

### 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年代から様々な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)、壁面で検出した温度・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、

多数が協調して動くことでより複雑で、高度の動作を実現できる。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研究対象に選び、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技術、MEMS アレイの制御技術および、その制御に用いる集積回路との信号接続方法を研究した。コンタクトフリーな搬送を行うデバイスとして、代表者の研究グループで実績のある、MEMS 技術による可変ノズルアレイを用いたエアフロー方式を用いた。バルクマイクロマシニングにより、上面シリコン層にはノズル開口を作り、下面シリコン層にはノズルから出る気流の方向を制御する静電アクチュエータを形成したデバイスである。ノズルとアクチュエータを持つ単位セルはおおよそ 1 cm 角であり、この中に 100 個程度の単位セルからなるアレイを収めている。デバイスを水平にして、その上に搬送物体を乗せ、アクチュエータの動作に伴ってノズル開口から吹き出す斜め方向の気流によって物体を動かす。このデバイスについては、本研究室で試作を行い、動作を確認しているが、搬送制御の研究を行うためには、様々なデバイスで実験を行う必要があり、ファブドリーを用いて必要な数のデバイスを作製した。

一方、上記のコンタクトフリーな搬送デバイスに対して、搬送物に直接コンタクトして搬送を行うデバイスについても、同様の研究を行った。このデバイスも代表者の研究グループにおいて開発されたものであり、熱駆動型のカンチレバー・アクチュエータをアレイ状に配置することで搬送動作を実現した。本研究に使用したデバイスでは、1.5 mm 角の単位セルに東西南北 4 方向を向くカンチレバー・アクチュエータが集積化されており、さらにこの単位セルが  $16 \times 16 = 256$  個のセルアレイを形成し、全体で一つのデバイスとして動作する。また、このデバイスは構造材料が透明であるため、ガラス基板上に作成すれば、光センシングデバイスとの積層化が容易である。そこで、本研究では、このデバイスを主に、センサデバイスとの集積化の実現、及びセンサ・アクチュエータ・フィードバック制御の実証的研究の観点から、使用する。

得られた成果は以下の通りである。

#### 研究項目1:アクチュエータアレイデバイスの製作

1. アクチュエータアレイ作製高歩留まりプロセスの確立
2. アクチュエータの故障を電氣的に検出し、信頼性を加速検査する手法の考案ならびに検証
3. 2次元カンチレバー・アクチュエータアレイの作製

#### 研究項目2:アレイデバイスの分散制御法

4. 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実証
5. 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の実証

#### 研究項目3:回路チップとの信号接続法

6. 高電圧制御回路の集積化によるアクチュエータアレイ高機能化必要性の明確化

## (2) 成果詳細

### 研究項目1:アクチュエータアレイデバイスの製作

#### ① アクチュエータアレイ作製高歩留まりプロセスの確立

ファウンドリによる量産のためのデバイス作製プロセスを確立し、同研究室で先行試作したエアフローアクチュエータデバイスを用い、これに対してトップダウン方式による制御を行い、あらかじめ指定した位置に物体を搬送する実験を行った。アレイ化したアクチュエータの協調動作によって、物体搬送というシステム全体の機能を実現できることが分かった。

(1) 深掘り反応性エッチング (Deep-RIE) によって表からノズル穴、裏からアクチュエータ形状を加工する両面加工、(2) 熱酸化とエッチングを繰り返すことによる構造幅の精密制御、(3) 手製の簡便なプロセス装置を用いた気体フッ酸による高信頼性リリース法を開発したことにより、560 個のマイクロアクチュエータからなる 35mm×35mm のアクチュエータアレイを、欠陥無く作製することができるようになった。Fig. 1 に二次元搬送デバイスの製作プロセスを示す。まず、上部基板によって気流用スルーホールを製作し、次に下部基板によって、マイクロアクチュエータを構成する。その後、アクチュエータの駆動電圧を小さくするため、サスペンションのバネ定数を低下させるプロセスを行なう。熱酸化プロセスにより層を形成し、その層を除去することで、サスペンション幅を減少させ、バネ定数の低下を実現した。次にマイクロアクチュエータのリリースを行うが、ここで、我々が開発したフッ酸蒸気を用いる犠牲層エッチング法 (HF 蒸気エッチング法) を適用することで、従来発生していた構造貼り付き問題を回避することが可能となり、ほぼ 100% の歩留まりでマイクロアクチュエータ製作することが可能となった。

560 個のアクチュエータは全て同一形状をしているが、2 種類の異なる方向を向いている。すなわち、東西方向にエアーを吹き出すアクチュエータと、南北方向にエアーを吹き出すアクチュエータである。Fig. 2 に示すように、駆動電圧を供給するための配線パッドはアレイ外周部にあり、ワイヤボンディングでピッチ変換基板に接続し、120V までの電圧を独立に on/off できるスイッチング IC ボードに接続している。スイッチング IC ボードはパーソナルコンピュータに接続して制御した。アクチュエータの動作電圧は 110V 前後である。

Fig. 3 に本研究で用いるアクチュエータの構造の概略および動作原理を示す。本アクチュエータは層の構造により構成され、いずれもシリコン基板をバルクマイクロマシニングによって加工することにより製作された構造である。図に示される通り、上部基板には気流のためのスルーホールが形成され、下部基板には、マイクロアクチュエータ (可動部、サスペンション及び静電引力のための電極) が形成されている。図に示すように、可動部を左側に移動させることにより、下部基板の右側貫通孔と上部基板の貫通孔によって左方向のノズルが構成され、斜め方向の気流を発生させることができる。

今回作製したアクチュエータの構造及び製作したアクチュエータの電子顕微鏡写真を Fig. 4 に示す。基本構造の大きさは約 1 mm 角であり、右方向気流用と左方向気流用のノズル (大きさ 150  $\mu\text{m}$  × 100  $\mu\text{m}$ ) を持つ。図に示される通り、貫通孔を持つ中央の構造が可動部であり、弾性支持梁によって支持されている。可動部の左右にある電極は上側の基板に固定されている。可動部の駆動は、可動部・電極間の静電引力により行なう。可動部と電極の接触によるショートを防ぐためにストッパーが設けられており、

このストッパーによって可動部は電極に接触する前に停止する。この仕組みにより、可動部の貫通孔を左右に移動させることで、Fig. 3 の動作原理による二方向の気流制御を実現した。

