

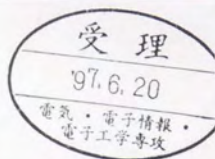
学 位 論 文

マイクロマシンによる  
磁気ディスク装置の高記録密度化の研究

平成9年6月

中 村 滋 男

①



# 博士論文

## マイクロマシンによる 磁気ディスク装置の高記録密度化の研究

### 指導教官

東京大学 生産技術研究所 第三部  
藤田 博之 教授

東京大学 大学院  
工学系研究科 電気工学専攻

中 村 滋 男

平成9年6月20日 提出

# 目次

1 序論	1
1.1 緒言	1
1.2 マイクロマシンと情報通信機器	3
1.3 磁気ディスク装置の機構系の概要	4
1.4 本研究の目的と方法	6
1.5 本研究の構成	8
1.6 結論	8
2 ヘッドにおけるマイクロマシン適用可能技術の提案	11
2.1 緒言	11
2.2 各論	13
2.2.1 ヘッド高精度位置決め用アクチュエータ	13
2.2.2 吸着防止用アクチュエータ	14
2.2.3 ヘッド機構部形成技術	14
2.2.4 一定ヨー角制御用アクチュエータ	14
2.2.5 耐環境用浮上量制御アクチュエータ	14
2.2.6 ダイナミックダンパ	14
2.2.7 吸着解除用サスペンション共振機構	15
2.2.8 プリアンプ	15
2.2.9 マルチサンプリング用角速度センサ, 外乱抑制用加速度センサ	15
2.2.10 ショックセンサ用加速度センサ	16
2.2.11 配線技術	16
2.2.12 昇電圧回路	16
2.3 結言	16
3 ヘッド高精度位置決め用マイクロアクチュエータの研究 (静電アクチュエータの研究)	17
3.1 研究の目的	17
3.2 研究の流れ	19
3.3 仕様	21
3.3.1 ストローク	21
3.3.2 機械的共振周波数	21
3.3.3 印加電圧	21
3.3.4 可動部搭載マス, サイズ	22
3.4 方式の検討	22
3.4.1 可動部	22
3.4.2 駆動法	22



3.4.3	制御法	25
3.4.4	粗動アクチュエータとの関係	25
3.5	2方向動作静電アクチュエータ	28
3.5.1	動作原理	28
3.5.2	動作原理の検証	31
3.5.3	線形化駆動の検討	33
3.6	数値計算	34
3.6.1	検討条件	36
3.6.2	最適化の手法	37
3.6.2.1	アクチュエータ外形寸法	37
3.6.2.2	最小ギャップ寸法	38
3.6.2.3	最適ギャップ比(後方ギャップ寸法, 電極数)	38
3.6.2.4	電極幅, 素子取り付け部厚さ	40
3.6.2.5	印加電圧/アクチュエータ高さ	40
3.6.3	数値計算結果	40
3.6.3.1	高さ250 $\mu$ m, 共振周波数20kHzのアクチュエータ	40
3.6.3.2	ギャップ寸法とアクチュエータの性能	42
3.7	プロトタイプモデルの試作	45
3.7.1	小型シンクロトロンを用いたLIGA (Lithographie, Galvanoformung und Abformung)	46
3.7.2	大型シンクロトロンを用いたLIGA	50
3.7.2.1	マスクの作製	50
3.7.2.2	試作例	53
3.7.3	ICP (Inductively Coupled Plasma) エッチング	55
3.7.4	RIE (Reactive Ion Etching)	58
3.7.5	電鋳	60
3.7.6	プロトタイプモデルの試作のまとめ	63
3.7.6.1	プロセス実力	63
3.7.6.2	共振周波数	63
3.7.6.3	発生変位	71
3.8	ヘッド素子の実装法についての考察	72
3.9	まとめ	75
4	スライダ・円板吸着防止用TiNi薄膜アクチュエータの研究	76
4.1	研究の目的	76
4.2	研究の流れ	76
4.3	TiNi薄膜の作製と温度特性	79
4.4	厚さ10 $\mu$ m程度のTiNi薄膜のパターニング方法の開発	80
4.5	発生力の実験的検討	82
4.6	上下運動(吸着防止用)アクチュエータの開発	83



4. 7 まとめ	85
5 スライダ・サスペンション一体形ヘッドの研究	86
5. 1 研究の目的	86
5. 2 研究の流れ	86
5. 3 有用性の検討(方式の検討)	88
5. 4 数値計算例	88
5. 5 試作例	93
5. 6 まとめ	94
6 マイクロマシンによる記録密度向上の試算	95
7 結論	97
7. 1 マイクロマシンによる磁気ディスク装置の高記録密度化の研究	97
7. 2 マイクロマシンの研究	97
7. 3 情報通信機器の開発指針の研究	98
7. 4 結言	99
謝辞	100
参考文献	101
発表文献	104
付録	107

## 図目次

1. 1	磁気ディスク装置の記録密度の増加の傾向	2
1. 2	磁気ディスク装置	5
1. 3	研究テーマ選定プロセス	7
1. 4	論文の構成	10
2. 1	マイクロマシン適用可能技術の提案	12
3. 1	研究の流れ	20
3. 2	マイクロアクチュエータの構想	24
3. 3	構造の検討	27
3. 4	2方向動作静電アクチュエータと1方向動作静電アクチュエータ	28
3. 5	試作アクチュエータ	32
3. 6	プロセスチャート	32
3. 7	電圧-変位特性	33
3. 8	電圧-変位特性の線形化の検討	35
3. 9	ヘッド素子とアクチュエータ高さの関係	36
3. 10	最適ギャップ比	39
3. 11	1方向動作と2方向動作アクチュエータの電圧-変位特性(シリコン)	41
3. 12	1方向動作と2方向動作アクチュエータの電圧-変位特性(ニッケル)	41
3. 13	印加電圧をパラメータにした設計線図(シリコン)	43
3. 14	印加電圧をパラメータにした設計線図(ニッケル)	43
3. 15	共振周波数をパラメータにした設計線図(シリコン)	44
3. 16	共振周波数をパラメータにした設計線図(ニッケル)	44
3. 17	プロセスチャート(小型シンクロトロンを用いたLIGA)	46
3. 18	現像中に変形したPMMAの型を用いた例	48
3. 19	小型シンクロトロンを用いたLIGAで作製したアクチュエータ	48
3. 20	印加電圧と変位(LIGA)	49
3. 21	周波数特性(LIGA)	49
3. 22	X線リソグラフィ用マスクの作製プロセスチャート	51
3. 23	X線リソグラフィ用マスク	52
3. 24	プロセスチャート(大型シンクロトロンを用いたLIGA)	54
3. 25	プロセス例(大型シンクロトロンを用いたLIGA)	55
3. 26	プロセスチャート(ICP, RIE)	56
3. 27	ICPで作製したアクチュエータ	56
3. 28	印加電圧と変位(ICP)	57
3. 29	周波数特性(ICP)	57
3. 30	プロセス例(RIE)	59
3. 31	プロセスチャート(電鍍)	61
3. 32	プロセス例(電鍍)	62

3. 3. 3	マスク寸法とレジスト寸法	62
3. 3. 4	断面プロファイル	63
3. 3. 5	共振周波数とサーボ帯域	65
3. 3. 6	フィードバック制御系	66
3. 3. 7	周波数特性 (シリコン, 共振周波数 20 kHz)	67
3. 3. 8	周波数特性 (シリコン, 共振周波数 15 kHz)	68
3. 3. 9	周波数特性 (ニッケル, 共振周波数 20 kHz)	69
3. 4. 0	周波数特性 (ニッケル, 共振周波数 15 kHz)	70
3. 4. 1	ヘッド素子・マイクロアクチュエータ付スライダの作製プロセス案 (シリコン)	73
3. 4. 2	ヘッド素子・マイクロアクチュエータ付スライダの作製プロセス案 (ニッケル)	74
4. 1	スライダ・円板吸着防止用スライダ	77
4. 2	研究の流れ	78
4. 3	TiNi薄膜の特性	80
4. 4	プロセスチャート	81
4. 5	加工例	81
4. 6	片持ち梁型SMAアクチュエータの寸法	82
4. 7	片持ち梁型SMAアクチュエータの発生力	82
4. 8	環状アクチュエータの組み立て方	83
4. 9	環状アクチュエータ	84
4. 1. 0	環状アクチュエータの動作	84
4. 1. 1	環状アクチュエータの周波数応答特性	85
5. 1	研究の流れ	87
5. 2	超小形スライダを用いたヘッドの作製プロセス案	90
5. 3	テーパフラット形スライダ	91
5. 4	浮上量誤差の比較	91
5. 5	一体形ヘッドの寸法	92
5. 6	浮上特性	92
5. 7	プロセスチャート	93
5. 8	試作ヘッド	94
6. 1	マイクロマシン技術による浮上量の低減	96
A. 1	レーザードップラー計の測定範囲	108
A. 2	システム構成	109
B. 1	ポリシリコン薄膜の3次元変形	111
B. 2	超小形ヘッド	112
B. 3	座屈梁	112
B. 4	応力緩和	114
B. 5	数値計算と実験値	115



## 表目次

1. 1	マイクロマシンの市場規模予測	2
1. 2	記録密度向上方法	4
2. 1	適用可能技術のまとめ	13
3. 1	2ステージ用微動アクチュエータの変遷	18
3. 2	マイクロアクチュエータの目標仕様	21
3. 3	駆動源の比較	24
3. 4	2ステージサーボ制御方式	26
3. 5	平行平板型アクチュエータと歯歯型アクチュエータ	27
3. 6	動作法の比較	30
3. 7	試作アクチュエータの寸法	31
3. 8	線形化の効果	34
3. 9	検討条件	37
3. 10	変位 $1\mu\text{m}$ に必要な印加電圧	40
3. 11	仕様案	42
3. 12	プロトタイプモデル試作一覧	45
3. 13	小型シンクロトロンを用いたLIGAで作製したプロトタイプモデルのまとめ	47
3. 14	ICPエッチングで作製したプロトタイプモデルのまとめ	58
3. 15	各工程におけるギャップ寸法	58
3. 16	プロセス実力	63
3. 17	フィードバック制御系の周波数応答	66
3. 18	発生変位のまとめ	71
4. 1	TiNi薄膜成膜条件	79
4. 2	発生力の比較	82
6. 1	マイクロマシンの効果	95
7. 1	新プロセスの開発	98
7. 2	情報通信機器への展開	99

# 1 序論

## 1. 1 緒言

近年、高度情報社会に向けての様々な研究が技術開発の分野で行なわれている。マイクロマシンを用いた情報通信機器の開発研究もその大きな流れの一つとして、盛んに行なわれている。マイクロマシンは、半導体微細加工を主としたマイクロマシーニング技術により、アクチュエータや可動機構などの微小立体構造を作り、それをセンサや電子回路と集積化し、超小形の運動システムを構築するものである。そして、3つのM、すなわち「マイクロ化(Miniaturization)」、「マルチ化(Multiplicity)」、「マイクロエレクトロニクス(Microelectronics)の集積化」という特徴をもつ[1]。入出力装置、通信装置、記憶装置などの情報通信機器の高機能化をマイクロマシンを用いて実現しようという試みは、マイクロマシンの3つのMが、情報通信機器の機械部品の開発動向である、小形、高精度、低価格に適していることからの発想である。

本研究では、情報通信機器の一例として、コンピュータの外部記憶装置として広く用いられている磁気ディスク装置を取りあげる。磁気ディスク装置は、数年前までの年率30%の記録密度の増加率が、ここ数年は年率60%となり(図1. 1)[2]、機械部品に求められる位置決め精度や寸法精度などの性能は、従来の構造や製造方法により実現できる限界の一手手前まで来ている。さらに、高記録密度化を実現するために、磁気ディスク装置及び部品の小形化も年々進み、機構系の実装密度も限界に近づいている[3]。このように、磁気ディスク装置はまさに新しい技術の導入が望まれている状況であり、マイクロマシンの具体的な適用分野としては、最適である。

本研究では、磁気ディスク装置における最重要開発課題である高記録密度の実現をマイクロマシンを適用して行なうことを目標とする。

本章では、マイクロマシンと情報通信機器の整合性について説明し、次に具体的な研究対象となる磁気ディスク装置の概要について述べる。さらに研究の方法を論文の流れに沿って説明する。

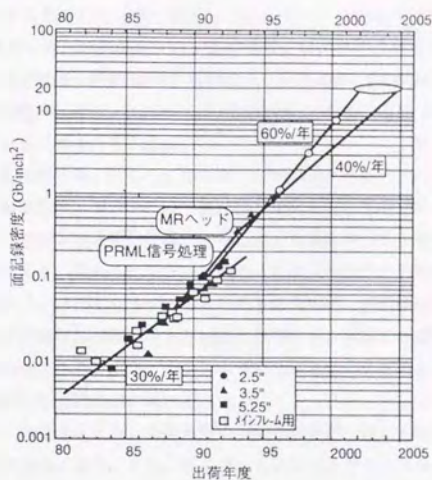


図 1. 1 磁気ディスク装置の記録密度の増加の傾向[2]

表 1. 1 マイクロマシンの市場規模予測

分野	1994年	2005年	2010年
情報通信機器	910	2876～4333	6133～9000
精密機器	90	684～2560	2710～6400
医療応用	230	1010～2405	2855～5600
計測	70	692～707	897～900
ナノテクノロジー・マイクロファクトリ	0	988～1670	2482～3824
メンテナンステクノロジー	0	1136～1973	22893～4540
環境	0	80～390	390～1000
航空宇宙	0	30	60
ホビー	90	180	270
合計	1390	7676～14248	18690～31594

単位：億円 (文献[6]のデータを集計)



## 1. 2 マイクロマシンと情報通信機器

マイクロマシンは、半導体微細加工を主としたマイクロマシーニング技術により、アクチュエータや可動機構などの微小立体構造を作り、それをセンサや電子回路と集積化し、超小形の運動システムを構築するものである。そして、これまで数々のセンサシステムやマイクロアクチュエータが実現されている[5]。その適用分野は、情報通信機器分野、精密機器分野、医療応用分野、計測分野などが考えられ、市場規模は、1994年に1400億円（情報通信機器分野900億円）程度であったものが、2005年には7700億～1兆4000億円（情報通信機器分野2900～4300億円）程度、2010年には1兆9000億～3兆2000億円（情報通信機器分野6100～9000億円）程度と予測されている（表1. 1）[6]。

マイクロマシンは、単に機械を微小にしたものでなく、先に述べたの「マイクロ化」、「マルチ化」、「マイクロエレクトロニクスの集積化」の3つのMで表される特徴を持つものである。

マイクロ化は、マイクロマシンの重要な要素である。マイクロ化のメリットは、まず、小形化そのもののメリットである。小形化により、従来入れなかった狭所への進入や設置が可能になったり、運搬が可能になったりすることである。マイクロ化のもう一つのメリットは高機能、高効率化である。機能体を小形化すると、単一体積や面積当たりの機能体の数が増え高機能化が図れる。換言すれば、1機能あたりに必要な面積や体積が減少し、高効率化が図れる。また、小形化することにより、必要とされるエネルギーも一般に小さくなるので、エネルギー的にも高効率化が図れる。

マルチ化とは、バッチプロセスにより、多種多量の部品を同時に一括して作製することを言う。したがって、個々の部品を低価格で実現できる。また、組立のいらぬブリアセンブル加工で複雑なシステムの一括製作が可能であるため、個々の部品は単純な機能しか持たなくても、多数集めることにより、複雑で高度な機能を実現することも可能である。

マイクロエレクトロニクスの集積化は、マイクロマシンに知能を与えるものである。マイクロ化やマルチ化の特徴も、機械部品と一緒に作製可能なマイクロエレクトロニクスなしでは、十分な機能を発揮できない。センサ、アクチュエータ、および論理回路を基板上に融合し、個々の制御を行うことにより、マイクロエレクトロニクスメカニカルシステムが構築できる。

入出力装置、記憶装置、通信機器等の情報通信機器の機械的特徴は、

- 可動部が、小形、軽量である。
- 製品の開発動向が、小形、大容量化（または、高密度化）である。
- メカトロニクス部品が多い。

などである。

情報そのものには、質量も体積もなく、処理や伝達も、光、電気、磁気などを介しておこなわれるので、光、電気、磁気などを操作する可動部も小形、軽量になる。情報は量が多いほど価値が高い。また、快適なマンマシン・インターフェイス環境下では、機械は小さければ小さい程、可搬性、スペース、エネルギーの点で有利であるため、製品の開発動向が、小形、大容量化になる。光、電気、磁気などを機械で扱うため、そして、入出力装置、記憶装置ではメディアとトランスデューサの正確な位置決めをサーボ技術を用いて行う必要があるため、構成部品にはメカトロニクス部品が多用されることになる。

小形化が要求され、メカトロニクス部品であること、また当然、低価格が要求されることから、マイクロマシンの特徴である3つのMが極めて有効に働く分野である。したがって、マイクロマシンの適用分野として情報通信機器は最適であると同時に、マイクロマシンは情報通信機器開発の基盤技術として非常に強力なものである。

### 1. 3 磁気ディスク装置の機構系の概要<sup>(1)</sup>

図1. 2に磁気ディスク装置機構系の概要を示す。情報の記録媒体である円板は、表面に磁性薄膜が形成されており、エンクロージャに固定されたスピンドルモータにより、3000R.P.M.(Revolution Per Minutes) から1万R.P.M.の速度で回転する。情報は、同芯円状に記録されている。この同芯円をトラックと呼ぶ。情報の記録/再生を行なうヘッドは、アクチュエータに保持され、VCM (Voice Coil Motor) により任意のトラックに位置決めされる。アクチュエータは、ベアリングを介しエンクロージャに固定されているシャフトに揺動可能な状態で支持されている。ヘッドの位置決め精度は、クォーターミクロンオーダー、あるトラックから別の任意のトラックへの平均的な移動時間(平均シークタイム)は、10ミリ秒程度である。

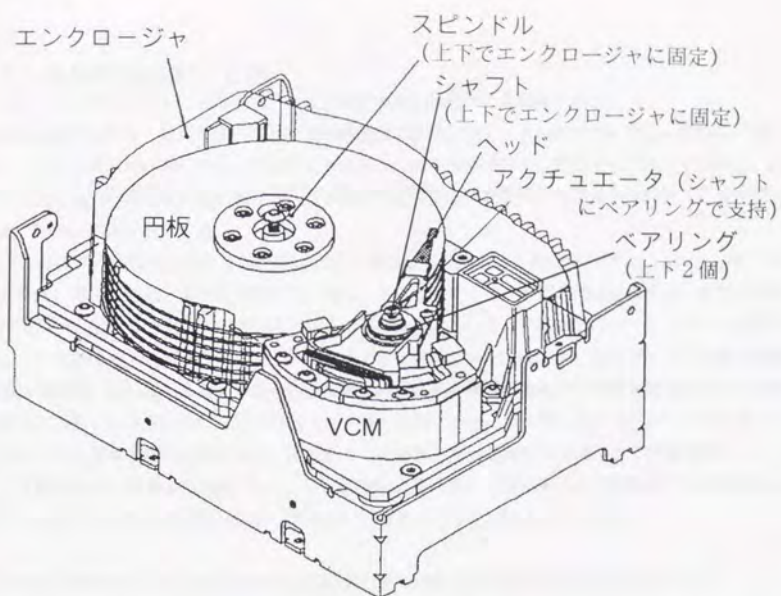
ヘッドは、記録/再生を行なう磁気回路を搭載し、円板上を数 $\mu\text{m}$ という微小隙間を保って浮上するスライダと、その支持機構であるサスペンションおよび信号線から構成される。磁気回路は、リング型ヨークにギャップを持った電磁石の記録用素子、再生用磁気抵抗(Magnetoresistance; MR)素子の2つの素子を薄膜形成技術により一体化しているものが最近では多い。記録時は、記録用素子に電流を流し、ギャップからの漏れ磁束により円板表面の磁性膜を局所的に円周方向に磁化する。再生時は、円板表面の磁性膜からの磁束を磁気抵抗素子で検出する。2値情報は磁化の向きによって判別される。

記録密度の向上は、単位情報当たりの媒体磁化面積を小さくすることなので、円板の周方向の記録密度(ビット密度)とトラック密度をそれぞれ向上させる必要がある。ビット密度を上げるためには、記録/再生のメカニズムから、ギャップと媒体の隙間(浮上量)を小さくすることが必須である。トラック密度を上げるためには、ヘッドの位置決め精度を上げることが必須である。何故なら、隣接するトラックの情報を保護するため、ヘッドの位置決め精度以上にトラック密度を上げることができないためである。記録密度の向上のため、記録/再生素子記録媒体の性能の向上を図ることも必要である(表1. 2)。

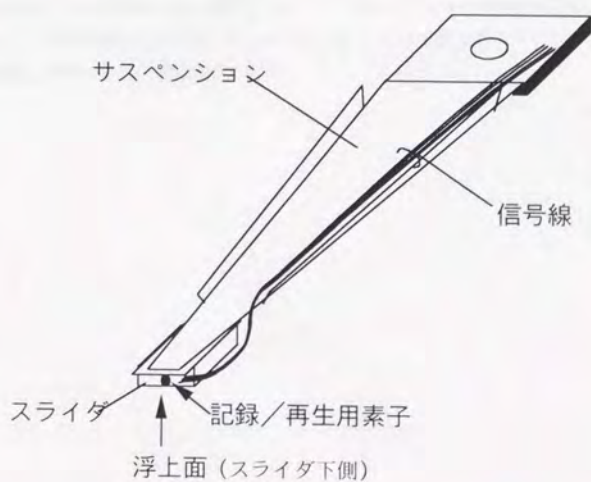
表1. 2 記録密度向上方法

項目	記録密度向上方法
ビット密度	●低浮上量化。 ●記録/再生素子, 媒体の性能向上。
トラック密度	●ヘッドの高精度位置決め。 ●記録/再生素子, 媒体の性能向上。

<sup>(1)</sup> 磁気ディスク装置の動作原理については、堀村洋太郎編、情報機器技術、東京大学出版会(1993-5)、日本機械学会編、情報機器のダイナミクスと制御、養賢堂(1996-11)等に詳しく解説がなされているので、参考にされたい。



(a) 磁気ディスク装置



(b) ヘッド

図1. 2 磁気ディスク装置



#### 1. 4 本研究の目的と方法

本研究は、マイクロマシンによる磁気ディスク装置の高記録密度化を目標とする。

情報通信機器における一般的な研究テーマや開発課題の抽出は図1. 3(a)のようになる。最初に実現したい目的（ニーズ）があり、次にそれを実現するためのシーズの探索を行う、次にシーズとニーズから、目的を達成のための適用可能技術の検討を行う。その適用可能技術と市場動向から具体的な研究テーマや開発課題を定め、研究、開発に着手する。

磁気ディスク装置の高記録密度化の場合は、上記に対応して、次のようになる（図1. 3(b)）。まず目的は、記録密度の向上である。より具体的には、表1. 2に示した、ヘッドの高精度位置決め、低浮上量化、記録/再生素子、媒体の性能向上がそれに当たる。次にシーズとして、本研究ではマイクロマシンを選んだ。これは、1. 2節で述べた様、3つのMに象徴されるマイクロマシンの特徴が、磁気ディスク装置の機構部品の開発に本質的に適しているからである。次に適用可能技術の検討であるが、対象を磁気ディスク装置の最重要部品であるヘッドを対象にしぼり行った。2章で詳細に述べるが、多くのマイクロアクチュエータ、マイクロセンサと集積化技術を検討した。磁気ディスク装置の高記録密度化を取り巻く市場環境として、まず、1. 1節で述べた年率60%の増加というトレンドがある。次に、磁気ディスク装置はすでに製品化されて久しく、企業において同様な研究が多くなされているという事実がある。そこで、

- 既に研究に着手されているが必要不可欠でかつ、未だ明確な実現手段が得られていないもの。
- 新しいコンセプトでかつ、重要度の高いもの。
- 5年後以降に製品化検討が始まると予測されるもの。

をテーマとして選定した。具体的には、研究リソースも考慮して、ヘッド高精度位置決め用マイクロアクチュエータ、ヘッド・媒体吸着防止用アクチュエータと小形ヘッドの研究を行なうこととした。

具体的な方法は、次節の研究の構成の中で示す。

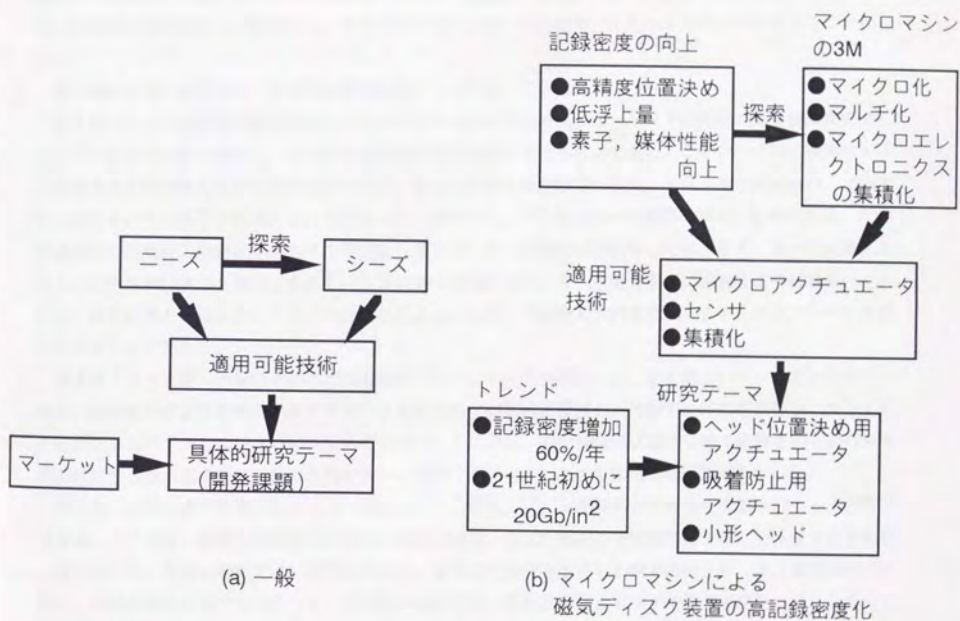


図1. 3 研究テーマ選定プロセス

## 1. 5 本研究の構成

本研究の流れを図1. 4に示す。本論文は全7章よりなる。

第1章「序論」では、研究の背景と目的を述べ、さらに、研究の方法ならびに流れを示した。

第2章「ヘッドにおけるマイクロマシン適用可能技術の提案」では、記録密度向上を目的にマイクロマシンを磁気ディスク装置の最重要部品であるヘッドに適用した際の適用可能技術を検討した。ここでは、記録密度向上を阻害している根本原因を解決する手段を提案した。具体的には薄膜プロセスで作製した超小形ヘッド、高精度トラッキング用ヘッド素子駆動アクチュエータ、吸着防止用アクチュエータ、一定ヨー角制御用マイクロアクチュエータ、ダイナミックダンパ、吸着解除用サスペンション共振機構、耐環境用浮上量制御用アクチュエータは、コンセプトも含めて全く新たな提案である。そして、提案した適用可能技術の中から、新規性と重要性という観点から、マイクロアクチュエータの研究と小形ヘッドの研究を行なうこととした。

第3章から第5章までは、具体的な研究成果について述べてある。

第3章「ヘッド高精度位置決め用マイクロアクチュエータの研究」は、ヘッドの先端に位置決め用のマイクロアクチュエータを搭載し、ヘッドの位置決め精度の向上を図るものである。このテーマは、磁気ディスク装置の高記録密度化には必要不可欠であり、多くの研究もなされているが、トラック密度40KTPi (Track Per Inch) という未着手の領域について行なった。本章では、アクチュエータ開発の際の、仕様決定、方式の選択から実現性の検討に至るまでの手順を一通り示した。実現性の検討としては、まず、同一印加電圧あたりの発生力が従来の2倍以上である、2方向動作静電アクチュエータを考案し、駆動原理の確認を行った。次に、数値計算とプロトタイプモデルの試作により、トラック密度40KTPiを達成するアクチュエータの実現性を示すことができた。

第4章「スライダ・円板吸着防止用TiNi薄膜アクチュエータの研究」は、全く新しいコンセプトのものである。昆虫の足のような環状アクチュエータをスライダの周囲に配置し、円板停止時に足が伸び、スライダが円板とコンタクトしないようにするものである。この足は、TiNi薄膜形状記憶合金で作製される。TiNi薄膜形状記憶合金、および加工法の開発を行い、環状アクチュエータの単体動作確認までを行った。

第5章「スライダ・サスペンション一体形ヘッドの研究」は、適用時期が5年程度先の小形ヘッドの研究である。ここでは、集積化部品開発の際の、仕様決定、方式の選択から実現性の検討に至るまでの手順を一通り示した。方式の選択では、集積化部品と、組み立て方法を改良した組立部品とを、浮上量誤差等で比較し、集積化部品の優位性を示した。実現性の検討では、数値計算による浮上特性の確認と、プロトタイプモデルの試作を行った。

