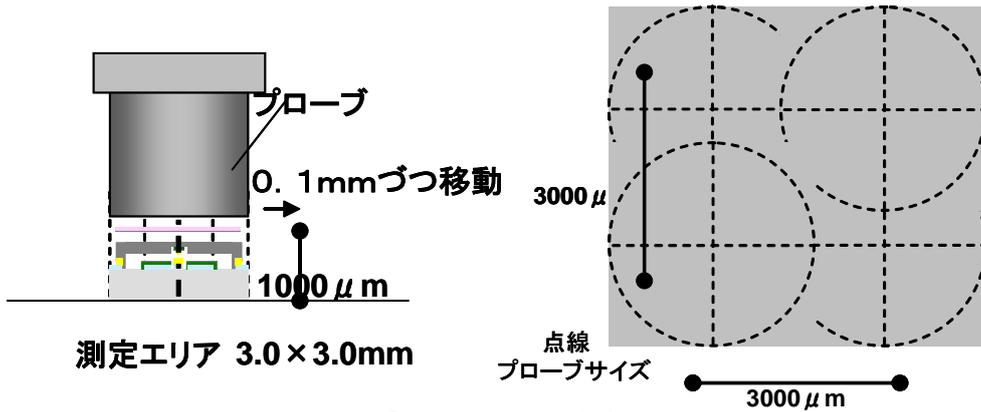
b. 測定システム

日立ディスプレイサイズでのEMIテスタEMV200 (図②-(7)-11) をもちいて測定した。

測定は、エリアは3.0mm×3.0mm移動、ピッチは0.1mmとし、近傍電磁界の測定を実施した。



図②-(7)-11 測定システム写真



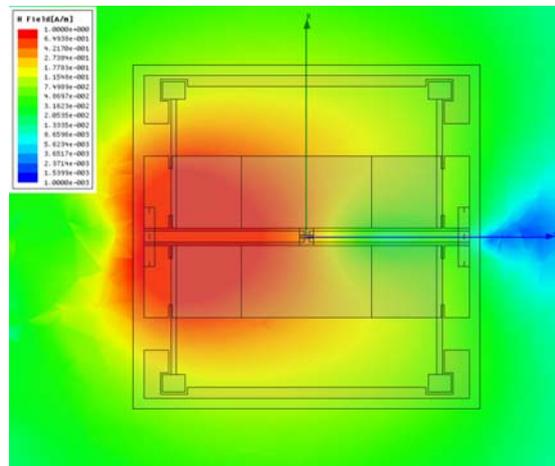
図②-(7)-12 測定方法

c. 測定結果

既存のシミュレーションソフト HFSS におけるシミュレーション結果と実測の結果を示す。

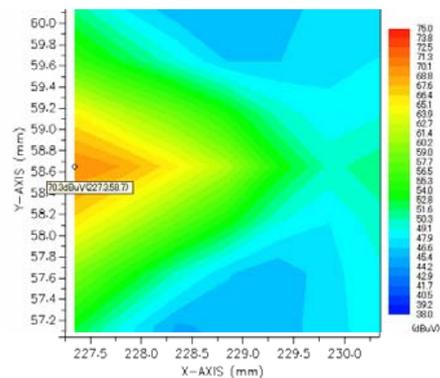
■ Si アクチュエータ部をはずした試料

- シミュレーション結果：可視化条件
- デバイスのガラス面上空 500um の磁界分布
- 周波数 1.8GHz
- デバイス底面は GND
- デバイス周囲は放射壁
- 入力エネルギーは解析ソフトの設定上、単位エネルギー入力時
- Modal Analysis 解析



図②-(7)-13 HFSS によるシミュレーション結果

- 実測結果：測定条件
- デバイスのガラス面上空 500um の磁界分布
- 周波数 1.75~1.85GHz
- デバイス底面は GND
- 0.1mm ステップで測定
- 投入エネルギー 20dBm

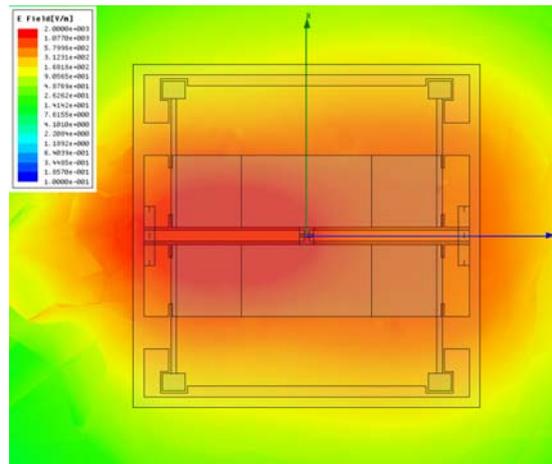


図②-(7)-14 EMI テスターを用いた実測結果

■アクチュエータ部を駆動させ信号線を導通させたもの

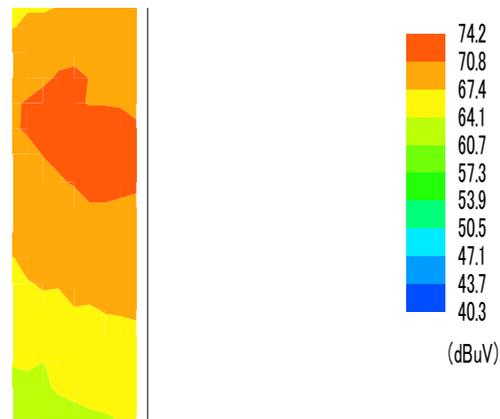
- ・駆動電圧：DC20V 駆動電流：ミニマム
- ・入力信号：10mW 周波数：1.8GHz

- ・シミュレーション結果の可視化条件
デバイスのガラス面上空 500um の磁界分布
周波数 1.8GHz
デバイス底面は GND
デバイス周囲は放射壁
入力エネルギーは解析ソフトの設定上、
単位エネルギー入力時
Modal Analysis 解析



図②-(7)-15 HFSS によるシミュレーション結果

- ・実測結果の測定条件
デバイスのガラス面上空 500um の磁界分布
周波数 1.75~1.85GHz
デバイス底面は GND
0.1mm ステップで測定
投入エネルギー 20dBm



図②-(7)-16 EMI テスターを用いた実測結果

d. 検証結果

実測の結果がループプローブ出力電圧 $78.4\text{dB}\mu\text{V}$ であったのに対し、MemsONE で計算した計算結果は、ループプローブ中心位置で $95.3\text{dB}\mu\text{V}$ となった。これは 22%の乖離であり目標を達成できた。

b) 伝熱解析・熱変形解析

既存装置で、十分な測定精度を得られるものがないため、外部の測定業者（住友金属テクノロジー株式会社）と協力して測定システムを組みあげた。

測定システムの分解能は $0.1\mu\text{m}$ より大きく、変形量の絶対評価にはまだ、十分ではないが、傾向分析には十分耐えうるレベルであり、これを基にソフトウェアの性能について評価・検討した。

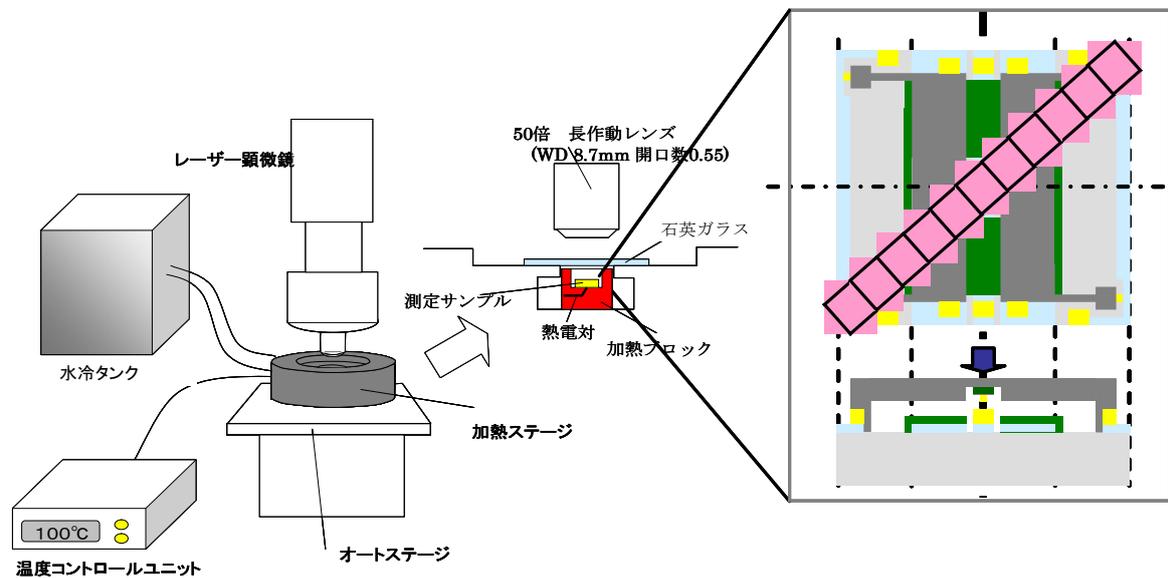
a. 測定対象と測定システム

作製した検証用デバイスについて、図②-(7)-17 のような測定システム（住友金属テクノロジー）を用いて次の条件で測定を実施した。

- 加熱温度： MUST100℃、WANT 上限温度 200℃、に設定
- 測定温度： MUST 三点、WANT 5 点（常温から）

測定チップ数： MUST3 デバイス、WANT5 デバイス

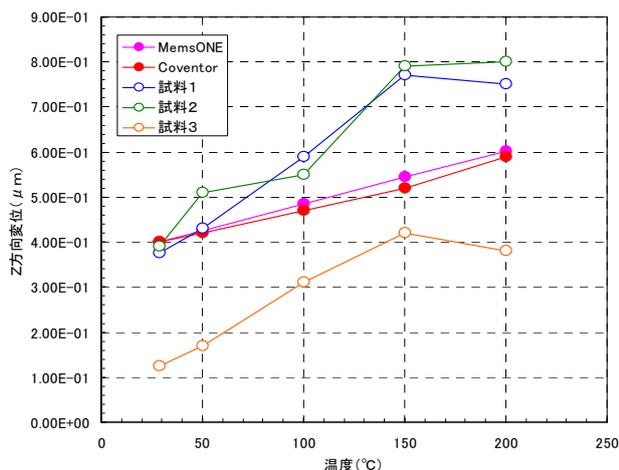
測定エリア： 図②-(7)-17の  を1セルとしてあらわした領域



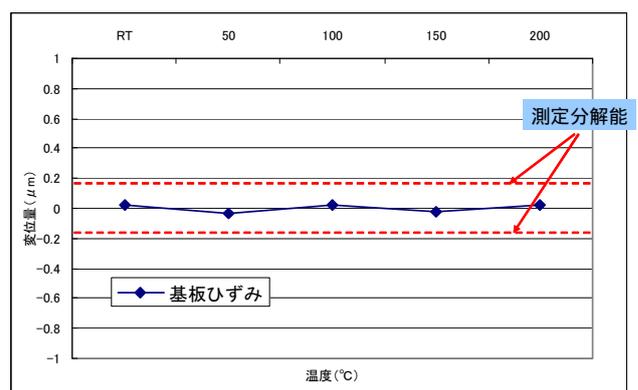
図②-(7)-17 熱変形解析測定システム (レーザテック社 HD100など)

b. 測定結果と検証結果

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 MemsONE の計算結果と実験結果には一定の相違があるものの、目標範囲内で一致している (図②-(7)-18 参照)。また、MemsONE の解析結果と Coventor 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②-(7)-19 参照)。



図②-(7)-18 可動部中央部の変位量比較



図②-(7)-19 基板の変位 (歪み)

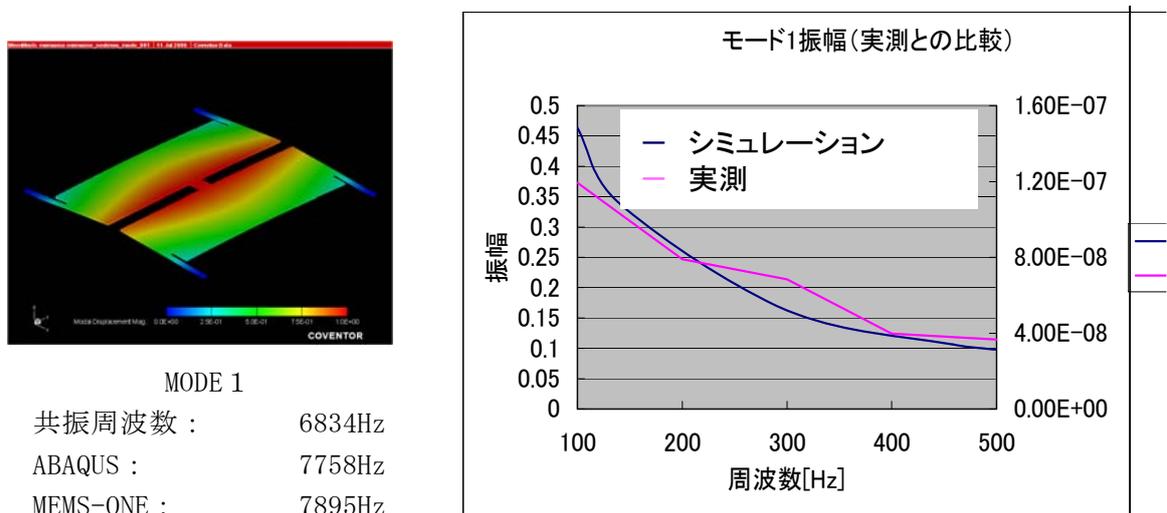
c) 連成解析

RF-MEMSスイッチは電圧を Si でできたアクチュエータに印加することによって発生する静電引力で、アクチュエータを動作させる機構をもつため力学-電磁界についての連成解

析を実施した。また連成を検証する上で基本的な情報として、力学データの取得が必要であったため、別途力学データも取得し、解析に活用した。

a. 力学データの取得と検証

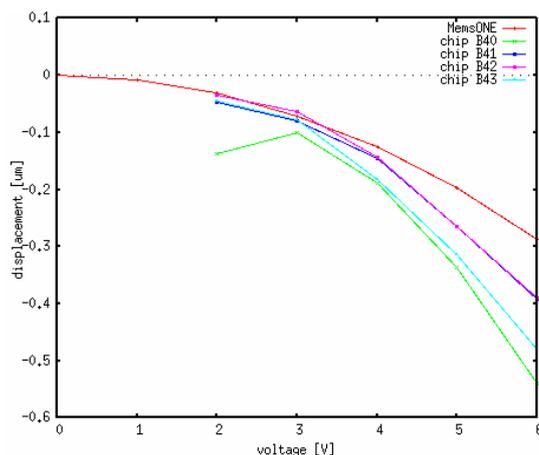
調和応答におけるモード1について実測値とシミュレーションを比較した。調和振動はSiアクチュエータにサイン波電圧を印加し、動作させレーザードップラー測定機を用いて測定した。図②-(7)-20 のような実測値とシミュレーションの値がよく一致した。



図②-(7)-20 実測値とシミュレーションの比較

b. 連成データの取得と検証

電界+力学連成解析では、6Vの駆動電圧を印加した場合に実験では、 $-0.39 \mu\text{m}$ の変位であったのに対し、MemsONEでは $-0.29 \mu\text{m}$ であり、実験との乖離は26%となり目標の50%以内を達成した。



図②-(7)-21 電界+力学連成解析の検証結果

3. 5 「プロセス解析ツールの開発」

担当：みずほ情報総研(株)

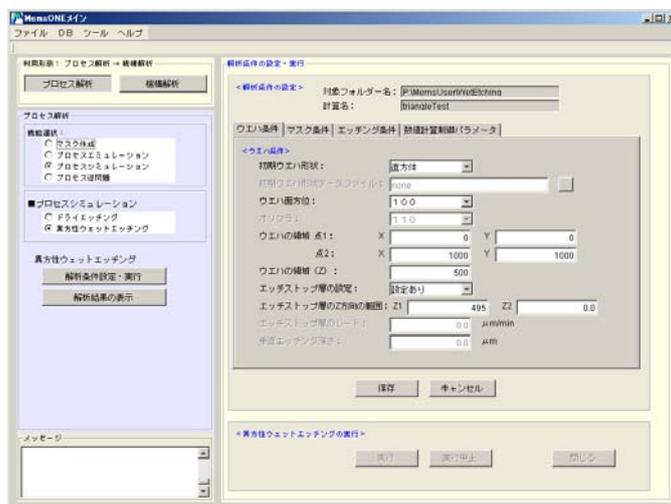
(1) 異方性ウエットエッチングプロセス

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エットエッチングプロセス解析シミュレータを開発する。ウエハ上下面にマスクを設定したウエハ中央で貫通するエッチングプロファイルの過渡変化の解析、エッチストップ層でエッチングの進行が停止する解析、マスクを変更し多段階のエッチングプロファイル得ることが可能となる。解析により得られた3次元構造は機構解析シミュレータで用いることが可能となる。

これらの開発作業のうち、平成18年度の研究開発では下記の成果を得た。

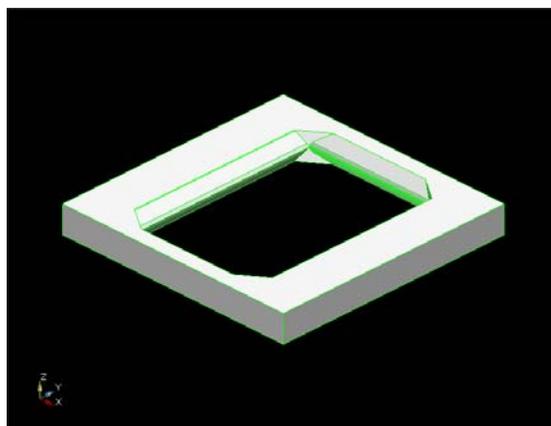
〈成果〉

異方性ウエ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。解析条件設定および解析実行画面を図③-(1)-1に示す。



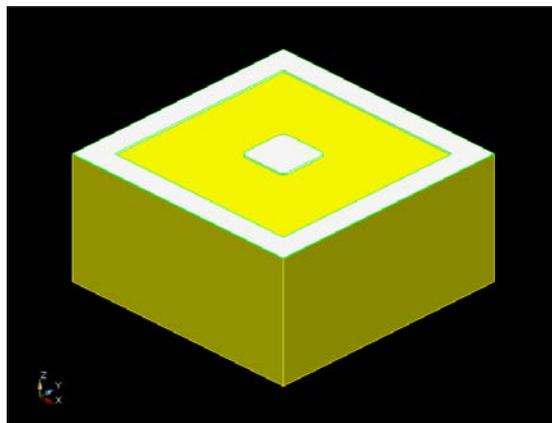
図③-(1)-1 異方性ウエットエッチングプロセス解析シミュレータの解析条件設定および解析実行画面

以下に検証解析結果を示す。最初に、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-(1)-2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。



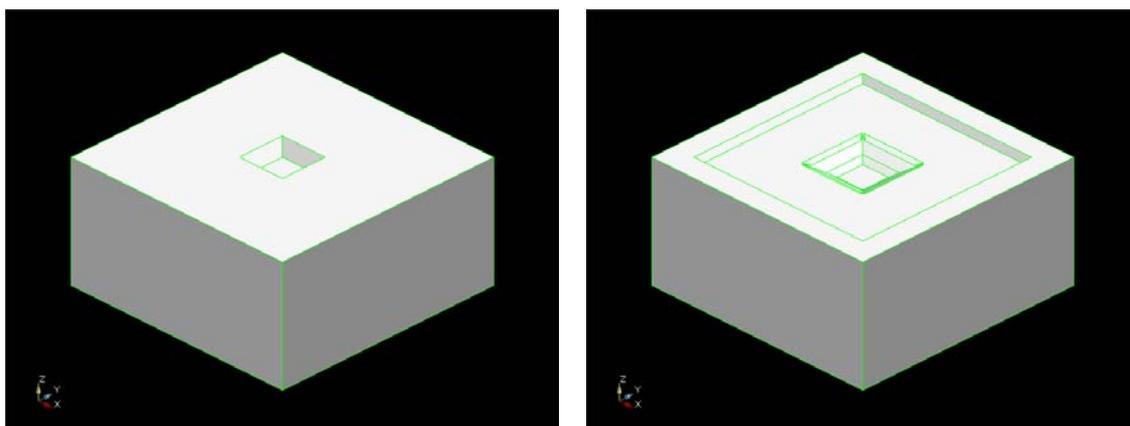
図③-(1)-2 ウエハ上下面にマスクを設定し、ウエハ中央で貫通するエッチングプロファイル

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-(1)-3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。



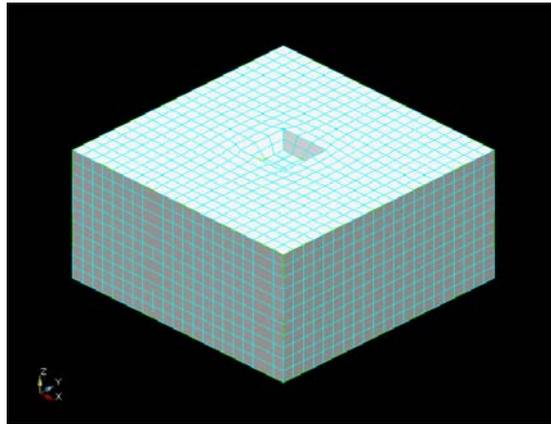
図③-(1)-3 エッチストップ層でエッチングの進行が停止する解析

予め解析した結果に対しマスクレイアウトを変更して、2段階にエッチングした場合の解析結果を図③-(1)-4に示す。図左が、予め解析した1段階目のエッチングプロファイル、図右がマスクレイアウト変更し、エッチングした場合の2段階目のエッチングプロファイルである。



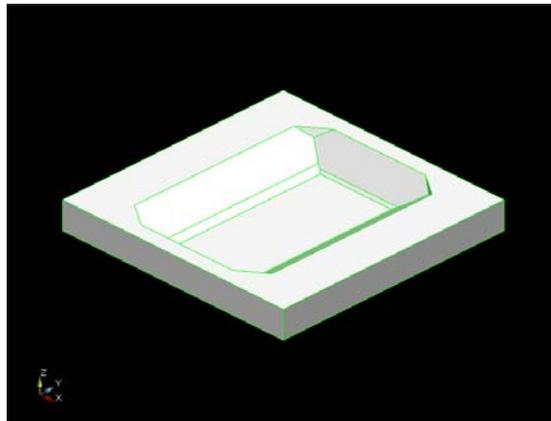
図③-(1)-4 マスクレイアウトを変更し2段階にエッチングを行ったときの解析結果

異方性ウエットエッチングプロセス解析シミュレータの解析結果を機構解析ツールで利用するため、解析結果形状にメッシュ生成を行った結果を図③-(1)-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-(1)-5 解析形状にメッシュ生成を行った結果

最後に、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は、異方性エッチングシミュレータで形成した結果を図③-(1)-6に示す。この形状は、実際のデバイス形状（デバイス作成は、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-(1)-6 結晶異方性エッチングで作成した圧力センサの基板

以上より、異方性ウェットエッチングプロセス解析シミュレータとフレームワークとの結合および動作検証を行った。また、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。

(2) ドライエッチングプロセス

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、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。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及び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デバイス構造作成機能はソリッド・モデラ（立体モデル生成機能）、もしくは多面体近似により3次元形状を構築する。

表面形状変化モデルとして、解析対象はシース領域（基板とプラズマが接する微小空間）下部から被エッチング材料までの領域とし、形状変化計算に特化する（プラズマ・バルク領域やシース領域の解析は行わない）。被エッチング材料表面上に飛来するラジカルとイオンの粒子流束とそれらによって引き起こされる熱励起型化学反応、スパッタリング反応、イオン・アシスト反応、デポジション反応の各反応率からエッチングレートとデポジションレートを求める。これらのレート値から表面移動速度を求め、新しい表面形状を算出する。新しい表面形状で再びエッチング

レート、デポジションレート、表面移動速度を算出する。この繰返しで最終的な表面形状が得られる。またデポジション反応とエッチング反応を同時に考慮した計算を可能とする。2次元の形状変化はストリングモデル（断面形状を多数の微小線分(ストリングと呼ぶ)に分割して表現する物理モデル)により表現する。

これらの開発作業の内、平成18年度の研究開発では下記の成果を得た。

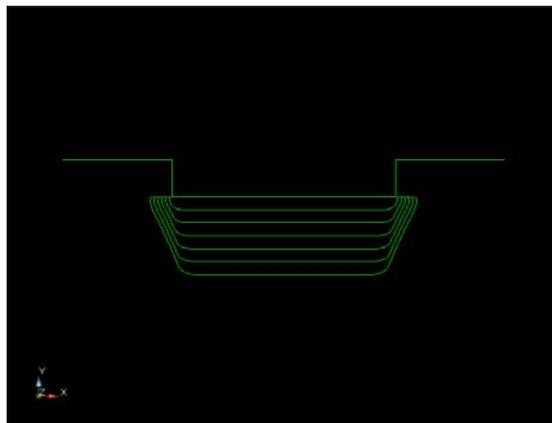
〈成果〉

ドライ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続合作業を実施し、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。解析条件設定および解析結果画面を図③-(2)-1に示す。



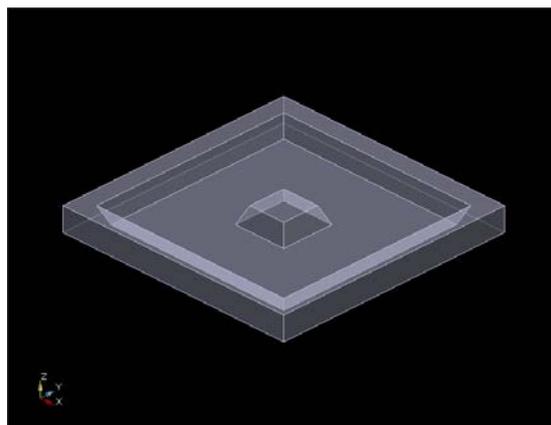
図③-(2)-1 解析条件設定画面（左）と解析結果画面（右）

解析結果は、図③-(2)-1に示された形状パラメータに加えて、エッチング形状の過渡変化を表示することができる。図③-(2)-2にエッチング形状の過渡変化を示す。



図③-(2)-2 エッチング形状の過渡変化

ドライエッチングプロセス解析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-(2)-3はマルチプロセスエミュレータのシミュレーション結果の取り込み画面とエミュレータによる3次元形状の構築結果である。マルチプロセスエミュレータで構築した3次元形状は、機構解析シミュレータで利用することができる。

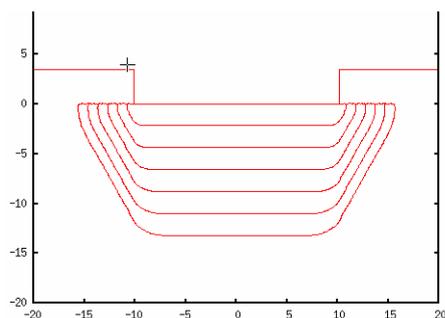


図③-(2)-3 マルチプロセスエミュレータのシミュレーション結果の取り込み画面（左）と3次元形状の構築結果（右）

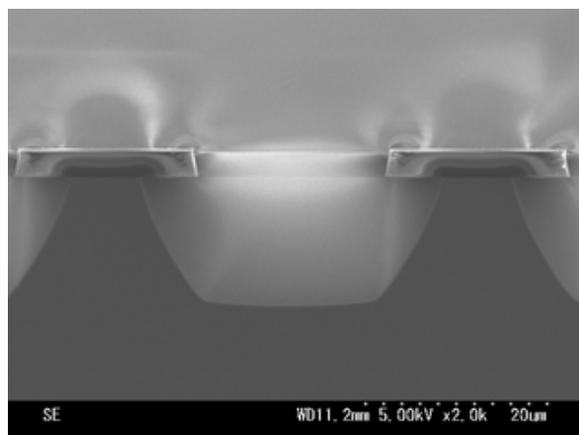
検証解析として、産総研殿よりご提供いただいた実測値（放電パワー75W、圧力 20Pa、流量 50sccm）とシミュレーション結果の比較検証を行った。実測値とシミュレーションによる予測値が、表③-(2)-1 および図③-(2)-4 に示される結果となり、よく一致した。

表③-(2)-1 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 μ m	33.1 μ m	1.5%
下部幅	18.2 μ m	18.7 μ m	2.7%
深さ	13.0 μ m	13.25 μ m	1.9%



シミュレータの予測形状



実測形状

図③-(2)-4 シミュレータによる予測形状（左）と実測形状（右）の比較

以上より、ドライエッチングプロセス解析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。

(3) 成膜プロセス

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

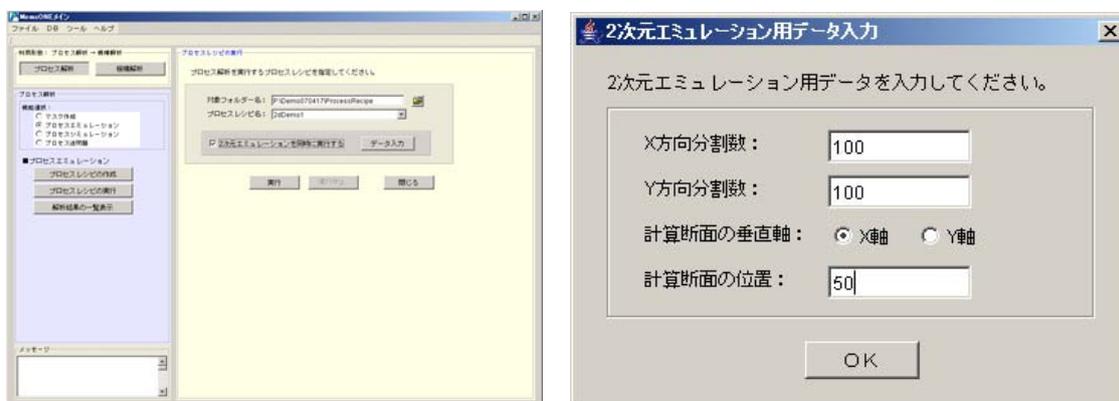
データベース等の情報を基に、幾何学的手法によるエミュレータを用いて成膜プロセスによる3次元構造を作成する機能を開発する。成膜プロセスとしては物理気相法(Physical Vapor Deposition)及び化学気相法(Cheical Vapor Deposition)を検討する。具体的にはプロセスレシピに従い元の形状に関して蒸着材料を等方的に堆積させる。また、成膜プロセスツールはマルチプロセスツールの成膜機能として作成する。

これらの開発作業の内、平成18年度の研究開発では下記の成果を得た。

<成果>

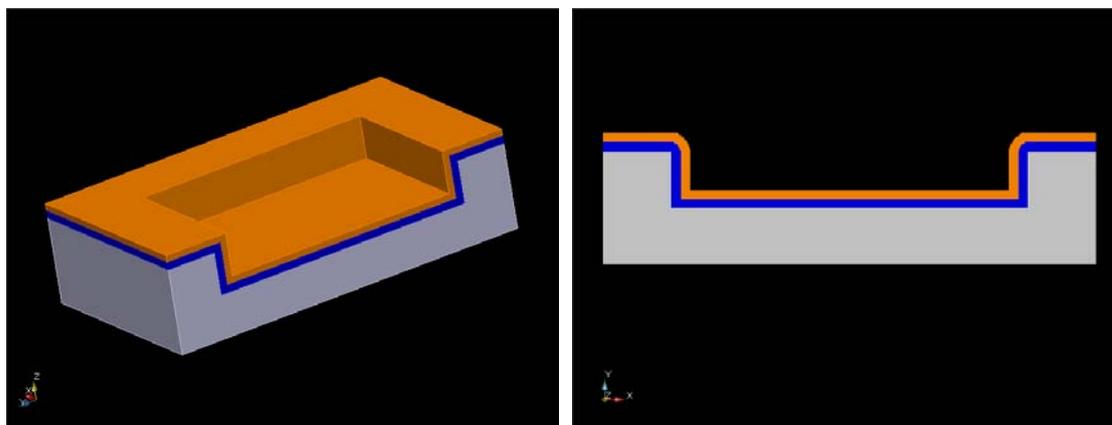
成膜プロセスツールはマルチプロセスエミュレータの成膜機能として開発した。成膜プロセスツールで対応するプロセス工程は、スパッタ、EB蒸着、真空蒸着、スピコート、電解メッキ、電鍍、熱酸化プロセスである。さらに、3次元の幾何学的手法では、表現が困難な曲面の成膜形状に対応するため、セル方式で成膜形状を構築する2次元エミュレータを開発した。

成膜プロセスツール(マルチプロセスエミュレータ)とフレームワークソフトとの統合作業の結果として、図③-(3)-1にマルチプロセスエミュレータの実行画面と2次元エミュレーション用のデータ設定画面を示す。



図③-(3)-1 マルチプロセスエミュレータの実行画面(左)と2次元エミュレーション用データ入力画面(右)

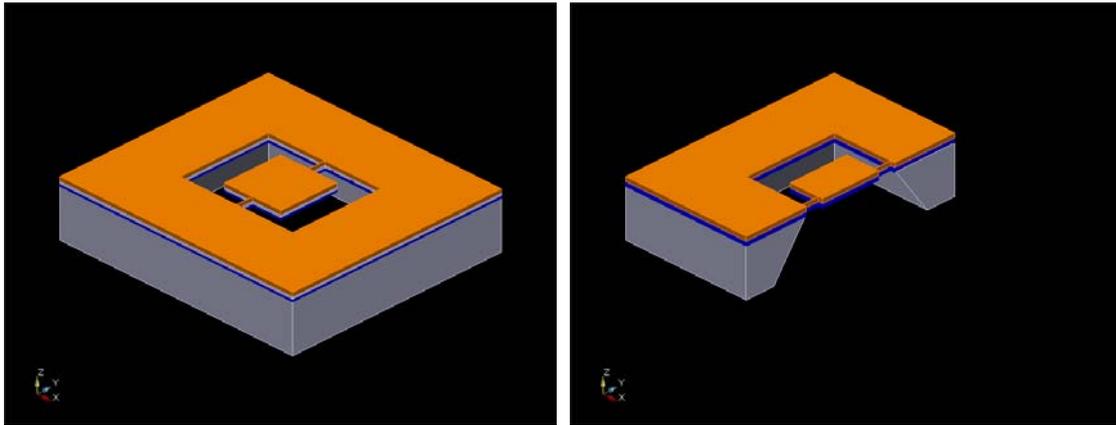
3次元と2次元のエミュレーションでは、成膜プロセスによる結果形状に違いが現れる。図③-(3)-2は、コンフォーマルに材料を成膜した時の3次元と2次元のエミュレーション結果である。2次元エミュレーションでは、コーナー部の曲面をセル方式で表現することができる。



