

触覚ディスプレイ用マイクロアクチュエータの研究

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

佐々木 光

目次

第1章	序論	
1.1	触覚ディスプレイ	・・・1
1.2	MEMS アクチュエータの現状と課題	・・・4
第2章	触覚表示デバイス用マイクロアクチュエータアレイ	
2.1	システムの構成	・・・9
2.2	マイクロアクチュエータアレイシステムの駆動原理	・・・11
2.3	本システムの仕様	・・・13
第3章	高アスペクト比微小突起加工技術	
3.1	アレイ状微小突起の構成	・・・15
3.2	ダイアフラムの変形	・・・16
3.3	作製プロセス	・・・18
3.4	ウェットエッチングによる突起部作製	
3.4.1	シリコン単結晶の異方性エッチングのアンダーカット現象	・・・23
3.4.2	突起作製の各種条件	・・・26
3.4.3	エッチングレートダイアグラムの影響	・・・27
3.4.4	マスク形状の影響	・・・29
3.4.5	シリコンウェハ結晶方向の影響	・・・31
3.4.6	エッチャント濃度の影響	・・・32
3.4.7	ウェットエッチングによる突起部作製のまとめ	・・・35
3.5	アレイ状微小突起の作製	・・・36

第4章	高出力アクチュエータの高密度化	
4.1	アレイ状クラッチ機構による高密度化	・・・37
4.2	チューリップ型静電マイクロアクチュエータ	
4.2.1	静電マイクロアクチュエータ	・・・39
4.2.2	曲線型駆動電極をもつ静電マイクロアクチュエータ	・・・41
4.2.3	チューリップ型静電マイクロアクチュエータと作製プロセス	・・・45
4.2.4	動作確認	・・・48
4.2.5	チューリップ型静電マイクロアクチュエータの強度評価	・・・53
第5章	ディスプレイ用アクチュエータシステムの試作	
5.1	ミリサイズアクチュエータ	
5.1.1	設計	・・・57
5.1.2	ミリサイズアクチュエータの動作確認	・・・61
5.2	ディスプレイシステムの実装	・・・62
5.3	突起保持機構	
5.3.1	背景と駆動原理	・・・65
5.3.2	突起保持機構の作製	・・・67
5.3.3	動作確認	・・・70
5.3.4	実装と今後の課題	・・・72
第6章	触覚表示デバイス用アクチュエータの機能評価	
6.1	実験方法	・・・73
6.2	結果と検討	・・・74
第7章	結論	・・・77

謝辞	・ ・ ・ 83
参考文献	・ ・ ・ 85
付録	・ ・ ・ 91

第 1 章 序論

1.1 触覚ディスプレイ

近年、情報通信網の発達により、ユーザーインターフェースとして様々な装置が開発されている。特に、コンピュータから人間に情報を伝えるインターフェースには、人間の視覚や聴覚が用いられる。視覚で情報を伝達する手段としては、ディスプレイモニタ、聴覚で情報を伝達するにはスピーカーといった装置が使用されている。しかしながら、コンピュータのさらなる大衆化、快適性や利便性の向上を目的として、近年では触覚を利用したユーザーインターフェースの研究が盛んになってきている[1-6]。人の触覚に情報を伝達するには主に指先の触覚刺激を提示する触覚表示ディスプレイが必要となる。なお上記以外に触覚表示デバイスは視覚障害者用点字情報の伝達、対象物のテクスチャ表示などへの応用も考えられている。

人に触覚を伝達する最も簡単な方法として、アレイ状に並んだ微小な突起を個別に上下に駆動して皮膚にある感覚器を刺激する方法がある。

人間の皮膚には触覚の受容器にある感覚器として、メルケル細胞、マイスナー小体、ルフィニ終末、パチニ小体などの神経細胞がある[7]。これらの細胞は外力による皮膚の変形を刺激として受け取り、触覚を人間に伝える。これらの細胞の刺激応答はその性質から 2 種類に分けられる。メルケル細胞、ルフィニ終末は刺激の始めと終わりにのみ応答する遅順応型 (Slowly Adapting : SA 型) で、マイスナー小体、パチニ小体は持続的な変形に反応する速順応型 (Fast Adapting : FA 型) である。従って FA 型に刺激を与えるには変形速度が速い必要があるが、皮膚の変形量は小さくて良い。逆に SA 型は皮膚の変形速度よりもある程度異常の皮膚の変形量が必要となる。現在、受容器の刺激応答性の違いに応じて、触覚ディスプレイは、FA 型を対象とするものと、SA 型を対象とするものの 2 種類が開発されている。FA 型を対象とする場合は皮膚に高速な変形を与えるため、圧電素子や静電気力 [8]、DC モータ [9]、弾性表面波 [10] などの高周波駆動が可能な駆動源が用いられ、SA 型を対象とする場合は大きな変位と大きな出力を実現するために、形状記憶合金 [11] や圧電素子

[12]などが用いられている。

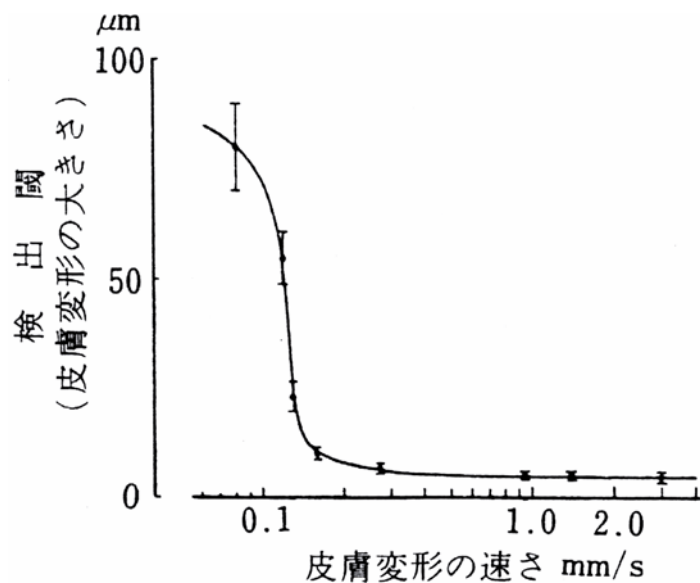


図1-1 皮膚の変形速度と皮膚が検知可能な変形の大さの関係 (Lindblom 1974)

空間分解能については受容器が 1~2 mm 間隔で存在するため、刺激を与える突起も同程度の間隔で並ぶ必要がある。FA 型の触覚ディスプレイで利用されている駆動源は大変位を必要としないことから表示素子を高密度化することが比較的容易であり、実際に研究、開発されている触覚ディスプレイデバイスも上記仕様を満たす装置が多く、また利便性の向上を目的とした装置の小型化もなされている。

一方、SA 型を対象とする触覚ディスプレイデバイスは、大きな変位と大きな出力を必要とする。そのため、FA 型を対象とする触覚ディスプレイデバイスで利用されている駆動源では実現が難しい。そこで、以下のような様々な方法によって SA 型を対象とする触覚ディスプレイは実現されている。

皮膚に刺激を与えるには、微小な突起を高出力、大変位で駆動して皮膚を変形させる必要がある。そこで、形状記憶合金の性質を利用した触覚表示ディスプレイデバイスが研究開発されている[22]。このデバイスはバネ状に加工した形状記憶合金と永久磁石の組み合わせで構成され、大きな出力と変位を得ている。さらに永久磁石は駆動した微小突起を保持する機能を有しており、電力を加えることなく、触覚の表示を保持することが出来る。し

かし、このデバイスは微小突起の上下駆動のためにバネ状に加工した形状記憶合金を複数配置せねばならず構造が非常に複雑である。したがって、微小突起のピッチが 2mm の 10×10、デバイス全体の大きさは 25 mm × 25 mm × 80 mm とかなり大きいデバイスとなってしまう。

また、小型化を目指すため、アレイ状に配置した形状記憶合金と単結晶シリコンのバイメタル構造アクチュエータを利用した盲人用触覚表示デバイスも開発されている[33]。このデバイスはバイメタル構造に電気配線を施し、電熱を加えることによって形状記憶合金を変形させて、アレイ状に並んだ微小突起を個別に駆動することが出来る。さらに熱を切ることによって形状記憶合金と単結晶シリコンの熱膨張係数の違いから、駆動前の状態に戻すことができるため、複雑な機械構造を必要としない。よって小型化に適しているが、変位が 30 μm とそれなりの大きさを得ることが出来るものの、出力が 4 mN 程度と非常に小さく、盲人用触覚表示デバイスとしての利用が困難であると考えられる。

さらに、出力の問題を解決するために、大きな出力を得ることが可能な圧電素子の力を利用した盲人用触覚表示デバイスも開発されている[23]。このデバイスは微小突起に 280kPa という大きな圧力を加えることができるが、圧電素子で大きな変位を得るには圧電素子自体の大きさを大きくする必要があり、結局、デバイス全体を大きくしなければならなくなる。さらに圧電素子をアレイ状に配置することは難しく、デバイスの作製に多大なコストがかかってしまう。

以上のように、これら SA 型を対象とする触覚ディスプレイシステムは、高出力、大変位を得ようとするため、必然的に機構が複雑になりデバイス全体が大きくなってしまっている。また、デバイスを小さくしようとするとう出力が小さくなってしまい、目的とするデバイスとしては不十分な仕様となってしまう。

そこで、この問題を解決するために、MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 技術を用いて作製されたマイクロアクチュエータをアレイ化してシステム全体を小型化し、微小突起を駆動する触覚ディスプレイシステムが提案されている [8-11]。次節では様々なマイクロアクチュエータの紹介とマイクロアクチュエータによる触覚表示デバイスの実現可能性を考える。

1.2 MEMSアクチュエータの現状と課題

アクチュエータとは、入力されたエネルギーを運動量に変換する機械システムの構成要素である。ここ十数年のマイクロマシニング技術の発展と共に、様々な動作原理をもつマイクロアクチュエータが研究・開発されてきている[13-18]。

ここでは、すでに具現化されている代表的なマイクロアクチュエータをその動作原理毎に分類したものを4種類紹介し、その問題点を挙げる。

(1) 静電マイクロアクチュエータ[19-20]

電荷間に働くクーロン力（静電気力）を駆動力に変換するアクチュエータである。古くから様々な静電アクチュエータが試作されてきたが、それらは高い駆動電圧、出力の微弱さを理由に機械的な駆動力として実用化されなかった。しかし、面積力である静電気力はアクチュエータが小型化され比表面積（表面積／体積）が増すにつれてその有効性は高まる。また、その基本的構成は対になった2枚の電極のみであるため、構造も比較的単純であり、微細加工に向いている。主にこの二つの特徴により、MEMS 開発においては静電マイクロアクチュエータが良く用いられる。

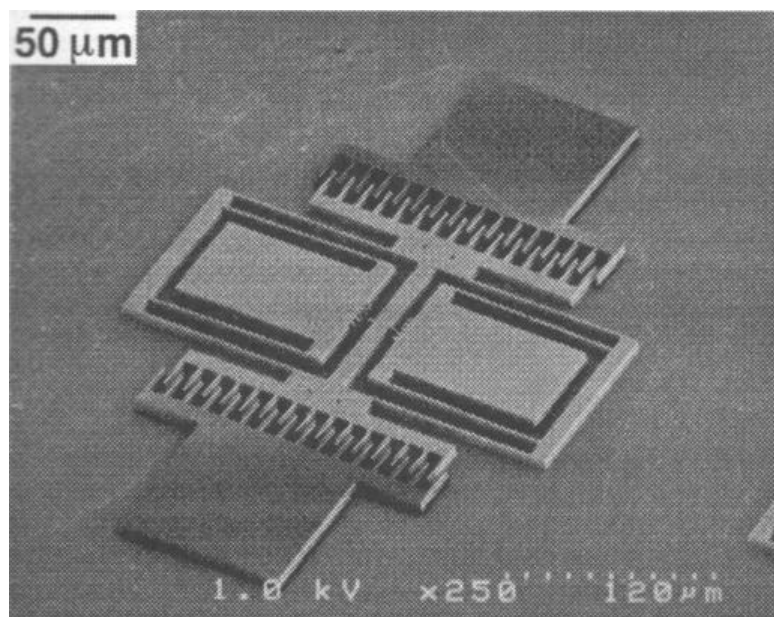


図1-2 櫛歯型静電マイクロアクチュエータ

(2) 電磁マイクロアクチュエータ [21-22]

このアクチュエータは構成に応じて何種類かに更に分類されるが、ここではうち代表的な二つの可動磁石型、可動コイル型について紹介する。

可動磁石型は電磁石と永久磁石から構成される。電磁石に電流を流すことにより永久磁石との間に発生する吸引力または反発力を発生させ永久磁石を駆動させる。

可動コイル型は磁界中のコイルに電流を流し、この時に生じるローレンツ力によりコイルを駆動する構造になっている。

静電アクチュエータに比べ、駆動電圧が低く出力が大きいことが利点として挙げられる。しかし、面積力である静電気力に対し、電磁力は体積力であるため、微小化に伴いその寸法の4乗に比例して出力が減少する。従って、電磁力が静電気力に比べ有利となるのはミリメートルオーダーまでとなる。

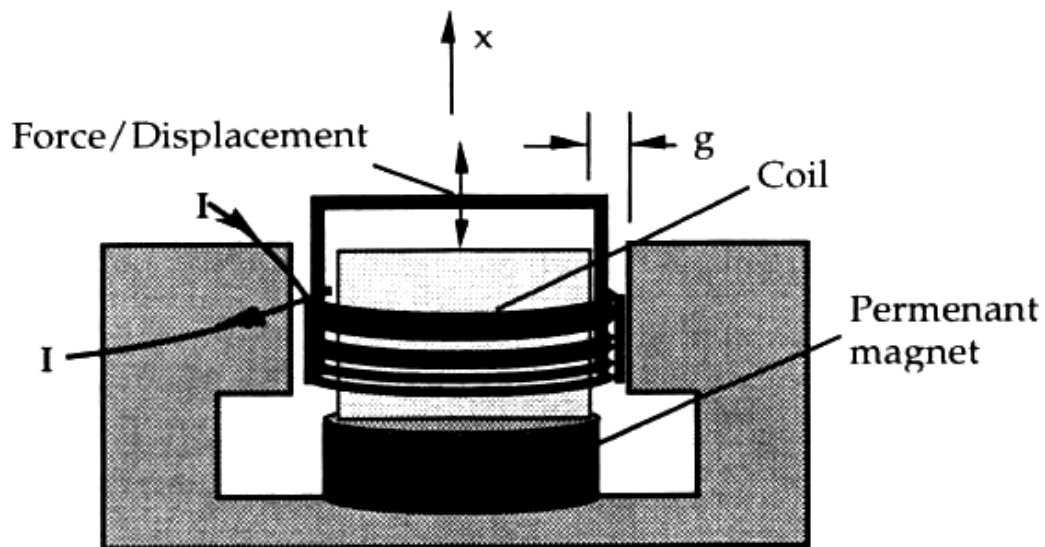


図1-3 電磁アクチュエータ

③ 圧電マイクロアクチュエータ [23-28]

圧電体に電界を印加すると圧電体自体が変形するという圧電効果を利用したアクチュエータである。大まかに直線変位型と屈曲変位型の二つに分かれ、圧電体の重ね合わせ方によりさらに、単板型、積層型、モノモルフ型、バイモルフ型などに分類される。(図1-4)

直線変位をとる積層型の変位、出力の特性は表1に示すとおりである。

この他に、圧電アクチュエータには長所として、1 nm までの高精度の微小変位制御が可能、短所として、駆動電圧が高い、という特性がある。

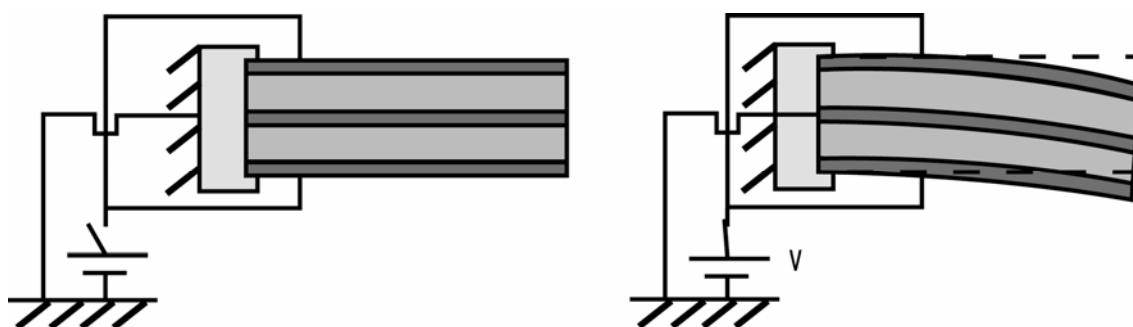


図1-4 圧電アクチュエータ

④熱マイクロアクチュエータ[29-33]

「熱アクチュエータ」という言葉は確立された専門用語ではなく、絶対的な定義もない。エネルギー供給源として、動作原理の一部に熱を利用していれば熱アクチュエータであるという広義の解釈がある。一方、熱による気体や液体の状態変化のみを動作原理とした、いわば熱機関のようなアクチュエータこそが熱アクチュエータである、という狭義の解釈もある。現在は電熱線に電流を流し、それにより発生する熱で気体や金属を膨張させ、出力を得る方法が主流である(図1-5)。また、熱アクチュエータの利点は、熱さえあれば、電気が使えない、電気を使いたくない所でも利用できる、という点である。生体内で用いるマイクロアクチュエータには、安全性の点から電気を使わないものが望まれるため、生体内で利用するという想定のもと開発されたの光熱駆動型マイクロアクチュエータという熱アクチュエータもある。

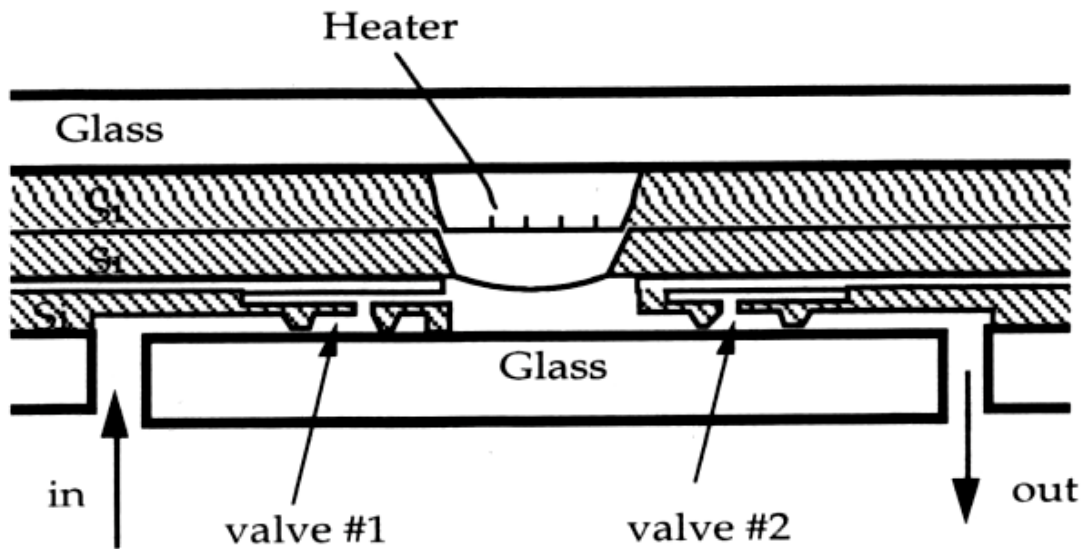


図1-5 熱駆動型マイクロアクチュエータ

これらのアクチュエータ以外にも、超磁歪アクチュエータ、水素吸蔵合金アクチュエータ、高分子アクチュエータなど将来的にマイクロ化が期待される要素が研究されている。各アクチュエータの直線運動をするものに限った出力・変位を表1に示す。

表1 各マイクロアクチュエータ(直線運動をとる機構)の出力および変位

分類	出力	変位	備考
静電型	×	◎	静電リニアアクチュエータ等
電磁型	△	○	ボイスコイル型等
圧電型	◎	×	積層型
熱型	△	△	熱膨張型

一般に、これらのマイクロアクチュエータは、変位と出力はトレードオフの関係にあり、変位を得ようとすれば出力が、出力を得ようとすれば変位が小さくなってしまふ。このことから、単にこれらマイクロアクチュエータをアレイ化することによって、高出力、大変位を必要とする触覚表示ディスプレイに適用させることは難しいといえる。

従って、触覚ディスプレイを実現するには応答速度、変位および空間分解能を考慮にいれた新たな駆動方式を決定する必要がある。よって、本研究では、今までにない、全く新しいコンセプトの駆動方法を提案する。

具体的には以下の通りである。

- (1) アクチュエータ全体で必要となる出力、及び変位を比較的小型な電磁モータで確保する
- (2) 電磁モータの出力を複数のマイクロアクチュエータを用いてアレイ状に配置した各微小突起表示部に分配する。

この方法は、マイクロアクチュエータを、動力を伝達するクラッチのように利用するため、マイクロアクチュエータ自身には大きな出力を必要としない。

本研究では上記コンセプトを実現する駆動機構を考案、作製し、SA型を対象とした触覚表示ディスプレイとしてのスペックを満たすことを確認した。本論文ではこの駆動機構を3つの部位に分け、各部位を章ごとに報告していく。最後に、本デバイスの欠点を補うためのさらなる機構を提案する。

第2章 触覚表示デバイス用マイクロアクチュエータアレイ

2.1 システムの構成

本章では、微小突起を新しい駆動原理で上下駆動する方法を提案する。前章で述べたように、マイクロアクチュエータのみでは、大きな出力、変位を得ることができない。そこで、出力、変位をミリサイズのアクチュエータ、例えば小型モーターなどの容易に大きな出力を得ることが出来るデバイス、で得ることとする。しかし、ミリサイズの大きなアクチュエータは、サイズが大きいため1～2 mmピッチでアレイ状に並ぶ微小突起に応じて配置することができない。そこで単一のミリサイズのアクチュエータの出力を多数の微小突起に個別に分配伝達するトランスミッタをマイクロアクチュエータにて構成した。このような二段階層構造にすることで、高出力、大変位を確保しつつ、1～2 mmピッチのアレイ状微小突起部を個別駆動することを可能にした。

図2-1に、本研究で提案するマイクロアクチュエータアレイシステムの構成を示す。本システムは大きく分けて3つのパーツで構成される。

(1) アレイ状微小突起

触覚ディスプレイ用の微小突起と、それを保持するダイアフラムとフレーム、微小突起の上下駆動に必要なメサ構造をもつ。メサ構造はダイアフラムを挟んで微小突起の下に配置され、クラッチの噛み合いの一部の役目をなす。

(2) クラッチ機構

マイクロアクチュエータをアレイ状に配置した動力伝達部である。マイクロアクチュエータはブロックを移動させ、クラッチの噛み合い状態を決定する。

(3) ミリサイズアクチュエータ

本システムの出力と変位を担うアクチュエータ。本研究ではミリサイズのステッピングモーターを利用する。

それぞれのパーツについては、次章から詳しく述べる。

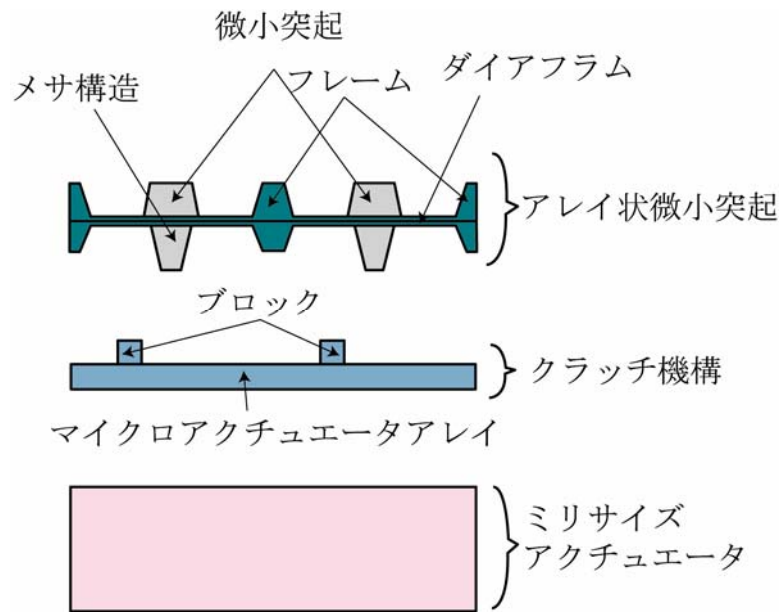


図2-1 マイクロアクチュエータアレイシステムの断面図

2.2 マイクロアクチュエータアレイシステムの駆動原理

図 2-2 に本システムの駆動原理を示す。

- (1) 図 2-2 (a) はシステムが駆動する前の初期状態である。
- (2) 駆動させたい微小突起 (図の場合は右から 2 番目) の裏面に配置したブロックを、アレイ状微小領域のメサ構造の真下にスライドさせる (図 2-2 (b))。
- (3) ミリサイズアクチュエータを駆動し、クラッチ機構全体を持ち上げる。すると、(2) でスライドさせたブロックがアレイ状微小突起のメサ構造と接触し、結果、微小突起を持ち上げることが出来る (図 2-2 (c))。その他の微小突起は、下に配置したメサ構造がブロックと噛み合わないため、持ち上げられない。

上記のように、任意の微小突起を個別に駆動することができる。

本システムの利点として次のようなものが挙げられる。

- (1) マイクロアクチュエータはブロックをスライドさせることにのみ利用されるため、大きな出力を必要としない。
- (2) システムの出力と変位はミリサイズアクチュエータにのみ依存するため、ミリサイズアクチュエータを交換することで、用途に応じて出力と変位を用意に変更できる。さらに大きな出力と変位を期待できる。また、ミリサイズアクチュエータにステッピングモータを利用すれば、駆動速度を自由に変えることが出来る。
- (3) 固体接触にて動力を伝達するため、スリッピングのような出力損失がない。
- (4) アレイ状微小突起とクラッチ機構はフォトリソグラフィ技術やマイクロマシニング技術などの MEMS 技術を利用して作製するため、微小突起のピッチ間隔を小さくし、システム全体の小型化ができる。

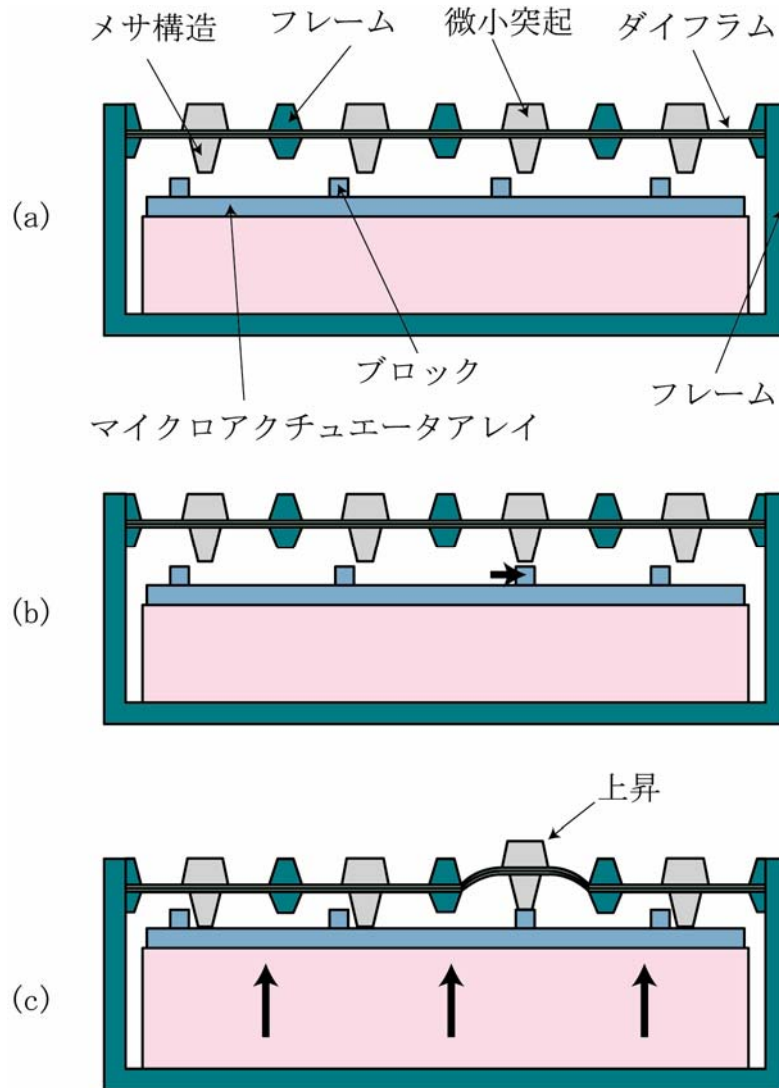


図2-2 デバイスの駆動原理

2.3 本システムの仕様

人の皮膚の受容器に刺激を与えるためには、微小突起を上下に駆動して皮膚を持ち上げ、変形させる必要がある。本節ではマイクロアクチュエータアレイシステムに必要な仕様を決定する。

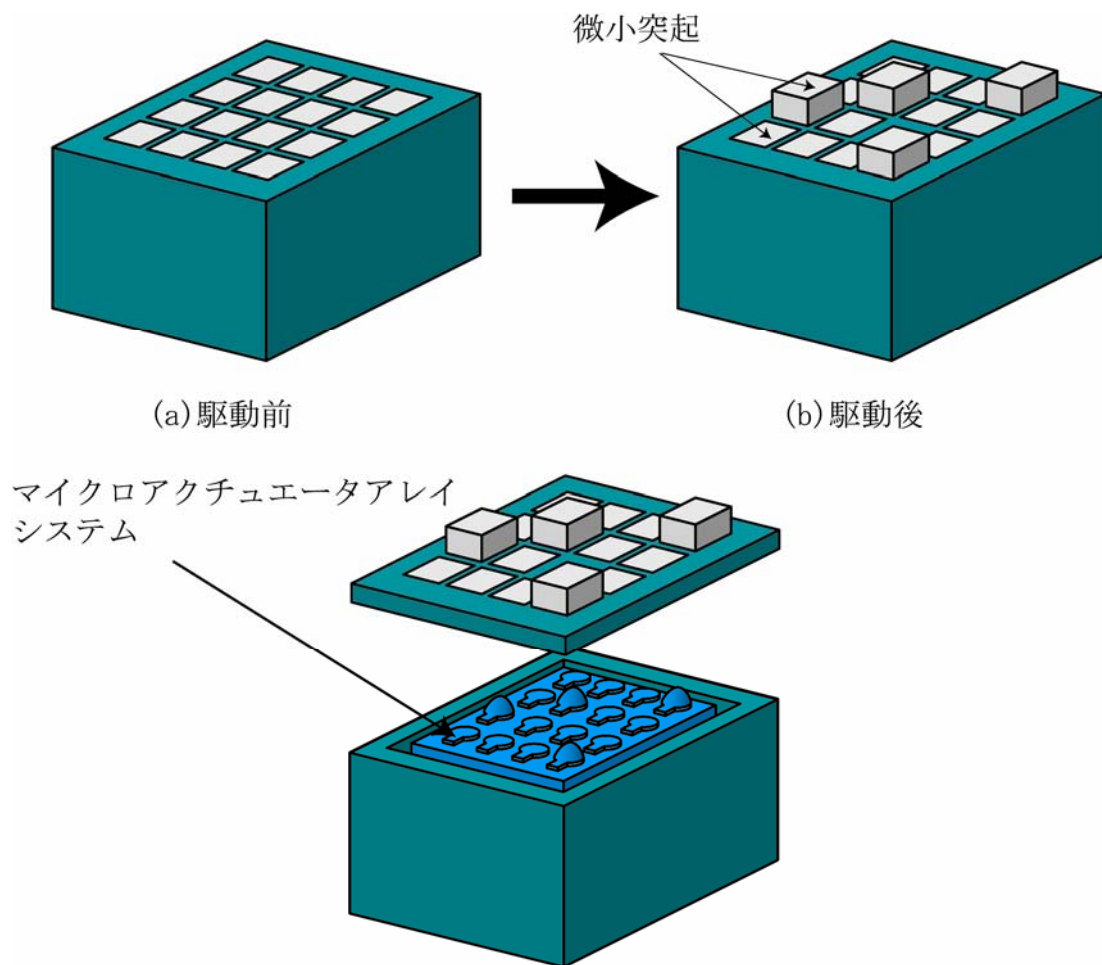


図2-3 触覚表示ディスプレイの概念図

前章で述べたように、皮膚の受容器には静的な変形を感知する SA 型と動的な変形を感知する FA 型との 2 種類の刺激応答がある。静的な SA 型の受容器に微小突起を駆動して刺激を与える場合、その駆動源には以下に示す仕様が必要となる。

