

新高速圧電アクチュエータの
超精密半導体プロセスへの応用と
原子スケール生産技術の確立

2005年9月

熊本大学大学院自然科学研究科

小坂光二

目次

第1章	序論	1
1.1.	研究背景	1
1.2.	従来のステージ構成とその問題点	4
1.3.	共振型超音波モータ	7
1.4.	非共振型超音波モータ(NRUSM)	9
1.5.	本論文の目的	11
1.6.	本論文の構成	12
	参考文献	13
第2章	非共振型超音波モータの開発	15
2.1.	緒言	15
2.2.	基本構成	15
2.2.1.	原型アクチュエータ	15
2.2.2.	予圧機構	17
2.3.	動性能評価	20
2.3.1.	基本セットアップ	20
2.3.2.	駆動電圧依存性	20
2.3.3.	駆動周波数依存性	26
2.3.4.	予圧力依存性	29
2.3.5.	振動解析	32
2.4.	新型アクチュエータ	37
2.5.	結言	37
	参考文献	38
第3章	高剛性ステージの開発	39
3.1.	緒言	39
3.2.	ファインセラミックスステージ	40
3.2.1.	ステージ仕様と FEM 解析	40
3.2.2.	ステージ姿勢計測	49
3.2.3.	微少修正と評価	53
3.3.	軽量化技法	59

3.3.1.	軽量化と高剛性のトレードオフ	59
3.3.2.	リブ構造によるファインセラミックステージ	59
3.3.3.	ハニカム構造を有するファインセラミックステージ	64
3.4.	NRUSMによる駆動評価	68
3.5.	結言	70
	参考文献	71
第4章	NRUSMの基本制御	73
4.1.	緒言	73
4.2.	NRUSMの動特性	73
4.2.1.	ダイナミクス取得手順	73
4.2.2.	モデル導出	77
4.3.	汎用制御手法における評価	79
4.3.1.	PID制御系	79
4.3.2.	ステップ&リピート動作評価	81
4.3.3.	定速度動作評価	83
4.3.4.	停止時のドリフト評価	87
4.4.	ロバスト制御系における評価	92
4.4.1.	I-P制御における評価	92
4.4.2.	先進型I-P制御の構築とその評価	98
4.4.3.	状態推定オブザーバによる評価	101
4.4.4.	連続軌跡追従系を装備したロバスト制御による評価	107
4.5.	結言	114
	参考文献	115
第5章	ステージシステムの耐久性評価	117
5.1.	緒言	117
5.2.	耐久性指針とステージシステム構成	117
5.3.	初期の耐久性試験結果	119
5.4.	連続駆動試験における耐久性評価指針となる各部の考察	121
5.4.1.	実験セットアップ	121
5.4.2.	圧電アクチュエータ評価	122
5.4.3.	ガイドプレート評価	125
5.5.	真空耐久性試験	127
5.5.1.	一般的な真空領域における評価	127
5.5.2.	超高真空領域における評価	132
5.6.	結言	137

参考文献	137
第6章 接触部における摩耗メカニズム	139
6.1. 緒言	139
6.2. 摩擦モデルの構築	139
6.2.1. 先端軌道モデル	139
6.2.2. 力学モデル	141
6.3. すべりの観測	144
6.4. すべりを抑圧した駆動方法	148
6.5. 結言	151
参考文献	151
第7章 制御による摩耗抑圧アプローチ	153
7.1. 緒言	153
7.2. 摩耗と静摩擦力との関係	154
7.2.1. 静摩擦限界の試算	154
7.2.2. 不感帯の抑圧	163
7.2.3. 摩耗評価	169
7.3. 摩擦理論を組み込んだ制御系	172
7.3.1. 静摩擦から動摩擦へと変化する瞬間の振る舞い	172
7.3.2. Bang-bang 補償における基本制御	175
7.3.3. 時間関数を取り入れた Bang-bang 補償制御	178
7.3.4. Bang-bang 補償を装備した連続軌跡追従制御系	182
7.4. 結言	185
参考文献	186
第8章 装置への応用事例	187
8.1. 緒言	187
8.2. 電子線描画装置への応用例	188
8.3. レティクルフリー露光装置への応用例	195
8.4. ナノサーチャリー装置への応用例	202
8.5. ナノプローブ装置への応用例	207
8.6. 結言	211
参考文献	211

第9章	総括	213
9.1.	結論	213
9.2.	今後の展望	216
謝辞	217
付録 A	剪断変形素子を使用しない非共振型超音波モータ	219
本論文に関する発表	227

目次

1.1	半導体製造工程とそこで使用されている基本技術	2
1.2	露光装置における光源の変遷	2
1.3	真空チャンバー内部の XY ステージと干渉除去機構	5
1.4	干渉除去機構の動作説明	6
1.5	電磁モータと圧電素子による粗微動型ステージ	6
1.6	共振型超音波モータ外観	7
1.7	共振型超音波モータの圧電素子構成	8
1.8	共振型超音波モータの動作原理	8
1.9	非共振型超音波モータ外観	9
1.10	非共振型超音波モータの圧電素子構成	10
1.11	非共振型超音波モータの動作原理	11
2.1	アクチュエータの概観	16
2.2	予圧機構「ZERO」の構成	17
2.3	予圧機構「Type-A」の構成	18
2.4	予圧機構の不具合点と必要機能	19
2.5	予圧機構「Type-S1」の構成	19
2.6	オープンループ駆動特性評価の実験セットアップ	21
2.7	ステージ駆動速度－駆動電圧依存性 (f=10kHz、P=35N)	23
2.8	ステージ駆動速度－駆動電圧依存性 (f=20kHz、P=35N)	24
2.9	ステージ駆動速度－駆動電圧依存性 (f=30kHz、P=35N)	24
2.10	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)	25
2.11	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)	25
2.12	NRUSM-1 の駆動速度－駆動周波数依存性 (V=180V _{pp} 、P=可変)	27
2.13	NRUSM-1 の駆動速度－駆動周波数依存性 (V=可変、P=35N)	28
2.14	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)	28
2.15	NRUSM-1、-5 の駆動速度－駆動周波数依存性比較 (V=120V _{pp} 、P=35N)	29
2.16	ステージ駆動速度－予圧力依存性 (f=10kHz、V=180V _{pp})	30
2.17	ステージ駆動速度－予圧力依存性 (f=20kHz、V=180V _{pp})	31
2.18	ステージ駆動速度－予圧力依存性 (f=30kHz、V=180V _{pp})	31
2.19	無負荷変位測定の実験セットアップ	33
2.20	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})	33

2.21	NRUSM-1 の無負荷伸縮変位・位相遅れ—駆動周波数依存性 ($V=100V_{pp}$)	34
2.22	20kHz、40kHz 駆動時の剪断変位—時間応答比較	34
2.23	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)	35
2.24	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 $V=100V_{pp}$)	35
3.1	ムク構造 XY ステージ全体構造	42
3.2	ムク構造上段ステージ形状モデル	43
3.3	ムク構造中段ステージ形状モデル	43
3.4	ムク構造 XY の上段ステージが中央位置の場合の有限要素モデル	44
3.5	ムク構造 XY の上段ステージが端に移動した場合の有限要素モデル	44
3.6	ムク構造 XY ステージの上段ステージが中央位置の場合のたわみ分布	45
3.7	ムク構造 XY ステージの上段ステージが端に移動した場合のたわみ分布	45
3.8	ムク構造上段ステージの 1 次振動モード (676Hz)	46
3.9	ムク構造上段ステージの 2 次振動モード (864Hz)	46
3.10	ムク構造上段ステージの 3 次振動モード (1897Hz)	47
3.11	ムク構造中段ステージの 1 次振動モード (646Hz)	47
3.12	ムク構造中段ステージの 2 次振動モード (835Hz)	48
3.13	ムク構造中段ステージの 3 次振動モード (1446Hz)	48
3.14	ステージ幾何精度計測における定義	50
3.15	300mm ストロークステージの軸構成と計測機器配置	50
3.16	組み立て後のステージ幾何精度の計測結果	51
3.17	40 往復後のステージ幾何精度の計測結果	51
3.18	300mm ストロークステージのアルミナ製 V 型ガイドレール構造図	52
3.19	ガイドレール外観と潤滑オイルからのカーボン析出写真	52
3.20	ガイドレール清浄後のステージ幾何精度の計測結果	53
3.21	300mm ストロークステージの Z 変動計測用セットアップ	54
3.22	300mm ストロークステージの Z 変動計測方法	54
3.23	ライン A の Z 変動計測結果	55
3.24	ライン D の Z 変動計測結果	55
3.25	300mm ストロークステージのステージ上面と定盤間での平行度計測方法	56
3.26	ライン A の平行度計測結果	56
3.27	ライン D の平行度計測結果	57
3.28	計測結果より得られたトップテーブルの空間変動値	57
3.29	トップテーブルならびにガイドレールの修正量	58
3.30	300mm ストロークステージの Z 変動 (修正後)	59
3.31	リブ構造 XY ステージの全体構造モデル	60
3.32	リブ構造 XY ステージの上段形状モデル	61
3.33	リブ構造 XY ステージの中段形状モデル	61

3.34	リブ構造 XY ステージでの 上段ステージが中央位置の場合の有限要素モデル	62
3.35	リブ構造 XY ステージでの 上段ステージが端に移動した場合の有限要素モデル	62
3.36	リブ構造 XY ステージでの上段ステージが中央位置の場合のたわみ分布	63
3.37	リブ構造 XY ステージでの上段ステージが端に移動した場合のたわみ分布	63
3.38	ハニカム構造 XY ステージの上段形状モデル	65
3.39	ハニカム構造 XY ステージの中段形状モデル	65
3.40	ハニカム構造 XY ステージでの 上段ステージが中央位置の場合の有限要素モデル	66
3.41	ハニカム構造 XY ステージでの 上段ステージが端に移動した場合の有限要素モデル	66
3.42	ハニカム構造 XY ステージでの上段ステージが中央位置の場合のたわみ分布	67
3.43	ハニカム構造 XY ステージでの上段ステージが端に移動した場合のたわみ分布	67
3.44	ハニカム構造のセラミックス製ステージ外観	69
3.45	ハニカム構造部の拡大図	69
3.46	ハニカム構造のセラミックス製ステージにおける瞬間最大加速度	70
4.1	無駄時間と整定時間測定時のブロックダイアグラム	74
4.2	ステップ入力に対する位置出力	74
4.3	ステップ入力に対する概算速度	75
4.4	同定実験のブロックダイアグラム	75
4.5	M 系列信号入力	76
4.6	M 系列信号入力に対する位置出力	76
4.7	ARX、ARMAX、OE、BJ の各モデルにおける周波数特性	78
4.8	同一入力に対する実験出力とモデル出力の比較	78
4.9	PID 制御システムの全体接続図	80
4.10	PID 制御系ブロックダイアグラム	80
4.11	PID 制御系サーボ用計算フィルター	81
4.12	NRUSM による 500 μ m ステップ&リピート動作	82
4.13	500 μ m ステップ&リピート動作の拡大図	82
4.14	電子線描画装置におけるステップ&リピート動作図	85
4.15	100nm/s と 102nm/s の等速駆動指令における速度分解能評価	86
4.16	速度域全体での等速度移動時の時間位置偏差	86
4.17	+1mm 移動後の停止時ドリフトデータ	87
4.18	-1mm 移動後の停止時ドリフトデータ	88
4.19	NRUSM の送りシーケンス	88
4.20	剪断素子のみを使用した送り原理	88
4.21	剪断素子のみを使用した微動制御のシーケンスフロー	89

4.22	微動制御を付加したステージ停止時のドリフトデータ	90
4.23	微動制御による 9.6nm ステップ&リピート駆動	91
4.24	微動制御による 1.2nm ステップ&リピート駆動	91
4.25	PI 制御器のブロックダイアグラム	94
4.26	I-P 制御器ブロックダイアグラム	94
4.27	各帯域における PI 制御器特性 (Position)	95
4.28	各帯域における PI 制御器特性 (Control input)	95
4.29	PI 制御器と I-P 制御器の特性比較 (Position)	96
4.30	PI 制御器と I-P 制御器の特性比較 (Control input)	96
4.31	速度特性を含めたモデルによるシミュレーション結果 (Position)	97
4.32	速度特性を含めたモデルによるシミュレーション結果 (Control input)	97
4.33	アンチwindアップ機能付き PI 制御器のブロックダイアグラム	99
4.34	非現実的なアンチwindアップ機能付き I-P 制御器のブロックダイアグラム	99
4.35	構築したアンチwindアップ機能付き I-P 制御器のブロックダイアグラム	100
4.36	位置情報による従来型 PI 制御器との比較	100
4.37	制御電圧による従来型 PI 制御器との比較	101
4.38	ロバスト制御系のブロックダイアグラム	102
4.39	ロバスト制御系の特性比較 (Position)	103
4.40	ロバスト制御系の特性比較 (Control input)	103
4.41	状態推定オブザーバのブロックダイアグラム	104
4.42	状態推定オブザーバによる速度推定	104
4.43	ステップ位置指令による特性比較 (速度推定無し)	105
4.44	ステップ位置指令による特性比較 (速度推定有り)	105
4.45	ランプ位置指令による特性比較 (速度推定無し)	106
4.46	ランプ位置指令による特性比較 (速度推定有り)	106
4.47	CPT 制御系のブロックダイアグラム	108
4.48	CPT 制御系とロバスト制御系の閉ループにおける周波数特性比較	108
4.49	ステップ位置指令による CPT 制御系の特性比較 (Position)	109
4.50	ステップ位置指令による CPT 制御系の特性比較 (Control input)	109
4.51	ランプ位置指令による CPT 制御系の特性比較 (Position)	110
4.52	ランプ位置指令による CPT 制御系の特性比較開始部分の拡大	110
4.53	ランプ位置指令に対する追従誤差比較	111
4.54	正弦波位置指令による CPT 制御系の特性比較 (Position)	111
4.55	正弦波位置指令による CPT 制御系の特性比較 (追従誤差)	112
4.56	正弦波位置指令時の追従誤差ヒストグラム (ロバスト制御系)	113
4.57	正弦波位置指令時の追従誤差ヒストグラム (CPT 制御系)	113
5.1	生産ラインで稼働している CD-SEM のウェハ 3 点計測図	118
5.2	連続駆動試験に用いた 100mm ストローク評価用ステージの外観	119

5.3	サーフェスプロファイラ外観	120
5.4	ガイドプレート摺動面における摩耗痕の 2D プロファイル	121
5.5	クローズドループ制御におけるステージ駆動プロファイル	122
5.6	D 材アクチュエータによる連続駆動試験時のサーボモニタプロファイル	123
5.7	NA 材アクチュエータによる連続駆動試験時のサーボモニタプロファイル	124
5.8	測温抵抗体 (Pt100) を用いた D 材素子と NA 材素子の温度計測	124
5.9	D 材素子と NA 材素子の駆動時における表面温度上昇	125
5.10	200km 耐久性試験におけるガイドプレート表面の 3D プロファイル	126
5.11	200km 耐久性試験における摩耗レートの計測結果	126
5.12	真空内耐久性試験に使用した JSM848 外観とステージ拡大図	128
5.13	真空内耐久性試験における駆動開始から 10 分毎のサーボモニタ電圧	129
5.14	真空内耐久性試験後のガイドプレート外観	129
5.15	真空内耐久性試験に使用した真空チャンバー外観	130
5.16	真空内耐久性試験におけるワイパー有無でのサーボモニタ電圧比較	130
5.17	ワイパー装着による耐久試験後のガイドプレート表面の 3D プロファイル	131
5.18	ワイパー装着による耐久試験後のガイドプレート表面の 2D プロファイル	132
5.19	真空耐久試験で使用した超高真空装置の外観	133
5.20	サーボモニタ電圧波形の経時変化	134
5.21	真空度遷移と等速駆動領域のサーボモニタ電圧平均値の関係	134
5.22	連続駆動試験後のガイドプレート表面と未走行領域の 3D プロファイル	135
5.23	XPS によるガイドレール上の堆積物解析結果	136
5.24	XPS によるガイドレール上の堆積物解析結果 (特異点拡大図)	136
6.1	NRUSM の発生変位軌道と位相変化の影響	140
6.2	駆動速度の試算結果	141
6.3	ステージとアクチュエータの座標	142
6.4	ステージとアクチュエータにかかる力	142
6.5	アクチュエータへの印加電圧と先端位置、速度、加速度の関係	144
6.6	無付加時の駆動周波数と先端変位の関係	146
6.7	すべりの観測実験セットアップ	146
6.8	剪断電圧の波形の数とステージの位置	147
6.9	すべりの観測	147
6.10	アクチュエータ先端の加速度、速度および位置	150
6.11	すべりを抑圧した駆動タイムチャート	150
7.1	摩耗評価用ステージの力学モデル	158
7.2	摩耗評価用ステージの外観写真	158
7.3	予圧機構 (ZERO) の構造図	159
7.4	素子先端部における軌道モデル	159

7.5	試算における駆動サイクル毎の電圧変化	160
7.6	試算における駆動サイクル毎の電圧変化に対応した軌道変化	160
7.7	試算における位置変化状態	161
7.8	200km 耐久試験時のガイドレール各位置と印加電圧との関係	162
7.9	200km 耐久試験時のガイドレール各位置における駆動サイクル間での 電圧変化分	162
7.10	オープン制御による NRUSM の速度特性	165
7.11	NRUSM のガイドプレートとの接触部拡大図	165
7.12	接触部における素子自身の内部応力を重視した力学モデル	166
7.13	接触部における表面粗さと足上げを考慮した力学モデル	166
7.14	NRUSM 駆動回路 (改良前)	167
7.15	改良後の NRUSM 駆動回路	167
7.16	NRUSM 駆動回路の入出力特性	168
7.17	駆動回路改良後のオープン制御による NRUSM の全速度域	168
7.18	駆動回路改良後の速度=0mm/s 近傍の拡大図	169
7.19	これまでの耐久性試験におけるガイドレール部の摩耗 (加減速、停止部分) ..	170
7.20	これまでの耐久性試験におけるガイドレール部の摩耗 (等速度領域)	170
7.21	静摩擦領域駆動を付加したガイドレール部の摩耗 (加減速、停止部分)	171
7.22	静摩擦領域駆動を付加したガイドレール部の摩耗 (等速度領域)	171
7.23	200km 耐久試験と静摩擦領域駆動での摩耗レート比較	172
7.24	有効ストローク左端より 10mm 位置での摩擦特性	174
7.25	連続駆動における摩擦特性の変化 (正方向駆動)	174
7.26	連続駆動における摩擦特性の変化 (負方向駆動)	175
7.27	bang-bang 制御のブロックダイアグラム	176
7.28	改良型 bang-bang 制御におけるステップ応答	177
7.29	改良型 bang-bang 制御における 1mm ステップの連続駆動	177
7.30	ステップ応答による目標位置と制御器出力の関係	179
7.31	ステップ応答による目標位置と制御器出力の関係 (拡大図)	180
7.32	7 時間連続駆動試験における正方向の各摩擦モデル	180
7.33	7 時間連続駆動試験における負方向の各摩擦モデル	181
7.34	7 時間連続駆動試験における各摩擦モデルによる 1mm ステップの連続駆動 ..	181
7.35	改良型 bang-bang 制御機能を含んだ CPT 制御系のブロック線図	183
7.36	正弦波位置指令 ($\pm 100\mu\text{m}$ 振幅, 10Hz) に対する各制御系の位置軌跡	183
7.37	正弦波位置指令 ($\pm 100\mu\text{m}$ 振幅, 10Hz) に対する各制御系の位置偏差	184
7.38	ロバスト制御系の位置偏差に関するヒストグラム	184
7.39	CPT + Bang-bang 補償制御系の位置偏差に関するヒストグラム	185
8.1	ナノテクノロジー技術の位置する寸法領域	188
8.2	走査型電子顕微鏡 (SEM) の偏向メカニズム	189

8.3	NRUSM 駆動の 100mm ストロークステージ外観	190
8.4	偏向調整アルゴリズムにおける中心画像取り込みイメージ	192
8.5	偏向調整アルゴリズムにおける offset 画像取り込みイメージ	193
8.6	PC 画面上に表示された計算用画像取得	193
8.7	描画順序と接合精度の検査用パターン	194
8.8	描画フローチャート	194
8.9	NRUSM 駆動ステージを搭載した R&D 描画装置におけるフィールド接合精度	195
8.10	オフライン露光方式とオンライン露光方式	197
8.11	プリント配線基板用オンライン露光システムの概略図	197
8.12	レティクルフリー露光装置の外観図	198
8.13	露光方式	199
8.14	レティクルとして使用した LCD 外観	199
8.15	オンライン露光システムに搭載した NRUSM 駆動の高精度ステージ外観	200
8.16	1 ショット露光時の開口パターン (日立ハイテクノロジーズ社製：FE-SEM S-4800)	201
8.17	プリント配線板回路パターン (日立ハイテクノロジーズ社製：FE-SEM S-4800)	201
8.18	マイクロマニピュレーション技術の概略	202
8.19	マウス卵細胞への DNA injection	203
8.20	ナノマニピュレーション技術の概略	204
8.21	ナノサージャリーシステムの装置全体構成	205
8.22	NRUSM 駆動の高精度小型ナノマニピュレータ外観	205
8.23	ミトコンドリアの吸引操作	206
8.24	半導体検査における従来のプロービング技術	208
8.25	要求されているプロービング技術	208
8.26	ナノプローブシステム外観	209
8.27	ナノプローブシステムにおける真空チャンバー内部の配置	209
8.28	NRUSM 駆動の高精度小型真空対応マニピレータ外観	210
8.29	電子顕微鏡下でのプローブ接触操作 (日本電子製：JSM-5510)	210
A-1	圧電素子の分極手順	221
A-2	円筒型圧電素子の構造	222
A-3	円筒型圧電素子の基本変形モード	222
A-4	変形モードの合成による楕円軌道発生	223
A-5	円筒型アクチュエータによる NRUSM	223
A-6	円筒型 NRUSM への印加電圧と先端動作	224
A-7	円筒型 NRUSM の性能評価装置外観	225
A-8	円筒型 NRUSM によるオープンループ時の速度性能	225
A-9	円筒型 NRUSM のクローズド制御時の位置決め性能	226

表目次

2.1	圧電アクチュエータの材料定数 (D 材)	16
2.2	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	22
2.3	駆動速度－駆動電圧依存性の実験条件	23
2.4	駆動速度－駆動周波数依存性の実験条件	27
2.5	駆動速度－予圧力依存性実験条件	30
2.6	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	33
2.7	非共振型圧電アクチュエータの FEM による構造解析結果	36
3.1	300mm ストローク XY ステージの目標性能	41
3.2	300mm ストロークに使用したセラミックス材料の機械的特性	42
3.3	ムク、リブ、ハニカムの各構造における XY ステージのたわみ量比較	68
3.4	ムク、リブ、ハニカムの各構造における XY ステージの姿勢比較	68
4.1	PI 制御系における帯域別のゲイン	93
4.2	CPT 制御系の各設定値	112
5.1	オープンループ駆動による連続駆動試験の結果	120
5.2	連続駆動試験で使用した 2 種類の圧電材料に関する諸特性	123
6.1	圧電アクチュエータの特性	145
7.1	接触部力学モデルで使用した各パラメータ	161
7.2	NRUSM の足上げモデルで使用した各パラメータ	166
8.1	研究開発用 EB に装着した NRUSM 駆動の 100mm ステージ仕様	191
8.2	オンライン露光システム仕様	200

第1章 序論

1.1 研究背景

量産体制における半導体微細加工寸法はついに 90nm 世代へと突入し、その製造装置にも変革が訪れている。現在の LSI 製造は、20 層以上にもおよぶ平面展開積層型の回路網である元データや、それらを各層毎の回路パターンや積層方向にパターンを接続する為のスルーホールパターンへと分割する CAD 設計から始まり、各層毎に転写する為の原盤 (Reticule : レティクル) を製作する電子線描画装置 (Electron Beam lithography system : EB)^[1]、その製作されたレティクルを CAD データと照合する微細寸法計測装置 (Critical Dimension measurement – Scanning Electron Microscope : CD-SEM)、そして製作されたレティクルを元にウェハーへの回路転写を行う縮小投影露光装置 (STEPPER/SCANNER) などが前工程と呼ばれる微細加工工程で可動している。この分担行程を図 1.1 に示す。ここでは、光や荷電粒子を使用した非接触加工が主流であり、EB や CD-SEM では電子線、STEPPER/SCANNER ではエキシマレーザー光を主に使用している。そして、これらの装置群を駆使した半導体量産体制における生産性は、縮小投影露光装置の生産性で決定されると言っても過言ではない。また一方で、ウェハーサイズが 8 インチから 12 インチへと大口径化する流れとは別に、LSI における最小加工寸法は微細化を辿ってきた。つまり、装置の大型化とは別に、縮小投影露光装置で使用する光源波長は、その解像度限界を向上させる為に変更を重ねてきた歴史を有している。その光源の変遷を図 1.2 に示す。それ以前には超高压水銀ランプを光源として、その放射スペクトルである g 線 (436nm)、h 線 (405nm)、i 線 (365nm) を分光して使用していたが、現在はフッ化クリプトンのエキシマレーザー光 (Kr-F : 248nm) からフッ化アルゴンのエキシマレーザー光 (Ar-F : 193nm) の世代へと継承されている。これらの光源による縮小投影露光装置を配置した製造ラインにおける最小加工寸法は、式 1.1 に示す「Rayleigh の式」により規定されることが一般的に知られている。

$$L_{reso} = k_1 \cdot \frac{\lambda}{NA} \quad (1.1)$$

ここで、 L_{RESO} は製造ラインが加工可能な最小線幅、 λ は転写用光源波長、 NA は縮小投影露光装置のレンズ開口率、 k_1 はプロセス係数を示す。そして、その露光装置におけるレンズ開口率は、

$$NA = n \cdot \sin\theta \quad (1.2)$$

である。 n はウェハーと対物レンズ間の媒質屈折率、 θ はウェハー上での光軸中心からの光束開

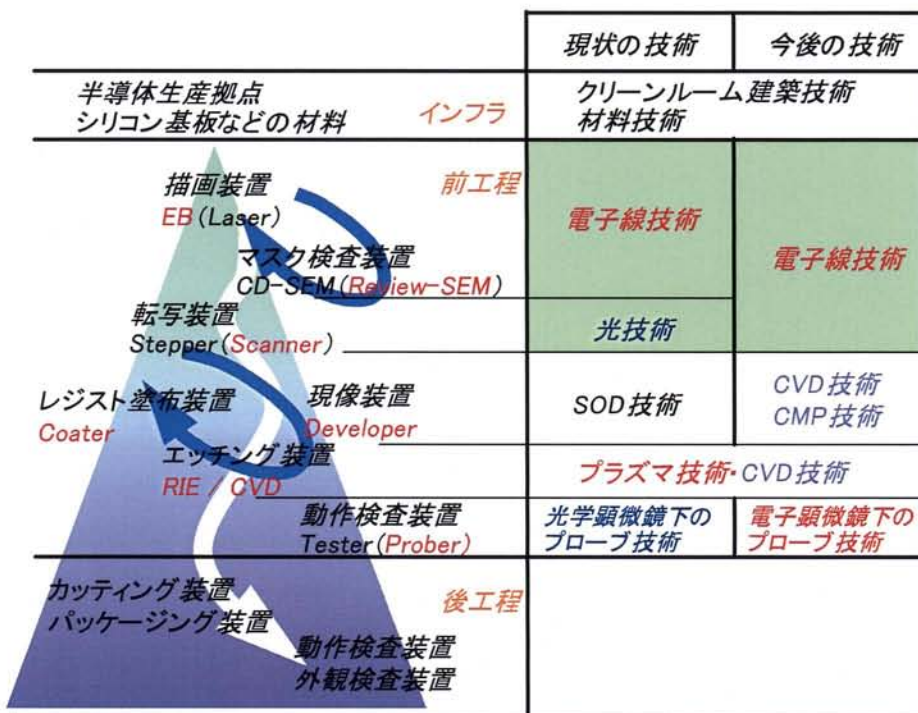


図 1.1 半導体製造工程とそこで使用されている基本技術

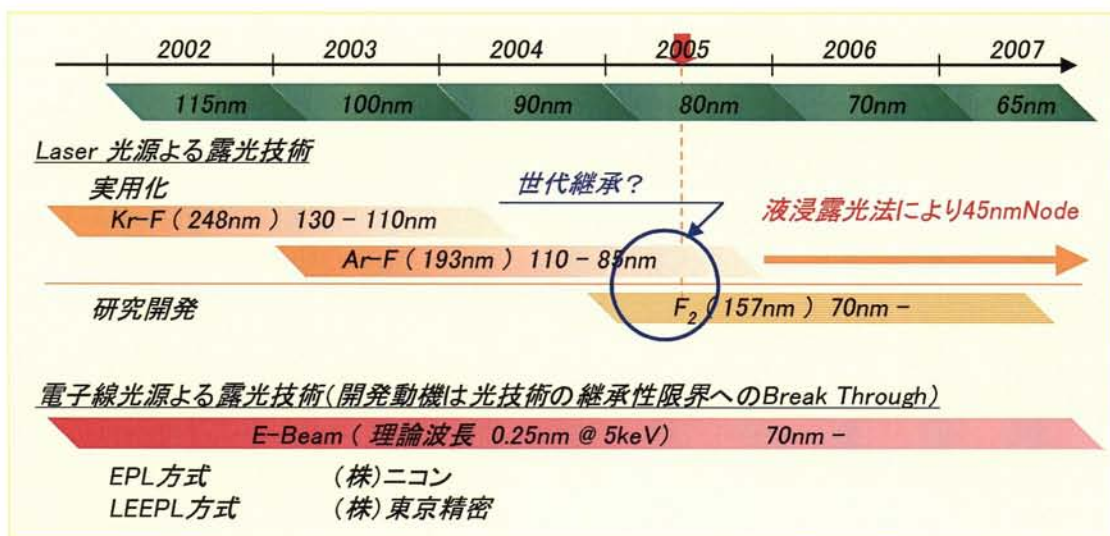


図 1.2 露光装置における光源の変遷

き角度である。つまり、製造ラインの最小加工寸法と縮小露光装置の性能には密接な関係があり、更なる微細加工領域へ到達するには、転写光源波長を小さくし、レンズ開口率を大きくする必要がある。また、プロセス係数も大きな部分を占める。現在、光源波長は限界に近づいているので、以下にプロセス係数とレンズ開口率の改善点を説明する。

プロセス係数とは、レジストプロセスの改良、変形照明、二重露光などの工夫や、コヒーレントなレーザ光の特性を応用した超解像向上技法などを併用して得られる総合指数であり、露光プロセスに関わる様々な工夫による効果の度合いを示す。ここで言う超解像度向上技法とは、露光領域において相互に光の位相を半波長だけずらす(位相シフト)ことにより、境界線上の振幅を理論上0にして解像度を上げる手法である。現実的には、レティクル上の適切な部分に先の効果を発揮する位相シフタを重ねることになるが、この手法がプロセス係数の改善に大きな効果を発揮しており、現在の k_1 は0.3程度まで達している。また、レンズ開口率の改善としては、光学系を構成する主要部品である対物レンズを大口径化して θ を大きくする工夫の他に、対物レンズとウェハの間に液体を充填し、屈折率 n を1より大きくする露光技術が研究されている。これは、液浸露光技術と呼ばれている。たとえば、媒質を水にすることで n を1.44程度まで向上することが可能となる。つまり、Ar-Fエキシマレーザの波長193nm、現状の光学的開口率0.9、先のプロセス係数0.3を総合した際の解像線幅は約65nm程度と見積もられる現行の最小加工寸法は、液浸露光技術を導入することにより光源波長の等価値が134nmとなるので、理論的最小加工寸法は45nm程度にまで到達する。しかし、現状では、45nm Nodeのすべてのパターンへの対応は難しいが、Ar-Fエキシマレーザを使用した露光技術の改良は日々開発が進められている。

一方、これまでに採られてきた解像度向上手法は、 λ 値の小さい光源に移行することである。そこで図1.2に示すように、波長の短いF₂レーザ光源や周辺技術の開発も平行して進められている。しかし、157nmの波長では酸素や水への吸収性が高く空气中を光が伝播しないので、装置光学系を窒素やヘリウムの雰囲気中におかなくてはならない。また、光の波長が変わることにより、レジストの素材についても新たに見直しが必要となる。さらに、その波長で使用できる透過光学材料が限られることから、極力色収差を出さないために光源の周波数純度を高める狭帯域化なども必須となる。このような理由により、同じ透過光学系を採用した露光技術とはいえ、Ar-F露光技術から切り替える為の障壁は高い。

しかし、半導体産業の発展指針として世界標準となっているITRS (International Technology Roadmap of Semiconductor) [2]の露光部門では、これらの光源を使用した製造ラインにおける最小加工寸法を遙かに超えた微細加工レベルへの到達を予想しており、各半導体装置メーカーもそこに照準を合わせた装置開発を行っている。代表例としては、これまでのエキシマレーザ光ベースのSTEPPER/SCANNERで培われてきた露光技術とレティクル製造分野で圧倒的実績を有するEBの基本要素である電子線技術とを融合させたEB-STEPPER/SCANNERの類である。この新分野では、密着型等倍露光方式のLEEPL (Low Energy Electron Beam Proximity Projection Lithography) [3]や縮小投影露光方式のEPL (Electron Projection Lithography) [4,5]などの開発が盛んに行われている。いずれの装置も光源には電子線を採用しており、解像度は70nm Nodeを達成している。これらの装置に共通なのは、真空チャンバー内部に置かれた精密ステージに対する動性能要求が極めて高いことである。言い替えると、ステージが最高の動性能を発揮するには、環境から受ける制約に左右されず、要求される性能を満たす動力源が必要となる。

また、ウェハの大口径化に伴い、ステージの大型化も必要となる。その際には、ステージを装着する真空容器の大型化も同様に不可欠となる。また、大型化したステージとチャンバーにより非常に増大した重量を支え、且つ、その製造装置に規定される振動レベルまで外乱振動混入を減衰する大型除振台なども不可欠となる。

このように、次世代半導体製造装置に要求される、高精度化と高スループット化と共に、環境適合性を満たすには、高速で高精度な位置決め性能を有し、従来の Point to point の移動性能だけでなく、Continuous Path Tracking 性能までもナノメートルオーダーとした高性能なアクチュエータと、大型化されながらもシステム全体に重量負担をかけない軽量化技法を施されたステージが必要となる。そして、それらの上位に位置し、先に述べたような極限性能を発揮するための専用制御システムも勿論不可欠である。

1.2 従来のステージ構成とその問題点

真空環境で使用されている精密ステージのうち、本研究の比較対象となるのは EB や CD-SEM に使用されているものである。基本構成としては、回転型電磁モータを動力源として、その回転運動をボールスクリュウにて直進運動へと変換して使用している^[6-10]。ボールスクリュウの両端は固定側テーブルに、可動部であるナットは移動側テーブルにそれぞれ固定される。構造としては簡単だが、真空中に使用するとすると種々の工夫が必要となる。

電子線を使用した微細加工や精密位置計測では、それらに要求される精度はナノメートルオーダーである。それ故に、電子線軌道を高精度に制御することは勿論のこと、外乱磁場または浮遊変動磁場からの影響を極力排除する為の磁場遮蔽は重要である。それは、レティクルやウェハなどのワークが搭載され、電子線環境の最も近傍に設置されるステージやその周辺にも同様のことが言える。つまり、これらの装置におけるステージへの要求は完全非磁性である。また、観察装置と違って、もう一つ拘束事項がある。それは、完全、またはほぼ磁性影響がない環境と共にステージを構築したとしても、発熱対策が施されていないならば、ステージ構成材料の線膨張係数による位置精度の悪化を招き、磁性対策が無意味となる。それ故に、ステージ自身が熱による影響を受けないように、発熱源を近傍に置かない、熱伝達経路を可能な限り遮断する、熱膨張係数の低い材質で構成するなどが重要項目となる。勿論、真空対応が必要なことは言うまでもない。

まず、回転型電磁モータとボールスクリュウにより構成されたステージ機構を図 1.3 に示す。ステージは真空チャンバー内部のほぼ中央に配置されており、動力源となる回転型電磁モータはチャンバー外壁に設置されている。これは、先に述べた通り、変動磁場源であり、また、ステージの幾何精度を悪化させる熱源でもあるモータ自身をステージ設置環境から絶縁する為である。勿論、この種の真空チャンバーでは、比透磁率とコスト、ならびに負圧容器としての強度を考慮し 50mm 程度の厚みを有する鉄を主材料とした材質で構成されている。標準的な 2 段重ね型 X-Y

ステージを大気中で使用する場合は、各軸に取り付けられたボールスクリューに対して、それぞれにモータを取り付けて使用する。その際には、下軸の移動と共に上軸に搭載されたステージならびにボールスクリューとモータは移動する。しかし、このようにボールスクリューならびにモータがチャンバーに固定されている X-Y ステージにおいては、このような取り付け方法では2次元動作を実現できない。そこで図 1.4 に示すような、力を伝達しながら方向性に対する「ニゲ」を有する干渉除去機構を伝達機構の中間に配置する。これにより真空外部からの動力伝達系を実現する。

ボールスクリューや干渉除去機構を配置した順次伝達構造において、それぞれの機構は僅かな不感帯を内在している。これらはバックラッシュと呼ばれている。そして、その伝達系はバックラッシュの総量に近い制御ヒステリシスを持つこととなる。これに対して、伝達系全体に予圧をかけて、それぞれの僅かな隙間を片側によせるバックラッシュ抑圧技法は存在するが、nm オーダーでの精度追求は難しくなる。また、この手法を適応したからといって、位置決めにおける本質的分解能の向上にはなり得ない。そこで、応答性が高く原子レベルの変位能力を有する圧電素子を微動機構として用い、そのバックラッシュ量以下の分解能を応用して精密位置決めを実現する。この種のステージは粗微動型ステージと呼ばれている^[9,10]。その基本構造を図 1.5 に示す。ロングレンジでの移動には回転型電磁モータとボールスクリューで構成した粗動ステージを用い、目標位置近傍においては圧電素子の変位による微動ステージを使用する。これによりステージ最上部では、目標となる位置に対してナノメートルレベルでの位置決めが可能となる。しかし、このステージ性能は、Point to point の移動に関してナノメートルレベルの位置決めを提供することに集約されており、今後の微細加工を担う半導体製造装置が移行しつつある連続移動モードにおけるナノメートルレベルの速度ムラを実現することは難しい。

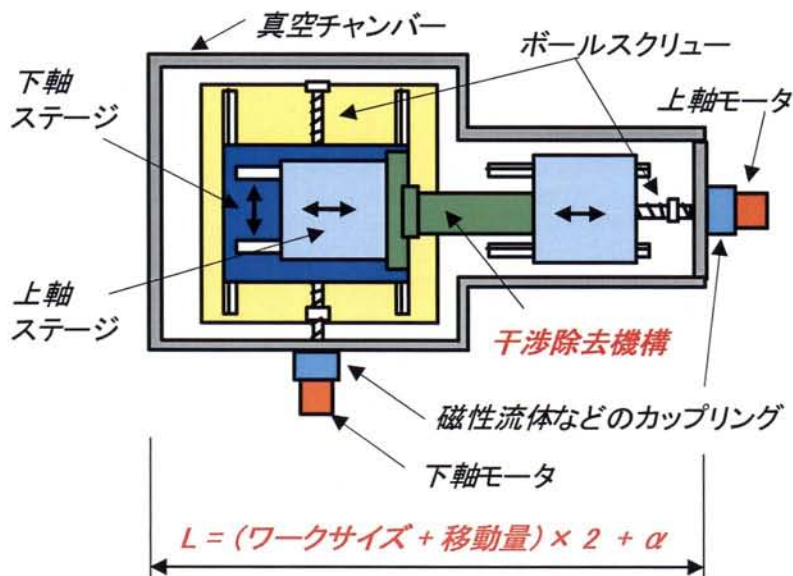
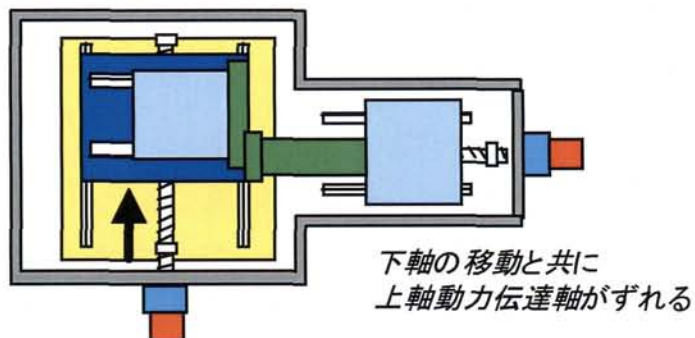


図 1.3 真空チャンバー内部の XY ステージと干渉除去機構

下軸ステージ移動時



上軸ステージ移動時

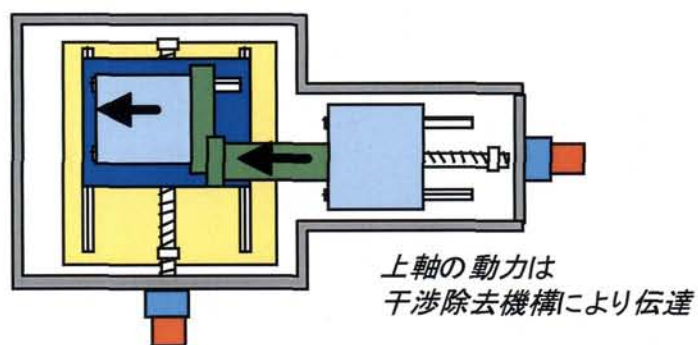


図 1.4 干渉除去機構の動作説明

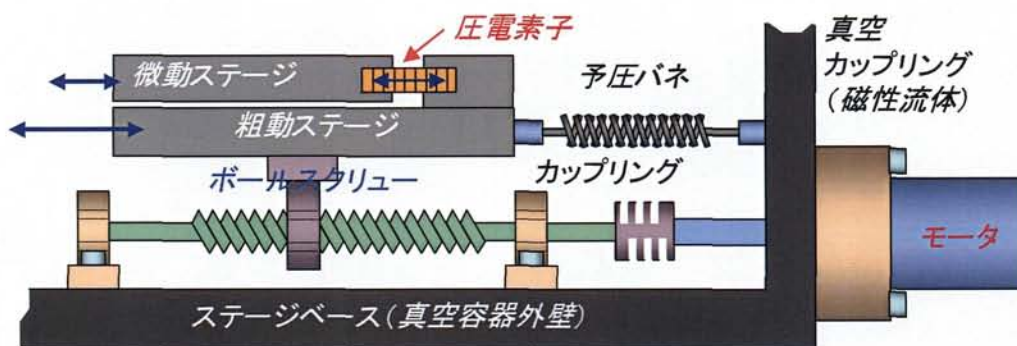


図 1.5 電磁モータと圧電素子による粗微動型ステージ

1.3 共振型超音波モータ

圧電素子の AC 特性を利用したモータに、超音波モータ^[11]がある。これらは、一般に共振現象を利用しているため、本研究で述べる非共振型と区別して共振型超音波モータと呼ぶことにする。共振型超音波モータは、可聴領域を越えた共振周波数で電圧を印加し、圧電素子が共振して定在波/進行波/楕円軌道等を合成し動力を得るものである^[12-15]。共振とは、外力の振動数と系の固有振動数が一致する点の近くで振幅比が非常に大きくなる現象を言う。このモータは DC 特性を利用したものより一回の送りにおける変位を大きく取ることができるためステージを高速駆動できるという利点がある。

中でも楕円軌道発生型の共振型超音波モータが高速・高精度・非磁性・真空対応ということで実際にステージシステムに組み込み既に市販されている^[16]。その外観と圧電素子構成を図 1.6、1.7 に、駆動原理を図 1.8 にそれぞれ示す。最高速度 200mm/s、位置決め精度 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ を達成しており、低速度タイプのもは位置決め精度は更に高く $\pm 10\text{nm}$ 以下である。しかし、電力を投入してから共振現象を起こし、圧電素子先端が楕円軌道を合成して対象物を駆動し始めるまでに動きに寄与しない無駄なエネルギーの供給が必要であり、結果として時間的に動作不感帯が生じる。また、位置決め精度は駆動時の楕円軌道の大きさにより制限されることや、印加電圧の 1 サイクル途中での停止ができないため、原理的に高精度な位置決めには限界がある。また、固定周波数であるためモータとステージガイドプレート間の摩耗が激しく、その耐久性を向上させるため現在も研究が続けられている^[17,18]。

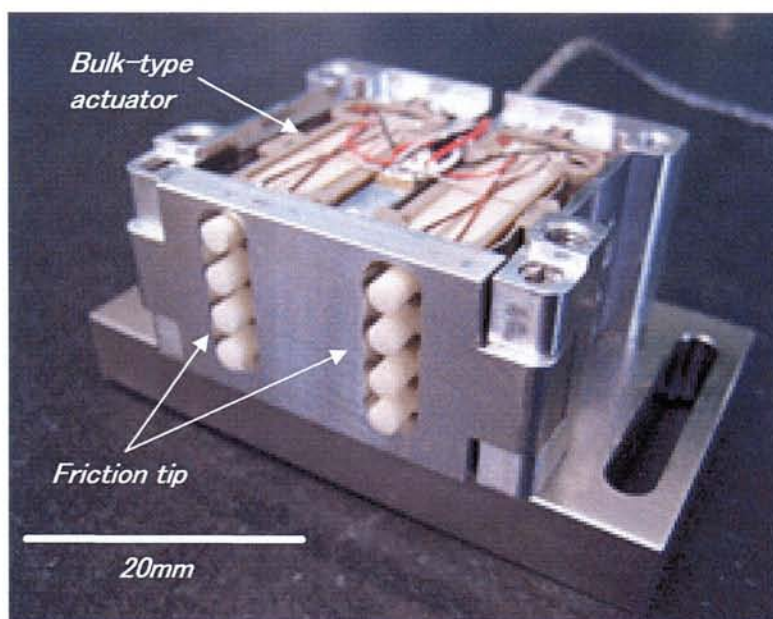


図 1.6 共振型超音波モータ外観

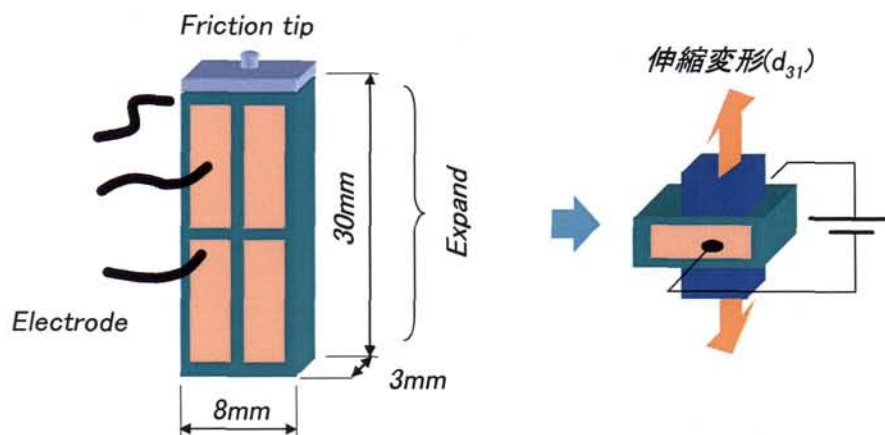


図 1.7 共振型超音波モータの圧電素子構成

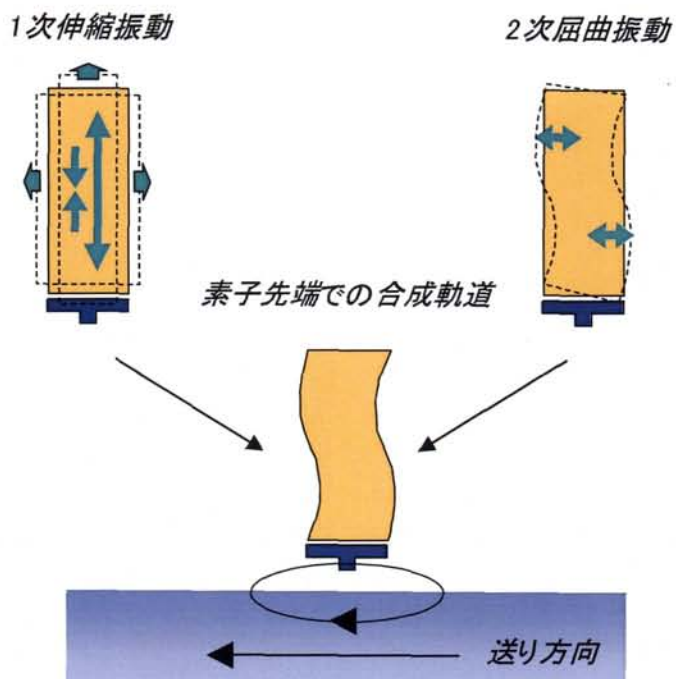


図 1.8 共振型超音波モータの動作原理

1.4 非共振型超音波モータ (NRUSM)

非共振型超音波モータ (NRUSM: Non-resonant Ultrasonic Motor) [19-21]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 1.9、図 1.10)。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用スキャナとして開発された圧電体ウォーカを原型としている[22,23]。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 μm 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 1.11 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
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、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、などの利点をもつ。

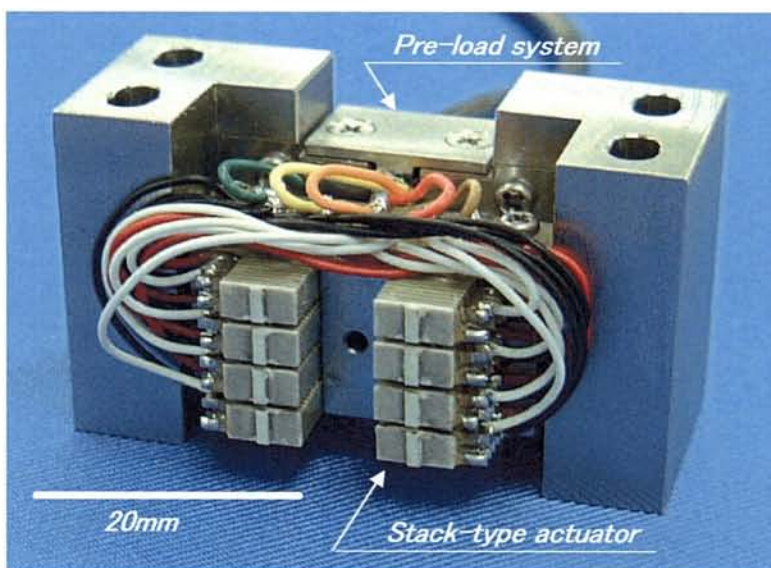


図 1.9 非共振型超音波モータ外観

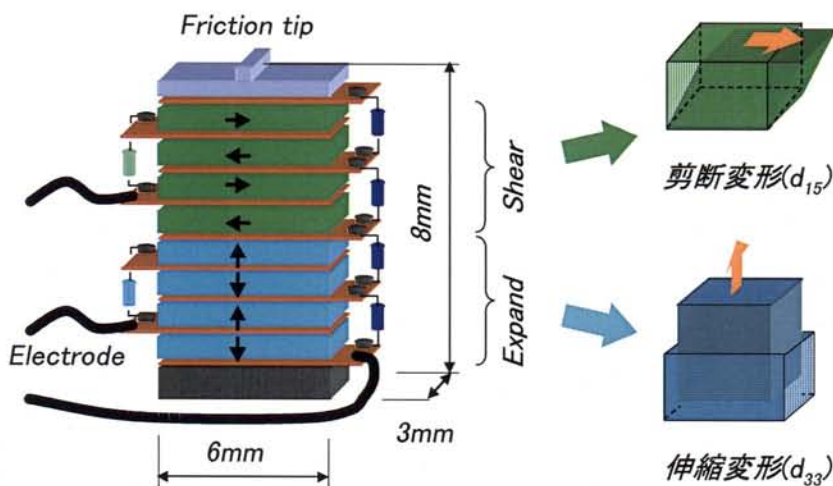


図 1.10 非共振型超音波モータの圧電素子構成

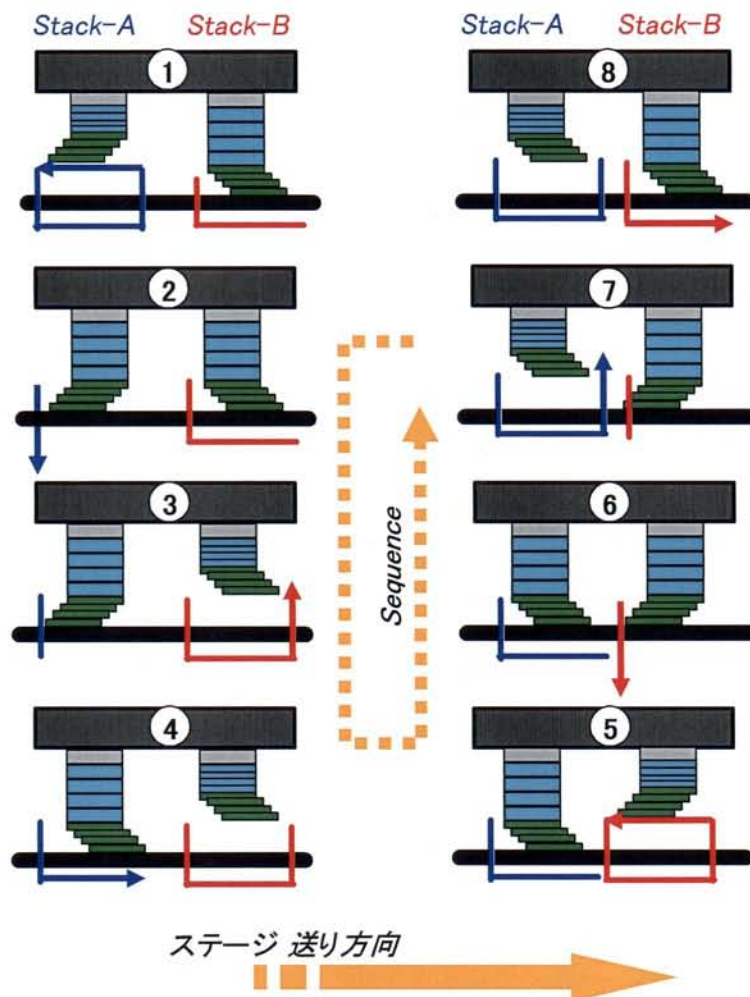


図 1.11 非共振型超音波モータの動作原理

1.5 本論文の目的

研究の主目的は、NRUSM の産業応用を目指した取り組みであり、単体性能追求だけにとどまらず、その成果を実用化する際に必要となる全ての項目を含めた総合研究開発として取り組んできた。

本論文の前半では、NRUSM の高速化に関する性能評価と改良を中心とした部分を述べる。また、NRUSM を装着して、その動作性能を最良の幾何精度と共に機構化した高精度セラミックステージについても述べる。後半では、これまでの高速駆動型接触式アクチュエータの欠点であった接触部の摩耗問題に関して、制御面からのアプローチにおける結果と考察を論ずる。また、NRUSM の持つ定速度安定性、小型化、高推力、自己保持力などの性能や特徴は、半導体製造装置分野以外の精密機器からも種々の要求や用途がある。本研究と平行して取り組んだ、それらへの応用に関する成果も述べる。

1.6 本論文の構成

本論文は9章より構成される。

第1章は「序論」であり、本研究の背景と目的について述べた。

第2章では「非共振型超音波モータ」として、NRUSMの基本性能と共に、その非共振領域における特性の評価結果を述べる。

第3章では「高剛性ステージの開発」として、これまで多用されてきた金属系材料に代えてファイナセラムックスを母材とした高剛性ステージの評価に関して、従来のムク焼成、軽量化を目的としたリブ構造、そして軽量化と高剛性を両立したハニカム構造に関する評価結果を述べる。そして、製造方法やステージの有する幾何誤差の計測方法と修正方法を述べながら、ファイナセラムックスのハニカム構造を基本とすることで、大型化と軽量化を両立し、高剛性な精密ステージ開発が可能であることを明らかにする。

第4章では「NRUSMの基本制御」として、NRUSMの動特性解明と共に、PID制御から始まり、分解加速度制御を用いたロバスト制御系までの各制御系による特性の評価結果を述べる。これは、今後の半導体製造装置で要求される連続移動での製造や検査に対して、NRUSMの持つ特性が十分に対応可能な事を明らかにする為である。

第5章では「ステージシステムの耐久性」として、NRUSMの産業応用においては基本性能の向上と並んで最重要項目となる、NRUSMの耐久性に関する評価結果を述べる。最初に、NRUSMをステージに装着し連続駆動することで得られた、圧電素子自身の耐久性や積層構造上の耐久性に関して述べる。次に、接触部で発生する摩耗状態の分類化と考察を通して、目標としていた200kmの連続駆動を達成した過程とその摩耗結果に関して述べる。その上で、産業応用におけるシステムの耐久性は、接触部の摩耗により決定されることを明らかにする。

第6章では「接触部における摩耗メカニズム」として、耐久性の根幹部分となる、NRUSMの推力伝達部分における摩擦と摩耗限界に関する評価結果を述べる。そこでは、周波数領域における素子発生力と接触部の摩擦力との相関を検証し、力学的見知に基づきながらその部分の摩擦限界を数式化したうえで、摩擦限界における最良の駆動方式は周波数可変型制御であることを明らかとする。

第7章では「摩耗に対する先進制御」として、第5章ならびに第6章の結果を踏まえて静摩擦領域における理論を構築し、それに基づいた制御実験とその評価結果を述べる。最初に、この静摩擦領域での制御法を用いることで、同材質のガイドプレートを使用しても従来と比較して1/30以下の摩耗低減を成し得た過程に関して述べる。そして、定数として扱っていた摩擦係数を、ガイドプレートの位置と関係付けた分布型変数として扱い、さらに連続駆動時には時間関数も併用することで制御性能の大幅な改善が可能であることも明らかとする。

第8章では「応用例と将来展望」として、NRUSMを半導体製造装置やそれ以外のナノテクノロジー関連装置へ応用した結果をまとめる。それらを踏まえてNRUSMの技術展開と方向性に関して述べる。

第9章では「総括」として、本研究によって得られた結果をまとめて全体を通じた考察を述べて締めくくる。

参考文献

- [1] 松井真二ほか, “電子ビーム露光技術の現状と展望”, 応用物理 第70巻 第4号, pp.411-417, 2001.
- [2] “LITHOGRAPHY,” International Technology Roadmap for Semiconductors, 2003.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] (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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] K. Uchino, “Piezoelectric ultrasonic motors: overview,” Smart Mater. Struct., Vol. 7, pp. 273-285, 1998.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] M. K. Kurosawa, “State-of-the-art surface acoustic wave linear motor and its future applications,” Ultrasonics, Vol. 38, pp. 15-19, 2000.
- [15] 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.
- [16] Nanomotion Ltd., “A Novel Non-Magnetic Miniature Motor for Ultra High Vacuum Applications,” Technical Report, Jan. 2000.

- [17] T. Yamaguchi, K. Adachi, Y. Ishimine and K. Kato, "Wear mode control of drive tip of ultrasonic motor for precision positioning," *Wear*, Vol. 256, Issues 1-2, pp. 145-152. Jan 2004
- [18] 竹之内一憲・足立幸志, "アルミナの電子ビーム露光装置用超音波モータへの応用", *セラミックス* 37 (2002) No.1, pp.39-41
- [19] Yoshiya Ehashira, et al, Sub-Nanometer Resolution Ultrasonic Motor for 300mm Wafer Lithography Precision Stage, *Digest of Papers, Microprocesses and Nanotechnology 2001*, (October 31-November 2, 2001)pp.252-253
- [20] Yoshiya Egashira, et al, 0.69nm Resolution Ultrasonic Motor for Large Stroke Precision Stage, *Proc. of 1st IEEE Conference on Nanotechnology*, (Main, Oct.2001) pp.397-402
- [21] 江頭義也, "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", 熊本大学大学院自然科学研究科博士論文, 2003
- [22] 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.
- [23] 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 非共振型超音波モータの開発

2.1 緒言

非共振型超音波モータ (NRUSM : Non Resonance type Ultra Sonic 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、8つの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。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用スキャナとして開発された圧電体ウォーカを原型としている。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 μm 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。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^[1,2]/Walking Drive機構^[3,4]/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。

本章では、まずNRUSMの基本構成として、アクチュエータと予圧機構について述べる。続いて、その動性能評価について述べ、それらの結果をもとに新型のアクチュエータを提案する。

2.1 基本構成

2.2.1 原型アクチュエータ

図2.1にはNRUSMに用いる圧電アクチュエータ(太平洋セメント(株)製)の基本ユニットを示す。伸縮モード(d_{33})と剪断モード(d_{15})に分極された圧電素子(奥行3mm×幅6mm×厚さ0.6mm)を各4枚ずつ計8枚、素子間に電極を挟んで積層し、さらに接触部の耐久性を高めるためのフリクションチップとシム材を上下に接着することにより構成している。素子の全長は5.25mmになる。また、今回使用した圧電素子の材料特性表を表2.1に示す。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。電極部分に関しては、GND、剪断、伸縮の各電極の共通部分はハンダによって拘束されている。なお、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。

ここで、同じ厚みの圧電素子を用いた場合、圧電アクチュエータの発生変位は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。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^[5]。

$$F = \frac{A}{t} Y_{ij} d_{ij} V \quad (2.1)$$

なお、 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。

表 2.1 圧電アクチュエータの材料定数 (D 材)

原材 料名	比誘電率		$\tan \delta$ [%]	圧電定数 ($\times 10^{-12}$ [m/V])		ヤング率 ($\times 10^{10}$ [N/m ²])		キュリー 温度 [°C]	密度 [g/cm ³]
	ϵ_{33}/ϵ_0	ϵ_{11}/ϵ_0		d_{33}	d_{15}	Y_{33}	Y_{15}		
D材	4500	4700	2.0	660	1010	5.4	6.7	180	7.8

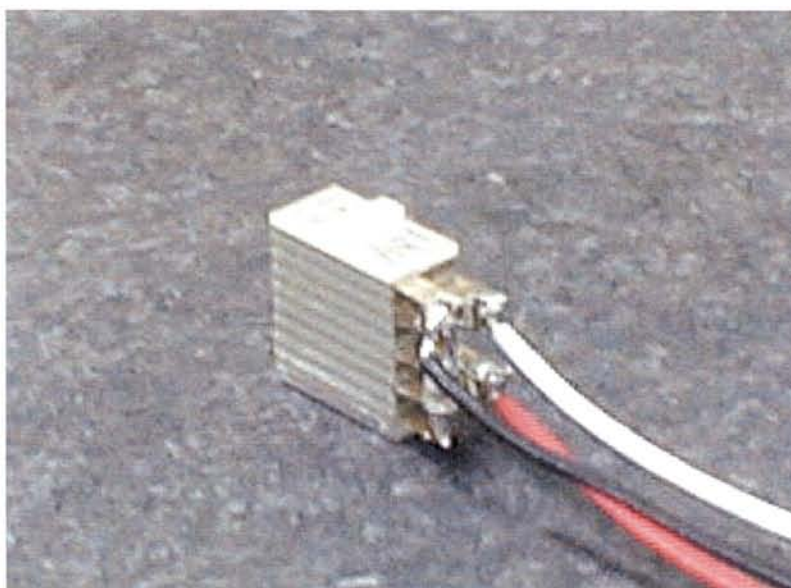


図 2.1 アクチュエータの概観

2.2.2 予圧機構

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 程度が推奨されている^[6]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。以下にこれまで開発した3タイプの予圧機構について紹介する。

【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2.2）。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へたり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。

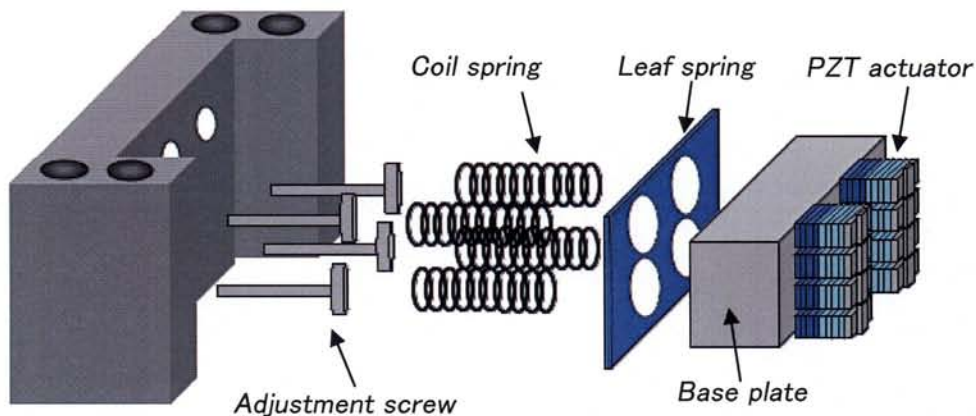


図 2.2 予圧機構「ZERO」の構成

【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 2.3 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 2.4 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 10mm 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。

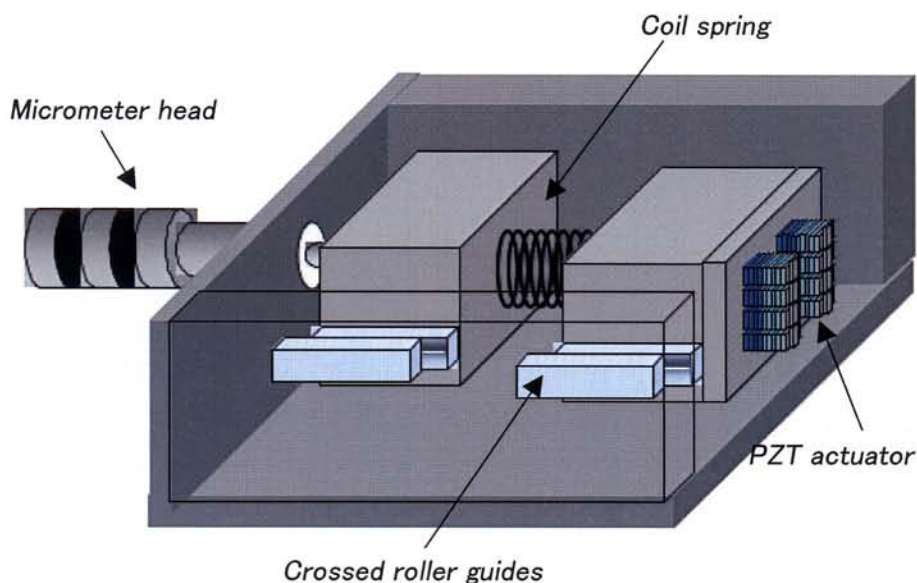


図 2.3 予圧機構「Type-A」の構成

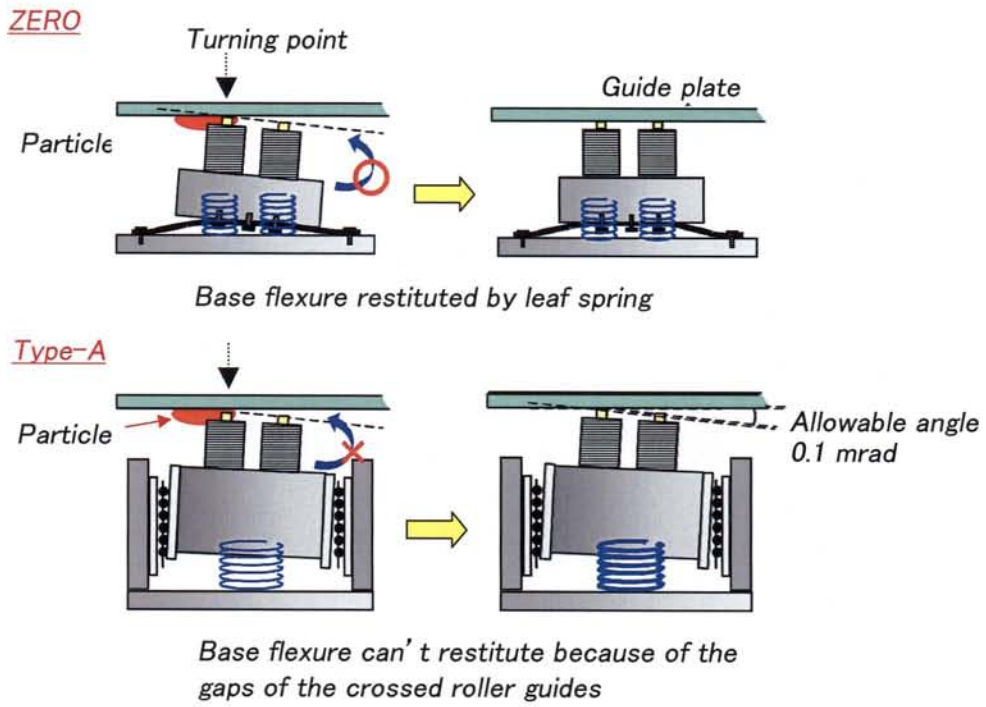


図 2.4 予圧機構の不具合点と必要機能

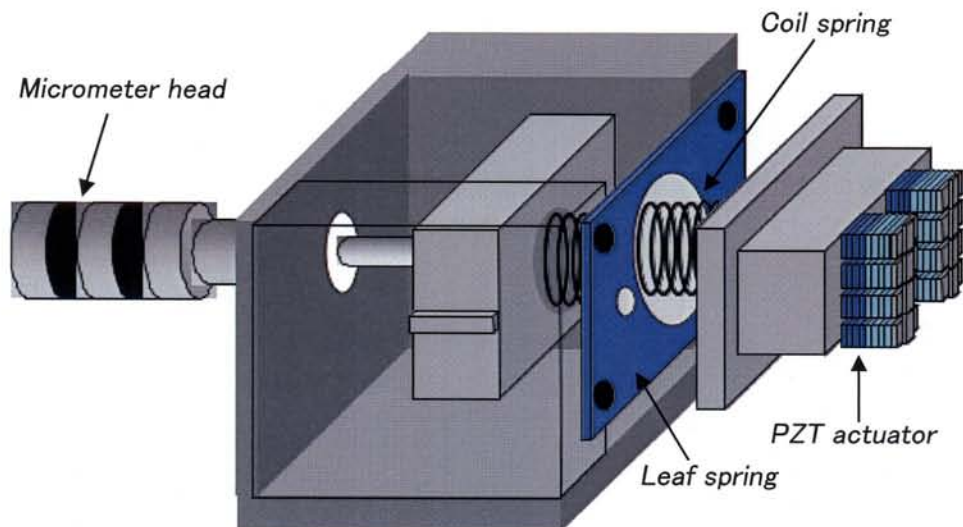


図 2.5 予圧機構「Type-S1」の構成

【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、対象物に倣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 2.5)。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。

2.3 動性能評価

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。

2.3.1 基本セットアップ

オープンループ特性評価の実験セットアップを図 2.6 に示す。内部を割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。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 2.2 に示す。

2.3.2 駆動電圧依存性

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 駆動シーケン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律束される。駆動速度の駆動電圧依存性の実験条件を表 2.3 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_{pp} 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。

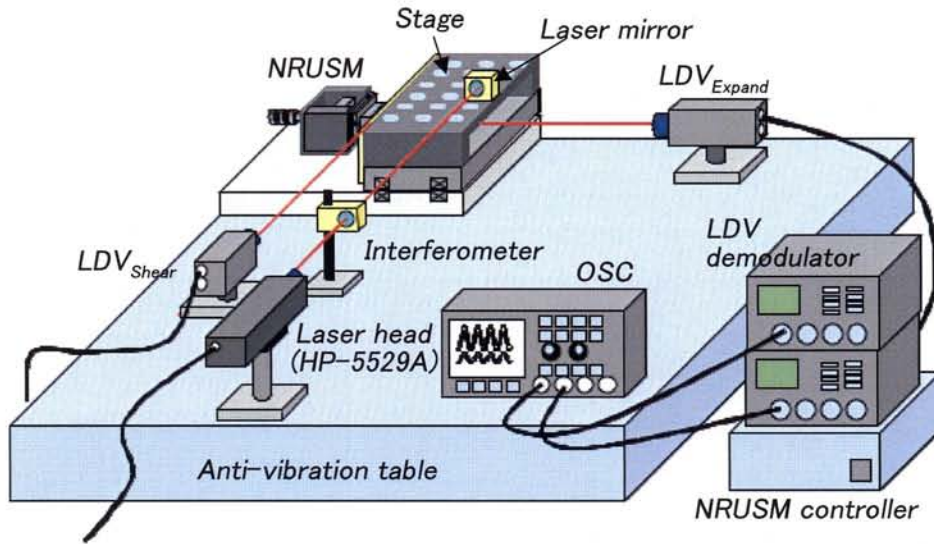


図 2.6 オープンループ駆動特性評価の実験セットアップ

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 2.7～図 2.9 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、30kHz 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 50～60V_{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。60V_{pp} における伸縮変位量試算値は 0.16μm 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 2.10 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 2.11 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 2.10 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により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。

表 2.2 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:2.2kg (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 _{pp} , 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

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。

表 2.3 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 ($V_{Shear} = V_{Expand}$)	実験2 伸縮変位のステージ駆動に及ぼす影響 ($V_{Shear} \neq V_{Expand}$)
評価アクチュエータ	NRUSM-1～-5	NRUSM-1
駆動電圧	0～200V _{pp}	V _{Shear} : 0～200V _{pp} V _{Expand} : V _{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2.6	図2.6
備考	V _{Shear} = V _{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 _{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_{pp} を最大値とする。

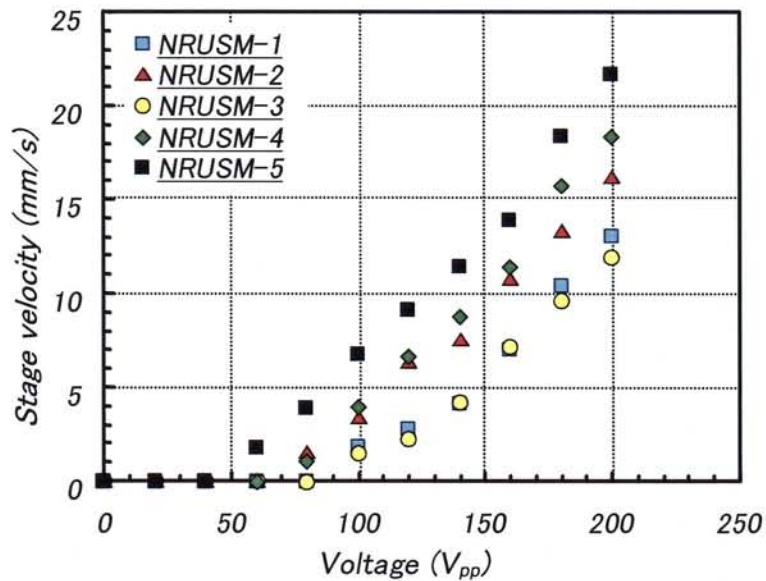


図 2.7 ステージ駆動速度－駆動電圧依存性 (f=10kHz、P=35N)

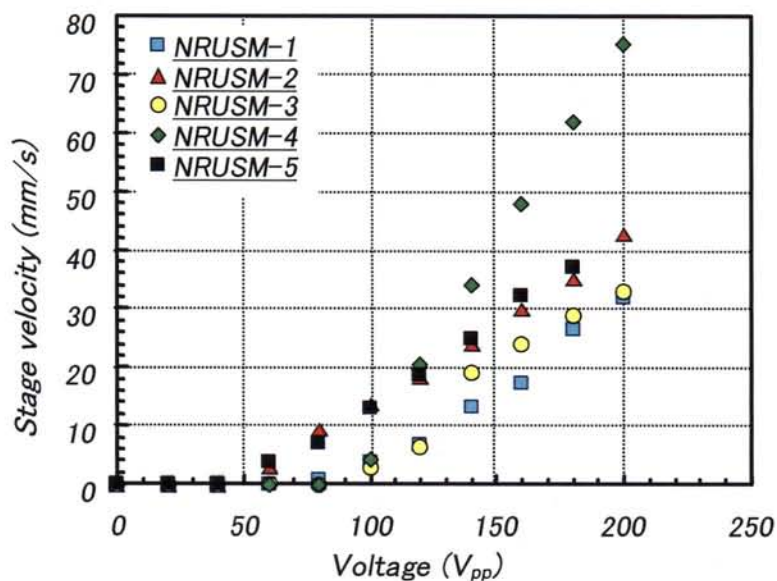


図 2.8 ステージ駆動速度－駆動電圧依存性 (f=20kHz、P=35N)

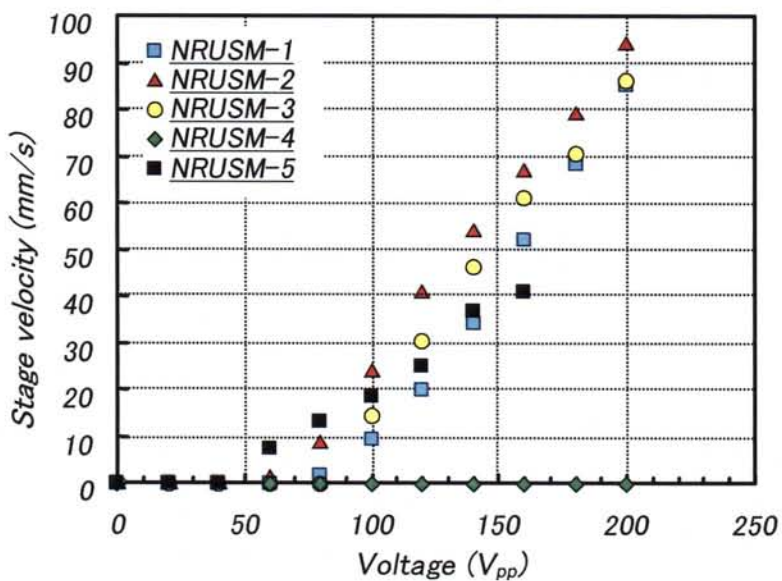


図 2.9 ステージ駆動速度－駆動電圧依存性 (f=30kHz、P=35N)

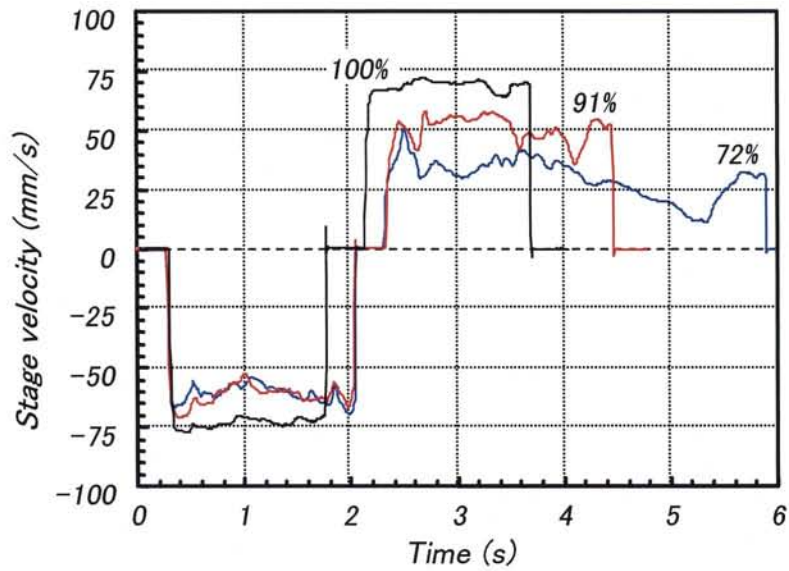


図 2.10 伸縮電圧を変化させたときのステージ駆動速度—時間応答
(NRUSM-1、 $f=30\text{kHz}$ 、 $P=35\text{N}$)

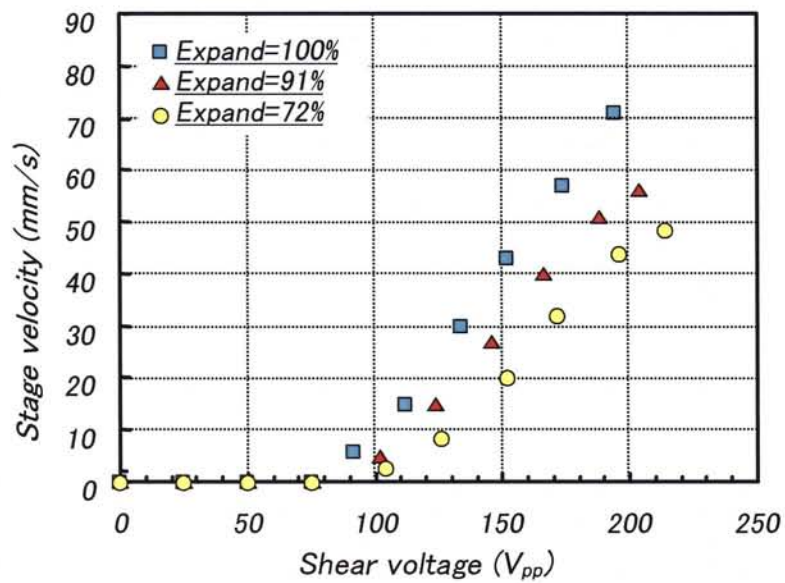


図 2.11 伸縮電圧を変化させたときのステージ駆動速度—駆動電圧依存性
(NRUSM-1、 $f=30\text{kHz}$ 、 $P=35\text{N}$)

2.3.3 駆動周波数依存性

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 2.4 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ー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 $180V_{pp}$ 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 2.12 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た。

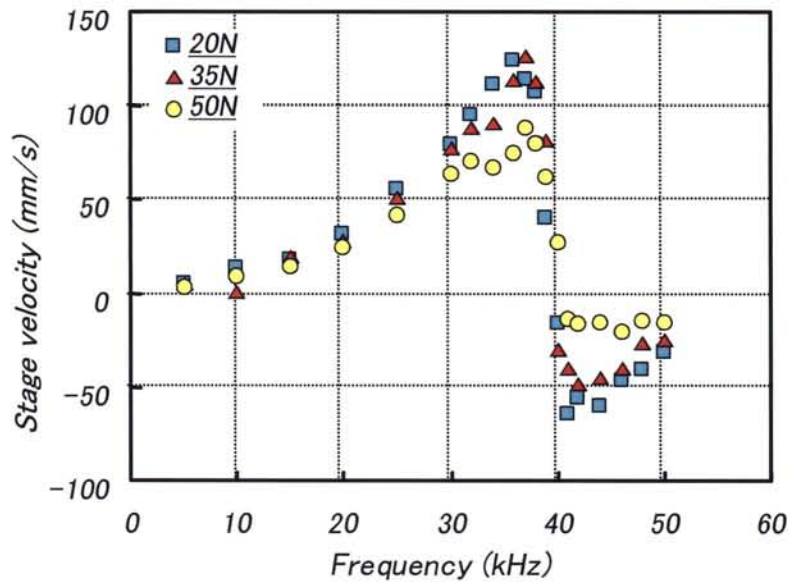
次に、駆動電圧が駆動速度の周波数依存性に与える影響を評価した (実験 2)。NRUSM-1 の予圧力を 35N 一定とし、駆動電圧をそれぞれ 120、150、 $180V_{pp}$ とした時の駆動速度の周波数依存性を図 2.13 に示す。電圧を小さくすることにより各駆動周波数で速度の違いが確認できるが、完全に電圧に比例した結果ではないことがわかる。特に 30kHz から 39kHz にかけては、 $180V_{pp}$ では速度ピークがあるのに対し、 $150V_{pp}$ 、 $120V_{pp}$ ではそれぞれほぼ一定の駆動速度である。やはり、伸縮方向の発生変位が駆動速度に影響していることが推測される。

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 $180V_{pp}$ 、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 2.14 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 2.13)、 $120V_{pp}$ で駆動を行い、NRUSM-1 を $120V_{pp}$ で駆動した時の結果との特性比較を行った。 $120V_{pp}$ -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 2.15 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。

表 2.4 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 _{pp}	120, 150, 180V _{pp}	180V _{pp} :NRUSM-1～-4 120V _{pp} :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2.6	図2.6	図2.6

図 2.12 NRUSM-1 の駆動速度－駆動周波数依存性 (V=180V_{pp}、P=可変)

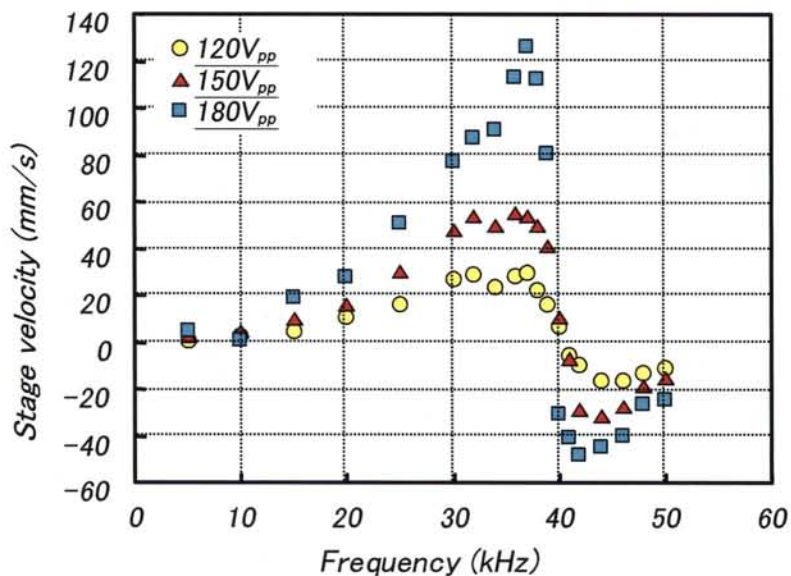


図 2.13 NRUSM-1 の駆動速度－駆動周波数依存性 (V=可変、P=35N)

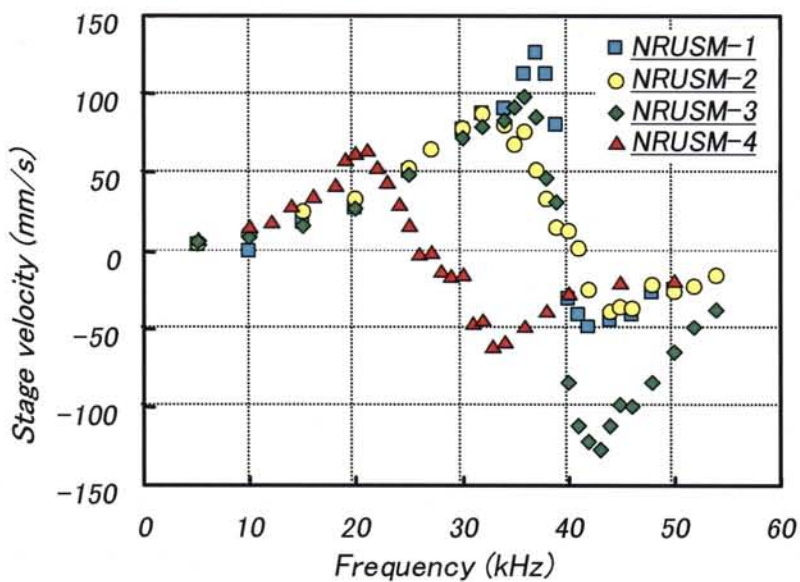


図 2.14 NRUSM-1、-2、-3、-4 の駆動速度－駆動周波数依存性比較 (V=180V_{pp}、P=35N)

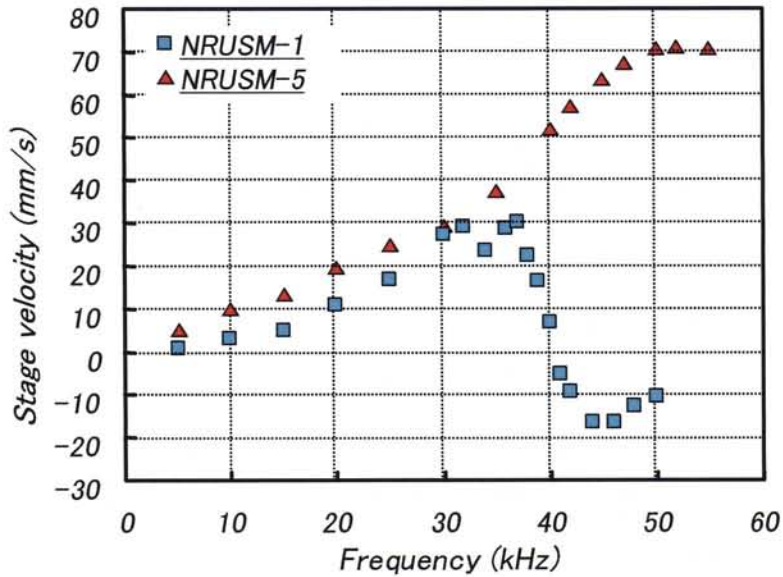


図 2.15 NRUSM-1、-5 の駆動速度－駆動周波数依存性比較 ($V=120V_{pp}$ 、 $P=35N$)