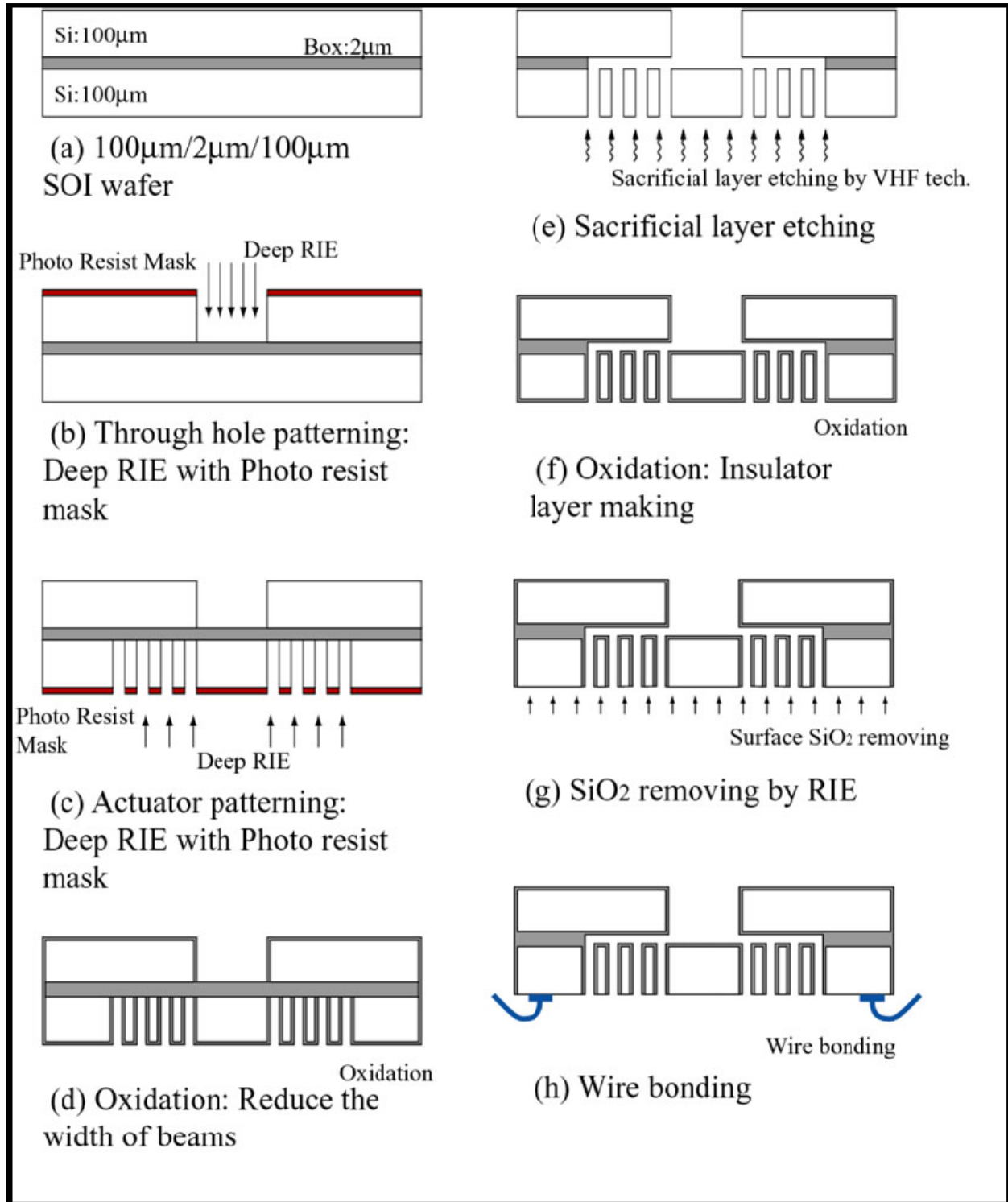


Fig. 1 マイクロアクチュエータの製作プロセス

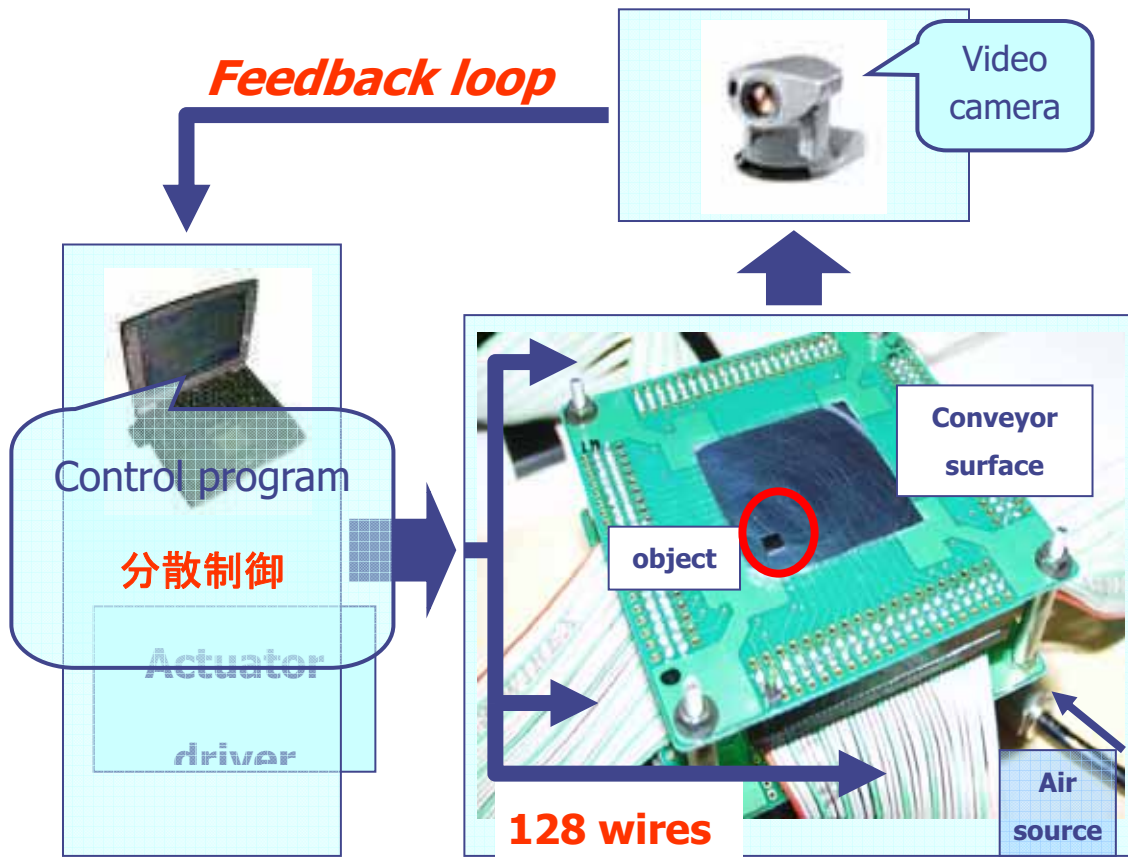


Fig. 2 デバイスの外観と制御系

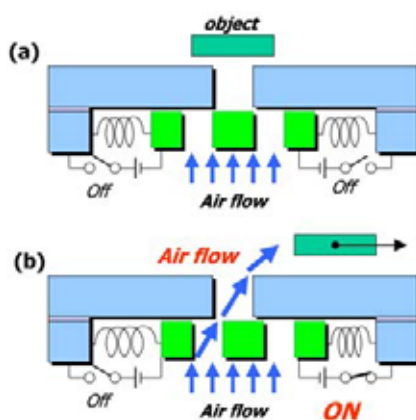


Fig. 3 気流による物体搬送原理

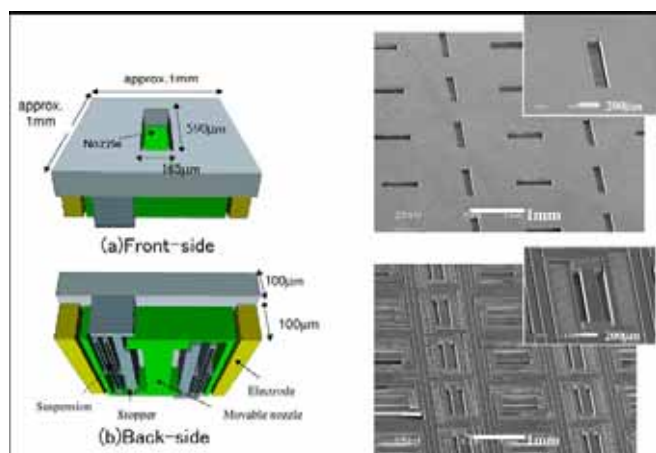


Fig. 4 搬送システムの構造および写真

次に、Fig. 5 のように、搬送指定位置に向けて気流が収束するように全てのエアバルブの向きをあらかじめセットしておく、オープンループによる制御によって、大きさ  $3.1\text{mm} \times 3.1\text{mm}$ 、質量  $2\text{mg}$  のシリコンチップの搬送実験を行った。リリースされたアクチュエータ上の物体は、気流の方向に沿って速やかに移動を開始し、途中で移動方向を  $90$  度変化し、 $2$  秒後目標位置に到達した。すなわち、アレイ化したアクチュエータの協調動作によって、物体搬送というシステム全体の機能を実現できた。

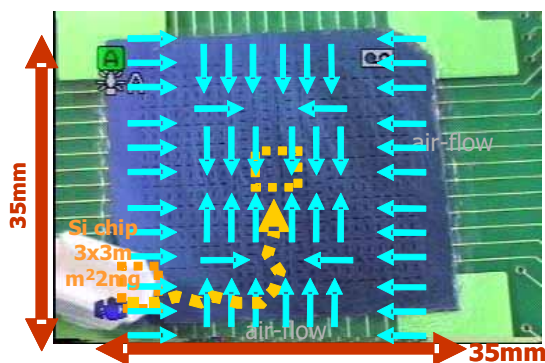


Fig. 5 オープンループ搬送のための気流分布

しかし、先端的研究室において開発した高歩留まりプロセスをファウンドリに委託作製する際のテクノロジトランスファに関しては以下のような問題が明らかとなった。

Deep-RIE 試作能力を持つファウンドリ国内メーカー 3 社と個別にヒアリングを行い、技術内容について討論し、一社に絞り 17 年 5 月に作製委託した。大規模集積回路の試作ファウンドリと違い MEMS アクチュエータ試作はプロセス手順が固定しないことから、同一のプロセスを必ずしも全ての会社で行えるわけではないことがわかり、同研究室で開発した作製プロセスをテクノロジトランスファできるかどうか会社が会社選択の決め手となることが明らかになった。