- ・ 必要な変位：100 μm 以上
- ・ 人の皮膚などが 100 μm 変位するのに必要な出力：15 mN 以上
- ・ 微小突起の配置間隔：1.5 mm 程度

しかし、図 1-1 から、ある程度の変形速度があれば変位が数十 μm 程度でも十分に感知できることがわかる。

さらに、動的な FA 型の受容器に微小突起を駆動して刺激を与える駆動源に必要な仕様を示す。

- ・ 皮膚の変形速度：0.2mm/s
- ・ 必要な変位：10 μm 程度
- ・ 皮膚などが上記速度で変形するのに必要な出力：数十 mN 以上
- ・ 微小突起の配置間隔：1.5 mm 程度

以上のことから、本研究で提案するマイクロアクチュエータアレイシステムの仕様を以下のように設定する。

- ・ 皮膚の変形速度：0.2 mm/s 以上
- ・ 必要な変位：20 μm 以上
- ・ 必要な出力：数十 mN 以上
- ・ 微小突起の配置間隔：1.2 mm

この設計であれば SA 型、FA 型のどちらの受容器にも刺激を与えることができる触覚ディスプレイシステムを実現することができる。

第3章 高アスペクト比微小突起加工技術

3.1 アレイ状微小突起の構成

アレイ状微小突起は、直接人体に刺激を与える微小突起、微小突起を支えるダイアフラム、ダイアフラムのフレーム、クラッチ機構により出力が伝えられるメサ構造からなる。

図3-1は微小突起のエレメントを4×4にアレイ化した概念図である。

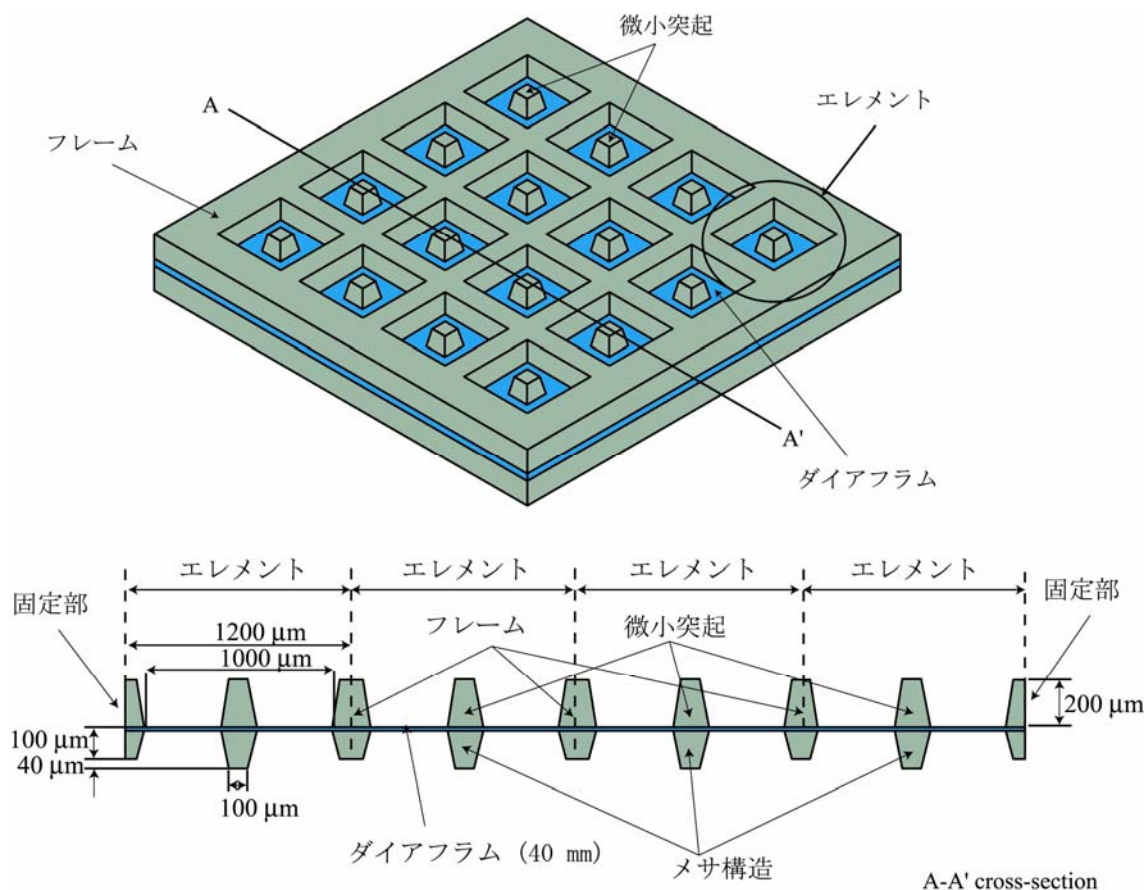


図3-1 アレイ状微小突起の概念図

アレイ状微小突起の詳細を以下に述べる。

ダイアフラムの大きさ：1 mm×1 mm×0.04 mm

微小突起の大きさ：0.1 mm×0.1 mm×0.2 mm

ピッチ：1.2 mm

メサ構造：0.1 mm×0.1 mm×0.14 mm

フレーム、微小突起、メサ構造の材質：単結晶シリコン (Si)

ダイアフラムの材質：シリコーンゴム

本システムの構造上、裏面に設けたメサ構造がフレーム表面から 40 μm 突き出た構造となっている。理由は、第5章で述べる。

3.2 ダイアフラムの変形

本システム構成では、アレイ状微小突起はその周辺部のみが外枠のフレームに固定されている (図2-2参照)。また、ダイアフラムに支えられたメサ構造を押し上げてミリサイズアクチュエータの出力を表面突起部に伝達する。このため、各ダイアフラムを支えるフレームは剛で、かつ、ダイアフラムのバネ定数が低くないと、動力伝達時にフレームが変形してしまう可能性がある。そこで本研究ではダイアフラムの剛性を低くすることを目的として以下の素材を使用した。

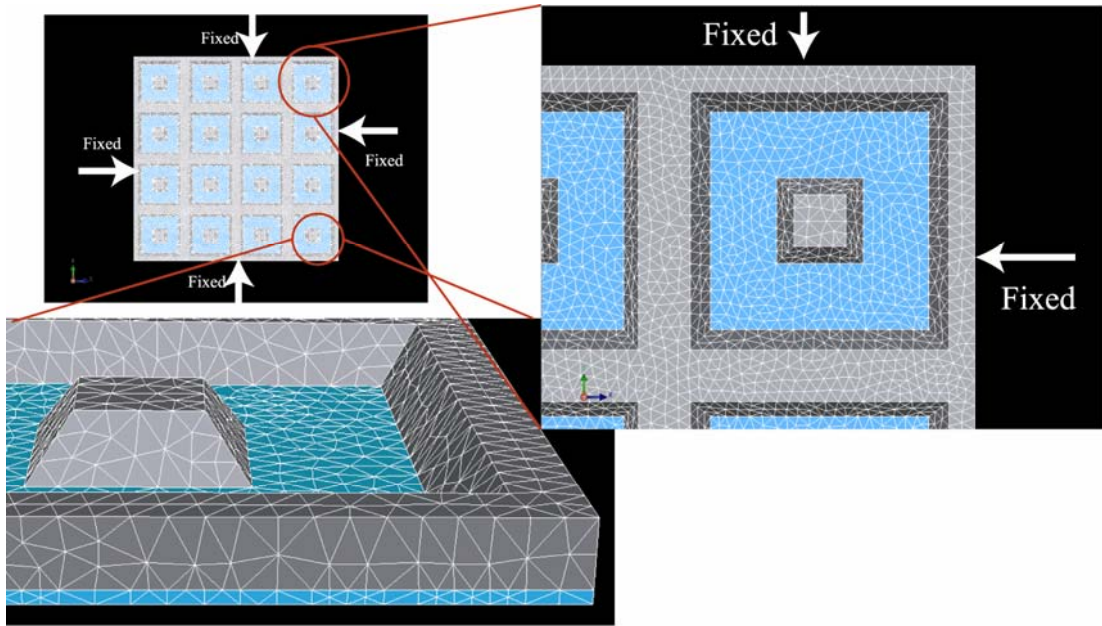
二液常温硬化型シルポット 184 W/C (株ダウコーニングアジア)

ヤング率： 2Mpa

ポアソン比： 0.45

また、この素材を利用した場合のフレームの変形をシミュレーションした結果を図3-2に示す。シミュレーションモデルを図3-2(a)に示す。シリコーンゴムダイアフラムとシリコンフレームは、構造的に表裏に対象性があるため、フレーム厚さ 100 μm 、シリコーンゴムダイアフラム厚さ 20 μm の構造で、シリコーンゴムダイアフラム上のメサ構造を 120 μm 変位させたときのシミュレーションを行った。

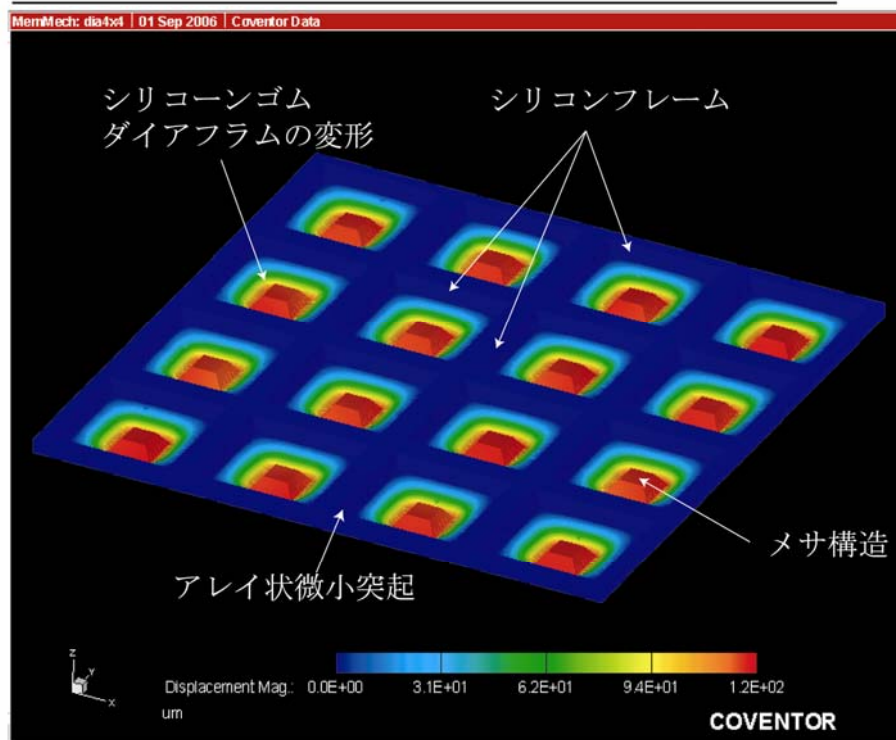
結果から、シリコーンゴムダイアフラムの変形に伴う、シリコンフレームの変形は最大でも 10 nm 程度であり、ダイアフラムの素材として上記シリコーンゴムは適切であると言える。



(a) FEM models

Conditions of FEM simulation model

item	Values
Nodes	41771
Elements	168857
Element type	linear tet 4nodes



(b) CoventorWare simulation の結果

図3-2 ダイアフラムの変形シミュレーション

3.3 作製プロセス

アレイ状微小突起の作製にあたって、MEMSの基本的な作製技術である、フォトファブリケーションと結晶異方性エッチングを利用する。この部位は表側の微小突起と裏面のメサ構造側をそれぞれ別に作製し、その後、この二つの構造体をはり合わせることでアレイ状微小突起を作製することにした。まずメサ構造側の作製プロセス（図3-3）を以下に述べる。

(a)シリコン基板に熱酸化により $3.0\ \mu\text{m}$ の酸化膜を形成。

シリコンウェハ： $\{100\}$ シリコンウェハ、厚さ $200\ \mu\text{m}$ 、P型、CZ

$\{100\}$ シリコンウェハはMEMSプロセスに良く利用される素材で、結晶異方性エッチングによってダイアフラム形状、突起形状を作りやすいという利点がある。酸化膜はフォトファブリケーション用のマスク材となる。

(b)アイランドパターンでマスクングし、片面の酸化膜を $1.5\ \mu\text{m}$ エッチング。裏面は保護。

マスク材：フォトレジスト OFPR800 30CP

エッチャント：BHF

アイランドパターン： $450\ \mu\text{m} \times 450\ \mu\text{m}$

酸化膜のアイランドパターンはメサ構造用のマスクである。メサ構造用のマスクの厚さはシリコンフレーム用のマスクよりも $1.5\ \mu\text{m}$ 厚くしている。理由は、この厚さの違いによって、シリコンフレーム用のマスクを除去する時に、メサ構造用のマスクを残し、さらにシリコンのエッチングを進めることによって、メサ構造とシリコンフレームに段差をつけるためである。

(c)アイランドパターンを残し、シリコンフレーム用の窓枠パターン作成。裏面は保護。

窓枠内辺長さ： $1000\ \mu\text{m}$

(d)シリコンエッチング。

エッチャント：KOH34wt%、 75°C

深さ： $160\ \mu\text{m}$

シリコンの結晶異方性ウェットエッチングによって、ダイフラム形状を作製する。この際、シリコンを貫通するまでエッチングせずに 160 μm エッチングしたところで一旦終了する。理由は、シリコーンゴムを塗布するための基板を残すため。

(e)マスク材の酸化膜をエッチング

酸化膜を 1.5 μm エッチングすることにより、アイランドパターンと裏面の酸化膜が 1.5 μm 残り、シリコンフレーム部の酸化膜が消失する。

(f)スピコートによりシリコーンゴム膜を裏面に形成

シリコーンゴム：二液常温硬化型シルポット 184 W/C (株ダウコーニングアジア)
厚さ：20 μm

シリコーンゴムは 100 μm ほどの深さを彫る長時間のウェットエッチングを行うと剥離してしまう。そこでシリコーンゴムを塗布するプロセスは最終エッチングプロセスの前に行う。

(g)シリコンエッチング

エッチャント：KOH34wt%、75°C
深さ：40 μm

シリコンが貫通するまでエッチングを行い、シリコーンゴムと酸化膜のダイアフラムを形成する。

(h)ダイフラムとアイランドパターンの酸化膜を除去

エッチャント：BHF

酸化膜を除去することにより、メサ構造に乗ったシリコーンゴムのみのダイアフラムが形成される。

以上により完成する。

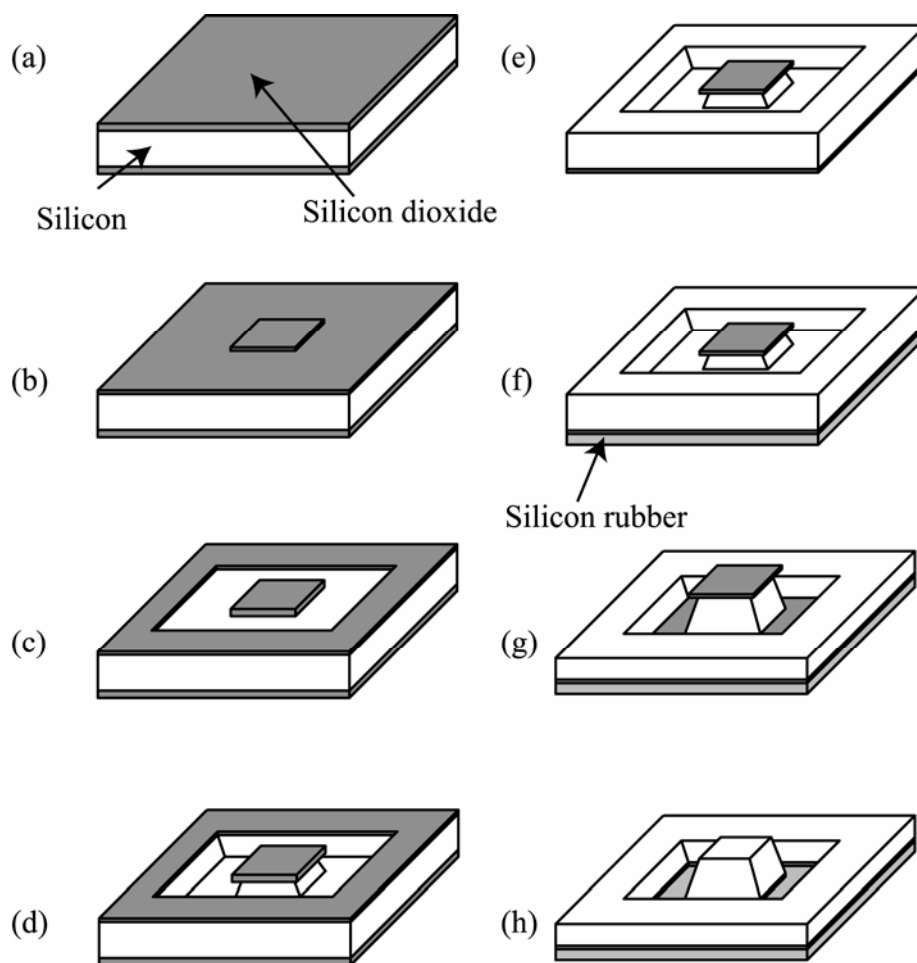


図3-3 アレイ状微小突起のメサ構造側作製プロセス

微小突起側の作製プロセス（図3-4）はメサ構造側の作製プロセスとほとんど変わらない。違いは $1.5\ \mu\text{m}$ のアイランドパターンを形成するプロセス(b)がないところである。アイランドパターン形成はメサ構造とシリコンフレームの厚さに違いをつくるためのプロセスであり、微小突起側ダイアフラムには必要がない。微小突起側の作製プロセスを以下に述べる。

(i) シリコン基板に熱酸化により $3.0\ \mu\text{m}$ の酸化膜を形成。

シリコンウェハ：{100}シリコンウェハ、厚さ $200\ \mu\text{m}$ 、P型、CZ

メサ構造側の作製プロセス(a)と同様に、{100}シリコンウェハは MEMS プロセスに良く利用される素材で、結晶異方性エッチングによってダイアフラム形状、突起形状を作り

やすいという利点がある。酸化膜はフォトファブ리케이션用のマスク材となる。

- (j) アイランドパターンとシリコンフレーム用の窓枠パターンに酸化膜をエッチング。裏面は保護。

マスク材：フォトレジスト OFPR800 30CP

エッチャント：BHF

アイランドパターン：450 μm \times 450 μm

窓枠内辺長さ：1000 μm

微小突起構造とシリコンフレームのマスク材の厚さは同じでよいので、アイランドパターンと窓枠パターンのマスク形成を行う。

- (k) シリコンエッチング

エッチャント：KOH34wt%、75°C

深さ：160 μm

メサ構造側の作製プロセス(C)と同様に、シリコンの結晶異方性ウェットエッチングによって、ダイフラム形状を作製する。この際、シリコンを貫通するまでエッチングせずに160 μm エッチングしたところで一旦終了する。理由は、シリコーンゴムを塗布するための基板を残すため。

- (l) スピンコートによりシリコーンゴム膜を裏面に形成

シリコーンゴム：二液常温硬化型シルポット 184 W/C (株)ダウコーニングアジア)

厚さ：20 μm

- (m) シリコンエッチング

エッチャント：KOH34wt%、75°C

深さ：50 μm

シリコンが貫通するまでエッチングを行い、シリコーンゴムと酸化膜のダイフラムを形成する

- (n) ダイフラムとアイランドパターンの酸化膜を除去。

エッチャント：BHF

酸化膜を除去することにより、微小突起構造が乗ったシリコーンゴムのみのダイフラムが形成される。

以上により完成する。

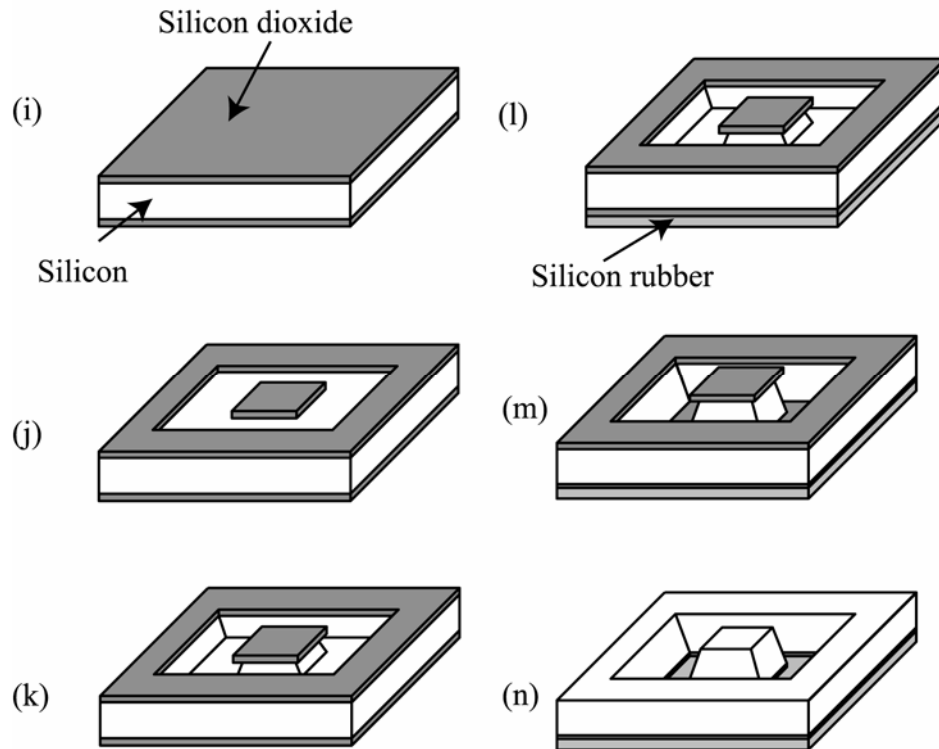


図3-4 アレイ状微小突起の微小突起側作製プロセス

上記のメサ構造側と微小突起側を接着剤で接着することにより、アレイ状微小突起が完成する。

ここで、結晶異方性ウェットエッチングによってメサ構造、微小突起構造を作製するには、突起の形や高さ、大きさの制御が必要になってくる。そこで次節より、結晶異方性ウェットエッチングによる突起構造の作製の指針を述べる。

3.4 ウェットエッチングによる突起部作製

3.4.1 シリコン単結晶の異方性ウェットエッチングのアンダーカット現象

アレイ状微小突起の突起部やメサ構造のような、微小な突起をアレイ状に加工・作製する方法として、ドライエッチング技術の利用[34-36]、ウェットエッチング技術の利用[39-40]、レーザー加工技術の利用[37]、電気鍍金技術の利用[38]など、様々な方法が研究、開発されている。そのなかでも、ドライエッチング技術、特に DRIE (Deep Reactive Ion Etching) 技術[24-36]は高アスペクト比の構造体を作製する方法として有用である。しかし、DRIE 装置は非常に高価であり、作製に莫大な資金を必要としてしまう欠点がある。レーザー加工技術も同様に装置、プロセスに莫大な資金を必要とする。一方、電気鍍金技術はプロセスや装置に多くの資金を必要としないが、鋳型の作成や除去などプロセスの複雑性において大きな欠点をもっている。

しかし、ウェットエッチング、特に KOH (水酸化カリウム) や TMAH (テトラメチルアンモニウムヒドロキシド) などのアルカリ溶液を利用した結晶異方性ウェットエッチング技術は、安価かつ非常に簡単なプロセスで単結晶シリコンのアレイ状突起構造体を作製することができる。したがって、多くの研究者が結晶異方性ウェットエッチング技術を利用したアレイ状突起構造作製の研究を行っている[41-45]。

結晶異方性ウェットエッチング技術を利用して突起構造を作製する場合、マスクアンダーカット現象を利用する。マスクアンダーカット現象とは広く知られている現象で、ウェットエッチングの際にマスクコーナー部に現れるエッチング形状のことである。しかし、このマスクアンダーカットにおいて、出現する結晶方位については従来から様々な報告があって定説がない[46-47]。

そこで、当研究室で作製しているエッチングレートシミュレーション (MICROCAD) データベースのエッチングレートダイアグラム (図3-6 (f)(g)) から、マスクアンダーカット現象のメカニズムを解明した。以下に図3-6 (a)~(e)の順にアンダーカット面の形成される過程を説明する。

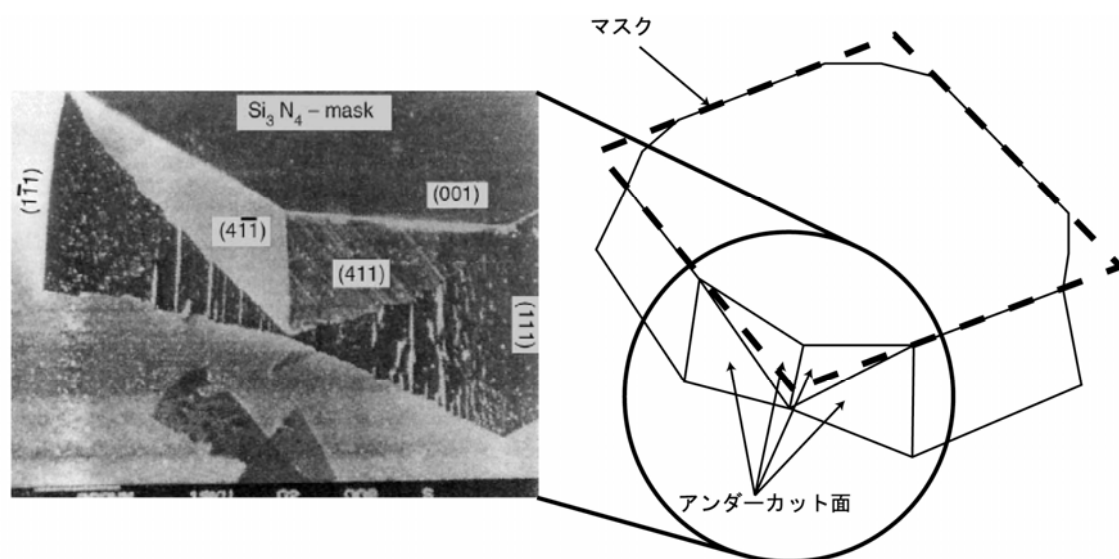


図3-5 マスクアンダーカット現象

図3-6(a) : (100) 単結晶シリコンウェハを KOH ウェットエッチングすると、マスクサイドからエッチングレートの最も遅い (111) 面が出現する。

図3-6(b) : 図3-6(a)B-B 断面で見ると、凸形状のプロファイルである。凸形状のプロファイルをエッチングする場合は、もっともエッチングレートの早い面が出現する。したがって (111) 面で挟まれた凸形状のエッチングプロファイルの場合、プロファイル中最もエッチングレートの早い (110) 面が出現する。

図3-6(c) : しかし図3-6(a)A-A 断面でみるとウェハ上部はエッチングマスクで覆われているため、凹形状のプロファイルになる。凹形状のプロファイルをエッチングする場合には、最もエッチングレートの遅い面が出現する。したがって、(100) 面と (110) 面で挟まれたこの断面に出現する面はプロファイル中最もエッチングレートの遅い (100) 面となる。

図3-6(d) : さらに図3-6(c)C-C 断面でみると、凸形状のプロファイルである。したがって (100) 面と (111) 面で挟まれたこの断面にはプロファイル中最もエッチングレートの速い (311) 面が出現する。

図3-6(e) : 図のようなプロファイルになった場合、(311) 面は A-A 断面において最もエッチングレートの遅い面、C-C 断面において最もエッチングレートの

速い面であり、このままエッチング中の出現面として安定する。

このように(311)面はエッチングレートダイグラム上で鞍点(Saddle point)に位置し、凸形状、凹形状において安定した面となり、その結果、アンダーカット面に出現する。

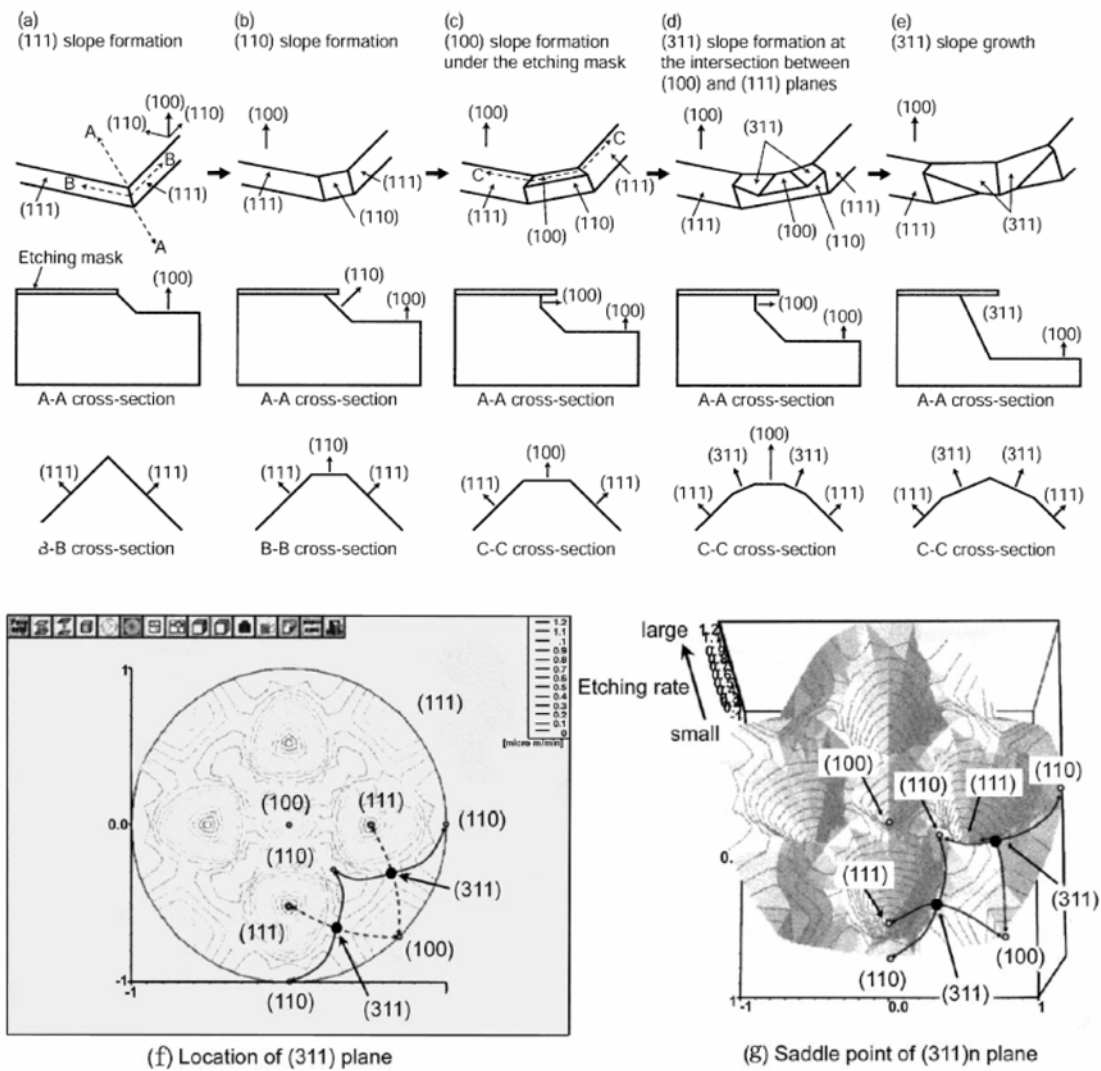


図3-6 マスクアンダーカット現象のメカニズム

アンダーカット現象を踏まえて、出現するエッチング面を考慮することによって、突起形状のアスペクト比を自由に変えることができる。

3.4.2 突起作製の各種条件

微小突起で触覚を与えるには、その微小突起の高さも重要になってくる。さらに、本章で紹介している触覚ディスプレイの微小突起は一辺1 mm程度のシリコンフレームに囲まれ、アレイ化されている。したがって背が高く、高アスペクト比で突起構造を作製することが望ましい。

