

「MEMS用設計・解析支援システム開発プロジェクト」

事業原簿

公開版

作成者	新エネルギー・産業技術総合開発機構 機械システム技術開発部
-----	----------------------------------

— 目 次 —

概要	2
（新製造技術プログラム）「MEMS 用設計・解析支援システム開発プロジェクト」基本計画	11
新製造技術プログラム 基本計画	21
I. 事業の目的・政策的位置付けについて	
1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性	27
1.1 NEDO が関与する意義	27
1.2 MEMS 用設計・解析支援システムの必要性	28
1.3 実施の効果（費用対効果）	29
2. 事業の背景・目的・位置づけ	
2.1 事業の位置付け・必要性	31
2.2 国のプログラムとの関連性	31
II. 研究開発マネジメントについて	
1. 事業の目標	34
2. 事業の計画内容	34
2.1 研究開発の内容	34
2.2 研究開発の実施体制	41
2.3 研究開発の運営管理	41
3. 情勢変化への対応	42
4. 中間評価結果への対応	45
5. 評価に関する事項	45
III. 研究開発成果について	
IV. 実用化の見通しについて	
1. 事業全体の成果	46
2. 各テーマ成果まとめ	57
3. 各テーマの成果詳細	
3.1 フレームワークソフトの開発（日本ユニシスエクセリョーションズ）	i-1～i-31
3.2 機構解析シミュレータの開発（みずほ情報総研）	ii-1～ii-30
3.3 プロセス解析ツールの開発（みずほ情報総研）	iii-1～iii-28
3.3.1 異方性ウェットエッチングシミュレータ	
3.3.2 ドライエッチングシミュレータ	
3.3.3 マルチプロセスエミュレータ	
3.3.4 ナノインプリント加工解析	

3.4	機能拡張ソフトの開発	iv-1～iv-61
3.4.1	プロセス逆問題解析（数理システム、日立製作所）	
3.4.2	接合実装解析（みずほ情報総研、三菱電機）	
3.4.3	回路集積化 MEMS シミュレータ（数理システム）	
3.5	データベース（知識・材料）の構築	v-1～v-61
3.5.1	知識データベース（みずほ情報総研、マイクロマシンセンター）	
3.5.2	材料・プロセス・データベース	
	（産業技術総合研究所、新潟大学、日立製作所、三菱電機）	
3.6	成果の普及（みずほ情報総研、マイクロマシンセンター）	vi-1～vi-25

添付資料（学会発表、プレス発表等）

概 要

	作成日	平成 19 年 7 月 11 日	
制度・プログラム名	新製造技術プログラム		
プロジェクト名	MEMS 用設計・解析支援システム 開発プロジェクト	PJ コード	P04005
担当推進部・担当者	機械システム技術開発部 浅海 一志		
0. 事業の概要	<p>多くの分野の技術者や 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支援システムを開発することにより、多くの技術者が MEMS 分野に抵抗無く参加されて MEMS 分野の裾野が広がり、解析精度の向上によりプロトタイプの試作回数が削減されてアイデアや着想が早く実現するなど MEMS 産業の振興及び発展が図られる。</p>		
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>規格品の工業製品の製造が大きく中国へシフトしているなか、我が国の製造業は研究開発型産業への転換が求められている。これらの新しい製造業の 1 分野として MEMS (Micro Electro Mechanical System: 微小電気機械システム) の産業の牽引役としての役割が期待されている。MEMS 産業は成長期の分野であるために、設備投資に比べて期待されるマーケットでの商品の売り上げ個数はかならずしも多くない。そのためハード面での設備投資のリスクを低減しつつ、設備インフラを整えるために、NEDO 技術開発機構は、「MEMS プロジェクト」(平成 15～17 年度)を通じて、MEMS ファンドリー整備事業に着手した。</p> <p>一方、MEMS 設備を備えた大学数が限られているために MEMS 技術者の数は少なく、且つ、MEMS 製造の対象は通信、化学、バイオ、エネルギー等多岐に渡る分野のために、異分野の技術者が MEMS 産業に抵抗なく参入できる土壌を醸成し、裾野の拡大を図る必要がある。これにより MEMS 技術が我が国の広範な製造業に波及し、競争力のある製品群を供給することが期待される。そのために、多くの異分野の技術者や研究者が MEMS 分野に抵抗なく参入するための方法として、国がソフト的な支援を行う必要があり、本事業では多くの異分野の技術者や MEMS プロセスに精通していない技術者が MEMS デバイスを容易に設計し、マスク描画を行い、迅速に試作評価を行えるための MEMS 用設計・解析支援システムを開発する。</p>		

II. 研究開発マネジメントについて

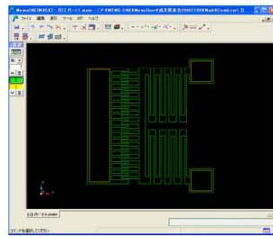
事業の目標	MEMS プロセスに明るくない多くの分野の技術者が機構設計、プロセスシミュレーション、マスク設計を簡便迅速におこなうことができるソフトウェアを開発する。機構設計、プロセスシミュレーションを精度良く実行するためのファンドリー事業者ごとの信頼性の高い材料およびプロセスのデータベースを構築する。これにより解析精度の向上を達成しプロトタイプの試作回数の低減に寄与する。				
事業の計画内容	主な実施事項	平成 16 年度	平成 17 年度	平成 18 年度	平成 19 年度
	MEMS 用設計解析 支援ツツの開発			→	
	MEMS 用材料・プロセス・データベースの開発			→	
	ナノプリント加工・ 解析システムの開発			→	
	回路集積化 MEMS シミュレータの開発			→	
					→ 成果普及事業
【開発予算】	(単位：百万円)	平成 16 年度	平成 17 年度	平成 18 年度	平成 19 年度
	一般会計	0	0	0	0
	特別会計 ＜高度化＞ ()内は成果普及調査費	418 (14)	562 (12)	587 (12)	60 (成果普及費)
	総予算額 1,627	418	562	587	60
【開発体制】	経済省担当原課	製造産業局産業機械課			
	運営機関	新エネルギー・産業技術総合開発機構			
	プロジェクトリーダー	東京大学教授 藤田博之			

	<p>委託先 （*委託先が管理法人の場合は参加企業数も記載）</p>	<p>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、株式会社計算力学研究センター※、独立行政法人産業技術総合研究所（※平成 16 年度のみ）</p>
<p>【情勢変化への対応】</p>	<p>プロジェクト立ち上げ当初においては考慮していなかったナノインプリント技術が急速に MEMS における有望なプロセスとして成長したため、平成 17 年度に世界初のナノインプリントの解析シミュレーションの開発テーマを追加した。</p> <p>また、微細化が進み同一基板上に機械系部品と電子回路が混在するのが普通となってきており、MEMS を機械・電子系連成システムとして捕らえ、その動作を同時に結合して解析することが設計の短期効率化に不可欠となってきたと判断し、平成 18 年度には、回路シミュレータを元に、従来の電氣的自由度だけではなく、機械的自由度も扱えるように拡張可能な回路集積化 MEMS シミュレータを追加した。</p>	

<p>Ⅲ. 研究開発成果について</p>	<p><u>(1) フレームワークソフトの開発</u></p> <p>多様な解析ソフトやデータベースを統合的に利用可能な MEMS 専用で、初心者でも容易に使用できる日本語版グラフィカル操作 (GUI) ソフトとして、フレームワークソフトを開発した。</p> <p><u>(2) 機構解析シミュレータの開発</u></p> <p>MEMS 開発に必要な力学解析、電磁界解析、圧電解析、伝熱解析、熱変形解析、雰囲気流体の影響解析およびその連成解析の基本的な数値解析を有限要素法等の技術で実現し、計算結果と実デバイスとの比較検証では良好な結果が得られた。</p> <p><u>(3) プロセス解析ツールの開発</u></p> <p>本研究開発では MEMS プロセスによる加工についてシミュレータまたはエミュレータにより MEMS 加工構造を実現して総合的に検証・評価するシステムを開発し、計算結果と実験値との比較検証では良好な結果が得られた。</p> <p>弾塑性解析と熱可塑性解析を含めた熱ナノインプリント加工の解析シミュレータ、光を電磁波として解析する高周波の電磁波解析 (FDTD 法を採用) を含めた光ナノインプリント加工の解析シミュレータを開発した。</p> <p><u>(4) 機能拡張ソフトの開発</u></p> <p>MEMS 設計・解析に必須でありながら従来のシステムには具備されていない、最終形状からマスクデータを生成するプロセス逆問題解析ソフトおよび MEMS 実装の重要課題である接合の力学的信頼性や温度変化に対する応答性を解析する機能を開発した。</p> <p>MEMS 機構を対象とした機械系素子の解析モデル構築を行い、回路シミュレータ SPICE3 の機能を拡張して、機械的自由度を扱えるようにした、汎用的な回路集積化 MEMS シミュレータを開発し、実デバイスとの比較検証を行った。</p> <p><u>(5) データベースの開発</u></p> <p>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とファンドリにフィットした材料・プロセスデータを使い易いデータベースとして開発した。蓄積したデータ数は、知識データが 1750 件、材料・プロセスデータが 435 件に上る。</p>
----------------------	--

(6) 成果の普及

普及活動の広告宣伝活動は、MemsONE の商標を獲得後、パンフレットを 5500 部配布し、パネルを 5 枚と P R ビデオを制作し、マイクロマシン展等の展示会・学会・セミナーにて活用し MemsONE の周知、普及を行った。また、MemsONE に関する情報を提供する Web サイト「MemsONE ひろば」の整備とともに「MemsONE クラブ」を開設し、約 800 名の会員を集った。さらに MemsONE 配布時に必要となるインストーラ・ライセンスライブラリ・マニュアルの整備を行い、開発途中バージョンを α 版と称して 391 件無償配布した。最終的にはプロジェクト全成果を MemsONE β 版として平成 19 年 5 月より実費（10,000 円/ライセンス）配布を開始し、平成 19 年 7 月末時点で 361 件の導入申し込みに到った。



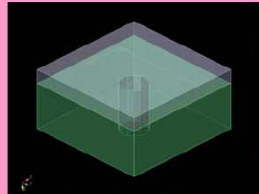
マスク作成例

プロセス工程	製造装置	タイプ	厚さ(μm)	膜厚	ガス	特性	材料
1	コート	有機膜	1.0	1.0			
2	コート	有機膜	1.0	1.0			
3	コート	有機膜	1.0	1.0			
4	コート	有機膜	1.0	1.0			
5	コート	有機膜	1.0	1.0			
6	コート	有機膜	1.0	1.0			
7	コート	有機膜	1.0	1.0			
8	コート	有機膜	1.0	1.0			

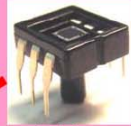
プロセスレシピ作成例

マルチプロセスエミュレーションの実行により3次元形状を作成

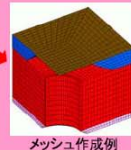
解析事例：圧力センサー



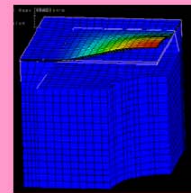
マルチプロセスエミュレータ実行結果



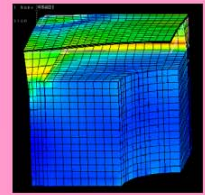
実デバイス



メッシュ作成例

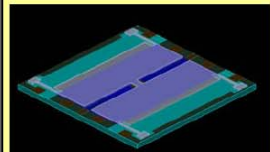


弾塑性解析例
(Z方向変位コンター)

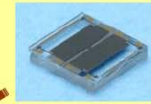


熱弾塑性解析例
(ミーゼス応力コンター)

解析事例：RFスイッチ



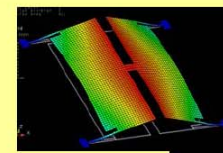
マルチプロセスエミュレータ実行結果



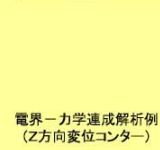
実デバイス



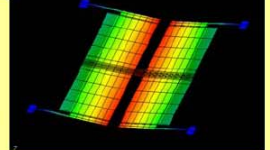
メッシュ作成例



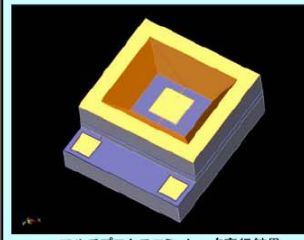
振動モード解析例
(1次モードZ方向変位コンター)



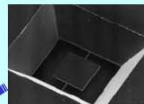
電界-力学連成解析例
(Z方向変位コンター)



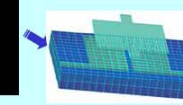
解析事例：MEMSミラー



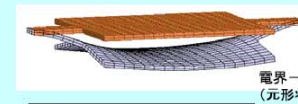
マルチプロセスエミュレータ実行結果



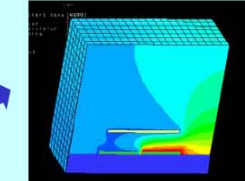
実デバイス



メッシュ作成例



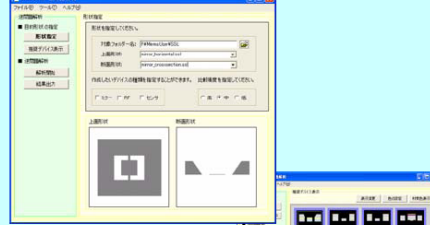
電界-力学連成解析例
(元形状&変形図表示)



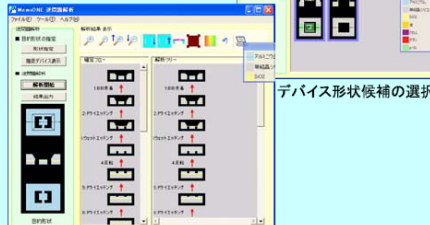
電界-力学連成解析例
(電界強度コンター)

MemsONE の解析事例 (1)

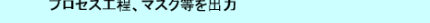
プロセス逆問題ソフト (デバイス形状からプロセス工程及びマスクを決定)



上面形状及び断面形状を入力

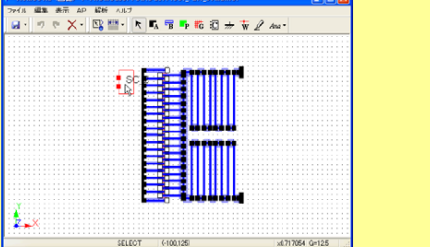


デバイス形状候補の選択

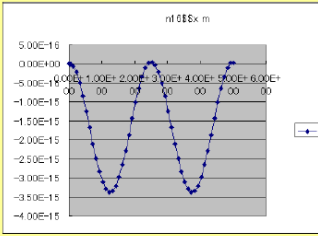


プロセス工程、マスク等を出力

回路解析ソフト (機械的自由度を扱うことができる回路シミュレータ)

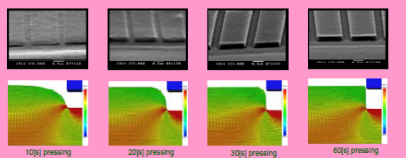


歯槽アクチュエータの作成例

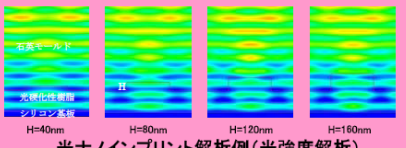


解析結果例

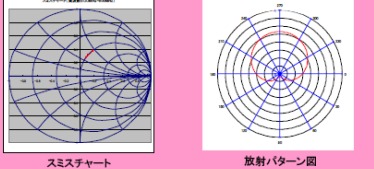
ナノインプリント解析ソフト



熱ナノインプリント解析例(粘弾性解析)

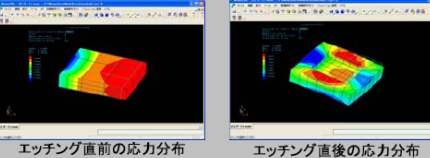


光ナノインプリント解析例(光強度解析)

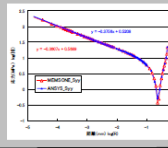


スミスチャート 放射パターン図
電磁波解析例

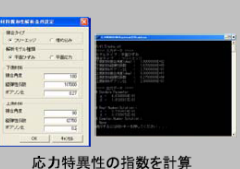
接合実装解析ソフト



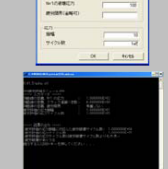
エッチング直前の応力分布 エッチング直後の応力分布
応力・温度履歴継承解析



接合強度評価
応力特異性の指数を評価



応力特異性の指数を計算
材料親和性評価



疲労強度評価

MemsONE の解析事例 (2)

	【成果発表数】					
	論文等誌上発表 (論文誌、学会誌、国際会議)		特許等		報道 (新聞、雑誌等)	
	国内	海外	国内	海外	国内	海外
	件数	73	148	1 (商標登録)	0	8
IV. 実用化、事業化の見通しについて	<p>実用化に向けて、普及活動の広告宣伝活動としてまず MemsONE の商標を獲得した。その後、パンフレットを 5500 部配布し、パネルを 5 枚と P R ビデオを制作し、マイクロマシン展等の展示会・学会・セミナーにて活用し MemsONE の周知、普及を行った。その数は、成果発表会 2 回開催、各種展示会に 7 回出展、講習会・セミナー 4 回開催、学会等で 3 回発表に上る。また、MemsONE に関する情報を提供する Web サイト「MemsONE ひろば」の整備とともに「MemsONE クラブ」を開設し、約 800 名の会員を集った。さらに MemsONE 配布時に必要となるインストーラ・ライセンスライブラリ・マニュアルの整備を行い、開発途中バージョンを α 版と称して 391 件無償配布し、MemsONE の認知度を高めた。最終的には、プロジェクト全成果を MemsONE β 版として平成 19 年 5 月より実費 (10,000 円/ライセンス) 配布を開始し、平成 19 年 7 月末時点で 361 件の導入申し込みに到り、現在も増加中である。これら MEMS 設計、開発の初心者から熟練者まで幅広い多くのユーザが MemsONE β 版を導入したことは国内 MEMS 産業の活性化するきっかけとして大きな意義がある。さらに、導入したユーザの約 3 割は他分野のユーザであったことから、他分野と MEMS 分野の融合が促進されることが大いに期待される。</p>					
V. 評価に関する事項	事前評価	なし				
	評価予定	平成 19 年度 事後評価実施予定				
VI. 基本計画に関する事項	策定時期	平成 16 年 3 月 策定				
	改訂履歴	平成 18 年 3 月 改訂				

(新製造技術プログラム)

「MEMS 用設計・解析支援システム開発プロジェクト」基本計画

機械システム技術開発部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

1) 背景

規格品の工業製品の製造が大きく中国へシフトしているなか、我が国の製造業は研究開発型に転換する必要がある。これらの新しい製造業の分野として MEMS (Micro Electro Mechanical Systems: 微小電気機械システム) は産業の牽引役としての役割が期待される。MEMS 産業は成長期の分野であるために、設備投資に比べて期待されるマーケットでの商品の売り上げ個数は必ずしも多くない。そのためハード面での設備投資のリスクを低減し、設備インフラを整えるために、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (以下 「NEDO 技術開発機構」という) は、「MEMS プロジェクト」(平成 15~17 年度) を通じて、MEMS ファンドリー整備事業に着手した。一方、MEMS 設備を備えた大学の数に限られているために MEMS 技術者の数は少なく、且つ、MEMS 製造は対象が通信、化学、バイオ、エネルギー等の多岐に渡る分野のために、異分野の技術者が MEMS 技術に抵抗なく参入できる土壌を醸成し、裾野の拡大を図る必要がある。これにより MEMS 技術が我が国の広範な製造業に波及し、競争力のある製品群を供給することが期待される。

2) 目的

上記背景をふまえ、今後の我が国の MEMS 産業の振興及び発展を進めていくためには多くの分野の技術者や研究者が MEMS 分野に抵抗なく参入するためのソフト的な支援を行う必要がある。このために本プロジェクトでは多くの分野の技術者や MEMS プロセスに精通していない技術者が MEMS デバイスを容易に設計し、マスク描画を行い、迅速に試作評価を行えるための MEMS 用設計・解析支援システムを開発する。これにより以下のような効果が期待できる。

- ・ 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。
- ・ 解析精度向上によりプロトタイプを試作回数が短縮され、アイデアや着想を早く実現でき、それにより先行者利益を確保できる。
- ・ 国内ファンドリーのプロセスデータの整備により、製造委託が増加する。

3) 位置付け

「新製造技術プログラム」の目的の一つとして、IT 等最新の技術を積極的に導入することによる新たな高付加価値産業を生み出す環境整備があり、MEMS 産業においては「MEMS プロジェクト」で高精度 3 次元 MEMS の製造技術の開発と、その技術をファンドリーへ展開することによる MEMS 産業の活性化及び環境整備を行っているが、更なる産業活性化のためには、設計・解析支援シス

テムを開発するソフト面の環境整備が必要である。

(2) 研究開発の目標

1) 最終目標

- ・ MEMS プロセスに明るくない多くの分野の技術者が機構設計、プロセスシミュレーション、マスク設計を簡便迅速におこなうことができるソフトウェアを開発すること
- ・ 機構設計、プロセスシミュレーションを精度良く実行するためのファンドリー事業者ごとの信頼性の高い材料およびプロセスのデータベースを構築すること
- ・ これにより解析精度の向上を達成しプロトタイプを試作回数の低減に寄与すること
- ・ 成果の普及のための体制をプロジェクト実行中より構築すること

以上の目標を達成するために、プロジェクト終了時において（別紙）研究開発計画の研究開発項目①、②、③および④の達成目標を達成すること。

(3) 研究開発内容

最終目標を達成するために以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

- ① 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）
- ② MEMS 用材料・プロセス・データベースの開発
- ③ ナノインプリント加工・解析システムの開発
- ④ 回路集積化 MEMS シミュレータの開発

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

NEDO 技術開発機構が、企業、民間研究機関、独立行政法人、大学等（委託先から再委託された研究開発実施者を含む）から公募によって研究開発実施者を選定の上、共同研究契約等を締結する研究体を構築し、委託して実施する。

共同研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルの最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、研究体には NEDO が指名する研究開発責任者（プロジェクトリーダー）を置き、その下に研究者を可能な限り結集して効果的な研究開発を実施する。

(2) 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有する NEDO 技術開発機構は、経済産業省及び研究開発責任者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標、並びに本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて設置される技術検討委員会等における外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、四半期に一回程度プロジェクトリーダー等を通じてプロジェクトの進捗について報告を受けること等を行う。

3. 研究開発の実施期間

本研究開発の期間は、平成 16 年度から平成 18 年度までの 3 年間とする。

4. 評価に関する事項

NEDO 技術開発機構は、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義ならびに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の事後評価を平成 19 年度に実施する。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

5. その他の重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

①成果の普及

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。

②知的基盤整備事業又は標準化等との連携

得られた研究開発の成果については、知的基盤整備または標準化等との連携を図るため、データベースへのデータの提供、標準情報 (TR) 制度への提案等を積極的に行う。

③知的財産権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第 26 条の規定等に基づき、原則として、すべて受託先に帰属させることとする。

(2) 基本計画の変更

NEDO 技術開発機構は、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状况、内外の研究開発動向、政策動向、プログラム基本計画の変更、第三者の視点からの評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

(3) 根拠法

本プロジェクトは、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第 15 条第 1 項第 2 号に基づき実施する。

6. 基本計画の改訂履歴

- (1) 平成 16 年 3 月、制定。
- (2) 平成 17 年 7 月、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」を追加。
- (3) 平成 18 年 3 月、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」の一部を修正。
研究開発項目「回路集積化 MEMS シミュレータの開発」を追加。
プロジェクト基本計画等の体系の整理に伴う様式の変更。

(別紙) 研究開発計画

研究開発項目①MEMS 用設計解析支援ソフトの開発

1. 研究開発の必要性

MEMS 製造プロセスに精通していない多くの分野の技術者が高度な機械設計、電磁気学や半導体製造技術の習得を前提とせずに MEMS の設計・シミュレーションができるようになれば、MEMS 産業分野の裾野が広がり、これにより我が国 MEMS 産業における異分野の融合を促し、競争力を大きく前進させることができる。そのために、フレームワークソフト、機構解析シミュレータ、プロセス解析ツール、機能拡張ソフト、知識データベースの機能を持つ MEMS 用設計解析支援ソフトの開発が必要とされている。

2. 研究開発の具体的内容

(1) フレームワークソフトの開発

機構解析シミュレータ、プロセスシミュレータ、材料・プロセス・データベース、知識データベース、機能拡張ソフト等を統合的に利用可能とする基本ソフト（フレームワークソフト）の開発を行う。なお、新たな MEMS（流体 MEMS など）の解析モジュール等の外部ソフト・外部データベースのプラグイン機能や個別データに基づくカスタマイズ機能を有し今後の拡張性を確保するために、インターフェース部分をオープンとする。

フレームワークソフトには、以下の機能を持たせるものとする

- ・ マスク作成
- ・ デバイス構造作成
- ・ 自動格子作成
- ・ プロセスレシピおよび解析条件設定
- ・ 解析結果表示
- ・ 各種主要解析ソフト（MEMS 用も含む）との入出力データコンバータおよび主要 CAD ソフトとのデータコンバータ
- ・ 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、知識データベース）

機構解析シミュレータの開発シミュレータ次元構造を対象とし、以下の解析が可能な機構解析シミュレータを開発する。ただし、(a)自動メッシュ機能を有すること、(b)主要な CAD ソフト（マスク作成ソフト、既存の各種機構解析ソフト）、回路シミュレータ、システム・デバイス性能評価ソフト等とのインターフェースがとれていること、(c)光 MEMS 等で用いられるヒンジを有したミラーや RF-MEMS で用いられる両持ちブリッジ構造の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、圧電アクチュエータの運動解析が行えることとする。またそれぞれの機構解析のチュートリアル（実験結果と対比した解析事例集、理論マニュアル等も整備）を含む。

- ・ 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）
- ・ 電磁界解析（静電、Sパラメータ、伝送路固有モード解析を含む）

- ・ 圧電解析
- ・ 伝熱解析、熱変形解析
- ・ 雰囲気流体の影響解析
- ・ 上記の連成解析

(2) プロセス解析ツールの開発

MEMS 製造で用いられる以下のプロセスのシミュレータまたはエミュレータを開発する。また、それぞれのプロセスのチュートリアルを含む。

- ・ 異方性ウエットエッチングプロセス
- ・ ドライエッチングプロセス
- ・ 成膜プロセス
- ・ マルチプロセス

(4) 機能拡張ソフトの開発

MEMS 製造に必要な、以下の特殊な解析（機構解析とプロセス複合化）を可能とするシミュレータまたはエミュレータを開発する。

- ・ プロセス逆問題解析ソフト（最終形状からマスクデータを生成する）
- ・ 接合実装解析ソフト（接合の力学的信頼性、温度変化に対する応答を解析）

(5) 知識データベースの開発

MEMS 製造を容易にするために、MEMS 設計・製作に特有な知識・ノウハウを体系化したデータベース（代表的デバイス・プロセス等の例示を含む）を開発する。

また、今後新しい分野の知見を反映できるような拡張性を用意する。

3. 達成目標

最終的に以下の 3 例について、それぞれ 2 者以上で試作実測したものと比較して、プロセス解析ツールと機構解析シミュレータを用いて、以下の諸量の解析精度を 50%以上とする。

- ・ 光 MEMS 等で用いられるヒンジを有したミラーの共振周波数、振れ角対駆動電圧特性の予測値と実測値
- ・ RF-MEMS で用いられる両持ちブリッジ構造の変位対静電アクチュエータの駆動電圧の予測値と実測値
- ・ 異種材料の接合体の接合後の熱歪による変形量及びその温度特性の予測値と実測値

研究開発項目②「MEMS 用材料・プロセス・データベース」

1. 研究開発の必要性

研究開発項目①の解析を精度良く行うためには、主要国内ファブドリー事業者におけるプロセス（成膜プロセス、ウェットエッチングプロセス、ドライエッチングプロセス等）で得られる材料・プロセスのデータをより広い条件で、精度良く取得する必要がある。

2. 研究開発の具体的内容

（1）材料・プロセス・データベースの構築

解析ソフトとのインターフェースがとれていること。および以下のデータを計測する。

・成膜材料の機械特性データ

フリースタANDING構造体として用いる材料（単結晶シリコン（100）、多結晶シリコン、Al、Ni、ポリイミド、SiO₂、SiN）の、最小限の温度範囲として常温から 200℃までの応力ひずみ線図、常温から 200℃までのヤング率、ポアソン比、残留応力、破壊強度

・ドライエッチングプロセス

シリコンの深堀エッチングにおける加工形状データ（角度および側面粗さ、マスク選択比）を取得する。

・ウェットエッチングプロセス

シリコン材料（100）、（110）、（111）の異方性エッチングデータ（エッチング深さおよび SiO₂ および SiN マスク選択比）を、主に各種文献調査により取得する。エッチャントは KOH および TMAH とする。

（2）計測・補間手法の確立

応力ひずみ線図に基づいた高精度計測法、迅速計測法の確立および比較を行なう。また、同時にデバイスの信頼性予測手法（接合体および弾性変形梁、可動接点を対象とする）を開発するとともに、物理法則に基づき、データベースの実測値を用いて異なる条件のデータを補間する手法を開発する。

3. 達成目標

取得データごとに最低国内 3 カ所のファブドリー事業者に試作依頼を行い、データの計測をおこなう。データについての計測は、基準温度を設定し、最小限の温度範囲として常温から 200℃の範囲で、少なくとも 50℃刻みにデータを取得する。ドライエッチングプロセスについては標準ラインアンドスペースパターンについてエッチング条件を、複数変化させて計測を行う。

計測手法については応力ひずみ線図にもとづく計測法と迅速手法を確立し、計測の精度を 90% 以上とする。

研究開発項目③ナノインプリント加工・解析システムの開発

1. 研究開発の必要性

近年、MEMS の応用分野が拡大し、ナノサイズの構造をリソグラフィー技術を用いずに、より安価に加工することが可能なナノインプリント加工の基礎研究と応用研究が進んできた。ナノインプリント加工を用いることで、マイクロ・ナノ構造をより簡便に大量に作製することが可能となり、従来の LIGA などのプロセスに変わる可能性が高い。この加工分野は、プレス加工メーカーや樹脂メーカーが中核であり、MEMS 分野をこれまでのリソグラフィー関連装置分野以外に拡大するものである。