2.3.4 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 2.5 に示す。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 10～70N 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 2.16 から図 2.18 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、 $3mm \times 6mm$ 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、 $3mm \times 3mm$ 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。

表 2.5 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 _{pp}
駆動周波数	10, 20, 30kHz
予圧力	10~70N
実験セットアップ	図2.6

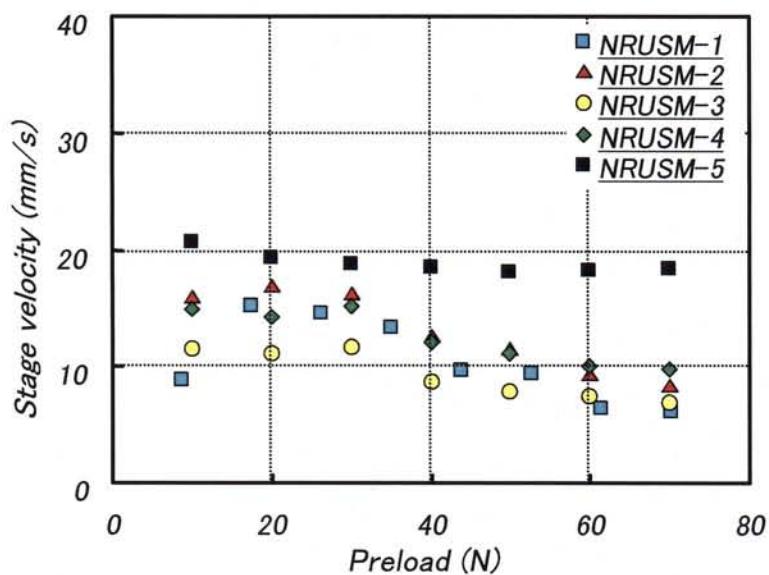


図 2.16 ステージ駆動速度－予圧力依存性 (f=10kHz、V=180V_{pp})

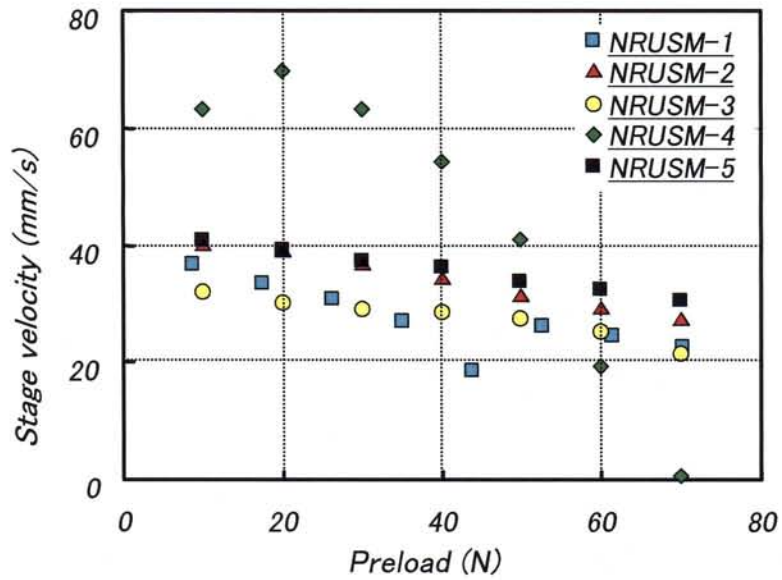


図 2.17 ステージ駆動速度—予圧力依存性 ($f=20\text{kHz}$ 、 $V=180V_{pp}$)

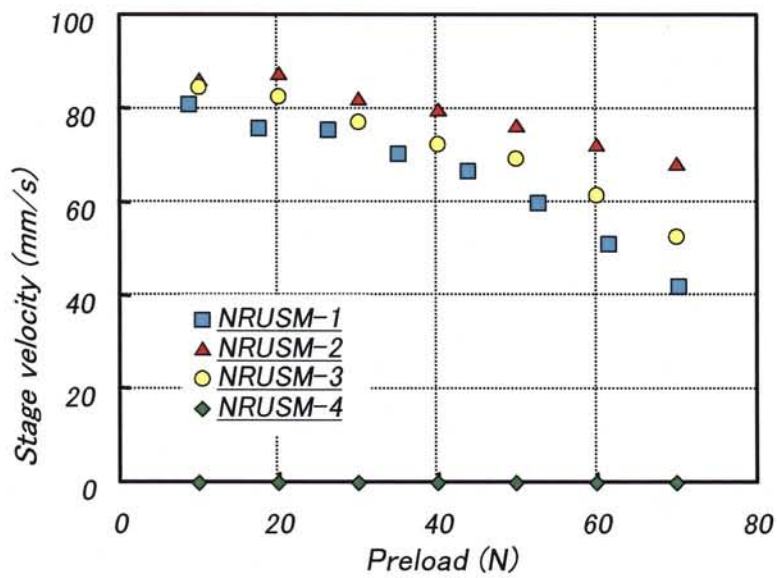


図 2.18 ステージ駆動速度—予圧力依存性 ($f=30\text{kHz}$ 、 $V=180V_{pp}$)

2.3.5 振動解析

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 2.6 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 2.19 に示す実験セットアップにて行った。図 2.20 は NRUSM-1 を $100V_{pp}$ 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 $3.4\mu m$ 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 2.21 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^[7]。

図 2.22 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 2.23 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。

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 $100V_{pp}$ のステップ電圧を加えた時の変位を、図 2.19 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 2.5、ならびに表 2.6 に示す。

NRUSM-1 に $100V_{pp}$ 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 2.24 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^[4]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。

表 2.6 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 _{pp}
駆動周波数	5~60kHz
実験セットアップ	図2.19

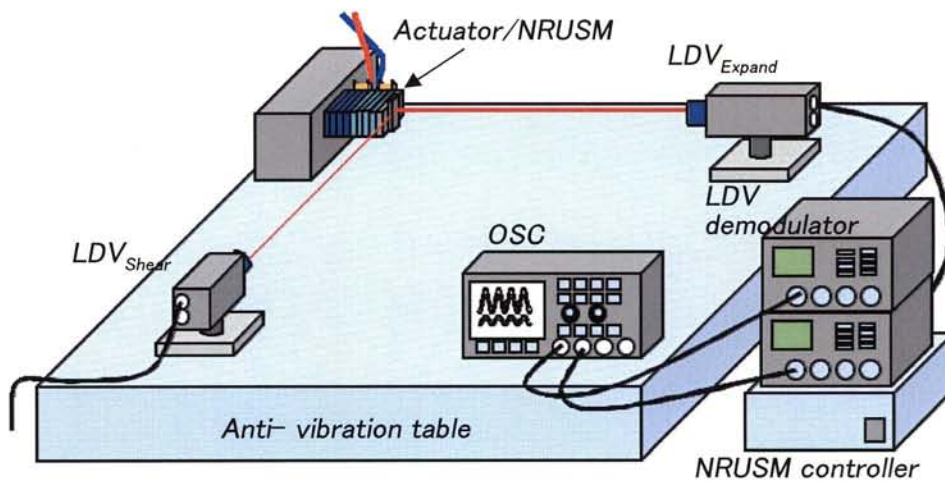


図 2.19 無負荷変位測定の実験セットアップ

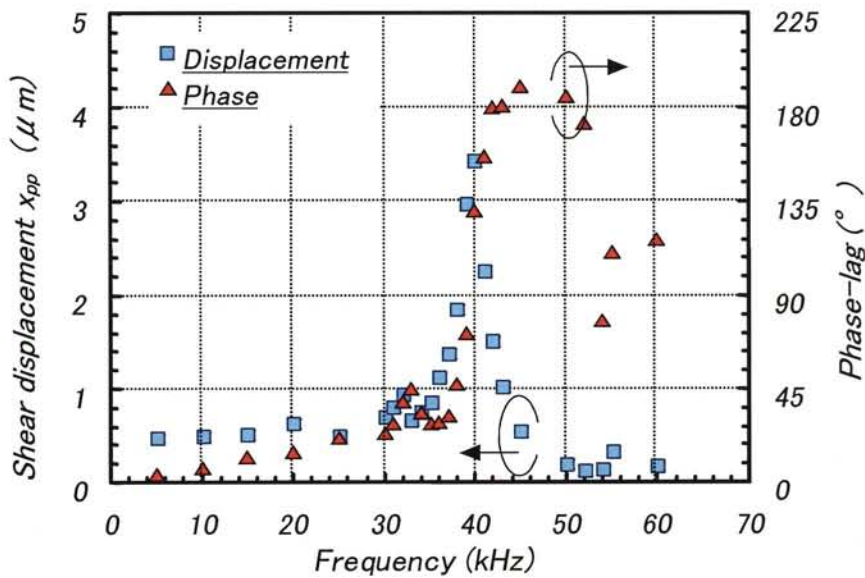


図 2.20 NRUSM-1 の無負荷剪断変位・位相遅れ—駆動周波数依存性 (V=100V_{pp})

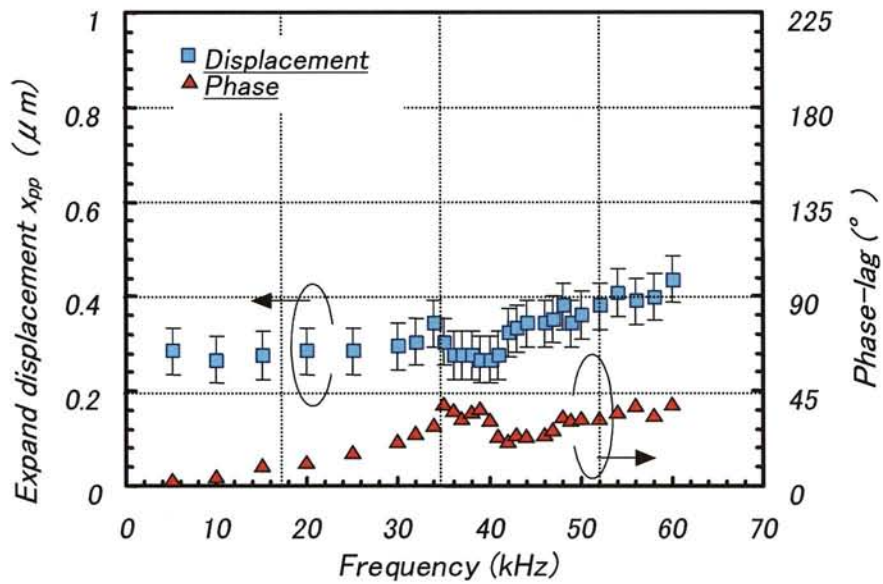


図 2.21 NRUSM-1 の無負荷伸縮変位・位相遅れ—駆動周波数依存性 ($V=100V_{pp}$)

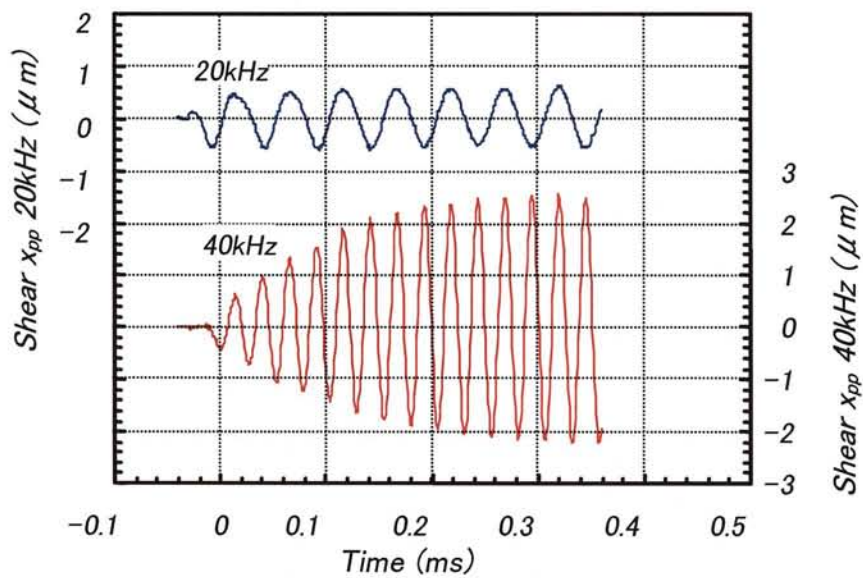


図 2.22 20kHz、40kHz 駆動時の剪断変位—時間応答比較

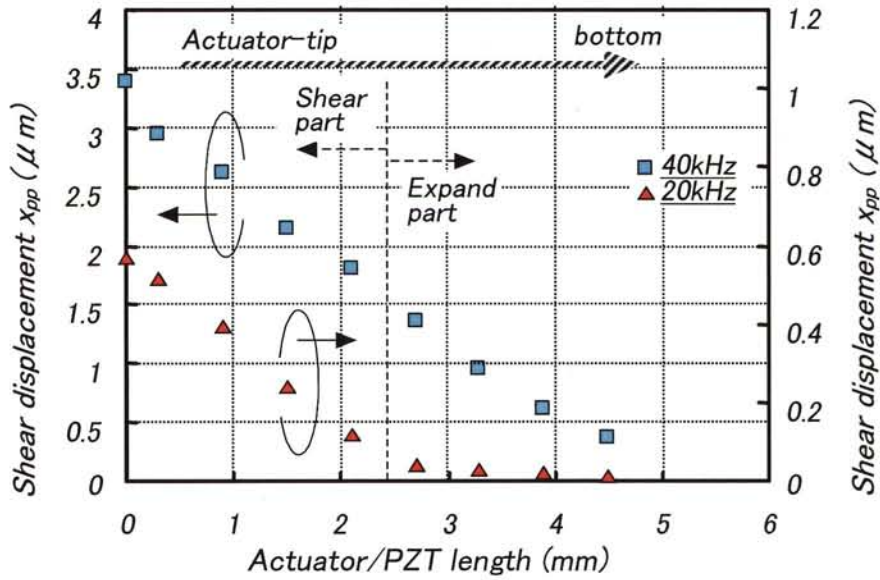


図 2.23 20kHz、40kHz 駆動時のアクチュエータ各部の剪断方向変位比較 (積層型圧電アクチュエータ先端を 0mm とする)

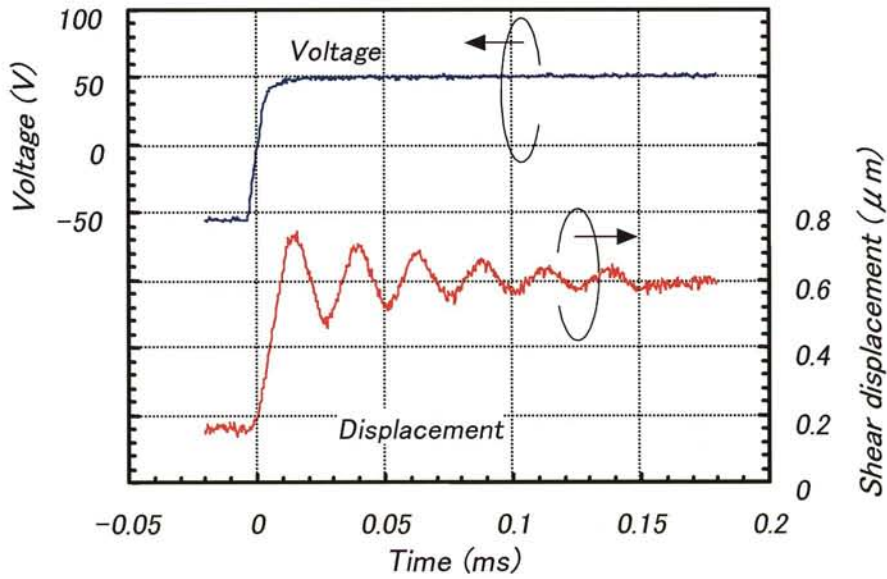


図 2.24 ステップ電圧駆動時の NRUSM-1 剪断方向変位—時間応答 (矩形波 $V=100V_{pp}$)

表 2.7 . 非共振型圧電アクチュエータの FEM による構造解析結果

項目	ブラン ク	素子幅の影響			素子長の影響			素子高の影響	
台座	ザグ リ有	ザグリ無し (14W×28L×10T)							
素子		3W	4W	6W	4W			4W	6W
		6L			6L	9L	12L	6L	
		7H						5H	4H
21									
22									
23	23								
24									
25		25							
26	26	26							
27	27	27					27		
28	28					28			
29			29		29				
30		30	30	30	30		30		
31			31		31	31	31		
32			32		32	32	32		
33	33					33			
34									
35		35							
36									
37	37	37		37					
38		38	38	38	38			39	
39	39	39						40	
40		40	40	40	40				
41		41	41		41				
42	42			42					
43	43	43					43	43	43
44	44						44		44

※	40	40	40	44	48	56	70
---	----	----	----	----	----	----	----

※素子の送り方向の固有振動数(片持ち梁)

2.4 新型アクチュエータ

表 2.7 はアクチュエータの FEM 解析結果である。非共振による動作領域を高周波数側へシフトさせるには、その固有振動数を向上させる必要が有る。FEM 解析の結果より、素子の高さを低く、幅を大きく設計すればよいことがわかった。

2.5 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、NRUSM の変位解析を行うことにより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。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、このスレッショ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。

参考文献

- [1] Burleigh Instruments Inc., "Inchworm Positioning Systems," Product Catalog, 1997.
- [2] 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.
- [3] E. Shamoto and T. Moriwaki, "Development of a "walking drive" ultraprecision positioner," Precision Engineering, Vol. 20, No. 2, pp. 85-92, 1997.
- [4] 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.
- [5] K. Uchino: Ferroelectric Devices (Marcel Dekker Inc., New York, 2000) Chap. 1, p. 12.
- [6] (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.
- [7] (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3章 高剛性ステージの開発

3.1 緒言

最新鋭の半導体製造装置は、300mm 口径の 12 インチウェハー対応となり大型化を迎えた。本研究においても、半導体前工程で稼働している製造装置は、NRUSM やそれを組み込んだ大型ステージの適応分野として強く意識している。この荷電粒子応用装置がひしめく半導体前工程において、真空チャンバー内部で稼働する精密ステージの基本材料はアルミニウムが主流である。その理由としては、非磁性材料なので荷電粒子軌道に影響を与えるような磁場変動を発生しないこと、鉄（比重 7.87 g/cm³）や銅（同 8.93 g/cm³）と比べるとアルミニウム（同 2.71g/cm³）の比重は約 1/3 程度であること、加工性が良いこと、耐食性が高くメッキが不要なことなどが挙げられる。しかし、大型化と共に更なる高精度化を要求されている微細加工分野においては、その剛性の低さが問題となりつつある。そこで、その様な要求を満たす為に、基本材料をアルミニウムからアルミナセラミックス（Al₂O₃）へと変更した 12 インチストローク対応大型ステージを開発して評価した。アルミニウムのヤング率が 70.1GPa に対して、アルミナセラミックスのそれは 400GPa と約 5 倍以上の強度を誇るので材料強度としては十分である。この特徴に着目したアルミナセラミックス製ステージはこれまでも試作され、真空装置に組み込まれて稼働している。しかし、アルミナセラミックスの比重は 3.96g/cm³ なので、アルミニウムと比較して約 1.46 倍の重量増加となる。この問題に対する解決法としては、「肉抜き」と呼ばれる手法が一般的である。しかし、剛体の途中途中に穴を開けると重量は軽くなるが、剛体自身の強度が低下する。また、焼結体であり脆性材料に分類されるアルミナセラミックスには、金属材料のような粘りは無い。つまり、切削加工する際の壁面厚さには限界があり、これを越えた加工をする際には破損の危険性が著しく上がる。それ故に、設計段階において強度計算を行い、それを元に軽量化設計を展開しなければ、軽量化は達成されたが想定した程の強度が出ない構造体を製作してしまうことになる。

本章では、従来型焼結法によるムク構造のアルミナセラミックスを基本材料とした大型ステージの製造と評価に関して最初に述べる。そこでは、基本設計図を基に有限要素法による強度計算、ならびに振動モード解析を実施し、その結果を設計にフィードバックする手法を用いている。また、製作された大型ステージ各部の高精度計測による幾何精度検証と修正を施し、目的とする性能に達するまでの過程についても述べる。次に、焼結体の中空化技法によるセラミックスを主材料としたステージに関する評価を行う。この焼結体の中空化技法では、複合の焼結行程を経ることで、従来の単一焼結行程では製作不可能であった平板のリブ構造化、ハニカム構造化を可能と

している^[1,2]。先に述べた今後の大型化傾向において、大型化、軽量化、そして強度維持の相反する要求をバランス良く両立させる新技術である。

3.2 ファインセラミックスステージ

3.2.1 ステージ仕様と FEM 解析

本節では、NRUSM と対となり、ワークに対して要求される空間位置を高精度に提供する超精密 XY ステージの開発と評価に関して述べる^[3]。ステージの目標性能を表 3.1 に示す。最初に、現在使用できる工業材料のうち、ステージ素材として最適と思われるアルミナセラミックスのムク（無垢）構造ステージで評価を行った。次に、今後の大型化傾向と要求性能、そして製造コストなどの複合的問題点を解決する為の要素技術である、アルミナセラミックスの軽量化技法を用いたステージによる評価へと移行した。この軽量化技法は、ムク構造に対して、上下板と中間リブとした中空構造化により軽量化を行ったものである。最後に、中間リブの空隙率を極限まで高めた極めて薄い隔壁を使用したハニカム構造にすることにより、形状精度を維持しながら最軽量化した。

まず、リブ構造化やハニカム構造化の実現可能性をステージ剛性の面から調べるために、ムク構造ステージの自重によるたわみ解析と上段ステージが端部に移動したときのステージ姿勢に対する評価、及び、各段のステージの固有振動解析による剛性評価を行った。それぞれに使用している材料ならびに特性を表 3.2 に示す。比重 3.9 のアルミナセラミックス製ムク構造ステージに対して、リブ構造及びハニカム構造ステージでは、太平洋セメント株式会社と株式会社日本セラテックにより共同開発された比重 2.5 のゼロ膨張セラミックス ZPF (Zero thermal expansion Pore Free ceramics) をステージ材料として採用した^[4]。ヤング率はアルミナセラミックスに比べて低いが、室温付近の熱膨張係数がゼロである特長を有する。また、レール部材料としては、株式会社日本セラテック開発の耐磨耗性の高いポアフリーセラミックス SLPF を採用した。

図 3.1 にムク構造ステージの全体構造を示す。図 3.2、図 3.3 にはムク構造上段ステージと中段ステージの形状モデルを示す。図 3.4、図 3.5 にムク構造 XY ステージの有限要素モデルを示す。最下段ステージはレール部のみモデルに含まれている。いずれも四面体 1 次要素で分割され、図 3.4 のモデルが要素数 17,748、節点数 32,097、図 3.5 のモデルが要素数 17,842、節点数 32,225 である。なお、本報での構造解析に用いたソフトウェアは、COSMOS/Works^[4]であり、ステージとステージの境界面には接触条件が設定されている。図 3.6、図 3.7 に自重によるたわみ分布を示す。上段ステージが中央位置にある場合、上段ステージの最大たわみは、 $0.3288 \mu\text{m}$ 、中段ステージの最大たわみは、 $0.2609 \mu\text{m}$ である。上段ステージが端に移動した場合、上段ステージの最大たわみは、上段ステージが中央位置にある場合に比べて、約 7.3%増の $0.3527 \mu\text{m}$ となり、中段ステージの最大たわみは、約 3.3%減の $0.2522 \mu\text{m}$ となった。このように中段ステージのたわみが若干減少したのは、上段ステージが端に移動したことにより、中段ステージに対する上段ステージの荷重としての影響が少なくなったためと考えられる。図 3.8、図 3.9、図 3.10 に、ムク構造上段ステージ固有振動モードを、図 3.11、図 3.12、図 3.13 には、ムク構造中段ステージ固有振動モード

を示す。それぞれは順番に、長手方向のねじれである1次振動モード、長手方向の曲げである2次振動モード、長手方向の非対称曲げである3次振動モードを示す。

表 3.1 300mm ストローク XY ステージの目標性能

項目	仕様
軸構成	X-Y 2軸
ストローク	X軸(上軸) :310mm Y軸(下軸) :310mm
材質	アルミナセラミックス製 Al_2O_3 99.5%
ガイドレール	アルミナセラミックス製 V-Vガイド方式
転動体	円筒型タングステンカーバイト 15mm × 4.000mm Φ
幾何精度	Yawing, Pitching, Rolling 全てにおいて 1arc-sec. 以下@300mm
Z変動	3 μ m@300mm
駆動源	非共振型超音波モータ(NRUSM)
最高速度	300mm/s.
最高瞬間加速度	0.5G
位置決め精度	10nm
位置計測装置	He-Neレーザー干渉計
位置計測分解能	0.6155nm/LSB

表 3.2 300mm ストロークに使用したセラミックス材料の機械的特性

		ステージ部	レール部
ムク構造	ヤング率 (GPa)	400	
	ポアソン比	0.24	
	比重	3.9	
リブ構造 ハニカム 構造	ヤング率 (GPa)	150	310
	ポアソン比	0.28	0.24
	比重	2.5	3.3

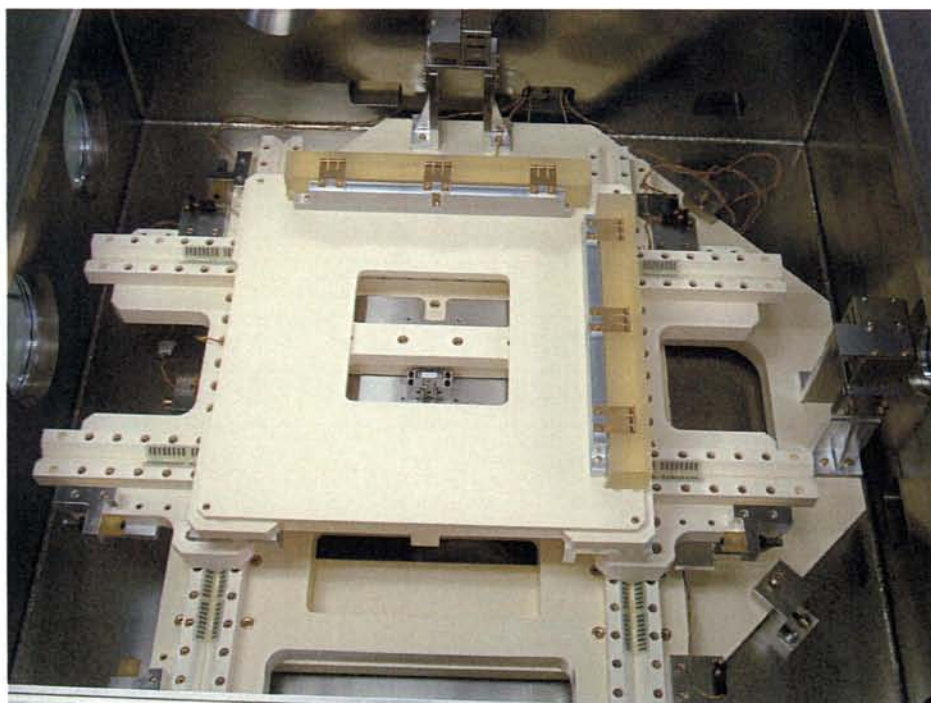


図 3.1 ムク構造 XY ステージ全体構造

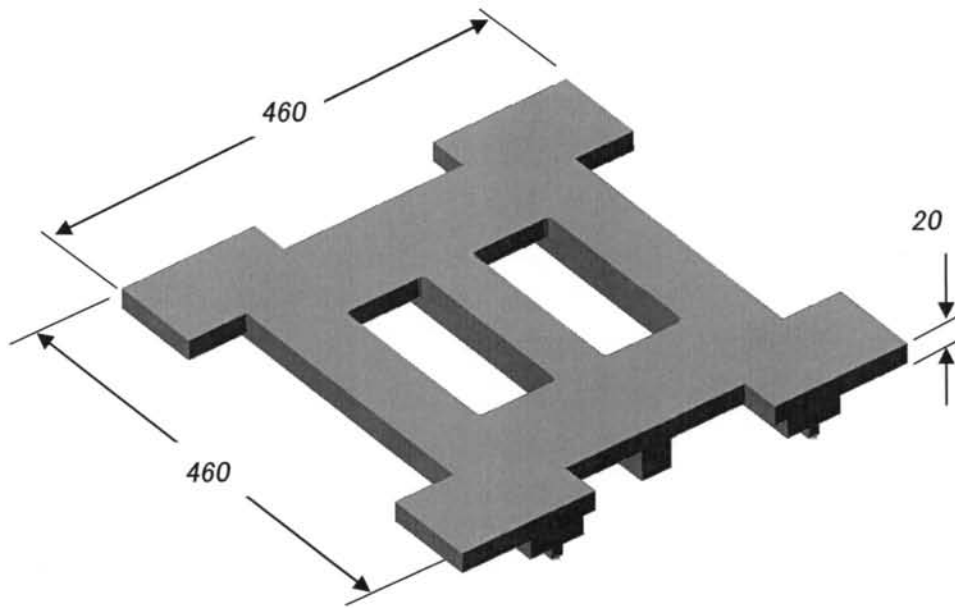


図 3.2 ムク構造上段ステージ形状モデル

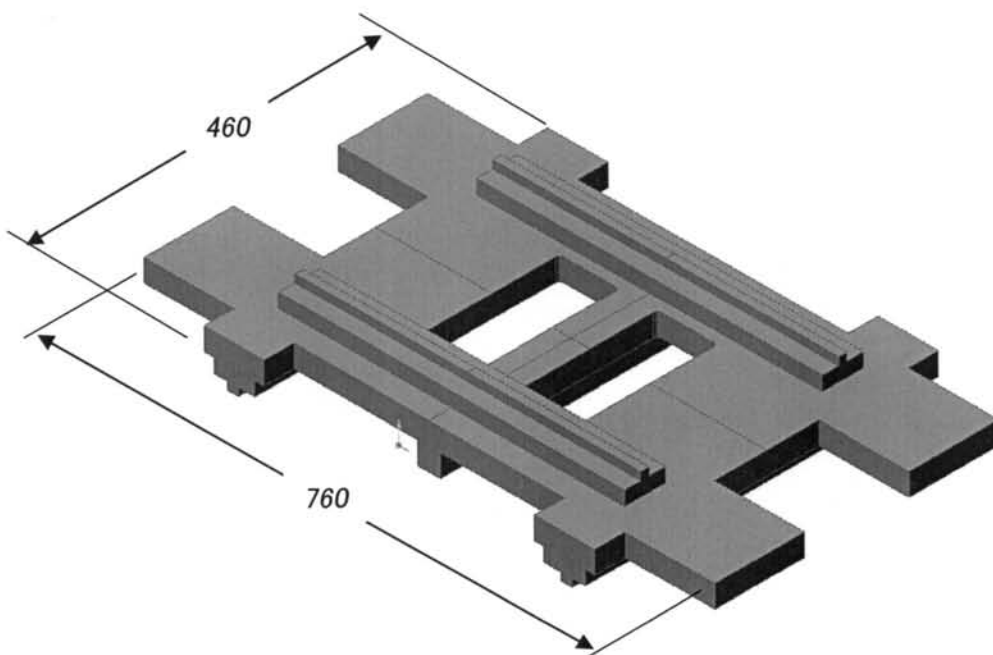


図 3.3 ムク構造中段ステージ形状モデル

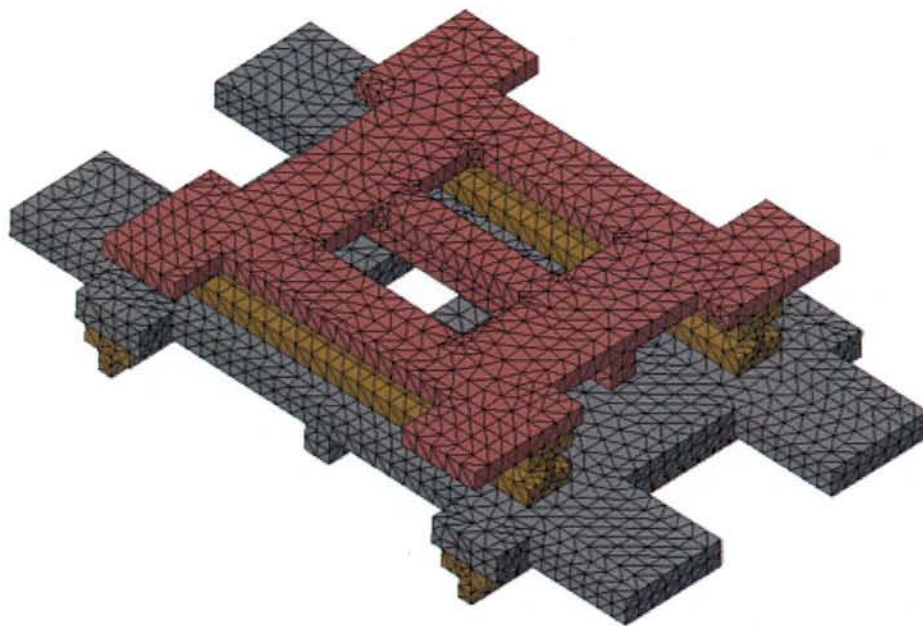


図 3.4 ムク構造 XY の上段ステージが中央位置の場合の有限要素モデル

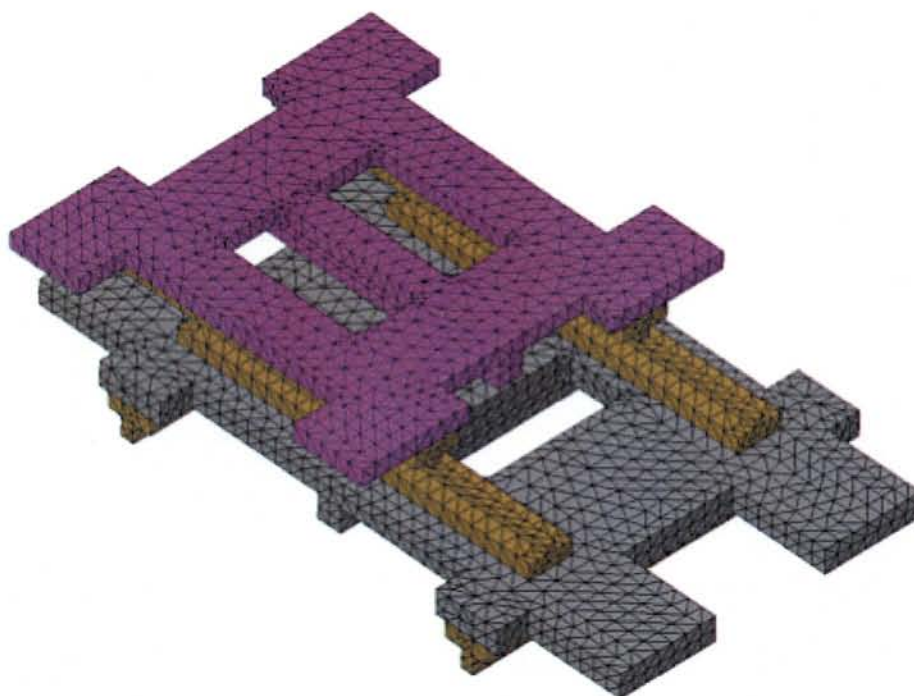


図 3.5 ムク構造 XY の上段ステージが端に移動した場合の有限要素モデル

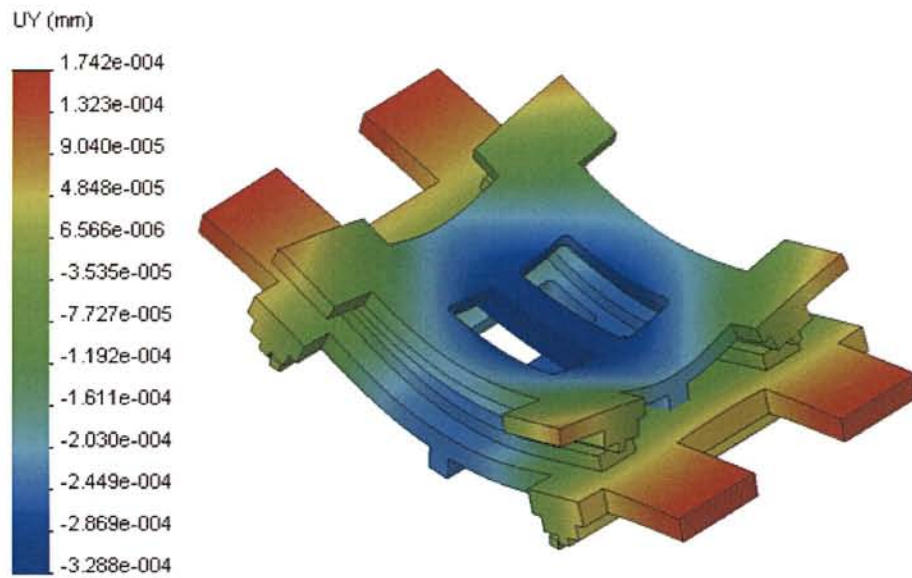


図 3.6 ムク構造 XY ステージの上段ステージが中央位置の場合のたわみ分布

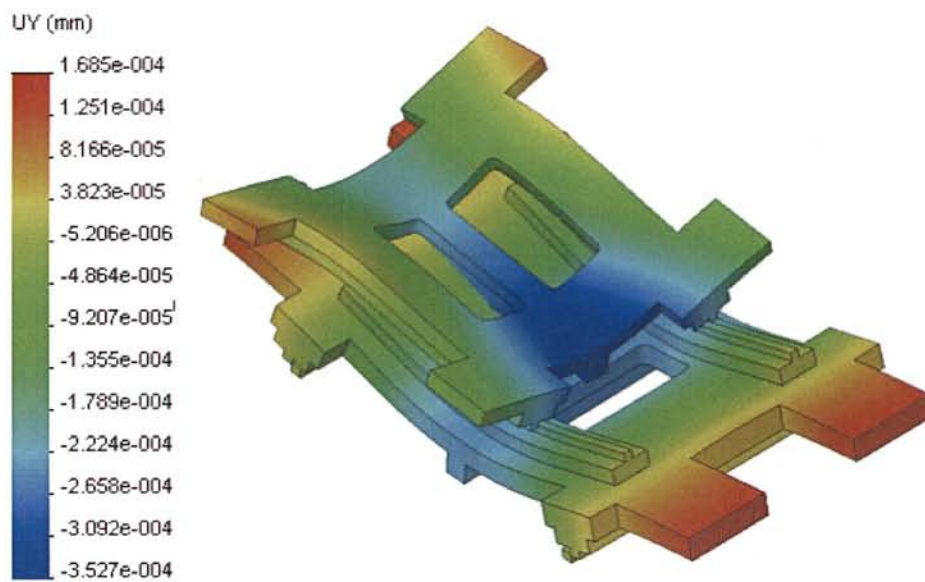


図 3.7 ムク構造 XY ステージの上段ステージが端に移動した場合のたわみ分布

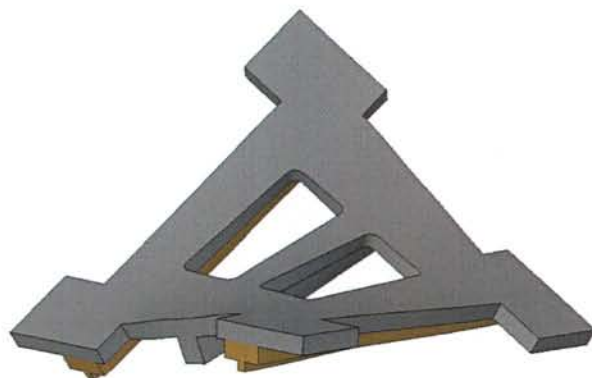


図 3.8 ムク構造上段ステージの 1 次振動モード (676Hz)



図 3.9 ムク構造上段ステージの 2 次振動モード (864Hz)



図 3.10 ムク構造上段ステージの3次振動モード (1897Hz)

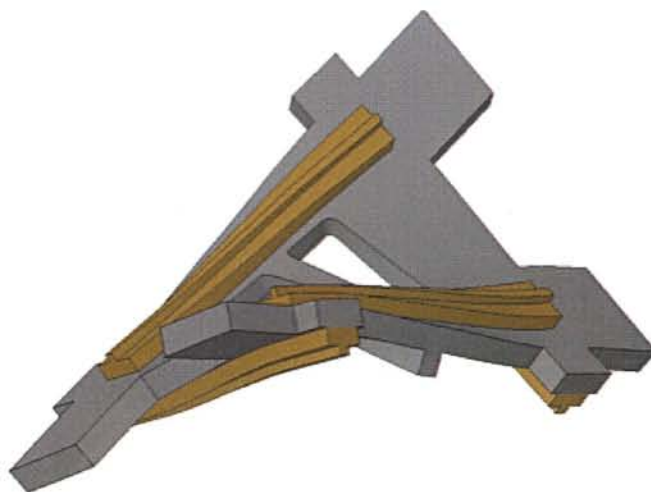


図 3.11 ムク構造中段ステージの1次振動モード (646Hz)

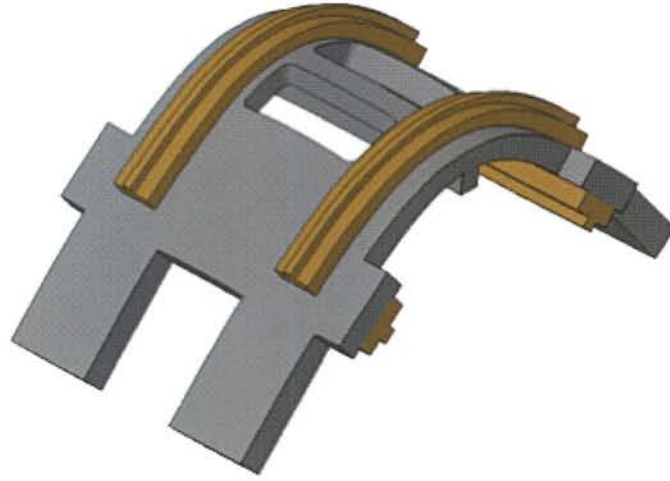


図 3.12 ムク構造中段ステージの 2 次振動モード (835Hz)

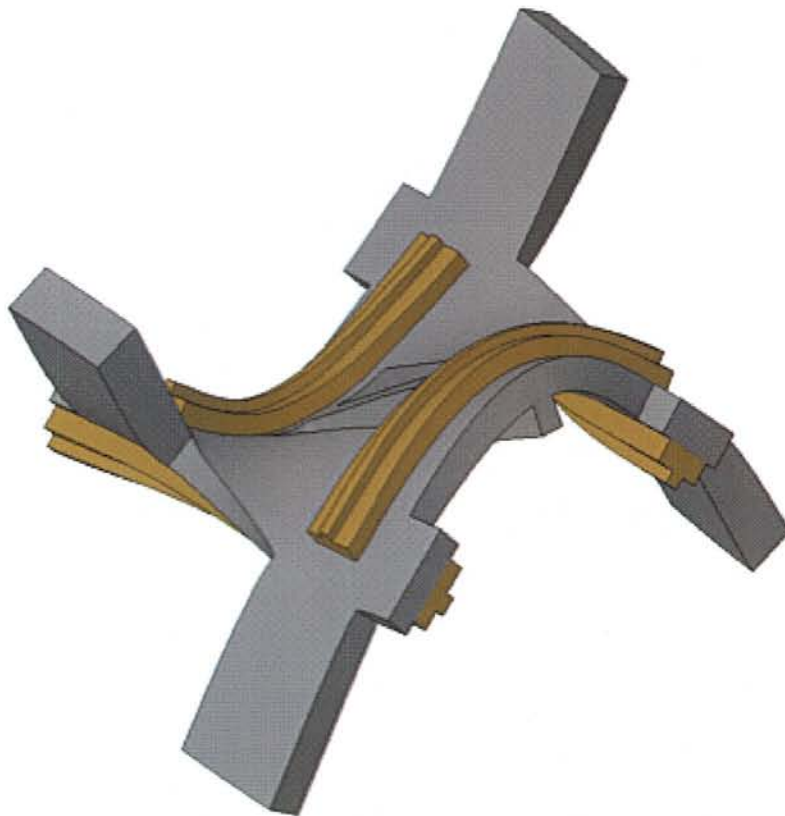


図 3.13 ムク構造中段ステージの 3 次振動モード (1446Hz)

3.2.2 ステージ姿勢計測

本節では、FEMにより構造解析した結果と、実際に製作したステージにおける精度評価を照らし合わせ、その手法の有効性を確認する。図3.14に計測項目の定義を示す。精密ステージにおける幾何精度とは、空間上に配置した理想XYZ座標に対する各XY軸の直進性、平行度、平面度などを評価項目としている。それらは、それぞれの座標軸に対する回転誤差として表現できる。つまり、XYZ座標への移動自由度と各軸に対する回転自由度である。それらは空間の6自由度として知られており、特に軸に対する回転誤差は、Yawing、Pitching、Rollingと呼ばれている。勿論、観測者がどの軸上にいるかで、それぞれの呼称は転換する。

Yawing、Pitching、Rollingの計測結果に関して述べる。図3.15に計測機器の構成を、図3.16にはその計測結果を示す。本研究で目指しているステージ精度は非常に高い。また、それは計測機器の計測限界値にも近いものである。故に、ここでは計測信頼性を確保する為に、アジレントテクノロジー製レーザー干渉計HP5529Aとニコン製オートコリメータPA102Sを併用して計測を行った。組み立て直後においては、目標とする姿勢精度を満たしていたが、40往復ほどステージを動かした後に再計測すると、姿勢が乱れていた(図3.17)。原因として考えられるのは、ガイドレール部で使用しているタングステンカーバイド製転動体とガイドレールに使用しているアルミナセラミックス間の潤滑として使用しているフロンブリンのカーボン析出である。図3.18、3.19にガイドレール部の構造と外観写真を示す。この付着に関しては、堆積する場所が決まっており、僅かな平行度誤差によるあたり具合の変化による圧力変動の結果として、カーボンが析出すると予想している。それと、カーボン堆積部とステージ精度劣化部分は一致している。この現象を当たり具合の情報と捉えることで、最終的に人間の手作業にて行うガイドレールの修正作業における指針となると考えている。それは、金属製平面を仕上げる際のキサゲ作業に使用する光明丹(Pb3O4)の作用と良く似ている。早速ステージをバラしてガイドレールに付着している汚れを除去し、再度計測を実施した所、所定の精度に復帰した。復帰後の精度データを図3.20に示す。このステージが目標としている精度は300mmストロークにおいて1arc-sec.以下の精度である。これを満たすには、ガイドレール上での加工誤差と、その後の堆積物やパーティクルの進入を含めて1 μ m以内の突起としておかなければならない。それ故に、パーティクルの管理が行き届いているクリーンルーム環境での組み立てと計測が非常に重要となる。

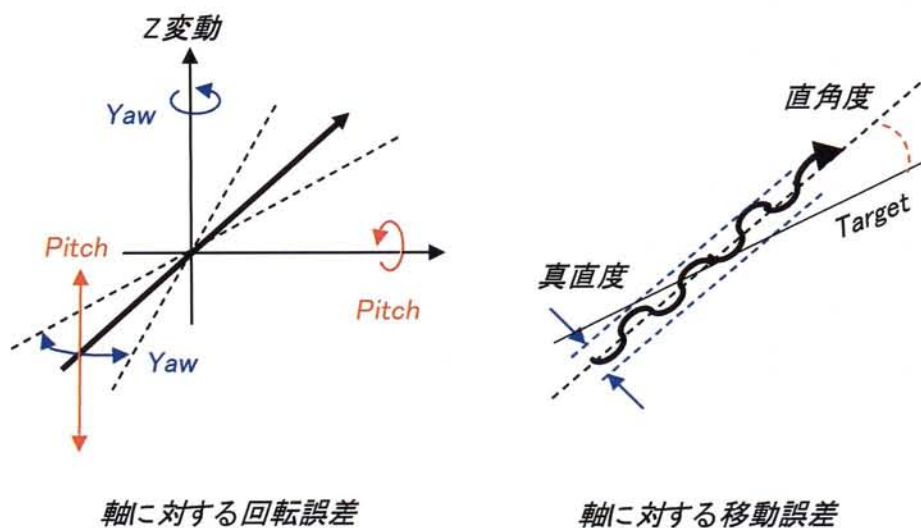


図 3.14 ステージ幾何精度計測における定義

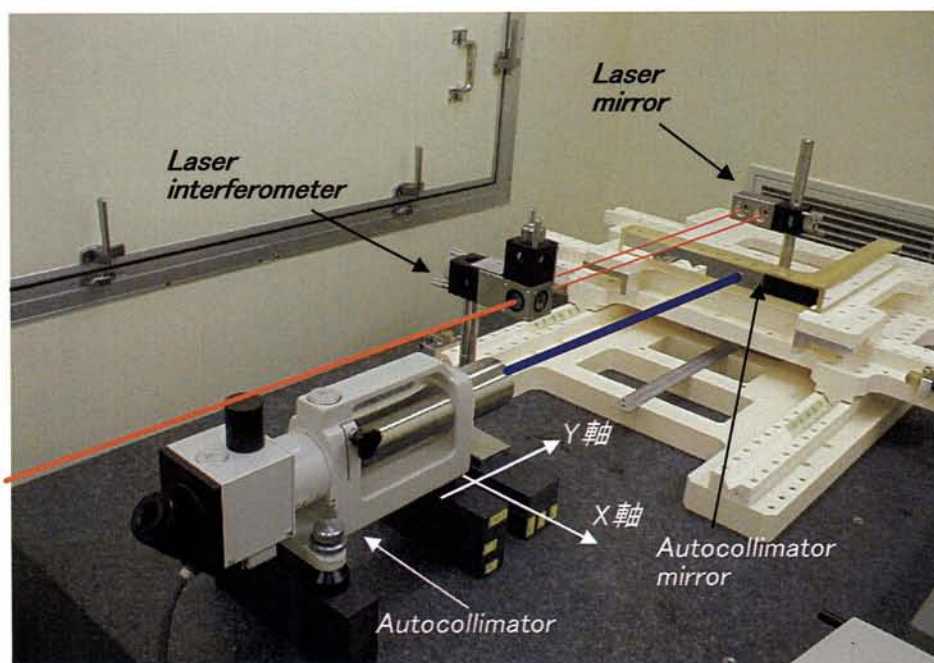


図 3.15 300mm ストロークステージの軸構成と計測機器配置

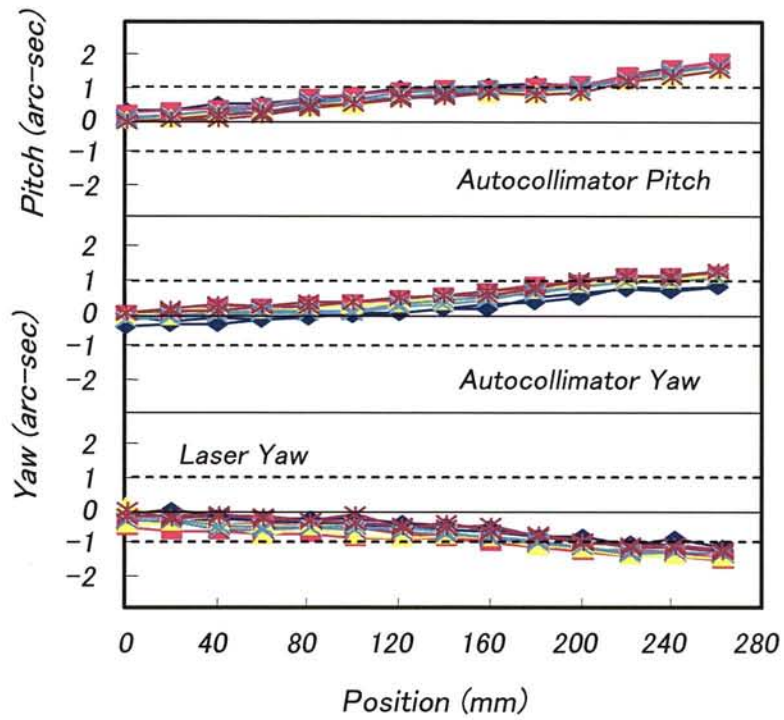


図 3.16 組み立て後のステージ幾何精度の計測結果

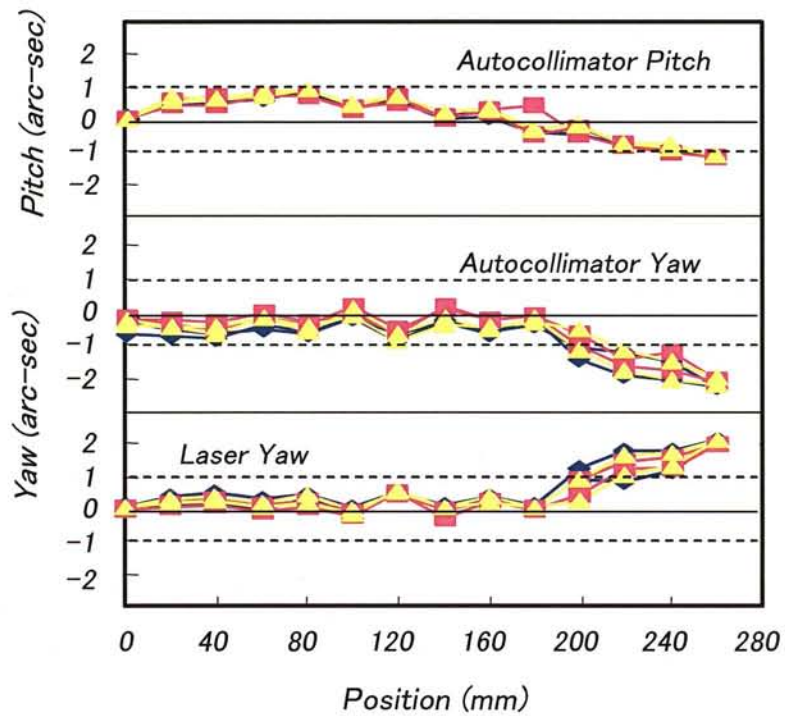


図 3.17 40 往復後のステージ幾何精度の計測結果

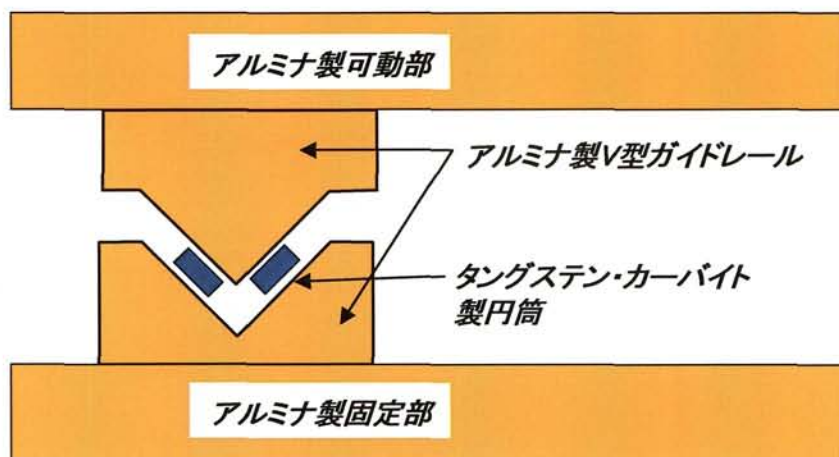


図 3.18 300mm ストロークステージのアルミナ製 V 型ガイドレール構造図

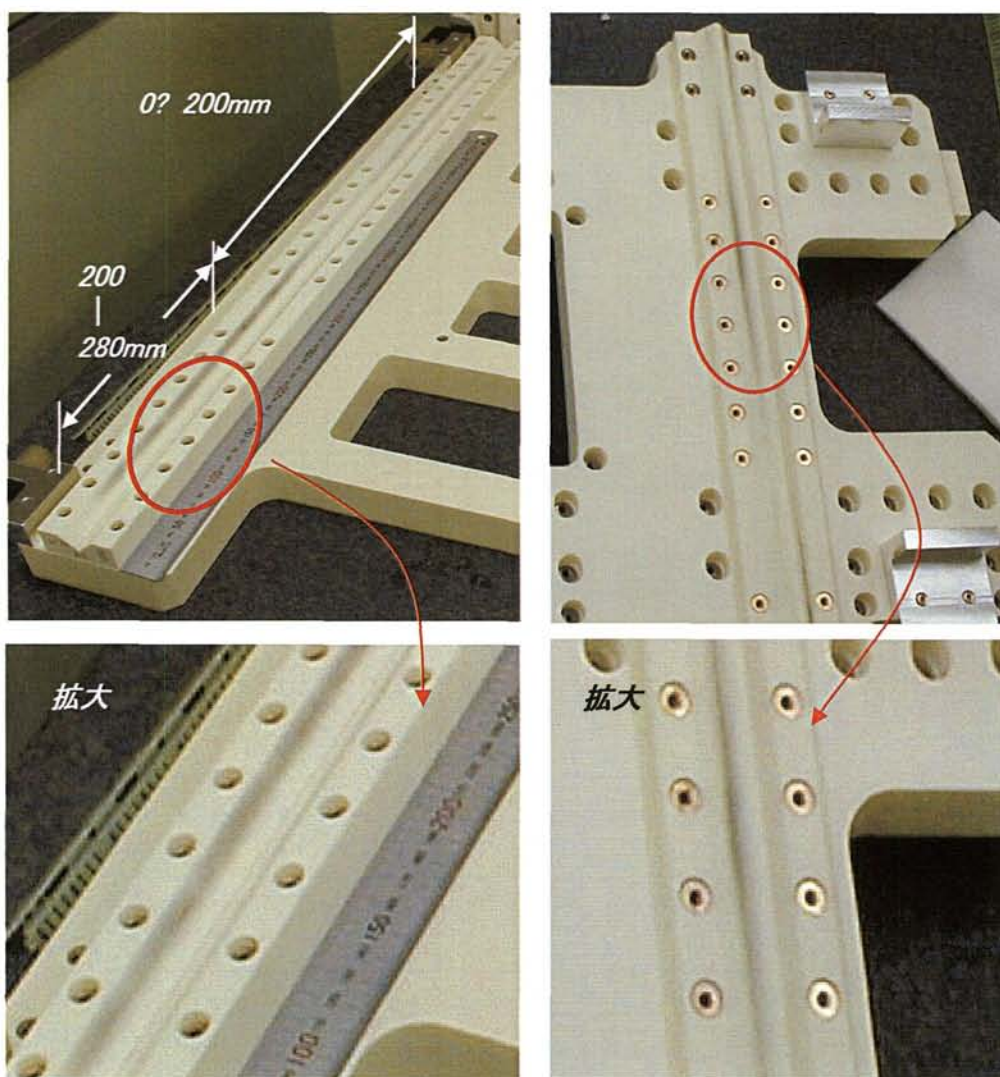


図 3.19 ガイドレール外観と潤滑オイルからのカーボン析出写真

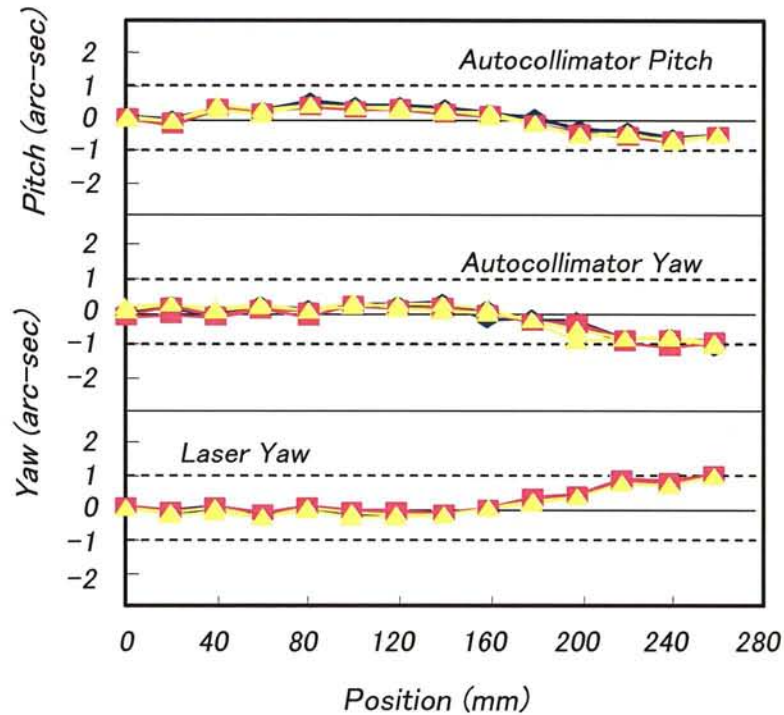


図 3.20 ガイドレール清浄後のステージ幾何精度の計測結果

3.2.3 微少修正と評価

次に、Yawing、Pitching、Rolling と共に重要視される、移動時のステージトップの高さ変動（Z 変動）に関して計測を行った。これは、微細加工装置における移動時の作動距離に相当する項目であり、装置全体性能と直結する。使用する計測機材の分解能に近い計測精度が要求されるので、接触式ならびに非接触式の 2 手法と、以下の 3 種類の計測機器を使用し、同時計測することで信頼性を確保した。

- ・オートコリメータ : Nikon 製 PA102S 非接触式
- ・接触式変位計 : Mitutoyo, 製 Mu-checker 接触式
- ・ " : Mahr 製 Millitron-12021C "

まず、初期計測として移動時の Z 変動を確認した。ステージの計測軸を図 3.21 に、ここでの計測方法を図 3.22 にそれぞれ示す。計測機器を大型石定盤上に固定し、ステージ最上部の 1 点を計測点とする。そして、ステージを等間隔で移動しながら計測値を記録する手順を取った。これにより、ステージ中心の鉛直方向に同軸配置された荷電粒子の照射側から見た場合の作動距離（Working Distance : WD）変動分として定義できる。図 3.23、3.24 にライン A とライン D の計測結果を示す。300mm ストロークでの Z 変動量は $10\mu\text{m}$ ほど有り、目標としている $3\mu\text{m}$ からすると 3 倍以上の差である。この計測結果は、それぞれの計測機器が同様な傾向を示しているので信

頼に値する．続いて、図 3.25 に示すように、定盤基準とした高剛性エアスライドと接触式電気マイクロメータを使用して、定盤自身、ステージ上部、ならびにステージ上部に置いた平面原器の平行度を計測した．図 3.26、3.27 にライン A とライン D の計測結果を示す．これまでの計測により得られたステージの空間変動値を図 3.28 に示す．これより、ステージ上面と下面での平行度誤差は $7\mu\text{m}$ 近くあることが判明した．これらの計測結果より、移動時の Z 変動は、対を成すガイドレールの厚み誤差と、最上部のプレート平行度誤差との合成であることが判明した．それらのデータに基づき、それぞれの部分を修正した．その際の指針を図 3.29 に、その結果を図 3.30 に示す．これにより、全ストロークにおける Z 変動を目標値としていた $3\mu\text{m}$ に入れる事ができた．

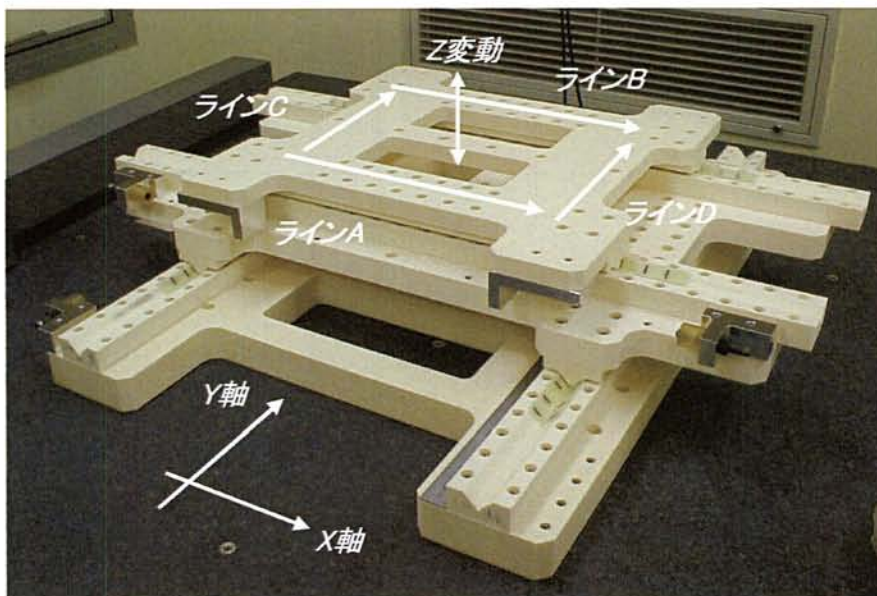


図 3.21 300mm ストロークステージの Z 変動計測用セットアップ

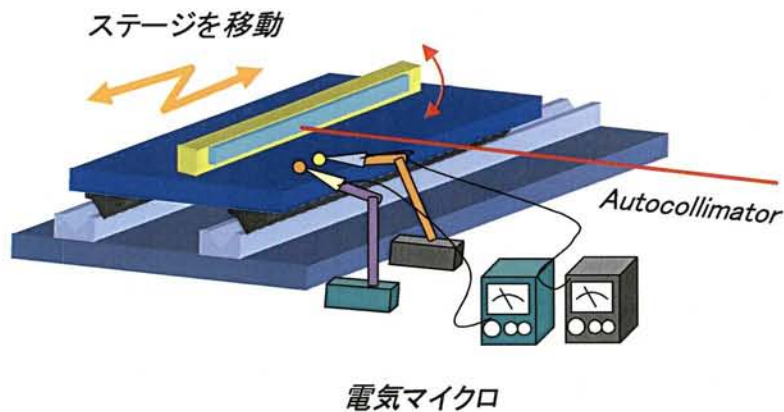


図 3.22 300mm ストロークステージの Z 変動計測方法

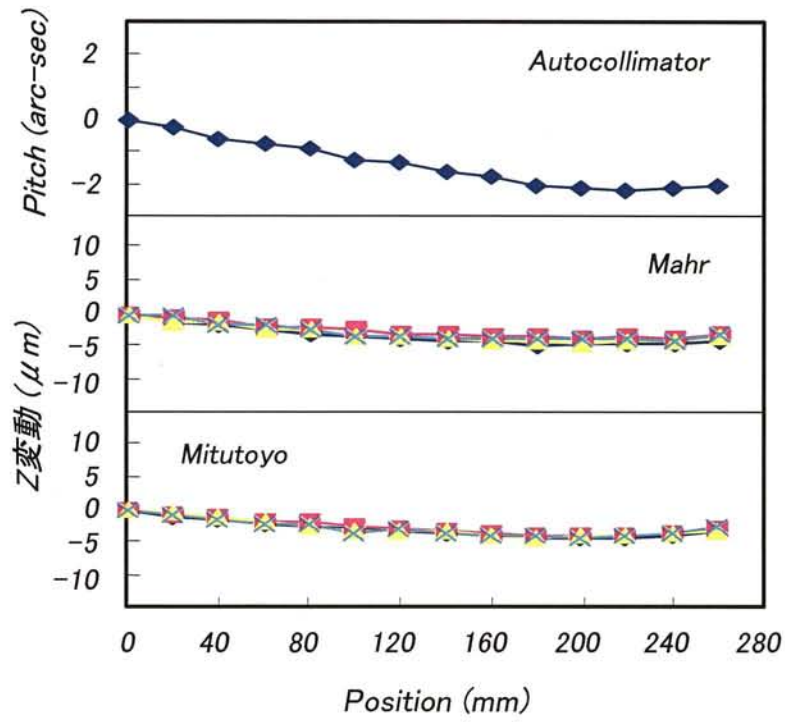


図 3.23 ライン A の Z 変動計測結果

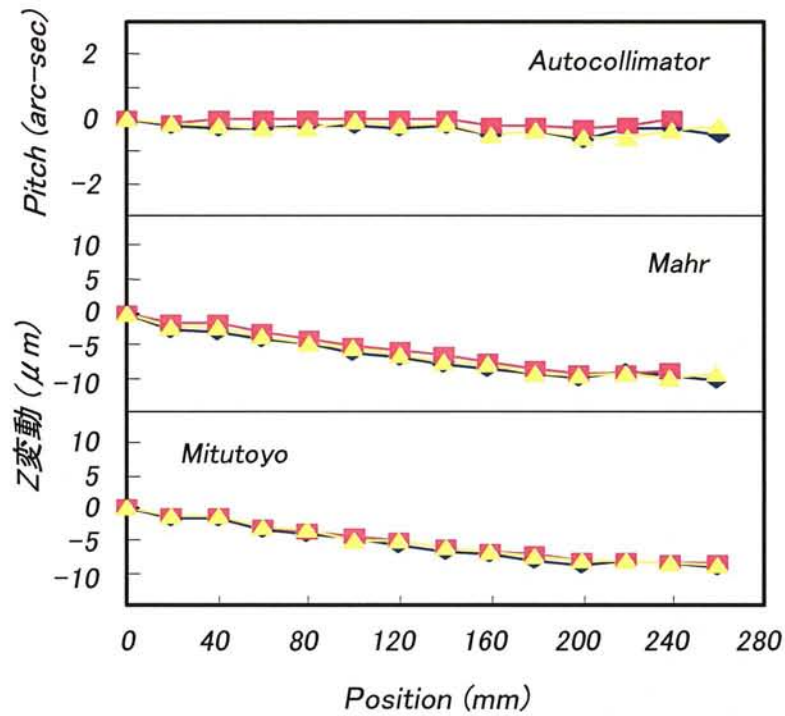


図 3.24 ライン D の Z 変動計測結果

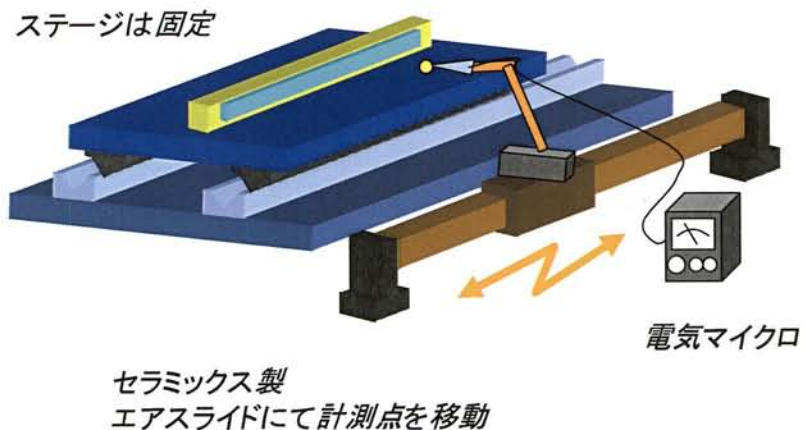


図 3.25 300mm ストロークステージのステージ上面と定盤間での平行度計測方法

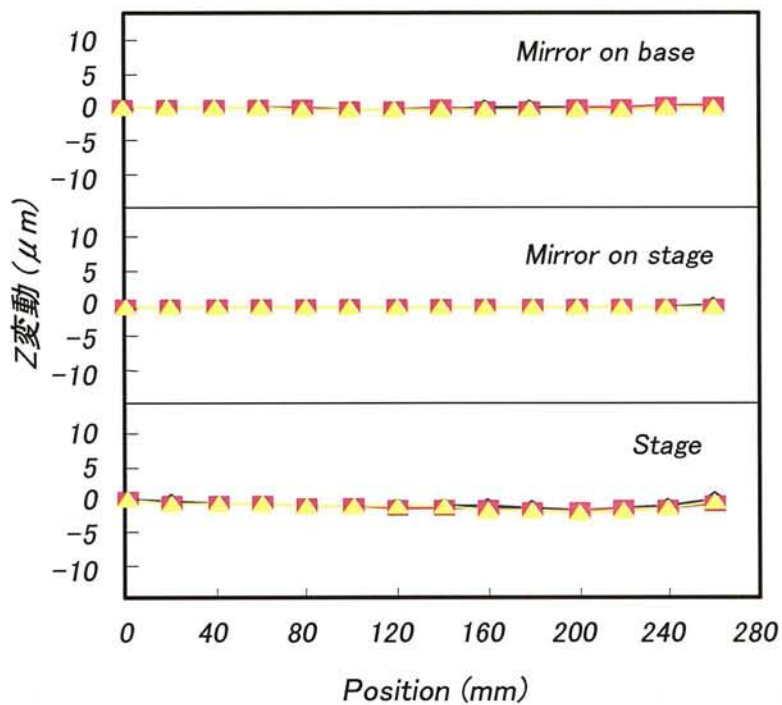


図 3.26 ライン A の平行度計測結果

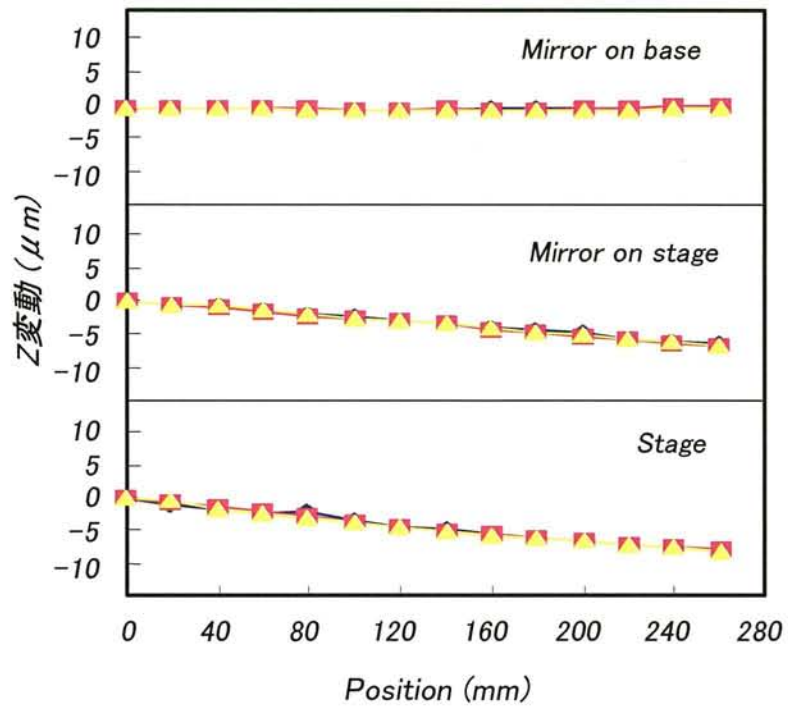


図 3.27 ライン D の平行度計測結果

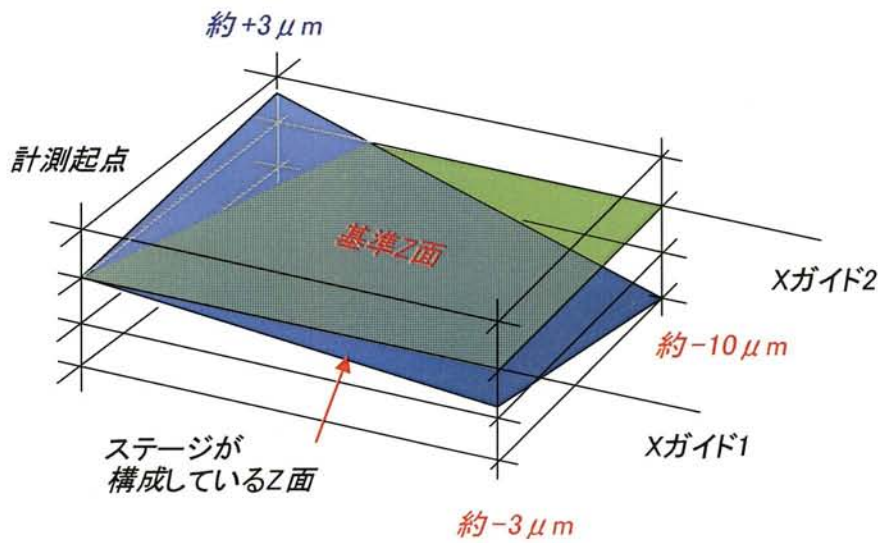
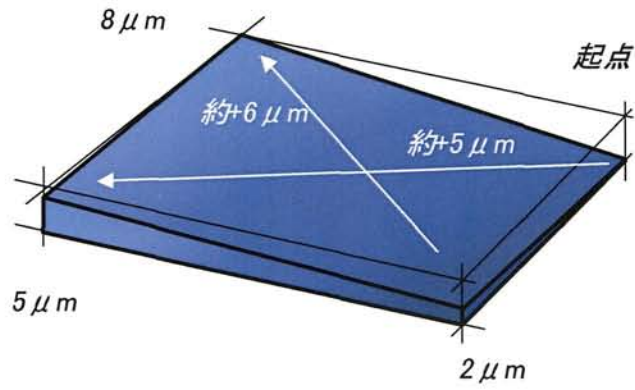
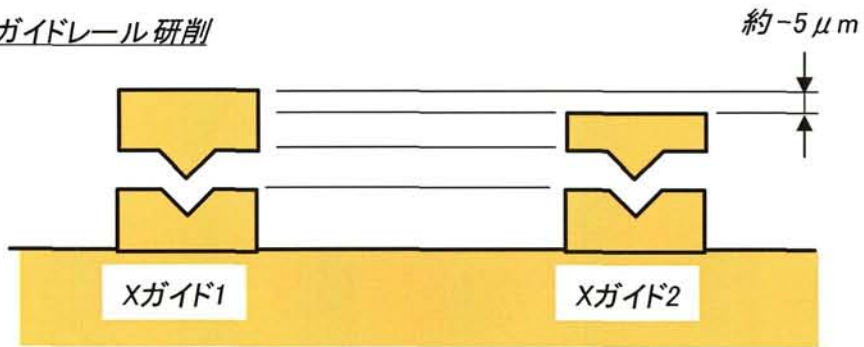


図 3.28 計測結果より得られたトップテーブルの空間変動値

トップテーブル研削



ガイドレール研削



4本のガイドレール平行度は約 $1\ \mu\text{m}$ 以内
相対高さを約 $5\ \mu\text{m}$ 修正

図 3.29 トップテーブルならびにガイドレールの修正量

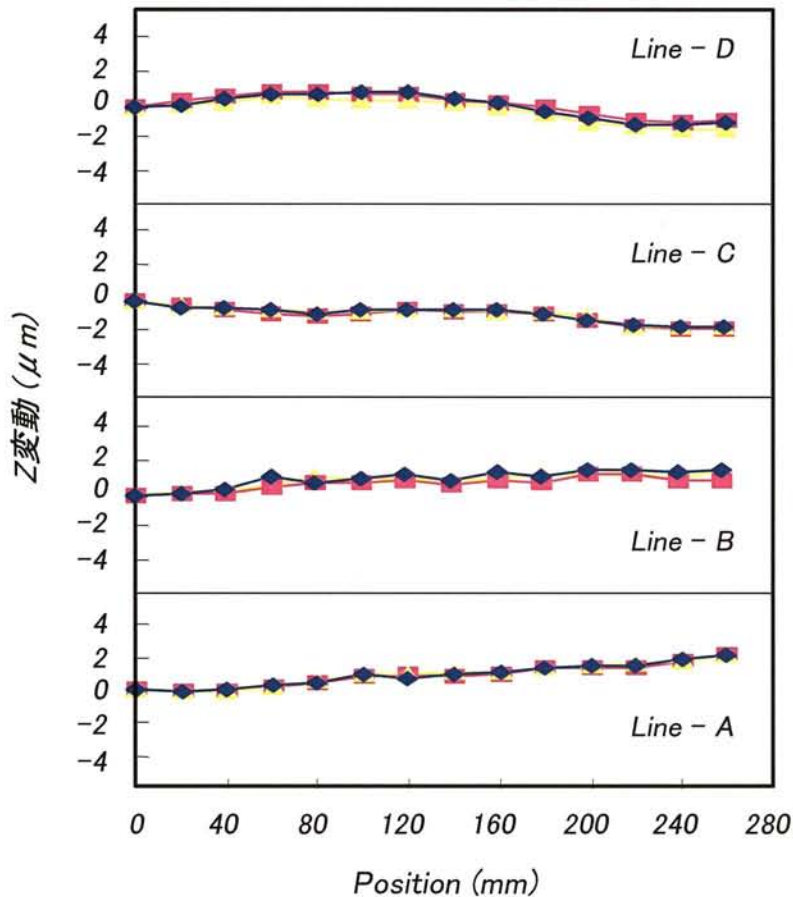


図 3.30 300mm ストロークステージの Z 変動 (修正後)

3.3 軽量化技法

3.3.1 軽量化と高剛性のトレードオフ

前節までのアルミナセラミックス製ムク構造のステージにおける精度確認ならびに修正は、今後のステージ材料として十分に有効であり、且つ、既存の高精度ステージメーカー以外でも高精度ステージを製作できる可能性を示した。本節では、今後更に大型化要求が高まっていく製造装置要求に対応する技術として、ステージ剛性を維持しながら軽量化する手法への取り組みと、その有効性を示す。

3.3.2 リブ構造によるファインセラミックスステージ

図 3.31 に、最下段ステージを含めたリブ構造 XY ステージの全体構造モデルを示す。これまでのムク構造のアルミナプレートは、プレス成型したアルミナから外形加工を施して焼結し、最終

加工を加えて所定の精度、寸法を満たしていた。このリブ構造では、プレス成形後に外形以外の内容積を切削で取り除き軽量化した上で焼結する。また、それだけでは完全なプレート構造とならないので、その軽量化した部材と対となる、ふた構造用平板も焼結する。そして、焼結が終わった部材同士の接触部分にトモ材料を塗布し、加圧しながら再度焼結工程にかけることで一体化を成し得る。

この形状設計の際にも FEM 解析を用いた手法を使用した。図 3.32、3.33 にリブ構造 XY ステージの上段ステージと中段ステージの形状モデルを示す。多数の小さな円孔は部材締結用のネジ穴であり、有限要素モデルでは省略される。図 3.34、3.35 には、リブ構造 XY ステージの有限要素法モデルを示す。最下段ステージはレール部のみモデルに含まれている。いずれも四面体 2 次要素で分割され、図 3.34 のモデルが要素数 60,823、節点数 106,239、図 3.35 のモデルが要素数 68,732、節点数 119,014 である。

上段ステージが中央位置にある場合と端に移動した場合の自重たわみ分を図 3.36、3.37 にそれぞれを示す。上段ステージが中央位置にある場合、上段ステージの最大たわみは、 $0.3931\ \mu\text{m}$ 、中段ステージの最大たわみは、 $0.3044\ \mu\text{m}$ である。上段ステージが端に移動した場合、上段ステージの最大たわみは上段ステージが中央位置にある場合に比べて、約 7.9% 増の $0.4241\ \mu\text{m}$ となり、中段ステージの最大たわみは $0.3033\ \mu\text{m}$ であり、わずかに減少した。ムク構造 XY ステージに比べ、リブ構造上段ステージの最大たわみは約 20% 増加し、中段ステージは、17~20% 増加した。また、トータル自重は、約 39% の減少となった。リブ構造化により大幅な軽量化は実現されたが、表 3.2 に示すようにステージのヤング率が 400GPa から 150GPa に低下したために、たわみが増加したものと考えられる。