第6章と第7章は研究成果のまとめである。

第6章「マイクロマシンによる記録密度向上の試算」では、第3章から第5章で開発した技術を製品化した場合の、記録密度の向上を試算し、マイクロマシンの有用性を示した。

第7章「結論」では、本研究の総括を行う。研究の成果を、磁気ディスク装置の高記録密度化の研究、マイクロマシンの研究、情報通信機器の開発指針の研究、という3つの観点から評価した。

## 1. 6 結論

本章では、本研究の目的および方法、さらに研究全体の流れを示した。

本研究の目的は、マイクロマシンによる磁気ディスク装置の高記録密度化である。磁気ディスク装置の高



記録密度化を実現するため、まず、マイクロマシンの適用可能技術の検討を行い、ヘッド高精度位置決め用マイクロアクチュエータ、スライダ・円板吸着防止用TiNi薄膜アクチュエータ、スライダ・サスペンション一体形ヘッドを具体的なテーマに選定し、研究を行う。各々の研究では、プロトタイプモデルの作製を行い、提案したアクチュエータや機構の実現性を示す。次に、これらの技術による記録密度の向上を試算し、有用性を確認し、最後に研究の総括を行う。

## 第1章

研究の目的：マイクロマシンによる磁気ディスク装置の高記録密度化

磁気ディスク装置からのニーズ

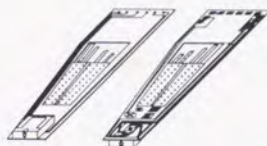
- ・ヘッドの位置決め精度の向上
- ・ヘッド浮上量の低減
- ・記録／再生効率の向上

シーズとしてのマイクロマシン

- 小形化
- マイクロアクチュエータ
- センサ
- 集積化
- 大量、一括生産

## 第2章

マイクロマシン適用技術の提案

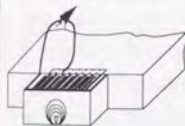


ヘッド位置決め精度の向上

ヘッド浮上量の低減

## 第3章 ヘッド高精度位置決め用 マイクロアクチュエータ

- 2方向動作静電アクチュエータの提案
- プロセスの研究  
LIGA  
ICPエッチング  
RIE  
電鍍



## 第4章 吸着防止用 TiNi薄膜アクチュエータ

- TiNi形状記憶合金薄膜の開発
- 加工法の研究
- TiNi環状アクチュエータ

## 第5章 スライド・サスペンション 一体形ヘッド

- 設計と試作

有用性の検討

## 第6章 記録密度向上の試算

- 開発技術による、総合効果の見積り。

まとめ

## 第7章 まとめ

- 成果のまとめ
- 情報機器への展開

図1.4 論文の構成

## 2 ヘッドにおけるマイクロマシン適用可能技術の提案

### 2.1 緒言

記録密度の向上ならびに信頼性の向上をを目的にマイクロマシンを磁気ディスク装置の基幹部品であるヘッドに適用した場合、多くの適用可能技術を提案することができる。図2.1, 表2.1 提案した適用可能技術を示す。適用可能技術を考える場合、ニーズにあったシーズの有無が重要な点である。

磁気ディスク装置のシーズは、本研究のテーマである高記録密度の実現と、高信頼性の確保である。高記録密度の実現というニーズを部品レベルに展開すると、

- ヘッドの高精度位置決め
- ヘッドの低浮上量
- 信号ノイズの低減

を実現することがニーズになる。

これに対してマイクロマシンというシーズは、第1章で挙げた3つのM, すなわち「マイクロ化(Miniaturization)」, 「マルチ化(Multiplicity)」, 「マイクロエレクトロニクス(Microelectronics)の集積化」という特徴を持ち、ニーズに対して極めて有効に機能する。具体的には、マイクロマシンで実現できるマイクロアクチュエータ、マイクロセンサ、エレクトロニクス部品、集積化微小構造がシーズとなる。しかも、マイクロマシンの利点は、性能向上を実現するセンサやアクチュエータをバッチプロセスにより大量に一括で作製でき、しかも現在ある部品との集積化も可能であるため比較的安価に機能付加したり、性能を向上させたりすることにある。また、現在の部品群を一体化する場合には、現状よりコストが下がり、しかも性能は向上させることができる。さらに、複数のセンサやアクチュエータを集積化しシステムを構築することにより、付加価値を一層増大させることも可能である。

本章では、図2.1, 表2.1に示した適用可能技術の各論について議論を行い、その中から具体的な研究テーマの選択を行う。



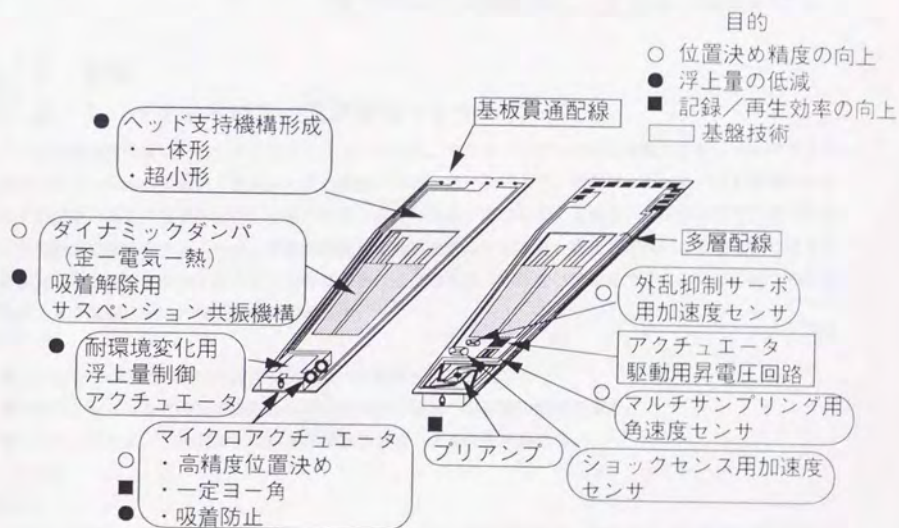


図2. 1 マイクロマシン適用可能技術の提案

表2. 1 適用可能技術のまとめ

	高記録密度化			高信頼性化
	ヘッドの 高精度位置決め	ヘッドの 低浮上量化	ノイズ の低減	
アクチュエータ	<u>高精度位置決め</u> <u>一定ヨー角</u> <u>ダイナミックダンパ</u>	<u>浮上量制御</u> <u>吸着防止</u>	—	<u>吸着解除</u>
センサ	マルチサンプリング 外乱抑圧		—	ショックセンス
エレクトロニクス	昇電圧回路		プリアンプ	
	多層配線, 基板貫通配線			
集積化微小構造	<u>一体形ヘッド</u> <u>超小形磁頭支持機構</u>		—	<u>一対形ヘッド</u> <u>超小形支持機構</u>

幾文字は、本論文研究項目。二重下線は、新規コンセプト。

## 2. 2 各論

### 2. 2. 1 ヘッド高精度位置決め用アクチュエータ

ヘッドの高精度位置決め用マイクロアクチュエータは、2ステージサーボ用の微動アクチュエータである。2ステージサーボは、微動アクチュエータと粗動アクチュエータにより、微動アクチュエータに搭載されたヘッドの記録/再生用素子を精密に位置決めするものである。簡単に考えるなら、人間が手で字を書くときの肩の役割が粗動アクチュエータ、手首の役割を微動アクチュエータだと考えれば良い。手首を使わなくても字は書けるが手首を使ったほうが上手な字が書ける（精度良くペンを位置決めできる。）のと同じである。磁気ディスク装置に用いた場合の具体的効果は、

- ベアリングの非線形特性の位置決め精度への影響を低減を図る。
- サスペンションなどの低周波数の振動の位置決め精度への影響の低減を図る。
- アクチュエータ/可動質量系の固有振動数を上げ、追従特性を高める。

である。

2ステージサーボは、光ディスク装置では実用化されている技術であり、磁気ディスク装置においてもビエゾと組立を用いた実験システムによるデモンストレーションがなされており[1][2]、効果は実証済である。

### 2. 2. 2 吸着防止用アクチュエータ

吸着防止用アクチュエータは、スライダの浮上面の側に足をつけ、円板静止時は足をのばし、スライダ浮上面と円板とを離しておき、円板回転開始直前に足を縮めスライダと円板を接触させることを考える。磁気ディスク装置の停止時スライダは、円板上に静止しているが、平滑面どうしを接触させると吸着が発生する。それを防ぐために、円板にデキスチャといわれる微小な凹凸をつけているが、その分浮上量を損失したり、

位置決め情報に悪影響を及ぼす。吸着防止用アクチュエータを用いることにより、円板を平滑にすることができ、浮上量を小さくすることや、位置決め精度の向上もできる。それでも、悪条件が重なって万が一スライダと円板が吸着してしまった場合は、足の伸縮を繰り返すことにより円板からスライダをひき剥がすことが可能である。

## 2. 2. 3 ヘッド機構部形成技術

ヘッドは、スライダ、サスペンション、信号線からなる構造体である。近年、信号線は、サスペンションと一体に形成されていることも多い。ヘッドは、前述の部品を組み立てることにより作製する。高記録密度化に従い、ヘッドは小形化している。これは、円板との接近性能の向上を計り、かつ、コストを下げるため、スライダを小形化する必要があることが大きな理由である。もう一つ、固有振動数を上げたり、アクチュエータに対する負荷を軽くするという意味もある。後者の理由では、サスペンションも小形化する必要がある。

ヘッドが小形化されると、従来行われているような、スライダやサスペンションを1個1個別々に作製して、後で組み立てるということができなくなり、スライダとサスペンションの一体化が必要となる。図2.1のような、種々の機能を付加する場合、その重要度は増してくる。

さらに、ヘッドの小形化が進むと、最終的にはヘッド素子と同等の大きさの支持機構、つまり数百 $\mu\text{m}$ 角のサスペンションが必要になってくる。そうなると、全てを薄膜プロセスで作製することになるが、ステンレスの薄板をプレスで加工するような、薄膜を自由な3次元形状に加工する技術が必要となってくる。

## 2. 2. 4 一定ヨー角制御用アクチュエータ

一定ヨー角制御用アクチュエータは、円板の半径位置によって異なる記録/再生素子とトラックのなす角(ヨー角)を補正することを目的とする。記録/再生素子とスライダ本体の間にマイクロアクチュエータを挿入し、記録/再生素子を傾け円板の半径位置に関わらず、常にヘッドの幅方向と円板の径方向を一致させるものである。これにより効率の良い磁気記録を行うことができ、トラック密度を上げることが出来る。同時に、記録/再生分離型ヘッドを用いた場合にも記録素子と再生素子を常に同一のトラックに位置決めすることが出来るので、記録時と再生時に異なった位置にヘッドを位置決めする必要がなくなる。

## 2. 2. 5 耐環境用浮上量制御アクチュエータ

浮上量制御アクチュエータは、温度や気圧の変化により変動する浮上量を制御するものである。スライダの浮上面の平面度を変化させることにより実現可能である。温度や気圧の変化が発生してもスライダと円板が衝突することを防ぎ、磁気ディスク装置の信頼性の向上を図れる。また温度や気圧の変化による変動を考慮して浮上量を定めている場合、変動分をなくすことができるので、その分浮上量を下げることができる。

これらのアクチュエータは、動作させたい記録/再生素子や浮上面のみを駆動させるのが、外乱の影響、エネルギー的効率、機械的性質等の観点から望ましい。マイクロマシンを用いることにより、アクチュエータを駆動対象近傍へ設置できることは、大きな利点である。

## 2. 2. 6 ダイナミックダンパ

ダイナミックダンパは、サスペンションの歪みを熱に変換し制振効果を持たすものである。振動の抑制に



より、ヘッドの位置決め精度の向上を図ることを目的としている。具体的には、サスペンションの共振時の歪が大きい領域に分極した圧電効果部材を成膜または、組み付け、圧電効果部材の電極通しを抵抗を介して接続する。この構成では、振動により発生する歪が、圧電効果部材により、電圧に変換され、さらに抵抗により熱に変換される。振動エネルギーを熱エネルギーとして放出するので、制振効果が期待できる。

## 2. 2. 7 吸着解除用サスペンション共振機構

それでも、スライダが剥がれない場合、外部から振動を与えて引き剥がそうというのが吸着解除用サスペンション共振機構である。

サスペンション共振機構とダイナミックダンパは、構造的にはピエゾ薄膜をサスペンション上に設ければ実現できる。共振機構として用いるときには、電極に電圧を印加し、ダンパとして用いるときは、前述の如く電極を短絡するよう制御回路を構成することにより、1つの構造で2つの機能を持たすことができる。まさにマイクロマシンの妙味である。

## 2. 2. 8 プリアンプ

プリアンプは、信号再生用のアンプである。現状の磁気ディスク装置では、このアンプはアクチュエータのシャフト付近やエンクロージャに搭載されている。ノイズの問題を考えると、プリアンプは、再生素子のできるだけ近くに設置する方が望ましい。マイクロマシンにより、スライダやサスペンションとの集積化が可能である。

## 2. 2. 9 マルチサンプリング用角速度センサ、外乱抑制用加速度センサ

磁気ディスク装置のヘッド位置決め制御は、円板上に記録されている位置決め情報を元に行われている。位置決め情報は、1つのトラックを円周方向にセクタと呼ばれる数十個の領域に分割し、セクタの境界部分に記録されているものが多い。ユーザのデータは、位置決め情報と位置決め情報の間に記録される。位置決め情報のサンプリング周波数が高いほど、ヘッドの位置決め精度をあげることができるが、ユーザの使用できる記録領域を広くするため、セクタの数が少ない方が良く、サンプリングレートを高くすることはできない。

マルチサンプリングとは、円板上に記録されている位置決め情報に加え、別の情報をヘッドの位置決め制御の為に検出することを言う。円板上の位置決め情報のサンプリングとサンプリングの間に、検出した角速度からヘッドの位置を求めれば、サンプリングレートが高くなったのと同じ効果が期待できる。円板上に記録されている位置決め情報のサンプリング時間は50~150 $\mu$ sec程度なので、この角速度センサは、10 kHz以上の周波数帯域が必要となる。このような高帯域用センサには、表面マイクロマシンで製作する角速度センサが適している。

外乱抑制用加速度センサは、外乱フィードフォワード制御[3]の外乱振動の検出に用いる。外乱フィードフォワード制御とは、ヘッドのトラック間移動などにより励起される外乱振動のヘッド位置決め精度への影響をフィードフォワード制御により抑える方法である。この加速度センサには、10 Hz~数kHzの間で平坦な周波数特性が必要とされる。

## 2. 2. 1 0 ショックセンス用加速度センサ

ショックセンス用加速度センサは、磁気ディスク装置を落としたときのように、ヘッドの位置決め制御が不可能な大きさの外乱が加わったとき、瞬時に記録用素子に流れる電流を切るために用いるセンサである。ヘッドの位置決め制御が不能の状態では情報を記録しようとすると、本来記録されるべき以外の位置に記録され、そこに記録されていた情報を破壊してしまう。それを防ぐことが目的である。これも前述の2つのセンサとは必要とされる周波数帯域感度の違うので、別に設けるのが現実的である。

これらのセンサで本来検出したい加速度や速度は、ヘッドの記録／再生素子位置での値である。マイクロマシンを用いてセンサを小形化し記録／再生素子近傍の設置を可能にできることは、大きな利点である。

## 2. 2. 1 1 配線技術

センサやアクチュエータを適用すると、信号線や電源供給線が多数となるので、それらを実装可能とする多層配線や基板貫通配線の技術も必要となる。

## 2. 2. 1 2 昇電圧回路

アクチュエータを磁気ディスク装置への供給電圧である数Vで駆動するのはかなり困難なので、昇電圧回路が必要とされる。

## 2. 3 結言

マイクロマシンを磁気ディスク装置用ヘッドに適用した場合の適用可能技術を提案した。マイクロマシンの3つのMがヘッドのニーズである、高精度位置決め、低浮上量、低ノイズの実現に極めて有効である可能性を示した。

以上の提案のなかで、必要不可欠である、ヘッド高精度位置決め用アクチュエータ、ヘッド機構部形成技術、ならびに新しいコンセプトで重要性の高い吸着防止用アクチュエータについて具体的な研究を行うことにした。

### 3 ヘッド高精度位置決め用マイクロアクチュエータの研究 (静電アクチュエータの研究)

#### 3.1 研究の目的

本章では、磁気ディスク装置のヘッド位置決め用2ステージサーボ用マイクロアクチュエータを開発する。目標はトラック密度40KTPi (記録密度20Gbit/in<sup>2</sup>)の実現である。

2ステージサーボとは、先に述べたように、位置決め精度がそこそこで可動範囲の広い粗動アクチュエータと、位置決め精度は良いが可動範囲の狭い微動アクチュエータとを組合せ、協調制御することにより、広い可動範囲において精度良くヘッドを位置決めする方法である。人間が手で字を書くときの肩の役割が粗動アクチュエータで、手首の役割が微動アクチュエータだと考えれば良い。粗動アクチュエータには、従来の磁気ディスク装置のヘッド位置決めアクチュエータであるVCMを用いる。

2ステージサーボを導入する具体的な目的は、微動アクチュエータにより

- 粗動アクチュエータを保持しているベアリングの非線形特性のヘッド位置決め精度への影響を排除する。
- ヘッドサスペンションの共振などの低周波数の振動のヘッド位置決め精度への影響を低減する。
- 可動質量を下げ、ヘッド位置決め系の固有振動数を上げ、サーボ帯域を拡大し、追従特性を高める。

ことである。そして、既に、磁気ディスク装置の記録密度の向上を目的に、多くの2ステージサーボ用微動アクチュエータの研究が行われている[1]-[10]。

従来の研究は、次の3世代に分けられる(表3.1)。

第1世代は、ガイドアームまたはサスペンションを駆動するものである。実現可能トラック密度は20KTPi程度までである。駆動源として、電磁アクチュエータ、圧電アクチュエータが用いられている。[1]-[4]

第2世代は、スライダを駆動するものである。実現可能トラック密度は30kTPi程度である。駆動源として、電磁アクチュエータ、圧電アクチュエータ、静電アクチュエータが用いられている。[5]-[9]

第3世代は、ヘッド素子部を駆動するものである。実現可能トラック密度は40KTPi以上である。駆動源として、静電アクチュエータが用いられている。[10]

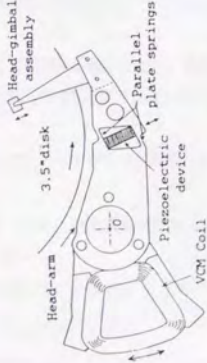
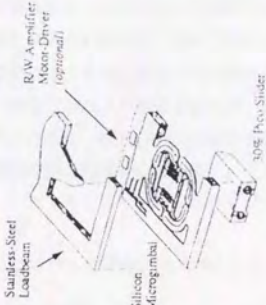
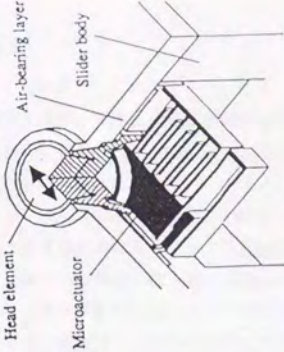
本研究は、目標とするトラック密度からは、第3世代に属するものである。方式等は必要とされる機能に基づき根本から検討し、今までに行なわれていない、

- 従来型(縦型コイル)のヘッド素子を搭載。
- フォローイング(ヘッドがあるトラックに位置決めされている状態)中は、微動アクチュエータのみで素子の位置決めを行なう。

微動アクチュエータを提案し、実現性を示すことを目的とする。



表 3. 1 2 ステージ用微動アクチュエータの変遷

	第一世代	第二世代	第三世代
構造	 <p>Head-arm 3.5" disk Head-gimbal assembly Parallel plate springs Piezoelectric device VCM coil</p>	 <p>Stainless Steel Load Beam Silicon Microgimbal 30V Piezo Slider R/W Amplifier Motor Driver (optional)</p>	 <p>Head element Microactuator Air-bearing layer Slider body</p>
可動部	ガイドアーム または サスペンション	スライダ	ヘッド素子部
駆動方法	PZT 電磁	PZT 電磁 静電	静電
実現 トラック 密度	20 kTPI	30 kTPI	40 kTPI

T.Imamura et al. 1996 [10]

D.K.Miu et al. 1995 [6]

K.Mori et al. 1991 [1]

### 3. 2 研究の流れ

本研究の流れを図3. 1に示す。

まず、磁気ディスク装置の仕様、トラック密度40KTPi(記録密度20Gbit/in<sup>2</sup>)を実現するアクチュエータの目標仕様を定めた。定めた目標仕様は、長さ1.25mmのピコスライダに対応し、共振周波数20kHz以上、変位が印加電圧30Vで0.5 $\mu$ m以上というものである。

次に方式の検討を行った。共振周波数20kHz以上、変位が印加電圧30Vで0.5 $\mu$ m以上という仕様を満たすためには、可動マスを最小にする必要がある。そこで、記録/再生素子部のみを可動することとした。駆動には、応答性、発生力、ヒステリシスの有無、磁気記録への影響を考慮し平行平板アクチュエータを連結した、平行平板列型の静電アクチュエータを用いた。また、アクチュエータの構造を簡単にするため、センサやフィードバック制御がなくても、精度良く位置決めを行なうことができる、発生力に変位が比例するカー変位型(スティフネス型)<sup>1)</sup>のアクチュエータ構造とすることにした。

次に選択した方式における機能設計、試作において実現性の検討を行った。静電アクチュエータは、発生力の大きさが開発課題になると考えられたので、まず、発生力の大きいアクチュエータとして、従来の平行平板列型アクチュエータの2倍以上力を発生する2方向動作静電アクチュエータを考案し、実験による動作原理の確認を行った。次に、製造プロセスの制限を受けない場合、どの程度の寸法のアクチュエータを作製すればよいかを計算で求めた。さらに、印加電圧、共振周波数をパラメータにし、プロセス実力とアクチュエータ性能との関係を示す設計線図を作成した。同時に、プロセス実力を見極めかつ計算の妥当性を検証するため、複数のプロセスで、プロトタイプモデルの試作を行った。これらの機能設計、試作において得られた結論は、

(1) 加工限界は材料がシリコン(Si)の場合、アスペクト比20程度以下、ニッケル(Ni)の場合で50程度以下である。

(2) この加工限界は高アスペクト比プロセスで実現でき、汎用プロセスでは困難である。

(3) トラック密度40KTPiに対応したサーボ帯域2kHzを実現するアクチュエータの共振周波数は15kHzで良い。また、簡単な制御器を用いた出力フィードバック系を構築した場合、周波数帯域を3.7kHz程度にできる。

(4) 現状プロセスで実現で、共振周波数20kHz、変位0.5 $\mu$ m(印加電圧50V)または、共振周波数15kHz、変位0.5 $\mu$ m(印加電圧30V)のアクチュエータの実現可能性がある。

ということである。

また、この機能試作と並行して、マイクロアクチュエータの特性を評価する微小物体振動評価設備を開発した<sup>2)</sup>。

ヘッド素子の実装方法については、思考実験を行い、マイクロアクチュエータ付磁気ヘッドスライダのプロセス案を提案した。

以上により、トラック密度40KTPiを実現する2ステージサーボ用マイクロアクチュエータの可能性を示した。

<sup>1)</sup> メカトロニクス用アクチュエータには、発生力に加速度が比例する、カー加速度型(コンプライアンス型)が多く用いられている。VCMが一例である。

<sup>2)</sup> 付録A 参照。

仕様

トラック密度40kTPI  
変位 $0.5\mu\text{m}$ @30V

方式の選択

可動部：ヘッド素子部  
動作原理：平行平板形静電アクチュエータ  
「カー変位」タイプ

機能試作

●2方向動作静電アクチュエータ  
●数値計算による検討  
●プロトタイプモデルの  
作製・評価

プロセスの研究

高アスペクト比プロセス  
●ICPエッチング  
●LIGA  
汎用プロセスの限界  
●RIE  
●電鍍

素子・アクチュエータ付  
スライダ作製法の検討

評価設備の研究

微小物体振動  
測定システム

(付録)

まとめ

トラック密度40kTPIを実現するアクチュエータの可能性を示した。

図3.1 研究の流れ



### 3.3 仕様

40KTP1 (記録密度20Gbit/in<sup>2</sup>対応)対応のマイクロアクチュエータの目標仕様を表3.2に示す。以下に根拠を示す。

表3.2 マイクロアクチュエータの目標仕様

ストローク		≥ ±0.5 μm
共振周波数		≥ 20kHz
印加電圧		≤ 30V
ヘッド素子	マス	8.2 μg
	サイズ	≥ 240 μm height × 220 μm width

#### 3.3.1 ストローク

フォローイングを微動アクチュエータのみで行なうためには、フォローイング中の振動の全振幅をカバーし得るストロークが必要となる。フォローイング中の振動で振幅が大きいのは、円板を回転させるスピンドルの振動である。その値は、流体軸受を用いた場合<sup>10)</sup>、最大偏芯量0.5 μm程度[11]<sup>11)</sup>である。この振幅をカバーするため、仕様を±0.5 μmに定めた。

#### 3.3.2 機械的共振周波数

機械的共振周波数は、位置決め精度より定める。

フォローイング中の位置決め精度はトラックピッチの約1/10である[12]。その半分を同期分の位置決め誤差とすると、5kTPIで0.25 μm、40kTPIで0.03 μmとなる。従って、40kTPIの装置のオープンループでは5kTPIの装置に比べ+18dBのゲインが必要になる。そのうち15dB程度は制御法で改善できる[13]ので、サーボ帯域の増加によるゲインの増加を5dB(0クロス周波数を1.8倍)とする。また、5kTPIクラスの3.5インチ磁気ディスク装置の0クロス周波数は、円板回転の1次周波数の6倍程度に設定されている。従って40kTPIで円板回転数が1000 R.P.M.の装置では、167Hzの10.8 (=1.8×6) 倍、1.8kHz以上が必要とされる0クロス周波数となる。

一方、サーボ帯域の増加の傾向を見ると、おおよそトラックピッチの平方根に比例して増加している[14]。現状の高性能磁気ディスク装置では、トラックピッチ4~5 kTPIに対して、オープンループの0クロス周波数は500~600Hzである。このことから、トラックピッチ40kTPIに対して必要とされる0クロス周波数は、1.9kHz以上であると考えられる。以上のことから、オープンループの0クロス周波数を2kHz以上とした。

磁気ディスク装置のヘッド位置決め制御系において0クロス周波数は、機械的な主共振周波数の約1/5~1/10に設定されているので、機械的な主共振周波数の仕様を20kHz以上とした。機械的共振周波数が0クロス周波数の5~10倍という経験則は、ヘッド位置決め用のアクチュエータが簡単な形状でなく、部品の締結条件も複雑なので、共振周波数に比べかなり低い周波数から共振の影響によるゲインの持ち上がりや位相の遅れが発生し始めること、振動除去のための狭帯域除去フィルタによる位相の遅れ、位相補償フィルタによ

<sup>10)</sup> トラック密度40 kTPIの実現のためには、スピンドルの軸受けを、現在の玉軸受けから流体軸受けに変えることも必要である[12]。

<sup>11)</sup> 回転数や、円板厚が異なっても、それに応じてスピンドルの剛性が設計されると考え、この数字を参考にした。

るゲインの持ち上がりなどが考慮されての結果である。マイクロアクチュエータの場合、構造が簡単なので、低い周波数からの共振の影響は、低減されと考えられる。この場合、機械的共振周波数の仕様をもう少し緩和できる可能性もある。

### 3. 3. 3 印加電圧

印加電圧の上限として、CMOSで制御できる範囲を考えた。CMOSで制御可能な最高電圧は80Vである[15]が、容易に制御可能な電圧として30V以下を目標仕様とした。30Vを得るためには、昇圧回路を適用することを想定している。

### 3. 3. 4 可動部搭載マス、サイズ

3. 3. 1~3. 3. 3の目標仕様を実現するには、次でも説明するが、可動部のマスを最小にする必要がある。そのため、可動部搭載物（アクチュエータに対する負荷）をヘッド素子部とした。記録密度20Gbit/in<sup>2</sup>が実現される時期のスライダの大きさは、長さ1.25mmのピコスライダだと考えられる。負荷マス、サイズは、ピコスライダ用に開発されている従来型ヘッド素子の値である。

## 3. 4 方式の検討

3. 3節で定めた仕様に基づき、図3. 2に示すアクチュエータを提案した。以下詳細に説明する。

### 3. 4. 1 可動部

このアクチュエータはスライダ先端に位置している。

ヘッド素子は、コイルがスライダの浮上面に対して垂直な、従来型素子を考えている。素子部のみを動作させるのは、可動マスを小さくすることと、他部位の振動の素子位置決め精度への影響を排除する為である。

