

217

マイクロトンネルユニットの製作、評価、
応用に関する研究

小林 大

目次	頁
1・本研究の背景と位置づけ	1
1.1 走査プローブ顕微鏡について	1
1.1.1 STM	
1.1.2 STMから派生した顕微鏡	
1.2 従来の研究と本研究の位置づけ	3
1.2.1 SPMとマイクロマシニングの接点	
1.2.2 従来の研究と本研究の位置づけ	
1.3 マイクロトンネルユニットの必要性	5
1.3.1 装置の寸法と分解能	
1.3.2 熱ドリフトの問題	
1.3.3 振動の問題	
1.4 マイクロトンネルユニットに対するニーズ	7
1.4.1 センサとしてのニーズ	
(1)加速度センサ	
(2)圧力センサ	
(3)AFMへの応用	
1.4.2 半導体基板への集積のニーズ	
1.4.3 一括大量製作のニーズ	
(1)ディスプレイ化	
(2)走査プローブ顕微鏡のマルチプローブ	
(3)情報記録デバイス	
1.5 本論文の構成	10
2・マイクロトンネルユニットに要求される特性	12
2.1 寸法	12
2.2 自由度	12
2.3 可動範囲	12
2.4 分解能	14
2.5 探針の特性	14
2.6 材料	17
2.7 2章のまとめ	17
3・マイクロトンネルユニットの設計	18
3.1 構造の配置	18
3.1.1 縦型と横型の比較	
3.1.2 横型の採用	
3.2 利用可能なマイクロアクチュエータ	20
3.2.1 静電アクチュエータ	
3.2.2 圧電アクチュエータ	
3.2.3 熱膨張の利用	
3.2.4 櫛形静電アクチュエータの採用	
3.3 テクノロジー	22
3.4 形状の設計	22
3.5 剛性	25
3.6 共振周波数	27
3.7 振動耐性	27
3.8 ダンピング	28
3.9 3章のまとめ	28

4・マイクロトンネルユニットの製作	29
4.1 製作プロセス	29
4.1.1 製作プロセス概要	
4.1.2 分離時の課題と対策	
(1) 付着問題と従来の方策	
(2) フォトレジスト・アシスト法	
4.1.3 探針を尖らせる方法	
4.1.4 プロセスフロー	
4.2 表面（導電層）の材質	40
4.2.1 金属の種類による特有の問題	
4.2.2 堆積法	
4.2.3 白金導電層の分析	
4.3 製作したデバイス	44
5・制御系の構成	46
5.1 制御器全体の構成	46
5.1.1 静電アクチュエータの非線型性について	
5.1.2 アクチュエータバイアス	
(1) 回路のダイナミックレンジについて	
(2) 伝達特性について	
5.2 制御則	48
5.2.1 制御対象の特性	
5.2.2 LTUのモデル	
5.2.3 PIDゲインの決定	
5.2.4 シミュレーション	
5.2.5 τ の値について	
5.2.6 モデルパラメータに対するロバスト性	
5.3 PID制御器の実現	58
5.4 外乱オブザーバ	58
5.4.1 設計	
5.4.2 シミュレーション	
5.5 電流電圧変換器(IVC)	62
5.5.1 IVCの原理	
5.5.2 トンネルバイアス供給の方法	
5.5.3 入力バイアス電流と入力オフセット電流	
5.5.4 入力バイアス電圧	
5.5.5 入力インピーダンス	
5.5.6 空気中での実験用IVCの設計	
5.5.7 真空中での実験用IVCの設計	
5.5.8 寄生容量と高速化	
5.5.9 シャント容量について	
5.5.10 実装その他	
5.6 対数変換器	69
5.7 駆動系、信号系回路の分離	72
5.7.1 容量結合と対策	
(1) シールドの難しさ	
(2) BPF型キャンセラ	
(3) 補償電極型キャンセラ	
5.7.2 変位電流と共通アース	
5.8 5章のまとめ	76

6	・マイクロトンネルユニットの特性評価	80
6.1	ゼロ位法による変位検出	80
6.1.1	実験装置	
	(1)使用したデバイス	
	(2)PZTアクチュエータ	
	(3)容量性結合について	
	(4)制御器	
6.1.3	実験の方法	
6.1.4	実験結果	
6.1.5	考察	
6.1.6	結論	
6.2	AFM探針の変位検出の基礎実験	91
6.2.1	実験装置	
6.2.2	実験結果	
6.2.3	考察	
6.2.4	結論	
6.3	STM像をとる基礎実験	96
6.3.1	実験装置	
	(1)使用したデバイス	
	(2)観察した試料	
6.3.2	実験結果	
6.3.3	考察	
6.3.4	結論	
6.4	トンネル電流値と変位の関係を確認する実験--- (空气中)	100
6.4.1	実験装置	
	(1)真空装置	
	(2)使用したデバイス	
	(3)制御器	
6.4.2	実験の方法	
6.4.3	実験結果	
6.4.4	考察	
6.4.5	結論	
6.5	トンネル電流値と変位の関係を確認する実験--- (極高真空中)	107
6.5.1	新たな問題	
6.5.2	実験装置	
6.5.3	積分制御	
	(1)制御器その他	
	(2)実験結果	
	(3)考察	
6.5.4	PID制御	
	(1)制御器その他	
	(2)実験結果	
	(3)考察	
6.5.5	外乱オブザーバを使用する上での問題	
6.5.6	結論	
6.6	6章のまとめ	112
7	・デバイスの改良による特性改善	115
7.1	"マイクロ"と高い剛性の両立における困難	115
7.1.1	長手方向への連結	
7.1.2	バネ定数を大きくする	

7.1.3	発生力の増大	
7.1.4	プロセス技術の改良	
7.2	製作したデバイス	117
7.3	制御器	117
7.4	実験	117
7.4.1	安定性	
7.4.2	トンネル電流と制御電圧の関係	
7.5	考察	119
7.6	7章のまとめ	122
8	・マイクロトンネルユニットの性能向上のための基礎技術	125
8.1	プロセス技術	125
8.1.1	電鍍によるLTUの製法	
8.1.2	SiO ₂ ベースマイクロマシニングの可能性	
8.1.3	バルク-表面マイクロマシニング	
8.2	設計	131
8.2.1	アクチュエータのプッシュ-プル駆動	
8.2.2	アクチュエータへのオフセット機構の付加	
9	・まとめ	135
10	・謝辞	137
11	・参考文献	138

1章 本研究の背景と位置づけ

本研究の目的は、可変ギャップを持つトンネル電流制御機構を、マイクロマシニングを利用して非常に小さく作ることにより、高分解能な変位センサを実現し、その特性を評価し、またそれがいくつかのアプリケーションに使用できる見通しをつけることである。そこで得られる知見は、他の微小なプローブを持つセンサ等へも適用できる。

既存の同様な研究との違いは、小型化自体が性能向上につながるという意識でデバイスが設計されていることである。性能向上のための改良も、寸法が極力大きくならないように留意して行った。

研究の背景を説明するため、まず簡単に走査プローブ顕微鏡の説明を行う。次に、マイクロマシニングと走査プローブ顕微鏡の接点で行われた他の研究に比較して、本研究の独自性を示す。

1.1 走査プローブ顕微鏡について

nmオーダーのギャップで隔てられた2つの電極電圧をかけると、ギャップの中が誘電体であるにもかかわらず、電子のトンネリングによって電流が流れる。トンネル確率はギャップ距離の変化を非常に敏感に反映するため、トンネル電流の大きさを測定しているとギャップの微小な(0.1nm以下の)変化が検出できる。この原理を応用した代表的な装置がSTM(走査トンネル顕微鏡)である[1]。またこれに刺激されて、トンネル電流以外の相互作用を利用した、走査プローブ顕微鏡(SPM)と呼ばれる一群の顕微鏡が開発されてきた。

1.1.1 STM

一對の電極の間をnmオーダーのエアギャップまたは真空のギャップに保ち、電圧をかけると、トンネル電流が流れる。トンネル電流の大きさは、ギャップ距離(間隔)の指数関数に反比例する。トンネル電流の大きさを I_t 、トンネルギャップ距離を Z 、電極表面の仕事関数を ϕ 、 V_{bias} はギャップに印加する電圧(トンネルバイアス)すると、

$$i_t = (V_{bias} / R_0) \exp(-A\phi^{1/2}Z) \quad (1.1)$$
$$A \approx 10(nm^{-1}eV^{-1/2})$$

の関係がある。ただし A と R_0 は定数である。金属の仕事関数は約5eVであるから、ギャップ距離が0.1nm減少するとトンネル電流は約1桁増加する。このため、トンネル電流はギャップ距離のきわめて微小な変化を検出するのに使用できる。

この原理を応用したのがSTM(走査トンネル顕微鏡)である[1]。STMは、試料表面(ただし導電性)に鋭く尖らせた探針を接近させ、両者の間に流れるトンネル電流の大きさを観測する(図1-1)。トンネル電流が一定値になるように(Z軸方向の微動アクチュエータを使って)ギャップ距離を調整しつつ、探針をXY走査すると、Z軸アクチュエータの駆動電圧が試料の凹凸を反映して変動する。このときのXYZ信号を3次元グラフィックに表示すれば、試料表面の凹凸を視覚的にとらえることができる。STMは原子の配列まで見ることができ、表面の平均的な情報ではなく個々の原子の配列まで知ることができる。また、STMを使用して個々の原子を表面から引き抜いたり、再度付着させたりする技術も可能になってきた。

1.1.2 STMから派生した走査プローブ顕微鏡

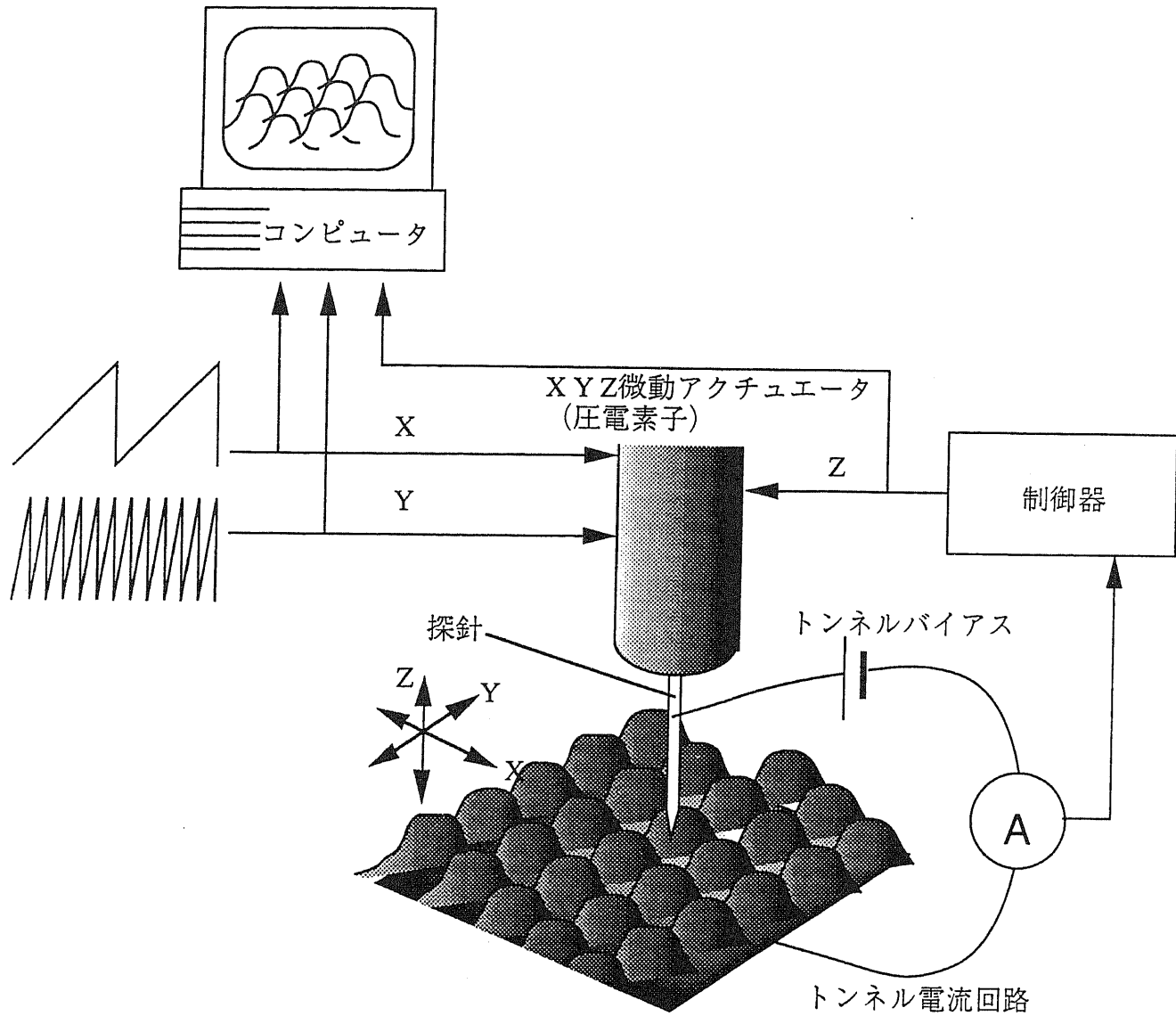


図1-1 STMの原理

トンネル電流が一定になるように探針をZ軸方向に微調節しながらXY走査を行う。Z軸方向の制御信号が試料の凹凸に対応して変化するので、それをグラフィック表示する。

(Z軸を調節しないでトンネル電流の変化を記録する場合もある)

STMの成功の後、探針先端と試料表面の微小な領域で起こる相互作用を検出し、映像表示にする顕微鏡が種々現れてきた。それらを総称して走査プローブ顕微鏡と言う。その中の代表的なものにAFM（原子間力顕微鏡）[2]がある（図1-2）。AFMの探針はカンチレバーの先端に取り付けてあり、探針が原子間力で試料に引き付けられたり反発力を受けるとカンチレバーが撓む。この撓みを何らかの方法で検出する。

現在一般的な方法は、カンチレバー背面にレーザービームを反射させ、返ってきた光のスポット位置の変化を検出する方法である。その他に、カンチレバー背面にSTM探針を接近させてトンネル電流で検出する方法もある。図では省略されているが、カンチレバーの撓みが一定になるようにZ軸を調節する機構がある。そのため、STM検出ではカンチレバーの両側に微小なギャップとそれを調節する機構が必要で、複雑なので光てこが一般化した。

1.2 従来の研究と本研究の位置づけ

マイクロマシニングとSPMの接点は初期の段階からあった。たとえば、AFMのカンチレバーはマイクロマシニングで作られ、市販されている。ここではマイクロマシニングをSPMに応用したり、逆にSPMの原理を利用したマイクロマシニング関連の研究を紹介し、それらがどういう問題意識あるいは目的で行われたかを考察し、本研究の違いを明らかにする。

1.2.1 SPMとマイクロマシニングの接点

マイクロマシニングをSPMに利用する上で、次の3つの立場があると思う。

- A 小さく作ること自体が性能を向上する
- B マイクロマシニングで作るほうが組立がいらぬなど、従来の方法よりむしろ作りやすく、コストも下がる。結果としてできたものが小さくても困らぬ
- C マイクロマシニングで作ると、普通のSPMにできないことができるようになる

つぎにSPMとマイクロマシニングの接点で行われた研究や事例を掲げ、それがうえのどの立場であるかを、筆者なりに判断してみる。

(1) STM探針（立場B）

STM探針を加工するのも、切削ではなくエッチングが主流である。すでにSTMの段階でマイクロマシニングの利用が始まっていると見ることができる。

(2) AFMカンチレバー[3-4]（立場B）

AFMでは、0.1から1mmオーダのカンチレバーを作るのに、マイクロマシニングを利用する（作りやすいので）。それに探針をくっつけるよりは、全体をマイクロマシニングで作る、組立をしない方が作りやすく、コストも削減でき、歩留まりもよい。そもそもAFMの走査範囲は小さいので、できたカンチレバーがいくら小さくても困らぬ。

(3) STM探針と微動アクチュエータ[5-6]（立場B）

STMは探針をマイクロマシニングで作るのだから、AFMカンチレバーと同じように、今度はSTMの微動アクチュエータをマイクロマシニングで一緒につくってしまうこともできる。

(4) センサへの応用[7-12]（立場C）

トンネル電流による変位検出の原理は優れているが、センサとして利用するときには小さくないと使いにくい。そこでトンネルデバイスをマイクロマシニングで作れば、センサに

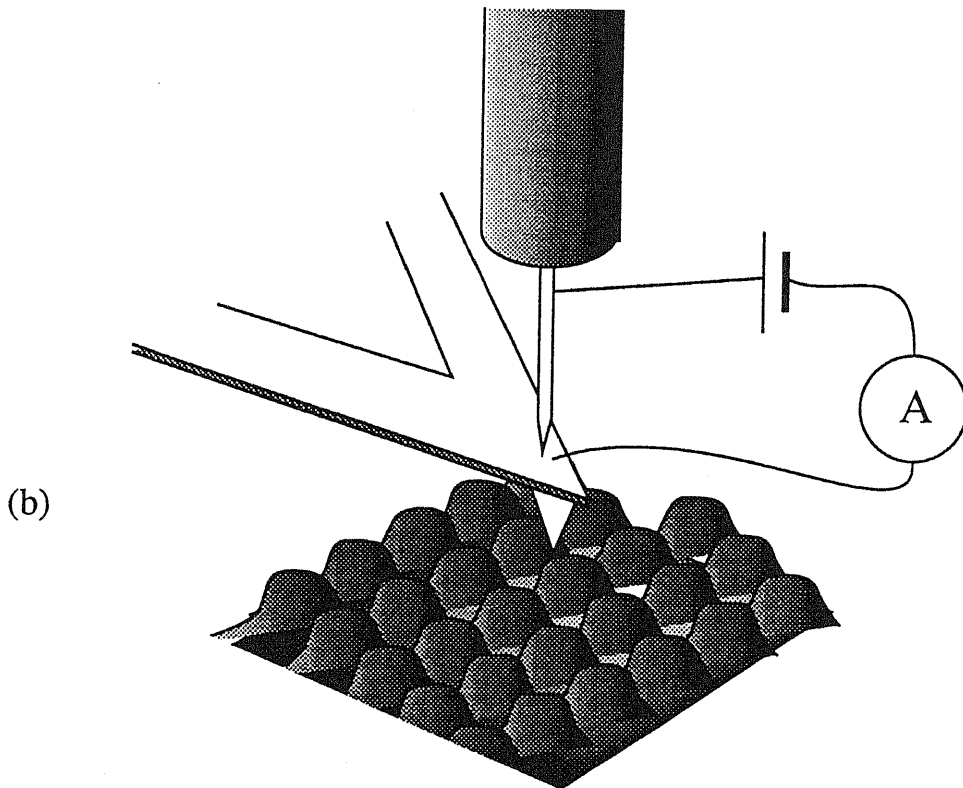
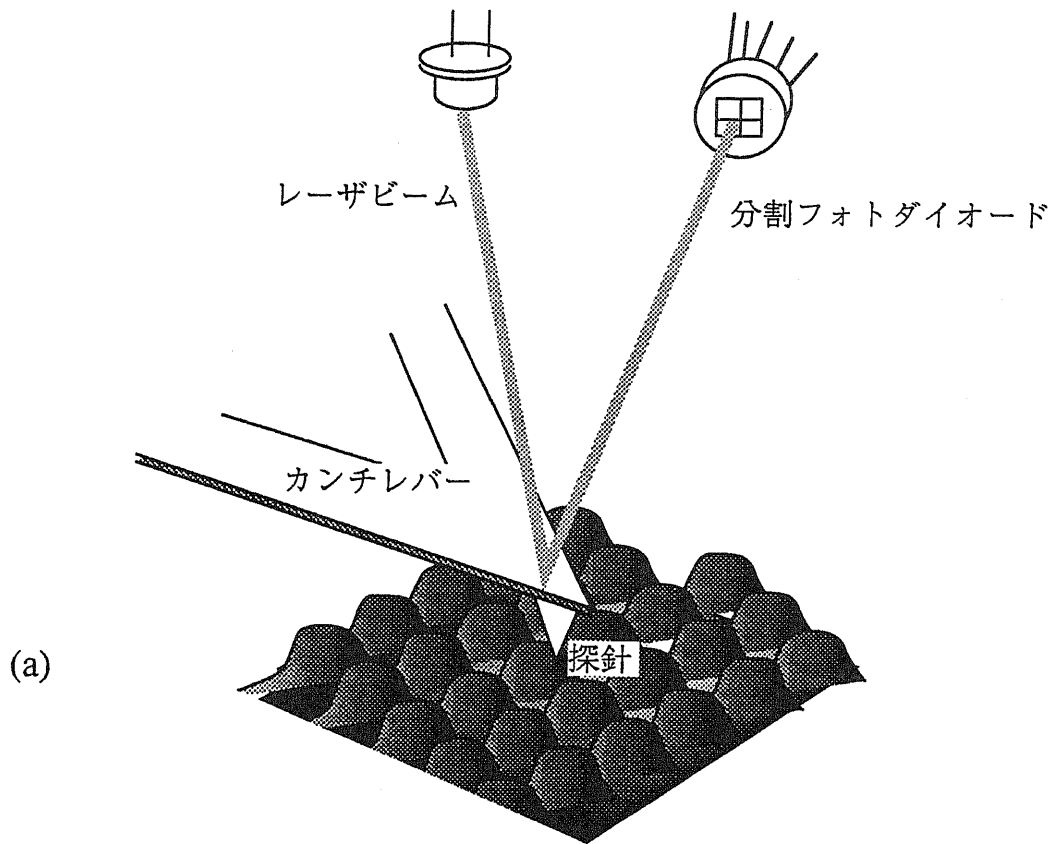


図1-2 AFMの原理

探針先端と試料表面に働く原子間力でカンチレバーが撓む。その撓みを何らかの方法で検出して映像化する。(a)は現在一般的な光てこによる検出法、(b)はSTMによる検出法

応用できる。

(5) TEMの中で使うため（立場C）

STMの探針と試料の間で何が起きているか、TEM（透過電子顕微鏡）で観察するために、TEMに入る寸法のSTM機能をもったデバイスが必要になり、マイクロマシニングを利用することで実現をはかった。

(6) AFMカンチレバー関連[13-14]（立場B）

AFMカンチレバーに走査機構を付けたもの[13]やカンチレバーに歪みセンサを内蔵したものが発表されている[14]。

1.2.2 従来の研究と本研究の位置づけ

上に挙げた例のうち、文献[14]の研究は、AFMの変位センサを非常に小さくするのでAの立場に近いが、AFM全体を小型化することにはならない^註。それ以外は明確にAの立場をとっているようには見えない。これに対し、本研究はAの、小型化自体が性能を上げる、という問題意識をもってデバイスの設計を行う。実際に製作したものと良く似た形のデバイスも他の研究で製作されているが、ひとつは上の(5)であり、もうひとつ[12]は設計論として小型化を重要視した結果ではない。

次節では、なぜ小型化が有利になるのかを見ていく。なお、SPMのプロブ、受動素子としてのプロブではなく、それを微動させるアクチュエータなどを集積したものをプロブユニットと呼ぶことにする。トンネル電流を扱うものは特にトンネルユニットと呼ぶことにする。

1.3 マイクロトンネルユニットの必要性

この節では小型化がなぜ意味を持つのか、わかりやすく説明するために、従来のSTMがいかにも不利な大きさを持っているかを、熱と振動の問題から見ていく。ただし、フルセットのSPMにはマクロな寸法の部分がかならず必要であるから、全体をマイクロマシニングで作ることはできない。ここでは、同じマイクロマシニングで作るにしても、より小さく作る方がよいことを強調するため、逆に寸法の大きいSTMの問題を取り上げる。

1.3.1 装置の寸法と分解能

STMは原子レベルの解像度を実現している。すなわち、探針の位置精度は0.01nmオーダーに達する。一方、装置の大きさを見てみると、従来の装置ではcmオーダーの大きさは最低必要である。通常STMは、探針を走査しZ軸方向に微動するアクチュエータとして、圧電（以下代表的な材料ということでPZTと表記）素子を使用している。PZTアクチュエータはいろいろな形があるが、例えばチューブ型と呼ばれるものについて見ると、10mmとか40mmといった長さがある。これに加え、探針の長さや試料を取り付ける台の寸法を考えると、微動機構だけで数cm程度の寸法が必要である。

さらに、STMやAFMは探針と試料の間を拡げて試料の交換を行う必要があるし、試料の厚さも毎回変わる。このため、探針と試料表面の間隔を、予め微動アクチュエータの可動範囲に入れるため、粗動機構が必要である。粗動機構を含めると、10cm近い寸法が必要となる。その結果、装置の寸法と分解能の比は 10^{10} に達する。ではなぜ寸法が大きいことがいけないのか。それは、熱ドリフトと振動の問題である。

^註 本研究のAFM/LTU集積デバイスもAFM装置の一部として使われるが、AFM/LTUデバイスはトンネルユニット部分を非常に小さくしている。また、トンネル電流の検出感度の方が原理的に高い。

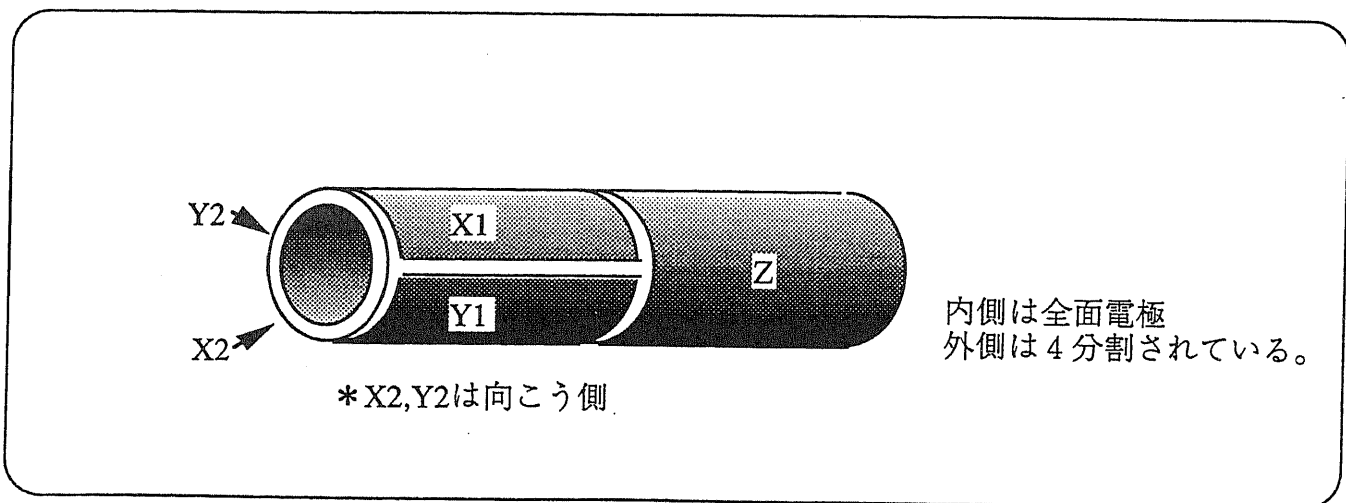


図1-3 チューブ型PZTアクチュエータ

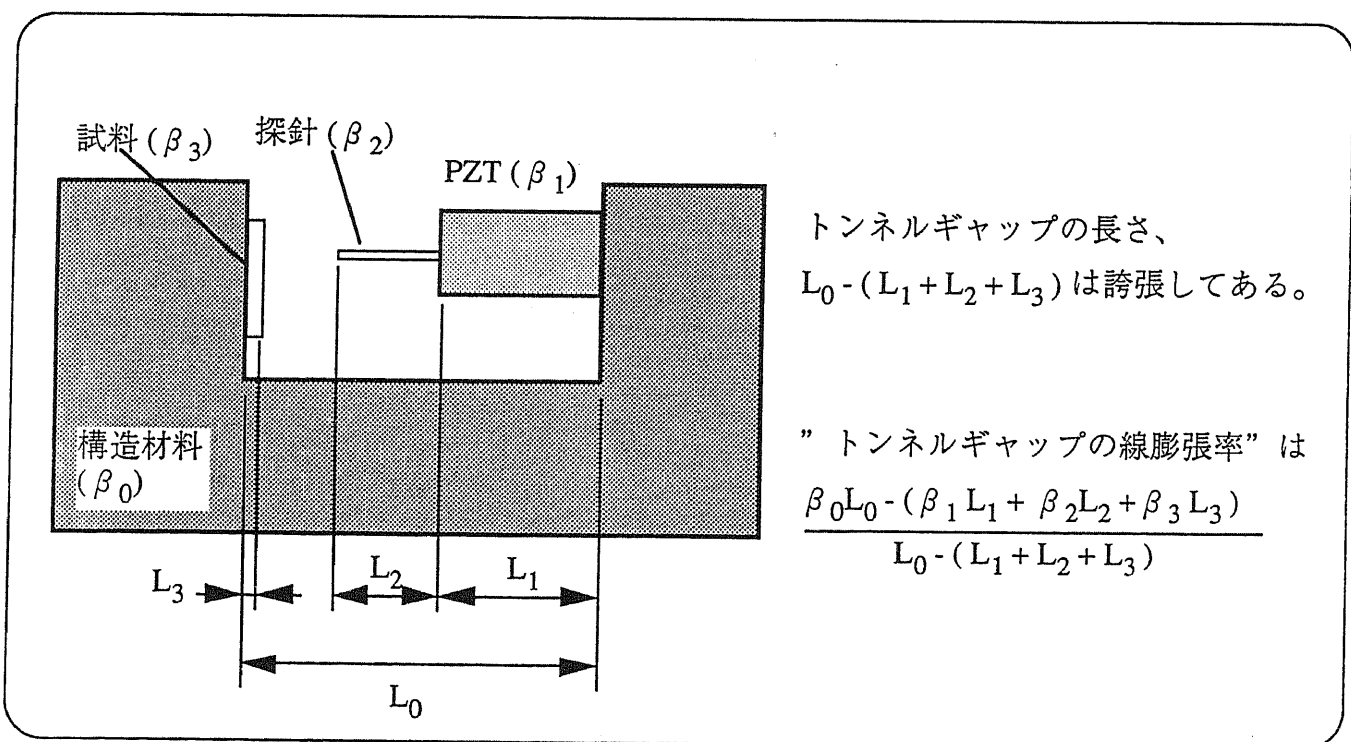


図1-4 STMの部品の長さ と 線膨張係数

1.3.2 熱ドリフトの問題

装置の温度が変わると、材料間の熱膨張率の差によってトンネルギャップが変化して動作点がずれていく。ひどい場合は微動アクチュエータの可動範囲を越えてずれてしまう可能性がある。従来の走査プローブ顕微鏡は、一般に金属製の構造物でできており、その上にPZTや探針など、異なる材料が取り付けられている。図1-4はこれを簡略化した図である。トンネルギャップの長さは誇張して描いてある。さてここで、“トンネルギャップの線膨張率”というものを考えると、その値は、

$$\frac{\beta_0 L_0 - (\beta_1 L_1 + \beta_2 L_2 + \beta_3 L_3)}{L_0 - (L_1 + L_2 + L_3)} \quad (1.2)$$

である。装置の寸法 $L_0 \sim L_3$ にかかわらず、ある値のトンネル電流に相当するトンネルギャップ（分母の式）は一定値で、その値はnmオーダーであるから $L_0 \sim L_3$ に比較して非常に小さい。したがって、トンネルギャップの線膨張率を小さくするには、分子を小さくする必要がある。そのためにはすべての材料の膨張率 β を同じ値にするか、各部の寸法 L を小さくするのが有効である。仮に β が異なっても、トンネルギャップの線膨張率は L に比例して小さくなるので、装置の小形化は直接熱ドリフトの低下に寄与する。装置の小型化が困難ならば、恒温槽に入れるとか熱的なシールドを施すなどの対策が必要である。

1.3.3 振動の問題

装置に外界から振動を加えると、慣性力で装置の部品が相對運動を生じ、トンネルギャップに影響を及ぼす。

図1-5は、例として一端が固定されたカンチレバー状の部品を示している。慣性力による部品の動きは、（質量／部品のバネ定数）に比例すると考える。 L 方向の振動は余り影響がないので、加えられる振動は W 方向であると仮定する。 W 方向の荷重に対する部品のバネ定数は W の3乗と H に比例し、 L の3乗に反比例する。一方質量は HWL に比例する。仮に寸法 H, W および L を一様に変化させると、バネ定数は代表寸法の1乗に比例し、質量は代表寸法の3乗に比例する。したがって、結局慣性力による部品の動きの大きさは、寸法の2乗に比例する。つまり、比例的に装置を小型化すると、その2乗の速さで振動の影響が低下していく。バネ定数が振動方向の寸法の3乗に比例し、幅に1乗で比例し、固定部からの長さの3乗に反比例するのは、ブリッジ形の構造でも同じである。

各次元の寸法を比例的に変化させる点など、一見すると粗雑な議論に見えるが、小型化すると振動に強くなる理由の本質を捕えている。

以上、従来の装置の問題点という視点から、小型化の必要性を検討した。分解能と装置自体の大きさの比が 10^{10} にも達しているから、何となく無駄であるとか、材料が無駄だというだけでなく、理論的にも小型化の必要性が明らかになったと思う。トンネル電流による変位検出という優れた原理を、とくにセンサとして利用するためには、フルセットのSTMは必要なく、大幅な小型化が可能である。ただし、最初にも述べたが、マイクロマシニングで全機能を備えた超小型STMができるわけではない。たとえば任意の試料を観察するためには粗動機構が必要であり、極端な小型化は不可能であろう。

1.4 プローブユニットに対するニーズ

ここでは超小型のプローブユニットに対するニーズを議論する。センサとして利用したいという要求、STMの能力を拡大するために必要となること、および多少未来の話として分子、原子レベルの情報記録デバイスに必要なだろうという予測を述べる。

1.4.1 センサとしてのニーズ

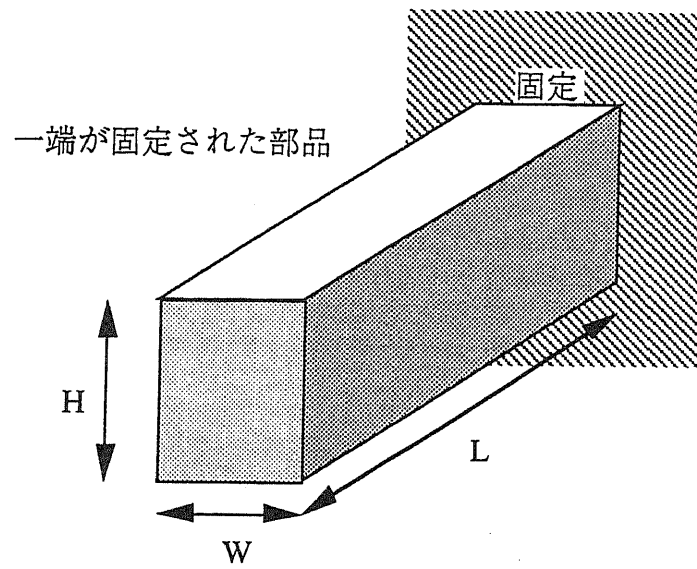


図1-5 一端が固定されたカンチレバー状の部品

トンネル電流で変位を検出するという方法は、物質世界の最小単位である原子より細かい、いわば究極の分解能を持つ。この方法は表面観察以外にも様々に役立つ場面がある。センサには、測定したい物理量を直接電気信号に変換せず、その物理量にともなって変位を発生する構造を持ち、その変位を測定するものがある。そういうタイプのセンサでは、変位検出感度の向上が、すなわちセンサの感度の向上をもたらす。そこにマイクロトンネルユニットのニーズが生まれる。

(1) 加速度センサ[10]

バネで支持された重りを持ち、加速度がかかるとそれが変位を生じる。これをなんらかの手段で検出することで加速度を知る。加速度検出感度を向上するには、単位加速度あたりの重りの変位を大きくするか、変位検出感度を上げる必要がある。前の方法はバネを柔軟にしたり重りの質量を大きくすることであるから、いずれも共振周波数を下げ、センサの対域を低下させる。したがって、後の方法の方が優れている。

(2) 圧力センサ[10]

圧力によって膨らむ膜を備え、その変形または変位を検出する。

(3) AFM[14-17]

前に述べたAFMはカンチレバーの変位を光で検出している。AFMが最初に開発された時は、STM探針をカンチレバーに接近させてトンネル電流で検出していた[2]。ところが、試料-AFM探針間と、カンチレバー背面-STM探針間の、2箇所原子レベルのギャップを維持する機構が複雑で扱いにくいいため、現在は光でこが一般的になった。

生体試料のような柔軟な試料のAFMによる観察では、試料が探針から受ける斥力で変形したり切断されてしないために、通常よりも弱い力で探針を接触させるか、あるいは引力領域で使用する必要がある。ところが、5章で説明するように、引力領域ではカンチレバーのバネ定数を大きく、つまり曲がりにくくしないと不安定になってしまう。その結果、弱い斥力にしても引力領域での使用にしても、変位の検出感度を向上させる必要が生じる。

光でこの検出感度は光路の長さを長くすると向上するが、これはまさに装置の小型化に逆行する。したがって、検出感度が光でこよりも優れたトンネル電流検出が再び必要になるだろう。しかも、装置を大型化しない、AFMカンチレバーと一体になるような小型のトンネルユニットが望まれる。

1.4.2 半導体基板への集積のニーズ

このように、トンネル電流の変位センサとしてのニーズが存在する。しかも、半導体基板上に製作できるものならば、トンネル電流アンプ、制御回路、マイクロプロセッサなどとの集積化が比較的容易で、便利である。

1.4.3 一括大量製作のニーズ

マイクロマシニングで作られるプローブユニットは、一括して大量製作できる特長がある。多数のユニットを集積した状態で作っても、工程が増えることもない。それが求められる場面をいくつか考えてみる。

(1) ディスポーザブル化

AFMカンチレバーは、すでにマイクロマシニングを利用して作られている。それが製法として適しているのみならず、大量に一括製作できるので、低コストに、特性もそろったものができる。上述のトンネル電流による変位検出機構とAFMカンチレバーの集積されたものも、一括大量生産に安定した性能を低コストで実現できる。個別に製作するとそうはならない。

(2) SPMのマルチプローブ

走査プローブ顕微鏡に複数の探針を設けると、一本がなんらかの作用を試料に施し、他のプローブがその影響を検出するというような、能動的な観察が可能になると予想される。そのとき、プローブの間隔が自由に制御できると可能性が広がる。このような目的には、

従来の走査プローブ顕微鏡の先に”マルチプローブユニット”を取付けて、全体の動きは走査プローブ顕微鏡が担当し、ローカルな動きはマルチプローブユニットが担当するというような構成になるだろう。

(3) 情報記録デバイス

STMで個々の原子を表面から取り除いたり、再度吸着させたりする技術が様々開発されている[18-21]。将来、原子の有無に情報のビットを対応させた記録ができる可能性があると言われている。またある種のLB膜が示す、電気パルスによるスイッチング現象を走査プローブの探針のもとで発現させたという報告[22]がある。このように、原子または分子レベルの超高密記録の研究には、現在のところSTMなどが使われている。

しかし実用化までには、STMのような大きな装置を使わずに情報を読み書きできるピックアップが必要になる。そうでなければ装置全体としての記録密度は上がらない。しかも複数のピックアップでそれぞれのエリアを担当しなければ、シーク時間が非常に長くなってしまう。本研究のデバイスが今すぐにこのような目的に使用できるわけではないが、近い将来重要な考え方となってくるだろう。

1.5 本論文の構成

図1-6に本研究の流を示す。1章で述べた研究の背景と位置付けにもとづき、マイクロトンネルユニットを設計、製作し、工学的応用と物理現象の2つの側面から実験を行った。

工学面では微小変位検出を実験で実証した。AFM/LTU集積デバイスの基礎実験は、同一プロセスで製作された微小構造の変位をトンネル電流で検出した初めての例と言えよう。またSTMのz軸アクチュエータとして使用する実験を行った。

物理面では、製作したマイクロトンネルユニットが、斥力領域で動作していることを示唆結果が導かれた。その原因を研究するために空気中と極高真空中でそれぞれ実験を行ったところ、空気中での積分制御による動作はきわめて安定であるのに対して、真空中では振動が起ることがわかった。デバイスのモデルに基づいたPID制御系を設計し、真空中の実験に使用したが、振動は完全には止まらなかった。さらに安定化させるために、デバイス自体を改良し、制御回路を高速化した。その結果真空中でも安定な条件が見つかり、デバイスの動作を解析すると、斥力の原因が空気中の汚染物ではなく原子間力であると考えたことで説明がついた。

上で述べたとおり、制御器はI制御で始まり、その後PIDに変更し、さらに高速化した。しかし、本論文の構成は設計、製作、制御器、実験の順としたので、制御器の章(5章)では前後不同に述べる。これに対して、標準設計のデバイスでの実験は6章で述べ、その結果必要と判断した改良とその結果については7章で扱うというように、この部分は研究の進展に沿って配列する。本論文の章立ては以下のようになっている。

- 2章でマイクロトンネルユニットに要求される特性を、なるべく一般的に議論する。
- 3章では、マイクロトンネルユニットを具体的に設計する。ここで設計したものを標準型と呼ぶことにする。
- 4章では製法を述べる。その中で、表面マイクロマシニング一般に問題となる現象の解決法をひとつ開発したので、それも紹介する。
- 5章では制御器を設計する。
- 6章で、標準型デバイスのいくつかの応用の可能性を実験で確かめる。また、物理的特性についての実験を行い、その結果、真空中での安定動作には、デバイス自体の改良が必要であることを明らかにする。
- 7章ではその結果をうけて、デバイスを改良し、不安定の原因を明らかにし、さらに改良するための指針を与える。
- 8章では、基礎実験をしながら採用しなかった技術や、さらなる改良の案について述べる。
- 9章で全体をまとめる。

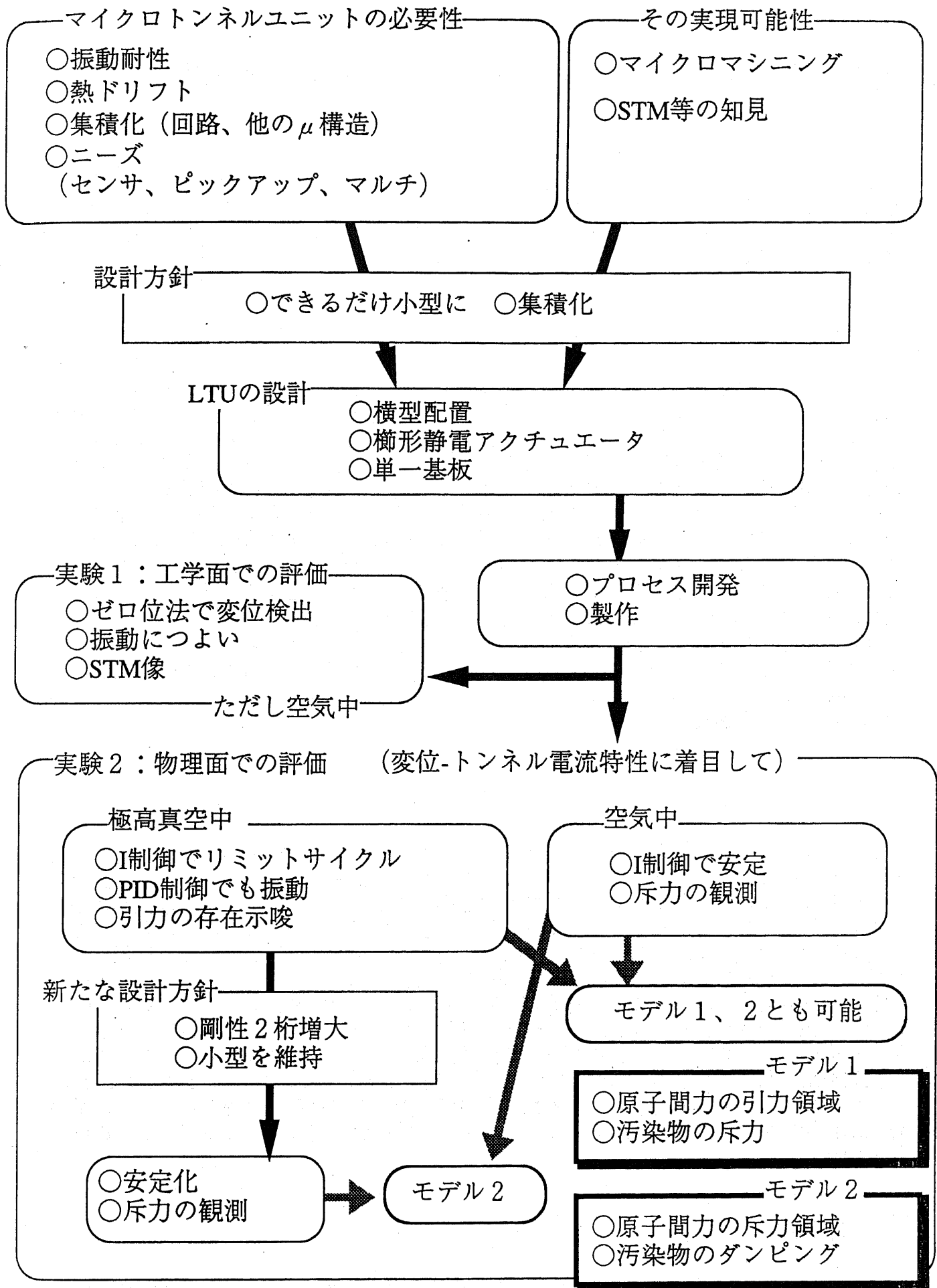


図1-6 本研究の流れ

2章 マイクロトンネルユニットに要求される特性

ここでは、前章で必要性を強調したマイクロトンネルユニットに、どのような特性が求められるかを議論する。使用する技術は半導体加工技術をベースにしたマイクロマシニングを前提にするが、ここではなるべく一般的な議論を行い、次章で本研究の具体的な設計について述べる。

2.1 寸法

ユニット全体の寸法は、小型化するほど振動や温度変化に強くなる、というのが前章の結論であった。もちろん、トンネルユニットとして必要な可動範囲より小さく作るのは原理的にできないが、加工技術から来るの実際的な最小限度はそれよりはるかに大きいので、寸法の下限は技術的な限界で決まることになる。この観点からは、使用するプロセス技術や採用するアクチュエータの種類が決まらなると、具体的な議論はできない。

そこで、従来の機械加工技術を洗練していけば、何とか実現できる寸法よりは十分小さいことを、寸法の上限とする。微動機構と探針と、探針と対をなす電極（対向面と呼ぶことにする）だけを持つユニットを、個別に製作した部品を組み立てる従来の方法で製作するならば、おそらく 1cm^3 がひとつの壁になるだろう。これに対して十分小さいという意味で、1辺が $100\mu\text{m}$ オーダーに入ることを条件とする。

逆に、AFMカンチレバーと集積する場合を想定すると、現在すでにマイクロマシニングで製作されているカンチレバーより極端に小さくする必要はないので、やはり $100\mu\text{m}$ オーダーが妥当である。しかし、STM用のマルチプローブなどの応用では、もっと小さいものが必要になるかも知れない。

2.2 自由度

STMの探針は、トンネルギャップの大きさを制御するZ軸と、走査するためのXY軸の動きが可能なので、3自由度である。STM像を得るためには3自由度がどうしても必要である。もしマイクロトンネルユニットでSTM像を得ることを目標にすると、粗動機構が必要となり、微動部分をいくら小さくしても全体の寸法には関係がないので、自己矛盾に陥る。

超高密度記録デバイスのピックアップとか、STMのマルチプローブといった応用においては、2自由度が必要である（図2-1）。(a)では探針の長さの差を吸収するのと、探針どうしを接近させたり離したりする動作が必要である。片方の探針は固定でもよい。(b)では探針の長さのばらつきを吸収する必要と、多数のユニットでディスクの半径を分担してカバーするため、2自由度必要であるが、円周方向はディスクの回転でカバーできる。

変位検出に限定すればZ軸だけなので、1自由度でよい。したがって、たかだか2自由度あればマイクロトンネルユニットの大部分の応用が可能になる。好都合なことに、半導体加工技術は平面的な加工技術なので、2自由度までは容易に実現できるが、3自由度は比較的難しい。

2.3 可動範囲

探針のZ軸可動範囲は、トンネル電流を何桁か変化させるだけなら 1nm あれば十分であるが、使用目的によってもっと大きな範囲を動かせる必要がある。ここで、いろいろな使用法を図2-2で解説する。(a)は対向面が変位して、トンネル電流に変化を生じるという使

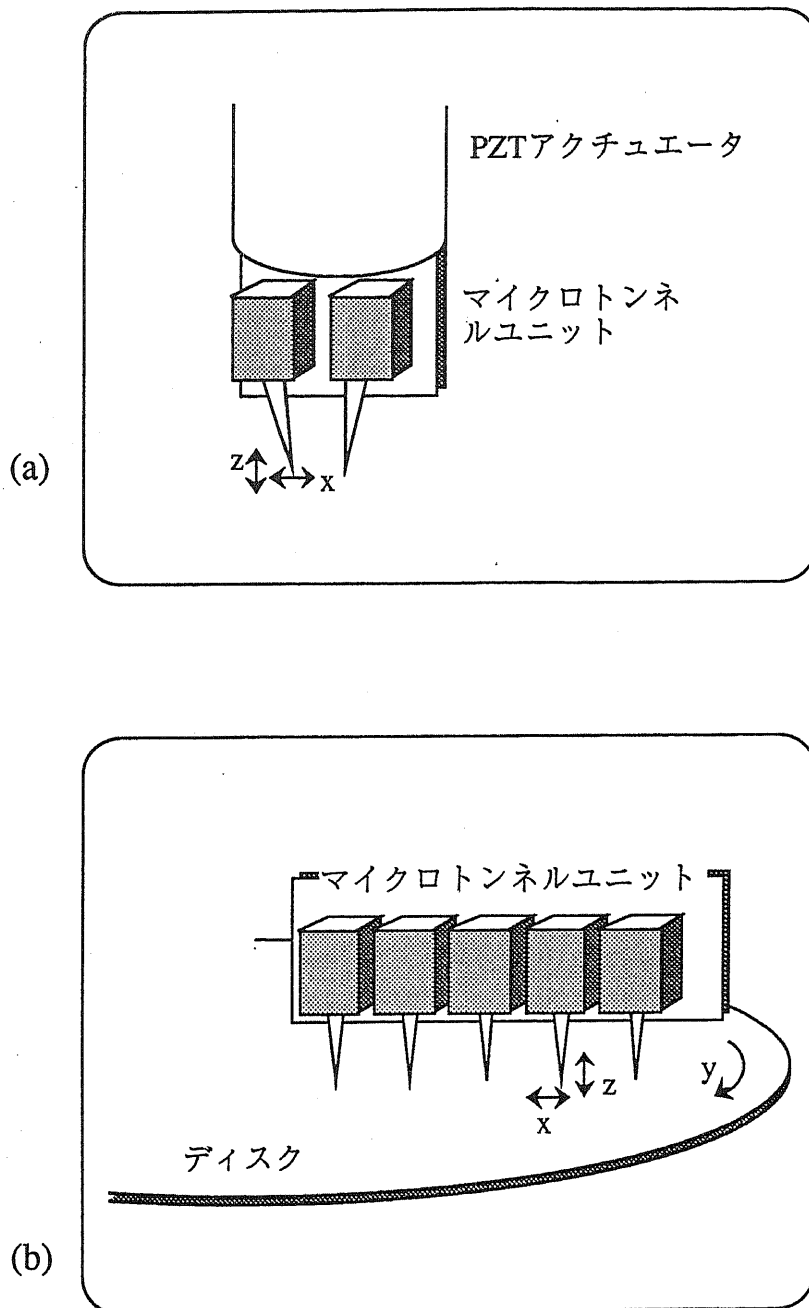


図2-1 複数の探針を集積する応用例

(a)STMに複数の探針をつけると、ひとつが刺激を与え、ひとつが変化を検出するとか、すぐ近くの現象を同時に観察するとか、片方が原子を引き抜き他方に渡し、渡された短針が原子を置くなど、いろいろな可能性が出てくる。

(b)“超高密度記録ディスク”が実現するときには、多数の探針をアレイ状に集積する必要が生じる。

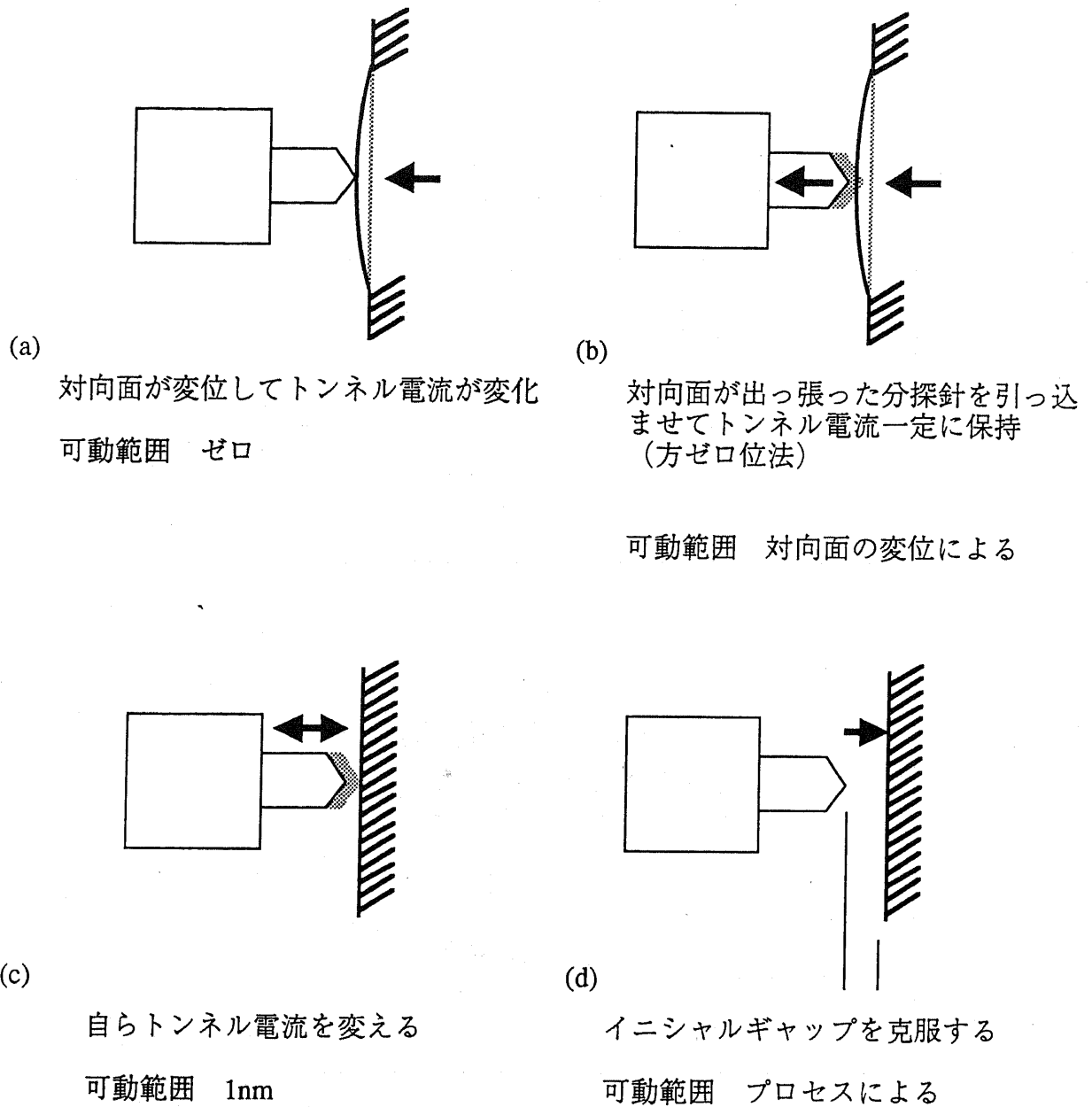


図2-2 トンネルユニットの使用形態とZ軸可動範囲

それぞれの使用形態の具体的な例：

- (a) 距離一定モードのSTM、センサ応用
- (b) ゼロ位法による変位センサ
- (c) 物理的特性の解析
- (d) 初期ギャップの克服

い方である。この場合、あらかじめ適当なトンネルギャップになるように製作できれば可動範囲は全くなくてよい。(b)はトンネル電流が一定になるようにアクチュエータで探針を動かすように制御する場合で、対向面が変位した分だけ探針も変位して、トンネル電流を一定に保つ。いわゆるゼロ位法である。この場合、アクチュエータの駆動信号に変位の情報が含まれる。必要な可動範囲は、対向面の変位量による。(c)は自ら探針を動かしてトンネル電流を変える場合で、すでに述べたように1nmの可動範囲で十分である。(d)は、最初は探針と対向面の間が離れているので、トンネル電流が検出できる距離まで探針を近づけなければならない、ということの意味している。探針と対向面の間のイニシャルギャップはプロセス技術による。

AFMで探針に作用する力を一定に保つ（これもゼロ位法）ときは、カンチレバーと変位検出器を一緒に移動させるか、または試料を移動させることによって、カンチレバーの変形を一定に保つ。したがって、AFMの変位検出にマイクロトンネルユニットを使用してゼロ位法を採用する場合は、(a)に相当する。

問題は(b)と(d)である。これらは個々のケースで検討する必要がある。特に、対向面がユニットと同じプロセスで作られた、同程度の寸法の微小構造物である場合、その最大変位はアクチュエータの最大変位と同じ要因、すなわち構造の最大変形量で決定されているので、適当な可動範囲に設計することができる。(d)については、プロセス技術が決まらなないと決定できない。しかし、プロセスの改良で対応できる可能性があり、イニシャルギャップを差し引く技術[45]もある。

X軸の可動範囲は、使用する目的によって異なる。STMのマルチプローブの場合、複数本のプローブ間のイニシャルギャップと長さのばらつき程度の可動範囲があればよい。(図2-1)の(b)の応用では、図に示したデバイスを厚さ方向にスタックして使用すればよいので、可動範囲は余り問題ではないが、現実的に考えて探針間隔の10パーセントは動く必要があるだろう。

2.4 分解能

トンネル電流による変位の検出自体は、STMでもマイクロトンネルユニットでもおなじである。ユニットを変位検出に使用する場合、電流の変化を読んでアクチュエータにフィードバックしない用途では、トンネル電流回路のS/N比が変位検出の分解能を決定するが、それは容易に0.01nmオーダに達することはSTMで実証されている。

アクチュエータにフィードバックをかけゼロ位法を行う場合、アクチュエータの駆動信号から変位を検出する。この場合、フィードバック回路のS/Nと、アクチュエータ自体位置決め精度が分解能を決定する。電子回路のS/Nはいくらでも改良できると仮定すると、アクチュエータの位置決め精度が問題になる。多少の非線形性はリニアライズできるとしても、再現性のないアクチュエータやヒステリシスのあるアクチュエータは使用すべきでない。

2.5 探針の特性

STMやAFMの探針形状に求められることは、先端半径が小さいことと、マクロな形状が鋭いことも重要である(図2-3)。これは解像力に直接関係がある。先端がいわゆるマルチテップになっていると、像が二重、三重に見えるので好ましくない。マルチプローブとしての応用では、これと同様の特性が求められる。単にZ軸方向の変位測定に使用する場合、探針の形状は問われない。しかし、先端半径が小さいことは、探針と対向面の様々な不要な相互作用、たとえばメニスカス力^{註1}や静電引力などを低下させるという意味でも望ましい。

^{註1} 空気中の物体表面には水が吸着しており、二つの物体が接近すると、この水の膜が一体化して表面張力により物体どうしを引きつける。

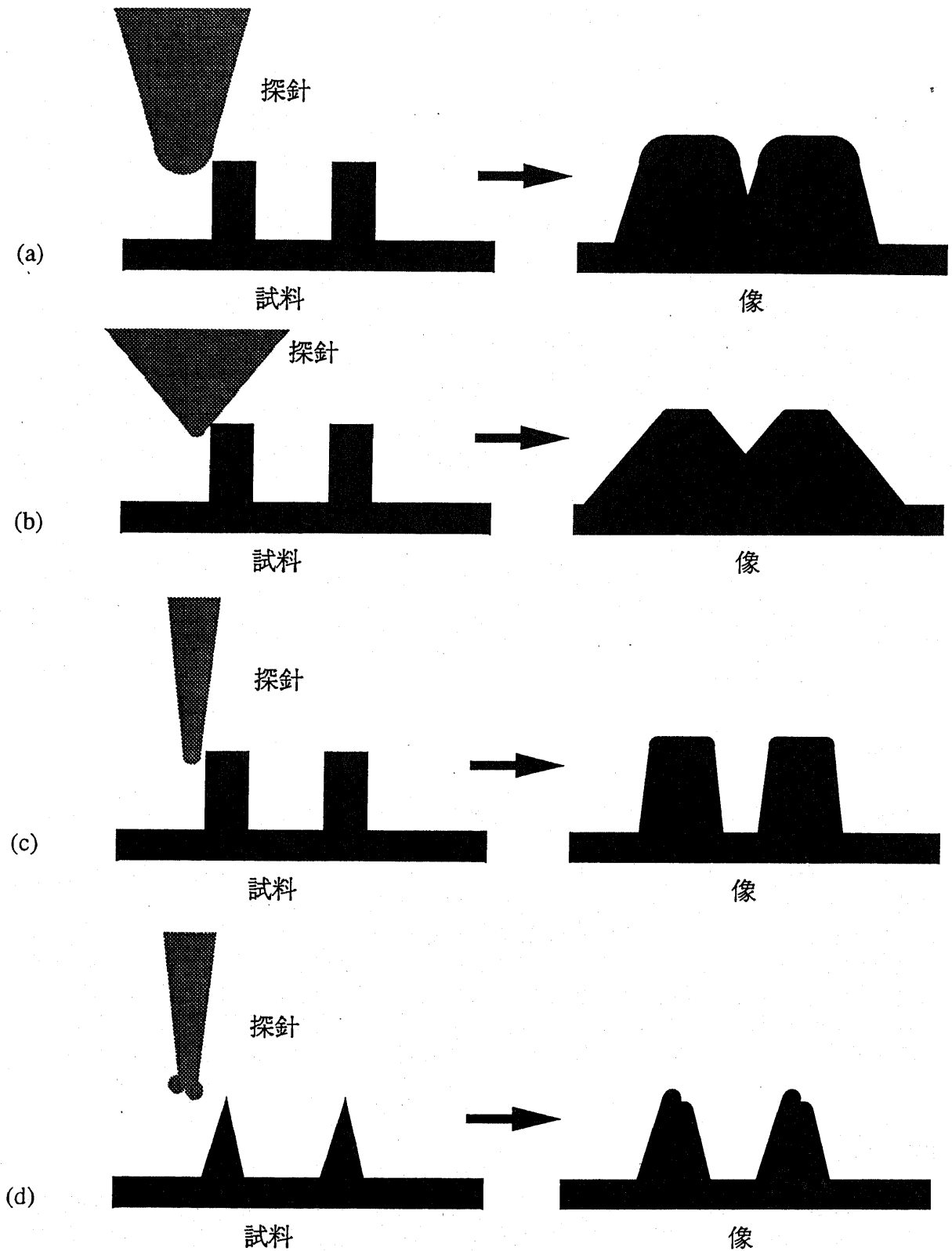


図2-3 探針の形状と像の違い

- (a) 先端半径が大きいと細かい構造がわからない
- (b) マクロに見て尖ってないと深い構造がわからない
- (c) 先端半径とマクロな形状が理想に近い場合
- (d) マルチチップの効果で像が多重に見える