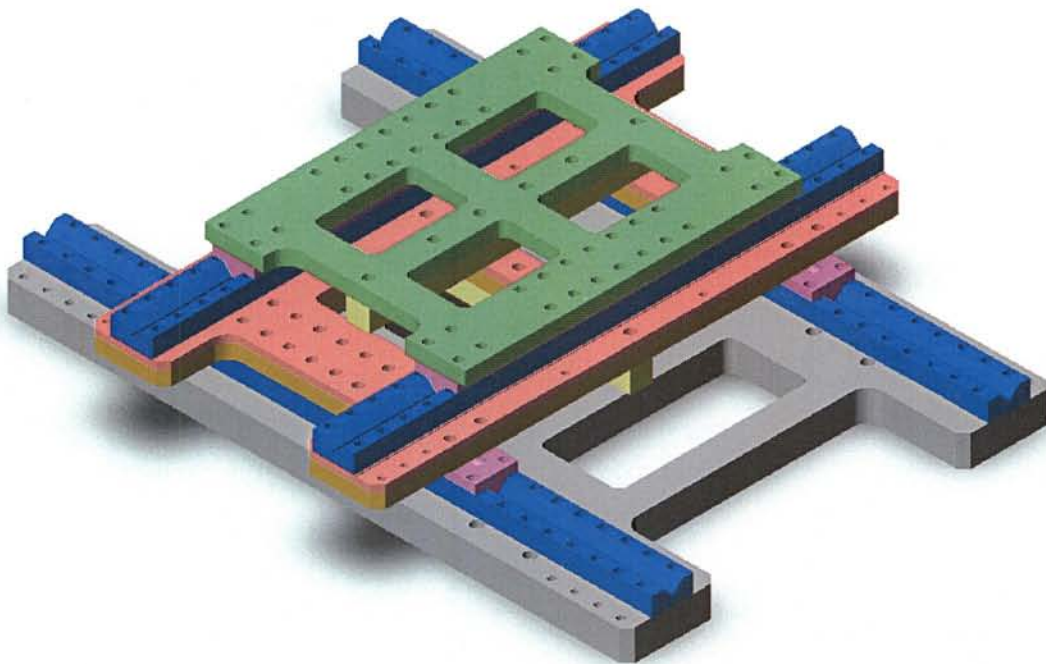


図 3.31 リブ構造 XY ステージの全体構造モデル

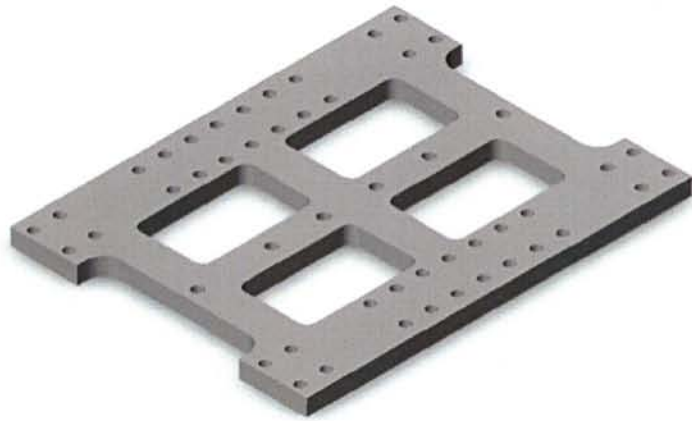


図 3.32 リブ構造 XY ステージの上段形状モデル

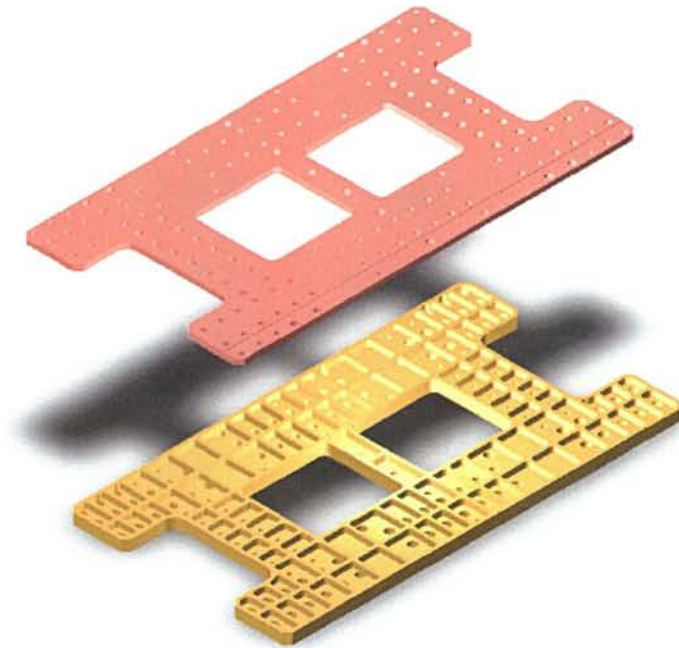


図 3.33 リブ構造 XY ステージの中段形状モデル

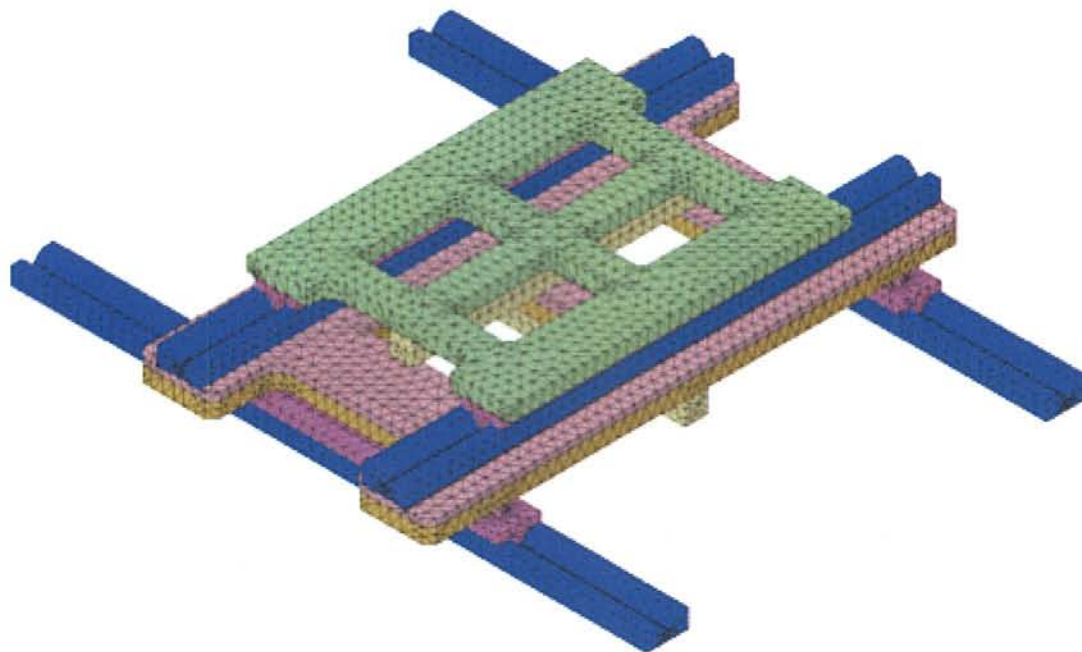


図 3.34 リブ構造 XY ステージでの上段ステージが中央位置の場合の有限要素モデル

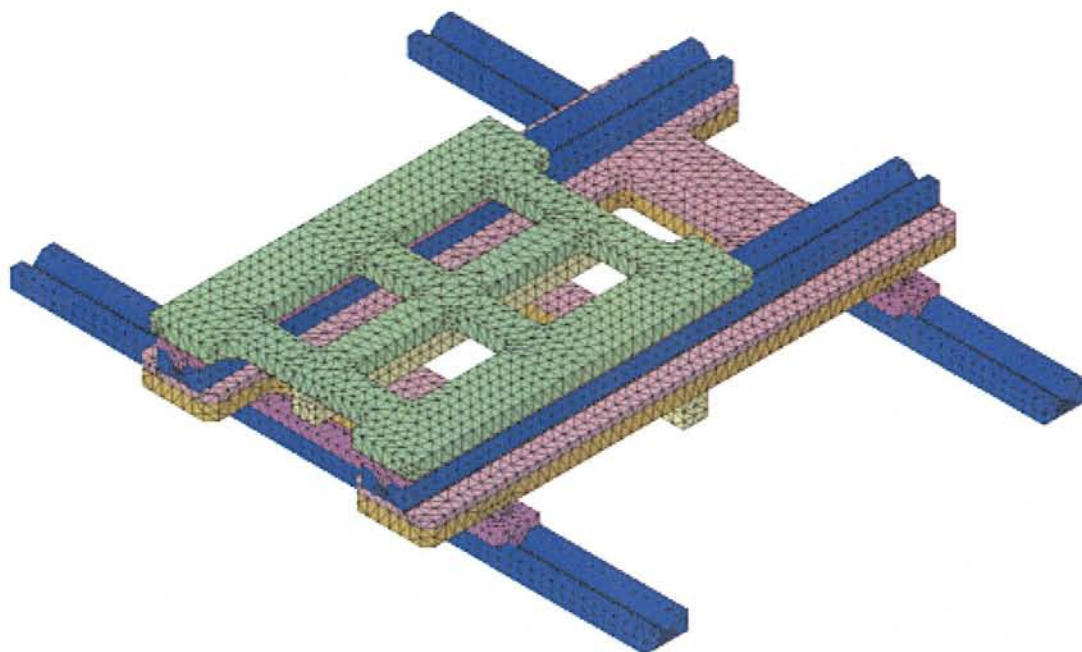


図 3.35 リブ構造 XY ステージでの上段ステージが端に移動した場合の有限要素モデル

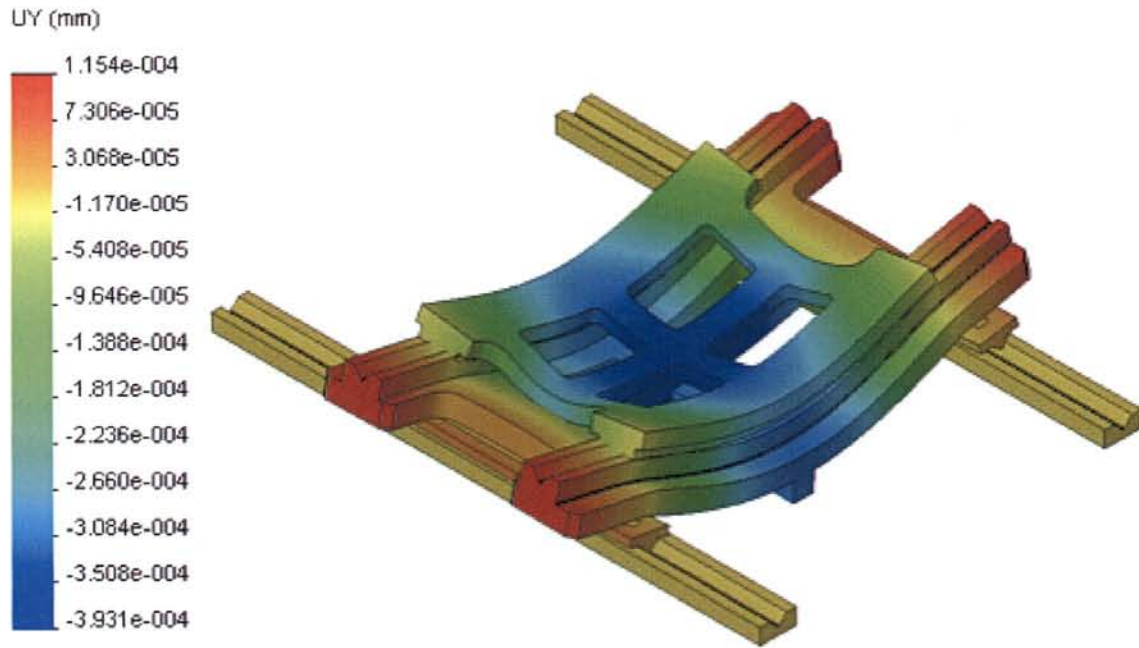


図 3.36 リブ構造 XY ステージでの上段ステージが中央位置の場合のたわみ分布

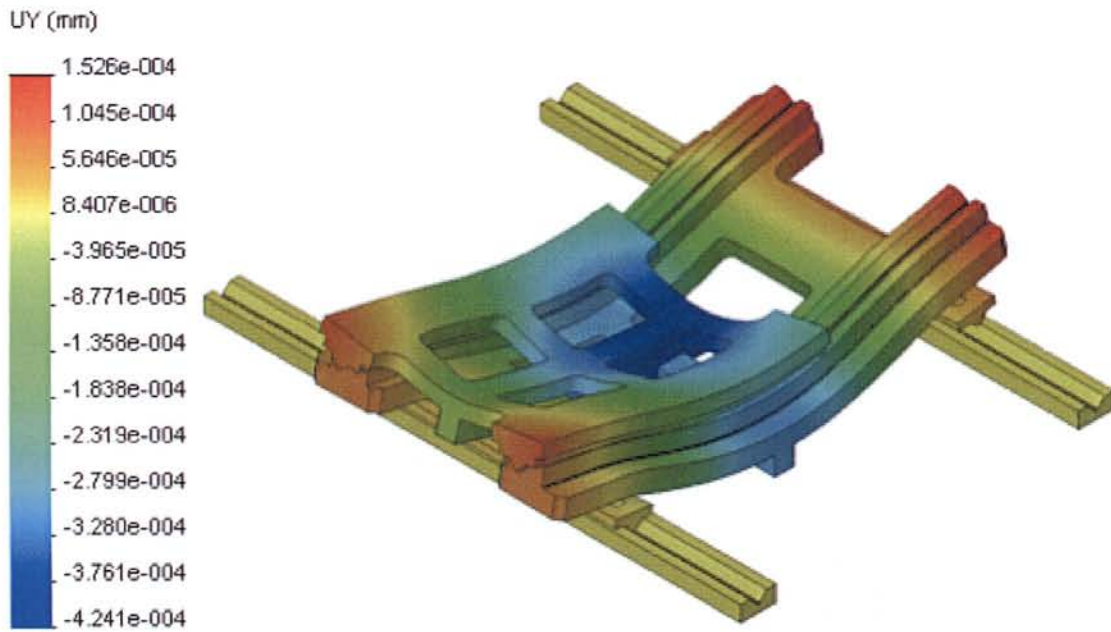


図 3.37 リブ構造 XY ステージでの上段ステージが端に移動した場合のたわみ分布

3.3.3 ハニカム構造を有するファインセラミックスステージ

リブ構造では、梁とその間の空隙に部分的偏りが生じる。それはこの構造の限界である。ここでは、全体剛性を維持し、且つ最大の軽量化を成し得るハニカム構造に関する評価を行う。図 3.38、3.39 に上段ステージと中段ステージの部品構成を示す。図 3.40、3.41 には、ハニカム構造 XY ステージの有限要素モデルを示す。ハニカム構造の場合、データ量が膨大になるので、対称条件を用いて 1/2 の領域をモデル化した。いずれも四面体 1 次要素で分割され、図 3.40 のモデルが要素数 317,313、節点数 81,746、図 3.41 のモデルが要素数 317,508、節点数 81,734 である。

上段ステージが中央位置にある場合と端に移動した場合の自重たわみ分を図 3.42、3.43 にそれぞれを示す。上段ステージが中央位置にある場合、上段ステージの最大たわみは、 $0.2296\ \mu\text{m}$ 、中段ステージの最大たわみは、 $0.1687\ \mu\text{m}$ である。上段ステージが端に移動した場合、上段ステージの最大たわみは上段ステージが中央位置にある場合に比べて、約 2.8% 増の $0.236\ \mu\text{m}$ となり、中段ステージの最大たわみは約 5.5% 減の $0.1596\ \mu\text{m}$ となった。このように中段ステージのたわみが若干減少したのは、上段ステージが端に移動したことにより、中段ステージに対する上段ステージの荷重としての影響が少なくなったためと考えられる。リブ構造ステージに比べ、ハニカム構造上段ステージの最大たわみは約 42~44% 減少し、中段ステージは 45~47% 減少した。また、トータル自重は約 16% の減少となった。ハニカム構造とリブ構造は同一材料であるので、リブからハニカムへの構造変更に伴う軽量化の効果が顕著に出て剛性向上に繋がったと考えられる。表 3.3、3.4 に得られた結果をまとめる。シミュレーションにおける姿勢精度では、ムク構造およびハニカム構造が 0.1arc-sec 以下の数値となっている。しかし、実測値では、Yawing $\pm 0.5\text{arc-sec}$ 、Pitching $\pm 0.7\text{arc-sec}$ である。

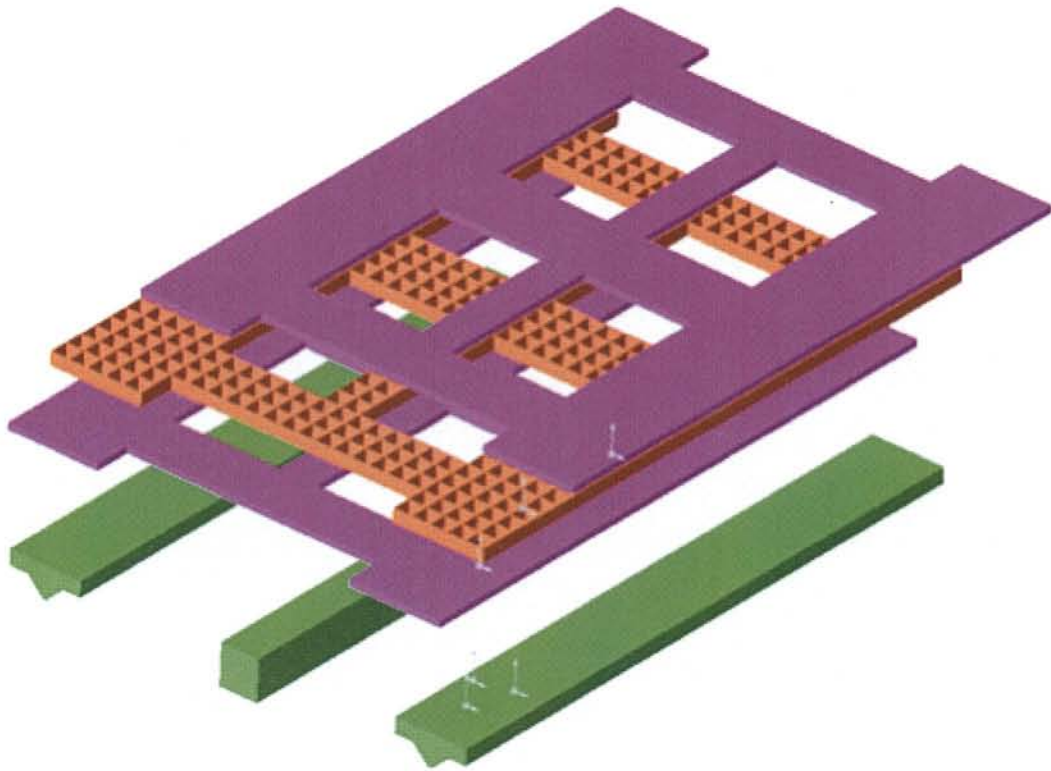


図 3.38 ハニカム構造 XY ステージの上段形状モデル

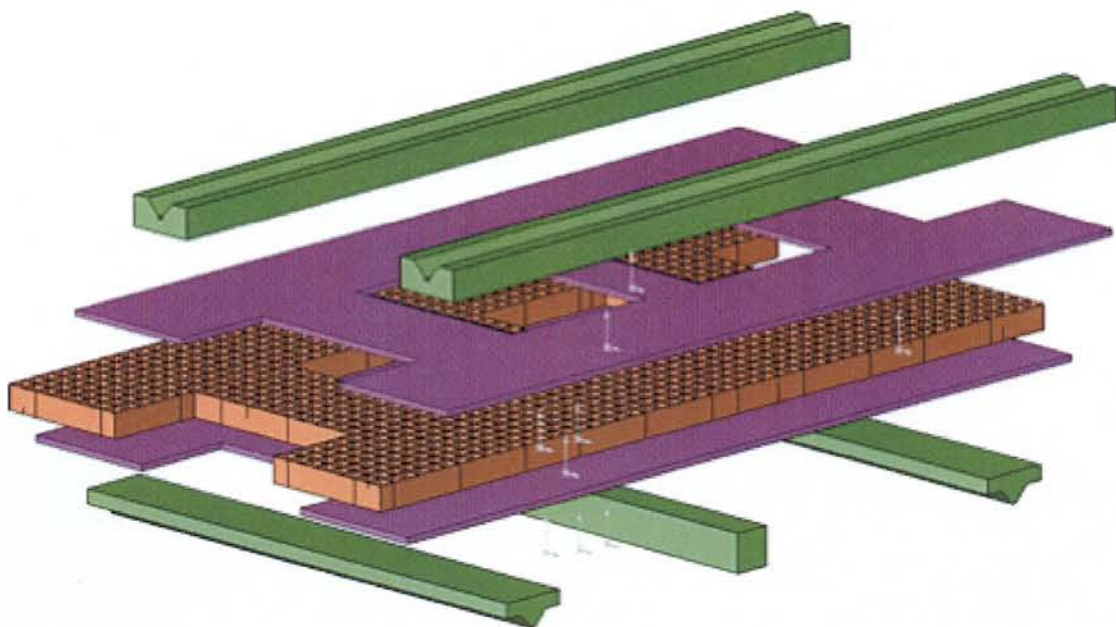


図 3.39 ハニカム構造 XY ステージの中段形状モデル

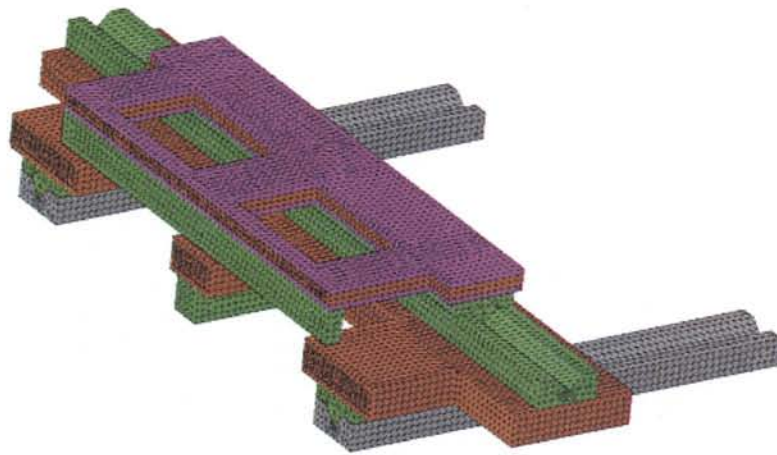


図 3.40 ハニカム構造 XY ステージでの上段ステージが中央位置の場合の有限要素モデル

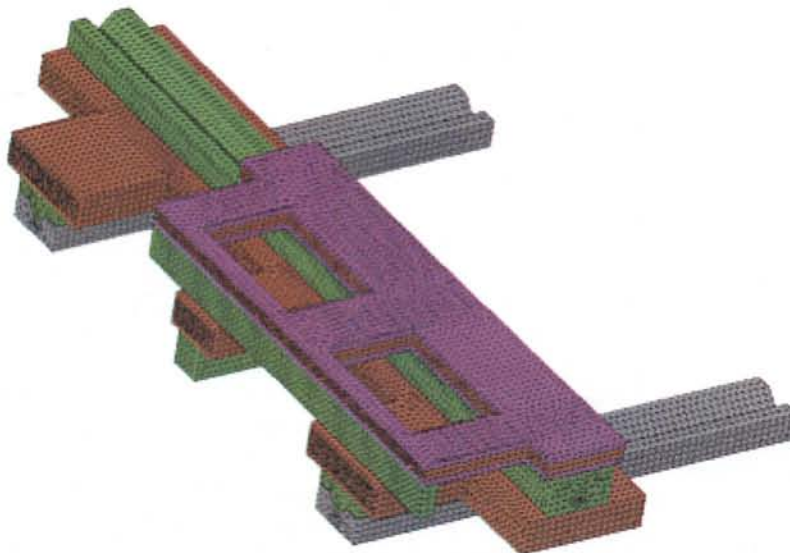


図 3.41 ハニカム構造 XY ステージでの上段ステージが端に移動した場合の有限要素モデル

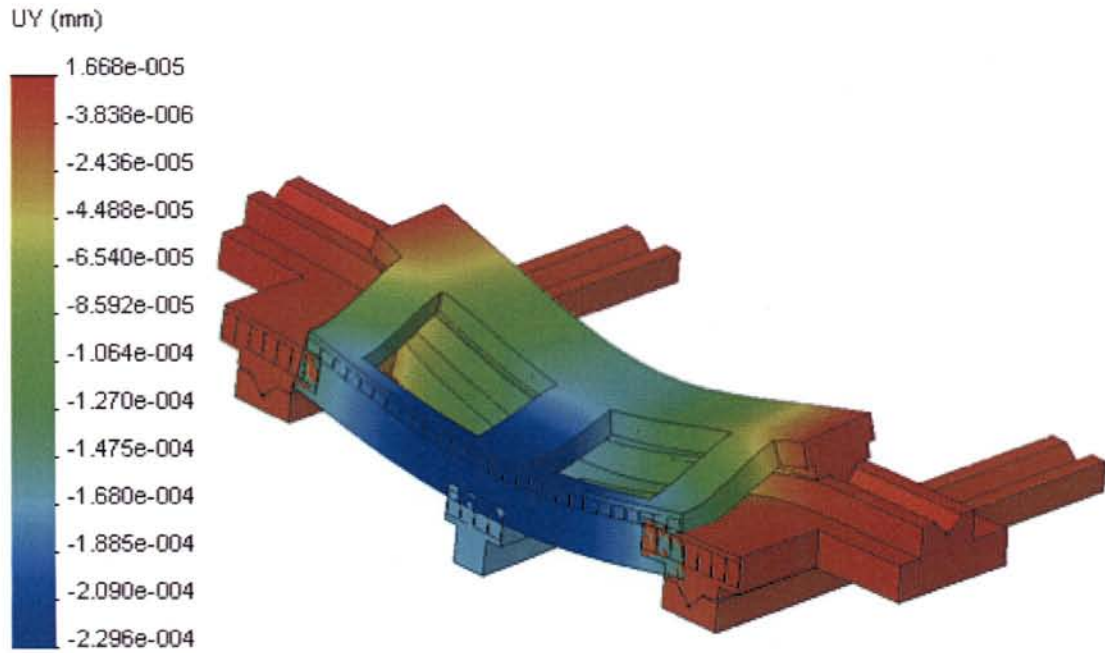


図 3.42 ハニカム構造 XY ステージでの上段ステージが中央位置の場合のたわみ分布

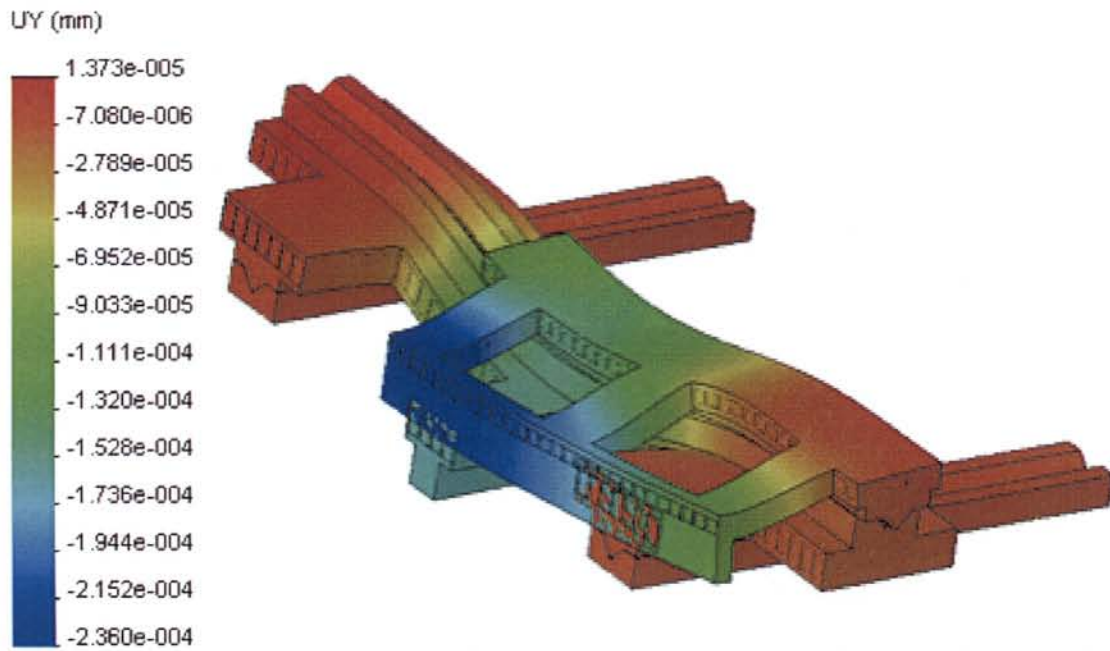


図 3.43 ハニカム構造 XY ステージでの上段ステージが端に移動した場合のたわみ分布

表 3.3 ムク、リブ、ハニカムの各構造における XY ステージのたわみ量比較

		上段ステージ位置	
		中央 (μm)	端部 (μm)
ムク構造 (54.58kg)	上段ステージ	0.3288	0.3527
	中段ステージ	0.2609	0.2522
リブ構造 (33.07kg)	上段ステージ	0.3931	0.4241
	中段ステージ	0.3044	0.3033
ハニカム構造 (27.80kg)	上段ステージ	0.2296	0.2360
	中段ステージ	0.1687	0.1596

表 3.4 ムク、リブ、ハニカムの各構造における XY ステージの姿勢比較

		ムク構造	リブ構造	ハニカム構造
上下方向	真直度 (nm)	67.9	70.8	39.1
	ピッチング (arc-sec)	0.0896	0.195	0.0755
幅方向	真直度 (nm)	8.87	5.03	1.69
	ヨーイング (arc-sec)	0.00107	0.0017	0.00088

3.4 NRUSM による駆動評価

本研究の目的として、生産装置のスループット向上を掲げているが、それにはステージの有する加速度性能は重要な要素である。図 3.44、3.45 にハニカム構造のセラミックステージ外観、ハニカム構造部の拡大図を示す。そして、図 3.46 には、NRUSM を装着したハニカム構造ステージにおける加速度計測の結果を示す。軽量化効果は大きく、本研究で当初目標としていた 0.5G の瞬間最大加速度を超えた 0.7G 程度までの値を示している。

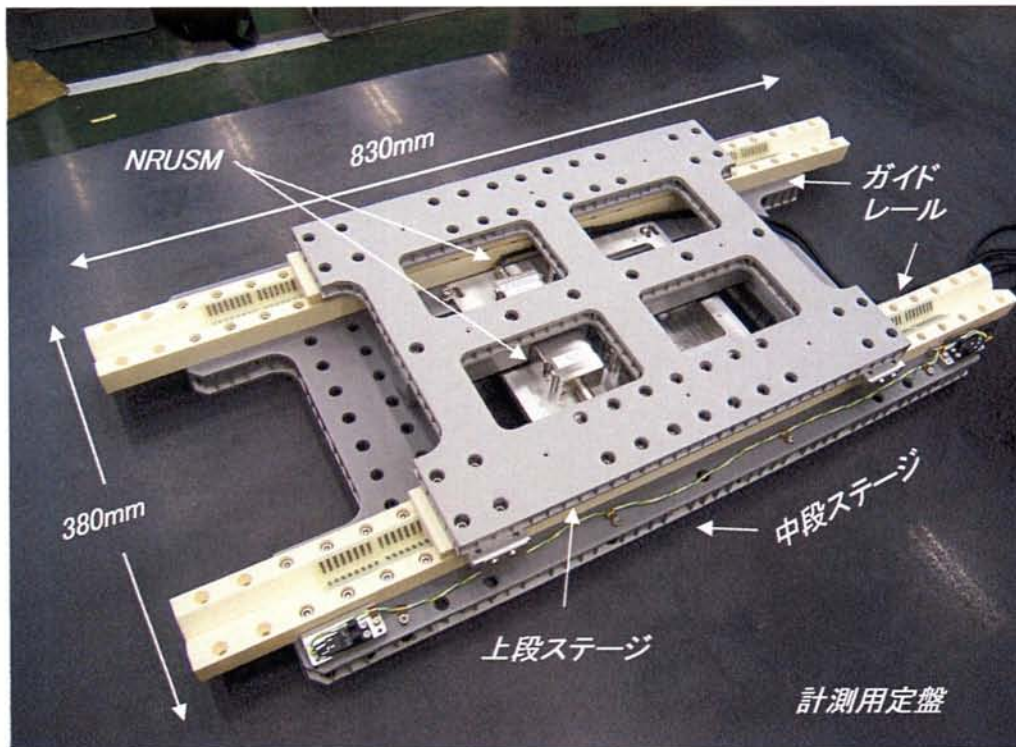


図 3.44 ハニカム構造のセラミックス製ステージ外観

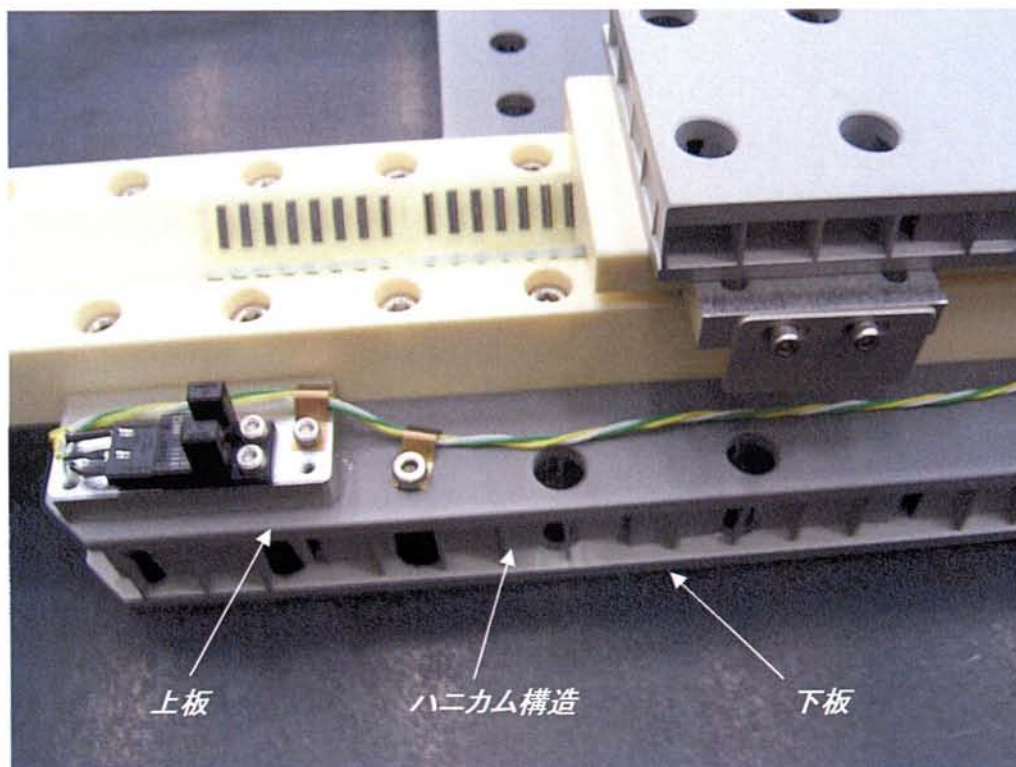


図 3.45 ハニカム構造部の拡大図

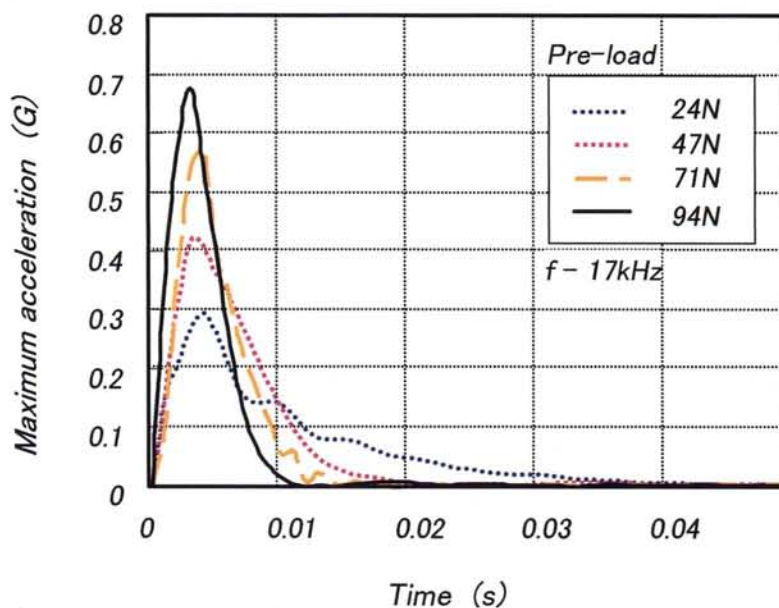


図 3.46 ハニカム構造のセラミックス製ステージにおける瞬間最大加速度

3.5 結言

本章では、高精度ステージの構造設計や計測手法と共に、次世代の大型化対応技術に関して述べた。最初に、通常焼結材であるアルミナセラミックスのムク材を用いた大型ステージに関して、加工→組み立て→計測→再加工→再組み立ての各行程を経て、姿勢精度±1arc-sec 以下、走りに対するZ変動 $3\mu\text{m}$ 以下の初期目標を達成した。その際に使用した手法は、アルミナセラミックスの有する高い材料性能（剛性と低線膨張係数）を頼りに、正確な精密計測と幾何学計算による修正量算出、そして、それに則った精密加工による修正である。それにより、目標としていた幾何精度を達成した。しかし、アルミナセラミックスの比重はアルミニウムと比較して約 1.5 倍程度大きく、可動部重量は 54.6kg である。そこで、更なる大型化による自重たわみと高精度化のトレードオフに関する解決手段として、リブ構造とハニカム構造におけるシミュレーションを行った。リブ構造はムク構造と比較して約 39%の軽量化を達成できる反面、自重たわみにおいては 20%の悪化を招いた。一方のハニカム構造では、ムク構造における可動部重量の約 50%にあたる、27.8kg までの軽量化を成し得た上で、ムク構造と同等の精度を達成した。また、事前に行っていた FEM によるシミュレーション結果では、ムク構造およびハニカム構造の姿勢精度は 0.1arc-sec 以下の数値となっていた。しかし、実測値では、Yawing±0.5arc-sec、Pitching±0.7arc-sec であった。勿論、このシミュレーションには組み立て誤差や、ガイドレールにおける非線形要素は含まれていない、ごく一般的な FEM による試算なので単純な比較は難しい。但し、この手法を最適化することで、高精度大型ステージをより効率的に開発できることを示した。

参考文献

- [1] 森山司朗ほか, “ステージ軽量化技術開発”, セミコン・ジャパン 2003 超精密半導体計測技術開発フォーラム, pp. 33-36, 2003.
- [2] 森山司朗ほか, “ステージ軽量化技術開発”, 熊本県地域結集型共同研究事業 最終成果報告会, pp. 29-33, 2004.
- [3] 東町高雄ほか, “超精密ステージの軽量化のための構造解析”, 電応研テクニカルレポート, Vol. 14, pp. 28-39. Nov 2004.
- [4] COSMOS/WORKS ユーザーズガイド Version6.0, (株) コスモスジャパン, 2000.

第4章 NRUSM の基本制御

4.1 緒言

NRUSM を装着したステージにおいて、最先端の半導体製造装置やそれ以外の精密機器などへの応用を論ずる際には、ステージを構成する機構系の静的幾何精度と共に、その位置決め制御における動的位置精度を議論する必要がある。それには、ステージ位置を計測している機器の精度、品質ならびに環境なども重要な検討要素であるが、それらの情報を基に位置制御を行った実際の結果が最重要な評価項目となる。その際には、連続的に指令される目標軌道に追従する動作パターン、現在位置から次の目標位置への移動指令に際して速度プロファイルをともなった動作パターンなど適応させる装置毎に様々な要求があり、それぞれのケースで性能評価するポイントが異なる。この位置決め性能に直結する要素技術がクローズドループ制御である。これらは、一般制御理論を骨格とし、さらに制御対象に起因した個別事象に対抗する特殊理論を肉付けすることで専用制御理論として完成される。

本章では、制御理論の根幹情報となる NRUSM のダイナミクス取得から始まり、汎用 PID 制御からロバスト制御、そして連続軌跡追従制御理論までの開発過程における NRUSM と各制御系との性能評価とそれらの適応性に関して論ずる。

4.2 NRUSM の動特性

4.2.1 ダイナミクス取得手順

本節では、精密ステージ制御に必要な NRUSM のモデル化を行う。モデル化にあたっては、NRUSM の特性変化や高周波帯域での不確かさを考慮し、実験データに基づくシステム同定法を用いた。

まずシステム同定実験に先立ち、NRUSM に対する基礎特性実験として無駄時間測定および整定時間測定を行った。無駄時間とは、制御入力を印加してから制御対象が動作し始めるまでの時間である。整定時間とは、入力電圧に相当した駆動速度まで制御対象が加速されて速度がほぼ一定値に達するまでの時間を指し、制御対象の応答性測定としては基礎的かつ重要な項目である。図 4.1 にブロックダイアグラムを示す。実験にあたっては可能な限りサンプリング時間

を小さく設定し、また、不感帯の影響がないよう十分に大きなステップ入力信号を印加した。ここで、入力信号の変換ゲインとしては±32767がNRUSMへの入力電圧±10Vに対応している。さらにこの±10Vがドライバ内で±130Vまで増幅されNRUSMに印加されることとなる。以下の実験ではサンプリング時間を0.1msとして、入力電圧の周波数は約5kHz、伸縮方向のオフセット電圧を約2.2V一定とした。図4.2に入力振幅8000の時のステップ入力信号と位置出力を示す。この結果より、本システムの無駄時間は0.4ms程度と仮定できる。図4.3には、入力振幅8000時のステップ入力信号に対する位置の1次後退差分から得られる概算速度 $(y(k) - y(k-1))/T_s$: 速度[mm/s]を示す。「整定時間とは、終速度値の±5% (図中に点線で示す) に入るまでの時間」と定義すると、同図より整定時間は約5msとなる。また、制御入力信号に対して位置の差分値が整定するということから、制御入力信号に対する位置までの特性はほぼ積分特性であることがわかる。この無駄時間が0.4ms、速度整定時間が約5msという結果をふまえ、同定実験のサンプリング時間は0.5msとした。図4.4に同定実験でのブロックダイアグラムを示す。入力信号は、高域での速度ダイナミクスの同定も考慮に入れ、その波形を擬似白色二値信号であるM系列信号とした。M系列信号のクロック周期はサンプリング時間の4倍とし、その次数は整定時間を考慮して8とした。さらに定常動作を確保するため入力信号にオフセット電圧を加えている。図4.5、図4.6に入出力信号を示す。

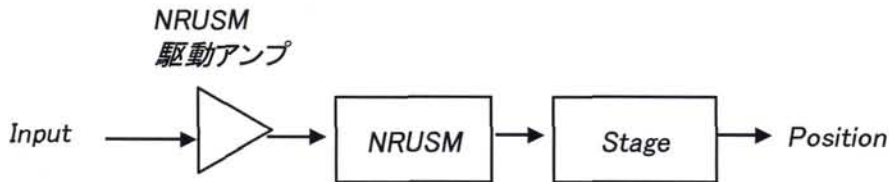


図 4.1 無駄時間と整定時間測定時のブロックダイアグラム

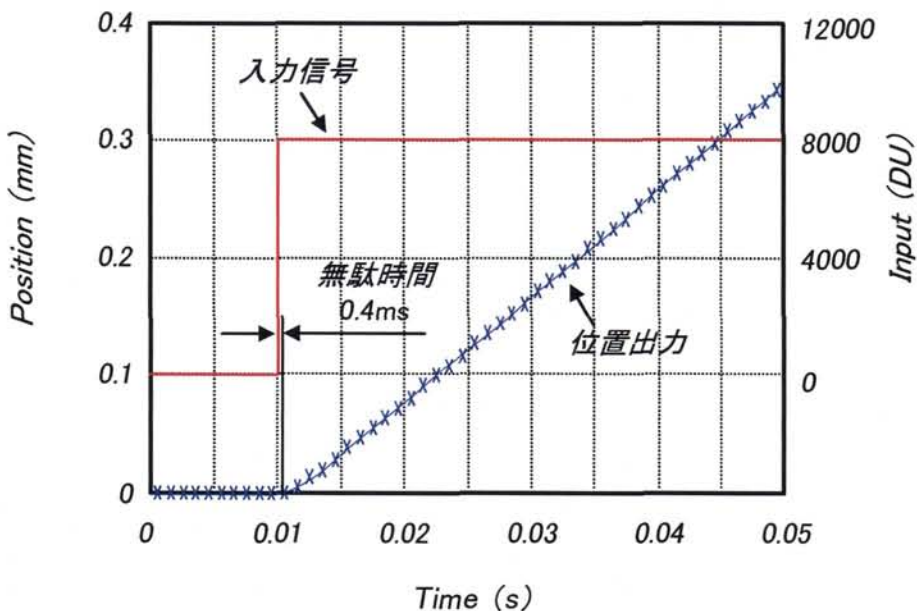


図 4.2 ステップ入力に対する位置出力

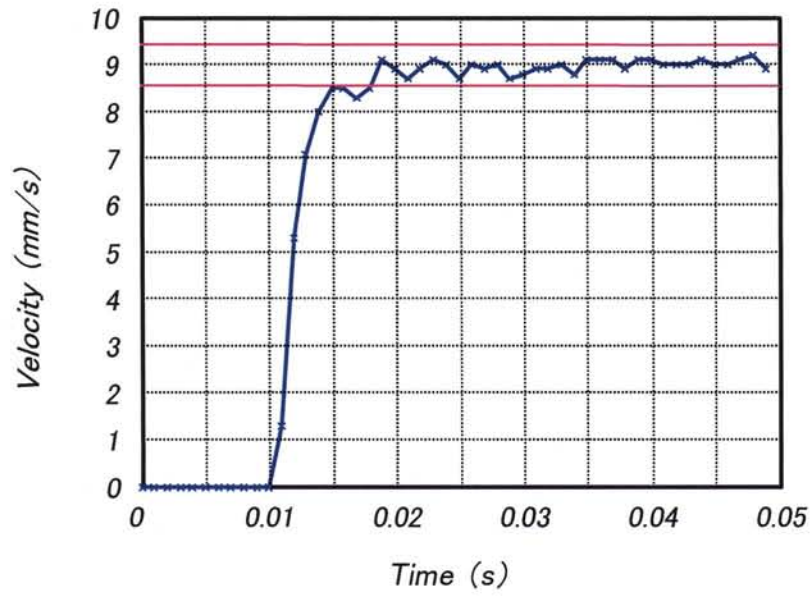


図 4.3 ステップ入力に対する概算速度

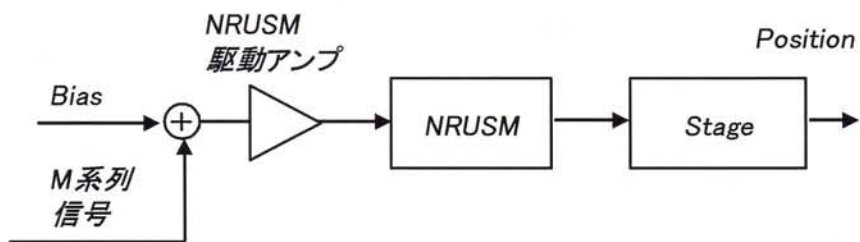


図 4.4 同定実験のブロックダイアグラム

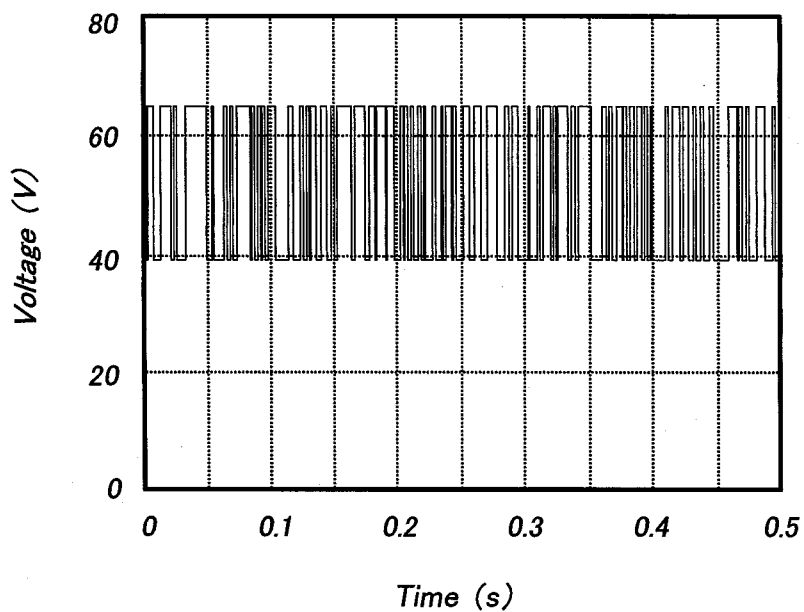


図 4.5 M 系列信号入力

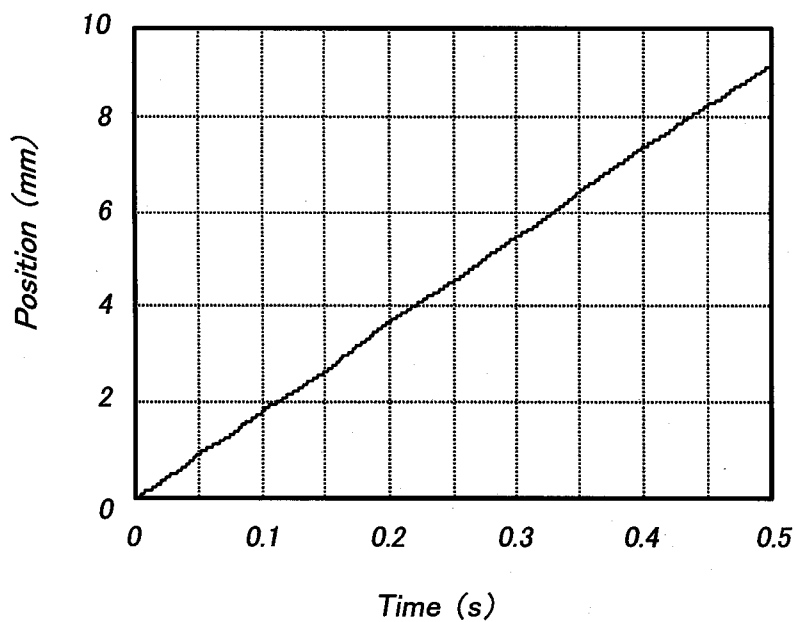


図 4.6 M 系列信号入力に対する位置出力

4.2.2 モデル導出

この入出力信号を用いて最小二乗規範型予測誤差法に基づくシステム同定を行った。データ数は2044である。同定モデルとしては特性の異なるARX(auto-regressive exogenous)モデル、ARMAX(auto-regressive moving average exogenous)モデル、OE(output error)モデル、BJ(Box Jenkins)モデルを用いた。モデル次数の決定にあたっては、ARXモデルを用いてクロスバリデーションにより次数を確定した後、その次数を他のモデルにも適用した。ここでは、半数のデータを同定用に、残りの半数を検証用に用いた。同定の結果、二乗誤差に基づく損失関数を最小化する次数は10次となった。各同定モデルの周波数特性を図4.7に示す。同図より、コヒーレンスの高い2500 rad/sまでの周波数帯域で各モデルのゲイン特性が良く一致していることが確認できる。特性の異なる複数モデルのゲインが良く一致することから、その周波数帯域では同定モデルの信頼性が高いと予想できる。ただし、このモデルを用いて制御系設計を行う場合は、制御帯域を少なくとも1/3程度の830 rad/s以内にする必要がある。

ここでは同定した10次のARXモデルを制御系設計の簡単化という観点から、最小実現手法に基づき制御入力から速度までの動特性と、速度から位置の積分特性を考慮しモデル低次元化を行った。導出された低次元モデルを以下に示す。

$$P_r(s)[mm/V] = \frac{251.8}{s(s+720.4)} \quad (4.1)$$

次に低次元化したモデルの妥当性を時間領域で確認するために、残り半数の検証用データの入力信号を低次元モデルに印加した。図4.8に、同一入力に対するモデル出力と実験出力を重ねて示す。同図においてモデル出力が実験出力に良く一致していることから、低次元モデルがNRUSMの動特性をよく記述していることが確認できる。

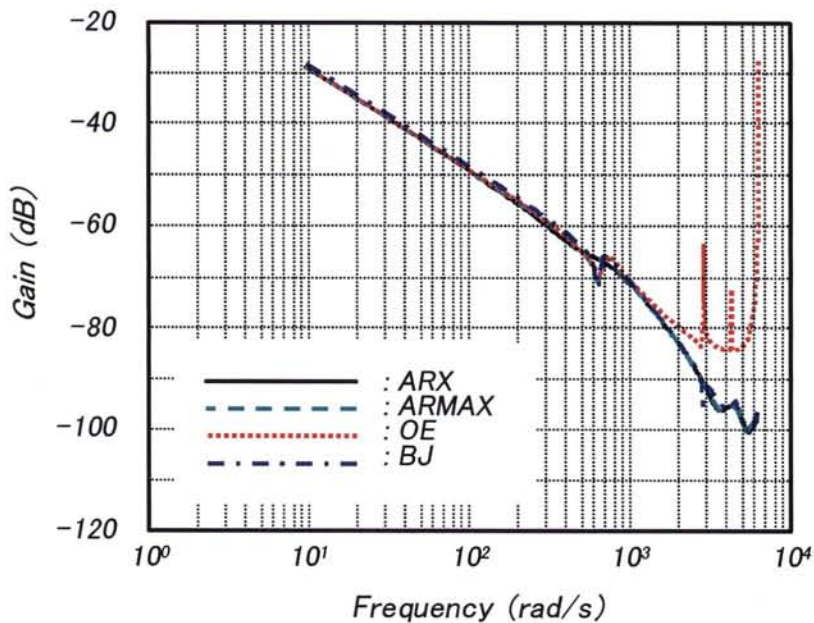


図 4.7 ARX、ARMAX、OE、BJ の各モデルにおける周波数特性

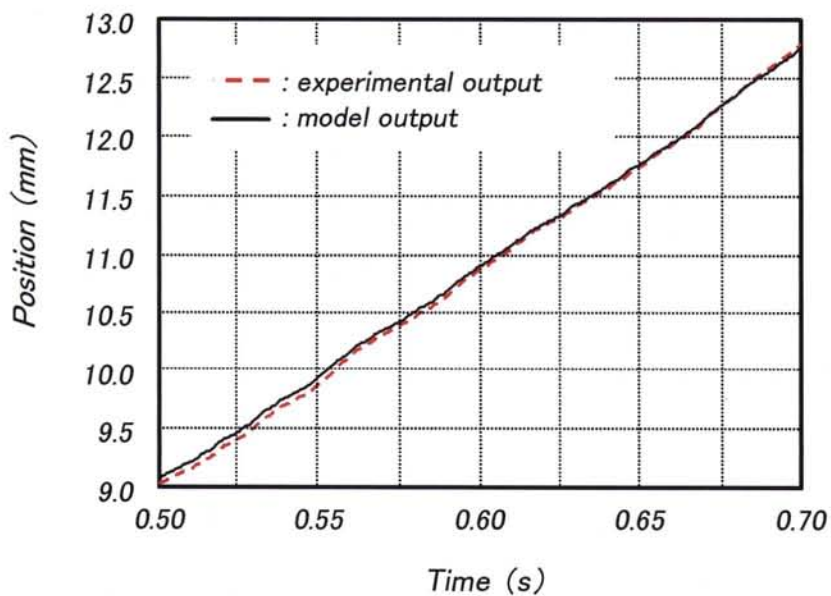


図 4.8 同一入力に対する実験出力とモデル出力の比較

4.3 汎用制御手法における評価

4.3.1 PID 制御系

ロバスト制御系による評価の前に、産業界において極めて広範囲に使用されている PID 制御系を用いて NRUSM の駆動評価を行った^[1]。評価に用いたシステムの全体接続、制御系ブロックダイアグラムならびにサーボフィルタを図 4.9、図 4.10 にそれぞれ示す。

本制御系は、32Bit Micro-Processing-Unit (MPU) と 64Bit Digital-Signal-Processor (DSP) の Master-slave 方式による制御体系で構成されている。MPU における役割は、RS232C を介したオペレータとの通信制御と、その内容解釈、ならびに DSP へのステージ動作コマンド発行である。そして、制御の中核部分となる PID 制御は、この DSP により実行される。この構成とすることで、DSP 性能の大部分をステージ制御に充てることが可能となる。

図 4.11 に PID 制御系で用いたデジタルフィルタの構造を示す。フィルタを構成する各演算部分は DSP 内部でソフトウェアにより実現している。Interval Generator が全体の制御サイクル (サーボサイクル) を決定し、制御サイクル毎に Trajectory Generator が算出する基準位置データと位置検出ユニットから入力される現在位置データとの差を位置偏差 E_n として、デジタルフィルタの演算が開始される。比例項では偏差 E_n と設定された比例ゲインとの積を、積分項では E_n の連続定積分値と積分ゲインとの積を、微分項では偏差 E_n の 1 次後退差分値と微分ゲインとの積をそれぞれ算出した後に合算する。この際に、積分項では、過大な積分による制御対象の振動 (ジャンプアップ) 抑圧や目標位置への収束時間短縮を図る為に、積算値を可変でクランプ可能なアンチwindアップ機能を、微分項では、速度安定を図る為のインターバルスキッピング機能をそれぞれ装備した。また、速度追従性を向上させる為に、この合算部分には速度フィードフォワードと加速度フィードフォワードも加算可能である。そして、その加算結果に対して制御対象とのゲイン整合用乗算器と方向性バイアス加算を行い演算結果として NRUSM に出力している。

全体の演算サイクルを司る Interval Generator には、プレ同定実験より得られている無駄時間と速度整定時間の時間合を基準として、その約 1/3~1/5 倍程度の時間設定値を初期値として用いる。また、それ以外の PID 定数は有限探索法と実験的導出により決定する。

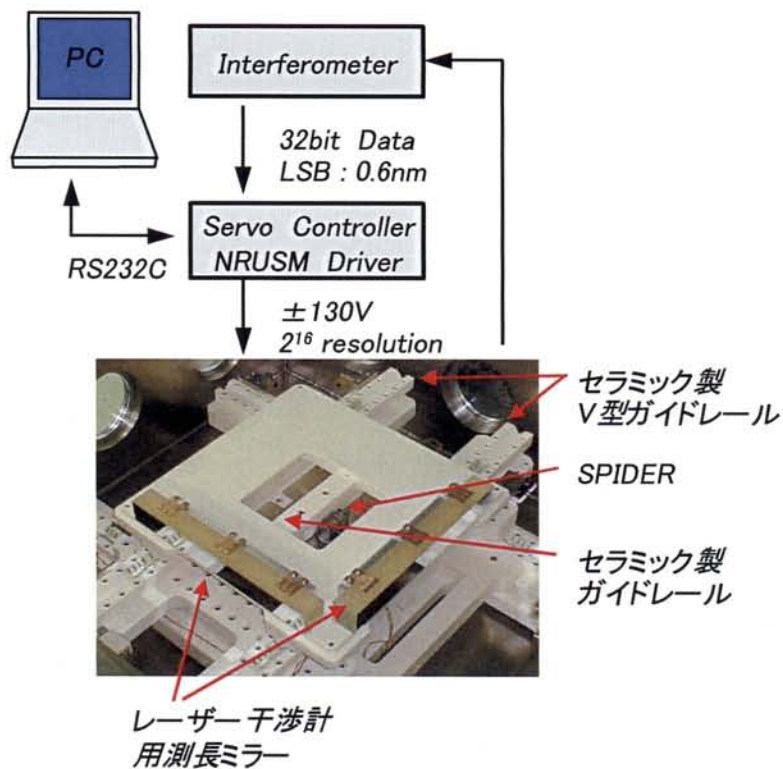


図 4.9 PID 制御システムの全体接続図

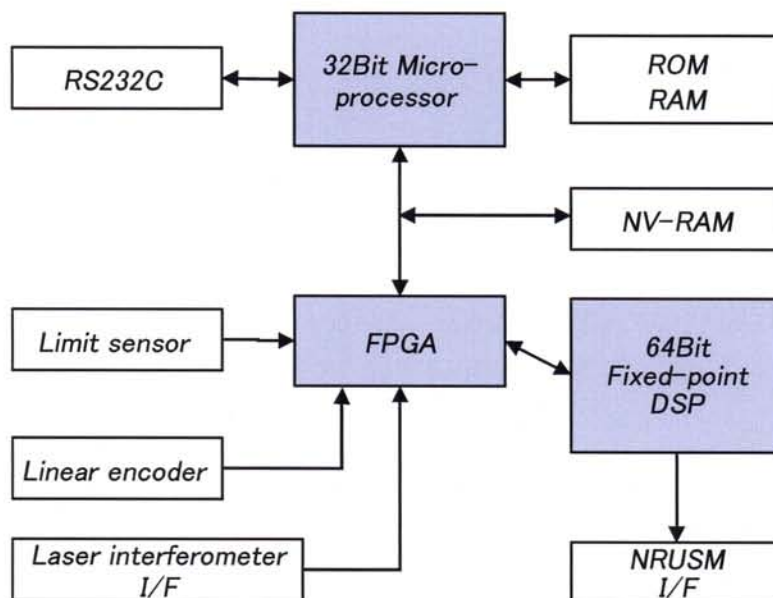
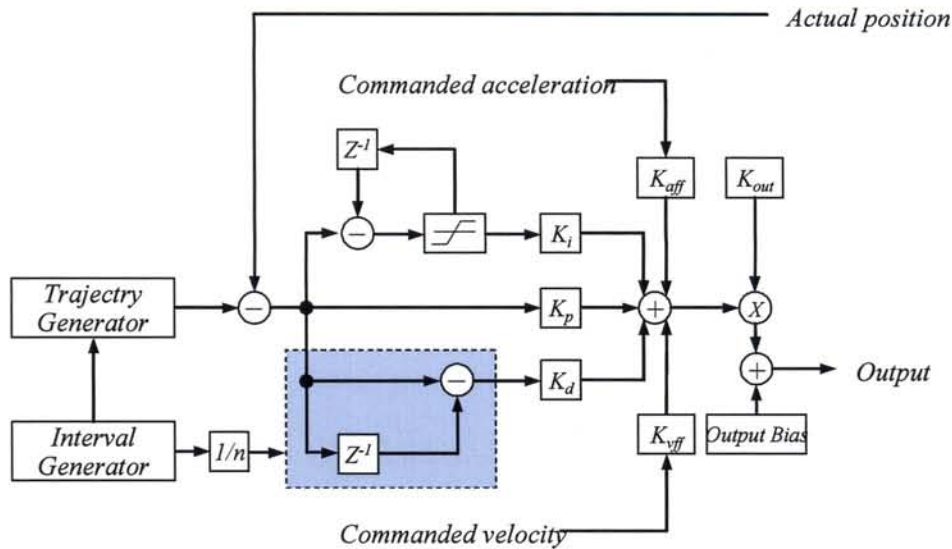


図 4.10 PID 制御系ブロックダイアグラム



$$\begin{aligned}
 \text{Output}_n = & [K_p E_n + K_d (E_k - E_{(k-1)}) + \sum_{j=0}^n E_j \times K_i / 256 \\
 & + K_{vff} (\text{CmdVel} / 4) + K_{aff} (\text{CmdAccel} \times 8)] \times K_{out} / 65536 + \text{Bias}
 \end{aligned}$$

- E_n : the accumulated error terms
 K_p : the Proportional Gain
 K_i : the Integral Gain
 K_d : the Derivative Gain
 K_{aff} : the Acceleration feed-forward
 K_{vff} : the Velocity feed-forward
 Bias : the DC output offset
 K_{out} : the scale factor for the output command

図 4.11 PID 制御系サーボ用計算フィルター

4.3.2 ステップ&リピート動作評価

従来の製造装置への適合性を議論する為に、ここでは Point to Point の位置決め性能に関する評価を行う。基本的な動作条件としては、動作パターンはステップ&リピート駆動、1 ステップにおける移動距離 $500 \mu\text{m}$ 、目標位置との偏差許容値 $\pm 1\text{LSB}$ (0.69nm)、規定偏差の保持時間 100ms としてデータを取得した。図 4.12 にその動作中の位置変化を、図 4.13 には最終的な位置決め部分の拡大図を示す。目標位置との偏差を $\pm 100\text{nm}$ 以内まで追い込む平均時間は 130ms であり、そこから 0.69nm までに追い込む平均時間は 210ms であった。また、位置静定してから 100ms 以内でのドリフトも 1LSB にしっかりと収まり、動作状態としては良好である。この NRUSM が有するステップ&リピート動作時の性能は、ASET で開発された電子線描画装置 EB-X3^[2]と同等以上であり、それらの装置に対する良好な適合性を示している。

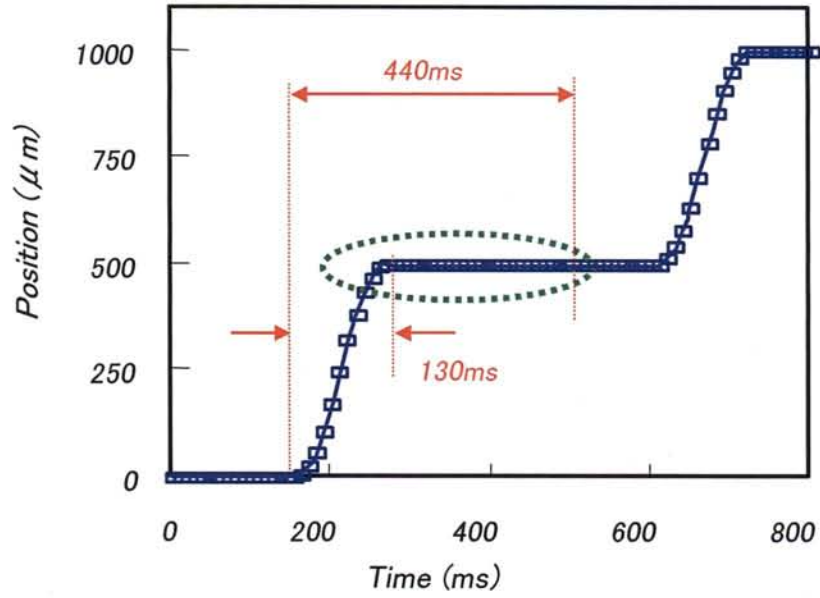


図 4.12 NRUSM による 500 μm ステップ&リピート動作

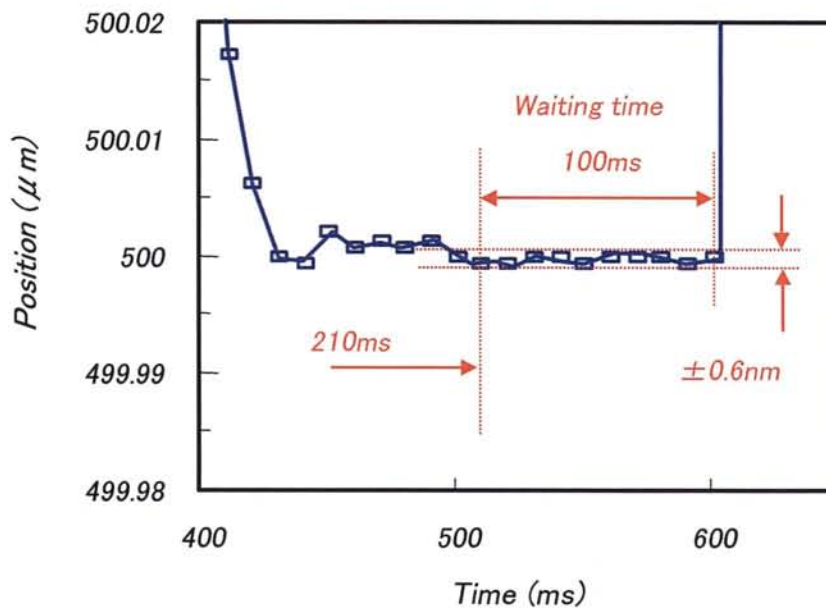


図 4.13 500 μm ステップ&リピート動作の拡大図

4.3.3 定速度動作評価

前節では従来型製造装置で多用されているステップ&リピート動作パターンにおける性能評価を行った。しかし、本研究の狙いは、従来型製造装置への応用だけでなく更に進化していく今後の製造装置への適応である。現状予測では、これまでのステップ&リピート駆動による加工/検査が連続駆動方式へと変遷する事が示唆され、また、一部の装置ではすでに連続駆動方式が採用され稼働している。まず、なぜそれらの装置が連続駆動方式へ移行するのかを理解する為に、ステップ&リピート駆動における問題点を明確にする。

ステップ&リピート駆動における加工や検査の手順は、必要とされる全処理領域から1回の加工/検査に相当する最小領域を定義し、その領域毎にステージを正確に移動しては停止して加工/検査することを基本としている(図4.14参照)。この際には、従来の精密位置決め機構を使用することで対応可能であった。しかし、製造におけるスループットを改善する為には、ステージの移動と停止におけるオーバーヘッドを極限まで短縮しなくてはならない。その為には、ステージの位置決めにかかる時間を最短とする為に、加減速度を可能な限り大きくする、ステージの最高移動速度を可能な限り大きくする、などの動作パラメータを改善するしかない。しかし、先に述べたように、ステージは大型化傾向にあり、その重量は100kgに近づいている。その様な質量を有する構造体を大きな加速度で移動させた場合に発生する、ステージを含むチャンバーや除振台の揺動は、もはやnmを議論するレベルでは無くなることは容易に想像できる。そして、その改善の為に、ステージ機構系にテクノロジーを集約させて挑むより、システム全体でその問題点を解決する手法として提唱されたのが、ステージを停止させないで加工/検査する連続駆動方式である。しかし、その方式とて、ステージに対する性能的許容値を軽くはしていない。むしろ、先のロードマップで示したような微細加工を支える為には、その最終精度から誤差配分された際のステージに対する性能的許容値、つまり速度ムラはnmオーダーである。そこでNRUSMを装着したステージシステムにおいて、連続駆動時の速度ムラデータを取得した。

図4.15には、基本的速度分解能を確認する為に取得したnm速度差再現性データを示す。これは、ステージの移動速度を100nm/sとした際の連続軌跡結果と102nm/sとした際の結果を重ねてグラフ化したものである。従来の駆動源においても非常に難しい1 μ m以下の等速移動をいとも容易く実現している。そして、それぞれに与えた速度指令から算出される位置差分値は、2秒後で4nm、4秒後で8nm、6秒後で12nmとなるが、 ± 1 nm精度で追従している。これによりNRUSMの有する速度分解能はnm以下であることがわかる。

その結果を受けて、NRUSMの速度域全体での速度ムラを計測した。その際の速度ムラとは、各サーボサイクルにおいて軌道発生部で算出される基準位置とステージの実位置との偏差を連続取得し、それらの標準偏差値(PACVF: Position Accuracy at Continuous Velocity Feeding)として定義している。その結果を図4.16に示す。10nm/sの極低定速度時から始まり、一般的装置における速度域である36mm/sまでの偏差分布としては、1nm~17nmであり、このPID制御系での速度ムラ10nm以下の速度域としては20mm/s以下となった。速度を向上するのに伴い速度ムラが悪化していくのはPID制御の限界であり、本節ではこれ以上の評価は行わない。しかし、汎用PID制御でもnmオーダーの位置決めならびに速度偏差を達成できた事は、NRUSMの高

い潜在性能による部分が大きい。

本節のまとめとして、この性能を有するステージシステムを先の EB-X3^[2]に搭載してコンティニアスモードで描画させた際のスループットをステップ&リピート時のそれと照らし合わせる試算を行う。最初にステップ&リピートにおける処理速度を試算する。EB-X3は6インチレティクル用製造装置である。そして、描画における偏向領域を650μm、1フィールドの移動時間を0.3s、1フィールドの平均描画時間を1.0sとすると、

$$1 \text{ 往復に必要な時間} = 150/0.65*(0.3+1.0)+0.3 = 300.300 \text{ s}$$

$$\text{往復数} = 150/0.65/2 = 116 \text{ counts}$$

となり、その合計時間は9時間41分弱(34834.800s)となる。一方で、コンティニアスモードにおける駆動速度は1フィールドにおける描画率を50%とすると1.3mm/s、折り返しでの加減速度を50mm/s²、逆方向への折り返し前の静定時間を0.2sとすると、

$$1 \text{ 往復に必要な時間} = 150/1.3*2+2/50*4+0.2 = 230.979 \text{ s}$$

$$\text{往復数} = 150/0.65/2 = 116 \text{ counts}$$

となる。その合計時間は7時間26分強(26793.591s)となり、最低でも1.3倍程度のスループット向上が期待できる。しかし、この際の描画処理系はベクター型からラスター型へと変更する必要があり、また、描画アドレスを1nmとした場合でも1.3MkHzの水平走査周波数となる。このように、ステップ&リピート型描画装置ではステージを含む機構系がスループット立則要因となるが、コンティニアス型描画装置では描画制御系の処理性能や電子偏向系帯域が全体を立則することになる。

CAD design

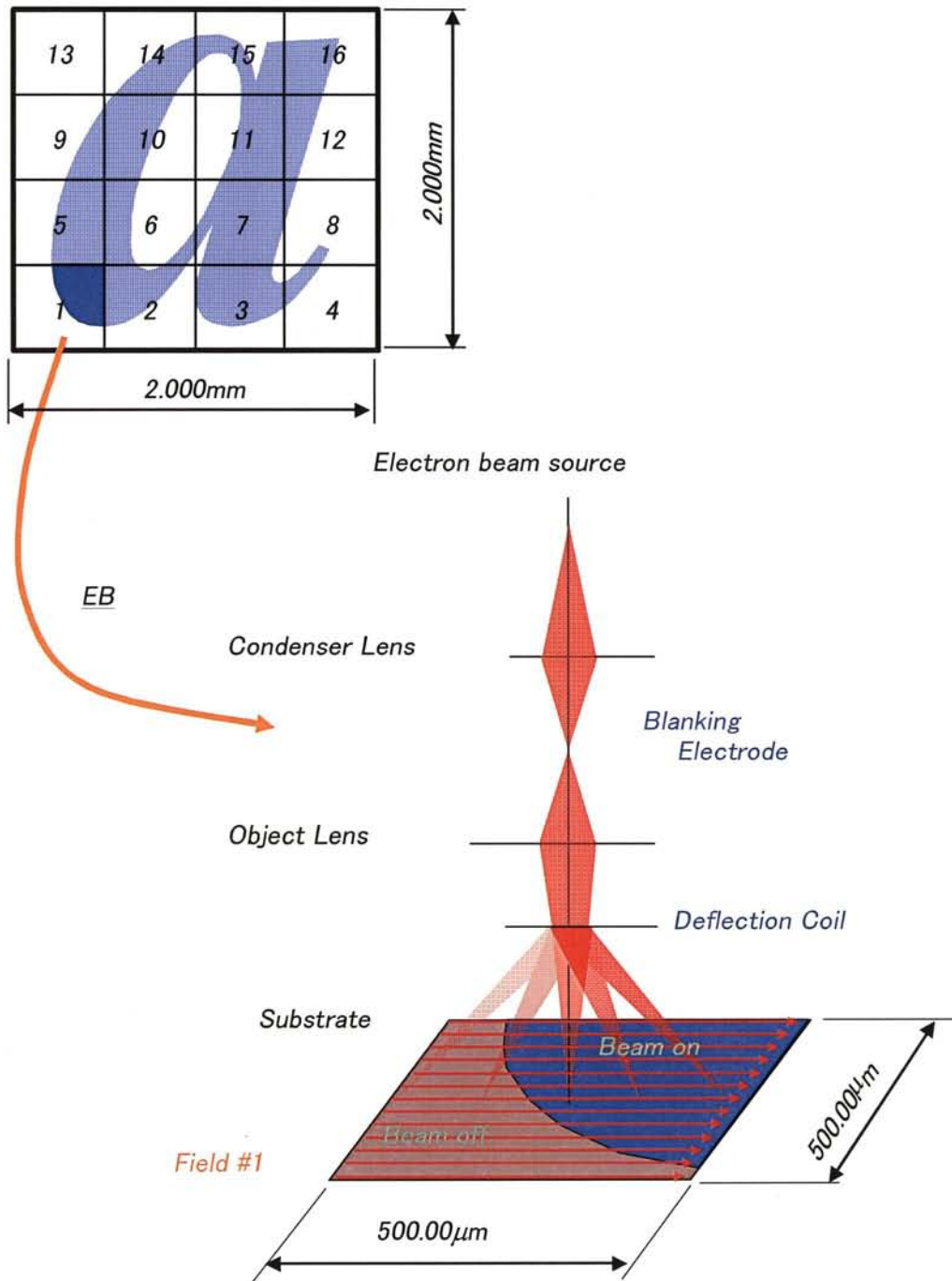


図 4.14 電子線描画装置におけるステップ&リピート動作図

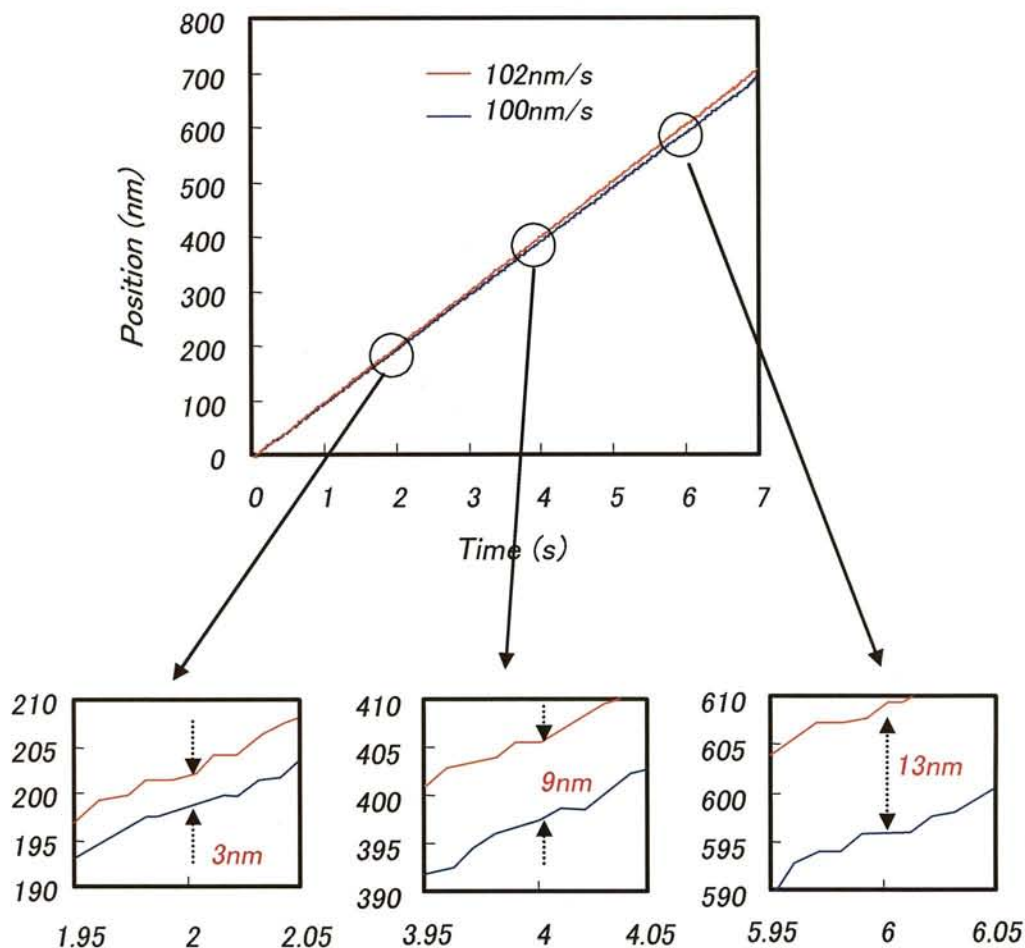


図 4.15 100nm/s と 102nm/s の等速駆動指令における速度分解能評価

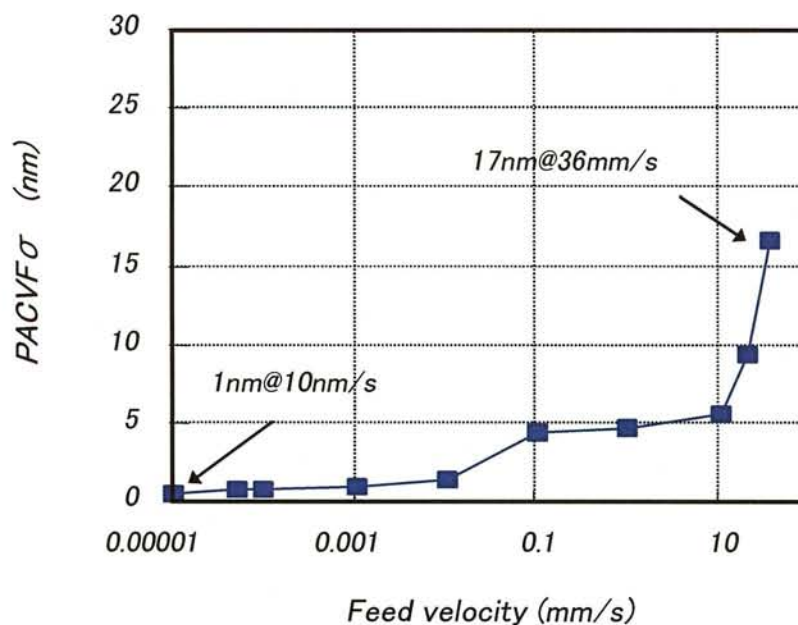


図 4.16 速度域全体での等速度移動時の時間位置偏差

4.3.4 停止時のドリフト評価

低スループット加工装置に応用されるステージにおいては、目標位置まで移動した後の停止時の位置ドリフトも性能評価項目となる。そこでの許容値は装置の最小加工分解能により規定されることとなるが、最新鋭の収束イオンビーム加工装置（FIB）などでは、数秒から数十分間のドリフトを数ナノメートル以下に抑える必要がある。この問題を従来の機械的伝達系を有するステージシステムで解決しようとする、伝達系を構成している素材自身の弾性変形領域における動的応力分布まで踏み込んだ解析と共に、その解析結果を忠実に実機で再構築する高いレベルの実践的技術が必要となる。一方、NRUSM を始めとするリニア型超音波モータの類はダイレクト駆動であり機械的伝達系は存在しない。それ故に、この種の問題では有利と思われがちだが、そうではない。これらはいずれも圧電素子をステージベース側に固定し、圧電素子先端を可動部に押し当てて推力伝達を促す予圧機構を有する。その内部には、当然の事ながら圧電素子の発生力によるステージ反力を受け止める機構が存在する。基本的には、この部分に同種の問題を内在しているのである。

本節では、NRUSM を装着したステージにおける、ステップ&リピート駆動時の停止時のドリフト評価、ならびに新たな制御方法を適応させて所望の性能を達成した過程をまとめる。

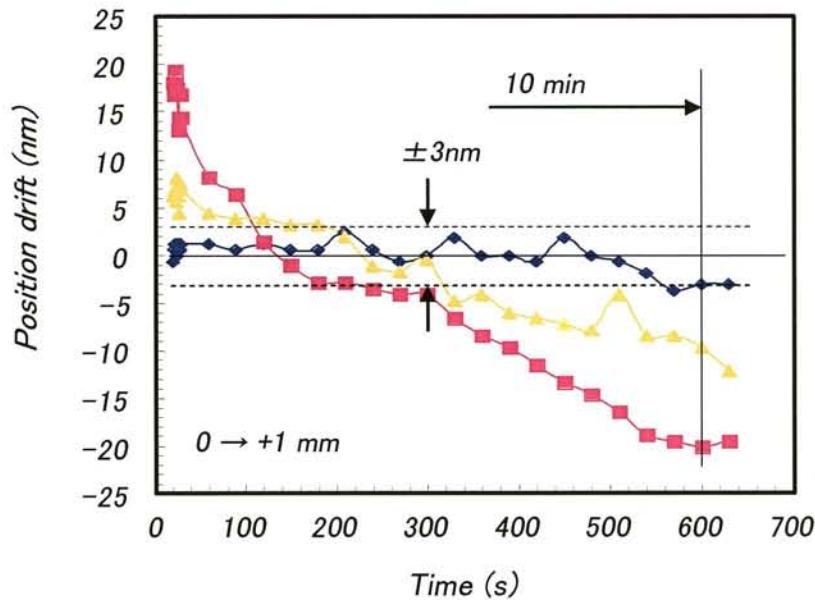


図 4.17 +1mm 移動後の停止時ドリフトデータ

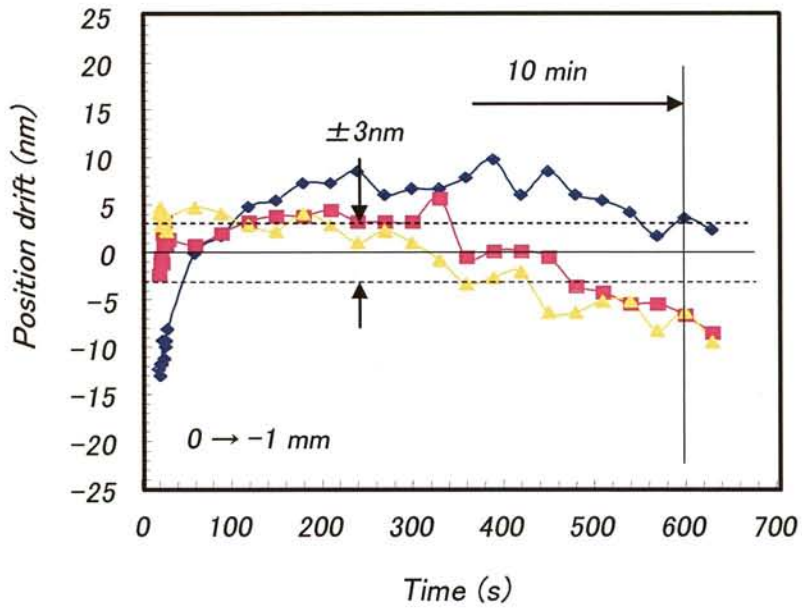


図 4.18 -1mm 移動後の停止時ドリフトデータ

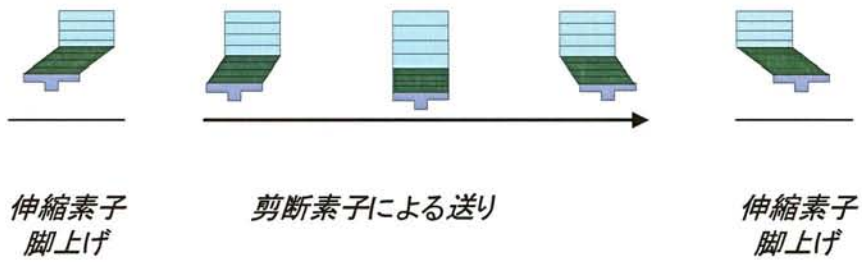


図 4.19 NRUSM の送りシーケンス

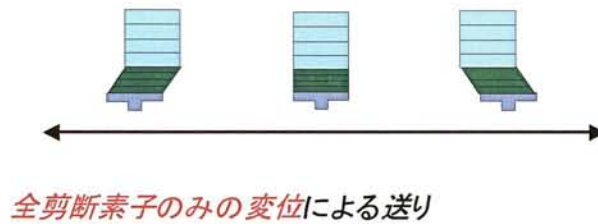


図 4.20 切断素子のみを使用した送り原理

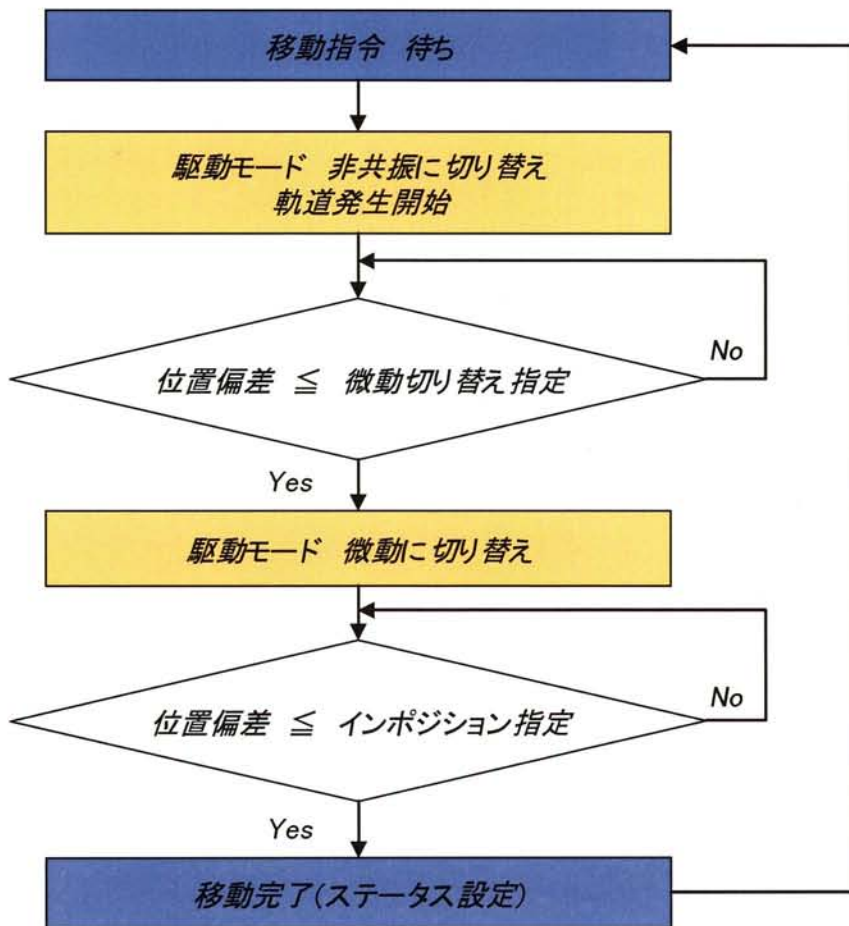


図 4.21 剪断素子のみを使用した微動制御のシーケンスフロー

図 4.17 には停止状態から+1mm 移動し、また停止した際のデータを、図 4.18 には停止状態から-1mm 移動し、また、停止した際の位置ドリフトデータを示す。各方向に対してそれぞれ 3 回のデータ取得を行ったが、目標としている $\pm 3\text{nm}$ 以内@10min. を満たすものとそうでないものとの結果は分かれた。また、その挙動には殆ど規則性は感じ得ない。このデータを見る限りにおいては、非制御状態での nm オーダードリフト規定は甚だ難しく、且つ、装置毎に違った傾向（機差）を有しても何ら不思議でない所見である。逆に、その部分に注力して仕様を満たす工夫をしたとしても、それは「勘と経験」が大部分を占める、エンジニアリングとは縁遠い世界を探索することでしかない。つまり、非制御における nm オーダードリフト規定は非現実的である。

そこで、NRUSM のもつ圧電素子の独立制御性に着目して、以下の手法を用いて評価を行った。図 4.19、図 4.20 に動作概要を示す。図 4.19 が基本的 NRUSM における動作シーケンスである。伸縮素子に印加するサイン波形電圧に対して、位相差を $\pi/2$ とした電圧波形を剪断素子

に印加することで、その先端軌道を楕円化し、また、その位相差極性を変えることで回転方向を制御している。しかし、図 4.20 に示す様に、伸縮素子に電圧印加せず剪断素子だけに DC の制御電圧を与えると、先端軌道はそのステージ位置を移動中心として、剪断素子の変形範囲だけの微動駆動を行うことになる。この機能を利用し、通常の Point to point の位置決め完了から剪断素子だけの微動位置制御に遷移するシーケンスフローを図 4.21 に示す。目標位置の指令が与えられたら、現在の位置から目標位置近傍までは通常のシーケンス、つまり楕円軌道による駆動モードにより移動する。そして、刻々と変化する実際位置と目標位置との差があらかじめ指定しておいた偏差量よりも小さくなったら微動位置制御のシーケンスに切り替える。最終的に、目標位置との差を位置制定偏差以内まで制御し、その位置に対する追従を継続する。それを用いたドリフト制御の結果を図 4.22 に示す。目標としていた $\pm 3\text{nm}$ 以内@10min を満たすだけでなく、パッシブでは 3 回のデータ取得において、そのそれぞれが異なる傾向を示していたが、アクティブ制御では、その傾向自身を目標値以内として良好な結果となった。また、この微動モードを使用した 9.6nm ステップ&リピート駆動と 1.2nm ステップ&リピート駆動における移動プロファイルを図 4.23、図 4.24 に示す。いずれの場合も良好な動作を示している。