### 3. 4. 2 駆動法

駆動には平行平板を並列に連ねた静電アクチュエータを用いる。

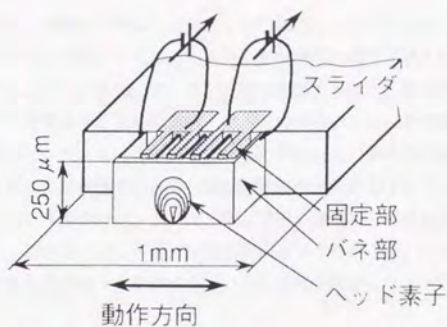
静電アクチュエータは、応答性に優れ、しかもヒステリシスや磁界を発生しないので、素子を駆動するアクチュエータとして最適である（表3. 3）。しかし、発生力が小さいという問題があり、可動マスを最小化すると同時に、アクチュエータの発生力を増大させる必要がある。

静電アクチュエータには表3. 4に示すよう平行平板の吸引力を利用する平行平板型アクチュエータと、平行平板の重なりが大きくなるよう平板がずれる力を利用した歯歯型アクチュエータとがある。平行平板型アクチュエータは、平板の重なる長さ(p)のギャップ(g)に対する比(p/g)を大きくとることにより、発生力を大きくすることができる。少しでも大きな発生力を確保したいので平行平板型アクチュエータを適用することにした。

平行平板型静電アクチュエータの様々な構造案に対し概略計算を行った結果を図3. 3に示す。案1はシーソーのように支点を中心に揺動するアクチュエータで、支点からの距離を大きくとることにより、平行平板間のギャップ量の変化を拡大しようというものである。しかし、変位量を稼ぐため支点からの距離を大きく取ると、可動質量が大きくなってしまい不利である。また、支点からの距離はスライダの長手方向の距離

となるが、スライダを長さ1.25mmとした場合、浮上特性からのスライダ本体とのバランスが問題となり、そう大きくとることは現実的でない。また、支点の結合の作製プロセスも問題である。案2は平行平板間のギャップの変化をそのまま変位に使うものである。可動質量が小さくて有利である。案3は平行四辺形の底辺を静電引力で引きつけ、それにより平行四辺形をつぶし、図3.3における上下方向の変位をヘッドを位置決めする左右方向の変位に変換しようというものである。この案も、変位量を稼ぐためには平行四辺形の高さ（図中で上下方向の長さ）を大きくする必要があり、可動質量やスライダ本体とのバランスが問題となる。平行平板間のギャップの変化をそのまま変位にする案2が仕様に対して実現性が高く、図3.2に示した厚い歯輪を板バネで支えた様な構造とした。





可動部	ヘッド素子。	スライダより2桁小さいマス。コロゲートな系。
駆動法	平行平板を連ねた静電アクチュエータ。	発生力が大きい。ヒステリシス、磁界が発生しない。
制御法	発生力とばね力を釣り合わせる。	センサレス。
粗動アクチュエータとの関係	フォロ잉は、微動アクチュエータのみで位置決め。	制御系の簡素化。

図3.2 マイクロアクチュエータの構想

表3.3 駆動源の比較

	電磁	静電	圧電		形状記憶合金	熱 (バイメタル)
			積層	バイモルフ		
ストローク	大	大	小 数十 $\mu\text{m}$ (0.1%)	中 ( $\sim 0.5\text{ mm}$ )	大	中
応答性	中	中～高	高 ( $\sim 100\text{ kHz}$ )	中 ( $\sim 1\text{ kHz}$ )	低～中(20Hz)	低
発生力	中	小 (数gf)	大 ( $400\text{ gf/cm}^2$ )	中 (数十gf)	大	大
電圧, 電流, 電力	0.5～1A	5～100V	10 ～100V	～5V	～10mA	0.1～1W
問題点	洩れ磁束	なし	クリープ ヒステリシス 集積化が困難		ヒステリシス 冷却	冷却

### 3. 4. 3 制御法

この静電アクチュエータを、高剛性の板ばねでスライダに固定し、アクチュエータの発生力とばね力が釣り合った位置で素子が静止するよう設計することにより、変位が印加電圧（発生力）により一意的に決定される（「変位—力」タイプ）。このことは、スライダと素子との相対変位を観測するセンサがなくても精度良く素子を位置決めすることができることを意味し、マイクロアクチュエータの構造を簡単にすることができる。しかし、周波数帯域はアクチュエータの機械的特性に依存し、広帯域化が困難であるという問題点がある。本研究では、可能な限り可動質量を小さくし機械的共振周波数を上げることとした。

一般にアクチュエータには、「変位—力」タイプの他、電圧や電流など（力）に対し加速度を発生する「加速度—力」タイプがある。「加速度—力」タイプで位置決めを行うためには、位置決め情報などの状態量を観測し、サーボ系を構成する必要がある、アクチュエータ駆動系が複雑になるという問題点がある。

### 3. 4. 4 粗動アクチュエータとの関係

このアクチュエータは、従来の2ステージサーボ用微動アクチュエータと異なり、フォローイング中の全周波数領域における位置決めを行うものである<sup>12)</sup>。粗動アクチュエータは、トラック間移動にのみ用いる（トラック追従／トラック間移動分割方式）。

このように従来と異なる方法をとったのは、

- 粗動アクチュエータを保持するベアリングの非線形特性のヘッド位置決め精度への影響を排除する。
- アクチュエータ構造や制御方法を簡単にするため、粗動アクチュエータ／微動アクチュエータの相対運動を観測するシステムを導入しない。

ためである（表3. 4）。

<sup>12)</sup> 従来は、低域は粗動アクチュエータ、高域を微動アクチュエータと、フォローイング中でも両方のアクチュエータを用いヘッドの位置決めを行っていた。

表3. 4 2ステージサーボの制御方式

方式	トラック追従 (フォロ잉) 方式	ブロック図	利点	欠点
周波数分割 方式	低周波数領域を粗動アクチュエータで追従させ、高周波数領域を微動アクチュエータで追従させる。		<ul style="list-style-type: none"> <li>●サーボ帯域拡大。</li> <li>●低周波数振動の影響の低減可能性有。</li> </ul>	●ベアリングの非線形性の影響が残る。
補正方式	粗動アクチュエータで発生する位置決め誤差を微動アクチュエータで補正する。(または、微動アクチュエータで発生する位置決め誤差を予測し、粗動アクチュエータを位置決めする。)		<ul style="list-style-type: none"> <li>●ベアリング非線形性の影響排除。</li> <li>●低周波数振動の影響低減。</li> <li>●実質的なサーボ帯域拡大。</li> <li>●光ディスク装置での実績有。</li> </ul>	●粗動/微動アクチュエータ間の相対運動を観測する、オフゼーパーまたは、センサが必要。
トラック追従/トラック間移動分割方式	トラック追従を微動アクチュエータのみで行ない、トラック間移動を粗動アクチュエータで行なう。	<p>または</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●ベアリング非線形性の影響排除。</li> <li>●低周波数振動の影響低減。</li> <li>●サーボ帯域拡大。</li> <li>●粗動アクチュエータの低共振周波数化の可能性有。</li> </ul>	●微動アクチュエータのストロークが大きい。

ブロック図は、補償器を省略。

CA : 粗動アクチュエータ

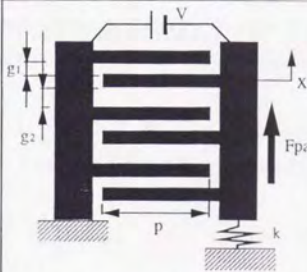
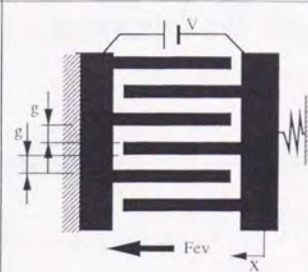
MA : マイクロアクチュエータ

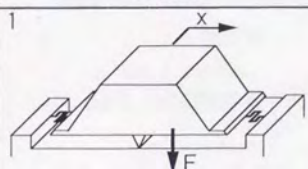
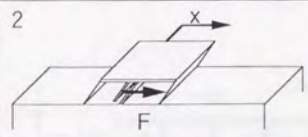
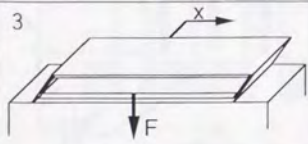
LPF : ローパスフィルタ

BPF : バンドパスフィルタ



表 3. 5 平行平板型アクチュエータと櫛歯型アクチュエータ

平行平板型	櫛歯型
 <p> <math>F_{pa}(x=0) \propto (1/g_1^2 - 1/g_2^2) p V^2</math> </p>	 <p> <math>F_{cv}(x=0) \propto (1/g) V^2</math> </p>

実装図	変位 (@30V) [μm]	共振周波数 [kHz]	結論
<p>1</p> 	0.19	7.2	<p>×</p> <p>共振周波数の仕様を満たす可能性が少ない。</p>
<p>2</p> 	0.63	9.9	<p>○</p> <p>平板数増加で仕様を満たす可能性有り。</p>
<p>3</p> 	0.13	9.5	<p>×</p> <p>変位、共振周波数とも仕様を満たす可能性が少ない。</p>

(ギャップ 2 μm)

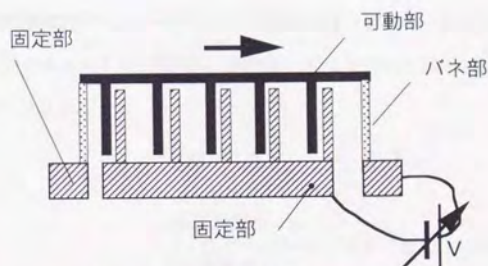
図 3. 3 構造の検討

### 3. 5 2方向動作静電アクチュエータ

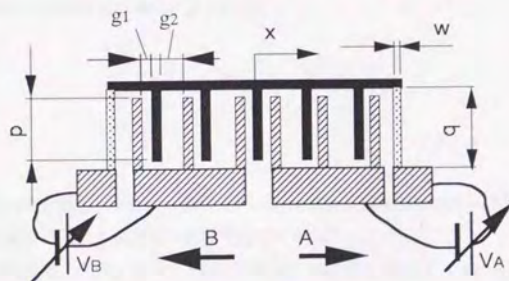
数値計算に先立ち、静電アクチュエータでいかに発生力を大きくするかについて検討を行い、2方向動作静電アクチュエータのを考案した。このアクチュエータは、平行平板アクチュエータを並列に接続したものであり、従来の一方方向に吸引するアクチュエータ（1方向動作静電アクチュエータ）に比べ、同一印加電圧における発生力（即ち、変位）が2倍以上になる。

#### 3. 5. 1 動作原理

図3. 4に1方向動作静電アクチュエータと2方向動作静電アクチュエータの模式図を示す。



(a) 1方向動作静電アクチュエータ



(b) 2方向動作静電アクチュエータ

図3. 4 2方向動作静電アクチュエータと1方向動作静電アクチュエータ

これらのアクチュエータの運動方程式は、(3.1)式ようになる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(x) \quad (3.1)$$

$m$  : 可動部質量

$x$  : 変位 ( $\dot{x}$ は $x$ の時間に関する1階微分; 速度,  
 $\ddot{x}$ は $x$ の時間に関する2階微分; 加速度)

$c$  : 粘性係数

$k$  : バネ部の動作方向のばね定数

$F(x)$  :  $x$ における発生力

アクチュエータの1次共振周波数より十分低い周波数領域、すなわち静的な変位 $x$ と発生力 $F(x)$ との関係は(3.2)式ようになる。

$$x = F(x) / k \quad (3.2)$$

1方向動作静電アクチュエータと2方向動作静電アクチュエータとでは、発生力 $F(x)$ が異なる。1方向動作静電アクチュエータの可動部は、印加電圧 $V$ により矢印の方向に動作する。このときの発生力 $F(x)$ は、(3.3)式ようになる。

$$F(x) = \frac{\epsilon pl}{2} \left\{ \frac{n}{(g_1 - x)^2} - \frac{n-1}{(g_2 + x)^2} \right\} V^2 \quad (3.3)$$

$\epsilon$  : 誘電率

$l$  : アクチュエータの高さ (図3.4の紙面垂直方向)

$p$  : 電極長

$n$  : アクチュエータを一方に動作させるときに駆動力を発生する  
平行平板数

$g_1$  : フロントギャップ (吸引方向側ギャップ)

$g_2$  : バックギャップ (吸引方向逆側ギャップ)

従って変位 $x$ と $V$ の関係は(3.4)式ようになる。

$$x = \frac{\epsilon pl}{2k} \left\{ \frac{n}{(g_1 - x)^2} - \frac{n-1}{(g_2 + x)^2} \right\} V^2 \quad (3.4)$$

なお、(3.4)式を満たす $x$ は、一般に2つ存在するが、絶対値の小さい方がここで求める変位になる。以下に出てくる変位に関する式全てにおいて同様である。

2方向動作静電アクチュエータでは、可動部は印加電圧 $V_A$ によりA方向に動き、 $V_B$ によりB方向に動く。 $V_A$ により発生する発生力および変位を正としたときの発生力 $F(x)$ 、変位 $x$ は(3.5)式、(3.6)式ようになる。



$$F(x) = \frac{\epsilon pl}{2} \left[ \left\{ \frac{n}{(g_1 - x)^2} - \frac{n-1}{(g_2 + x)^2} \right\} V_A^2 - \left\{ \frac{n}{(g_1 + x)^2} - \frac{n-1}{(g_2 - x)^2} \right\} V_B^2 \right] \quad (3.5)$$

$$x = \frac{\epsilon pl}{2k} \left[ \left\{ \frac{n}{(g_1 - x)^2} - \frac{n-1}{(g_2 + x)^2} \right\} V_A^2 - \left\{ \frac{n}{(g_1 + x)^2} - \frac{n-1}{(g_2 - x)^2} \right\} V_B^2 \right] \quad (3.6)$$

可動部をフルストロークL(±0.5L)動作させる場合、1方向動作静電アクチュエータでは、1方向への吸引によりLだけ動かす必要があるが、2方向動作静電アクチュエータでは、片側に0.5Lずつ動かせば良い。g<sub>l</sub>の2/3以下に可動部の電極と固定部の電極が近づくと、電極どうしが吸着してしまうので、g<sub>l</sub>は動作ストロークの3倍以上にする必要がある。従って、2方向動作静電アクチュエータのg<sub>l</sub>は、1方向動作静電アクチュエータの1/2にすることができる。一方、2方向動作静電アクチュエータのnは、1方向動作静電アクチュエータの約1/2である。(3.4)式、(3.6)式より、xは概ねnに比例し、g<sub>l</sub>の2乗に反比例するので、2方向動作静電アクチュエータのxは、同一の印加電圧に対する1方向動作静電アクチュエータの約2倍になる。また、ある一定のxに対して、2方向動作静電アクチュエータの印加電圧は、1方向動作静電アクチュエータの約1/√2である(表3.6)。表3.6の[]内は、1方向動作静電アクチュエータの値を1としたときの相対値を示してある。

表3.6 動作法の比較

	2方向動作	1方向動作
g <sub>l</sub>	1.5L	3L
n	$\frac{N}{2}$	N
$x \doteq a \cdot n \left( \frac{V}{g_l} \right)^2$	$\frac{1}{4.5} \left[ a \cdot N \left( \frac{V}{L} \right)^2 \right]$ [2]	$\frac{1}{9} \left[ a \cdot N \left( \frac{V}{L} \right)^2 \right]$
$V \doteq \sqrt{\frac{x}{a \cdot n}} g_l$	$V \approx \frac{3}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{x}{a \cdot N}} L$ [1/√2]	$V \approx 3 \sqrt{\frac{x}{a \cdot N}} L$

α 係数

N: 可動部の電極数

### 3. 5. 2 動作原理の検証

以上述べた、アクチュエータの動作原理の検証を行なう為、Siで表3. 7に示す寸法のアクチュエータを作製し(図3. 5), 評価した。

プロセスチャートを図3. 6に示す。基本的には、SOI (Silicon On Insulator) ウェハを反応性イオンエッチング (Reactive Ion Etching; RIE) で加工したもの[17]である。

(a) SOIウェハに窒化シリコン( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )膜を減圧化学的気相堆積(Low Pressure Chemical Vapor Deposition; LPCVD)法で堆積。SOI表面の $\text{Si}_3\text{N}_4$ 膜を除去した後、真空蒸着法でクロム(Cr)を成膜し、その後パターニングする。

(b) 六弗化硫黄( $\text{SF}_6$ )系ガスを用いたRIEで、SOIを異方的にエッチングする。酸化シリコン( $\text{SiO}_2$ )膜が、エッチングストップになる。

(c) 裏面の $\text{Si}_3\text{N}_4$ 膜をパターニングし、水酸化カリウム(KOH)水溶液で、Siを異方的にエッチングする。そのとき、Siは数十 $\mu\text{m}$ 残しておく。その後、 $\text{SF}_6$ ガスを用いたRIEで、残したSiをエッチングする。裏面のSiのエッチングを2段階で行なっているのは、KOHエッチングで $\text{SiO}_2$ 膜が破壊された場合、表面の構造を壊してしまうので、形状制御性は悪いが $\text{SiO}_2$ 膜で確実にエッチングを止めることができるRIEを最後に用いた。

(d) バッファード沸酸(BHF)で、 $\text{SiO}_2$ をエッチングし、可動部をリリースする。

表3. 7 試作アクチュエータの寸法

総平行平板数	7
$n$ : 実効平行平板数	4
$l$ : アクチュエータ高さ	15 $\mu\text{m}$
$p$ : 電極長	200 $\mu\text{m}$
$w$ : バネ部幅	5.5 $\mu\text{m}$
$q$ : バネ部長さ	245 $\mu\text{m}$
$g_1$ : フロントギャップ (吸引方向側ギャップ)	6 $\mu\text{m}$
$g_2$ : バックギャップ (吸引方向逆側ギャップ)	14 $\mu\text{m}$
縦弾性係数	160 GPa [16]

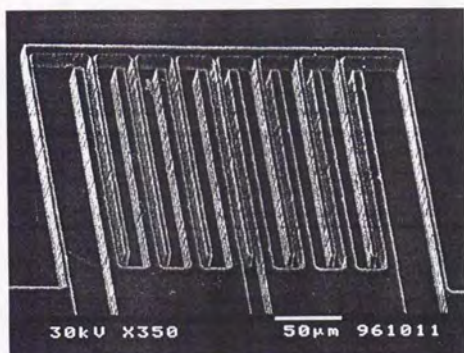


図3. 5 試作アクチュエータ

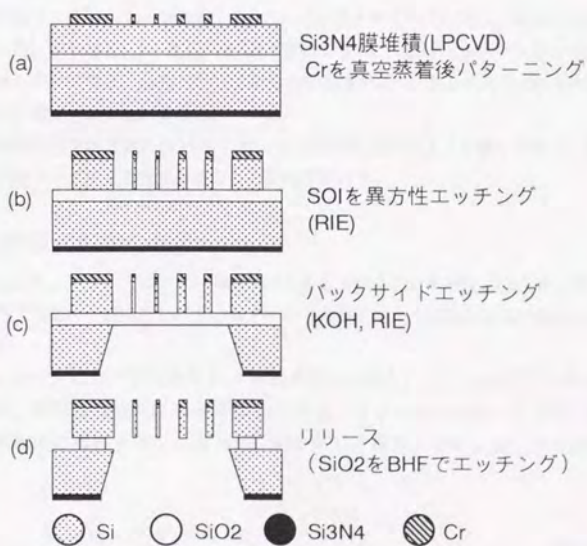


図3. 6 プロセスチャート



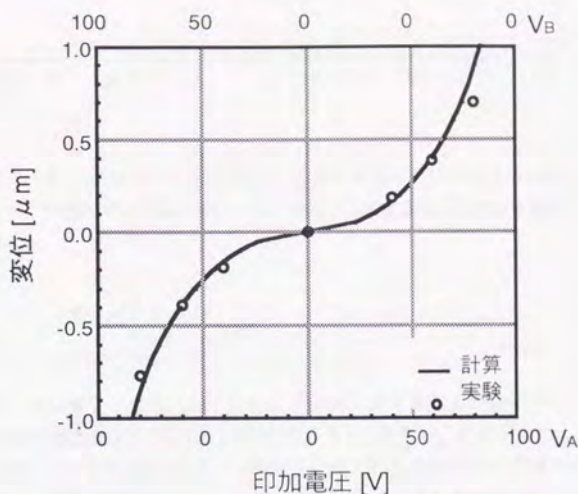


図3. 7 電圧変位特性

次に評価結果について述べる。

電圧一変位特性を図3. 7に示す。印加電圧は、 $V_A$ 、 $V_B$ の片方のみに印加し、変位は $V_A$ に印加したときの動作方向を正にした。すなわち、 $V_A \geq 0$ 、 $V_B = 0$  (変位  $x \geq 0$ )、及び $V_A = 0$ 、 $V_B \geq 0$  ( $x < 0$ ) となっている。図中曲線で示した計算値と、白丸 (○) で示した実験値がよく一致しており、(3.6)式に示した電圧一変位特性の動作原理を検証することができた。

また、1次の共振周波数も計算値の30.9kHzに対して実測値30.2kHzとよく一致しており、図3. 7の計算に用いた寸法や材料のヤング率が妥当であることを裏付けている。

### 3. 5. 3 線形化駆動の検討

制御法の研究として、アクチュエータの非線形性を小さくすることを検討した。センサレスタイプのアクチュエータを目指すため、一般に行われているフィードバックによる方法をとるのではなく、駆動電圧の印加方法を検討した。

2方向アクチュエータにバイアス電圧 $V_0$ 、制御電圧 $V$ を導入し、(3.7)式に示す様 $V_A$ 、 $V_B$ を差動させることにより、電圧一変位特性を線形に近づけることが可能である。これは、楕歯型静電アクチュエータの線形化に用いられている手法[18]を平行平板型アクチュエータに適用したものである。

$$V_A = V_0 + V, \quad V_B = V_0 - V \quad (3.7)$$

(3.6)式に(3.7)式を代入すると(3.8)式になる。

$$x = \frac{\epsilon pl}{2k} \left[ \left\{ \frac{n}{(g_1 - x)^2} - \frac{n-1}{(g_2 + x)^2} \right\} (V_0 + V)^2 - \left\{ \frac{n}{(g_1 + x)^2} - \frac{n-1}{(g_2 - x)^2} \right\} (V_0 - V)^2 \right] \quad (3.8)$$

さらに  $x = 0$  とすると (3.9) 式になり,  $x$  が極めて小さい領域においては (3.9) 式に示す様, 線形化される。また, バイアス電圧  $V_0$  が高いほど, 制御電圧  $V$  に対する発生変位  $x$  の感度が大きいことも分かることが分かる。

$$x = \frac{2\epsilon_0\epsilon pl}{k} \left\{ \frac{n}{(g_1)^2} - \frac{n-1}{(g_2)^2} \right\} V_0 V \quad (3.9)$$

図 3. 8, 表 3. 8 に表 3. 7 のアクチュエータに本方法を適用した際のシミュレーション結果を示す。変位が 0 から  $0.5 \mu\text{m}$  になるのに必要な電圧を 1 とすると, 変位が  $0.5 \mu\text{m}$  から  $1 \mu\text{m}$  になるのに必要な電圧は, バイアス電圧が無い場合 0.27, バイアス電圧が 60 V の場合 0.73, 同じく 80 V の場合 0.74 と電圧—変位特性の線形性を改善できた。また, 変位が 0 から  $0.5 \mu\text{m}$  になるのに必要な電圧は, バイアス電圧が無い場合 65.8 V であったものが, バイアス電圧が 60 V の場合 15.3 V, バイアス電圧が 80 V の場合 8.1 V と, 変位 0 付近の感度が改善された。

表 3. 8 線形化の効果

バイアス電圧 $V_0[\text{V}]$	制御電圧 $V$	
	変位: $0 \rightarrow 0.5 \mu\text{m}$	変位: $0.5 \rightarrow 1 \mu\text{m}$
0	65.8	17.7
60	15.3	11.1
80	8.10	6.03

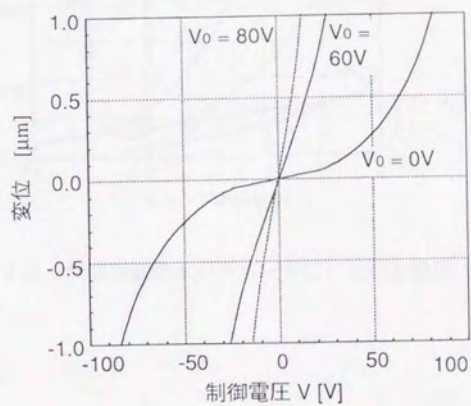


図 3. 8 電圧一変位特性の線形化の検討



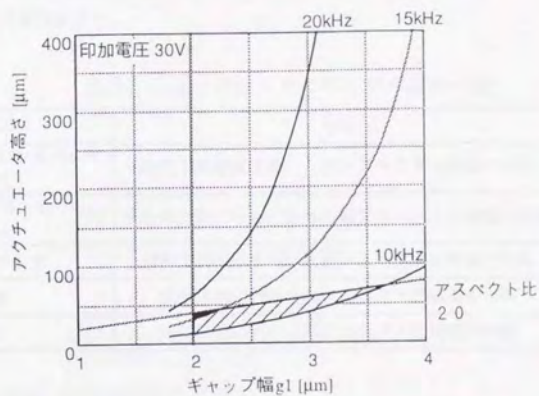


図 3. 1 5 共振周波数をパラメータにした設計線図 (シリコン)

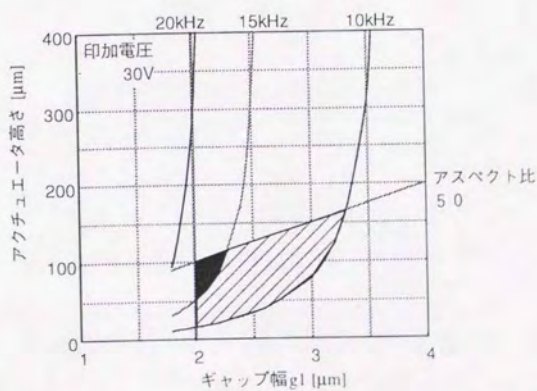


図 3. 1 6 共振周波数をパラメータにした設計線図 (ニッケル)

### 3. 7 プロトタイプモデルの試作

プロセスの検討と数値計算例の妥当性を検討するために、プロトタイプモデルの試作を行った。高アスペクト比の構造が実現できるプロセスとして、LIGA、ICPエッチング、汎用性が高いプロセスとして電鍍とRIEについて検討を行うこととした。

表3. 12に行った試作を示す。

表3. 12 プロトタイプモデル試作一覧

プロセス名	目的	材料
小型シンクロトロンを用いたLIGA	最新工業技術を用いた高アスペクト比構造の作製	ニッケル
大型シンクロトロンを用いたLIGA	学術的実験レベルにおける高アスペクト比構造の作製	ニッケル
ICPエッチング	最新工業技術を用いた高アスペクト比構造の作製	シリコン
電鍍	汎用技術における高アスペクト比構造の作製	ニッケル
RIE	汎用技術における高アスペクト比構造の作製	シリコン

各プロセスの状況を、以下に説明する。

### 3. 7. 1 小型シンクロトロンを用いたLIGA

#### (Lithographie, Galvanoformung und Abformung)

LIGAは、アクリル系の樹脂 (PMMA:Polymethylmetacrylate) をシンクロトロン照射のハードX線を用い露光, 現像したものを型に使い, 電鍍や焼結により3次元的構造物を作製するプロセスである。ここでは, エネルギーレベル600MeV程度の小型シンクロトロンを用いたプロセス[19]を行う。  
プロセスチャートを図3. 17に示す。

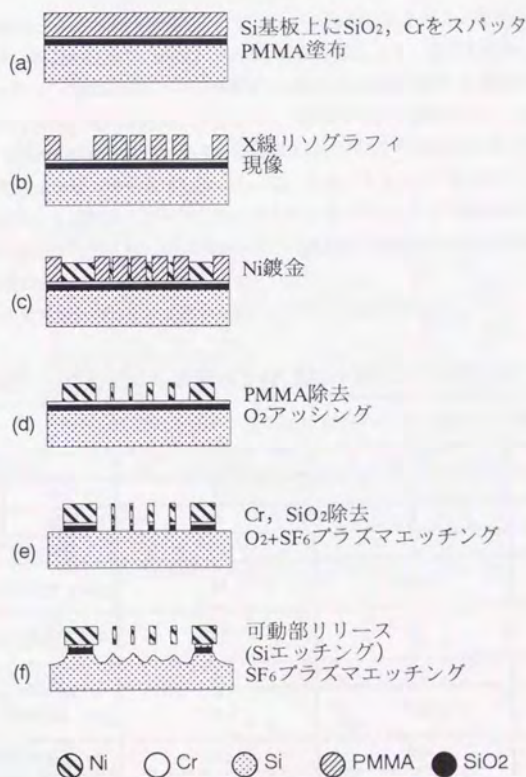


図3. 17 プロセスチャート (小型シンクロトロンを用いたLIGA)



