

超精密位置決め用圧電アクチュエータの  
高速駆動に関する研究

2003年3月

熊本大学大学院自然科学研究科

江頭義也

## 目次

第1章	序論	1
1.1.	超精密位置決め技術に対する要求	1
1.2.	従来型ステージ駆動機構	2
1.2.1.	電磁モータ	2
1.2.2.	圧電アクチュエータ	4
1.2.3.	共振型超音波モータ	5
1.3.	非共振型超音波モータ	6
1.4.	本論文の目的	9
1.5.	本論文の構成	9
	参考文献	10
第2章	マイクロ波焼結による高信頼性 PZT 圧電素子の作製	13
2.1.	緒言	13
2.2.	マイクロ波焼結と従来焼結技術比較	14
2.3.	使用したマイクロ波焼結装置構成	16
2.4.	焼結実験方法	17
2.4.1.	材料	17
2.4.2.	PZT 焼結方法	18
2.5.	組織観察と材料特性評価	21
2.5.1.	微細組織	22
2.5.2.	電気的特性	26
2.5.3.	機械的特性	28
2.5.4.	単板変位特性	29
2.6.	マイクロ波焼結型圧電アクチュエータの特性評価	31
2.6.1.	非共振型超音波モータ用 PZT のマイクロ波焼結方法	31
2.6.2.	DC 変位特性	32
2.6.3.	分極特性	36
2.7.	結言	39
	参考文献	40

第3章	非共振型超音波モータの駆動特性と先端変位解析	43
3.1.	緒言	43
3.2.	予圧機構の開発	43
3.3.	実験装置と評価方法	46
3.3.1.	基本実験セットアップ	46
3.3.2.	評価アクチュエータの仕様と圧電材料の及ぼす影響	47
3.4.	ステージ駆動速度	52
3.4.1.	駆動速度の予圧力依存性	52
3.4.2.	駆動速度の駆動電圧依存性	52
3.4.3.	駆動速度の駆動周波数依存性	58
3.5.	ステージ駆動推力と出力	62
3.5.1.	駆動推力	62
3.5.2.	出力とエネルギー効率	65
3.6.	非共振型超音波モータの変位解析	67
3.6.1.	解析パラメータの定義	67
3.6.2.	有負荷変位特性	68
3.6.2.1.	ステージ駆動時の変位の予圧力依存性	68
3.6.2.2.	ステージ駆動時の変位の駆動周波数依存性	70
3.6.3.	無負荷変位特性	78
3.6.3.1.	無負荷変位の駆動周波数依存性	78
3.6.3.2.	ステップ応答と固有振動数	79
3.7.	ステージ駆動速度と先端変位の相関	84
3.7.1.	変位軌道モデル	84
3.7.2.	変位軌道モデルによるステージ駆動速度導出	86
3.8.	結言	88
	参考文献	89
第4章	非共振型超音波モータの大型精密位置決めステージ駆動	91
4.1.	緒言	91
4.2.	ステージシステム構成	91
4.3.	実験方法	95
4.4.	駆動性能評価	96
4.4.1.	駆動速度	96
4.4.2.	間欠位置決め特性	98
4.4.3.	連続位置決め特性	101
4.5.	結言	104
	参考文献	104

---

第5章	総括	105
5.1.	結論	105
5.2.	今後の展望	107
謝辞		109
付録 A	連続走行試験と NRUSM 圧電特性	111
付録 B	共振原理を用いたステージ駆動	115
本論文に関する発表		119

## 目次

1.1	回転型電磁モータを利用した直線ステージ駆動機構	2
1.2	干渉除去機構を装備した真空対応送りねじ駆動方式	3
1.3	リニア型電磁モータを利用したステージ駆動機構	3
1.4	Inchworm 機構の駆動原理	5
1.5	共振型超音波モータの駆動原理	5
1.6	非共振型超音波モータの構成	6
1.7	非共振型超音波モータの外観	7
1.8	非共振型超音波モータの駆動原理	8
2.1	材料と電磁波のエネルギー吸収	14
2.2	マイクロ波焼結の装置構成	15
2.3	焼結方法による試料加熱状態の違い	16
2.4	マイクロ波焼結実験装置の外観	17
2.5	マイクロ波焼結実験用チャンバ	17
2.6	焼結用試料の脱バインダ温度プロファイル	18
2.7	マイクロ波焼結実験における焼結試料と熱電対のセットアップ	19
2.8	マイクロ波焼結実験における電力・温度プロファイル	20
2.9	マイクロ波焼結の異常加熱時に見られる現象	20
2.10	異常加熱時の試料温度プロファイル	21
2.11	マイクロ波焼結した PZT の破断面 SEM 像 (×6000)	23
2.12	電気炉焼結した PZT の破断面 SEM 像 (×6000)	23
2.13	マイクロ波焼結試料の平均粒径－焼結温度依存性	24
2.14	電気炉焼結試料の平均粒径－焼結温度依存性	24
2.15	マイクロ波焼結試料の試料内各部の破断面 SEM 像 (×6000)	25
2.16	焼結試料の XRD 結果 (Wide-range)	25
2.17	焼結試料の XRD 結果 (Narrow-range)	26
2.18	焼結試料の密度－粒径依存性	27
2.19	焼結試料の比誘電率・圧電定数－粒径依存性	27
2.20	焼結試料のヤング率・曲げ強度－粒径依存性	28
2.21	焼結試料研磨面の SEM 像 (×2000)	29
2.22	単板変位測定の実験セットアップ	29
2.23	マイクロ波焼結試料 (1150°C, 5min) の単板発生変位－電圧依存性 (正弦波－250Hz)	30
2.24	単板変位－粒径依存性 (正弦波－250Hz, 310V <sub>pp</sub> )	30

2.25	圧電アクチュエータの DC 変位測定の実験セットアップ	32
2.26	圧電アクチュエータの剪断素子発生変位 (正弦波-0.5Hz, 200V <sub>pp</sub> )	33
2.27	圧電アクチュエータの伸縮素子発生変位 (正弦波-0.5Hz, 200V <sub>pp</sub> )	33
2.28	圧電アクチュエータの発生変位-電圧依存性 (正弦波-0.5Hz)	34
2.29	電圧印加と圧電素子のドメイン回転	35
2.30	圧電素子の分極変化	36
2.31	強誘電体の分極測定回路 (ソーヤ・タワ回路)	37
2.32	圧電アクチュエータの剪断素子分極変化-電界依存性 (正弦波-10Hz)	38
2.33	剪断素子の分極変化-周波数依存性 (166V/mm)	38
3.1	予圧機構「ZERO」の構成	44
3.2	予圧機構「Type-A」の構成	45
3.3	予圧機構の不具合点と必要機能	45
3.4	予圧機構「Type-S1」の構成	46
3.5	オープンループ駆動特性評価の実験セットアップ	47
3.6	クローズドループ制御による連続駆動時の速度プロファイル	49
3.7	圧電材料とステージ駆動時の発熱 (NRUSM-1, D 材 : $\tan\delta=2.0\%$ , NRUSM-3, NA 材 : $\tan\delta=0.5\%$ )	50
3.8	クローズドループ制御による連続駆動時のサーボモニタ電圧比較 (NRUSM-1, D 材 : $\tan\delta=2.0\%$ , NRUSM-3, NA 材 : $\tan\delta=0.5\%$ )	50
3.9	ステージ駆動速度-予圧力依存性 (f=10kHz, V=180V <sub>pp</sub> )	53
3.10	ステージ駆動速度-予圧力依存性 (f=20kHz, V=180V <sub>pp</sub> )	53
3.11	ステージ駆動速度-予圧力依存性 (f=30kHz, V=180V <sub>pp</sub> )	54
3.12	ステージ駆動速度-駆動電圧依存性 (f=10kHz, P=35N)	55
3.13	ステージ駆動速度-駆動電圧依存性 (f=20kHz, P=35N)	56
3.14	ステージ駆動速度-駆動電圧依存性 (f=30kHz, P=35N)	56
3.15	伸縮電圧を変化させたときのステージ駆動速度-時間応答 (NRUSM-1, f=30kHz, P=35N)	57
3.16	伸縮電圧を変化させたときのステージ駆動速度-駆動電圧依存性 (NRUSM-1, f=30kHz, P=35N)	57
3.17	NRUSM-1 の駆動速度-駆動周波数依存性 (V=180V <sub>pp</sub> , P=可変)	59
3.18	NRUSM-1 の駆動速度-駆動周波数依存性 (V=可変, P=35N)	59
3.19	NRUSM-1, 2, 3, 4 の駆動速度-駆動周波数依存性比較 (V=180V <sub>pp</sub> , P=35N)	61
3.20	NRUSM-1, 5 の駆動速度-駆動周波数依存性比較 (V=120V <sub>pp</sub> , P=35N)	61
3.21	ステージ/アクチュエータの動摩擦-予圧力依存性 (電源 OFF 時)	63
3.22	NRUSM-5 の駆動推力-駆動周波数依存性 (V=120V <sub>pp</sub> )	64
3.23	NRUSM-3 の駆動推力-駆動周波数依存性 (V=180V <sub>pp</sub> )	64
3.24	駆動推力-駆動周波数依存性比較 (P=35N)	65
3.25	NRUSM-3 の駆動電流・電力-駆動周波数依存性 (V=180V <sub>pp</sub> )	66

3.26	出力・効率－駆動周波数依存性 (NRUSM-3, $V=180V_{pp}$ , $P=35N$ )	67
3.27	変位解析における変位量と応答遅れの定義	68
3.28	NRUSM-1 の変位－予圧力依存性 ( $V=180V_{pp}$ )	69
3.29	NRUSM-1 の剪断・伸縮変位の時間応答 ( $V=180V_{pp}$ , $f=30kHz$ )	70
3.30	NRUSM-1 の剪断変位－駆動周波数依存性( $V=180V_{pp}$ , $P=可変$ )	71
3.31	NRUSM-1 の剪断変位応答遅れ－駆動周波数依存性( $V=180V_{pp}$ , $P=可変$ )	72
3.32	NRUSM-1 の剪断変位位相遅れ－駆動周波数依存性( $V=180V_{pp}$ , $P=可変$ )	72
3.33	NRUSM-1 の剪断・伸縮変位－駆動周波数依存性( $V=180V_{pp}$ , $P=35N$ )	73
3.34	NRUSM-1 の剪断・伸縮変位応答遅れ－駆動周波数依存性 ( $V=180V_{pp}$ , $P=35N$ )	74
3.35	NRUSM-1 の剪断・伸縮変位位相遅れ－駆動周波数依存性 ( $V=180V_{pp}$ , $P=35N$ )	74
3.36	NRUSM の位相変化による楕円軌道変化	75
3.37	NRUSM-1 の各アクチュエータの剪断変位－駆動周波数依存性 ( $180V_{pp}$ , $P=35N$ )	76
3.38	NRUSM-1 の各アクチュエータの剪断変位位相遅れ－駆動周波数依存性 ( $180V_{pp}$ , $P=35N$ )	76
3.39	NRUSM-1,-3,-5 の剪断変位－駆動周波数依存性 (NRUSM-1,-3 : $V=180V_{pp}$ $P=35N$ , NRUSM-5 : $V=120V_{pp}$ $P=35N$ )	77
3.40	NRUSM-1,-3,-5 の剪断変位位相遅れ－駆動周波数依存性 (NRUSM-1,-3 : $V=180V_{pp}$ $P=35N$ , NRUSM-5 : $V=120V_{pp}$ $P=35N$ )	77
3.41	無負荷変位測定の実験セットアップ	79
3.42	NRUSM-1 の無負荷剪断変位・位相遅れ－駆動周波数依存性( $V=100V_{pp}$ )	80
3.43	NRUSM-1 の無負荷伸縮変位・位相遅れ－駆動周波数依存性( $V=100V_{pp}$ )	80
3.44	20kHz, 40kHz 駆動時の剪断変位－時間応答比較	81
3.45	20kHz, 40kHz 駆動時のアクチュエータ各部の剪断方向変位比較	81
3.46	ステップ電圧駆動時の NRUSM-1 剪断方向変位－時間応答 (矩形波 $V=100V_{pp}$ )	82
3.47	NRUSM の固有振動数－形状依存性	83
3.48	NRUSM の発生変位軌道と位相変化の影響	85
3.49	変位軌道モデルの検証	86
3.50	NURSM-3 の変位解析結果 ( $V=180V_{pp}$ , $P=35N$ )	87
3.51	変位軌道モデルによるステージ駆動速度導出結果と実測値との比較 (NRUSM-3, $V=180V_{pp}$ , $P=35N$ )	87
4.1	NRUSM 駆動 300mm ストローク大型ステージの外観 (材質：アルミナセラミックス(99.5%), 寸法：760mm×460mm×170mm, 可動部重量：25kg)	92

4.2	間欠位置決め (Point to point) と連続位置決め (Continuous path) .....	92
4.3	NRUSM ステージシステム構成 .....	94
4.4	NRUSM コントローラのサーボモデル .....	94
4.5	NRUSM コントローラ位置決めプロセス .....	95
4.6	300mm ストロークステージの駆動速度-駆動電圧依存性 ( $f=30\text{kHz}$ , $P=40\text{N}$ ) .....	96
4.7	300mm ストロークステージの駆動速度-時間応答 ( $V=170V_{pp}$ , $f=30\text{kHz}$ , $P=40\text{N}$ ) .....	97
4.8	100nm ステップ応答 (位置決め精度 $\pm 0.69\text{nm}$ , 位置決め完了後待機時間 100ms) .....	98
4.9	位置決め精度と追い込み時間のヒストグラム .....	99
4.10	位置決め精度と追い込み時間の相関 .....	99
4.11	10nm 連続ステップ駆動の時間応答 (位置決め精度 $\pm 0.69\text{nm}$ , 位置決め完了後待機時間 100ms) .....	100
4.12	500 $\mu\text{m}$ 連続ステップ駆動の時間応答 (位置決め精度 $\pm 5\text{nm}$ , 位置決め完了後待機時間 100ms) .....	101
4.13	等速駆動領域にける連続位置決め特性(10nm/s $\sim$ 10 $\mu\text{m/s}$ ) .....	102
4.14	等速駆動領域にける連続位置決め特性(100 $\mu\text{m/s}\sim$ 20mm/s) .....	102
4.15	100nm/s と 102nm/s の等速駆動指令における時間応答 .....	103
A-1	連続走行試験によるガイドプレート磨耗と発生粉塵堆積 .....	112
A-2	連続走行 200km の試験前後のサーボモニタ電圧比較 .....	113
A-3	連続走行 200km 後のアルミナガイドプレートの磨耗プロファイル .....	114
B-1	剪断・伸縮電圧位相差 $\theta=0^\circ$ の時のステージ駆動速度試算結果 (NRUSM-3, $V=180V_{pp}$ , $P=35\text{N}$ ) .....	115
B-2	剪断・伸縮電圧位相差 $\theta$ を変化させた時のステージ実駆動速度比較 (NRUSM-3, $V=180V_{pp}$ , $P=35\text{N}$ ) .....	116
B-3	剪断・伸縮電圧位相差 $\theta$ を変化させた時のステージ推力比較 (NRUSM-3, $V=180V_{pp}$ , $P=35\text{N}$ ) .....	117
B-4	剪断・伸縮電圧位相差 $\theta$ を変化させた時のステージ出力・効率比較 (NRUSM-3, $V=180V_{pp}$ , $P=35\text{N}$ ) .....	117



## 表目次

2.1	マイクロ波パワーユニット仕様	16
2.2	焼結チャンバ仕様	17
2.3	PZT 焼結条件	18
2.4	評価用試料寸法	22
2.5	微細組織と結晶構造評価の使用機器	22
2.6	マイクロ波焼結型圧電アクチュエータの焼結条件	31
2.7	評価アクチュエータ仕様	32
2.8	DC 変位特性評価の使用機器	34
2.9	200V <sub>pp</sub> における圧電アクチュエータ変位	35
2.10	駆動周波数 10Hz－駆動電界 166V/mm における分極変化	37
3.1	ステージ構成要素とオープンループ駆動評価の使用機器	48
3.2	圧電素子の材料定数	49
3.3	評価アクチュエータ仕様	51
3.4	駆動速度－予圧力依存性実験条件	52
3.5	駆動速度－駆動電圧依存性の実験条件	54
3.6	駆動速度－駆動周波数依存性の実験条件	58
3.7	駆動推力測定の実験条件	62
3.8	出力と効率評価の実験条件	66
3.9	アクチュエータ有負荷変位－予圧力依存性の実験条件	68
3.10	アクチュエータ有負荷変位－駆動周波数依存性の実験条件	71
3.11	アクチュエータ無負荷変位－駆動周波数依存性の実験条件	78
3.12	ステップ応答評価アクチュエータ仕様	82
3.13	アクチュエータ仕様と固有振動数	83
3.14	ステージ駆動速度と先端変位相関の実験条件	86
4.1	NRUSM ステージシステム構成	93
4.2	オープンループ制御駆動の実験条件	96
4.3	間欠位置決め特性評価の実験条件	97
4.4	連続位置決め特性評価の実験条件	103
A-1	連続走行試験の駆動条件と結果	111
B-1	電圧位相制御による共振原理駆動の実験条件	116
B-2	電圧位相制御とステージ駆動性能比較	118

## 第1章 序論

### 1.1. 超精密位置決め技術に対する要求

半導体製造技術、新材料評価技術、細胞生物学において、対象の微細化は日々進展し、かつては未知の領域であったナノメートル領域での操作が必要とされている<sup>[1-5]</sup>。遺伝子や細胞内微小器官の操作、高集積化のためのLSIパターンの微細化などがその一例である。これらのキーテクノロジーとなるのが精密工学に代表される超精密位置決め技術である。

半導体製造技術においては、高集積・高密度化のための微細化の進展とは対極に、生産性の向上のためのSiウェハの大型化が進められており、12inchウェハ上にデザインルール100nm以下のデバイスが実装されつつある。LSIはリソグラフィ技術により作製したパターンを元に、複数回にわたるエッチングや成膜工程を経て製造するため、スタートポイントであるリソグラフィ技術の限界がLSIの高集積・高密度化の限界を決定すると言っても過言ではない。現在のリソグラフィ技術は、レチクル（原版）上のマスクパターンを縮小レンズを通して基板上に転写する方式が主流である。微細化に伴い露光装置に使用される光の波長はg線(436nm) → i線(365nm) → KrF(248nm) → ArF(193nm)と徐々に短波長化しており、それに伴う露光装置の開発が進められている。一方で、次世代のリソグラフィ技術確立を目指した電子ビームを光源とするEPL(Electron Projection Lithography)<sup>[6,7]</sup>やLEEPL(Low Energy Electron Beam Proximity Projection Lithography)<sup>[8]</sup>に代表される新しい露光技術の開発も行われている。ITRS'01(International Technology Roadmap for Semiconductors)<sup>[9]</sup>によれば、2005年の80nmのデザインルールを達成するためには、28nm以下の重ね合わせ精度がリソグラフィ技術に要求されている。

このような半導体の製造/評価装置に搭載されるステージの性能としては、ワークサイズが数100mmを超えるものに対応し、かつ、最終的な位置決め分解能がナノメートルオーダーであることが必要とされる。更には、スループット向上のために対象物移動に要する時間の短縮が重要となる。また、使用環境も次第に真空・電子線環境へと移行しており、これに伴いステージ本体とその駆動機構に対する制約条件も厳しくなっている。電子線描画技術<sup>[10-13]</sup>は、リソグラフィを前提とする高解像度レチクル作製には不可欠であり、装置に使用される精密ステージには真空対応、かつ、非磁性であることが要求される<sup>[7]</sup>。また、スキャン型露光装置等<sup>[14,15]</sup>のように、

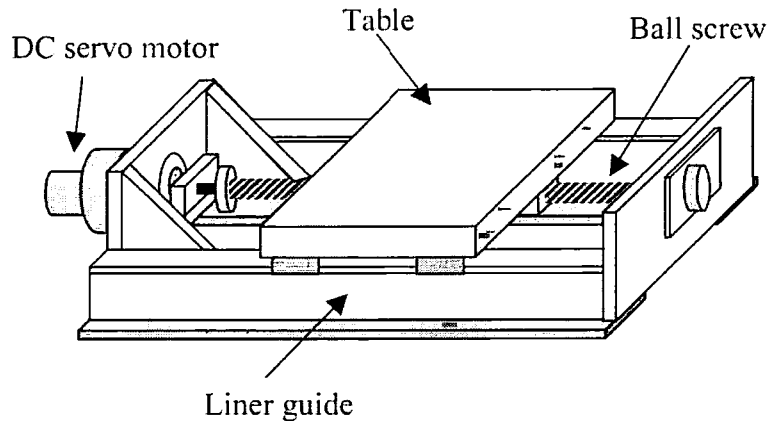


図 1.1 回転型電磁モータを利用した直線ステージ駆動機構

電子線描画装置<sup>[16,17]</sup>のスループットの問題を解決する手段として、現行のステップ&リピート描画方式から連続移動描画方式へと移行することが予想され、従来の最終位置決め性能に加え、移動中の等速安定性等の高い速度制御性が要求される。

このように、次世代の半導体製造装置に要求される高精度・高スループットの生産性を達成するには、高速で高精度な位置決め性能を装備し、更に、連続移動方式にも対応可能な時間位置分解能の極めて高いステージシステムが不可欠となる。これには、要求される動性能を満足する高性能なステージ駆動機構の開発が必要である。

## 1.2. 従来型ステージ駆動機構

### 1.2.1. 電磁モータ

#### 【回転型電磁モータ】

従来のリニアステージ機構では、直線状のガイドに導かれたステージを回転型電磁モータ（DC サーボモータ、AC サーボモータ、ステッピングモータ）と送りねじ（すべりねじ、ボールねじ、静圧ねじ等）<sup>[18]</sup>とを用いて送るようにしたものが多く開発されている（図 1.1）<sup>[19-22]</sup>。回転型電磁モータの場合には、運動軸の変換機構や減速機構など多くの機械要素によって構成されるため、特に接触式の送りねじを利用する機構では、単一機構でのナノメートルオーダの位置決めは困難である。そのため回転型電磁モータと送りねじにより構成された粗動ステージと、圧電素子を用いた微動ステージを複合させた粗微動型ステージ<sup>[20]</sup>や、送りねじのダブルナットに圧電素子を組み込み<sup>[21]</sup>微動位置決めを行う機能化送りねじ方式が広く用いられている。これらの方式では複合型の機構となるため、制御システムが複雑化するという短所を持つ。一方、非接触式の送りねじを用いた駆動機構では、補助的な位置決め機構を用いずに位置決め精度 $\pm 2\text{nm}$ を達成している報告<sup>[22]</sup>があり、接触式の問題点が克服されている。いずれの方式においても、電磁式モータは空間を隔てて電磁力を利用しているため、常にサーボをかけておかなければ位置決め後に静

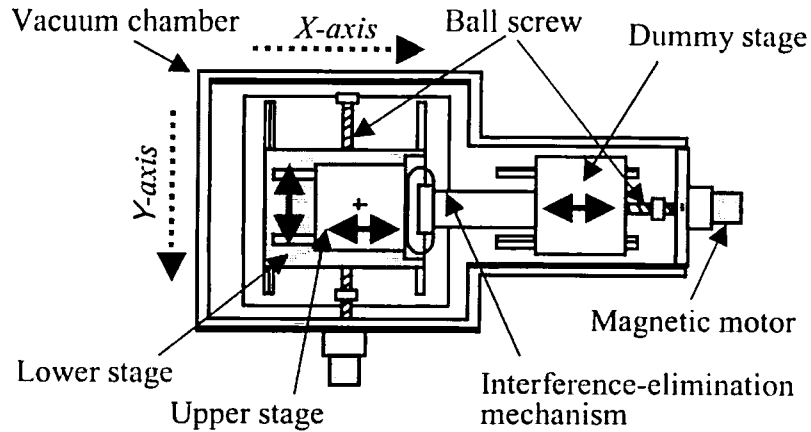


図 1.2 干渉除去機構を装備した真空対応送りねじ駆動方式

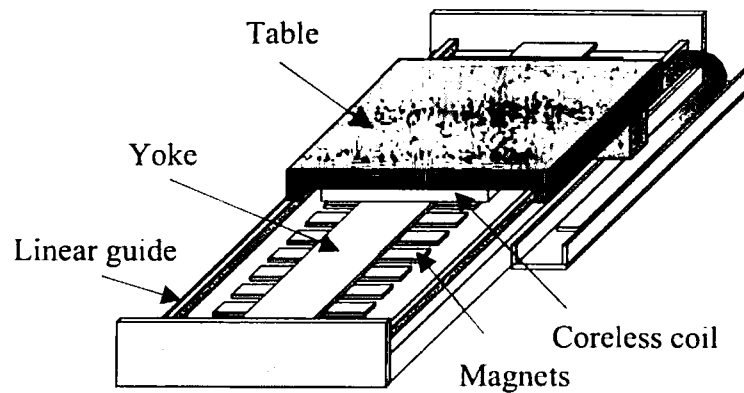


図 1.3 リニア型電磁モータを利用したステージ駆動機構

止しつづけるのは困難である。

これらの方式を次世代の半導体製造装置に応用する場合には、真空・非磁性といった電子線環境に適合する装置設計が必要である。高い精度の要求されるXY2軸のステージにおいては、下側に設置されたY軸のステージは駆動源と直接結合が可能であるが、上側に設置されたX軸のステージはY軸ステージの移動に伴い、ステージの送りねじとモータ回転軸との位置関係にずれが生じるためこれを除去する干渉除去機構が必要となる。図 1.2 は干渉除去機構を用いた代表的なステージを示したものであるが、ステージシステム全体の大型化を引き起こすため、ウェハサイズの大型化に伴いそのフットプリントの拡大は避けられない。

#### 【リニア型電磁モータ】

リニア型電磁モータは、回転型電磁モータの回転子／固定子およびエアギャップをそれぞれ直線状に展開し、電気エネルギーを直線運動エネルギーに直接変換できるものである（図 1.3）。送りねじのような運動変換機構が不必要であり、静圧軸受けを用いることによりステージを非接

触の状態直接駆動できるため、速度・加速度を大きく取れる、推力が大きい、バックラッシュがない等の利点を持ち、回転型電磁モータ駆動ステージの多くの問題点が克服されている。スキャン型露光装置<sup>[14,15]</sup>のレチクルステージならびにウェハステージに広く使われており、LSIの生産性を大幅に向上させたキーテクノロジーの一つである。しかしながら、漏洩磁場やコイルからの発熱があるため、電子線環境へと近づきつつある次世代露光装置には克服すべき大きな課題がある。(株)ニコンが現在開発を進めているEPL用電子線ステッパのステージ部分には、リニア型電磁モータとエアガイドが採用<sup>[7]</sup>されている。電子線環境に適合させるためにエアガイド部分での差動排気システムやリニアモータ部分での磁場シールドにより諸問題を解決しているが、装置のコストが極めて高い上、重厚長大なシステムとなっているのが現状である。

### 1.2.2. 圧電アクチュエータ

電圧印加に応じて変位を発生するPZTに代表される圧電素子は、応答性が高く、原子レベルでの変位を利用するため高精度変位制御が可能であることに加え、磁場を発生しない(影響を受けない)という特徴を持つ。最大発生変位量が数 $\mu\text{m}$ 程度と非常に小さいために、複数の圧電素子を張り合わせた積層型圧電アクチュエータ<sup>[23,24]</sup>や、発生した変位を拡大する機構を持つアクチュエータ<sup>[25]</sup>等が実用化されている。しかしながら、最大変位量は一般にミリメートルレンジ以下に限定されるため、微小位置決め機構としては有効であるが、長ストロークのステージ駆動は不可能である。そこで圧電素子の高い分解能を維持したまま、長ストローク移動を可能にした駆動機構が開発されている。なお、本研究で取り扱う位置決め用圧電アクチュエータの基本構成は下記に説明する機構と類似したものである。

#### 【Inchworm 機構】

Inchworm 機構<sup>[26,27]</sup>は、尺取虫が移動するように微小距離移動を繰り返すことにより移動する機構であり、位置決めシステムとしてBurleigh Instruments Inc.<sup>[26]</sup>により市販されている。圧電素子の両端にクランプ機構を取り付け、クランプ機構のロックと解除を圧電素子の変位/駆動タイミングに合わせて最適制御することにより、微小距離ずつのステップ移動を連続して行うことができる(図 1.4)。1ステップを上限とする圧電素子の最大変位量以下の移動量であれば、高い分解能で滑らかな移動が可能であるが、大きな移動量を得るためには持ち替えに伴うクランプ機構のロック/解除を行う必要がある。そのため移動が一時的に停止する必要があり滑らかな移動ができないとともに、クランプ持ち替え時に約 $1\mu\text{m}$ の位置ずれが生じる問題がある<sup>[26]</sup>。圧電効果を直接利用しているため分解能に優れるが、断続的な移動と最高駆動速度が $10\text{mm/s}$ 程度である短所を持つ。

#### 【Walking Drive 機構】

Inchworm 機構の問題を改善すべく、長ストロークにわたり連続した滑らかな移動を得ることができる機構としてWalking Drive<sup>[28,29]</sup>が挙げられる。Inchworm 機構との基本的な違いは、送り方向に変位する圧電素子を2つ以上用いている点である。これにより、一方の圧電素子が最大変位をむかえるときに他方が変位し、その間に最大変位した圧電素子を元の状態に縮める一連の

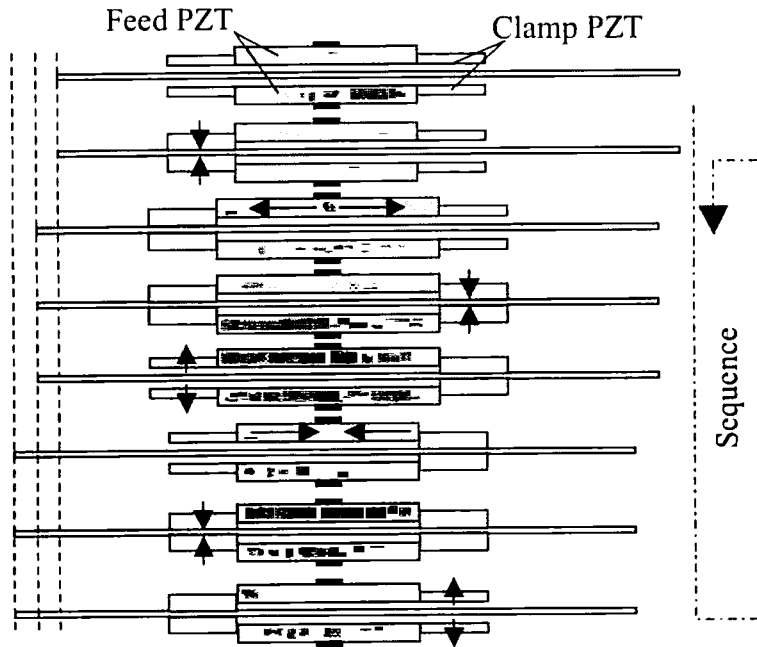


図 1.4 Inchworm 機構の駆動原理

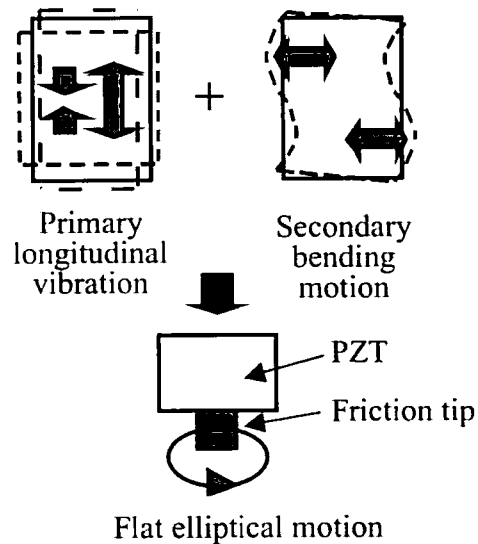


図 1.5 共振型超音波モータの駆動原理

シーケンスを、クランプ機構と組み合わせ繰り返すことにより連続的な移動が可能となる。分解能と連続移動性能に優れるが最高駆動速度は数 10mm/s 程度である。

### 1.2.3. 共振型超音波モータ

圧電素子の寸法／形状設計で決定される共振周波数の電圧を印加し、その共振現象により発生する大きな変位を利用したアクチュエータは、一般に超音波モータ (USM: ultrasonic motor)

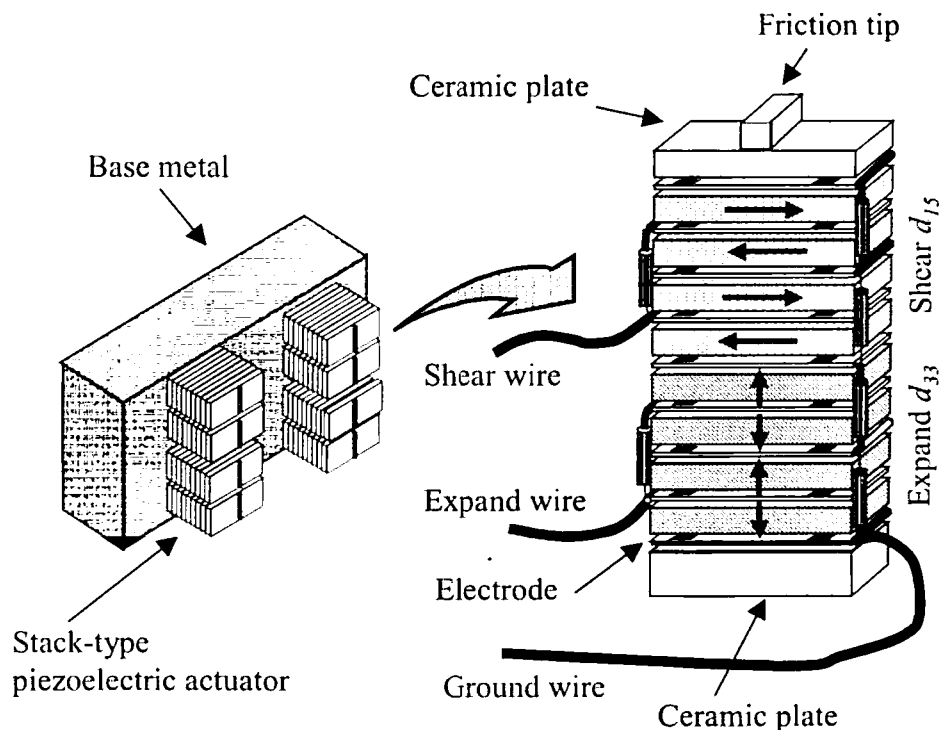


図 1.6 非共振型超音波モータの構成 (矢印は分極方向)

[30]と呼ばれているが、本論文では特に共振型超音波モータと呼ぶこととする。駆動力を定在波によって得る定在波型[31-33]と、進行波によって得る進行波/表面弾性波型[34-36]とに大別でき、いずれも摩擦力を介して対象物を移動させている。

Nanomotion Ltd.が超精密ステージの駆動機構として市販している定在波型リニア超音波モータ[31]の基本動作原理は、図 1.5 に示すように共振周波数 (39.6kHz) で駆動した圧電素子に発生する 1 次縦/2 次屈曲それぞれの振動が、圧電素子先端部で楕円軌道を合成できることを利用したものである。基本性能としては位置決め分解能 5nm、250mm/s での高速ステージ駆動が可能であり、電子線環境に適合している特長を持つ。しかしながら、電力を投入しても共振現象を起し楕円軌道を合成して駆動力を発生するまでの動きに寄与しない無駄なエネルギーが必要であり、結果として時間的な動作不感帯が生じる。更に、最適位置検出した際の共振振動の 1 サイクル途中での停止が難しいため、実質的にはナノメートルオーダでの高精度位置決めを行うのは容易ではない。

### 1.3. 非共振型超音波モータ

非共振型超音波モータ(NRUSM : nonresonant ultrasonic motor)は伸縮変形 ( $d_{33}$ ) と剪断変形 ( $d_{15}$ ) を行う 2 種類の圧電素子を積層して圧電アクチュエータを構成しており、現在は 8 つの

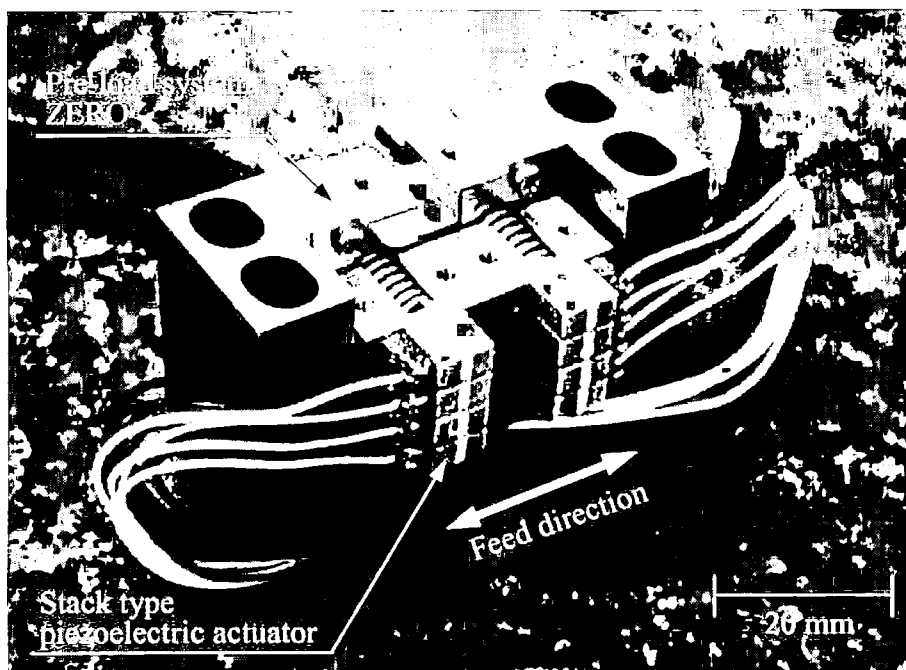


図 1.7 非共振型超音波モータの外観

積層型圧電アクチュエータにより1つのモータを構成している(図 1.6, 図 1.7). アクチュエータの初期デザイン並びに駆動原理は, 1987年に魚住らによってSTM用スキヤナとして開発された圧電体ウォーカ<sup>[37, 38]</sup>を原型としている. 自走式の機構である圧電体ウォーカは, XYZの計3軸のプローブ操作を可能としたものであり, 圧電効果によるナノメートルオーダーの分解能と, STMユニットとしては十分な駆動速度である0.27mm/sの性能<sup>[37]</sup>を持っていた. 圧電体ウォーカが自走式であるのに対し, 圧電体を固定してリニアステージの駆動源として開発されたのがNRUSMである. 動作原理は1対の積層型圧電アクチュエータを基本単位としており, 最適な伸縮・剪断動作をさせることにより, 数 $\mu\text{m}$ 程度の最大変位量をもつ積層型圧電アクチュエータによって長ストロークの連続移動が可能となる.

#### 【駆動原理】

積層型圧電アクチュエータ対のうち的一方をA, 他方をBとして図 1.8 に示す動作ループを繰り返すことにより連続移動を行う.

1. Aの剪断部分をステージの送り方向とは逆の方向に変形
2. Aの伸縮部分を伸ばしステージと接触
3. Bの伸縮部分を縮める
4. ステージと接触しているAの剪断部分をステージの送り方向に変形  
----- ここでステージが送られる -----
5. Bの剪断部分をステージの送り方向とは逆の方向に変形



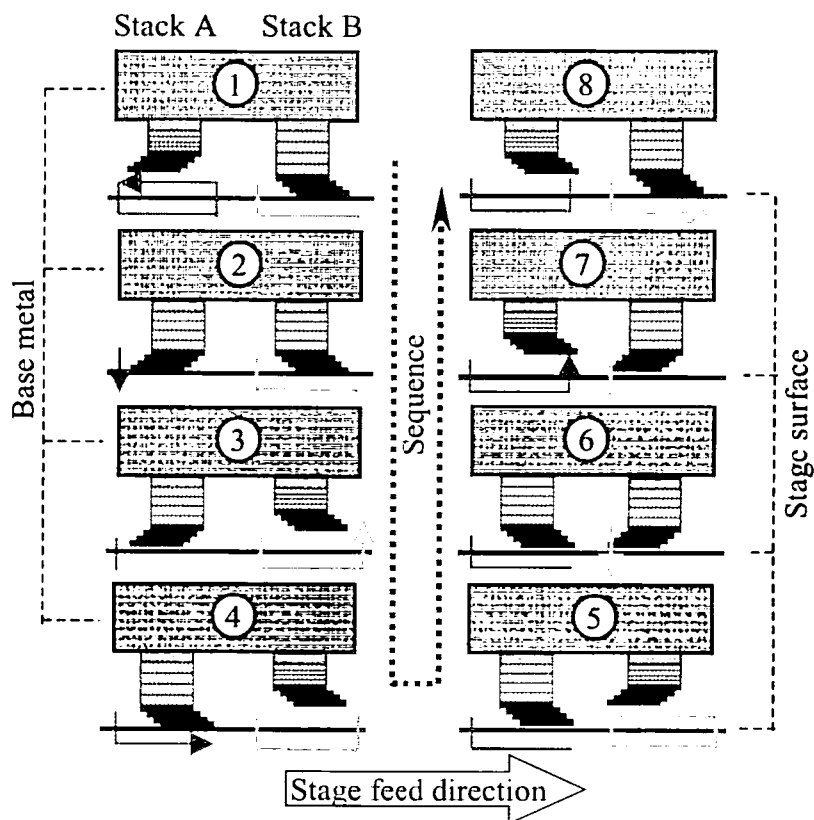


図 1.8 非共振型超音波モータの駆動原理

6. B の伸縮部分を伸ばしステージと接触
7. A の伸縮部分を縮める
8. ステージと接触している B の剪断部分をステージの送り方向に変形  
 ----- ここでステージが送られる -----

矩形波電圧によって駆動される場合には上記動作に完全に従うが、現在は正弦波電圧で駆動されているため、動作としては連続的なものとなる。

ステージの駆動速度  $v$  は、一回の変位シーケンス当りの圧電アクチュエータ変位量  $x_{sequence}$  とその繰り返し周波数  $f$  で決定されるため、駆動原理に従えば理論的に次式で表すことができる。

$$x_{sequence} = d_{15}VN_{15} \quad (1.1)$$

$$v \propto x_{sequence} \cdot f = 2d_{15}VN_{15}f \quad (1.2)$$

ここで、 $d_{15}$ は圧電アクチュエータ剪断素子の圧電定数、 $V$ は駆動電圧、 $N_{15}$ は圧電アクチュエー

タ剪断素子積層枚数である。駆動速度の向上にはこれらのパラメータを増加させることが有効となる。

本機構は、高い分解能での位置制御が可能であること、アクチュエータの2方向変位（伸縮と剪断）をそれぞれ独立に駆動できること、駆動周波数を選択できることが大きな特長である。また、Inchworm 機構/Walking Drive 機構/共振型 USM 同様に接触型のダイレクトドライブ方式であるため、静止保持力が高くブレーキ機構が不必要である、装置のフットプリントを小型化することが可能である利点をもつ。

そこで、本論文における超精密位置決め用圧電アクチュエータとして NRUSM を取り上げ、次世代半導体製造への応用を検討することにした。

#### 1.4. 本論文の目的

NRUSM を次世代半導体製造装置に応用するには、電子線環境において高速駆動・高分解能等の動作性能を満たす必要がある。NRUSM は原理的にサブナノメートルの分解能を有するため、克服すべき最初の課題は駆動速度の高速化である。本論文では、信頼性を高め、かつ、ナノメートルオーダの位置決め精度を保ちながら駆動速度を高速化することを目的とし、従来とは異なる方法での高信頼性圧電材料の作製プロセス提案を行い、続いて NRUSM の駆動特性を解明することにより非共振原理に基づいた高速化を行うための積層型圧電アクチュエータの形状設計について論ずる。

#### 1.5. 本論文の構成

第1章「序論」では、本研究の背景と目的について述べた。

第2章「マイクロ波焼結による高信頼性 PZT 圧電素子の作製」は、信頼性を高めるために有効と考えられる微細結晶粒を持つ PZT 圧電素子を、マイクロ波焼結法により作製し、従来技術である電気炉焼結との比較検討を行う。

第3章「非共振型超音波モータの駆動特性と先端変位解析」は、駆動電圧と駆動周波数を変化させた時のステージ駆動速度性能を中心に、圧電素子材料・予圧力・アクチュエータ形状の与える影響を明確にする。続いて NRUSM の変位解析を行うことにより諸現象ならびに駆動原理破綻のメカニズムを解明し、非共振原理に基づいた高速駆動が可能なアクチュエータを設計するための指針について検討を行う。また、ステージ駆動速度と NRUSM 発生変位の相関を変位伝達系のモデル化により検討する。

第4章「非共振型超音波モータの大型精密位置決めステージ駆動」は、300mm ストロークの大型ステージに NRUSM を取り付け、オープンループ制御での駆動速度評価を行い、続いてクローズドループ制御による間欠位置決め特性と連続位置決め特性について検討を行う。

第5章「総括」では、本論文で得られた成果を要約し、今後の展望について述べる。

## 参考文献

- [1] L. Dong, F. Arai, and T. Fukuda, "Three-Dimensional Nanoassembly of Multi-Walled Carbon Nanotubes through Nanorobotic Manipulations by Using Electron-Beam-Induced Deposition," Proceedings of 1st IEEE Conference on Nanotechnology, October 2001, pp. 93-98.
- [2] P. Bøggild, T. M. Hansen, K. Mølhave, A. Hyldgård, M. O. Jensen, J. Richter, L. Montelius, and F. Grey "Customizable nanotweezers for manipulation of free-standing nanostructures," Proceedings of 1st IEEE Conference on Nanotechnology, October 2001, pp. 87-92.
- [3] 桂進司, "DNA 分子のマイクロマニピュレーション," 精密工学会誌, Vol. 68, No. 11, pp. 1415-1418, 2002.
- [4] 大石勝昭, 工藤謙一, "細胞マニピュレーション," 精密工学会誌, Vol. 68, No. 11, pp. 1419-1423, 2002.
- [5] 福田宏, "超解像露光技術の現状と課題," 応用物理, Vol. 69, No. 9, pp. 1060-1066, 2000.
- [6] T. Yamaguchi, "EB Stepper-A High Throughput Electron-Beam Projection Lithography System," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 39, Part 1, No. 12B, pp. 6897-6901, 2000.
- [7] S. Kawata, M. Hamashima, T. Miura, K. Suzuki, K. Okamoto, and T. Yamaguchi, "Progress and Preliminary Results on EB Stepper," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 41, Part 1, No. 6B, pp. 4136-4140, 2002.
- [8] T. Usumi, "Low-Energy E-Beam Proximity Lithography (LEEPL): Is the Simplest the Best?," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 38, Part 1, No. 12B, pp. 7046-7051, 1999.
- [9] "LITHOGRAPHY," International Technology Roadmap for Semiconductors, 2001.
- [10] K. Kurihara, K. Iwadate, H. Namatsu, M. Nagase, H. Takenaka, and K. Murase, "An Electron Beam Nanolithography System and its Application to Si Nanofabrication," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 34, Part 1, No. 12B, pp. 6940-6946, 1995.
- [11] T. Fujino, H. Maeda, Y. Kimura, H. Horibe, Y. Imanaga, H. Shinkawata, S. Nakao, T. Kato, Y. Matsui, M. Hirayama, and A. Yasuoka, "Electron Beam Direct Writing Techniques for the Development of Sub-Quarter-Micron Devices," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 35, Part 1, No. 12A, pp. 6320-6327, 1996.
- [12] K. Nakajima, H. Yamashita, Y. Kojima, S. Hirasawa, T. Tamura, Y. Yamada, K. Tokunaga, T. Ema, K. Kondoh, N. Onoda, and H. Nozue, "0.15  $\mu\text{m}$  Electron Beam Direct Writing for Gbit Dynamic Random Access Memory Fabrication," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 36, Part 1, No. 12B, pp. 7535-7540, 1997.
- [13] J. Yamamoto, F. Murai, Y. Someda, and S. Uchino, "Fine Pattern Fabrication below 100 nm with 70 kV Cell Projection Electron Beam Lithography," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 39, Part 1, No. 12B, pp. 6854-6860, 2000.
- [14] (株)ニコン, "縮小投影型露光装置 NSR-S306C," 製品カタログ, 2001.

- 
- [15] キヤノン(株), "半導体露光装置 FPA-5000AS3," 製品カタログ, 2003.
- [16] Etec Systems, "MEBES eXara," Product Catalog, 2001.
- [17] T. Kunioka, Y. Takeda, T. Matsuda, N. Shimazu, and Y. Nakayama, "XY stage driven by ultrasonic linear motors for the electron-beam x-ray mask writer EB-X3," *J. Vac. Sci. Technol.*, Vol. B 17, pp. 2917-2920, 1999.
- [18] (社)精密工学会 超精密位置決め専門委員会 次世代精密位置決め技術編集委員会, "次世代位置決め技術," フジ・テクノシステム, pp. 311-345, 2000.
- [19] K. Nakashima, Y. Tamaru, and K. Takafuji, "Feeding Behavior of Screw Drive Table," *Proceedings of The 1st Korea-Japan Conference on Positioning Technology (Daejeon, Korea)*, pp. 34-39, 2002.
- [20] H. J. Pahk, D. S. Lee, and J. H. Park, "Ultra precision positioning system for servo motor-piezo actuator using the dual servo loop and digital filter implementation," *Int. J. Machine Tools & Manuf.*, Vol. 41, pp. 51-63, 2001.
- [21] J. S. Chen and I. C. Dwang, "A ballscrew drive mechanism with piezo-electric nut for preload and motion control," *Int. J. Machine Tools & Manuf.*, Vol. 40, pp. 513-526, 2000.
- [22] J. Mao, H. Tachikawa, and A. Shimokohbe, "Precision positioning of a DC-motor-driven aerostatic slide system," *Precision Engineering*, Vol. 27, pp. 32-41, 2003.
- [23] (株)トーキン, "積層圧電アクチュエータ Vol. 1," 製品カタログ, 1998.
- [24] J. Watanabe, T. Someji, and S. Jomura, "Fundamental Consideration of Piezoelectric Multiplayer Actuators with Interdigital-Electrode-Type Structure," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 38, Part 1, No. 5B, pp. 3331-3333, 1999.
- [25] S. H. Chang and B. C. Du, "A precision piezodriven micropositioner mechanism with large travel range," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 69, No. 4, pp. 1785-1791, 1998.
- [26] Burleigh Instruments Inc., "Inchworm Positioning Systems," Product Catalog, 1997.
- [27] S. Lee and M. Esashi, "DESIGN OF THE ELECTROSTATIC LINEAR MICROACTUATOR BASED ON THE INCHWORM MOTION," *Mechatronics*, Vol. 5, No. 8, pp. 963-972, 1995.
- [28] E. Shamoto and T. Moriwaki, "Development of a "walking drive" ultraprecision positioner," *Precision Engineering*, Vol. 20, No. 2, pp. 85-92, 1997.
- [29] 社本英二, 甲興哲, 森脇俊道, "Walking Drive による精密送り機構の開発 (第3報)," *精密工学会誌*, Vol. 67, No. 7, pp. 1125-1129, 2001.
- [30] K. Uchino, "Piezoelectric ultrasonic motors: overview," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 7, pp. 273-285, 1998.
- [31] Nanomotion Ltd., "A Novel Non-Magnetic Miniature Motor for Ultra High Vacuum Applications," Technical Report, Jan. 2000.
-

- [32] M. Kümmel, S. Goldschmidt, and J. Wallaschek, "Theoretical and experimental studies of a piezoelectric ultrasonic linear motor with respect to damping and nonlinear material behaviour," *Ultrasonics*, Vol. 36, pp. 103-109, 1998.
- [33] A. Ferreira and P. Minotti, "Control of a multidegree of freedom standing wave ultrasonic motor driven precise positioning system," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 68, No. 4, pp. 1779-1786, 1997.
- [34] M. K. Kurosawa, "State-of-the-art surface acoustic wave linear motor and its future applications," *Ultrasonics*, Vol. 38, pp. 15-19, 2000.
- [35] Y. Roh, S. Lee, and W. Han, "Design and fabrication of a new traveling wave-type ultrasonic linear motor," *Sensors and Actuators*, Vol. A 94, pp. 205-210, 2001.
- [36] L. Petit, N. Rizet, R. Briot, and P. Gonnard, "Frequency behaviour and speed control of piezomotors," *Sensors and Actuators*, Vol. 80, pp. 45-52, 2000.
- [37] 魚住清彦, 中本圭一, 藤岡景昭, "送り装置," 公開特許広報(A) 昭 63-274894, 1988年11月11日公開.
- [38] 魚住清彦, "剪断変形と伸縮変形を利用した圧電体ウォーカ," *超音波テクノ*, Vol. 11, pp. 15-18, 2000.

