

# 経営講演会

## 講演録

『新産業創出のキーとなる

MEMSテクノロジー』

—MEMSの集積・融合化技術の進展—

講師 立命館大学工学部マイクロ機械システム工学科教授

マイクロシステム技術研究センター センター長

杉山 進 氏



財団法人 リそな中小企業振興財団



講 師 立命館大学工学部マイクロ機械システム工学科教授  
マイクロシステム技術研究センター センター長  
杉 山 進 氏

プロフィールご紹介

研究分野：シンクロトン放射光応用マイクロマシニング  
マイクロセンサ・アクチュエータ・システム

主な経歴：名城大学工学部電気工学科卒業後

1965年より	(株)豊田中央研究所
1991年	主任研究員
1992年	シリコンデバイス研究室長
1993年	デバイス開発室長
1994年	東京工業大学博士(工学)
1995年	立命館大学工学部機械工学科教授
1996年	工学部ロボティクス学科教授
2004年	工学部マイクロ機械システム工学科教授
2000年より	立命館大学マイクロシステム技術研究センター長を兼任

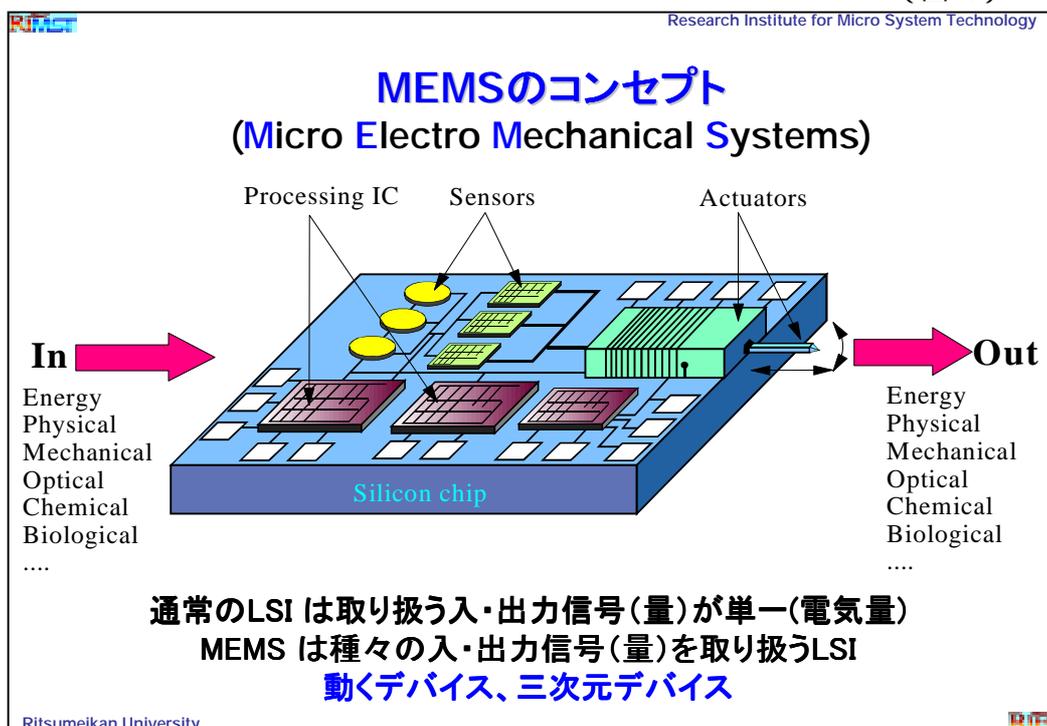
## MEMSのコンセプト

立命館大学の杉山でございます。私達が研究している MEMS のテクノロジーに関してご紹介をさせていただいて、皆様の企業活動に少しでもヒントになれば幸いに存じます。本日の副題である「MEMS の集積・融合化技術の進展」に焦点を合わせて MEMS という技術はどのようなものかということをご紹介したいと思います。

1987年にアメリカの電気電子学会が、Micro Electro Mechanical Systems の会合をつくりましたが、この会の名前が定着して MEMS と呼んでおります。

その概念は、一番使いやすいものという面から代表的な例として、シリコンを基板として、その上にセンサーとかアクチュエータ、IC が一体的にできているものであります。センサーは情報を取り入れ、アクチュエータは仕事をする、あるいは外に働きかけそれを制御する、IC は情報通信を司ります (図 1)。

(図 1)



これは電気と機械のシステムであり、日本には、メカとエレクトロニクスを合わせたメカトロニクスという言葉がありますが、それと同意語であると思います。メカトロニクスはもっと幅広く使われます。通常の LSI は取り扱う入出力が電気であるのに対して、MEMS はエネルギーから物理量、化学量、機械量、光、あるいはバイオも含めた入出力によって、この中で処理をするということです。簡単な例としては、水とお米をヒーターで沸騰させてご飯を作り、それをインキュベータの中で麹と反応させます。ヒーターで 37 に温めて長時間置くとアルコールができるわけですが、そのようなケミカル、あるいはバイオケミ

カルなプロセッシングをするというものも MEMS に入るわけであります。

整理をしますと、MEMS は本質的に集積デバイスであり、機械と電気、その他いろいろな情報処理を扱うことができるということです。それから、いろいろな入出力を扱う。もう 1 つ特徴的なのは、すべてというわけではありませんが、動く機械、メカニズムが入っています。生きているように、いずれは手足を持って歩き出すデバイスになるだろうと思っております。

最も重要なのが製造概念でありまして、機械要素を含んだデバイスは IC と同じように転写・一括処理、バッチプロセスで出来上がります。これは、IC、LSI が基板の上に同一のパターンで処理を加えて、例えば 20 センチの基板に何万、あるいは何十万個という同じ特性のものが出来上がるというように大量生産できるわけです。いままで、一般的には機械加工が個別加工であったのに対して、転写・一括処理できるということで、特に光を使った写真と同じ技術を使って一括処理する、これが特徴的なことです。

1980 年から 1990 年代は、MEMS は大学の研究室の中で、どのように作るかということが研究されていましたが、21 世紀に入ると研究室から飛び出して、我々の生活の中で役立つものを作ってビジネスをするという段階になりました。

30 年以上前から、IC は産業の基幹素子、基盤素子であり産業の「こめ」と言われており、どの機械にも IC が付いていないものはないという時代になっています。同じような意味で、MEMS は産業の「まめ」といえるのではないのでしょうか。「こめ」はエネルギー源で炭水化物、「まめ」はタンパク質で我々の体を構成する、あるいは生きていく上で必要なものだということで、MEMS も IC と同じように産業になくてはならないものになっていきます。人間生活の中のあらゆる場面で有用性が期待されているということであり、既にその時代は始まっております。

先ほど、コンセプトの説明でシリコンを取り扱いましたが、なぜシリコンを使うかといいますと、シリコンは優秀な電気材料で、半導体、IC、LSI の基板材料として広く、なくてはならないものになっています。それと同時に、シリコンは優秀な機械材料であるということです。私どもはシリコンを扱って 40 年以上になりますが、大変にいい材料です(図 2)。剛性を表すのにヤング率等がありますが、ほとんどスチールと同じです。従って、バネ性も同じですからバネをつくることのできる。それから強度、例えば破断強度とか圧縮強度もスチールとほとんど同じです。いろいろな処理をした場合の違いはありますが、ほぼスチールと同じぐらいの機械的な強さ、剛性を持っています。

もう 1 つは、重さです。比重はアルミニウムと同じ 2~3 ぐらい。こちらのヤング率は、スチールと同じぐらいです。これはどういうことかと言うと軽くて強いということですから、機械材料として、あるいは構造材料として大変いいということでありまして、一般に、私たちの取り扱う分野では固有振動数という概念がありますが、強くて軽いというものは固有振動数が高いわけでありまして、高い周波数と早い応答が期待できるということでありまして、そういう意味でも、機械材料として優秀だということです。これは 1982 年より

前に、現在「SiTime」という会社の CEO であるカール・ピーターセンという人が、IBM にいたときに「シリコンアズストラクチャーマテリアルス」という論文を出しまして、これが 1 つのバイブルになっていますが、シリコンは大変優秀な機械材料であって環境負荷が少ないということです。地球にやさしい材料、これはお分かりのように、珪素ですから資源は石ころであります。それから  $\text{SiO}_2$  の結晶は水晶になるわけですが、石英で無害である。そういう意味でも、広く現在 IC に使われているゆえんだと思います。

(図 2)

**なぜSi?**

- ✦ Siは優秀な電気材料である: 半導体、IC・LSI基板材料
- ✦ Siは優秀な機械材料である:  
剛性、強度≒鋼、比重≒アルミニウム  
Dr. Kurt Petersen: -Silicon as a Structural Material- 1982
- ✦ Siは環境負荷が少ない地球に優しい材料である:  
珪素＝資源豊富、 $\text{SiO}_2$ (石英)＝安定、無害
- ✦ Siの加工技術は高精密、高信頼である:  
半導体、IC・LSI 製造技術の発展、蓄積  
製造概念: バッチプロセス(一括転写、大量生産型)
- ✦ Siはセンサエレメントとして多くの優れた特性を有する:  
光電効果、光導電効果、ピエゾ抵抗効果. . .