プロセスのためのフォトマスクは東京大学大規模集積システム設計教育研究センターの全国公開電子線描画装置によって作製し現物支給した。7 月にマスク欠陥を指摘され再度試作・送付した後、ファウンドリによる試作が開始されたが第一試作結果のデバイス納品が平成 18 年 2 月末と、大幅に遅延をきたしたので、待ち期間に成果(6)に記した高電圧制御回路との集積化というテーマを進めるため、並行して東京大学武田先端知スーパークリーンルームにおいても追試作環境を整え、サンプルを作製した。ファウンドリより受領した一次試作の写真を Fig. 6 に示す。デバイスをテストしたところ、動作電圧  $100\text{V}$  付近前後で動作をはじめ、共振周波数は  $360\text{Hz}$  付近が確認された。動作特性そのものは大変良好であり、多くのデバイスチップを利用する用途にとってファウンドリにプロセステクノロジをトランスファし、量産する方法は、大変有効であることが示された。しかしながら、製作遅延のためテクノロジトランスファには、結果として 8 ヶ月かかり、当初二度試作する計画であったのに対して、試作は一度のみの実行にとどまり、高電圧制御回路との集積化のための二次試作をファウンドリで行うことは出来なかった。

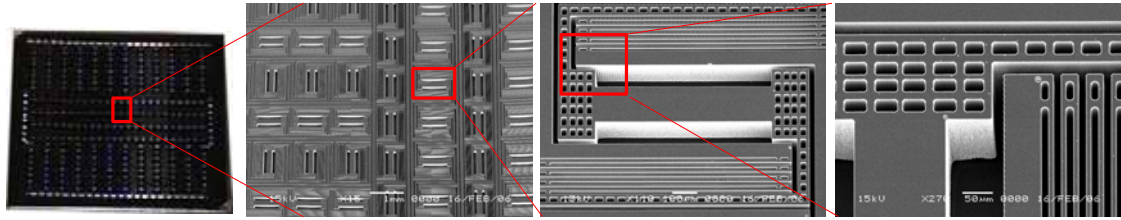


Fig. 6 ファウンドリで試作したエアフローアクチュエータデバイス

## ②アクチュエータの故障を電氣的に検出し、信頼性を加速検査する手法の考案ならびに検証

制御回路とアクチュエータが集積化されることによってはじめて実現可能となる高度な機能の例として、Smart Skin 自身に組み込む、制御用集積回路のマイクロアクチュエータによって自己診断を行い、アクチュエータが故障している箇所を避けながら物体搬送する機能の実現が考えられる。そのためには、アクチュエータが制御信号に従って動いているか、動いていないかを制御回路自身が検出する必要がある。制御回路の集積化を考えたときに最も望ましい動作/動作不良の検出手法は、何らかの電氣的な動作信号(working signature)を検出することである。静電駆動タイプのアクチュエータの動作を電氣的に検証する手法は、世界的にも研究例が少なく、(1)高周波を用いた静電容量の変化検出や(2)共振周波数の変化を測定する手法がわずかに報告されているに過ぎない。このうち、共振周波数の変化はアクチュエータが動作していることを仮定しているので本目的には馴染まないため、高周波による静電容量変化検出手法の採用を試みた。しかし1セグメントあたりアクチュエータが8つ並列接続されていることと、本アクチュエータ素子に内包される寄生容量成分が大きいため検出感度が非常に悪く、これら既存手法の壁を打破する新規手法の発明が望まれた。

