

「MEMSプロジェクト」
事後評価報告書

平成19年3月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

平成19年3月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
理事長 牧野 力 殿

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会 委員長 曾我 直弘

NEDO技術委員・技術委員会等規程第31条の規定に基づき、別添のとおり
評価結果について報告します。

目 次

はじめに	1
分科会委員名簿	2
審議経過	3
評価概要	4
研究評価委員会におけるコメント	6
研究評価委員会委員名簿	7
第1章 評 価	
1. プロジェクト全体に関する評価結果	1-1
1. 1 総論	
1. 2 各論	
2. 個別テーマに関する評価結果	1-13
2. 1 RFスイッチ製造技術の開発	
2. 2 光可動ミラー製造技術の開発	
2. 3 超小型MEMSセンサ製造技術の開発	
3. 評点結果	1-19
第2章 評価対象プロジェクト	
1. 事業原簿	2-1
2. 分科会における説明資料	2-2
参考資料 1 評価の実施方法	参考資料 1-1
参考資料 2 評価に係る実施者意見	参考資料 2-1

はじめに

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構においては、被評価プロジェクト毎に当該技術の外部の専門家、有識者等によって構成される研究評価分科会を研究評価委員会によって設置し、同分科会にて被評価対象プロジェクトの研究評価を行い、評価報告書案を策定の上、研究評価委員会において確定している。

本書は、「MEMSプロジェクト」の事後評価報告書であり、第6回研究評価委員会において設置された「MEMSプロジェクト」（事後評価）研究評価分科会において評価報告書案を策定し、第13回研究評価委員会（平成19年3月28日）に諮り、確定されたものである。

平成19年3月
独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
研究評価委員会

「MEMSプロジェクト」

事後評価分科会委員名簿

(平成19年1月現在)

	氏名	所属
分科会 会長	服部 正	兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 光応用・先端 技術大講座 教授
分科会 会長代理	佐藤 一雄	国立大学法人名古屋大学 大学院工学研究科 マイク ロナノシステム工学専攻 教授
分科会 委員	石田 誠	国立大学法人豊橋技術科学大学 工学部 電気・電子 工学系 教授
	出川 通	株式会社テクノ・インテグレーション 代表取締役社長
	羽根 一博	国立大学法人東北大学 大学院工学研究科 ナノメカ ニクス専攻 教授
	三宅 常之	株式会社日経BP社 日経マイクロデバイス編集 副編集長

敬称略、五十音順

審議経過

- 第1回 分科会（平成19年1月8日）
 1. 開会、分科会の設置、資料の確認
 2. 分科会の公開について
 3. 評価の手順と評価報告書の構成について
 4. プロジェクトの概要説明と質疑応答
 5. プロジェクトの詳細説明と質疑応答
 6. 総合評価・まとめ（講評）
 7. 今後の予定
 8. 閉会

※議題5. は非公開セッション

- 第13回 研究評価委員会（平成19年3月28日）

評価概要

1. 総 論

1) 総合評価

本事業は、我が国のMEMS分野の発展に資するものであり、新製造技術プログラムの目標達成への寄与は大きい。

実施体制は概ね妥当であるが、計画の途中で追加された委託事業は、助成事業における研究開発目標との関連性が薄く助成事業の有効性の検証としての妥当性にやや疑問が残る。また、コスト低減化等、従来課題をブレークスルーする挑戦的な目標が見られないのは残念である。

成果は、総合的に及第レベルに到達しており評価できる。既存技術を上手に活用して、短期間にMEMSファウンドリーに係わる要素技術の開発がなされた。

事業化に対しては、コスト低減化への更なる対処策が必要であろう。また、本事業で新たに受託可能となったプロセススペックを定量的にファウンドリーユーザーへ提供することや、本事業の実施者を含めた関係者の連携によるファウンドリー運営は、ユーザーニーズに資するため、これらへの対処も望まれる。

2) 今後に対する提言

MEMSは多数の技術の上に成立するが要素技術の標準化が困難でもあるため、各企業はファウンドリーとして、開発した技術内容等に係わる情報発信に努めると共に、積極的な相互の連携も検討されたい。

また、ファウンドリーとしての受託可能範囲や品質等、本事業の成果による影響をユーザーから調査等して、成果を有効に活用するMEMS商品化事業の実施が期待される。

尚、本事業によってファウンドリーとしての前進は見られるが、実装技術や低コスト化技術等、インフラ整備を目的とする更なるフォローは必要である。

2. 各 論

1) 事業の位置付け・必要性について

本事業は、ファウンドリーの強化によって我が国のMEMS産業の発展を目指すものであり、新製造技術プログラムの目標達成への寄与は大きい。

また、企業の自主努力による解決が期待される課題もあったが、ファウンドリー事業は参入初期の短期間において多額の設備投資を必要とするため民間活動のみでは改善し難いものであり、NEDOの事業としての妥当性は高い。

そして、MEMSの国際的競争における我が国の優位性確保を築くために今後の製造インフラとなり得るファウンドリー技術の獲得を目指すことは社会の要求に合致しており、事業目的も妥当である。

2) 研究開発マネジメントについて

実施者である企業や大学の各技術分野における研究開発実績や実用化へのリソースは十分なものであり、体制は概ね妥当である。

助成事業に係わる開発計画は、各技術分野の事情に起因した差異が見られるが、技術や市場の動向を概ね正しく把握しており一応の評価はできる。

しかし、当該事業の完了時期には陳腐化している開発ターゲットも見られ、情勢への変化に対してはより機敏な対応が必要であった部分がある。

また、計画の途中で追加された委託事業に係わるテーマや開発期間等は、助成事業に係わる成果の検証としては、妥当性にやや疑問が残る。

更に、MEMSが多数の要素技術の集積の上に成立する点に鑑みると、当該事業で開発した製造技術がユーザーから最も必要とされている技術であるのか不明でもある。

3) 研究開発成果について

特許出願や論文発表状況は、実施者間で比較的大きな差異が見られるものの、全体として概ね満足すべき水準である。

成果も、実施者間でやや差異が見られるものの全体としては設定した目標をクリアしたと評価される水準に到達しており、短期間でそれらを獲得した全ての実施者に敬意を表する。

但し、成果には、従来からの課題をブレイクスルーするような新技術は見られず、また必ずしも「世界初」には相当し得ない部分もある。ファウンドリーとして対処すべき課題は残存しており、それらに対する更なる検討による有効な対処策の立案が必要である。

尚、実施者である各企業が従来から具備していたファウンドリーとしての技術レベルに対して、今回新たに獲得したレベルアップ部分がどのようなものなのか不明瞭であるという側面もある。

4) 実用化、事業化の見通しについて

本事業の実施によって、MEMS分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じ、得られた成果は当該分野の技術的发展に貢献したものと評価される。

各企業とも事業化への進展が見られるものの、事業化に必須な低コスト化やそれに基づく競合技術に対する優位性についての見通しがこれで十分とはいえない。加えて、MEMSデバイスは多様性という特質を有するため今回の成果がファウンドリーの一プロセスとして確立されたのか不明であることから、全体的に、事業化にはもう少々の時間を要するだろう。

市場動向も激しいことから今後も努力を要するだろうが、各企業の早期事業化を期待したい。

研究評価委員会におけるコメント

第13回研究評価委員会（平成19年3月28日開催）に諮り、了承された。研究評価委員からのコメントは特になし。

研究評価委員会

委員名簿

委員長	曾我 直弘	滋賀県立大学 理事長 兼 学長
委員長代理	西村 吉雄	東京工業大学 監事
委員	伊東 弘一	早稲田大学 理工学術院総合研究所 客員教授 (専任)
委員	稲葉 陽二	日本大学 法学部 教授
委員	大西 優	株式会社カネカ 顧問
委員	尾形 仁士	三菱電機エンジニアリング株式会社 取締役社長
委員	黒川 淳一	横浜国立大学 大学院工学研究院 システムの創生部門 教授
委員	小柳 光正	東北大学大学院 工学研究科 バイオロボティクス専攻 教授
委員	佐久間 一郎	東京大学大学院 工学系研究科 精密機械工学専攻 教授
委員	富田 房男	放送大学 北海道学習センター 所長
委員	架谷 昌信	愛知工業大学 工学部機械学科 教授
委員	平澤 洽	東京大学名誉教授
委員	吉原 一紘	アルバック・ファイ株式会社 技術開発部 理事

(合計 13 名)

(敬称略、五十音順)

第 1 章 評価

この章では、分科会の総意である評価結果を枠内に掲載している。なお、枠の下の○、●、●が付された箇条書きは、評価委員のコメントを原文のまま、参考として掲載したものである。

1. プロジェクト全体に関する評価結果

1. 1 総 論

1) 総合評価

本事業は、我が国のMEMS分野の発展に資するものであり、新製造技術プログラムの目標達成への寄与は大きい。

実施体制は概ね妥当であるが、計画の途中で追加された委託事業は、助成事業における研究開発目標との関連性が薄く助成事業の有効性の検証としての妥当性にやや疑問が残る。また、コスト低減化等、従来課題をブレークスルーする挑戦的な目標が見られないのは残念である。

成果は、総合的に及第レベルに到達しており評価できる。既存技術を上手に活用して、短期間にMEMSファウンドリーに係わる要素技術の開発がなされた。

事業化に対しては、コスト低減化への更なる対処策が必要であろう。また、本事業で新たに受託可能となったプロセススペックを定量的にファウンドリーユーザーへ提供することや、本事業の実施者を含めた関係者の連携によるファウンドリー運営は、ユーザーニーズに資するため、これらへの対処も望まれる。

<肯定的意見>

- 総合的には MEMS ファウンドリーとして必要な技術が試作を通してよく展開されたと考えます。
- 4 つの評価軸に対していずれも及第点を与える。短期間でよくここ迄やってきた。日本の MEMS 発展に大きなインパクトを与えた。
- 短期間で、各社とも企業内で行うには難しい課題を、うまく既存技術や設備を組み合わせ実施され、評価できる成果をだされたと思っています。
- 特に、「事業の位置付け・必要性」、「研究開発マネジメント」、「研究成果」において評価できる。
- 我が国の MEMS 分野を発展させていくために、当該企業への効果は大いにあったと考える。また、この技術の社会への波及効果に今後期待する。

<問題点・改善すべき点>

- ファウンドリーは一般ユーザーへの多様な対応が重要であるので新たにどのようなプロセスを引き受けられるようになったかの数値化等が必要ではないか。
- 今後の国際競争下では価格が大きな壁になるが、この点に対するブレークスルー技術の芽が出てきていないという点がやや不満である。
- どちらかというと、技術も目標も波及効果も寄せ集め的なプロジェクトの印象

があります。これはMEMS固有の問題という面もありますが、ブレークスルー的なリスクテキング事業ではないという印象と重なっているかと思います。

- 「実用化、事業化の見通し」についての判断が多くの場合は難しかった。
- 投資した効果を出すためにも、製品化の早期実現とファウンドリーをどのように運営していくかが問題。企業間での連携したファウンドリー運営が必要か。委託事業の実施時期等の問題をクリアする必要がある。
- 大学への委託内容は本事業の検証にふさわしくない。ファウンドリー企業が取り組む技術目標・スペックとの関係が薄い。プロジェクト途中から技術委員会メンバーに委託を出す内容と、委託先の選定が不透明で問題がある。

<その他の意見>

- 委託事業は短期間であったため相当の苦労があったと思われるが、技術としては良くやってきたと思う。もう少し企画段階で、目的、内容等を検討すればもっと成果が出たと思う。
- 業界における、景気浮揚の側面もあるプロジェクトという点も理解できるか、本来国のプロジェクトは長期的な挑戦的なプロジェクト、または民間では採算上無理な試作開発型のファウンドリー支援として実施するほうが、一般には理解しやすいと思います。
- 競合技術の長短所と進化について、さらに考察があると良いと思う。

2) 今後に対する提言

MEMSは多数の技術の上に成立するが要素技術の標準化が困難でもあるため、各企業はファウンドリーとして、開発した技術内容等に係わる情報発信に努めると共に、積極的な相互の連携も検討されたい。

また、ファウンドリーとしての受託可能範囲や品質等、本事業の成果による影響をユーザーから調査等して、成果を有効に活用するMEMS商品化事業の実施が期待される。

尚、本事業によってファウンドリーとしての前進は見られるが、実装技術や低コスト化技術等、インフラ整備を目的とする更なるフォローは必要である。

<今後に対する提言>

- ファウンドリーからの情報発信に努めて欲しい。勿論、ファウンドリーの技術内容には開示できるもの、出来ないものがあるが、それを区別して、前者は積極的に開示すること。
- 本分野には多くの技術を必要とするが、LSIのような標準化が困難である。研究プロジェクトに参加した企業は積極的にファウンドリーとしての企業連携を組むことが必要。これを可能にする研究開発が必要と考える。それには今回のような委託事業を積極的に行い、公開することが望まれる。
- 選定企業やファウンドリーが、国際的競争力を持ち、なおかつ事業に貢献したことを検証でき、その効果を確認できれば、これを発展させたプロジェクトを進めると良いと思う。今回得られた技術改善を収益などの事業の向上に結びつけたかどうかの評価基準もあれば望ましいと思う。
- 今回、当初の目的のファウンドリーに対して一歩前進したが、インフラ整備を含めたさらなるフォローが必要と考える。今後の技術の要であるパッケージングの異種材料接合技術、組付け技術などの実装技術開発が急務である。コストダウンとしての転写技術、シリコン以外の3次元高アスペクト比構造の作製技術が次なるキー技術と考える。
- 本プロジェクトにおいて、成果が得られたファウンドリーサービスを有効に使用する、MEMS商品開発プロジェクトが期待されます。
- 本プロジェクトについては、長期的には、ファウンドリーとして利用しやすくなったか、可能性、試作レベルが向上したかをファウンドリーのユーザーから調査することが必要と思います。

<その他の意見>

- 携帯端末などの部品はまだ日本に優位性がある。この分野の中小企業に対して国として支援をしていただきたい。

- 開発だけですませるのではなくて、開発した試作品を商品として実用化する段階（死の谷を超える）に対する施策が求められていると思います。そのためにファウンドリーサービスを使うことが今回のプロジェクトの成果を生かすことになると思います。

1. 2 各 論

1) 事業の位置付け・必要性について

本事業は、ファウンドリーの強化によって我が国のMEMS産業の発展を目指すものであり、新製造技術プログラムの目標達成への寄与は大きい。

また、企業の自主努力による解決が期待される課題もあったが、ファウンドリー事業は参入初期の短期間において多額の設備投資を必要とするため民間活動のみでは改善し難いものであり、NEDOの事業としての妥当性は高い。

そして、MEMSの国際的競争における我が国の優位性確保を築くために今後の製造インフラとなり得るファウンドリー技術の獲得を目指すことは社会の要求に合致しており、事業目的も妥当である。

<肯定的意見>

- MEMSは日本の将来をささえる重要技術であるにもかかわらず、初期の設備投資が大きく、ビジネスが育っていない段階での企業投資には限界がある。その観点で、今回の助成事業は大変意義があるものと思われます。
- 先進的デバイスをファウンドリーで試作し、レベルアップをはかる計画はファブレベルの評価、向上のために有用（重要）と考えられる。
- NEDO 事業として、時代の要求に合致したプロジェクトであり、期の途中で技術検討会を新たに設置するなど柔軟な運営管理を行い、良好な成果を上げている。技術成果、知的財産件数、成果発表件数なども合格といえる。予算と事業効果についても及第点である。
- 我が国のMEMS産業の基礎体力を付けるために、ファウンドリーの強化を目的としたことは適切であり、目標はNEDO事業としてふさわしい。
- 省エネ・省部材をもたらすMEMSを製造業の基盤技術とする点に意義がある。また国際競争力を強化する意味でも重要である。比較的直近の事業化が見込まれ、また市場の成長が見込まれるRF、光、センサに着目するのも適切である。今後の製造インフラとなり得るファウンドリーの技術向上を目指すことは有意義である。
- MEMSの国際的競争に日本としての優位性確保を築くためにNEDOの関与は妥当である。特に、ファウンドリーとして企業を活用できるようにすることは、必要かつ最も効率的な方法といえる。短期間であったが、その成果をファウンドリーとして活用し技術開発となったことは評価できる。

<問題点・改善すべき点>

- 巨額な費用の配分目標がファウンドリー育成と商品開発の二つを追ったためか、商品化目標が若干不明確なプロジェクトも見られ、またファウンドリー事業としての技術の公開に対するスタンスが、明確でない企業もあります。

- 具体的にどのようなプロセス改善と導入が行われたか分かりにくい。
- 大学への委託事業は技術内容も相当難しいものであり、短期間に目標値達成が困難なものであると思われる。企画段階で、ファウンドリーでの検証という観点からテーマ選定すべきであった。またこのファウンドリーで製作したか、またその結果に対し、ファウンドリーとして、どこまでの市場要求に応えることができるかなどの評価が欲しい。
- 直近の実用化を目指した結果、目標が保守的と見受けられる場合がある。これは企業自身の努力で実現できた可能性がある。
- 大きな予算を投じたのに見合う成果を出すために、企業ができるファウンドリー項目の公開と企業間の関連をどうしていくかの方策が必要。

<その他の意見>

- 後半に本プロジェクトに関連して実施された、大学関係への委託事業については、その内容、目的と本来の趣旨が必ずしも明確でなかったような印象をもっています。
- 委託事業のあり方については今後のプロジェクトに反映して欲しい。
- ファウンドリーとしてどこまで市場要求に応えることができるか、今後の活動を見ていく必要がある。各要素技術に対して何が製作できるか、納期、価格などを公開して欲しい。また助成事業者はファウンドリービジネスとして事業を推進し、本事業の目標を達成して欲しい。
- 平成 17 年 1 月に追加した委託事業とその委託先の選定経緯が不透明な印象を与える。時間制約などの条件を踏まえても、その経緯が適切だったことの説明があればより望ましい。
- 知財の数が少ないのと、海外発表が少ないところが存在。

2) 研究開発マネジメントについて

実施者である企業や大学の各技術分野における研究開発実績や実用化へのリソースは十分なものであり、体制は概ね妥当である。

助成事業に係わる開発計画は、各技術分野の事情に起因した差異が見られるが、技術や市場の動向を概ね正しく把握しており一応の評価はできる。

しかし、当該事業の完了時期には陳腐化している開発ターゲットも見られ、情勢への変化に対してはより機敏な対応が必要であった部分がある。

また、計画の途中で追加された委託事業に係わるテーマや開発期間等は、助成事業に係わる成果の検証としては、妥当性にやや疑問が残る。

更に、MEMSが多数の要素技術の集積の上に成立する点に鑑みると、当該事業で開発した製造技術がユーザーから最も必要とされている技術であるのか不明でもある。

<肯定的意見>

- 目標に対して数値目標をあげ、定量的な指標になっている。研究開発計画、体制は問題なし。1 テーマの半年延長も柔軟な運営管理ということで及第点をつける。
- 3年間の研究開発期間と「フォーカス 21」の趣旨からして、概ね適切な目標設定だったと思う。また具体的な設定もなされていた。選定企業・大学は、それぞれのテーマにおいて十分な実績と国際競争力のある技術を持っている上、実践していくためのリソースもあるため適切である。
- 企業によって目標設定、開発計画、事業体制に差異が見られたが、開発分野の困難さの違いもあるので、おおむね妥当と考える。
- 目標は産業化において重要である。
- 技術動向、市場動向はおおむね正しく把握している。目標達成度をはかる指標も適切に設定されている。
- これまでのMEMS分野でのそれぞれの技術基盤をもつ企業を選定され、それぞれの強みをいかした研究開発目標・計画となっていると思います。

<問題点・改善すべき点>

- 委託事業の役割が不明確であったためと考えられるが、テーマ選定、開発期間などの無理があった。
- ファウンドリーが対応可能かを調べるためのテーマは、元のテーマに含まれる製造技術に絞っても良かったのではないかと思います。あるいは選んだ追加テーマで目標が達成できることの説明がある方が良いと思う。
- 進歩の早い分野であるので、開発目標設定は容易でないだろうが、本プロジェクト以外の会社で当プロジェクトの目標を達成している企業が存在している

のは、少し本プロジェクトの研究開発計画の見直しが必要であったところもある。

- 有用な製造技術の開発やファウンドリーへの展開の定量的（数・レベル）評価が分かりにくい。
- 途中で委託事業を追加することもある必要のあることは理解できたが、「何を」、「誰に」委託するかについては、今回は完全に失敗したと考える。
- 定量的なターゲットをもっていることは評価されるが、世界的なレベルでの進歩は早く、完了時期には陳腐化したターゲットになっている面もあり、その面での適切な目標変更やその対応が必要かと思われます。

<その他の意見>

- 助成事業の技術成果についてはよくやったということがいえる。ファウンドリーへの取り組みに対しては今後の活動を見ていく必要がある。ほんとうに作ってくれるのかという不安を感じる（製作可能範囲と開発費の関係及び製作期間が長いなどで、実際には製作を断るといふ点に対して）。事業終了後も NEDO としてよく見ておいて欲しい。
- 金額の適切さが分かりにくく感じた。
- 大学関係への委託事業については、詳細の経緯が把握できていない面があるが、ファウンドリー技術の実証という面では少々わかにくい説明でした。

3) 研究開発成果について

特許出願や論文発表状況は、実施者間で比較的大きな差異が見られるものの、全体として概ね満足すべき水準である。

成果も、実施者間でやや差異が見られるものの全体としては設定した目標をクリアしたと評価される水準に到達しており、短期間でそれらを獲得した全ての実施者に敬意を表する。

但し、成果には、従来からの課題をブレークスルーするような新技術は見られず、また必ずしも「世界初」には相当し得ない部分もある。ファウンドリーとして対処すべき課題は残存しており、それらに対する更なる検討による有効な対処策の立案が必要である。

尚、実施者である各企業が従来から具備していたファウンドリーとしての技術レベルに対して、今回新たに獲得したレベルアップ部分がどのようなものなのか不明瞭であるという側面もある。

<肯定的意見>

- 2企業は目標を十分達成していると考えるが、1社はこれからの努力が必要。また、知財、発表等にも企業間の差が大きい。
- 全体として、目標達成度は満足すべき水準にある。特許出願、学会発表についても満足すべき水準にある（特に、松下電工、オムロン）。
- 全体として目的はよく達成されているように思う。
- 目標達成度は、当初目標に対してクリアしており、短期間での成果を挙げられた各社に敬意を表します。成果についての発信、公表も適切にされているかと思えます。
- 目標値は達成しており、及第。これまでにないブレークスルー技術がなかった点はやや寂しい。ただ今回のファウンドリーという立場から見れば、品質管理、信頼性などの観点からも研究開発を行っており、良好な結果といえる。成果の意義、特許等の取得、成果の普及に対しても目標は達成。
- ほとんどのテーマにおいて課題は達成された。

<問題点・改善すべき点>

- 委託事業でファウンドリーの達成度を見る試みはよい方策であったが、時期、方法については検討が必要。また、ファウンドリーとしての達成度はまだ従来の問題が解決できている訳ではないので、今後のさらなる検討課題解決が望まれる。
- ファウンドリーとして従来そなえていた技術レベルと今回のプロジェクトでレベルアップした分の分離がいく分はつきりしない。

- 世の中の進展は早く、開発製品の市場創成は難しい印象です。ファウンドリーサービスの充実に関しても自社のキープする技術と公開する技術の境界が不明な会社もみられ世の中にどのくらい還元されるか不透明な面もあるようです。
- 技術目標に対しては OK であるが、全体的にコストの概念が希薄のように思える。これでは高価すぎ、とても事業展開できないのではという製品もあった。今後の活動に注目していきたい。
- 一部のテーマでは、研究期間中に目標値より小型のものが売り出された。それがわかった時点で目標数値など変更すべきであった。
- 成果が、必ずしも「世界初」といったものばかりではないように見受けられた。

<その他の意見>

- 本プロジェクトの目的が、新たな製品開発という面（プロダクトイノベーション）と、ファウンドリーサービスに使用する、プロセスのブラッシュアップという面（プロセスイノベーション）の両面があり、このことが成果の評価と今後の適用をわかりにくく、事業者側にも戸惑いが生じている一因かとおもわれます。
- 世界初などの言葉使いには注意をしていただきたい。MEMS 分野のデバイスへの適用が初めてという意味であると思うが、一般には世界で初めてこの技術を開発したと捕らえられる。

4) 実用化、事業化の見通しについて

本事業の実施によって、MEMS分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じ、得られた成果は当該分野の技術的发展に貢献したものと評価される。

各企業とも事業化への進展が見られるものの、事業化に必須な低コスト化やそれに基づく競合技術に対する優位性についての見通しがこれで十分とはいえない。加えて、MEMSデバイスは多様性という特質を有するため今回の成果がファウンドリーの一プロセスとして確立されたのか不明であることから、全体的に、事業化にはもう少しの時間を要するだろう。

市場動向も激しいことから今後も努力を要するだろうが、各企業の早期事業化を期待したい。

<肯定的意見>

- 多くのテーマにおいて、事業化に結びつきやすい進展があった。
- 大きなビジネスに結びつきにくい、本プロジェクトの実施自体が当該分野の研究開発や人材育成等を促進するなどの波及効果を生じていると思います。
- 技術動向・市場動向はおおむね正しく把握している。目標達成度をはかる指標も適切に設定されている。市場の動きのほうが多くて苦しい部分はあるが、おおむね良好である。
- 本成果は、MEMS 分野の技術的发展に大きく貢献するものとする。
- 開発した特定デバイスに対しては実用化がよく期待できる。
- 各社とも事業化への取り組みはしっかりとしており、課題も明確となっており、期待したい。

<問題点・改善すべき点>

- 多くのテーマにおいて、今後、量産効果などによって、どの程度低コスト化できるのか、それが既存技術に対して十分な競争力を持つものかが明確にならなかった。
- 産業技術としての見極め（適用可能性の明確化）は、直接的にはまだ不十分かと思っています。したがってコストダウン、導入普及、事業化までの期間、事業化とそれに伴う経済効果等の見通しはまだこれからという印象です。
- RF スイッチの出来はすぐれているが、デバイス単体でどこまで市場がとれるものか、やや心配である。
- この成果をファウンドリーとして活用できるまでには時間がかかりそうであることと、製品化への時間が Focus21 の目的と一致しているか問題のあるところである。
- MEMS は多様なデバイスであるので汎用化あるいはファウンドリーの一プロ

セスとして確立されたかどうかが不明である。

- ファウンドリー事業への取り組みがこの時点ではやや不確かさがある。事業を成功するためには黒字にすることが必須である。今後の努力を期待したい。

<その他の意見>

- 実用化に向けた課題は、要素技術のみで決まらないので、実用化の可能性を占うことが難しい。
- 各社とも、前向きに先行投資を行い、実用化、ビジネス化に対する姿勢は評価できるが、実用化の即効性や経済効果という面では、今回のような大企業向けでなく、中小・ベンチャー企業向けの商品開発助成が有効かと思います。
- 早期製品化は製品を取り巻く状況、各社の方針で難しい点が多々あると思いますが、ニッチ製品の少量生産でも結構ですから世の中に出して欲しい。各社の頑張りに期待したい。

2. 個別テーマに関する評価結果

2. 1 RFスイッチ製造技術の開発

目標にブレークスルーを生じ得る差別化技術が乏しかったとも言えるが、自らが保有する基盤技術等を上手に組み合わせて所定の目標を達成しており、獲得した成果は高く評価される。実用化に対する課題を克服するものであると共に、国際的にも高い水準に到達した我が国のRF技術の高度化に資するものである。

事業化に向けては、コスト低減化への更なる努力が必要であろう。また、ファウンドリー事業へ適用できる技術範囲の見極めやその明確化も重要であり、これらに対する明確な対処方針の立案が望まれる。

競合技術に対する優位性を打ち出せる開発を推進して、より大きなビジネスモデルを構築出来るよう注力されることも期待される。

<肯定的意見>

- RF・スイッチの主要素技術である3次元加工技術、接点固着技術の開発は、地味ながら実用化への大きな課題を克服したことは大きな成果である。
- 具体的な目標を設定してそれを達成した。同じ技術を開発する米国企業よりも高い特性を得た。
- 3次元加工技術精度を飛躍的に進歩させた、RFスイッチの可能性を示している。そのためのプロセス技術装置を開発させている。ノウハウを集積してファウンドリーにも対応している。それぞれの3課題ともよい結果が出ている。
- 接点の信頼性を評価試験により比較評価でき、高度なレベルであることが示されたことは非常によいと考えられる。
- 接点の安定的接続と固着防止を両立する材料プロセス技術、および、低衝撃駆動技術において、高いポテンシャルを確立した。日本のRF技術の高度化に役立っている。
- ターゲットが明確にされており、自社の既存ビジネスと技術基盤とうまく組み合わせて、目標を達成されたことは評価できると思います。

<問題点・改善すべき点>

- スイッチデバイス単体のビジネスは限られている。集積化MEMSスイッチの可能性を含めて、もっと大きなビジネスモデルにむかって注力して欲しい。
- ファウンドリーとして、使用の範囲をどこまで明確化できるか、それ以外の範囲の開発は可能かが問題となる。
- 大市場であり、大きなインパクトを与え得る携帯電話機向けに展開するために、既存の半導体との競合を乗り越えられるように課題を設定する必要がある。
- パッケージング技術としての基本性能としては良好な結果となったが、コスト

的にもう一段の努力が必要であろう。

- どちらかという、製造プロセスや信頼性の向上的な小さなイノベーションの積み重ねをとまなう、プロセスイノベーション型の研究開発であり、出来ればそのなかにブレークスルーを伴うような差別化技術の開発を入れてほしかった。
- 応用デバイス(RF 通信器等)に導入して、利用者からの評価もあると実現性が期待できる。

<その他の意見>

- ファウンドリーサービスにおける、公開技術と自社でキープする技術を明確にされ、出来るだけ早く、多く、ファウンドリーサービスとして世の中に成果を還元していただきたいと思います。
- RF デバイスづくりと、RF 市場の開拓は別物である。RF システム開発企業との協力を促進することが今後の急務である。
- 送受切り替え用途に耐える切り替え回数を実現できるとなご良いと思う。信頼性の底上げとなり、接点のある他の MEMS デバイスへの波及効果が大きい。また、送受切り替え用途まで含めて半導体を置き換えられると RF 部をモジュール化した際に、半導体に対してより有利になれる。
- 事業化に対しては、携帯端末に採用されるためにはコスト課題を達成していく必要があり、もう少し時間が必要になると考えられる。そのために LSI テスタへの適用はよいと思う。早期の製品化を強く望みたい。

2. 2 光可動ミラー製造技術の開発

ベンチマークや検出方式の選定経緯が不明瞭だったとも言えるが、高精度ミラーの開発からモジュール化までの一連の開発を柔軟に推進して獲得した成果は高く評価される。特に、光 MEMS に最も重要である高精度ミラーに係わる成果は素晴らしい。これらは、基盤技術の着実な蓄積であると共に、光通信の大市場である米国参入への布石として、意義が大きい。

事業化に向けては、歩留まりを含めた製造品質に係わる再現性の向上が必要であろう。また、ファウンドリーユーザーに向けた受託可能な技術スペックのより積極的な公開は重要であり、これらに対する明確な対処方針の立案が望まれる。

自社事業との棲み分けを上手に行ったファウンドリー事業への成果のフィードバックやアクセス系にも適用可能な技術の開発も期待される。

<肯定的意見>

- 具体的な目標を設定してそれを達成した。
- 短期間に所定の目標を達成され、さまざまな課題についてもフレキシブルに対応されていると思います。
- 光通信という大市場へ向けて、基礎技術の着実な蓄積ならびに米国市場への参入の布石がみられる。
- 困難な技術課題に対して、挑戦するために本助成が役立っていると考えられるが、今後の進展を期待したい。
- 光 MEMS にとって最も重要なミラー開発でよい成果が得られている。
- 高精度のミラーの開発から、ミラー制御、計測、モジュール製作までの一連の研究開発は評価に値する。事業化に対しても明確なポリシーを持ち、着実に推進しており、MEMS 分野に大きなインパクトを与えたと考える。

<問題点・改善すべき点>

- ファウンドリーサービスに対して、ミラー等の可能技術のスペック表示などの積極的な利用者へのサービスを望みたい。
- ファウンドリー事業への取り組みも精力的に行っているようであるが、さらなるレベルアップが必要と思う。今後課題になると思われるのは、いつでも同じものができるという製造における品質（装置の再現性、歩留まりなど）であろう。この点の解決を期待したい。
- もう少しチャレンジブルな研究開発テーマとして、世界に勝てるようになっていたら更に良かったと思います。事業性については期待しているが難しいのでは。
- 容量センシング方式がベストなのか分かりにくい。複数方式を比較した上で、

市場において受け入れられるかどうかという視点で、方式を選定したという結果があればなお良かったと思う。

- ベンチマークが不明確。どこに新規性があるのか、TI と比較してどうなのかがわかるように。角度検出アンプ IC を試作する必要はあったかが不明。

<その他の意見>

- うまく自社事業と切り分けて、MEMS ファウンドリー事業への成果のフィードバックが期待されます。
- 狙っている製品が収益性の高いものになっているため、事業への成功は期待できる。
- 加工が可能なスペックを判りやすく公開して欲しい。たとえば以下の項目。固定ミラー（90°、45° ミラー）の平坦度、回転ミラーについては平坦度をミラー寸法と周波数の関係において明らかにされたい。
- メトロ系のみならずアクセス系でも光スイッチは利用される可能性があり、アクセス系で利用可能にする技術の方が、社会や産業界へ大きなインパクトを与える。その意味でアクセス系に利用可能な技術開発も進めてほしい。
- 電磁式、容量式のどちらが主であるのか不明。

2. 3 超小型MEMSセンサ製造技術の開発

開発されたウェハレベル一貫製造工程に係わる技術は実用域において世界最高水準に到達する優れたものであり、獲得した成果は高く評価される。特に、MEMSデバイス分野におけるウェハレベルでの初めての検証であること自体や、Si-Si低温接合技術に係わる成果の意義は大きい。知的財産権の取り扱いも十分であり評価される。

事業化に向けては、開発商品に係わる目標設定に際して十分な事前調査の実施が望まれる。

成果をファウンドリーサービスへ積極的に還元することや、ニッチ製品でも構わないから成果を活用した製品を早期にリリースすることが期待される。

<肯定的意見>

- 開発されたウェハレベル一貫製造工程は優れた技術である。期待するところが大きい。特に、Si-Si低温接合は、MEMSの新規市場開拓に大きく貢献するだろう。
- 目標ターゲットをベンチマーキングして、しっかりと目標を達成していることは評価できる。また、知財もしっかりと確保されている。
- 直近で必要とされる課題を設定し、それを解決した。技術成果を実用レベルの水準にした。実用域の技術としては世界最高水準を達成した。事業の貢献につながることを確認した。
- この接合方式は、既に半導体分野で世の中に出ているが、MEMS素子分野では初めてウェハレベルで検証された意義は大きい。半導体と違う要素技術に対しての要素技術開発も精力的に行い、目標値を達成。また事業化へのロード・マップも良く検討されている。
- 概念的には示されていた技術課題を実際に実施して、実証した点は評価できると思います。
- 高いパッケージ技術が開発されている。

<問題点・改善すべき点>

- もともと、ポテンシャルと総合力がある会社なので、単に当初の目標を達成した以上の世の中の展開を超えるような、もう一步の進展や展開がなされるとよかった。
- 本プロジェクトでの成果の一部が他社と同レベルということは、当初目標設定が正しかったのか。
- 自社技術開発としてレベルが高いが、ファウンドリーサービスの観点からどれだけ還元されるのかが分かりにくい。
- 提案のセンサはいずれも既に大量生産の世界（コスト競争の世界）に入ってい

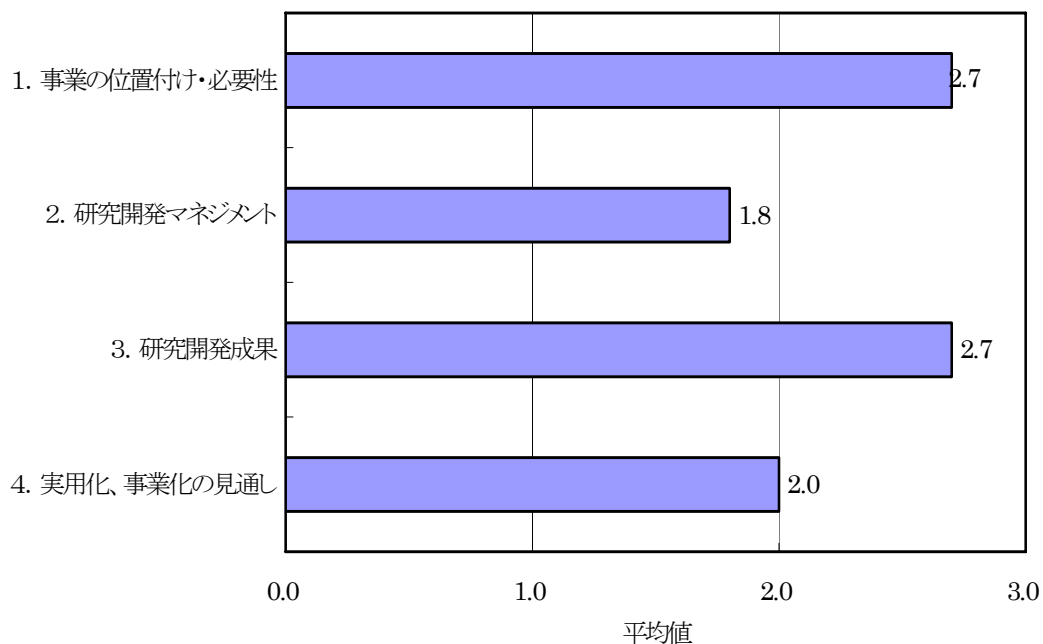
るので、製品化時期が遅くなっているのではと思われる。ニッチ製品でも良いから早期に製品化をめざし、世の中に出していただきたい。

- より短期により広範な製品に展開できるとさらに良いと思う。

<その他の意見>

- MEMS センサのみならず半導体など幅広い応用に展開できるため、幅広くこの技術の可能性を世に問う方が良いと思う。
- シリコン以外の材料に対して、この方式でどこまで可能性があるのか興味がある。
- ファウンドリーサービスの位置づけと技術のフィードバックがもう一つ不明確かと思われます。
- 完成度は高いが、製品化への時間が長い。

3. 評点結果



評価項目	平均値	素点（注）					
1. 事業の位置付け・必要性について	2.7	B	A	A	A	A	B
2. 研究開発マネジメントについて	1.8	B	B	B	B	B	C
3. 研究開発成果について	2.7	A	A	B	B	A	A
4. 実用化、事業化の見通しについて	2.0	A	B	C	B	B	B

（注）A=3, B=2, C=1, D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

<判定基準>

(1)事業の位置付け・必要性について

- ・非常に重要 →A
- ・重要 →B
- ・概ね妥当 →C
- ・妥当性がない、又は失われた →D

(3)研究開発成果について

- ・非常によい →A
- ・よい →B
- ・概ね妥当 →C
- ・妥当とはいえない →D

(2)研究開発マネジメントについて

- ・非常によい →A
- ・よい →B
- ・概ね適切 →C
- ・適切とはいえない →D

(4)実用化、事業化の見通しについて

- ・明確に実現可能なプランあり →A
- ・実現可能なプランあり →B
- ・概ね実現可能なプランあり →C
- ・見通しが不明 →D

第 2 章 評価対象プロジェクト

1. 事業原簿

次ページに当該事業の推進部室及び研究実施者から提出された事業原簿を示す。

事業原簿

公開版

「MEMS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プロジェクト」技術開発課題	8
新製造技術プログラム 基本計画	13
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	19
1.1 NEDOが関与する意義	19
1.2 実施の効果（費用対効果）	20
2. 事業の背景・目的・位置づけ	
2.1 事業の背景・目的	22
2.2 事業の位置づけ	22
II. 研究開発マネジメントについて	
1. 事業の目標	29
2. 事業の計画内容	29
2.1 研究開発の内容	29
2.2 研究開発の実施体制	33
2.3 研究開発の運営管理	33
3. 情勢変化への対応	34
4. 中間評価結果への対応	36
5. 評価に関する事項	36
III. 研究開発成果について	
IV. 実用化、事業化の見通しについて	
1. 事業全体の成果	37
2. 各テーマ成果まとめ	40
3. 各テーマの成果詳細	
3.1 RFスイッチ製造技術の開発（オムロン株式会社）	i-1～i-33
3.2 光可動ミラー製造技術の開発（オリンパス株式会社）	ii-1～ii-13
3.3 超小型MEMSセンサ製造技術の開発（松下電工株式会社）	iii-1～iii-12
3.4 MEMSデバイスの研究開発	
3.4.1 スマートスキンの実現を目指すMEMSアレイと その信号接続方法の研究（東京大学）	iv-1～iv-18
3.4.2 マイクロ走査型顕微鏡の研究開発（九州大学）	v-1～v-16
3.4.3 超小型6軸フォースセンサの研究開発（立命館大学）	vi-1～vi-51
添付資料1（出願特許）	
添付資料2（学会発表、論文、プレス発表等）	

概 要

		作成日	平成18年12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プロジェクト	PJコード	P03025
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	本プロジェクトは、経済産業省において研究開発の成果が迅速に事業化に結びつき、産業競争力強化に直結する「経済活性化のための研究開発プロジェクト（フォーカス21）」の一つとして、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（Radio Frequency、高周波）－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、「MEMSデバイスの研究開発」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。		
I. 事業の位置付け・必要性について	グローバル化の進展やアジア諸国の製造業の台頭など、我が国製造業を取り巻く環境が厳しさを増す中で、製造業の高付加価値化による競争力の強化が急務となっている。このような観点から、情報通信、医療・バイオ、自動車など多様な分野において、小型・高機能で省エネ性に優れた高付加価値部品の製造を可能とするMEMS（Micro Electro Mechanical Systems、微小電気機械システム）技術に対し、我が国製造業を支える新たな基盤技術としての期待が高まっている。 MEMSは、自動車用加速度センサやインクジェットプリンタのヘッドなど一部の分野で既に実用化が始まっており、2003年時点でMEMSを活用した製品は国内で約5,000億円の市場を形成しているとも推定される。今後は、光通信や高速無線通信といった通信分野、血液検査や環境計測などの化学・バイオ分野等を中心に、2010年までに国内市場は1.35兆円程度に成長すると見込まれているが、一方で、これらの新しいMEMSは、現在実用化されているMEMSと比べて更なる高性能化や構造の複雑化等が進むと考えられている。このようなMEMSの実用化を図るためには、深さ方向の高精度な加工や複雑なパッケージングなどに代表される高度なMEMS製造技術の確立が不可欠である。 また、今後、MEMS技術をより多様な分野における製品に活用し、大きな市場を形成していくためには、このような高度なMEMS製造技術が多様な主体に提供可能となるファンドリー等の環境整備が重要である。		

II. 研究開発マネジメントについて

事業の目標

フォーカス 2 1 の要件に照らし、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（Radio Frequency、高周波）－MEMS、光MEMS、センサMEMS）の実用化に必要な製造技術を開発する。

（１）RFスイッチ製造技術の開発

高精度 3 次元加工技術開発においては、加工条件を確立して、量産レベルで加工精度 1 %を実現する。接点固着防止技術開発においては、固着の起きにくい金属材料の製作プロセスを確立し、開閉回数 10 億回を達成する。低損失パッケージ技術開発においては、損失の少ないパッケージ技術を確立し、量産レベルでパッケージ損失 0.1dB(@10GHz)を達成する。