STM探針や変位測定に用いる探針は、導電性がよくなければならない。表面に絶縁性の厚い酸化膜ができるような材料や、表面の科学的活性が強い材料は不適當である。また探針からトンネル電流アンプまでの抵抗がトンネル抵抗（トンネルバリアの印加電圧／トンネル電流）より十分小さい必要がある。1mVのトンネルバイアスで10nAのトンネル電流が流れると仮定すると、トンネル抵抗は100k Ω であるから、探針の抵抗値は数k Ω 以下が望ましい。

2.6 材料

材料とプロセス技術は密接に関係しているので、具体的な材料を先に決めるわけにはいかないが、ガスを発生したり、経時変化や熱による変性がないものが望まれる。トンネル電流回路やアクチュエータの駆動電圧など、電氣的に絶縁する必要がある部分は、絶縁抵抗が高く、ブレイクダウンをおこさない材料が必要である。

一般的な（半導体加工技術から派生した）マイクロマシニングに使われる材料は、シリコン（まれにGaAs）や、その化合物、および金属が主体である。ポリマーや圧電材料も使える。何をを使うかは総合的な判断に基づいて決定すべきである。ただし、基板にシリコンを用いる場合、構造をシリコンで作ると熱膨張率自体が比較的小さく、しかも基板と構造の係数が等しいので好ましい。

2.7 2章のまとめ

マイクロトンネルユニットに必要な特性を、一般的な立場で検討した。これをもとに、次章では具体的な設計を行う。

3章 マイクロトンネルユニットの設計

ここでは、前章までに述べたマイクロトンネルユニットに体する要求を踏まえて、具体的な設計を行う。本研究以前にも、マイクロマシニングを用いたトンネルユニットは存在した[5-11]が、従来の機械加工で製作可能な寸法であったり、組立工程が省けることが主な利点であったりするものが多かった。これに対し、本研究では本質的に有利である小型化を最優先した設計を行う。

3.1 構造の配置

3.1.1 縦型と横型の比較

マイクロトンネルユニットに必要な要素は、探針とそれを動かすアクチュエータ、および探針と対をなしてトンネルギャップを形作るもう一方の電極（対向面と呼ぶ）である。これらの配置が、小型化の限界を決定し、後の応用の容易さに影響し、かつ使用可能なプロセステクノロジーを決定する。ここで、平面状の基板の上に加工を施す、標準的なマイクロマシニング¹⁾を使用することを前提にする。

基板に対する探針の向き、したがってアクチュエータの力の向きを決める。本研究を開始する時点で発表されていたマイクロトンネルユニットは、探針が基板に対して垂直なものが多かった[5-10]。

図3-1に示すのは、垂直方向の探針を持つ2例である。(a)ダイヤフラム型静電アクチュエータを利用したものである[9-10]。はシリコン基板の中央に薄膜部分（ダイヤフラム）をつくり、その中央に探針を作る。ダイヤフラムと駆動電極を対向させて電界をかけると、ダイヤフラムは撓むので、探針が垂直に動く。トンネル電流は3枚目の電極から検出する。したがって(b)に示すように3枚の基板が必要である。(c)のように探針をダイヤフラムの裏側に付けば、2枚の基板でもよい。

このタイプは、(b)のいちばん上の基板を、圧力で膨らむダイヤフラムにするとか、重りを付けて加速度で変位させるとかすれば、センサに使用するのに都合がよい。しかし、最低2枚の基板を必要とし、組立工程が存在し、ダイヤフラムの縁はただ基板の接合にしか寄与していない。このため、全体の大きさがcm程度になってしまう。

図3-1(b)は薄膜の圧電素子(ZnO)4個が束になった形のカンチレバーになっており、その先端に探針がついている。これは圧電素子の駆動電圧のかけ方によって、伸び、左右の曲げ、上下の曲げ、および捻り運動をすることができる。カンチレバーの長さは約1mmである。文献[5-6]にはこれを使ったSTM像が掲載されている。このユニットは、そもそもSTMの微動アクチュエータと探針をマイクロマシニングで製作するのが目的で、対向面まで集積する意図はないのだが、STM装置大部分は従来のままなので、小型化という利点はあまり生かされていない。

3.1.2 横型の採用

このように、探針を基板に垂直に配置すると、小型化が妨げられる。幸い、水平方向の変位を発生するマイクロアクチュエータはいろいろな型があるので、水平方向に探針を向けて動かす設計とする。そこで、製作するトンネルユニットをLateral Tunneling Unit (LTU)と呼ぶことにする。なお、文献[10-11]のは水平型のユニットである。文献[12]は本研究のLTUと構造上はほぼ同じものであるが、探針に熱電対を組み込んで、熱的なプローブに使うものとされている。

¹⁾ 立体の表面にリソグラフィや選択的堆積を行う技術もあるが、一般的ではない。

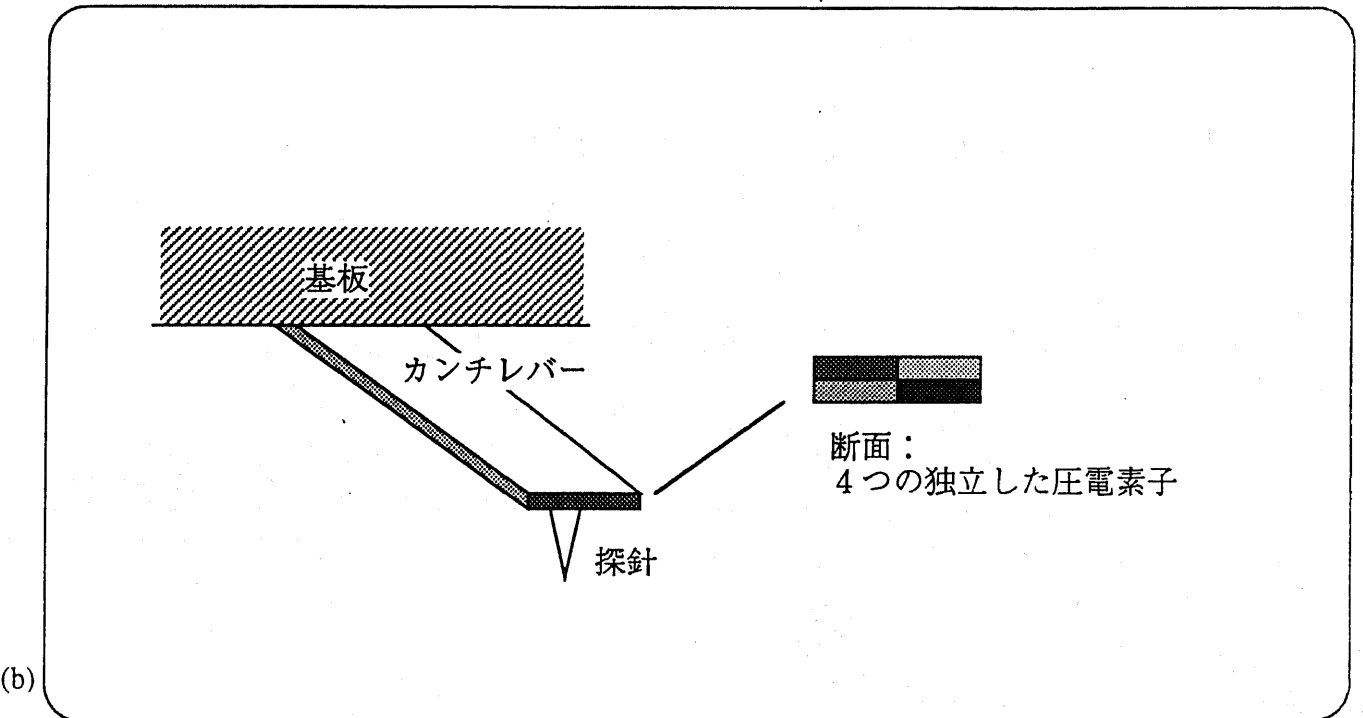
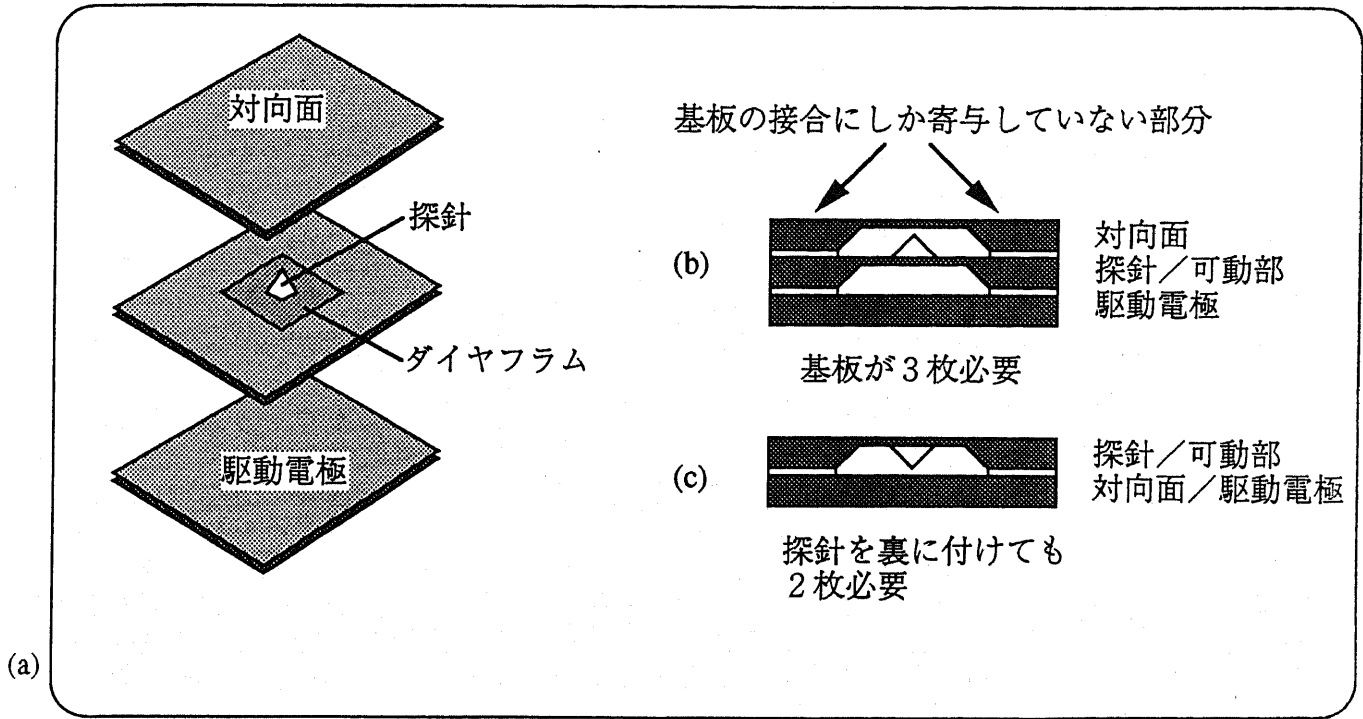


図3-1 縦方向に探針が向いているトンネルユニットの例

- (a)ダイヤフラム型[9-10]
- (b)カンチレバー型[5-11]

3.2 利用可能なマイクロアクチュエータ

3.2.1 静電アクチュエータ

水平方向に変位を発生するマイクロアクチュエータとして、何種類かの静電アクチュエータがある。モータのように連続的な変位（回転）を発生するものはここでは必要ない。というのは、現在のマイクロモータはトルク変動が大きく、そもそも出力を取り出したり減速したりする機構が発達していないので使えないのである。現段階ではPZTアクチュエータと同じように変位を直接利用するものに限定される。

もっとも単純なものは平行平板の一方を可動にするものである（図3-2(a)）。このタイプは、かならずどこかで不安定になり、可動電極が固定電極に吸い付けられてしまう。これは距離が接近するほど電界が強くなり、引っ張る力がさらに強まるという正帰還に陥るからである。電極の形が変形せずに平行のまま接近すると仮定したとき、初期ギャップの1/3まで変位したところで不安定になる。次に述べる櫛形に比較して単純な形で力は強いが、意外に変位が取れない。また、非線形性が強いので、計測に利用するには不便である。

櫛形静電アクチュエータ[23]（図3-2(b)）は、固定部と可動部に付いた櫛状の電極が互いに接触しないように組み合わせられたもので、支持梁のバネ性と櫛部分の発生する引力が釣り合う位置まで変位を発生する。このアクチュエータの発生力と印加電圧の関係を見よう。櫛一對あたりの重なり部分を、平行平板コンデンサの静電容量 C とする。印加電圧 V によって蓄えられる静電エネルギー U は、

$$U = \frac{1}{2} CV^2$$

と表される、Z軸方向の力 F は仮想変位によって次の式になる。

$$F = \frac{dU}{dz} = \frac{dU}{dC} \cdot \frac{dC}{dz} = \frac{1}{2} V^2 \cdot \frac{dC}{dz}$$

ここで、櫛の重なる増加と新たに加わる静電容量の関係は、櫛間隔を d 、櫛の厚さを h とすると、

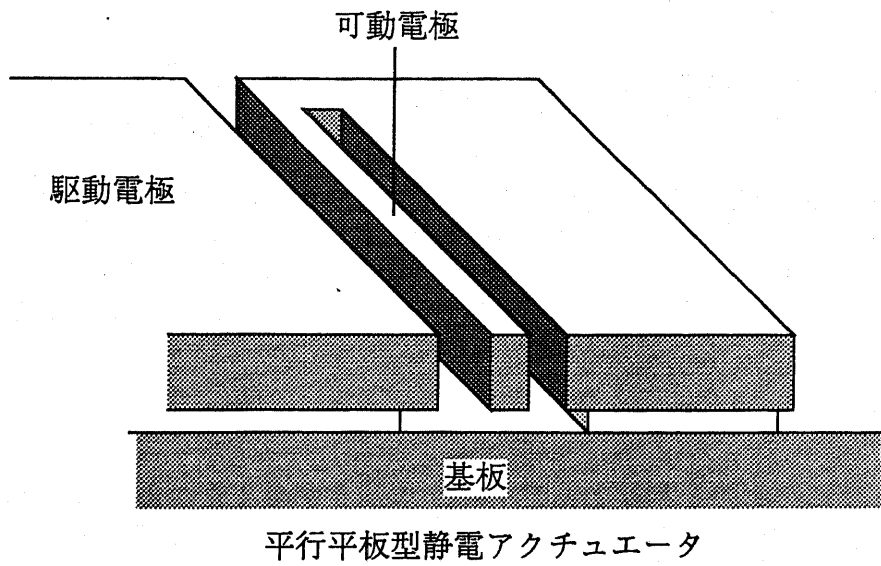
$$\Delta C = \epsilon \frac{h \cdot \Delta z}{d}$$

したがって、

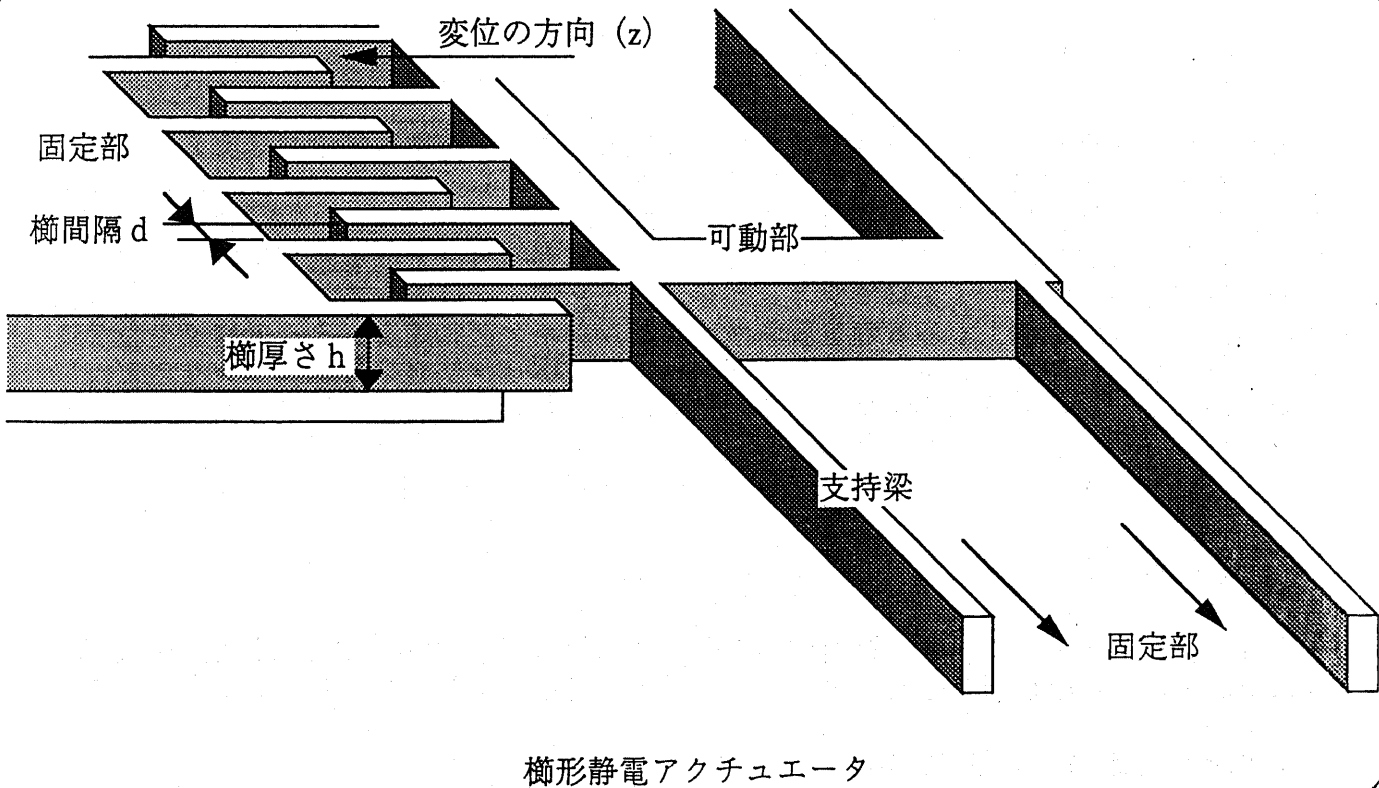
$$F = \frac{\epsilon h}{2d} V^2$$

となって、アクチュエータの発生力は電圧の2乗に比例する。つまり、すでに挿入されている深さには関係ないので、アクチュエータの静特性は素直な2乗特性である。この非線形性は電子回路でリニアライズすることもできるが、特性の等しい2個のアクチュエータの力の差をとることで、2乗の成分を本質的に取り除く方法[46]もある。その方法については8章で述べる。また、原理的には変位の大きさに制限がない。

ただし、櫛の重なり部分が大きくなると、横方向の引力が強くなる。櫛歯が対称に作られていれば、両側からかかる横方向の引力は釣り合っているが、これは不安定平衡点であり、可動部に微小なかたよりが発生すると、平衡平板型のアクチュエータの不安定現象と同様に破局につながる。これを避けるため支持梁はZ軸方向には柔らかく、直交する方向には堅い構造に設計されるが、この堅さの比が最大変位を決定する要因として重要である。このアクチュエータは変位が大きくとれるが、占有面積のわりに力が弱いという問題もあ



(a)



(b)

図3-2 2種類の静電マイクロアクチュエータ

(a)平衡平板型は力が強いが可動距離が小さく、非線形性が強い
 (b)櫛形は力は弱いが可動距離が大きく、2乗特性

る。

3.2.2 圧電アクチュエータ

圧電アクチュエータで、基板に水平な変位を発生するものがある。発生力が比較的大きい特長がある。しかし従来のSTMのPZTが、マクロな機械部品程度の大きさを必要とすることからわかるように、単位長さあたりの発生変位が小さいので、バイモルフにして変位を拡大するといった使い方がされる場合が多く（文献[5-6]の例もバイモルフである）、発生力の強さが犠牲になってしまう。圧電材料の膨張率がシリコンとことなること、駆動電圧と変位の関係にヒステリシスがあることなど、不利な点も多い。最も困るのは、マイクロマシニングでPZT（チタン酸ジルコン酸鉛）のような高性能な圧電素子を利用するのが難しい点である。

3.2.3 熱膨張の利用

バイメタルのように熱膨張を利用したアクチュエータが考えられる。通電してジュール熱で加熱できるので、構造も簡単であり、力も強い。ただし温度変化、特に冷却に時間がかかること、雰囲気の温度に影響をうけること等が問題である。

3.2.4 櫛形静電アクチュエータの採用

線形性が良く、ヒステリシスがなく、大きな変位が得られる点に注目し、以上のアクチュエータのなかで、本研究では櫛形静電アクチュエータを採用する。

3.3 テクノロジー

櫛形静電アクチュエータを採用することを前提とすると、使用可能なプロセス技術は限られてくる。一般的にはポリシリコンの薄膜をエッチングして形成される。単結晶シリコンの基板自体を加工して作る方法や、GaAsを材料にする方法を行っている研究者もあるが、本研究の目的では、ポリシリコンで可能であれば他の方法を取る利点は特にない。

基板自体を加工するマイクロマシニングを、バルクマイクロマシニングと呼び、基板表面に堆積した薄膜を加工するものを表面マイクロマシニングと呼ぶ。ここではポリシリコンを材料にした表面マイクロマシニングを採用する。ポリシリコンと基板のシリコンは熱膨張率が近く、しかも熱伝導が良いので、構造の小ささだけでなく材料から見ても熱ドリフトの小さいトンネルユニットができる。

3.4 形状の設計

探針、アクチュエータ、および対向面を図3-3のように配置する。図は標準的なLTUの構造である。支持梁が折り返しているのは、以下の効果を期待しているためである[23]。

1. 引っ張り応力の緩和（図3-4）

折り返しがない場合、梁が曲がると引っ張り応力が働き、曲がりにくくなる²²。折り返しがあると、連結梁が枠の方へ近づいて張力を緩和する。本来支持梁の長さに長短があると、応力が完全に緩和されないのが、好ましくない。これは設計のミスと言える部分だが、実用上あまり問題はなかった。

2. 残留応力の緩和（図3-5）

²² 材料力学で一般的な微小変位の理論では考慮されない。

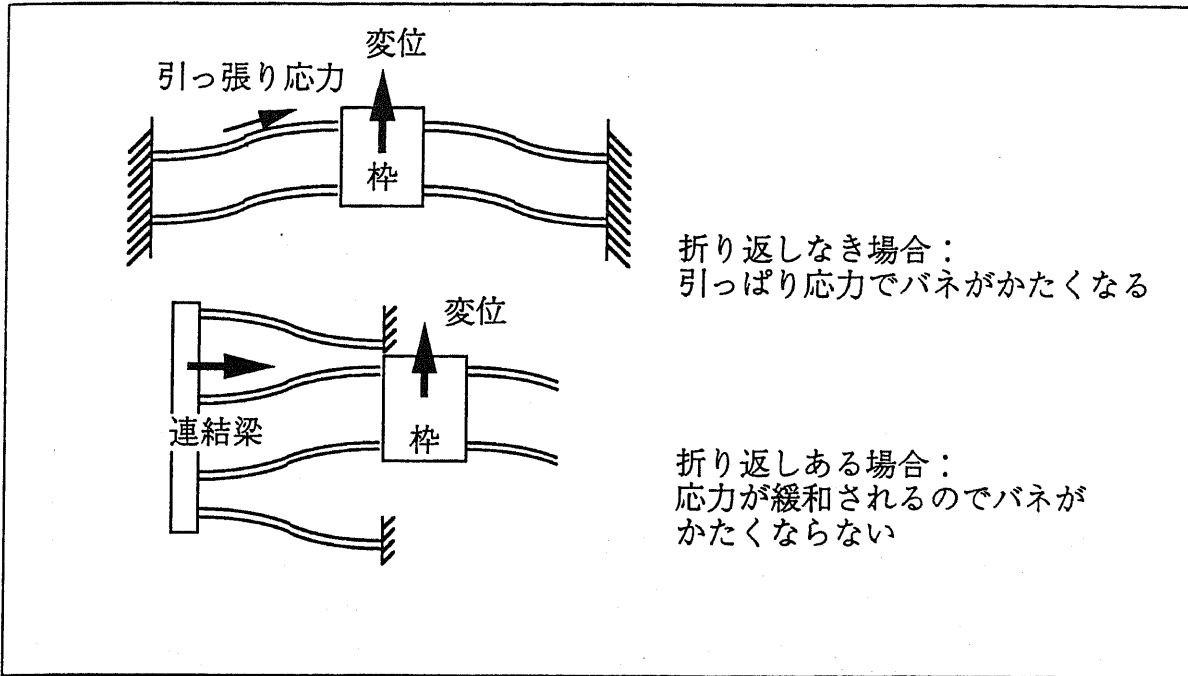


図3-4 折り返し梁の効用1 引っ張り応力の緩和

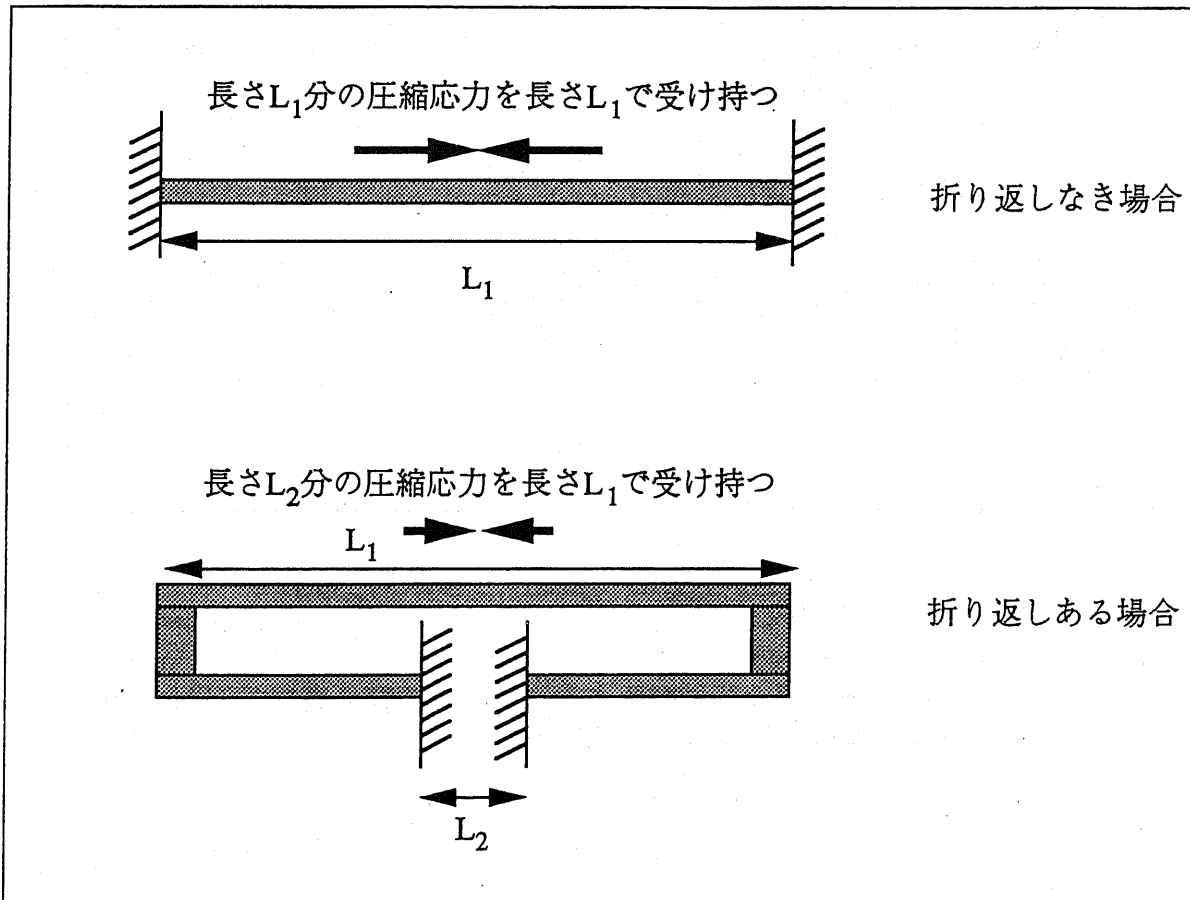


図3-5 折り返し梁の効用2 圧縮応力の緩和

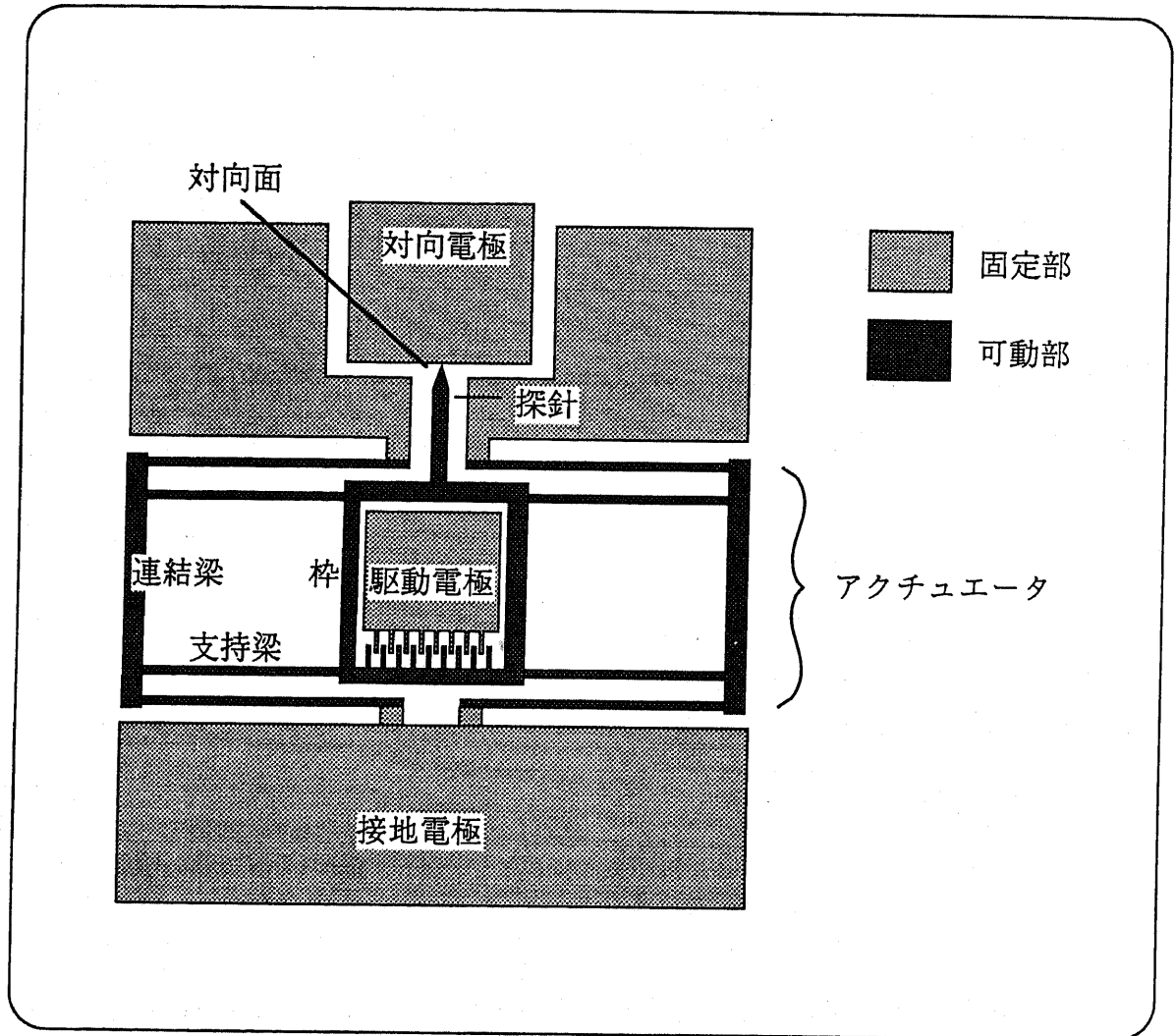


図3-3 LTUの構造配置

すべての構造を平面的に配置する。各部の名称を、図中にしめしたとおり定義する。

シリコン基板に対して、ポリシリコン薄膜に圧縮性の残留応力が入っている場合、両端の固定部の間に支持梁で可動部が支持されている構造では、薄膜が上か下に座屈する。折り返しを採用すると、両方の固定部の間隔が狭くなり、その狭い間隔に相当する圧縮応力だけが残り、それより外側の応力は開放される。

折り返し梁は、縦方向のバネ定数は小さく横方向の剛性が高いので、平行平板コンデンサとしての力に対向して、Z軸方向の動きのみを許す構造になっている。

発生変位量はイニシャルギャップによって決める必要がある。マスクパターン上ではイニシャルギャップは $0.5\mu\text{m}$ 毎に自由に設計できるが、仕上がり寸法はプロセスを通してみないとわからない。また、変位量は支持梁の太さや櫛の太さに関係してくる。そこで、各部の寸法をパラメータとして、種々の組み合わせを作り、実際に製作することによって寸法を決定した。その最も代表的な（マスクパターン上の）寸法は、以下のとおりである。

長支持梁	:	長さ $213\mu\text{m}$	幅 $2.5\mu\text{m}$
短支持梁	:	長さ $107\mu\text{m}$	幅 $2.5\mu\text{m}$
櫛歯の幅	:	$3\mu\text{m}$	
櫛歯の間隔	:	$2\mu\text{m}$	
櫛対数	:	48	
櫛の長さ	:	$30\mu\text{m}$	
櫛の重なり	:	$15\mu\text{m}$	
初期ギャップ	:	$0.5\mu\text{m}$	
連結梁の幅	:	$10\mu\text{m}$	
枠の幅	:	$10\mu\text{m}$	

なお厚さは特記しないかぎり $4\mu\text{m}$ （ポリシリコン）

連結梁と枠は曲がらないことが求められるという意味で、支持梁に対して十分太く設計する必要があるが、一方で構造の太さの差を利用して可動部と固定部を作り分けているため、極端には太くできない。実際の仕上がり寸法はかなりばらつくことが多く、正確にパラメータを知るためにはその都度測定する必要がある。

3.5 剛性

上記のパラメータで実際に製作したLTUの、支持梁のバネ定数を求めてみる。支持梁の幅は実測で約 $2\mu\text{m}$ 程度が多いので、ここでは $2\mu\text{m}$ とする。支持梁の両端は枠と連結梁に直角に保たれたまま変形する。図3-6は支持梁にかかる荷重 W とたわみ y を描いたものである。この場合の y は次式で表される。

$$y = \frac{WL^3}{12EI}$$

ただし、 E は材料のヤング率、断面2次モーメントである。支持梁の幅を b 、厚さを h （図3-7）とすると、

$$I = \frac{hb^3}{12}$$

である。したがってバネ定数は、

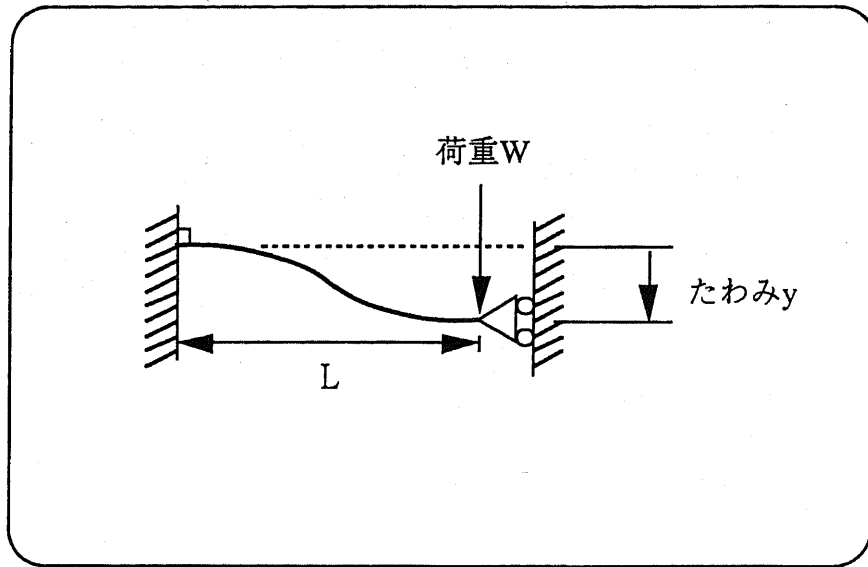


図3-6 支持梁にかかる荷重とたわみ

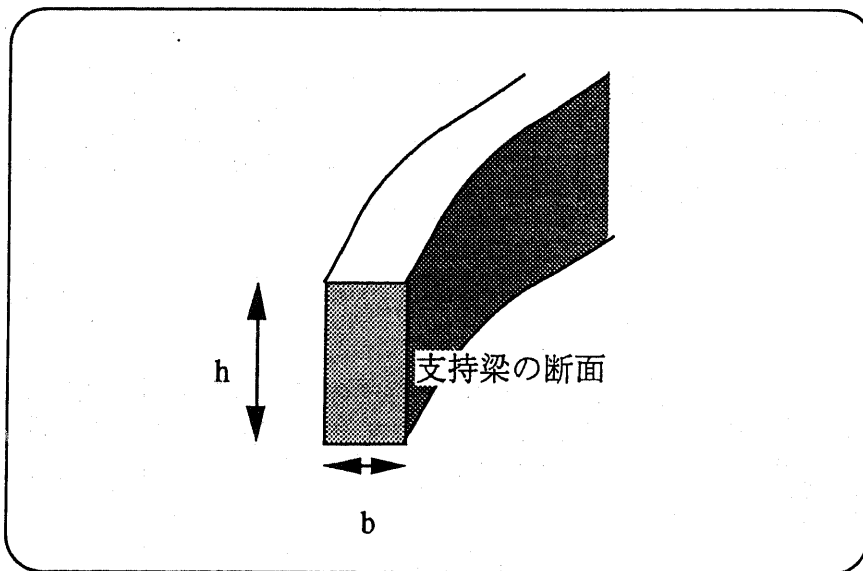


図3-7 支持梁の幅と厚さの記号の定義

$$\frac{y}{W} = Eh \left(\frac{b}{L} \right)^3 \quad (3.1)$$

となる。これにシリコンのヤング率²³⁾、 $E=1.9 \times 10^{11} \text{Pa}$ を代入し、 h, b, L を μm 単位で代入できるように換算すると、次式になる。

$$\text{バネ定数 (N/m)} = 1.9 \times 10^5 (\text{厚さ}(\mu\text{m})) \left(\frac{\text{幅}(\mu\text{m})}{\text{長さ}(\mu\text{m})} \right)^3 \quad (3.2)$$

先に示した長短支持梁の長さと、幅 $2\mu\text{m}$ および厚さ $4\mu\text{m}$ を代入すると、

$$\begin{aligned} \text{長支持梁のバネ定数} &= 0.63 \text{ N/m} \\ \text{短支持梁のバネ定数} &= 5.0 \text{ N/m} \end{aligned}$$

が得られる。長支持梁は4本あり並列につながっている。短支持梁もやはり4本あり並列につながっている。これらが直列になっているのがLTUの可動部の総合バネ定数、

$$\left((4 \times 0.63)^{-1} + (4 \times 5.0)^{-1} \right)^{-1} = 2.2 (\text{N/m})$$

である。

これは通常のSTMのバネ定数よりはるかに小さく、むしろAFMのカンチレバーに近い²⁴⁾値である。バネ定数が小さいことは、ゼロ位法による変位測定では原理的に全く問題にならないが、真空中では不安定現象の原因のひとつになることが、実験の結果わかった。逆に、柔軟な構造は外力に対して容易く逃げるができるため、探針を傷めることが少なく、これがAFMの変位測定においては利点となる。これらについては6章で議論する。

3.6 共振周波数

枠の外側の寸法は、マスクパターン上で $263\mu\text{m} \times 275\mu\text{m}$ であり、幅はどこも $10\mu\text{m}$ である。探針は長さ $60\mu\text{m}$ 、幅 $10\mu\text{m}$ の長方形に底辺 $10\mu\text{m}$ 、高さ $20\mu\text{m}$ の三角形が付いた形である。可動部の櫛歯は24本あり、長さ $30\mu\text{m}$ 、幅は $3\mu\text{m}$ の長方形である。プロセスで各部の幅が $0.5\mu\text{m}$ 狭くなるとして、おおよその面積を計算し、厚さ $4\mu\text{m}$ をかけると体積がわかる。メートル単位で表現すると、約 $5.1 \times 10^{-14} \text{m}^3$ である。シリコンの密度は 2.34g/cm^3 すなわち、 2340kg/m^3 であるから、可動部の質量は約 $1.2 \times 10^{-10} \text{kg}$ と求まる。

連結梁と支持梁の質量を無視して、先の総バネ定数と今求めた質量から共振周波数を求めると、約 22kHz となる。実測でも10数kHzから20数kHzである。また、実測ではそれより低い周波数には他のモードは存在しない。

3.7 振動耐性

単位加速度で可動部が受ける慣性力は、 $1.2 \times 10^{-10} \text{N}$ である。Z軸方向のバネ定数で割ってみると、 $5.4 \times 10^{-11} \text{m}$ となる。すなわち、Z軸方向の単位加速度に対し 0.054nm しか動か

²³⁾ ポリシリコンのヤング率はかならずしも単結晶シリコンのそれと等しいとは限らないが、ここでは単結晶の値を流用する。

²⁴⁾ 代表的なAFMカンチレバーのバネ定数は 0.1 から 10N/m 。

ない。一般的な実験室の振動として、100Hzの周波数で1 μ mの振幅を仮定する。この振動の最大加速度は0.39m/s²であるから、LTUの可動部の最大変位は0.02nmで、全く除振しないでテーブルにおいたまま使用原子分解能を実現できる可能性がある。重力加速度に対しても0.53nm程度の変位で、これは原子程度の大きさである。

LTUは可動部の質量が非常に小さいため、可動部が受ける単位加速度あたりの慣性力が小さい。バネ定数はSTMに比較して非常に小さいと述べたが、質量は長さの3乗に比例して低下するので、質量の低下の効果が上回る。

支持梁の厚さ $h=4\mu$ mと幅 $b=2\mu$ mを入れ替えると、基板に垂直な方向のバネ定数が求められる。厚さが幅より大きいので、その値はZ軸方向のバネ定数より大きくなる。すなわち、上で求めたZ軸方向のバネ定数2.2N/mに、 $(2\times 4^3)/(4\times 2^3)$ をかけて、8.8N/mを得る。つまり縦方向の振動耐性はさらに高い。

なお、比較的低い10kHzのオーダに共振点があるので、固体伝播音や空気からの音響振動に対してはシールドが必要になる可能性はある。

3.8 ダンピング

LTUの可動部分は純粋なバネ-質量振動系に近く、ダンピングが悪いので、ステップやインパルスの力が加わると振動が静定しにくいことが予想できる。この点は真空中での使用に際して問題になることがわかったが、6章で詳しく扱う。ダンピングを向上させる対策については、8章で議論する。

3.9 3章のまとめ

小型化を最優先した設計を行った。その結果、従来のSTMよりはるかに小さいユニットとなり、振動に対する強さを見積ると、予想どおり好ましいものであった。また、基板と構造の両方がシリコンなので、熱ドリフトも少ないはずである。ただし、振動のダンピングは低い構造になった。

4章 製作

4.1 製作プロセス

4.1.1 製作プロセスの概要

LTUの製作は、シリコンベースの表面マイクロマシニングで行う。一般に表面マイクロマシニングでは、次のようなプロセスで可動な構造を形成する（図4-1）。

1. 後の工程で選択的に除去することにより可動部を基板から分離するための材料（犠牲層）を基板上に堆積する
2. 完成時に可動部分になる材料（構造層）を堆積する
3. 構造層をリソグラフィとエッチングにより切り分けて構造を作る
4. 犠牲層を選択的に除去して構造を可動にする

図4-2は製作プロセスを簡略に示したものである。ここでは、構造層がポリシリコンまたは単結晶シリコンで、犠牲層はシリコン酸化物である。本研究では、上述の1と2の工程が済んだ基板からプロセスを開始した。図4-2を簡単に説明する。

1. まず後工程のRIE（Reactive Ion Etching）において、エッチングしたくない部分を覆うための（エッチングマスクとするための）金属薄膜を真空蒸着する。
2. 次にフォトリソグラフィで構造部の形をフォトレジストに焼付け、レジストパターンを形成し、ウェットエッチング^脚でこのパターンをエッチングマスクに転写する。
3. RIEによって構造層のシリコンを、酸化膜に達するまで基板に対して垂直に掘る（異方性エッチング）。
4. 続いて酸化膜をフッ化水素酸で除去する（分離工程）。この工程では、可動部は固定部に対して細く設計されているので、時間管理によって可動部の下部の酸化膜が完全に除去され、同時に固定部と基板の間には酸化膜が残っているようにすることができる。
5. 最後に、安定な導電性を付与すると同時にワイヤボンディングができる表面とするため、金属を堆積する。

以下、製作上とくに問題となる点について説明を加えた上で、最後に詳細なプロセスフローを示し解説する。

4.1.2 分離時の課題と対策

表面マイクロマシニングでは、構造が柔軟なため、これを基板から分離する際に基板への付着がしばしば発生し（図4-3）、それをどう防ぐかが問題となる。本研究では、この問題を解決する簡便で効果的な技術（PRアシスト法）[25-26]を開発した。これは本研究に限らず利用可能な技術なので、以下に表面マイクロマシニング一般の議論として、この技術について述べる。

(1) 付着問題と従来の対策

犠牲層の除去にウェットエッチングを用いると、洗浄液を乾燥または遠心分離などによって除去する際に、基板と構造物が付着してしまうことがある。その主な原因は洗浄液の

^脚 腐食液を使用するエッチングをウェットエッチングと呼ぶことがある。これに対して、RIEやO₂アッシングをドライエッチングと呼ぶ。

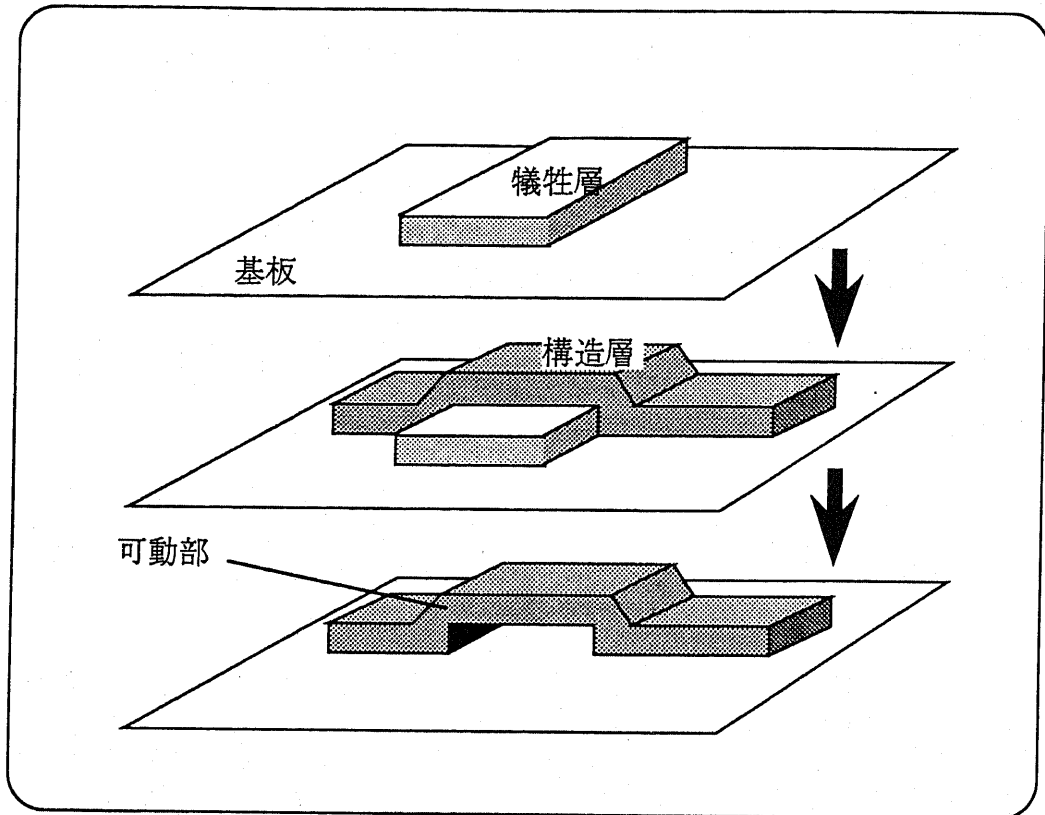
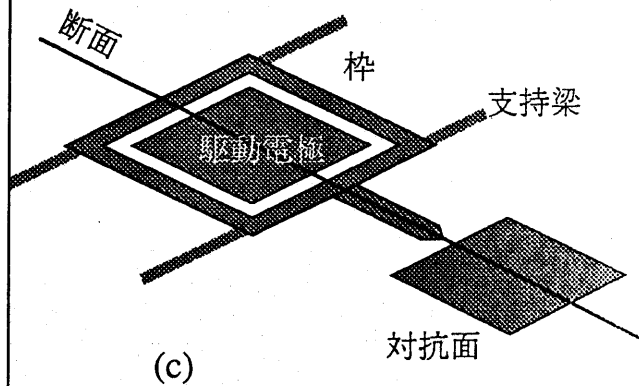
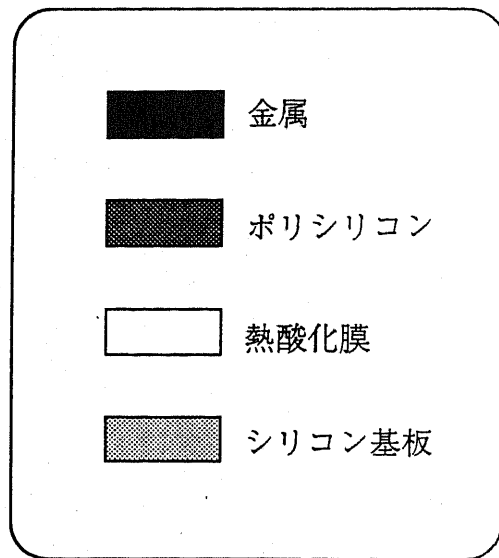
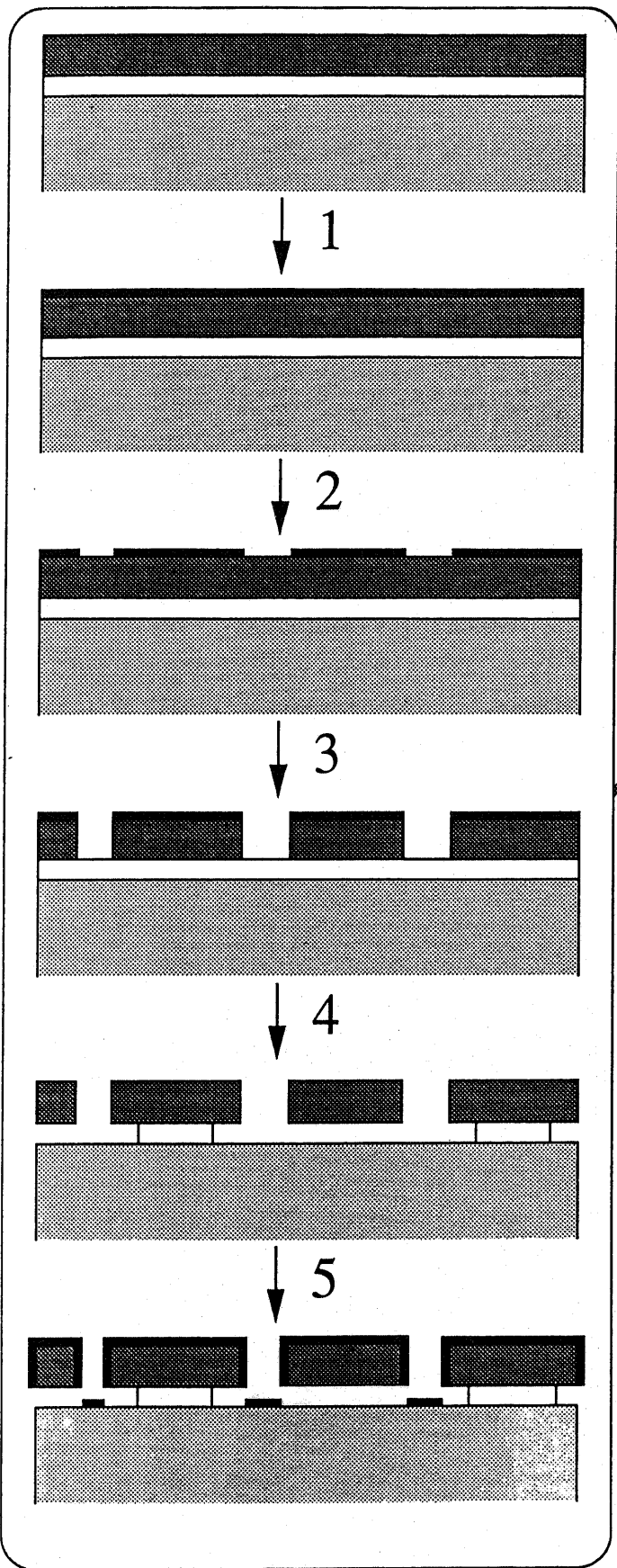


図4-1 表面マイクロマシニングの一般的なプロセス

あらかじめ犠牲槽を用意し、その上に構造層を乗せ、最後に犠牲槽を選択的にエッチングして可動部を作る。

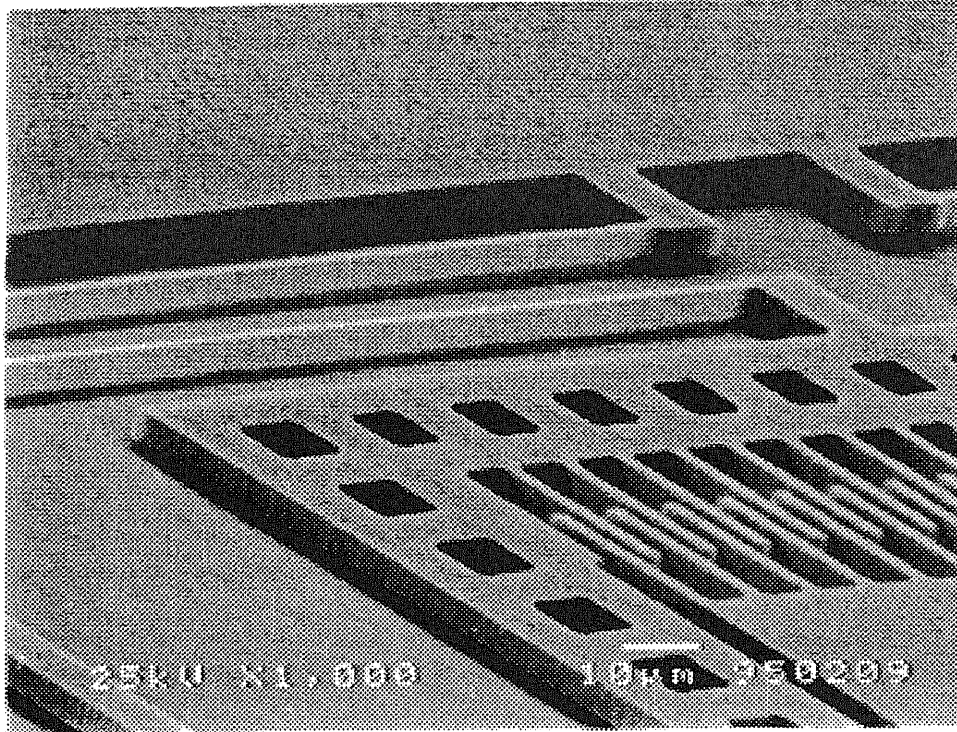


1. まず後工程のRIE (Reactive Ion Etching) において、エッチングしたくない部分を覆うための (エッチングマスクとするための) 金属薄膜を真空蒸着する。
2. 次にフォトリソグラフィで構造部の形をフォトレジストに焼付け、レジストパターンを形成し、ウェットエッチングでこのパターンをエッチングマスクに転写する。
3. RIEによって構造層のシリコンを、酸化膜に達するまで基板に対して垂直に掘る (異方性エッチング)。
4. 続いて酸化膜をフッ化水素酸で除去する (分離工程)。可動部は固定部に対して細く設計されているので、時間管理によって可動部の下部の酸化膜が完全に除去され、同時に固定部と基板の間には酸化膜が残っているようにすることができる。
5. 最後に、安定な導電性を付与すると同時にワイヤボンディングができる表面とするため、金属を堆積する。

図4-2 製作プロセスの概要

(a)はプロセスの概要。断面の位置は(c)参照。
材料は(b)に示す。

(a)



(b)

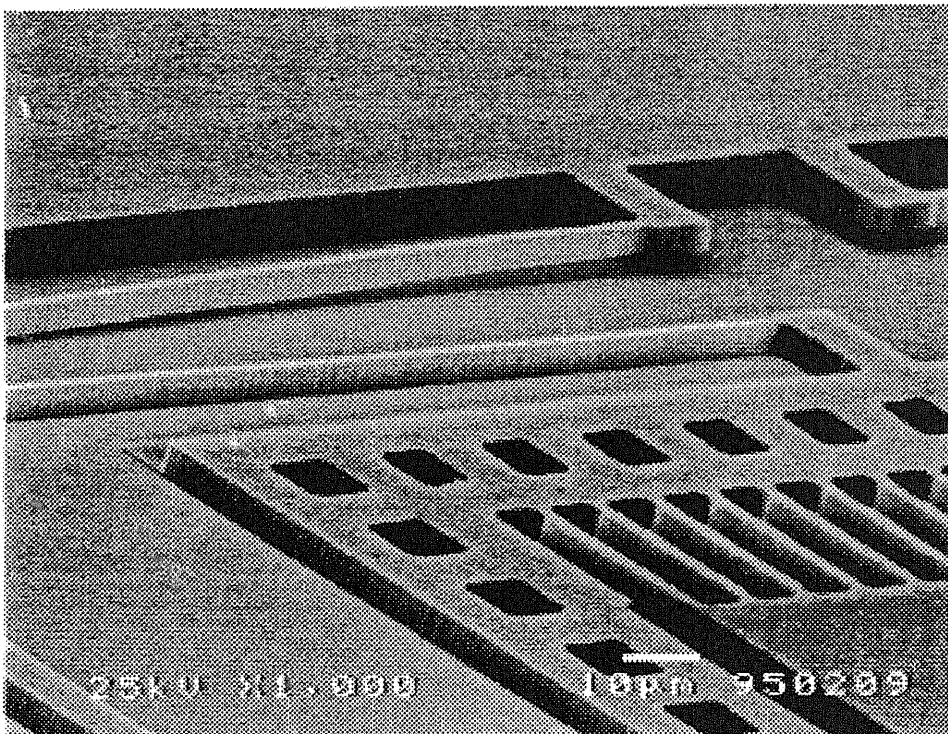


図4-3 正常な可動部と付着をおこした可動部

(a)は正常な可動部、(b)は分離後の乾燥時に付着現象を起こした可動部

表面張力によるものと思われる。犠牲層の除去にドライエッチングを使用[27]すればこのような問題は起こらない。しかし、等方的にエッチングできる材料とガスの組み合わせは多くない。たとえばシリコンは等方的にエッチングできるが、シリコン酸化物や金属はできないため、シリコンの構造をドライエッチングで分離するのは難しい。ドライエッチングが適用できない場合や、かなり工夫のいる場合が多い。

付着現象の対策として従来行われているものに凍結乾燥法[28]がある。これは、洗浄液をt-ブチルアルコール[29]やパラジクロロベンゼン[16]などの液体で置換し、冷却して固化させ、真空中で昇華させることによって液体の表面張力が働かないようにする。凍結乾燥法は簡便であるが、凍結、昇華させる物質に含まれる不純物や汚れがすべて構造物の表面に残ってしまう。昇華性の物質の代わりに、構造物と基板の間の液をフォトレジストで置換して付着を防ぎ、アッシングでフォトレジストを除去する方法[30]も報告されている。これは後で述べる筆者らの方法に似ているが、犠牲層エッチングや洗浄の途中で発生する付着や、液の動きによって構造が歪められたり破壊されることに対しては無防備である。

柔軟な構造物を製作中にだけ支えるための構造を作り込んでおき、最後にそれを機械的に壊して取り除く方法[31]もよく使われる。そのような支持部を電流[32]やレーザー[33]で切断する技術も発表されている。これらの方法は付着防止の効果はたいへん優秀であるが、プロセスが複雑になったり、構造によっては適用しにくい場合がある。また、個別の作業が必要になる。

(2) フォトレジスト・アシスト法

開発した方法は、犠牲層のエッチング中から洗浄、乾燥までの間、網目状にパターンニングしたフォトレジストで構造物を支持し、最後に酸素プラズマでアッシングしてレジストを除去する、というものである。これをフォトレジスト・アシスト法 (PRアシスト法) と呼ぶことにする。

PRアシスト法の対象となるのは、図4-4(a)に示すような、表面マイクロマシーニングで作られた、柔軟な薄い構造である。この後通常は犠牲層をウェットエッチングで溶かす工程へと進む。

PRアシスト法では、(b)のようにドライエッチングで犠牲層を垂直に掘り、(c)のように厚いフォトレジストを塗布する。これに図4-5に示したような格子模様のマスクをかけて露光する(d)。図では立体形状がわかりにくいですが、網目状になったフォトレジストが柔軟構造を側面および上面から支持している。次に犠牲層をエッチングする(e)。エッチング液は網目の穴から犠牲層に到達する。フォトレジストは付着防止と同時に、洗浄中や、乾燥のための遠心分離の際にも柔軟構造を破壊から守る。最後にアッシングでフォトレジストを除去する。

使用するマスクは、図4-5に示したような格子状のパターンが全面に広がっているものである。対象とする構造の太さが極端に違う場合は別として、構造ごとに別のマスクを用意する必要はない。しかもマスクあわせは不要である。

