

空気潤滑超精密位置決め機構と
そのX線露光装置への応用

石原直



①

空気潤滑超精密位置決め機構と
そのX線露光装置への応用

石 原 直

目 次

第1章 序論

第1.1節 本研究の背景と動機	2
第1.2節 本研究の目的と意義	5
第1.3節 本研究の概要	6

第2章 セラミック製多孔質空気軸受

第2.1節 緒論	10
第2.2節 セラミック多孔質材料と無電解ニッケルめっき	14
2.2.1 ウレタンフォーム多孔体	14
2.2.2 無電解ニッケルめっきによる絞り抵抗制御	16
第2.3節 空気軸受特性の理論解析	20
2.3.1 解析モデルと記号	20
2.3.2 多孔質空気軸受の理論解析	23
2.3.3 空気軸受の特性に関する考察	29
第2.4節 軸受特性の基礎的実験	34
2.4.1 実験方法	34
2.4.2 実験結果と考察	37
第2.5節 本章の結論	39

第3章 空気潤滑超精密ねじ送り機構

第3.1節 緒論	41
第3.2節 空気静圧送りねじの基本構造	43
第3.3節 空気静圧送りねじ	48
3.3.1 空気静圧送りねじの設計	48
3.3.2 母材の製造と加工法の検討	50
3.3.3 空気潤滑ねじ送り機構	53

第3.4節 空気潤滑ねじ送り機構の特性評価と考察	55
3.4.1 空気静圧送りねじの軸方向静剛性	55
3.4.2 空気潤滑ねじ送り機構の移動分解能	59
3.4.3 空気潤滑ねじ送り機構の送り精度	62
第3.5節 ねじ送り機構の位置決め制御	66
3.5.1 空気潤滑ねじ送り機構の動特性	66
3.5.2 位置決め制御	68
第3.6節 本章の結論	72

第4章 X線露光装置における精密位置決め

第4.1節 緒論	74
第4.2節 X線露光の原理とパラメータの定義	76
第4.3節 解像力に対するギャップの影響	78
4.3.1 半影はけの影響	78
4.3.2 フレネル回折の影響	85
第4.4節 X線露光における重ね合わせの誤差解析	87
4.4.1 機械的位置合わせ誤差	87
4.4.2 物理的位置合わせ誤差	95
4.4.3 放射光X線露光における重ね合わせ誤差	101
第4.5節 シンクロトロン放射光X線露光の生産性	103
4.5.1 放射光X線パワーの計算	103
4.5.2 スループットの計算	107
第4.6節 本章の結論	110

第5章 シンクロトロン放射光用X線露光装置への応用

第5.1節 緒論	112
第5.2節 X線露光装置の設計	114
5.2.1 放射光X線露光システムと露光装置の基本設計	114
5.2.2 位置決め制御方法の設計	118

5.2.3 放射光X線露光装置の構成	124
第5.3節 放射光X線露光装置の試作と特性評価	128
5.3.1 空気潤滑ねじ送りによるたて形XYステージ	128
5.3.2 光ヘテロダイン干渉による位置ずれ計測	134
5.3.3 空気潤滑送り機構による位置合わせ制御	139
第5.4節 露光実験による装置特性の評価	141
5.4.1 解像力の評価	141
5.4.2 位置合わせ精度の評価	143
5.4.3 テストデバイスの露光実験	148
第5.5節 本章の結論	150

第6章 本論文の総括

第6.1節 本研究のまとめ	152
第6.2節 今後の課題と展開	155

謝 辞	158
-----	-----

参考文献	159
------	-----

1. 研究の背景と動機
2. 研究の目的と意義
3. 研究の概要
4. 研究の方法
5. 研究の結果
6. 研究の結論
7. 参考文献
8. 謝辞
9. 索引
10. 目次