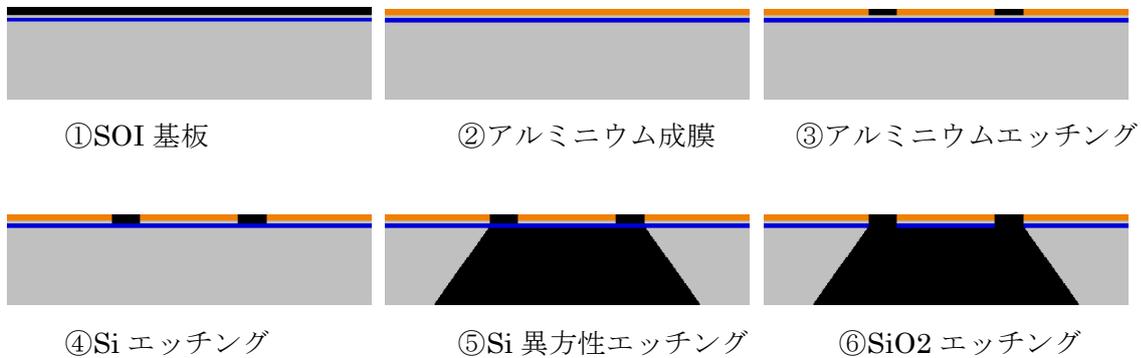
図③-(3)-2 3次元エミュレーション(左)と2次元エミュレーション(右)の結果

また、2次元エミュレータは、3次元エミュレータと同様に、成膜プロセスの他、エッチング、切削、接合等のプロセスにも対応しており、同一プロセスレシピで形状計算が行える。図③-(3)-3

にミラーデバイス可動部作成時の2次元エミュレーション結果を各プロセス・ステップで示す。



ミラーデバイス可動部の3次元形状図（左）と切断面（右）



図③-(3)-3 切断面における2次元エミュレーションの計算結果

成膜プロセスツールは、マルチプロセスエミュレータの一部機能としてフレームワークソフトと結合し、統合検証テストを完了した。尚、検証モデルの計算結果および機構解析シミュレータとの連携に関しては、マルチプロセスの項にまとめて成果を示す。

（4）マルチプロセス

マルチプロセスでは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、幾何学的手法によるエミュレータを用い、3次元構造を作成する機能を開発する。3次元構造データおよびプロセスレシピに記述された熱履歴等は機構解析シミュレータで利用することが可能とする。マルチプロセス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エ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
- 一切削
- ・マイクロ穴加工
 - ・基板の切削

マルチプロセスのエミュレータは、フレームワークソフトの機能（マスク作成、デバイス構造作成、プロセスレシピ、解析条件設定等）を利用して統合化し開発する。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およびプロセス工程の置換を可能にする。また、他のプロセスの追加が容易になるように構築する。

本開発は材料・プロセスデータベース、知識データベース、フレームワークソフトの開発グループと連携し、実施する。

これらの開発作業の内、平成 18 年度の研究開発では下記の成果を得た。

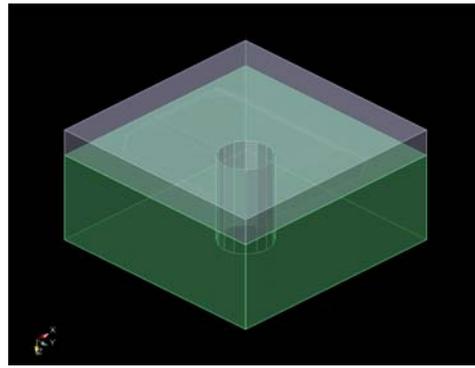
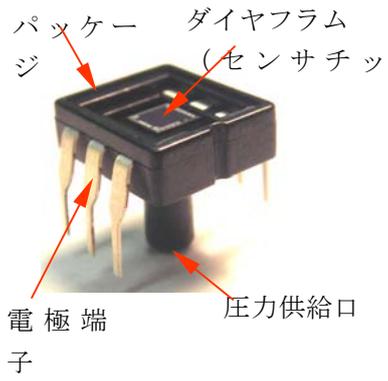
〈成果〉

マルチプロセスエミュレータとフレームワークソフトとの結合作業を実施した。図③-(4)-1 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。

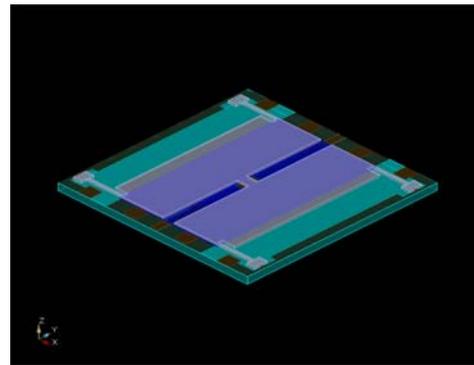
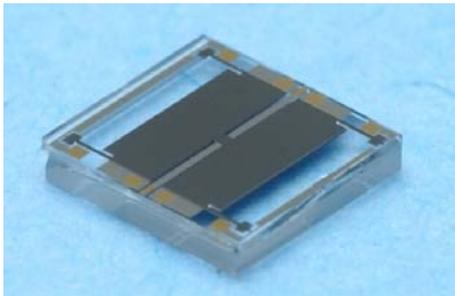


図③-(4)-1 フレームワークソフトのプロセスレシピ作成画面

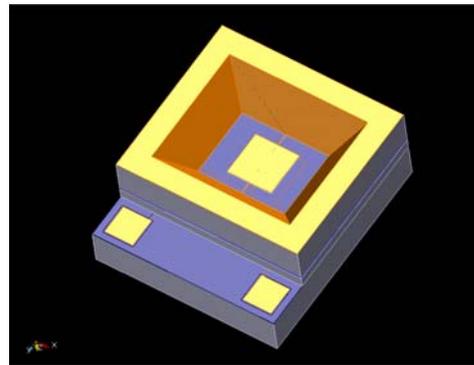
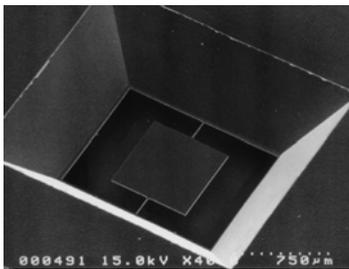
図③-(4)-2 に、検証モデル（圧力センサ、RF スイッチ、静電駆動ミラー）に対しマルチプロセスエミュレータを用いて作成した結果を示す。各検証モデルともに、実際のプロセスに即したレシピにてモデル形状を作成し、測定形状とよく一致することを確認した。ここで、圧力センサの基板部分は、異方性エッチングシミュレータで形成した結果（図③-(1)-6）をマルチプロセスエミュレータで取り込んだ結果であり、異方性エッチングシミュレータとの連携結果である。ドライエッチングプロセス解析シミュレータとの連携結果は、ドライエッチングプロセスの項に示した。



圧力センサ



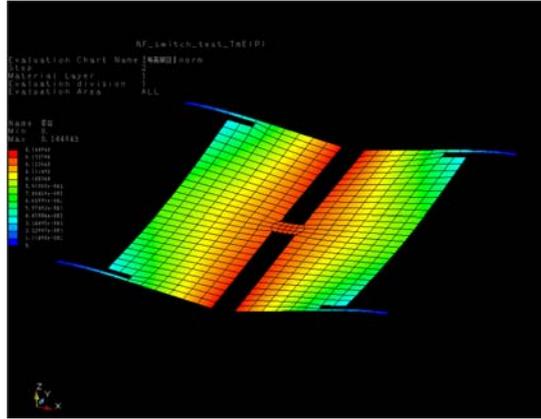
RF スイッチ



静電駆動ミラー

図③-(4)-2 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-(4)-3 に示す。



図③-(4)-3 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エットエッチングプロセス解析シミュレータおよびドライエッチングプロセス解析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。

(5) システム評価（再委託先：松下電工(株)）

プロセス解析ツールの各機能における要件抽出、物理モデルの構築、選択、仕様等に対してデバイス開発の立場から検討を行うとともに、プロセス解析ツールの評価のための実証測定、パラメータ合わせこみ等のシステム評価・検討を行う。

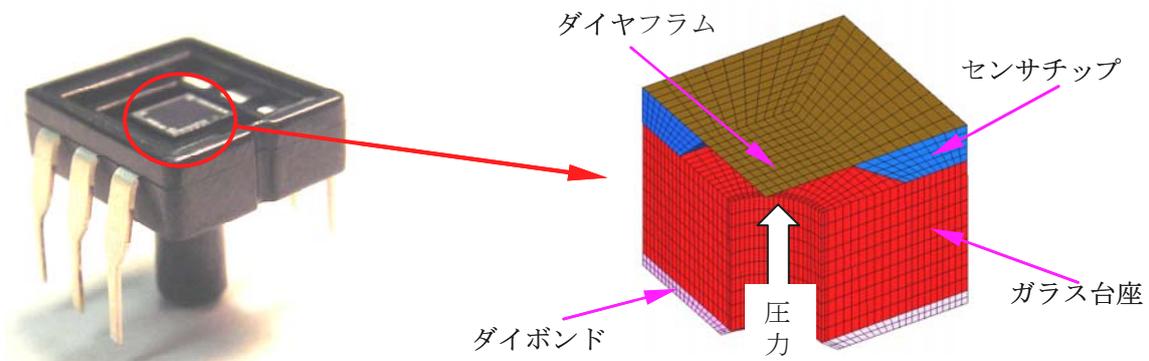
これらの開発作業の内、平成18年度の研究開発では下記の成果を得た。

<成果>

平成18年度の目標である検証のためのモデル形状を作成し、検証評価項目の測定、プロセス解析ツールとの比較検討を行い、パラメータ合わせこみ等のプロセス解析ツールの実証評価・検討を行うために、実践した研究開発内容を以下に順次報告する。

1) 検証用デバイスである圧力センサの有限要素法モデルの作成

システム評価のために、検証用デバイスであるダイヤフラム部を有する圧力センサの有限要素法モデルを作成した。（図③-(5)-1 および図③-(5)-2 参照）



図③-(5)-1 圧力センサ外観

図③-(5)-2 解析モデル（対称性を考慮した1/4モデル）

2) 圧力センサを用いた力学解析（弾塑性解析）の評価検証（その1）

力学解析の評価検証のために、圧力センサに圧力を負荷し、その際発生するダイヤフラムの変位量を比較した。解析結果と実験結果は、良好に一致した。

3) 圧力センサを用いた力学解析（弾塑性解析）の評価検証（その2）

力学解析の評価検証のために、圧力センサに圧力を負荷し、ダイヤフラム上に形成されたピエゾ部の応力変化（出力電圧）を比較した。解析結果と実験結果は、良好に一致した。

4) 圧力センサを用いた連成解析（力学解析－伝熱解析）の評価検証（その1）

連成解析、特に力学解析と伝熱解析における連成解析の評価検証のために、無負荷状態の圧力センサの温度を変化させ、その際発生するピエゾ部の応力変化（出力電圧）を比較した。解析結果と実験結果は、最大約±20%以内で一致した。

5) 圧力センサを用いた連成解析（力学解析－伝熱解析）の評価検証（その2）

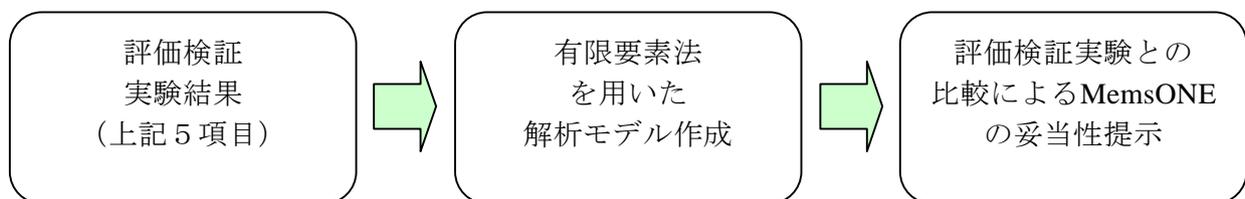
連成解析、特に力学解析と伝熱解析における連成解析の評価検証のために、圧力と温度をそれぞれ個別に変化させ、その際発生するピエゾ部の応力変化（出力電圧）を比較した。解析結果と実験結果は、良好に一致した。

6) 圧力センサを用いたプロセス解析ツールの評価検証

プロセス解析ツール、特にマルチプロセスエミュレータの評価検証実験のために、デバイス構造の形状、外観を比較した。マルチプロセスエミュレータ結果と実験結果は、良好に一致した。

7) システム評価のための評価方法、評価項目の策定

システム評価のための評価方法、評価項目を以下のように具現化した。



図③-(5)-3 統合検証評価プロセス

8) まとめ

本研究開発の目的は、プロセス解析ツールの各機能における要件抽出、物理モデルの構築、選択、仕様等に対してデバイス開発の立場から検討を行うとともに、プロセス解析ツールの評価のための実証測定、パラメータ合わせこみ等のシステム評価・検討を行うことである。

その結果、平成18年度は、目標であるプロセス解析ツールの実証評価を完了した。また、評価検証実験との比較により、MemsONEの妥当性を提示し、本プロジェクトの目標を達成することができた。

3. 6 「④機能拡張ソフトの開発」

3. 6. 1 「④-1 プロセス逆問題解析ソフトの開発」

担当：(株)数理システム、(株)日立製作所

MEMS 構造体形状から、その加工プロセスを解析により導出し、加工用マスク形状を求めるプロセス逆問題解析ソフトを開発する。

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プロセス逆問題解析ソフトを開発する。本ソフトは、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するもので、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 開発支援ツールである。

これらの開発作業のうち、平成 18 年度の研究開発では下記の成果を得た。

(1) ソフト開発 (担当：(株)数理システム、(株)日立製作所)

1) フレームワーク結合・システム統合テスト・改修 (担当：(株)数理システム)

<成果>

プロセス逆問題解析ソフトウェアを完成し、フレームワークとの結合と統合テストを完了させた。ソフトウェア本体については、主に初心者向けのツールとして GUI の操作の簡素化を行った。またソフトウェアの実行に必要なプロセスデータを作成した。フレームワークとの結合については、フレームワークからの起動、プロセスエミュレータと同じ形式のレシピファイルの出力という 2 点を実装しテストを行った。参考として以下に本ソフトウェア最終版の主機能を挙げる。

(a) 形状指定機能

ユーザが解析を行う形状を入力するための機能である。入力は断面形状、上面形状の 2 つを指定する (図④-1-(1)-1 参照)。

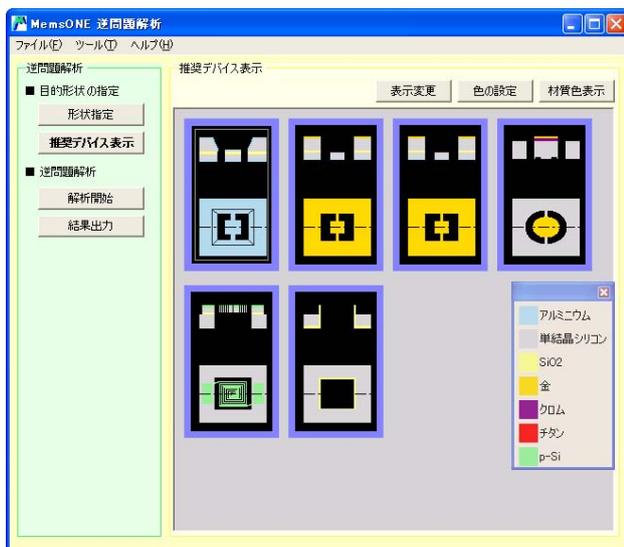


図④-1-(1)-1 形状指定機能の画面イメージ

(b) 推奨デバイス表示機能

ユーザ入力に対する最も近いデバイスの表示を行う機能である。ユーザが形状指定機能で指定し

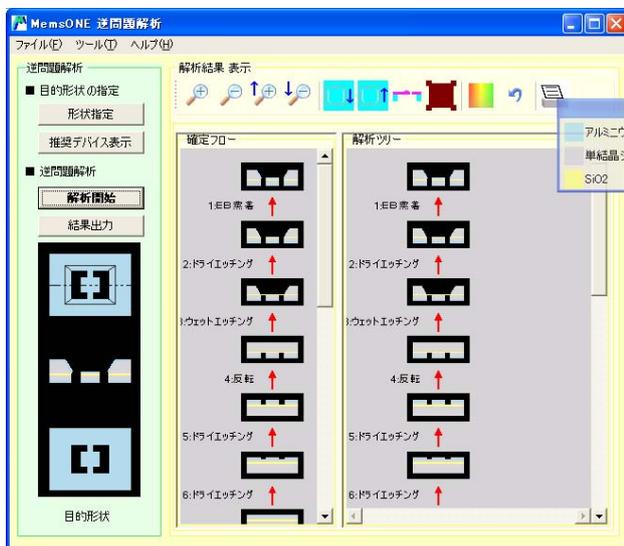
た形状にもっとも近いデバイス形状を複数提示する。ユーザは提示されたデバイスから解析したいデバイスを選択する（図④-1-(1)-2 参照）。



図④-1-(1)-2 推奨デバイス表示機能の画面イメージ

(c) 解析機能

プロセスを1ステップ毎に遡ってユーザに提示する機能である。選択された推奨デバイスについて、解析を行う。解析は基板（ウェハ）まで到着すると終了する。ガイダンス中は選択されたデバイス（目的形状）と、選択されたプロセスを確定フローとして、同時に表示することができるようにした（図④-1-(1)-3 参照）。



図④-1-(1)-3 解析結果フロー表示の画面イメージ

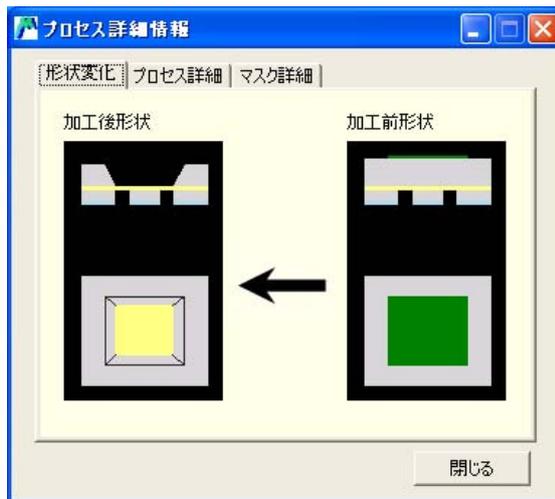
(d) 結果出力（レシピ作成）機能

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。

(e) 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

プロセスの種類、マスク形状である（図④-1-(1)-4 参照）。



図④-1-(1)-4 プロセス詳細情報表示の画面イメージ

(f) 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（図④-1-(1)-5 参照）。



図④-1-(1)-5 ユーザ環境設定機能の画面イメージ

2) 妥当性の評価（担当：(株)日立製作所）

<成果>

設計形状を入力としたプロセス逆問題解析により、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フロー及びマスクのデータを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た。

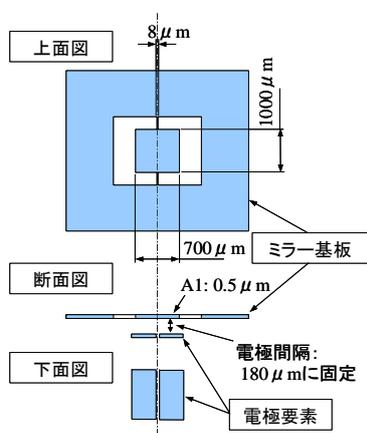
図④-1-(1)-6 に検証モデル初期形状を示す。デバイスの構造としては、静電駆動 1 軸マイクロミラーを選定し、最小限の構成要素のみ指定した。本モデルに対し逆問題解析を実施した結果を以下に示す。

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④-1-(1)-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 SSL ファイルで出力されることを確認した。

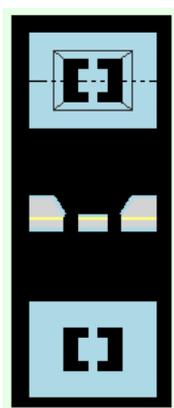
ii) 出力されたプロセスレシピとマスクデータがフレームワーク上で認識されてプロセス表と CAD 図に展開・表示されることを確認し、開発目標が 100% 達成されたことを実証した。

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④-1-(1)-8 に示す検証用マイクロミラー要素を製作した。

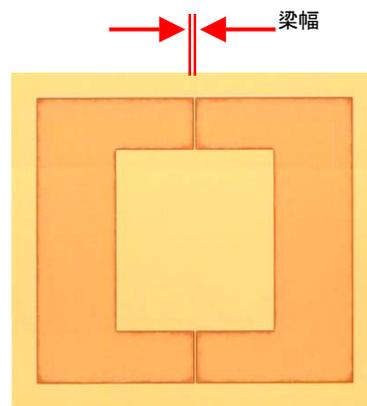
iv) 製作したマイクロミラー要素に対し、初期形状と製作要素の梁幅寸法データを比較した結果を表④-1-(1)-1 に示す。マイクロミラー初期形状に対し、それを SOI ウェハのデバイス層で支持する構造が逆問題解析によりガイダンスされ、加工プロセスにおける寸法シフト量で補正されたマスクデータをもとに製作したマイクロミラー要素の梁幅は 7.4~7.6 μm となった。



図④-1-(1)-6
検証モデル初期形状



図④-1-(1)-7
逆問題解析による推奨形状



図④-1-(1)-8
検証用マイクロミラー要素

表④-1-(1)-1 寸法・形状比較表

検証項目	梁幅寸法 (μm)
初期形状	8.0
推奨形状	8.0
マスク形状	9.5
製作形状	7.4~7.6

(2) プロセスデータ採取 (担当：(株)日立製作所)

<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、PI (ポリイミド) 及びホトレジストを、その他の材料として、熱酸化 SiO₂ 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 (Inductively Coupled Plasma-Reactive Ion Etching)、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。

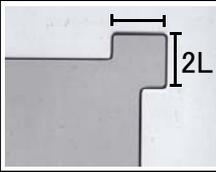
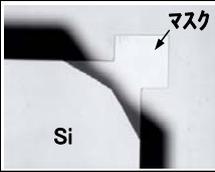
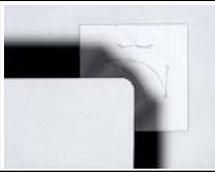
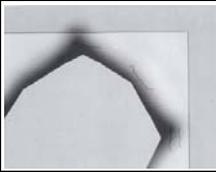
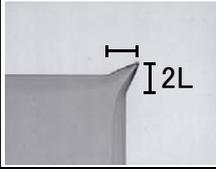
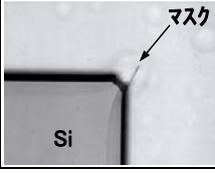
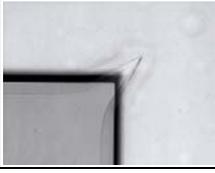
表④-1-(2)-1 に採取したプロセスデータの例として、エッチング速度を示す。

表④-1-(2)-1 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 ₂ -RIE)	—
レジスト	—	—	~0.01 (C ₄ F ₈ +Ar)	~0.01 (SF ₆ /C ₄ F ₈)
熱酸化 SiO ₂	~0.01 (BHF)	0.001~0.002 (40wt%KOH)	0.2~0.4 (C ₄ F ₈ +Ar)	~0.01 (SF ₆ /C ₄ F ₈)
Si	—	0.5~1.2 (40wt%KOH)	—	2~4 (SF ₆ /C ₄ F ₈)
ガラス	—	—	0.1~0.3 (C ₄ F ₈ +Ar)	—

(単位：μm/分)

図④-1-(2)-1 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④-1-(2)-1 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. 6. 2 「④-2 接合実装解析ソフトの開発」

担当：みずほ情報総研(株)、三菱電機(株)

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及び接合端部の幾何学的形状、中間層の材料・寸法などの影響で、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する。

- －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

これらの開発作業の内、平成18年度の研究開発では下記の成果を得た。

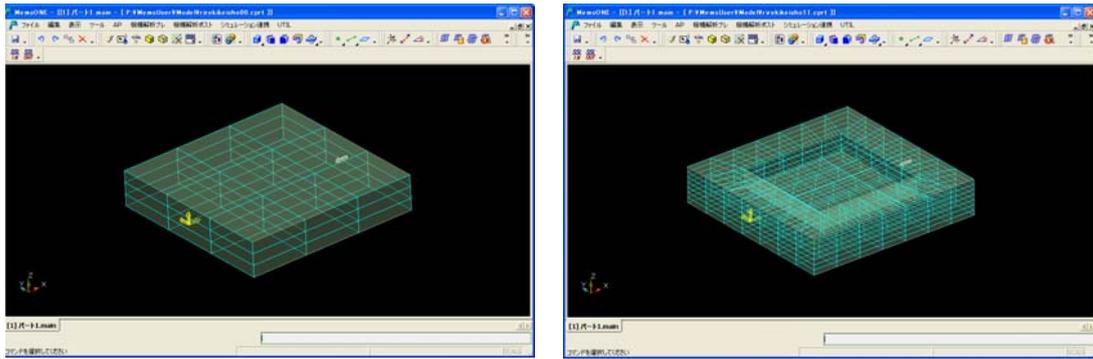
(1) ソフトの開発 (担当：みずほ情報総研(株)、三菱電機(株))

1) システム統合 (担当：みずほ情報総研(株))

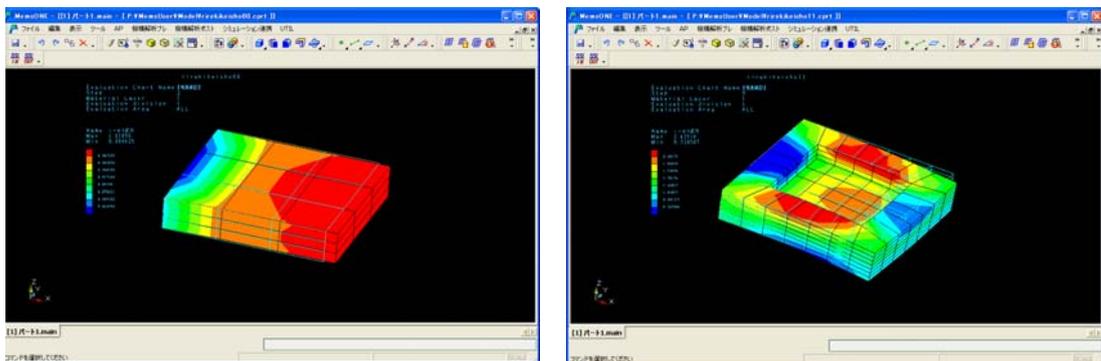
<成果>

接合解析モジュールとして、1) 応力履歴継承解析、2) 温度履歴継承解析、3) 接合強度評価、4) 材料親和性評価、5) 疲労強度評価のそれぞれの機能の開発を完了した。応力履歴継承解析では、解析対象の形状が大きく変化するような加工プロセスの直前と直後のデバイス形状に対して、加工プロセスの直前のメッシュ上の応力分布（および変位、ひずみ）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した上で②-(1)の弾塑性解析を行う機能を開発した。温度履歴継承解析では、解析対象の形状が大きく変化するような加工プロセスの直前と直後のメッシュに対して、加工プロセスの直前のメッシュ上の温度分布（および熱流束）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した上で②-(4)の熱伝導解析を行う機能を開発した。MEMSデバイスの作成過程は、エッチングなどのように形状が大きく変化するような加工プロセスの逐次実行の繰り返しによって構成されるので、加工プロセスの直前と直後の二つのデバイス形状に対する異なるメッシュ間の応力・温度のマッピング処理による履歴継承機能は、複数のプロセスをまたぐ力学特性・熱特性の評価に適していると考えられる。デバイス形状が大きく変化するような加工プロセスの直前と直後のメッシュデータは独立して作成されることを前提としているので、応力・温度のマッピング処理を行うためには異なるメッシュ間の近傍探索処理が必要となる。本件の応力履歴継承解析と温度履歴継承解析では、この近傍探索処理としてバケット法を採用することで、処理時間の短縮化を図っている。

応力履歴継承解析の機能検査を実施した。応力履歴継承解析の機能検査の例題としては、加工プロセスのある段階で残留応力などの応力分布を伴ったデバイスに対して、次の段階の加工プロセスとしてエッチングを行った場合のデバイスの変形挙動を解析する場面を想定した。機能検証の便宜上、引っ張り荷重を与えることによってエッチング直前のデバイス上の応力分布を作成した。図④-2-(1)-1はエッチング直前のデバイスのメッシュとエッチング直後のデバイスのメッシュをフレームワークソフトによって表示したものである。図④-2-(1)-2は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）をフレームワークソフトによって表示したものである。フレームワークソフトと接合実装解析ソフトのソルバーとの結合が正しく実現されており、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。本例題では、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いる。



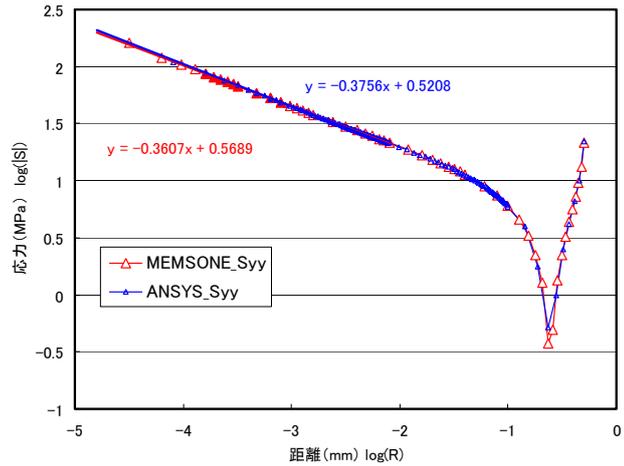
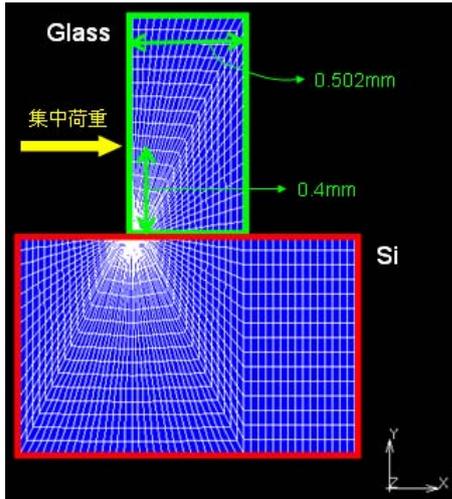
図④-2-(1)-1 エッチング直前のデバイスのメッシュと直後のデバイスのメッシュ
(フレームワークソフトによるメッシュ表示)



図④-2-(1)-2 エッチング直前のデバイスの応力分布と直後のデバイスの応力分布
(フレームワークソフトによる解析結果の表示)

接合強度評価では、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応力分布の計算結果から評価する機能を開発した。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応力分布は、②-(1)の弾塑性解析を実施することで得られるので、本機能では、②-(1)で実施した弾塑性解析の結果としての応力分布をフレームワークソフトが抽出し、指定した接合界面における応力分布の両対数グラフの傾きと切片をフレームワークソフトが自動的に算出する。一般的に接合界面端部における応力場は、接合端からの距離 r が十分小さい範囲で $\sigma = K/r^\lambda$ となることが知られているので、フレームワークソフトは、カーブフィッティングによって $\log_{10} \sigma = -\lambda \log_{10} r + \log_{10} K$ の係数 λ と K を算出する。

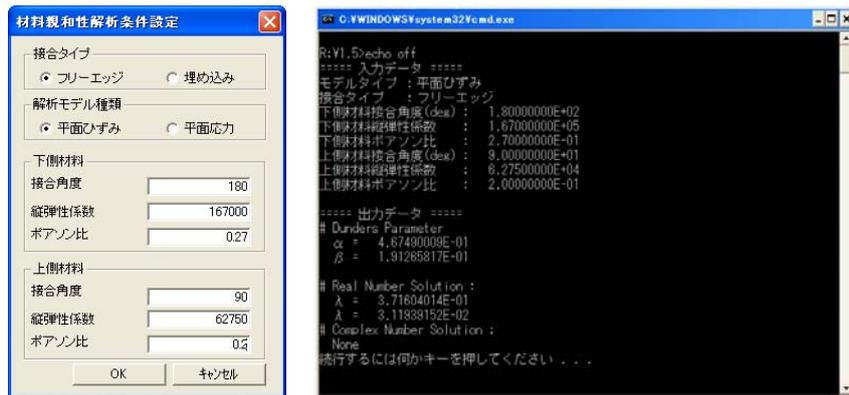
接合強度評価の機能検証として、シリコンとガラスがそれぞれ接合角度 180° と 90° で接合している状況で、ガラス側に荷重を与えるというダイシエア試験を解析した。図④-2-(1)-3はダイシエア試験のモデル概要と接合端部の応力場の両対数グラフと直線によるカーブフィッティングの結果を示している。接合端部の応力分布の解析結果は MemsONE と商用コードとで十分一致しており、両対数グラフの直線によるカーブフィッティングの結果から得られた応力特異性も、切欠きの場合の応力特異性についての *Bogy* の特性方程式の理論解と十分良く一致している。



図④-2-(1)-3 ダイシエア試験のモデル (右図) と応力分布の両対数グラフ (左図)

材料親和性評価では、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。本機能は、前述の接合強度評価のように弾塑性解析の結果としての応力分布から応力特異性の指数を算出するのと異なり、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は、切欠き (フリーエッジ) モデルでは **Bogy** の特性方程式であり、埋め込みモデルでは陳・西谷らの特性方程式であり、これらの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。

機能検証として、上述のダイシエア試験を解析した。図④-2-(1)-4 は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している。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。

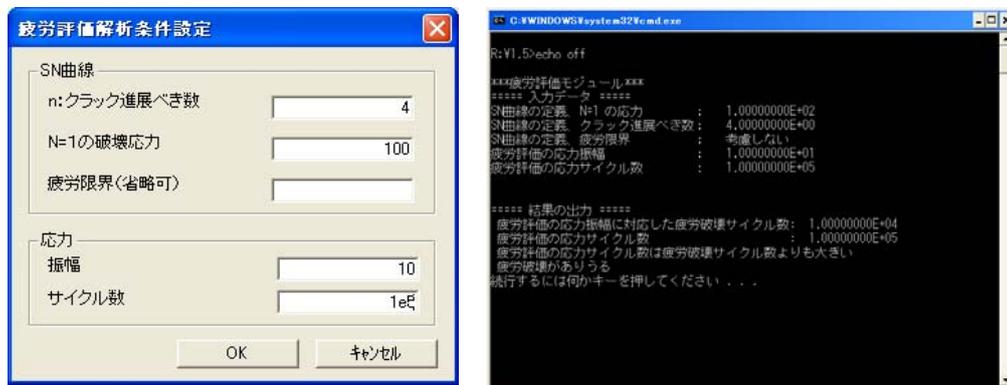


図④-2-(1)-4 材料親和性評価のパラメータ入力画面と結果出力画面 (フレームワークソフトによる表示)