開発した技術では、犠牲層エッチングの前に、網目状にパターンニングされたフォトレジストで柔軟構造を支える。これが、犠牲層エッチング、洗浄、乾燥の工程において柔軟構造が基板に付着が起るのを防止する。フォトレジストは最後にアッシングによって取り除く。これはウェットエッチングとドライエッチングの利点を組み合わせたものといえる。

この技術は分離工程以外には何らの変更も必要としない。通常表面マイクロマシーニングができる設備があれば十分である。使用するフォトマスクは1枚であり、しかも汎用的に使用できる。後述するように、この方法は構造を主に側面で支えるため、大面積で穴のない構造を支持するにはやや不利であるが、穴やスリットが適当な密度であいている構造には面積に関係なく適用できる。この点では、あらかじめ支持構造を作り込む方法(周囲からのみ支持する)に勝る効果が期待できる。

4.1.3 探針を尖らせる方法

前章で述べたように、探針は可能なかぎり鋭く尖っていることが望ましい。基板に対し

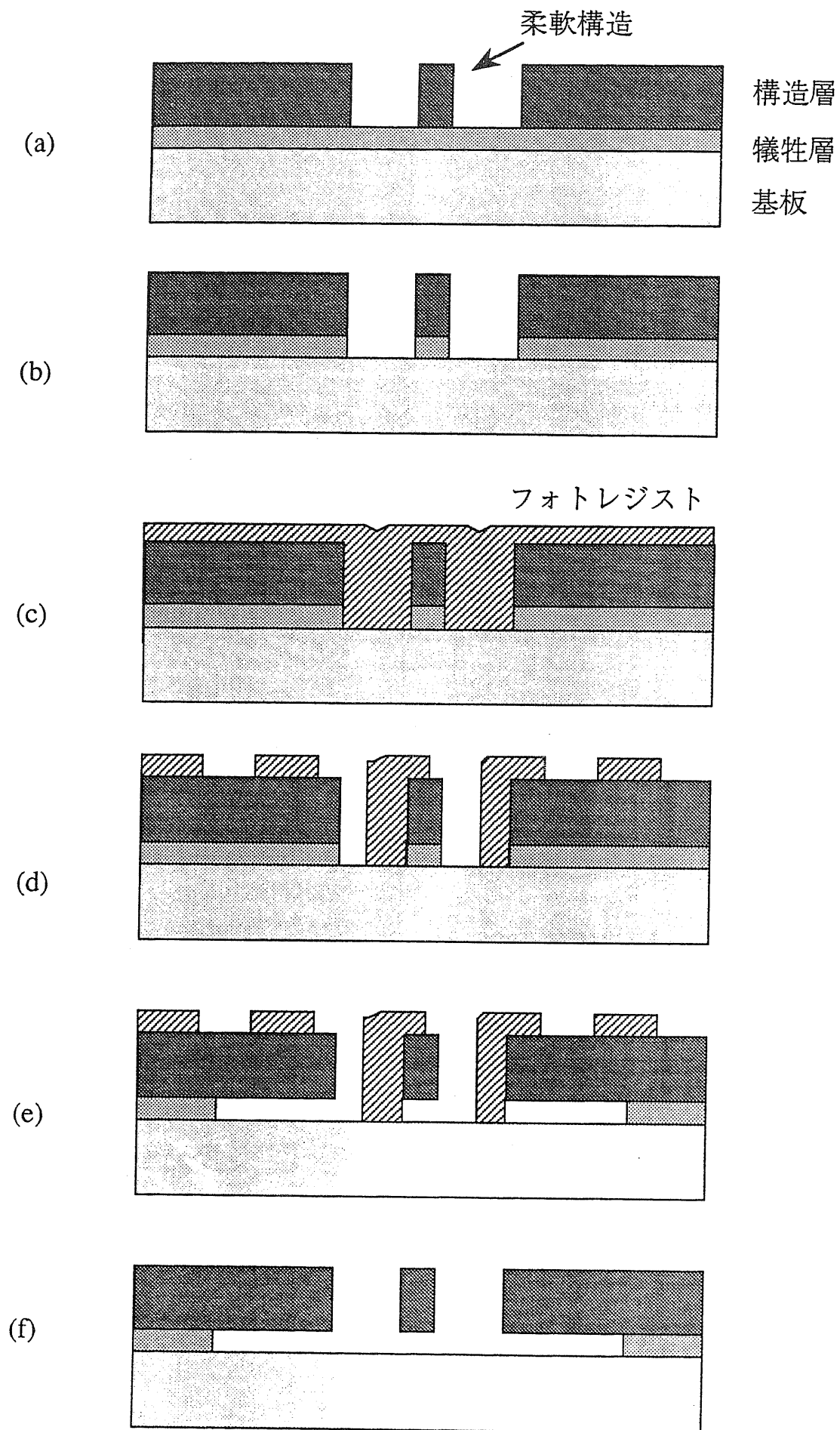


図4-4 PRアシスト法のプロセス

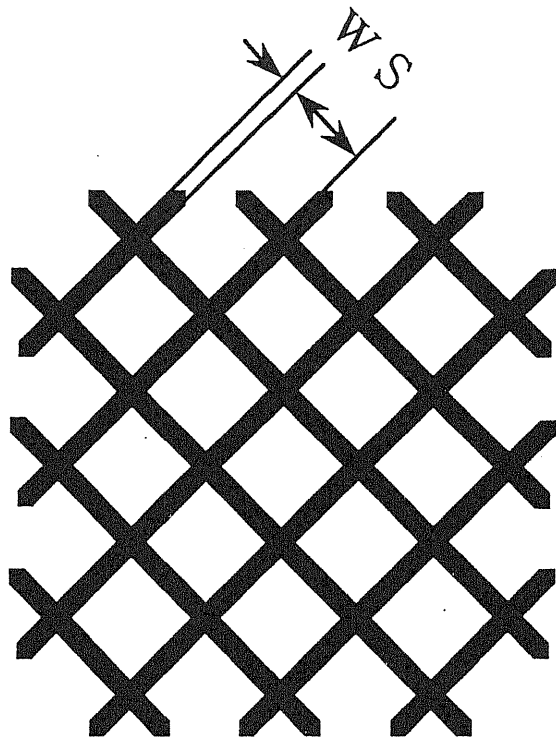


図4-5 PRアシスト法のマスクパターンの例

全面このようなパターンで埋め尽くしたマスクを使用する。
ライン幅 (W) とスペース (S) は支持する柔軟構造の幅から決定する。

今回使用したマスクは $W=3\mu\text{m}$, $S=15\mu\text{m}$

て平行に位置するLTUの探針を尖らせる方法として、本研究では部分的な等方性エッチングを用いた。図4-6に示すように、金属のRIEマスクに重ねて塗布した厚いフォトレジストに窓を開け、RIEによる等方性エッチングを施すことにより、探針は犠牲層に接した側が尖った形状に仕上がる。フォトレジストを除去した後、探針以外の部分の異方性RIEを行っても、探針の上に金属マスクが残っているため、探針が不要なエッチングを受けることはない。

この方法では、探針の先端が対向面の下端に当たるようになる。対向面の厚さの中央部に当たるように作ることにはできない。ここで、対向面が基板上に集積されている使用法と、探針が基板からオーバハンクして、外部の試料を走査する使用法に分けて考える。

前者の場合、基板を下に向けて使用したとしても、引力によって探針が垂れ下がる量はオングストローム以下なので、やはり先端が対向面に当たっていると考えてよい。また、表面に金属の導電層を付けるときの条件で、僅かに引っ張り応力をかけて探針を上に戻らせることもできる。そもそも対向面が基板上にある使用法では、xy走査を前提としていないので、マルチプル・ティップの問題はない。z方向の変位検出のみならば、探針を積極的に尖らせる必要すらないとも言える。探針を尖らせることは、むしろ探針と対向面の不要な相互作用（キャピラリー力、静電引力等）を低下させるために有効である。

後者の場合、STMやAFMにおける本来の意味で探針が尖っている必要があるが、探針が基板外に出ているので、先端の位置は不問となる。

4.1.3 プロセスフロー

図4-7を用いて製作プロセスを説明する。左側に断面を示し、右側に適宜写真を添える。基板はポリシリコン付きのもので説明するが、SOIでも全く同じプロセスである。

- (a)約500 μm 厚のシリコンウエハを熱酸化により2.5 μm 酸化したうえに、LPCVDで4 μm 厚のポリシリコンを堆積したものから始める。
- (b)RIEによるポリシリコンのエッチングのマスクとなる、クロムまたはニッケルを真空蒸着する。使用する金属の選択においては、対RIE耐性とウェットエッチング（(c)参照）におけるサイドエッチの小さい条件があることなどを基準にした。ニッケルは比較的RIE耐性があるが、RIEの異方性を若干低下させる。クロムはニッケルより耐性が高い。ニッケルの場合は150nm、クロムの場合は80nm程度の厚さとする。ただし、シリコンの異方性エッチング以外へ用いる場合、耐性の強さは逆転する場合もある。
- (c)ポジのフォトレジスト、M1400-17（シプレイ）を7000RPMでスピコートする。右側の写真のようなパターンを露光し、現像する。次にウェットエッチングでニッケルまたはクロムをパターンニングする。ニッケルのエッチング液は、硝酸-酢酸-磷酸-水の混合液を50から60 $^{\circ}\text{C}$ に加熱して使用する。クロムのエッチング液は、硝酸第2セリウムアンモニウムを常温で使用する。右側の写真はクロムのエッチングが終了後を示す。
- (d)探針を尖らせるためのプロセスで、尖らせない場合は(d)と(e)を省略する。全体をポジレジストM1400-31（シプレイ）でカバーし、金属パターンの探針相当部分のみ窓をあける。
- (e)探針部分のみ、等方性プラズマエッチングを行う。装置はRIEを用い、使用ガスSF₆約50sccm、圧力約0.2Torr、投入電力100W、時間4分の条件で行う。
- (f)フォトレジストを酸素プラズマでアッシングして除去し、ポリシリコンをRIEで

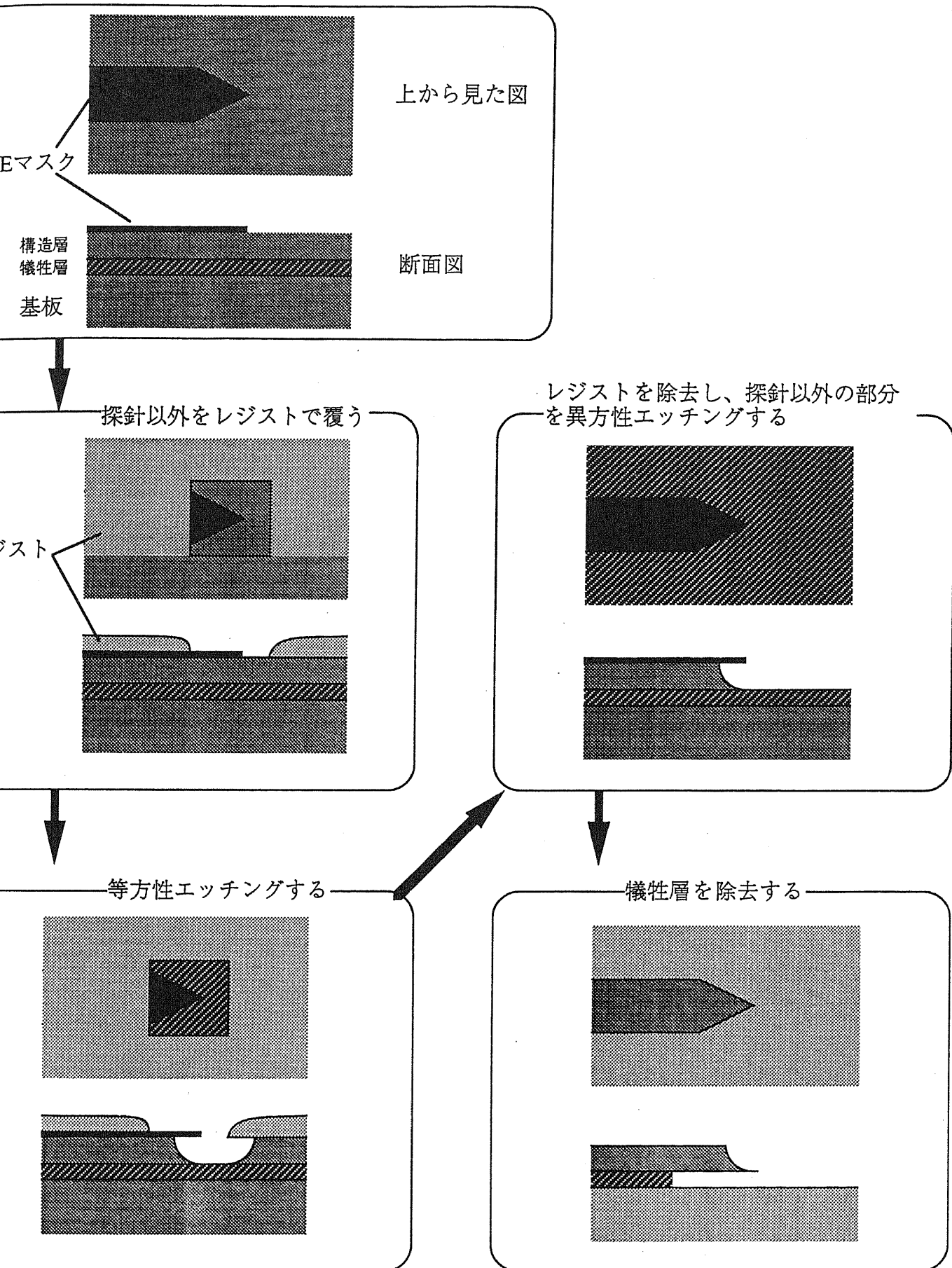


図4-6 横向きの探針を尖らせる手順

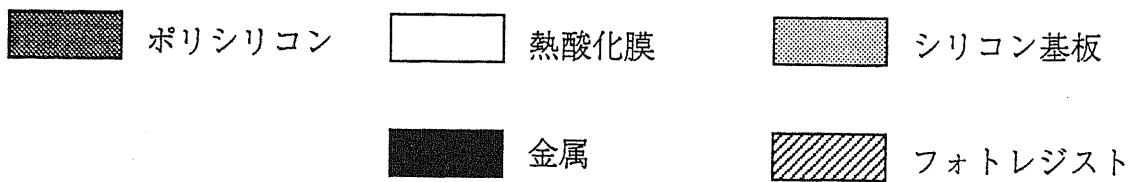
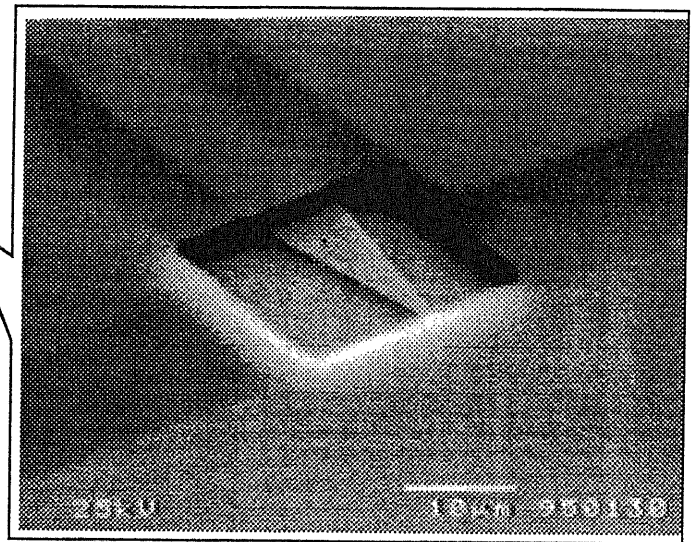
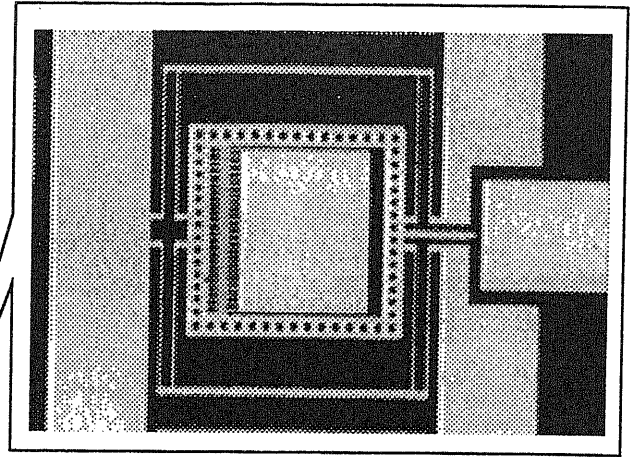
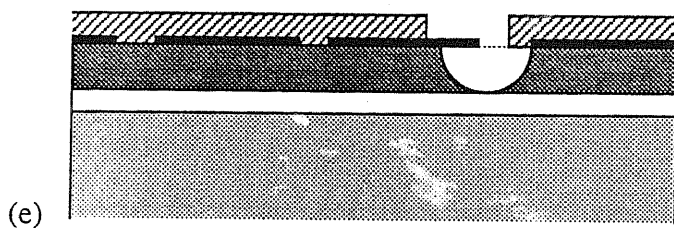
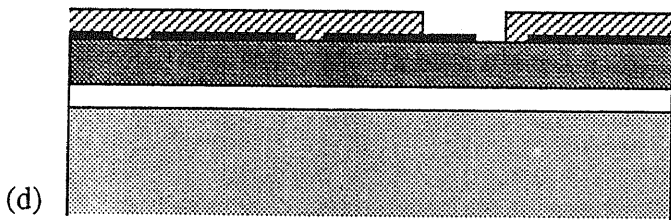
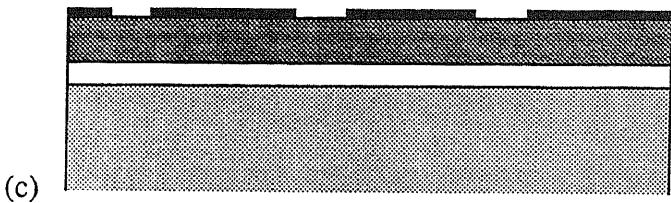
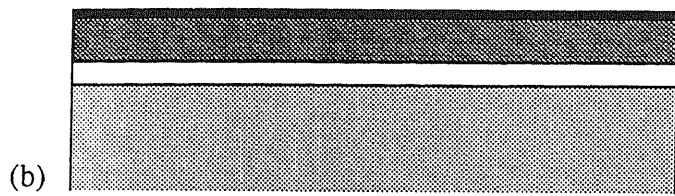
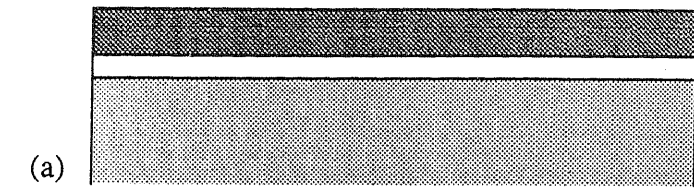


図4-7 プロセスフロー

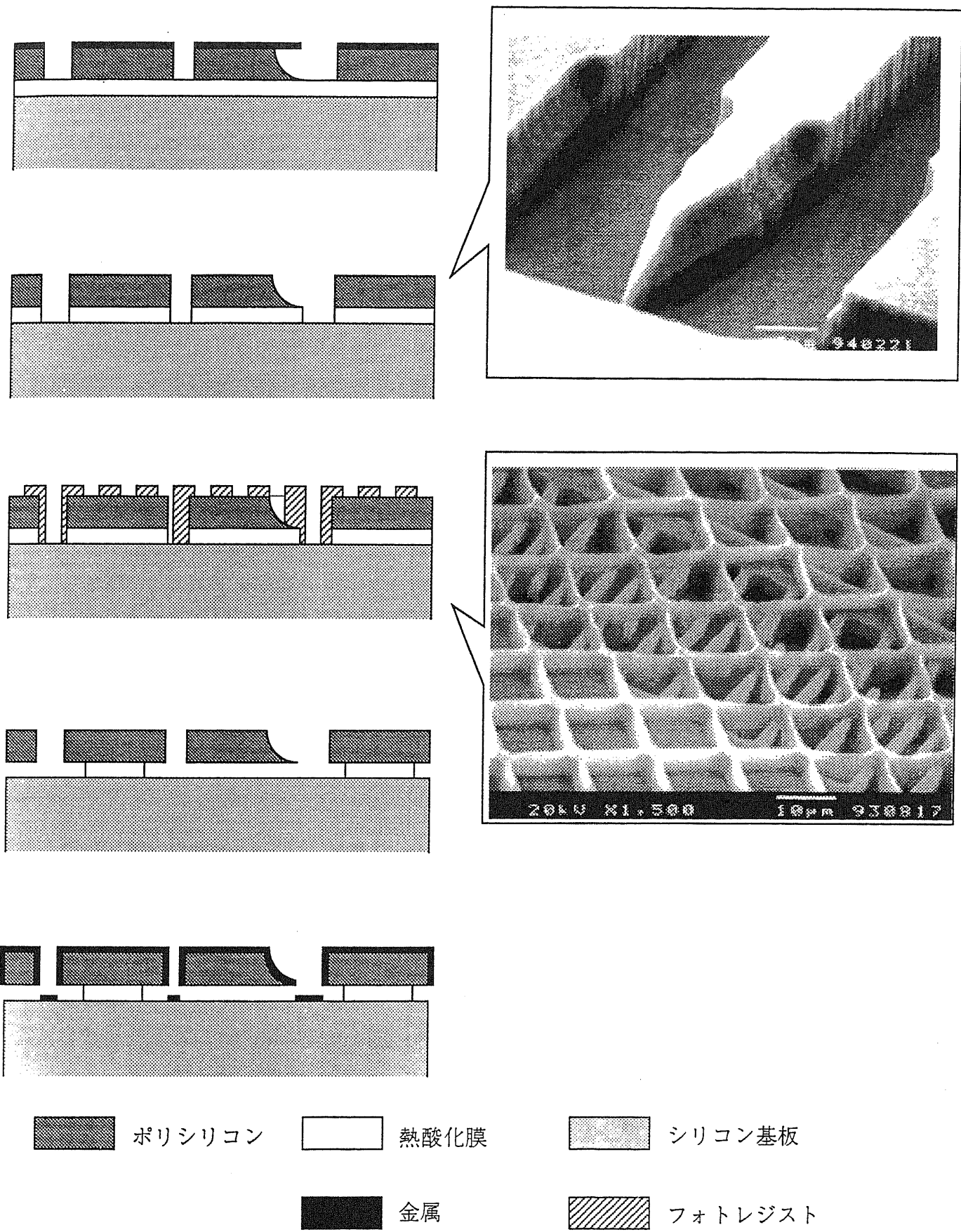


図4-7 プロセスフロー (つづき)

異方性エッチングする。条件は、使用ガスSF₆ 44sccm+CCl₂F₂ 20sccm、圧力約0.08Torr、投入電力150W、時間50分。

(g)ここから(h)まではPRアシスト法である。ニッケルまたはクロムマスクを除去し、酸化膜を異方性RIEでエッチングする。条件は、使用ガスCHF₃ 12sccm、圧力約0.05Torr、投入電力150W、時間30分。ただし、RIEの反応器の床に石英板を置き、その上に基板を乗せる。CHF₃ プラズマはフッ素樹脂に似た堆積膜を生成し、これが酸素を含まないシリコン等を覆って、エッチングから保護する。一方、酸化膜から出た酸素は堆積膜を分解するので、酸化膜のみがエッチングされる。しかも、イオン衝撃が小さい垂直壁では、堆積膜の下の酸素が叩きだされにくいため、異方性エッチングとなる。しかし、あまりCHF₃ 圧力が高いと酸化膜上にも次第に堆積がおこり、エッチングを止めてしまう。石英板を使用するのは、適度の酸素を反応器内に供給して過度の堆積をおこさせないためである。

(h)基板をかるくHF水溶液で洗うと、表面の自然酸化膜がとれ、酸化膜の方がポリシリコンより幾分か痩せるので、続いて行うフォトレジストの付きがよくなる。次にポジレジストをコートし、グリッド状のマスクでパターンニングする。右の写真では8μm程度の厚いレジスト(OFPR800-800:東京応化,800cP,特注)を使用しているのでPRアシスト法の説明にはわかりやすいが、実際には非常に薄いレジスト(M1400-17)でも効果がある。

グリッドが完成したら、47%のHF水溶液で約12分かけて酸化膜を溶かす。可動部は細いので、その下にある酸化膜は完全に無くなり、基板に固定されるべき部分は面積が大きく作られているため、その下の酸化膜は周辺部だけ無くなった段階で終了となる。

(j)HFを純水で洗浄し、乾燥させた後、酸素プラズマでレジストをアッシングして除去する。最後にスパッタまたは真空蒸着で白金や金等を堆積する。

4.2 表面の金属

導電層に使用する金属には、次のような性質が要求される。

1. 表面に酸化膜を形成しない、または酸化膜が容易に除去できること
2. ワイヤボンディングが可能なこと
3. シリコンとの接着が強固なこと

電子線照射などの強力な清浄化手段が適用できる場合は、1は必ずしも問題とならないが、探針が基板上にある場合、真空加熱程度の方法しか適用できない。

4.2.1 金属の種類による特有の問題

上記1より、候補は金、白金、および銀に絞られる。金と白金は空気中で酸化しない。酸化銀は160℃以上に加熱するだけで還元されるので、真空装置をバークする際に酸化膜が除去できる。またこれらの金属はいずれも金線のワイヤボンディングが可能である。

これら3種類のうち、白金以外は探針と対向面がくっついて戻らなくなるという現象がしばしば見られた。これは探針が対向面にクラッシュした時に圧着されてしまい、静電アクチュエータの支持梁の弱い復元力では引き離せなくなるためと思われる。しかし制御が失敗しない限り、探針と対向面が接触することはないので、正常に制御がかかっている限り問題はない。

真空蒸着法では、金とシリコンの接着力はたいへん弱いので、下地として接着力の強いクロムを蒸着し、その上に金を蒸着することが一般的に行われる。ところが、クロムが金の中を拡散して表面に達し、酸化クロムを生じるため、次第に特性が低下するという報告がある[10]。文献[10]によると、接着層をチタンにし、その上に拡散バリアとして白金を付け、さらにその上に金を付けると特性が変化しないという。

表4-1 表面に堆積する金属の種類と性質

	空気中での酸化	Siとの接着力	探針-壁の貼り付き	ワイヤボンディング (金)	その他
金	しない	非常に弱い	頻繁におこる	可能	STMでの実績あり
銀	するが高温で還元	強くない	おこる	可能	導電性最良
白金	しない	良好 (堆積法に依存)	おこらない	可能	水素の解離吸着がある

4.2.2 堆積法

しかしこの方法はプロセスが複雑である上に、導電層が厚くなるので探針先端半径が増大するという点が好ましくない。そこで、金および白金をシリコンに直接スパッタすることを試みた。その結果、シリコン表面を逆スパッタしてから白金を堆積すれば、良好な接着が得られることがわかった。シリコン表面の自然酸化膜（または酸素プラズマアッシングによって形成される酸化膜）にアルゴンイオンが衝突すると、酸素がたたき出されてシリコンリッチになり、反応性が向上して白金との接合が良くなるものと思われる。金については、同様な方法を用いても良い接着は得られなかった。金と銀は、上記の方法で直接スパッタした白金の上に、真空蒸着またはスパッタすればよく付く。

導電膜に内部応力が入っていると、モノモルフの効果で構造が反ってしまう。特に圧縮応力の場合、構造が基板側に反るため、可動部が基板と接触したり、探針と対向面の位置関係に不都合が生じたりする。スパッタ時のガス（アルゴン）圧と白金の内部応力の関係を調べた結果、 7×10^{-2} Torr以下では強い引っ張り応力が、 8×10^{-2} Torr以上では強い圧縮応力が残留していることがわかった（図4-8）。写真はLTUの支持梁の折り返し部分である。

掲載しなかった写真も含めて言えることは、 8×10^{-2} Torrと 7×10^{-2} Torrの間で急激に圧縮から引っ張りに変化するものの、それより上または下では応力の変化はあまりないということである。

これを参考にし、圧力を精密に管理すれば、若干の引っ張り応力を入れて探針を上に戻らせ、探針先端が対向面の中程にあたるようにすることも可能である。しかし圧縮から引っ張りに変わる圧力が微妙なので、応力を緩和する方法が一般には必要である。スパッタ時の基板加熱（約300℃）により、スパッタ時の圧力にかかわらず応力が殆ど緩和されることを確認した。一旦白金を堆積したLTUを加熱しても応力は緩和されない。応力が残ってしまった場合逆スパッタで白金を取り除くことができ、シリコンはほとんど侵されない。

4.2.3 白金導電層の分析

スパッタでシリコンに直接堆積した白金導電層に、マイクロオージェ分析を行った^{註2}。探針は尖鋭化してないものを用い、白金のスパッタ時にターゲットに面するArea 1と、側面になるArea 2について分析を行った。

結果を図4-9に示す。この分析は、in-situにスパッタリングで試料をエッチングしながら、次第に深部を表面に露出させて組成を分析することにより、成分のdepth profileを得るものである。(a)は分析したエリアの配置、(b)と(c)の表はスパッタ回数毎の組成比、(d)はArea 2のdepth profileを、それぞれ示している。

^{註2} 日立製作所中央研究所、細木茂行氏のご協力による。

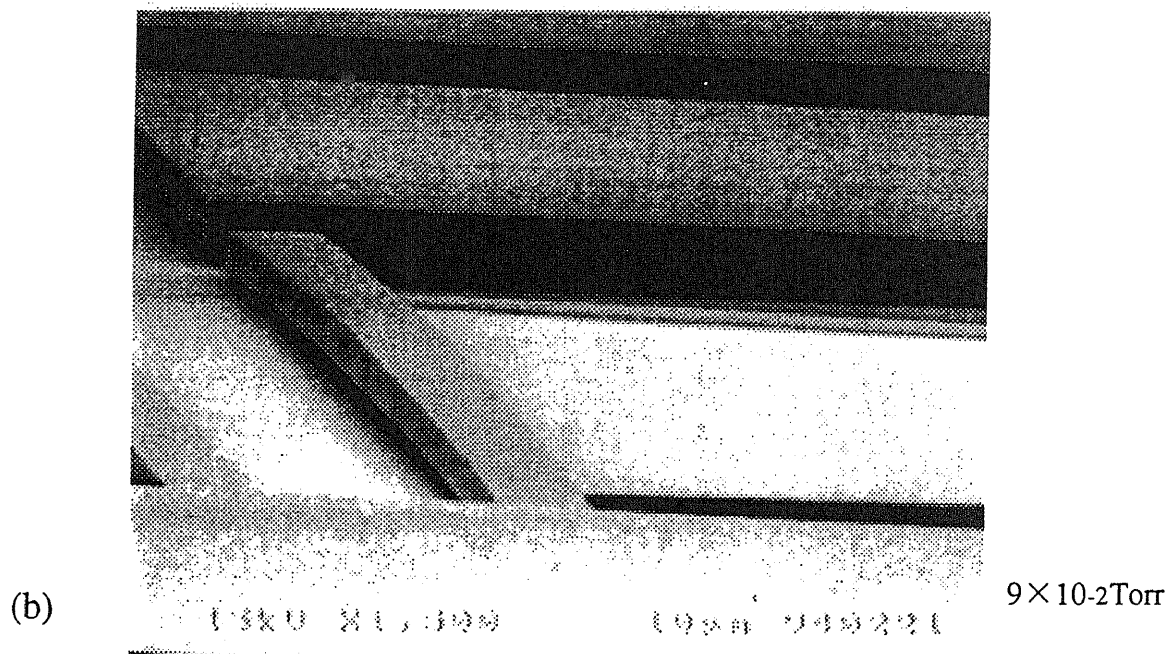
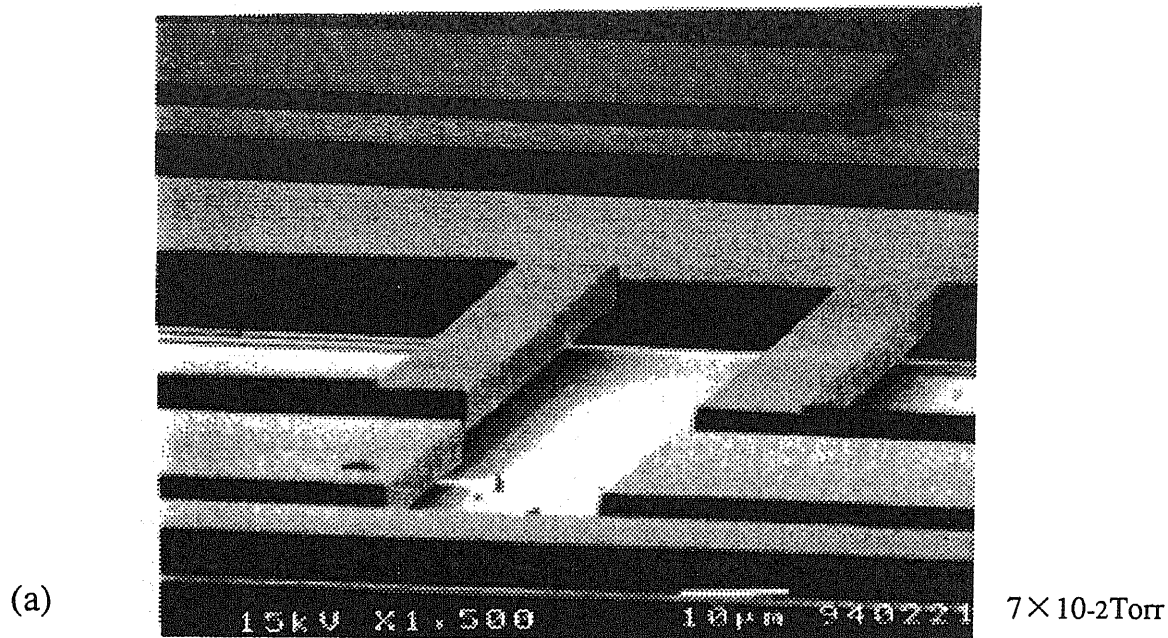


図4-8 白金のスパッタ時の圧力と残留応力の関係

- (a)はアルゴン圧力 7×10^{-2} Torrの場合：引っ張り応力
 (b)はアルゴン圧力 9×10^{-2} Torrの場合：圧縮応力
 投入電力はいずれも100W

LTUでは探針が水平方向に向いているため、導電層が構造の側面にまで堆積されている必要がある。スパッタによる薄膜の堆積は、サイドカバレッジ（側面への堆積）が良いと一般に言われているが、分析結果からも側面に白金が堆積していることが確認できた。なお、個々の構造は電氣的に絶縁されている必要があり、あまりに導電層の回り込みが良いと絶縁が保てないが、パッドとパッドの間の絶縁抵抗は300M Ω （使用した測定器の測定限界）以上あることを確認した。

白金表面に下地のシリコン原子が拡散してくると、そこで酸化物を形成してトンネル電流を妨げる可能性がある。また、スパッタによって堆積した材料は、電子ビーム蒸着などに比較して純度が低いとされている。これは、装置のチェンバを構成するステンレス等が、スパッタターゲットと同時にスパッタされるためであり、やはり酸化物を形成する危険性がある。分析結果から表面までシリコン原子が拡散していないこと、および白金以外の金属が含まれていないことが確認できた

はじめに炭素が検出されるのは、空気中で試料に有機物が付着するためである。白金のがなくなる深さから酸素が検出されはじめているので、白金を堆積する前のシリコン表面は酸化していることがわかる。

4.3 製作したデバイス

ここでは製作したLTUのSEM写真を掲載する。

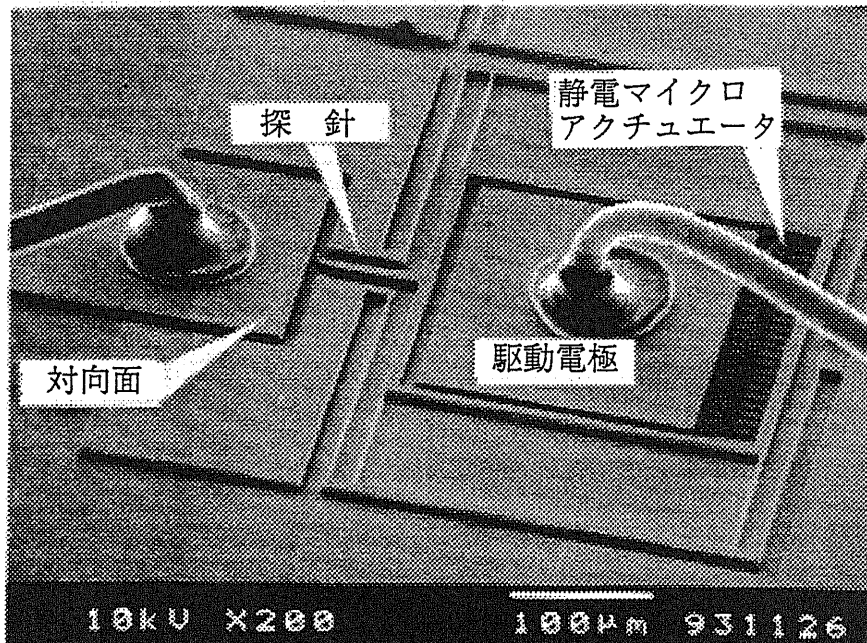


図4-10 標準LTUのSEM写真

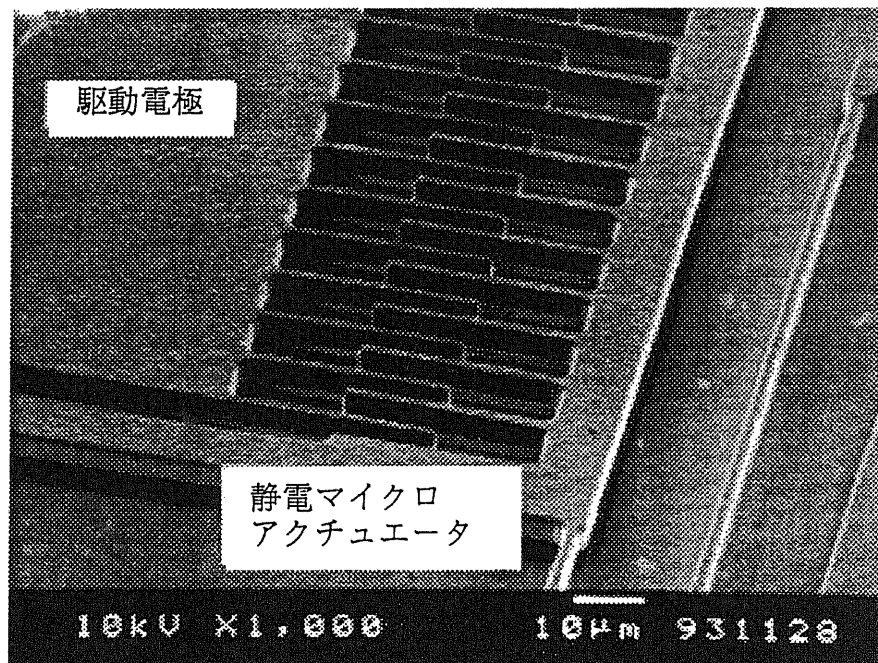


図4-11 標準LTUの櫛歯部分

図4-10は最も基本的なLTUである。ワイヤボンディングの金線の太さが $25\mu\text{m}$ である。この寸法のLTUは約 $500\mu\text{m}$ 角に1個が収まり、 1cm 角のチップに約200個集積できる。図4-11は同じLTUの静電アクチュエータを拡大したものである。対向する櫛のピッチは $5\mu\text{m}$ である。設計上は櫛歯の太さが $3\mu\text{m}$ 、櫛歯と櫛歯の間隔が $2\mu\text{m}$ であるが、製作過程でサイドエッチが入って細めに仕上がっている。

図4-12は探針である。尖らせるプロセスを行わないとこのようなくさび形の先端になる。これに対し、図4-13は等方性エッチングで尖らせた探針のSEM写真である。異方性エッチングの部分との対照がよく見て取れる。基板に見える白い点は、PRアシストのグリッドが完全に除去されていないためである。

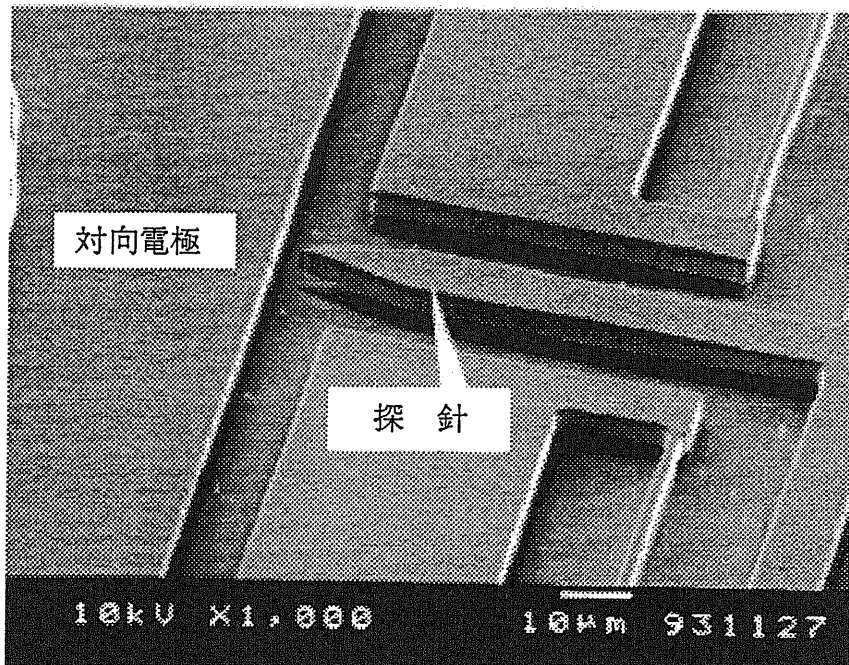


図4-12 尖らせるプロセスを施してない探針

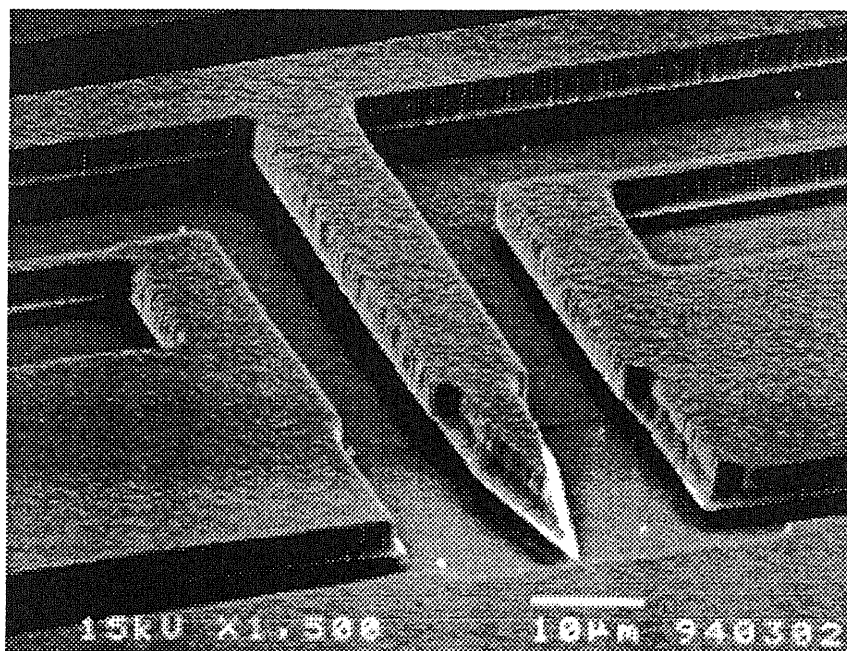


図4-13 尖らせるプロセスを施した探針

5章 制御系の構成

ここで制御系とは制御則、制御回路、および増幅器など、制御に必要な要素をすべて含めて呼ぶことにする。

機械要素としてのLTUは振動系なので、理論的には少なくともPID制御を行う必要がある。しかし大気中でのLTUを制御する場合、制御則としては積分制御のみで、非線型要素（トンネル電流とトンネルギャップの関係）の線形化も行わずに安定に制御が可能であった。その制御器については6章の実験の中で示すことにし、この章では真空中での制御に対応するための制御器について論じる。はじめに全体の構成を示し、次に各部を説明する。

5.1 制御器全体の構成

図5-1に制御器の全体の構成を示す。トンネル電流はトンネル電流アンプ（IVC:電流-電圧変換器）で電圧信号に変換される。トンネル電流の大きさ I_t は、トンネルバリア（探針と対向面間のギャップ）の大きさ Z の指数関数になっている

$$i_t = (V_{bias} / R_{io}) \exp(-A\phi^{1/2}Z) \quad (5.1)$$
$$A \approx 10(nm^{-1}eV^{-1/2})$$

ので、対数変換回路を通してトンネル電流信号を変位に対して線形化する。線形化されたトンネル電流信号を $\text{Log}(I_t)$ と呼ぶことにする。 $\text{Log}(I_t)$ が基準信号 V_{ref} と一致するように、演算部で処理し、最終段のアンプを通して静電アクチュエータの駆動電圧にフィードバックする。なお制御器は全てアナログ回路で構成した。

5.1.1 櫛形アクチュエータの非線型特性について

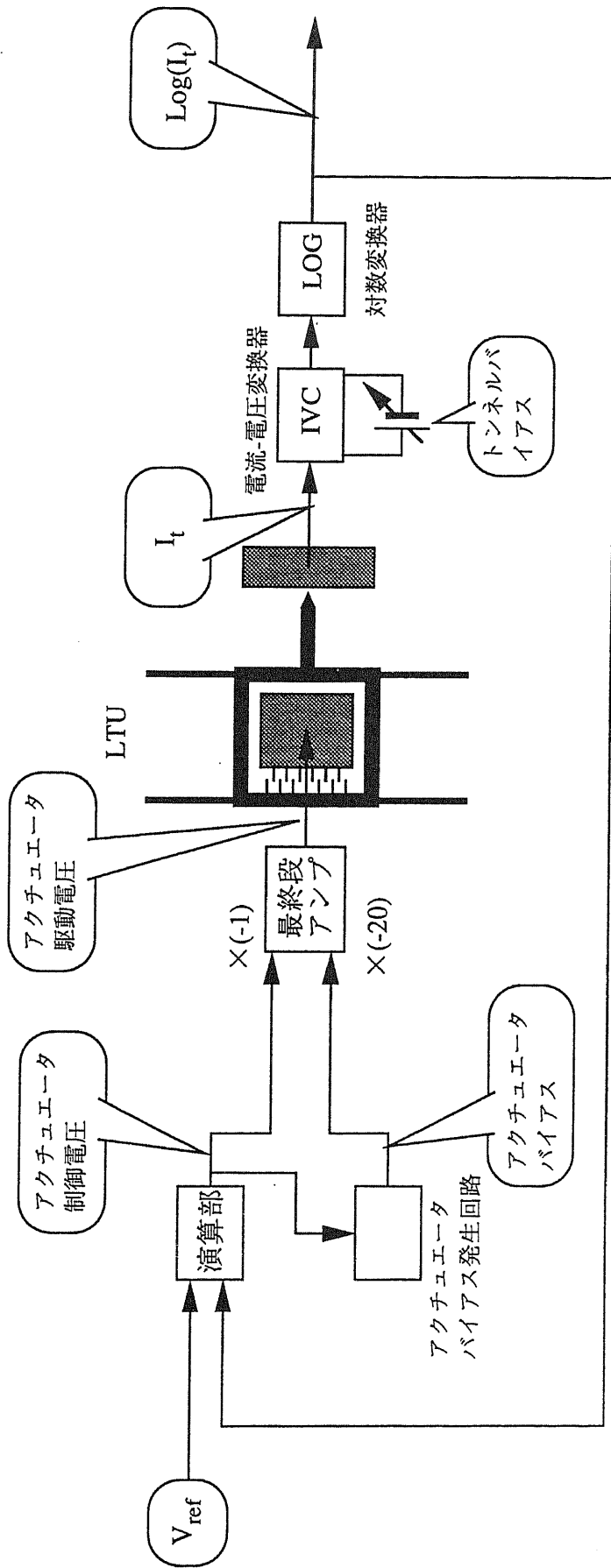
櫛形静電アクチュエータの発生変位は、駆動電圧の2乗に比例するので、全ストロークを線形化するには開方演算が必要である。しかしLTUの探針-対向面初期ギャップは $1\mu\text{m}$ ないし $3\mu\text{m}$ 程度離れているため、駆動電圧の大部分がDC成分で、ナノメートル程度の変位に対応して変化する成分は微小である。よって、ここではアクチュエータを線形と見なして、開方演算は行わない。

また、これには次のような理由もある。後述するように、アクチュエータ駆動電圧は、全体をひとつの回路で発生させるわけではない。DC電圧（アクチュエータバイアス）によって初期ギャップを克服し、トンネル状態に入る位置まで探針を動かし、その上に精密な位置制御を行うための制御電圧加算するという方法をとっている。この加算は最終段で行うので、開方演算を行うには最終段しかない。しかし、アクチュエータを駆動するために必要な、最大200Vの電圧で動作する開方演算回路は作れない。

アクチュエータの2乗特性を本質的に解決する方法は存在する。互いに逆に向いた、同一特性の櫛形アクチュエータを2個使用すれば、互いの2乗特性が相殺されて線形特性になるという方法である。詳細は8章で述べる。

5.1.2 アクチュエータバイアス

一般的なSTMでは、圧電素子を微動に用う。微動アクチュエータの可動範囲内まで試料と探針の間隔を近付けるためには別の粗動機構を持っている。これに対し、対向面が基板上に集積されているLTUでは、探針と対向面の距離は予め決まっているため、粗動機構を別に設ける必要はない。しかしながら、プロセスの精度から探針と対向面間の距離は $1\mu\text{m}$ ないし $3\mu\text{m}$ 程度離れているのに対し、STMやAFMの変位検出分解能としてはオングストロ



- アクチュエータバイアスは、正確には-20倍された電圧を言うべきで、アクチュエータ駆動電圧の直流成分を意味する。
- トンネルバイアスはIVC内部から供給される。
- 外乱オフザーバは省略した。

図5-1 制御器全体の構成

ム以下が要求される。微動アクチュエータだけで対応するにはややレンジが広すぎる。

そこで、ハードウェアとしてはひとつのアクチュエータだが、駆動方式のうえでは疑似的な粗動と微動に分けると都合がよい。具体的には初期ギャップを克服するためのDC電圧（アクチュエータバイアス）と微小変位に対応するための電圧（制御電圧）を別々に発生させ、加算してアクチュエータに印加する。これには次のような2つの理由がある。

- 1.回路のダイナミックレンジ
- 2.伝達特性

以下にそれぞれの説明を行う。

(1) 回路のダイナミックレンジについて

LTUのアクチュエータ駆動電圧のDC成分は50Vから200V程度必要（探針の先を尖らせるプロセスで探針が短くなるのでこの程度のばらつきが避けられない）である。制御回路全体を200V電源で構成するのは比現実的なもので、最終段以外は標準的な±15V電源で構成し、最終段で20倍に増幅することにする。いっぽう、1オンゲストロームの変位に対する駆動電圧変化は数mV程度である^{註1}。アクチュエータの駆動電圧を一括して扱おうと、1オンゲストロームの変位に対する振幅は、最終段の20倍アンプの入力では数百μVにすぎない。これは回路のノイズやオフセット電圧を考えると小さすぎる。そこでアクチュエータバイアスと制御電圧を別々に発生し、最終段のアンプではアクチュエータバイアスのみ20倍に増幅し、制御電圧はユニティゲインで、もしくは減衰して加えるようにすると、出力段の入力での振幅が小さくなりすぎない。

(2) 伝達特性について

もうひとつの理由は、探針をアプローチする動作と変位検出動作における制御器の応答特性は、必ずしも同じでないほうが都合がよいことである。例えば、変位検出において速い応答を得るため、多少オーバーシュート気味の応答を持たせた場合、アクチュエータバイアスと制御電圧が分離されていないと、アプローチにおいてはナノメートルを越えるオーバーシュートとなり、探針がクラッシュする。

以上の理由から、アクチュエータバイアスと制御電圧を発生する回路を別々に設けた。アクチュエータバイアス発生回路は、制御電圧の時間平均が0Vになるように、DC電圧を変化させる。ただし、探針位置を一定に保持してトンネル電流の変化を掲出する時は、アクチュエータバイアスの調節動作を停止し、一定のDC電圧を出力し続ける必要がある。これはデジタル回路とDAコンバータで構成することも可能だが、製作と使用上の便宜のためDCモータ付きのポテンショメータを使用し、アナログで構成した。

5.2 制御則

5.2.1 制御対象の性質

従来のSTMとLTUの違いにより、制御も難しくなる。大きな違いは下記の2点である。

- 1.LTUの機械的性質は振動系である
- 2.バネ定数が小さいため外乱力が問題になる

従来のSTMでは積分制御が用いられている場合が多いが、振動系の制御には最低PIDが必要である。外乱の影響に対しては外乱オブザーバの適用を検討する。

筒形アクチュエータは、はじめ共振周波数で使用するものとして発表されたように[23]、LTUはダンピングが小さく、機械的特性はバネ-マス系と見ることができると言える。したがって、

^{註1} これは探針に外乱力が働かない場合の値。6章と7章の結果から、もっと大きい変化が必要なことが後で分かったが、アクチュエータの剛性が十分高ければ数mVになる。

外乱力を無視して機械的特性だけ考慮しても、積分要素だけでは制御しきれない。

通常のSTMは、微動アクチュエータとして圧電素子を使用し、発生する変位は駆動電圧にほぼ比例する。圧電素子の弾性定数は焼結体自身のヤング率であり、それが変位を発生するという事は力も非常に強い。このため探針の表面に加えられる原子間力やメニスカス力ですほどの変形は受けず、印加電圧が直接変位に変換されていると見なせるのである。

すなわち、アクチュエータの特性はきわめて安定である。このため、制御則は積分制御で十分であったと言える。また、静電アクチュエータでもダイヤフラム型を使用したマイクロトンネルユニットは、比較的剛性が高いため、積分制御[16-17]、または比例制御[10]で十分な結果を得られる例がある。

これに対し、LTUのアクチュエータはバネ定数が小さく（典型的には1N/m程度）、探針-対向面間の原子間力等の外乱が無視できない。つまり、印加電圧で決定されるのは発生力だけであり、実際にどんな変位が発生するかは、バネの反力、慣性力、外乱力等を考慮して運動方程式を解かなければわからない（図5-2）。

外乱力の種類には、メニスカス力、原子間力、静電引力、コンタミナントの粘弾性等がある。どの力が支配的かは探針の先端半径や雰囲気等の条件で左右される。空気中では、試料表面にコンタミナントが存在し、それが探針と対向面の間に加える反発力が支配的である。そのため、探針が対向面に接触すると、アクチュエータのバネにコンタミナントの弾性（粘性をもつ可能性もある）が加えられ、バネ定数が増大したように見えるだけで、系は本質的に安定と考えられるし、実際そのような結果となる。真空中では原子間力と静電引力（トンネルバイアスによるもの）が問題となり、これらは主に引力であるため、系が本質的に不安定になる場合がある。

図5-3は、原子間力とアクチュエータのバネの力を、トンネルギャップの距離を変数として示した模式図である。原子間力はA点より距離が大きいたまは引力であり、それより距離が小さいときは反発力となる。バネの力とx軸の交点Bは、外乱力が何もない時に探針が落ち着く位置である。バネの力と原子間力を合成した力を合成力と仮に呼ぶことにすると、バネ定数が小さい場合は合成力は図5-3(a)の様に極大点Cと極小点Dを持ち、バネ定数が大きいときは極大、極小を持たない。実際の探針の位置は、合成力とx軸の交点Eとなる。

探針を対向面に接近させるようとする事は、アクチュエータに探針を押し付ける方向の力、すなわち引力方向の力を発生させることを意味する。上記の合成力にアクチュエータの力を更に合成すると、合成力の曲線は下にずれる（図5-3(b)）。

別の見方をすれば、バネ力とx軸の交点Aが距離の小さい方にずれる結果、合成力の曲線が下にずれる。このとき、探針-対向面距離は連続的に減少していくが、極大点Cがx軸を割り込むと、曲線とx軸の交点、すなわち探針-対向面距離は不連続に飛び移る。逆に距離を離して行くときは、極小点がx軸を上回る時にジャンプが起こる。この現象はAFMでしばしば観察される。もちろん、通常のSTMのようにバネ定数が十分大きいときは、飛び移りは発生しない。

LTUにおいて、このような外乱力があることは、制御ループの非線型化を招くので好ましくないし、アクチュエータの駆動電圧と本来のバネ定数から変位を推定することができなくなるのも不都合である。しかしより本質的な問題は、希望する大きさのトンネル電流を得るための探針-対向面距離が、上述の飛び移りによるヒステリシスループの付近にある場合で、積分制御ではリミットサイクルを引き起こし、制御の安定性自体が脅かされることが容易に予想される。はたしてそうなるか否かは、探針の先端半径やトンネルバイアスの値にも関係する。

このように、積分制御はもはや通用しない、しかしLTUで観測できる変数は駆動電圧とトンネル電流だけであるから、あまり高度の制御はできない。そこで、LTUの機械的特性はPIDで制御し、外乱力の影響が大きい場合には外乱オブザーバで抑制することにする。

5.2.2 LTUのモデル

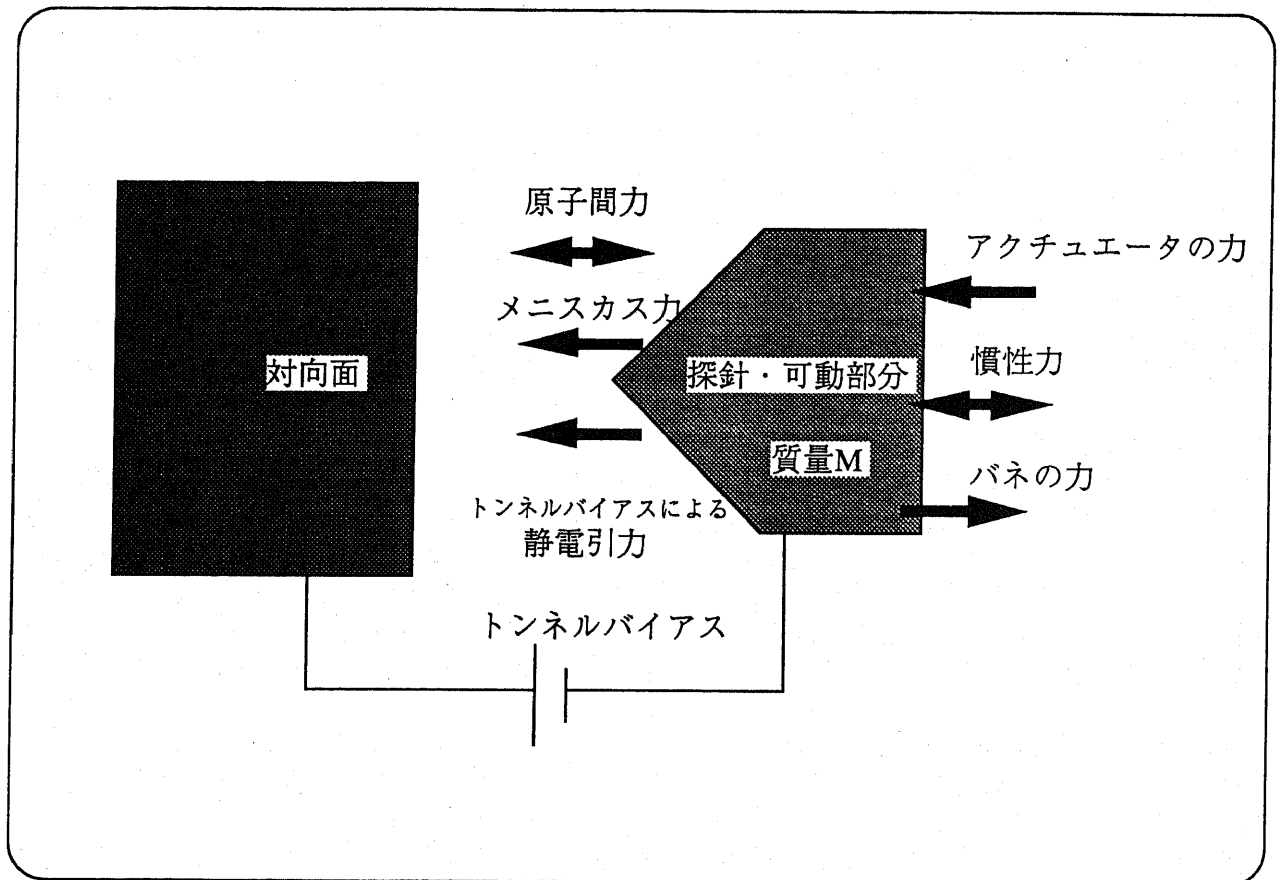
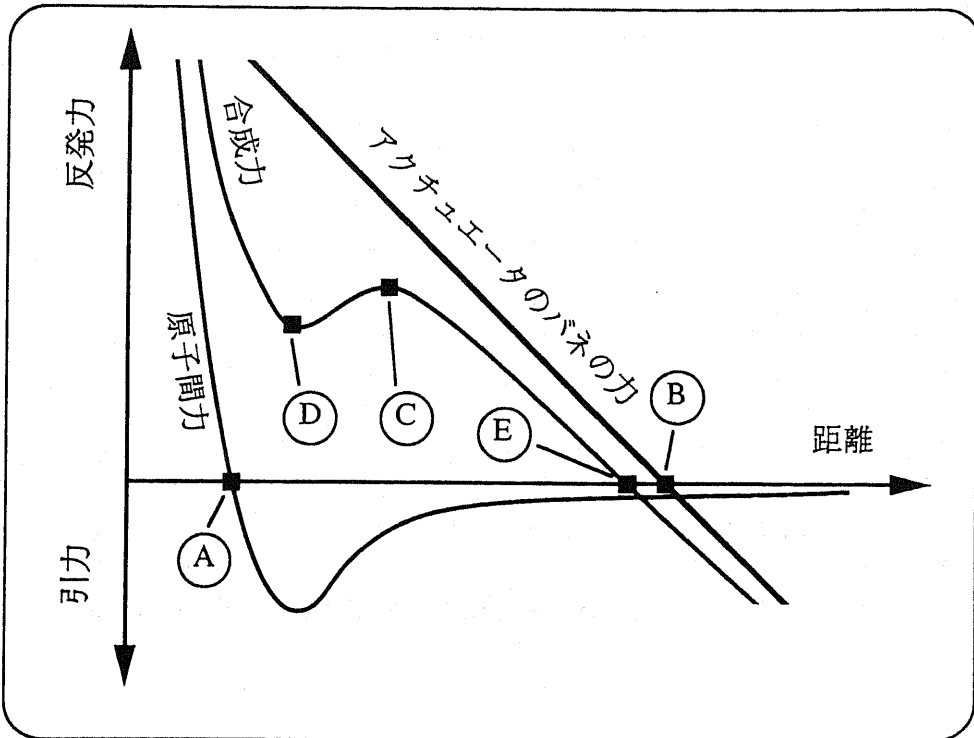
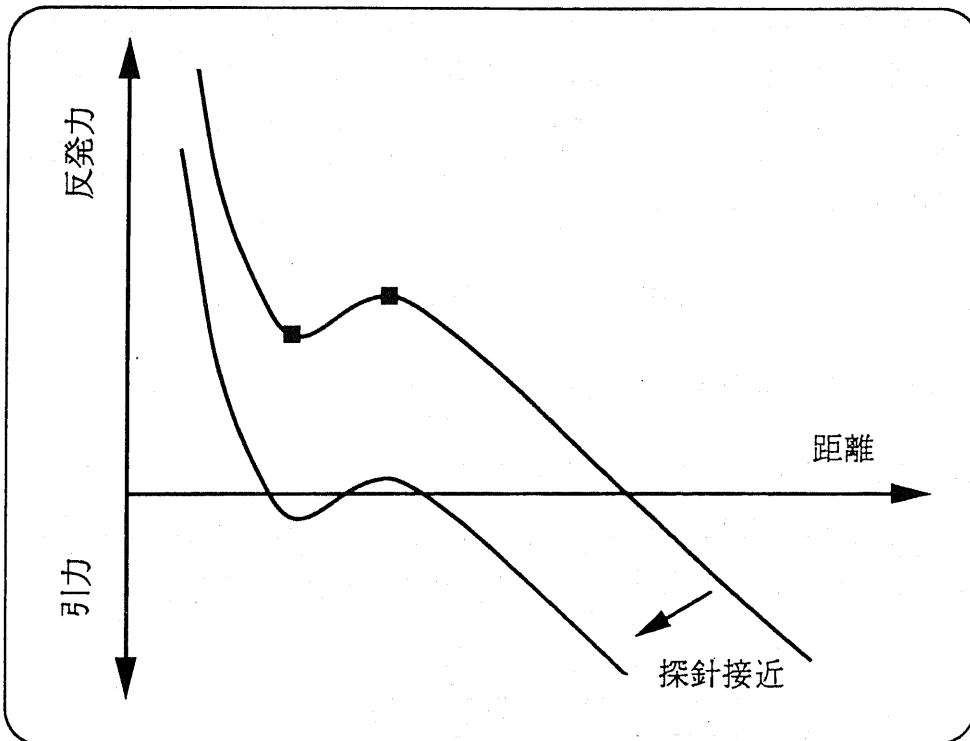