（２）光可動ミラー製造技術の開発

光可動ミラーの加工要素技術とそれをアレイ化するための加工技術課題に取組み、トータルな可動ミラーモジュールの加工技術を確立する。また、光可動ミラーを 2/1000 度以下の精度で自由に角度制御できる高精度角度制御技術を確立する。これらの技術を用いて試作した最終光SWモジュールにおいて、光可動ミラーの可動回数が 100 億回以上可能なことを確認する。

（３）超小型MEMSセンサ製造技術の開発

貫通孔配線・電極形成技術は、厚み 500 μ m のシリコンウエハに 10 μ m ϕ の貫通孔形成を達成する。配線電極埋め込みについては、Cu を貫通孔に埋め込む安定した工程を確立する。最適接合方式でのウエハレベルパッケージを用いたセンサ・回路一体モジュールを試作検討し、サイズ 1/10 の小型化を検証する。一貫工程の構築を 3 軸加速度センサとジャイロセンサを用いて試作検証する。

また、本プロジェクトで開発した要素技術の成果を、目標とする製品のみならず、より多様な分野における製品に活用し、さらにはMEMS製造設備を十分有しない大学や新規事業者等の参入障壁を下げるファンドリー事業を整備する。

本プロジェクトで整備したファンドリーの有効性を検証するために、平成 17 年 1 月より、委託事業を追加した。この委託事業では、高度な製造プロセスを必要とする先進的なデバイス開発を、全工程ファンドリーを活用して試作することにより、プロジェクト期間中にファンドリーの有効性検証を行うための具体的なテーマは以下のとおり。

（４）MEMSデバイスの研究開発

超小型 6 軸フォースセンサの研究開発、マイクロ走査型顕微鏡の研究開発、スマートスキンの実現を目指すMEMSアレイとその信号接続方法の研究については、ファンドリーを活用してそれぞれ目標とするデバイスの試作を完了する。

事業の計画内容	主な実施事項		平成 15 年度	平成 16 年度	平成 17 年度	平成 18 年度
	①RF スイッチ 製造技術の開発					
	②光可動ミラー 製造技術の開発					
						※半年間延長
	③超小型 MEMS センサ製造技術 の開発					
④MEMS デバ イスの研究開発						
【開発予算】	(単位:百万円)		平成 15 年度	平成 16 年度	平成 17 年度	平成 18 年度
助成事業の 助成率:1/2	一般会計					
	特別会計 (高度化)	助成	591(上期) 560(下期)	1,765	1,306	26 ※前年度からの繰越し分
		委託			86	
	総予算額 4,334		1151(独法化により 半期毎に契約)	1,765	1,392	26 ※前年度からの繰越し分
【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			
	助成先・委託先		＜助成先＞ オムロン株式会社 オリンパス株式会社 松下電工株式会社 ＜委託先＞ ※平成 17 年1月より追加 国立大学法人東京大学 国立大学法人九州大学 学校法人立命館大学			
【情勢変化への 対応】	平成 16 年度技術委員会(平成 16 年 6 月 23 日開催)にて、ファンドリー整備状況について、ファンドリーがどこまで対応できるかの有効性については未知数。プロジェクト期間中に、ファンドリーの有効性検証を行うべき。との委員の指摘を受け、プロジェクト期間中にファンドリーの有効性検証を行うための委託事業を、平成 17 年 1 月より追加した。 この委託事業は、高度な製造プロセスを必要とする先進的なデバイス開発を、ファンドリーを活用して試作することにより、本プロジェクトで整備したファンドリーの有効性を検証すること、および助成事業との連携により MEMS 技術の高度化を図ることを目的とするものである。					

Ⅲ. 研究開発成果について

(1) RFスイッチ製造技術の開発

①高精度材料加工技術

実機テストを通じて、ばらつきも含めて加工精度 1%を達成するとともに、ファンドリーへの技術移転を行った。

②接点固着防止技術

固着の起きにくい金属材料とその製作プロセスを確立し、開閉回数 10 億回を達成した。

③低損失パッケージ技術

高周波の断続負荷および連続負荷等の各種信頼性試験を行い、パッケージ損失 0.09dB (@10GHz) と目標 0.1dB (@10GHz) 以下を達成した。



<開発したRF-MEMSスイッチ写真>

(2) 光可動ミラー製造技術の開発

①高精度 3 D加工技術開発

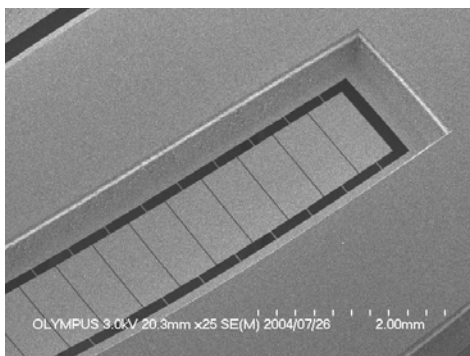
低応力成膜と新たな加工プロセスを開発して、ミラー面のソリ量が 1.25nm/100 μ m²の平坦なミラーを実現できた。

②高精度制御技術開発

容量変化により、ミラー角度 2/1000 度以下を検出できることが確認できた。

③信頼性の計測・評価技術開発

加速試験を行い、その換算値から 100 億回以上可動できる耐久性を見積もることができた。



<試作したミラーデバイス写真>

(3) 超小型MEMSセンサ製造技術の開発

① ウエハ低温接合技術

S i ウエハの常温直接接合に関して、ボイドレス接合を実現し、歩留りに問題がないことを確認した。また、各種信頼性試験を行い、接合信頼性にも問題がないことを確認した。

② 貫通孔配線・電極形成技術

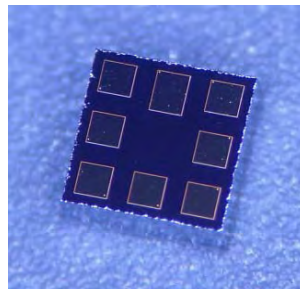
深さ $500\mu\text{m}$ (孔径 $10\mu\text{m}$) のウエハ貫通配線を実現し、歩留りに問題がないことを確認した。また、各種信頼性試験を行い、配線の信頼性にも問題がないことを確認した。

③ センサ、回路一体化技術

M I Dへのチップの常温バンプ接合に関して、各種信頼性試験を行い、接続信頼性に問題がないことを確認した。

④ ウエハレベルパッケージング一貫工程の構築

構築した一貫工程により、3軸加速度センサモジュールとジャイロモジュールを試作し、その動作を確認するとともに、従来品と比較して、体積比 1/10、コスト比 1/2 を実証した。



<小型センサエレメント外観写真>

(4) MEMSデバイスの研究開発

超小型6軸フォースセンサの研究開発、マイクロ走査型顕微鏡の研究開発、スマートスキンの実現を目指すMEMSアレイとその信号接続方法の研究について、ファンドリーを利用したデバイスの開発試作を完了した。

本試作により、概ねファンドリーの有効性が確認された。またプロセス条件の最適化に伴う試作の遅延、高精度アセンブリの技術力向上が課題であることが明らかになった。

	【特許出願数および成果発表数】			
		論文等誌上発表	特許	報道
	(1) R F スイッチ 製造技術の開発	19	10	20
	(2) 光可動ミラー 製造技術の開発	24	4	19
	(3) 超小型MEMS センサ製造技術の開発	9	88	9
	(4) MEMS デバイス の開発	25	2	3
	合計	77	104	51
IV. 実用化、事業化 の見通しについて	本プロジェクトの開発成果を応用したデバイスを各社の事業戦略に則って量産化する計画である。また、ファンドリーへの技術展開もすでに着手しており、問い合わせ件数、委託件数とも着実に増加している。又、ユーザも、従来の大企業から中小企業に確実に拡大しており、こうしたファンドリーユーザが、自社で高額な設備の投資とプロセス開発に多数の人員を投資することなく、MEMSを適度の開発コストで早期に調達できることを可能にし、MEMSの研究開発、並びに、MEMS応用商品を含む革新的な商品造出に寄与し、我が国の製造業の発展を大幅に加速できることと考える。			
V. 評価に関する事項	事前評価	なし		
	評価予定	平成18年度 事後評価実施予定		
VI. 基本計画に関する事項	策定期間	平成 15 年 3 月 策定		
	改訂履歴	平成 17 年 1 月 改訂		

(新製造技術プログラム)
「MEMSプロジェクト」技術開発課題

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

本プロジェクトは、経済産業省において研究開発の成果が迅速に事業化に結びつき、産業競争力強化に直結する「経済活性化のための研究開発プロジェクト(フォーカス21)」の一つとして位置付けられており、以下の要件を前提に実施するものである。

- ・技術的革新性により競争力を強化できること。
- ・研究開発の成果を新たな製品・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、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組が示されていること。

具体的には、成果の実用化に向け、本事業によって確立される高度なMEMS製造技術をファンドリー事業に適用することで、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ことを助成事業者に対し求める。

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。

グローバル化の進展やアジア諸国の製造業の台頭など、我が国製造業を取り巻く環境が厳しさを増す中で、製造業の高付加価値化による競争力の強化が急務となっている。このような観点から、情報通信、医療・バイオ、自動車など多様な分野において、小型・高機能で省エネ性に優れた高付加価値部品の製造を可能とするMEMS(Micro Electro Mechanical Systems、微小電気機械システム)技術に対し、我が国製造業を支える新たな基盤技術としての期待が高まっている。

MEMSは、自動車用加速度センサやインクジェットプリンタのヘッドなど一部の分野で既に実用化が始まっており、MEMSを活用した製品は世界全体で約5,000億円の市場を形成しているとも推定される。今後は、光通信や高速無線通信といった通信分野、血液検査や環境計測などの化学・バイオ分野等を中心に、2010年までにその市場は2兆円程度に成長すると見込まれているが、一方で、これらの新しいMEMSは、現在実用化されているMEMSと比べて更なる高性能化や構造の複雑化等が進むと考えられている。このようなMEMSの実用化を図るためには、深さ方向の高精度な加工や複雑なパッケージングなどに代表される高度なMEMS製造技術の確立が不可欠である。

また、今後、MEMS技術をより多様な分野における製品に活用し、大きな市場を形成していくためには、このような高度なMEMS製造技術が多様な主体に提供可能となる環境整備が重要である。

このような観点を踏まえ、本事業では、フォーカス21の要件に照らし、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[Radio Frequency、高周波]—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ことを目的とする。

(2) 研究開発の目標

平成17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製造技術を確立するとともに、これらのMEMSを実用化する。

(3) 研究開発内容

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。

① RFスイッチ製造技術の開発

RFスイッチは、RF-MEMSの中で現在最も期待される需要が大きく、かつRF-MEMSに共通の課題を多く含んでいることから、その実用化技術開発はRF-MEMS全般の実用化に波及効果が大きい。従って、本技術開発においては、RFスイッチの製造技術の開発を行うこととする。

イ. 技術開発の具体的内容

1) RFスイッチの高周波信号線路、接点に用いられる金属薄膜、及びアクチュエータの形状を精密に制御して、高周波の反射・損失を最小限に抑える高精度材料加工技術を開発する。

2) 金属接点に発生する固着を、接触部分の材料の選定や接触部分を保護するパッケージ技術により低減させ、デバイスの寿命を延伸させる技術を開発する。

3) 高周波に対応したパッケージ方法を開発し、封止パッケージによるインサーションロスの増加を最小限に押さえる技術を確立する。

ロ. 達成目標

1) 厚さ $2\mu\text{m}$ 程度の金属薄膜等を用いた高周波信号線路、接点及びシリコン等のアクチュエータ構造において、寸法精度1%以下の高精度材料加工技術を構築する。

2) 動作回数 10^9 回以上の確保が可能な接点固着防止技術を構築する。

3) DC～10GHzの信号伝送で、パッケージングによるインサーションロス増加を0.1dB以下に抑えるパッケージ技術を構築する。

② 光可動ミラー製造技術の開発

単一または複数の微小ミラーを用いて光制御を行う光可動ミラーアレイは、光スイッチ、マイクロ光スキャナ等、多くの光MEMSに共通の機能素子であり、その実用化技術開発は光MEMS全般の実用化に波及効果が大きい。従って、本技術開発においては、光可動ミラーの製造技術の開発を行うこととする。

イ. 技術開発の具体的内容

1) 微小可動ミラーの表面粗さをナノレベルにすることで、インサーションロスを抑えることが可能な高精度加工プロセス技術を開発する。

2) 微小可動ミラーを駆動するアクチュエータ素子と、位置検出を行う集積化されたセンサ素子を組み込んで、微小ミラーを高精度かつ自由に角度制御することを可能とする集積化光制御素子を開発する。

3) 実用上十分な駆動信頼性を確保するため、信頼性を含む計測・評価技術を開発する。

ロ. 達成目標:

1) 微小可動ミラーの表面粗さの絶対値が、 $100\mu\text{m}$ 角平方の面積に渡って 50nm 以下の平坦度を達成する高精度加工技術を開発し、光学モジュールと一体化した後のインサーションロスとして 3dB 以下を実現する。

2) 微小可動ミラーを $2/1000$ 度以下の精度で自由に角度制御することを可能とするセンサ・回路集積化加工技術、及び高精度制御技術を構築する。

3) 信頼性を含む高精度計測・評価技術を開発し、常温にて 10^{10} 回以上の駆動信頼性を有する高精度微小可動ミラーを実現する。

③超小型MEMSセンサ製造技術の開発

MEMSセンサは、自動車分野などに幅広く普及しているが、今後、更なる小型化と機能集積を実現する「超小型センサ」の実用化が期待されている。このためにはウエハレベルパッケージ技術の開発が重要であること、及び、同技術はMEMS全般の実用化共通課題でもあり波及効果も大きいことから、本技術開発においては、ウエハレベルパッケージの実用化技術開発を通じた超小型MEMSセンサの製造技術の開発を行う。

イ. 技術開発の具体的内容

1) Siセンサウエハに接合されたパッケージ基板(ガラス、Si等)を通じてSiセンサ信号を外部に取り出すための量産に適合した配線・電極形成技術を開発する。

2) 封止工程によるSiセンサ部への内部熱応力を抑制するため、Siセンサウエハに接合するパッケージ基板とセンシング部本体ウエハの量産に適合した低温接合技術を開発する。

3) パッケージ化したセンサとその信号処理を行う回路部品(ICや電子部品)を一体化する工程を開発する。

4) 上記1)～3)の技術開発を行うことにより、MEMSのウエハレベルパッケージ一貫工程を構築し、センサチップ体積に対するパッケージ体積の抜本的な小型化と低コスト化を可能とする実装技術を開発する。

ロ. 達成目標:

1) 厚み数百 μm 程度の基板(ガラス、Si等)に、 $10\mu\text{m}$ 以下の口径の貫通孔を形成する量産に適合した工程とこれに電気配線材料を埋め込む量産に適合した工程を構築する。

2) Siセンサウエハに接合するパッケージ基板とセンシング部本体を $\pm$ 数 μm 以内の高精度に位置合わせして常温で接合する量産に適合した工程を構築する。

3) パッケージ化したセンサとその信号処理を行う回路部品(ICや電子部品)を一体に実装し、モジュールに仕上げる量産に適合した工程を構築する。

4) 上記1)～3)の技術開発を行うことにより、MEMSのウエハレベルパッケージ一貫工程を構築し、現状の樹脂パッケージやセラミックパッケージに対して、センサチップ体積に対するパッケージ体積比率を $1/10$ 以下に、コストを $1/2$ 以下に低減可能な実装技術を構築する。

④MEMSデバイスの研究開発

具体的なMEMSデバイスの研究開発を委託事業にて実施する。製作をファンドリーに依頼して進め、MEMS技術の高度化及びファンドリー事業の促進を図る。

イ. 技術開発の具体的内容

1) スマートスキンの実現を目指すMEMSアレイとその信号接続方法の研究

可変ノズルアレイを用いたエアフロー方式アクチュエータに関し、基板両面からのエッチングにより静電駆動可能なアクチュエータのアレイ構造を実現するとともに、基板下部から電氣的接続を行う方法を開発する。

2) マイクロ走査型顕微鏡の研究開発

高精度に位置決めボンディングした半導体レーザやフォトダイオードチップなどの光学素子、マイクロミラー等からなる集積型のマイクロ光走査型顕微鏡を設計・製作し、パッケージング技術、ボンディング技術の開発を行う。

3) 超小型6軸フォースセンサの研究開発

センサ内に形成したシリコンビームに発生する応力をピエゾ抵抗素子によって検出する方式を用いた6軸フォースセンサを設計・開発し、センサ内に配置した複数のピエゾ抵抗素子の抵抗変化を組み合わせ、6成分の力を求める信号処理方法等の研究開発を実施する。

4) 技術検討会の実施

委託事業者と助成事業者による技術検討会を実施し、デバイス特性及び製造プロセスの高度化、ファンドリー事業の促進を図る。

ロ. 達成目標:

1) スマートスキンの実現を目指すMEMSアレイとその信号接続方法の研究

開発したMEMSアレイの仕様が、アレイの数 10×10 、駆動電圧150Vを達成し、エアフローの制御を確認する。

2) マイクロ走査型顕微鏡の研究開発

開発した顕微鏡の仕様が、分解能 $5 \mu\text{m}$ 、寸法 $5 \times 10 \text{mm}$ (マイクロマシン部分)を達成する。

3) 超小型6軸フォースセンサの研究開発

開発したセンサの仕様が、寸法 5mm 角以下、軸力レンジ $0.2 \sim 1.0 \text{N}$ 、モーメントレンジ $50 \text{N} \mu\text{m} \sim 100 \text{N} \mu\text{m}$ を達成する。

2. 研究開発の実施体制

<助成事業>

「RFスイッチ製造技術の開発」、「光可動ミラー製造技術の開発」及び「超小型MEMSセンサ製造技術の開発」は、NEDO技術開発機構が、本邦の企業、研究組合、公益法人等の研究機関（原則、国内に研究開発拠点を有していること。ただし、国外企業の特別の研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点から国外企業との連携が必要な部分はこの限りではない。）から、公募によって技術開発実施者を選定する。

（なお、実用化を目的とすることから、技術力を有する極力少数の企業等による役割分担の明

確な開発体制が望ましい。)

＜委託事業＞

「MEMSデバイスの研究開発」は研究要素が高いために委託事業とする。また、本事業は、助成事業者との技術的な連携が必要なため、当該助成事業に技術委員として最も精通・関与しており、かつ上記の研究開発に係る分野の第一人者で、上記研究開発を遂行するために基礎となる研究実績と高い技術的な知見および能力を有している3大学への特命とする。

3. 研究開発の実施期間

＜助成事業＞

「RFスイッチ製造技術の開発」、「光可動ミラー製造技術の開発」及び「超小型MEMSセンサ製造技術の開発」の期間は、平成15年度(2003年度)から平成17年度(2005年度)までの3年間とする。

＜委託事業＞

「MEMSデバイスの研究開発」の研究機関は、平成16年度(2004年度)から平成17年度(2005年度)までの2年間とする。

4. 評価に関する事項

NEDO技術開発機構は、技術的及び産業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。その他、必要に応じ適宜開催することとする。

5. その他の重要事項

(1) 技術開発課題の変更

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・経済的状況、内外の研究開発動向、政策動向等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、技術開発体制等技術開発課題の見直しを弾力的に行う。

(2) 根拠法

＜助成事業＞独立行政法人新エネルギー・産業技術開発機構法第15条1項3号に基づき実施する。

＜委託事業＞独立行政法人新エネルギー・産業技術開発機構法第15条1項1号ハに基づき実施する。

6. 技術開発課題の改訂履歴

(1) 平成15年3月、制定。

(2) 平成17年1月、改訂

新製造技術プログラム基本計画

1. 目的

I T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・I T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ため設計・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、多様なユーザーニ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

グローバル化の進展やアジア諸国の製造業の台頭など、我が国製造業を取り巻く環境が厳しさを増す中で、製造業の高付加価値化による競争力の強化が急務となっている。このような観点から、情報通信、医療・バイオ、自動車など多様な分野において、小型・高機能で省エネルギー性に優れた高付加価値部品の製造を可能とするMEMS技術に対し、我が国製造業を支える新たな基盤技術としての期待が高まっている。

経済産業省では、研究開発の成果が迅速に事業化に結びつき、産業競争力強化に直結する「経済活性化のための研究開発プロジェクト（フォーカス21）」の一つとしてMEMS分野を位置付けており、比較的短期間で新たな市場が想定され、経済波及効果が期待できる分野のMEMS製品の開発を国が支援することにより、国際競争力を強化することを目的としている。

MEMSは、自動車用加速度センサやインクジェットプリンタのヘッドなど一部の分野で既に実用化が始まっており、2003年時点でMEMSを活用した製品は国内で約5,000億円の市場を形成しているとも推定される。今後は、光通信や高速無線通信といった通信分野、血液検査や環境計測などの化学・バイオ分野等を中心に、2010年までに国内市場は1兆3500億円程度に成長する（基本計画策定時の予測2兆円よりその後修正された）と見込まれているが、一方で、これらの新しいMEMSは、現在実用化されているMEMSと比べて更なる高性能化や構造の複雑化等が進むと考えられている。このようなMEMSの実用化を図るためには、深さ方向の高精度な加工や複雑なパッケージングなどに代表される高度なMEMS製造技術の確立が不可欠である。

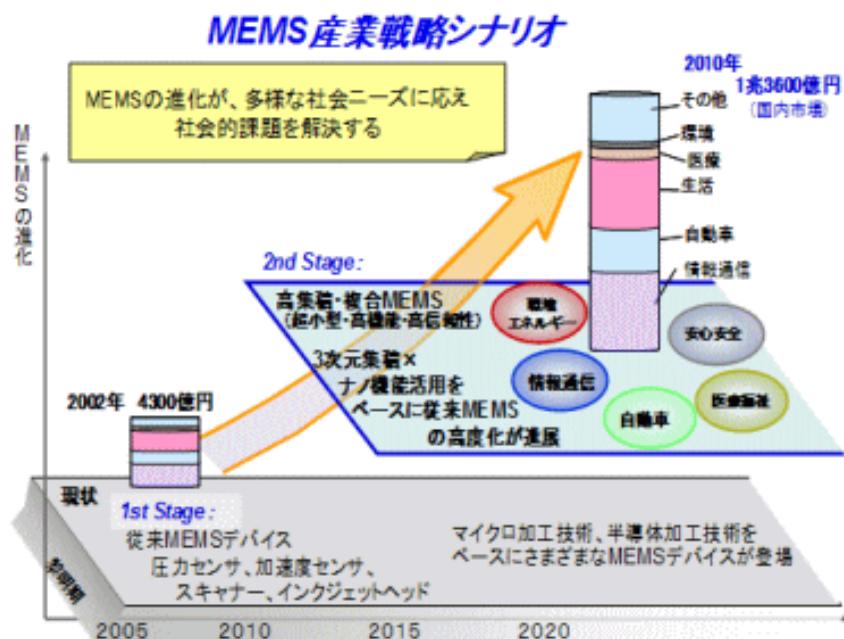


図 1.1 MEMS 進化のシナリオ

また、今後、MEMS技術をより多様な分野における製品に活用し、より大きな市場を形成していくためには、このような多様なMEMS製造技術が迅速に提供可能となる環境整備が重要と考えられる。

つまり、昨今急速に立ち上がっていく市場においては、早期に上市したメーカーがデファクトスタンダードとして市場を独占する傾向が強いため、競争力を確保するためには短期間での実用化が重要となる。また、多様なMEMS製品の開発には、ファンドリー事業の活性化にも目を向ける必要がある。大学やベンチャー企業等十分なファブを持たない開発者に広く活用してもらい、MEMS産業の裾野を拡大して、優れたアイデアを具現化させる必要がある。

しかしながら、企業単独で行う場合には以下のような困難な点がある。

- 今後成長が期待される分野における MEMS 製造技術の開発とその実用化には、短期間に莫大な投資が必要である
- これから成長する分野における市場予測精度の不確かさ、新たな技術分野に見られる高い技術ハードル等、高いリスクが存在する
- ファンドリー事業への展開は、最終的に国内のファンドリー拠点をつくることが狙いであり、多くの研究者が利用できる公共性の高いものである

これらの観点から、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コミットメントを得つつも、NEDO が関与することで実用化を促進し、国際競争力を有利なものにすべきである。

1.2 実施の効果(費用対効果)

NEDOが本プロジェクトを実施する効果として、以下の4つが挙げられる。

(1) MEMS 製造技術の国際競争力の向上

本プロジェクトにより、難易度の高い高精度三次元加工によるMEMSの実用化が進むことで、高い成長率が期待される情報通信MEMSやバイオMEMSについて我が国の競争力の強化が図られる。

(2) 我が国の MEMS 市場の拡大

RF-MEMS、光MEMS、センサMEMSの各分野において高度な製造技術が確立されるとともに、具体的なMEMSが実用化されることで、我が国MEMS産業の市場拡大が見込まれる。

(3) 多様なMEMS製品の開発の加速化

また、開発したMEMS製造技術がファンドリー事業に展開されることで、MEMS産業の裾野の拡大と、国際競争力を持った多様なMEMS製品の開発の加速化が期待できる。

(4) ファンドリー事業の発展と新規参入者の拡大

国内研究機関のアイデアがファンドリー事業者を利用することにより実現されるため、MEMS技術力が向上するばかりでなく、ファンドリー事業に対する評価も高くなり、事業の展開が容易になる。

プロジェクトの総実績額は43億円であったが、各社とも本プロジェクトの成果の製品化、実用化のシナリオに沿った事業展開を着実に進めており、ハイリスクな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絶大なものがあったといえる。また、各種展示会等で本プロジェクトの成果である新規プロセスを取り入れたファンドリー事業の拡充も広くPRしており、ファンドリー事業に対する引き合い件数も着実に増加している。

なお、本プロジェクトの展示・PR活動は昨年開催された「愛・地球博」会場のNEDOパビリオンでの展示も含めのべ39件行い、また報道数ものべ51件に上るなど、広く一般国民へその成果を公開し、MEMSをより身近にすべく努めている。

2. 事業の背景・目的・位置付け

2.1 事業の背景・目的

これまで、日本におけるMEMS産業はインクジェットプリンタヘッドや自動車用加速度センサに代表されるように、マイクロマシン分野やセンサ分野で成長してきた経緯がある。同様に欧米でもボッシュやアナログデバイセズ等が自動車用やコンシューマー用に高信頼性、低コスト化の集積化センサを開発し、市場を席卷しつつある。一方で、T I（テキサス・インスツルメンツ）が光学機器向けのDMD（Digital Micromirror Device）を開発し、光MEMS市場を開拓するなど、海外メーカの成長が著しい。しかしながら、国内のMEMS産業に目を向けると、新たな市場展開は目に見える形では起きていない。今後新しいMEMSは、現在実用化されているMEMSと比べて更なる高性能化や構造の複雑化等が進むと考えられているが、MEMS技術をより多様な分野における製品に活用し、より大きな市場を形成していくためには、新たなMEMS分野において多様なMEMS製造技術が迅速に提供可能となる環境整備が重要である。

また、多様なMEMS製品の開発には、ファンドリー事業の活性化にも目を向ける必要がある。欧米では比較的早い段階でMEMSファンドリーサービスが開始され、米国ではMUMPS、欧州ではEURO PRACTICEが有名である。日本においても、一部の民間企業がファンドリーサービスを行っているが、より使いやすいサービスにするためにファンドリーメニューをさらに充実させるための技術開発が重要となる。これにより、大学やベンチャー企業等十分なファブを持たない開発者に広く活用してもらうことで、MEMS産業の裾野が拡大されることになる。

以上の2つの視点から今後のMEMS分野の産業競争力強化につなげていくことが、本プロジェクトの目的である。

2.2 事業の位置付け

このような状況の中、我が国の製造技術をより高付加価値化するための施策として、経済産業省が新製造技術プログラムを制定した。本プログラムは、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、目標として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ことを掲げている。

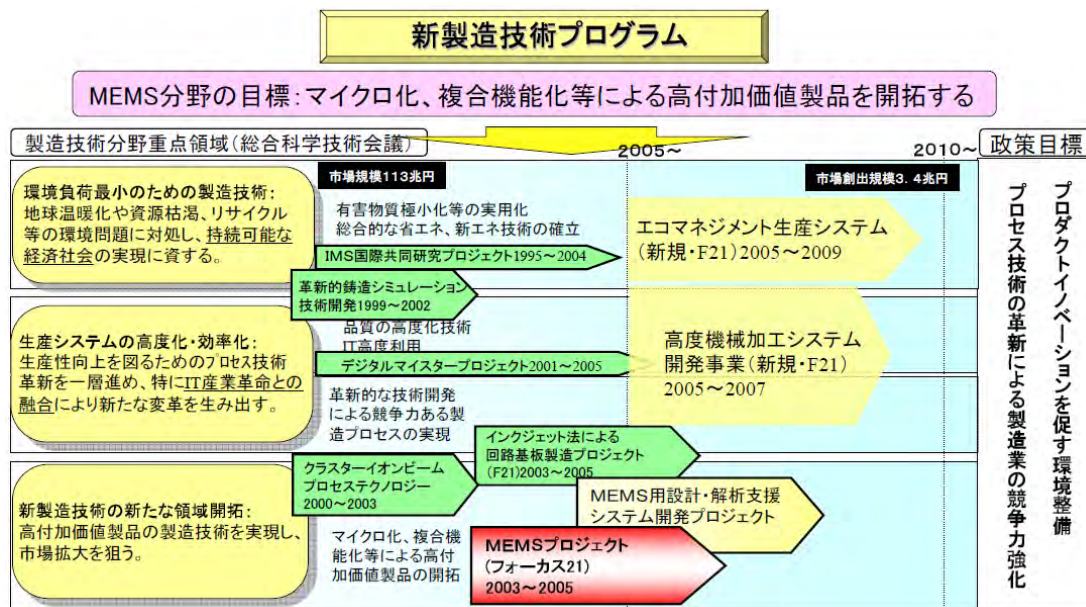


図1.2 新製造技術プログラム

この新製造技術プログラムの中で、MEMSプロジェクトは、マイクロ化・複合機能化等による高付加価値製品の開拓により市場拡大に貢献することで目標に合致している。

なお、本プロジェクトは、経済産業省において研究開発の成果が迅速に事業化に結びつき、産業競争力強化に直結する「経済活性化のための研究開発プロジェクト(フォーカス21)」に位置付けられており、次の条件のもとで実施した。

- ・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組みが示されていること。

フォーカス21は、比較的短期間で実用化が見込まれる重点4分野(ライフサイエンス、環境、情報通信、ナノテクノロジー・材料)において、経済活性化を促進するプロジェクトであり、MEMSプロジェクトは情報通信分野における重要プロジェクトのひとつと認識されている。

実用化に直結した経済活性化プロジェクトの創設 (フォーカス21)

ライフサイエンス、情報通信など重点4分野において、比較的短期間に実用化が見込まれ、その結果として民間企業のコミットメントが得られた経済活性化プロジェクトを「フォーカス21」として厳選し、予算の集中投入(367億円)を行う。

「フォーカス21」

(計30プロジェクト:合計367億円(平成15年度予算額))
<60億円(平成14年度補正予算額)>

ライフサイエンス分野 88億円(0億円)
<平成14年度補正予算:23億円>

- 糖鎖エンジニアリングプロジェクト
- バイオ・IT融合機器開発プロジェクト
- その他・計8プロジェクト

環境分野 44億円(0億円)
<平成14年度補正予算:10億円>

- 省エネ型次世代PDPプロジェクト
- 光触媒利用高機能住宅用部材プロジェクト
- その他・計8プロジェクト

情報通信分野 173億円(46億円)
<平成14年度補正予算:28億円>

- 情報通信基盤高度化ソフトウェア開発プロジェクト
- 半導体アプリケーションチッププロジェクト
- その他・計13プロジェクト
(5プロジェクト再掲)

ナノテクノロジー・材料分野 61億円(0億円)

- カーボンナノチューブFEDプロジェクト
- ダイヤモンド 極限機能プロジェクト
- その他・計13プロジェクト
(7プロジェクト再掲)

()内は平成14年度予算額

図 1.3 フォーカス21の創設

情報通信分野

<政策の必要性>

○日本経済の基幹産業である情報通信産業が、今後とも我が国経済を牽引していくためには、技術動向に加えて市場の発展性も見極めつつ、ハードとソフトの両面から戦略的に取り組んでいくことが不可欠。

○特に、実用化に直結し短期間で大きな市場が見込まれる。

- 1)半導体の製造技術及びその応用チップの開発、
- 2)情報通信機器を他の機器とネットワーク化し活用するためのシステム(ソフトウェア)

の分野に資源を集中投入して、取組みを加速化することが必要。

○併せて、高速大容量の通信が可能となるよう情報通信の基盤整備を図ることも必要。

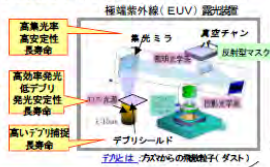
半導体アプリケーションチッププロジェクト

- ・事業期間 H15～17年度(3年間)
- ・H15年度予算案額 33億円
(H14年度補正予算案額 10億円)
- 高度情報化時代を迎え、今後の半導体チップで重要となる高性能・高信頼性サーバ用半導体チップ及び電源を切っても記憶が消えない(不揮発性)半導体メモリを開発。
- 高性能・高信頼サーバ用半導体チップ
高価な大型コンピュータから安価なサーバへのダウンサイジングが進展するなかで、オープンソースソフトウェアをOSとするサーバの信頼性向上が今後の重要な課題。そこで、オープンソースソフトウェア向けのサーバの頭脳になる計算用半導体チップを開発する。
- 不揮発性メモリ(MRAM: Magnetoresistive Random Access Memory)
電源を切ってもデータが消えないパソコンや消費電力の低い携帯情報端末等を実現するために、磁気材料を用いた電源を切っても記録が消えない(不揮発性)メモリを開発する。



極端紫外線(EUV)露光システムプロジェクト

- ・事業期間 H15～17年度(3年間)
- ・H15年度予算案額 25億円
- 高度情報化社会を実現するためには、情報通信機器の共通基盤技術である半導体LSI技術の微細・高集積化が必要不可欠であり、その中でも露光技術は、微細加工技術を先導する重要な役割を担っている。
- 本プロジェクトでは、半導体技術ロードマップにおけるテクノロジーノード50nm以降に対応する波長13nm～14nmの極端紫外線(EUV: Extreme Ultra Violet)を用いた露光システムを開発する。



我が国半導体産業の技術基盤の確立及び競争力向上 (2004年に世界の半導体市場は35兆円との予測)

情報通信基盤高度化ソフトウェア開発プロジェクト

- ・事業期間 H15～17年度(3年間)
- ・H15年度予算案額 38億円
- ビジネス・クラウド・コンピューティング
ネットワークで接続された複数のサーバ(中型コンピュータ)、記憶装置を、あたかもひとつのコンピュータのように稼働して、ビジネス利用に耐えられるような高信頼・高安全なサービスを提供するための基盤ソフトウェア(ミドルウェア)を開発。
- デジタル情報機器相互運用基盤
家庭や公共の場で情報家電、携帯情報端末などの各種の情報機器を、特別な知識がなくとも容易にかつセキュリティなど信頼性が高く接続できて情報のやりとりが可能となるためのソフトウェアを開発。

情報通信システムのソフトウェア基盤技術の確立及び競争力向上

その他のプロジェクト

- <次世代半導体材料・プロセス基盤プロジェクト>
・事業期間: H15～17 H15年度予算案額: 46億円
(H14年度補正予算案額: 18億円)
- <最先端システムLSI設計プロジェクト>
・事業期間: H15～17 H15年度予算案額: 6億円
- <MEMSプロジェクト>
・事業期間: H15～17 H15年度予算案額: 19億円
- <準天頂衛星システム基盤プロジェクト>
・事業期間: H15～19 H15年度予算案額: 12億円
(フォーカス21分6億円)
- <インクジェット法による回路基盤製造プロジェクト(再掲)>
- <省エネ型次世代PDPプロジェクト(再掲)>
- <カーボンナノチューブFEDプロジェクト(再掲)>
- <高分子有機EL発光材料プロジェクト(再掲)>
- <ディスプレイ用高強度ナノガラスプロジェクト(再掲)>

図 1.4 フォーカス21における MEMS プロジェクトの位置づけ

今後、国内の MEMS 市場では、光通信や高速無線通信といった通信分野、血液検査や環境計測などの化学・バイオ分野を中心に MEMS が普及していくと予想され、2010 年には 1 兆 3500 億円の市場規模に拡大していくと考えられる。

こうした状況の中、MEMS 産業の国際競争力を確保するためには、新たな市場での早い段階での市場投入が重要である。今後早い時期に、新たに創出される分野を調査し、

- ①RF-MEMS
 - ②光 MEMS
 - ③センサ MEMS
- と予測した。

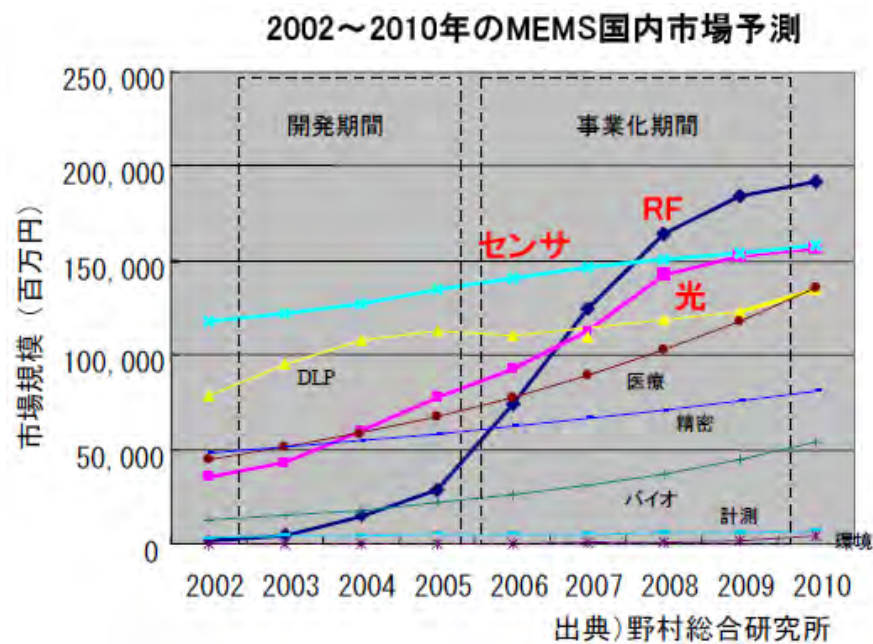


図 1.5 2002～2010 年の MEMS 市場

RFMEMS では主に RF スイッチ、アンテナなどの市場が今後急速に立ち上がると考えられる。これは、高周波帯域における MEMS スイッチの高特性により、次世代携帯電話を中心とした高周波を用いるアプリケーションにて、従来ディスクリートにて行われてきたスイッチ回路が RFMEMS に置換わることを想定している。

3GHz以上の周波数帯では、既存のディスクリート（GaAs FET、PIN ダイオード）のスイッチ回路では挿入損失が大きくなり、良いスイッチ特性が出ない。一方、RFMEMSでは、周波数が変化しても挿入損失がほとんど変化しない特性をもつことから、スイッチングデバイスとして非常に有望なものとして期待されている。

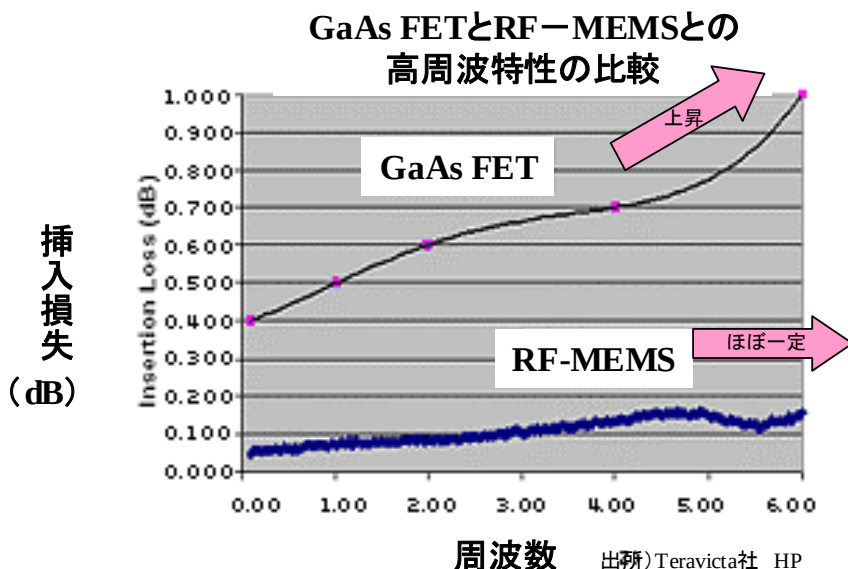


図 1.6 GaAsFET と RE-MEMS との高周波特性の比較

また、RFMEMS が搭載されるアプリケーションの市場を見ると、RFMEMS がその優位性を発揮できる 2GHz 以上の高周波携帯電話の市場は 2005 年の 6,800 万台から 2010 年の 2.5 億台に欠けて急速に拡大していくと考えられる。こうした市場にて、ディスクリート回路から RFMEMS に置き換えが進行すると、RFMEMS の市場は 2006 年をめどに急速に立ち上がることが期待される。

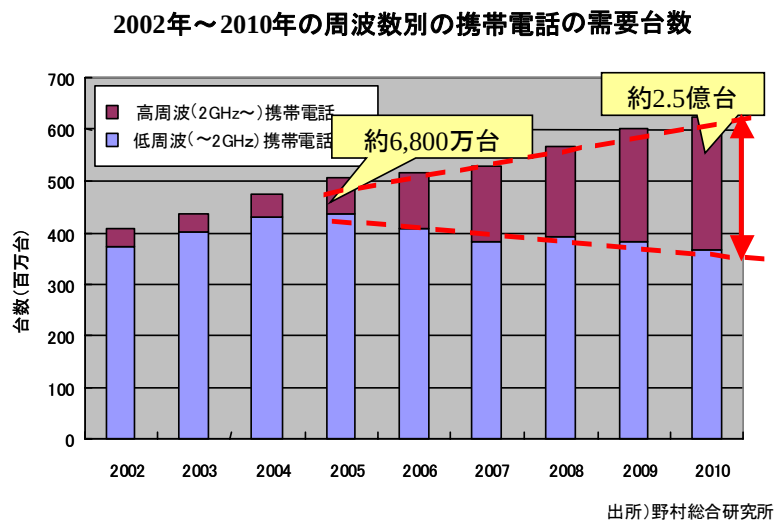
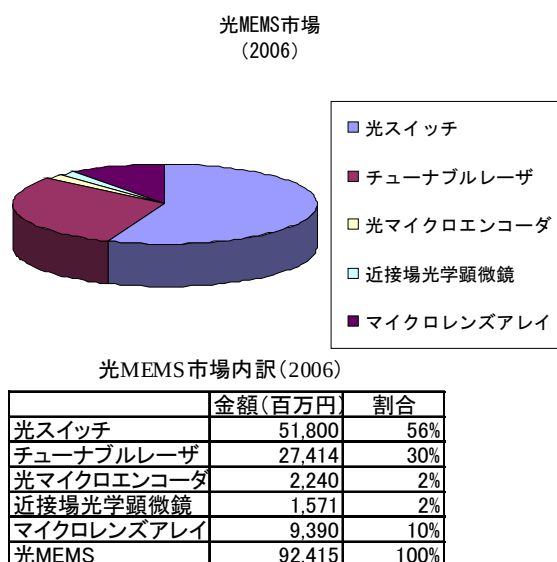