- (a)まず、厚さ1mmのシリコン基板に絶縁層兼犠牲層(SiO<sub>2</sub>)、鍍金のシード層(Cr)を成膜し、次にPMMAを塗付する。
- (b)SOR(Synchrotron Orbital Radiation)光で露光した後、現像を行ない鍍金の型を作る。
- (c)鍍金を行なう。
- (d)PMMAを酸素プラズマで除去する。
- (e)シード層、犠牲層をプラズマエッチングで除去する。
- (f)さらに可動部下のシリコンをプラズマエッチングで除去し、可動部をリリースする。

このプロセスでの限界寸法は、厚さ50 $\mu$ m、ギャップ2.5 $\mu$ mであった。これ以上ギャップを詰めると(レジストのボタン幅を細くすると)、プロセス(b)の現像中にPMMAが表面張力で変形してしまう(図3.18)。

このプロセスで作製した1方向動作静電アクチュエータのSEM写真を図3.19に示す。図3.20は印加電圧と変位を示す。横軸が時間で、縦軸がそれぞれ印加電圧および、変位である。測定は微小物体振動測定システムで行った<sup>13)</sup>。100Hzのハイパスフィルター(high pass filter; HPF)と100kHzのローパスフィルター(Low pass filter; LPF)を用いているため、フィルターの影響で多少位相がずれている。図3.21は、同じく印加電圧に対する速度の周波数特性である。印加電圧は、バイアス電圧を40Vかけ、 $\pm 10$ Vの振幅で掃引した。この周波数特性は速度/掃引電圧を示している。このアクチュエータは図3.20や(3.4)式に示したように、印加電圧に対して複雑な挙動をするが、バイアス電圧をかけ、その数分の1程度の振幅で加振するばあいには、ほぼ $\sin \omega t$ の入力に対して $\cos \omega t$ にゲインのかかった波形が出てくるので、通常速度/変位の周波数特性と同様に扱うことができる<sup>14)</sup>。

このアクチュエータの寸法と特性をまとめると表3.13のようになる。

表3.13 小型シンクロトロンを用いたLIGAで作製したプロトタイプモデルのまとめ

			プロトタイプモデル	仮想アクチュエータ1	仮想アクチュエータ2
寸法	駆動方式		1方向	2方向	←
	電極数	合計	8	7	7
		実効	8	4	4
	ギャップ幅 [ $\mu$ m]		4.5	2	←
	アクチュエータ高さ [ $\mu$ m]		54	100	←
	アスペクト比(高さ/幅)		12	50	←
	負荷マス [ $\mu$ g]		0	8.2	←
	可動部マス(含負荷) [ $\mu$ g]		13.3	29.8	←
	バネ剛性[N/m]		653	469	264
性能	共振周波数[kHz]		35.3	20	15
	振幅 [ $\mu$ m]		0.09 @50V	0.59 @50V	0.38 @30V

13) 付録A 参照。

14) (3.1)式を整理し  $\ddot{x} = \alpha V^2$  とし、 $V = V_0 + V_s \sin \omega t$  とすると、 $\ddot{x} = 2\alpha V_s \omega (V_0 + V_s \sin \omega t) \cos \omega t$  となり、 $\sin \omega t$  の大きい領域では  $\ddot{x}$  は0に近い。

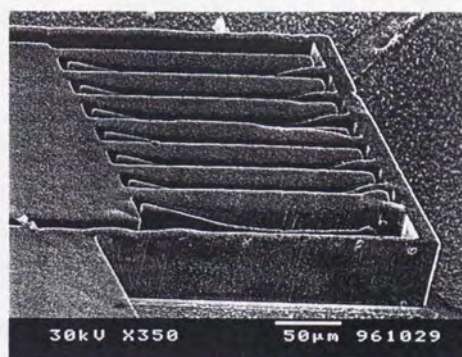


図3. 18 現像中に変形したPMMAの型を用いた例

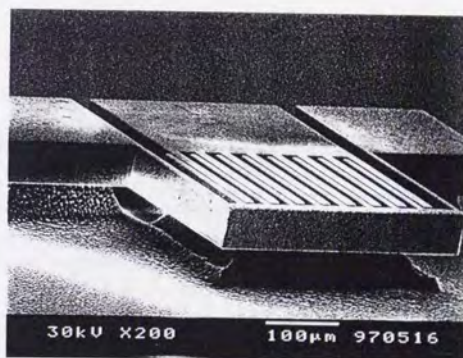


図3. 19 小型シンクロトロンを用いたLIGAで作製したアクチュエータ

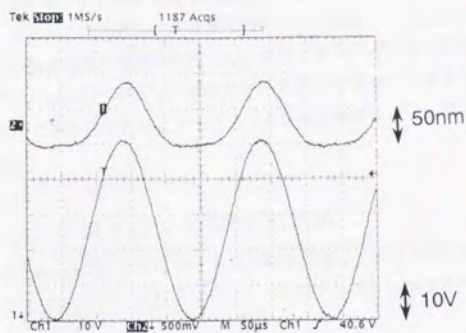


図3.20 印加電圧と変位 (LIGA)

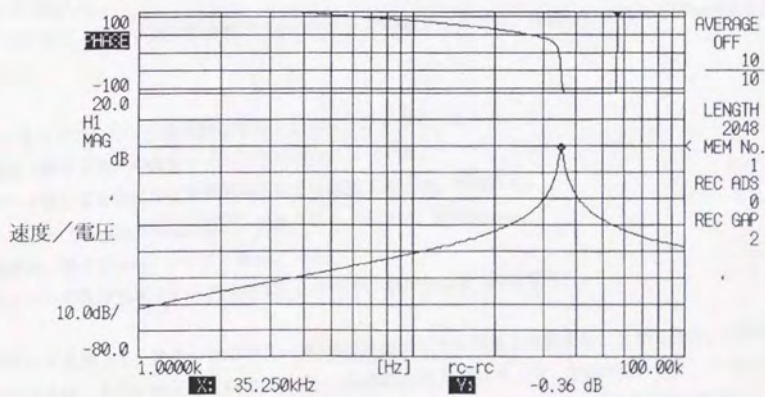


図3.21 周波数特性 (LIGA)



仮想アクチュエータ1, 2は, 表3. 1. 1の仕様案1, 2に対応するものである。性能は, プロトタイプモデルの性能を基に, 寸法を変えたときの値を計算で求めたものである。発生力はギャップ幅の2乗に反比例し, 印加電圧の2乗, アクチュエータ高さと実効電極数に比例, アクチュエータ可動部マスはアクチュエータ高さと電極数に比例, 2方向動作の場合の実効電極数は1方向動作アクチュエータの1/2とした。

この仮想アクチュエータの数値は先に数値計算で示した結果と整合性がとれており, Niが材料のアクチュエータの実現性を示せた<sup>15)</sup>。しかし, 小型シンクロトロンを用いたLIGAプロセスで実現できるアスペクト比は, 先に述べたよう最大20であり, それ以上のアスペクト比を実現するには, 次項で述べる大型シンクロトロンを用いる必要がある。

### 3. 7. 2 大型シンクロトロンを用いたLIGA

このプロセスでは, 高さ250  $\mu\text{m}$ のアクチュエータの作製を目指し, エネルギレベル1.8GeV程度のシンクロトロンを用いたプロセス[20]を行う。X線リソグラフィにはシリコン一金マスクを使用する。

#### 3. 7. 2. 1 マスクの作製

X線リソグラフィ用マスク作製の技術的課題は,

- X線吸収材料を寸法精度良く, かつ厚く, X線透過材料の上に形成する。
- 低価格で実現する。

ことにある。ここでは, 低価格化を重視し, 透過材をシリコン, 吸収材を金とし, UVリソグラフィを用いてマスクを作製した。

X線リソグラフィ用のマスクの作製プロセスチャートを図3. 2. 2に, 作製したマスクのSEM写真を図3. 2. 3に示す。

- (a) (100) シリコンウェハを熱酸化する。酸化シリコン厚さ, 数千Å。
- (b) 裏面(図中下側)の酸化シリコンをバターニングする。
- (c) シード層になる金属膜を真空蒸着法により成膜する。金, 千数百Å。
- (d) レジスト(Shipley社SJR5740<sup>®</sup>)塗布, リソグラフィ。厚さ20  $\mu\text{m}$ 。
- (e) 金鍍金。厚さ15  $\mu\text{m}$ 。レジスト除去。
- (f) シリコンの異方性エッチング(KOH)。シリコン膜厚15  $\mu\text{m}$ (時間管理)。

このマスクを用いて, 後述の様にアスペクト比125のニッケル構造を作製することができた。このマスク作製プロセスは, 入手が容易な材料<sup>16)</sup>を用い, 比較的簡単なプロセス<sup>17)</sup>の組み合わせで, アスペクト比100以上のLIGA構造を作製可能なX線リソグラフィ用マスク作製できることが, 大きな特徴である。

<sup>15)</sup> 仮想アクチュエータ2で, 変位の仕様が未定であるが, これは, アクチュエータの形状を最適化すれば達成できる。計算と実測が一致することは, すでに3. 5. 2で示した。このプロトタイプモデルは, 形状が最適化されておらず, 必要以上に各面の剛性やマスが大きくなっている。そのため, 単位入力当たりの発生変位が小さめになっている(これは, 仮想アクチュエータ1についても同じ。)

<sup>16)</sup> 透過材として, 酸化シリコンや炭化シリコンがよく用いられているが, これらはシリコンウェハの上に堆積する必要がある。

<sup>17)</sup> 電極の型の作製にX線リソグラフィを用いられることも考えられる。

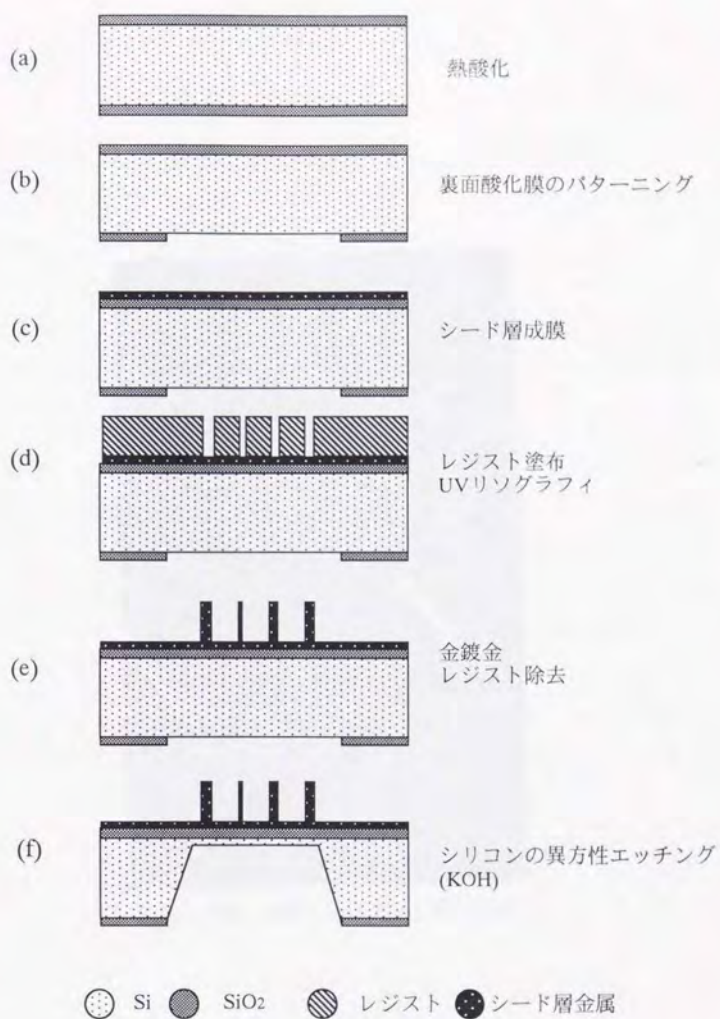


図3. 22 X線リソグラフィ用マスク作製のプロセスチャート

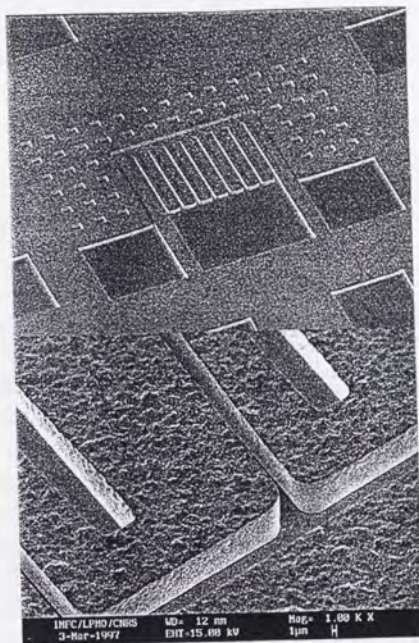


図3. 23 X線リソグラフィ用マスク



### 3. 7. 2. 2 試作例

試作例プロセスチャートを図3. 24に示す。

- (a) 厚さ数mmの銅基板上に、シード層兼犠牲層のチタン (Ti) をスパッタで約1 $\mu$ m成膜。  
PMMA塗布。厚さ250 $\mu$ m。
- (b) X線リソグラフィ。
- (c) ニッケル鍍金後、上面研磨。研磨後のNi厚さ250 $\mu$ m。
- (d) 犠牲層除去。ニッケル構造を銅基板からリリースする。
- (e) アクチュエータの固定部の一部を別基板に接合。
- (f) PMMA除去。酸素プラズマアッシング。

このプロセスと小型シンクロトロンを用いたLIGAとのプロセスの相違は、

- 基板に厚さ数mmの銅基板を用いていること(a)。
- 犠牲層を除去したあとで、レジストを除去すること(f)。

ことである。前者の理由は、小型シンクロトロンを用いたLIGAに比べレジストが厚いので、基板が反らない様、熱膨張係数がレジストに近い材料 (PMMA:  $70 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , Si:  $2.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ , Cu:  $17 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) の厚い基板にした。後者の理由は、構造を高くすると、表面張力の影響が大きくなるため、ギャップ間のレジスト除去をウェットの工程を全て終了した最終工程にしようと考えた。

このプロセスで作製できたアクチュエータはないが、条件出しの途中でアスペクト比125を実現することができた。例を図3. 25に示す。このSEM写真は、工程(c)の後、鍍金の状態を観察するために、PMMAを酸素プラズマで除去したものである。構造のところどころが欠けているが、アクチュエータのパネ部が、高さ250 $\mu$ mに対して幅2 $\mu$ m (アスペクト比125) を実現できていることがわかる。また、ギャップ幅は14 $\mu$ m (アスペクト比18) である。構造の欠落の原因は、X線リソグラフィ用マスクのシリコン膜厚にばらつきがあり、シリコン膜の厚い部分のPMMAを完全に露光しようとして、長時間の露光を行った結果、金の薄い部分でX線を吸収しきれなくなり、バタンの一部が欠けたり、ギャップ幅が広がったためである。ギャップ幅が広がるのは、バタンの端の金が薄いためである。

このプロセスは、X線リソグラフィ用マスクにSOI (Silicon on Insulator) ウェハのように厚さのばらつきの少ないシリコンウェハを用いたり、バタン寸法の補正をかけたりすることにより、アスペクト比50を見込めるものである。

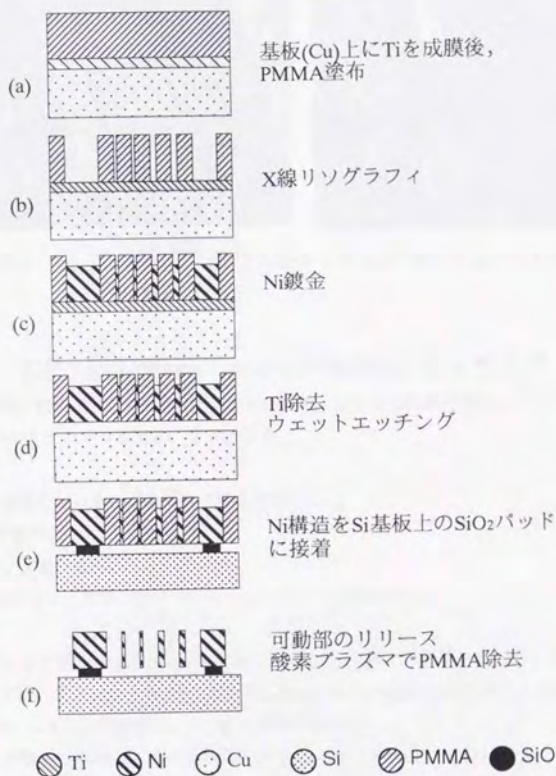


図3. 24 プロセスチャート (大型シンクロトロンを用いたLIGA)

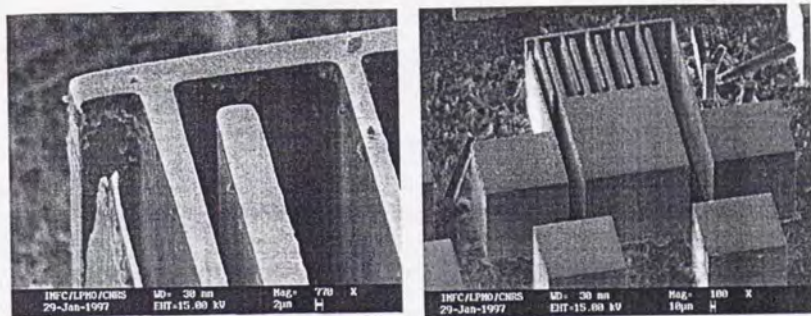


図3. 25 プロセス例 (大型シンクロトロンを用いたLIGA)

### 3. 7. 3 ICP (Inductively Coupled Plasma) エッチング

このプロセスは、ICPと呼ばれる高密度のプラズマで、シリコンを異方的にエッチングしようというものである[18]。プロセスチャートを図3. 26に示す。

- (a) SOIウェハの表面にエッチングのマスク材を成膜する。
- (b) バターニングを行なう。
- (c) SOIのエッチングを行なう。
- (d) 最後に、酸化シリコンを部分的にウェットエッチングで除去する。

現在、最小ギャップ幅 $5.6\mu\text{m}$ 、高さ $25\mu\text{m}$ のアクチュエータ (アスペクト比4.5) の作製に成功している。また、構造としては、アスペクト比7を実現している。プロセス限界はアスペクト比20は達成できる見込みである[18]。なお、エッチング速度は、 $1\mu\text{m}/\text{分}$ 程度である。

このプロセスで作製したある1方向動作静電アクチュエータのSEM写真を図3. 27に示す。図3. 28は印加電圧と変位を示す。横軸が時間で、縦軸がそれぞれ印加電圧および、変位である。図3. 29は、同じく印加電圧に対する速度の周波数特性である。測定は、微小物体振動測定システム<sup>®</sup>で行った。

このアクチュエータの寸法と特性をまとめると表3. 14のようになる。



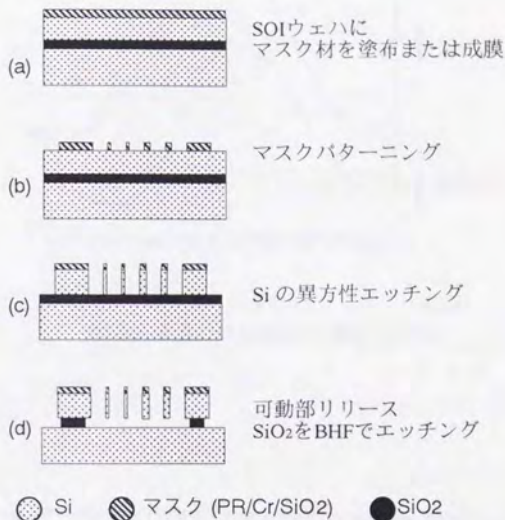


図3.26 プロセスチャート (ICP, RIE)

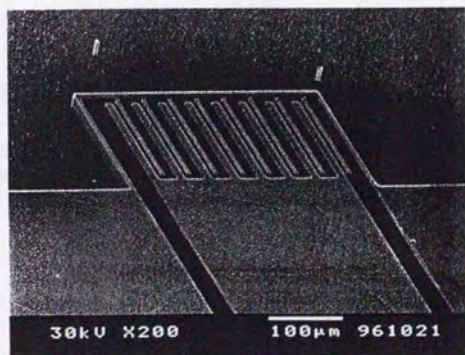


図3.27 ICPで作製したアクチュエータ

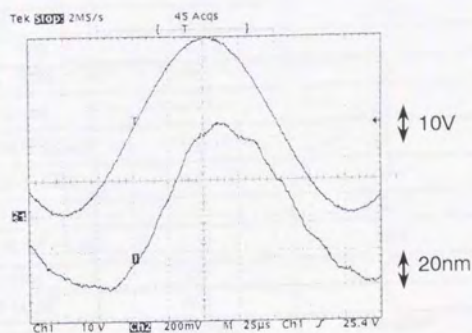


図 3. 2 8 印加電圧と変位 (ICP)

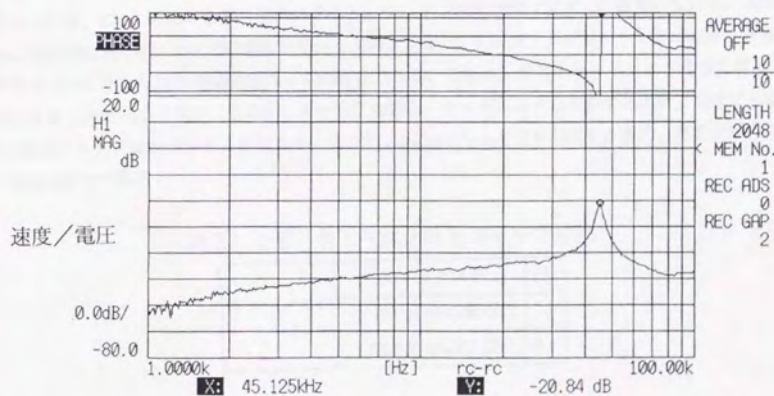


図 3. 2 9 周波数特性 (ICP)

表3. 14 ICPエッチングで作製したプロトタイプモデルのまとめ

		プロトタイプモデル	仮想アクチュエータ1	仮想アクチュエータ2
寸法	駆動方式	1方向	2方向	←
	電極数	合計	8	7
		実効	8	4
	ギャップ幅 [ $\mu\text{m}$ ]	5.6	2	←
	アクチュエータ高さ [ $\mu\text{m}$ ]	25	40	40
	アスペクト比 (高さ/幅)	4.5	20	←
	負荷マス [ $\mu\text{g}$ ]	0	8.2	←
	可動部マス (含負荷) [ $\mu\text{g}$ ]	1.73	10.6	←
	バネ剛性[N/m]	139	174	94.2
性能	共振周波数 [kHz]	45.1	20	15
	振幅 [ $\mu\text{m}$ ]	0.09 @50V	0.56 @50V	0.30 @30V

仮想アクチュエータの性能は、3. 7. 2項と同様に求めた。この仮想アクチュエータの数値は先に数値計算で示した結果と整合性がとれており<sup>19)</sup>、シリコンが材料のアクチュエータの実現性を示せた。

### 3. 7. 4 RIE (Reactive Ion Etching)

このプロセスは、半導体製造プロセスに広く用いられているRIEを用い、シリコンを異方的にエッチングしようというものである。汎用のプロセスで作製可能なアクチュエータ寸法を知ることが目的である。プロセスチャートは、ICPと同じである(図3. 26)。エッチングのマスクには、Crを用いている。現在、幅4.5 $\mu\text{m}$ 、深さ30 $\mu\text{m}$ のエッチングに成功している(図3. 30)。エッチングレート0.13 $\mu\text{m}/\text{分}$ 程度であり、マスク(Cr)とシリコンの選択比は、1:80程度である。問題は、サイドエッチングが深さに対して4%程度発生することである(表3. 15)。ギャップの場合、サイドエッチングが両側の壁で発生するので、深さの8%程ギャップ幅が広がることになる。従って、2 $\mu\text{m}$ のギャップを形成する場合、高さの限界は、せいぜい20 $\mu\text{m}$ までである。

表3. 15 各工程におけるギャップ寸法

ギャップ寸法 [ $\mu\text{m}$ ]	フォトマスク	2.0
	Cr (0.5 $\mu\text{m}$ 厚) 転写後	2.2
	深さ30 $\mu\text{m}$ RIE後	4.5

<sup>19)</sup> 仮想アクチュエータ2で、変位の仕様が未定であるが、これは、アクチュエータの形状を最適化すれば達成できる。計算と実測が一致することは、すでに3. 5. 2で示した。このプロトタイプモデルは、形状が最適化されておらず、必要以上に各部の剛性やマスが大きくなっている。そのため、単位入力当たりの発生変位が小さくなっている(これは、仮想アクチュエータ1についても同じ。)



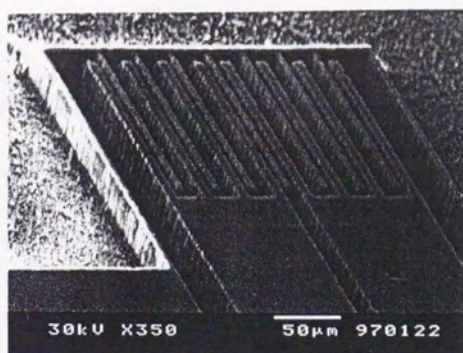


図3.30 プロセス例 (RIE)

### 3. 7. 5 電鍍

このプロセスは、基本的にLIGAプロセスと同じだが、モールド材にフォトレジストやポリイミドを用い、フォトリソグラフィまたは異方的ドライエッチングにより、電鍍の型を作るものである。20 $\mu\text{m}$ 厚さのフォトレジストをマスクアライナーで露光し、現像することにより、最小ギャップ幅2 $\mu\text{m}$ （アスペクト比10）を実現した。また、電鍍を行うことにより高さ15 $\mu\text{m}$ 、最小ギャップ幅3.5 $\mu\text{m}$ のニッケル構造を作製することができた（アスペクト比4.3）。

レジストを材料にフォトリソグラフィによりモールドを作製する電鍍のプロセスチャートをプロセスチャートを図3. 3 1に示す。

- (a) シリコン基板上に、絶縁層、シード層の成膜。
- (b)-1 レジスト（Shipley社SJR5740<sup>®</sup>）塗付。200r/m, 700r/m30秒
- (b)-2 室温で放置。5分。
- (b)-3 プリベーク1。100—105°C, 6分。
- (c)-1 エッジ処理。アセトン, 6000r/m。
- (c)-2 プリベーク1。100—105°C, 15分。
- (d)-1 露光。コンタクトアライナー, 50秒。
- (d)-2 現像。2.3%水酸化カリウム(KOH)水溶液, 3分。
- (d)-3 脱イオン水洗浄。2分。
- (d)-4 乾燥。
- (d)-5 ポストベーク。100—105°C, 5分。
- (e) 鍍金。
- (f) レジスト除去。
- (g) シード層、絶縁層をドライエッチングで除去後、可動部をRIEでリリース。

このプロセスで作製したニッケル構造のSEM写真を図3. 3 2に示す。高さ15 $\mu\text{m}$ 、最小ギャップ幅3.5 $\mu\text{m}$ （アスペクト比4.3）である。

このプロセスの限界を実験的に確かめた。図3. 3 3は、マスク寸法に対するレジスト寸法を露光時間を変え調べたものである。幅の狭いところで、レジスト幅が2 $\mu\text{m}$ 程度狭くなり、これは極めて細いギャップボタンがマスク上にあっても、レジストに転写すると2 $\mu\text{m}$ 程度まで広がってしまうことを意味している。また、露光時間を変えた際の断面プロファイルを図3. 3 4に示す、露光時間に関係なく、膜の厚さ方向の中間付近で2 $\mu\text{m}$ 弱幅が狭まって鼓状になっていることがわかる。これらの検討から、厚さ20 $\mu\text{m}$ に対してギャップ幅、ボタン幅とも2 $\mu\text{m}$ が限界と言える。

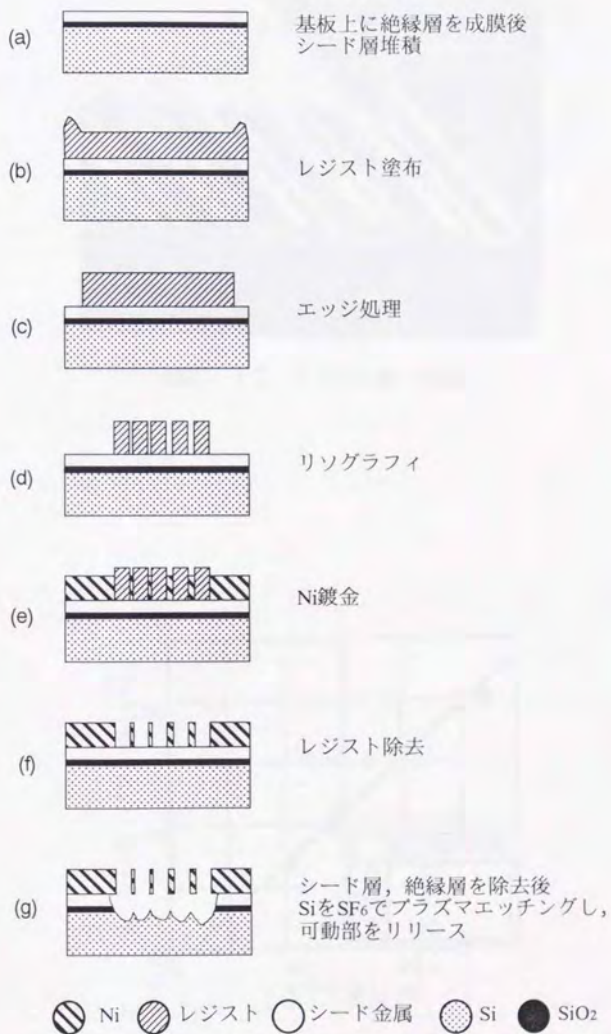


図 3. 3 1 プロセスチャート (電鍍)