図5-2 探針に働く力

LTUの動きを記述するには運動方程式が必要。探針の右に書いた力はLTUの固有の力、左に書いたのは外乱力。



(a)



(b)

図5-3 探針に働く力と支持梁のバネ定数

PID制御のパラメータを決定する方法として、真鍋多項式を用いる[34-36]。そのために、LTUと対数演算回路を含めた伝達特性のモデルを決める。ここでは、IVCは理想的な伝達特性を持つものとする。入力はアクチュエータの制御電圧 V_{cont} 、出力は $\log(I_t)$ である。図5-4に、その過程を示す。

まずいちばん下の囲みに示すように、LTUの機械的特性を $(Ms^2+Ds+K)^{-1}$ とする。Mは可動部の質量、Dはダンピング、Kはアクチュエータの支持梁のバネ定数で、MとKは構造の寸法と材料の物性から求め、Dは適当に推定することとする。アクチュエータの制御電圧と発生力間の係数は K_e とするが、 K_e/K は実験から求められる。これらを乗ずると、アクチュエータの制御電圧から変位までの伝達特性となる。

これにギャップ距離とトンネル電流の大きさの関係をかけるとLTUの制御電圧からトンネル電流までの伝達特性になる（下から2番目の囲み）。トンネル電流は、材料の仕事関数で多少変化するが、ほぼ1オングストロームで1桁変化する。

次にIVCが接続されているが、その後に対数演算器があるので、IVCの感度は不問となり、LTUの伝達特性に対数変換器の特性を掛けて、所望の伝達特性が得られる（下から3番目の囲み）。対数演算器は、入力が1桁変化すると、出力が1V変化する。したがって、 k は K_e を 10^{10} 倍したものである。

アクチュエータの大振幅特性は駆動電圧の2乗に比例するので、比例定数をAとすると、

$$d = A \cdot V_d^2 \quad (5.1)$$

と表される。ただし、 d は変位、 V_d は駆動電圧である。ここで、探針-対向面の初期ギャップ d_0 は実測で求められ、また探針が対向面に接触する時の駆動電圧 V_{dc} （アクチュエータバイアスに相当）も実測で求められる。これらを上式に代入すると、 $A = d_0 / V_{dc}^2$ が得られる。一方、上式を駆動電圧で微分するとアクチュエータの感度が得られ、それに今求めたAを代入すると、アクチュエータのトンネル動作時（マクロに見て探針が対向面に接触している）の静特性 K_e/K になる。

$$K_e/K = 2 \cdot d_0 / V_{dc} \quad (5.2)$$

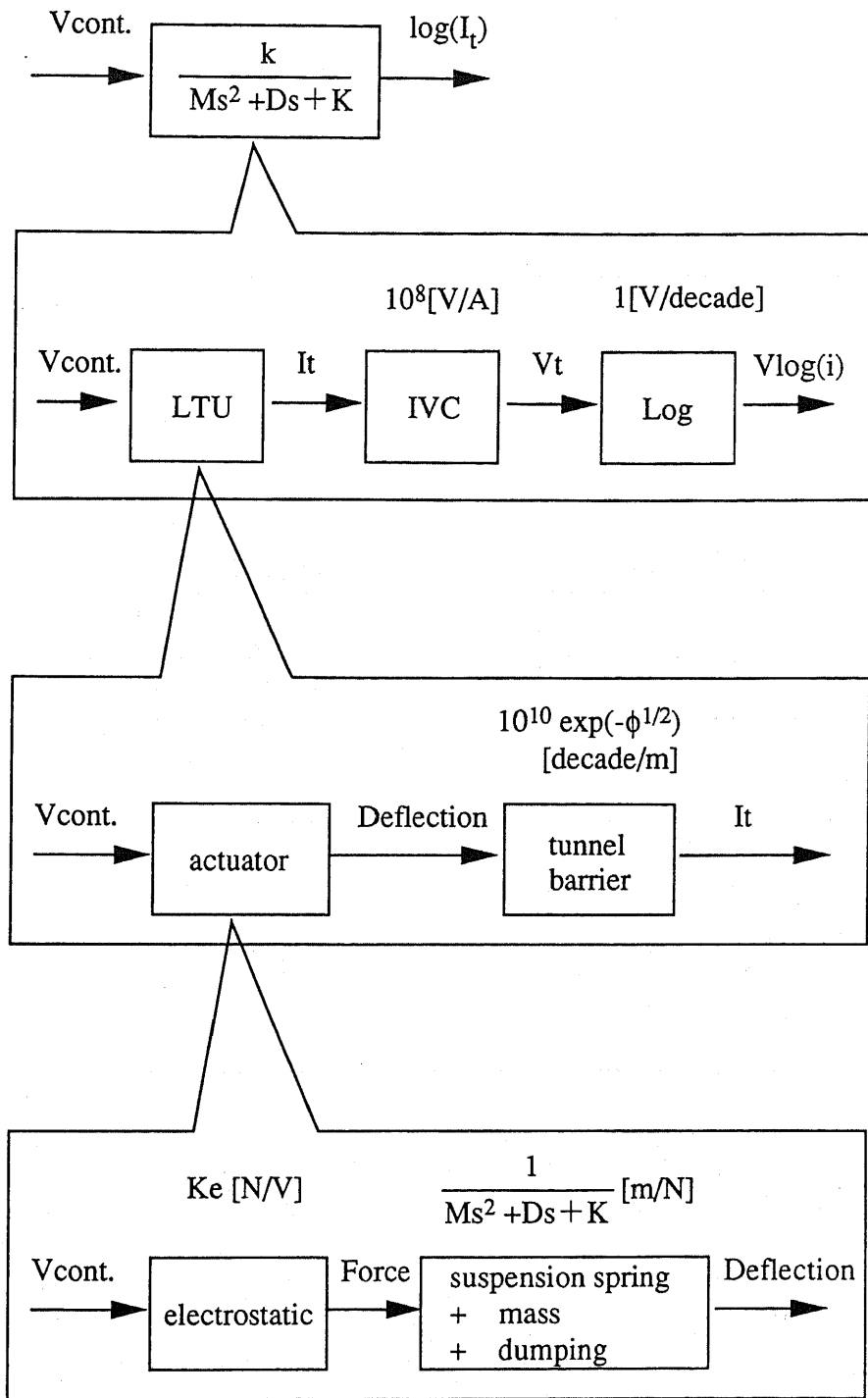
この式から K_e および k が求められる。

5.2.3 PIDゲインの決定

図5-5にPID制御器のブロックダイヤグラムを示す。比例、積分および微分の各ゲインをそれぞれ、 K_p 、 K_i および K_d とすると、制御ループの伝達特性 $H(s)$ は、

$$\begin{aligned} H(s) &= \frac{\frac{K_p s + K_i + K_d s^2}{s} \cdot \frac{k}{Ms^2 + Ds + K}}{1 + \frac{K_p s + K_i + K_d s^2}{s} \cdot \frac{k}{Ms^2 + Ds + K}} \\ &= \frac{k(K_p s + K_i + K_d s^2)}{Ms^3 + (D + kK_d)s^2 + (K + kK_p)s + kK_i} \end{aligned} \quad (5.3)$$

となる。H(s)の分母の係数から、真鍋多項式 γ_1 、 γ_2 および等価時定数 τ は以下のようにになる。



$$k \text{ [N/m]} = K_e \text{ [N/V]} \times 10^{10} \text{ [decade/m]} \times 1 \text{ [V/decade]}$$

図5-4 LTUのモデルとパラメータの意味

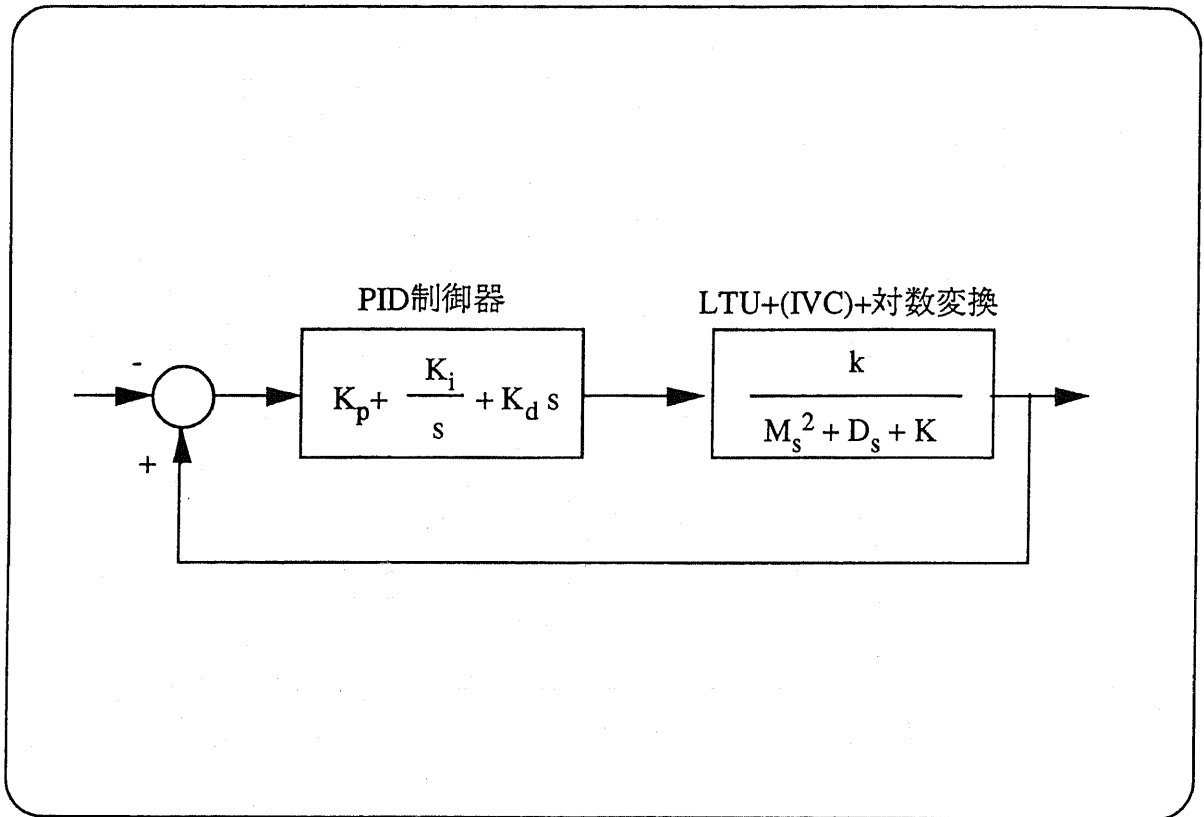


図 5-5 PID制御器のブロックダイアグラム

$$\gamma_1 \equiv \frac{(K + kK_p)^2}{kK_i(D + kK_d)} \quad (5.4)$$

$$\gamma_2 \equiv \frac{(D + kK_d)^2}{M(K + kK_p)} \quad (5.5)$$

$$\tau \equiv \frac{K + kK_p}{kK_i} \quad (5.6)$$

真鍋法に従って、 γ_1 および γ_2 を、それぞれ2.5および2として K_p 、 K_i および K_d を求めると、

$$K_p = \left(\frac{12.5M}{\tau^2} - K \right) \cdot \frac{1}{k} \quad (5.7)$$

$$K_i = \frac{12.5M}{\tau^3 k} \quad (5.8)$$

$$K_d = \left(\frac{5M}{\tau} - D \right) \cdot \frac{1}{k} \quad (5.9)$$

となる。ここで τ は自由に決めることができる。等価時定数 τ はプラントの応答（この場合共振の周期）よりも速くできないように思われるが、じつはPID制御器はあまり複雑な内部構造を持たないため、 τ をLTUの共振周期より大きく設定することは、遅い制御しか行わないことを意味し、振動が抑制できないことが、シミュレーションの結果分かった。

5.2.4 シミュレーション

典型的なLTUのモデルパラメータ、 $M=10^{-9}\text{kg}$ 、 $K=10$ を用い、上述の方法で決めたPIDパラメータのもとに、MATLABで制御系のステップ応答を求めた。このパラメータでは、共振周波数は約16kHz、周期にすると約63 μs である。LTUのダンピングは低いことを仮定してQ値10000とした。

5.2.5 τ の値について

τ がLTUの共振の周期より大きい場合と小さい場合の、トンネル電流のステップ応答を示したのが図5-6である。(a)の $\tau=10\mu\text{s}$ ではややオーバーシュートがあるものの、素直な応答を示す。図には示さなかったが、これより小さい値の τ に対しては殆ど応答が変わらない。ところが(b)の $\tau=100\mu\text{s}$ では大きく負に振れてから1に収束する。この傾向は τ が大きくなるほどひどくなる。

5.2.6 モデルパラメータに対するロバスト性

次にモデルパラメータに対する感度を調べた。波形は掲載しないが、Q値は10から 10^8 程度まで変えても殆ど応答は変化しない。図5-7は、MまたはKをLTUの50%から200%まで変化させたときの応答である。 τ は $10\mu\text{s}$ とした。たとえばMが25%大きいときとKが25%小さいときは全く同じ応答である。結局、共振の周期が等しければ、応答波形は他のパラメ

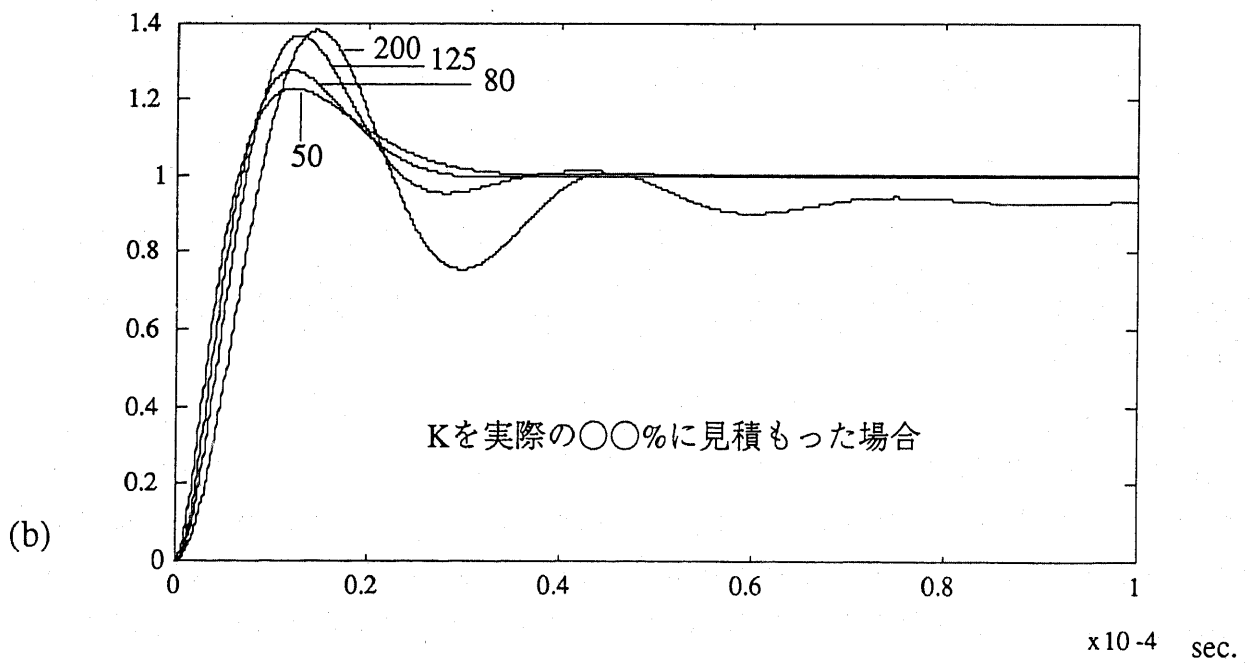
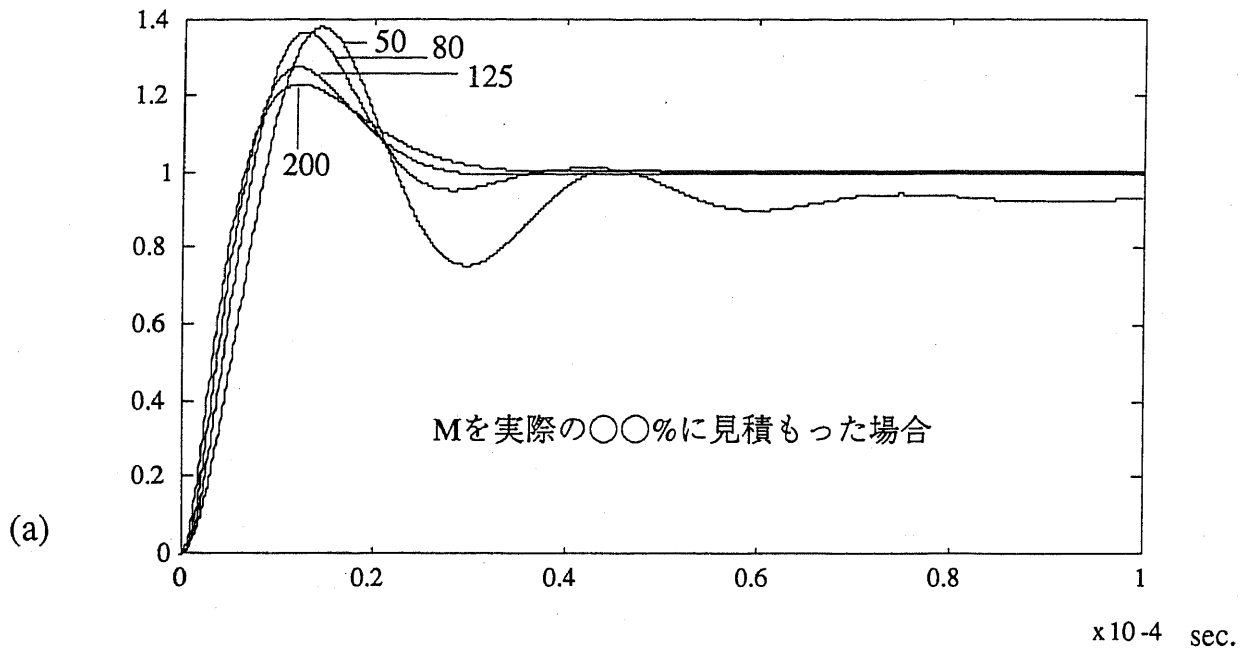


図5-7 ステップ応答のパラメータ感度

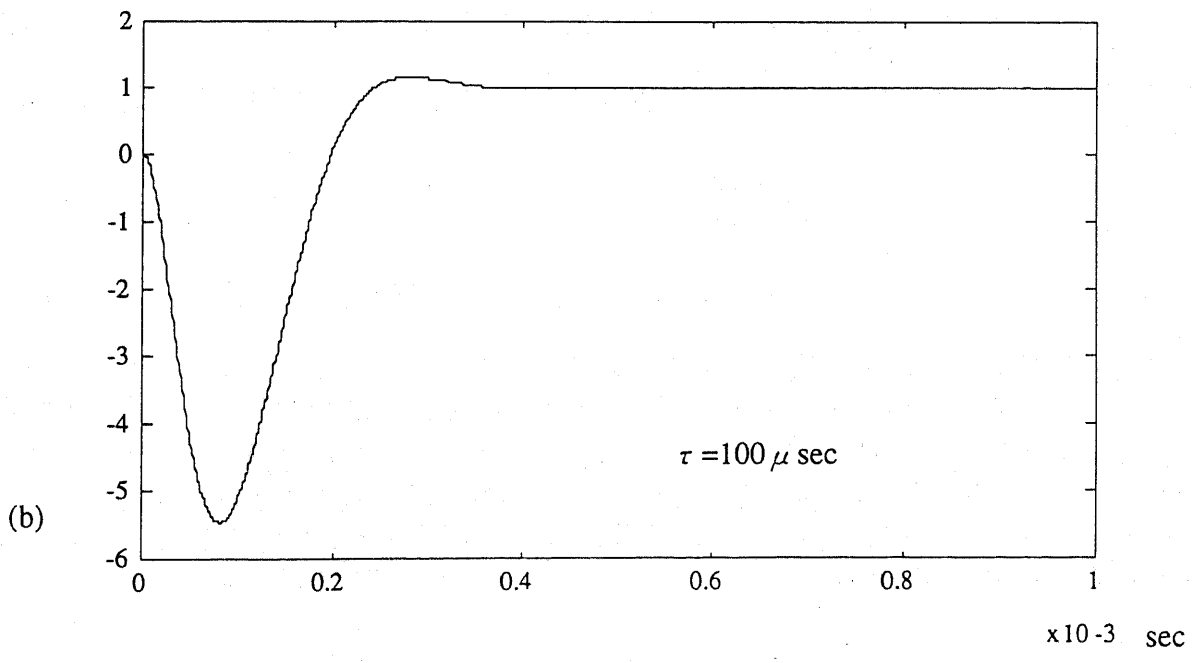
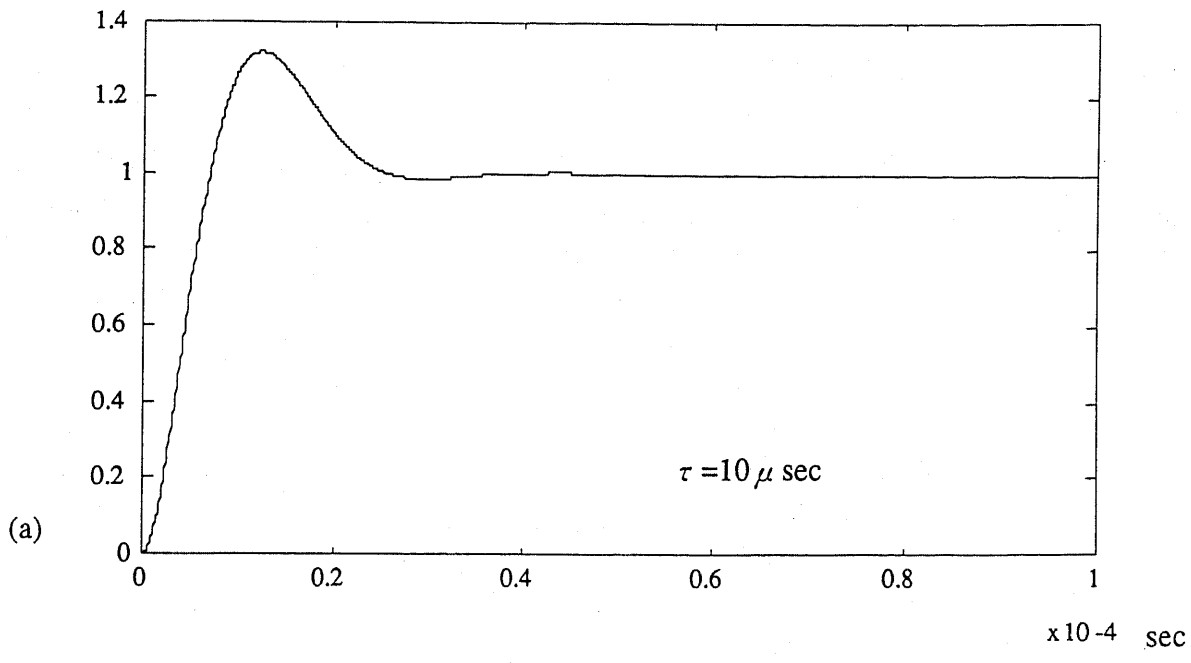


図5-6 等価時定数 τ とステップ応答の関係

ータには殆ど関係ないらしい。

5.3 PID制御器の実現

PID制御器はアナログ回路で実現した。図5-8に回路図を示す。実際に製作した回路は2自由度制御系になっている[37-38]。微分は $\text{Log}(I_t)$ の変化に対してのみ働くので、ステップ状の司令値に対してはゆっくり応答し、オーバシュートを生じにくい。比例項は $\text{Log}(I_t)$ と $(\text{Log}(I_t) - V_{\text{ref}})$ を R_4 と R_5 で分圧した電圧を入力しているが、 $\text{Log}(I_t)$ 成分に対しては抵抗の分圧比に関わらず同じ強さで働く。分圧比は司令値応答を見て決定する。司令値応答が遅くてよいなら R_4 を外しておけばよい。 R_{11} は完全微分を使用するとかえってノイズを強調する場合があるため、高域でゲインを抑えるために必要である。シミュレーションによると、

$$s \rightarrow \frac{s}{1+10s}$$

としてもあまり応答が変化しないことを確認した。

5.4 外乱オブザーバ[38-39]

5.4.1 設計

プラントの入力と出力が、プラントのモデルの振舞いと違っていれば、それは外乱が入ったためと考えられる。外乱がプラントの入力に加わったと仮定すれば、プラント出力をプラントの逆モデルに通して入力との差をとったものが、外乱の推定値となる。この推定外乱をプラント入力から差し引くと、外乱の影響が抑圧できる。図5-9は、このようにして外乱を抑圧する、外乱オブザーバを取り付けたPID制御器のブロック図である。2次のローパスフィルタ、

$$\frac{1}{(1+T \cdot s)^2}$$

は、逆モデルに含まれる2次の微分がノイズを強調する可能性があるため、これが必要になる。

ここでは原子間力等の非線型な力をすべて外乱とみなし、外乱オブザーバで対応する。また、 M_n, K_n 等のいわゆるノミナル値が実際のLTUの M, K 等と異なるとき、外乱オブザーバが理論通りに機能していれば、パラメータの違いをも外乱として押え込んでしまう。この場合PID制御器から見たLTU+外乱オブザーバの特性は、外乱オブザーバが持っているノミナルなモデルの特性となる。したがって、モデルパラメータが多少実際と食い違っている可能性がある場合、外乱オブザーバを用いるとその影響が減少する。

5.4.2 シミュレーション

MATLABを用いて、図5-9の外乱入力にステップを入れたときの $\text{Log}(I_t)$ の応答を調べた。LTUのパラメータは上に述べたPID制御器のシミュレーションと同じ値を使用し、 $\tau=10^{-5}s$ とした。

図5-10(a)および(b)は、ローパスフィルタの T をパラメータとして計算した、外乱応答である。当然ながら T が小さいほうが外乱抑圧特性は優れている。 $T=1ms$ では、外乱オブザーバの効果はほとんどない。 $T=1\mu s$ 以下では応答波形は相似で、振幅は T に比例する。トンネル電流を1桁変化させるには、LTUアクチュエータの駆動電圧をmVオーダ変化させれ

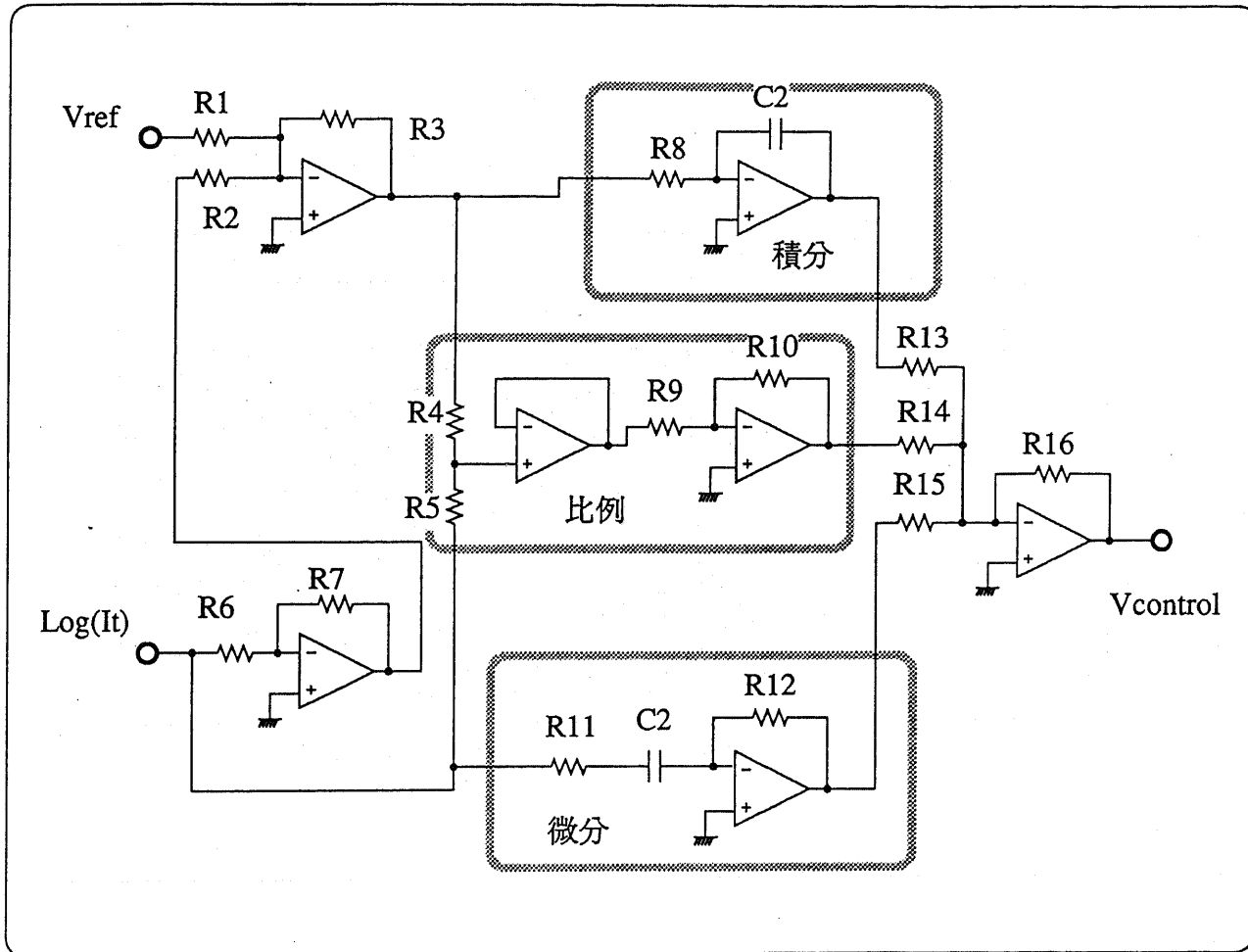


図5-8 PID制御器の回路図

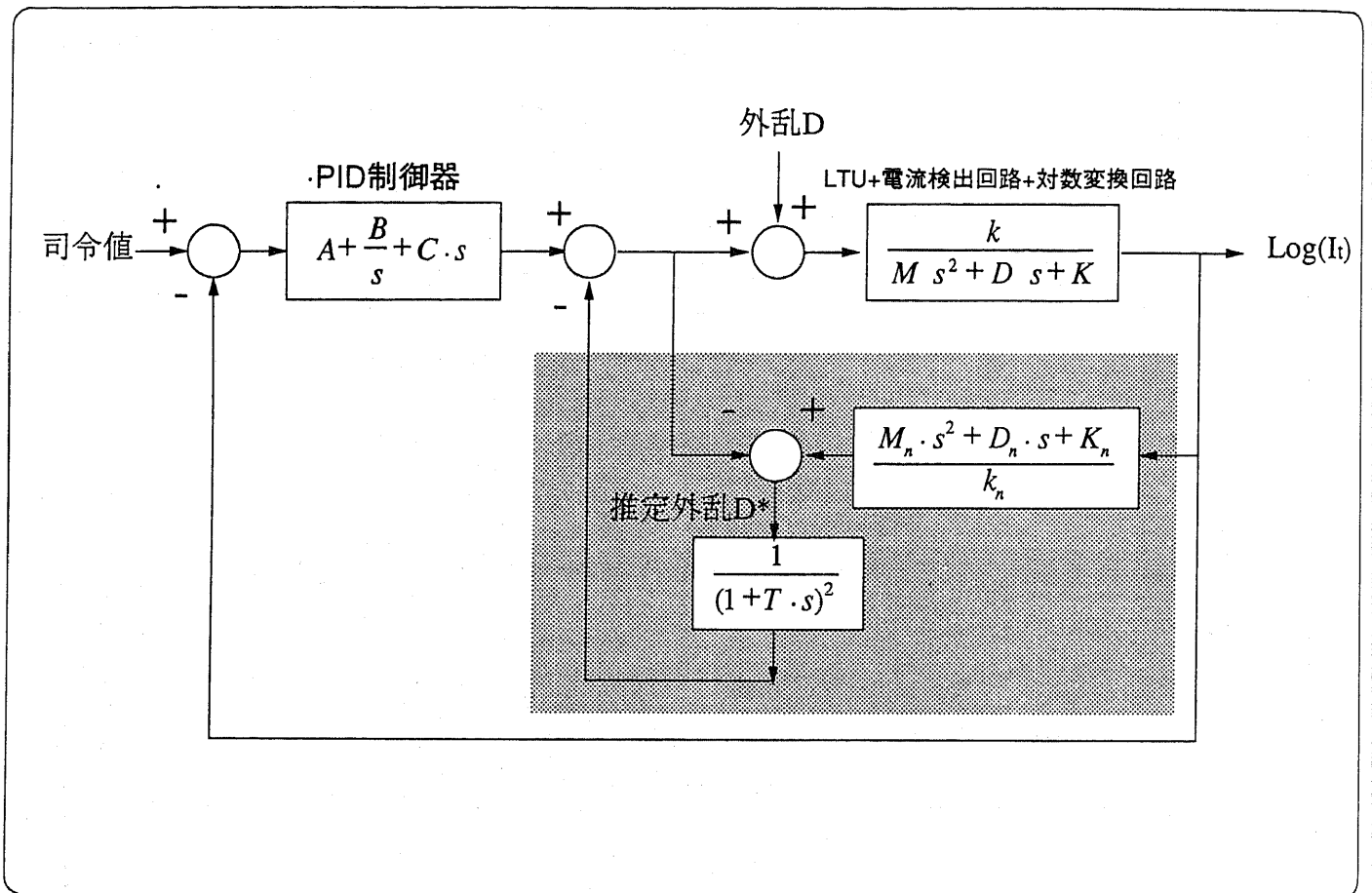


図5-9 外乱オブザーバを含む制御器のブロックダイヤグラム

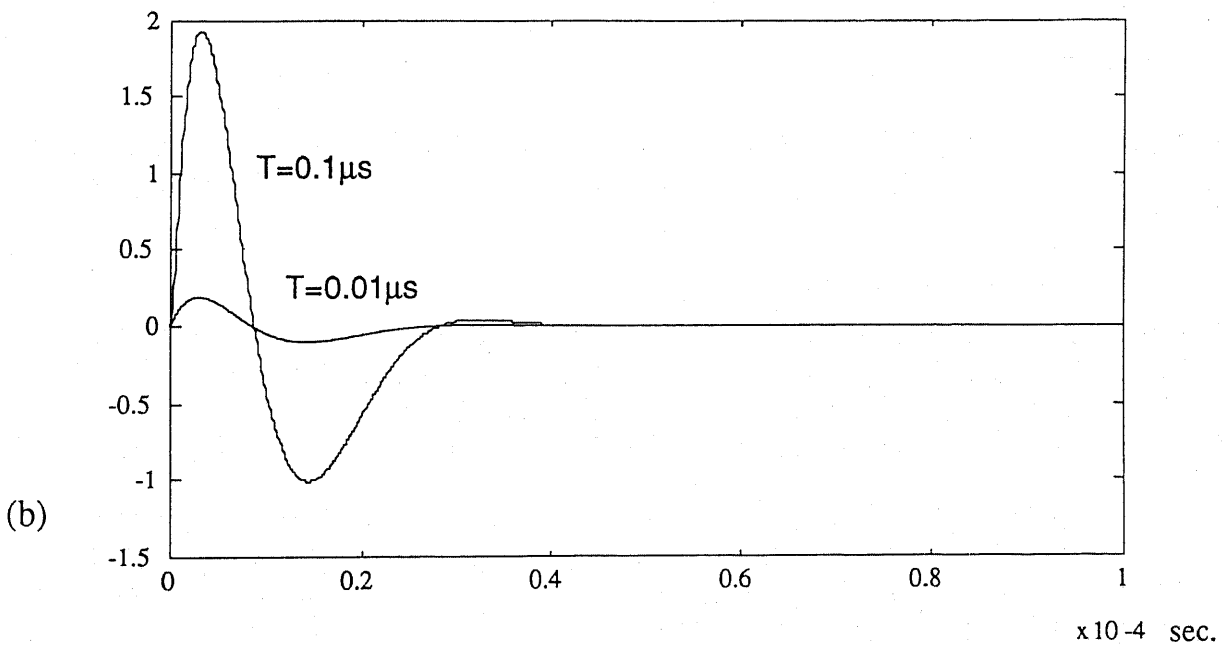
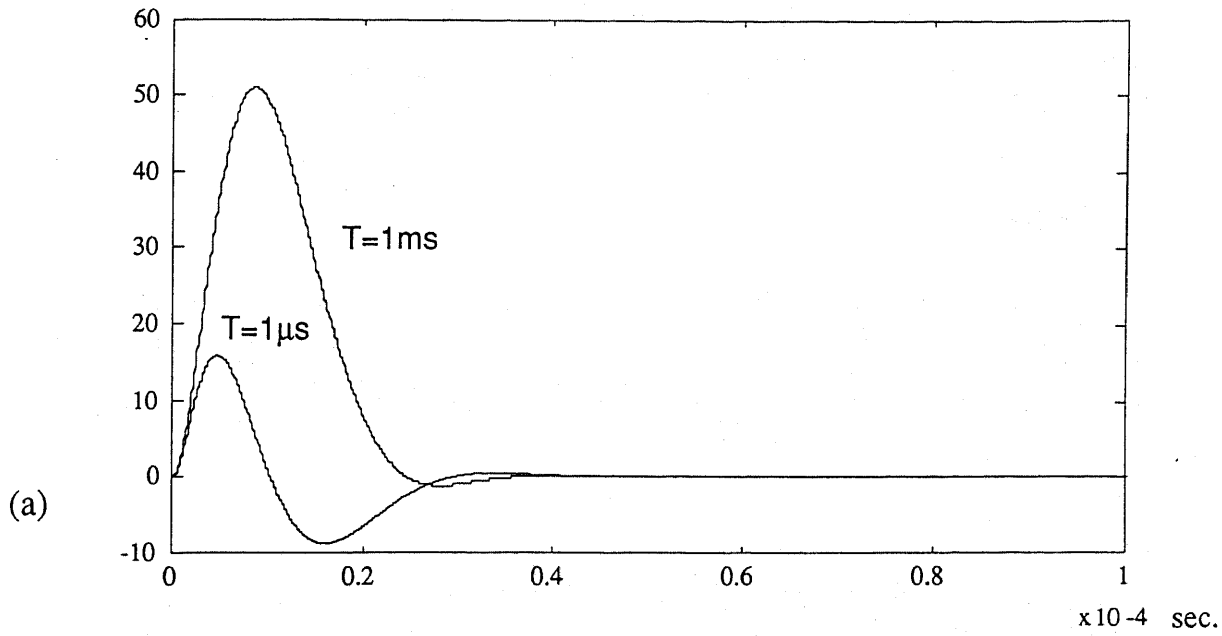


図5-10 外乱オブザーバを付加したPID制御器の外乱応答

ステップ外乱に対するLog(I_t)出力の応答波形。LTUのパラメータは、 $M=1\text{ng}$ 、 $K=10\text{N/m}$ 、PIDの等価時定数は $10\mu\text{s}$ 。
 T はローパスフィルタの時定数。
 $T=1\mu\text{s}$ 以下では応答波形は相似で、振幅は T に比例する。

ば十分であるから、1Vのステップ入力はかなり大きいといえる。これに対して $\text{Log}(I_p)$ が1V変化するという事はトンネルギャップにして0.1nm程度の変化であるから、 $\text{Log}(I_p)$ の変動が2V程度になる $T=0.1\mu\text{s}$ ならば、実用的な効果があると言える。それより小さい T にすると、普通のOPアンプ回路ではローパスフィルタがないのと大差がないと思われる。

5.5 電流電圧変換器(IVC)

トンネル電流の変化を素早く検出して駆動電圧にフィードバックを掛けるために、IVCの動作は速いほどよい。ところが、IVCは高い伝達コンダクタンスを必要とする、言い換えるとOPアンプを使用した一般的な回路に比較して、フィードバック抵抗の値がかなり大きいので、入力インピーダンスや周波数特性を理想的な値にすることは困難である。IVCの設計において重要なポイントは下記のような点である。

- 1.伝達コンダクタンス (変換ゲイン) の値
- 2.入力インピーダンス
- 3.動作速度
- 4.オフセット電圧とオフセット電流
- 5.電圧性ノイズと電流性ノイズ

これらを考慮したところ、市販のIVCで満足できるものはなかった。以下IVCの設計について述べる。

5.5.1 IVCの原理

図5-11は、IVCの原理を示した図である。OPアンプの反転入力端子には電流は流れ込まないものとする、IVCの入力電流はすべて抵抗 R に流れるので、入力電流と抵抗 R の積($-iR$)が出力となる。

5.5.2 トンネルバイアスの供給方法

トンネルギャップには、トンネル電流回路の電源として、バイアス電圧(トンネルバイアス)を印加する必要がある。ところが、現在の設計のLTUでは、アクチュエータの可動部と探針が機械的に連結しているだけでなく、電気的にも結合しているので、アクチュエータ側にもトンネル電流回路側にも矛盾のない方法でトンネルバイアスを供給しなければならない。

アクチュエータの可動部は基板と同電位でないと、垂直方向の引力が発生して基板に吸い付けられてしまうため、可動部は基板と同電位とし回路の接地に接続する。必然的に駆動電圧はアクチュエータの固定電極側に供給することになる。したがってトンネルバイアスは対向面側から供給し、しかも対向面から電流を検出する以外に方法がない。

上述のようなバイアス供給を実現するには、IVCの入力にフローティングの電源、すなわち乾電池などを挿入(図5-12(a))してもよいが、電源を管理するのが煩雑である。またIVCの入力線は外乱ノイズに対し高い感度をもつため、乾電池を含めてシールド内に収納しなければならない、さらに乾電池の前と後では電位が違うので漏れ電流を抑えるためのガードリングが使えない。

これを解決するため、図5-12(b)のような構成とした。OPアンプの非反転入力端子をバイアスすることにより、自動的に反転入力端子も同電位にバイアスされる。出力からバイアス電圧を引き算すれば、入力電流に参照抵抗を掛けた電圧が得られる。非反転入力側のバイアス電圧は低インピーダンスな電圧源なので、シールド(ガードリング)をここに接続することができる。また、非反転入力端子には接地に対して規定された電圧を与えればよい(フローティング電源でなくてよい)ので、バイアス電圧を外部の計測器等から与えることができるようになる利点もある。

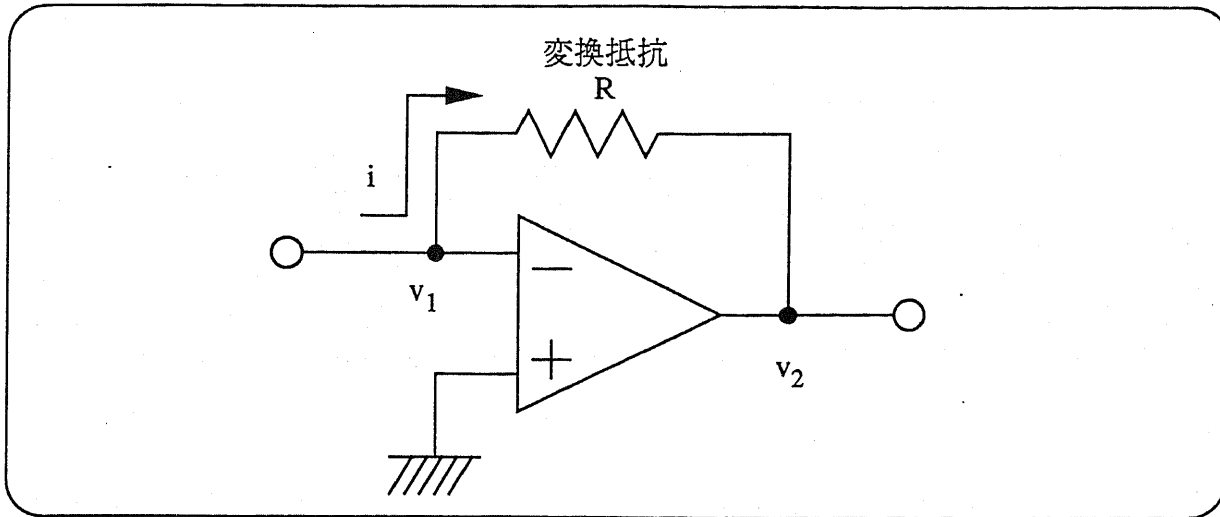
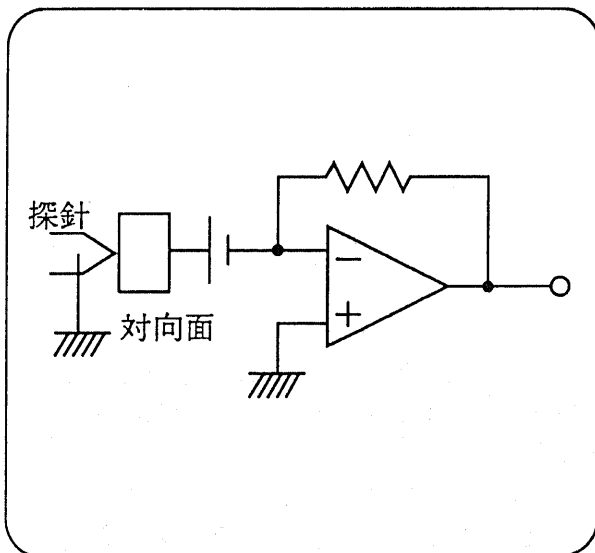
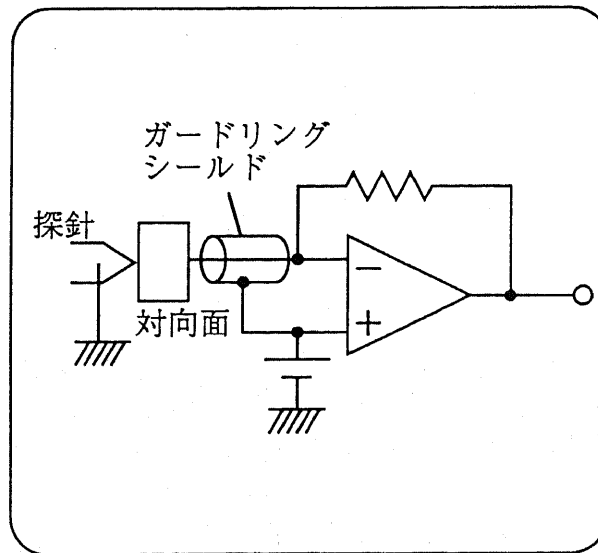


図5-11 IVCの原理

理想的OPアンプの入力には電流が流れ込まないので、電流は全部変換抵抗に流れる。負帰還がかかったOPアンプの反転入力と非反転入力の電位は等しくなるので、出力電圧は $-iR$ となる。入力インピーダンスはゼロである。



(a)



(b)

図5-12 トンネルバイアスの供給方法

探針が接地と決まっているので、対抗面側にポテンシャルを与え、しかも対抗面側から電流を測定するには、上の二つの方法がある。

5.5.3 入力バイアス電流と入力オフセット電流

実際のOPアンプの入力には、バイアス電流と呼ばれる、初段のベース電流あるいはゲート漏れ電流が流れる。この電流が変換抵抗に流れ込むので、出力にはオフセット電圧として現れる。これは原理的には非反転入力にも変換抵抗と等しい抵抗を挿入すれば解消できるが、入力間のバイアス電流の差である、オフセット電流をキャンセルするのは難しい。本研究では、トンネル電流の最小値を0.1nAとして設計するが、バイアス電流およびオフセット電流はそれより十分小さいことがOPアンプを選択するうえでの目安になる。

5.5.4 入力バイアス電圧

変換抵抗の下限は、最小測定電流の変換出力が、OPアンプのオフセット電圧より十分大きい範囲に収まることを条件に設定する必要がある。OPアンプのオフセット電圧は、ドリフトを考慮すると、外部で調整しても0.1mV程度が限界と考えるのが妥当である。従って10%の測定誤差を認めるとしても、0.1nAを入力したときの出力が1mVとなる変換抵抗、すなわち $R=10M\Omega$ が最小である。

5.5.5 入力インピーダンス

上述の電流-電圧変換の原理を厳密に計算するには、OPアンプの電圧増幅率を考慮する必要がある。Rの値を無限大でなくAとすると、

$$\begin{cases} V_2 = -AV_1 \\ V_2 = V_1 - R \cdot i \end{cases}$$

↓

$$V_1 = \frac{1}{1+A} R \cdot i$$
$$V_2 = -\frac{A}{1+A} R \cdot i$$

のようになる。Aは汎用および高速OPアンプで数万、高精度OPアンプでは10万倍以上あるので、出力電圧についてはAを無限大と考えて全く問題ない。しかし反転入力に現れる電圧は考慮する必要がある。仮に変換抵抗Rを100M Ω 、Aを 10^5 とすると、

$$V_1 \approx 1000i$$

となる。つまりIVCの入力インピーダンスが1k Ω に達している。さらに、OPアンプの電圧増幅率は周波数特性を有するため、周波数が高くなると入力インピーダンスは上昇する(図5-13)。

トンネル電流回路の中で、IVCの入力インピーダンスがどれほどの影響があるか考えてみる。(トンネルバイアス) / (トンネル電流) をトンネル抵抗と呼ぶことにすると、入力インピーダンスがトンネル抵抗より十分小さい範囲であれば問題ないと言える。トンネルバイアスの最小値を1mV、トンネル電流の最大値を10nAとすると、トンネル抵抗の最小値は100k Ω となる。これは上記の条件における入力インピーダンスの100倍あるので、静特性の上では問題ない。しかし、一般的なOPアンプの電圧増幅率のロールオフは、数十Hzで始まるので、数千HzではIVCの入力インピーダンスがトンネル抵抗の最大値とほぼ等しくなる。これは最悪の場合であるが、IVCの入力インピーダンスを低く抑える意味から言えば、変換抵抗は小さく、OPアンプの電圧増幅率を大きくすることが必要である。

5.5.6 空気中での実験用IVCの設計

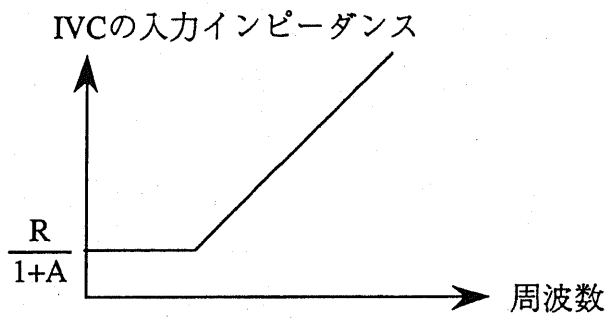
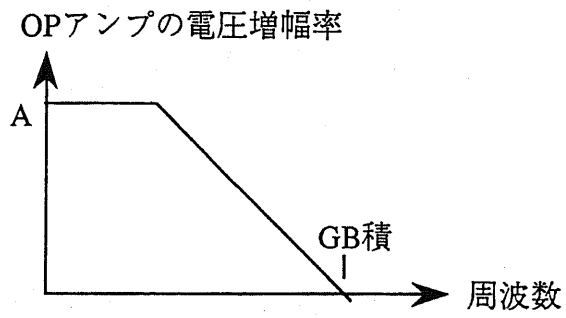


図5-13 OPアンプの周波数特性とIVCの入力インピーダンス

大気中でのLTUは本質的に安定な系なので、比較的低速な応答で十分である。この場合静特性を重視した設計が可能である。OPアンプとしては、入力オフセット電流が最大150fAのOPA128を使用し、 $R=100M\Omega$ とした。

5.5.7 真空中での実験用IVCの設計

一方、真空中ではLTUを制御で安定化する必要があるので、速度を最優先にした設計が求められる。実際に $R=100M\Omega$ として製作したIVCに、トンネル抵抗の代わりに $1M\Omega$ の入力抵抗を接続して周波数を測定した。この回路の入出力特性は、理想的にはOPアンプのGB積を電圧ゲイン ($100M\Omega/1M\Omega$) で割った周波数がカットオフに持つ1次遅れになると予想される。しかし、実際はそれよりも遅い応答を示した。OPアンプを高速な品種に変えても応答が変わらないことを確認した。

5.5.8 寄生容量と高速化

最大の要因は、入出力間に寄生する静電容量である (図5-14)。この容量がミラー積分効果を示し、IVCの伝達特性が時定数 RC_i の1次遅れになる。仮に $R=100M\Omega$ 、 $C_i=1pF$ の場合、カットオフ周波数は1.6kHz程度である。この容量は、OPアンプICのチップ自体にも存在するので、完全に除去することはできないが、最も深刻なのは変換抵抗の端子間の寄生容量である。抵抗器は一般に、抵抗膜に螺旋状の溝を切って抵抗値を調整してあるので、溝の間に比較的大きな静電容量が存在する。抵抗器の寄生容量を小さくするには、細長い形状の抵抗器を使用すると若干効果があるが、電極の面積が大きくなり、かえって容量を増大する効果もある。抵抗器に銅箔を巻き付けて接地すると、この寄生容量を効果的に排除することができる (図5-15)。しかし同時に、図5-14に示したシャント容量の増加をもたらす可能性がある。

シャント容量はループゲインに周波数特性を持たせ、周波数特性にピークを生じる原因となり、また入力インピーダンスを高域で増加させる。したがって、寄生容量の低減は試行錯誤で行わざるを得ない。

銅箔のシールドで積分容量を低下させると、OPアンプの違いによる周波数特性の差が確認できる程度に応答速度が向上する。OPアンプの選定において、ここでは速度を最優先するので、入力オフセット電流やノイズ特性は多少悪いものも対象とする。小信号特性ではGB積が大きいOPアンプがよく、大信号特性ではスルーレートが大きいものがよいが、実際に測定してみるとスルーレートに達するような立ち上がりは得られないので、GB積を重視する。高精度OPアンプおよび、OPA128のような超低入力バイアス電流のOPアンプはGB積が1MHz程度で、低すぎる。また高速OPアンプはオフセット電圧、オフセット電流等の直流特性が悪いので使用できない。

ここでは、5倍以上の電圧ゲインで安定動作が保証されているFET入力の汎用OPアンプ、LF357を選択した。ユニティゲインでの安定性は補償しないかわりに内部補償を軽くして高速化したOPアンプで、GB積は20MHzである。入力オフセット電流は最悪値で50pA、標準で3pAなのでここでの使用目的には適用可能である。入力オフセット電圧は外部で調整した。変換抵抗には銅箔でシールドを施した。トンネル電流が流れていない時は電圧ゲインがゼロになるので、LF357の安定は保証されていないが、シャント容量のために高域で帰還量が減り、発振に至らない。帰還抵抗 $100M\Omega$ の場合立ち上がり時間約 $10\mu s$ 、 $10M\Omega$ の場合、立ち上がり時間約 $5\mu s$ を達成した。これは、市販の高速電流アンプ (東洋テクニカ428型) の同一ゲインと比較した場合、3倍から5倍速い。図5-16に変換抵抗 $10M\Omega$ の場合の測定回路(a)と応答特性(b)を示す。

5.5.9 シャント容量について

IVCの入力は静電結合による外乱に対し非常に敏感なので、一般的にはシールドを施す

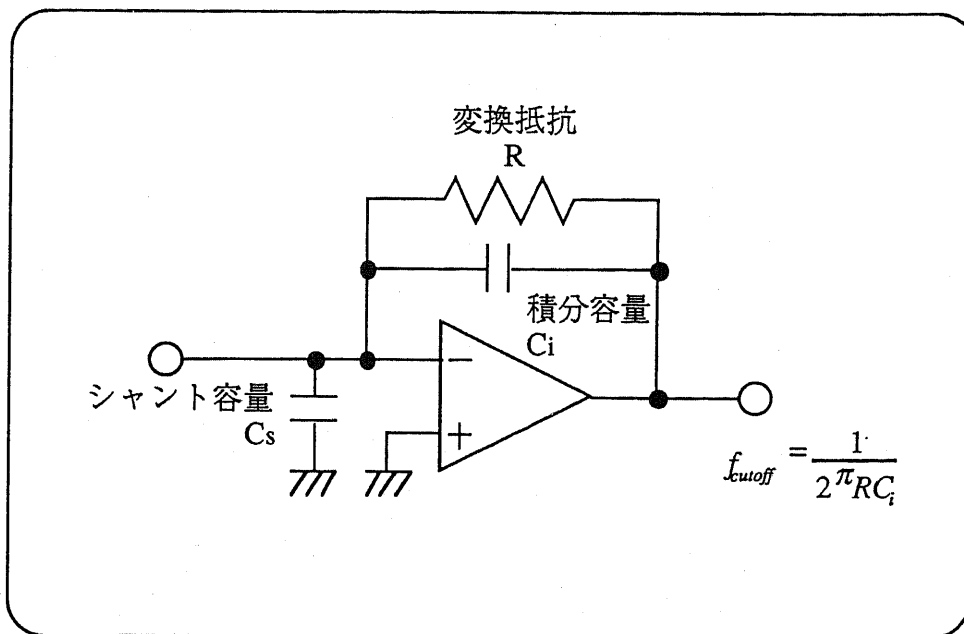


図5-14 IVCの寄生素子

積分容量は動作を遅くする。シャント容量は伝達特性の肩にピークを作る。

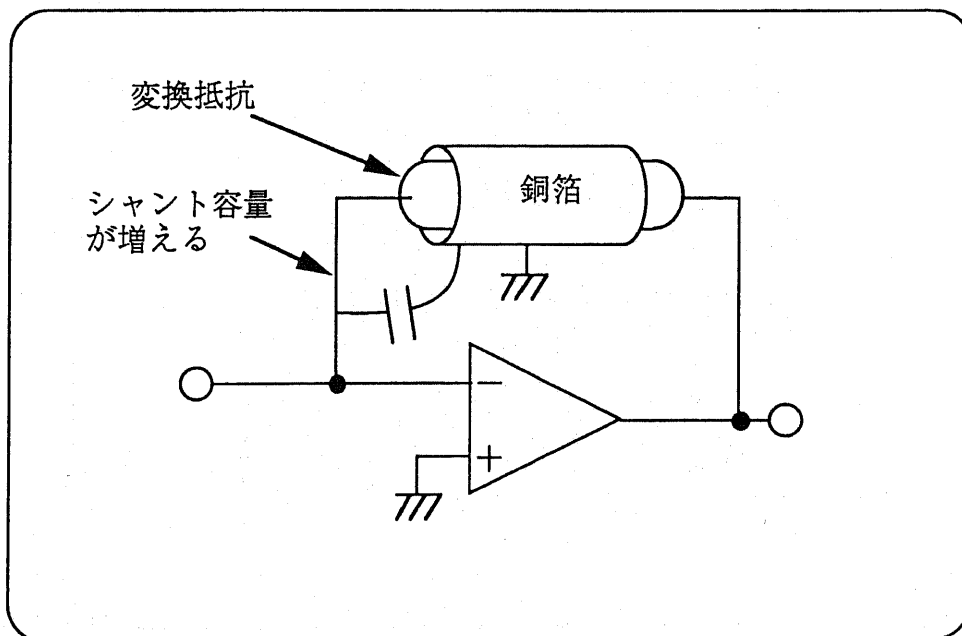


図5-15 抵抗器のシールド

銅箔で抵抗器をシールドすると積分容量は減るがシャント容量が増える危険性もある。

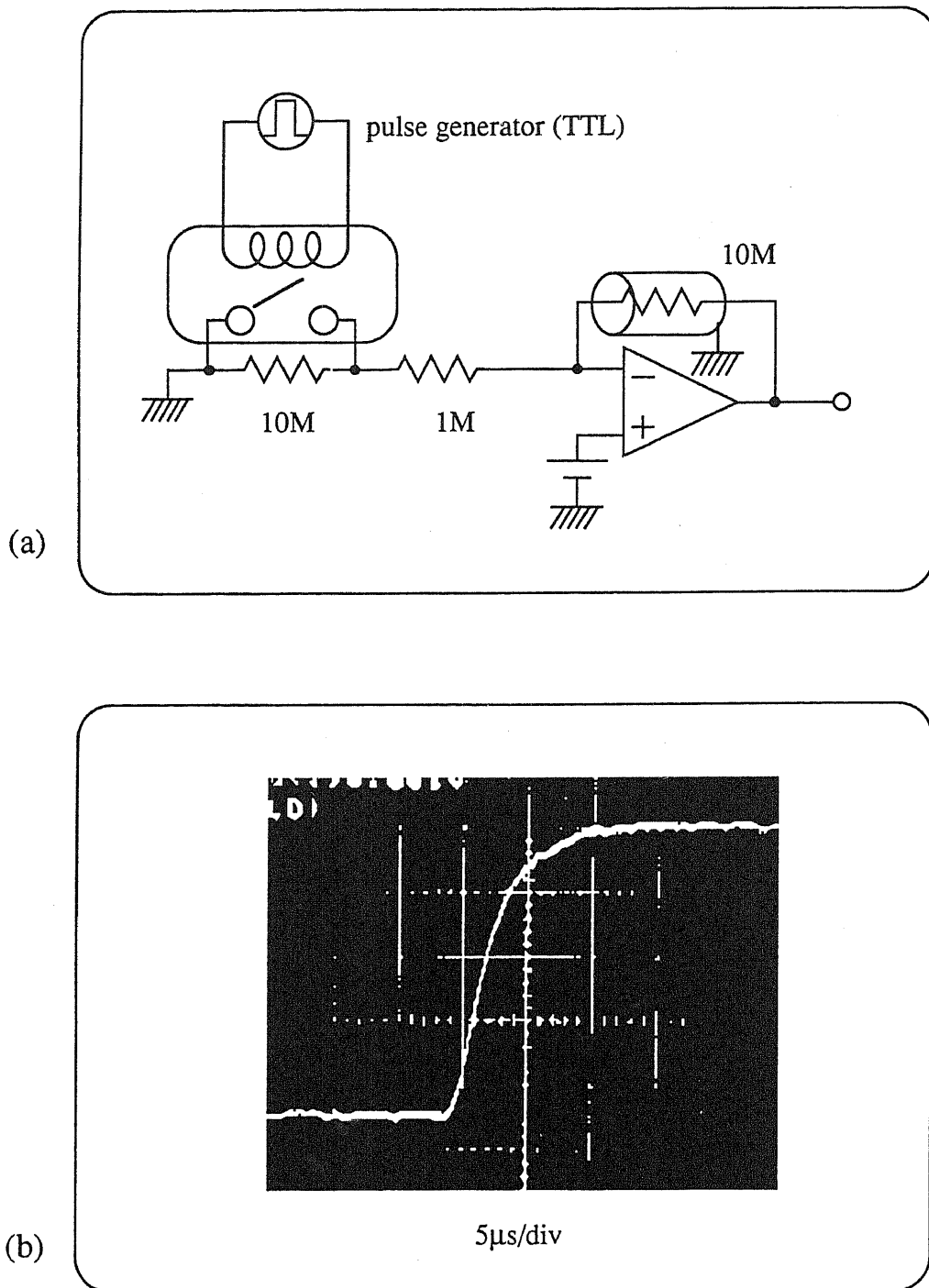


図5-16 IVCステップ応答の測定回路と応答特性

(a)測定回路、(b)応答波形

トンネル電流回路は一定抵抗に変動する電圧源が接続されているのではなく、一定電圧に変動する抵抗が接続されているモデルの方が正しいので、リードリレーで抵抗値を変化させてステップ応答を測定した。