図 1.7 2002～2010 年にかけての携帯電話国内市場予測

光 MEMS の分野では、アプリケーションの多くに光可動ミラー素子が用いられる共通の素子である。光可動ミラー素子とは、単一もしくは複数の微小ミラーを用いて光制御を行うデバイスであり、光スイッチ、マイクロ光スキャナ、偏向ミラー、DLP などに用いられている。また、光通信機器、光計測機器、表示装置など今後の成長潜在力の高いアプリケーションにも用いられている。2006 年までの素子別の市場規模を見ると、光スイッチを中心に市場が拡大していくものと考えられる。

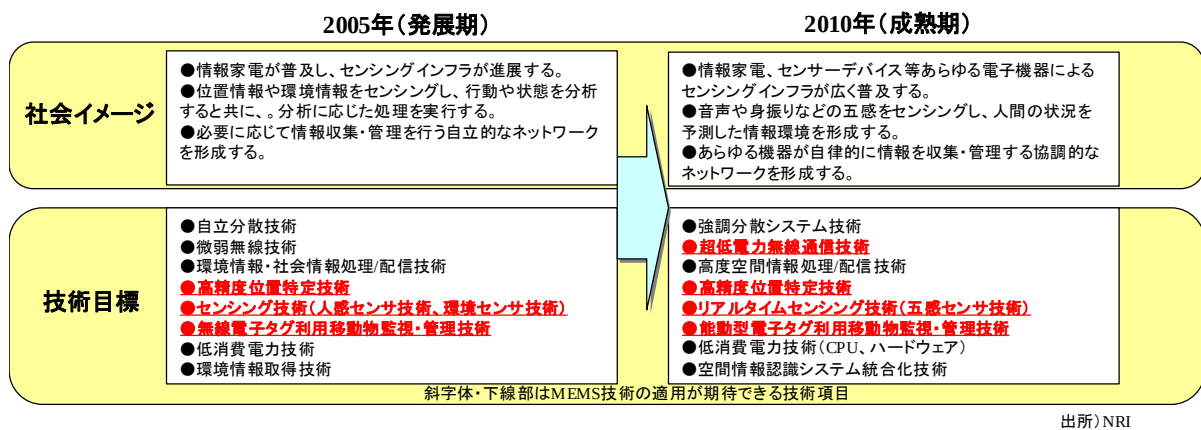


出所)富士キメラのデータを基にNRI作成

図 1.8 光 MEMS のデバイス別国内市場

センサ MEMS の中でも特に自動車用センサは市場規模としては非常に大きく、他の MEMS に比べても成熟している領域であるが、今後この自動車向けを中心とするセンサ MEMS に大きな変化が生じると考えられる。1つのトレンドとして、車両制御の統合化に伴い、MEMS センサの複合化がニーズとして新たに求められると考えられる。

もう1つのトレンドとしては、ユビキタスネットワーク社会などの次世代の生活シーンとして、コンシューマー向けのセンサ MEMS が増加していく。ユビキタスネットワーク社会を中心とする次世代生活シーンでは、多くのセンシング技術が必要になると考えられている。自動車用センサとして用いられている加速度センサ、圧力センサなどは人の動きやバイタルサインなどを計測する際に非常に有望であると考えられている。これらの事例に共通して言えることとして、次世代生活シーンでは、センシング技術が必要となり、かつそのデバイスは非常に小さいものが要求されていることにある。



出所) NRI

図 1.9 ユビキタス社会の社会イメージとそこで用いられる技術

Ⅱ．研究開発マネージメントについて

1. 事業の目標

フォーカス21の要件に照らし、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（Radio Frequency、高周波）－MEMS、光MEMS、センサMEMS）の実用化に必要な製造技術を開発する。また、本プロジェクトで開発した要素技術の成果を、目標とする製品のみならず、より多様な分野における製品に活用し、さらにはMEMS製造設備を十分有しない大学や新規事業者等の参入障壁を下げるファンドリー事業へ展開する。

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、各々の達成目標は、市場の要求スペックおよびコストがその設定根拠となる。

①RFスイッチ製造技術の開発

RFスイッチは、RF-MEMSの中で現在最も期待される需要が大きく、かつRF-MEMSに共通の課題を多く含んでいることから、その実用化技術開発はRF-MEMS全般の実用化に波及効果が大きい。従って、本技術開発においては、RFスイッチの製造技術の開発を行うこととする。

イ. 技術開発の具体的内容

1) RFスイッチの高周波信号線路、接点に用いられる金属薄膜、及びアクチュエータの形状を精密に制御して、高周波の反射・損失を最小限に抑える高精度材料加工技術を開発する。

2) 金属接点に発生する固着を、接触部分の材料の選定や接触部分を保護するパッケージ技術により低減させ、デバイスの寿命を延伸させる技術を開発する。

3) 高周波に対応したパッケージ方法を開発し、封止パッケージによるインサーションロスの増加を最小限に押さえる技術を確立する。

ロ. 達成目標

1) 厚さ2 μ m程度の金属薄膜等を用いた高周波信号線路、接点及びシリコン等のアクチュエータ構造においアクチュエータ以下の高精度材料加工技術を構築する。

2) 動作回数10⁹回以上の確保が可能な接点固着防止技術を構築する。

3) DC～10GHzの信号伝送で、パッケージングによるインサーションロス増加を0.1dB以下に抑えるパッケージ技術を構築する。

②光可動ミラー製造技術の開発

単一または複数の微小ミラーを用いて光制御を行う光可動ミラーアレイは、光スイッチ、マイクロ光スキャナ等、多くの光MEMSに共通の機能素子であり、その実用化技術開発は光MEMS全般の実用化に波及効果が大きい。従って、本技術開発においては、光可動ミラーの製造技術の開発を

行うこととする。

イ. 技術開発の具体的内容

1) 微小可動ミラーの表面粗さをナノレベルにすることで、インサーションロスを抑えることが可能な高精度加工プロセス技術を開発する。

2) 微小可動ミラーを駆動するアクチュエータ素子と、位置検出を行う集積化されたセンサ素子を組み込んでアクチュエータ精度かつ自由に角度制御することを可能とする集積化光制御素子を開発する。

3) 実用上十分な駆動信頼性を確保するため、信頼性を含む計測・評価技術を開発する。

ロ. 達成目標:

1) 微小可動ミラーの表面粗さの絶対値が、 $100\ \mu\text{m}$ 角平方の面積に渡って50nm以下の平坦度を達成する高精度加工技術を開発し、光学モジュールと一体化した後のインサーションロスとして3dB以下を実現する。

2) 微小可動ミラーを2/1000度以下の精度で自由に角度制御することを可能とするセンサ・回路集積化加工技術、及び高精度制御技術を構築する。

3) 信頼性を含む高精度計測・評価技術を開発し、常温にて 10^{10} 回以上の駆動信頼性を有する高精度微小可動ミラーを実現する。

③超小型MEMSセンサ製造技術の開発

MEMSセンサは、自動車分野などに幅広く普及しているが、今後、更なる小型化と機能集積を実現する「超小型センサ」の実用化が期待されている。このためにはウエハレベルパッケージ技術の開発が重要であること、及び、同技術はMEMS全般の実用化共通課題でもあり波及効果も大きいことから、本技術開発においては、ウエハレベルパッケージの実用化技術開発を通じた超小型MEMSセンサの製造技術の開発を行う。

イ. 技術開発の具体的内容

1) Siセンサウエハに接合されたパッケージ基板(ガラス、Si等)を通じてSiセンサ信号を外部に取り出すための量産に適合した配線・電極形成技術を開発する。

2) 封止工程によるSiセンサ部への内部熱応力を抑制するため、Siセンサウエハに接合するパッケージ基板とセンシング部本体ウエハの量産に適合した低温接合技術を開発する。

3) パッケージ化したセンサとその信号処理を行う回路部品(ICや電子部品)を一体化する工程を開発する。

4) 上記1)～3)の技術開発を行うことにより、MEMSのウエハレベルパッケージ一貫工程を構築し、センサチップ体積に対するパッケージ体積の抜本的な小型化と低コスト化を可能とする実装技術を開発する。

ロ. 達成目標:

1) 厚み数百 μm 程度の基板(ガラス、Si等)に、 $10\ \mu\text{m}$ 以下の口径の貫通孔を形成する量産に適合した工程とこれに電気配線材料を埋め込む量産に適合した工程を構築する。

2) Siセンサウエハに接合するパッケージ基板とセンシング部本体を $\pm$ 数 μm 以内の高精度に位

置合わせして常温で接合する量産に適合した工程を構築する。

3) パッケージ化したセンサとその信号処理を行う回路部品(ICや電子部品)を一体に実装し、モジュールに仕上げる量産に適合した工程を構築する。

4) 上記 1)～3)の技術開発を行うことにより、MEMS のウエハレベルパッケージ一貫工程を構築し、現状の樹脂パッケージやセラミックパッケージに対して、センサチップ体積に対するパッケージ体積比率を 1/10 以下に、コストを 1/2 以下に低減可能な実装技術を構築する。

また、本プロジェクトで開発した要素技術の成果を、目標とする製品のみならず、より多様な分野における製品に活用し、さらにはMEMS 製造設備を十分有しない大学や新規事業者等の参入障壁を下げるファンドリー事業を整備する。

平成 17 年 1 月より、プロジェクト期間中にファンドリーの有効性検証を行うための委託事業を追加した。この委託事業では、高度な製造プロセスを必要とする先進的なデバイス開発を、全工程ファンドリーを活用して試作することにより、本プロジェクトで整備したファンドリーの有効性検証を行う。

④MEMS デバイスの研究開発

超小型 6 軸フォースセンサの研究開発、マイクロ走査型顕微鏡の研究開発、スマートスキンの実現を目指すMEMS アレイとその信号接続方法の研究については、それぞれ目標とするデバイスの開発試作を完了する。

これらの研究開発スケジュールと開発予算の推移を下表に示す。

光可動ミラー製造技術の開発に関しては、プロジェクト中に達成目標2) の角度制御をクリアするための新たな課題が見つかり、その対策に予想以上の時間を要することになった。しかしながら、原因は明らかであり、開発期間を延長することで目標を満足する目処が立っていたことから、半年間期間を延長して実施した。本プロジェクト 3 年間の総予算額は約43億円である。

表2.1 研究開発スケジュールと開発予算

		平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	
(1)RFスイッチ製造技術の開発						
(2)光可動ミラー製造技術の開発						※半年間延長
(3)超小型MEMSセンサ製造技術の開発						
(4)MEMSデバイスの研究開発						
年度別予算(百万円)						総額(3年間)
一般会計						
特別会計 (高度化)	助成	591 (上期) 560 (下期)	1,765	1,306	26 ※前期からの繰越し分	4,248
	委託			86		86
総予算額(計)		1151	1,765	1,392	26	4,334

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から各実施者に助成率1/2で助成を行う体制とした。公募により6件の応募があり、プロジェクトの目的および審査基準に合致した3件を採択した。プロジェクト開始時の実施体制を以下に示す。RFスイッチ製造技術の開発はオムロン株式会社、光可動ミラー製造技術の開発はオリンパス株式会社、超小型MEMSセンサ技術の開発は松下電工株式会社がそれぞれ開発を実施した。

また各実施者の行う研究テーマ間に密接な関連はなく、プロジェクト遂行に当たって個別の運用・管理が可能であることから、プロジェクトリーダーは置かずNEDOが直接マネジメントを行う体制とした。

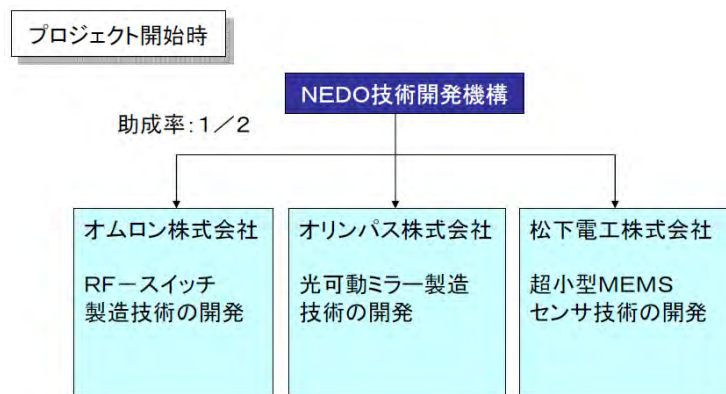


図2.1 実施体制（プロジェクト開始時）

2.3 研究開発の運営管理

運営管理方法は、立命館大学 杉山教授を委員長とした技術委員会を設置した。この委員会は各テーマの専門家および有識者で構成され、研究開発の進捗状況、競合技術とのベンチマーク、事業化計画に関する議論を2回/年の頻度で実施した。その中でNEDOは、運営管理体制の見直し、プロジェクト途中での事業追加、開発期間の延長等の企画立案、調整を行った。また、技術委員とともに実施者を個別訪問して、試作サンプルを確認しながら進捗確認・技術相談を行うなど、研究開発を機動的に管理し課題の吸い上げと迅速な対応を心がけた。

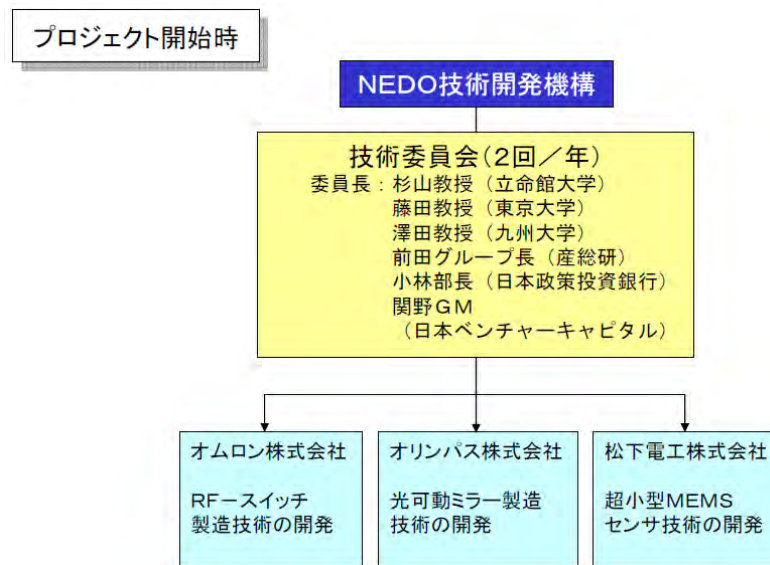


図2.2 プロジェクト運営管理（プロジェクト開始時）

3. 情勢変化への対応

平成16年度技術委員会（平成16年6月23日開催）にて、ファンドリー整備状況について、ファンドリーがどこまで対応できるかの有効性については未知数。プロジェクト期間中に、ファンドリーの有効性検証を行うべき。との委員の指摘を受け、プロジェクト期間中にファンドリーの有効性検証を行うための委託事業 ④MEMSデバイスの研究開発を、平成17年1月より追加した。委託先の選定においては、助成事業者との技術的な連携および技術的に最も精通・関与しており、上記研究開発を遂行するために基礎となる研究実績と高い技術的な知見および能力を有している3大学への委託事業とした。

この委託事業は、高度な製造プロセスを必要とする先進的なデバイス開発を、ファンドリーを活用して試作することにより、本プロジェクトで整備したファンドリーの有効性検証を行うことを目的としたものである。また同時に助成事業者との連携により、技術レベルの高度化を狙った。

これにより、実施体制を以下のように変更した。

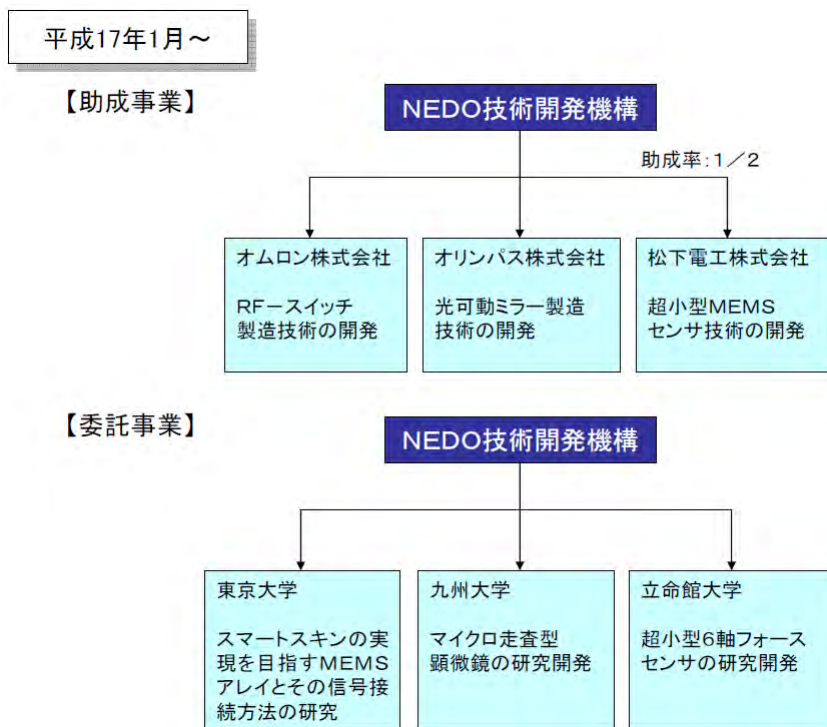


図2.3 実施体制（平成17年1月～）

また同時に運営管理方法も見直し、委託事業であるファンドリーの有効性を検討する技術検討会を新たに設置した。この技術検討会では、委託事業者が助成事業者に対してファンドリーによる試作進捗を報告し、課題についての議論とそこで明らかになった成果やノウハウを助成事業へ展開し、技術レベルの高度化を図ることを目的とした。

このように、これまでの技術委員会では助成事業の進捗管理、技術検討会では委託事業の進捗報告および情報共有と役割を分けることで効率的なマネジメントを実施した。

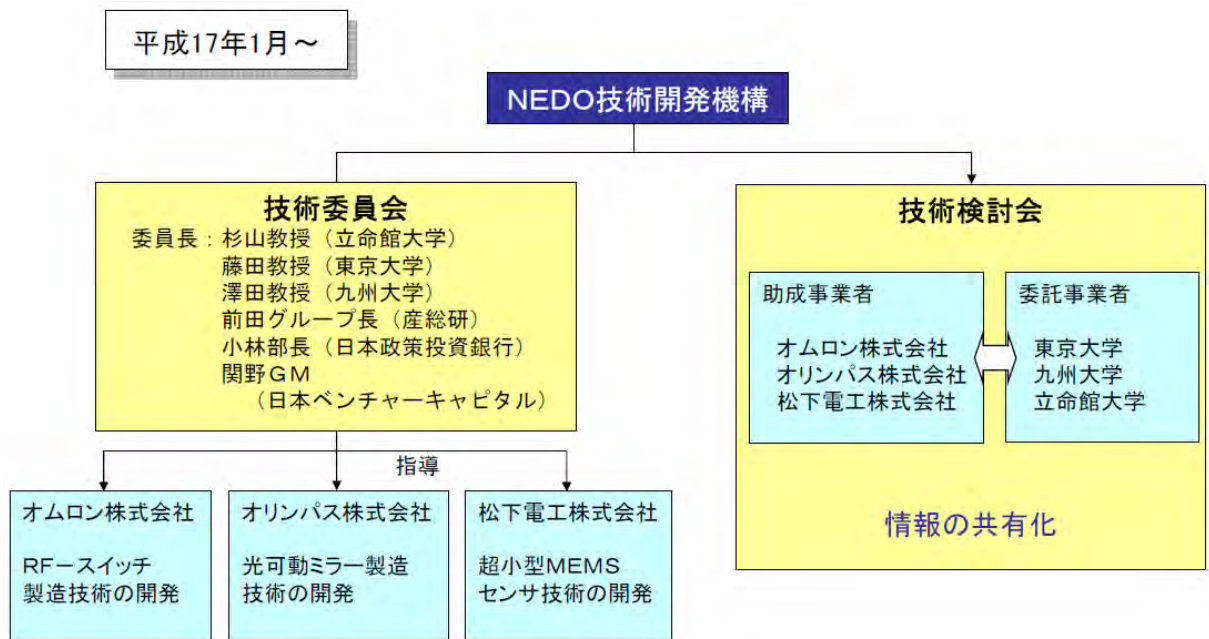


図2.4 プロジェクト運営管理（平成17年1月～）

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) 目標の達成度

助成事業では一部開発期間を延長したものの、RF-MEMS、光 MEMS、センサ MEMS の各分野において設定したRFスイッチ、光可動ミラー、超小型MEMSセンサの実用化に必要な製造技術を確認し、当初の目標を達成できた。また委託事業では、マイクロ走査型顕微鏡の研究開発において一部目標性能を満足できなかったものの、ファンドリーを利用した先進的なデバイス開発試作は概ね目標を満足することが出来た。

目標性能を満足できなかった原因は、一部のファンドリー試作でのアセンブリの精度不足によることが判明した。これについては現時点で高精度アセンブリの技術力が不足していること、また必要に応じプロセスを補完できるファンドリー企業間のネットワークが必要である点を浮き彫りにした。これらは財団法人マイクロマシンセンターに設置された MEMS 協議会等にも働きかけ、MEMS ファンドリーサービスの更なる充実を目指していきたいと考える。

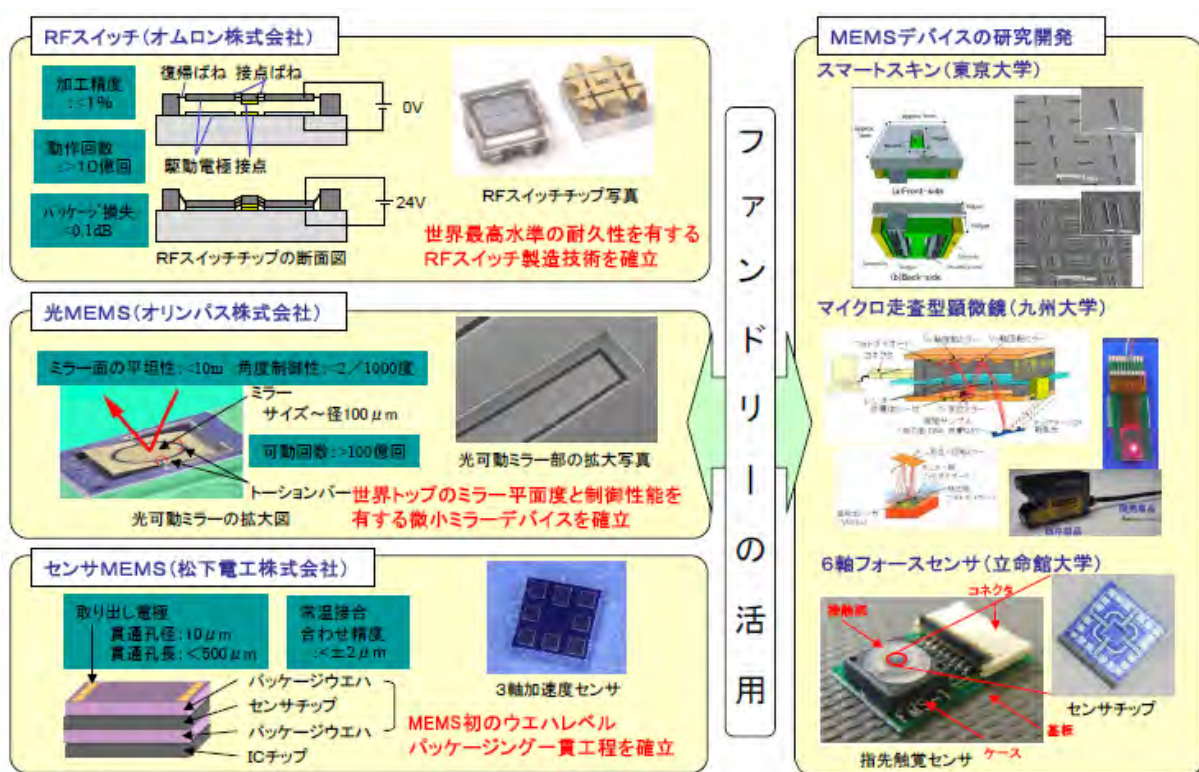


図 3.1 事業全体成果

表 3.1 事業全体の達成度

テーマ	目標	成果	達成度
(1) RFスイッチ製造技術の開発	・量産レベルで加工精度1%を実現する ・開閉回数10億回を達成する ・量産レベルでパッケージ損失0.1dB (@10GHz)を達成する	・ばらつきも含めて加工精度1%を達成するとともに、ファンドリーへの技術移転を行った ・接点面着防止技術面着の起きにくい金属材料とその製作プロセスを確立し、開閉回数10億回を達成した ・パッケージ損失0.09dB (@10GHz)実用性を確認した	○
(2) 光可動ミラー製造技術の開発	i) 表面粗さ100 μm角平方の面積に達してPV値で50nm以下 ii) ターゲットAデバイスミラーソリ量100 μm角平方の面積に達してCPV値で1.5nm以下 ・ターゲットBデバイスミラーソリ量がPV値で6nm以下 ・微小可動ミラーを2/1000度以下の精度で自由に角度制御する ・常温にて10¹⁰回以上の駆動信頼性を実現する ・MEMSミラー及び空間光学系からなるモジュールを製作し、波長選択スイッチ(WSS)機能を実現する	i) PV値で20nm以下のエッチングが可能となった ii) ターゲットA: そりが曲率で1m以上(ソリ量で1.5nm以下)、ターゲットBのミラーデバイスのそりが曲率20cm以上(ソリ量で1.5nm以下)となり目標を達成した ・ターゲットBミラーデバイスの試作評価を行い制御角度、ほぼ2/1000度の制御分解能を確認した ・ミラーデバイスのヒンジ材料、3種類のミラーの駆動信頼性評価を実施し、ほぼ10¹⁰回以上の駆動信頼性があることを確認 ・MEMSミラー及び空間光学系からなるモジュールを製作し、波長選択スイッチ(WSS)機能を実証した	○
(3) 超小型MEMSセンサ製造技術の開発	・貫通孔配線・電極 径10 μm、深さ500 μm ・低温接合: 常温 ・アライメント精度±2 μm ・低温実装: 常温 ・小型パンプ: 径30 μm ・一貫工程構築し、超小型センサで検証 コスト1/2 - パッケージ/チップ体積従来比1/10以下	・径10 μm、深さ500 μmの貫通孔配線電極を実現 ・表面活性化により、Siウエハ常温接合を実現 アライメント精度±2 μm ・活性化フリップチップ工法により常温接合を実現 パンプ径30 μm ・ウエハレベルパッケージングの一貫工程を構築し、コスト1/2を実現 ・加速度センサにおいて、パッケージ/チップ体積従来比<1/10	○
(4) MEMSデバイスの研究開発	・スマートスキンの実現を目指すMEMSアレイとその信号接続方法の研究、マイクロ走査型顕微鏡の研究開発、超小型6軸フォースセンサの研究開発のデバイスの開発試作を完了する	スマートスキンの実現を目指すMEMSアレイとその信号接続方法の研究、マイクロ走査型顕微鏡の研究開発、超小型6軸フォースセンサの研究開発のデバイスの開発試作を完了した。	概ね○ (一部において目標未達)

※達成度は、目標を達成したものを○とした

(2) 成果の意義

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として、

- ・世界最高水準の耐久性を有するRFスイッチ製造技術（オムロン株式会社）
- ・世界トップのミラー平面度と制御性能を有する微小ミラーデバイス（オリンパス株式会社）
- ・MEMS初のウエハレベルパッケージング一貫工程（松下電工株式会社）

に示される製造技術を開発できたことは、国際競争力の大きなアドバンテージになったといえる。

また、本プロジェクトで開発した要素技術の成果をファンドリー事業に展開したことで、ファンドリー事業に対する引き合い件数も着実に増加している。この結果は、ユーザーのニーズに合致するプロセスが提供できたことを意味しており、MEMS産業の裾野が拡大されつつある。

以上のことから、本プロジェクトは当初の目的を果たしたといえる。

(3) 特許の取得状況

本プロジェクト全体の特許の出願状況は、国内出願 95 件、外国出願 9 件、計 104 件であり、戦略的に出願している。

(4) 論文発表・成果の普及

論文発表は、国内 51 件、海外 26 件の計 77 件、新聞雑誌等による報道は 51 件を数えた。
また、展示会等での P R 活動はのべ 39 件に上る。昨年開催された「愛・地球博」会場の NEDO
パビリオンでも本プロジェクトの成果を紹介するなど、広く一般国民へその成果を公開し、よ
り MEMS を身近なものにするよう努めた。

表 3.2 論文、特許出願、報道数一覧

	論文等誌上発表 (論文誌、学会誌、国際会議)		特許		報道 (新聞、雑誌等)
	国内	海外	国内	海外	
(1)RFスイッチ製造技術の開発	15	4	7	3	20
(2)光可動ミラー製造技術の開発	24	0	4	0	19
(3)超小型MEMSセンサ 製造技術の開発	5	4	82	6	9
(4)MEMSデバイスの研究開発	7	18	2	0	3
計	51	26	95	9	51
合計	77		104		51

2. 各テーマ成果まとめ

(1) 目標の達成度

1-1 RFスイッチ製造技術の開発

超小型、高信頼性で封止パッケージ化した高周波RFスイッチの製造技術の開発

研究項目	目的	目標	成果	達成度
高精度3次元加工技術開発	絶縁膜, シリコン加工形状, 電極金属成膜のそれぞれの高精度加工を実現する。	加工精度 $\pm 1\%$ 以下を実現する。	・絶縁膜の高精度成膜技術を取得 ・シリコン加工の高精度加工技術を取得 ・電極金属の高精度成膜技術を取得 ・高速・高精度計測評価技術を取得	絶縁膜成膜精度 $\leq 0.93\%$, シリコン加工形状 $\leq 1\%$ 電極金属膜 $\leq 0.92\%$ となり, 目標を達成した。
接点固着防止技術開発	超長期開閉寿命を実現する。	・10億回以上の接点开閉を実現する。	・高耐久材料データベースを構築。最適材料, 成膜構成の抽出を実現。 ・高耐久材料の表面処理, 加工技術を取得。 ・超長期接点寿命評価技術の取得。	・接点开閉回数において, 目標10億回 < 20 億回となり, 目標を達成。
低損失パッケージ技術開発	低損失パッケージを実現する。	・10GHzでの伝送損失が0.1dB以下となるパッケージを実現する。	・低損失パッケージ材データベースを構築。 ・低損失パッケージ技術を取得。	・10GHzでの伝送損失が0.1dB > 0.09 dBとなるパッケージを実現。

1-2 光可動ミラー製造技術の開発

光スイッチの高精度加工技術の開発

(1) 目標の達成度

研究項目	目的	目標	成果	達成度
高精度3D 加工技術開発	ミラーの光学特性を向上するために、ミラー表面をナノ精度の粗さ、ソリに仕上げる高精度加工技術を開発する。	i) 表面粗さの絶対値が、 $100\ \mu\text{m}$ 角平方の面積に渡って PV 値で 50nm 以下 ii) ターゲットAデバイスミラーソリ量が $100\ \mu\text{m}$ 角平方の面積に渡って PV 値で 1.5nm 以下* ターゲットBデバイスミラーソリ量が PV 値で 6nm 以下*	i) DeepRIE エッチング装置を高精度エッチング技術を獲得するとともに、デバイス構造に適した後加工技術を開発した。 ii) ミラー薄膜成膜の内部応力を制御する技術を獲得し、ミラーデバイス構造、加工工程を改善することに成功した。	i) 表面から垂直平面の凹凸が PV 値で 20nm 以下のエッチングが可能となり目標を達成した。 ii) ターゲットAのミラーデバイスのそりが曲率で 1m 以上 (ソリ量で 1.25nm 以下)、ターゲットAのミラーデバイスのそりが曲率 20cm 以上 (ソリ量で 6.0nm 以下) となり目標を達成した。
高精度制御技術開発	微小ミラーを高精度かつ自由に角度制御する技術を開発する	微小可動ミラーを $2/1000$ 度以下の精度で自由に角度制御することを可能とするセンサ・回路集積化加工技術、及び高精度制御技術を構築する。	容量センシング方式を選択して、ミラーデバイス専用のアンプ IC の設計を行うとともに、ミラーデバイスに IC を実装一体化する技術開発を行った。	ターゲットBミラーデバイスの試作評価を行い制御角度、 2mm 度の制御分解能を確認した。目標を達成した。

信頼性・計測・評価 技術開発	実用上十分な駆動信頼性を確保するため、信頼性を含む計測・評価技術を開発する。	常温にて 10^{10} 回以上の駆動信頼性を有する高精度微小可動ミラーを実現する。	ミラー反射面の光学特性の高温高湿耐性、ミラー配線の信頼性、電極基板の絶縁耐性、ミラー駆動信頼性夫々の信頼性評価を行い、ミラーデバイスの信頼性評価技術を獲得した。	ミラーデバイスのヒンジ材料、3種類（ポリイミド、SiN、ポリシリコン）のミラーの駆動信頼性評価を実施して、ほぼ 10^{10} 回以上の駆動信頼性があることを確認。目標を達成した。
光ミラーアレイモジュール製作	光学的な位置合わせ精度を確保した光SW専用のインターフェイスとモジュール全体の信頼性を確保するためのケーシング技術を開発する。	MEMSミラー及び空間光学系からなるモジュールを製作し、波長選択スイッチ(WSS)機能を実現する。	ミラーアレイデバイスを試作し、光学部品と高精度に実装する技術を獲得した。	MEMSミラー及び空間光学系からなるモジュールを製作し、波長選択スイッチ(WSS)機能を実証し、目標を達成した。

* ミラーのソリ量は、光SWモジュール開発の過程で、当初の目標値の50nmでは、特性として不十分なことが判ったので、変更した。2つの数値目標があるのは、2つの仕様の光SWデバイスを開発目標としたため。

1-3 超小型MEMSセンサ製造技術開発

MEMSセンサの小型化、低コスト化とファンドリーサービス展開の為の製造技術の開発

研究項目	目的	目標	成果	達成度
①貫通配線・電極形成技術の開発	センサウエハの電気信号を外部に取り出す為のウエハ貫通配線・電極を形成する。	・孔径 $\phi 10 \mu\text{m}$、深さ $500 \mu\text{m}$ ・量産に適した工程の構築	・シリコンウエハを孔径 $\phi 10 \mu\text{m}$ で貫通するエッチング技術と、上記の貫通孔へCuを埋め込むめっき技術による貫通配線・電極形成技術を取得。 ・貫通配線を直列に接続した貫通配線・電極評価デバイスの試作評価により、歩留り、及び各種信頼性試験により特性変動なきことも確認し、量産に適した工程を構築。	・孔径 $\phi 10 \mu\text{m}$、深さ $500 \mu\text{m}$ 以下の貫通孔配線を形成。抵抗は、ほぼ理論値に合致しており、目標を達成。 ・貫通配線の電気的特性、歩留り、および信頼性の評価により、量産に適した工程を構築し、目標を達成。
②シリコンウエハ低温接合技術開発	シリコンウエハを、低温度、高精度で接合するウエハ接合技術を開発する。	・接合温度 25°C ・アライメント精度 $\pm 2 \mu\text{m}$ ・量産に適した工程の構築	・シリコンウエハを常温、高精度で接合する表面活性化ウエハ常温接合技術を取得。 ・ウエハ接合特性評価デバイスの試作評価により、歩留り、及びボイド、シエア強度特性の各種信頼性試験による特性変動なきことも確認し、量産に適した工程を構築。	・シリコンウエハ低温接合において、接合温度：常温 (25°C)、アライメント精度 $2 \mu\text{m}$ 以下を実現し、目標を達成。 ・ボイド、シエア強度特性、歩留り、および信頼性の評価により、量産に適した工程を構築し、目標を達成。

③センサ・回路一体化 実装技術の開発	MEMS技術 によって作ら れたセンサと 信号処理ICチ ップを、低スト レスで一体化 する	・バンプ接合温度 25℃ ・バンプ径 30 μ m ・量産に適した工程 の構築	・Au バンプを用い た表面活性化フリ ップチップ工法によ りセンサ・回路一体 化常温接合技術、 及び金スタッドバン プによる小径バン プ形成技術を取 得。 ・バンプ接続抵抗 評価素子を試作 し、各種信頼性試 験後に、接続抵抗 変動なきことを確認 し、量産に適した 工程を構築。	・低温バンプ実装に おいて、 接合温度 25℃、バ ンプ径 30 μ m 以下 を実現し、目標を達 成。 ・電気的特性、歩留 まり、および信頼性 の評価により、量産 に適した工程を構 築し、目標を達成。
④MEMSウエハレベ ルパッケージング一貫 工程開発 (a)3軸加速度センサ	ウエハレベル パッケージン グ技術による MEMSセンサ の小型化検証	パッケージ/チップ 体積従来比 1/10 以 下、感度：0.5 $\pm$ 0.05V/G、オフセット電 圧：1.5 $\pm$ 0.06V、他 軸感度： $\pm$ 2%	ウエハレベルパッ ッケージングプロセス のデバイス応用技 術を取得	パッケージ/チップ 体積従来比 1/10 以 下、感度： 0.5V/G、オフセット電 圧：1.5V、他軸感 度： $\pm$ 2%以下となり、 目標を達成。
(b)ジャイロセンサ	ウエハレベル パッケージン グ技術による MEMSセンサ の小型化検証	パッケージ/チップ 体積従来比 1/10 以 下、感度：10mv/dps 以上、精度： $\pm$ 1dps 以下	ウエハレベルパッ ッケージングプロセス のデバイス応用技 術を取得	パッケージ/チップ 体積従来比 1/10 以 下、感度：10mv/dps 以上、精度： $\pm$ 1dps 以下となり、目標を 達成。

1-4 MEMSデバイスの研究開発

1-4-1 スマートスキンの実現を目指す MEMS アレイとその信号接続方法の研究

研究項目	目的	目標	成果	達成度
アクチュエータアレイ デバイスの 製作	(1) 多数のアクチュエータを持つデバイスを歩留まり良く製作するプロセス (2) アレイ化マイクロアクチュエータの電氣的信頼性評価計測手法 (3) 2次元カンチレバー・アクチュエータアレイの作製	(1) シリコンのバルク加工で 500 個以上のアクチュエータを持つデバイスを 10 個以上作製 (2) 電氣的測定のみで、アレイ化マイクロアクチュエータの信頼性を評価する (3) 表面マイクロ加工で 1000 個以上のアクチュエータを持つデバイスを作製	(1) 気層フッ酸犠牲層エッチング技術をファンドリー企業に技術移転し、製作歩留まりを向上 (2) アクチュエータの共振周波数を電氣測定し、その変化から信頼性を評価 (3) ガラス基板上に熱駆動カンチレバー・アクチュエータアレイのデバイスを製作した	(1) 560 個のアクチュエータを持つ17 個のチップを作製し、目標を達成した。 (2) 実際のアクチュエータアレイデバイスに適応し融合性を確認し、目標を達成 (3) 1024 個のアクチュエータを持つチップを作製し、目標を達成
アレイデバイスの分散 制御法	(1) スマートスキン概念に基づくセンサ・アクチュエータ集積システムの分散制御 (2) 2次元カンチレバー・アクチュエータアレイとフォトダイオードアレイとの積層化によるフィードバック制御	(1) アクチュエータアレイデバイス上の物体の位置を検出しそれを動かす分散制御を実現する (2) 2次元カンチレバー・アクチュエータとフォトダイオードアレイを積層集積しフィードバック制御を実証する	(1) 搬送物体のエッジの検出およびエッジへのエアフロー印加という、フィードバック制御を行った。 (2) アクチュエータと同一ピッチのフォトダイオードアレイと積層して、デバイス上の搬送物検出しフィードバック搬送した	(1) 局所的分散情報処理に基づく制御が有効に働くことを示し、目標を達成した。 (2) 積層集積したセンサ・アクチュエータアレイで物体の検出とその情報に基づくフィードバック制御を行い、目標を達成した
回路チップ との信号接 続法	高電圧制御回路の集積化によりアクチュエータアレイを高機能化する	高電圧制御用ICチップをアクチュエータアレイと集積し信号線を接続する	LSI を MEMS チップ中にうめこむドロップイン集積化手法でICチップを一体化し、ワイヤーボンディングで信号線を接続できた	高電圧制御用ICチップをアクチュエータアレイと集積し信号線を接続でき、目標を達成した。

1-4-2 マイクロ走査型顕微鏡の研究開発

研究項目	目的	目標	成果	達成度
積層タイプマイクロ走査型顕微鏡試作	1) マイクロ走査型顕微鏡の製造を通しての光MEMS製造技術のレベル把握と技術レベル向上 2) 走査型顕微鏡(プロトタイプ)の実現	走査画像を得る。	個々の部品製造について成功。個々の部品組み立て技術に課題があることを確認。	総合的には不満足。部品組み立てを除く個別部品の製造は成功。
本体個別技術1:シリコンミラー基板ファブリケーション	シリコン基板載置可能マイクロミラーチップの実現(3種類: x、y軸回転Z軸方向変位ミラ)	走査範囲<100 ミクロン角以上。Z軸方向変位 10 ミクロン以上	シリコンミラー基板ファブリケーション技術の確立確認	成功
本体個別技術2:LD, PD実装	光学素子の高精度、無損失ボンディング	ボンディング精度: 数ミクロン	得意な企業で行えば実現可能。	成功
本体個別技術3:レンズガラス基板	フォトリソグラフィ技術でのマイクロ非球面レンズ形成(グレーマスクレンズ作製)	レンズ形状誤差< 数%	得意な企業で行えば実現可能。	成功
本体個別技術4:PD、ミラー駆動回路、制御回路などの電気回路	基本的な電気回路、制御技術の確認	正常動作	個別に正常動作確認	成功

本体個別技術6:個別基板の高精度アSEMBル(組み立て)	MEMS光学部品の高精度ボンディング	積層基板の合わせ精度 10 ミクロン以下(アクティブアライメントでも可)。	MEMS光学部品の高精度ボンディング技術の不足を確認。	不成功
内蔵型変位センサの個別技術1:光素子、シリコン枠、シリコンベース、ガラスカバーの作製と個々の部品のボンディング	MEMSに関する基本的な製造技術の確認と変位センサの実現	実現可能	実現可能	成功
個別技術8:貫通穴電極	MEMSパッケージング技術には不可欠な縦方向配線技術レベルの確認	断線、ショートなし。	得意な企業で行えば実現可能。	成功
個別技術9:血流センサ受光部	ピンホールの作製とPD素子上への載置(ボンディング)	ピンホールサイズ; 穴径 40 ミクロン、長さ 400 ミクロン	得意な企業で行えば実現可能。シリコン貫通穴形成技術確認。ボンディング技術確認。	成功

1-4-3 MEMS 技術を用いた小型多軸フォース・モーメントセンサの開発

研究項目	目的	目標	成果	達成度
MEMS 技術を用いた小型多軸フォース・モーメントセンサの開発	ロボットハンドの指先に搭載可能な柔軟接触部を有する指先触覚センサを開発する。	MEMS ファウンドリーを活用し、3mm 角以下の多軸フォースセンサチップおよび装着容易なパッケージ構造を持った触覚センサの実用化開発を行う。	MEMS ファウンドリーを活用し、2mm 角の 6 軸フォース・モーメントセンサチップおよび装着容易なパッケージ構造を持った4成分検出可能触覚センサを開発した。	4 成分検出、チップ寸法 2mm 角、センシング部のパッケージ寸法 5 mm(W)×5 mm(L)×3.3 mm(T)となり、目標を達成した。