そこで、単結晶シリコンの結晶異方性エッチングによる突起構造作製プロセスの条件を変えることにより、各種条件が突起構造の背の高さ、アスペクト比にどのような影響を与えるか調べ、最後に触覚ディスプレイ用の突起構造作製の指針を示す。

作製プロセスの各種条件

エッチングレートダイアグラム：

前節で述べたようにエッチングレートダイアグラムは突起部の形状に大きく影響を与える。エッチングレートダイアグラムはエッチャントの種類やエッチャント濃度によって変わってくる。シリコンエッチングにおいて高濃度のエッチャントを利用すると、そのエッチングは化学反応に支配され、低濃度のエッチャントを利用すると、エッチャントの拡散に支配される。

エッチャント濃度：

エッチャント濃度を変える事によってエッチングレート比を変えることができる。エッチングレート比を変えることによって背の高い突起構造の作製が望まれる。

マスク形状：

マスク補償パターンを利用することによって突起形状の構成面を変えることができる。

これによって背の高い突起構造の作製が望まれる。

シリコンウェハ：

シリコンの結晶方位面の違いによって、エッチングによって出現する面の基板面に対する角度を変えることができる。したがって出現面が基板表面に対して垂直な面をもつウェハであれば、背の高い突起構造の作製が可能である。

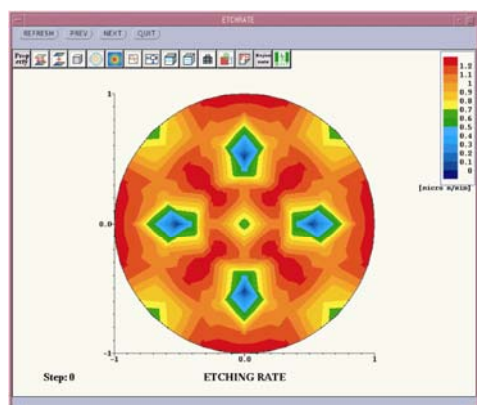
3.4.3 エッチングレートダイアグラムの影響

エッチングレートダイアグラムの影響を調べるために、KOH と TMAH、2種類のエッチャントを用意した。KOHは安価で毒性も少なく、MEMSデバイス作製に良く利用されるエッチャントである。TMAHはCMOSプロセスに適したエッチャントであり、これもMEMSデバイス作製によく利用されている。これらの大きな違いはエッチングレートダイアグラムが大きく違うところであり、鞍点を示す面が異なるため、前節で述べた突起形状の構成面を変えることができる。用意したエッチャントの詳細は以下の通り。

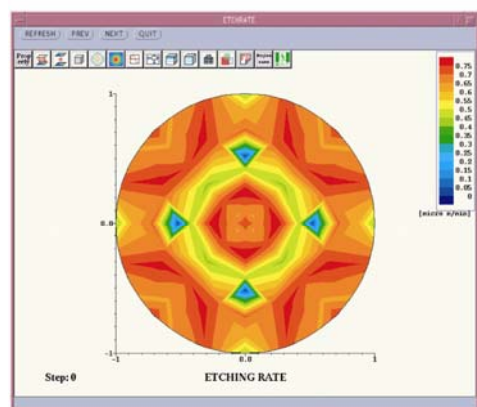
34.0 wt% KOH、70 °C（高濃度のエッチャントとして調べる）

10.0 wt% TMAH、80 °C（低濃度のエッチャントとして調べる）

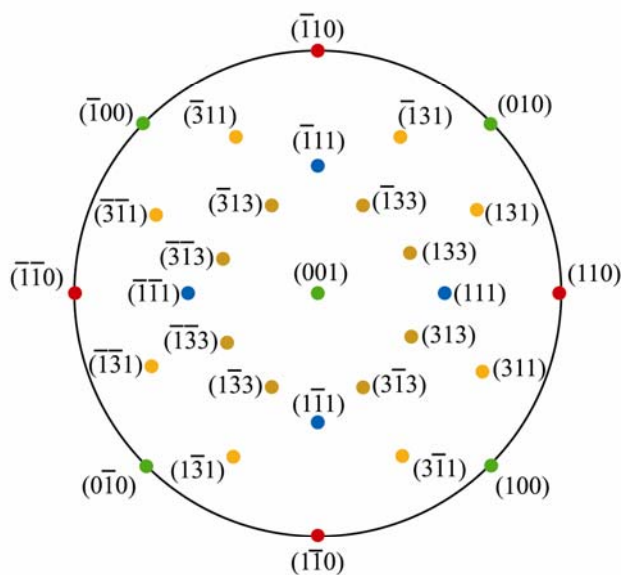
これらのエッチングレートダイアグラムを図3-7に載せる。これは半球試験によるエッチングデータベースから得たものである[49-50]。



(a) 34.0 wt.% KOH (70 deg-C)



(b) 10.0 wt.% TMAH (80 deg-C)



(c) Locations of orientations on the map

図3-7 KOH と TMAH のエッチングレートダイアグラム

赤い部分はエッチングレートが早く、青い部分はエッチングレートが遅いことを示している。

これらのエッチャントで得られた突起形状を図3-8に載せる。

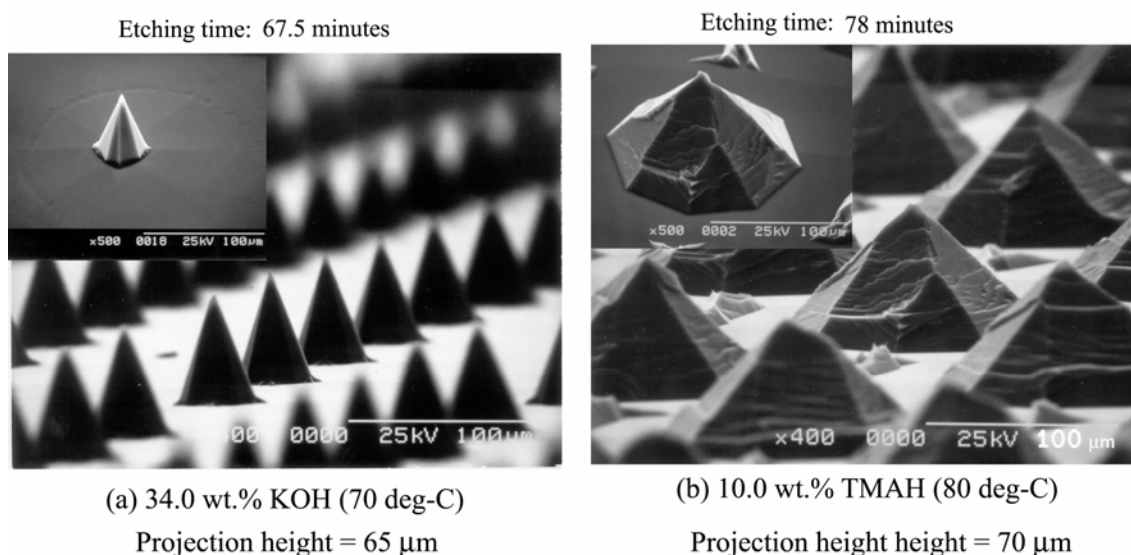


図3-8 KOHとTMAHによって加工された突起形状

TMAHを利用して作製した突起形状はKOHを利用したものよりも高さが5 μm 大きい。KOHを利用して作製した突起構造は(3 1 1)面で構成された八角錐であり、TMAHを利用して作製された突起構造は(3 3 1)面で構成された八角錐である。よってアスペクト比からみると、KOHで作製した突起構造の方が本研究で望まれる形状に近いといえる。

したがって、高アスペクト比の突起構造を作製するにはKOHが最適である。

3.4.4 マスク形状の影響

マスク形状も突起構造の形状に大きく影響を与える。通常、図3-9(1)のような Square マスクパターンで突起形状の作製ができる。前述したマスクアンダーカット現象により突起構造が作製できるが、マスクアンダーカット現象によるマスクコーナーの角落ち現象が速いと突起構造の高さが小さくなってしまふ。そこで、マスクコーナーの角落ち現象を抑えることが出来る「補償マスクパターン」と呼ばれるラインパターンを利用すれば、突起構造の背を高くすることが期待される。そこで、3種類の長さの違う補償マスクパターンを持つマスク形状を用意し、その効果を調べた(図3-9(2))。

また、図3-9(3)のマスクは後述する「3.4.5 シリコンウェハの結晶方向の影響」で(110)方向シリコンウェハで突起構造を作るためのマスクである。

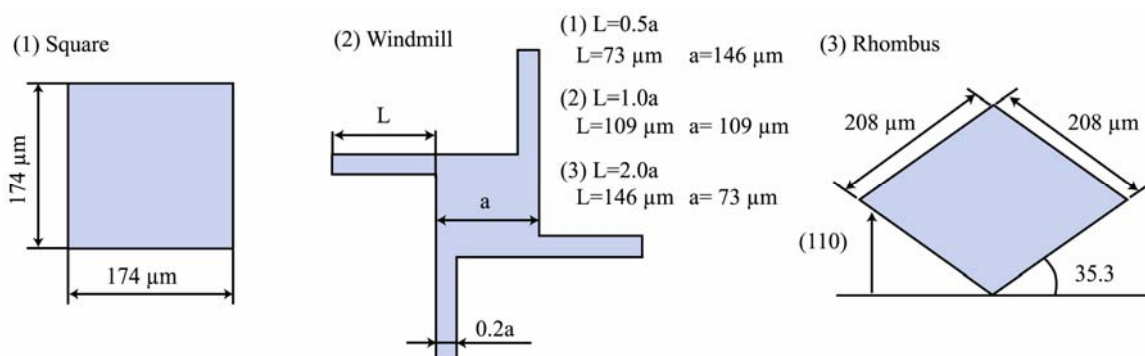


図3-9 各種マスクパターン

実験では前節で良好な結果を得た 34.0 wt% KOH、70 °C によりエッチングを行い、その形状を比較した。結果を図3-10に示す。

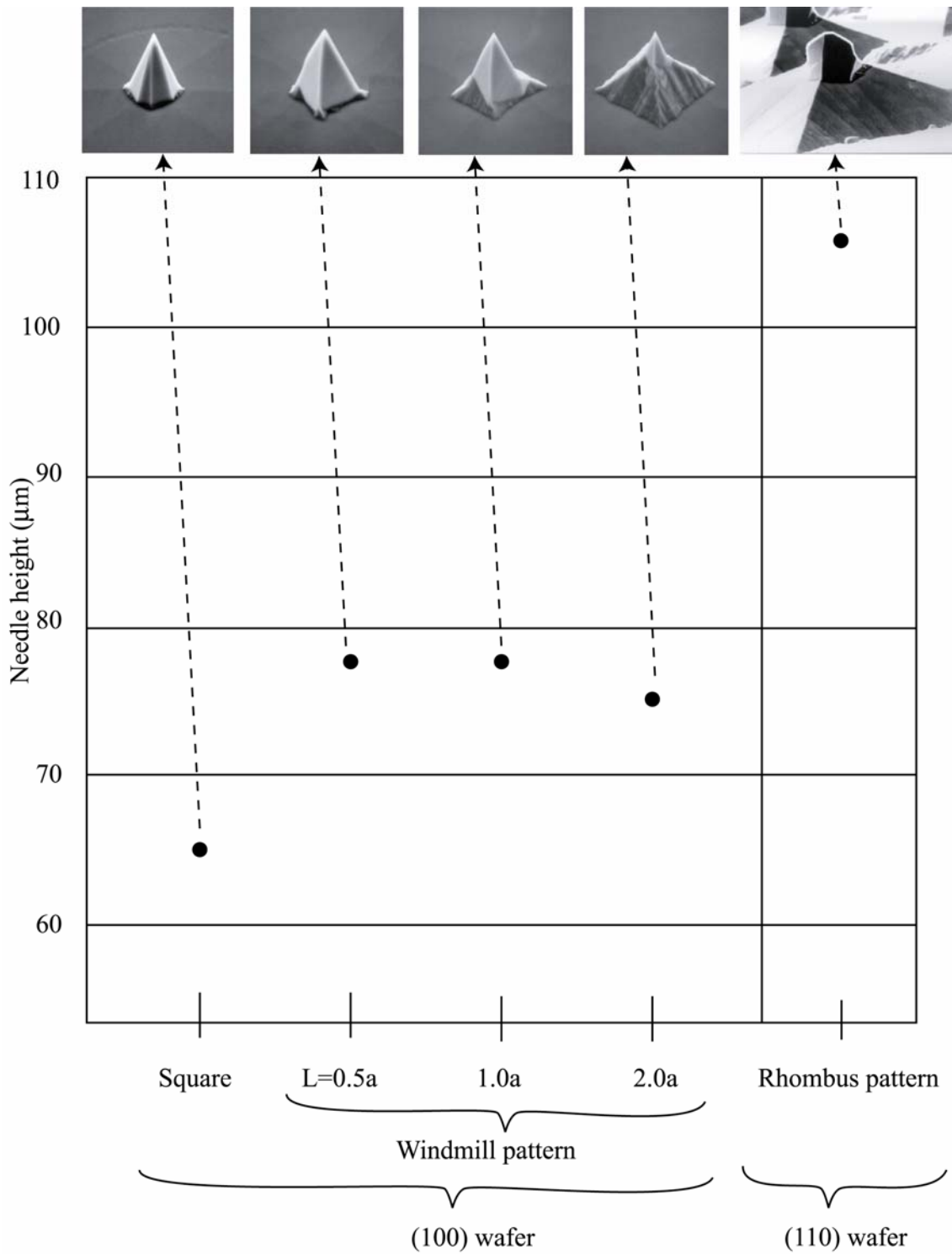


図3-10 各種マスクパターンによる突起高さ

結果から、(100) ウェハの場合、Square パターンを利用すると (311) 面で構成された八角錐の突起構造体ができ、Windmill パターンを利用すると (311) 面か、より鈍角の凹凸のある面で構成された四角錐の突起構造体ができることがわかる。また、Windmill パターンを利用すると Square パターンよりも 10 μm 程度、背の高い突起を作製することができる。これは補償マスクパターンにより角落ち現象が抑えられ、基板表面に垂直な方向へのエッチングが進み、突起構造の背の高さが大きくなったと考えられる。Windmill パターンの補償マスクによる突起構造の高さに違いはあまり見られなかったが、形状に違いが見られた。補償マスクパターンが $L=2.0a$ と長いマスクを使用した場合、突起構造の下部に凹凸のある面が形成されているのを確認。さらに、補償マスクパターンが短くなるにつれ、凹凸面が消失し、補償マスクパターンが $L=0.5a$ でほぼ凹凸面がなくなり、(311) 面で構成された表面が平滑な四角錐の突起構造になった。この結果と Square マスクパターンの結果から、次のように考察できる。補償マスクパターンによって角落ち現象が抑えられている間は $L=2a$ のような凹凸のある鈍角の面で構成された形状の突起構造でエッチングがすすむが、補償マスクパターンがなくなると、角落ち現象がはじまり、(311) 面で構成される突起構造ができる。

本研究で望まれる形状にするには補償マスクパターンが $L=0.5a$ である必要があることがわかる。

3.4.5 シリコンウェハの結晶方向の影響

(110) 方向シリコンウェハは深溝のような高アスペクト比の構造体作製によく利用される。そのため、高アスペクト比の突起構造体を作製できると期待される。そこで、図3-9(3)のような菱形マスクを利用して、突起構造体の作製を行った。菱形マスクのそれぞれの辺は、(110) 方向シリコンウェハの (111) 面に沿って配置することによってエッチングレートの遅い (111) 面で構成された突起構造を期待できる。

結果は図3-10に示したとおり、Windmill パターンで作製した構造体よりも 1.6 倍の高さを持つ、もっとも背の高い突起構造体の作製に成功した。しかし、形状がナイフ状であり、ディスプレイ用突起構造への利用には適していない。

3.4.6 エッチャント濃度の影響

ウェットエッチングプロセスにおいて、エッチングレートダイアグラムに影響を与えるパラメータはエッチャント濃度とエッチャント温度である。

KOH でエッチングする場合、3.4.1 節で述べたとおり、構造体は (3 1 1) 面で構成される。したがって、基板表面に垂直な方向へのエッチングスピードが (3 1 1) 面のエッチングスピードに対して、相対的に速ければ、より深く加工できるため、結果的に突起構造体の高さを高くできるのである。このエッチングスピードはエッチャントの濃度によって決まる。つまり、(1 0 0) 面と (3 1 1) 面のエッチングレートの比が、構造体の高さを決定するパラメータとなり、それは濃度によって決まるのである。

しかし、エッチャント温度は基本的にアレニウスの式に従うため、エッチングレートダイアグラムには大きく影響を及ぼさない。一方エッチャント濃度はエッチングレートダイアグラムに大きく影響を及ぼす。そこで、KOH の濃度が 3 4.0 w t % ~ 5 1. 0 w t % (温度は 6 9 ~ 7 1 °C) までの数種類でエッチングを行い ((1 0 0) ウェハ、Square マスク、Windmill マスク)、突起構造体の形状を比較した。6 9 °C ~ 7 1 °C でのエッチングは最も平滑なエッチング面を出せるため、この温度を採用した[49-58]。

そこで、(1 0 0) 面と (3 1 1) 面のエッチングレートの比を Table.1 と図 3-11 にまとめた。

Table.1 (1 0 0) 面と (3 1 1) 面のエッチングレートの比

KOH concentration (wt.%)	Etching rate ($\mu\text{m}/\text{min}$)		Etching Rate Ratio
	{100}	{311}	{100}/{311}
17.0	0.713	1.344	0.531
25.5	0.759	1.430	0.531
34.0	0.629	1.065	0.591
42.5	0.473	0.747	0.633
51.0	0.265	0.380	0.697

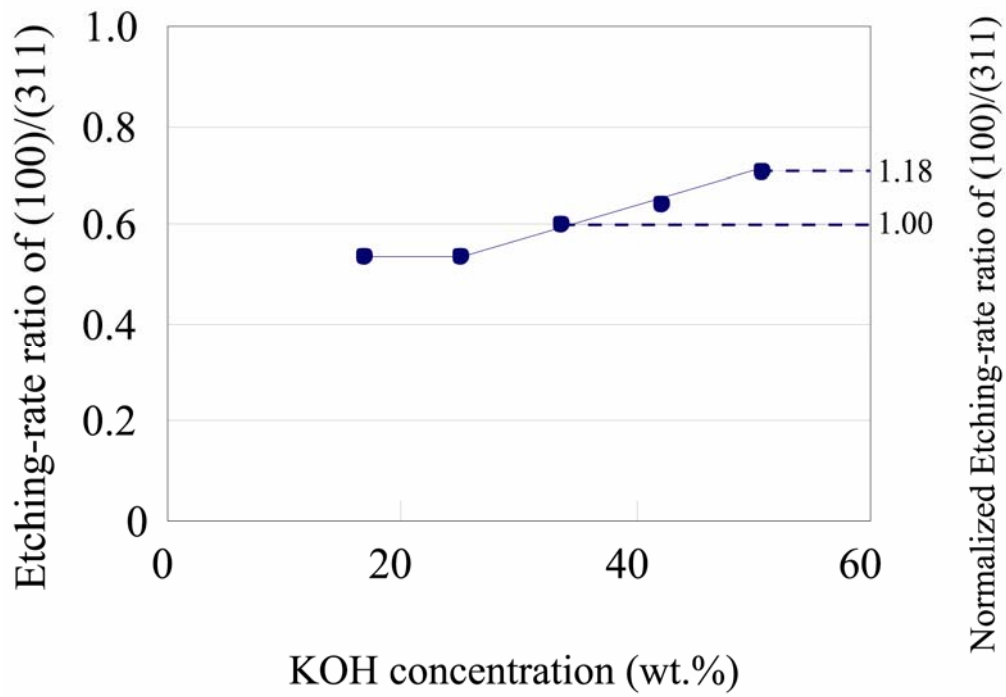


図3-11 KOHの(100)面と(311)面のエッチングレートの比

濃度の上昇とともに、(100)面と(311)面のエッチングレートの比が大きくなっていく。このことから、濃度の上昇により、突起構造体の背の高さも高くなることが期待される。図3-12に作製結果を載せる。

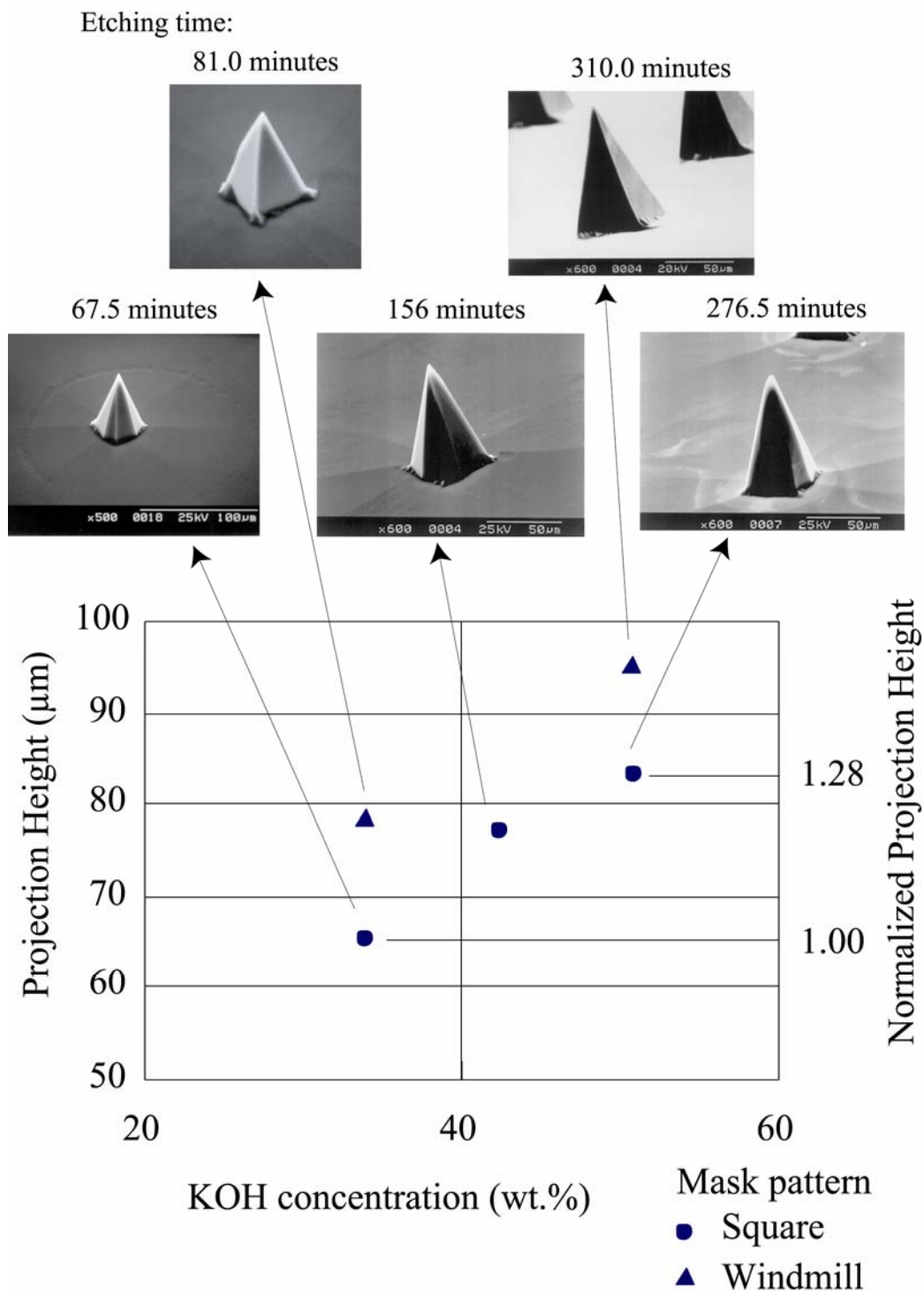


図3-11 エッチャント濃度を変化させたときの突起構造作製結果

結果から、51.0wt%で得られた突起構造は、34.0wt%で得られたものより 1.2~1.3 倍、高さが大きくなった。これはエッチングレート比とほとんど同じであり、構造体を構成する面と基板表面のエッチングレートの比較から構造体の高さを予測する指針となることを示している。

3.4.7 ウェットエッチングによる突起部作製のまとめ

以上の結果を Table.2 に載せる。

Table.2 突起作製のまとめ

Etching solution		Si wafer	Mask pattern	Fabricated needle array	
				Shape	Height (μm)
TMAH	10.0 wt%	{100}	Square	Obtuse-angled octagonal-pyramid	70
KOH	34.0 wt%	{100}	Square	Sharply-angled octagonal-pyramid	65
			Windmill (L=0.5a)	Sharply-angled tetragonal-pyramid	78
			Windmill (L=1.0a)	Sharply-angled tetragonal-pyramid	78
			Windmill (L=2.0a)	Sharply-angled tetragonal-pyramid	75
		{110}	Rhombus	knife-shaped	106
	42.5 wt%	{100}	Square	Sharply-angled octagonal-pyramid	77
	51.0 wt%	{100}	Square	Sharply-angled octagonal-pyramid	83
Windmill (L=0.5a)			Sharply-angled tetragonal-pyramid	95	

以上のことから突起部作成において次のようにまとめる。

- (1) 突起の背の高さは TMAH による作製が有利であるが、ディスプレイ用突起として利用する場合、形状は KOH で作製した突起構造が適している。
- (2) Windmill マスクパターンのような補償マスクを利用すると、より背の高い突起構造を作製することができる。

- (3) (110) ウェハを利用すると最も背の高い突起構造を作製できるが、ディスプレイ用突起として利用する場合には適さない。
- (4) 構造体を構成する面と基板表面のエッチングレート比を考慮に入れることによって、より背の高い突起構造を作製することができる。

3.5 アレイ状微小突起の作製

前節の突起作成を踏まえて、アレイ状微小突起を作製した。図3-13は作製したアレイ状微小突起の写真と SEM 画像である。図はメサ構造側から見た写真と画像である。4.8 mm x 4.8 mm に 16 個のダイアフラムと微小突起が並べてある。またメサ構造の厚さはシリコンフレームの厚さよりも 40 μm 厚いことも確認した。

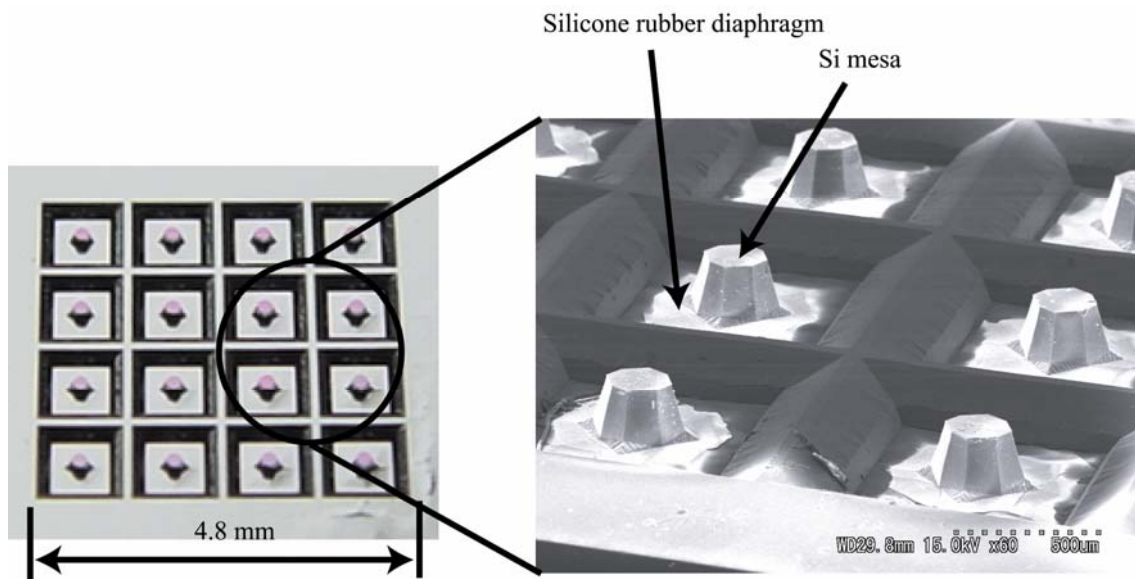


図3-13 作製したアレイ状微小突起の写真と SEM 画像

第4章 高出力アクチュエータの高密度化

4.1 アレイ状クラッチ機構による高密度化

第1章で述べたように、クラッチ機構はミリサイズアクチュエータからの出力をアレイ状微小突起に分配するマイクロアクチュエータアレイである。このクラッチ機構は、基板、アレイ状に配置されたブロック、ブロックを動かすマイクロアクチュエータで構成されている（図4-1）。