また、ナノインプリント加工が金型・プレス・樹脂という分野が中心であることから、日本が圧倒的な技術蓄積と産業を有しており、ナノインプリントの利用技術は急速に国内で発展しつつある。このような背景をもとに、MemsONE の利用拡大と既存の欧米の設計解析システムとの差別化の観点から、ナノインプリント加工の解析機能と解析に必要な材料データベースの構築が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 熱・光ナノインプリント加工解析システムの開発

1) 熱ナノインプリント加工解析システムの開発

①熱ナノインプリント・プロセス解析モデルの構築

熱ナノインプリント・プロセス解析シミュレータの解析モデルの構築を行うにあたり、型の最適化、ナノインプリント・プロセス解析技術、塑性加工関連、材料試験関連の知識を体系化し、これに基づき、プロセス解析モデル構築を行う。

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

解析モデルに基づき、熱ナノインプリント・プロセス解析シミュレータの開発を行う。

③標準試験片によるシミュレーション結果の評価検証

標準試験片によるナノインプリント実験結果とシミュレーション結果の評価検証を行う。

2) 光ナノインプリント加工解析システムの開発

①光ナノインプリント・プロセス解析モデルの構築

光ナノインプリント・プロセスに対応した電磁波解析プログラムの解析モデル構築および検証モデルの検討を行う。

②光ナノインプリント・プロセス解析シミュレータの開発

解析モデルに基づいた電磁波解析プログラムの開発および MemsONE への組み込みを行う。

③シミュレーション結果の評価検証

検証モデルを用いて、電磁波解析プログラムのシミュレーション結果を評価する。

3) フレームワークソフトの改修

熱ナノインプリント加工解析シミュレータへの対応と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ための改修を行う。

- ・ 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
- ・ データベースインターフェース
- ・ 電磁波解析プログラムのプレ機能
- ・ 電磁波解析プログラムのポスト機能
- ・ システム全体への組み込み

(2) データベースの構築

ナノインプリント用樹脂物性データベースの構築とシミュレーション結果の検証を行う。

1) ナノインプリント用樹脂の物性データベース構築

ナノインプリント用樹脂のシミュレーションに必要な材料データベースを構築する。

① 代表的樹脂に対して実施

- ・ データ収集用実験系構築
- ・ 樹脂物性データ収集（シミュレーション計算に必須の物性値）

② 用途に応じて使用される複数の種類に対して実施

- ・ レジスト用、光学素子用、流体素子用等の樹脂に対するシミュレーション用物性データ収集とデータベース化
- ・ ナノインプリント後の樹脂物性値の評価とデータベース化

2) シミュレーション結果の検証

① 代表的樹脂に対しての検証

標準試験片を用いたナノインプリント実験評価を通して、シミュレーション結果を検証する。

- ・ ナノインプリント実験評価装置の構築
- ・ シミュレーション結果検証用モールド（金型）の製作
- ・ ナノインプリント実験評価

② 多様な形状、材料に対しての検証

多様な形状、材料に対応した実験データの収集を行う。

- ・ 多様な成形パターン金型製作
- ・ ナノインプリント実験評価

3) 知識・材料データの整理及び入力

収集したデータを整理し、材料データベースへの入力データとして蓄積する。

3. 達成目標

ナノインプリント・プロセス解析の解析モデル構築を行い、解析モデルに基づく熱ナノインプリント加工解析システムおよび光ナノインプリント加工解析システムを開発し、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。

ナノインプリント・プロセス用樹脂およびニッケル材金型に対する物性データ収集用実験系を構築し、ナノインプリント加工・解析システムに必要な樹脂およびニッケル材金型物性データを収集する。また、標準型を用いたナノインプリント実験評価方法を確立する。

研究開発項目④回路集積化 MEMS シミュレータの開発

1. 研究開発の必要性

微細化が進み同一基板上に機械系部品と電子回路が混在するのが普通となりつつある現在、MEMS を機械・電子系連成システムとして捕らえ、その動作を同時に結合して解析することが必須のものとなってきている。巨大かつ複雑な物理系を比較的単純化されたモデルのネットワークとして解析する手法は、回路シミュレーションにおいて、多大な実績を上げてきた。今回、回路シミュレータを元に、従来の電氣的自由度だけではなく、機械的自由度も扱えるように拡張することで、回路集積化 MEMS シミュレータを開発する。

2. 研究開発の具体的内容

(1) シミュレータの開発

1) 機械系素子のモデル構築

- ①MEMS 機構を比較的単純な要素素子に分解する。
- ②要素素子ごとの電氣的あるいは力学的解析モデルを構築する。
- ③要素素子モデルをライブラリとして整備する。

2) 汎用的な回路集積化 MEMS シミュレータ解析エンジンの開発

- ①回路シミュレータ SPICE3 の機能を拡張して、機械的自由度を扱えるようにする。
- ②機械系素子の入力仕様を決め、入力モジュールを作成する。
- ③機械系素子の出力仕様を決め、出力モジュールを作成する。

3) シミュレーション結果の評価

検証モデルを用いて、シミュレーション結果の評価検証を行い、解析精度を実証する。

(2) データベースの構築

MEMS 用の回路シミュレータに関する知識や知見を知識データとして整理・集約し、蓄積したデータをデータベースシステムに登録する。

3. 達成目標

検証モデルをサーボ・フィードバック付き加速度センサとし、この検証モデルに必要な機構要素モデルを作成して、サーボ電子回路と合わせた連成シミュレーションを行い、解析結果の解析精度を実証する。

新製造技術プログラム基本計画

1. 目的

IT等最新の技術を導入し、プロセス技術の革新を図ることにより、我が国経済社会の基盤である製造業の競争力の維持・強化を目指す。

2. 政策的位置付け

科学技術基本計画（2001年3月閣議決定）における国家的・社会的課題に対応した研究開発の重点化分野である製造技術分野、分野別推進戦略（2001年9月総合科学技術会議）における重点分野である製造技術分野に位置づけられるものである。

また、産業技術戦略（2000年4月工業技術院）における革新的・基盤的技術（製造技術）の涵養、知的な基盤の整備とともに「産業発掘戦略－技術革新」（「経済財政運営と構造改革に関する基本方針2002」（2002年6月閣議決定）に基づき、2002年12月取りまとめ）の情報家電・ブロードバンド・IT分野における戦略目標（国民、産業界、政府等共有の目標により、国民の存在需要を発掘）、及びナノテクノロジー・材料分野における戦略目標（10年後に、世界市場を主導できる我が国発の企業をナノテクノロジー・材料分野の‘5つの産業’で創出する。）等への対応を図るものである。

3. 目標

2007年度までに、現在の製造に要する時間やコスト等を半減することを目標に、プロセスの一層の合理化を図るとともに、新たな高付加価値産業を生み出すプロダクトイノベーションの環境を整える。

4. 研究開発内容

【プロジェクト】

I. 新製造技術の新たな領域開拓

（1）MEMSプロジェクト（フォーカス21）（運営費交付金）

①概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、我が国に蓄積された半導体製造技術やマイクロマシン技術を活用し、情報通信、医療・バイオ、産業機械など多様な分野におけるキーデバイスとして期待が高まっているMEMSのうち、今後比較的短期に大きな市場が形成されると期待されるMEMS（RF-MEMS、光MEMS、センサMEMS）の実用化に必要な製造技術を開発するとともに、これらのMEMS製品の実用化等を通じ、多様な産業・民生分野におけるエネルギー使用の合理化を図る。

②技術目標及び達成時期

2005年度までに、RF-MEMS、光MEMS、センサMEMSの各分野において特に有望と期待されるデバイスの実用化に必要な高精度の三次元MEMS製造技術を確立するとともに、これらのMEMS製品を実用化する。

③研究開発期間

2003年度～2005年度

④中間・事後評価の実施期間

事後評価を2006年度に実施。

⑤実施形態

民間企業、大学、公的機関等から最適な研究体制を構築し、実施。

(2) MEMS用設計・解析支援システム開発プロジェクト（運営費交付金）

①概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、MEMS (Micro Electro Mechanical System) 技術を活用した製品のアイデアを持つ異業種・ベンチャー企業等の多様な主体が開発に取り組むための産業基盤として、技術者に蓄積された加工ノウハウや加工条件と連携する材料特性データを組み込んだMEMS設計・解析支援システムを構築する。本事業により、大企業から中小・ベンチャー企業まで、従来MEMS製品のアイデアを持ちながらMEMS加工プロセスや材料特性の知見が無い設計・開発ができなかった多様な主体によるMEMSデバイスの開発を可能とする。加えて、設計・試作回数の削減によりデバイス開発の省エネルギー・省資源化を実現する。

②技術目標及び達成時期

2006年度までに、MEMS用設計・解析支援システムを開発し、MEMS製品のアイデアは有するものの必要な設備・技術を持たない企業等に、MEMSデバイス開発を可能とする環境を整備する。

③研究開発期間

2004年度～2006年度

④中間・事後評価の実施期間

事後評価を2007年度に実施。

⑤実施形態

民間企業、大学、公的機関等から最適な研究体制を構築し、実施。

(3) インクジェット法による回路基板製造プロジェクト（フォーカス21）（運営費交付金）

①概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、金属インク、絶縁物インク等をインクジェットヘッドから基板に吐出して回路基板を製造する技術の開発を行う。メッキ、レジスト塗布、露光、現像、エッチング等の一連の工程を行う従来法（エッチング法）に比べ、本プロジェクトの回路基板製造方法は数分の1の工程で行うため、製造工程の省エネルギー化が可能となる。

②技術目標及び達成時期

2005年度までに、インクジェット法による回路基板の製造技術を確立する。

③研究開発期間

2003年度～2005年度

④中間・事後評価の実施時期

事後評価を2006年度に実施。

⑤実施形態

民間企業、大学、公的機関等から最適な研究体制を構築し、実施。

(4) クラスターイオンビームプロセステクノロジー（一部運営費交付金）

①概要

イオン化した原子・分子集団からなるクラスターイオンビームを活用した大電流ビーム発生・照射技術の開発及び超硬質薄膜形成等の新規材料プロセス技術の開発を行う。

②技術目標及び達成時期

2004年度までに、ビーム電流1mAのクラスターイオンビーム発生装置を開発し、超硬質薄膜形成等の新規プロセス技術の実用化を図る。

③研究開発期間

2000年度～2003年度

④中間・事後評価の実施時期

ミレニアム・プロジェクトの評価・助言会議において、毎年度、評価を実施。

⑤実施形態

民間企業、大学、公的機関等から最適な研究体制を構築し、実施。

II. 生産システムの高度化・効率化

(1) デジタルマイスタープロジェクト

①概要

設計・製造現場に、「暗黙知」として存在する技能やノウハウを科学的な分析を通じて「形式知」化し、情報技術を活用してソフトウェア化、データベース化する手法等の開発を行うことにより、情報技術と製造技術が融合した、時間・コスト・品質競争力のある新たな生産システムの構築を図る。この一部については、現場技能の形式知化等を通じた加工工程の効率化・省エネルギー化により、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

②技術目標及び達成時期

2003年度までに、金型設計・製造に係る熟練者の技能をCAD/CAM等の設計・製造支援アプリケーションに組み込んで活用するシステムの高性能化、及び金型加工機等の高速・高精度化のための技術とともに、複雑曲面形状等を有する超精密金型を高精度で加工・計測する技術を開発する。また、2005年度までに、金型設計・製造分野をはじめ、一般製造分野に関する技能の抽出・整理・体系化手法を確立し、当該手法を活用してデータベース等を開発するとともに、当該システムを

企業で効果的に活用し、IT等を駆使した新しいものづくりの方法を提案する。

③研究開発期間

2001年度～2005年度

④中間・事後評価の実施時期

中間評価を2003年度（一部の事業については2004年度）に、事後評価を2006年度に実施。

⑤実施形態

民間企業、大学、公的機関等から最適な研究体制を構築し、実施。

（2）革新的鋳造シミュレーション技術開発

①概要

鋳造法における精密化、生産性向上、低コスト化、開発期間の短縮化等を実現するため、超耐熱合金精密鋳造法及び一般精密鋳造法における湯流れ及び凝固過程のシミュレーション技術、鋳造組織及び欠陥生成シミュレーション技術、並びに関連測定技術の開発を行う。この一部については、伝熱、物質移動及び結晶欠陥生成等の革新的シミュレーション技術の開発を通じた精密鋳造工程の効率化・省エネルギー化により、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

②技術目標及び達成時期

2002年度までに、鋳造時の鋳型充填時間、充填直後の鋳型、溶湯温度及び引け巣発生位置・程度等を、高精度に且つ短時間で予測する技術を開発する。

③研究開発期間

1999年度～2002年度

④中間・事後評価の実施時期

事後評価を2003年度に実施。

⑤実施形態

民間企業、大学、公的機関等から最適な研究体制を構築し、実施。

Ⅲ．国際協力

IMS国際共同研究プロジェクト

①概要

エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものであり、先進国の製造業が共通して抱える環境問題や製造現場の省エネルギー推進などの課題について国際的な共同研究により効率的解決を目指すIMS（Intelligent Manufacturing System）プログラムの枠組みの中で、効率的な設計・製造工程の実現など次世代高度生産システムを目指した研究開発を行う。具体的には、省エネルギー化・省資源化を考慮した設計システムが期待される研究開発を行う。

②技術目標及び達成時期

2004年度までに、多様なユーザーズに対応できる柔軟かつ効率的な生産システムなど次世代高度生産システムに必要とされる技術基盤の確立を目指す。

③研究開発期間

1995 年度～2004 年度

④中間・事後評価の実施時期

中間評価を 2000 年度に、事後評価を 2005 年度に実施。

⑤実施形態

民間企業、大学、公的機関等から最適な研究体制を構築し、実施。

5. 研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの(事業名に(運営費交付金)と記載したもの)は、運営費交付金の総額を算定する際に使用するものであることから、当該部分は、国の裁量によって実施されるものではなく、中期目標、中期計画等に基づき当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

【フォーカス 21 の成果の実用化の推進】

フォーカス 21 は、研究開発成果を迅速に事業に結び付け、産業競争力強化に直結させるため、次の要件の下で実施。

- ・ 技術的革新性により競争力を強化できること。
- ・ 研究開発成果を新たな製品・サービスに結びつける目途があること。
- ・ 比較的短期間で新たな市場が想定され、大きな成長と経済波及効果が期待できること。
- ・ 産業界も資金等の負担を行うことにより、市場化に向けた産業界の具体的な取り組みが示されていること。

具体的には、成果の実用化に向け、実施者による以下のような取組を求める。

・ MEMS プロジェクト

事業費の 1/2 負担により、今後成長が期待される情報通信分野の MEMS 等の実用化に必要な高精度三次元加工技術等の開発を行う。また、本プロジェクトによって確立される高度な MEMS 製造技術を活用し、多様な主体による MEMS 製品開発・生産が活性化する環境を構築する。

・ インクジェット法による回路基板製造プロジェクト

事業費の 1/2 負担により、金属インク、絶縁物インク等をインクジェットヘッドから基板に吐出して回路基板を製造する技術を確立する。

なお、適切な時期に、実用化・市場化状況等について検証する。

6. プログラムの期間、評価等

プログラムの期間は 2002 年度から 2007 年度までとし、プログラムの中間評価を 2005 年度、事後評価を 2008 年度に行うとともに、研究開発以外のものについては 2010 年度に検証する。

また、中間評価等を踏まえ、必要に応じ基本計画の内容の見直しを行う。

7. 研究開発成果の政策上の活用

- ・研究開発成果啓蒙普及事業公益法人等を活用した成果の積極的な啓蒙普及に取り組む。

例えば、IMS プログラムの成果については、一般を対象としたフォーラムやインターネットを通じて公開する。

- ・標準化戦略

各プロジェクトで得られた成果のうち、標準化すべきものについては、適切な標準化活動（国際規格（ISO/IEC）、日本工業規格（JIS）、その他国際的に認知された標準の提案等）を実施する。

8. 政策目標の実現に向けた環境整備

- ・MEMS 製造拠点の検討

MEMS 技術の多様な分野での展開を推進するため、大規模な製造設備が必要な MEMS 製造拠点（ファウンダリー）の整備を検討していく。

9. 改訂履歴

- （1）平成 14 年 2 月 28 日付け制定。
- （2）平成 15 年 3 月 10 日付け制定。新製造技術プログラム基本計画（平成 14・02・25 産局第 6 号は、廃止。
- （3）平成 16 年 2 月 3 日付け制定。新製造技術プログラム基本計画（平成 15・03・7 産局第 9 号は、廃止。

I. 事業の目的・政策的位置付けについて

1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

1.1 NEDO が関与する意義

規格品の工業製品の製造が大きく中国へシフトしているなか、我が国の製造業は研究開発型産業への転換が求められている。これらの新しい製造業の 1 分野として MEMS (Micro Electro Mechanical System: 微小電気機械システム) の産業の牽引役としての役割が期待されている。MEMS 産業は成長期の分野であるために、設備投資に比べて期待されるマーケットでの商品の売り上げ個数はかならずしも多くない。そのためハード面での設備投資のリスクを低減しつつ、設備インフラを整えるために、NEDO 技術開発機構は、「MEMS プロジェクト」(平成 15～17 年度)を通じて、MEMS ファンドリー整備事業に着手した。

一方、MEMS 設備を備えた大学の数に限られているために MEMS 技術者の数は少なく、且つ、MEMS 製造の対象は通信、化学、バイオ、エネルギー等多岐に渡る分野のために、異分野の技術者が MEMS 産業に抵抗なく参入できる土壌を醸成し、裾野の拡大を図る必要がある。これにより MEMS 技術が我が国の広範な製造業に波及し、競争力のある製品群を供給することが期待される。そのために、多くの異分野の技術者や研究者が MEMS 分野に抵抗なく参入するための方法として、NEDO がソフト的な支援を行う必要がある。

そこで本事業では多くの異分野の技術者や MEMS プロセスに精通していない技術者が MEMS デバイスを容易に設計し、マスク描画を行い、迅速に試作評価を行えるための MEMS 用設計・解析支援システムを開発する。

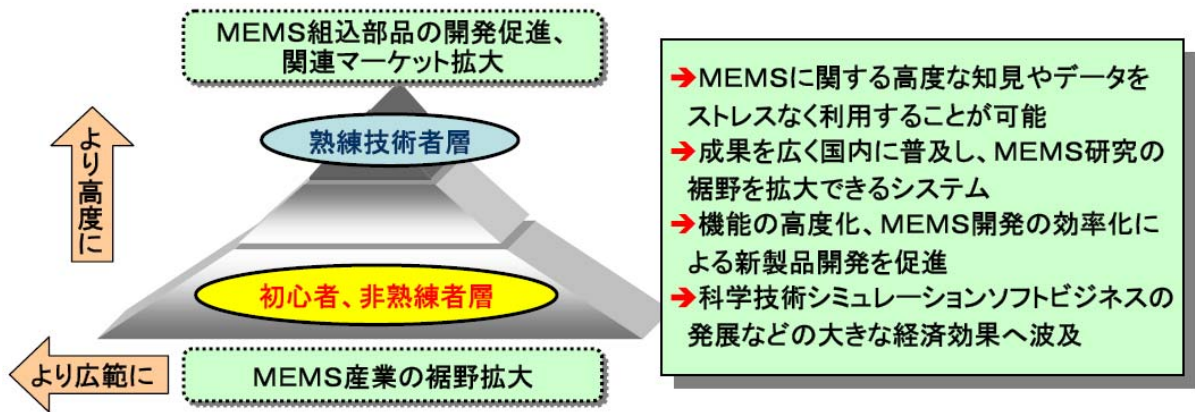


図1.1 MEMS用設計・解析支援システムのコンセプト

1.2 MEMS 用設計・解析支援システムの必要性

MEMS はこれからの微細加工を革新する基盤製造技術であり、その応用範囲は極めて広い。しかしグローバル化の進む現在の社会では、いつまでも同じ技術や製品に頼っているだけでは、すぐに競争力を失ってしまう。他所で得られない付加価値を生むためには、新たな知識を利用する速度と、なるべく多くの知識を総合的に活用する包括性が重要である。

MEMS の現状では、ある用途について開発した加工プロセス、マイクロ機構、アクチュエータなどのデバイス、などをわずかに設計変更することで、全く他の分野で利用することが可能である。しかし、開発過程で獲得した知識を、別の機会に利用できる形で蓄える仕組みは、必ずしも多くの企業が整えているわけではない。また、各企業の専門分野は限られており、多様な応用分野にその知識を転用する能力があるとは限らない。このときに、MEMS 設計製造の知識を再利用可能な形として蓄え、それを様々な分野における MEMS 応用システムに適用し、さらにシステムの機能を検証するシミュレータが大きな役割を果たすことが期待できる。

即ち、ある製品開発において MEMS の機構設計や製造プロセスに関して蓄えた経験や知識を、他の製品、特に他の応用分野の製品に生かして、より容易かつ短時間に開発を行うことが競争力の強化に必須である。これは単に一企業内に留まらず、わが国の企業群においてこのような知識と経験を共有する仕組みを作ることができれば、MEMS 産業化において大きな優位性を確保することが可能となる。MEMS 用設計・解析支援シミュレータとそれに付属する材料特性、加工特性、各種設計知識に関するデータベースは、このような仕組みとして最適である。ユーザ企業における新規の加工プロセスの開発や新たな機能の考案、新規応用分野の開拓などに伴い、シミュレータにも新たな解析機能の付加が必要となる。このような要求は、シミュレータの開発ベンダーへと集まるため、これを解析し蓄積することで常にデータベースとソフトウェアに最新のノウハウを取り込むことが可能になる。さらに新たな汎用デバイスが考案された場合は、有償もしくは無償で設計ライブラリに登録することで、次回以降の設計時に再利用が可能となり、機能部品の組み合わせで容易にシステムを設計できる道が開ける。

しかるに現状では、MEMS 用設計・解析支援システムはほとんどすべて国外の製品で占有され、わが国で得た知識は国外の企業に蓄えられる仕組みと成っている。さらに解析機能の改良要求に対応するまでの時間遅れが大きいこと、もしくは極めて多額の対価を要求されること、最新のデータベース更新や機能改良の恩恵を最初に享受できるのは国外企業である場合が多い、など様々な問題が生じている。このためには、わが国独自の MEMS 用設計・解析支援システムを開発することが焦眉の課題であると考えられる。独自ソフトウェアの開発により、逆に諸外国の知識を獲得する手立てとなる可能性も含めて、わが国の企業の要求に最適の解析技術を常時確保することが、ユーザ企業にとっても大きな恩恵になる。さらに、大学教育に独自ソフトウェアを活用することにより、そのソフトウェアに精通した即戦力の人材育成が可能となる。

1.3 実施の効果(費用対効果)

MEMS 製造技術に立脚した産業を創出するに当たり、次の観点が重要である。すなわち、大規模な市場を持つ応用製品の特定、広範囲の応用分野の開拓、製造基盤技術と関連産業の育成、の3点である。これらの観点に対応する企業群も、類別ができる。大規模な応用製品を目指すのはMEMS 技術にある程度の経験を持つユーザ企業が対応する。一方この技術にはあまりなじみがないが、その企業固有の応用対象にMEMS 技術を導入して、新たな製品展開を模索していきたいと考えているユーザ企業は、広い範囲で応用分野を開拓する役割を果たす。最後に、製造技術に関連するのは、製造装置産業、解析設計ツール産業、エンジニアリング産業、コンサルティング産業、設計・製造代行産業、などハードウェア・ソフトウェアに関係する企業である。そこで、これらの観点から見た設計支援シミュレータの効果を以下に述べる。

(1) 設計の短期効率化

グローバル競争の時代においては、良い製品アイデアに基づいて、いち早く特許を押え、実現性を確かめ、他社に先駆けてサンプルを顧客に提供してゆくことが、市場確保に必須である。計算機シミュレーションを活用しあらかじめ設計を吟味し、試作検証すべきパラメータ範囲を限定しておくことにより、実際の試作と評価に費やす期間を最低限に抑え、設計を短期に効率よく進めることが可能になる。これは、全てのユーザ企業に対し効果的であり、製造や設計の受託サービスにおいても効率化に直結する。

(2) 応用対象の多様化および横展開の促進

設計に要する時間と研究資源の投資が最小限に押えられるので、様々な応用分野で探索的な研究開発が可能になる。MEMS 技術をよく使っているユーザ企業では、これまでの知識を利用して他の分野への展開を促進できる。

さらに、この技術に不慣れなユーザ企業でも、自社の得意とする分野へのMEMS 技術の応用可能性を探るために、設計解析シミュレータの複合領域解析機能を利用することが有効である。また、製造だけでなく設計まで外部に委託する場合は、サービスを行う企業側が自社のプロセスに最適化したシミュレータを利用し、あらかじめデバイスの性能を顧客に提示することが可能となる。これによって、双方の企業リスクを低減できる。すなわち、MEMS 技術に不慣れなユーザ企業に対して、技術知識の面から、MEMS 技術の利用に際しての障壁を下げ、MEMS 応用デバイスの産業化を促進することが可能になる。

(3) IP の蓄積と設計支援データベース構築

一方、MEMS 製造技術を提供する側にとっては、ユーザのニーズを把握しそれに対応する仕組みとして、設計解析サービスを活用できる。その活動を通じて、MEMS デバイスの製造プロセスに関する経験や、基本機能ブロックに関する知識(一括してIP と称する)を蓄積し、設計支援のためのデータベースやCAD ライブラリを構築することが可能になる。これは、MEMS 技術の国際競争力強化に必須である。とくに設計製造受託サービスを行う企業にとって、自社のプロセスと精密に

適合したシミュレータとデータベースを提供し、またすぐに利用できる様々の MEMS デバイスライブラリーを準備することは、顧客の獲得と維持に多大な効果がある。

(4) デファクト標準化

多くのユーザが共通に使用するシミュレータと、データベースやライブラリがシミュレータの普及と機能強化を通じて、デファクト標準化される。前節で述べたように、このようなインフラと環境の整備が、MEMS 技術の広範囲な産業化に不可欠である。パッケージや、性能評価の方法や基準に付いてもこのようなデファクト標準化が期待できる。全ての企業群に対して、効率化と競争力の向上が期待できる。

(5) 設計技術者の養成

MEMS 技術は極めて新しいため、これを熟知した設計技術者や、製作プロセスに習熟した技術者が不足している。大学の基礎訓練を土台として、実地にこれらの技能を身に付ける場が必要である。シミュレーションソフトを用いた教育を通じて、広範囲のニーズと多様なプロセスに精通した高級技術者を育成することができる。自社で MEMS 技術を重点として行うユーザ企業や、設計製造受託企業に対して効果が期待できる。また MEMS 技術は今後の製造技術の基盤であり、計算機上で設計と製作を学習することにより、一般の学生についても MEMS の知識を容易に高めることができる。

(6) 大学・研究機関の最新成果の産業化支援

すべての企業群に共通することであるが、MEMS 技術に関する大学・研究機関の最新成果を産業化しようとする際、情報の共有の範囲が限られ、情報取得までの時間がかかることが問題であった。設計解析シミュレータという知識共有の仕組みを提供することで、研究成果をスムーズに産業移転できるようにすることが期待される。MEMS デバイスやシステムそのものに関する研究成果だけでなく、モデル化手法・新解析手法・特性評価の手法や理論など、シミュレータの性能向上の役立つ成果も取り込むことができる。一方、大学・研究機関も精緻なシミュレータを新規デバイスの設計や実験結果の解析に利用できることにより、研究速度の飛躍的向上が望める。

プロジェクトの総実績額は約 16 億円であるが、上述の 6 つの効果が達成でき、MEMS 分野での新たな市場創生・拡大を考えれば、費用に対する効果は妥当であると考えられる。

2. 事業の背景・目的・位置付け

2.1 事業の位置付け・必要性

規格品の工業製品の製造が大きく中国へシフトしているなか、我が国の製造業は研究開発型産業への転換が求められている。これらの新しい製造業の1分野としてMEMS（Micro Electro Mechanical System:微小電気機械システム）の産業の牽引役としての役割が期待されている。MEMS産業は成長期の分野であるために、設備投資に比べて期待されるマーケットでの商品の売り上げ個数はかならずしも多くない。そのためハード面での設備投資のリスクを低減しつつ、設備インフラを整えるために、NEDO技術開発機構は、「MEMSプロジェクト」（平成15～17年度）を通じて、MEMSファンドリー整備事業に着手した。

一方、MEMS設備を備えた大学の数に限られているためにMEMS技術者の数は少なく、且つ、MEMS製造の対象は通信、化学、バイオ、エネルギー等多岐に渡る分野のために、異分野の技術者がMEMS産業に抵抗なく参入できる土壌を醸成し、裾野の拡大を図る必要がある。これによりMEMS技術が我が国の広範な製造業に波及し、競争力のある製品群を供給することが期待される。そのために、多くの異分野の技術者や研究者がMEMS分野に抵抗なく参入するための方法として、国がソフト的な支援を行う必要があり、本事業では多くの異分野の技術者やMEMSプロセスに精通していない技術者がMEMSデバイスを容易に設計し、マスク描画を行い、迅速に試作評価を行えるためのMEMS用設計・解析支援システムを開発する。

2.2 国のプログラムとの関連性

「新製造技術プログラム」における目的の一つとして、IT等最新の技術を積極的に導入することによる新たな高付加価値産業を生み出す環境の整備があり、MEMS産業においては、昨年度までに「MEMSプロジェクト」で高精度3次元MEMSの製造技術の開発と、その技術をファンドリーへ展開することによるMEMS産業の活性化環境整備を行ってきたが、さらに、産業活性化のためには設計・解析支援システムを開発するソフト面の環境整備が必要であると考えられる。

この新製造技術プログラムの中で、MEMS用設計・解析支援システム開発プロジェクトは、設計・解析支援システムというソフトウェアの開発によりMEMS産業の裾野を広げ、市場拡大に貢献することで目標に合致している。