本アレイ化マイクロアクチュエータの動作を詳細に考察したところ、一般に平行平板型と呼ばれるシステムのマイクロアクチュエータであり、この種のアクチュエータにおいては可動部の移動距離が極板間の初期距離の3分の1を超えた瞬間に、静電引力がばね抗力を常に上まることがから可動電極が対向電極に向けて加速されるという、「pull-in」と呼ばれる現象が存在することが良く知られている。実験に使用しているマイクロアクチュエータも、pull-in現象を活用してバルブの開閉を行っており、pull-in時には、キャパシタンスが急激に変化することに起因するラッシュ電流  $VdC/dt$  が生じることを見出した。従って、アクチュエータに流れる電流を計測するだけでアクチュエータの動作/非動作を計測できることが予測され、実験を行った。

Fig. 7に示すように、回路に直列に抵抗を接続し、両端の電位を計測したところ、予測通り静電アクチュエータのプルインに対応したスパイク状の電流が生じた(Fig. 9)。複数アクチュエータが同時にプルインをおこした場合は、ピーク電流の値が大きくなるが、1アクチュエータ・1プルインあたりの電流を積分し、電荷量の変化を計算すると、アクチュエータのキャパシタンスのプルイン前( $C_0$ )と後( $C_1$ )との変化による電荷量  $Q=V(C_0-C_1)$  となり、複数アクチュエータの同時動作の際電荷量は、プルインしたアクチュエータの個数に比例して2倍、3倍となることが確認できた。

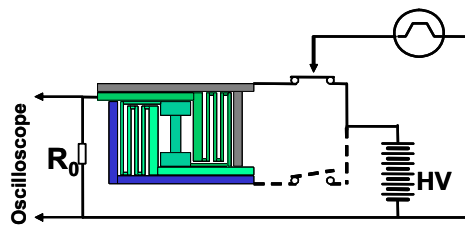
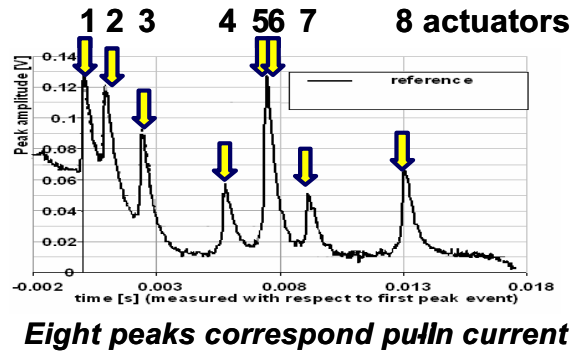


Fig. 7 測定用回路



Eight peaks correspond pulln current

Fig. 8 駆動電流の周波数特性

### ③ 2次元カンチレバー・アクチュエータアレイの作製

Fig. 9 にカンチレバー・アクチュエータアレイによる搬送原理を示す。図のように互いに向き合った一対のカンチレバーが一つのセルを構成し、これが同一基板上に多数アレイ化されている。搬送動作は、各セルの左右のカンチレバーに互いに  $\pi/4$  だけ位相のずれた矩形信号を入力することによって実現され、カンチレバー先端と搬送物の接触点に生じる静止摩擦によって、カンチレバー先端の水平変位が搬送物の変位量に反映する。

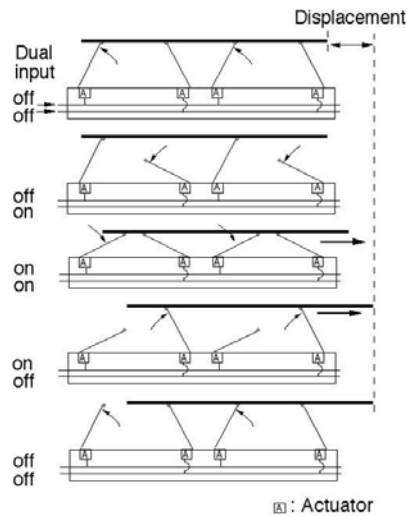


Fig. 9 カンチレバー・アクチュエータアレイの搬送原理

上記の搬送原理をもとに、これを二次元搬送に対応するように拡張したのが、Fig. 10 に示すデザインである。同図には、作製プロセスチャートも示してある。



カンチレバーの構造材料には、成膜が容易であり、耐熱性・絶縁性に優れ、かつ、機械的に柔らかい材料である、ポリイミドをもちいた。二種類の熱膨張率の異なるポリイミドを層状に重ね、それらの中にヒーターとなる金属薄膜を形成することにより、外部からの通電加熱によって、熱駆動型のアクチュエータとして機能する。

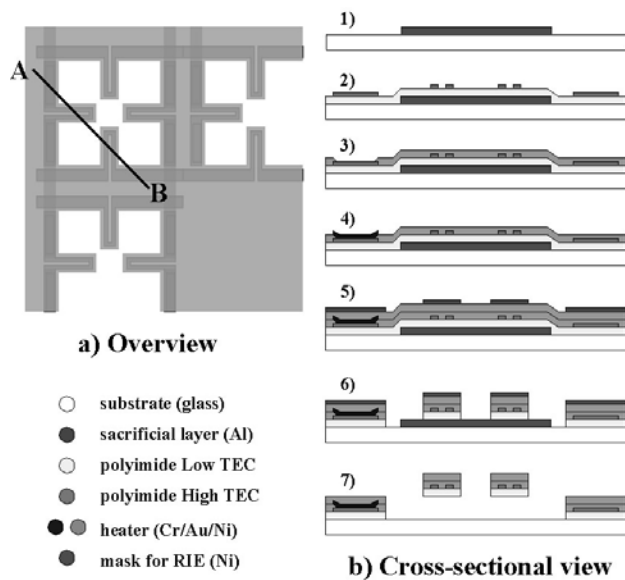


Fig. 10 カンチレバー・アクチュエータアレイのデザインとプロセス図

Fig. 11a が完成したデバイスの全体図、13b が一つのセルの拡大図である。デバイスは、1.5mm ピッチの 16 x 16 セルアレイから構成されており、一つのセル内に、500um 長、100um 幅のカンチレバー・アクチュエータが集積化されている。