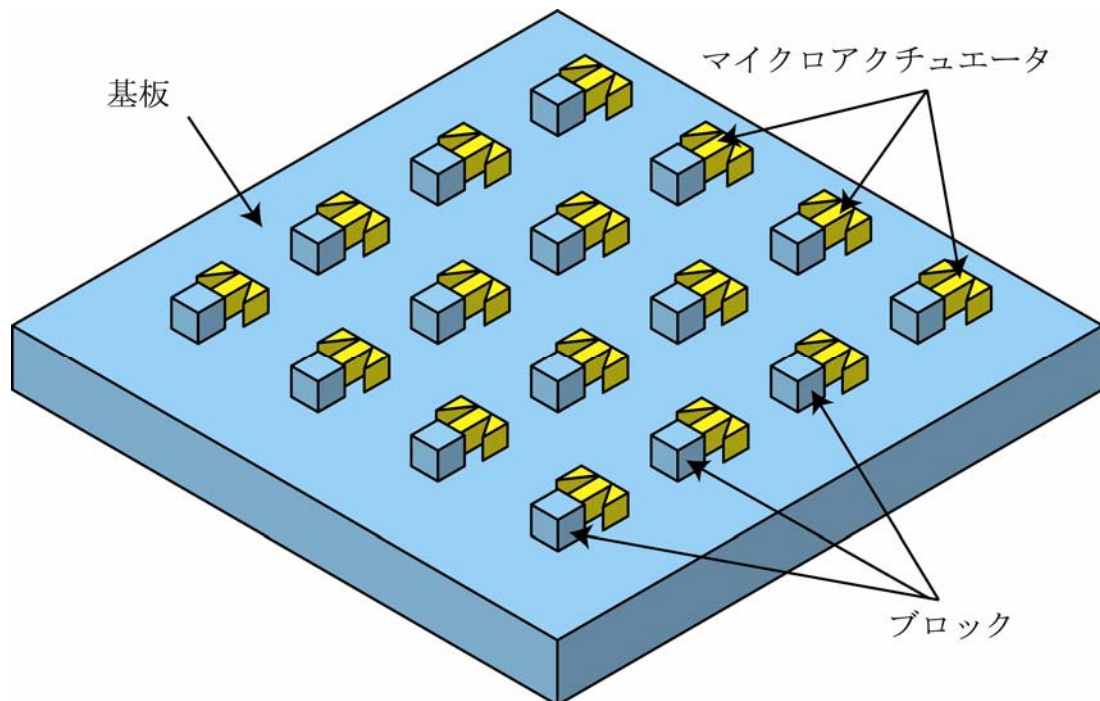


図4-1 クラッチ機構の概念図

それぞれのパーツを高密度集積化するに当たって、作製プロセス、それぞれのパーツの材質、マイクロアクチュエータの駆動原理、が重要になってくる。前章で述べたように、本デバイスの駆動原理から、ブロックは下部に設置されたミリサイズアクチュエータの出力を直接、アレイ状微小突起にクラッチングして伝達する。したがって、ブロックとそれを個別に駆動するマイクロアクチュエータは1 mm ピッチ程度に配置しなければならない。こういった微小なピッチで複雑な機構を精度良く加工、作製するためには、MEMS 技術の

作製プロセスを利用することが考えられる。さらに単結晶シリコン (Si) は MEMS 技術の作製プロセスに非常に良く用いられる材質であり、その加工技術は広く研究されている。

また、本研究ではマイクロアクチュエータの駆動原理に静電気力を利用したマイクロアクチュエータを採用する。静電気力を利用したマイクロアクチュエータは駆動原理が単純でかつ、MEMS 加工技術との整合性が良い。

以上をまとめて、静電クラッチを以下のような材質、加工方法で作製することにした。

ブロック、マイクロアクチュエータのピッチ：1.2 mm

作製プロセス技術：MEMS 作製プロセス (DRIE 加工技術) の利用

基板、ブロック、マイクロアクチュエータの材質：単結晶シリコン (Si)

マイクロアクチュエータ：静電気力アクチュエータ

次節に静電気力を利用したマイクロアクチュエータの詳細と作製プロセスを述べる。

4.2 チューリップ型静電マイクロアクチュエータ

4.2.1 静電マイクロアクチュエータ

本システムの駆動原理から、マイクロアクチュエータはブロックを最小 $100\mu\text{m}$ 程度、基板に対して水平方向にスライドしなければならない。したがって、マイクロアクチュエータに必要な条件は以下ようになる。

- ・ $100\mu\text{m}$ 以上の変位を得ることができる
- ・ ブロックを基板表面上でスライドさせることができる
- ・ 1.2mm ピッチでアレイ化できる

以上の条件を満たすため、本研究では「静電気力を利用したマイクロアクチュエータ」を利用して、クラッチ機構を実現する。

本来、静電気力を利用したマイクロアクチュエータは、平行に配置した電極に電圧を印加して、静電気力による引力で一方の電極を駆動する(図4-2)。

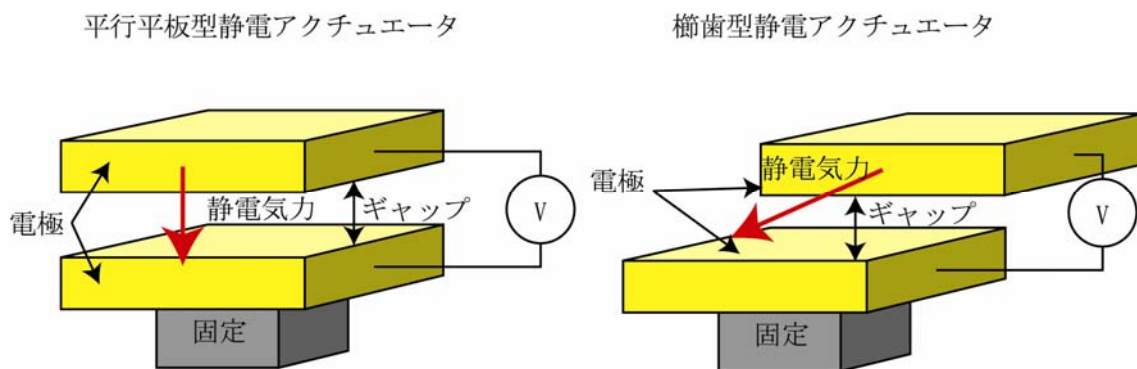


図4-2 静電気力を利用したマイクロアクチュエータの基本図

平行平板型静電アクチュエータは、電極間のギャップを小さくすることにより、出力を大きくすることができる。しかし、電極同士が近づく方向に駆動するため、ギャップを小さくすればそれだけ駆動ストロークが小さくなってしまう。櫛歯型静電アクチュエータは電極同士のギャップを一定に保ち、電極に対して平行に駆動する。そのため、駆動ストロークを大きくすることができる。さらに、電極の数を増やすことによって大きな変位を得ることができる。しかし、ギャップを一定に保つために複雑な機構が必要になり、結果的

に全体のシステムを大きくしてしまう。

そこで上記のような問題を解決するために、本研究では「曲線型駆動電極をもつ静電マイクロアクチュエータ」を提案する。次節で曲線型駆動電極をもつ静電マイクロアクチュエータの駆動原理と詳細を述べる。

4.2.2 曲線型駆動電極をもつ静電マイクロアクチュエータ

基本的な駆動原理を以下に示す。図4-3は曲線型駆動電極をもつ静電マイクロアクチュエータの概念図である[59]。曲線形状を持つ電極と、一端を固定された片持ち梁に電圧を印加して、発生する静電気力を利用し駆動梁を電極に接触させる。駆動梁は曲線形状に沿って変形するため、梁の先端の変位を大きくすることが出来る。

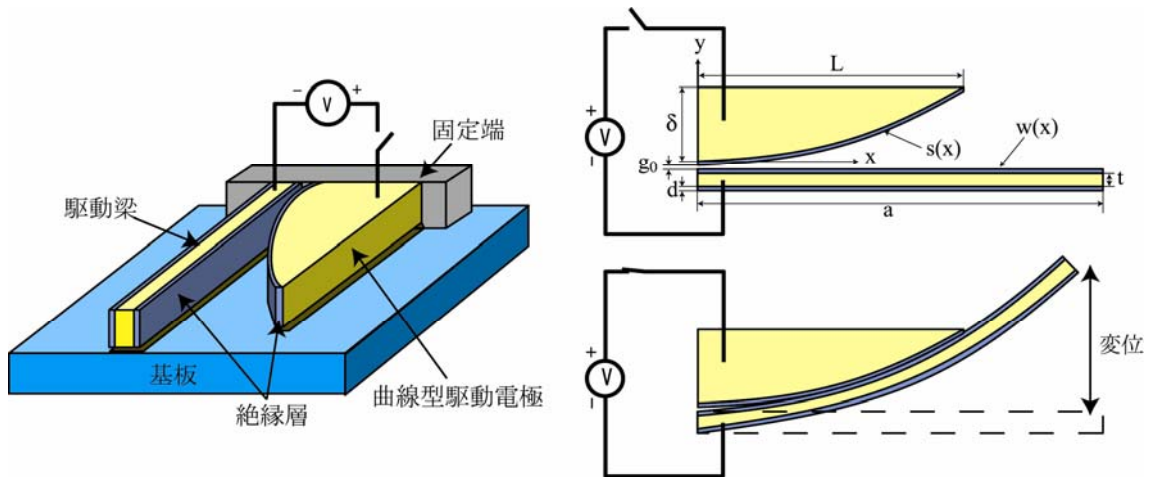


図4-3 曲線型駆動電極をもつ静電マイクロアクチュエータの概念図

図4-3に示すように、 $s(x)$ を曲線型駆動電極の曲線形状を表す式、 $w(x)$ を駆動梁の変形を表す式とすると両式は式(1)、(2)で表される。ただし、 $x (0 < x < L)$ 。

$$s(x) = \delta \left(\frac{x}{L}\right)^2 \quad (1)$$

$$w(x) = cx^2(6L^2 - 4Lx + x^2) \quad (2)$$

ここで δ は曲線型駆動電極の根元の幅、 L は曲線型駆動電極の長さ、 c は駆動梁の定数である。

また、系全体のエネルギー U を考えると式(3)で表される。

$$U = U_b + U_{el} \quad (3)$$

ここで U_b は駆動梁がもつ弾性エネルギー、 U_{el} は静電気力によるエネルギーであり、そ

それぞれ式(4)、式(5)のように表される。

$$U_b = \frac{1}{2} \int_0^L EI \left[\frac{d^2 w(x)}{dx^2} \right]^2 dx \quad (4)$$

$$U_{el} = -\frac{1}{2} \int_0^L \frac{\varepsilon_0 h V^2}{\frac{d}{\varepsilon_r} + s(x) - w(x) + g_0} dx \quad (5)$$

ここで、 V は駆動電圧、 EI は駆動梁の剛性、 ε_0 は空気の誘電率、 ε_r は絶縁層の比誘電率、 h は駆動梁と曲線型駆動電極の厚さである。系全体のエネルギーはエネルギー保存則より、第一次微分は定数 $Const$ である。したがって式(6)のように表される。

$$U = U_b + U_{el} = Const \quad (6)$$

式(4)、式(5)をすべて式(6)に代入すると、駆動電圧 V が式(7)のように表される。

$$V = \sqrt{\frac{EI \cdot \frac{1}{2} \int_0^L EI \left[\frac{d^2 w(x)}{dx^2} \right]^2 dx}{\varepsilon_0 h \int_0^L \frac{1}{\frac{d}{\varepsilon_r} + s(x) - w(x) + g_0} dx}} \quad (7)$$

さらに、式(7)に式(1)、式(2)を代入することにより、駆動電圧 V と定数 c の関係式を得ることができ、その結果得られた c から駆動梁の先端の変位と駆動電圧の関係が求まる。図4-4は片持ち梁先端と駆動電圧の関係を示すグラフである。

片持ち梁の厚さ h を $20 \mu\text{m}$ と設定しているが、静電エネルギー、弾性エネルギーともに、梁の高さ h に比例するため、高さ h は梁の動作には関与しない。したがって、グラフは片持ち梁の厚さに関係なく成立する。グラフから駆動電圧 180V で引き込み現象が確認され、片持ち梁の長さ L が $970 \mu\text{m}$ のときに $140 \mu\text{m}$ の変位を得ることがわかる。

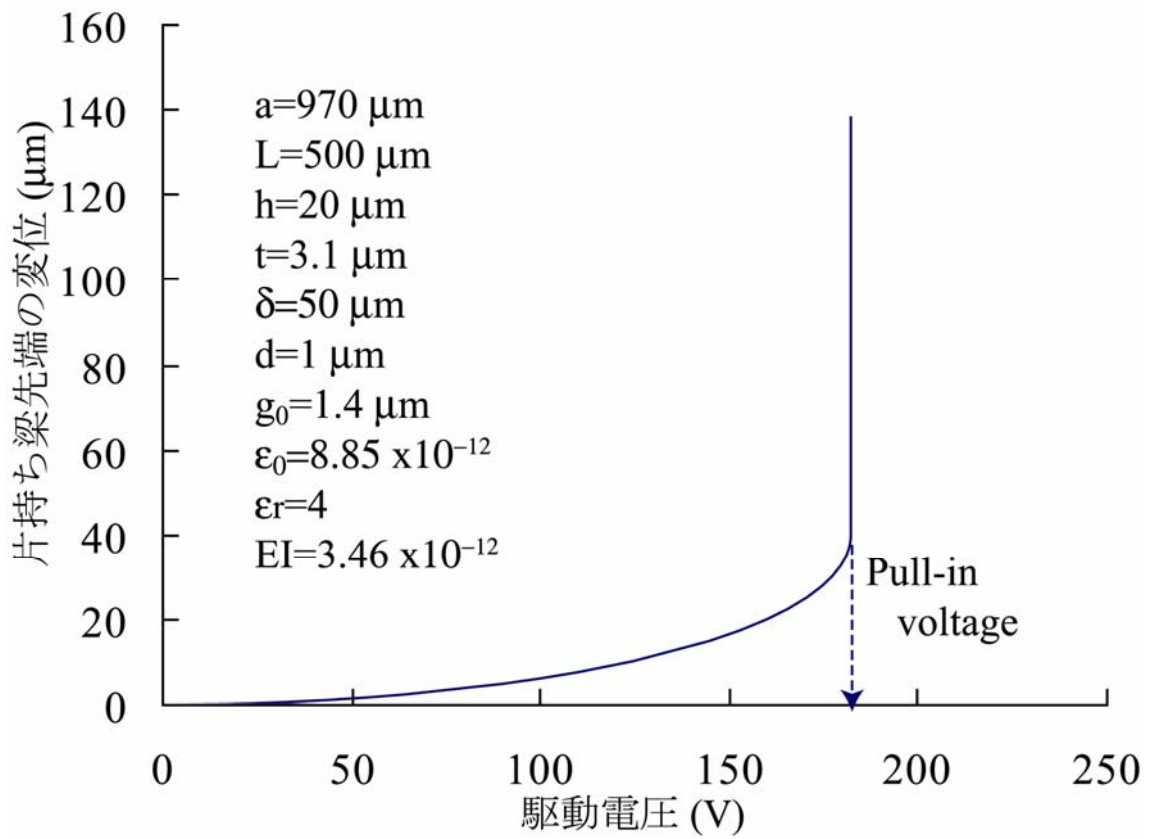


図4-4 片持ち梁先端の変位と駆動電圧

本研究では、この駆動梁の先端にブロックを設けることで、ブロックを $100 \mu\text{m}$ 以上水平移動する。図4-5に本研究で作製する曲線型駆動電極をもつ静電マイクロアクチュエータの概念図を示す。

本研究ではこのアクチュエータを「チューリップ型静電マイクロアクチュエータ」と呼ぶ。

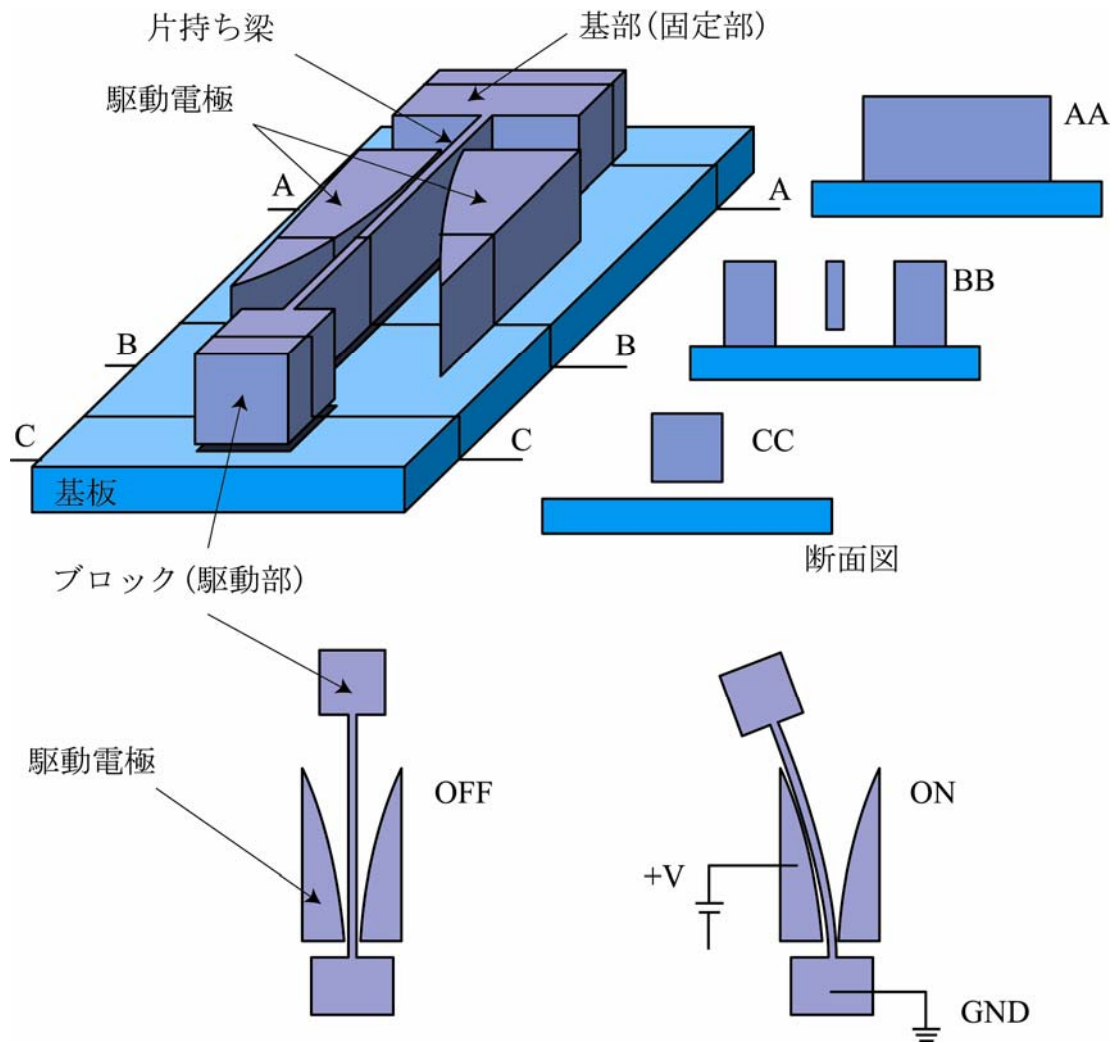


図4-5 チューリップ型静電マイクロアクチュエータの概念図

4.2.3 チューリップ型静電マイクロアクチュエータと作製プロセス

図4-6にチューリップ型静電マイクロアクチュエータの作製プロセスを示す。以下に詳細を述べる。

(a) 4インチの SOI ウェハを用意。

- (1) P/B (100) Device $20\ \mu\text{m}$
Handle $400\ \mu\text{m}$
Box $1.5\ \mu\text{m}$
Res $0.01\text{-}0.05\ \Omega$
- (2) P/B (100) Device $60\ \mu\text{m}$
Handle $355\ \mu\text{m}$
Box $2\ \mu\text{m}$
Res $0.001\text{-}0.015\ \Omega$

今回は、上記2種の SOI ウェハを用意。Device 層は加工され、チューリップアクチュエータとなるため、Device 層厚さは片持ち梁の厚さ h に相当する。また、静電アクチュエータとして利用するため、低効率ができるだけ低いウェハを使用している。Box 層は片持ち梁を基板から浮かすための犠牲層となる。

(b) DRIE 加工用のマスク材を Device 層上に作製する。

感光性フォトリソグランドを利用してチューリップ型のマスクをパターニングする。

(c) チューリップアクチュエータの形状を削り出す。

DRIE により Device 層をエッチング。

(d) ブロック、片持ち梁部を基盤より浮かす。

BHF により埋め込み酸化膜 (Box 層) の除去を行う。ただし、ブロックと片持ち梁部が基板から浮くまでの犠牲層エッチング。曲線型電極の下にある埋め込み酸化膜は完全に除去しない。

(e) 片持ち梁を駆動したときに、曲線型電極と片持ち梁が通電しないように、絶縁層で覆う。

熱酸化処理により酸化膜で全体を覆う。この酸化膜が絶縁層となる。

図4-7に、今回作製したチューリップ型静電マイクロアクチュエータの詳細とSEM写真を示す。(1)のウェハを利用して作製したものである。

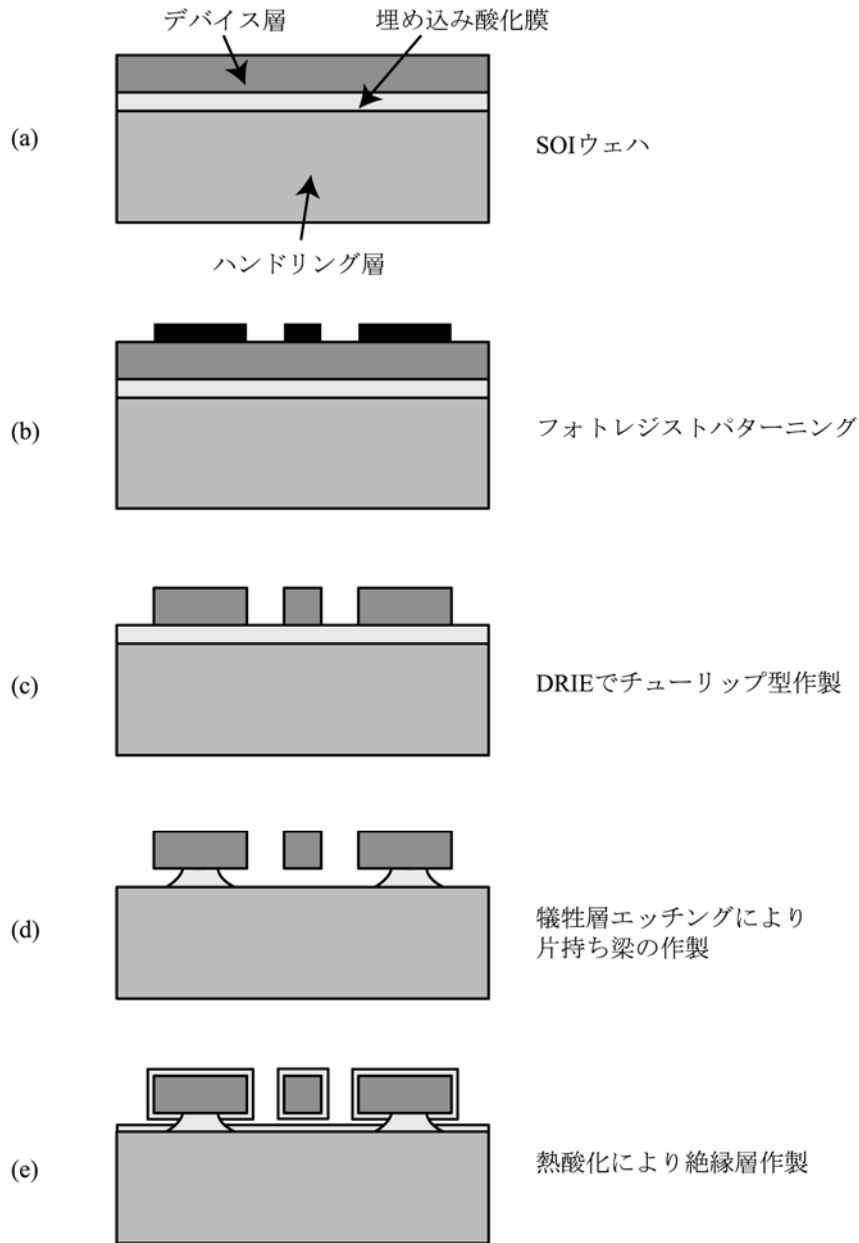


図4-6 チューリップ型静電マイクロアクチュエータの作製プロセス

(Unit:micrometers)

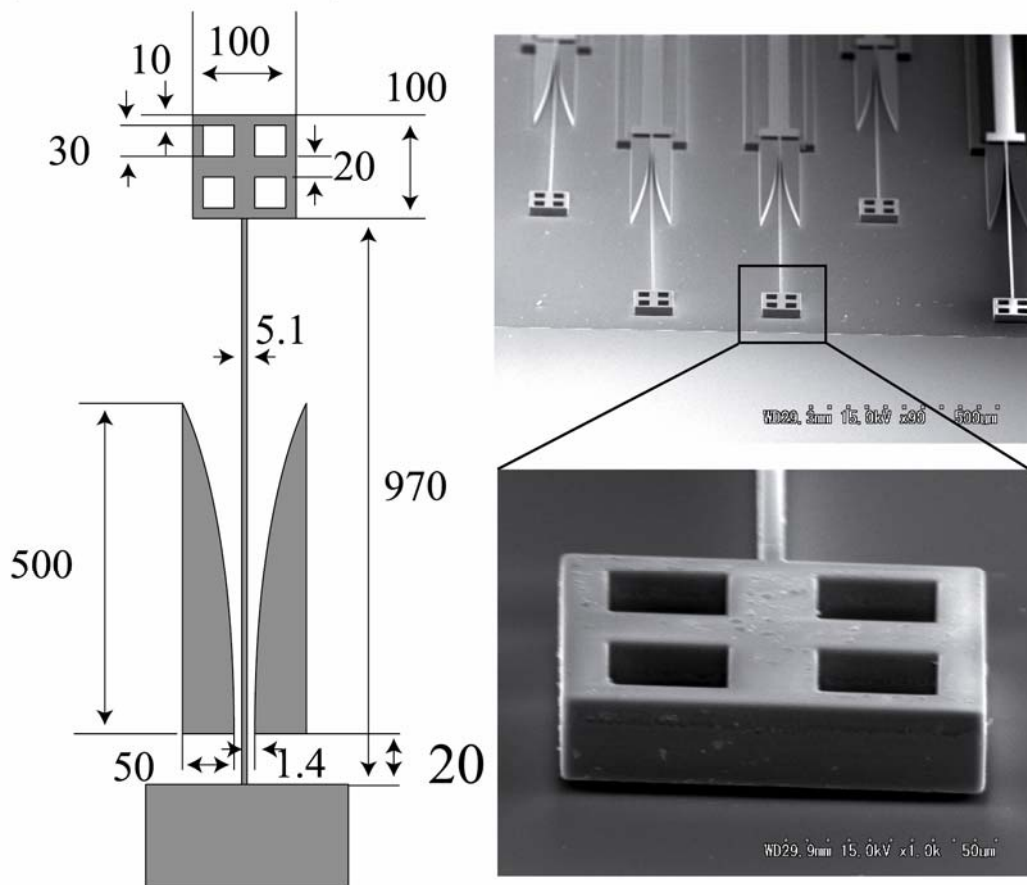


図4-7 作製したチューリップ型静電マイクロアクチュエータ

工程(d)において、ブロック部を基板に固定している Box 層酸化膜の除去に時間がかかってしまうと、曲線型駆動電極まで基板から離れてしまう恐れがある。したがって、電極が基板から離れてしまう前にブロック部を固定している Box 層酸化膜を除去しなければならない。図4-7右下のSEM写真のブロックに開いた4つの穴は、酸化膜のエッチング液 BHF (Buffered Hydrogen Fluoride) をブロック下部に侵入させ、ブロック部を固定している Box 層酸化膜をより早く除去し浮上させるために設けたものである。

4.2.4 動作確認

チューリップ型静電マイクロアクチュエータの動作確認を行った。図4-8に装置図を示す。

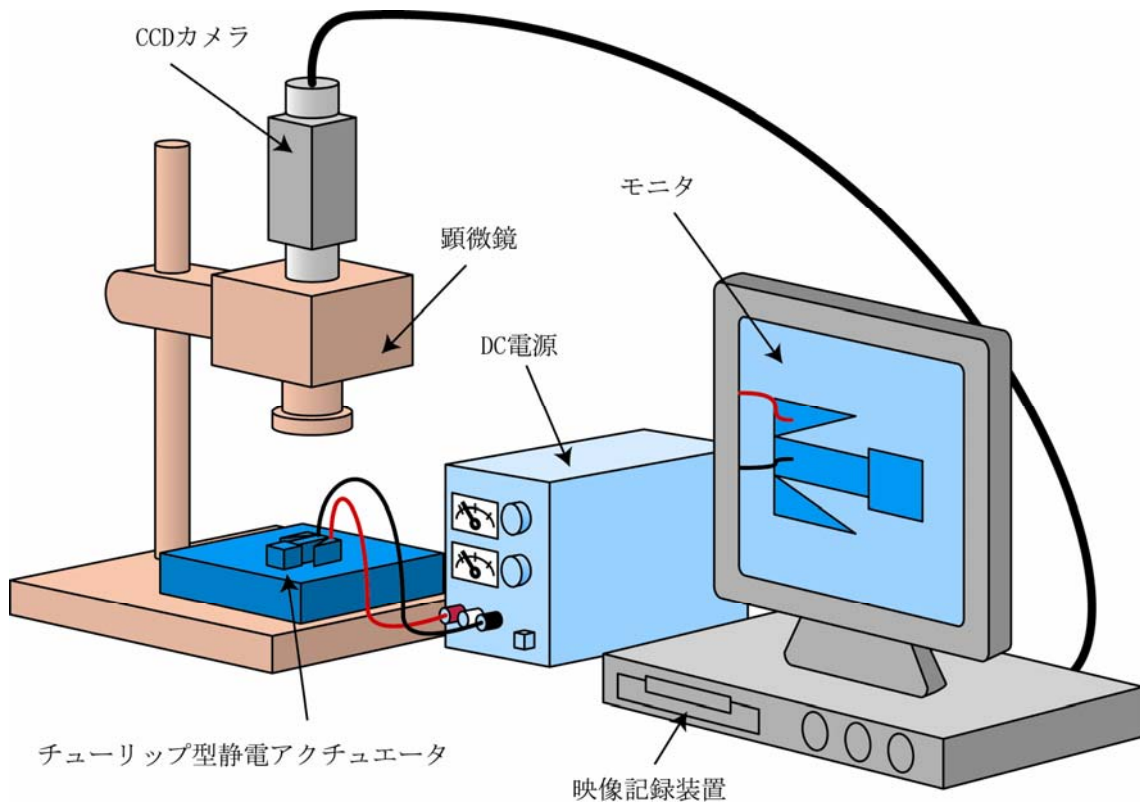
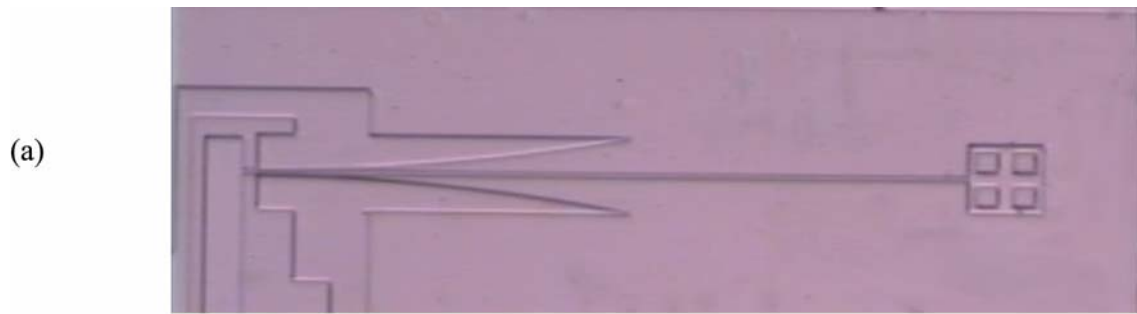