疲労強度評価では、疲労評価試験の SN 曲線を特定するためのパラメータとして、クラック進展べき数とサイクル数 1 のときの破壊応力 (と疲労限界) を与えて、実際に適用する応力振幅とサイクル数が疲労破壊に達するかどうかを評価するものである。

図④-2-(1)-5 は 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している。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④-2-(1)-5 疲労強度評価のパラメータ入力画面と結果出力画面
(フレームワークソフトによる表示)

2) 妥当性の検証 (担当：三菱電機(株))

〈成果〉

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④-2-(1)-1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。

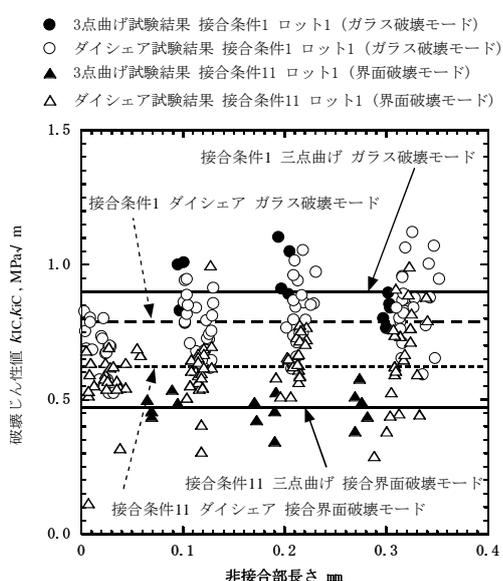
表④-2-(1)-1 陽極接合条件と破壊モードの関係

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

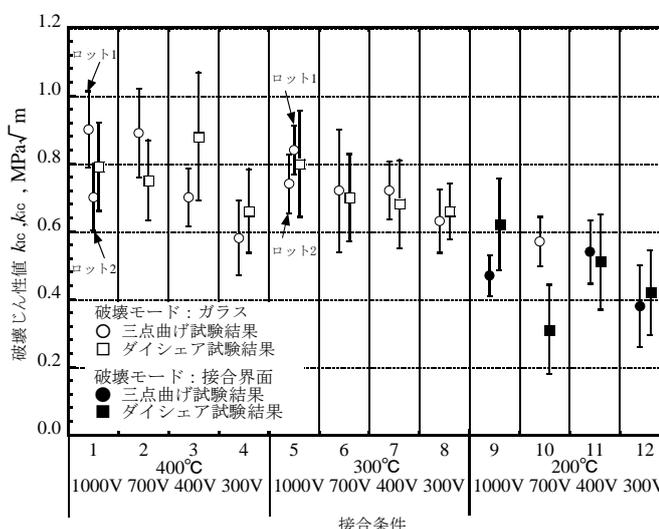
また、試験により得られた破断荷重とFEM解析により得られた応力拡大係数を用いて各試験片の破壊モードにあわせて破壊じん性値を算出し、数値解析の妥当性を検証した。有限要素法を用いた応力解析により三点曲げ試験、及びダイシエア試験時の非接合部先端の応力場にはガラスが

破壊した方向、及び界面方向について、き裂と同等の $r^{-1/2}$ の応力特異性が存在することが明らかになったため非接合部をき裂と同様に取り扱った。図④-2-(1)-6 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。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ていることから、解析結果の妥当性が確認された。

全接合条件の破壊じん性値を図④-2-(1)-7 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。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、接合を行なう際は、接合界面破壊が起こらない条件下で確実に接合を行な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。



図④-2-(1)-6 破壊じん性値と非接合長さの関係



図④-2-(1)-7 破壊じん性値と接合条件の関係

(2) 接合・封止データ採取 (担当：三菱電機(株))

〈成果〉

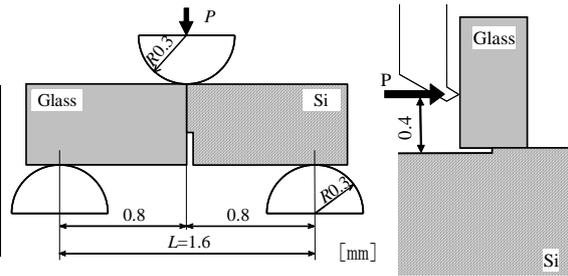
接合強度を定量化するため三点曲げ試験およびダイシエア試験を行ない、基本データをデータベースに登録した。平成 17 年度に確立した作製プロセスで試験片を作製し、接合条件を拡張して接合を行った。昨年度の接合条件も含めて、表④-2-(2)-1 で示す条件で接合を行った。

三点曲げ試験には(株)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)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。接合試験模式図を図④-2-(2)-1 に、試験結果を図④-2-(2)-2, 3 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

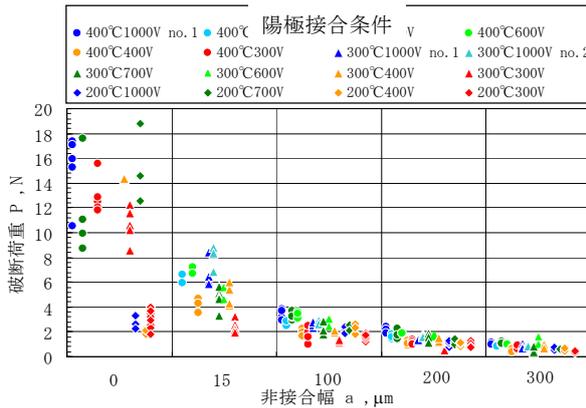
った。

表④-2-(2)-1 接合条件
(a) 陽極接合 (b) 半田接合

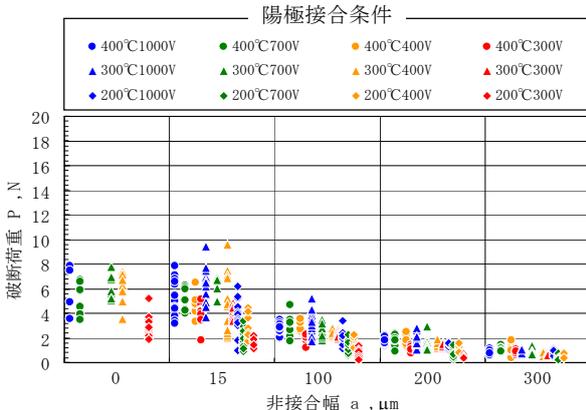
温度℃ 電圧V	200	300	400	下地膜成 はんだ 物性	スパッタ Cr/Ni/Au	電解メッキ Cr/Cu/Ni/Au	無電解メッキ Cr/Cu/NiP/Au
300	3hr	1hr	1hr	Sn-37Pb	233℃	233℃	233℃
400	3hr	1hr	1hr	Sn-3.5Ag	271℃	271℃	271℃
700	3hr	1hr	1hr	Sn-0.7Cu	277℃	277℃	277℃
1000	3hr	1hr	1hr				



(a) 三点曲げ試験 (b) ダイシエア試験

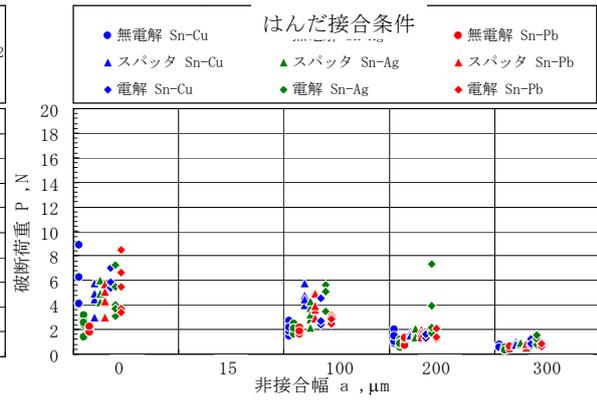


(a) 三点曲げ試験結果

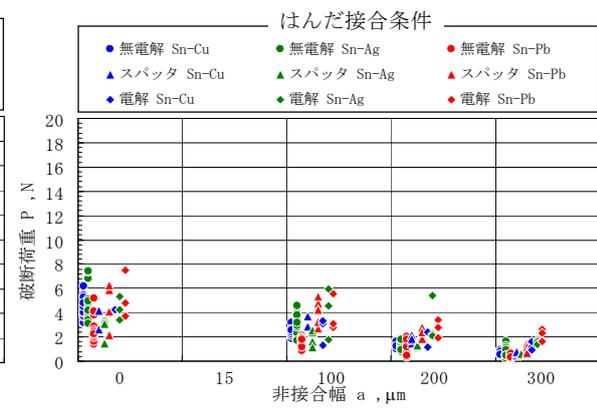


(b) ダイシエア試験結果

図④-2-(2)-2 陽極接合試験結果



(a) 三点曲げ試験結果



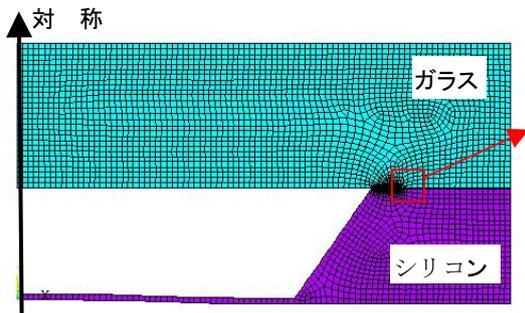
(b) ダイシエア試験結果

図④-2-(2)-3 はんだ接合試験結果

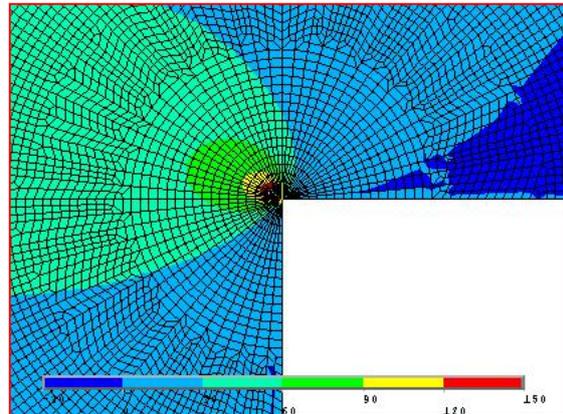
封止性の評価は、真空封止後のサンプルを、大気圧中でヒートサイクル試験(-40℃30分⇄125℃30分)に投入し、ダイヤフラムの反りで封止性の劣化を評価した。封止性評価サンプルは2mm×2mm、厚み20μmのSiのダイヤフラムであり、真空封止を行っているため、大気圧により変形し、接合端部に応力負荷が作用する。そこで、陽極接合部に負荷される応力状態を明確にするために数値解析を行った。解析には汎用有限要素解析ソフトウェア ANSYS Ver. 7.1 を用いた。2次元軸対称モデルとし、8節点2次要素を用いた。数値解析の結果(FEMモデルの一例(封止幅0.1mm))を図④-2-(2)-4、5に示す。また、封止幅と反り、破壊じん性値を求めた結果を表④-2-(2)-2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④-2-(2)-6に作製した封止性評価サンプルのダイヤフラム面の反りの状態を示す。また、測定した陽極接合の反りの平均値とその標準偏差σについて表④-2-(2)-3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④-2-(2)-4 変形図



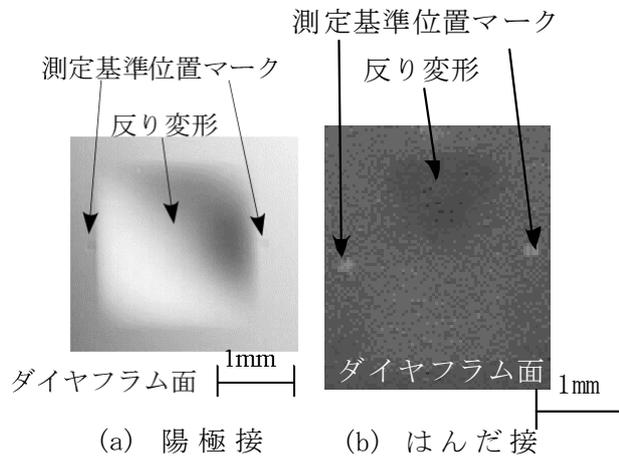
図④-2-(2)-5 周方向応力分布図

表④-2-(2)-2 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 kIC	界面方向 kiC
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④-2-(2)-3 封止幅反り (実測値)

封止幅 mm	反り平均 値 μm	標準偏 差 σ	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



図④-2-(2)-6 ダイアフラム面反り

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、作製したサンプルのほとんど ($n=803$) 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. 7 「⑤知識データベースの開発」

担当：みずほ情報総研(株)、(財)マイクロマシンセンター
岡山大学、香川大学、京都大学、東京大学、東京工業大学、
豊橋技術科学大学、名古屋大学、新潟大学、兵庫県立大学

(1) 知識データベース設計と実装 (担当：みずほ情報総研(株))

知識情報については知識データベース内部で有機的に連携させ、蓄積・検索・可視化する仕組みを構築する。また、データベースへのアクセスは「フレームワークソフト」の機能であるデータベースインターフェースにより行う。

これらの開発作業のうち、平成 18 年度の研究開発により、下記の成果を得た。

〈成果〉

知識データの蓄積がなされたデータベースを用いて、フレームワークソフトとの連携による知識データベースシステムの機能実装および統合検証テストを実施した。実装内容を以下に示す。

知識データを蓄積するために必要となる、MySQL を用いたデータベースを構築した。その際、知識データについては、プロセス、デバイス、材料特性、解析の大分類毎に定めた中分類で整理し、データベースへの格納を実施した。

また、ユーザによる知識データの追加、変更等を実現するために、知識データの編集機能を実装した。実装した編集機能を表⑤-(1)-1 に示す。

表⑤-(1)-1 知識データの編集機能

機能名	機能内容
事例追加	分類に事例を追加する。
事例削除	事例を削除する。
タイトル変更	タイトルを変更する。
ページ編集	事例のページ追加、削除、変更を行う。
キーワード編集	事例毎に設定するキーワードを編集する。
参考文献編集	事例毎に設定する参考文献を編集する。
ユーザ作成事例入力	指定フォルダ以下のユーザ作成事例を入力し、データベースに登録する。
ユーザ作成事例出力	ユーザ作成事例を指定フォルダに出力する。
ユーザ登録事例全削除	ユーザ登録事例をすべて削除する。

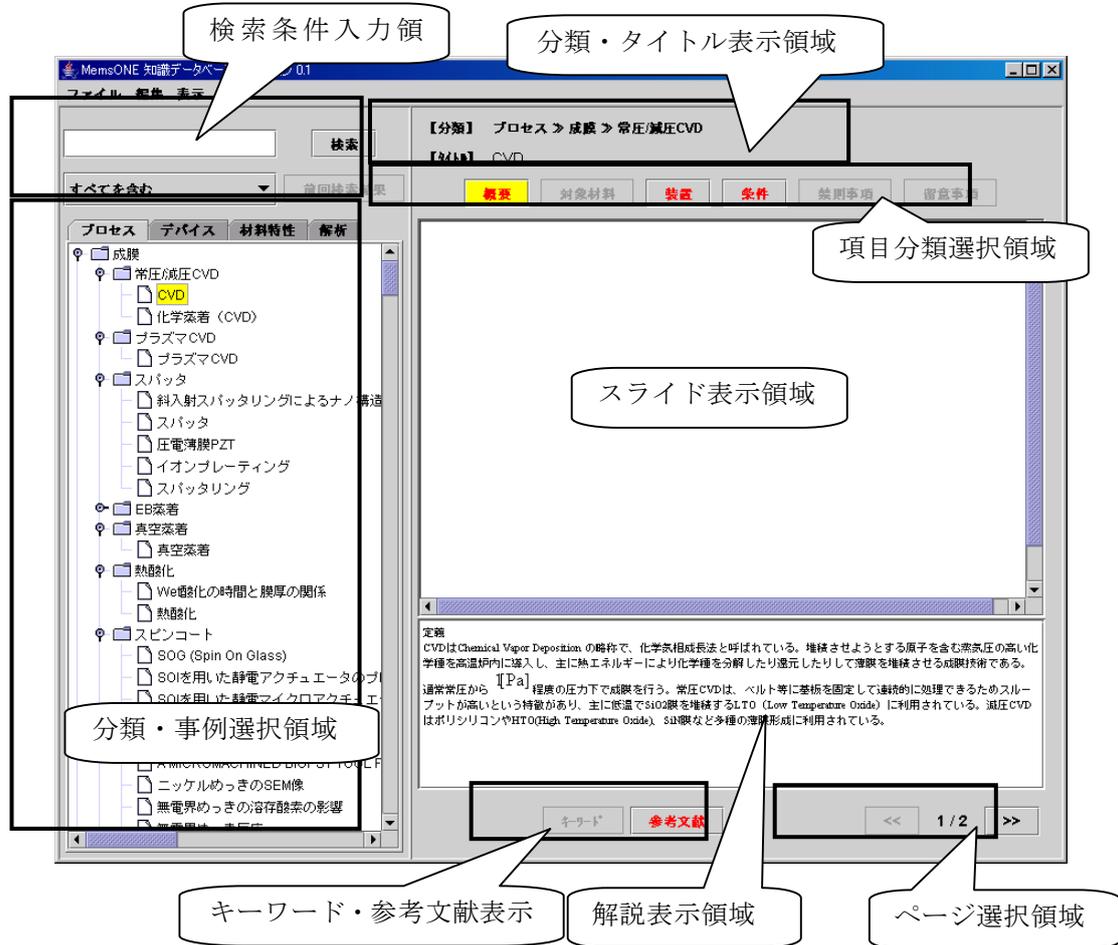
また、知識データを可視化するために構築した知識データベースシステムの画面要素を表⑤-(1)-2 に示す。

表⑤-(1)-2 知識データベースシステムの画面要素

画面要素	表示内容
検索条件入力領域	検索キーワード、条件を入力します。「検索」ボタンをクリックすると検索を実行します。
分類・事例選択領域	選択された分類の事例を一覧表示します。事例をクリックすると選択された事例が表示されます。なおインストール時に配布される事例は黒色で、ユーザ作成事例は赤色で事例タイトルが表示されます。
分類・タイトル表示領域	現在表示されている事例の分類、タイトルを表示します。
項目分類選択領域	表示中の事例に設定されている項目分類が選択可能となります。
スライド表示領域	選択されたページのスライドを表示します。
解説表示領域	選択されたページの解説文を表示します。

キーワード・参考文献表示	表示事例に関連するキーワード、参考文献を表示します。
ページ選択領域	表示を行うページを選択します。

また、データベース内に蓄積した事例に対して、可視化機能を使用して表示した例を図⑤-1)-1に示す。



図⑤-1)-1 知識データベースシステムの画面構成

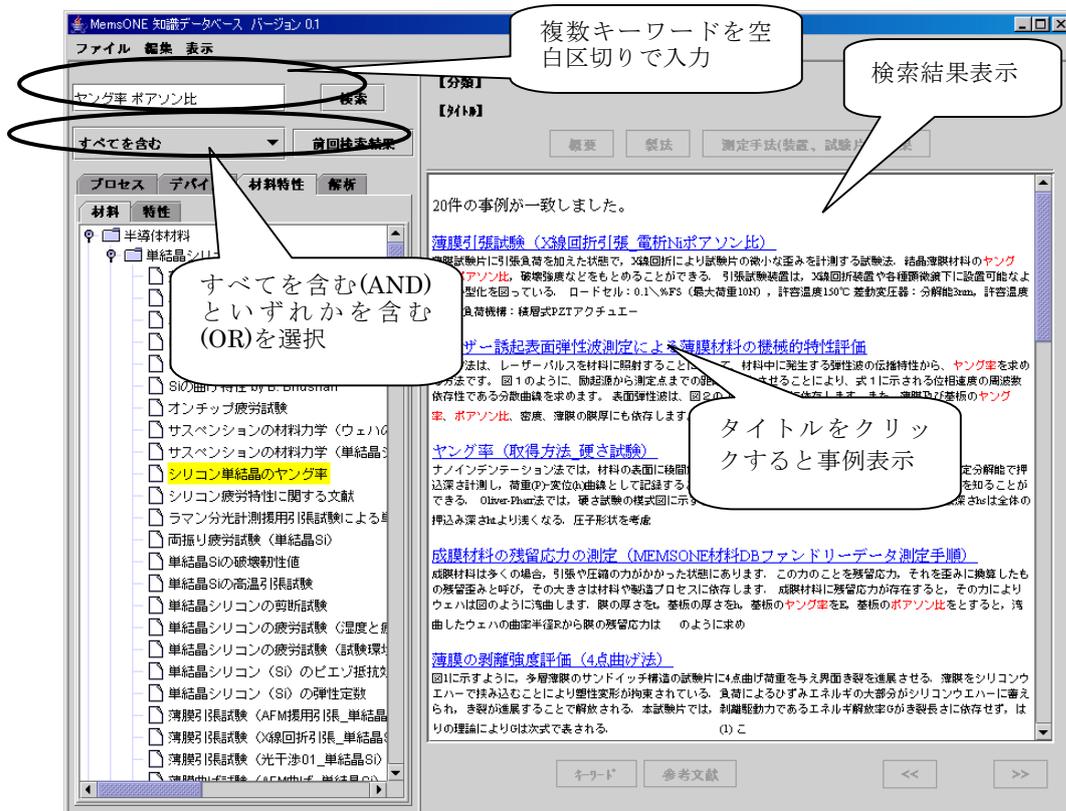
最後に、知識データベース内のタイトル、文書を対象に検索を実施し、入力されたキーワードを含む事例を一覧表示する検索機能を作成した。検索を実行する際に使用するメニューを表⑤-1)-3に示す。

表⑤-1)-3 検索メニュー

検索キーワード	検索キーワードを空白区切りで入力する。
検索モード選択	「すべてを含む(AND)」と「いずれかを含む(OR)」が選択可能。
検索結果表示画面	検索結果を表示する。以下の項目を表示し、タイトルをクリックすると、個別事例が表示される。 ・タイトル ・検索に一致した語句を含むページの解説文
「検索」ボタン	入力条件による検索を実行する。
前回検索結果	直前の検索結果を表示する。

「ヤング率」、「ポアソン比」の双方のキーワードを含む検索の実行例を図⑤-1)-2に示す。赤

色で検索キーワードが表示され、タイトルをクリックすることにより、検索条件に一致したページが表示される。



図⑤-(1)-2 検索実行例

以上より、知識データベース内部で有機的に連携させ、蓄積・検索・可視化する仕組みを構築し、知識データの蓄積がなされたデータベースを用いて、フレームワークソフトとの連携による知識データベースシステムの機能実装および統合検証テストを実施して、動作確認を完了した。

(2) 知識データの作成、整理・蓄積 (担当：9大学、マイクロマシンセンター)

MEMS設計に関わる以下の知識、知見を集約するとともに、代表的なデバイス、プロセス、計測評価等関連技術について事例を含めて知識データとして集約する。また、集約された知識データをデータベースシステムに登録する。

作業の実施は、マイクロマシンセンターおよびマイクロマシンセンターから再委託する9大学が担当する。

これらの研究作業のうち、平成18年度の研究開発では下記の成果を得た。

〈成果〉

1) 9大学

MEMS設計、プロセス、解析技術、材料特性、代表的なプロセス条件やマスク形状と最終的に得られるMEMS構造の対応例、計測手法等のデータを作成・集約した。全体として約800件(企業作成文を含む)の知識データを集約することができた。分野別ではプロセス分野と材料特性分野が30%強と多く、デバイス分野20%強、解析分野が10%弱と少ないが、全分野を網羅しており、知識データベースとしての有効性を発揮できものである。ベータ版頒布以降普及が進むにつれ解析事例が蓄積でき、知識データベースとして有用性が增大するものと期待される。

各大学における成果内容は、下記「9大学の成果概要」に記載の通りである。

2) マイクロマシンセンター

9大学から収集するデータに加え、知識データベースを更に充実するため、国内外のMEMS関連の主要学会（ μ TAS2006（International Conference on Miniaturized Systems for chemistry and Life Sciences）とMNE2006（International Conference on Micro-& Nano-Engineering））から最新知識情報を探索・収集し、MEMSのデバイス、プロセス・試作、計測・評価及び材料特性分野の最新の知識データを今年度分として約10件集積した。3ヶ年の活動により約110件の知識データを集積し登録した。

また、マイクロ化学研究組合で構築された知識データベースの中でMEMS関連の約750件の知識データを先方の了解の下にMemsONE知識データベースに組み込むことができた。組み込み作業はみずほ情報総研が実施した。更に、マイクロマシンセンターが平成10年に「マイクロマシン技術専門用語」の冊子を纏めたが、これはMEMS関連の基本的用語の理解には有用であることから、再度電子データ化してMemsONE知識データベースに約200件収納した。組み込み作業は同じくみずほ情報総研が担当した。

以上の成果と大学の成果とを合わせると約1750件の知識データが集積できたことになり、本プロジェクト推進の最初の知識DB委員会で申し合わせた目標値1000件を達成することができた。

<9大学の成果概要>

(a)「MEMS材料の電磁特性計測とそれを活用した電磁界解析のための知識データベース構築」

担当：岡山大学

平成17年度の成果を受けて、本プロジェクトの最終年度となる平成18年度は、電磁特性DBと他の諸特性に関するDBとの整合性を検討するとともに、DBを組み込んだ設計・解析システムの機能および精度を確認し、実用化を目指して改善を図った。さらに、利用促進のため、ユーザが必要とする理論および使用法に関するマニュアル作成に必要な知識の提供、解析結果の評価方法および設計指針に関する知識DBの作成、各種のMEMS応用機器に対応した標準的な解析例の提示などを行なった。

(b)「マルチプロセスデータベースのための知識データベースの構築」

担当：香川大学

研究試作しているデバイスのプロセスデータをデータベースとして登録した。具体的には原子間力顕微鏡用プローブとして研究している櫛歯アクチュエータについて、様々なバネ定数、バネ構造、共振周波数を有するデバイスを作製し、理論計算やシミュレーションとのずれについて考察・データベース化した。またこれに関連し、ラグランジュ方程式による櫛歯アクチュエータの解析手法をデータベースに登録した。また、Siの熱膨張アクチュエータについてもその作製方法のレシピ詳細をデータベース登録した。その他、標準プロセスのチュートリアル、ホーロー構造のAFMプローブ、DNAピンセット、マルチプローブチップ、光干渉型プローブなど、複雑な形状を作製するためのプロセスとノウハウをデータベース化した。さらに、櫛歯アクチュエータの自励発振についてもデータベースとして登録した。

(c)「MEMS材料の機械的特性データベースのための解析知識データベースの構築」

担当：京都大学

平成18年度は、データベース構築、情報の蓄積をH17年度に続いて行うとともに、機能解析ソフトの機能評価および構造に関して検証を行った。また、知識DBが提供すべき機能を継続して検証するとともに、データベースの構造の充実化を図った。

(d) 「MEMS材料の熱伝導・熱伝達特性データベースのための解析知識データベースの構築」
担当：京都大学

平成18年度はこれまでに蓄積した、MEMS用薄膜材料、内部流動、雰囲気環境等の熱伝導・熱伝達特性に関するデータを基に、知識データベースを完成させるとともに、既に入力されている知識データベースの見直しを図りながら、最新の材料試験の結果を反映させた伝熱特性に関するデータベースを更新した。また、それに平行した熱流動実験結果、MEMS用解析システムの評価用基準モデル、試作結果などについての知識データベースへの反映を実験グループと協力して実施した。

(e) 「ドライエッチングデータベースのための知識データベースの構築」

担当：東京大学

従来のSOI（貼り合わせシリコン基板）を用いたバルクマイクロマシニング型アクチュエータでは、SOI活性層にサスペンション等の機械構造と、静電歯電極などの駆動機構の両方を製作する例がほとんどであった。このため、限られた面積内でコンパクトにアクチュエータを設計するための自由度が低いことが問題であった。これを解決するための手法として、本研究では、SOIの活性層と支持基板の両方をドライエッチングによって加工し、XYZステージなどの比較的複雑な機構を2階建て構造としてコンパクトに設計する方法を提案した。SOIと基板の2つのレイヤー間の機械的・電氣的接続を確保するために、埋め込み酸化膜を介した遊離構造や電源配線用サスペンション、スティッキングを利用したSOI-基板間の電氣的接続などの構造を考案し、一連の設計手法をトポロジカル・レイヤースイッチ（複数のデバイス層間を縫って複雑な幾何位相をもつ構造をつくる）手法として提案した。

(f) 「MEMSを構成するマイクロ・ナノ材料の機械的特性評価」

担当：東京工業大学

本年度のMEMSを構成するマイクロ・ナノ材料の機械的特性評価に関する研究開発はa) 集束イオンビーム加工（FIB）の影響、b) 電解研磨による超微細引張試験片（断面径約50・ μm ）の加工法と機械的特性評価およびc) 高分子（SU8）膜の強度に及ぼすプロセスの影響および密着強度計測評価法の開発、d) ステンレス薄膜の曲げ疲労試験を行った。

a) に関してはこれまでに報告してきた強度や変形挙動の解析に加え、ビームの照射方向や被照射材の化学組成が照射時に誘起されるナノ結晶の析出形態や結晶方位に及ぼす影響を明らかにした。

b) に関しては従来の材料試験で用いられている加工法と同一かつ損傷が最も少ないと考えられている電解研磨を用いて作成するシステムを開発した。具体的には所謂ドッグボーン型引張試験片をコンピュータ制御された全自動超精密電解研磨装置で作成し、その機械的特性と試験片径および組織との関連を求めた。

c) に関してはMEMSで用いられる光感光レジストのSU8を用い、プロセス特に露光量の強度に及ぼす影響を微小曲げ試験片および引っ張り試験片を用いて求めた。一方密着強度に関してはフォトリソグラフによってシリコン基板上に直径200-50・ μm の円柱状のジグを作成した。これをマイクロサイズ試験片用の材料試験機を用いてSU8とシリコン間のせん断および引っ張り密着強度を求めた。

d) 板厚20・ μm 、結晶粒径1・ μm のステンレス薄膜より長さ50・ μm のカンチレバー型曲げ疲労試験片をFIBで加工し、疲労強度および変形機構を解析した。

(g) 「成膜プロセスデータベースおよび電子回路集積プロセスのための知識データベースの構

築」

担当：豊橋技術科学大学

プロジェクトの最終年度である今年度は、引き続き CMOS 集積化 MEMS プロセスの研究を実施し、CMOS 回路集積プロセス、マイクロマシニングの定義、事例知識データを、新規に 33 件登録した。CMOS 回路集積プロセスの知識データにおいては、集積回路と MEMS デバイスの一体化に必要な基本技術、ならびに基本プロセス、ならびに、それらを応用したデバイス事例について記述している。プロジェクト期間全体を通じ、本学の知識データ登録件数は 50 件を超えることができた。

(h) 「異方性ウェットエッチングデータベースのための知識データベースの構築」

担当：名古屋大学

シリコン単結晶がアルカリ水溶液でエッチングされるさいのエッチング速度を Si(100), (110), (111)の 3 方位について表示するシステムを完成した。パラメータはエッチング液 (KOH, TMAH の 2 種類)、溶液濃度、エッチング温度の 3 項目である。昨年度に試作したシステムに加えて、高濃度溶液の条件で 100°C 以上の高温領域のエッチング速度データを新たに増強した。

このシステムは、これまで当研究室が測定・評価してきた範囲をカバーする上記条件を内挿する範囲で、上記パラメータを与えるとエッチング速度を計算して表示する。さらにパラメータによるエッチング速度の変化をグラフ表示することができる。

(i) 「マイクロデバイス用材料の接合・接着信頼性予測手法の開発」

担当：新潟大学

今年度は、マイクロデバイス用材料(シリコン、ガラス)の陽極接合・接着法について、各種の接合条件(電圧、時間、温度)・接着条件(接着剤の種類)での接合部・接着部への、使用中の環境因子(温度、時間、湿度、逆電圧等)の影響を検討した。

陽極接合では、ガラスの種類の影響について検討した結果、PYREX7740, TEMPAX よりも、SW-YY の方が低い接合温度で接合可能である。これは、リチウムの添加で低い温度でのイオンの移動が可能であり、接合時の電荷量の観点では大差がない。また、使用中の環境因子として、湿度(80%)や温度(RT~80°C)は接合部の機械的性質にほとんど影響しない。しかし、接合部への逆電圧の付与は接合部に大きな損傷を与える。この劣化は、接合時に接合界面から移動したアルカリイオンが逆電圧の付与で接合界面に再度偏析し、水溶性の物質が形成されることが原因である。

接着では、多分岐フォスファゼンポリマーをグラフトしたシリカを用いるエポキシ樹脂の硬化物の特性と接着強度について検討した。その結果、多分岐フォスファゼンポリマーによる硬化物のガラス転移温度は市販の硬化剤の系よりも 30~50°C 上昇し、耐熱性が向上することが分かった。また、アルミ板間の接着強度も多分岐フォスファゼンポリマーグラフトで硬化した方が市販の硬化剤を用いたときと比較して、約 1.5 倍になることが分かった。また、相対湿度 96%、90°C で 72 時間放置後のガラス転移温度と接着強度の低下は、市販の硬化剤の系と比較して小さいことが明らかになった。この様な結果は、シリカナノ粒子が硬化物中へ疎水性のグラフト鎖間の化学結合を介して組み込まれているためと考えられる。

(j) 「マイクロからナノ領域での材料特性取得のための知識データベースの構築」

担当：兵庫県立大学

プロジェクト 3 年目となる 18 年度は、知識データベースの入力を重点に実施した。具体的には、MEMS 材料の力学特性(特に、ヤング率・ポアソン比・引張/曲げ強度等)の計測方法、MEMS デバイス (Ti-Ni 形状記憶合金を用いたマイクロアクチュエータ等)、MEMS プロセス (Au-Sn はんだ接着等)に関する知識情報を論文ならびに国際会議プロシーディングから抜粋し、55 件の

データを入力した。兵庫県立大学で取得した材料データについても入力を行った。委員会活動では、主に a) 知識データ入力画面ならびに MemsONE ソフト画面の開発、b) 知識データ入力情報の内容について議論・検討した。

また、マイクロマシン関連の国際会議：APCOT'06（シンガポール，6/25～6/28）および MEMS2007（神戸，1/21～1/25）、材料関連の国際会議：THERMEC'06（カナダ，7/4～7/8）に出席・発表し、ナノ・マイクロレベルでの機械的特性評価技術の最新情報収集を行い、知識データベースに反映させた。

研究開発項目「MEMS用材料・プロセスデータベースの開発」

3. 8 「①材料・プロセスデータベースの構築」

産業技術総合研究所、(財)マイクロマシンセンター、みずほ情報総研(株)の共同実施

(1)～(3) 産業技術総合研究所が担当

(4) 材料・プロセスデータベースの構築 (マイクロマシンセンター、みずほ情報総研(株))