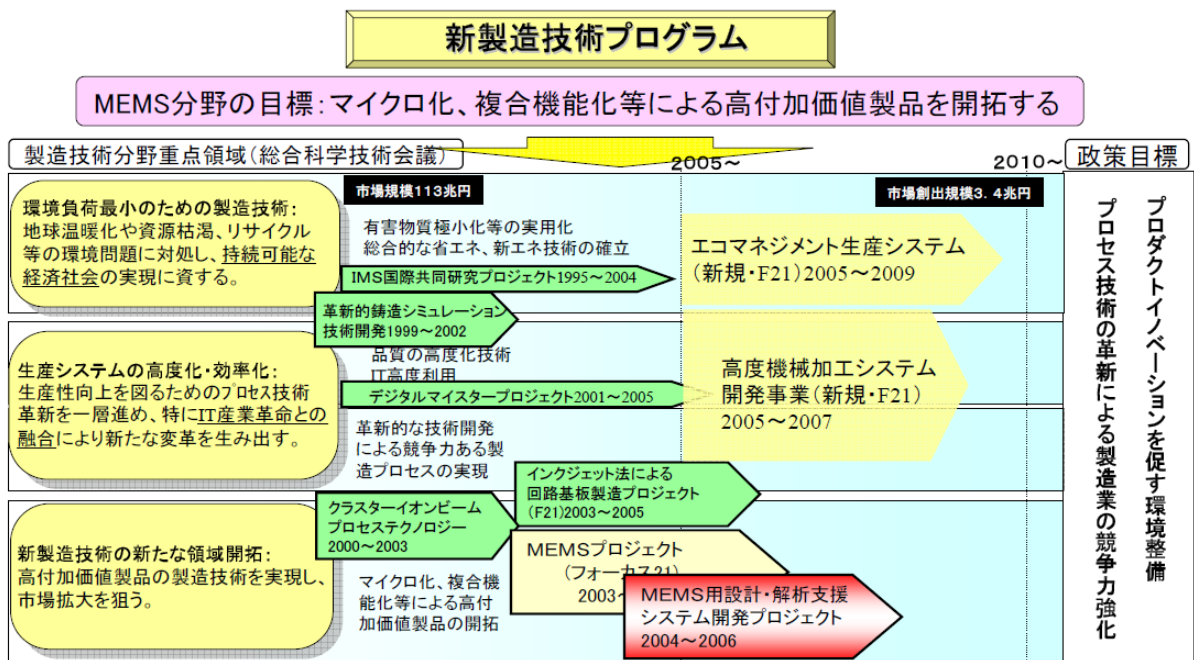


図 1.2 新製造技術プログラム

II. 研究開発マネージメントについて

1. 事業の目標

本事業の目標として以下を設定した。

- MEMSプロセスに明るくない多くの分野の技術者が機構設計、プロセスシミュレーション、マスク設計を簡便迅速におこなうことができるソフトウェアを開発すること
- 機構設計、プロセスシミュレーションを精度良く実行するためのファンドリー事業者ごとの信頼性の高い材料およびプロセスのデータベースを構築すること
- これにより解析精度の向上を達成しプロトタイプを試作回数の低減に寄与すること
- 成果の普及のための体制をプロジェクト実行中より構築すること

2. 事業の計画内容

2.1 研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の項目について技術開発を行う。

また、各々の達成目標については、各目標ごとにその根拠も示す。

研究開発項目①MEMS 用設計解析支援ソフトの開発

1. 研究開発の必要性

MEMS 製造プロセスに精通していない多くの分野の技術者が高度な機械設計、電磁気学や半導体製造技術の習得を前提とせず MEMS の設計・シミュレーションができるようになれば、MEMS 産業分野の裾野が広がり、これにより我が国 MEMS 産業における異分野の融合を促し、競争力を大きく前進させることができる。そのために、フレームワークソフト、機構解析シミュレータ、プロセス解析ツール、機能拡張ソフト、知識データベースの機能を持つ MEMS 用設計解析支援ソフトの開発が必要とされている。

2. 研究開発の具体的内容

(1) フレームワークソフトの開発

機構解析シミュレータ、プロセスシミュレータ、材料・プロセス・データベース、知識データベース、機能拡張ソフト等を統合的に利用可能とする基本ソフト（フレームワークソフト）の開発を行う。なお、新たな MEMS（流体 MEMS など）の解析モジュール等の外部ソフト・外部データベースのプラグイン機能や個別データに基づくカスタマイズ機能を有し今後の拡張性を確保するために、インターフェース部分をオープンとする。

フレームワークソフトには、以下の機能を持たせるものとする

- マスク作成
- デバイス構造作成

- ・自動格子作成
- ・プロセスレシピおよび解析条件設定
- ・解析結果表示
- ・各種主要解析ソフト（MEMS 用も含む）との入出力データコンバータおよび主要CADソフトとのデータコンバータ
- ・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、知識データベース）

（2）機構解析シミュレータの開発

任意の3次元構造を対象とし、以下の解析が可能な機構解析シミュレータを開発する。ただし、(a)自動メッシュ機能を有すること、(b)主要なCADソフト（マスク作成ソフト、既存の各種機構解析ソフト）、回路シミュレータ、システム・デバイス性能評価ソフト等とのインターフェースがとれていること、(c)光MEMS等で用いられるヒンジを有したミラーやRF-MEMSで用いられる両持ちブリッジ構造の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、圧電アクチュエータの運動解析が行えることとする。またそれぞれの機構解析のチュートリアル（実験結果と対比した解析事例集、理論マニュアル等も整備）を含む。

- ・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）
- ・電磁界解析（静電、Sパラメータ、伝送路固有モード解析を含む）
- ・圧電解析
- ・伝熱解析、熱変形解析
- ・雰囲気流体の影響解析
- ・上記の連成解析

（3）プロセス解析ツールの開発

MEMS製造で用いられる以下のプロセスのシミュレータまたはエミュレータを開発する。また、それぞれのプロセスのチュートリアルを含む。

- ・異方性ウェットエッチングプロセス
- ・ドライエッチングプロセス
- ・成膜プロセス
- ・マルチプロセス

（4）機能拡張ソフトの開発

MEMS製造に必要な、以下の特殊な解析（機構解析とプロセス複合化）を可能とするシミュレータまたはエミュレータを開発する。

- ・プロセス逆問題解析ソフト（最終形状からマスクデータを生成する）
- ・接合実装解析ソフト（接合の力学的信頼性、温度変化に対する応答を解析）

（5）知識データベースの開発

MEMS 製造を容易にするために、MEMS 設計・製作に特有な知識・ノウハウを体系化したデータベース（代表的デバイス・プロセス等の例示を含む）を開発する。

また、今後新しい分野の知見を反映できるような拡張性を用意する。

3. 達成目標

最終的に以下の3例について、それぞれ2者以上で試作実測したものと比較して、プロセス解析ツールと機構解析シミュレータを用いて、以下の諸量の解析精度を50%以上とする。

- ・光 MEMS 等で用いられるヒンジを有したミラーの共振周波数、振れ角対駆動電圧特性の予測値と実測値
- ・RF-MEMS で用いられる両持ちブリッジ構造の変位対静電アクチュエータの駆動電圧の予測値と実測値
- ・異種材料の接合体の接合後の熱歪による変形量及びその温度特性の予測値と実測値

4. 目標値の根拠

今日の MEMS の利用分野として、光ネットワーク技術やディスプレイ技術を支える光 MEMS とともにユビキタスネットワークを実現するとともに、自動車などの対障害物・人のセンシング等に利用できる RF-MEMS が重要である。また、これらの MEMS を作製し利用するためには、MEMS の構造である積層膜間の接合強度を、使用時の機械的な応力・ひずみ・熱伝導と熱応力とともに評価することが重要である。そこで、本開発における達成目標として、上記3種類①光 MEMS の振動特性・静電駆動時の変形特性、②RF-MEMS の駆動電圧とその変形特性、③異種材料の接合界面の特性評価を設定した。

数値解析システムの開発という特徴から、数値解をすでにわかっている単純形状・単純条件における理論解と比較するばかりでなく、実際にデバイスを作製し作製したデバイスの計測結果との比較により、開発したシステムの解析精度と解析能力を評価し、数値計算誤差・計測誤差等を考慮して、難しい問題であっても±50%以内の精度を達成することで、実用に耐えるかどうかを評価できる。

研究開発項目②「MEMS 用材料・プロセス・データベース」

1. 研究開発の必要性

研究開発項目①の解析を精度良く行うためには、主要国内ファブドリー事業者におけるプロセス（成膜プロセス、ウェットエッチングプロセス、ドライエッチングプロセス等）で得られる材料・プロセスのデータをより広い条件で、精度良く取得する必要がある。

2. 研究開発の具体的内容

（1）材料・プロセス・データベースの構築

解析ソフトとのインターフェースがとれていること。および以下のデータを計測する。

- ・成膜材料の機械特性データ

フリースタANDING構造体として用いる材料（単結晶シリコン（100）、多結晶シリコン、Al、Ni、ポリイミド、SiO₂、SiN）の、最小限の温度範囲として常温から 200℃までの応力ひずみ線図、常温から 200℃までのヤング率、ポアソン比、残留応力、破壊強度

- ・ドライエッチングプロセス

シリコンの深堀エッチングにおける加工形状データ（角度および側面粗さ、マスク選択比）を取得する。

- ・ウェットエッチングプロセス

シリコン材料（100）、（110）、（111）の異方性エッチングデータ（エッチング深さおよび SiO₂ および SiN マスク選択比）を、主に各種文献調査により取得する。エッチャントは KOH および TMAH とする。

（2）計測・補間手法の確立

応力ひずみ線図に基づいた高精度計測法、迅速計測法の確立および比較を行なう。また、同時にデバイスの信頼性予測手法（接合体および弾性変形梁、可動接点を対象とする）を開発するとともに、物理法則に基づき、データベースの実測値を用いて異なる条件のデータを補間する手法を開発する。

3. 達成目標

取得データごとに最低国内3カ所のファブリー事業者にて試作依頼を行い、データの計測をおこなう。データについての計測は、基準温度を設定し、最小限の温度範囲として常温から 200℃の範囲で、少なくとも 50℃刻みにデータを取得する。ドライエッチングプロセスについては標準ラインアンドスペースパターンについてエッチング条件を、複数変化させて計測を行う。

計測手法については応力ひずみ線図にもとづく計測法と迅速手法を確立し、計測の精度を 90%以上とする。

4. 目標値の根拠

エッチングプロセスにおける特性（エッチングレートやエッチング形状）は使用する装置および用いるガスにより大きく変化する。そこで実際に実験結果と解析結果を比較し、±10%以内の差異以内であれば実用に耐えるこのことから目標値を設定した。

研究開発項目③ナノインプリント加工・解析システムの開発

1. 研究開発の必要性

近年、MEMS の応用分野が拡大し、ナノサイズの構造をリソグラフィー技術を用いずに、より安価に加工することが可能なナノインプリント加工の基礎研究と応用研究が進んできた。ナノインプリント加工を用いることで、マイクロ・ナノ構造をより簡便に大量に作製することが可能とな

り、従来の LIGA などのプロセスに変わる可能性が高い。この加工分野は、プレス加工メーカーや樹脂メーカーが中核であり、MEMS 分野をこれまでのリソグラフィ関連装置分野以外に拡大するものである。

また、ナノインプリント加工が金型・プレス・樹脂という分野が中心であることから、日本が圧倒的な技術蓄積と産業を有しており、ナノインプリントの利用技術は急速に国内で発展しつつある。このような背景をもとに、MemsONE の利用拡大と既存の欧米の設計解析システムとの差別化の観点から、ナノインプリント加工の解析機能と解析に必要な材料データベースの構築が必要である。

2. 研究開発の具体的内容

(1) 熱・光ナノインプリント加工解析システムの開発

1) 熱ナノインプリント加工解析システムの開発

①熱ナノインプリント・プロセス解析モデルの構築

熱ナノインプリント・プロセス解析シミュレータの解析モデルの構築を行うにあたり、型の最適化、ナノインプリント・プロセス解析技術、塑性加工関連、材料試験関連の知識を体系化し、これに基づき、プロセス解析モデル構築を行う。

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

解析モデルに基づき、熱ナノインプリント・プロセス解析シミュレータの開発を行う。

③標準試験片によるシミュレーション結果の評価検証

標準試験片によるナノインプリント実験結果とシミュレーション結果の評価検証を行う。

2) 光ナノインプリント加工解析システムの開発

①光ナノインプリント・プロセス解析モデルの構築

光ナノインプリント・プロセスに対応した電磁波解析プログラムの解析モデル構築および検証モデルの検討を行う。

②光ナノインプリント・プロセス解析シミュレータの開発

解析モデルに基づいた電磁波解析プログラムの開発および MemsONE への組み込みを行う。

③シミュレーション結果の評価検証

検証モデルを用いて、電磁波解析プログラムのシミュレーション結果を評価する。

3) フレームワークソフトの改修

熱ナノインプリント加工解析シミュレータへの対応と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ための改修を行う。

- ・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
- ・データベースインターフェース
- ・電磁波解析プログラムのプレ機能
- ・電磁波解析プログラムのポスト機能
- ・システム全体への組み込み

(2) データベースの構築

ナノインプリント用樹脂物性データベースの構築とシミュレーション結果の検証を行う。

1) ナノインプリント用樹脂の物性データベース構築

ナノインプリント用樹脂のシミュレーションに必要な材料データベースを構築する。

①代表的樹脂に対して実施

- ・データ収集用実験系構築
 - ・樹脂物性データ収集（シミュレーション計算に必須の物性値）

②用途に応じて使用される複数の種類に対して実施

・レジスト用、光学素子用、流体素子用等の樹脂に対するシミュレーション用物性データ収集とデータベース化

- ・ナノインプリント後の樹脂物性値の評価とデータベース化

2) シミュレーション結果の検証

①代表的樹脂に対しての検証

標準試験片を用いたナノインプリント実験評価を通して、シミュレーション結果を検証する。

- ・ナノインプリント実験評価装置の構築
 - ・シミュレーション結果検証用モールド（金型）の製作
- ・ナノインプリント実験評価

②多様な形状、材料に対しての検証

多様な形状、材料に対応した実験データの収集を行う。

- ・多様な成形パターン金型製作
- ・ナノインプリント実験評価

3) 知識・材料データの整理及び入力

収集したデータを整理し、材料データベースへの入力データとして蓄積する。

3. 達成目標

ナノインプリント・プロセス解析の解析モデル構築を行い、解析モデルに基づく熱ナノインプリント加工解析システムおよび光ナノインプリント加工解析システムを開発し、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。

ナノインプリント・プロセス用樹脂およびニッケル材金型に対する物性データ収集用実験系を構築し、ナノインプリント加工・解析システムに必要な樹脂およびニッケル材金型物性データを収集する。また、標準型を用いたナノインプリント実験評価方法を確立する。

4. 目標値の根拠

ナノインプリント加工における解析結果の評価指標としては、加工形状および加工圧力がある。ナノインプリント加工時の素材内部の応力分布等を計測することが困難であることから、上記形状と圧力から評価することが有効である。このことから目標値を設定し、実際に加工を行い解析結果と比較することにより有効性を確認する。

研究開発項目④回路集積化 MEMS シミュレータの開発

1. 研究開発の必要性

微細化が進み同一基板上に機械系部品と電子回路が混在するのが普通となりつつある現在、MEMS を機械・電子系連成システムとして捕らえ、その動作を同時に結合して解析することが必須のものとなってきている。巨大かつ複雑な物理系を比較的単純化されたモデルのネットワークとして解析する手法は、回路シミュレーションにおいて、多大な実績を上げてきた。今回、回路シミュレータを元に、従来の電氣的自由度だけではなく、機械的自由度も扱えるように拡張することで、回路集積化 MEMS シミュレータを開発する。

2. 研究開発の具体的内容

(1) シミュレータの開発

1) 機械系素子のモデル構築

- ①MEMS 機構を比較的単純な要素素子に分解する。
- ②要素素子ごとの電氣的あるいは力学的解析モデルを構築する。
- ③要素素子モデルをライブラリとして整備する。

2) 汎用的な回路集積化 MEMS シミュレータ解析エンジンの開発

- ①回路シミュレータ SPICE3 の機能を拡張して、械的自由度を扱えるようにする。
- ②機械系素子の入力仕様を決め、入力モジュールを作成する。
- ③機械系素子の出力仕様を決め、出力モジュールを作成する。

3) シミュレーション結果の評価

検証モデルを用いて、シミュレーション結果の評価検証を行い、解析精度を実証する。

(2) データベースの構築

MEMS 用の回路シミュレータに関する知識や知見を知識データとして整理・集約し、蓄積したデータをデータベースシステムに登録する。

3. 達成目標

検証モデルをサーボ・フィードバック付き加速度センサとし、この検証モデルに必要な機構要素モデルを作成して、サーボ電子回路と合わせた連成シミュレーションを行い、解析結果の解析精度を実証する。

4. 目標値の根拠

MEMS の動作時の変形を回路素子として取り込む方法はあたらしく、解析に求められる精度を設定することは難しい。そこで、理論解および実際に RF-MEMS の起動時の電圧と変位の関係を計測し、機構解析と同じ±50%の精度内に入れば実用に耐える。このことを元に目標値を設定した。

Mems-ONE の機能構成を図 2.1 に示す。

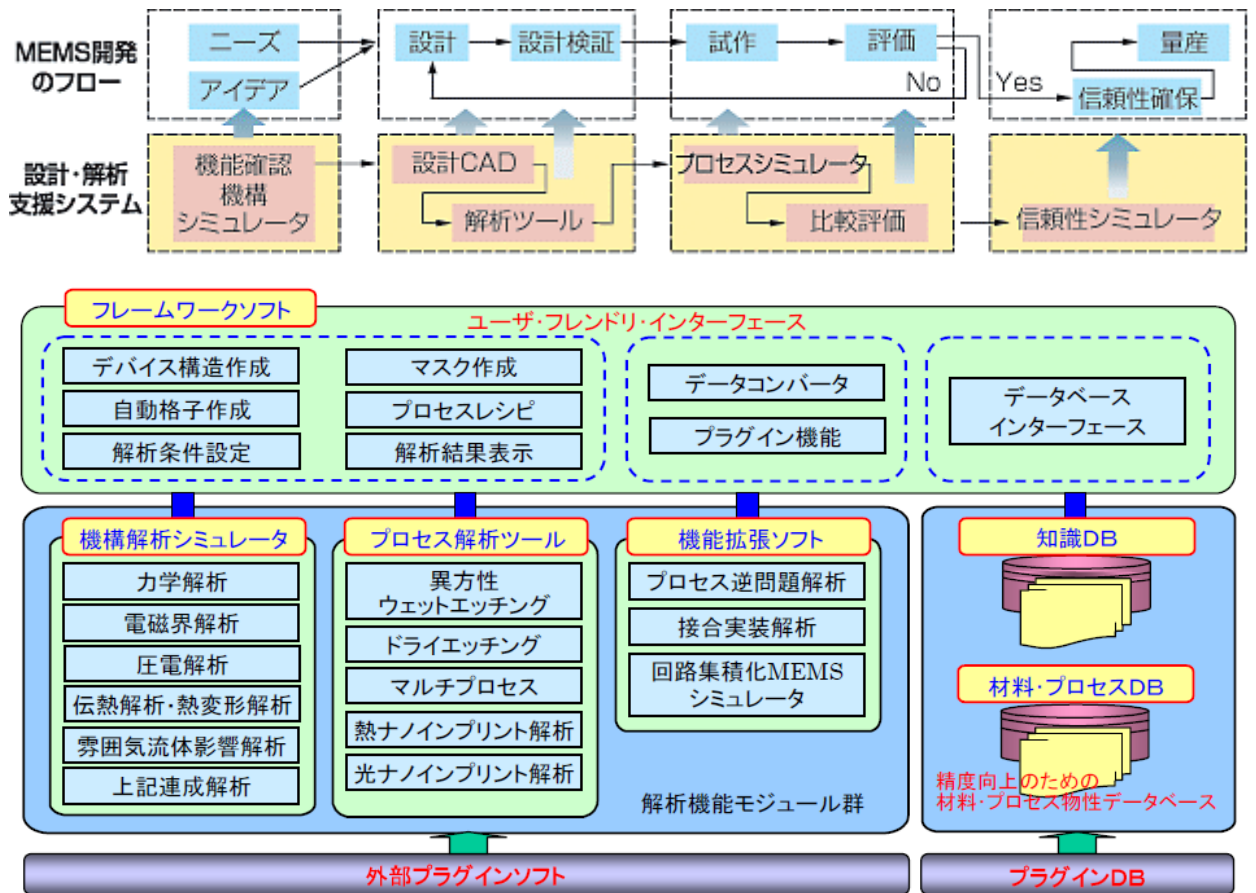


図2.1 Mems-ONEの機能構成

2.2 研究開発の実施体制

経済産業省の政策原課及び予算原課は、それぞれ製造産業局産業機械課及び産業技術環境局研究開発課であり、NEDO から各実施者に対して委託を行う体制とした。公募により共同提案を含む5件の応募があったが、採択審査委員会において提案プロジェクトの目的および審査基準に合致するよう、提案時の体制の見直しが必要との指摘も考慮し、部分提案の一部採択の実施者も体制に組み入れることとした。

また、物質場 Maxwell 電磁波解析ソフトの開発を提案した計算力学研究センターは、採択評価において基本計画に記載がないものの、実現できると利用価値が高いソフトとなりうることから、採択に至った。

プロジェクト開始時の実施体制を以下に示す。本プロジェクトは研究開発課題が互いに関連し合うものであることから、全体を統括するプロジェクトリーダーは、東京大学の藤田博之教授に委嘱し、技術的なマネジメントを行うプロジェクトサブリーダーとして京都大学の小寺秀俊教授を委嘱した。

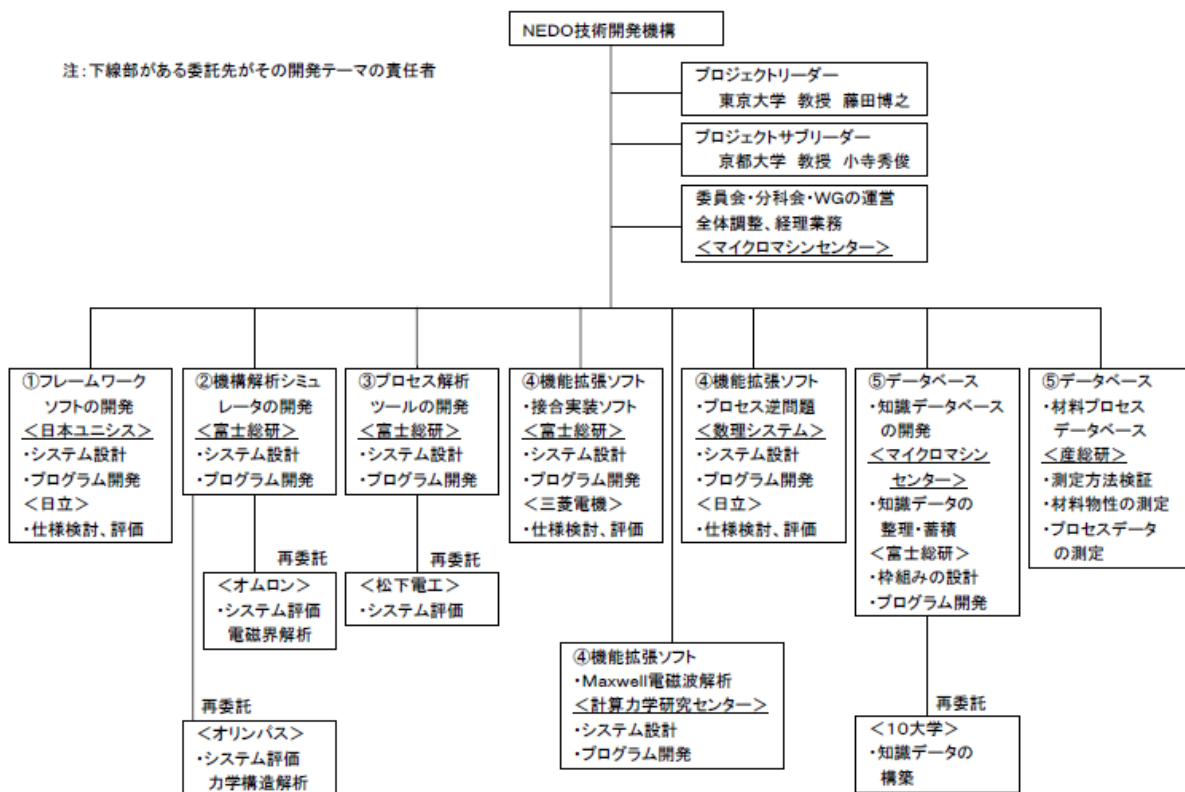


図2.2 実施体制（プロジェクト開始時）

2.3 研究開発の運営管理

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、等を目的とした各種委

員会を設置し、適切な運営を行った。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。

3年間にわたる委員会の開催実績は以下のとおりである。

- 1) プロジェクト推進委員会 開催14回（ワーキング含む）
- 2) ソフトウェア委員会 開催25回（ワーキング含む）
- 3) 知識DB委員会 開催18回（ワーキング含む）
- 4) 材料・プロセスDB委員会 開催19回（ワーキング含む）
- 5) 普及活動検討委員会 開催25回（ワーキング含む）
- 6) 知的財産権委員会 開催3回

3. 情勢変化への対応

計算力学研究センターが提案した物質場Maxwell電磁波解析ソフトの開発は、16年度終了時において、設定した目標が達成できる見込みがないと判断し、17年度以降の委託を打ち切った。

プロジェクト立ち上げ当初においては考慮していなかったナノインプリント技術が急速にMEMSにおける有望なプロセスとして成長したため、平成17年度に世界初のナノインプリントの解析シミュレーションの開発テーマを追加した。

また、微細化が進み同一基板上に機械系部品と電子回路が混在するのが普通となっており、MEMSを機械・電子系連成システムとして捕らえ、その動作を同時に結合して解析することが設計の短期効率化に不可欠となってきたと判断し、平成18年度には、回路シミュレータを元に、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拡張可能な回路集積化MEMSシミュレータを追加した。

最終の実施体制を以下に示す。

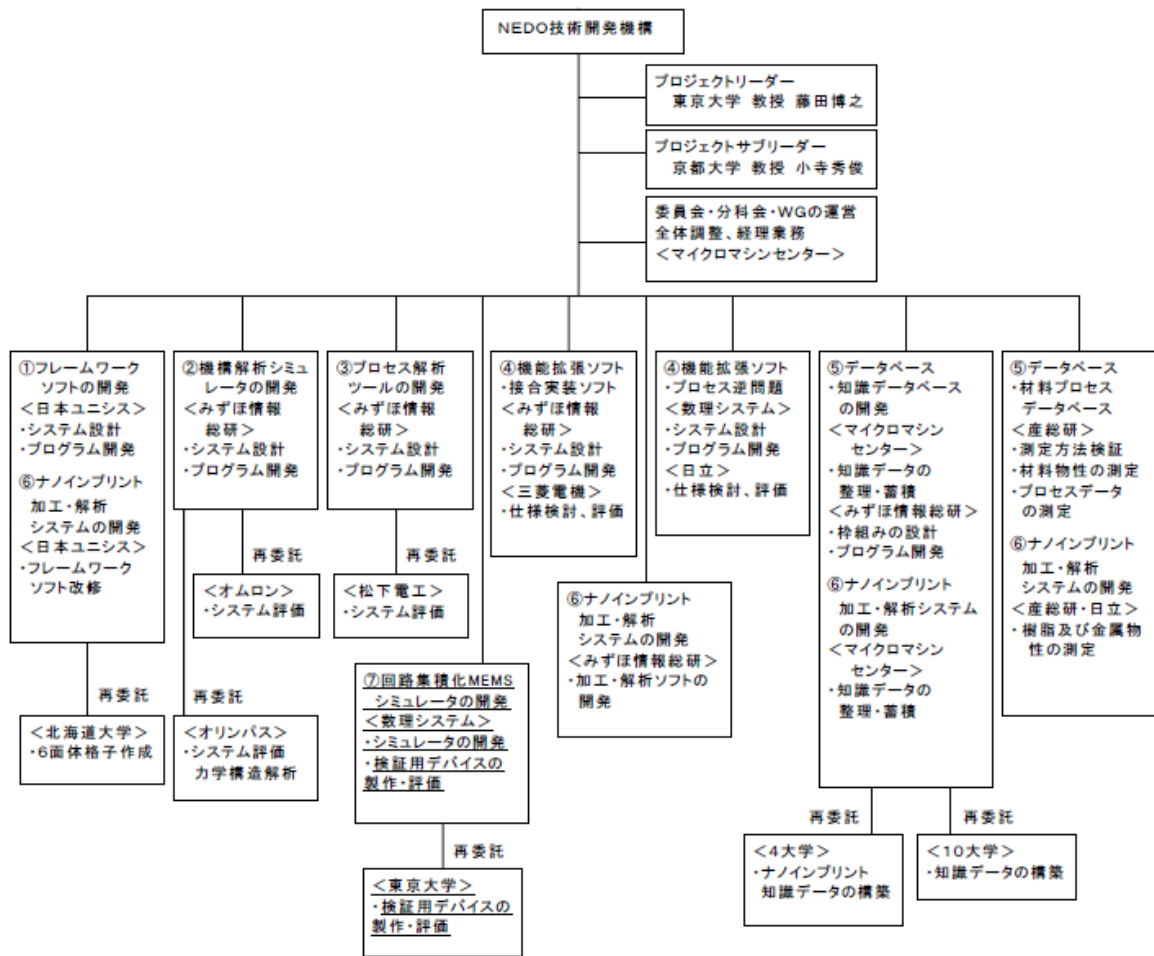


図2.3 実施体制（最終体制）

研究開発スケジュールと開発予算を表2.1に示す。ここに示す研究開発項目は、図2.1で示したMems-ONE機能構成の各モジュール群で表記する。以後、研究開発成果も各モジュール群毎に示す。本プロジェクトは3年間のプロジェクトであるが、19年度は成果普及事業がスタートした。これまでの総予算額は、プロジェクト期間中の成果普及調査費および19年度の成果普及事業費を含めて約16億円である。