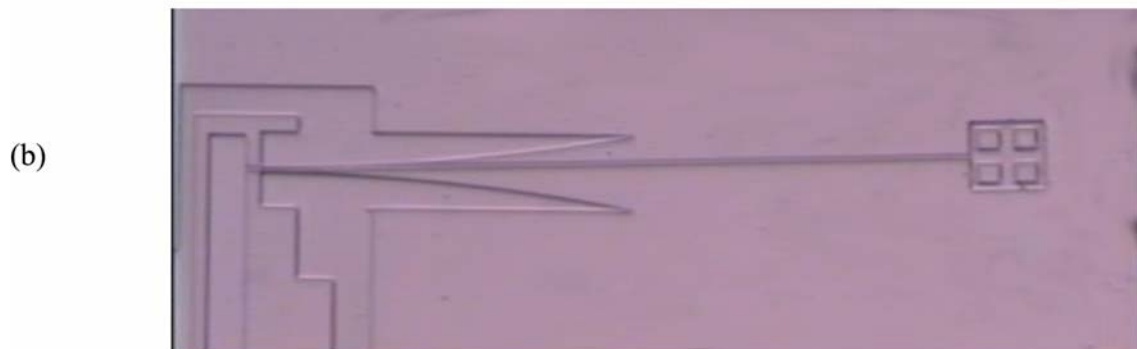
図4-8 チューリップ型静電マイクロアクチュエータの動作確認装置図

チューリップ型静電マイクロアクチュエータに DC 電源を繋ぎ駆動、その様子を光学顕微鏡と CCD カメラで観察する。ブロックの変位はモニタ画面で寸法を測り、比率から計算した。

図4-9に作製したチューリップ型静電マイクロアクチュエータが駆動する様子を示す。(a)は 50V を上側の駆動電極に印加したときの様子である。ブロック中心の変位はほとんど見られなかった。(b)は 140V 印加した様子である。ブロック中心は $32 \mu\text{m}$ 変位した。(c)は 200V 印加した様子である。引き込み現象が発生して、ブロック中心は $138 \mu\text{m}$ 変位した。



$V = 50 \text{ V}$ Deflection = $0 \mu\text{m}$



$V = 140 \text{ V}$ Deflection = $32 \mu\text{m}$



$V = 200 \text{ V}$ Deflection = $138 \mu\text{m}$

図4-9 チューリップ型静電マイクロアクチュエータの駆動

さらに、変位と駆動電圧の関係を調べ、グラフ化したものを図4-10（梁厚さ $h=20 \mu\text{m}$ ）、図4-11（梁厚さ $h=60 \mu\text{m}$ ）に示す。

図4-10（梁厚さ $h=20 \mu\text{m}$ ）の結果から引き込み電圧 178V を確認した。シミュレーションの計算結果とほぼ一致する。ただし、115V 付近で小さな引き込み現象を確認した。これは曲線型電極が完全な曲線ではなく、直線を組み合わせて曲線に近い形状を作り上げているため、直線同士の交点で静電気が局所的に大きくなり、小さな引き込み現象が起きたと考えられる。

図4-11（梁厚さ $h=60 \mu\text{m}$ ）は梁固定端付近の駆動電極と梁とのギャップを変えた結果である。ギャップは $1.12 \mu\text{m}$ と $2.12 \mu\text{m}$ であり、それぞれ引き込み電圧 170V、200V を確認した。ギャップを小さくすることによって、引き込み電圧を小さくできることがわかる。これも図4-10と同様に、シミュレーション結果とほぼ一致した。

次に、4.2.3 節で述べたプロセス(e)において絶縁層としてデバイス表面を覆った熱酸化膜と引き込み電圧との関係を調べた。熱酸化によってシリコン上に酸化膜を形成する場合、形成した酸化膜厚さの 45%程度デバイス表面が膨らむ。そのことから、プロセス(d)において完成したチューリップアクチュエータのギャップが、プロセス(e)で熱酸化することによって小さくなる。そのため熱酸化膜の厚さを厚くすると、引き込み電圧を小さくできることが期待される。その結果を図4-12に示す。

結果から熱酸化膜を厚くすることによって引き込み電圧を小さくすることができることを確認した。ただし、作製する SOI ウェハの BOX 層厚さを考慮しないと、駆動の際にブロックと基板が擦れてしまうため、駆動できなくなる。したがって、SOI ウェハの BOX 層厚さから熱酸化膜の厚さを考慮して作成する必要がある。

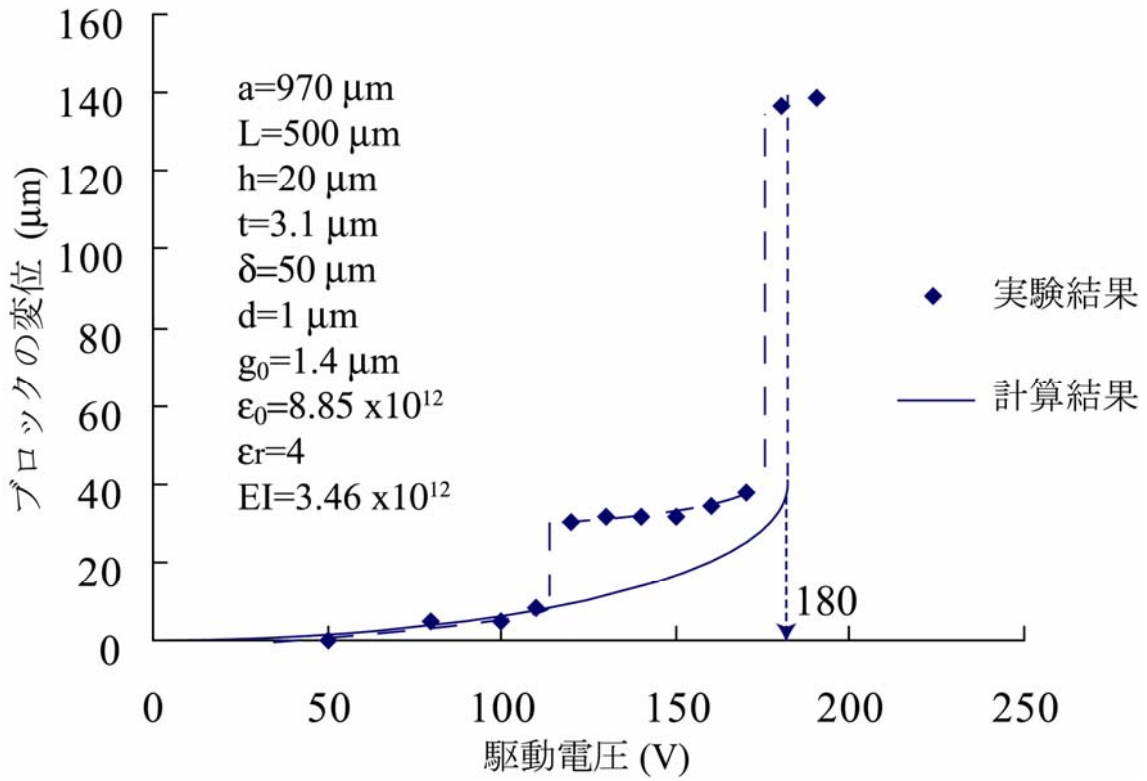


図4-10 ブロックの変位と駆動電圧の関係 ($h=20 \mu\text{m}$)

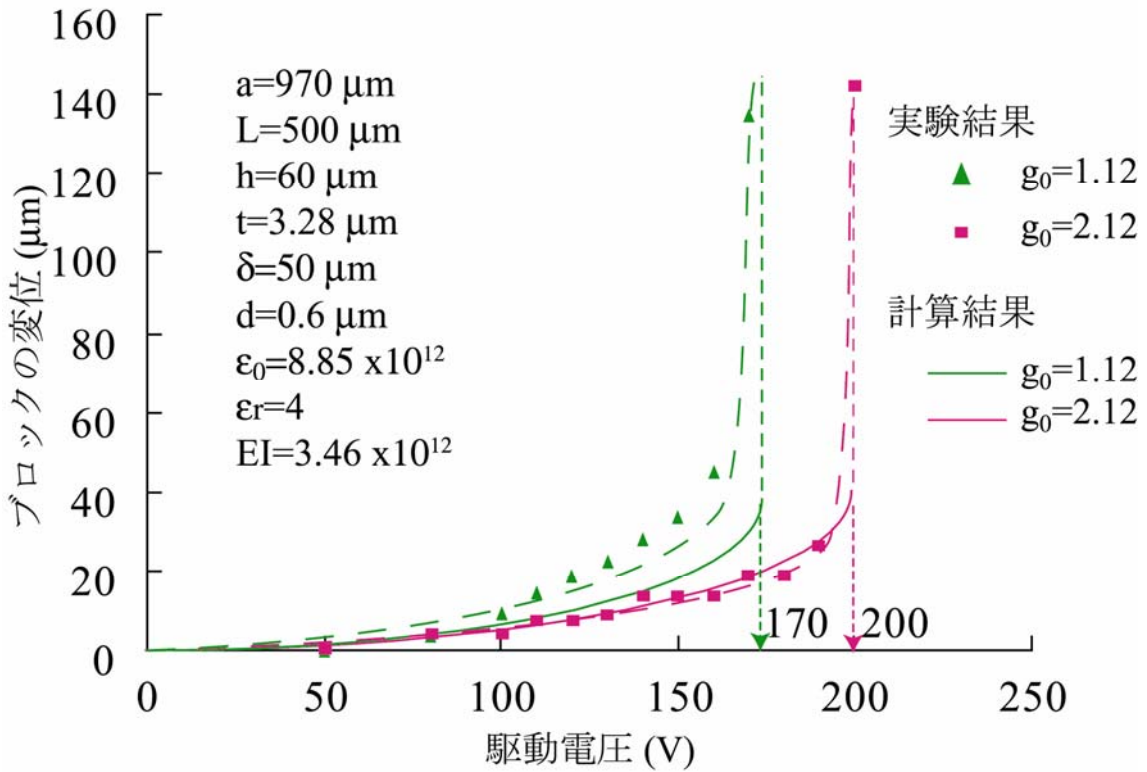


図4-11 ブロックの変位と駆動電圧の関係 ($h=60 \mu\text{m}$)

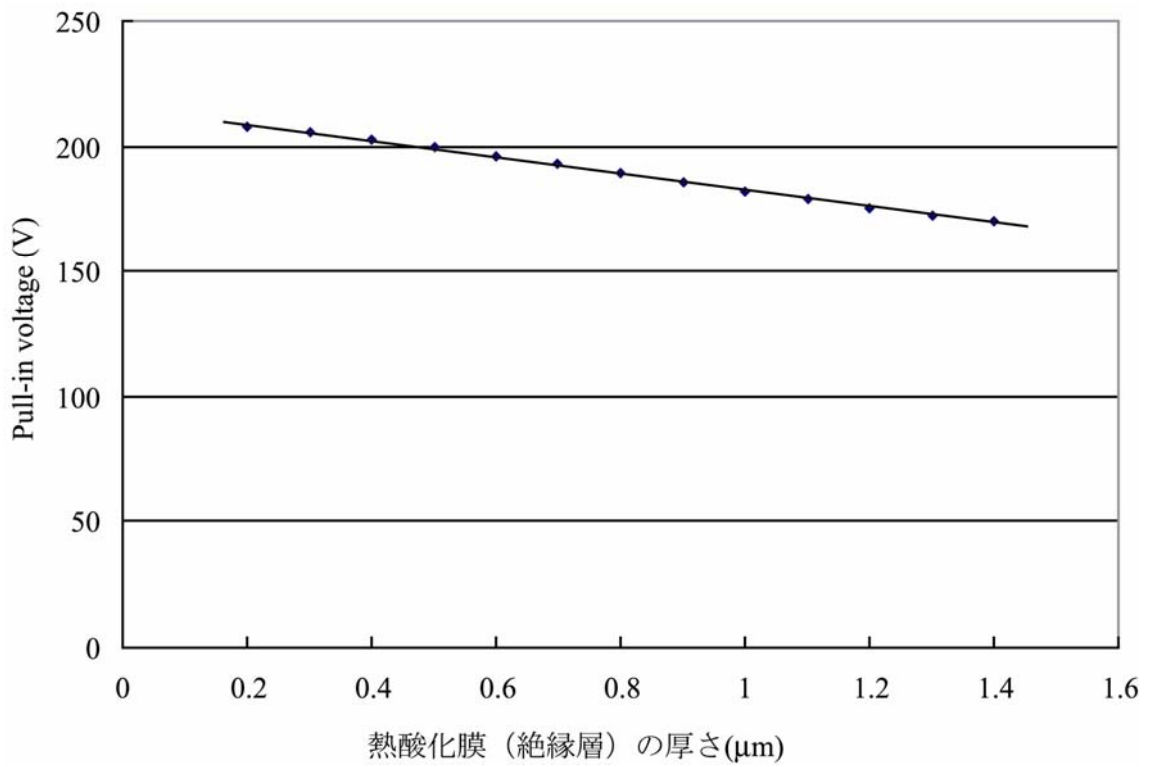


図4-12 引き込み電圧と熱酸化膜（絶縁層）の厚さの関係

4.2.5 チューリップ型静電マイクロアクチュエータの強度評価

チューリップ型静電マイクロアクチュエータを、本デバイスで利用する場合、図4-13(a)(b)のように力を受け変形する。そこで本節ではこの変形にともなうチューリップ型静電マイクロアクチュエータの歪を計算し、その強度を評価する。

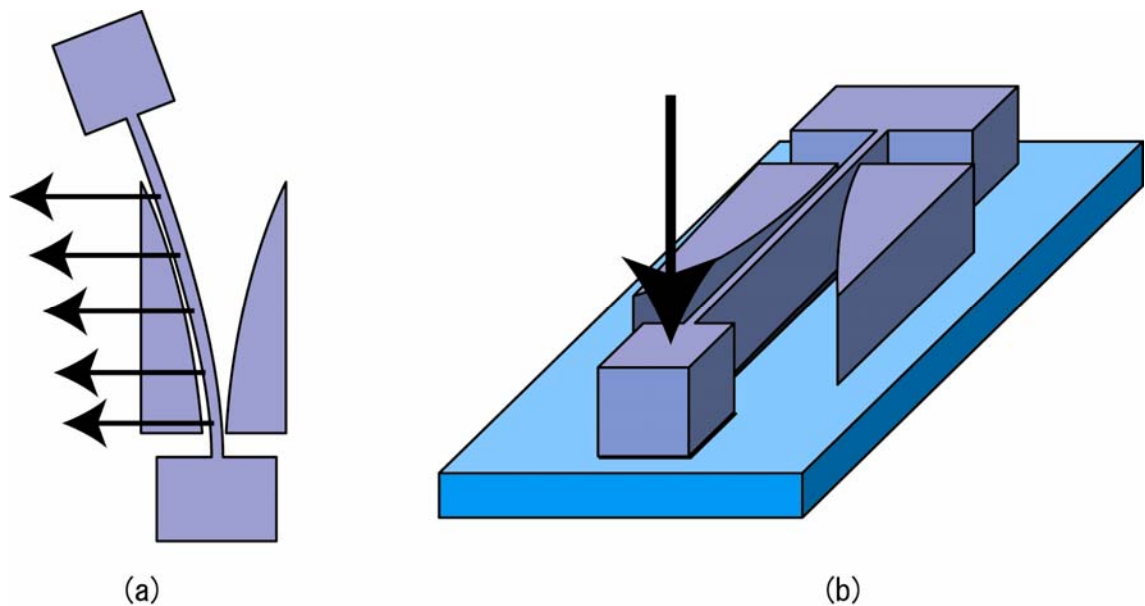


図4-13 チューリップ型静電マイクロアクチュエータの変形の様子

図4-13(a)の場合、静電気力によって片持ち梁が駆動電極に引っ張られ、基板に平行に駆動し変形する。したがって、片持ち梁に大きな歪が予想される。また、梁の変形量が梁の幅に対して非常に大きいため、簡単な材料力学では計算できない。そこで片持ち梁の大きさを以下のように設定し、Coventor Ware による FEM シミュレーションを行った。

長さ $L = 970 \mu\text{m}$

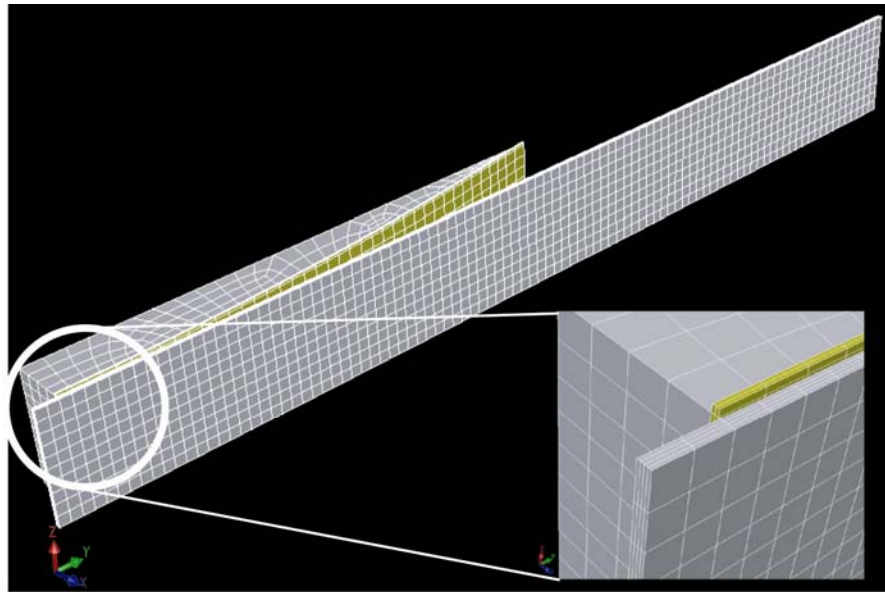
幅 $t = 5 \mu\text{m}$

厚さ $h = 100 \mu\text{m}$

材質 単結晶 Si

片持ち梁軸方向 (100)

図4-14は FEM 解析の各種条件である。結果を図4-15に示す。



item	Values
Nodes	5390
Elements	3880
Element type	linear hex 8nodes

図4-14 FEMシミュレーションの各種条件

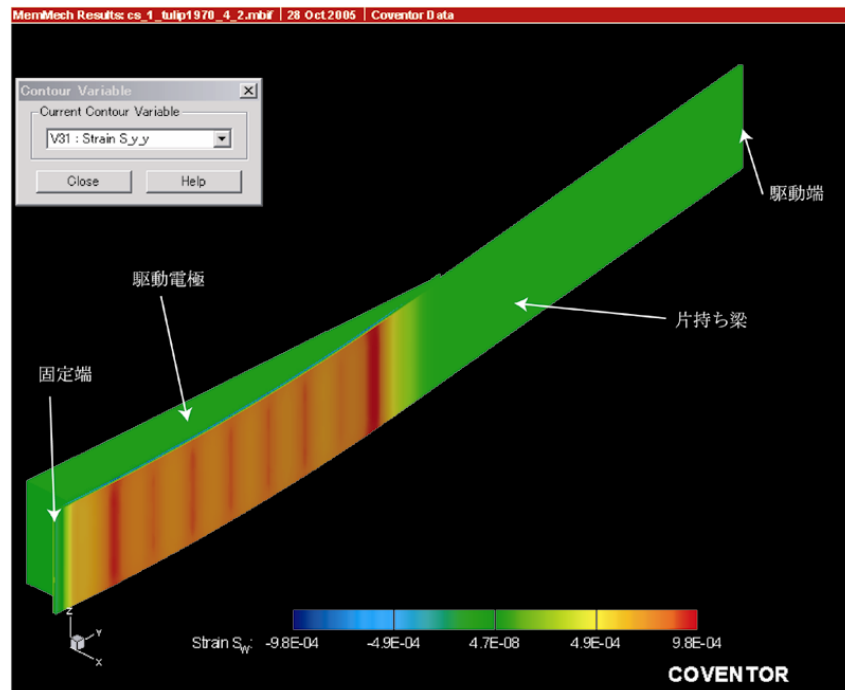


図4-15 FEMシミュレーションの結果

シミュレーション結果から、静電気力により基板に平行に駆動したチューリップアクチュエータの最大歪は0.00098%と解る。材料に単結晶シリコンを使用しているため、駆動による破壊はほぼ発生しないと考えられる。

図4-13(b)は、ブロックがアレイ状微小突起のメサ構造にクラッチングした時にブロックは基板に垂直な力を受け、片持ち梁を変形させる場合である(図4-16)。この場合、梁の最大変位が梁の厚さからみて非常に小さいため、簡単な材料力学の考え方で歪を計算することができる。今回の場合、歪が最大となるところは梁の固定端上面である。梁のたわみ量を y_{\max} とすると

$$y_{\max} = \frac{Pl^3}{3EI} \quad (8)$$

ここで P はメサ構造からの荷重、 l は梁長さ、 E はヤング率、 I は断面二次モーメントである。さらにこの式から荷重 P は

$$P = \frac{3y_{\max}EI}{l^3} \quad (9)$$

で表され、固定端上面の歪 ε_0 は

$$\varepsilon_0 = \frac{Plh}{2EI} = \frac{3y_{\max}h}{2l^2} \quad (10)$$

となる。ここで h は梁の厚さである。

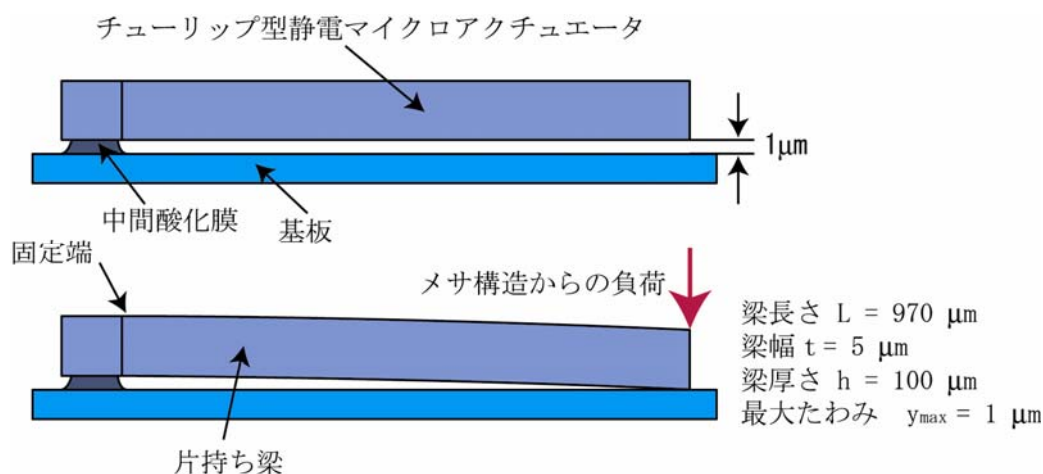


図4-16 片持ち梁の変形

この式 (10) にチューリップ型静電アクチュエータの各種条件を代入すると最大歪 ε_0 は 0.0026% となる。ここから、梁の最大曲げ応力は 3.4 MPa である。シリコンの破壊応力値は 1GPa～であることから、垂直な荷重によるチューリップ型静電アクチュエータの破壊は発生しないと考えられる。

第5章 ディスプレイ用アクチュエータシステムの試作

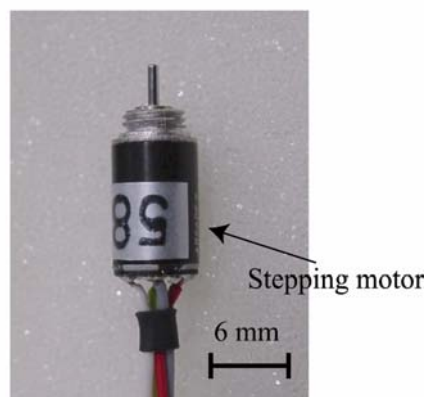
5.1 ミリサイズアクチュエータ

5.1.1 設計

本システムの出力はクラッチ機構全体の上昇下降によって生み出される。この出力はミリサイズアクチュエータの出力に依存することになる。本システムは将来的に触覚ディスプレイへの応用を考えている。したがって数十mNという大きな出力と数十 μm の変位を必要とする。こういった大きな出力を得るために、本研究では市販されているステッピングモータを利用することを提案する。

スイスARSAPE社製
小型ステッピングモータ
シリーズADM 0620

Steps per revolution	20
Function mode	2 phase on
Roter magnet	Bonded neodymium magnet
Max. starting pulse rate	1000pps min



モータドライバ

図5-1 利用した小型ステッピングモータ

ステッピングモータの大きな特徴の1つに「周期的な信号入力により、回転速度、回転角、回転方向の制御が非常に簡単である」ことが挙げられる。このことから、本システムは μm 単位での上昇、下降を繰り返す必要があり、ステッピングモータがその利用に適している。しかしながら、ミリサイズアクチュエータに適用するには回転機構をリニア運動に変換する機構が必要である。

ここで、ステッピングモータの回転運動をネジ機構や偏心軸機構によりリニア運動へ変

換する二つの異なった機構を提案する。ネジ機構を用いたものをネジ型、偏心軸機構を用いたものを偏心軸型とする。

ネジ型

図5-2(a)に示すようにステッピングモータを縦に配置し、軸にネジを装着してトランスミッションを上下させる機構である。今回、ネジピッチが $35\mu\text{m}$ のものを採用した。したがって1パルス $17\mu\text{m}$ の変位を得ることが出来る。ステッピングモータの回転方向を変える事によって駆動ステージの上下運動を制御するため、変位の大きさは自由になるがステッピングモータの回転方向を制御するコントローラが必要となる。

偏心軸型

図5-2(b)に示すようにステッピングモータを横に配置し、偏心軸によりトランスミッションを上下させる機構である。偏心の幅によって変位を調節する。ステッピングモータの回転方向は一定のまま利用できるため、回転方向を制御するコントローラは必要がないが、変位の調節をする場合は偏心軸を取り替える作業が必要になる。

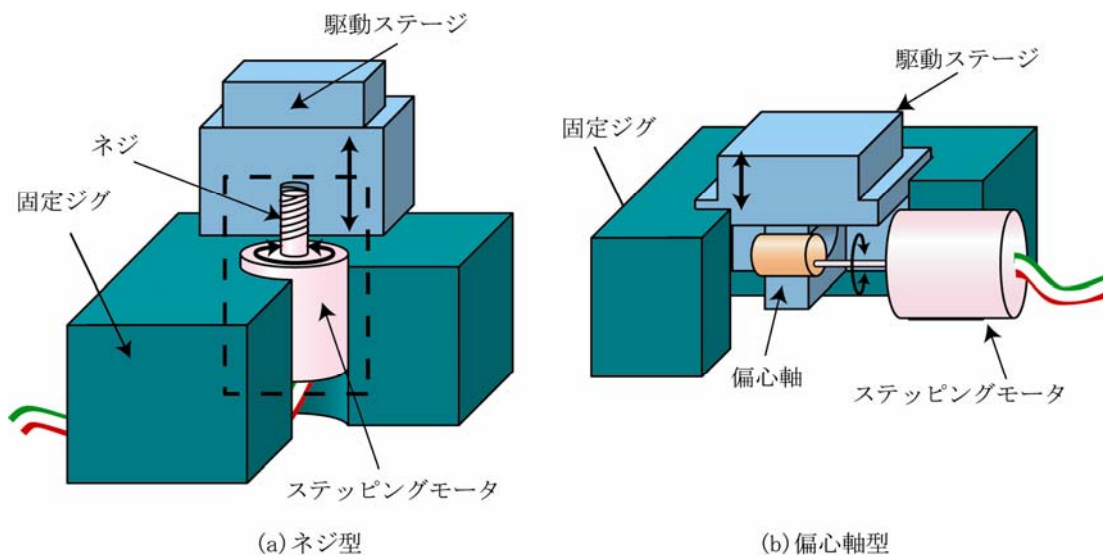


図5-2 回転運動⇒リニア運動変換機構(a)ネジ型(b)偏心軸型

ミリサイズアクチュエータの主要部品は固定ジグ、駆動ステージ、ステッピングモータの3点である。図5-3 に作製したネジ型ミリサイズアクチュエータ、図5-4 に偏心軸型ミリサイズアクチュエータの写真を載せる。

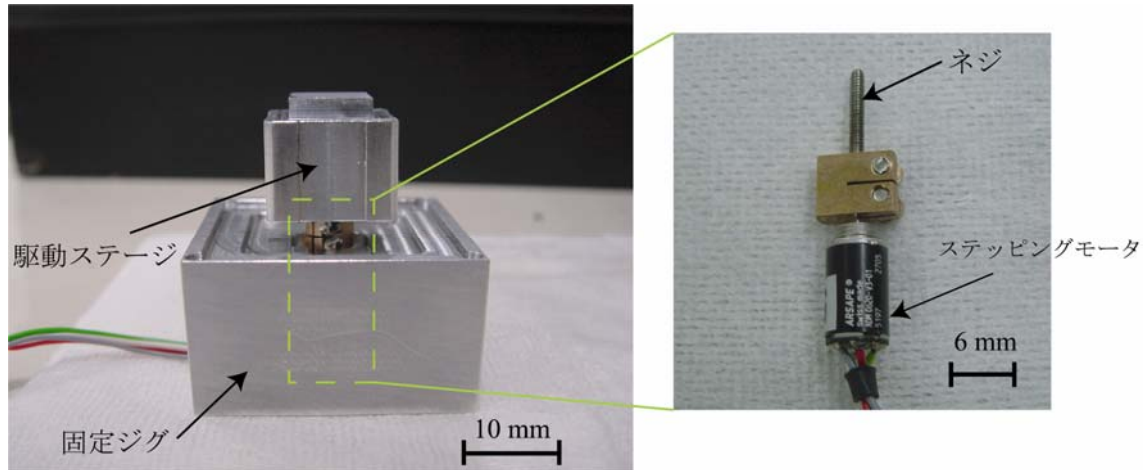


図5-3 ネジ型ミリサイズアクチュエータ

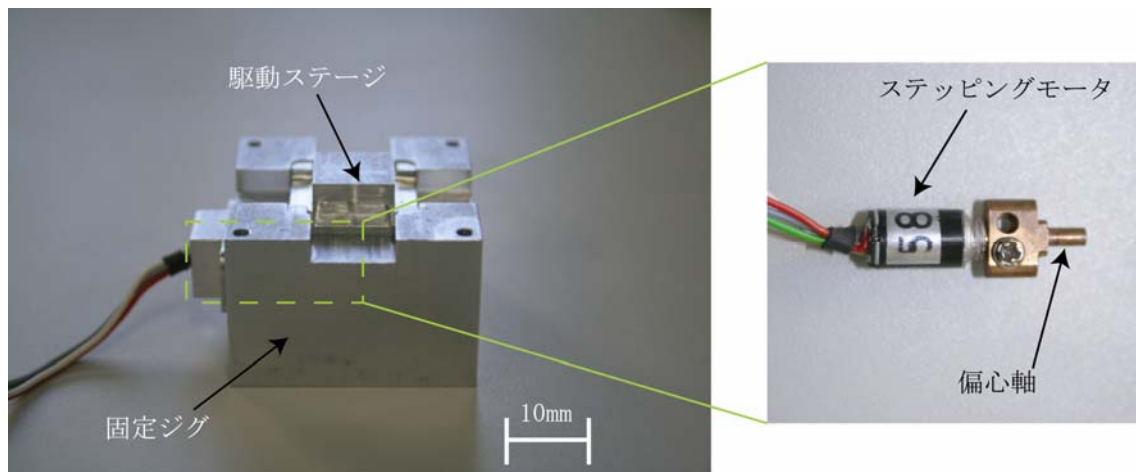


図5-4 偏心軸型ミリサイズアクチュエータ

上述したように、ネジ型ミリサイズアクチュエータではステッピングモータの回転方向を制御するコントローラが必要である。

ステッピングモータの仕様から、ステッピングモータへ印加する周波数が20Hz の場合 1rps となる。触覚ディスプレイとして必要な変位と速度を考えると、最大100Hz 程度までのパルス数の可変が可能なコントローラが必要である。クラッチ機構のON / OFF の切り替えに時間が必要であることや出力時の視認性確保のため駆動ステージの最上点及び最下点で一定の静止時間を設定できる必要もある。