(2) 成果の意義

1-1 RFスイッチ製造技術の開発

超小型、高信頼性で封止パッケージ化した高周波RFスイッチの製造技術の開発

研究項目	成果の意義
高精度3次元加工技術開発	半導体およびMEMS技術を活用して、高精度絶縁膜成膜技術、高精度シリコン加工技術、高精度金属膜成膜技術、高速・高精度計測評価技術を取得したことは、MEMS加工精度の能力を飛躍的に向上させたことを示したもので意義がある。
接点固着防止技術開発	構築した高耐久材料データベース、最適材料、成膜構成の抽出、および取得した高耐久材料の表面処理、加工技術を活用し、超長期接点寿命評価技術を取得したことは、MEMSスイッチの接点耐久性が実用上問題にならないことを示したもので意義がある。
低損失パッケージ技術開発	構築した低損失パッケージ材データベースを活用し、低損失パッケージ技術を取得したことは、MEMSスイッチの能力を充分引き出せるパッケージを実現したことを示したもので意義がある。

1-2 光可動ミラー製造技術の開発

光スイッチの高精度加工技術の開発

研究項目	成果の意義
高精度3D 加工技術開発	世界トップのミラー平面度を有するMEMS加工技術を獲得した。 これらの高精度加工技術は、今後、実用化を進める波長選択スイッチにとまらず、様々な光通信向けの MEMS への応用が考えられ、実用化を加速すると考えている。また、当社のMEMSファンドリーサービスへの適用を進めることにより、様々な高性能 MEMS の実用化を加速すると考える。
高精度制御技術開発	微小ミラーデバイスにセンサ・IC集積化して、世界トップの制御性能を実現した。 この成果は、光 SW 用のミラーデバイスへの適用だけではなく、現在の光スキャナー用ミラーを高性能化に寄与できる技術である。例えば、ミラー角度を高精度にコントロールできると表示装置、等への応用展開が可能である また、極微小容量変化や抵抗変化を検出するアンプ IC を開発し、それらを小型実装する技術開発を行ったことになる。この成果は、様々な超小型センサMEMSモジュールを小型化するための基礎技術を獲得した。

信頼性・計測・評価技術開発	この結果は、駆動部をもつ、光 MEMS デバイスが最高10年程度は連続して使用されることが想定される光 SW システムを構成するモジュール、デバイスとして、充分、信頼性があることを示しており、その他の様々な応用分野への応用を加速できると考える。
光ミラーアレイモジュール製作	波長選択スイッチモジュール、あるいは3次元型の光SWモジュールに応用するとともに、光 SW 以外の光 MEMS を搭載する様々な製品への応用するための MEMS+光学部品実装技術を獲得できた。

1-3 超小型MEMSセンサ製造技術開発

MEMSセンサの小型化、低コスト化とファンドリーサービス展開の為に製造技術の開発

研究項目	成果の意義
①貫通配線・電極形成技術の開発	シリコン貫通エッチング技術とCuめっき技術を活用して孔径10 μ m、深さ500 μ mの貫通孔配線・電極を開発、世界最高の高アスペクト貫通孔配線・電極形成技術を取得したことは、貫通配線を通してセンサ信号を伝送できるウエハレベルパッケージング、及び、それによるMEMSデバイスの超小型、低コストの実現性を示したもので意義がある。
②シリコンウエハ低温接合技術開発	MEMS 分野で初めて、表面活性化接合技術を活用して、シリコンウエハを常温、高精度で接合するウエハ接合技術を開発、取得したことは、残留応力や残留歪を抑制できるウエハレベルパッケージング、及び、それによるMEMSデバイスの超小型、低コストの実現性を示したもので意義がある。
③センサ・回路一体化実装技術の開発	MEMS 分野で初めて、3次元立体回路(MID)基板に MEMS センサと IC チップを低ストレスかつ超小型に一体化する常温バンプ接合技術を開発、取得したことは、センサと IC との一体化によるMEMSデバイスモジュールの超小型、低コストの実現性を示したもので意義がある。
④MEMSウエハレベルパッケージング一貫工程開発 (a)3軸加速度センサ	センサと IC との一体化プロセスを含むウエハレベルパッケージング一貫工程のデバイス応用技術を取得したことは、MEMS デバイス、モジュールの超小型、低コストの実現性を示したことで意義がある。
(b)ジャイロセンサ	センサと IC との一体化プロセスを含むウエハレベルパッケージング一貫工程のデバイス応用技術を取得したことは、MEMS デバイス、モジュールの超小型、低コストの実現性を示したことで意義がある。

1-4 MEMSデバイスの研究開発

1-4-1 スマートスキンの実現を目指す MEMS アレイとその信号接続方法の研究

研究項目	成果の意義
アクチュエータアレイデバイスの製作	気層フッ酸犠牲層エッチング技術をファンドリー企業に技術移転し、製作歩留まりを向上したことは、MEMSファンドリーの技術強化に意義がある。また、アクチュエータの共振周波数の電氣的に測定し、その変化から信頼性を評価したことは、アレイ化MEMSの信頼性うい容易に評価できる方法を示したもので意義がある。さらに、ガラス基板上に 1024 個もの熱駆動カンチレバー・アクチュエータをアレイ化したことは、多数のMEMSアクチュエータの一括製作が可能なることを示したもので意義がある。
アレイデバイスの分散制御法	搬送物体のエッジの検出およびエッジへのエアフロー印加という、フィードバック制御を行ったこと、およびアクチュエータと同ピッチのフォトダイオードアレイと積層して、デバイス上の搬送物検出しフィードバック搬送したことは、センサ・アクチュエータのアレイデバイスを用いて分散フィードバック制御が可能なることを初めて示したもので意義がある。
回路チップとの信号接続法	LSIをMEMSチップ中にうめこむドロップイン集積化手法でICチップを一体化し、ワイヤーボンディングで信号線を接続できたことは、駆動に高電圧が必要な静電アクチュエータアレイデバイスを最低限の配線数で容易に駆動する方法を示したもので意義がある。

1-4-2 マイクロ走査型顕微鏡の研究開発

研究項目	成果の意義
マイクロ走査型顕微鏡の研究開発	提案した光MEMS技術を用いて作製可能な積層タイプのマイクロ走査型顕微鏡デバイスを助成事業者も含むファンドリー企業で試作することにより、実用化に必要な光MEMS製造技術のレベルの把握と技術レベルの向上を図ったことは意義がある。

1-4-3 MEMS 技術を用いた小型多軸フォース・モーメントセンサの開発

研究項目	成果の意義
MEMS 技術を用いた小型多軸フォース・モーメントセンサの開発	国内 MEMS ファウンドリーの技術力の向上、MEMS のロボット応用への拡大のみならずネットワークセンシングやユビキタスセンシングなどへの応用展開も含め広く産業に貢献するものと考える。

(3) 特許の取得状況

1-1 RFスイッチ製造技術の開発

超小型、高信頼性で封止パッケージ化した高周波RFスイッチの製造技術の開発

特許の名称	特徴・強み・新規性
接点開閉器および接点開閉器を備えた装置	ばらつき低減
静電マイクロスイッチ	高抵抗半導体の可動電極に低抵抗領域を設けて動作時間遅延を抑制
配線基板の製造方法、フォトマスク、配線基板、回路素子、通信装置、および計測装置	フリット密着する配線の側面にギザギザを設けて封止性向上
静電マイクロ接点開閉器およびその製造方法、ならびに静電マイクロ接点開閉器を用いた装置	復帰バネと接触力バネを分離して低電圧化(チビ)
接点支持機構、接点開閉器、計測装置及び無線機	スティック防止
半導体装置の電気的接続構造及び当該構造を備えた機器	アンカにスリット入れて陽極接合安定化
静電マイクロ接点開閉器およびその製造方法、ならびに静電マイクロ接点開閉器を用いた装置	低電圧化

1-2 光可動ミラー製造技術の開発

光スイッチの高精度加工技術の開発

特許の名称	特徴・強み・新規性
光スイッチ	環境変化、経時変化に影響されず、出力用の光ファイバに正確に出力(スイッチ)することが可能な、信頼性の高い光スイッチを提供すること。
静電気駆動素子	可動部の変形を高感度かつ高精度に検出可能な静電駆動素子を提供する。
光スイッチ装置	小型・低光損失活の光スイッチ信頼性の高い光スイッチを提供すること。
波長選択スイッチ	光スイッチ用におけるミラーデバイスの取り付け構造。高精度な光 SW 取り付け構造を実現する。

1-3 超小型MEMSセンサ製造技術開発

MEMSセンサの小型化、低コスト化とファンドリーサービス展開の為の製造技術の開発

①貫通配線・電極形成技術の開発

特許の名称	特徴・強み・新規性
貫通孔配線の製造方法:6件	貫通孔配線の製造工程簡略化、及び、信頼性向上
貫通孔配線、及び、その製造方法:2件	貫通配線の小型化
貫通孔へのめっき埋め込み方法及びめっき装置:1件	貫通配線の埋め込み性向上
MEMSデバイス及びその製造方法:1件	貫通配線の導通性向上
貫通孔配線の形成方法、ウエハレベルパッケージ構造体の製造方法:1件	貫通配線の工程短縮化

②シリコンウエハ低温接合技術開発

特許の名称	特徴・強み・新規性
駆動装置及び光デバイス	駆動装置及び光デバイスの小型化、高歩留り化
半導体装置の製造方法、半導体アクチュエーター及び光デバイス	構造設計、プロセス設計の自由度が高い半導体装置の製造方法、半導体アクチュエーター及び光デバイス
半導体装置の製造方法	半導体構造の高電気絶縁化
半導体構造の製造方法、半導体アクチュエータ及び光デバイス	構造設計、プロセス設計の自由度が高い半導体装置の製造方法、半導体アクチュエーター及び光デバイス
半導体センサおよびその製造方法	半導体センサの小型、高性能化
センサエレメント	半導体センサの低歪化
ウエハレベルパッケージ構造体およびセンサエレメント	センサ、ウエハレベルパッケージ構造体の工程簡略化
センサエレメントおよびウエハレベルパッケージ構造体	センサ、ウエハレベルパッケージ構造体の高接合特性化
ウエハレベルパッケージ構造体およびセンサエレメント	センサ、ウエハレベルパッケージ構造体の高接合特性化

ウエハレベルパッケージ構造体 およびセンサエレメント	センサ、ウエハレベルパッケージ構造体の高接合特性化
センサ素子の製造方法	センサの高性能化
センサエレメント	センサの高性能化
ウエハ接合装置およびウエハ接 合装置	センサの高性能化

③センサ・回路一体化実装技術の開発

特許の名称	特徴・強み・新規性
フリップチップ実装方法:4 件	低ストレス(常温)実装。接続信頼性向上。小型化。
バンプ形成方法:2 件	接続信頼性向上。バンプ形状小型化。
パッケージ製造方法:1件	実装チップの低ストレス化。パッケージ小型・低背化。IC とセンサ一体化。
パッケージ構造:10 件	実装チップの低ストレス化。パッケージ小型・低背化。IC とセンサ一体化。
パッケージ配線構造:1件	基板へのパッケージ実装品質向上。パッケージ小型化。

④MEMSウエハレベルパッケージング一貫工程開発

(a)3軸加速度センサ

特許の名称	特徴・強み・新規性
半導体多軸加速度センサ 4 件	センサの温度特性向上
ウエハレベルパッケージ構造体 およびその製造方法、加速度セ ンサ 1 件	センサウエハのウエハレベルパッケージングによる構造体、およびその製造方 法
センサエレメント 1 件	ウエハレベルパッケージングによる小型化および、接合信頼性の向上。
センサエレメント 1 件	配線および接合信頼性の向上。
物理量センサ 1 件	接合信頼性の向上
物理量センサおよびその製造方 法 1 件	物理量センサ性能検査の簡略化

(b)ジャイロセンサ

特許の名称	特徴・強み・新規性
ジャイロセンサおよび角速度検出方法:1件	検出精度と感度の向上
半導体センサ及びその製造方法:1件	高い配線接続性の高精度、工程簡略化
ジャイロセンサ:2件	センサの温度特性向上
半導体装置の製造方法:1件	貫通孔形成工程の簡略化
ジャイロセンサおよびそれを用いたセンサシステム:10件	センサの温度特性向上
半導体力学量センサ:1件	センサの高精度化
ジャイロセンサの製造方法:1件	センサの工程簡略化
ジャイロセンサおよび角速度検出方法:1件	センサの検出精度の向上
微小電気機械デバイスおよびその製造方法:1件	センサの高集積化
微小電気機械デバイス:5件	デバイスの小型化
MEMSデバイスおよびその製造方法:1件	デバイスの気密性向上
角速度検出装置:3件	センサの検出精度向上
角速度検出装置:1件	センサの検出精度向上
角速度センサ:1件	振動体の安定駆動化
センサ装置:1件	振動体の制御精度の向上

1-4 MEMSデバイスの研究開発

1-4-1 スマートスキンの実現を目指す MEMS アレイとその信号接続方法の研究

特許の名称	特徴・強み・新規性
無し	

1-4-2 マイクロ走査型顕微鏡の研究開発

特許の名称	特徴・強み・新規性
変位測定装置	MEMS内蔵可能な超小型光学式回転角/変位センサ。しかも高精度:Z変位測定で数10nm の分解能。

1-4-3 MEMS 技術を用いた小型多軸フォース・モーメントセンサの開発

特許の名称	特徴・強み・新規性
加速度センサおよび加速度センサの製造方法	- 特徴:起歪ビームを従来の直交より平行型にし、かつ温度の影響を受けにくい構造とした。 - 強み:高感度超小型化に適する。 - 新規性:大

(4)論文発表・成果の普及

1-1 RFスイッチ製造技術の開発

超小型、高信頼性で封止パッケージ化した高周波RFスイッチの製造技術の開発

論文等紙上発表(論文誌、学会誌、国際会議)		口頭発表		特許		報道(新聞、雑誌等)
国内	国外	国内	国外	国内	国外	
4	1	11	3	7 件	3 件 5 ヶ国	20

1-2 光可動ミラー製造技術の開発

光スイッチの高精度加工技術の開発

論文等紙上発表(論文誌、学会誌、国際会議)		口頭発表		特許		報道(新聞、雑誌等)
国内	国外	国内	国外	国内	国外	
8	0	16	0	4	0	19

1-3 超小型MEMSセンサ製造技術開発

MEMSセンサの小型化、低コスト化とファンドリーサービス展開の為の製造技術の開発

論文等紙上発表(論文誌、学会誌、国際会議)		口頭発表		特許		報道(新聞、雑誌等)
国内	国外	国内	国外	国内	国外	
2	2	3	2	82	6	9

1-4 MEMSデバイスの研究開発

1-4-1 スマートスキンの実現を目指すMEMS アレイとその信号接続方法の研究

論文等紙上発表(論文誌、学会誌、国際会議)		口頭発表		特許		報道(新聞、雑誌等)
国内	国外	国内	国外	国内	国外	
0	5(他1件採択済み)	0	0	0	0	0

1-4-2 マイクロ走査型顕微鏡の研究開発

論文等紙上発表(論文誌、学会誌、国際会議)		口頭発表		特許		報道(新聞、雑誌等)
国内	国外	国内	国外	国内	国外	
0	1	0	1	1	0	2

1-4-3 MEMS 技術を用いた小型多軸フォース・モーメントセンサの開発

論文等紙上発表(論文誌、学会誌、国際会議)		口頭発表		特許		報道(新聞、雑誌等)
国内	国外	国内	国外	国内	国外	
0	9	7	1	1	0	1

3. 各テーマの成果詳細

3.1 MEMSプロジェクト RFスイッチ製造技術の開発

超小型、高信頼性で封止パッケージ化した高周波RFスイッチの製造技術の開発

3-1 研究概要

プロジェクトの目的である「RF MEMSスイッチの製造技術開発」達成に向けて、各年度の取り組み目標とその結果の概要を示す。

DC-10GHzの信号伝送で、幅 $100\mu\text{m}$ 、厚さ $2\mu\text{m}$ の信号線を有するRFスイッチの製造技術に関し、以下の目標を設定する。

- ① 信号線、接点用金属材料の膜厚精度およびアクチュエータの寸法精度1%以下の高精度材料加工技術を開発する。
- ② 接点の開閉回数10億回以上可能な接点固着防止技術の開発。
- ③ パッケージの伝送損失を0.1dB以下(10GHz)に抑える低損失パッケージ技術の開発。

本プロジェクトで開発したRF-MEMSスイッチを図1に示す。

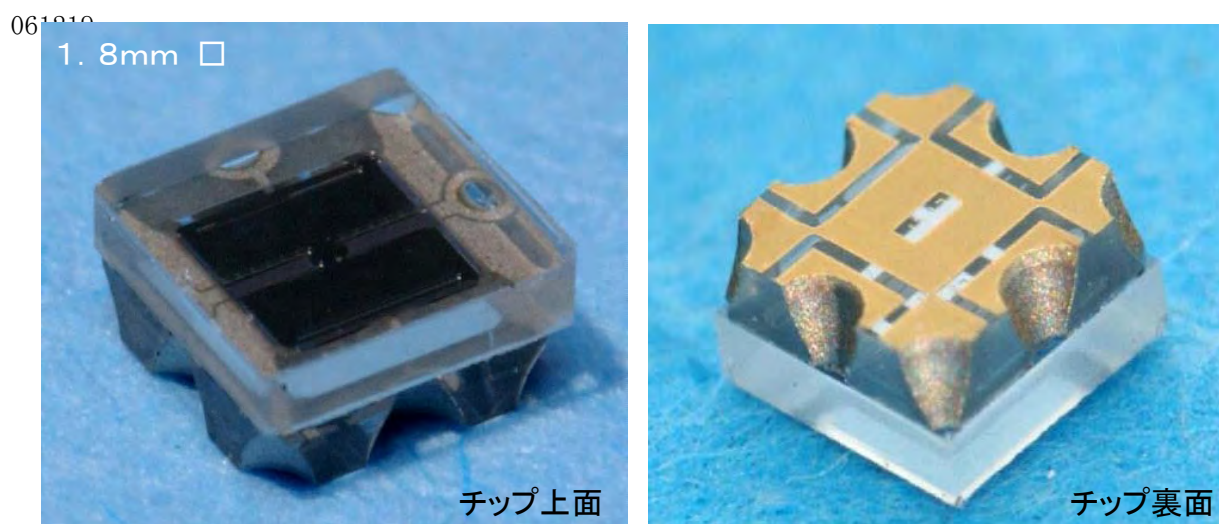


図1 開発したRF-MEMSスイッチ写真

3-2 成果詳細

(1) 高精度 3 次元加工技術開発

研究・試作のみでなく、実用化されたRF-MEMSスイッチ実現には高精度の加工技術とその再現性が十分でなければならなかった。特にRF-MEMSスイッチは2つに分割されている信号線を静電引力で駆動する接点金属で接触、導通させる構造のため、適度な押し付け圧、十分な駆動速度、それぞれの安定した動きが要求され、その性能を決める駆動部分と接点周りの加工精度が非常に厳しく要求される。[図2]

そこで具体的に以下の3点の加工精度ばらつきを1%以下を抑えることを目標に研究開発を行った。またこのプロセス技術の深耕度を正しく評価する測定機器や開発ツールを整備し、開発を正確かつ効率よく実行できる体制を整備し開発を実行した。

加工目標精度

- ・ 絶縁膜形成膜厚ばらつき
- ・ 電極金属形成膜厚ばらつき
- ・ シリコン加工形状ばらつき

高精度膜厚制御

高精度膜厚制御

高精度シリコン・メタルエッチング

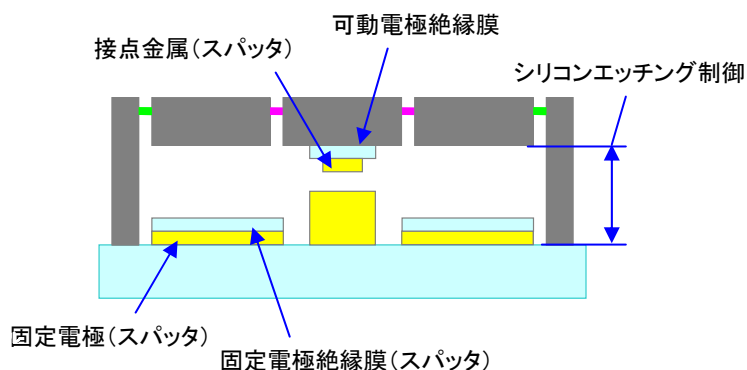
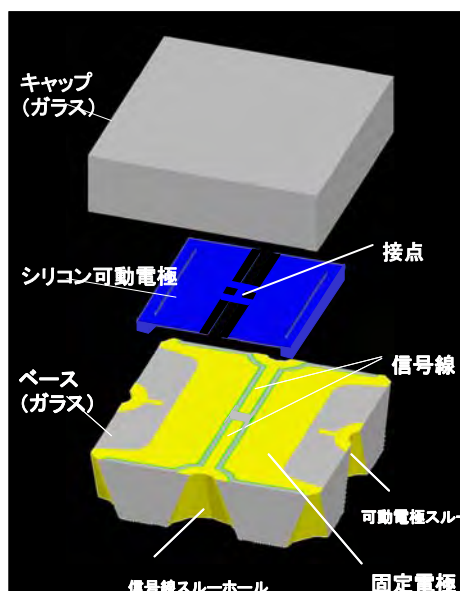


図2 RF-MEMS スイッチと3次元加工精度要求箇所

そして各年の目標を次のように定め、開発に着手した。

平成15年度：各種成膜装置、エッチング装置を立ち上げるとともに、寸法計測速度の高速化検討を行う。

平成16年度：各種成膜条件、エッチング条件を求め、加工精度1%への目処を得る。

平成17年度：信号線、接点用金属材料の膜厚精度およびアクチュエータの寸法精度1%以下の高精度材料加工技術を開発する。

①平成15年度の開発実績

平成15年度は開発基盤の整備と開発の着手のステージで高精度3次元加工技術開発においては主に各種成膜装置、エッチング装置を立ち上げるとともに、寸法計測速度の高速化検討を行った。

1)高精度膜厚制御

平成 15 年上期導入装置した拡散炉 [図 3, 4] の立ち上げ、および下期に導入したドライ酸化炉、P-DEPO 装置、インプラ修理ドラフトの立ち上げを完了した。装置の条件だし用プロセスでは、評価用パターンをMEMSシミュレーションソフト「CoventorWare」を活用し、必要膜質、膜厚の設計を行い、これを目標値に条件出しを実施した。さらに、これらの装置の立ち上げ後、高精度加工を実現するプロセス条件探索を目的とする試作を実施した。ドライ酸化炉、P-DEPO 装置は上期導入装置である拡散炉と同様に、温度制御に優れた縦型を採用した。

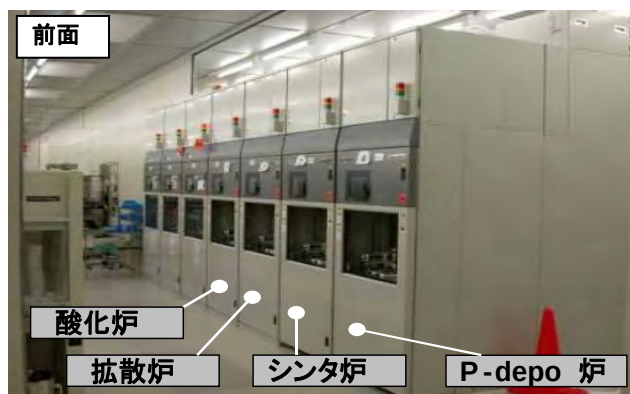


図 3 成膜装置 前面写真



図 4 成膜装置 裏面写真

2) 高精度シリコン・メタルエッチング

エッチングに必要な装置である、スピンエッチャー、ウエハ薬品洗浄ドラフト、レジスト除去溶剤系ドラフト、レジスト除去酸系ドラフト、酸化膜エッチングドラフトの立ち上げを行った。立ち上げた装置の一例として、図 5 にウエハ薬品洗浄ドラフトの洗浄作業フローを示す。この装置は、水素溶解水(水素水)・オゾン溶解水(オゾン水)・超音波の組み合わせで、ウエハを洗浄する。従来の RCA 洗浄装置と比べると、少ない薬液で付着微粒子・有機物質を洗浄するため、より厳密な環境管理が可能であり、プロセス再現性向上も期待できる。また、薬液濃度が薄くできるため、ウエハ表面に与えるダメージも本装置の方が従来よりも小さくできる。さらにウエハ表面のダメージはばらつきに寄与する為、本装置によりプロセスばらつきを軽減出来ると考えられる。

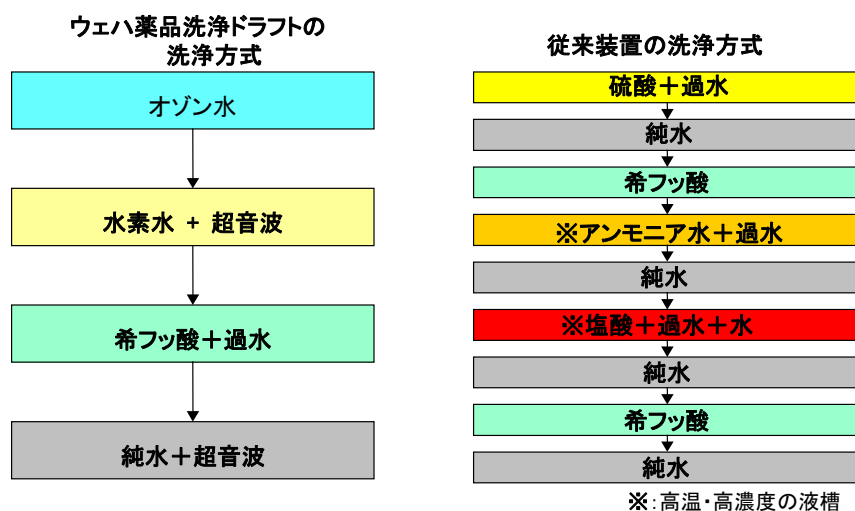


図 5 ウエハ薬品洗浄ドラフト 洗浄作業フロー

3) 高速・高精度計測評価

高精度加工を安定して行うには、その加工精度を正確に評価することが必要である。また実用化製品をタイムリーに出すには、正確なデバイス構造設計と高速・高精度な計測評価が必要である。そこで加工表面を分析する表面分析機を選定し、発注を完了するとともにMEMSシミュレーションソフトウェア「CoventorWare」を使用してデバイス設計を開始し、短期間でのデバイス構造設計に活用した。

②平成 16 年度の開発実績

平成 16 年度は技術開発・検証のステージであり、平成 15 年度で蓄積した技術データを基に各種成膜条件、エッチング条件を求め、加工精度 1 % への目処を得た。

1) 高精度膜厚制御

拡散炉、ドライ酸化炉、ウェット酸化炉、LP-CVD 装置については条件出しにより表 1、図 6 のような成膜装置の均一性のような結果を得た。さらにもう一つの成膜課題である金属膜厚制御技術の開発として、スパッタ装置（アルバック SME-200U）〔図 7〕の導入立ち上げ、および条件の最適化・補正板の使用などの改良を実施し、1 % 以下の加工精度を達成した。〔図 8〕さらにMEMSシミュレーションソフト「CoventorWare」を用いて設計した評価用パターンを活用することで開発を加速させることを実現した。

表 1 各成膜装置の膜厚精度 (±X%)

	目標	面内	面間	バッチ間
LP-CVD (Si ₃ N ₄)	1.00	0.68	0.78	0.93
ウェット酸化炉	1.00	0.32	1.00	0.93
ドライ酸化炉	1.00	0.69	0.75	0.72
拡散炉	1.00	0.48	0.57	0.75

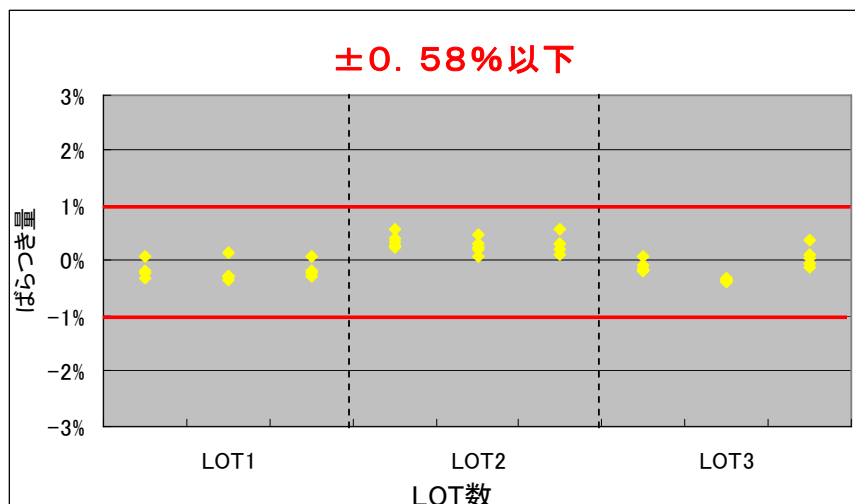


図 6 可動電極絶縁膜 膜厚ばらつき

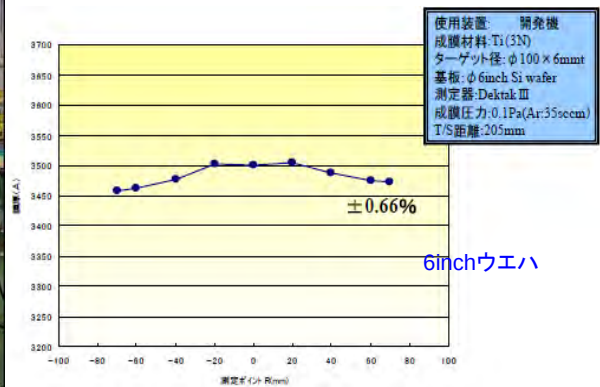


図7 成膜装置（スパッタ）の均一性

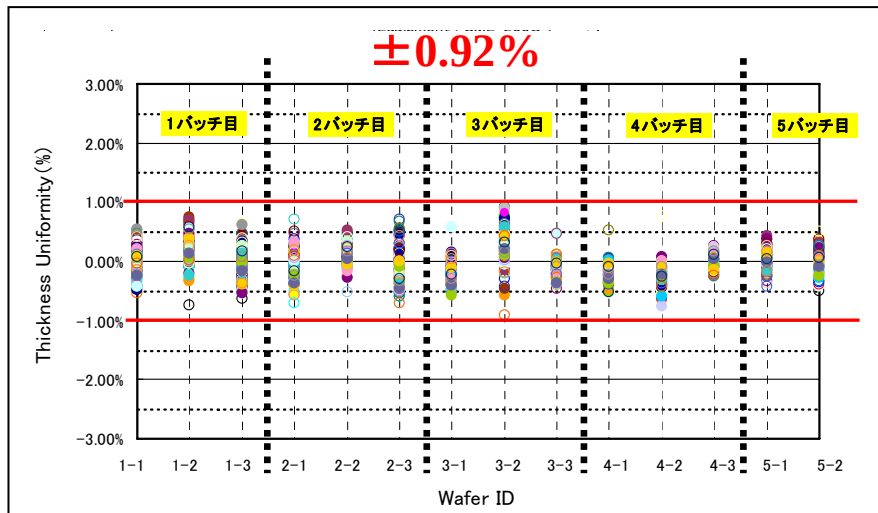


図8 スパッタ装置の成膜膜厚ばらつき（バッチ間）

2) 高精度シリコン・メタルエッチング

先に述べたようにシリコン加工形状ばらつきはRF-MEMSの性能、特に接点信頼性を左右する。この形状に影響を与える加工プロセスは、基板であるシリコンやその上に形成されている金属で作られた電極をエッチングなどの加工を加える場合である。プロセスごとに形状を測定した結果、実際に大きなばらつきが存在し、性能に影響を与えるのはシリコンのエッチングプロセスであることが判った。そこで、TMAHを用いたシリコンウエハのエッチングにおいて、投入ウエハ間、面内、どこでも同一プロセス環境を実現することを目標に装置開発を実施した。その結果、槽内温度差 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ で制御することや、薬液の供給と攪拌方法を最適化すること、薬液槽の密閉化などの機構を持つシリコンエッチング装置〔図9, 10〕を開発することにより加工精度1%以下を達成した。〔図11〕

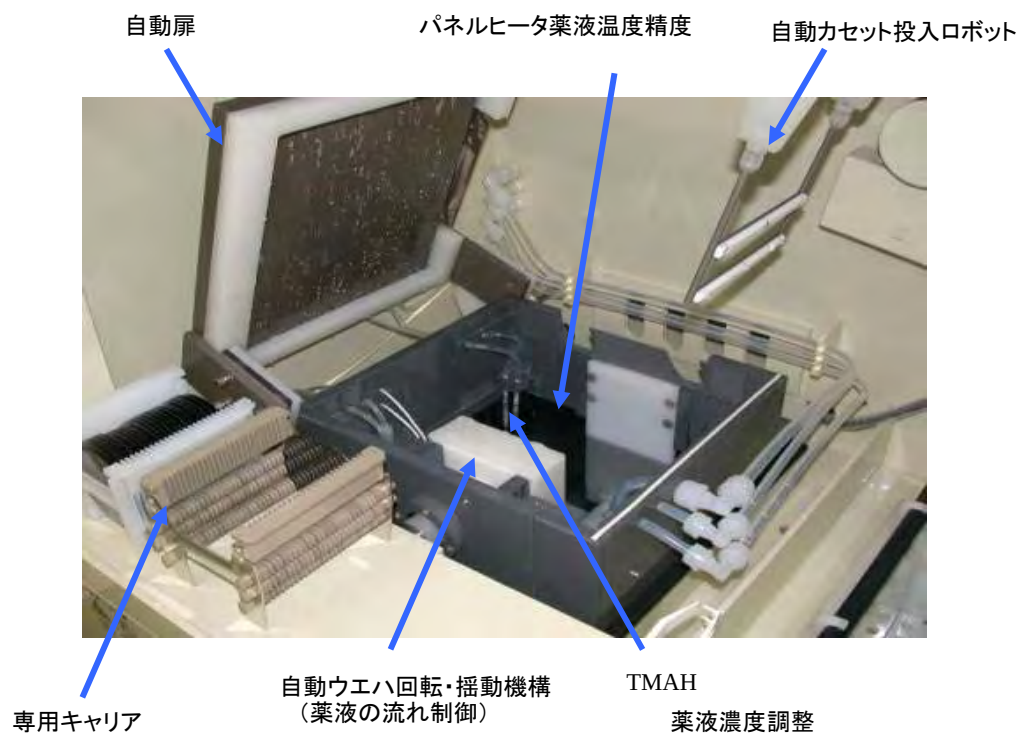


図9 シリコンエッチング装置 (エッチング槽)

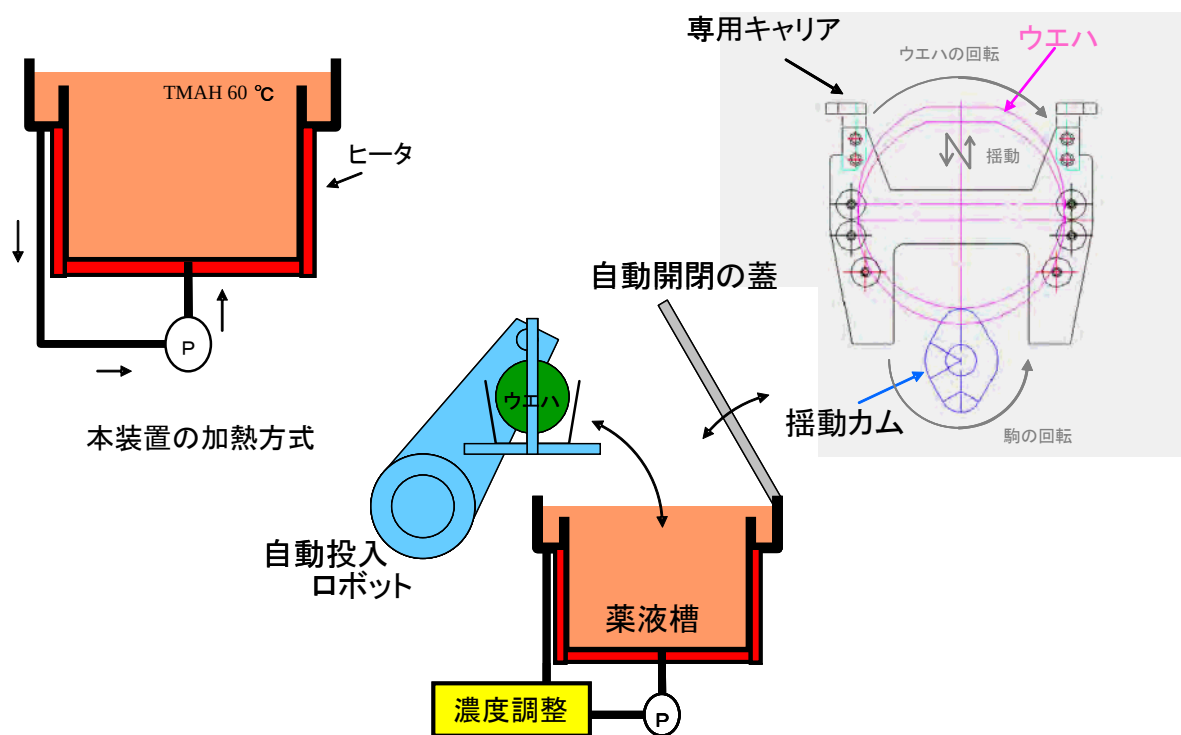
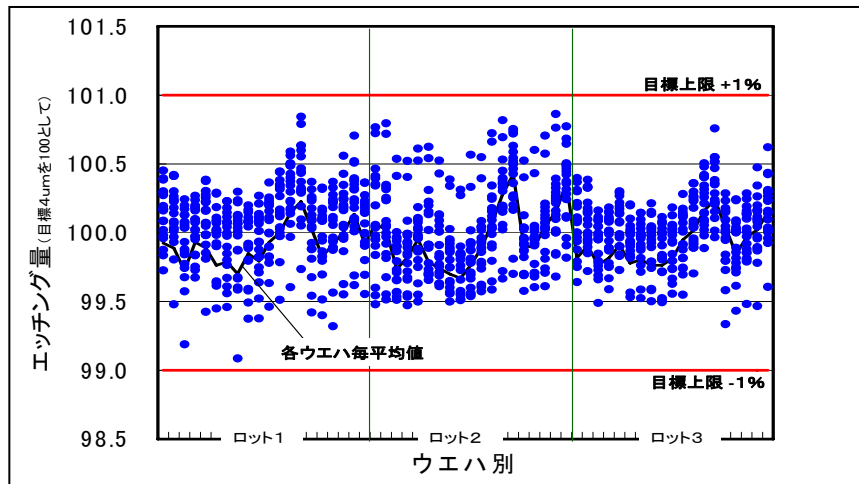


図10 シリコンエッチング装置の構成

±0.91%



ウェハ面内: ±0.47%

ロット内: ±0.53%

ロット間: ±0.53%

図 11 TMAH による Si エッチングばらつき (ロット間)

3) 高速・高精度計測評価

高精度シリコン・メタルエッチングの加工データと設計データの相関・検証を実施し、開発加速に活用した。

③平成 17 年度の開発実績

平成 17 年度は実用化とファンドリへの技術展開のステージであり、信号線、接点用金属材料の膜厚精度およびアクチュエータの寸法精度 1%以下の高精度材料加工技術を実機テストを通じて達成確認するとともに、ファウンドリに技術移転を行った。

1) 高精度膜厚制御

平成 15 年から 16 年度までに得た条件を用いて実デバイスを量産試作し、成膜評価を実施した。その結果、絶縁膜形成膜厚ばらつきおよび電極金属形成膜厚ばらつきともに量産化に十分な出力結果を得た。電極金属形成膜厚ばらつきのデータをファンドリでの試験結果とともに提示する。

[図 12]

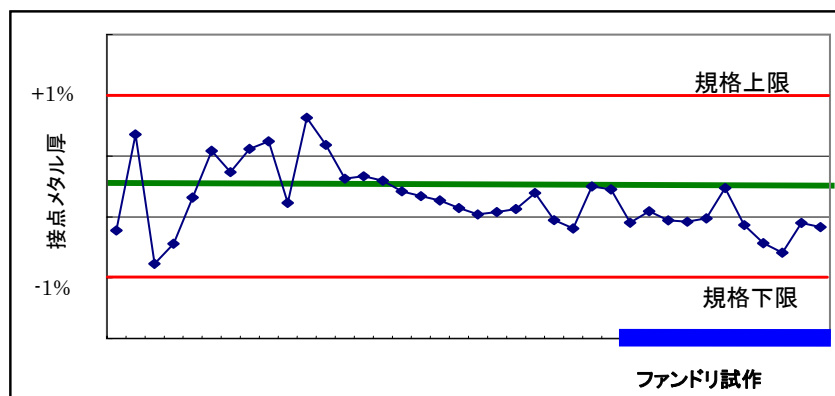


図 12 接点メタルスパッタ膜厚

2) 高精度シリコン・メタルエッチング

シリコン形状の安定加工技術が実際の量産プロセスの中で実用に耐えうるか確認するため、実デバイスを多く試作する中で評価を行い、十分な結果を得た。[図 13]

さらに今回 1%以下の精度向上を目標としたプロセスも含む実デバイスで、実用可能なデバイスが実際に作製できているのかをファンドリ試作し、信頼性を評価することで検証した。[表 2]

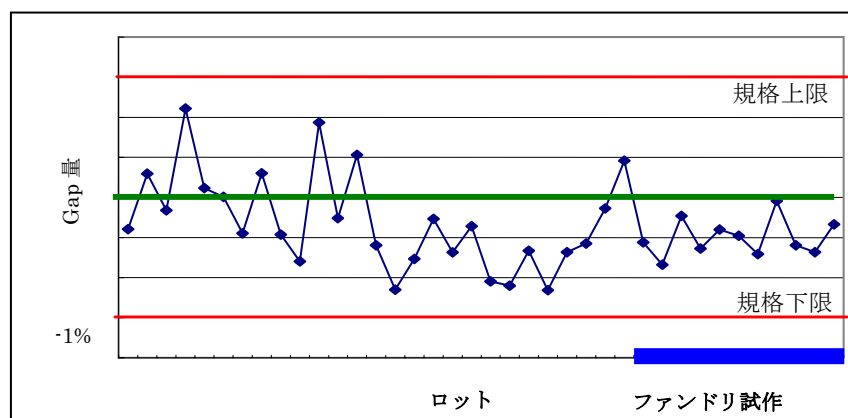
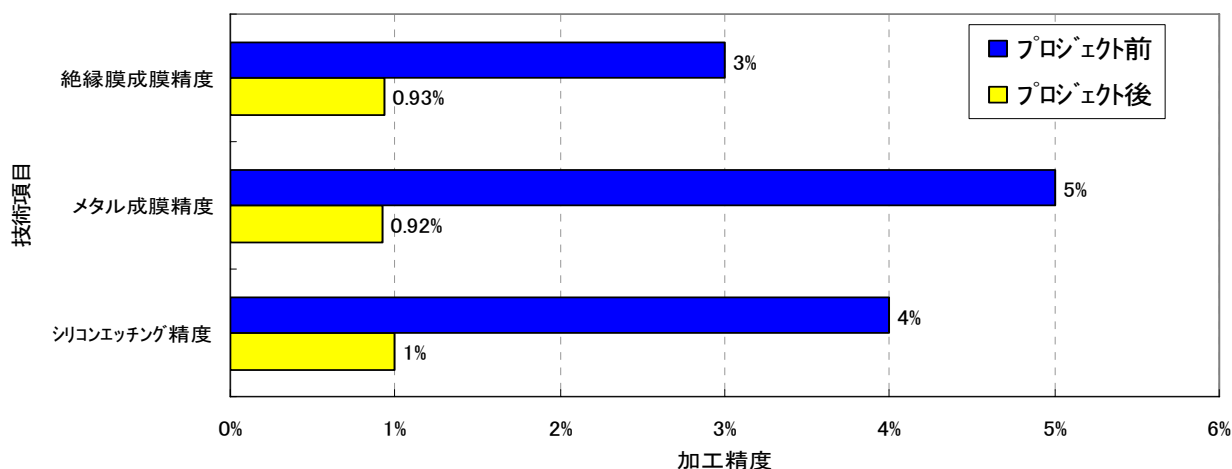