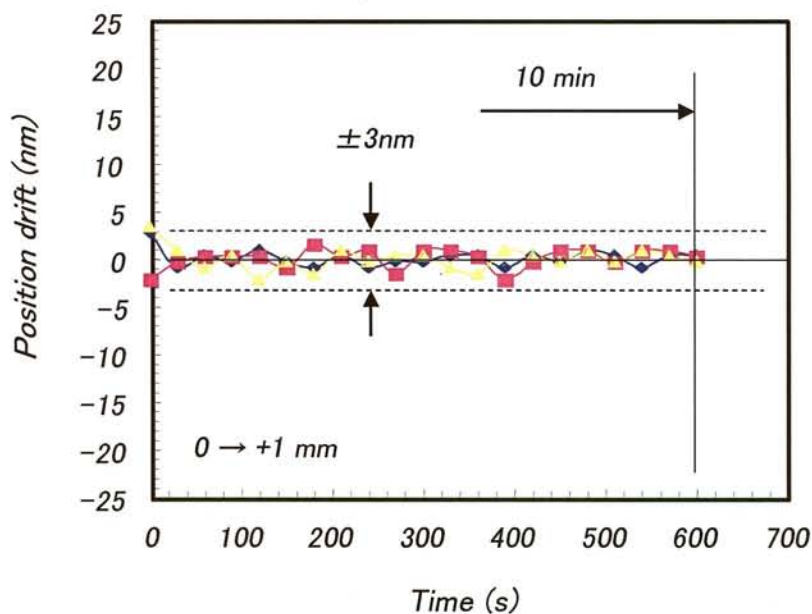


図 4.22 微動制御を付加したステージ停止時のドリフトデータ

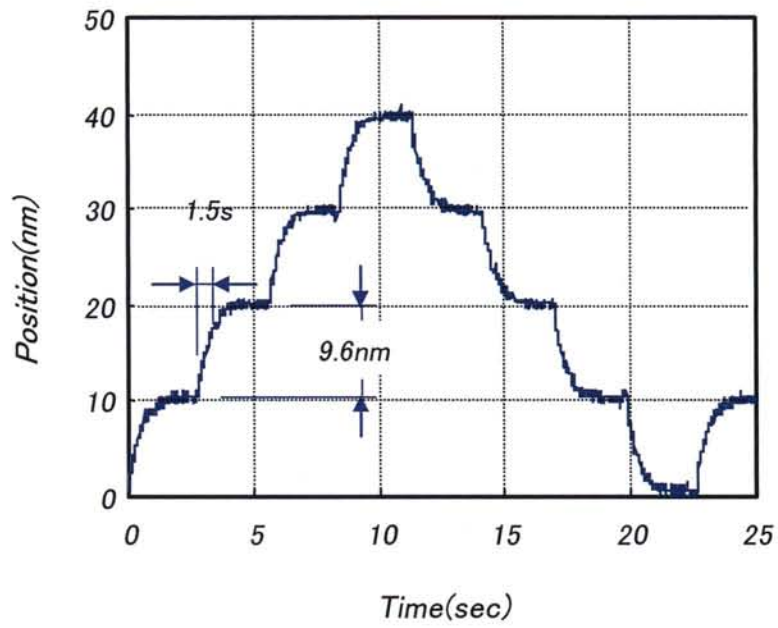


図 4.23 微動制御による 9.6nm ステップ&リピート駆動

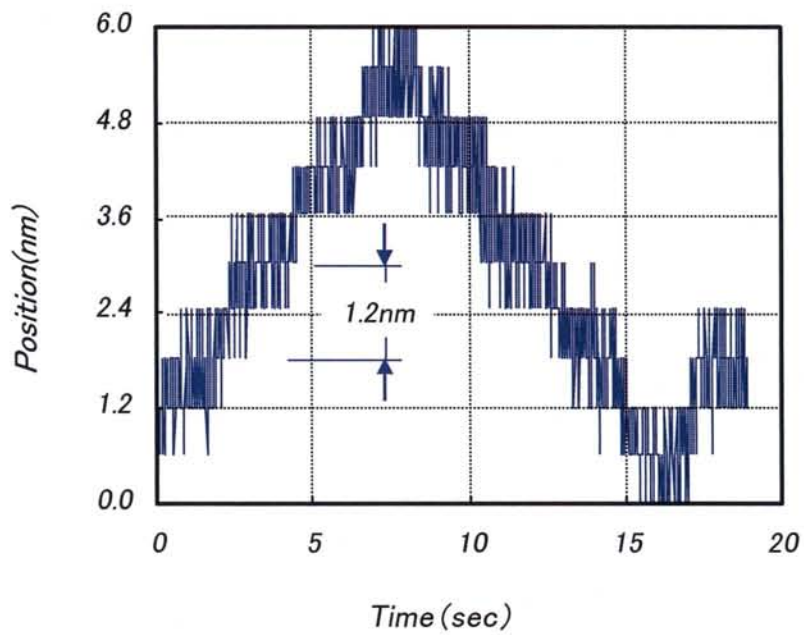


図 4.24 微動制御による 1.2nm ステップ&リピート駆動

4.4 ロバスト制御系における評価

4.4.1 I-P 制御における評価

加工装置では、目標位置に移動する際に、行き過ぎ（オーバーシュート）は厳禁としているものもある。なぜならば、特殊な制御またはメカニズムを併用していない加工装置では、移動した際の軌跡が全てワークに残ることになるが、その痕跡自身が加工にとっては致命的エラーとなる場合があるからである。ここでは、そのようなオーバーシュート対策として、I-P 制御系を用いた際の NRUSM の性能評価を行った。

これまでの PI 制御系では、位置指令に対する比例項が存在するため、指令にステップ関数を用いた場合には NRUSM にステップ的な電圧が加わり、オーバーシュートや振動的な応答が発現する。これに対して I-P 制御系では、比例項を出力のみからフィードバックすることにより、指令印加時の NRUSM への急激な印加電圧を回避することが可能となる。その結果、目標値に達する時間は遅くなるが制御系全体の安定性が優先され、オーバーシュートが低減する。また I-P 制御系では、外乱に対する周波数特性はゲインが同一であれば PI 制御系と全く同一となるという特長も有する。図 4.25、図 4.26 にこれまでの PI 制御系と今回評価した I-P 制御系のブロックダイアグラムを示す。式 4.1 で示したモデルを用いて、ステップ位置指令に対してオーバーシュート量を 20%一定とし、制御帯域が 20Hz、50Hz、100Hz となるよう PI 制御器を設計した。このときの PI 制御器ゲインを表 4.1 に、これらのパラメータによりシミュレーション及び実験を行った結果を図 4.27、図 4.28 にそれぞれ示す。同図より確認できるように、広帯域化に伴い摩擦の影響が軽減でき、シミュレーションに近い応答となるが、オーバーシュートも大きくなり、帯域幅 100Hz に対しては 25%のオーバーシュートとなっていることが確認できる。オーバーシュートの改善について以下考察する。一般的に、PI 制御系にてオーバーシュートを改善するには一巡伝達関数(PI 制御器+NRUSM モデル)のゼロクロス周波数近傍での周波数特性を改善する必要がある。ここでの改善とは、ゼロクロス周波数での傾きをできるだけ積分特性である-20dB/dec に近づけることを意味する。しかしながら、NRUSM の接点周波数が 720.4 rad/s であることから、100Hz(=628rad/s) のゼロクロス周波数となる PI 制御器にてこれを実現するのは困難であり、現状のオーバーシュート 25%はほぼ限界の数値である。

今回用いた極配置による I-P 制御系の設計法について示す。まずは、設計の簡単化のため制御対象である NRUSM モデルを $K=s$ の積分近似モデルとする。すると位置指令から位置までの閉ループ伝達関数 $G(s)$ は

$$G(s) = \frac{KK_I}{s^2 + KK_{PS} + KK_I} \quad (4.2)$$

となる。ここで閉ループ系の減衰率を ζ 、固有周波数を ω とすると、

$$\zeta = \frac{K_P}{2} \sqrt{\frac{K}{K_I}} \quad (4.3)$$

$$\omega = \sqrt{KK_I} \quad (4.4)$$

となる。減衰率が1、固有周波数が314 rad/s となるように係数を決定すると $K_P = 1.79 \times 10^3$ 、 $K_I = 2.82 \times 10^5$ となる。但し、 $K = 0.350$ とした。PI 制御系およびI-P 制御系のステップ位置指令に対する実験結果の時間応答波形を図4.29、図4.30に示す。同図よりI-P 制御系にすることで、目標値からのオーバーシュートが25%から1.2%まで改善されることが確認できる。目標値の誤差 $\pm 5\%$ に入るまでの整定時間はPI 制御系では32 ms であるのに対して、I-P 制御系では19 ms となった。また、広帯域化に伴い増大した指令印加時の制御入力も半分以下となっていることが確認できる。ここで、制御系設計にあたり簡易化のため積分近似モデルを用いたが、導出したI-P ゲインにより速度特性を含めたモデルでシミュレーションを行った結果を図4.31、図4.32に示す。位置応答に対してはほぼ同程度の特性であることから、積分近似により導出したI-P ゲインでもこの制御帯域での制御においては問題ないことが確認できる。また、制御入力も精密モデルでは約10%程度増加しており実験結果をよく表している。

表4.1 PI 制御系における帯域別のゲイン

ω_c [Hz]	ω_c [rad/s]	K_P	K_I
20	126	3.48×10^2	1.46×10^4
50	314	9.62×10^2	6.05×10^4
100	628	1.59×10^3	1.00×10^5

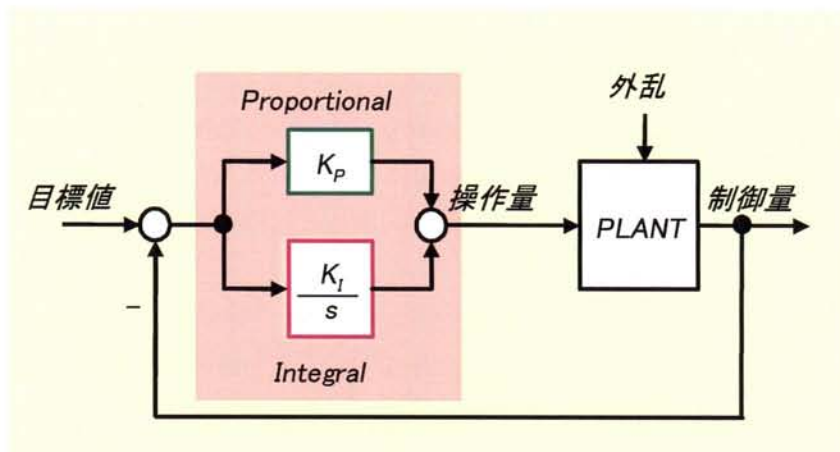


図 4.25 PI 制御器のブロックダイアグラム

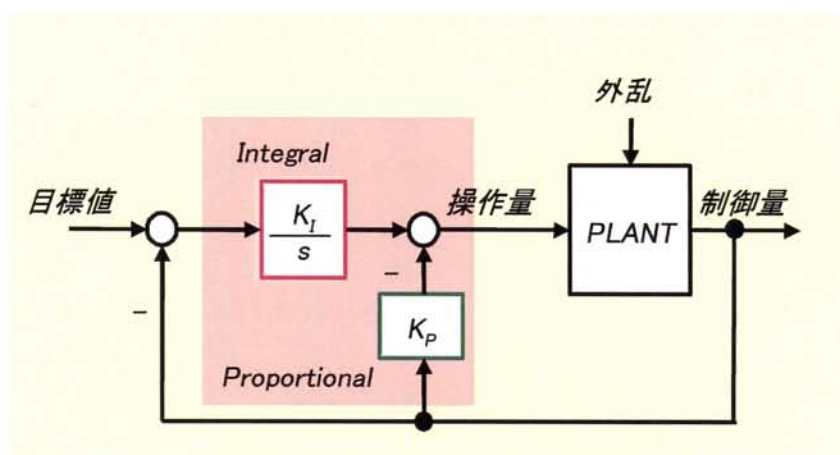


図 4.26 I-P 制御器ブロックダイアグラム

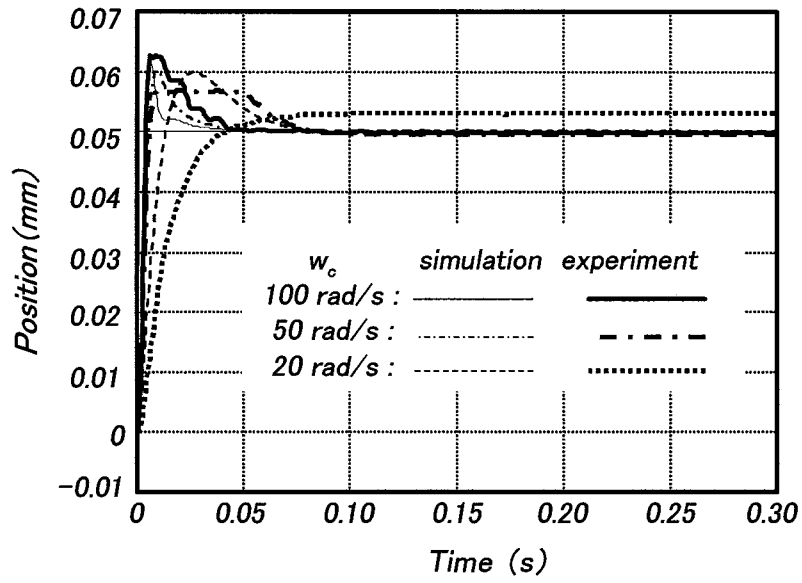


図 4.27 各帯域におけるPI制御器特性 (Position)

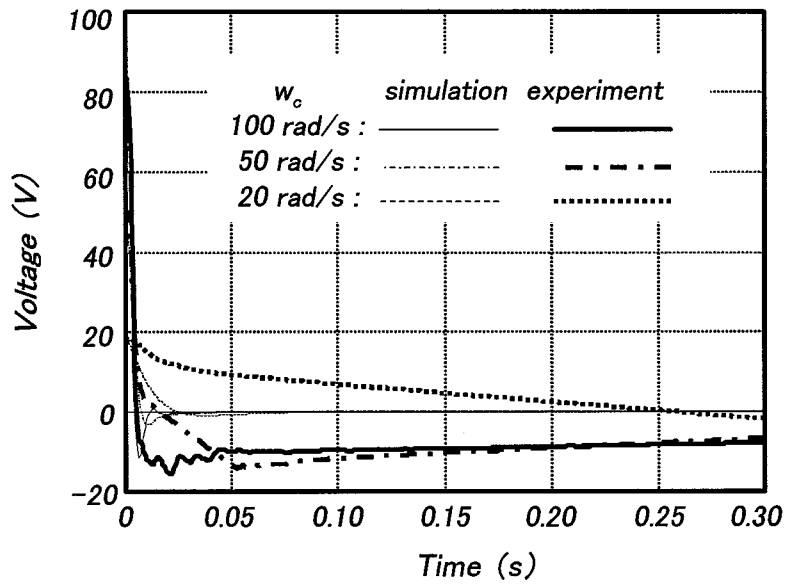


図 4.28 各帯域におけるPI制御器特性 (Control input)

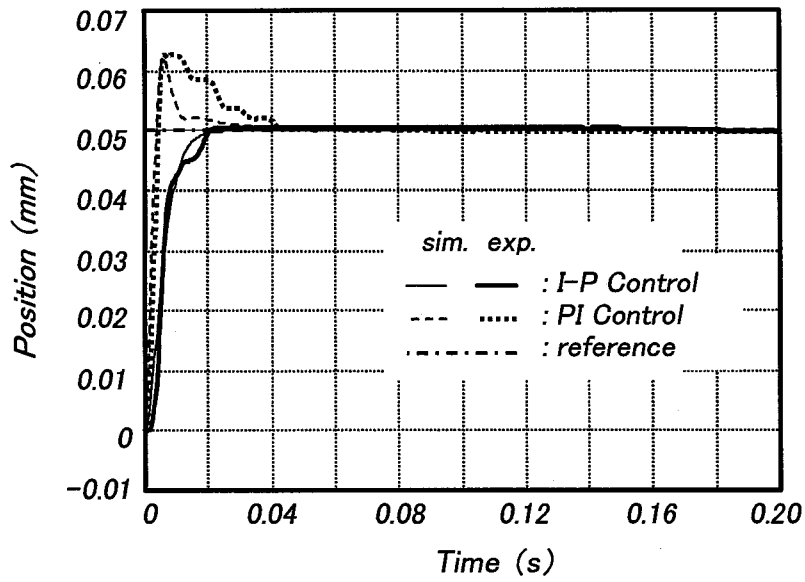


図 4.29 PI 制御器と I-P 制御器の特性比較 (Position)

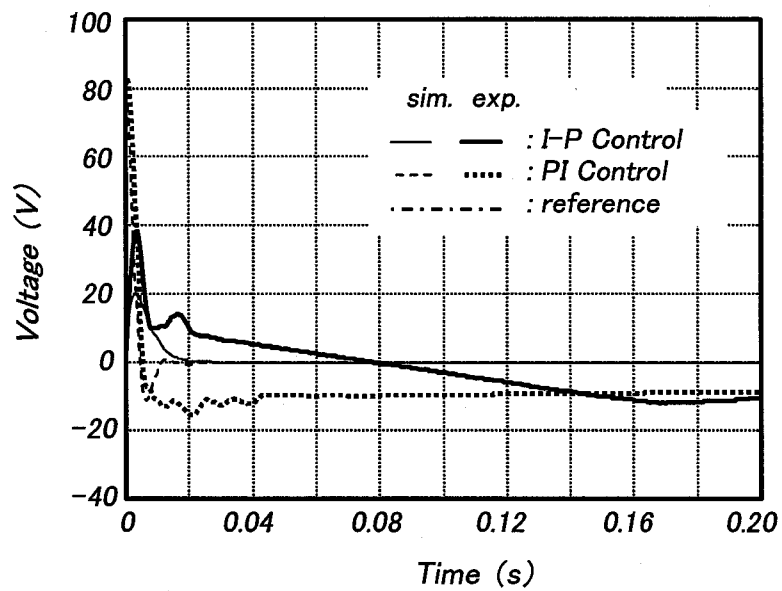


図 4.30 PI 制御器と I-P 制御器の特性比較 (Control input)

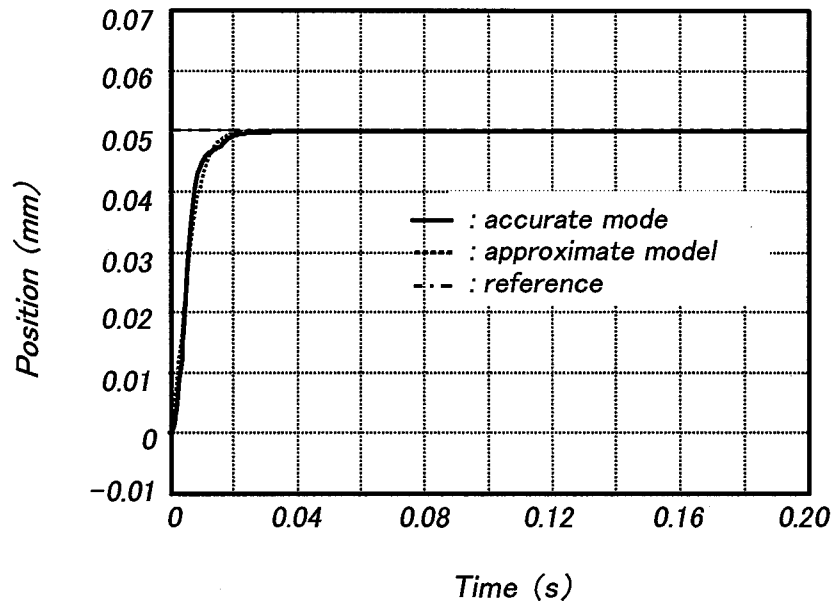


図 4.31 速度特性を含めたモデルによるシミュレーション結果 (Position)

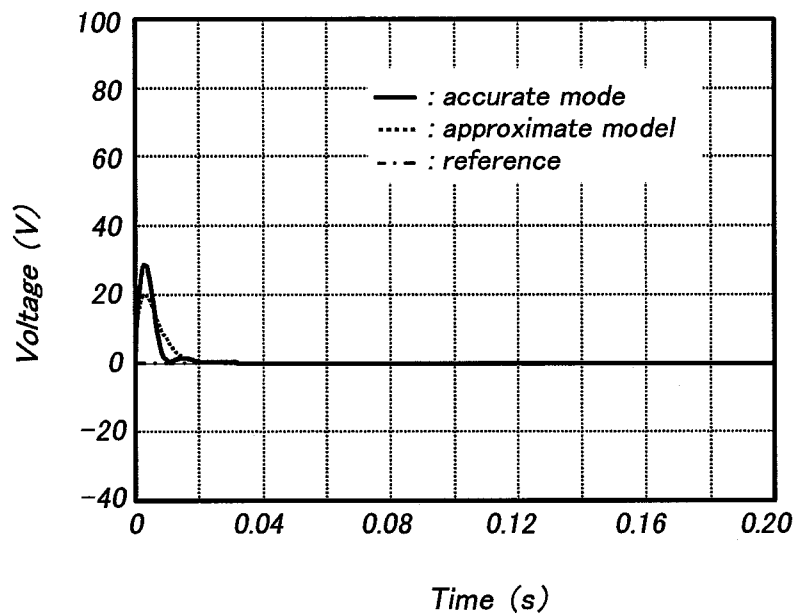


図 4.32 速度特性を含めたモデルによるシミュレーション結果 (Control input)

4.4.2 先進型 I-P 制御の構築とその評価

本節では、前節で確認した I-P 制御系の持つ有益な特性を向上させるアンチwindアップ技法の追加評価に関して述べる。

目標値に対する応答性向上を狙う目的で、制御器を広帯域化するのは極めて一般的である。しかし、実際の制御系入力には駆動回路に伴う電圧制限が存在している。そのために、制御入力は飽和しやすくなるが、制御入力の飽和により、制御器が積分特性を有するサーボ系では目標値近傍での振動や応答性低下の可能性が高くなる。そこで、積分器飽和時に制御器の誤差積分動作を停止し、その制御範囲まで誤差が復帰した後より再度誤差積分を開始することにより、上記振動や応答性低下問題に対応可能となる。これがアンチwindアップ技法である。図 4.33 に PI 制御器にアンチwindアップ機能を追加した際のブロックダイアグラムを示す。この手法は、PI 制御系においては極めて一般的なものである。しかし、I-P 制御系となると、この手法を用いた例を挙げるのは難しい。図 4.34 には、PI 制御系で構成されていたアンチwindアップ機能を I-P 制御系に適応させた場合の基本ブロックダイアグラムを示す。この系を用いて同様の制御をした場合、制御入力飽和時に積分制御器を停止すると制御不能状態となる。これは、PI 制御系では積分制御器を停止しても、比例制御器に目標位置情報を持ちながら制御するが、I-P 制御系では目標位置情報は積分制御器にしか含まれておらず、それを停止した時点で目標位置を見失うからである。故に、図 4.34 に示すような I-P 制御系は成立しない。

そこで、積分制御器停止を伴わないでアンチwindアップ機能を追加した I-P 制御系を考案した。そのブロックダイアグラムを図 4.35 に示す。この系に実装されたアンチwindアップ機能の大前提は、「制御入力飽和時に積分制御器の出力に等価的な飽和を設定し、その飽和量に基づき制御器への入力を修正する」ことである。

まず、積分制御器の等価飽和量を

$$u_{I\max} \equiv u_{\max} + u_p \quad (4.5)$$

とおく。そして、制御の中核となる積分制御器は、双一次変換を用いて

$$x(k+1) = Ax(k) + be(k) \quad (4.6)$$

$$u_I(k) = cx(k) + de(k) \quad (4.7)$$

の形で実現する。また、そこでの積分飽和発生時の状態空間モデルを、

$$\tilde{x}(k+1) = A\tilde{x}(k) + b\tilde{e}(k) \quad (4.8)$$

$$\tilde{u}_I(k) = c\tilde{x}(k) + d\tilde{e}(k) \quad (4.9)$$

とする。但し、ここでの $\tilde{e}(k)$ は、

$$\tilde{e}(k) = e(k) - \Delta u_I(k) / d \quad (4.10)$$

$$\Delta u_I(k) = u_I(k) - \text{sgn}\{u_I(k)\}u_{I\max} \quad (4.11)$$

である。これにより、制御入力飽和が生じた瞬間に等価飽和量前後の差分情報を利用し、入力飽和が生じないよう同サンプル時間内で目標追従誤差情報を修正することが可能となる^[3-4]。図4.36、図4.37には、PI制御系とアンチwindアップを装備したI-P制御系の応答性データを重ねて示す。その際の制御帯域は50Hzと規定して、50 μ mのステップ信号入力に対する位置情報を0.1msインターバルで取得した。アンチwindアップ機能付きI-P制御系にすることで、目標値からのオーバーシュートが28%からほぼ0%まで改善され、また、目標値の誤差 \pm 5%に入るまでの整定時間も、PI制御系では22msであるのに対して、I-P制御系では9.4msと改善された。

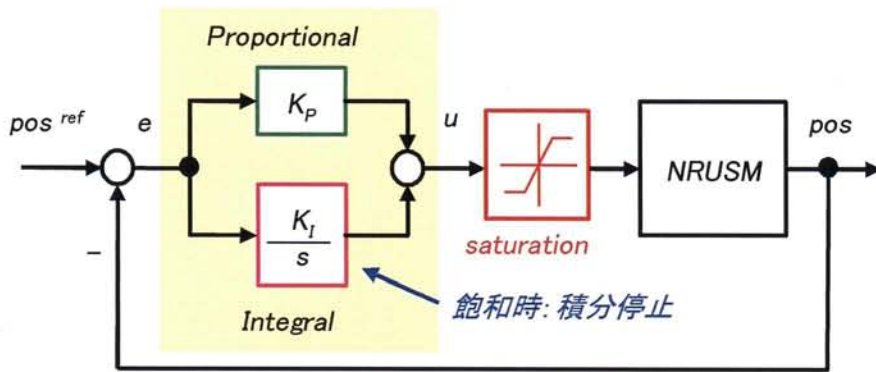


図 4.33 アンチwindアップ機能付きPI制御器のブロックダイアグラム

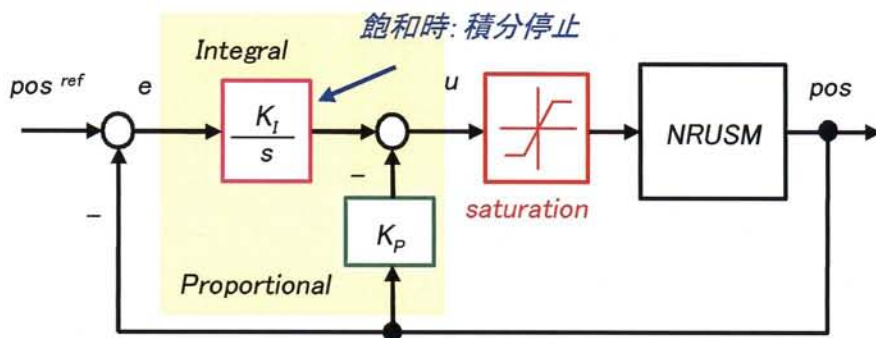


図 4.34 非現実的なアンチwindアップ機能付きI-P制御器のブロックダイアグラム

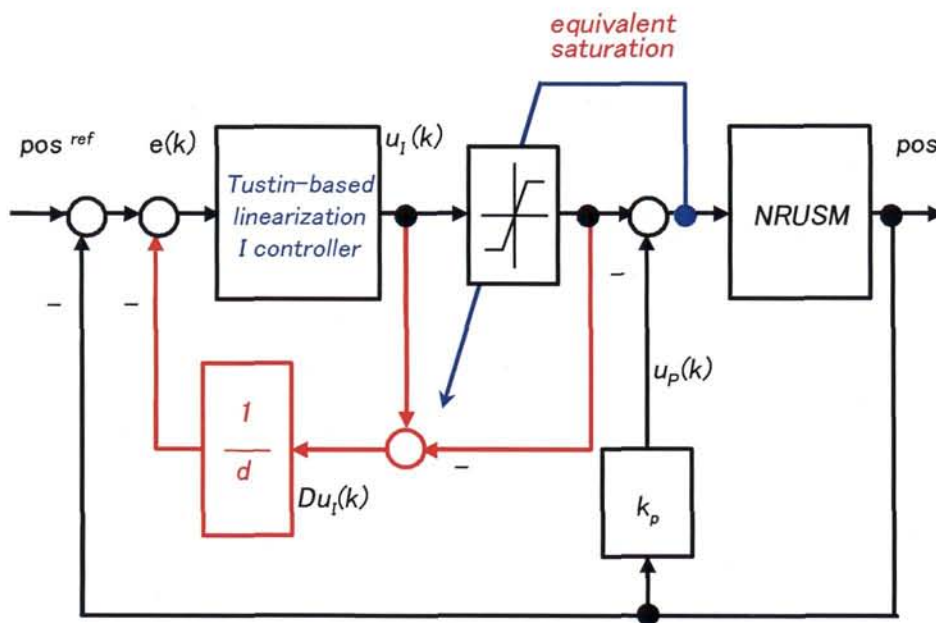


図 4.35 構築したアンチワインドアップ機能付き I-P 制御器のブロックダイアグラム

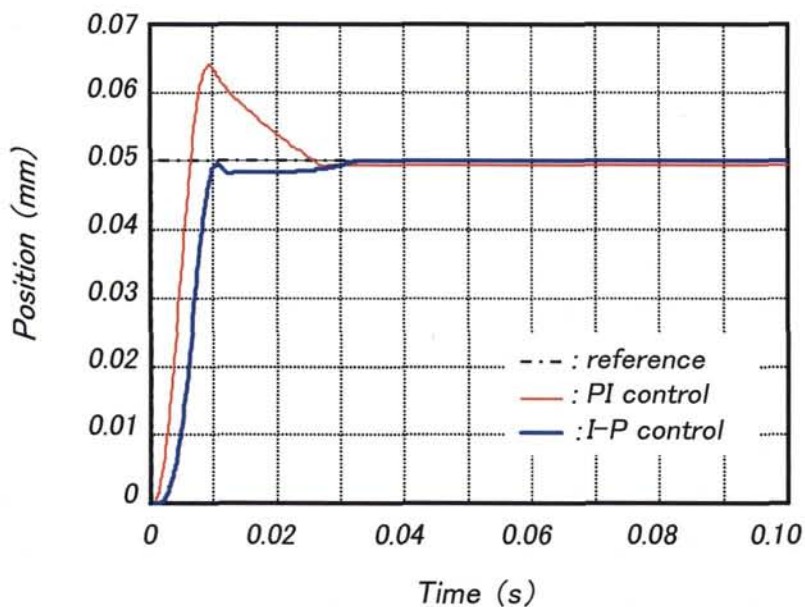


図 4.36 位置情報による従来型 PI 制御器との比較

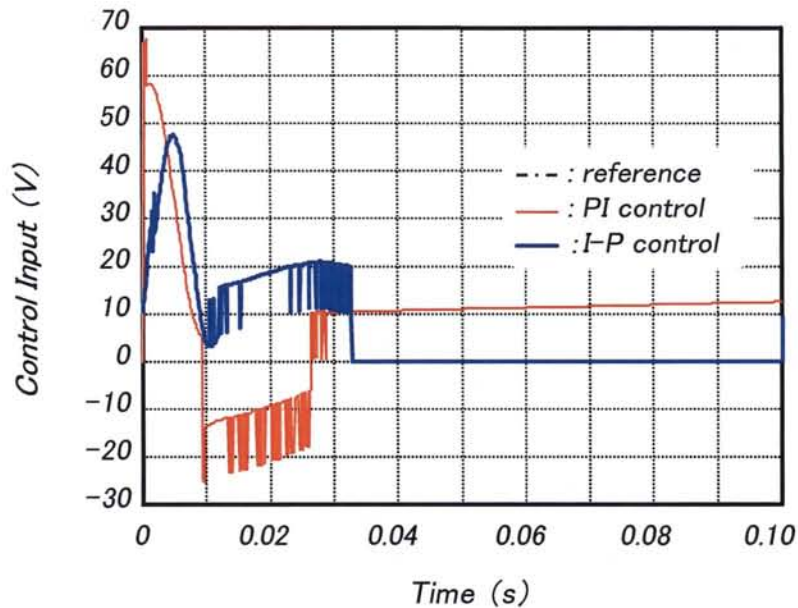


図 4.37 制御電圧による従来型 PI 制御器との比較

4.4.3 状態推定オブザーバによる評価

本節では、モデル化誤差、速度擾乱といった外乱に対して制御性能の劣化しない位置制御系、すなわちロバスト位置制御系を構築し評価する。

構築した制御系のブロック線図を図 4.38 に示す。位置偏差信号に対しては制御器の実装化および現場での調整の簡便性を考慮し PI 補償器を用いている。摩擦補償に対しては、静止摩擦をフィードフォワード的に補償電圧として加える bang-bang 制御型の補償を、また、制御系設計用の同定モデルと実際の制御対象との間に生じる誤差、すなわち外乱に対しては外乱推定値に基づくフィードバック補償を、さらに位置制御系の広帯域化が可能となるようマイナーループとして速度フィードバックループを構成している。制御系の広帯域化に伴う制御入力飽和に対しては、その差分情報に基づき位置偏差信号を逐次修正するアンチwindアップ補償法を適用している。図 4.39、図 4.40 にはロバスト制御系の特性を示す。PI+速度フィードバックの構成におけるオーバーシュートは 18%であったが、外乱フィードバックを併用することで 12%まで低減している。ここで使用されている技法のうち、速度推定に関する補足説明をする。ロバスト制御系を構成する上で速度情報は重要な信号源である。しかし、使用可能な信号はリニアスケールからの位置信号のみである。これまでは、1 次後退差分値を元にサンプリング時間幅との演算による速度算出を行ってきたが、時間幅の揺らぎ、僅かな外乱による位置変動などで算出速度が大きく影響され、結局は速度フィードバックを使用しない方が状態安定であった。ここでは、ステップ状の 1 型外乱を仮定した状態推定オブザーバ (帯域 1000Hz) により速度推定 (帯域 400Hz) を行っている。これにより、滑らかで、且つ、定常偏差を伴わずに速度推定

が可能となった。図 4.41 には使用した推定オブザーバのブロックダイアグラムを、図 4.42 にはこれまでの速度推定値と推定オブザーバによる速度推定値を重ねて示す。図 4.43、図 4.44 にはステップ位置指令における速度フィードバック有りとなしの場合での位置決め時間特性を示す。移動距離は 0.05mm とし、指令印加から 0.2s までを標準整定時間として、その際の位置偏差を 2000 サンプルで記録した。一見すると速度フィードバック無しの LSB 偏差の方が頻度としては多いように見えるが、全体としての分散傾向は速度フィードバック、静止摩擦補償とアンチwindアップ (VFB+BB+AW) を追加した制御系のほうが整っている。図 4.45、図 4.46 には同様の条件下でのランプ位置指令への追従性を評価した結果を示す。指令速度は 5mm/s として、指令印加から 0.2s までの位置偏差を 2000 サンプルで記録した。今回構築した制御系は圧倒的な優位性を示している。

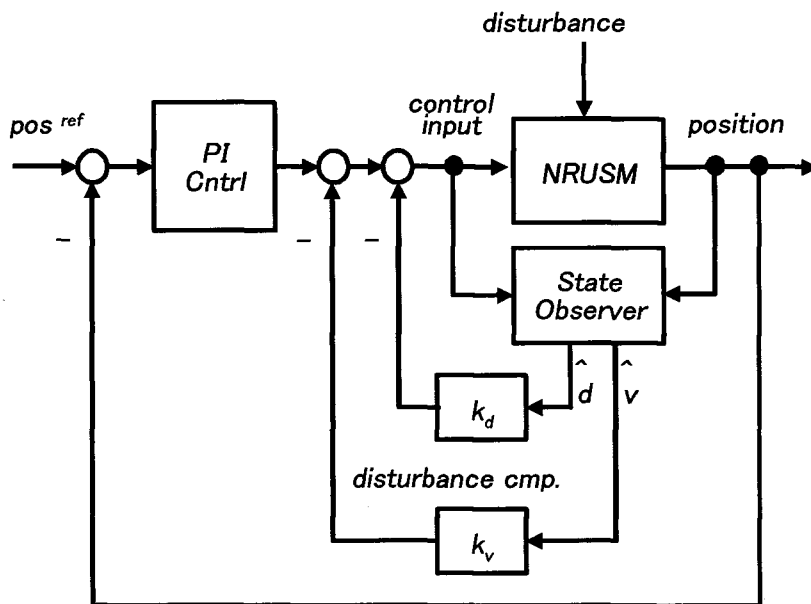


図 4.38 ロバスト制御系のブロックダイアグラム

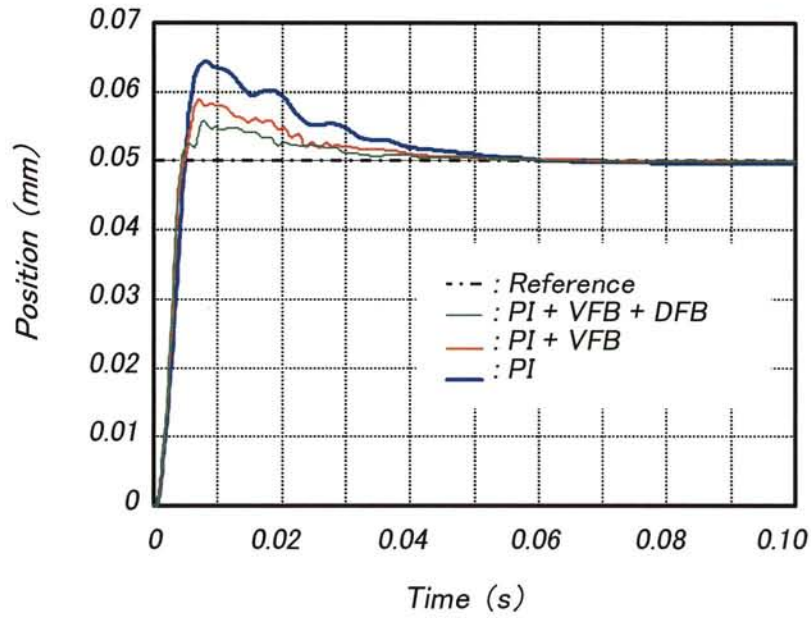


図 4.39 ロバスト制御系の特性比較 (Position)

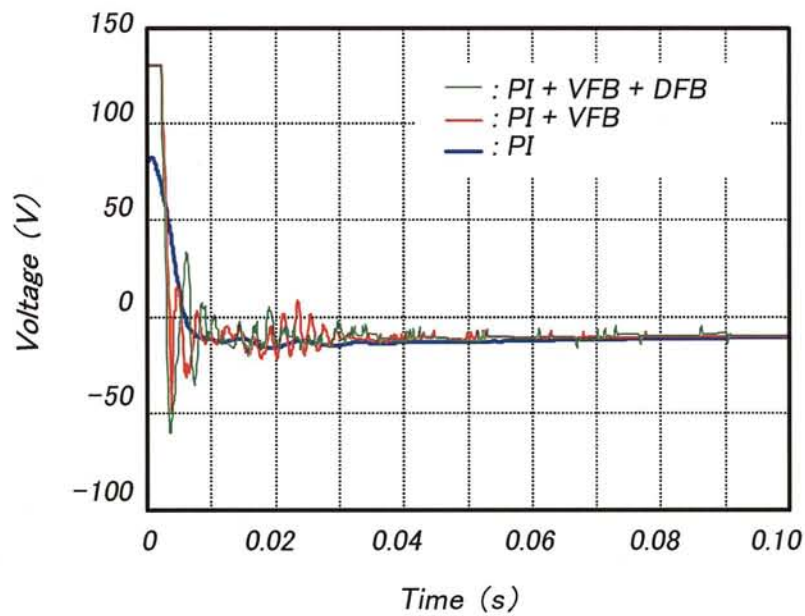


図 4.40 ロバスト制御系の特性比較 (Control input)

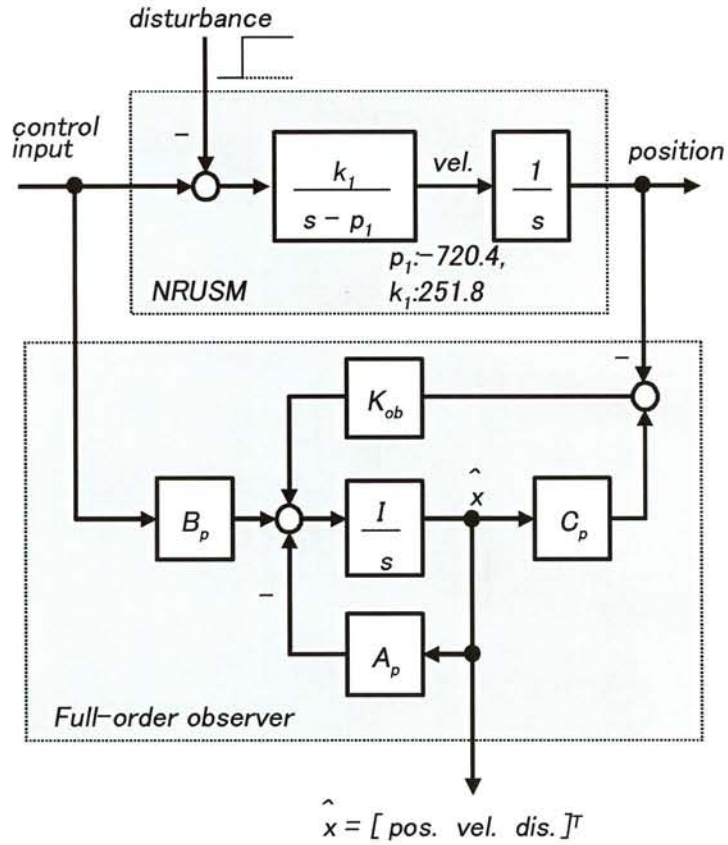


図 4.41 状態推定オブザーバのブロックダイアグラム

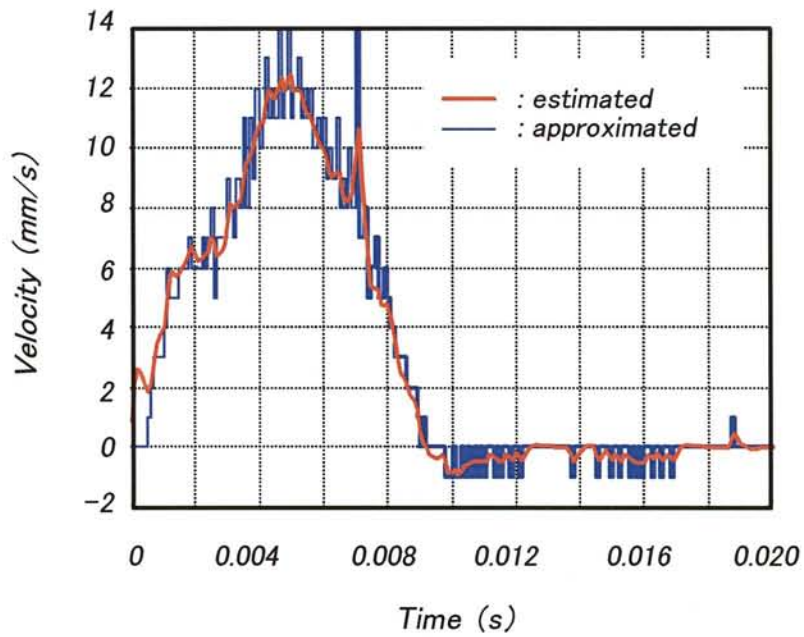


図 4.42 状態推定オブザーバによる速度推定

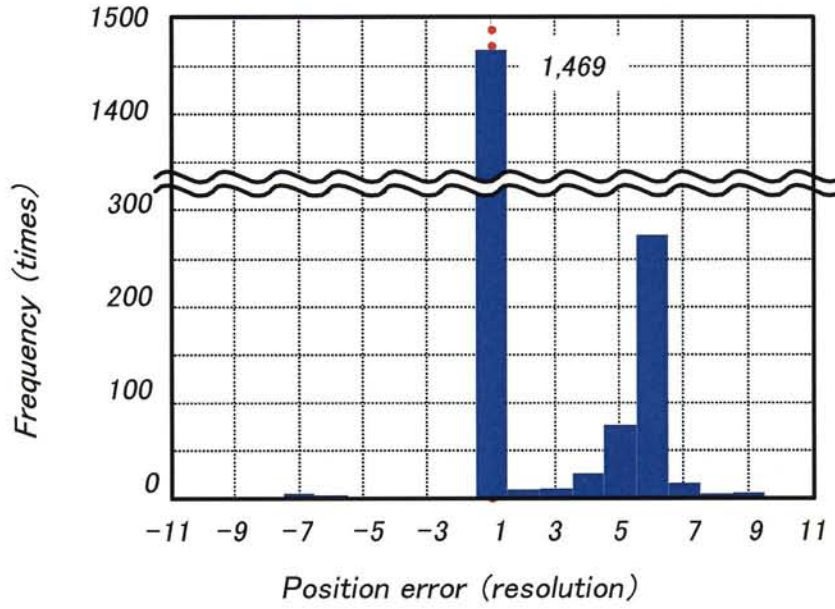


図 4.43 ステップ位置指令による特性比較 (速度推定無し)

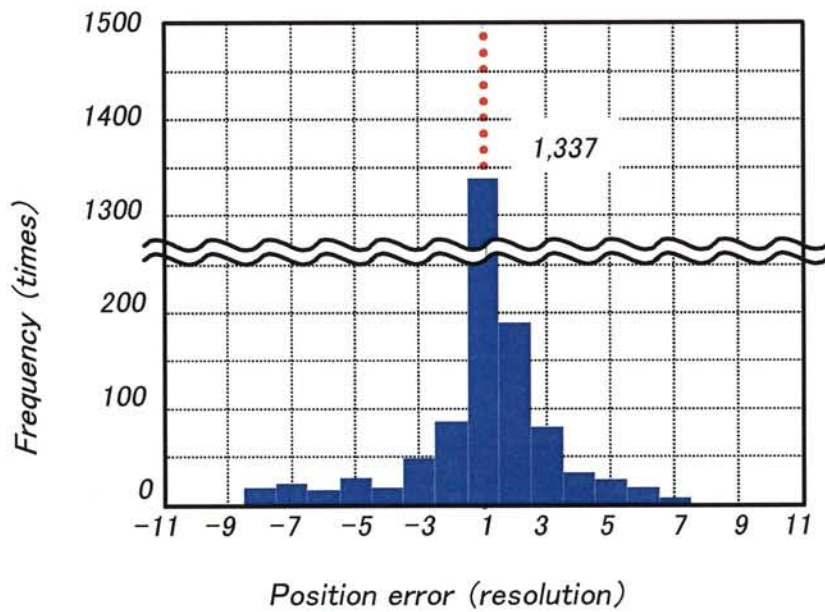


図 4.44 ステップ位置指令による特性比較 (速度推定有り)

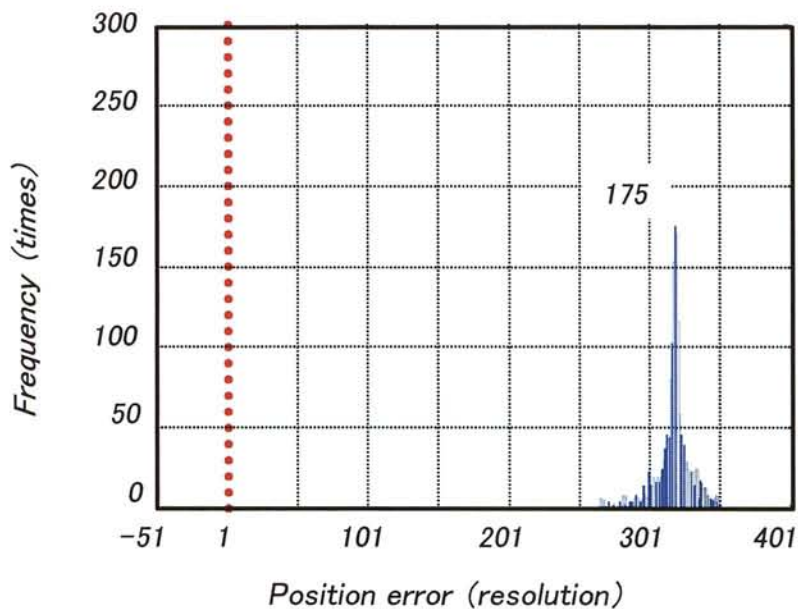


図 4.45 ランプ位置指令による特性比較 (速度推定無し)

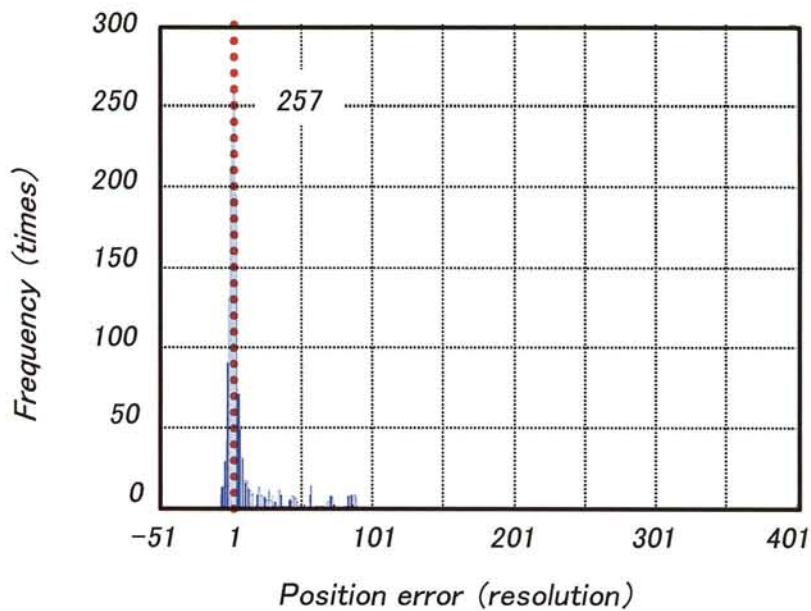


図 4.46 ランプ位置指令による特性比較 (速度推定有り)

4.4.4 連続軌跡追従系を装備したロバスト制御による評価

本節では、前節で構築したロバスト位置制御系に加え、コンティニアスモード型製造装置への適応を意識して、連続軌跡への追従性向上を目的とした設計と評価に関して述べる。構築した連続軌跡追従制御系 (Continuous Path Tracking : CPT) のブロック線図を図 4.47 に示す。前節で述べたロバスト制御系にフィードフォワード型の連続軌跡制御器が加わるという簡単な構成である^[5]。

ロバスト制御系と CPT 制御系の位置指令から位置までの伝達関数をそれぞれ以下に示す。連続軌跡追従制御器を加えることで分母に存在する項と同一の項が分子にも現れ、位置指令から位置までの伝達特性が理想特性であるゲイン 1 に近づいていることが確認できる。また、両方の制御系に対する閉ループ系周波数特性を図 4.48 に示すが、連続軌跡追従制御系の方が広帯域化され且つ伝達ゲイン 0 dB を超える量が減少していることが確認できる。ここでは、制御パラメータを決定するための設計仕様、および各種設定値を表 4.2 のように決定した。

$$\text{Robust Control System: } \frac{pos}{pos^{ref}} = \frac{C(s)}{s^2 + (p_1 + k_1 k_v)s + C(s)} \quad (4.12)$$

$$\text{CPT Control System: } \frac{pos}{pos^{ref}} = \frac{k_1 k_v s + C(s)}{s^2 + (p_1 + k_1 k_v)s + C(s)} \quad (4.13)$$

これら 2 つの位置制御系に対し、まずは振幅 0.05mm のステップ位置指令を印加した際の時間応答波形を図 4.49、図 4.50 に示す。図 4.48 の周波数特性から予想される通り、図 4.49 ロバスト制御系ではオーバーシュートが 9.4 % であるのに対して、連続軌跡追従制御系では 0.2 % まで改善できていることが確認できる。また図 4.50 の制御入力波形より、追従誤差がスケール分解能に入る時間が 28 ms から 22 ms 程度まで改善できていることが確認できる。

次に 10mm/s のランプ位置指令を印加したときの時間応答波形を図 4.51、図 4.52 に示す。図 4.51 の位置信号より、どちらの制御系もランプ指令に対して定常偏差無く追従していることが確認できる。しかし、図 4.52 に示すその拡大図からは、連続軌跡追従制御系ではロバスト制御系と比較し良好な追従特性が得られていることが確認できる。また拡大領域内の追従誤差を図 4.53 に示す。制御系を CPT 制御型にすることでロバスト制御系と比較し最大追従誤差を 36.5 % 低減可能となることも確認した。

最後に正弦波位置指令 ($\pm 1\text{mm-p}$, 1 Hz) を印加したときの実験結果を図 4.54、図 4.55 に示す。図 4.55 より、ほぼ全ての領域で追従誤差が低減できていることが確認できる。また、図 4.56、図 4.57 には両システムの追従誤差に対するヒストグラムを示しているが、連続軌跡追従制御系では標準偏差が 1/3 程度に減少しており、良好な特性改善が確認できる。

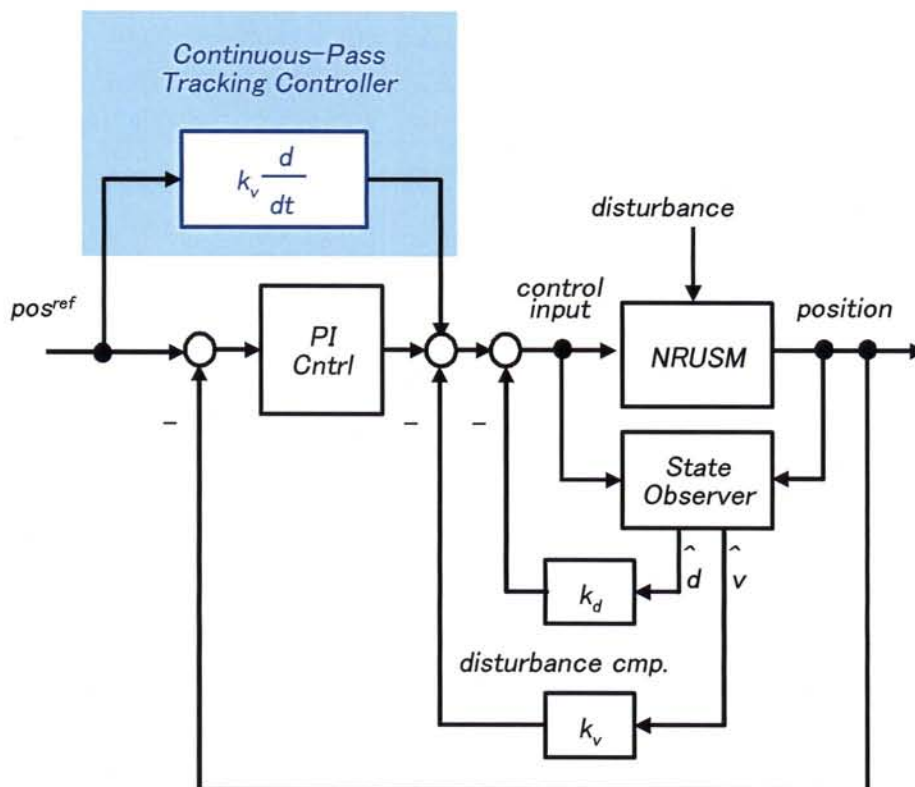


図 4.47 CPT 制御系のブロックダイアグラム

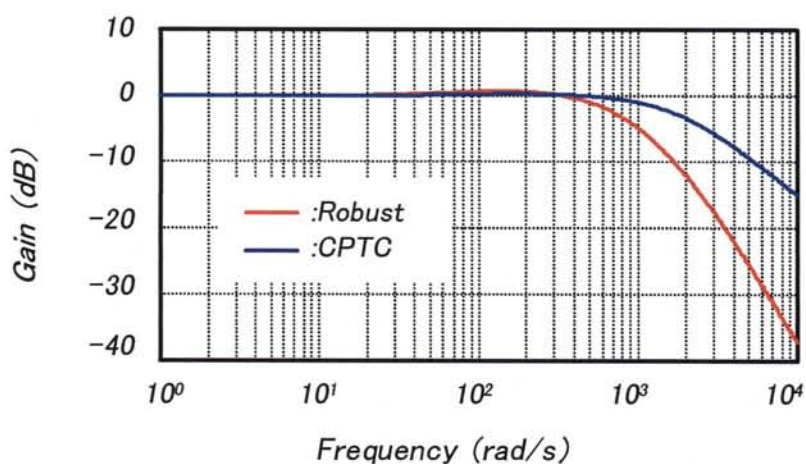


図 4.48 CPT 制御系とロバスト制御系の閉ループにおける周波数特性比較

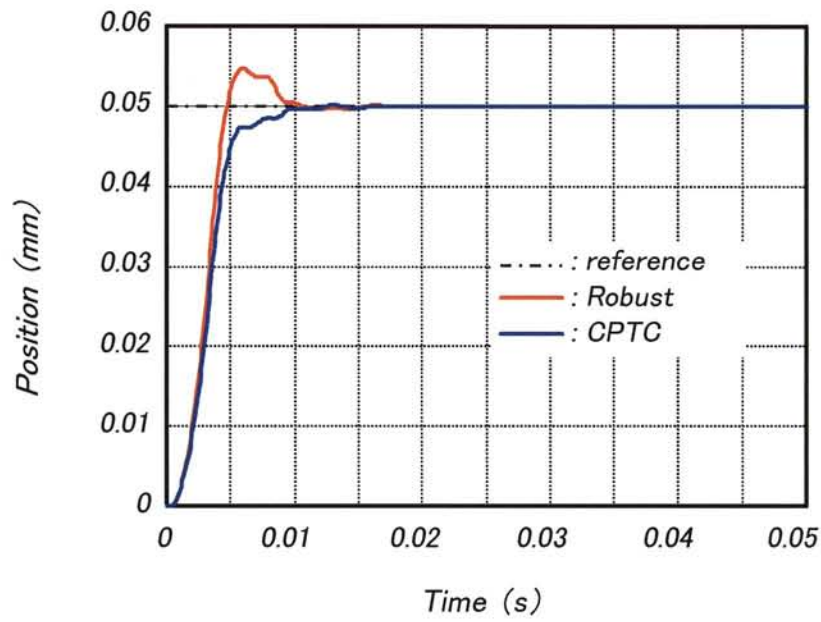


図 4.49 ステップ位置指令による CPT 制御系の特性比較 (Position)

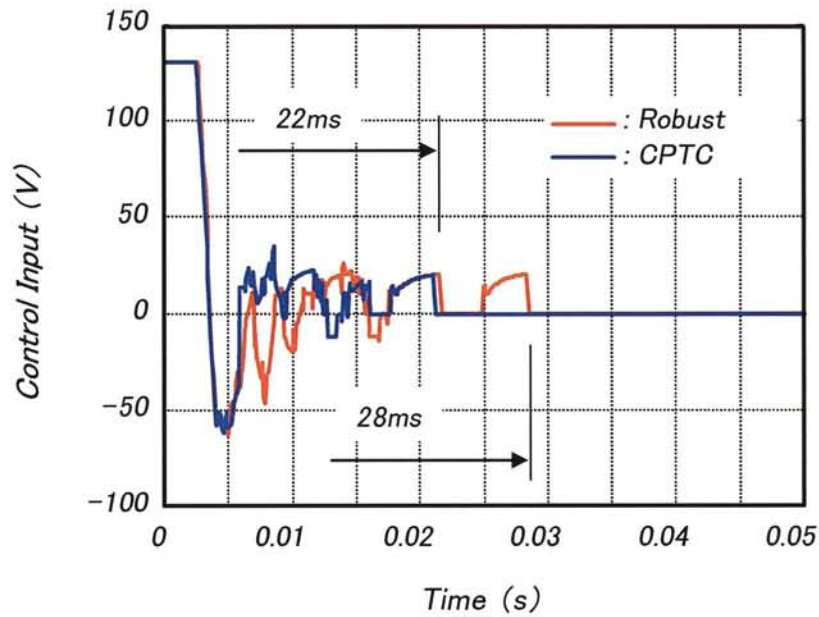


図 4.50 ステップ位置指令による CPT 制御系の特性比較 (Control input)

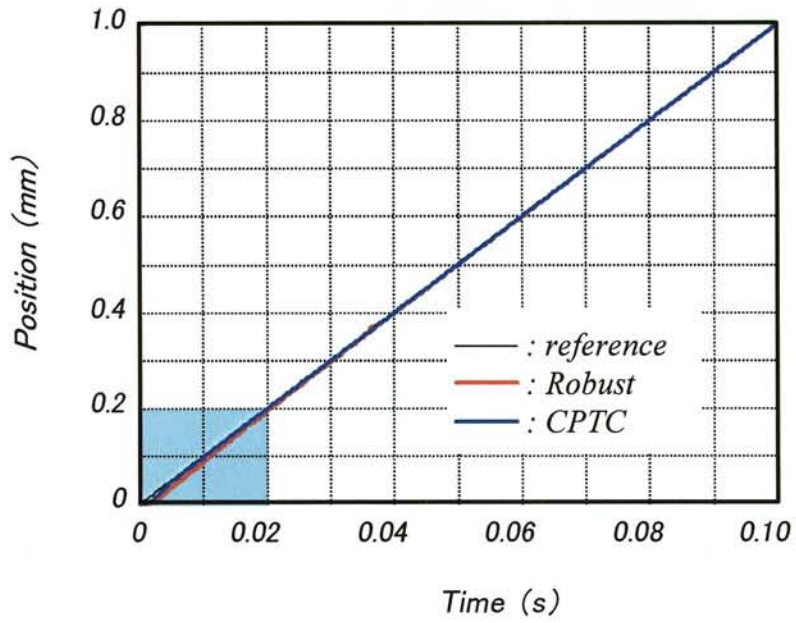


図 4.51 ランプ位置指令による CPT 制御系の特性比較 (Position)

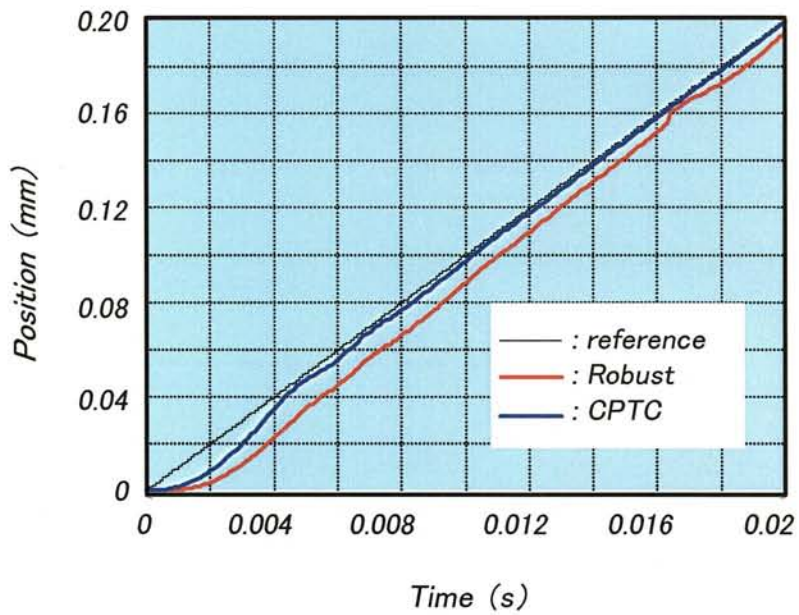


図 4.52 ランプ位置指令による CPT 制御系の特性比較開始部分の拡大

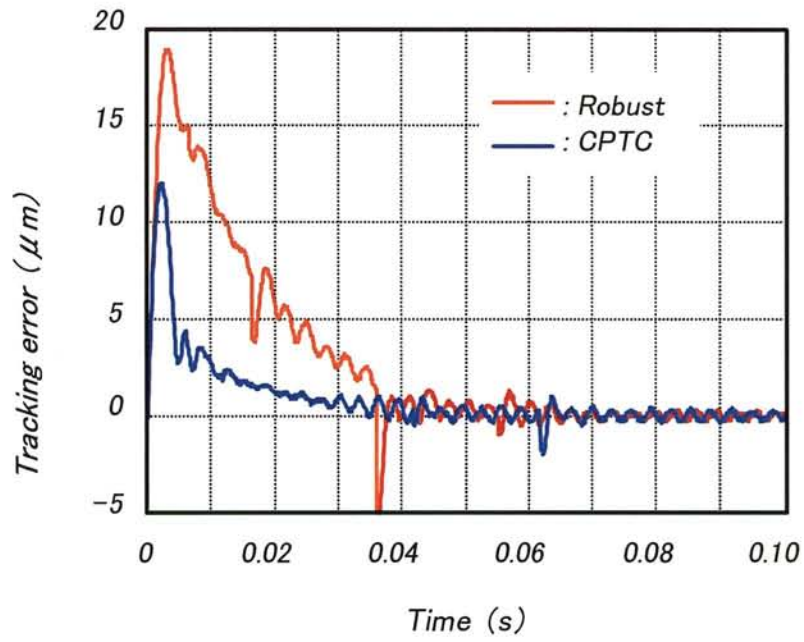


図 4.53 ランプ位置指令に対する追従誤差比較

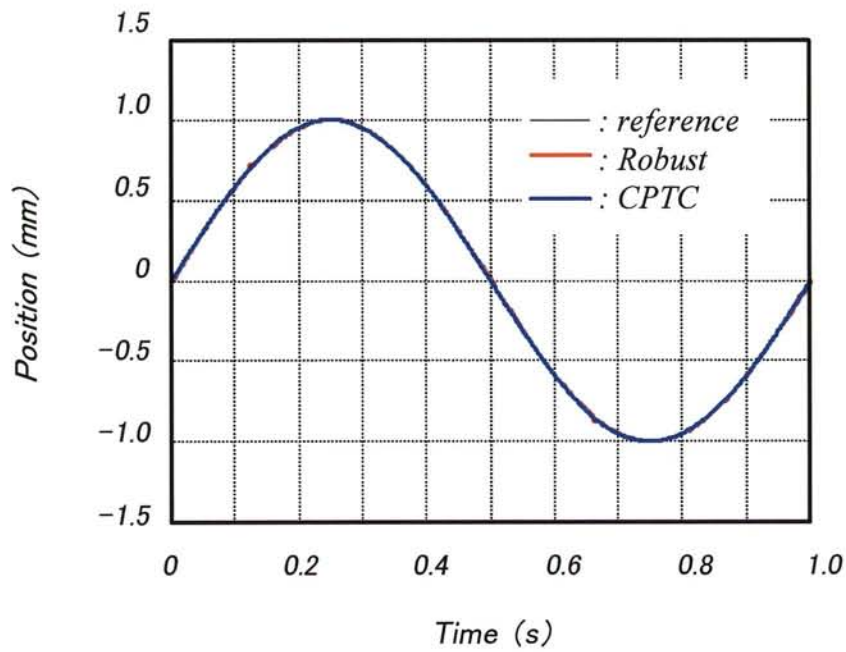


図 4.54 正弦波位置指令による CPT 制御系の特性比較 (Position)

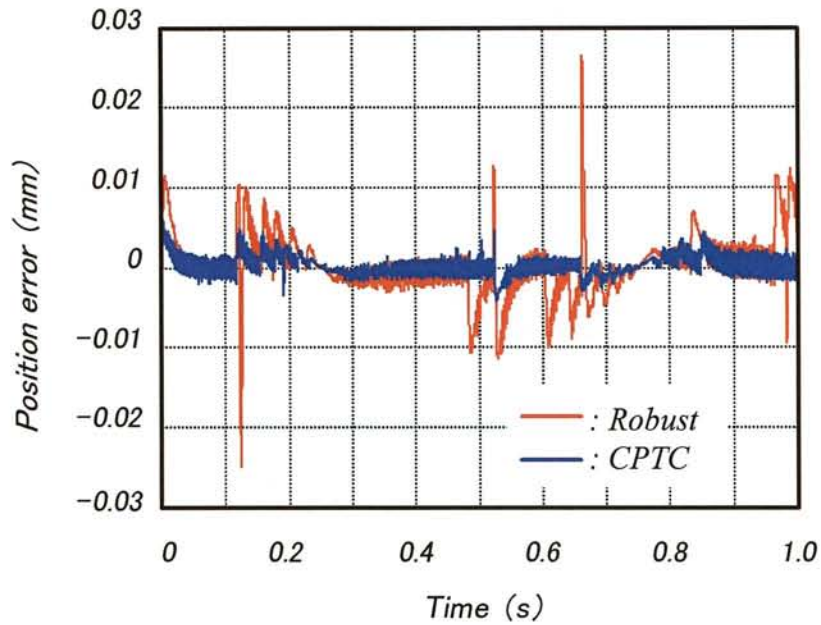


図 4.55 正弦波位置指令による CPT 制御系の特性比較 (追従誤差)

表 4.2 CPT 制御系の各設定値

NRUSM 駆動周波数	20 kHz
サンプリング周波数	0.1 ms
オブザーバ帯域幅	1,000 Hz
速度制御帯域幅	400 Hz
位置制御帯域幅	100 Hz
外乱補償	あり(50%フィードバック)
アンチ・windアップ補償	あり
bang-bang 補償	あり(静止摩擦補償)
伸縮オフセット電圧	39 V

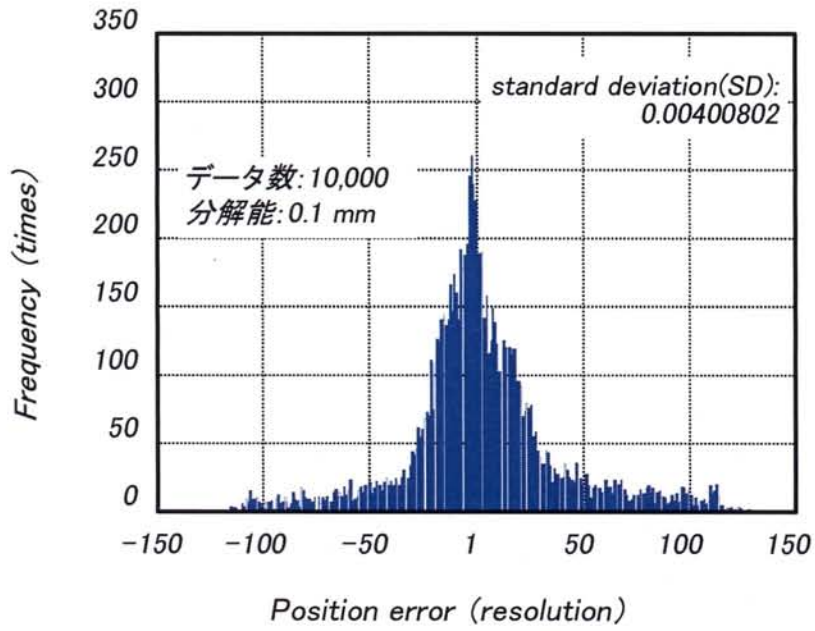


図 4.56 正弦波位置指令時の追従誤差ヒストグラム (ロバスト制御系)

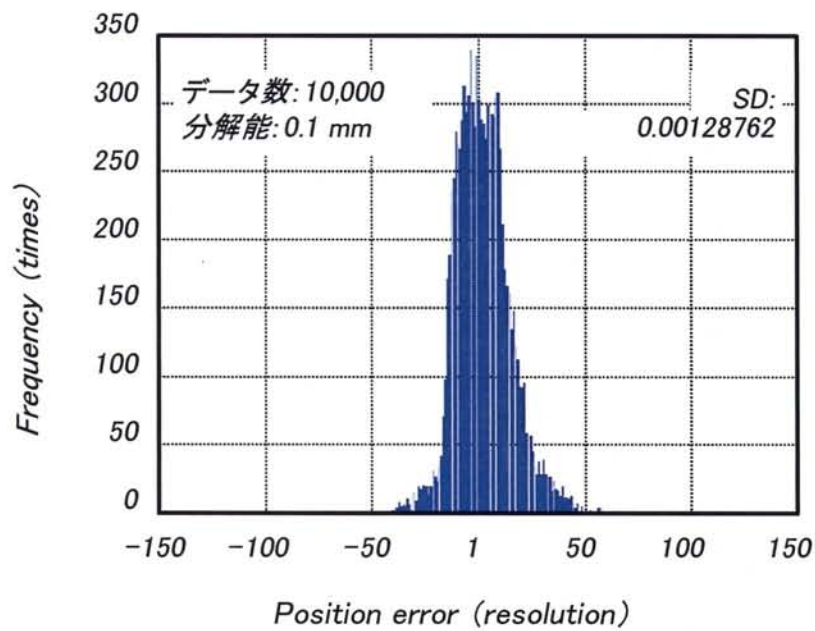


図 4.57 正弦波位置指令時の追従誤差ヒストグラム (CPT 制御系)

4.5 結言

本章では NRUSM のモデリングから始まり、それぞれ特徴の有る各種制御系によりステージ駆動時の評価を行った。最初の PID 制御系を使用した駆動評価により、NRUSM の駆動分解能は、位置計測装置として用いたレーザー干渉計の最小分解能である 0.6nm 以下である事を証明した。そして、制御に対する挙動から、その分解能にはまだ余裕が有る事も明らかになった。第 2 章にも記載したように、ここで使用した圧電素子は、太平洋セメント (株) 製の D 材 (等価圧電定数: 1010pm/V, 厚さ 0.6mm) を 4 枚積層したものである。そして、制御系から見た駆動電圧分解能は 3.9mV であり、システムの S/N 比ならびに定在ノイズから見込まれる実質的分解能を 5LSB (20mV) とすると、アクチュエータ先端での実用的解能は 0.08nm と試算される。実際に、ステージに NRUSM を装着した状況で、この試算により導かれた数値に近い性能を発揮できるのも、送り動作に剪断素子を使用した単純で且つ、普遍性の高い動作原理を有する NRUSM の特徴である。

最初のアプローチとしては、制御方式を PI 制御系から類似構造である I-P 制御系へ変更し、制御帯域の広帯域化に伴い顕在化してきたステップ位置指令に対するオーバーシュートを、制御方式の変更により改善する手法を示した。ちなみに、その設計には極配置法を用いている。これにより、摩擦に対する定常特性を PI 制御系と同等に保ちながら、オーバーシュートを 25% から 1.2% へ、また整定時間を 32 ms から 19 ms まで改善できた。さらに、指令印加時の制御入力 (NRUSM への印加電圧) を半分以下まで抑えることが可能となった。今回は減衰を 1、固有周波数を 314 rad/s とし極配置を行ったが、設計法に対しては他にも種々の方法があり、目的および用途により変更する必要があると思われる。また、本研究により実現化された I-P 制御系へのアンチwindアップ実装技法は、積分器のみ、スミス補償をフィードバック制御器として有する、I-PD 制御系、積分器+状態フィードバック制御系型 I-PD 制御系などに広く応用可能である。

続いて、PI 制御系を基本として、状態推定オブザーバによるロバスト制御系を構築し、その性能評価を行った。外乱フィードバックと共に、オブザーバによる速度推定情報を使用した速度フィードバック、それとアンチwindアップ機能の併用により、18%以上のオーバーシュートを 12%まで低減した。また、ステップ位置応答による時間制約付き位置決め評価でも良好な結果を示した。最後に、そのロバスト制御系に対して、フィードフォワード型連続軌跡制御器を追加した CPT 制御系による評価では、ロバスト制御系でのランプ位置応答時の最大追従誤差を 36.5%低減した。また同様に、正弦波位置指令における追従誤差評価でも、ロバスト制御系の誤差分布に対して 1/3 以下まで低減した結果を示した。

参考文献

- [1] 須田信英, “PID 制御”, システム制御情報学会編, 1992.
- [2] S.Tsuboi, H.Watanabe, M.Ezaki, H.Aoyama, Y.Kikuchi, Y.Nakayama, S. Shigehisa, T.Watanabe, T.Morisawa, K.Saito, M.Oda, T.Matsuda, “Precise Delineation Characteristics of Advanced Electron Beam Mask Writer EB-X3 for Fabricating 1x X-Ray Masks,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 39, Part 1, No. 12B, pp. 6902-6907, 2000.
- [3] 大石潔ほか, “操作量飽和を考慮したデジタルロバスト速度サーボ系の一構成法”, 電気学会論文誌 D 産業応用部門誌 Vol.119 No.1, 1999, pp.88-96.
- [4] 小坂光二ほか, “アンチ・ワインドアップ補償による高速 I-P 位置制御系の一構成法”, 電気学会論文誌 D 産業応用部門誌 Vol.125 No.1, 2005, pp.117-118.
- [5] 橋本誠司ほか, “スティックスリップ補償と連続軌跡追従制御に基づく超音波アクチュエータ駆動精密ステージの一制御法”, 電気学会論文誌 D(産業応用部門誌), IEEJ Trans.IA, Vol. 125, No. 6, 2005, pp.582-589.