それから、製造技術の発展・蓄積によって半導体、IC、LSI は大変精密な加工ができます。接点に使ったとしても、 $10^{10}$  回以上の動きができるというように信頼性も高いです。また、製造方法については、先ほど言いましたようにバッチプロセスによる大量生産型であるということです。もう 1 つの特徴は、センサの素子として優れた特性を持っているということです。これは光との関係で光電効果、あるいは光導電効果、それから力、ピエゾ抵抗効果、ヒズミゲージとしても使えるということで、多くの優秀な特性を持っています。

## MEMS 技術ロードマップ

MEMS の発展ですが、先ほど言いました 1987 年ごろに「MEMS」という言葉ができましたが、同じ年にソリッドステイトセンサ・アンド・アクチュエータの国際会議が東京で開催されました。そのときに、この MEMS というものが 1 つの大きなセッションで発表されたわけでありまして。それ以前は、特に動くものではなくてセンサとして 1970 年代から使われておりました。例えば、1979 年、スタンフォード大学では直径 5 センチのシリコンの板の上に、幅は 50 ミクロン以下だと思いますが、延長 1.5 メートルのうず巻状に溝を作ります。そしてガスを流します。例えば、不活性ガスである窒素を流しておいて、バルブをつけて、静電引力あるいは電磁力でバルブを動かすと、ここからガスが加えられて、溝の中にガスが離脱着するわけですが、ガスの種類によって速度が違ふ。それをうまく利用して、出てくるまでの時間を計ります。そうすると、メタンガスではどれだけ、プロパンではどれだけだということが分ります。横軸に時間、縦軸にガスの比熱を取ってガスがあるかないかということ調べるわけですね。そうしますと、例えば空気中のガスの濃度、いろいろなガスの混ざったものが分ります。事例としては、NASA が空気の汚染度を調べるために宇宙船に積んでいったということです。

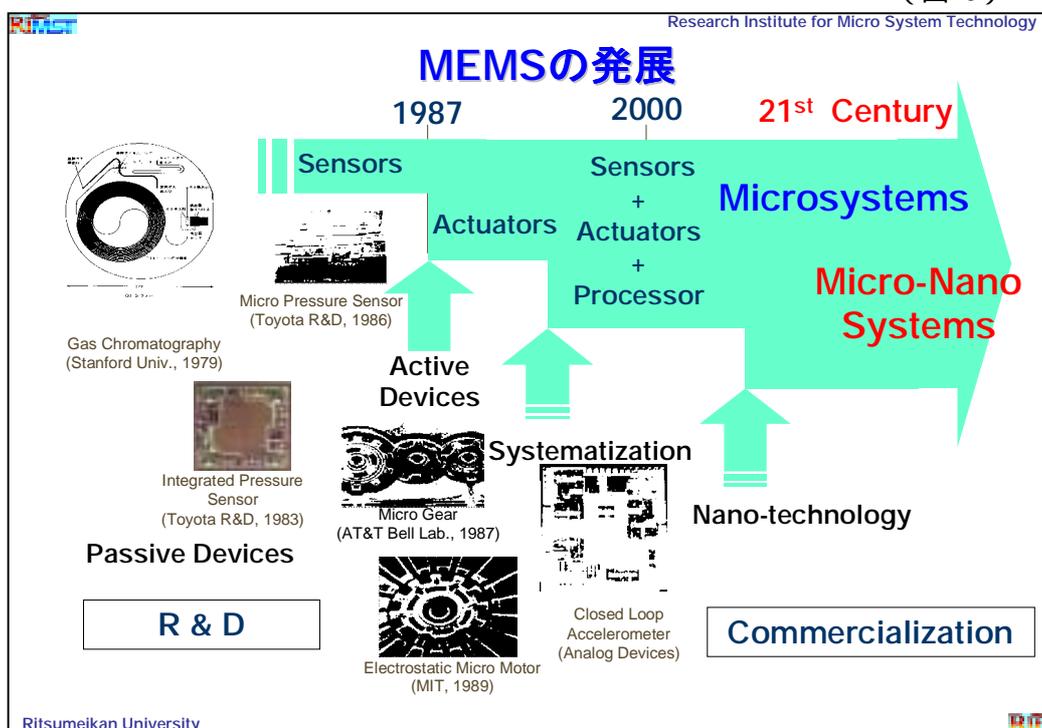
私は、以前トヨタの研究所にいましたが、そこで 30 年間センサをつくっていました。現在皆様が乗っていらっしゃる自動車のエンジン燃料噴射システムの中に使われている圧力センサなどを研究してきましたが、当時はこれを開発するのに 10 年かかりました。半導体は温度特性が悪いということで、車への搭載は嫌われておりましたが、品質が揃うし、耐久性も機械式のものに劣らないことが実証されて、1985 年頃から使われ始めています。その圧力センサの年代推移を見ても、1973 年のものにはまだ IC が入っておりませんが、この時期から既にシリコンの圧力センサを作っておりまして、回路と一体化したものの、更に精度を上げたものに推移しています。チップはそれほど小さくなっておりませんが、いろいろな指数によって性能を比較すると、コストパフォーマンスは当初に比べて 16 倍よくなっておりまして。そういう仕事をやっておりましたが、1986 年に、世界で一番小さな圧力センサを作ることに取り組みました。その内容は一辺が 80 ミクロンの薄い板をつくりまして、下に真空の部屋を作ってやります。これは一々掘るのではなくて、IC を作る方法と同じように一括して何千個が同時に出来上がるという方法です。シリコンの 2 ミクロンぐらいの窒化膜の薄いダイヤフラムですが、その上に多結晶シリコンの素子が乗っています。この中は真空になっていますが、これをウエハーの上に何千、何万個同時につくることができるというものです。

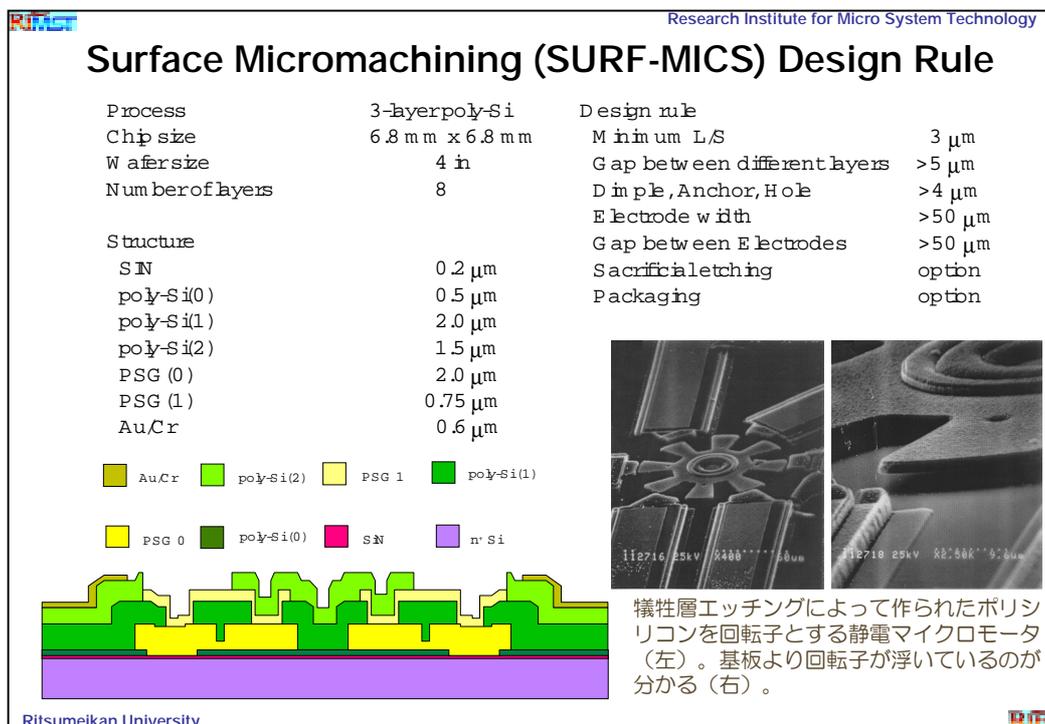
これを開発して、1986 年にアメリカの電子デバイスの国際会議で発表しました。そして会議の後に、カリフォルニア大学のパークレー校の、MEMS のフロンティアとして大変有名なムラー先生のところへ行きましたら、シリコンチップ上にセンサではなく機械部品を乗せている訳です。それはバネがあり、ゼンマイがあり、歯車があってピンセットで挟んで離すとポンと戻るんです。全体は固定されていて、こちらを動かすとあちらが動くとい