## 第2章 マイクロ波焼結による高信頼性 PZT 圧電素子の作製

### 2.1. 緒言

非共振型超音波モータ (NRUSM) の駆動速度向上を図るには、(1.2) 式で表されるように駆動電圧の高圧化・高周波数化が有効であるが、その際には積層型圧電アクチュエータにかかる電氣的・機械的負荷が大きくなるという問題がある。それゆえ、本機構の性能および信頼性を高めるには、積層時の接着技術ならびに変位伝達部分である先端フリクションチップ材料の耐磨耗性の改善と共に、圧電素子の耐久性の向上も重要な課題である。具体的には、絶縁破壊電圧・脱分極電圧 (電氣的強度) が高く、かつ、機械的強度に優れた圧電材料の開発が切望される。この圧電素子の耐久/劣化特性を左右する機械的強度と分極反転電圧とは相互に関連していることが既に報告されている<sup>[1]</sup>。また、この電氣的・機械的強度は共に圧電素子の微細構造に依存し、小さいドメイン構造ほど特性は向上すると一般的に考えられている<sup>[2-7]</sup>。更に、ドメインサイズは結晶粒径に依存<sup>[6,7]</sup>することから、高信頼性化のためには圧電素子の結晶粒微細化が有効な手段と考えられる。一方で、微細結晶粒を持つ圧電素子は圧電特性の低下を引き起こすことも報告されている。このため、圧電特性と電気・機械的強度を共に向上させるには圧電素子そのものの成分調整などが有効<sup>[1,8]</sup>とされているが、本研究では、従来の製造プロセスを見直し焼結時間の短縮により結晶粒成長を抑制する手法を検討した。

マイクロ波加熱によるセラミックスの焼結<sup>[9-17]</sup>は、マイクロ波エネルギーが物質内部に浸透し、誘電損失により吸収されて内部発熱を誘起するため、従来の電気炉焼結に代表される外部加熱に比べ均一加熱、急速加熱が可能な焼結法と考えられている。更に、マイクロ波加熱では従来の電気炉加熱より低温・短時間で焼結でき、圧電素子の電氣的・機械的特性の改善に有益<sup>[14-16]</sup>であることも報告されている。

本章では、圧電素子の信頼性を高めるために有効と考えられる微細結晶粒を持つ PZT 圧電素子を、マイクロ波焼結により作製し、従来技術である電気炉焼結との比較検討を行う。

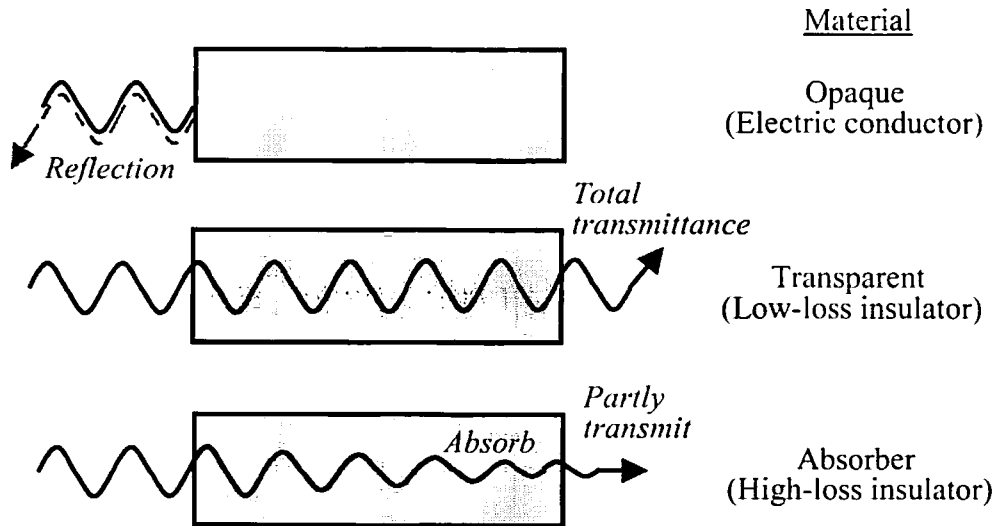


図 2.1 材料と電磁波のエネルギー吸収

## 2.2. マイクロ波焼結と従来焼結技術比較

誘電体は一般に正負の電荷をもった双極子の集合体と考えられる。誘電体に周波数の高いマイクロ波電界を印加すると、分子の正負の重心移動（分子振動）が電界の交番に追従できず遅れをとり、その遅れ分のエネルギーが熱エネルギーとして誘電体に吸収され内部発熱する。つまり、マイクロ波帯の電磁波を用いたセラミックス誘電体加熱は、試料内部での誘電損失による自己加熱であり、電気炉などの熱伝導による外部加熱とは原理的に異なる焼結法である。誘電体の単位体積当りのマイクロ波吸収電力  $P$  は次式で表される<sup>[9,10]</sup>。

$$P = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta E^2 \quad (2.1)$$

ここで  $f$ : 周波数,  $\epsilon_0$ : 真空誘電率,  $\epsilon_r$ : 物質の比誘電率,  $\tan \delta$ : 物質の誘電正接,  $E$ : 電界強度である。これらのうち、比誘電率  $\epsilon_r$  および誘電正接  $\tan \delta$  は材料によって異なるが、電磁波の周波数と温度にも依存する。一般に、誘電正接の値は温度の上昇と共に増加し<sup>[10,14]</sup>、低損失のセラミックスでは数 100°C まで加熱すると誘電損率  $\epsilon_r \tan \delta$  が急激に増大する。多くのセラミックスにおいては、周波数が高くなるほど誘電損率の温度依存性は小さくなる傾向にある。吸収電力が周波数に比例することからも、周波数の高い電磁波の方が加熱効率は高いということがいえる。

マイクロ波は空間を自由に伝播するが、図 2.1 に示すように、金属面では反射し、誘電体の中ではそのエネルギーを誘電損率により吸収され、減衰しながら伝播する。そのため内部に進む程電界は弱まり誘電損率の大きな物質ほど内部は加熱されにくい。マイクロ波のエネルギーが 1/2 に減衰する深さ  $D$  は、次式で表される<sup>[9]</sup>。

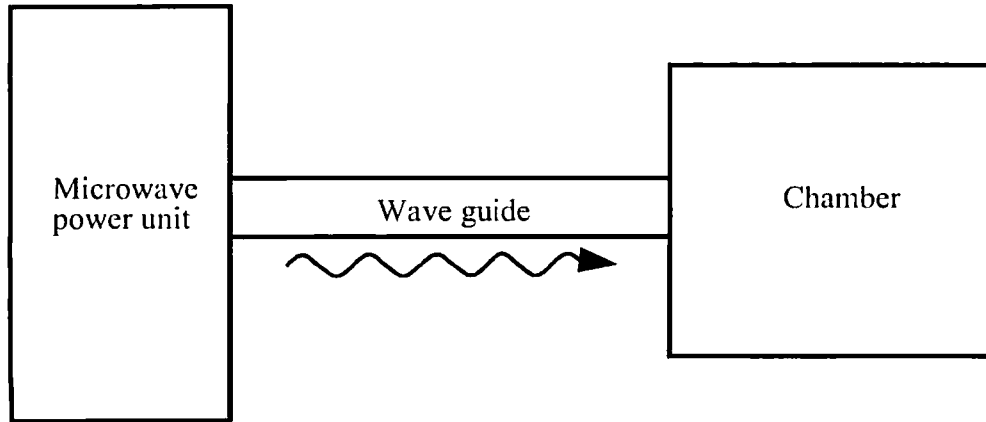


図 2.2 マイクロ波焼結の装置構成

$$D = \frac{3\lambda_0}{8.686\pi\sqrt{\epsilon}\tan\delta} \quad (2.2)$$

ここで、 $\lambda_0$ は真空中における電磁波の波長である。これより、周波数が高すぎる、あるいは誘電損率 ( $\epsilon \tan\delta$ ) が大きすぎれば浸透深さ  $D$  は浅くなり、内部まで均一に加熱することが困難となる。逆に、誘電損率の小さな物質は浸透深さ  $D$  が大きくなり、加熱されにくいことがわかる。

マイクロ波を用いたセラミックス焼結は、(2.1) 式によるマイクロ波吸収による発熱と熱伝導による緩和を伴って行われる。その際、電界強度の空間的不均一あるいは表面からの放熱等により、試料中に不均一な温度分布が生じると、誘電正接  $\tan\delta$  の温度依存性のために温度の高い部分は低い部分に比べてエネルギー吸収がよくなるため発熱量が増大する。更に、高温部から低温部への熱伝導による温度差が緩和されない状態となると、温度の不均一性はより顕著になる。その結果、初期に発生した高温部にマイクロ波のエネルギー吸収が集中して急速な局部過熱（サーマル・ランナウェイ）に至り、それが熱応力あるいは局部的な緻密化の進行に伴う局部収縮によって試料の割れや融解を生じる<sup>[10,14]</sup>。

マイクロ波焼結は、一般的に図 2.2 に示す構成で行う。マイクロ波パワーユニットで発生したマイクロ波は、導波管を通りチャンバに照射される。通常、試料はチャンバ内の絶縁体内に置かれる。マイクロ波を吸収して発生した熱は試料内で蓄えられ高温となる。マイクロ波焼結では試料自体が発熱体となるので、試料の大きさが変化すると、他の条件は一定でも到達温度が変化する。通常、試料が大きいほど高温になる。

従来のセラミックス焼結方法は図 2.3 (a) に示すような、電気炉などを用いた外部加熱によるものである。外部からの熱でまず試料表面を加熱し、熱伝導により試料内部を加熱していくプロセスをとり、焼結を完了するのに数時間から数十時間をかけている。一方、マイクロ波焼結法は、図 2.3 (b) に示すようにセラミックスがマイクロ波を吸収し、試料内部が発熱する内部加熱方式に基づくため、通常の電気炉焼結に比べて効率が高く、短時間で緻密化する<sup>[17]</sup>。焼結時間が短いため、必要以上に温度を高くしない限り粒成長は起きないと考えられている。また、外部加熱方式では最初に緻密化する部分は最も温度の高い試料表面であるため、中央に気孔を残したまま焼結が進み、特性劣化を生じる可能性が高いが、マイクロ波焼結では中央部から外部へとセラ



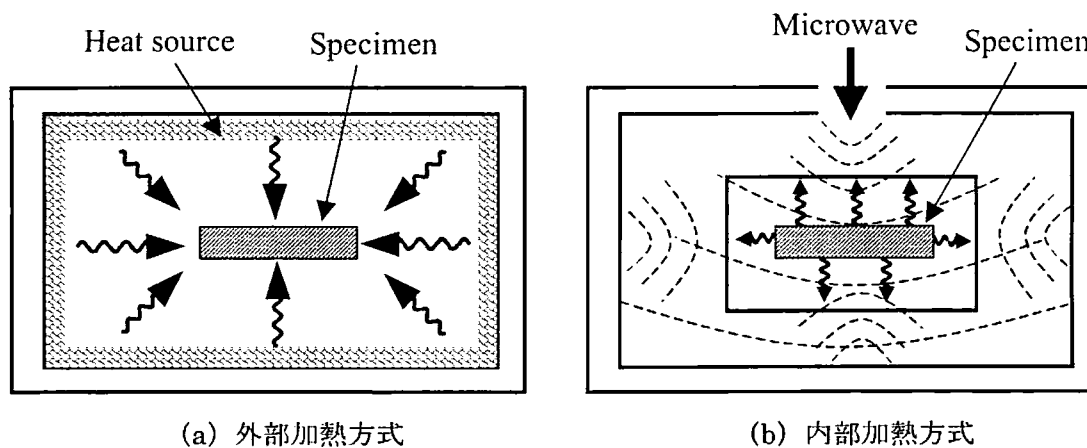


図 2.3 焼結方法による試料加熱状態の違い

表 2.1 マイクロ波パワーユニット仕様

メーカー	新日本無線(株)	
型番	NJA2010N	
入力	電圧	$\phi 3 - 200V$
	周波数	50, 60Hz
出力	発振管	マグネトロン 2M13
	出力取出口	導波管 WRJ-2
	マイクロ波出力	5kW (連続波) 負荷 VSWR 1.1 以下
	出力可変範囲	0~5kW 連続可変
	最大陽極電流	1.1A
	周波数	2450 $\pm$ 30MHz
	最大負荷 VSWR	3

ミックスの焼結が進行するため、オープン気孔が存在する間に焼結させれば、気孔のない緻密な焼結体を得ることが可能となる<sup>[17]</sup>。

### 2.3. 使用したマイクロ波焼結装置構成

本研究で用いたマイクロ波焼結装置は、図 2.4 に示すようにマイクロ波パワーユニット、導波管、スリースタブチューナ、チャンバによって構成した。表 2.1、表 2.2 にその仕様を記す。

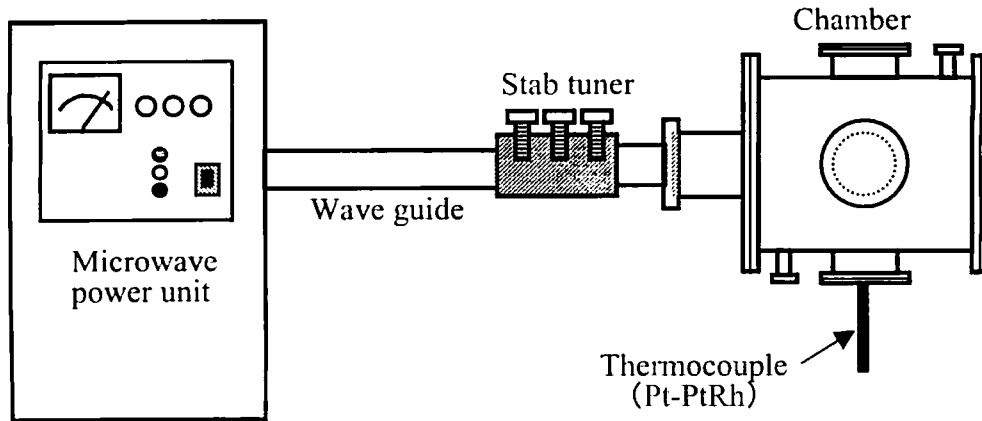


図 2.4 マイクロ波焼結実験装置の外観

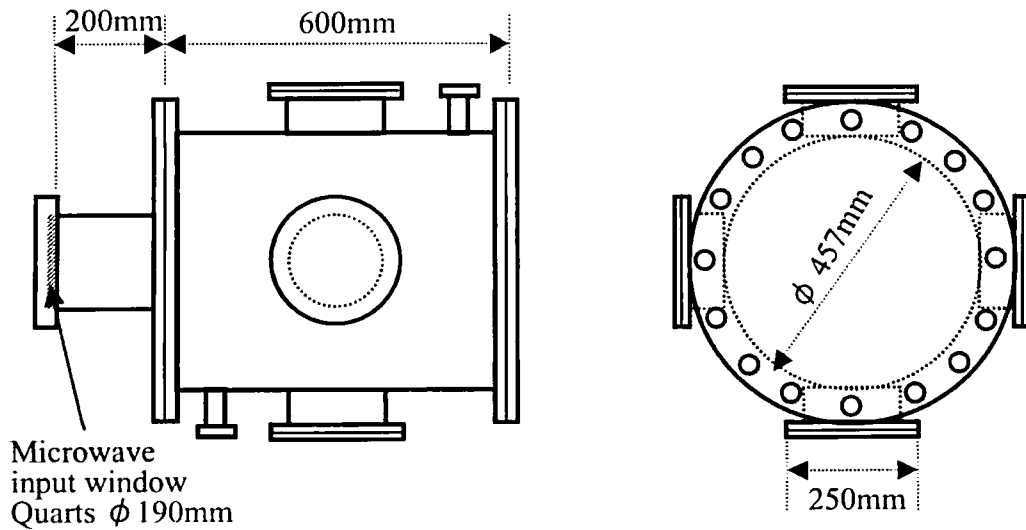


図 2.5 マイクロ波焼結実験用チャンバ

表 2.2 焼結チャンバ仕様 (図 2.5)

材質	SUS	
形状	円筒型	
	内径	457mm
	長さ	600mm

## 2.4. 焼結実験方法

### 2.4.1. 材料

焼結試料用の材料として、太平洋セメント(株)製のチタン酸ジルコン酸鉛 (PZT:  $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ ) グリーンシート (D材,  $t=137\mu\text{m}$ ) を用いた。PZT成形体は、所定の厚みになるようにグリーン

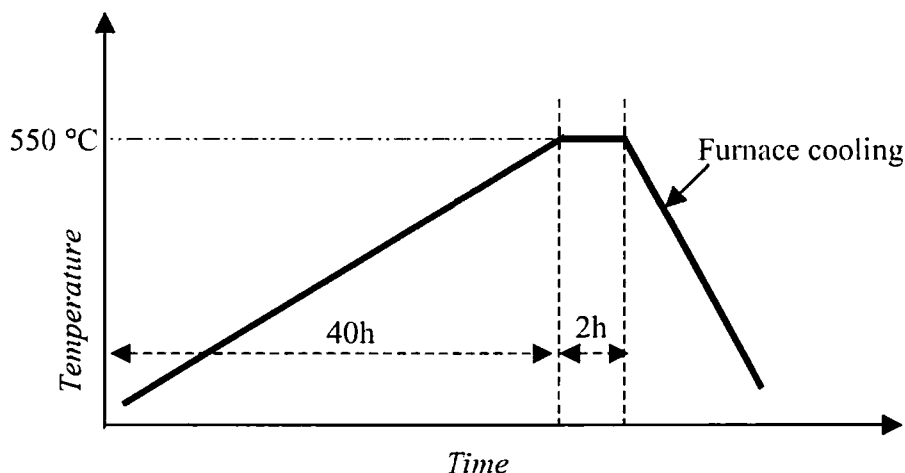


図 2.6 焼結用試料の脱バインダ温度プロフィール

表 2.3 PZT 焼結条件

	電気炉焼結	マイクロ波焼結
脱バインダ工程	本焼結前 (図 2.6)	本焼結前 (図 2.6)
焼結温度	1150~1250°C	1020~1230°C
雰囲気	大気中	大気中
本焼結/保持時間	2 h	5 min
昇温条件	太平洋セメント(株)焼結条件に準ずる	出力: 1.4 kW *1
試料寸法	70mm×70mm×2mm	10mm×20mm×2mm

\*1 昇温速度が 20°C/min を超える場合には出力調整を行う。

シートを積層し、温度 100°C の金型で圧力プレスして圧着後、電気炉焼結を行うものは 70mm×70mm×2 mm に、マイクロ波焼結を行うものは 10mm×20 mm×2 mm に切断して作製した。焼結用試料は本焼結工程の前に電気炉を用いて 550°C で脱バインダ処理 (温度プロフィール: 図 2.6) を行った。

#### 2.4.2. PZT 焼結方法

焼結実験条件を表 2.3 にまとめる。従来技術の焼結法として、一般的な電気炉を用いて大気中 1150~1250°C で 2h 行った。また、マイクロ波焼結は 1020~1230°C で 5min 行った。

マイクロ波焼結を行った際、試料はチャンバ内の多重反射により発生した定在波の電界強度が最大と予想されるチャンバの中央に配置した。また、試料内の温度分布を均一にするために、マイクロ波に対して透過性を示す断熱材 (アルミナファイナボード) で試料全体を囲み、放熱による熱損失を抑えるよう工夫した。試料の温度測定は図 2.7 に示すように、Pt-PtRh 熱電対 (シース管あり) を試料から 2mm 離れた場所に配置させ、試料からの放射熱を測定した。マイクロ

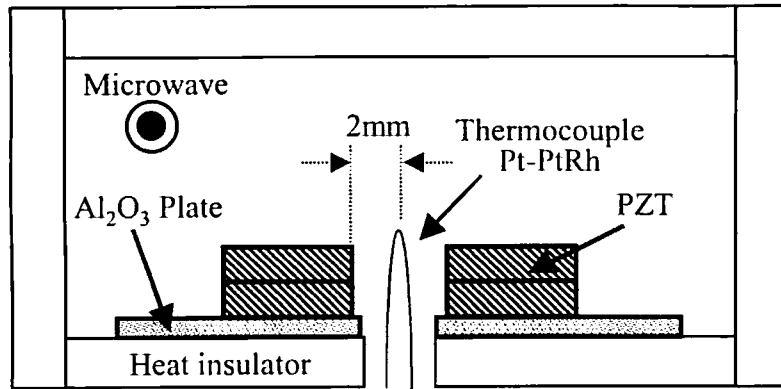


図 2.7 マイクロ波焼結実験における焼結試料と熱電対のセットアップ

波焼結実験では試料からの放熱による雰囲気温度を試料温度と定義した。PZT は高温状態において断熱材と反応する可能性があるため、アルミナ板上に  $ZrO_2$  粉末をまぶし、その上に試料をセットした。

下記にマイクロ波焼結実験の手順をまとめる。

#### 【マイクロ波焼結実験手順】

1. PZT 焼結用試料をチャンバ内断熱材上の  $ZrO_2$  粉末をまぶしたアルミナ板上に置いた。  
この時図 2.7 に示すように、マイクロ波入射方向を正面として熱電対の両側に試料を置いた。また、熱電対と試料の間隔は 2mm とした。
2. 試料を断熱材で囲み、チャンバを閉めた。
3. マイクロ波パワーユニットの電源を入れ、出力 500W にて電磁波漏れチェックを行った。
4. 反射電力が最小となるようにスリースタブチューナを調整した。
5. 反射電力に注意しながら、1.4kW まで出力を上げ、一定出力で昇温した。但し、昇温速度が  $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$  を超える場合には出力調整を行った。
6. 目的温度（焼結温度）の  $50^{\circ}\text{C}$  手前より出力を除々に下げ、目的温度  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  となるように出力を調整した。
7. 目的温度で 5min 維持し、その後出力をゼロとし自然冷却した。
8. 試料の温度が  $300^{\circ}\text{C}$  以下となったらチャンバを開け、試料を取り出した。

図 2.8 はマイクロ波焼結実験での典型的な入射電力、反射電力、試料温度の時間変化を示したものである。出力 1.4kW で昇温した場合には、試料が  $900^{\circ}\text{C}$  まで上昇するのにこの結果では約 120 分かかっている。昇温開始後 100 分以降では、昇温速度が変化して大きくなっているが、これは PZT 試料のマイクロ波エネルギー吸収率が上昇したためだと考えられる。これは 2.2 節（：マイクロ波焼結と従来焼結技術比較）に述べたように誘電損率が温度依存性を持つからであり、本実験に用いた PZT 試料では  $600^{\circ}\text{C}$  付近から吸収が良くなることがわかる。これは反射電力が急激に低下していることから吸収率増加が裏付けられる。

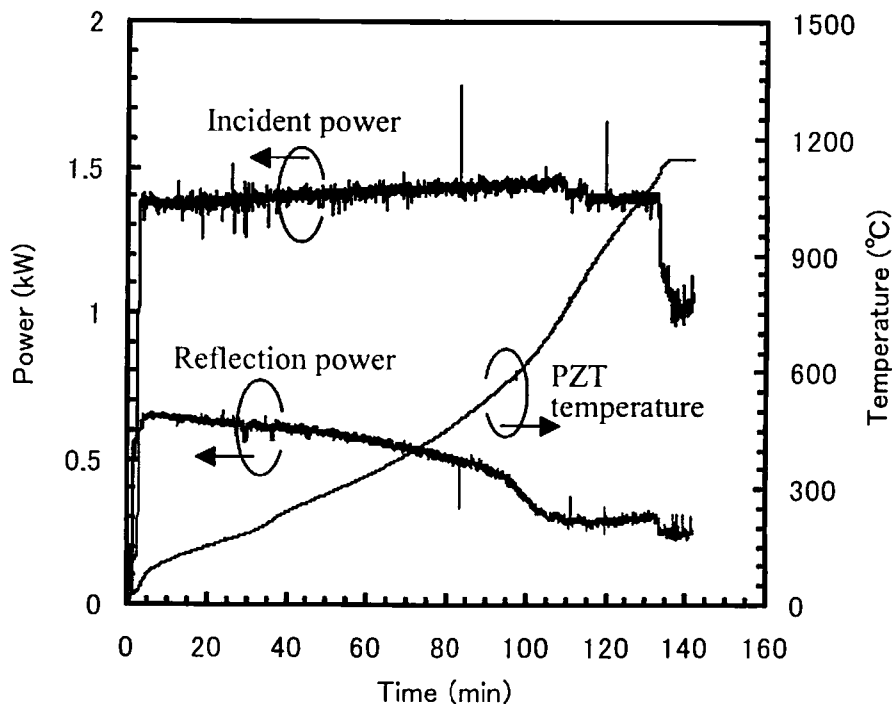


図 2.8 マイクロ波焼結実験における電力・温度プロファイル

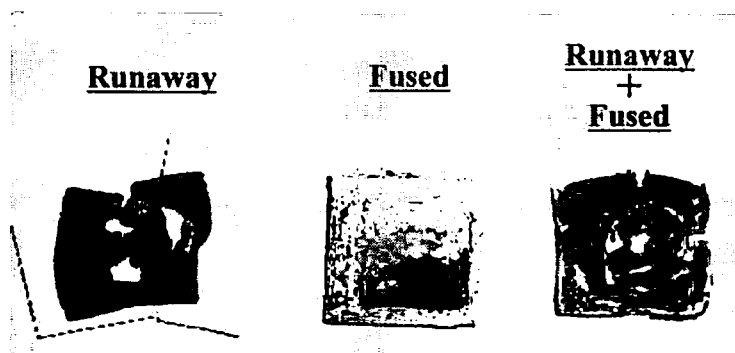


図 2.9 マイクロ波焼結の異常加熱時に見られる現象

マイクロ波焼結の異常加熱によって起こる現象を図 2.9 に示す。試料内の電界不均一性および低い熱伝導性のためにサーマル・ランナウェイを起こしたもの、あるいは試料全体が高温状態となり融解していることがわかる。これらの異常現象は、試料の温度をモニタすることで把握できる。異常加熱の時の温度プロファイルを図 2.10 に示す。サーマル・ランナウェイについては、瞬間的に温度が上昇していることがわかるが、融解についてはサーマル・ランナウェイよりも温度変化は緩やかであるが急な温度上昇が確認できる。融解が 1000°C 付近で発生しているが、PZT 試料がその程度の温度で融解することは考え難いことから、実際には試料温度は計測温度よりも遥かに高かったことが推測される。このような急速な温度上昇が生じた時には、出力調整により熱暴走を防止したが、これらの前兆を予測することができれば、異常加熱を防ぐことができ、マ

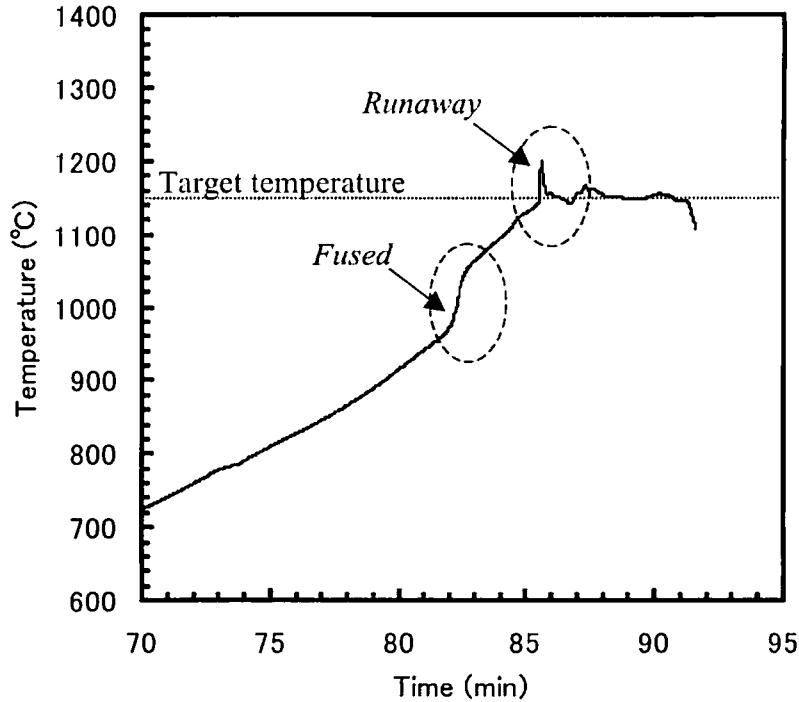


図 2.10 異常加熱時の試料温度プロファイル

マイクロ波焼結法の信頼性を高めることが可能となる。サーマル・ランナウェイの発生機構は先に述べたが、その原因は試料中の成分の不均一あるいは試料表面に付着した微小な金属片なども大きく影響することから、マイクロ波焼結においては焼結用試料の準備段階でこれらのことを十分注意する必要がある。

PZTは熱伝導率が悪いため、マイクロ波焼結を行う際には試料内の熱分布を抑えるためにSiCを用いた焼結が提案<sup>[13,14]</sup>されている。しかし、この方式では焼結試料の焼結が自己加熱により進むのか、あるいはマイクロ波エネルギーを吸収して発熱したSiCからの熱伝導により進むのか明確に分離することができない。本実験ではこのようなヒータとしての役割を果たす補助的な要素を使用せずに焼結を行ったので、自己加熱による焼結であると断定して考察できるものと考えている。

## 2.5. 組織観察と材料特性評価

マイクロ波焼結および電気炉焼結によって作製した焼結試料は、平面研削盤およびダイサーを用いて表 2.4 に示す寸法に加工した。電極焼付けの後に誘電率・単板変位測定用の試料は2kV/mm、圧電定数測定用試料は1kV/mmにてシリコンオイル(100°C)中で分極処理を行った。試料はそれぞれ、粒径、密度、ヤング率、電気的特性(誘電率・圧電定数)、単板変位、曲げ強度の測定により評価した。なお、曲げ強度測定用の試料においては分極処理していないものを用いた。

表 2.4 評価用試料寸法

評価項目	試料加工寸法
誘電率	3mm×6mm×1mm
圧電定数	1mm×1.5mm×6mm
単板変位特性	3mm×6mm×1mm
曲げ強度	1mm×1.5mm×8mm

表 2.5 微細組織と結晶構造評価の使用機器

機器	メーカー	備考	測定項目
電子顕微鏡 (SEM)	(株)日立製作所	FE-SEM S-4000	微細構造 (粒径)
X線回折装置 (XRD)	(株)リガク	RINT2500V	結晶構造 理論密度
超精密電子分析天秤	(株)島津製作所	AEL-200	密度

### 2.5.1. 微細組織

表 2.5 に各評価に用いた機器をまとめる。焼結試料の微細構造は電子顕微鏡により観察を行い、平均粒径を求めた。また、XRD により焼結条件による結晶構造の変化を測定した。また、焼結試料の体積と質量を測定し密度の導出（アルキメデス法）を行った。

マイクロ波焼結と電気炉焼結により作製した試料の破断面の SEM 観察像をそれぞれ図 2.11、図 2.12 に示す。これらの SEM 観察結果より、焼結試料の平均結晶粒径を求め、その焼結温度依存性を示したのが図 2.13、図 2.14 である。焼結温度を上昇させることで平均粒径が大きくなっており、両焼結方法において粒径制御が可能であることがわかる。同じ焼結温度で比較した場合には、焼結時間が大幅に短いマイクロ波焼結の方がより平均粒径が小さくなることが予測されていたが、焼結温度 1200℃で比較した場合、マイクロ波焼結試料は平均粒径 2.1μm、電気炉焼結試料では平均粒径 2.2μm であることから、結果としては焼結時間ではなく焼結温度に大きく依存することがわかる。

一般にマイクロ波焼結では、試料内部に 50~100℃程度の温度差<sup>[10]</sup>があると報告されていることから、図 2.15 に示すようにマイクロ波焼結した試料を中心付近で切断し、試料破断面の各部を SEM 観察した。試料各部において粒径の差はほとんど確認できず、試料中心部と端部で 50℃程度の温度差が生じていたとは考え難い。この現象は他研究者にも指摘されており<sup>[18]</sup>、温度差があるにもかかわらず粒径・密度・電気的特性はほぼ等しい特徴をもつといわれている。その原因は未だ解明されておらず、一般的にはマイクロ波による効果とされている。本実験の場合には、焼結温度が異なれば確実に粒径に反映（図 2.13、図 2.14）されることから、焼結試料の厚みが 2mm 程度と薄いために試料中心部と端部の温度差が微小であったと推測している。

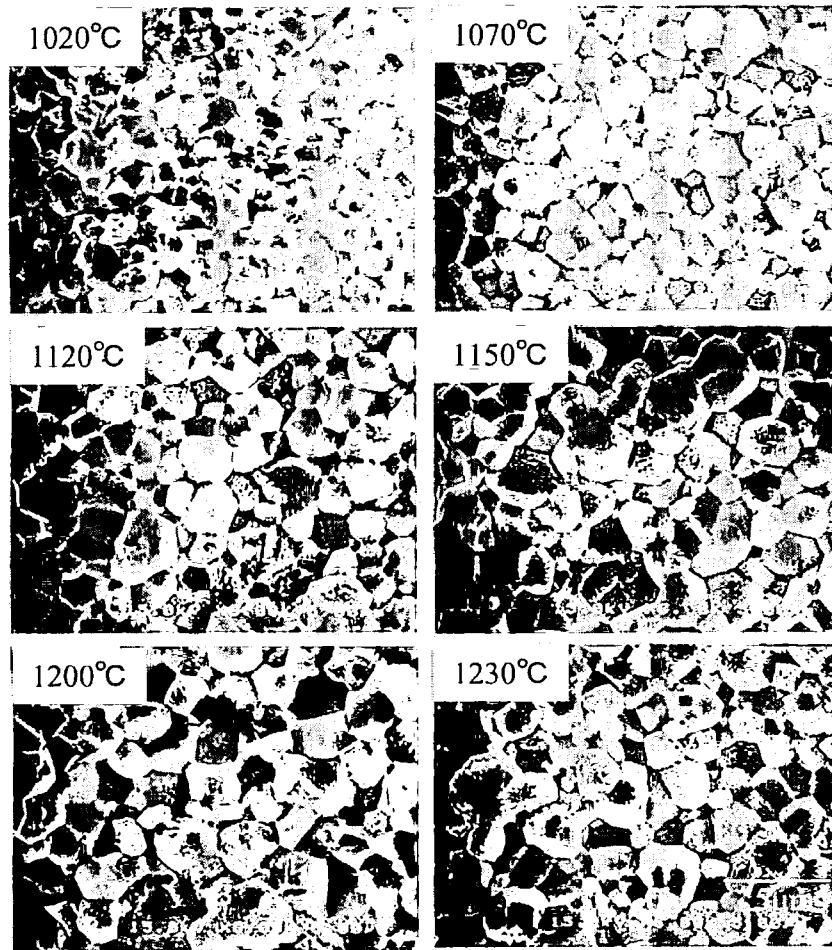


図 2.11 マイクロ波焼結した PZT の破断面 SEM 像 (×6000)

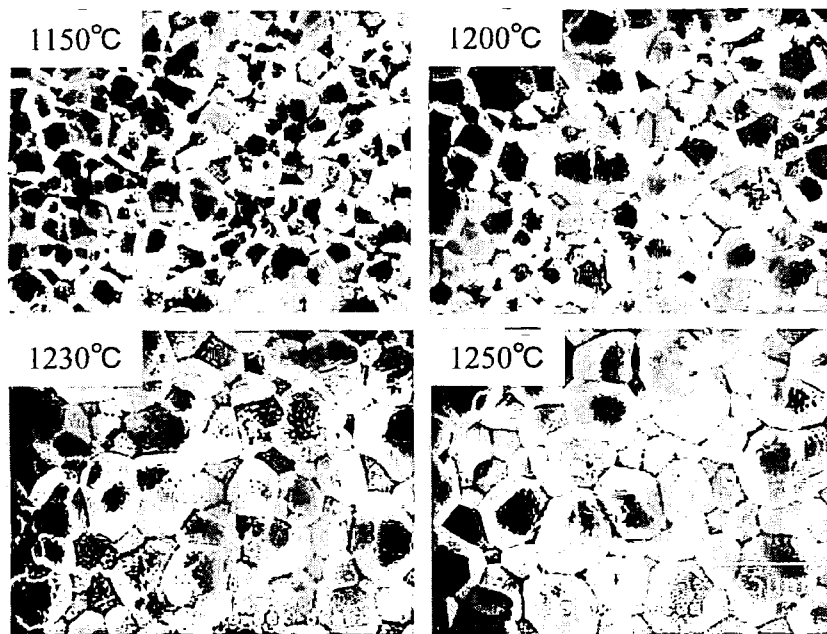


図 2.12 電気炉焼結した PZT の破断面 SEM 像 (×6000)



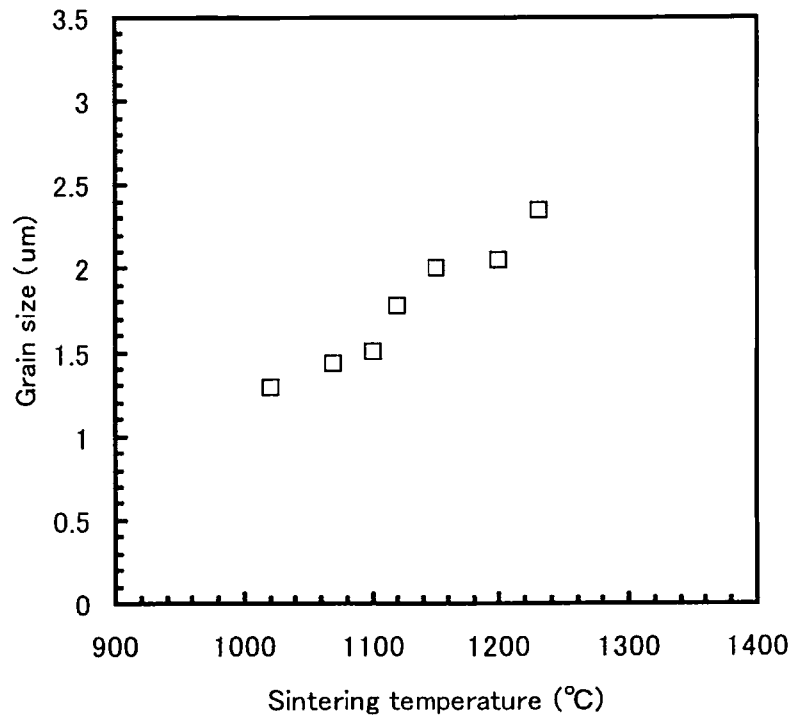


図 2.13 マイクロ波焼結試料の平均粒径－焼結温度依存性

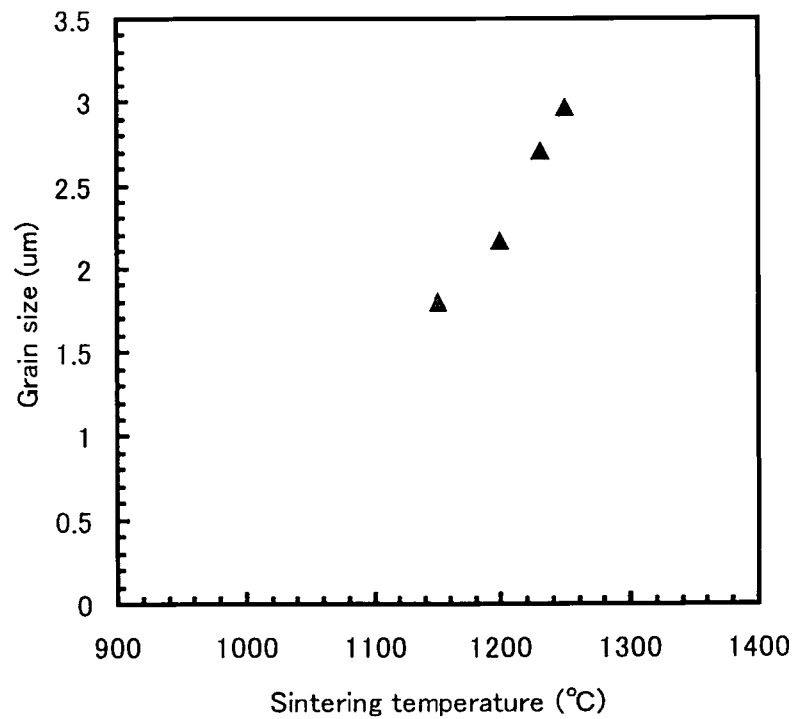


図 2.14 電気炉焼結試料の平均粒径－焼結温度依存性

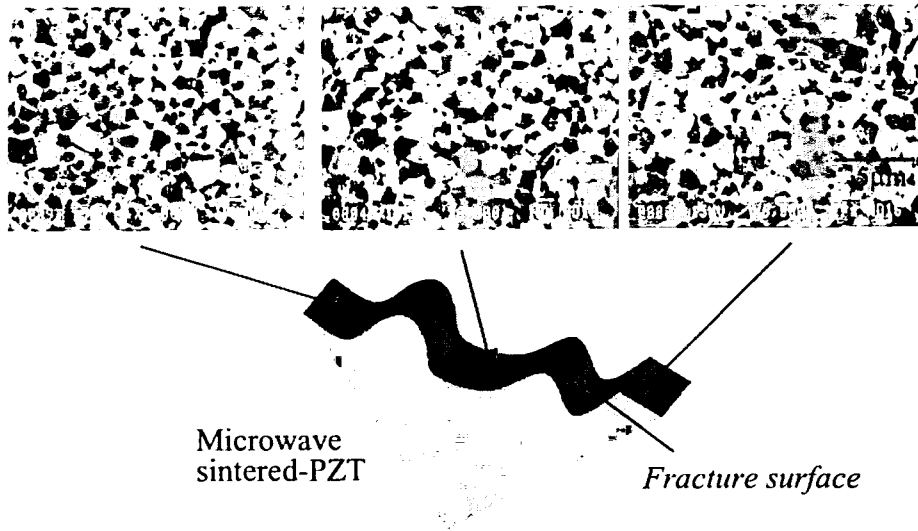


図 2.15 マイクロ波焼結試料の試料内各部の破断面 SEM 像 ( $\times 6000$ )

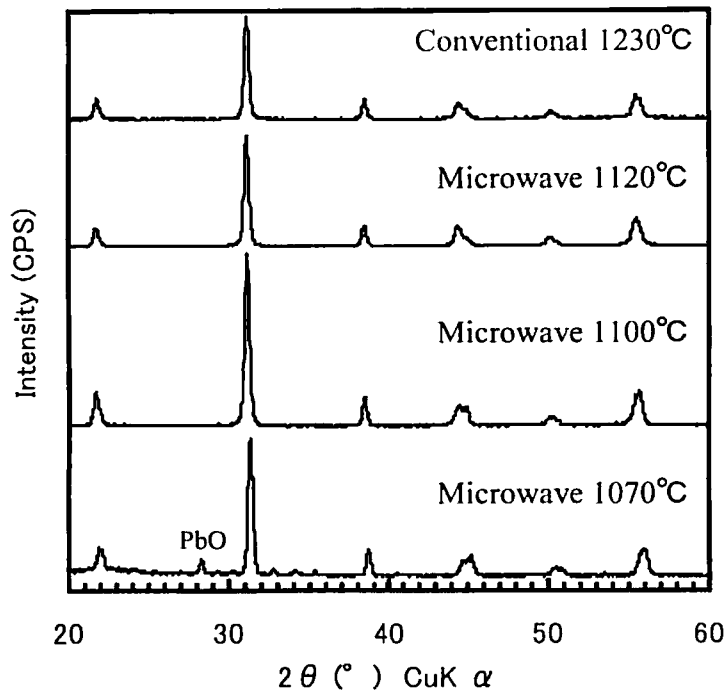


図 2.16 焼結試料の XRD 結果 (Wide-range)

図 2.16, 図 2.17 は焼結試料の XRD 結果の一部を示したものである。ペロブスカイト構造を示すピーク<sup>[14,15,19]</sup>が確認されるが, 1070°Cでマイクロ波焼結した試料には原料の一部である PbO のピークが表れていることがわかった。また, マイクロ波焼結試料から, 焼結温度により 45° 付近での(002), (200)のピークスプリットに差があることが確認された。焼結温度を高くすることにより, (002)が高くなってきており, より正方晶が強い構造となっていると考えられる。XRD の

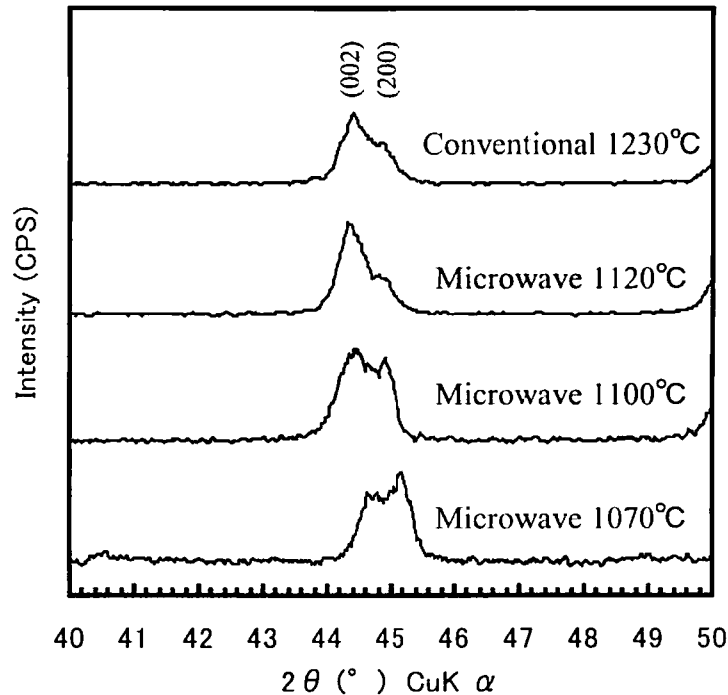


図 2.17 焼結試料の XRD 結果 (Narrow-range)

回折ピークより格子定数を求めたところ、実験に使用した圧電材料の理論密度は  $7.89\text{g/cm}^3$  であることが計算された。

図 2.18 は焼結試料の密度と結晶粒径の関係を示したものである。  $7.7\sim 7.8\text{g/cm}^3$  で密度は飽和しており、理論密度の約 98% が得られていることがわかる。マイクロ波焼結においては平均粒径  $1.4\mu\text{m}$  以下、電気炉焼結では平均粒径  $2.2\mu\text{m}$  以下では密度が低く焼結が完了していないことが推測された。このように粒径を小さくした場合に、焼結未完了により高密度が得られなくなる限界粒径が焼結方法によって異なることがわかる。電気炉焼結で作製した粒径  $1.8\mu\text{m}$  の試料においては、密度が低下しているにも関わらず高密度焼結試料と同じ XRD プロファイルが得られたが、高い密度が得られたマイクロ波焼結体の粒径  $1.4\mu\text{m}$  の試料においては  $\text{PbO}$  が検出されており、試料の内部組織に違いがあることが示されている。

### 2.5.2. 電気的特性

焼結試料の電気的特性として、誘電率と圧電定数をインピーダンスアナライザ（横河ヒューレットパッカード(株)、4194A）を用いて算出した。

焼結試料の比誘電率と圧電定数の粒径依存性を図 2.19 に示す。電気的特性は粒径に依存して大きくなり、最終的に飽和することがわかる。マイクロ波焼結試料は平均粒径  $1.8\mu\text{m}$  で飽和しており、比誘電率  $\epsilon_{33}/\epsilon_0 = 4926$  と圧電定数  $d_{33} = 592 \times 10^{-12}\text{m/V}$  が得られた。一方、電気炉焼結試料は平均粒径  $2.2\mu\text{m}$  で同等の電気的特性を有することがわかる。粒径が小さすぎると比誘電率・圧電定数とも飽和点に達しておらず、2.5.1 節（：微細組織）の密度や XRD 結果だけでは試料の

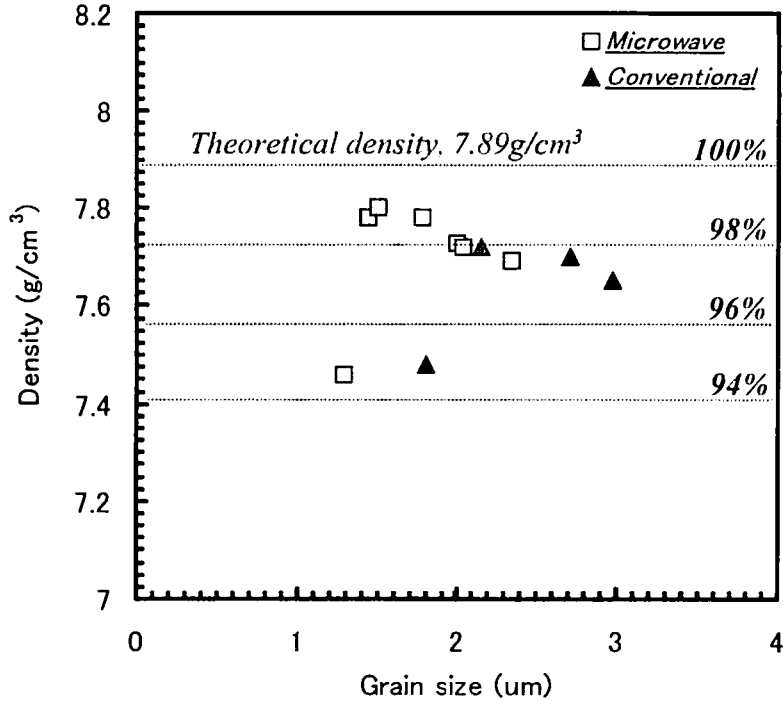


図 2.18 焼結試料の密度－粒径依存性

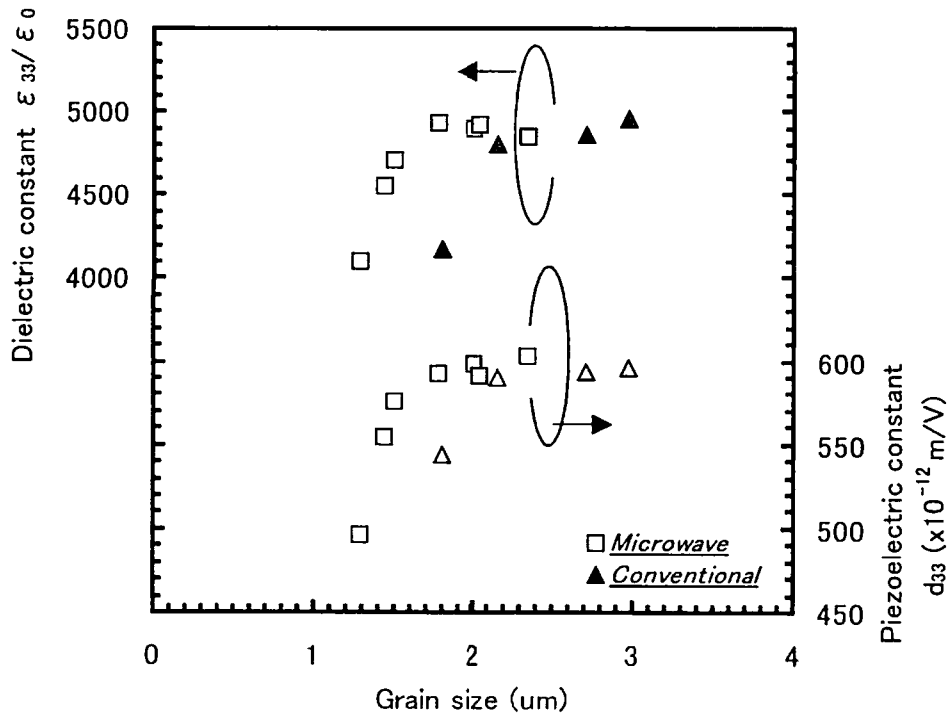


図 2.19 焼結試料の比誘電率・圧電定数－粒径依存性

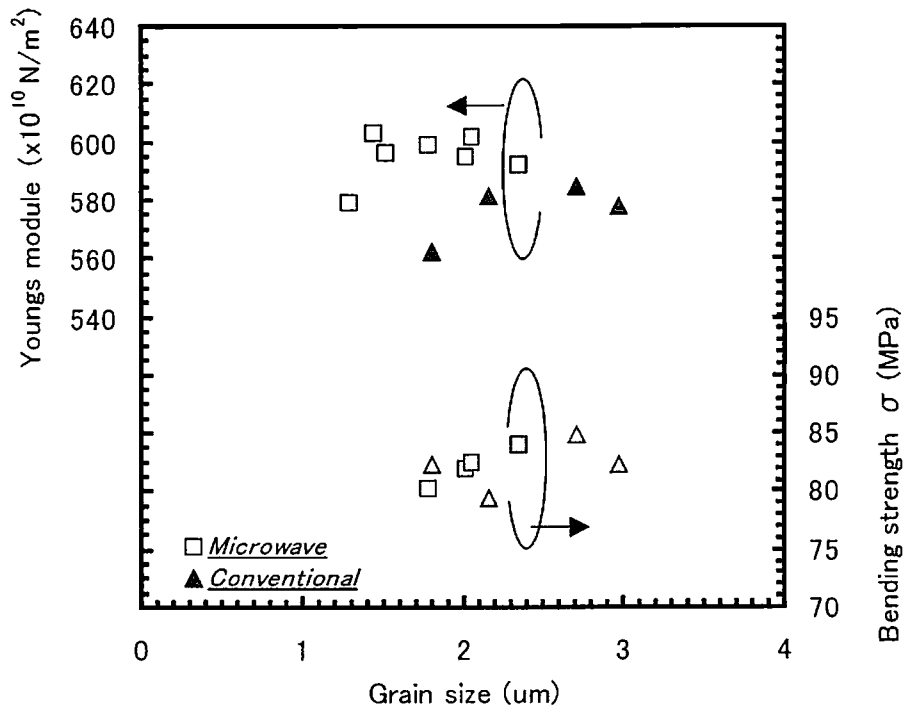


図 2.20 焼結試料のヤング率・曲げ強度－粒径依存性

評価ができないことがわかる。電気炉焼結試料においては密度が低いことが電気的特性劣化の原因と考えられるが、マイクロ波焼結試料は高密度が得られていることから組成の問題があることが推測される。これは焼結に用いた材料が電気炉焼結を前提とした原料配合であり、長時間焼結時の PbO 蒸発による特性劣化を補償するために過剰の PbO が混入されているが、マイクロ波焼結では短時間焼結であるためにその過剰成分が残留し、それが特性劣化の原因であると考えられる。このように電気的特性は不純物の影響に敏感であることが明らかとなり、小粒径で優れた電気的特性の PZT を得るためには、マイクロ波焼結の焼結条件に適した試料の成分調整が必要であるといえる。