べきである。また、絶縁抵抗の低い部分があると漏れ電流が流れるので、シールドはOPアンプの非反転入力端子と同じ電圧源に接続し、ガードリングを形成するとよい。

しかし、シャント容量の影響はすでに述べた、IVCの伝達特性にピークを生じることのほかに、トンネル抵抗と共に1次遅れ回路を形成し、IVC入力にトンネル電流の変化が現れるのを遅らせる効果がある。このため、シャント容量は極力小さくすべきである。実験に用いる真空装置の内部に設置したデバイスは、アクチュエータの駆動電圧がトンネル電流回路へ結合するのを避けるため、真空用のシールド線（約30cm）でフィードスルーに接続している。このシールド線の中心導体とシールド間の静電容量を測定すると、60nF程度ある。

トンネル抵抗が最大（すなわちトンネルバイアス100mV、トンネル電流0.1nAの場合、1G Ω ）のとき、60nFの容量とトンネル抵抗で形成される1次ローパスフィルタのカットオフ周波数は380Hzと、非常に低い。このため、シールドは駆動電圧側のみ使用し、トンネル電流側はシールドを開放しておくべきである。

シャント容量をキャンセルする方法として、ブートストラップがある。IVC出力を反転して適当な容量で入力に結合させる。この方法は、結合容量を適切に調節すると、一定の効果があることは確認した。しかし結合容量が不足するとほとんど効果がないうえ、一種の正帰還なので、容量が大きすぎるとリングングを生じたり発振に至る。扱いが難しいので今回は採用しなかった。

5.5.10 実装その他

真空装置内の配線は振動を受けにくく、空気を伝わる音響の影響がないので、比較的長くてもよい。これに対して真空装置のフィードスルーからIVCへの配線に同軸ケーブルを使用すると、音響的なノイズや振動によるケーブル内部の静電的なノイズなどが無視できない。これを根本的に解決するため、フィードスルーの外側のコネクタシェルを改造し、その中にIVCを組み込んだ。図5-17はその写真である。

IVC側からトンネルバイアスを供給する方式なので、トンネルバイアス分のオフセットを差し引く回路が必要である。入力オフセット電圧の小さい差動増幅器を使用すればよいが、計装用アンプとして売られているICはスルーレートが低いので、ここでは高精度OPアンプと集合抵抗からなる単純な差動増幅器を用いた。

5.6 対数変換器

対数変換器には2種類の代表的な方式がある。図5-18にバイポーラトランジスタのベース-エミッタ電圧対コレクタ電流の対数特性を利用するものの原理を示す。これは精度が高くダイナミックレンジが広い。しかしフィードバックループに非線形素子が入っているため、入力電流が小さいときはループゲインが大きく、入力電流が大きいときはループゲインが小さくなる。その変化は何桁にもわたっているため、低ゲインで安定なように位相補償容量を決定すると、高ゲイン時には非常に動作が遅くなる[40]。このため、この方式は低速動作で十分な大気中での実験に使用した。同方式のIC、LOG100（バーブラウン）を使用した。

もうひとつの方式は、全波整流回路の非線形性を利用するもので、非線形素子がオープンループで使われているため高速応答する。ただし、対数特性に近似できる範囲が狭いため、リミッタ付きのアンプと全波整流回路のユニットをカスケードに接続してダイナミックレンジを拡げてあり、ユニット間の対数特性のつなぎめで近似精度が落ちる。この方式は高速動作が優先される真空での実験に使用した。同方式のIC、AD640（アナログデバイス）を使用した。ダイナミックレンジは50dB、帯域は実測で10MHz程度であった。本方式は全波整流回路を使用するので、入力の絶対値の対数を出力する。このため、トンネルバイアスの極性を反転しても、後段の回路動作に影響がない点が便利である。

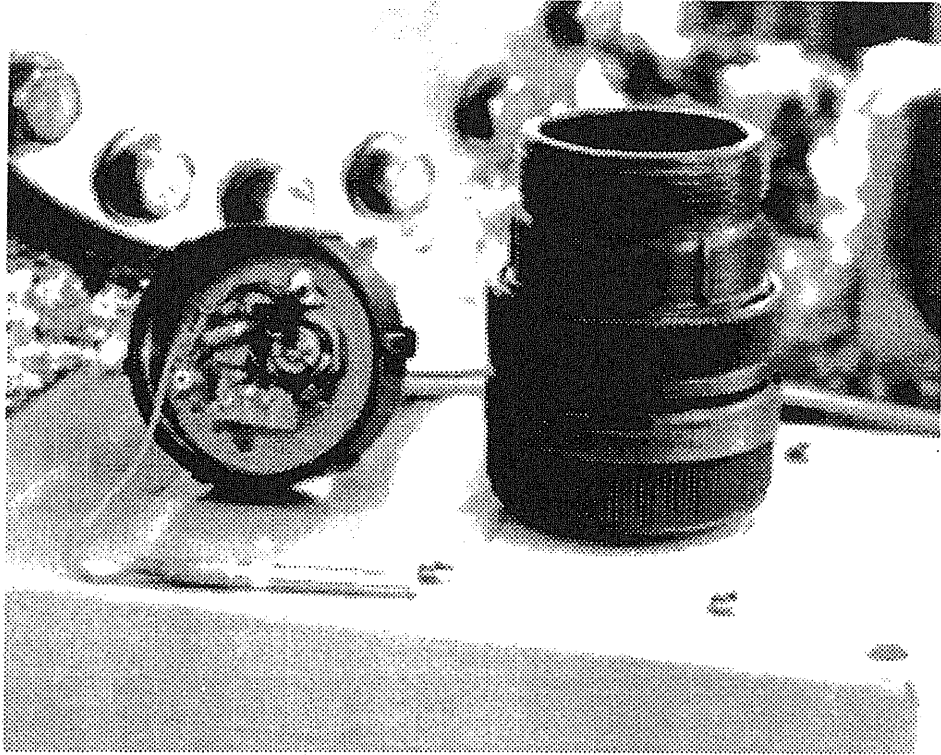


図5-17 コネクタシェルに組み込んだIVC

ケーブルのノイズを完全に除去するため、真空装置のフィードスルーのコネクタにIVCの初段を組み込んだ。下の箱は電源と差動増幅器が入った本体。

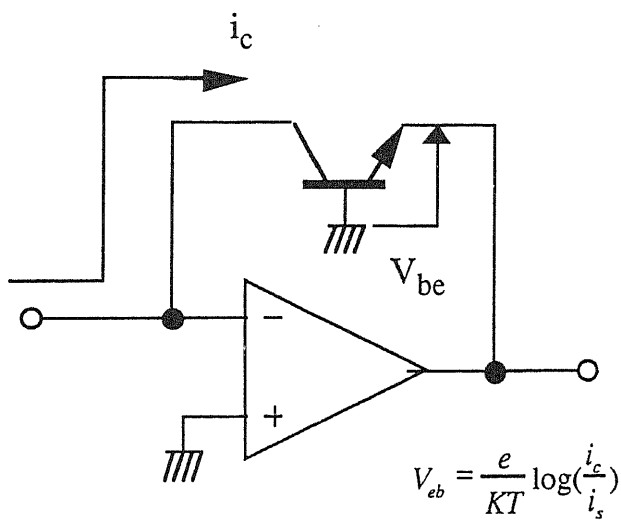


図5-18 pn接合の特性を利用した対数変換器の原理

5.7 駆動系、信号系回路の分離

LTUのアクチュエータと対向面は、基板上で互い接近した位置に配置されているため、駆動電圧がトンネル電流回路に電氣的に結合してしまう危険性がある。これは3種の原因に分けられる。第1は駆動電極と対向面間の静電容量による結合であり、第2は共通アースによる結合であり、第3は絶縁不良によるリークである。共通アースによる結合とは、駆動電圧の変化により可動電極側に変位電流が流れ、この電流が支持梁を通過して接地に流れる際、支持梁の抵抗に電位差が現れ、トンネルバイアスを変化させたのと等しい効果を示すことである。以下、それぞれの結合を見積り、あるいは対策を検討する。

5.7.1 容量性結合と対策

(1)シールドの難しさ

容量性の結合を防ぐ通常の方法は、シールドを施すことである。しかしLTUの駆動部を、電氣的に遮蔽し、かつ機械的に出力を取り出すということは、製作プロセス上、不可能ではないにしても、非常に難しい。楕円形アクチュエータの上に厚い犠牲層を堆積し、さらにその上に覆いとなる材料を堆積し、覆いの孔を通して犠牲層をエッチングし、減圧下で孔を塞ぐという技術も発表されている[41]。しかしそれ自体かなり高度な技術である。

この技術を使用する以外には、構造的な工夫ではトンネル電流回路の露出部分を小さくするとか、駆動電極から遠ざけるといった対策しか行えない。LTUと類似の水平型のマイクロ走査プローブでも、シールドは施されていない。この点ではダイヤフラム型のマイクロトンネルユニットが有利である。ダイヤフラムは表と裏をそれぞれトンネル電流回路と駆動回路に分けることができるからである。

本研究では、シールドを採用しないかわりに、BPF法と補償電極法という2種類の容量性結合キャンセル法を開発した。

(2)BPF型キャンセラ

図5-19に示すように、アクチュエータ駆動アンプ、LTUの容量性結合、およびIVCを総合した特性をシミュレートする回路を設け、引き算することで容量性結合の影響を除去することができるはずである。

アクチュエータ駆動アンプに正弦波を入力し、IVC出力を測定した。その結果、図5-20に示す周波数特性を得た。このバンドパス特性は、容量性結合による微分特性と、IVCのローパス特性が合成されたものと考えられることができる。これはかなり正確に2次のバンドパスフィルタ(BPF)特性となっている。これをシミュレートするため、中心周波数 f_0 と3dBダウンする周波数からQ値を求め、図5-21に示す多重帰還型バンドパスフィルタを設計し、BPF型キャンセラを構成した。図5-22は、BPF型キャンセラの有無による、容量性結合の影響を示したものである。この型のキャンセル法が有効なことが実証できた。

(3)補償電極型キャンセラ

図5-23に示すように、対向面の近くに新たに電極(補償電極)を設置し、それに適当な大きさの、駆動電極の電圧と逆位相の電圧を印加すると、容量性結合によるリークが相殺される。駆動電極と対向面電極間の静電容量を C_1 、補償電極と対向面電極間の静電容量を C_2 、駆動電極と補償電極に印加する電圧をそれぞれ V_1 、 V_2 とすると、 $V_2 = -(C_1/C_2)V_1$ とすればよい。

この方法は、後述する変位検出の実験において検証した。図5-24に補償電極を含む実験装置を示す。この補償電極は、LTU基板上でなく、装置のシールドケースに取り付けた。ここでは、 C_2 を一定とするかわりに V_2 を一定とし、 C_2 を調整した。調整の方法は、駆動電極に方形波を印加し、IVC出力を観測しながら、補償電極(錫メッキ銅線)を曲げ伸ばして、IVC出力が最小になるように行った。

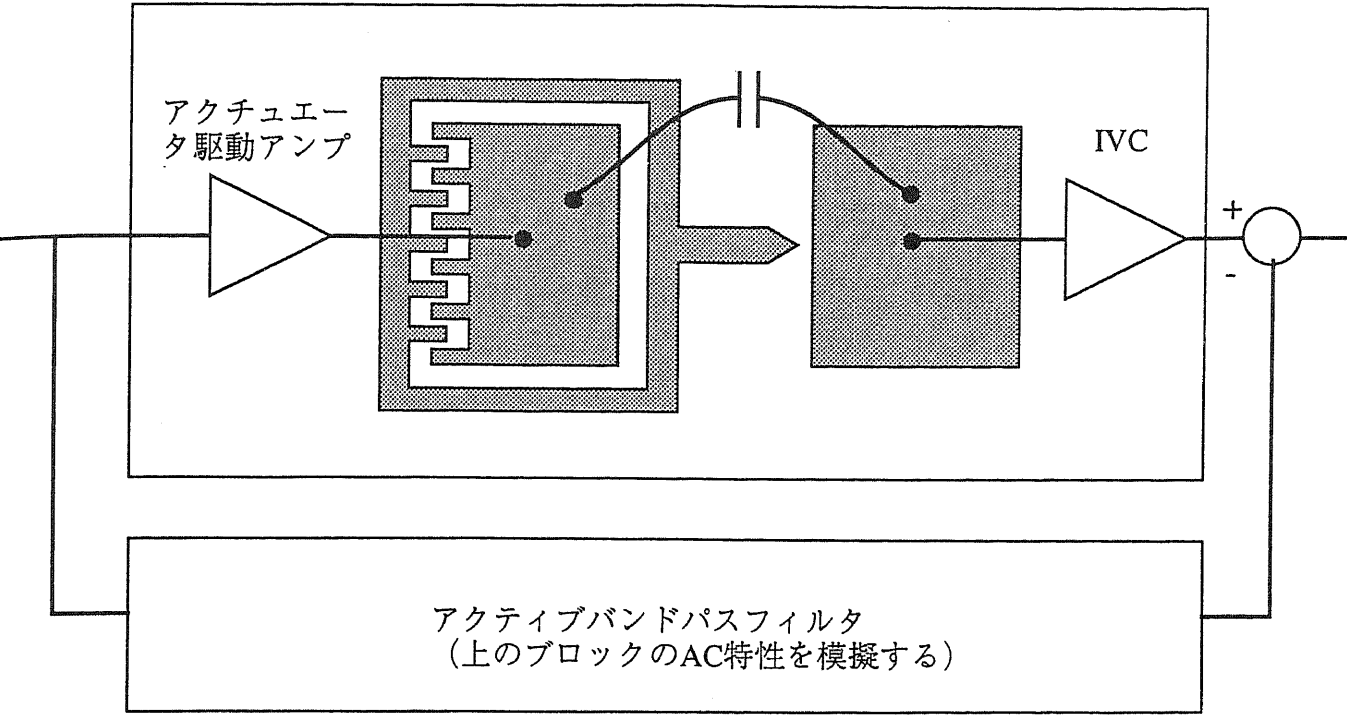


図5-19 BPF型結合キャンセラの考え方

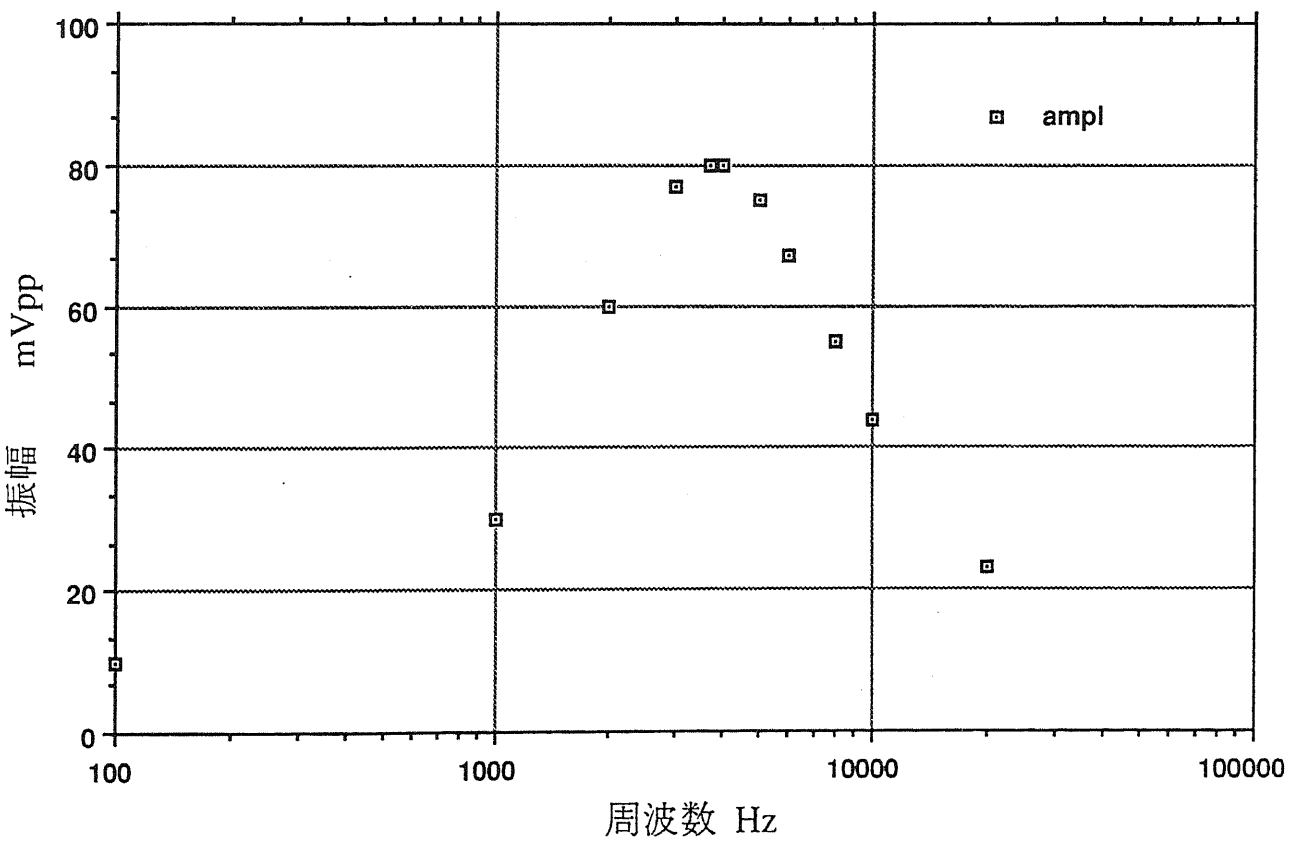
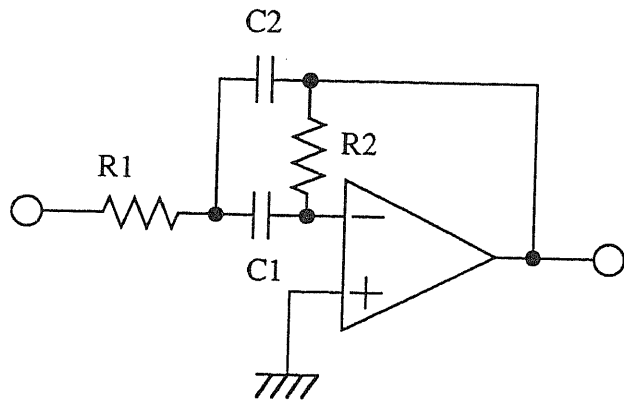


図5-20 容量性結合の周波数特性 (アンプとIVCを含む)



設計法 $C_1=C_2=C_f$ とすると、

$$R_f = (\omega_0 \cdot C_f)^{-1}$$

$$R_1 = R_f / (2Q)$$

$$R_2 = 2Q \cdot R_f$$

$$\omega_0 = 2\pi \cdot f_0 = 238000, \quad Q = 0.667$$

$$C_f = 0.01 \mu\text{F} \text{ とすると、}$$

$$R_f = 4.2 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = 3.14 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 5.58 \text{ k}\Omega$$

図5-21 多重帰還型バンドパスフィルタの設計

単位：mV

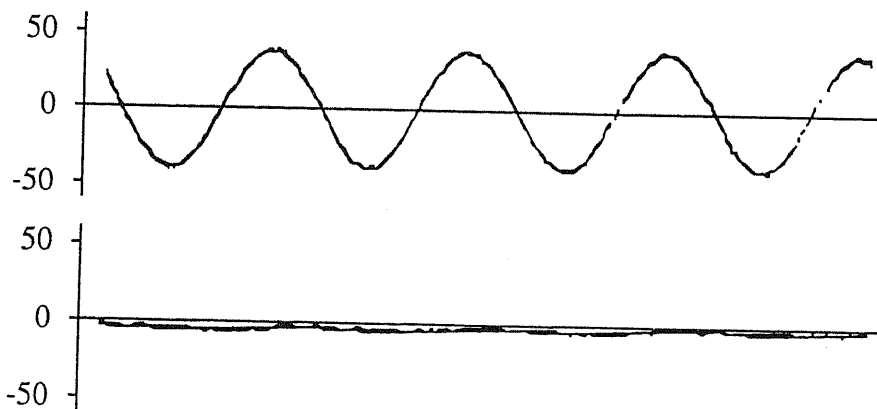


図5-22 BPF型キャンセラの効果

駆動アンプから10Vppの正弦波を与え、IVCに現れた電圧をキャンセル前(上)とキャンセル後(下)で比較した。周波数は、容量性結合によるリークの振幅が最も大きくなる3.8kHz。

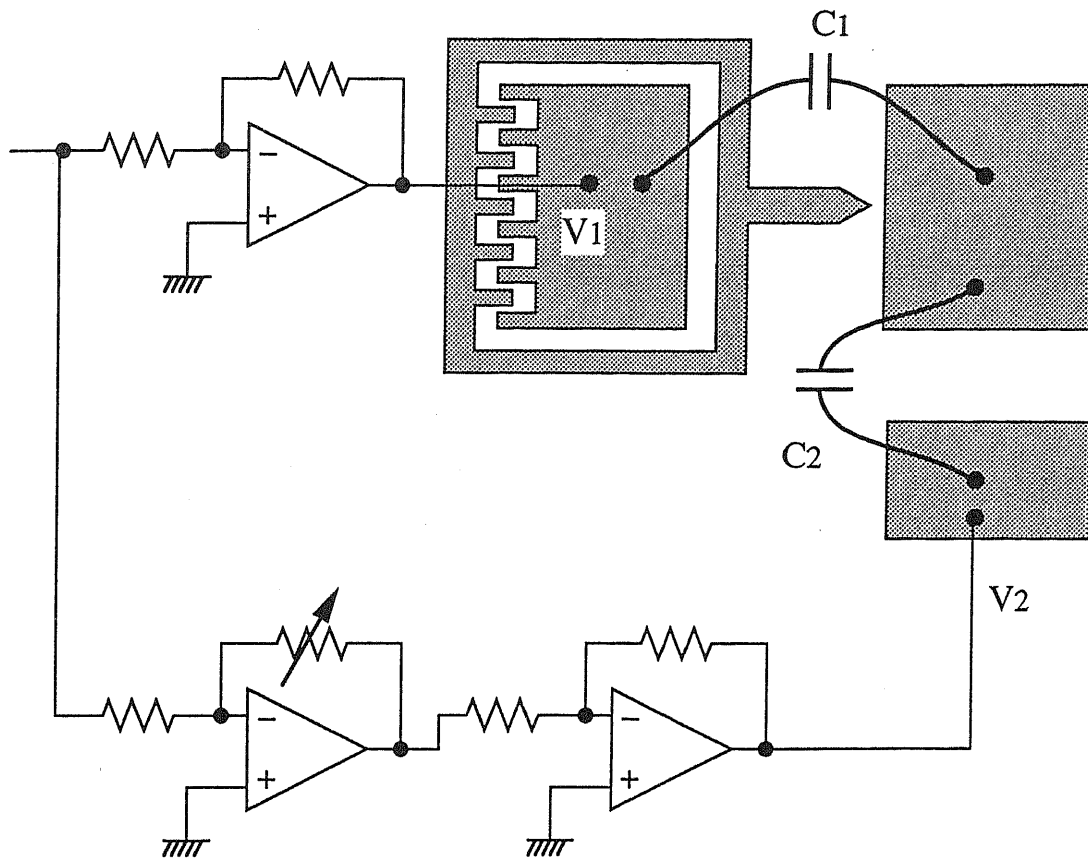


図5-23 補償電極型容量結合キャンセラの考え方

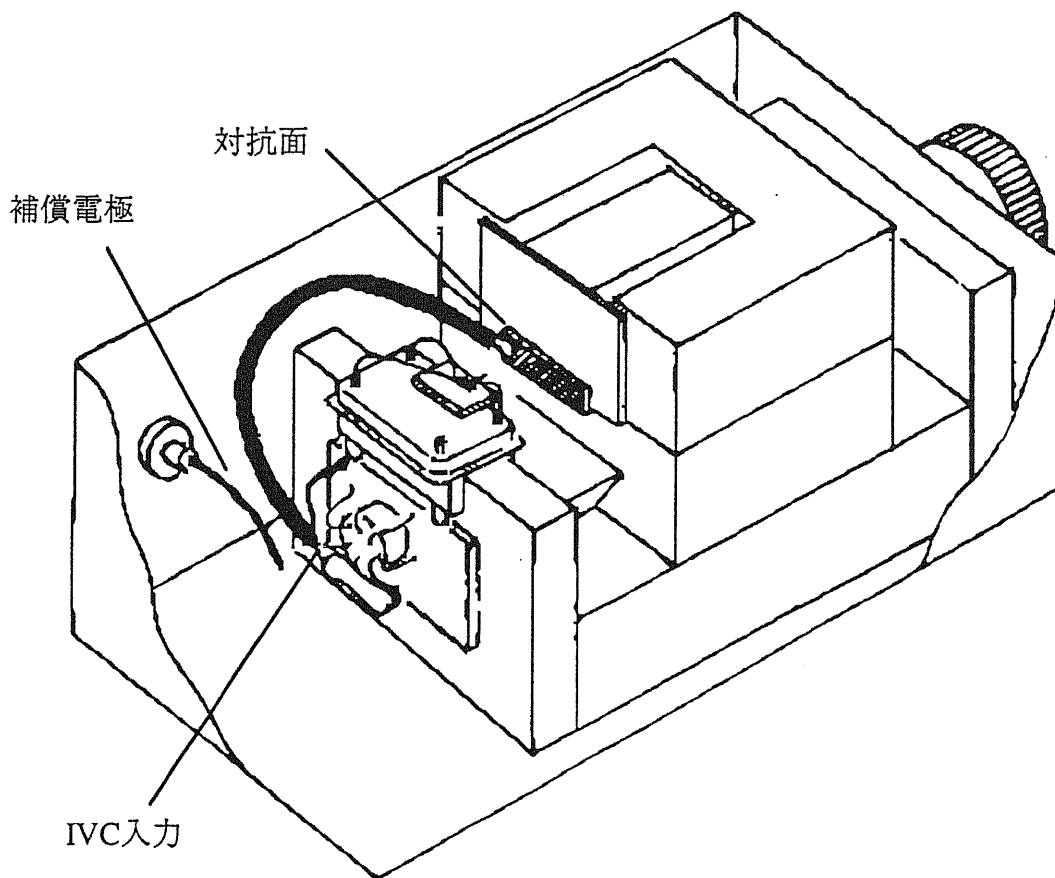


図5-24 補償電極型キャンセラの実験装置

6章で使用するの実験装置を使用した。ここでは補償電極の結合容量を調整した。

図5-25は、補償電極型キャンセラの有無による、容量性結合の影響を示したものである。この実験装置は、対向面が 20mm^2 程度の大きな面積を持つため、キャンセラを使用しないと実験が困難なほどの容量性結合リークが見られるが、補償電極型キャンセラにより、殆ど完全にリークが除去できることがわかった。

BPF型より補償電極型の方が、問題の本質を改善する方法であり、調整を要するパラメータが1個だけなので優れている。またIVC特性を変更しても、キャンセラを変更する必要がない。

5.7.2 共通アースによる結合の見積り

図5-26に示すように、駆動電極と可動部の間には静電容量がある。また支持梁には電気抵抗がある。この容量と電気抵抗は1次のハイパスフィルタを形成し、その出力が本来接地電位であるべき探針の電位を変動させる。いわゆる共通アースによる結合である。

駆動電極と可動部間の静電容量は、大部分が櫛歯間の静電容量である。櫛歯と櫛歯が平行平板コンデンサを形成しているとして、静電容量を計算する。図5-27に示すように、櫛歯の厚さは $4\mu\text{m}$ 、噛み合わせの深さは約 $10\mu\text{m}$ 、そして櫛歯と櫛歯の間隔は代表的な値で $2\mu\text{m}$ である。したがって櫛歯1組あたりの静電容量は約 0.18fF と見積もれる。櫛歯の数は、LTUのタイプによって異なるが、代表的な値として60組あったとすると、全静電容量は約 10fF である。一方、白金を（構造上面において） 20nm コートしたLTUの可動部と接地間の電気抵抗を実測すると、数百から $1\text{k}\Omega$ 程度である。

このハイパスフィルタのカットオフ周波数は、約 16GHz と計算される。仮に駆動電極に振幅 10V で 160kHz の正弦波が印加された場合、共通アースの効果で探針に現れる電位は 0.1mV に過ぎない。トンネルバイアスが通常数十 mV であることと、正常動作時に駆動電極に 160kHz - 10V の信号が印加されるという仮定が厳しすぎることを考慮すると、共通アースの影響は無視してよい。

5.8 5章のまとめ

LTUのモデルに基づきPID制御器および外乱オブザーバの設計を行った。IVCの性能を制限している要因を詳しく検討し、性能を改善することができた。駆動系と信号系の静電的結合に対する対策を2種考案し、効果を確かめた。共通アースの影響をは小さいことがわかった。

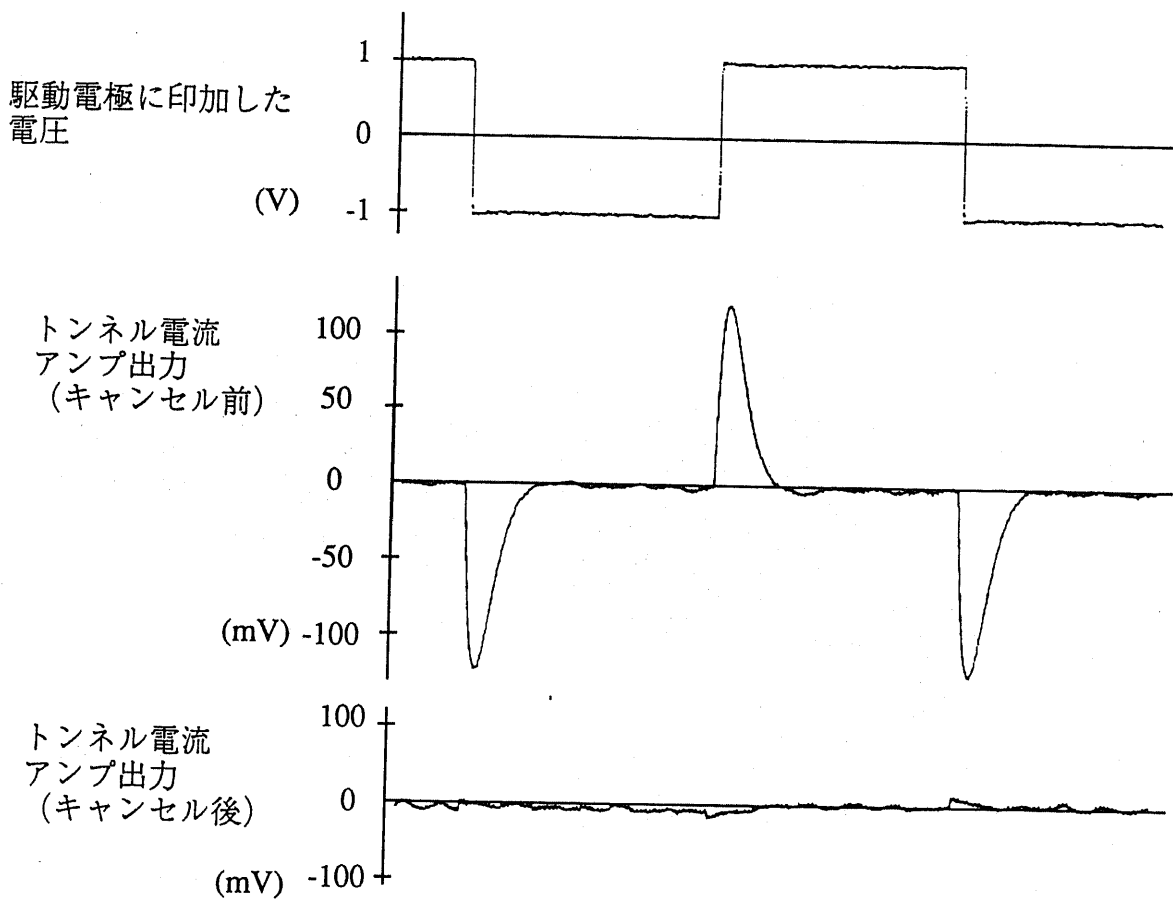


図5-25 補償電極型キャンセラの効果

駆動電極に方形波電圧を入力すると、IVC出力には微分波形が現れる。補償電極にかける逆極性の方形波電圧の振幅または補償電極の結合容量を、微分波形が最小になるように調整する。上図のキャンセル後は、補償前の逆極性の微分が出ているのでやや補償し過ぎになっている。

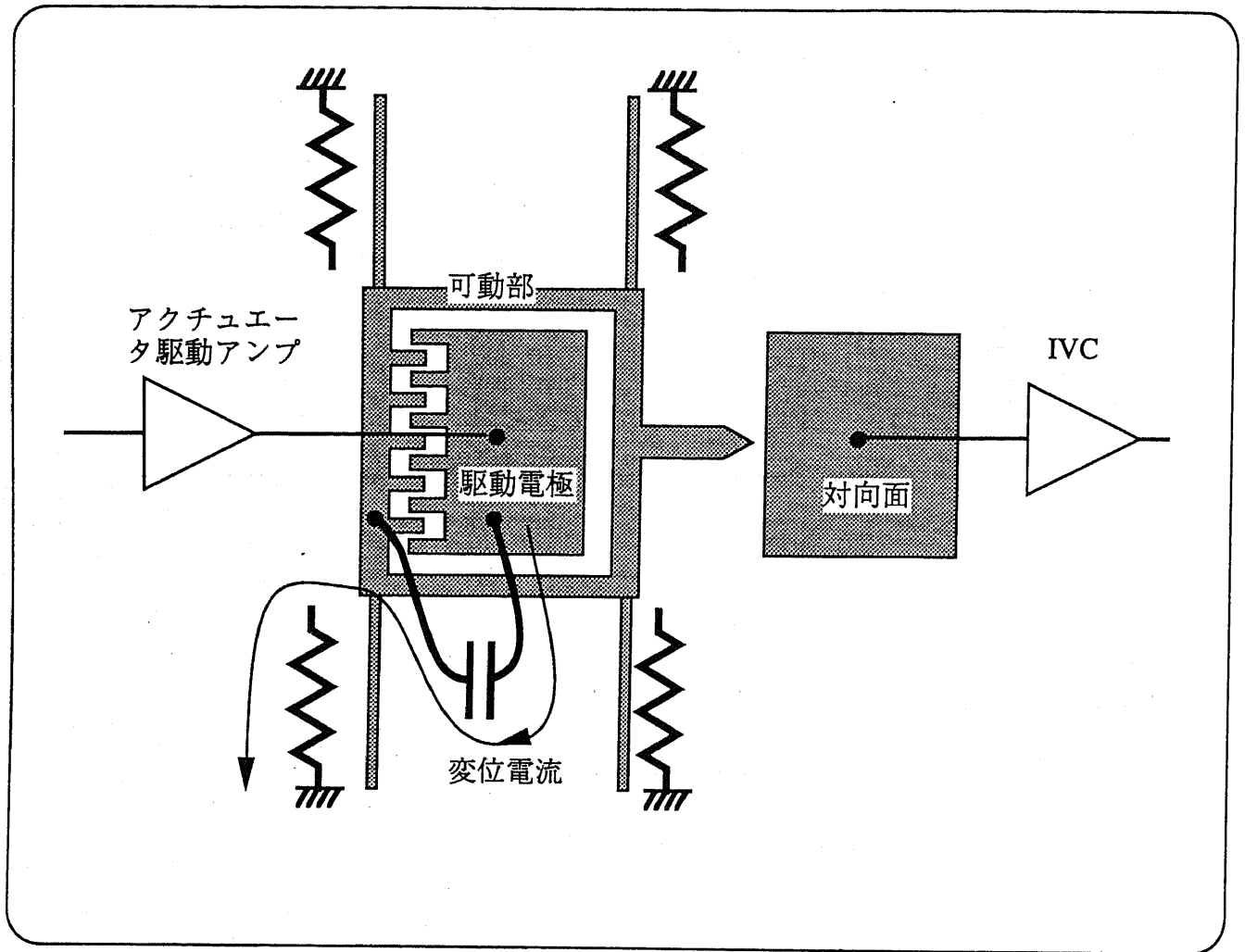
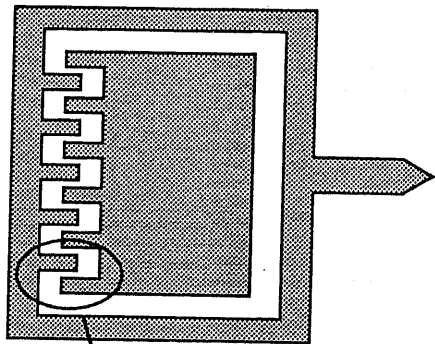


図5-26 櫛歯の容量を通過する変位電流によるトンネル電極への影響

支持梁の電気抵抗が有限の値を持つため、櫛歯間の容量を通して流れる変位電流がトンネル探針の電位を変化させる。

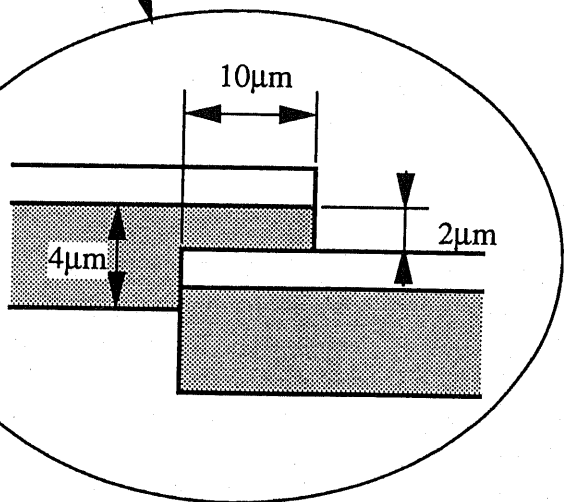


櫛歯 1 組あたりの静電容量は

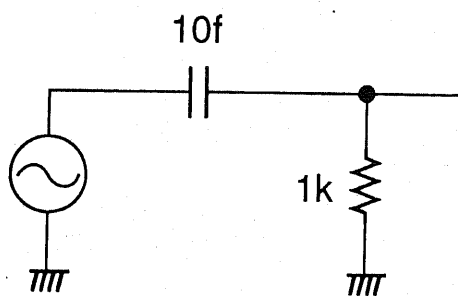
$$\begin{aligned}
 C_1 &= \epsilon_0 A / d \\
 &= (8.85 \times 10^{-12}) \times (4 \times 10^{-11}) / (2 \times 10^{-6}) \\
 &= 1.77 \times 10^{-16} \text{ [F]}
 \end{aligned}$$

櫛歯が 60 組あるとすれば、全静電容量は

$$C_{60} = 10 \text{ [fF]}$$



(a)



カットオフ周波数

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2\pi \times (10 \times 10^{-15}) \times (1 \times 10^3)} \\
 & = 1.6 \times 10^{10} \text{ [Hz]}
 \end{aligned}$$

(b)

図5-27 櫛歯間の容量の見積

(a) 櫛歯の容量を平行平板として計算する

(b) 櫛歯の容量と支持梁の抵抗で形成される微分回路の特性

6章 マイクロトンネルユニットの特性評価

LTUの特性評価として、2章で検討したLTUの使用法のうち、図2-2(b)のように対向面の変位をゼロ位法で検出する実験と、同図(c)のように自らトンネル電流の大きさを変化させる実験を行った。

6.1 ゼロ位法による変位検出

LTUの対向面に校正された変位を与え、ゼロ位法で変位を測定する。変位はLTUのアクチュエータ制御電圧の変化として測定される。この実験は空気中で行った。

6.1.1 実験装置

図6-1に実験装置を示す。変位の発生には、基板の外部に設置したPZTアクチュエータを用いることにした。対向面（1mm×20mm程度のシリコン基板に白金をスパッタで堆積したもの）はPZTアクチュエータに取付け、マイクロメータで前後することができる台に取付けた。LTUの探針を基板のエッジから外へ突き出させたデバイスを作り、対向面と向き合うように固定側に取付けた。対向面は装置内に組み込んだIVCに接続した。IVCは直流特性に優れたOPA128を使用したもので、変換抵抗は100M Ω である。

実験装置はアルミニウムのシールドケースで囲われている。実体顕微鏡のステージに除振のために厚さ20mm程度のスポンジを置き、その上に装置を置いた。図6-2は実験装置の接続を示したものである。図6-3に実験装置の写真を示す。

(1) 使用したデバイス

探針が基板のエッジから突き出したデバイスを作る必要がある。ここでは普通に製作したLTUの基板を、正しい位置で劈開して実現した¹¹⁾ 図6-4(b)。劈開する前のデバイスは、AFMカンチレバーと一体に集積したLTU（図6-4(a)）、として製作したものである¹²⁾。このLTUは特に探針が長く、劈開の位置の許容範囲が広いので都合がよい。

支持梁の幅は2 μ m、短支持梁の長さが約100 μ m、長支持梁の長さが約150 μ m、表面の金属は白金で厚さは水平面で約120nmであった。バネ定数を計算すると、約1.4N/mである。探針を尖らせるプロセスは省略したので、探針形状はくさび形である。なおAFM探針が対向しているのは、試験用のアクチュエータである。

これを金属製のステム¹³⁾に接着し、ワイヤボンディングにより金線で配線した。ボンディングワイヤのボール部分が完全に潰れていないのは、短辺約70 μ mと標準より小さい駆動電極からはみ出さないためである。隣接するLTUはワイヤボンダのキャピラリーで破壊し、探針を突き出したLTUを1個だけ残した（図6-5）。

(2) PZTアクチュエータ

20mm（長さ）×10mm×10mmの積層形PZTアクチュエータを使用した。図6-6(a)は、粗動台の部品に取付けたPZTアクチュエータである。図6-6(b)に示す無負荷時の印加電圧-発生変位は、カタログ値であるが、レーザ変位計で実測した結果、ほぼカタログ値通りであ

¹¹⁾ 文献 [12,42,44] など、プロセス技術でオーバハング構造を作ることは可能。ここでは基礎的な実験によって劈開で対応した。

¹²⁾ 図でわかるように、AFMカンチレバー部分は何回も折り返したバネになっており、片持ち梁ではなくてカンチレバーと呼ぶのは正しくない。しかし、AFMで原子間力を受けて変位を生じる構造をカンチレバーと呼ぶので、ここでもそれに倣う。

¹³⁾ DIPサイズの水晶振動子用パッケージの台の部分をステムと呼ぶ。メタルパッケージの「ベース」とも呼ぶ。

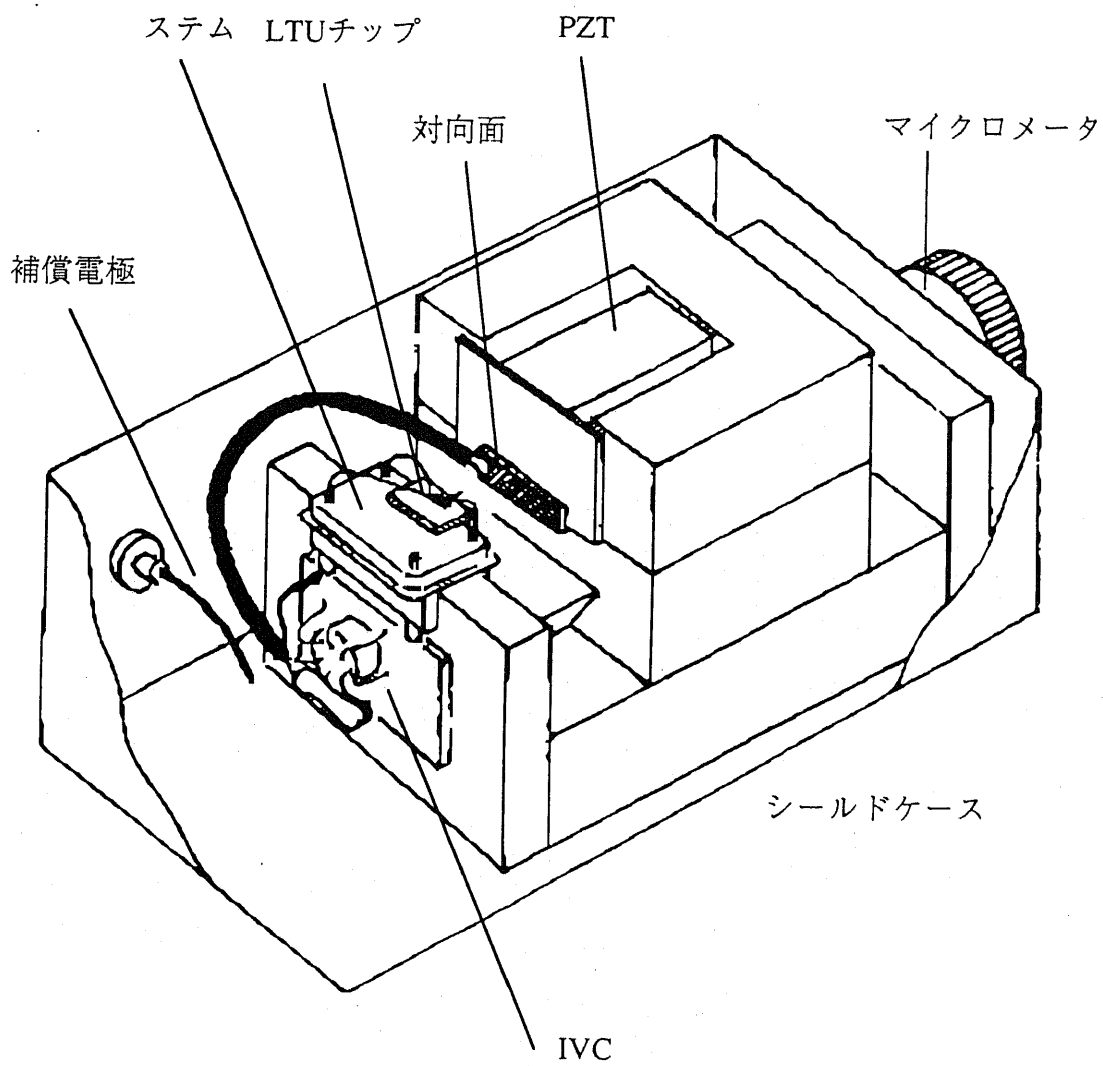


図6-1 チップ外のPZTで対向面に変位を与える実験装置

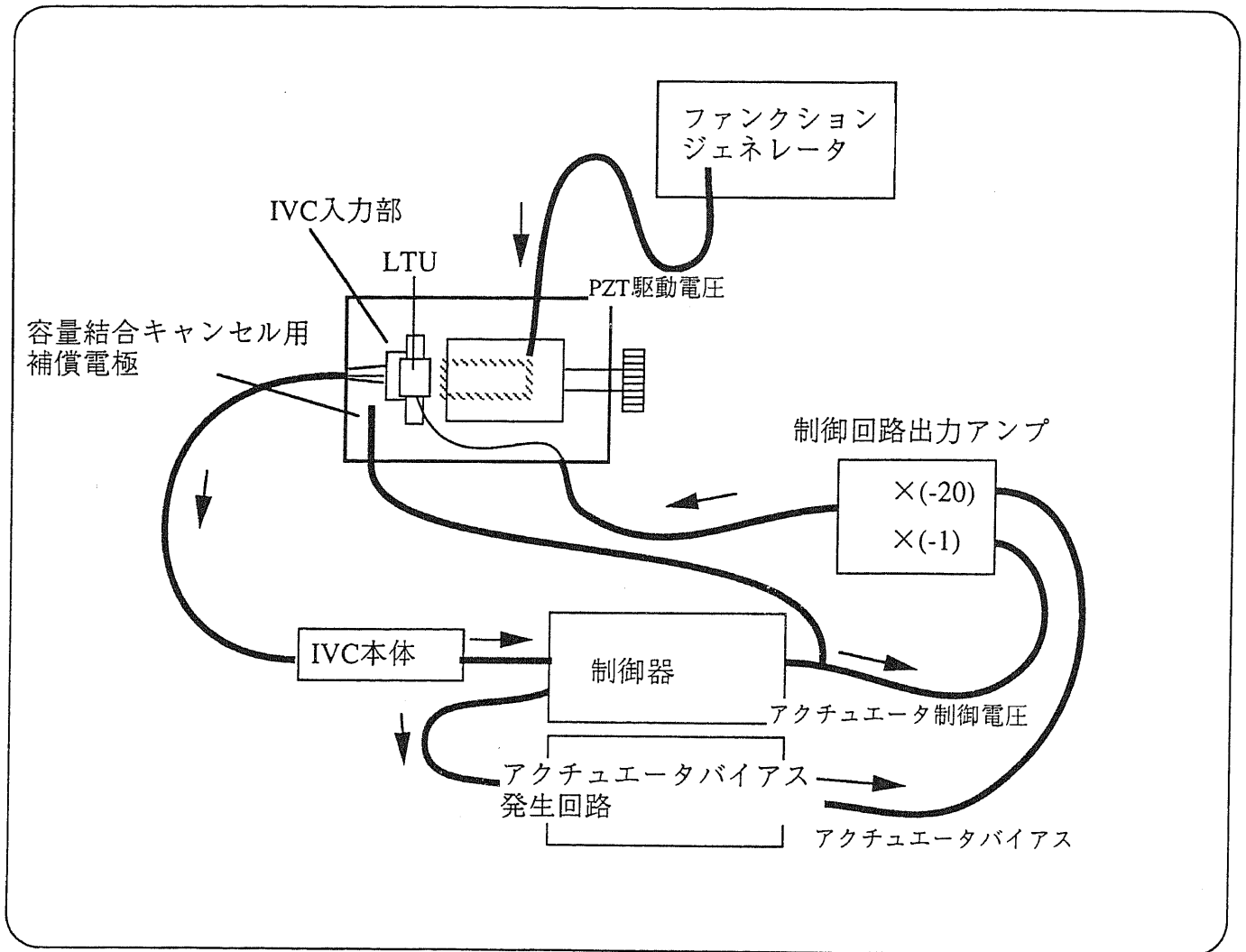


図6-2 LTUのゼロ位法変位検出実験の装置接続

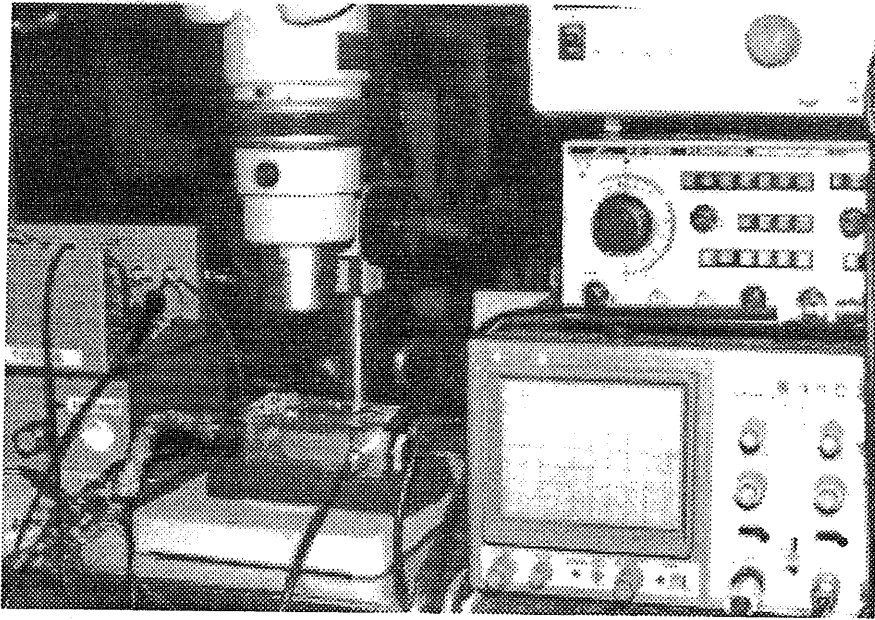


図6-3 実験装置の写真

顕微鏡の台には除振のためにスポンジが敷いてありその上に装置が乗せられている。他に除振は行わなかった。

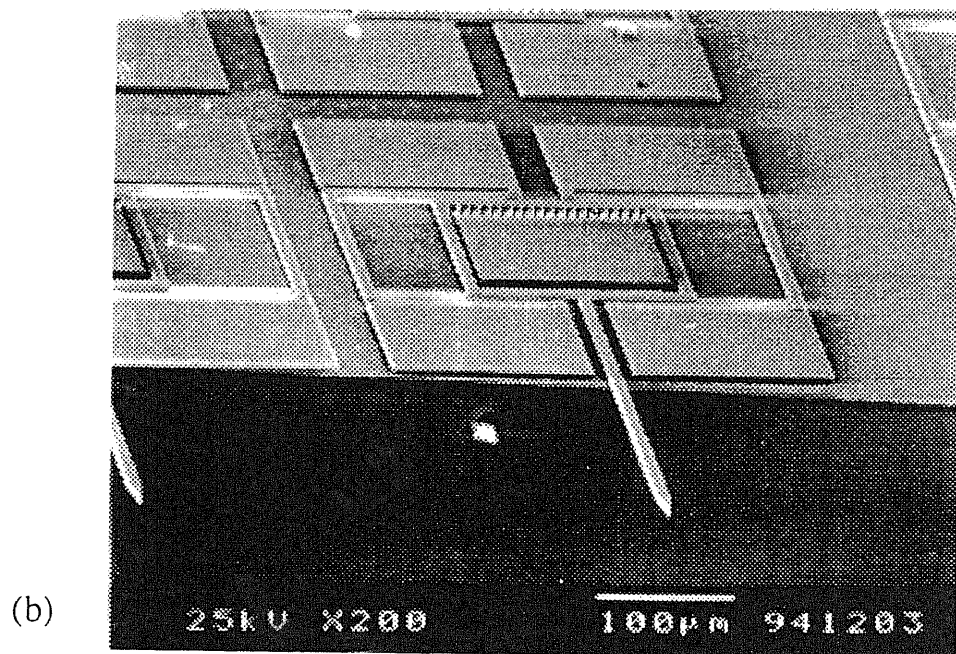
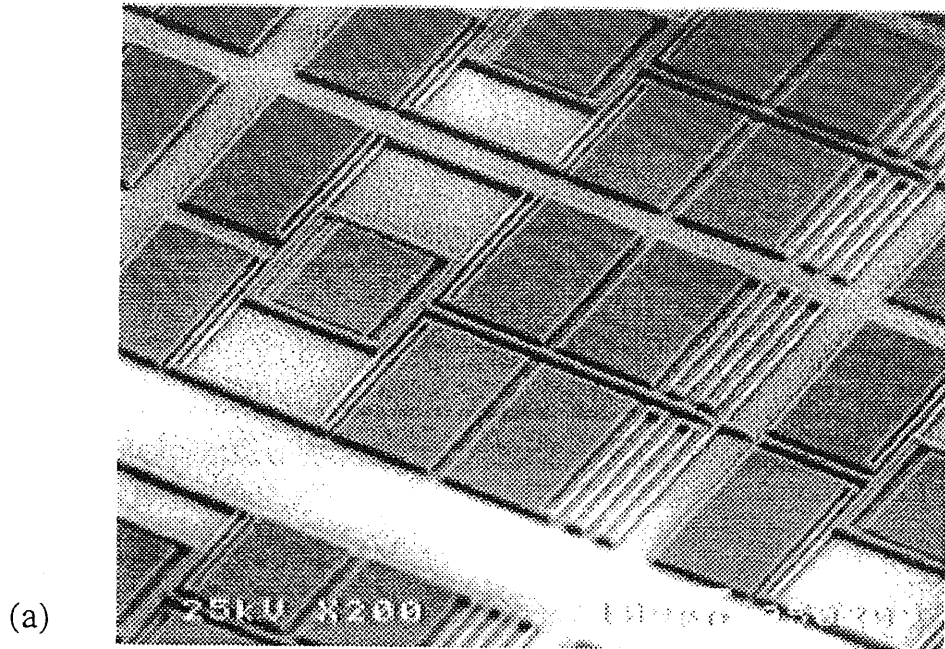


図6-4 AFM/LTU集積デバイスと劈開して作った、オーバハンダしたLTU

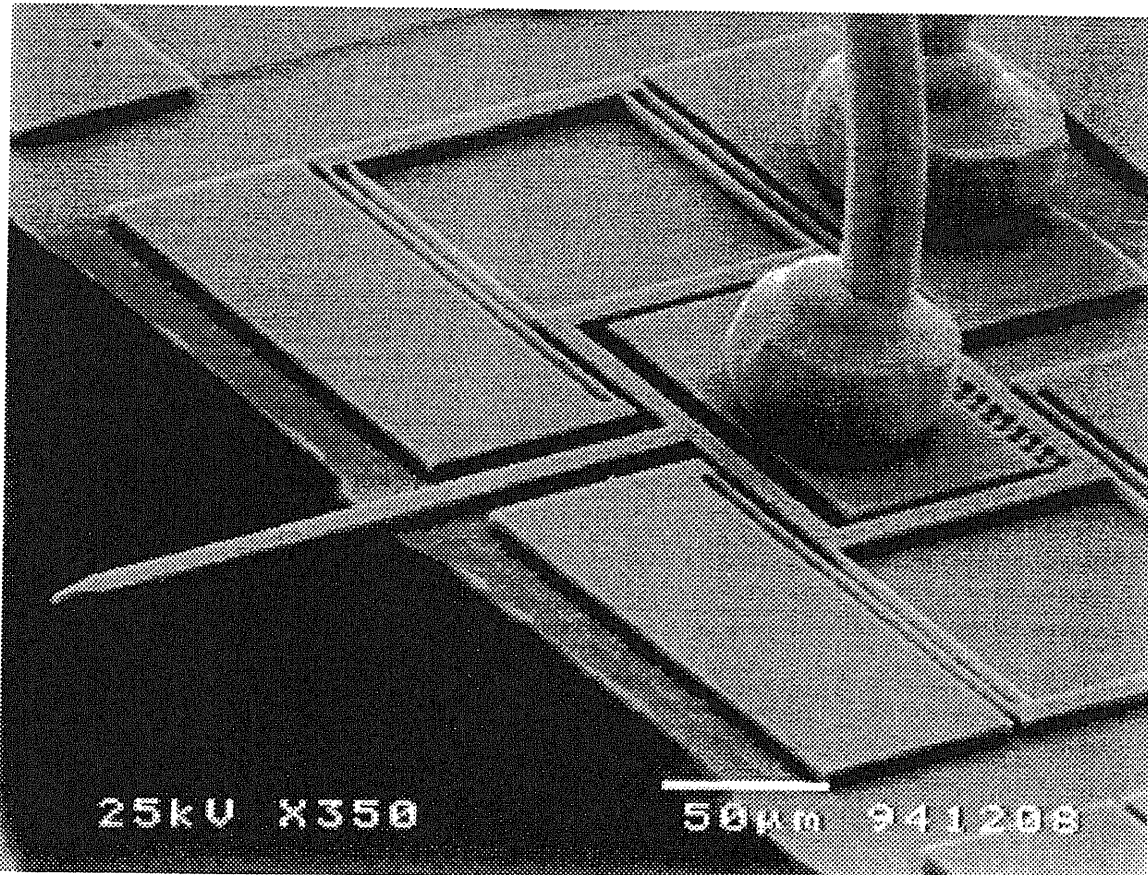
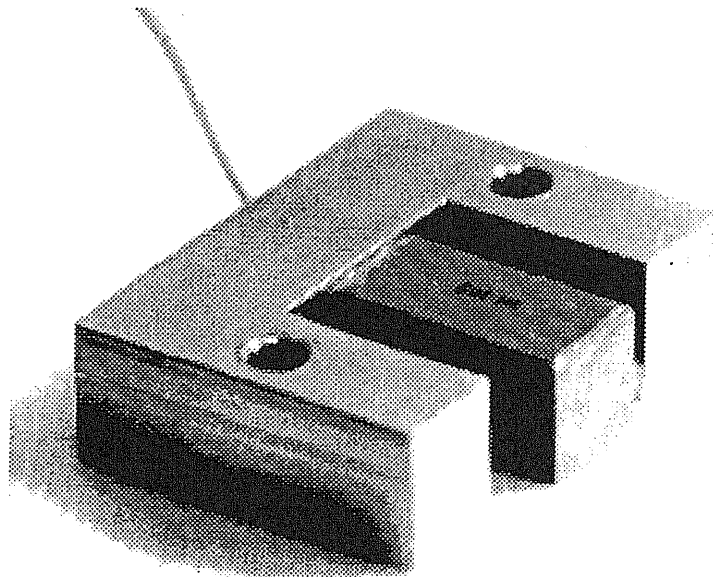
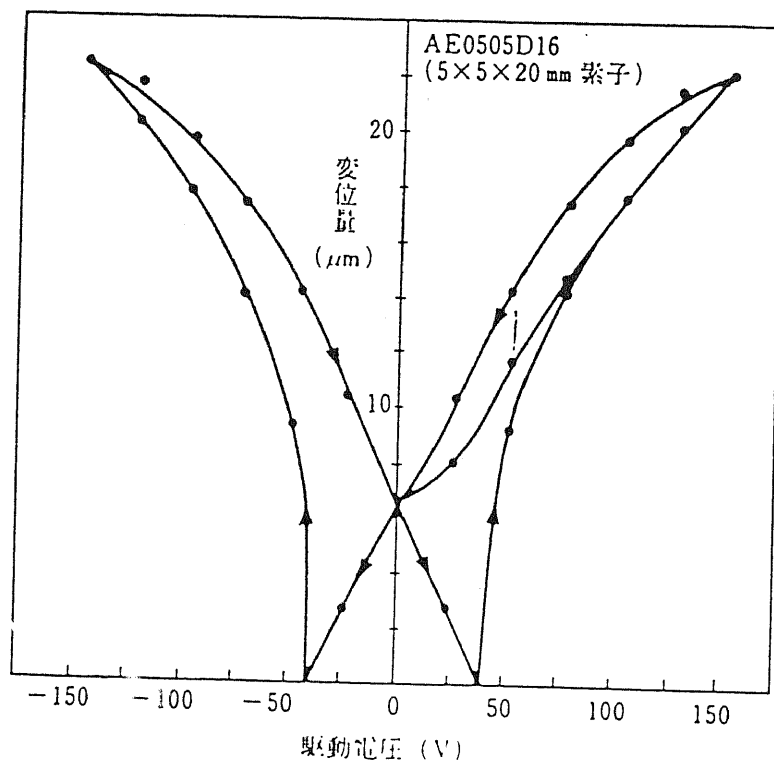