収集した薄膜材料の機械特性やプロセスデータを体系化し、フレームワークソフトの基本機能であるデータベース・インターフェースを通して、初心者へのMEMS設計の支援を行うことができるMEMS開発・設計にフィットした、使い易い材料・プロセスデータベースを構築する。

1) 材料・プロセスデータベース設計と実装 (みずほ情報総研(株))

知識データベースとの整合を執りつつ、材料・プロセスデータベースの概念設計および詳細設計を行う。概念設計においては、材料・プロセスデータ内容の構成要素の抽出、構成要素の従属関係等、材料・プロセスデータベースの要件抽出、機能を決定する。詳細設計においては、フレームワークソフトとの連携を考慮したシステムのプログラム構成を策定する。

これらの開発作業のうち、平成18年度の研究開発により、下記の成果を得た。

〈成果〉

フレームワークソフトと連携した機能の実装および統合検証テストを実施して、MySQLを用いたデータベースシステムを開発した。

これらの開発は「知識データベース設計と実装」の中で平行して実施した。詳細は3.7章を参照。

2) 材料・プロセスデータの整理・蓄積 (マイクロマシンセンター)

MEMS設計に関わる、産業技術総合研究所が計測または収集した材料・プロセスデータの整理、蓄積を行う。また、蓄積されたデータをデータベースシステムに登録する。

これらの開発作業のうち、平成18年度の研究開発により、下記の成果を得た。

〈成果〉

前年度にみずほ情報総研(株)と協力して設計し試験的にデータ入力を試みた材料データ整理・蓄積方法を見直し、さらに使いやすいものに仕上げた。この書式を用いて、産業技術総合研究所が計測または収集した半導体、酸化膜/窒化膜、金属、ポリマーの材料特性データの整理・蓄積を行った。

また、材料特性データの収集状況を容易に把握する為に、MEMS設計・解析に必要と考えられる材料特性一覧をマップに仕上げ、整備した。これに基づいて、産業技術総合研究所が計測または収集する他に、材料メーカーの保有する材料特性データを広範囲に収集することに努め、更にMEMS関連学術文献や国内外の学会、展示会の発表資料 (HanoverMesse2006、NSTInanotech-2006 : The nanotechnology Conference and Trade Show、Nanotech2007) から材料特性データの抽出を行い、材料データベースとしての蓄積・整備をした。この結果、半導体、酸化膜/窒化膜、金属、ポリマー、ガラス/セラミクス、磁性材料、圧電材料、形状記憶合金、その他の9分野全部に亘り、合わせて約230件の材料諸特性値を整備した。また当初計画には入っていなかった接合強度解析の評価に有用な破壊じん性値56件を三菱電機と協力して収納した。

今後の課題は MemsONE ユーザの要望に合わせて、既得データの精度向上と新規材料特性値の充実を図ることである。

研究開発項目「ナノインプリント加工・解析システムの開発」

3. 9 「①熱・光ナノインプリント加工解析システムの開発」

担当：みずほ情報総研(株)、日本ユニシス・エクセリョーションズ(株)

①-1 熱ナノインプリント加工解析システムの開発（みずほ情報総研(株)）

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の内、熱ナノインプリント・プロセス解析システムに対応した有限要素法による解析機能を開発する。

これらの開発作業のうち、平成18年度の研究開発では下記の成果を得た。

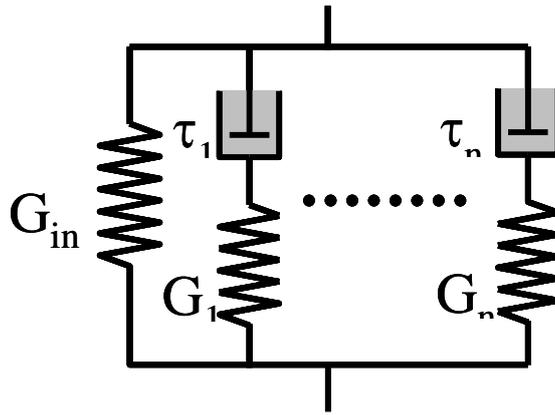
(1) 熱ナノインプリント・プロセス解析モデルの構築

〈成果〉

熱ナノインプリント解析では、例えば加熱→押込→保持→冷却→離型という様に趣の異なる複数のプロセスを連続して解析する必要がある。そこで本シミュレータでは「静的微小変形プロシージャ」、「静的大変形プロシージャ」、「準静的微小変形プロシージャ」、「準静的大変形プロシージャ」、「定常熱伝導プロシージャ」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実行出来るようにした。境界条件もプロセス毎に独立して設定することが出来る。上述の最も一般的な成型プロセスを例にとると、加熱プロセスを定常熱伝導プロシージャで解析した後、押込プロセス以降を準静的大変形プロシージャで解析する、といった解析を可能にした。

樹脂材料モデルとして「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。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①-1-(1)-1に示す。材料の静的な状態を決定する横弾性係数 G_{∞} 、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 τ_i のペア)から成るモデルであり、ダッシュポットの影響で粘性、すなわち歪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。温度依存性については、WLF則と呼ばれる温度-時間換算則を用いて考慮される。一方、粘弾性モデルの体積方向の挙動は、温度および歪み速度に依存せず体積弾性率 K_{∞} 一定を仮定した。なお、粘弾性モデルの定義に必要な物性値は「長期ヤング率」、「長期ポアソン比」、「無次元化横弾性係数と時定数のペアの配列」、「WLF則の温度定数3種」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。従って、桁落ちが心配される弾塑性体モデルよりも剛体モデルを用いる方が賢明であるが、有限要素法で剛体要素を扱うには若干特殊な内部処理が必要である。本シミュレータ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。



図①-1-(1)-1 粘弾性モデルのせん断挙動モデル図

(2) 熱ナノインプリント・プロセス解析シミュレータの開発（解析機能追加）

<成果>

熱ナノインプリント・プロセス解析に対応する為、先述の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行った。

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（フレームワークは四面体は未対応）を、2次元（軸対象、平面歪み、平面応力）では四角形要素・三角形要素を開発した。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為、要素はすべて一次要素とした。

接触アルゴリズムとして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。力学的な解析プロシージャでは各節点の釣り合いの式に加え、表面に対して節点が貫入していないかの判定を行うと共に、接触を開始した接触ペアに対しては節点が表面上に位置するという幾何学的条件を課す。熱伝導の解析プロシージャでは表面上にある節点の温度が表面の側の接触点と一致するという条件を課す。いずれの場合も条件を課す方法としてラグランジュの未定係数法を用いた。

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。MINRES 法は非正定置スパース対称行列の為の残差最小化法であり、ラグランジュ未定係数法による接触や剛体要素に対する処理を施した有限要素マトリックスの解法として近年利用されている。特に高アスペクト比のパターンに対する充填解析では得られる有限要素マトリックスが大規模かつ悪条件となる為、直接法による解法に比べて本手法が有効である場合が多いと考えられる。

自動増分調整機能とは必要に応じて解析の時間刻みを調整する機能である。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は自動増分調整機能が必要不可欠である。本シミュレータには収束不能、急激な変形等が起こった場合に時間刻みを細かくして解析を続行させる機能、および良好に収束する増分が続いた場合に時間刻みを大きくする機能を組み込んだ。

フレームワークとの結合機能の開発も行った。具体的には、フレームワークが出力する解析条件ファイル（拡張子 **kinp**）から本シミュレータの入力ファイル（拡張子 **fin**）を作成するフォーマット変換プログラム、およびシミュレータ内部で解析結果フォルダ（拡張子 **post**）以下のファイル群を作成する機能を開発した。

(3) シミュレーション結果の総合評価検証

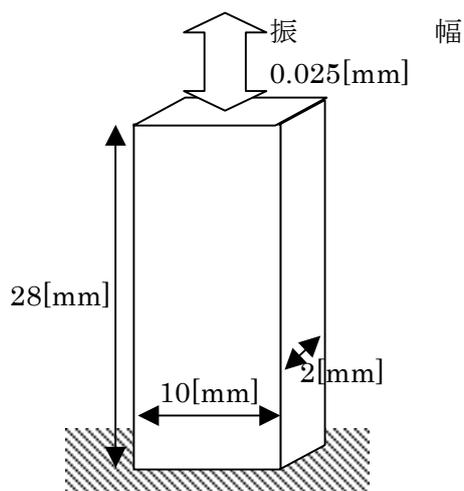
<成果>

粘弾性モデルの精度検証として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。精度検証例題の概要を図①-1-(3)-1 に示す。材料物性値は産総研測定 of PMMA の値を用い

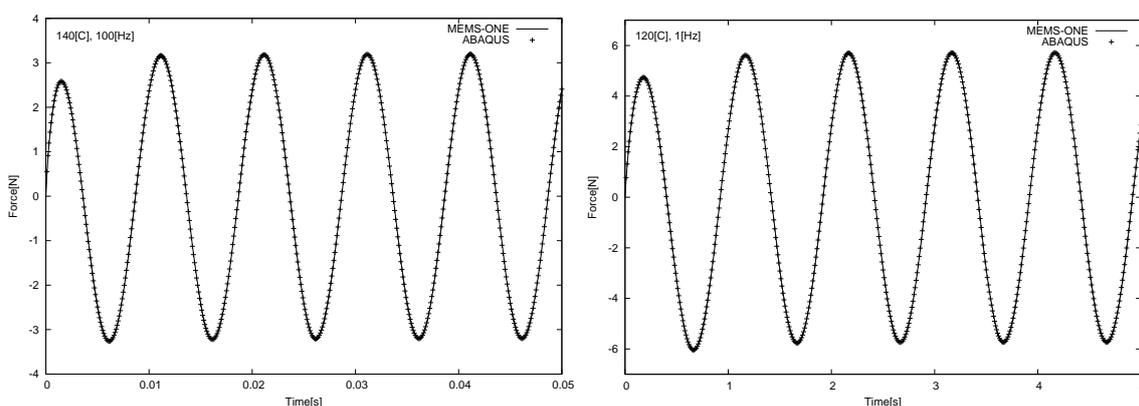
た。140℃と 120℃で 1[Hz]および 100[Hz]の強制振動を与えた場合の荷重時刻歴を図①-1-(3)-2に示す。いずれのケースでも本シミュレータと ABAQUS で精度良く一致していることがわかる。この検証により、本シミュレータの粘弾性材料モデルが正しく組み込まれていることが確認できた。

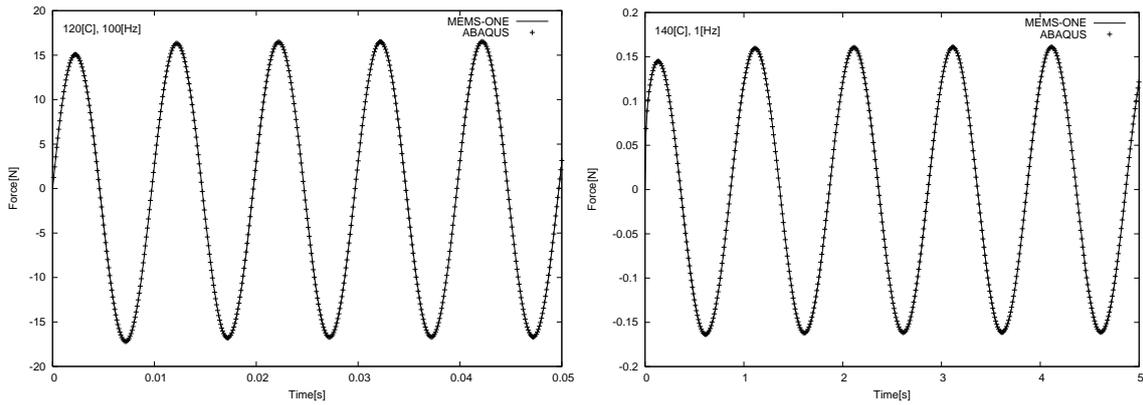
実際的なインプリントプロセスに対しての実験検証を大阪府立大学と共同にて行った。実験検証例題の概要を図①-1-(3)-3に示す。圧力一定の境界条件の下で押込時間を変化させ、粘性の影響により時間と共に充填率が上がって行く様子を図①-1-(3)-4に示す。成型形状比較により、解析結果と実験結果が良く一致している事が確かめられた。

より詳細な実験との比較検討は産総研と共同にて行った。(詳細は産総研担当の節を参照)こちらでも実験と解析が良好に一致することが確かめられた。

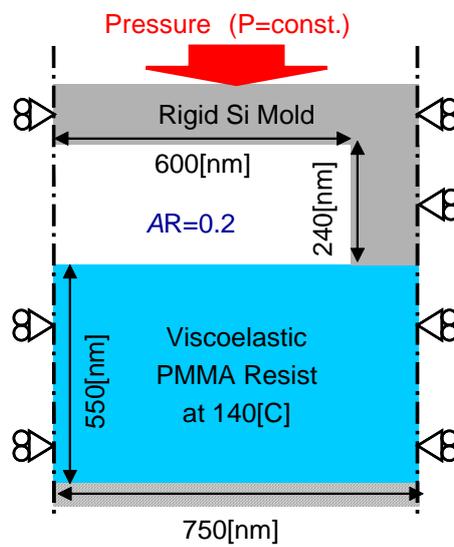


図①-1-(3)-1 精度検証例題概要

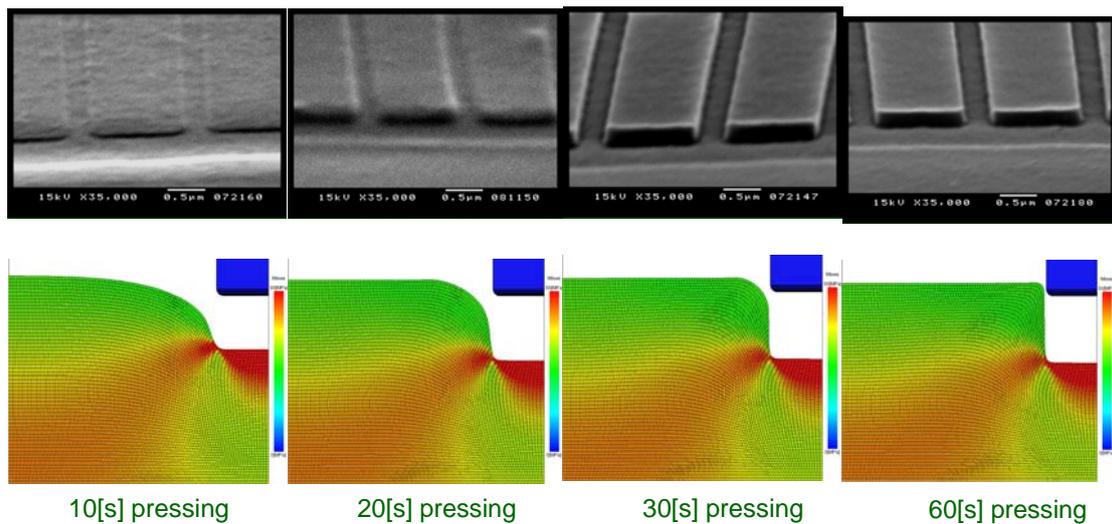




図①-1-(3)-2 精度検証例題での ABAQUS との比較結果



図①-1-(3)-3 実験検証例題概要



図①-1-(3)-4 実験検証例題の比較結果

①-2 光ナノインプリント加工解析システムの開発 (みずほ情報総研(株))

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の内、光ナノインプリント・プロセス解析システムに対応した電磁波を解析する機能を開発する。

これらの開発作業のうち、平成 18 年度の研究開発では下記の成果を得た。

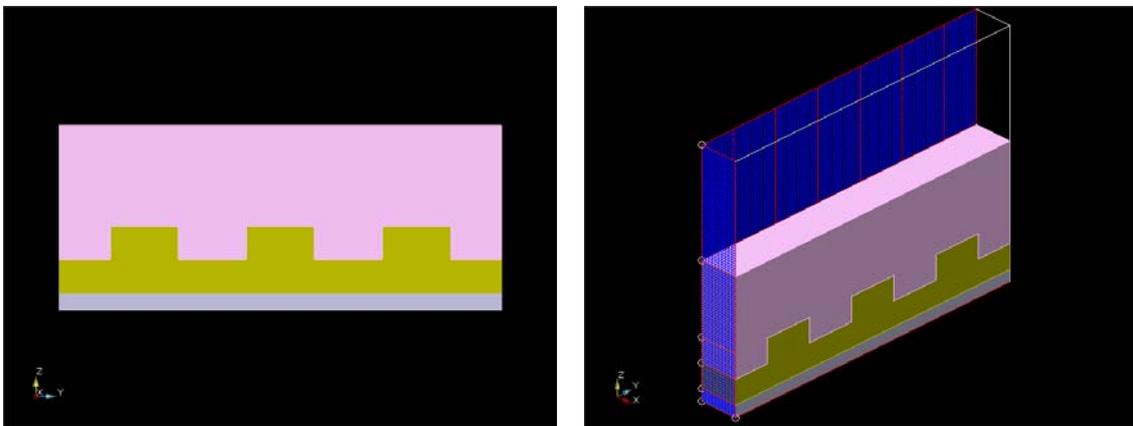
(1) 光ナノインプリント・プロセス解析シミュレータの開発

(インターフェースの設計、入出力データ変換機能作成、エラーチェック機能作成、実行制御機能の作成を含む)

<成果>

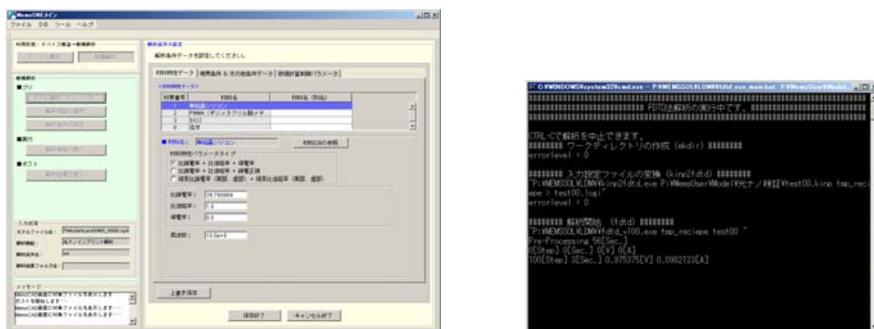
光ナノインプリント・プロセス解析モデルに基づいた FDTD 法による電磁波解析プログラムをフレームワークへ結合し、統合検証テストを行った。

解析モデルは、プロセス解析ツールあるいはデバイス構造作成ツールで作成することができる。ここでは、プロセス解析ツール（マルチプロセスエミュレータ）を用いてライン&スペース構造の解析モデルを作成し、FDTD 解析用の直交格子を作成した結果を図①-2-(1)-1 に示す。直交格子は解析に必要な空間領域を含めて生成する必要がある。



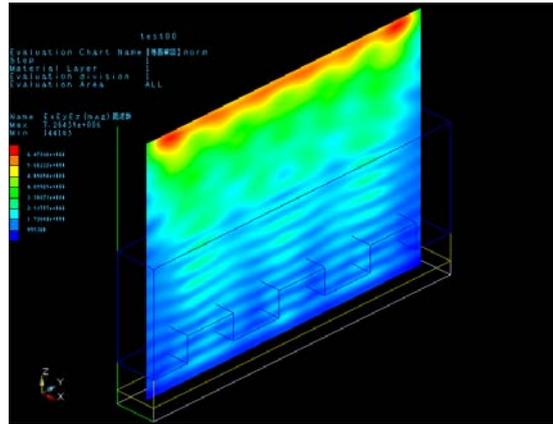
図①-2-(1)-1 マルチプロセスエミュレータを用いて作成した解析モデル（左）に FDTD 解析用の直交格子を生成した結果（右）

図①-2-(1)-2 にフレームワークの解析条件設定画面と計算実行時の計算状況表示画面を示す。フレームワークで設定された解析条件は、変換プログラムを介して、FDTD 法の電磁波解析プログラムへ引き渡される。



図①-2-(1)-2 解析条件設定画面（左）と計算状況表示画面（右）

次に、解析の実行後、フレームワークソフトを用いて電界強度分布を表示した結果を図①-2-(1)-3 に示す。



図①-2-(1)-3 FDTD 解析用の直交格子生成（左）と電界強度分布（右）の結果

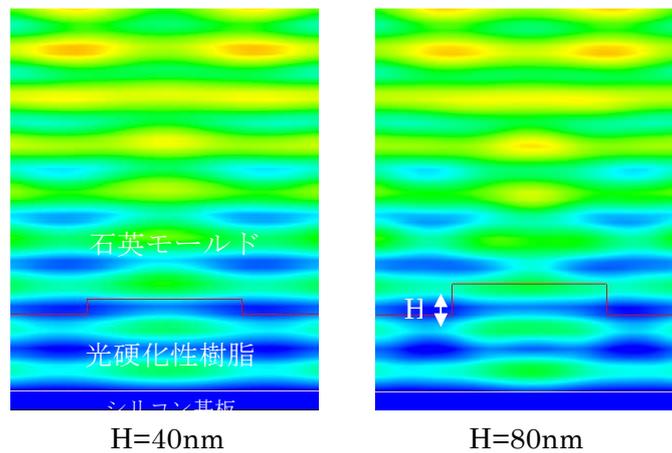
以上より、プロセス解析ツール（マルチプロセスエミュレータ）との連携を含め、FDTD 法の電磁波解析プログラムとフレームワークとの統合検証テストを完了した。

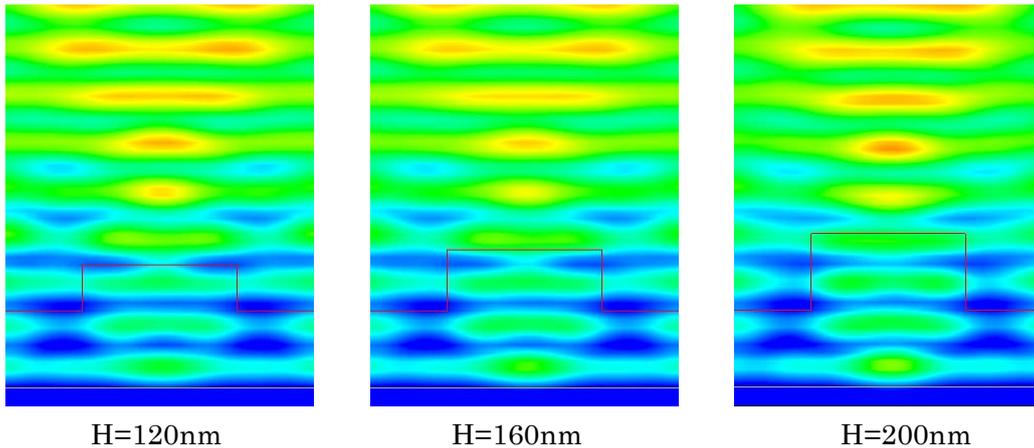
（2）シミュレーション結果の評価検証

〈成果〉

ライン&スペース構造の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文献（“Impact of residual layer uniformity on UV stabilization after embossing”, M. Wissen, et. al., 2004, American Vacuum Society.”）との比較検証により評価した。

波長 365nm の単色光がライン&スペース構造の検証モデルに入射したときの、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①-2-(2)-1 に示す。





図①-2-(2)-1 ライン高さ 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。ライン高さの違いにより、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。

以上より、開発したシミュレータは、光ナノインプリント・プロセス解析シミュレータとして、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。

①-3 フレームワークソフトの改修（日本ユニシス・エクセリューションズ(株)）

熱ナノインプリント・プロセス解析シミュレータおよび光ナノインプリント加工解析システムの FDTD 法電磁波解析プログラムに対応する為に改修すべきフレームワーク機能の研究開発を実施する。

これらの開発作業のうち、平成 18 年度の研究開発では下記の成果を得た。

（1）プロセス解析シミュレータの解析条件設定

熱ナノインプリント・プロセス解析シミュレータの材料物性データ、境界条件、計算条件パラメータなどの解析条件設定 GUI の組み込みを行う。

〈成果〉

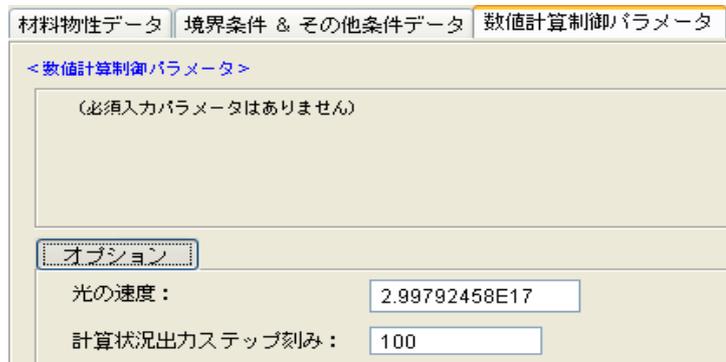
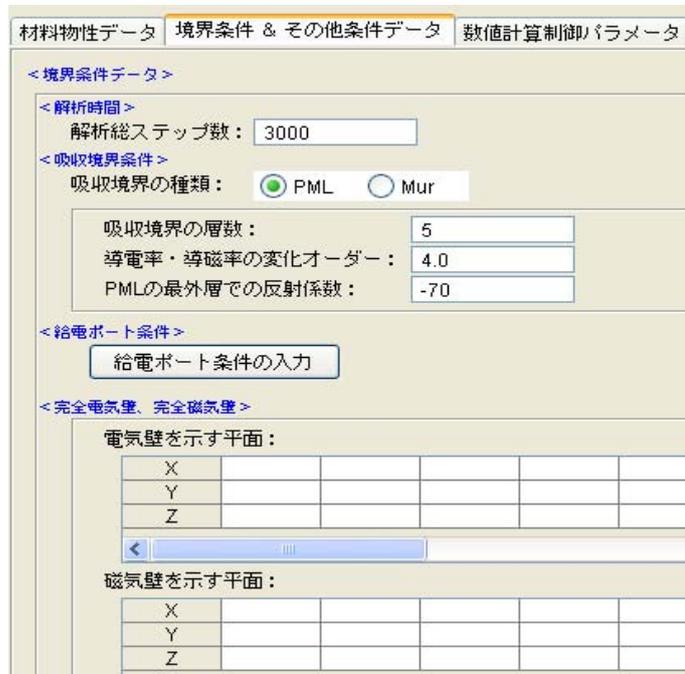
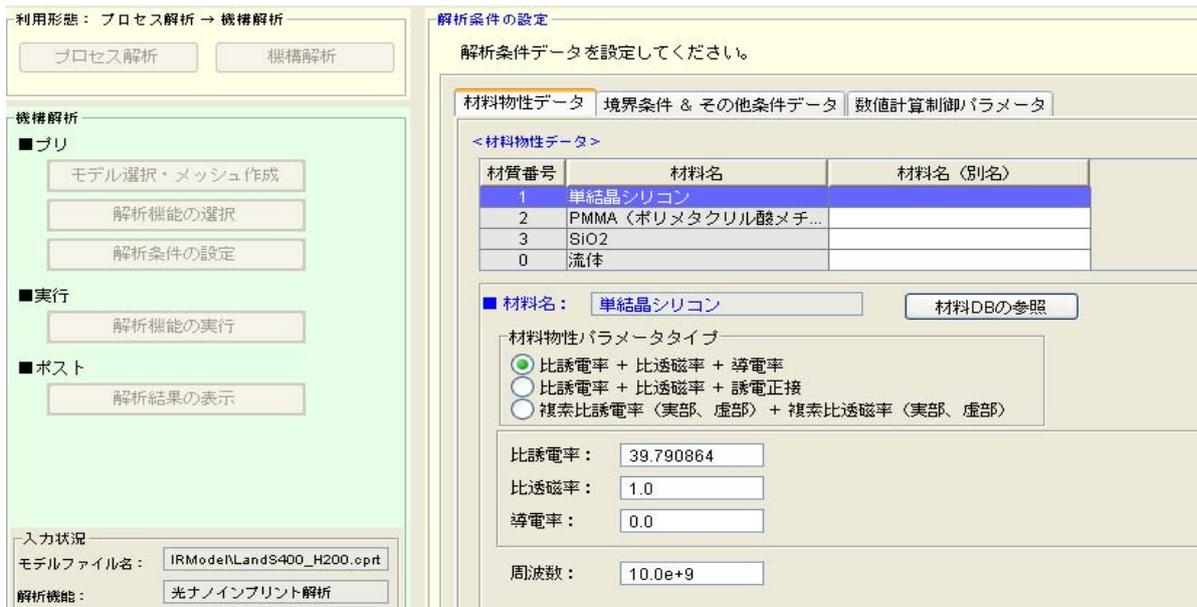
「MEMS 用設計・解析支援システムの開発」のフレームワーク開発における解析条件設定機能をベースとして、平成 17 年度の開発作業を踏まえて、対象モデルファイルの選択、材質番号と材質名の指示、拘束条件や荷重条件などの境界条件の設定、数値計算制御パラメータの設定など、熱ナノインプリント・プロセス解析シミュレータの解析条件設定 GUI 機能に関わる、調査、要件定義、仕様検討、設計作業、および単体テストを実施し終了した。

図①-3-(1)-1 は熱ナノインプリントの解析条件設定 GUI の例を示す。

図①-3-(1)-2 は光ナノインプリントおよび電磁波解析ソフトの解析条件設定 GUI の例を示す。



図①-3-(1)-1 熱ナノインプリントの解析条件設定 GUI



図①-3-(1)-2 光ナノインプリントおよび電磁波解析ソフトの解析条件設定 GUI 例

(2) データベースインターフェース

熱・光ナノインプリント・プロセス解析に必要な材料 DB および知識 DB のデータベースイン

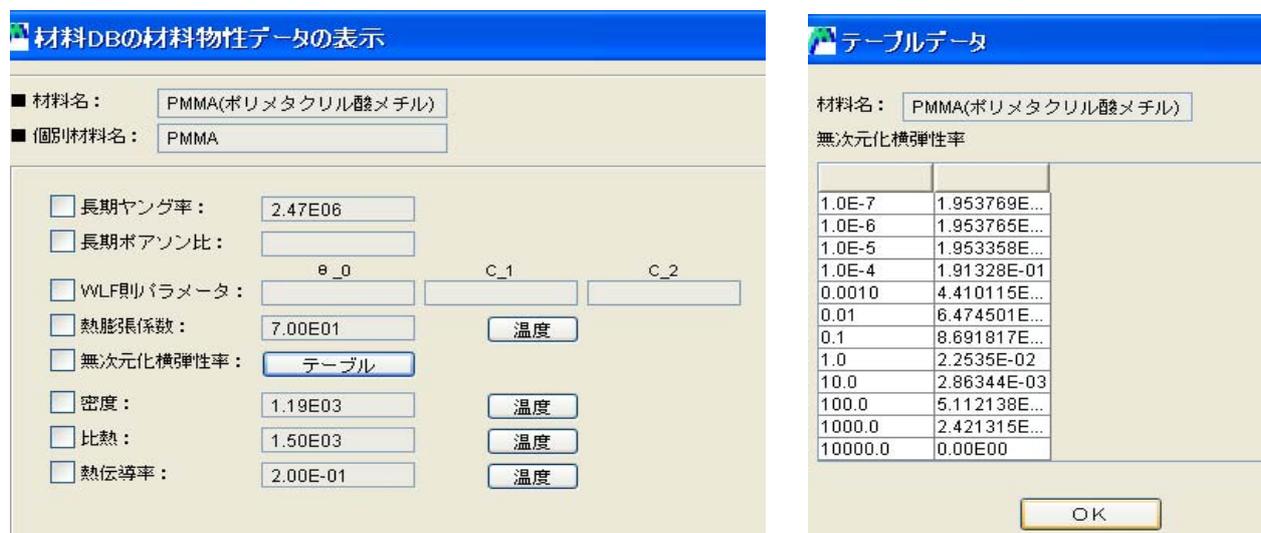
ターフェースの対応を図る。

<成果>

「MEMS用設計・解析支援システムの開発」のフレームワーク開発におけるデータベースインターフェース機能をベースとして、平成17年度の開発作業を踏まえて、熱・光ナノインプリント・プロセス解析シミュレータに必要な材料物性データおよび知識データのインターフェース機能の開発を完了した。

具体的には、熱ナノインプリント解析ソフトの材料物性データとして、粘弾性体の材料特性（長期ヤング率 E ，長期ポアソン比 ν ，WLF則のパラメータ θ_{-0} ， C_{-1} ， C_{-2} ，参照温度 θ_{ref} ，温度 θ -熱膨張率 α テーブル、無次元化横弾性率 g_{-I} 時定数 τ_{-I} テーブル)、また、光ナノインプリントおよび電磁波解析ソフトの材料物性データとして、比誘電率、比透磁率、導電率、導電正接、複素比誘電率、複素比透磁率の各材料物性パラメータの対応作業を完了した。

図①-3-(2)-1は熱ナノインプリントの材料物性値を参照するGUI画面例を示す。



図①-3-(2)-1 熱ナノインプリントの材料物性値を参照する GUI 画面

(3) 電磁波解析プログラムのプレ機能

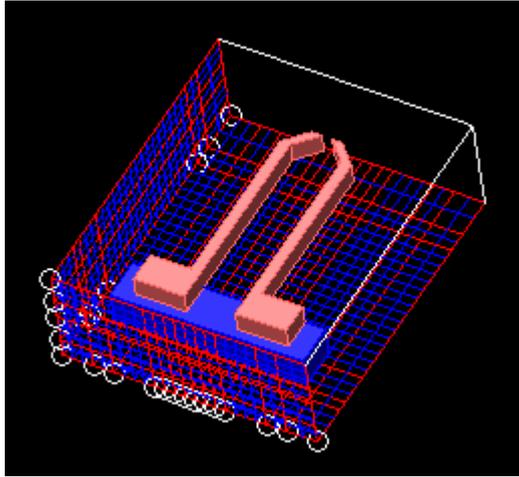
FDTD 法電磁波解析プログラムに対応した空間直交格子定義機能、FDTD 法電磁波解析プログラムの解析条件設定 GUI など、プレ機能全般の組み込みを行う。

<成果>

「MEMS用設計・解析支援システムの開発」のフレームワーク開発における解析条件設定機能、自動格子作成機能およびデバイス構造作成機能をベースとして、平成17年度の開発作業を踏まえて、FDTD 法電磁波解析プログラムにおける吸収境界、入力特性の計算制御、放射パターンの計算制御、給電ポートなどの解析条件設定 GUI の組み込み、および空間直交格子定義機能の開発を完了した。

特に、光ナノインプリント解析用及び電磁波解析用の固有機能である、FDTD 法解析シミュレータ向けの構造格子の定義・変更・確認機能に関わる機能の開発を実施した。

図①-3-(3)-1 FDTD 法構造格子の操作画面は FDTD 法構造格子の定義・セル分割数変更、削除の為の操作画面例を示す。○では含まれた線分が同一セルサイズの区間範囲を示す。