表2.1 研究開発スケジュールと開発予算

		平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度	テーマ別予算 (百万円)	備考
(1)フレームワークソフトの開発		→				292	※ナノインプリント加工に関するソフト改良含む
(2)機構解析シミュレータの開発		→				166	
(3)プロセス解析ツールの開発	・異方性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 ・マルチプロセスシミュレータ	→				166	
	ナノインプリント加工解析システムの開発		→			108	※平成17年度に新規追加
(4)機能拡張ソフトの開発	・プロセス逆問題解析 ・接合実装解析	→				228	
	回路集積化MEMSシミュレータの開発			→		30	※平成18年度に新規追加
(5)データベースの開発		→				539	※ナノインプリント加工に関するデータ追加含む
(6)成果の普及					→	98	
年度別予算 (百万円)	一般会計	0	0	0	0		
	特別会計 <高度化>	418(14)	562(12)	587(12)	60 (成果普及費)		うち()内は成果普及調査費
総予算額(計)		418	562	587	60	1,627	

4. 中間評価結果への対応

本事業は、開発期間が3年間のため中間評価は実施していない。

5. 評価に関する事項

NEDOは技術的及び政策的観点から見た技術開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等の観点から、外部有識者による技術開発の事後評価を平成18年度に実施する。

Ⅲ. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果

(1) 成果概要

[1] フレームワークソフトの開発

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。

平成17年度より開発項目を追加した、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]機構解析シミュレータの開発

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

3-1 プロセス解析ツールの開発

MEMS プロセスシミュレータもしくはエミュレータにより MEMS 加工構造を実現し、総合的に検証、評価するシステムを開発した。開発したツールは異方性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、および成膜プロセスを含むマルチエミュレータの3種類である。異方性ウェットエッチングシミュレータは、シリコン単結晶の全方位のエッチングレートデータを基に、設定したマスクパターンに対して、3次元エッチング・プロファイルの時間変化を解析する機能を有する。ドライエッチングプロセスシミュレータはドライエッチングプロセスによる被エッチング材料上の表面反応と形状変化を2次元で解析し、2次元断面におけるエッチング形状を確認することを可能とする機能を有する。また、マルチプロセス・エミュレータはプロセスレシピ、材料・プロセス・データベース、知識データベース等の情報を基に、幾何学的手法を用いて3次元構造および2次元断面形状を作製する機能を有する。異方性ウェットエッチングシミュレータでは圧力センサ、マルチプロセスエミュレータでは3種類の検証デバイスを用いて、ドライエッチング・プロセス・シミュレータにおいては産業技術総合研究所より提供された実測値に対して検証解析を実施し、解析結果の妥当性を確認した。

3-2 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。

3-3 ナノインプリント加工・解析

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。

[4]機能拡張ソフトの開発

4-1 プロセス逆問題解析

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。

4-2 接合実装解析

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。

4-3 回路集積化MEMSシミュレータの開発

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。

[5]データベースの開発

5-1 知識データベース

MEMS の設計開発に有効な知識データベースの構成の枠組みについてデータ情報の整理、分析を実施し、知識データの構成の枠組みを構築した。知識データ内容における構成要素の抽出、構成要素の従属関係等、知識データベースの要件抽出を行い、蓄積・検索・可視化機能を実現する知識データベース・システムを開発し、フレームワークソフトとの連携による統合検証テストを実施し、動作を確認した。

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 820 件（ナノインプリント関連、企業作成分を含む）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 年間の活動により総数約 110 件の知識データを登録した。

また、マイクロ化学研究組合で構築された知識データベース中の MEMS 関連データ約 730 件を MemsONE 知識データベースに組み込んだ。更に、MMC 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、これを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。

以上の各成果を合わせると約 1750 件の知識データを蓄積したことになる。

5-2 材料・プロセス・データベース

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 5 6 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。

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。

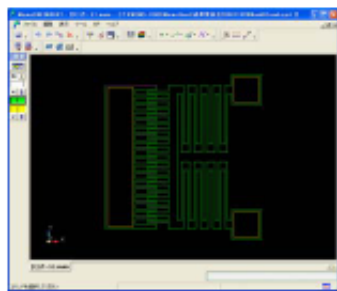
レジスト用成形材料としてはMEMSで多用される薄膜材料であるPMMA、感光性ポリイミド (PI)、SU-8について、光学素子用成形材料としては、低融点ガラスについて、金型材料としてはNiおよびSiについて、機械的特性（ヤング率、残留応力）と熱的特性（熱膨張率）を、レーザ表面弾性波法、ナノインデンテーション法、光てこ法を用いて測定した。また、これらの結果を材料データベースに組み込んだ。

(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。

[6] 成果の普及

普及活動の広告宣伝活動は、MemsONEの商標を獲得後、パンフレットを5500部配布し、パネルを5枚とPRビデオを制作し、マイクロマシン展等の展示会・学会・セミナーにて活用しMemsONEの周知、普及を行った。また、MemsONEに関する情報を提供するWebサイト「MemsONEひろば」の整備とともに「MemsONEクラブ」を開設し、約800名の会員を集った。さらにMemsONE配布時に必要となるインストーラ・ライセンスライブラリ・マニュアルの整備を行い、開発途中バージョンをα版と称して391件無償配布し、MemsONEの認知度を高めた。最終的には、プロジェクト全成果をMemsONEβ版として平成19年5月より実費(10,000円/ライセンス)配布を開始し、平成19年7月末時点で361件の導入申し込みに到った。

— MemsONEの解析事例(1) —



マスク作成例



プロセスレシピ作成例

マルチプロセスエミュレーションの実行により3次元形状を作成

解析事例: 圧力センサー

マルチプロセスエミュレータ実行結果

実デバイス

メッシュ作成例

弾塑性解析例 (Z方向変位コンター)

熱弾塑性解析例 (ミーゼス応力コンター)

解析事例: RFスイッチ

マルチプロセスエミュレータ実行結果

実デバイス

メッシュ作成例

電界-力学連成解析例 (Z方向変位コンター)

振動モード解析例 (1次モードZ方向変位コンター)

解析事例: MEMSミラー

マルチプロセスエミュレータ実行結果

実デバイス

メッシュ作成例

電界-力学連成解析例 (元形状&変形図表示)

電界-力学連成解析例 (電界強度コンター)

— MemS ONEの解析事例(2) —

プロセス逆問題ソフト
(デバイス形状からプロセス工程及びマスクを決定)



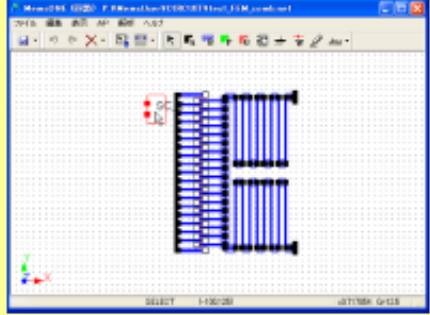
上面形状及び断面形状を入力



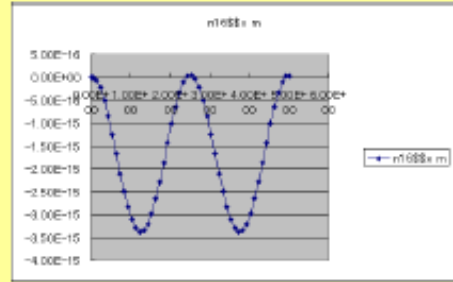
デバイス形状候補の選択

プロセス工程、マスク等を出力

回路解析ソフト
(機械的自由度を扱うことができる回路シミュレータ)

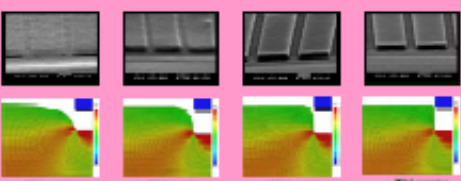


縦曲アクチュエータの作成例

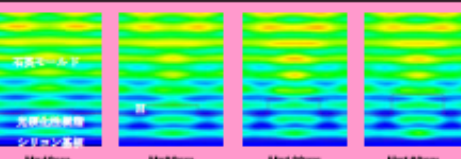


解析結果例

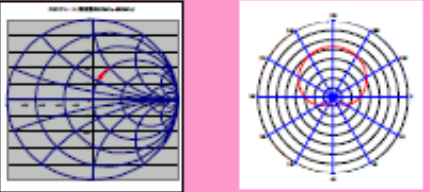
ナノインプリント解析ソフト



熱ナノインプリント解析例(粘弾性解析)



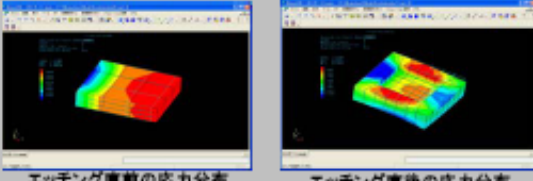
光ナノインプリント解析例(光強度解析)



スミスチャート 放射パターン図

電磁波解析例

接合実装解析ソフト

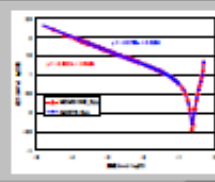


エッチング直前の応力分布 エッチング直後の応力分布


応力・温度履歴継承解析

接合強度評価


応力特異性の指数を評価



応力特異性の指数を計算
材料親和性評価



疲労強度評価



(2) 目標の達成度

表 3.1 事業全体の目標の達成度

研究項目	目標	成果	達成度
[1] フレームワークソフトの開発	マスク作成、デバイス構造作成、自動格子作成、プロセスレシピ、解析条件設定、解析結果表示、解析ソフト・CAD データとのデータコンバータ、データベースインターフェース、プラグイン機能とスーパーバイザの9つの機能をユーザーフレンドリーな GUI と共に実現する。更に、ナノインプリント解析機能の追加に伴うフレーム機能の改修を行う。	当初計画のフレームワークの9つの機能を、操作性・利便性等を重視して開発し、各解析機能との適正な動作確認および検証を行い、ユーザーフレンドリーな GUI を実現した。また、ナノインプリント解析機能の追加に伴うフレームワーク機能の改修を行った。 以上により、目標通りの成果を得た。	○
[2] 機構解析シミュレータの開発	MEMS の設計・解析において重要な数値解析機能を実現する。さらに、機能の拡張性を容易にしたシステムを実現する。開発した「フレームワークソフト」や「プロセス解析ツール」を用いて作成した3次元 MEMS デバイス構造を、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検証する。検証結果の目標値として、解析精度 50%以上を実現する。	計画通りのシミュレータを開発し、製作した3種類の検証用デバイス（ミラー、RF スイッチ、圧力センサ）の実測値と開発したシミュレータによる解析結果を比較検証した。検証結果は、各解析とも市販ソフト値と良く一致するとともに、実験値に対しても傾向は良く一致し、解析精度は72%以上（誤差：解析種別により2%～28%）を達成した。	○
[3] プロセス解析ツールの開発	1) プロセス解析ツール MEMS プロセスシミュレータもしくはエミュレータによって MEMS 加工構造を作成し、総合的に検証・評価できるプロセス解析ツールを実現する。 また、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）を作成し、「機構解析シミュレータ」を用いて解析するとともに、実際に試作したデバイス構造の実測値と比較評価する。 2) 熱・光ナノインプリント加工解析シミュレータ MEMS の加工において近年急速に加工方法が構築され、研究開発および技術開発に利用されてきている熱および光を利用したナノインプリント加工に対応した解析シミュレータを開発する。 熱ナノインプリント解析においては、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。目標として、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。 光ナノインプリント解析においては、シミュレーション結果と文献の実測データとの比較検証評価を試行する。	計画通りのシミュレータを開発し、製作した3種類の検証デバイス（ミラー、RF スイッチ、圧力センサ）の実測値と開発したシミュレータやエミュレータによる解析結果を比較検証した。このシミュレーションやエミュレーションによる検証結果は、実際のデバイス形状に良く一致し、誤差についても8%以内であった。 以上により、目標通りの成果を得た。 計画通りのシミュレータを開発し、シミュレータによる解析結果と実験結果や文献値との比較検証を行った。 熱ナノインプリント解析においては、測定された厳密な材料物性値（パラメータ）を用いることで、解析結果が実用に耐えうる精度で一致することを確認した。また、光ナノインプリント解析においては、電界強度分布の違いが文献で示される通りとなり、モールド設計やプロセス条件の最適化に利用できることを確認した。 以上により、目標通りの成果を得た。 【世界初技術】	○

<p>[4] 機能拡張ソフトの開発</p>	<p>1) プロセス逆問題解析ソフト 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内蔵した、フレームワークソフト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 デバイスを検証用モデルとしてソフト機能を検証する。</p> <p>2) 接合実装解析ソフト 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、温度変化に対応した応答および力学的信頼性の解析ソフトを開発する。一方では陽極接合と半田接合に係る接合強度・封止性データを採取してデータベースを構築する。 また、具体的な接合サンプルで実測・評価し、解析の妥当性を検証する。</p> <p>3) 回路集積化 MEMS シミュレータ 光スキャナー、RF スイッチ、圧力センサー等を構成する機械系素子モデルを構築して、これらのデバイスが解析できる汎用的な回路集積化 MEMS シミュレータを開発する。また、櫛歯型静電アクチュエータと位置検出電子回路を製作して実験データを取得し、連成シミュレーションによる解析値と比較検証してシミュレータの解析精度を実証する。</p>	<p>代表的な MEMS プロセスレシピとエッチング加工データを採取し、420 件のプロセスデータとして内蔵した計画通りの解析ソフトを開発し、フレームワークとの連携とデータ受け渡しに問題のないことを確認した。さらに、ミラーデバイスを検証用モデルとして検証を行い、その初期形状に対する逆問題解析の結果、妥当なプロセスレシピとマスクデータが出力されることと、その出力データを用いて製作したミラーデバイスが検証用モデル形状寸法にほぼ一致することを確認した。 以上により、目標通りの成果を得た。【世界初技術】</p> <p>計画通りに開発した解析ソフトを用いて陽極接合部の破壊じん性値を算出し、破壊強度が接合条件ごとに整理可能であることを示すことで、解析の妥当性を検証した。一方、陽極接合とはんだ接合に関する接合強度および封止性試験を行い、基本データを体系的に整理しデータベースを構築した。以上により、目標どおりの成果を得た。</p> <p>計画通りの SPICE3 を拡張した解析シミュレータを開発し、検証用デバイスである櫛歯型静電アクチュエータに外力を加えた場合と静電力を与えて場合の検証評価を実施したが、何れも実験結果とシミュレーション結果は良く一致することを確認し、シミュレータの解析精度を実証した。以上により、目標通りの成果を得た。</p>	<p>○</p>
<p>[5] データベースの開発</p>	<p>1) 知識データベース 初心者や経験の乏しい研究者・技術者を支援するために、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収集し、使い易い知識データベースとして構築する。 この構築した 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。</p>	<p>1) 知識データベース 初心者や経験の乏しい研究者・技術者が使い易い知識データベース機能を開発し、MEMS 設計やナノインプリント解析に有用な知識データを蓄積した。データ蓄積件数の目標値を 1000 件以上としていたが、最終的には、大学・研究機関・企業から 820 件、マイクロマシン技術専門用語 200 件、マイクロ化学研究組合データ 730 件の計 1750 件を蓄積した。以上により目標通りの成果を得た。【世界初技術】</p>	<p>○</p>

	<p>2) 材料・プロセス・データベース</p> <p>国内3カ所以上のファンドリー事業者による試作を行い、成膜材料の機械特性データ及びドライエッチング、ウェットエッチングのプロセスデータを取得し、ファンドリー事業者の活用により有用な材料・プロセスデータベースを構築する。また、ナノインプリント成形材料として、COP、PMMA、PET など代表的な樹脂の粘弾性特性データおよび成形加工特性データを取得する。さらに、成型用コーティング膜材料として PMMA、ポリイミド (PI)、SU-8、低融点ガラスなど、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。以上の構築した 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>2) 材料・プロセス・データベース</p> <p>国内ファンドリー3社により試作された成膜材料の材料特性の測定を実施した。シリコンの疲労特性では、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。また、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。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、その内実測値は59件、他は文献値とカタログ値である。</p> <p>国内ファンドリー3社によるドライエッチングおよびウェットエッチングにおける加工データ・加工特性データを取得するとともに、文献等から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。【独自技術】</p> <p><ナノインプリントDB></p> <p>代表的な樹脂の粘弾性特性データおよび成形加工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した。</p> <p>さらに、スピコート・焼成による樹脂膜及び低融点ガラス膜、金型材料の機械的特性（ヤング率、残留応力）、熱的特性（熱膨張率）を取得した。これらの材料データベースを構築した。</p> <p>以上により、目標通りの成果を得た。</p>	
<p>[6] 成果普及</p>	<p>広告宣伝活動に必要なパンフレット、パネル、ビデオの制作、MemsONE の情報を提供する Web サイトの整備、商標権の獲得等を行い、普及のために必要となるインフラを整備する。</p> <p>さらに、MemsONE を国内に広く知らしめるため、各種展示会への出展、開発途上におけるα版無償配布、講習会等を実施して、ユーザからの意見・要望を収集し、システムへの反映を図る。</p>	<p>広告宣伝活動用インフラとして、パンフレット、パネル、ビデオを作成・整備し、展示会やセミナー等で広く活用した。普及に向けた活動として、成果発表会2回開催、各種展示会に7回出展、講習会・セミナー4回開催、学会等で3回発表を行うとともに、このインフラを活用して MemsONE を広く紹介した。これらの活動において、パンフレットは5500部を配布し、パネルは7回、ビデオは3回程度活用した。</p> <p>さらに、MemsONE の情報を提供するための Web サイトを開設し、MemsONE クラブ会員800名以上を募るとともに、情報配信を逐次行った。また、開発途上におけるユーザ評価を得るためにα版（開発途中バージョン）を無償配布し、391ライセンス、評価アンケート176件を回収し、β版に向けた意見・要望を収集することができた。</p> <p>あわせて、MemsONE の商標権を(財)マイクロマシンセンターにて獲得した。以上により、目標を上回る成果を得た。</p>	<p>○</p>

特許等出願数および成果発表数を表 3.2 に示す。論文等の誌上発表数は、国内、海外合わせて 221 件であった。また、特許等の出願数は、MemsONE（メムスワン）の商標登録の 1 件である。特許出願および著作権（プログラム著作物登録）は、企業判断により行っていない。報道数は、国内のみ 8 件であった。

表 3.2 論文、特許等、報道数一覧

	論文等誌上発表 (論文誌、学会誌、国際会議)		特許等		報道 (新聞、雑誌等)	
	国内	海外	国内	海外	国内	海外
件数	73	148	1* (商標登録)	0	8	0

* 「MemsONE（メムスワン）」を商標登録

2. 各テーマ成果まとめ

(1) 目標の達成度

[1] フレームワークソフトの開発

研究項目	目的	目標	成果	達成度
マスク作成	プロセス設計におけるマスクデータを作成・編集する機能を開発する。	マスク領域の定義・編集、セル構造操作、GDSII データの入出力に関わる機能を実装したマスク CAD ソフトの開発を完了する。	下記機能項目の開発を完了した。 ・CAD 基盤（ファイル、データ編集、表示） ・グリッド、レイヤ操作、セル構造 ・点・線・マスク領域の定義・編集、検査	○
デバイス構造作成	ユーザが機構解析を行うためのデバイス構造モデルを定義・編集できる機能を開発する。	基本立体構造の定義、材質領域の設定・編集、立体データ間の集合演算などに関わる機能を実装したデバイス CAD ソフトの開発を完了する。	下記機能項目の開発を完了した。 ・CAD 基盤（ファイル、データ編集、表示） ・材質操作 ・モデリング機能（立体、点線面） ・集合演算、検査	○
自動格子作成	有限要素法による機構解析を行うためには、形状データを構造格子に分割する必要があり、このための自動格子作成機能を開発する。	ソリッド要素として、解析精度と解析効率のよい6面体の格子、シェル要素として、4角形および3角形格子を自動作成する機能の開発を完了する。	下記機能項目の開発を完了した。 ・自動格子（メッシュ）作成（6面体、3角形、4角形） ・メッシュ削除、メッシュ検査	◎ (局所的な細分指示も含めた6面体自動格子分割が可能となった)
プロセスレシピ	MEMS デバイスを製造する為のマルチプロセス工程を設定・編集する機能を開発する。	各種プロセス工程の選択、各工程での、装置条件、材質設定、マスク設定、形状パラメータなどの設定・編集機能の開発を完了する。	下記レシピ関連機能の開発を完了した。 ・プロセス工程の選択 ・各プロセス条件の設定（装置条件、プロセスタイプ、形状パラメータ、表裏タイプ、マスク設定、マスク極性、材料、電気特性、装置条件） ・レシピの追加、チェック、保存、呼出し	○

解析条件設定	機構解析およびプロセス解析を行うための、各種解析条件を設定し、解析ソフトを実行するための機能を開発する。	機構解析ソフトの解析種類別に、材料物性データ、境界条件、計算制御パラメータを設定し機構解析ソフトを起動する機能、プロセス解析ソフト種類別にプロセス条件を設定し、プロセス解析ソフトを起動する機能の開発を完了する。	機構解析種類別に、材料物性データ、境界条件、計算制御パラメータを設定し機構解析ソフトを起動する機能、プロセス解析ソフトのプロセス条件設定とプロセス解析ソフトを起動する機能の開発を完了した。	◎ (ユーザにとって利便性が高い解析条件の再利用機能を実装することが出来た)
解析結果表示	機構解析およびプロセス解析の解析結果データの可視化機能を開発する。	機構解析ソフトの解析結果表示機能として、出力物理量に応じた、変位図、ベクトル図、等高線図の表示機能の開発を完了する。また、プロセス解析結果の形状データの表示機能の開発を完了する。	下記機能項目の開発を完了した。 ・評価図表示 (等高線図、変位図、ベクトル図、テンソル図、断面図、材料構成図) ・グラフ出力、リスト出力 ・アニメーション ・プロセス解析の解析結果の形状データ	○
解析ソフト、CADソフトとのデータコンバータ	市販のCADソフト、解析ソフトとのデータ授受を行うためのデータコンバータ機能を開発する。	CADの形状データは、IGES、DXF、GDSのデータ形式を対象に、また解析ソフトの格子データは、NASTRAN、ABAQUS、MARCのデータ形式を対象としたデータコンバータ機能の開発を完了する。	下記機能項目の開発を完了した。 <CADデータ> ・IGESデータの入出力 ・DXFデータの入出力 ・GDSデータの入出力 <有限要素データ> ・NASTRANとの入出力 ・ABAQUSとの入出力 ・MARCとの入出力	○
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。	材料・プロセス・データベースおよび知識データベースのデータベースインターフェースライブラリ開発を完了する。	材料・プロセス・データベースおよび知識データベースのデータベースインターフェースライブラリを開発した。このライブラリにより、知識データベース、材料プロセス・データベースの閲覧・編集が可能となった。	○

<p>プラグイン機能とスーパーバイザ</p>	<p>ユーザ独自ソフトをMemsONE と連携させるためのプラグインインターフェースの仕組みと、フレームワーク機能と各種解析ソフトを整合性を持って連携させる全体制御機能を開発する。</p>	<p>プラグインに関しては、解析ソフトとのインターフェースデータに関わるインターフェース仕様を整備し公開する。 また、スーパーバイザ機能に関しては、フレームワークと各種解析ソフトに関わるすべての機能を整合性を持って作動させる仕組みの開発を完了する。</p>	<p>プラグイン機能として、解析ソフトの計算結果データ、機構解析の解析条件データ、および、形状モデルに関する解析ソフトとのインターフェースデータに関し、インターフェース仕様を公開した。また、スーパーバイザ機能として、フレームワークと多様な解析ソフトが整合性を持って作動する全体制御機能を実装した。</p>	<p>○</p>
<p>「ナノインプリント加工・解析システムの開発」におけるフレームワークソフトの改修</p>	<p>熱および光ナノインプリント加工・解析システムにおけるフレームワークソフト関連機能を開発する。</p>	<p>熱ナノインプリントに関しては、解析条件設定機能、DB インターフェース機能、解析結果表示機能の開発を行う。 また、光ナノインプリントに関して、FDTD 法解析プログラムのプレ機能（直交格子データの作成・編集機能、解析条件設定機能）、ポスト機能（解析結果表示機能）の開発を完了する。</p>	<p>下記機能項目の開発を完了した。 ・熱ナノインプリン、光ナノインプリント、電磁波解析の解析条件設定機能 ・ナノインプリント用材料・プロセス DB、データベースインターフェースの対応 ・FDTD 法の直交格子の作成・編集・表示制御機能 ・解析結果表示機能として放射パターン図、スミスチャート図の対応</p>	<p>○</p>

[2]機構解析シミュレータの開発

研究項目	目的	目標	成果	達成度
片持ち梁、両持ち梁、ダイヤフラム構造等の力学解析(構造・振動、積層薄膜も含む)	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。	<ul style="list-style-type: none"> 片持ち梁、両持ち梁、ダイヤフラム構造等の力学解析の開発内容を確定し、概念設計、詳細設計・プログラム設計を完了する。 設計作業を踏まえ、本機能単体の開発を完了する。 フレームワークソフトへの結合およびシステム統合を実現させ、結合検証テストおよび統合検証テストを完了する。 	<ul style="list-style-type: none"> 概念設計では機能、システム構成を策定した。詳細設計・プログラム設計ではモジュールの構成等を策定した。また、モジュール検証テスト計画を検討した。 力学解析について、各種要素の整備、プログラム開発を完了した。また、開発したプログラムを用いて機能検証を実施した。機能検証ではRF-MEMS(オムロン株式会社)を模した形状やカンチレバーを対象に商用コードや理論解との比較を実施し、結果の一致を確認した。 力学解析の機能について、フレームワークソフトとの結合を完了し、結合検証テストおよび統合検証解析を完了した。検証解析では圧力センサと光スキャナを対象とし、圧力センサでは実験結果のダイヤフラム変位と解析結果は良好に一致した。光スキャナではトーションバー型ミラー構造の可動部中央の荷重と変位の関係を比較し、解析結果と実験結果の誤差は2%未満となり良好な一致を確認した。 	○
電磁界解析	電界解析、線形交流定常磁界解析、非線形静磁界解析、非線形過渡磁界解析、非線形定常時間周期磁界解析、電流解析、周波数応答解析電磁界解析の機能を開発する。	<ul style="list-style-type: none"> 概念設計および詳細設計・プログラム設計を完了する。 電磁界解析シミュレータ単体の開発を完了する。 フレームワークソフトへの結合およびシステム統合を実現し、結合検証テストおよび統合検証テストを完了する。 	<ul style="list-style-type: none"> 概念設計では要件抽出、モジュールの入力項目、出力項目、機能、システム構成を決定した。詳細設計・プログラム設計ではモジュール構成等を策定した。また、モジュール検証テスト計画を検討した。 電磁界解析のプログラム開発を完了した。電磁界解析の機能検証を実施した。機能検証では理論解と解析解との比較を実施し、良好な結果が得られることを確認した。 電磁界解析について、フレームワークソフトとの結合を完了し、結合検証テストおよび統合検証解析を完了した。検証解析では RF-MEMS 	○

			の信号線に交流電流を流し、デバイス近傍に発生した磁界強度を実測(オムロン株式会社)と解析結果を比較し、電磁界解析で計算した解析結果はループプローブ中心位置で 95.3dB μ V であり、両者は 22%の乖離であり目標を達成できた。	
圧電解析	圧電材料を用いた MEMS デバイスに対応するため、圧電応力定数テンソルを用いた圧電解析の基本方程式により電界と力学解析との連成解析を行う機能を開発する。	<ul style="list-style-type: none"> ・概念設計、詳細設計・プログラム設計を完了する。 ・圧電解析シミュレータの開発を完了する。 ・フレームワークソフトへの結合およびシステム統合を実現させ、結合検証テストおよび統合検証テストを完了する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・概念設計では機能、システム構成を策定し、詳細設計・プログラム設計ではモジュールの構成等を策定した。また、モジュール検証テスト計画を検討した。 ・圧電応力定数テンソルを用いた圧電解析機能の開発を行った。また、圧電解析機能における機能検査、検証を行い、ソフトウェアの動作、解析結果の確認を行った。機能検証ではラミネートプレートを解析対象とした逆圧電効果と圧電効果について実施し良好な結果を得た。 ・フレームワークソフトとの結合検証テストおよび統合検証テストを完了した。検証解析では、圧電駆動のカンチレバーを解析対象とし、実験(オリンパス株式会社、京都大学)により得られた圧電定数を用いてカンチレバーの逆圧電効果を解析し、実験結果と解析結果の Z 方向変位は十分良く一致することを確認した。 	○
伝熱解析、熱変形解析	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。	<ul style="list-style-type: none"> ・開発内容を確定し、概念設計、詳細設計・プログラム設計を完了する。 ・伝熱解析シミュレータと熱変形解析シミュレータ単体の開発を完了する。 ・フレームワークソフトへの結合およびシステム統合を実現させ、結合検証テストおよび統合検証テストを完了する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・概念設計では機能構成、システム構成を策定し、詳細設計・プログラム設計ではモジュール構成等を策定した。また、モジュール検証テスト計画を検討した。 ・非定常熱伝導方程式による熱伝導解析と熱応力解析を連成して、熱変形を解析する機能の開発を行った。また、機能検査用簡易モデルによる機能検査、検証を実施し、理論解との一致を確認した。 ・検証解析では、RF-MEMS と圧力センサを対象 	○