### 2.5.3. 機械的特性

焼結試料のヤング率はインピーダンスアナライザ (横河ヒューレットパッカード(株), 4194A) を用いて算出した。また、万能引張試験装置 ((株)オリエンテック, TENSILON UTM-4-100, ロードセル 20kg, スパン 6mm) を用いて 3 点曲げ試験を行い曲げ強度の測定を行った。

図 2.20 に焼結試料のヤング率と曲げ強度の粒径依存性を示す。ヤング率は電気炉焼結試料と比較して、マイクロ波焼結試料の方が全体的に高い値を示していることがわかる。一方、曲げ強度は焼結方法および粒径にほとんど依存しておらず、80~85MPa 程度であることがわかる。通常の金属材料と同様に、結晶粒微細化による機械強度の向上 (ホールペッチの法則<sup>[20]</sup>) を期待したが、その効果は確認できなかった。曲げ強度が粒径に依存していない原因の 1 つとして、気孔の存在が考えられ、この気孔と破壊強度の関係はグリフィスの法則<sup>[21]</sup>として知られている。このことから焼結試料の気孔が強度面で支配的であったことが原因であると推測した。

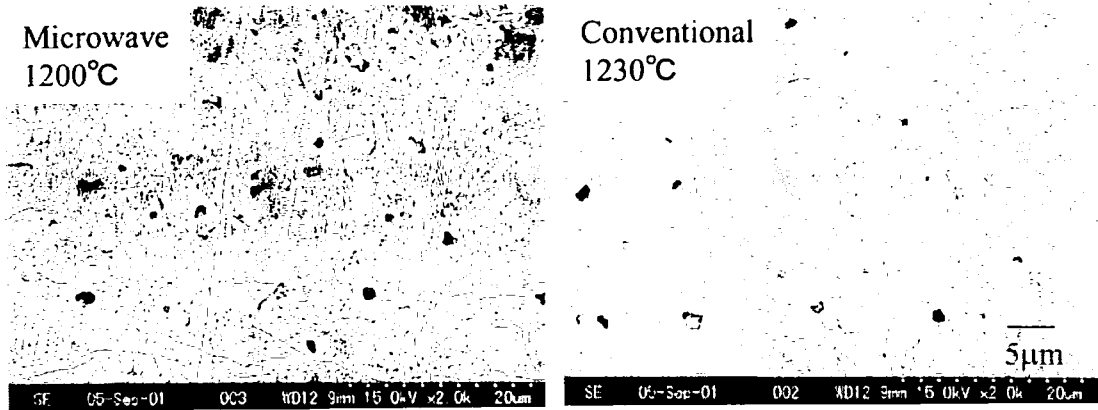


図 2.21 焼結試料研磨面の SEM 像 (×2000)

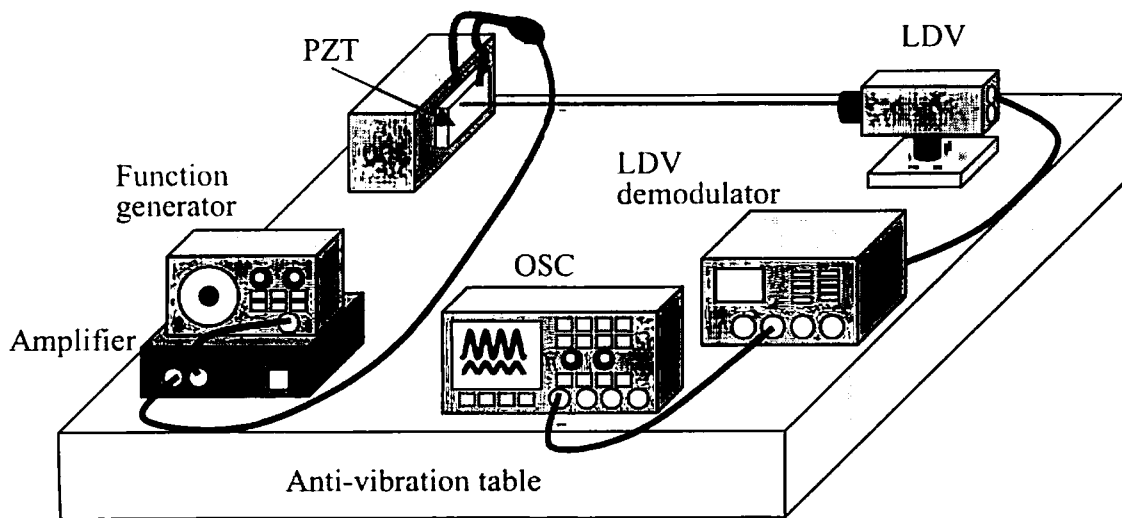


図 2.22 単板変位測定の実験セットアップ

マイクロ波焼結試料と電気炉焼結試料の研磨面の SEM 観察像を図 2.21 に示す。両者ともに  $2\mu\text{m}$  程度の気孔が確認できることから、本研究で用いた PZT の破壊強度は気孔が支配的であり、それにより強度の粒径依存性が検討できなかつたといえる。

#### 2.5.4. 単板変位特性

焼結試料を正弦波電圧で駆動した時の発生変位量 ( $d_{33}$  変形) を、レーザドップラー振動計 (グラフィテック(株), AT-0023/3500) を用いて測定した。実験セットアップを図 2.22 に示す。ファンクションジェネレータ (リーダー電子(株), LFG-1300S) で発生した 250Hz の駆動信号をアンプ ((株)東京テクノロジー, NRUSM-00) にて増幅 ( $0\sim 310\text{V}_{pp}$ ) し、測定試料に印加した。レーザドップラー振動計のレーザ光を試料の電界印加方向に照射し、復調器から出力された変位信号をオシロスコープに取り込み評価を行った。

図 2.23 は  $1150^\circ\text{C}-5\text{min}$  の条件でマイクロ波焼結した試料 (平均粒径  $2.0\mu\text{m}$ ) の単板変位の駆動電圧依存性 (測定回数 5 回) を示したものである。測定回数により発生変位のバラツキが確

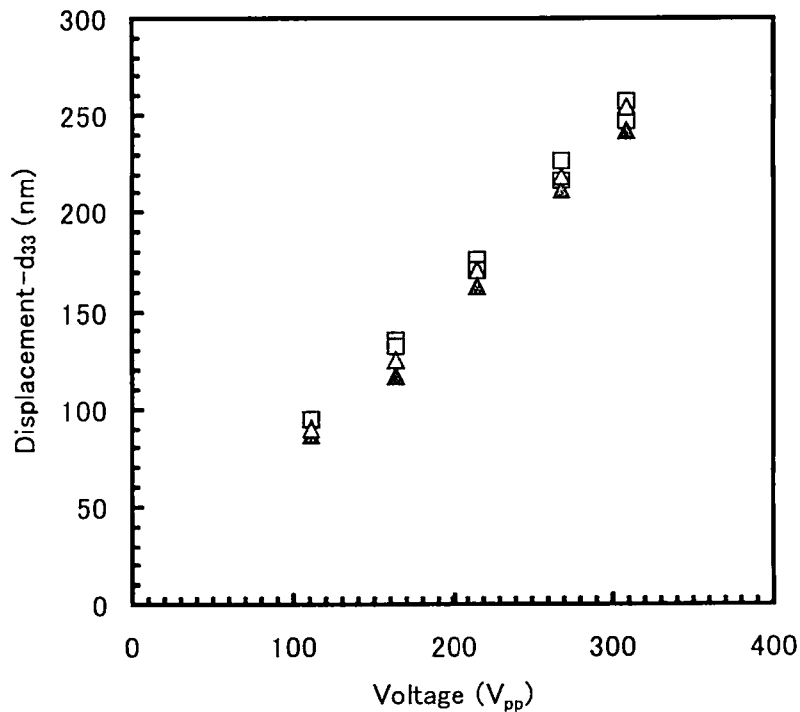


図 2.23 マイクロ波焼結試料 (1150℃, 5min) の単板発生変位-電圧依存性 (正弦波-250Hz)

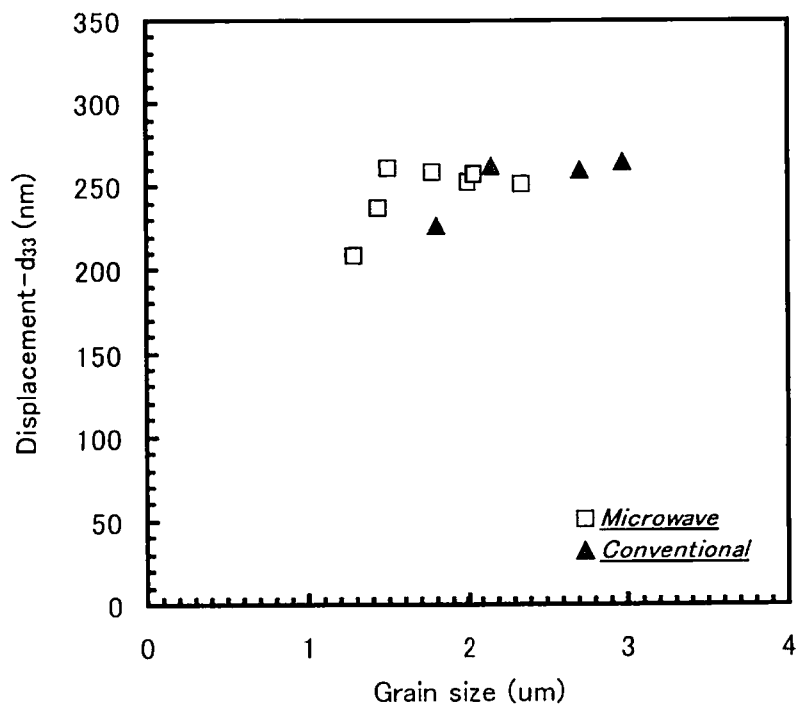


図 2.24 単板変位-粒径依存性 (正弦波-250Hz, 310V<sub>pp</sub>)

表 2.6 マイクロ波焼結型圧電アクチュエータの焼結条件

脱バイнда工程	本焼結前 (図 2.6)
焼結温度	1150°C
本焼結/保持時間	5min
昇温条件	出力: 1.4 kW
試料寸法	25mm×30mm×0.95mm

認められるが、これは変位量が小さいため種々の外乱の影響を受けたものだと考えられる。電圧に比例して変位が増加していることがわかり、電圧変化による変位制御が可能であることが確認できる。

図 2.24 はマイクロ波焼結と電気炉焼結で異なる焼結温度によって作製した試料に 310V<sub>pp</sub> の電圧を印加した時の単板変位の粒径依存性を示したものである。いずれの焼結法においても、粒径に対して飽和点が存在するが、マイクロ波焼結の方がより小さい粒径で特性が飽和していることがわかる。圧電定数・比誘電率の電気的特性評価では平均粒径 1.5 $\mu$ m のマイクロ波焼結試料では特性が損なわれた結果を示したが、本測定のような実際に圧電素子を使用する高電圧駆動領域では変位劣化は見られず、焼結試料の密度が反映された結果となっている。

## 2.6. マイクロ波焼結型圧電アクチュエータの特性評価

材料特性評価から、マイクロ波焼結により小粒径、かつ、電気的・機械的特性の劣化のない PZT 圧電素子を作製することが可能であることが明らかとなった。本節ではマイクロ波焼結により作製した NRUSM 用圧電アクチュエータの特性評価を行い、電気炉焼結で作製したものととの比較検討を行う。

### 2.6.1. 非共振型超音波モータ用 PZT のマイクロ波焼結方法

現在の標準型 NRUSM は全部で 8 つの積層型圧電アクチュエータ ( $A=3\text{mm}\times 6\text{mm}$ ) により構成されているが、その製造プロセスはアクチュエータ 8 つ分の断面積をもつ圧電プレートを必要枚数分積層・接着し、それを切断することにより作製されている。マイクロ波焼結で作製するアクチュエータを従来品と比較するには、全く同じ製造プロセスを経る必要があるため、大面積の試料の焼結が必要となった。マイクロ波焼結型圧電アクチュエータ用 PZT の焼結条件を表 2.6 に示す。前述の材料特性評価から総合的に判断し焼結温度を 1150°C に設定した。アクチュエータ用の試料焼結を実施したところ、焼結後の試料に反りが発生する問題が生じた。これは焼結試料が大面積で、かつ、厚みが薄いことが原因であると推測された。そこで本実験では、図 2.7 に示されたセッティングの最上部に焼結試料よりも面積の大きいアルミナプレートをのせることにより、反りの問題を解決し、大面積試料の焼結を可能とした。焼結試料は太平洋セメント(株)にてアクチュエータ化した。



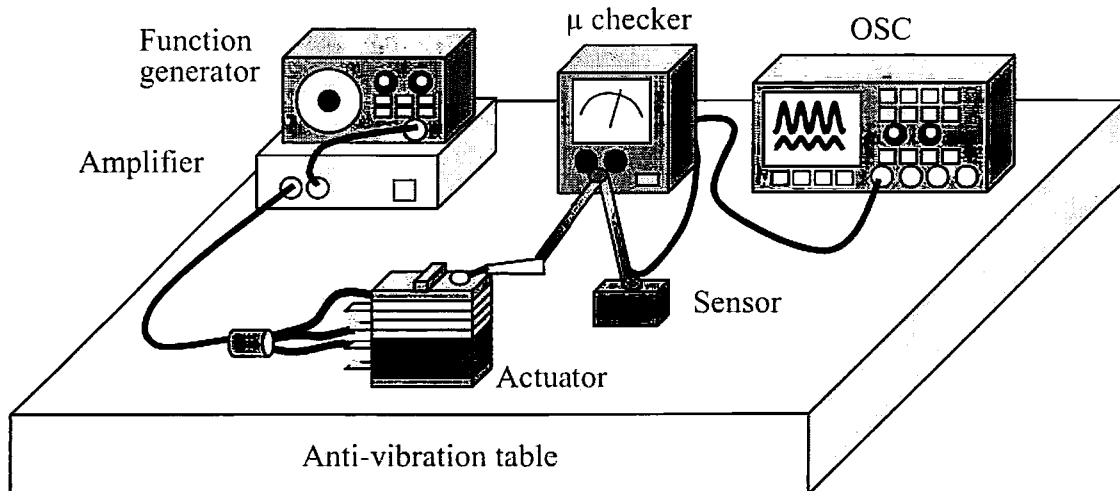


図 2.25 圧電アクチュエータの DC 変位測定の実験セットアップ

表 2.7 評価アクチュエータ仕様

	PZT 材料	アクチュエータ形状				試算変位量 (200V <sub>pp</sub> の時)	
		断面積 (mm <sup>2</sup> )	素子厚 (mm)	積層数 (枚)	全長** (mm)	伸縮 (μm)	剪断 (μm)
マイクロ波焼結型	D材	3×6	0.6	8	5.25	0.53	0.81
電気炉焼結型*	D材	3×6	0.6	8	5.25	0.53	0.81

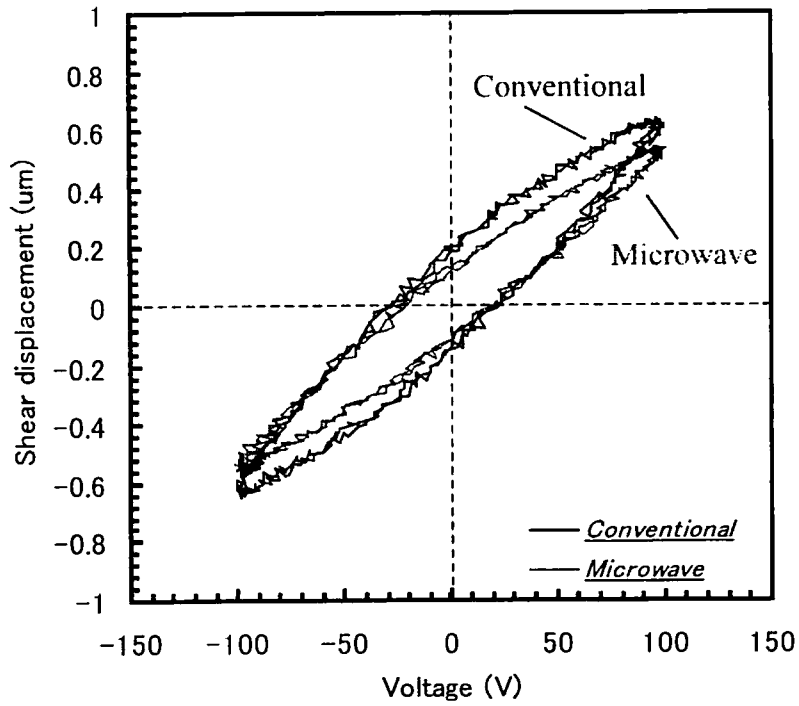
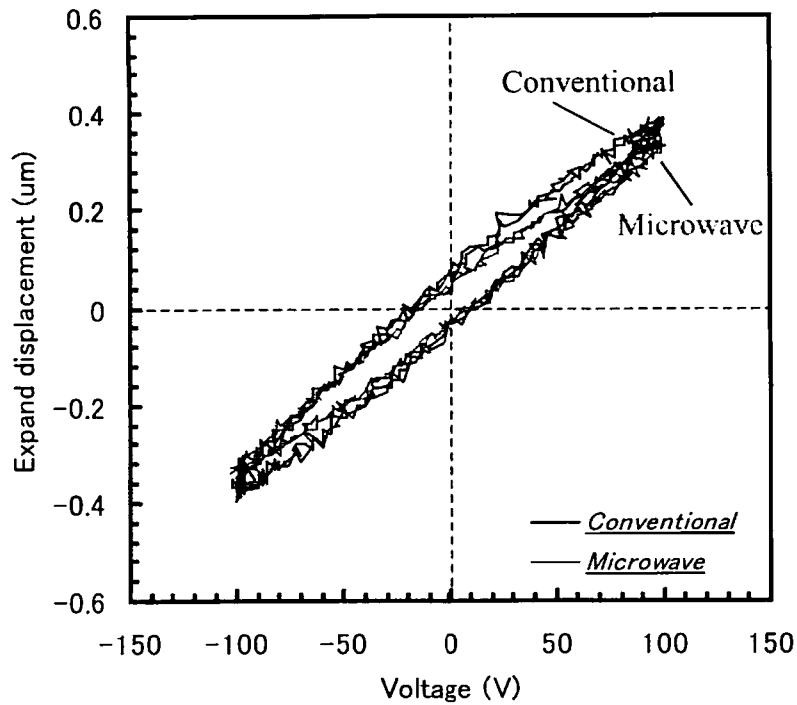
\*太平洋セメント(株)にて焼結 (1230℃, 2h)

\*\* アクチュエータ上下のシム板を除いた長さ = PZT 積層枚数 × 素子厚 + 電極枚数 × 板厚

### 2.6.2. DC 変位特性

圧電アクチュエータの剪断方向と伸縮方向の DC 駆動領域での発生変位を、図 2.25 に示す実験セットアップにより測定した。ファンクションジェネレータで発生した 0.5Hz の正弦波信号をアンプにより増幅（正弦波、0～200V<sub>pp</sub>）し、アクチュエータの剪断・伸縮素子に電圧を印加した。発生変位は接触式の変位計を用いて測定を行い、アナログ出力信号をオシロスコープに取り込み評価した。評価に使用した圧電アクチュエータの仕様を表 2.7 に、評価に使用した機器を表 2.8 に示す。

マイクロ波焼結および電気炉焼結により作製された NRUSM 用圧電アクチュエータの、200V<sub>pp</sub> 電圧駆動時（駆動周波数：0.5Hz）の剪断部分と伸縮部分の変位特性をそれぞれ図 2.26、および図 2.27 に示す。圧電素子特有のヒステリシス現象が現れているが、マイクロ波焼結型アクチュエータの方が剪断変位と伸縮変位共にヒステリシスループ/最大変位量が小さいことがわかる。表 2.9 はそれぞれの実測変位量をまとめたものであるが、表 2.7 に示した試算値を大幅に上回っており、剪断変位においてはマイクロ波焼結型が 33%、電気炉焼結型は 60%の変位量増加が

図 2.26 圧電アクチュエータの剪断素子発生変位 (正弦波-0.5Hz, 200V<sub>pp</sub>)図 2.27 圧電アクチュエータの伸縮素子発生変位 (正弦波-0.5Hz, 200V<sub>pp</sub>)

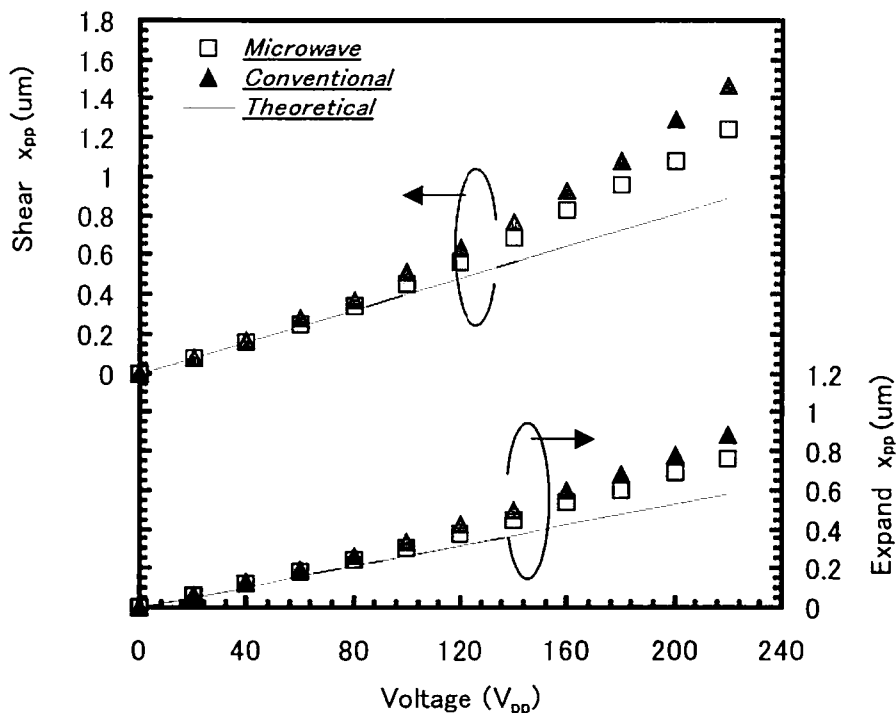


図 2.28 圧電アクチュエータの発生変位－電圧依存性（正弦波－0.5Hz）

表 2.8 DC 変位特性評価の使用機器

機器	メーカー	仕様
ファンクションジェネレータ (LFG-1300S)	リーダー電子(株)	出力：0.01Hz～20MHz
増幅器 (NRUSM-00)	(株)東京テクノロジー	位置制御：PID 制御方式 サーボループ周波数：10kHz 出力：0～220V <sub>pp</sub> , 1kHz～60kHz, 4ch(2 相励磁)
電気マイクロメータ (ミューチェッカ, M403)	(株)ミットヨ	分解能：0.1μm
デジタルオシロスコープ (TDS-3014B)	日本テクトロニクス(株)	周波数帯域：100MHz サンプルレート：1.25GS/s 入力インピーダンス：50Ω/1MΩ チャンネル数：4ch

確認された。また、マイクロ波焼結型と電気炉焼結型の変位比は剪断変位で 1.19 であり、電気炉焼結型の方が大きい。図 2.28 は発生変位の駆動電圧依存性（駆動周波数：0.5Hz）を示したものであるが、駆動電圧が高くなるほど圧電定数から計算された理論変位よりも大きくなっているこ

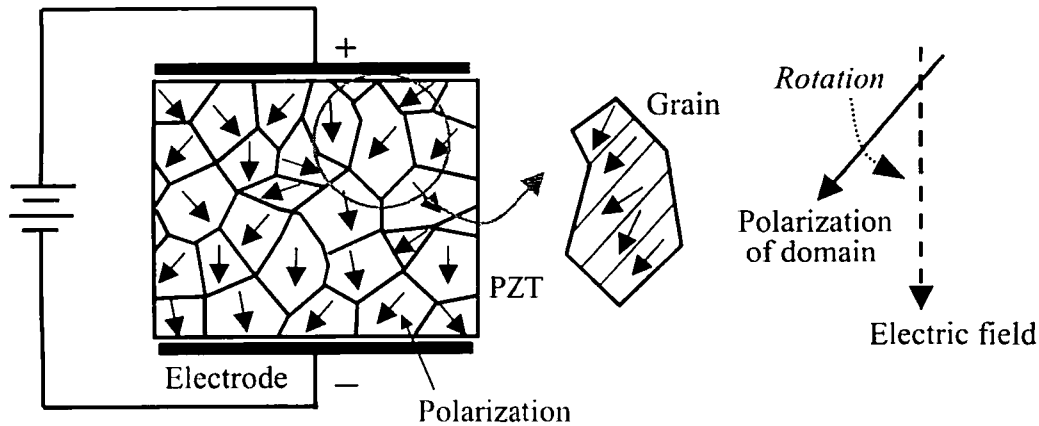


図 2.29 電圧印加と圧電素子のドメイン回転

表 2.9 200V<sub>pp</sub>における圧電アクチュエータ変位

	剪断変位 (μm)	伸縮変位 (μm)
マイクロ波焼結型 $x_m$	1.08	0.69
電気炉焼結型 $x_d$	1.29	0.78
変位比 $x_d/x_m$	1.19	1.13

とがわかる。また、伸縮変位よりも剪断変位が、マイクロ波焼結型よりも電気炉焼結型の方が、変位の非線形現象が顕著に現れている。

駆動電圧を高くすることにより非線形性が大きくなることから、これは結晶粒内のドメイン回転<sup>13,7)</sup>が原因として考えられる。電界が極めて低い場合には、圧電素子の発生変位は 180° ドメインによる歪みであるため線形な挙動を示す。一方、電界が高い場合には、180° ドメイン歪みに加え非 180° ドメインの回転が起こり、それによる歪みが加算されるため圧電素子は非線形な挙動を示すことになる(図 2.29)。分極処理はこの非 180° ドメインを回転させ、電界方向に揃える処理であるが、圧電素子内の全てのドメインを分極方向に揃えることは極めて困難であり、図 2.29 に示したドメイン構成になっていることが推測される。伸縮素子は分極方向と電界印加方向が同じであるため、電界に対する非 180° ドメインの占める割合は小さい。一方で、剪断素子は分極方向と電界印加方向が直交していることから、電界に対する非 180° ドメインの占める割合は極めて大きく、ほとんどのドメインが電界に対して 90° 方向の分極状態にあると考えられる。つまり剪断素子の方が、非 180° ドメイン回転を起こす確率は圧倒的に高いことになる。剪断素子の方が顕著に非線形現象が現れるのはそのためだと考えられる。

次にマイクロ波焼結型アクチュエータと電気炉焼結型アクチュエータの非線形量が異なる原因の検討を行った。まず両者の異なる点は PZT の平均粒径である。マイクロ波焼結型アクチュエータが平均粒径 2.0μm であるのに対し、電気炉焼結型アクチュエータは平均粒径 2.7μm である(図 2.13、図 2.14)。そこで結晶粒径とドメイン回転について検討を行った。ドメインサイズ  $d$

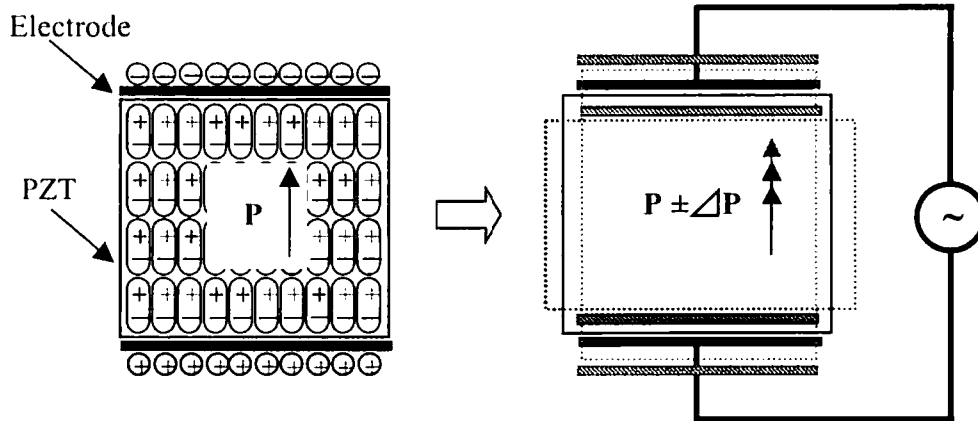


図 2.30 圧電素子の分極変化

と粒径  $g$  には次の関係が成り立つことが報告<sup>[6,7]</sup>されている。

$$d \propto g^{1/2} \quad (2.3)$$

結晶中の粒界はドメイン回転のピンニング力として機能することから、粒径が小さいほど粒界からうけるピンニング力は高くなることが考えられる<sup>[3]</sup>。つまり、粒径が小さいほどドメイン回転にはより多くのエネルギーが必要となる。このことから同じ電界下では粒径が小さいほど変位の非線形現象が小さくなることが考えられ、実験結果と一致する。非線形現象は結晶構造に余分なストレスを与えるため、圧電素子としての耐久性／信頼性への影響が懸念される。

以上より、粒径を小さくすることでドメイン回転を抑制することができ、抗電界の向上のみならず、耐久性／信頼性を向上させるのに有効であると期待できる。

### 2.6.3. 分極特性

圧電素子の変位は、外部電界によって微小に移動した荷電粒子による歪みの現れであることから、発生変位と分極変化は比例関係にあると考えられる（図 2.30）。そこで電氣的な計測により分極測定を行うことで、より信頼性ある測定方法で圧電素子の非線形現象の検討を行った。

圧電素子の分極測定回路（ソーヤ・タワ回路）<sup>[22]</sup>を図 2.31 に示す。圧電素子に印加される電圧と、標準コンデンサに見立てた  $C_0$  での電位（=電荷の変化）を測定することにより分極変化を測定することができる。分極変化はアクチュエータの総断面積を  $A$  をとして、次の計算式を用いる。但し、 $C_0 \gg C_f$  とする。

$$\text{測定素子の印加電圧} \quad V_x = V_1 \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (2.4)$$

$$\text{測定素子の電荷} \quad Q = C_0 \cdot V_2 \cong C_f \cdot V_x \quad (2.5)$$

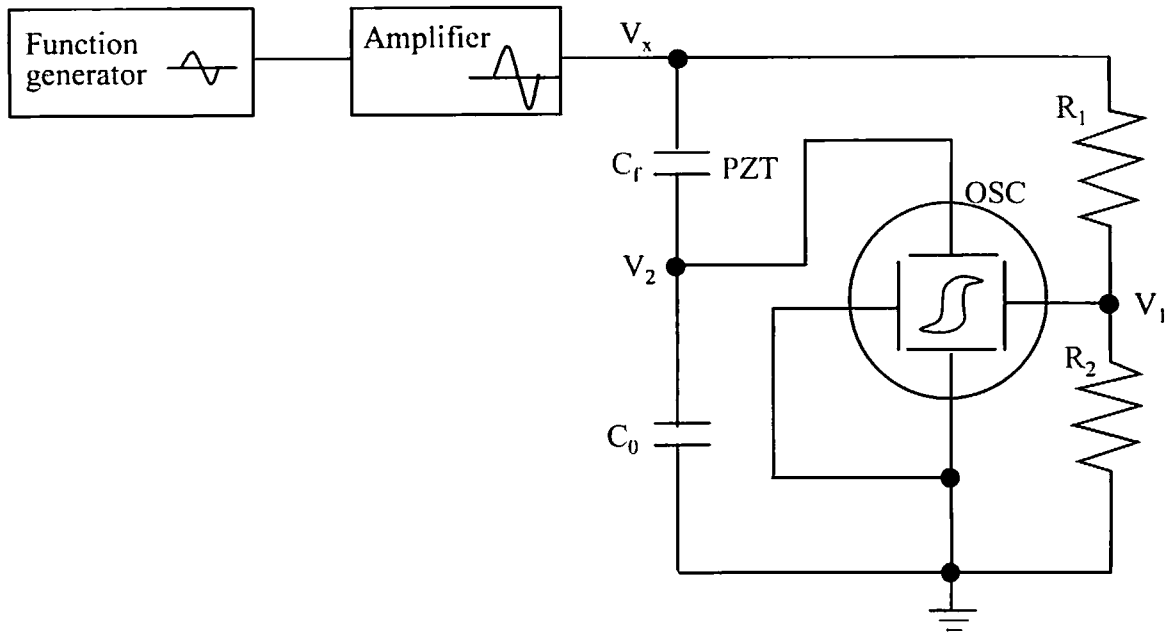


図 2.31 強誘電体の分極測定回路（ソーヤ・タワ回路）

表 2.10 駆動周波数 10Hz—駆動電界 166V/mm における分極変化

	剪断素子分極 $\Delta P$ ( $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ )
マイクロ波焼結型 $P_m$	0.875
電気炉焼結型 $P_d$	1.025
分極比 $P_d/P_m$	1.17

測定素子の分極変化 
$$\Delta P = \frac{Q}{A} \tag{2.6}$$

図 2.32 は表 2.7 に示した圧電アクチュエータの剪断素子を、駆動周波数 10Hz で駆動（正弦波、0~200V<sub>pp</sub>）した時の分極変化の電界依存性を示したものである。電界が高くなるに従って、分極変化量  $\Delta P$  が増加しており、更には、電界に対して非線形性を示していることがわかる。また、両焼結法で作製された圧電アクチュエータを比較するとマイクロ波焼結型の方が高電界における分極変化量が小さく、より非線形性が小さいことがわかる。表 2.10 は 166V/mm(=100V)における両者の比較を行ったものであるが、分極比が表 2.9 で示した変位比とほぼ同じ値を示しており、電気的な測定においても結晶粒微細化による非線形現象の低減が確認できる。

圧電アクチュエータの駆動電圧を 100V(=166V/mm)一定として、駆動周波数を変化(10Hz, 100Hz, 1kHz, 10kHz)させた時の、剪断素子の分極変化の周波数依存性を図 2.33 に示す。いずれの焼結方法においても周波数が高くなるにつれて分極変化量が小さくなっており、飽和の傾向が確認できる。分極は正負両電荷の移動によって発生するため、多少の時間的な遅れが発生す

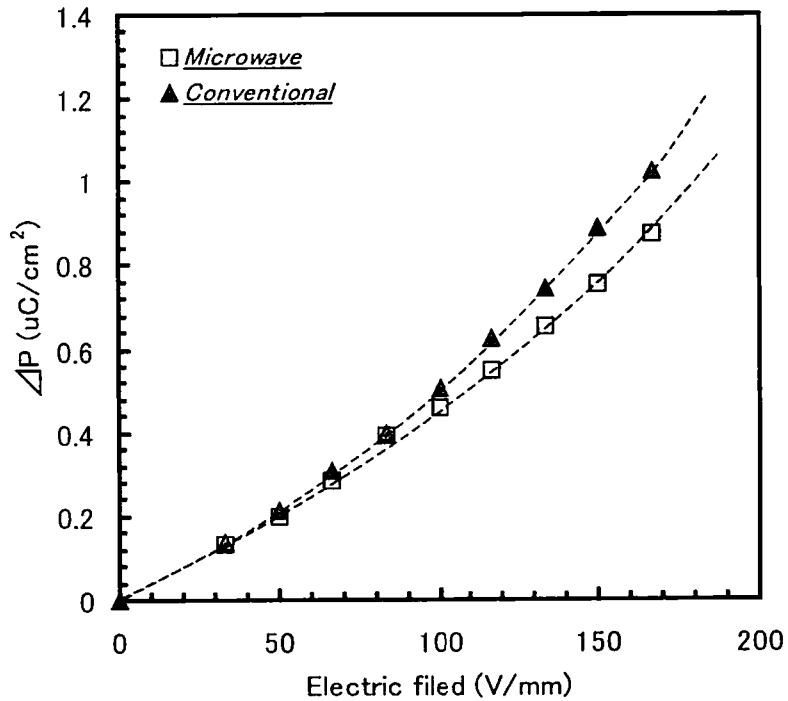


図 2.32 圧電アクチュエータの剪断素子分極変化—電界依存性 (正弦波—10Hz)

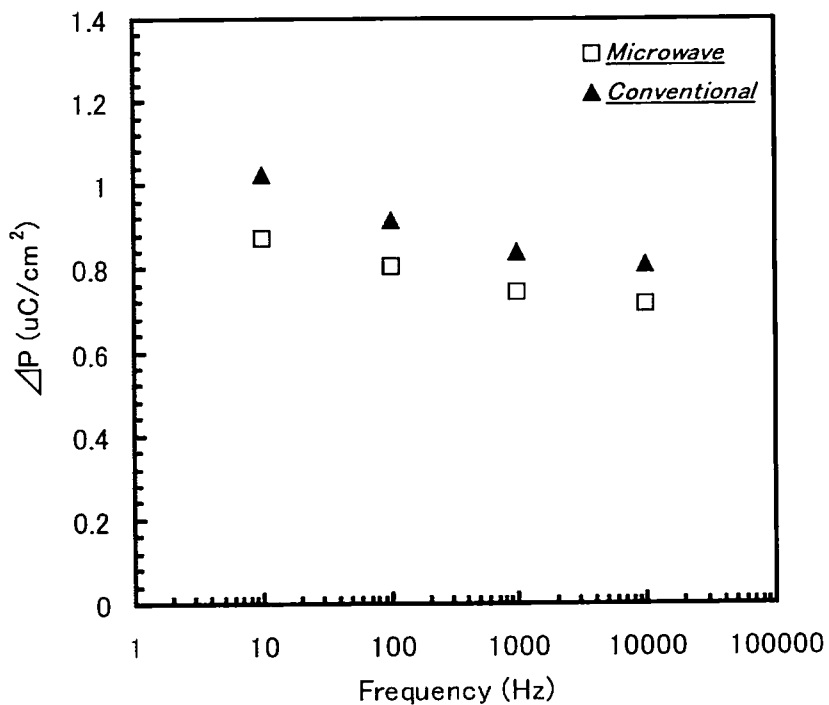


図 2.33 剪断素子の分極変化—周波数依存性 (166V/mm)

ることが考えられる。180° ドメインにおいてはドメイン回転を起こさず電荷の移動だけで済むのに対し、非 180° ドメインではドメイン回転を起こすため時間的な遅れが大きくなることが考えられる<sup>[23]</sup>。従って、周波数が高くなるにつれて非 180° ドメインによる影響は減少し、結果として分極の非線形性はより小さくなると予測される。このことから発生変位は周波数を高くすることにより、非 180° ドメイン回転による歪みは低減されることが考えられる。

以上のことから非線形性の高い圧電素子では、駆動周波数が異なれば同じ駆動電圧でも異なる変位量を発生することが推測され、駆動周波数を変化させるアプリケーションでは、粒径の小さな圧電素子を用いることにより、変位制御性を向上させることが期待される。

## 2.7. 結言

本章では、圧電素子の信頼性を高めるために有効と考えられる微細結晶粒を持つ PZT 圧電素子を、マイクロ波焼結法により作製を行い、従来技術である電気炉焼結との比較検討を行った。

マイクロ波焼結実験によりサーマル・ランナウェイと融解の 2 種類の異常加熱が確認され、両現象とも温度プロファイルとの相関があることが分かった。また、ヒータとしての役割を果たす補助的な要素を用いずに焼結を行い、それにより PZT の純粋な自己加熱による焼結が可能であることが確認された。

焼結試料の微細組織の観察により、マイクロ波焼結・電気炉焼結のいずれの焼結手法においても焼結温度を変化させることにより粒径制御が可能であることが分かった。焼結試料の密度評価によりマイクロ波焼結では平均粒径 1.4 $\mu\text{m}$  で理論密度の 98%を得ることができ、同じ密度が得られた電気炉焼結の 2.2 $\mu\text{m}$  と比較して、より小さい粒径の PZT 焼結体が作製できることが明らかとなった。

電気的特性・単板変位特性の評価により、劣化のない圧電特性を有するのに必要な最小平均粒径はマイクロ波焼結で 1.5 $\mu\text{m}$ 、電気炉焼結で 2.2 $\mu\text{m}$  であり、マイクロ波焼結の方が粒径の小さな PZT 作製に有利であることがわかった。

機械的特性の評価では、曲げ強度の粒径依存性が確認できなかった原因として、いずれの焼結試料においても無数の気孔が存在しているためであることがわかった。機械的強度の特性向上には、気孔を取り除く、すなわち相対密度の更なる向上が課題である。

積層型圧電アクチュエータの DC 変位測定において、剪断素子の方が伸縮素子よりも電圧に対する変位の非線形性が高く、駆動電圧の増加に伴って圧電定数から求まる変位試算値と異なることがわかった。これは結晶中のドメイン回転によるものであり、粒径を小さくすることにより非線形現象が低減されることが明らかとなった。

積層型圧電アクチュエータの剪断素子の分極測定により、圧電素子の結晶粒微細化による分極変化の非線形性の減少がみられ、変位測定と同様に電気的測定においても粒径を小さくすることによる効果が確認された。

以上より、マイクロ波焼結法により粒径の小さな圧電素子を作製することが可能となり、この結晶粒微細化により圧電アクチュエータの信頼性・変位制御性を向上できる可能性が確認できた。マイクロ波焼結に特化した圧電材料の成分調整により、更なる改善が期待される。



## 参考文献

- [1] 酒井武信, 河本洋, “アクセプター添加と微粉碎による PZT の変位/耐久性の向上,” *Journal of the Ceramic Society of Japan*, Vol. 106, No. 8, pp. 792-797, 1998.
- [2] J. M. Calderon-Moreno, “Stress induced domain switching of PZT in compression tests,” *Materials Science and Engineering*, Vol. A315, pp. 227-230, 2001.
- [3] M. Laurent, U. Schreiner, P. A. Langjahr, A. E. Glazounov, and M. J. Hoffmann, “Microstructural and electrical characterization of La-doped PZT ceramics prepared by a precursor route,” *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 21, pp. 1495-1498, 2001.
- [4] X. Tan, Z. Xu, and J. K. Shang, “In situ transmission electron microscopy observations of electric-field-induced domain switching and microcracking in ferroelectric ceramics,” *Materials Science and Engineering*, Vol. A314, pp. 157-161, 2001.
- [5] J. M. Calderon-Moreno and M. Popa, “Stress dependence of reversible and irreversible domain switching in PZT during cyclic loading,” *Materials Science and Engineering*, Vol. A336, pp. 124-128, 2002.
- [6] W. Cao and C. A. Randall, “GRAIN SIZE AND DOMAIN SIZE RELATIONS IN BULK CERAMIC FERROELECTRIC MATERIALS,” *J. Phys. Chem. Solids*, Vol. 57, No. 10, pp. 1499-1505, 1996.
- [7] M. J. Hoffmann, M. Hammer, A. Endriss, and D. C. Lupascu, “CORRELATION BETWEEN MICROSTRUCTURE, STRAIN BEHAVIOR, AND ACOUSTIC EMISSION OF SOFT PZT CERAMICS,” *Acta mater.*, Vol. 49, pp. 1301-1310, 2001.
- [8] 田島健一, 黄海鎮, 山東睦夫, 新原皓一, “極微量の酸化物添加による PZT の機械的, 電氣的特性変化,” *Journal of the Ceramic Society of Japan*, Vol. 108, No. 6, pp. 607-610, 2000.
- [9] D. E. Clark, D. C. Folz, and J. K. West, “Processing materials with microwave energy,” *Material Science and Engineering*, Vol. A287, pp. 153-158, 2000.
- [10] 佐野三郎, “セラミックスのミリ波焼結,” *セラミックデータブック 工業製品技術協会*, pp. 151-154, 1998.
- [11] S. T. Oh, K. Tajima, M. Ando, and T. Ohji, “Fabrication of porous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by microwave sintering and its properties,” *Materials Letters*, Vol. 48, pp. 215-218, 2001.
- [12] Z. Xie, Z. Gui, L. Li, T. Su, and Y. Huang, “Microwave sintering of lead-based relaxor ferroelectric ceramics,” *Materials Letters*, Vol. 36, pp. 191-194, 1998.
- [13] A. Goldstein and M. Kravchick, “Sintering of PZT Powders in MW Furnace at 2.45 GHz” *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 19, pp. 989-992, 1999.
- [14] 福島英沖, 森広行, 畑中達也, 松居正夫, “マイクロ波焼結した PZT セラミックスの特性と微構造,” *Journal of the Ceramic Society of Japan*, Vol. 103, No. 10, pp. 1011-1016, 1995.
- [15] H. Takahashi, K. Kato, J. Qiu, and J. Tani, “Property of Lead Zirconate Titanate Actuator Manufactured with Microwave Sintering Process,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 40, Part 1, No. 2A, pp. 724-727, 2001.

- 
- [16] H. Takahashi, K. Kato, J. Qiu, J. Tani, and K. Nagata, "Fabrication of High-Performance Lead Zirconate Titanate Actuators Using the Microwave and Hot-Press Hybrid Sintering Processes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 40, Part 1, No. 7, pp. 4611-4614, 2001.
- [17] "セラミックスの高速焼結技術 セラミックス電磁プロセッシング," ティー・アイ・シー, 1998.
- [18] A. Eremeev, Institute of Applied Physics Russian Academy of Sciences. Private communication. (Y. Bykov, A. Eremeev, S. Egorov, V. Ivanov, Y. Kotov, V. Khrustov, and A. Sorokin. "SINTERING OF NANOSTRUCTURAL TITANIUM OXIDE USING MILLIMETER-WAVE RADIATION." *NanoStructured Materials*, Vol. 12, pp. 115-118, 1999.)
- [19] A. Boutarfaia. "Investigations of co-existence region in lead zirconate-titanate solid solutions: X-ray diffraction studies," *Ceramics International*, Vol. 26, pp. 583-587. 2000.
- [20] 小寺沢良一, "材料強度学要論," 朝倉書店, pp. 47-49.
- [21] 岡田明, "セラミックスの破壊学," 内田老鶴圃, pp. 59-74.
- [22] 電気学会, "誘電体现象論," オーム社, p. 156.
- [23] 内野研二, "圧電/電歪アクチュエータ 基礎から応用まで," 森北出版株式会社, p. 38.