図①-3-(3)-1 FDTD 法構造格子の操作画面例

(4) 電磁波解析プログラムのポスト機能

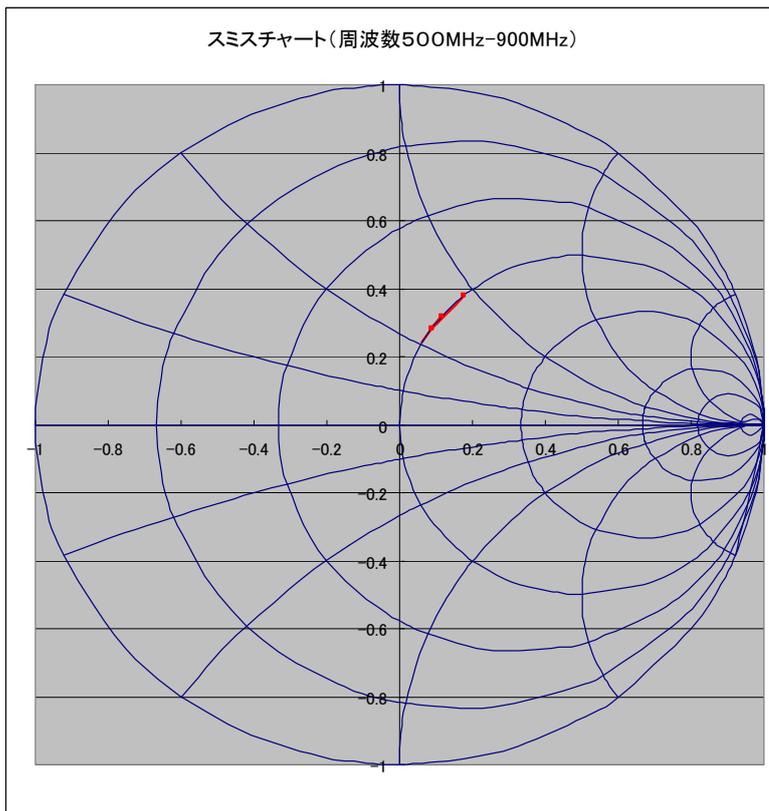
FDTD法電磁波解析プログラムの多様な解析結果データを表現するための解析結果データ構造の改修と、解析結果表示機能などのポスト機能の強化を行う。

<成果>

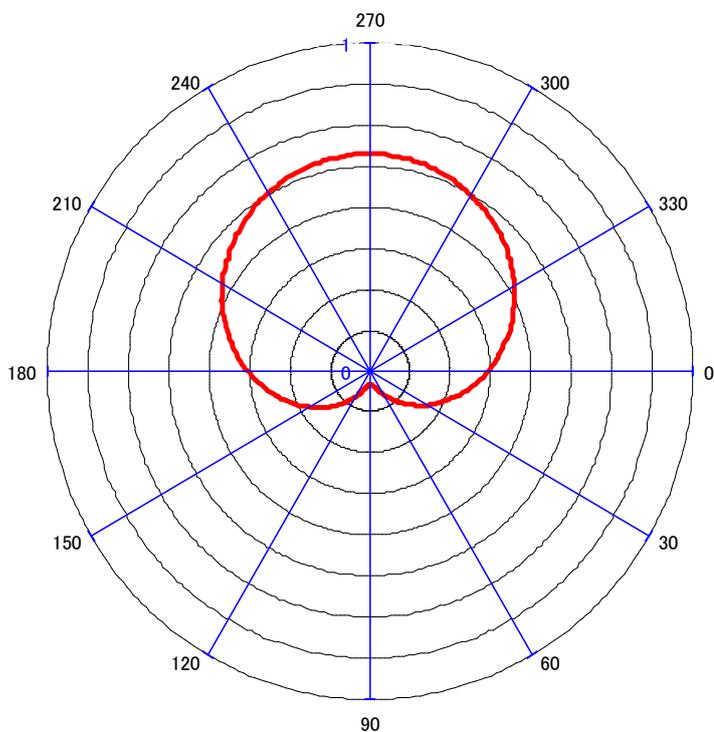
「MEMS用設計・解析支援システムの開発」のフレームワーク開発における解析結果表示機能をベースとして、平成17年度の開発作業を踏まえて、FDTD法電磁波解析プログラムの多様な解析結果データを表現するための解析結果データ構造の改修と、解析結果表示機能の強化を終了した。

特に、電磁波解析用の固有機能である、FDTD法解析シミュレータ向けの放射パターン図とスミスチャート出力機能の開発を完了した。

図①-3-(4)-1 電磁波解析ソフトのスミスチャートの出力例は、電磁波解析ソフトの出力結果であるインピーダンスをスミスチャート図として出力した例を示す。また、図①-3-(4)-2 電磁波解析ソフトの放射パターン図出力例は、電磁波解析ソフトの出力結果の放射パターンデータをグラフ図として出力した例を示す。



図①-3-(4)-1 電磁波解析ソフトのスミスチャートの出力例



図①-3-(4)-2 電磁波解析ソフトの放射パターン図出力例

(5) システム全体への組み込み

熱ナノインプリント・プロセス解析シミュレータおよび電磁波解析プログラムを MemONE

システムの機能として組み込みを行う。

〈成果〉

「MEMS用設計・解析支援システムの開発」のフレームワーク開発機能全般をベースとして、平成17年度の開発作業を踏まえて、熱ナノインプリント・プロセス解析シミュレータおよび電磁波解析プログラムにかかわる MemsONE 全体制御メニューへの関連項目の追加、従来機能との整合性確保など、MemsONE 全体システムへの反映を完了した。

3. 10 「②データベースの構築」

担当：(独)産業技術総合研究所、(株)日立製作所、(財)マイクロマシンセンター
大阪府立大学 岡山大学 京都大学 群馬大学 首都大学東京

(1) 代表的樹脂のデータベース構築 (担当：(独)産業技術総合研究所、(株)日立製作所)

ナノインプリントプロセスシミュレーションに必要な樹脂物性値を、本年度購入する樹脂材料データベース実験装置と、平成17年度に購入した粘弾性特性評価装置を用いて計測し、その結果をデータベース化する。

具体的には、平成17年度に計測したPMMA、PC、PET、COPの各樹脂基板に対するガラス転移温度、熔融温度、硬化特性、緩和時間等の樹脂物性値に対して、同種の樹脂における製造メーカーや製造プロセスによる差を評価し、データベースの充実を図る。また、本年度は新規の樹脂として、ポリパラキシレン(通称パリレン)薄膜の物性値を計測し、成膜条件と対比してデータベース化する。そのうち、(株)日立製作所は以下の研究開発を実施する。

これらの開発作業のうち、平成18年度の研究開発により、下記の成果を得た。

〈成果〉

ナノインプリント成形材料としてレジスト用、光学素子用、金型用成形材料に対する機械的・熱的物性データについて、収集・採取した。

表②-(1)-1に材料データベース評価内容をまとめて示す。レジスト用成形材料としては、MEMSで多用される薄膜材料であるPMMAとPI(ポリイミド)を、光学素子用成形材料としては、低融点のSOG(Spin on Glass)を、金型材料としては、Ni電鍍膜およびSi基板を用いた。それらの材料に対して、機械的特性(ヤング率、残留応力)と熱的特性(熱膨張率)を評価した。評価装置としては、(独)産業技術総合研究所が構築した材料物性データ計測実験環境としてのレーザ表面弾性波法及びナノインデント、(株)日立製作所が保有する評価装置である触針式応力評価、及び外部解析機関の光てこ法及び熱機械分析法を用いた。

表②-(1)-1 材料データベース評価内容

	素材	パラメータ	ヤング率		残留応力	熱膨張率
			表面弾性波法	ナノインデント		
(1)薄膜	PMMA	膜厚	表面弾性波法	ナノインデント	—	—
	PI	〃	—	—	触針法	—
	Ni電鍍膜	成膜条件	—	ナノインデント	光てこ法	光てこ法
	SOG	—	表面弾性波法	ナノインデント	—	—
(2)薄板	Si	方位3種類	表面弾性波法	—	—	熱機械分析法

表②-(1)-2に材料データベース評価結果をまとめて示す。薄膜材は全てSi基板にスピコート焼成あるいは電鍍により形成しており、厚さは数 μm 程度である。

表面弾性波法は硬い弾性材料に適した評価法であるが、今回PMMA樹脂とSOG焼成材料の評価に適用したところ、ナノインデント評価でも同様の値が得られたので、有意な数値が得られていると考える。ただ、SOGについては、ナノインデントではかなり低い結果となった。この原因は、インデントで材料を押し込んだ際にSOGが多孔質であるため変形が発生したのではないかと推測される。

光てこ法によるNi電鍍膜の評価では、成膜するメーカーによって残留応力は大きく異なる結果となったが、ナノインデントによるヤング率も約2割程度数値が異なり、それらの結果から算出される熱膨張率は1割程度の違いにとどまった。また数値自体は、バルク材の数値である $13 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ に対し若干低い値となった。

得られた材料データは、MEMS-ONEの材料・プロセスデータベースに組み込んだ。

表②-(1)-2 材料データベース評価結果

	材料	パラメータ	評価方法	ヤング率 (GPa)	ポアソン比	密度 (10 ³ kg/m ³)	残留応力 (初期応力) (MPa)	熱膨張率 (10 ⁻⁶ /°C)
薄 膜 材	PMMA	厚さ:0.4-0.9μm	表面弾性波法	5.1-5.3	(0.3)*	(1.19)		
			ナノインデンタ	5.8-6.6	(0.3)			
	PI	厚さ:4μm	触針式応力評価				46-48	
	Ni電鍍膜A	厚さ:1μm	光てこ法	(200-220)	(0.3)		40-110	9-11 (40-120°C)
			A社成膜	ナノインデンタ	200-220	(0.3)		
	Ni電鍍膜B	厚さ:1μm	光てこ法	(150-190)	(0.3)		140-230	8-10 (40-120°C)
			B社成膜	ナノインデンタ	150-190	(0.3)		
SOG	厚さ:0.3μm	表面弾性波法	6.4-7.8	(0.3)	(1.4)			
		100°C焼成	ナノインデンタ	2.9-3.1	(0.3)			
基板	Si	(111)基板	表面弾性波法	181-182	(0.3)	(2.23)		
		(100),(110),(111)	熱機械分析法					2.9-4.0 (RT-1000°C)

* ()内の数値は、測定に必要な物性値で、バルク材の典型値を使用。

(2) 代表的樹脂に対する検証 (担当: (独)産業技術総合研究所)

(3) 知識・材料データの整理および入力 (担当: (財)マイクロマシンセンター、大阪府立大学
岡山大学 京都大学 群馬大学 首都大学東京)

ナノインプリント加工・解析に関わる知識や知見を知識データとして集約するとともに、(独)産業技術総合研究所および(株)日立製作所が採取する代表的な樹脂および金型材料の材料物性値データ、並びに用途に応じて使用される複数種類のナノインプリント用樹脂に対する材料物性値データを整理し、データベースに蓄積する。

作業の実施は、(財)マイクロマシンセンターおよび(財)マイクロマシンセンターから再委託する5大学が担当する。

これらの開発作業のうち、平成18年度の研究開発により、下記の成果を得た。

<成果>

1) 5大学

ナノインプリント加工・解析に関わる金型の最適化、解析技術、塑性加工、材料試験などの知識データを作成または収集した。

各大学における成果内容は、下記「5大学の実施テーマおよび成果」に記載の通りである。

2) (財)マイクロマシンセンター

(独)産業技術総合研究所および(株)日立製作所が採取する代表的な樹脂および金型材料の材料物性値データ、並びに用途に応じて使用される複数種類のナノインプリント用樹脂に対する材料物性値データを整理して所定の形式で蓄積した。ナノインプリント解析の場合には固有の材料特性として、複素比誘電率、複素比透磁率、誘電正接、WLF則:基準温度、WLF則:C1、WLF則:C2、長期弾性率、長期ポアソン比、無次元化弾性率があり、これらを含む形式のデータ一覧を整備した。収集・登録した材料データ数は14件である。

<5大学の実施テーマおよび成果>

・「ナノインプリント加工における材料特性と加工条件の関係及び評価方法に関する知識DBと材料DBの構築」

担当: 大阪府立大学

ナノインプリント加工における材料特性と加工条件の関係と評価方法に関する知識DBと材料DBの作成を行い、MEMS用設計・解析支援システム構築のための定量的、定性的な解析基盤を構築する。

平成18年度は、MemsONEにおけるナノインプリント用シミュレーションのプロセスデータの収集とデータベース登録および検証実験を行った。

熱ナノインプリントについては時間応答の実験を行い、シミュレーション結果と良い一致を得た。また、光ナノインプリントについての検証データの収集を行った。

・「FDTD解析ソフトの提供とMemsONEへの組み込み及び解析理論と利用者知識DBの構築」

担当：岡山大学

従来のプロセスより安価に加工することが可能で、急速に発展・利用されてきている光ナノインプリント加工の解析機能をシステムに追加するため、これまでインターネット上で公開し、多数の民間企業、学術機関で使用された実績のあるFDTD法ソルバのMemsONEに向けたカスタマイズおよびインターフェースの構築を行う。

平成18年度は、光ナノインプリントにおける設計指針および物理現象を把握するためのアシストを目的とし、電磁波解析に主として用いられてきたFDTD法ソルバを拡張した。フレックワークとのインターフェースを整備し、光ナノインプリント用シミュレータとして動作するようにした。加えて、従来の電磁波解析機能を有効に残すことで、MemsONEにおける電磁波解析、高周波解析の1ソルバとして動作するようメンテナンスを行った。

・「ナノインプリント加工の加工条件に関する知識DBの構築」

担当：京都大学

ナノインプリント技術の解析システムに必要な情報をまとめてデータベース化する。

- ・解析に利用する材料変形理論
- ・温間での加工事例による知識DB
- ・解析による型設計支援

平成18年度は、ナノインプリント加工実験を行い加工事例DBを充実させるとともに、解析との比較に関しての検討もを行い、変形理論および境界条件の問題、マイクロ・ナノサイズにおける材料特性の違いといった要因についての事例を知識DBとして纏めた。また、NNT2006（2006年11月、サンフランシスコ）に参加し、ナノインプリント技術について調査を行った。

・「ナノインプリント加工解析理論と解析方法及び加工時の知識DBの構築」

担当：群馬大学

ナノインプリント材料として非晶質構造を有し、熱可塑性特性を有する粘性流動材料をとりあげ、材料自体のマクロ、マイクロ、ナノ変形特性、ナノインプリント加工特性とその支配要因、加工における寸法効果を実験的に明らかにし、知識データベース（知識DB）を構築する。また、加工解析理論と解析方法を開発すると共に、知識DBの統合化を行う。

平成18年度は、ナノインプリント材料として有望な合金として金属ガラスをとりあげ、その特性解析と加工時の知識データベースの構築を行った。金属ガラスは、ガラス遷移挙動を示し、過冷却液体域温度にてニュートン粘性挙動を呈する合金で、熱ナノインプリントが可能である。高強度、耐食性や軟電磁特性などの高機能性金属材料として期待される。集束イオンビーム加工(FIB)を用いて非晶質カーボン、シリコン、金属ガラス製ナノ金型を製作して、ナノインプリント加工特性を調べた。実験解析の結果、金型接触近傍の成形圧力、粘性係数、表面張力、特に金型・材料間の接触角（濡れ性）が成形特性に影響を及ぼすこと、厚み大きい材料ではバルク流動の影響が大きく良好な成形結果が得られないこと、等を明らかにした。以上の特性と、基本的な熱

ナノインプリント特性に必要な物性計測方法や材料特性について調査し、知識 DB の構築を行った。

・「ナノインプリント用材料の材料試験方法に関する知識 DB の構築と材料 DB の収集」

担当：首都大学東京

ナノインプリントにおける材料変形に及ぼす影響因子を分析し、ナノスケールでの基本材料物性や変形特性などを取得する試験方法に関する調査を行い、材料試験方法に関する知識データベースの構築を行う。また、ナノインプリントの設計・解析に適した材料特性データの収集及び材料試験方法の提案を行う。

平成 18 年度に実施した研究開発は以下の 2 点である。

(a) マイクロスケールでの材料変形特性評価

ナノインプリントにおける材料変形に及ぼす影響因子を分析し、マイクロナノスケールでの材料物性や変形特性などを取得する試験方法に関する調査を行った。高分子材料に対して、成形金型パターンが小さくなるにつれて、変形抵抗が大きく、また材料を形成する高分子チェーンがある特定の方向に揃い、その結果、機械的な特性や光学的な特性が変化することがわかった。

そこで、簡易な実験装置を製作し、金型パターンを 100 μm , 50 μm , 15 μm , 1 μm と変化させた場合、樹脂の成形性に及ぼす成形速度および成形圧力の影響を調べた。また、同様な条件について、開発の有限要素法解析ソフトを用いた成形シミュレーションを行った。成形速度および成形圧力が樹脂の成形性に及ぼす影響が大きく、また金型パターンの寸法が小さくなるにつれて、その影響が大きくなることが分かった。実験結果とシミュレーション結果を比較した結果、その相違が大きいことが分かった。すなわち、樹脂材料に対して、マクロな実験で得られた材料物性はマイクロナノスケールでの変形には、必ずしも対応せず、マイクロナノスケールで成形ではそれぞれのスケールでの材料特性評価システムの構築が必要と考えられる。今後、各種スケールでの材料実験法の提案やそれぞれのスケールに応じた材料モデルを構築する必要がある。

(b) 機械特性評価知識データベースの構築

薄膜を含むマイクロ材料の機械特性評価知識データベースの構築を行った。金属材料薄膜や微粒子材料の物性評価および材料変形特性などの知識データベースを作成した。

3. 1 1 「①シミュレータの開発」

担当：(株)数理システム、東京大学

MEMSデバイスと電子回路とを集積化することで、センサ・アクチュエータシステムの性能や機能が飛躍的に向上することが期待でき、集積化加速度センサのように市場化に成功した例が近年ますます増加している。従来これら集積化システムは、試作機を何度も作り直ししながら、長期間かけて開発されてきたが、集積化MEMSの動作を計算機上で予測する「シミュレータ」があれば、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。このように重要とされてきながら、わが国においてはこれまで、電気・機械にわたる統合的シミュレーションを行うことのできる、使いやすいソフトウェアは必ずしも開発されているとは言えない状況である。

そこで、電子回路シミュレーションの手法を基に、従来の電氣的自由度だけでなく、機械的自由度も扱えるように回路シミュレータを拡張した、汎用的な回路集積化MEMSシミュレータを開発する。

これらの開発作業のうち、平成18年度の研究開発では下記の成果を得た。

(1) 機械系素子のモデル構築

〈成果〉

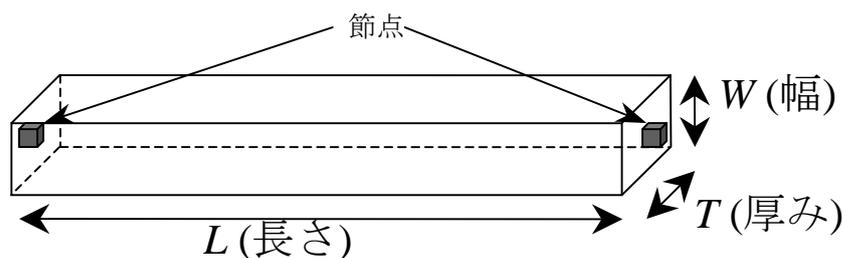
機械系素子モデルの定式化を行い、プログラムモジュールを作成した。作成した素子モデルは、アンカ、ビーム、プレート、ギャップと呼ばれる4種類である。この素子モデルにより、歯状アクチュエータ、トーションミラー等のMEMSを構成し、その機構部分を解析することが可能になった。以下では、各モデルについて、説明する。

1) 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。

2) 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①-(1)-1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①-(1)-1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。



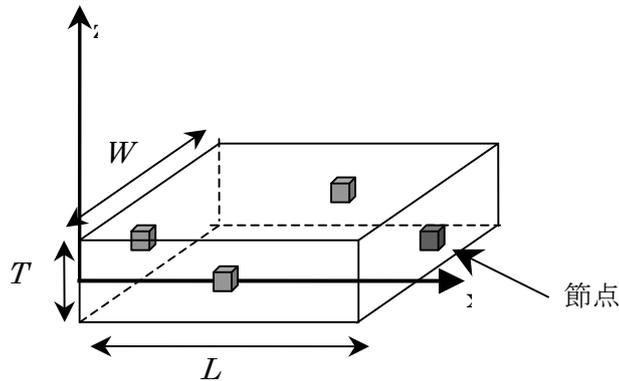
図①-(1)-1 ビーム素子の模式図

表①-(1)-1 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

3) 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①-(1)-2 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。本素子は変形をせず、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①-(1)-2 に示したパラメータを有する。これ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①-(1)-2 プレートの模式図

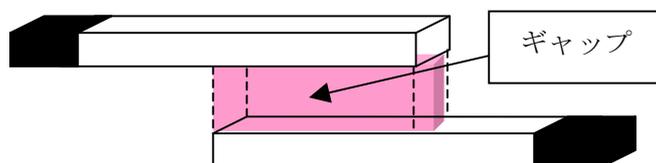
表①-(1)-2 プレートのパラメータ

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

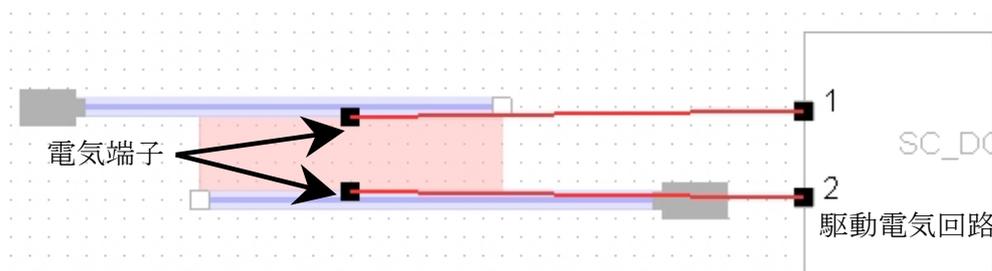
4) ギャップ

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①-(1)-4 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①-(1)-3 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①-(1)-3 (ビーム間)ギャップの模式図



図①-(1)-4 電気回路との接続

表①-(1)-3 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

〈成果〉

回路集積化MEMSシミュレータのエンジン部分は、SPICE3をベースにして開発した。素子(アンカ、ビーム、プレート、ギャップ)をSPICE3に追加実装することによって、電気素子と機械素子を同時に扱うことができるようになった。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え、解析時間(計算時間)の短縮を図った。

SPICE3がベースになっていることから分かるように、エンジンへの入力形式は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みに用いる。ネットリストの拡張分となる素子モデルのフォーマットは、電機素子の記述に準じてフォーマットを決定した。

```
_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

```

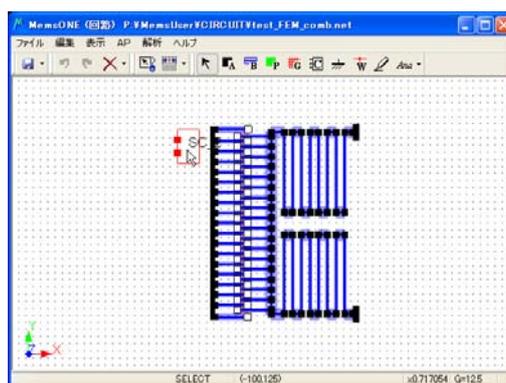
図①-(2)-1 素子モデルのネットリストの記述例

このネットリストをユーザが手書きで記述するには負担が大きいため、入力モジュールとして GUI としての回路シミュレータソフトを作成した。

このソフトの主な特徴は以下の通りである。

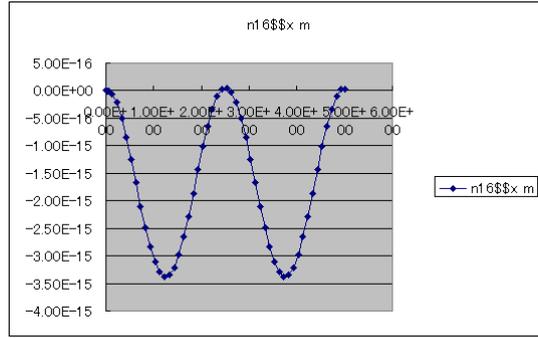
- ・ 形のあるシンボル表記で、実際のデバイスに似た表現が可能
- ・ 素子モデルを隣接させて配置するだけで、回路ネットワークを自動的に構築
- ・ 基本的な素子（アンカー、ビーム、ギャップ）を組み合わせるだけで、MEMS デバイスの大部分を表現可能
- ・ ネットリストに準拠しているため、熟練者の細かい指定にも対応

くし歯アクチュエータの例を図①-(2)-2 に示す。



図①-(2)-2 くし歯アクチュエータ

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い、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①-(2)-3 解析結果表示

3. 1 2 「②検証用デバイスの製作・評価」

担当：(株)数理システム、東京大学

検証用デバイスとして、櫛歯アクチュエータを備えたマイクロピンセットと位置検出電子回路を製作し、実験データを取得して、連成シミュレーションによる解析値と比較検証し、シミュレータの解析精度を実証する。

これらの開発作業のうち、平成 18 年度の研究開発では下記の成果を得た。

〈成果〉

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、秋葉原で購入可能で、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。ただし、当初、検証デバイスとして櫛歯アクチュエータを備えたマイクロピンセットを用いることを予定していたが、マイクロピンセットが備わっていない静電アクチュエータを検証用モデルとしても、電気・機械連成シミュレーションの解析精度を実証することは出来る為、検証デバイスはマイクロピンセットを備えないものを用いた。

このテストデバイスを用いて(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、数理システムにおいて、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、解析結果と実験データとの比較検証の詳細を述べる。また、テストデバイス作製と電氣的な読み出し実験の詳細については、その後の「**東京大学の実施テーマおよび内容**」にて述べる。

(1) 「力入力-電気出力」による電氣的な読み出し実験との比較

アクチュエータの構造を、図②-1 に示した。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ある。なお、数値は全て設計値である。電氣的な読み出し回路は、図②-2 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、 $2.1\text{V}_{0\text{-p}}$ 、 100kHz (実測 99.92kHz) のサイン信号を与え、それぞれの出力を抵抗 $10\text{k}\Omega$ で AC グラウンドに落とし、ブリッジ出力を計装アンプ INA103 に接続した。これらの構造データから、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②-3 のようにモデル化をおこなった。

図②-1 において、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。図②-4 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。正方向(図②-1 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 $48\text{mV}_{\text{p-p}}$ 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 $42\text{mV}_{\text{p-p}}$ の出力波が得られた。一方、図②-5 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 102uN の外力を加えた場合、 $48\text{mV}_{\text{p-p}}$ の出力が得られ、これは実験値に対応するものである。更に、負方向に 91uN の外力を加えた結果 ($42\text{mV}_{\text{p-p}}$) が実験値に対応した。

(2) 「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

アクチュエータの構造を図②-1、読み出し回路を図②-2 に示した。静電引力による駆動を行うために、力入力-電気出力の測定系に、四角で囲んだ部分を追加した。駆動のための電極は、駆

動電極 D である。また、高周波出力が高電圧源に流れないようにするために、1 M Ω の抵抗を挟んだ。

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②-6 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 $-90 \text{ mV}_{0\text{-p}}$ 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②-2 の C3)。容量アンバランス $C3 = 68.8 \text{ fF}$ の場合、シミュレーションで得られた出力波の $V_{0\text{-p}}$ と位相の遅れは、実験結果に一致した (図②-7)。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。

1) 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②-8 に、実験結果を示した。電圧上昇時に一瞬電位が下降するが、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。

図②-9 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下降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。

2) 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②-10 に、実験結果を示した。電圧降下時に一瞬電位が上昇する様子が観測されたが、その前後では、フィッティングの結果、入力波より 0.9π 遅れで、かつ符号の逆転した $V_{0\text{-p}} = -50 \text{ mV}$ の出力が得られた。

一方、図②-11 にシミュレーション結果を示した。電圧降下後 $1 \mu\text{s}$ までの計装アンプからの出力は、入力波より 1.5π 遅れで、かつ符号の逆転した $V_{0\text{-p}} = -54.6 \text{ mV}$ の出力が得られた。出力波の $V_{0\text{-p}}$ については実験結果にほぼ一致した。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上昇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→130V 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。

< 東京大学の成果 >

「回路集積化 MEMS シミュレータの開発支援、検証用デバイスの製作および検証」

東京大学では、「回路集積化 MEMS シミュレータ」の開発を支援した。具体的には、MEMS 技術者にとって本当に必要であるニーズや目標設定について研究打ち合わせを行い、諸外国等の例を示しながら、開発されるソフトウェアが MEMS 界にとって本当に役立つものとなるよう助言指

導を行った。

また、検証用デバイスの製作および検証を行った。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 →ハイドロフルオロエーテル 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②-2 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 $2.1V_{0-p}$ 、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 k Ω (1/4W 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。高周波出力が高電圧源に流れないようにするために、1M Ω 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。

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
- 秋葉原の量販店で購入可能な、広く流通している部品である

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②-1 のとおりである。重なり幅663 μm 、高さ100 μm 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 μm 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 μm 、高さ100 μm 、厚み8 μm 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②-11 に作製したデバイスの顕微鏡写真を、図②-12 に実装基板ならびにワイヤボンディングの実体顕微鏡写真を示す。駆動のための電極は構造の端部に、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。

測定系に 3Hz、0~130V の方形波を加え、

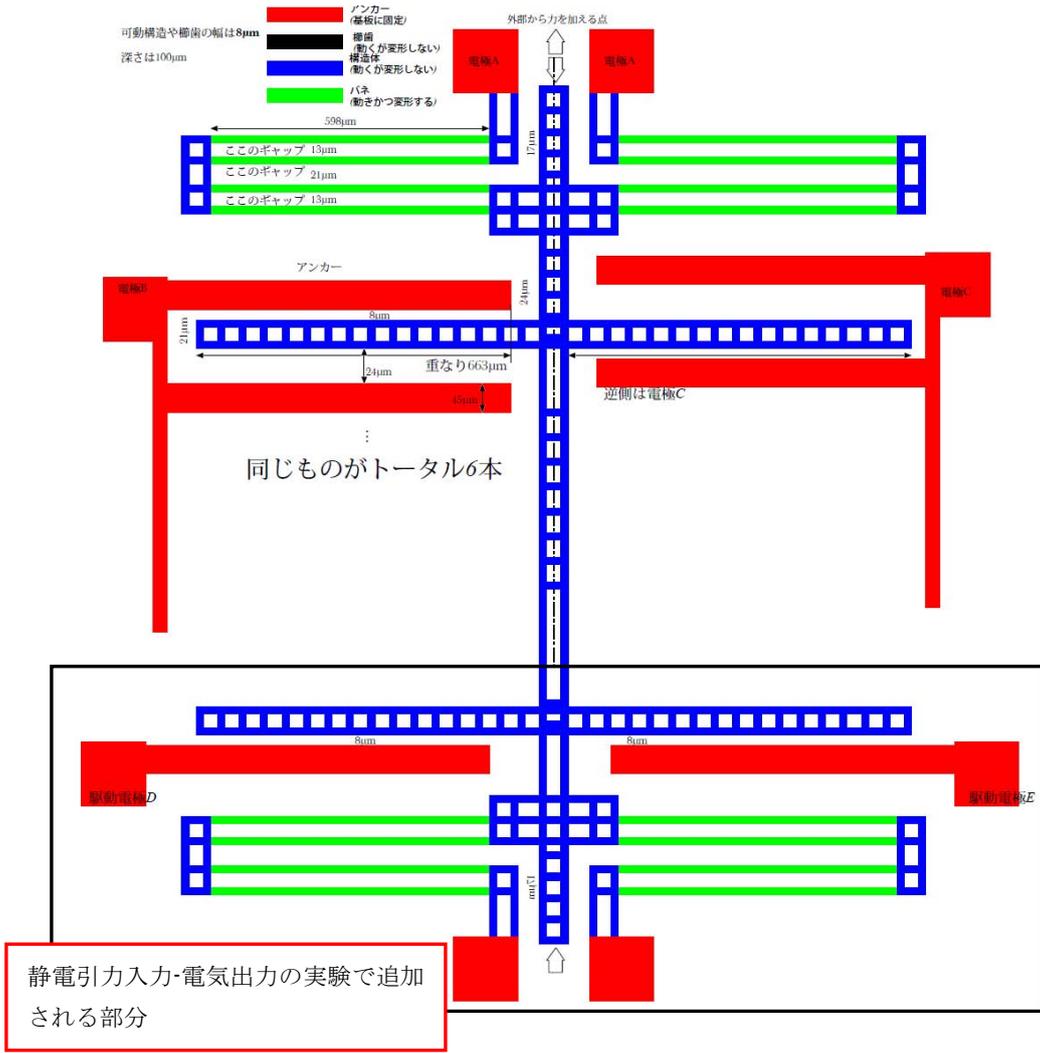
- 無駆動時
- 0V → 130V 上昇時
- 130V → 0V 下降時

のそれぞれについて波形をオシロスコープで観測した。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。実験結果は、図②-6、図②-8、図②-10 に示した。実験結果の説明、シミュレーション結果との比較検討については、前節で行っている。