第 1 章 序 論

- 1. 1 本研究の背景と動機
- 1. 2 本研究の目的と意義
- 1. 3 本研究の概要

本研究は、社会経済の発展に伴って生じる環境問題の解決に貢献することを目的として実施された。本研究の背景と動機は、近年の気候変動や資源不足の深刻化による社会への影響が懸念されることである。本研究の目的は、持続可能な社会の実現に向けた政策提言を行うことである。本研究の概要は、環境問題の現状分析、政策の検討、および実施計画の策定である。

1.1 本研究の背景と動機

1948年のトランジスタ発明以来、半導体集積回路の急速な進歩は産業界に多大なインパクトを与えてきた。その中でも1970年代からの、IC、MSI、LSI、超LSIと留まることのない高集積化の流れは、これを支える製造技術に多大な影響を与え、LSIバタンへの微細化要求がその製造技術の高度化、特に微細バタンの形成技術の高精度化を促してきた。

このような状況の中で、1972年にMITのH. I. Smithら [Spears 1972A, 1972B] が微細バタン形成技術としてX線リソグラフィを提唱し、将来の超微細なバタンの転写技術として大きな期待を集めた。本研究がなされたNTTの電気通信研究所でも、LSIの研究を拡充する時期と相俟って、1974年よりX線リソグラフィを取り上げ、本格的な研究に着手した。

X線リソグラフィは、波長1nm前後の軟X線を用いるプロキシミティ露光法である。LSIのバタン形成に広く用いられている波長400~200nmの紫外線~遠紫外線に比べて、X線リソグラフィで使用する軟X線は波長が大幅に短いため、光の回折・干渉による解像力低下が極めて小さく、高い解像力が期待できる。このようなX線リソグラフィの潜在能力をLSIバタンの転写技術として利用する上での技術的課題として、狭い露光ギャップの設定と転写バタンの位置合わせがある。X線は屈折光学系の存在しない光であるため、バタン転写における解像力やウエハ上に転写されるバタンの位置精度が、マスクとウエハの空間的な位置決め精度に強く依存する。従って、X線リソグラフィにおいて、高精度の機械的位置決め技術は、露光システムの性能を支配する最も重要な基盤技術の一つである。

位置決め技術は、その適用される分野によって要求される機能がそれぞれ特徴を有している。例えば、精密加工の分野では、被加工物の形状精度を高めるために位置決め機構の運動精度と運動軌跡の制御が重要である。また、位置決め系に加工力が変動負荷として働くため、大きな負荷容量と高い剛性が必要である。他方、精密測定用の位置決めでは、一般的に負荷は小さく、かつ負荷変動が無い場合が多いが、代わりに高速の送り速度や一定速度の送り機能が要求される。

ここで研究対象とするX線露光装置の主要機能はウエハのステップ移動とマスクとウエハの位置合わせである。前者では、半導体製造装置で特に重要なスループット確保のための高速性が重要であり、後者ではもちろん、微細化するバタン寸法に応じた高い移動分解能と位置決め精度が必須である。また前述のように、非常に狭いギャップを保ったままマスクとウエハを相対運動させるため、相互の衝突を避けるために機構には高い運動精度が要求される。これらのことから、X線リソグラ

フィを対象に研究開発する超精密位置決め技術は、超精密加工や計測など他の幅広い分野においても、波及効果を及ぼし得るものと考えられる。

本研究は以上のような背景と動機のもとでスタートしたものである。当初のX線露光装置は電子線励起形X線源を搭載しており、点光源・発散光束を使用した。この時の適用領域は1ミクロンないしサブミクロンバタンの転写であった。電子線励起形X線源は水冷の回転ターゲットに電子線をあてた時に発生する特性X線を利用するもので、ターゲット材料を選ぶことによりX線の波長を選択する。しかしながら、投入する電子線エネルギーからX線エネルギーへの変換効率が極めて低いため、ウエハ上で得られるX線パワーは1mWにも到達しない非常に小さいものであった。レジストとしては、紫外線用のレジストがX線に対する感度が低いため電子線用に開発されたものがX線露光に利用されたが、これでも1回のX線露光には数十分から数時間を要するという状況であった。また露光の方式は、ウエハのサイズも小さかったのでウエハ全面を一度に露光する一括露光方式がとられていた。このため、バタンの重ね合わせのための位置決め機構としては長い移動ストロークは不要であり、もっぱら移動分解能を向上させる研究開発が行なわれた。並行してX線マスクの研究開発も進められたが、初期のX線マスクは当然のことながら平坦度やX線吸収体の配置精度が悪く、破損もし易いものであった。このため、X線露光装置を試作して [Yamazaki 1978, 石原 1980, 山崎 1980] そのバタン重ね合わせ精度を評価しても十分な精度は得られず、重ね合わせ誤差の原因がX線マスクにあるのか、露光ギャップ設定にあるのか、位置決め誤差なのかを正確に分析することさえ難しい状況であった。