図6-5 ワイヤボンディングを施したオーバハンダLTU



(a)



(b)

このカーブは 5×5×20mm のアクチュエータのものである
 実験に使用したものは、断面が10×10mmであるが、作りの感度は同じとみなしてよいだろう。レーザ変位計で
 確認した結果、このカーブの一部（縦軸と交差している部分）と感度が一致した

図6-6 使用したPZTアクチュエータと電圧-変位特性

った。

(3) 容量性結合について

この実験では対向面が大きいので、アクチュエータ駆動電圧と対向面との容量性結合は非常に大きかったが、5章で述べた補償電極法でキャンセルした。その効果は5章ですでに述べた。

また、PZTアクチュエータ駆動電圧が変化するとトンネル電流回路に変位電流が流れるという結合があった。これはPZTの駆動電圧が直接対向面に結合している可能性と、IVCの電源線等から出ている直流電界の中を対向面が移動するときに変位電流が流れている可能性がある。この現象は駆動電圧の変化が速いほど強く現れたが、これだけではどちらの原因でも説明できる。PZTアクチュエータの周りは厳重にシールドされているので、おそらく後者が原因と思われるが、これは簡単に取り除けない。そこで、PZTにかける交流成分の周波数を10Hz程度に制限し、IVC出力での振幅数mVに影響を抑えた。

(4) 制御回路

PID制御を用いた。実験にはいくつかのLTUを用意したので、PIDパラメータは平均的なLTUモデル（バネ定数1N/m、共振周波数10kHz）に合わせた。外乱オブザーバは使用しなかった。

6.1.3 実験の方法

この実験装置の機械加工で製作した部分は、走査プローブ顕微鏡のような熱ドリフト対策は考慮されていない。したがってドリフトのためにすぐに動作点がずれてしまう。またマイクロメータの位置決め精度が $1\mu\text{m}$ 程度しかないため、LTU探針が最初に可動範囲の中央付近にある状態で実験を開始しなければならない。次のような手順で実験を行った。

トンネル電流を一定値に保つように制御回路を作動させておく。この段階では対向面が離れているので、アクチュエータ制御電圧はフルスイングしている。アクチュエータバイアスの調節回路も作動させておくが、アクチュエータ制御電圧が飽和しているので放っておくとアクチュエータバイアスも最大値まで行ってしまふ。そこで調節回路のポテンシオメータのつまみを手で押さえておく（ポテンシオメータはモータで駆動されているが、手で止めておけば駆動軸はスリップしている）。この状態で顕微鏡を見ながら対向面を接近させていく。このとき、トンネル電流の大きさで周波数に変調をかけた発振器にスピーカを接続しておき、実験者は電流の変化を音程で知ることができる。トンネル電流が流れたらポテンシオメータのつまみから手を離し、動作が安定するのを待つ。ドリフトで動作点がずれた場合、多少はPZTアクチュエータの直流電圧で補正できる。

動作が安定したらアクチュエータバイアスの調節回路を停止し、PZTアクチュエータに三角波を印加して対向面を変位させる。それに対してトンネル電流が一定に保たれていること、および記録したLTUのアクチュエータ制御電圧波形がPZTアクチュエータの電圧と相似的に変化^{註4}するかどうかを調べる。

図6-7(a)は実験装置内のLTUチップ、図6-7(b)は顕微鏡下でLTUに対向面を接近させているところである。

6.1.4 実験結果

実験結果を図6-8に示す。(a)はトンネル電流値1nA、トンネルバイアス110mVの場合のPZT駆動電圧とLTUアクチュエータの制御電圧を同時に測定したものである。アクチュエータ電圧は距離に換算してある。正の方向がLTU探針を押し向きの変位を意味する。制御電圧はこのあと-1倍され、直流電圧（この場合64Vの）と加算されてアクチュエータに印加させるので、正方向は探針を引っ込める向きである。

^{註4} LTUの静電アクチュエータの変位-電圧特性は2乗特性であるが、PZTアクチュエータで与える変位は小さいので、線形と近似する。

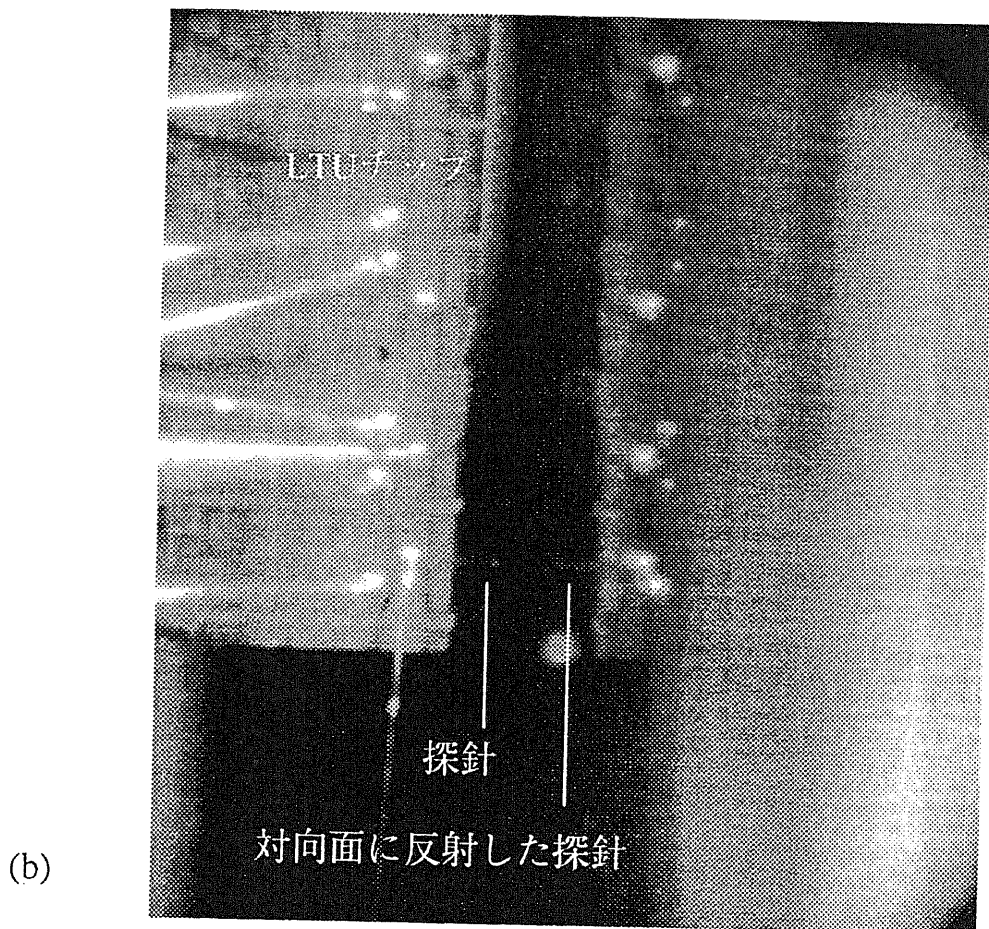
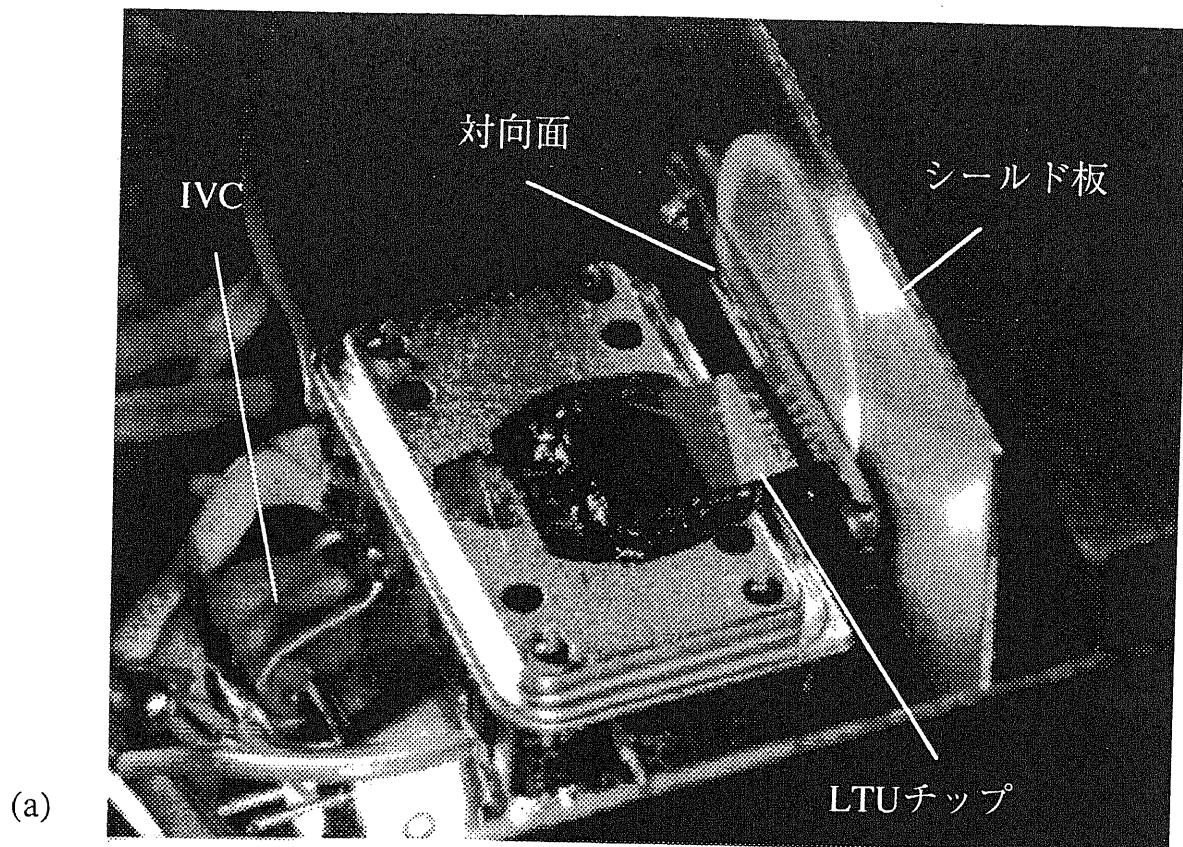
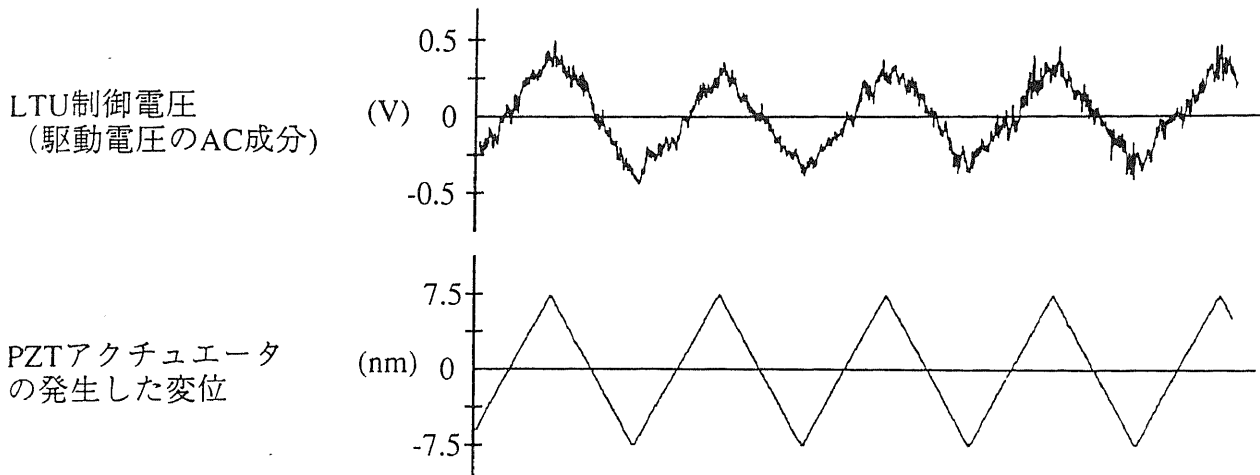


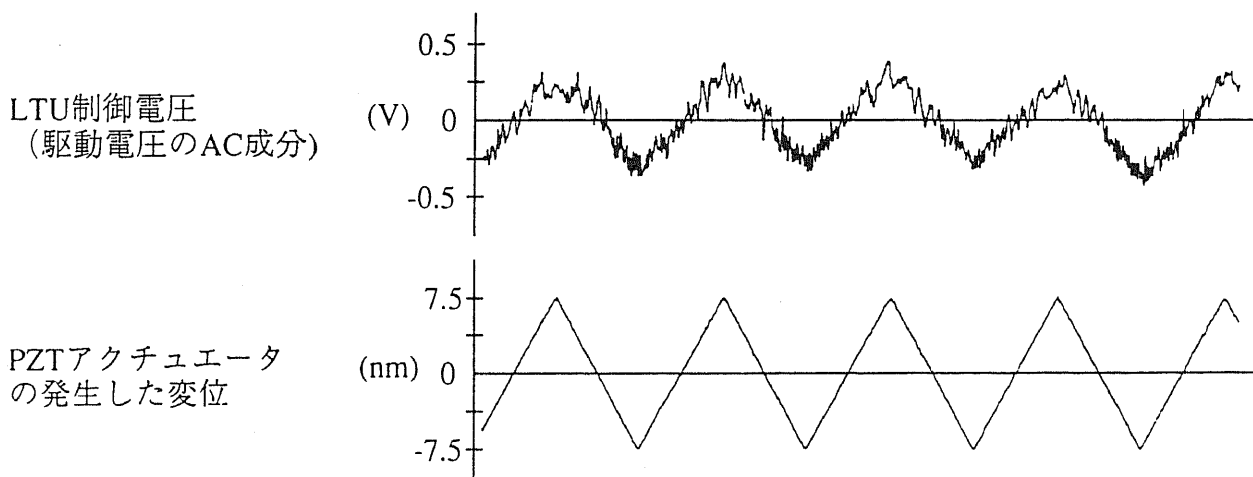
図6-7 実験装置内のLTU

(b)は探針を接近させている途中の顕微鏡の像



測定条件

分類	単純LTU
電流値	1nA
トンネルバイアス	110mV
周波数	10Hz
アクチュエータバイアス	64V

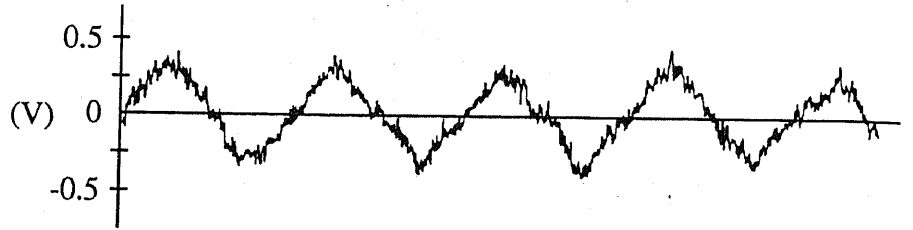


測定条件

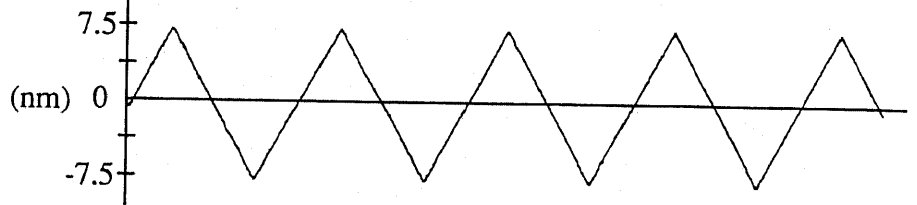
分類	単純LTU
電流値	1nA
トンネルバイアス	25m
周波数	10Hz
アクチュエータバイアス	64V

図6-8 PZTの変位とLTUの制御電圧

LTU制御電圧
(駆動電圧のAC成分)



PZTアクチュエータ
の発生した変位

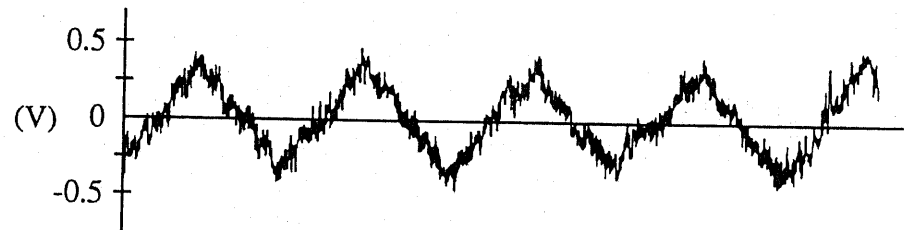


測定条件

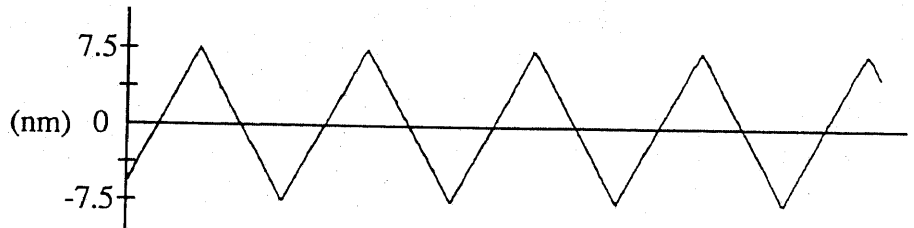
分類	単純LTU
電流値	10nA
トンネルバイアス	25mV
周波数	10Hz
アクチュエータバイアス	64V

(c)

LTU制御電圧
(駆動電圧のAC成分)



PZTアクチュエータ
の発生した変位



測定条件

分類	単純LTU
電流値	0.1nA
トンネルバイアス	25m
周波数	10Hz
アクチュエータバイアス	64V

(d)

図6-8 PZTの変位とLTUの制御電圧 (つづき)

LTUのアクチュエータ制御電圧は、PZTの駆動電圧に伴って三角波状に変化している。ノイズのために、数nmの検出まではできる程度の性能である。(b)はトンネルバイアスがそれぞれ110mVと25mVで、その他の条件は同じである。

また、(b)、(c)および(d)はトンネルバイアスが25mVで共通で、トンネル電流値がそれぞれ1nA,10nAおよび0.1nAである。このように、バイアス電圧を変えても一定に保つトンネル電流の値を変えても、いずれも安定に動作しており、感度もほとんど変わらない。

図6-9は、PZTの駆動電圧をLTUアクチュエータの制御電圧をプロットしたものである。同じデバイスを使用したか、一旦対向面を離して再度実験を行ったため、動作点が変わり、アクチュエータバイアスが48Vに変化している。グラフはほぼ直線になっているが、僅かに上に反っているのは、静電アクチュエータの2乗特性のためである。探針を引っ込めるということは（直流成分と制御電圧を加算した絶対値としての）駆動電圧を小さくすることに相当し、単位電圧あたりの変位量が減るから、制御電圧はより大きく変化する必要がある。

図6-10は、以上の実験中、トンネル電流が一定に制御されていることを示すものである。

6.1.5 考察

図6-8より、この実験では数nmの変位をLTUを用いて測定できることがわかった。測定限界の下限を下げるには、ノイズを減らさなければならない。この実験では、前述したようにシールドケース上面が開放されており、下からの除振はスポンジを敷いただけで、ケーブルを伝わって侵入する振動には何ら対策を講じなかった。振動と音響の影響を除去すれば、ノイズを減らせる可能性がある。

使用したマイクロメータの精度が低いため、対向面を探針に当ててしまうことが何回もあったが、LTUが破壊されることはなかった。実験に用いたLTUのZ軸可動範囲は前後に5 μ m程度あることに加え、支持構造のバネ定数が低いためである。

6.1.6 結論

LTUがゼロ位法による変位検出に使用できることが証明された。

6.2 AFMの変位センサとしての基礎実験

AFMカンチレバーとLTUを同一プロセスであらかじめ集積した形で製作した、AFM/LTU集積デバイスを用い、AFMカンチレバーの変位をLTUで測定する実験を行った。図6-4(a)にAFM/LTU集積デバイスのSEM写真を示した。ここでは、図6-11のようにAFM探針が基板のエッジから突き出たものを作り、この探針に外部から変位を与えた。

6.2.1 実験装置

実験装置は単純なLTUの場合と同じものを用いた。ただし、PZTアクチュエータの先端には水晶板を貼り付け、これを介してカンチレバーに変位をおこさせる。

6.2.2 実験結果

図6-12に結果を示す。上の波形は $\text{Log}(I_t)$ 、下の波形はアクチュエータ制御電圧である。(a)と(b)は加えた変位の振幅が異なる。PZTの変位に追従してLTUのアクチュエータ制御電圧は直線的に変化している。

6.2.3 考察

先に行った単純なLTUの実験が成功したので、この実験が成功することはほぼ間違いなかったのであるが、同一プロセスで作られた微小構造の変位を検出したという意味がある。これの方が想定しているLTUのアプリケーションの実際に近い実験である。

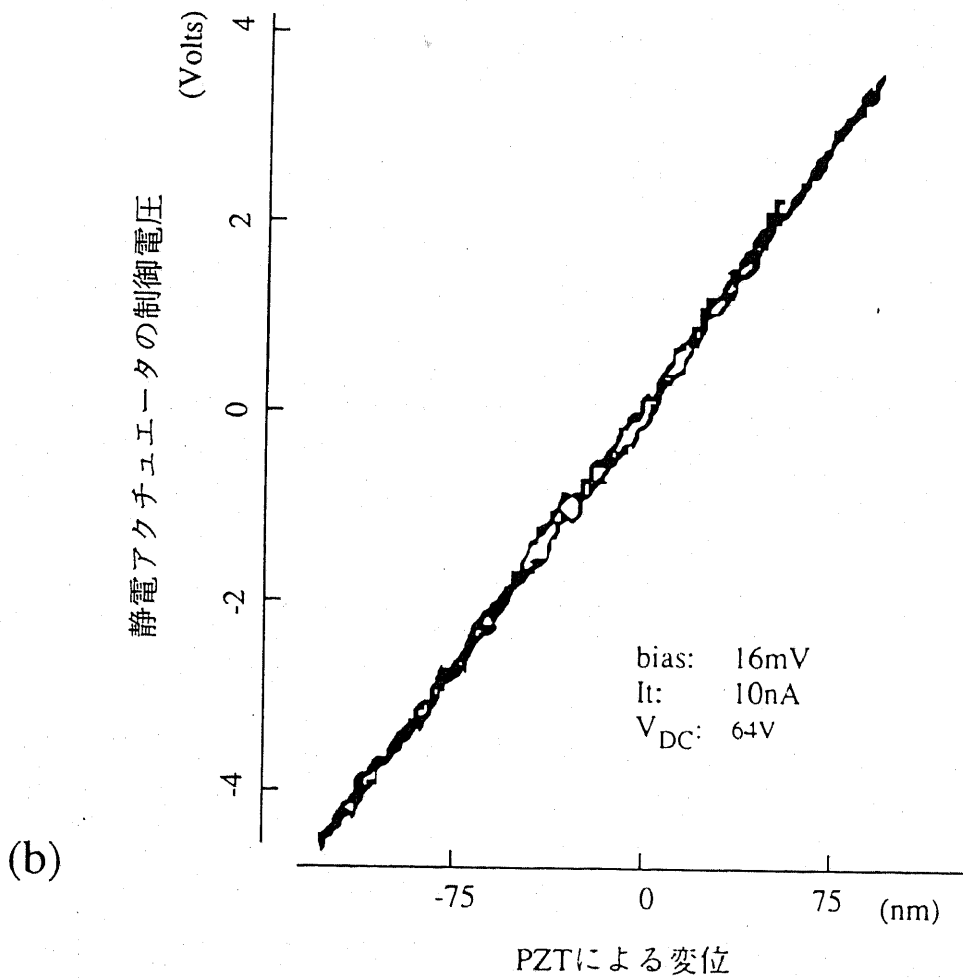
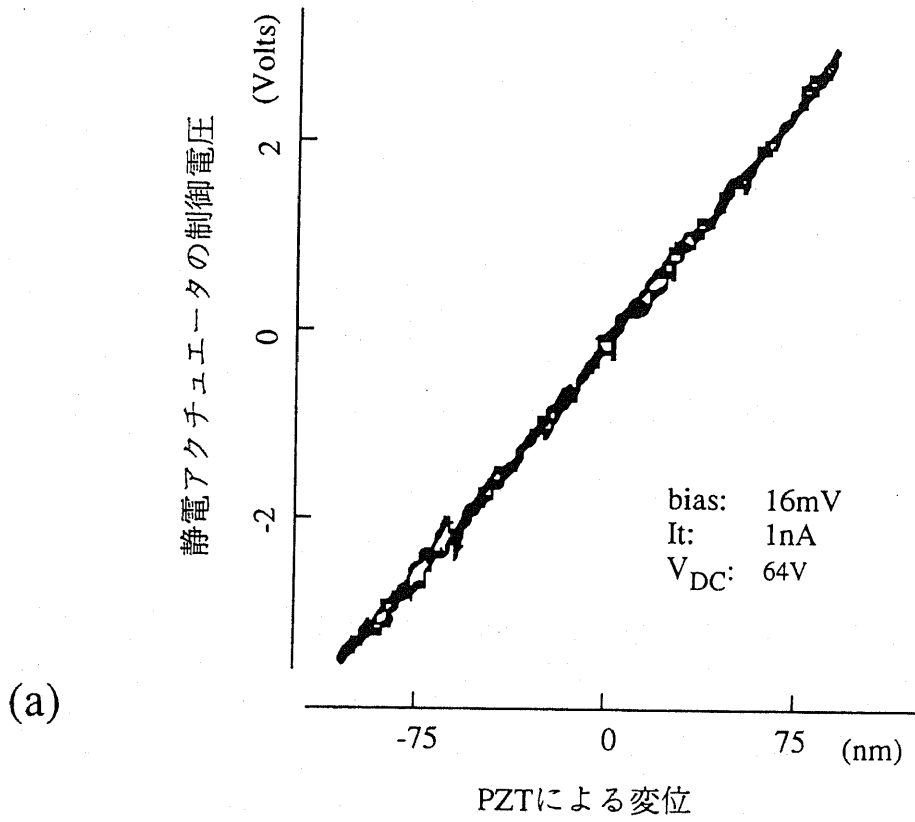
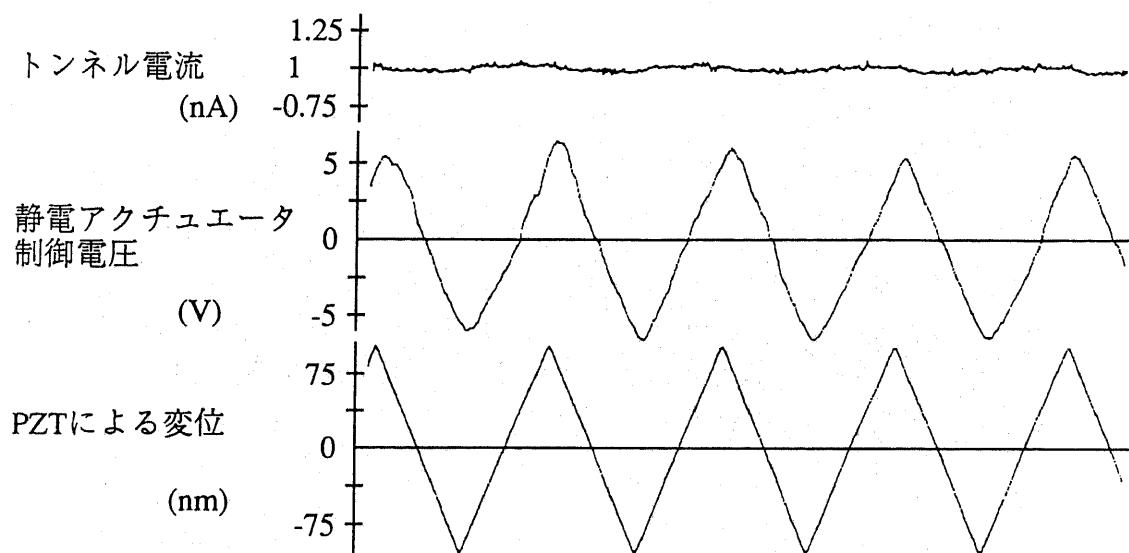


図6-9 PZT変位-LTU制御電圧曲線のプロット



測定条件

分類	単純LTU
電流値	1nA
トンネルバイアス	16mV
アクチュエータバイアス	48V

図6-10 トンネル電流が一定に保たれていることの確認

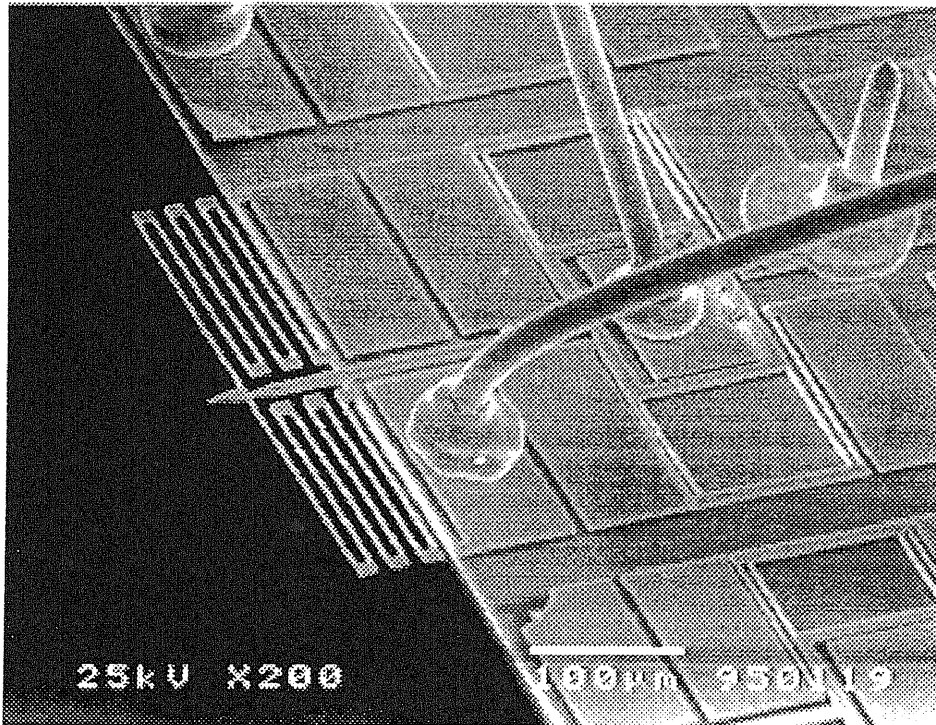
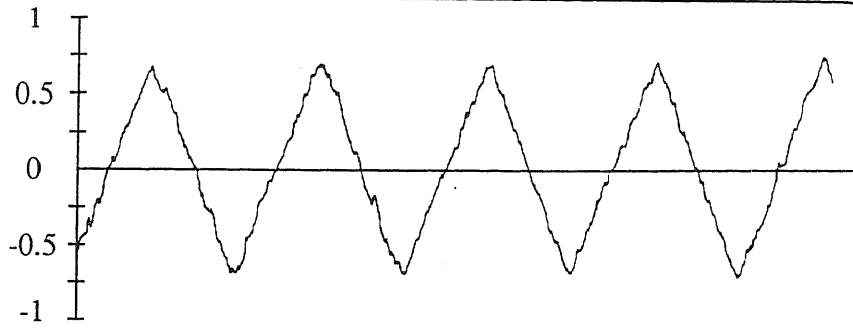
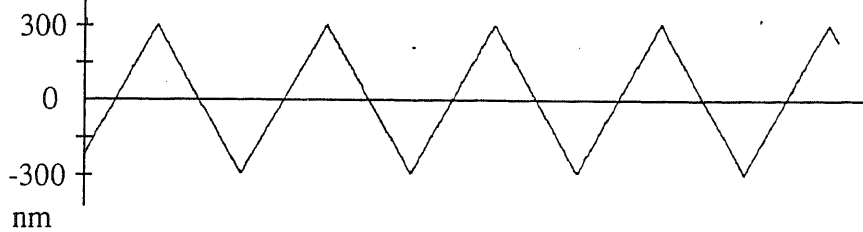


図6-11 オーバハングしたAFMカンチレバー

LTU制御電圧
(駆動電圧のAC成分)



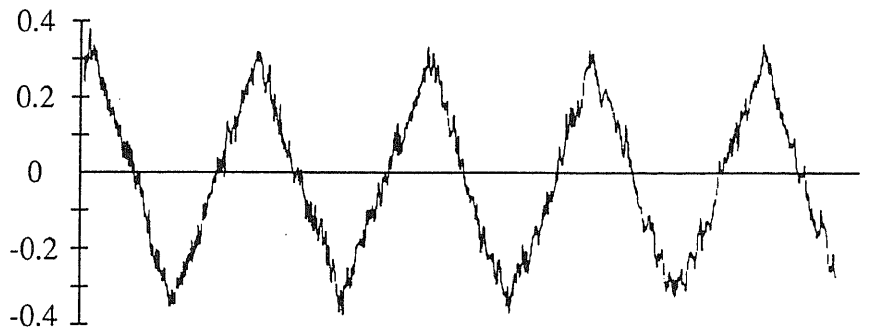
PZTアクチュエータ
の発生した変位



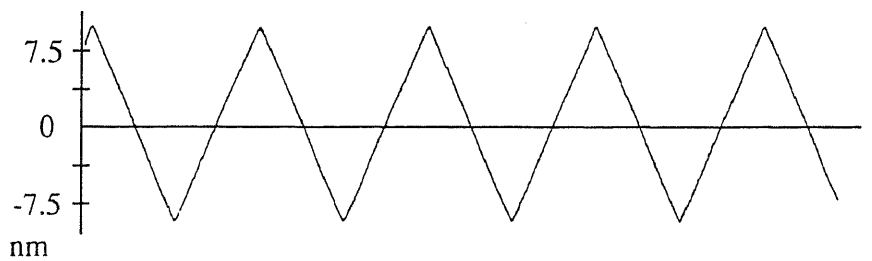
測定条件

分類	AFM/LTU
電流値	10nA
トンネルバイアス	26mV
周波数	10Hz
アクチュエータバイアス	100V

LTU制御電圧
(駆動電圧のAC成分)



PZTアクチュエータ
の発生した変位



測定条件

分類	AFM/LTU
電流値	10nA
トンネルバイアス	26mV
周波数	10Hz
アクチュエータバイアス	100V

図6-12 PZTの変位とLTUの制御電圧 (AFM/LTU集積デバイス)

AFMは実際には、カンチレバーの変位が一定（したがって原子間力一定）に保たれるよう、試料をZ軸方向に微動させる。実際のAFMにこのデバイスを使用する場合、LTUのトンネル電流がわずかに変化すると、AFMの制御回路がAFM自身のアクチュエータにフィードバックをかけることで、トンネル電流を元に戻すように動作する。結果的にトンネル電流は一定に保たれる、という意味でやはりゼロ位法であるが、探針とカンチレバーの距離を調節するのはLTUのアクチュエータの仕事ではない（図2-4(a)に相当）。したがって、ここでの実験はAFMの実際とは異なっている。

6.2.4 実験結論

同一基板に集積した微小構造物の変位を測定するアプリケーションに、LTUが使用できることが実証された。

6.3 STM像をとる基礎実験

LTUをZ軸アクチュエータに用い、凹凸のある試料を対向面としてこれを外部に置いたXYスキャナで走査すれば、STM像が得られるはずである。

6.3.1 実験装置

実験装置は、上述の実験で使用した装置のPZTアクチュエータをチューブ形のPZTアクチュエータに変更して行った。図6-13に使用したチューブスキャナを示す（長さ40mm、直径14mm）。内側は全面がひとつの電極になっており、接地して使用する。外側はXYスキャン用に4つにわかれた電極と、Z軸の長さを変えるための円筒状の電極がついているが、ここではZ軸の電極は使用しない。

図6-14に示したように、X方向走査信号として0.2Hz,約4Vppの三角波を、Y方向走査信号として20Hz,約5ないし6Vppの鉅歯状波を、2台のファンクションジェネレータからそれぞれ発生させ、これらをオシロスコープのXおよびY入力に接続した。また、これらの電圧をそれぞれ20倍に増幅してチューブスキャナに印加した。トンネル電流指令値は1nAに固定し、LTUのアクチュエータ制御電圧をオシロスコープのZ軸（輝度変調）に入力した。

(1)使用したデバイス

パラメータはゼロ位法に用いたものと同じである。探針を尖らせるプロセスを施したLTUを用いたが、実験後SEMで観察すると探針の先端が折れていた。この理由は後で述べる。

(2)観察した試料

試料として、GaAs基板に干渉露光で375nmおきにストライプをきり、エッチングしたものに、白金を約80nmの厚さにスパッタしたものをを用いた。走査電子顕微鏡で観察したが、解像度が低く構造の正確な深さはわからなかった。

6.3.2 結果

図6-15に得られた像を示す。試料のストライプ状形状を反映した像が得られた。

6.3.3 考察

像を取る際、電流は完全には一定に保つことができず、試料の凸の部分では電流が指令値を越えてしまった。その原因は凹凸が深すぎるためではないかと思われる。2値画像になっているのは、電流が指令値を越えた時に制御電圧が飽和してしまうため、中間の輝度が出なかったことが原因である。オシロスコープの輝度変調の直線性が悪いためではない。探針の先がかけてしまったのは、試料の取付けが斜めになっていたため、大きく走査し

* 江口匡史氏に提供していただいた。

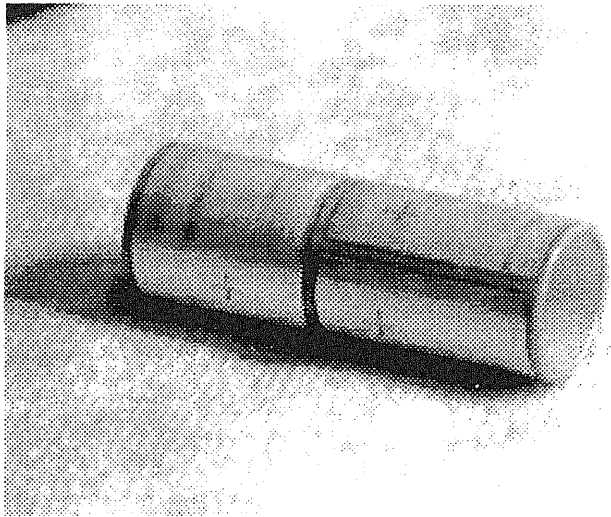


図6-13 実験に使用したのと同型のチューブスキャナ

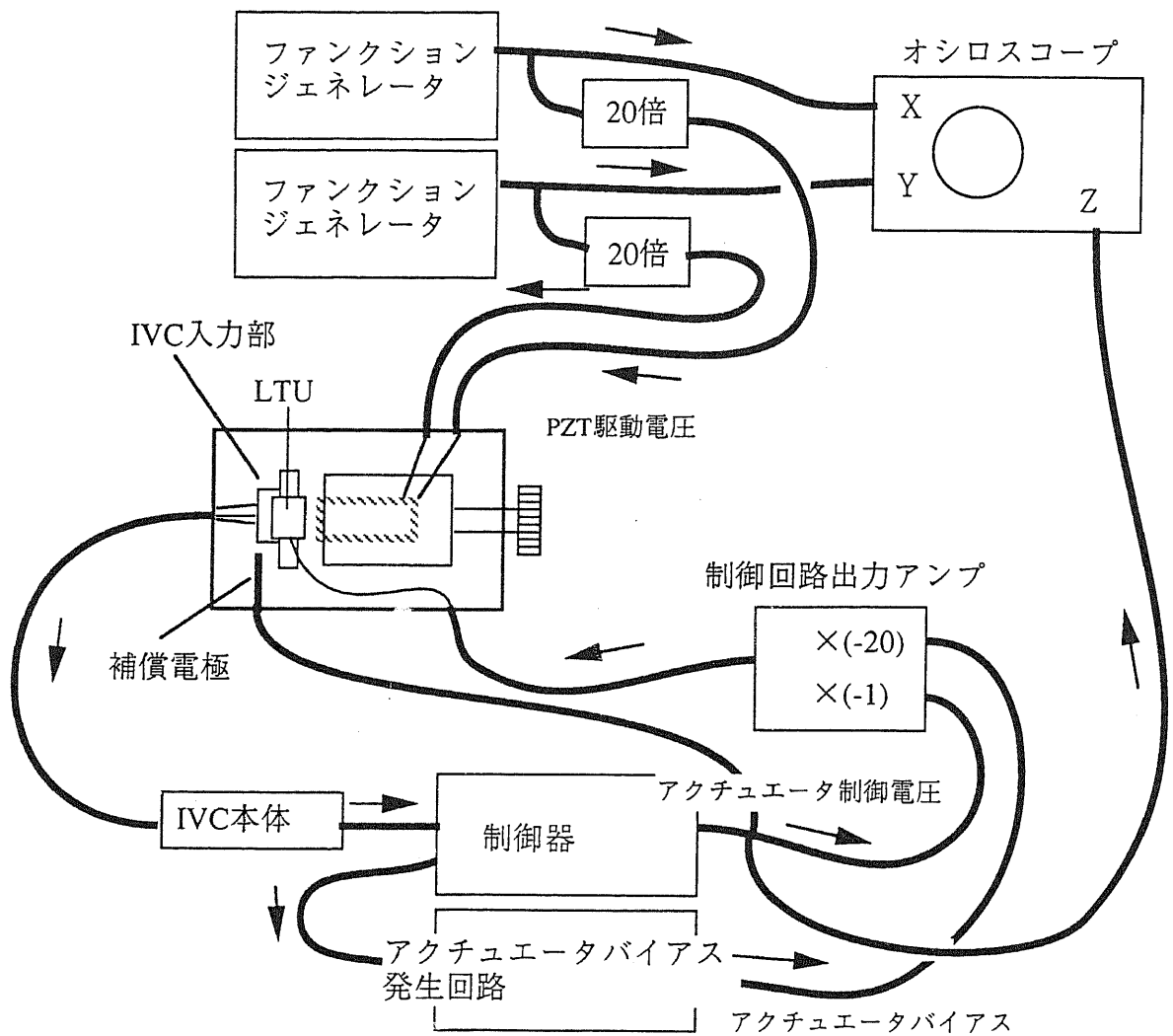


図6-14 STM像をとる実験の装置配線

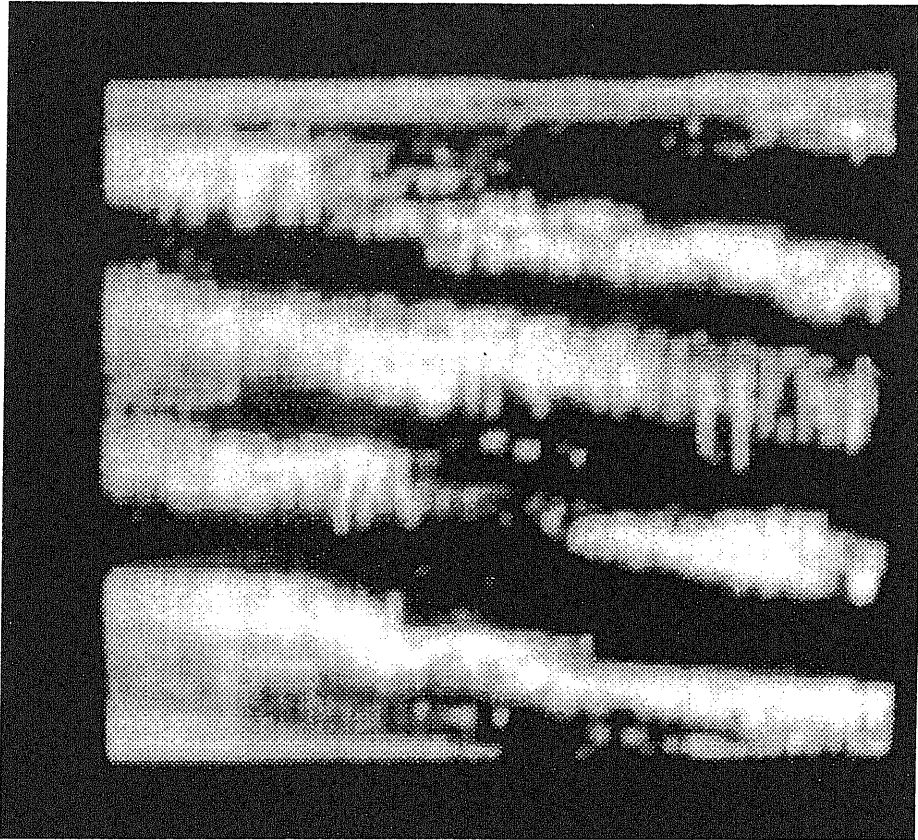


図6-15 得られたSTM像

た際に探針を引っ掛けてしまったためと思われる。

6.4節以下で議論することを先取りする形になるが、仮に表面が水などで汚染されているとしたとき、LTUは剛性が低いために、走査にともなって探針が横方向に引っ張られる可能性がある。

6.3.4 結論

STM像を得る実験を行った。結果はあまり鮮明でなく、改善の余地がある。走査プローブ顕微鏡のマルチプローブに使用する場合、もっと剛性を上げる必要があるかも知れない。剛性を高める方法については、7章で議論する。

6.4 トンネル電流値と制御電圧の関係--- (空气中)

アクチュエータの力でトンネルギャップを変化させ、トンネル電流と探針の変位の関係を求める実験を行った。実際にはトンネル電流を指令値に従って変化させ、そのときの変位をアクチュエータ制御電圧から求めるという方法をとる。

この種の実験は、以前にプローブステーションを用いて空气中で行ったところ、疑問な点が出てきたため、極高真空中でも行う必要が生じた。プローブステーションの実験は、制御器や実験装置が未熟であったため、非常にノイズが多かった。ここでは、後の真空での実験と同じ装置を使用して、真空排気する前の真空槽内で行った実験について書くことにする。

真空槽を開けるときは乾燥窒素を充填するので、実際には90%以上の窒素雰囲気で行っていることになるが、空气中と超項真空以上に排気された環境での違いは気圧とデバイス表面の汚れにあるので、本当の空气中で実験しても特性上の違いは見られない。真空槽が良好なシールドケースの役割をはたすため、空气中の実験のために別の実験装置を用意するよりも便利である。

6.4.1 実験装置

前述したように、実験は排気する前の真空装置で行った。

(1) 真空装置

実験に使用した真空装置の外観を図6-16に示す。補助排気系としてターボ分子ポンプを備え、主排気系としてスパッタイオンポンプとチタンゲッタポンプを持つ、円筒形の真空槽である。本装置の仕様を以下に記す。

- ターボ分子ポンプ (UTM-50)
 - 排気速度 N_2 : 50 lit./sec.
 - H_2 : 40 lit./sec.
 - 最大圧縮比 N_2 : $> 10^8$
 - H_2 : 10^3
- ロータリポンプ (GVD-50A)
 - 排気速度 50 lit./min. (50Hz)
- スパッタイオンポンプ
 - 排気速度 100 lit./sec.
- チタンゲッタポンプ
 - 排気速度 1500 lit./sec.
- 到達圧力 5×10^{-11} Torr以下
- イオンゲージ (GI-N7)
- エクストラクタゲージ (IONIVAC IN520)

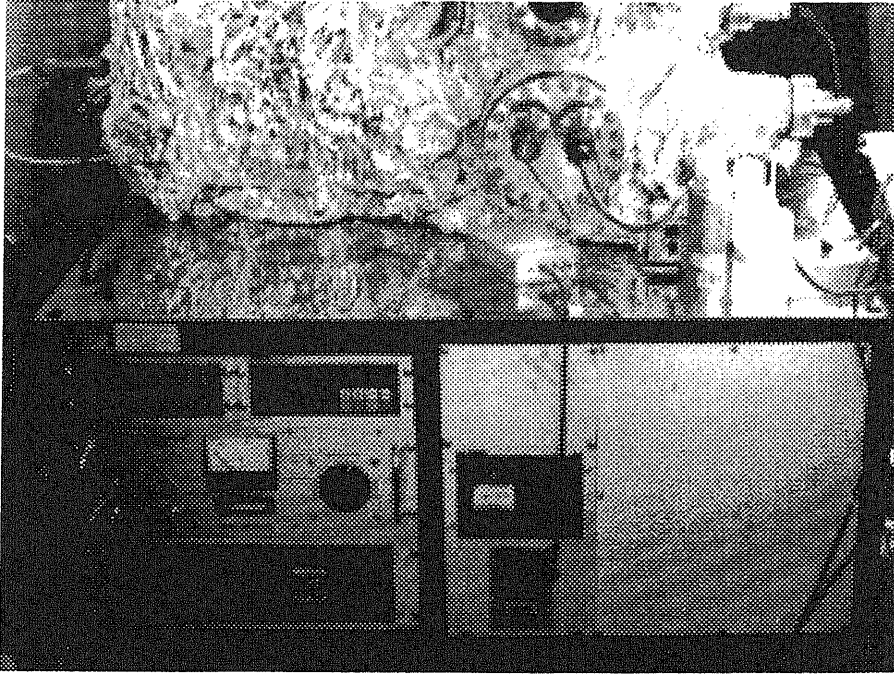


図6-16 実験に使用した極高真空装置

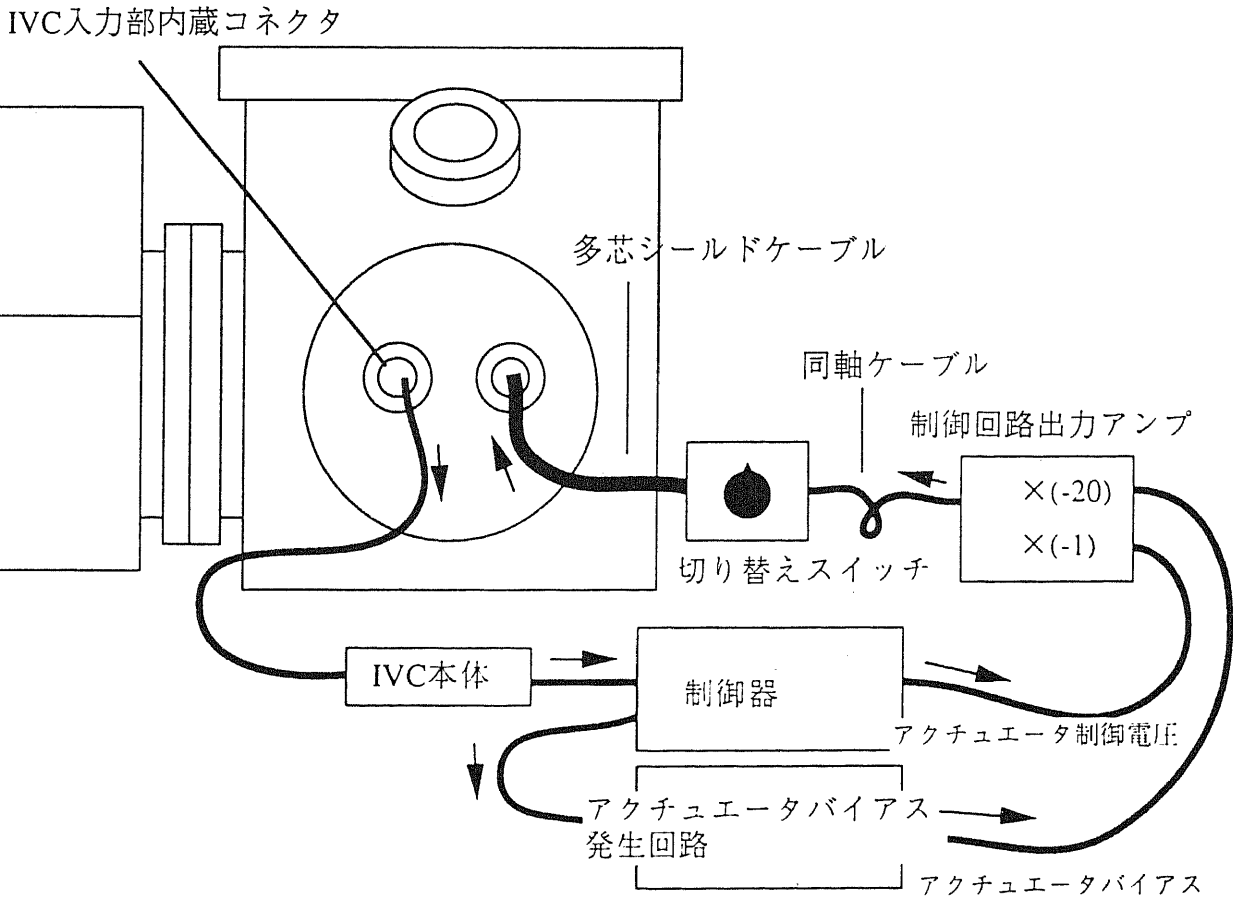


図6-17 真空実験装置配線図

200°Cにベークし、スパッタイオンポンプとチタンゲッタポンプで排気しながら常温まで冷却すると、大気開放から 5×10^{-11} Torrまで、2日以内に 5×10^{-11} Torr以下に到達する。最高のデータでは 1×10^{-12} Torrに達した。

前面に24ピンのフィードスルーが2個ついた203mmのフランジがあり、このフランジの内側に棒状の試料台を取付け、その先端に近い位置にLTUチップを乗せた24ピンDIPのステムをねじ留めした。ステムの足とフィードスルーの内側のピンとは真空仕様のシールド線で接続した。このシールド線はポリイミドで絶縁、被覆されているので、300°C以下のベークでは分解せず、汚染源にならない。

シールド線の芯線にはフィードスルーの真空側専用のコネクタピンを圧着し、シースは3本づつまとめてやはりコネクタピンを圧着し、それぞれフィードスルーのピンに接続した。シールド線のもう一方の端には外径1mmの銅パイプを圧着し、パイプの他端を丸ピンICソケットのピンに圧着し、ステムの交換がICソケットの丸ピンの抜き差しで行えるようにした²⁶。駆動側、トンネル電流側それぞれに9本の線を用意し、1度の真空排気につき、1個のチップに載った9個のデバイスを実験できるようにした。

右のフィードスルーはアクチュエータ駆動電圧専用、左のフィードスルーはトンネル電流専用とした。制御回路の出力アンプの出力をロータリスイッチで9本のデバイスに切り替えられるように装置した。トンネル電流は、フィードスルーの大気側コネクタ内に組み込んだIVCに1本だけコネクタピンを付け、実験するデバイスを変える度にピンを差しかえるようにした(図6-17)。

LTUのチップは、24ピンDIPのステムにねじまたはサマリウムコバルト磁石で固定し、ワイヤボンディングによりピンと接続した(図6-18)。図6-19は、これが真空槽内に取付けられたところをビューポートから見たもので、光源はチタンゲッタポンプのフィラメント²⁷である。

なお真空装置による実験では除振装置は使用していない。

(2) 使用したデバイス

使用したデバイスは、3章で示した標準寸法のLTUで、表面の金属は水平面上の厚さ約120nmの白金である。

(3) 制御器

空気中の実験ではLTUは非常に安定であり、制御則は積分制御で十分に制御でき、しかも積分時定数を $10\mu\text{s}$ から1msまで変えても安定であった。言い換えると制御器のゲインが変化しても影響がないということで、対数変換器も必要がなかった。図6-20に制御器のブロックダイアグラムを示す。IVCはOPA128を使用、変換抵抗 $100\text{M}\Omega$ である。

6.4.2 実験の方法

対数変換器を省略したので、トンネル電流の対数 $\text{Log}(I_t)$ ではなくトンネル電流 I_t そのものを制御する形になる。指令値 I_{ref} として、ファンクションジェネレータから時間の指数関数として変化する電圧を入力する(したがって I_t もこれと同じ値になる)。このとき観測される電流がトンネル電流であれば、トンネルギャップは一定のレートで変化する筈である。

6.4.3 実験結果

トンネル電流とアクチュエータ制御電圧を図6-21に示す。制御電圧の波形は直線になることもあるし、上に凸な曲線になることもある。

²⁶ ベーク時高温になるため、樹脂を使用しているICソケットは使用できない。ソケットをばらしてピンは利用した。

²⁷ 実験は大気圧で行ったが、装置のセットアップの説明として、真空時の写真を使った。

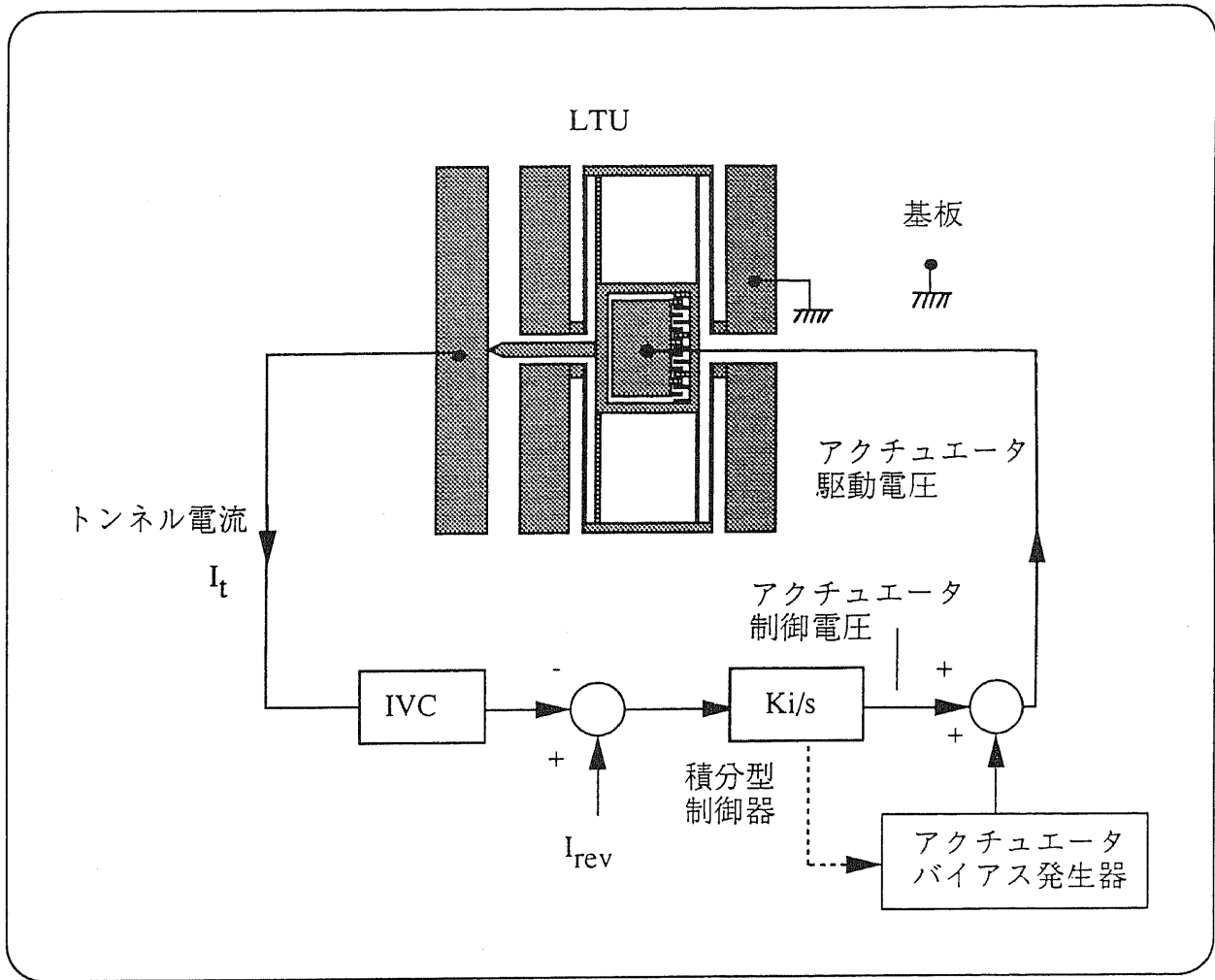


図6-20 積分制御によるLTUコントローラ



図6-18 メタルパッケージのベースに取付けられたLTU

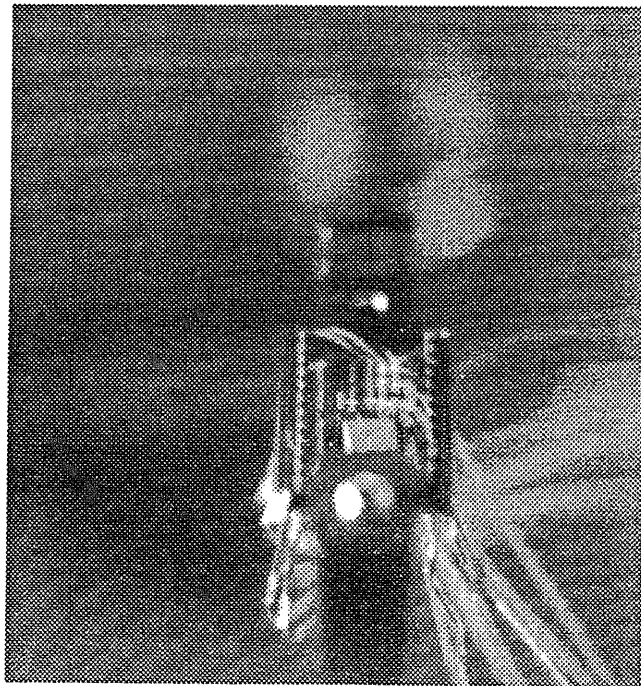
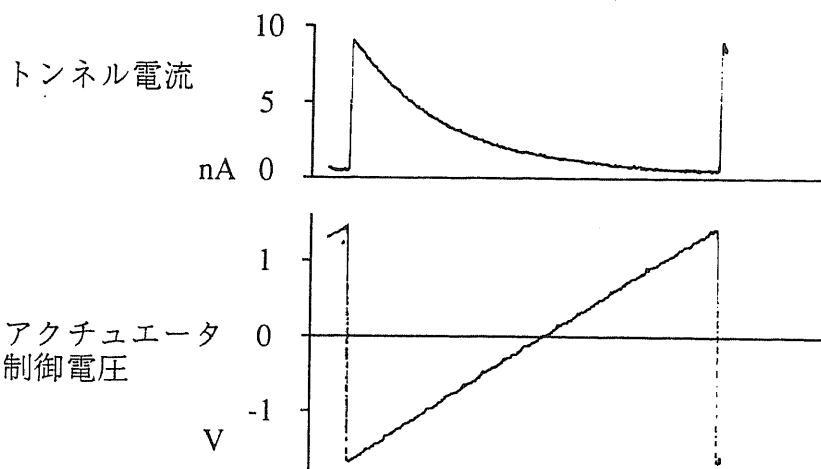
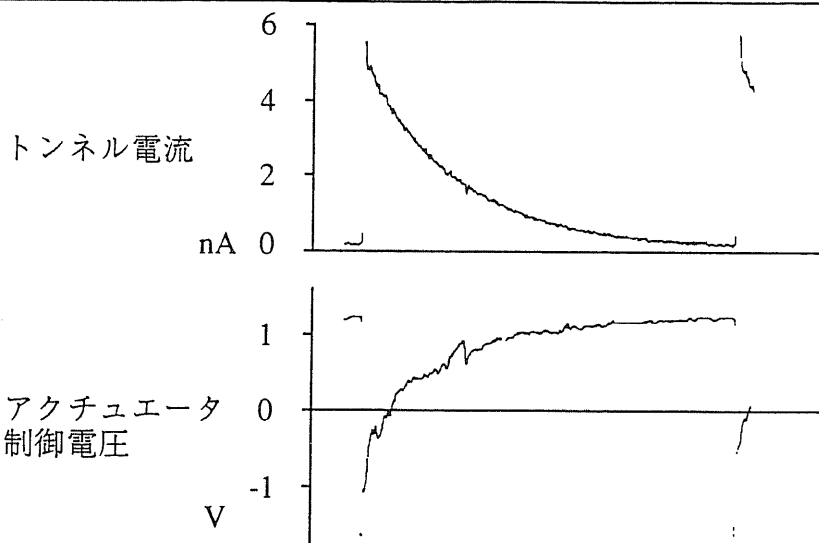


図6-19 ビューポートから見た真空装置内のLTU



Frequency : 10 Hz, Tunnel bias : 100mV, V_{DC} : 140V.