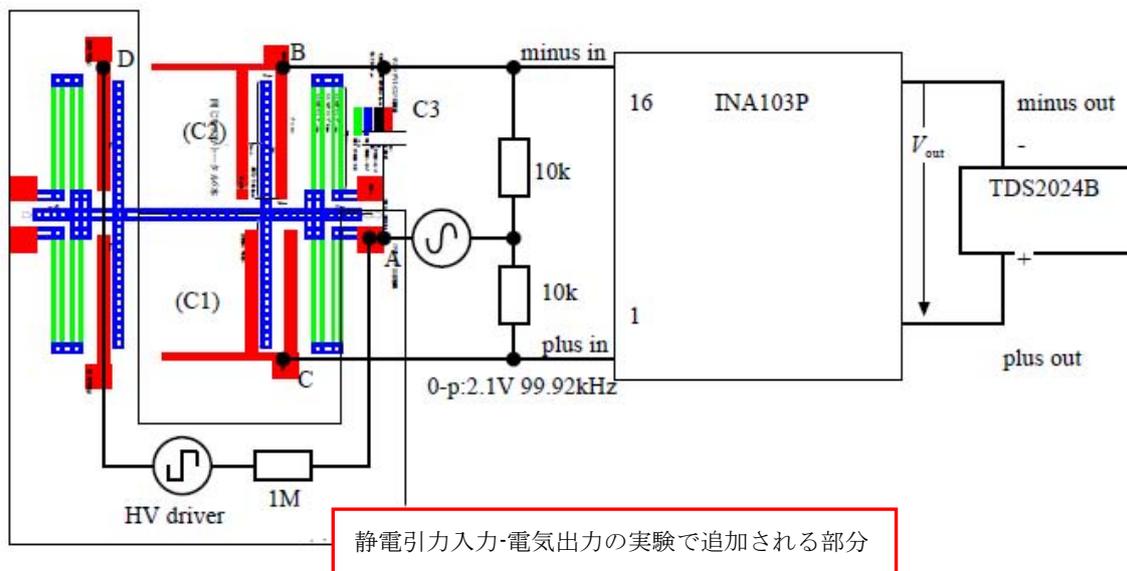
以上をまとめると、

- 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。

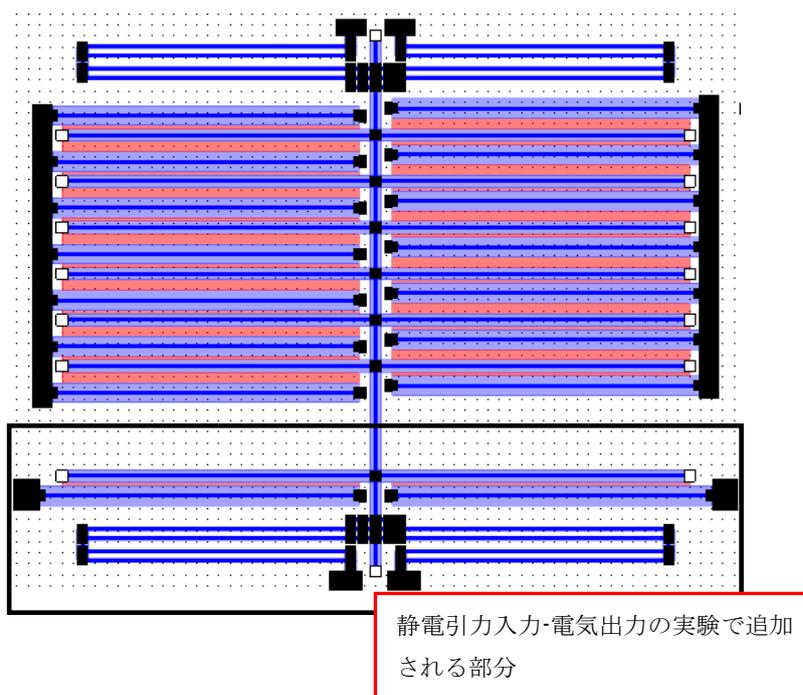
本回路は非常に汎用性の高い回路であり部品は全て秋葉原で市販されているものであるため、今後同期検波回路などを実装することで、リアルタイムに変位を読み出すセンサなどへの応用を比較容易に実現できる可能性が示された。



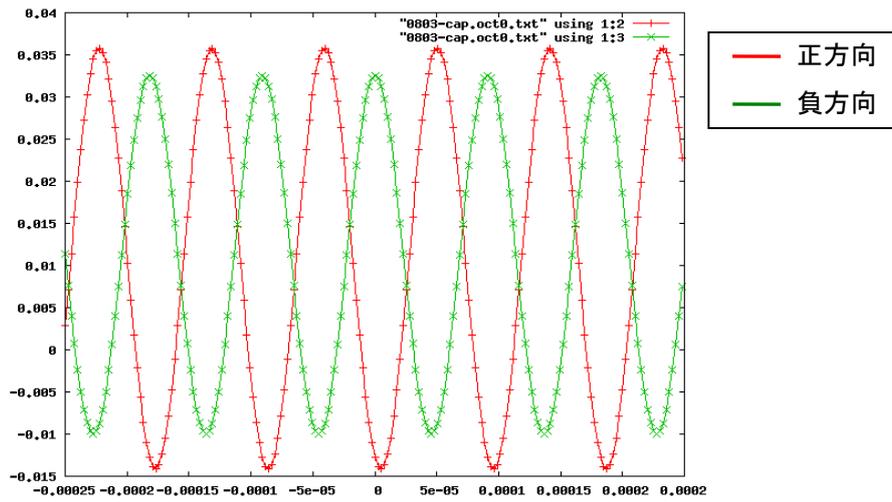
図②-1 検証デバイスの構造



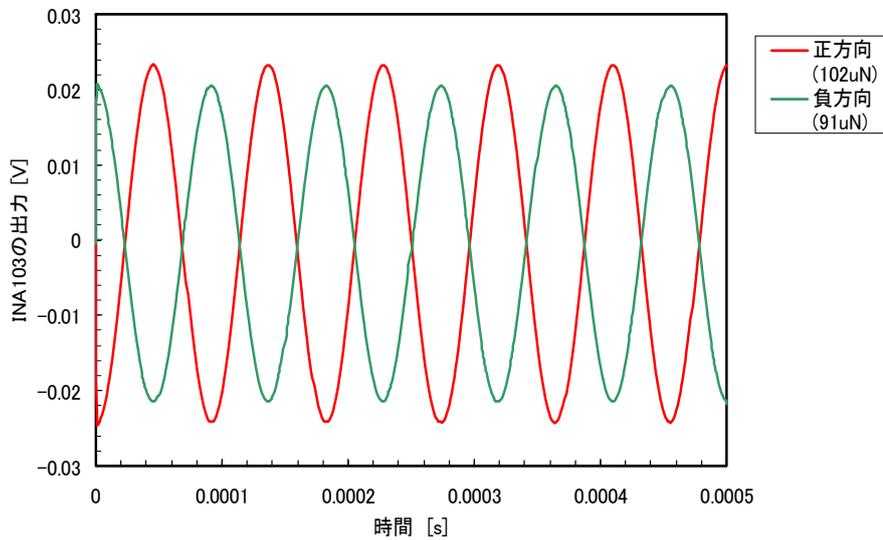
図②-2 読み出し回路の全体図。



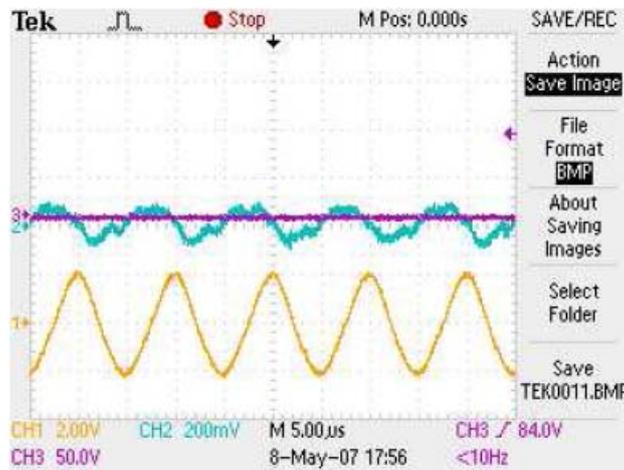
図②-3 検証デバイスのコンパクトモデル図



図②-4 計装アンプの出力（実験結果）

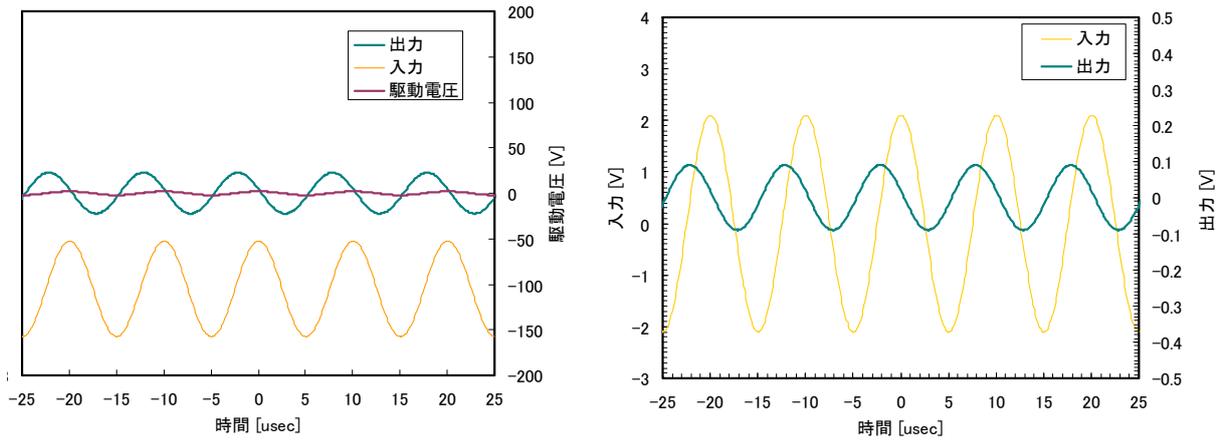


図②-5 計装アンプの出力（シミュレーション結果）

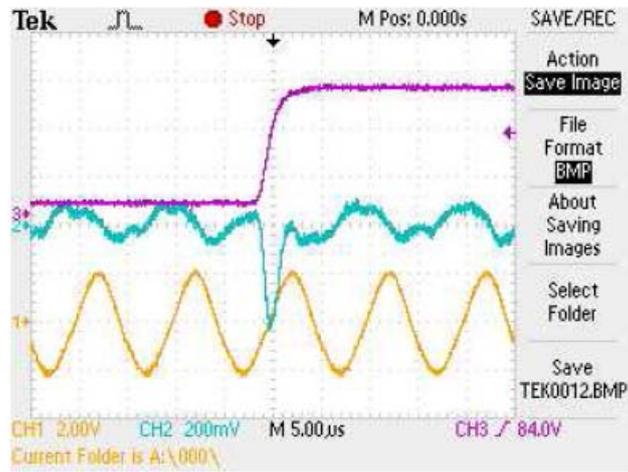


図②-6 制御信号 0V 時の波形（実験結果）

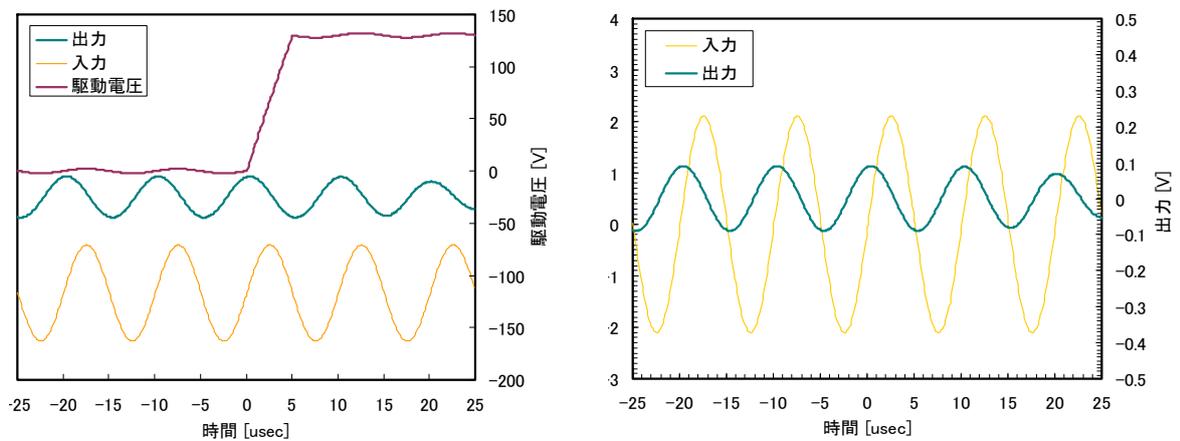
CH1：測定入力、CH2：測定出力(正負逆転)、CH3：駆動電圧



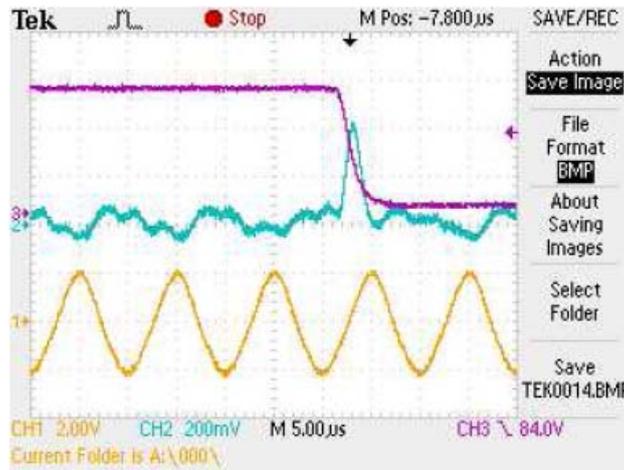
図②-7 制御信号 0V 時の波形 (シミュレーション結果)



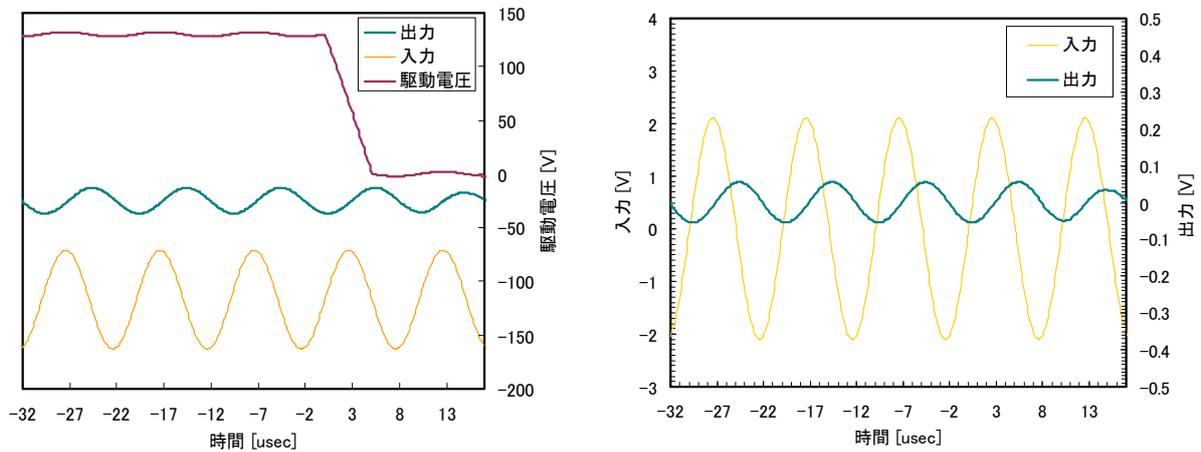
図②-8 0V→130V 上昇時の波形 (実験結果)
CH1 : 測定入力、CH2 : 測定出力(正負逆転)、CH3 : 駆動電圧



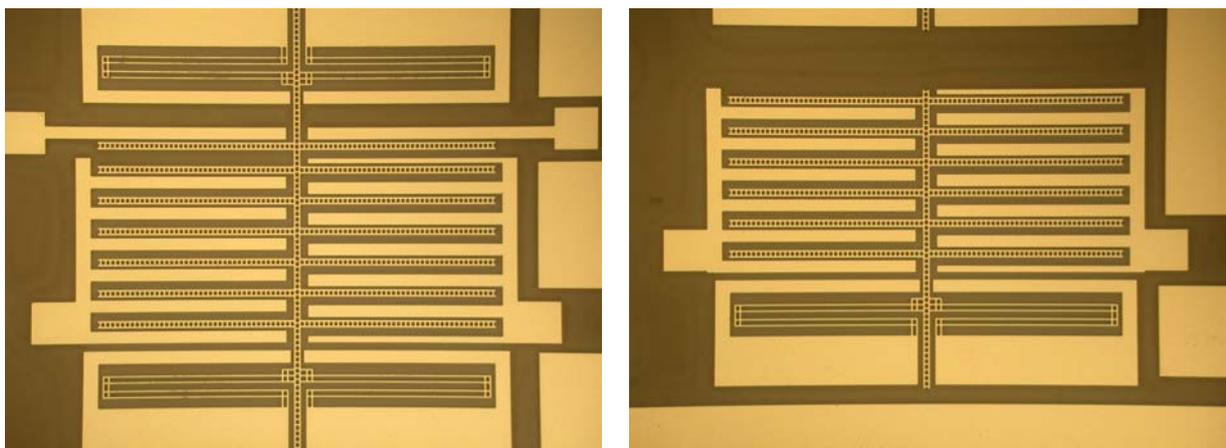
図②-9 0V→130V 上昇時の波形 (シミュレーション結果)



図②-10 130V→0V 下降時の波形 (実験結果)
 CH1 : 測定入力、CH2 : 測定出力(正負逆転)、CH3 : 駆動電圧



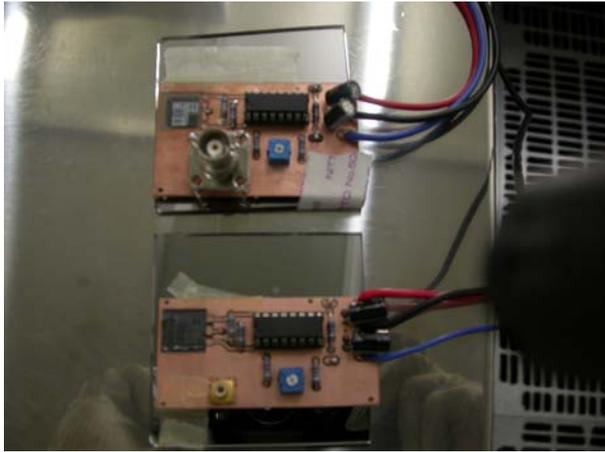
図②-11 130V→0V 下降時の波形 (シミュレーション結果)



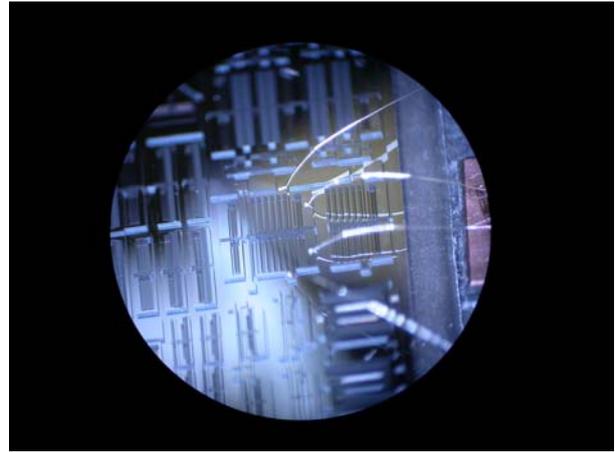
(a)

(b)

図②-12 完成したテストデバイス
 静電駆動電極付き (a)、無し (b)



(a)



(b)

図②-13 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



図②-14 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)

3. 13 「プロジェクト推進業務」

担当：マイクロマシンセンター

本プロジェクトの目的・目標達成に向け、プロジェクトを円滑に推進するために、1) 進捗管理・調整、2) 技術的課題の検討・対策、3) ユーザ要求の収集と機能仕様への反映、等を目的とした各委員会活動の企画・サポートを行うとともに、企業間の技術調整及び成果普及に関する業務を実施した。

プロジェクトには、プロジェクト推進委員会の下に5つの小委員会があり、計6つの委員会構成で運営されている。今年度は、最終年度ということで、ソフト開発およびデータ取得に注力するとともに、開発ソフトの連結・動作検証、評価版(α版)を用いた試験的評価および解析事例の作成講習会の開催等を重点に実施した。これらの活動により、MEMS用設計・解析ソフトとして、概ね計画通りの成果を挙げる事ができた。

各委員会の開催状況は、下記の通りである。

(1) プロジェクト推進委員会

プロジェクトの目的・目標達成に向け、プロジェクトの推進を円滑に図るため、機能別の推進状況の把握、委員会間の調整、決議事項の承認等を目的に計4回開催し、プロジェクト全体推進をリードした。

開催回数	開催日	開催場所	開催時間	出席者数
第9回	2006.04.18	マイクロマシンセンター	13:30~17:00	22
第10回	2006.09.07	銀座キャピタルホテル	13:00~16:00	39
第11回	2006.12.15	マイクロマシンセンター	13:30~17:30	20
第12回	2007.03.06	マイクロマシンセンター	13:30~17:30	25

(2) ソフトウェア委員会

多くの分野の技術者がMEMSプロセスの深い知識を前提とせず、機構の解析やパッケージを含めた製造プロセスのシミュレーション、マスク製作および最終機能の確認・評価まで一連の解析を行うことができるシステムを構築するため、機能①~④の進捗管理を図るとともに、検証デモによるユーザ要求の収集と反映、技術的な仕様の検討、課題の解決を目的に計10回(WGを含む)開催した。今年度加速財源でテーマ設定した回路集積化MEMSシミュレータの開発をスムーズに進めるために下部機関としてWGを設置し、開発の方向付けを適宜行うことができ、これにより短期間ではあるが当初目標の開発を遂行できた。

開催回数	開催日	開催場所	開催時間	出席者数
第16回	2006.04.14	マイクロマシンセンター	09:15~12:30	27
第17回	2006.06.16	マイクロマシンセンター	11:00~14:30	28
第18回	2006.09.07 ~08	銀座キャピタルホテル	16:00~20:00 09:00~17:00	46 47
第19回	2006.10.19	マイクロマシンセンター	13:30~16:30	20
第20回	2006.12.26	マイクロマシンセンター	13:30~17:30	22
第21回	2007.02.06	マイクロマシンセンター	13:30~17:30	24
第22回	2007.02.26	マイクロマシンセンター	14:30~18:00	27
FWWG1	2006.03.31	岡山大学会議室	13:30~18:00	8
回路WG1	2006.05.23	マイクロマシンセンター	10:00~12:30	11

回路 WG2	2006. 06. 16	マイクロマシンセンター	09:30～11:00	10
--------	--------------	-------------	-------------	----

(3) 知識DB委員会

初心者のMEMS設計の支援を行うことができるとともに、MEMS開発・設計者の知識、知見、実績の蓄積が可能な知識データベースを構築するために、知識データの収集やデータベース開発における技術的な仕様検討及び課題の解決を目的に計7回（解析事例講習会を含む）開催した。特にα版を活用して解析事例を作成するための講習会を東京と関西で開催した。

開催回数	開催日	開催場所	開催時間	出席者数
第12回	2006. 04. 18	マイクロマシンセンター (材料・プロセスDB委員会と合同)	10:00～12:00	26
第13回	2006. 06. 30	マイクロマシンセンター	10:00～12:00	22
第14回	2006. 09. 07	銀座キャピタルホテル (プロジェクト推進委員会と合同)	13:00～16:00	39
第15回	2007. 01. 17	マイクロマシンセンター	13:30～15:00	25
第16回	2007. 03. 06	マイクロマシンセンター	11:00～12:30	27
事例 WG1	2006. 09. 22	マイクロマシンセンター	10:00～17:30	11
事例 WG2	2006. 09. 29	オムロン会議室	10:00～17:00	12

(4) 材料・プロセスDB委員会

初心者のMEMS設計の支援を行うことができるMEMS開発・設計にフィットした、使い易い材料・プロセスデータベースを構築するために、データの計測・収集やデータベース開発における技術的な仕様検討及び課題の解決を目的に計6回開催した。

開催回数	開催日	開催場所	開催時間	出席者数
第13回	2006. 04. 18	マイクロマシンセンター (知識DB委員会と合同)	10:00～12:00	26
第14回	2006. 05. 16	マイクロマシンセンター	13:30～16:00	19
第15回	2006. 07. 12	マイクロマシンセンター	13:30～15:30	18
第16回	2006. 09. 07	銀座キャピタルホテル (プロジェクト推進委員会と合同)	13:00～16:00	39
第17回	2007. 01. 30	マイクロマシンセンター	10:00～12:00	17
第18回	2007. 02. 26	マイクロマシンセンター	13:00～14:30	18

(5) 普及活動検討委員会

得られた研究開発成果については、MEMS設計・解析を支援する基本的なプラットフォームとして極めて安価に配布し、利用の拡大を促進する。また、産学官の連携を図りつつシステムの更新を継続的に行っていくため、サポートセンターの設置、運用サイトの構築など適切なサポート体制についても整備を行う、とする成果の普及促進を目的に計16回開催（ワーキング含む）した。特に、11月のマイクロマシン展に同時開催の成果発表会と、α版を使ってMemsONEの普及促進を図るためのイベント活動を積極的に実施した。

開催回数	開催日	開催場所	開催時間	出席者数
第5回	2006. 06. 16	松下電工創研会議室	15:00～17:00	19

第6回	2006. 12. 22	マイクロマシンセンター	10:00～12:30	17
第7回	2007. 01. 26	マイクロマシンセンター	10:00～12:00	19
発表会WG6	2006. 07. 12	マイクロマシンセンター	10:00～12:00	16
発表会WG7	2006. 08. 30	マイクロマシンセンター	10:00～12:30	13
発表会WG8	2006. 09. 23	オリンパス会議室	10:00～17:00	7
発表会WG9	2006. 09. 27	オリンパス会議室	09:00～12:00	5
発表会WG10	2006. 10. 19	マイクロマシンセンター	10:00～13:00	11
発表会WG11	2006. 11. 07	帝国ホテル	17:30～19:00	5
普及活動 WG1	2006. 10. 05 ～10. 06	サンポート高松	09:00～17:30	2
普及活動 WG2	2006. 10. 11 ～10. 13	インテックス大阪	09:00～17:30	3
普及事業 WG1	2007. 01. 12	マイクロマシンセンター	15:00～18:00	11
普及事業 WG2	2007. 01. 17	マイクロマシンセンター	09:30～12:00	11
α版講習会1	2006. 12. 12	松下電工創研	09:00～13:00	20
α版講習会2	2006. 12. 19	京都大学桂	14:00～17:30	30
α版講習会3	2006. 12. 22	松下電工創研	14:00～17:30	19

(6) 知的財産権委員会

今年度は委員会は開催しなかったが、本プロジェクトの遂行に当たり、開発グループの登録研究員により得られた研究成果に対する知的財産権の取り扱いについて、その公正な取り扱いを保証し、もって研究を促進し、研究成果の普及、有効利用を図るために昨年度作成・締結した規程（守秘義務を含む）の見直しを行った。

(7) 普及活動実績

MEMS用設計・解析支援システム完成後の利用の拡大を促進する目的で、下記の広宣活動を実施した。この活動は、普及活動検討委員会と連携して実施したものである。

- ・昨年度に引続き、MEMS-ONE クラブ会員を募集し、会員数 800 名にまで拡大した。会員にはプロジェクトの開発状況やリリース・イベント情報等を逐次配信した。
- ・昨年度に引続き、成果発表会を開催して、MemsONE を広く紹介するとともに、ユーザの意見を収集し、プロジェクト成果β版への反映を図った。参加者は昨年を上回る 240 名と盛大であった。
- ・電気学会シンポジウム（高松）、関西設計製造ソリューション展（大阪）、マイクロマシン展（東京）、ナノテク 2006（東京）に出展し、MemsONE を広く紹介した。

3. 14 「達成目標の評価」

取り纏め：マイクロマシンセンター

本プロジェクトの達成目標は、下記の開発機能テーマ別に設定されており、数値目標があるテーマや実証までのテーマなど、様々な目標が掲げられている。達成目標は、検証用のデバイスを製作し、実際に動かした際のパラメータを計測して、解析結果と比較し、そのズレを評価すると言った、実用上の評価が主に計画されている。実際の比較条件については、プロジェクト推進過程で詳細な検討がなされ、比較検証が進められた。従って、実施計画とは若干異なる箇所もあるが、概ね実施計画に基づいて遂行され、各開発機能テーマ共に目標を達成することができた。

達成目標の評価の詳細については、統一様式に取り纏めた下記の別添資料、または上記3章の成果報告を参照されたい。

■開発機能テーマ

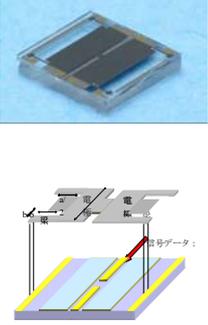
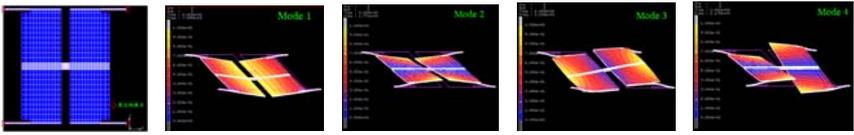
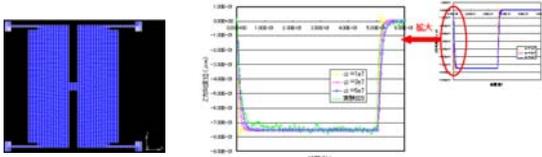
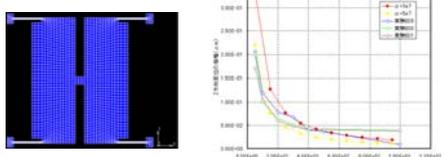
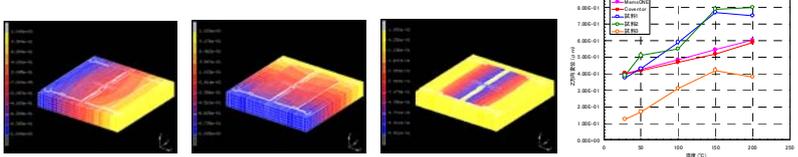
- ①フレームワークソフト（別添－1）
- ②機構解析シミュレータ（別添－2～4）
- ③プロセス解析ツール（別添－5～6）
- ④-1 プロセス逆問題解析ソフト（別添－7）
- ④-2 接合実装解析ソフト（別添－8）
- ⑤-1 知識データベース（別添－9）
- ⑤-2 材料・プロセスデータベース（別添－10）
- ⑥熱・光ナノインプリント加工解析システム（別添－11～12）
- ⑦回路集積化 MEMS シミュレータ（別添－13）

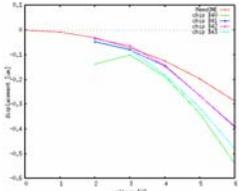
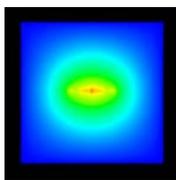
MEMS-ONEプロジェクトの達成目標に対する検証方法と検証結果

フレームワークソフトの開発	
プロジェクトの達成目標 (実施計画)	<p>(1)本体の目標: マスク作成機能ほか8つのフレームワーク機能を実現する。8つの機能の中には、MEMSに特有の構造定義、解析用格子分割機能有し、プロセスレシピや解析条件設定の機能を有する。さらに、材料・知識データベースとのユーザーフレンドリーなGUIを組み込むことで利用者のストレスの軽減を実現する。また、市販の外部ソフトやユーザーソフトとのインターフェイス機能を提供する。</p> <p>(2)ナノインプリントの目標: フレームワーク機能の改修結果として、熱・光ナノインプリント・プロセス解析シミュレータの解析条件設定GUIの組み込み、各プロセス解析シミュレータに必要なデータベースインターフェース、FDTD法電磁波解析プログラムにおけるプレ機能およびポスト機能、熱・光ナノインプリント・プロセス解析シミュレータのMemsONEシステムへの組み込みを完了する。</p>
検証用デバイス	<p>(1)フレームワークソフトの開発 担当: 日本ユニシス・エクセリュージョンズ</p>
フレームワークソフトの開発	<p>評価検証方法</p> <p>①開発機能: フレームワークを構成する1)マスク作成、2)デバイス構造作成、3)自動格子作成、4)プロセスレシピ、5)解析条件設定、6)解析結果表示、7)解析ソフト、CADソフトとのデータコンバータ、8)データベースインターフェース、9)プラグイン機能とスーパバイザ機能の9機能の開発を完了し、動作検証を行う。</p> <p>②検証方法と検証項目: 1)マスク作成機能に関し、基盤機能(ファイル、表示、編集など)、セル構造、プロセス解析ソフトと連携するためのマスクレイアウト形状に関わる機能の動作検証を行う。 2)デバイス構造作成機能に関して、基盤機能(ファイル、表示、編集など)およびモデリング機能(立体、点線、解析)の動作検証を行う。 3)自動格子作成機能は、6面体メッシュ自動分割と、4角形および3角形メッシュ自動分割機能、デバイス構造作成との連携機能の動作検証を行う。 4)プロセスレシピに関し、プロセスレシピのエディタ機能およびプロセスエミュレータとのインターフェース機能の動作検証を行う。 5)解析条件設定機能は、解析種類の解析条件設定GUI、ウェットエッチングシミュレータおよびドライエッチングシミュレータの解析条件設定機能の動作検証を行う。 6)解析結果表示に関し、解析結果の評価図と物理量の選択GUI、等高線図、変位図、ベクトル図、テンソル図、グラフ出力、アニメ用画像出力、リスト出力機能の動作確認を行う。 7)解析ソフト、CADソフトとのデータコンバータに関しては、IGES入出力、GDSII入出力、DXF入出力、解析格子データのNASTRAN、ABAQUS、MARCとの入出力機能の動作検証を行う。 8)データベースインターフェースとしては、知識データベースおよび材料・プロセスデータベースとのインターフェースライブラリの開発を終了し、フレームワークに参照・登録機能を組み込んだ結果の動作検証を行う。 9)プラグイン機能とスーパバイザ機能に関しては、全体制御機能の動作検証を行う。 また、上記のフレームワーク機能を使用して、機構解析シミュレータの検証、プロセス解析ツール、および、機能拡張ソフトの検証を実施する。</p>
	<p>評価検証結果</p> <p>①検証結果: 上記、開発機能の動作確認および検証作業によりフレームワーク機能として正常な結果を得ることが確認出来た。</p> <p>②達成状況: 目標を達成できた。</p>
	<p>(2)ナノインプリント用フレームワークソフトの改修 担当: 日本ユニシス・エクセリュージョンズ</p>
フレームワークソフトの改修	<p>評価検証方法</p> <p>①開発機能: 熱・光ナノインプリント加工解析システム向けの改修作業として、1)プロセス解析シミュレータの解析条件設定、2)データベースインターフェース、3)電磁波解析プログラムのプレ機能、4)電磁波解析プログラムのポスト機能、5)システム全体への組み込み、に関する、開発作業を完了し動作検証を行う。</p> <p>②検証方法と検証項目: 1)プロセス解析シミュレータの解析条件設定に関し、熱ナノインプリント解析の解析条件設定機能の動作確認を行う。 2)データベースインターフェースに関し、ナノインプリント独自の材料物性値に対応する機能を追加し、動作確認を行う。 3)電磁波解析プログラムのプレ機能としてFDTD法解析シミュレータ向けの構造格子の定義・変更・確認機能の動作確認を行う。 4)電磁波解析プログラムのポスト機能として、放射パターン図とスミスチャート出力機能を開発し、動作確認を行う。 5)熱ナノインプリント解析ソフトおよび光ナノインプリント、電磁波解析ソフトをフレームワーク機能全体に組み込み、動作確認を行う。 また、上記ナノインプリント向けのフレームワーク改修結果を使用して、ナノインプリント加工解析ソフトの検証を実施する。</p>
	<p>評価検証結果</p> <p>①検証結果: 上記、開発機能の動作確認および検証作業によりフレームワーク機能として正常な結果を得ることが確認出来た。</p> <p>②達成状況: 目標を達成できた。</p>
	<p>評価検証方法</p>
	<p>評価検証結果</p>