その後のX線露光装置の第一の技術革新は、ウエハをステップ移動させながらある狭い領域を順次露光していくステップアンドリピート方式の採用である。これにより、露光領域が小さいのでX線マスクの精度が向上する。ランアウト (X線マスクに入射するX線が角度を持つために生じる転写バタンの径方向位置シフト) が小さいので線源距離を近づけてウエハ上のX線パワーを増加できるなどの利点が生じ、結果としてX線露光装置の性能は大幅に向上した。例えばこの段階で試作されたX線露光装置 [Hayasaka 1985] は、0.5 μ m領域のデバイスの試作に適用されるまでの性能が得られている。しかしながら、装置の位置決め機構に対しては、より狭い露光ギャップの設定とウエハの高速ステップ移動という新たな機能が要求されることとなり、要求される位置合わせ精度も転写バタンの微細化に応じたより厳しいものとなってきた。このため、LSI産業におけるウエハの大口径化の動向と相俟って、X線露光装置用の位置決め機構には、より大ストロークで超高分解能、かつ高い運動精度を確保することを全て満足させることが要求されるようになった。

このような状況の中で、X線露光の第二の技術革新はX線源の世代交代である。より強いX線パワーを得ることを目標にX線露光用のX線源は、電子線励起形からプラズマX線源へ、そしてシンクロトロン放射光へと推移してきた。これらのX線源の変遷において、ウエハ上のX線強度は概ね一桁ずつ向上し、X線に対して感度の高いレジストの開発も加わって、露光時間が大幅に短縮される見通しが得られつつある。さらに、シンクロトロン放射光の場合は、前二者が発散X線を使用するのに対して、平行X線を利用できるという大きな変化がある。これは、X線露光装置に対してはランアウトが極めて小さくなるために露光ギャップの設定における要求精度を緩和するという利点をもたらす。また、シンクロトロン放射光は水平面内に放射されることから、露光装置の構造自体もマスクとウエハが鉛直に置かれるたて形に変化している。

以上のような歴史的背景の下、X線リソグラフィは、現状において次々世代のクォータマイクロン超LSI用の露光技術として位置づけられ、位置決めに要求される精度はナノメートルのオーダに到達しようとしている。本研究は一貫してX線露光装置用位置決め技術の高精度化を研究対象としており、本論文は、位置決め機構の基本要素とその超高精度送り機構への展開、およびX線露光装置への応用についてまとめたものである。なお、本論文の主論点は位置決め技術の根幹をなす位置決め機構技術であり、計測、および制御技術については既存技術の応用の範疇で扱っている。また、X線露光装置としてはシンクロトロン放射光を用いるフェーズの研究開発に対応している。

1.2 本研究の目的と意義

超LSIパタンの微細化トレンドを外挿すると、1990年代後半から終盤にはパタン寸法はクォータマイクロン～0.2マイクロンの領域となる。この世代において、X線リソグラフィは最も有力な微細パタン形成手段であり、そこで要求されるパタンの転写位置精度は数十ナノメートルである。これを、X線露光装置として実現するためには、位置決め機構、位置計測、位置決め制御の各技術の高度化と総合化が必要である。特に、機構技術はその根幹をなすものであり、ナノメートルオーダの高速位置決めを達成するためには、ブレイクスルーとなるような革新的技術を必要とする。そこで、位置決め機構の高速・超高精度化のアプローチとして、「機構から固体摩擦を完全に排除したフリクションフリー送り機構」を取り上げる。そして、これを基本要素として、X線露光装置用の位置決め機構へと展開する。