う簡単なものですが、これを実際に見せられて、動くものができているということに目からうろこが落ちる思いがしました。シリコンのCMOSプロセスをそのまま使うことによって機械要素ができるんですね。動く機械が一括して何千個一緒にできる。それも組み立てられて出てくる、こういうイノベーションがあったということです。私は発表の一年前に、先生の研究室を見せていただいて、機械要素を積極的につくろうという研究が始まっているということを知っていましたが、目の当たりにしてまさに驚いて帰ったわけです。

1987年になるとAT&Tのベル研からICと同じ手順を踏んで3層の多結晶シリコンで作った歯車が発表されました(図3)。大体直径が100ミクロン、髪の毛の断面が80ミクロンくらいですが、大体同じくらいのものが並んでいてぐるぐる回るわけです。それから、1989年には、MITから静電モーターが発表されました(図3)。外側に電極がたくさん並んでいて、そこに電圧を順次かけていくと歯車状になっている電極のプラスとマイナスが引きつけられて静電引力でくるくる回ります。大体1分間に1万回転とか10万回転です。100ミクロンという大変小さいもので慣性がありませんので、スタート、ストップが大変早いです。ただし、静電モーターで力が弱いものですから自分自身を回すのが精一杯ですが、シリコンのICのウェハー上でくるくる回るものができるということであります。

(図 3)

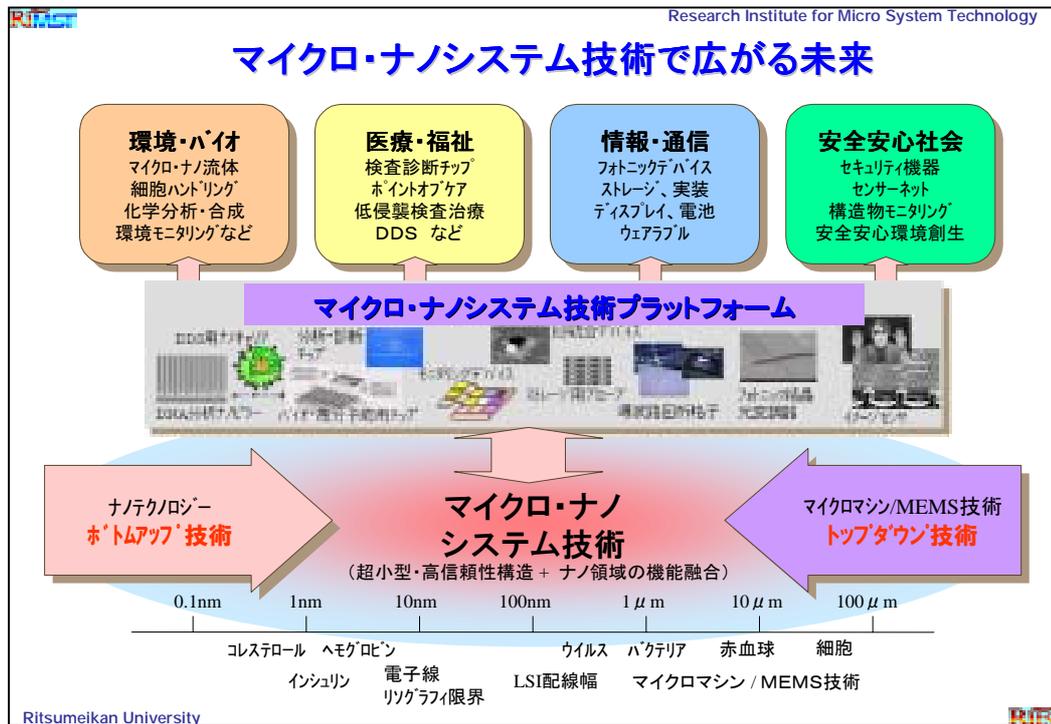




断面は、このようにたくさん層が重なっています（図4）。上の方が多結晶シリコンで、下はシリコン基板です。その上に順次重ねてCVD、化学蒸着方式を使って作るわけです。作ったらエッチング、パターニングして、また重ねてという形で作り上げます。最終的には、中間部分が、犠牲層と言っておりますシリコンの酸化膜です。溶けやすいようにリンが入っており、フッ酸系の水溶液でよく溶けます。ところが、多結晶シリコンは溶けませんので、残ります。下がなくなり浮いた状態になりますので、回ることができるという訳です。それをサーフェスマイクロマシニングと言っています。犠牲層によってつくられたシリコンを回転子とする静電マイクロモーターです。基板から回転子が浮いていることによって、モーターができるわけです。

### MEMSとナノテクノロジーの融合

従来の技術は、トップダウン技術で、IC、LSIを中心にして、どんどん小さく作ろう、細かいものを作ろうということやってきました。それに対して、ナノテクノロジーは、原子、分子から積み上げて新しい機能、材料を作る方向に進んでおります（図5）。この2つがちょうど融合したところ、大体数十ナノから数十ミクロンの間にマイクロナノシステム技術という、私達がこれから生活の上で享受するイノベーションがここから生まれるということです。これを、マイクロナノシステム技術プラットフォームと呼んでいます。その中で、研究レベルですが、いろいろな技術が生まれ始めています。その成果を環境・バイオ、医療・福祉、情報・通信、安全・安心の産業にこのプラットフォームを使おうということで、経産省、文科省を中心に展開を始めております。



これまでエレクトロニクスを中心にした産業を引っ張る牽引力は、半導体でした。第2の波はディスプレイです。大型のフラットディスプレイが実現しており、夢の壁掛テレビがもう実現しています。次の第3の波、これはまさに21世紀に入ってからMEMSのデバイスが産業の中心の1つになっています。この波が産業を引っ張る1つになるだろうと言われています。

インテルの前会長 Moore 氏は、1年半から2年にかけて集積密度が倍になると言っています。これはいままでの経験則で言っているわけですが、プロットしてみると、例えばインテルのマイクロプロセッサはこの法則が当てはまっています。MEMSについてもこのカーブに沿って上がっており、単体デバイスか集積デバイスかという点はあると思いますが、このラインに沿って技術は進展するということであり、市場がそれを期待しているということです。

### MEMS技術の動向

- ・ MEMS技術の実例・成功例

#### 自動車

MEMSの使用例で、身近なところでは自動車関連で多く使われています。例えば、圧力センサで言うと1980年代に本格的生産が始まりました。電子燃料噴射システム、今日ここにいらっしゃる皆さんはキャブレターを知っていらっしゃると思いますが、今の自動車には、キャブレターはありません。燃料と空気はキャブレターで混ぜて霧吹きをしていま

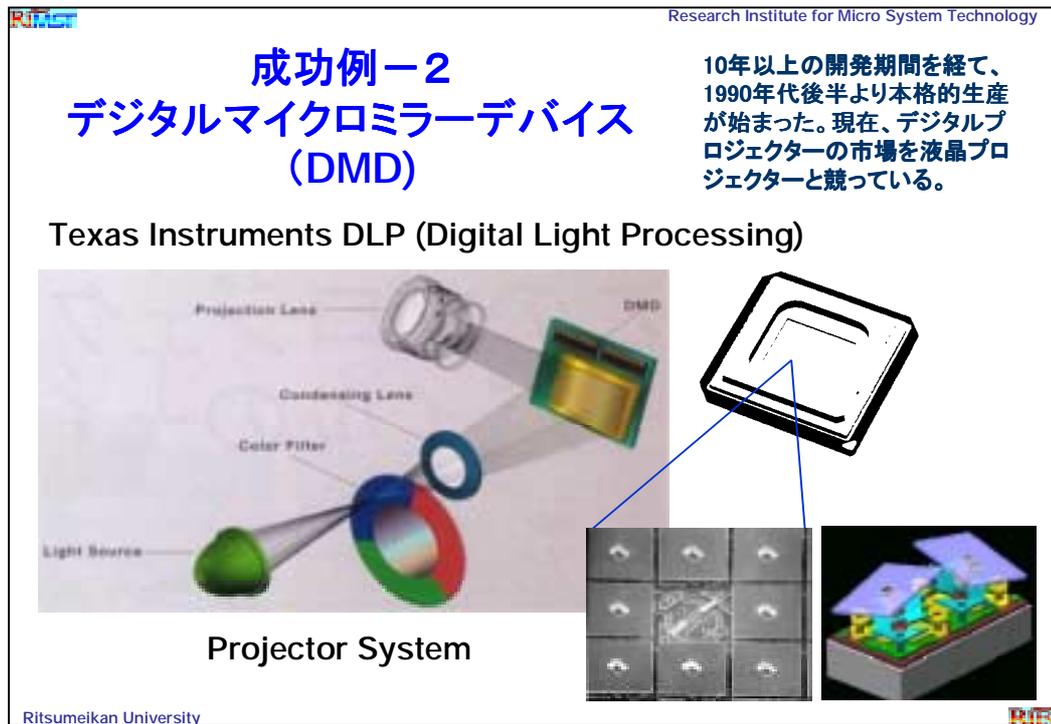
したが、いまはエンジンのシリンダーの中に入る直前に電磁バブルで噴射させます。空気はエアフィルターから吸い込んで入れるわけですが、吸い込むときの圧力を正確に取ろうということで、圧力センサが生まれました。これができたお陰で、空気と燃料の比率をちょうどいい具合にしてくれます。理想的な燃焼を行って、排ガスも少ない。ハイドロカーボンやNOxも少ないということではありますが、そのためにこれは開発されました。