第5章 ステージシステムの耐久性

5.1 緒言

1986年、(株)新生工業が発表したUSR60-4-100から始まった回転型超音波モータの産業応用へのトライアルは20年になろうとしている^[1]。そして、それらの製品群は、すでに5,000h以上の製品耐久性を備えて市場における市民権を確立した。その用途としては、1眼レフカメラのオートフォーカス動力源が有名である。しかし、回転数は数百rpmと一般的回転モータからすると物足りない。また、その回転数では、ボールスクリューを介してステージと接続しても数10mm/s程度の速度にしかない。それ故に、リニア型超音波モータの高速性と高分解能性能は精密ステージを構築する際には魅力的である。しかし、回転型超音波モータと比較して、その摺動面における面圧が数10倍以上高いリニア型超音波モータにおける摩耗は重大な問題である。本章では、接触部の摩耗計測を中心に、NRUSMの耐久性に関する実験結果に関して述べる。

5.2 耐久性指針とステージシステム構成

本研究で開発した非共振型超音波モータ駆動のステージシステムを半導体製造装置へ実用化するためには、駆動性能の長期安定性、つまり高耐久性化が最も重要な課題となる。なぜなら、摩擦駆動型アクチュエータにおいて、高速・高加速度駆動を実現するためには、アクチュエータから発生した変位を効率よくステージへ伝達する必要がある。そのためには、高い摩擦係数の摺動材料を組合せて用いるのが有効だが、このような材料の組合せでは摺動時に強烈な摩耗が発生し、接触面の形状変化あるいは塵埃によって駆動性能の安定性が損なわれてしまう。摩擦駆動型アクチュエータにおいて、高速・高加速と高耐久性とは物理法則上では二律背反となってしまふ。実際のところ、高速・高加速度駆動と高耐久性を融合させ実用化した製品は殆ど無い。そこで、非共振型超音波モータの高耐久性化を図るための指針を得るためには、まず現状の耐久性を評価する必要がある。よって、連続駆動試験を実施するにあたり、まずは目標とする連続駆動距離の算出を行なうことにした。

半導体製造の前工程において、主流となっている検査装置の一つにCD-SEMがある。NRUSMの実用化ターゲットをCD-SEMとして、生産ラインで稼働している際の連続駆動距離を目標値とした耐久試験を実施する。この際のウェハ1枚あたりの基本動作を図5.1とすると、目標とする走行距離算出の条件は以下となる。

- ・ ウェハ 1 枚当たりのステージ走行距離は 600mm @ 12-inch wafer
- ・ 検査スループットは 40 Wafer/h @ 3 point/Wafer^[2]
- ・ 真空装置のメンテナンス頻度は 1 年に 1 回程度 (365 day×24 h)

これにより、210.24km と試算できるため、目標走行距離を 200 km とした。^[3]

今回の連続駆動試験に用いた 100mm ストローク評価用ステージの外観を図 5.2 に示す。連続駆動試験は、大気中におけるオープンループ駆動およびクローズドループ駆動による耐久性評価、次に真空環境下および高真空環境下でのクローズドループ駆動による耐久性評価を順次行なった。なお、連続走行試験後には表面形状計測によるガイドプレート摺動面の計測による摩耗評価を行なった。

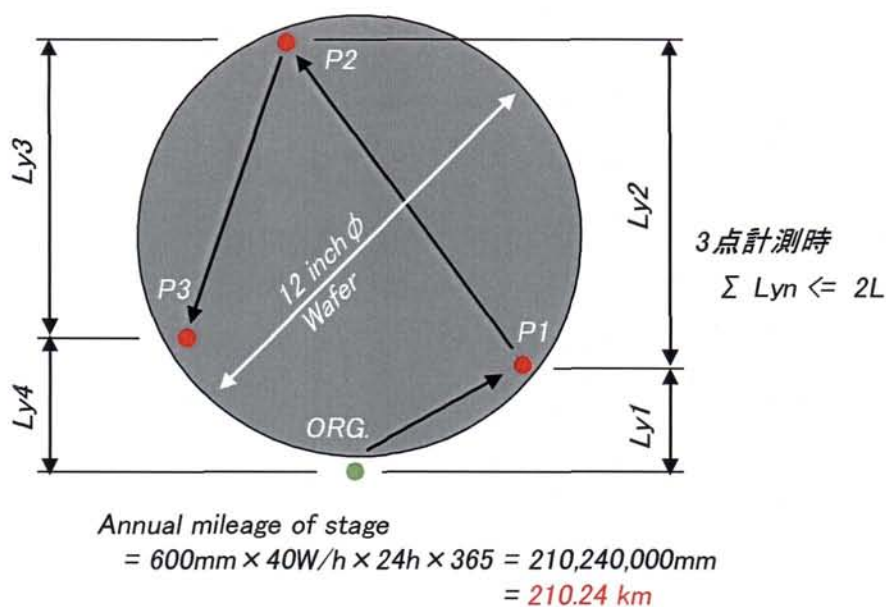


図 5.1 生産ラインで稼働している CD-SEM のウェハ 3 点計測図

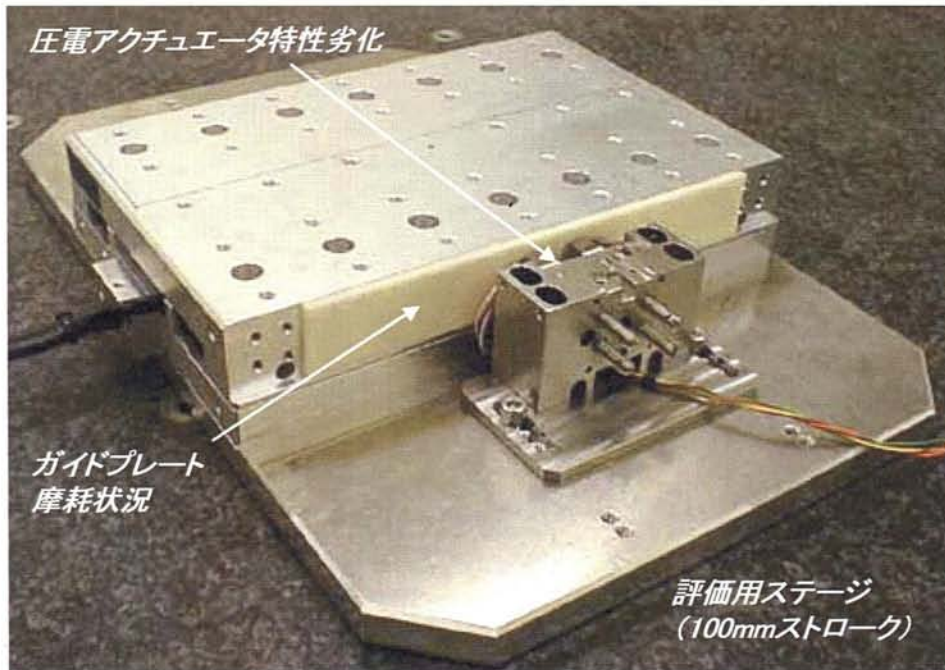


図 5.2 連続駆動試験に用いた 100mm ストローク評価用ステージの外観

5.3 初期の耐久性試験結果

連続駆動試験を実施するにあたり、まず、ステージ側の摺動材料であるガイドプレートの選定を行なった。ステージ可動部重量 1.2kg、予圧力 30N、駆動周波数 25kHz、駆動電圧 210V_{pp} という駆動条件で、いずれも耐摩耗性の高い摺動材料であるアルミナセラミックス (Al₂O₃)、窒化珪素 (Si₃N₄)、アルティック (Al₂O₃-TiC) をガイドプレートとして用い、オープンループ駆動による連続駆動試験を行なったときの結果を表 5.1 に示す。なお、圧電アクチュエータ側の摺動材料には、太平洋セメント (株) 社製のアルミナセラミックスを用いた。ステージは 100mm ストロークの両端にあるリミットセンサー間を往復運動するように設定して、ストローク中間あたりの駆動速度が約 50mm/s となる様に駆動電圧を設定した。また、耐久性限界の判定条件は、駆動停止もしくは駆動速度が 10mm/s 以下となった時点としたが、結果としては、いずれの材料においても目標距離 200km の半分にも満たない状況であった。そして、連続走行が中断した時点で、摺動部に発生する摺動痕の最大摩耗深さを計測して、走行距離で除した数値をそれぞれ材料における摩耗率とした。計測には図 5.3 のサーフェスプロファイラ (Veeco 社製 WYKO NT3300) を使用した。これにより、ガイドプレート表面の 3D プロファイルを得ることができ、摺動面の摩耗状態を把握可能となる。また、2D プロファイルによる Z 方向の定量値を得ることにより、ガイドプレートの摩耗概算値を算出することも可能となった。その結果より、摩耗率が 4nm/km ともっとも低いアルミナセラミックスを今後の耐久性試験における標準材料とした。中断時のそれぞれのガイドプレート摺動面における 2D プロファイルを図 5.4 に示す。選定材料はアルミナセラミッ

クスであるが、幅 3.5mm の摺動痕域における最大摩耗深さは 250nm まで達している。圧電アクチュエータの有する伸縮変位量は約 500nm なので、この摩耗量は圧電アクチュエータの駆動力伝達に十分支障をきたすレベルである。この試験により摺動材料は選定されたが、このままでは目標とする連続走行距離に達する可能性は低い。そこで、摩耗状況を確認し、以下の変更を追加して再度試験に臨むこととした。

ガイドプレート摺動面を計測した結果、折り返し位置にあたる部分の摩耗量が異常に多いことが判明した。また、評価に使用したオープンループ制御では、ステージの加速/減速の制御を行なわない急停止である。つまり、急停止によるスリップが、ガイドプレート摺動面の激しい摩耗を引き起こす原因と考えられる。よって、連続駆動試験では、常に加速/減速の制御を行なうクローズドループ制御で評価する必要があると判断した。

表 5.1 オープンループ駆動による連続駆動試験の結果

ガイド材質	走行時間	走行距離	最大磨耗量	摩耗率
アルミナセラミックス (Al_2O_3)	723h	60km	250nm	4nm/km
窒化珪素 (Si_3N_4)	138h	6km	100nm	17nm/km
アルチック (Al_2O_3-TiC)	33h	1km	10nm	10nm/km

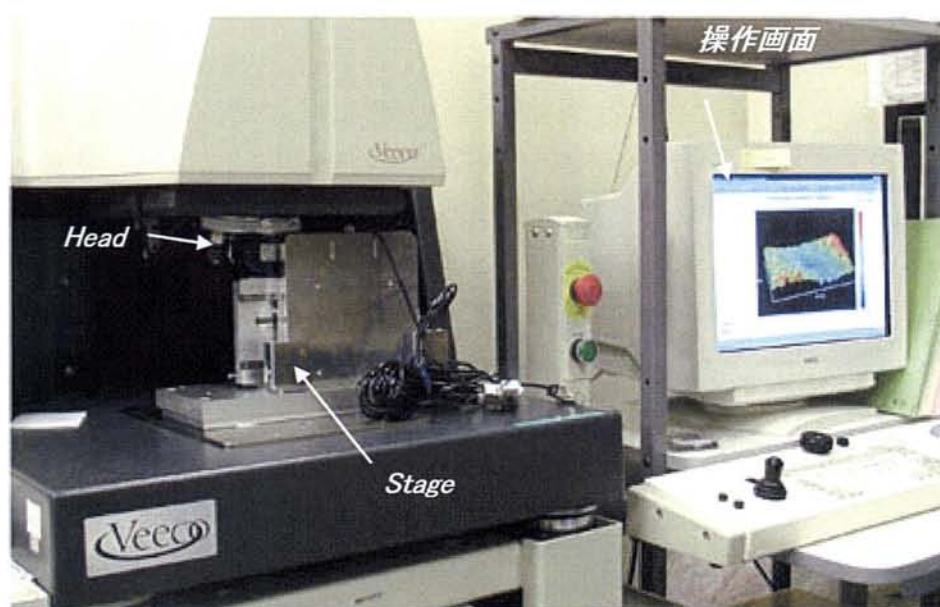


図 5.3 サーフェスプロファイラ外観

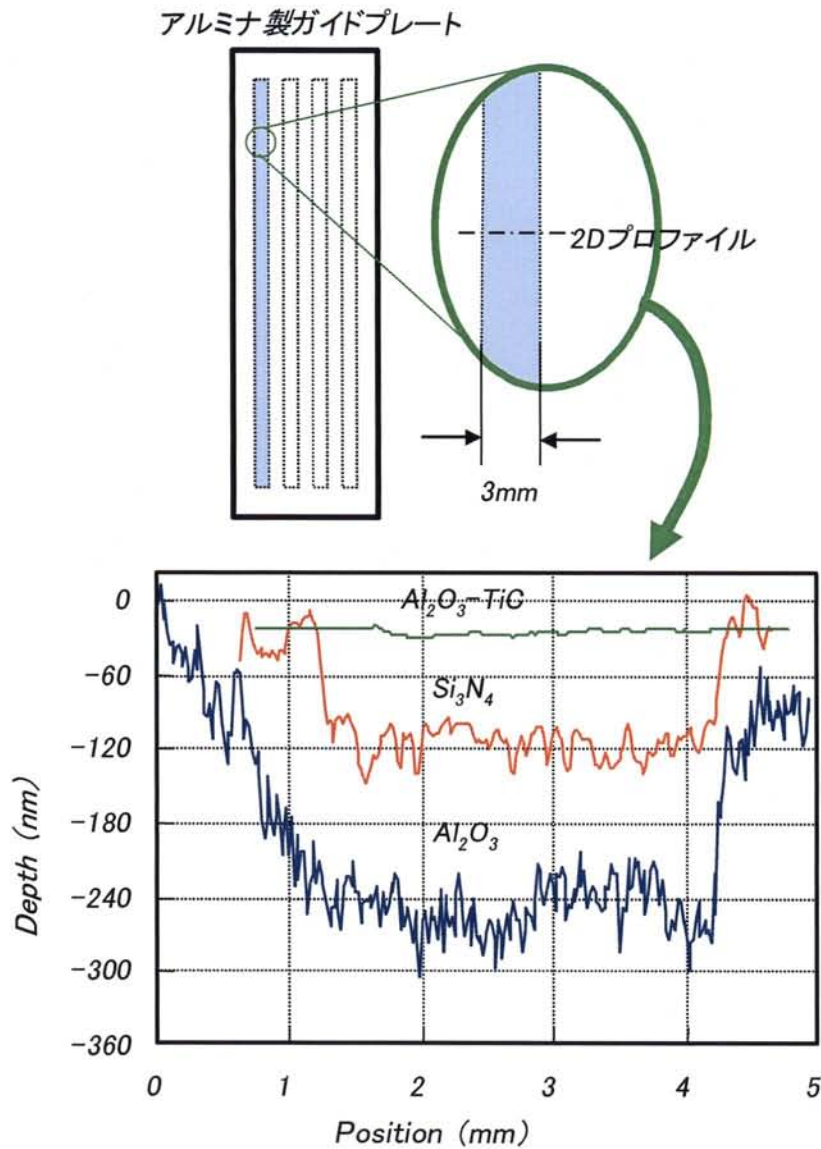


図 5.4 ガイドプレート摺動面における摩耗痕の 2D プロファイル

5.4 連続駆動試験における耐久性評価指針となる各部の考察

5.4.1 実験セットアップ

クローズドループ制御におけるステージ駆動プロファイルを図 5.5 に示す。ステージ可動部重量 1.2kg、予圧力 30N であり、NRUSM 駆動周波数 25kHz の PID によるクローズドループ（サーボ）制御を用いた。その際の加速度は 80mm/s^2 、定速度領域は 50mm/s として、減速度も同じ 80mm/s^2 で駆動した。そして、この速度プロファイルによる 90mm ストロークの往復運動で 200km の走行

耐久性試験を行なった。なお、圧電アクチュエータの先端部分材料には（株）日本セラテック製ポアフリーアルミナセラミックスを、ガイドプレートには同社製アルミナセラミックス（99.5%）を使用している。結果としては、約3ヶ月間かけて200kmの駆動距離に相当する112万回の往復駆動を完了した。次節以降に耐久性指針となる圧電アクチュエータ評価とガイドプレート摩耗に関する結果を述べる。

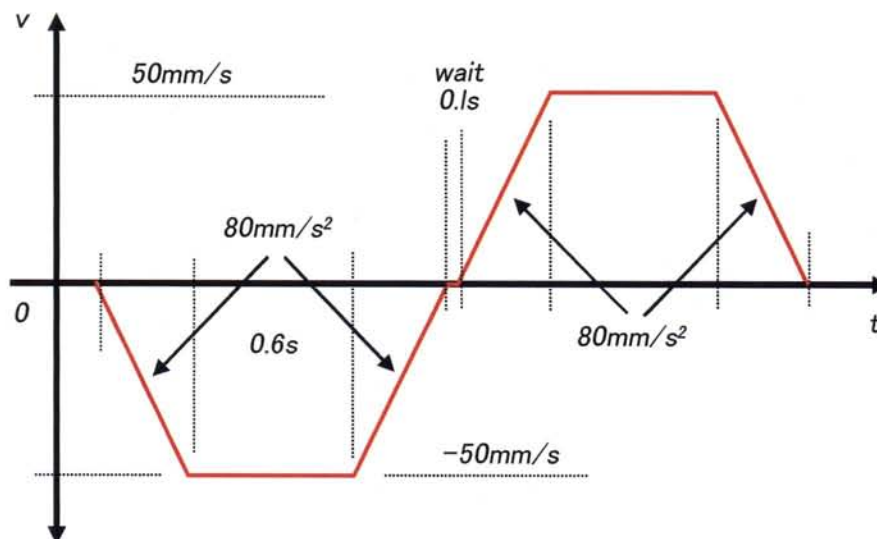


図 5.5 クローズドループ制御におけるステージ駆動プロファイル

5.4.2 圧電アクチュエータ評価

圧電アクチュエータの性能劣化に関する評価には、サーボ制御系のモニタ電圧出力を用いた。サーボモニタ電圧とは、コントローラの軌道発生部分が生成する速度要求を基準値として、現在のステージ速度との過不足分をPID制御系が算出する。その算出値はNRUSMドライバーへ出力される。この際の算出値を±10Vの範囲で別途出力しているのがサーボモニタ電圧である。圧電アクチュエータの効率が低下するとサーボモニタ電圧は上昇し、逆に、効率が向上すると電圧は下降することになる。故に、走行耐久性試験の開始時と終了時のモニタ電圧を比較することで、圧電アクチュエータにおける効率変化が確認できる。表 5.2 に、今回の連続駆動試験で使用した2種類の圧電材料に関する諸特性を示す。どちらも太平洋セメント（株）社製であり、圧電アクチュエータとしては表中のD材が一般的に使用されている。これは、等価圧電定数がNA材の2倍弱あるので、同一電界強度では、その比率に準じた変位を取り出せるからである。しかし、結論から言うと、200kmの走行耐久を完了したのはNA材によるNRUSMであった。図 5.6 に、D材で構成されたアクチュエータによる連続駆動試験時のサーボモニタプロファイルを示す。これは、時間的に連続した往復駆動時のプロファイルを重ねたものである。この図に示されている通り、走行耐久性試験は、実験を開始してから僅か数分後にサーボ制御系の偏差エラー検出により停止した。図 5.7 にはNA材のサーボモニタプロファイルを占めず。こちらは、実験開始時のプロフ

ファイルと 200km 終了時のそれを重ねたものであるが、これからすると素子における効率変化は感じられない。走行耐久性試験における D 材と NA 材を使用した際の違いを探る目的で、図 5.8 に示すような測温抵抗体 (Pt100) を用いた素子温度計測を実施した。図 5.9 に計測結果を示す。NA 材における素子表面の温度上昇は 2° 程度で飽和しているのに対して、D 材素子は 40° 以上の温度上昇を起こしている。そして、電源を切り暫くした後に駆動させると、D 材は元の良好な動作状態に復帰した。これより、素子の AC 損失分である誘電正接 ($\tan \delta$) による発熱が、層間接着剤の軟化を招き、素子変位がそこで失われたことで動作不良を起こしたと判断した。

表 5.2 連続駆動試験で使用了 2 種類の圧電材料に関する諸特性

Constants	D	NA
D_{15} (nm/V)	1010	580
$\tan \delta$ (%)	2.0	0.5

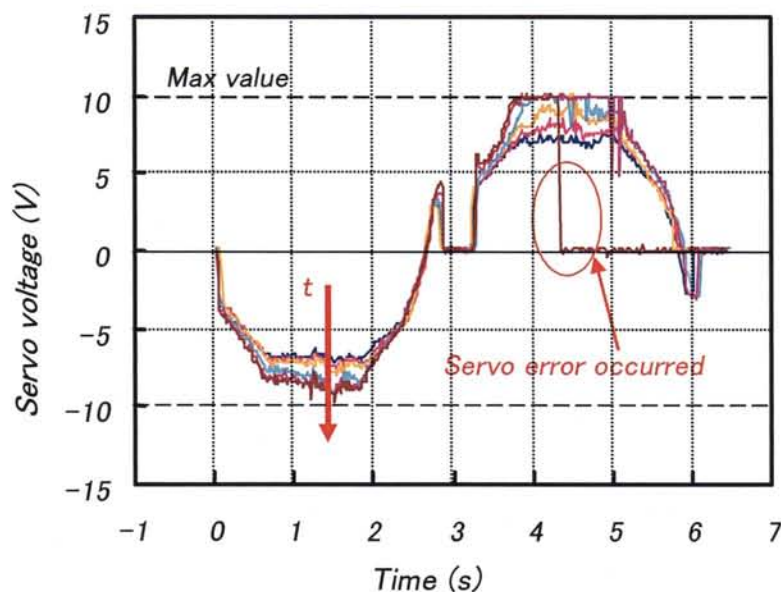


図 5.6 D 材アクチュエータによる連続駆動試験時のサーボモニタープロファイル

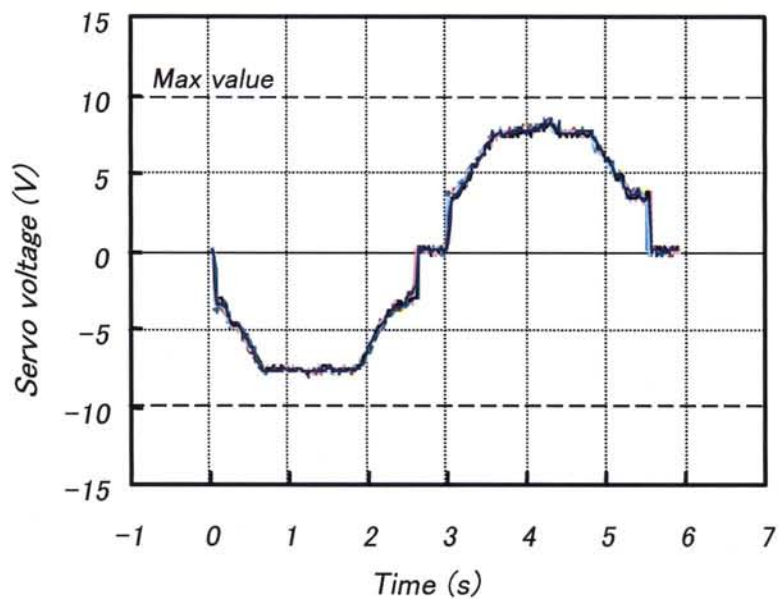


図 5.7 NA 材アクチュエータによる連続駆動試験時のサーボモニタプロフィール

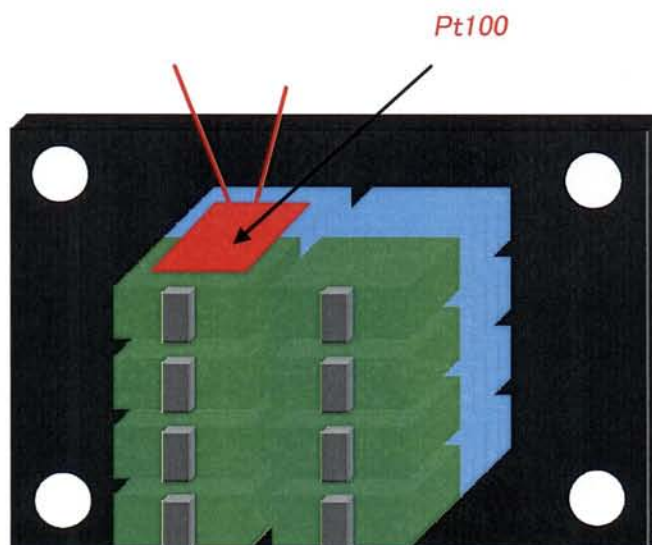


図 5.8 測温抵抗体 (Pt100) を用いた D 材素子と NA 材素子の温度計測

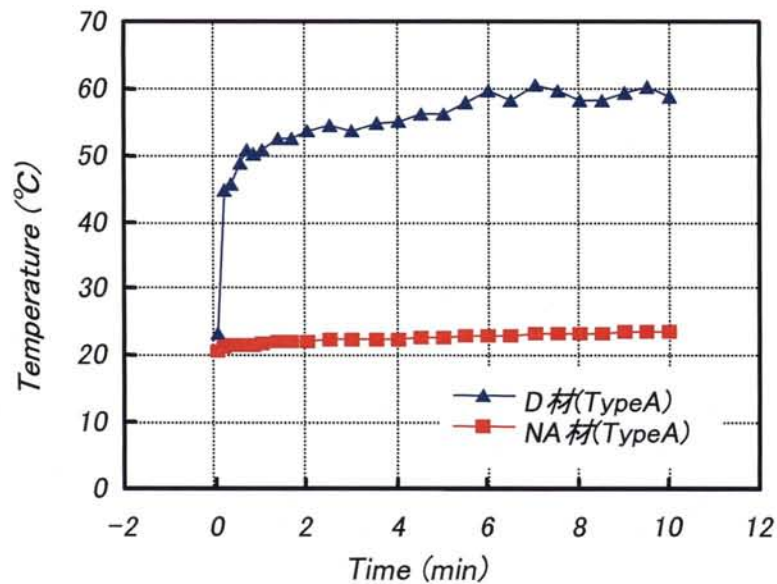


図 5.9 D材素子とNA材素子の駆動時における表面温度上昇

5.4.3 ガイドプレート評価

図 5.10 に 200km 連続駆動後のガイドプレートの表面計測結果を示す。加減速/停止部および等速領域では、摩耗の質と共に量の違いがはっきりと確認できる。等速領域での摩耗深さが約 50nm であるのに対し、往復運動のために駆動方向が反転する加減速/停止部の摩耗深さは最大で約 110nm に達していた。よって、伸縮素子の最大変位量が約 500nm であることを考慮し、それに対する摩耗許容量を 60%と仮定すると、現状の摩耗レートでは約 600km が走行限界と判断される。図 5.11 には、耐久性試験における摩耗レートの計測結果を示す。同図より、摩耗状態は、急激な傾きを持つ初期摩耗と、緩やかな傾きの定常摩耗の 2つの領域に分かれていることが確認できる。この傾向は、一般的摺動材の摩耗レートと良く似ている。ちなみに、初期摩耗とは、研磨加工されたガイドプレート表面および圧電アクチュエータ先端の未使用面同士の摺動により、互いの突起が擦れ合って接触面、つまり「なじみ面」を形成するまでの期間であり、ここでは激しい摩耗を生じる。一方、定常摩耗は初期摩耗を過ぎた後の期間であり、初期摩耗に比べて摩耗が小さい。この摩耗レート計測は、その摩耗の本質的な部分を把握するには非常に都合が良く、且つ、時間短縮となる。

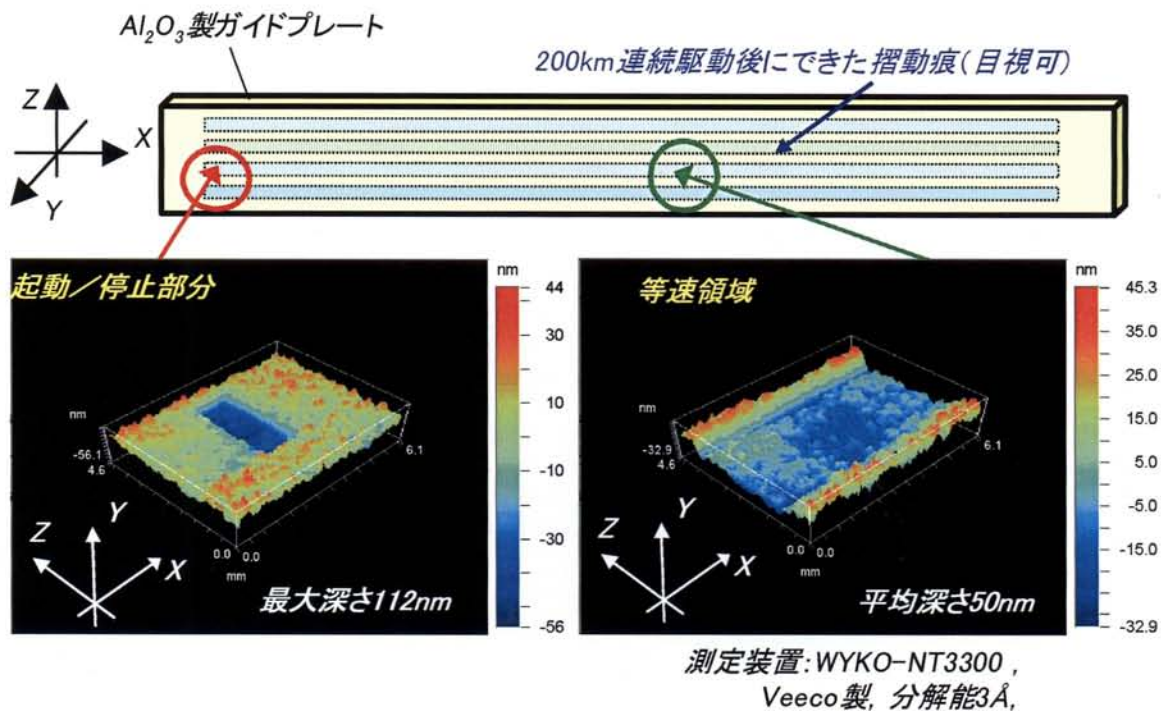


図 5.10 200km 耐久性試験におけるガイドプレート表面の 3D プロファイル

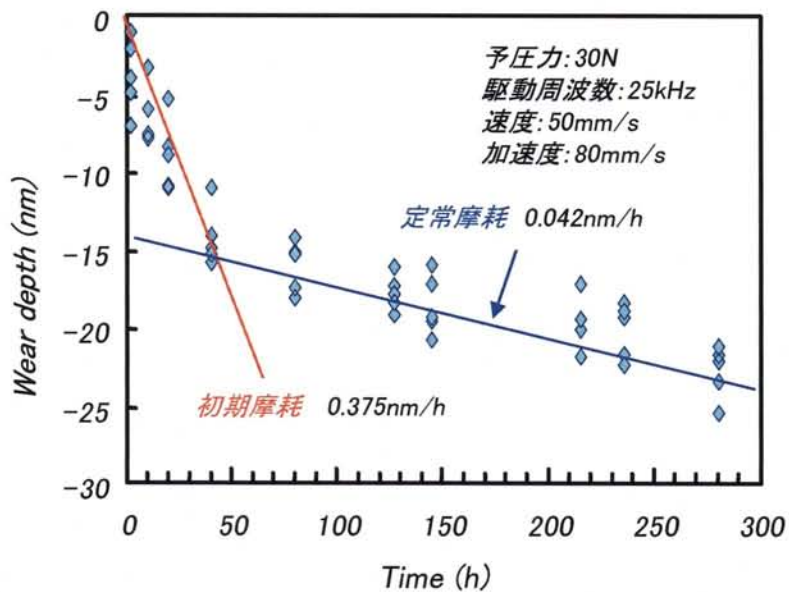


図 5.11 200km 耐久性試験における摩耗レートの計測結果

5.5 真空耐久性試験

5.5.1 一般的な真空領域における評価

前節までの 200km 連続走行の耐久性試験では、アクチュエータ変位性能に劣化は無く、耐久性を向上させる為にはガイドプレートの摩耗抑制することが重要だとわかった。しかし、これは大気中での結果である。また、NRUSM の目的としている荷電粒子応用装置のステージは真空中に設置される。そして、その環境とは 10^{-3} Pa 以下の減圧環境である。そこでは、蒸気圧が高い物質からは様々な分子が揮発し、そして浮遊するため、物理的に異なった現象が起きると考えられる。それらの影響を把握し、その対策を明らかにすることを目的として実験を行なった。^[4]

最初の実験では、走査電子顕微鏡（日本電子（株）製：JSM848）の真空チャンバー内にステージを設置し、その環境を 7×10^{-4} Pa とした状態で連続駆動試験を行った。図 5.12 に装置外観および NRUSM 駆動のセラミックステージを示す。ステージシステムは XY の 2 軸構成であり、各軸の位置計測にはレーザ干渉計を使用している。なお、本実験では Y 軸（下軸）のみを使用した。排気系構成は、ターボ分子ポンプ（島津製作所製：TMP-403M）とロータリーポンプ（ULVAC:G-100D）を用い、チャンバー到達真空度を 4×10^{-5} Pa の真空度として評価を行った。図 5.13 に駆動開始から 10 分おきに観測したサーボモニタ電圧波形を重ねて示す。時間の経過と共に、徐々に波形の乱れが大きくなっているのが分かる。このサーボモニタ電圧値の上昇から、ガイドプレートの摺動面あるいは圧電アクチュエータの性能に何らかの変化が起こっていることが考えられたため、チャンバーを大気開放し、それぞれ観察を行なった。

図 5.14 に取り出したガイドプレートの写真を示す。ガイドプレートの摺動面には、茶色いハイドロカーボン系と考えられる物質がアクチュエータ接触部と同じ場所に付着していた。この付着物が原因で、アクチュエータの発生変位伝達部である接触部に異常が生じ、サーボモニタ電圧の上昇や乱れが発生したと推測される。この評価に使用している SEM は製造から 20 年を向かえる製品で、油拡散ポンプにより排気系が構成されていたものをターボ分子ポンプに交換したものである。内部洗浄は隔々まで手が回らなかったため、真空配管内にオイルが付着していた懸念がある。そこで、次に、ハイドロカーボン系の浮遊分子がより少ない真空環境での連続駆動試験へ移行することにした。図 5.15 は、2 回目の真空環境下の連続駆動試験で使用したテスト用チャンバーである。未使用でかつ構造がシンプルのため、ハイドロカーボン系の浮遊分子による心配は少ない。今回は到達真空度 1×10^{-4} Pa の環境下で連続駆動試験を行った。ここでは、ターボ分子ポンプとロータリーポンプの間に油の拡散を防止するフォアライントップ（ULVAC:OFI-200C）も構成した。なお、ステージ及びガイドプレート以外は、前回の連続駆動試験で用いたものと同じものを使用した。さらに、ガイドプレート表面への付着物を防止し、常に清浄な状態に維持するためのガイドクリーニング用のワイパーを装備した場合としない場合で、それぞれサーボモニタ電圧の観測を行なった。なお、ワイパーとしては、レーザ反射用ミラーをクリーニングするために用いられる繊維の離脱しにくいレンズクリーナー（Kodak 製）を使用した。

図 5.16 には、ワイパーを装備した場合としない場合での、サーボモニタ電圧波形を示す。ワイパーの装備により、駆動時間が飛躍的に向上して、等速駆動部分の電圧値にはほとんど変化がないことが確認できる。これはワイパーによって、ガイドプレート表面が清浄さを保ち、モータの

摩擦状態が変化しなかったためだと考えられる。しかし、減速・停止部に関しては電圧値の変動が大きく、アクチュエータの発生変位の伝達効率に変化もたらした何らかの現象が起きているといえる。そこで、駆動停止後、ガイドプレートの表面状態の評価を行った。

各部の観察を行なったところ、ワイパーおよびガイドプレート摺動面ともに茶色く変色していた。これはワイパーによる付着物の拭き取りが限界を超えて、ガイドプレート表面への付着物が堆積したものだと考えられる。更に、この付着物をアルコールによって洗浄すると、接触面に白く筋が入っているのが確認された。図 5.17 に、ワイパーを装着し、連続駆動試験を行なった後のガイドプレート表面の 3D プロファイルを示す。摺動面の加減速/停止部では摩耗による溝ができ、等速度部分に関しては付着物が堆積していることがわかる。なお、図 5.18 の 2D プロファイルから、加減速/停止部の摩耗深さは約 100nm、付着物の堆積は約 50nm であることが確認できた。駆動中のサーボモータ電圧の上昇が、加減速/停止部で発生していたことから、スリップが摩耗の原因であったことは明らかである。

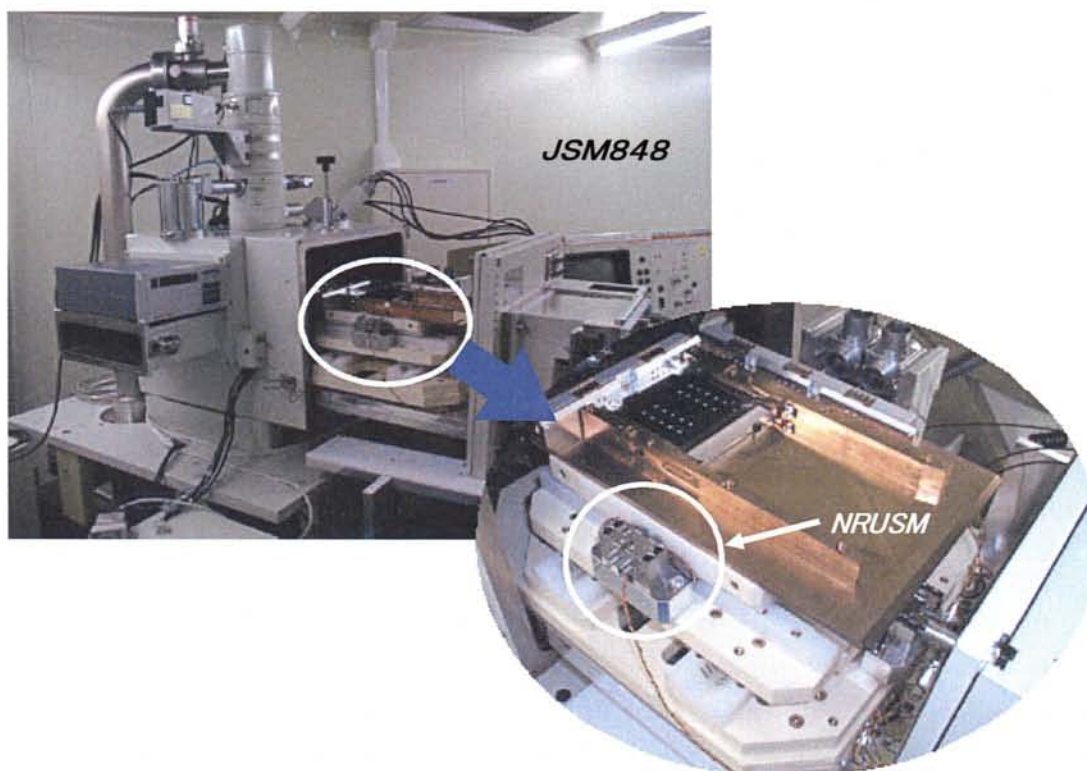


図 5.12 真空内耐久性試験に使用した JSM848 外観とステージ拡大図

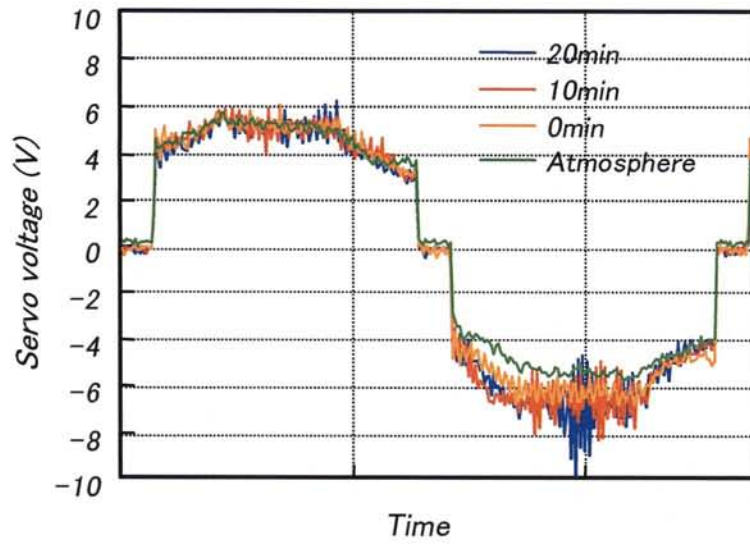


図 5.13 真空内耐久性試験における駆動開始から 10 分毎のサーボモニタ電圧

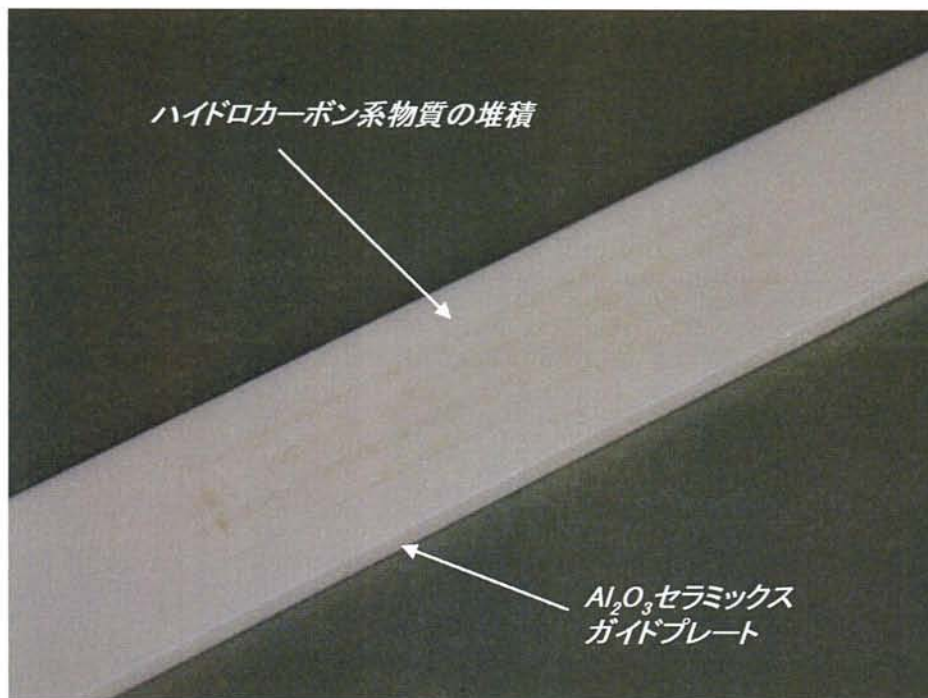


図 5.14 真空内耐久性試験後のガイドプレート外観



図 5.15 真空内耐久性試験に使用した真空チャンバー外観

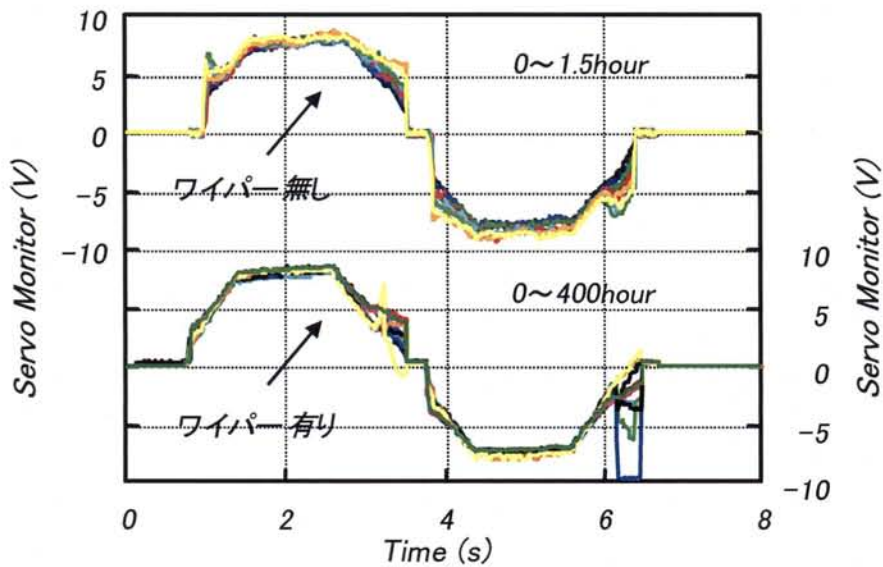


図 5.16 真空内耐久性試験におけるワイパー有無でのサーボモニタ電圧比較

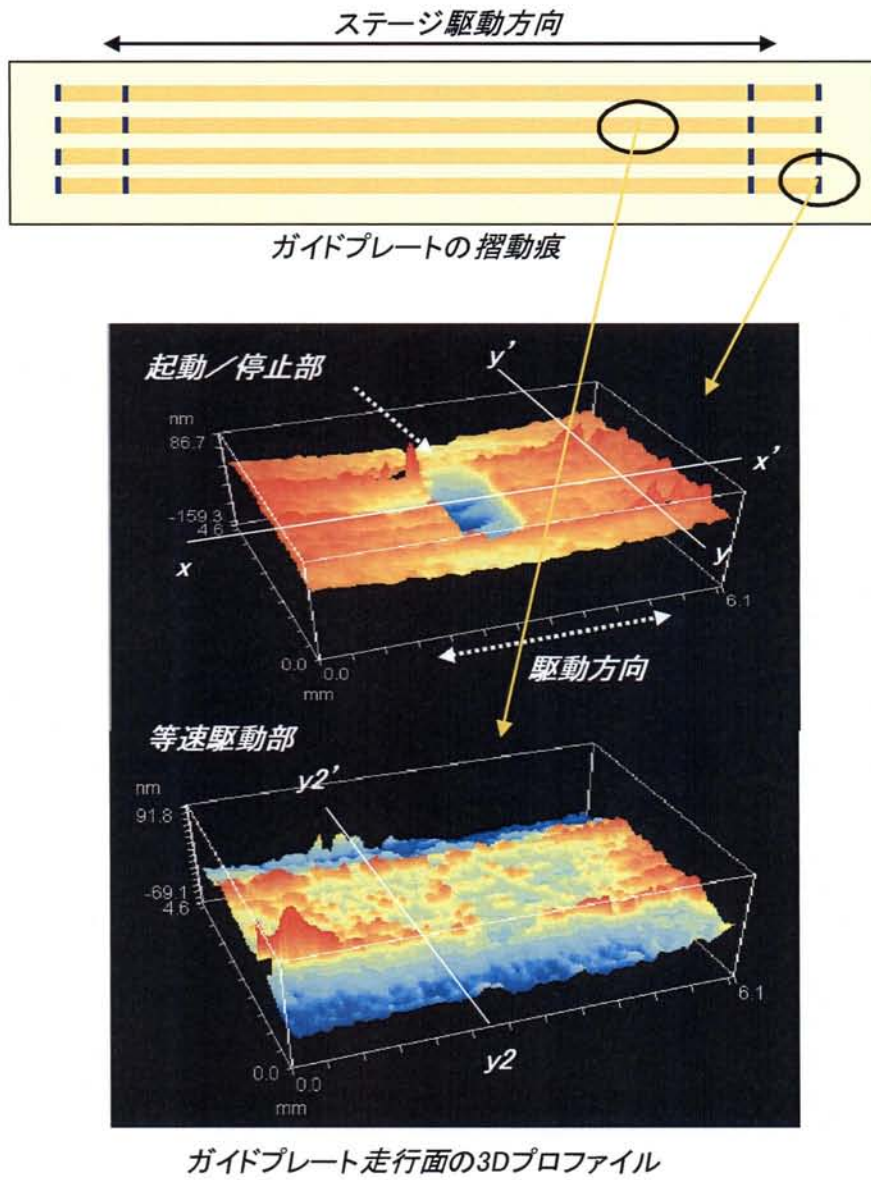


図 5.17 ワイパー装着による耐久試験後のガイドプレート表面の 3D プロファイル

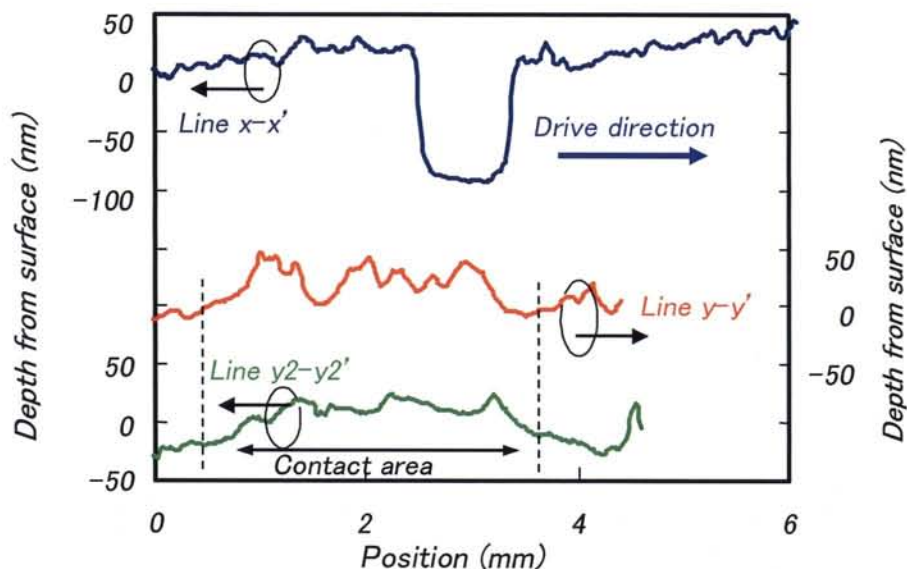


図 5.18 ワイパー装着による耐久試験後のガイドプレート表面の 2D プロファイル

5.5.2 超高真空領域における評価

摺動面への付着物の堆積をさらに抑止するために、真空度が 3×10^{-6} Pa の超高真空環境下で連続駆動試験を行なった。図 5.19 に超高真空装置の外観を示す。このときは、0.93km 走行（7750 往復）した時点でステージが停止した。図 5.20、5.21 には、サーボモニタ電圧波形の経時変化および真空度の遷移に伴う等速駆動領域のサーボモニタ電圧平均値の変化を示す。それらより、時間の経過とともに電圧値の上昇と、真空度が高くなっているにもかかわらず、電圧値の上昇が発生している様子が確認できる。図 5.22 に、連続駆動試験後のガイドプレート表面と未走行領域の 3D プロファイルを示す。走行距離が少ないので加減速/停止部の摩耗は 10nm 以下であったが、摺動面には付着物の堆積が確認された。よって、次に堆積物の XPS 解析を行なうことにより、発生源の特定を試みた。図 5.23 に XPS による堆積物の解析結果を、その特異点部分の拡大図を図 5.24 に、それぞれ示す。F および Al のピークが確認された。F に関しては、クロスローラーガイドの潤滑油であるファンブリン (CF, CFO, CF₂, CF₃, C₂F₄, C₂F₅ 等) が、Al に関しては、ガイドレールや圧電アクチュエータの摩擦材の材料である Al₂O₃ がそれぞれ発生源であると考えられる。

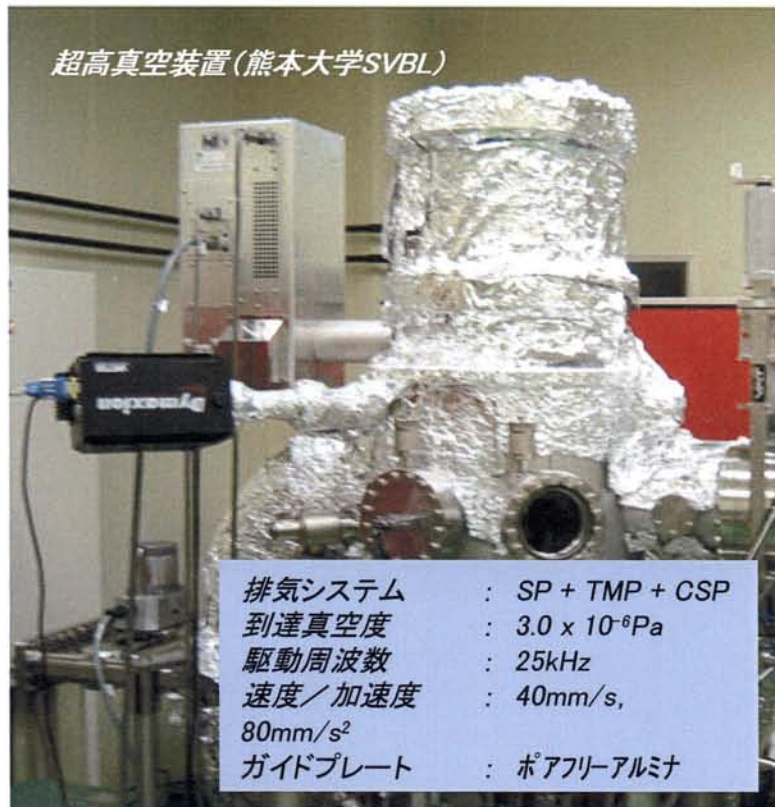


図 5.19 真空耐久試験で使用した超高真空装置の外観

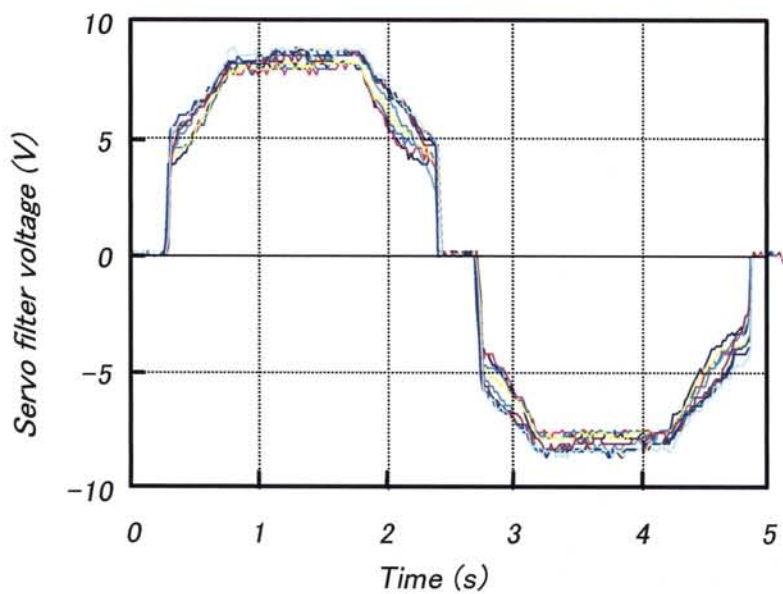


図 5.20 サーボモニタ電圧波形の経時変化

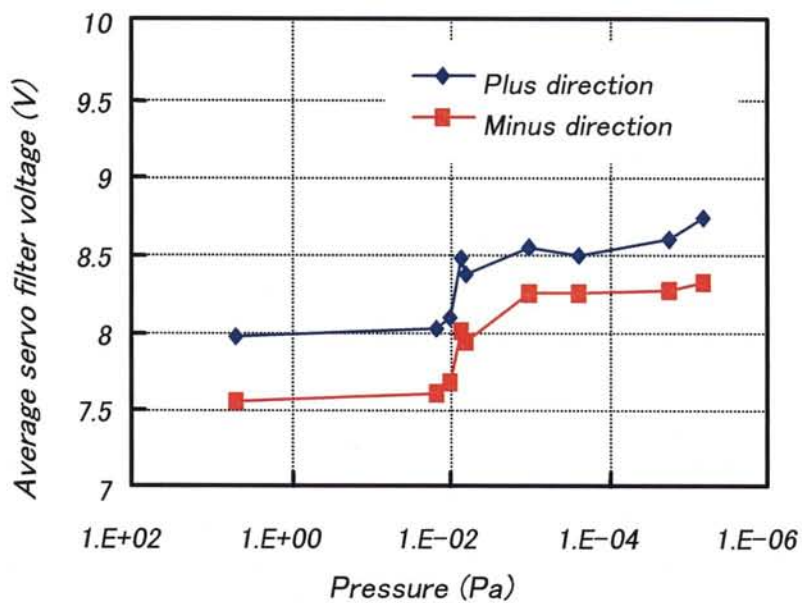


図 5.21 真空度遷移と等速駆動領域のサーボモニタ電圧平均値の関係

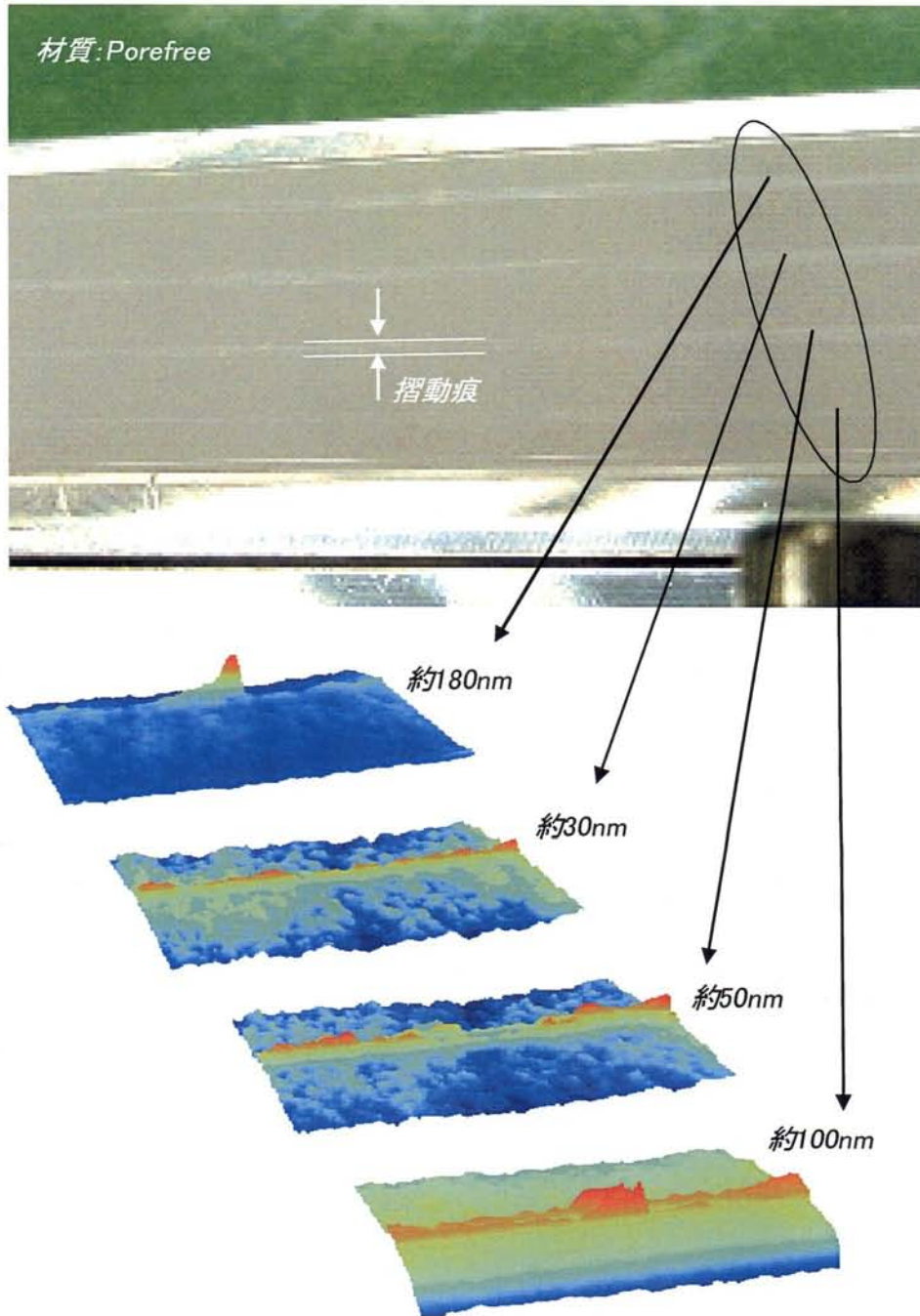


図 5.22 連続駆動試験後のガイドプレート表面と未走行領域の 3D プロファイル

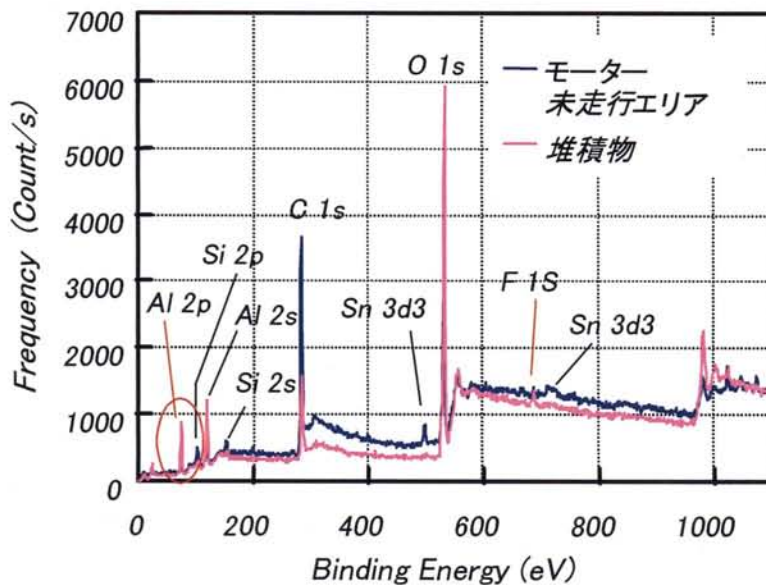


図 5.23 XPS によるガイドレール上の堆積物解析結果

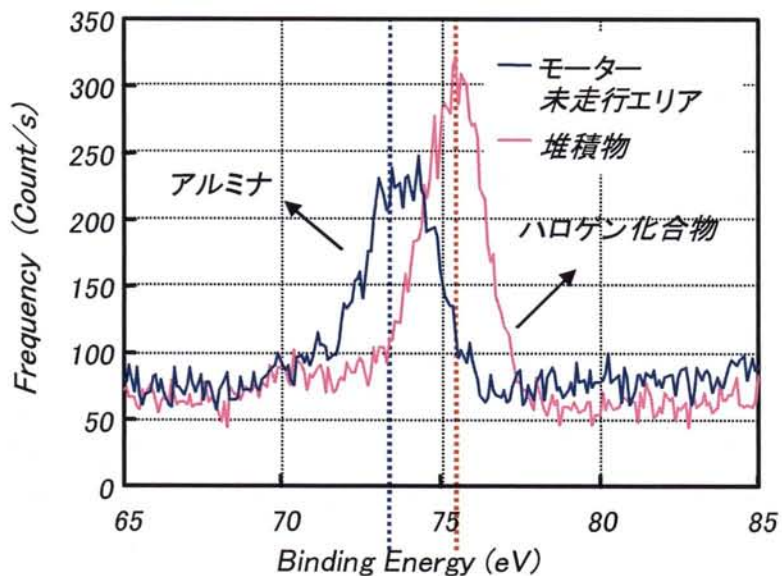


図 5.24 XPS によるガイドレール上の堆積物解析結果 (特異点拡大図)

5.6 結言

本章では、NRUSM の適応装置を半導体生産ラインにおける CD-SEM と定めて、それに適合する実用化耐久性を試算すると共に、同等の評価を行った。その過程を通して、接触部における最適材質、圧電素子材料の改良、駆動評価方法の確立など、研究の最終目標に直結する重要な成果を得た。摺動材料としてはアルミナセラミックス、圧電素子材料としては低誘電正接材料が性能追求と実用化達成を両立させる為には不可欠であると判明した。また、それらを用いた 200km 走行耐久性試験においては、アルミナセラミックス製ガイドプレートの停止／往復部では約 110nm、定速度走行部でも 50nm の摩耗が発生していることを確認した。これにより、この摩耗問題を解決しなければ、目的とする CD-SEM に NRUSM 駆動ステージを導入しても、その耐久性は約 3 年程度と試算された。また、真空環境下あるいは超高真空環境下における耐久性評価では、ワイパー機構を採用したことで、走行距離を飛躍的に伸ばすことができた。しかしながら、いずれの連続走行試験においても、ガイドプレートへの堆積物により停止に至るという結果に終わった。

よって、大気中の耐久性を向上させるためにはガイドプレートの摩耗対策を、真空環境下における耐久性を向上させるためにはガイドプレートへの堆積物対策を、それぞれ行なう必要があるということが本章の結論である。

参考文献

- [1] <http://www.tky.3web.ne.jp/~usrmotor/historyj.html>
- [2] <http://www.semtech.org/>
- [3] 大高正, “測長技術と精度”, 熊本県地域結集型共同研究事業 第 1 回シンポジウム資料, pp. 7-10, 2000.
- [4] 橋口弘幸, “非共振型超音波モータの真空中における駆動耐久性向上に関する研究”, 熊本大学大学院自然科学研究科修士論文, 2004.

第6章 接触部における摩擦メカニズム

6.1 緒言

摩擦とは、固体の一部が摩擦によって取り去られる減量現象であり、NRUSM とガイドプレートの接触部においても同様の現象が生じている。第5章で述べたように、NRUSM の耐久性及び信頼性も、ガイドレールとの接触部における摩擦に大きく左右されることが判明した。そのなかでも、台形型速度プロファイルによる連続駆動試験の結果においては、起動/停止部に相当するガイドプレート部の摩擦が激しく、これが耐久性を決定する要因となった。仮に、すべりが無い、つまりガイドプレートと圧電素子先端部の移動速度が同一な状態を構築できれば、摩擦の大部分を占める摺動摩擦に関する抑圧が可能と予想される。本章では、接触部における力学的モデルを構築し、すべりを生じ始める理論値と実測値の比較検討を行い、あわせて、すべりを抑圧した駆動方法も提案する。

6.2 摩擦モデルの構築

6.2.1 先端軌道モデル

NRUSM の剪断素子と伸縮素子が 90° 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 6.1 に示された 2 つの軌道が考えられる。変位モデル (Displacement-model) とは単位時間当たりの変位量から駆動速度を求めるものであるが、単振動モデル (Vibration-model) ではガイドプレートとの接触点におけるアクチュエータ速度を基に駆動速度を求めるモデルとなっており、一般的な単振動運動の速度ベクトルに相当する。そして、駆動原理に従った剪断・伸縮変位が得られている場合、それぞれのモデルにおけるステージ駆動速度は次式で表される^[1]。

$$\text{変位モデル} \quad v_d = 2 \cdot 2r \cdot f = 4fr \quad (6.1)$$

$$\text{単振動モデル} \quad v_v = r\omega \quad (6.2)$$

ここで、 f : 駆動周波数, r : 剪断方向の楕円半径, ω : 角振動数である。(6.1) 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。(6.2) 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。

第 2 章における変位解析により、ステージ駆動時の剪断・伸縮変位間での印加電圧位相差 ($\phi = 90^\circ$) と NRUSM 先端部での変位発生は、駆動周波数により時間的に大きなズレを発生することが明らかとなっているため、軌道モデルには図 6.1 に示すような楕円軌道の傾斜や回転の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実効変位量が減少し、また、単振動モデルでは速度ベクトルが減少するため、いずれのモデルでも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。

$$\text{変位モデル} \quad 0^\circ \leq \phi \leq 180^\circ \text{ のとき} \quad v_d = 2fr(1 + |\cos(\phi - 90)|) \quad (6.3)$$

$$180^\circ < \phi < 360^\circ \text{ のとき} \quad v_d = -2fr(1 + |\cos(\phi - 90)|) \quad (6.4)$$

$$\text{単振動モデル} \quad v_v = r\omega \cos(\phi - 90) \quad (6.5)$$

$r = 0.5\mu\text{m}$ 、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 $0\mu\text{s}$ 一定として 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 6.2 の駆動速度の試算結果を得る。いずれのモデルも高周波数領域での速度減少と駆動反転を示しているが、変位モデルを用いることで、第 2 章の図 2.15 における急激な速度減少や駆動反転をほぼ説明できる。

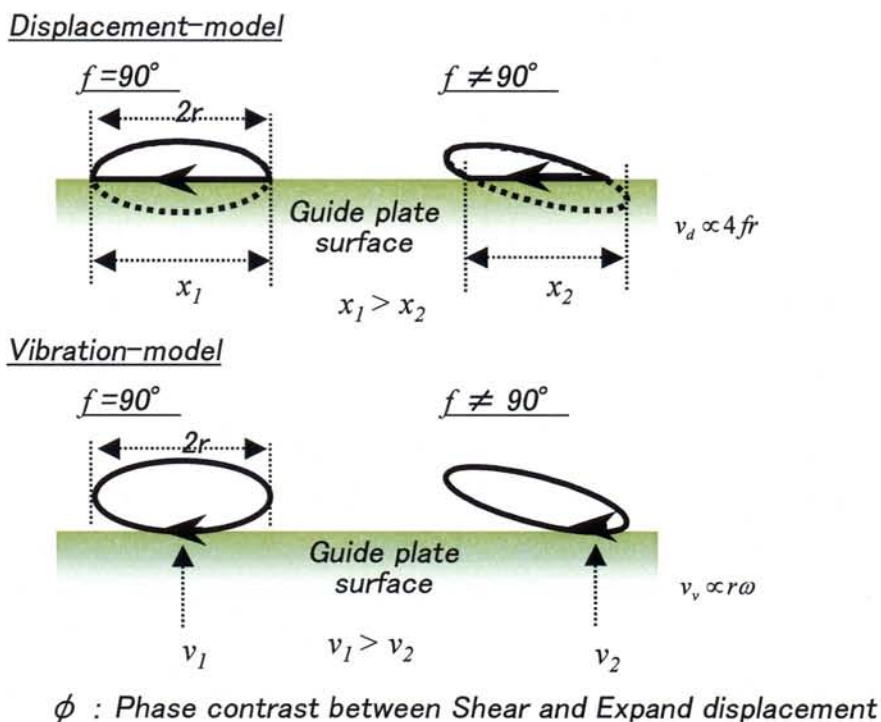


図 6.1 NRUSM の発生変位軌道と位相変化の影響

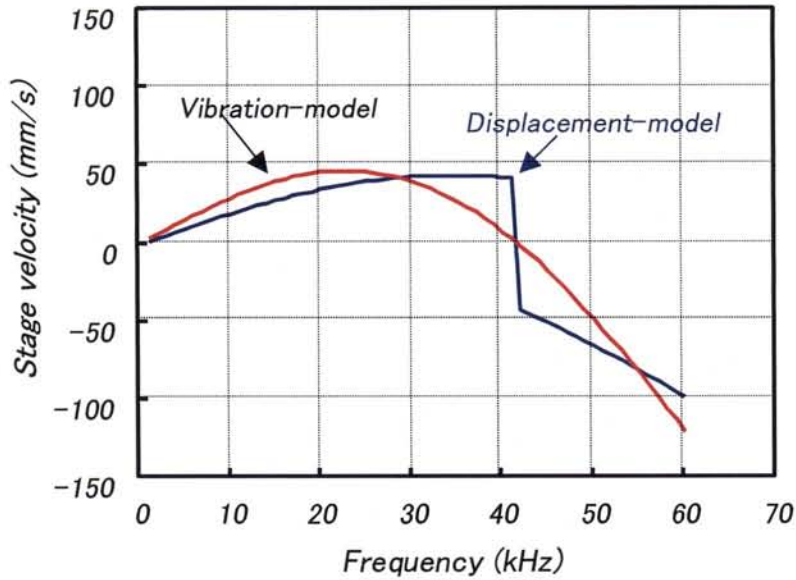


図 6.2 駆動速度の試算結果

6.2.2 力学モデル

本節では、NRUSM がステージを駆動する部分に関して、すべりを考慮した力学的モデルを構築して、すべらない限界条件を試算する [2]。

図 6.3 に示すように、ステージ上のある点 P を慣性系 $0 - xy$ から見た座標は $r(x, y)$ であり、同じ点を圧電アクチュエータの摩耗材上にとった別の座標系 $0' - x'y'$ から見たときは $r'(x', y')$ となる。座標系 $0' - x'y'$ は、慣性系 $0 - xy$ に対してその座標軸の向きを変えずに並進運動するものと仮定する。座標系 $0' - x'y'$ の座標軸の向きは任意に選べるので、慣性系の座標軸の向きに平行に選んだとしても今から立てるモデルが一般性を失うことはないと考えられる。慣性系 $0 - xy$ からみた座標系 $0' - x'y'$ の原点の座標を r_0 とすると、2つの座標系の関係は、 $r_0 = r + r'$ 、あるいは $x_0 = x + x', y_0 = y + y'$ となる。ここで、ステージの重量を m とし、ステージが y 軸方向に運動することはないと仮定すると、 x 軸に関するステージの運動方程式は次式となる。

$$F = m \frac{d^2 x_0}{dt^2} = m \frac{d^2 (x + x')}{dt^2} \quad (6.6)$$

$$m \frac{d^2 x'}{dt^2} = F - m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (6.7)$$

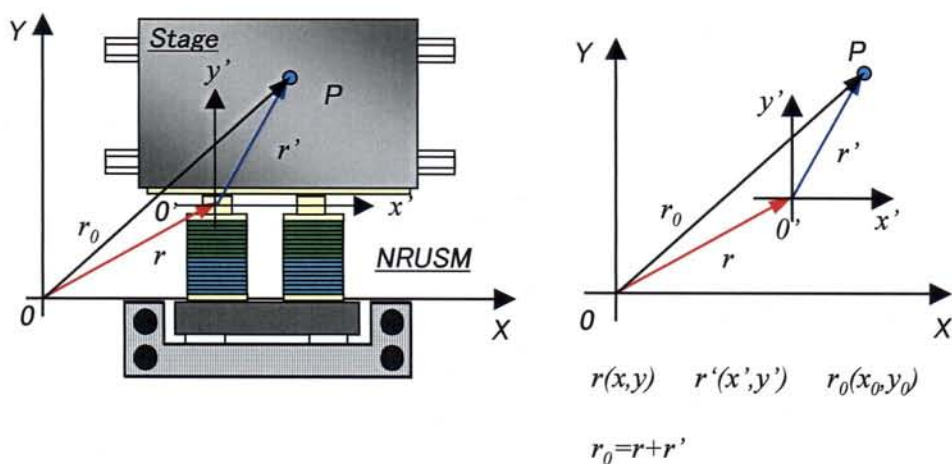


図 6.3 ステージと圧電アクチュエータの座標

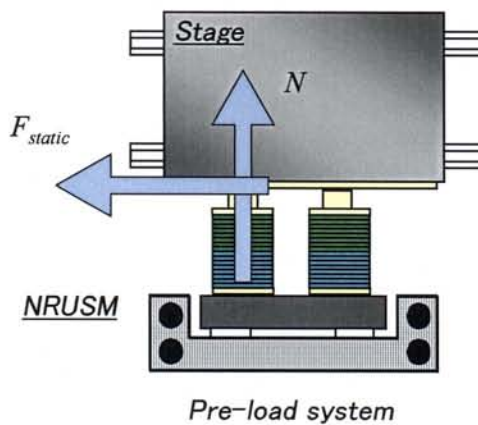


図 6.4 ステージと圧電アクチュエータにかかる力

ここで、圧電アクチュエータ先端部とガイドプレートの間ですべりが発生しないためには、 $dx'/dt = 0$ でなければならないので、

$$0 = F - m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (6.8)$$

そして、図 6.4 より $F = -F_{static}$ であるから (F_{static} : 静止摩擦力)、

$$F_{static} = -m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (6.9)$$

ここで、 $F_{static} \leq \mu N$ であるから (μ : 摩擦係数、 N : 予圧力)、

$$\mu N \geq -m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (6.10)$$

また、圧電アクチュエータに印加される電圧は正弦波であり、圧電アクチュエータ先端の摩耗材の位置 x 、速度 dx/dt 、加速度 d^2x/dt^2 の関係は図 6.5 となる。よって、

$$\mu N \geq -m(-A\omega^2 \sin(\omega t - \frac{T}{4})) \quad (6.11)$$

$$\mu N \geq m(A\omega^2 \cos \omega t) \quad (6.12)$$

右辺の最大値および $\omega = 2\pi f$ より、接触部にすべりが発生しないための駆動周波数 f の条件は以下のようになる。

$$f \leq \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu N}{mA}} \quad (6.13)$$

ここで、 $\mu = 0.3$ 、 $N = 40$ 、 $m = 1.2$ kg、 $A = n \times d_{15} \times V_0 = 8 \times 580 \times 10^{-12} \times 90$ m (n : 剪断素子積層枚数、 d_{15} : 剪断圧電定数、 A : 圧電アクチュエータの変位振幅) とすると、駆動電圧 180 V_{pp} で駆動した際のすべりの限界条件は以下となる。

$$f \leq 0.77 \text{ kHz} \quad (6.14)$$

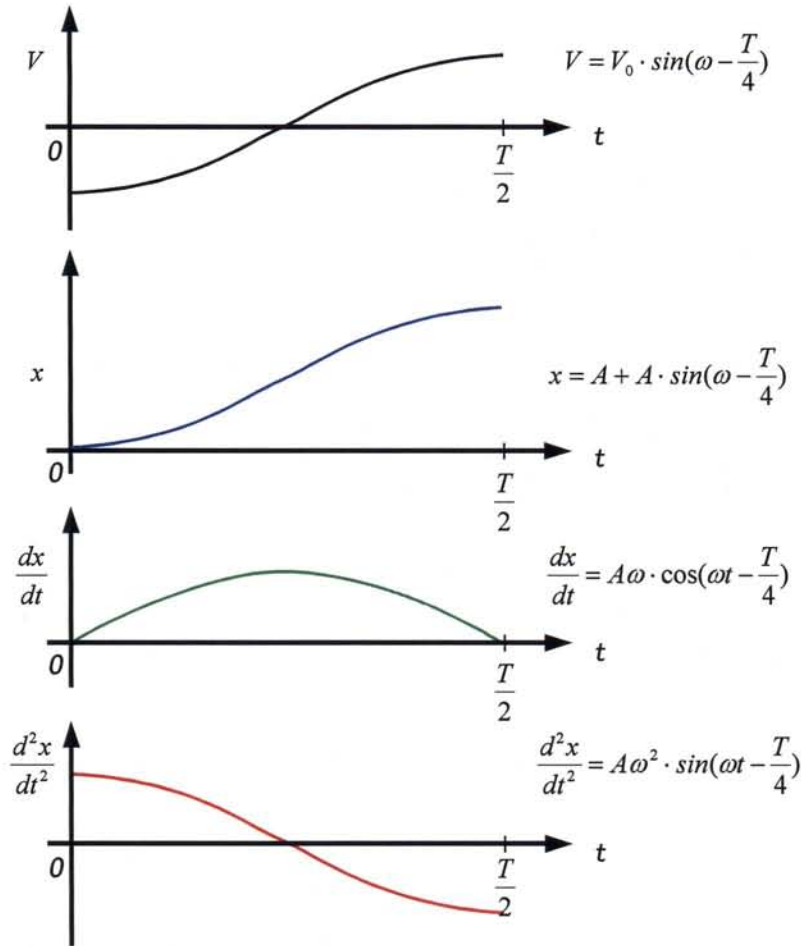


図 6.5 圧電アクチュエータへの印加電圧と先端位置、速度、加速度の関係

6.3 すべりの観測

前節の試算により、圧電アクチュエータとガイドプレートの接触点が滑らないための駆動周波数は 0.77 kHz 以下であることがわかった。よって、本節では、すべりを観測する為の実験手順とその結果に関して述べる。

図 6.6 は、伸縮電圧、剪断電圧ともに $180 V_{pp}$ という条件において、圧電アクチュエータを無負荷駆動させた場合の剪断方向変位の周波数特性である。この実験では No.6~No.9 の圧電アクチュエータ（製造ロットナンバー：A-078-01~04）を使用した。その特性は表 6.1 に記載した No.1~No.4（製造ロットナンバー：A-097-04~A-098-04）と同等のものである。同図より、駆動周波数 1 kHz のときに p-p 値で剪断方向に約 $0.7 \mu m$ 変位することが判明している。変位モデルにおいてこの NRUSM がすべり無くステージを駆動したと仮定すると、1 周期分の電圧印加により、 $0.7 \mu m \times 2 \text{ 相} = 1.4 \mu m$ ステージを駆動することになる。つまり、アクチュエータに印可する電圧を一定値として駆動周波数を試験条件とすると、数周期分の駆動をした際の移動距離が試算値に満たない状況が発生した場合、その周波数ですべりが発生したと言えることになる。すべりの測定に使用した実験セットアップを図 6.7 に示す。

NRUSMに印加する駆動電圧を、伸縮電圧 $180 V_{pp}$ 、剪断電圧 $180 V_{pp}$ として、駆動周波数を変化させた際の駆動サイクル数とステージの移動距離の関係を図 6.8 に示す。前述したように、変位モデルと仮定した NRUSM の先端変位が 100%ステージに伝達したとすると、いずれの駆動周波数においても駆動サイクル数だけでステージの移動距離は決まり、それぞれのグラフは全て重なるはずである。しかし、同図より、駆動周波数が 100 Hz と 1 kHz の場合においてグラフはほぼ重なっているが、10 kHz と 20 kHz の場合は 1 kHz の場合に比べて移動距離が減少している。この状態は、変位の伝達効率が低下してすべりが発生していると言える。つまり、1 kHz と 10 kHz の間に移動距離が減少し始める境界値 (= 静止摩擦力の限界値) が存在するはずである。

次に、各駆動周波数と印加電圧において 1 駆動サイクルだけ電圧印加した場合のステージ移動距離を図 6.9 に示す。この際、伸縮電圧には $180 V_{pp}$ を固定印加して剪断電圧のみ可変とした。同図より、剪断電圧にほとんど関係なく、1 kHz を超えたあたりから移動距離が徐々に減少していることがわかる。つまり、すべりは駆動電圧よりも駆動周波数の方が支配的であると考えられる。また、1 Hz~1 kHz まで移動距離はほぼ一定であるため、1 kHz あたりまでがすべらないで駆動できる周波数であることがわかる。つまり、1 kHz 以上で駆動すると、アクチュエータ先端部とガイドプレートの接触点では常にすべりが発生していることになる。また、すべらないで駆動できる周波数を上げるためには、摩擦係数および予圧力を大きくすること、あるいはステージの重量および圧電アクチュエータの変位振幅を小さくすることが定性的には言える。前者に関しては、予圧力の増大化や摩擦係数の高いガイドプレート材料への交換などが手法として考えられるが、接触部の摩耗を促進させるので耐久性の面から好ましくない。後者に関しては、ステージの可動部の剛性を保ったままの軽量化や駆動速度の上限値を低下させた仕様とすることなどが必要になる。いずれにしても、超音波領域の駆動周波数で、接触部がすべらずにステージを駆動することは非常に困難であると言える。

表 6.1 圧電アクチュエータの特性

素子番号	製造ロットナンバー	剪断方向変位 [μm]	伸縮方向変位 [μm]	剪断素子静電容量[nF]	伸縮素子静電容量[nF]
No.1	A-097-04	1.4	0.6	6.6	5.9
No.2	A-097-08	1.4	0.6	6.6	6.0
No.3	A-098-01	1.4	0.7	6.4	5.8
No.4	A-098-02	1.4	0.6	6.4	5.9
No.5	A-098-04	1.4	0.6	6.4	5.9

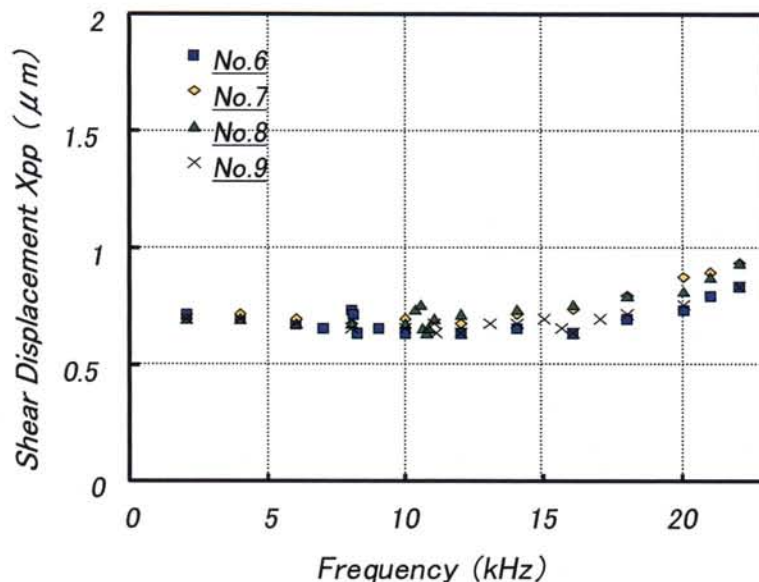


図 6.6 無付加時の駆動周波数と先端変位の関係

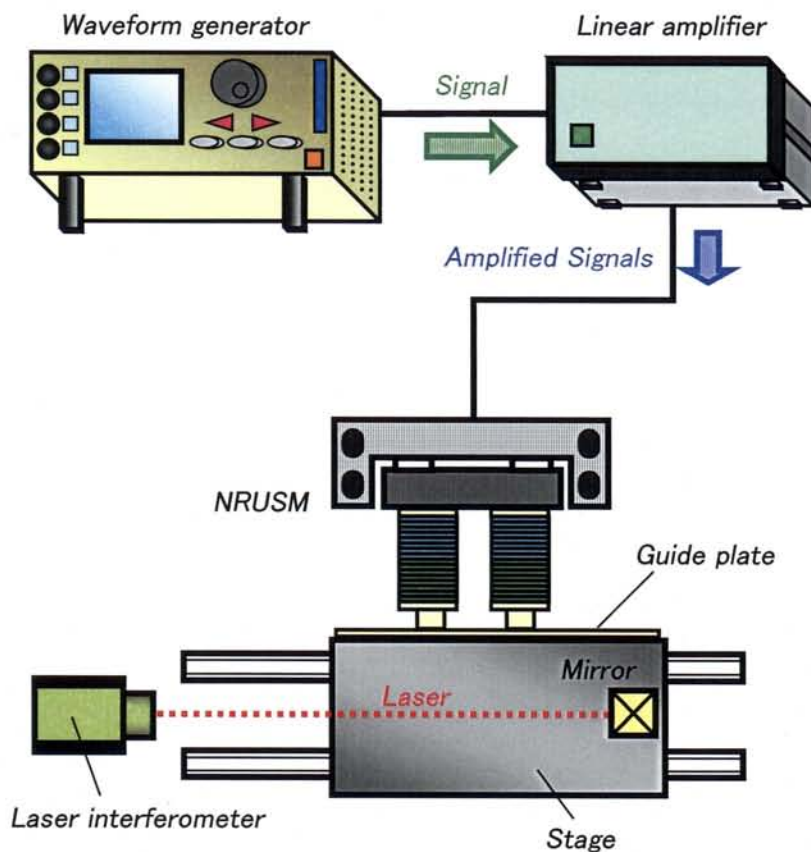


図 6.7 すべりの観測実験セットアップ

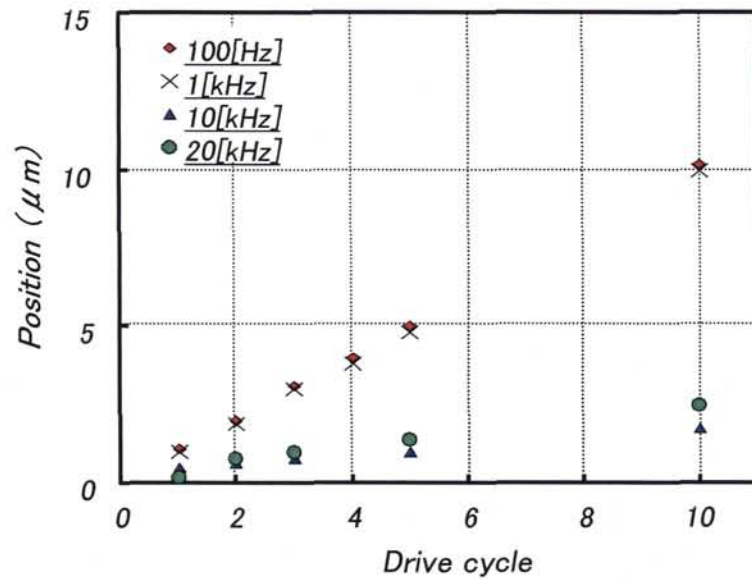


図 6.8 剪断電圧の波形の数とステージの位置

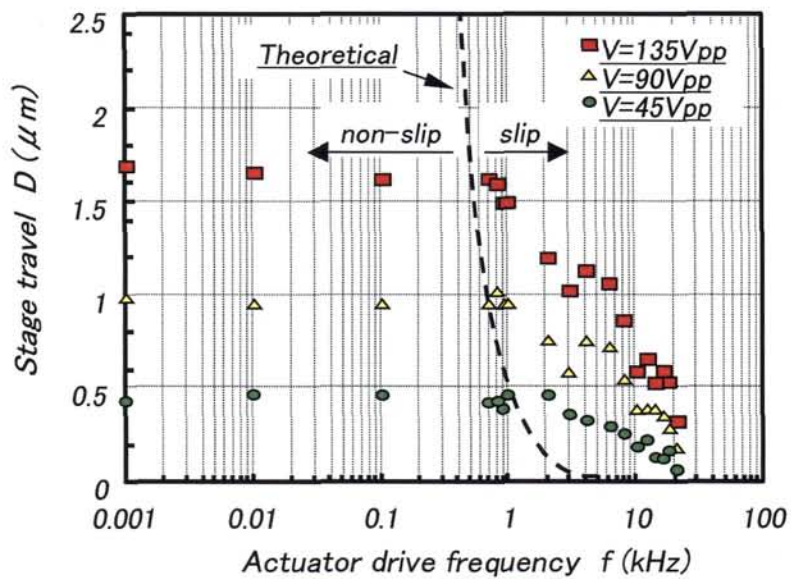


図 6.9 すべりの観測

6.4 すべりを抑圧した駆動方法

前述のとおり、正弦波電圧によってステージを駆動した場合、接触部がすべらずにステージを駆動できる駆動周波数は約 1kHz であり、式 6.14 における各パラメータを変化させたとしても、その周波数の飛躍的向上は難しい。そこで、接触部のすべりを抑えた新しい駆動方法について考察する^[3]。

NRUSM において、積層型アクチュエータは A 相と B 相の 2 相駆動によって交互にステージを送ることになる。ここで、A 相と B 相は 180 度の位相差を有するので、各相が同時にステージを送ることはない。そこで A 相からステージを送ることとし、 $0 < t \leq T_1$ における A 相アクチュエータの先端速度を v_{A1} 、その位置を x_{A1} とすると、

$$v_{A1} = a_m t \quad (6.15)$$

$$x_{A1} = \frac{1}{2} a_m t^2 \quad (6.16)$$

となる。時刻 T_1 で速度 v_{A1m} に達し、最大変位量 A_m まで変位したとすれば、

$$v_{A1m} = a_m T_1 \quad (6.17)$$

$$A_m = \frac{1}{2} a_m T_1^2 \quad (6.18)$$

$$T_1 = \sqrt{\frac{2A_m}{a_m}} \quad (6.19)$$

となり、ステージは B 相アクチュエータによって送られる次の駆動シーケンスに移行する。 $T_1 < t \leq T_2$ における B 相アクチュエータの先端速度を v_{B1} 、その位置を x_{B1} とすると、

$$v_{B1} = a_m t \quad (6.20)$$

$$x_{B1} = \frac{1}{2} a_m t^2 - 2A_m \quad (6.21)$$

となる。時刻 T_2 で速度 v_{B1m} に達し、最大変位量 A_m まで変位したとすれば、

$$v_{B1m} = a_m T_2 \quad (6.22)$$

$$A_m = \frac{1}{2} a_m T_2^2 - 2A_m \quad (6.23)$$

$$T_2 = \sqrt{\frac{6A_m}{a_m}} \quad (6.24)$$

となり、ステージは再び A 相アクチュエータによって送られる次のシーケンスへと移行することになる。 $T_2 < t \leq T_3$ における A 相アクチュエータの先端速度を v_{A2} 、その位置を x_{A2} とすると、

$$v_{A2m} = a_m T_3 \quad (6.25)$$

$$A_m = \frac{1}{2} a_m T_3^2 - 4A_m \quad (6.26)$$

$$T_3 = \sqrt{\frac{10A_m}{a_m}} \quad (6.27)$$

時刻 T_3 で速度 $v_3 = v_{A2m}$ に達し、最大変位量 A_m まで変位したとすれば、

$$v_{Anm} = a_m T_{2n-1} \quad (6.28)$$

$$v_{Bnm} = a_m T_{2n} \quad (6.29)$$

$$T_n = \sqrt{\frac{2(2n-1)A_m}{a_m}} \quad (6.30)$$

となる。この状態における v_n および T_n は次式で表される (n は自然数)。その際、 v_n で表される先端速度は、 n が奇数のときは A 相、 n が偶数のときは B 相アクチュエータのものである。

$$v_n = a_m T_n \quad (6.31)$$

$$T_n = \sqrt{\frac{2(2n-1)A_m}{a_m}} \quad (6.32)$$

図 6.10 には、理想的等加速度運動を実現した際のアクチュエータ先端における加速度、速度、位置を示す。これを基に、各駆動サイクルにおける素子への印加電圧と周波数変化を図 6.11 に示す。この制御方法によりアクチュエータを変位させることで、すべりを発生すること無く最大加速度でステージを駆動することが可能となる。

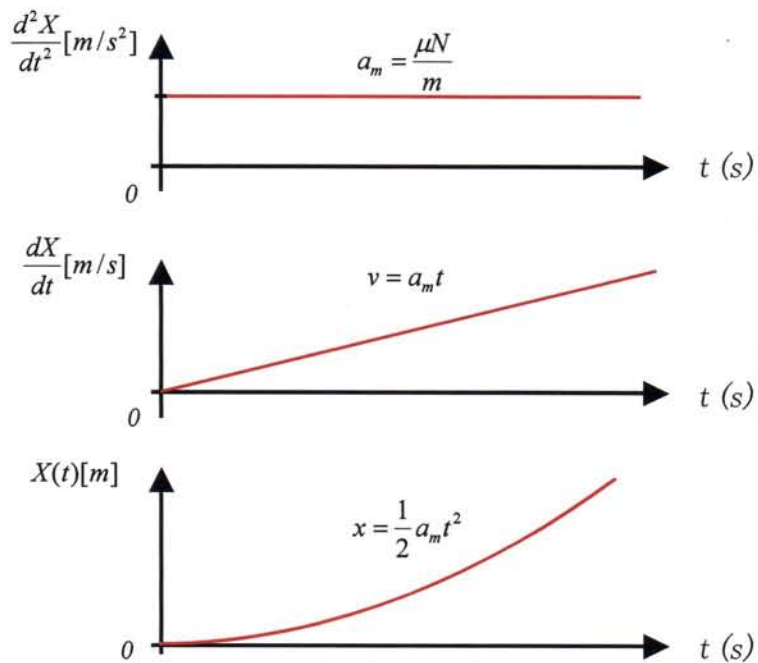


図 6.10 アクチュエータ先端の加速度、速度および位置

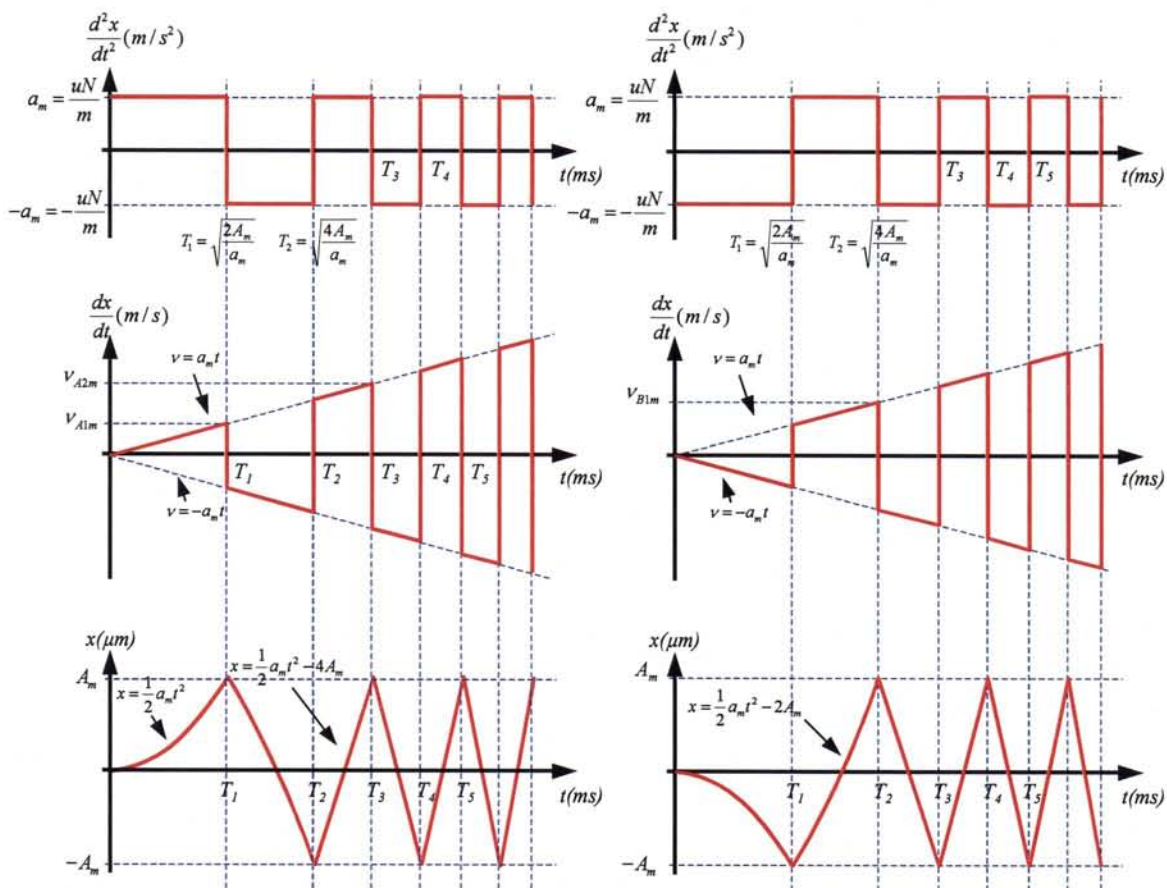


図 6.11 すべりを抑圧した駆動タイムチャート

6.5 結言

本章では、NRUSM を用いたステージにおける本質的なすべりに関する理論を構築し、力学的モデルによる試算値と測定結果とを比較することにより、試算値で得られたすべりの発生しない駆動周波数 $f \leq 0.77\text{kHz}$ と測定結果が良く一致することを確認した。これにより、アクチュエータ先端部とガイドプレートの接触点におけるすべりは力学として十分に把握できることを示した。次に、接触点における摩擦を極限まで抑えるための手法として可変周波数駆動を提案し、その検討を行った。これは、駆動周波数を任意に選択できる NRUSM の特徴を最大限に活かした駆動方式である。物質の等加速度運動方程式に則り、その最大加速曲線をトレースする本方式を用いることで、NRUSM が装着されたステージを理論限界で加速することが可能となる。

参考文献

- [1] 江頭義也, “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”, 熊本大学大学院自然科学研究科博士論文, 2003.
- [2] 遠藤泰史, “非共振型超音波モータの周波数可変駆動に関する研究”, 熊本大学大学院自然科学研究科修士論文, 2004.
- [3] Taishi Endo, Yoshiya Egashira, Hiroyuki Furukawa, Hiroyuki Hashiguchi, Kouji Kosaka, Masayuki Watanabe, Noboru Miyata, Shirou Moriyama, Syunichi Sasaki, Akira Nakada, Tadahiro Ohmi and Hiroshi Kubota, “Silp-Free Driving Method for Nonresonant Piezoelectric Actuator,” Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 44, Part 1, No.7A, pp.5264-5268, 2005.