本研究は、「次々世代超LSI用X線リソグラフィを実現するための基礎技術としての高速・超高精度位置決め機構の研究開発と、そのX線露光装置への適用による有効性の検証」を目的とする。本研究のより具体的な目的は以下のとおりである。

- (1) 位置決め機構の基本要素である空気軸受のセラミック多孔質による高性能化。
- (2) 同多孔質紋りによる完全空気潤滑ねじ送り機構の実現。
- (3) X線露光装置に要求される位置決め機能・性能の一般化。
- (4) 完全空気潤滑位置決め機構を適用したX線露光装置の開発と、これによる基本技術の有効性検証。

以上により、クォータマイクロン世代に利用可能なX線露光装置を実現するとともに、その過程で研究開発した位置決め機構基本技術を汎用技術として超精密分野に提供する。

1.3 本研究の概要

本論文の主な内容と構成を図1.1に示す。

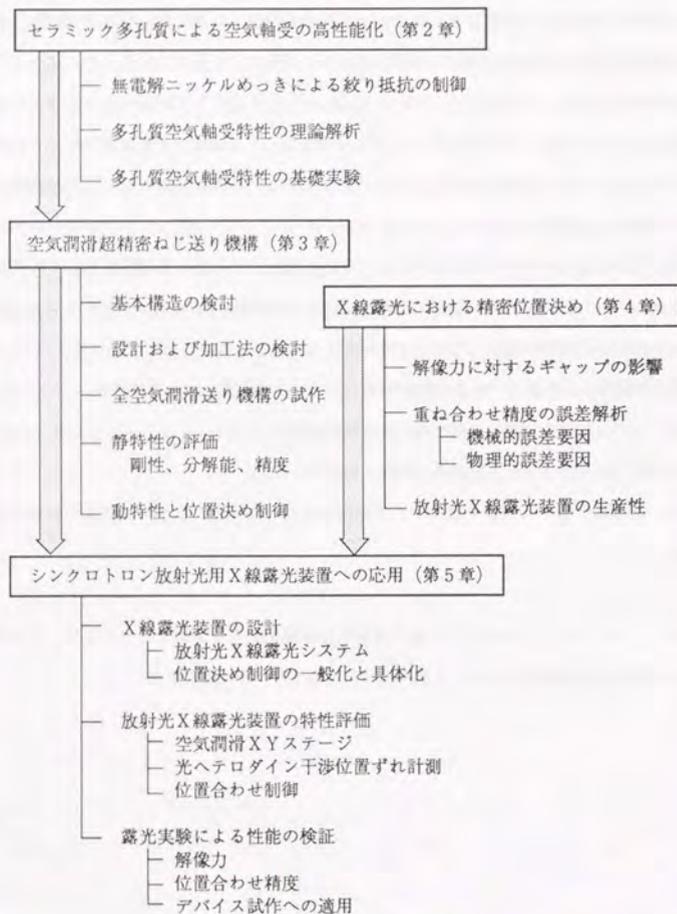


図1.1 本論文の流れと主な内容

第2章から第5章の概要は以下のとおりである。

<第2章 セラミック製多孔質空気軸受>

位置決め機構の基本要素である案内において、静圧気体軸受は高精度化のために最適な要素の一つであり、剛性の問題を解決すれば極めて有力な手段である。特に、らせん案内まで空気潤滑できれば完全な摩擦フリーの位置決め機構を実現できる。この観点からセラミック製の多孔質材料に着目し、これを空気軸受用の絞りに用いることを試みる。この材料はセラミック泥を発泡ウレタンに casting、成形、焼結することにより製作されるもので、気孔径の比較的大きな多孔質が素材の必要部分にのみ形成できるという特長を持つ。