次にエアバック用の加速度センサですが、エアバックにはセンサチップが乗っております。このセンサチップには、シリコンの錘が入っていて、シリコンの錘は加速度によって行ったり来たりするわけですね。そこに、バネになっているシリコンのビームがありまして、そのビームの一端にヒズミゲージができております。加速度によって発生する力をこの錘でバネのたわみに変える。それで、ヒズミゲージの抵抗変化を回路で増幅するというセンサになっております。ただ、いま衝突したのかどうか分からないという点については、ある診断メカニズムができていて衝突感知をするシステムになっています。最近では、横から当たっても開くカーテン型のエアバッグもありますし、それからジャイロスコープを使って、車が回転したときに開くようになっているものもあります。

それからタイヤ圧力センサですが、タイヤの場合だと回転するので、この中の圧力をワイヤレスで測定します。そのほか、回転角センサや、ガスセンサ等々、自動車の中には100個以上のセンサ、高級車になればなるほどセンサがいっぱい入っています。それが月産数百万個以上の規模になっているわけでありまして。

#### デジタルマイクロミラーデバイス (図6)

もう1つがデジタルマイクロミラーデバイス、これはDMDといって、それを組み込んだシステムでDLP(デジタル・ライト・プロセッシング)というチップがありまして、これは20年くらい前からテキサスインスツルメントで開発が始められたと聞いていますが、1990年代には本格的な生産が始まりました。現在、デジタルプロジェクターの市場を液晶プロジェクターと競っております。1.5センチ×1センチぐらいのチップの中に、14ミクロンのミラーがトータルで100万個乗っています。それぞれのミラーが独立して動きます。そして、傾いたものと傾かないものがON、OFFという形でそれぞれ独立して動いて、その下にはメモリがありまして、いまの状態を記憶しています。それで、RGBのフィルターを通して、このチップに光を当てて、それでミラーを傾けると、平面であればプロジェクターのレンズを通して画面にくる。ところが、傾いたら光は違う方向に行くわけです。そこに熱吸収の膜を置いておいて光を吸収するという形になっています。真っ白のところは、光が全部来ますが、真っ黒のところは光が来ません。では、グレーのところはというと、これを振動させて、その振動がこちらへ来る量と行かない量の比率をうまく作ってやって、それで中間色を作っています。反射型で98%以上の反射率を持っているので、小さくて明るいプロジェクターができるということです。NEC、プラス、ソニー、それから三菱電機のプロジェクターはこのチップを使っております。



### 通信分野（携帯電話）

携帯電話の中にもだんだん MEMS がなくてはならないデバイスになっております。1 つの携帯電話でも周波数は 1 つだけではなくていろいろな周波数を変える必要が出てきています。そのために、2 ギガヘルツの高周波に対応するマイクロスイッチが MEMS でなければならない時代になっています。半導体だとロスが多いですから、MEMS の原理は、昔のリレーですが、ただのリレーではなくてちゃんと高周波に整合したロスの少ない高速伝送のスイッチが出来ております。

それから集積マイクロフォンですが、マイクロフォンはいま熾烈な戦いになっておりまして、シリコンの集積化、MEMS マイクロフォンがどんどん開発されております。何がいいかというと、この中に詰まっている IC の中に全部作り込むことができるので、部品点数が少なくなると同時にコストが下がるということです。このように、MEMS はいま携帯電話の中に使われ始めていますが、特になくなくてはならないのが、先程のマイクロスイッチです。いろいろな周波数を切り替えるときに半導体のスイッチでは損失が大きいということで、金属のスイッチを使うようになってきています。シリコンのチップの上に IC 以外にも機械的な要素が作られ始めております。それは、金や銅の金属でもスイッチを作ることができますから、抵抗が大変小さいために損失がない。それからもう 1 つはパターンニングができるので、それで高周波の信号が漏れないように同軸ケーブルのようにシールドして、情報が漏れないパターンニングができるということです。

## 医療分野

日本ではオリンパスから既に市販され始めていますが、カプセル内視鏡といって、CCDカメラを乗せて、無線で外とやり取りができます。それから、向きも変えられる。これを飲み込むと CCDでお腹の中が見られるわけですが、当然ランプも乗ってなければいけないわけです。ただ、飲み込んだだけではどこを見ているかわからないので、外から、磁場を移動させて回転して見たいところを見るようにするという形になっています。

それからペースメーカーですが、体の中に埋め込むわけですから小さいほうがいいに決まっていますし、エネルギーも少ないほうがいいです。それからもう1つは信頼性、私たちの体に害を与えない負荷の小さいものが必要だということで、こういうものに大変期待が高まっています。

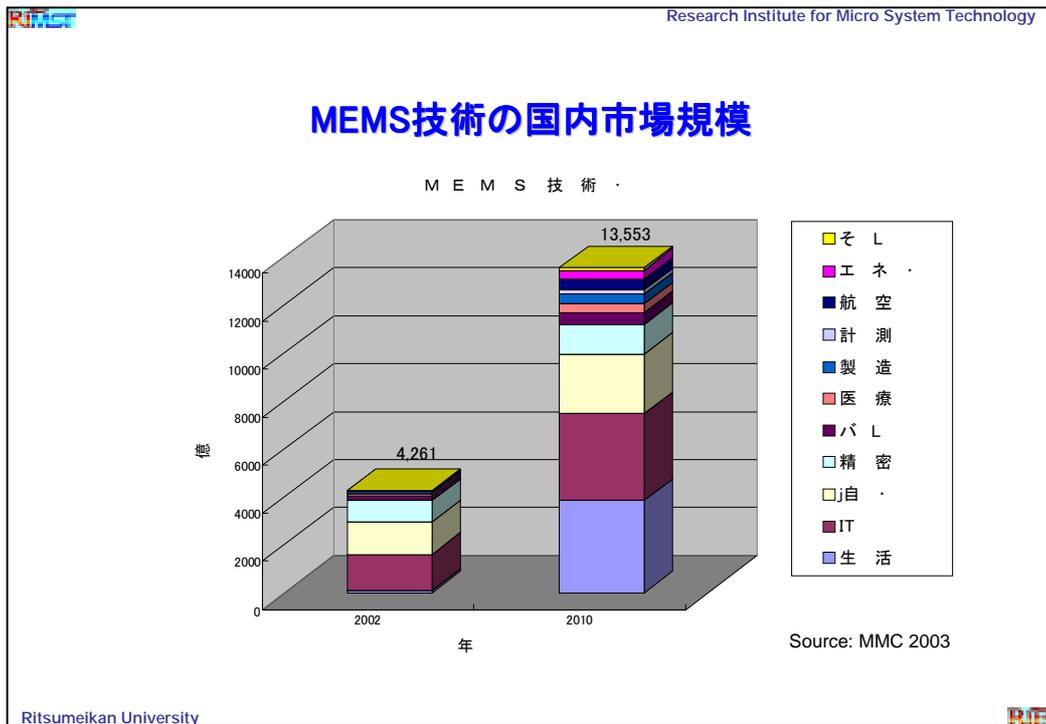
それから Lab on a chip ということで、ラボラトリー、すなわち、実験室がチップの上に乗るということで、DNA の診断チップなどでいま盛んに市販され始めておりますし、もっと化学分析を行うということで、トータル化学分析チップというのがいま出来始めておりますが、血液分析、それからいろいろな私たちの体液を取ったり、DNA の分析を行って診断を行うという時代になっています。このチップは MEMS の加工技術、それからメカニカル、ケミカル、エレクトロニクスを合体したチップが必要となります。

## 安全・安心の分野

生物化学兵器のようなものが使用されたときに、その場に行けないので、遠隔地からそれを調べる必要があります。アメリカの国防関係では、光を使って遠隔地から来た光を分析して、どういうガスがそこにあるのかということが研究されています。

### ・国内市場

日本の国内市場の規模ですが、2002年の実績は4261億円となっております。(図7) マイクロマシンセンターの調査によると、2010年には1兆3000億円の売上規模があるということです。そのうち、生活文化、IT、自動車、精密機器の分野で1兆円を超す規模があるという予測です。2002年の内容は、光と慣性センサ、加速度センサとかジャイロスコープです。それから圧力センサ、それからDNAの分析等に使われている流体素子、こういうところでした。それが2007年になると、どこが増えるかという、光と慣性センサがちょっと増えます。情報のほうで使われるということです。それから、高周波MEMSは3倍ぐらいに増えるという予測があります。こういう予測をしておりますが、大体、通信分野では30~40%、それから情報分野が大体30%以上の成長率、自動車分野は20%以上です。これらの分野が、2010年にかけて1兆円を目指して成長しているということです。