図 13 1stGap シリコンエッチング

表 2 動作信頼性評価一覧

試験項目	試験条件	試験個数	判定
電氣的耐久性	DC0.5V,0.5mA、1億回以上	116	合格
高温保存	100℃ 192H	11	合格
低温保存	-40℃ 192H	11	合格
高温高湿	85℃85%RH	11	合格
温度サイクル	-40℃～100℃ 100サイクル	11	合格
高温通電	85℃ 192H 定格通電	11	合格
低温通電	-20℃ 192H 定格通電	11	合格
誤動作振動	10～55Hz/1.5mm/1掃引 5min(9G)接点ON/OFF1掃印	5	合格
誤動作振動	10～500Hz/1.5mm/1掃引 5min(10G)接点ON/OFF1掃印	5	合格
誤動作振動	100～2000Hz/20G/1掃引 4min接点ON/OFF1掃印	5	合格
耐久振動	10～55Hz/1.5mm/1掃引 1min(9G)3軸方向各2H	5	合格
耐久振動	10～500Hz/1.5mm/1掃引 15min(10G)3軸方向各2H	5	合格
耐久振動	100～2000Hz/20G/1掃引 4min3軸方向各4回	5	合格
誤動作衝撃	50G 3軸6方向各3回接点ON/OFF	11	合格
耐久衝撃	100G 3軸6方向各3回接点OFF	11	合格
取付方向性	直交 3軸6方向	11	合格
はんだ耐熱	260℃10sec2回	11	合格
温度特性	-20～85℃において2H放置後基本特性	11	合格
静電耐圧	HBM: 100V±極性5sec間隔5回	11	合格
絶縁抵抗1次-2次間	100MΩ以上/100VDC	22	合格
絶縁抵抗2次間	100MΩ以上/100VDC	22	合格

ファンドリ試作・技術移転に関して、ファンドリ技術者が実際に試作やプロセス、精度評価を実施することで、技術移転に取組んだ。結果として各加工精度の向上が確認でき、ファンドリの実力向上が得られたと評価できる。[図 14]



3) 高速・高精度計測評価

量産試験を行った実デバイスの加工状態を評価した結果、以下のように安定した評価を得られた。研究所試作とファンドリ試作との比較を図 17, 18, 19, 20 に示す。

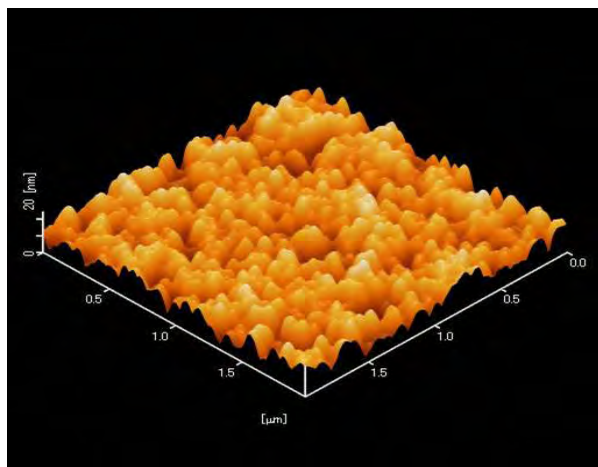


図 15 研究所試作チップ接点表面 AFM 像

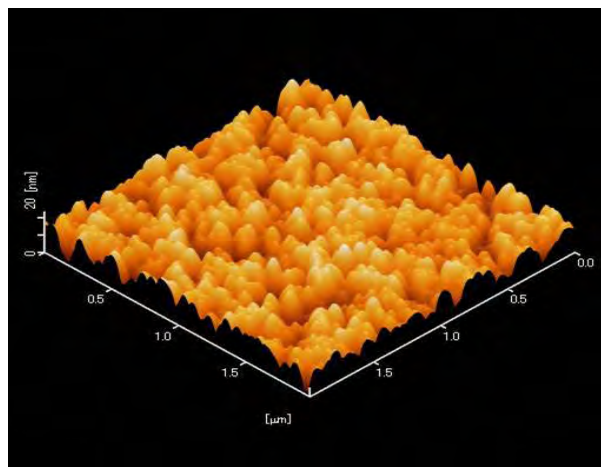


図 16 ファンドリ試作チップ接点表面 AFM 像

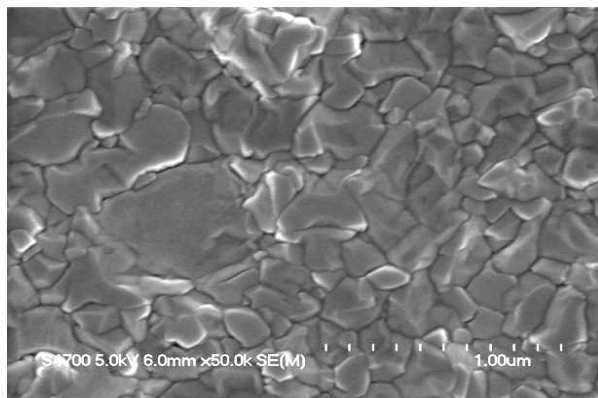


図 17 研究所試作チップ接点表面 SEM 像

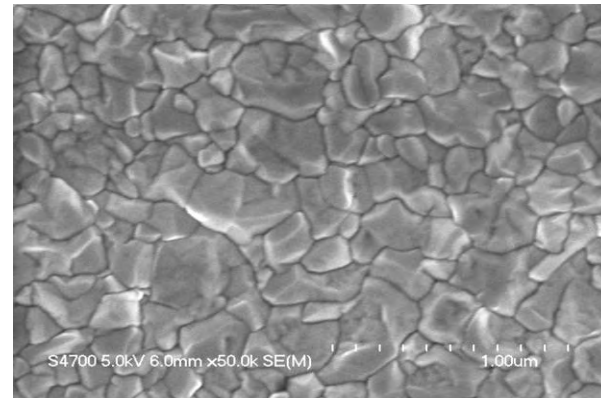


図 18 ファンドリ試作チップの接点表面 SEM 像

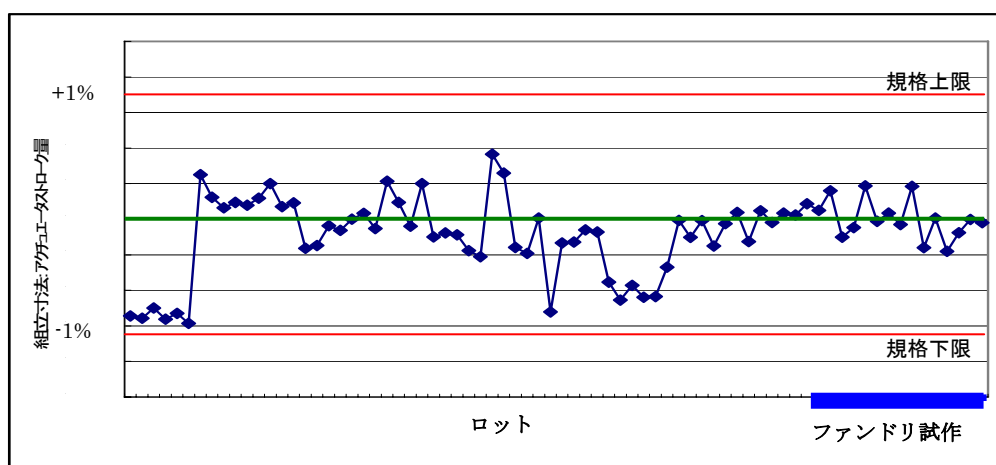


図 19 組立寸法 アクチュエータストローク量推移

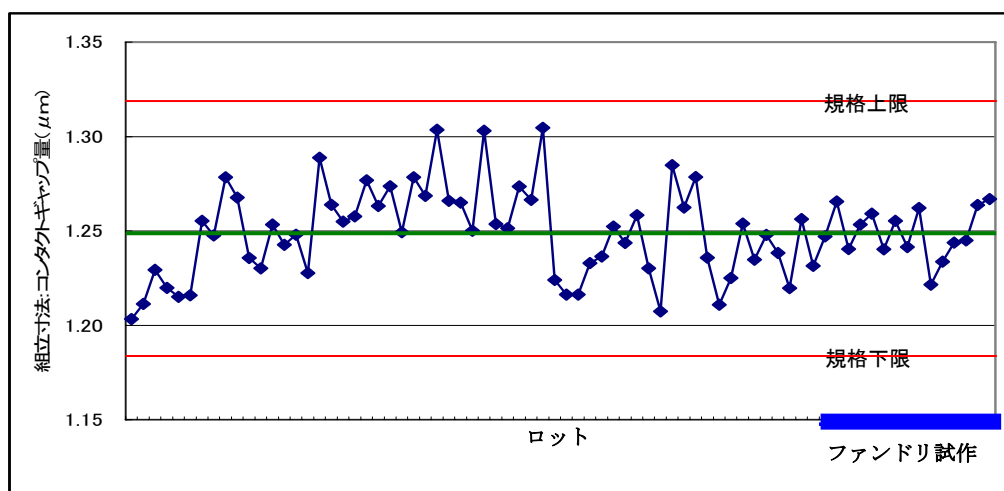


図 20 組立寸法 コンタクトギャップ量推移

高速・高精度計測評価についてもファンドリへの技術移転を行い、アクチュエータ、接点の解析・評価および設計へのフィードバックを行えるようにした。[表 3]

表 3 プロジェクトによるファンドリ測定評価技術向上効果

区分	技術項目	プロジェクト前	プロジェクト後
測定能力	表面分析分解能	10nm	1nm
	アクチュエータ動作高速解析	—	測定可能

(2) 接点固着防止技術開発

スイッチ(リレー)の開閉設計において、考慮しなければならないパラメータは、「接点材料の硬度・固着力、アクチュエータの接触力・開離力、接点表面の制御、接触抵抗値」である。特に静電駆動型のMEMSスイッチの場合、アクチュエータであるシリコンの弾性力をスイッチの接触力や開離力として用いているので、接触力・開離力を大きく取ることができない。接点表面のコンタミネーションが多い場合、接触力が不足し接触抵抗が不安定になる。また、接点材料の固着力が開離力を上回る場合は接点の固着が起こる。MEMSスイッチにおいては、特に固着が大きな課題となっている。固着力は、接触抵抗とトレードオフの関係にあるので、まずMEMSスイッチに合致した固着力の材料を選定し、選定した材料の加工プロセスの開発、コンタミネーション抑制を含めた洗浄工程などの接点表面制御プロセスの開発、およびデバイスとしての量産製造プロセス確立を目指した。また、超長期開閉寿命試験を実施・評価して得られる課題を抽出して、開閉設計の最適化を図ることで、最終目標である開閉回数 10 億回以上を達成すべく取り組んだ。

接点固着防止技術開発における、マイルストーンとして以下の目標を設定した。

成 15 年度：固着の起きにくい金属材料の選定とその加工技術を開発し、開閉回数 2 億回達成する。

平成 16 年度：固着の起きにくい金属材料の製作プロセスを確立し、開閉回数 5 億回達成する。

平成 17 年度：接点の開閉回数 10 億回以上可能な接点固着防止技術を開発する。

以下、年度ごとにその成果を詳しく示す。

①平成 15 年度の開発実績

以下のように平成 15 年度の目標を達成した。

1) 高耐久材料選定

接触抵抗と固着力はトレードオフの関係にあるので、MEMSスイッチに合致した固着力を持つ金属材料を選定する必要があった。平成 15 年度上期に行った材料による固着力ー接触抵抗評価を基に固着の起きにくい金属材料の組み合わせを抽出した。[図 21, 22] また再現性・安定性を目標に積層膜の構成を決定し、プロセス条件の最適化を図り、開閉寿命試験にて信頼性実力を評価した。表面処理技術の確立と併せ、原理モデルにて寿命評価試験で 2 億回を達成し[図 23]、高耐久材料の選定を完了した。

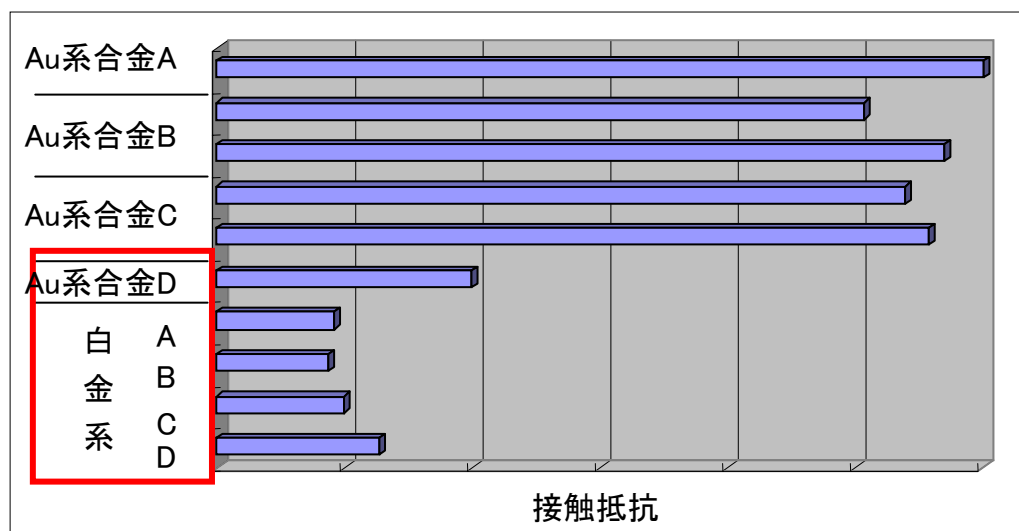


図 21 接点材料ごとの接触抵抗測定結果

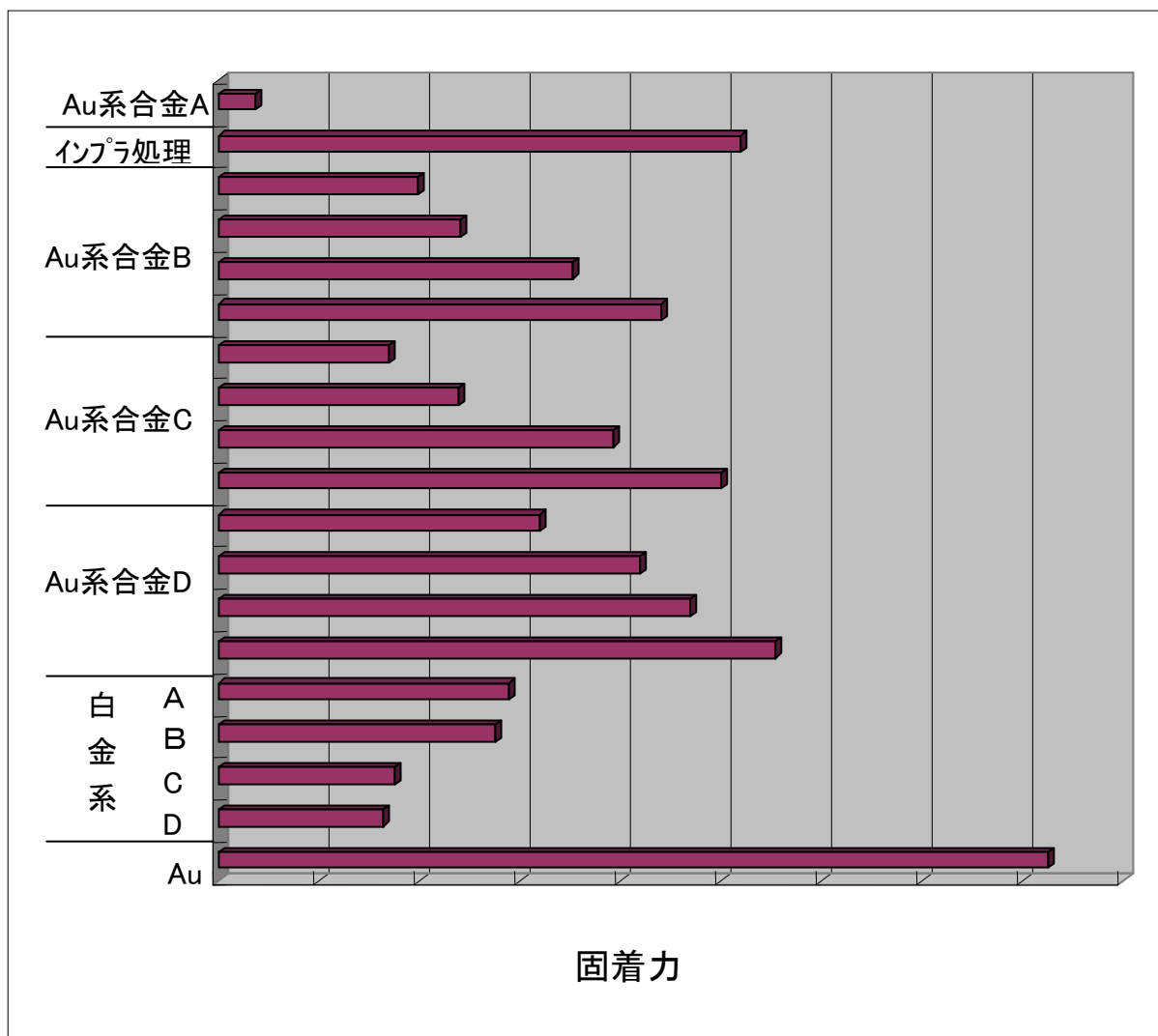


図 22 接点材料ごとの固着力測定結果

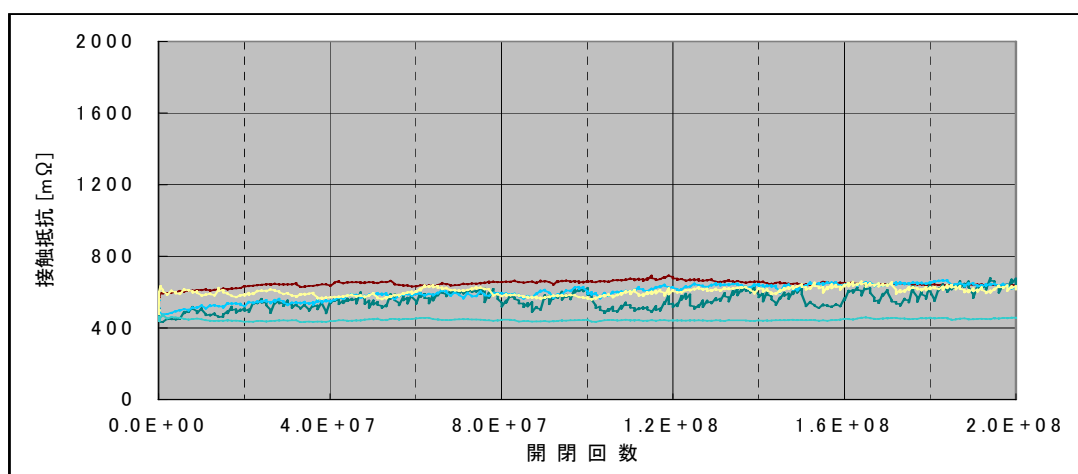


図 23 寿命評価試験結果(2億回)

2) 表面処理・加工技術

高耐久材料は難エッチング材料であったので、その加工方法を検討し、基板材料、配線材料と親和性のあるリフトオフ工法を開発した。この工法は金属材料のリフトオフ膜を使用するもので、リフトオフ膜形成時の洗浄工法、リフトオフ後に不要物の残留や表面荒れを起こさない犠牲層除去工法などを含む。[図 24]この工法により、パターン形成に関してはプロセスの制約無しに、自由に接点材料を選ぶことが可能となった。また、リフトオフ基板の表面汚染がその後の高耐久材料(接点)成膜プロセスにおいて、結晶成長を妨げる要因となるので、リフトオフ基板の表面波プラズマによるガス洗浄プロセスを開発した。プラズマのガス種、温度、電力の条件を調整し、高い有機物除去能力と低ダメージを両立させた。さらに、試作プロセスデータはデータベースにて管理し、工程管理、課題と工程条件の相関抽出等に活用した。内作・外注にて作成した接点表面については、結晶配向性と結晶粒度の観点で表面分析[図 25]を実施し、開閉寿命との相関にて試作する金属膜構成を決定した。また、シンタ炉を導入し、立ち上げ完了した。接合機については、寿命に影響を与える接合時雰囲気制御が可能になるよう、改造を行った。

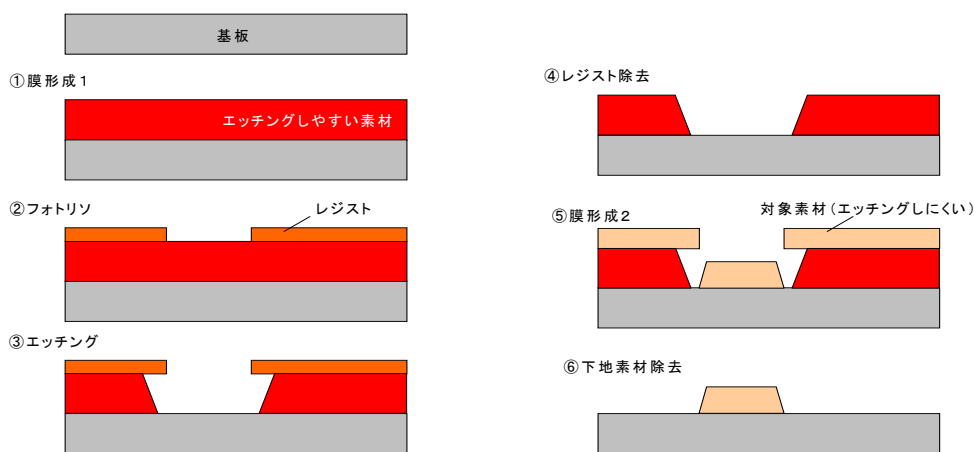


図 24 リフトオフ工法

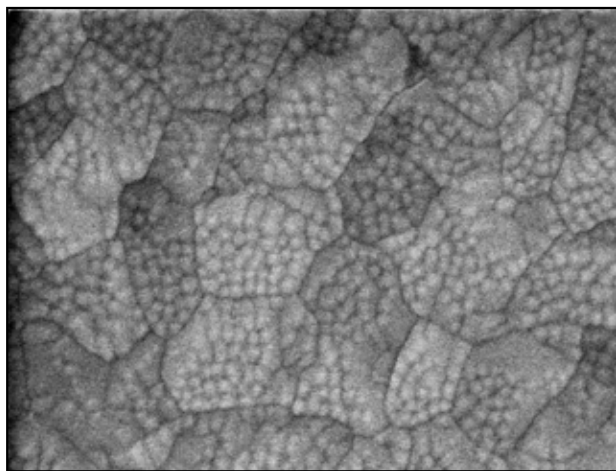


図 25 結晶制御した高耐久材料の観察像 [左: 表面SEM, 右: 断面TEM]

3) 超長期接点寿命評価

選定した高耐久材料接点の 10 億回を超える超長期寿命評価を実施するために、評価装置の仕様を検討した。10 億回の寿命評価に必要なスイッチ駆動周波数、サンプリング周期、信号線の転送量などを抽出した。スイッチ固着などのモード分析と併せ、要求仕様としてまとめた。[表 4]

表 4 超長期寿命評価装置仕様

部位	機能	仕様	備考
コイル部	駆動電圧印加 印加電圧 印加方式 駆動速度 精度	0~80V 菊水PAN60-3A MOSIにて入切 max500Hz ±3%以内	
接点部	接点抵抗計測 印加電圧(内部) 印加電圧(外部) 負荷抵抗(内部) 負荷抵抗(外部) 接点通電電流(内部) 接点通電電流(外部) 精度 分解能	10mV~10V 10mV~35V 100Ω,1kΩ,10kΩ 5Ω~10kΩ 10μA~10mA 10μA~100mA 既存ライフスタ同等以上のものとする 200kS/S,接点電圧32000分割/試料	電圧指令(アナログ)+ bit3(デジタル))は無段階出力 低電流時での精度が問題 となる 200kS/Sのうち統計値を RTシステムに出力する
	溶着計測 印加電圧(内部) 印加電圧(外部) 負荷抵抗(内部) 負荷抵抗(外部) 接点通電電流(内部) 接点通電電流(外部) 精度 分解能	10mV~10V 10mV~35V 100Ω,1kΩ,10kΩ 5Ω~10kΩ 10μA~10mA 10μA~100mA ±0.5μsec(20MHz) ±0.05μsec(20MHz)	20MS/Sのうち統計値を RTシステムに出力する

②平成 16 年度の開発実績

平成 16 年の開発目標は固着の起きにくい金属材料の製作プロセスを確立し、開閉回数 5 億回達成することであり以下のように目標を達成した。

1)高耐久材料成膜プロセスと寿命評価

平成 15 年度に選定した高耐久材料接点の安定した寿命性能を確保するためには、その成膜プロセスのロットおよびウエハ面内における安定化が必要である。そこで、高耐久材料成膜用の超高真空スパッタ装置（アルバック社製 SME-200U）の導入立ち上げ、および条件の最適化を実施した。図 26 は、高耐久材料接点の従来品と成膜プロセス安定化品の 1 億回までの開閉寿命性能を比較したものである。成膜プロセスを安定化させたものは、抵抗変動のばらつきが抑制されており、高耐久材料接点の安定出力に対して目処を得た。

また、高精度 3 次元加工技術確立によって得られた、アクチュエータの寸法精度向上による接触力・開離力といった開閉設計パラメータのばらつき抑制と、接点当接時の低衝撃化などのアクチュエータの動作安定化に取り組み、開閉寿命試験で 5 億回動作を達成した。[図 27]

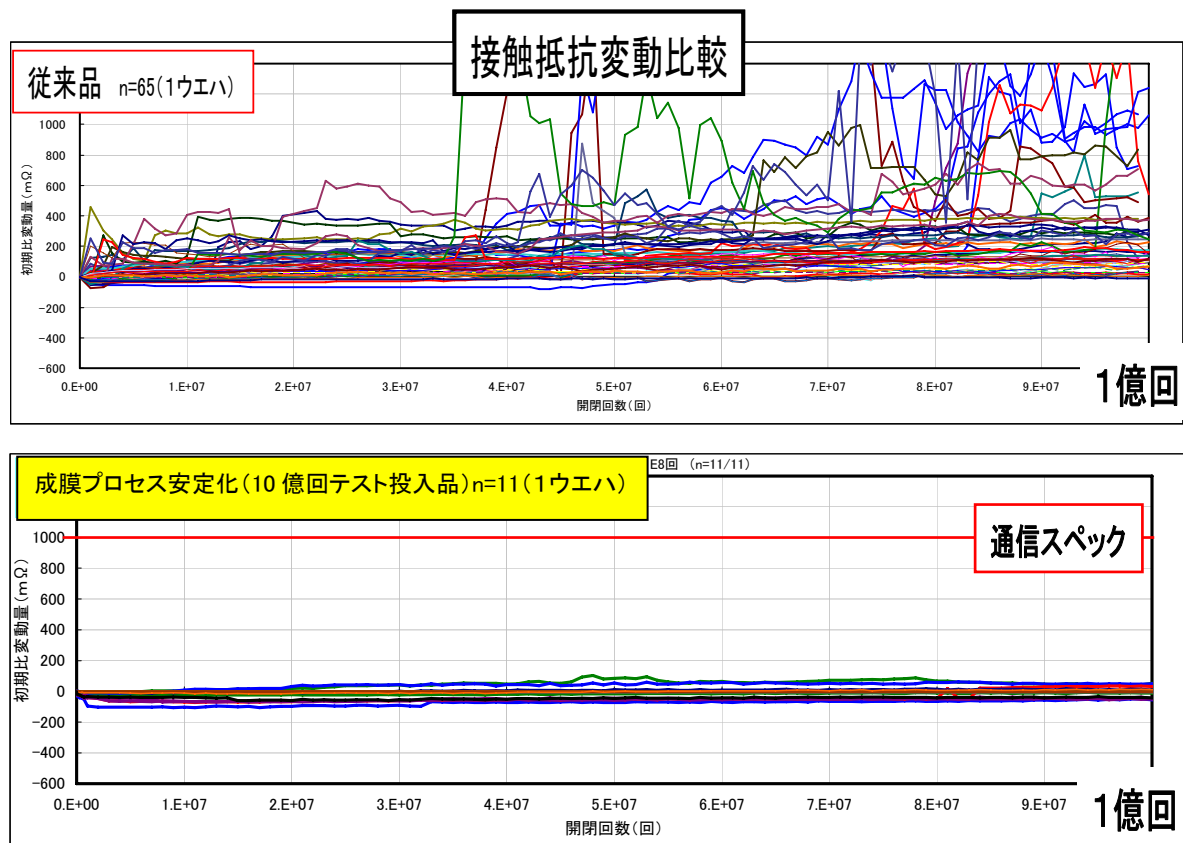


図 26 寿命評価試験結果（初期データの安定化）

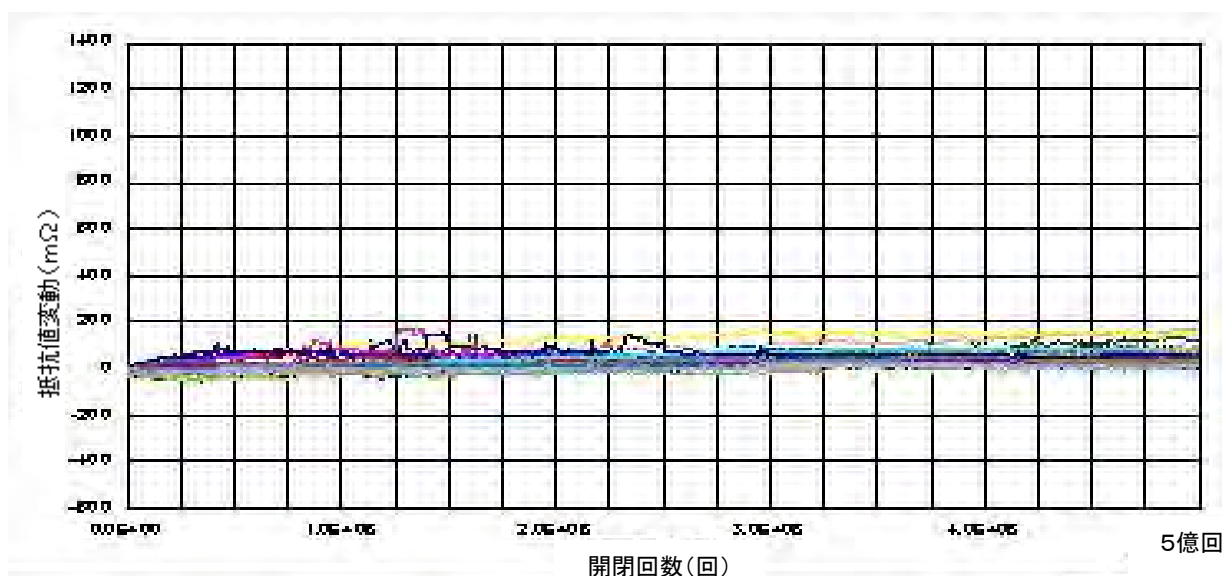


図 27 寿命評価試験結果 (5 億回)

2) 洗浄プロセス安定化

高耐久材料接点により固着が防止され、高精度 3 次元加工技術確立で得られたアクチュエータの寸法精度向上により開閉設計のパラメータのばらつきを抑えることができた。寿命を含めた性能をさらに安定して引き出すためには、接点表面状態の制御が重要である。特に、接点表面に付着するコンタミネーションは接触抵抗を不安定にする要因となるので、製造プロセスにおける洗浄工程を強化した。接点表面状態の安定化のためには、接点形成プロセスに限らず全工程の清浄化が必要である。バッチ・ウエハ面内ともに安定したプロセスの確立を図るため、表面洗浄装置の選定／導入を完了した。[図 28]



図 28 表面洗浄装置

3) 超長期接点寿命評価

10 億回以上の超長期接点寿命評価を実施するため、平成 15 年度に決定した要求仕様を満たす装置を選定し、納入／立ち上げを完了した。[図 29]



図 29 超長期接点寿命評価装置 (E-life Tester)

4) デバイス状態評価

R F スイッチの性能を評価するにあたり、どんなパラメータがどの程度寄与しているのかを調べるために、アクチュエータの動作や接点表面形状、付着物の分析といったデバイス状態を詳細に解析することが必要である。そのための評価装置を選定／導入した。

接点表面の結晶粒の状態観察や付着物の分析に表面分析器、アクチュエータの動作を解析するスキニング振動計 [図 30-1]、接点表面の形状や表面粗さなどを測定する走査型プローブ顕微鏡システム [図 30-2]、そして配線の長さや立体構造の高さなどを測定する測長 SEM である。



図 30-1 スキニング振動計



図 30-2 走査型プローブ顕微鏡システム

③平成 17 年度の開発実績

平成 17 年の開発目標は接点の開閉回数 10 億回以上可能な接点固着防止技術を開発することであり、以下のようなプロセス安定化技術の確立により目標を達成した。

1) プロセス安定化（高耐久材料選定および表面処理加工技術）と接点寿命評価

平成 16 年度までに導入した製造装置ならびに、表面処理・加工・洗浄プロセスで基本的な高耐久材料選定および表面処理加工技術は確立した。平成 17 年はこれらのプロセスを用いた実デバイスの評価とその評価にもとづくプロセスの安定化を図ることであった。これを実行してきた結果、以下の図のように複数ロットで接点開閉寿命 10 億回を達成した。[図 31] また、一部のロットでは寿命評価を継続し 20 億回以上の実力があることを確認した。[図 32]

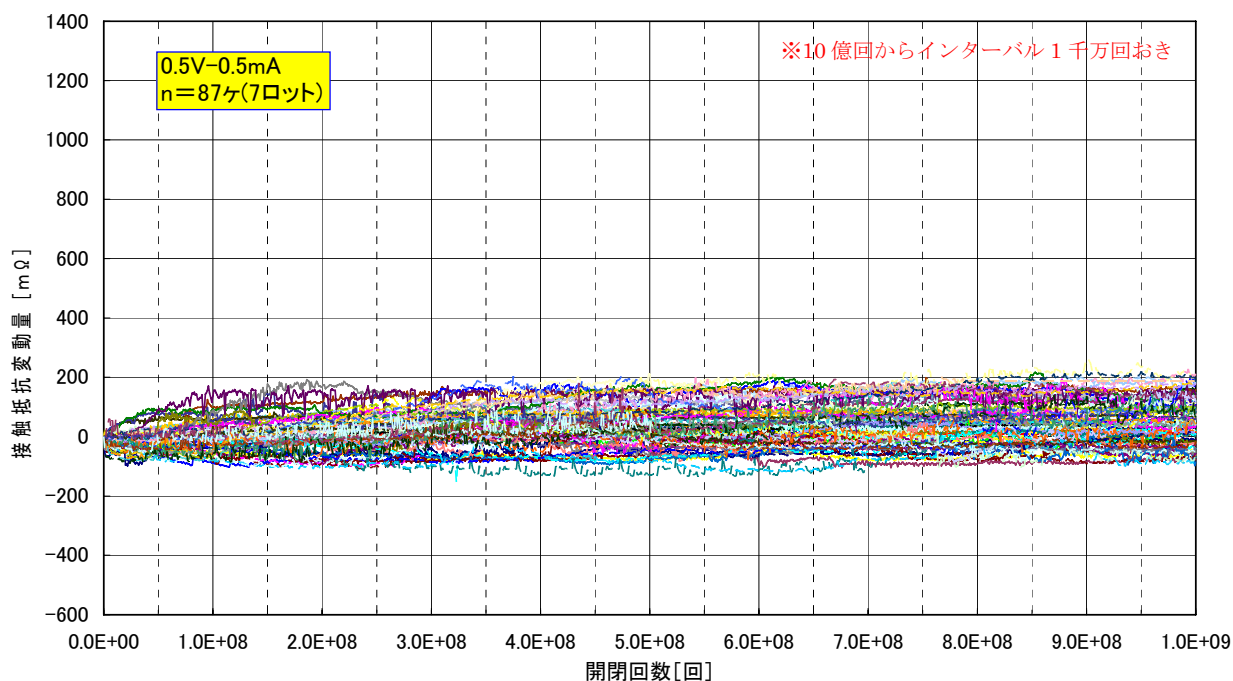


図 31 寿命評価試験結果（10 億回）

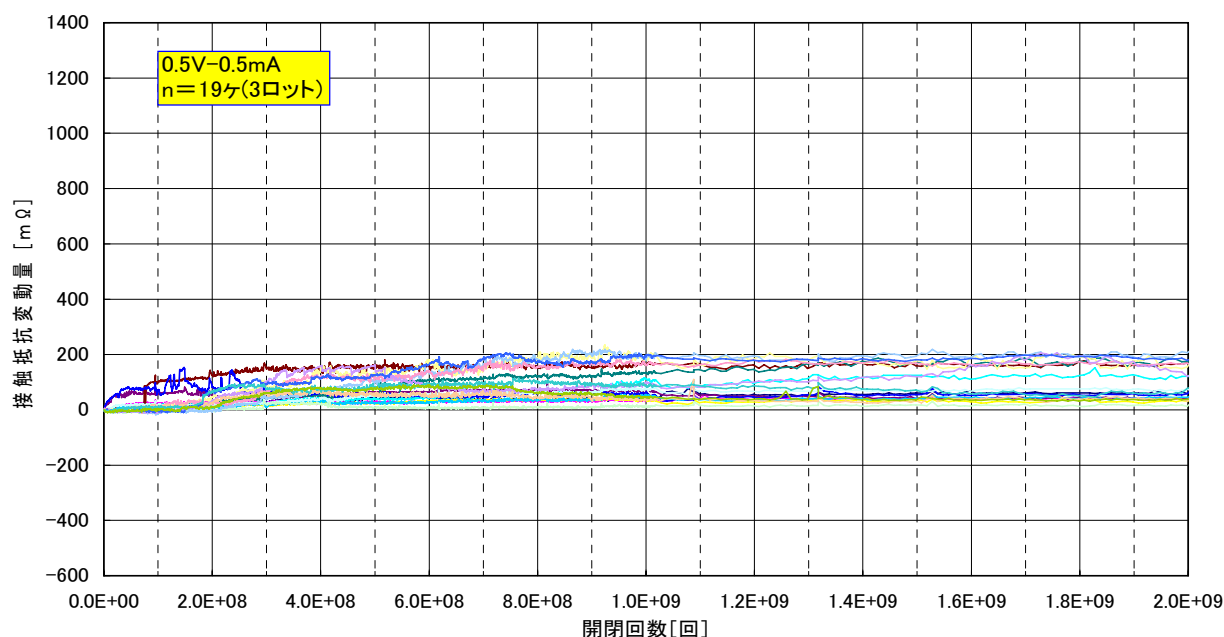


図 32 寿命評価試験結果（20 億回）

2) バーンイン工程の確立

開閉動作中に発生する故障モードの中には、初期特性検査で選別できないモードが存在する。それを出荷前に取り除くためのバーンイン(選別)工程を、その他の研究開発課題として検討した。市場での故障率を抑制するためには、出荷される製品を故障率と時間軸から描かれる Bath-tub 曲線[図 33]の底部(偶発故障期間)の段階に持っていく必要がある。それを加速させて行うのがバーンイン工程である。加速するパラメータとして、周囲温度、駆動電圧、負荷などを検討し、条件を抽出した。バーンイン後の寿命評価試験にて故障率 0 %を確認した。(n=116 チップ[水準:LTPD2%])

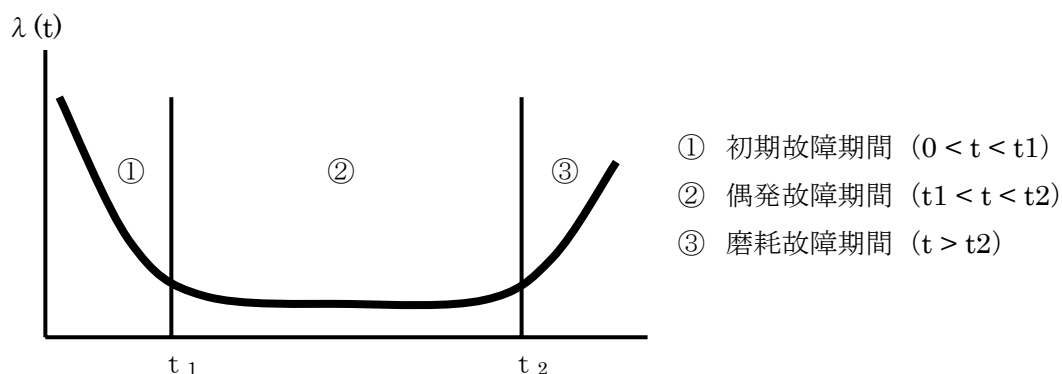


図 33 Bath-tub 曲線

3) その他の信頼性評価

実機としての完成度を高めるため、特に目標には掲げていない信頼性評価試験を実施した。社内における汎用リレーの技術標準と E I A J 規格を参考に、信頼性の項目と試験基準を定め信頼性評価を実施し、全ての項目で合格した。[表 5]

表 5 信頼性評価項目と合否

大項目	小項目	判定
基本特性	動作電圧	合格
	復帰電圧	
	動作時間	
	復帰時間	
絶縁抵抗	1次-2次間	合格
	2次間	合格
耐環境性	高温保存 (EIAJ B-111/JIS)	合格
	低温保存 (EIAJ B-112/JIS)	合格
	高温高湿 (EIAJ B-121/JIS)	合格
	温度サイクル (EIAJ B-131)	合格
	温度特性	合格

大項目	小項目	判定
耐環境性	誤動作振動 (EIAJ A-121/121A)	A) 合格 B) 合格 C) 合格
	耐久振動 (EIAJ A-121/121A)	A) 合格 B) 合格 C) 合格
	誤動作衝撃 (EIAJ A-122)	合格
	耐久衝撃 (EIAJ A-122)	合格
	取り付け方向性	合格
	はんだ耐熱 (EIAJ A-133)	合格
	静電耐圧 (EIAJ C-111/MIL883)	合格
	耐溶剤性 (EIAJ C-121)	合格

4)ファンドリーへの技術移転

高耐久材料の表面処理・加工技術などの工法および、寿命評価などの評価解析手法の技術移転に関して、高精度加工技術と同様、ファンドリー技術者が研究所において実際に原理・考え方、装置・その構成・操作方法を検討する形態で実施し完了した。表 6 に技術移転の効果を示す。

表6 プロジェクトによるファンドリ加工技術・測定評価技術向上効果

区分	技術項目	プロジェクト前	プロジェクト後
加工能力	貴金属パターン形成(リフトオフ)	—	加工可能
	接点洗浄	—	加工可能
測定能力	寿命評価(E-Life 試験)期間	300 日	25 日
	RF実負荷試験	—	測定可能
	RF特性試験	—	測定可能