Frequency : 10 Hz, Tunnel bias : 100mV

図6-21 空気中での実験結果

指令値 I_{ref} に与えた波形は、デジタル的に発生した信号をD-A変換するタイプのファンクションジェネレータ (BIOMATION 2202A) で発生したもので、そのプログラムから55倍 (exp(4)) の変化をしている。(a)について見ると最大値は900mVであるから、IVCの変換ゲイン 10^8 V/Aより9nAから0.16nAまで変化したことになる。トンネルバイアスは100mV、アクチュエータバイアスは140であった。このとき、アクチュエータ制御電圧は直線的に約3V変化している。アクチュエータ制御電圧は、実際の回路では最終増幅段で-1倍される¹⁸⁾ので、この図で正の方向は探針を引き戻す側に作用する。

6.4.4 考察

アクチュエータの2乗特性の影響について考える。アクチュエータバイアスに対してアクチュエータ制御電圧が十分小さいので、線形とみなすことができる。波形がきれいなので、(a)について考察してみる。

LTUのアクチュエータ駆動電圧 (V) -変位 (Z) 特性は次の式で表される。

$$Z = \alpha V^2 \quad (6.1)$$

ただし α は比例定数。ここでのVはアクチュエータ駆動電圧すなわち、アクチュエータ制御電圧とアクチュエータバイアスの和である。 α を求めるには、(6.1)に特定のVとZの組を代入すればよい。

$$Z_0 = \alpha V_0^2 \quad (6.2)$$

実験から知れる Z_0 と V_0 の組として、イニシャルギャップとアクチュエータバイアスの組がある。ここではそれぞれ約 $1\mu\text{m}$ と140Vである。

(6.1)をVで微分すると、アクチュエータの感度 (単位電圧あたりの変位) の式が得られる。

$$\frac{dZ}{dV} = 2\alpha V \quad (6.3)$$

先の特定の Z_0 と V_0 の組における感度は、

$$\left. \frac{dZ}{dV} \right|_{V=V_0} = \frac{2Z_0}{V_0} \quad (6.4)$$

で表される。上の実験の動作点でのアクチュエータ感度は、 $Z_0=1\mu\text{m}$ と $V_0=140\text{V}$ を代入すると、 $1.4 \times 10^{-8} \text{m/V}$ となる。実験では制御電圧の振幅 (すなわち δV) が3Vなので、アクチュエータ感度から計算される変位は約43nmである。

一方、トンネル電流の変化はexp(4)、つまりトンネル電流とトンネルギャップの関係式のexp(-10 ϕ Z)の値がここではexp(4)である。白金の仕事関数 5.6eVを代入すると、Z=0.169nmが得られる。すなわち、理論的には1.69nmのトンネルギャップの減少が、exp(4)=55倍のトンネル電流の増加をもたらす。

まとめてみると、探針の変位をトンネル電流の変化から求めると0.17nm、アクチュエータの電圧から求めると43nmとなり、250倍も違っている。この原因はいくつか考えられる。

¹⁸⁾ このアンプは15V電源で動作する回路で発生したアクチュエータバイアスを-20倍に増幅するためのものなので、アクチュエータ制御電圧は同じアンプに-1のゲインで加算される。

○仕事関数が違っている場合

トンネル電流が55倍変化するのに43nmの変位を必要とする仕事関数は $8.6 \times 10^{-5} \text{eV}$ となり、低すぎる。また、制御電圧が上に凸の場合が説明できない。

○表面の汚染が関係している場合

トンネル電流は理論どおりの距離と電流値の関係にあるが、表面が汚れで覆われていて探針の動きを妨げているために、必要な変位を発生するためのアクチュエータ駆動電圧の変化が大きくなっている。上の計算は、探針が対向面から離れている時の、アクチュエータ固有のバネ定数だけを考慮したものである。静電アクチュエータの変位はバネ定数が増加すれば減少するので、汚れが550N/m程度の堅さを発揮したと仮定すれば、説明はつく。

○原子間力の斥力領域にはいつている場合

斥力にさからってなお距離を接近させようとする、上の場合と同じことが起こる。この場合、ギャップが小さくなるほど斥力の傾きは増すので、(b)のように制御電圧が曲がっていても説明がつく。

積分制御で安定ということ、制御系のゲインが100倍変わっても安定ということなどを考慮すると、上の2番目と3番目のように何かはLTUの動きを抑制していると思われる。

6.4.5 結論

トンネル電流と変位の関係は理論式どおりにならなかった。この原因は空気中にあるときにデバイス表面が汚染されていることと関係があるかも知れないので、表面を徹底的に清浄にするため、真空中での実験が必要である。

6.5 トンネル電流値と制御電圧の関係--- (極高真空中)

6.5.1 新たな問題

空気中での実験では、表面の汚れが動作に影響している可能性がある。これを確かめるには真空排気し試料をベークして清浄化してみる必要がある。ところが、結果を先に述べると、真空中では制御系がリミットサイクルを発生する現象のために、トンネル電流値と変位の間係を得る以前に制御を安定させることができない。

本節のタイトルは、前節の問題意識で付けられているが、実際は一定電流に制御することを目標に制御系の改良と現象の検討を行う。まず空気中で十分な性能を示した積分制御から始め、制御系をPIDにするなど改良を加えていった。結果的にはデバイスの改良が必要という結論に達するが、ここでは積分制御から順に述べる。

6.5.2 実験装置

真空装置は6.4節の実験と同じものを使用し、 10^{-11}Torr 台に達してから実験を行った。

6.5.3 積分制御

まず最初に積分制御で電流を一定に保つ制御を試みた。

(1) 制御器その他

空気中と同じ積分制御で、標準型のLTUを用いて実験を行った。探針は尖らせてない。IVCはOPA128使用、変換抵抗100M Ω 。トンネル電流の指令値は1nAである。

(2) 実験結果

図6-22に、結果を示す。制御電圧（下が接近方向）が降下していくと、トンネル電流が急激に流れ始め、10数nAでIVCが飽和する。実際の電流はもっとエスカレートしている可能性がある。トンネル電流が指令値を越えたので、制御電圧は上昇し始め、あるところで

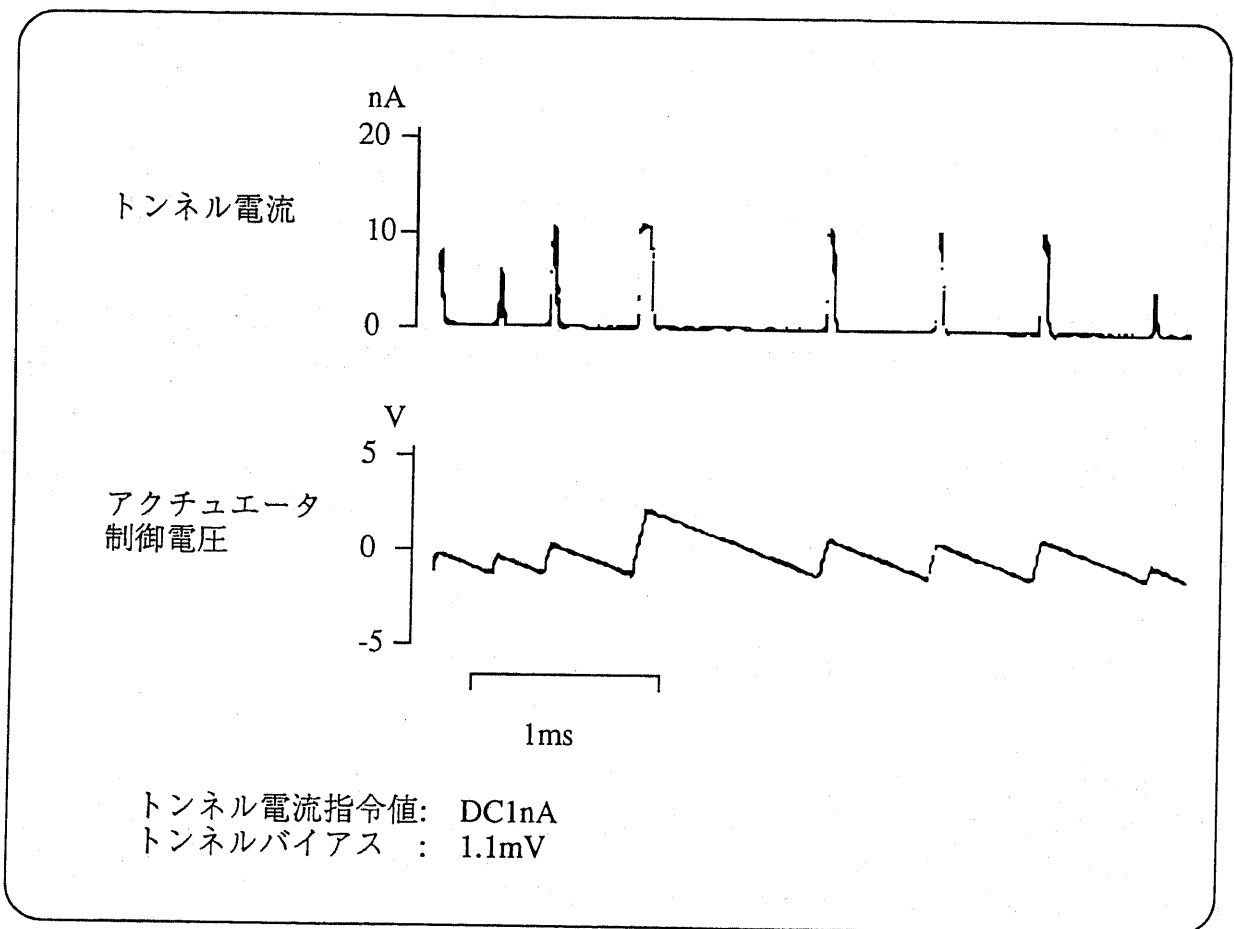


図6-22 積分制御による真空中でのLTUの振る舞い

トンネル電流が急激にゼロになる。このため再び制御電圧が下降に転じる。振動の周期は一定しておらず、一見カオス現象のようにも見える。積分時定数を小さく（あるいはゲインを大きく）すると、振動の周期が小さくなり、時定数を大きくすると周期は大きくなるが、振動を停止することはできなかった。IVCの立ち上がりトンネルバイアスの関係を調べたところ、トンネルバイアス40mVのとき1.1V/ μ s、4mVの時0.14V/ μ sであった。このとき、どちらも指令値は0.8nAとした。トンネルバイアスが大きい方がIVCの立ち上がりが速いようである。

(3)考察

この振動の原因は、IVCのようにダイナミックレンジの狭い部分を持つ回路（リミッタとしてはたらく）と積分器から原理的に起こりうる、リミットサイクルと考えられる。また、リミッタがなくても、振動系であるLTUを積分制御で安定化させることはできないはずである。むしろ空気中で安定であったことの方が、表面の汚れを示唆している。ちなみに、いったん振動を始めたLTUは、乾燥窒素を充填してもただちに振動がとまることはない。したがって、気体のダンピング効果はあまり関係がない。

トンネルバイアスとIVCの立ち上がりがほぼ比例していることは、2つの見方ができる。ひとつはトンネル電流の立ち上がりがバイアス電圧に比例するという可能性である。これはトンネルギャップにかかるトンネルバイアスの引力で、探針が引きつけられていると仮定すると、引力が電圧に比例することから説明がつく。もしそうだとすると、探針がトンネルバイアスの引力圏引き込まれたり脱出したりする現象（5章の原子間力とバネの力の説明参照）も振動の原因に関係していることになる。

2つめは、探針と対向面が接触したときに流れる短絡電流が、トンネルバイアスに比例するため、飽和してはいるもののIVCの立ち上がりが短絡電流に比例して速くなっているという見方である。この場合は引力の説明にはならない。

6.5.4 PID制御

次にPID制御器を適用し、電流を一定に保つ制御を試みた。

(1)制御器その他

標準型のLTUのパラメータを使ってPIDパラメータを決定したPID制御器（ $\tau=10\mu$ s）を使用した。今回は5章で設計したとおりのPID制御系なので対数変換器を導入した。使用したLTUは標準型で、探針は尖らせてない。表面には約100nmの銀を真空蒸着してある。垂直面にも蒸着されるよう、基板を斜めにして回転しながら蒸着を行った。表面の金属を変えたのは、「白金が水素の解離吸着をおこすためSTM像に影響する可能性がある」という情報〔青野最終報告〕があったためだが、結果的にはこの実験では白金でも大きな違いはなかった。

(2)実験結果

図6-23に結果を示す。上の波形は $\text{Log}(I_t)$ 、下の波形はアクチュエータ制御電圧である。(a)と(b)は指令値とトンネルバイアスの条件が異なる。トンネル電流はIVCが飽和するほどにはエスカレートしないものの、電流の変化にして10倍以上の振幅で振れている。トンネルバイアスや電流指令値を変化させても、振動が止る条件は存在しなかった。

(3)考察

(b)の動作波形を見ると、15kHz程度の小さい振動と、0.25msから0.32ms程度の周期が一定していない大きい振動が重なっている。このことから、LTUはバネ-質量系の機械的特性のために振動しながら、それより遅い大きな振動をしていると考えられる。大きな振動の原因を、トンネルバイアスまたは原子間力による引力と仮定すると次のように説明が可能である。

対抗面に接近してきた探針がこの引力に引き込まれると（図6-24のイからロ）、電流指令値よりもトンネル電流が大きくなる位置まで行ってしまい（ロからハ）、その上で振動

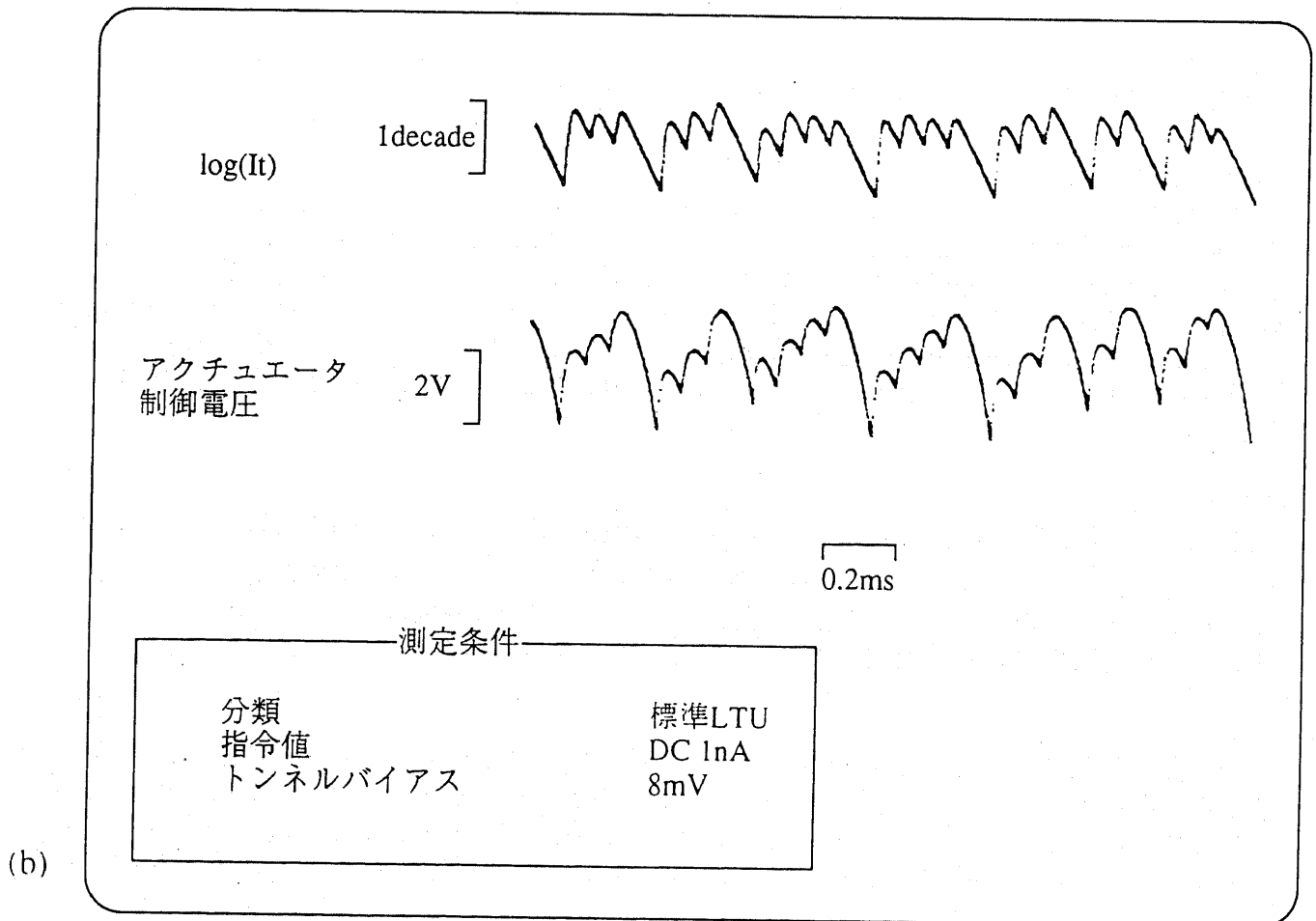
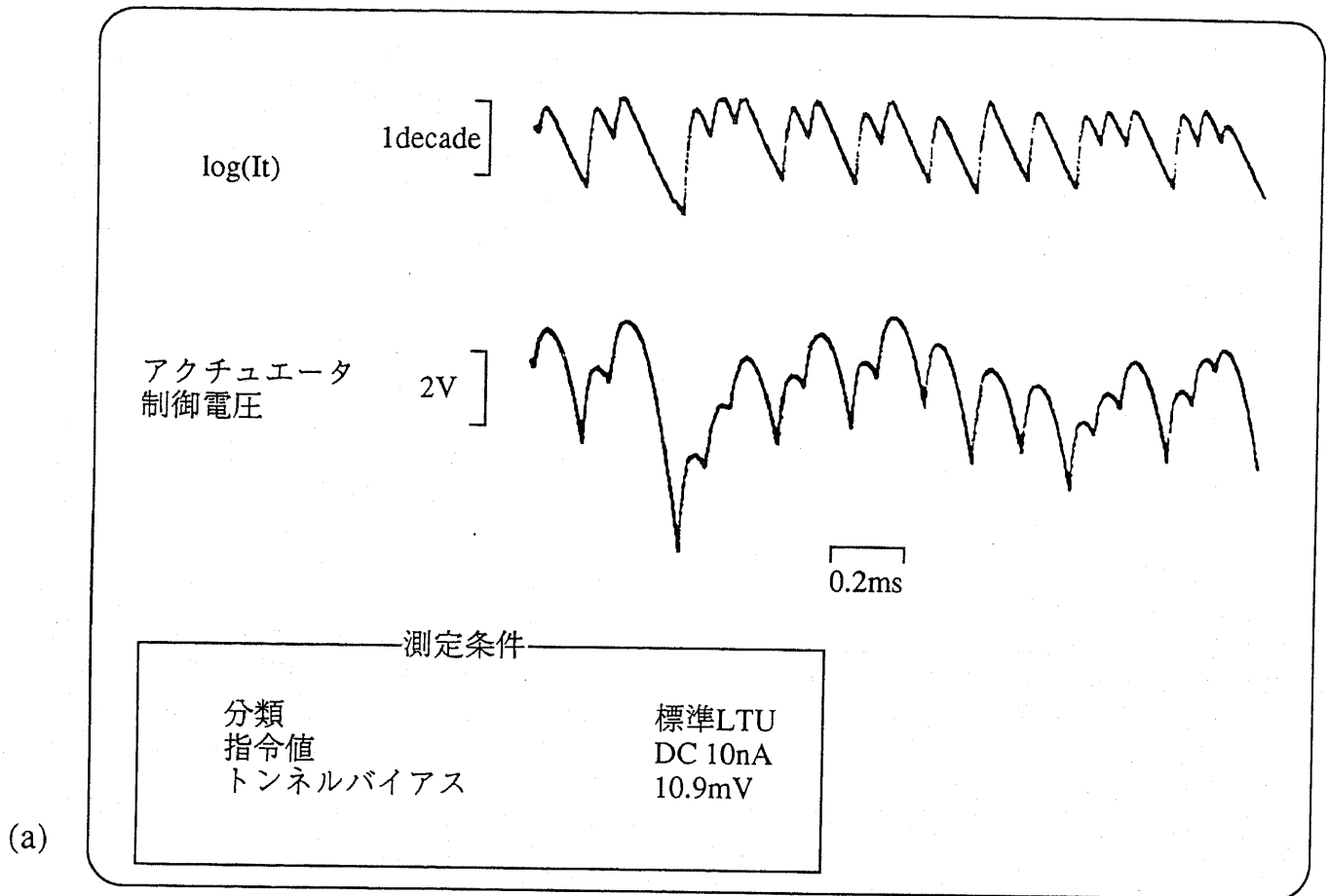


図6-23 PID制御によるLTUの真空中での振る舞い

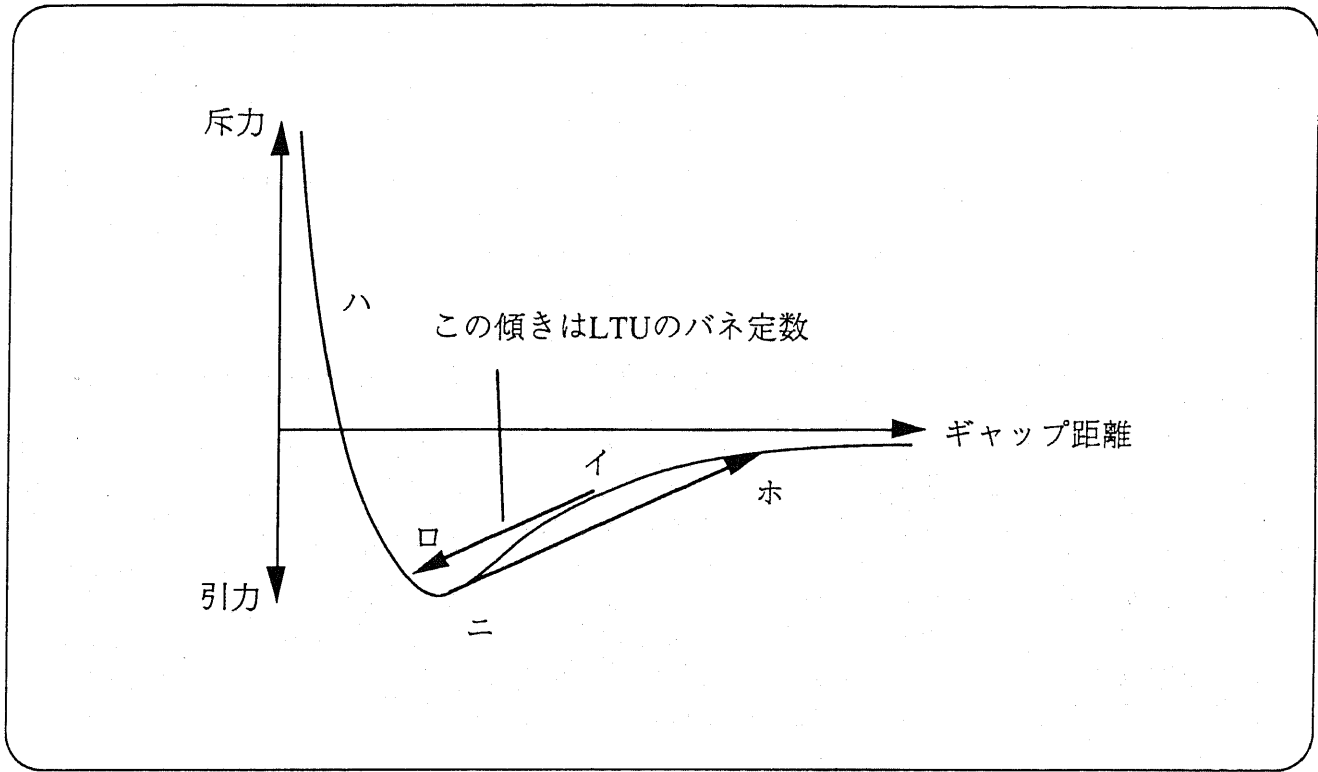


図6-24 原子間力と"飛び移り"の説明図

している。次第に制御が効いてきて、探針は引き離される方向に向かうが、探針が(二)まで来ると(ホ)まで飛び離れてしまう。再び制御が効いてきて(イ)から(ロ)に飛び移る。ということを繰り返している。小さい振動は飛び移りで励振されるし、逆に引き戻す方向の制御がかかっているとき、小さい振動の方向が一致するとその時飛び離れるので、二つの振動は同期する。少し飛躍するが、非線形な力と機械振動が関係するとカオスが発生する可能性がある⁴⁹。このモデルが正しければ、大きな振動の方を抑えると小さい振動も励振されなくなると予想できる。

アクチュエータ制御電圧が急激に立ち上がっているところの振幅は、約2Vである。アクチュエータバイアス約100V、イニシャルギャップ約2 μm として式(6.4)から感度を計算すると、 $4 \times 10^{-8} \text{m/V}$ である。これを単位電圧あたりの発生力に換算するには、標準LTUのバネ定数2.2N/mをかけて、 $8.8 \times 10^{-8} \text{N/V}$ となる。これに立ち上がりの振幅2Vをかけると、約 $1.8 \times 10^{-7} \text{N}$ となる。つまり、探針が引力に引き込まれて斥力に達するまでの力の変化は、 10^{-7}N のオーダーであることが推測できる。この大きさは、LTUの発生力が 10^{-6}N のオーダーであることを考えると、PID制御で対処するには外乱として大きすぎることを意味している。

6.5.5 外乱オブザーバについて

6.5.3の最後でPIDでは外乱を抑えきれないと述べた。そこで外乱オブザーバを導入したくなるが、これには落とし穴があった。

5章で設計した外乱オブザーバを取付けてみたが、かえってヒステリテックな大振幅の振動を発生した。この理由は次のように説明できる。外乱オブザーバには、図6-25に示すように、ローカルな正帰還のループが存在する。通常動作時にはトンネル電流からの負帰還がこれを打ち消しているのだから、外乱入力がない限り外乱オブザーバはなんの出力も出さない。しかし探針が対抗面から遠く離れているとき、対数変換器は飽和している(仮に飽和しなければ、トンネルギャップが $1 \mu\text{m}$ に広がれば、対数変換器の出力は-10000Vになっていなければならない)。このため正帰還だけが働き、新たなメカニズムによる振動を発生する。有効に利用するには、正常動作に入ったことを検出して、外乱オブザーバを投入するような工夫が必要であろう。

トンネル電流が測定できるレンジが非常にせまいということは、外乱オブザーバを使用しない場合でも、制御系がイレギュラーな状態にあるレンジが広いということである。このとき、制御対象のLTUが遅れを持っていたり振動系だったりすると、トンネル電流でフィードバックがかかるレンジに入った瞬間にただちに正常動作に入ることができない。

6.5.6 結論

真空中では、標準型LTUを制御で安定化することは不可能である。LTU自体に何らかの改良が必要である。改良の参考となるメカニズムの2つの可能性を本章全体のまとめで示す。

6.6 6章のまとめ

LTUが少なくとも空気中では変位検出に使用できることを実証した。数nmの変位分解能が得られたが、これはマクロな寸法の実験装置が限界を決めてしまったものと思われる。LTU自体の能力はもっと高い可能性が残されている。必要な点は改良するとしても、たとえばAFMカンチレバーと集積可能という点だけをとっても、LTUには実用的な価値があるだろう。

⁴⁹ 重りのついたバネがぶら下がっており、バネを伝わって一定速度で水が重りの方へ流れてくるというモデルを考える。重りの下には水滴ができるが、その質量にかかる重力加速度と重りの振動の(上向きとの)加速度の和が一定値を越えると水滴が落下する。このモデルを計算機でシミュレーションすると、カオスが発生する[鳳絃一郎教授の博士演習にて]。

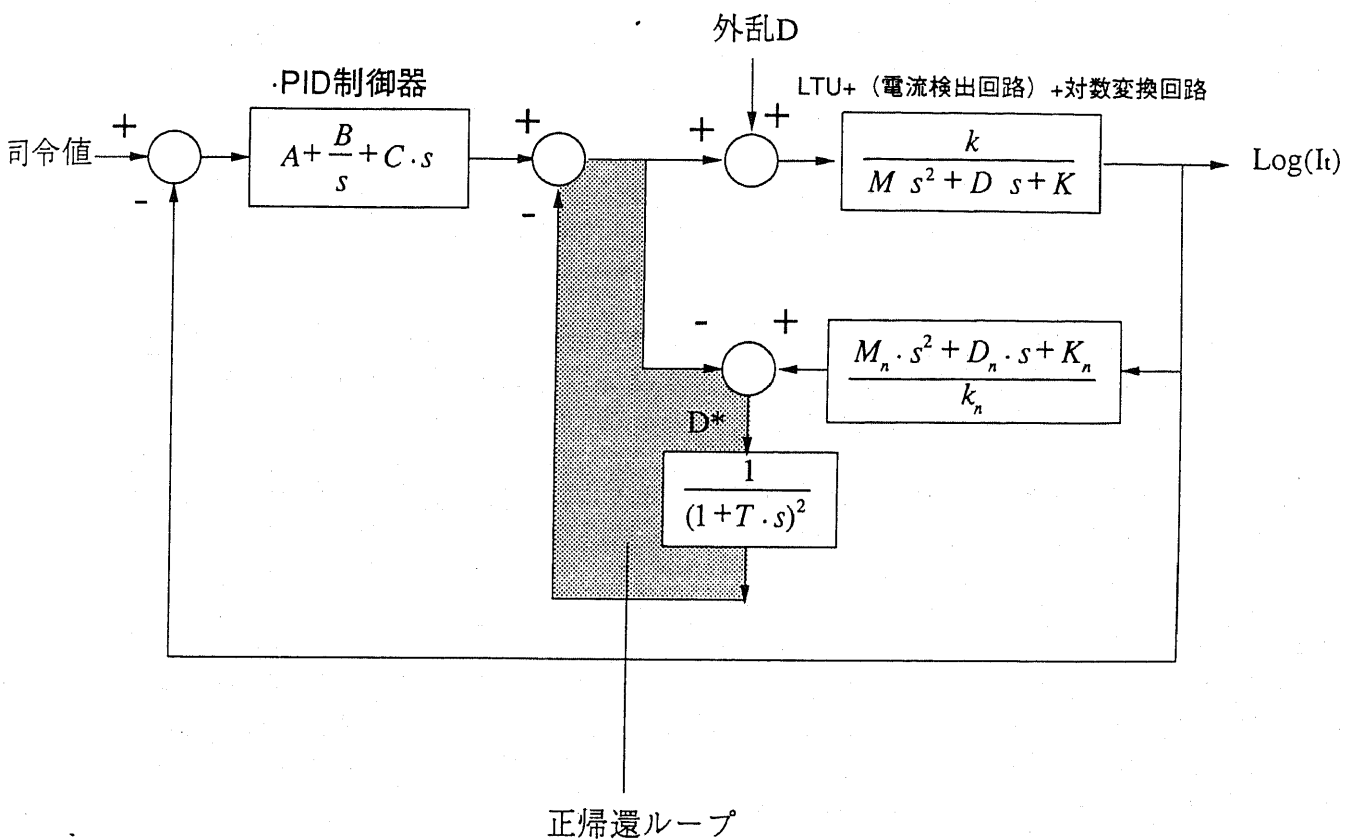


図6-25 外乱オブザーバのマイナーな正帰還

外乱オブザーバは正常動作時は安定だが、IVCなどが飽和するとゲインが0dBに下がって正帰還だけが残る、振動が起こる。

STMのZ軸アクチュエータとしての使用には、この標準的な設計のLTUはあまり適していない。剛性を高めるなどの改良が必要である。

LTUの物理現象面からの検討の結果、空気中ではきわめて安定に動作するが、真空中では電流を一定に保つことさえ難しいということが判明した。これが、空気中では表面が汚染されていることと関係があることは確実である。空気中では安定に動作するので、とりあえずそれで使用すれば良い場面もあるが、汚染に偶然に助けられているというのでは安定性に問題がある。また真空中で使用することができないと、走査プローブ顕微鏡へ利用するにあたって、重大な欠陥となる。

6.5節ではLTU自体の改善なくしては真空中での制御は不可能という結論を出したが、改善の方向を探るため、6.4および6.5節の実験結果をまとめてみると次の3点に要約される。

- 空気中の実験では何かから斥力を受けていることが明らかになった。斥力の源は、探針が原子間力の斥力領域に入っている可能性と、コンタミナントのふたつが考えられる。そのバネ定数の一例は550N/mであった。
- 真空中の実験では、安定に制御することができなかった。空気中と真空中の違いは、表面の汚染と圧力であるが、圧力は関係ないことが確かめられたので、空気中と真空中の違いには汚染が関与していることがわかった。
- 真空中の実験から、原子間力または静電的な引力が不安定の原因である可能性が示唆された。その大きさは 10^{-7} Nのオーダーであった。

ここで仮に空気中で見られた斥力の原因が汚染であると仮定すると、

- 数10mVのトンネルバイアスで0.1から10nAのトンネル電流が流れるギャップ距離は本来原子間力の引力領域にあり、標準型LTUのバネ定数では飛び移りを起こすために原理的に制御できない。空気中ではコンタミナントが適度の斥力を発生しているために、引力が打ち消されて制御できる状態になる。

という説明ができる。一方、空気中で見られた斥力の原因が原子間力であると仮定すると、

- 数10mVのトンネルバイアスで0.1から10nAのトンネル電流が流れるギャップ距離は本来原子間力の斥力領域にあり、空気中の実験で観察された斥力はそのためである。真空中ではLTUに機械的なダンピングがないため、振動しているうちに引力領域に引き込まれたり斥力領域に入ったりする。空気中ではコンタミナント（水分を想定するとイメージしやすいが）がダンパになって、本来の斥力領域から飛び出すほどの振動は起こさない。

という説明ができる。どちらも矛盾はない。LTUの改善において、これらを参考にする必要がある。

7章 デバイスの改良による特性改善

前章の最後で、空気中での安定性がコンタミによるダンピングであるか、またはコンタミによる斥力であると結論した。どちらが原因としても、制御されたコンタミを付けたデバイスを製作すれば、とりあえず空気中と同じような特性が真空中でも得られるであろう。しかし、それではどちらのメカニズムか解明ができない。

従来のSTMが安定であるように、原子間力の傾き以上に剛性（バネ定数）が高いLTUを作れば、真空であろうと空気中であろうと安定になるはずである。その上で、真空中でのトンネル電流変化、制御電圧振幅、バネ定数、初期ギャップおよびアクチュエータバイアスから、探針にはたらく力を見積ればよい。

ここでは、引力の傾きを越えるバネ定数は実現できないかも知れないが、標準型LTUにくらべて2桁バネ定数を大きくすることを目標に、LTUの改良を行う。

7.1 "マイクロ"と高い剛性の両立における困難

スケーリング則があるかぎり、バネ定数（剛性）は寸法の縮小に伴って低下するものである。単純にバネ定数を大きくするには、LTUのアクチュエータを多数連結してしまえばよいが、100倍のバネ定数を実現するには面積が100倍になってしまう。また、バネ定数だけ大きくするには、支持梁を太くするか短くすれば容易に実現できるが、それに見合った発生力を確保する必要がある。とくに表面マイクロマシニングは厚さ方向に拡張することが困難なので、平面的に広がってしまい、堆積の利用率が悪化する。ここでは、構造の連結で約1桁、各支持梁の設計変更でさらに1桁程度、合わせて2桁大きいバネ定数を実現する。そのためには発生力を10倍に増加させる必要がある。

7.1.1 長手方向への連結

占有面積が増大することには妥協し、LTUのアクチュエータを長手方向に10個連結することにより、バネ定数と発生力をどちらも10倍に増大させる。図7-1(a)はのポンチ絵のように、"枠"部分を強化するため梯子状にした。駆動電極は10箇所に分れるため、とりあえずワイヤボンディングで並列に接続する。新たに配線層を設ければ、原理的にはもっと駆動電極を小さくできる。

7.1.2 バネ定数を大きくする

個々の支持梁のバネ定数を大きくした。標準LTUでは $2.5\mu\text{m}$ であった支持梁の幅を、 $4.5\mu\text{m}$ （マスク上）にし、長短支持梁の長さをそれぞれ $200\mu\text{m}$ 、 $180\mu\text{m}$ とした。製作時に $3.8\mu\text{m}$ 幅になったとしても、長支持梁1本が 5.2N/m 、単支持梁が 7.1N/m である。それぞれ40本があるので、各バネ定数を40倍して直列につなぐと 120N/m となり、2桁増大が達成できる。

7.1.3 発生力の増大

連結した効果はバネ定数と発生力の双方を増大させるので、従来と同等の変位を出すにはバネ定数の増大分を補うため、発生力をあと1桁増大する必要がある。ここでサブミクロンギャップと多段櫛歯[24]の効果を利用する。図7-1(b)は、多段櫛歯を示したものである。図のように櫛歯の横に段を付ける状態では、製作するときは、櫛歯の間隔は製作可能な大きさである。アクチュエータが駆動され、櫛歯が挿入されてくると、間隔はサブミクロンに低下し、単位電圧当りの発生力が大きくなる。この方法は、サブミクロンのプロセス技術がなくても使えるのが便利である。また1本の櫛歯を新たに作るのに、最小限必要な幅よりも、段をひとつ付けるための幅の方が小さくてすむため、多段にすると力の発生

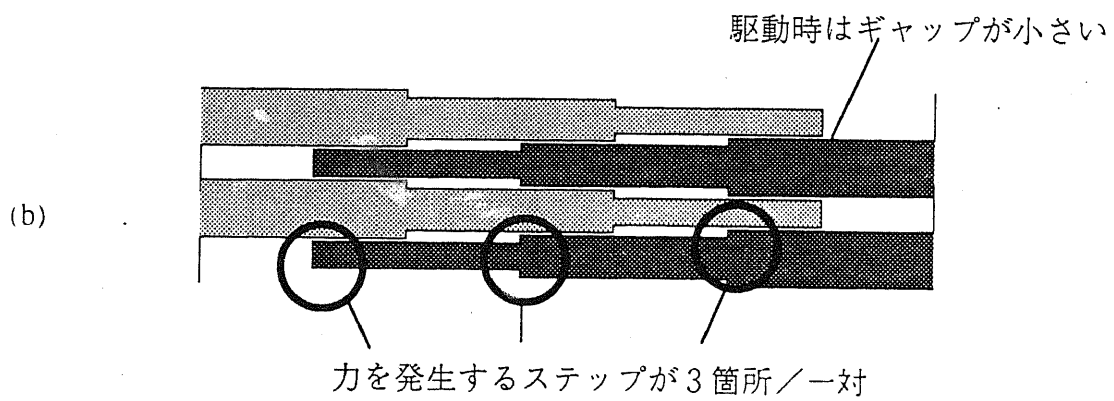
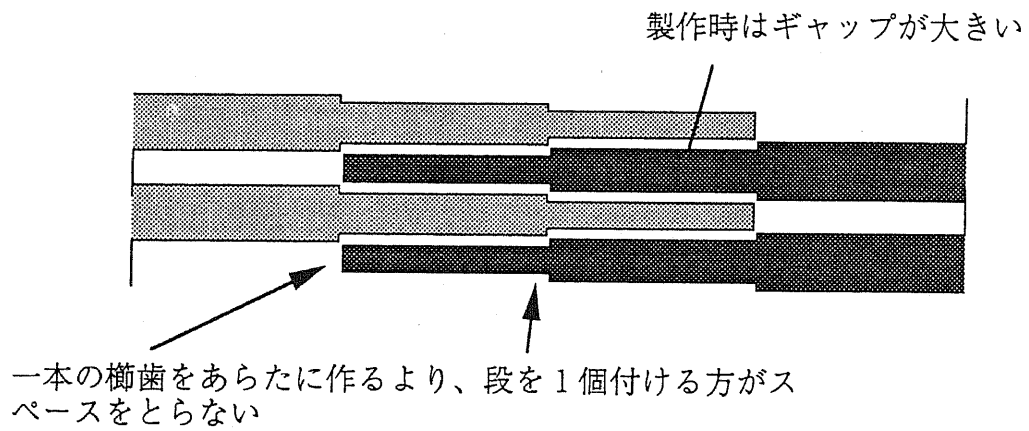
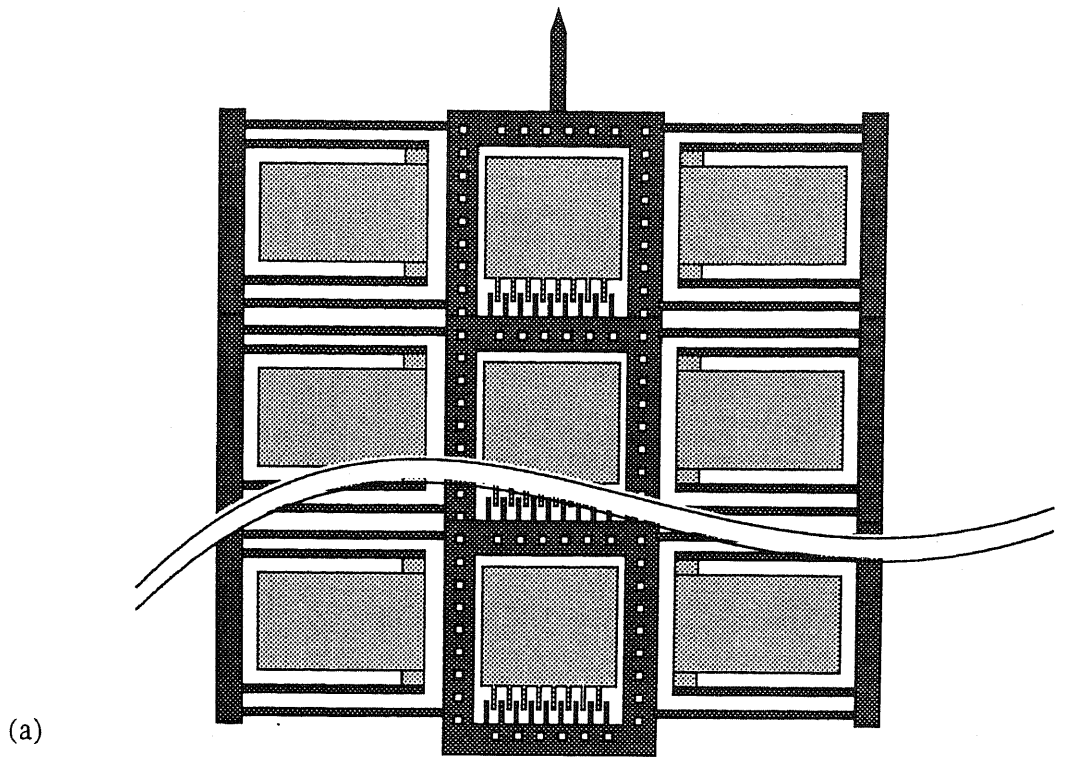


図7-1 アクチュエータの剛性を高め発生力を大きくする方法

部位が増やせる。

ここでは製作時の櫛歯間隔は $1.5\mu\text{m}$ とした。あまり段が多いと駆動電極の面積が食われるため、櫛歯の段は3段とした。駆動電極1個について30本の3段櫛歯を付けたので、力の発生部位はアクチュエータ1個につき180箇所となった。参考までに標準LTUでは48である。

Z方向の力のみならず横方向の引力も強くなるため、短絡する危険が増えるが、支持梁の剛性が高まっているので、両方の効果は相殺する方向に作用する。この設計が危険か否かは製作時のサイドエッチ量に依存するため、シミュレーションは行わず、実験で確認する。

7.1.4 プロセス技術の改良

表面マイクロマシニングでは、数 μm の深さまでの加工が一般的であるが、厚さ $20\mu\text{m}$ のシリコンの加工を表面マイクロマシニングの技術で行うことを試みた。粗いパターンでは成功したが、櫛歯の間は途中までしかエッチングができなかったため、残念ながらここでは使用できない。これが成功すればさらにバネ定数は5倍大きくなる。このプロセスについては8章で述べる。

7.2 製作したデバイス

図7-2は製作した高剛性LTUのSEM写真である。実測した支持梁の幅を使ってバネ定数を計算すると、バネ定数は約 126N/m である。共振周波数は 54kHz であった。したがって質量は 1.1ng である。これらを使って、PIDパラメータを決定した。 $1\mu\text{m}$ 程度の初期ギャップ分の変位を発生できるので、アクチュエータの発生力は $120\mu\text{N}$ 以上であり、櫛形静電アクチュエータとしては従来のもものより1桁は大きい。

実験に使用したLTUは、探針を尖らせるプロセスを施してない。探針-対抗面の相互作用を減らすため、探針を尖らせるプロセスを施したのも製作したが、探針が短くなって初期ギャップが拡大した結果、探針が対抗面に接触する前にアクチュエータがブレイクダウンを起こした。

7.3 制御器

PID制御を行う。5章でおこなったシミュレーションによれば、等価時定数 τ は、共振の周期より小さくしなければならない。つまり、遅い制御器は高い周波数の振動を励起することはないが、始まってしまった振動を抑えることもできない。今回は共振周波数が高いので、すべてに速度を最優先した設計をした。対数変換器はAD640を使用した高速タイプ、IVCはLF357と変換抵抗 $10\text{M}\Omega$ の高速タイプを使用した。入力インピーダンスが重要な部分以外のOPアンプは、高速応答を期待してLM318を使用した。結果的に直流特性は犠牲になった。

7.4 実験

7.4.1 安定性

回路全体が高速なため、容量性の結合が大きく、補償電極方式で容量結合の低下を計ったが、完全に相殺することはできなかった。この原因は最終段アンプの位相が若干遅れるためと思われるが、低速タイプのIVCを使用していた時は気づかない程度のものであった。

IVCの変換係数が 10^7V/A で、 1nA 入力時の出力が 10mV なのに対し、イズレベルが数 mV あったため、対数変換後 (1nA が 1V に変換される) の出力は常に0から数 100mV の振幅の

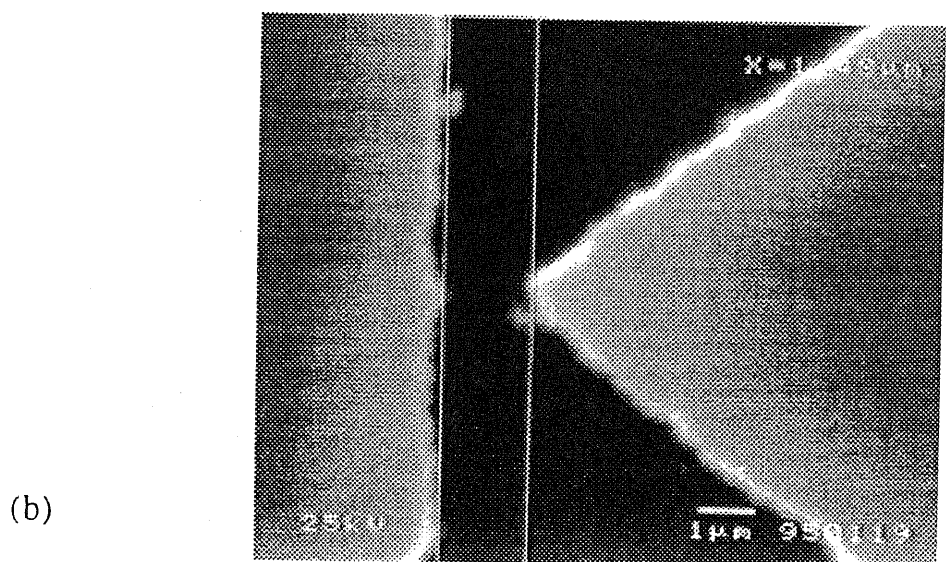
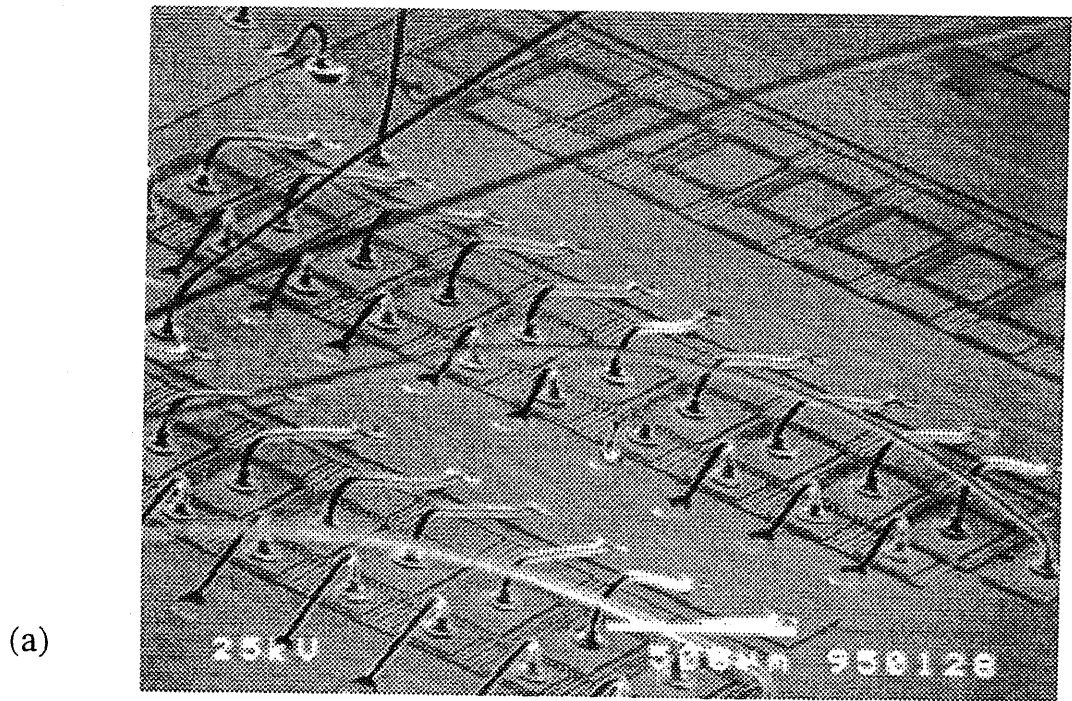


図7-2 高剛性LTUのSEM写真

- (a)10個のアクチュエータをボンディングワイヤで並列に配線した
- (b)探針の先端。イニシャルギャップは約1.5 μm 。先端から横に飛び出した部分が構造の一部なのかゴミなのかは不明。

ノイズを含んでいた。

このような条件の中で、まず一定電流に制御できる、トンネルバイアスと電流値の範囲を調べた。バイアス電圧の条件は非常にせまく30mV（探針正）付近のみで、それより上でも下でもリミットサイクルを生じた。電流値は1nAから10nA弱に安定な領域があった。電流が小さいほうは制御が不安定であるが、大きいほうは対数変換器のリミットが来るためである。

7.4.2 トンネル電流と制御電圧の関係

空気中の実験のように電流指令を2桁振ると不安定な領域に入ってしまうので、ここでは約1nA強から10nA弱の範囲で変化させた。図7-3に結果を示す。上の波形は $\text{Log}(I_t)$ 、下の波形はアクチュエータ制御電圧で、それぞれ縮尺は1V/div.と100mV/div.。

(a)はアベレージをかけてない生の波形で、あばれている様子がわかる。電流値が大きい時は安定になっている。 $\text{Log}(I_t)$ の変化は1.1Vから1.75V（電流にして1.26nAから5.6nA）、500Hzの三角波。(b)は256回のアベレージをかけたものである。

7.5 考察

はじめに前章のまとめの最後の部分を再掲する。

- 数10mVのトンネルバイアスで0.1から10nAのトンネル電流が流れるギャップ距離は本来原子間力の引力領域にあり、標準型LTUのバネ定数ではjump-to-contactを起こすために原理的に制御できない。空気中ではコンタミナントが適度の斥力を発生しているために、引力が打ち消されて制御できる状態になる。
- 数10mVのトンネルバイアスで0.1から10nAのトンネル電流が流れるギャップ距離は本来原子間力の斥力領域にあり、空気中の実験で観察された斥力はそのためである。真空中ではLTUに機械的なダンピングがないため、振動しているうちに引力領域に引き込まれたり斥力領域に入ったりする。空気中ではコンタミナント（水分を想定するとイメージしやすいが）がダンパになって、本来の斥力領域から飛び出すほどの振動は起こさない。

という説明はどちらも矛盾がない。

さて、(b)の制御電圧の振幅は約120mVである。初期ギャップが1.5 μm で、アクチュエータバイアスが約100Vであったので、アクチュエータ感度を計算すると30nm/Vとなる。したがって、制御電圧振幅（120mV）から計算した変位は、3.6nmである。一方、トンネル電流は1桁弱の変化なので、0.1nm未満の変位しかしていないことになる。したがって、ここでも斥力が働いていたとことになる。これは前章で示した可能性のうち、後の方が正しいことを示唆している。

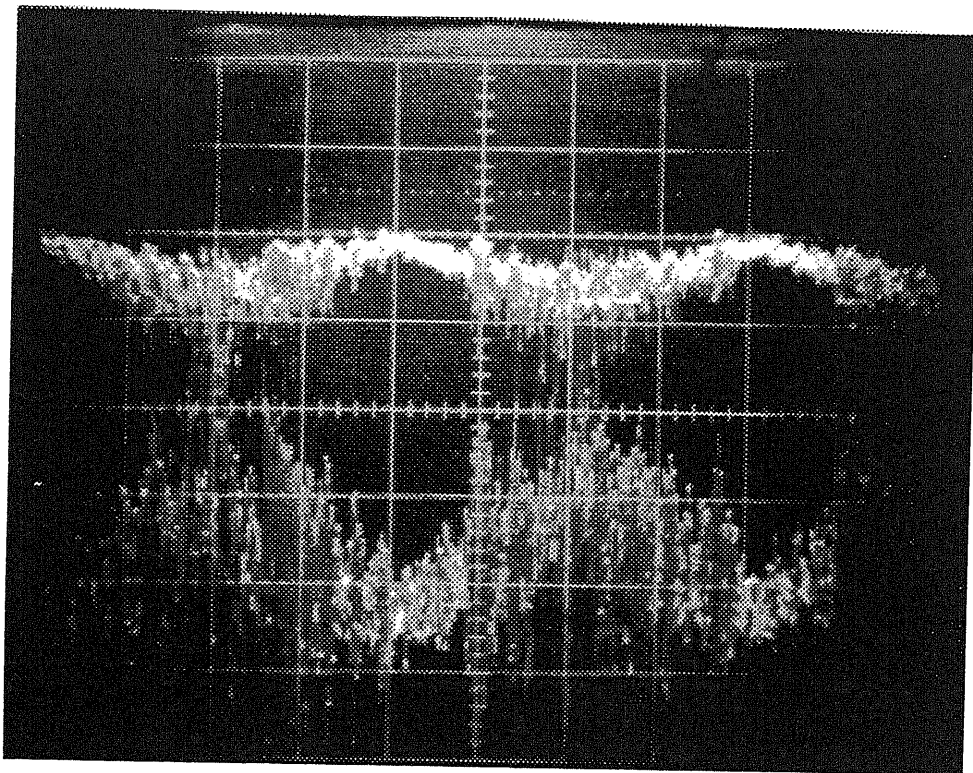
しかも(b)の制御電圧は下側にいくほど尖っている。制御電圧は下が押しつけ方向なので、探針を押しつけるほど高い発生力が必要になることを意味する。これは原子間力の斥力領域に入っていると考えるとつじつまがあう。

斥力の大きさをおおまかに見積る。アクチュエータ感度30nm/Vにバネ定数126N/mをかけると、発生力感度（単位電圧あたりの発生力） $3.78 \times 10^{-6} \text{N/V}$ を得る。制御電圧波形は曲がっているが、ピークピークの振幅は約120mVであり、発生力感度をかけて斥力の変化幅を求めると $4.5 \times 10^{-7} \text{N}$ となる。

図7-4は、文献[43]から引用したグラフで、トンネル電流を同時に測定することができるAFMで測定した、力およびトンネル電流を距離の関数として表示したものである。このグラフに添って、上の実験結果を半定量的に検討する。

原子間力などの力は探針の先端半径に依存するので、このグラフで上の実験を定量的に考察することは危険であるが、文献[43]によれば、実験に使用した探針半径は0.1から1 μm と推定されている。それに対し、本実験で使用したLTUの探針は、図7-2(b)に示したよう

(a)



(b)

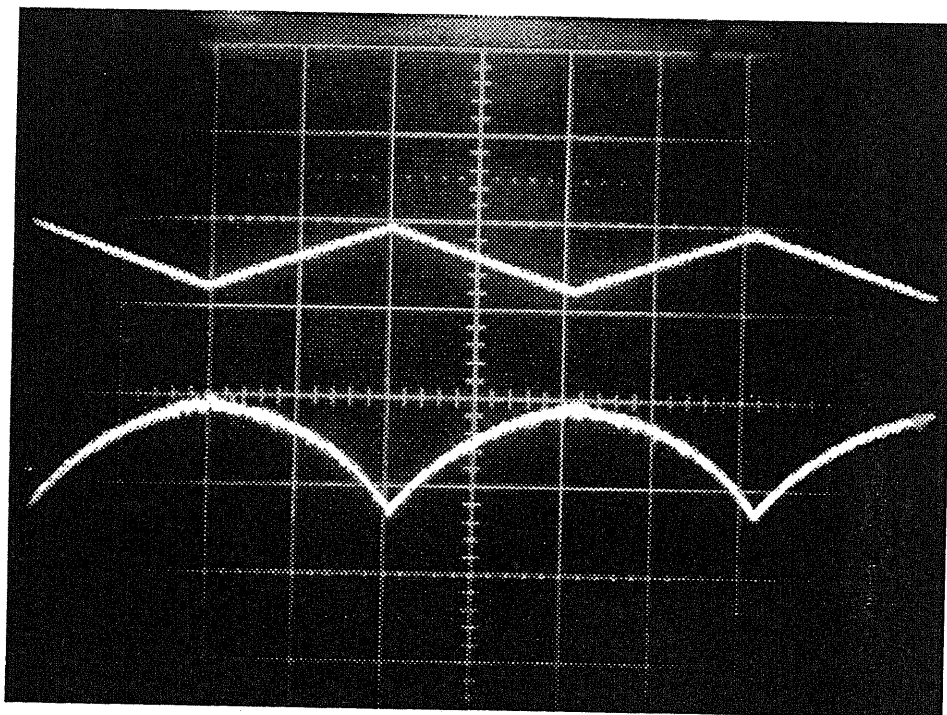


図7-3 実験結果

上の波形は $\text{Log}(I_r)$ 、下の波形はLTUの制御電圧。

(a)はアベレージを施してない波形。(b)は256回のアベレージを施した波形。

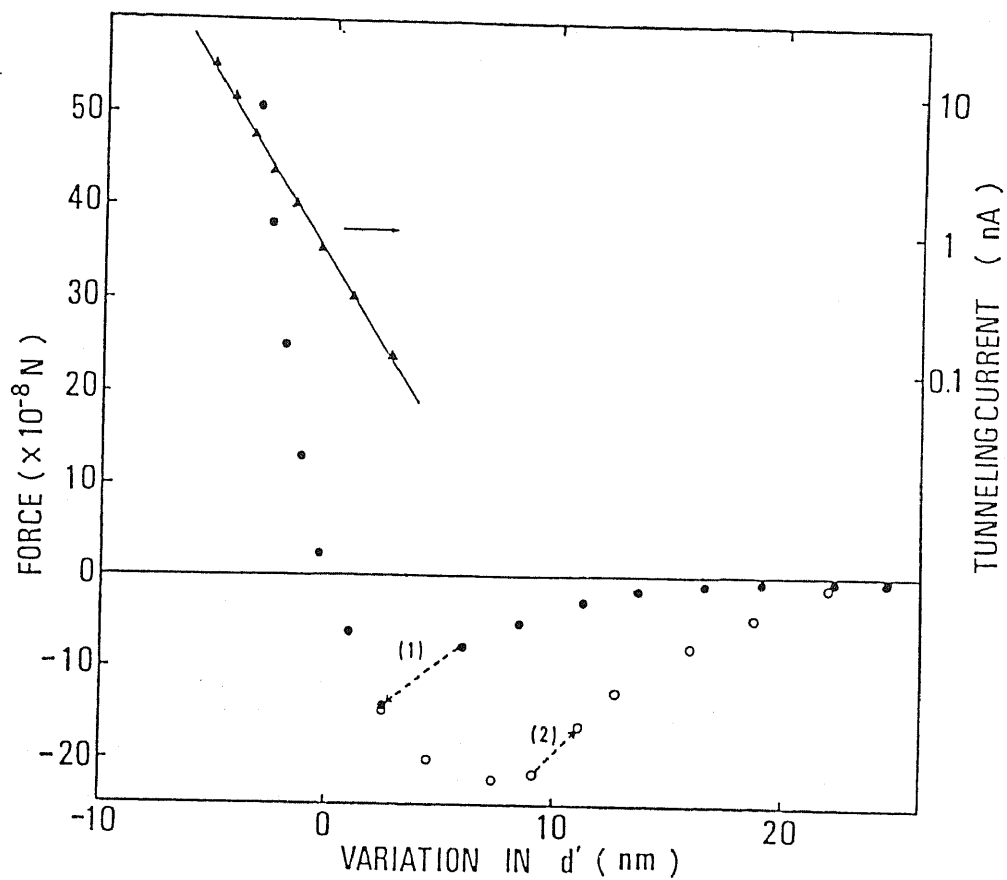


Figure 3. 21. Force (circles) and tunneling current (triangles) vs apparent variation in the tip-surface distance. Measured force between tip sample. Solid (open) circles were measured during approaching (detaching) the sample. Sudden attraction (1) and repulsion (2) occurs because the spring constant of the cantilever is smaller than the force gradient in the attractive range.