#### ・ 国家戦略

国のプロジェクトは、「MEMS プロジェクト」という名称で平成 15 年から 17 年までの 3 年計画が、昨年度終わりましたが、年間大体 8 億円ぐらい、トータル 25 億円規模でこのプロジェクトが走りました ( 図 8 )。私も参加させていただきましたが、その中で、特に企業の技術開発力を向上させようということで、RF - MEMS、それから光 MEMS とセンサ MEMS の 3 つのテーマです。RF - MEMS はオムロン、それから光 MEMS はオリンパス、センサ MEMS は松下電工が、それぞれ委託されて大成功に終わっているということでもあります。オムロンで開発した高周波スイッチは  $10^{10}$  以上、100 億回ぐらいスイッチングしても壊れないというスイッチができているということでもあります。それからオリンパスは光、ミラーを使った計測と通信、松下電工は、センサの小型化と実装という成果を挙げております。

それから、一昨年からは MEMS 用設計・解析支援システム ( MEMS - ONE ) 開発プロジェクトが始まりました。デザインツール、シミュレーションを含めて、日本は設計ツールの分野に弱いということです。IC・LSI の CAD はアメリカのものを使っております。MEMS に関しても、そういう傾向がありますので、メイドインジャパンを作ろうということで、年間 4 億円ぐらのプロジェクトです。今年度終わるわけですが、成果が大変期待されているということでもあります。



MEMS とナノ機能、ナノテクノロジーの複合化をさせるということで三菱電機と東京大学、産総研、それから MEMS と半導体の一体化は日立、オムロン、フジクラ、東芝、そして立命館大学、東北大学、産総研、それから MEMS と MEMS の高集積結合はオリンパス、松下電工、横河電機、レーザー技術総合研究所、東北大学、それから高集積複合、データベース、この開発はマイクロマシンセンターがこれらの成果を蓄積するという形のプロジェクトが始まりました。始まったばかりで成果はこれからですが、国家的な方針、総合科学技術関連の中に MEMS の重要性が謳われておりますので、こういうプロジェクトが始まっております。

#### ・立命館大学マイクロシステム研究センターについて

##### 多細胞的集積技術

私達の研究センターの研究内容についていくつかご紹介したいと思います。多細胞的集積技術というのは少し難しい言葉ですが、要は、たくさんの同じものを並べて、それで何か仕事をしようということでありまして、1 つはシンクロトロン放射光を使ってマイクロニードルを作ろうということです。高さが 300 ミクロンから 500 ミクロンの針を、例えば 1 センチ角の中に千本作ることができます。それから溝を掘っておけば、毛細管現象で血液や薬剤を蓄積することができるものです。それから、当然穴もあいていて、これで薬剤を投与する、あるいは血液を吸引するというものができています。例えば、定期的にこういうものを使ってインシュリンを投与する、そういうシステムも医療器具メーカーと共同で開発しております。

##### バルーンアクチュエータ

人間の体に接近すると、硬いものとか、傷つけるものは困りますから、ポリマーや柔らかいプラスチックを使って動くものを作ろうということで、バルーンを使って関節を作り上げていきます。そして、協調制御、分散制御をさせれば、うまく仕事をする事ができるということでありまして。これをもっと発展させて、5 本の指を作って対象物を挟んだりするものを、愛知万博でデモンストレーションに出しました(図 10)。その使用目的ですが、こういうものを体の中に入れて手術をするということです。この親指と人差指が反対方向で掴むことができる。それで、テレオペレーションをして医師の動きをここに伝えてやることができますから、遠隔地で手術したり、あるいは作業することができます。マジックハンド的なものが 1 ミリ程度の大きさの範囲になったということです。



### 多次元的集積

これは特にセンサの世界ですが、XYZ空間の方向で3次元、それに回転も取ろうということで、合計6つの成分の力を1個のチップで取るということです。棒型にしてロジックチップみたいにやる場合がありますが、この場合だと実際にこの中に約20個のピエゾ抵抗素子、ICと同じような手法を詰め込んで、発生する応力、ヒズミをうまく、そしてバランスを取るようにすると、6つの成分が1個のチップで取ることができる。いま我々は2ミリ角のチップに作り上げています。ただ、実装センサは大体5ミリ角ぐらいになります。これを使ってロボットの指につけて、精密作業をさせようという実験を行っています。

### 加速度センサ

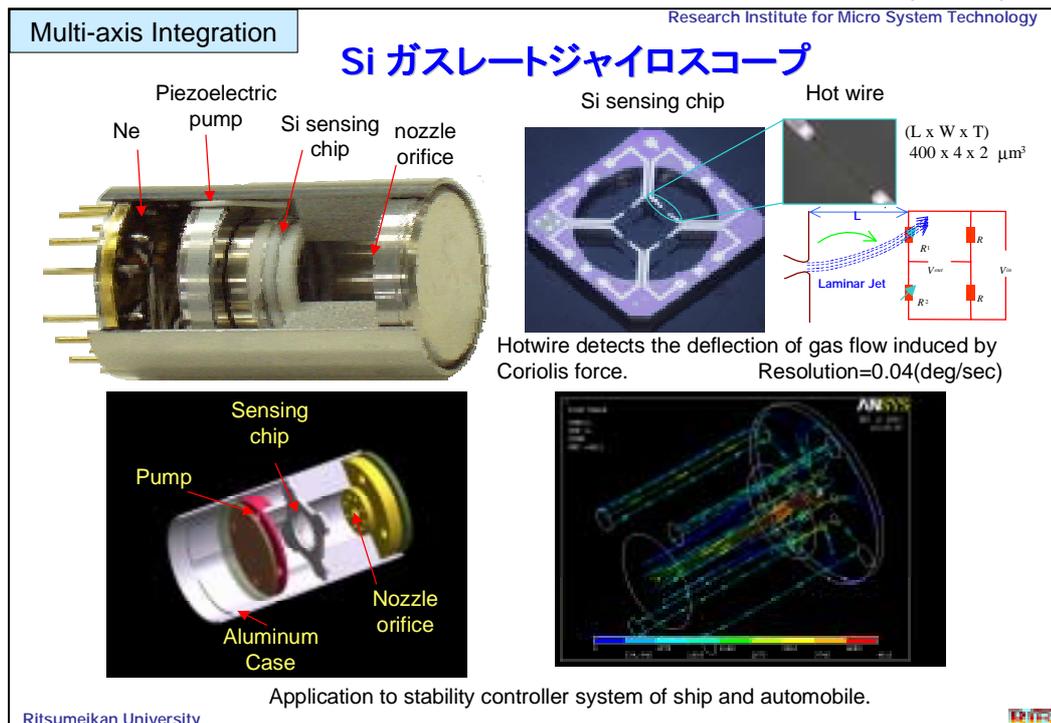
XYZの3軸の加速度、それから回転の加速度を取ろうということで、検出メカニズムを作りまして、それでXYZの3軸回りの回転を取ろうというもので、錘が上下に付いています。3軸加速度センサにおいては0.5ミリ角、米粒よりも小さい加速度センサができています。私どもは砂MEMSと言っておりますが、砂粒のようなチップを作るとどこに何があるか分からない。というのは、センサがあるということが分かってしまったら計測に障害を与えます。100メートル走る選手の心臓の鼓動や脈拍を取ったり、血圧を取ったりしてスポーツ医学でいろいろな実験がされていますが、100メートルの選手が10秒で走るのに重い計測器をぶら下げていってはだめですから、こういう小さいものを絆創膏でペタッと張って走るという時代がもうすぐ来ると思います。

## ジャイロ스코ープ

船につけるガスジャイロというジャイロ스코ープがあります(図 11)。原理は、ガスがノズルから出ていて、回転すると、自転車で走りながら水鉄砲をかけたときのような軌道になります。止まっているときはガスが真っ直ぐ行きますので、そこに少し温かい抵抗体を埋め込んでおきます。そして、ちょっと回転して変位が発生すると、その部分だけ冷えて、あとは冷えない。そうすると、抵抗のバランスが崩れて電圧が発生するというものです。

それで、もっと細かいものを作ろうということで、2 ミクロンで長さが 400 ミクロンのワイヤーを作って、その中にネオンガスを流します。ネオンガスを圧電ポンプで繰り返し循環させます。心臓部のセンサチップは MEMS の技術で作ります。これで、1 秒間に 0.04 度の傾きを計測することができます。豪華客船のような船ですとフワッと動く気持ち悪くなりますので、それをスタビライザによって安定化させるというような用途に使います。

(図 11)



## マイクロエンジン

10円玉の上に乗るくらいのエンジンを作ります。バネとピストン、シリンダーがあって、そして1ミリ角の燃焼室で水素を燃焼・爆発させて動いたものをバネで戻します。そこに磁石をつけておくと発電するというものです。これは大学での実験段階ですが、レシプロエンジンがシリコンを使ってできるということです。これで、大体 20 ミリワットくらいの発電をさせようという試みです。