上記の搬送原理図に示すパターンを組み合わせることによって、東西南北方向だけでなく、斜め方向の搬送動作も確認された。

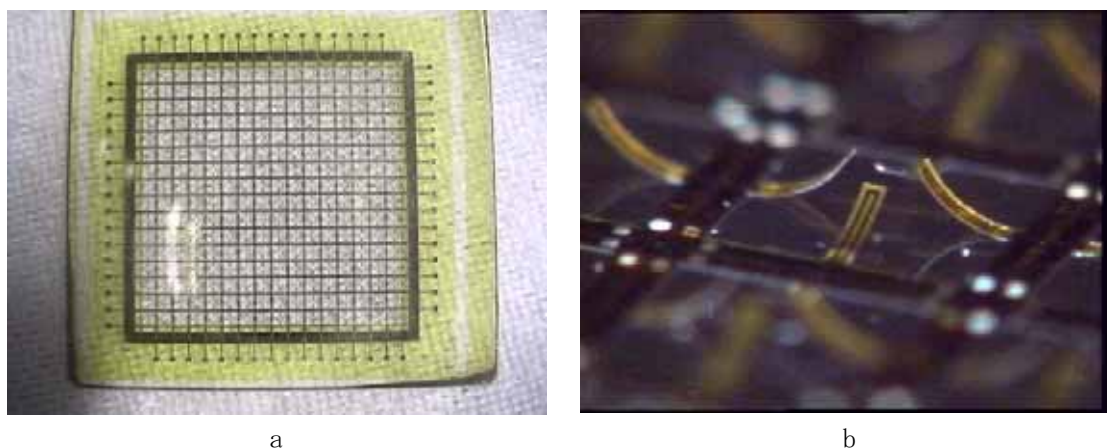


Fig. 11 カンチレバー・アクチュエータアレイの全体図とセルの拡大図

#### ④ 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実証

Fig. 5 に示した実験では、全てのアクチュエータノズルから気流は定められた方向に連続的に吹き出している。アレイデバイスの分散制御手法検討の一環として第二に、システムに取り付けたカメラによって物体の位置を観察しながらエアバルブを開閉し搬送制御を行うことを試みた。センサよりの信号を分散処理し、搬送物体のエッジ位置を検出して、エッジ部分のアクチュエータのみを選択的に駆動することで、物体の一旦のみを押しながらステップングモーター動作のように、物体を一定距離搬送して停止させる動作を実現した。

本研究では、分散センサおよび分散プロセッサの機能をエミュレートしたシステムを用いている。この搬送システムに形状認識プログラムを適用して、搬送物体の形状によるマイクロマシンアレイ搬送装置の搬送方向の制御を行なった。エアフローを用いた搬送システムにとって、搬送物体のエッジにエアフローを印加することは有効な手段である。また、搬送物体のエッジを検出し、エッジ部に相当するアクチュエータのみを駆動してエアフローを印加するのは、完全にローカルで実現可能な処理である。そこで、分散した情報を分散センサや分散プロセッサによって取り扱い、その結果として対応するアクチュエータを局所的に駆動させるという搬送実験を行なった。

まず、分散センサとプロセッサを用いたエッジ検出方法について説明する。その概要を以下に示す。まず、各セルが、自セルの画像センサの入力を判断する。この場合、最も単純に、自セル上の物体の有無を判断する。次に、セルが隣接する4つのセルと物体有無の情報の交換し、自分自身が物体のエッジ部に相当するかどうかの判断を行なう。物体のエッジに相当するセルは、アクチュエータに駆動命令を出して、エアフローを生成する。その結果、搬送物体エッジ部の下部に位置するアクチュエータのみが駆動し、エアフローを効率よく印加できる。一連の処理によるエッジ検出の仕組みを Fig. 12 に示す。

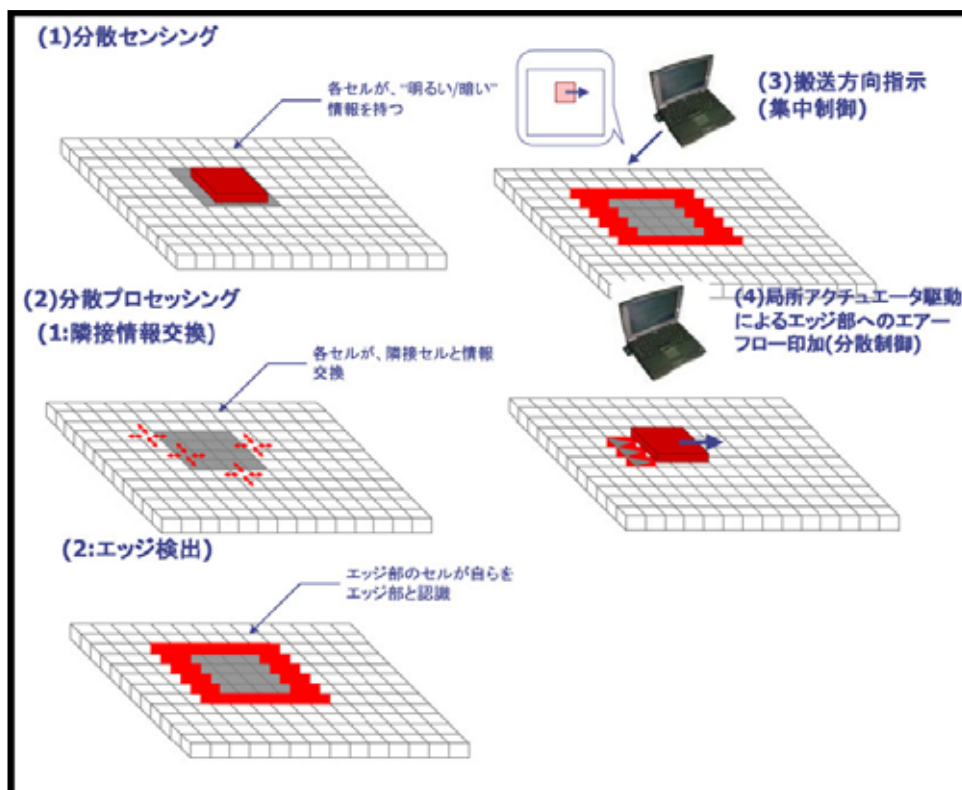


Fig. 12 各セル分散処理による搬送物体の端部の検出とエッジ部気流印加による搬送

この方法に従い、物体を搬送することに成功した。Fig. 13 に、物体が搬送面中央付近から右辺方向へ搬送される様子を示す。このときの搬送は、エアフローが搬送物体エッジに印加された瞬間に、隣接する横方向アクチュエータまでの距離（この場合、約 2mm）を移動するようなステップ駆動が実現された。ここでは、アクチュエータの駆動周波数を約 1Hz としているため、本搬送では、約 1 秒ごとに約 2mm 搬送される。このステップを繰り返して、搬送を実現した。