図7-4
同時測定された原子間力とトンネル電流 (文献[43]から引用した参考試料)

に、これと同等の半径と考えてよいだろう。

図7-4によると、1nAから10nAのトンネル電流が流れる距離は斥力領域になっている。まず定性的には上の実験事実と矛盾しない。上の実験では1.26から5.6nAまで変化させたので、同図からそれに相当する距離²¹⁾斥力の幅を読み取ると、約 4×10^{-7} Nとなる。この値は、上で求めた 4.5×10^{-7} Nとよく合っている。

トンネルバイアスが+30mV付近以外では安定しなかった問題について考える。探針-対抗面間の静電引力は、トンネルバイアスの自乗に比例して増加する。トンネルバイアスが10倍になると静電引力は100倍に増加する。これに対して、一定電流を与えるギャップ距離は、トンネルバイアスが10倍になっても0.1nm増加するだけなので、引力領域で探針を制御することになり不安定化する、と説明できる。

上の説明を外挿しても、逆に小さい電圧の場合は説明できないので、他の理由が必要である。ひとつの可能性として、電圧が小さい場合トンネルギャップが狭くなり、ますます斥力領域に入っていく。斥力は距離の-12乗で近似される急激な増加を示す。これがアクチュエータの発生力を越える場合は、振動は起こさないうえアクチュエータバイアスが最大値まで上昇するだけである。探針-対抗面間の距離がある程度小さくなると、トンネル電流ではなく、伝導電流が流れると思われるが、急激な電流変化は振動の要因となりうる。

なお、実験後にIVCのオフセットを測定すると数mVあった。真空槽の温度が室温より高いうちに実験を行ったため、オフセット調整が狂ったものと思われる。トンネルバイアス+30mVで安定化したので、-30mV付近で安定になる電圧を探したが見つからなかった。実はオフセット電圧があったため、探した範囲の外に安定点があった可能性がある。

次に引力領域では制御ができないのか考えてみる。図7-4のトンネル電流を1桁変化させるために必要な横軸の長さは、ギャップ距離の真変化(約0.1nm)に比例していると仮定する。これを使って引力領域の最大の傾きを計算すると、約-1000N/mとなる。これに対してLTUのバネ定数の方が小さいので、飛び移りは避けられない。ただし、図7-4の引力にはメニスカス力が含まれているので、超高真空では引力はもっと弱いかも知れないが、このような小さい距離変化で急激に変化する力の成分は、原子間力と思われる。これを速い制御で抑えるには、次に述べる振動が問題になる。

振動の原因は、LTUのダンピングが小さいことにある。線形系ならば速いPID制御で安定化できるが、この実験のように安定領域が狭い場合、振動のために不安定領域に飛び出してしまふことがあり、その結果また振動が励振されてしまふ。実際、電流値の小さい方で、言い換えると引力領域に近いほうで特性が悪化している。これは7章で見たのと同じ現象である。

7.6 7章のまとめ

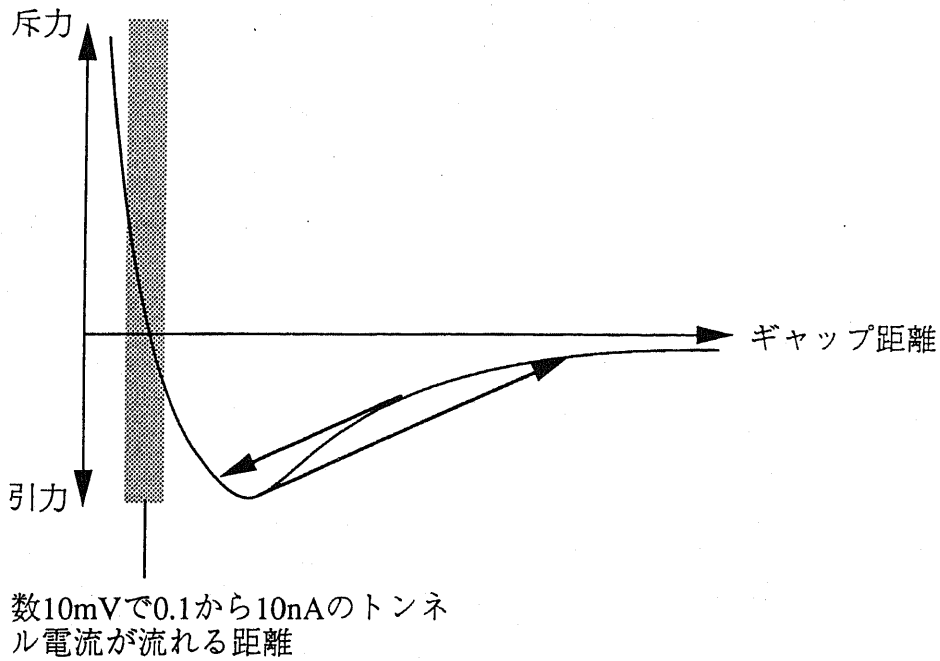
LTUのバネ定数を2桁増加させた。そのために長手方向の連結と支持梁一本一本のバネ定数の増加で1桁ずつ分担した。ついで発生力を1桁大きくするため、多段櫛歯とサブミクロンギャップを採用した。制御器は速度を最優先にした。

その結果、限られた範囲であるが、真空中で制御が可能になった。実験結果から、空気中でも真空中でも、原子間力の斥力領域で動作していたと仮定するとうまく説明がつく。空気中と真空中の違いは、コンタミによるダンピングの差であると言えよう。また、バネ定数の増大だけでトンネルギャップの全域を安定化するには、少なくとももう1桁堅くする必要はあるだろう。

図7-5を使って、振動のメカニズム(仮説)の説明をする。バネを堅くして飛び移りによるヒステリシスループを小さくすると、固有振動も抑えられる。ヒステリシスループをなくするのがもっとも良い解決だが、できなければダンピングを大きくすることで限定された範囲(つまり斥力領域)を使うかぎり安定なものになる。

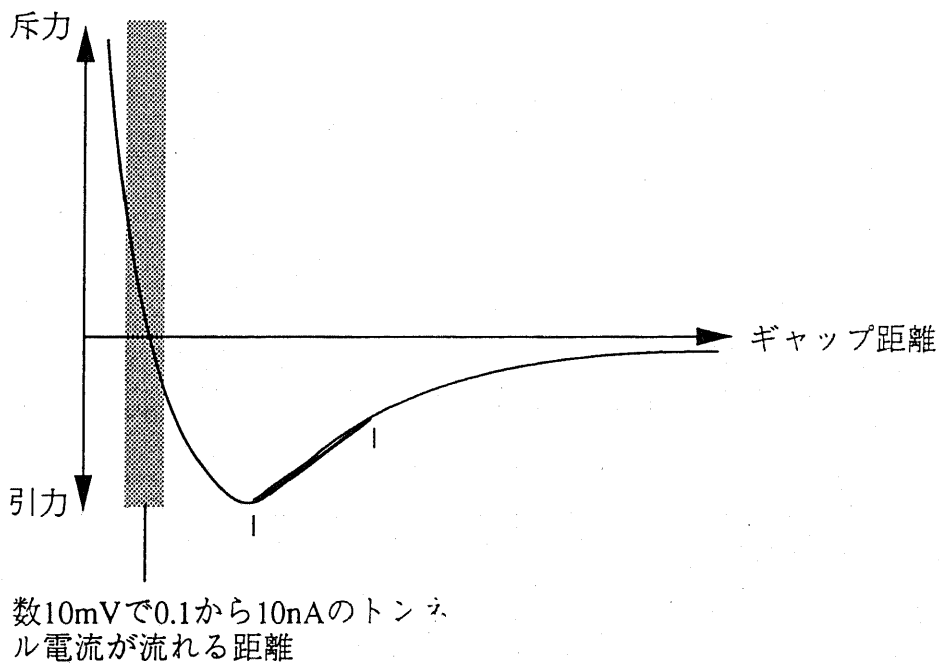
本章の改良では、LTUのバネ定数を大きくし質量はあまり増加させなかったため、共振周波数が高くなり、より高速の制御回路が要求されることとなった。その結果、IVCのノ

²¹⁾ 試料が弾性変形するために、ギャップの真の値はこの図の横軸の距離より小さい。



(a)

標準LTUでは、ヒステリシスループが大きい。
 空気中ではダンピングが効いているので、探針が斥力領域の入ると安定する。
 真空中ではヒステリシスと制御の遅れによる振動が大きく、さらにそれがLTUの固有振動を励起している。



(b)

高剛性LTUは、ヒステリシスループが小さい。
 ヒステリシスと制御の遅れにより振動は発生し得るが、励振の振幅が小さいので、斥力領域に入っているうちに制御がかかって安定する場合がある。

図7-5 振動のメカニズム (仮説) の説明

イズ特性や回路全体の直流特性が犠牲になった。共振周波数は高いほうが外来の振動には強いが、励振されてしまった振動を止めるにはかえって困難が増大する。

ここで更に改良する場合の指針を示すと次のようになる。

- さらにバネ定数を上げる場合は引力の傾きより1桁以上強く、すなわち 10^4N/m 程度にする。
- そこまで強くできなければ、制御で安定化しやすいように質量も同時に増加させる。
- あるいは、強力なダンピングを発揮する要素を取り入れる。
- ただし、探針の先端半径がもっと小さければ上記の必要な堅さの見積は緩和される。

8 章

マイクロトネルユニットの性能向上のための基礎技術

この章では、今後更にマイクロトネルユニットの性能向上に役立つと思われるいくつかの基礎技術について検討する。

8.1 プロセス技術

本研究で採用したLTUの製作テクノロジーは、シリコンベースのマイクロマシニングが比較的によく確立されていたため、他の方法にもとくに優れた点があれば検討してみる価値がある。電鍍による製法とシリカベースのマイクロマシニングは、全く使用する材料を変更するが、それぞれに利点がある。前者は試作まで行い、探針を尖らせるプロセスも開発した。後者は議論だけであるが、マイクロマシニングを経験するなかで、何度かその可能性に気づかされることがあった。

バルク-表面マイクロマシニングと呼んだのは、7章のプロセスの改良で完成できなかった技術である。表面マイクロマシニングの得意とする微細なパターンで、バルクマイクロマシニング並みの厚さを実現できる。

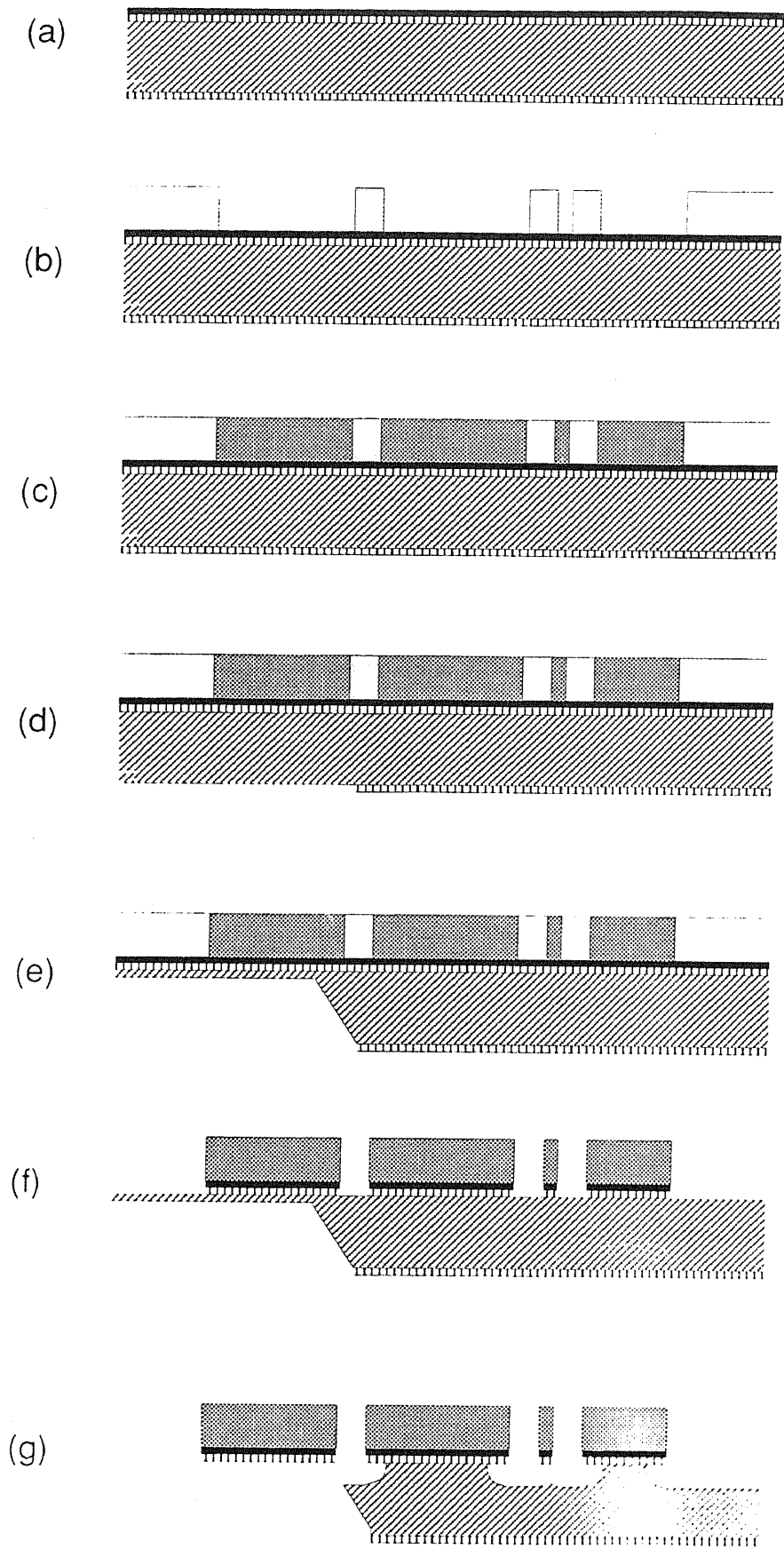
8.1.1 電鍍による製法[44]

図8-1に電鍍による製法を示す。これは探針を基板の縁から外へ突き出した（オーバハンク）構造をつくるプロセスを同時に示している。

- (a)シリコン基板に窒化シリコンを堆積する。これは電氣的絶縁とKOHによるシリコンの異方性エッチングのマスクとなる。そのうえに電鍍の種として金属を蒸着し、厚い(7 μm 程度) フォトレジストをコートする。
- (b)作りたい形のネガパターンをフォトレジストで形成する。これが鋳型になる。
- (c)厚く電気鍍金をする。
- (d)裏の窒化膜を部分的に除去しする。
- (e)KOHで裏側から途中の厚さまでエッチングする。
- (f)レジストを除去する。
- (g)ドライエッチングでシリコンを等方的にエッチングし、可動部を基板から分離するとともに、基板の薄くなっている部分を貫通させ、オーバハンク構造を完成させる。

この方法で製作すると全体が金属なので、導電層を後から堆積する必要がない。図8-2は製作したAFM/LTU集積デバイスのSEM写真である。アクチュエータの動作を実験で確認した。

電鍍で作った探針は、電解研磨で尖らせることができ、その上に余計な金属をコートしないので、探針の特性が向上できる。図8-3に示すように探針のもとになるパターンの近傍に電極を追加し、電解液（例えばニッケルに対してはNaCl水溶液）に浸漬して探針側に正、追加した電極に負の電圧を印加する。金属はイオンとなって電解液に溶けるが、電界が強い部分ほど速く溶けるので、探針のもととなる棒状部分はくびれ、最終的に切れて尖った探針ができる。このとき、探針は短くなり長さの制御も難しいが、AFM/LTU集積デバイスでは、解像力にかかわるAFM探針部分にだけこの方法を適用し、LTUの探針には使用しなければよい。








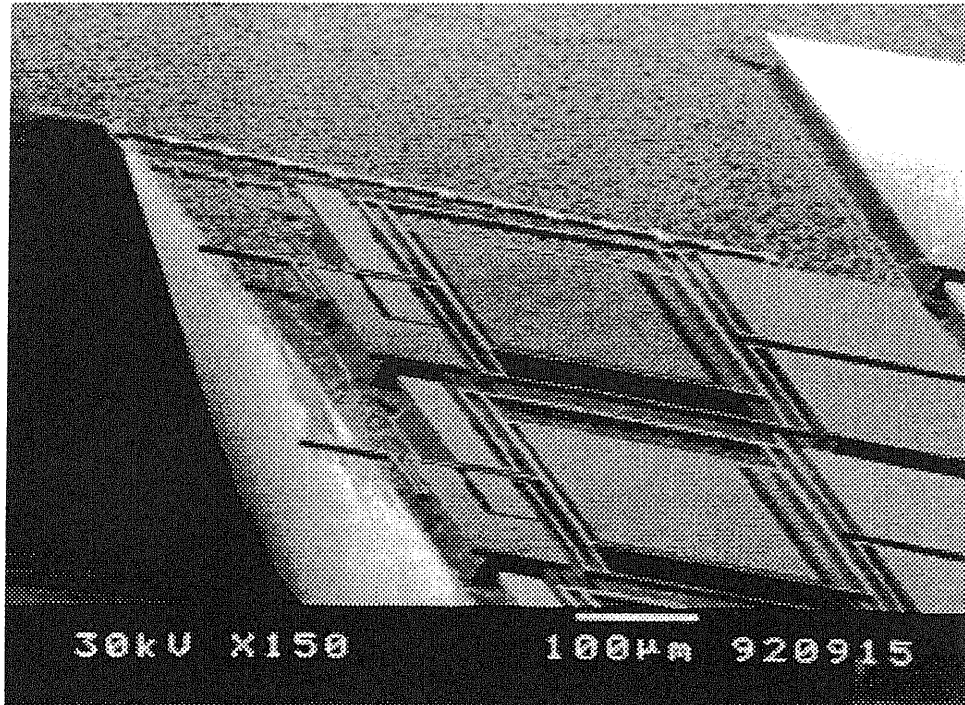
-  Photoresist (7 μm)
-  Silicon Wafer (500 μm)
-  Seed Layer (0.1 μm)
-  Silicon Nitride (0.2 μm)
-  Electroplated Metal (7 μm)

図8-1
電鍍によるLTUの製作法

(a)



(b)

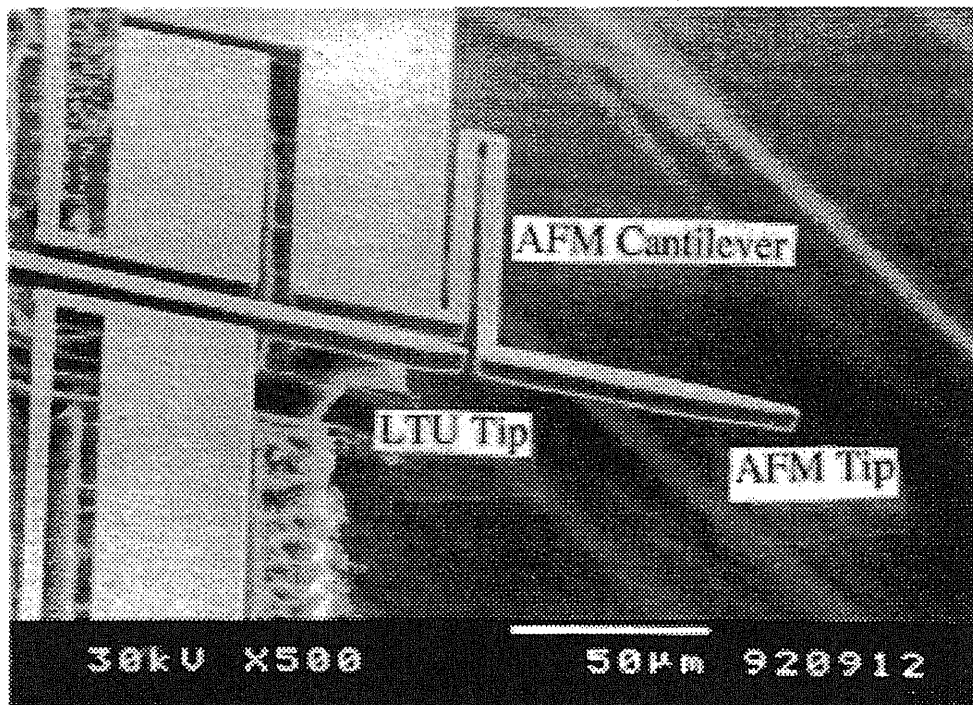


図8-2 電鍍により製作したAFM/LTU集積デバイス

- (a) 探針がオーバハンクしている
- (b) 集積されたAFM探針とLTU探針。写真のデバイスでは探針とカンチレバーの形は最適化されていない

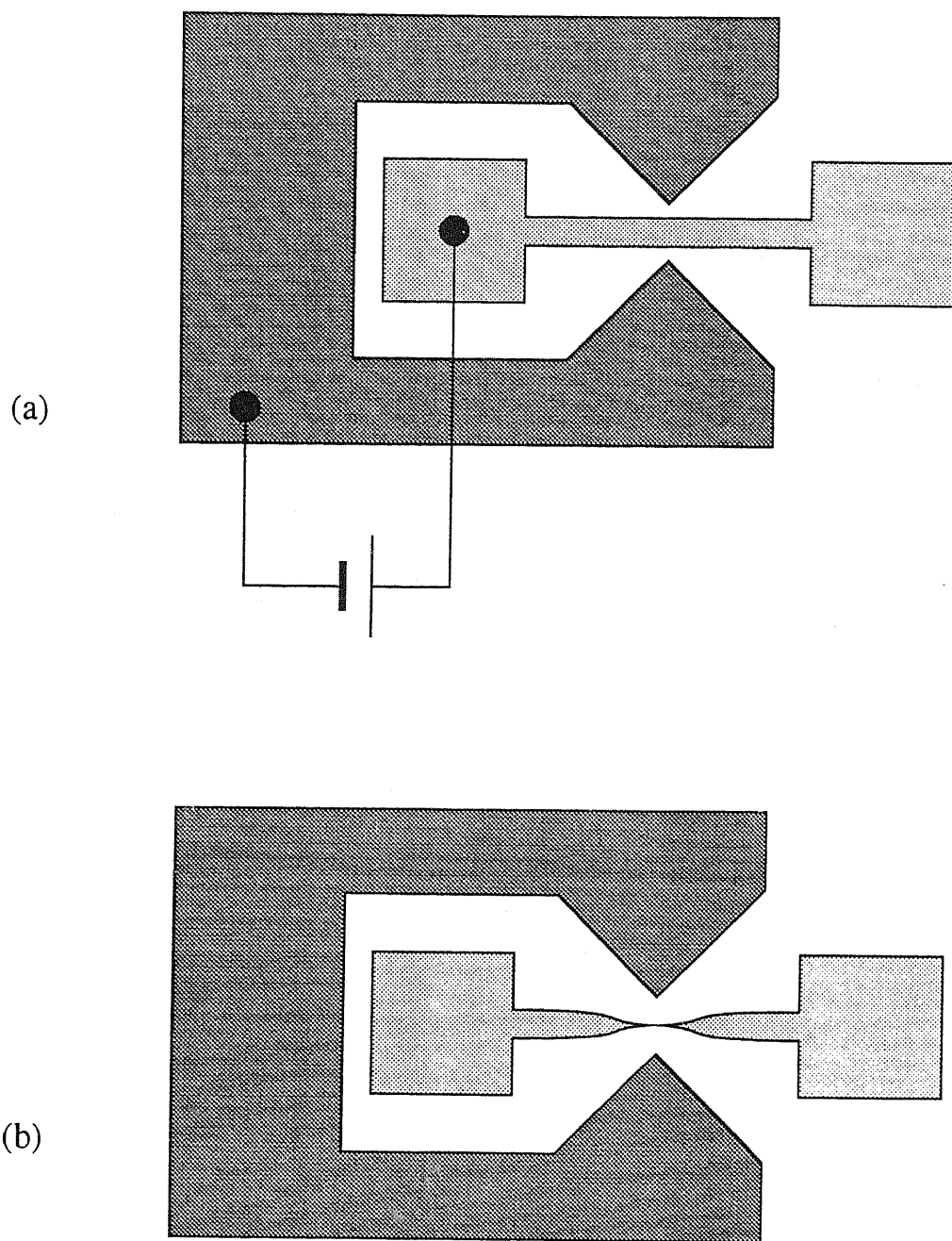


図8-3 局所的電界研磨による探針の尖鋭化

(a)電解液の中で、探針になるべき部分に正、付加電極に負の電圧を印加する。
 (b)棒状部はくびれて切れ、尖った探針ができる。

また金属とシリコンの選択性を使い、容易にオーバハングさせることができる。ただし、基板と構造の熱膨張係数がちがうので、熱ドリフトはポリシリコンのLTUより大きい。

8.1.2 SiO_2 ベースマイクロマシニングの可能性

RIEによるシリコンの異方性エッチングでは、エッチングする対象物の表面に保護膜を形成するガス成分をエッチングガスと共に供給する。4章で述べた現在のLTUの製法では、 CCl_2F_2 がその役割をはたす。上に向いている面ではイオン衝撃でこの膜が除去されてエッチングが進むが、側壁では衝撃が弱いためにエッチングが遅くなり、異方性が生じる。この原理から想像できるように、ガスの混合比や圧力等の条件は厳しく管理しなければならない。

一方、 SiO_2 の異方性エッチングには、 CHF_3 また $\text{CF}_4 + \text{H}_2$ を使う。反応の機構は次のように説明されている。HはFと結合してHFを形成してF不足の状態を作りだし、CFや CF_2 など結合手があまった反応種が多くなり、これらが重合して膜を作る。この膜は、Si表面では堆積していくが、 SiO_2 表面ではエッチングの結果出てくる酸素で酸化、除去されて、 SiO_2 だけがエッチングされる。

これは異方性より選択性の説明であるが、経験的に SiO_2 のエッチングは非常に異方性が強く、圧力や電力の条件はさほど厳密に管理する必要はない。また、シリコンとの選択性を求めなければ、 CF_4 や SF_6 に僅かに CHF_3 を添加した条件で、シリコンの異方性エッチング以上のエッチレイトが得られ、しかもシリコンは等方的に SiO_2 は異方的にエッチングされる。

したがって SiO_2 を構造層に使用すると、むしろプロセスが容易になる可能性がある。ただし、シリコン表面を熱酸化した酸化膜は、強い圧縮応力が入っているため、構造には使えない。またCVDやスパッタで堆積した酸化膜にも応力が入っており、しかも機械的、化学的強度が低く、これも実用性が低い。実用化するためには、石英基板にシリコンをサンドイッチして接合したものを製作する必要がある。図8-4は、このプロセスを説明したものである。

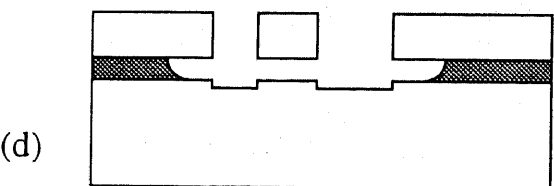
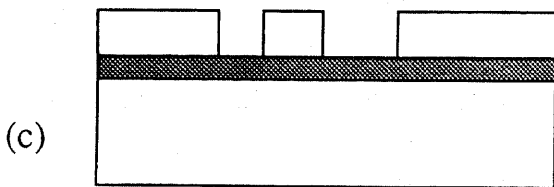
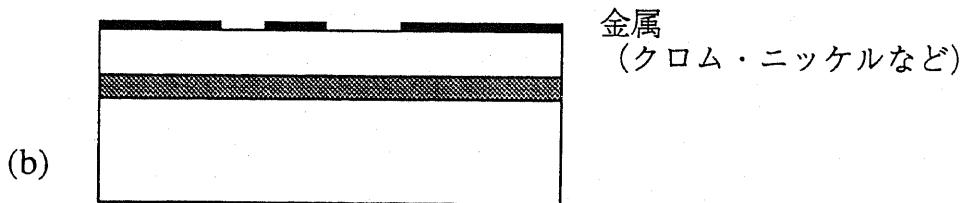
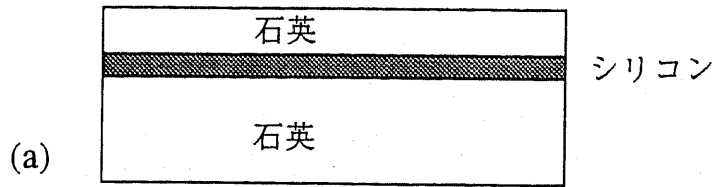
- (a) 石英基板をシリコン層をはさんで接合したもの。これはSOI (図8-5) のシリコンと SiO_2 を入れ替えた構造である。コストの高いSOIがあえて製作されることを考えると、マイクロマシニング用にこのような基板を開発する意味はあるだろう。
- (b) この基板にRIEマスクを付け、
- (c) $\text{CF}_4 + \text{CHF}_3$ でRIEを行う。
- (d) さらにRIEを続けてるとシリコンが除去されて分離が完了する。

このように、構造の形成工程と分離工程が同時に完了し、しかもドライエッチングなので付着がおこらない。またシリコンの異方性エッチングよりも時間とガスが節約できる。図8-5(b)の段階でHFによって探針を尖らせることも可能である。

SiO_2 のヤング率はシリコンのヤング率の半分以下だが、熱膨張係数はシリコンが $2.33 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ であるのに対し SiO_2 が $0.55 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ と小さいので、熱ドリフトには更に強くなる。LTUでは導電層を表面に付けるので、構造が誘電体であっても問題はない。むしろ、プロセスの工夫によっては探針とアクチュエータの可動部を電氣的に分離することができるという利点がある。

8.1.3 バルク-表面マイクロマシニング

これは、表面マイクロマシニングの方法を変更したものではないが、表面マイクロマシ



(a)石英基板をシリコン層をはさんで接合したもの
 (b)RIEマスクを付け、
 (c)CF₄+CHF₃でRIEを行う。
 (d)さらにRIEを続けるとシリコンが除去されて、
 分離が完了。ドライエッチングなので付着が発生しない。RIEのガスを変える必要もない。

図8-4 SiO₂ベースの表面マイクロマシニング

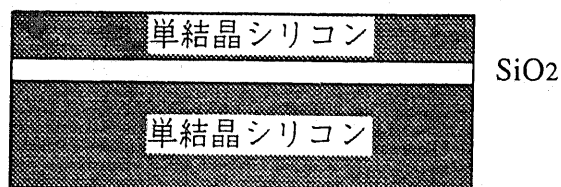


図8-5 SOI基板

SOIはSilicon-On-Insulatorの略。単結晶シリコンをSiO₂を挟んで接合し、表側のシリコンを研磨して所定の厚さにしたもの（他の製造法もある）。コストは高いが、ICにおける素子間の誘電体分離プロセスやマイクロマシニングの材料としても有望。

ニングでは異例の厚さである、20 μm 厚のSOI基板^{註1}を加工した例である。RIEマスクとシリコンの選択性を実験で調べた結果クロムを採用し（従来はニッケルであったが、この検討により、4 μm 厚のLTUでもクロムを使用するようになった）、サイドエッチ量などを最適化した結果、図8-6(a)のような構造が製作可能になった。構造が5倍の厚さになると、縦方向の剛性が125倍になるため、このような曲がりくねった構造でも付着現象がみられない。しかし図8-6(b)に示すように櫛歯のあいだの狭い溝が下まで掘れなかったため、今回の目的には利用できなかった。

8.2 設計

8.2.1 アクチュエータのプッシュ-プル駆動[46]

図8-7は同一特性の櫛形静電アクチュエータを2個、逆の向きに結合し、発生力の差を出力する構造を示している。それぞれのアクチュエータの駆動電圧はそれぞれ、

$$\begin{aligned} F_1 &= K_e(V_c + V_b)^2 \\ F_2 &= -K_e(V_c - V_b)^2 \end{aligned} \quad (8.1)$$

と表せる。 K_e は比例定数である。これらを加えると、

$$F_1 + F_2 = 4K_e V_c V_b \quad (8.2)$$

となり、2乗成分が消える。ここで、 V_b を一定にし、 V_c を制御信号として使うことができる（逆でもよい）。また V_b を変化させると感度が調節できる。この駆動方法は実験で確認した。

8.2.2 アクチュエータへのオフセット機構の付加[45]

多段櫛歯を使用した櫛形静電アクチュエータでは、櫛歯の間がサブミクロンギャップになるまで挿入されて、はじめて強い力が発生する。はじめからサブミクロンギャップになっている場合に比べると、アクチュエータの線形性が悪く、駆動電圧も大きくなるだけでなく、サブミクロンギャップになるときすでに高い電圧がかかっている、横方向の安定性の余裕が低下する危険性がある。

また、探針を尖らせるとマスクパターンよりも短くなるため、アクチュエータの可動範囲を大きめに設計する必要があり、これがバネ定数を大きくできない要因のひとつになる危険性がある。

これを解決する方法が文献[45]に見られる。図8-8に示すように支持梁の一部を折り返し、この部分を平行平板型アクチュエータにしておく。この付加的なアクチュエータに電圧を印加して、折り返し部分を吸い付け、スポット溶接に原理で密着させてしまうと、櫛歯があらかじめ挿入された状態になる。

^{註1} 信越半導体にご提供いただいた。

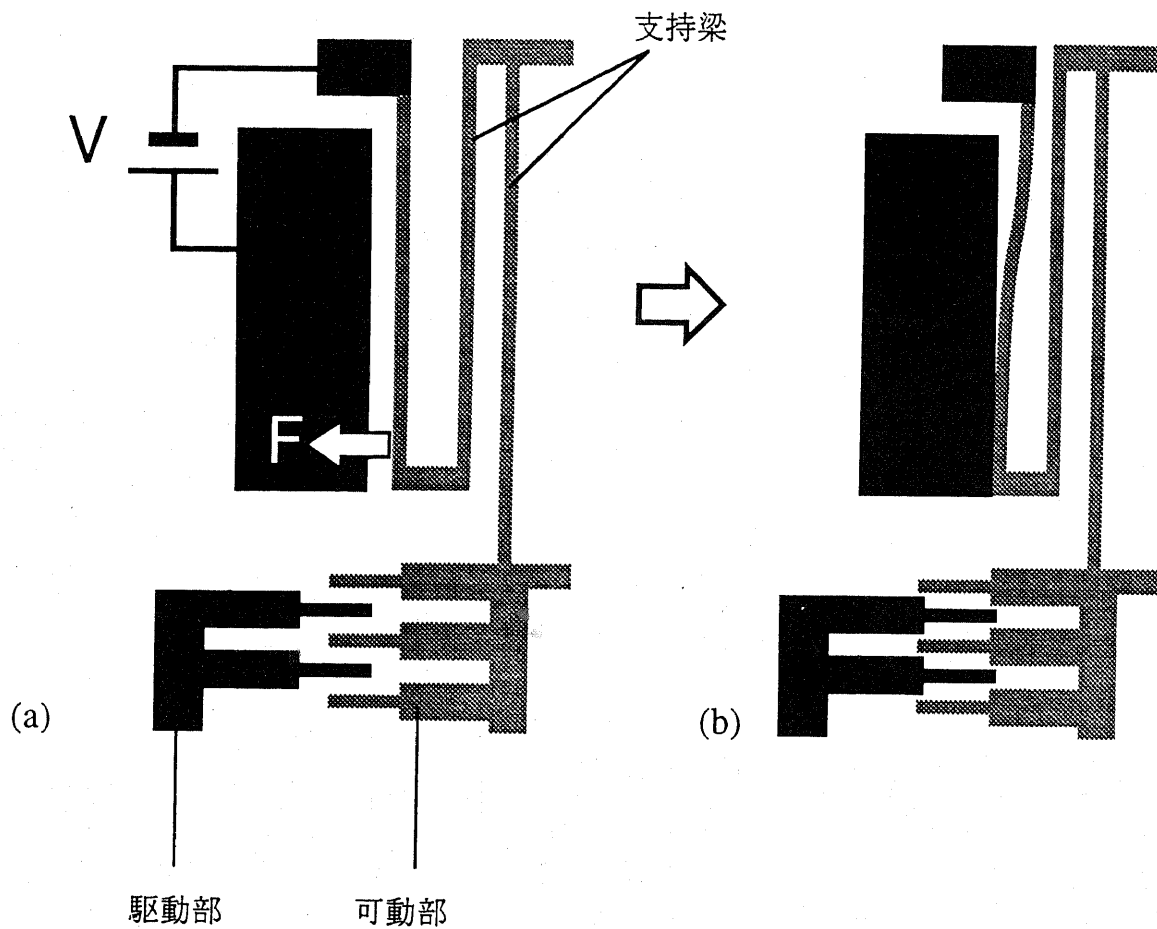


図8-8 櫛形静電アクチュエータにあらかじめオフセットを加える方法[42]

- (a) 支持梁の一部を平行平板型アクチュエータにしておきここに電圧を印加する。
- (b) 平行平板部分は吸い付けられ、スポット溶接の原理で離れなくなる。

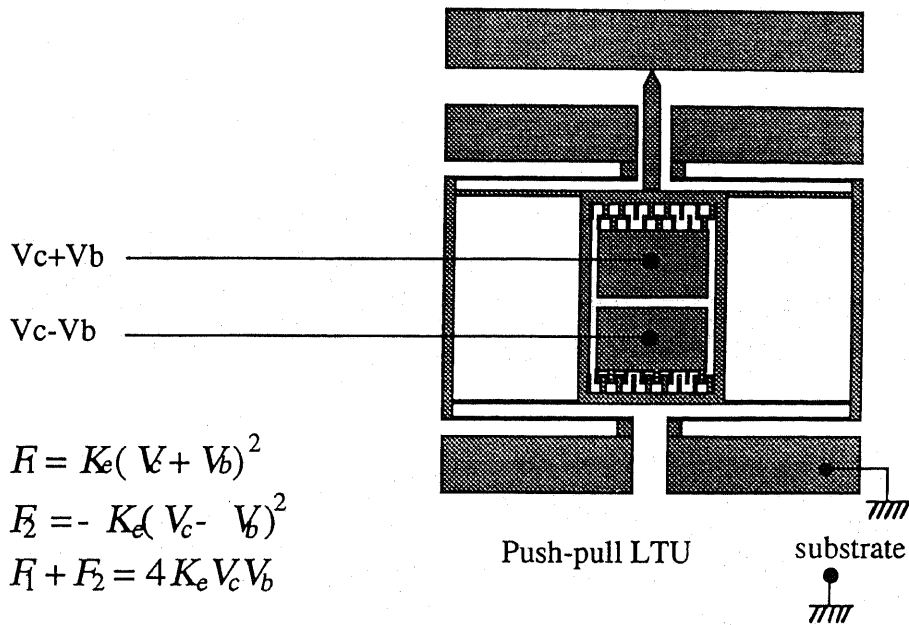
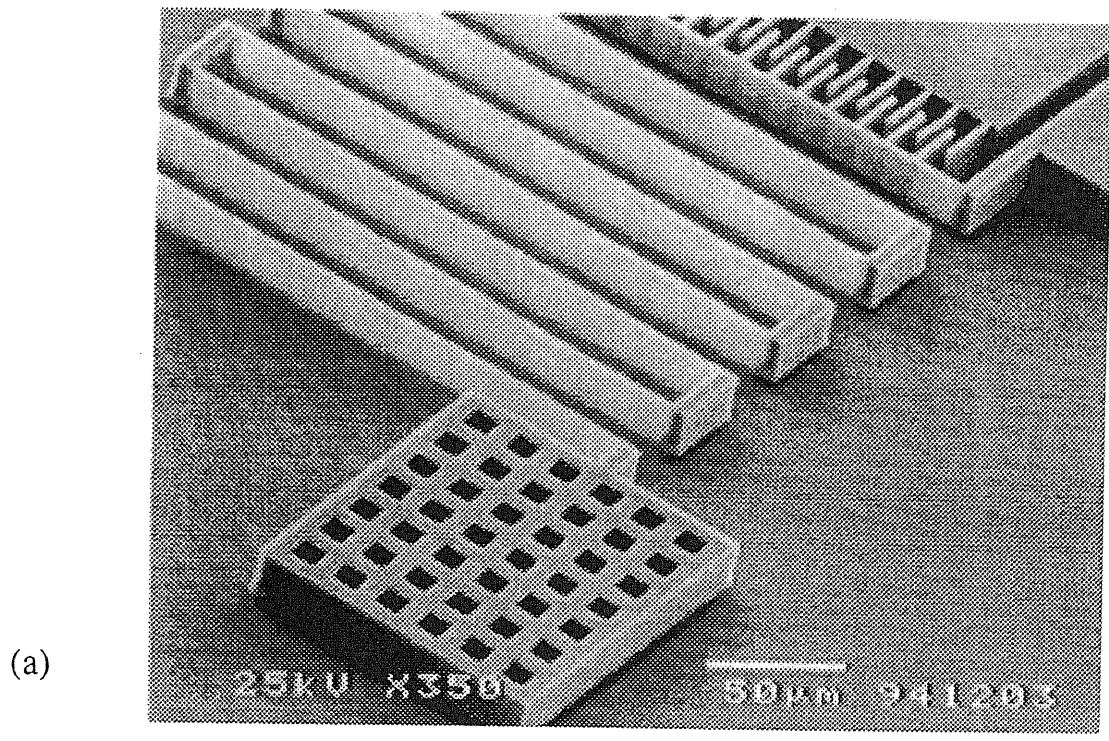
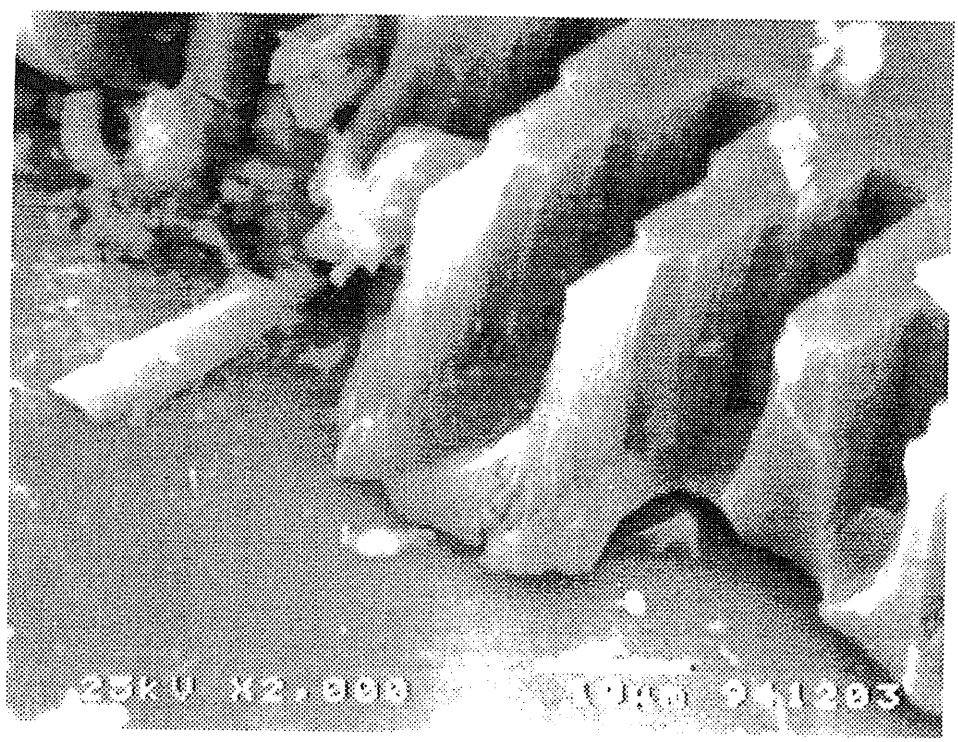


図8-7 2乗特性のアクチュエータの線形駆動法



(a)



(b)

図8-6 厚さ20 μm のシリコン表面マイクロマシニングの製作結果

(a)疑似スタティック変位アクチュエータ[]の実験に使用した構造。HFで分離した後、純水で洗浄しエタノールに置換して乾燥させたところ、付着を生じなかった。
 (b)高剛性LTUの櫛歯を機械的に破壊して断面を観察した。(a)のような粗いパターンは下まで掘れても、狭いギャップでは下までエッチングが終わらないことが多い。サイドエッチが無視できないため、下まで掘り下げると構造が痩せてバネ定数がかえって低下するので、今回は使用できなかった。使用したRIE装置はRF電力が150W程度で排気速度も低いため、これ以上の異方性を出すことは困難であったが、条件次第では可能である。

9章 まとめ

まず、各章を要約してみる。

1章：
トンネルユニットは小型であるほど外部からの振動の影響と熱ドリフトが小さくなることを理論的に予想し、従来のマイクロマシニングを用いたトンネルユニットよりも小型になるような設計方針が必要であることを主張した。

2章：
トンネルユニットに必要な様々な特性を議論し、設計の指針を提出した。

3章：
2章の要求を満たしつつ、1章の理想に近いマイクロトンネルユニット (LTU) を設計した。

4章：
製作上のいくつかの問題点を解決し、LTUを完成させた。また表面マイクロマシニングに一般的に利用できる、付着防止技術を開発した。

5章：
LTUは小さくすることを優先したため、振動的な機械特性になる。これを制御するために、真鍋多項式を指標にしてPID制御器を設計した。実現においては回路の特性にまで踏み込んで、性能の高い制御器を作ることを試みた。また、原子間力による不安定を予想して外乱オブザーバも用意した。

6章：
LTUで変位を検出する実験を行い、変位センサへの応用が可能であることを示した。また、空気中では非常に安定であった。

空気中では探針は斥力を受けていることがほぼ明らかになった。この理由がコンタミナントの硬さにあるのか、他の原因があるのか確認するため、極高真空装置で実験を行ったところ、リミットサイクル様の振動が発生した。

この振動は、PID制御である程度抑えられることが分かったが、動作波形から強い引力の存在が示唆された。

これを空気中との違いで考えてみると、汚染が関係あることは明らかである。トンネルギャップが斥力領域にあると仮定すると、汚染の役割はダンピングを増加させることとなり、トンネルギャップが引力領域にあると仮定すると、汚染の役割はみずから斥力を発生することとなる。

更に強力な制御で外乱を抑えるためにオブザーバを利用してみたが、かえって動作が暴れることがわかった。これは、リミッタ要素がある制御対象で外乱オブザーバを使用したためと考えられる。

結局、真空中で安定化させるにはデバイス自体の改良が不可欠であることがわかった。

7章：
剛性が高いPZTを使用しているSTMがそうであるように、アクチュエータの剛性が非常に

高ければ必ず安定化するので、2桁硬いアクチュエータを目標に、極力寸法が大きくなり設計変更を行った。

その結果、限られた領域であるが、真空中でも明確な斥力を観測した。これはトンネルギャップが斥力領域であることを示唆するものである。したがって、空気中でのコンタミナントが斥力を発生して引力に対抗しているというモデルは否定され、安定に寄与していたのはダンピングであろうと考えられる。

8章：

本論文の主題からはずれるために、開発したが7章までに書かなかった技術と、今後の改良に利用できる技術について述べた。

以上が前章までの要約である。工学面と物理面からのまとめを以下に述べる。

工学面のまとめ

LTUはマイクロトンネルユニットのなかでも、とくに小型化を優先した設計を行った。その結果、アクチュエータの剛性が低く力が弱いという特徴を持つことになったが、空気中ではきわめて安定に動作し、変位センサとして使用できることがわかった。AFMカンチレバーの変位測定の実験は、同一プロセスで同一基板に製作した微小構造の変位をトンネル電流で測定した最初のケースであろう。このことは、同一平面に構造を配置して水平方向に探針を動かすという、当初の設計の妥当性を証明するものである。

物理面のまとめ

探針と対向面が斥力を及ぼしあっているか、あるいはまた引力で引き合っているかは、LTUの安定性に対して重要な意味を持つ。引力領域で作動させなければならないとすれば、原理的に剛性が低いアクチュエータでは安定化できない。実験の結果、斥力領域であることが支持されるので、ダンピングをよくすれば弱いバネでも安定であることがわかった。

10 謝辞

本論文は、東京大学大学院工学系研究科博士課程在籍中に、生産技術研究所第3部藤田研究室で行った研究をまとめたものであります。本研究を終えるにあたり、ご指導頂いた藤田博之東京大学工学部教授に心より感謝の意を表します。また、審査をしていただいた原島文雄教授、榊裕之教授、堀洋一助教授、川勝英樹助教授、平川一彦助教授の各先生方には、それぞれご専門の分野からの貴重なご意見をいただきましたことにお礼申し上げます。

ポリシリコンを堆積した基板は、日本IBM野洲工場で作られたものをいただきました。日本IBM株式会社と、ご協力くださった方々にお礼申し上げます。とくに、日本IBMから研究員として藤田研究室に派遣されていた古畑智武氏と平野敏樹氏には、日頃からプロセス技術をご指導いただいたり研究上のディスカッションができたことを感謝いたします。

SOI基板は信越半導体のご厚意により、無償でご提供いただきましたことにお礼申し上げます。

オージェ分析では、日立中央研究所の細木茂行氏にたいへんお世話になりましたことにお礼申し上げます。

STMの試料をご提供くださった江口匡史氏にお礼申し上げます。

ポストドクターとして藤田研究室にいられていたC.-J. Kim氏（現UCLA助教授）には、PRアシスト法の開発などにご助言をいただきましたことにお礼申し上げます。

理化学研究所の青野正和先生と青野原子操作プロジェクト（当時）の小林中氏には、STM技術に関連して多くのことをご教示いただきましたことにお礼申し上げます。

米ジェット推進研究所（当時）のT.W.Kenny氏には、マイクロトンネルユニットの研究の先輩として有用なご意見をいただきましたことにお礼申し上げます。

極高真空装置の製作にあたり、日本真空技術株式会社取締役の山川洋幸氏にお世話になりましたことにお礼申し上げます。

生産技術研究所第1部の岡野達雄教授ならびに寺田啓子氏には、真空技術のご指導を賜りましたことにお礼申し上げます。

生産技術研究所第2部（当時、現精密機械工学科）の樋口俊郎教授ならびに川勝英樹助教授には、修士課程で行った実験でSTM装置を使用させていただきましたことにお礼申し上げます。

システムを無償で製作していただきました富東電子工業の高野社長、ならびにその件でお世話になりましたYS電子工業の杉田社長の両氏にお礼申し上げます。

本研究は1992年度より3年間、日本学術振興会の特別研究員制度により、研究費の補助と奨学金を受けました。同会にお礼申し上げます。

11 参考文献

- [1] G. Binnich, H. Rohrer, Ch. Gerber, and E. Weibel, "Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy", *Phys. Rev. Lett.* 49, 57 (1982)
- [2] G. Binnich, C. F. Quate and Ch. Gerber, "Atomic Force Microscope", *Phys. Rev. Lett.* 56, 930 (1986)
- [3] S. Akamine, R. C. Barrett and C. F. Quate, "Improved atomic force microscope image using microcantilever with sharp tips", *Appl. Phys. Lett.* 57 (3), 16, July 1990.
- [4] J. Brugger, R. A. Buser and N. F. de Rooij, "Silicon Cantilevers and tips for scanning force microscopy", *Sensors and Actuators A*, 34 (1992) 193-200
- [5] S. Akamine, T. R. Albrecht, M. J. Zdeblic and C. F. Quate, "Microfabricated Scanning Tunneling Microscope", *IEEE Electron Device Letters*, 10, 490-492 (1989)
- [6] S. Akamine, T. R. Albrecht, M. J. Zdeblic and C. F. Quate, "A planer process for microfabrication of a scanning tunneling microscope", *Sensors and Actuators A21-A24* (1990), pp.964-970.
- [7] T. W. Kenny, S. B. Waltman, J.K. Reynolds and W. J. Kaiser, "A Micromachined Silicon Electron Tunneling Sensor", *Technical digest of IEEE, Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, January 1990, Napa Valley, CA, U.S.A., pp.192-196.
- [8] T. W. Kenny, S. B. Waltman, J.K. Reynolds and W. J. Kaiser, "Micromachined silicon tunnel sensor for motion detection", *Appl. Phys. Lett.* 58 (1), 7, January 1991.
- [9] T. W. Kenny, W. J. Kaiser, J. A. Podosek, H. K. Rockstad and J. K. Reynolds, "Micromachined Electron Tunneling Infrared Sensor", *Technical digest of IEEE, Solid-State Sensor and Actuator 1992*, June 1992, Hilton Head, CA, U.S.A., pp.174-177.
- [10] T. W. Kenny, W. J. Kaiser, H. K. Rockstad, J. K. Reynolds, J. A. Podosek, and E. C. Vote, "Wide-Bandwidth Electromechanical Actuators for Tunneling Displacement Transducers", *J. of Microelectromechanical Systems*, Vol.3, No.3, September 1994.
- [11] D. F. Moore, M. I. Lutwyche, "Fabrication of freestanding structures and proposed applications in tunneling sensor", *J. Vac. Sci. Technol. B* 11(6), Nov/Dec 1993, 2548-2551.
- [12] Y. B. Gianchandani and K. Najafi, "A bulk silicon dissolved wafer process for Microelectromechanical device", *J. Microelectromechanical Systems*, 1, 77-85 (1992)
- [13] P. F. Indermuehle, C. Linder, J. Brugger, V.P. Jaecklin and N. F. de Rooij, "Design and fabrication of an overhanging xy-microactuator with integrated tip for scanning surface profiling", *Sensors and Actuators A*, 43 (1994) 346-350.
- [14] T. Itoh and T. Suga, "Piezoelectric force sensor for scanning force microscopy", *Technical digest of IEEE, Solid-State Sensor and Actuator 1993*, June 1993, Yokohama, Japan, pp.610-613.
- [15] M. Tortonesi, et al., "Atomic force microscopy using a piezoresistive cantilever", *Technical digest of IEEE International Conference on Solid-State Sensors and Actuators 1991*, June 1991, San Francisco, CA, USA, pp.448-451.
- [16] D. Kobayashi, T. Hirano, T. Furuhashi and H. Fujita, "An Integrated Lateral Tunneling Unit", *Technical digest of IEEE, Micro Electro Mechanical Systems Workshop 1992*, February 1992, Travemünde, Germany, pp.214-219.
- [17] D. Kobayashi, T. Hirano, T. Furuhashi and H. Fujita, "A micro displacement detector using tunneling current", *Technical digest of 11th Sensor Symposium*, June 1992, Tokyo, pp.31-34.
- [18] T. R. Albrecht, M. M. Dovek, M. D. Kirk, C. A. Lang, C. F. Quate and D. P. E. Smith, "Nanometer-scale hole formation on graphite using a scanning tunneling microscope", *Appl. Phys. Lett.* 55 (17), October 1989, 1727-1729
- [19] J. S. Foster, J. E. Formmer and P. C. Arnett, "Molecular manipulation using a tunneling microscope", *Nature* Vol.331, pp324-326, January 28 1988

- [20] D. M. Eiger and E. K. Schweizer, "Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope", *Nature* Vol.344, pp524-526, April 5 1990
- [21] Activity report No.1 of Aono Atom Craft Project, ERATO, JRDC, December 1992
- [22] 瀧本, 矢野, 畑中, 江口, 中桐, "走査プローブ顕微鏡を用いたLB膜のスイッチング現象", *応用物理* 63巻5号, pp.470-477, (1994)
- [23] W. C. Tang, T. H. Nguyen and R. T. Howe, "Laterally driven polysilicon resonant microstructures", *Technical digest of IEEE, Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, February 1990, Napa Valley, CA, pp.1-8.
- [24] T. Furuhashi, T. Hirano, K. J. Gabriel, H. Fujita, "Sub-micron gaps without sub-micron etching", *Technical digest of IEEE, Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, January 1991, Nara, Japan, pp.57-62.
- [25] D. Kobayashi, C.-J. Kim and H. Fujita, "Photoresist-Assisted Release of Movable Microstructures", *Japanese J. of Appl. Phys.* Vol.32, No.11A, pp.L1642-L1644
- [26] 小林, C.-J. Kim, 藤田, "表面マイクロマシーニングで製作した柔軟構造の分離時における付着防止技術", 次世代センサ協議会技術委員会 マイクロ理工学研究会マイクロマシーニング研究会合同研究会発表資料 MP-93-10, MM-93-10, pp.55-58, 1993年3月12日、東北大学
- [27] Z. L. Zhang and N. C. MacDonald, "An RIE process for submicron silicon electro-mechanical structures", *Proceedings of IEEE International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, June 24-27, 1991, pp.520-523.
- [28] H. Guckel, J. J. Sniegowski, T. R. Christenson, and F. Raissi, "The application of fine-grained, tensile polysilicon to mechanically resonant transducers", *Sensors and Actuators*, A21 (1990) pp.346-351
- [29] N. Takeshima, K. J. Gabriel, M. Ozaki, J. Takahashi, H. Horiguchi, H. Fujita, "Electrostatic parallelogram actuators", *Proceedings of IEEE International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, June 24-27, 1991, pp.63-66.
- [30] M. Orpana and A.O. Korhonen, "Control of residual stress of polysilicon thin films by heavy doping in surface micromachining", *Proceedings of IEEE International Conference on Solid-State Sensors and Actuators*, June 24-27, 1991, pp.957-960.
- [31] C. -J. Kim, A. P. Pisano, R. S. Muller, and M. G. Lim, "Polysilicon microgripper", *Technical Digest of IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head Island, June 1990, pp.48-51.
- [32] G. K. Fedder, J. C. Chang, and R. T. Howe, "Thermal assembly of polysilicon microactuators with narrow-gap electrostatic comb drive", *Technical digest of IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, June 22-25, 1992, pp.63-68.
- [33] K. Minami, Y. Wakabayashi, T. Matsubara, K. Yoshimi, M. Yoshida, and M. Esashi, "YAG laser assisted etching for releasing silicon micro structure", *Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, February 7-10, 1993, pp.53-58.
- [34] 真鍋, "古典制御, 最適制御, H_∞ 制御の統一的解釈", *計測と制御* Vol.30, No.10, pp.941-946, 1991
- [35] 堀 洋一, "共振比制御と真鍋多項式による2慣性系の制御", *電気学会論文誌D* Vol.114, No.10, 1994, pp.1038-1045
- [36] 堀, "PID制御のみによる2慣性系の制御", *電気学会論文誌D* Vol.115, No.1, 1995, pp.86-87
- [37] 荒木, "2自由度制御系---I-PID・微分先行形・I-PD制御系の統一的見方などについて--", *システムと制御* Vol.29, No.10, 1985, pp.649-658
- [38] 梅野, 堀, "2自由度ロバストサーボ系の構成とマネビュレータの運動制御への応用", *電気学会論文誌D* Vol.110, 1990, pp.1163-1170
- [39] 大西, "メカトロニクスにおける新しいサーボ技術", *電気学会論文誌D* Vol.107, 1987, pp.83-86
- [40] BURR-BROWN プロダクトデータブック, 1986

- [41] L. Lin, K. M. McNair, R. T. Howe and A. P. Pisano, "Vacuum-Encapsulated Lateral Microsensors", Technical digest of IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, June 7-10, 1993, Yokohama, pp.270-273.
- [42] C.-J. Kim, et al., "Overhung electrostatic microgripper", Technical digest of IEEE International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, June 1991, San Francisco, CA, USA, June 1991, pp.610-613.
- [43] H. Yamada, T. Fujii and K. Nakayama, "Experimental study of forces between a tunnel tip and the graphite surface", J. Vac. Sci. Technol. A 6 (2), Mar/Apr 1988, pp.293-295.
- [44] T. Hirano, D. Kobayashi, T. Furuhashi and H. Fujita, "Electroplated and Dry-Released Metallic Microstructures for a Lateral Tunneling Unit Application", Japanese J. of Appl. Phys. Vol.33, No.2, 1994, pp.1202-1208
- [45] T. Hirano, T. Furuhashi, K. J. Gabriela and H. Fujita, "Design, Fabrication, and Operation of Submicron Gap Comb-Drive Microactuators", J. of Microelectromechanical Systems Vol.1, No.1, March 1992, pp.52-59
- [46] 小林 大, 修士論文, "半導体マイクロマシーニングによる一体型トンネル顕微鏡の基礎研究", 1992