(3) 低損失パッケージ技術開発

10GHz という高周波領域で、仕様を満たすには従来のパッケージング技術では不可能である。これはパッケージング材による損失と実装・配線方法に問題があったためである。

そこで低損失パッケージング材の選定とそれを用いた配線・実装・パッケージングプロセス技術を満たすものとしてチップサイズパッケージ(CSP)技術の開発を行った。

結果としてインピーダンス不整合の原因となるボンディングワイヤを廃し、スルーホールを用いた配線構造を採用することと、低誘電率であるガラスを用いた完全封止技術を確立し、0.1dB 以下(10GHz)である低損失パッケージング技術を完成させた。

以下に年度ごとの低損失パッケージ技術開発目標を記述する。

平成 15 年度：損失の少ないパッケージ材料の選定と、その工法および評価法を開発し、TEG（テスト用のダミーデバイス）にて、0.1dB（10GHz）を達成する。

平成 16 年度：損失の少ないパッケージ技術を開発し、デバイスにて 0.1dB(10GHz)を達成する。

平成 17 年度：パッケージの伝送損失を 0.1dB 以下(10GHz)に抑える低損失パッケージ技術を開発する。

①平成 15 年度の開発実績

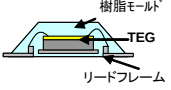
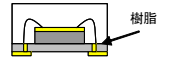
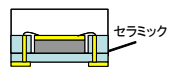
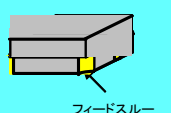
平成 15 年は低損失パッケージの材料と工法の絞りこみを行うステージであった。

1)低損失材料選定

以下のような部材を用いたパッケージを、TEG チップ（可動接点のない、配線のみ接続したダミーチップ）を用いて試作し、高周波特性の評価を実施した。

パッケージ種類と損失を比較した結果を表 7 に示す。

表 7 パッケージの種類によるパッケージ損失の比較

	パッケージ材料	説明	構成	パッケージ挿入損失 (dB@10GHz)
ワイヤあり	① 樹脂モールドパッケージ	デバイスをリードフレーム(金属の板状配線部品)に載せ、全体を樹脂で固めたもの。ワイヤ配線あり。実効配線長が長い。		× -8.5
	② 樹脂パッケージ	樹脂基板上的デバイスを樹脂の箱で保護したもの。ワイヤ配線あり。		× -10.2
	③ セラミックパッケージ	デバイスを箱状のセラミックで保護したもの。ワイヤ配線あり。		× -4.6
ワイヤなし	④ CSP(ガラス)	デバイスに箱状のガラスをフリットガラスペーストで接着し、密封したもの。フィードスルー(貫通孔配線)あり。		○ -0.09

評価の結果、樹脂モールドパッケージ、樹脂基板によるパッケージ、セラミックパッケージのいずれも、10GHz ではパッケージ損失 0.1dB を達成できないことが判明した。これは、パッケージ内部で使用するボンディングワイヤに起因する。これら樹脂やセラミックなどの材料では、誘電率が高いため、実効配線長が長くなる上、誘電正接による損失が無視できない量が発生する。一方、CSP で使用するガラスの場合、配線長を短く出来る点、誘電率と誘電正接が小さく実効配線長を短く出来ること

から、10GHz でのパッケージ損失を 0.1dB 以下に出来る見込みがあると判明した。以上から、パッケージ材料としてはガラス系材料が優れていると判定した。[図 34]

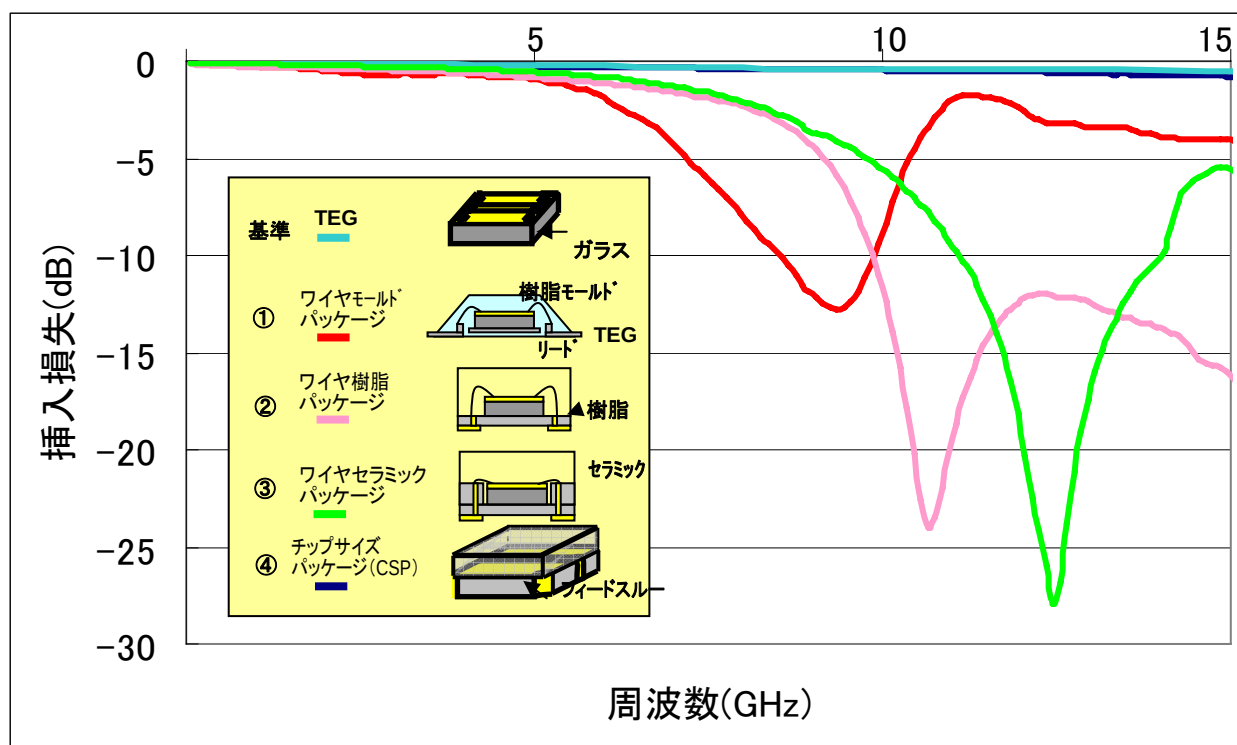


図 34 パッケージによる高周波特性比較

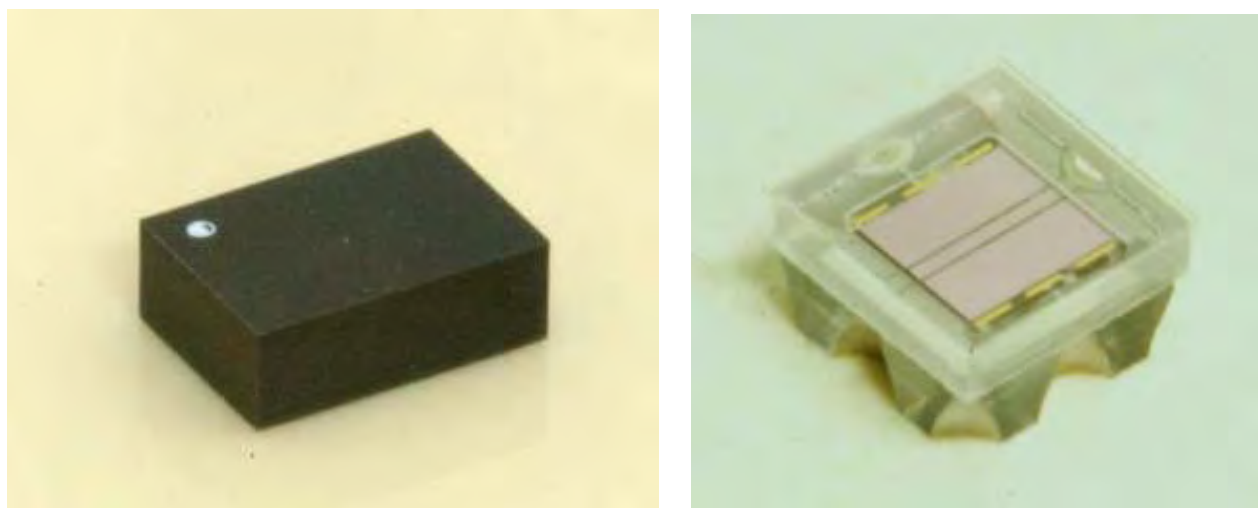


図 35 (左)樹脂パッケージ、(右)ガラスによる CSP

2) パッケージ工法確立

従来型のパッケージとして、デバイスをボンディングワイヤで配線し樹脂で封止する樹脂パッケージ、デバイスをセラミックの箱に入れ、ボンディングワイヤで配線するセラミックパッケージを試作・評価した。両パッケージは、ボンディングワイヤとパッケージ内部の配線長が最小になる構造とすることで、パッケージの損失改善を図った。

更に、RF スイッチ基板に貫通配線を設け、フリットガラスペーストを用いてガラスの蓋(キャップ)を RF スイッチに被せた CSP を試作し、同じく評価を行った。このパッケージは、RF スイ

ッチをウエハから分割する前にキャップウエハをガラスフリットペーストで接合し、ウエハ上のRFスイッチを一度にパッケージングすることを特徴とする。また、このパッケージはデバイスとパッケージを一体整形可能であり、損失発生個所をデバイス内で特定できるという特徴がある。

特性評価の結果、CSPでのパッケージによる損失は、TEGで0.091dB(@10GHz)を達成。[図36]パッケージ工法としてCSP工法が優れているという結論を得た。

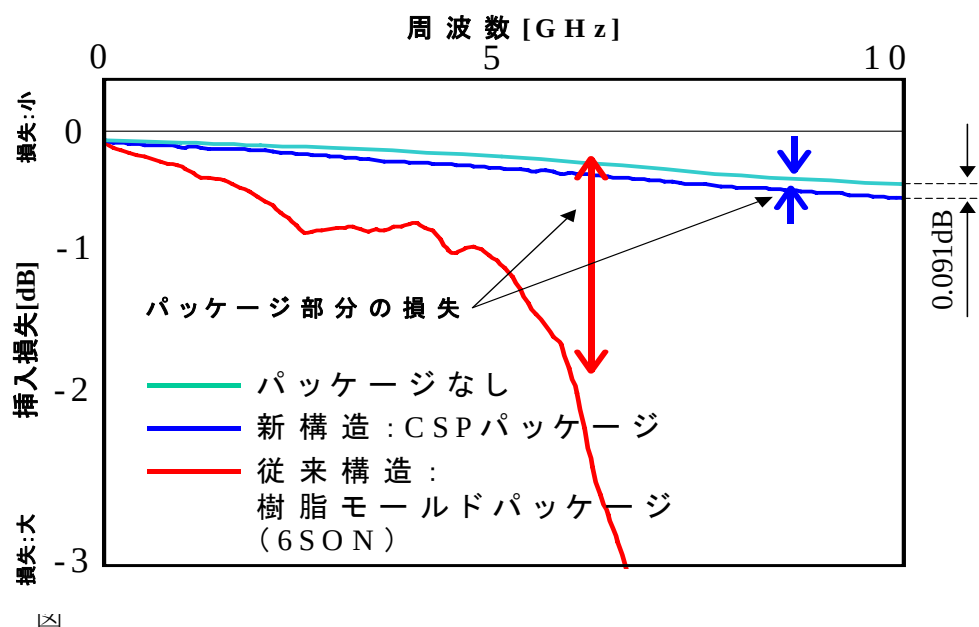


図 36 パッケージ種類による挿入損失比較(TEG)

3)高周波信頼性評価技術

信頼性評価用に、高周波信号を連続して流した際のRFスイッチの挿入損失、反射損失、アイソレーションの変化を評価できる電氣的信頼性評価装置の条件を抽出し、仕様策定を完了した。

②平成 16 年度の開発

平成 16 年の開発目標は実際のデバイスにて 0.1dB(10GHz)を達成すること。そこで前年確定したガラス材料を用いてRFスイッチを試作し、そのプロセス評価とCSP構造の評価を実施した。またガラスについても低損失のものなど評価した。前年度の試作評価は、パッケージ対象はダミーパターンのみでスイッチ開閉機能のないTEGチップであった。これに対し平成 16 年度の試作では、実際に開閉機能を有するRFスイッチでパッケージングを行い、CSP構造で課題となるデバイスプロセスとパッケージプロセスの親和性をRFスイッチで評価した。

1) 低損失材料選定

何種類かのガラス材料を用いてRFスイッチを試作し、そのプロセス評価とCSP構造の評価を実施した。高周波特性を考慮すると低誘電率ガラスが有利であるが、低誘電率ガラスでは熱膨張率の違い、接合プロセスである陽極接合が困難といった点が問題となった。このため、将来、より低誘電率素材の開発が必要になると思われるが、現状の10GHz以下の周波数領域においては現状の接合方法・プロセスとの整合性がよい、方珪酸系ガラス素材を最適と判断し、デバイス出力を実施した。

2) パッケージ工法確立

CSP工法を用いてSPST(1入力1接点開閉)タイプのRFスイッチを試作を実施し、パッケージ工法の確立を図った。[図37] 接合面積を考慮し、キャップウエハ接合工程の温度・圧力の最適条件出しを行った。また、製造プロセス途中で発生する貫通配線部分へのダメージでパッケージの損失が増大するため、プロセスで使用するガス種・薬液の変更等の保護プロセス確立で、パッケージプロセス中にダメージが発生しない工法を確立した。

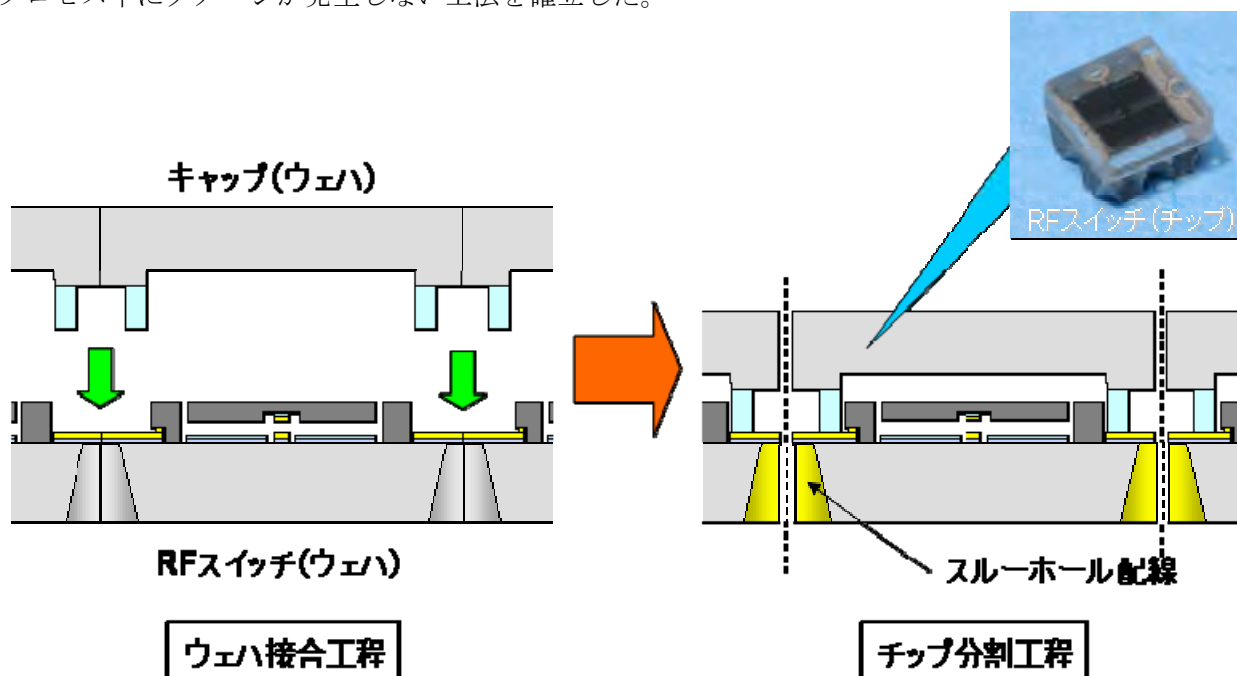


図 37 CSP による RF スwitch のパッケージ工程

以上の結果、実際のRFスイッチで測定して、インサーションロスにて0.09dB(10GHz)という目標の性能を得た。[図38] この工法でパッケージしたRFスイッチの挿入損失特性を評価した結果、チップ間での特性の差は十分に小さく、この工法は安定していることを確認した。[図39]

更に、CSPの封止性についてヘリウムガスを加圧してパッケージ周囲に与えてパッケージのリークレートの加速試験を実施した。その結果、リークレートは $3.4 \times 10^{-17} [\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}]$ という評価結果を得た。このリークレートは、ハーメチックシールで用いられるセラミックパッケージの半田封止によって得られるリークレートを上回るため、このCSPは十分な封止性があることを確認した。

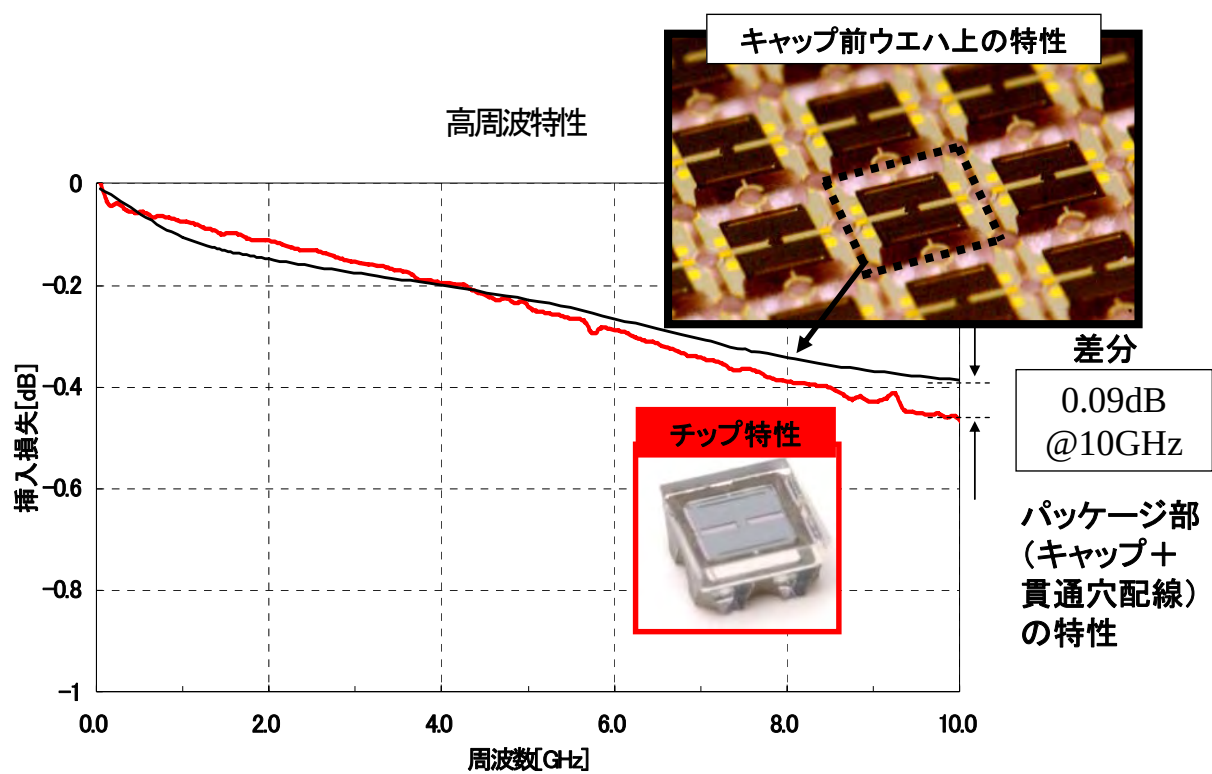


図 38 C S P 工法パッケージによる挿入損失

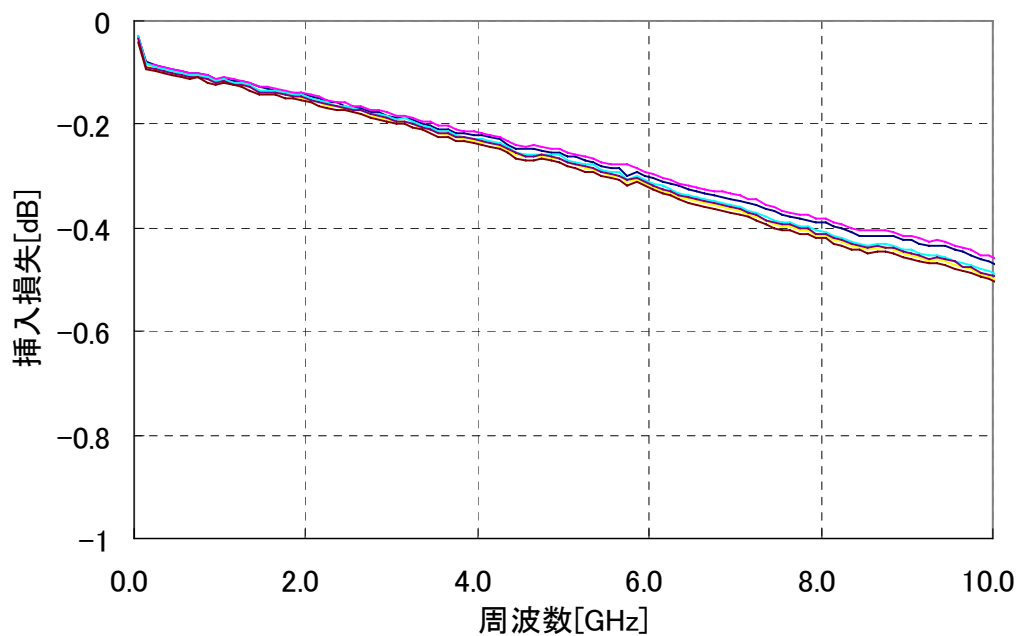


図 39 パッケージ後の高周波特性の安定性

3) 高周波信頼性評価技術

平成 15 年度に策定した仕様（高周波信号を連続して流した際の R F スイッチの挿入損失、反射損失、アイソレーションの変化を評価できる）に基づき装置の発注を実施。平成 17 年度前半に装置を立ち上げた。[図 40] 本装置は最大で同時に 10 個の R F スイッチに対し、最大許容電力に近い電力負荷を長期に与えつつ高周波特性を測定できる装置であり、高周波信頼性評価を加速することが可能である。



図 40 高周波信頼性評価装置 全景

③平成 17 年度の開発実績

平成 17 年度は低損失パッケージの実用性を検証するステージであった。

量産試作により作製されたデバイスを種々の環境負荷をかけ、高周波特性がどのように変化するかを測定し、実用化に耐えうるか検証した。

平成 17 年度はまた、ファウンドリ部門への技術移転を行う年でもある。パッケージ工程について技術資料をまとめ、パッケージ工程の実施、評価をファウンドリ部門でも実行できるよう環境を整備した。

具体的には、平成 16 年度に導入した高周波信頼性評価装置を用いて R F スイッチに高周波負荷を与え、挿入損失、反射損失の経時変化を通じてパッケージの損失量の変化を観察し、パッケージ信頼性を評価した。[図 41] 負荷条件として連続負荷とスイッチング負荷を与え、負荷電力は 0.1W から 1W までの範囲で与えた。負荷中の挿入損失の変化、及び試験前後での挿入損失の変化に対して試験基準を設け、パッケージの信頼性試験を行った。更に、R F スイッチテストシステムを用いて、パッケージ状態の R F スイッチに高周波信号を印加し、デバイスが発生させる信号歪みに関する電力特性を評価した。R F スイッチ自体は原理的に信号歪みを発生しにくい構造であり、パッケージ状態でも電力特性的に実用可能かどうかを測定し、R F スイッチの実用性を評価した。

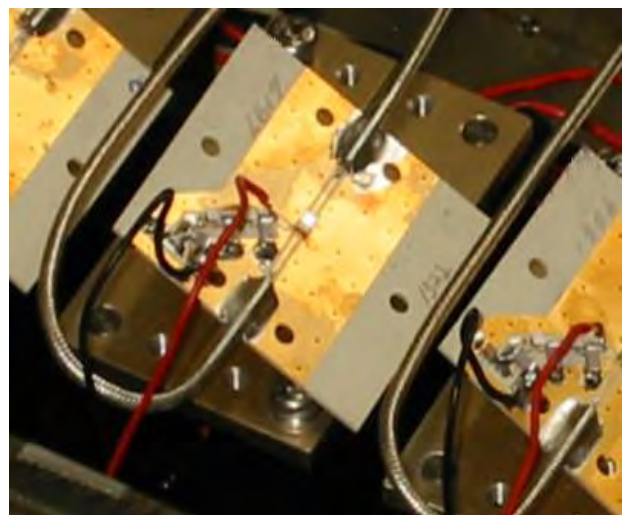


図 41 高周波信頼性評価装置 (左:シールドボックス内、右:評価中の RF スイッチ)

1) パッケージの高周波長期信頼性

パッケージを施した RF スイッチに実用時に多用すると考えられる電力負荷を長期間与え、挿入損失の変化からパッケージ損失変化を評価した。連続負荷時・断続負荷時のいずれの場合でも、挿入損失の変化はほとんどなく、パッケージの損失は長期にわたって安定であることが証明できた。

[図 42, 43]

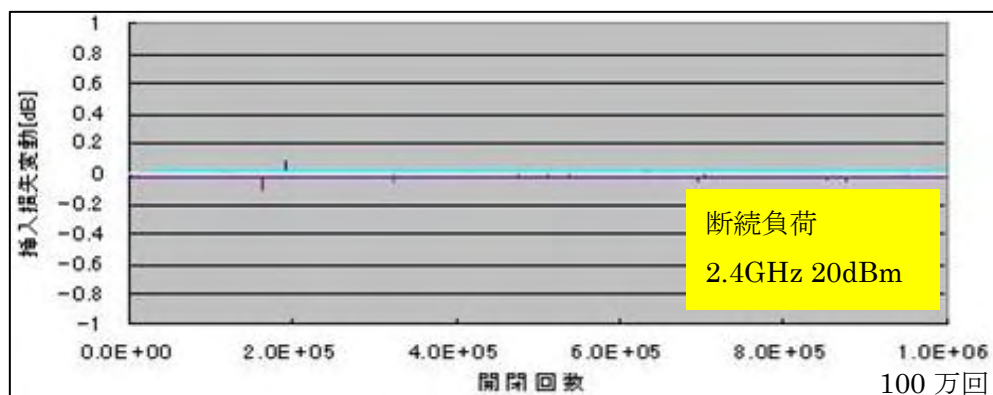


図 42 RF スイッチパッケージの高周波長期信頼性(断続負荷)

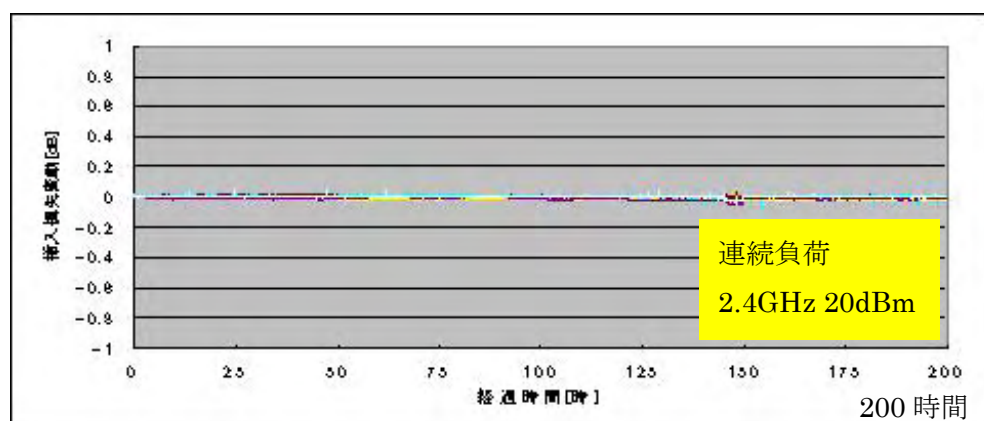


図 43 RF スイッチパッケージの高周波長期信頼性(連続負荷)

2) パッケージの大電力負荷時信頼性

パッケージしたRFスイッチに実際の使用時に瞬間的にかかりうる、許容電力負荷に近い大電力負荷を与えて挿入損失の変化を計測し、パッケージが高周波電力で低損失性を損なわないかを評価した。[図 44, 45] 電力は連続負荷と断続負荷の2通りの条件で与え、損失による発熱が十分飽和するまで測定した。その結果、パッケージ部分は大電力を与えても損失が増大せず、大電力に対してもこのパッケージは信頼性を保つことが判明した。

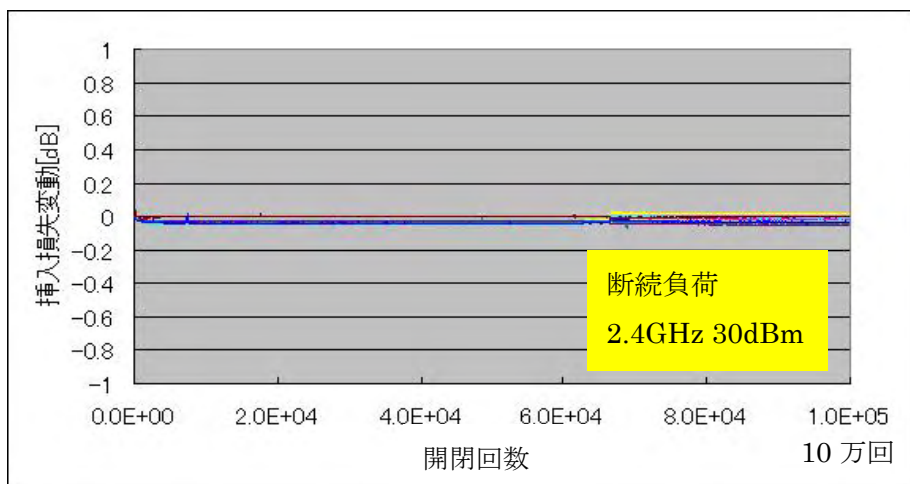


図 44 RF スイッチパッケージの大電力負荷時信頼性(断続負荷)

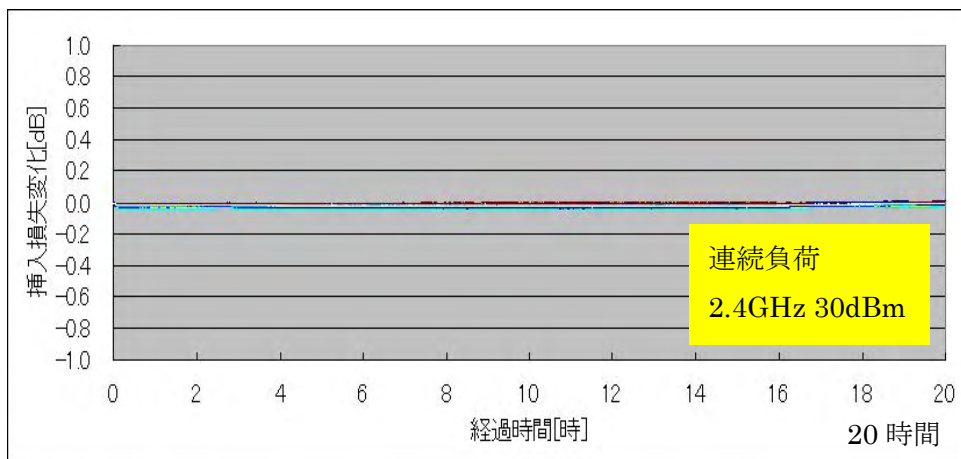


図 45 RF スイッチパッケージの大電力負荷時信頼性(連続負荷)

3) 信号歪み

パッケージ後のRFスイッチの実用性評価の一環として、電力負荷時の各種電力特性評価を実施した。この評価で使用するRFスイッチテストシステムは、RFスイッチに対して電力を通過させて、通過後の信号に発生した各種高調波成分を広帯域に測定する装置である。[図 46] この装置を使ってパッケージ状態のスイッチに大電力をかけ、特性値に変化があるかを評価した。



図 46 RF スイッチテストシステム

評価の際は、周波数 1GHz で電力 36dBm(約 4W)の正弦波を R F スイッチに投入した。また比較用として、TEG として高周波用同軸ケーブルを測定端子間に接続し、R F スイッチと同じ条件で電力を投入した。TEG は使用可能周波数内において、3 次高調波などを発生させる非線形特性がないため、TEG の測定結果は装置の測定限界になる。従って、R F スイッチの測定結果が TEG に近いほど、R F スイッチは非線形性の少ない、優れたスイッチということになる。

評価の結果、R F スイッチの特性は全ての特性で測定端子間に TEG を接続した場合とほぼ同等で、非常に線形性が高いことを確認できた。またこの結果から、スイッチ自身に非線形特性がないだけでなく、パッケージ部分も非線形ひずみを発生させていないことを確認できた。[表 8]

表 8 RF スイッチ信号歪み特性一覧

RFスイッチ実力値

測定項目	記号	測定値	単位
0.1dB利得圧縮時入力電力	P.in(0.1dB)	>37	dBm
入力3次インターセプトポイント	IIP3	>71	dBm
高調波	2nd Order	>92	dBc
	3rd Order	>98	dBc
隣接チャンネル電力比(BW:3.84MHz)	ACPR(5MHz)	>48	dBc
	ACPR(10MHz)	>63	dBc

TEG実力値＝装置測定限界

測定項目	記号	測定値	単位
0.1dB利得圧縮時入力電力	P.in(0.1dB)	>37	dBm
入力3次インターセプトポイント	IIP3	>70	dBm
高調波	2nd Order	>94	dBc
	3rd Order	>97	dBc
隣接チャンネル電力比(BW:3.84MHz)	ACPR(5MHz)	>48	dBc
	ACPR(10MHz)	>65	dBc

測定条件(共通)

項目	記号	値
入力信号周波数	f	1 GHz
入力電力	P	36 dBm
入力信号形式	ACPR以外	CW
	ACPR	W-CDMA変調波

4)ファウンドリへの技術移転

パッケージ工程に関して、プロセス手順資料等をまとめ、この資料と実プロセスによる教育を通じ、ファウンドリ側の人員のみでRFスイッチのパッケージプロセス、評価、必要に応じた設計変更が可能な体制を構築した。プロジェクトで技術向上効果を表9に示す。

表9 プロジェクトによるファウンドリでのパッケージ技術・評価・設計技術向上効果

区分	技術項目	プロジェクト前	プロジェクト後
加工能力	CSP工法	—	加工可能
測定能力	高周波基本特性評価	—	測定可能
	高周波信頼性評価	—	測定可能

2-3 成果の意義

本プロジェクトにより、MEMS RFスイッチがメカニカルリレーと同等以上の優れた高周波特性を持たせつつ、最も課題とされた接点耐久性を10億回開閉を実現できた。また、サイズも既存半導体スイッチと同等レベルの小型化を実現できたことは、世界的に高い水準の成果を達成したと言える。特に開発技術の高精度3次元加工技術は、他の研究やファウンドリの実力と比較して、世界最高水準と言える。これにより、新たな高性能小型化高耐久性なスイッチングデバイスを市場に投入できる見通しが立ったことで、通信、計測機市場への波及はもちろん、通信業界ではRF MEMSスイッチを応用した新たなアプリケーション開発の動きも出始めていることから考えると、新市場創出に対して充分影響力があると考えられる。RF MEMSスイッチの展開できる市場は、ICテスト市場だけでも今後年間数10億円以上の拡大が見込まれており、投入助成額に見合った成果が充分得られたと考える。

2-4 特許の取得

本プロジェクトで得られたRFスイッチに関する知的財産において、構造関連特許は、既存構造は当然のこと将来的な高機能化を狙った先取り特許として出願を実施。一方、製造技術関連特許は、MEMSデバイスを実現する上で最も重要な要素の1つであるため、特許化／ノウハウ化の吟味を十分に行い、事業戦略に沿って出願を行っている。また、一部の基本特許については、早期審査による早期権利化を進める一方、想定される市場や製造地域は、国内だけでなく米国、ヨーロッパ、アジアとグローバルであり、主要各国への出願も確実に実施している。

2-5 成果の普及

本プロジェクトの成果については、学会・論文発表やプレス発表、関連分野の展示会への出展などにより普及活動にも力を入れてきた。学会・論文発表に関して、世界最高水準となるRF-MEMSスイッチ関連技術内容を盛り込んだ、学会発表14件、論文発表5件を実施し、世界の関連専門分野への成果アピールを充分実施してきたと考える。また、成果となるデバイスのユーザ（携帯業界、ICテスト業界）に対しても、ユーザーヒアリング等を通じて、成果をアピールすることで普及を行ってきた。同時にニーズの吸収も行い、新たなデバイス課題の抽出や改善へのフィードバックにも取り組んできた。この他、一般向けとなるマイクロマシン展やナノテク展、愛・地球博などへの出展を計7件、プレス発表、技術講演を計20件を実施、広く一般に対しても情報発信を行ってきた。図47に各展示会の写真を示す。

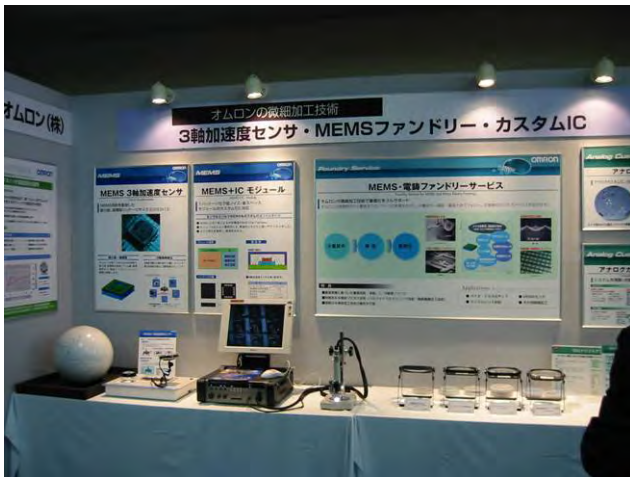


図47-1 2003年度 マイクロマシン展 出展写真



図47-2 2004年度 マイクロマシン展 出展写真



図47-3 2005年度 マイクロマシン展 出展写真

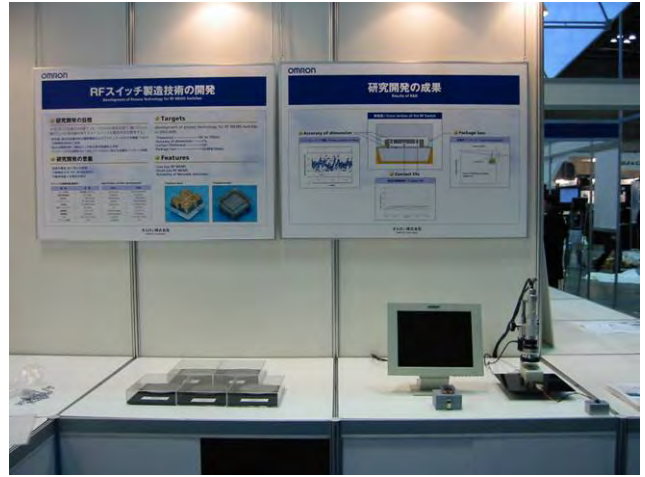


図47-4 2005年度 ナノテク展 出展写真

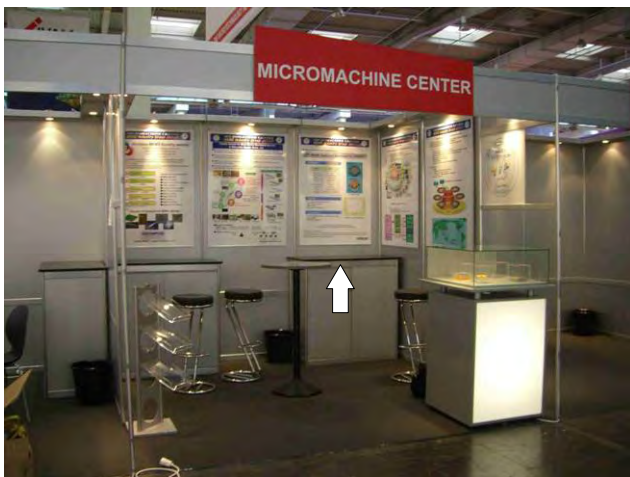


図47-5 2005年度 ハノーバメッセ 出展写真



図47-6 2005年度愛・地球博NEDOパビリオン 展示写真



図47-7 左:2005年愛・地球博NEDOパビリオン(RFスイッチ)紹介HP



図47-8 右:2006年CEATEC展示写真

IV. 実用化、事業化の見通しについて

(1) 成果の実用化可能性

現在、本成果を基盤としたRF MEMSスイッチの商品化を実行中である。産業技術としてのRF MEMSスイッチの適用可能性について、チップ単体での信頼性試験を実施し、市場で充分耐えうる信頼性を確認、量産性についても高い歩留まりで生産できることを確認している。また本プロジェクトで培った技術は、実際のMEMSファンドリ事業に徐々に展開され始め、実用化に向けて着実に進んでいる。実用化への課題として、実際のユーザニーズに合わせた商品仕様への設計変更、その仕様に基づく信頼性試験、量産性検証を行う必要があり、今後の課題となる。

(2) 波及効果

優れた高周波特性を実現したことで、通信機器においては小型低コストでのマルチバンド化や低消費電力化が容易になるため、例えば現在一部の携帯電話ハイエンドモデルにのみ搭載されていた性能が、廉価モデルに展開できると期待され、需要拡大への効果が見込まれ。また、ICテストにおいては、より高速な信号を扱えるようになるため、より高速なCPUやメモリ、システムLSIの開発が加速されと考えられるため、これにより、コンピュータや通信機器のデータ処理、データ通信はより高速化大容量化が可能になり、関連分野における経済的波及効果は充分大きいと期待できる。ファンドリ事業に関しては、世界最高水準の高精度加工技術を活かし、いままで受託できなかった高精度加工に関する委託内容に対しても応えられるようになった。これにより産業界における新しい構想のデバイス、モジュールの実現に貢献し、結果として新デバイス、モジュールによる新市場創出にもつながり、経済的波及効果も間接的に貢献できると期待できる。

技術的波及効果として、RFスイッチの完成度が高まり、広く情報発信やサンプル提供を行ってきたことで、RFスイッチ以外のRF-MEMSの研究が盛んになり、高速データ伝送やウェアラブルなどの新デバイス技術開発に波及効果が出て来ていると考える。また、プロジェクトのために投入されたMEMSエンジニアは多くの未知の課題解決や解決手法、評価方法の考案・実行、各種機器の設計・開発・導入などの様々な技術的経験による能力向上を達成することができた。このような技術レベルを飛躍的に向上することができたことで、人材育成促進の観点でも波及効果が大きかったと言える。

(3) 事業化までのシナリオ

今後のRFスイッチの事業化シナリオは以下のことが予想される。

2007年度 商品開発を完了し、同年度に商品第一弾としてATE(Automatic Test Equipment：自動試験装置)用RFスイッチを市場に投入する。この商品リリースにより、一層の量産技術、品質安定性向上を図り、同時に携帯などの通信機器に仕様を合わせた通信機器向けRFスイッチの技術開発(価格競争力を上げるためのコストダウン技術など)を実行することで、2010年度あたりから本格化すると予想される携帯4Gへの展開に合致した事業化計画を進めていく。商品第一弾となるATE用RFスイッチのターゲット市場は、2009年度に100億円を超える見込みである。[図 48]