MEMS-ONEプロジェクトの達成目標に対する検証方法と検証結果

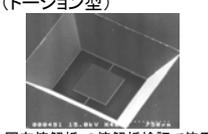
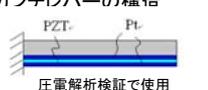
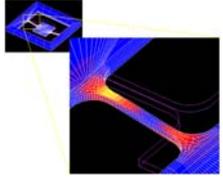
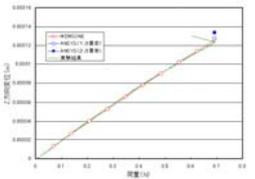
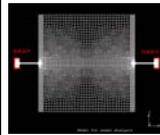
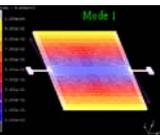
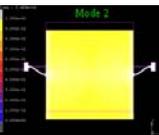
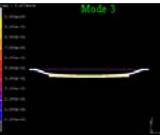
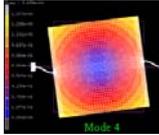
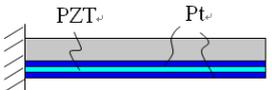
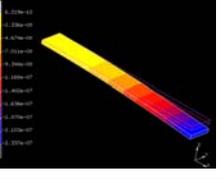
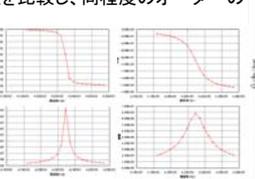
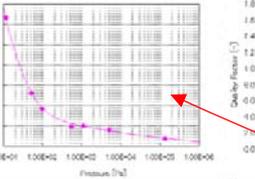
機構解析シミュレータ (1/3)

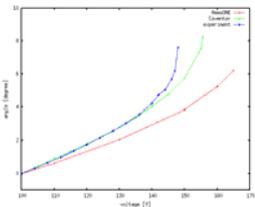
<p>プロジェクトの達成目標 (実施計画)</p>	<p>「フレームワークソフトの開発」、「プロセス解析ツールの開発」の機能を用いて作製した3次元MEMSデバイス構造に対して機構解析シミュレータを用いて解析し、試作実測した結果と比較して解析精度50%以上を実現する。</p>																																																																		
<p>検証用デバイス</p>	<p>(1)力学解析 (固有値解析, 時刻歴応答解析, 調和応答解析) 担当: オムロン、みずほ情報総研</p>																																																																		
<p>■RFスイッチの構造</p> 	<p>固有値解析 評価検証方法</p>	<p>①評価目標: MemsONEの力学解析機能が正しく動作することを商用コードとの比較によって確認する。 ②評価方法: MemsONEと商用コードABAQUSとで同等の例題を解析し、解析結果を比較する。 ③入出力データ: RFスイッチを模擬した形状データをMemsONEとABAQUSのそれぞれに入力し、4次までの固有値と固有モードのコンター図を出力する。 ④解析条件: 要素タイプ=8節点6面体要素、要素数=7776、節点数=11202、境界条件=ヒンジ端部拘束</p> <p>①評価結果: MemsONEとABAQUSの4次モードまでの固有値の誤差は4%未満であり、よく一致した結果が得られた。</p> <p>②達成状況: 目標を達成できた。</p> 																																																																	
<p>■RFスイッチの特性値</p> <table border="1" data-bbox="119 817 359 1176"> <thead> <tr> <th rowspan="2">材料</th> <th colspan="5">特性値</th> </tr> <tr> <th>Si</th> <th>熱酸化SiO2</th> <th>スパッタSiO2</th> <th>金</th> <th>ガラス</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>密度</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td>バ</td> </tr> <tr> <td>残留応力</td> <td>バ</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>バ</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>ヤング率</td> <td>バ</td> <td>A</td> <td>A</td> <td>バ</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>ポアソン比</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>熱膨張係数</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>誘電率</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td>オム</td> <td>バ</td> <td>バ</td> </tr> <tr> <td>透磁率</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td>バ</td> </tr> <tr> <td>導電率</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td>バ</td> </tr> <tr> <td>粘性係数</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>バ</td> </tr> </tbody> </table> <p>バ:バルクデータを使用 A:産総研の計測データ使用 オリ:オリンパスの計測データ使用 松:松下電工の計測データ使用 オム:オムロンの計測データ使用 メ:材料メーカーのデータを使用</p>	材料	特性値					Si	熱酸化SiO2	スパッタSiO2	金	ガラス	密度	バ	バ	バ	バ	バ	残留応力	バ	A	A	バ	-	ヤング率	バ	A	A	バ	-	ポアソン比	バ	バ	バ	バ	-	熱膨張係数	バ	バ	バ	バ	-	誘電率	バ	バ	オム	バ	バ	透磁率	バ	バ	バ	バ	バ	導電率	バ	バ	バ	バ	バ	粘性係数	-	-	-	-	バ	<p>時刻歴応答解析 評価検証方法</p>	<p>①評価目標: MemsONEによる解析によって実デバイスの評価が可能であることを確認する。 ②評価方法: MemsONEの解析結果と実デバイスに対する実験結果を比較し、解析で適用する粘性係数のパラメータサーベイを行う。 ③デバイスの動作方法: 静電駆動型のスイッチの電極間に電圧を与えることでSiでできたアクチュエータを変形させる。 ④入出力データ: 実デバイスの形状データ(および電極間電圧)を入力データとして与えて、デバイス中央点の変位の時刻歴を出力する。 ⑤解析条件: 要素タイプ=8節点6面体要素、要素数=3980、節点数=6732、境界条件=脚部裏面拘束</p> <p>①評価結果: 解析で適用するレイリ-減衰の係数を変えて解析し、実験結果とよく一致するような減衰係数を推定することができた。</p> <p>②達成状況: 目標を達成できた。</p> 
材料		特性値																																																																	
	Si	熱酸化SiO2	スパッタSiO2	金	ガラス																																																														
密度	バ	バ	バ	バ	バ																																																														
残留応力	バ	A	A	バ	-																																																														
ヤング率	バ	A	A	バ	-																																																														
ポアソン比	バ	バ	バ	バ	-																																																														
熱膨張係数	バ	バ	バ	バ	-																																																														
誘電率	バ	バ	オム	バ	バ																																																														
透磁率	バ	バ	バ	バ	バ																																																														
導電率	バ	バ	バ	バ	バ																																																														
粘性係数	-	-	-	-	バ																																																														
<p>調和応答解析</p>	<p>評価検証方法</p>	<p>①評価目標: MemsONEによる解析によって実デバイスの評価が可能であることを確認する。 ②評価方法: MemsONEの解析結果と実デバイスに対する実験結果を比較し、解析で適用する粘性係数のパラメータサーベイを行う。 ③デバイスの動作方法: 静電駆動型のスイッチの電極間に電圧を与えることでSiでできたアクチュエータを変形させる。 ④入出力データ: 実デバイスの形状データ(および電極間電圧)を入力データとして与えて、デバイス中央点の変位の時刻歴を出力する。 ⑤解析条件: 要素タイプ=8節点6面体要素、要素数=7513、節点数=10134、境界条件=脚部裏面拘束</p> <p>①評価結果: 解析で適用するレイリ-減衰の係数を変えて解析し、実験結果とよく一致するような減衰係数を推定することができた。</p> <p>②達成状況: 目標を達成できた。</p> 																																																																	
<p>熱弾塑性解析</p>	<p>評価検証方法</p>	<p>①評価目標: MemsONEの力学解析機能が正しく動作することを商用コードとの比較によって確認する。 ②評価方法: MemsONEと商用コードCoventorとで同等の例題を解析し、解析結果を比較する。 ③入出力データ: RFスイッチを模擬した形状データ(および温度分布)をMemsONEとCoventorのそれぞれに入力し、デバイス中央点の変位を出力する。 ④解析条件: 要素タイプ=8節点6面体要素、要素数=15306、節点数=19914、境界条件=ガラス基板部分拘束、アクチュエータ上面に荷重(初期変形を与える)</p> <p>①評価結果: 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MemsONEの計算結果と実験結果には一定の相違があるものの、目標範囲内で一致している。また、MemsONEの解析結果とCoventorの解析結果は良く一致している。</p> <p>②達成状況: 目標を達成できた。</p> 																																																																	
<p>担当: オムロン、みずほ情報総研</p>																																																																			

	電磁界解析	<p>評価検証方法</p> <p>①電界+力学解析連成解析 駆動電極を接地、可動部に+2,+3,+4,+5,+6Vの電圧を印加し、可動部中心におけるz方向の変位を実測と解析で比較する。メッシュデータはエミュレータで作成したソリッドモデルから六面体要素を作成する。</p> <p>②磁界解析 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と解析で比較する。メッシュデータはエミュレータで作成したソリッドモデルから、MemsONEのα版で三角形要素を作成する。周波数は1.8GHz、入力電流は10mWで行う。</p>	
	電磁界解析	<p>評価検証結果</p> <p>①評価結果: 電界+力学連成解析では、6Vの駆動電圧を印加した場合に実験では$-0.39\ \mu\text{m}$の変位であったのに対し、MemsONEでは$-0.29\ \mu\text{m}$であり、実験との乖離は26%となり目標の50%を達成した。 また磁界解析は実験結果がループプローブ出力電圧$78.4\text{dB}\ \mu\text{V}$であったのに対し、MemsONEで計算した計算結果はループプローブ中心位置で$95.3\text{dB}\ \mu\text{V}$となった。これは22%の乖離であり目標を達成できた。</p> <p>②達成状況: 目標を達成できた。</p>	 

MEMS-ONEプロジェクトの達成目標に対する検証方法と検証結果

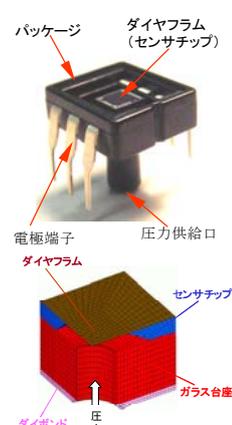
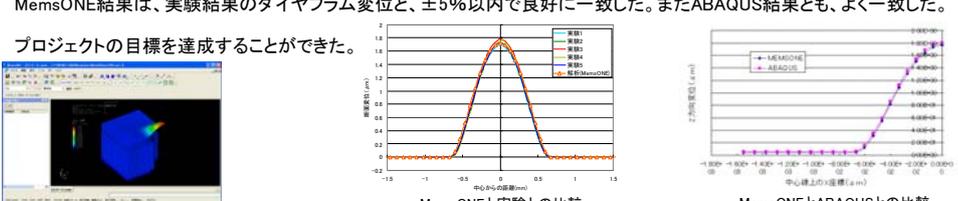
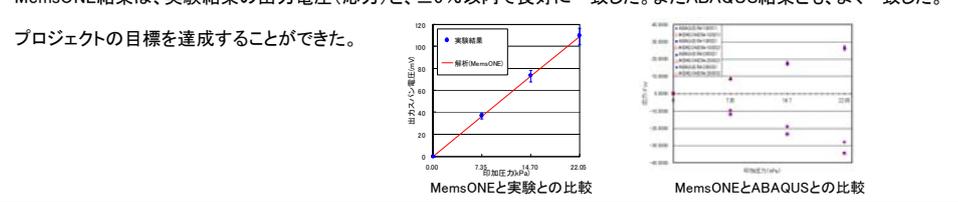
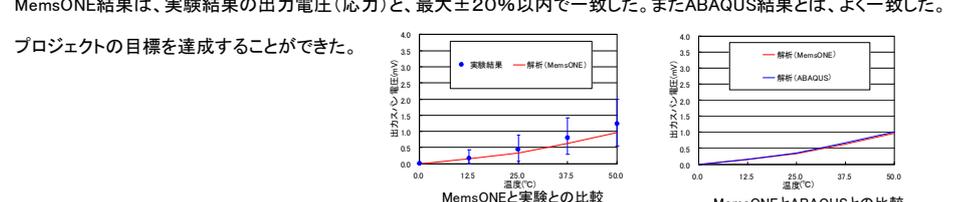
機構解析シミュレータ (2/3)

<p>プロジェクトの達成目標 (実施計画)</p>	<p>「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、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。</p>																																																																																																			
<p>検証用デバイス</p> <p>■ 光スキャナの構造 (トーション型)</p>  <p>固有値解析・Q値解析検証で使用</p>  <p>静電場連成解析検証で使用</p> <p>■ カンチレバーの構造</p>  <p>圧電解析検証で使用</p> <p>■ 光スキャナの特値 (トーション型)</p> <table border="1" data-bbox="119 817 359 1086"> <thead> <tr> <th>材料</th> <th>Si</th> <th>空気</th> <th></th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>特性値</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>密度</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>ヤング率</td> <td>バ</td> <td>-</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>ポアソン比</td> <td>バ</td> <td>-</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>材料減衰</td> <td>-</td> <td>-</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>粘度</td> <td>-</td> <td>バ</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>誘電率</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>■ カンチレバーの特値</p> <table border="1" data-bbox="119 1243 359 1512"> <thead> <tr> <th>材料</th> <th>Si</th> <th>白金</th> <th>PZT</th> <th>絶縁体 SiO2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>特性値</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>密度</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td>バ</td> </tr> <tr> <td>ヤング率</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td>バ</td> </tr> <tr> <td>ポアソン比</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td>バ</td> </tr> <tr> <td>材料減衰</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>誘電率</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td>バ</td> <td>バ</td> </tr> <tr> <td>圧電応力マトリクス</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>バ</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table> <p>バ : バルクデータを使用 A : 産総研の計測データ使用 オリ : オリジナルの計測データ使用 松 : 松下電工の計測データ使用 オム : オムロンの計測データ使用 メ : 材料メーカのデータを使用</p>	材料	Si	空気				特性値						密度	バ	バ				ヤング率	バ	-				ポアソン比	バ	-				材料減衰	-	-				粘度	-	バ				誘電率	バ	バ				材料	Si	白金	PZT	絶縁体 SiO2	特性値					密度	バ	バ	バ	バ	ヤング率	バ	バ	バ	バ	ポアソン比	バ	バ	バ	バ	材料減衰	-	-	-	-	誘電率	バ	バ	バ	バ	圧電応力マトリクス	-	-	バ	-	<p>(1) 力学解析 (静解析、固有値解析) 担当: オリジナル、みずほ情報総研</p> <p>静解析</p> <p>① 評価方法: MemsONEと商用コードANSYSのそれぞれの解析結果と実験結果を比較する。 ② デバイスの動作方法: 光スキャナのミラー形成された可動部の中央をロードセルによって挿圧する。 ③ 入出力データ: 入力: ロードセルから得られた荷重値、出力: 可動部中央の変形量(挿圧方向) ④ 解析条件: 要素タイプ=8節点6面体要素、節点数=6640、要素数=4412、境界条件=ミラー周囲にグローバル解析の結果の固定境界、ミラー中央に集中荷重</p> <p>① 評価結果: MemsONEの解析結果と実験結果の誤差は2%未満であり、よく一致した結果が得られた。 ② 達成状況: 目標を達成できた。</p>   <p>固有値解析</p> <p>① 評価方法: MemsONEと商用コードCoventorとで同等の例題を解析し、解析結果を比較する。補足として静電駆動させた周波数応答測定と解析結果も参考として比較する。 ② デバイスの動作方法: 周波数応答特性は両電極に180度位相のずれた正弦波の電圧を印加し駆動。 ③ 入出力データ: 入力: なし[実験: 駆動電圧、周波数]、出力: 各モードの共振周波数 ④ 解析条件: 要素タイプ=8節点6面体要素、要素数=23292、節点数=33044、境界条件=脚部側面拘束</p> <p>① 評価結果: MemsONEとCoventorの5次モードまでの固有値の誤差は5%未満であり、よく一致した結果が得られた。周波数応答測定で得られたMode1、Mode3、Mode5の共振周波数とも良い相関が得られた。 ② 達成状況: 目標を達成できた。</p>     	<p>(4) 圧電解析 担当: オリジナル、みずほ情報総研</p> <p>圧電解析</p> <p>① 評価方法: 評価方法を含め実験データは論文からの引用し、MemsONEによる解析結果を比較する(データ提供: 京都大学神野先生)。 ② デバイスの動作方法: 基板上に成膜された圧電膜を用いた圧電駆動でカンチレバーを駆動。 ③ 入出力データ: 解析 入力: 実験により得られたe31および圧電膜への印加電圧、出力: カンチレバーの変形形状(ANSYS/MemsONE) 実験 入力: 圧電膜への印加電圧、出力: カンチレバーの変形形状 ④ 解析条件: 要素タイプ=8節点6面体要素、節点数=22055、要素数=16000、境界条件=端部拘束</p> <p>① 評価結果: MemsONEの解析結果と論文との結果との誤差は6%未満であり、よく一致した結果が得られた。 ② 達成状況: 目標を達成できた。</p>  	<p>(5) 雰囲気流体の影響解析(Q値解析) 担当: オリジナル、みずほ情報総研</p> <p>Q値解析</p> <p>① 評価方法: MemsONEの解析結果と実験結果を比較する。雰囲気流体の影響評価解析ソフトは連続体近似が可能である流体を対象としているので、高圧側(1kPa以上)での比較を行う。 ② デバイスの動作方法: 圧力雰囲気の変化可能な環境で、静電駆動型の光スキャナをねじり共振(Mode1、Mode3)させる。 ③ 入出力データ: 解析 入力: 雰囲気圧力、振動条件、間隙高さ 出力: 減衰率 実験 入力: 雰囲気圧力 出力: Mode1のQ値、低圧(構造減衰状態)でのMode3のQ値 ④ 解析条件: 要素タイプ=8節点6面体ソリッド要素、節点数=21840、要素数=18249、境界条件=端部拘束</p> <p>① 評価結果: Q値を大気から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、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、同程度のオーダーの結果が得られた。 ② 達成状況: 目標を達成できた。</p> <table border="1" data-bbox="454 2049 678 2116"> <thead> <tr> <th>実験</th> <th>解析(1次元減衰)</th> <th>解析(1次元減衰)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Q値</td> <td>358.5</td> <td>1055</td> </tr> <tr> <td>減衰率</td> <td>1.31e-3</td> <td>4.56e-4</td> </tr> </tbody> </table>  	実験	解析(1次元減衰)	解析(1次元減衰)	Q値	358.5	1055	減衰率	1.31e-3	4.56e-4
材料	Si	空気																																																																																																		
特性値																																																																																																				
密度	バ	バ																																																																																																		
ヤング率	バ	-																																																																																																		
ポアソン比	バ	-																																																																																																		
材料減衰	-	-																																																																																																		
粘度	-	バ																																																																																																		
誘電率	バ	バ																																																																																																		
材料	Si	白金	PZT	絶縁体 SiO2																																																																																																
特性値																																																																																																				
密度	バ	バ	バ	バ																																																																																																
ヤング率	バ	バ	バ	バ																																																																																																
ポアソン比	バ	バ	バ	バ																																																																																																
材料減衰	-	-	-	-																																																																																																
誘電率	バ	バ	バ	バ																																																																																																
圧電応力マトリクス	-	-	バ	-																																																																																																
実験	解析(1次元減衰)	解析(1次元減衰)																																																																																																		
Q値	358.5	1055																																																																																																		
減衰率	1.31e-3	4.56e-4																																																																																																		

(6) 連成解析 (力学-静電場)		担当: オリンパス、みずほ情報総研
静電場連成解析	評価検証方法	<p>①評価方法: MemsONEと商用コードCoventorWare(FEM)のそれぞれの解析結果と実験結果を比較する。</p> <p>②デバイスの動作方法: 静電駆動型の光スキャナの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駆動。</p> <p>③入出力データ: 入力: オフセット電圧、正弦波半周期分の電圧データ 出力: 光スキャナ可動部の機械振れ角</p> <p>④解析条件: 要素タイプ=8節点6面体要素、節点数=212,976(電界解析時)および15,860(弾塑性解析時)、要素数=196,528(電界解析時)および4,995(弾塑性解析時)、境界条件=端部拘束</p>
	評価検証結果	<p>①評価結果: MemsONEと商用コードCoventorWareでの解析結果を実験結果と比較した結果、駆動電圧と機械振れ角の関係はMemsONEではCoventorほどの一致は得られなかったものの、130Vでの乖離は28%であり、達成目標である50%以内の乖離は達成した。また電圧の大きい領域で線形以上の変化率で機械振れ角が増大しており、プルインの現象も再現できた。</p> <p>②達成状況: 目標を達成できた。</p> <div style="text-align: right;">  </div>

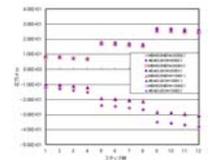
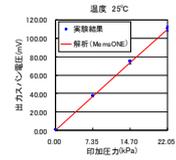
MEMS-ONEプロジェクトの達成目標に対する検証方法と検証結果

機構解析シミュレータ (3/3)

<p>プロジェクトの達成目標 (実施計画)</p>	<p>「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、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。</p>																														
<p>検証用デバイス</p> <p>■圧力センサの構造</p>  <p>パッケージ ダイアフラム (センサチップ) 電極端子 圧力供給口 ダイアフラム センサチップ ガラス台座 ダイボンド 圧力負荷</p> <p>■圧力センサの特性値</p> <table border="1" data-bbox="119 873 351 1220"> <thead> <tr> <th>材料</th> <th>Si</th> <th>SiO₂</th> <th>SiN</th> <th>ガラス</th> <th>ダイボンド</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ヤング率</td> <td>バ</td> <td>メ</td> <td>メ</td> <td>メ</td> <td>メ</td> </tr> <tr> <td>ポアソン比</td> <td>バ</td> <td>メ</td> <td>メ</td> <td>メ</td> <td>メ</td> </tr> <tr> <td>熱膨張係数</td> <td>バ</td> <td>メ</td> <td>メ</td> <td>メ</td> <td>メ</td> </tr> <tr> <td>ピエゾ係数</td> <td>バ</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table> <p>バ : バルクデータを使用 A : 産総研の計測データ使用 オリ : オリンパスの計測データ使用 松 : 松下電工の計測データ使用 オム : オムロンの計測データ使用 メ : 材料メーカーのデータを使用</p>	材料	Si	SiO ₂	SiN	ガラス	ダイボンド	ヤング率	バ	メ	メ	メ	メ	ポアソン比	バ	メ	メ	メ	メ	熱膨張係数	バ	メ	メ	メ	メ	ピエゾ係数	バ	-	-	-	-	<p>(1)力学解析 (弾塑性解析) 担当: 松下電工、みずほ情報総研</p> <p>評価検証方法</p> <p>①評価方法: MemsONE結果と実験結果を圧力によるダイアフラムの変位と比較評価する。また、同じ要素分割方法で汎用有限要素法ABAQUS(以後、ABAQUSと呼ぶ)を用いた解析を行い、変位を比較評価する。</p> <p>②デバイスの動作方法: 圧力によるダイア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。(ダイアフラム上にピエゾ抵抗を具備した圧力センサである。)</p> <p>③入出力データ: ダイアフラムを中心に、対称性を考慮した1/4解析モデルを作成。各材料はそれぞれの材料定数および寸法を設定し、要素は、圧力センサに適するソリッドとシェルで分割する。入力データは、圧力であり、出力データは、ダイアフラムの変位である。</p> <p>④解析条件: 要素タイプ=4節点積層シェル要素+8節点6面体要素、節点数=8774、要素数=7696、境界条件=底面拘束+1/4対称条件</p> <p>評価検証結果</p> <p>①評価結果: MemsONE結果は、実験結果のダイアフラム変位と、±5%以内で良好に一致した。またABAQUS結果とも、よく一致した。</p> <p>②達成状況: プロジェクトの目標を達成することができた。</p> 
材料	Si	SiO ₂	SiN	ガラス	ダイボンド																										
ヤング率	バ	メ	メ	メ	メ																										
ポアソン比	バ	メ	メ	メ	メ																										
熱膨張係数	バ	メ	メ	メ	メ																										
ピエゾ係数	バ	-	-	-	-																										
<p>(1)力学解析 (弾塑性解析) 担当: 松下電工、みずほ情報総研</p> <p>評価検証方法</p> <p>①評価方法: MemsONE結果と実験結果を圧力による出力電圧(応力)と比較評価する。また、同じ要素分割方法でABAQUSを用いた解析を行い、出力電圧(応力)を比較評価する。</p> <p>②デバイスの動作方法: 圧力によるダイア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。(ダイアフラム上にピエゾ抵抗を具備した圧力センサである。)</p> <p>③入出力データ: ダイアフラムを中心に、対称性を考慮した1/4解析モデルを作成。各材料はそれぞれの材料定数および寸法を設定し、要素は 圧力センサに適するソリッドとシェルで分割する。入力データは、圧力であり、出力データは、出力電圧(応力)である。</p> <p>評価検証結果</p> <p>①評価結果: MemsONE結果は、実験結果の出力電圧(応力)と、±5%以内で良好に一致した。またABAQUS結果とも、よく一致した。</p> <p>②達成状況: プロジェクトの目標を達成することができた。</p> 	<p>(6)連成解析 (力学解析-伝熱解析) 担当: 松下電工、みずほ情報総研</p> <p>評価検証方法</p> <p>①評価方法: MemsONE結果と実験結果を温度による出力電圧(応力)と比較評価する。また、同じ要素分割方法でABAQUSを用いた解析を行い、出力電圧(応力)を比較評価する。</p> <p>②デバイスの動作方法: 圧力によるダイア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。(ダイアフラム上にピエゾ抵抗を具備した圧力センサである。)</p> <p>③入出力データ: ダイアフラムを中心に、対称性を考慮した1/4解析モデルを作成。各材料はそれぞれの材料定数および寸法を設定し、要素は 圧力センサに適するソリッドとシェルで分割する。入力データは、温度であり、出力データは、出力電圧(応力)である。</p> <p>評価検証結果</p> <p>①評価結果: MemsONE結果は、実験結果の出力電圧(応力)と、最大±20%以内で一致した。またABAQUS結果とは、よく一致した。</p> <p>②達成状況: プロジェクトの目標を達成することができた。</p> 																														
<p>(6)連成解析 (力学解析-伝熱解析) 担当: 松下電工、みずほ情報総研</p> <p>評価検証方法</p> <p>①評価方法: MemsONE結果と実験結果を圧力・温度による出力電圧(応力)と比較評価する。また、同じ要素分割方法でABAQUSを用いた解析を行い、出力電圧(応力)を比較評価する。</p> <p>②デバイスの動作方法: 圧力・温度によるダイア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。(ダイアフラム上にピエゾ抵抗を具備した圧力センサである。)</p> <p>③入出力データ: ダイアフラムを中心に、対称性を考慮した1/4解析モデルを作成。各材料はそれぞれの材料定数および寸法を設定し、要素は 圧力センサに適するソリッドとシェルで分割する。入力データは、圧力・温度であり、出力データは、出力電圧(応力)である。</p> <p>評価検証結果</p> <p>①評価方法: MemsONE結果と実験結果を圧力・温度による出力電圧(応力)と比較評価する。また、同じ要素分割方法でABAQUSを用いた解析を行い、出力電圧(応力)を比較評価する。</p> <p>②デバイスの動作方法: 圧力・温度によるダイア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。(ダイアフラム上にピエゾ抵抗を具備した圧力センサである。)</p> <p>③入出力データ: ダイアフラムを中心に、対称性を考慮した1/4解析モデルを作成。各材料はそれぞれの材料定数および寸法を設定し、要素は 圧力センサに適するソリッドとシェルで分割する。入力データは、圧力・温度であり、出力データは、出力電圧(応力)である。</p>	<p>(6)連成解析 (力学解析-伝熱解析) 担当: 松下電工、みずほ情報総研</p> <p>評価検証方法</p> <p>①評価方法: MemsONE結果と実験結果を圧力・温度による出力電圧(応力)と比較評価する。また、同じ要素分割方法でABAQUSを用いた解析を行い、出力電圧(応力)を比較評価する。</p> <p>②デバイスの動作方法: 圧力・温度によるダイア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。(ダイアフラム上にピエゾ抵抗を具備した圧力センサである。)</p> <p>③入出力データ: ダイアフラムを中心に、対称性を考慮した1/4解析モデルを作成。各材料はそれぞれの材料定数および寸法を設定し、要素は 圧力センサに適するソリッドとシェルで分割する。入力データは、圧力・温度であり、出力データは、出力電圧(応力)である。</p> <p>評価検証結果</p> <p>①評価方法: MemsONE結果と実験結果を圧力・温度による出力電圧(応力)と比較評価する。また、同じ要素分割方法でABAQUSを用いた解析を行い、出力電圧(応力)を比較評価する。</p> <p>②デバイスの動作方法: 圧力・温度によるダイア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。(ダイアフラム上にピエゾ抵抗を具備した圧力センサである。)</p> <p>③入出力データ: ダイアフラムを中心に、対称性を考慮した1/4解析モデルを作成。各材料はそれぞれの材料定数および寸法を設定し、要素は 圧力センサに適するソリッドとシェルで分割する。入力データは、圧力・温度であり、出力データは、出力電圧(応力)である。</p>																														

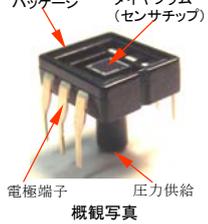
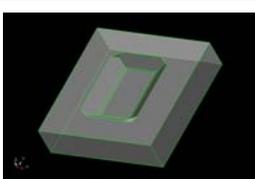
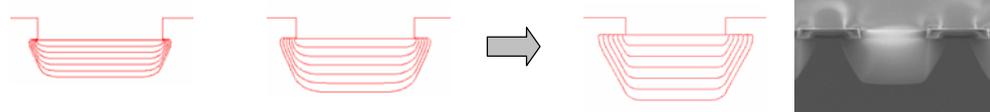
解析
評価検証結果

①評価結果: MemsONE結果は、実験結果の出力電圧(応力)と、±5%以内で良好に一致した。またABAQUS結果とも、よく一致した。
②達成状況: プロジェクトの目標を達成することができた。

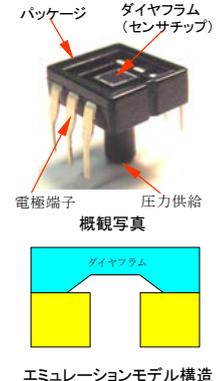
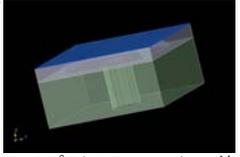
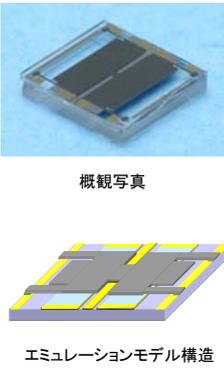
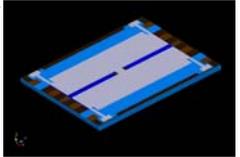
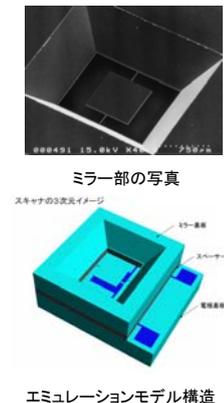
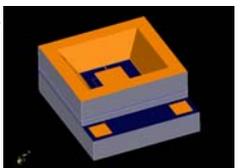


MEMS-ONEプロジェクトの達成目標に対する検証方法と検証結果

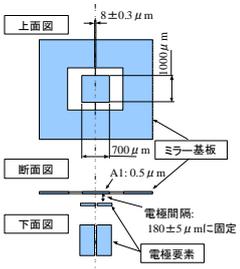
プロセス解析ツール (1/2)

プロジェクトの達成目標 (実施計画)		開発したプロセス解析ツールを用いて3次元MEMSデバイス構造(ヒンジを有したミラー構造、両持ちブリッジ構造)を作成、「機構解析シミュレータの開発」の機能により解析するとともに、実際に試作したデバイス構造の実測値と比較評価する。	
検証用デバイス		(1)ウェットエッチングシミュレータ	担当: みずほ情報総研
<p>■ 圧力センサの構造</p>  <p>ダイアフラム シミュレーションモデル構造</p>	<p>①評価方法: 実測したデバイス構造とシミュレーション結果を比較評価する。</p> <p>②入力データ: 圧力センサのダイアフラム部分をウェットエッチングシミュレータを用いて、結晶異方性エッチングプロセスを行う。作成した形状は、マルチプロセスエミュレータで取り込み、圧力センサチップを作成できるか確認する。</p> <p>③主な評価ポイント: ・実デバイスとシミュレーション結果との形状比較 ・マルチプロセスエミュレータとの接続</p>	 <p>ウェットエッチングシミュレーション結果</p>	
	ウエットエッチングシミュレータ		<p>①評価結果: ・ウェットエッチングシミュレーションの結果を右図に示す。 ・この結果は、実際のデバイス形状とよく一致した。 また、シミュレーション結果はマルチプロセスエミュレータで取り込むことができ、他のプロセスと組み合わせることで実際の圧力センサを作成できた。</p> <p>②達成状況: 目標を達成できた。</p>
■ エッチング形状		(2)ドライエッチングシミュレータ	担当: 産総研、みずほ情報総研
 <p>流量50sccm,放電パワー50W,圧力5Pa</p>  <p>流量50sccm,放電パワー50W,圧力15Pa 産総研保有装置による実測結果</p>	<p>①評価方法: 形状予測シミュレーションの結果と実測形状を比較評価する。</p> <p>②入力データ: 各測定条件において形状フィッティングにより計算パラメータの抽出を行う。次に抽出した計算パラメータを用い、装置条件を変えて形状予測シミュレーションを実施する。</p> <p>③主な評価ポイント: ・フィッティング結果と実測値の比較 ・形状予測シミュレーション結果と実測値の比較</p>	<p>①評価結果: 各測定条件において形状フィッティングした結果例を下図に示す。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。これらのフィッティング解析により、計算パラメータを抽出した。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。</p> <p>②達成状況: 目標を達成できた。</p> <p>フィッティング結果 (0~8%程度の誤差で実測値と一致した結果が得られた)</p> <p>形状予測シミュレーションの結果 (数%程度の誤差で実測値と一致する結果が得られ)</p>  <p>流量50sccm,放電パワー50W,圧力5Pa 流量50sccm,放電パワー50W,圧力15Pa 流量50sccm,放電パワー75W,圧力20Pa</p>	
	ドライエッチングシミュレータ		