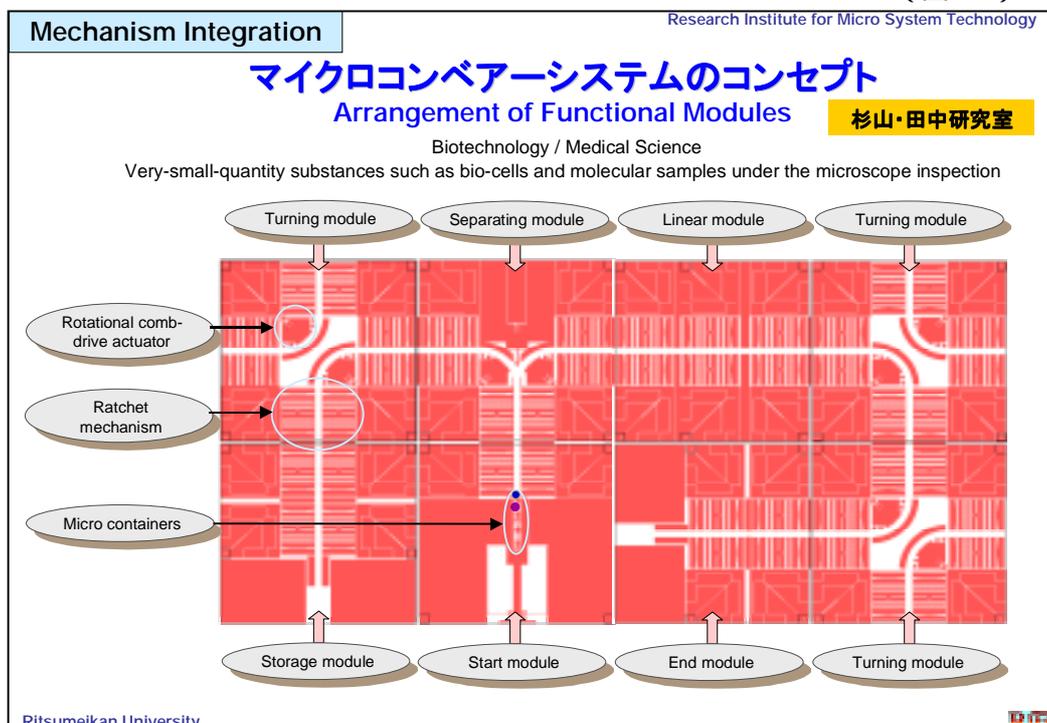
### 高周波スイッチ

我々が扱っている MEMS では高周波というのは、10 ギガヘルツ以上のことをいっております。シリコンのチップの上に機械要素のスイッチが乗っていて、静電引力で行ったり来たりすることによって、ON・OFF させるというスイッチです。大体 20 ギガヘルツまで特性が確認されておりますが、信頼性は、 $10^{10}$  回以上期待されています。現状 20 ギガヘルツでマイナス 1.2 デシベルですが、0.5 デシベルにしたいと思っています。

### マイクロコンベア (図 12)

マイクロコンベアというのは、顕微鏡の下でピンセットでも扱えないようなナノパーティクルとか、あるいは細胞を輸送したり、ソーティングしようということで、モジュールを作ってそれぞれ組み合わせる。直線モジュール、ソーティングモジュール、回転モジュールを組み合わせると、小さなファクトリーができるわけです。これはシリコンで作られ、大体 1 ミリぐらいの大きさですが、中に 250 ミクロン × 450 ミクロンの大きさのコンテナが入っています。このコンテナにのこぎりの歯状のラッチが付いています。これによって、一方向にしか動かないということです。櫛歯型の静電引力で動くということでもあります。これは無限軌道で動きますので、このレールをずっとつないでいけばどこまでも動くということです。回転部分はまだ不十分ですが、このコンテナの上に細胞を乗せて保管しておいて測るときに持って来る、このように大変小さなコンテナですが、自由自在に動かすという働きをしています。

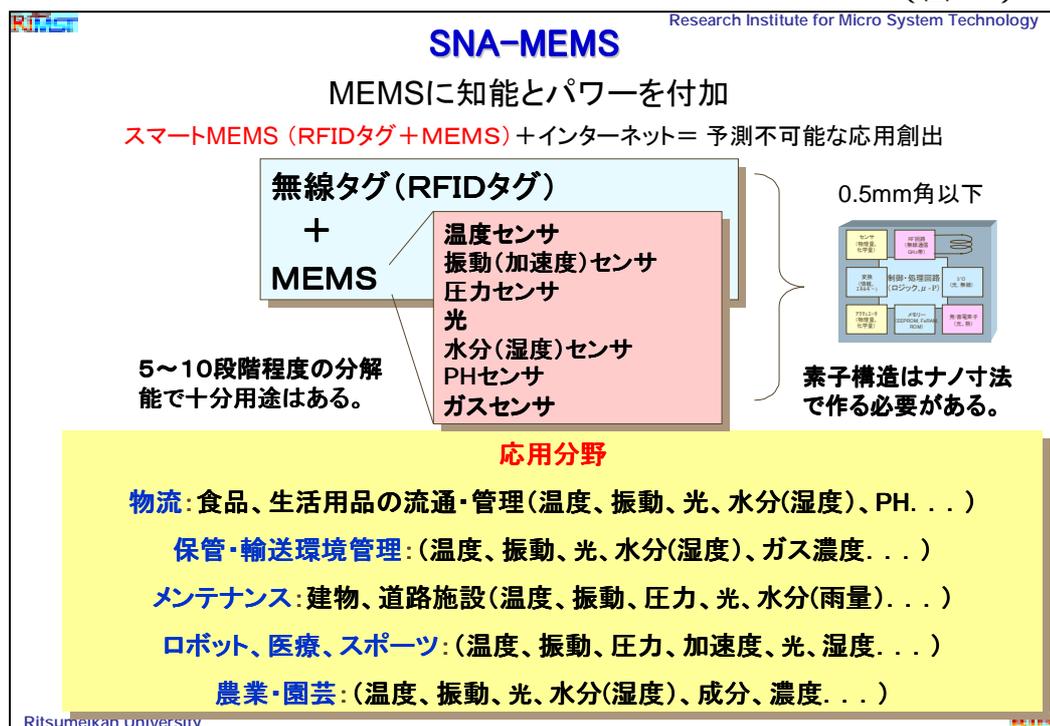
(図 12)



## 通信との融合

通信との融合については、スマートナノ MEMS (SNA - MEMS) と言っておりますが、いろいろな機能を小さなチップに収めてしまおうというものです (図 13)。昨年度は 1 センチ角のものでしたが、今年度には 2.5 ミリ角に埋め込んでしまおうという計画です。MEMS の部分は、特にセンサの部分と、ロジック、メモリ、CMOS の部分と、それからパワー、外から供給する電磁誘導で蓄えるところ、それから通信に継ぐ RF アンテナを含めた通信部、これを 2.5 ミリ以下の中に入れてしまおうということでありませう。そうすると、ワイヤレスにセンサがついているから環境の計測が容易にできるということです。こういう MEMS チップを使うと、無線タグ、これは ID が入っていますからチップそれぞれに認証番号があります。そこに温度センサ、振動センサ、光センサ等々複数個乗せて、物流、保管輸送、メンテナンス、更に医療、スポーツ、農業、園芸などの分野で環境を計測しよう、あるいは、その対象物の状態を見ようということです。

(図 13)



物流と言うと、現在は無線タグが使われ始めていますが、その中に温度だとか振動とか光のセンサを付けます。すると例えば、冷凍宅配便でカニを冷凍して北海道から送ってくるわけですが、果たしてずっとマイナス 10 以下になっていたかというのは、宅配の会社を信用するしかない訳ですが、これを付けておけば温度履歴が皆入るということです。それから振動については、割れ物注意となっても、流通の途中で投げたりしているかもしれない。仕分け工場の中を見ることはできませんが、振動センサを入れておけば、最

大振動がどこまでかかったかというのが分かるかもしれません。それから冷暗所に置くべきものでも、野晒しに遭ってしまったかもしれない。ですから、保証をするためにこういうチップを商品の中に入れるという考えができます。