まず、空気軸受絞り抵抗の最適化のために、セラミック多孔体に無電解ニッケルめっきを施すことにより、その流体抵抗を自在に制御できることを示す。次に、めっき膜付きのセラミック多孔体の空気軸受としての特性を多数オリフィス絞りのスラスト静圧空気軸受モデルにより解析し、空気軸受としての性能を論ずる。そして、静圧空気浮上の基礎実験によって、高性能の空気軸受が得られることを検証する。

<第3章 空気潤滑超精密ねじ送り機構>

第2章のセラミック製多孔質空気軸受を基本に、固体摩擦を完全に排除した超精密ねじ送り機構について論じる。すなわち、位置決め用送り機構要素として最も一般的な送りねじを気体潤滑によって非接触化し、長ストロークかつ超高分解能の送り機構を実現できることを示す。

始めに、従来技術の問題点を指摘し、空気静圧送りねじの基本構造について論じる。そして、多孔質絞りと角ねじを基本コンセプトとする空気静圧送りねじの構造を提案し、加工法の検討も加えて、セラミック製空気静圧送りねじを設計・試作する。次に、本空気静圧送りねじと、空気軸受、空気静圧案内を組み合わせた全空気潤滑ねじ送り機構により、位置決め用送り機構としての性能を詳細に評価する。さらに、機構の動特性の測定に基づいて位置決め実験を行ない、通常の線形フィードバック制御により超微小送りが実現できることを示す。以上により、全空気潤滑ねじ送り機構が超精密領域の送り機構として極めて有力な手段であると結論する。

<第4章 X線露光装置における精密位置決め>

精密位置決め技術の応用としてX線露光装置を取り上げる。本章ではX線露光装置において位置

決めの果たす役割とその要求条件について解析的に論じる。

X線露光の原理に基づいて、マスクとウエハの位置決めに要求される機能と性能を系統的に明かにするため、リソグラフィシステムの基本性能である解像力、重ね合わせ精度、生産性について、X線露光におけるこれら性能の支配要因を解析する。解像力については、半影はけとフレネル回折の条件からマスクとウエハ間のギャップで支配されることを示す。重ね合わせ精度の検討では、幾何学的誤差要因が重ね合わせ精度に及ぼす影響について解析し、物理的な位置ずれ誤差要因も加味して実現可能な重ね合わせ精度を求める。さらに、光源とレジストを仮定して露光に要する時間を求め、ウエハの処理時間を短縮するために位置決め機構に高速性が要求されることを示す。ここに、パタンの重ね合わせ精度と生産性がトレードオフの関係にあり、適用するパタンルールに応じて最適な露光システムの設計がなされることを示す。

<第5章 シンクロトン放射光用X線露光装置への応用>

前章までに述べた機構技術の実際応用として、全空気潤滑ねじ送り機構による位置決め技術をシンクロトン放射光用X線露光装置に適用し、高性能の露光装置を実現して空気潤滑位置決め機構の有効性を検証する。始めに、装置設計の前提となる放射光X線露光システムの構成について述べ、第4章での検討結果に基づいてX線露光装置の基本機能、位置決め制御軸の構成と制御方法を検討する。次に、第3章で述べた空気潤滑ねじ送り機構を用いた露光装置を設計・試作する。装置は空気潤滑たて形XYステージを基本要素とし、種々の微動機構、位置計測要素、制御機器と組み合わせて構成する。X線露光装置の機能として最も重要な位置合わせでは、光ヘテロダイン干渉式マーク検出信号によりねじ送り機構の微小位置決めを制御する。そして、装置各部の特性測定、露光実験による装置性能評価、およびテストデバイスの露光を行ない、クオータミクロン領域の微細パタン転写に適用可能であることを示すことにより、全空気潤滑送り機構の有効性を実証する。

<第6章 本論文の総括>

第2章、第3章、第4章、および第5章を総括する。セラミック製多孔質空気軸受の基本特性、これによる空気潤滑ねじ送り機構の提案と試作、そしてX線露光装置への応用についての検討結果をまとめる。さらに、空気潤滑ねじ送り機構およびX線露光装置の問題点と残された重要課題を概観し、その解決策を示唆するとともに、今後の超精密位置決めへの展開について述べる。