## 第3章 非共振型超音波モータの駆動特性と先端変位解析

### 3.1. 緒言

優れたステージ駆動性能を得るためには、制御アルゴリズムもさることながら、使用するアクチュエータの制御性能が高いことが重要である。そのためにはアクチュエータの持つ諸特性を明らかにし、その性能を最大に引き出す駆動条件の検討が必要となる。本章で行う全ての特性評価は、任意の電圧振幅／周波数の ON/OFF 制御によりステージを駆動させるものであり、これにより NRUSM の駆動特性を明らかにする。本研究ではこれをオープンループ制御駆動と位置づけ、その駆動方式における駆動速度の向上に重点を置いて議論を進める。NRUSM の駆動速度は(1.2)式で表されることから、その向上には各パラメータを増加させることが有効であると考えられる。

本章では、駆動電圧と駆動周波数を変化させた時のステージ駆動速度性能を中心に、圧電素子材料・予圧力・アクチュエータ形状の与える影響を明確にする。続いて NRUSM の変位解析を行うことにより諸現象ならびに駆動原理破綻のメカニズムを解明し、非共振原理に基づいた高速駆動が可能なアクチュエータを設計するための指針について検討を行う。また、ステージ駆動速度と NRUSM 発生変位の相関を変位伝達系のモデル化により検討する。

### 3.2. 予圧機構の開発

アクチュエータで発生した駆動力を効率よく対象物に伝達することは極めて重要である。摩擦駆動を採用する本方式においては、駆動対象物の側面に NRUSM を配置させるため、適切な力で押し付ける必要がある。一般に、この予圧力は圧電アクチュエータ発生力の 1/2 程度が推奨<sup>1)</sup>されているが、本機構が剪断素子を用いた特殊な駆動方式であること、接触部分での磨耗問題など実用化に向けても多くの条件を満足させる設定が必要となるため、開発段階においては予圧力が容易に変更可能な機構であることが望ましい。

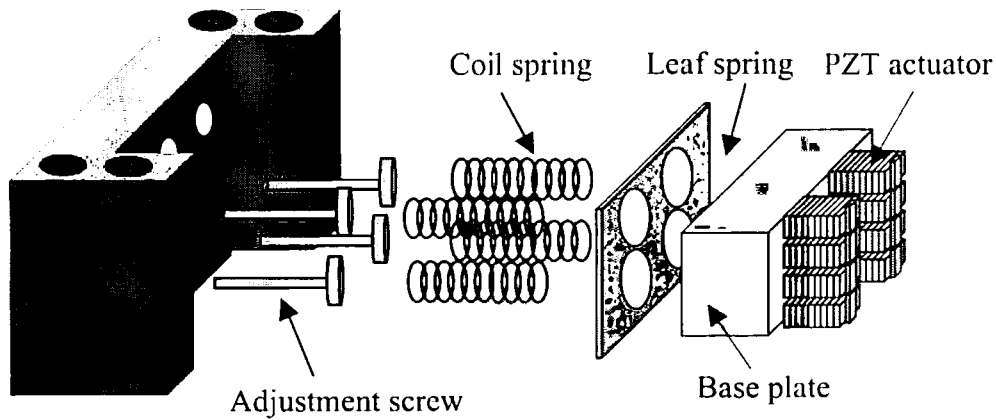


図 3.1 予圧機構「ZERO」の構成

## 【予圧機構「ZERO」】

開発初期の予圧機構は、予圧力を与える4本のコイルバネと、送り方向への拘束力をもつ板バネにより構成されている(図 3.1)。この機構はコンパクトに構成できるが、それぞれのコイルバネの特性やヘタリなどのバラツキが顕著に現れるため、単純に調整ネジの押し込み量（縮み量）だけでは、NRUSMの全8つの積層型圧電アクチュエータ先端を均等な力でステージガイドプレートに押し付けることが困難となり、速度ムラなど駆動方向による駆動性能誤差が起き易いという欠点がある。この速度ムラをなくすための調整作業は熟練者の勘と経験に頼る部分が大きく、また、その予圧力を直接モニタできないために、再現性のあるNRUSM取り付け、予圧力をパラメータとした評価が困難であり、性能評価には不向きである。

## 【予圧機構「Type-A」】

再現性のある取り付けを重要視して開発した予圧機構 Type-A を図 3.2 に示す。コイルバネを1本とし、NRUSMの予圧力を読み取れるようにロードセルを装備した。また、市販のクロスローラガイドを用いることにより、ステージ駆動方向に対してはベースプレートを拘束し、予圧力を与える方向（駆動方向と直交方向）にはスライドできる構造とした。Type-Aにより予圧力をパラメータとしたNRUSM評価実験が可能となったものの、連続走行試験（付録A：連続走行試験とNRUSM圧電特性）を通して特に駆動方向を反転させる際に粉塵等の影響を受け易く、構造上改善すべき点が浮上した。図 3.3 に示すように、予圧機構 ZERO は板バネを使用しているため、何らかの原因によりNRUSMベースプレートが傾いた場合にでも元の状態に戻す復帰力が働くが、Type-Aにはクロスローラガイドを使用しているため、その要素が欠落している。NRUSMの伸縮変位量が $1\mu\text{m}$ であると仮定した場合に、単一ベースプレート上に配置された全アクチュエータ（4行2列）が、ガイドプレートに接触し正常動作を得るための傾き許容角は、アクチュエータの列間隔が $10\text{mm}$ の場合、 $\tan^{-1}(1\mu\text{m}/10\text{mm})=0.1\text{mrad}$ となり、機械的なガタをもつクロスローラガイドで補償できるオーダではないことが考察される。更には、駆動方向とその直交方向（上下方向）にもバネ成分がないため、ガイドプレート表面の凹凸や傾斜に対してアクチュエータの姿勢

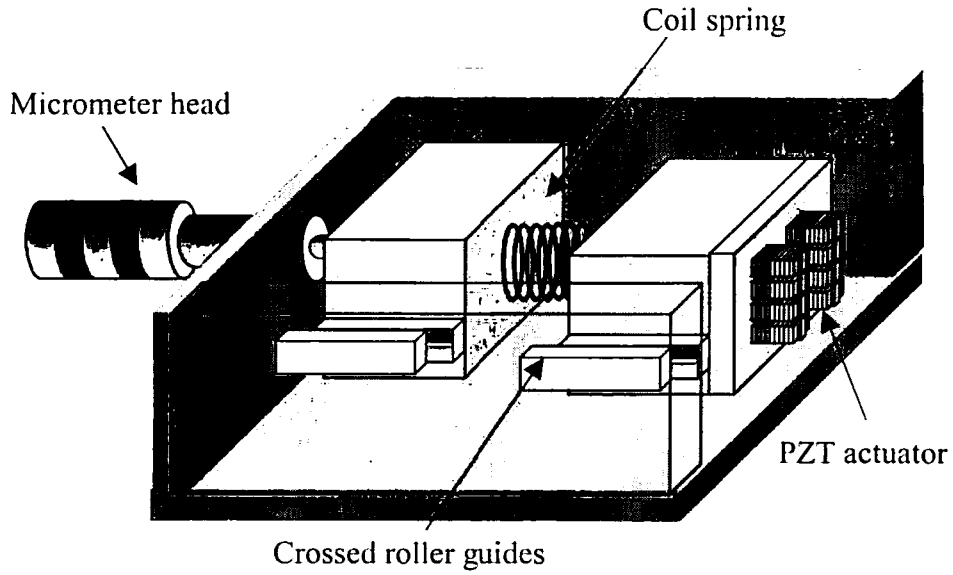


図 3.2 予圧機構「Type-A」の構成

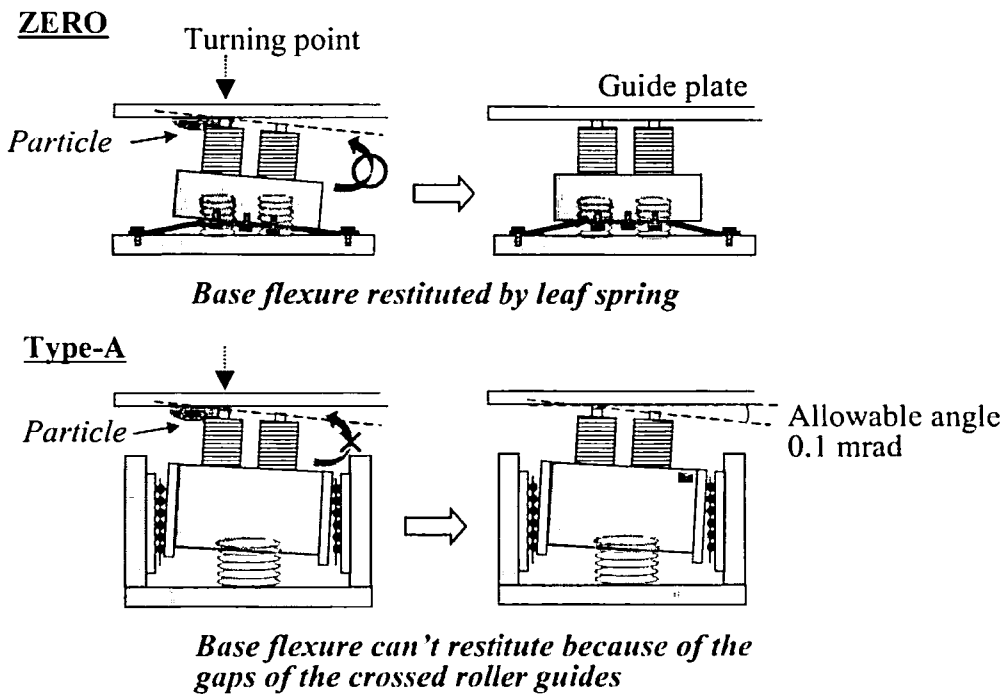


図 3.3 予圧機構の不具合点と必要機能

を倣わせることができず、ガイドプレート/ステージ側面の影響をまともに受ける。そのため、良好な駆動を行うためには、全アクチュエータの作り出す平面とガイドプレート表面との2次元の平行度調整ができることが予圧機構への必要条件であることがわかった。

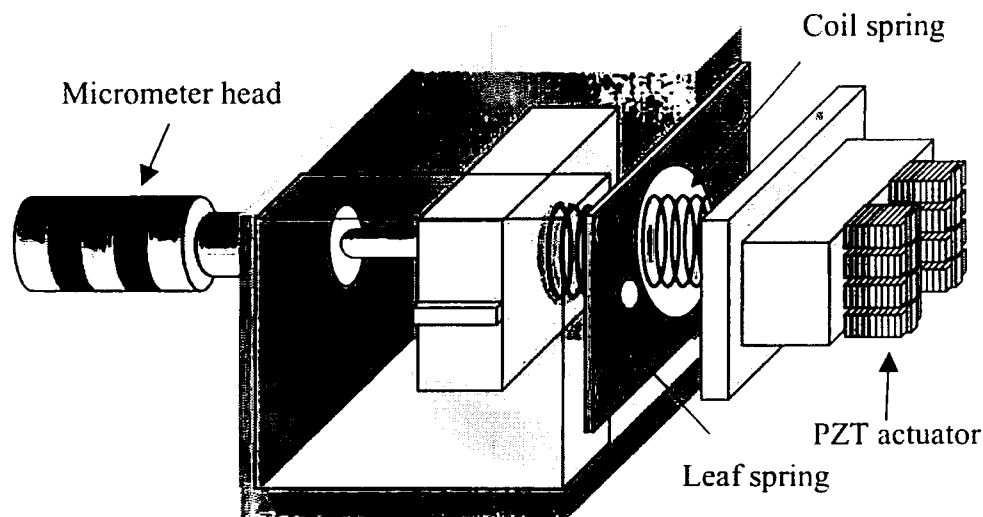


図 3.4 予圧機構「Type-S1」の構成

#### 【予圧機構「Type-S1」】

予圧機構 ZERO と Type-A の開発により、予圧機構への要求事項が明らかとなった。送り方向とその直交方向には、対象物に做うための適度な自由度と常に元の状態に戻すための復帰力が必要不可欠である。そこで、ZERO と Type-A の両者の利点を生かして開発したのが Type-S1 である（図 3.4）。基本構造は、コイルバネ 1 本と板バネ 1 枚を用いており、前述の 2 つの機構よりも比較的高い取り付け再現性を得ることができている。本章ではこの予圧機構を用いて駆動性能評価を行った。

### 3.3. 実験装置と評価方法

本実験では NRUSM のステージ駆動特性を評価すると共に、諸現象を解析するためにアクチュエータ変位解析を同時に実施した。ステージの駆動特性はレーザ干渉計を用いた駆動速度（平均値）による評価を、アクチュエータの変位解析は非接触で変位が測定できるレーザドップラー振動計（LDV：Laser Doppler Vibrometer）を用いた発生変位とその応答遅れによる評価を行った。

#### 3.3.1. 基本実験セットアップ

オープンループ特性評価の実験セットアップを図 3.5 に示す。内部を削り貫いて中空構造とした先端変位計測用特殊プレートをステージ本体トッププレート上に取り付け、続いてスリットの入ったアルミナ製ガイドプレートをステージ側面に取り付けた。この中空構造によりガイドプレートがステージ側面に全面接触しないため、ガイドプレートが薄ければ撓みやすい状態となる。

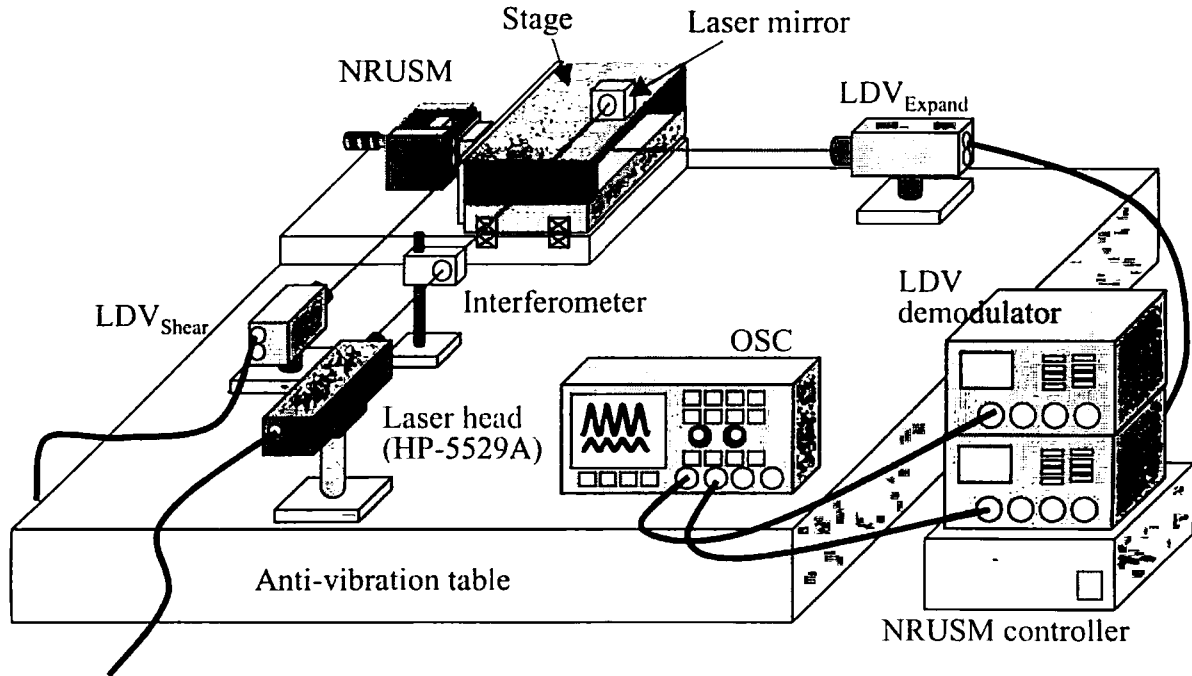


図 3.5 オープンループ駆動特性評価の実験セットアップ

そのためプレートを十分に厚く設計し撓みの問題を軽減させた。除振台上にステージを固定し、可動部分にレーザ干渉計用の反射ミラーを配置することにより、ステージの位置/速度情報を測定した。また、積層型圧電アクチュエータ先端に剪断方向と伸縮方向の2方向からレーザビームを照射できるように2つのLDVを配置し、それぞれの発生変位を同時に計測した。LDVの速度出力信号は復調器の積分回路で変位に換算され、オシロスコープを用いてロギングした。

ステージの駆動は、コントローラ付属のオープンループ専用調整ポートを使用することにより、任意に電圧振幅/周波数の設定を行った。本章の評価で使用した機器を表3.1に示す。

### 3.3.2. 評価アクチュエータの仕様と圧電材料の及ぼす影響

#### 【圧電材料と発熱】

積層型圧電アクチュエータを構成する圧電材料は、同じPZTと称される材料であっても微量の成分調整により材料特性が大きく異なる。本研究ではアクチュエータの最大変位量を大きくすることを目的とした高圧電定数材料を標準材料としているが、真空装置への応用の際に問題となる発熱を考慮し、低誘電損失材料の検討を行った(表3.2)。同じ圧電体積を有する2つの異なる材料を用いて作製したアクチュエータNRUSM-1-3(表3.3)をステージに取り付け、図3.6に示す駆動プロファイル(クローズドループ制御、第4章参照)でストローク100mmを往復駆動した。

図3.7はNRUSMを駆動電圧 $180V_{pp}$ 、駆動周波数25kHzでステージを駆動した時の積層型圧電アクチュエータ表面温度を、测温抵抗体(林電工(株)、セラミック白金薄膜素子Pt100 $\Omega$ )を直接貼り付けて計測したものである。NRUSM-1(D材)においては駆動直後から温度上昇が

表 3.1 ステージ構成要素とオープンループ駆動評価の使用機器

機器	メーカー	仕様
ステージ	シグマテック(株)	材質：アルミ 最大ストローク：108mm 可動部重量：2.2 kg (先端変位計測用特殊プレート付) トップテーブル面積：120mm×180mm クロスローラガイド：THK 製, VR 型
ガイドプレート	京セラ(株)	材質：アルミナセラミックス 重量：0.2kg 寸法：40mm×140mm×10mm (先端変位計測用スリット付)
予圧機構 (Type-S1)	(有)熊本テクノロジー	材質：SUS303 コイルバネ：φ10mm, 1.0kgf/mm 板バネ：26mm×42mm×0.1mm
ステージコント ローラ (NRUSM-01)	(株)東京テクノロジー	位置制御：PID 制御方式 サーボループ周波数：10kHz 出力：0～220V <sub>pp</sub> , 1kHz～60kHz, 4ch(2 相励磁)
レーザ干渉計 (HP-5529A)	アジレントテクノロジー(株)	光源：He-Ne ガスレーザ 位置分解能：10nm 反射ミラー重量：1kg
レーザドップラ ー振動計 (AT-0023/3700)	グラフテック(株)	光源：He-Ne ガスレーザ 応答周波数：DC～2MHz 速度範囲：4μm/s～10m/s 出力：±10V
フォースゲージ (DPX-50)	(株)今田製作所	計測範囲：0～490N
デジタルオシロ スコープ (TDS-3014B)	日本テクトロニクス(株)	周波数帯域：100MHz サンプルレート：1.25GS/s 入力インピーダンス：50Ω/1MΩ チャンネル数：4ch
ファンクション ジェネレータ (LFG-1300S)	リーダー電子(株)	出力：0.01Hz～20MHz



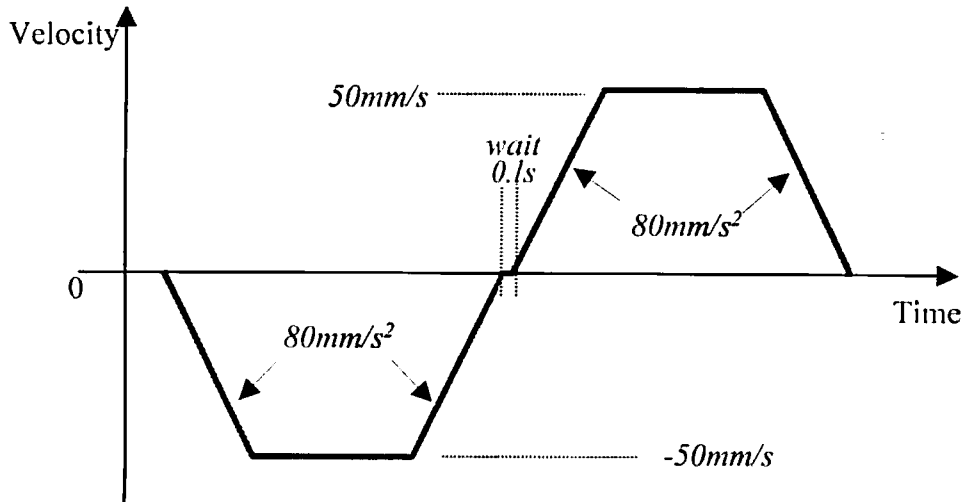


図 3.6 クローズドループ制御による連続駆動時の速度プロファイル

表 3.2 圧電素子の材料定数

原料名		D 材	NA 材
材料定数		(NRUSM-1)	(NRUSM-3)
比誘電率	$\epsilon_{33}/\epsilon_0$	4500	1460
	$\epsilon_{11}/\epsilon_0$	4700	1750
損失係数 (%)	$\tan \delta$	2.0	0.5
圧電定数 ( $\times 10^{-12}$ m/V)	$d_{33}$	660	315
	$d_{15}$	1010	580
ヤング率 ( $\times 10^{10}$ N/m <sup>2</sup> )	$Y_{33}$	5.4	6.5
	$Y_{11}$	6.7	8.2
キュリー温度 (°C)		180	310
密度 (g/cm <sup>3</sup> )		7.8	7.6

起こり、連続駆動後 1 分で 23°C の温度上昇が確認される。一方、NRUSM-3 (NA 材) においては連続駆動後 10 分でも温度上昇は 1.5°C 程度であり、圧電素子の損失成分による両者の発熱挙動が大きく異なることがわかる。NA 材は損失成分が小さいことが大きく影響しているが、一層当たりの圧電素子厚みが薄いことや、積層枚数増加に伴う電極枚数増加により放熱条件が有利となったことも発熱量を抑えることができた要因であると考えられる。

一方で、ステージを駆動した時のサーボモニタ電圧 (Max/Min : ±10V) を観測することで、NRUSM の駆動状態を予測できる。同じ駆動速度を維持するためにより高い電圧印加が必要となれば、駆動性能が低下していると判断できる。図 3.8 上部の波形は NRUSM-1 (D 材) の駆動後 1 分以内のサーボモニタ電圧を重ね合わせた (10 秒間隔) ものであるが、時間と共にサーボ電圧が高くなっていることがわかる。一方で、下部の波形は NRUSM-3 (NA 材) の駆動後 10 分以内

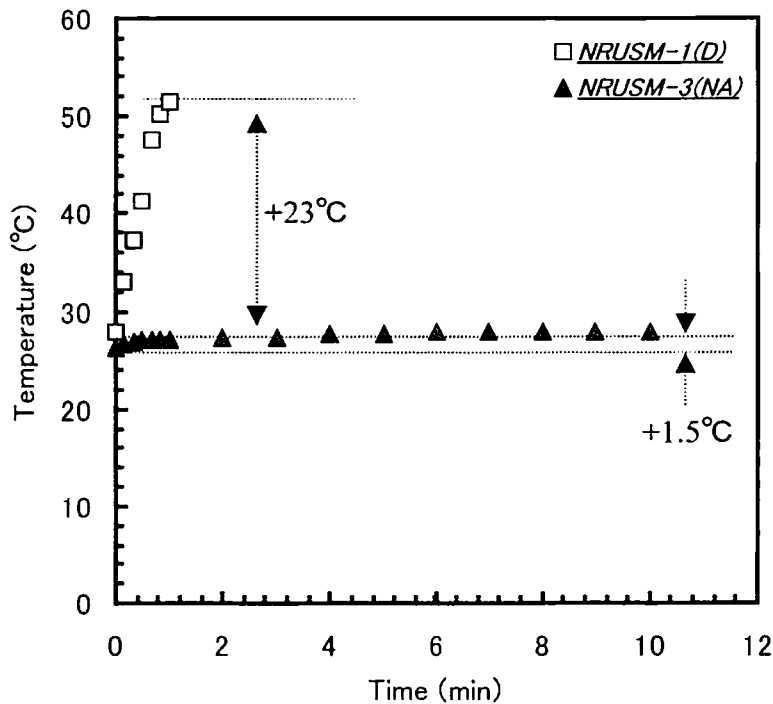


図 3.7 圧電材料とステージ駆動時の発熱  
 (NRUSM-1, D 材 :  $\tan\delta=2.0\%$ , NRUSM-3.NA 材 :  $\tan\delta=0.5\%$ )

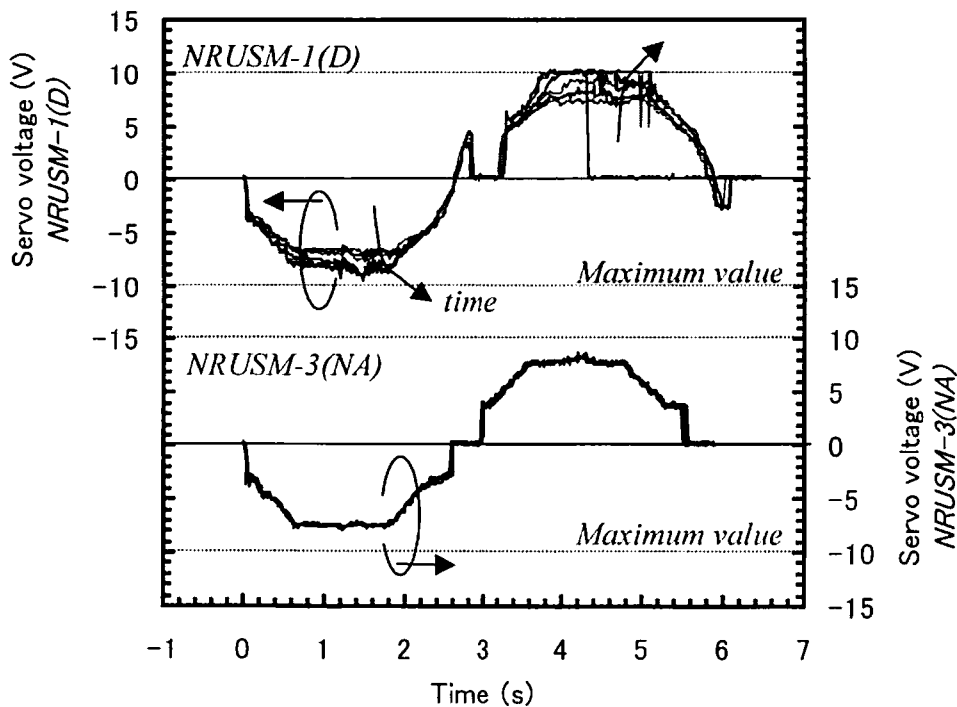


図 3.8 クローズドループ制御による連続駆動時のサーボモニタ電圧比較  
 (NRUSM-1, D 材 :  $\tan\delta=2.0\%$ , NRUSM-3.NA 材 :  $\tan\delta=0.5\%$ )

表 3.3 評価アクチュエータ仕様

名称	PZT 材料	積層型圧電アクチュエータ形状				試算変位量 (200V <sub>pp</sub> の時)	
		断面積 (mm <sup>2</sup> )	素子厚 (mm)	積層数 (枚)	全長** (mm)	伸縮 (μm)	剪断 (μm)
NRUSM-1	D 材	3×6	0.6	8	5.25	0.53	0.81
NRUSM-2	D 材*	3×6	0.6	8	5.25	0.53	0.81
NRUSM-3	NA 材	3×6	0.3	16	5.65	0.50	0.93
NRUSM-4	D 材	3×3	0.6	8	5.25	0.53	0.81
NRUSM-5	D 材	3×6	0.3	8	2.85	0.53	0.81

\* 第2章マイクロ波焼結により作製した圧電素子を使用

\*\* アクチュエータ上下のシム板を除いた長さ = PZT 積層枚数 × 素子厚 + 電極枚数 × 板厚

の状態を示したものであるが、サーボモニタ電圧に変化は見られず、安定した駆動が得られている。NRUSM-1 は駆動後 1 分で 23℃ の温度上昇が起きていることから、駆動性能低下は圧電素子の発熱によるものと考えられる。駆動性能低下のメカニズムは、圧電素子発熱 → 圧電素子の積層間接着剤軟化 → アクチュエータ先端での合成変位減少 → 駆動性能低下と推測される。

これより、低誘電損失材料は発熱量が小さく真空用途に有利であることが明らかになると共に、高誘電損失材料を用いる場合には、駆動性能低下を防止するために積層構造の中間接着層の検討が必要であることが明らかとなった。

#### 【積層型圧電アクチュエータの形状】

圧電アクチュエータの発生変位は (1.1) 式で表せることから、同じ厚みの圧電素子を用いた場合、断面積によらず印加電圧と積層枚数にのみ依存する。一般にアクチュエータの発生力は、電圧を印加してアクチュエータを変位させた状態で負荷（外部圧力）をかけ、変位量がゼロ、すなわち元の大きさに戻るときの応力を最大発生力と定義されている<sup>11)</sup>。外部圧力は積層型圧電アクチュエータを構成する全素子に均等にかかるため、積層枚数は発生力に依存しないと予測される。これよりアクチュエータの発生力  $F$  は次式で表すことができる。

$$F = \frac{A}{t} Y_{ij} d_{ij} V \quad (3.1)$$

ここで、 $A$  はアクチュエータの断面積、 $t$  は圧電素子の厚み、 $Y_{ij}$  はヤング率である。

本研究では積層型圧電アクチュエータの発生変位を一定とし、形状依存性を検討する。NRUSM 評価に用いた積層型圧電アクチュエータの仕様を表 3.3 に示す。NA 材は圧電定数が小さいため、本材料を用いた NRUSM-3 は D 材型アクチュエータと同じ駆動電圧で同等の変位量を発生するように一層当りの圧電素子厚みと積層枚数を決定している。

表 3.4 駆動速度—予圧力依存性実験条件

評価アクチュエータ	NRUSM-1～5
駆動電圧	180V <sub>pp</sub>
駆動周波数	10, 20, 30kHz
予圧力	10～70N
実験セットアップ	図 3.5

### 3.4. ステージ駆動速度

#### 3.4.1. 駆動速度の予圧力依存性

任意の予圧力をアクチュエータに与えた場合、その力によって発生するステージ—NRUSM間の摩擦力は静止/動摩擦係数と予圧力との積で表すことができる。つまり予圧力を大きくすることで摩擦力を増加させ、結果として高い保持力を生み出すことができる。アプリケーションにもよるが、適度な保持力を有すればステージにブレーキ機構を付加する必要がなくなり、ステージシステムとしてもメリットが大きい。駆動速度の予圧力依存性の実験条件を表 3.4 に示す。駆動電圧を 180V<sub>pp</sub>、駆動周波数をそれぞれ 10kHz, 20kHz, 30kHz の一定とし、予圧力を 10～70N に変化させた時のステージ駆動速度をレーザ干渉計で計測した。なお、NRUSM-5 については静電容量の関係上、ステージコントローラの電力供給不足となるため、駆動周波数 30kHz での測定は行っていない。

駆動周波数毎にまとめたステージ駆動速度の予圧力依存性を図 3.9 から図 3.11 に示す。いずれの NRUSM においても予圧力を増大させることにより駆動速度が減少していることがわかる。予圧力 10N における駆動速度が 20N の時よりも低い NRUSM が確認されるが、これは予圧力が足りないために、アクチュエータ変位が完全にステージに伝達されていないことが原因だと推測される。また、積層型圧電アクチュエータの断面積による特性の違いが確認できる。駆動周波数 20kHz では、3mm×6mm の断面積を持つアクチュエータは速度減少率が 40%未満であるのに対し、3mm×3mm の NRUSM-4 は予圧力の影響をより顕著に受けており、予圧力 70N で完全に駆動ができない状態となった。また、駆動周波数 30kHz では NRUSM-4 はステージを駆動することができないことがわかる。断面積が半分であることから、アクチュエータの発生力が低下したことが原因と考えられるが、実際には駆動周波数 10kHz において、他の NRUSM と同じ特性/傾向を示している。従って、発生力が主たる原因ではない可能性が高く、駆動周波数による駆動性能変化が推測される。

#### 3.4.2. 駆動速度の駆動電圧依存性

(1.1)式ならびに(1.2)式によればアクチュエータの駆動電圧を増加させることにより、ステージの駆動速度は増加する。駆動電圧の増加によってアクチュエータ変位量を増大させ、1 駆動シークスあたりの変位量を大きくする結果、ステージ駆動速度が増加すると考えられる。しかしながら圧電素子は高電界印加により分極反転を起こすため、駆動電圧の上限は脱分極電界により

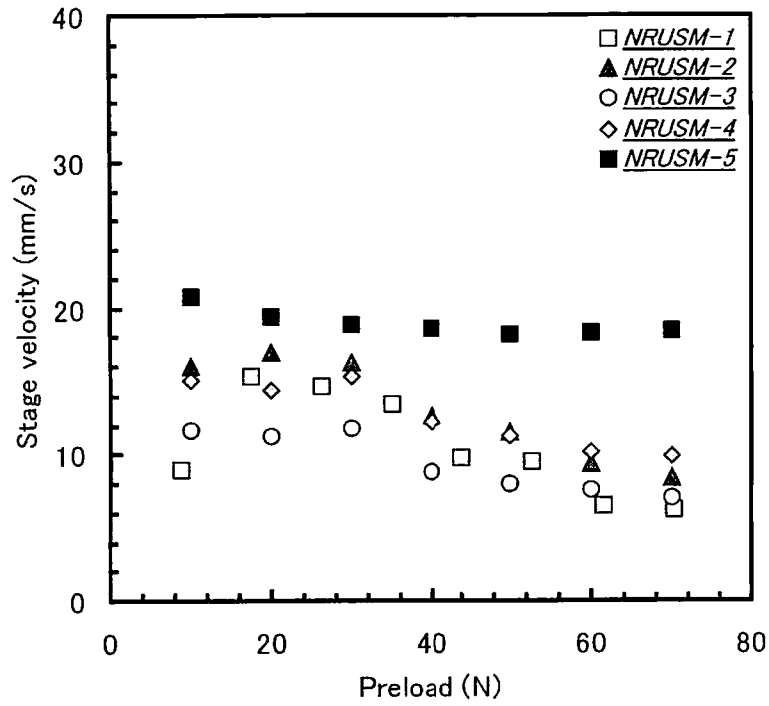


図 3.9 ステージ駆動速度－予圧力依存性 ( $f=10\text{kHz}$ ,  $V=180V_{pp}$ )

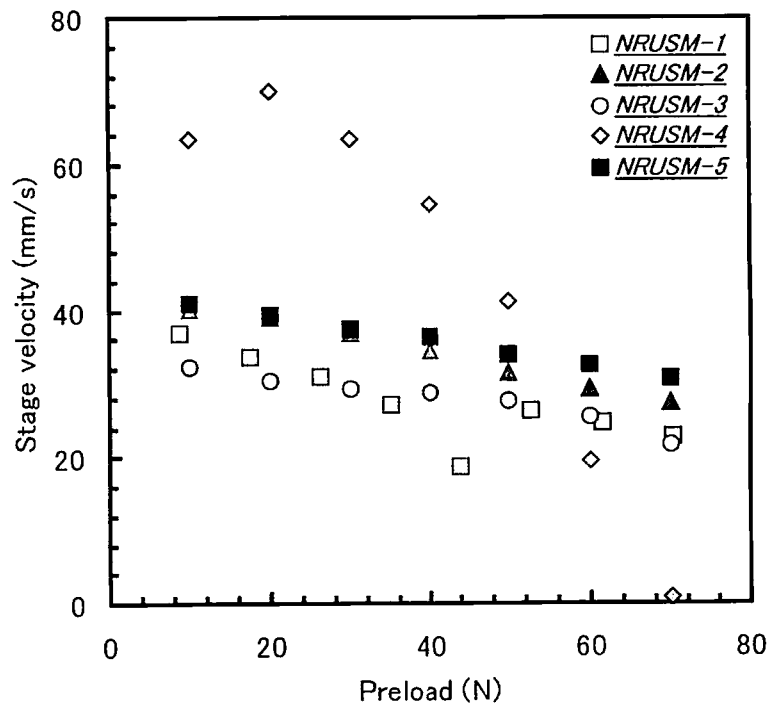


図 3.10 ステージ駆動速度－予圧力依存性 ( $f=20\text{kHz}$ ,  $V=180V_{pp}$ )

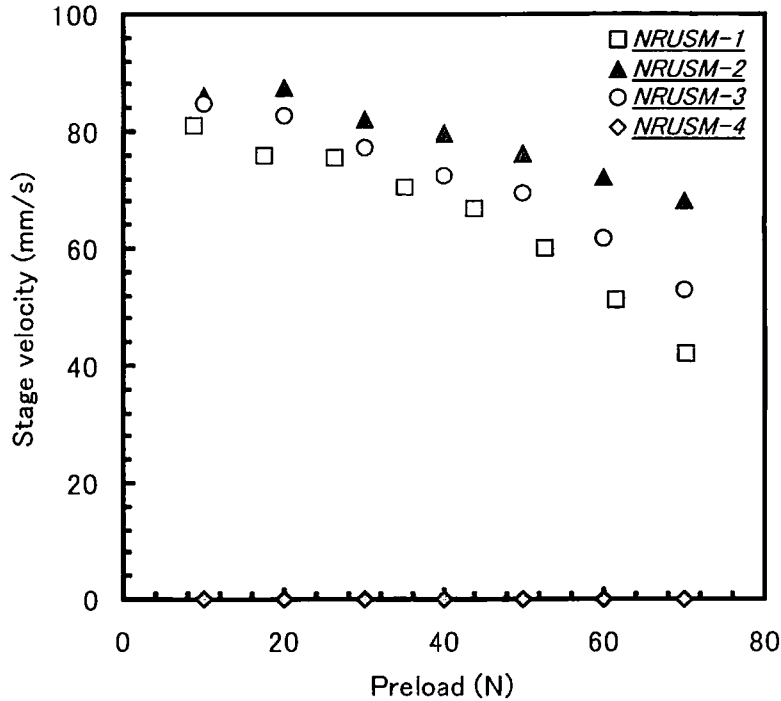


図 3.11 ステージ駆動速度－予圧力依存性 ( $f=30\text{kHz}$ ,  $V=180V_{pp}$ )

表 3.5 駆動速度－駆動電圧依存性の実験条件

	実験 1 駆動電圧依存性 ( $V_{\text{Shear}}=V_{\text{Expand}}$ )	実験 2 伸縮変位のステージ駆動に及ぼす影響 ( $V_{\text{Shear}}\neq V_{\text{Expand}}$ )
評価アクチュエータ	NRUSM-1～5	NRUSM-1
駆動電圧	0～200V <sub>pp</sub>	$V_{\text{Shear}}$ : 0～200V <sub>pp</sub> $V_{\text{Expand}}$ : $V_{\text{Shear}}$ の 100, 91, 72%値
駆動周波数	10, 20, 30kHz	10, 20, 30kHz
予圧力	35N	35N
実験セットアップ	図 3.5	図 3.5
備考	$V_{\text{Shear}}=V_{\text{Expand}}$ は コントローラ標準設定	アンプのゲイン変更により $V_{\text{Expand}}$ を調整

\* NRUSM-5 は静電容量の関係上、ステージコントローラの電力供給不足のため、駆動周波数 30kHz では 160V<sub>pp</sub> を最大値とする。

律束される。駆動速度の駆動電圧依存性の実験条件を表 3.5 に示す。予圧力を 35N、駆動周波数をそれぞれ 10kHz、20kHz、30kHz の一定とし、駆動電圧を 0～200V<sub>pp</sub> に変化させた時のステージ駆動速度をレーザ干渉計で計測した。

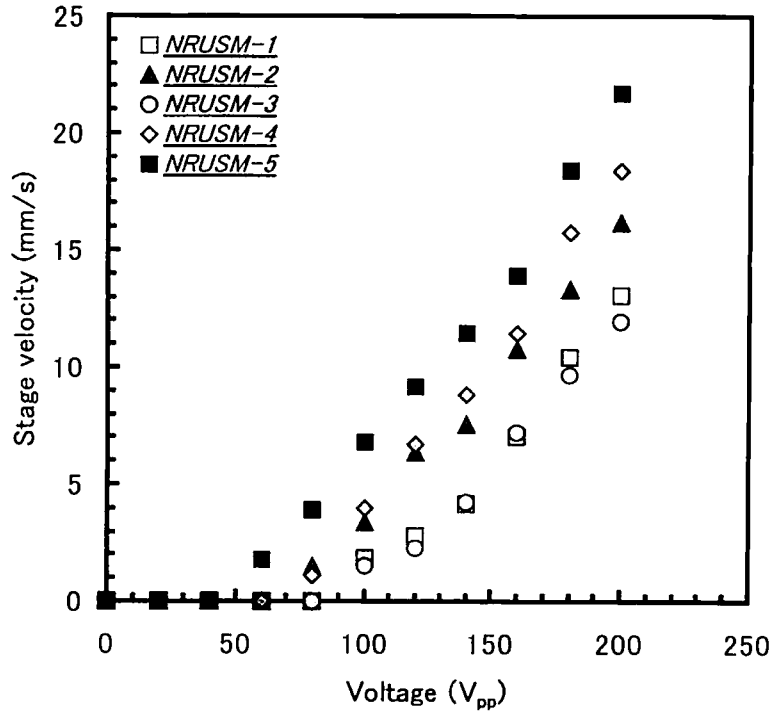


図 3.12 ステージ駆動速度－駆動電圧依存性 ( $f=10\text{kHz}$ ,  $P=35\text{N}$ )

伸縮駆動電圧が剪断駆動電圧と等しい時（コントローラの標準設定）の、各 NRUSM のステージ駆動速度と駆動電圧の関係を図 3.12～図 3.14 に示す（実験 1）。全体傾向として駆動電圧の増大によりステージの駆動速度が向上することが確認できる。予圧力依存性と同様にアクチュエータ断面積が半分である NRUSM-4 は駆動周波数の影響を受けており、 $30\text{kHz}$  ではステージ駆動ができないことがわかる。またいずれの NRUSM においても  $50\sim 60\text{V}_{pp}$  以下ではステージ駆動速度がゼロ、つまり駆動できない不感帯領域があり、(1.2)式と異なる挙動を示している。このような駆動スレッシュホールド電圧が生じるの原因の 1 つとして伸縮方向のアクチュエータ変位量が影響していることが考えられる。 $60\text{V}_{pp}$  における伸縮変位量試算値は  $0.16\mu\text{m}$  であるが、これはアルミナセラミックスのガイドプレート表面粗さ  $Ra=0.2$  と同等のレベルである。ガイドプレートの表面粗さが影響するような変位状態では、駆動原理が成立しないためステージ駆動が困難となることが容易に推測され、これが駆動スレッシュホールド電圧を持つ原因であると考えられる。従って(1.2)式は伸縮素子がガイドプレートの表面粗さ以上に変位し、その表面の影響を受けないときに成立することになる。

伸縮変位の駆動速度依存性を検討するために剪断駆動電圧を一定にし、伸縮駆動電圧を一定割合減少（剪断電圧の 100%、91%、72%値）させてステージ駆動を行った。そのときのステージ駆動速度の時間応答を図 3.15 に示す（実験 2）。伸縮電圧 100%では正負両方向において大きな速度差は見られないが、伸縮電圧を 91%→72%と減少させることにより正負方向の速度差、更には駆動中の速度ムラが顕著に現れていることがわかる。剪断変位の電圧を一定に保っているにも関わらずこのような結果が生じていることから、伸縮変位がガイドプレートの影響を受け、場所によ

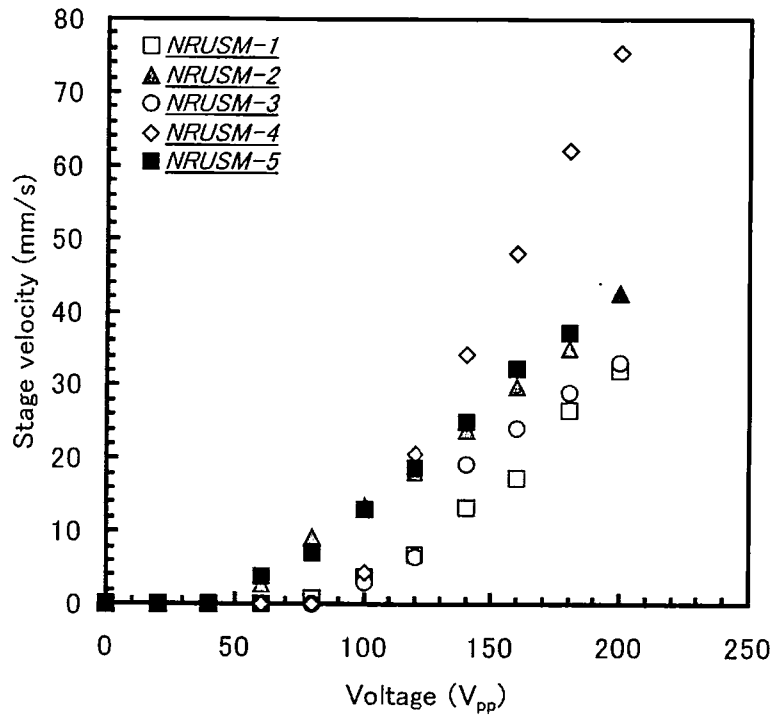


図 3.13 ステージ駆動速度－駆動電圧依存性 (f=20kHz, P=35N)

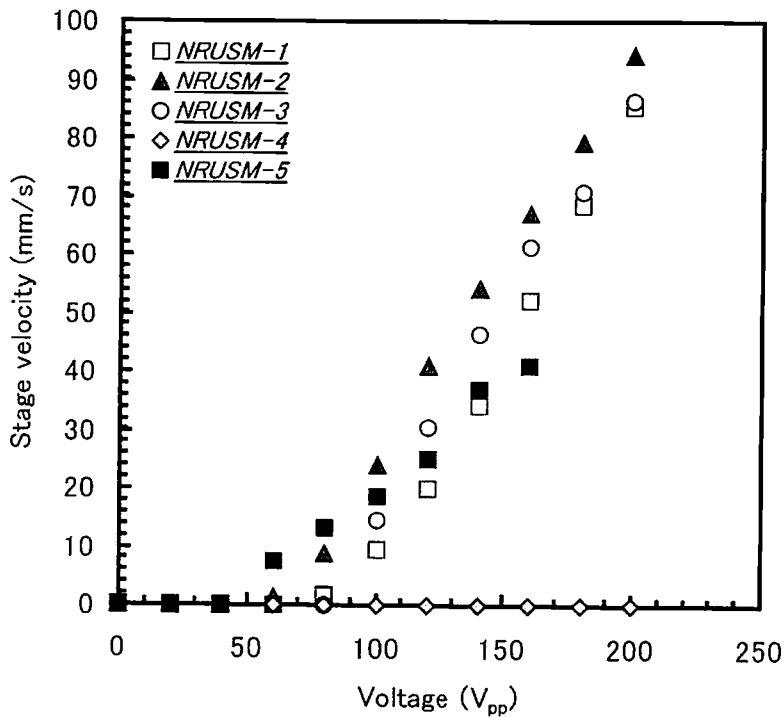


図 3.14 ステージ駆動速度－駆動電圧依存性 (f=30kHz, P=35N)



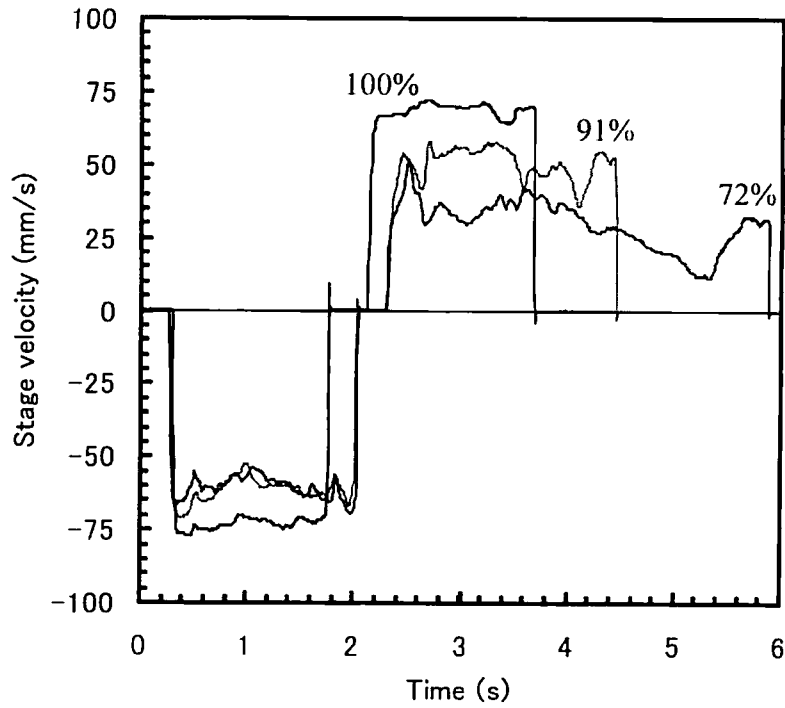


図 3.15 伸縮電圧を変化させたときのステージ駆動速度-時間応答  
(NRUSM-1,  $f=30\text{kHz}$ ,  $P=35\text{N}$ )

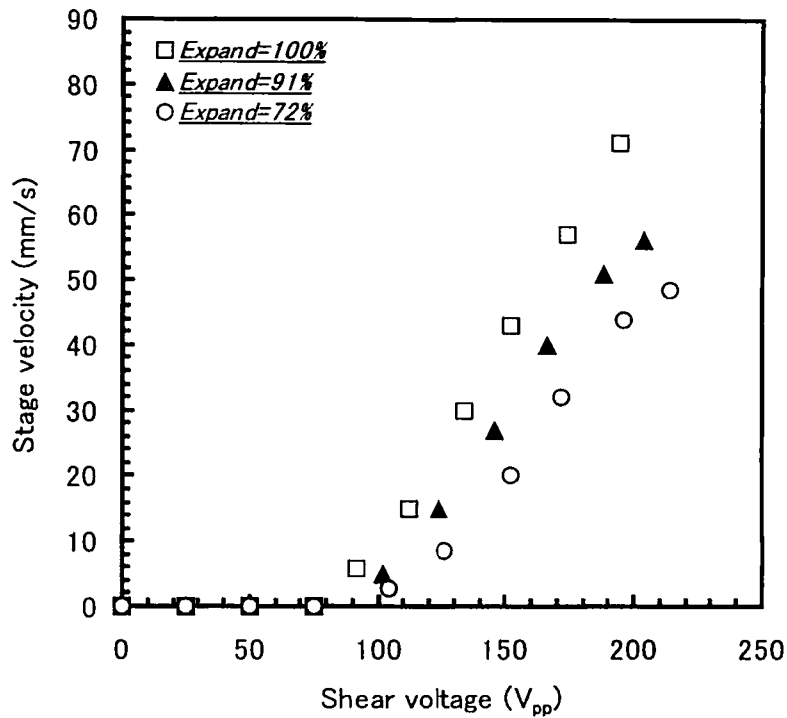


図 3.16 伸縮電圧を変化させたときのステージ駆動速度-駆動電圧依存性  
(NRUSM-1,  $f=30\text{kHz}$ ,  $P=35\text{N}$ )

表 3.6 駆動速度－駆動周波数依存性の実験条件

	実験 1 予圧力依存性	実験 2 駆動電圧依存性	実験 3 アクチュエータ依存性
評価 アクチュエータ	NRUSM-1	NRUSM-1	NRUSM-1～-5
駆動電圧	180V <sub>pp</sub>	120, 150, 180V <sub>pp</sub>	180V <sub>pp</sub> : NRUSM-1～-4 120V <sub>pp</sub> : NRUSM-1, -5 *
駆動周波数	5～52kHz	5～50kHz	5～56kHz
予圧力	20, 35, 50N	35N	35N
実験セットアップ	図 3.5	図 3.5	図 3.5

\* NRUSM-5 は静電容量の関係上、ステージコントローラの電力供給不足のため 120V<sub>pp</sub> で実施。特性比較は NRUSM-1 を 120V<sub>pp</sub> で駆動した時の結果を用いる。

ってはNRUSMがガイドプレート表面を引きずりながらステージを駆動していることが推測される。図 3.16 は伸縮電圧を剪断電圧よりも一定割合低くした時の、駆動速度の駆動電圧依存性を示したものである。なお、図 3.15 からわかるように速度ムラが大きいため、最高速度を用いてプロットを行った。駆動電圧（剪断）に比例した駆動速度が得られているが、やはり伸縮電圧を下げることで駆動速度が減少していることがわかる。伸縮電圧 100%の時の駆動速度を基準として、その速度値の 91%、72%の計算値が、実際に伸縮電圧を変化させた時の実験値と同等の値を示しており、伸縮電圧が駆動速度と相関があることが考察される。

以上より、ステージの駆動速度が駆動電圧で制御できることが確認されると共に、伸縮変位量が駆動に大きな影響を与えることが明らかとなった。伸縮駆動電圧は一定とし剪断駆動電圧のみを変化させることで、より効率よくステージを駆動できる可能性が示された。

### 3.4.3. 駆動速度の駆動周波数依存性

(1.2)式に従えば、NRUSM の駆動シーケンスを増加させることによりステージ駆動速度は増加する。ステージ駆動速度の駆動周波数依存性を評価するために実施した諸実験を表 3.6 に示す。いずれの実験においても、ステージ駆動速度はレーザ干渉計で計測を行った。

先ず予圧力が駆動速度の周波数依存性に与える影響を評価した（実験 1）。NRUSM-1 の駆動電圧を 180V<sub>pp</sub> 一定とし、予圧力をそれぞれ 20, 35, 50N とした時のステージ駆動速度の周波数依存性を図 3.17 に示す。37kHz までは(1.2)式に従って駆動速度が上昇していることが確認できるが、それ以上の周波数では駆動速度が徐々に減少し、更には、41kHz 付近で駆動方向が反転していることがわかる。駆動方向が反転すると一時的に周波数の増加に従って駆動速度も上昇しているが、駆動速度が低くなる方向に収束している傾向が見られる。予圧力を大きくすることで多少の速度低下が確認され、3.4.1 節（：駆動速度の予圧力依存性）と同様の傾向が確認される。

次に、駆動電圧が駆動速度の周波数依存性に与える影響を評価した（実験 2）。NRUSM-1 の予圧力を 35N 一定とし、駆動電圧をそれぞれ 120, 150, 180V<sub>pp</sub> とした時の駆動速度の周波数依

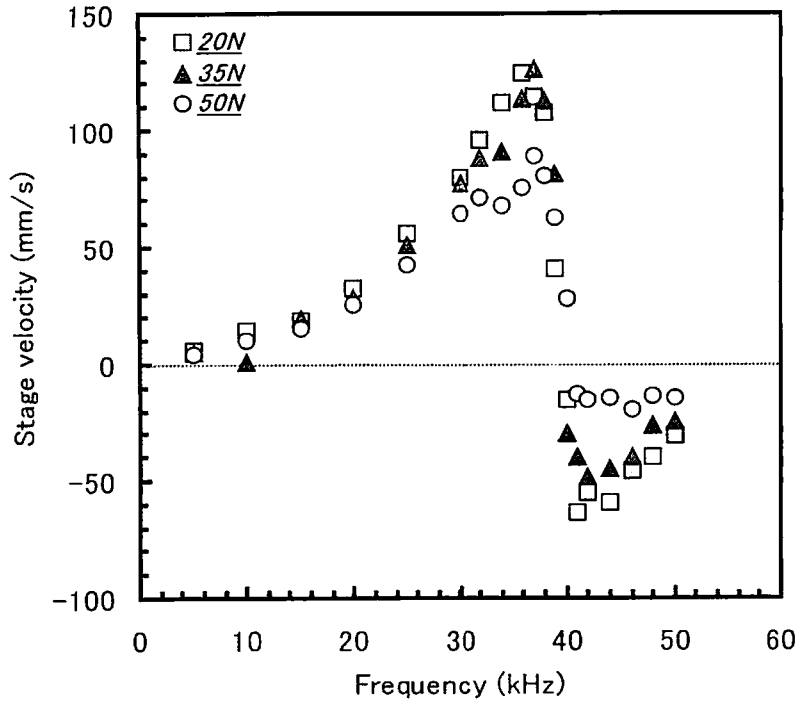


図 3.17 NRUSM-1 の駆動速度－駆動周波数依存性 ( $V=180V_{pp}$ ,  $P$ =可変)