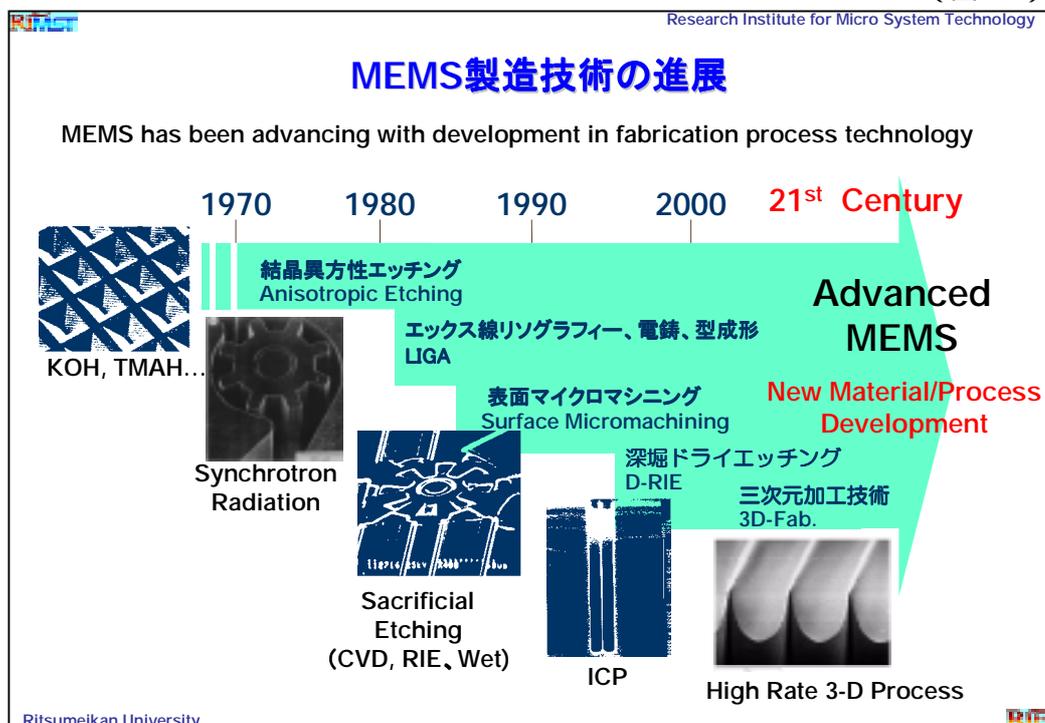
それから、道路や施設ですが、災害があった後、例えば土砂崩れがあったりした場合、生埋めになった後で誰かがいないと分かってから捜し始めるのではなくて、例えば土手の法面の要所にこういうチップを置いておけば、傾斜が変わったり振動が発生したということが早期に検知できるということです。ですから、災害の拡大を防ぐことができる。それから農業・園芸に関しては、農業の工業化ということで環境を精度よくコントロールするためにはこういうものが必要になってくるということです。

工業以外の用途にも使うことができます。医療の面、例えば、健康管理や診断の場合に、血圧を測る時に上がってしまう人でも、24時間血圧がモニターできるようにできる。それも、血圧計がそこにあるということを感じなくて計測できる時代がすぐ来ると思います。私の父親は心臓が悪かったときに、重いメーターを付けて24時間測ってくださいと言われて心電図を撮りましたが、あれは大変です。これでしたら絆創膏でペタッと貼っておけばいいということですが、もうすぐこれが活用される時代になると思います。

### MEMS 製造技術の進展

ところで、このような MEMS の技術の進展に関して、製造技術のイノベーションによって、デバイスのイノベーションが誘発されるということが起きています (図 14)。

(図 14)

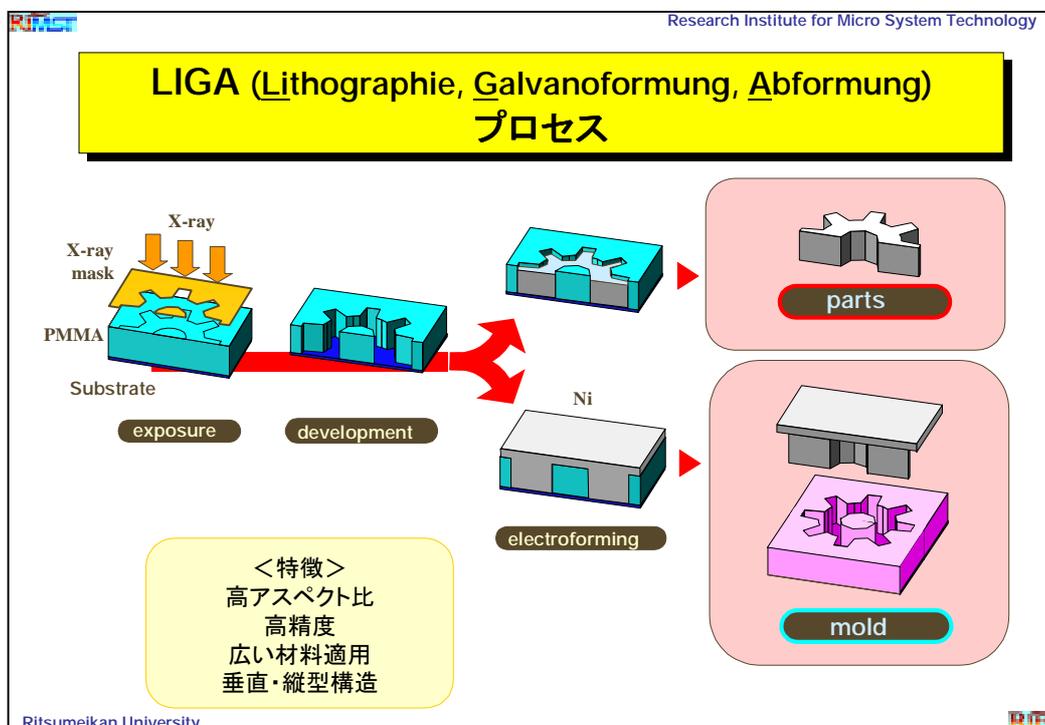


1970年代の製造技術は、水酸化カリウムや水酸化ナトリウム等の液体を利用した結晶異方性エッチングでしたが、その後、X線を使ったリソグラフィーが開発されました。そして1980年の後半にIC技術を使った表面マイクロマシニングというものが出始めました。最近では、深堀ドライエッチング(D-RIE)といいますが、誘導結合型のプラズマを使ってプラズマ密度を高くして深いエッチングができるようになりました。しかも、横に広がらず縦にエッチングができます。

1990年代に入って、自動車用のエレクトロニクス部品で有名なBOSCHが新しい方式を開発しました。それは、シリコンのドライエッチングですが、フッ素をシリコンと結合させて真空ポンプで引き出す方法です。ところが、どんどん進めると横に広がってしまうので、途中でテフロンのような膜をつけて、また掘るといふ、シールド工法です。この加工技術によって深くてきれいな縦方向のエッチングができるようになりました。この技術を使ってMEMSが発展しました。

それからLIGAプロセスという方法ですが、シンクロトロン放射光のX線を使って、材料にX線が透過しないマスクを当てて加工します(図15)。例えば、アクリルに金のマスクを置いてX線を透過させます。X線が当たると、アクリルの高分子の連鎖が切れて溶けてしまいます。従ってマスクに沿って溶けます。そして、このアクリルを取ってしまうとパーツができるという訳です。この方法で、アスペクト比が100:1、すなわち幅1ミクロンで高さ100ミクロンのものができるということです。

(図15)



立命館大学にもこういう設備がありますが、直径が 3.2 メートルと小さいもので、波長は 0.8 ナノメートルぐらいです。これで現在のところ、200 ナノメートルで深さが 10 マイクロメートルぐらいの構造体を作ることができます。

このように、いろいろな製造方法の歴史があって、それぞれのイノベーションが MEMS のデバイスの開発につながっています。それぞれの製造技術の比較を行ってみると(図 16)、結晶異方性エッチングの長所は設備が大変安い点です。エッチングですから苛性ソーダ、あるいは苛性カリを入れて大体 70 ぐらいに温めればいい。大変きれいにできますが、面積がどうしても必要となりますし、ピラミッド型になってしまって形状の任意性もないという短所があります。LIGA プロセスは数十億円の設備が必要です。そしてスループットが低く、1 つのパターンを作るのに 1 日かかります。それから、表面マイクロマシニングですが、これは LSI のプロセスを使いますから精密であって高集積ができますが、アスペクト比は小さいですし、トータルで数十億円の設備が必要となります。それから深堀エッチング(D-RIE)は、精密で高集積、アスペクト比も高い。しかし、1 ミクロン掘るのに 1 分かかりますし、ウェハーが 1 枚しか入らないということで大変スループットが低いということと、装置も 2 億円ぐらいします。

(図 16)

Research Institute for Micro System Technology

### MEMS製造技術の比較

製造技術	長所	短所	設備費
異方性エッチング	設備簡単 仕上がり綺麗	任意形状不可 面積ロスが大	数十万円
LIGA	超精密 高アスペクト比	低スループット (数十時間)	数十億円
表面マイクロマシニング	精密 高集積	低アスペクト比	数十億円
D-RIE	精密、高集積 高アスペクト比	低スループット (数時間)	数億円