第7章 制御による摩耗抑圧アプローチ

7.1 緒言

第5章では、摺動材料選定、摩耗評価方法などを確立すると共に、それらを基に基本的耐久を見定める試験に関して述べた。そして停止、加減速などの局所的な部分に摩耗が集中し、その摩耗痕が耐久性の限界立則であることを確認した。これまで行われてきた研究スタイルは、主に、有効材料の組み合わせでこの現象に対抗し、耐久性を向上させる試みが成されてきた^[1, 2]。しかし、本研究では、従来の摩擦駆動型アクチュエータの研究で行われてきた摺動材料面からのアプローチは行わない。何故ならば、ガイドプレート材料と圧電素子先端部材料の組み合わせ、予圧力とガイドプレート材料の組み合わせ、負帰還における制御定数と駆動条件の組み合わせなどが既に実施されており、この研究方向性を延長したとしても、いくつかの拘束条件内でのトレードオフを模索するだけの作業になってしまうからである。

通常、圧電素子先端で発生した変位を効率よく伝達する為には、高い摩擦係数を有する摩擦駆動用の材料が必要となる。しかしながら、このような材料の組合せでは摺動時に強烈な摩耗が発生してしまう。それ故に、この接触部には単に摩擦力が大きいだけでなく、摩耗が少ない材料が必要となる。しかし、これは物理的に二律背反であり、この条件を満たす材料は存在しない。つまり、アクチュエータにおける動力伝達原理である接触方式は、自身の利点と欠点を成しており、これまでの材料工学の観点だけでは、利点のみを取り出して活用することは難しいのである。そこで、摩耗の本質的原理とその限界を把握し、それらを含めて制御系全体で問題解決することが必要となる。その導入として、第6章では、摩耗の根本的原因であるすべりを理解する、つまり静摩擦領域での基本的考え方と、それに基づく基本実験を行い、理論的すべり限界の試算値と、実際のステージにおける実験結果が良く一致する検証過程に関して述べた。

本章では、この評価から得られた基本的要素と、それ以外の静摩擦領域での駆動要素を統合化した理論体系を構築すると共に、それに基づいた評価を行い、摩耗に対する総合的な抑圧を試みた過程に関して述べる。また、集中定数型で確立した静摩擦領域の駆動理論を、ガイドレール上の分布定数型へと変形し、さらに時間関数を取り入れた形式での制御系として評価した結果についても併せて述べる。

7.2 摩擦と静摩擦力との関係

7.2.1 静摩擦限界の試算

本節では、動作状態での静止摩擦限界モデルを考察する。図 7.1 に試験で使用した 4 インチステージの力学モデルを、図 7.2 には外観写真を示す。最初に、接触部における摩擦力の発生方法に関して説明する。8 本の積層型圧電素子は、板バネと固定された取り付けベースに固定され、予圧支持壁に内蔵された 4 本のコイルバネからの反力を背面に受けた状態で予圧支持壁に固定する。コイルバネの他方は、予圧支持壁背面に貫通して設けられたタップ穴にねじ込まれている予圧調整シャフトに支持されている。この構成により NRUSM となる。ステージに装着する際には、NRUSM 先端部をステージ可動部に接触した状態で予圧支持壁をステージ固定部に固定する。この状態において、予圧調整シャフトのネジを回すことでコイルバネが圧縮され、その反力により NRUSM 先端部がステージ可動部に押しつけられることで摩擦力が発生する。この際、予圧調整シャフトの回転量により摩擦力調整が可能となる。また、NRUSM 先端部にはアルミナセラミックス (Al_2O_3 : 99.5%、ポアフリー) 製のフリクションチップを、ステージ可動部のフリクションチップとの接触部にもアルミナセラミックス (Al_2O_3 : 99.5%、 R_a : 0.15 μm) のガイドプレートをそれぞれ使用している。図 7.3 に予圧機構の構造を示す。

次に、NRUSM の駆動状態における力学モデルを説明する。まず、NRUSM が駆動状態だとすると、その動作原理より、ガイドレールには全脚数の 1/2、つまり 4 本の先端部が絶えず接触していることになる。その際に接触部に発生する反力は、この $4F_p$ の予圧力と等しい $4F_E$ となる。 m はアルミニウム製のステージ可動部重量、 a は素子先端加速度、 μ は静摩擦係数を表す。これらの条件下において、ガイドプレートとフリクションチップとの間に発生している静止摩擦力が、素子発生力を凌いでいれば接触部での摩擦現象は起こらない。その関係を次式に示す。

$$4(\mu \cdot F_E) \geq m \cdot a \quad (7.1)$$

ここで定数化しているのは、 μ 、 m そして F_E である。ちなみに、この μ の値は、実際のステージにおいて計測した 10 回の計測結果の平均値を採用している。1 回の計測方法を説明する。まず、NRUSM をステージに装着した後に、フォースゲージ (DPX-50: イマダ製) によりステージ可動方向の摺動抗力を 10 カ所の等分配位置で計測する。そして、それらの平均値を予圧力で除した値を水準値としたが、いずれの平均値算出過程においても、突発誤差からの影響を排除する為に、メディアン法を用いた算術平均値を採用した。また、その際に用いた予圧力は、予圧機構に内蔵したストレーンゲージ (LM-5KA: 共和電業製) により計測したもののだが、各回の計測毎に予圧機構をステージから取り外し再度装着する手順を踏んだ。

次に、この式 7.1 で示した静摩擦領域を保持する数式のうち、素子先端加速度である a を試算する。4 元方程式のうち 3 元までが定数化されているので a 自身の算出には何ら手間取らない。しかし、この加速度 a は、圧電素子を構成する材料定数、それを制御する印加電圧や駆動周波数から構成されており、それら全てを含んで立則条件を出す。第 6 章における基礎実験では、素子の先端軌道を楕円として a を角速度 ω とした算術展開を行った。しかし、角速度領域における接

触とは点であり、その接触部の表面粗さは0以外取り得ない。そして、素子の軌道半径と対を成すガイドレールの平面度も、仮想基準位置に対する揺らぎは0と成らざるを得ない。実際のステージにおいて、それは不可能である。本章では、本質的挙動を的確に捉え、より高速化領域における厳格な試算を行うことを目的としている。そこで、先端接触状態をモデル化し、再度算出することとした。図7.4に軌道モデルを示す。素子先端で生成される楕円軌道は、その予圧力により変形され、半楕円形状となっていると仮定する。つまり、第6章における Displacement-model である。このモデルにおいては、実際の素子先端における振動までの時間遅れが生じると楕円軌道は傾く。すると、送り速度の源となる1回の送り量は低下する。従って、静摩擦限界を試算する上で、ここでは速度最大値が得られる傾斜 0° のモデルを用いる。それに基づいて、連続駆動中における1駆動サイクルの変位から算出される瞬間平均速度 \bar{v} を次式にて定義する。

$$\bar{v} = \frac{2A \cdot \phi_L}{1/f} = 4Af \quad (7.2)$$

ここで、 A は楕円軌道半径、 ϕ_L は素子駆動相である 2 、 f は駆動周波数をそれぞれ表す。求めようとする加速度は、この平均速度を表す式7.2中の A または f の変化分で表されることになる。ここでは、駆動周波数 f を固定して楕円軌道半径 A を変化させながら加速する、つまり、制御系から見ると、電圧制御であることを前提として試算を進める。1サイクル中の送り量は連続的であり、それらは平均速度として定義できる。単純に考えると、各駆動サイクルの時間幅は固定値 $1/f$ であるから、平均速度の変化分である $(A_{n+1}-A_n)$ を、それで除した値を使用すれば良いように思われる。しかし、現在の駆動サイクルと次の駆動サイクルとの切り替わりは連続だが時間的に見て瞬間的である。それ故に、駆動サイクル毎に離散化された平均速度を、連続時間軸にて表現することで加速度を厳格に定義する必要がある。図7.5および図7.6に、駆動サイクル毎の電圧変化とそれに伴う楕円軌道変化を示す。Displacement-model では、駆動電圧変化と速度変化は等価である。また、本章では加加速度を持たない最大直線加速度を試算するので、時間軸で見た場合の電圧変化は直線となる。故に、図中ではサイクル毎の電圧差分値が等しい電圧変化としている。ここで、軌道半径増加分を ΔA とすると、 $n+1$ サイクル目における楕円軌道半径 A_{n+1} は $A_{n+1}=A_n+\Delta A$ となる。これを軌道半径初期値 A_1 を用い A_n として展開すると、

$$A_n = A_1 + (n-1) \cdot \Delta A \quad (7.3)$$

となる。そして、この等差級数を n サイクルまで定積分した際の移動距離を x_n とすると、

$$x_n = 2 \cdot \sum_{i=1}^n \{A_1 + (n-1) \cdot \Delta A\} = 2 \left[(\Delta A)n^2 + \{2A_1 - (\Delta A)\} \cdot n \right] \quad (7.4)$$

と表現できる。ここで用いた先頭の2は2相駆動を指し示す。また、次の2は半径から直径への換算である。そして、この x_n までの移動に要した時間 t_n は駆動サイクルの逆数 $1/f$ とサイクル数

n との積であり、以下となる。

$$t_n = \frac{1}{f} \cdot n \quad (7.5)$$

式 7.5 を n について展開し、式 7.4 に代入することで x_n は次式となる。

$$x_n = 2\Delta A f^2 t_n^2 + (4A_1 - 2\Delta A) f t_n \quad (7.6)$$

この場合、 $1/f \ll 1$ であるならば、図 7.7 に示すように、その位置変化状態は放物線として近似できる。つまり、等加速度運動における位置を示す公式、

$$x = \frac{1}{2} a t^2 + 4 a t \quad (7.7)$$

の初項 $1/2 a t^2$ と $2 \Delta A f^2 t_n^2$ を等価と見なすことができる。故に、加速度 a は次式となる。

$$a = 4\Delta A f^2 = 4(A_{n+1} - A_n) f^2 \quad (7.8)$$

そして、式 7.8 を式 7.1 に代入することで、

$$4(\mu \cdot F_E) \geq m \cdot 4(A_{n+1} - A_n) f^2 \quad (7.9)$$

を得る。ところで、先端軌道半径 A は剪断変形素子の変位であり、

$$A_n = n_{15} \cdot d_{15} \cdot V_{15}^{(n)} \quad (7.10)$$

で表される。ここで n_{15} は剪断素子の積層枚数、 d_{15} は剪断素子の等価圧電定数、 $V_{15}^{(n)}$ は n 駆動サイクルにおける各剪断素子に印加される電圧を表す。そして、式 7.10 を式 7.9 に代入することで、

$$4(\mu \cdot F_E) \geq m \cdot 4 \cdot n_{15} \cdot d_{15} \cdot (V_{15}^{(n+1)} - V_{15}^{(n)}) f^2 \quad (7.11)$$

を得る。そして、静摩擦領域での駆動を確保しながら最大加速度を得られる電圧変化分の最大値は、

$$(V_{15}^{(n+1)} - V_{15}^{(n)}) \leq \frac{4(\mu \cdot F_E)}{4n_{15}d_{15} \cdot mf^2} \quad (7.12)$$

となる。表 7.1 よりそれぞれの変数を代入することで、

$$(V_{15}^{(n+1)} - V_{15}^{(n)}) \leq 1.01 \text{ [V]} \quad (7.13)$$

を得る。これにより、図 7.1 のステージにおける静止摩擦領域を保つ駆動サイクル間での最大電圧変化分が規定された。故に、駆動サイクル間での電圧変化分をこれ以下とした運用では、摩擦や摩耗により出現したパーティクルとのともづりなどは発生しなと期待できる。その観点で第 6 章での耐久性試験におけるプロファイルデータを再検証する。第 5 章の図 5.7 では、NRUSM の印加電圧を速度と等価としたグラフを用いたが、図 7.8 にはガイドプレート上の各位置における印加電圧として再プロットした。明らかに急峻な電圧変化が見られる部分と、先の摩擦プロファイルとの相関が見受けられる。それを更に明確化する為に、図 7.8 の印加電圧を駆動サイクル間での電圧変化分に変換したグラフを図 7.9 に示す。グラフ中に挿入されている上下の波線が、式 7.13 で求められた静止摩擦領域を保つ為の最大電圧である。駆動電圧の超過部分と摩擦が良く一致している。また、瞬間的、部分的に超えているのではなく、全体的に限界値に近い電圧変化で駆動されていることも明白である。ちなみに、このデータは 110 万回行った往復駆動における 1 ストロークを抜き出したデータであり、この傾向からすると、本データでは限界電圧値を超えていないとしても、それ以外のストロークでは超えている危険性が有ると予想できる。何故ならば、摩擦による発塵が有る限り、その発塵を巻き込んだ素子先端部とガイドレールの間では、コロガリ要素の混入による見かけ上の静止摩擦係数変化や、発塵を砥粒としたともづりなどの要因により限界電圧の降下が予想される。そして、発塵は、進行方向にかけて、または往復運動の戻り時には次の発塵要因となってしまう。その現象は止まる事無く継続され、伝染病的に全領域での摩擦を誘発する危険性を含む。つまり、摩擦駆動における静摩擦領域での駆動を実現する為には、僅かな発塵さえも許容してはならないことになる。

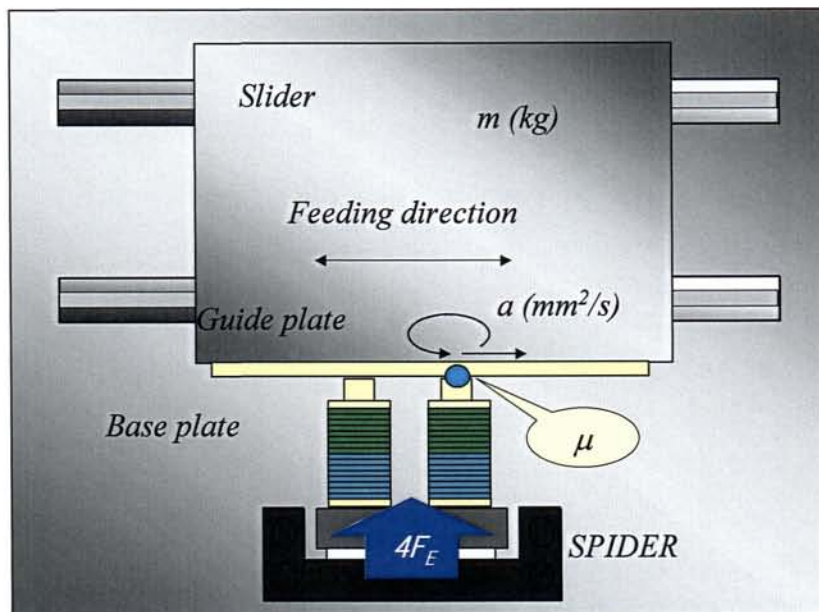


図 7.1 摩耗評価用ステージの力学モデル

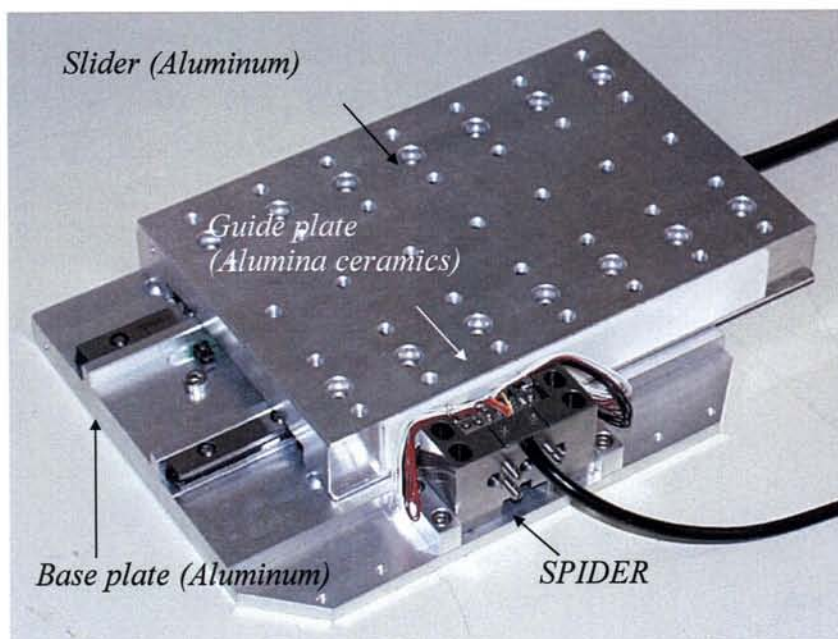


図 7.2 摩耗評価用ステージの外観写真

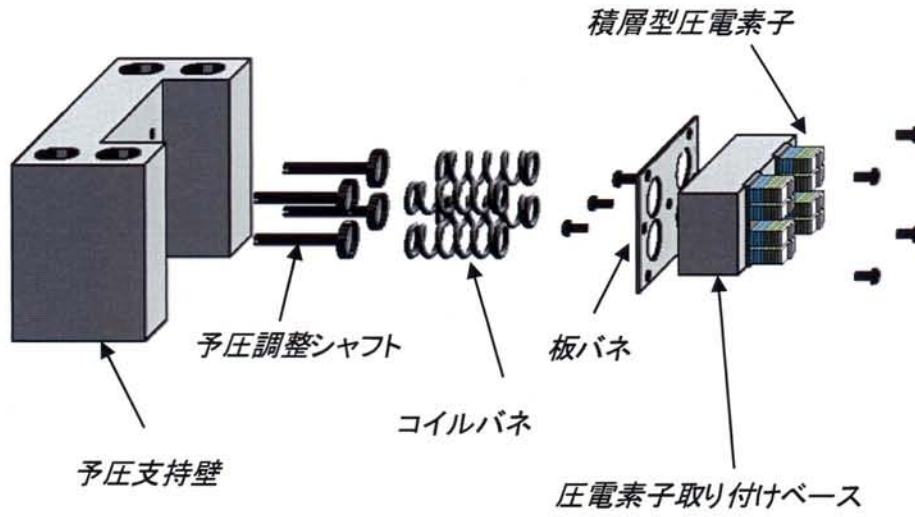


図 7.3 予圧機構の構造図

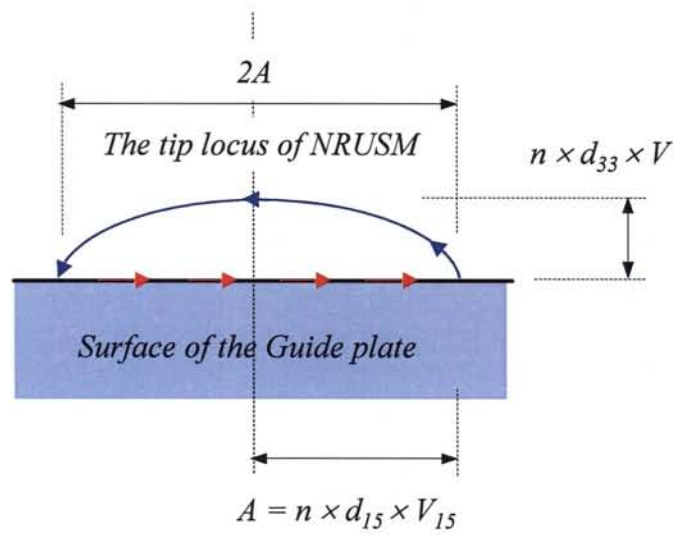


図 7.4 素子先端部における軌道モデル

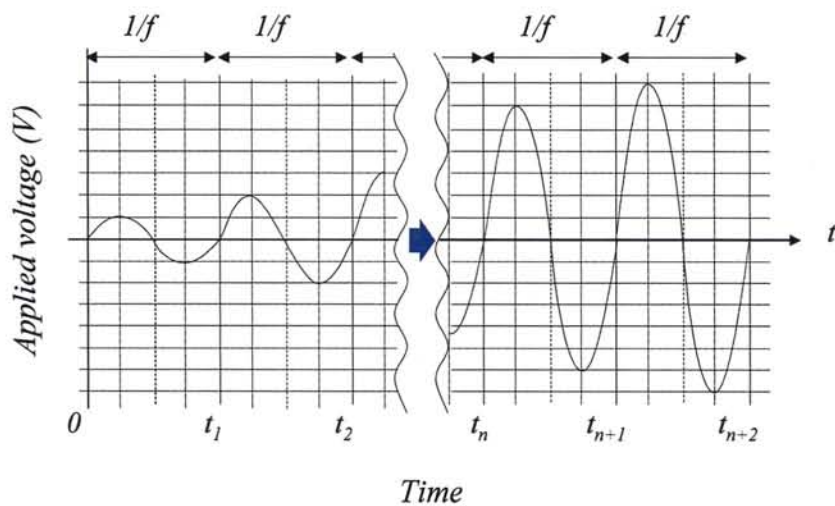


図 7.5 試算における駆動サイクル毎の電圧変化

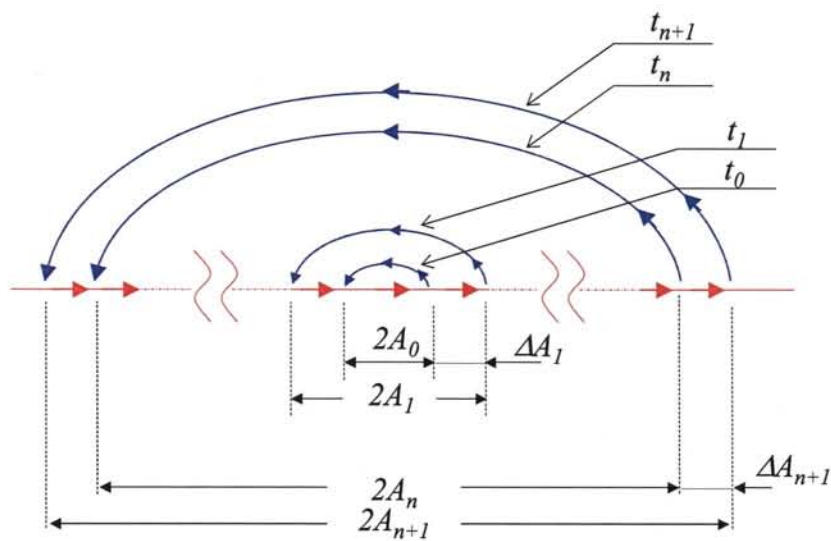


図 7.6 試算における駆動サイクル毎の電圧変化に対応した軌道変化

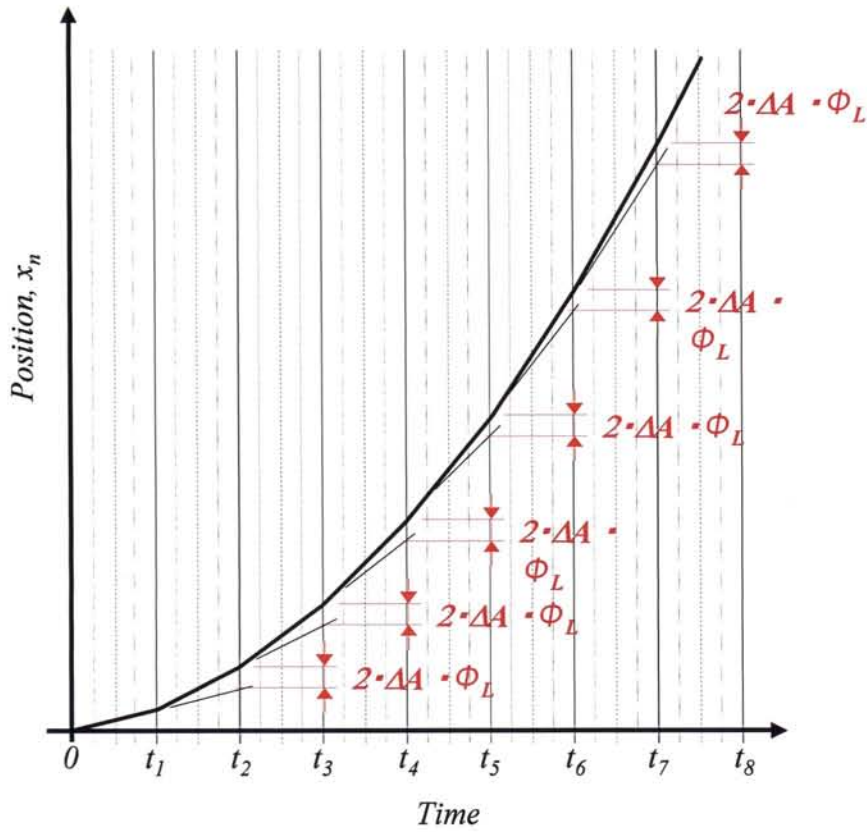


図 7.7 試算における位置変化状態

表 7.1 接触部力学モデルで使用了各パラメータ

パラメータ	数値	単位
m	1.05	kg
f	25.0	kHz
F_p	10.0	N
d_{15}	580×10^{-12}	m/V
n_{15}	8	-----
μ	0.306	-----

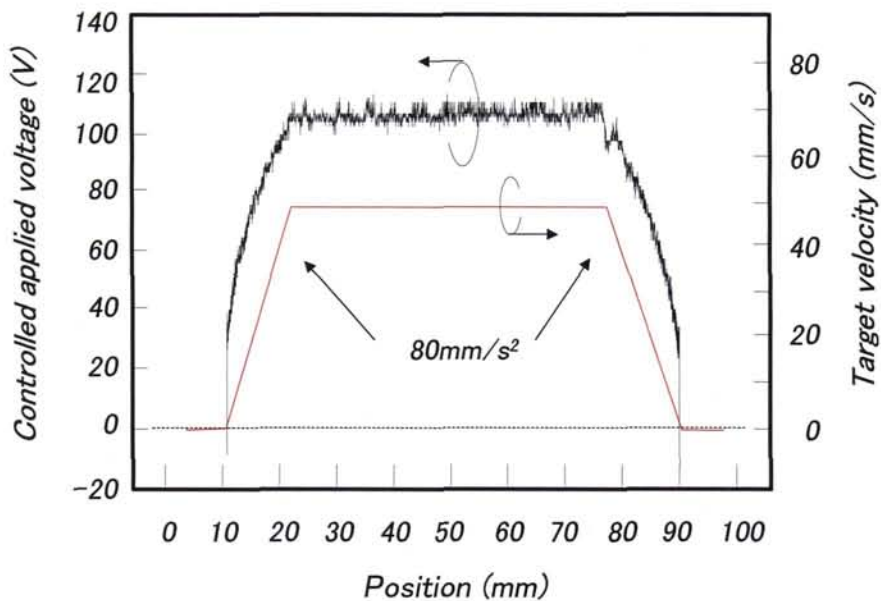


図 7.8 200km 耐久試験時のガイドレール各位置と印加電圧との関係

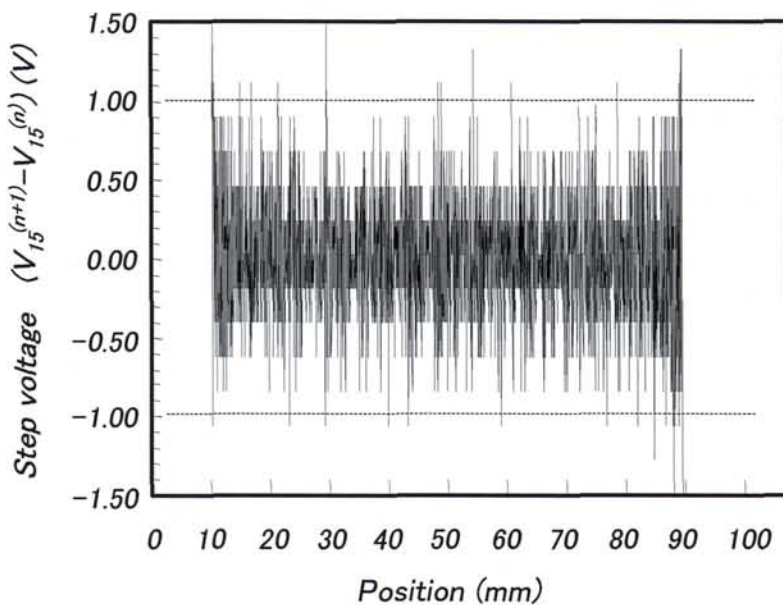


図 7.9 200km 耐久試験時のガイドレール各位置における駆動サイクル間での電圧変化分

7.2.2 不感帯の抑圧

前節では、接触部における静摩擦限界を保持する理論を、NRUSM に印加する制御電圧から構築した。その前提としては図 7.4 で示された軌道モデルを用い、素子先端部での平均速度より限界電圧変化分を算出した。但し、この理論展開における暗黙的前提とは、NRUSM への印加電圧とその先端部における平均速度との関係が線形なことである。また、静止摩擦領域を保つ駆動サイクル間での最大電圧変化分が 1.01V と算出されたことから、NRUSM の速度域全域において、その最大電圧変化分で規定される平均速度より十分に細かい速度分解能を有しないと、この理論は成立しないことを意味する。本節では、それらを検証しながら目的性能を達成した過程に関して述べる^[3]。

図 7.10 に同一の装置で取得した NRUSM への印加電圧とステージ速度に関するグラフを示す。この際の速度に付加した符号は駆動方向を意味しており、また、グラフ中の波線は理論速度を示している。実際に取得されたデータを見ると、約 0~60Vp-p 程度までは電圧を入力してもステージが動かない、いわゆる「動作不感帯」が観測された。原理的には、NRUSM の送り動作は剪断変形する圧電素子の DC 変位を応用しているため、このような不感帯は存在しないと考えていた。しかし、実際に計測すると非常に大きな不感帯を有している事が判明した。このような不連続かつ非線形な速度特性では、静摩擦領域を保つ駆動など到底期待できない。そこで、この原因を追求し改善する為に、接触部における予圧力と素子発生力の関係をモデル化した。NRUSM は、予圧力による摩擦力発生が無いと素子先端部での変位を駆動負荷側には伝達できない。それ故に、予圧力は不可欠な力である。一方、NRUSM における送りの大前提は、接触部の足上げである。NRUSM の動作原理からして、いくら剪断素子が入力電圧に応答した変形をしたとしても、伸縮素子の足上げが出来なければ送りは実現しない。つまり、動作原理上では不可欠な力である予圧力を、送り動作時には抑圧する力が重要であると考えた。同時に、その足上げ量は、素子が接しているガイドプレートの表面粗さより大きくなければならない。図 7.11 に接触部の拡大図を、図 7.12、図 7.13 には考慮すべき 2 つの力学的モデルを示す。図 7.12 において、ガイドプレート表面での反力 F_E はコイルバネにより発生した予圧力 F_P とほぼ等しい。そして、反力 F_E とは NRUSM の伸縮素子部における発生力 F_{PZT} と、圧電素子内部で逆方向に発生する復元力 F_Y との差となる。この状態は、

$$F_E = F_{PZT} - F_Y = \frac{V_{33} \times d_{33} \times S}{s_{33}^E \times D} - \frac{\left(\frac{\Delta L}{n_{33}}\right) \times S}{s_{33}^E \times D} \quad (7.14)$$

と表せる。ここで、 V_{33} は伸縮素子への印加電圧、 d_{33} は伸縮素子の等価圧電定数 (0.54nm/V)、 s_{33}^E は弾性コンプライアンス、 L は自然長 (0.3mm)、 S は素子断面積 (18mm²)、 n_{33} は積層数、 D は素子の自然長、 ΔL は変位量をそれぞれ示す。それらを表 7.2 に示す。一方、図 7.13 では、素子先端部がガイドプレート表面粗さをクリアして足上げする概念を示している。この時点でのコイルバネはその表面粗さを超える量だけ僅かに圧縮されている。そして、その状態を含めて、完全な足上げに必要な変位量は、

$$\Delta L \geq Ra \tag{7.15}$$

を満たす必要が有る。故に、式 7.14 と式 7.15 より、

$$V_{33} \geq F_E \cdot \frac{s_{33}^E \times D}{d_{33} \times S} + \frac{\left(\frac{Ra}{n_{33}} \right)}{d_{33}} \tag{7.16}$$

が、足上げに必要な伸縮素子電圧となり、表 7.1 と表 7.2 より 68.3V と算出される。これらより、駆動時の伸縮素子への印加電圧には試算値程度のオフセットが必要と見込まれる。それを実現した手法に関して次に述べる。

図 7.14 に改良前の駆動回路のブロックダイアグラムを示す。駆動回路内部は大きく分けて、DDS (Direct Digital Synthesizer) と乗算型 DAC (Digital to Analog Converter)、そして高出力アナログ増幅器で構成されている。まず、DDS において、内部基本周波数を元に周波数指令値から位相積算用信号を生成する。位相積算用信号は位相積算器により積算され次段の振幅変換器により正弦波信号となる。余弦波信号は位相積算器に $\pi/2$ だけ重畳した信号を振幅変換器に接続して生成する。そして、それらの正弦波と余弦波は振幅指令値に基づき、乗算型 DAC により $\pm 2^{15}$ (32, 767) の振幅制御で固定ゲインの高出力アナログ増幅器へと入力される。図 7.15 に改良した駆動回路のブロックダイアグラムを示す。これまでの駆動回路は、振幅指令値、周波数指令値、位相差指令値の入力が可能であった。それに対して、先の試算における追加出力を実現する為に、伸縮素子用振幅オフセット指令値入力とその実行回路を追加した。この出力状態は図 7.16 に示すように、振幅指令値が 0 の場合は出力を 0 に、それ以外の指令値の場合は、振幅オフセット値を加算して伸縮素子に出力する回路である。制御的観点からすると、この伸縮電圧加算機能は、NRUSM の駆動回路系に対するフィードフォワード信号として位置付けることができる。

図 7.17、図 7.18 に振幅オフセットをパラメータとして、印加電圧とステージ速度に関して再度取得したデータを示す。図 7.17 は速度域全体のデータである。また、グラフ中にある直線は、素子定数から算出される理論速度である。振幅オフセットが $\pm 40V$ を超えるあたりから少しずつ動作不感帯が小さくなり、 $\pm 80V$ あたりではほぼ動作不感帯が消えている。また入出力特性も、理論値に近づき線型性も回復している。図 7.18 には図 7.17 における速度が 0mm/s 近傍を拡大したデータを示す。4 象限の原点部分での線形性も確保され、また、静摩擦限界電圧以下の分解能も確認された。

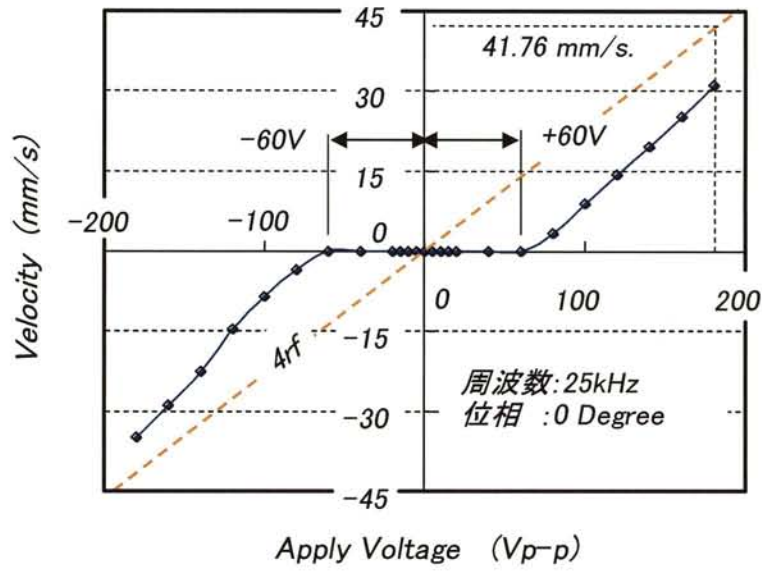


図 7.10 オープン制御による NRUSM の速度特性

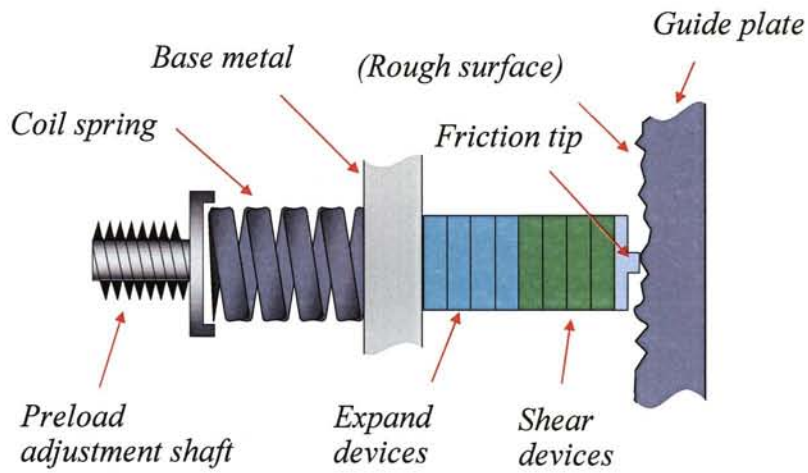


図 7.11 NRUSM のガイドプレートとの接触部拡大図

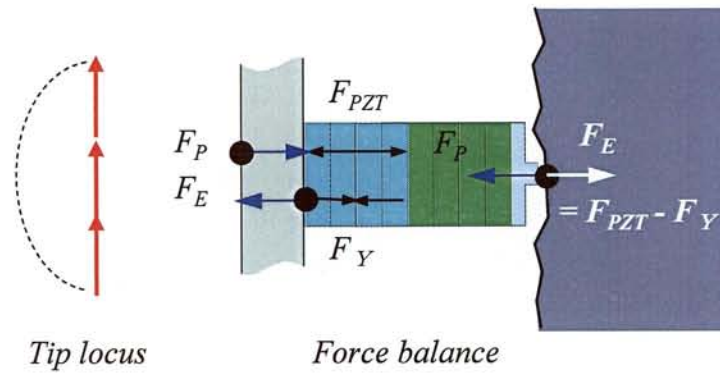


図 7.12 接触部における素子自身の内部応力を重視した力学モデル

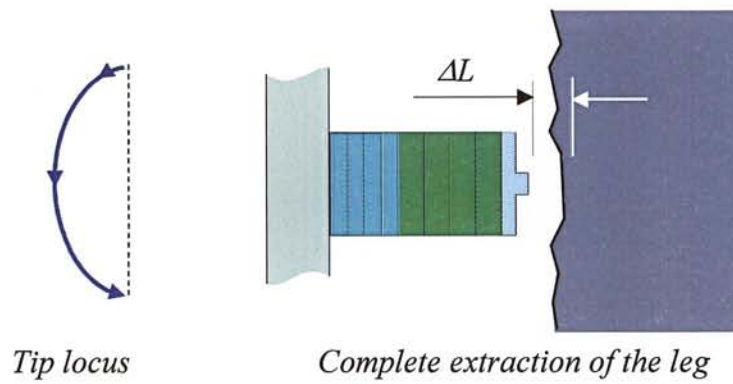


図 7.13 接触部における表面粗さと足上げとを考慮した力学モデル

表 7.2 NRUSM の足上げモデルで使用した各パラメータ

パラメータ	数値	単位
d_{33}	315×10^{-12}	m/V
S	18.0	mm ²
s_{33}^E	16.0×10^{-12}	m ² /N
D	0.30	mm
Ra	0.15	μm
n_{33}	8	-----

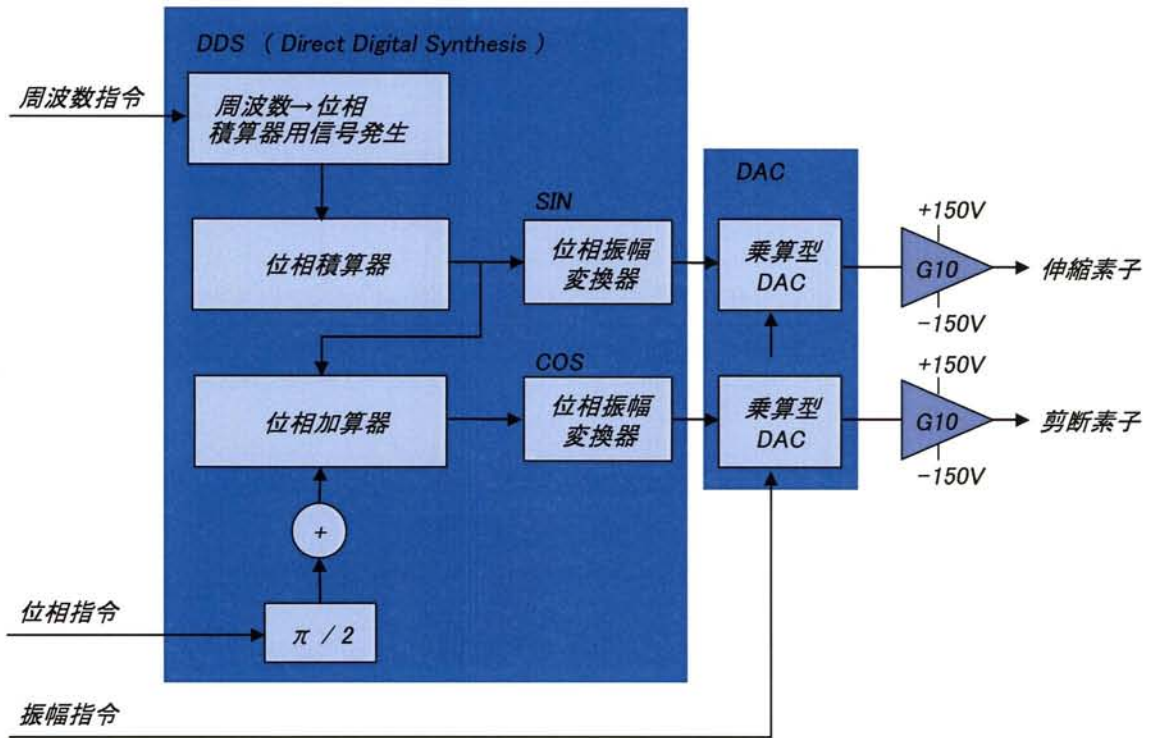


図 7.14 NRUSM 駆動回路 (改良前)

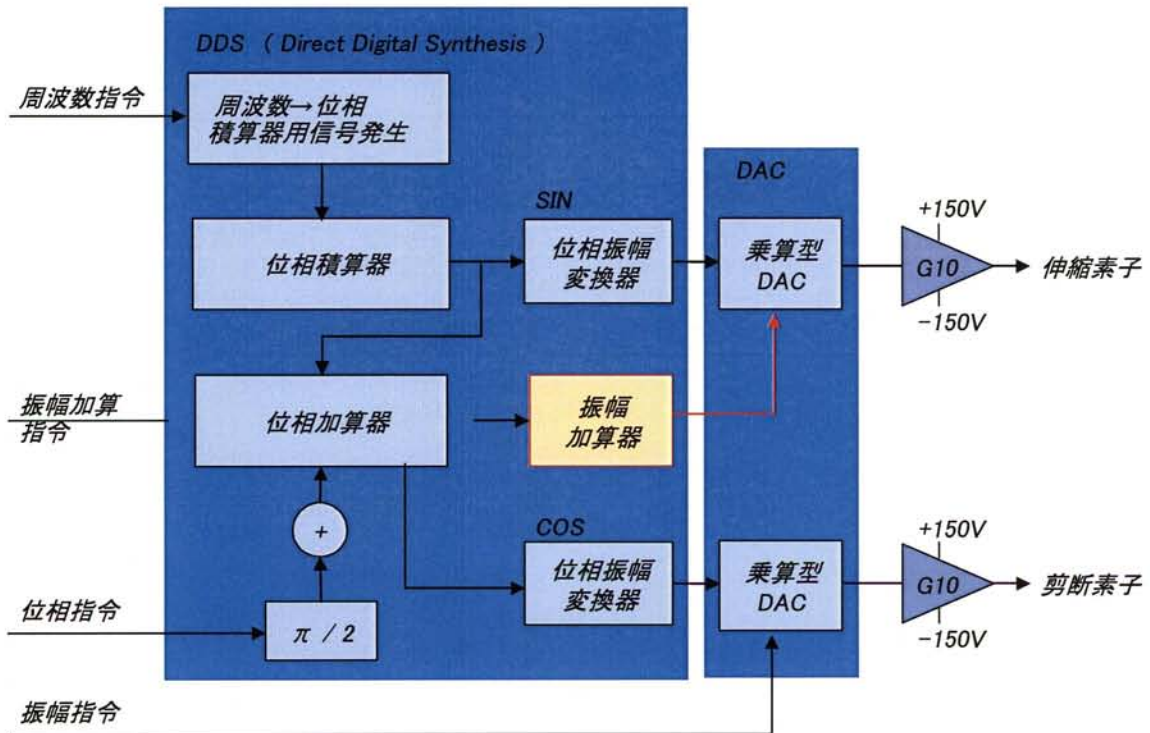


図 7.15 改良後の NRUSM 駆動回路

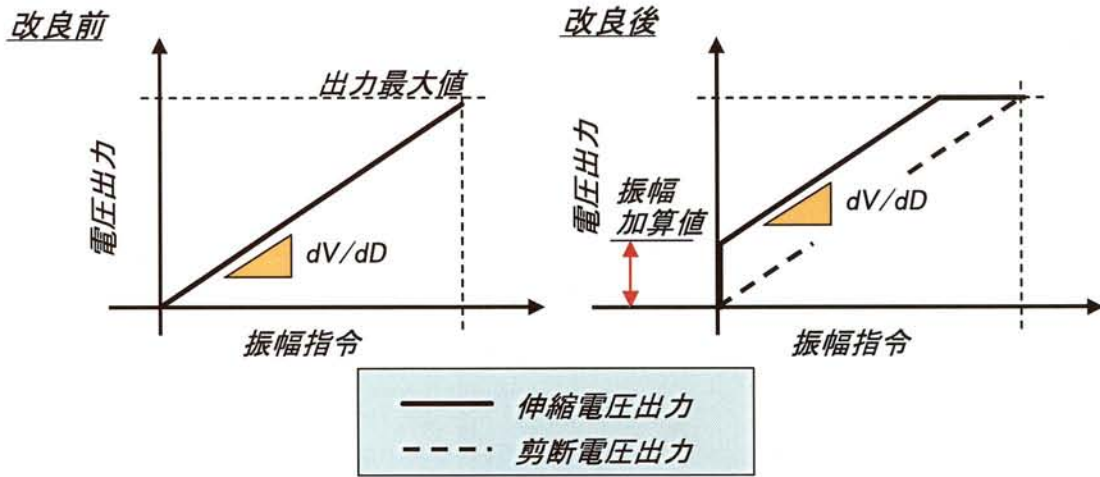


図 7.16 NRUSM 駆動回路の入出力特性

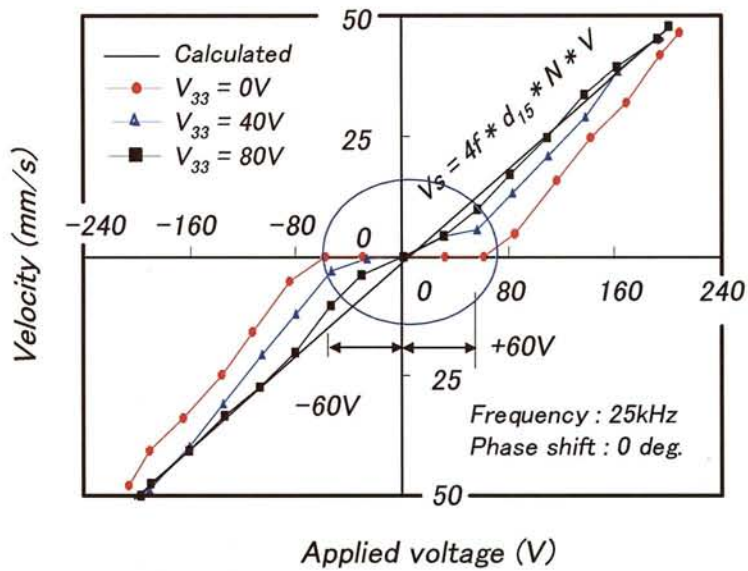


図 7.17 駆動回路改良後のオープン制御による NRUSM の全速度域

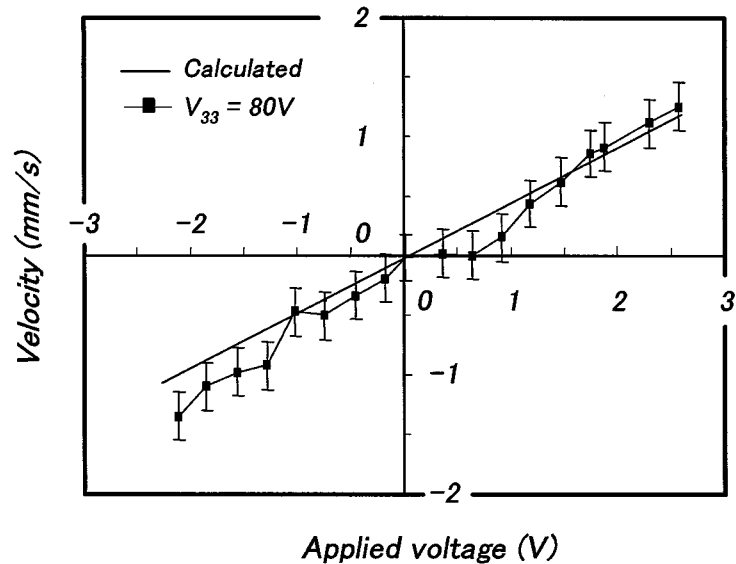


図 7.18 駆動回路改良後の速度 = 0mm/s 近傍の拡大図

7.2.3 摩擦評価

第6章で述べた耐久性試験におけるガイドレールの摩擦量の計測結果を図 7.19、図 7.20 に示す。加減速、停止位置には約 110nm もの摩擦穴が観測されている。また、等速駆動領域でも 50nm 程の摩擦溝ができています。今回の静摩擦限界電圧制御を PID 制御に追加し、伸縮オフセット回路を付加した駆動回路による耐久性試験の結果を図 7.21、図 7.22 に示す。但し、この際の走行距離は 50km としている。加減速、停止位置での摩擦は 17nm に、等速度領域でも約 12nm と非常に良好である。この数値が示すものが 200km 走行耐久と比較して良好な結果なのかどうかを判断する為に、本評価では摩擦量と共に摩擦レートを計測した。前回同様の耐久性試験における摩擦レートと、今回の結果を重ねて図 7.23 に示す。ここで明白化したことは、今回の耐久性試験で計測された摩擦量は、初期の接触面におけるなじみを生成する為の初期摩擦（エージング領域）であったことと、それが終了してからの摩擦（ランニング領域）こそが評価すべき対象であったことである。その観点からランニング領域を比較すると、先の計測時は $9.40 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ であった摩擦レートが、 $2.93 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ となり、摩擦レートは当初の 1/30 以下と改善された。そして、先の計測時には発生していた目視上のテカリも確認されず、また、加減速、停止位置と等速領域での摩擦傾向に違いも無く、走行の障害となる段差も確認されなかった。つまり、全駆動領域で静摩擦限界内の制御が行われた結果として、駆動状態に左右されない極低摩擦な摩擦駆動が実現できたと考えられる。

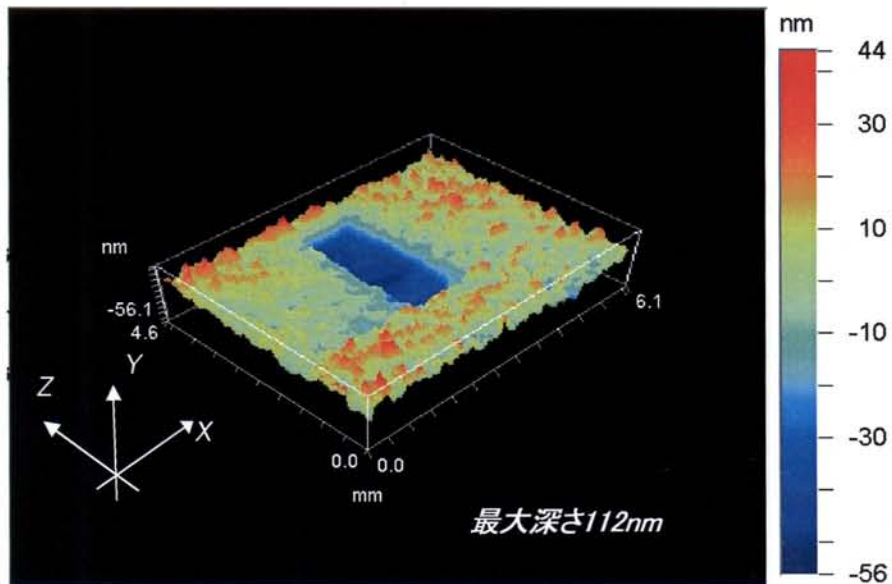


図 7.19 これまでの耐久性試験におけるガイドレール部の摩耗（加減速、停止部分）

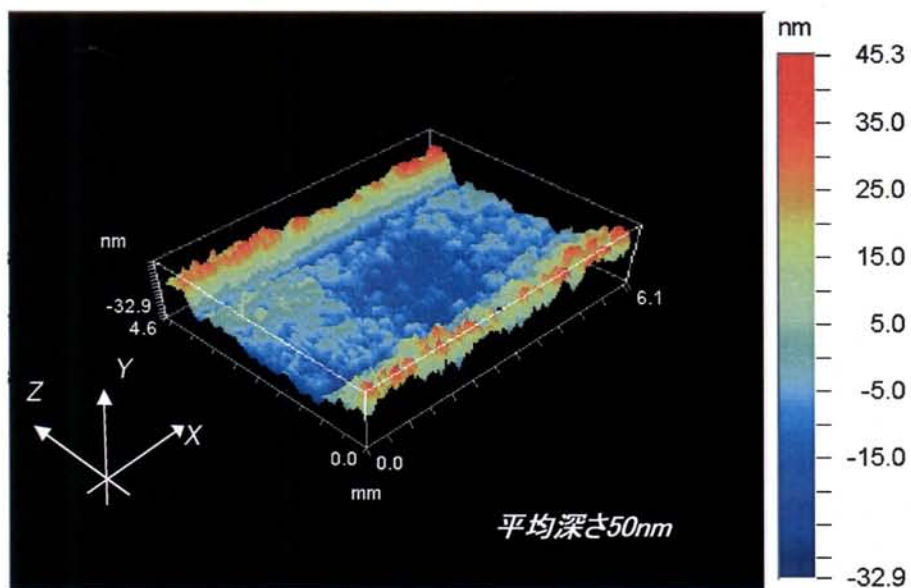


図 7.20 これまでの耐久性試験におけるガイドレール部の摩耗（等速度領域）

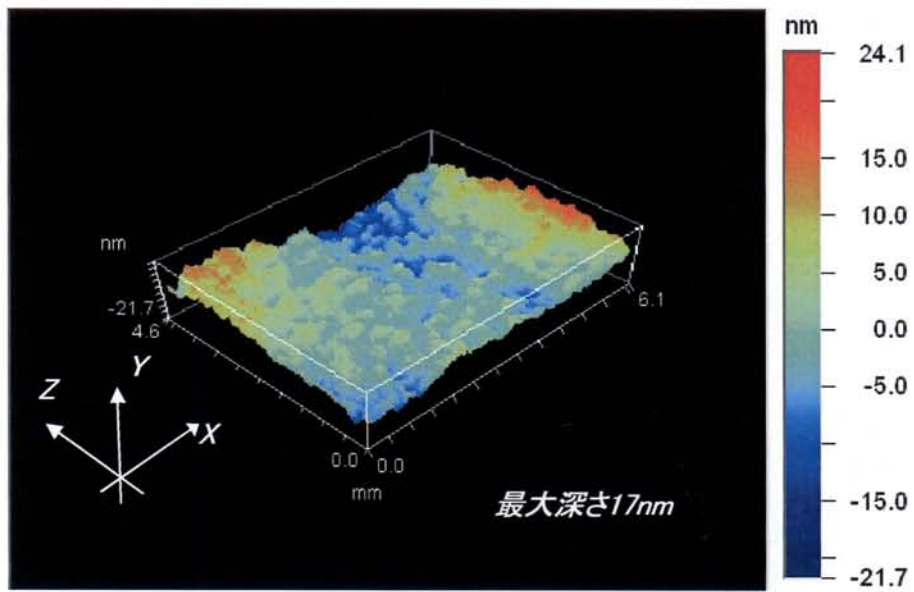


図 7.21 静摩擦領域駆動を付加したガイドレール部の摩耗（加減速、停止部分）

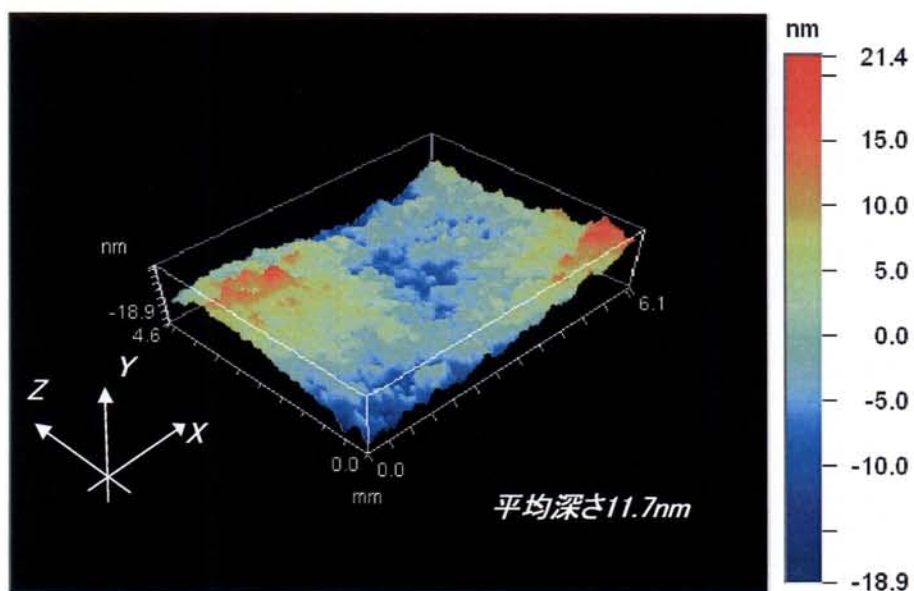


図 7.22 静摩擦領域駆動を付加したガイドレール部の摩耗（等速度領域）

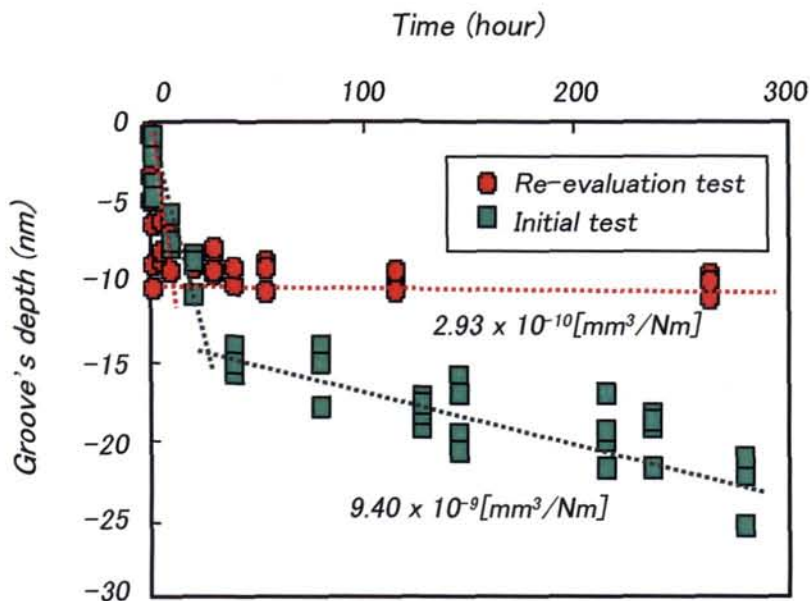


図 7.23 200km 耐久試験と静摩擦領域駆動での摩耗レート比較

7.3 摩擦理論を組み込んだ制御系

NRUSM の駆動原理を構成している摩擦力は、ガイドレール材料とアクチュエータ先端材料、それと予圧力とで決定される原理的要因、その取り付け場所毎の機械的原因により決定される要因、ならびに時間的に変化する表面状態に左右される要因などに支配される。それらを集中定数として表現する事は勿論不可能であり、また、移動履歴や時間的履歴などを無視することも難しい。故に、時間と位置との関数を用いた分布型変数として対応する必要がある。本節では、固定値且つ、集中定数として到達した前節までの静止摩擦限界モデルを更に拡張し、第 4 章にて述べてきた制御系への融合を行い、実用型制御系として動性能評価を行った過程に関して述べる。

7.3.1 静摩擦から動摩擦へと変化する瞬間の振る舞い

NRUSM により駆動されるステージ可動部の摺動速度を v とすると、その摩擦特性は次式によって表すことができる^[4, 5]。

$$F_{SS} = F_C + F_S e^{-(v/v_s)^2} + F_v \dot{x} \tag{7.17}$$

ここで F_C はクーロン摩擦、 F_S は静止摩擦、 F_v は粘性摩擦係数、 v_s はストライベック速度である。一般的に $F_S > F_C$ なので、素子発生力が小さいときは静止摩擦によりステージは静止し、発生力が最大静止摩擦を超えると摩擦の減少に伴い急に動き出す。この微小速度域での負勾配摩擦特性

が「スティックスリップ現象」を引き起こす要因となる^[5]。本節では、その振る舞いをガイドレール上の各位置でサンプリングすることで、摩擦特性の同定、それらの線分布、ならびに連続運転における時間に対する変化傾向の取得などを試みた。

まず、粘性摩擦抵抗が摩擦値の殆どを占める動摩擦領域においては、有効ストローク左端を始点とし、定速度制御によりステージを駆動させ、10 mm 地点を通過した際の制御入力電圧を摩擦値とした。そして、5mm/s から 35mm/s まで 5mm/s きざみの定速度で、この計測手順による摩擦値計測を行った。また、ストライベック曲線の近似に必要な低速度域における摩擦値測定には、先の 10mm 地点においてステージを静止させた状態から印加電圧を徐々に増加させ、ステージが動きだすまでの挙動をサンプリングした上で速度同定を行った。この摩擦特性の結果を図 7.24 に示す。僅かではあるが、動き始めるところで摩擦値が静止摩擦値を下回っている。得られたデータから最小二乗近似により導出した正方向及び負方向に対する近似曲線 $\{u_p, u_n\}$ を以下に示す。

$$u_p[V] = 13.1 + 2.0e^{-(v/0.17)^2} + 1.74v \quad (7.18)$$

$$u_n[V] = -(14.1 + 1.6e^{-(v/0.14)^2}) + 1.70v \quad (7.19)$$

次に、ステージストローク全域の静止摩擦同定を、温度 20° 湿度 50% のクラス 1000 クリーンルームにて行った。まず、ガイドレール面とアクチュエータ先端の接触部の両方を洗浄し、乾燥させた後にステージとして再構成した。これは、接触部への粉塵混入や雰囲気湿度変化など、結果に影響を与える不要因子を除去する為である。続いて、ガイドレール上 10mm 間隔の位置を計測点として、各点における正速度と負速度の摩擦値データを取得した。ちなみに、各点における取得データは、10 回計測の平均値を使用している。また、この静止摩擦値の取得作業を 1 時間毎に 7 時間後まで実施し、時間経過に対する挙動も併せて観測した。この際、連続時間における静止摩擦値変化を計測することを目的としていたので、データ取得中以外でもステージは連続駆動状態とした。また、各時間における取得データは 5 回計測平均値を使用している。その結果を図 7.25、7.26 に示す。位置に応じて摩擦力に変化が有り、また、正方向と負方向でも大きな違いが見られる。そして、時間経過と共に摩擦力が増加していくことも確認された。これらの結果より、短時間での静止摩擦値は再現性があるが、時間経過に伴い、その値は増加する傾向にあることが判明した。

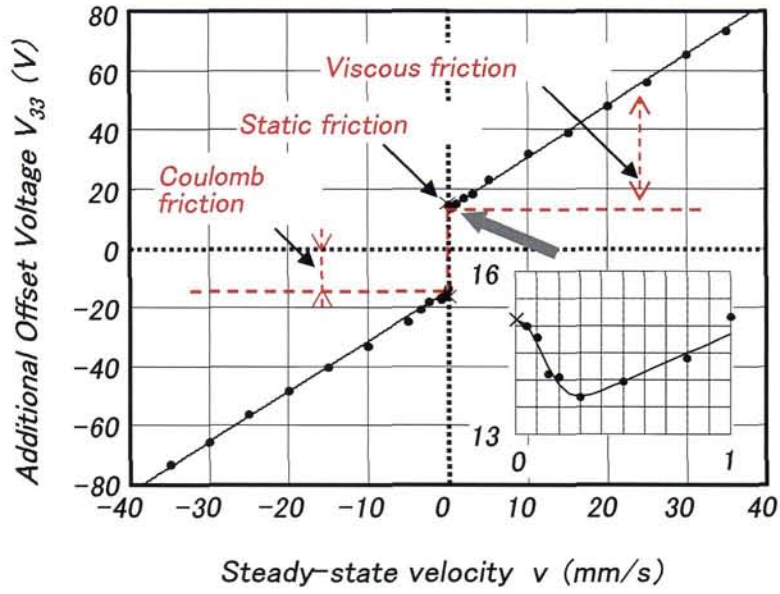


図 7.24 有効ストローク左端より 10mm 位置での摩擦特性

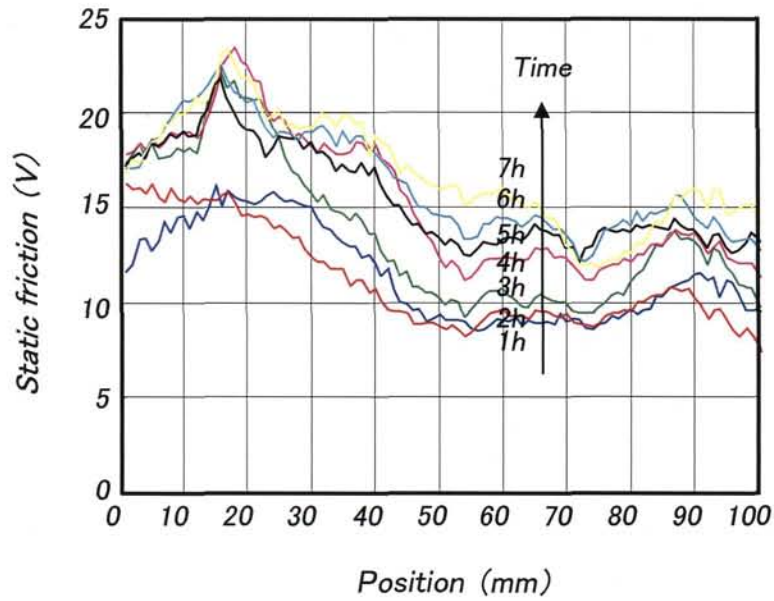


図 7.25 連続駆動における摩擦特性の変化 (正方向駆動)

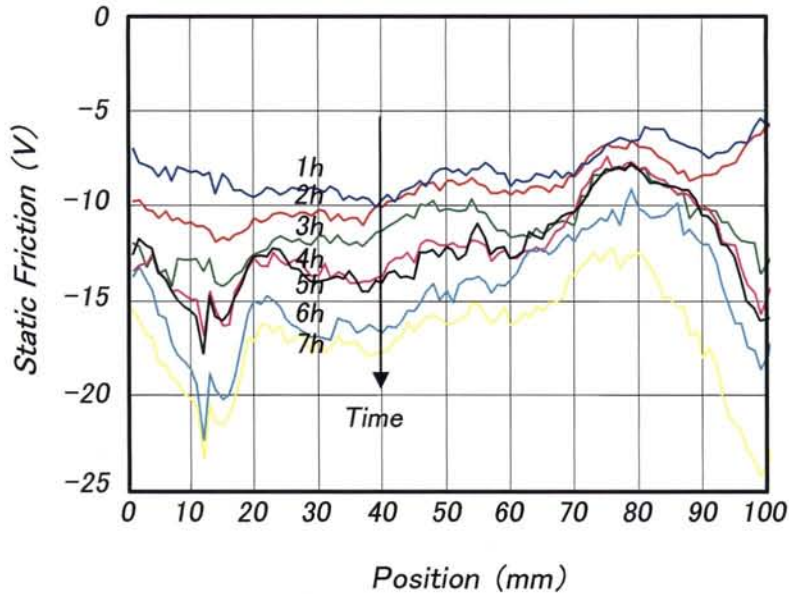


図 7.26 連続駆動における摩擦特性の変化 (負方向駆動)

7.3.2 Bang-bang 補償における基本制御

摩擦駆動による高精度位置決め制御においては、先に述べたように、微小速度域での負勾配摩擦特性の影響から目標値応答特性が悪化する．スティックスリップ現象が引き起こすこの類の問題に対しては、bang-bang 制御に基づく補償法を提案してきた^[4]．図 7.27 に bang-bang 制御のブロックダイアグラムを示す．この手法ではステージ静止時の位置追従誤差に着目し、式 7.18、7.19 で同定した静止摩擦力相当の補償電圧 $\{us_p, us_n\}$ をフィードフォワード的に印加する．しかし、単純に補償値を PI 制御出力と合算してもうまくいかない場合がある．それは、積分動作との干渉、つまり、積分ゲインが過大な設定状態において目標位置を行き過ぎた場合、PI 制御器が算出する出力に bang-bang 制御における補償値を合算しても、制御器出力の極性が反転しない状態を指す．そこで、ここでは bang-bang 制御に対し以下の改良を加えた．制御入力を u 、制御器出力を u_c とし、制御器の離散化を次式のようにする．

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Be(k) \\ u_c = Cx(k) + De(k) \end{cases} \quad (7.20)$$

ここで位置誤差が存在し、かつステージが静止した時 ($e \neq 0$ かつ $v=0$) の 1 サンプル目に、 $x(k)=0$ として制御器の内部状態をクリアする．次に、 $u_c(k)=De(k)$ として制御器出力を定常項のみに設定して摩擦補償電圧 $\{us_p, us_n\}$ を印加する．すなわち、

$$u(k) = \begin{cases} De(k) + us_p & \text{if } (e > 0) \ \& \ (v = 0) \\ De(k) + us_n & \text{if } (e < 0) \ \& \ (v = 0) \end{cases} \quad (7.21)$$

とした処理を施す。この改良を加えた PI 制御系におけるステップ応答波形を図 7.28 に示す。基本的 PI 制御においては、最大静止摩擦値以下の制御出力ではステージは静止した状態となり、動き出したとたんに目標位置を通過してしまう、いわゆるスティックスリップ現象をおこしている。一方で、この手法をいた制御においては、bang-bang 制御により電圧が印加された時に静止摩擦相当が加算されるため、目標位置に素早く追従している。また、図 7.29 には、ガイドレールの走行全域にあたる 100mm 区間を 1mm 間隔で連続駆動した際の結果を示す。ちなみに、1mm 駆動の位置静定規則としては、目標位置との差が±100nm となるまでとした。予め全域の摩擦補償電圧を取得してその平均値を使用した場合は、スティックスリップの影響が随所に見られ、位置決めまでの静定時間もばらついている。しかし、全域にわたる摩擦補償電圧を使用した際には、いずれの駆動場所においても静定時間は安定し、全体的に良好な結果を示した。そして、100mm 移動にかかった全体時間比としては、分布補償電圧を使用した制御方式では平均値を使用した場合に比べて 63%以上の改善となった。

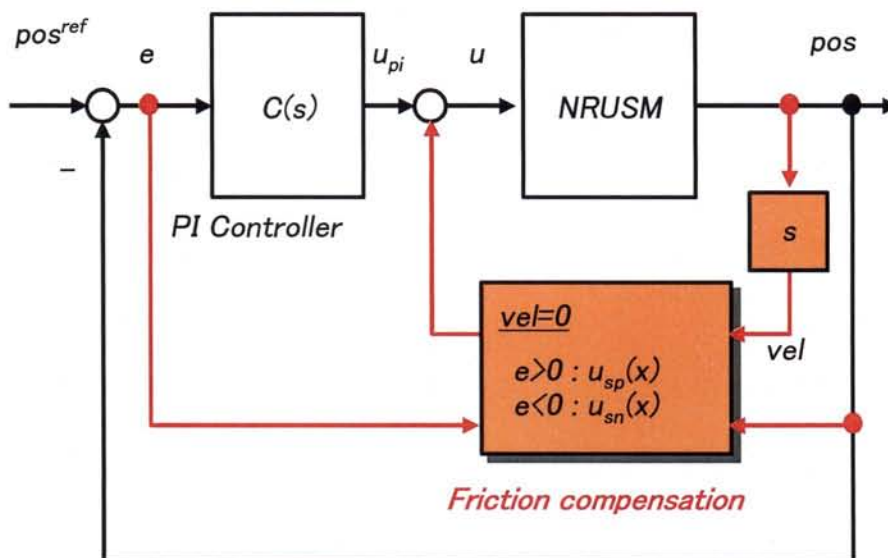


図 7.27 bang-bang 制御のブロックダイアグラム

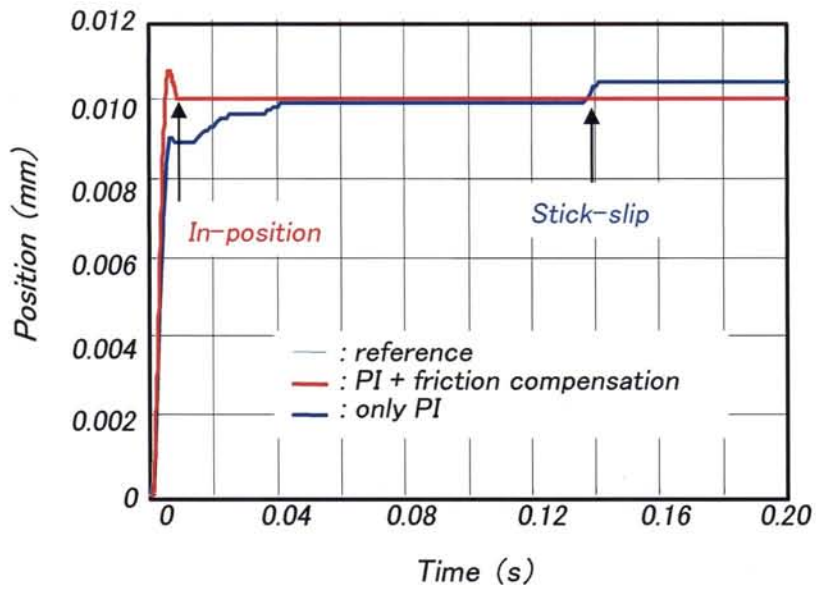


図 7.28 改良型 bang-bang 制御におけるステップ応答

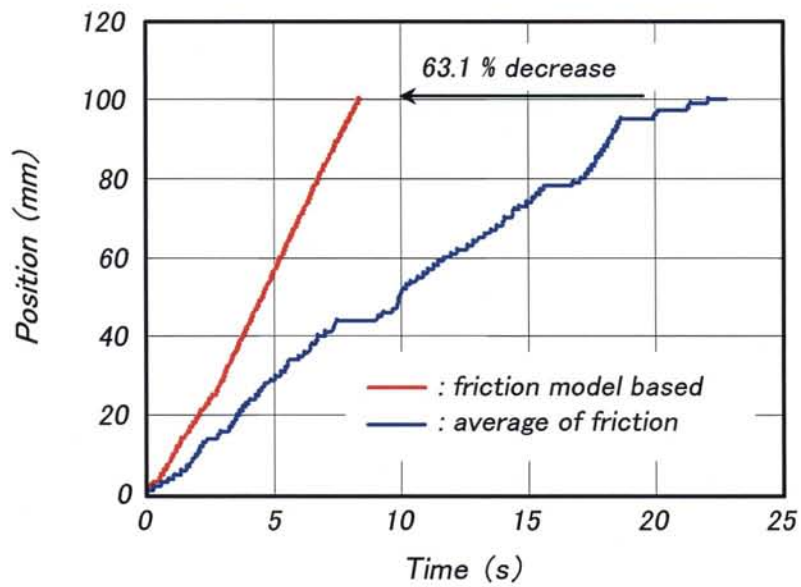


図 7.29 改良型 bang-bang 制御における 1mm ステップの連続駆動

7.3.3 時間関数を取り入れた Bang-bang 補償制御

7.3.1 節で示したように、制御系から観察される摩擦力は位置や連続動作時間などで変化する。この静止摩擦の時間変化は電圧軸に対する増減値として現れると仮定すると、静止摩擦 u_s はガイドレール上の位置 x ，時間 t の関数として、次式のように記述することができる。

$$u_s(s, t) = u_{sid}(x) \times k_{tv}(t) \quad (7.22)$$

ここで、 u_{sid} はある時刻において同定された位置関数としての静止摩擦であり、 k_{tv} が時間変化を表すスケジューリングパラメータとなる。評価した同定法は、初期値として $u_{sid}(x)$ をオフラインで同定したうえで、 u_s の時間変化に関するパラメータ k_{tv} をステージ駆動中にオンライン同定する方式である。すなわち、ステージ駆動中に任意の位置に関する静止摩擦 $u_{sm}(x_i)$ を同定することで、静止摩擦の時間変化特性 $k_{tv}(t)$ を次式から導出できるようになり、静止摩擦に対する位置関数の初期情報 $u_{sid}(x_i)$ を即時に更新することが可能となる。

$$K_{tv}(t) = \frac{u_{sm}(x_i)}{u_{sid}(x_i)} \quad (7.23)$$

摩擦補償付き制御系に対してステージ駆動中に静止摩擦 $u_{sm}(x_i)$ を取得する手法を説明する。ステップ応答試験の制御入力と位置の関係を図 7.30 に、停止時の制御入力拡大図を図 7.31 にそれぞれ示す。目標位置に対して偏差がある状態でステージが静止した時のみ摩擦補償電圧は制御器出力に加算される。しかし、目標位置近傍で静止すると、制御器出力が少ないために一定時間ステージが静止してしまう場合がある。図 7.31 中の丸印部分に、制御器の偏差積分演算により制御入力が次第に増加し、最大静止摩擦を超えたところでステージが目標位置へ移動し始める様子を示している。この電圧を位置 x_i における $u_{sm}(x_i)$ とすることで式 7.23 より k_{tv} を得ることが可能となる。図 7.31 は 50 mm 位置での 1 回の位置決めデータだが、このシーケンスにより 7 回分の静止摩擦が計測でき、その平均値は 14.7 V となった。7.3.1 節で説明した手法により得られている 50 mm 地点での静止摩擦計測値は 14.4 V であり、良い一致が確認できている。

この静止摩擦の時間変化に関するオンライン同定手法の有効性を検証した。実験環境は前述同様にクリーンルームとして、7 時間連続で 1mm のステップ&リピート駆動をストローク有効長である 100mm 区間で往復させた。そして、7 時間経過後の正方向 1 回目の位置決めシーケンス時に、1 時間経過時の摩擦モデル (1 時間計測モデルとする) に対するスケジューリングパラメータを導出し、そのスケジューリングパラメータを式 7.22 に従い 1 時間計測モデルに乗算することで 7 時間モデルの推定値 (7 時間推定モデルとする) を導出した。また、100mm 位置からの折り返し時には、負方向 1 回目に同様の処理をした。そして、2 回目以降の位置決めでは、推定した 7 時間推定モデルを用い位置決めを行った。図 7.32 に 1 時間計測モデル (青線)、7 時間推定モデル (緑線) および 7 時間計測モデル (赤線) の正方向データを、図 7.33 に負方向データをそれぞれ示す。スケジューリングパラメータは正方向、負方向それぞれ 1.437、2.420 となった。7 時間計測モデルと 7 時間推定モデルを比較すると、正方向で特に良い一致が確認できている。各摩擦モデルを

用い7時間経過時に行った位置決め実験結果を図7.34に示す。7時間経過時に1時間モデルをそのまま用いた場合には、特に最初の部分で位置決め性能が劣化している。また、その傾きも若干緩やかとなっており、静止摩擦の時間変化を考慮する必要性が確認できる。これに対して、7時間計測モデルおよび7時間推定モデルを用いた場合にはほぼ同等の位置決め時間となっている。そして、1時間計測モデルでの位置決め時間に対して7時間推定モデルを用いた場合には22.2%の位置決め時間の短縮が達成されており、同定手法の有効性が表れている。

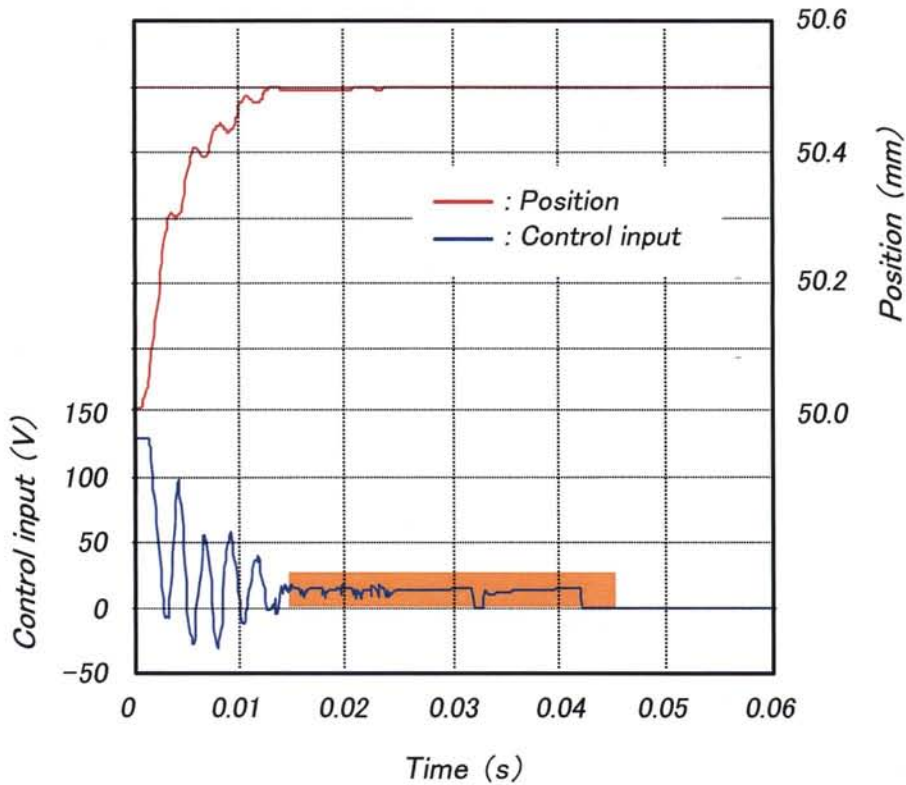


図 7.30 ステップ応答による目標位置と制御器出力の関係

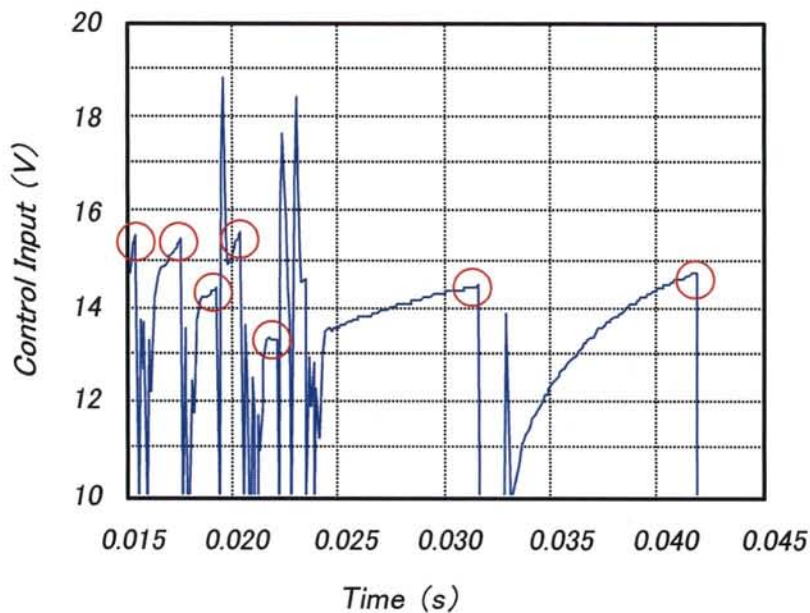


図 7.31 ステップ応答による目標位置と制御器出力の関係 (拡大図)

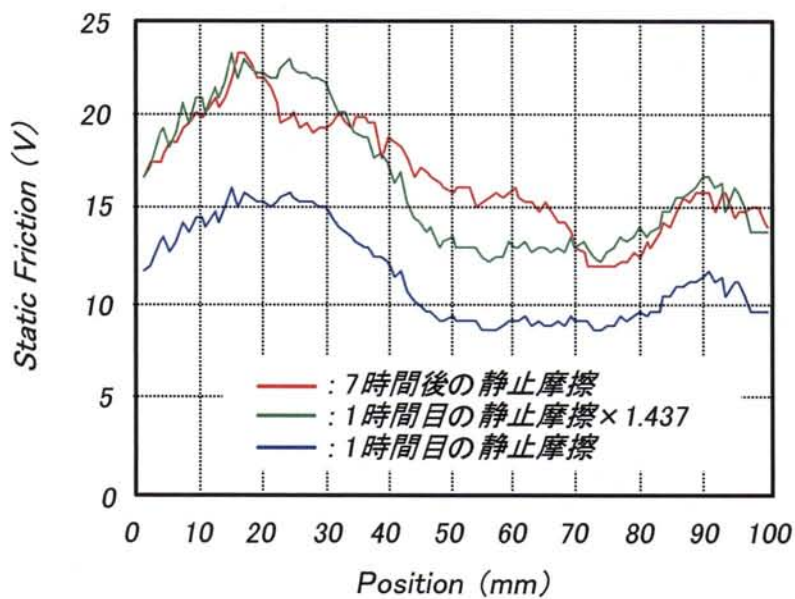


図 7.32 7時間連続駆動試験における正方向の各摩擦モデル

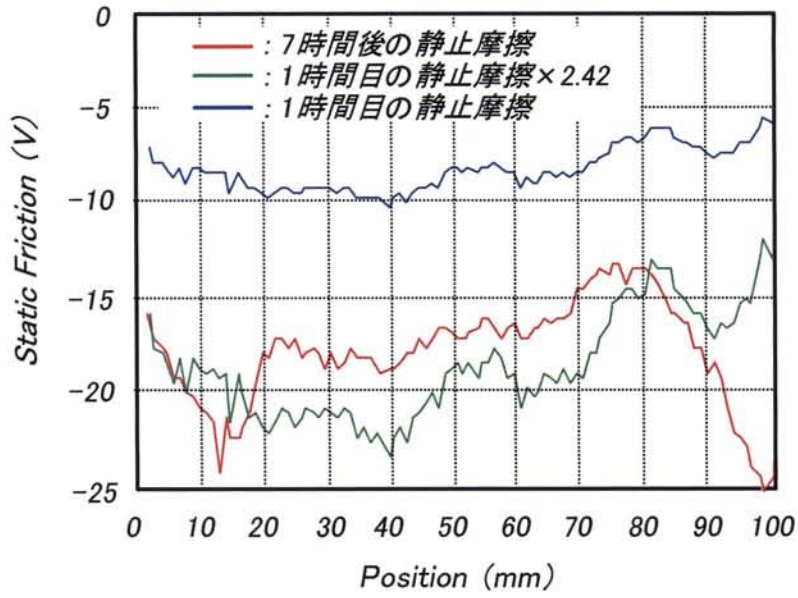


図 7.33 7時間連続駆動試験における負方向の各摩擦モデル

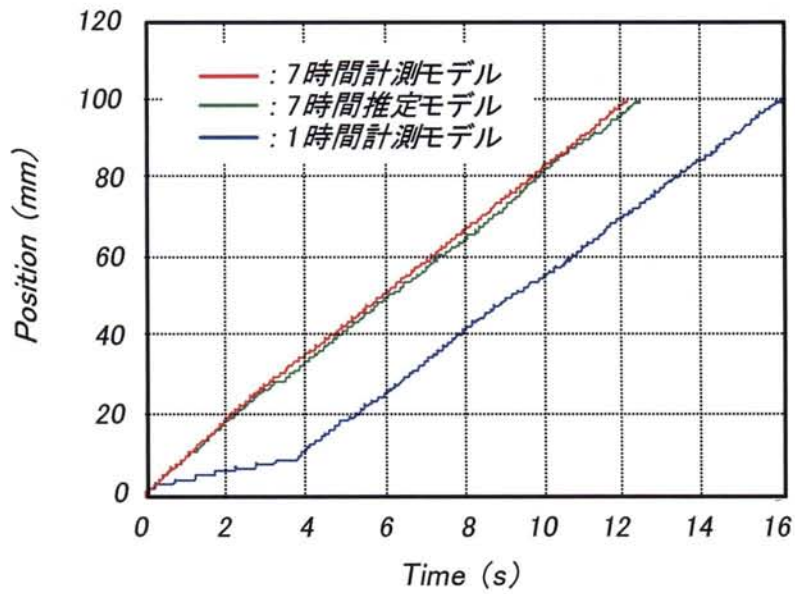


図 7.34 7時間連続駆動試験における各摩擦モデルによる 1mm ステップの連続駆動

7.3.4 Bang-bang 補償を装備した連続軌跡追従制御系

第4章において評価したCPT制御系にBang-bang補償を融合して、その性能に関する評価を行った。ブロック線図を図7.35に示す。CPT制御系が目標としているのは連続軌跡への追従だが、実用化における連続軌跡応用では速度0から最大速度までの指令値に対する理想的な追従性が必要となる。これまでの産業応用機器においては、速度0近傍での不確かさが問題となっており、特に、2軸補間による加工装置などでは象限突起誤差として知られている⁶⁾。第4章でNRUSMの速度安定性を述べたが、その評価では停止状態から速度安定期までの振る舞いは評価に入れていない。そこでは同様の問題が発生していたからである。しかし、Bang-bang補償を有効に取り入れることで、その性能を速度0近傍まで拡張できる可能性がある。それは、速度0近傍での問題点の本質は、微小速度域での負勾配摩擦特性によるものであり、この補償法は速度が0近傍で威力を発揮するからである。