			<p>とした評価検証を実施した。RF-MEMS では解析結果と商用コードの解析結果は良く一致し、実験結果との比較においても良好な結果を確認した。圧力センサでは実験結果と解析結果は十分良く一致していることを確認した。</p>	
<p>雰囲気流体の影響解析</p>	<p>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。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・雰囲気流体の影響解析シミュレータの開発内容を確定し、概念設計、詳細設計・プログラム設計を完了する。 ・雰囲気流体の影響解析シミュレータ単体の開発を完了する。 ・フレームワークソフトへの結合およびシステム統合を実現させ、結合検証テストおよび統合検証テストを完了する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・概念設計では、機能・システム構成等を検討し確定した。詳細設計・プログラム設計においては、解析モデルを検討した。 ・雰囲気流体の影響解析のために必要な入出力機能、Reynolds 方程式の求解機能、および、得られた解析結果からの減衰率抽出機能の開発を実施した。また単体の機能検査・機能検証を実施した。機能検証では振動平行平板の圧力分布について計算結果と理論解とを比較し良好な一致を得た。 ・フレームワークソフトとの結合検証テストおよび統合検証テストを完了した。検証解析では静電駆動型光スキャナの Q 値の実験値との比較を実施し、同程度のオーダーの結果が得られることを確認した。 	○
<p>連成解析</p>	<p>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連成解析を開発する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・機構解析シミュレータの連成方式を確定し、概念設計、詳細設計・プログラム設計を完了する。 ・連成解析に必要なモジュールまたはインターフェースの開発を完了する。 ・連成解析のフレームワークソフトへの結合およびシステム統合を実現させ、結合検証テストおよび統合検証テストを完了する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・連成解析方式の決定、概念設計、およびモジュールの構成等の詳細設計・プログラム設計およびモジュール検証テスト計画を検討した。 ・連成解析に必要なモジュールまたはインターフェースの開発、並びに機能検査を行った。 ・連成解析について、フレームワークソフトとの結合検証テストおよび機構解析シミュレータや材料・プロセス・データベースとの統合検証テストを実施した。電磁場解析と力学解析の連成解析の検証解析として、RF-MEMS (オムロン株式会社) および光スキャナ (オリンパス株式会社) を対象に実施した。RF-MEMS を用いた検証解析では、可動部の z 方向変位は実測では 	○

			0.39 μm 、解析では 0.29 μm あり、実験との乖離は 26% となり、目標を達成できた。光スキャナを用いた検証解析では、駆動電圧と可動部の機械振れ角との関係を、実験および解析にて比較し、機械振れ角の実測値と解析結果を比較すると 130V のとき 27% の乖離であり、目標を達成した。	
接合実装解析ソフトの開発	MEMS の設計・開発を支援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および力学的信頼性解析機能を含めた接合実装解析ソフトを開発する。	<ul style="list-style-type: none"> 接合実装解析ソフトの各解析機能の開発内容を確定し、概念設計、詳細設計・プログラム設計を完成させる。 概念設計および詳細設計・プログラム設計を踏まえ、本解析機能単体の開発を完了する。 接合実装解析ソフトのフレームワークソフトへの結合およびシステム統合を実現させ、統合検証テストを完了する。 	<ul style="list-style-type: none"> 概念設計、およびモジュールの構成等の詳細設計・プログラム設計を検討した。 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および力学的信頼性解析機能の各機能モジュールの開発を実施した。 開発した接合実装解析ソフトについて、フレームワークソフトとの結合検証テストおよび検証解析を実施した。 	○

[3]プロセス開発ツールの開発

研究項目	目的	目標	成果	達成度
異方性ウェットエッチングプロセス・シミュレータの開発	材料・プロセス・データベースのエッチングデータ（各面方位のエッチングデータ）を基に3次元エッチング・プロファイルの過渡変化を予測する異方性ウェットエッチングプロセス解析シミュレータを開発する。	<ul style="list-style-type: none"> 異方性ウェットエッチングプロセスに関する概念設計、詳細設計・プログラム設計を完了する。 異方性ウェットエッチングプロセス単体の開発を完了する。 異方性ウェットエッチングプロセス解析シミュレータ単体とフレームワークソフトへの結合およびシステム統合を実現させ、結合検証テストおよび統合検証テストを完了する。 	<ul style="list-style-type: none"> 要件抽出、システム構成をまとめ、インターフェース、モジュールの構成・機能、処理、プログラム構成、モジュール検証テスト計画を完了した。 単体機能検証、および入出力接続部の開発・試験を行い、実際のデバイス形状にほぼ一致することを確認した。 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た。 検証解析結果より、実際のデバイス形状（再委託先：松下電工株式会社）とシミュレーション結果が良く一致することを確認した。 	○
ドライエッチング・プロセス・シミュレータの開発	ドライエッチングプロセスによる被エッチング材料上の表面反応と形状変化を2次元で解析し、2次元断面におけるエッチング形状を確認することを可能とするドライエッチング・プロセス・シミュレータを開発する。	<ul style="list-style-type: none"> ドライエッチング・プロセス・シミュレータの概念設計および詳細設計・プログラム設計を完了する。 ドライエッチング・プロセス・シミュレータ単体の開発を完了する。 3次元構造への拡張およびマルチプロセスからの呼び出しの実装を完了し、フレームワークソフトとの結合検証テスト、および統合検証テストを完了する。 	<ul style="list-style-type: none"> 概念設計ではモジュールの入力項目、出力項目、機能を決定した。詳細設計・プログラム設計ではフレームワークソフトとの入出力形式、モジュールの機能の実装となる解析モデル、数値解法、プログラム構成、処理およびデータフロー、モジュール検証テスト計画を完了した。 被エッチング材料上の表面反応と形状変化を解析する機能、およびエッチング深さ・側壁角・サイドエッチ量をドライエッチング・プロセス・シミュレータの解析結果から抽出する機能を開発した。 フレームワークソフトとの統合作業を実施した。 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、検証解析結果により、シミュレーション結果の妥当性を確認した。 	○

<p>マルチプロセスエミュレータの開発(成膜プロセス・エミュレータを含む)</p>	<p>フレームワークソフトの機能であるプロセスレシピ、材料・プロセス・データベース、知識データベース等の情報を基に、幾何学的手法を用いて3次元構造および2次元断面形状を作製するマルチプロセス・エミュレータ(成膜プロセスを含む)を開発する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・概念設計、詳細設計・プログラム設計を完了する。 ・設計作業を踏まえ、マルチプロセスエミュレータの開発を完了する。 ・マルチプロセスエミュレータのフレームワークソフトへの結合およびシステム統合を実現させ、結合検証テストおよび統合検証テストを完了する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・概念設計では、要件抽出、システム構成を、詳細設計・プログラム設計では、インターフェース、モジュールの構成・機能、処理およびプログラム構成を決定し完了した。 ・プロセスレシピ定義ファイルおよびマスク定義ファイルを読み込み、それらのデータに従って3次元CADデータおよび2次元セルデータを生成するプログラムを開発した。 ・実際のプロセスに即したレシピにてモデル形状を作製し、測定形状と比較し、モデル形状と実デバイス形状が良く一致することを確認した。また、フレームワークソフトとの結合テストを実施した。 	<p>○</p>
<p>ナノインプリント加工・解析システムの開発</p>	<p>MEMS の加工において近年急速に加工方法が構築され、研究開発および技術開発に利用されてきている、熱および光を利用したナノインプリント加工について、シミュレーション的なアプローチからの解析システムを開発する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・熱ナノインプリント・プロセス解析に対応する解析モデル構築を完了する。 ・熱ナノインプリント・プロセス解析シミュレータの開発を完了する。 ・熱ナノインプリント・プロセス解析シミュレータの総合的な評価検証を完了する。 ・光ナノインプリント・プロセス解析に対応した電磁波解析プログラムのモデル構築を完了する。 ・解析モデルに基づき、光ナノインプリント加工解析シミュレータに対応する電磁波解析プログラム(FDTD 法)の単体モジュールの開発を完了する。 ・光ナノインプリント加工解析シミュレータの評価検証を試行する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・加熱→押込→保持→冷却→離型のプロセスを連続して解析する、熱ナノインプリント・プロセス各工程を有限要素法に対応する数値解析モデルの構築を完了した。 ・5つの解析プロセスと粘弾性、剛体、弾塑性体の各材料モデルに加えて、各種要素、接触アルゴリズム、マトリックスソルバー、自動増分調整、フレームワークとの結合機能の開発を完了した。 ・実験検証を完了し、成型形状比較により、解析結果と実験結果が良く一致している事を確認した。 ・光ナノインプリント・プロセスに対応したFDTD 法による電磁波解析プログラムの解析モデル構築、および検証モデルの検討を完了した。 ・FDTD 法による電磁波解析プログラムの開発を完了した。 ・検証モデルを用いて、FDTD 法による電磁波解析プログラムのシミュレーション結果を評 	<p>○ ○</p>

			価し、モールド設計やプロセス条件の最適化に 利用できることを確認した。	
--	--	--	--	--

[4]機能拡張ソフトの開発

4.1 プロセス逆問題解析

研究項目	目的	目標	成果	達成度
ユーザ要求仕様と解析手法の導出	プロセス逆問題解析ソフト設計の基礎的情報を取得する。	マスク作成・編集機能、プロセス設計解析機能に関するユーザ要求仕様書の作成を完了し、プロセス逆問題解析手法について纏める。	プロセスレシピ・マスキレイアウトエディタに関するユーザ要求仕様書とプロセス逆問題解析手法に関する仕様書を作成した。 既存のプロセス・マスク設計ツールの課題を明確にし、本ソフト設計の基礎となる仕様を確立した。	○
プロセスデータ採取	プロセス逆問題解析において、検索・抽出対象となるデータベースを構築する。	プロセスデータ項目の調査と仕様策定を実施し、Si・SOI・SiO ₂ 基板と有機材料薄膜の3次元形状及び異形状加工特性に関するプロセスデータ採取を完了する。	目標とする材料の異方性ウェット及びドライエッチングにおける加工前後の形状変化をプロセスデータとして採取した。 MEMSで多用される材料のプロセスデータを実験的に採取し、本ソフトに組み込むことで、プロセス・マスクデータを求める機能が発揮されるようにした。	○
プロセス逆問題ソフトウェアの開発	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。	逆問題解析ソフトの開発と、その機能検証を行う。検証はソフトウェアによって導出された光MEMSデバイスの加工プロセスと、マスク形状を用いて、デバイスの試作を行い、その結果を評価するによって行う。	ソフトウェアを用いて、加工プロセスとマスク形状が導きだされることを確認した。また検証として光MEMSデバイスを試作し、デバイスが作成できることを確認した。	◎ ソフトウェアによって導出された加工プロセスとマスク形状を用いてデバイスの試作を行った結果から、本開発における目標は達成された。 <世界初技術>

妥当性の検討	プロセス逆問題解析ソフトのプロセスレシピ・マスクデータ生成機能の検証	検証モデルとして光 MEMS (ミラー) デバイスを設定し、解析結果の妥当性の評価を完了する。解析で得られたプロセスレシピとマスクデータを用いて検証モデルを試作することにより、プロセス逆問題解析が可能であることを実証する。	<p>本ソフトにより、検証用ミラーデバイスのプロセスレシピとして、SOI ウェハを用いるプロセスと寸法シフト量を考慮したマスクデータが求められ、製作したミラーデバイスの梁幅が検証モデルの形状寸法にほぼ一致した。</p> <p>光 MEMS デバイスを検証モデルとして、プロセス逆問題解析を実施し、解析結果に基づいて検証モデルが製作できることが実証された。</p>	<p>◎ 本解析が可能であるだけでなく、解析精度も十分であることが実証された。</p>

4.2 接合実装解析

研究項目	目的	目標	成果	達成度
接合実装解析ソフトの開発	MEMS の設計・開発を支援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および力学的信頼性解析機能を含めた接合実装解析ソフトを開発する。	<ul style="list-style-type: none"> 接合実装解析ソフトの各解析機能の開発内容を確定し、概念設計、詳細設計・プログラム設計を完成させる。 概念設計および詳細設計・プログラム設計を踏まえ、本解析機能単体の開発を完了する。 接合実装解析ソフトのフレームワークソフトへの結合およびシステム統合を実現させ、統合検証テストを完了する。 	<ul style="list-style-type: none"> 概念設計、およびモジュールの構成等の詳細設計・プログラム設計を検討した。 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および力学的信頼性解析機能の各機能モジュールの開発を実施した。 開発した接合実装解析ソフトについて、フレームワークソフトとの結合検証テストおよび検証解析を実施した。接合強度評価の検証解析として、シリコンとガラスを接合したダイシユア試験を解析し、応力特異性について Bogy の特性方程式の理論解と十分良く一致していることを確認した。応力履歴継承解析の検証解析として、残留応力等のあるデバイス構造に対するエッチング前後の変形挙動について解析を実施し物理的に妥当な結果が得られていることを確認した。 	○
妥当性の検証	接合実装解析ソフトの解析の妥当性検証	陽極接合された接合強度試験片を検証デバイスとして、取得した強度データを用いて、解析の妥当性検証を完了する。	陽極接合された接合強度試験片を検証デバイスとして、取得した強度データを用いて、解析の妥当性検証を完了する。	○
接合・封止データ採取	接合強度・封止性データの採取を進め、データを体系的に整理しデータベースを構築する。	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進め、その基本データのデータベースへの登録を完了する。	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した。	○

4.3 回路集積化 MEMS シミュレータ

研究項目	目的	目標	成果	達成度
機械素子のモデル構築	回路シミュレータを用いて、典型的な MEMS の特性を解析するために必要な新規モデルの開発を行う。	MEMS を構成している機構部分の機械系素モデルを構築し、MEMS 機構部分の解析を可能にする。	アンカ、ビーム、プレート、ギャップと呼ばれる 4 種類の機械系素子モデルを構築した。	○
汎用的な回路集積化 MEMS シミュレータエンジンの開発	電気回路と MEMS 機構部分を同時に解析可能な計算エンジンを開発する。	従来の電子回路シミュレータで扱う電気素子と、機械的自由度を持つ機械系素子とを、区別なく同時に扱える MEMS 用回路シミュレータエンジンを開発する。	<ul style="list-style-type: none"> ・機械系素子モデルの SPICE3 への追加実装により、電気成分と機械成分の同時解析が可能になった。 ・ユーザのモデル構築を支援する GUI も開発した。 	◎ (MEMS 機構部を見た目をそのまま組み立てる感覚でモデル化できる GUI は他に類を見ない使いやすいものである為)
検証用デバイスの製作・評価	汎用的な回路集積化 MEMS シミュレータの検証を行う。	静電アクチュエータチップを検証用モデルとして、電子・機械連成シミュレーションを行い、解析精度を実証する。	静電アクチュエータチップを作製し、(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結果と、回路集積化 MEMS シミュレータを用いた解析結果の比較検証を行い、シミュレータの解析精度を実証した。	○

[5]データベース（知識・材料）の構築

5.1 知識データベース

研究項目	目的	目標	成果	達成度
知識データの作成、整理・蓄積 (MEMS の設計解析・ナノインプリント解析・回路解析に関わる)	MEMS の設計やナノインプリント解析に有用な最先端の知識データを蓄積し、初心者や経験の乏しい研究者・技術者の MEMS 設計を支援する。	MEMS の設計やナノインプリント解析に関わる知識データ（知識、知見、実績）をより多く蓄積し、MEMS 設計に有効な設計支援システムを実現する。 知識データ作成件数の目標値を 1000 件とする。	12 大学、1 研究機関、1 団体、5 企業により、MEMS 設計に関わる最先端の知識、知見、実績データを収集し、MEMS 設計やナノインプリント解析関連データ 820 件、マイクロマシン技術専門用語 200 件、マイクロ化学研究組合データ 730 件の計 1750 件蓄積した。	○
知識データベースシステムの構築	MEMS 開発・設計に関わる知識・ノウハウを体系化し、フレームワークソフトと連携し、フレームワーク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システムを構築する。	<ul style="list-style-type: none"> ・知識データベースの構成の枠組みを終了する。 ・知識データベースの概念設計および詳細設計を完了する ・平成 16 年度の概念設計および詳細設計を踏まえ、知識データベースシステムの開発を完了する。 ・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統合検証テストを完了する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・知識データベース構築において、MEMS の設計開発に有効な知識データベースの構成の枠組みについてデータ情報の整理、分析を実施し、知識データの構成の枠組みを構築した。 ・概念設計においては知識データ内容における構成要素の抽出、構成要素の従属関係等、知識データベースの要件抽出を行い、機能を決定する。詳細設計で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した ・作成したデータの論理構造(ER 図)を基に知識データベース管理システムを実装し、画面イメージに従った蓄積・検索・可視化機能を実現するシステムを開発した。 ・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、知識データベースシステムの動作を確認した。 	○

5.2 材料・プロセス・データベース

研究項目	目的	目標	成果	達成度
材料・プロセス・データベースの構築（産総研）	ソフトウェアによる解析精度向上のため、国内主要ファンドリー事業者のプロセスにより得られる薄膜材料・エッチングプロセスのデータを取得する。	<ul style="list-style-type: none"> 国内3カ所以上のファンドリー事業者による、薄膜材料の材料データおよびエッチングのプロセスデータを取得し、これらを含む材料・プロセスデータベースを構築する。 	<ul style="list-style-type: none"> 3社のMEMSファンドリーにより作製された、それぞれ6種類の薄膜材料の材料特性データを計測し、解析システムの材料DBに収録。 3社のMEMSファンドリーによる、ドライエッチングおよびSi異方性ウェットエッチングの加工特性を計測し、解析システムのプロセスDBに収録。 当初計画にはなかった接合破壊じん性値データ、文献等から収集したデータを合わせ、収録総数は250件を超た。 	○
計測・補間手法の確立（産総研）	MEMSデバイスの信頼性予測に必要な計測手法を確立する。	<ul style="list-style-type: none"> 接合体の信頼性評価手法を確立する。 弾性変形梁の信頼性評価手法を確立する。 可動接点の信頼性評価手法を確立する。 	<ul style="list-style-type: none"> 接合条件および環境因子の、陽極接合強度への影響について評価手法を開発し、データを取得した。 MEMSマイクロ疲労試験片チップによる疲労特性評価手法を開発し、単結晶シリコンの疲労特性データを取得した。 平行バネカンチレバーによる微小接点の信頼性評価手法を開発し、微小接点の繰り返し接触特性データを取得した。 	◎ 開発した疲労試験法は、国際会議のKeynote Speechなど、高い評価を得ている。

<p>ナノインプリント成形樹脂のデータベース構築（産総研）</p>	<p>熱ナノインプリント解析ソフトウェアで使用する材料データ、および解析ソフトウェア検証用のためのナノインプリント成形データを取得する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 各種の樹脂材料の、粘弾性特性データを取得する。 • 各種樹脂材料の熱ナノインプリント成形実験を行い、成形データを取得する。 	<ul style="list-style-type: none"> • COP, PMMA, PET, PC の各樹脂の粘弾性特性を測定し、ソフトウェアで使用する材料物性パラメータを抽出し、材料 DB に収録した。 • COP, PMMA, PET の各樹脂について、成形特性と荷重および荷重保持時間に関するデータを収集した。データは知識 DB に収録した。 • ソフトウェアによる解析と成型実験との比較により、精度を検証した。 	<p>○</p>
<p>ナノインプリント用代表的樹脂のデータベース構築（日立製作所）</p>	<p>熱ナノインプリントのプロセスシミュレーションに必要な材料データベースを構築する。</p>	<p>ナノインプリント成形材料として、PMMA、PI、SU-8 薄膜、低融点ガラスを、金型用成形材料として、Ni 電鍍膜、Si 基板を対象として、機械的・熱的物性データを採取する。</p>	<p>目標とする材料のヤング率、残留応力、及び熱膨張率を、ナノインデント、レーザ表面弾性波法、光てこ法等、複数の評価法を用いて測定した。</p> <p>材料と評価法の相性により、一部の評価データに大きなばらつきが認められるものもあったが、得られた結果を材料・プロセス・データベースとして MemsONE に搭載した。</p>	<p>○</p>

[6] 成果の普及

実施項目	目的	目標	成果	達成度
普及インフラ整備	<p>広告宣伝活動に必要となるパンフレット、パネル、ビデオの制作や、MemsONEに関する情報を提供するWebサイトの整備、および商標権を獲得し、さらに MemsONE 配布時に必要となるインストーラ・ライセンスライブラリの開発、を行い、普及のために必要となるインフラを整備する。</p>	<p>パンフレット制作し、MemsONE 普及の為有効活用する。</p>	<p>平成17年度に第1版パンフレットを作成した。平成18年度には全面改訂を行い、8ページの冊子を制作した。製作した冊子は各種展示会、セミナー等で配布した。また、プロジェクト期間中に約5500部のパンフレットを配布し、MemsONEの普及活動に大きく貢献するとともに、普及に必須のツールとなった。また、平成17年度に永続的普及を踏まえ、MemsONEの商標権を(財)マイクロマシンセンターにて獲得した。</p>	○
		<p>パネル制作し、MemsONE 普及の為有効活用する。</p>	<p>プロジェクトの概要(狙い・体制等)、機能概要、機能の特徴をまとめた5枚のパネル(A0版)を製作し、展示会、セミナーで活用した。また、プロジェクト期間中にマイクロマシン展等の展示会に6回、学会・セミナー等に1回展示し、MemsONEの周知、普及に活用した。</p>	○

<p>ビデオ制作し、 MemsONE 普及の為有効活用する。</p>	<p>プロジェクトの紹介編、MemsONE 機能の紹介編、運用サポート編、の 3 編からなるビデオを平成 18 年 10 月に制作した（媒体は DVD）。プロジェクト終了後の利用も視野に入れ、各編独立構成とし、個別に上映できる仕組みとした。また、本ビデオはプロジェクト期間中に大型ディスプレイを活用してマイクロマシン展等の展示会に 2 回、学会・セミナー等に 1 回放映し、MemsONE の周知、普及に活用した。放映会場には多数の観客が立ち寄り、普及に大きく貢献した。</p>	<p>◎</p> <p>プロジェクト終了以後の永続的活用も視野に入れ制作した。</p>
<p>Web 整備し、 MemsONE 普及の為有効活用する。</p>	<p>ホームページ「MemsONE ひろば」を逐次更新し、プロジェクトのトピックスや開発者の声、MemsONE 開発状況、α 版の配布計画・入手方法、α 版の申し込み受付・アップデート依頼、β 版の配布案内、などの情報発信により、MemsONE を広く紹介するとともに、MemsONE ユーザの獲得を図った。また、「MemsONE クラブ」会員の募集も行った。本サイトを通しての問い合わせは、プロジェクト期間中多数あり、普及に大きく貢献した。また、平成 18 年度末時点で MemsONE クラブ会員は約 800 名にまで拡大した。</p>	<p>○</p>

		ソフトウェアインフラ整備	コピー防止・顧客管理のためのライセンスライブラリー及びライセンス申請・発行・登録ツールの開発、MemsONE 導入時に必要となるインストーラの開発及び導入マニュアルの作成、MemsONE を容易に活用するためのチュートリアルマニュアルの作成を行った。本インフラは MemsONE α 版（開発途中のバージョン）で活用することにより、β 版（プロジェクト全成果） MemsONE 普及の為有効活用する。配布時にはライセンス発行やインストールに関する問題はほとんど発生せず、普及のためのインフラとしての整備は完了した。マニュアルに関しても一連の操作が順を追って容易にできるものに仕上がっている。	○
広告宣伝	MemsONE を国内にて広く知らしめるため、各種展示会への出展を行う。また、開発途中バージョン（MemsONE α 版）を無償配布し、MemsONE の認知度を高めるとともに、ユーザからの意見・要望を収集する。あわせて、適切に MemsONE α 版を評価してもらうため、利用方法に主眼を置いた講習会を実施する。	MEMS 関連 展示会出展	平成 17 年度はマイクロマシン展に、平成 18 年度は電気学会センサーシンポジウム、設計・製造ソリューション展、マイクロマシン展、ナノテク 2006 に出展し、デモ、プレゼンテーション、ビデオ放映、パネル展示、パンフレット配布を行い、MemsONE を広く紹介した。また、マイクロマシン展にあわせて成果発表会も行った。結果、プロジェクト期間中展示会に 7 回出展し、広く MemsONE を宣伝することができた。参加者は平成 17 年度の成果発表会には 215 名、平成 18 年度は 240 名あり、MemsONE の認知度及び期待が大きくなっていることを確認することができた。	○

<p>α 版配布</p>	<p>平成 18 年 10 月より開発途中バージョンを α 版と称して無償配布した。最終的な配布数は 391 本により α 版配賦目標の 300 ライセンスを達成。また、α 版利用ユーザから 176 件のアンケートを回収し、β 版に向けた意見・要望を収集することができた。</p>	<p>○</p>
<p>α 版講習会</p>	<p>平成 18 年 12 月に東京及び京都で計 3 回の MemsONE α 版講習会を実施した。内容は MemsONE α 版の利用方法の説明及びデモであり、参加者数は計 69 名であった。また、参加者から 40 件の意見・要望を収集し、β 版への対応・普及方法の検討材料とした。また、α 版ユーザへのアンケート、ヒアリングより β 版普及方法を収集した。特に β 版完成度向上に向けた α 版ユーザからの機能改善・改良要求は、β 版以後のバージョンアップにおいても十分参考となる情報を入手できた。</p>	<p>○</p>

<p style="text-align: center;">成果の配布</p>	<p>プロジェクト終了後、プロジェクト全成果 (MemsONE β 版) を配布する。</p>	<p style="text-align: center;">β 版の配布</p>	<p>プロジェクト全成果を MemsONE β 版として平成 19 年 5 月より実費 (10,000 円/ライセンス) 配布を開始した。インストーラ・ライセンスツール・マニュアルは α 版のものから全面的に更新し、よりユーザが利用しやすいものとした。特にマニュアルに関しては、プロジェクトで開発した全機能を一通り容易に実施することができるチュートリアルマニュアルとして整備した。MemsONE β 版のライセンス申込み数は平成 19 年 7 月末時点で 361 である。また、β 版配賦目標である 150 機関、300 ライセンスを配賦開始 2 ヶ月半で達成。200 機関、400 ライセンスに届く勢いで伸びていることより十分達成と言える。さらに、β 版ユーザ分析の結果、MEMS 業界のみならず機械系の業界等の他分野からの申込みも多数あり、MemsONE の波及効果を確認することができた。</p>	<p style="text-align: center;">◎</p> <p>当初の配布目標ライセンス数を大きく達成。</p>
--	---	---	---	--

(2) 成果の意義

[1] フレームワークソフトの開発

研究項目	成果の意義
マスク作成	マスク作成機能の開発により、プロセス設計に必要なマスクデータを作成・編集しプロセス解析ソフトで活用することが可能となった点で意義がある。
デバイス構造作成	デバイス構造作成機能の開発により、ユーザが機構解析を行うためのデバイス構造モデルを直接作成することが可能となった点で意義がある。
自動格子作成	自動格子作成機能の開発により、デバイス構造作成機能やプロセスエミュレーション機能により作成された形状データから機構解析を行うための有限要素に自動分割することが可能となった点で意義がある。
プロセスレシピ	プロセスレシピ機能の開発により、MEMS デバイスの製造プロセスの各工程を定義してプロセスエミュレーションを実行し、プロセス工程で作成されるデバイス形状を予測することが可能となった点で意義がある。
解析条件設定	解析条件設定機能の開発により、機構解析およびプロセス解析を行うための各種解析条件を設定し解析ソフトを実行することが可能となった点で意義がある。
解析結果表示	解析結果表示機能の開発により、機構解析およびプロセス解析の解析結果データを可視化し視覚的にわかりやすい評価を行うことが可能となった点で意義がある。
解析ソフト、CAD ソフトとのデータコンバータ	解析ソフト、CAD ソフトとのデータコンバータ機能の開発により、市販の CAD ソフト・解析ソフトとのデータ授受が可能となり、ユーザのデータ活用範囲が広がった点で意義がある。
データベースインターフェース	データベースインターフェース機能の開発により、材料・プロセス・データベースおよび知識データベースの参照・編集が可能となった点で意義がある。
プラグイン機能とスーパーバイザ	プラグイン機能のインターフェース仕様の公開により、ユーザ独自ソフトを MemsONE と連携させる環境を提供し、スーパーバイザ機能により、MemsONE のフレームワーク機能と各種解析ソフトを整合性を持って連携させることが可能となった点で意義がある。
「ナノインプリント加工・解析システムの開発」におけるフレームワークソフトの改修	「ナノインプリント加工・解析システムの開発」におけるフレームワークソフトの改修を行うことにより、熱ナノインプリント加工・解析ソフトおよび光ナノインプリント加工・解析システムを MemsONE に組み込み、利用することが可能となった点で意義がある。

[2]機構解析シミュレータの開発

研究項目	成果の意義
片持ち梁、両持ち梁、ダイヤフラム構造等の力学解析(構造・振動、積層薄膜も含む)	開発された力学解析を用いることで、MEMS デバイス構造の挙動(振動・変形・応力特性等)を精度良く予測することが可能となり、MEMS デバイスの構造設計に対して効率化が図れる点で意義がある。
電磁界解析	開発された電磁界解析を用いることで、光 MEMS や RF-MEMS の駆動や検出機構等、多くの MEMS 構造の設計、評価を数値的に予測することが可能となり、MEMS デバイスの構造設計に対して効率化が図れる点で意義がある。
圧電解析	開発された圧電解析を用いることで、圧電材料を用いた圧力センサ、発振器等の MEMS デバイスの機構を数値的に予測することが可能となり、MEMS デバイスの構造設計に対して効率化が図れる点で意義がある。
伝熱解析、熱変形解析	開発された伝熱解析、熱変形解析を用いることで、MEMS プロセスにおける熱処理や熱駆動時の環境下における、構造体の熱伝導やそれに伴う構造体材料の熱膨張或いは熱収縮による変形を数値的に予測することが可能となり、MEMS デバイスのプロセス・構造設計に対して効率化が図れる点で意義がある。
雰囲気流体の影響解析	開発された雰囲気流体の影響解析を用いることで、高速に振動する構造を持つ MEMS デバイスにおいて、その振動部分は相似則から構造周囲の流体粘性により大きな振動抵抗を数値的に予測が可能となり、振動部分を有する MEMS デバイスの構造設計に対して効率化が図れる点で意義がある。
連成解析	連成解析により機構解析シミュレータの機能が大幅に拡大し、電磁アクチュエータ、静電アクチュエータ、熱型アクチュエータ等の MEMS の構造的な応力-ひずみ、振動問題、静電場、磁場、圧電等の駆動機構や動作機構を検証、評価を総合的に行うことが可能となり、MEMS デバイスの構造設計に対して効率化が図れる点で意義がある。