Ritsumeikan University

## 日本のMEMS産業の課題

このようなことで、産業化が進むのかという話です。特に、新しい技術はベンチャーカンパニーのスタートアップが望まれています。というのは、大企業は、なかなかチャレンジしません。ですから、スタートアップをベンチャーカンパニーに頑張ってもらいたい。新しい事業を興し、それで経済を活性化させましょう。特に国際競争力の点では、アメリカ、ヨーロッパ、台湾、韓国がいま MEMS に注力しています。このままでは、日本はモノづくり大国だと言っていますが負けてしまうのではないかと考えています。

設備が高く、生産コストが高いし、技術開発期間が長い。先ほどからいろいろなことで十年かかったとかいう話をしましたが、1回試作するのに3~4ヵ月かかります。設備が高いという点ですが、IC会社がファブレスの受託生産をしたらどうでしょうか。

それから製造プロセスに関しては、当然新しい機械を開発しなければいけないと思います。それから生産コストが高い点。シリコンはいい材料ですが、それを携帯電話のように、ポリマーやプラスチックを成形して作らないといけないのではないかと考えています。それから大量生産品目を創出するという点、同じ特性のものがたくさん必要だという、そういうアプリケーションを創出しなければいけないと思います。

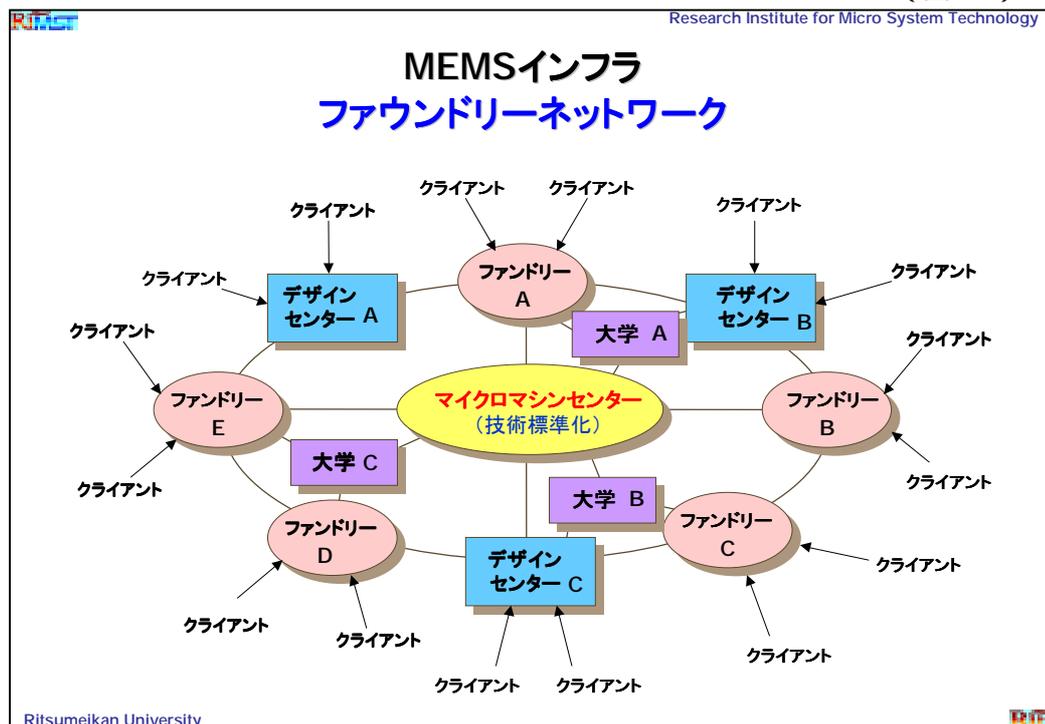
それから、開発期間が長い点ですが、これは1回設計して作り、だめだったところを直すという、これは数ヵ月単位の長い話ですから、開発・設計ツールの開発を行う必要があります。先ほどお話ししたような日本発の開発ツール、CADシステムを作るということに注力して取り組んでいます。それから、この開発期間が長いということについては、ベンチャーがデスバレーに入って3年間、ベンチャーキャピタルから早く売上を上げろと言われて苦しい思いをするわけですが、ぜひベンチャーキャピタルが理解あるファンドをつかっていただきたい。これは、当然リスクを買ってくださいということでもあります。アメリカでは新しく作っては潰し、そして潰して売ったりしています。日本には、終身雇用が根付いていて、そういうカルチャーがありませんので、なかなかチャレンジができません。それから人材が少ない点。これは私どもも責任がありますが、現在教育研修拠点の整備ということで、北は東北大学から、東大、名古屋大学、立命館大学、兵庫県立大学、九州大学、佐賀大学で、MEMSの拠点を作っています。また、産総研にもMEMSの拠点ができておりますので、それを活用していただきたいと思います。先ほどのファブレスですが、こういう機関をうまく利用すれば、機械を安く使えますので、ぜひ人員を送り出して教育を受けてほしいと思います。

先端技術、ハイテクノロジーはベンチャー会社がすぐできるものではありません、ソフトウェアはできるかもしれませんが。というのは、実は成熟した従来技術の基盤の上でようやく先端技術が生きるわけです。やはりプラットフォームがきちんとしていて、その上にまさに先端技術が乗っかる。それで機能するわけですが、従来技術がないと砂上の楼閣で崩れてしまいます。結局は、ベンチャーも潰れるわけです。

そういう意味でも成熟企業、すなわち中堅・大企業を含めてチャレンジしてほしいと思

います。中堅企業はローテクをうまく活用して、その上に先端技術を乗せていただかないと、モノづくりの場合はベンチャーの中で動くというのは難しいのです。それで、ファウンドリーネットワークをここ10年かけて構築しました。MEMSのモノづくりに関して、ファブ리케이션だけを請け負いますというネットワークです(図17)。マイクロマシンセンターが中心になって、ファウンドリー会社、特に半導体の古い設備を使って立ち上がっております。

(図17)



大学も応援してやっておりますが、現在、ファウンドリーサービス、ネットワークに参加されている会社が、その製造ラインを提供していただいて動き始めております。ファウンドリーを使う方法ですが、MEMSのフルプロセスを1回使うのに2000万円がかかります。カスタムで安くお願いした場合でも、1000万円がかかります。それではスタートアップカンパニーは使うことができません。それについては、マルチユーザーインテグレーション・チップ・サービスというものがあります。これは、いろいろなプロセス、テクノロジーについて、それをユーザー・クライアントが共同でマスクを保有したり、共同でファウンドリーを利用するという方法です。マスクは10枚セットで1つ20万円ですから、最低200万円ぐらいかかります。また、ウェハーで処理して1万個できても、私の会社では1万個は要らない、千個でいいということであれば、ちょうど10社集まればいわけです。それからプロセスも、1回やるのに2000万円がかかります。ですから、20社集まれば、100万円できるわけです。こういうシステムが用意され、うまくこれを利用して、例えば、船が出るから船に乗ってくださいという場合に、船の運賃を皆さんで分担すれば、トータ

ルが 2000 万円のプロセスが 100 万円で済むし、うまくいけば 50 万円ぐらいで済みます。ただしこの場合の基板は決ってまして、こういうプロセスの基板なら使えますが、そうでないとコストが高くなるという点は注意が必要です。こういうような枠組みをうまく活用していただきたいと思います。

その場合のファウンドリーですが 1998 年から 2004 年間にかけて、オリンパス光学工業、横河アイ・エム・ティー、大日本印刷、凸版印刷、住友金属等の企業に協力していただきました。いろいろな課題があって、多岐にわたってコーディネートする人間が必要だということで、これは私が担当させていただきました。

それから MEMSCAD のインストラクターですが、これは CAD のソフトが出来ても、教える先生が必要です。それから種々のセミナーでマニュアルを皆さんにわかるように技能を向上させる。それから MEMS の設計プロセスの標準化、こういう点につきましては、マイクロマシンセンターが中心になって進めています。さらにファウンドリーの育成ということで、先ほど示した 10 社ほどに手を上げていただいておりますが、穴を空けるのが得意なところとか、膜をつけるのが得意なところと、どんどん参加していただいてファウンドリーネットワークの充実を図りたいと思っています。

#### まとめ

以上、まとめさせていただきますと、

- ・ MEMS は新産業創生のキーデバイスとして期待されている。
- ・ MEMS はナノテクノロジーの研究成果を実社会に繋ぐ重要な技術である。
- ・ MEMS と IT 技術を融合し、インターネットにリンクすることによって豊かな社会生活の構築が期待されている。
- ・ MEMS の産業化、特にコスト低減には製造技術のイノベーションが必要である。
- ・ MEMS 産業創出や国際競争力強化のために MEMS インフラの整備が急務である。

ということです。

先ほど言いましたように、コンソーシアムを組んでいただいて、グループの力が大きな流れを作るきっかけになりますので、ぜひよろしく願いいたします。

ご清聴ありがとうございました。

この講演録は、平成 18 年 11 月 17 日、りそな銀行東京本社講堂で開催された、当財団主催の経営講演会を収録・編集したものです。