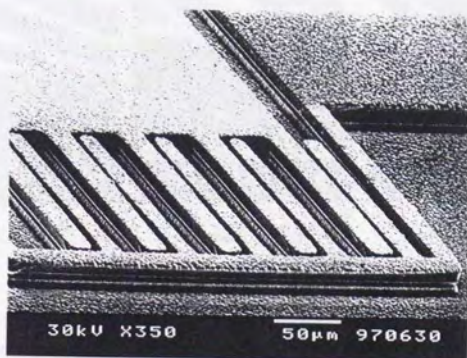


図3. 32 プロセス例 (電鍍)

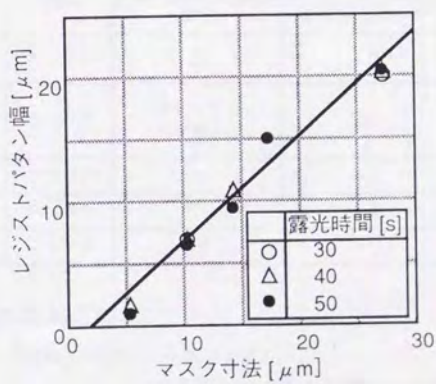


図3. 33 マスク寸法とレジスト寸法

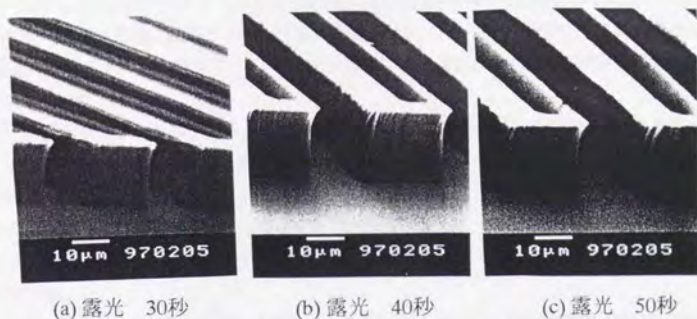


図3.34 断面プロファイル

### 3.7.6 プロトタイプモデルの試作のまとめ

プロトタイプモデルの試作をまとめる。

#### 3.7.6.1 プロセス実力

まず、プロセス実力は表3.16の通りである。実現可能アスペクト比は、実験結果および文献データから導出した。

表3.16 プロセス実力

	材料	試作で実現したアスペクト比		実現可能アスペクト比
		構造	アクチュエータ	
小型シンクロトロンを用いたLIGA	ニッケル	25	12	25
大型シンクロトロンを用いたLIGA	ニッケル	ギャップ18 パネ部125	—	50
ICPエッチング	シリコン	7	4.5	20
RIE	シリコン	7	2.5	7
電鍍	ニッケル	4.3	—	10

#### 3.7.6.2 共振周波数

次に、共振周波数とサーボ帯域との関係についてまとめる。

共振周波数 $f_p$ から40dB/decのラインを引いて周波数特性と交わる周波数を $f_0$ とする。これは、2次のローパスフィルターで高域のゲインを落とし、共振周波数で発振させないようにするためのカットオフ周波数の最大の値を示すものである。 $f_p/f_0$ の値が、アクチュエータの仕様を定める際に議論となった、共振周波数のサーボ帯域に対する倍率になる。プロトタイプモデルで試作したNi（小型シンクロトロンを用いたLIGA），

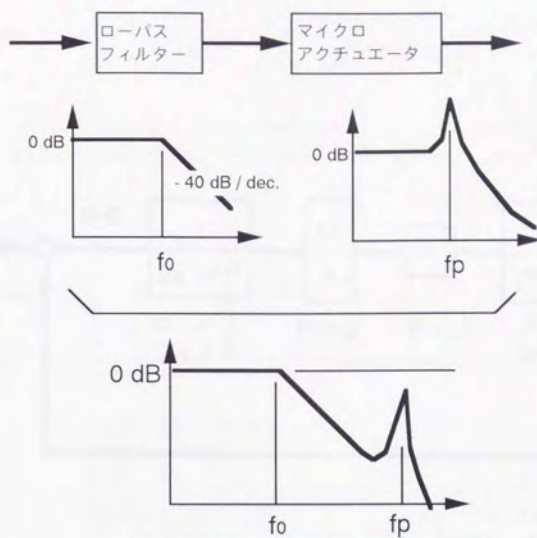
シリコン（ICPエッチング）のアクチュエータに対してこの $f_p/f_0$ を調べた結果を図3.35に示す。 $f_p/f_0$ の値は最大でも6以下である。このことから共振周波数は、オープンループの0クロス周波数の6倍以上に設定すれば良いことが分かり、所望のオープンループの0クロス周波数が2kHzの場合は、共振周波数は15kHzもあれば良いことがわかった。

参考のため、実際にサーボ系を構成した場合について検討した。考察の対象は図3.36に示すサーボ系である。ヘッド位置信号（出力）は、連続的に観測されるものとする。

制御対象のマイクロアクチュエータは2次振動系である。そこで、共振周波数のゲインを抑えるための2次のローパスフィルタ、追値制御における定常偏差が発生しないように積分器を導入し、出力フィードバックを行なう。ローパスフィルタの定数 $T$ と積分器の定数 $K_{cl}$ は、オープンループの0クロス周波数が2kHzになるよう定めた。

ICPエッチングにおける仮想アクチュエータ1, 2（材料シリコン、共振周波数20kHz/15kHz、表3.14）および小型シンクロトロンを用いたLIGAにおける仮想アクチュエータ1, 2（材料：Ni、共振周波数：20kHz/15kHz、表3.13）の図3.36における周波数特性を図3.37～3.40及び表3.17にまとめる。いずれの場合も、サーボ系の一般的条件[22]を満たし、サーボ帯域を3.7kHz程度にすることができた。パラメータの最適化を行なったり、高級な制御器を用いると、さらに良い特性を得ることが期待できる。





$f_p$ でのゲインが0を超えない様、 $f_0$ を定める。

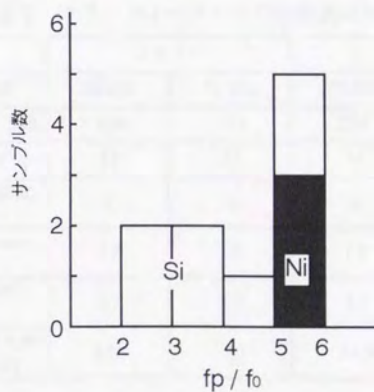
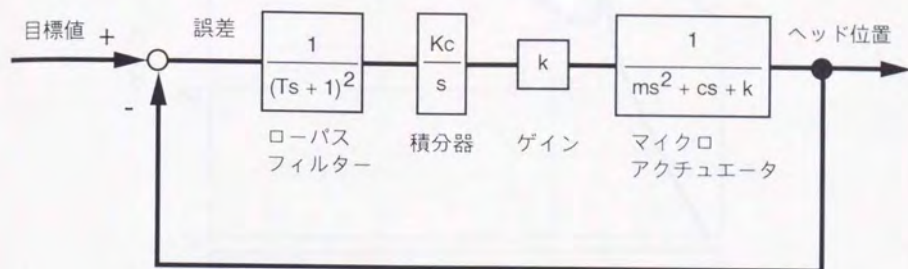


図3.35 共振周波数とサーボ帯域



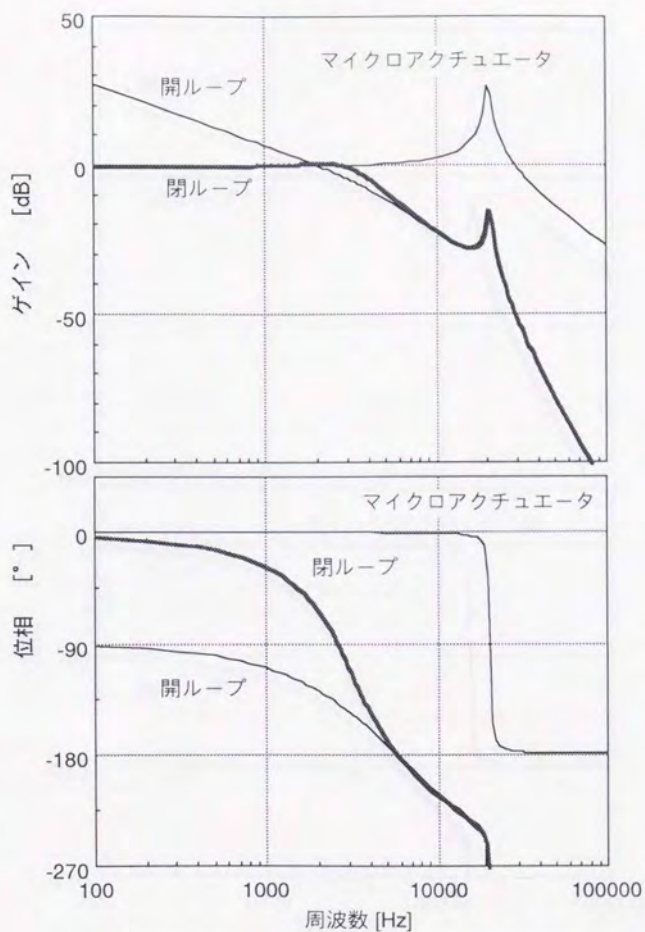
$$T = 2\pi \times 5700$$

$$Kc = 14000$$

図3. 36 フィードバック制御系

表3. 17 フィードバック制御系の周波数応答

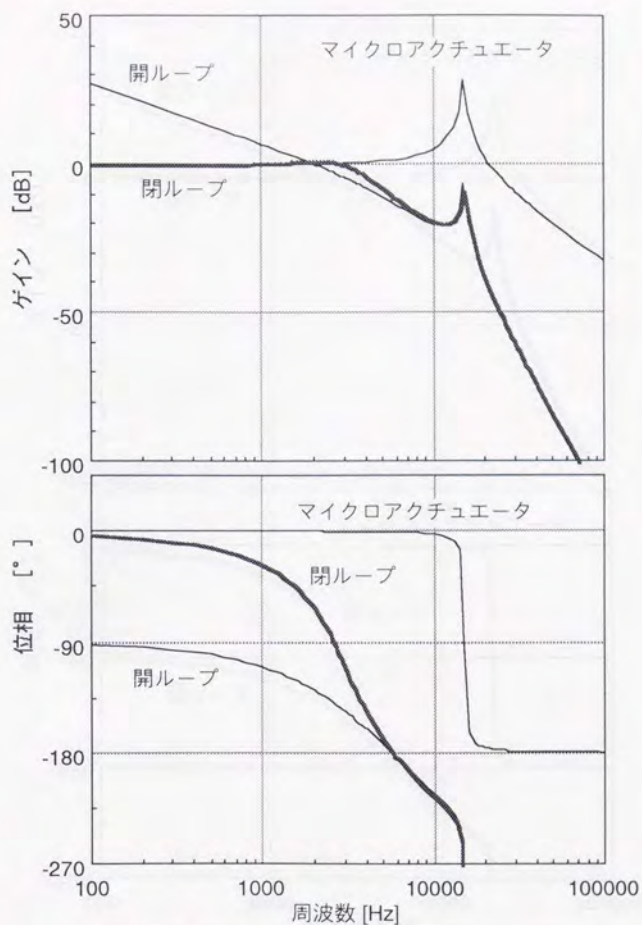
アクチュエータ	材料	シリコン		ニッケル		サーボ系推奨値 [22]
	共振周波数	20 kHz	15 kHz	20 kHz	15 kHz	
開ループ特性	ゲイン余有 [dB]	13.3	12.6	13.3	12.6	>12
	位相余有 [°]	61	61	61	61	>40
	0クロス周波数 [kHz]	2	2	2	2	—
閉ループ特性	Mp(Maximum Peak)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2~1.5
	周波数帯域幅 [kHz]	3.7	3.8	3.7	3.8	入力の有意義な最高周波数
	共振周波数でのゲイン [dB]	-15.3	-9.3	-11.8	-8.4	—



制御対象	共振周波数	20 kHz
開ループ特性	0 クロス周波数 ゲインマージン 位相マージン	2 kHz 13.3 dB 61 °
閉ループ特性	サーボ帯域(-3dB) Mp 共振周波数でのマージン	3.7 kHz 1.2 15.3 dB

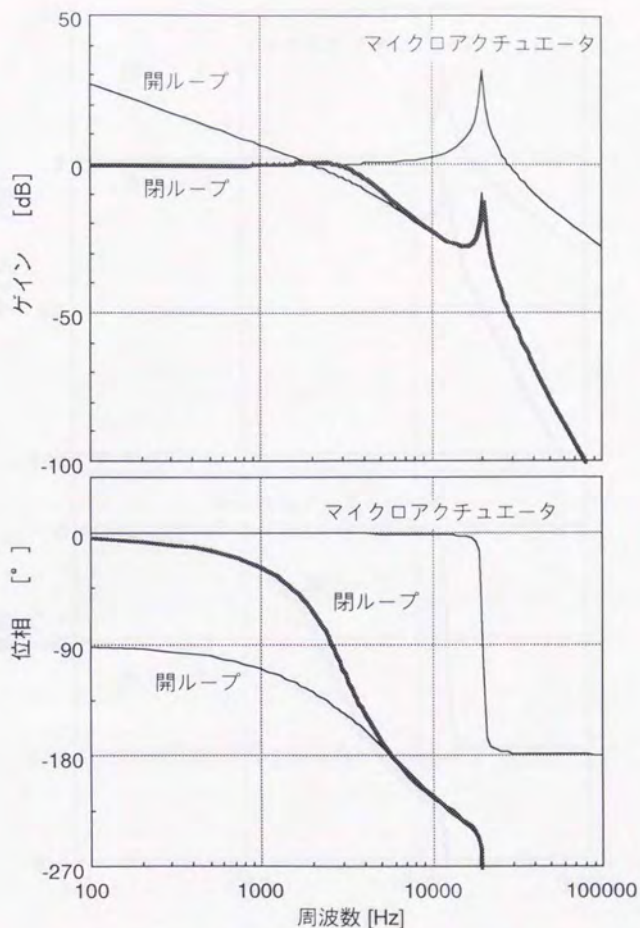
図3. 3 7 周波数特性 (シリコン, 共振周波数20 kHz)





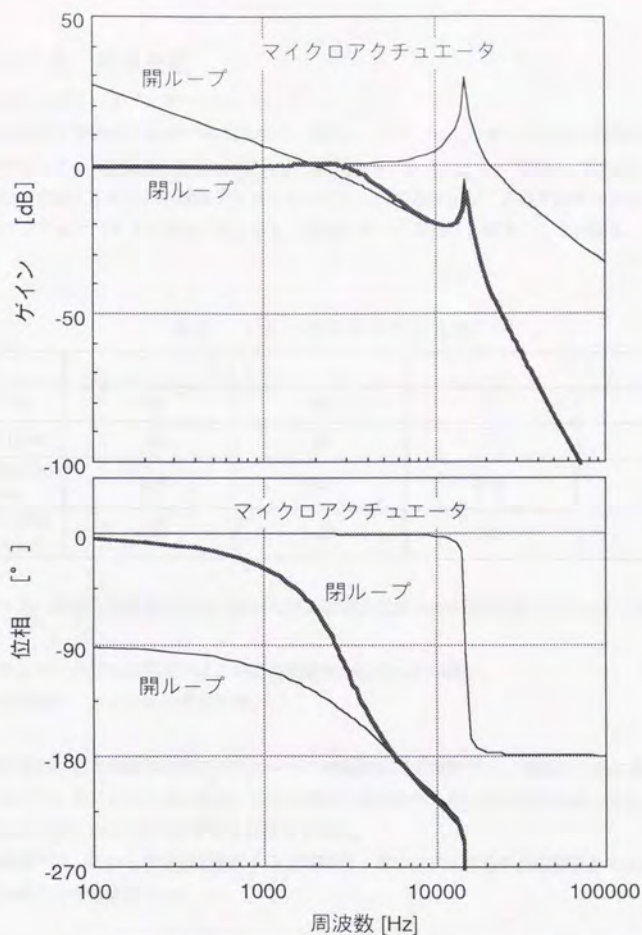
制御対象	共振周波数	15 kHz
開ループ 特性	0 クロス周波数 ゲインマージン 位相マージン	2 kHz 12.6 dB 61 °
閉ループ 特性	サーボ帯域(-3dB) Mp 共振周波数でのマージン	3.8 kHz 1.2 9.3 dB

図3.38 周波数特性 (シリコン, 共振周波数15 kHz)



制御対象	共振周波数	20 kHz
開ループ特性	0 クロス周波数 ゲインマージン 位相マージン	2 kHz 13.3 dB 61 °
閉ループ特性	サーボ帯域(-3dB) Mp 共振周波数でのマージン	3.7 kHz 1.2 11.8 dB

図3. 39 周波数特性 (ニッケル, 共振周波数20 kHz)



制御対象	共振周波数	15 kHz
開ループ特性	0 クロス周波数 ゲインマージン 位相マージン	2 kHz 12.6 dB 61 °
閉ループ特性	サーボ帯域(-3dB) Mp 共振周波数でのマージン	3.8 kHz 1.2 8.4 dB

図3. 40 周波数特性 (ニッケル, 共振周波数15 kHz)



### 3. 7. 6. 3 発生変位

発生変位について表3. 18にまとめる。

試作からの推定発生変位は、材料がNiの場合は、小型シンクロトロンを用いたLIGAの試作結果（表3. 13）、材料がシリコンの場合は、ICPエッチングの試作結果（表3. 14）である。印加電圧50 V、共振周波数20 kHzのものは、前出の表の仮想アクチュエータ1、印加電圧30 V、共振周波数15 kHzのものは、前出の表の仮想アクチュエータ2に対応する。また、最適モデルの変位は、図3. 13～図3. 16より求めた。

表3. 18 発生変位のまとめ

材料	ニッケル		シリコン	
印加電圧 [V]	30	50	30	50
共振周波数 [kHz]	15	20	15	20
試作からの推定発生変位 [ $\mu\text{m}$ ]	0.38	0.59	0.30	0.56
最適モデルの変位（計算） [ $\mu\text{m}$ ]	0.64	0.85	0.59	0.78

試作アクチュエータからの推定変位は、最適モデルの変位の50～70%程度になっている。この理由は、

- 試作アクチュエータからの推定では、寸法の最適化がなされていない。
- ギャップ表面粗さ、および平行度の影響。

等が、考えられるが、2方向動作静電アクチュエータの動作原理の検証<sup>23)</sup>で、実際の寸法に基づく計算値と実測値が一致していることから考えると、寸法の最適化の問題が大きいと予想できる。また、印加電圧を50Vにした場合は、0.5 $\mu\text{m}$ 以上の変位を得る見通しを得た。

開発の次の段階では、これらの要因を分析すると同時に、プロトタイプモデルの結果をもとにした補正係数を設計で用いることが考慮される。

### 3. 8 ヘッド素子の実装法についての考察

3. 7節までの検討により所望のアクチュエータを得る見通しを得たが、ヘッド素子の搭載方法がもう一つの大きな課題として残る。しかし、ICPエッチングの場合は図3. 41, LIGAの場合は図3. 42に示す方法で実現できると考える。

ICPエッチングの場合は、

- (a) スライダ本体材料 (例えば,  $\text{AlTiC}$ ) の上に絶縁層を成膜し、その上にシリコンを成膜または接合。  
作製した複合材料ウェハに、素子を形成 (従来のヘッドスライダ形成プロセスと同じ。)  
ローバーに切り出し、浮上面を形成 (従来のヘッドスライダ形成プロセスと同じ。)
- (b) アクチュエータ用マスクを形成。
- (c) シリコン部に溝を形成。
- (d) ICPエッチングでアクチュエータ作製。
- (e) 個々のスライダに分割する (従来のヘッドスライダ形成プロセスと同じ。)

となり、複合材料ウェハに素子を形成し (a), 従来のヘッドスライダ形成プロセスおよび、本研究の試作プロセスを踏襲すれば、マイクロアクチュエータ、ヘッド素子付スライダを実現できる見通しである。

LIGAの場合は、工夫が必要である。電極間のPMMAをそのまま残し、絶縁体兼構造体として用いる。

- (a) 基板の上に、鍍金のシード層兼、犠牲層となるTiを成膜する。  
浮上面の雛型になるようTiを加工。  
その上に、PMMAを塗布する。
- (b) X線リソグラフィにより、電鋳の型を作製。
- (c) Niを鍍金。
- (d) 上面を平坦化のため研磨。
- (e) 従来プロセスで作製したヘッドスライダを接合。
- (f) 従来プロセスで作製したヘッドスライダの母材を機械的に除去。  
(このプロセスは、電子銃の作製プロセスとして実績有[22]。)
- (g) アクチュエータ可動部のPMMAを除去するためのマスク形成。
- (h) アクチュエータ可動部のPMMAを酸素プラズマで除去。
- (i) Tiをエッチングし、基板からリリース。

浮上面は、基板からのリリースで自動的に形成される。また、基板からのリリース時に個々のスライダに分割される。

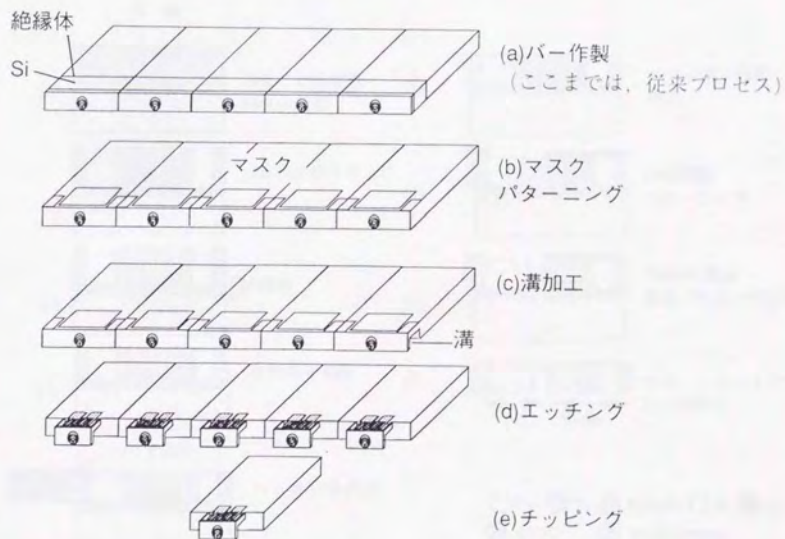
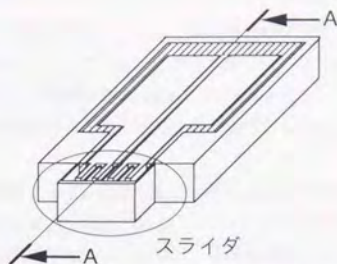


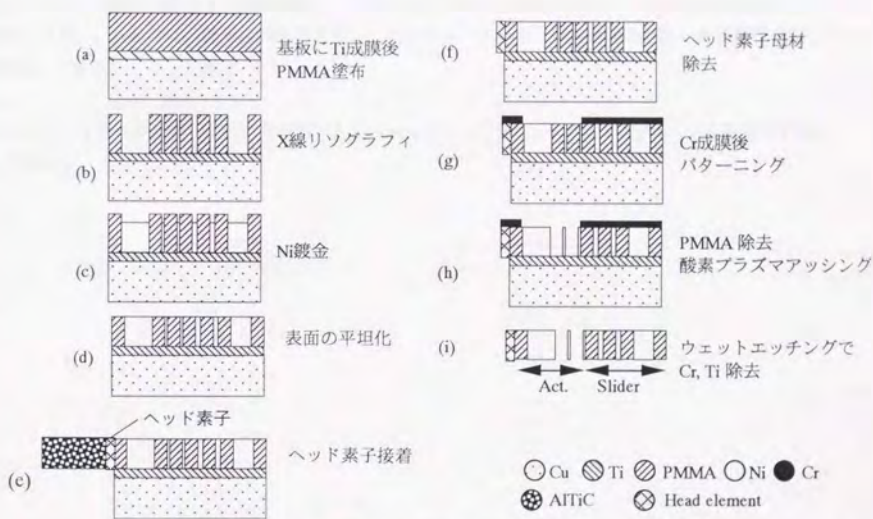
図3. 41 ヘッド素子・マイクロアクチュエータ付スライダ作製プロセス案(シリコン)





(a) アクチュエータ付スライダのコンセプト

A - A



(b) アクチュエータ付スライダのプロセスチャート

図3. 4 2 ヘッド素子・マイクロアクチュエータ付スライダ作製プロセス案(ニッケル)

### 3. 9 まとめ

本章をまとめる。

(1) トラック密度40kTPIを実現する2ステージサーボ用マイクロアクチュエータの提案を行なった。提案したアクチュエータは、スライダの先端に位置し、ヘッド素子部のみを静電アクチュエータで駆動するものである。作製は、LIGA (Ni) やICPエッチング (Si) と言った高アスペクト比プロセスを用いる。目標仕様は、印加電圧30Vで変位  $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 以上、共振周波数20 kHz以上である。

(2) アクチュエータの発生力を増加させるため、2方向動作静電アクチュエータを考案し、動作原理を実験的に検証した。

(3) プロトタイプモデルの試作評価により、設計したアクチュエータの実現性を示した。実現可能なアスペクト比は、LIGAで50、ICPエッチングで20程度である。このプロセス実力では、目標仕様を満たすことはできないが、印加電圧50 V、または共振周波数15 kHzにし、形状を最適化すれば、実現できる見通しを計算により得た。試作アクチュエータの性能からの換算では、シリコン、Niとも、印加電圧を50 Vにすると、共振周波数は20 kHzで、 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 以上の変位を得ることができる。

また、オープンループの0クロス周波数を2 kHz以上にするためのアクチュエータの共振周波数は、15 kHz以上で良い。ちなみに、簡単な制御器を用い、出力フィードバック系を構築すれば、周波数帯域を3.7 kHz程度にできる。

以上より、トラック密度 40 kTPIを実現する2ステージサーボ用のマイクロアクチュエータを実現する見通しを得た。

## 4 スライダ・円板吸着防止用

### TiNi薄膜アクチュエータの研究

#### 4. 1 研究の目的

磁気ディスク装置の停止時スライダは円板上に静止しているが、平滑面とおしを接触させると吸着が発生する。それを防ぐために、円板表面にテクスチャという微小な凹凸をつけているが、その分浮上量を損失したり、位置決め情報に悪影響を及ぼす。スライダに足をつけ、円板静止時は足をのぼし、スライダ浮上面と円板とを離しておき、円板回転開始直前に足を縮めスライダと円板を接触させることができれば、円板を平滑にすることができ、浮上量を小さくしたり、ヘッドの位置決め精度の向上を図ることができる。そこで図4. 1のように環状アクチュエータをスライダの周辺に配置し、スライダをロード・アンロードさせることを考案した。だと

この環状のアクチュエータは、TiNi薄膜形状記憶合金で作製され、電流のON/OFFにより上下に作動するものである。

形状記憶合金は、

- 単位重量当たりの出力が大きい。
- 駆動電力が小さい。
- 力を発生すると同時にそれ自体が構造体になり、摺動部のないアクチュエータを実現できる。
- アクチュエータの構造を簡単にできる。

などの特徴がある一方、ヒステリシスを発生するという問題点もある[1][2] (表3, 3)。図4. 1に示したように、比較的大きな力をON/OFF駆動し使うマイクロアクチュエータには最適である。

ここでは、環状の単体アクチュエータを作製し、動作確認をすることを目的とした。

#### 4. 2 研究の流れ

本研究の流れを図4. 2に示す。

まず、仕様としてあたえられる条件は、円板静止時のスライダ・円板の吸着防止である。

これを実現するために、一般に

- 円板、スライダ浮上面に突起等の凹凸をつけたり、化学的な表面処理を行う方法。
- 円板静止時、スライダを円板外に退避させる方法（ランプロード方式）。
- スライダを円板表面から持ち上げる方法。
- 円板回転開始直前にヘッドを振動させ、吸着を解除する方法<sup>23)</sup>。