また、RF MEMSスイッチに関するオムロンの事業化シナリオを図 49 に示す。

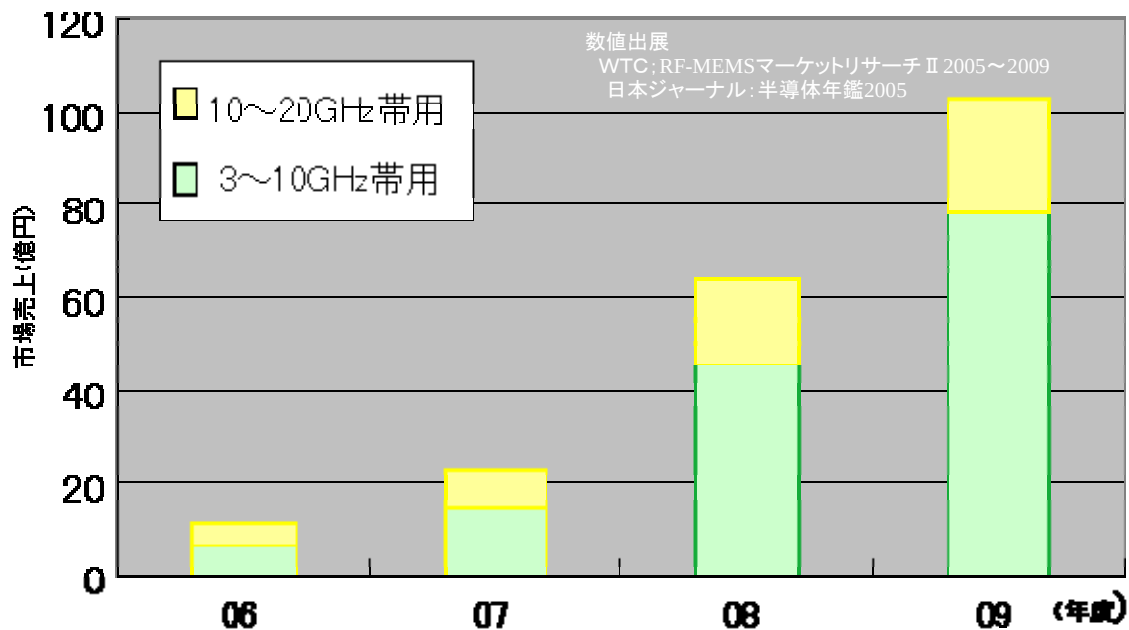


図 48 ATE用RFスイッチ市場売上額(予想)

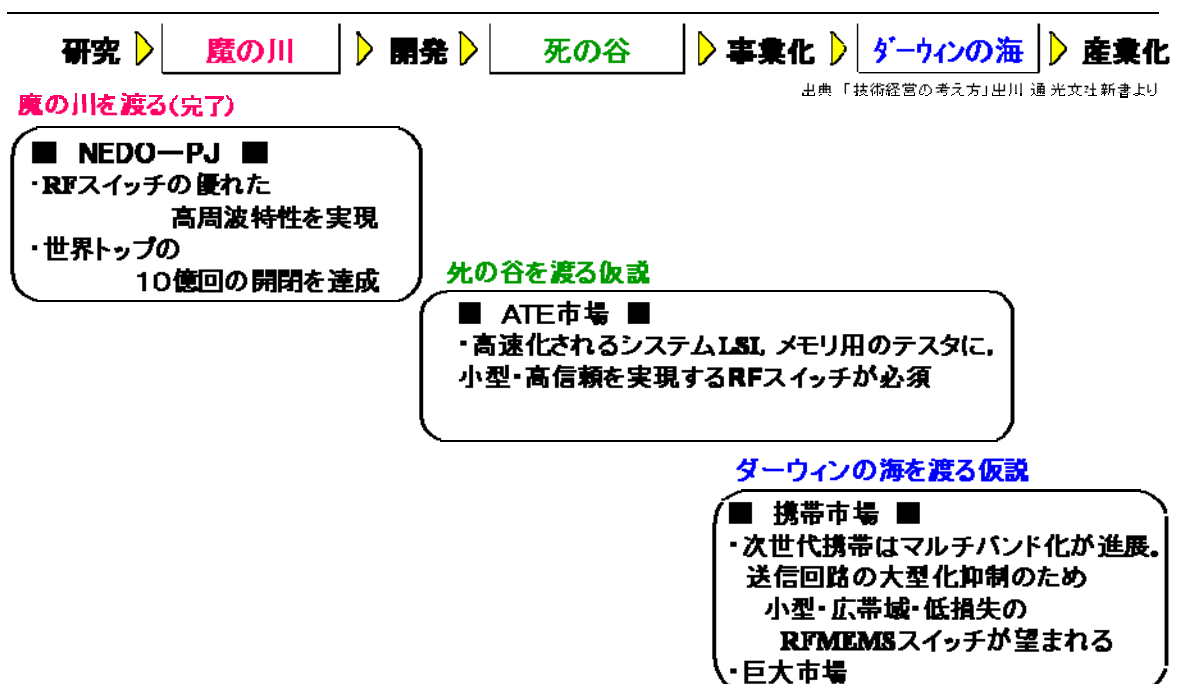


図 49 RFスイッチ 事業化シナリオ

3. 各テーマの成果詳細

3.2 光可動ミラー製造技術開発

光スイッチの高精度加工技術の開発

(1) 研究概要

本研究開発助成事業では、光可動ミラーの応用製品であるMEMSタイプの光クロスコネクタ（OXC）等の実用化に不可欠な必要な高精度加工技術を開発し、これらのMEMS製品を実用化することを目標とした。実際には以下の研究開発を実施した。

- ① 高精度 3D 加工技術開発
- ② 高精度制御技術開発
- ③ 信頼性・計測・評価技術開発
- ④ 光ミラーアレイモジュール製作

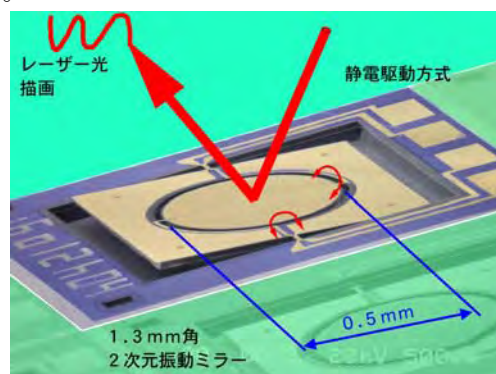
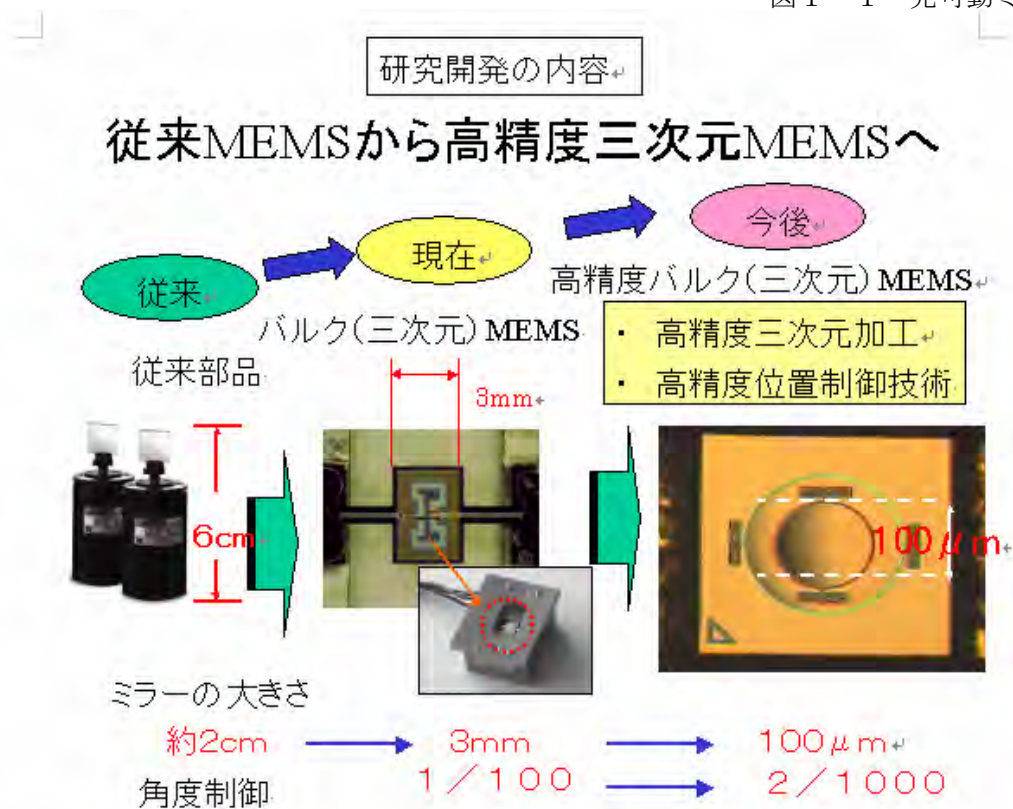


図 1 - 1 光可動ミラー例



① 高精度3D加工技術開発

高精度 3D 加工技術は、通信用 SW として重要な、挿入損失等の光学特性を左右する、MEMS ミラーの表面粗さ及びソリを低減することを目標として、MEMS ミラーの加工に必要な様々な高精度な加工技術を開発した。以下の数値をその目標にした。

- ・表面粗さの絶対値が、100 μm 角平方の面積に渡って PV (Peak-Valley: 頂点) 値で 50nm 以下

- ・ミラーソリ量が $100\mu\text{m}$ 角平方の面積に渡って PV 値で 6nm 及び 1.5nm 以下

1) 要素加工技術開発の成果

要素加工技術開発では、MEMS ミラーの加工に必要な以下の要素加工技術の開発を行った。

i) 薄膜成膜技術

ミラーを構成する薄膜の内部応力を高精度に制御する薄膜加工技術に取り組んだ。様々な薄膜の成膜実験を行い、内部応力を±数 10MPa 以下の精度でコントロール技術を獲得した。

ii) リソグラフィ技術

高性能フォトリソグラフィ関連装置を導入して、高精度加工技術を獲得した。

高段差基板に対応したフォトリソ技術と、 $0.1\mu\text{m}$ レベルの表裏面合わせ精度を実現した。

iii) エッチング技術、

三次元MEMSの加工には欠かせない Deep RIE に等よる高度な加工技術を開発した。Deep RIE 特有のエッチング面の凹凸を低減するプロセス開発し、表面粗さの絶対値が、 $100\mu\text{m}$ 角平方の面積に渡って PV 値で 50nm 以下の目標をはるかにクリアする、数 100nm 以下を実現した。さらに、Pt のようにエッチングが困難な金属材料をドライ雰囲気中でエッチングする技術や、MEMS ミラー加工プロセスでも多用する強アルカリ水溶液を用いた Si 結晶異方性エッチングに関しても、高精度エッチング技術を開発した。

iv) その他の加工技術

成膜、エッチング技術以外の光 MEMS に用いる高度なデバイス加工技術を開発した。低温ウエハ接合技術、レーザダイシング等、次世代の光 MEMS を実現するのに有望な加工技術を獲得した。

2) MEMS ミラーデバイス加工技術

ミラーデバイスを形成するための加工技術、試作に用いた加工技術開発の成果を報告する。光 MEMS、特に光スイッチデバイスに関する加工技術の中で、ここでは、高精度加工技術の目標である、ミラーのソリに着目して報告する。

まず、試作した2種類のミラーデバイスについて、i) 加工目標・仕様を整理する。次にデバイス加工プロセスの工程中に生じる ii) 薄膜の内部応力の変化について報告する。その後、夫々のミラーデバイス加工技術開発を iii) ミラーデバイス A、iv) ミラーデバイス B について、最後に v) ミラーのソリ以外のデバイス仕様に影響するプロセス技術開発の結果についても報告する。

i) ミラーデバイス加工目標・仕様

今回ミラーデバイスは想定している光スイッチシステムの仕様が異なる2つのタイプのデバイスを開発した。それぞれの課題についてまとめる。

表 ミラーデバイス加工目標

ミラーデバイス	レバー材料	曲率半径(そり)	角度制御	信頼性
ミラーデバイス A	Si	$>1.0\text{m}$ ($1.25\text{nm}/100\mu\text{m}\square$)	—	実施
ミラーデバイス B	PI→SiN	$>0.2\text{m}$ ($6\text{nm}/100\mu\text{m}\square$)	2/1000度	実施

ii) 薄膜の内部応力の変化

MEMS ミラーの反射膜として多用されている、Au/Cr 膜と Al 膜について、成膜後の後処理で応力が変化し、ミラーのソリが変化する様子を報告する。

iii) ミラーアレイモジュール：ミラーデバイス A

ミラーデバイス A は、前ページの表で示したように、デバイスの内部に角度センシング機能を保有していないので比較的シンプルな構成のミラーである。ミラー反射基板の構造や、表面汚染の対策等を行い、目標のミラーのソリ量 $1.25 \text{ nm}/100 \mu\text{m}$ 以下を達成した。

iv) ミラーアレイモジュール：ミラーデバイス B

ミラーデバイス B は、センサ機能を有している。それゆえ、ミラーデバイス A のミラーと比較すると、複雑な構成にならざるを得ない。また、システムの光学仕様の違いから、同じ形状ではよりミラーの駆動振れ角が大きくなるようにヒンジ材料もミラーデバイス A では、Si であったのが、より柔らかい材料の SiN を選択した。

特に、ミラー基板の構成が複数電極を要することにより、複数の薄膜の内部応力を考慮した構造を開発して、ミラーソリ量の $6.0 \text{ nm}/100 \mu\text{m}$ を達成した。

3) 加工精度評価技術の開発の成果

1)、2) で述べた加工技術開発を遂行するには、評価技術の開発が不可欠であった。すなわち、ミラーの表面精度向上や薄膜内部応力の制御精度向上には、高精度の 3D 形状評価技術が必要である。また、基板表面だけではなく、例えば内部に形成されたキャビティ構造の形状評価も重要である。さらに、ミラーデバイスのダイナミックな動作時の面精度は、光 SW の動作速度に直接影響するので、動的振る舞いの解析技術の開発にも取り組んだ。

最後にミラーデバイス特有の光学特性やアレイ化したデバイスの外観評価や動作特性に関する評価技術も獲得した。

② 高精度制御技術開発

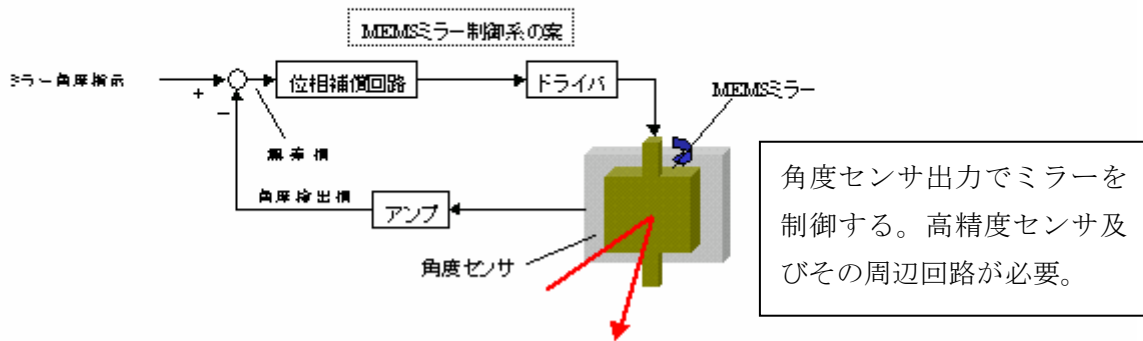
微小ミラーを用いて光制御を行う光可動ミラーアレイを光通信に用いる際の大きな課題が、ミラー回転角の高精度角度制御である。この高精度の制御性が求められる理由は、次の微小機械 (MEMS) の持つ 2 つの課題を高精度角度制御によって克服する必要があるためである。

- ・経時変化、熱ドリフトによる不安定性、衝撃時の特性不安定性
- ・高速動作特性の確保

特に我々が開発ターゲットとしている波長選択 SW は、大きな空間光学系を前提にしているのでレーザ光の空間伝播長が長くなる。従って、これらは重要な課題と言える。

本技術開発では、まず、微小センシングの方式の検討を行い、微小ミラーの角度センサとして適しているセンサとして、構成の容易さ及び感度特性から容量センサを選択し、それに合わせた、アンプ IC の設計を行った。初期の検討用ミラーデバイスとアンプ IC を用いて、基本的な角度センシングは実証できたが、SN が低いことやクロストークがある等の課題も明らかになった。そこで、アンプ IC の特性改善、実装基板の改良、さらには、ミラーデバイスのセンシング構成の改良等を行い、目標の角度制御分解能 $2/1000$ 度をほぼ達成した。

研究開発の内容



③ 信頼性・計測・評価技術開発

光可動ミラーの実用化を阻んでいる一つの原因は、信頼性の問題とされている。光通信向けのスイッチの実用的な信頼性を保障するためには、目標 10^{10} 回（100億回）以上の駆動動作回数が必要である。

そこで、ミラー駆動信頼性を中心に様々な、実用上問題になるであろう、項目について信頼性試験を行った。また、この信頼性試験に必要な計測評価技術開発も合わせて行ったが、その詳細は、(2) 研究の詳細報告でのべる。

ミラーデバイスの信頼性に係わる技術開発として、駆動信頼だけではなく、1) ミラー反射面の光学特性の経時変化、2) ミラー駆動用配線の信頼性、3) 電極基板の絶縁耐性、4) ミラー駆動信頼性の4項目について信頼性評価を実施した。

1) ミラー反射面の光学特性の経時変化では、Au ミラーと Al ミラーの2種類のミラーについて耐久性試験を実施して、ミラーの光学反射率劣化に関する信頼性評価を行った。ともに、高温高湿耐性試験でも、著しい劣化はなく、信頼の高い膜構造であることを確認した。

2) ミラー駆動用配線の信頼性試験を実施し、ヒンジ部に一体構成される配線構造に係わる構造の課題を明確にした。配線材料や保護膜の種類により、劣化の様子が異なることが判った。今回の結果から、メカニカルストレスでも、電気的なストレスでも Cu 配線の耐久性が比較的良いことや、PI（ポリイミド）保護膜も特有な効果があることが判った。

3) 電極基板の絶縁耐性では、プラズマ酸化膜の絶縁耐性を評価した。プラズマ酸化膜を静電アクチュエータの絶縁層として使用しても、充分絶縁耐性があることを確認した。

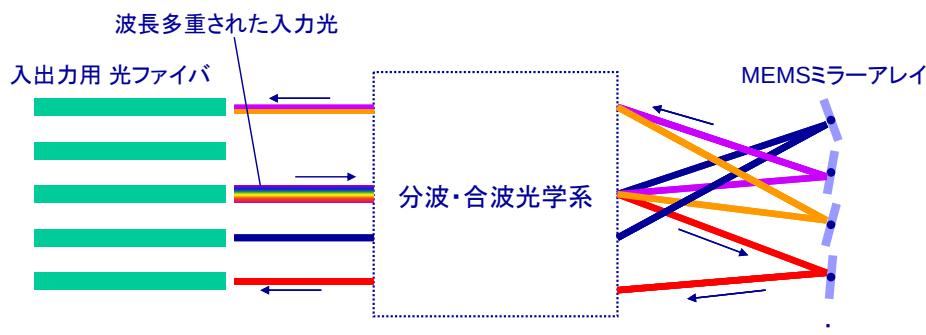
4) ミラー駆動信頼性の評価では、PI ヒンジ、SiN ヒンジ、Si ヒンジ夫々の構造のミラーの長期動作試験を実施した。いずれのヒンジ材料でも目標の 10^{10} 回レベルの駆動信頼性があることを確認した。また、Si ヒンジについては、駆動に伴う故障モードを調べた。その結果、磨耗故障型ではなく初期故障型であると結論した。

④ 光ミラーアレイモジュール製作

これまで述べてきた、①加工技術、②制御技術を駆使して、光ミラーデバイスの実用化に向けた、モジュールを作成し、評価した。プロジェクト期間では、プロトモジュールと光 SW モジュールの2つのモジュールを作成したので、順番に報告する。

開発した光SWモジュールはWXC（波長レベル光クロスコネク）を想定した。下図にその波長選択型の光スイッチのイメージ図をのせる。

- ◆ ターゲットとする光SWのイメージ
 - － 波長選択型の光スイッチ
 - » 波長多重された入力光に対し、波長ごとに出力ファイバの切り替えを行う



まずWXCとして求められる光学特性や機能を想定して、光学系及びモジュールのパッケージング技術等の設計を行い、ターゲットBのミラーアレイデバイスを搭載したプロトモジュールを試作した。このプロトモジュールを用いて光伝送特性評価を実施して、挿入損失等に課題があることが明らかになった。

このプロトモジュール評価結果から、各種特性を改善する検討を進め、光学設計、デバイス設計、ケーシングの再設計を行い、最終光SWモジュールを製作した。この、モジュールは、単体ミラーの制御機能だけではなく、アレイ化されたミラーに対して、角度制御が出来る構成を取っている。本ミラーアレイの制御精度評価も実施し 10/1000 度以下の角度制御性能があることが確認された。光学伝送特性等の詳細評価は、今後開発を継続する中で実施して行く。

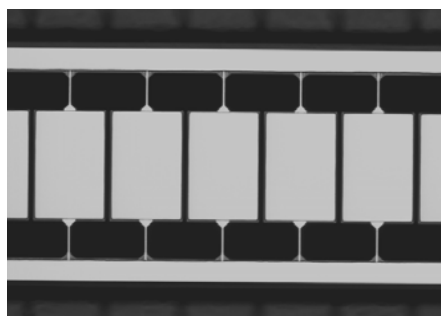


図 プロトモジュール用ミラーアレイ

(2)成果の意義

本プロジェクトでは、光MEMS、特に通信用マイクロ光スイッチの実現に必要な、①高精度3D加工技術の開発、②高精度制御技術の開発、③高精度評価・信頼性技術、④光SWモジュールの開発これらの4つの技術開発に取り組んできた。ここでは、夫々の成果の意義を報告する。

① 高精度3D加工技術の開発

高精度加工技術として、MEMSミラーのソリを低減した。個々の成膜の内部応力を制御す

る技術を確立するとともに、ミラーデバイス構造、加工工程を改善することにより MEMS 平面ミラーのソリは、プロジェクトの目標を達成した。

この成果は、世界最高水準であるとともに、MEMS ミラーで光 SW の実用化が進まなかった要因の一つを解決したと考えている。

また、Si 基板表面に対して垂直に Deep RIE で加工して形成するミラーでは、高性能装置を用いて、最適な条件を見出すとともに、デバイス構造にマッチした後加工技術を開発することにより、表面荒れを従来の $1/3 \sim 1/5$ の数 10nm 以下加工技術を開発した。これらの技術は、光 MEMS の開発にとどまらず、Deep RIE を使用する様々な MEMS デバイスの加工精度を、世界最高水準のレベルで適用できる技術まで獲得したと考えている。

さらに、将来のミラーデバイスに必要な様々な加工要素技術（接合技術や、エッチング技術等）も開発した。いずれも、現時点で世界最高水準の加工技術を獲得したと考えている。

これらの高精度加工技術は、今後、実用化をまず進める波長選択スイッチにとまらず、様々な光通信向けの MEMS への応用が考えられ、実用化を加速すると考えている。また、弊社のファンドリ案件への適用を進めることにより、様々な高性能 MEMS の実用化を加速すると考える。

② 高精度制御技術の開発

MEMS ミラーの角度センシングが可能な微小センシングの方式の検討を行い、容量センシング方式を選択して、ミラーデバイス専用のアンプ IC の設計を行い、目標の角度分解能を達成した。

この微小ミラーの角度センシング技術は、世界的に例が殆どない。この成果により、光通信で MEMS ミラーの実用化を阻んでいる大きな課題が克服できると考えている。現状の光通信のスイッチモジュールにおいても、光信号を光強度をモニターすることでシステムの安定化を実施している。その方法は出力側の光信号を分岐して分配して光強度変化をモニターする方法である。これは、システム全体の構成が複雑になり、システムコストが高い原因となっている。本技術開発の成果は、システム全体の小型化、低価格化をもたらし、光通信の実用化がさらに加速されると考えている。

これらの成果は、光 SW 用のミラーデバイスへの搭載にとどまらず、現在の光スキャナー用ミラーを高性能化に寄与できる技術である。例えば、ミラー角度を高精度にコントロールできると表示装置、空間光通信の送受信機、空間光位置センサ、バイオや医療用の光計測・診断装置等への応用展開が進むと考えている。

② 高精度評価・信頼性技術開発

光通信等の市場で、光可動ミラーの実用化を阻んでいるもう一つの原因は、信頼性の問題と言われている。そこで、ミラーデバイスの信頼性に係わる技術開発として、1) ミラー反射面の光学特性の経時変化、2) ミラー配線の信頼性、3) 電極基板の絶縁耐性、4) ミラー駆動信頼性の4項目の信頼性評価を実施した。

最新の信頼性の評価技術、評価結果は、一般には報告されないことが多い。この中で、2) ミラー配線の信頼性は、今後の可動性ミラーの信頼性について、Cu 配線の優位性や PI 保護膜のような柔らかい保護膜の必要性等指針を示すことができた。詳細な検討が必要と言う課題を残した結果で終わってしまったが、逆に言えば、今後、技術的な発展がさらに期待され

る。

ミラー駆動信頼性の評価では、本研究開発の光通信向けモジュールでも適用した、静電駆動式のミラーで目標の駆動信頼性を確保することを確認した。これは、光通信の様に、社会インフラを担う、非常に高い信頼性が要求される分野においても、MEMS の適用が可能であることを示している。

④ 光SWモジュールの開発

加工技術、センサー一体化制御技術及び高精度評価技術を開発するとともに、それを応用した波長選択型光SWモジュールを製作した。その過程で、光学的な位置合わせ精度を確保した光SW専用のインターフェイスとモジュール全体の信頼性を確保するためのケーシング技術を開発した。

これらの技術は、正に現在実用化開発を急いでいる、波長選択スイッチモジュールに応用される。さらに、光SW以外の光MEMSを搭載する様々な製品へ応用することが期待される。

(3)成果の普及

当社は、2002年2月にファンドリサービス事業を開始することを外部正式にアナウンスした。遅れること一年、2003年4月からMEMS開発本部にMEMS関係部署が統合化されるとともに、事業化を推進する、本部内にMEMS事業推進部さらには、市場開発Gが組織された。このGが、マーケティングを担当するグループであり、積極的に活動を行っている。

光通信向けの市場に向けては、国内ファイバーオプティックス展示会（FOE）等に、当社の技術展示を行っている。また米国の光通信関連展示会（Photonics West, OFC等）でもブース展示を行い、光通信市場へのブランドの伸展を図っている。国内外 計5回 展示発表。



図 国内展示会（FOE 2005）の様子

これまで、光通信モジュール及びそれに搭載するミラーの展示は次の展示会に限って実施している。毎年2月に実施されている、ナノテク展示会のNEDOブースでPJの成果を3回展示。そして、オリンパス技術展示会（2004、11月）、そのオリンパス展示会の様子を下に載せる。



図 オリンパス技術展示会の様子

この展示では、波長選択スイッチ「WSSのプロトモジュール」デモ機”を用いた「ビデオ伝送システム」を展示した。ここでは、

- ・ 2つの動画を光ファイバで伝送
- ・ 伝送経路が遮断されてもWSSが予備ファイバー経路に切り替えて動画伝送を継続。途切れないネットワークを実現。

このように、WSSによりフレキシブルな伝送システムが構築できるというデモを行った。

また、光通信市場に関しては、モジュール、システムメーカー大手が存在する北米市場を睨んで、米国子会社にMEMS調査担当部門を設置し活動してきた。ファンドリの顧客は国内にとどまらず、海外にも窓を開けて、サービスを実施している。

MEMSファンドリ事業については、マイクロマシンセンターで開催される、一般向けセミナーを始め、各種展示会、セミナーに積極的にこれまで参加し、当社のMEMS技術、ファンドリ事業をアピールしている。また、当社独自の外部向けセミナーも開催して顧客との接点を増やす試みを行っている。

さらに、専門誌、学会で、当社MEMS技術、MEMSファンドリを紹介、解説したことも例多い。最後にこれらの外部発表件数をまとめる。



社外MEMSセミナー

論文等紙上発表(論文誌、学会誌、国際会議)		口頭発表		特許		報道(新聞、雑誌等)
国内	国外	国内	国外	国内	国外	
8	0	16	0	4	0	18

IV. 実用化、事業化の見通しについて

(1) 成果の実用化可能性

本研究開発助成事業で開発する高精度加工技術により作成される光可動ミラーは、通信用マイクロ光スイッチやマイクロ光スキャナー等、多くの光MEMSに共通の機能素子である。その応用製品は光通信市場へ向けた光SWモジュールである。本研究開発では、光MEMS、特に通信用マイクロ光スイッチの実現に必要な、①高精度3D加工技術の開発、②高精度制御技術の開発、③高精度評価・信頼性技術、④光SWモジュールの開発 これらの4つの技術開発に取り組んできた。ここでは、夫々の成果を実用化の視点で報告する。

① 高精度3D加工技術の開発

微小ミラーを高精度に加工技術として、通信用SWとして重要な、挿入損失等の光学特性を左右する、MEMSミラーの表面粗さ及びソリを低減することを目標として、また、MEMSミラーアレイの実用化に必要な様々な高精度加工技術を開発した。

要素加工技術開発では、ミラーソリや荒れを抑えるための成膜エッチング技術を開発した。ミラー一部表面に反射膜として形成されたの薄膜金属の内部応力の低減やミラー構造の改善を行い、平面ミラーのソリは、プロジェクトの目標を達成した。また、Si基板表面に対して垂直にDeep RIEで加工して形成するミラーでは、表面荒れを従来の1/3～1/5に低減する加工技術を開発した。

これらの成果は近々に実用化を図るWSS用のミラーアレイデバイス（ターゲットA）に、応用される。

将来のミラーデバイスの加工に必須と考えている、様々な加工要素技術（接合技術や、エッチング技術等）も開発に着手した。今後、これらの技術はファンドリ案件の試作・開発・生産への適用を積極的に行い、加工実績を積み、加工精度や再現性等の向上を図って行く。これにより、夫々の加工技術をさらに洗練し、次機種、次世代の光スイッチ用ミラーデバイスに適用することを考えた。

また、今後、WSSにとどまらず、一般的な光SWであるOXCへの適用や、スキャナー用ミラーに今回獲得した技術を適用して、それらの光学特性の向上を実現して行きたい。

② 高精度制御技術の開発

微小ミラーを用いて光制御を行う光可動ミラーアレイを光通信に用いる際の大きな課題が、ミラー一回転角の高精度角度制御である。特に我々が開発ターゲットとしている波長選択SWは、空間光学系を前提にしているのでレーザ光の空間伝播長が長くなる。従って、ミラー一回転角の高精度角度制御技術の確立は大きな課題である。事実、今回の開発期間で行った、プロトタイプミラーデバイスをを用いた、モジュールの評価結果でも、ミラーの制御に関わる課題が抽出された。

本研究開発では、まず、微小ミラーの角度センサとして適しているセンサとして、歪センサ方式と容量センサ方式の試作評価を行い、両者の結果を比較して、容量センサを選定した。さらに、アンプICの設計を行い、ミラーデバイスと実装一体化して、高感度化も図った。この開発の過程で、S/Nや感度を改善するためにアンプICの特性改善、実装基板の改良、さらには、デバイス中のセンシング構成の改良等を行い、目標の角度分解能を達成した。

これらの成果は、今後光SW用のミラーデバイスへの搭載にとどまらず、現在の光スキャナー用ミラーを高性能化へ応用できる。スキャナーミラー角度を高精度にコントロールできると表示装

置、空間光通信の送受信機、空間光位置センサ、バイオや医療用の光計測・診断装置等への応用が展開できると考えている。

③ 高精度評価・信頼性技術

光可動ミラーの実用化を阻んでいるもう一つの原因は、信頼性の問題と言われている。

事実、光SWの開発例の報告でも、数千万回の動作報告例があるが、しかし、光通信市場において、実用的な信頼性を保障するためには、目標の 10^{10} 回（100億回）以上の駆動動作回数が必要である。

そこで、ミラーデバイスの信頼性に係わる技術開発として、駆動動作信頼性を評価した。実際には、この駆動信頼だけではなく、1) ミラー反射面の光学特性の経時変化、2) ミラー配線の信頼性、3) 電極基板の絶縁耐性、最後に4) ミラー駆動信頼性の4項目の信頼性評価を実施した。

1) ミラー反射面の光学特性の経時変化では、AuミラーとAlミラーの2種類のミラーについて反射率劣化に関する信頼性評価を実施した。ともに、高温高湿耐性は十分な構造であることを確認した。

2) ミラー配線の信頼性も検討し、トーションバーに形成される配線構造に係わる構造の課題を明確にした。ミラーデバイスの信頼性向上の指針を得ることが出来たと考えている。

3) 電極基板の絶縁耐性では、プラズマ酸化膜が、高電圧を必要とする静電アクチュエータの絶縁膜として、充分耐性があることを確認した。この結果は光MEMSに限らず、静電駆動を行うMEMSデバイスへ適用できる結果である。

4) ミラー駆動信頼性の評価では、目標の 10^{10} 回の駆動信頼性があることを確認した。この結果は、MEMSの光SWが最高10年程度は連続して使用されることが想定される光SWシステムを構成するモジュール、デバイスとして、充分、信頼性があることを示している。

④ 光SWモジュールの開発

加工技術、センサー一体化制御技術及び高精度評価技術を開発するとともに、それを応用した光SWモジュールを製作した。その過程で、光学的な位置合わせ精度を確保した光SW専用のインターフェイスとモジュール全体の信頼性を確保するためのケーシング技術を開発した。

光MEMSを搭載する様々な製品の形態の違いはもちろん、波長選択スイッチモジュールは、システムの仕様によって、光学仕様やモジュール形態の仕様がまちまちである。従って、開発するモジュールに合わせた開発も今後必要であることは言うまでもない。

(3) 事業化までのシナリオ

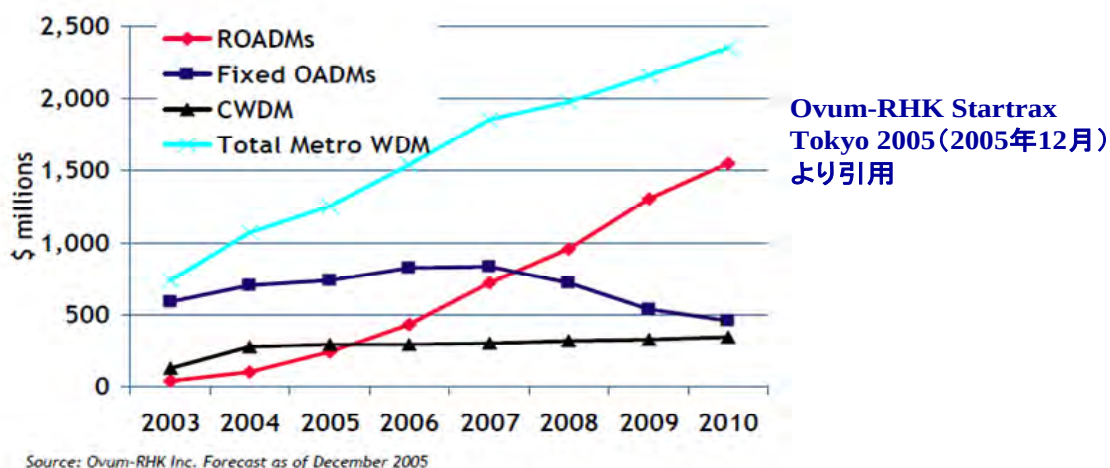
本研究開発助成事業で開発した成果の事業化について、(1) 光通信向けモジュール事業、と研究開発の波及効果である(2) ファンドリサービス事業について報告する。

① 光通信向けモジュール事業

(市場状況とMEMS方式WSSへの期待)

光通信市場向けの光MEMSデバイスは最近、再び話題になり、市場も活発に推移している。MEMSによるVOAデバイスが製品化され、メトロ系光通信市場は活発になってきており、特に安価で柔軟なネットワーク運用を可能にするReconfigurable性をMEMSにより実現できると

大いに期待されている。



Ovum-RHK Startrax
Tokyo 2005 (2005年12月)
より引用

図、メトロ向けWDM市場におけるROADMの伸び

MEMSを活用したReconfigurable OADM (Optical Add Drop) が注目技術であり、本プロジェクトの最終モジュールはまさにそのシステムに用いるモジュールであり、波長選択スイッチモジュール (WSS) である。この研究開発プロジェクトで開発したミラーはこのWSS用の高精度ミラーアレイである。

ROADMは、1本の光ファイバに複数の波長を多重化して大容量伝送するDWDM方式の1つで、開発している波長選択スイッチは、光ファイバから伝送された光信号を波長ごとに分離し、独立に光路を切り換え、かつ、光の強度なども制御できる機能を有している。下にその原理図を示す。

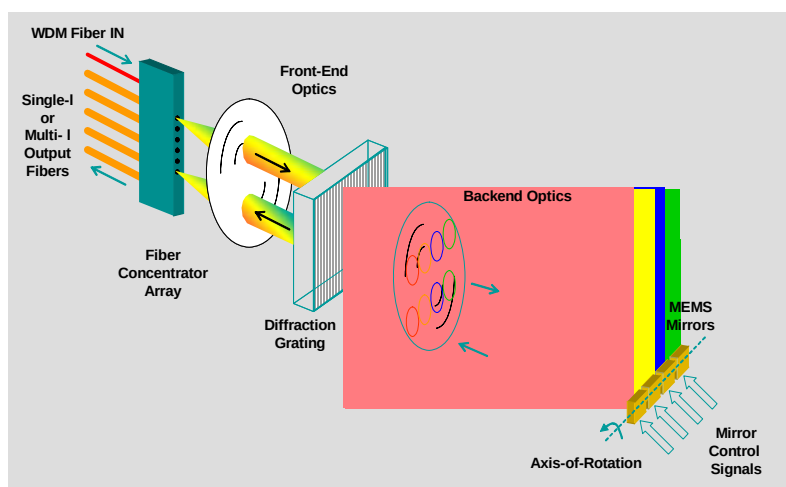


図 波長選択スイッチ (WSS) 原理図

この、波長選択スイッチは、システムとしての要請は、高速大容量化とコスト低減を両立したいということである。このニーズに答える方式として「グレーティング (空間光学系) で分波し、MEMSミラーでスイッチする」方式が、最も親和性が高い (=WSSに向いている) と期待されている。

我々は事業を進める、重要な、顧客 (このWSSの場合は、光通信向けシステムベンダー) への販売ルートを確立するための施策も行った。それが、Movaz社との合弁会社の設立の理由の一つである。

今年4月 オリンパスは、このMovaz社、本社: アメリカ・ジョージア州アトランタ、Chairman

and CEO : Bijan Khosravi) *と合弁会社(社名 : Olympus Microsystems America, Inc., カリフォルニア州サンノゼ)を設立した。オリンパスのMEMS技術とMovazの光通信市場における経験とシステム技術を合わせ持つことで、競争力のある光通信システム・コンポーネントの提供を図る狙いである。

(事業計画)

今回、実用化を図るデバイスは、性能、安定性及び信頼性の観点で、これまでの製品をはるかに凌駕し、周辺回路を一体化することにより高性能でありながら、低価格モジュールを提供するものである。

この光通信向けモジュール事業化の日程は、本助成事業終了後、直ちに製品設計・開発を行い、2年目から生産を開始する。現在、市場調査用の試作品をすでに準生産体制で試作を始めており、2006年のマイクロマシン展でその試作品WSSモジュールを展示した。

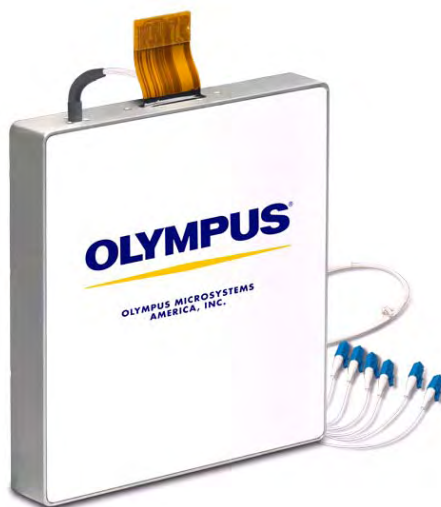


図 試作品 WSS モジュール

このモジュールに搭載されている、光 SW は、基本的な構造はターゲット A ミラーデバイスであり、本研究開発の成果が応用されている。

(2) ファンドリ事業

MEMSファンドリ事業は、話題が先行しているが、事業性としては難しい事業と言うのが、一般に言われているところである。事実、最近の市場調査結果でもその様子が見てとれる。

事実、世界的にも有数なMEMSファンドリでも売上げは大きくても数十億円であることがわかる。これは、今でも言われることであるが、ファンドリに依託するキラーアプリが無いことを示している。しかし、個別のMEMSデバイスの需要は増え、各社とも2005年は伸びを予想しており、MEMSの市場は次第に大きくなることも期待されている。

当社の状況も、大幅にMEMSファンドリでの売上げ増には到っていないが、この3年間、順調に、ファンドリサービスの問い合わせはもとより、試作・生産は増加している。

当社のファンドリサービスは、本プロジェクトを始めとする様々なMEMS開発の経験をベースに設計試作や量産に留まらず、その前のニーズレベルの顧客から要望を聞き、最終的な量産サ

ービスまで幅広いサービスを顧客に提供できるところに他社には無い強みがある。

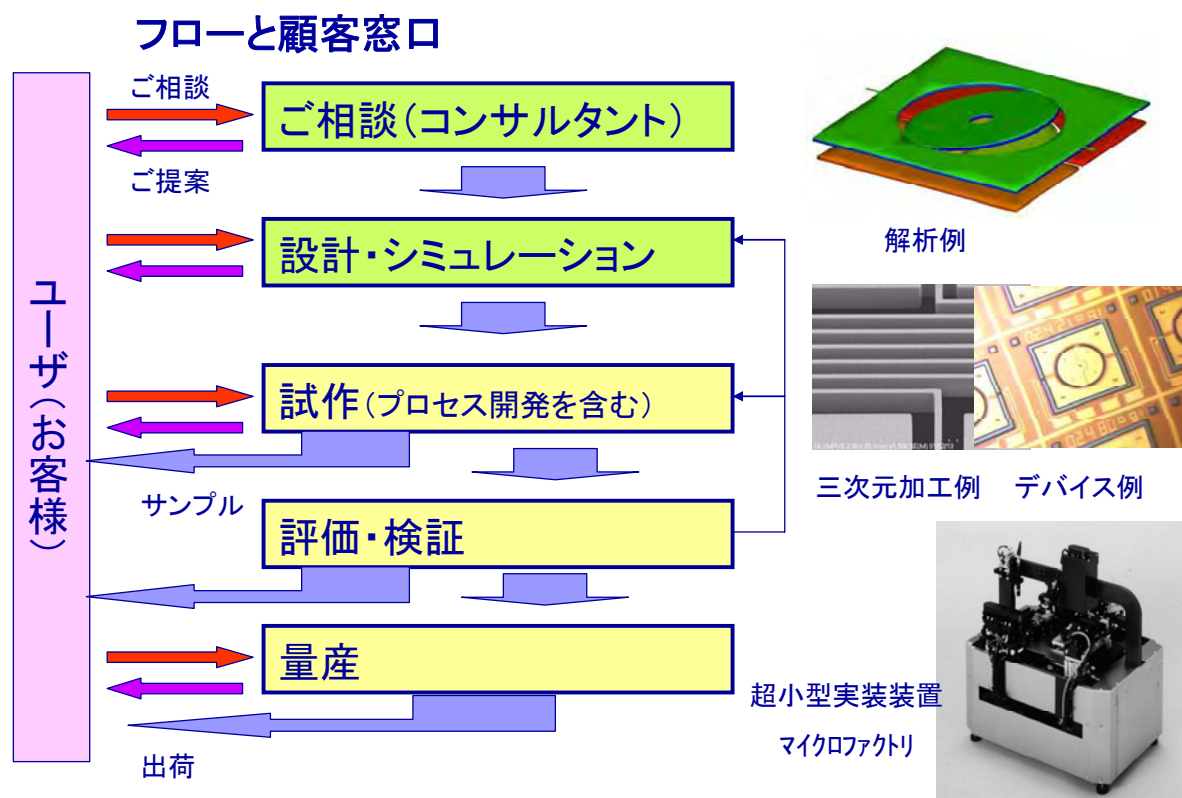


図 オリンパスMEMSファンドリ概要

また、MEMSプロジェクトを実施するための投資に加え、自社独自の投資も行い、辰野事業場（長野県）のCR環境、装置増強を進めてきた。国内のみならず世界的にも有数なMEMS加工拠点へと進化させてきた。