以上のような信号の可変コントロールを可能とするコントローラを設計、作製した。図5-5にネジ型ミリサイズアクチュエータのステッピングモータの回転方向を制御するコントローラを載せる。

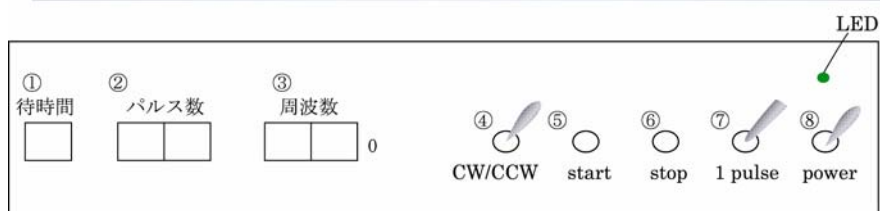


図5-5 ネジ型ミリサイズアクチュエータ用コントローラ

5.1.2 ミリサイズアクチュエータの動作確認

ステッピングモータ、ドライバ、回転⇒リニア運動変換機構、コントローラを実装し、動作確認を行った。

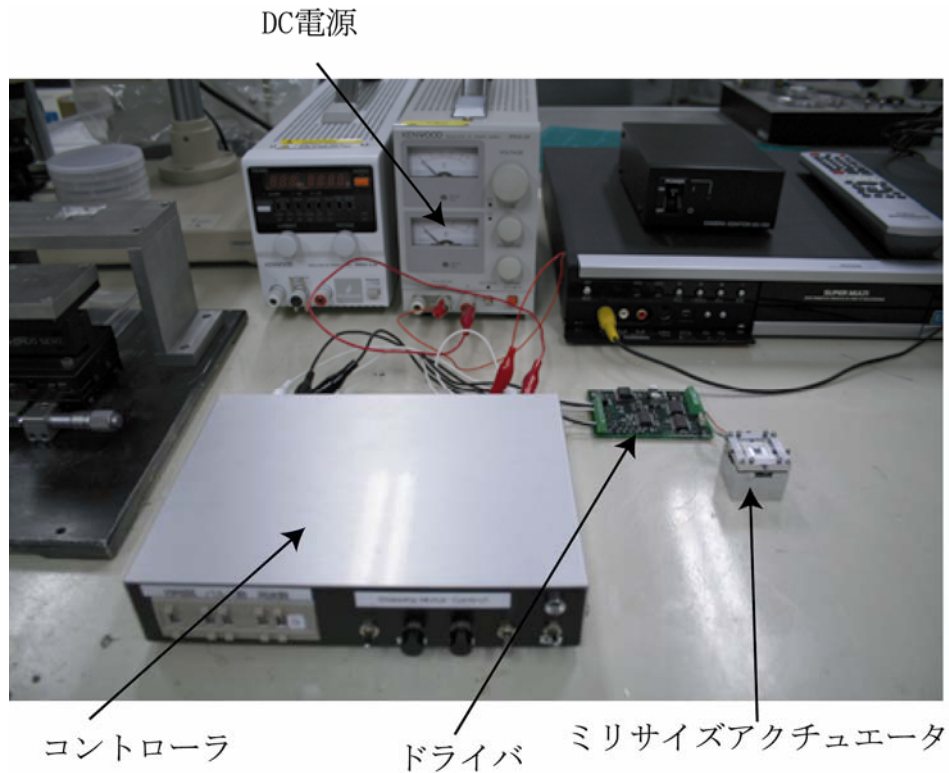


図5-6 実装の様子

ネジ型ミリサイズアクチュエータ

周波数に依存せず、最大出力600mNを確認した。出力は電子天秤上にミリサイズアクチュエータを固定し、さらに駆動ステージを電子天秤の外部に固定した屋根に固定、ステッピングモータを駆動させ電子天秤の表示により確認した。変位は1パルスにつき $18\mu\text{m}$ とほぼ設計通りであることを確認した。

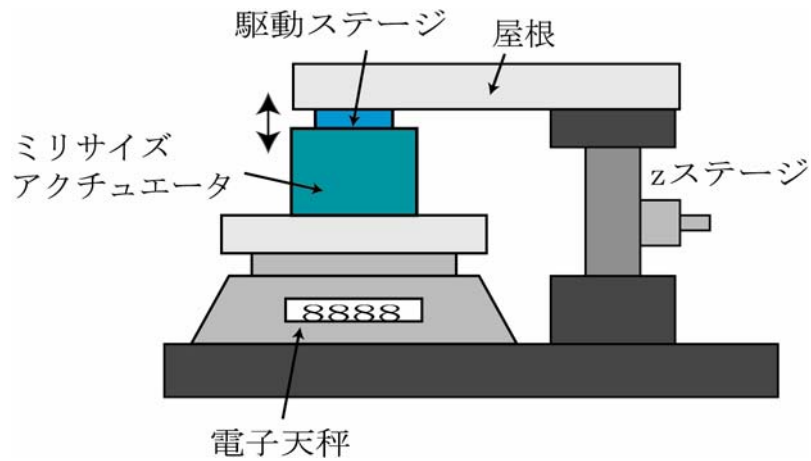


図5-7 ミリサイズアクチュエータの出力評価装置図

偏心軸型ミリサイズアクチュエータ

入力信号20Hzで最大出力600mNを確認した。しかしながら、入力信号の周波数を上げると出力が落ちることを確認した。入力信号の周波数を上げた場合、ステッピングモータの特性上、脱調現象などによりトルクが減少するためである。ただし、入力信号100Hzでも出力400mNと十分大きな出力を得ているので、問題は無いと判断した。

5.2 ディスプレイシステムの実装

3章で述べたアレイ状微小突起、4章で述べたチューリップ型静電アクチュエータ、本章で述べたミリサイズアクチュエータを統合し、ディスプレイシステムのプロトタイプを製作した。サイズは3.0 cm × 3.0 cm × 4.0 cm、外観を図5-8に示す。

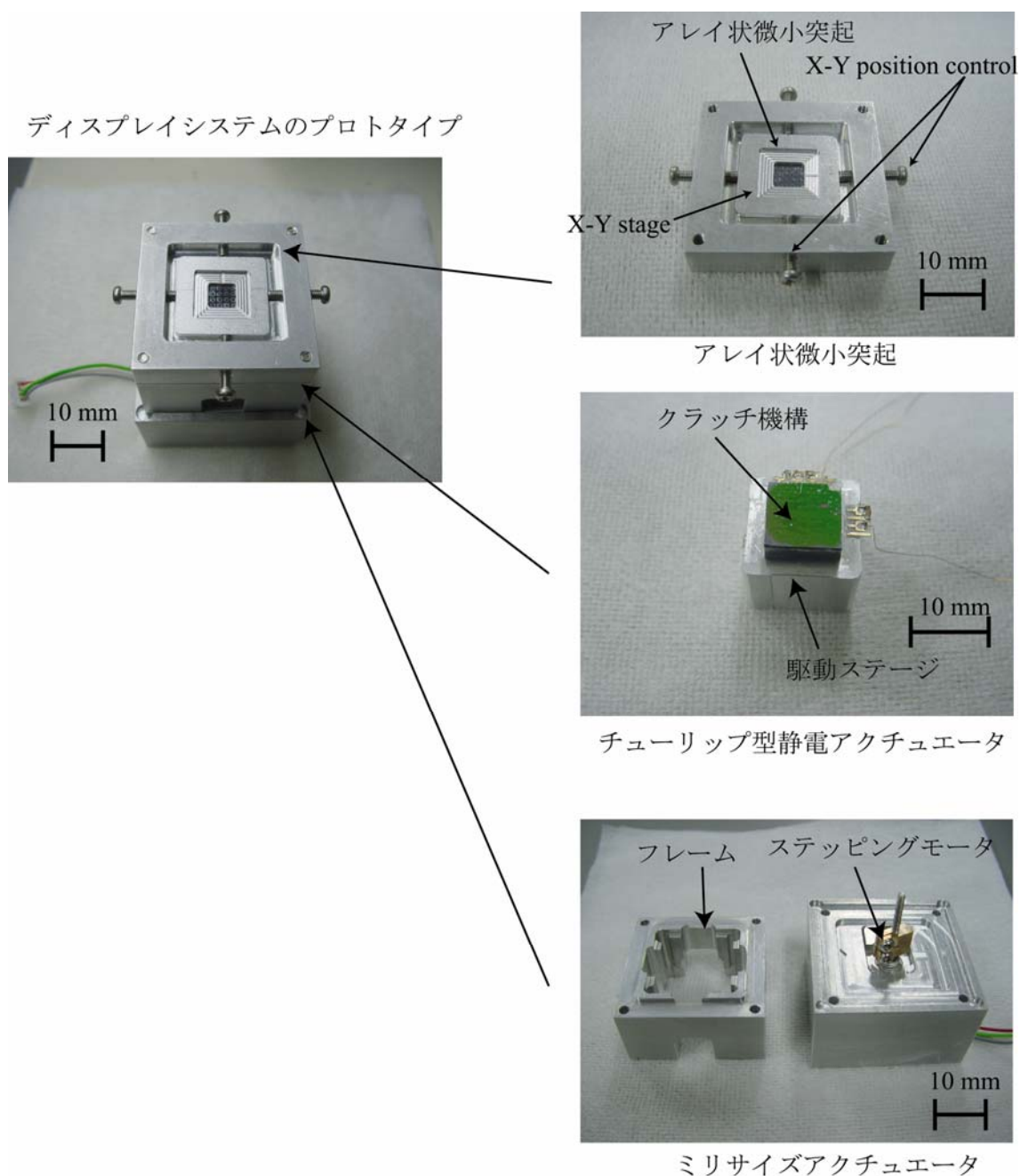


図5-8 ディスプレイシステムのプロトタイプ

また、クラッチ機構とアレイ状微小突起の詳細な組み合わせの様子を図5-9に示す。初期状態ではブロックはメサ構造とクラッチングする位置関係ではなく、ミリサイズアクチュエータが駆動しても、微小突起は変位しない。チューリップ型静電アクチュエータを駆動し、その後ミリサイズアクチュエータを駆動することによって微小突起を変位させる。したがって、変位はチューリップ型静電アクチュエータの厚さ分、つまり図5-9の駆動ストローク分になる。

また、メサ構造はアレイ状微小突起のフレーム部よりも厚く設計してある。これはアレイ状微小突起のフレーム部とチューリップ型静電アクチュエータが干渉しないようにするためである。

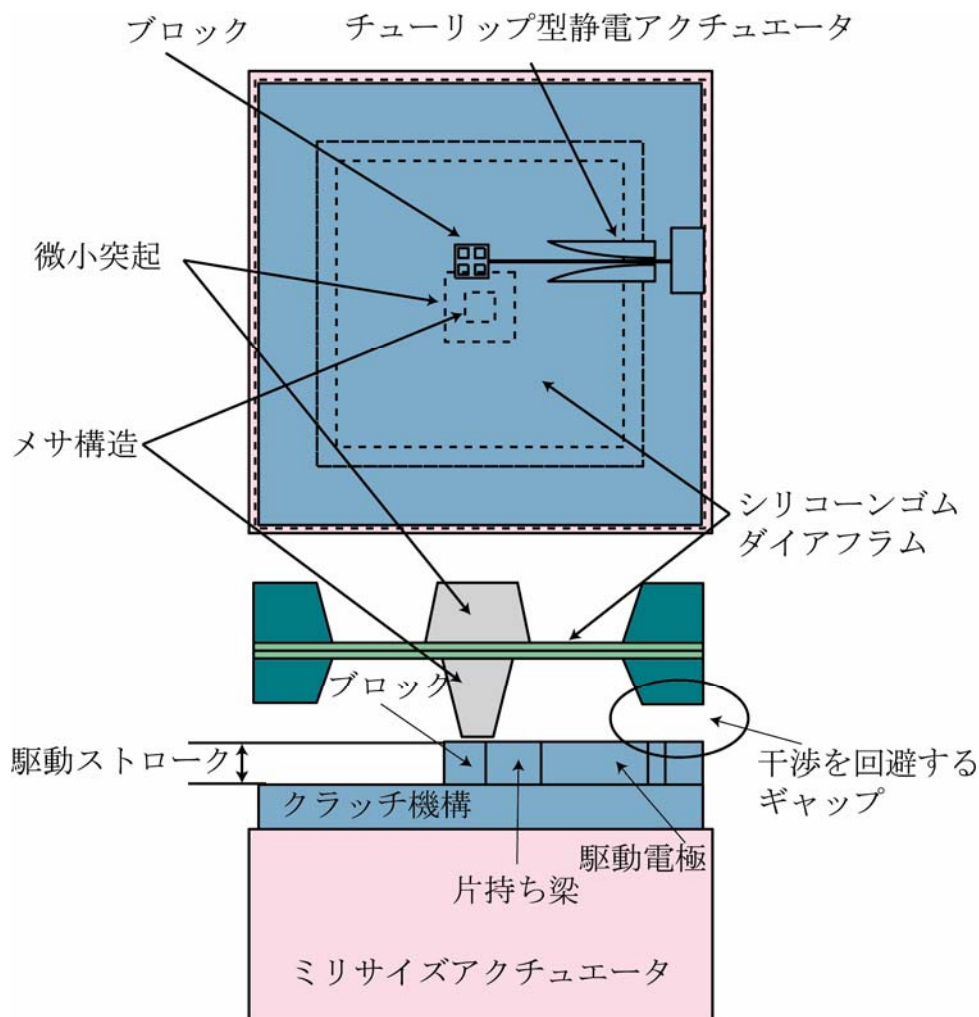


図5-9 クラッチ機構とアレイ状微小突起の組み合わせ

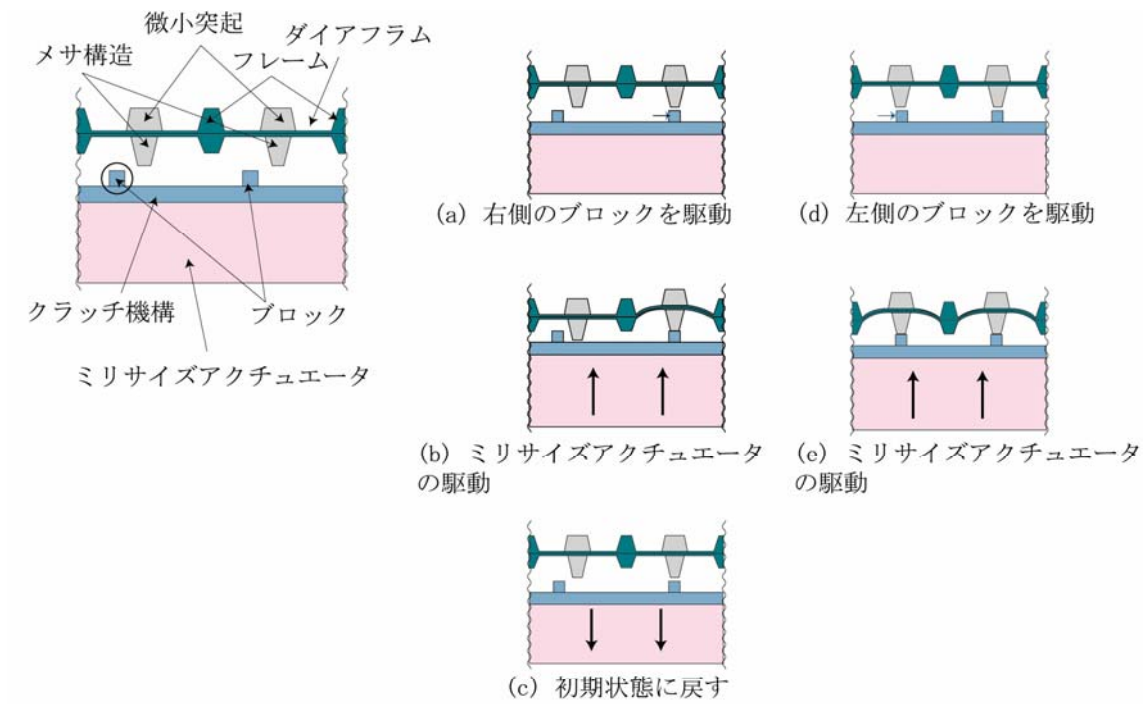
5.3 突起保持機構

5.3.1 背景と駆動原理

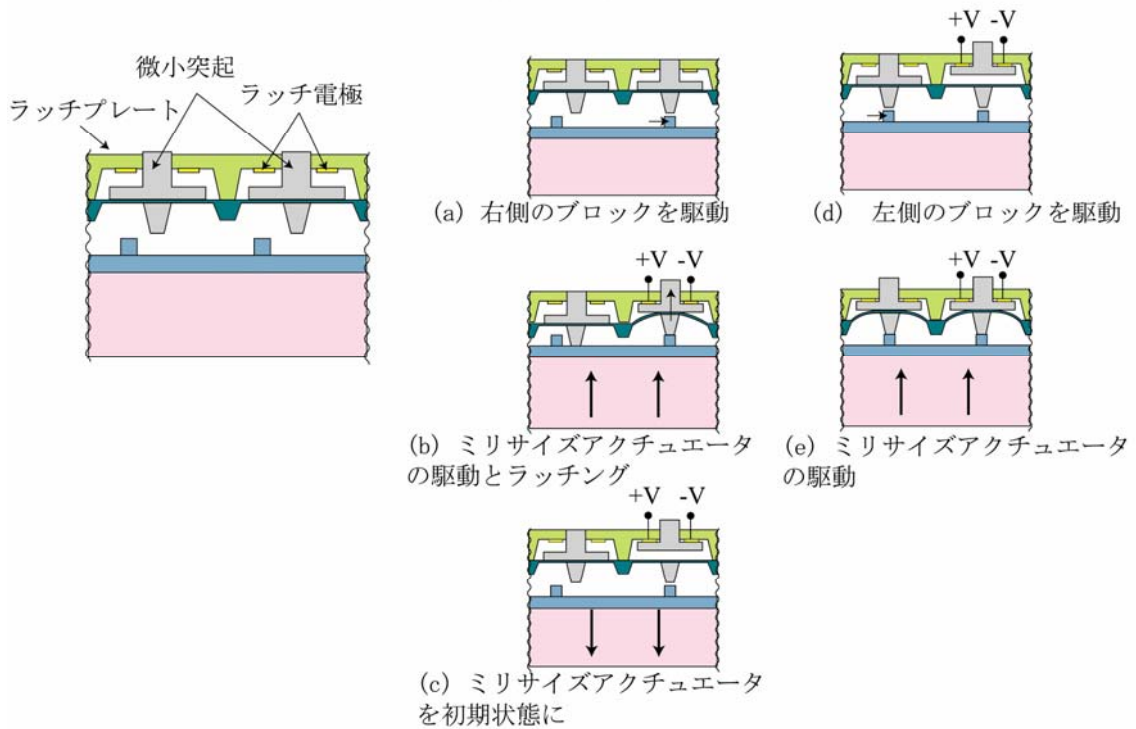
図5-10(1)のように、前節までに提案したディスプレイシステムは、一度駆動した後(a)、さらに別の表示に切り替えたい場合(e)にはミリサイズアクチュエータを下降し、全てを初期状態に戻してから次の状態へと変える(c)。このため一度変位した微小突起の状態を保ったまま、別の状態へと直接表示切替をすることができない。

そこで、本節では上記問題を解決するために表示突起を保持する機構を新たに付加した新ディスプレイシステムを構築する。新ディスプレイシステムはプロトタイプディスプレイに、突起保持機構を付加したものである。突起保持機構は微小突起、ラッチプレート、ラッチ電極から構成される。新ディスプレイシステムの構成と駆動原理を図5-10(2)に示す。

プロトタイプディスプレイシステムと同様に、ブロックとミリサイズアクチュエータを駆動して、表示部を選択する(a)(b)。別の表示に切り替える際は、ラッチ電極に電圧を印加し、静電気力で微小突起を保持しながらミリサイズアクチュエータを下降させる(c)。再度、別のブロックとミリサイズアクチュエータを駆動することによって(d)(e)、微小突起を初期状態に戻すことなく別の表示に切り替えることができる。



(1) 前節までに提案したディスプレイシステム



(2) 本節で提案するディスプレイシステム

図5-10 プロトタイプディスプレイシステムと新ディスプレイシステムの駆動原理

5.3.2 突起保持機構の作製

図5-11に突起保持機構の作製プロセスを示す。

- (a) (100) 方向Si基板の上に結晶異方性ウェットエッチング用マスクを形成
突起を保持するステージ面は平滑でラッチ電極と平行であることが求められる。したがって(100) 方向Si基板をステージとして利用する。(100) 方向Siウェハは結晶異方性ウェットエッチングによって、平滑で基板上面に対して平行な面を形成できるため、ステージの材料として最適であると考えられる。マスク材は熱酸化によるSiO₂膜を形成し、フォトファブ리케이션によるパターニングを行う。
- (b) 結晶異方性ウェットエッチング
微小突起の駆動ストロークと同じ深さだけウェットエッチングを行う。このウェットエッチングによって加工された部分がステージとなる。
- (c) ガラスにスルーホールを開ける。
ラッチ電極を形成するためのガラスウェハに、微小突起を設置する穴を開ける。ガラスウェハはラッチ電極を形成するための基盤である。ラッチ電極もステージ同様に平滑であることが求められ、さらに基板は絶縁性である必要があるため、ガラスウェハを利用する。
- (d) ラッチ電極をパターニング
フォトファブ리케이션によるレジストのパターニングと金属スパッタによって、工程(c)でできたガラス基板にラッチ電極を形成する。
- (e) 工程(b)と工程(d)で出来上がったパーツを接着しダイシング
ガラス接着剤により二つのパーツを接着する。さらにSi部分からステージを切り離すためダイシングによって加工する。
- (f) ダイシングした突起スタンドに絶縁層として酸化膜を形成
切り離したステージのみに熱酸化によって1 μmの酸化膜を形成する。
- (g) 細線ワイヤーから微小突起を切り出し、スルーホールに設置する。

図5-12に作製した突起保持機構を載せる。

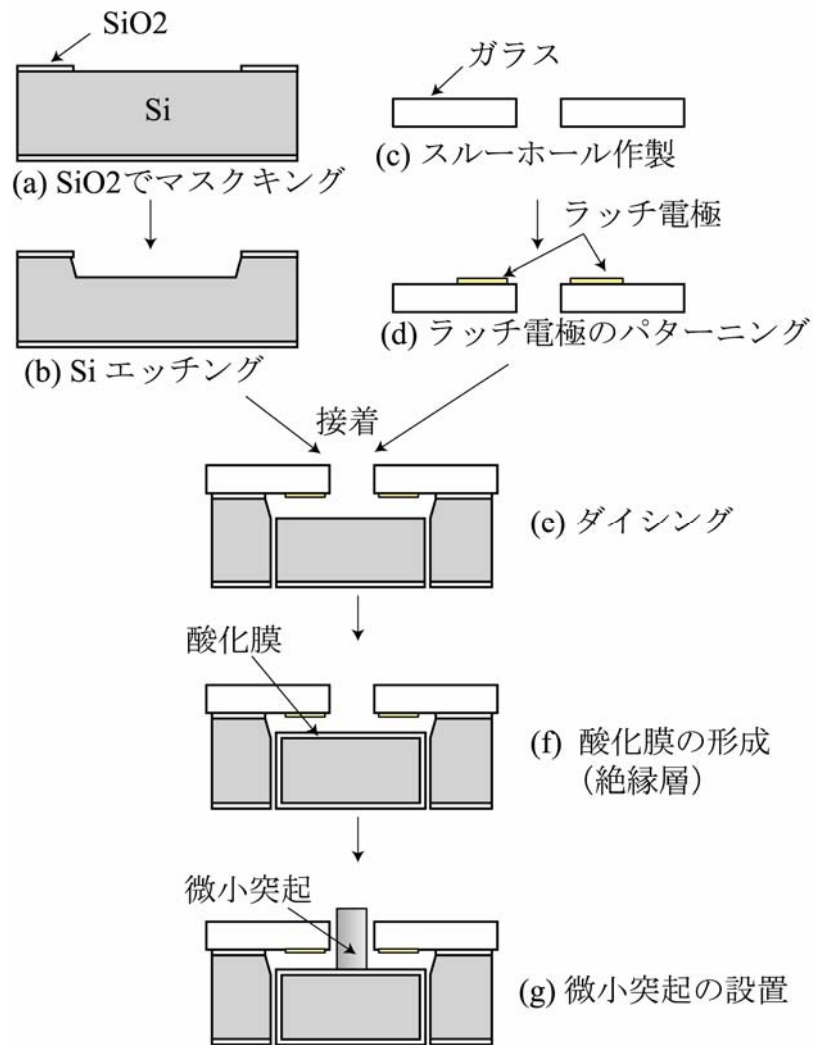


図5-11 突起保持機構の作製プロセス

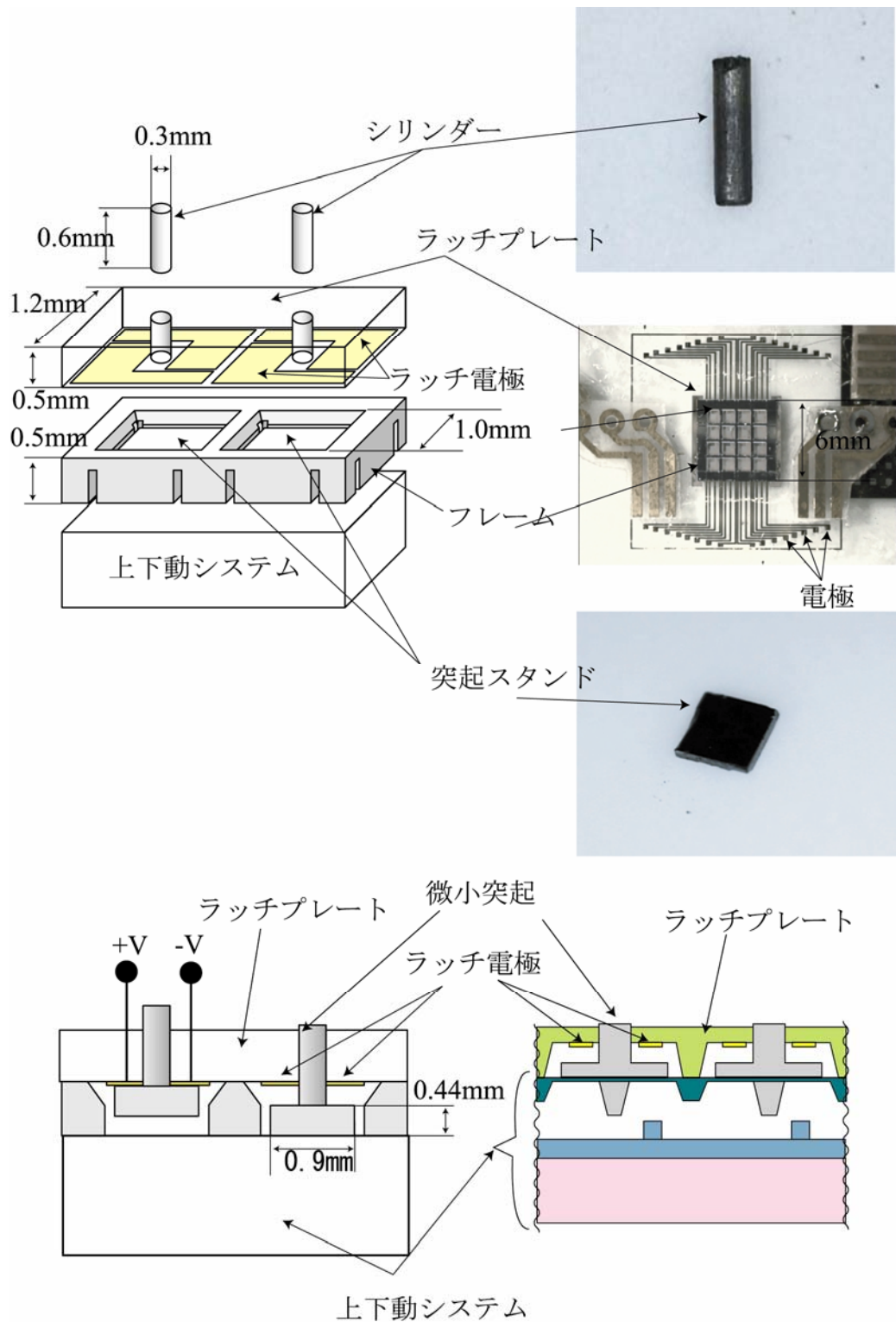


図5-12 作製した突起保持機構

5.3.3 動作確認

突起スタンドは二つのラッチ電極に±Vの電圧を印加することによって、静電気力でラッチプレートに吸着する。ラッチ電極などが完全に平滑で理想的にラッチ電極とスタンドが密着している場合（図5-13(a)）、その吸着力は次式で現される。

$$F = \frac{\epsilon_0 \epsilon_d S V^2}{2d^2} \quad (11)$$

ここで、吸着力F、真空の誘電率 ϵ_0 、絶縁層の比誘電率 ϵ_d 、ラッチ電極の面積S、印加電圧V、絶縁層の厚さd。

しかしながら、ラッチプレートや突起ステージのうねりや表面粗さの影響で、微小な空隙は必ず存在する。したがってラッチ電極とスタンド間に一定の空隙があると仮定した場合（図5-13(b)）、吸着力は次式で現される。

$$F = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{air} S V^2}{2(d_g + \frac{d}{\epsilon_d})^2} \quad (12)$$