[3]プロセス解析ツールの開発

研究項目	成果の意義
異方性ウェットエッチングプロセス・シミュレータの開発	<p>開発された異方性ウェットエッチングプロセス・シミュレータを用いることで3次元エッチング・プロファイルの過渡変化を予測すること可能であり、結晶異方性エッチングを用いた形状作製プロセスにおける補償マスク等のマスク設計の効率化や、プロセス最適化が図れる点で意義がある。</p> <p>また、予測したプロファイルを後述マルチプロセスエミュレータに接続することで、MEMSデバイスの機械的、電気的な特性を解析する時に必要となるMEMSデバイスのCADモデルへの変換が可能となり、MEMSの機械的、電気的な特性評価の効率化が図られるものと期待される点でも意義がある。</p>
ドライエッチング・プロセス・シミュレータの開発	<p>開発されたドライエッチング・プロセス・シミュレータを用いることで2次元エッチング・プロファイルの過渡変化を予測することが可能であり、ドライエッチングプロセスを用いた形状作製プロセスにおけるプロセス最適化が図れる点で意義がある。</p> <p>また、予測した断面形状を後述マルチプロセスエミュレータに接続することで、MEMSデバイスの機械的、電気的な特性を解析する時に必要となるMEMSデバイスのCADモデルへの変換が可能となり、MEMSの機械的、電気的な特性評価の効率化が図られるものと期待される点でも意義がある。</p>
マルチプロセスエミュレータの開発(成膜プロセス・エミュレータを含む)	<p>開発されたマルチプロセスエミュレータを用いることでプロセスレシピとマスクデータからMEMSデバイスの機械的、電気的な特性を解析する時に必要となるMEMSデバイスのCADモデルが容易に作製することが可能となり、MEMSの機械的、電気的な特性評価の効率化が図られるものと期待される点で意義がある。</p>
ナノインプリント加工・解析システムの開発	<p>ナノインプリント加工解析システムの開発により、ナノインプリント・プロセスの各種条件の検討が、ナノインプリント用樹脂材料の粘弾性特性のデータベースを利用した熱ナノインプリント加工解析システム、光ナノインプリント加工解析システムによる解析からも可能となり、ナノインプリント・プロセス開発の効率化が図られるものと期待される点で意義がある。</p>

[4] 機能拡張ソフトの開発

4.1 プロセス逆問題解析

研究項目	成果の意義
ユーザ要求仕様と解析手法の導出	<p>既存のプロセス・マスク設計ツールの問題点を分析し、MEMS 分野への新規参入技術者（ユーザ）が必要とする仕様をその解決策として求め、プロセス逆問題解析手法を世界初の試みとして考案・導出した。MEMS とそのプロセスに関して経験の浅い新規参入ユーザがプロセスとマスクを設計する場合に失敗を犯すリスクを軽減し、開発に要する時間と費用を削減できる効果がある。</p> <p>さらに、新規参入ユーザに便利な支援ツールを提供することで、MEMS 産業自体の振興にも寄与できる。</p>
プロセスデータ採取	<p>加工工程前後の形状データと工程のテキスト情報からなる独自のデータベースを構築し、プロセス逆問題解析を可能にした。</p> <p>MEMS 加工用マスクに対する加工形状のずれを設計・加工ノウハウとしてデータベース化することで、プロセスとマスクの手直しを含めた総合的な設計時間が短縮され、MEMS 開発の飛躍的な高効率化が実現できる。</p>
プロセス逆問題ソフトウェアの開発	<p>プロセス逆問題解析ソフトウェアは、作りたい形状からそれに対応するプロセスレシピ、マスク形状を半自動的に作成する世界初の機能を持ったソフトウェアである。これを利用することで、MEMS 初心者でも簡単にプロセスレシピを作成することができることなどから、MEMS 業界の新規開発者の増加・育成を促進することが期待される。</p> <p>また、上級者はマスク形状を自動的に生成する機能を利用して、ラピッドプロトタイピング等における作業コストを軽減することが期待される。</p>
妥当性の検討	<p>検証モデルを設定して逆問題解析によりプロセスレシピとマスクデータを求め、それに基づいて製作したデバイス要素と検証モデルを照合した結果、概ね近い寸法のデバイスが得られ、本ソフトの妥当性が実証された。</p> <p>なお、本開発で解析対象とした光・RF-MEMS 及びセンサ MEMS の典型的なデバイス以外についても、プロセスデータを追加していくことにより、より一般的な形状に対しても類似の形状をガイダンスすることが可能になる。</p>

4.2 接合実装解析

研究項目	成果の意義
接合実装解析ソフトの開発	接合実装解析ソフトの開発により、接合実装プロセスの異種材料接合親和性、力学的信頼性を検証、評価、および複数のプロセスをまたぐ力学特性・熱特性の評価を数値的に行うことが可能となり、MEMS デバイスの構造設計に対して効率化が図れる点で意義がある。
妥当性の検証	ウェハプロセスを用いて作製した MEMS の実デバイス寸法の試験片を用いた強度試験を行い、陽極接合部の接合強度を破壊じん性値を用いて体系的に整理した。その結果、破壊強度が試験片形状や負荷モードによらず、接合条件に依存することが示され、本解析の妥当性が実証された。
接合・封止データ採取	MEMS の接合でよく使用される陽極接合およびはんだ接合の接合強度データを体系的に整理しデータベースを構築した。さらに陽極接合では、破壊じん性値を用いた接合強度データベースを構築し、数値解析を用いた接合部の破壊判定を可能としたことで、MEMS デバイスの構造設計に対して高効率化が図れる点で意義がある。

4.3 回路集積化 MEMS シミュレータ

研究項目	成果の意義
機械系素子のモデル構築	機械系素子モデルの構築により、集積化 MEMS の動作を解析できる回路集積化 MEMS シミュレータエンジンの開発が可能になった点で意義がある。
汎用的な回路集積化 MEMS シミュレータエンジンの開発	回路集積化 MEMS シミュレータを利用することによって、集積化 MEMS の特性を試作前にあらかじめ予測することが可能となり、開発期間の短縮、新機能の予測等、集積化 MEMS の可能性を飛躍的に向上させられる点で、意義がある。また、MEMS デバイスを実際に組み立てる感覚でモデル化することが可能で、MEMS 初心者にも扱いやすいグラフィカルユーザーインターフェイスを活用すれば、MEMS 新規開発者の育成を促進することが期待される点で意義がある。
検証用デバイスの製作・評価	回路集積化 MEMS シミュレータの解析精度を実証したことにより、本シミュレータの有用性を示すことができた点で意義がある。また、検証用デバイスに用いた読み出し回路は非常に汎用性の高い回路であり、部品は全て電気街の量販店で容易に手に入るものであるため、今後同期検波回路などを実装することで、リアルタイムに変位を読み出すセンサなどへの応用を比較的容易に実現できる可能性が示された点でも意義がある。

[5] データベース（知識・材料）の構築

5.1 知識データベース

研究項目	成果の意義
知識データの作成、整理・蓄積 (MEMS の設計解析、ナノインプリント解析、回路解析に関わる)	12 大学、1 研究機関、1 団体、5 企業の MEMS 設計・研究・開発における最先端の知見やノウハウを一元化した知識データベースの構築は、過去に無いものであり、MEMS 設計における初心者や経験の乏しい研究者・技術者の支援のみならず、熟練者や研究者の基礎的データとして活用できる点で意義がある。また、この成果の利用によって、MemsONE の国内普及を促進するとともに、MEMS 産業の裾野の拡大に貢献できる点で意義がある。
知識データベースシステムの構築	開発された知識データベースシステムによる MEMS の基本知識の取得、蓄積が容易になることから、MEMS 設計の初心者に対する MEMS 設計知識支援になるだけではなく、産業界からの新規 MEMS 事業参加の知識的な障壁を低下させることが期待される。また、各 MEMS 研究開発企業、MEMS 研究教育機関等で用いられることにより、各々の研究開発機関特有のプロセス、装置条件、ノウハウ等の経験則に基づく知識情報を知識データベースシステムに蓄積することが可能であり、各研究開発機関内の情報の共有化、各研究開発機関の MEMS 研究開発の加速、拡大に資すると思われる。

5.2 材料・プロセス・データベース

研究項目	成果の意義
材料・プロセス・データベースの構築	ファンドリー事業者による薄膜材料や加工プロセスのデータベースが用意されることにより、解析精度が向上し、ファンドリーユーザによるデバイス設計の効率が大きく向上する。データベースの整備によりファンドリーの活用が促進され、自ら MEMS 作製プロセスを保有することが出来ないユーザでも MEMS への参入が容易になることは、MEMS 産業の発展のために大きな意義がある。
計測・補間手法の確立	開発手法の中で、弾性変形梁の疲労試験手法では、測定値のばらつきを従来法に比べ大幅に低減し、環境因子の影響を評価することに成功している。MEMS の信頼性評価手法は非常に重要であるにも関わらず開発が遅れていた分野であり、接合評価および微小接点の評価手法とあわせ開発された評価手法の意義は大きい。
ナノインプリント成形樹脂のデータベース構築	樹脂の材料特性データベースの整備により、一般化 Maxwell モデルを用いた変形解析が可能となった。これにより、従来困難であった温度の影響の比較を含めた変形解析が可能となり、時系列解析でも解析精度が大きく向上した。また、解析結果と成形実験結果の比較から、モデルおよび解析手法の妥当性が検証されている。これらの成果は、ナノインプリントプロセス開発の効率化という点で、大きな意義がある。

ナノインプリント用代表的樹脂のデータベース構築	<ul style="list-style-type: none"> ・熱ナノインプリントのプロセスシミュレーションに必要な材料の機械的・熱的物性データを採取した。 ・成形材料を準備する場合に使用される薄膜プロセスにより形成した材料に対し、評価法によるデータのばらつきも含めてデータベース化した。
-------------------------	--

[6] 成果の普及

研究項目	成果の意義
成果の普及	<p>成果普及の意義は、プロジェクト全成果の MemsONE β 版が平成 19 年 7 月末時点で 361 件国内市場に普及し現在も増加中である。これら MEMS 設計、開発の初心者から熟練者まで幅広い多くのユーザが MemsONE β 版を導入したことは国内 MEMS 産業の活性化するきっかけとして大きな意義がある。さらに、導入したユーザの約 3 割は他分野のユーザであったことは、他分野と MEMS 分野の融合が促進されることが大いに期待される点においても、普及の大きな意義がある。</p>

3. 各テーマの成果詳細

3.1 フレームワークソフトの開発

3.1.1 研究開発の概要

MEMS用設計・解析支援システムを統合管理し、機構解析ソフトウェア、プロセス解析ソフトウェア、材料・プロセスおよび知識データベースとの有機的連結と親和性を有し、初心者にもわかりやすいユーザインターフェースを実現する「フレームワークソフト」の研究開発を行った。研究開発の具体的な内容は、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データとのデータコンバータ、8) データ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ー機能、10) 「ナノインプリント加工・解析システムの開発」におけるフレームワークの改修、で構成される。

3.1.2 研究開発成果の詳細（機能別）

1) マスク作成

MEMS製造工程ではフォトリソグラフィー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した。

具体的には、ファイル、表示、編集などの基盤機能、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、マスク作成機能を使用してGDSII形式データから読み込んだマスクデータの例を図3-1-1で示す。また、開発されたマスクCADの詳細機能を表3-1-1で示す。

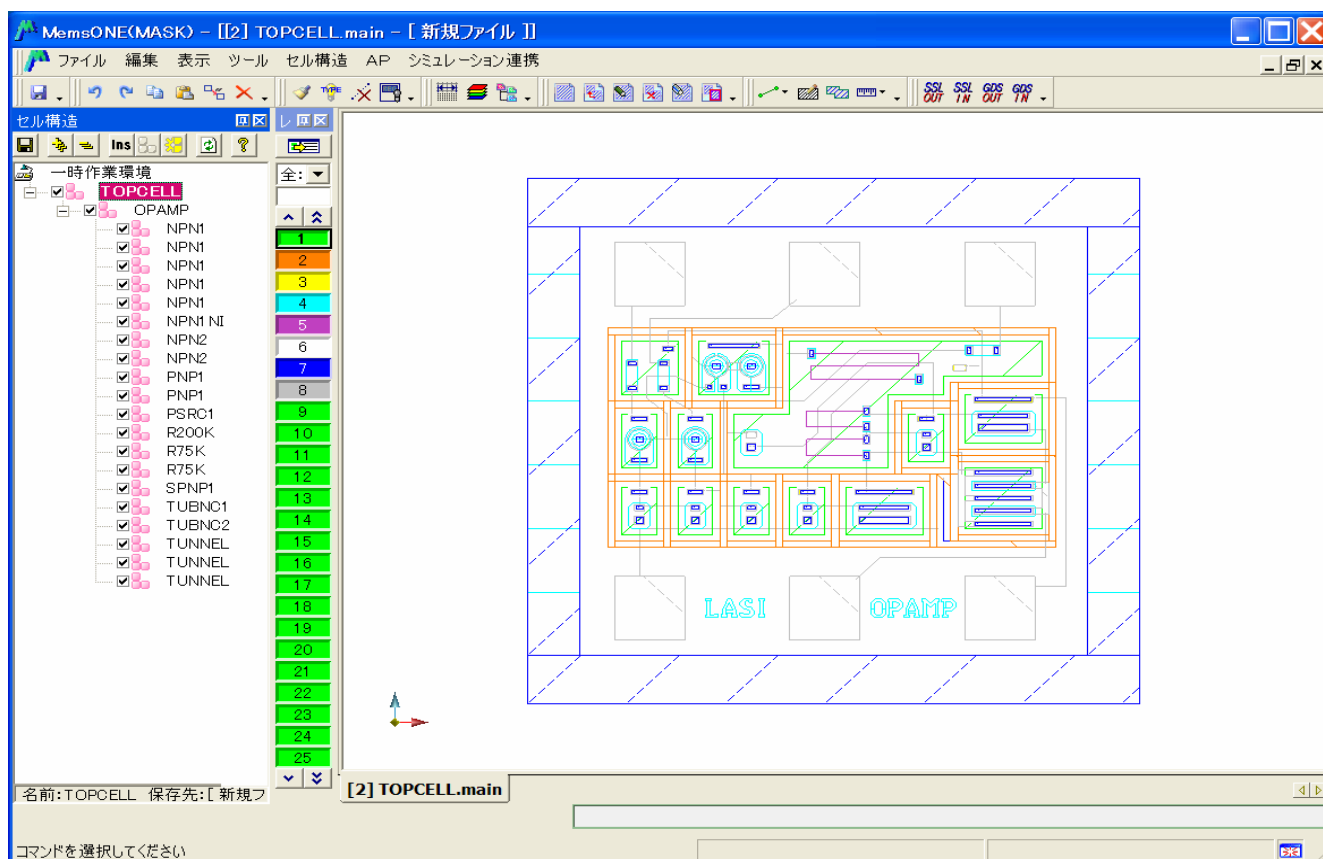


図 3-1-1 マスク作成 CAD 画面

表 3-1-1 マスク CAD 機能一覧表

MEMS メニューバー	MEMSツールバー			説明
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	検査コマンドのレジスター表示値の削除
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親セルにおける基準位置を変更する
			セル構造解除	セル間の親子関係を解除する
			セル削除	セルそのものを名前毎削除する
			創生セル切り替え	新規に定義される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線を交点で切り取り、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	線における他の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。 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
			距離	2点間距離を調べる
			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)作成
	SSL入力			SSL形式データの取り込み
	GDS出力			GDSII形式データの作成
	GDS入力			GDSII形式データを取り込む
	DXF出力			DXF形式データの作成
	DXF入力			DXF形式データを取り込む

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した。

具体的には、ファイル、表示、編集などの基盤機能、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次元櫛歯モデルの例を図 3-1-2 で示す。

また、開発されたデバイス CAD の詳細機能を表 3-1-2 で示す。

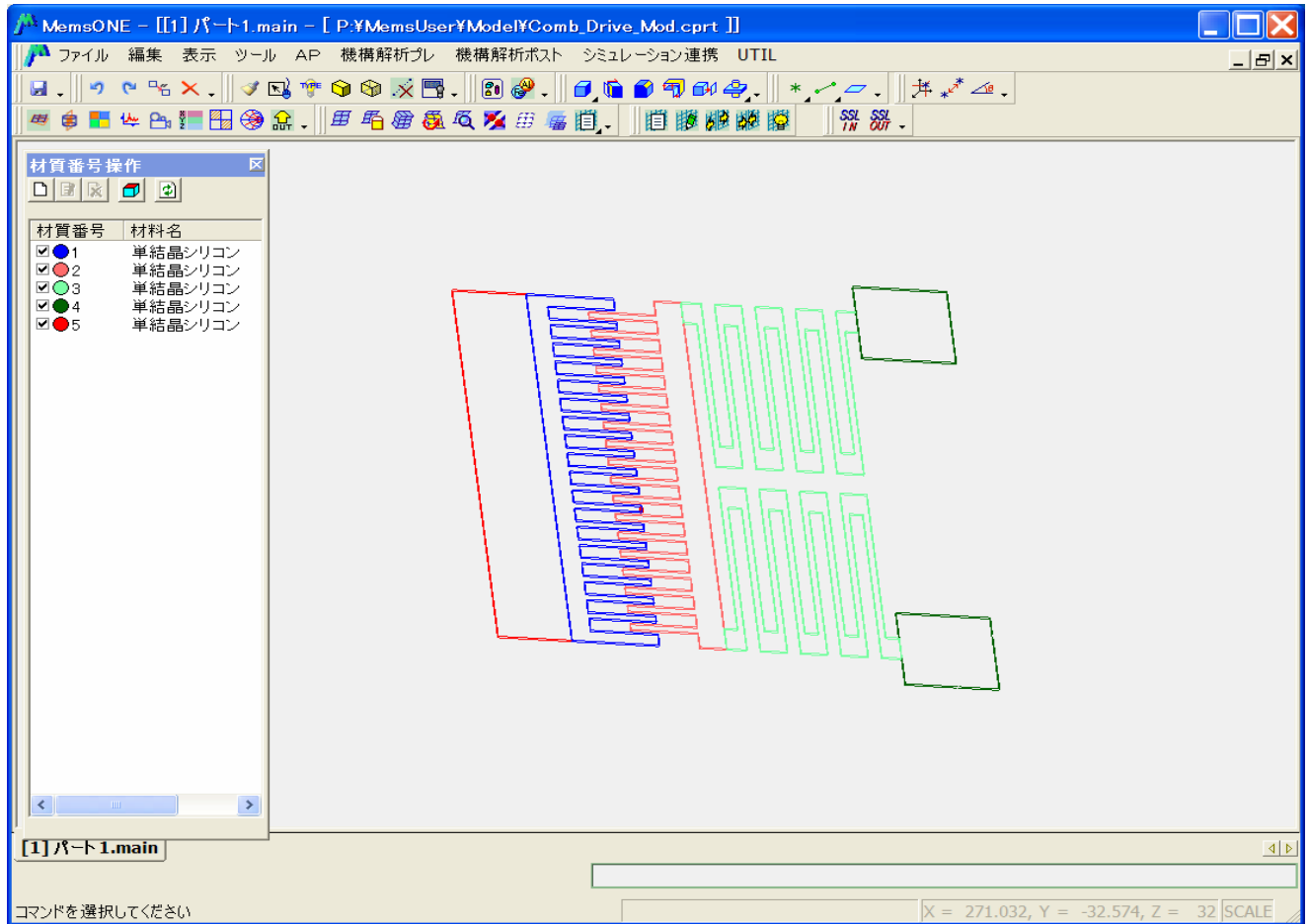


図 3-1-2 デバイス構造作成 CAD 画面

表 3-1-2 デバイス CAD 機能一覧表

MEMS メ ニューバー	MEMSツールバー			備考	
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		2次元要素、3次元シェル要素、3次元6面体要素、 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による立体作成
		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 法向けの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		電磁波解析データの特異図表示
		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が必須であり、この機能を開発した。

具体的には、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角形格子自動分割の骨子機能、デバイス構造作成との主要連携機能の開発を終了した。

6面体格子に関しては、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成した。

図 3-1-3 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 3-1-4 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。

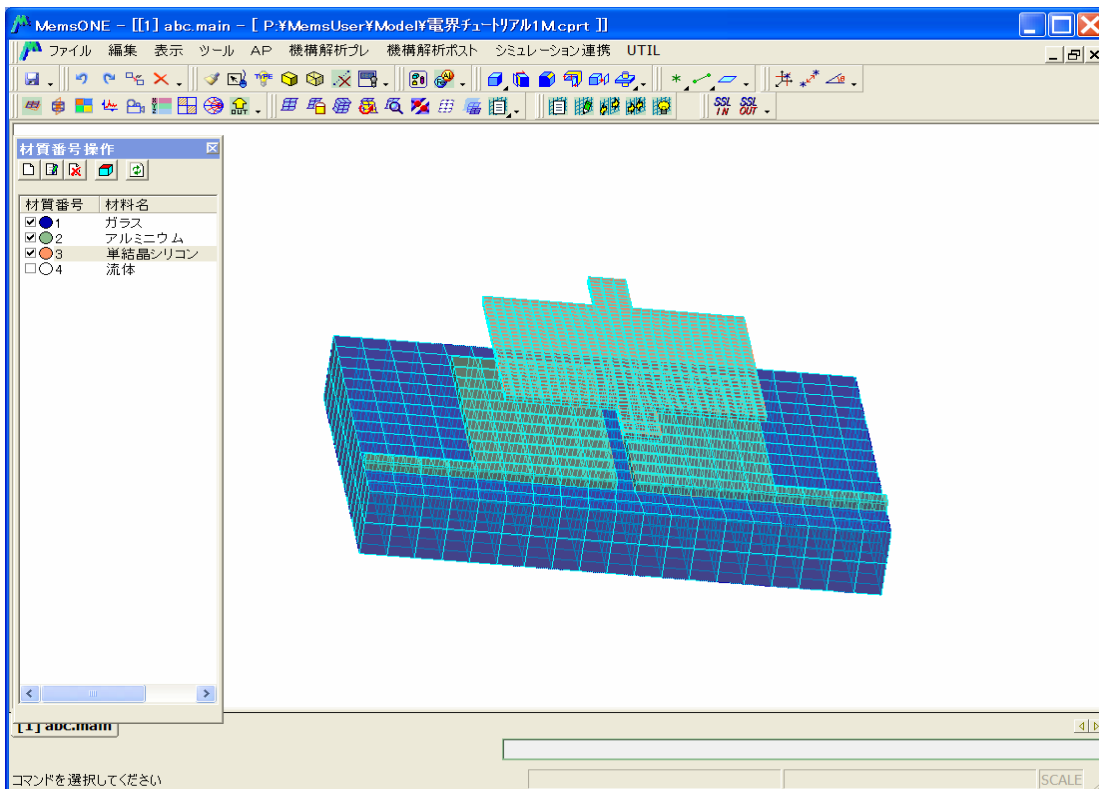


図 3-1-3 ミラー部品の電磁界解析用モデルの6面体格子への自動分割結果

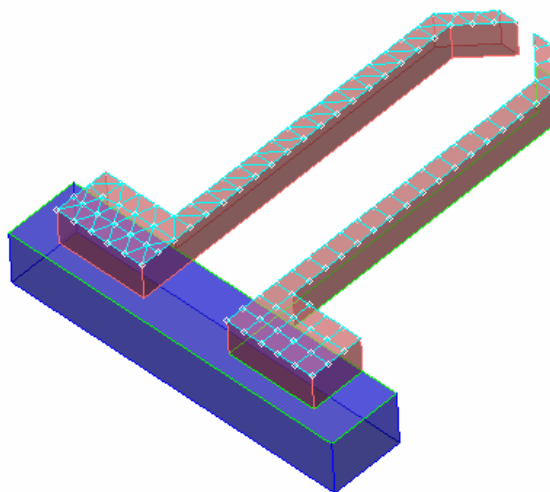


図 3-1-4 ツインプロープの3角形格子および4角形格子への自動分割結果

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した。

具体的には、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 3-1-5 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 3-1-6 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 3-1-7 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 3-1-8 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。

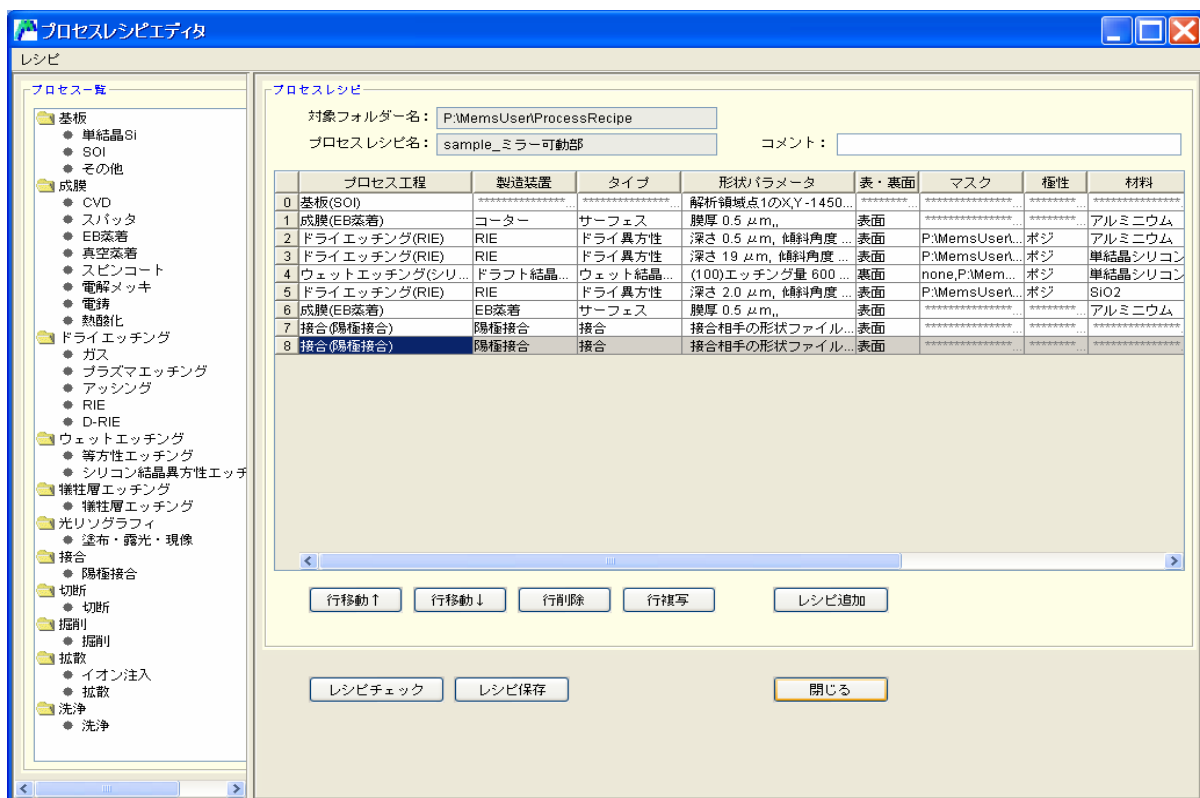


図 3-1-5 プロセスレシピ定義・編集画面

ロプロセス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き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 3-1-6 プロセスレシピチェック結果の例

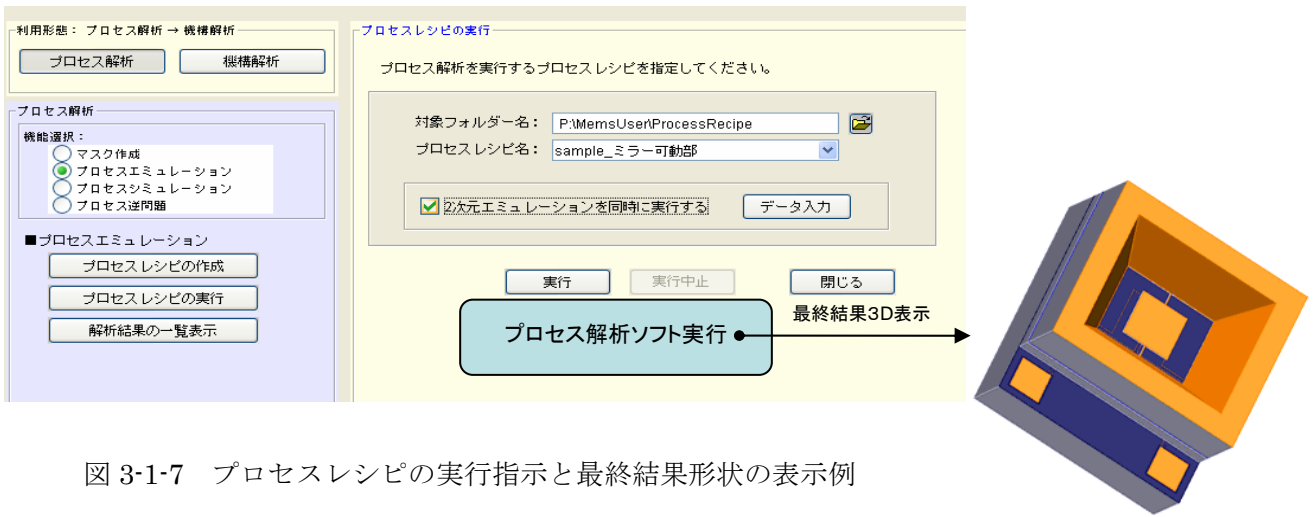


図 3-1-7 プロセスレシピの実行指示と最終結果形状の表示例

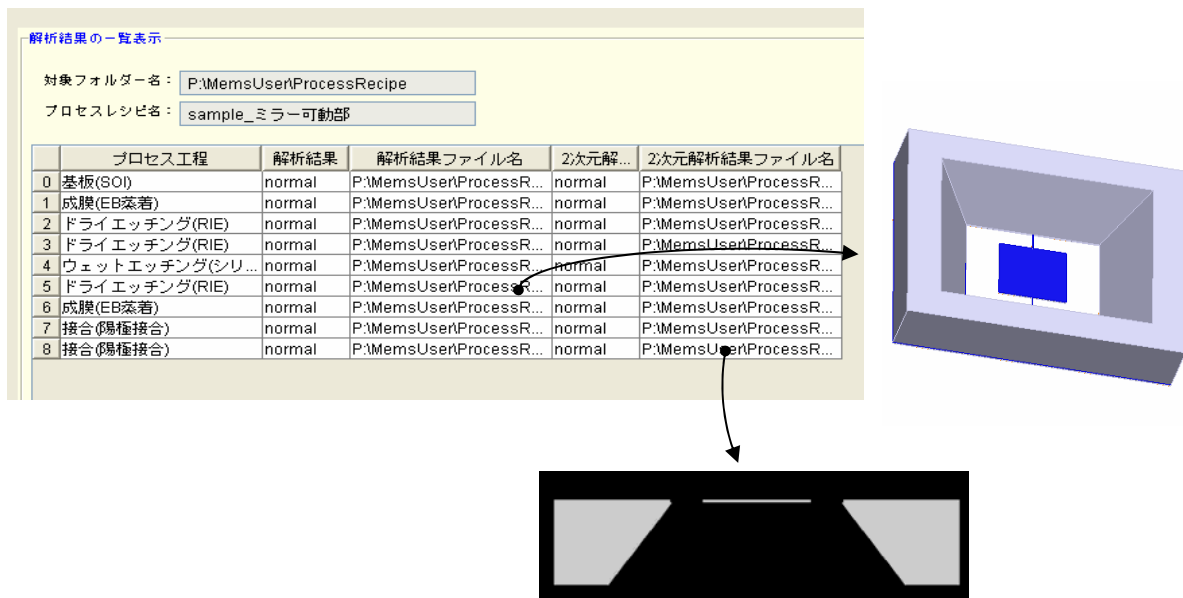


図 3-1-8 解析結果データの一覧表示とプロセス途中結果および2Dエミュレータ結果の例

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した。

具体的には、機構解析の解析機能種類の選択、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、機構解析種類別の解析条件設定機能、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、解析条件データの再利用機能、の開発を終了した。