等が考えられる[3]。しかし、円板やスライダの表面を処理する方法は、前述の如く、浮上特性やヘッド位置決め特性に悪影響を及ぼす可能性が高い。また、ランプロード方式は、VCMのストロークを大きくする必要があり、また、サスペンションに対する制約も多くなる。スライダを円板表面から持ち上げる方法は、



円板面と垂直な方向に衝撃が加わった場合、スライダが円板を叩く可能性が高い。また、振動により吸着を解除する方法は、吸着解除時にサスペンションに大きな負荷がかかると同時に、円板に吸着痕が残るという問題点がある。

スライダの浮上面周辺の浮上特性に影響のない部分に、昆虫の足の様なものを複数配置し、円板停止時、極微小面積の爪先で、しっかり、円板表面とスライダ表面を乖離し、円板回転開始直前または、同時に足を縮める方式だと、ロード・アンロード方式で発生する問題は発生しない。この方式には、発生力が大きく、強固な微小アクチュエータが必要で、そのためには形状記憶合金アクチュエータが最適である。そして、複数の微小アクチュエータをスライダ浮上面と周辺という限られた領域に配置するためには、バッチプロセスで作製する薄膜形状記憶合金アクチュエータが望ましい。

そこで、まず、薄膜形状記憶合金の開発と、加工法を開発した。次に、開発した形状記憶合金薄膜と加工法を用い、アクチュエータを開発、評価し、提案したロード・アンロード方式の実現の可能性を示した。

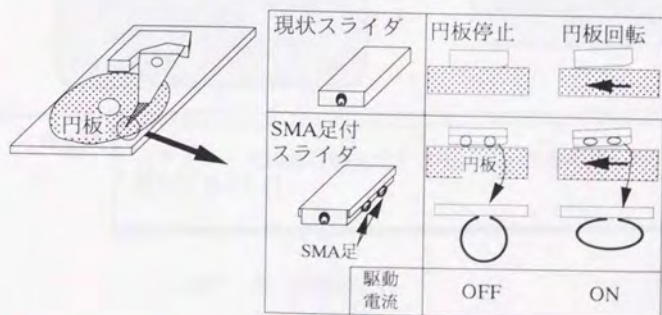


図4. 1 スライダ・円板吸着防止用スライダ

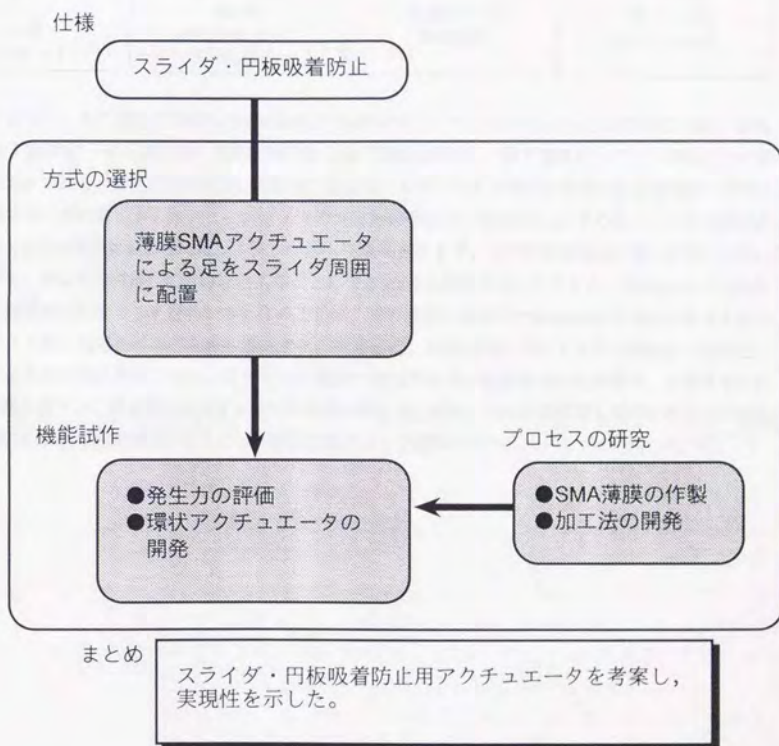


図4.2 研究の流れ

### 4. 3 TiNi薄膜の作製と温度特性

図4. 1に示したロード・アンロード機構を実現するために、まず、TiNi薄膜形状記憶合金を開発した。

TiNi薄膜は、Ti-50at%Niのターゲットを用いDCスパッタ法により成膜した後、結晶化アニールと時効処理を施すことにより形状記憶効果を生じさせた。スパッタ条件および熱処理条件を表4. 1に示す。

表4. 1 TiNi薄膜成膜条件

スパッタ条件		熱処理条件	
方法	DCマグネトロンスパッタ	圧力	0.5 mTorr
圧力	Ar 3 mTorr	結晶化処理	750 °C 10分
パワー	500 W	時効処理	500 °C 360分
時間	45分 (10 $\mu$ m)		
ターゲット	Ti-50at % Ni		

図4. 3は表4. 1の条件で作製したTiNi薄膜の負荷応力に対するマルテンサイト変態温度 ( $M_s$ : 開始温度  $M_f$ : 終了温度  $M^*$ : ピーク温度) と逆変態温度 ( $A_s$ : 開始温度  $A_f$ : 終了温度  $A^*$ : ピーク温度) との関係を示したものである。形状記憶効果は、低温域で安定なマルテンサイト相が高温域で安定な母相へ加熱により逆変態するときに発生する[4]。このTiNi薄膜の無負荷時の  $M_s$  は室温(293 K)以下であり、一度加熱により母相となったTiNi薄膜は室温中ではマルテンサイト変態を起こさず、形状記憶効果は一度しか発生しない。ところが図4. 3よりTiNi薄膜に負荷を与えることにより  $M_s$  を上昇させることができ、330MPa以上の負荷を与えると室温以上になることがわかる。このことは、TiNi薄膜に室温中で330MPa以上の応力を与えると、マルテンサイト相が誘起されることを意味する。他方  $A_s$  は、無負荷時においてですら室温以上なので、応力除去による逆変態は発生しない。従ってTiNi薄膜に330MPa以上の負荷を与えた状態で、室温中での加熱・空冷を繰り返すと、逆変態とマルテンサイト変態が繰り返し起り、形状記憶効果を生じることになる。

この負荷により変態温度が上昇するという性質を後述の上下運動アクチュエータでは利用している。



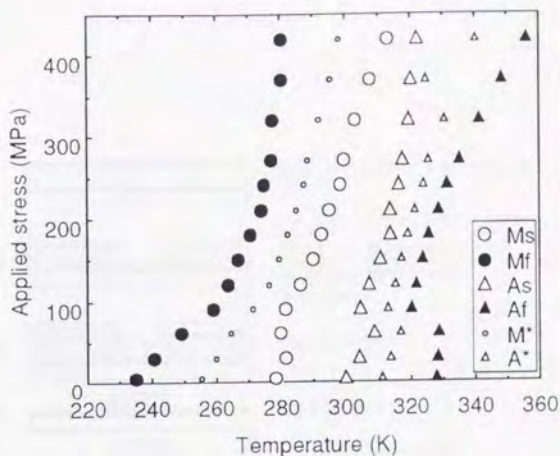


図4.3 TiNi薄膜の特性

#### 4.4 厚さ10 $\mu$ m程度のTiNi薄膜のパターニング方法の開発

厚さ1 $\mu$ m程度のTiNi薄膜の加工は、ドライエッチング法、ウェットエッチング法、リフトオフ法のいずれでも可能であるが、高アスペクト比のパターニングが可能で、かつ、内部応力の分布も小さいリフトオフ法による加工がマイクロアクチュエータの作製には有利である。ところが一般のリフトオフ法では1 $\mu$ m程度の厚さのTiNi薄膜しか加工できなかった。そこで、マイクロアクチュエータの駆動源として必要な厚さのTiNi薄膜を加工するために、10 $\mu$ m程度の厚さのTiNi薄膜のパターニングを実現できるリフトオフ法を開発した。プロセスチャートを図4.4に示す。

- 基板上に、TiNi薄膜と基板の密着層になるCr薄膜を真空蒸着法で成膜する。次に犠牲層としてポリイミドをスピンコートし、その後熱硬化させる。その上に再度Cr薄膜を真空蒸着法で成膜する。
- Cr薄膜をネガ型にパターニングし、このCr薄膜をマスクにポリイミドをO<sub>2</sub>ガスを用いアッシングする。
- スパッタによりTiNi薄膜を成膜する。
- リフトオフはKOHで行う。
- TiNi薄膜のない部分及びTiNi薄膜の可動部の裏側のCr薄膜をウェットエッチングで除去する。

本方法により厚さ10 $\mu$ mのTiNi薄膜を20 $\mu$ m幅でパターニングできた。加工例を図4.5に示す。

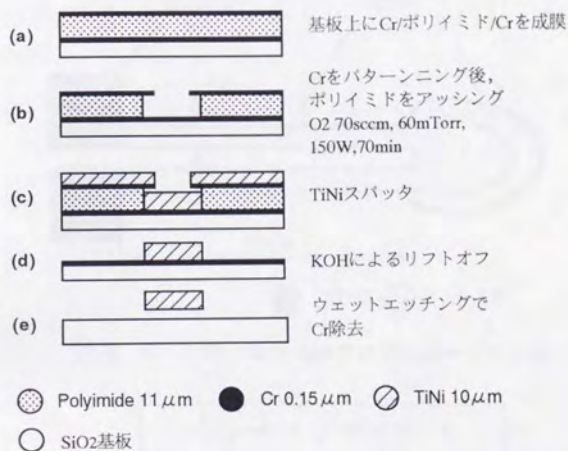


図4.4 プロセスチャート

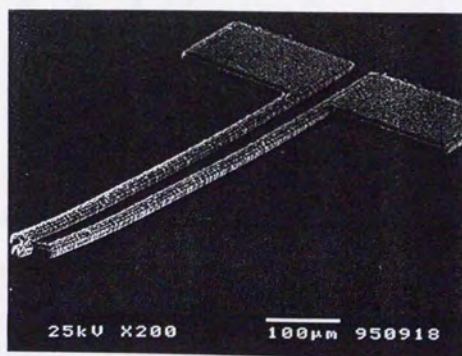


図4.5 加工例

#### 4. 5 発生力の実験的検討

図4. 4のプロセスで、幅 $30\mu\text{m}$ ×2、長さ $850\mu\text{m}$ 、厚さ $10\mu\text{m}$ の片持ち梁型アクチュエータ（図4. 6）を作製し、通電加熱による発生力を測定した（図4. 7）。測定結果および他の駆動原理によるアクチュエータ[5][6]との比較を表4. 2に示す。TiNi薄膜アクチュエータは、消費電力、面積効率とも優れており、マイクロアクチュエータの駆動源として有効であることが確認できた。

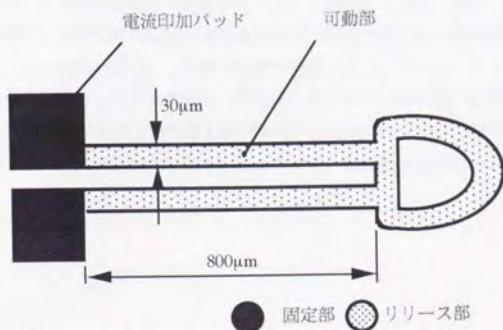


図4. 6 片持ち梁型SMAアクチュエータの寸法

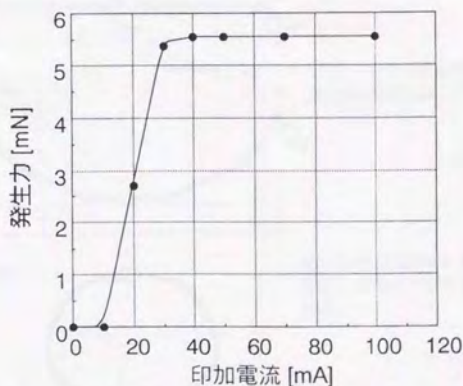


図4. 7 片持ち梁型SMAアクチュエータの発生力

表4. 2 発生力の比較

項目	TiNi	熱バイモルフ[5]	静電 (SDA) [6]
パワー効率 [ mN / mW ]	0.55	0.49	-
面積効率 [ mN / mm <sup>2</sup> ]	108	39	18



#### 4. 6 上下運動（吸着防止用）アクチュエータの開発

図4. 6に示した片持ち梁を図4. 8の様に組みあげ、上下／左右運動をするマイクロアクチュエータを作製した。マイクロアクチュエータのSEM写真を図4. 9に示す。片持ち梁は、幅 $30\mu\text{m} \times 2$ 、長さ $1000\mu\text{m}$ 、厚さ $10\mu\text{m}$ で基板に沿った平らな形状を記憶している。

片持ち梁型アクチュエータを通电加熱すると、そのアクチュエータは、基板に沿うよう形状回復を行おうとする。両方のアクチュエータを同時に通电加熱すると、環は横長に変形し、結合部は下に動く。通电を止めると元の位置に戻り、上下運動を行う（図4. 10(a)）。通电を止めると元の位置に戻るの、片持ち梁の一部は、熱処理で発生した析出物や表面の酸化層および付加応力の小さい部分など、形状記憶合金化されていない部分があり、その部分がばねとして働くためである。

4. 3節で述べた様今回開発したTiNi薄膜は、無負荷では室温中で繰り返し動作を行わないが、環状にし応力を負荷することにより室温中でも繰り返し動作を行う。このアクチュエータへの負荷応力は約 $600\text{MPa}$ である。左右方向動作の周波数応答特性を図4. 11に示す。最大振幅は $300\mu\text{m}$ で、 $20\text{Hz}$ まで動作した。

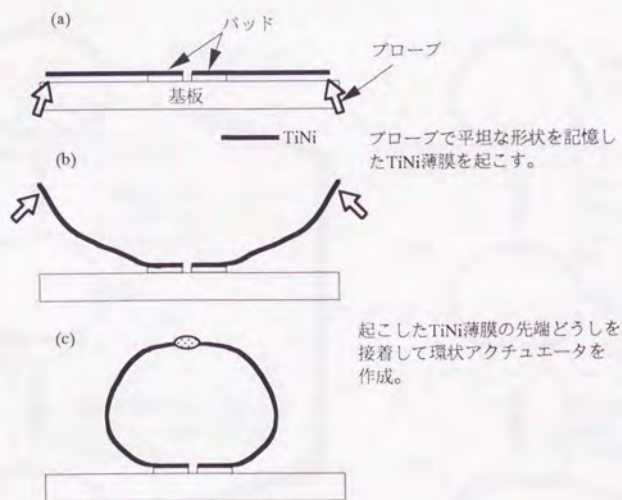


図4. 8 環状アクチュエータの組み立て法



図4. 9 環状アクチュエータ

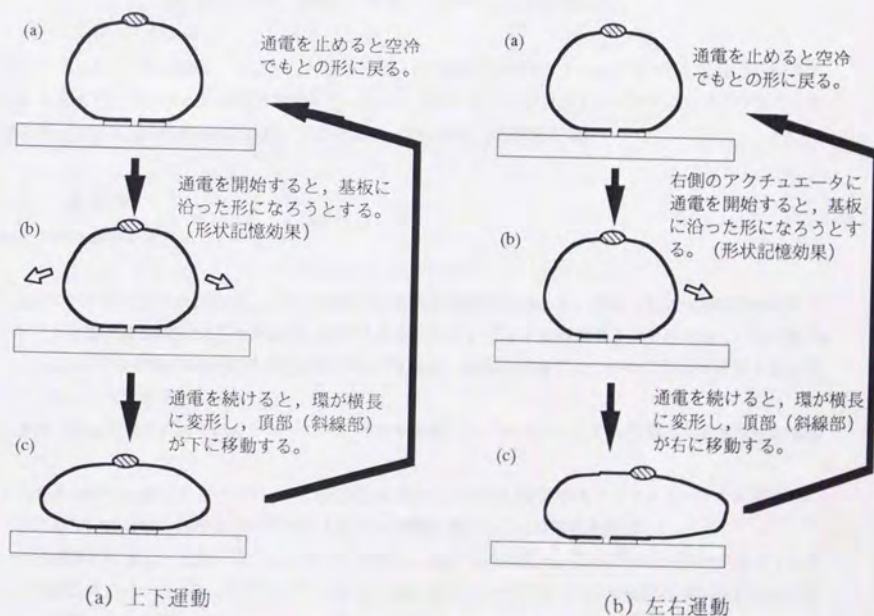


図4. 10 環状アクチュエータの動作

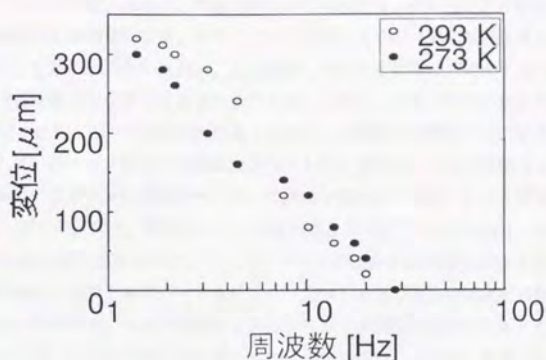


図4. 1 1 環状アクチュエータの周波数特性

このアクチュエータを、図4. 1に示した様にスライダの周辺にサスペンションと一括して作り込むことにより、スライダ・円板吸着防止用アクチュエータとして用いることができる。サスペンションがスライダを円板に押し付ける荷重は数mNであり、アクチュエータの発生力も問題がない。

#### 4. 7 まとめ

本研究で得た結果をまとめる。

- (1) DCマグネトロンスパッタ法によりTiNi形状記憶合金薄膜を作製した。作製したTiNi薄膜のマルテンサイト変態温度は室温以下であるが、応力を負荷することにより変態温度を上昇させることができる。330MPa以上の負荷では室温中での変態が可能であり、加熱・空冷により形状記憶効果を繰り返し発生することができる。
- (2) 厚さ10μm程度のTiNi薄膜のパターニング方法を開発し、アクチュエータの作製により有用性を確認した。
- (3) 片持ち梁型TiNi薄膜アクチュエータの発生力を測定し、他の動作原理のアクチュエータと比較することにより、TiNi薄膜のマイクロアクチュエータの駆動源としての有用性を確認した。
- (4) TiNi薄膜による上下運動アクチュエータを開発し、動作を確認した。このアクチュエータをスライダの周辺にサスペンションと一括して作り込むことにより、スライダ・円板吸着防止用アクチュエータとして用いることができる。



## 5 スライダ・サスペンション一体形ヘッドの研究

### 5.1 研究の目的

ヘッドは、スライダ、サスペンション、信号線から構成され、別々に形成したこれらの部品を組立ることによって作製する。サスペンションは、さらに、複数の部品から構成され、組み立てにより形成することが多い。

磁気ディスク装置の高記録密度化には、スライダの小形化によるヘッドの低浮上量化が必須である。スライダを小形化することにより、円板のうねり、上下振動に対する追従特性が向上することと、位置決め動作時の振動による浮上量変動量を小さくできるためである。しかし、スライダの小形化が進むに従い、識別やハンドリングが困難となり、ヘッドの組立性が悪くなるという問題点が発生する。また低浮上量化が進むに連れ、従来許容されていたヘッド組立寸法誤差に起因する浮上量誤差も大きな問題点となってきた。これらの問題点を解決する為、シリコンによるスライダ・サスペンション一体形ヘッドを提案する。

ヘッドの一体化に関する研究は、従来のヘッド作製技術からのアプローチ[1][2]、およびマイクロマシンからのアプローチ[3][4]の双方があったが、サスペンションの複数の部品および信号線を一体化するものであった。これらの研究は、低浮上量用ヘッドをサスペンションと信号線の寸法精度の向上により実現することを目的としていた。そのため、ヘッドの低浮上量化への寄与は間接的なものであり<sup>12)</sup>効果も小さかった。

ここで提案するシリコンによるスライダ・サスペンション一体形ヘッドは、今までに行われていない、スライダとサスペンションを一体化を図るものであり、スライダの小形化を実現し、画期的に浮上量を低減することを目標としている。

本章では、一体形ヘッドの効果の定量的検討、数値計算および試作による実現性の検討を行う。

### 5.2 研究の流れ

研究の流れを図5.1に示す。

ここで要求される仕様は、浮上量を低減するために、長さ1.25mm以下の超小形スライダ搭載ヘッドを実現することである。

この超小形スライダ搭載ヘッドの実現手段には、従来の組立方式の改良と、組立なしの一体形ヘッドの作製の2通りが考えられるが、プロセス案及び浮上量誤差を比較して、一体形ヘッドを採用した。

機能試作としては、ヘッド素子なし（サスペンションとスライダ本体のみ）プロトタイプモデルの試作と、数値計算による浮上特性の検討を行い、一体形ヘッドの実現性を示した。

本章では、小形スライダを有すヘッドの実現方式の有用性の定量的検討、数値計算および試作による実現性の検討を行った。

<sup>12)</sup> 次のような、事例は考えられる。(1) サスペンションの寸法誤差が小さくなることにより、ヘッド浮上量誤差が小さくなり、その分浮上量を下げることが可能。(2) サスペンションの寸法誤差が小さくなった分、スライダをサスペンションに接合するときの誤差を大きくでき、作業性の悪い、小形のスライダでも組立可能になる。など。

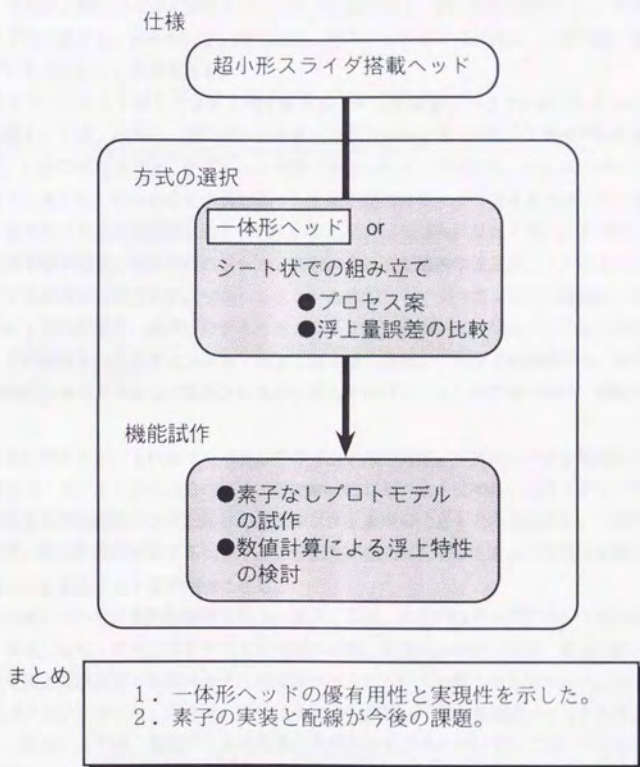


図5. 1 研究の流れ

### 5. 3 有用性の検討（方式の検討）

スライダの小形化による組立性の問題点を解決する方法を図5. 2に示す。

一体形ヘッド(a)はバッチプロセスにより、スライダとサスペンションを一括で生産するものである。スライダの識別やハンドリングを無くすと同時に、組立誤差を無くすることによる寸法精度の向上を目的としている。このプロセスでは、まず、ヘッド素子をウェハに形成する。次に短冊状のローバーに切り出し、浮上面加工を行う。その後、段差加工およびサスペンションの形状加工、信号線の配線を行い、最後に1個1個に分割し、ヘッドが完成する。基本的には、段差加工、サスペンションの形状加工と信号線の配線が従来のスライダ加工プロセスに加えたものである。

シート状のサスペンション列とスライダ列であるローバーを接着しヘッドを組み立てる方法(b)（以下組立形ヘッドと略す。）は、治具と一緒にスライダをハンドリングすることにより作業性を改善することを目的としている。このプロセスでは、まず、ヘッド素子をウェハ上に形成する。次にローバーに切り出し、浮上面加工を行う。そして、ローバーを治具に貼り、1個1個のスライダになるようローバーを切断する。この段階では、個々のスライダは治具に貼り付いているので、ばらばらにはならない。その後、あらかじめ形成しておいた信号線が配線されたサスペンション列とスライダを接合する。そして、サスペンション列に接合したスライダを治具から取り外す。サスペンションの幅がスライダの幅より広い場合は、サスペンション列とスライダの1回の接合で、治具に接合されたスライダは、数個おきにサスペンション列に接合される。最後にスライダが接合されたサスペンション列を1個1個に分割し、ヘッドが完成する。基本的には、現在1個1個行われているヘッド組立プロセスのスライダとサスペンションの接合工程を、複数個同時に行うものである。

2つの方法を比較すると、1枚のウェハあたりのヘッド素子数は、一体形ヘッドと組立形ヘッドは等しく、素子形成工程では、差が生じない。その後の工程では、組立形ヘッドは概ね、スライダとサスペンションを1つずつ組み立てる従来形のヘッドと同等の性能やコストを実現できると考えられる。一体形ヘッドは組立工程がないので、組立誤差に起因するヘッド浮上量誤差が発生しないことと、工程数の低減およびそれに伴う不良率の低下による低コスト化が期待できる。

浮上量ばらつきについて定量的な検討を行う。図5. 3は、典型的なテーパフラット形スライダの一例である。図5. 4は、図5. 3の公差をスライダの加工公差、サスペンション公差、組立公差に分け、それぞれの要因による浮上量誤差を一体形ヘッドと組立形ヘッドについて比較したものである。図5. 4の縦軸は「浮上量誤差/ノミナル浮上量」の2乗、図中の括弧内の数値は「浮上量誤差/ノミナル浮上量」の2乗平均値である。一体形ヘッドは、磁気ディスク装置の内周条件外周条件のいずれにおいても誤差が組立形ヘッドの約2/3になっている。この解析は、線形化ボルツマン法[5]を用いて行い、図5. 3中のA点の浮上量について議論している。

### 5. 4 数値計算例

スライダ・サスペンション一体形ヘッドの実現性を探るため、下記の方針で数値計算を行った。

- 材料：機械的特性[6]と将来の加速度センサやマイクロアクチュエータの搭載を考慮し、シリコンとした。
- スライダ：サイズは長さ1.25mmのピコスライダとした。シリコンによるサスペンションは、大きな

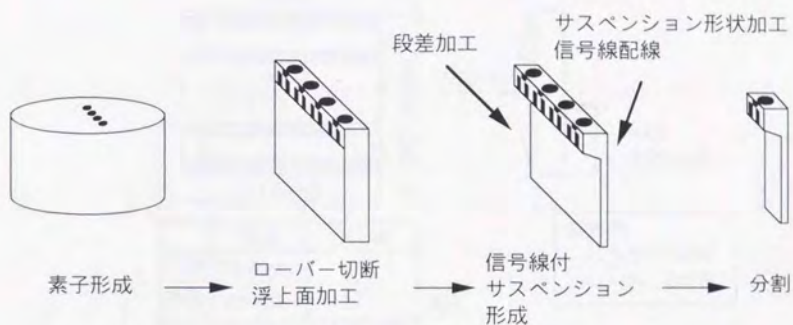


押し付け荷重を出しにくいので、押し付け荷重が小さくできる負圧利用形の浮上面とした。

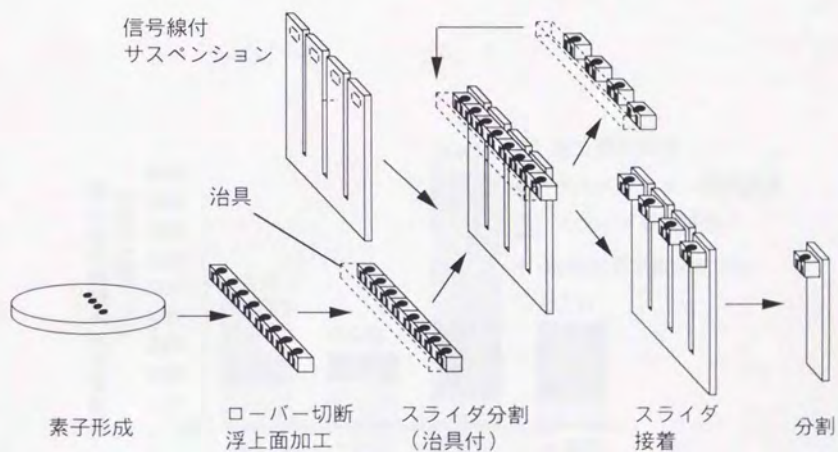
●サスペンション：シリコンの塑性加工は一般的には難しいので、サスペンション全体のたわみで押し付け荷重を出す構造とした。線形解析を用いた。

以上により求めたヘッドの一例を図5. 5に、押し付け荷重が4.9mNから12.3mNまでの4条件の浮上特性を図5. 6に示す。図5. 6の横軸は、スライダの基準点における円板速度で9.42m/sを1に規格化してある。図5の縦軸は、各押し付け荷重におけるスライダの基準点の浮上量で、円板速度9.42m/s（規格化円板速度1）の時の浮上量を1に規格化してある。押し付け荷重が4.9mNの場合は、円板速度が2倍になっても浮上量の増加は20%以下でほぼ満足のいく特性[7]を得ることができた。