本実験の場合、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なっている。エッジの検出には、仮想分散センサ（ビデオカメラ）で得た画像データをセル単位に展開し、隣接セルと比較を行なうという、分散処理により物体エッジの検出を行なっている。さらに、その出力に基づき、エッジに相当する場所にあるアクチュエータのみ駆動させ、エッジ部分に効率的にエアフローを印加している。すなわち、情報の取得、処理およびアクチュエータの駆動という一連の流れを分散システムで局所的に実現したことになる。これにより、分散システムに集中システムを併用した制御方式が実現された。

今後の展開として、物体搬送中に、物体の両側のエッジを検出し両エッジへ高速で局所的なエアフローを印加することで、物体搬送中の位置誤差の即時補正を行なうという、搬送中の姿勢制御が考えられる。なお、このような場合は物体の動特性に合わせて、十分早い周期でフィードバック制御を行うことが必要である。分散制御では、情報の処理を居所的にできるため、集中処理に比べて制御周期を高速にすることが容易であり、スマートスキン概念が効果的な事例となる。

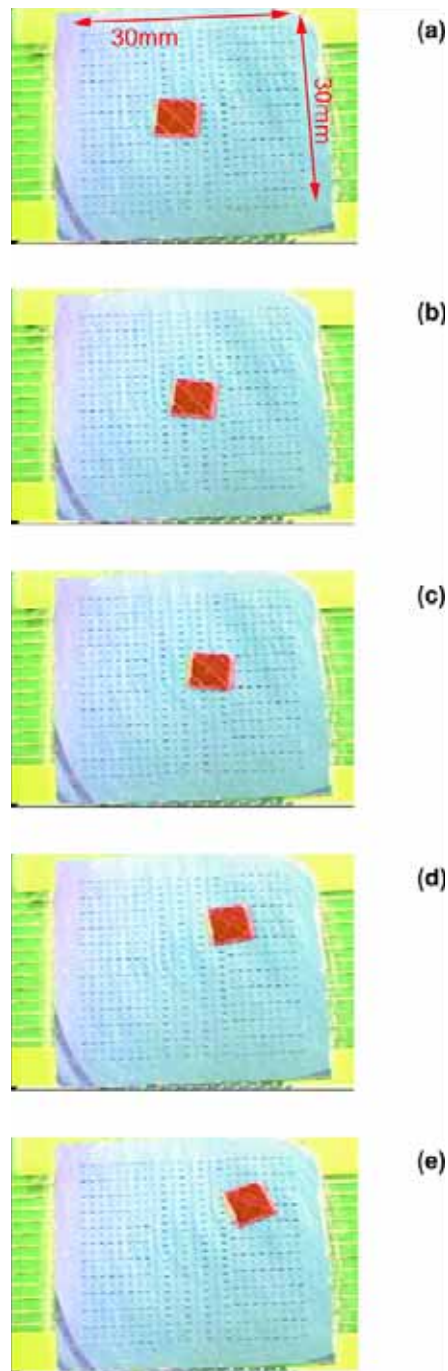


Fig. 13 各セル分散処理による物体搬送（横方向）：  
 (a) 検出されたエッジ部に、エアフローが印加される。(b) 図右辺方向へ、隣接の横方向アクチュエータのある位置まで搬送される（このとき、ステップ幅は約2mm）。(c)～(e) 同様のステップが繰り返され、図右辺方向へ搬送される。

#### ⑤ 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の実証

作製したデバイスは、Fig. 11に見られるように、ガラス基板上につくられているため、光に対して透明である。そこで、このデバイスと同じセル構造、同じピッチを持つ、フォトダイオードアレイと積層

化することによって、デバイス上の搬送物を光の遮蔽によって検出する、擬似的なセンサ・アクチュエータアレイを簡単に実現できる。

Fig. 14a は、この目的で使用したフォトダイオードアレイである（浜松ホトニクス(株)製 S3805）。アクチュエータアレイデバイスは、パッケージ基板に装着しワイヤボンディングを施すことによってコネクタ接続を可能にした後、フォトダイオードアレイ上に、両者のセルが一致するように搭載される。Fig. 14b は、フォトダイオードアレイ上に実際に搭載したアクチュエータアレイである。Fig. 14c には、このシステムの一部を拡大した写真を示す。アクチュエータアレイの透明基板をとおして、センサデバイスの配線部を見ることができる。

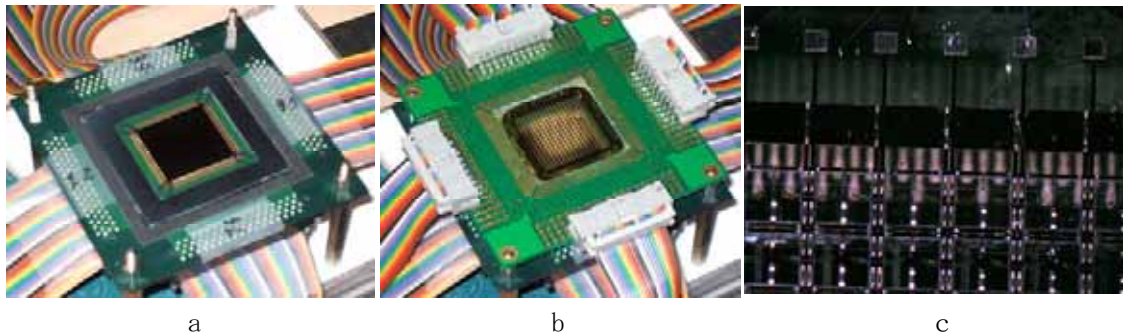


Fig. 14 カンチレバー・アクチュエータアレイの全体図とセルの拡大図

次に、このセンサ・アクチュエータアレイを FPGA によってコントロールする、フィードバックシステムを構築した。Fig. 15 に、このシステムのブロックダイアグラムを示す。

光照射によってアクチュエータアレイ上の搬送物の影がフォトダイオードアレイによって検出され、その各セルからの信号は、別途試作したドライバ回路によって、8ビットごとに32本のシリアル信号としてFPGAにおくられる。この信号をもとに、FPGAで信号処理を行い、駆動信号が駆動回路（トランジスタアレイ）に送られることによって、外部電源からの電流が所望のセルに供給される。ただし、今回作製したアクチュエータデバイスは、隣り合うセルの同じ位置にあるアクチュエータが直列に接続されている（例えば、任意のセルの北側にあるアクチュエータは、その両隣のセルの北側のアクチュエータと直列に接続されている）ため、それぞれのセル内が独立して動作するわけではなく、デバイスの端部に配置された、 $16 \times 4$ （16個の直列接続された駆動配線  $\times$  東西南北）の駆動パッドに送られる電流によって、16個のアクチュエータが一斉に動作する。