評価には、 $\pm 100\mu\text{m}$ 振幅で周波数が10Hzの正弦波位置指令を使用し、PI制御系、ロバスト制御系、そしてCPT + Bang-bang補償制御系のそれぞれにおける目標位置に対する追従性を比較した。図7.36には各制御系における位置軌跡を、図7.37には目標位置との偏差をそれぞれ示す。PI制御系やロバスト制御系と比較して、明らかにCPT + Bang-bang補償制御系の優位性が表れている。図7.38と図7.39には、ロバスト制御系とCPT + Bang-bang補償制御系について、それぞれの目標位置との偏差に関するヒストグラムを示す。評価点数は2,000ポイントとして、 $0.1\mu\text{m}$ 分解能で処理した。ロバスト制御系における標準偏差は45.1であったのに対して、CPT + Bang-bang補償制御系のそれは10.3と4倍以上の改善となった。この評価で使用しているリニアスケール分解能が $0.1\mu\text{m}$ であることを考慮すると、10.3の標準偏差、つまり $1.03\mu\text{m}$ は非常に良好な結果であり、高速度～低速度域までのCPT制御系と速度0近傍でのBang-bang補償の整合性が高いことを証明している。

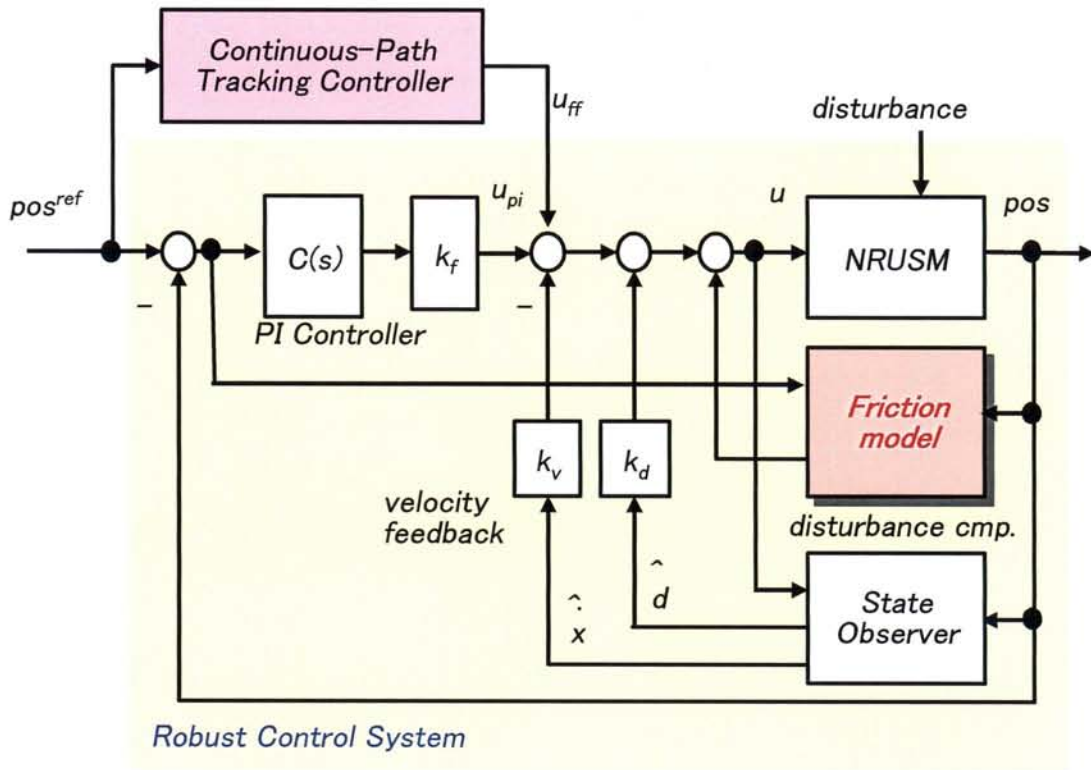


図 7.35 改良型 bang-bang 制御機能を含んだ CPT 制御系のブロック線図

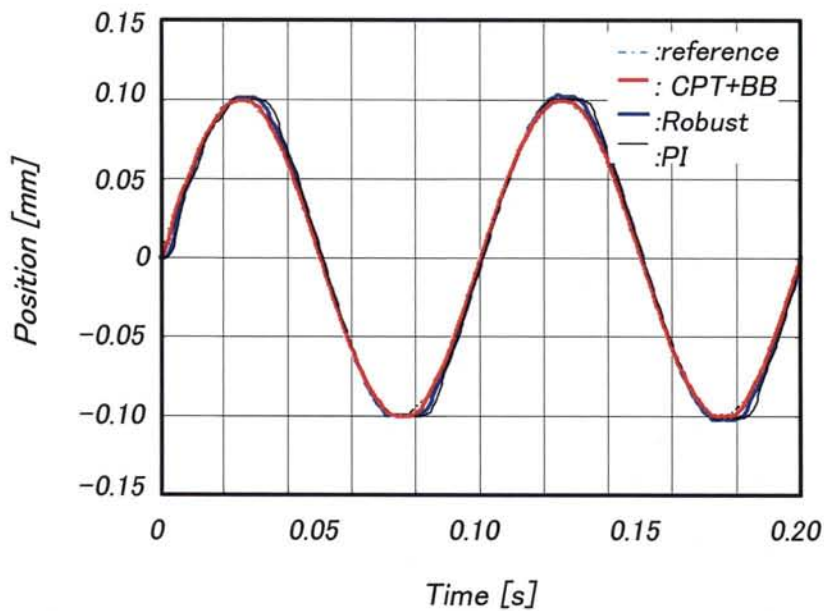


図 7.36 正弦波位置指令（±100μm 振幅，10Hz）に対する各制御系の位置軌跡

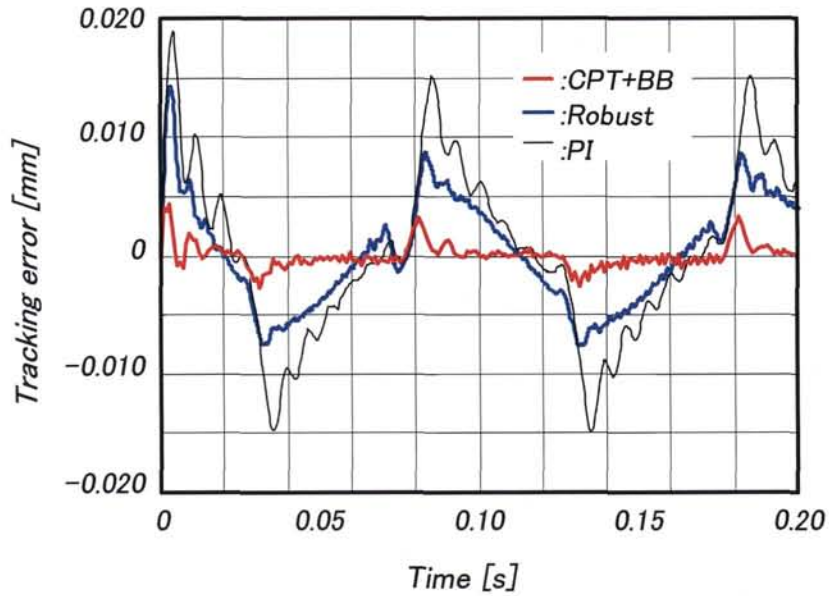


図 7.37 正弦波位置指令 ($\pm 100\mu\text{m}$ 振幅, 10Hz) に対する各制御系の位置偏差

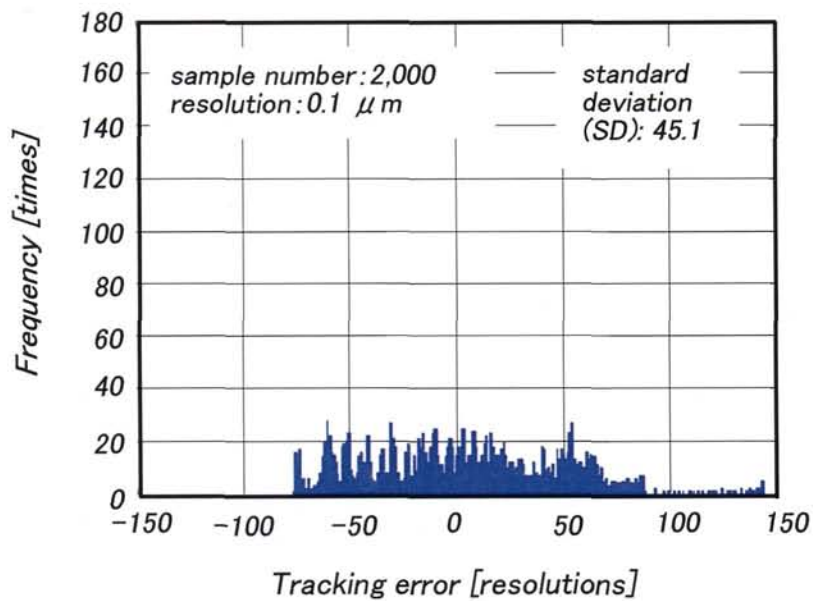


図 7.38 ロバスト制御系の位置偏差に関するヒストグラム

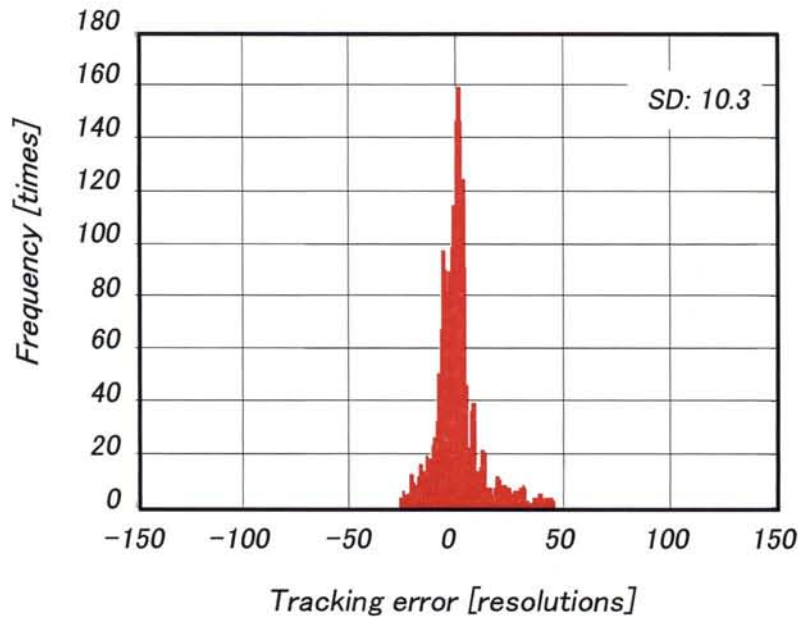


図 7.39 CPT + Bang-bang 補償制御系の位置偏差に関するヒストグラム

7.4 結言

本章では、摩擦駆動型アクチュエータにおける摩擦問題に対して、本質的対策方法とその評価結果に関して述べた。基本的アプローチとしては、摩擦を殆ど伴わない静摩擦領域での駆動検討である。その結果として、従来と同一材料、同一条件下において、これまでは $9.40 \times 10^{-9} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ であった摩擦レートが、 $2.93 \times 10^{-10} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ と、1/30 以下に低減された。勿論、駆動性能は維持したままである。これにより、実用化への最大の関門である摩擦問題を克服したことで、NRUSM の実用化が見えてきた。また、ここで示した動作不感帯を摩擦力と定義し、ガイドレール上での線分布と時間的変化を把握したうえで、それらの要素をロバスト制御系へと融合した。この制御系による性能は、従来のロバスト制御系と比較して、特に要求速度が 0 近傍において良好な結果を示した。この成果は、今後 NRUSM を使用した多軸補間制御を実施する際に、象限突起誤差を大幅に改善する際の有効手段と思われる。

参考文献

- [1] K. Adachi, K. Kato, N. Chen, "Wear map of ceramics," *Wear* 203-204, pp.291-301, 1997.
- [2] Koji Kato, Koshi Adachi, "Wear of advanced ceramics," *Wear* 253, pp.1097-1104, 2002.
- [3] 小坂光二 他, "非共振型超音波モータの開発 (制御システム)", 第 16 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp.317-322, 2004.
- [4] T.Ohishi, S.Hashimoto, K.Ohishi, T.Ishikawa, K.Kosaka, H.Kubota and T.Ohmi, "Position Control of a Precision Stage with Non-Resonant Ultrasonic Motor Considering Friction Property", 2004 NATIONAL CONVENTION RECORD I.E.E.JAPAN [4] 4-204. pp.332-333, 2004.
- [5] S.Hashimoto, K.Ohishi, T.Ohishi, T.Ishikawa, K.Kosaka, Y.Egashira, H.Kubota and T.Ohmi, "Ultra-Precision Stage Control Based on Friction Model of Nonresonant Ultrasonic Motor", Proc of the 8thIEEE International Workshop on Advanced Motion Control(AMC'04), pp.559-564, 2004.
- [6] 田中淑晴, 恩田一, 大塚二郎, 大岩孝彰 "直線転がり案内の非線形ばね特性と円弧象限切替突起誤差", 2002 年度精密工学会秋季大会学術論文集, F63(2002), pp.241, 2002.

第8章 装置への応用事例

8.1 緒言

近年、半導体製造技術、新材料評価技術、微細生物学において、対象物の微細化は日々進み、かつては未知の領域であったナノスケールの操作が必要となってきた^[1]。この牽引力として強く働いているのは、ナノテクノロジーと総称される技術分野である。このナノテクノロジー技術は半導体微細加工の延長技術とされているが決してそうではなく、これらは「トップダウン技術」と「ボトムアップ技術」、この二つに大別されていた技術群の集合体である。トップダウン技術とは、これまでの半導体製造を主流とした微細加工技術であり、原材料となるシリコンを精製しバルク材料とするところが出発点である。人間の目に見えるサイズから加工を始めて、機械的加工や分子線による非接触加工を経てマイクロメートル、ナノメートルの世界へと微細化していく。一方の材料分野を主流としたボトムアップ技術では、最初に扱う材料スケールが既にナノメートル以下の原子サイズである。そして、それらの原子や分子を積み重ねてナノスケールの目的物へと仕上げていく。両者の根本的違いは、長さを制御単位としているか、物性を制御単位としているかに大別される。つまり、半導体製造技術の本質は半導体理論をシリコンなどの基板上に具現化する加工技術が主体的であり、材料分野では自己組織化や触媒技術などの化学技術が中心となる。しかし、1981年の走査トンネル顕微鏡(STM)の発明により、この二つの技術をインターフェースする試みが急速に加速していった。それは、ボトムアップにより作り上げられた分子構造を、トップダウン技術により個別に操作/配置する要求、つまり、ボトムアップのスケール上限値とトップダウンのスケール下限値のインターフェース領域を融合させた技術分野の確立である。これが、現在のナノテクノロジー技術群の原点である。そして、それらの頂点には、個々の原子を原子スケール精度で操作/配置する技術が位置することになる。図8.1に、そのナノテクノロジー領域を概念的に示す。

本章では、これらの社会的背景を踏まえ、nm以下の位置制御分解能、nmレベルでの速度リップル、そしてそれらと対照的な数100nm/s以上の送り速度などの特徴を有するNRUSMの応用に関して、電子線描画装置やレティクルフリー露光装置などの微細加工装置や、ナノサーチャリー装置やナノプローブ装置などのマニピレータ応用装置等々の半導体産業やナノテクノロジー産業を牽引していく種々の装置に融合させた応用事例について述べる。

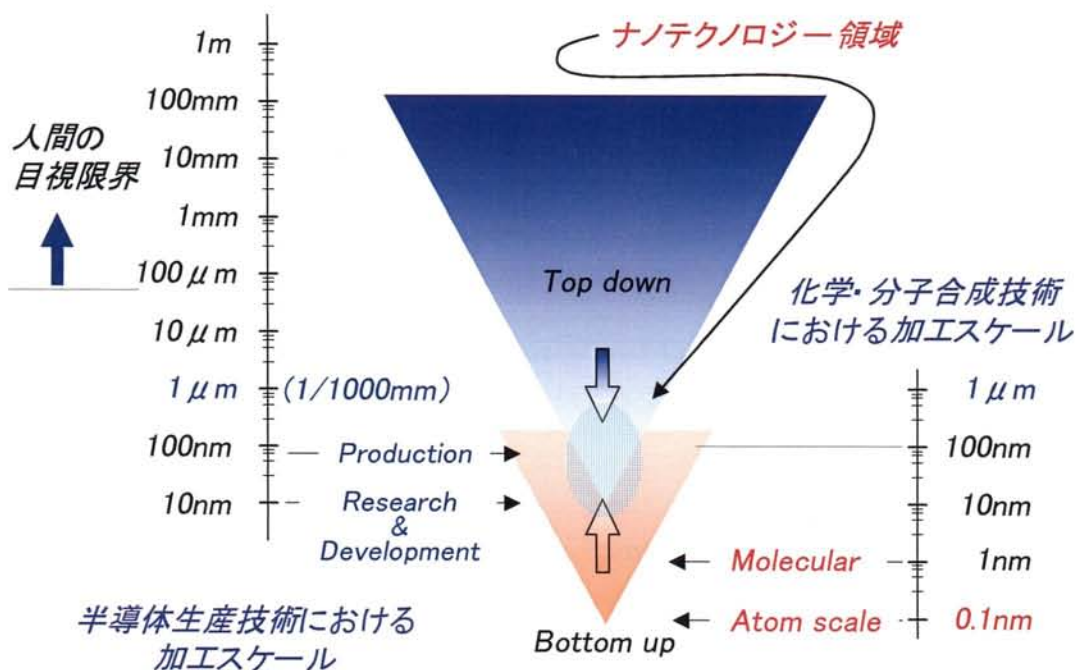


図 8.1 ナノテクノロジー技術の位置する寸法領域

8.2 電子線描画装置への応用例

走査型電子顕微鏡 (SEM) を基本体とした研究開発用電子線描画装置 (EB) に、NRUSM を装着した高精度ステージを導入した応用例に関して述べる。元来、EB は半導体生産工程の最上流に位置し、量産用微細加工パターン原盤 (レティクル) を製作する用途に用いられている (図 1.1 参照)。しかし、微細加工技術を必要としているのは LSI 製造分野だけではない。現在では、ナノテクノロジーの先頭ランナーとして、MEMS や μ -TAS などの新たな研究分野が着々と成果を上げている。その様な研究開発分野では、半導体製造と同様の製造プロセスで微細加工が行われているが、その開発ペースは異なる。試作品が完成したらその場で評価し、結果を確認しながらデザイン修正に取りかかる。そして、幾つかのパラメータを変更し、また微細加工行程からやり直す非常に短い開発サイクル (Turn Around Time : TAT) が要求されている。その行程を確保するには半導体製造装置群の占有が前提条件となる。しかし、通常の半導体製造ラインを一式揃えたとすると、場所ならびに装置コストなどで数 10 億円から数 100 億円の巨額な予算と人員確保が必要となる。そこで、それらの活動を支援する商品群として、研究開発用を冠した同様な装置カテゴリーが存在する。これらの装置においては、基本性能としては同等だが扱える基板サイズが非常に小さい、生産性が低い、自動化されていないなどの欠点は有るものの、試作製造を行う上ではそれほど問題とならず、そしてコストは桁違いに安いのが特徴である。研究開発用 EB もそれに属しているが、近年この装置に対する要求傾向は違ってきている。それは、微細加工における成果物の寸法精度を支配する割合が装置群のなかで一番高いこと、微細加工レベルは数 10〜数 nm オーダーと超高分解能になってきていること、にも係わらず加工を施す基板サイズは数 10mm×数 10mm〜数 100mm

×数 100mm と広域となってきたことに起因する。まず、微細加工レベルの問題は、電界放出型電子線源を用いることで数 10nm まで可能となる。しかし、広域描画の要求を満たすことは一朝一夕には叶わない。何故ならば、電子線描画における微細加工は一度に大きなエリアを処理できないので、数 $100\mu\text{m}$ × 数 $100\mu\text{m}$ のフィールドと称される小さな処理単位に分割しながら進め、ステージの移動によりそれらのフィールドを繋ぎ合わせていくことで広域描画を実現するからであり、この部分に装置としての品質が凝縮されている。つまり、SEM を基本体とした研究開発用 EB 装置では、このフィールド接合精度が生産用描画装置と比較して大きく劣る。これは、以下の理由による。

最初に、偏向装置における原理的問題点を説明する。この偏向装置とは、電場または電磁場を発生させて、そこを通過する電子線の軌道を曲げる機構である。機械的に 90° 位相で構成された 2 つの発生源とその制御回路から成り、それぞれに X-Y 走査信号を印加することで電子線による 2 次元走査を試料面で実現する。生産用描画装置で使用されている電子線偏向装置は、その殆どが静電偏向方式を採用している。静電偏向とは、電子線軌道に対向した平行平板を設置し、その間に電界を発生させて通過する電子線の軌道を曲げる方式である。この静電偏向方式における利点は、印加した電圧により発生する電界強度が正確に決まる点である。つまり、正確な描画には高精度な電子線の位置制御が必要となるが、静電偏向方式の場合は高精度な電圧制御によりそれが可能となる。一方で、SEM に使用されている偏向装置では、発生する電磁場が電子線と直交するように設置した対向コイルに電流を流して通過する電子線軌道を偏向する、いわゆる電磁偏向方式を採用している。この場合は、いくら電流を正確に制御しても原理的に磁気回路の持つヒステリシスの影響は免れない。図 8.2 に走査型電子顕微鏡の偏向メカニズムを示す。

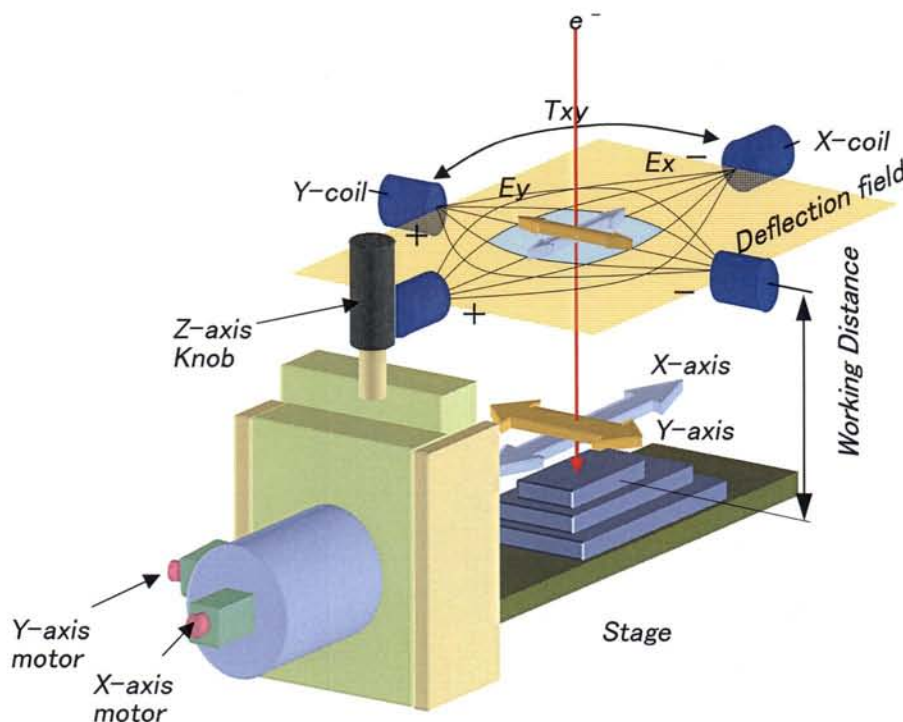


図 8.2 走査型電子顕微鏡 (SEM) の偏向メカニズム

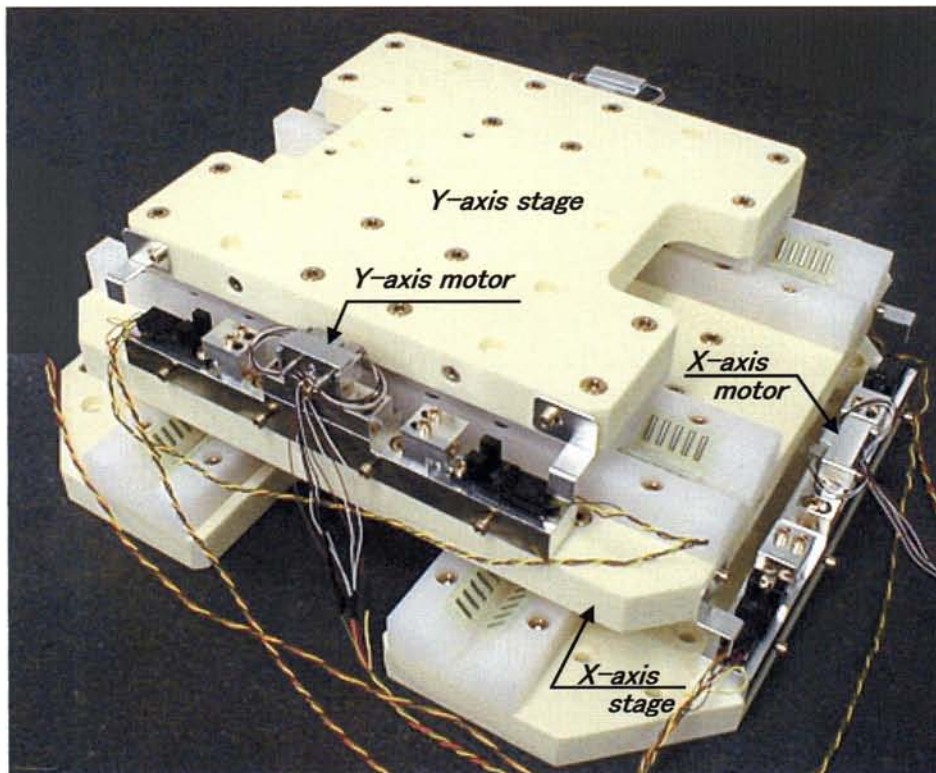


図 8.3 NRUSM 駆動の 100mm ストロークステージ外観

次に、偏向装置における機械的問題点を説明する。標準的な走査型電子顕微鏡の場合、対向設置されたコイルの機械的直角精度は約 $\pm 0.5^\circ$ (9mrad)程度、制御回路を含めた振幅精度は約2%程度である。しかし、 $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ を基本フィールドサイズとした描画時に要求される偏向精度は、そのフィールド接合精度を100nmとすると、振幅精度や直角精度は共に1/10,000程度(振幅:0.01%以内 直角: 0.0045° 、 $80\mu\text{radian}$ 以内)が必要となる。これらの基本機構では到底高精度の描画などは期待できない。そこで、ヒステリシスの影響を受けにくいラスタ型描画方式を前提として、NRUSMを駆動源とした高精度ステージを用いた高精度偏向/直角調整を行うことで上記2点の問題点を解決した。ステージ外観を図8.3に、その仕様を表8.1に示す。このステージは固定部、可動部ならびにガイドレールも全てアルミナセラミックス製であり、その転動体にはタングステン-カーバイド製のローラーを使用している。これにより、電子照射系の対物レンズ作動距離に相当するステージ中心部の10mm上部における磁場変動量は1nT以下を達成している。位置計測には、計測分解能0.61nmのアジレントテクノロジー製レーザー干渉計を使用した。外乱振動の影響もありステージ位置決め分解能は9.6nmで運用した。このステージを使用した偏向/直角調整手順に関して以下に述べる。

表 8.1 研究開発用 EB に装着した NRUSM 駆動の 100mm ステージ仕様

項目	仕様
軸構成	X-Y 2軸
ストローク	X軸(上軸):110mm Y軸(下軸):110mm
材質	アルミナセラミックス製 Al_2O_3 99.5%
ガイドレール	アルミナセラミックス製 V-Vガイド方式
転動体	円筒型タングステンカーバイト 15mm × 4.000mm Φ
幾何精度	Yawing, Pitching, Rolling 全てにおいて1arc-sec. 以下@100mm
Z変動	1 μ m@100mm
駆動源	非共振型超音波モータ(NRUSM)
最高速度	30mm/s
最高瞬間加速度	0.1G
位置決め精度	10nm
位置計測装置	He-Neレーザー干渉計
位置計測分解能	0.6155nm/LSB
Yawing	± 1.0 arc-sec
Pitching	± 1.0 arc-sec

まず、偏向中心部のマーク画像 ($10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$) を図 8.4 のように取得する。次に、ステージを X 軸上 $240.00\mu\text{m}$ のアドレスに移動し、 $240\mu\text{m}$ 程度の偏向オフセット量を与えて画像 ($10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$) を取り込む (図 8.5)。同様に、ステージを X 軸上 $-240.00\mu\text{m}$ のアドレスに移動し、 $-240\mu\text{m}$ 程度の偏向オフセット量を与えて画像 ($10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$) を取得する。同様のシーケンスを Y 軸上でも実施することで合計 5 つの画像が取得できる (図 8.6)。そして、それらの画像に関して、積和演算を基本としたパターンマッチング法による画像ズレ量の演算を行うことで、偏向誤差量、角度誤差量や偏向系座標とステージ移動系座標との回転誤差量などが算出できる。その補正量を描画時に使用することで正確な偏向が実現可能となる。つまり、ステージの管理している平面座標を偏向制御系に複写する方式である。

次に、調整された偏向量をもとに、実際の描画による精度確認を行う。図 8.7 で示すように 1 回の描画サイズは $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ と小さいため数 mm 四方を描画する場合、フィールド毎の描画終了と共にステージを移動し、フィールド間での図形接合を行いながら全体を描画する。今回は精度確認のため、図形接合部のそれぞれのフィールド側に $2.0\mu\text{m}$ ピッチと $1.9\mu\text{m}$ ピッチのバー

ニアパターンを描画し、ノギスの読み取りと同様な方式で接合精度の確認をした。図 8.8 に描画フローチャートを示す。従来の生産用描画装置のステージでは、大抵の場合は電磁式回転モータが使用されている。そのステージにおける位置決め精度は $1\mu\text{m}$ 程度だが、実際の描画における図形接合精度は 50nm 以下である。そこでは、フローチャートに示すように、静電偏向装置のヒステリシスフリーな特徴を活かし、目的とする絶対位置と現在位置との差を偏向装置の電場中心にフィードバックする手法が用いられている。これにより、描画時の中心は絶対位置と一致するので位置精度の粗いステージを使用しているにもかかわらず 50nm 以下の高精度な図形接合が可能となる。しかし、ヒステリシスを伴う電磁偏向装置では、その方法は使用できない。一度でも偏向中心を移動するとヒステリシスの影響で、元の中心位置に戻すことが難しいからである。しかし NRUSM を使用した精密ステージでは、 nm オーダーの位置決め精度を実現できるので、偏向中心をずらすこと無く連続描画が可能となる。描画結果を図 8.9 に示す。フィールド接合精度は 50nm 以下と、生産用描画装置と同等の性能を発揮しており、高精度描画で要求される精度を十分満たしている。

本節では、EB 用精密ステージに NRUSM を構成した事例に関して述べた。超精密位置決めを特徴とし、さらに真空対応や非磁性などの対環境性を有する NRUSM を使用することで、これまでは難しかった電磁偏向装置を使用した EB でも高精度描画が可能であることを実証した。今後、高い要求と厳しい制約事項が増えてくる真空応用装置の精密ステージ分野では、NRUSM の有する種々の特徴が威力を発揮すると考える。

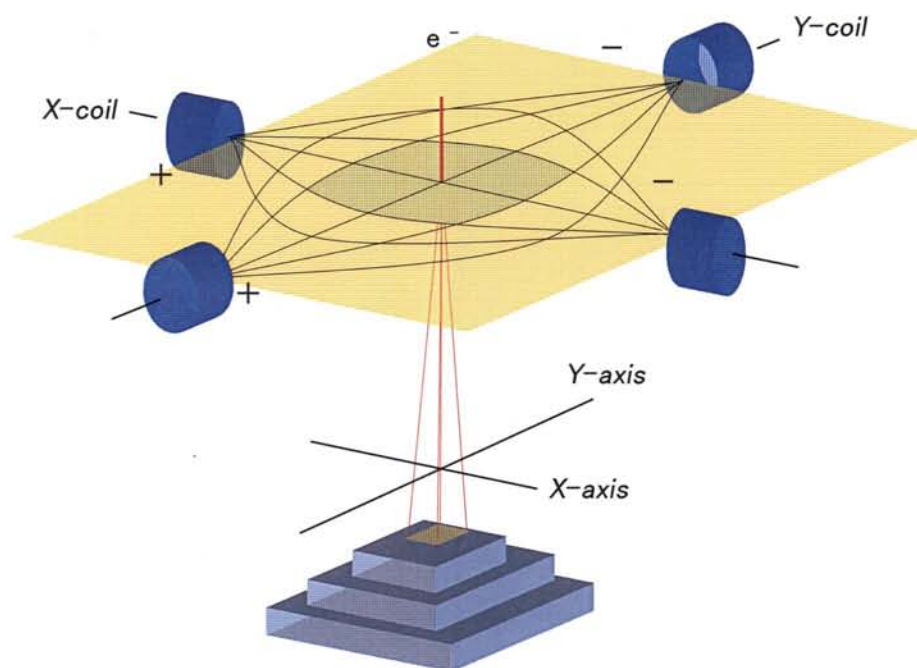


図 8.4 偏向調整アルゴリズムにおける中心画像取り込みイメージ

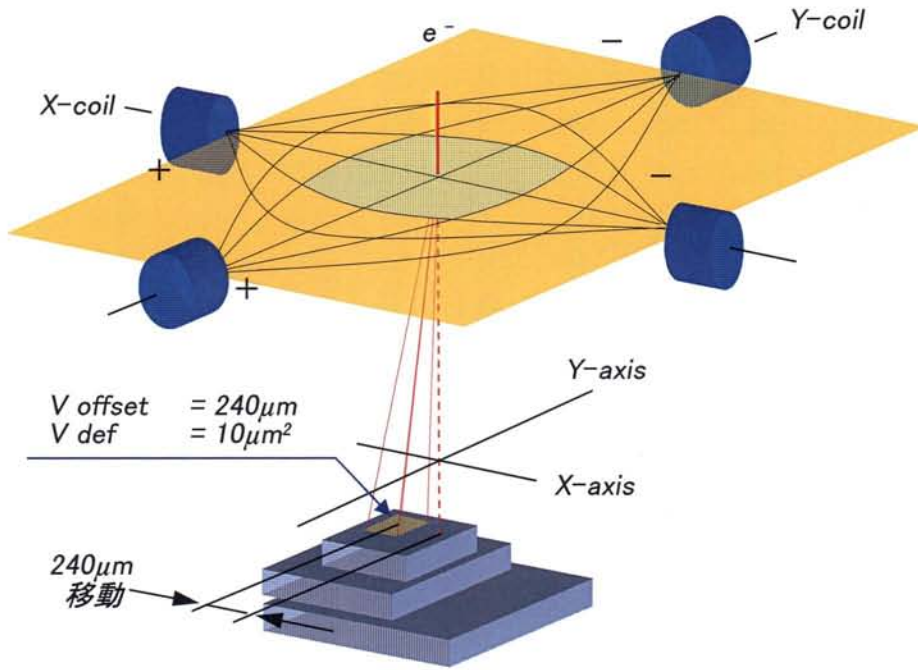


図 8.5 偏向調整アルゴリズムにおける offset 画像取り込みイメージ

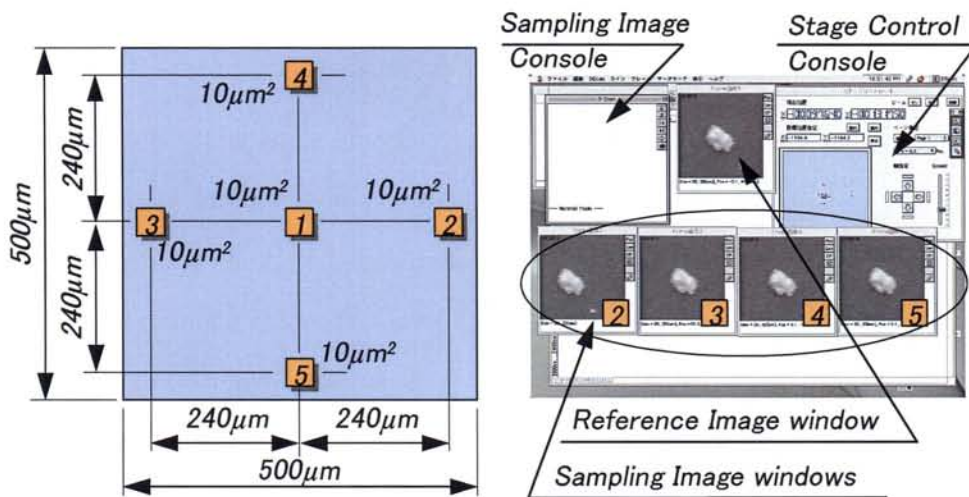


図 8.6 PC 画面上に表示された計算用画像取得

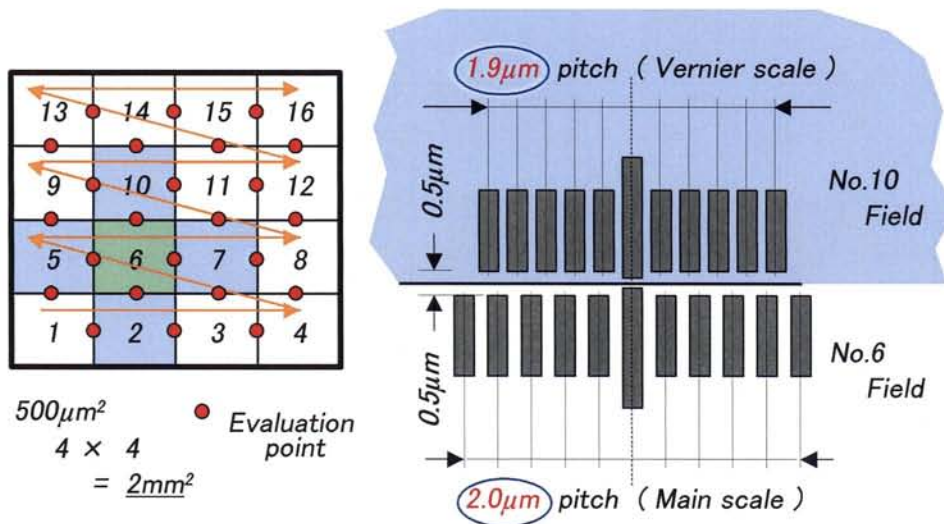


図 8.7 描画順序と接合精度の検査用パターン

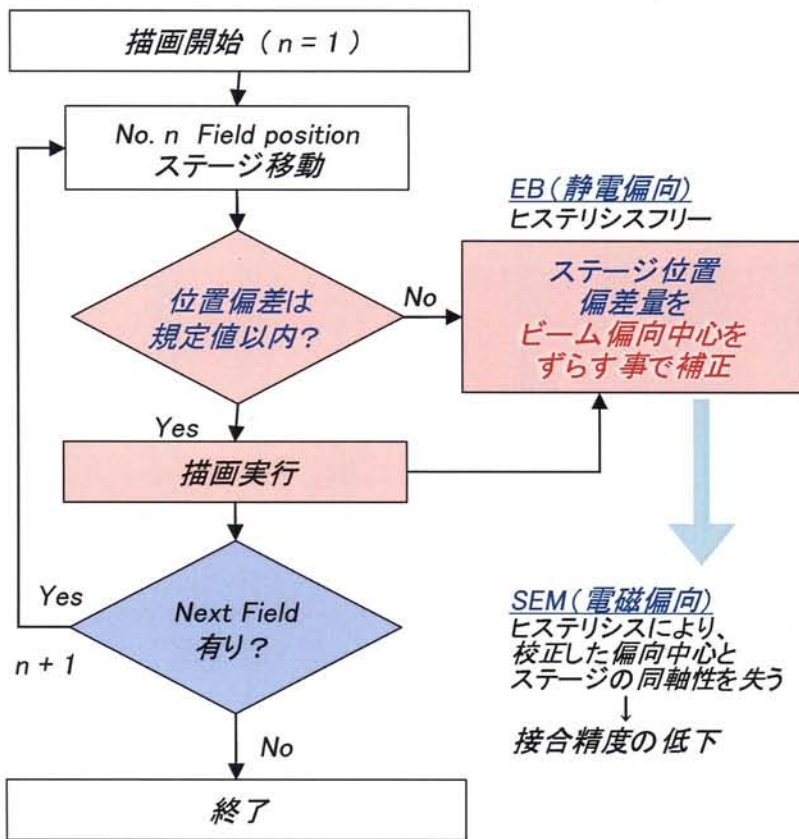


図 8.8 描画フローチャート

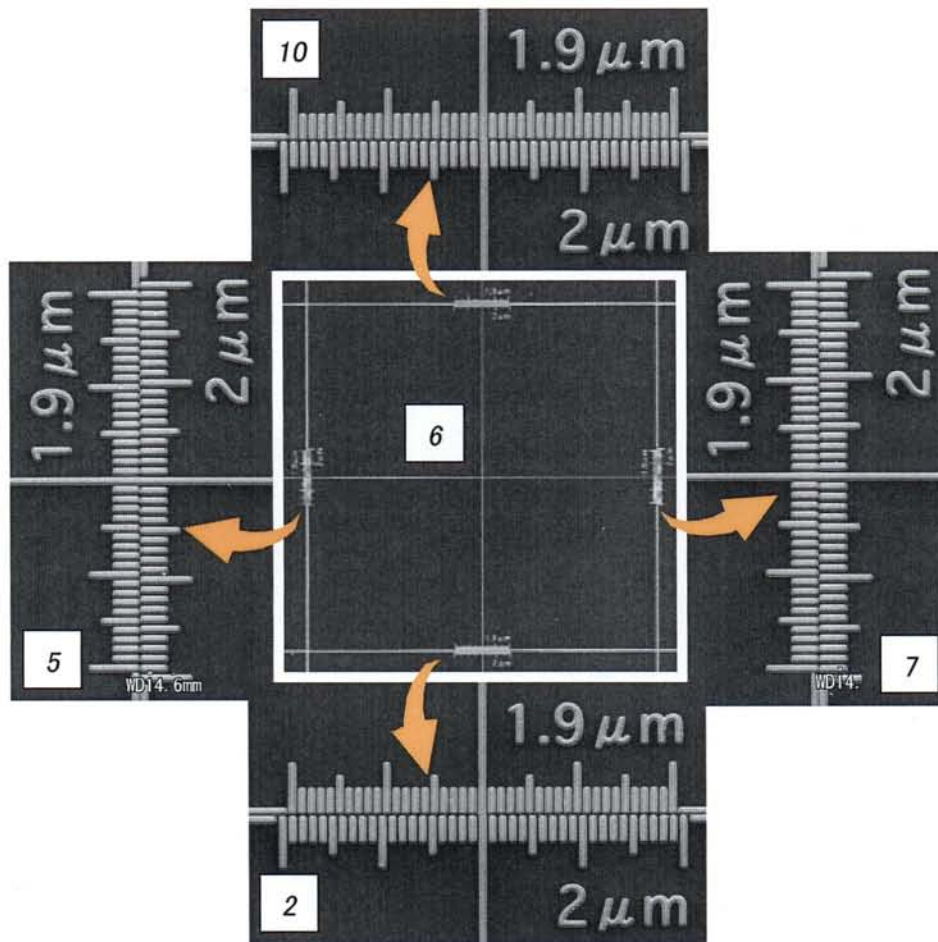


図 8.9 NRUSM 駆動ステージを搭載した R&D 描画装置におけるフィールド接合精度

8.3 レティクルフリー露光装置への応用例

半導体製造技術の進歩やブロードバンドネットワークの普及により、プリント配線基板やパッケージ基板には高密度実装や高速信号の伝達への対応が要求されるようになってきた。このプリント配線基板上の配線寸法は、2007年には $20\mu\text{m}$ になると予想されており、半導体と同様のパターン形成方法が適用されるようになってきた。同時に、プリント配線基板を大量に消費する電子機器の開発分野では、更なる微細化、短い製造期間、そして低コストなどの要求も非常に高まってきている。しかし現行技術の延長線では、従来のガラスマスクあるいはレティクルの製造 TAT の長期化や製造コストの高騰化が、その障害となることは予想に容易い。そこで、プリント配線基板用露光装置としてレティクルを使用しない露光方式を確立し、上記要求に応える生産方式が提案されている。この方式の特徴は、設計システムから露光装置までを全てオンラインネットワークで接続し、作業フローの中間に位置していたガラスマスクやレティクルを排除している所である。図 8.10 に従来のオフライン露光方式と今後のオンライン露光方式の概念図を示す。オフラ

イン露光では、固定化されたマスクパターンを使用するので、それ以上の自由度は無い。しかし、オンライン露光では、回路設計時に露光パターンだけでなく露光制御用パラメータもデザイナーとしてカプセル化できるので、露光処理全体の自由度が上がる。また、これにより、不具合が発生した場合の設計までのフィードバックが容易に行えるようになり、電子機器開発期間の短縮化の観点からも相当に有効な手段となる。そのような要求に対して、露光光源、LCD、NRUSM による精密ステージとシステムソフトウェアによるレティクルフリー露光装置を開発したので、それに関して述べる

図 8.11 に開発した露光システムの概略図を示す。本システムは以下の構成から成る。

- ・ CAD システム：回路設計と露光用データの変換
- ・ データベースサーバー：露光データや露光情報の管理を行うサーバー
- ・ 露光制御ユニット：アライメント操作、ステージの制御、LCD パネルへの画像転送
- ・ 露光装置：LCD 画像の表示、露光シーケンスの実行

これらの各システムおよびユニットは、すべて TCP/IP のネットワークで接続されている。これにより、露光データや露光情報が各システムおよびユニットで共有できるシステムとなっており、設計が完了後、直ちに露光データが露光装置に転送され、露光プロセスへと移行できる。露光装置の外観を図 8.12 に、その露光方式を図 8.13 に示す。LCD パネルは、光源と 1:1 の等倍投影レンズ（ウシオ電機社製：UPL-03DX）の間に設置され、LCD 駆動基板に接続されている。LCD 駆動基板の制御は、TCP/IP ネットワークに接続されている露光制御ユニットにより行い、CAD システムから転送された露光データを LCD に表示させる。露光制御ユニットは、画像の表示切り替え制御、露光ステージ制御を行い、アライメントスコープの制御によりアライメント操作も行えるようになっている。露光用波長は、バンドパスフィルタを用いることで g 線、h 線および i 線の選択が可能であり、LCD に表示されたパターンは、等倍投影レンズを介して直接プリント配線基板上に転写される。なお、等倍投影レンズの解像度は、L/S パターンで $7\mu\text{m}$ 、焦点深度は $\pm 50\mu\text{m}$ となっている。

LCD 外観を図 8.14 に示す。本露光装置に用いた LCD（ソニー製：LCX036）パネルは、画素構成が 1600 (H) × 1200 (V) ピクセルの透過型である。ピクセルピッチは $23\mu\text{m}$ で、開口部のサイズはピクセルピッチの 1/2 に相当する $11.5\mu\text{m}$ となっており、この開口サイズが最小加工寸法に相当する。したがって、開口サイズを最小グリッドサイズとして露光することにより、画素ピッチの 2 倍の解像度で露光することが可能である。NRUSM 駆動の露光用ステージを図 8.15 に示す。X-Y- θ の 3 軸駆動が可能であり、各軸のストロークは、X 軸 $\pm 150\text{mm}$ 、Y 軸 $\pm 200\text{mm}$ 、 θ 軸 $\pm 3^\circ$ となっており、分解能は X,Y は 10nm 、 θ は 0.1arc-sec であり、最小露光単位同士の正確な接合を提供する。実際の露光では、LCD パネルの画面サイズである $36.8\text{mm} \times 27.6\text{mm}$ をフィールド単位とし、ステージのステップ&リピート動作と露光により $340\text{mm} \times 340\text{mm}$ 基板の露光が可能である。また、Z 軸により基板厚みの差に伴う差動距離調整が可能となっている。アライメントスコープには、CCD カメラが取り付けられており、基板の画像を取得し、重ね合わせ露光の位置合わせを行う。その際には、ハロゲンランプ光源にフィルタをかけ、非露光波長を用いたオンアクシス TTL (Through The Lens) 方式により画像を取得する。これにより $\pm 0.5\mu\text{m}$ の重ね合わせ精度を確保している。表 8.2 に露光装置の仕様を示す。

図 8.16 には、開口部サイズを最小単位として、1 ショット露光した際のパターンを SEM(日立

ハイテクノロジーズ社製：FE-SEM S-4800)により観察した結果を示す。この結果から、レジストパターンのエッジが鋭く切れていることが分かり、露光装置の焦点深度が 25 μm 厚のドライフィルムレジストに対して十分であることが確認された。また図 8.17 には回路パターンを露光した結果を示す。この結果から、4 画面の切り替えとステージ微動の連動により、最小線幅 34.5 μm のパターン形成が可能であることが確認された。

本節では、レティクルフリー露光方式をプリント配線基板に適用させ、オンライン露光が可能なシステムを構築した事例に関して述べた。また、この装置を使用して実際にプリント配線基板のテストパターンの露光実験を行い、産業界における現状の最小加工寸法である 20 μm に対して約 1/2 である 11.5 μm の最小加工分解能と、NRUSM 駆動の精密ステージによる高精度なフィールド接合が可能であることも実証した。

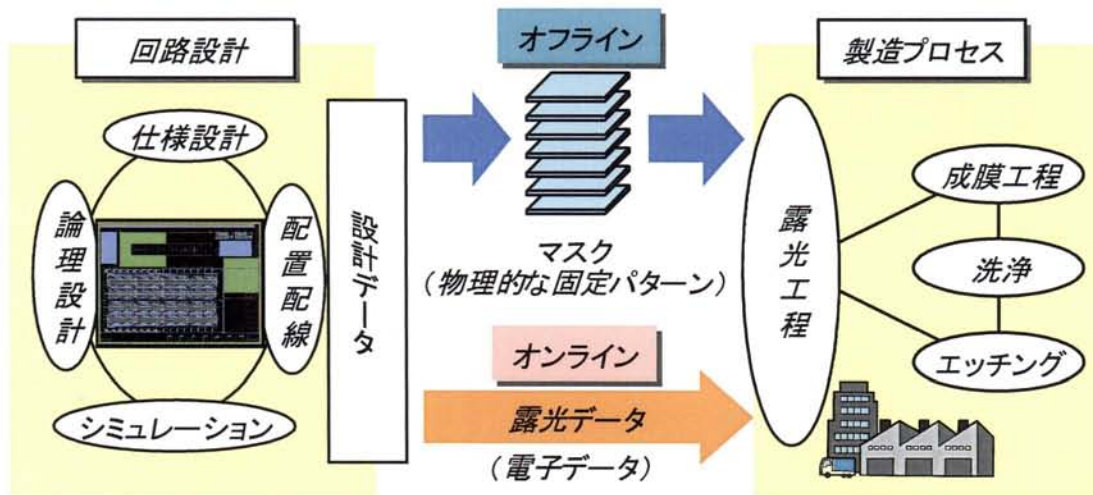


図 8.10 オフライン露光方式とオンライン露光方式

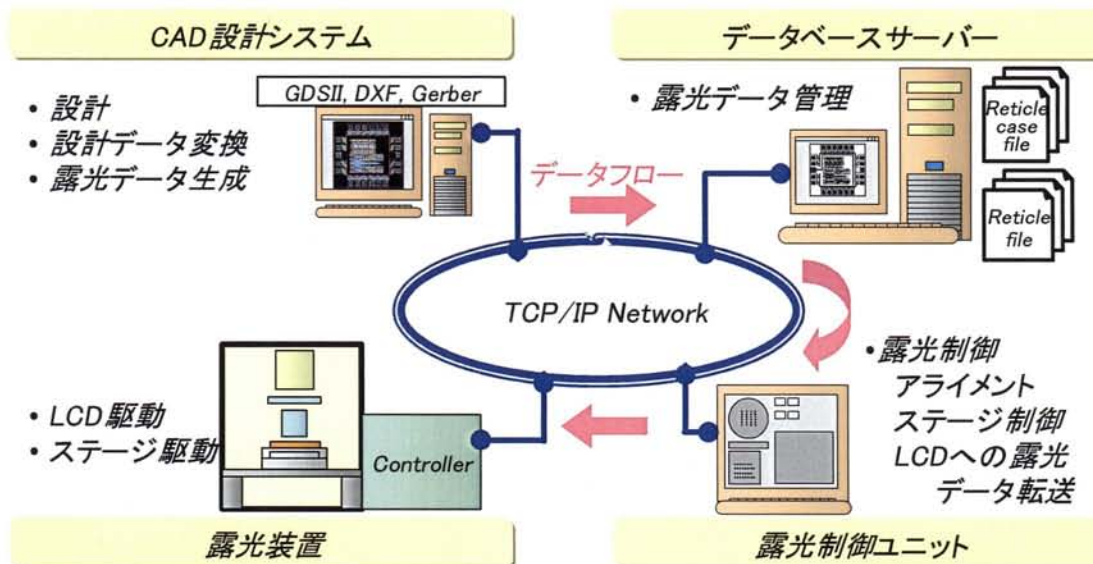


図 8.11 プリント配線基板用オンライン露光システムの概略図

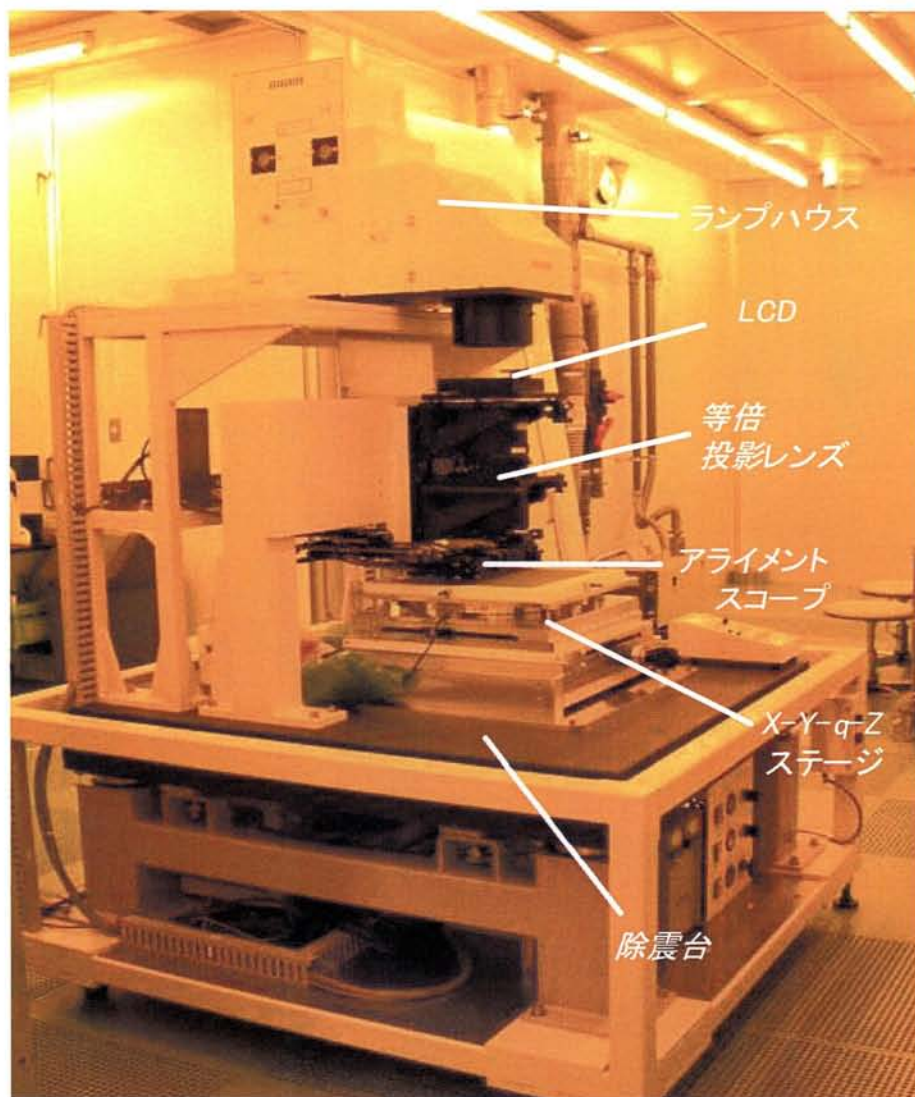


図 8.12 レティクルフリー露光装置の外観図

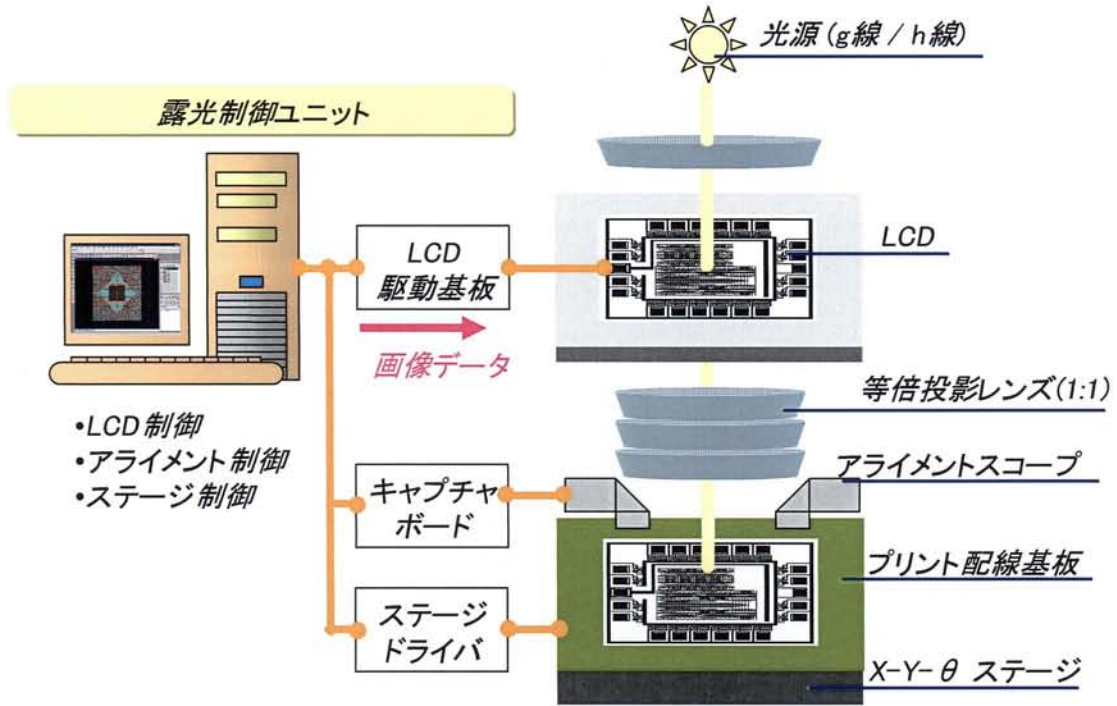
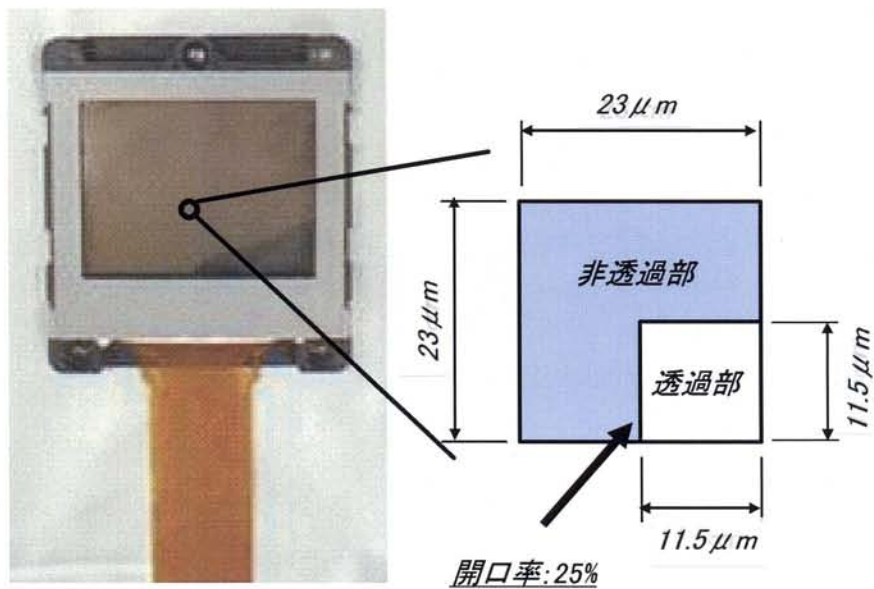


図 8.13 露光方式



LCD パネル仕様

■ LCDタイプ	TFT透過型
■ パネルサイズ	36.8mm × 27.6mm
■ ピクセル数	1600 × 1200 pixels
■ ピクセルサイズ	23 μ m
■ 開口サイズ	11.5 μ m

図 8.14 レティクルとして使用した LCD 外観

表 8.2 オンライン露光システム仕様

項目	仕様	備考
基板サイズ	340 mm × 340 mm	
光源	1kW超高压水銀ランプ	g線, h線, i線選択可能
投影レンズ	1:1 等倍投影レンズ	解像度: L/S = 7 μm
最小加工寸法	11.5 μm	LCD開口部サイズ
重ね合わせ精度	±0.5 μm	

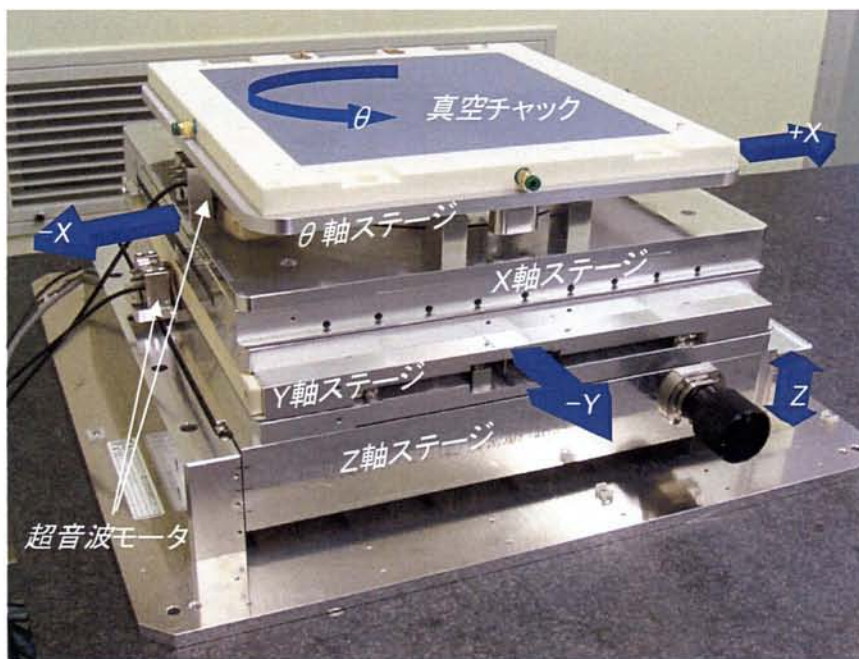


図 8.15 オンライン露光システムに搭載した NRUSM 駆動の高精度ステージ外観

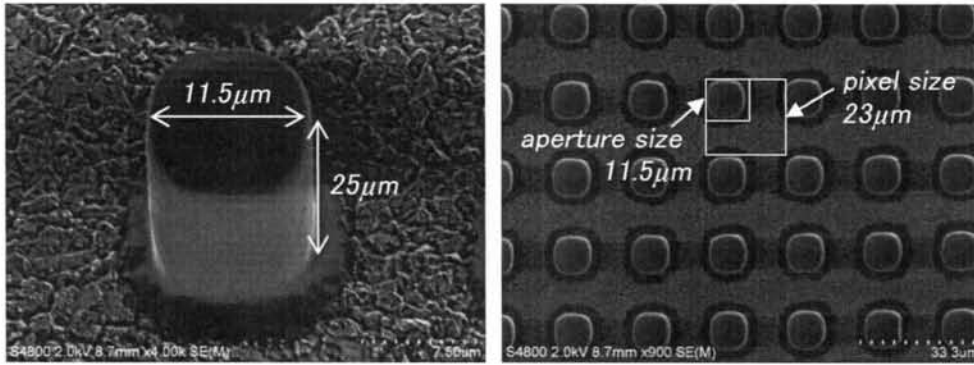


図 8.16 1ショット露光時の開口パターン（日立ハイテクノロジーズ社製：FE-SEM S-4800）

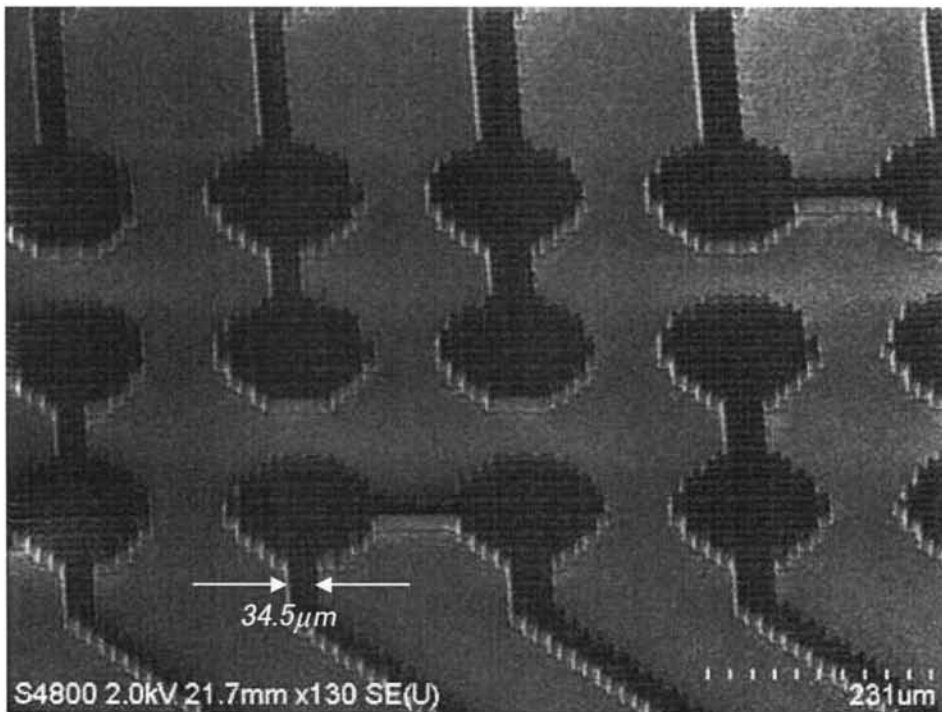


図 8.17 プリント配線板回路パターン（日立ハイテクノロジーズ社製：FE-SEM S-4800）

8.4 ナノサージャリー装置への応用例

バイオテクノロジー分野において、細胞内小器官を自由自在に取り扱う要求や細胞内に遺伝子などの薬液を微量かつ定量に注入する要求は非常に高い。あたかも患者を医師が外科手術するように、細胞を生かしたままで細胞内小器官を自由自在に取り扱う“ナノサージャリー”の実現が期待されてきたが、これを実現する為の機材は存在しなかった。本節では、NRUSM を応用して開発したナノサージャリー装置に関して述べる^[2]。

図 8.18 に、従来のマイクロマニピレーション技術で使用されているピペットと被操作細胞とのスケールを概略図で示す。モータ電動式や油圧式で構成されたマイクロマニピレータ (X-Y-Z ステージ) に、オペレータが操作するジョイスティックの動きを縮小して伝達することが操作の基本である。そして、最上部には基端側にはチューブを介してインジェクタ (注射器) を装着したマイクロピペット (ガラス微細管) を取り付ける。オペレータは光学顕微鏡下で、マイクロピペット先端部を観察操作しながら卵細胞などに突き刺し、マイクロピペット先端の液量を操作して精子や DNA を注入する。これらは、家畜の品種改良などを目的とした卵細胞核移植などの畜産分野や、不妊治療のひとつである顕微授精などの医学分野で用いられている。図 8.19 にマウス卵細胞への DNA 注入の様子を示す。これまでの問題点は、対象細胞の大きさが数 $10\mu\text{m}$ なのにも関わらず、マイクロマニピレータにおける位置決め精度が数 $10\mu\text{m}$ 程度であったことである。つまり、対象物の大きさと位置精度がほぼ同等の条件下では、これらを使用した際の作業効率はオペレータの熟練度合いに大きく依存してしまう点にある。また、この位置決め精度では今後要求される更なる微細部への操作などは不可能である。

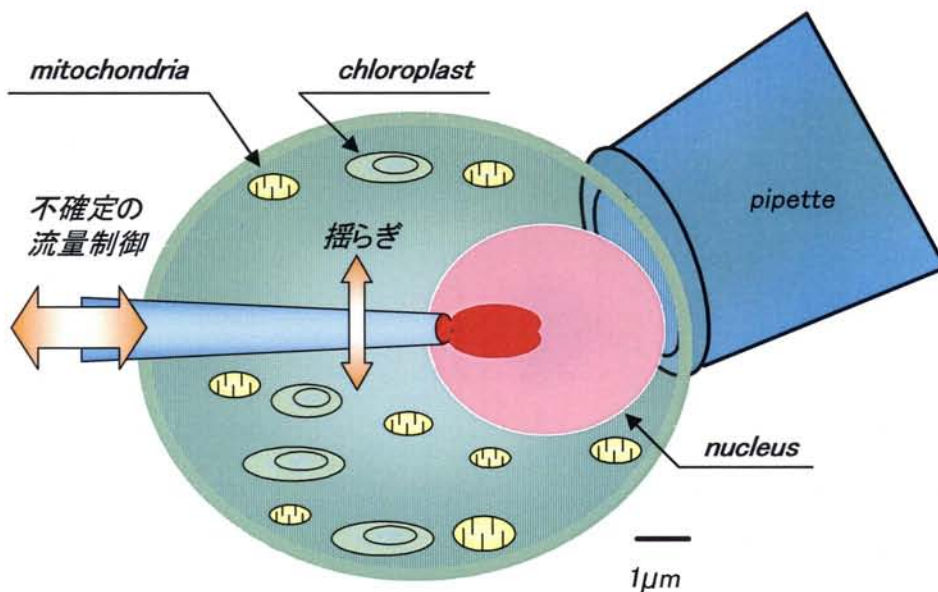


図 8.18 マイクロマニピレーション技術の概略

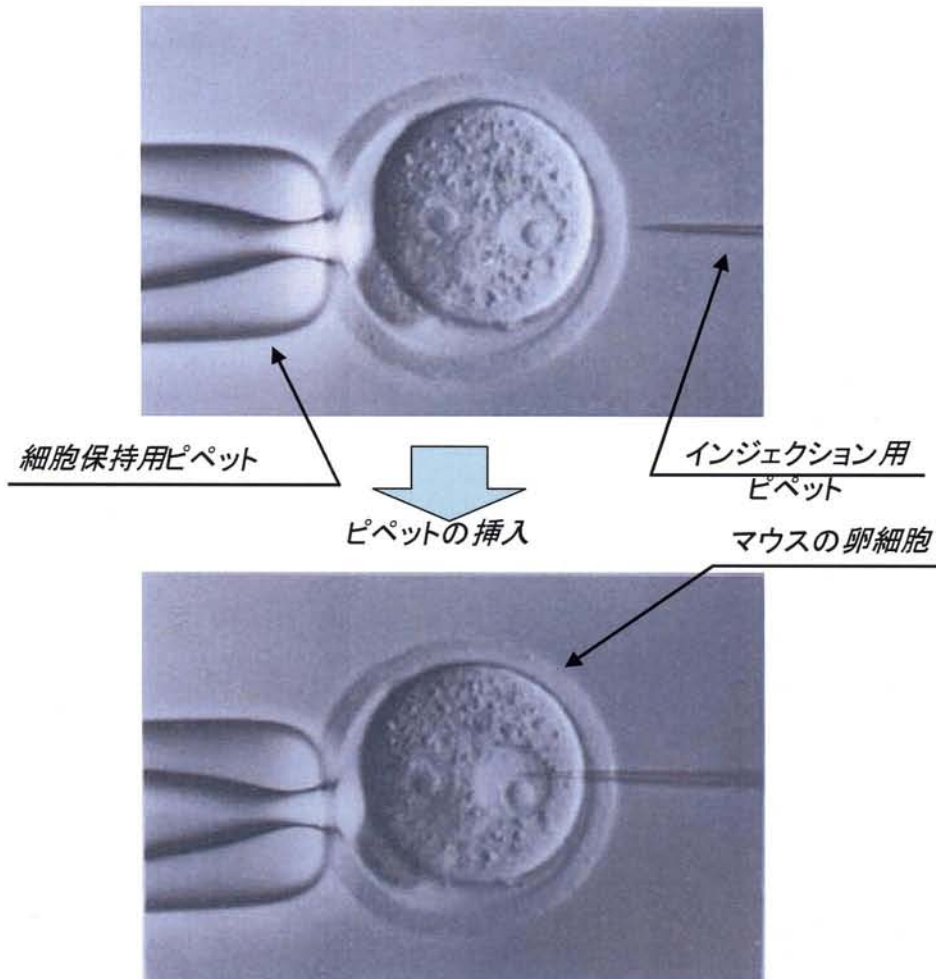


図 8.19 マウス卵細胞への DNA injection

図 8.20 に要求されている操作概念を示す。機構に要求される技術的要素は、高い位置制御分解能と操作における滑らかな動作、そして、耐振動性が高く早い反応速度を有することである。これまでのマニピレータにおける手動方式は論外として、自動方式にそれを当てはめても、いずれの項目も満たさない。しかし、NRUSM 駆動の精密ステージで構成されたナノマニピレーションシステムでは、10nm 以下の精密な位置決めと、数 10nm/s 以下の速度ムラによる定速度移動能力、摩擦駆動による耐振動性や圧電素子の俊敏な動作など、どれをとってもオペレータ側の要求を十分に満たす。図 8.21 に開発したナノサージャリーシステムの構成を示す。倒立顕微鏡、ナノマニピレーションシステム、フェムトリットルポンプシステム、除振システムなどから構成されている。図 8.22 にナノマニピレータの構成を示す。可動範囲は X 軸、Y 軸共に 20mm、Z 軸は 5mm で、位置決め分解能は X 軸、Y 軸共に 10nm、Z 軸は 2nm となっている。また、ピペットの角度は 3 段階に切り換えることが可能となる。それらのマニピレータやポンプの操作は、ジョイスティックを介して行うが、感覚的には自分の手先と同等である。これにより、ナノマニピレー

タを自分の手のごとく自在に操ることが可能となり、細胞小器官移動による品種改良や遺伝子病（ミトコンドリア病）の解明、細胞内小器官の基礎研究など、微細な動きが要求される細胞操作が実現可能となる。図 8.23 にナノマニピレーションシステムによるミトコンドリアの吸引操作を示す。ミトコンドリアをピペットが吸引していることで、これまでは困難であった $1\mu\text{m}$ 程度の細胞を扱うことが可能であることを実証した。

本節では、NRUSM の有する速度分解能を人間の感応で言うところの「滑らかさ」の実現に応用した開発事例に関して述べた。この滑らかさとは速度分解能であり、NRUSM の特徴の一つである。勿論、小型化しても十分な発生量を保持し、かつ、制御分解能を維持しているのも圧電素子ならではの特徴である。今後の課題としては、さらなる微細な動作領域の細胞操作や、動き回る細胞などへの容易なアクセスなどが考えられる。

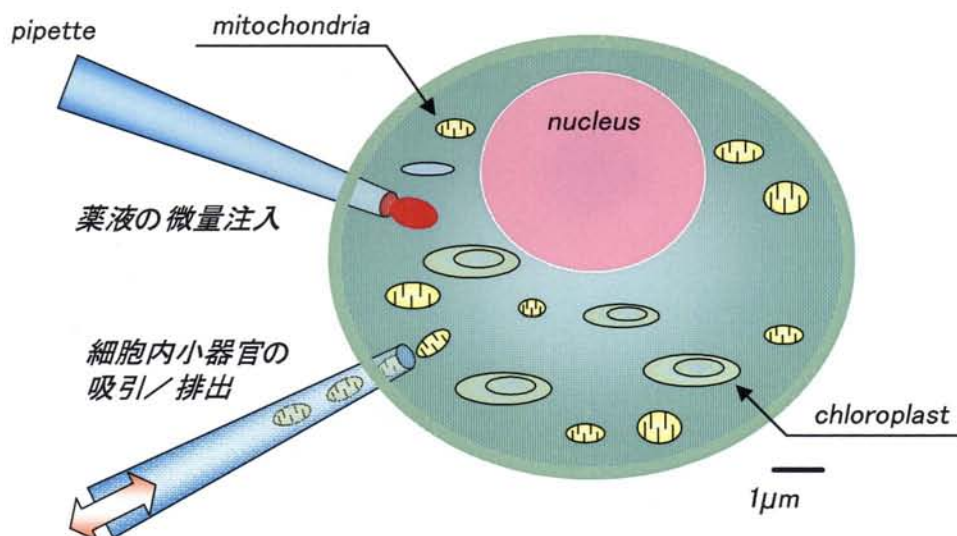


図 8.20 ナノマニピレーション技術の概略

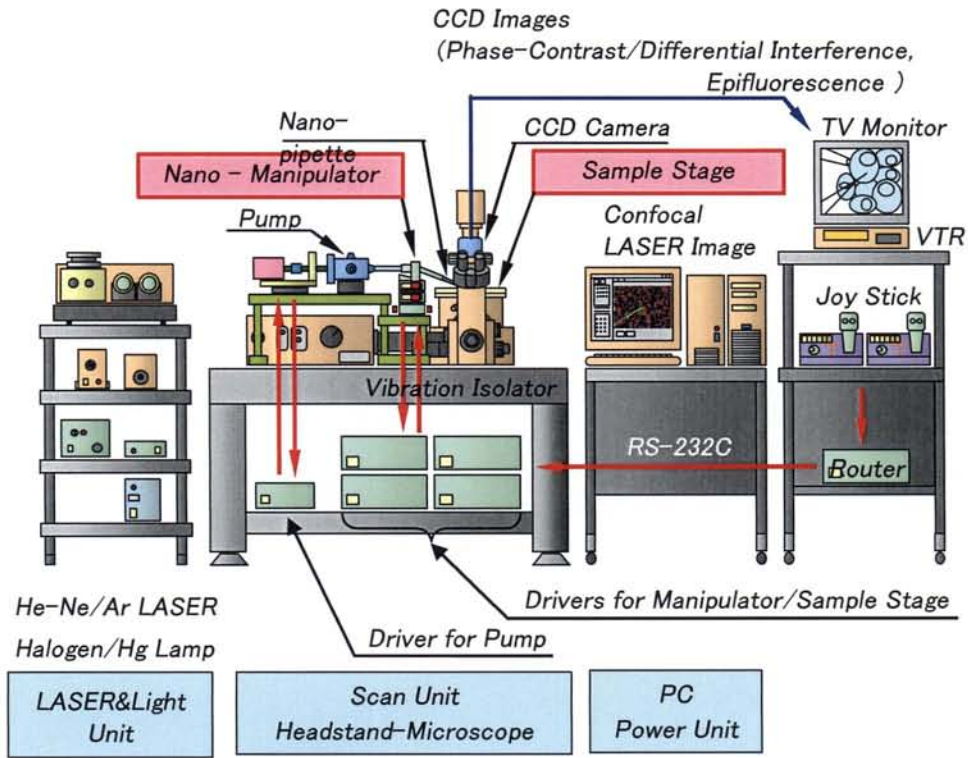


図 8.21 ナノサージャリーシステムの装置全体構成

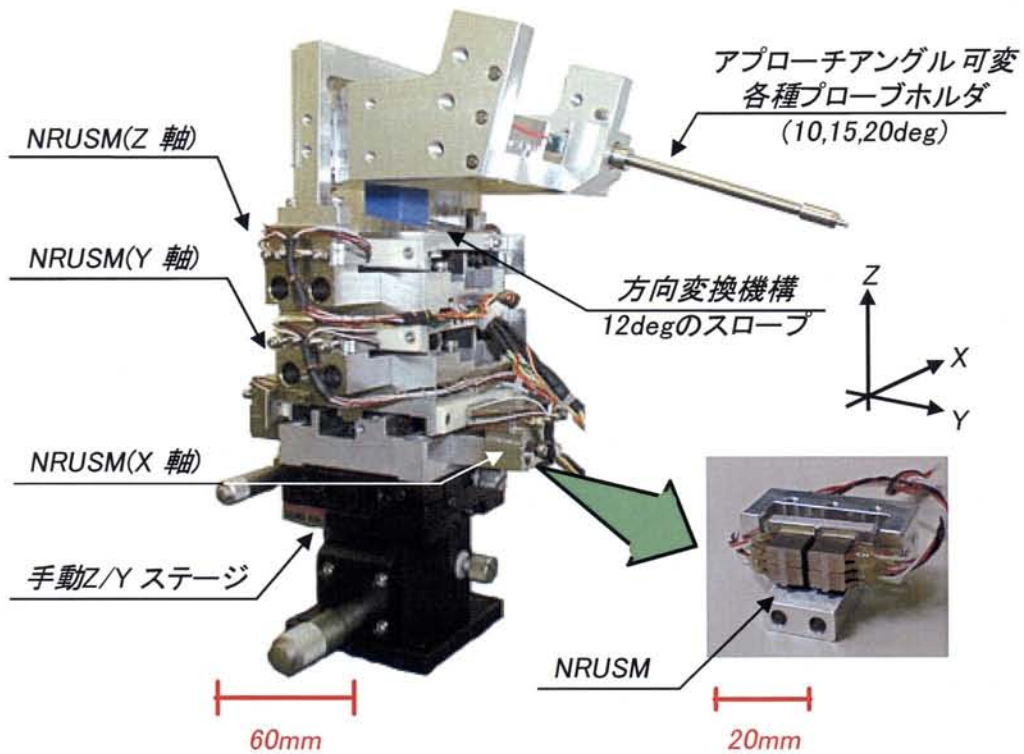


図 8.22 NRUSM 駆動の高精度小型ナノマニピレータ外観

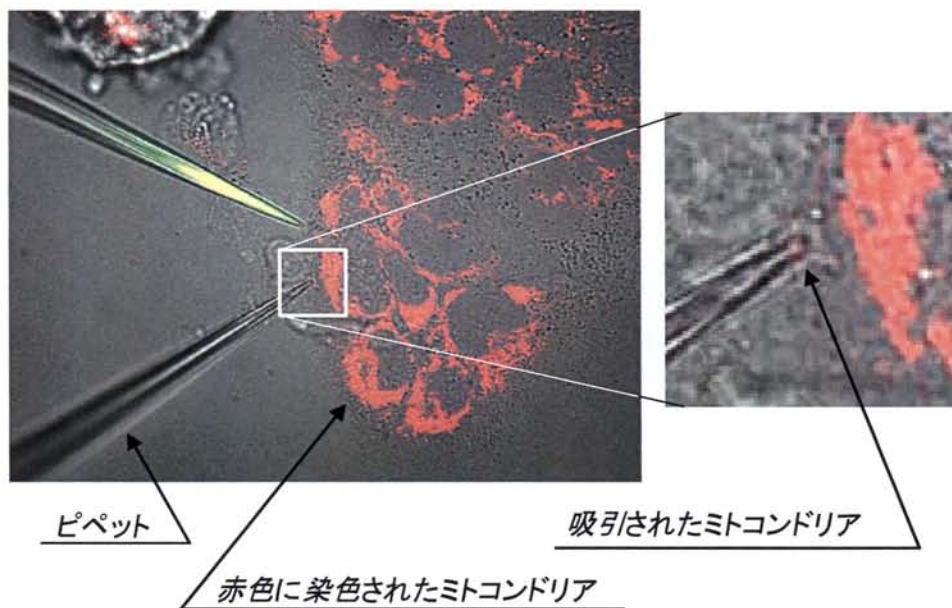


図 8.23 ミトコンドリアの吸引操作

8.5 ナノプローブ装置への応用例

従来の半導体デバイスの電気特性計測におけるプローピングの概要を図 8.24 に示す。これは、主に薄膜やシリコンウェハのような一層で形成されたデバイス用の計測手法であり、その殆どは手動のプローブと約 100 倍程度の光学顕微鏡、それとプローブに接続された電気特性の計測装置で構成されている。そして、プローブの位置決め機構は、ボールネジ等を用いた簡易手動操作が一般的であり、分解能は $10\mu\text{m}$ 程度である。また、プローブの先端径も数 $10\mu\text{m}$ のものが多く、大抵の場合、プローブ間のピッチは固定である。現状では、これらを用いて数 μm 以下の微細構造へアクセスし、それらの電的特性を計測することは不可能である。そのため、計測専用の大きな電極を後工程で作る必要があり、プロセス直後の正確な電気特性は計測できないというもどかしさがあつた。また、現行の LSI における集積化や微細化は水平展開を基本としているので、 $100\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$ 程度の電極を平面上に混在させることは集積化の方向と逆行した行為でもある。そこで、真空対応の精密マニピレータと走査型電子顕微鏡と組み合わせることで、図 8.25 に示すような、電極を持たない回路にも適応可能な高分解能プローピング装置を実現した。

図 8.26 にシステム外観を示す。走査型電子顕微鏡 (SEM) の基本体としては、日本電子 (株) 製 JSM-5510 を使用した。そして、その真空チャンバーを大型化したうえで、内部に 4 基の XYZ マニピレータと 1 台の XY サンプルステージを設置した。それらの真空内部における配置を図 8.27 に示す。ナノマニピレータは、X-Y-Z ステージ部とプローブを固定する最上部のホルダー部から構成されている。図 8.28 にマニピレータ外観を示す。ステージ駆動源には、位置決め分解能と速度安定性能が高い NRUSM を使用している。また、ステージにおける位置計測用のスケールには、小型化と精度の観点から Micro E 社のリニアエンコーダを採用している。XY 軸のストロークは 20mm で分解能は 10nm 、Z 軸のストロークは 5mm で分解能は 2nm となっている。そして、プローブは 2 重シールド線により形成された伝送路を介して、真空外部に設置された電気計測ユニットに接続されている。ちなみに、このマニピレータは前節で述べた「ナノサージャリー装置」で開発したマニピレータを更に小型化し、そして真空対応としたものであり、4 基の中央に位置するサンプルステージには、この XYZ マニピレータから最上部の Z 軸ステージ部を外したものを使用した。図 8.29 には、SEM による観察状態でプローブを LSI 配線部に接触させている画像を示す。 $0.1\mu\text{m}$ 以下の観察性能と、その 10 倍以上のマニピレーション性能により、後工程での計測用電極を作製すること無く、プロセス直後の電気特性を計測することが可能となった。

今後の課題としては、プローブの接触、非接触状態の検出が挙げられる。現状では、Z 軸を微速制御状態としてプローブを少しずつ配線に近づけ、その先端部の僅かなソリを SEM 画像にて確認し、接触認定しながら作業している。これは、SEM の有する深い焦点深度 (約 $70\mu\text{m}@\text{WD}35\text{mm}$ 、分解能 $0.1\mu\text{m}$ 時) が災いして、Z 方向の移動情報が画像からは確認しづらいことによる。しかし、この部分の自動化が遅れると、装置全体としての自動化の妨げとなる。今後は、いくつかの手法を考案し、違った角度から情報抽出を試みるのが有効と考える。