押し付け荷重4.9mNの時のサスペンションのスライダ搭載部分のたわみは0.1mmで、最大応力は44MPaであり、単結晶シリコンの降伏応力7GPa[2]の1%未満であり問題はない。



(a) 一体形ヘッドのプロセス案



(b) 組立形ヘッドのプロセス案

図5. 2 超小形スライダを用いたヘッドの作製プロセス案

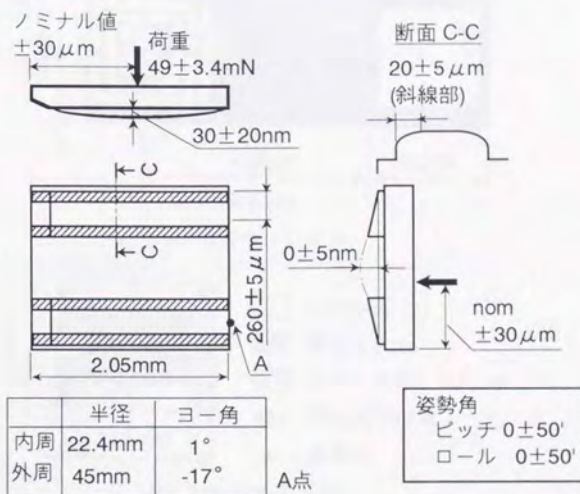


図 5. 3 テーパー・フラット形スライダ

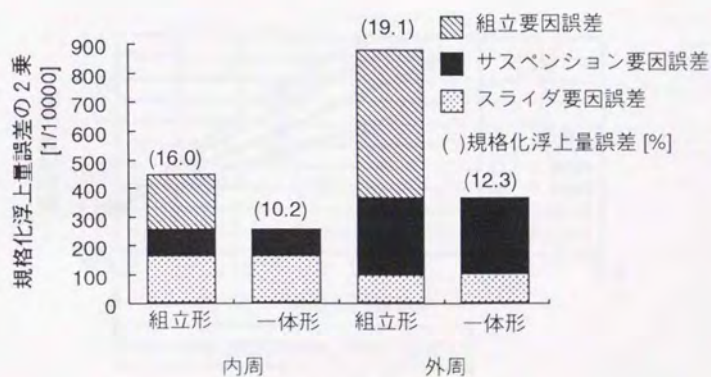


図 5. 4 浮上量誤差の比較



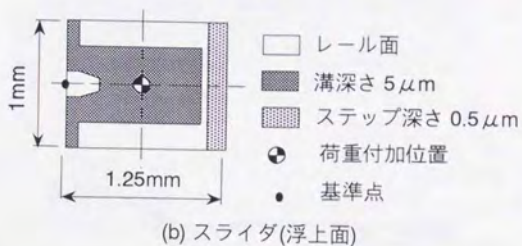
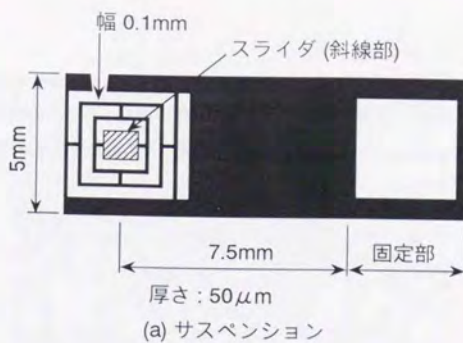


図5.5 一体形ヘッドの寸法

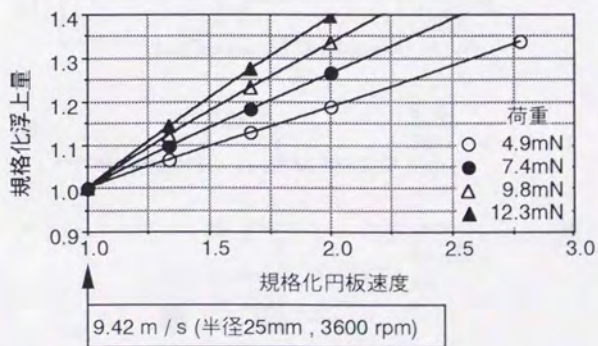


図5.6 浮上特性 (ヨー角  $0^\circ$ )

## 5. 5 試作例

一体形ヘッドの実現性を示すため、図5. 2 (a)のプロセスの浮上面加工から段差加工およびサスペンションの形状加工に至る工程の試作を行った。試作例のプロセスチャートを図5. 7に、試作したヘッドのスライダ付近の浮上面側からのSEM写真を図5. 8に示す。

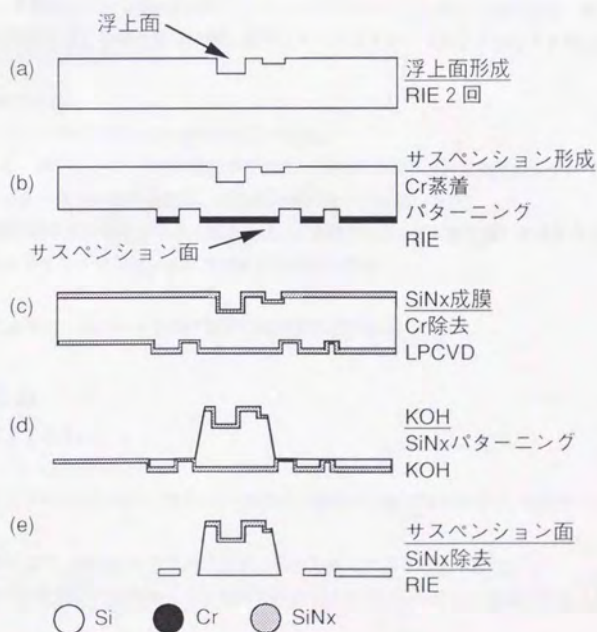


図5. 7 プロセスチャート

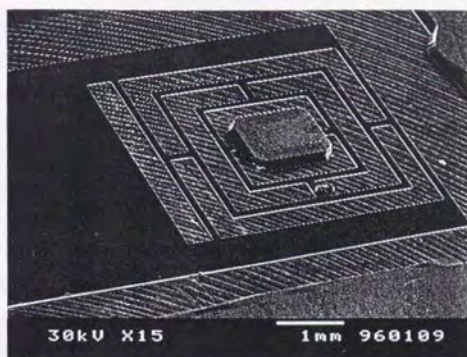


図5.8 試作ヘッド

このヘッドは、単結晶シリコン(Si)を材料に、スライダとサスペンションの浮上面を一体に形成したものである。ヘッドの製作には、半導体製造技術に基づくマイクロマシーニングプロセスを用いた。

- (a) 浮上面をRIEで形成。
- (b) サスペンションの形状を浮上面の裏からRIEで形成。
- (c)(d) 段差加工を、窒化シリコン(SiN)膜をマスクに、KOHによるSiの異方向性エッチングで行う。  
角部のアンダーカットの補正には、正方形補償パターンを用いた[8]。
- (e) 浮上面と反対側の面の窒化シリコン膜をRIEにより除去した。SiN膜を残したままだと、SiN膜形成時の熱応力によりサスペンションに反りが生じるためである。

上記プロセスにより、一体形ヘッドの作製が可能であることを示した。

## 5.6 まとめ

本研究についてまとめる。

- (1) スライダ・サスペンション一体形ヘッドは浮上量ばらつきコストの点で、組立形ヘッドより有利である。
- (2) 数値計算により一体形ヘッドで良好な浮上特性を得られることを示した。
- (3) 試作を行いSiを用いた一体形ヘッドの機構系をマイクロマシンにより製造できることを示した。

以上によりスライダ・サスペンション一体形ヘッドの実用化の見通しを得ることができた。記録/再生素子と信号線の一体形成方法の開発が課題として残る。



## 6 マイクロマシンによる記録密度向上の試算

以上、磁気ディスク装置の記録密度の向上を目的に行なっている、マイクロマシンのヘッドへの応用研究について述べた。ここでは、それらが記録密度の向上にどれだけ寄与しているか試算を行ない、行なった研究の評価を試みる。

記録密度500Mbit/in<sup>2</sup> (100kBPI, 5kTPI) が、オープンループの0クロス周波数500Hz, スライダサイズ2mm, 浮上量50nm (磁気的隙間80nm) で実現されているとする。円板回転数は5400R.P.M.とする。

ヘッド高精度位置決め用マイクロアクチュエータでは、0クロス周波数を500Hzから2kHzに上げることができる。円板回転数が10000R.P.M.になった場合でも、ゲインは平均的に6.7dB稼げ、圧縮率が増加した分トラック密度を向上させると、トラック密度を2.2倍にできる。円板回転数が5400R.P.M.の場合には、トラック密度を4倍にできる。(表6.1)

スライダ・サスペンション一体形ヘッドでは、まず、スライダ長さ1.25 mmのピコスライダが実用可能となる。スライダ長さと浮上量のトレンドをみると、概ね浮上量はスライダ長さに比例しているので、浮上量を現在の60%にできる。さらに、組立公差により発生する浮上量ばらつきがなくなり、公差により発生する浮上量ばらつきは2/3になり、その分浮上量を下げることができる。公差による浮上量ばらつきを全浮上量の15%とすれば、組立公差を排除することにより、浮上量を5%下げることができる。トータルとして、スライダ・サスペンション一体形ヘッドにより浮上量を57% (磁気的隙間は73%) にすることができる。出力を一定に保ち、他の条件を変えなければ、記録波長 (すなわち、ビット密度の逆数) は、磁気的隙間に比例するので[1], ビット密度を1.4倍にできる。(図6.1, 表6.1)

スライダ・円板吸着防止用アクチュエータを用いると、円板のテキスチャーを廃止することができる。円板の表面粗さに起因するヘッド浮上量のばらつきの1/2が、円板のテキスチャーの廃止により軽減できるとし、その量を全浮上量の20%と仮定する。このアクチュエータを単体で用いた場合、浮上量を80% (磁気的隙間は88%) にでき、ビット密度を1.1倍にできる。スライダ・サスペンション一体形ヘッドと組合せた場合は、浮上量を45% (磁気的隙間は66%) にでき、ビット密度を1.5倍にできる。(図6.1, 表6.1)

本研究で開発したアクチュエータや技術を用いることにより、記録密度を6倍 (円板回転数5400R.P.M.) にできる。(表6.1)

表6.1 マイクロマシンの効果

適用技術	効果	記録密度換算	その他
A. 高精度位置決め用マイクロアクチュエータ	位置決め誤差 1/4	トラック密度 4倍	—
B. スライダ・サスペンション一体形ヘッド	浮上量 57%	ビット密度 1.4倍	低コスト
C. 吸着防止用アクチュエータ	浮上量 80%	ビット密度 1.1倍	高信頼性
A + B + C	位置決め誤差 1/4 浮上量 45%	トラック密度 4倍 ビット密度 1.5倍 記録密度 6倍	低コスト 高信頼性

従って、21世紀初頭に現在の記録密度の20倍である20Gbit/in<sup>2</sup>を達成しようとした場合、円板やヘッドの磁気特性やサーボ技術で、4倍の記録密度を向上実現すれば良く、マイクロマシンの応用が、高記録密度化の極めて有効な実現手段であるということが言える。

なお、磁気特性やサーボ技術での4倍の記録密度を向上は、巨大磁気抵抗(Giant Magnetoresistance; GMR)効果を利用したヘッド素子による再生特性の向上、スライダと円板保護膜の薄膜化による磁氣的浮上量の低減、流体軸受けを用いたスピンドルモータをはじめとする機構部品の低振動化、高速DSP (Digital Signal Processor) や加速度情報を用いた高級なサーボ技術による位置決め精度の向上などにより実現される見込みである。

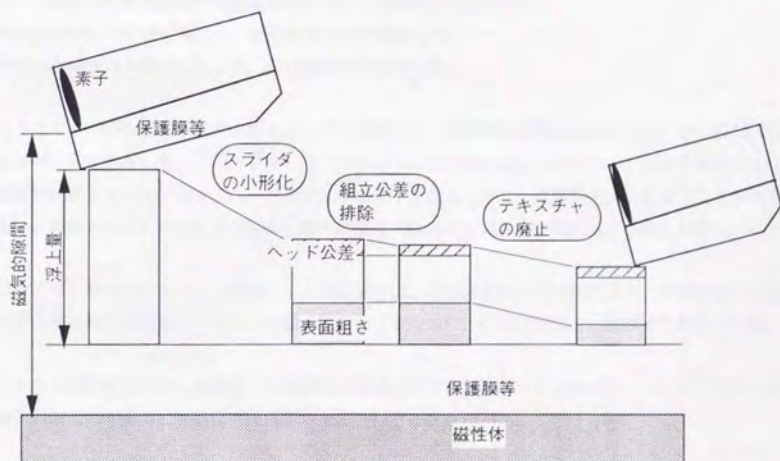


図6. 1 マイクロマシンによる浮上量の低減

## 7 結論

本章では本研究を総括する。

### 7.1 マイクロマシンによる磁気ディスク装置の高記録密度化の研究

マイクロマシンによる磁気ディスク装置への高記録密度の実現という具体的な目的に対し、適用可能技術を提案し、適用可能技術を実現する設計とプロセスを示し、プロトタイプモデルによる検証を行なった。このことにより、マイクロマシンによる超高記録密度の磁気ディスク装置の実現の可能性を示すことができた。個別成果は下記である。

(1) マイクロマシンを用いた磁気ディスク装置の高記録密度化の研究として、適用可能技術の提案を行ない、

- ヘッド高精度位置決め用マイクロアクチュエータ
- スライダ・円板吸着防止用アクチュエータ
- スライダ・サスペンション一体形ヘッド

の研究を行った。

(2) ヘッド高精度位置決め用マイクロアクチュエータの研究では、

- 発生力の大きい、2方向動作静電アクチュエータを考案し、動作原理の検証を行なった。
- トラック密度40kTPIを達成する微動アクチュエータの設計を行なった。
- 試作品作製および評価結果より、設計の妥当性を検証した。
- 実用化への問題点を明確にし、それらの解決案を提示した。

(3) スライダ・円板吸着防止用アクチュエータの研究では、薄膜形状記憶合金を用いた、全く新しい発想のアクチュエータを考案した。このアクチュエータは従来の吸着防止用アクチュエータには具備されていない、吸着解除機能をも有しており、ヘッドの浮上量の低下を図ると共に、信頼性も向上させることができるものである。単体アクチュエータを作製し、動作確認を行なうことにより、実現性の見通しを得た。

(4) スライダ・サスペンション一体形ヘッドの研究では、数値計算例と試作例により、実現性を示した。ヘッドの浮上量の低下を図ることによる記録密度を向上と同時に、信頼性の向上、低価格を実現できる。

(5) これらの技術を実用化した場合、記録密度は現状の6倍まであげることができ、マイクロマシンの応用が、高記録密度化の極めて有効な実現手段であるということを示した。

### 7.2 マイクロマシンの研究

マイクロマシンの研究として本論文には次の意味がある。

(1) マイクロマシンの特徴を活かす適用分野の開拓。狭い意味では、磁気ディスク装置、広い意味では情報通信機器がその分野である。



(2) 新方式アクチュエータの研究。

- 2方向動作静電アクチュエータを開発した。これは、従来の平行平板型アクチュエータに比べ、同一印加電圧での発生力が2倍になるものである。
- 薄膜形状記憶合金を用いたアクチュエータを開発した。

(3) プロセスの研究。

- 高アスペクト比構造を実現する種々のプロセスの比較検討を行なった。材料がSiの場合はICPエッチングが最適である。材料が金属の場合は現状ではLIGAが良いが、高アスペクト比リソグラフィを用いた電鋳も今後期待ができる。
- 新プロセスの開発(表7.1)。
- アライメントを必要としない犠牲層付きLIGA(SLIGA)プロセスを開発。
- LIGAによる静電アクチュエータの作製を行なった。
- LIGAによりアスペクト比125の構造の作製に成功した。マスク用の微細鍍金フレームの作製技術(UVリソグラフィによるアスペクト比10の実現)と、PMMA高速除去技術を新たに導入することにより、実現できた。
- UVリソグラフィにより、アスペクト比10を実現した。
- DCマグネトロンスパッタ法を用いた形状記憶合金薄膜を開発した。
- 形状記憶合金薄膜の加工法の開発をした。厚さ1 $\mu\text{m}$ 程度以下の膜が加工可能なドライエッチング法と、厚さ10 $\mu\text{m}$ 程度以下の膜が加工可能リフトオフ法を開発した。

表7.1 新プロセスの開発

プロセス種類	新しいプロセス	新しい用途への適用	従来プロセスの性能向上
LIGA	アライメントなし SLIGA	静電アクチュエータ 作製	アスペクト比125
形状記憶合金薄膜	薄膜の作製 薄膜の加工	立体的な アクチュエータ作製	—
高アスペクト比 リソグラフィ	—	電鋳モールド	アスペクト比10

(4) マイクロマシン開発ツールの研究。

- 薄膜シリコンの3次元変形構造解析技術の開発<sup>23)</sup>。変形後の形状予測を可能にした。
- 静電アクチュエータのプロセス性能とアクチュエータ性能のトレードオフを示すチャートの考案。
- 微小振動解析システムの構築<sup>24)</sup>。市販のシステムの改造により、使い勝手が飛躍的に増大した。

## 7.3 情報通信機器の開発指針の研究

本研究は、マイクロマシンによる磁気ディスク装置の高記録密度化に取り組んだものであるが、情報通信機器全般の開発指針への展開が可能である。ヘッド高精度位置決め用アクチュエータ、スライダ・円板吸着防止用アクチュエータ、一体形ヘッドなどの開発技術が、情報機器全般に対して、どのように展開できるか

<sup>23)</sup> 付録B 参照。

<sup>24)</sup> 付録A 参照。

を表7.2にまとめる。

表7.2 情報通信機器への展開

本論文の内容	内容	応用範囲	情報通信機器での応用例
ヘッド高精度位置決め用アクチュエータ	マイクロアクチュエータの設計法	位置決め用アクチュエータ	●ポスト磁気ディスク装置（例えば顕微鏡like (SNOM, STM, AFM) の記憶装置）のヘッド位置決め機構 ●光ファイバコネクタ ●顕微鏡 (SNOM, STM, AFM) のセンサ位置決め
	マイクロアクチュエータの評価設備	サブミリサイズの機械部品全般	●部品の振動特性評価 ●可動部の変位、速度、加速度評価
スライダ・円板吸着防止用アクチュエータ	形状記憶合金薄膜、加工法、アクチュエータの開発	オン/オフアクチュエータ、拮抗形アクチュエータ	●搬送システム用アクチュエータ ●リレー・スイッチ ●XYステージ
一体形ヘッド	部品集積化法	サブミリサイズの機械部品全般	●集積化が必要とされる機構部品
薄膜シリコンの3次元変形構造解析技術	薄膜曲げ加工形状解析ツール	薄膜曲げ加工品の設計	●バネ部品など、現在プレス加工されている部品が小形化された部品
共通	プロセスの研究	マイクロ構造全般	●部品製造全般

ヘッド高精度位置決め用アクチュエータは、小さい負荷を精度良く位置決めするアクチュエータである。その意味で、センサやファイバなど、質量の小さいものを精度良く位置決めする用途に展開することができる。また、ここで開発した評価設備は、マイクロアクチュエータのみでなく、小形機構部品全般の評価に用いることができる。

スライダ・円板吸着防止用アクチュエータは、小形のON/OFFアクチュエータである。ON/OFF動作の繰り返し、位相制御により実現できる搬送システムや、リレー、スイッチに展開することができる。

一体形ヘッドの研究では、機構部品の集積化法を示しており、適用範囲は、ほぼ全機構部品と言っても過言ではない。

薄膜シリコンの3次元変形構造解析技術では、薄膜曲げ加工後の形状を予測する方法を開発しており、バネ部品など、現在プレス加工されている部品が小形化され、半導体薄膜技術で作製されるようになった場合に有効である。

また、各研究で行ったプロセスの研究は、基本的には部品製造プロセスの開発であり、部品の生産技術として汎用性が高い。

## 7.4 結言

本研究は、マイクロマシンによる磁気ディスク装置の高記録密度化を目的とした。ヘッド高精度位置決め用マイクロアクチュエータ、スライダ・円板吸着防止用アクチュエータ、スライダ・サスペンション一体形ヘッドなどの開発により、その実現の可能性を示した。これらの開発した技術は、広く情報機器全般に適用可能である。

またマイクロマシンの研究として、適用分野の開拓、新方式アクチュエータの開発、プロセスの開発、開発ツールの開発の面で成果を得、マイクロマシンの発展に寄与した。



## 謝辞

本論文は、筆者が平成6年10月から平成9年9月まで東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻の博士課程に(株)日立製作所からの社会人学生として在籍し、当学生産技術研究所第三部藤田博之教授の御指導のもと研究を行なった結果をまとめたものであります。藤田先生には、研究の構想から論文のまとめ方に至る全ての過程で御指導いただきました。

本学精密工学科 鯉渕興二教授、本学生産技術研究所 原島文雄教授、同 橋本秀紀助教授、本学電気工学科 堀洋一助教授、本学大規模集積システム設計教育研究センター 平本俊郎助教授、本学生産技術研究所 年吉洋講師には、本研究全般についてのご指導を頂きました。

筑波大学の宮崎修一先生には、形状記憶合金の材料特性を測定していただいた他、形状記憶合金の物性、使用法、応用例についてご指導を頂きました。

本研究は、多くの方々のご協力を受けました。共同研究のパートナーになっていただいた、Dr. S.Basrour, Dr. M.LabacheleieをはじめとするLPMO/IMFCの皆様、沼澤稔之氏、高田博史氏をはじめとする住友電気工業株式会社の皆様、越智利彦氏をはじめとする住友精密工業株式会社の皆様、(株)メックスの栗原賢一氏に深く感謝いたします。また、信越半導体株式会社の片山正健氏には、SOIウェハを供給していただきました。

橋口原氏(新日本製鐵株式会社)、小林大氏(現 日立電線株式会社)、秋山照伸氏(現 スイス、ヌシヤテル大学)、小西聡氏(現 立命館大学)をはじめとする、藤田研究室の皆様にもお世話になりました。特に、共同研究者になっていただいた安宅学技官、学生の中村洋介氏(現 日本テレビ放送網株式会社)、福田和人氏(現 JR東日本株式会社)、鈴木耕世氏の諸氏のおかげで、多くの貴重なデータを得ることができました。同研究室に在籍していたLIMMS/CNRSのL.Buchillot博士の尽力による研究成果の発表も大きな励みとなりました。

研究の機会を与えて頂いた、(株)日立製作所ストレージシステム事業部の加藤勝彦前事業部長、斉藤翼生ヘッド設計部長、ならびに、研究構想及び方法のご指導いただいた、菅沼庸雄センタ長、鈴木良郎部長をはじめとする同事業部 技術開発センタの皆様には感謝いたします。また、同社機械研究所の平井洋武主管研究員、原田武主任研究員、佐藤和恭主任研究員をはじめとする皆様には、種々の貴重なご意見をいただきました。

最後になりましたが、本研究の一部は、情報ストレージ開発推進機構からの研究助成により行われたものであります。富士通株式会社の植松幸弘氏をはじめとする、メカ・サーボ部会の皆様とは、単なる研究助成をいただいただけでなく、研究方針も含めた種々の議論ができ、深く感謝しております。



## 参考文献

### 1. 緒言

- [1] H. FUJITA, "A decade of MEMS and its future", IEEE Proc. of MEMS, Jan. 26-30, 1997, Nagoya, Japan (1997) pp. 1-8
- [2] 青井基, 超高密度磁気記録方式の課題と展望, 日本応用磁気学会第93回研究会資料, 1996年2月1-2日, 大阪(1996) pp. 9-15
- [3] 吉田忍, 河野敬, 浜田, 次世代磁気ディスク装置における機構技術, 日本機械学会講演会資料集96-1[V](1996) pp. 38-39
- [4] 板生清, 電子情報通信のメカトロニクス, 電子情報通信学会(1992)
- [5] 江刺正喜, 藤田博之, 五十嵐伊勢美, 杉山進, マイクロマシーニングとマイクロメカトロニクス, 培風館(1992)
- [6] 日本機械工業連合会, マイクロマシンセンター, 平成6年度 マイクロマシン技術に関する経済効果(技術予測)に関する調査研究報告書(1994-3)

### 2. マイクロマシン適用可能技術の提案

- [1] K. Mori, T. Munemoto, H. Otsuki, Y. Yamaguchi and K. Akagi, "A Dual-Stage Magnetic Disk Drive Actuator Using a Piezoelectric device for a High Track Density", IEEE Trans. on Magn., 27-6, (1991) pp. 5298-5300.
- [2] T. Imamura, S. Hasegawa, K. Takaishi and Y. Mizoshita, "Piezoelectric Microactuator Compensating for Off-Track Errors in Magnetic Disk Drives", ASME Adv. Info. Storage Syst., vol. 5, (1993) pp. 119-126.
- [3] (社) 日本機械学会 編, 情報機器のダイナミクスと制御, 養賢堂 (1996) pp. 204-209.

### 3. ヘッド高精度位置決め用マイクロアクチュエータの研究

- [1] K. Mori, T. Munemoto, H. Otsuki, Y. Yamaguchi and K. Akagi, "A Dual-Stage Magnetic Disk Drive Actuator Using a Piezoelectric device for a High Track Density", IEEE Trans. on Magn., 27-6, (1991) pp. 5298-5300.
- [2] T. Imamura, S. Hasegawa, K. Takaishi and Y. Mizoshita, "Piezoelectric Microactuator Compensating for Off-Track Errors in Magnetic Disk Drives", ASME Adv. Info. Storage Syst., vol. 5, (1993) pp. 119-126.
- [3] Z.-w. Jiang, S. Chonan and J. Tani, "Control of a Flexible Arm Using Piezoelectric Bimorph Chells", Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., 522(C), (1990) pp. 416-423, in Japanese
- [4] S. Koganezawa, K. Takaishi, Y. Mizoshita, Y. Mizoshita, Y. Uematsu, T. Yamada, S. Hasegawa and T. Ueno, "A Flexural Piggyback Micro-Actuator for over 5Gbit/in<sup>2</sup> Density Magnetic Recording", IEEE Trans. on Magn., 32-5, (1996) pp. 3908-3910.
- [5] T. Munemoto, K. Mori, S. Nishiyama and S. Jomura, "Basic Studies on Micro Actuator in a Slider for Fine Positioning in Magnetic Hard Disk Drives", Prepr. of Jpn. Soc. Mech. Eng., 920-17, 1-3 April, 1992 (1992) pp. 565-566, in Japanese.
- [6] D. K. Miu and Y.-C. Tai, "Silicon Micromachined SCALED Technology", IEEE Trans. on Industrial Electronics, 42-3 (1995) pp. 234-239.
- [7] L.-S. Fan, H. H. Ottesen, T. C. Reiley and R. W. Wood, "Magnetic Recording Head Positioning at Very High Track

Densities Using a Microactuator-Based, Two-Stage Servo System", IEEE Trans. on Industrial Electronics, 42-3 (1995) pp.222-233

[8] P. Cheung and R. Horowitz, "Design, Fabrication Position Sensing, and Control of an Electrostatically-driven Polysilicon Microactuator", IEEE Trans. on Magn., 32-1 (1996) pp.122-128.

[9] Y. Tang, S.X. Chen and T.S. Low, "Micro Electrostatic Actuators In Dual-Stage Disk Drives With High Track Density", IEEE Trans. on Magn., 32-5 (1996) pp.3851-3853.

[10] T. Imamura, T. Koshikawa and M. Katayama, "Transverse Mode Electrostatic Microactuator for MEMS-Based HDD Sliders", Proc. of IEEE the 9th Annual Int. Workshop on MEMS, 11-15 Feb. 1996, San Diego, U.S.A. (1996) pp.216-221.

[11] 河野敬, 仲野, 富田, 井上, 磁気ディスク用すべり軸受スピンドルの開発, 日本機械学会講演論文集, 95-49(1995) pp.29-30.

[12] 吉田忍, 河野敬, 浜田, 次世代磁気ディスク装置における機構技術, 日本機械学会講演会資料集96-1[V](1996) pp.38-39

[13] Horowitz and B. Li, "Adaptive Track-Following Servos for Disk File Actuators", IEEE Trans. on Magn., 32-3 (1996) pp.1779-1786

[14] K. K. Chew, "Control System Challenges to High Track Density Magnetic Disk Storage", IEEE Trans. on Magn., 32-3 (1996) pp.1799-1804

[15] P. Favrat, L. Paratte, H. Ballan, M. Declercq and N. F. de Rooij, "A 1.5V Supplied, CMOS ASIC for the Actuation of an Electrostatic Micromotor", Proc. of IEEE the 9th Annual Int. Workshop on MEMS, 11-15 Feb. 1996, San Diego, U.S.A. (1996) pp.25-31.