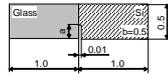
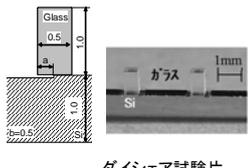
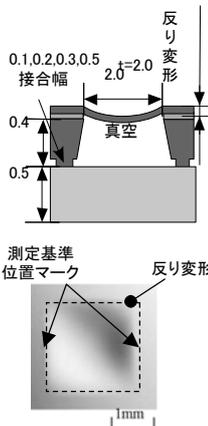
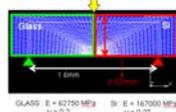
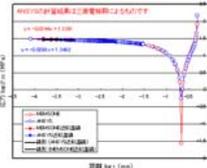
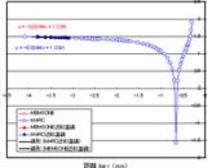
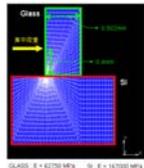
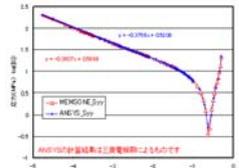
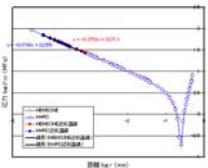
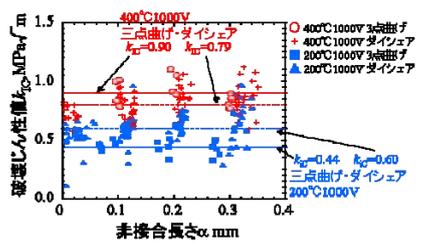
MEMS-ONEプロジェクトの達成目標に対する検証方法と検証結果

プロセス解析ツール (2/2)	
プロジェクトの達成目標 (実施計画)	開発したプロセス解析ツールを用いて3次元MEMSデバイス構造(ヒンジを有したミラー構造、両持ちブリッジ構造)を作成、「機構解析シミュレータの開発」の機能により解析するとともに、実際に試作したデバイス構造の実測値と比較評価する。
検証用デバイス	(3-1) マルチプロセスエミュレータ [その1] 担当: 松下電工、みずほ情報総研
<p>■ 圧力センサの構造</p>  <p>パッケージ ダイアフラム (センサチップ) 電極端子 圧力供給 概観写真 ダイアフラム エミュレーションモデル構造</p>	<p>マルチプロセスエミュレータ</p> <p>評価検証方法</p> <p>①評価方法: デバイス構造とマルチプロセスエミュレーション結果を比較評価する。</p> <p>②入力データ: 実際のデバイス作成プロセスに即したプロセスレシピおよびマスキレイアウトを設定する。</p> <p>③主な評価ポイント: ・ウェットエッチングシミュレーション結果の取り込み ・掘削プロセスの実装</p> <p>評価検証結果</p> <p>①評価結果: マルチプロセスエミュレーションの結果を右図に示す。この結果は、実際のデバイス形状とよく一致した。また、エミュレーションにおける主な評価ポイントは、問題なくクリアできた。尚、ウェットエッチングシミュレーションの結果形状が複雑な場合、マルチプロセスエミュレータで取り込み後、エッチング等のプロセスを行うことができないことがある。</p> <p>②達成状況: 目標を達成できた。</p>  <p>マルチプロセスエミュレーション結</p>
<p>■ RFスイッチの構造</p>  <p>概観写真 エミュレーションモデル構造</p>	<p>(3-2) マルチプロセスエミュレータ [その2] 担当: オムロン、みずほ情報総研</p> <p>マルチプロセスエミュレータ</p> <p>評価検証方法</p> <p>①評価方法: デバイス構造とマルチプロセスエミュレーション結果を比較評価する。</p> <p>②入力データ: 実際のデバイス作成プロセスに即したプロセスレシピおよびマスキレイアウトを設定する。</p> <p>③主な評価ポイント: ・接合プロセス後の形状エミュレーション ・多層の薄膜構造への適用</p> <p>評価検証結果</p> <p>①評価結果: マルチプロセスエミュレーションの結果を右図に示す。この結果は、実際のデバイス形状とよく一致した。また、エミュレーションにおける主な評価ポイントは、問題なくクリアできた。尚、薄膜厚さの下限は0.01 μmである。</p> <p>②達成状況: 目標を達成できた。</p>  <p>マルチプロセスエミュレーション結</p>
<p>■ ミラーの構造</p>  <p>ミラー部の写真 スキャナの3次元イメージ エミュレーションモデル構造</p>	<p>(3-3) マルチプロセスエミュレータ [その3] 担当: オリンパス、みずほ情報総研</p> <p>マルチプロセスエミュレータ</p> <p>評価検証方法</p> <p>①評価方法: デバイス構造とマルチプロセスエミュレーション結果を比較評価する。</p> <p>②入力データ: 実際のデバイス作成プロセスに即したプロセスレシピおよびマスキレイアウトを設定する。</p> <p>③主な評価ポイント: ・エミュレーション結果の機構解析への引継ぎ ・複数の接合プロセスの実装</p> <p>評価検証結果</p> <p>①評価結果: マルチプロセスエミュレーションの結果を右図に示す。この結果は、実際のデバイス形状とよく一致した。また、エミュレーションにおける主な評価ポイントは、問題なくクリアできた。尚、エミュレーション結果を機構解析で利用する為には、多くの場合においてエミュレータで作成した形状の一部を切り出してメッシュ生成後、解析を実施する必要がある。</p> <p>②達成状況: 目標を達成できた。</p>  <p>マルチプロセスエミュレーション結</p>

達成目標に対する検証方法と検証結果

機能拡張ソフト																	
プロジェクトの達成目標 (実施計画)	シリコンその他の材料のエッチング加工でのプロセスデータを採取して、フレームワーク上で動作するプロセス・マスク設計用逆問題解析ソフトを構築し、光MEMSデバイスをモデルとしてソフト機能の検証を完了する。																
検証用デバイス	(1)プロセス逆問題解析ソフト	担当：日立製作所、数理システム															
<p>■光MEMSデバイスの構造</p>  <p>図1 初期形状</p>	<p>プロセス逆問題解析ソフト</p> <p>評価検証方法</p> <p>①デバイスの構造: 静電駆動マイクロミラー。解析効果を検証するため、意図的に構成要素を最小限にとどめて指定する。 ②検証用データ: マイクロミラーの初期形状、逆問題解析の出力(プロセスレシビとマスクデータ)、製作したマイクロミラーの平面形状寸法評価データ。 ③評価方法(手順): 1)構造設計されたマイクロミラーの初期形状を入力して逆問題解析し、解析結果としてのプロセスレシビとマスクデータを出力する。 2)出力されたプロセスレシビとマスクデータがフレームワーク上で認識・表示され、その内容が妥当な場合、目標達成とする。 3)マスクデータを基にマスクを製作し、それをを用いてマイクロミラー要素を製作する。 4)製作したマイクロミラー要素の寸法を測定し、同一箇所の初期形状・寸法との対比表を作成し、参考として添付する。</p>																
	<p>評価検証結果</p> <p>①評価結果: 1)マイクロミラーの初期形状(図1)に対し推奨形状(図2)がガイダンスされ、推奨形状のプロセスレシビがGSVファイルで、マスクデータがSSLファイルで出力された。 2)上記ファイルがフレームワーク上で問題なく認識され、プロセス表とCAD図に展開された。 3)出力マスクデータに基づいて、マイクロミラー要素(図3)を製作した。 4)初期形状と製作要素の梁幅寸法データを比較した結果(表1)、両者は概ね一致した。 ②達成状況: 初期形状に基づく逆問題解析の結果、プロセスレシビとマスクデータが出力されるとともに、フレームワーク上で問題なく認識され、開発目標が100%達成された。</p>	 <p>図2 推奨形状</p>  <p>図3 検証用 マイクロミラー要素</p> <p>表1 寸法・形状比較表</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>検証項目</th> <th>全体形状</th> <th>梁幅寸法 (μm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>初期形状</td> <td>ミラー-電極要素のみ</td> <td>80±0.3</td> </tr> <tr> <td>推奨形状</td> <td>SiO₂支持キラー</td> <td>80</td> </tr> <tr> <td>マスク形状</td> <td>行状シフト補償</td> <td>85</td> </tr> <tr> <td>製作形状</td> <td>デバイス層エッチング</td> <td>74~78</td> </tr> </tbody> </table>	検証項目	全体形状	梁幅寸法 (μm)	初期形状	ミラー-電極要素のみ	80±0.3	推奨形状	SiO ₂ 支持キラー	80	マスク形状	行状シフト補償	85	製作形状	デバイス層エッチング	74~78
	検証項目	全体形状	梁幅寸法 (μm)														
	初期形状	ミラー-電極要素のみ	80±0.3														
推奨形状	SiO ₂ 支持キラー	80															
マスク形状	行状シフト補償	85															
製作形状	デバイス層エッチング	74~78															
評価検証方法																	
評価検証結果																	
評価検証方法																	
評価検証結果																	

MEMS-ONEプロジェクトの達成目標に対する検証方法と検証結果

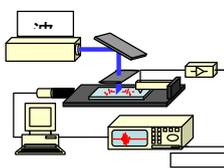
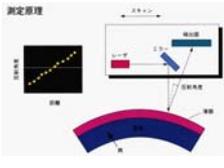
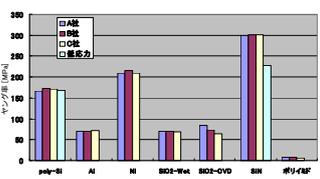
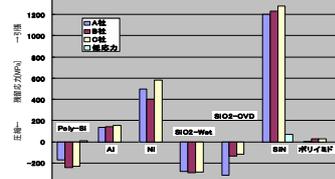
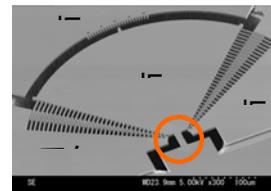
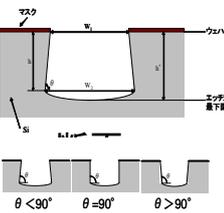
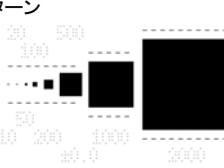
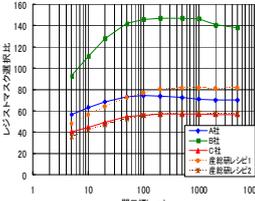
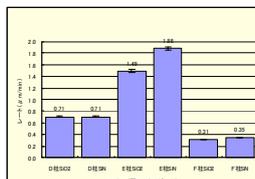
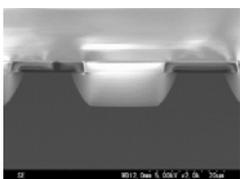
機能拡張ソフト	
プロジェクトの達成目標 (実施計画)	材料データベースを活かした異種材料接合親和性の評価、力学的信頼性の解析ソフトの開発及び統合を行い、一方では陽極接合と半田接合に係るデータベースを構築して、最終的には具体的な接合サンプルで実測・評価し、解析ソフトの検証を完了する。
検証用デバイス	(2)接合実装解析ソフト 担当：三菱電機、みずほ情報総研
<p>■検証デバイス(試験片)の形状</p>  <p>三点曲げ試験片</p>  <p>ダイシエア試験片</p>  <p>封止性試験片</p>	<p>評価検証方法</p> <p>①妥当性評価方法: MemsONEと商用コードANSYS、MARCとで3点曲げの例題を解析し、解析結果を比較する。</p> <p>②解析条件: 要素タイプ=4節点平面ひずみ要素、要素数=3960、節点数=4016、 境界条件=2点拘束+1点集中荷重</p> <p>①評価結果: MemsONEとANSYS、MARCとの計算結果は良く一致した。</p> <p>②達成状況: 目標を達成できた。</p>   
	<p>評価検証方法</p> <p>①妥当性評価方法: MemsONEと商用コードANSYS、MARCとでダイシエアの例題を解析し、解析結果を比較する。</p> <p>②解析条件: 要素タイプ=4節点平面ひずみ要素、節点数=4973、要素数=4905、 境界条件=Si側面固定+1点集中荷重</p> <p>①評価結果: MemsONEとANSYS、MARCとの計算結果は良く一致した。</p> <p>②達成状況: 目標を達成できた。</p>   
	<p>評価検証方法</p> <p>①評価方法: 陽極接合された接合強度試験片を検証デバイスとして、3点曲げおよびダイシエアによる強度試験および有限要素法解析を行ない、接合部の強度を体系的に整理し、接合部の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すことによって解析の妥当性を検証する。</p> <p>②測定データ: MEMSプロセスや実装に用いられる異種材の接合方法である陽極接合およびはんだ接合について、強度試験および封止性試験を行ない、接合強度および封止性データを取得する。</p>
	<p>評価検証結果</p> <p>①評価結果: 陽極接合およ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するとともに、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。</p> <p>②達成状況: 目標を達成できた。</p> 

MEMS-ONEプロジェクトの達成目標に対する検証方法と検証結果

知識データベースの開発	
プロジェクトの達成目標 (実施計画)	構築したMEMS設計のための知識データベースを用いることにより、MEMS設計に有効な設計支援システムを実現する。 (初心者や経験の乏しい研究者・技術者にも使いこなせるシステムを構築するために、先端研究者の豊富な知見やノウハウに関する知識データを、使い易い知識データベースとして開発するとともに、MEMS開発・設計者の知識、知見、実績の蓄積が可能な知識データベースを構築する。)
検証用デバイス	(1)知識/材料データベースソフトの開発 担当: みずほ情報総研
DBソフトの開発	<p>評価検証方法</p> <p>①開発機能: 1)知識・材料データの蓄積 知識・材料データを蓄積するために必要となる、MySQLを用いたデータベースを構築した。その際、知識データについては、プロセス、デバイス、材料特性、解析の大分類毎に定めた中分類で整理し、データベースへの格納を実施した。また材料データについては、材料・特性毎に固定値、範囲値等の物性値に対応するデータベースを構築した。 2)知識データの可視化 知識データを可視化するために必要な事例、項目、ページ選択等の機能を実装した。 3)知識データ検索 知識データベース内の文書を対象に検索を実施し、入力されたキーワードを含む事例を一覧表示する検索機能を作成した。 ②検証方法と検証項目: 各機関からの知識・材料データおよびマイクロマシン技術用語に格納されているMEMS関連用語をデータベース内に格納し、知識データの可視化、知識データ検索が正しく実行されることを確認する。</p> <p>評価検証結果</p> <p>①検証結果: 上記、開発機能の動作確認および検証作業により知識/材料データベースソフトとして正常な結果を得ることが確認出来た。知識データの可視化画面、および検索結果の一例を示す。</p>   <p>②達成状況: 目標を達成できた。</p>
	(2)知識データベースの構築 担当: MMC、12大学
知識データの収集	<p>評価検証方法</p> <p>①目標収集件数: 知識DB委員会の初回の委員会において、知識データ数は概ね1,000件以上を達成することを申し合わせた。 ②収集データ種別: 大きく分けて、本プロジェクトに参画した大学教官が研究内容や基本知識等を知識データとして開発する、MEMS関連ですでに知識DBとして収集されたものを選定して本プロジェクトの知識DBに組み入れる、マイクロマシンセンターがマイクロマシン用語集として編集した、MEMSやマイクロマシン関連の専門用語を組み入れる、という3種の知識データを開発・収集した。 ③蓄積方法: 先ず、本プロジェクトに参画した大学教官が専門分野の研究内容や基本知識等をDBソフトの知識体系に則り作成した。本知識DBの骨格となるものである。またMEMS関連ですでに知識DBとして収集されたものを本プロジェクトで構築する知識DBに組み入れた。更に、マイクロマシンセンターがマイクロマシン用語集として編集した、MEMSやマイクロマシン関連の専門用語の定義と解説等を初心者向けに搭載した。</p> <p>評価検証結果</p> <p>①収集結果: 知識DBとして総数で約1,700件のデータを収集できた。内訳は、大学教官が作成したもの約800件、既存の知識DBとしてマイクロ化学研究組合がMEMS関連で収集した流体関連MEMSやセンサ関連MEMSの知識データとして約700件、マイクロマシンセンターがマイクロマシン用語集として編集した、MEMSやマイクロマシン関連の専門用語の定義とその解説関連で焼く200件となっている。</p> <p>②達成状況: 知識DBとして数量的には当初目標(申し合わせ)を十分達成できた。また、知識体系としてデバイス、プロセス、材料および解析の4分野に対してもほぼ全分野をカバーしている。MemsONE設計解析ソフトを使用する初心者や異分野の技術者向けの知識DBとしては構築できたと考えられる。今後はMEMS技術の展開に即して更なる充実を図る必要があり、高集積・複合MEMS技術開発プロジェクト(ファインMEMSプロジェクト)で開発の知識DBの組み込み等を推進する所存である。</p>
	評価検証方法
評価検証結果	

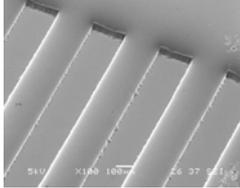
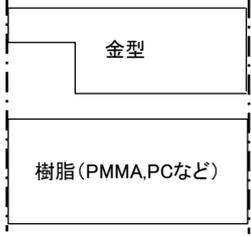
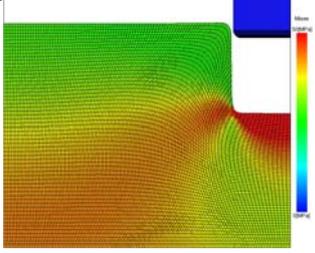
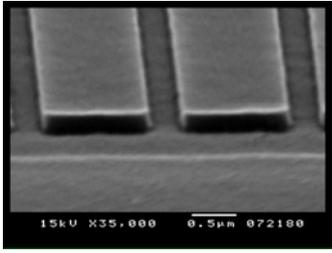
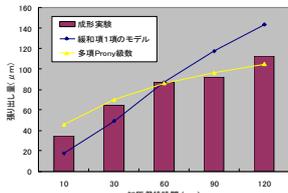
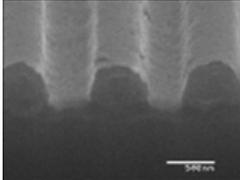
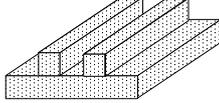
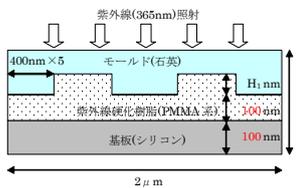
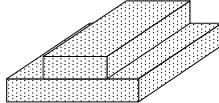
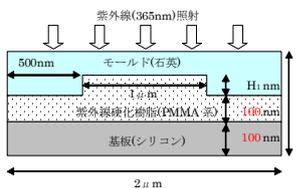
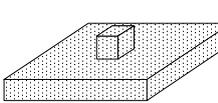
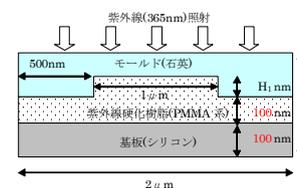
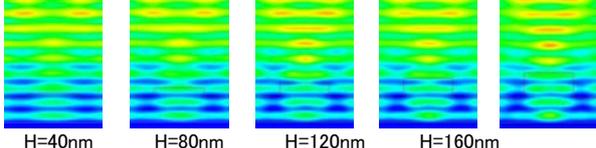
MEMS-ONEプロジェクトの達成目標に対する検証方法と検証結果

材料・プロセスデータベースの構築

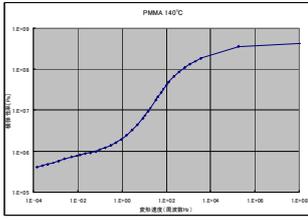
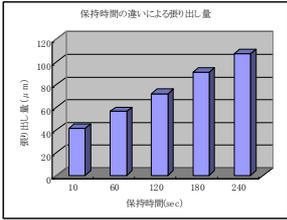
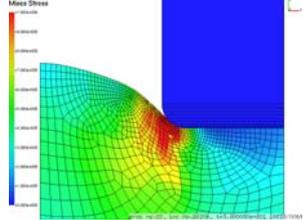
<p>プロジェクトの達成目標 (実施計画)</p>	<p>薄膜材料破壊強度、ヤング率、ポアソン比、残留応力のデータを取得し、ファブリー事業者により有用な機械特性データベースを構築する。また構築したMEMS設計のための材料・プロセスデータベースを用いることにより、MEMS設計に有効な設計支援システムを実現する。</p>	
<p>計測用デバイス</p> <p>■計測方法</p> <p>●表面弾性波法によるヤング率測定</p>  <p>●薄膜応力の測定</p> 	<p>(1)材料特性データベース構築</p> <p>担当：産業技術総合研究所、マイクロマシンセンター</p> <p>評価検証方法</p> <p>①測定材料種別： 国内MEMSファブリー3社により作製された、ポリシリコン、SiO₂、SiN、アルミニウム、ニッケル、ポリイミド膜の材料特性を実測するとともに、MEMSに使用される主要な材料の物性値を文献等から収集する。</p> <p>②測定する材料特性： ファブリーにより作製された各種膜材料のヤング率および残留応力を実測するとともに、その他の物性値について文献道からデータを収集する。また、シリコンの疲労特性など、MEMSの信頼性に影響する材料特性データを取得する。</p> <p>③測定・評価方法： ヤング率は、レーザー誘起表面弾性波法およびナノインデンテーション法により測定する。膜の残留応力は、成膜されたウェハの反りを光学的に測定することにより、応力を測定する。シリコンの疲労特性については、静電駆動を用いたMEMS疲労試験片により評価を行う。</p> <p>①測定結果： 成膜材料の材料特性の測定を完了した。ヤング率および残留尾力の測定結果を、左下および中央のグラフに示す。シリコンの疲労特性では、右下のようなMEMS試験片を作製し、最大応力および湿度と疲労寿命に関するデータを取得した。これらと、各種文献からそのほかの材料および物性値のデータを収集し、材料データベースを構築した。</p> <p>②達成状況： 目標を達成出来た。</p>    <p><マイクロマシンセンター担当> ファブリー企業のプロセスでサンプルを作成しそれを用いて材料特性を実測する他に、MEMS関連の文献や材料メーカーのカタログ等からも各種の材料特性を探索・収集した。その結果、材料特性収集分野は知識DBとの整合を図り、半導体、酸化膜/窒化膜、金属、ポリマー、ガラス/セラミクス、磁性材料、圧電材料、形状記憶合金、その他の全分野の材料特性データをカバーし、更には当初計画にはなかった接合破壊じん性値も比較評価のために収録できた。収録総数は250件を超える。そのうち実測値は59件、他は文献値とカタログ値である。収録したデータの中で各分野ごとに重要性、適用性の高い170件強をβ版に搭載することとしている。今後とも順次材料データは充実させていくことになっている。</p>	<p>評価検証結果</p>
<p>計測方法</p> <p>●ドライエッチングの測定パラメータ</p>  <p>●ウェットエッチング評価用パターン</p> 	<p>プロセスデータの取得</p> <p>評価検証方法</p> <p>①測定対象プロセス： 国内MEMSファブリー3社により試作された、D-RIEによるシリコンのドライエッチングおよび結晶異方性エッチングによるシリコンのウェットエッチングの加工特性データを収集する。また、RIE装置によりドライエッチングの各種パラメータとエッチング特性に関するデータを収集する。</p> <p>②測定するパラメータ： ファブリーでの試作結果について、ドライエッチングのエッチングレート、側壁角度、マスク選択比および側面の表面粗さを測定する。ウェットエッチングでは、各結晶面のエッチングレートおよび底面の表面粗さを測定する。また、RIE装置でエッチングレート、サイドエッチングレートと各種パラメータの関係についてデータを収集する。</p> <p>③測定・評価方法： エッチングレートおよび側壁角度は、光学顕微鏡やSEMIによる断面観察により測定する。表面粗さは、SEM、AFM、および光学式粗さ計により測定する。</p> <p>①測定結果： ドライエッチングでは、ファブリーによるD-RIE加工のデータに加え、産総研の試作による標準的なデータの取得を完了した。ウェットエッチングについても、データ収集を完了した。RIEの加工特性については、各種加工条件と加工結果との関係についてのデータを取得した。図は、左下からDRIEのエッチング断面、ドライエッチングのマスク選択比データ、ウェットエッチングのエッチングレートデータ、RIEによるエッチング断面写真である。これらの結果に加え、文献等からの他の加工プロセスに関するデータを収集し、プロセスデータベースを構築した。</p> <p>②達成状況： 目標を達成出来た。</p>   	<p>評価検証結果</p>

MEMS-ONEプロジェクトの達成目標に対する検証方法と検証結果

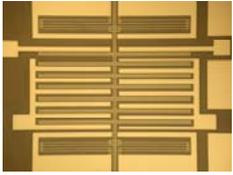
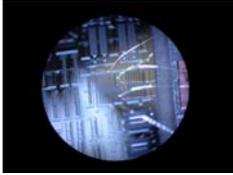
ナノインプリント加工解析ソフト

プロジェクトの達成目標 (実施計画)		<p><熱> 開発した熱ナノインプリント・プロセス解析プログラムを用いて、標準試験片によるナノインプリント実験結果に対して、シミュレータ開発面から比較検証評価を試行する。標準型の形状に対する実測値と予測値の解析精度を50%以上とする。</p> <p><光> 開発した光ナノインプリント・プロセス解析プログラムに対応した電磁波解析プログラムを用いて、シミュレータ開発面から比較検証評価を試行する。</p>	
検証用デバイス		(1) 熱ナノインプリント解析	
■ 熱用デバイスの構造		担当: 産総研、みずほ情報総研	
 <p>アクリル樹脂のライン&スペース成型形状例(産総研測定)</p>	評価検証方法 熱ナノインプリント解析	<p>① 評価方法: 検証解析は、複数の樹脂に対して、種々のアスペクト比、パターン密度、樹脂厚み等を持つライン&スペースパターンに対して行う。離型後の形状を実験結果のSEM写真と解析結果とで比較検証する。実際の解析モデルは左下図の様にパターンの一部を取り出したものとなる。解析と実験を比較した例を右下図に示す。</p>   	
		<p>① 評価結果: 評価例として、十分にパターン深さを持ち、ライン幅とスペース幅共に200 μmの金型をバルクのPMMAに押し込む問題を実験と解析の両方で行った。樹脂材料物性は産総研による測定値を用いた。押し込み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右図に示す。厳密な材料物性値を用いた解析(右図の黄色線)結果が実験(右図の赤色棒)と実用に耐えうる精度で一致していることが確認できた。</p>  <p>② 達成状況: 目標は達成された。</p>	
■ 光用デバイスの構造		(2) 光ナノインプリント解析	
 <p>文献[1]の実測データ</p> <p>[1] M. Wissen, H. Schulz, N. Bogdanski, H.-C. Scheer, Y. Hirai, H. Kikuta, G. Ahrens, F. Reuther, K. Pfeiffer, "UV curing of resists for warm embossing", Microelectronic Engineering 73-74(2004) 184-189.</p>		評価検証方法 光ナノインプリント解析	<p>担当: 大阪府立大学、岡山大学、みずほ情報総研</p> <p>① 評価方法: 検証解析は、次の3パターンのモデルを対象に実施し、文献[1]の実測データとの比較により解析結果の評価を行う。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>① 400nmライン&スペース</p>   <p>$H_1 = 40, 80, 120, 160, 200 \text{ nm}$</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>② 1 μmライン&スペース</p>   <p>$H_1 = 40, 80, 120, 160, 200 \text{ nm}$</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>③ ピラー</p>   <p>$H_1 = 40, 80, 120, 160, 200 \text{ nm}$</p> </div> </div> <p>① 評価結果: 左図にパターン①の結果を示す。電界強度は、青(弱)→黄(中)→赤(強)で強度を現している。ライン高さの違いにより、光硬化性樹脂の上面上、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、文献[1]で示されるとおり、現象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。 以上より、光ナノインプリント・プロセス解析シミュレータとして、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。</p> <p>② 達成状況: 目標は達成された。</p>  <p>H=40nm H=80nm H=120nm H=160nm</p>

MEMS-ONEプロジェクトの達成目標に対する検証方法と検証結果

ナノインプリント用データベースの構築																																																													
プロジェクトの達成目標 (実施計画)	ナノインプリント成形材料としてPMMA、ポリイミド(PI)、SU-8、低融点ガラスなどを、金型材料としてNiおよびSiを対象に、これらの機械的・熱的物性データを採取してデータベースを構築する。さらに、標準金型によるナノインプリント実験結果と解析結果の妥当性を検証する。																																																												
計測用デバイス	(1)材料特性データベース構築 担当: 産業技術総合研究所																																																												
■粘弾性特性測定装置 	評価検証方法 ①測定材料種別: 代表的なナノインプリント用樹脂材料として、PMMA、COP、PET、PCの粘弾性特性データを収集する。 ②測定する材料特性: 各種樹脂の、長期ヤング率、長期ポアソン比、WLF則のパラメータ(T0,C1,C2)、無次元化横弾性率等の粘弾性特性データ。および、これら樹脂の標準的な金型による成形特性のデータ。 ③測定・評価方法: 粘弾性特性の測定には、引張圧縮式の粘弾性測定装置を使用する。成形特性のデータは、小型のナノインプリント装置により成形時間および加圧力を変えてデータを取得する。成形用の型としては、シミュレーション結果との比較を容易にするため、ミクロな型に加え、200μm程度のマクロな型を用いたデータを取得する。																																																												
■小型ナノインプリント装置 																																																													
材料特性データの取得	評価検証結果 ①測定結果: 樹脂の粘弾性特性データを取得し、シミュレーションに必要なパラメータを抽出とデータベースを構築を完了した。また、PMMA、COP、PETの成形加工特性データを取得した。測定された各パラメータを用いて成形のシミュレーションを行った。左下から、PMMAの粘弾性測定結果、PMMAの成形実験データ、測定パラメータを用いて行ったナノインプリントシミュレーション結果の一例を示す。 ②達成状況: 目標は達成出来た。   																																																												
計測用デバイス(試験片)の形状	(2)材料特性データベース構築 担当: 日立製作所																																																												
■試験方法	評価検証方法 ①測定材料種別: スピコート・焼成による樹脂膜(PMMA、PI)及び低融点ガラス膜(SOG)、金型材料(Ni電鍍膜、Si) ②測定するパラメータ: 機械的特性(ヤング率、残留応力)、熱的特性(熱膨張率) ③測定・評価方法: 表面弾性波法、ナノインデンタ、光てこ法、触針式応力測定装置、熱機械分析法																																																												
材料特性データの取得	評価検証結果 ①測定結果: 測定した材料物性データを右表にまとめて示す。 ②達成状況: 予定した材料に対し、機械的・熱的物性データを複数種類の評価装置を用いて採取し、目標を達成した。																																																												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>評価法</th> <th>ヤング率 (GPa)</th> <th>残留応力 (MPa)</th> <th>熱膨張率 (ppm/°C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PMMA</td> <td>表面弾性波法</td> <td>5.1-5.3</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>ナノインデンタ</td> <td>5.8-6.6</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>PI</td> <td>触針式応力評価</td> <td></td> <td>46-48</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ni電鍍膜A</td> <td>ナノインデンタ</td> <td>200-220</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>光てこ法</td> <td></td> <td>40-110</td> <td>9-11</td> </tr> <tr> <td>Ni電鍍膜B</td> <td>ナノインデンタ</td> <td>150-190</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>光てこ法</td> <td></td> <td>120-230</td> <td>8-10</td> </tr> <tr> <td>SOG</td> <td>表面弾性波法</td> <td>6.4-7.8</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>ナノインデンタ</td> <td>2.9-3.1</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Si</td> <td>表面弾性波法</td> <td>181-182</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>熱機械分析法</td> <td></td> <td></td> <td>2.9-4.0</td> </tr> </tbody> </table>		評価法	ヤング率 (GPa)	残留応力 (MPa)	熱膨張率 (ppm/°C)	PMMA	表面弾性波法	5.1-5.3				ナノインデンタ	5.8-6.6			PI	触針式応力評価		46-48		Ni電鍍膜A	ナノインデンタ	200-220				光てこ法		40-110	9-11	Ni電鍍膜B	ナノインデンタ	150-190				光てこ法		120-230	8-10	SOG	表面弾性波法	6.4-7.8				ナノインデンタ	2.9-3.1			Si	表面弾性波法	181-182				熱機械分析法			2.9-4.0
	評価法	ヤング率 (GPa)	残留応力 (MPa)	熱膨張率 (ppm/°C)																																																									
PMMA	表面弾性波法	5.1-5.3																																																											
	ナノインデンタ	5.8-6.6																																																											
PI	触針式応力評価		46-48																																																										
Ni電鍍膜A	ナノインデンタ	200-220																																																											
	光てこ法		40-110	9-11																																																									
Ni電鍍膜B	ナノインデンタ	150-190																																																											
	光てこ法		120-230	8-10																																																									
SOG	表面弾性波法	6.4-7.8																																																											
	ナノインデンタ	2.9-3.1																																																											
Si	表面弾性波法	181-182																																																											
	熱機械分析法			2.9-4.0																																																									
	評価検証方法																																																												
	評価検証結果																																																												

達成目標に対する検証方法と検証結果

回路集積化MEMSシミュレータ		
プロジェクトの達成目標 (実施計画)	櫛歯アクチュエータを備えたマイクロピンセットと位置検出電子回路を製作し、実験データを取得して、連成シミュレーションによる解析値と比較検証し、シミュレータの解析精度を実証する。	
検証用デバイス	(1)回路集積化MEMSシミュレータ 担当: 数理システム、東京大学	
■静電アクチュエータの構造  	回路シミュレータ 評価検証方法 ① デバイスの動作方法: 力入力-電気出力実験では中央梁上部から針で外力を加えることで、静電引力入力-電気出力実験では駆動電極部に高電圧を印加することで、上下方向へ変位させる。但し、検証デバイスにマイクロピンセットが備わっていないと連成シミュレーションの解析精度を実証できる為、マイクロピンセットを備えないものを用いた。 ② 入出力データ: テストデバイスの構造データと電気回路図から本シミュレータ上でモデル図を作成し、計装アンプの出力波形を得る。 ③ 評価方法: 1)力入力-電気出力: 中央の梁上部から力を加えた際の変位を電氣的に読み出す。外力を加えたとき計装アンプの出力波の位相変化とVp-pについて、実験データと解析結果の比較を行う。 2)静電引力入力-電気出力: 駆動電極にパルス波を印加し、130V→0V降下時、及び0V→130V上昇時の計装アンプの出力波(100kHz成分)のVp-0について、実験データと解析結果の比較を行う。	
	評価検証結果 ① 評価結果: 1)力入力-電気出力: 外力を加えたときの出力波の位相変化は一致した。また、実験結果とシミュレーション結果の比較から、Vp-pの実験値とよい一致を示す印加外力の大きさを得た。 2)静電引力-電気出力: 130V→0V降下時、0V→130V上昇時ともに、電圧変化前と、電圧変化の瞬間を除く電圧変化後10μs程度以内で、出力波(100kHz成分)のVp-0は実験結果とよい一致を示した。 ② 達成状況: 目標を達成できた。	
	評価検証方法	
	評価検証結果	
	評価検証方法	
評価検証結果	