FPGA での制御は、研究の進捗状況にしたがって、次の3段階を想定した。

- 1) 駆動方向はFPGAに外部接続したジョイスティックによって行う。この場合、駆動されるのは、センサアレイからの信号が反応したセル（つまり、搬送物が上部にのっているセル）を含む駆動パッドだけになるように、フィードバック制御を行う。
- 2) 外部から搬送目標位置を指示し、任意の位置にある搬送物が目標位置にくるようにフィードバック制御を行う。
- 3) 2)の動作を、分散的手法によって行う。

このうち、実際に検証できたのは、1) だけであった。

Fig. 16 に 1) の駆動実験を行った際の搬送例を示す。図は、搬送実験中 10sec 間隔で撮られたスナップショットである。左側の図が、各時刻にセンサアレイによって取得された搬送物のイメージであり、右側はシステム全体を俯瞰する位置から撮られた CCD カメラのイメージである。各時刻間のアクチュエータによる搬送方向（ジョイスティックの指示方向）は、図左端に赤い矢印で示してある。時間を追うたびに、搬送物が駆動方向に向かって搬送されている様子がみてとれる。

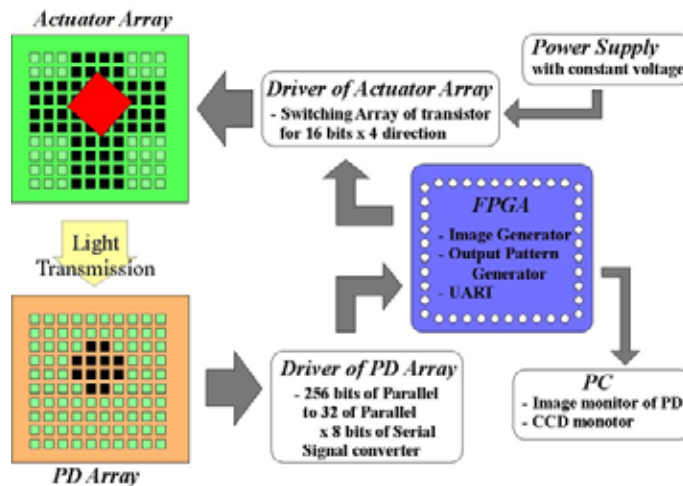


Fig. 15 センサ・アクチュエータアレイによるフィードバックシステムのブロックダイアグラム

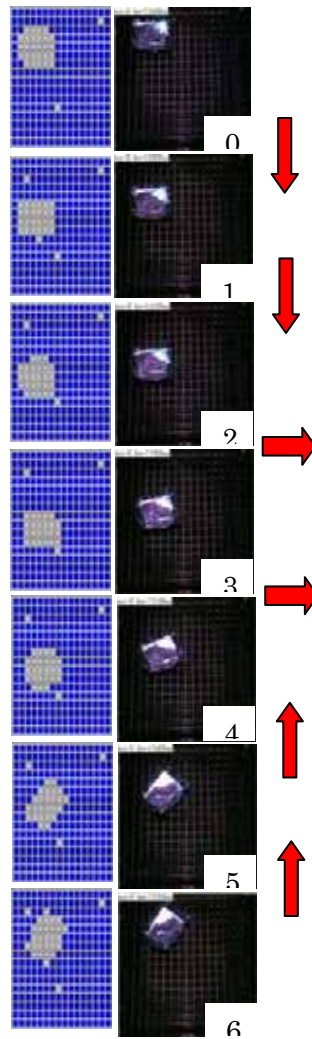


Fig. 16 センサ・アクチュエータアレイによるフィードバックシステムの搬送実験例

### 研究項目3:回路チップとの信号接続法

#### ⑥高電圧制御回路の集積化によるアクチュエータアレイ高機能化

本アクチュエータの構成では交差配線ができないことと、制御線を外部に引き出すことによる配線本数の物理的制約から、同一方向を向いている 8 個のアクチュエータをまとめてセグメントを構成し、560 個のアクチュエータアレイを 72 セグメントに分割して外周の制御電圧パッドから接続した。このことにより、エアフローに死角が生じ、搬送物体の位置によっては進めない領域が生じている。セグメントの単位を 8 個 1 単位から 4 個、2 個というようにファイングレイン化することで死角は解消するので、理想的には 560 個のアクチュエータを独立に制御することが望ましい。このためには、高電圧スイッチングのできる制御 IC ならびに、制御出力を一つ一つのアクチュエータに独立して接続する信号接続手法の重要性が浮き彫りになった。

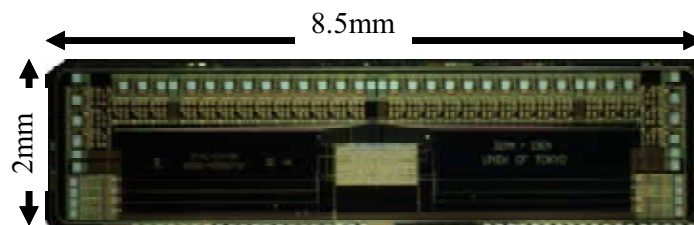
そこで、高電圧スイッチングのできる制御 IC を試作し、アクチュエータアレイデバイスに集積化する手法を検討した。スイッチング LSI としては、本研究室とフランス国 IEMN 研究所との共同研

究によって開発した、40MHz 動作のシフトレジスタを内蔵した 100V、32 チャンネル独立制御を行なう ASIC を用いる。アクチュエータのバルブは二方向に動くので、1 つの LSI で 16 区画を制御でき、アクチュエータに搭載する LSI の数を増やすことでグラニューラリティを向上できる。LSI の大きさは凡そ 2.1mm×8.5mm である。Fig.17 にチップの外観と 1 チャンネル分の回路図を示す。制御信号はシフトレジスタによりシリアル伝送する。シフトレジスタは 40MHz までの周波数で動くので、1 本のシリアル線によって 560 アクチュエータ全てを独立に制御したとしても一秒間に 7 万回状態を制御でき、これは十分大きな値である。

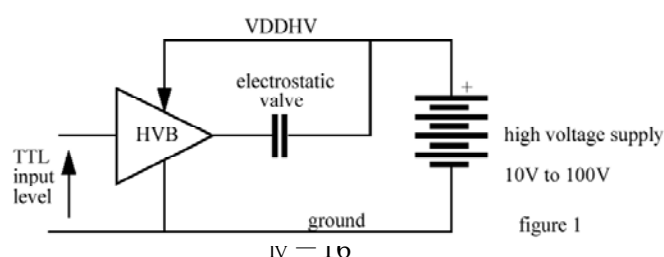
信号接続の手法として、(1)スイッチング LSI を MEMS チップ中にうめこむドロップイン集積化手法、(2)スイッチング LSI を MEMS チップと垂直に接合するスタック集積化手法を比較した。(1)方式では、LSI が占める部分にアクチュエータを設置できないため、搬送に寄与できない「盲点」ができることが弱点である。(2)方式はグラニューラリティを高くできる上、搬送盲点もなく望ましいが、エアフローアクチュエータにおいては加圧空気が必要なため、電氣的接続とチップの機械的固定強度を確保した上に空気流路を設けるための仕組（インターポーザー等）が必要となり、システムの作製難度が高い。搬送盲点に物体が滞留しないよう近傍の空気流を調整することが可能と考えられることと、作製手法がシンプルであるという利点から、方式(1)を軸に検討試作を行った。