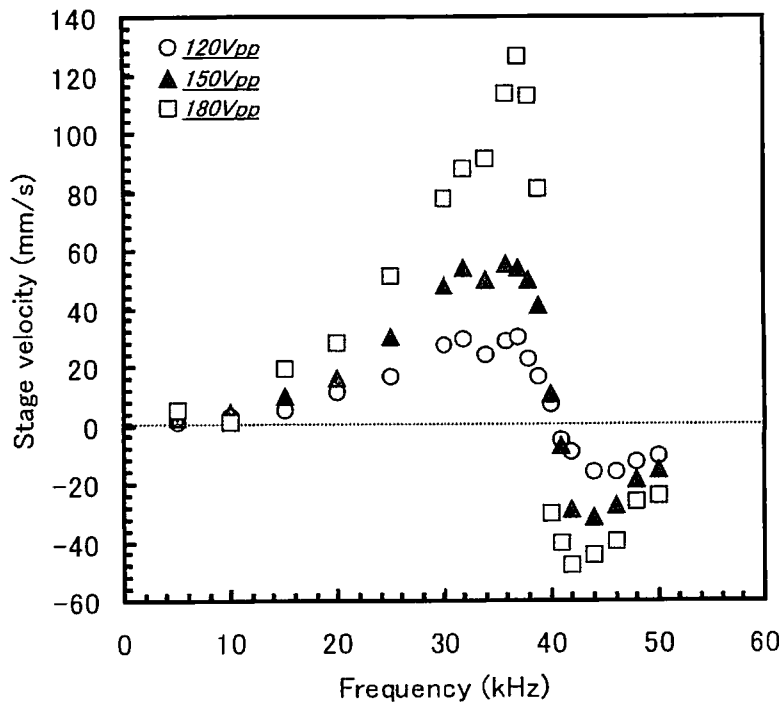


図 3.18 NRUSM-1 の駆動速度－駆動周波数依存性 ( $V$ =可変,  $P=35N$ )

存性を図 3.18 に示す。3.4.2 節（：駆動速度の駆動電圧依存性）の結果と同様に、電圧を小さくすることにより各駆動周波数で速度の違いが確認できるが、完全に電圧に比例した結果ではないことがわかる。特に 30kHz から 39kHz にかけては、180V<sub>pp</sub> では速度ピークがあるのに対し、150V<sub>pp</sub>、120V<sub>pp</sub> ではそれぞれほぼ一定の駆動速度である。やはり、伸縮方向の発生変位が駆動速度に影響していることが推測される。

実験 1 と実験 2 より、予圧力と駆動電圧に依存せず NRUSM-1 は 37kHz 近傍で速度ピークをむかえ、40kHz 近傍で駆動方向が反転する周波数特性を持ち、駆動速度の理論式には従わないことが明らかとなった。

これらの結果を踏まえ、予圧力と駆動電圧を固定値として NRUSM-1～5 の各アクチュエータの周波数特性評価を行った（実験 3）。駆動電圧 180V<sub>pp</sub>、予圧力 35N における NRUSM-1～4 の駆動速度の周波数依存性を図 3.19 に示す。NRUSM-5 は静電容量の関係上、ステージコントローラの電力供給不足があるため、高電圧下での駆動評価ができない。そこで、周波数依存性の全体傾向に駆動電圧が依存しないことから（図 3.18）、120V<sub>pp</sub> で駆動を行い、NRUSM-1 を 120V<sub>pp</sub> で駆動した時の結果との特性比較を行った。120V<sub>pp</sub>-35N の駆動条件における NRUSM-1 と NRUSM-5 の駆動速度の周波数依存性を図 3.20 に示す。ここで、各アクチュエータの以下の比較検討はすべて NRUSM-1 を基準に議論する。

第 2 章のマイクロ波焼結で作製した圧電素子を用いたアクチュエータが NRUSM-2 である。NRUSM-2 の速度ピークが若干低周波数側（34kHz）にシフトしていることが確認できるが、駆動速度が反転する周波数は 41kHz であり、NRUSM-1 と同じ周波数で起こっている。速度がピークとなる周波数帯（34kHz～39kHz）を除いては、全体として同様の周波数特性が得られており、マイクロ波焼結した PZT 圧電素子は、従来焼結技術と比較して同等の駆動性能を有することが確認できた。なお、速度ピークの低周波数側へのシフトの原因については 3.6 節（：非共振型超音波モータの変位解析）で考察を行う。

低誘電損失材料を用いて作製したアクチュエータが NRUSM-3 である。正方向と負方向の速度ピークに違いが見られるが、40kHz で駆動方向反転が起こっており、やはり NRUSM-1 と同様の周波数特性を有していると考えられる。これより高周波数化に伴う諸現象は、圧電材料に起因するものではないことがわかった。

続いて積層型圧電アクチュエータの剪断変位方向の長さを変えて断面積を半分の大きさ（3mm×6mm → 3mm×3mm）にしたのが NRUSM-4 であるが、NRUSM-1～3 と異なる周波数特性を示していることがわかる。速度ピークは 21kHz、駆動方向反転が 28kHz で起きており、大幅に低周波数側に特異点がシフトしている。また、16kHz～21kHz における駆動速度は NRUSM-1～3 と比較して高いことが確認できる。

最後に圧電素子の厚みを半分（0.6mm → 0.3mm）にし、積層型圧電アクチュエータの高さを低く（5.25mm → 2.85mm）したものが NRUSM-5 である。圧電素子の厚みを薄くしたことが静電容量増加の原因であるが、駆動回路が高負荷対応でないことから、56kHz での最大出力電圧である 120V<sub>pp</sub> で周波数依存性を評価した。図 3.20 に示すように駆動速度の低下、駆動方向反転現象は起きていないことがわかる。50kHz 以上で駆動速度が飽和している傾向がみられるが、これは駆動回路の供給電流が飽和したことによるものであり、アクチュエータの特性ではない。

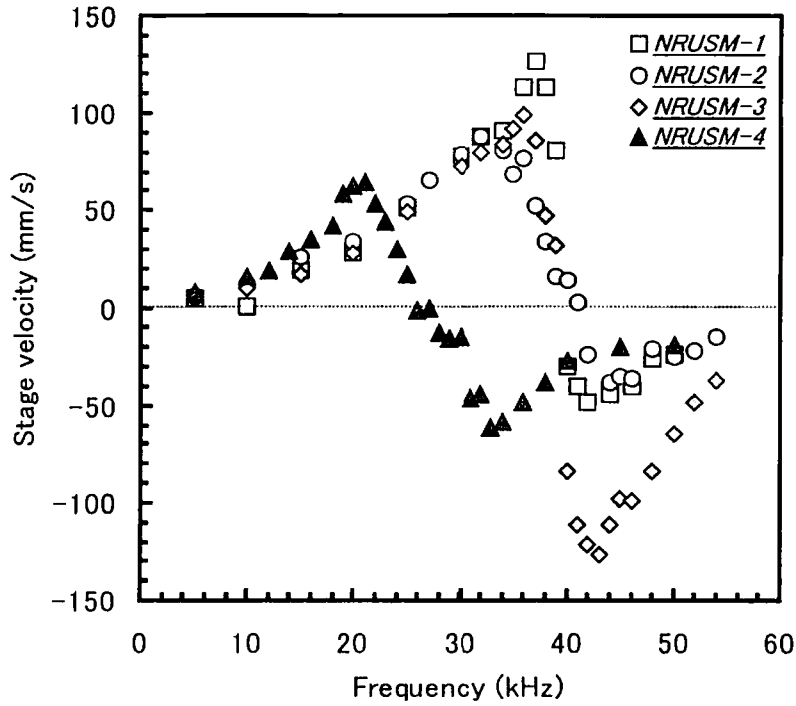


図 3.19 NRUSM-1,-2,-3,-4 の駆動速度－駆動周波数依存性比較 ( $V=180V_{pp}$ ,  $P=35N$ )

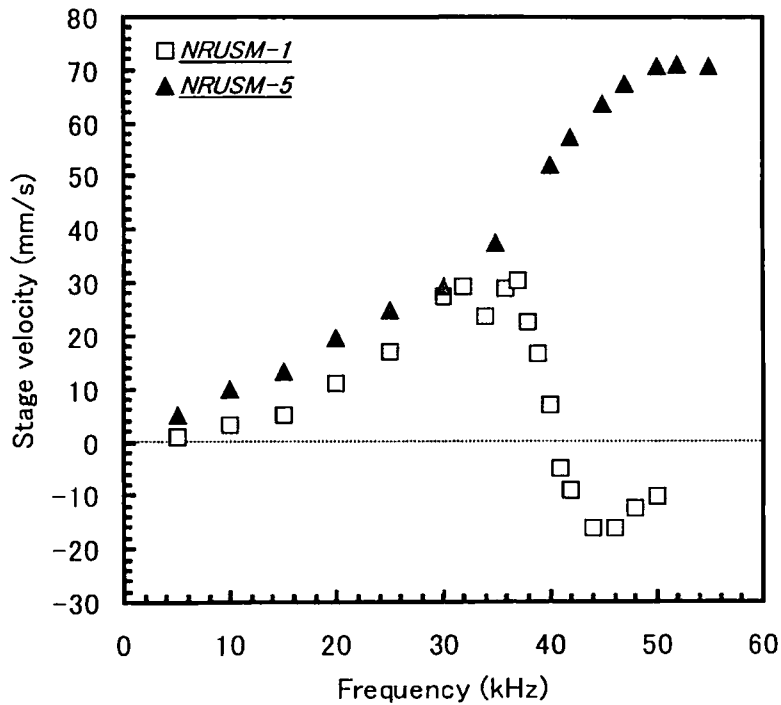


図 3.20 NRUSM-1,-5 の駆動速度－駆動周波数依存性比較 ( $V=120V_{pp}$ ,  $P=35N$ )

表 3.7 駆動推力測定の実験条件

	実験 1	実験 2	実験 3
	動摩擦力測定	周波数/予圧力依存性	アクチュエータ依存性
評価 アクチュエータ	NRUSM-5	NRUSM-3 NRUSM-5	NRUSM-1, -3, -4, -5
駆動電圧	0V <sub>pp</sub> (電源 OFF)	180V <sub>pp</sub> : NRUSM-3 120V <sub>pp</sub> : NRUSM-5	180V <sub>pp</sub> : NRUSM-1, -3, -4 120V <sub>pp</sub> : NRUSM-5
駆動周波数	電源 OFF	5~55kHz	5~55kHz
予圧力	5~70N	20, 35, 50N	35N
実験セットアップ	図 3.5	図 3.5	図 3.5

30kHz 以下では NRUSM-1 と比較して速度が高いことが確認できるが、これは圧電素子の厚みを半分にしたことにより素子の電界強度が高くなるため、第 2 章で述べた発生変位の非線形現象や、積層型圧電アクチュエータの発生力が大きくなっていることが影響していると考えられる。

アクチュエータの駆動周波数特性の総合比較により下記のことが明らかとなった。

1. 周波数特性はアクチュエータ形状が同じ場合、圧電材料に依存しない。
2. 剪断変位方向の長さを短くしてアクチュエータ断面積を小さくすることにより、速度ピークと駆動方向反転の 2 つの特異点は、低周波数側にシフトする。
3. アクチュエータの高さを低くすることにより、駆動速度減少と駆動方向反転は高周波数側にシフトする。

### 3.5. ステージ駆動推力と出力

#### 3.5.1. 駆動推力

ステージ駆動において駆動速度と共に重要となるのが駆動推力である。駆動速度が高くても、推力が小さければ必然的にアプリケーションは小さな負荷のものに限定される。そこでアクチュエータの推力について検討を行った。ステージ駆動推力を評価するために実施した諸実験を表 3.7 に示す。なお動摩擦力ならびに駆動推力はフォースゲージを用いて計測した。

摩擦駆動方式では、アクチュエータの発生力がいかに大きくても、ステージの最大推力は静止摩擦力によって制約を受ける。NRUSM の駆動周波数が数 10kHz であることから、実際には動摩擦力でステージが駆動されていることが推測され、動摩擦力が推力を律束すると考えられる。

駆動推力を測定するにあたり、まず予圧力と動摩擦力の関係について調べた（実験 1）。NRUSM-5 をステージに固定し、電源を OFF にした状態での動摩擦力をフォースゲージで測定した。ガイドプレートの表面状態が影響していることが懸念されるため、エタノールを用いて表面をクリーニングし複数回の測定を実施した。図 3.21 はその結果を示したものであるが、予圧力の

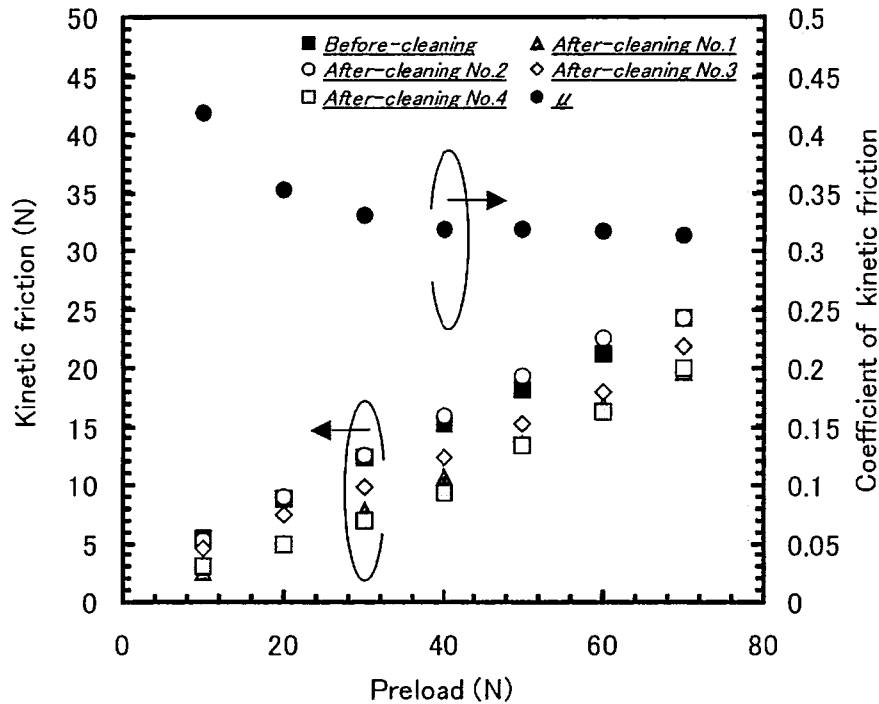


図 3.21 ステージ/アクチュエータの動摩擦力-予圧力依存性（電源 OFF 時）

増加と共に動摩擦力は増加し、摩擦力の関係式 ( $F=\mu N$ ,  $\mu$ : 摩擦係数,  $N$ : 抗力) に従った結果が得られている。しかしながら、クリーニングの有無に関係せず、同じ予圧力において動摩擦力が変動していることが確認できる。摩擦力が変動する原因としては、接触面の表面粗さ、湿り具合がガイドプレート面内の場所により異なることや、予圧機構のステージ駆動方向の剛性問題などが考えられる。この状態で正確な摩擦係数を求めるのは困難であるが、平均すると予圧力 20N 以上での動摩擦係数は約 0.32 であることがわかる。

ステージ駆動速度は駆動周波数によって大きく異なるため、推力も同じ傾向を示すことが予測される。高周波数化に伴い速度反転が起こる NRUSM-3 と、その現象が見られなかった NRUSM-5 を用いて、予圧力 20, 35, 50N での駆動推力の駆動周波数依存性を評価した(実験 2)。図 3.22 は駆動電圧 120V<sub>pp</sub> で NRUSM-5 を駆動したとき駆動推力の駆動周波数依存性を示したものである。同じ駆動周波数で比較した場合、予圧力が大きいほど駆動推力が大きいことが確認できる。このように予圧力を高めることによって静止/動摩擦力が増大するため駆動推力が大きくなるが、一方で駆動速度は 3.4.1 節（：駆動速度の予圧力依存性）から明らかのように予圧力増加と共に減少するため、用途に応じた最適予圧力の設定が必要である。いずれの予圧力においても駆動周波数依存性は顕著に現れていないが、40kHz で最大推力が得られており約 13N(@50N) であることがわかる。一方、図 3.23 は駆動電圧 180V<sub>pp</sub> で NRUSM-3 を駆動したときの駆動推力の駆動周波数依存性を示したものであるが、NRUSM-5 とは異なる特性を示している。いずれの予圧力においても 39kHz で最小となる駆動推力の減衰特性が現れている。予圧力 20N では動摩擦力が駆動推力よりも小さいことが予想され不明瞭であるが、35N と 50N の結果より最大推力を発生する駆動周波数は 25kHz であることがわかる。

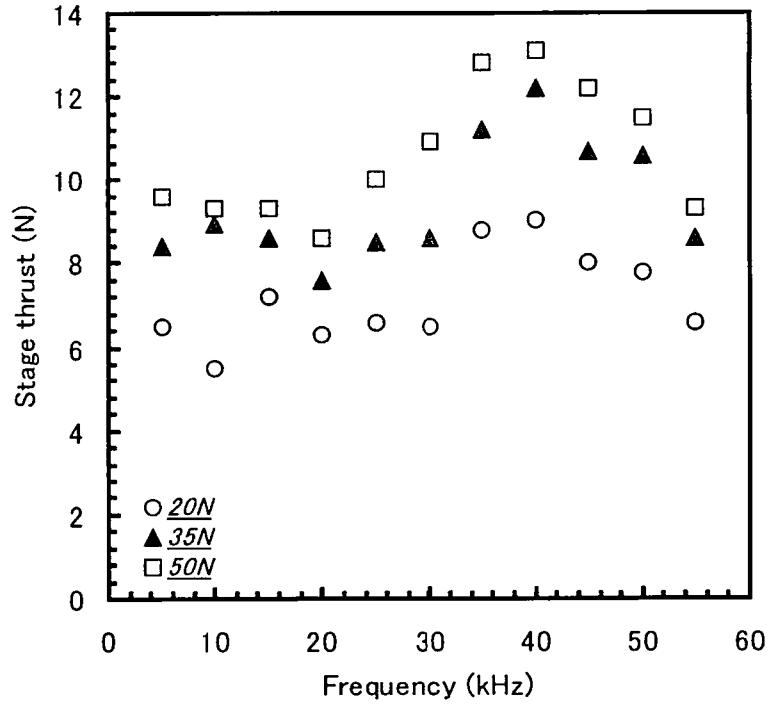


図 3.22 NRUSM-5 の駆動推力-駆動周波数依存性 ( $V=120V_{pp}$ )

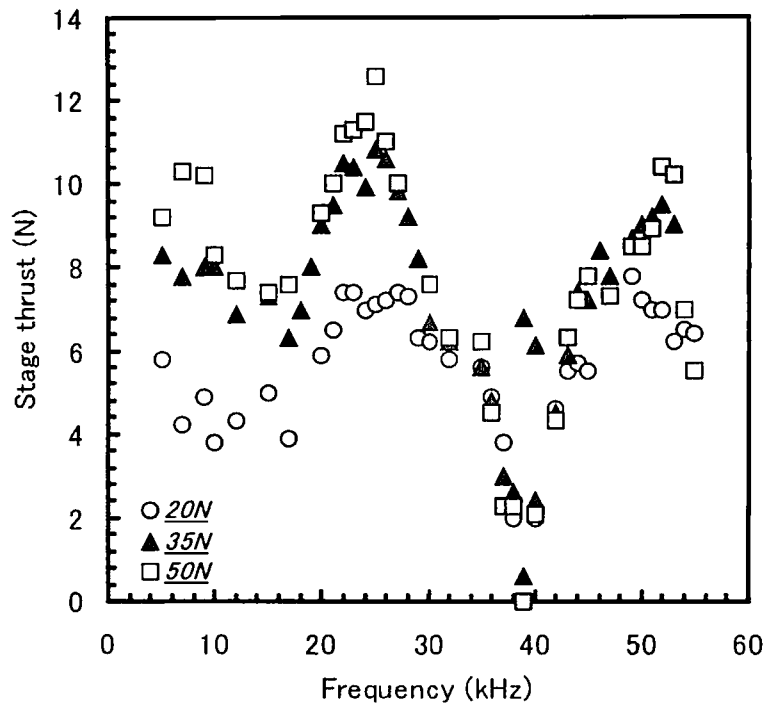


図 3.23 NRUSM-3 の駆動推力-駆動周波数依存性 ( $V=180V_{pp}$ )



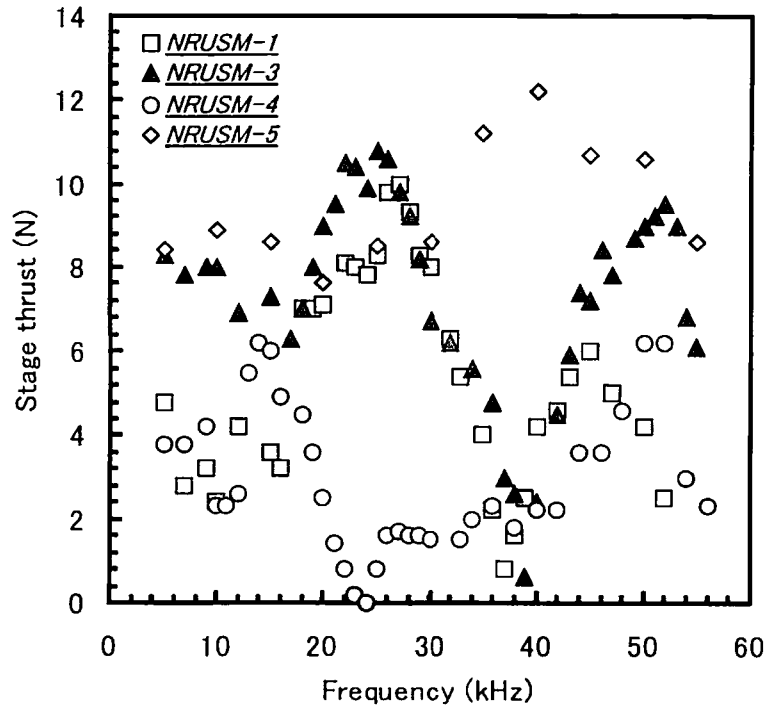


図 3.24 駆動推力－駆動周波数依存性比較 (P=35N)

続いて駆動推力の積層型圧電アクチュエータ形状依存性を評価した(実験3). 駆動電圧  $180V_{pp}$ , 予圧力  $35N$  での駆動推力を測定した. 但し, NRUSM-5 については静電容量の関係上  $120V_{pp}(35N)$  での駆動推力を測定した. 図 3.24 は各アクチュエータの駆動推力の駆動周波数依存性をまとめたものであるが, 3.4.3 節 (: 駆動速度の駆動周波数依存性) のようにアクチュエータ形状が推力特性に大きく影響していることが確認できる. 積層型圧電アクチュエータの断面積が半分 ( $3mm \times 3mm$ ) の NRUSM-4 は, 推力が最低となる特異点が低周波数側にシフトしている. NRUSM-5 は駆動電圧が約 30% 低いのに関係なく推力が大きい, これは(3.1)式でも表されるように厚みの薄い圧電素子を利用したことにより, 印加電界が高くなり発生力が増大したためであることが推測される.

### 3.5.2. 出力とエネルギー効率

これまでの駆動特性評価により, 各駆動周波数における駆動速度と駆動推力が積層型圧電アクチュエータの形状に依存して大きく異なることが明らかとなった. これら速度と推力は性質の異なる特性であるため, 総合的な評価が困難である. そこで NRUSM 駆動ステージの出力 (= 仕事率) と, 駆動電力を求め効率を計算した. 出力と効率の評価実験条件を表 3.8 に示す.

図 3.25 は NRUSM-3 を駆動電圧  $180V_{pp}$ , 予圧力  $35N$  で駆動した時の積層型圧電アクチュエータ 1 つあたりの剪断素子に流れる電流  $I_{act}$  と, NRUSM-3 の全剪断素子 (計: 8 つ) の消費電力  $P_{in}$  を示したものである. なお, 消費電力  $P_{in}$  は電圧と電流の位相差を  $\varphi$  として, 次式により計算した.

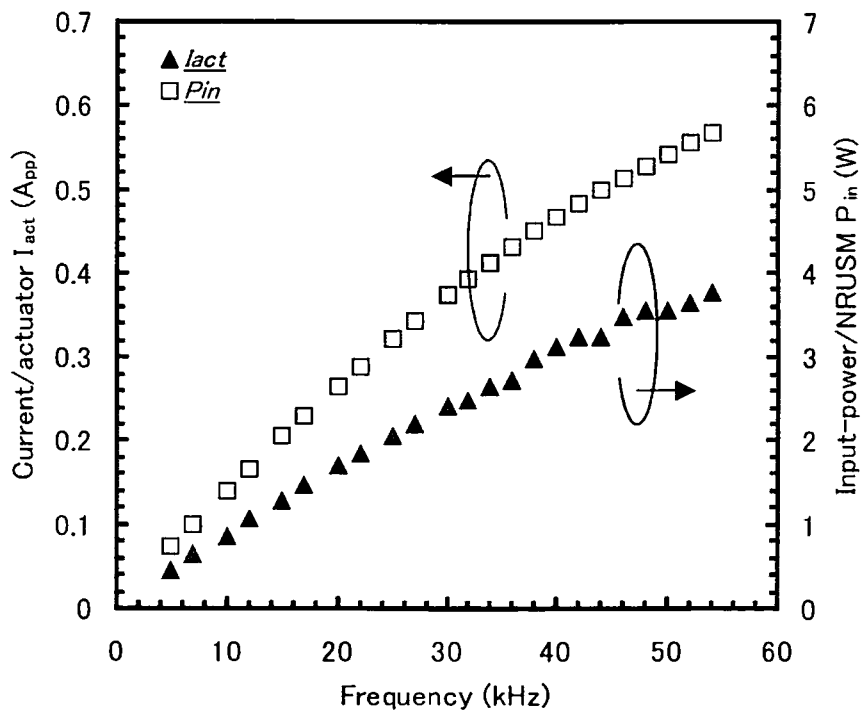


図 3.25 NRUSM・3 の駆動電流・電力－駆動周波数依存性(V=180V<sub>pp</sub>)

表 3.8 出力と効率評価の実験条件

評価アクチュエータ	NRUSM・3
駆動電圧	180V <sub>pp</sub>
駆動周波数	5～54kHz
予圧力	35N
実験セットアップ	図 3.5

$$P_{in} = 8VI_{act} \cos \varphi \quad (3.2)$$

一方、駆動されたステージの出力  $P_{out}$  は駆動推力を  $F$ 、駆動速度を  $v$  として次式で計算した。

$$P_{out} = P_{stage} = Fv \quad (3.3)$$

また、エネルギー効率  $\eta$  は次式で求めた。

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (3.4)$$

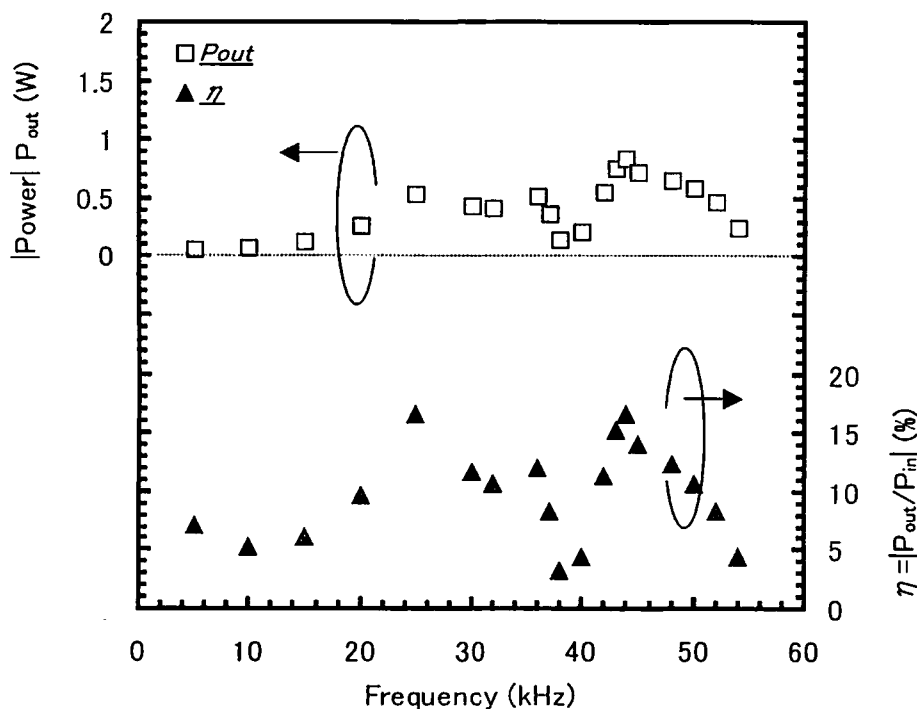


図 3.26 出力・効率－駆動周波数依存性 (NRUSM-3,  $V=180V_{pp}$ ,  $P=35N$ )

NRUSM-3 駆動ステージの出力  $P_{out}$  と効率  $\eta$  を図 3.26 に示す。ステージの最大出力は駆動方向が反転した後の 44kHz で 0.8W 程度であり、最高速度が得られる 39kHz 近傍で最低値となるのがわかる。また、最大効率は駆動周波数 25kHz と 44kHz において 16% 程度であることがわかった。エネルギー損失の原因として、圧電素子の誘電損率による熱損失、予圧機構の剛性不足やスリップ等の発生変位の伝達効率低下による損失などが考えられるが、後者の占める割合が大きいと推測している。

### 3.6. 非共振型超音波モータの変位解析

NRUSM の高速化を図る上で、スレッシュホールド値があるものの駆動電圧は駆動速度とほぼ線形の関係を示すが、駆動周波数においては積層型圧電アクチュエータの形状に依存して、特定の駆動周波数から速度の減少、更には駆動方向が反転する現象が現れており、速度向上の妨げとなっていることが 3.4 節（：ステージ駆動速度）で明らかとなった。本節では NRUSM の発生変位を解析することで、予圧力増加に伴う駆動速度の減少、続いて高周波数化に伴って生じた問題の原因を明らかにし、積層型圧電アクチュエータの設計指針について検討を行う。

#### 3.6.1. 解析パラメータの定義

NRUSM の発生変位を実測することにより、変位の振幅量、駆動電圧に対する応答遅れの情

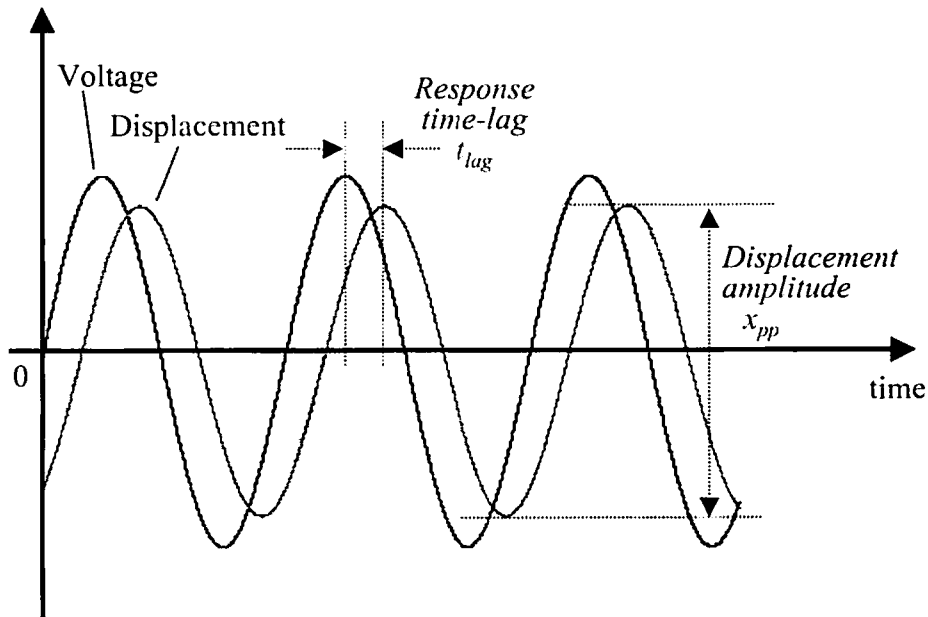


図 3.27 変位解析における変位量と応答遅れの定義

表 3.9 アクチュエータ有負荷変位—予圧力依存性の実験条件

評価アクチュエータ	NRUSM-1
駆動電圧	180V <sub>pp</sub>
駆動周波数	10, 20, 30kHz
予圧力	10~70N
実験セットアップ	図 3.5

報を得ることができる。ここで、本実験における変位振幅量  $x_{pp}$  と応答遅れ  $t_{lag}$  の定義を図 3.27 に示す。また、応答遅れを位相角  $\theta^\circ$  で表す場合には、駆動周波数を  $f$  として、下記の関係式を用いる。

$$\theta = 360t_{lag}f \quad (3.5)$$

### 3.6.2. 有負荷変位特性

#### 3.6.2.1. ステージ駆動時の変位の予圧力依存性

予圧力を増加することによってステージ駆動速度が減少する原因を解明するために、ステージ駆動時（有負荷）の変位解析を行った。アクチュエータ有負荷変位の予圧力依存性の実験条件を表 3.9 に示す。

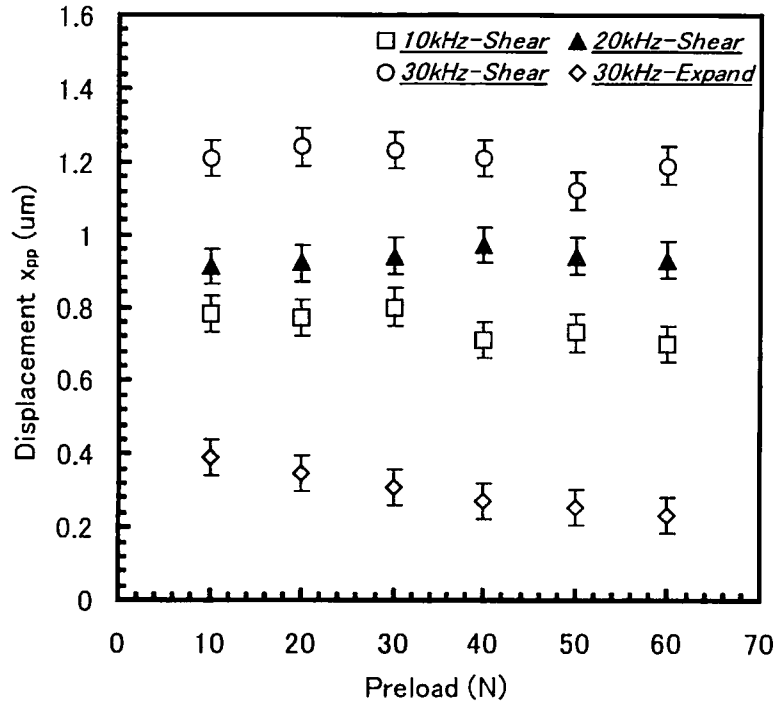


図 3.28 NRUSM-1 の変位-予圧力依存性 ( $V=180V_{pp}$ )

駆動電圧を  $180V_{pp}$ 、駆動周波数をそれぞれ  $10kHz$ 、 $20kHz$ 、 $30kHz$  の一定とし、予圧力を  $10\sim 70N$  に変化させた時の NRUSM の剪断変位と伸縮変位をレーザドップラー振動計 (LDV) で計測した。図 3.28 は NRUSM-1 の発生変位の予圧力依存性を示したものである。いずれの駆動周波数においても剪断変位 (Shear) は予圧力に依存せず、ほぼ一定の値を示していることがわかる。駆動周波数により変位量が異なっているが、これは駆動速度によって決まる慣性エネルギーを持って移動しているステージから受けた影響が原因であると推測される。一方、伸縮変位 (Expand) は予圧力の増加とともに減少していることが確認できる。図 3.29 は駆動周波数  $30kHz$  における剪断変位と伸縮変位の時間応答を示したものであるが、両者の変位応答が異なることがわかる。剪断変位は正弦波状の一定の変位を示しているのに対し、伸縮変位は正側が潰れた正弦波状の変位であり、予圧力の大きさに依存して小さくなっていることがわかる。伸縮変位はステージに積層型圧電アクチュエータを押し付けたり引き離したりする役目を果たす変形であるため、ステージ側面のガイドプレートに NRUSM が確実に接触していることを示した変位波形である。(3.1)式に諸条件を代入して積層型圧電アクチュエータの伸縮方向発生力を計算すると  $96N/actuator@180V_{pp}$  となる。一方で、NRUSM を構成する各積層型圧電アクチュエータに与えられた予圧力を計算すると、2相駆動であることを考慮して  $17.5N/actuator@70N$  である。これらの計算結果より、与えた予圧力は発生力よりも十分小さいため、圧電素子自体の発生変位が低下したとは考え難い。そのため変位減少の原因として次のことが考えられる。現在の作製工程では NRUSM が積層構造をとる関係上、圧電素子と電極を接合させるために中間層としてエポキシ系接着剤が使われているため、条件によっては圧電素子で発生した変位がこの中間層で吸収され

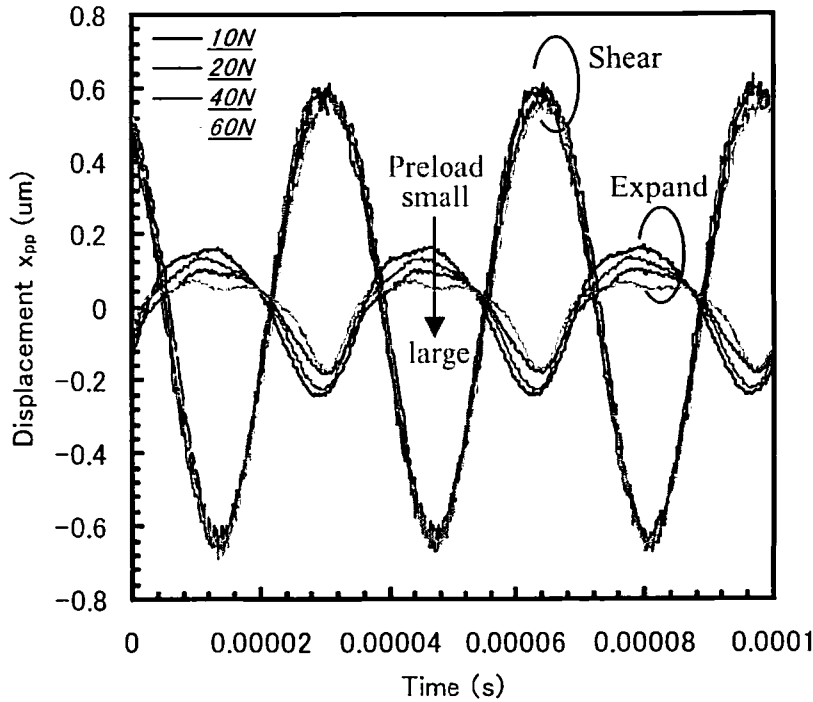


図 3.29 NRUSM-1 の剪断・伸縮変位の時間応答 ( $V=180V_{pp}$ ,  $f=30kHz$ )

る可能性が考えられる。本実験での変位計測手法は NRUSM 先端の伸縮変位を測定しており、積層型圧電アクチュエータを構成する個々の圧電素子の変位計測ではない。従って中間層で変位吸収が起こっている場合には、あたかも圧電素子の発生変位量が低下しているように計測される。実際には積層型圧電アクチュエータでの先端変位量が重要であるため、LDV で計測された変位量が実際の駆動状態を示すことになる。このように積層型圧電アクチュエータとしての変位量低下をもたらす中間層での変位吸収は駆動に悪影響を及ぼすため、可能な限り小さくなるような接合部分の改善が必要である。

以上の発生変位の予圧力依存性より、3.4.1 節（：駆動速度の予圧力依存性）で議論した予圧力増加によるステージ駆動速度の減少は、剪断変位が予圧力の影響を受けたのではなく、積層型圧電アクチュエータ先端での伸縮変位量が減少したことによるものであると説明できる。なお、伸縮変位量と駆動速度の関係については 3.4.2 節（：駆動速度の駆動電圧依存性）で議論した。

### 3.6.2.2. ステージ駆動時の変位の駆動周波数依存性

積層型圧電アクチュエータ形状に依存したステージの駆動速度減少と駆動方向反転の原因を解明するために、発生変位／先端軌道の周波数依存性の解析を行った。表 3.10 に NRUSM 有負荷変位の駆動周波数依存性の実験条件を示す。

NRUSM-1 の駆動電圧を  $180V_{pp}$  一定とし、予圧力をそれぞれ 20, 35, 50N でステージを駆動した時の、剪断変位量の駆動周波数依存性を図 3.30 に示す。34kHz までは  $0.7\sim 1\mu m$  の変位量を発生しているが、35kHz から極端に変位量が大きくなり、40kHz 近傍で最大変位量、42kHz

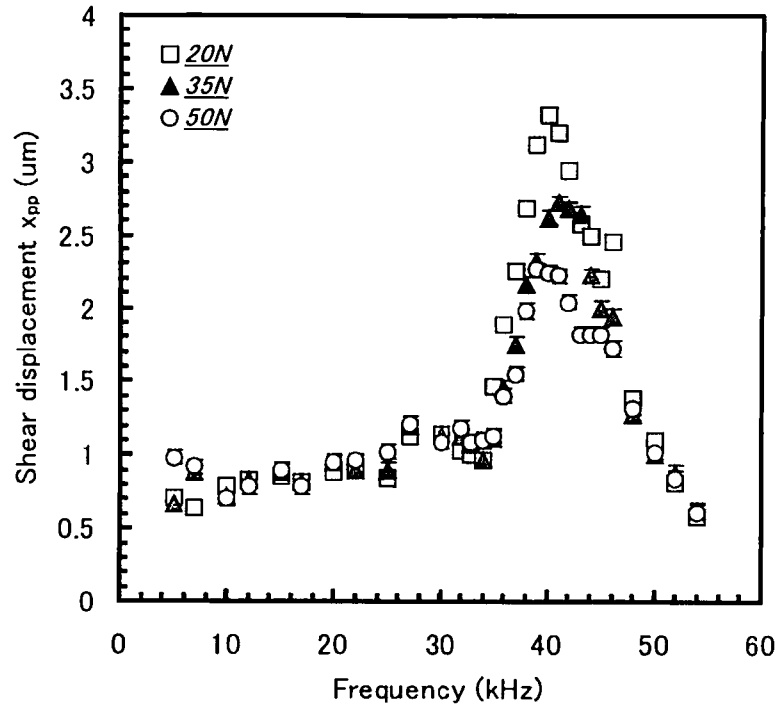


図 3.30 NRUSM-1 の剪断変位－駆動周波数依存性( $V=180V_{pp}$ ,  $P$ =可変)

表 3.10 アクチュエータ有負荷変位－駆動周波数依存性の実験条件

	実験 1 予圧力依存性	実験 2 アクチュエータ形状依存性
評価アクチュエータ	NRUSM-1	NRUSM-1, -3, -5
駆動電圧	180V <sub>pp</sub>	180V <sub>pp</sub> : NRUSM-1, -3 120V <sub>pp</sub> : NRUSM-5
駆動周波数	5~54kHz	5~54kHz : NRUSM-1, -3 5~60kHz : NRUSM-5
予圧力	20, 35, 50N	35N
実験セットアップ	図 3.5	図 3.5

以降は変位量が減少していることがわかる。変位量が  $1\mu\text{m}$  を上回る  $35\text{kHz}\sim 48\text{kHz}$  の範囲内では最大変位量は予圧力に依存しており ( $3.3\mu\text{m}@20\text{N}$ ,  $2.7\mu\text{m}@35\text{N}$ ,  $2.4\mu\text{m}@50\text{N}$ )、表 3.3 の試算変位量を大幅に実変位量が上回っている。図 3.31 は駆動周波数に対する剪断変位応答遅れを示したものであるが、 $37\text{kHz}$  以下の駆動周波数では  $4\mu\text{s}$  以下の応答遅れであるのに対し、それ以降は応答遅れが増加し、 $42\text{kHz}$  以上の駆動周波数では  $7\mu\text{s}$  以上の応答遅れを生じていることがわかる。この応答遅れを位相角で表したものが図 3.32 であるが、 $41\text{kHz}$  以上の駆動周波数では  $90^\circ$  以上の位相遅れを生じていることがわかる。また、変位量については一部の周波数帯で予圧力依

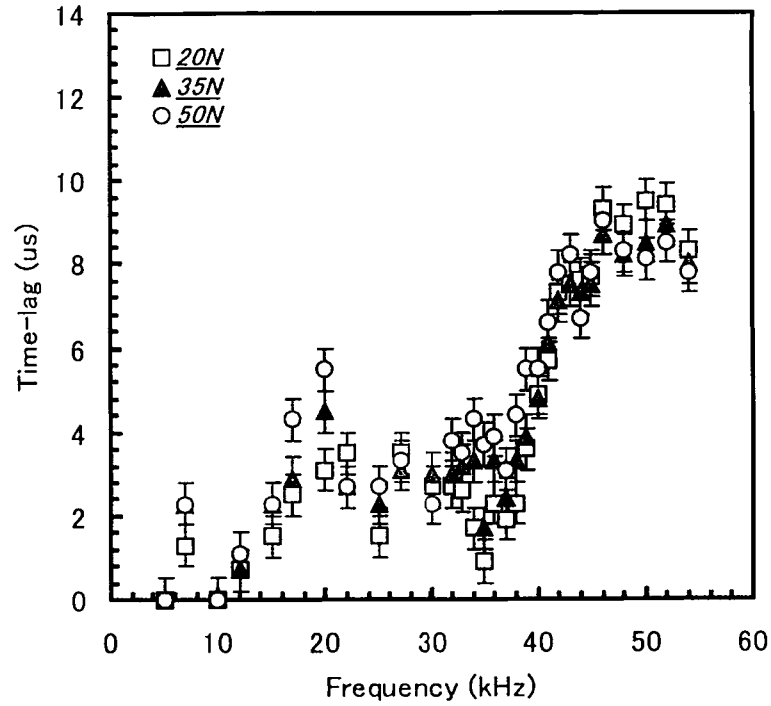


図 3.31 NRUSM-1 の剪断変位応答遅れ—駆動周波数依存性( $V=180V_{pp}$ ,  $P$ =可変)

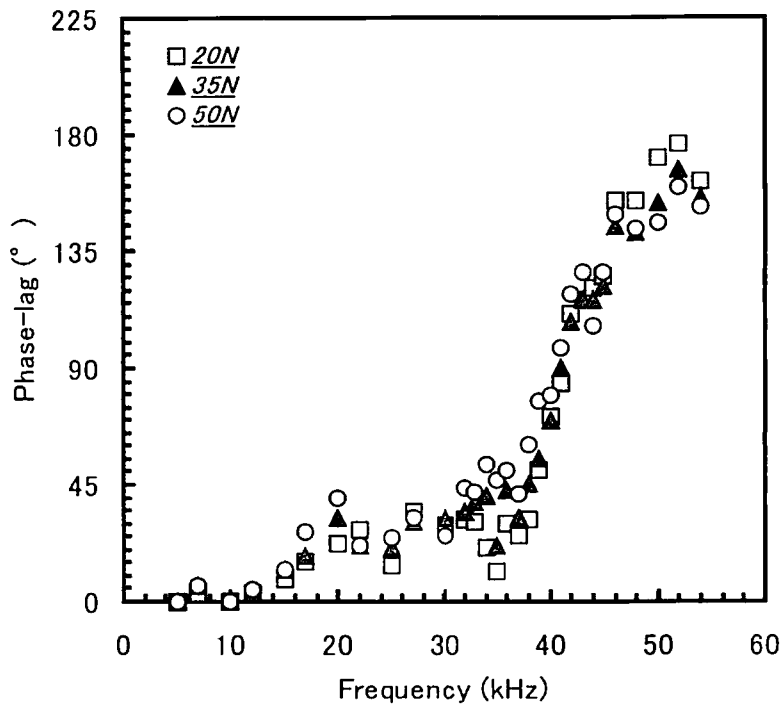


図 3.32 NRUSM-1 の剪断変位位相遅れ—駆動周波数依存性( $V=180V_{pp}$ ,  $P$ =可変)



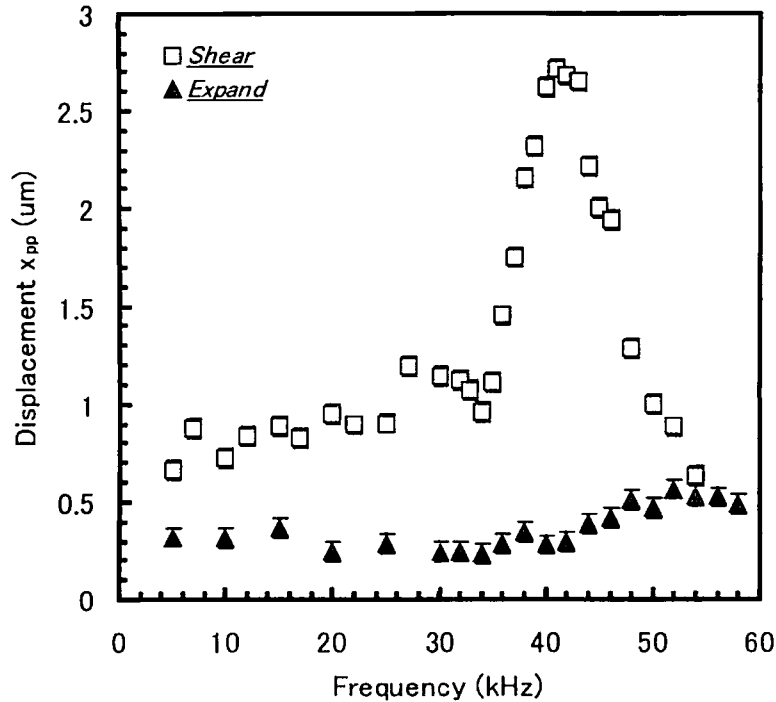


図 3.33 NRUSM-1 の剪断・伸縮変位－駆動周波数依存性( $V=180V_{pp}$ ,  $P=35N$ )

存性が確認されたが、時間応答には予圧力依存性はほとんどないことがわかる。

図 3.33～図 3.35 は NRUSM-1 を駆動電圧  $180V_{pp}$ 、予圧力  $35N$  で駆動した時の剪断・伸縮変位量／応答遅れ／位相遅れの駆動周波数依存性を示したものである。剪断変位量については前述した通りであるが、伸縮変位量は  $48kHz$  以上で多少増加しているものの、表 3.3 の試算値と同等でありほぼ一定の変位を示している。伸縮変位の応答遅れは平均  $2\mu s$  であり、急激な位相変化は起きていない。このように剪断変位方向にのみ  $40kHz$  近傍で振幅が増大し、位相が  $90^\circ$  以上となっていることから、圧電アクチュエータが剪断変位方向の共振現象を起こしていることが推測される。

ここで注目すべき現象は、3.4.3 節（：駆動速度の駆動周波数依存性）で示したように、アクチュエータ振幅が最大になる  $40kHz$  ではステージ駆動速度が極端に減少し、駆動性能が低下する点である。一般に共振現象を利用した超音波モータは、駆動速度・推力共に高い性能を有する<sup>[2,3]</sup>。この原因は、本機構が剪断素子と伸縮素子を  $90^\circ$  位相の電圧で駆動させ、楕円軌道を発生させることを駆動原理としているからである。駆動周波数  $41kHz$  における剪断素子の駆動電圧に対する位相遅れは約  $90^\circ$  であるが、これは伸縮変位に対しては、(剪断・伸縮素子の電圧位相)+(剪断素子位相遅れ)-(伸縮素子の位相遅れ) $\approx 90^\circ+90^\circ-25^\circ\approx 155^\circ$  となる。つまり駆動原理に則った楕円軌道が形成されないことを示している。更に位相遅れが増加して剪断変位と伸縮変位の位相差  $\phi$  が  $180^\circ$  以上になれば、楕円軌道の回転方向が反転することになる。図 3.36 に楕円軌道と位相  $\phi$  の関係を示す。これより、3.4.3 節（：駆動速度の駆動周波数依存性）で議論した NRUSM-1 の駆動周波数を高くすることによって生じる駆動速度の減少ならびに駆動方向の反転は、剪断素子の応答遅れによる楕円軌道変化が原因であることがいえる。

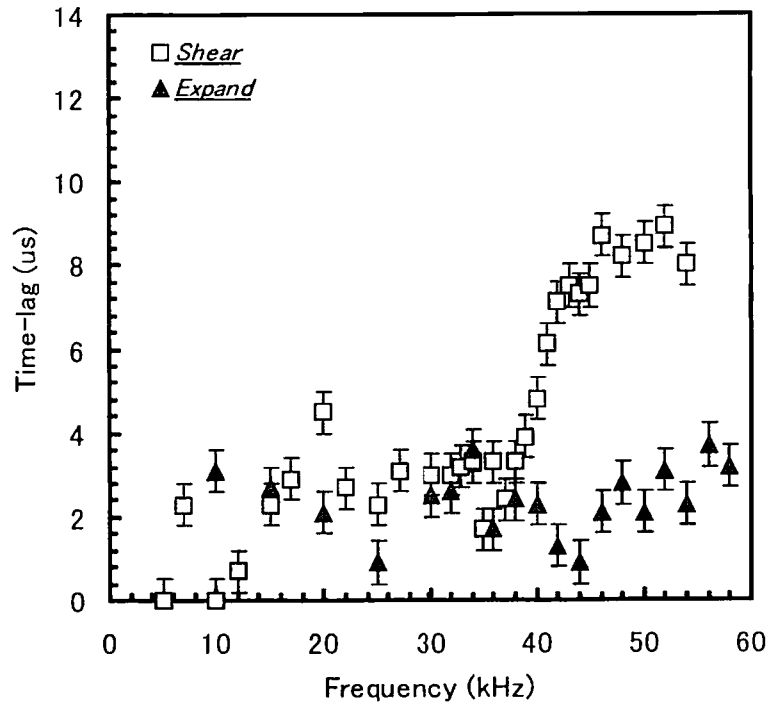


図 3.34 NRUSM-1 の剪断・伸縮変位応答遅れ—駆動周波数依存性( $V=180V_{pp}$ ,  $P=35N$ )

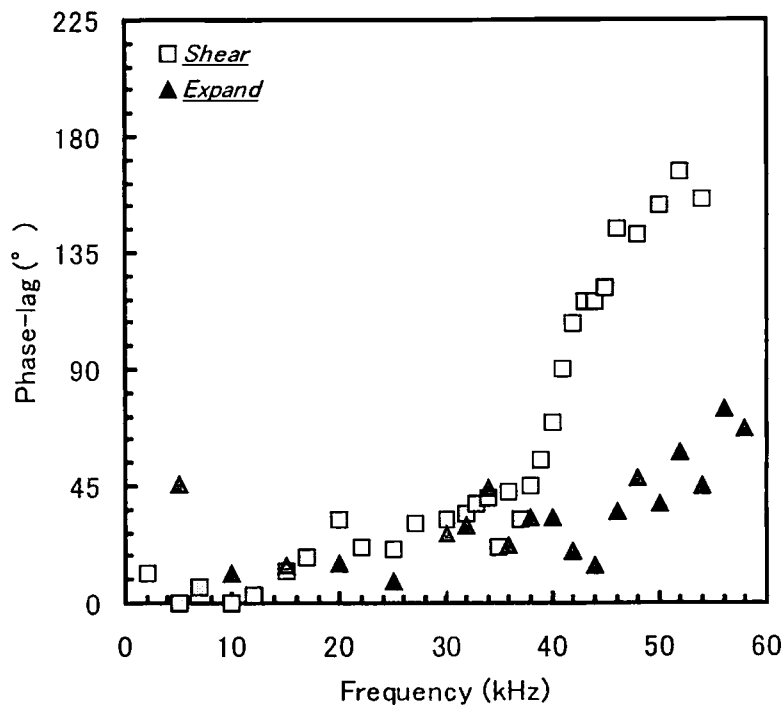
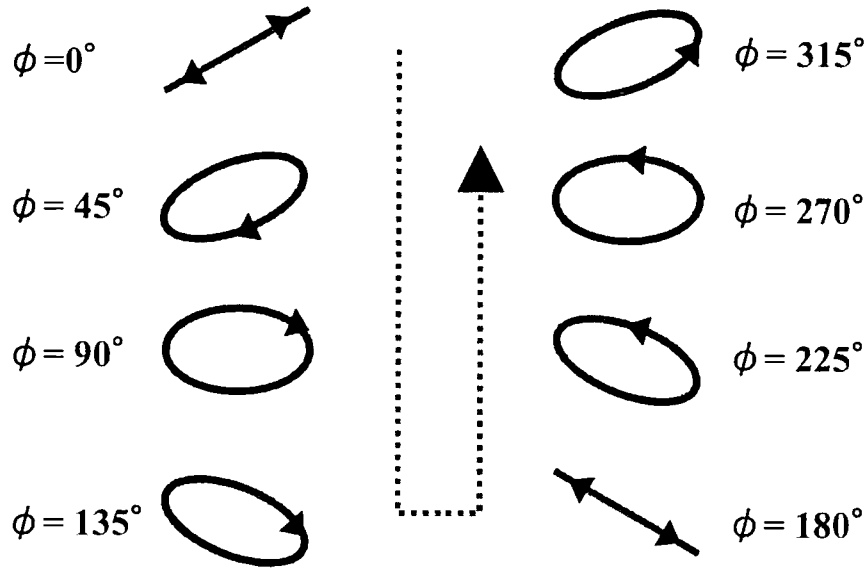


図 3.35 NRUSM-1 の剪断・伸縮変位位相遅れ—駆動周波数依存性( $V=180V_{pp}$ ,  $P=35N$ )



$\phi$ : Phase-contrast between Shear/Expand displacement

図 3.36 NRUSM の位相変化による楕円軌道変化

図 3.37, 図 3.38 は NRUSM-1 を駆動電圧  $180V_{pp}$ , 予圧力  $35N$  でステージ駆動させた時の, 全 8 つの積層型圧電アクチュエータ中, 4 つの剪断変位解析を行った結果である. いずれの積層型圧電アクチュエータも  $41kHz$  をピークとし位相遅れが  $90^\circ$  となる変位の周波数特性をもっていることが確認できるが, 完全に同じ特性を有していないことがわかる.  $42kHz$  以上の周波数帯では, 変位量・位相遅れ共に積層型圧電アクチュエータ間でのバラツキが顕著に現れている. 各積層型圧電アクチュエータの変位量・時間応答の周波数依存性が異なれば, これは剪断変位と伸縮変位の位相差  $\phi$  も異なることになり, 発生する楕円軌道にも違いが生じることになる. 剪断変位と伸縮変位が位相差  $\phi=180^\circ$  となるような  $40kHz$  近傍の周波数では, 楕円軌道の回転方向が順方向のものと逆方向のものが混在した状態となるため, ステージ駆動方向の反転周波数は若干変化することが予想される. また, NRUSM に 1 つでも楕円軌道の変位量/回転方向が異なるような積層型圧電アクチュエータが含まれていれば, 残り 7 つの積層型圧電アクチュエータの発生変位を阻害することになるため, 速度ピークとなる駆動周波数が低周波数側にシフトすること等が考えられる. これが図 3.19 (3.4.3 節: 駆動速度の駆動周波数依存性) に示された NRUSM-1 と NRUSM-2 の速度ピークの駆動周波数が異なる原因であると考察される. このように積層型圧電アクチュエータのバラツキはお互いを干渉し合い, 不安定な駆動状態を引き起こすため, 各積層型圧電アクチュエータの特性が揃っていることが重要となる.