第2章

セラミック製多孔質静圧空気軸受

2.1 緒論

2.2 セラミック多孔質材料と無電解ニッケルめっき

2.2.1 ウレタンフォーム多孔体

2.2.2 無電解ニッケルめっきによる絞り抵抗制御

2.3 空気軸受特性の理論解析

2.3.1 解析モデルと記号

2.3.2 多孔質空気軸受の理論解析

2.3.3 空気軸受の特性に関する考察

2.4 軸受特性の基礎的実験

2.4.1 実験方法

2.4.2 実験結果と考察

2.5 本章の結論

2. 1 緒論

位置決め機構を構成する基本要素の中で、案内機構は機構の精度を論じる上で極めて重要な役割を果たす。案内機構は大別すると、軸の回転運動を支持する回転案内、移動体の直進運動を案内する直線案内、および、送りねじに代表されるらせん案内があり、相対運動する接触面に発生する運動を滑らかにこなわせるのが軸受である。軸受の基本機能は、固定体と移動体の間に作用する荷重を支持し、かつ相対運動の方向の摩擦を低減して運動を滑らかにこなわせることである。

軸受の形式は、固定体と移動体の間の軸受すきまの潤滑機構によって、軸受すきまにボールやローラなどの転動体を介して荷重を支持する転がり軸受と、流体膜で荷重を支持する滑り軸受に大別される。さらに、潤滑流体膜の形成メカニズムの違いによって動圧軸受と静圧軸受に分類され、また潤滑流体の種類によって非圧縮性の潤滑油を用いる油軸受と圧縮性の気体を用いる気体軸受（以下、空気軸受）に分類される。

それぞれの軸受は形式に応じた特徴を有している。主な特徴を表2.1にまとめる。負荷容量と剛性の点では転がり軸受と静圧油軸受が優れた性能を有しており、空気軸受は気体の圧縮性ゆえに高い負荷容量と剛性は得にくい。運動精度や回転精度に関しては、比較的厚い潤滑膜が軸と軸受面の形状誤差の影響を緩和するいわゆる「平均化効果」により、静圧軸受が最も優れている。静圧軸受の潤滑流体に着目すると、負荷容量、剛性、減衰性では油軸受が優れ、低摩擦（空気の粘性係数は通常の潤滑油の $1/5,000 \sim 1/10,000$ ）、低発熱、広い使用温度範囲、クリーン環境性、装置の簡便さでは空気軸受が優れている。その他、運動精度、寿命などの性能は潤滑流体によらずほぼ同等と考えてよい。従って、負荷容量・剛性の問題を解決すれば、静圧空気軸受は機構の高精度化にとって有力な案内方式であり、これまでも空気軸受による高精度直線運動機構の研究がなされている〔Kanai 1983, 青山 1985A, 1985B, 木下 1986, Ishihara 1986, 辻 1986, Aoyama 1987, 青山 1988, 松本 1988, 諸貫 1989〕。ただし、空気の圧縮性によって引き起こされる自励振動〔十合 1984〕（以下ニューマティックハンマという）や低粘性係数ゆえの減衰性の悪さ〔里見 1985B, 宮地 1990〕に注意が必要である。また、空気軸受の軸受すきまは数ミクロンから十数ミクロンであり、構成部品の寸法、形状精度に非常に高い加工精度を確保しなければならない。

静圧空気軸受では加圧した空気を外部から絞りを通して軸受すきまに給気し、その圧力によって荷重を支持する。絞りは、荷重の変化に対してすきま内の圧力を変化させ、軸受すきまの変化を

小さく抑える圧力の補償要素であり、空気軸受に剛性を付与する。これまでの高剛性化の試みは、絞りの能動的な制御〔Blondeel 1976, 本郷 1987, Mizumoto 1989B, 水本 1989A, 1989B, 1990, 糸目谷 1989, 渡辺 1988, ホリカワ 1989A, 1989B〕, 給気圧の高圧化〔十合 1990〕, あるいは軸受すきまの極小化〔吉本 1990〕など、多くは外部より新たな機能を追加する方法がとられ、軸受の形式そのものに関する検討が少なかった。