図 3-1-9 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 3-1-10 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 3-1-11 は選択された解析種類で使用される材料物性パラメータの設定画面の例を示す。

図 3-1-12 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 3-1-13 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 3-1-14 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 3-1-15 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。

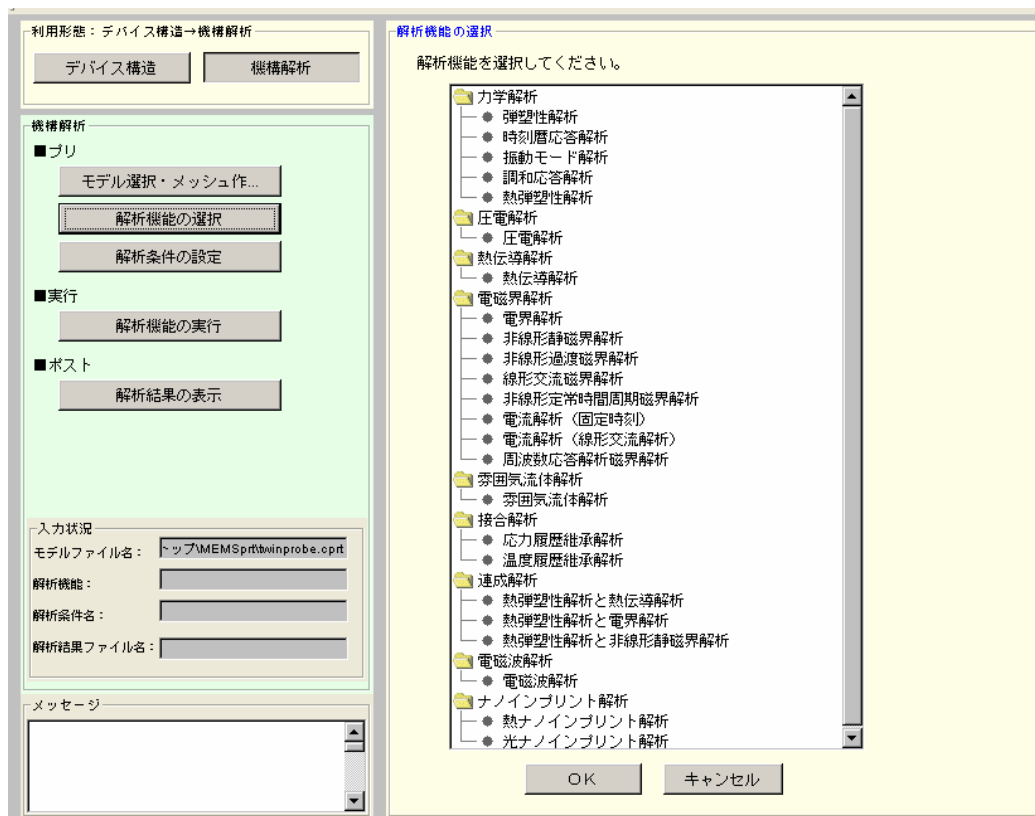


図 3-1-9 機構解析の操作の流れと解析種類選択画面

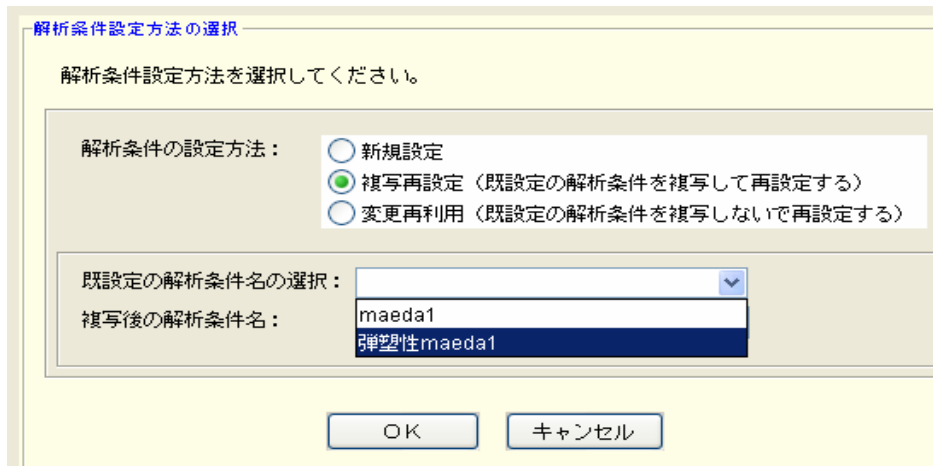


図 3-1-10 解析条件設定方法の選択画面

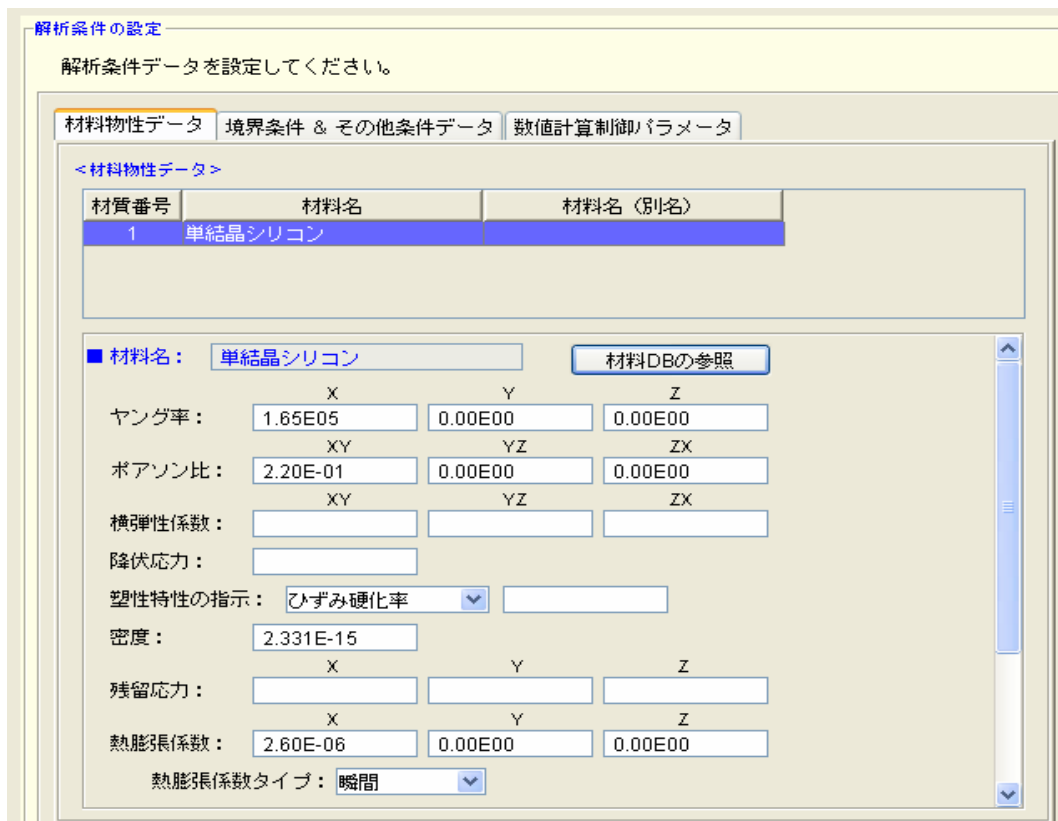


図 3-1-11 解析条件の材料物性データの設定画面

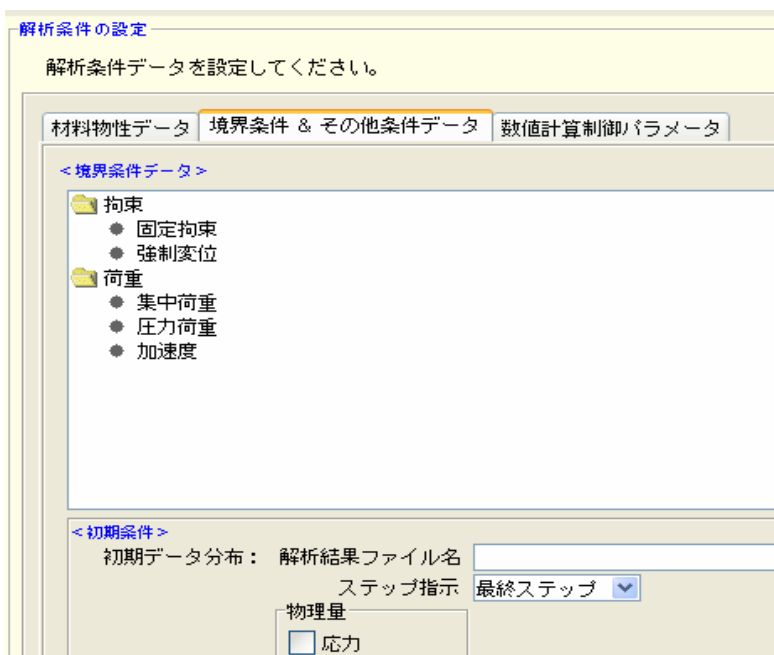


図 3-1-12 解析条件の境界条件設定画面

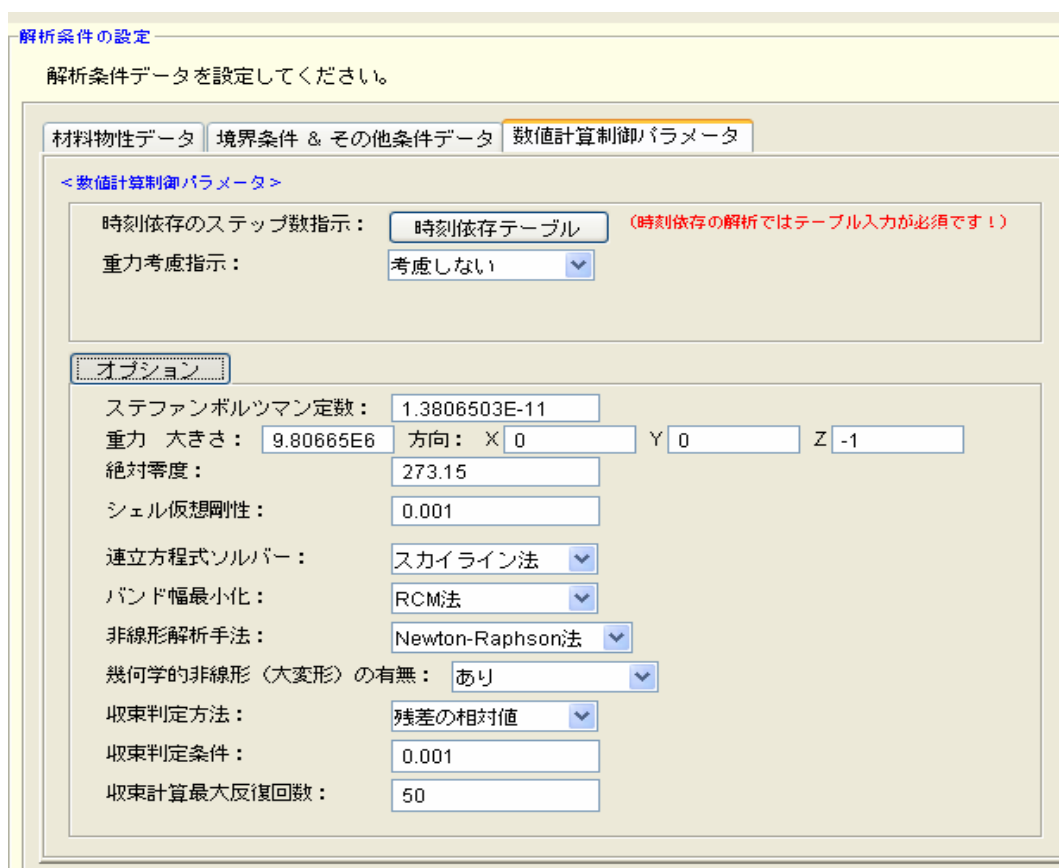


図 3-1-13 解析条件の計算制御パラメータの設定画面

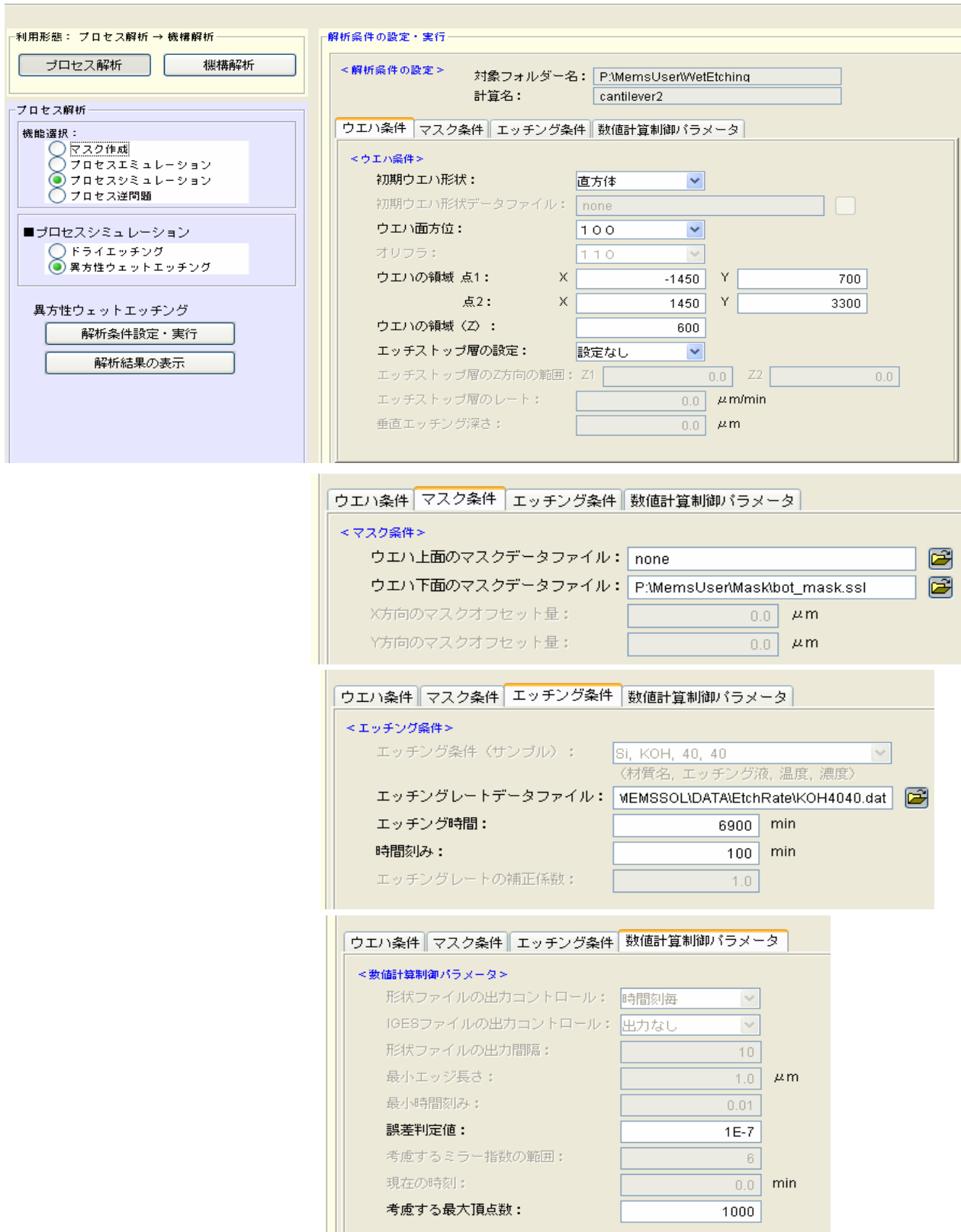


図 3-1-14 ウェットエッチングシミュレータの解析条件設定画面

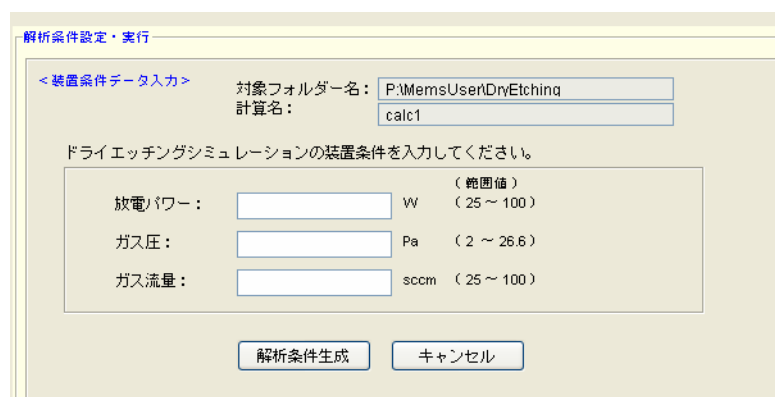
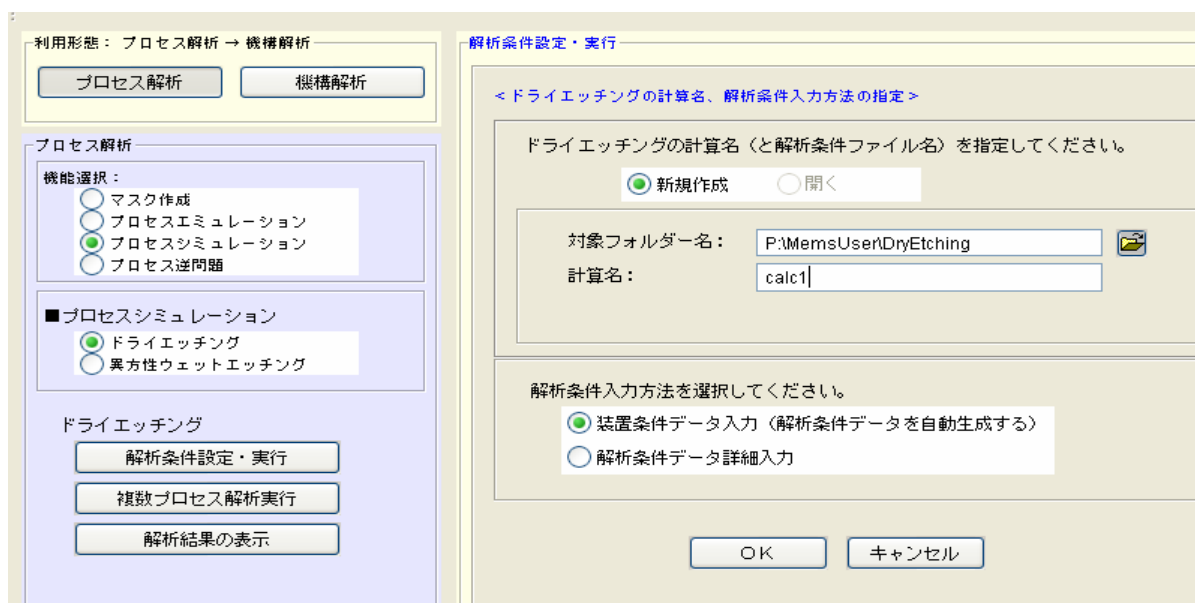


図 3-1-15 ドライエッチングシミュレータの解析条件設定画面

6) 解析結果表示

機構解析ソフトの出力データを等高線、変位図、ベクトル図、グラフ等により表示する機能、およびプロセス解析結果の形状データを表示する機能を開発した。

具体的には、機構解析結果に関しては、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、等高線の断面図、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、プロセス解析（プロセスエミュレーション、ウェットエッチングシミュレーション、ドライエッチングシミュレーション）に関しては各解析ソフト実行結果の形状の表示機能の開発を終了した。

図 3-1-16 は物理量と評価図選択 GUI 画面を示す。

図 3-1-17 は 3 次元応力解析結果の等高線図例を示す。

図 3-1-18 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 3-1-19 は電解解析結果の等高線の断面評価図の例を示す。

図 3-1-20 はウェットエッチングシミュレーションの解析結果の表示例を示す。

図 3-1-21 はドライエッチングシミュレーションの解析結果の表示例を示す。

また、プロセスエミュレーションの解析結果表示例は、図 3-1-7 と図 3-1-8 を参照願う。

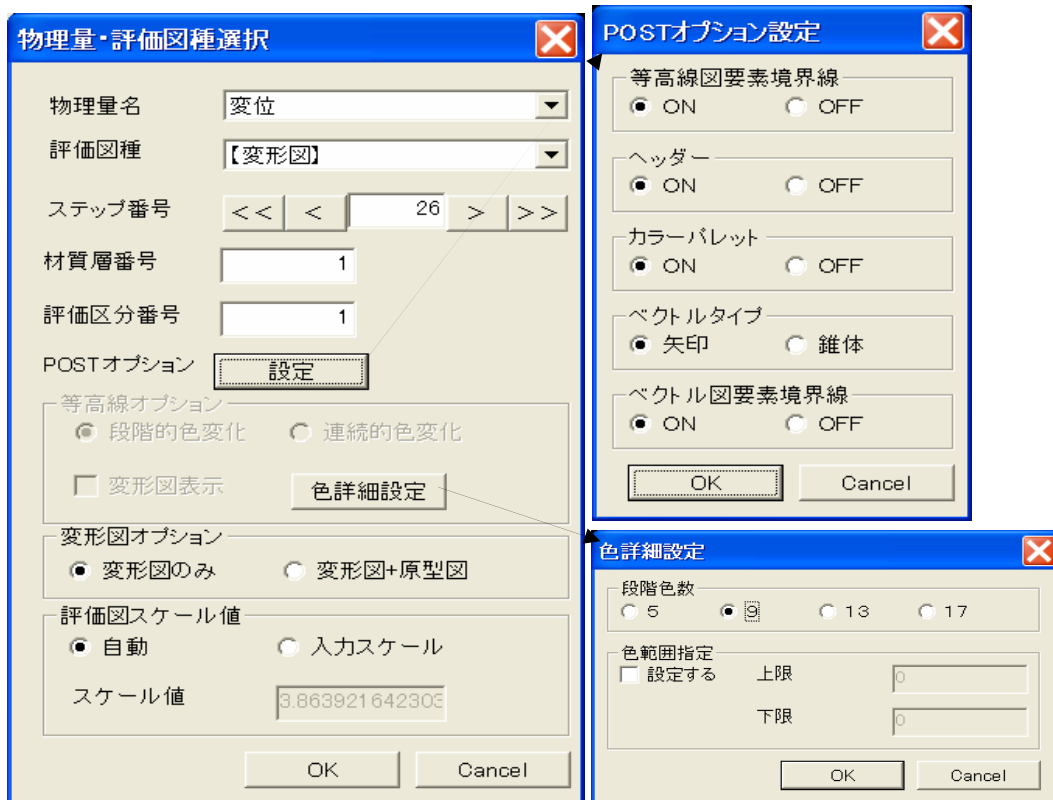


図 3-1-16 物理量と評価図選択 GUI 画面

Name 変位量
 Min 0
 Max 0.44043

0.44043
0.70117
0.34119
0.43268
0.46237
0.19411
0.16485
0.89558
0.26112
0.59786
0.82719
0.29859
0.641384
0

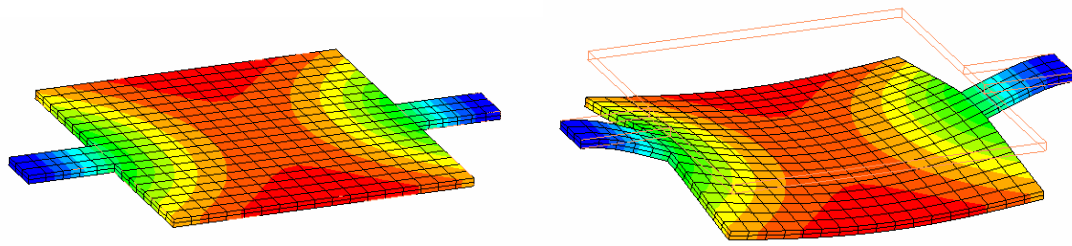


図 3-1-17 応力解析結果の等高線評価図（右図は変形図上の等高線表示）

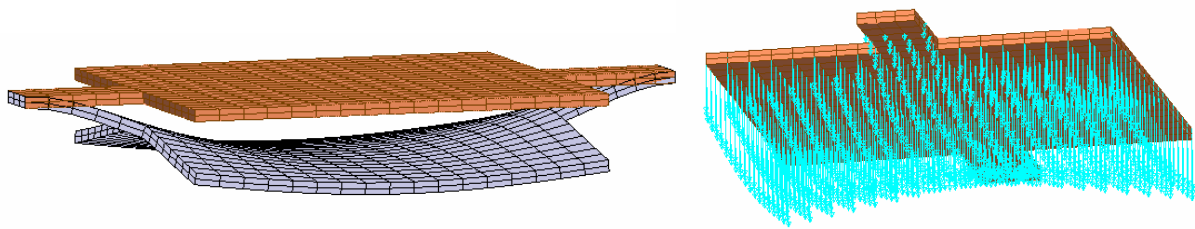


図 3-1-18 応力解析結果の変形図とベクトル図

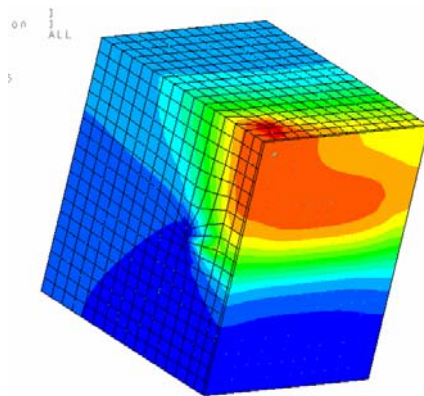


図 3-1-19 電解解析結果の等高線断面評価図

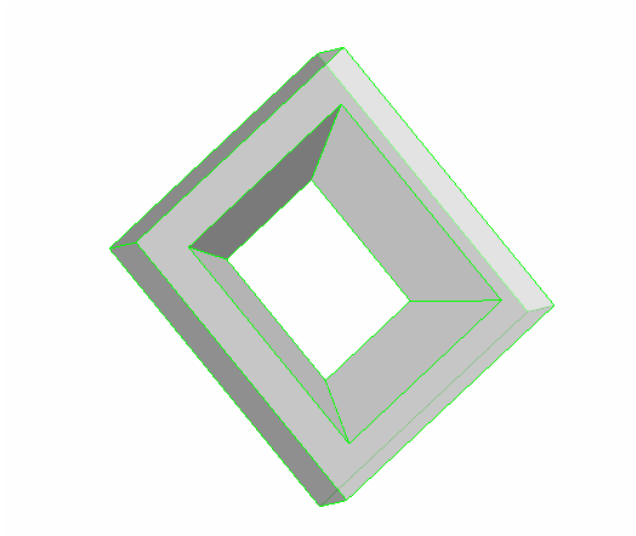


図 3-1-20 ウェットエッチングシミュレーションの解析結果表示例

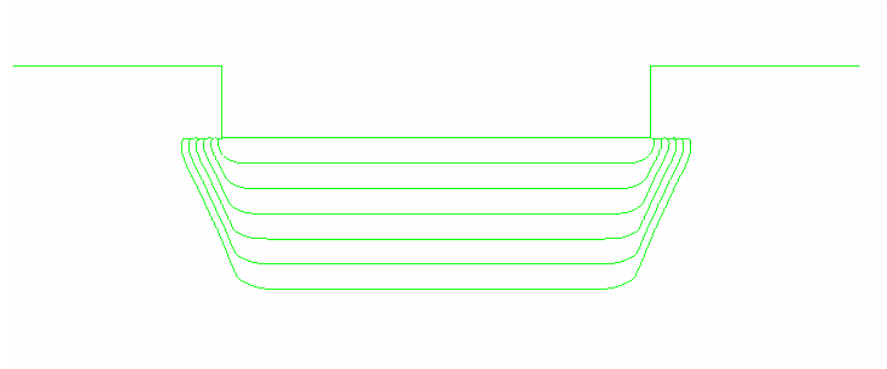


図 3-1-21 ドライエッチングシミュレーションの解析結果表示例

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した。

具体的には、CAD形状データに関しては、IGES、GDSII、DXF、解析格子データに関しては、ABAQUS、MARC、NASTRANとのそれぞれ入出力機能の開発を終了した。

図 3-1-22 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 3-1-23 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