続いて積層型圧電アクチュエータの形状依存性を評価するために NRUSM-1,-3,-5 の変位解析を行った (実験 2). NRUSM-1,-3 は駆動電圧を  $180V_{pp}$ , NRUSM-5 は  $120V_{pp}$ , 予圧力を  $35N$  でステージを駆動した. 図 3.39, 図 3.40 は NRUSM-1,-3,-5 の剪断変位の変位量・位相遅れの周波数依存性を比較したものである. NRUSM-1,-3 を比較すると,  $40kHz$  付近での変位ピーク値に

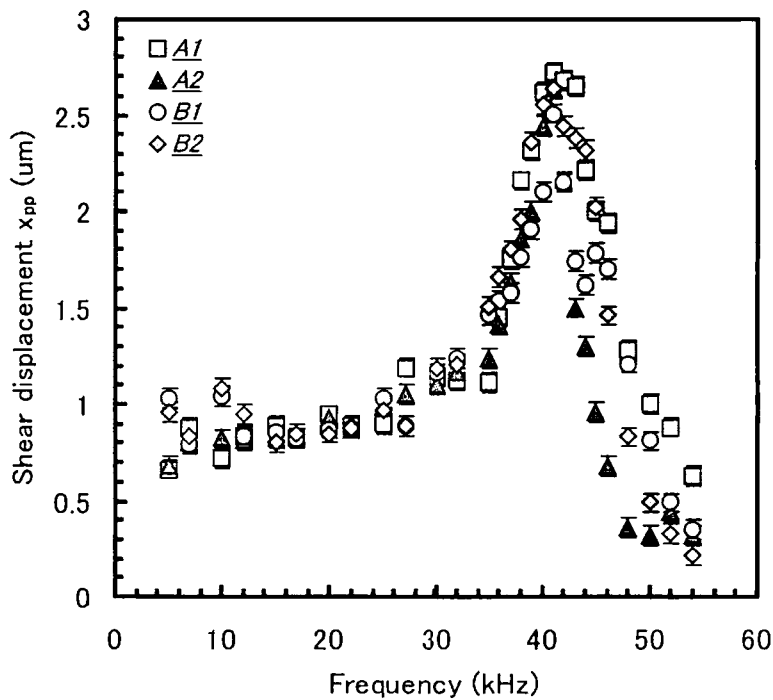


図 3.37 NRUSM-1 の各アクチュエータの剪断変位—駆動周波数依存性(180V<sub>pp</sub>, P=35N)

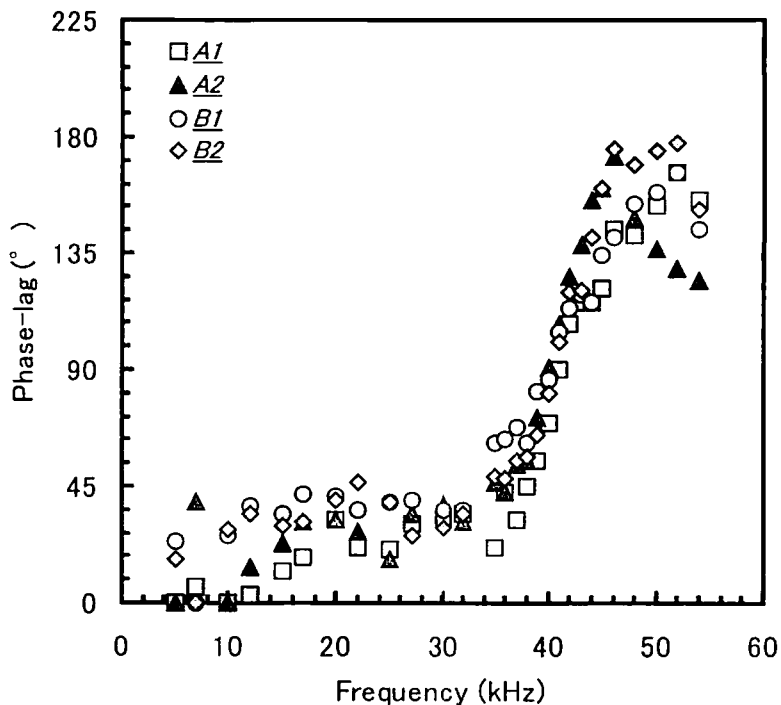


図 3.38 NRUSM-1 の各アクチュエータの剪断変位位相遅れ—駆動周波数依存性  
(180V<sub>pp</sub>, P=35N)

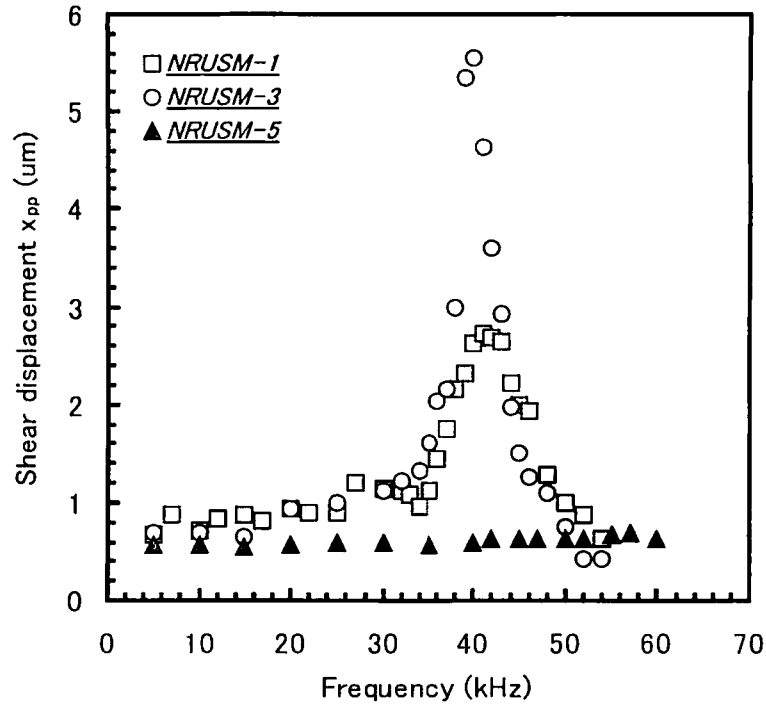


図 3.39 NRUSM-1,-3,-5 の剪断変位－駆動周波数依存性  
(NRUSM-1,-3 :  $V=180V_{pp}$   $P=35N$ , NRUSM-5 :  $V=120V_{pp}$   $P=35N$ )

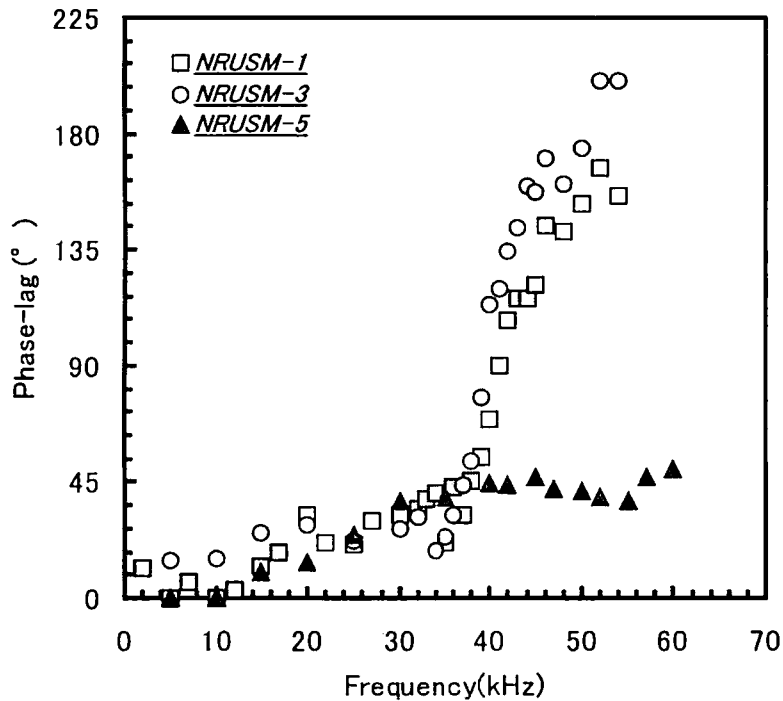


図 3.40 NRUSM-1,-3,-5 の剪断変位位相遅れ－駆動周波数依存性  
(NRUSM-1,-3 :  $V=180V_{pp}$   $P=35N$ , NRUSM-5 :  $V=120V_{pp}$   $P=35N$ )

表 3.11 アクチュエータ無負荷変位－駆動周波数依存性の実験条件

評価アクチュエータ	NRUSM-1
駆動電圧	100V <sub>pp</sub>
駆動周波数	5～60kHz
実験セットアップ	図 3.41

違いが見られるが、全体的には同じ特性を示している。一方、NRUSM-5は周波数60kHzまでの範囲以内では一定変位を保っており、また、位相遅れも単調に増加していることから応答遅れに変化が無いことがわかる。これらの変位解析結果より、積層型圧電アクチュエータの形状が変位・位相遅れの周波数依存性に大きく影響しており、それが駆動周波数の高周波数化に伴うステージ駆動速度減少と駆動方向反転の原因であることが明らかとなった。

### 3.6.3. 無負荷変位特性

有負荷変位特性においてアクチュエータの変位・応答遅れについて検討を行ったが、これはステージを駆動している状態での変位計測であるため、駆動されるステージから様々な影響を受ける可能性があり、積層型圧電アクチュエータ自体の特性と結論づけることができない。そこで無負荷状態で評価することにより、積層型圧電アクチュエータ自体の特性評価を行い、駆動周波数の高周波数化に伴う諸現象の原因特定を行った。

#### 3.6.3.1. 無負荷変位の駆動周波数依存性

積層型圧電アクチュエータ自体の周波数特性を解明するために、無負荷時の変位解析を行った。表 3.11 に無負荷変位の駆動周波数依存性の実験条件を示す。

測定は図 3.41 に示す実験セットアップにて行った。図 3.42 は NRUSM-1 を 100V<sub>pp</sub> で駆動したときの、無負荷剪断変位の駆動周波数依存性を示したものである。40kHz で剪断変位はピーク値の 3.4μm を発生しており、位相遅れが 90° を大きく上回っていることが確認できる。一方で、図 3.43 は無負荷伸縮変位の周波数依存性を示したものであるが、伸縮変位量および位相遅れとも急激な変化は見られない。36kHz～41kHz の変位減少は、変位量が極端に大きくなる剪断変位の影響を受けている可能性が考えられ、ほぼ一定と見なせる。無負荷における変位の周波数依存性が有負荷での評価結果と同じ傾向を示していることから、ステージ駆動において発生する諸現象は、積層型圧電アクチュエータ固有のものであることが示されるとともに、共振現象を起こしている可能性が高いことが推測される。

図 3.44 は駆動周波数 20kHz と 40kHz における変位の時間応答を示したものであるが、20kHz では終始同じ変位を発生しているのに対し、40kHz では駆動開始から数周期にかけて徐々に振動変位が大きくなっていることがわかる。また図 3.45 はこのときのアクチュエータの先端から根元にかけての各部の剪断方向変位を測定したものである。20kHz においては剪断変位の発生する剪断素子部分にのみ剪断方向変位が発生しているが、40kHz では本来剪断変位の発生しない

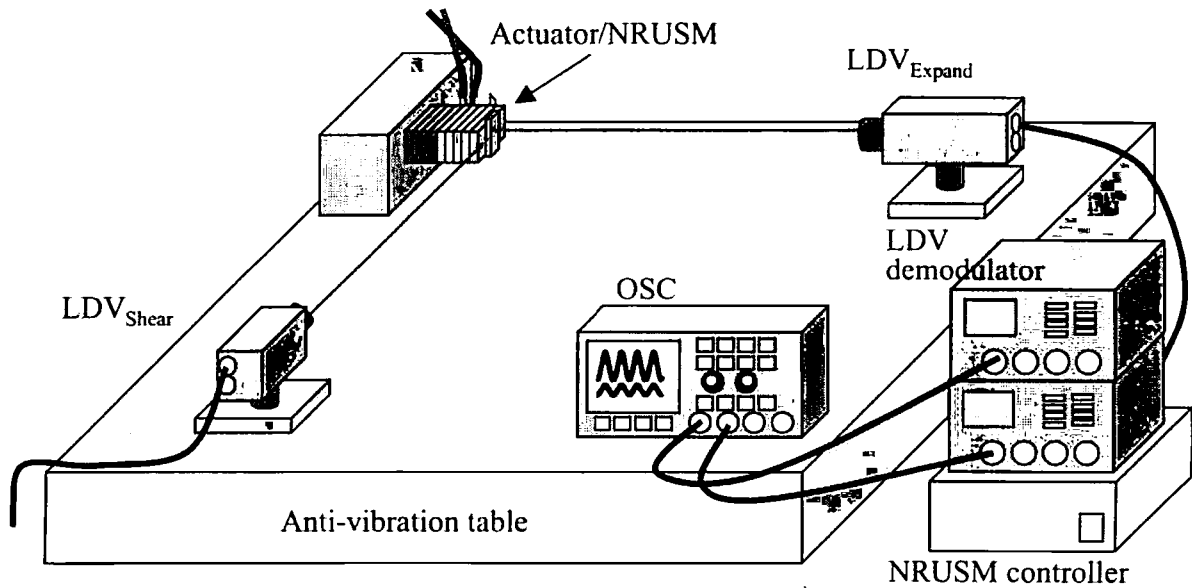


図 3.41 無負荷変位測定の実験セットアップ

伸縮部分も剪断方向に変位していることが確認できる。この 40kHz での変位応答は撓み振動のモードであると推測され、このことから NRUSM-1 の積層型圧電アクチュエータは共振現象を起こしているといえる。

以上の変位解析により、NRUSM の発生変位が特定周波数近傍で増加し、更には応答遅れが発生するのは、積層型圧電アクチュエータの共振現象が原因であることが明らかとなった。

### 3.6.3.2. ステップ応答と固有振動数

ステージ駆動速度の周波数依存性で発生した駆動速度減少や駆動方向反転は、積層型圧電アクチュエータの共振現象が原因であることがこれまでの変位解析により明らかとなった。そこで積層型圧電アクチュエータの共振周波数を異なる手法により計測を行い、これまでに得られた結果との比較検討を行った。実験は無負荷時の積層型圧電アクチュエータに 100V<sub>pp</sub> のステップ電圧を加えた時の変位を、図 3.41 に示した実験セットアップで LDV により測定した。本評価に用いたアクチュエータを表 3.3、ならびに表 3.12 に示す。

NRUSM-1 に 100V<sub>pp</sub> のステップ電圧を印加した時の、積層型圧電アクチュエータ先端の剪断方向変位の時間応答を図 3.46 に示す。ステップ電圧の印加により変位した後に、一定周期 (40.4kHz) で振動していることが確認できる。ステップ信号は高次の周波数成分により構成されるため、駆動された積層型圧電アクチュエータは固有振動数、すなわち共振周波数の振動が残留する。この手法は、一般的に構造物の固有振動数を測定する際に行うハンマリング試験に相当するものである。本手法を用いて計測した NRUSM の固有振動数を表 3.13 に示す。NRUSM-1、-2、-3、-10 は外形寸法がほぼ等しいものであるが、固有振動数は 37~43kHz と比較的近い値を示している。これより圧電材料・製造工程 (メーカー)・接着枚数の依存性は小さく、積層

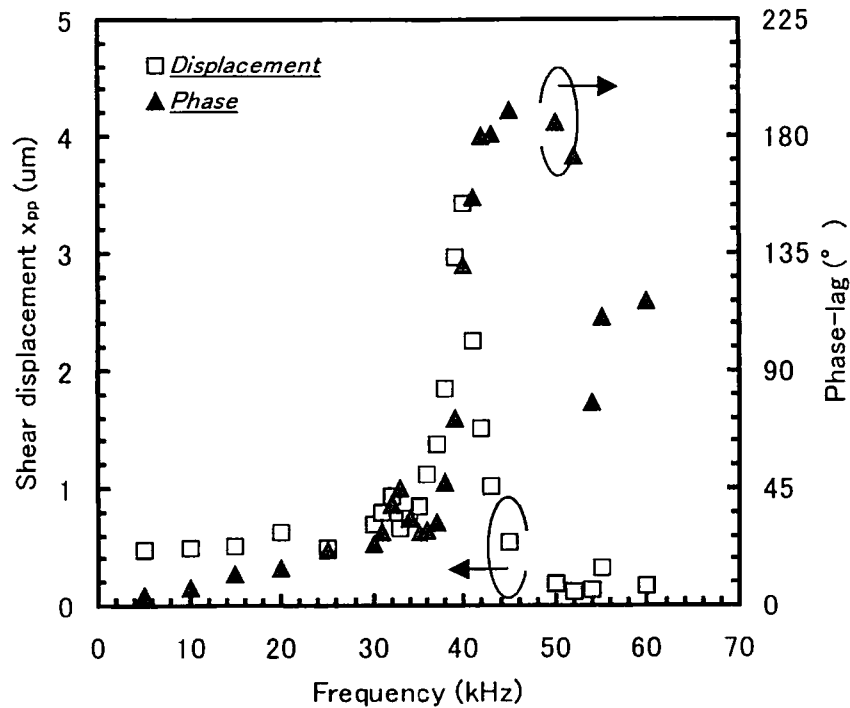


図 3.42 NRUSM-1 の無負荷剪断変位・位相遅れ—駆動周波数依存性( $V=100V_{pp}$ )

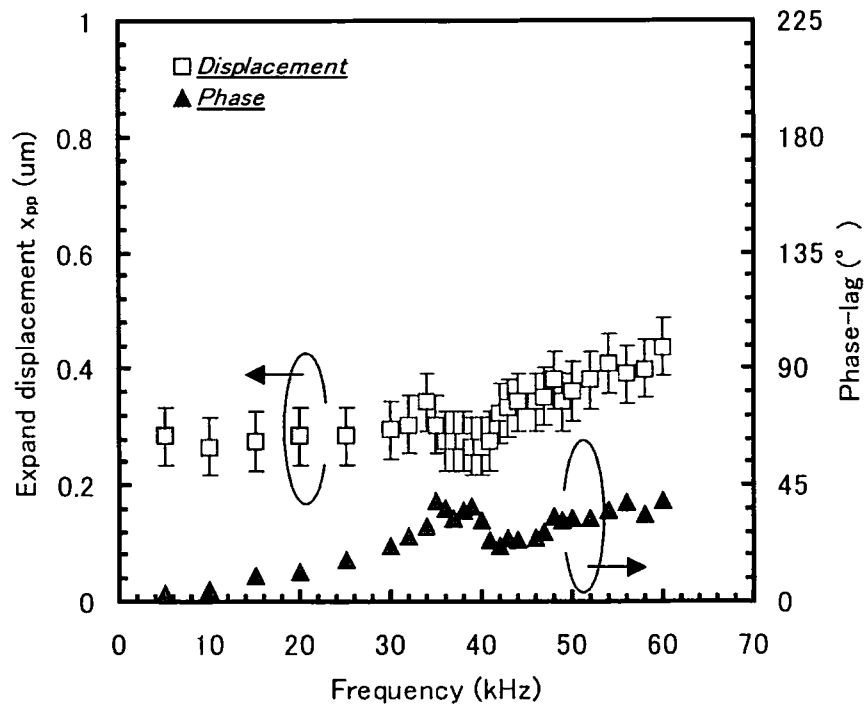


図 3.43 NRUSM-1 の無負荷伸縮変位・位相遅れ—駆動周波数依存性( $V=100V_{pp}$ )



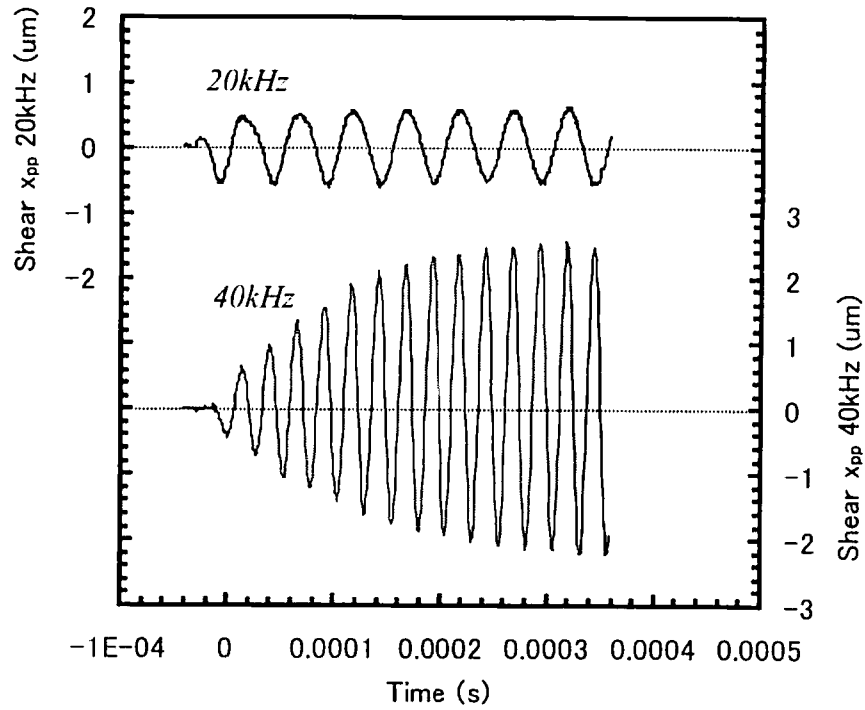


図 3.44 20kHz, 40kHz 駆動時の剪断変位-時間応答比較

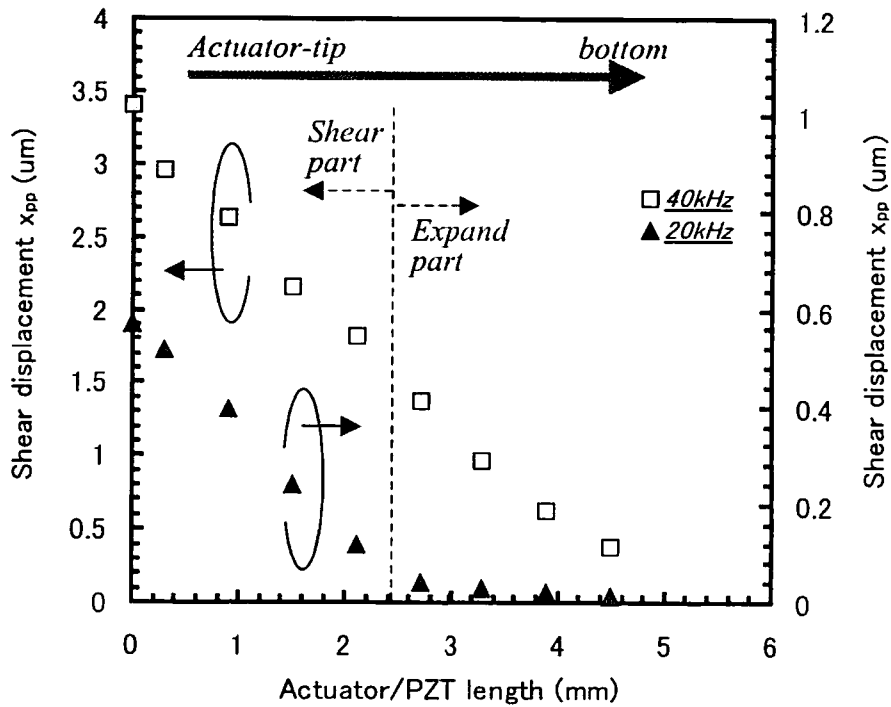


図 3.45 20kHz, 40kHz 駆動時のアクチュエータ各部の剪断方向変位比較  
(積層型圧電アクチュエータ先端を 0mm とする)

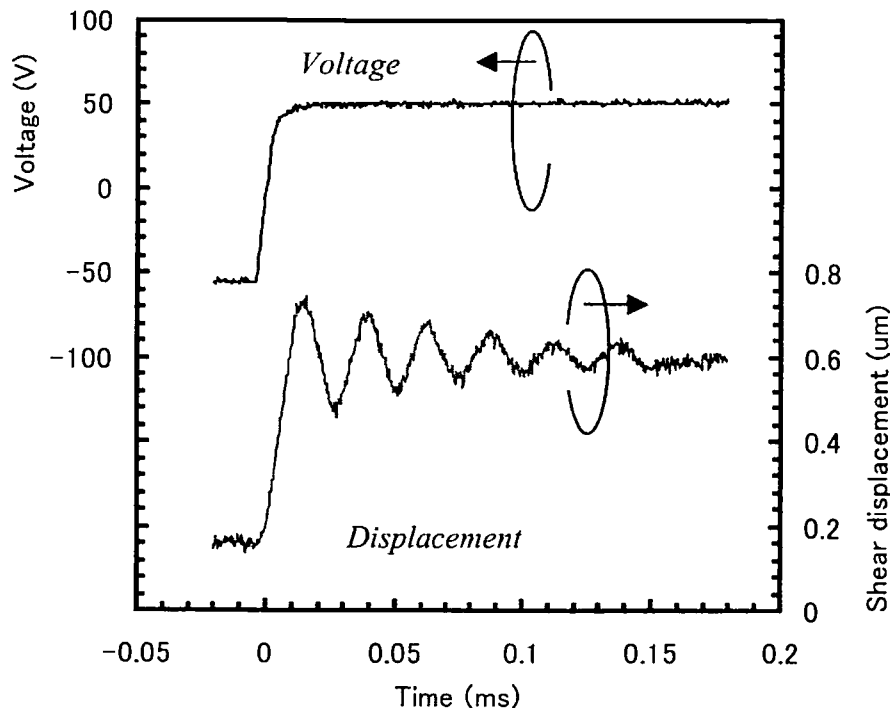


図 3.46 ステップ電圧駆動時の NRUSM-1 剪断方向変位—時間応答 (矩形波  $V=100V_{pp}$ )

表 3.12 ステップ応答評価アクチュエータ仕様

名称	PZT 材料	アクチュエータ形状				試算変位量 ( $200V_{pp}$ の時)	
		断面積 ( $mm^2$ )	素子厚 (mm)	積層枚数 (枚)	全長** (mm)	伸縮 ( $\mu m$ )	剪断 ( $\mu m$ )
NRUSM-6	D 材	3×6	0.6	12	7.85	0.79	1.21
NRUSM-7	D 材	3×6	0.6	16	10.45	1.06	1.62
NRUSM-8	D 材	3×3	0.3	8	2.85	0.53	0.81
NRUSM-9	D 材	3×3	0.6	12	7.85	0.79	1.21
NRUSM-10	C-82*	3×6	0.6	8	5.25	0.38	0.60

\* (株)富士セラミックス製アクチュエータ

\*\* アクチュエータ上下のシム板を除いた長さ = PZT 積層枚数 × 素子厚 + 電極枚数 × 板厚

型圧電アクチュエータ形状に大きく依存性していることがわかる。図 3.47 は表 3.13 をアクチュエータの長さをパラメータとして整理したものであるが、アクチュエータ長が短く、かつ、断面積が大きいほうが固有振動数は高くなることがわかる。

ここで、NRUSM-1 のステップ応答結果 (固有振動数) を、ステージ駆動方向が反転する周波数 (3.4.3 節)、ステージ駆動時に変位量が最大となる周波数 (3.6.2.2 節)、無負荷時に変位量

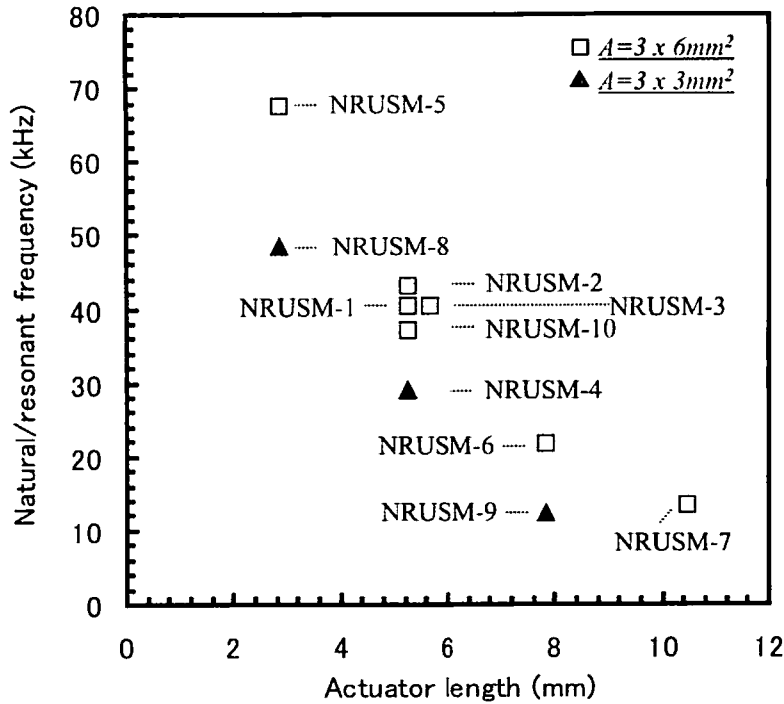


図 3.47 NRUSM の固有振動数－形状依存性

表 3.13 アクチュエータ仕様と固有振動数

名称	PZT 材料	アクチュエータ形状				固有振動数 (kHz)
		断面積 (mm <sup>2</sup> )	素子厚 (mm)	積層数 (枚)	全長 (mm)	
NRUSM-1	D 材	3×6	0.6	8	5.25	40.4
NRUSM-2	D 材	3×6	0.6	8	5.25	43
NRUSM-3	NA 材	3×6	0.3	16	5.65	40.3
NRUSM-4	D 材	3×3	0.6	8	5.25	29
NRUSM-5	D 材	3×6	0.3	8	2.85	67.5
NRUSM-6	D 材	3×6	0.6	12	7.85	21.7
NRUSM-7	D 材	3×6	0.6	16	10.45	13.5
NRUSM-8	D 材	3×3	0.3	8	2.85	48.5
NRUSM-9	D 材	3×3	0.6	12	7.85	12.5
NRUSM-10	C-82	3×6	0.6	8	5.25	37.3

が最大となる周波数 (3.6.3.1 節) と比較すると、すべて 40kHz 近辺で一致している。また、NRUSM-4 の駆動方向反転が低周波数側にシフトする原因、NRUSM-5 には駆動速度ピークならびに駆動方向反転現象が生じない理由は表 3.13 と図 3.47 から理解でき、駆動原理が破綻するの

は積層型圧電アクチュエータの共振現象が原因であることが結論づけられる。

以上より、NRUSM の形状設計としては、下記 2 通りの指針が考えられる。

1. 共振現象を利用せず完全な非共振原理でステージ駆動速度の高速化を図るには、駆動周波数領域拡大のためにアクチュエータ全長を短く、かつ、剪断変位方向に長くなるように断面積を大きくし、共振点を高周波数側にシフトさせる。
2. 共振現象を利用する場合には、目的にあった周波数で共振が得られるように素子形状を設計し、方向反転現象を防止するために共振周波数よりも低い周波数で駆動させる。

### 3.7. ステージ駆動速度と先端変位の相関

NRUSM の特性評価により、ステージの駆動特性は圧電アクチュエータの共振現象を含めた変位特性が大きく関係することが明らかとなった。本節では、変位伝達系のモデル化を行い LDV により得られる NRUSM の変位解析結果からステージの駆動速度を導出し、NRUSM 発生変位とステージの駆動速度の相関を明らかにする。

#### 3.7.1. 変位軌道モデル

NRUSM の剪断素子と伸縮素子が  $90^\circ$  位相差の正弦波電圧によってそれぞれ駆動される場合、積層型圧電アクチュエータ先端には楕円軌道が発生する。この楕円軌道を対象物に押し付けることで駆動力を与えるのが NRUSM の駆動原理であるが、ステージ駆動時の先端変位は図 3.48 に示された 2 つの軌道が考えられる。実際には駆動条件によりいずれの要素も混在した変位軌道であることが予測される。変位モデル (Displacement-model) は単位時間当たりの変位量から駆動速度を求めるモデルであるのに対し、単振動モデル (Vibration-model) はガイドプレートとの接触点でのアクチュエータ速度から駆動速度を求めるモデルであり一般的な単振動運動の速度に相当する。これらのモデルを用いると、駆動原理に従った剪断・伸縮変位が得られている場合のステージ駆動速度は次式で表される。

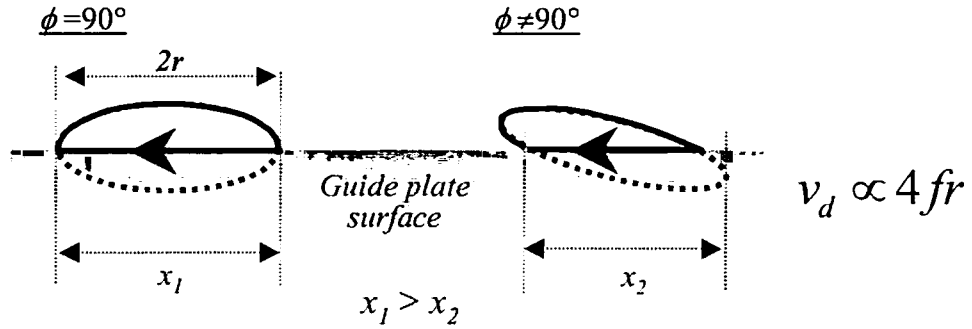
$$\text{変位モデル} \quad v_d = 2 \cdot 2r \cdot f = 4fr \quad (3.6)$$

$$\text{単振動モデル} \quad v_v = r\omega \quad (3.7)$$

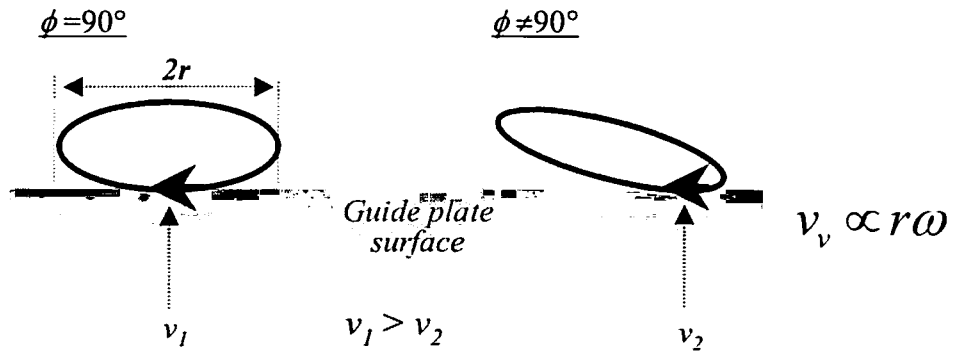
ここで、 $f$ : 駆動周波数、 $r$ : 剪断方向の楕円半径、 $\omega$ : 角振動数である。(3.6)式における係数 2 は 2 相駆動から得られているものである。(3.7)式については単振動運動の基本式であるため、説明は省略する。

これまでの変位解析により、ステージ駆動時には剪断・伸縮変位には理想位相差  $\phi=90^\circ$  が保たれておらず、駆動周波数により位相差が変化することが明らかとなっているため、軌道モデル

Displacement-model



Vibration-model



$\phi$ : Phase contrast between Shear and Expand displacement

図 3.48 NRUSM の発生変位軌道と位相変化の影響

には同図に示すようにように楕円軌道が傾く／回転する概念を追加する必要がある。楕円軌道が回転すると、変位モデルではアクチュエータの接触変位量が減少し、一方、単振動モデルでは接触速度が減少するため、結果的に駆動速度は低下する。ここで剪断変位と伸縮変位の位相差を $\phi$  ( $>0$ ) とすると各変位軌道モデルは次のように表される。

変位モデル

$0^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$  のとき

$$v_d = 2fr(1 + |\cos(\phi - 90)|) \quad (3.8)$$

$180^\circ < \phi < 360^\circ$  のとき

$$v_d = -2fr(1 + |\cos(\phi - 90)|) \quad (3.9)$$

単振動モデル

$$v_v = r\omega \cos(\phi - 90) \quad (3.10)$$

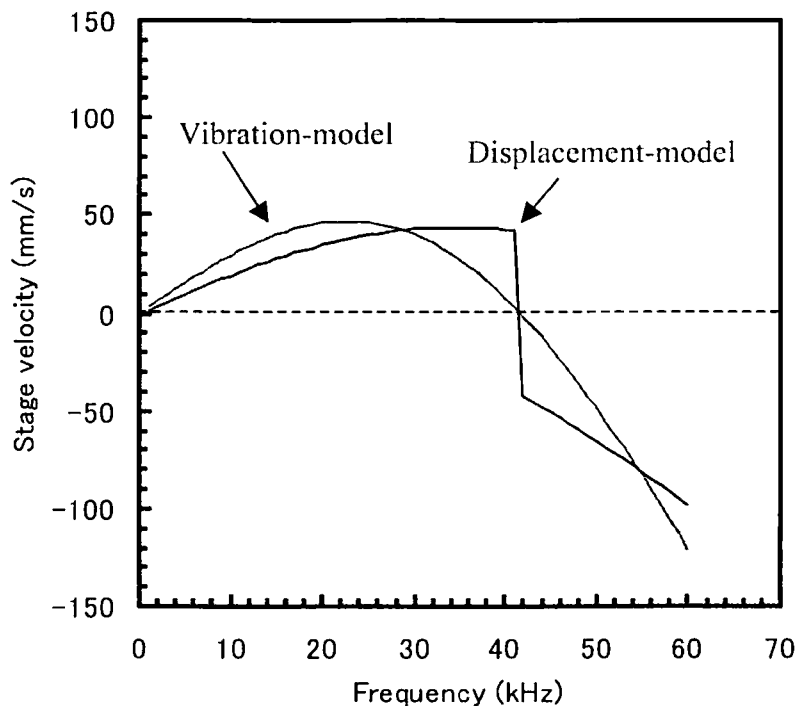


図 3.49 変位軌道モデルの検証

表 3.14 ステージ駆動速度と先端変位関連の実験条件

評価アクチュエータ	NRUSM-3 (表 3.3)
駆動電圧	180V <sub>pp</sub>
駆動周波数	5~54kHz
予圧力	35N
実験セットアップ	図 3.5

ここで、 $r = 0.5\mu\text{m}$ 、剪断変位の応答遅れを  $6\mu\text{s}$  一定、伸縮変位の応答遅れを  $0\mu\text{s}$  一定とし、NRUSM の発生変位が損失なくステージ駆動に伝達されたと仮定すると、各モデルから図 3.49 の駆動速度の試算結果を得ることができる。楕円軌道の回転による速度減少と駆動反転が表現されており、ステージ駆動速度を先端変位情報を用いて表すことができる可能性が示唆される。

### 3.7.2. 変位軌道モデルによるステージ駆動速度導出

変位軌道モデルを用いたステージ駆動速度導出のために行った実験条件を表 3.14 に示す。NRUSM-3 を駆動電圧 180V<sub>pp</sub>、予圧力を 35N 一定とし、駆動周波数を 5~54kHz に変化させた時のステージ駆動速度と、NRUSM の剪断方向変位を測定した。図 3.50 に NRUSM-3 の剪断変位解析結果を示す。伸縮変位については、NRUSM-1 (3.6.2.2 節：ステージ駆動時の変位の駆動

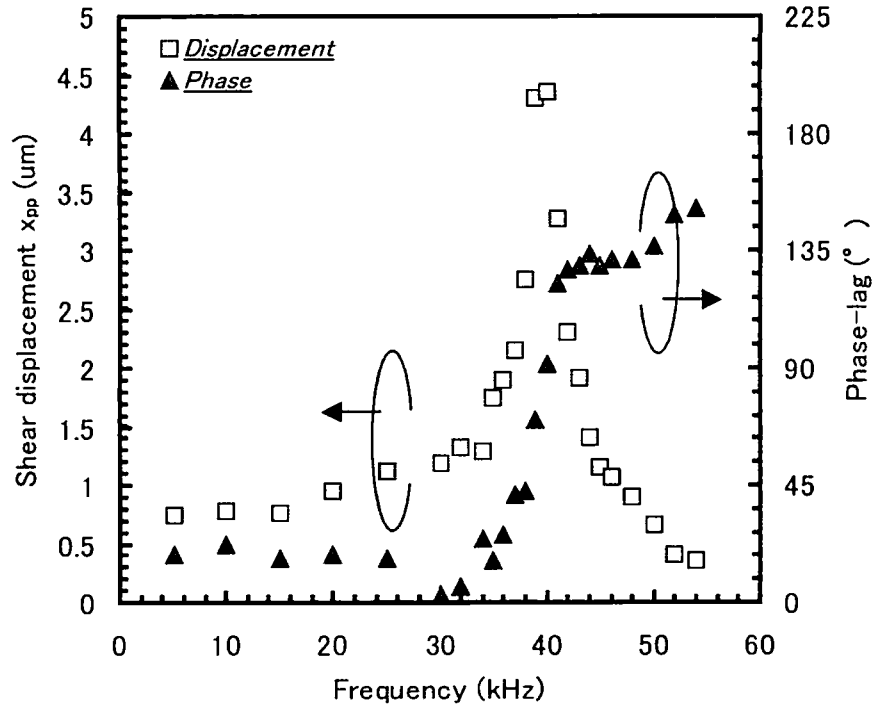


図 3.50 NURSM-3 の変位解析結果 ( $V=180V_{pp}$ ,  $P=35N$ )

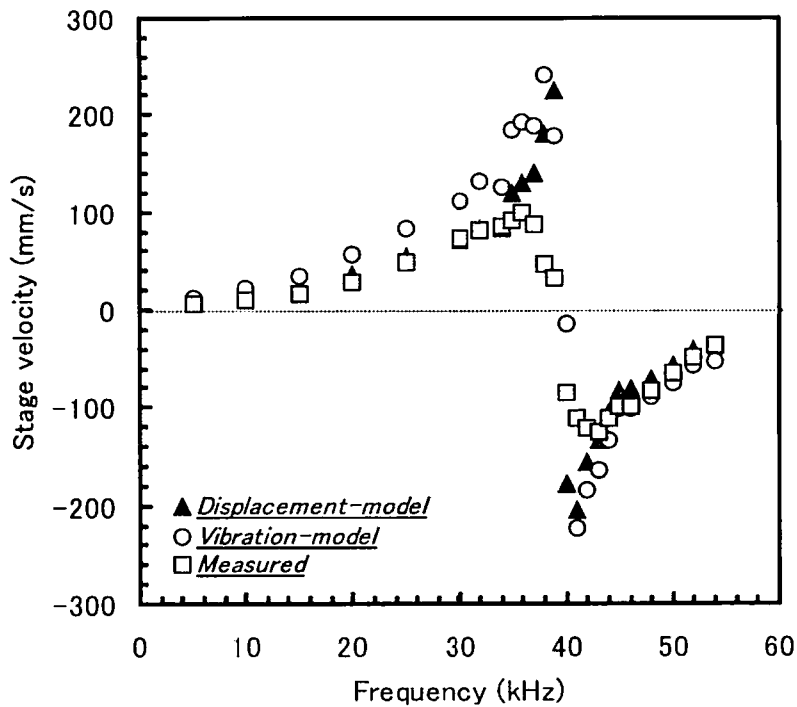


図 3.51 変位軌道モデルによるステージ駆動速度導出結果と実測値との比較  
(NRUSM-3,  $V=180V_{pp}$ ,  $P=35N$ )

周波数依存性)と同様に周波数依存性はないため、NRUSM-3においても平均応答遅れ  $2\mu\text{s}$  が生じていると仮定して以下の議論を進める。2つの変位軌道モデルに得られた NRUSM-3 の変位解析結果を代入し、ステージ駆動速度を計算した結果を図 3.51 に示す。レーザ干渉計により実測されたステージ駆動速度と比較すると、変位モデルの方が単振動モデルよりもよりステージの実測値に近いことがわかる。36kHz~42kHz の共振現象が生じている領域での速度値は一致しないものの、それ以外の領域ではおおよそ一致していることがわかる。共振周波数付近での速度試算値が実測値と一致しない1つの原因として、本モデルが NRUSM 先端とステージガイドプレートとの間のスリップ現象を考慮していないことが考えられ、より試算精度を高めるにはスリップ現象の検討が課題である。

以上より、先端変位解析を行うことにより、比較的高い相関でステージ駆動速度が導出可能であることが明らかとなった。

### 3.8. 結言

本章では、駆動電圧と駆動周波数を変化させた時のステージ駆動速度性能を中心に、圧電素子材料・予圧力・アクチュエータ形状の与える影響を明確にし、続いて NRUSM の変位解析を行うことにより諸現象ならびに駆動原理破綻のメカニズムを解明し、非共振原理に基づいた高速駆動が可能なアクチュエータを設計するための指針について検討を行った。また、ステージ駆動速度と NRUSM 発生変位の相関を変位伝達系のモデル化により検討した。

NRUSM を真空装置への応用の際に問題となる発熱を考慮し、圧電材料の検討を行い、低誘電損失材料は発熱量が小さく真空用途に有利であることが明らかになった。また、高誘電損失材料を用いる場合には、発熱による駆動性能低下を防止するために、接合部分で使用する中間接着層の検討が必要であることが明らかとなった。

駆動速度の予圧力依存性評価により、予圧力の増加に伴うステージ駆動速度の低下は、予圧力を高めることによりアクチュエータ先端での伸縮変位量が減少し、結果的にアクチュエータが十分な伸縮変位量を確保できないことが原因であることがわかった。

駆動速度の駆動電圧依存性評価により、駆動電圧の増大によりステージの駆動速度が向上することが確認された。駆動電圧が  $50V_{pp}$  以下ではステージを駆動できず、理論式と異なる結果が得られたが、このスレッシュホールド電圧が生じるのは、伸縮変位量がガイドプレートの表面粗さと同等の値となるために、駆動原理に従った楕円軌道の合成ができないことが原因であることがわかった。また、駆動速度の伸縮駆動電圧依存性により、伸縮変位が十分に確保されていないことで、駆動速度低下、駆動方向の速度差、そして駆動中の速度ムラが顕著に現れることが明らかとなった。

駆動速度の周波数依存性評価により、積層型圧電アクチュエータの形状に依存した特定周波数を境界に駆動速度減少と駆動方向反転が確認された。これは圧電アクチュエータの剪断方向の応答遅れが原因であり、剪断素子と伸縮素子の位相差が大きくなり、結果としてアクチュエータ先端で合成される楕円軌道が変化することが明らかとなった。

積層型圧電アクチュエータの無負荷時のステップ応答により、圧電アクチュエータの固有振



動数が、ステージ駆動方向が反転する周波数、ステージ駆動時に変位量が最大となる周波数と一致しており、駆動周波数の高周波数化に伴い発生した諸現象は、積層型圧電アクチュエータの剪断方向の共振現象が原因であることが明らかとなった。また、共振現象を高周波数側にシフトするためには、アクチュエータ全長を短く、かつ、剪断変位方向に長くなるように断面積を大きくすることが有効であることがわかり、NRUSMの非共振原理での駆動周波数領域を広げ、高速化を図るためのアクチュエータ形状設計の指針が明らかとなった。

NRUSMの変位軌道モデルにより、先端変位解析結果から導出されたステージ駆動速度は、共振現象付近での速度実測値とは一致しないものの、それ以外の周波数帯ではほぼ再現できており、先端変位解析によりステージ駆動速度が導出可能であることが明らかとなった。

駆動推力の周波数依存性により、推力は摩擦力の関係式に従い予圧力が高いほど大きいことがわかった。しかしながら、共振周波数付近では推力が最低となる減衰特性があることが明らかとなった。駆動推力と駆動速度から、NRUSM-3のステージ最大出力は0.8Wであり、消費電力に対するエネルギー効率は最大で16%程度であることが確認された。

## 参考文献

- [1] (株)トーキン, "積層圧電アクチュエータの使用ガイド Vol. 3," 技術マニュアル, 1997.
- [2] M. Kümmel, S. Goldschmidt, and J. Wallaschek, "Theoretical and experimental studies of a piezoelectric ultrasonic linear motor with respect to damping and nonlinear material behaviour," *Ultrasonics*, Vol. 36, pp. 103-109, 1998.
- [3] Y. Roh, S. Lee, and W. Han, "Design and fabrication of a new traveling wave-type ultrasonic linear motor," *Sensors and Actuators*, Vol. A 94, pp. 205-210, 2001.
- [4] (株)デンソー, "ピエゾアクチュエータ技術マニュアル," 技術マニュアル, 1998.