ここで空気の比誘電率 ϵ_{air} 、空隙 d_g

実際に、表面段差計（デックタック）によりラッチプレート表面の凹凸を観察したところ平均3.3 μm 程度のバリ等が観察された。

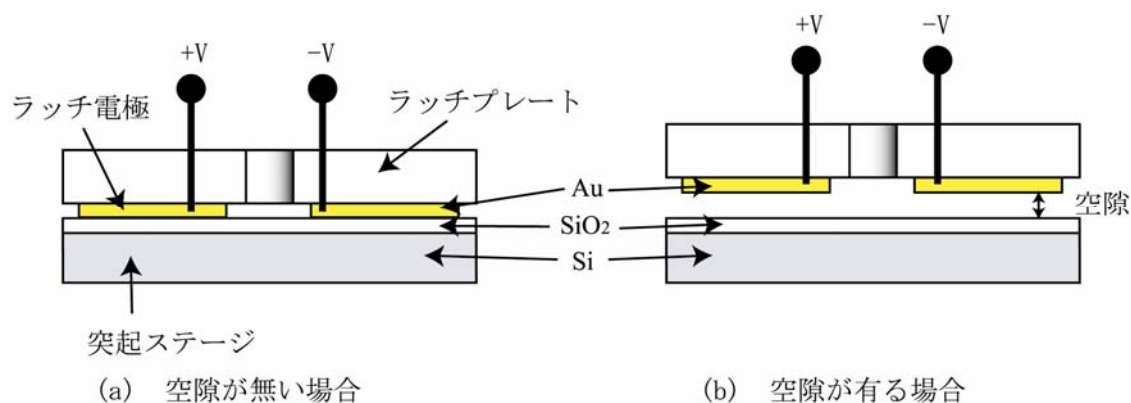


図5-13 ラッチ電極と突起ステージ

以上を考慮して、突起保持機構の動作確認を行った。図5-14は装置図と結果のグラフである。Zステージ1にて突起スタンドと微小突起を上昇させ、ラッチ電極で保持、その後Zステージ2にて平行板バネを介して微小突起に力を加え、その平行板バネの変位から突起スタンドがラッチ電極から離れたときの力を計算した。駆動電圧と吸着力との関係を図5-14に示す。図から吸着力が電圧の二乗に比例していることを確認した。

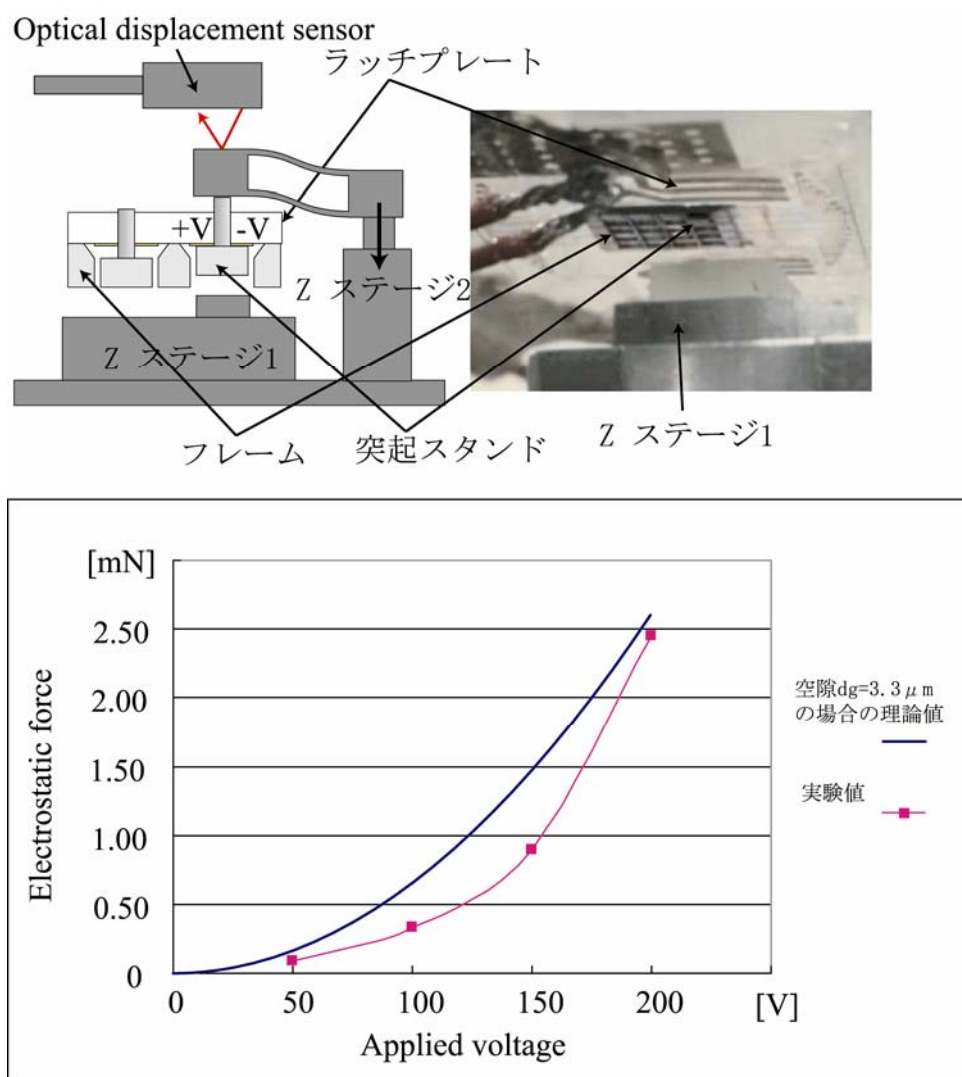


図5-14 突起保持機構の動作確認装置図と結果

5.3.4 実装と今後の課題

図5-15に突起保持機構を実装した新ディスプレイシステムのイメージを載せる。ラッチ電極からの配線の引き出しが難しく、実装はまだ行っていない。今後の課題と解決法として、以下の2点を挙げる。

1、実装

上下動システム（本研究のプロトタイプ）のダイヤフラムを固定するジグに配線用の穴を形成することによって解決出来る。

2、保持力の上昇

保持力（吸着力）が最大2.5 mNと非常に弱い。上下動システムの出力の200分の1程度しかないため、上下動システムの利点の一つである高出力が失われてしまう。したがって、吸着力をあげるために、ラッチプレートやラッチ電極、突起ステージの表面をより平滑化する必要がある。加工プロセスの見直しによってステージの反りやバリを防ぐことが可能である。さらにクリーンルームの利用等により加工時のホコリの侵入もふせぐことができる。

空隙を0.5 μm 程度にすることができれば出力は最大60 mNにすることができる。

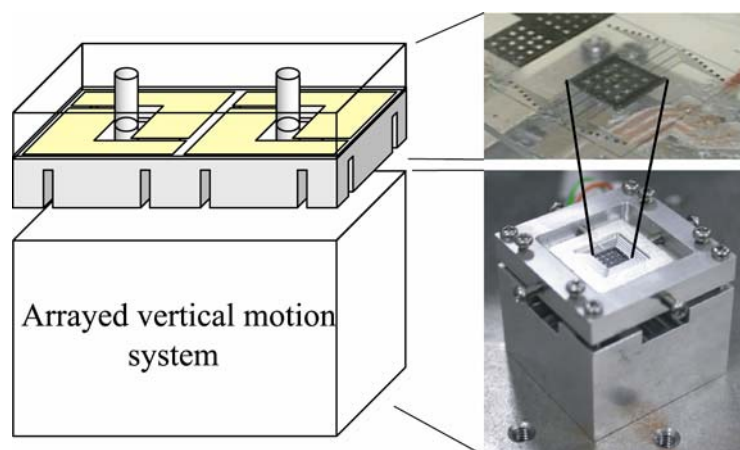


図5-15 突起保持機構実装イメージ

第6章 触覚表示デバイス用アクチュエータシステムの機能評価

6.1 実験方法

プロトタイプディスプレイ用アクチュエータの機能評価を行った。図6-1に観察用の装置図を載せる。実験では、駆動の様子を観察と、変位の評価を行った。変位の評価は図6-1のCCDカメラをレーザー変位計に交換し計測した。

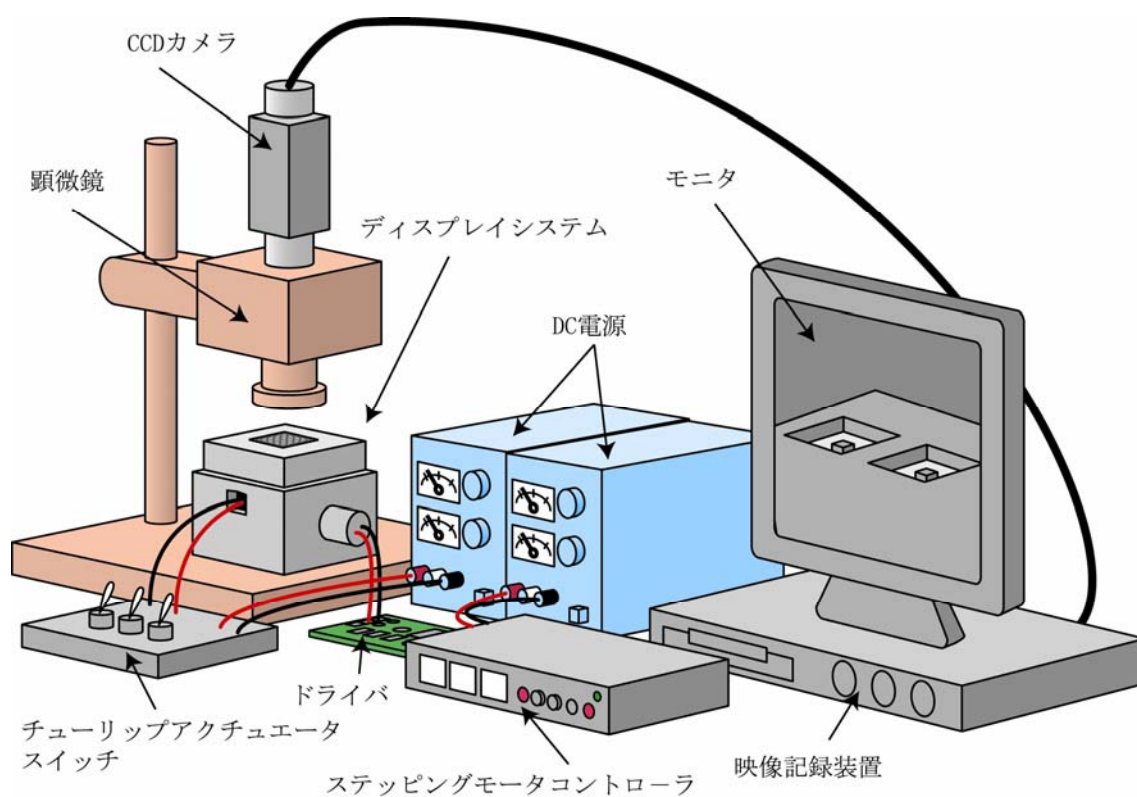


図6-1 機能評価用装置図

6.2 結果と検討

突起保持機構を実装しないプロトタイプディスプレイシステムの駆動の様子を図6-2に載せる。厚さ 20 μm のチューリップ型静電アクチュエータ、ネジ型ミリサイズアクチュエータを採用している。

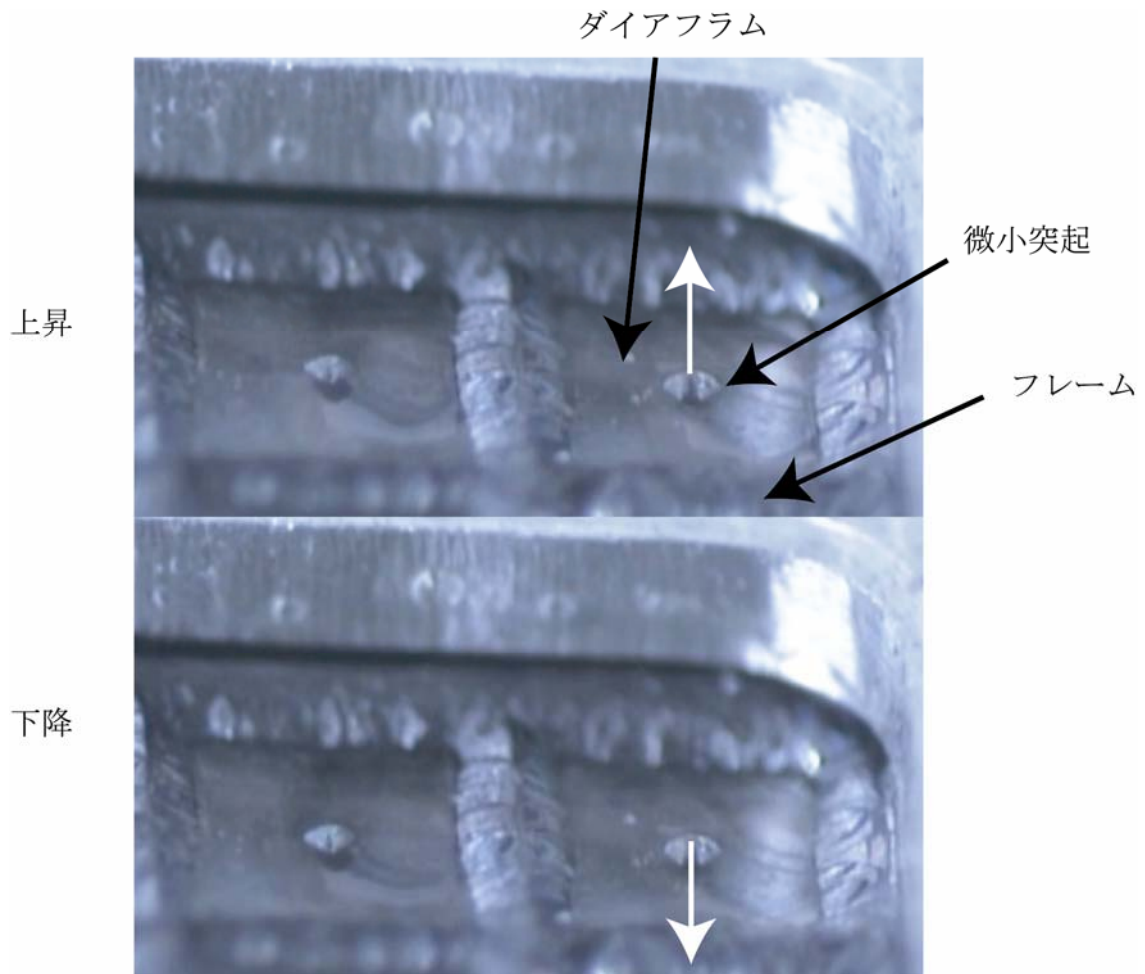


図6-2 プロトタイプディスプレイシステムの駆動の様子

ダイアフラムの大きさが $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ であり、変位が数十 μm 程度なので、写真では、その変位の大きさがわかりにくい。そこで、レーザ変位計の出力をオシロスコープで波形化した ($5\ \mu\text{m/V}$)。

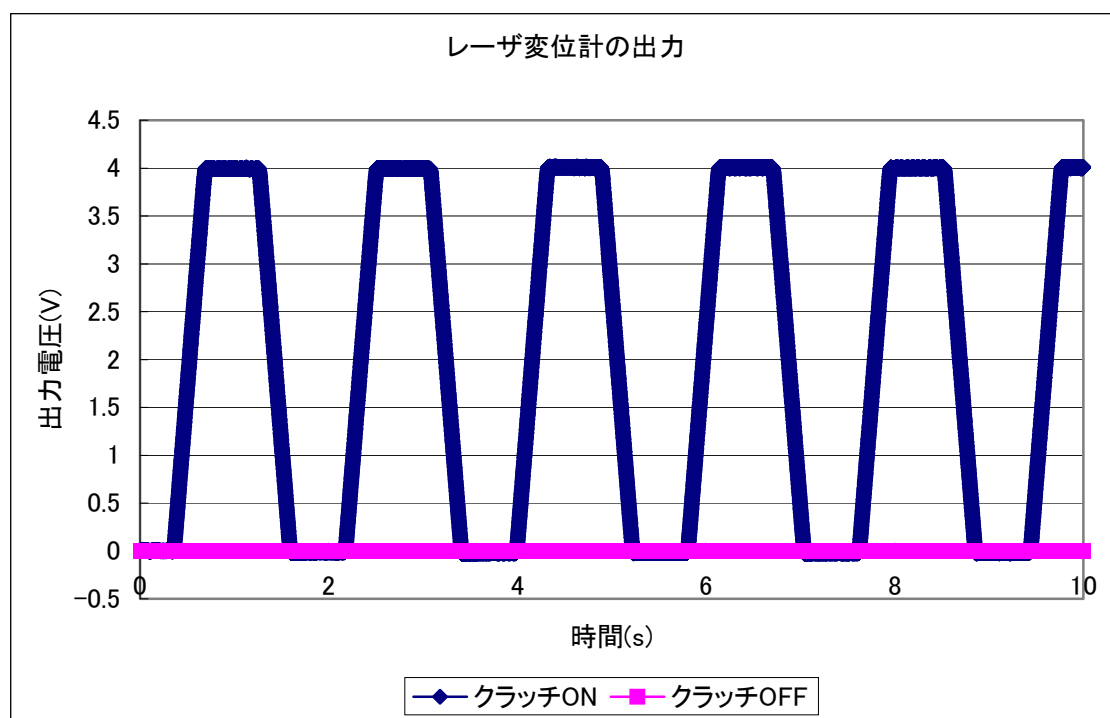


図6-3 レーザ変位計の出力

微小突起がレーザ変位計により $19.2\ \mu\text{m}$ 変位することを確認した。アクチュエータの駆動に伴い、ステッピングモータへの入力信号は 100Hz 、上昇時と下降時の待機時間を 0.9 秒に設定した。第5章のミリサイズアクチュエータの設計から、突起の駆動速度は $1920\ \mu\text{m/s}$ であり、図6-4から十分に人が感知できる変位と速度であると言える。

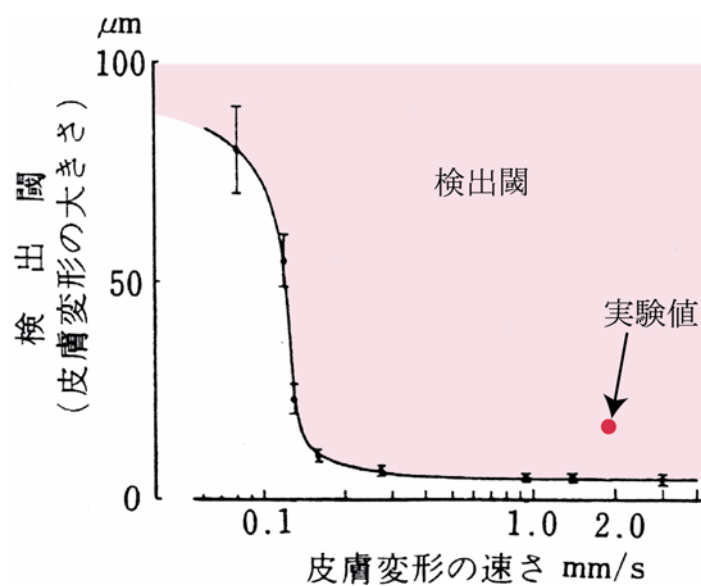


図6-4 人の触覚の検出閾と実験値

以上のことから本アクチュエータシステムは触覚表示用ディスプレイデバイスのアクチュエータアレイとして、有用であるといえる。

今後は、以下のように検討を行う必要がある。

- (1) 実際に人の指を利用して、触覚表示ディスプレイとしての機能評価を行う。
- (2) 突起保持機構の実装し機能評価を行う。

第7章 結論

近年の情報通信網の発達により、触覚を人間に伝えるインターフェースとして触覚表示デバイスの開発が盛んになってきている。触覚を伝える方法として微小な突起を上下に駆動して、皮膚に直接刺激を与える方法があるが、従来のマイクロアクチュエータでは出力が不足したり、出力を補うために全体の大きさが大きくなってしまいうという欠点があった。

そこで、本研究では上記欠点を補うため、マイクロアクチュエータによる微小突起駆動ではなく、より大きなミリサイズのアクチュエータから必要な出力を取り出し、マイクロアクチュエータによってそれぞれの微小突起に分配するという新しいコンセプトを提案し、触覚ディスプレイ用マイクロアクチュエータの設計とプロトタイプの開発を行った。以下に得られた知見と結論を述べる。

(1) 触覚ディスプレイ用マイクロアクチュエータアレイのシステム設計

既存触覚ディスプレイの大きな問題である出力不足を解決するため、必要な出力をミリサイズの大きなアクチュエータより得て、それをマイクロアクチュエータにより、微小な領域へ分配する方法を提案した。

(2) 高アスペクト比微小突起の加工と作製

第3章において、触覚ディスプレイ用高アスペクト比微小突起の設計、ならびに、ウェットエッチングにおける突起構造の作製指針を検討とアレイ状微小突起の作製を行った。

- i) 高アスペクト比微小突起の設計を行い、その特性をシミュレーションにより確認、触覚ディスプレイの突起アレイとして十分な機能を果たせることを確認した。
- ii) 単結晶シリコンのウェットエッチング技術により、微小突起を作製する指針を実験により比較検討した。51 wt% KOHエッチャントと Windmill マスクパターンによる作製がもっとも高アスペクト比微小突起を作製できることを確認した。比較により、表面性状が良い状態で加工できる高濃度の KOH エッチャントで補償

マスクパターンを適切な長さで設計する必要があることがわかった。

- iii) 以上を踏まえ、アレイ状微小突起の作製を行った。1.2mm ピッチで4×4の計16個の微小突起を設計通りの仕様で作成することが出来た。

(3) チューリップ型静電マイクロアクチュエータアレイの設計と作製

第4章において、ミリサイズアクチュエータからの出力を微小突起アレイに分配するためのチューリップ型静電マイクロアクチュエータアレイの設計と作製を行った。

- i) ブロックを100 μm 以上スライド可能なマイクロアクチュエータとして、曲線駆動電極をもつ静電アクチュエータの提案と設計を行った。
- ii) チューリップ型静電マイクロアクチュエータの詳細な設計と作製プロセスの構築を行い、作製した。
- iii) チューリップ型静電マイクロアクチュエータの動作実験を行なった。200V 以下の駆動と140 μm の変位を確認し、触覚ディスプレイ用マイクロアクチュエータとしての有用性を示した。
- iv) シミュレーションにより、チューリップ型静電マイクロアクチュエータの強度評価を行い、十分な信頼性を確認した。

(4) ミリサイズアクチュエータの設計と作製

- i) 本システムの出力源であるミリサイズアクチュエータの設計を行い。ネジ型、偏心軸型の二つのアクチュエータを提案し、作製した。
- ii) 400mN~600mN の出力を確認し、本システムに十分な出力であることを確認した。

(5) 突起保持機構の設計と作製

- i) 本システムで、別表示への切り替えをスムーズにするための突起保持機構の設計と作製を行った。
- ii) 動作実験から200Vで2.5mNの突起保持力を確認した。

(6) 触覚ディスプレイ用マイクロアクチュエータアレイの実装と評価

- i) 触覚ディスプレイ用マイクロアクチュエータアレイの実装を行った。サイズを 3.0 cm × 3.0 cm × 4.0 cm まで小型化した。
- ii) 駆動実験から、触覚ディスプレイ用マイクロアクチュエータアレイとしての有用性を示した。

以上より、プロトタイプの触覚ディスプレイ用マイクロアクチュエータアレイの設計、開発に成功した。

次に、現在の問題点を挙げ、その具体的な解決法を今後の課題として提案する。

問題点 1

表示部の大変位化

解決法 1 - 1

微小突起の最大変位は、チューリップ型静電アクチュエータの厚さ h と等しい。したがって、微小突起の最大変位を大きくするためには、**DRIE** 加工によりチューリップ型静電マイクロアクチュエータを、より深く加工すればよい。しかし、**DRIE** に用いるマスク材が加工の際に削られてしまうため、より深い加工を行おうとすると、加工中にマスク材が消失し、目的の深さまで加工できない。したがって、マスク材の選定、もしくは **DRIE** の加工方法の再考が必要と考えられる。

現在、**DRIE** の加工方法の条件を再考し、厚さ $h = 60 \mu\text{m}$ のチューリップ型静電アクチュエータの作製に成功している。

解決法 1 - 2

また、本質的に微小突起の最大変位はチューリップ型静電アクチュエータの厚さ h よりもクラッチ機構の駆動部であるブロック部の厚さと等しいとも言える。つまり微小突起の最大変位を大きくするには、ブロック部の厚さのみ厚くすればよい。具体的には、**DRIE** 加工を 2 段階にすることによってブロック部のみ厚くする方法、チューリップアクチュエータ用の **SOI** ウェハに、あらかじめ厚膜レジストなどによってブロックを形成し、後にチュ

ーリップアクチュエータを加工する事によって、ブロックを厚くする方法などが考えられる。

問題点2

突起保持機構の保持力が 2.5mN と非常に小さい。

解決法2-1

保持力はステージとラッチ電極の間の空隙に大きく依存する。ステージやラッチ電極のバリやうねり等を小さくすることによって、空隙を 0.5 μm 程度にすることができれば出力は最大 60 mN にすることができる。

以上の問題点を解決することにより、本システムのさらなる発展が期待される。

今回、本研究で開発したマイクロアクチュエータアレイシステムは、触覚ディスプレイ用ではあるが、アレイ状微小突起部、クラッチ機構部の大きさは自由に変更できるため、高出力でアレイ状の駆動を必要とする他デバイス応用も可能である。具体的には、粘度の高い液を搬送するマイクロペリスターポンプや高圧で利用するマイクロバルブなどが考えられる。

マイクロペリスターポンプはフレキシブルな流路に充填された粘度の高い液、もしくは流路の径が小さくなることによりレイノルズ数が大きくなった液を、流路を押しつぶすことにより移動させる。これをアレイ状にならんだ突起が順次駆動することで、液を搬送する。このためには流路を押しつぶすための一定レベルの出力が必要になるため、高出力を生み出す本システムは有効である。さらに、アレイ状に交差した流路であっても、本システムは2次元アレイ化されているため、十分に対応可能である。

従来のマイクロバルブは静電気力、磁気力、熱などによりバルブの開閉を行っていたが、マイクロ化によって出力が小さくなるため、高圧環境下では利用できなかった。しかし、本システムは同程度の大きさのマイクロアクチュエータよりも数十～数百倍の出力が見込めるため、高圧環境下でのマイクロバルブに適用ができると考える。

さらに、本研究の「大きな出力源を、マイクロアクチュエータにより、微小な領域へ分配する」という概念は、マイクロの世界では実現不可能である高出力を実現するための重要な考え方である。

将来、この概念をさらに発展させることによりマクロの世界とマイクロの世界を結び、さらにマイクロからナノへと続く、重要な基盤技術の概念となる可能性があると考ええる。

謝辞

本研究、本論文の遂行に際し、終始適切かつご親切なご指導を賜りました、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 佐藤一雄 教授、エコトピア科学研究所（現 工学研究科マイクロ・ナノシステム工学専攻） 式田光宏 准教授、名古屋大学大学院工学研究科結晶材料工学専攻 財満鎮明 教授、名古屋大学大学院情報科学研究科複雑系科学専攻 大岡昌博 准教授、マイクロ・ナノシステム工学専攻 安藤妙子 助教に深く感謝し、ここに厚く御礼申し上げます。

評価デバイスの作製に際し、株式会社デンソー 基礎研究所 担当部員 大原淳士 氏、竹内幸弘 主幹、川原伸章 博士には多くのご指導、ご協力を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

本研究を遂行するに際し、実験装置の加工に関してご協力を頂きました名古屋大学大学院工学研究科機械工学専攻 技術職員 千田進幸 氏に深く感謝し、ここに厚く御礼申し上げます。

本研究を遂行するに際し、本研究室 学生 長谷川義大 氏、本研究室 学生 肥田博隆 氏、本研究室 学生 中尾茂樹 氏、本研究室 学生 高木信吾 氏、本研究室 卒業生 新美匡俊 氏（現在、株式会社 JTEKT）に多くのご協力を頂きました。ここに深く感謝いたします。

最後に、公私共に、終始暖かな励ましをいただきました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 集積機械デバイス講座 マイクロ・ナノプロセス工学グループの皆様に、感謝いたします。

参考文献

- [1] Å. B. Vallbo and R. S. Johansson, "Properties of Cutaneous Mechanoreceptors in the Human Hand Related to Touch Sensation", *Human neurobiology*, Vol. 3, 2, 1984, pp.3-14
- [2] M. Ohka, K. Kato, T. Fujiwara, Y. Mitsuya, "An Experimental Compound Display for Pressure and Force Presentation", *IEEJ Trans. SM*, Vol. 126, 4, 2006, pp.150-157
- [3] 大岡昌博, "触覚ディスプレイ装置におけるアクチュエータ技術", *日本ロボット学会誌*, Vol. 21, 7, 2003, pp.62-65
- [4] 池井寧, 福田収一, "触覚ディスプレイのための画像データ変換", *日本バーチャル・リアリティ学会論文誌*, Vol. 5, 4, 2000, pp.1-7
- [5] H. Iwata, H. Yano, F. nakaizumi and R. kawamura, "Project FEELEX: Adding Haptic Surface to Graphics", *Proc. ACM SIGGRAPH 2001*, pp. 469-475
- [6] 清水豊: インターネットによる情報公開「触覚伝達機器の設計支援情報」,
<http://www.tsukuba-tech.ac.jp/info/kenkyu/kaken/home.html>
- [7] 「知覚のセンサー」, 日本生物物理学会編, 吉岡書店, 1997
- [8] A. Yamamoto et al., "Electrostatic Tactile Display with Thin Film Slider and Its Application to Tactile Telepresentation Systems", *IEEE Transactions on visualization and computer graphics*, Vol. 12, 2, 2006, pp.168-177
- [9] R. W. Lindeman, Y. Yanagida, "Empirical Studies for Effective Near-Field Haptics in Virtual Environments", *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference 2003*, 2003, pp. 287
- [10] T. Nara et al., "Surface Acoustic Wave Tactile Display", *IEEE Computer Graphics and Applications*, November/December 2001, pp.56-63
- [11] T. Matsunaga et al., "2-D and 3-D Tactile Pin Display Using SMA Micro-coil Actuator and Magnetic Latch", *Proceedings of the IEEE TRANSDUCERS'05*, June 5-9, (2005), pp.325-328
- [12] ケーゲーエス株式会社, <http://www.kgs-jpn.co.jp/index.html>
- [13] アクチュエータ研究会: ミクロをめざすニューアクチュエータ, 工業調査会
- [14] 林輝: マイクロマシンと材料技術, シーエムシー
- [15] 樋口俊郎, 生田幸士: マイクロメカニカルシステム 実用化技術総覧, フジ・テクノシステム