図 3-1-24 は ABAQUS 形式データの MemsONE への入力結果

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      000000100D0000217
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+1,0,0,0,0,0,0,1,219;                                             0000217P0000109
406,1,1H1,0,0;                                                              0000219P0000110
S0000001G0000004D0000220P0000110                                          T0000001
    
```

図 3-1-22 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 3-1-23 ABAQUS データの出力例

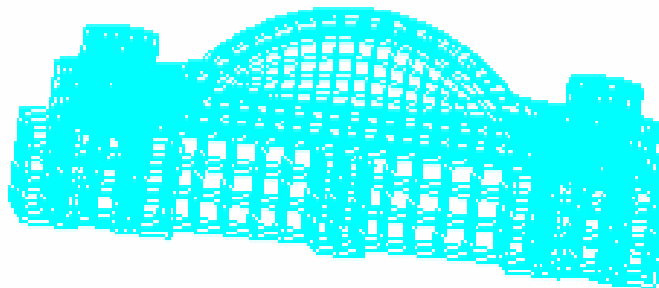


図 3-1-24 ABAQUS データの入力例

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用のライブラリの開発を終了した。

図 3-1-25 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 3-1-26 は材料・プロセスデータベースの物性値を参照した画面例を示す。

いずれも、内部的に、データベースライブラリーを使用している。

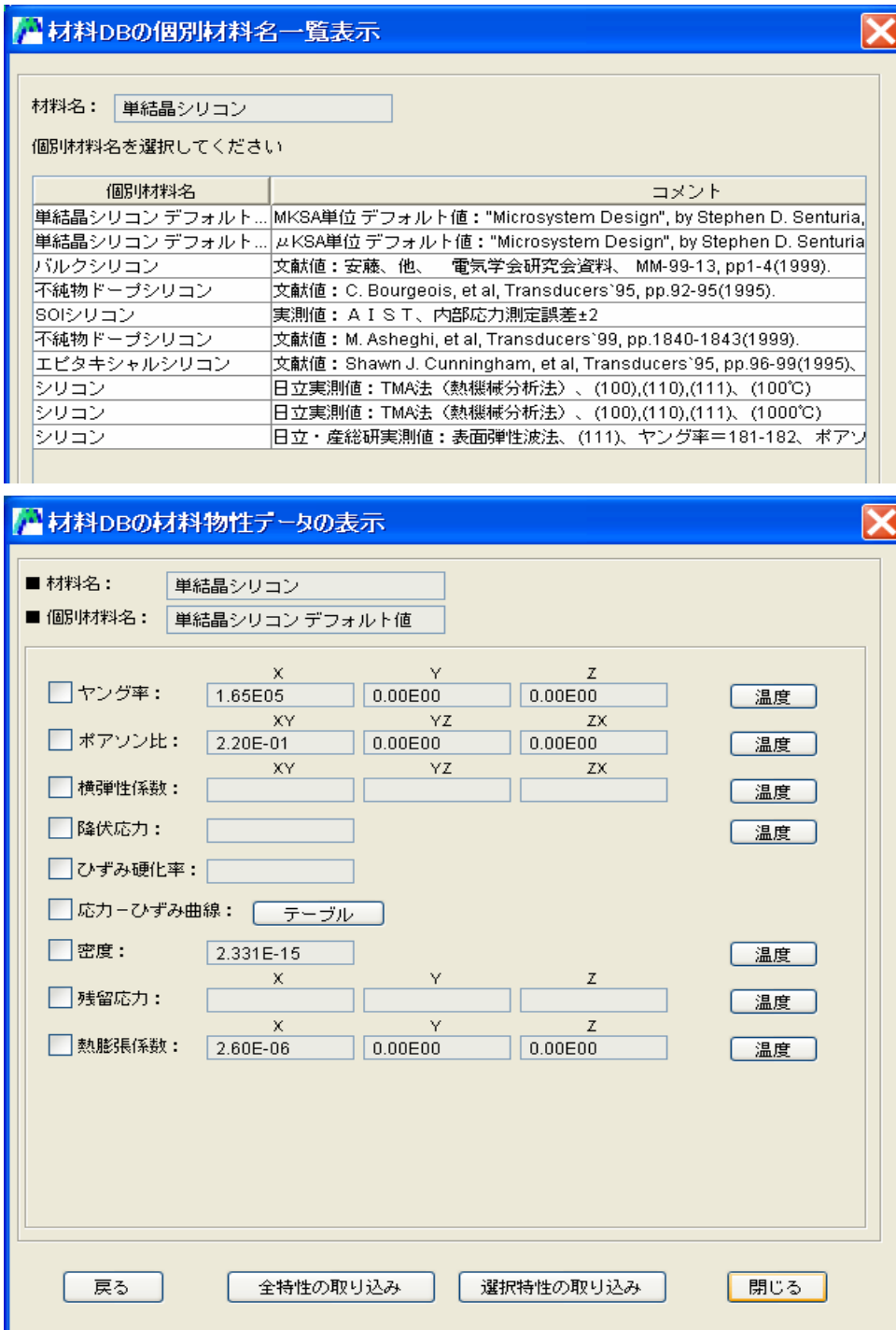


図 3-1-25 材料名毎の物性値の参照 GUI 例



図 3-1-26 材料・プロセスデータの検索画面例

9) プラグイン機能とスーパーバイザー機能

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。

公開インターフェースファイルとして、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、「MEMS-ONE 標準 解析結果ファイル解説書」および「MEMS-ONE 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 3-1-27 は、MemsONE 全体構成図とプラグイン機能およびスーパーバイザー機能との関連を示す。

図 3-1-28 は SSL 形式の仕様書の一部を示す。

図 3-1-29 はスーパーバイザーの制御対象となる MEMS-ONE の全体画面遷移図を示す。

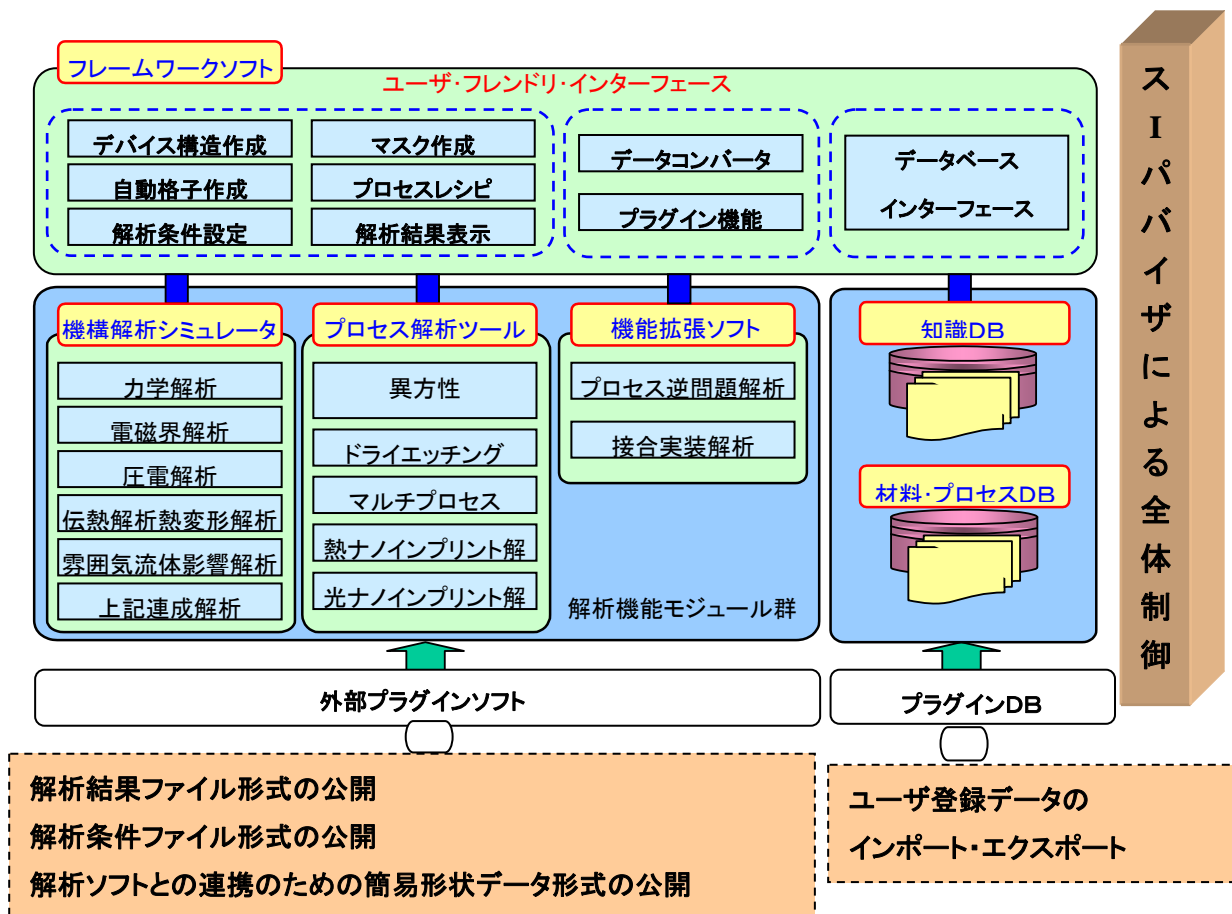


図 3-1-27 MemsONE 全体構成図とプラグイン機能およびスーパーバイザー機能

1.2 領域

//領域データの表現形式。AREA行が先頭行。/

各領域は、XY平面上の開POLYLINEで表現する。また、内周領域の存在を許す。

/領域数

AREA, nf

...各面は、境界線の点列（終点=始点と一致）で表現される

/領域1の境界線数。外周+内周の合計数。第1境界線は外周とする

nel

/領域1の第1境界線の頂点数（終点も含む）。頂点の並びはZ+方向視点で線の左側が領域内側

nv1

/領域1の第1境界線の頂点座標値（終点も含む）

x 1 1、 y 1 1、 z 1 1
x 1 2、 y 1 2、 z 1 2
...

} nv1行

/領域1の第2境界線の頂点数（終点も含む）

nv2

/領域1の第2境界線の頂点座標値（終点も含む）

x 2 1、 y 2 1、 z 2 1
x 2 2、 y 2 2、 z 2 2
...

} nv2行

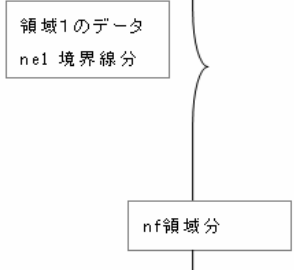


図 3-1-28 SSLデータのインターフェース仕様の一部

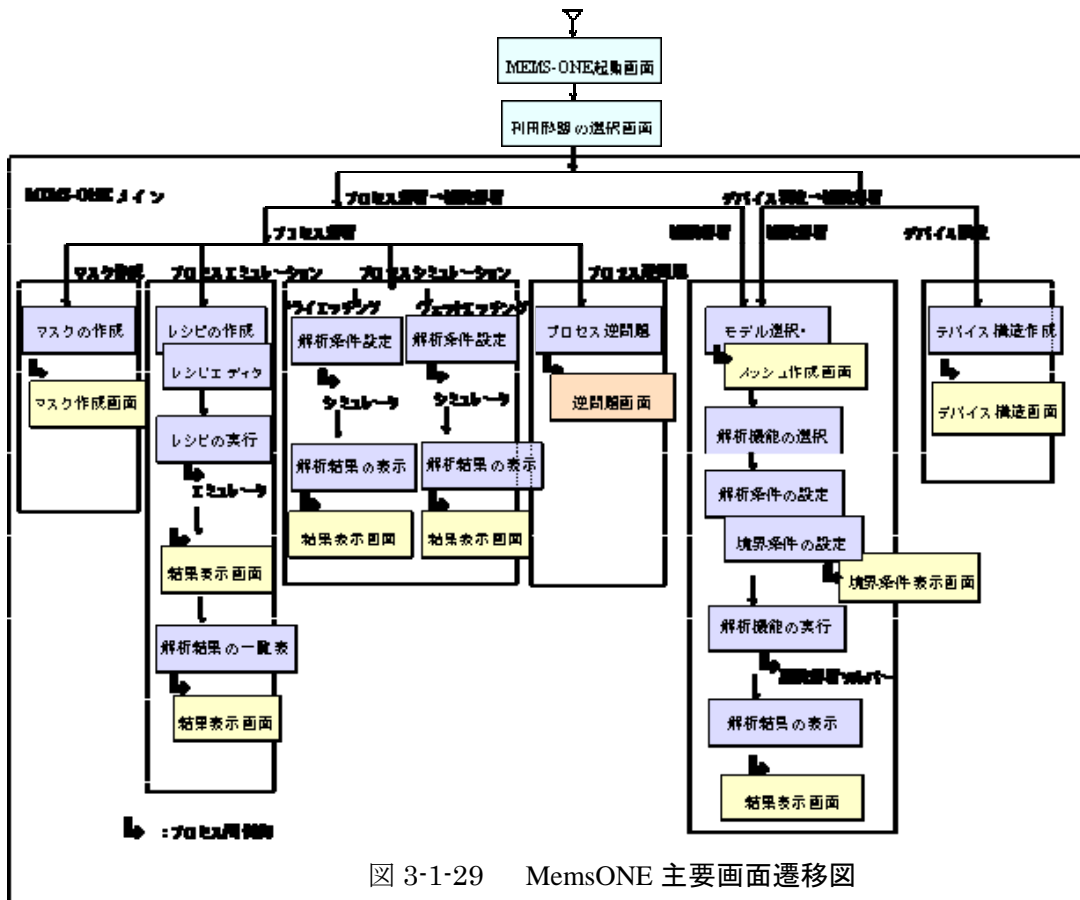


図 3-1-29 MemsONE 主要画面遷移図

10) 「熱・光ナノインプリント加工解析システムの開発」におけるフレームワークソフトの改修

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完了した。具体的には、下記の内容から成る。

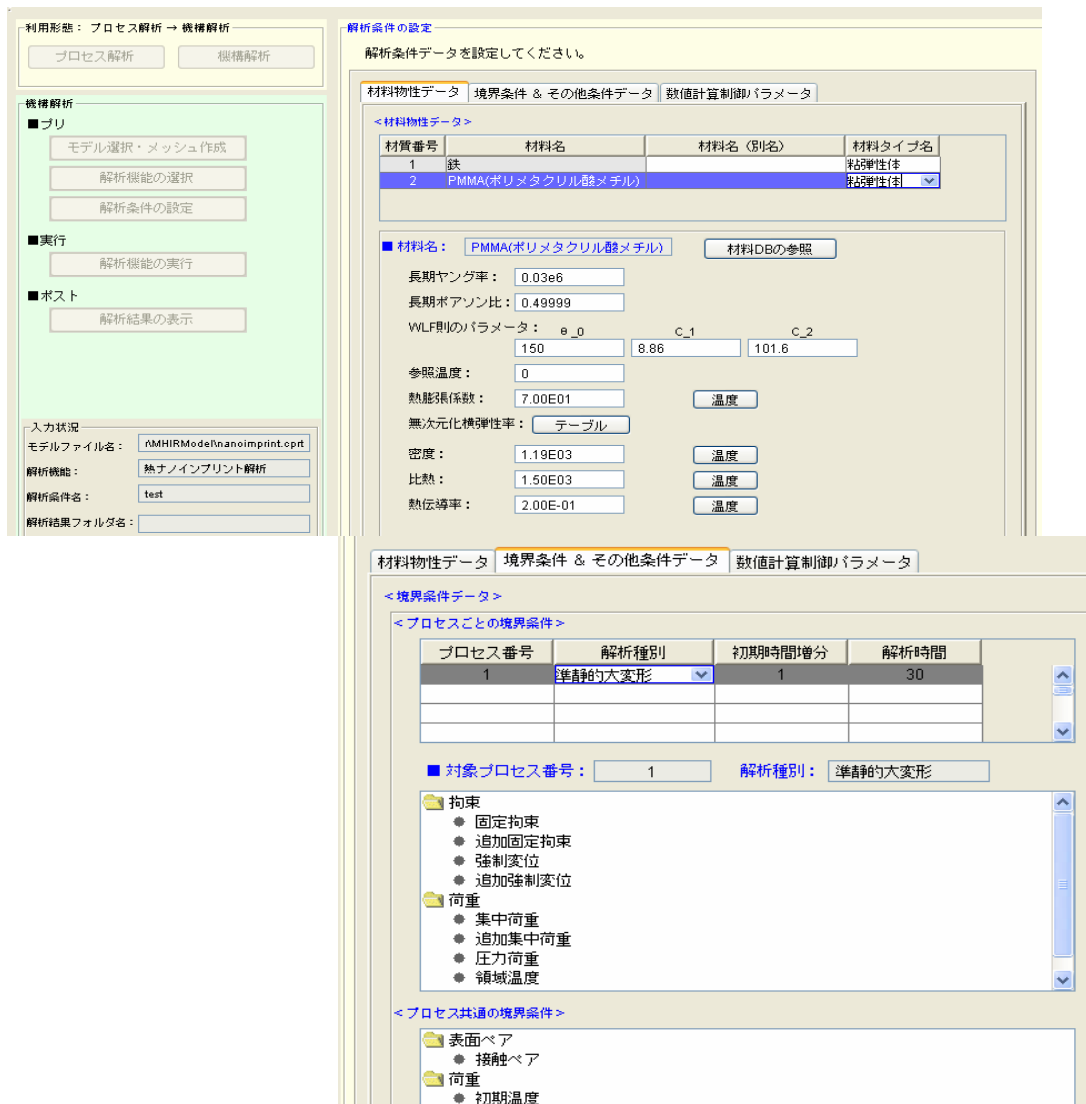
①プロセス解析シミュレータの解析条件設定

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 の組み込みを行った。

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 機能に関わる開発を終了した。

図 3-1-30 は熱ナノインプリントの解析条件設定 GUI の例を示す。

図 3-1-31 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。



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>

■ 対象プロセス番号: 1 (プロセス番号の設定は「境界条件 & その他条件データ」タブで行い、ここでは対象プロセス番号を選択してください。)

(必須入力パラメータはありません)

オプション

(力学、熱伝達プロセス共通) (初期値)

最小時間増分: [] 初期時間増分×E-09

最大時間増分: [] 初期時間増分

収束判定方法: [] 0 (0: 残差の相対値 1: 残差の絶対値)

許容相対荷重(熱流量)誤差比: [] E-05

許容絶対荷重(熱流量)誤差比: [] 0

最大イテレーション回数: [] 18

残差が増大するイテレーションの限度回数: [] 4

行列解法: [] 0 (0: ヤコビ前処理付きMINRES法 1: MINRES法
2: スーパーLU法 3: CG法 4: ヤコビ前処理付きCG法
5: 対角不完全LU分解前処理付きCG法)

行列解法とインクリメントの許容誤差比: [] 0.1

post出力頻度: [] 1

図 3-1-30 熱ナノインプリントの解析条件設定 GUI

利用形態: プロセス解析 → 機構解析

プロセス解析 機構解析

機構解析

■ プリ

モデル選択・メッシュ作成

解析機能の選択

解析条件の設定

■ 実行

解析機能の実行

■ ポスト

解析結果の表示

入力状況

モデルファイル名: IRModelLandS400_H200.cprt

解析機能: 光ナノインプリント解析

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

<材料物性データ>

材質番号	材料名	材料名(別名)
1	単結晶シリコン	
2	PMMA(ポリメタクリル酸メチ...	
3	SiO2	
0	流体	

■ 材料名: 単結晶シリコン 材料DBの参照

材料物性パラメータタイプ

比誘電率 + 比透磁率 + 導電率

比誘電率 + 比透磁率 + 誘電正接

複素比誘電率(実部、虚部) + 複素比透磁率(実部、虚部)

比誘電率: 39.790864

比透磁率: 1.0

導電率: 0.0

周波数: 10.0e+9

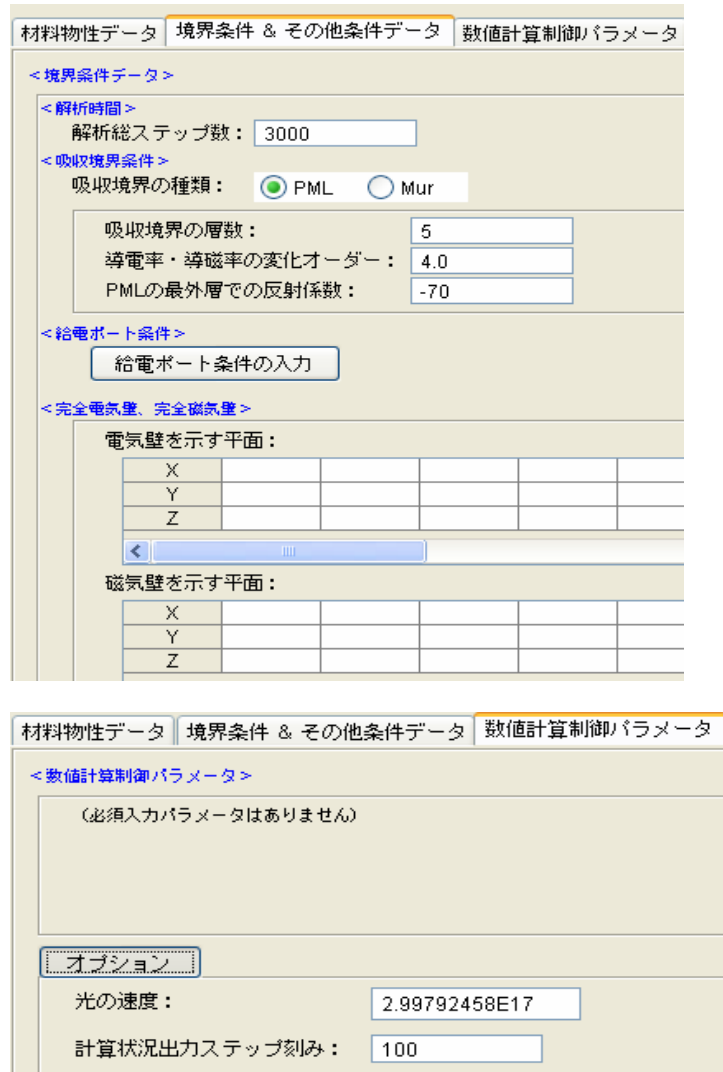


図 3-1-31 光ナノインプリントおよび電磁波解析ソフトの解析条件設定 GUI 例

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データベース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 3-1-32 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。

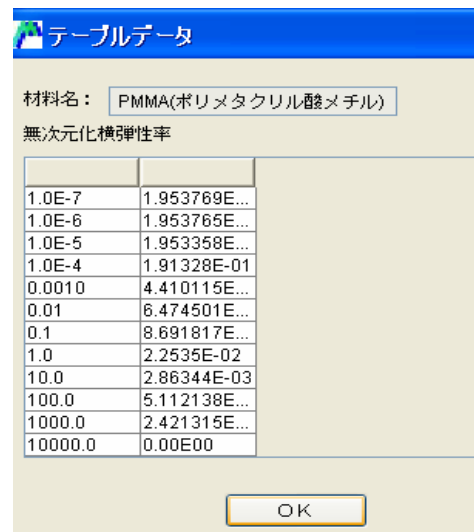
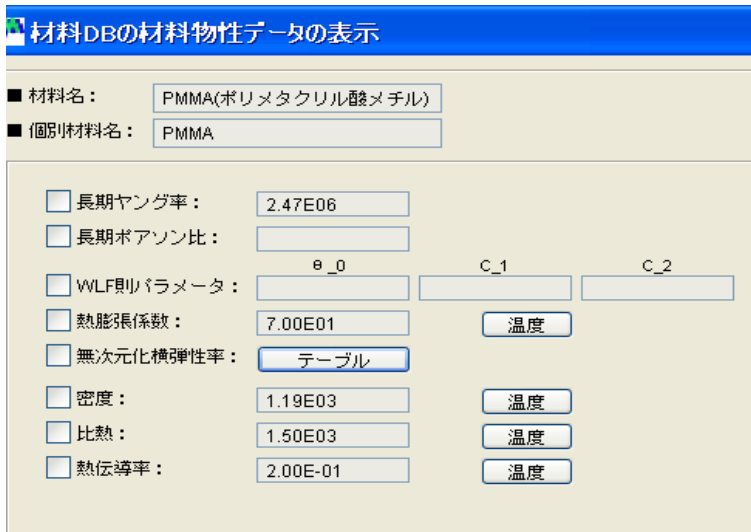


図 3-1-32 熱ナノインプリントの材料物性値を参照する GUI 画面

③光ナノインプリント解析および電磁波解析プログラムのプレ機能

光ナノインプリント解析用及び電磁波解析用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 FDTD 法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完了した

図 3-1-33 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している。

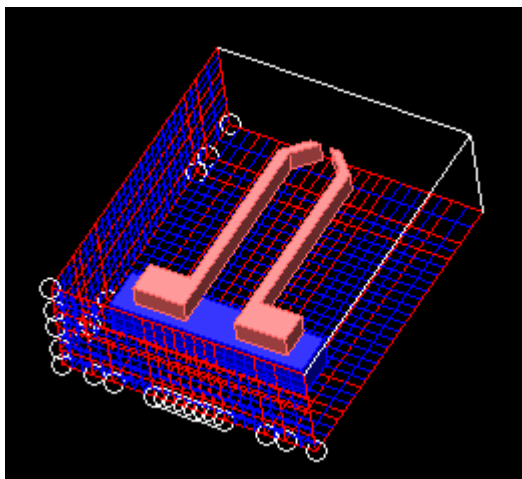


図 3-1-33 FDTD 法構造格子の操作画面

④光ナノインプリント解析および電磁波解析プログラムのポスト機能

FDTD 法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、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 3-1-34 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。

図 3-1-35 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。

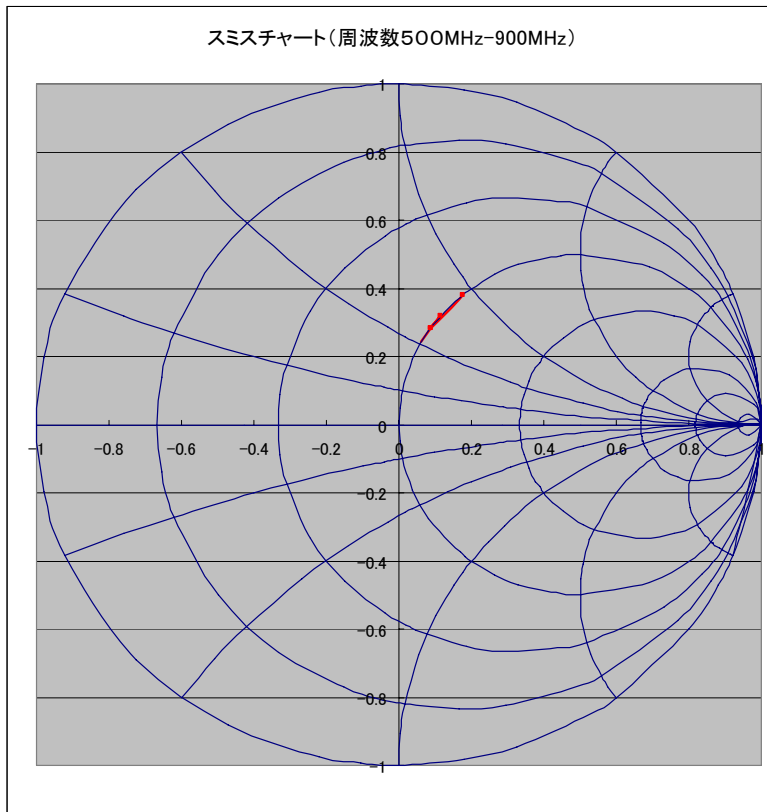


図 3-1-34 電磁波解析ソフトのスミスチャートの出力例

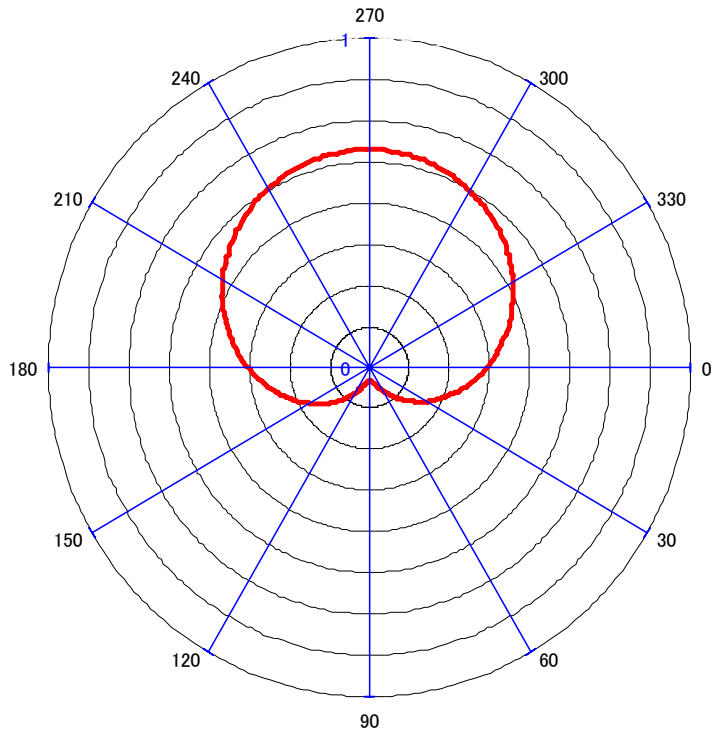


図 3-1-35 電磁波解析ソフトの放射パターン図出力例

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にかかわる MEMS-ONE 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、MEMS-ONE 全体システムへの改修を完了した。

3.1.3 研究開発成果の意義

マスク作成、デバイス構造作成、自動格子作成、プロセスレシピ、解析条件設定、解析結果表示、解析ソフト・CADデータとのデータコンバータ、データデスインターフェース、プラグイン機能とスーパーバイザー機能、「ナノインプリント加工・解析システムの開発」におけるフレームワークの改修、から成るフレームワーク機能の開発により、MEMS デバイスの設計・解析の一連の作業を、初心者にもわかりやすい GUI 操作により、シームレスに実行することが可能となった。

下図は、MEM デバイスの設計・解析作業において利用するフレームワーク機能の主な流れを示す。