## 第4章 非共振型超音波モータの大型精密位置決めステージ駆動

### 4.1. 緒言

NRUSM のような高周波数領域で駆動される圧電アクチュエータを用いた摩擦駆動方式で、優れたステージパフォーマンスを達成するには、ステージの位置を検出し、それを高速にフィードバックして位置エラーを補償するクローズドループ制御は必要不可欠である。クローズドループ制御では、駆動指令が与えられると駆動条件に従った位置の軌道が計算され、時間と共に変化する目標位置に追従して常にステージが駆動されるようにアクチュエータは制御される。発生された位置軌道にいかにも追従できるかが、そのステージシステムの性能となる。

本章では、300mm ストロークの大型ステージ (図 4.1) に NRUSM を取り付け、オープンループ制御での駆動速度評価を行い、続いてクローズドループ制御により、移動中の経路を考慮せずに最終目標位置が達成できるかを評価する間欠位置決め (Point to point 方式) と、移動中の経路を考慮し時間と共に変化する指令からの経路ずれを評価する連続位置決め (Continuous path 方式) の両性能<sup>[11]</sup>について検討を行う (図 4.2)。

### 4.2. ステージシステム構成

クローズドループ制御でのステージ駆動を行うには、アクチュエータ、ステージ本体、駆動原理に従った電圧を出力するドライバに加え、ステージの位置情報を検出する測長システム、軌道からの位置偏差を計算し補償するためのサーボシステムが必要となる。ステージの絶対位置が要求される場合には、レーザ干渉システムを用いてステージの姿勢精度も含めた位置計測が必要となる。本研究はアクチュエータの追従性能を評価し、位置決め機構としての検討を行うことが目的であるため、特にレーザ干渉システムを用いたステージシステム構成にする必要はない。大気中の一般的な環境で数 nm 以下にレーザを安定させることは困難であることから、NRUSM の駆動性能評価にはむしろ安定した位置情報を検出できる測長システムの方が適切であると判断される。そこでレーザスケールを測長システムとして用い、クローズドループ制御での性能評価を実施した。NRUSM ステージシステムを図 4.3 に、各構成要素を表 4.1 に示す。

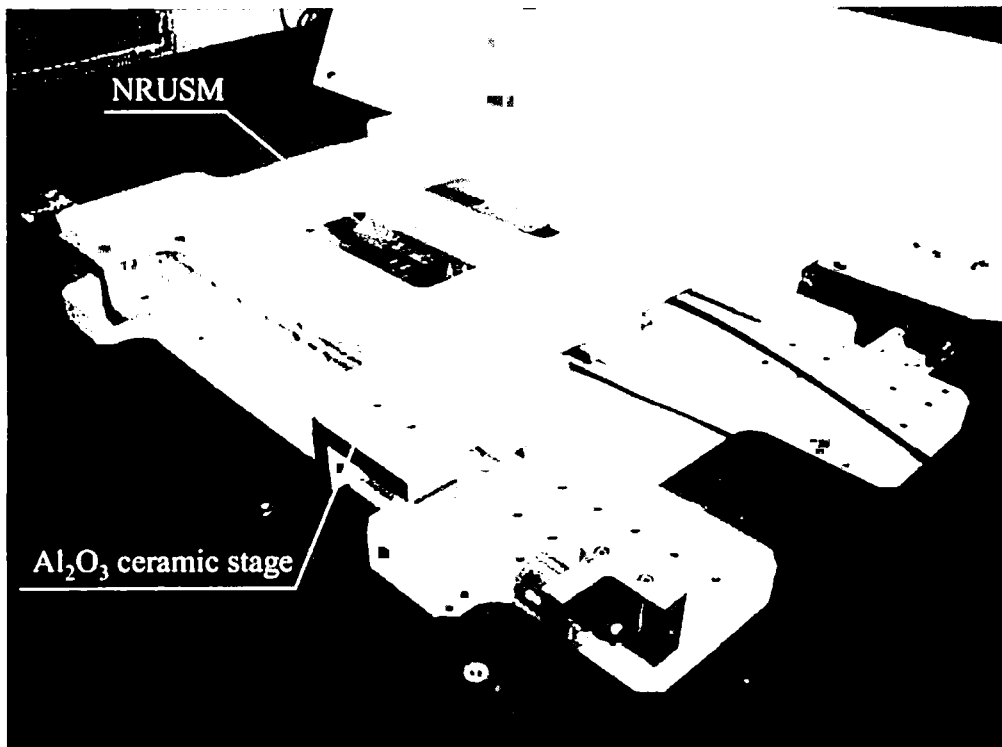


図 4.1 NRUSM 駆動 300mm ストローク大型ステージの外観  
(材質：アルミナセラミックス(99.5%)，寸法：760mm×460mm×170mm，可動部重量：25kg)

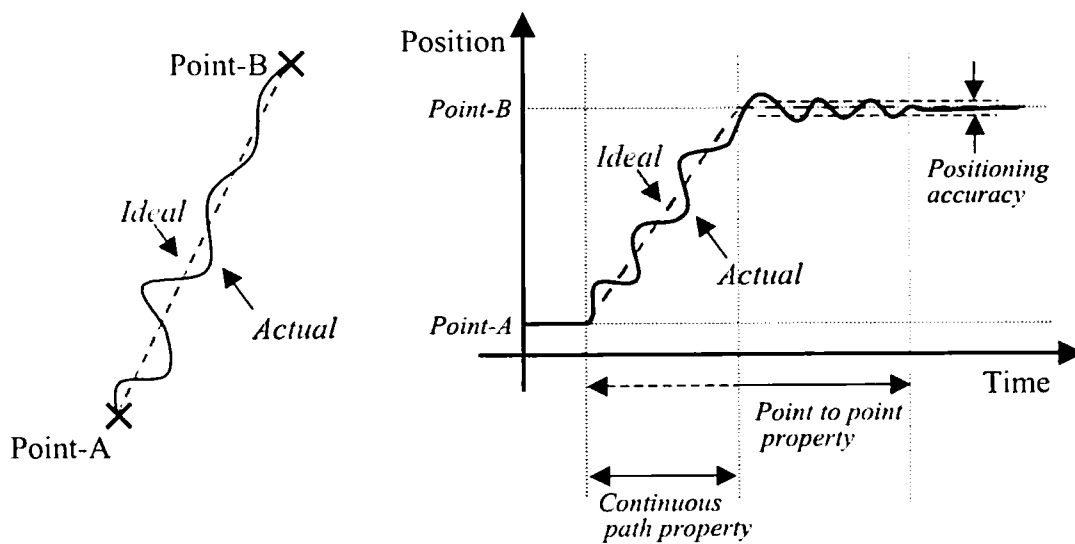


図 4.2 間欠位置決め (Point to point) と連続位置決め (Continuous path)

表 4.1 NRUSM ステージシステム構成

機器	メーカー	仕様
ステージ	(株)日本セラテック	材質：アルミナセラミックス(99.5%) ステージ寸法：760mm×460mm×170mm 可動部重量：25kg ストローク：300mm クロスローラガイド：THK 製, VR 型
ガイドプレート	(株)日本セラテック	材質：アルミナセラミックス Pore-free™
ステージコントローラ (NRUSM-00)	(株)東京テクノロジー	位置制御：PID 制御方式 サーボループ周波数：10kHz (Max) 出力：0~220V <sub>pp</sub> , 1kHz~60kHz, 4ch(2 相励磁)
レーザスケール (BS76, BD15-T22)	(株)ソニープレジジョンテクノロジー	光源：半導体レーザ 検出方式：回折格子走査式 スケールピッチ：0.138μm 分解能：0.69nm(200 分割時) 最大測定長：320mm 最大応答速度：100mm/s
予圧機構 (ZERO)	(有)熊本テクノロジー	コイルバネ：φ6mm, 1.0kgf/mm 板バネ：25mm×28mm×0.1mm
非共振型超音波モータ (NRUSM-1)	太平洋セメント(株)	モータ数：1 個 材料：PZT-D 材 素子断面積：3mm×6mm 素子厚み：0.6mm 積層枚数：剪断素子 4 枚, 伸縮素子 4 枚 積層型アクチュエータ数：8 個

## 【ステージコントローラ】

図 4.3 に示すように、外部 PC より入力された指令は RS232C ケーブルによりドライバ内 MPU (Micro processor unit) へ取り込まれ、MPU 指令に応じて DSP (Digital signal processor) 内の軌道発生ユニットで軌道計算が行われる。PID フィルタ (図 4.4) を通過した駆動信号は D/A 変換され、2 相励磁式 (sin/cos 波信号) ドライバで増幅され NRUSM へ出力される。ステージシステムに装備されたスケールによりステージの位置検出を行い、それを PID フィルタユニットに取りこむことでフィードバックループを構成している。現在のシステムでは駆動周波数は固定値とし、駆動電圧を制御対象とする電圧振幅制御でステージは制御されている。

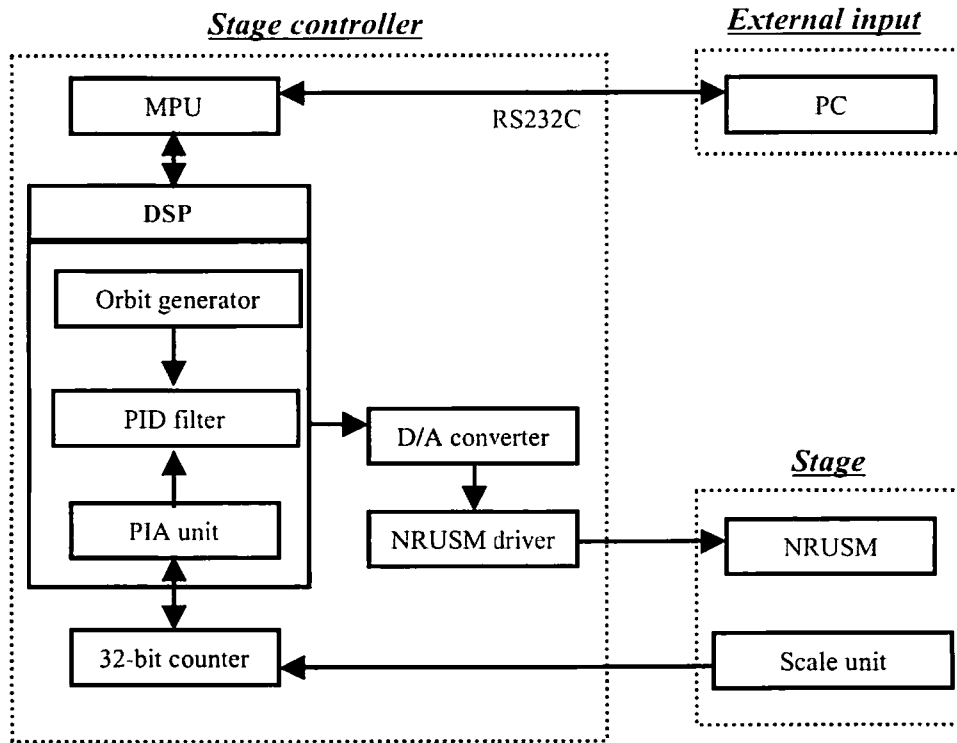
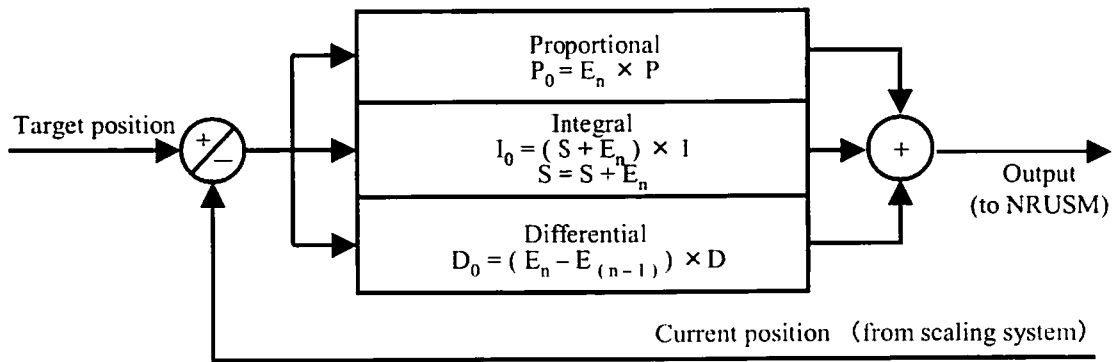


図 4.3 NRUSM ステージシステム構成



$$\left[ \begin{array}{l} \text{Output} = E_n \times P + \int E_n \times \frac{I}{256} + (E_n - E_{n-1}) \times D \\ E_n = TP_n - AP_n \\ E_n \quad : \text{Position error at sampling time } t=n \\ TP_n \quad : \text{Target position at sampling time } t=n \\ AP_n \quad : \text{Current position at sampling time } t=n \end{array} \right]$$

図 4.4 NRUSM コントローラのサーボモデル

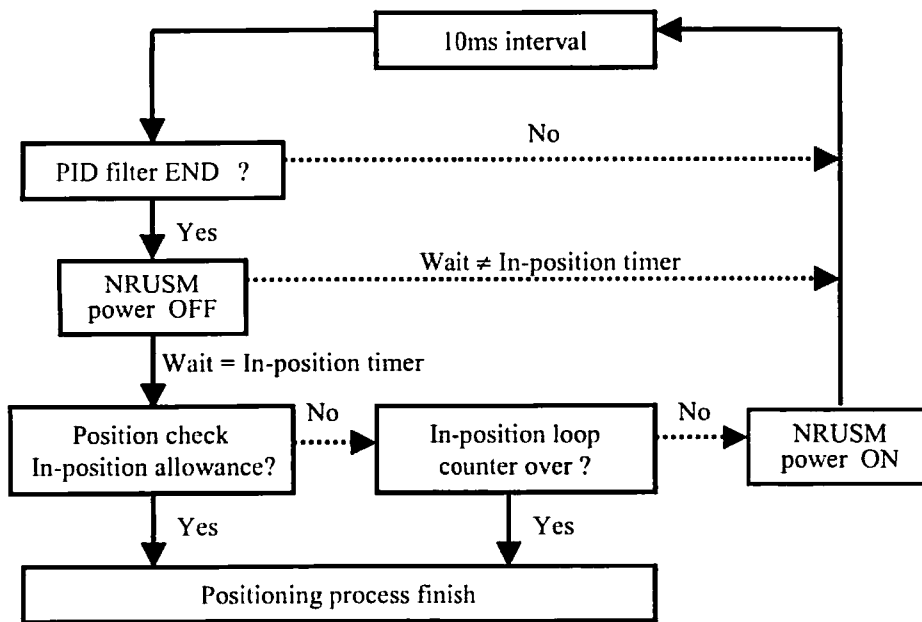


図 4.5 NRUSM コントローラ位置決めプロセス

## 【位置決めプロセス】

ステージコントローラの位置決めプロセスを図 4.5 に示す。スケールシステムからフィードバックされた位置情報は PID フィルタに取り込まれ、そこで目標位値と実際の位置との差である位置偏差が演算される。位置偏差が位置決め許容値以上であれば、割込みインターバル 10ms 後に再度 PID フィルタで演算が行われ位置偏差の判定が行われる。PID フィルタ演算が位置決め許容値以内であれば、モータの出力を OFF (DIP スイッチによりモータ出力の ON/OFF は設定可能) にする。位置決め完了後の待機時間 (Wait) を終えた後、PID フィルタから出力された位置偏差が待機前と同様に位置決め許容値以内であれば、位置決めプロセスは終了となる。もし待機時間後の位置偏差が位置決め許容値以上であれば、再び位置決めを行うように NRUSM が駆動される。ただし、設定された位置決めプロセスループの試行回数以上になればプロセスは自動的に終了する。この場合には、位置決め許容偏差以内に入らないままプロセスは終了する。

## 4.3. 実験方法

オープンループ特性評価は図 3.5 を基本セットアップとし、除振台上に 300mm ストロークステージを固定し、ステージ上にレーザ用反射ミラーを配置して駆動速度をレーザ干渉計(アジレントテクノロジー(株), HP5529A)を用いて測定した。

また、クローズドループ制御における性能評価は、コントローラ内で発生された軌道情報とレーザスケールからの実際の位置情報をロギングして行った。なお、測定された位置情報がステージの絶対位置を示すものではないため、本実験で扱う位置決めは相対位置決め性能に相当する。

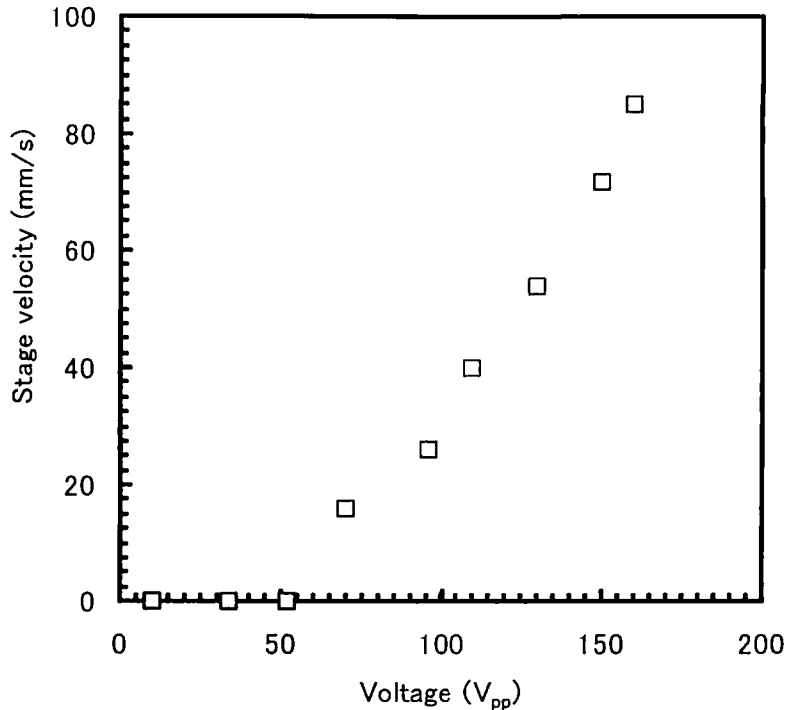


図 4.6 300mm ストロークステージの駆動速度－駆動電圧依存性 ( $f=30\text{kHz}$ ,  $P=40\text{N}$ )

表 4.2 オープンループ制御駆動の実験条件

駆動電圧	0～170V <sub>pp</sub>
駆動周波数	30kHz
予圧力	40N(推定)
実験セットアップ	図 3.5

#### 4.4. 駆動性能評価

##### 4.4.1. 駆動速度

表 4.2 にオープンループ制御における駆動速度の電圧依存性評価の実験条件を示す。図 4.6 は駆動周波数 30kHz でステージを駆動したときの、駆動速度の電圧依存性を示したものである。ステージ駆動スレッシュホールド電圧は 50V<sub>pp</sub> であり、それより高い電圧では駆動電圧に従い速度の向上が確認できる。100mm ストロークステージ(可動部重量 2.4kg) の駆動電圧依存性と同様(3.4.2 節：駆動速度の駆動電圧依存性)の結果が得られており、NRUSM の駆動速度はステージの重量に依存せず、その駆動条件にのみ依存することがわかる。図 4.7 は駆動電圧 170V<sub>pp</sub>、駆動周波数 30kHz におけるステージ駆動速度の時間応答を示したものであるが、駆動速度 85mm/s、加速領域 0～40mm/s における平均加速度は 375mm/s<sup>2</sup> が得られていることがわかる。

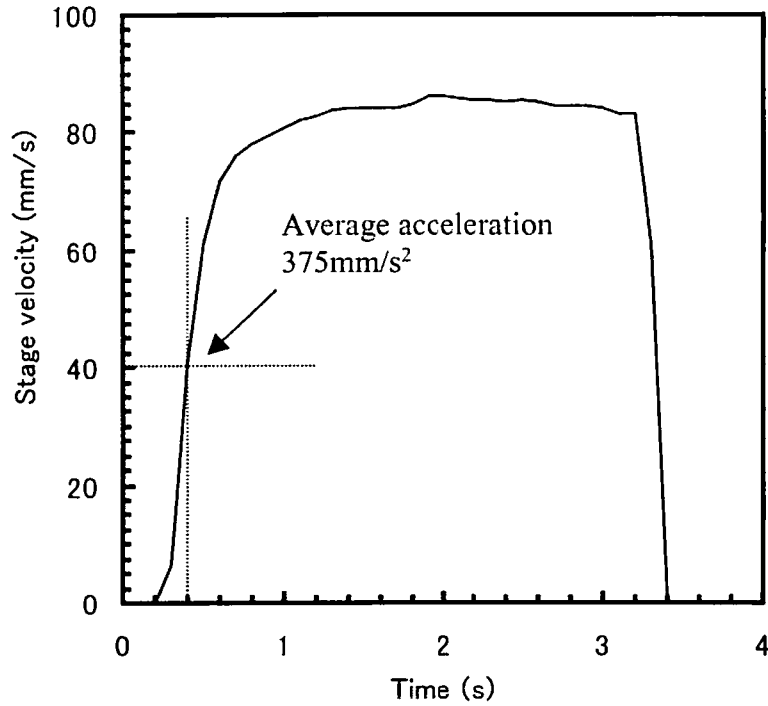


図 4.7 300mm ストロークステージの駆動速度-時間応答 (V=170V<sub>pp</sub>, f=30kHz, P=40N)

表 4.3 間欠位置決め特性評価の実験条件

	実験 1	実験 2	実験 3	実験 4
	100nm ステップ応答	位置決め時間 の精度依存性	10nm 連続 ステップ応答	500μm 連続 ステップ応答
駆動電圧(Max)	170V <sub>pp</sub>	170V <sub>pp</sub>	170V <sub>pp</sub>	170V <sub>pp</sub>
駆動周波数	30kHz	30kHz	30kHz	30kHz
予圧力	40N(推定)	40N(推定)	40N(推定)	40N(推定)
速度(Max)	20mm/s	20mm/s	20mm/s	20mm/s
加速度(Max)	27mm/s <sup>2</sup>	27mm/s <sup>2</sup>	27mm/s <sup>2</sup>	27mm/s <sup>2</sup>
位置決め精度	±0.69nm	±0.69, ±5, ±10, ±30nm	±0.69nm	±5nm
位置決め完了後 待機時間	100ms	100ms	100ms	100ms
サーボループ	3.3kHz	3.3kHz	3.3kHz	3.3kHz
PID 定数*	20,200,40	15,400,60	150,600,100	15,350,50

\* 最適定数を実験により導出



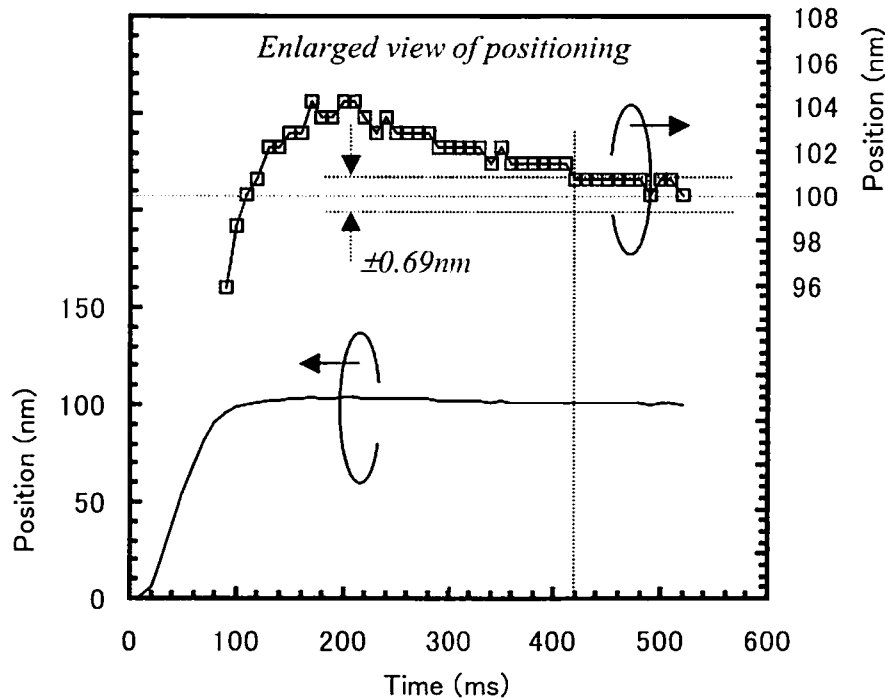


図 4.8 100nm ステップ応答 (位置決め精度 $\pm 0.69\text{nm}$ 、位置決め完了後待機時間 100ms)

#### 4.4.2. 間欠位置決め特性

間欠位置決め特性とは、ステージ移動後の最終目標位置近傍での位置決め挙動である。ここでは位置決めを許容される定常偏差以下の状態で静止した状態と定義し、評価を実施する。位置決め時のオーバーシュート、最終位置決めにかかる時間等は制御システムによって大きく異なる。また、用途に応じてその位置決め判定も異なる。位置決め偏差許容値（以下、位置決め精度という）を大きくとる場合には位置決めにかかる時間は短い、許容偏差を小さくする、すなわち位置決め精度が高い場合には長い時間を要する。本研究では、オーバーシュートが小さく、かつ、位置決め時間が短いことを理想位置決めとした。間欠位置決め特性評価の実験条件を表 4.3 に示す。

#### 【位置決め精度と位置決め時間】

図 4.8 は位置決め精度 $\pm 0.69\text{nm}$ 、位置決め完了後の待機時間を 100ms に設定したときの 100nm ステップ応答と位置決め拡大図を示したものである（実験 1）。最大オーバーシュートは 4nm、100nm のステップ応答に要した時間は約 520ms（待機時間も含む）であり、測長系最小単位にも関わらず安定して $\pm 0.69\text{nm}$ の位置決めを達成していることがわかる。

続いて 500 $\mu\text{m}$  のステップ応答をさせた時の、第 1 次が発生軌道パターンが終了した時間から位置決めを完了するまでの時間を追い込み時間と定義し、その評価を行った（実験 2）。図 4.9 は位置決め精度を変化（ $\pm 0.69\text{nm}$ 、 $\pm 5\text{nm}$ 、 $\pm 10\text{nm}$ 、 $\pm 30\text{nm}$ ）させた時の追い込み時間のヒストグラム(N=100 回)を示したものである。位置決め精度が高くなるにつれて追い込み時間のバラ

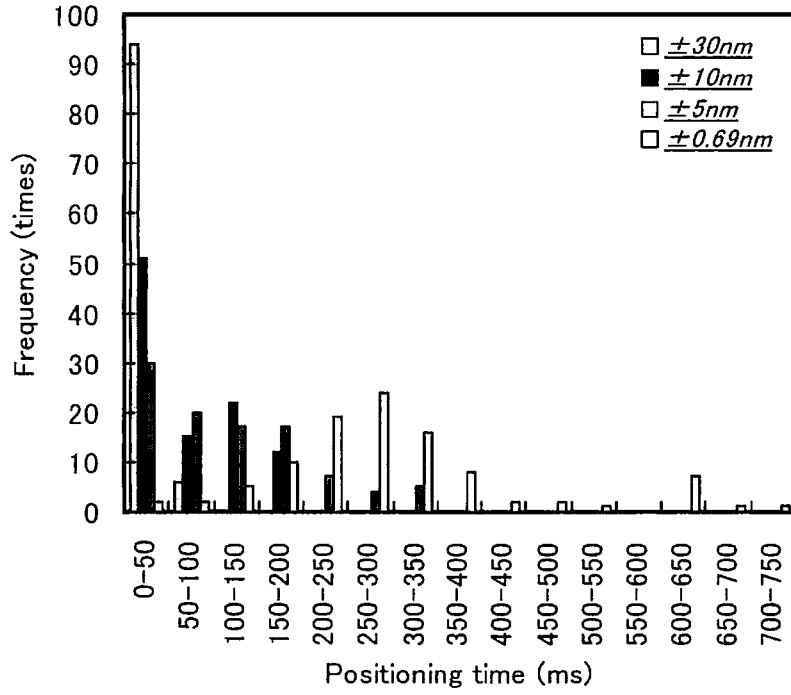


図 4.9 位置決め精度と追い込み時間のヒストグラム

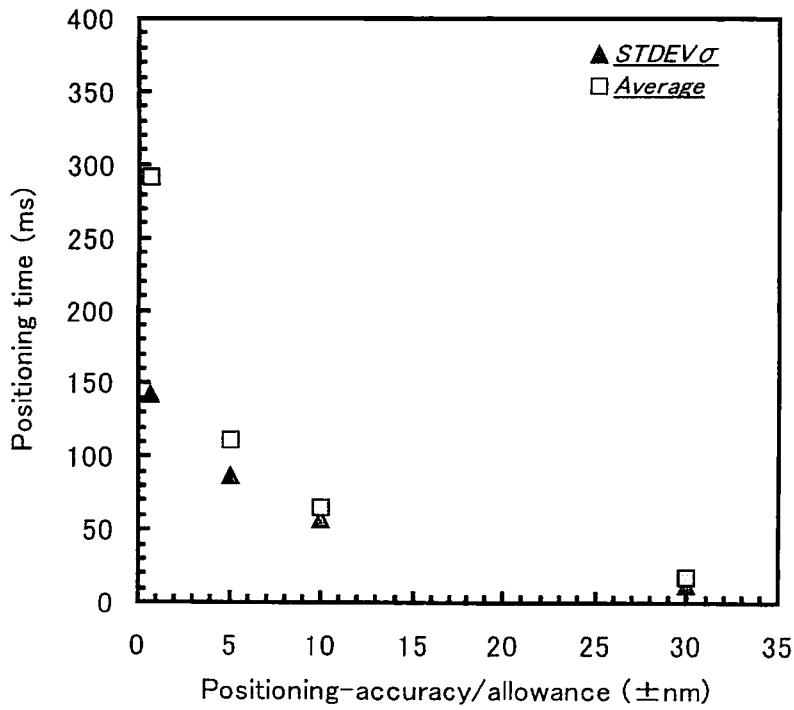


図 4.10 位置決め精度と追い込み時間の相関

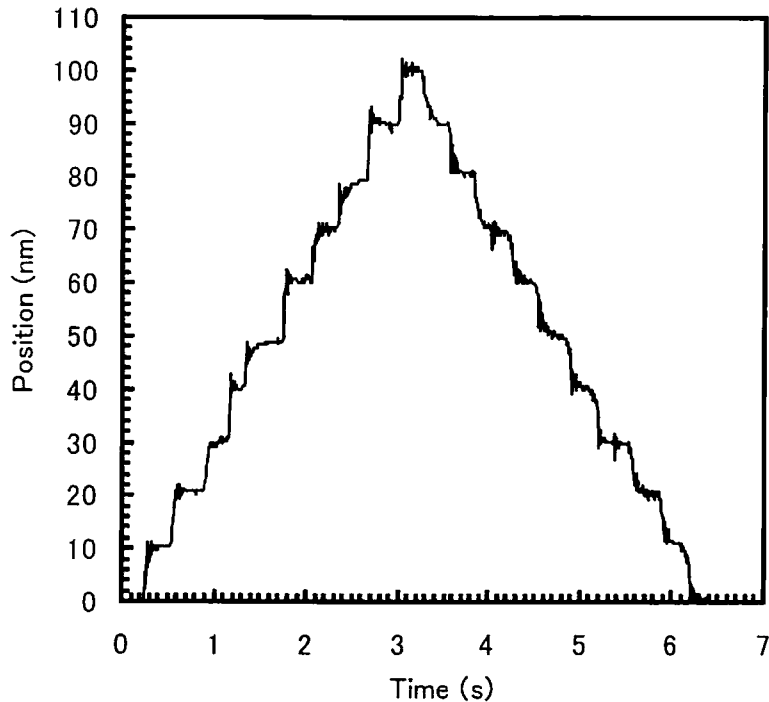


図 4.11 10nm 連続ステップ駆動の時間応答  
(位置決め精度 $\pm 0.69\text{nm}$ , 位置決め完了後待機時間 100ms)

ツキが大きくなり、平均時間も増大していることがわかる。図 4.10 は位置決め精度と平均追い込み時間とその標準偏差の関係を示したものであるが、位置決め精度 $\pm 10\text{nm}$ の時には平均 70ms で位置決めが完了できることがわかる。接触式の駆動系でのナノメートルオーダー位置決めでは、アクチュエータ接触部の面精度が影響することが予想されるため、それが位置決め精度を高くした時に増加する追い込み時間バラツキの 1 つの原因であると考察される。

#### 【連続ステップ応答】

図 4.11 は位置決め精度 $\pm 0.69\text{nm}$ 、待機時間を 100ms に設定した時の 10nm の連続ステップ応答 (ステップ&リピート) を示したものである (実験 3)。わずかなステップ幅であるが移動に 100ms 程度を要しており、PID サーボモデルの積分項にかかるエラーの時間積分で徐々にアクチュエータがステージを駆動している傾向が見られる。この結果から微小移動時の軌道発生方法の改善、制御定数の調整が必要であることがわかる。なお、この時の最大オーバーシュートは 2.8nm であった。

図 4.12 は位置決め精度 $\pm 5\text{nm}$ 、待機時間を 100ms に設定した時の 500 $\mu\text{m}$  の連続ステップ応答を示したものである (実験 4)。最大オーバーシュートは 14nm、各ステップ応答に要した平均時間は 390ms であり、これから待機時間を引いた時間 (=290ms) が 500 $\mu\text{m}$  のステップ移動と $\pm 5\text{nm}$  の位置決めを行うのに必要な時間である。これは、共振型 USM 搭載の電子線描画システ

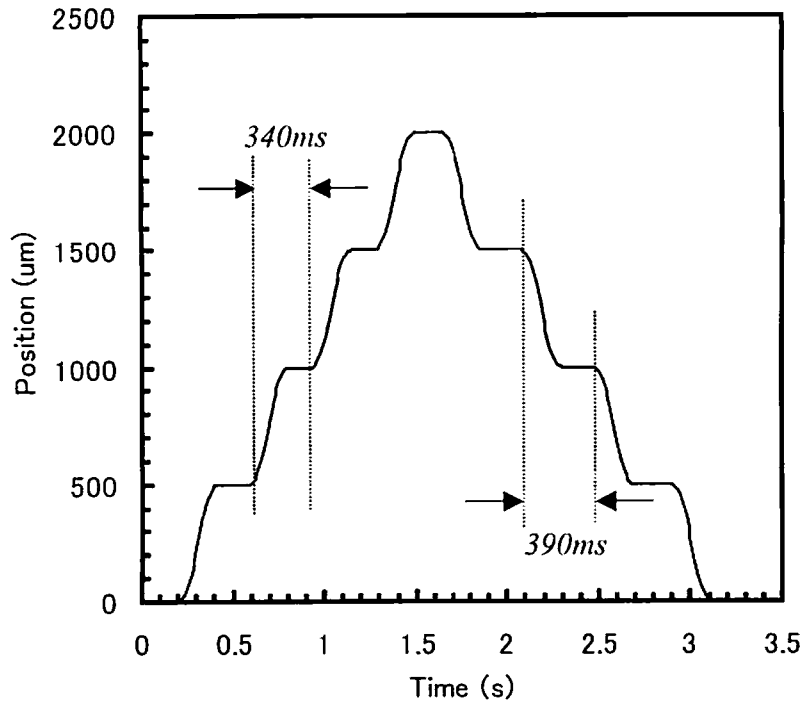


図 4.12 500 $\mu\text{m}$  連続ステップ駆動の時間応答  
(位置決め精度 $\pm 5\text{nm}$ 、位置決め完了後待機時間 100ms)

ム EB-X3<sup>2)</sup>の、ステージ位置決め性能(650 $\mu\text{m}\cdot\text{step}@\pm 100\text{nm}$ , within 270ms)と同等以上の性能であると考えられる。

#### 4.4.3. 連続位置決め特性

広義のステージの連続位置決め特性とは、間欠位置決め特性が最終位置を定義しているのに対し、移動中の軌道からの位置ずれ、すなわち、いかにドライブコントローラで計算された軌道に追従して駆動しているのかを示すものである。本研究ではステージが等速駆動を行っている領域での連続位置決め特性の評価を行った。連続位置決め特性評価の実験条件を表 4.4 に示す。

10nm/s $\sim$ 20mm/s の駆動速度レンジにおいてステージを駆動した時の、等速領域における連続位置決め特性の評価を行った(実験 1)。図 4.13、図 4.14 はステージが等速移動をしている時の指令位置からの偏差(位置エラー)を示したものであり、偏差が小さいほど速度変動がないことを意味する。駆動速度が高くなるにつれて位置エラーが大きくなっていることが確認できる。20mm/s においては突発的なエラーが確認されるが、このエラーの発生する場所には再現性があることから、ステージのクロスローラガイドの影響を受けたものだと推測している。このような外乱によるエラーを除いた状態では、10nm/s $\sim$ 10 $\mu\text{m}/\text{s}$  では $\pm 2\text{nm}$  以下、100 $\mu\text{m}/\text{s}\sim$ 20mm/s においては $\pm 15\text{nm}$  以下の連続位置決めが達成されており、NRUSM が等速駆動性能に優れていることがわかる。

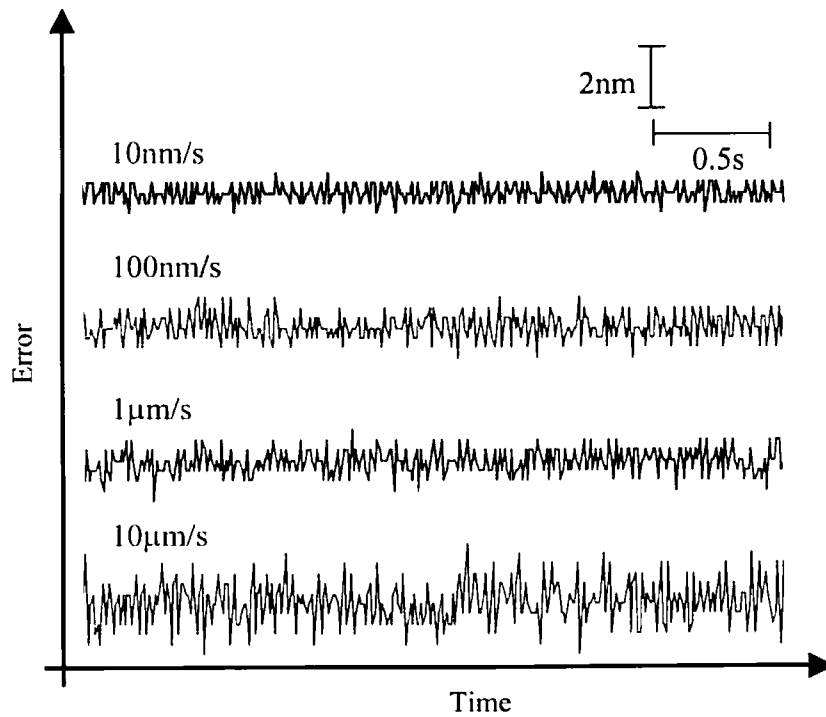


図 4.13 等速駆動領域における連続位置決め特性(10nm/s~10μm/s)

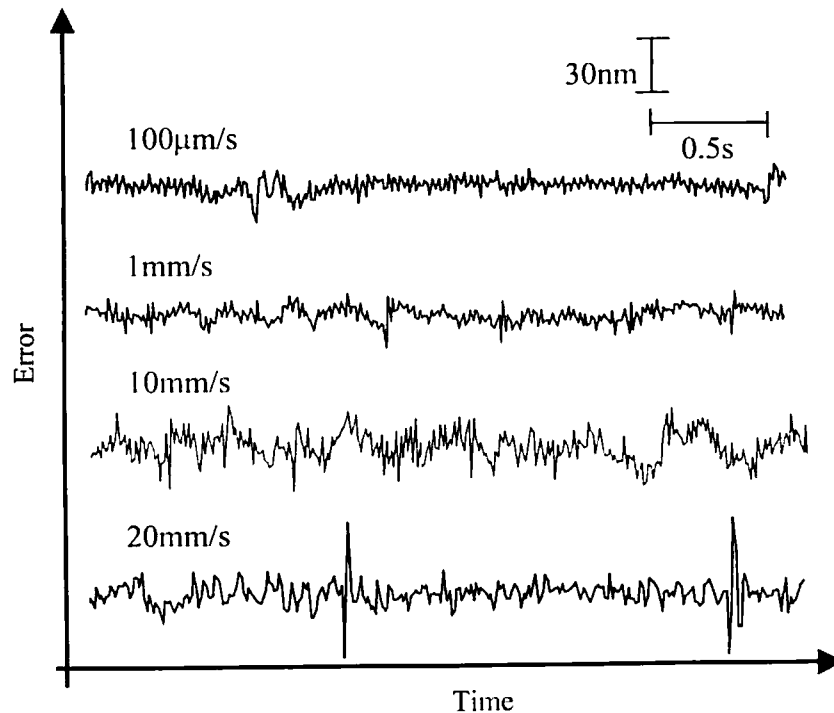


図 4.14 等速駆動領域における連続位置決め特性(100μm/s~20mm/s)

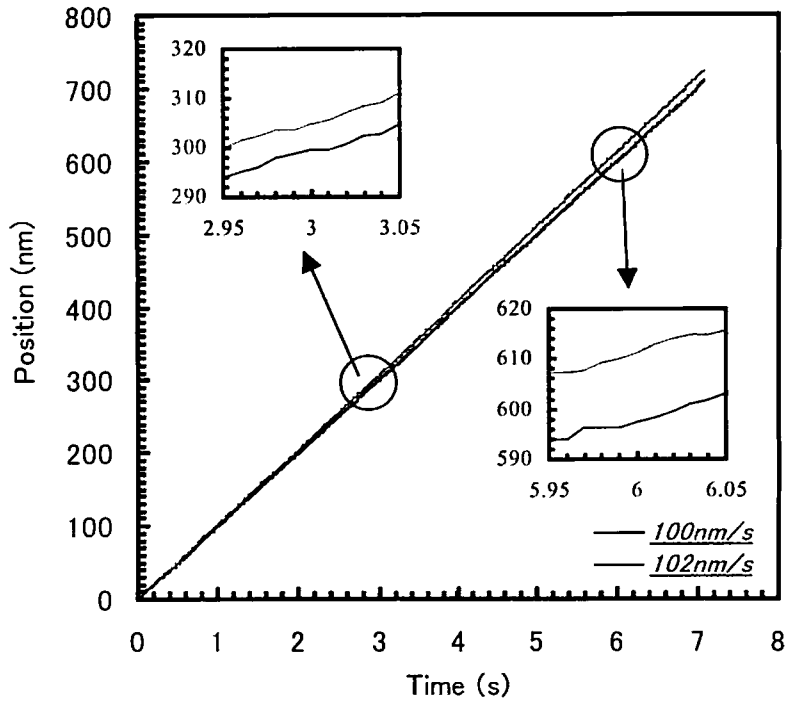


図 4.15 100nm/s と 102nm/s の等速駆動指令における時間応答

表 4.4 連続位置決め特性評価の実験条件

	実験 1 駆動速度と位置エラー (等速領域)		実験 2 駆動速度の分解能	
駆動電圧(Max)	170V <sub>pp</sub>		170V <sub>pp</sub>	
駆動周波数	30kHz		30kHz	
予圧力	40N(推定)		40N(推定)	
サーボループ	3.3kHz		3.3kHz	
駆動速度 /PID 定数*	10nm/s	50,100,50	100nm/s, 102nm/s	50,100,50
	100nm/s	50,100,50		
	1μm/s	30,80,50		
	10μm/s	5,10,20		
	100μm/s	15,10,20		
	1mm/s	5,10,20		
	10mm/s	5,10,20		
	20mm/s	5,30,80		

\* 最適定数を実験により導出

駆動速度の分解能を評価するために、非常に近い等速駆動指令を与えたときの駆動特性の評価を行った(実験2)。図4.15は100nm/sと102nm/sで連続的にステージを駆動した時の時間応答を比較したものであるが、時間 $t = 3.6$ sにおける両者の位置の差は6nmおよび13nmであることがわかる。速度制御が難しい超低速度領域であるにも関わらず2nm/sの指令差を識別し、高い精度で目標位置に追従していることがわかる。これよりNRUSMの速度分解能は2nm/s以上であることが明らかとなった。

以上より、NRUSMはnm/s～mm/sにおける広い速度レンジにおいてナノメートルオーダーの分解能で軌道への追従ができ、等速駆動領域における連続位置決め特性に優れることが確認された。

#### 4.5. 結言

本章では、300mmストロークの大型ステージにNRUSMを取り付け、オープンループ制御での駆動速度評価を行い、続いてクローズドループ制御により間欠位置決めと連続位置決めの両性能について検討を行った。

オープンループ制御駆動により、85mm/sの駆動速度を得ることができ、NRUSMが小型ステージのみならず、重量の大きな大型ステージの駆動が可能であることを明らかにした。

間欠位置決め特性評価により、NRUSMが位置決め精度 $\pm 0.69$ nmを達成できるような高い位置決め性能を持つことが示された。また、500 $\mu$ mの連続ステップ応答では、ステップ移動と $\pm 5$ nmの位置決めに必要な平均時間は290ms、最大オーバーシュート14nmが得られており、短い時間でかつオーバーシュートの小さい間欠位置決め特性が得られた。

連続位置決め特性評価により、等速駆動性能として10nm/s～10 $\mu$ m/sでは $\pm 2$ nm以下、100 $\mu$ m/s～20mm/sにおいては $\pm 15$ nm以下の偏差で連続位置決めに達成し、更に、駆動速度分解能は2nm/s以上であることが明らかとなった。

以上より、NRUSMは間欠位置決めのみならず、広い速度レンジにおいてもナノメートルオーダーの追従が可能であり、優れた制御性を持つことが確認された。

#### 参考文献

- [1] (社)精密工学会 超精密位置決め専門委員会 次世代精密位置決め技術編集委員会, “次世代位置決め技術.” フジ・テクノシステム, p. 10, 2000.
- [2] T. Kunioka, Y. Takeda, T. Matsuda, N. Shimazu, and Y. Nakayama, “XY stage driven by ultrasonic linear motors for the electron-beam x-ray mask writer EB-X3.” J. Vac. Sci. Technol., Vol. B 17, pp. 2917-2920, 1999.