[16] C. J. Wilson and P. A. Beck, "Fracture Testing of Bulk Silicon Microcantilever Beams Subjected to a Side Load", J. MEMS, 5-3(1996) pp.142-150.

[17] 金, C. Bergaud, 小西聡, 増沢隆, 藤田博之, "Fabrication of micro twin probe for dimensional measurement of microholes", 平成8年度電気学会全国大会講演論文集, 3(1996) pp.162-163.

[18] L.-S. Fan, S. J. Woodman, R. C. Moore, L. Crawforth, T. C. Reiley and M. A. Moser, "Batch-Fabricated area-efficient milli-actuators", Solid-State sensor and actuator workshop, June 13-16, 1994, Hilton Head, U.S.A. (1994) pp.38-42.

[19] ICPエッチングの場合, J. K. Bhardwaj and H. Ashraf, "Advanced silicon etching using high density plasmas", SPIE vol.2639 (1995) pp.224-233.

[20] LIGAの場合, 例えば, 高田博史, 平田嘉祐, 奥山浩, 沼澤稔之, 超電導小形シンクロトロン光源を用いたLIGAプロセスの開発, 電気学会論文誌, 116-C(1996-12) pp.1334-1340.

[21] 橋口原, 三村秀典, 藤田博之, 薄膜トランジスタ積層型ポリシリコン電子銃アレイの製造方法及び電気特性, 電気学会論文誌, 116-E (1996) p.98

[22] 明石一, 制御工学増訂版, 共立出版(1979) p.135

#### 4. 吸着防止用TiNi薄膜アクチュエータの研究

[1] 大方, 大塚, 日本ロボット学会誌, 13-2(1995)p.189

[2] 藤田博之, マイクロマシンの世界, 工業調査会 (1992)

[3] 細村洋太郎 編, 情報機器技術, 東京大学出版会 (1993) pp.99-104

[4]田中喜久昭, 戸伏寿昭, 宮崎修一, 形状記憶合金の機械的性質, 養賢堂 (1993)

[5]M. Ataka, A. Omodaka, N. Takeshima and H. Fujita, J. MEMS, 2-4 (1993) p.146

[6]T. Akiyama and H. Fujita, Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems (1995) p.310

## 5. スライダ・サスペンション一体形ヘッドの研究

[1]中村滋男, 高橋賢治, 前田直起, 清水利彦, ビボットレスサスペンションの設計, 日本機械学会講演論文集95-1[IV] (1995) pp.21-22

[2]T. Ohwe, T. Watanabe, S. Yoneoka and Y. Mizoshita, "A new integrated suspension for pico-slider", IEEE Trans. on Magn., 32-5 (1996) pp.3648-3650

[3]D.K. Miu, S. Wu, V. Temevary and Y.-C. Tai, "Silicon microgimbals for super-compact magnetic recording rigid disk drives", Adv. Info. Storage Syst., 5 (1993) pp.139-152

[4]M. Narbutovskii, L. Field, G. Clifford, D. Henze, D. Burriesci, J. Williams and P. Beck, "A silicon microsuspension for disk drive applications", Digest of Technical papers, 1997 Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, June 16-19, 1997, Chicago, U.S.A. (1997-6) pp.221-224

[5]竹内芳徳他, 日本機械学会論文集 60-576(C) (1994) p. 2547

[6]K.E. Peterson, Proc. of the IEEE, 70-5 (1982) p.420

[7]例えば, 竹内芳徳, 松本真明, 上利宏司, 一定浮上量任意形状負圧力利用スライダの開発, 日本機械学会講演論文集, 940-10-IV (1994) pp.658-660

[8]五十嵐伊勢美, 藍光郎 編, Siマイクロマシニング先端技術, (株)サイエンスフォーラム (1992-3) pp.117-118

## 6. マイクロマシンによる記録密度向上の試算

[1]松本, 磁気記録, 共立出版(1977)



## 発表文献

### A. 学会誌論文

#### ●研究全般

(1)S.Nakamura and H.Fujita, "Application of micromachine technologies to hard disk drives", IEEE Trans. on Magn. (1998-3) submitted

#### ●静電アクチュエータ関係

(2)中村滋男, 藤田博之, 2方向動作静電アクチュエータ, 電気学会論文誌, 117-E(1997-12) 掲載予定。

(3)中村滋男, S.Basrour, 鈴木耕世, 藤田博之, 高アスペクトリソグラフィによる電鋳型の作製とその応用, 電気学会論文誌, 117-E (1997-10) 掲載予定。

(4)S.Nakamura, K.Suzuki, M.Akata, H.Fujita, S.Basrour, V.Soumann, M.Labachellerie and W.Daniau, "An electrostatic micro actuator using LIGA process for a magnetic head tracking system of hard disk drives", Microsystems Technology Journal, submitted

(5)S.Nakamura, K.Suzuki, M.Akata and H.Fujita, "An electrostatic micro actuator for a magnetic head tracking system of hard disk drives", ASME Advanced in Information Storage Systems (AISS), submitted

#### ●形状記憶合金関係

(6)中村滋男, 中村洋介, 安宅学, 藤田博之, TiNi形状記憶合金薄膜の加工法, 電気学会論文誌, 117-E (1997-1) pp.27-32.

(7)Y.Nakamura, S.Nakamura, L.Buchaillet, M.Akata and H.Fujita, "Two thin film shape memory alloy microactuators", 電気学会論文誌, 117-E(1997-11) 掲載予定。

### B. 国際学会講演論文

#### ●研究全般

(1)S.Nakamura and H.Fujita, "Micromachine application for hard disk drives", Asia pacific data storage conference, July 16-18, 1997, Tao-Yuan, Taiwan, (1997-7) p.101.

#### ●静電アクチュエータ関係

(2)S.NAKAMURA and H.FUJITA, "An Electrostatic Micro Actuator for a Magnetic Head Tracking System of Hard Disk Drives", Proceedings of the 3rd France-Japan / 1st Europe-Asia Congress on Mechatronics, 2, Besancon, France, (1996-10) pp.778-783.

(3)S.Nakamura, K.Suzuki, M.Akata and H.Fujita, "An electrostatic micro actuator for a magnetic head tracking system of hard disk drives", Digest of Technical papers, 1997 Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, June 16-19, 1997, Chicago, U.S.A., (1997-6) pp.1081-1084

(4)S.Nakamura, K.Suzuki, M.Akata, H.Fujita, S.Basrour, V.Soumann, M.Labachellerie and W.Daniau, "An electrostatic micro actuator using LIGA process for a magnetic head tracking system of hard disk drives", High Aspect Ratio Micro Structure Technology 1997 (Harmst'97) Book of Abstracts, June 20-21, 1997, Madison, U.S.A. (1997-6) Session 3

(5)S.Nakamura, K.Suzuki, M.Akata and H.Fujita, "An electrostatic micro actuator for a magnetic head tracking system of hard disk drives", Int. Conf. on Micromechanics for Information and Precision Equipment(MIPE'97), Tokyo,

Japan,(1997-7) pp.58-63.

### ●形状記憶合金関係

- (6)Y.NAKAMURA, S.NAKAMURA, M.ATAKA, H.FUJITA,S.MIYAZAKI, "Micromachining Process for TiNi-Film SMA Actuators", Proc. of the Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation,2 (1996) p.493.
- (7)L.BUCHAILLOT, Y.NAKAMURA, S.NAKAMURA and H.FUJITA,"Thin Film Actuators for MEMS Applications",Proc. of 3rd France-Japan / 1st Europe-Asia Congress on Mechatronics,2 (1996-10) pp.627-630.
- (8)Y.NAKAMURA, S.NAKAMURA, L.BUCHAILLOT, H.FUJITA, "A THREE-DIMENSIONAL SHAPE MEMORY ALLOY LOOP ACTUATOR", Proc. of IEEE the 10th Annual Int. Workshop on MEMS, January 26-30,1997,Nagoya, Japan (1997-1) pp.262-266
- (9)L.BUCHAILLOT, Y.NAKAMURA, S.NAKAMURA, M.ATAKA and H.FUJITA,"Constitutive part of a Shape Memory Alloy TiNi thin film catheter", Abstract and delegates of 2nd Int. Conf. on Shape memory and superelastic technologies; engineering and biomedical applications, 2-6 March, 1997 ,Pacific Grove, U.S.A. (1997-3) p.41.

### ●薄膜3次元加工関係

- (10)Y.FUKUTA, H.TOSHIYOSHI, S.NAKAMURA, T.AKIYAMA and H.FUJITA, "An FEM Modeling of Plastically Reformed Polysilicon Beams with Joule Heat", Proc. of IEEE Forum on Micromachine and Micromechatronics, Oct.30-31,1995, Nagoya,Japan (1995) p.115

## C. 国内学会講演論文

### ●静電アクチュエータ関係

- (1)鈴木耕世, 中村滋男, 安宅学, 藤田博之, 厚膜レジストを用いた高アスペクト比リソグラフィ, 平成9年電気学会全国大会, 1997年3月26-28日, 3, 同志社大, 京都 (1997) pp251
- (2)中村滋男, 鈴木耕世, 藤田博之, 2方向動作静電アクチュエータの駆動法の検討, 平成9年電気学会全国大会, 1997年3月26-28日, 3, 同志社大, 京都, (1997) pp288
- (3)中村滋男, 鈴木耕世, 藤田博之, 2方向動作静電アクチュエータの検討, 日本機械学会講演論文集, 97-1-IV (1997) pp112-113
- (4)中村滋男, 鈴木耕世, 安宅学, 藤田博之, 磁気ディスク装置用マイクロアクチュエータの検討, 日本機械学会講演論文集, 97-1-IV (1997) pp378-379
- (5)鈴木耕世, 中村滋男, 安宅学, 栗原賢一, 藤田博之, 高アスペクト比リソグラフィと電気メッキモールドへの応用, 日本機械学会講演論文集, 97-22,A (1997) pp103-104
- (6)鈴木耕世, 中村滋男, 安宅学, 藤田博之, マイクロアクチュエータの作製に適した高アスペクト比構造作製技術, 日本機械学会講演論文集(1997-11)掲載予定
- (7)中村滋男, 藤田博之, 磁気ディスク装置ヘッド位置決め用静電マイクロアクチュエータ, 日本機械学会講演論文集(1997-11)掲載予定

### ●形状記憶合金関連

- (8)中村洋介, 中村滋男, 安宅学, 藤田博之, 松永健, 宮崎修一, 薄膜形状記憶合金アクチュエータの作製と応用, 計測自動制御学会第7回自律分散システム・シンポジウム資料 (1996) p.301
- (9)中村洋介, 中村滋男, 安宅学, 藤田博之, 松永健, 宮崎修一, TiNi薄膜の作製と加工法の開発, 次世代センサ協議会, 第11回マイクロ理工学研究会, 第10回マイクロマシーニング研究会 (1996) p.11



(10)中村滋男, 中村洋介, 藤田博之, TiNi合金薄膜のバターニングの検討, 精密工学会1996年度春季大会学術講演会講演論文集(1996) pp.1029-1030.

(11)中村洋介, 中村滋男, 藤田博之, 松永健, 宮崎修一, TiNi薄膜形状記憶合金アクチュエータの作製法とその応用, 電気学会平成8年全国大会講演論文集 (1996) pp.3-142

(12)中村滋男, 中村洋介, 安宅学, 藤田博之, 宮崎修一, TiNi形状記憶合金薄膜によるマイクロアクチュエータの検討, 日本機械学会講演論文集, 96-2[B](1996) p.1473-1474

(13)中村滋男, L.BUCHAILLOT, 中村洋介, 安宅学, 藤田博之, 薄膜形状記憶合金3次元マイクロアクチュエータの構成法, 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集(1996)pp.1131-1132

#### ●一体形ヘッド関係

(14)中村滋男, 福田和人, 藤田博之, シリコンを用いた一体形ヘッドの製作, 電気学会平成8年全国大会講演論文集, 3 (1996)pp.153-154.

(15)中村滋男, 藤田博之, 平井洋武, スライダ/サスペンション一体形ヘッドの検討, 日本機械学会講演論文集96-1[IV](1996)pp.588-589.

#### ●薄膜3次元加工関係

(16)福田和人, 秋山照伸, 中村滋男, D.COLLARD, 藤田博之, マイクロアクチュエータによる3次元マイクロ構造の構築法, 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集(1996)pp.1127-1128.

#### ●その他磁気ディスク装置関係

(17)中村滋男, 高橋賢治, 前田直起, 清水利彦, ヒポットレスサスペンションの設計, 日本機械学会講演論文集95-1[IV] (1995)pp.21-22.

(18)中村滋男, 宮崎卓, 中沢まなみ, 前田直起, 鈴木敏夫, テーパフラット形スライダの浮上プロファイルの検討, 日本機械学会講演論文集95-49(1995)pp.13-14.

#### D. 出願特許

##### ●マイクロマシン関連

(1)藤田博之, 中村滋男, 磁気ヘッド及び磁気ディスク装置, 特開平09-022519 (1997)

(2)藤田博之, 中村滋男, 森健次, 磁気ヘッドスライダ及びそれを用いた磁気ディスク装置, 特願平08-036583 (1996)

(3)藤田博之, 中村滋男, 宮本光秀, 森健次, ヘッド支持機構及び情報記録装置, 特願平08-075862 (1996)

##### ●その他, 磁気ディスク装置関係

(4)鈴木敏夫, 中村滋男, 小山哲夫, 宮崎卓, 磁気ヘッドスライダおよびその製造方法ならびに磁気ディスク装置, 特願平07-198239(1995)



## 付録

### A 微小物体振動評価システム

#### A. 1 目的

マイクロアクチュエータの特性評価として、振動特性、入力変位特性の評価は必須である。しかし、マイクロアクチュエータの評価は、その対象が小さいこと、発生変位が小さいこと、共振周波数が高いことなどにより、測定自体がそう容易ではなかった。また、対象が小さいため、測定システムへのセッティングが難しいという問題点もあった。測定自体は、昨年、顕微鏡付のレーザードップラー振動計が発売され<sup>[1]</sup>、市販の設備で、最小測定対象；直径 $2\mu\text{m}$ 、変位分解能； $0.01\text{ nm}$ の測定が可能となった。しかしながら、後者の測定システムへのセッティングの困難さという問題点は依然として残ったままであった。

ここでは、顕微鏡付のレーザードップラー振動計を操作性を向上させるための改良を行い、さらに、他の測定機を組み合わせることにより、マイクロアクチュエータの振動特性、入力変位特性を容易に測定できるシステムを構築した。

#### A. 2 顕微鏡付レーザードップラー振動計の性能

本システムに用いた顕微鏡付レーザードップラー振動計の測定範囲を図A. 1に示す。最小測定対象（最小レーザースポット径）；直径 $2\mu\text{m}$ 、変位分解能； $0.01\text{ nm}$ 、測定周波数帯域； $0.01\sim 1.5\text{ MHz}$ であり、3章で対象としているマイクロアクチュエータをはじめとする、サブミリサイズのアクチュエータの評価に用いることができる。

#### A. 3 操作性の改良

顕微鏡付レーザードップラー振動計でのマイクロアクチュエータの評価を容易にするため、下記の改良を行った。

- (1) 顕微鏡筒のxy移動機構の追加。
- (2) 試料台のxyチルト機構の追加。
- (3) プローブの設置
- (4) 側面拡大観察装置の追加。

(1) (2)は被測定物体に、レーザ光を当て、反射光を検出する際の作業性が飛躍的に向上した、(3)は、アクチュエータに電圧や電流を印加したり、それらの値を測定するのに用いる。このことにより、アクチュエータ単体自体での評価が可能となる。これは、従来よく行われていた、ワイヤーボンディングによる配線が不要になるという点で、サンプルの作製や、後工程でアクチュエータを他の部品と集積化する際の取扱いが容易になるという利点がある。(4)は、3章で扱うアクチュエータのように、挙動の観察し易い方向と、特性を評価したい方向が異なるときに有用である。3章の場合、レーザは可動部の動作方向から当てるが、挙動は動作方向と垂直な方向で観察したほうが良く分かる。また、動作方向と垂直な方向からプローブで電圧や電流を印加する構造が多いので、その際の位置合わせにも便利である。

#### A. 4 システムの構成

システム全体の構成を図A. 2に示す。先に述べた構成の他、レーザー信号(速度信号)の微積分装置、アクチュエータに電圧を印加する電源、アンプ、データを解析するFFT、オシロスコープなどから構成した。

#### A. 5 測定例

測定例は、3.7.1節、3.7.3節で示した。

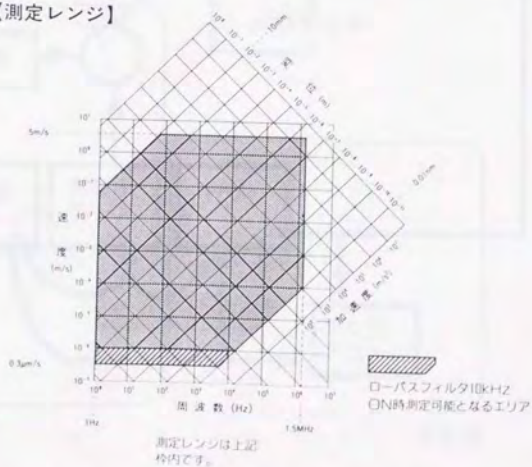
#### A. 6 まとめ

以上により、構築したシステムがマイクロアクチュエータの測定に有用であることが確認できた。

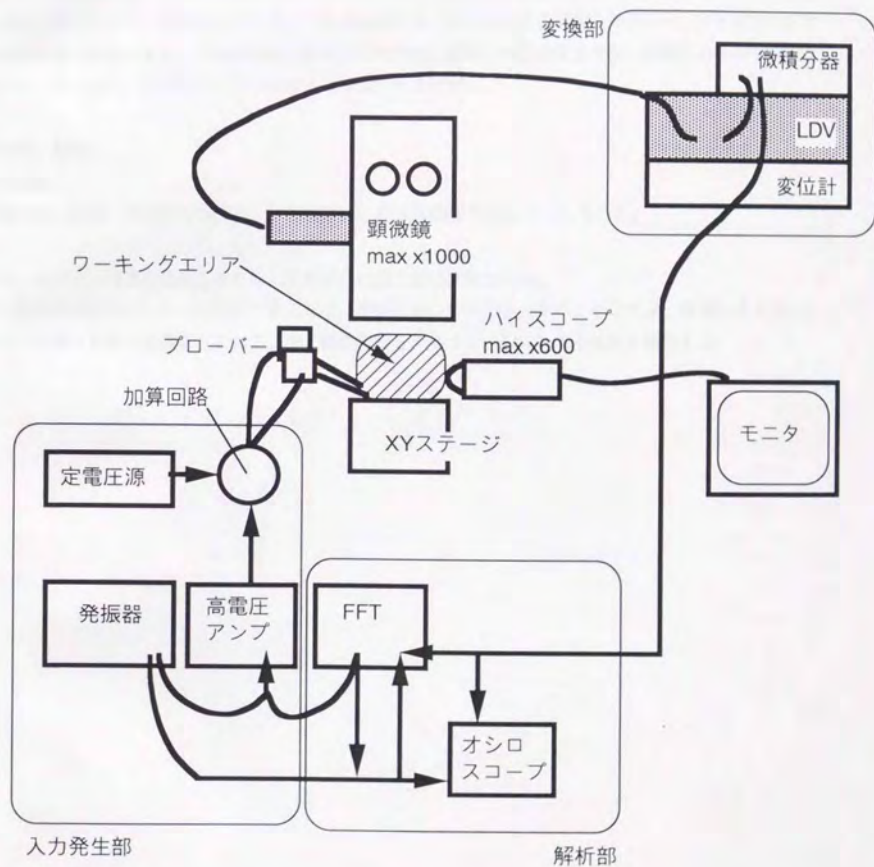
#### 文献

- [1]米田昭, 微小物体振動測定システム, 光アライアンス1996.11,(1996)6-9
- [2]小野測器, LV-1300レーザードップラ振動計取扱説明書

【測定レンジ】



図A. 1 レーザードップラ計の測定範囲 [2]



図A. 2 システム構成



## B 薄膜シリコンの3次元変形構造解析技術の研究

### B. 1 研究の目的

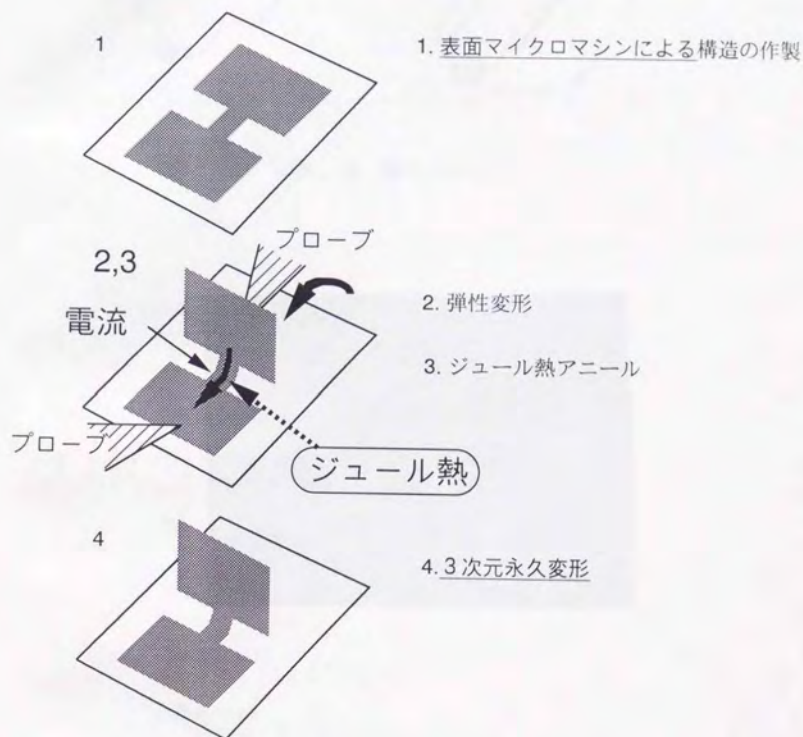
5章で述べた技術は、今から2世代先のフェムトスライダと呼ばれる長さ0.8mmのスライダサイズ位までは有効であると考えられる。その先は、もはやスライダとかサスペンションという区別がなくなり、半導体プロセスで作るのに程良いサイズになってくる。そのときに問題になるのが、いかに3次元形状を作製するかである。機械的剛性、強度を確保したり、実装上の関係から、今のサスペンションをステンレス板のプレス加工で作製しているよう、薄膜を自由に3次元加工できることが重要になる。その実現手段として、福田ら[1]により開発された、ジュール熱を用いたポリシリコンの3次元変形加工法は、極めて有用である。この方法は、ポリシリコン薄膜を曲げ、そこで通電加熱することにより応力緩和を発生させ、3次元変形させるものである(図B. 1)。この方法をうまく活用すれば、図B. 2に示すような、薄膜による超小形ヘッドが作製可能である。超小形ヘッドの機構部に要求される性能は、

- 小形、軽量。
- 高強度。
- 各方向(図B. 2の左右方向や上下方向等)に適当な剛性<sup>12)</sup>をもっていること。

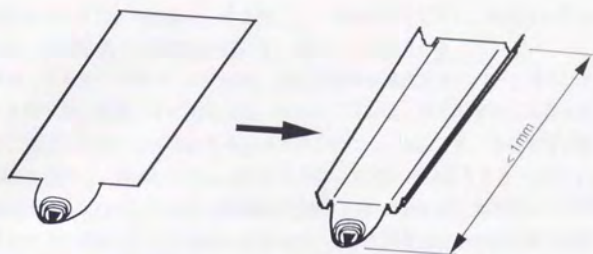
であり、シリコン薄膜を任意形状に加工できるこの加工法は最適である。

加工後の形状をシミュレーションすることは、設計において不可欠である。ここでは、薄膜による超小形のヘッド作製のための基礎研究として、加工後の形状をシミュレーションする方法を開発する。

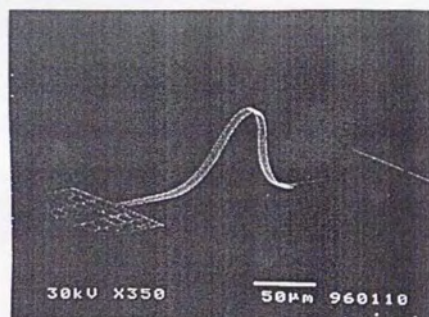
<sup>12)</sup> 浮上特性と位置決め精度のバランスで定まる。



図B. 1 ポリシリコン薄膜の3次元変形



図B. 2 超小形ヘッド



beam size  
400 x 10 x 0.75 ( $\mu\text{m}$ )

pad size  
100 x 100 x 0.75 ( $\mu\text{m}$ )

図B. 3 座屈梁



## B. 2 座屈梁の計算

図B. 3に示す、座屈梁について計算する。

この梁は、平面状のポリシリコンの梁を、一端を固定し、他端を水平に押し、座屈させたものである。

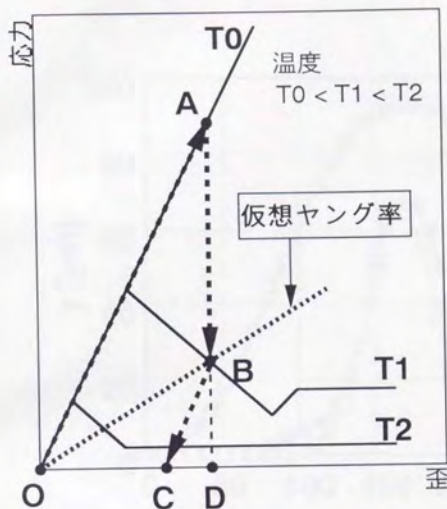
通電加熱前の形状は、非線形の大変形問題を解けば、精度よく計算できる。

通電加熱後の形状は、梁を幾つかのパートに分け、通電加熱時の温度が高いパートのヤング率を、温度が高い程低く設定して計算する。図B. 4に示すよう、ポリシリコンは、ある温度以上になると塑性変形をおこす。座屈梁のように応力と拘束された歪みをもったポリシリコン（A点）を、塑性変形を起す温度以上に加熱すると、応力緩和を発生し、歪みはほとんど変わらずに、応力のみが低下する（B点）。梁に力を加える前の応力-歪み曲線の原点（O点）から応力緩和後の状態（O点→B点）は、通常のヤング率（O点→A点）に比べ、低いヤング率で弾性変形したのと同等とみなせる。ヤング率を温度が高い程低く設定するのは、温度が高い程、降伏後の応力が低いからである。

計算例を図B. 5に示す。計算と実験は非常に良い一致をしており、本計算方法の有用性が確認できた。

## B. 3 まとめ

ジュール熱を用いたポリシリコンの3次元変形加工の形状を解析する方法を開発した。薄膜による超小形のヘッドの開発ツールとして、利用できると考えている。



OA - 初期弾性変形

AB - 部分的応力緩和

BC - 内部応力の解放

OC - 永久歪

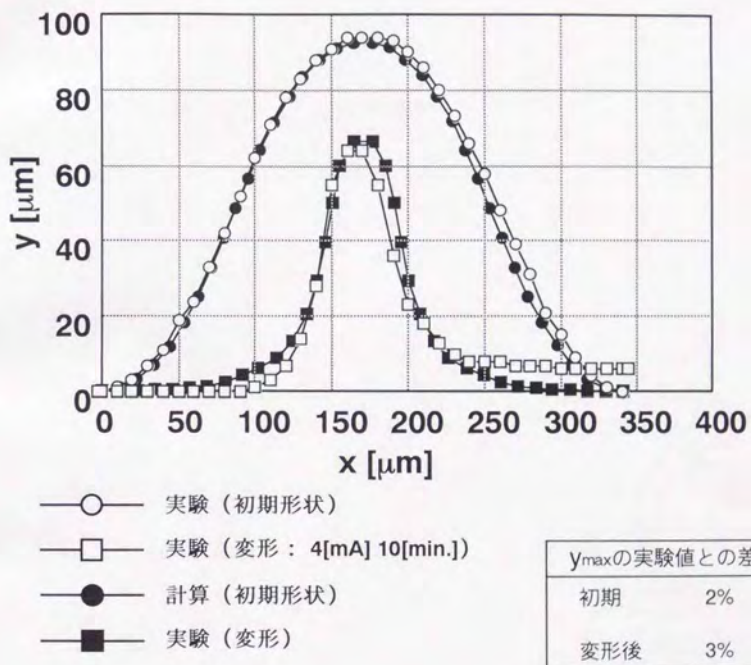
CD - バックラッシュの変位

OB - 仮想ヤング率

### 簡単化のための仮定

1. 実験 --- 変形後アニール  
計算 --- アニール後, 変形 ] 等価
2. 仮想ヤング率による, 特性の線形化
3.  $CD \ll OC$

図B. 4 応力緩和



図B. 5 数値計算と実験値

# 文献

[1]Y.Fukuta, T.Akiyama and H.Fujita, "The Reshaping Technology for Three Dimensional Polysilicon Microstructure",電気学会論文誌, 117-E (1997) pp.20-26.