-
- [16] 藤田博之：マイクロ・ナノマシン技術入門，工業調査会
- [17] 鈴森康一，堀光平，宮川豊美，古賀章浩：マイクロロボットのためのアクチュエータ技術，コロナ社
- [18] μ M産業化研究会：進化するマイクロマシン—産業化のロードマップとナノとの融合—，日刊工業新聞社
- [19] D. Bullen and C. Liu, “Electrostatically actuated dip pen nanolithography probe arrays”, *Sensors and Actuators A* 125 504–511 (2006)
- [20] J. W. Suh, S. F. Glander, R. B. Darling, C. W. Storment and G. T. A. Kovacs, “Organic thermal and electrostatic ciliary microactuator array for object manipulation”, *Sensors and Actuators A* 58 51–60 (1997)
- [21] A. Feustel, O. Krusemark and J. M^uller, “Numerical simulation and optimization of planar electromagnetic actuators”, *Sensors and Actuators A* 70 276–82 (1998)
- [22] W. Makishi, K. Iwami, Y. Haga and M. E. Kawasaki, “Batch fabrication of SMA actuated pin display for blind aid”, *Technical Digest of the 18th Sensor Symposium*, pp. 137–42 (2001)
- [23] G. Wei, X. Zhu, N. Futai, B. S. Cho and S. Takayama, “Computerized microfluidic cell culture using elastomeric channels and Braille displays”, *Proc. Natl Acad. Sci.* 101 15861–6 (2004)
- [24] K. H. Lam, X. X. Wang and H. L. W. Chan, “Lead-free piezoceramic cymbal actuator”, *Sensors and Actuators A* 125 393–7 (2006)
- [25] D. Y. Zhang, T. Ono and M. Esashi, “Piezoactuator-integrated monolithic microstage with six degrees of freedom”, *Sensors and Actuators A* 122 301–6 (2005)
- [26] K. Y. Kim, K. H. Park, H. C. Park, N. S. Goo and K. J. Yoon, “Performance evaluation of lightweight piezo-composite actuators”, *Sensors and Actuators A* 120 123–9 (2005)
- [27] Y. S. Kim, H. J. Nam, S. M. Cho, J. W. Hong, D. C. Kim and J. U. Bu, “PZT cantilever array integrated with piezoresistor sensor for high speed parallel operation of AFM”, *Sensors and Actuators A* 103 122–9 (2003)
- [28] J. Juuti, A. Lozinski and S. Lepp^avuori, “LTCC compatible PLZT thick-films for piezoelectric devices”, *Sensors and Actuators A* 110 361–4 (2004)
- [29] J. Singh, T. Gan, A. Agarwal, Mohanraj and S. Liw, “3D free space thermally actuated

- micromirror device”, *Sensors and Actuators A* 123–124 468–75 (2005)
- [30] W. C. Chen, C. C. Chu, J. Hsieh and W. Fang, “A reliable single-layer out-of-plane micromachined thermal actuator”, *Sensors and Actuators A* 103 48–58 (2003)
- [31] J. M. Noworolski, E. H. Klaassen, J. R. Logan, K. E. Petersen and N. I. Maluf, “Process for in-plane and out-of-plane single-crystal-silicon thermal microactuators”, *Sensors and Actuators A* 55 65–6 (1996)
- [32] A. Jain, H. Qu, S. Todd and H. Xie, “A thermal bimorph micromirror with large bi-directional and vertical actuation”, *Sensors and Actuators A* 122 9–15 (2005)
- [33] W. Yoshikawa, A. Sasabe, K. Sugano, T. Tsuchiya, O. Tabata and A. Ishida, “Vertical drive micro actuator using SMA thin film for a smart button”, *MEMS2006 Technical Digest* pp. 734–7 (2006)
- [34] S. Henry, D. McAllister, M. G. Allen, and M. R. Prausnitz, “Microfabricated microneedles: a novel method to increase transdermal drug delivery”, *J. Pharm. Sci.* 87, pp. 922-925 (1998)
- [35] E. V. Mukerjee, S. D. Collins, R. R. Isseroff, and R. L. Smith, “Microneedle array for transdermal biological fluid extraction and in situ analysis”, *Sensors and Actuators A* 114 267-75 (2004)
- [36] P. Griss and G. Stemme, “Side-opened out-of-plane microneedles for microfluidic transdermal liquid transfer”, *J. Microelectromech. Syst.*, 12, pp. 296-301 (2003)
- [37] W. Martanto, S. Davis, N. Holiday, J. Wang, H. Gill, and M. Prausnitz, “Transdermal delivery of insulin using microneedles in vivo”, *Proceedings of International Symposium on Controlled Release Bioactive Material*, 666 (2003)
- [38] S. P. Davis, B. J. Landis, Z. H. Adams, M. G. Allen, and M. R. Prausnitz, “Insertion of microneedles into skin: measurement and prediction of insertion force and needle fracture force”, *J. Biomech.* (in press)
- [39] H. Seidel, L. Csepregi, A. Heuberger, and H. Baumgartel, “Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions”, *J. Electrochem. Soc.*, 137, pp. 3612 (1990)
- [40] U. Schnakenberg, W. Benecke, and B. Lochel, “NH₄OH-based etchants for silicon micromachining”, *Sensors and Actuators A* 21-23 1031 (1990)

- [41] R. Dizon, H. Han, A. G. Russell, and M. L. Reed, "An ion milling pattern transfer technique for fabrication of three-dimensional micromechanical structures", *J. Microelectromechanical Systems*, 2, 4, pp. 151-159 (1993)
- [42] M. Shikida, K. Sato, K. Tokoro, and D. Uchikawa, "Difference in anisotropic etching properties of KOH and TMAH solutions", *Sensors and Actuators A* 80 179-188 (2000)
- [43] P. M. Zavracky, "Comparative studies of TMAH and KOH for anisotropic etching of silicon", *Electrochem. Soc. Proc.*, 97-5, pp. 102-117 (1997)
- [44] H. L. Offereins, H. Sandmaier, K. Maruszczyk, K. Kühn, and A. Plettner, "Compensating corner undercutting of (100) silicon in KOH", *Sensors and Materials* 3 3 127-144 (1992)
- [45] G. K. Mayer, H. L. Offereins, H. Sandmaier, and K. Kühn, "Fabrication of non-underetched convex corners in anisotropic etching of (100)-silicon in aqueous KOH with respect to novel micromechanic elements", *J. Electrochem.*, 137, 12, pp. 3947-3951 (1990)
- [46] M. Elwenspoek, "The form of etch rate minima in wet chemical anisotropic etching of silicon", *J. Micromech. Microeng.*, 6, 405 (1996)
- [47] M. Elwenspoek and H. Jansen, "Silicon Micromachining", Cambridge University Press (1998)
- [48] M. Shikida, K. Nanbara, T. Koizumi, H. Sasaki, M. Odagaki, K. Sato, M. Ando, S. Furuta, and K. Asaumi, "A model explaining mask-corner undercut phenomena in anisotropic silicon etching: a saddle point in the etching-rate diagram", *Sensors and Actuators A* 97-98 1 758-763 (2002)
- [49] K. Sato, M. Shikida, Y. Matsushima, T. Yamashiro, K. Asaumi, Y. Iriye, and M. Yamamoto, "Characterization of orientation-dependent etching properties of single-crystal silicon: effects of KOH concentration", *Sensors and Actuators A* 64 87-93 (1998)
- [50] K. Sato, M. Shikida, T. Yamashiro, K. Asaumi, Y. Iriye, and M. Yamamoto, "Anisotropic etching rates of single-crystal silicon for TMAH water solution as a function of crystallographic orientation", *Sensors and Actuators A* 73 131-137 (1999)
- [51] H. L. Offereins, K. Kühn, and H. Sandmaier, "Methods for the fabrication of convex corners in anisotropic etching of (100) silicon in aqueous KOH", *Sensors and Actuators A* 25-27 9-13 (1991)
- [52] P. M. M. C. Bressers, J. J. Kelly, J. G. E. Gardeniers, and M. Elwenspoek, "Surface morphology of p-type (100) silicon etched in aqueous alkaline solution", *J. Electrochem. Soc.*, 143, 5, pp.

1744-1750 (1996)

[53] T. Baum and D. J. Schiffrin, "AFM study of surface finish improvement by ultrasound in the anisotropic etching of Si (100) in KOH for micromachining applications", *J. Micromech. Microeng.*, 7, pp. 338-342 (1997)

[54] R. Divan, N. Moldovan, and H. Camon, "Roughening and smoothing dynamics during KOH silicon etching", *Sensors and Actuators A* 74 18-23 (1999)

[55] H. Tanaka, Y. Abe, T. Yoneyama, J. Ishikawa, and O. Takenaka, "Effects of small amount of impurities on etching of silicon in aqueous potassium hydroxide solutions", *Tech. Digest of Transducers'99*, Sendai, Japan, June, (1999), pp. 538-541.

[56] K. Sato, M. Shikida, T. Yamashiro, M. Tsunekawa, and S. Ito, "Roughening of single-crystal silicon: surface etched by KOH water solution", *Sensors and Actuators A* 73 122-130 (1999)

[57] M. Shikida, K. Tokoro, D. Uchikawa, and K. Sato, "Surface morphology of anisotropically etched single-crystal silicon", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 10, 4, pp. 522-527 (2000)

[58] M. Shikida, T. Masuda, D. Uchikawa, and K. Sato, "Surface roughness of single-crystal silicon etched by TMAH solution", *Sensors and Actuators A* 90 3 223-231 (2001)

[59] R. Legtenberg, J. Gilbert, S. D. Senturia and M. Elwenspoek, "Electrostatic curved electrode actuators" *J. Microelectromech. Syst.* 6 257-65 (1997)

[60] M. Tsuda (1997) *Sensor of perception* Yoshioka Bookstore (in Japanese)

付録

本論文に関連して公表した学術誌論文

- [1] M. Shikida, K. Nanbara, T. Koizumi, H. Sasaki, M. Odagaki, K. Sato, M. Ando, S. Furuta and K. Asaumi, “A model explaining mask- corner undercut phenomena in anisotropic silicon etching: a saddle point in the etching-rate diagram”, *Sensors and Actuators A Physical* 97 -98 (2002) pp. 758-763
- [2] Y. Hasegawa, T. Shimizu, T. Miyaji, M. Shikida, H. Sasaki, K. Sato, and K. Itoigawa “A micro machined active tactile sensor for hardness detection”, *Sensors and Actuators A* 114 2-3 (2004) pp. 141-146
- [3] H. Sasaki, M. Shikida, and K. Sato, “A force transmission system based on a tulip-shaped electrostatic clutch for haptic display devices”, *J. Micromech. Microeng.* 16 (2006) 2673-2683
- [4] Y. Hasegawa, M. Shikida, H. Sasaki, K. Itoigawa and K. Sato, “An active tactile sensor for detecting mechanical characteristics of contacted object”, *J. Micromech. Microeng.* 16 8 (2006) 1625-1632
- [5] H. Sasaki, M. Shikida, and K. Sato : Fabrication of densely arrayed Si needles with large height for transdermal drug delivery system application, *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* 2007年5月号 (掲載決定)

国際会議

- [1] Y.Hasegawa, T.Shimizu, T.Miyaji, M.Shikida, H.Sasaki, 他 2 名, “Hardness detection using a micromachined active tactile sensor”, Tech. Dig. of Transducers'03, Boston, USA, June (2003) 927-930
- [2] Y.Hasegawa, H.Sasaki, M.Shikida, K.Sato and K.Itoigawa, “Magnetic actuation of a micro-diaphragm structure for an active tactile sensor”, Proc. 2004 International Symposium on Micro/Nano-Mechatronics for Information-Based Society“MHS/Micro-Nano COE Symposium”October 31-November 2 (2004) Nagoya 99-104
- [3] Y.Hasegawa, H.Sasaki, T.Ando, M.Shikida, K.Sato and K.Itoigawa, “Multifunctional Active Tactile Sensor using Magnetic Micro Actuator”, Tech. Dig. MEMS-05 January 30-February 3(2005) Miami Beach 275-278.
- [4] H. Sasaki, M. Shikida and K. Sato, A Novel Type of Mechanical Power Transmission Array for Switching Densely-Arrayed Actuator Systems, Proc. 19th IEEE Intl. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems, Istanbul (2006), pp. 790-793
- [5] H. Sasaki, M. Shikida and K. Sato : Changes in the shape of micro needles etched on a silicon wafer depending on the etching conditions, Proc. 5th International Workshop on Physical Chemistry of Wet Etching of Semiconductors, Saarbrucken (2006), pp. 42-46
- [6] S.Takagi, H.Sasaki, M.Shikida, and K.Sato, “Electrostatic Latch Mechanism For Handling Projection on Arrayed Vertical Motion System”, Tech. Dig. of Transducers'07, Lyon, FRA, June (2007) (掲載決定)

その他

[1] Y.Hasegawa, H.Sasaki, M.Shikida, S.Kuriyama, K.Sato and K.Itoigawa, “Magnetically driven active tactile sensor for hardness detection”, Tech. Dig. 21st SENSOR SYMPOSIUM Japan, Oct. (2004) 453-456.

[2] H.Sasaki, M.Shikida, and K.Sato, “A Novel Type of Mechanical Power Transmission System For Haptic Display”, Proc. 23rd SENSOR SYMPOSIUM Japan,(2006).pp.197～200

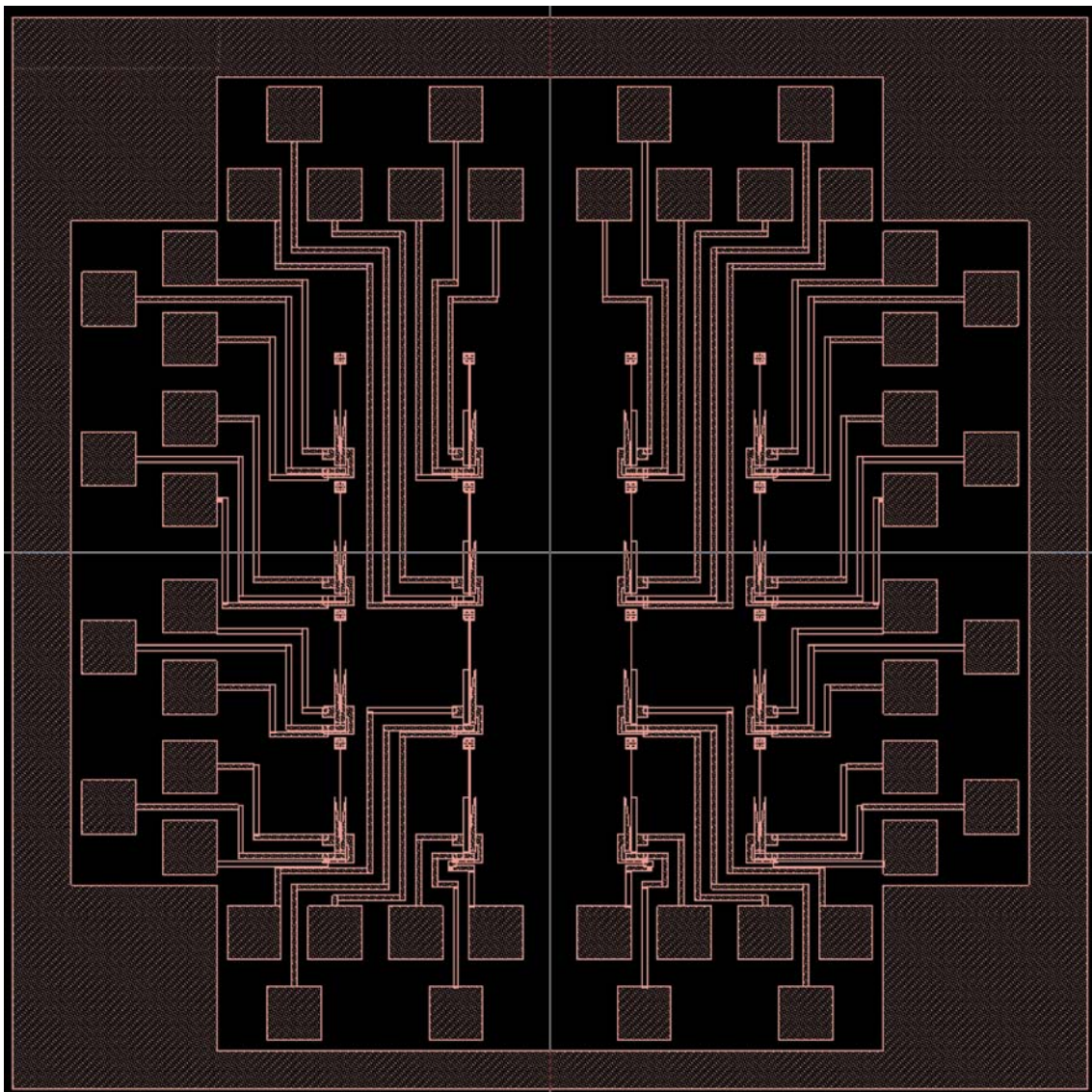
特許

[1] アレイ状独立駆動機構

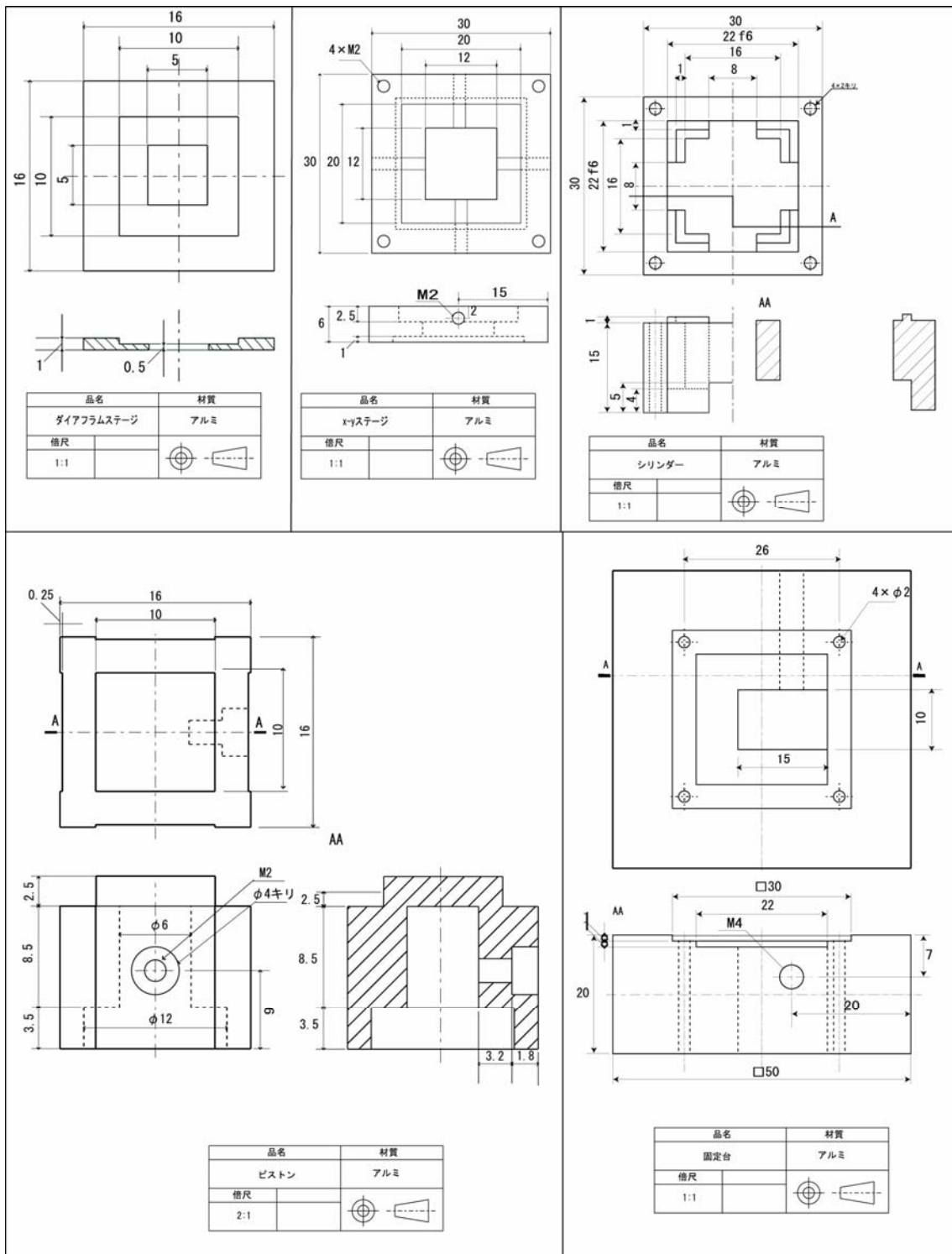
特願2005-217709 (出願日：平成17年7月27日)

発明者：式田光宏 佐藤一雄, 佐々木光

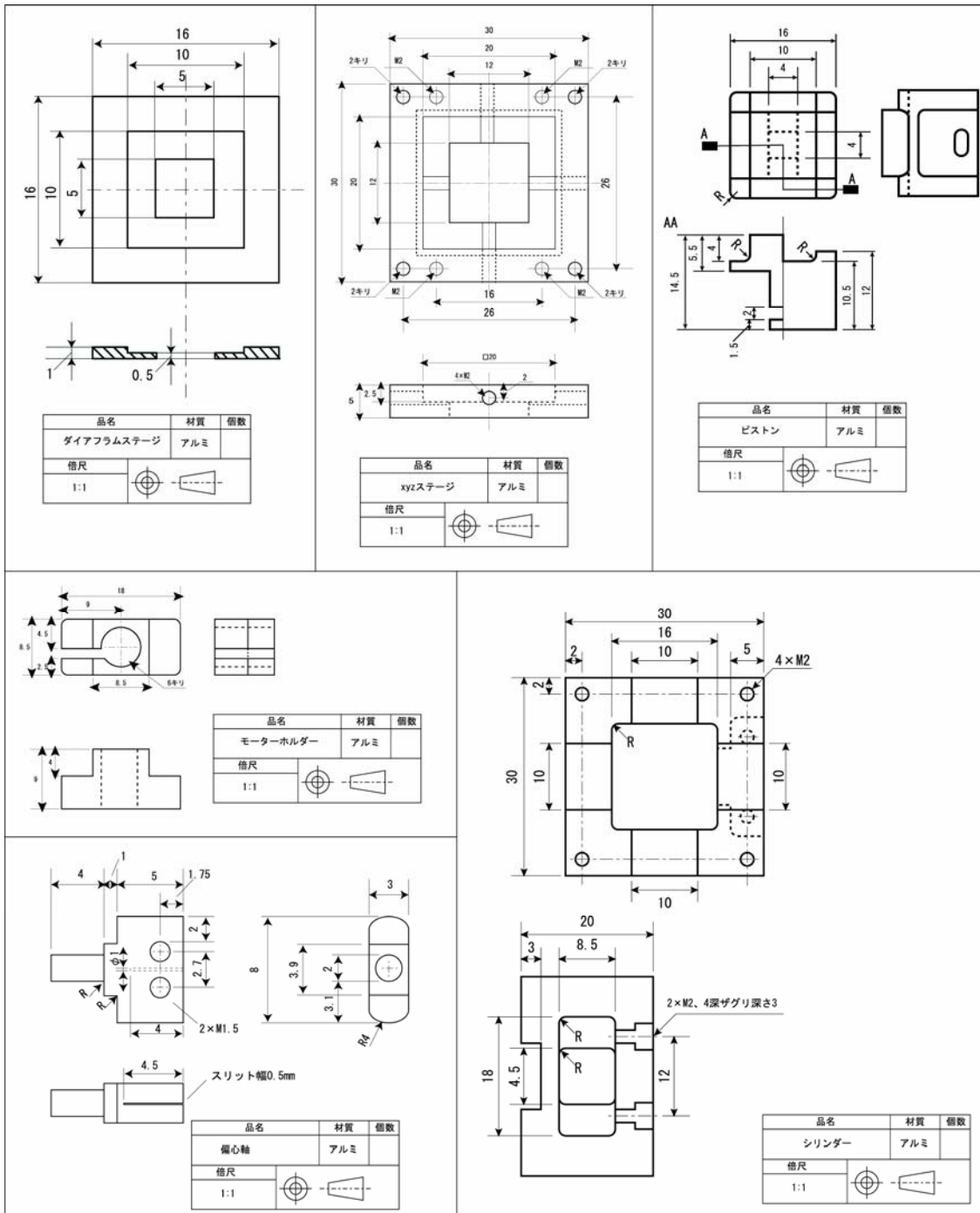
設計図その他



付録1 チューリップ型静電マイクロアクチュエータのマスクデータ (rietulip.GDS)



付録2 ネジ型ミリサイズアクチュエータフレーム



付録3 偏心軸型ミリサイズアクチュエータフレーム



ステッピングモータ

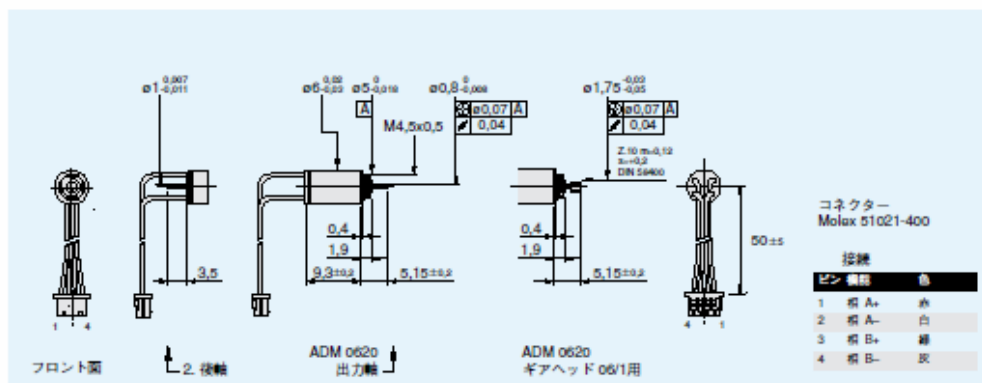
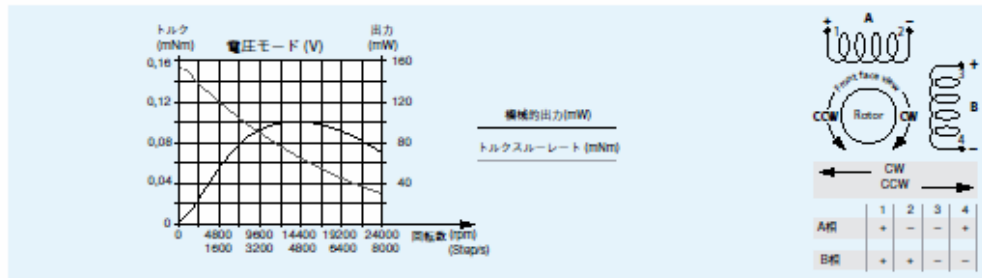
2相、20ステップ/回転

組み合わせ
ギアヘッド：06/1
ドライバー：AD VLM

シリーズ ADM 0620

	V3		V6		電圧モード
	3	6	3	6	
1 定格電圧 U_n	3	6			V DC
2 相抵抗 (20°C時)	30	120			Ω
3 相インダクタンス (1kHz)	3.5	9.9			mH
4 定格相電流 (2相 ON)	100	50			mA
5 発生電圧係数	0.49	0.94			V/k step/s
6 ホールディングトルク ¹⁾ (2相定格電流時)	0.2				mNm
7 ホールディングトルク ¹⁾ (2X定格電流時)	0.28				mNm
8 無励磁保持トルク	0.04				mNm
9 熱抵抗(コイル-外気)	165				°C/W
10 最大コイル温度	130				°C
11 外気温度範囲	-35 ... +70				°C
12 熱時定数	120				s
13 ステップ角 (フルステップ)	18				度 (°)
14 角度精度 ²⁾	±5				% of full step
15 ロータイナーシャ	0.7				-10° kgm²
16 軸受	後部: ボールベアリング、前部: スリプベアリング				
17 最大軸負荷					
- 半径方向(軸受から52 mm)	0.3				N
- 軸方向	0.5				N
18 最大軸遊び					
- 半径方向 (0.2N)	20				μm
- 軸方向 (0.2N)	50				μm
19 重量	1.4				g
20 絶縁テスト電圧	200				V
21 共振周波数	170				Hz
22 電氣的時定数	0.10				ms

¹⁾ バイポーラドライバで
²⁾ 2相ON、バランスのとれた相電流



仕様データの記載は、技術情報を参照してください。

仕様は改善のため変更することがあります。



ドライバ

低電圧モードドライバ

組み合わせ
 ステッパモータ: ADM 0620, AM 0820, AM 1020,
 AM 1524

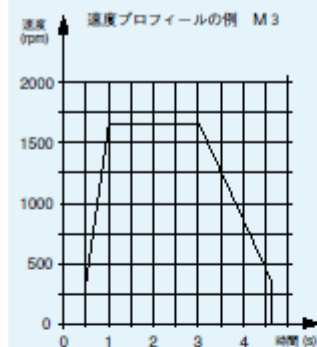
シリーズ AD VL M

	VL M1	VL M3	
供給電圧			
- min.	9	9	V DC
- max.	14	14	V DC
供給電流			
最大出力電流 (各相)	14	16	mA
	400	400	mA
ロジック入力レベル			
- low	0 ... 0.6	0 ... 0.6	V DC
- high	1.6 ... 14	1.6 ... 14	V DC
回転方向	CW / CCW	CW / CCW	
ステップモード	フルステップ / ハーフステップ	フルステップ / ハーフステップ	
ステップ周波数			
- min.	-	10	750ステップ/s
- max.	-	2 000	7500ステップ/s
動作温度範囲	0 ... +70	0 ... +70	°C
重量	22	34	g

応答特性 / コマンドコネクタ接続

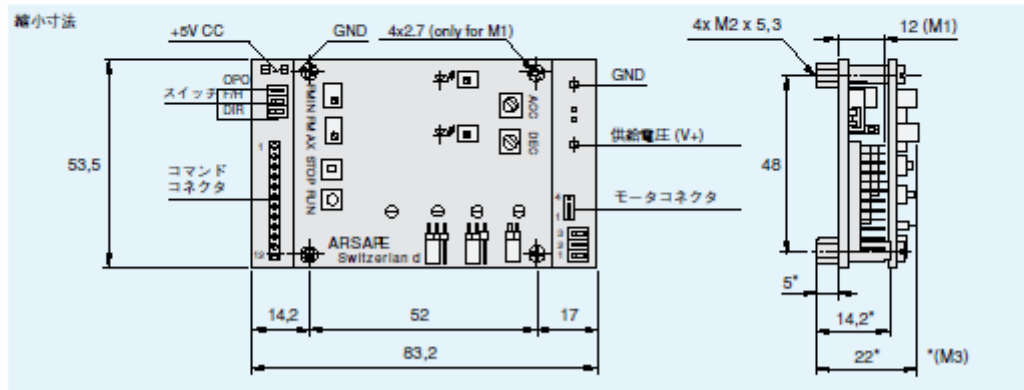
ドライバタイプAD VL Mは2相ステッパモータAMシリーズをドライブするために設計され、次の2タイプのドライバが使用出来ます。

- AD VL M1 基本的なドライブは、トランスレータ(フルステップ及びハーフステップモード)と電圧モードのパワーステージで構成されています。
- AD VL M3 AD VL M1と勾配を発生するパルスジェネレータで構成されています。この回路は、加速の勾配をもってステッパモータのスタートとストップの速度プロフィールを与えることが出来ます。



ピン	I/O	機能	ハイロジックレベルで動作
1	I	OPO	> フルステップモード、1相ON (キューブ)
2	I	F/H	> ハーフステップモード、初期設定またはローロジックレベルフルステップモード、2相ON
3	I	DIR	> CCW; 初期設定またはローロジック-CW
4	I	CLK	> 外部クロック入力、クロックパルスのポジティブエッジで動作
5	I	RUN	> クロックジェネレータのスタート*
6	I	STOP	> クロックジェネレータのストップ*
7	I	Inhibit	> モータの両コイルに電流が流れない
8	O	Busy	> クロックが動作中はローレベル*
9	-	GND	> GND電位 0V
10	O	VCC	> +5V出力
11	-	GND	> GND電位 0V
12	I	VCO	> 外部電圧入力(電圧でコントロールされたオシレータ)*

* AD VL M3に適用



技術データの注釈は、技術情報を参照してください。

改善のため予告無しに、仕様変更することがあります。

www.arsape.com