アクチュエータアレイデバイスのうち、裏面のアクチュエータ構造のみブロック分を実装した 10mm×10mm のチップを作製した。その中央部分に、制御 IC を落とし込むくぼみを Deep-RIE で加工した (Fig. 18 (a))。そのくぼみに Fig. 17 に示した高電圧制御 IC を挿入し、さらにワイヤーボンディングで電氣的接続を行った (Fig. 18 (c))。その結果、Fig. 18 (d)の模式図に示すようなアクチュエータアレイと制御 IC を集積化したデバイスを作ることが出来た。

なお今後の課題であるが、現状のシステムは一つ一つのセグメントを PC からの出力で全て管理しているので、PC からスイッチングボードへのデータ転送バンド幅がボトルネックとなり、アクチュエータの制御可能周波数に対して 2 桁から 3 桁低い周波数で制御信号を切り替えている。このため、望みの位置をオーバーシュートするなどの問題が出ている。この状態を生体に例えると、「大脳」にあたる PC が、末端の筋肉全てを制御しようとしている状況であるから、効率が悪い。この問題を解決するためには、大脳と筋肉との間に、運動の細かい制御をつかさどる、「小脳」に相当する回路を組み込んで、大脳(PC 等)⇔小脳(組み込み制御 IC)⇔筋肉(アクチュエータ)のようなシステムが必要であると考えられる。



(a)



(b)



Fig. 17 高電圧制御 I Cチップ (a) 外観写真、 (b) 1 チャンネル分の回路図

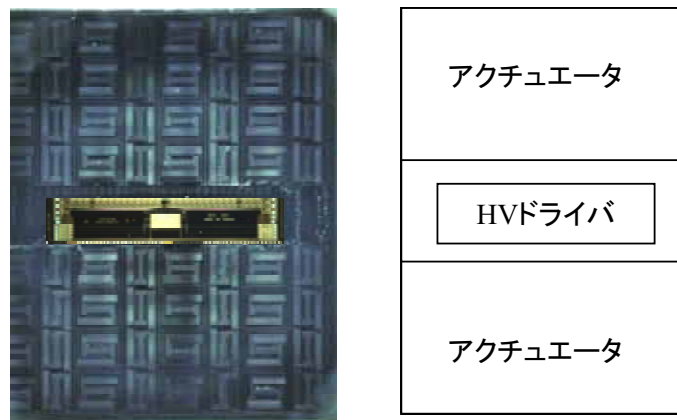
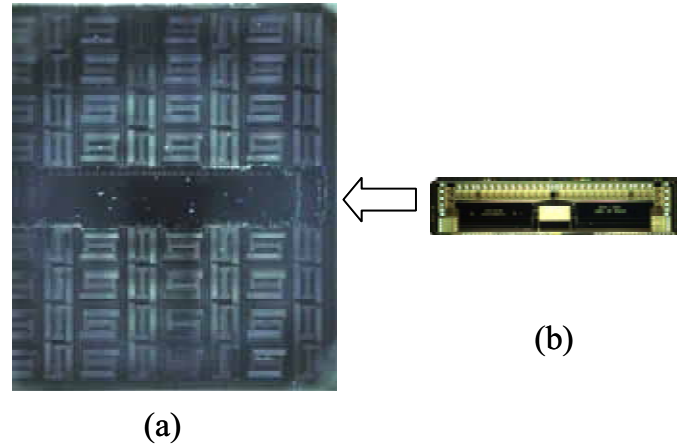


Fig. 18 ダイドロップイン集積化による、アクチュエータアレイデバイスと高電圧制御 I Cの一体化 (a) アクチュエータアレイデバイス、(b) 高電圧制御 I C、(c) ダイドロップイン集積化、(d) 集積化チップの模式図

### (3) 成果の意義

本成果は、スマートスキン概念に基づいた新たな技術領域を開拓するため、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、その分散型制御方式、および制御用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ものである。この成果に関しては、MEMS 関連の国際会議として世界で最高の水準にある IEEE MEMS 国際会議で 2005 年と 2007 年（発表予定）の 2 回に渡って口頭発表論文に選ばれており、成果の新規性と独創性が世界に認められている

（注：2005 年の MEMS 国際会議においては 750 件の投稿の中から僅か 41 件のみが口頭発表論文に選ばれた）。2006 年度から NEDO の事業として「高集積・複合 MEMS 製造技術開発プロジェクト」が開始され、その一部として MEMS と MEMS の集積化、および MEMS と回路の集積化の技術が研究

対象に挙げられている。本成果は、MEMS アレイを歩留まりよく製作する技術が前者と関連し、制御用集積回路との信号接続方法は後者と深く関連する。すなわち、このプロジェクトの先駆となる成果である点で大きな意義がある。

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として汎用性がある。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）、壁面で検出した温度・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 応用と、新産業への展開が期待できる。

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。上記のように、投入された予算に見合った成果が得られている。

#### (4) 特許の取得

本研究の重要な目的の一つは、我々が開発した高歩留まりプロセスをファンドリーにテクノロジトランスファすることであり、これについては研究開始前に論文として発表済みである。また、制御方式についても既に概念を発表済みであり、特許性が乏しく出願はしていない。今後、スマートスキンの概念を用いた応用システムが実用化に近く発展した時点で、特許の申請につながる可能性がある。

#### (5) 成果の普及

前述したようにこの成果に関しては、MEMS 関連の国際会議として世界で最高水準にある IEEE MEMS 国際会議で 2005 年と 2007 年（発表予定）の 2 年連続で口頭発表論文に選ばれており、世界の第一線の研究者に対して、その新規性と独創性を十分にアピールしている。さらに、学術誌にも既に論文が 1 編掲載されており、他の国際会議に 3 編の発表がある。論文の発表は、質・量ともに十分である。また、国際ナノテクノロジー総合展においても、ポスター展示を行い企業の研究者や一般市民への普及に努めた。

また本研究の過程で、我々が開発した高歩留まりマイクロマシーニングプロセスをファウンドリーにテクノロジトランスファすることができた。ファウンドリーを通じて先進のプロセスが広く一般の企業に利用可能とすることで成果を広く普及した。