## 第5章 総括

### 5.1. 結論

本論文では、現在から将来にわたって半導体製造／生物学分野に要求される超精密な位置決め機構を満たすために開発されている非共振型超音波モータの、信頼性を高め、かつ、ナノメートルオーダーの位置決め精度を保ちながら駆動速度を高速化することを目的とし、従来とは異なる方法での高信頼性圧電材料の作製プロセス提案を行い、続いて非共振型超音波モータの駆動特性を解明することにより非共振原理に基づいた高速化を行うための積層型圧電アクチュエータ形状設計の指針を示した。各章で得られた結論は次の通りである。

第2章では、圧電素子の信頼性を高めるために有効と考えられる微細結晶粒を持つPZT圧電素子を、マイクロ波焼結法により作製を行い、従来技術である電気炉焼結との比較検討を行った。まず従来知見として提案されているヒータとしての役割を果たす補助的要素を用いずに、PZTの純粋な自己加熱により焼結が可能であることを明らかにした。マイクロ波焼結・電気炉焼結のいずれの焼結手法においても焼結温度を変化させることにより粒径制御が可能であることが分かったが、電気的特性・単板変位特性の総合評価により、劣化のない圧電特性を有するのに必要な最小平均粒径はマイクロ波焼結で1.5 $\mu\text{m}$ 、電気炉焼結で2.2 $\mu\text{m}$ であり、マイクロ波焼結の方が粒径の小さなPZT焼結に有利であることが明らかとなった。機械的強度の粒径依存性が確認できなかったのは、焼結試料に存在する無数の気孔が原因であり、いずれの焼結手法でも機械的特性改善には気孔を取り除くことが課題である。また、両焼結手法で作製した非共振型超音波モータ用の積層型圧電アクチュエータを用いて発生変位と分極変化の評価を行ったところ、剪断素子の方が電圧／電界に対する非線形性が高いことがわかったが、この原因が結晶中の非180°ドメインの回転によるものであることを示し、粒径を小さくすることにより非線形現象が低減されることを明らかにした。これらの結果から、マイクロ波焼結によるPZT圧電素子の結晶粒微細化により、圧電アクチュエータの信頼性・変位制御性を向上できる可能性が確認できた。

第3章では、駆動電圧と駆動周波数を変化させた時のステージ駆動速度性能を中心に、圧電素子材料・予圧力・アクチュエータ形状の与える影響を明確にし、続いてNRUSMの変位解析を行うことにより諸現象ならびに駆動原理破綻のメカニズムを解明し、非共振原理に基づいた高速駆動が可能なアクチュエータを設計するための指針について検討を行った。また、ステージ駆動速度とNRUSM発生変位の相関を変位伝達系のモデル化により検討した。まず圧電材料の検討を行い、低誘電損失材料は発熱量が小さく真空用途に有利であることが明らかになると共に、高誘



電損失材料を用いる場合には、発熱による駆動性能低下を防止するために中間接着層の検討が必要であることが明らかとなった。駆動速度の予圧力依存性では、予圧力の増加に伴うステージ駆動速度の低下は、予圧力を高めることによりアクチュエータが十分な伸縮変位量を確保できないことが原因であることがわかった。また、駆動速度の駆動電圧依存性評価では、駆動電圧振幅の増大によりステージの駆動速度が向上することが確認されたが、スレッシュホールド電圧  $50V_{pp}$  以下では伸縮変位量がガイドプレートの表面粗さと同等の値となるために、NRUSM が駆動原理に従った楕円軌道の合成ができず、それによってステージ駆動ができないことがわかった。更に、伸縮変位が十分確保されていないことで、駆動速度低下、駆動方向の速度差、そして駆動中の速度ムラが顕著に現れることが明らかとなった。駆動速度の周波数依存性評価により、積層型圧電アクチュエータ形状に依存した特定周波数を境界に駆動速度減少と駆動方向反転が確認されたが、これは圧電アクチュエータの剪断方向の応答遅れが原因であり、剪断素子と伸縮素子の位相差が大きくなり、結果としてアクチュエータ先端で合成される楕円軌道が変化することが明らかとなった。この原因を特定するために、積層型圧電アクチュエータの固有振動数を計測したところ、ステージ駆動方向が反転する周波数、ステージ駆動時に変位量が最大となる周波数と一致していることから、駆動周波数の高周波数化に伴い生じた駆動原理の破綻は、積層型圧電アクチュエータの剪断方向の共振現象が原因であることが明らかとなった。また、共振現象を高周波数側にシフトするためには、アクチュエータ全長を短く、かつ、剪断変位方向に長くなるように断面積を大きくすることが有効であることがわかり、NRUSM の非共振原理での駆動周波数領域を広げ、高速化を図るためのアクチュエータ形状設計の指針が示された。駆動推力の周波数依存性評価により、推力は予圧力が高いほど大きいことがわかったが、共振周波数付近で推力が最低となる減衰特性があることが明らかとなった。NRUSM の変位軌道モデルと先端変位解析結果より導出されたステージ駆動速度は、共振現象付近での速度実測値とは一致しないものの、それ以外の周波数帯ではほぼ再現できており、先端変位解析によりステージ駆動速度が導出可能であることが明らかとなった。

第4章では、300mm ストロークの大型ステージに NRUSM を取り付け、オープンループ制御での駆動速度評価を行い、続いてクローズドループ制御により間欠位置決めと連続位置決めの両性能について検討を行った。オープンループ制御駆動では駆動速度 85mm/s が得られ、NRUSM が小型ステージのみならず、重量の大きな大型ステージの駆動が可能であることを明らかにした。クローズドループ制御駆動により位置決め精度  $\pm 0.69\text{nm}$  を達成し、等速駆動領域の連続位置決め性能として、20mm/s 以下の駆動速度では  $\pm 15\text{nm}$  以下に追従偏差を抑えることができた。また、駆動速度分解能は 2nm/s 以上であることが明らかとなり、NRUSM は間欠位置決めのみならず、広い速度レンジにおいてもナノメートルオーダの追従が可能であり、優れた制御性を持つことが確認された。

## 5.2. 今後の展望

本論文の目的にも示したように、非共振型超音波モータの半導体製造装置への実用化を早期に実現するには、先ず従来の電磁モータや共振型超音波モータと同程度の駆動速度を達成する必要がある。現行の2相駆動方式を採用し素子発熱を考慮せず完全な非共振原理で速度向上を試みた場合の、アクチュエータ設計/駆動条件の一例を下記に示す。

----- 300mm/s を達成するためのアクチュエータ設計/駆動条件 -----

### 【アクチュエータ設計】

使用材料：太平洋セメント(株)製 D 材

圧電素子厚み：0.3mm

積層枚数：伸縮素子×4枚、剪断素子×10枚

断面積：6mm×12mm (厚み方向×剪断変位方向)

電極厚み：0.01mm

アクチュエータ長：4.35mm (=14×0.3mm + 15×0.01mm)

予想共振周波数：68kHz (図 3.47 を元に試算)

### 【駆動条件】

駆動方式：2相

駆動電圧：250V<sub>pp</sub>

駆動周波数：60kHz

### 【駆動速度試算】

駆動速度は変位軌道モデルに従うと仮定して (1.2) 式より、

$$v = 303\text{mm/s.}$$

上記試算を実現するには電源/コントローラの駆動能力の大幅な改善が必要とされるとともに、圧電素子の耐電圧特性(脱分極、絶縁破壊)もより高い性能が要求されることになる。更に、発熱を考慮する場合には変位量が比較的小さい低誘電損失材料を用いる必要があるため、積層枚数の増加は避けられず、より一層駆動条件は過酷となることが予想される。1つの解決手段は現在の2相駆動方式を3相/4相等のように増やすことであり、これにより圧電素子への負担は軽減できる。

一方で、等速領域において高い連続位置決め性能が要求されないのであれば、共振現象を利用(付録 B: 共振原理を用いたステージ駆動)できるため、改めてアクチュエータの設計を行う必要は無く、可変周波数制御による非共振駆動と共振駆動の混在駆動により、高速かつ高精度位置決めを非共振型超音波モータで達成することが可能となり、圧電素子への負担を軽減できる。但し、共振駆動させる周波数帯において伸縮素子と剪断素子の変位位相を常に90°に保つような位相補償制御が必須となる。積層型圧電アクチュエータの変位状態のセンシングが可能となれば、

リアルタイムで位相補償ができるため、常に理想的な駆動を実現できるであろう。

駆動速度の問題が改善され、積層型圧電アクチュエータの多脚化や予圧力増大によって加速度も十分な性能を確保した場合、次に重要となるのが耐久性である。これまでの大気中の実験により連続走行試験（付録 A：連続走行試験と NRUSM 圧電特性）において走行距離 200km を達成している。積層型圧電圧電アクチュエータの性能劣化は確認されていないが、ガイドプレートの磨耗による粉塵析出が確認されており、駆動性能に影響を及ぼす傾向がみられる。耐磨耗性に優れた接触材料の選定、更には可変周波数制御駆動などの磨耗を抑制する駆動方式は、耐久性／信頼性を高めるための重要な課題である。摩擦材料以外にも耐久性を左右するパラメータとして、脱分極／機械的破壊による圧電素子自体の耐久性、圧電素子の接合部分の剥離による積層型圧電アクチュエータの耐久性が挙げられる。圧電素子の耐久性向上の指針については第 2 章で述べたように、素子の結晶粒微細化と共に、HIP 処理などの加圧技術を用いた気孔除去が有効であると推測される。積層型圧電アクチュエータとしての耐久性／信頼性を向上させるには、圧電素子と電極材料との間の強固な接合が必要であり、高積層化する場合には一層重要な課題となる。本研究で用いた非共振型超音波モータのみならず、現在の圧電素子の積層技術はエポキシ系接着剤を用いているものがほとんどであり、信頼性に欠けることに加え、圧電素子の性能を十分に発揮できていないのが現状である。使用環境が真空の場合、使用する接着剤からのアウトガスなどによる強度劣化が予測され、接合材料に優れた耐真空性が要求される。そこで接着剤を用いない圧電素子と電極材料の接合が有効であると考えられる。一部のセラミックスなどの接合は、金属などをセラミックス間に挟むことで直接接合する技術が既に確立されているが、200℃以上の温度で行われているのが現状である。圧電素子は高温下（キュリー温度以上）で圧電特性が消失する特性があるため、200℃以上の温度での既存の接合プロセスは応用することができない。従って金属を用いた直接接合技術を圧電素子に応用するためには、先ず 200℃以下で融解する接合金属の選定が必要となる。また、別の接合手法としては積層型圧電アクチュエータの一体焼成が挙げられる。電極パターンの印刷された圧電シートを積層し、それを焼結することによって接合と電極形成が同時に達成される。非共振型超音波モータ用の積層型圧電アクチュエータは剪断素子を用いる必要があるため、分極処理をどのように行うかが課題となるが、一体焼成型の圧電アクチュエータ製造プロセスが確立されれば、金属を用いた接合法よりもはるかに高い信頼性を得ることができるとであろう。

真空環境での駆動性能評価など実用化に向けて多くの克服すべき課題が存在するが、非共振型超音波モータ駆動方式の諸問題を解決することで、従来技術では達成し得なかった、数 100 ミリメートルからサブナノメートルを自在に操作可能な単一ステージ駆動機構が実現することが期待される。

## 謝辞

本論文は、熊本大学大学院自然科学研究科博士前期・後期課程において行われた研究をとりまとめたものである。本研究を遂行するにあたり久保田弘教授、中田明良助教授には終始懇切丁寧な御指導と御鞭撻を賜りました。また研究、教育、産業に対する情熱的な先生方の御姿勢から多くを学ぶことができました。ここに深甚なる感謝の意を表します。

本論文をまとめるにあたり、それぞれ御専門の立場から数々の有益な御教示、心暖まる激励、そして御審査いただきました生野浩正教授、檜山隆教授、三浦秀士教授に深く感謝いたします。

本研究の遂行にあたり、的確な研究方針の御教示をいただきました東北大学の大見忠弘教授に深く感謝いたします。先生の情熱的な御姿勢と数多くの御助言に勇気づけられ、本研究を進めることができました。

実験や理論、更には論文執筆にあたり、様々な面で御指導および御助言をいただきました熊本大学の森園靖浩助手に深く御礼申し上げます。

本研究の基礎を築きあげられ、また私を開発チームに快く迎えていただき、研究のみならず数々の面で懇切丁寧に御指導いただきました株式会社東京テクノロジー／有限会社熊本テクノロジーの小坂光二常務取締役 deeply 御礼申し上げます。また、実験装置の準備や改善など様々な面で御指導、御協力をいただきました奥寺智代表取締役、馬場哲郎氏、岩渕哲也氏、小坂哲也氏をはじめ、皆様に深く感謝いたします。

本研究を行うにあたり、マイクロ波焼結のための試料準備／評価、実験に用いた積層型圧電アクチュエータの製造、更には有益な御助言をいただきました太平洋セメント株式会社の宮田昇氏、山川孝宏氏、阿隅一将氏、渡邊雅幸氏をはじめ、皆様に深く感謝いたします。

本研究を行うにあたり、マイクロ波焼結装置を快く貸与していただきました産業総合技術研究所中部センターの都築明博氏、佐野三郎氏に深く感謝いたします。

圧電アクチュエータを用いた精密ステージについて先駆的な研究をなされ、多くの有益な御助言をいただきました元 NTT 通信エネルギー研究所の國岡達也氏に深く感謝いたします。

本研究のみならず、数々の面で懇切丁寧に御指導、御助言いただきました財団法人くまもとテクノ産業財団の中村一光氏に深く御礼申し上げます。また、本研究を行うにあたり、物品購入や事務手続き等で終始御協力いただきました財団法人くまもとテクノ産業財団特定プロジェクト室の皆様に深く感謝いたします。

本研究を行うにあたり、圧電材料の XRD 評価に御協力いただきました博士後期課程の若杉雄彦氏に心より感謝いたします。また、実験方法や実験結果を共に議論していただきました博士後期課程の永本恵市氏に深く感謝いたします。また、本研究の全ての実験に携わっていただき、数々の議論により研究を共に進めてきた博士前期課程の原田崇氏、遠藤泰史氏、橋口弘幸氏、居村史人氏、学部生 4 年の小磯公房氏、古川博之氏に心から感謝いたします。更に、終始御協力いただきました久保田研究室、中田研究室のスタッフ並びに学生諸氏に深く感謝いたします。

最後に、私を理解し、計り知れない多くの知識を与え続け、いつでも暖かく見守り続けていただいた両親に深く感謝いたします。

本研究はこのように多くの方々の御指導、御協力のもとに行われたものであり、諸氏に改めて厚く御礼申し上げます。

なお本研究は、熊本県地域結集型共同研究事業「超精密半導体計測技術開発」の御支援により行われたものである。

## 付録 A 連続走行試験と NRUSM 圧電特性

走行距離 200km を第一目標として連続走行耐久試験を行った。NRUSM の耐久性評価には、圧電素子の圧電性能耐久性と、発生変位を摩擦によって伝達する接触部分（NRUSM 先端チップとステージ側ガイドプレート）の耐久性に大別することができる。接触部分の耐久性に関しては材料の組合せにより改善が見込まれるため、まずは NRUSM の圧電性能耐久性に着目して評価を開始した。表 A-1 に 100mm ストロークステージ（詳細は表 3.1）を用いて実施した代表的な走行試験の駆動条件とその結果を示す。実験 A、B は駆動速度ならびに加速/減速を制御せずにオープンループ制御（駆動周波数 25kHz、駆動電圧 210V<sub>pp</sub>）によりステージ駆動したものである。一方、実験 C はクローズドループ制御（駆動速度プロファイル：図 3.6、駆動周波数 25kHz）により駆動を行ったものである。いずれの実験も駆動速度を約 50mm/s として走行試験を行い、オープンループ制御駆動での走行試験では、駆動停止もしくは駆動速度が 10mm/s 以下となった時点で評価を終了させた。

表 A-1 連続走行試験の駆動条件と結果

実験	ガイドプレート	NRUSM 仕様*1,2	駆動方式*3	粉塵用 ブラシ	概算 走行距離	ガイドプレ ート磨耗量
A	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (99.5%) Nanomotion Ltd.	NRUSM-1 (D 材)	オープン ループ制御	無し	2km	未計測
B	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (99.5%) Nanomotion Ltd.	NRUSM-1 (D 材)	オープン ループ制御	有り	65km	約 100nm
C	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (99.5%) (株)日本セラテック	NRUSM-3 (NA 材)	クローズド ループ制御	有り	200km	約 112nm

\*1 NRUSM の詳細仕様は表 3.2, 表 3.3 参照。

\*2 NRUSM 先端チップは(株)日本セラテック製高純度 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Pore-free™)を使用

\*3 駆動周波数 25kHz

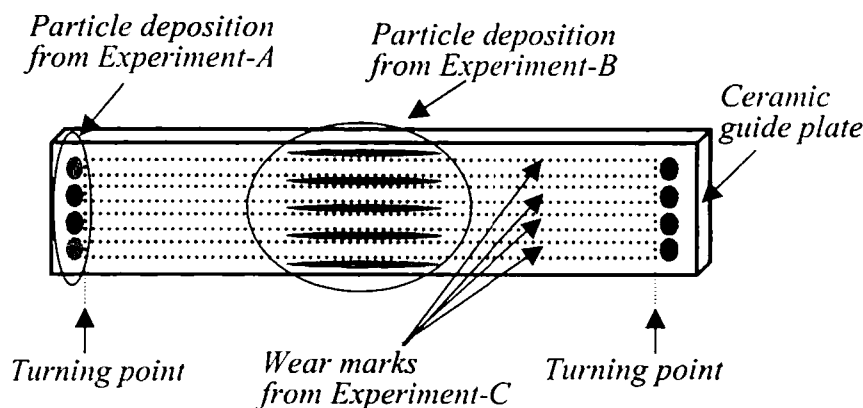


図 A-1 連続走行試験によるガイドプレート磨耗と発生粉塵堆積

実験 A では走行距離約 2km でステージ駆動停止に至った。NRUSM の圧電特性が劣化しておらず、かつ、ガイドプレート表面／走行面端部の駆動方向が反転する部分で粉塵堆積が確認（図 A-1）されたことから、駆動停止の原因は粉塵によって NRUSM が空回りして駆動力を伝達できなかった、あるいは、空回りによりアクチュエータの発熱量が急激に増加し、一時的に性能が劣化して発生変位が小さくなったことが推測された。そこで走行面端部の粉塵堆積を防止するために、ブラシ機構を装備して評価した。実験 B ではブラシ機構を装備することにより走行距離を約 65km に改善することができた。実験 A 同様に圧電特性の劣化は起きていないことから、走行試験後のガイドプレートの観察を行ったところ、下記の 2 点が明らかとなった。

1. ブラシによる粉塵除去が行われなかったガイドプレート中央部分には、発生粉塵が固形化したと思われる線状の堆積物が目視により確認（図 A-1）。
2. 表面形状計測（表面形状粗さ計：日本ビーコ(株)、WYKO-NT2000）の結果、ガイドプレートに局所的な磨耗による轍（図 A-1）が起きており、特にステージ駆動方向が反転する端部では  $0.1\mu\text{m}$  程度の磨耗による段差が確認。

このことから、駆動停止原因のきっかけは  $0.1\mu\text{m}$  程度の段差か、あるいは堆積粉塵かのいずれかであることが考えられた。実験 B の解析結果より、目標走行距離 200km を達成するときには  $0.3\mu\text{m}$  以上の段差が駆動方向反転部分で形成されることが推測され、これが NRUSM 伸縮変位量  $0.5\mu\text{m}$ （詳細は表 3.3）と近いレベルであることから駆動性能への影響は確実であり、現状での目標達成が困難であると判断した。このような局所的な磨耗はオープンループ制御駆動による駆動方向反転時の急加速／急減速が原因と推測され、加速／等速／減速の駆動全体が完全に制御されたクローズドループ制御による駆動が磨耗抑制に有効であると考えられた。

クローズドループ制御による耐久試験は図 3.6 の速度プロファイルにて行った。高誘電損失材料である D 材は発熱による駆動性能低下（図 3.8）により、サーボエラーが発生して長時間の連続駆動が困難であるため、発熱が極めて小さな NA 材を用いた。実験 C はこのような条件で連続駆動したものであり、それによって第一次目標の連続走行距離 200km を達成することができた。

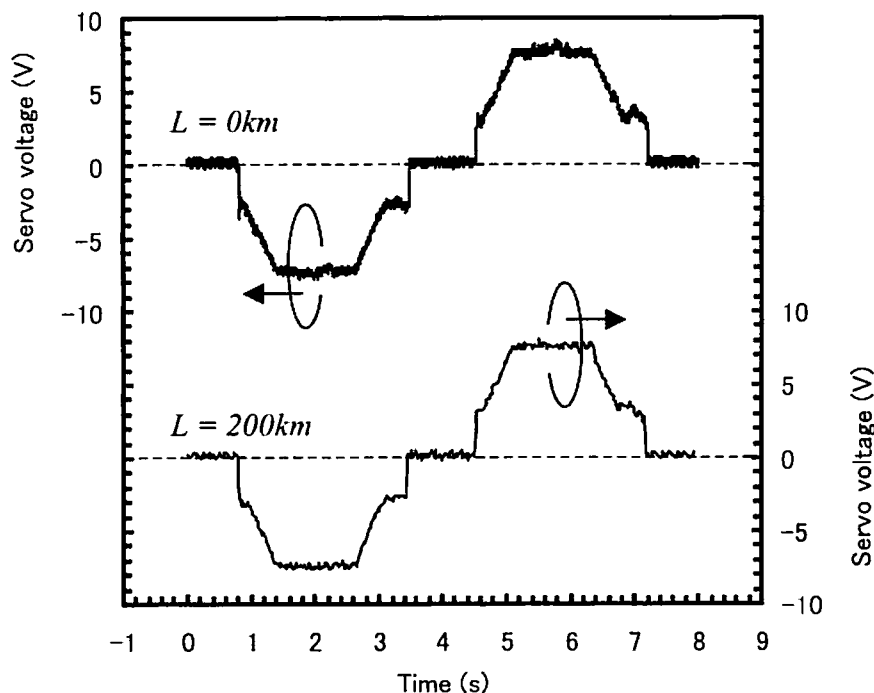


図 A-2 連続走行 200km の試験前後のサーボモニタ電圧比較

なお、各構成要素解析のため 200km 走行した時点で駆動停止させた。図 A-2 は連続走行試験開始直後と、200km 走行後のサーボモニタ電圧 (Max/Min :  $\pm 10\text{V}$ ) を示したものであるが、両者のサーボ電圧プロファイルに差が見られないことから、圧電素子の性能劣化は起きていないと考えられる。ガイドプレートの NRUSM が走行した領域 (図 A-1) の表面形状粗さ計を用いた解析結果を図 A-3 に示す。加速/減速領域では他の部分よりも磨耗が激しく、特に駆動方向が反転する部分では 112nm の段差があることがわかる。また、等速駆動領域においても 50nm 程度の磨耗が発生しており、走行距離の拡大には加速/減速レートをより低くすることや、材料の検討が必要であることがわかる。

以上のことから、クローズドループ制御駆動により圧電素子の圧電特性の劣化無く、200km 以上の走行距離を駆動できることがわかった。走行耐久性の向上には駆動プロファイルならびに使用材料の検討が必要である。



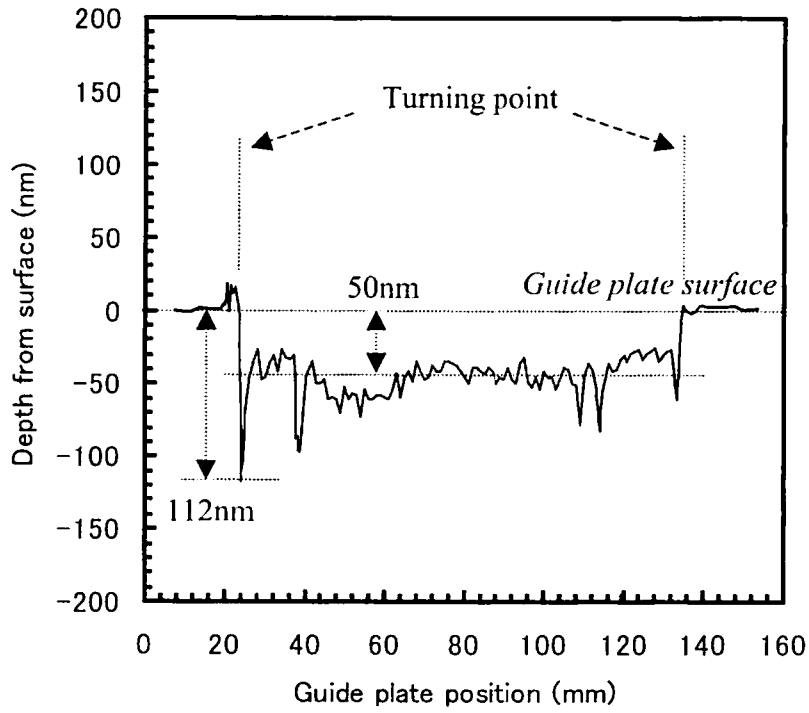


図 A-3 連続走行 200km 後のアルミナガイドプレートの磨耗プロファイル

## 付録 B 共振原理を用いたステージ駆動

共振原理を利用した NRUSM 駆動は研究初期での目的に反するが、その現象をうまく利用することにより特性向上が見込まれ、更には応用分野を広げることができる。本論文から明らかのように、NRUSM の問題点は、共振点近傍で駆動方向が反転すること、位相変化が起きることにより推力が低下することである。この問題を解決するには、剪断変位と伸縮変位が常に理想位相差  $90^\circ$  を保つ、つまり(3.8)~(3.10)式からも判断されるように式中の " $\cos(\phi - 90) = 1$ " となるような状態で駆動させることが有効であると推測される。

図 3.50 に示された NRUSM-3 の変位解析結果を用いて、共振周波数 40kHz の時に発生する剪断変位の応答遅れを予め見込み、伸縮変位に対して理想位相差  $90^\circ$  となるように、剪断と伸縮駆動電圧の位相差  $\theta = 0^\circ$  とした時の変位軌道モデルの試算結果を図 B-1 に示す。駆動方向の反転

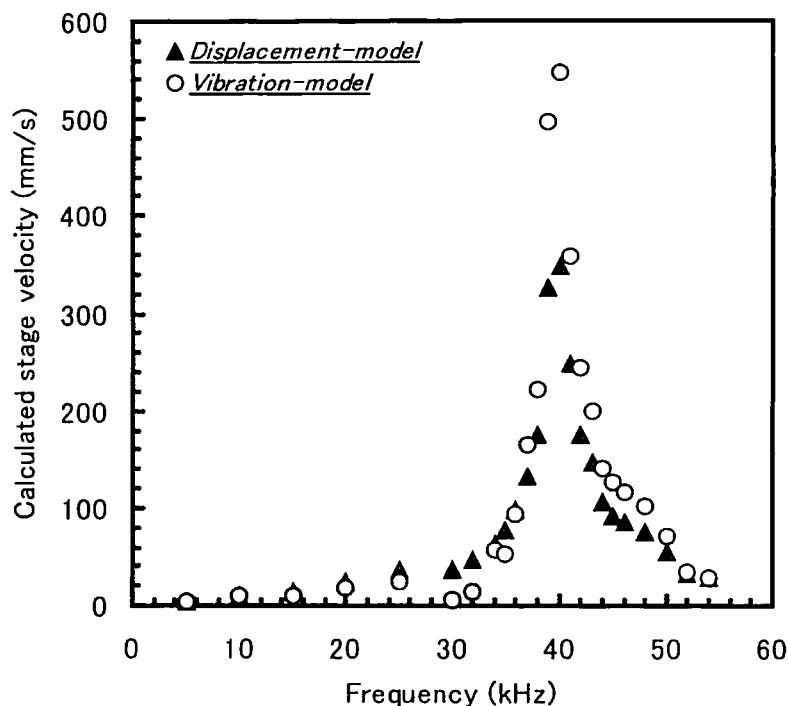


図 B-1 剪断・伸縮電圧位相差  $\theta = 0^\circ$  の時のステージ駆動速度試算結果  
(NRUSM-3,  $V=180V_{pp}$ ,  $P=35N$ )

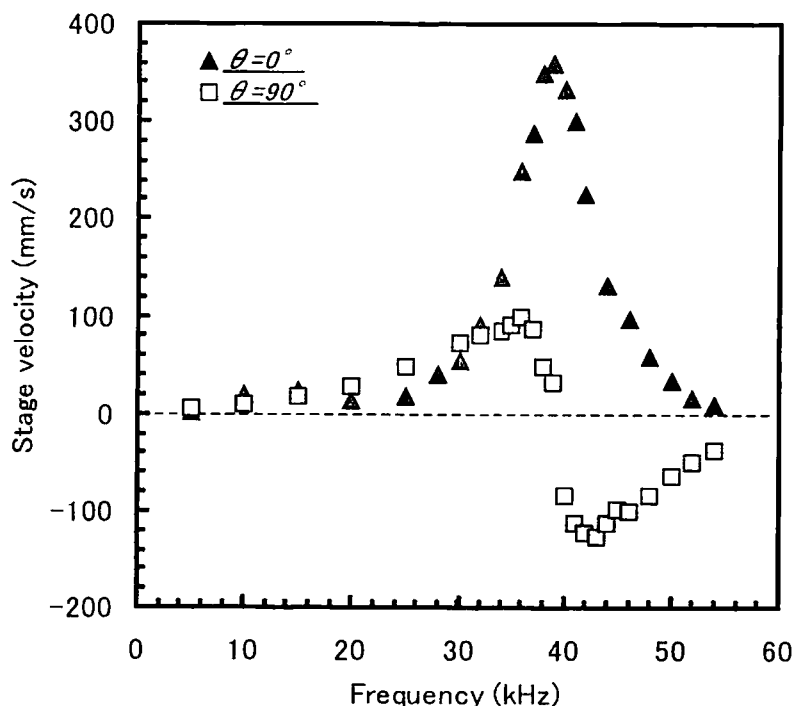


図 B-2 剪断・伸縮電圧位相差 $\theta$  を変化させた時のステージ実駆動速度比較  
(NRUSM-3,  $V=180V_{pp}$ ,  $P=35N$ )

表 B-1 電圧位相制御による共振原理駆動の実験条件

評価アクチュエータ	NRUSM-3 (表 3.3)
駆動電圧	180V <sub>pp</sub>
伸縮・剪断電圧位相差 $\theta$	90°, 0°
駆動周波数	5~54kHz
予圧力	35N
実験セットアップ	図 3.5

は起こっておらず、図 3.51 の位相差 $\theta = 90^\circ$  と比較して駆動速度は大幅に増加していることわかる。変位モデルで 350mm/s、単振動モデルでは 550mm/s という試算値が得られた。

試算結果を元に、実際に駆動電圧の位相差 $\theta$  を理論的には  $90^\circ$  であるものを剪断変位の遅れを予め見込み  $0^\circ$  に変更してステージ駆動を試み、レーザ干渉計(アジレントテクノロジー(株)、HP5529A)を用いて測定を行った(表 B-1)。NRUSM-3 を  $\theta = 90^\circ$  と  $\theta = 0^\circ$  で駆動した時の駆動速度の駆動周波数依存性を図 B-2 に示す。電圧位相差 $\theta = 0^\circ$  では駆動方向の反転が起こっておらず、最高駆動速度は 39kHz で 360mm/s を達成しており、図 B-1 の試算値が示した傾向と同様の結果を得ることができた。

図 B-3 はフォースゲージを用いて伸縮・剪断電圧位相差 $\theta$  が  $90^\circ$  と  $0^\circ$  の時のステージ駆動

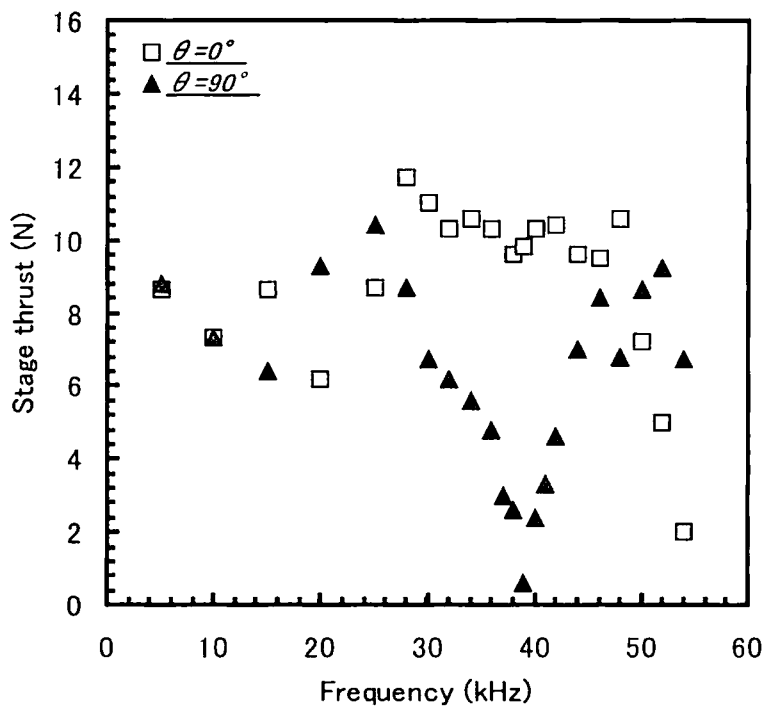


図 B-3 剪断・伸縮電圧位相差 $\theta$  を変化させた時のステージ推力比較  
(NRUSM-3,  $V=180V_{pp}$ ,  $P=35N$ )

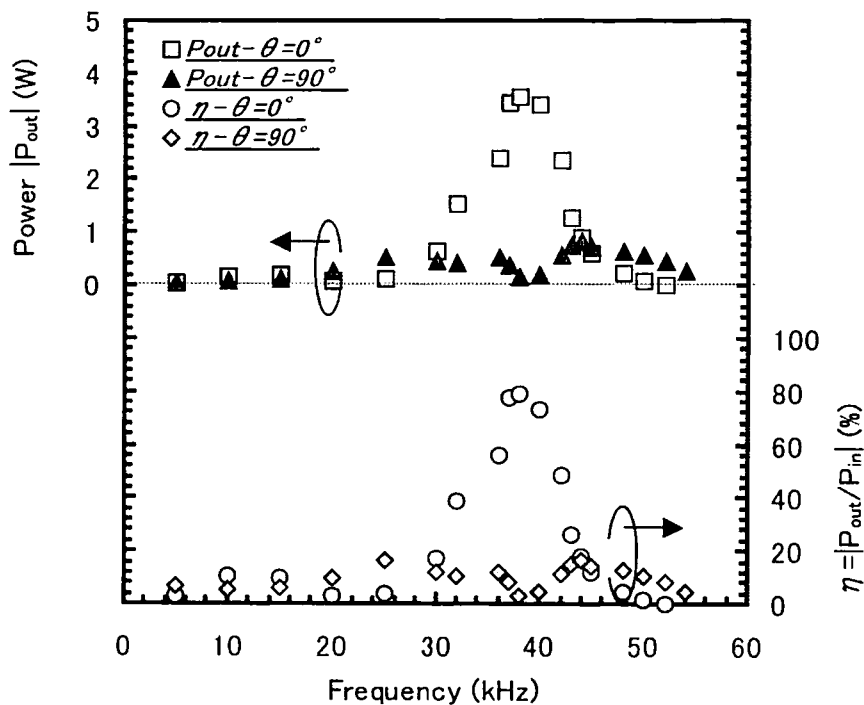


図 B-4 剪断・伸縮電圧位相差 $\theta$  を変化させた時のステージ出力・効率比較  
(NRUSM-3,  $V=180V_{pp}$ ,  $P=35N$ )

表 B-2 電圧位相制御とステージ駆動性能比較

剪断・伸縮 電圧位相	最高速度	駆動方向反転	最大出力	エネルギー 効率
$\theta = 90^\circ$	100mm/s	有り	0.8W	16%
$\theta = 0^\circ$	360mm/s	無し	3.4W	78%

推力を比較したものであるが、 $\theta = 0^\circ$  にすることで共振周波数付近での推力減衰が改善され、28kHz～48kHzの周波数帯で約10Nの一定推力を保っていることがわかる。なお、48kHz以降の推力低下は、楕円軌道の回転によるものと推測される。

図 B-4 は位相差 $\theta = 90^\circ$  と $\theta = 0^\circ$  の時のステージ出力と効率を(3.2)～(3.4)式を用いて求め比較したものであるが、 $\theta = 0^\circ$  では38kHzで出力3.4W、効率78%が得られており、共振周波数付近でのステージの駆動性能が大幅に向上されたことがわかる。このように剪断素子と伸縮素子の駆動電圧位相差を電気的な操作により $90^\circ \rightarrow 0^\circ$ に変更することで、共振周波数近傍での特性改善を行うことができた(表 B-2)。

以上より、NRUSMの駆動性能を向上させるには、位相補償による共振周波数付近での楕円軌道変化補正を行うことが有効であることが示された。アクチュエータ毎に剪断変位の周波数特性を予め取得する、あるいはリアルタイム計測により、位相変化が起こる周波数帯で適切な位相調整を行うことにより、より効率的な駆動が見込まれる。

## 本論文に関する発表

## [学術論文]

Yoshiya Egashira, Kouji Kosaka, Tetsuya Iwabuchi, Tetsuya Kosaka, Tetsuro Baba, Taishi Endo, Hiroyuki Hashiguchi, Takashi Harada, Keiichi Nagamoto, Masayuki Watanabe, Takahiro Yamakawa, Noboru Miyata, Shiro Moriyama, Yasuhiro Morizono, Akira Nakada, Hiroshi Kubota and Tadahiro Ohmi, "Sub-Nanometer Resolution Ultrasonic Motor for 300 mm Wafer Lithography Precision Stage." Japanese Journal of Applied Physics, Part 1. Vol. 41, No. 9, September 2002, pp. 5858-5863. (第3章と第4章に関する発表)

Yoshiya Egashira, Kouji Kosaka, Shinji Takada, Tetsuya Iwabuchi, Misawo Shibata, Keiichi Nagamoto and Hiroshi Kubota, "Development of an Ultra-Precision Positioner and its Applications," Solid State Phenomena, Vols. 78-79, March 2001, pp. 413-418. (第4章に関する発表)

## [国際会議]

Yoshiya Egashira, Kouji Kosaka, Taishi Endo, Hiroyuki Hashiguchi, Keiichi Nagamoto, Masayuki Watanabe, Takahiro Yamakawa, Akira Nakada, Hiroshi Kubota, and Tadahiro Ohmi, "Development of Non-Resonant Ultrasonic Motor with Sub-Nanometer Resolution." Proceedings of 2002 IEEE International Ultrasonic Symposium, October 2002, accepted. (第3章と第4章に関する発表)

Kouji Kosaka, Yoshiya Egashira, Tetsuya Iwabuchi, Satoru Okudera, Keiichi Nagamoto, Takashi Harada, Taishi Endo, Hiroyuki Hashiguchi, Yasuhiro Morizono, Akira Nakada, Hiroshi Kubota and Tadahiro Ohmi, "Development of the non-resonance type ultra-sonic motor and its application for XY-stage," Proceedings of The 1st Korea-Japan Conference on Positioning Technology, October 2002, pp. 172-175.

Fumito Imura, Akira Nakada, Yoshiya Egashira, Hiroshi Kubota, Kouji Kosaka, Tetsuya Kosaka, Hiroyuki Kagami, Kiyoshi Masuda, Jun-ichi Hamada, Mitsuhiro Tada, and Tetsuya Moriuchi. "Development of Nano-Surgery System for Cell Organelles," Proceedings of The Society of Instrument and Control Engineers Annual Conference 2002, August 2002, pp. 3212-3217.

Yoshiya Egashira, Kouji Kosaka, Shinji Takada, Tetsuya Iwabuchi, Tetsuro Baba, Shiro Moriyama, Takashi Harada, Keiichi Nagamoto, Akira Nakada, Hiroshi Kubota, and Tadahiro Ohmi. "0.69 nm Resolution Ultrasonic Motor for Large Stroke Precision Stage," Proceedings of 1st IEEE Conference on Nanotechnology, October 2001, pp. 397-402. (第3章と第4章に関する発表)

Yoshiya Egashira, Kouji Kosaka, Shinji Takada, Tetsuya Iwabuchi, Tetsuya Kosaka, Tetsuro Baba, Takashi Harada, Keiichi Nagamoto, Akira Nakada, and Hiroshi Kubota, "Sub-Nanometer Resolution Ultrasonic Motor for 300mm Wafer Lithography Precision Stage," Digest of papers 2001 International Microprocesses and Nanotechnology Conference, October 2001, pp. 252-253. (第3章と第4章に関する発表)

K. Kosaka, S. Takada, T. Iwabuchi, M. Shibata, Y. Egashira, K. Nagamoto, H. Kubota. Digest of papers 6th International Workshop on BEAM INJECTION ASSESSMENT OF MICROSTRUCTURES IN SEMICONDUCTORS, November 2000, p. 79.

#### [国内発表]

江頭義也、小坂光二、馬場哲郎、岩渕哲也、宮田昇、山川孝宏、渡邊雅幸、森山司郎、佐々木俊一、荒尾淳、井上知行、高木宏司、大隈義信、大隈恵治、高橋孝誠、井戸泰男、坂本博宣、小磯公房、古川博之、遠藤泰史、橋口弘幸、原田崇、永本恵市、森園靖浩、中田明良、久保田弘、大石潔、大見忠弘、「超精密ステージ開発 ～第3報～」、第17回熊本県産学官技術交流会 講演論文集、平成15年1月、246頁 - 247頁。

古川博之、小磯公房、遠藤泰史、橋口弘幸、原田崇、永本恵市、中田明良、久保田弘、小坂光二、岩渕哲也、馬場哲郎、江頭義也、山川孝宏、渡邊雅幸、「非共振型超音波モータ駆動ステージの制御パラメータモニタリング」、第17回熊本県産学官技術交流会 講演論文集、平成15年1月、256頁 - 257頁。

板倉敬二郎、居村史人、中田明良、久保田弘、小坂光二、岩渕哲也、小坂哲也、江頭義也、荒尾淳、井上知行、前田安弘、高木宏司、「微細構造デバイス用電気計測システムの開発」、第17回熊本県産学官技術交流会 講演論文集、平成15年1月、258頁 - 259頁。

小磯公房、古川博之、遠藤泰史、橋口弘幸、永本恵市、中田明良、久保田弘、小坂光二、岩渕哲也、馬場哲郎、江頭義也、山川孝宏、渡邊雅幸、「低発熱材料を用いた非共振型超音波モータの特性評価」、第17回熊本県産学官技術交流会 講演論文集、平成15年1月、320頁 - 321頁。

遠藤泰史、橋口弘幸、古川博之、小磯公房、永本恵市、江頭義也、小坂光二、中田明良、久保田弘、「非共振型超音波モータの予圧機構に関する研究」、2002年度応用物理学会九州支部講演会講演論文集、平成14年11月、28頁。

遠藤泰史、橋口弘幸、江頭義也、永本恵市、小坂哲也、岩渕哲也、小坂光二、中田明良、久保田弘、「高速超精密ステージ用非共振型超音波モータの開発 ～予圧機構とステージ駆動性能～」（第5報）」、2002年度精密工学会秋季大会講演論文集、平成14年10月、253頁。

江頭義也、小坂光二、岩渕哲也、小坂哲也、馬場哲郎、遠藤泰史、橋口弘幸、永本恵市、中田明良、久保田弘、「非共振型超音波モータ駆動超精密ステージの開発 -（第6報）積層型圧電アクチュエータの動特性-」、2002年度精密工学会秋季大会講演論文集、平成14年10月、254頁。

小坂光二、江頭義也、岩渕哲也、小坂哲也、馬場哲郎、永本恵市、遠藤泰史、橋口弘幸、中田明良、久保田弘、「非共振型超音波モータ駆動超精密ステージの開発 -（第7報）非共振型超音波モータの微動特性-」、2002年度精密工学会秋季大会講演論文集、平成14年10月、255頁。

橋口弘幸、遠藤泰史、江頭義也、永本恵市、小坂哲也、小坂光二、山川孝宏、中田明良、久保田弘、「非共振型超音波モータ駆動超精密ステージの開発 -（第8報）-」、2002年度精密工学会秋季大会講演論文集、平成14年10月、256頁。

居村史人、中田明良、久保田弘、小坂光二、江頭義也、小坂哲也、岩渕哲也、馬場哲郎、加納竹志、荒尾淳、「非共振型超音波モータを用いたナノマニピュレータの性能評価」、2002年度精密工学会秋季大会講演論文集、平成14年10月、109頁。

原田崇、江頭義也、中田明良、久保田弘、山川孝宏、渡邊雅幸、佐野三郎、「マイクロ波焼結によって作製したPZTセラミックスの特性とその接合法に関する研究」、第63回応用物理学会学術講演会講演予稿集、平成14年9月、154頁。

遠藤泰史、古川博之、小磯公房、橋口弘幸、原田崇、永本恵市、江頭義也、小坂光二、中田明良、久保田弘、「高速超精密ステージ用非共振型超音波モータの開発 ～予圧機構とステージ駆動性能～」、第63回応用物理学会学術講演会講演予稿集、平成14年9月、636頁。

橋口弘幸、小磯公房、古川博之、遠藤泰史、江頭義也、小坂光二、山川孝宏、中田明良、久保田弘、「高速かつ高精度な圧電アクチュエータの動解析」、第63回応用物理学会学術講演会講演予稿集、平成14年9月、636頁。

小坂光二、江頭義也、岩渕哲也、奥寺智、永本恵市、原田崇、遠藤泰史、橋口弘幸、森園靖浩、中田明良、久保田弘、大見忠弘、「非共振型超音波モータとそれを応用した超精密XYステージの開発」、第14回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集、平成14年5月、541頁 - 546頁。

江頭義也、小坂光二、高田真次、岩渕哲也、小坂哲也、永本恵市、遠藤泰史、橋口弘幸、中田明良、久保田弘、「非共振型超音波モータ駆動超精密ステージの開発 -（第3報）-」、2002年度精密工学会春季大会講演論文集、平成14年3月、119頁。

小坂光二、江頭義也、岩渕哲也、小坂哲也、永本恵市、原田崇、石橋秀隆、遠藤泰史、橋口弘幸、魚住清彦、中田明良、久保田弘、「非共振型超音波モータ駆動超精密ステージの開発 -（第4報）-」、2002年度精密工学会春季大会講演論文集、平成14年3月、120頁。

原田崇、江頭義也、石橋秀隆、遠藤泰史、橋口弘幸、中田明良、久保田弘、小坂光二、高田真次、宮田昇、山川孝宏、渡邊雅幸、佐野三郎、「マイクロ波焼結を用いたPZTセラミックスの作製」、第49回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、平成14年3月、198頁。



遠藤泰史、橋口弘幸、石橋秀隆、原田崇、永本恵市、江頭義也、高田真次、小坂光二、中田明良、久保田弘、「積層型圧電アクチュエータを用いた非共振型超音波モータ (NRUSM) の開発」、第 49 回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集、平成 14 年 3 月、769 頁。

橋口弘幸、石橋秀隆、遠藤泰史、原田崇、江頭義也、永本恵市、高田真次、小坂光二、中田明良、久保田弘、「円筒型圧電素子を用いた非共振型超音波モータ (NRUSM) の開発」、第 49 回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集、平成 14 年 3 月、769 頁。

居村史人、中田明良、江頭義也、小坂光二、小坂哲也、鏡裕行、久保田弘、「細胞内構造体操作用ピペットの先端における流体挙動の観察」、第 49 回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集、平成 14 年 3 月、1298 頁。

小坂光二、江頭義也、岩渕哲也、宮田昇、山川孝宏、渡邊雅幸、森山司郎、佐々木俊一、永本恵市、原田崇、遠藤泰史、橋口弘幸、森園靖浩、中田明良、久保田弘、大見忠弘、「非共振型超音波モータを応用した超精密高速ステージとそのモータを応用した精密マニピュレータ」、2002 年全九州半導体技術フォーラム 講演資料・ポスター資料、平成 14 年 3 月、38-1 頁 - 38-4 頁。

居村史人、中田明良、江頭義也、森川晃次、原田崇、石橋秀隆、遠藤泰史、橋口弘幸、久保田弘、小坂光二、小坂哲也、岩渕哲也、馬場哲郎、加納竹志、鏡裕行、「細胞手術ナノピペットと超精密マニピュレーションシステムの開発」、第 16 回熊本県産学官技術交流会 講演論文集、平成 14 年 1 月、194 頁 - 195 頁。

原田崇、江頭義也、永本恵市、森園靖浩、中田明良、久保田弘、石橋秀隆、遠藤泰史、橋口弘幸、小坂光二、高田真次、岩渕哲也、小坂哲也、井戸泰男、坂本博宣、荒尾淳、井上知行、高木宏司、大隈義信、宮田昇、山川孝宏、渡邊雅幸、「超精密ステージ開発 ～第 2 報～ - 圧電素子に関する基礎研究-」、第 16 回熊本県産学官技術交流会 講演論文集、平成 14 年 1 月、196 頁 - 197 頁。

橋口弘幸、石橋秀隆、遠藤泰史、原田崇、永本恵市、江頭義也、中田明良、久保田弘、岩渕哲也、小坂哲也、高田真次、小坂光二、「非共振型超音波モータ駆動超精密ステージの開発 - アクチュエータの特性評価-」、第 16 回熊本県産学官技術交流会 講演論文集、平成 14 年 1 月、198 頁 - 199 頁。

遠藤泰史、橋口弘幸、石橋秀隆、原田崇、永本恵市、江頭義也、中田明良、久保田弘、岩渕哲也、小坂哲也、高田真次、小坂光二、「非共振型超音波モータ駆動超精密ステージの開発 - ステージの駆動性能評価-」、第 16 回熊本県産学官技術交流会 講演論文集、平成 14 年 1 月、200 頁 - 201 頁。

原田崇、江頭義也、石橋秀隆、遠藤泰史、橋口弘幸、中田明良、久保田弘、小坂光二、高田真次、宮田昇、山川孝宏、渡邊雅幸、「マイクロ波焼結を用いた PZT セラミックスの作製」、平成 13 年度応用物理学九州支部講演会 講演予稿集、平成 13 年 12 月、第 27 巻、125 頁。

江頭義也、原田崇、小坂光二、石橋秀隆、遠藤泰史、橋口弘幸、中田明良、久保田弘、高田真次、宮田昇、山川孝宏、渡邊雅幸、「マイクロ波焼結した圧電素子を用いた非共振型超音波モータの開発」、平成 13 年度応用物理学九州支部講演会 講演予稿集、平成 13 年 12 月、第 27 巻、126 頁。

小坂光二、奥寺智、高田真次、岩渕哲也、江頭義也、永本恵市、原田崇、遠藤泰史、橋口弘幸、森園靖浩、中田明良、久保田弘、大見忠弘、「非共振型超音波モータ駆動ステージの開発とそれを応用した電子線描画装置」、第 2 回ナノビームテクノロジーシンポジウム研究会(日本学術振興会)研究資料、平成 13 年 12 月、51 頁 - 57 頁。

江頭義也、原田崇、永本恵市、中田明良、久保田弘、石橋秀隆、遠藤泰史、橋口弘幸、小坂光二、高田真次、「非共振型超音波モータ駆動超精密ステージの開発 - (第2報) -」、2001年度精密工学会秋季大会 講演論文集、平成13年9月、540頁。

江頭義也、小坂光二、高田真次、永本恵市、原田崇、石橋秀隆、遠藤泰史、橋口弘幸、中田明良、久保田弘、「NRUSM 駆動 300mm ウェハ対応電子線描画装置用超精密ステージの開発」、第62回応用物理学会学術講演会 講演予稿集、平成13年9月、545頁。

江頭義也、永本恵市、久保田弘、柴田節、小坂光二、高田真次、岩淵哲也、馬場哲郎、「非共振型超音波モータ駆動超精密ステージの開発」、2001年度精密工学会春季大会 講演論文集、平成13年3月、526頁。

江頭義也、柴田節、中田明良、久保田弘、小坂光二、高田真次、宮田昇、「マイクロ波焼結による圧電アクチュエータ用 PZT セラミックスの作製」、第48回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集、平成13年3月、203頁。

小坂光二、高田真次、岩淵哲也、宮田昇、山川孝宏、阿隅一将、井戸泰男、坂本博宣、荒尾淳、井上知行、時松政幸、大隈義信、江頭義也、柴田節、森園靖浩、中田明良、久保田弘、大見忠弘、「熊本県地域結集型研究事業「超精密半導体計測技術開発」～コアグループ：非共振型超音波モータ駆動超精密高速ステージの開発～」、2001年全九州半導体技術フォーラム サテライト会議資料、平成13年3月、59頁 - 62頁。

高田真次、小坂光二、岩淵哲也、久保田弘、江頭義也、永本恵市、柴田節、井戸泰男、坂本博宣、荒尾淳、井上知行、時松政幸、大隈義信、東町高雄、井原なつみ、「非共振型超音波モータ駆動精密高速ステージ」、第15回熊本県産学官技術交流会 講演論文集、平成13年1月、214頁・215頁。

江頭義也、森園靖浩、中田明良、久保田弘、小坂光二、高田真次、宮田昇、山川孝宏、阿隅一将、「非共振型超音波モータ用 PZT セラミックスのマイクロ波焼結」、第15回熊本県産学官技術交流会 講演論文集、平成13年1月、640頁・641頁。

江頭義也、柴田節、永本恵市、久保田弘、小坂光二、高田真次、岩淵哲也、馬場哲郎、「超音波モータ駆動超精密ステージの開発」、平成12年度応用物理学会九州支部講演会 講演予稿集、平成12年12月、63頁。

永本恵市、江頭義也、柴田節、久保田弘、小坂光二、高田真次、「非共振型超音波モータ駆動ステージの位置決め特性評価」、平成12年度応用物理学会九州支部講演会 講演予稿集、平成12年12月、64頁。

江頭義也、柴田節、久保田弘、小坂光二、高田真次、岩淵哲也、馬場哲郎、「電子線描画装置対応非共振型超音波モータ駆動ステージの開発」、第61回応用物理学会学術講演会 講演予稿集、平成12年9月、614頁。

江頭義也、久保田弘、小坂光二、馬場哲郎、桜井健、永本恵市、「サブ 0.1 $\mu\text{m}$  次世代集積化技術におけるステージ精度」、第47回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集、平成12年3月、705頁。

江頭義也、久保田弘、小坂光二、馬場哲郎、桜井健、永本恵市、「サブ 0.1 $\mu\text{m}$  対応次世代電子線露光装置におけるステージ精度」、平成11年度応用物理学会九州支部講演会 講演予稿集、平成11年12月、36頁。

[解説・特集]

江頭義也、小坂光二、高田真次、岩淵哲也、宮田昇、山川孝宏、渡邊雅幸、森山司郎、永本恵市、原田崇、遠藤泰史、橋口弘幸、森園靖浩、中田明良、久保田弘、大見忠弘、「非共振型超音波モータ駆動超精密ステージの開発」、超音波 TECHNO 日本工業出版、第 14 巻、第 3 号、平成 14 年 5 月、28 頁 - 32 頁。

居村史人、中田明良、久保田弘、荒尾淳、小坂光二、江頭義也、小坂哲也、「半導体製造技術の超精密技術を応用して開発したナノマニピュレータ」、機械設計 日刊工業新聞社、第 46 巻、第 10 号、平成 14 年 7 月、59 頁 - 63 頁。

[特許]

小坂光二、岩淵哲也、江頭義也、特願 2002-350468 「粗微動共用送り装置」。

[受賞]

2001 International Microprocesses and Nanotechnology Conference (Sponsored by The Japan Society of Applied Physics. Technical-Cosponsored by IEEE Electron Device Society), Young Author's Award, November 2002.

国際ナノテクノロジー総合展・技術会議、ナノテック大賞バイオテクノロジー部門賞、平成 14 年 3 月。