このように技術の優位性とそれを支えるCR等のインフラの整備により当社のファンドリサービス事業の予想される障害として、今後すぐに、眼前に出る問題はないと考えている。

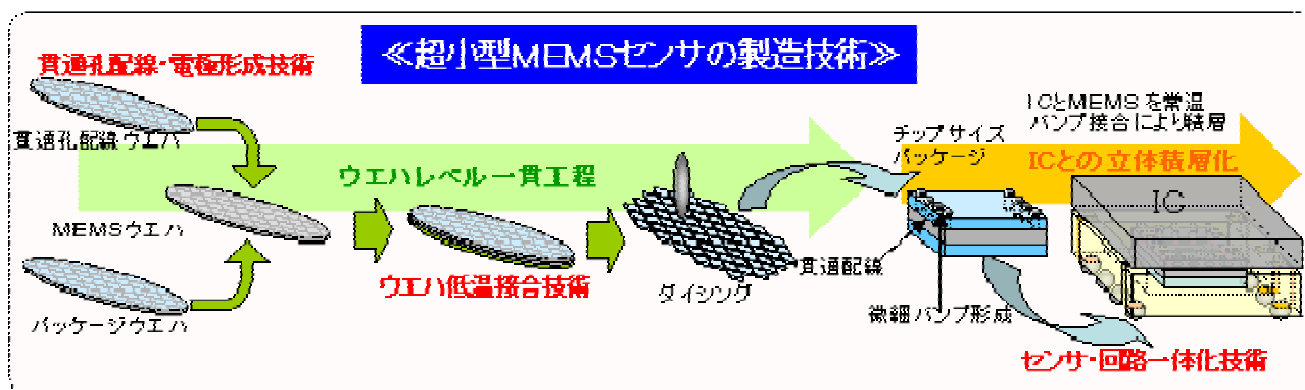
3. 各テーマの成果詳細

3.3 超小型MEMSセンサ製造技術開発

MEMSセンサの小型化、低コスト化とファンドリーサービス展開の為の製造技術の開発

(1) 研究概要

本研究開発は、MEMSセンサの小型低コスト化とファンドリーサービス展開のための製造技術開発を狙いとして、3つの革新プロセス技術を有するMEMS初のウエハレベルパッケージー貫製造プロセスを構築することである。(図1)



＜図1：ウエハレベルパッケージー貫製造＞

この製造技術開発においては、センサを構成するMEMSウエハから電気信号を外部へ取り出す“貫通孔配線・電極形成技術”、シリコンウエハどうしを低応力でパッケージーングする“ウエハ低温接合技術”、ICを立体積層化するための“センサ・回路一体化技術”、これらをウエハプロセス工程として構築する“ウエハレベルパッケージー貫製造”を重点課題として、開発を進めた。

①貫通孔配線・電極形成技術

本技術開発の狙いは、超小型 MEMS センサ実現の為のウエハレベルパッケージーング技術開発において必要不可欠であるセンサウエハの電気信号を外部に取り貫通孔配線・電極を実現することであり、その形状目標は、孔径 $10\mu\text{m}\phi$ 、深さ $500\mu\text{m}$ であった。

目標達成の為に、高アスペクトな貫通孔配線・電極形成に必要な装置を導入し、プロセス改善や条件の最適化を行い、一連の貫通孔配線・電極形成技術を開発した。

その結果、最終目標である孔径 $10\mu\text{m}\phi$ 、深さ $500\mu\text{m}$ の貫通孔配線・電極の形成を達成した。

更に、実センサへの応用検証を行うことで、量産可能な貫通孔配線・電極を実現した。

②シリコンウエハ低温接合技術

本技術開発の狙いは、超小型MEMSセンサを実現するため、MEMSセンサウエハと同種材料のシリコンウエハを用いて残留応力・残留歪を生じないウエハレベルパッケージーング技術を開発することである。

最終目標とするシリコンウエハ常温直接接合（接合温度 25°C 、アライメント精度 $\pm 2\mu\text{m}$ ）を目指して、表面活性化によるシリコン-シリコン常温直接接合条件の最適化を実施し、目標（接合温度 25°C 、アライメント精度 $\pm 2\mu\text{m}$ ）を達成した。又、常温接合の技術を検証デバイスの試作に適用し、3軸加速度センサ、及び、ジャイロセンサの動作サンプルを作製し、開発目標を満足する特性を確認した。

③センサ・回路一体化実装技術の開発

本技術開発の狙いは、超小型センサを実現するため、MEMS技術によって作られたセンサと信号処理用ICチップを、低ストレスで一体化する技術を開発することである。

そのために、金スタッドバンプへのプラズマ表面活性化法を用いた常温バンプ接合技術を開発し、MID

(Molded Interconnect Devices: 立体回路形成基板) 基板への低ストレスなセンサ・回路一体化実装を実現した。またセンサ小型化に必要な小径バンプ形成工法を開発し、目標であるバンプ径 $\Phi 30 \mu\text{m}$ 程度のスタッドバンプ形成を実現した。

④MEMSウエハレベルパッケージング一貫工程開発

(a)3軸加速度センサ

本開発では、超小型3軸加速度センサチップの設計および試作開発、センサ信号処理用ICの設計および試作開発を行うとともに、それらを用いてウエハレベルパッケージング技術によるMEMSセンサの小型化検証を行った。

(b)ジャイロセンサ

本開発では、ジャイロセンサについても同様に小型センサチップの設計および試作開発、センサ信号処理用ICの設計および試作開発を行い、それらを用いてウエハレベルパッケージング技術によるMEMSセンサの小型化検証を行った。

上記の①貫通配線・電極形成技術、②シリコンウエハ低温接合技術、③センサ・回路一体化実装技術の開発、④MEMSウエハレベルパッケージング一貫工程開発の各課題に対する研究開発を推進した結果、最終の目標を達成する事ができた。各課題の目標と達成状況を表1にまとめる。

開発項目	①貫通孔配線・電極形成技術	②シリコンウエハ低温接合技術	③センサ・回路一体化実装技術	④MEMSウエハレベルパッケージング一貫工程の構築
目標	◇貫通孔配線・電極 ・径 $10 \mu\text{m}$ ・深さ $500 \mu\text{m}$	◇低温接合: 常温 ◇アライメント精度: $\pm 2 \mu\text{m}$	◇低温実装: 常温 ◇小型バンプ: 径 $30 \mu\text{m}$	◇一貫工程構築し、超小型センサで検証 ・コスト1/2 ・パッケージ/チップ体積従来比1/10以下
開発成果	◆径$10 \mu\text{m}$深さ$500 \mu\text{m}$の貫通孔配線電極を実現 ◆実センサに応用展開し、センサの動作を確認 <貫通配線・電極顕微鏡> 	◆表面活性化によりSiウエハ常温接合を実現 ・アライメント精度 $< \pm 2 \mu\text{m}$ ◆実センサに応用展開し、センサの動作を確認 <接合界面顕微鏡>  <Si-Si接合断面顕微鏡> 	◆活性化フリップチップ工法により常温接合を実現 ・バンプ径$30 \mu\text{m}$ ◆実センサに応用展開し、センサの動作を確認 <小径スタッドバンプ>  <Au-Au接合断面顕微鏡> 	◆ウエハレベルパッケージングの一貫工程を構築し、コスト1/2を実現 ◆加速度センサ ・パッケージ/チップ体積従来比 $< 1/10$ <加速度センサモジュール> 

<表1：各課題の開発目標と達成状況>

(2) 成果詳細

① 貫通配線・電極形成技術

i) 貫通孔形成

高アスペクト貫通孔エッチングを実現する為に、Deep-RIE装置を用いた独自のプロセスレシピの開発と最適化により、最終目標である孔径 $10\mu\text{m}\phi$ 、深さ $500\mu\text{m}$ の高アスペクト貫通孔形成を実現した。エッチング形状の一例を図2に示す。加工精度は、 $\pm 2\sim 3\mu\text{m}$ であり実用化可能な制御範囲にある。

ii) 貫通孔配線・電極

貫通孔への配線充填材料およびその充填方法として、Cuめっき法を選定した。

このCuめっき法を用い、最終目標である孔径 $10\mu\text{m}\phi$ 、深さ $500\mu\text{m}$ の貫通孔への配線充填について検討した。

孔径 $10\mu\text{m}\phi$ 、深さ $500\mu\text{m}$ の貫通孔へのCu充填を行い貫通孔配線・電極を形成した

例を図3に示す。Cuが貫通孔に対しボイドなく完全に埋め込まれており、良好な配線が形成できている。また、貫通孔の気密性はHeリークテストの結果、測定限界以下であることが確認できた。これらのことより、実センサデバイスへの応用が十分に可能であると言える。

また歩留まりについては、ウェハ面内へ均等に配置した貫通孔チェーン TEG(テスト素子)で評価した結果、断線および抵抗の異常値も無く、高歩留まりの結果が得られた。

更に、TEGにて熱衝撃試験)、高温放置試験、低温放置試験等を行い電気特性、気密性に変動のないことを確認した。

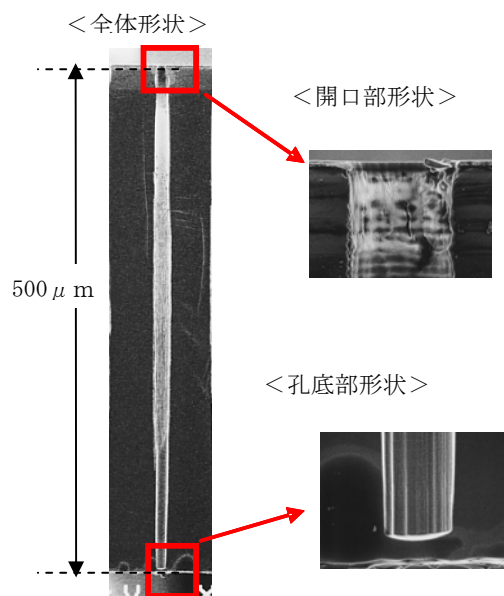
以上の結果より、最終目標である孔径 $10\mu\text{m}\phi$ 、深さ $500\mu\text{m}$ の貫通孔への完全埋め込みがCuにて達成できたこと、また TEG 評価にて電気的特性および、歩留まり、信頼性に問題が無いことが確認できたことで、実センサデバイスへの適応が可能で、量産可能な貫通孔配線・電極形成技術の開発ができたと言える。

さらに、本技術を検証デバイスへ適用し、3軸加速度センサ、及び、ジャイロセンサの動作サンプルを作製し、開発目標を満足する特性を確認した。

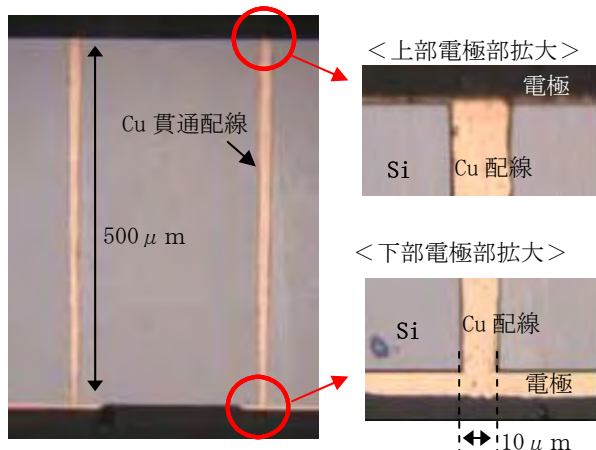
② シリコンウェハ低温接合技術

本技術開発の狙いは、超小型MEMSセンサを実現するため、MEMSセンサウエハと同種材料のシリコンウエハを用いて残留応力・残留歪を生じないウエハレベルパッケージング技術を開発することである。本技術開発を推進するために、種々の中間層を介したシリコン-シリコン低温接合技術開発、及び、常温接合のための表面活性化接合技術開発を実施し、接合特性の評価、比較検討結果より、ウエハレベルパッケージングに最適な接合方法として、表面活性化によるシリコン-シリコン常温直接接合方法を選定した。

表面活性化条件等を最適化した結果、接合特性として、接合強度 $> 10\text{kgf}/\text{mm}^2$ 、アライメント精度 $< \pm 2\mu\text{m}$ 、ボイドレス接合を実現した。(表3参照) また、接合部の信頼性については、熱衝撃試験、



<図2：最終エッチング形状>

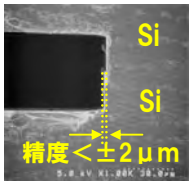


<図3：孔径 $10\mu\text{m}\phi$ 、深さ $500\mu\text{m}$ の貫通孔配線・電極>

高温放置試験、低温放置試験により、気密性、接合強度に有意な変化が無い事を確認した。

以上の様に、ウエハレベルパッケージングに最適な表面活性化による常温接合技術を開発し、最終開発目標（接合温度25℃、アライメント精度 $\pm 2 \mu\text{m}$ ）を達成するとともに、歩留り、接合信頼性に問題ないことを確認した。

さらに、本技術を検証デバイスへ適用し、3軸加速度センサ、及び、ジャイロセンサの動作サンプルを作製し、開発目標を満足する特性を確認した。

評価項目	接合材料	常温直接接合
		Si-Si
アライメント精度		$< \pm 2 \mu\text{m}$ 
接合強度		$> 10\text{kg/mm}^2$
総合評価		○

<表2：常温接合の接合特性の評価結果>

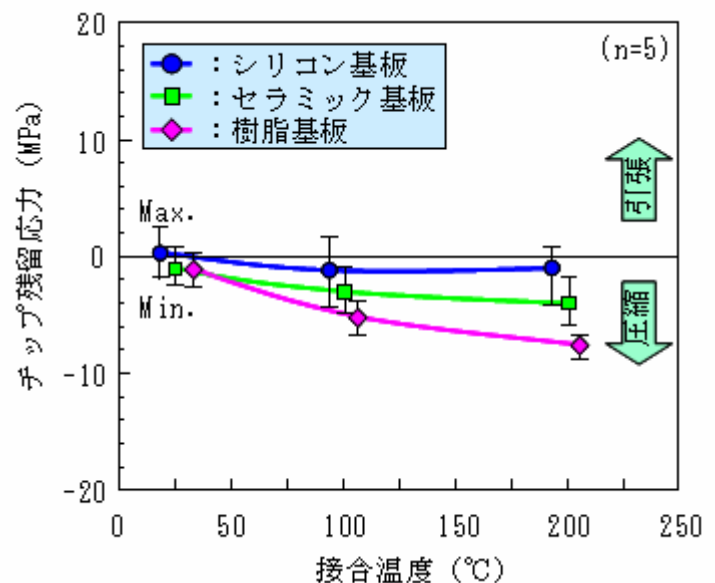
③センサ・回路一体化実装技術の開発

i) 常温バンプ接合技術

バンプを形成したチップと回路基板とをプラズマ表面活性化処理後に常温にてバンプ接合する技術を開発した。

線膨張係数の異なる基板にチップをバンプ接合し、チップに発生する残留応力を接合温度の変化とともに測定した結果を図4に示す。

接合温度が常温の場合、基板材質にかかわらずチップ残留応力が発生しておらず($\pm 2\text{MPa}$ 以下)、常温で実装することによりチップと線膨張係数の異なる基板に低ストレスで実装可能なことが検証できた。



<図4：チップ残留応力測定結果>

ii) 小型化のためのフリップチップ実装工程

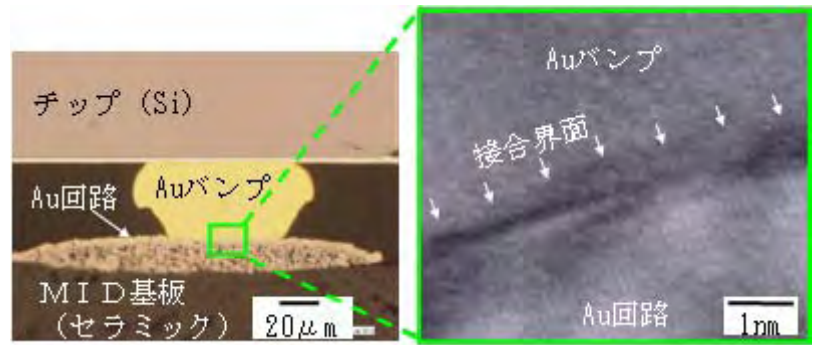
金バンプの形成方法としてスタッドバンプ法を検討し、ボンディング荷重、超音波発振強度等を最適化することにより、バンプ径 $\phi 30 \mu\text{m}$ 以下のスタッドバンプ形成を実現した。バンプ外観を図5に示す。



<図5：小径スタッドバンプ>

iii) MIDによる回路配線の3次元化

金スタッドバンプを形成したチップとMID基板とをプラズマ表面活性化処理後に常温にてバンプ接合し、接合強度10kgf/mm²以上、バンプ接続抵抗も100m Ω 以下の良好な接合を実現した。バンプ接合断面の光学顕微鏡写真とTEM写真を図6に示す。金バンプ側の金格子縞と金めっき電極側の金格子縞が接合界面で交差しており、接合界面において界面層およびボイド等の存在が認められないことから、両側の金粒子は密着し、良好に金属接合できていることが確認できる。



<図6：バンプ接合断面>

表面活性化常温バンプ接合における影響因子の明確化および条件管理範囲の検討により、実装条件の最適化を行った。その条件下で実装したサンプルのチップ接合強度とバンプの電気的導通を測定した結果、全て接合強度10kgf/mm²以上、バンプ接続抵抗100m Ω 以下であった。

また、リフロー後に熱衝撃試験、高温放置試験、低温放置試験等に対しても接続信頼性を維持していることを確認した。

さらに、本技術を検証デバイスへ適用し、3軸加速度センサ、及び、ジャイロセンサの動作サンプルを作製し、開発目標を満足する特性を確認した。

④MEMSウエハレベルパッケージング一貫工程開発

(a) 3軸加速度センサ

設計したセンサチップは十字型の極薄ビームの中央に重りを吊り下げた構造のピエゾ抵抗式加速度センサで、応力シミュレーションによりチップサイズを最小にする設計を行った。その重要パラメータである薄いビームを高精度に形成するためのプロセスとしてSOI (Silicon On Insulator) ウエハ構造を活用したシリコンエッチングストップ法を用いた。

試作・開発したセンサチップのサイズは約2mm $\square$ で、1チップでX、Y、Zの3軸方向の加速度検出が可能である。本センサチップを標準的なパッケージに実装して、導入した特性評価装置にて測定した結果、ほぼ狙いとする出力特性が得られた。

一方、本センサチップの出力信号を増幅・調整するため、信号処理ICの開発を行なった。設計した回路は、完全差動の低ノイズDC増幅回路とゲイン調整用プログラマブルアンプ、およびオフセット調整用DA変換回路などから構成され、センサチップの微小な電圧信号を増幅し、ばらつきを調整して所定の性能を達成できるようにした。

開発した3軸加速度センサチップおよび信号処理ICを用いて、「貫通孔配線・電極形成技術」、「ウエハ常温接合技術」および「センサ・回路一体化実装技術」からなるウエハレベルパッケージング技術応用のMEMSセンサを製作した。具体的には、試作・開発したセンサウエハに貫通配線を形成したウエハとパッケージウエハを3層で常温接合することによりウエハレベルで低応力、高気密にパッケージングし、チップ個片に切り出すことで小型のチップサイズパッケージセンサエレメントを実現した。

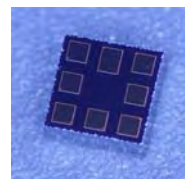
(図7)

また、ICとセンサエレメントを常温バンプ接合にて低応力に立体積層実装することにより、センサと回路を一体化した小型センサモジュールを実現

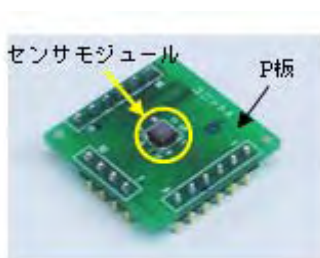
した。(図8) 本センサモジュールの特性は、図9

に示す通り、感度： 0.5 V/G 、オフセット電圧：

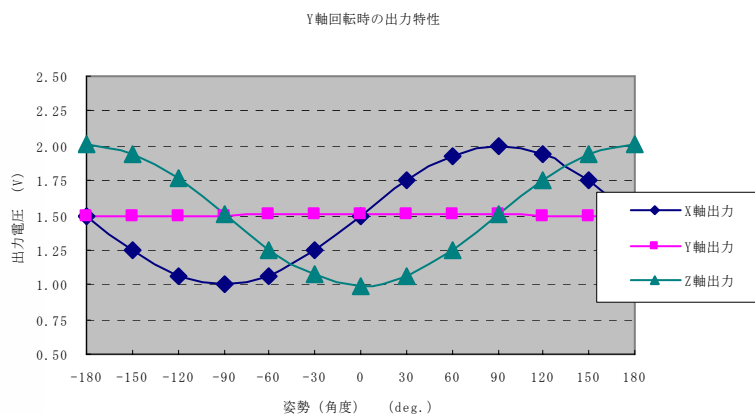
1. 5 V 、他軸感度： $\pm 2\%$ と目標の出力が得られ、本開発の狙いとする低応力なパッケージング技術の妥当性が確認された。センサモジュールのサイズは業界最小レベルであり、パッケージ/チップ体積従来比は目標である $1/10$ 以下を達成した。



<図7：小型センサエレメントの外観写真>



<図8：小型センサモジュールの外観写真>

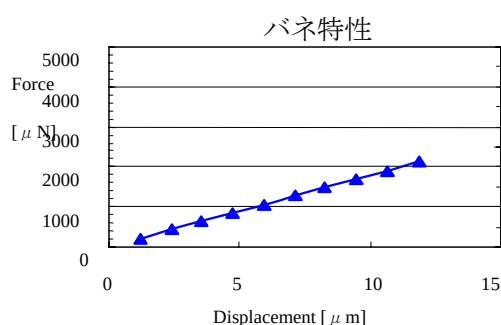
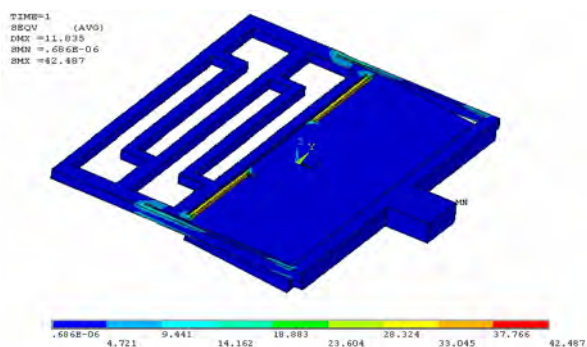


<図9：センサモジュールの出力特性>

(b) ジャイロセンサ

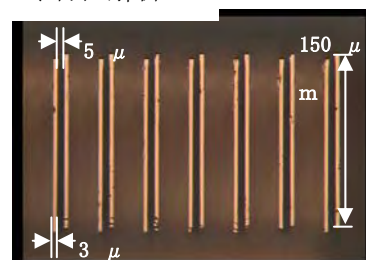
設計したセンサチップは静電駆動/静電検出方式の片持ち梁構造で、チップは小型でありながら高感度センシングを実現する為に、検出部は $5\mu\text{m}$ 間隔のくし歯型平行平板コンデンサとし、駆動部は大きな駆動力を得る為の大面積平行平板コンデンサで構成した。図10に、静電力により振動する駆動部のバネ特性を示す。

また、微小間隔のくし歯型平行平板コンデンサを形成するために、導入したD-RIE装置を用いて、深さ150



<図10:センサチップの応力解析とバネ特性解析>

μm で、間隔 $5\mu\text{m}$ の高アスペクト比(アスペクト比30)シリコンエッチングプロセスを開発し、側壁垂直性を有するくし歯構造を実現した。(図11)さらに、上記の設計と櫛歯形成プロセスを用いて、センサチップの試作を行った。



<図11:くし歯構造の断面写真>

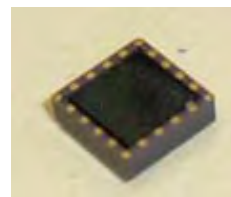
一方、センサ感度 10mV/deg/sec 、分解能 $\pm 1.0\text{deg/sec}$ を狙い共振振動制御回路および微小容量検出回路の開発も行った。

開発したジャイロセンサチップおよび信号処理ICを用いて、3軸加速度センサと同様に小型センサモジュールを実現した。(図12)

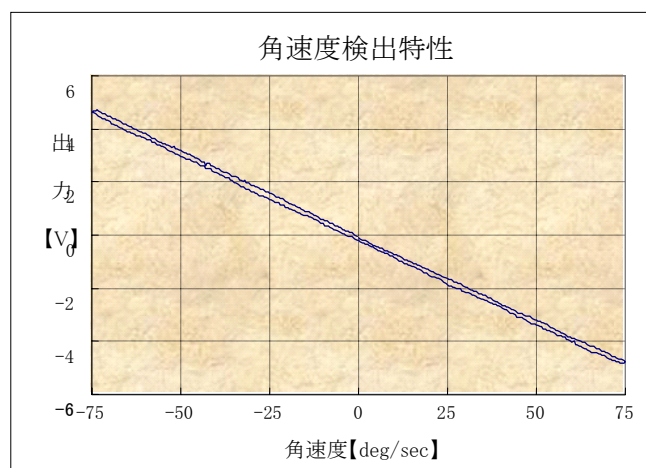
センサモジュールのパッケージ/チップ体積従来比は、目標である $1/10$ 以下を達成し、従来品と比較して、飛躍的な小型化を達成している。

本センサモジュールの特性は、感度： 10mV/deg/sec 以上、精度： $\pm 1\text{deg/sec}$ 以下と目標のセンサ出力が得られた。(図14)

これにより、本開発の狙いとする低応力な超小型パッケージング技術の妥当性を確認することができた。



＜図12:小型センサモジュール外観写真＞



＜図14:センサモジュール出力特性＞

(3) 成果の意義

①貫通配線・電極形成技術

孔径 $10\mu\text{m}$ 、深さ $500\mu\text{m}$ という世界最高水準の高アスペクト(50)貫通孔配線を形成するMEMSプロセス技術を開発した。実用レベルの深さ $200\mu\text{m}$ の貫通孔配線においては、量産に適した工程を構築し、高歩留まり、且つ信頼性を確保した製造技術を開発した。

又、世界初のウエハ常温接合技術とあわせて、貫通孔配線を有するウエハのウエハレベルパッケージングにおいて気密性を確保した。

この成果により、貫通配線を通してセンサ信号を伝送できるウエハレベルパッケージング、及び、それによるMEMSデバイスの超小型、低コストが可能となり、MEMS市場の拡大が期待できる。

又、貫通配線技術は、MEMSデバイスに限らず、LSIの3次元配線を含め他デバイスへの応用可能であり、新規小型、高集積デバイスへの展開が期待できる。

②シリコンウエハ低温接合技術

MEMS分野で初めて、常温接合を用いたウエハレベルパッケージング技術を開発し、接合界面の残留応力が低減可能なことを実証した。

この成果により、低応力接合によるセンサの高精度化、ウエハレベルパッケージングによる小型化、低コスト化を同時に実現できることにより、MEMS市場の拡大が期待できる。

又、表面活性化常温接合技術は、MEMSのパッケージングに限らず、LSIの3次元実装、MEMSとLSIとの積層化、異種基板積層へ応用可能であり、種々の新規小型、高集積デバイス、パッケージへの展開が期待できる。

③センサ・回路一体化実装技術の開発

MEMS 分野で初めて、3次元立体回路(MID)基板に MEMS センサと IC チップを低ストレスかつ超小型に一体化する常温バンプ接合技術を開発した。

この成果により、パッケージ／センサチップ体積比を従来比1／10以下にすることが可能となり、MEMS の小型化特徴を活かしたデバイス造出が実現可能となるため、MEMS 市場の拡大が期待できる。

又、常温バンプ接合技術は、MEMS デバイス以外のLSIとの積層化等へ応用可能であり、種々の新規小型、高集積デバイス、モジュール、パッケージへの展開が期待できる。

④MEMSウエハレベルパッケージング一貫工程開発

(a)3軸加速度センサ

世界初のウエハレベルに気密封止された3軸加速度センサモジュールを作製し、①貫通配線・電極形成技術、②シリコンウエハ低温接合技術、③センサ・回路一体化実装技術の実用化を検証した。

(b)ジャイロセンサ

世界初、世界最小のウエハレベルに気密封止されたジャイロセンサエレメント、ジャイロセンサモジュールを作製し、①貫通配線・電極形成技術、②シリコンウエハ低温接合技術、③センサ・回路一体化実装技術の実用化を検証した。

上記2種類のデバイスで検証したセンサと IC との一体化プロセスを含むウエハレベルパッケージング一貫工程は、種々の MEMS デバイス、モジュールの超小型、低コストを可能にする応用性がある技術であり、MEMS市場の拡大が期待できる。

又、開発したウエハレベルパッケージング一貫工程をベースにして、MEMS デバイス、モジュール以外の種々の新規小型、高集積デバイス、パッケージへの展開が期待できる。

(4)特許の取得

開発技術を活用した事業を確保するため、直近の事業展開、および将来の事業化態様を通して開発技術を多角的に捉え、事業を護るための知財を国内外で戦略的に出願した(国内:82件、外国:6件)。

また、事業化に向けて適切な内容及び時期での権利化を図るべく、事業化計画に即した戦略的な権利化を推進中であり、直近の事業化に直結するものに関しては、特許庁へ早期審査の請求と審査官との面談により早期権利化を働きかけている。

(5)成果の普及

研究成果の発表は、3つの要素技術に関して国際学会を含む学会や研究会、シンポジウムにて計5件の発表を行った。

貫通孔配線・電極形成技術は、国際学会である INTERNATIONAL DISPLAY WORKSHOPS (IDW'06、2006 年 12 月、大津)の Optical MEMS and Sensors のセッションにて「Through-Hole Interconnection in Si Substrate for Wafer Level Package」の題目でウエハレベルパッケージング実現のためのウエハ貫通孔配線技術の口頭発表を行った。

シリコンウエハ低温接合技術では、応用物理学会主催の国際学会である The International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM、2006 年 9 月、横浜)の MEMS and NEMS : Fabrication のセッションにて「MEMS Wafer Level Packaging by Using Surface Activated Bonding」の題目でウエハレベルパッケージング実現のためのウエハ低温接合技術の口頭発表を行った。本学会は、半導体、電子デバイスの学会として国際的に認知され、国内外の主要メーカー、研究機関からの参加、発表がある。特に、本年は、オープニングセッションで、東北大、江刺教授より、MEMS 技術に関する講演があり、MEMS 技術を、半導体、電子デバイスメーカー

に広く情報発信するのに適している。

センサ・回路一体化実装技術では、溶接学会のマイクロ接合研究委員会シンポジウム(Mate2005、2005 年 2 月、横浜)のデバイス実装のセッションにて「表面活性化常温フリップチップ実装プロセスの開発」の題目で表面活性化法を用いた低ストレス常温実装技術に関する口頭発表、論文投稿を行った。また、翌年の同シンポジウム(Mate2006、2006 年 2 月、横浜)の微細接合のセッションにて「セラミックス基板への表面活性化常温フリップチップ実装プロセスの開発」の題目で常温実装技術のセラミックス基板への適用に関する口頭発表、論文投稿を行った。本シンポジウムはエレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術分野で国内最大のシンポジウムである。さらに、合同マイクロメカトロニクス実装研究会(2005 年 11 月、京都)においても「表面活性化常温接合を用いた MEMS 低応力実装法」の題目で MEMS 機能を最大限に活かすための常温実装技術に関する口頭発表を行った。本研究会はマイクロメカトロニクス委員会(エレクトロニクス実装学会)、ナノ・MEMS 実装技術研究会および MEMS 商業化技術専門委員会(精密工学会)の3部門合同の研究会であり、国内の MEMS 主要関連企業、MEMS 主要研究機関が一同に会する研究会である。

研究成果を展示会にてPRし、ファンドリー事業への応用展開を目指したニーズ調査を行った。

日本国内におけるMEMS関連展示会で最大のマイクロマシン展(第14回:2003年11月、第15回:2004年11月、第16回:2005年11月)をはじめ、国際ナノテクノロジー総合展(nano tech2004:2004年3月、nano tech2005:2005年2月、nano tech2006:2006年2月)、海外展示会であるドイツ国際見本市(ハノーバーメッセ、2006年4月)へとプロジェクト期間中に計7回出展し、成果の普及とファンドリーサービスの拡大に努めた。展示会の様子を写真1、写真2、写真3に示す。

展示会での来場者の関心は、技術の革新性・新規性により、貫通孔配線・電極形成技術やウエハ常温接合技術、それらを用いたウエハレベルパッケージング技術、常温バンプ技術が高く、MEMSパッケージの小型化、低コスト化に対する各社の課題、ニーズを収集し、本プロジェクトの技術開発の有用性を確認することができた。

さらに、ウエハレベルパッケージング技術は、弊社独自の特徴ある技術として本年度よりPRの強化を行い、ファンドリー事業の受注活動を本格的に開始した。第17回マイクロマシン展(2006年11月)での出展ポスター(図16)と弊社ホームページでのウエハレベルパッケージングのPR事例(図17、2006年9月より)を次に示す。

平成18年4月～10月の期間において、本技術開発、及び導入設備に関わるファンドリー引き合い件数比率は、昨年度に比べ2倍の18%に増加しており、本技術の普及効果が確認できる。



<写真1：マイクロマシン展、科学技術館>



<写真3：ドイツ国際見本市：ハノーバーメッセ>



<写真2：国際ナノテクノロジー総合展、東京ビッグサイト>

松下電工のMEMSファンドリーサービス

開発、量産、品質保証の豊富な経験を有し、設計から実装、評価まで、一貫したサービスを提供します。

ONE STOP SHOP

従来のシリコン3次元微細加工に加え、接合パッケージングの強化により、高機能MEMSを実現するONE-STOPサービスを提供します。

3次元微細加工

接合
実装
評価
設計/解析
信頼設計

ウエハレベルパッケージング技術 一貫製造プロセスで超小型シリコンパッケージを実現

ウエハレベルパッケージングプロセス

パッケージングウエハ → MEMSウエハ → パッケージングウエハ → ウエハ接合 → ダイシング

高速化したMEMSプロセスを確保

MEMSウエハ

パッケージングウエハ

ウエハ接合

ダイシング

シリコンパッケージの特徴

1 超小型 (チップワイズパッケージ)

微細貫通孔配線 (10μmφ) により、電極面積を最小化

シリコンチップサイズパッケージ

2 オールシリコン

シリコン直接接合により、熱応力低減

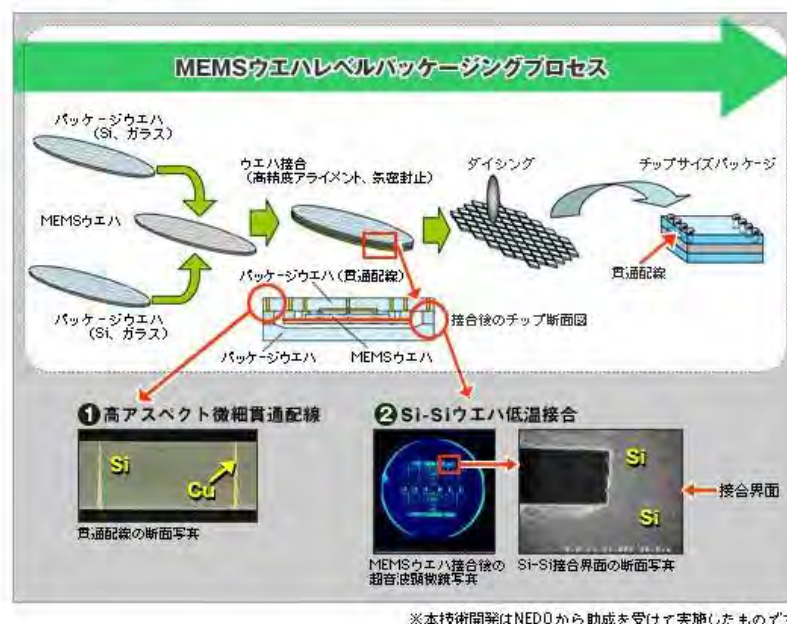
3 低背

シリコンパッケージングウエハ薄型化により、低背パッケージを実現

シリコンパッケージの断面図

<図16：第17回マイクロマシン展 ウエハレレベルパッケージング展示ポスター>

iii - 10



※本技術開発はNEDOから助成を受けて実施したものです

<図 1 7 : MEMSファンドリーサービスホームページ ウエハレベルパッケージング>

<http://www.mew.co.jp/mems>

IV. 実用化、事業化の見通しについて

(1) 成果の実用化可能性

開発した3技術(貫通配線・電極形成技術、シリコンウエハ低温接合技術開発、センサ・回路一体化実装技術)に関しては、MEMSデバイスに適応するための必要な基本初期特性を確認し、更に、各種信頼性試験を実施して、特性の変動がなきことも確認しており、既に、産業技術として有効な段階であるといえる。

平成18年9月から、ファンドリーサービスにて、MEMSウエハレベルパッケージング技術としてホームページに掲載し、受注活動を本格的に開始した。

また、前記3技術を用いて、3軸加速度センサ、ジャイロセンサの2種類の検証デバイスを実現する一貫工程も開発し、3軸加速度センサ、ジャイロセンサの初期特性を満足することも実証し、実MEMSデバイスへの適応性も検証できている。

なお、検証デバイスを含めたMEMSセンサの実用化に対して、多数枚処理時の各工程の安定化検証、及び、各種信頼性試験による特性評価を実施し、品質の安定性を確認検証する予定である。

(2)波及効果

開発した4技術は、2種類の検証デバイスで実証したように、MEMS分野で初めて、ウエハレベルでパッケージングすることにより、MEMSの小型、低コスト化を実現する技術であり、MEMSセンサはもとより、センサ以外のMEMS分野への適応をファンドリーサービスを通じて展開することにより、MEMS市場の更なる拡大に寄与できる。

特に、小型化が要求される携帯機器(携帯電話、携帯型音楽プレーヤー、ハードディスク搭載モバイル機器)用センサ、及び、安全、安心を狙いとしたネットワーク機器に市場拡大に有効である。

又、ファンドリー引き合い件数の増加とともに、ユーザも、従来の大企業から中小企業に確実に拡大しており、こうしたファンドリーユーザが、自社で高額な設備の投資とプロセス開発に多数の人員を投資することなく、MEMSを適度の開発コストで早期に調達できることを可能にし、MEMSの研究開発、並びに、MEMS応用商品を含む革新的な商品造出に寄与し、我が国の製造業の発展を大幅に加速できることと考える。

(3)事業化までのシナリオ

当社は、既に商品化している圧力センサと加速度センサを核に、本技術開発成果を応用した特徴ある次世代MEMS商品群を創出することによりMEMS事業の拡大を図る。

3. 各テーマの成果詳細

3.4.1 「スマートスキンの実現を目指す MEMS アレイとその信号接続方法の研究」

(1) 研究概要

半導体微細加工技術を用いてミクロの立体構造や機械システム (MEMS: micro electro mechanical systems) を作る方法を、マイクロマシニングと呼び、1980年代から様々の研究が行われてきた。マイクロマシニングを用いれば、複雑な形状のマイクロ構造からモータやアクチュエータのように力や変位を発生するデバイスまでを作製できる。この MEMS 技術を用いて、自動車用の加速度センサ、インクジェットプリンターのヘッドなど、様々な製品が生み出され私たちの身の回りで用いられている。

さらにデバイスを多数ならべたり、電子回路と集積化したりすることで、MEMS の一層の性能向上と応用範囲の拡大が期待できる。すなわち、

- (1) 個々のアクチュエータは単純な動きしかできなくても、多数が協調して動くことでより複雑で、高度の動作を実現する。
- (2) アレイ化したセンサや制御回路を組み込むことで、アクチュエータやその近くの状態を測り、その情報に基づいて個々のアクチュエータを適切に動かすシステムを構築できる。
- (3) 応用として、スマートスキンの実現が期待できる。スマートスキンはその表面に、感覚、判断、動作の3機能を行うデバイスを多数分布して持つシステムである。広面積にわたって、その場その場の状態に合わせたきめ細かい動作が行えるため、固体と流体界面での乱流発生を制御するシステム (航空機、船舶、配管中の流体抵抗低減への応用が可能)、アクチュエータアレイの上に置いた物体を検出してそれを望みの場所へ動かす搬送システム (マイクロファクトリーの部品搬送、マイクロ流体チップ用の微量検体搬送などへの応用が可能)、壁面で検知した温度・湿度・照度等にあわせて空調や照明を自動的に調節するシステム (室内の環境管理などに応用が可能)、などの次世代 MEMS 応用への展開が期待できる。

上記の夢を実現するための構成要素となるアレイ機構や素子については、研究代表者を中心とするグループを先駆として、米国などで萌芽的な研究が始まっている。

このような背景に基づき、本研究では半導体マイクロマシニングを用いて MEMS アレイを歩留まりよく製作可能とすることと、その制御に用いる集積回路との信号接続方法を開発することにより、従来得られなかった操作自由度や検出能を持つ次世代の MEMS を実現し、今後の MEMS 技術の発展に資することを目的とした。特に研究代表者の研究室で実績のある、アクチュエータアレイの上に置いた物体を検出してそれを望みの場所へ動かす搬送システムを対象として、アクチュエータアレイの製作法、回路との集積化手法、制御方法などについて研究を行った。以下、研究の過程で得た成果について報告する。

本研究は半導体マイクロマシニングを用いて MEMS アレイを歩留まりよく製作可能とすることと、その制御に用いる集積回路との信号接続方法を開発することにより、従来得られなかった操作自由度や検出能を持つ次世代の MEMS を実現し、今後の MEMS 技術の発展に資することを目的として行った。特に申請者の研究室で実績のある、アクチュエータアレイの上に置いた物体を検出してそれを望みの場所へ動かす搬送システムを対象として、研究を進めた。個々のアクチュエータは単純な動きしかできなくても、