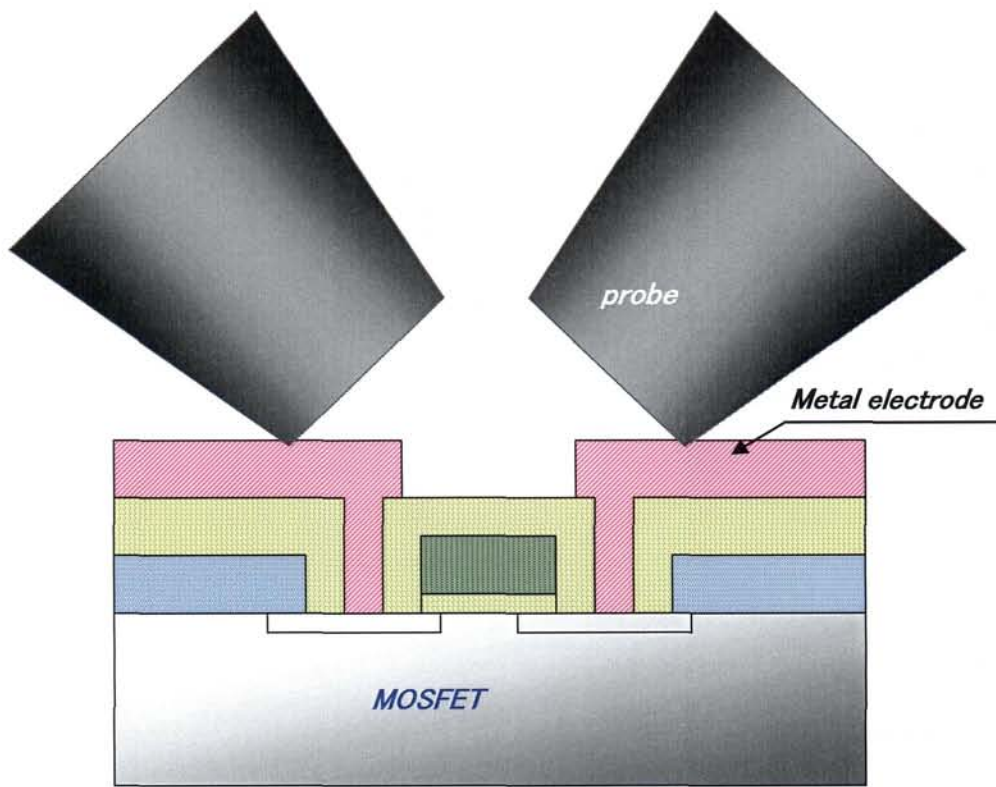


図 8.24 半導体検査における従来のプロービング技術

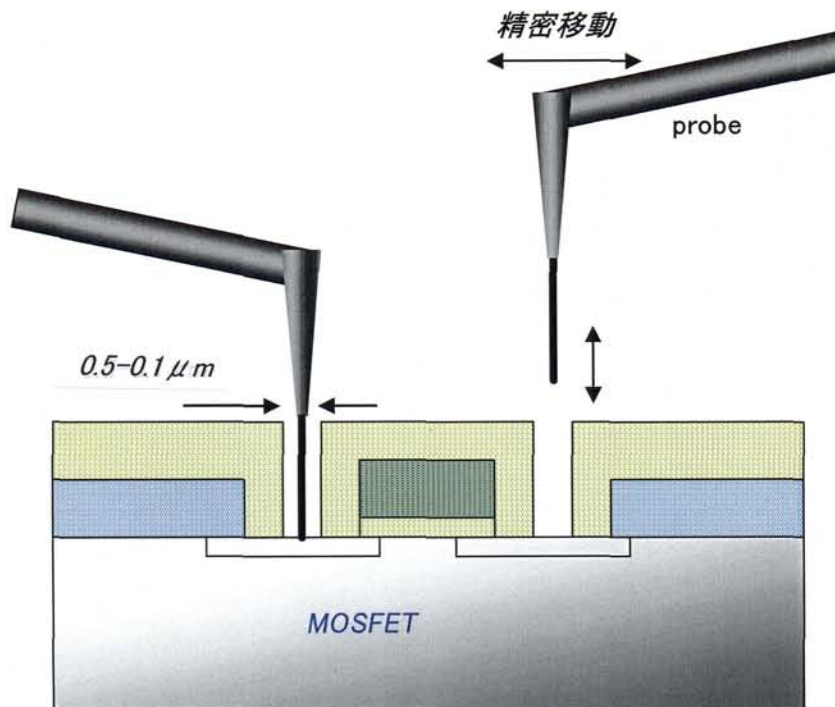


図 8.25 要求されているプロービング技術

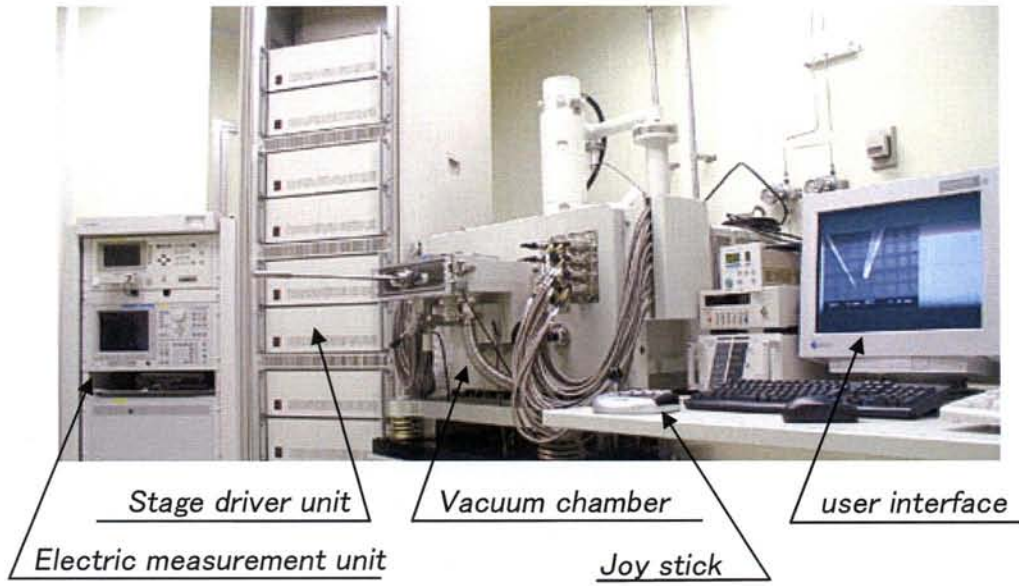


図 8.26 ナノプローブシステム外観

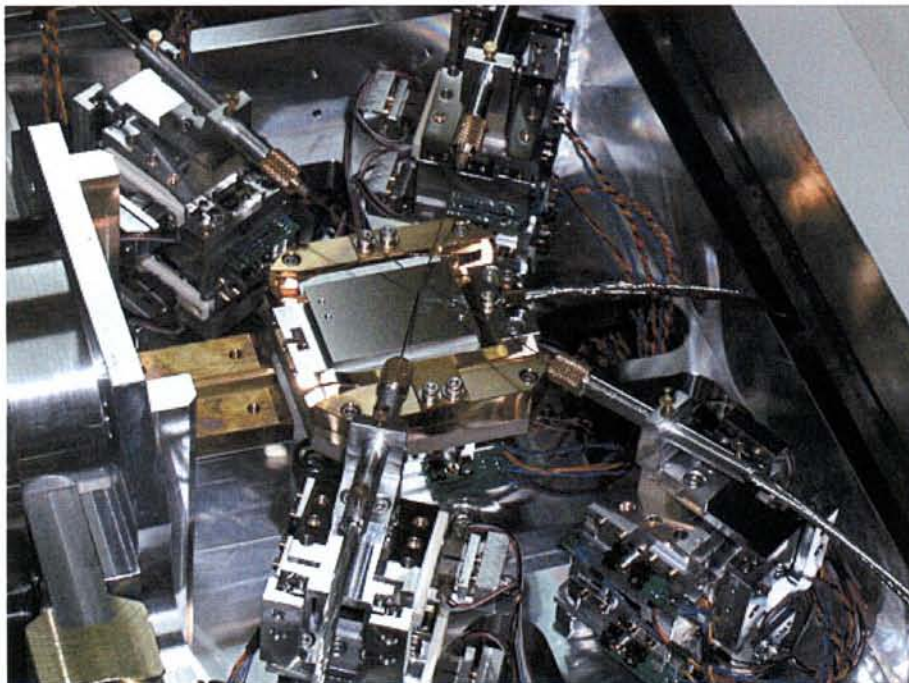


図 8.27 ナノプローブシステムにおける真空チャンバー内部の配置

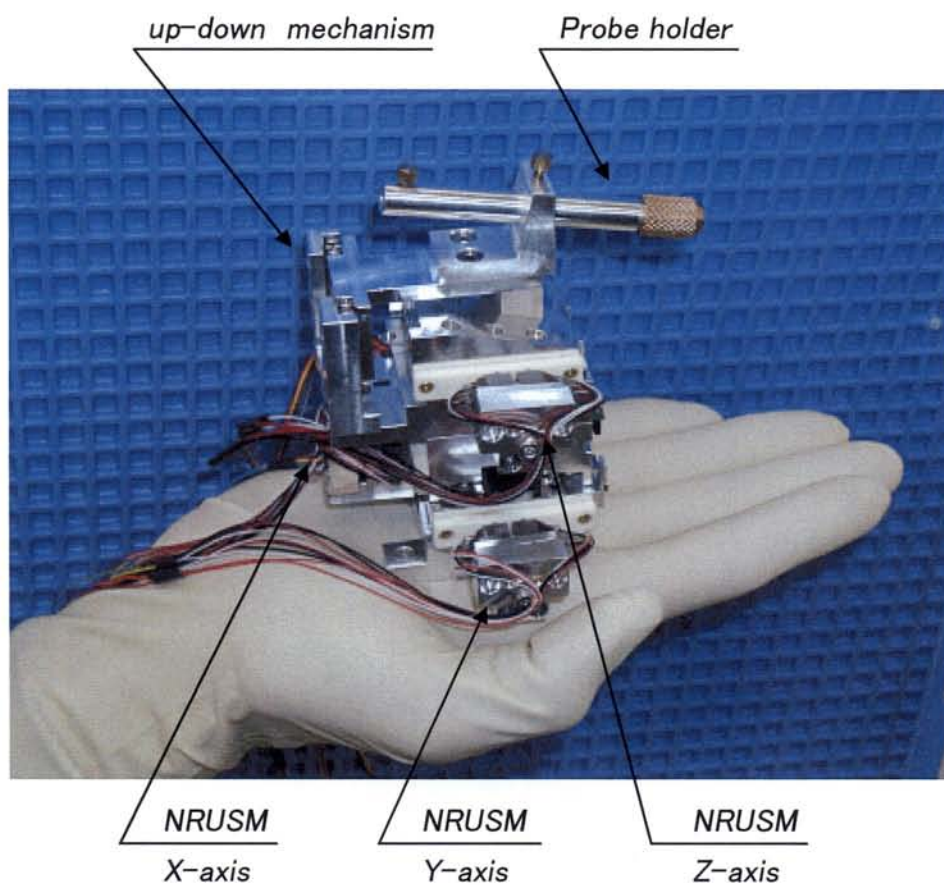


図 8.28 NRUSM 駆動の高精度小型真空対応マニピレータ外観

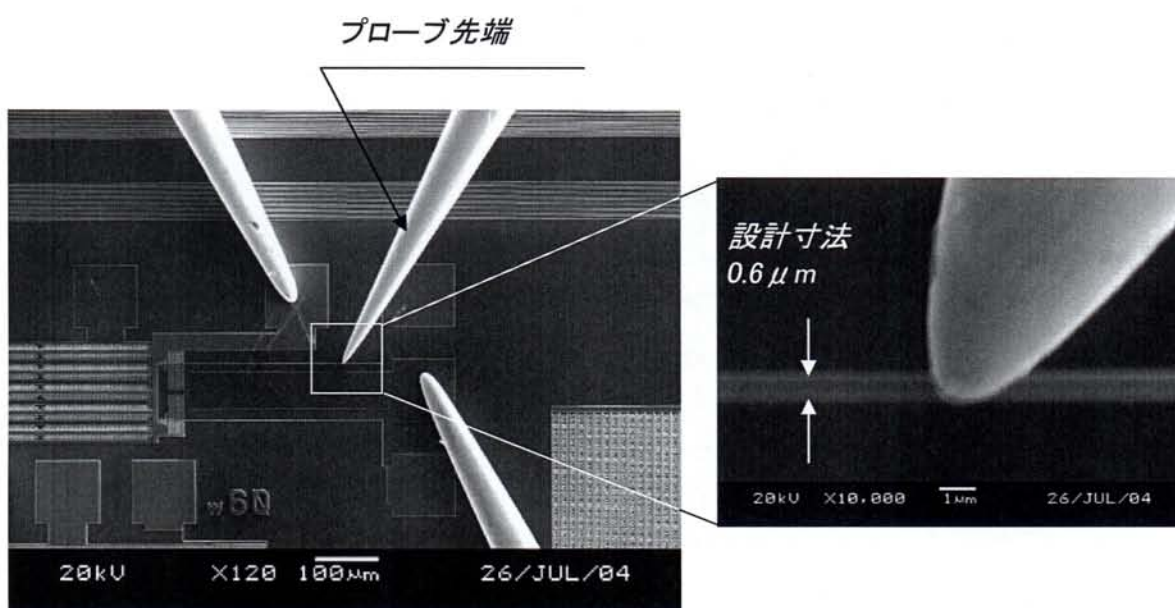


図 8.29 電子顕微鏡下でのプローブ接触操作 (日本電子製: JSM-5510)

8.5 結言

本章では、NRUSM を駆動源とした精密ステージを、電子線描画装置、レティクルフリー露光装置、ナノサージャリー装置、ナノプローブ装置に応用し、それらの評価を行った。

電子線描画装置に NRUSM を導入した評価においては、描画装置の性能指針となるフィールド接合精度は 50nm 以下であった。これより、ステージ性能を向上させることで簡易な研究開発用描画装置を生産用描画装置と同等の性能レベルへと向上させることができた。また、レティクルフリー露光装置でも高精度な接合精度を提供した。さらに、ナノサージャリー装置では、今までの装置では成し得なかった $1\mu\text{m}$ 程度の細胞内小器官を採取することができ、今後の研究に多いに役立つ可能性を示唆した。そして、そこで開発したマニピレータを更に小型化し、真空対応として SEM に構成したナノプローブ装置では、従来のプローブシステムでは成し得なかったプロセス直後の電気特性を計測することも実証した。

参考文献

- [1] <http://www.nanonet.go.jp/japanese/nano/primer/nano01.html>
- [2] 居村史人, “細胞手術のための微細管内流体操作に関する研究”, 熊本大学大学院自然科学研究科修士論文, 2004.

第9章 総括

9.1. 結論

本論文では、半導体産業に限らず精密機構を必要とする全ての産業において、次世代ステージの動力源となりうる NRUSM に関する基本性能解析と耐久性向上ならびに、その装置応用に関する過程と結果について述べてきた。各章で得られた結論は以下の通りである。

第2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、NRUSM の変位解析を行うことにより、非共振原理に基づいたアクチュエータ設計の指針について検討を行った。駆動速度の駆動電圧依存性評価や駆動周波数依存性評価を通して、動作不感帯、剪断素子の先端振動と駆動電圧間での応答遅れ、常用駆動周波数帯に隣接した共振点の存在などを明らかにした。また FEM 解析により、共振点を高周波数側にシフトするパラメータは、アクチュエータ全長と剪断変位方向長であることを示した。

第3章では、高精度ステージの構造設計や計測手法と共に、次世代の大型化ステージへの対応技術に関して述べた。前半では、通常焼結材であるアルミナセラミックスのムク材を用いた大型ステージに関して、姿勢精度 $\pm 1 \text{arc-sec}$ 以下、走りに対する Z 変動 $3 \mu\text{m}$ 以下の初期目標を達成するまでのプロセスを述べた。後半では、大型化による自重たわみと高精度化のトレードオフに関する解決手段として、アルミナセラミックスによるリブ構造やハニカム構造の効果に関して述べた。リブ構造やハニカム構造ステージは高価であり、また製造にも時間を要するので、開発する際には、設計段階での試算やシミュレーションが最重要課題となる。そこで、シミュレーションを先行させながらの試作評価を行った。シミュレーションにおけるリブ構造の姿勢精度は 0.1arc-sec 以下であったが、実測値では、Yawing $\pm 0.5 \text{arc-sec}$ 、Pitching $\pm 0.7 \text{arc-sec}$ となった。勿論、このシミュレーションには組み立て誤差や、ガイドレールにおける非線形要素は含まれていない、ごく一般的な FEM による試算なので単純な比較は難しい。しかし、リブ構造では強度に分布が発生してしまい、目的の精度を有するステージを1回で開発することは非常に難しい。そこで、強度分布の発生率が低く、リブ構造よりさらに軽量化が可能なハニカム構造により、ムク構造における可動部重量の約 50%にあたる 27.8kg までの軽量化を成し得た上で、ムク構造と同等の姿勢精度を達成した。そして、このハニカム構造による軽量化ステージを使用した加速度評価において、当初目標としていた 0.5G を上回る 0.7G までの瞬間最大加速度を実現した。これにより、アルミナセラミックスを母材とし、ハニカム構造を採用することで、大型化と高精度化、ならびに高加速度駆動の共存が可能であることを示した。このアルミナセラミックスを母材とした

ハニカム構造ステージの産業における優位点を以下に記す。

現在の半導体関連装置や液晶関連装置は、そのいずれもが大型化傾向にあり、製造コストと性能の両立が限界点に達している。それらの分野で使用されるステージが軽量化されることで、それを支える架台や除振システムの負担が大幅に減る。また、真空チャンバー内での使用を目的としたステージシステムでは、NRUSM を使用したダイレクト駆動との併用により、従来型と比較してステージサイズも相当に減少する。それらを受けて、ステージを内蔵する真空チャンバーの断面積や内部容積なども縮小され、チャンバー重量の低減化、排気システム容量の軽減化なども可能となる。それらを合計すると、巨額のコスト節約とフットプリント低減効果が得られる。つまり、この新技術を取り入れて製造装置を構成することで大きな競争力を得ることが可能となる。

第4章では、NRUSM のモデリングから始まり、それぞれ特徴の有る各種制御系によりステージ駆動時の評価を行った。最初の PID 制御系を使用した駆動評価により、NRUSM の駆動分解能は、位置計測装置として用いたレーザー干渉計の最小分解能である 0.6nm 以下である事を証明した。そして、制御に対する挙動から、その分解能にはまだ余裕が有る事も明らかになった。第2章にも記載したように、ここで使用した圧電素子は、太平洋セメント（株）製の D 材 (d_{15} 等価圧電定数：1010pm/V, 厚さ 0.6mm) を 4 枚積層したものである。そして、制御系から見た駆動電圧分解能 (4.0mV) とシステムの S/N 比ならびにノイズフロアから実質的分解能を 5LSB (20mV) と見込むと、アクチュエータ先端での実用的分解能は 0.08nm と試算される。実際に、ステージに NRUSM を装着した評価において、この試算値を感じさせる性能が発揮できるのも、送り動作に剪断素子を使用した、単純で且つ、普遍性の高い動作原理を有する NRUSM の特徴である。続いて、I-P 制御系の適応により、オーバーシュートを 25%から 1.2%へ、また整定時間を 32 ms から 19 ms まで改善した。さらに、指令印加時の制御入力 (NRUSM への印加電圧) を半分以下まで抑えることが可能となった。そして、PI 制御系を基本とした状態推定オブザーバによるロバスト制御系における評価では、外乱フィードバックと共に、オブザーバによる速度推定情報を使用した速度フィードバック、それとアンチwindアップ機能の併用により、18%以上のオーバーシュートを 12%まで低減した。また、ステップ位置応答による時間制約付き位置決め評価でも良好な結果を示した。最後に、そのロバスト制御系に対して、フィードフォワード型連続軌跡制御器を追加した CPT 制御系による評価では、ロバスト制御系でのランプ位置応答時の最大追従誤差を 36.5%低減した。また同様に、正弦波位置指令における追従誤差評価でも、ロバスト制御系の誤差分布に対して 1/3 以下まで低減した結果を示した。全体としては、制御アルゴリズムを上位型へと更新するごとに評価結果が良好となる傾向を得た。

第5章では、NRUSM の適応装置を半導体生産ラインにおける CD-SEM と定めて、それに適合する実用化耐久性を試算すると共に、同等の評価を行った。その過程を通して、接触部における最適材質、圧電素子材料の改良、駆動評価方法の確立など、研究の最終目標に直結する重要な成果を得た。摺動材料としてはアルミナセラミックス、圧電素子材料としては低誘電正接材料が性能追求と実用化達成を両立させる為には不可欠だと判明した。また、それらを使用した 200km 走行耐久性試験において、アルミナセラミックス製ガイドプレートの停止/往復部では約 110nm 程度、定速度走行部でも 50nm 程度の摩耗が発生していることを確認した。これにより、この摩耗問題を解決しなければ、目的とする CD-SEM に NRUSM 駆動ステージを導入しても、その耐久性は約 3 年程度と試算された。

第6章では、第5章の結果を受けて摩擦抑圧の為に、すべりに関する基本的理論を構築し、試算と計測結果とを比較した。試算より導かれた、すべりの発生しない駆動周波数 $f \leq 0.77\text{kHz}$ は、実測結果とほぼ一致した。これにより、材料面から取り組む摩擦抑圧手法に以外に、駆動理論から取り組む糸口が見えた。また、接触式アクチュエータの摺動部分における摩擦を、極限まで抑えるための手法として可変周波数駆動を提案し、その検討を行った。これは、駆動周波数を任意に選択できる NRUSM の特徴を最大限に活かし、物質の等加速度運動方程式に則り最大加速曲線をトレースする方式である。この理論を適応することで、NRUSM が装着されたステージを理論限界で加速することが可能となることを示した。

第7章では、高速駆動域までの摩擦抑圧理論構築と実験結果、そして、それを踏まえた上で摩擦に対する制御理論構築に関して述べた。ここで行った対策方法の本質は、摩擦を殆ど伴わない静摩擦領域での駆動検討である。これは、第6章における基礎評価を延長した理論展開であり、従来と同一材料、同一条件下において、これまでは $9.40 \times 10^{-9} \text{mm}^3/\text{Nm}$ であった摩擦レートを、 $2.93 \times 10^{-10} \text{mm}^3/\text{Nm}$ と 1/30 以下に低減させた。勿論、高速駆動性能は維持したままである。これにより、実用化への最大の関門である摩擦問題を克服した。そして、この研究成果は、伸縮素子による足上げと剪断素子による送り、この2方向の変形動作が分離制御可能であるアクチュエータの優秀性に有ることを付け加える。それにより、低速域での非共振動作と高速域での駆動位相シフトによる共振動作との両立や、静摩擦領域を保持する限界指令電圧通りの先端動作と、予圧力や表面粗さなどの動的障害に対する足上げに必要となるオフセット電圧の重畳機能などを可能としたのである。

また、固定値且つ、集中定数として到達した上記の静止摩擦限界モデルを更に拡張し、第4章にて述べてきた制御系への融合を行い、実用型制御系として動性能評価を行った。摩擦力の同定実験結果では、100mm ストロークのガイドレール上でも制御量全体に対して約 15%以上の分散を示し、また、正負の駆動方向によっても傾向は違った。そして、連続駆動することでも 10%以上の上昇を示した。これらを踏まえ、PI 制御系に動的な Bang-bang 補償制御を追加することで 63%以上の性能改善を得た。また、CPT 制御系に融合させた結果、約 5%程度の改善を成し得た。このように、NRUSM における摩擦抑圧理論の骨子となる部分は静摩擦係数が重要な役割を担っていることが判明したが、これらの結果は事前に収集した LUT を使用した結果である。今後は、NRUSM をステージに組み込んだ状態でのリアルタイム性の高い制御を実現する為には、制御情報から摩擦力を検出するアルゴリズムの研究が重要となる。

第8章では、NRUSM を駆動源とした精密ステージを、電子線描画装置、レティクルフリー装置、ナノサージャリー装置、ナノプローブ装置などに応用し、それらの評価を行った。簡易型の研究開発用電子線描画装置に NRUSM 駆動のステージを導入した評価において、描画装置の性能指針となるフィールド接合精度で 50nm 以下を達成した。また、ナノサージャリー装置では、今までの装置では成し得なかった $1\mu\text{m}$ 程度の細胞内小器官を採取することができ、今後の研究に多いに役立つ可能性を示した。そして、ナノサージャリーで開発したマニピレータを更に小型化し、真空対応として SEM に構成したナノプローブ装置では、従来のプローブシステムでは不可能であったプロセス直後の電気特性を計測することも可能となった。

9.2. 今後の展望

従来から行われてきた摩擦駆動型アクチュエータにおける研究分野では、共振型アクチュエータは高速型、非共振型アクチュエータは低速型との分類が暗黙的に成されていた。そして、非共振型の優位点は位置決め精度であり劣位点は速度、逆に、共振型の優位点は速度であり劣位点は精度との認識であった。NRUSM は非共振型アクチュエータに属するが、その優秀性は速度と精度の両立を成し得た所に有る。しかし、高速駆動による耐久試験を通して、共振型アクチュエータ同様の摩耗問題が顕著化してきた。これまでの研究方向性として、そのような高速駆動の摩擦駆動型アクチュエータにおける接触部の摩耗問題に対しては、接触部分に使用している材料の問題として取り組まれていた感がある。実際に、研究当初より、この問題解決には摺動性の良好な材料が不可欠であるとの指摘を受け、その方向での探索をした時期も有ったが問題解決には至らなかった。本文に述べたように、材料探索をすればするほど、摩擦駆動型アクチュエータの接触部における材料要求、つまり、高い摩擦係数を有し、且つ、低摩擦なる物質は存在しないことが明白化したからである。

しかし、ここで確立した理論を展開することにより、接触部に使用する材料の選択方向性も明確になる。それは、静止摩擦係数が比較的高く、且つ、面粗さを伸縮素子の足上げ最大量の 10% 以下にできる材料を使用することである。その上で本理論の適応により、圧電素子が発生した変位を余すことなく伝達しながら高い耐久性を両立できる。今後は、それらの条件を満たす摺動材料の探索と共に、残された摩耗要素である衝撃摩耗に対しても、この構造の有する原理的柔軟性が、その技術的障壁を乗り越えると期待する。

また、装置応用に関しては、NRUSM を駆動源とした精密ステージを使うことで、従来は難しいとされた装置開発が可能となった。本研究を通して、機構におけるただ一部分のみを交換することで、これまで成し得なかった、高精度化、小型化、非磁性化、真空対応などの共存を成し得る NRUSM の潜在能力は非常に高く、今後の半導体製造装置のみならずナノテクノロジー全般、ならびにバイオテクノロジー産業などの分野に大いに貢献できると確信した。

謝辞

本研究の遂行や論文をまとめるにあたり、沢山の方々にお世話になりました。この場を借りて感謝の意を述べさせていただきます。

1998年12月、前々職の会社知人から電話がかかってきました。「電子ビーム描画装置と精密ステージを開発する会社を探している」とのことで訪問した先が、本研究を本格的に始める契機となり、そして私の主査となっていたいただいた久保田弘教授との出会いでした。当時、共振型超音波モータ駆動の真空対応ステージを試作したものの、その性能や耐久性に関して数々のトラブルを抱えていた私は、漠然と非共振型超音波モータへの移行を考えていました。そして、その動作原理は理解できても、本質的な改良方向性が不明であった私との議論のなかで「今のままだと製品は日の目を見ない。本当に製品化を目指すならば、熊本で研究開発をやらないか」と仰って下さった日のことを今でも覚えています。それから1年後には熊本での研究開発が始まり、その2年後には熊本大学大学院自然科学研究科博士後期課程に入科、4年間の大学院生活を含めた7年余りの研究期間が、今振り返ると一瞬のことのよう思い出されます。その間、公私にわたり沢山の時間を指導に割いて頂き大変にありがとうございました。久保田教授からいただいたご指導や研究に対する姿勢論は、その一言一言が重く、そして貴重なものばかりでした。今後、エンジニアとして岐路に直面した時には、先生のご指導を思い出しながら初心に立ち返り、自分の信ずる道を邁進する為の糧といたします。

1999年7月、独立行政法人科学技術振興機構の池之端研究交流センターで初めてお会いした際に「やる気の無い者は研究に参加しなくていい」と情熱的に語りかけていただいたのが東北大学の犬見忠弘名誉教授との出会いでした。5年の研究期間のなかで、先生からいただいた数々の叱咤激励は強烈でしたが、そのおかげでやる気を失いかけていた自分は踏み留まることができました。大変にありがとうございました。信念を貫き通す先生の研究姿勢を忘れることなく今後も精進を重ねて参ります。

1998年3月、応用物理学会春季大会の会場にて「共振機構を使用しない超音波モータを開発したけれど興味有りますか」と話していただいたのが、NRUSMの原理発案者である青山学院大学工学部の魚住清彦教授との出会いでした。そして、見学のために訪問した私のために、STMを開発する為にNRUSMを発明した経緯、自作されたNRUSMの構造説明、動作原理などの説明に時間を取って頂きました。先生から託していただいたNRUSMのお陰で今日の自分があることを忘れず、更なる改良に尽力いたします。大変にありがとうございました。

本論文をまとめるにあたり、有益な御教示と共に御審査をいただいた岩井善太教授、檜山隆教授、中村有水教授、宮原邦幸教授に深く感謝いたします。

本研究を遂行するにあたり、研究参加の機会を与えていただいた株式会社東京テクノロジーの奥寺智氏ならびに皆様に深く感謝いたします。

本研究を遂行するにあたり、圧電素子材料から始まりアクチュエータまでの製造、ならびに動作解析における有益なご助言をいただいた太平洋セメント株式会社の宮田昇氏、阿隅一将氏、渡邊雅幸氏をはじめとした皆様と、株式会社ヨコオの山川孝宏氏に深く感謝いたします。

本研究を遂行するにあたり、近代制御理論におけるご指導をいただいた長岡技術科学大学の大石潔教授、群馬大学工学部の橋本誠二助教授に深く感謝いたします。先生方に授けていただいた沢山の英知を、今後のエンジニアリングに活かしてまいります。

本研究の推進母体であり、物品購入や事務手続き等で多大なるご尽力をいただい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は深く感謝いたします。

中田明良助教授をはじめ、この研究期間中に社会人となられた江頭義也氏、遠藤泰史氏、橋口弘幸氏、古川博之氏と、居村史人氏、板倉敬二郎氏、永原聡氏ならびに研究室の学生諸君やスタッフの皆様、大変にありがとうございました。論文作成や予稿原稿作成時のみならず普段の何気ない会話を通して、さまざまな知識を得ることができました。

業務と平行した資料作成、実験システムの開発、その他諸々に関して多大なご協力をいただいた有限会社テック・コンシェルジュの馬場哲郎氏、岩淵哲也氏、木下珠美様、そして株式会社ピーエムティーの徳田基氏に深く感謝いたします。皆様の励ましは何物にも代え難い貴重なものでした。

なお本研究は、独立行政法人科学技術振興機構による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す。

最後に、妻 祐美や子供たち 一馬、健吾そして祐子は、研究生活のベースを支えてくれました。ありがとう。

以上の方々や、ここに書ききれない実験の参加者、実験システムの開発に協力していただいた方々のお陰で、本論文をまとめることができました。改めて心からお礼申し上げます。

2005年9月

小坂 光二

付録 A 剪断変形素子を使用しない非共振型超音波モータ

NRUSM の特徴は、非共振原理でありながら、その駆動周波数が高域（超音波域）であることは序論にて述べた。また、素子自身の耐久性や NRUSM としての耐久性に関しても本研究の成果として実用域まで達したことを前章までに述べた。しかし、全ての問題が解決した訳では無い。積層素子部の接着強度や電極配線方式など、まだ取り組まなければならないことは有る。その一つに剪断素子の脱分極問題が挙げられる。

剪断素子の製作手順を図 A-1 に示す。①チタン酸ジルコン酸鉛 (PZT) をシート成形して焼結。②剪断変形方向と平行な面に分極用電極を形成。③高温高電界中にて分極処理。④その後、分極用電極を剥離。⑤分極方向と直交する面に駆動用電極を形成して単体素子の完成となる。この製造過程からも判るように、NRUSM における動作原理の中核を成す剪断素子の特徴は、素子分極方向と使用時の電界方向が直交していることである。ちなみに、上記行程を①→⑤→③とすると伸縮素子となる（図中波線参照）。その際の分極方向と使用時の電界方向は平行である。そして、この剪断変形の単板素子と配線用電極、ならびに伸縮変形の単板素子と配線用電極のそれぞれを、交互に規定枚数だけ分域積層し、外形寸法を整える工程を経ることで NRUSM に使用する圧電アクチュエータとなる。

最初に、この様な構造における圧電素子の脱分極に関する考察をする。圧電素子の脱分極要因は分極過程で使用している電界と熱である。そこで、まずは電界の影響について述べる。圧電素子の分極された電界方向に対して大きな逆電界が印加されると、素子内部の双極子モーメント（一軸性配向）は少しずつ弱まる。勿論、逆電界がより大きければ、モーメントの符号は負となっていく。いま、駆動用電極に逆電界を印加したとすると、伸縮素子はその影響を受けるが剪断素子はそれに強い。何故ならば、駆動用電極に逆電界を印加しても、剪断素子の場合には双極子とは電界が直交するだけであり、受ける電界はほぼ 0 だからである。次に熱の影響に関して述べる。伸縮素子と剪断素子は、どちらも熱によりモーメントの減少を招く。素子を加熱（内部発熱を含む）していくと、結晶変態点（キュリー温度）の $1/2 \sim 2/3$ 程度の温度から分極が大幅に消滅し始める脱分極領域に入る。そして、キュリー温度を超えると、強誘電性は消失して常誘電相となるのでモーメントが 0 になる。これは物理的現象なので、分極方向による違いは無い。

次に、以上のいずれかの要因により、アクチュエータを構成している圧電素子が脱分極した場合の再分極化（再生）について考える。再分極をする際にも必要となるのは電界と熱である。但し、熱は分極方向には寄与しないので、ここでは電界の作用に関して述べる。また、理論的検討

なので、必要となる電界強度による絶縁破壊などの実作業レベルの問題点は省く。分極する場合には、必要とされるモーメント方向に電界を構成する必要がある。その観点からすると、伸縮素子の再分極化には駆動用電極を流用できる。しかし、剪断素子には適応できない。それは、自身の駆動用電極を用いて発生させることができる電界方向は、必要となるモーメント方向に直交しているからである。つまり、駆動電極に電圧印加して電界を発生させたとしても、分極後には伸縮素子となってしまう。そこで、外部に平行平板を配置して、剪断素子となる分極方向に強い電界を発生させたと仮定する。それにより分極ができるかと言うと、やはり不可能である。何故ならば、必要となるモーメント方向と平行に、素子自身の駆動用電極があるので電位勾配が発生せず、その区間の電界強度がほぼ0となるからである。故に、アクチュエータとして構成された場合、脱分極した剪断素子を再分極することはほぼ不可能である。これが、剪断素子の脱分極問題である。しかし、NRUSM に使用している圧電素子材料は低損失材料であり、第5章で示した様に低発熱である。また、熱伝導媒介である空気が無い真空チャンバー内の連続駆動においても、自己発熱による温度上昇はキュリー点にはほど遠かった。では、どのような使用環境で脱分極の心配をする様な事態が発生するのか？それは、超高真空の環境における NRUSM 応用である。

一般的に超高真空と呼ばれる環境を構築する場合、真空容器内面および内部に設置した機材からの離脱分子や脱ガスを促し、速やかに分子密度を下げる目的でベークアウトを実施する。このベークアウトとは、表面温度を約 200°C程度まで上昇させ、その状態を数日間維持する処置である。この温度はまだキュリー点を超えてはいなが、素子の分極を減少させる懸念は十分にある。また、その環境下に長時間置かれると、その危険は更に高まる。第5章の超高真空下における耐久試験時は、100°C以下の温度として約24時間のベークアウトを施した。いわゆる、ソフトベークである。しかし、今後 NRUSM を商品として世に送り出した場合、各ユーザーが同様の配慮をしてくれるとは限らない。それ故に、今後の超高真空応用を視野に入れた問題点の解決が急がれる。そこで、以下の非共振型アクチュエータを考案した。[1-2]

図 A-2 に圧電素子の構造を示す。基本構造は STM や AFM に使用されているのと同様の円筒形圧電素子である。外筒面には2分割した駆動用対向電極を有し、内面は全て GND 電極となっている。分極方向は、外筒方向として変形モードは d_{31} である。基本的変形モードを図 A-3 に示す。対向電極に同一電圧を印加した際の変形は「伸び」を生じるので、ここでは伸縮モードとする。絶対値が同じで符号の違う電圧印加時は「反り」を生じるので、同様にスライドモードとする。それらの変形モードにおける圧電素子頂点の位置は、

$$\text{スライドモード} \quad \Delta x = \frac{L^2}{D \cdot t} \cdot V \cdot d_{31} \quad (\text{A-1})$$

$$\text{伸縮モード} \quad \Delta y = \frac{L}{t} \cdot V \cdot d_{31} \quad (\text{A-2})$$

となる。つまり、印加電圧の極性により x-y の2方向に移動する。そこで、図 A-4 に示すように、90° の位相差を有する正弦波電圧を駆動電極に印加することで、頂点に楕円軌道が発生させることが可能となる。これにより、先端部における送り動作が可能となるが、楕円軌道の発生には共振原理を使用していないので、このアクチュエータは非共振型に分類される。そして、伸縮モードのみで構成されているので再分極可能である。

図 A-5 に円筒型圧電素子で構成した NRUSM を示す。予圧機構は NRUSM 用の Type-S1 を使

用した。図 A-6 には駆動時の印加電圧と先端動作を図解した。基本的には NRUSM のそれと同等の動きである。この円筒型 NRUSM を用いて駆動速度と位置決め制御を行った。評価用装置の外観を図 A-7 に、オープンループ性能を図 A-8 にクローズド制御時の位置決め精度を A-9 に、それぞれ示す。

オープンループにおける最高速度は 130mm/s、最大加速度は 0.06G と実用域である。また、ステップ&リピート動作においても、位置決め精度 $\pm 3.5\text{nm}$ である。ちなみに、この評価で使用したのは PID 制御系なので、制御系を最適化することで性能向上が期待できる。また、すでにこの圧電素子に関する FEM 解析や強度解析などは終了しており、今後は、それらの情報を基に改善を進めながら、応用に則した実用化耐久性などを進めるフェーズへと移る。

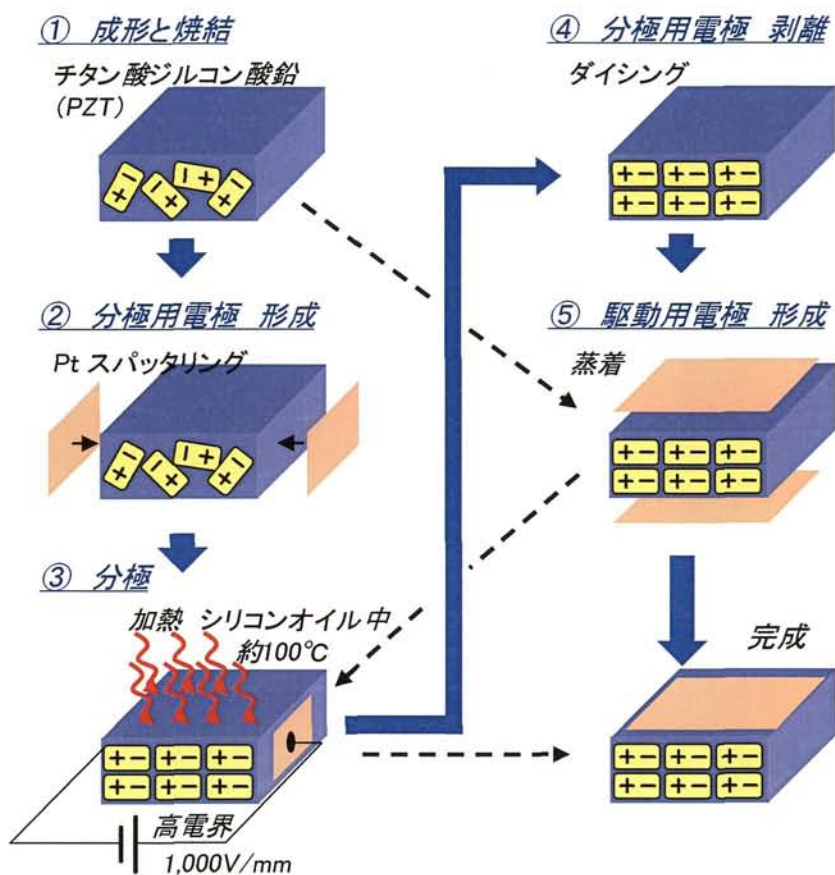


図 A-1 圧電素子の分極手順

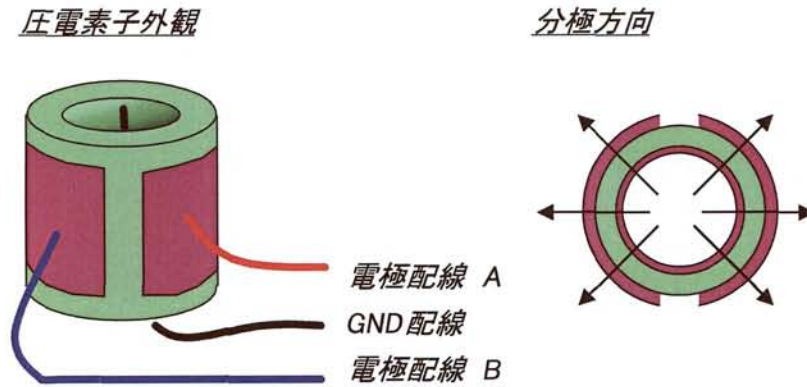
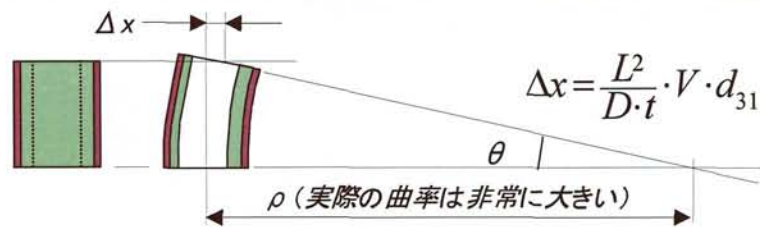


図 A-2 円筒型圧電素子の構造

スライド(擬似剪断)モード

STM/AFMなどのプローブ走査に使用されている。
 $A/B = -1$ を満たす電圧印加を用いる。



伸縮モード

通常の伸縮モード。
 $A/B = 1$ を満たす電圧印加を用いる。

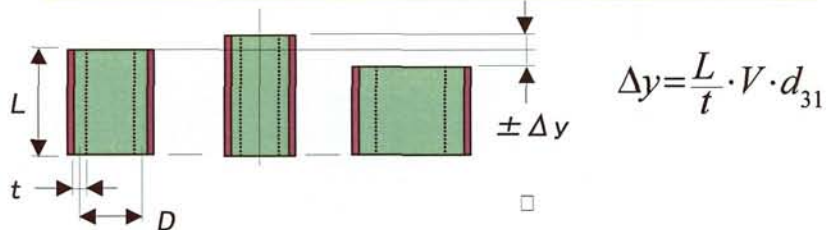
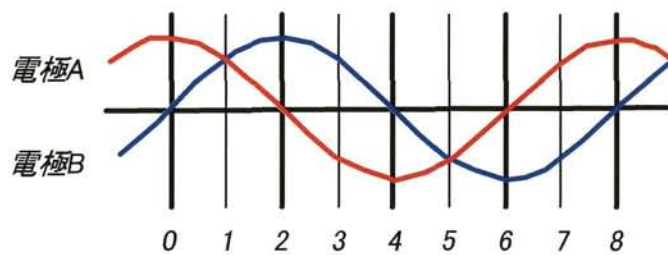


図 A-3 円筒型圧電素子の基本変形モード

軌道合成のための電圧波形



先端部の状態遷移

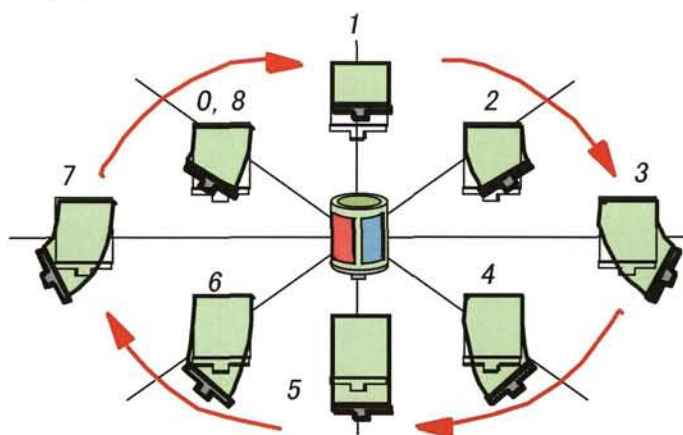


図 A-4 変形モードの合成による楕円軌道発生

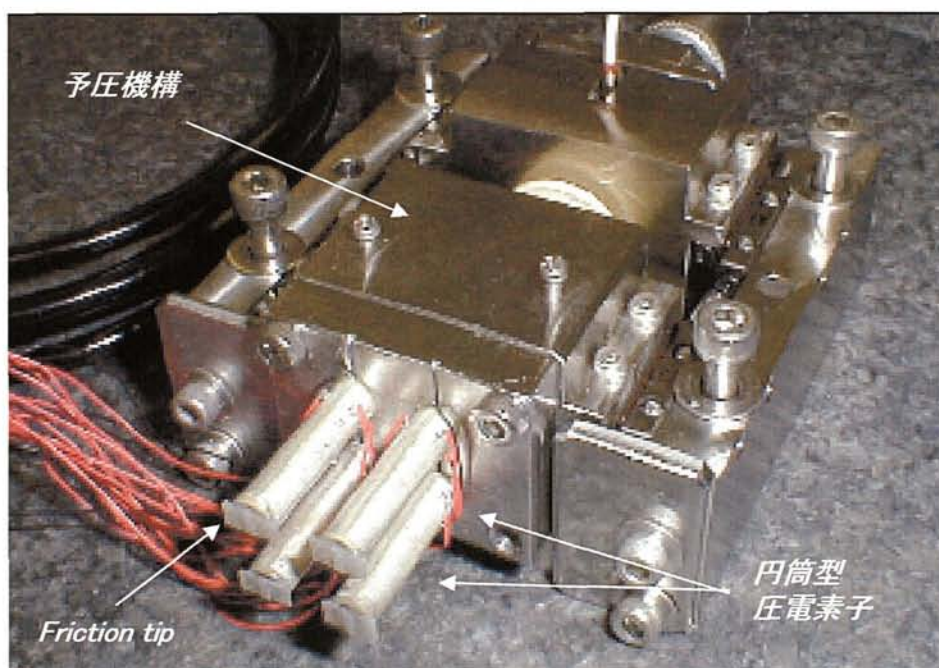
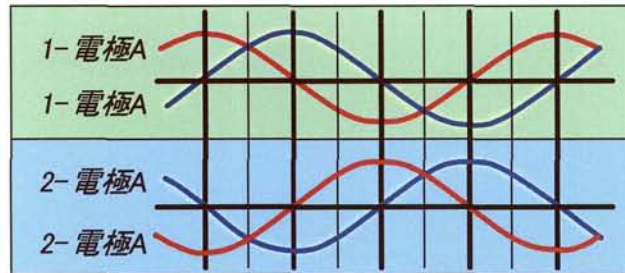


図 A-5 円筒型アクチュエータによる NRUSM

印加電圧波形



先端動作

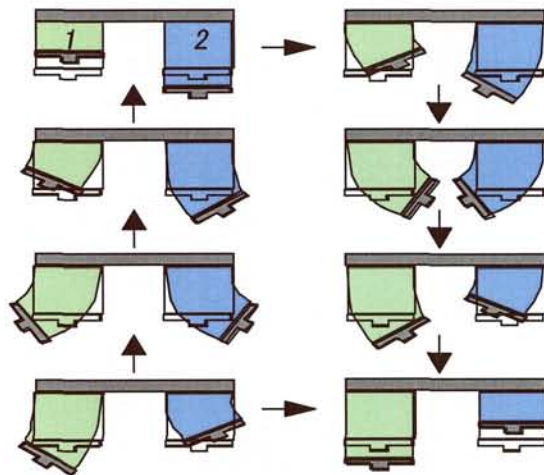


図 A-6 円筒型 NRUSM への印加電圧と先端動作

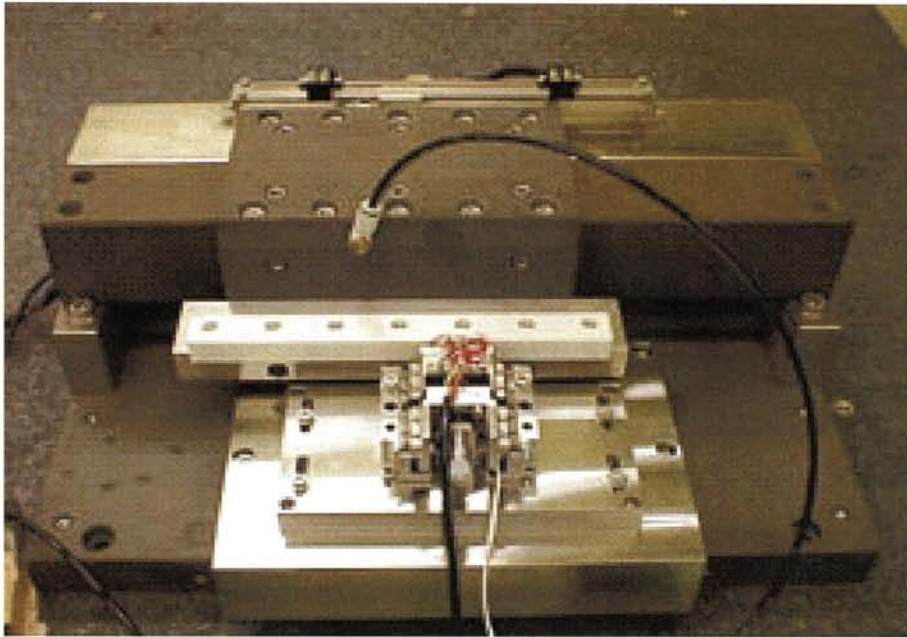


図 A-7 円筒型 NRUSM の性能評価装置外観

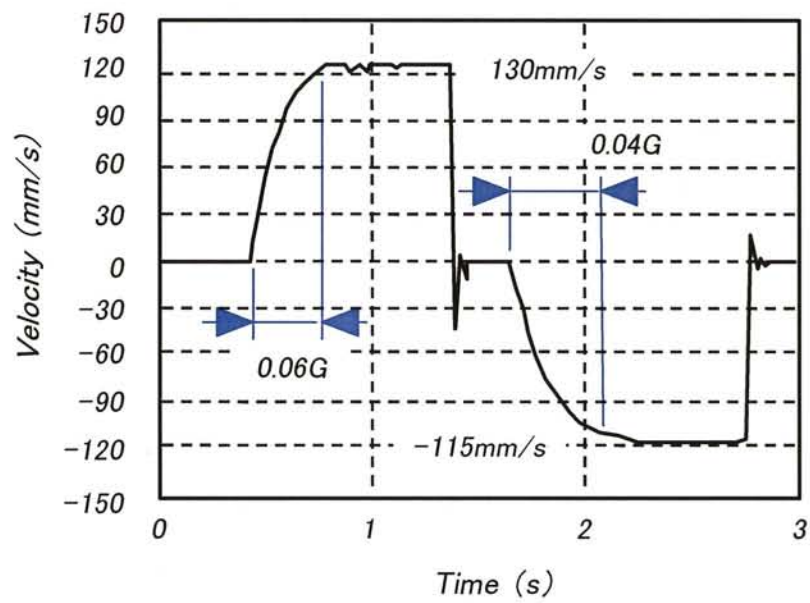


図 A-8 円筒型 NRUSM によるオープンループ時の速度性能

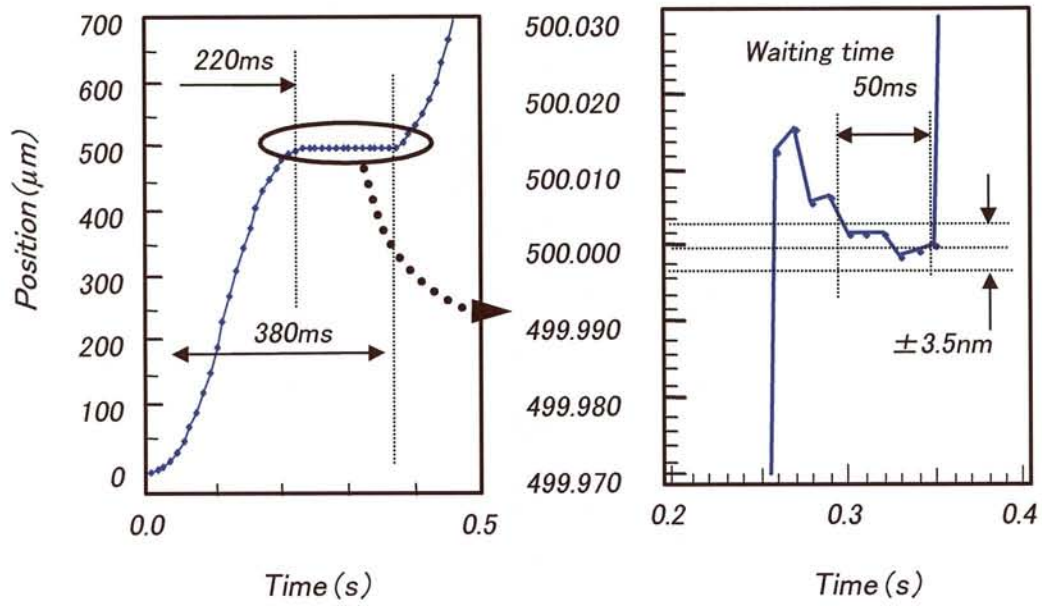


図 A-9 円筒型 NRUSM のクローズド制御時の位置決め性能

参考文献

- [1] 小坂光二、魚住清彦, “円筒型アクチュエータ”, 特開 2003-046159.
- [2] 橋口弘幸, “非共振型超音波モータの真空中における駆動耐久性向上に関する研究”, 熊本大学大学院自然科学研究科修士論文, 2004.

本論文に関する発表

【学術論文】

小坂光二, 橋本誠司, 大石潔, 石川赴夫, 久保田弘, 大見忠弘, 「アンチ・windアップ補償による高速 I-P 位置制御系の一構成法」、電気学会論文誌 D 2005 年 1 月号 産業応用部門誌 Vol.125 No.1, 2005, 平成 17 年 1 月, 117 頁-118 頁. (第 3 章に関する発表)

Taishi Endo, Yoshiya Egashira, Hiroyuki Furukawa, Hiroyuki Hashiguchi, Kouji Kosaka, Masayuki Watanabe, Noboru Miyata, Shirou Moriyama, Syunichi Sasaki, Akira Nakada, Tadahiro Ohmi, and Hiroshi Kubota, “Slip-Free Driving Method for Nonresonant Piezoelectric Actuator,” Japanese Journal of Applied Physics, Vol.44(2005), Part1, No.7A, pp.5264-5268, 2005. (第 6 章に関する発表)

橋本誠司、大石潔、小坂光二、石川赴夫、久保田弘、大見忠弘、「スティックスリップ補償と連続軌跡追従制御に基づく超音波アクチュエータ駆動精密ステージの一制御法」、電気学会論文誌 D (産業応用部門誌) 平成 17 年 6 月号 IEEJ Trans.IA, Vol. 125, No. 6, 2005, 平成 17 年 6 月、582 頁-589 頁. (第 7 章に関する発表)

Hiroyuki Hashiguchi, Yoshiya Egashira, Hiroyuki Furukawa, Taishi Endo, Tetsuya Kosaka, Koji Kosaka, Kiyoharu Uozumi, Masayuki Watanabe, Takahiro Yamakawa, Noboru Miyata, Akira Nakada, Hiroshi Kubota, and Tadahiro Ohmi, “Highly reliable piezoelectric actuator for precision stage system,” to be published in Japanese Journal of Applied Physics, vol. 44, no. 5A, 2005, pp.3307-3312. (付録 A に関する発表)

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 2 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 2 章に関する発表)

[国際会議]

Kouji Kosaka, Tetsuya Iwabuchi, Tetsuro Baba, Taishi Endo, Hiroyuki Hashiguchi, Hiroyuki Furukawa, Yoshiya Egashira, Seiji Hashimoto, Mutsumi Touge, Kiyohiko Uozumi, Akira Nakada, Hiroshi Kubota and Tadahiro Ohmi, "A Wear Reduction Method for the Frictionally Fast Feeding Piezo-Actuator," accepted in Japanese Journal of Applied Physics, 2005. (第 7 章に関する発表)

Fumito Imura, Toshihiro Kawasaki, Kazufumi Takamune, Kouji Kosaka, Akira Nakada, and Hiroshi Kubota, "Nano-injection of foreign substance into a living cell with nano-surgery system," Abstracts of Third International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics (M&BE3), p. 82, Tokyo, Japan, March 3-4, 2005. (第 8 章に関する発表)

Seiji Hashimoto, Kiyoshi Ohishi, Takuya Ohishi, Takeo Ishikawa, Kouji Kosaka, Yoshiya Egashira, Hiroshi Kubota and Tadahiro Ohmi, "Ultra-Precision Stage Control Based on Friction Model of Non-Resonant Ultrasonic Motor," The 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control ,Kawasaki International Center, Japan, March 25-28, 2004, pp.559-564. (第 7 章に関する発表)

Seiji Hashimoto, Kiyoshi Ohishi, Takuya Ohishi, Takeo Ishikawa, Kouji Kosaka, Yoshiya Egashira, Hiroshi Kubota and Tadahiro Ohmi, "Development of an Ultra-Precision Stage Control System Using Nonresonant Ultrasonic Motor," IECON 2003, The 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Hotel Roanoke and Conference Center, Roanoke, Virginia, USA Sunday, November 2nd to Thursday, November 6th, 2003, pp. 1331-1336. (第 7 章に関する発表)

Fumito Imura, Satoshi Ito, Makoto Kumazaki, Akira Nakada, Kouji Kosaka, Tetsuya Kosaka, and Hiroshi Kubota, "Volume Control System if Liquid in Nano-Pipette Using Fluid Interface," Abstracts of the 1st International Symposium on Active Nano-Characterization and Technology, P-63, pp.223-224, Tsukuba, Japan, November 2003. (第 8 章に関する発表)

Keijiro Itakura, Fumito Imura, Akira Nakada, Kouji Kosaka, Atsushi Arao, and Hiroshi Kubota, "A Nano-Probing System for Measurement of Micro-Device," Abstracts of the 1st International Symposium on Active Nano-Characterization and Technology, P-64, pp.225-226,

Tsukuba, Japan, November 2003. (第 8 章に関する発表)

Kouji Kosaka, Tetsuya Iwabuchi, Tetsuya Kosaka, Tetsuro Baba, Satoru Okudera, Kouji Takaki, Yasuhiro Maeda, Fimito Imura, Akira Nakada, Hiroshi Kubota, Kiyohiko Uozumi, and Tadahiro Ohmi, "Development of Vacuum Environment Compatible Nano-probe System," Digest of Papers Microprocesses and Nanotechnology 2003/ 2003 International Microprocesses and Nanotechnology Conference, October 29-31, 2003 Tokyo, Japan, 30P-7-39, pp.246-247. (第 8 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," Proceedongs of the 2003 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment(IIP/ISPS Joint MIPE), June 16-18, 2003, Yokohama, Japan, P-PW-05, pp. 409-410. (第 5 章に関する発表)

Kazumitsu Nakamura, Hiroshi Kubota, Tatsuro Morimoto, Hiroshi Kubota, Akira Nakada, Takayuki Akamichi, Tsuneo Inokuchi, Kenji Urabe, and Kouji Kosaka, "Arbitrary Pattern Fabrication by Means of Reticle-Free Exposure Method with LCD," SPIE, In Digest of Papers Photomask Japan 2003, pp211-212, Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technoligy IIX, April 2003, Yokohama, Japan. (第 8 章に関する発表)

Tatsuo Morimoto, Kazumitsu Nakamura, Hiroshi Kubota, Akira Nakada, Takayuki Akamichi, Tsuneo Inokuchi, and Kouji Kosaka, "Arbitrary Pattern Fabrication with a LCD reticle-free exposure method," SPIE, Vol. 5130, pp347-356, Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technoligy X, 16-18 April 2003, Yokohama, Japan. (第 8 章に関する発表)

Hiroshi Kubota, Fumito Imura, Akira Nakada, Yoshiya Egashira, Kouji Kosaka, Tetsuya Kosaka, "Nano-Surgery System by Ultra-Precision Semiconductor Technology," Abstracts of the Second International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics, p. 136, Tokyo, Japan, March 2003. (第 8 章に関する発表)

Hiroshi Kubota, Akira Nakada, Kouji Kosaka, Tadahiro Ohmi, "Sub-nanometer resolution stage for 0.1 micrometer LSI with its application to nanotechnology," Proceedings (Second Day) of 2003 International Semiconductor Technology Joint Forum in Kyushu, pp. 31-45, Kumamoto, Japan, March 2003. (第 4 章に関する発表)

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, pp.619-622. (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. (第5章に関する発表)

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. (第8章に関する発表)

Kazumitsu Nakamura, Hiroshi Kubota, Akira Nakada, Tsuneo Inokuchi, and Kouji Kosaka, "Development of Reticle-Free Exposure Method with LCD Projection Image," in Digest of Papers of Photomask Japan 2002 (the Symposium on Photomask and Next Generation Lithography Mask Technology IX), 5 c -01[4754-43], pp. 83-84, Yokohama, Japan. (第8章に関する発表)

Kazumitsu Nakamura, Hiroshi Kubota, Akira Nakada, Tsuneo Inokuchi, and Kouji Kosaka, "Development of Reticle-Free Exposure Method with LCD Projection Image," Proceedings of The Society for Optical Engineering, Volume4754, pp737-744, 2002. (第8章に関する発表)

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4章に関する発表)

K. Asumi, T. Yamakawa, S. Takada, K. Kosaka, Y. Egashira, "The piezoelectric Elements for the Non-resonance Type motor using a shear deformation mode," International Center for

Actuators and Transducers 33rd Annual, Symposium, 2001, (第2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. (第2章に関する発表)

【国内発表】

小坂光二、古川博之、遠藤泰史、久保田弘、「超音波モータにおける接触部耐久性向上技法」、第17回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム2PM5、平成17年6月、333頁-336頁。

大石卓也、橋本誠司、大石潔、小坂光二、石川赴夫、久保田弘、大見忠弘、「SPIDER 駆動精密ステージの位置決め制御における実験的摩擦補償法」、電気学会産業計測制御研究会 IIC-05-53、平成17年3月、79頁-84頁。

上村篤嗣、Truong Ngoc Minh、大石潔、高田雅介、橋本誠司、小坂光二、久保田弘、大見忠弘、「非共振型超音波アクチュエータを用いた精密ステージの連続軌跡追従制御系の構成法」、電気学会産業計測制御研究会 IIC-05-52、平成17年3月、73頁-78頁。

小坂光二、岩淵哲也、馬場哲郎、奥寺智、宮田昇、石井守、渡邊雅幸、森山司朗、佐々木俊一、荒尾淳、井上知行、高木宏司、江頭義也、橋本誠司、大石潔、遠藤泰史、橋口弘幸、中田明良、久保田弘、大見忠弘、「超精密高速ステージ開発 最終成果発表」、セミコン・ジャパン 2004 熊本フォーラム資料、平成16年12月、33頁-40頁。

上村篤嗣、早野徹、大石潔、橋本誠司、小坂光二、久保田弘、大見忠弘、「非共振型アクチュエータを用いた精密ステージの位置制御法」、第47回自動制御連合講演会、CD-R 論文集、平成16年11月、916。

板倉敬二郎、石川康之、中田明良、久保田弘、小坂光二、「ナノプローブシステムを用いた微細配線直接プロービング計測」、第57回電気関係学会九州支部連合大会、講演番号05-2P-05、平成16年9月、312頁。

上村篤嗣、大石潔、橋本誠司、小坂光二、久保田弘、大見忠弘、「非共振型アクチュエータ (SPIDER) を用いた精密ステージの高速位置決め制御法 11-1」、電気関係学会東北支部 平成16年連合大会、平成16年8月、304頁。

宮田昇、松野晋、渡邊雅幸、萬矢晃庸、小坂光二、馬場哲郎、岩淵哲也、中田明良、久保田弘、「高出力圧電素子技術開発」、熊本地域結集型共同研究事業「超精密半導体計測技術開発」第5回技術シンポジウム資料、平成16年6月、23頁-28頁。

小坂光二、岩淵哲也、馬場哲郎、奥寺智、宮田昇、石井守、渡邊雅幸、石井守、森山司朗、佐々木俊一、荒尾淳、井上知行、高木宏司、江頭義也、遠藤泰史、橋口弘、橋本誠司、大石潔、魚住清彦、古川博之、中田明良、久保田弘、大見忠弘、「超精密高速ステージの開発」、熊本地域結集型共同研究事業「超精密半導体計測技術開発」第5回技術シンポジウム資料、平成16年6月、7頁-22頁。

森山司朗、佐々木俊一、広瀬正孝、小坂光二、岩淵哲也、石井守、梅津基宏、東町高雄、久保田弘、大見忠弘、「ステージ軽量化技術開発」、熊本地域結集型共同研究事業「超精密半導体計測技術開発」第5回技術シンポジウム資料、平成16年6月、29頁-33頁。

中村一光, 森本達郎, 久保田弘, 中田明良, 赤道孝之, 井口恒夫, 占部憲治, 小坂光二, 小坂哲也, 馬場哲郎, 藤井敏夫, 高山由則, 鈴木信二, 若杉雄彦, 中村博文、「レチクルフリー露光技術開発」、熊本地域結集型共同研究事業「超精密半導体計測技術開発」第5回技術シンポジウム資料、平成16年6月、35頁-45頁。

小坂光二, 江頭義也, 橋本誠司, 大石潔, 魚住清彦, 荒木俊二, 中田明良, 久保田弘, 大見忠弘、「非共振型超音波モータの開発(制御システム) A314」、第16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16年6月、317頁-322頁

古川博之, 中田明良, 久保田弘, 小坂光二, 江頭義也、「非共振型超音波モータの開発(駆動性能の安定化及び予兆アルゴリズム) A315」、第16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16年6月、323頁-324頁。

江頭義也, 小坂光二, 馬場哲郎, 渡邊雅幸, 宮田昇, 古川博之, 中田明良, 久保田弘, 大石潔, 大見忠弘、「非共振型超音波モータの開発(静摩擦領域を応用した高耐久性駆動方式) A313」、第16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16年6月、313頁-316頁。

中田明良, 若杉雄彦, 赤道孝之, 板倉敬二郎, 脇本聡, 久保田弘, 中村一光, 森本達郎, 小坂光二, 相川創, 鈴木信二, 井口恒夫, 土屋忠明, 阿部和夫、「QTAQを実現するレチクルフリー露光技術と超精密検査技術」、第100回研究資料、(独)日本学術振興会、結晶加工と評価加工と評価技術第145委員会資料、平成16年5月、10頁-17頁。

橋本誠司, 大石潔, 小坂光二, 大石卓也, 石川赴夫, 久保田弘, 大見忠弘、「摩擦モデルに基づく非共振型超音波アクチュエータ駆動精密ステージの一制御法」、電気学会産業計測制御研究会資料 IIC-04-24, 平成16年3月、1頁-6頁。

大石卓也, 橋本誠司, 石川赴夫, 大石潔, 小坂光二, 久保田弘, 大見忠弘、「非共振型アクチュエータを用いた超精密ステージに対する摩擦特性の検証と位置制御法」、平成16年度電気学会全国大会 講演論文集、平成16年3月、332頁-333頁。

遠藤泰史, 橋口弘幸, 古川博之, 百島雅人, 荒木俊二, 江頭義也, 小坂光二, 岩淵哲也, 馬場哲郎, 奥寺智, 小坂哲也, 宮田昇, 山川孝宏, 渡邊雅幸, 森山司朗, 佐々木俊一, 荒尾淳, 井上知行, 高木宏司, 橋本誠司, 大石潔, 魚住清彦, 中田明良, 久保田弘, 大見忠弘、「超精密高速ステージの開発」、第18回熊本県産学官技術交流会 講演論文集、平成16年1月、302頁-303頁。

赤道孝之, 吉野彰一郎, 原弘一, 脇本聡, 若杉雄彦, 中田明良, 久保田弘, 中村一光, 森本達郎, 井口恒夫, 藤井敏夫, 相川創, 小坂光二, 小坂哲也, 鈴木信二, 直原正人, 高山良則, 中村博文、「レチクルフリー露光技術の開発」、第18回熊本県産学官技術交流会 講演論文集、平成16年1月、304頁-305頁。

宮田昇, 松野晋, 渡邊雅幸, 萬矢見庸, 森山司朗, 佐々木俊一, 小坂光二, 馬場哲郎, 岩淵哲也, 遠藤泰史, 橋口弘幸, 中田明良, 久保田弘, 大見忠弘、「高出力圧電素子技術開発」、セミコン・ジャパン2003超精密半導体計測技術開発フォーラム資料、平成15年12月、25頁-32頁。

小坂光二, 岩淵哲也, 馬場哲郎, 奥寺智, 小坂哲也, 宮田昇, 山川孝宏, 渡邊雅幸, 森山司朗, 佐々木俊一, 荒尾淳, 井上知行, 高木宏司, 江頭義也, 橋本誠司, 大石潔, 魚住清彦, 遠藤泰史, 橋口弘幸, 中田明良, 久保田弘, 大見忠弘、「超精密高速ステージの開発」、セミコン・ジャパン2003超精密半導体計測技術開発フォーラム資料、平成15年12月、11頁-23頁。

森山司朗, 佐々木俊一, 広瀬正孝, 小坂光二, 岩淵哲也, 石井守, 井口真仁, 東町高雄, 江頭義也, 久保田弘, 大見忠弘、「ステージ軽量化技術開発」、セミコン・ジャパン2003超精密半導体計測技

術開発フォーラム資料, 平成 15 年 12 月、33 頁-36 頁.

中村一光, 森本達郎, 久保田弘, 中田明良, 赤道孝之, 井口恒夫, 占部憲治, 小坂光二, 小坂哲也, 馬場哲郎, 藤井敏夫, 相川創, 高山由則, 鈴木信二, 若杉雄彦, 中村博文、「レチクルフリー露光技術開発」、セミコン・ジャパン 2003 超精密半導体計測技術開発フォーラム資料, 平成 15 年 12 月、37 頁-46 頁.

上村篤嗣, 大石潔, 橋本誠司, 小坂光二, 久保田弘, 大見忠弘、「Bang-Bang 制御による非共振型アクチュエータを用いた精密ステージの制御法」、第 13 回電気学会東京支部新潟支所研究発表会 予稿集、平成 15 年 11 月、131 頁.

若杉雄彦, 土屋忠明, 久保田弘, 中田明良, 赤道孝之, 松岡真二, 吉野彰一郎, 原弘一, 脇本聡, 中村一光, 森本達郎, 井口恒夫, 小坂光二, 小坂哲也, 鈴木信二, 直原正人, 藤井敏夫, 相川創, 高山由則, 中村博文、「QTAT オンライン電子回路パターンニング技術」、第 4 回熊本半導体・ナノテクノロジー研究会, 第 1 回 QTAT 熊本研究会合同シンポジウム、映像デバイス先端講座シンポジウム資料, 1-1, 平成 15 年 11 月、3 頁-11 頁.

居村史人, 伊藤訓史, 熊崎誠, 中田明良, 小坂光二, 久保田弘、「細胞手術用微細ピペットにおける超微量液体制御システム」、平成 15 年計測自動制御学会関西支部シンポジウム、講演番号 T201、平成 15 年 10 月、21 頁-24 頁.

古川博之, 久保田弘, 中田明良, 遠藤泰史, 橋口弘幸, 小坂光二, 小坂哲也, 江頭義也, 山川孝宏、「非共振型超音波モータ駆動ステージの真空内評価」、2003 年度精密工学会秋季大会、講演番号 N51、平成 15 年 10 月.

赤道孝之, 吉野彰一郎, 若杉雄彦, 中田明良, 久保田弘, 森本達郎, 中村一光, 井口恒夫, 小坂光二、「液晶ディスプレイを用いたレチクルフリー露光におけるアドレスグリッドの最適化」、第 64 回応用物理学会学術講演会講演予稿集、平成 15 年 9 月.

大石卓也, 橋本誠司, 石川赴夫, 大石潔, 小坂光二, 久保田弘, 大見忠弘、「静止摩擦を考慮した超精密ステージによる位置制御法」、平成 15 年電気学会産業応用部門大会 講演論文集 Y-83、平成 15 年 8 月、1 頁

居村史人, 伊藤訓史, 熊崎誠, 中田明良, 小坂光二, 久保田弘、「細胞操作用ピペット先端における 2 液界面の挙動とその物理的考察」、第 64 回応用物理学会学術講演会講演予稿集、No.3、講演番号 31a-S-5、平成 15 年 8 月、1190 頁.

小坂光二, 馬場哲郎, 岩渕哲也, 宮田昇, 山川孝宏, 渡邊雅幸, 森山司朗, 佐々木俊一, 荒尾淳, 井上知行, 高木宏司, 江頭義也, 橋本誠司, 大石潔, 遠藤泰史, 橋口弘幸, 森園靖浩, 中田明良, 久保田弘, 大見忠弘、「超精密高速ステージ開発」、熊本地域結集型共同研究事業「超精密半導体計測技術開発」第 4 回技術シンポジウム資料、平成 15 年 6 月、5 頁-13 頁.

中田明良, 居村史人, 板倉敬二郎, 万化, 久保田弘, 小坂光二, 小坂哲也, 岩渕哲也, 加納竹志, 馬場哲郎, 荒尾淳, 井上知行, 岩根宏, 前田安浩, 高木宏司、「パッドフリー計測のためのナノプローバの開発」、熊本地域結集型共同研究事業「超精密半導体計測技術開発」第 4 回技術シンポジウム資料、平成 15 年 6 月、71 頁-75 頁.

中村一光, 森本達郎, 久保田弘, 中田明良, 赤道孝之, 井口恒夫, 占部憲治, 小坂光二, 小坂哲也, 藤井敏夫, 高山由則, 鈴木信二, 若杉雄彦, 中村博文、「レチクルフリー露光技術開発の展開」、熊本地域結集型共同研究事業「超精密半導体計測技術開発」第 4 回技術シンポジウム資料、平成 15

年 6 月、15 頁-22 頁.

小坂光二, 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の開発ー耐久性に関する評価ー 6B08」、第 15 回電磁力関連のダイナミックシンポジウム講演論文集、平成 15 年 5 月、677 頁-680 頁.

遠藤泰史, 古川博之, 橋口弘幸, 永本恵市, 中田明良, 久保田弘, 小坂哲也, 小坂光二, 「非共振型超音波モータの開発ー駆動性能の安定化ー 6B07」、第 15 回電磁力関連のダイナミックシンポジウム講演論文集、平成 15 年 5 月、675 頁-676 頁.

橋口弘幸, 古川博之, 遠藤泰史, 中田明良, 久保田弘, 小坂哲也, 小坂光二, 「非共振型超音波モータの開発ー圧電アクチュエータの最適構造設計ー 6B06」、第 15 回電磁力関連のダイナミックシンポジウム講演論文集、平成 15 年 5 月、671 頁-674 頁.

中田明良, 居村史人, 板倉敬二郎, 久保田弘, 小坂光二, 小坂哲也, 岩淵哲也, 加納竹志, 馬場哲郎, 荒尾淳, 井上知行, 岩根宏, 前田安浩, 高木宏司, 「半導体電気計測のためのナノプローブ技術の開発」、第 1 回産学連携による九州産業クラスター・知的クラスター合同成果発表会成果事例集、平成 15 年 5 月、157 頁-164 頁.

小坂光二, 江頭義也, 小坂哲也, 奥寺智, 後藤雄一, 多田光宏, 守内哲也, 濱田淳一, 遠藤泰史, 橋口弘幸, 居村史人, 中田明良, 久保田弘, 大見忠弘, 「超精密位置決め技術を応用した細胞マニピュレータ」、精密工学会超精密位置決め専門委員会定例会講演前刷集 (No.2003-1)、平成 15 年 4 月、21 頁-28 頁.

橋口弘幸, 古川博之, 遠藤泰史, 森川晃次, 江頭義也, 小坂光二, 小坂哲也, 山川孝宏, 中田明良, 久保田弘, 「真空中における非共振型超音波モータのステージ駆動特性 30a-YK-1」、2003 年春季 第 50 回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集 NO.2、平成 15 年 3 月、776 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 ~摩擦・摩耗特性に関する研究~ 30a-YK-2」、2003 年春季 第 50 回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集 NO.2、平成 15 年 3 月、776 頁.

古川博之, 久保田弘, 中田明良, 橋口弘幸, 小坂光二, 江頭義也, 「非共振型超音波モータの連続動作後の時間位置偏差量観察」、2003 年精密工学会 第 10 回学生会員卒業研究発表講演会~今後の精密工学を担う萌芽的研究~、平成 15 年 3 月.

橋本誠司, 大石潔, 大石卓也, 石川赴夫, 小坂光二, 江頭義也, 久保田弘, 大見忠弘, 「次世代超精密ステージ機構用アクチュエータの位置制御系の開発」、2003 年電気学会産業計測制御研究会、産業計測制御研究会資料 資料番号 I I C-03-47、平成 15 年 3 月、13 頁-18 頁.

居村史人, 森本達郎, 中田明良, 小坂光二, 小坂哲也, 久保田弘, 「界面張力平衡現象を用いた圧力制御型微量注射器」、第 50 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、No.3、講演番号 29p-P12-14、平成 15 年 3 月、1396 頁.

赤道孝之, 松岡真二, 中田明良, 久保田弘, 森本達郎, 中村一光, 井口恒夫, 小坂光二, 「プリント配線基板用レチクルフリー露光システムの性能評価」、第 50 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、No.2、講演番号 28a-YK-8、平成 15 年 3 月、763 頁.

居村史人, 板倉敬二郎, 中田明良, 久保田弘, 小坂光二, 小坂哲也, 江頭義也, 前田安浩, 高木宏司, 「小型ナノマニピュレータの性能評価」、2003 年度精密工学会春季大会学術講演論文集、講演番号 M18、平成 15 年 3 月、558 頁.

中田明良、居村史人、板倉敬二郎、久保田弘、小坂光二、荒尾淳、「Development of nano-probing system for metallization-free measurement」、2003 電子情報通信学会総合大会講演論文集、講演番号:SC-12-4、平成 15 年 3 月、S-67 頁-S-68 頁。

森本達郎、赤道孝之、松岡真二、中田明良、久保田弘、中村一光、小坂光二、井口恒夫、内野博介、藤井敏夫、「Development of reticle free exposure system」、2003 電子情報通信学会総合大会講演論文集、講演番号:C-11-5、平成 15 年 3 月、65 頁。

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、257 頁 - 258 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。

松岡真二、赤道孝之、中田明良、久保田弘、森本達郎、中村一光、小坂光二、井口恒夫、内野博介、藤井敏夫、「レチクルフリー露光システムの開発」、第 17 回熊本県産学官技術交流会講演論文集、論文番号 521、平成 15 年 1 月、252 頁-253 頁。

小坂光二、馬場哲郎、岩渕哲也、江頭義也、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、山口輝志、井戸泰男、坂本博宣、高橋孝誠、大石潔、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、「超精密高速ステージ開発」、セミコン・ジャパン 2002 超精密半導体計測技術開発フォーラム資料、平成 14 年 12 月、11 頁-21 頁。

中村一光、森本達郎、久保田弘、中田明良、赤道孝之、松岡真二、井口恒夫、占部憲治、小坂光二、加納竹志、藤井敏夫、高山由則、「レチクルフリー露光技術開発の展開」、セミコン・ジャパン 2002 超精密半導体計測技術開発フォーラム資料、平成 14 年 12 月、11 頁-21 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、岩淵哲也、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) 円筒型圧電素子を用いたアクチュエータの動解析」、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、岩淵哲也、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。

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。

赤道孝之、松岡真二、中田明良、久保田弘、森本達郎、中村一光、井口恒夫、小坂光二、「液晶ディスプレイ投影像を用いた連続ラインパターン形成」、第63回応用物理学会学術講演会予稿集、No.2、講演番号26p-N-15、平成14年9月、635頁。

小坂光二、馬場哲郎、岩淵哲也、江頭義也、宮田昇、山川孝宏、渡邊雅幸、森山司朗、佐々木俊一、荒尾淳、井上知行、高木宏司、大隈義信、山口輝志、井戸泰男、坂本博宣、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、大石潔、大見忠弘、「超精密高速ステージ開発」、熊本地域結集型共同研究事業「超精密半導体計測技術開発」第3回技術シンポジウム資料、平成14年6月、5頁-13頁

中田明良、居村史人、江頭義也、久保田弘、小坂光二、加納竹志、小坂哲也、岩淵哲也、馬場哲郎、荒尾淳、井上知行、岩根宏、前田安浩、「半導体電気計測のためのナノプローブ技術の開発 - 細胞ナノサージェリーから半導体ナノプローブへ」、熊本地域結集型共同研究事業「超精密半導体計測技術開発」第3回技術シンポジウム資料、平成14年6月、65頁-70頁。

中村一光、久保田弘、中田明良、森本達郎、赤道孝之、井口恒夫、水口義弘、小坂光二、加納竹志、「レチクルフリー露光技術開発の展開」、熊本地域結集型共同研究事業「超精密半導体計測技術開発」第3回技術シンポジウム資料、平成14年6月、57頁-64頁。

小坂光二、江頭義也、岩淵哲也、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。

小坂光二、江頭義也、岩淵哲也、奥寺智、宮田昇、山川孝宏、渡邊雅行、森山司朗、佐々木俊一、大隈義信、荒尾淳、井上知行、高木宏司、井戸泰男、坂本博宣、永本恵市、原田崇、石橋秀隆、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の開発とそれを応用した超精密XYステージの開発」、精密工学会 超精密位置決め専門委員会 定例会講演前刷集 (No.2002-1)、平成14年4月、13頁-21頁。

江頭義也、小坂光二、高田真次、岩淵哲也、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、岩淵哲也、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、高田真次、岩淵哲也、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。

赤道孝之、中村一光、井口恒夫、小坂光二、中田明良、久保田弘、「縮小投影露光用液晶ディスプレイの波長依存特性の計測」、第49回応用物理学関係連合講演会講演予稿集、No2、講演番号29a-YR-11、平成14年3月、718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、岩淵哲也、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、岩淵哲也、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、岩淵哲也、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。

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、岩淵哲也、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。

赤道孝之、羽山隆史、中田明良、久保田弘、中村一光、小坂光二、井口恒夫、「液晶パネルを用いたレチクル交換レス露光装置技術の開発」、第16回熊本県産学官技術交流会講演論文集、論文番号520、平成14年1月、256頁-257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年度応用物理学会九州支部講演会 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年度応用物理学会九州支部講演会 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、岩淵哲也、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。

小坂光二、高田真二、岩淵哲也、江頭義也、宮田昇、山川孝宏、渡邊雅行、森山司朗、佐々木俊一、荒尾淳、井上知行、高木宏司、大隈義信、井戸泰男、坂本博宣、永本恵市、原田崇、石橋秀隆、遠藤泰史、橋口弘幸、森園靖浩、中田明良、久保田弘、大見忠弘、「超精密高速ステージ開発」、セミコン・ジャパン2001超精密半導体計測技術開発フォーラム資料、平成13年12月、13頁-20頁。

中村一光、久保田弘、中田明良、井口恒夫、小坂光二、「液晶ディスプレイ投影画像を用いたレチクルフリー露光技術の開発」、セミコン・ジャパン2001超精密半導体計測技術開発フォーラム資料、平成13年12月、13頁-20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。

小坂光二、高田真二、岩淵哲也、江頭義也、宮田昇、山川孝宏、渡邊雅幸、森山司朗、佐々木俊一、荒尾淳、井上知行、高木宏司、大隈義信、井戸泰男、坂本博宣、永本恵市、原田崇、石橋秀隆、遠藤泰史、橋口弘幸、森園靖浩、中田明良、久保田弘、「超精密高速ステージ開発」、熊本地域結集型共同研究事業「超精密半導体計測技術開発」第2回技術シンポジウム資料、平成13年6月、9頁-15頁。

中田明良、居村史人、江頭義也、小坂光二、久保田弘、「ナノテクノロジーを応用した細胞内構造体の手術・操作」、新エネルギー・産業技術総合開発機構、即効型地域新生コンソーシアム研究開発事業成果報告書、平成13年3月。

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、岩渕哲也、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、岩渕哲也、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、岩渕哲也、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、岩渕哲也、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 回応用物理学学会学術講演会 講演予稿集、平成 12 年 9 月、614 頁。

小坂光二、「超精密高速ステージの開発と事業化に向けて」、熊本地域結集型共同研究事業「超精密半導体計測技術開発」第 1 回技術シンポジウム資料、平成 12 年 6 月、29 頁・38 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 μm 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 μm 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 年度応用物理学九州支部講演会 講演予稿集、平成 11 年 12 月、36 頁。

【解説・特集】

小坂光二、「レーザ干渉計搭載超音波モータ方式 電子線描画装置用精密ステージ」、光アライアンス、2005, MAY, Vol.16, No.5, 平成 17 年 4 月、51 頁・55 頁。

東町高雄、石井守、小坂光二、「超精密 XY ステージの軽量化のための構造解析」、電応研テクニカルレポート Vol.14, No.1, November, 2004, Ser.No.23, 平成 16 年 11 月、28 頁・39 頁。

小坂光二、「非共振型超音波モータの開発一次世代の高精度アクチュエータを目指して」、SEAJ Journal 2003/7 July, 平成 15 年 7 月、44 頁-45 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.

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、「特集：超音波を使用したさまざまな加工、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.

中村一光、久保田弘、中田明良、井口恒夫、小坂光二、「液晶によるレチクルレス露光方式の開発」、M&E、12 月号、工業調査会、平成 13 年 12 月、114 頁-119 頁.

【特許】

- 河西秀典、小坂光二、特開平 11-113273 「超音波モータ、駆動ステージ及び露光装置」
- 高田真次、小坂光二、特開 2000-116159 「超音波モータの制御方法」
- 小坂光二、特開 2001-293629 「送り装置」
- 小坂光二、特開 2001-293630 「送り装置」
- 小坂光二、特許第 3597440 号 「電子線描画方法およびその装置」
- 小坂光二、高田真次、久保田弘、山川孝宏、阿隅一将、特許第 3406900 号 「圧電アクチュエータ」
- 小坂光二、高田真次、岩淵哲也、特開 2002-187092 「送り装置」
- 小坂光二、魚住清彦、特開 2003-046159 「円筒型アクチュエータ」
- 小坂光二、魚住清彦、特開 2003-045940 「ビーム照射装置」
- 小坂光二、岩淵哲也、江頭義也、特開 2004-187389 「送り装置」
- 久保田弘、中田明良、居村史人、小坂光二、特開 2003-284775 「液体の吸入および／または吐出装置ならびに液体の吸入および／または吐出方法」
- 渡邊雅幸、山川孝宏、小坂光二、特開 2005-006393 「圧電アクチュエータ」
- 渡邊雅幸、宮田昇、小坂光二、特開 2005-168137 「圧電アクチュエータ及び駆動装置」
- 小坂光二、特願 2004-045305 「位置決め装置」
- 江頭義也、久保田弘、遠藤泰史、小坂光二、中田明良、特願 2004-099163 「送り機構の駆動方式」
- 大石潔、小坂光二、橋本誠司、特願 2004-259084 「位置制御装置および位置制御方法」
- 渡邊雅幸、宮田昇、小坂光二、特願 2004-179191 「圧電アクチュエータおよび駆動装置」
- 大石潔、小坂光二、橋本誠司、特願 2004-375412 「位置制御装置および位置制御方法」
- 小坂光二、PCT/JP02/06551 「送り装置」

[受賞]

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.