空気軸受の形式として剛性を高めるためには、軸受すきまをできるだけ小さく設計することが有力な手段であり、このためには軸受内に流入する空気流量を十分に絞る必要がある。自成絞りは、給気孔と軸受すきまの間の流路断面積変化を絞りとして利用するもので、構造が単純なことから従来より最も多く用いられるが、負荷能力・剛性は低い。絞り部にオリフィスを設けてその流体抵抗によって絞り作用を発生するオリフィス絞りにより、ある程度の高剛性化が図れるが、微小なオリフィスの加工が難しい、あるいはオリフィス出口にポケットを設けるとニューマティックハンマを生じやすいなどの問題がある。そこで、軸受すきまの極めて小さい軸受用に、給気孔の最小径の制限を克服する形式として、軸受面に設けた浅い溝の流体抵抗を利用する表面絞りがある〔矢部 1979, 小暮 1982〕。さらに、オリフィスによる給気絞りと軸受面の浅い溝の絞り効果を重ね合わせた複合絞りがあり、二段の絞り効果を用いている分、高い剛性が得られる〔小野 1981, 伊庭 1984, 杉山 1985〕。しかしながら、剛性の高い分だけ減衰性が低下し、ニューマティックハンマが起こりやすくなる。

多孔質材料内部の微小孔の壁面での粘性抵抗を絞りとして用いる多孔質絞り〔十合 1972, 1984, 矢部 1981, 田中 1985, 水兼 1988, 山本 1988, 河島 1990〕は、軸受全面に給気孔が分布しているために高い負荷容量・剛性を期待できる絞り形式である。しかし、多孔質絞りとして銅系の焼結多孔質金属を用いる場合には軸受面の加工精度が問題となる。一つは軸受面として良好な加工精度が得にくいことで、軸受面のうねりや粗さが軸受性能に悪影響を及ぼす。これを取り除くために、つば付き軸受が提案されて理論解析と実験が行なわれている〔森 1968, Mori 1973〕が、軸受すきまを大きくせざるを得ない方策であるために根本的解決とはなっていない。他方は軸受面加工の際に生じる目づまりの問題で、透過率の確保や流量の制御を難しくしている。機械加工を巧みに行なえば、表面目づまりがかえって軸受性能を向上させるという報告〔日本機械学会 1972〕もあり、軸受面の適度な目づまりは、高剛性化やニューマティックハンマの防止には有効に作用する〔十合 1984〕。しかしながら、非常に高い形状精度を要求される空気軸受において目づまりの程度と加工精度を両立させることは難しく、これは技能的な方法と言えよう。このような状況の中で、最近になって、セラ

ミックスやグラファイトなどの脆性材料の多孔質素材が得られるようになり、加工精度や加工目づまりの問題は解決されつつあるが、逆に目づまりのない多孔質軸受ではニューマティックハンマが起りやすい[小山 1989]という欠点を持っている。

以上の空気軸受構造の特徴比較から、高い剛性が得られる軸受形式として多孔質絞りが有望であり、加工目づまりのない素材を用いて表層に強い絞り効果を持たせることが問題解決の方法であると考えられる。このことから、本章では、セラミック多孔質材料を絞りに用いた空気軸受を提案する。まず、発泡ウレタンを鋳込み成型・焼結することにより得られるアルミナセラミック多孔質（ウレタンフォーム多孔体と呼ばれる）について述べ、軸受表層部に無電解ニッケルめっきを施すことによって絞りの流体抵抗が自在に制御できることを示す。次に、本多孔質軸受を多数オリフィス絞りで近似することにより軸受特性を解析する。また、実際にセラミック多孔体試料を準備して軸受特性の測定を行ない、理論解析結果と実験結果を比較する。これにより、加工目づまりがなく、かつ高い加工精度の得られるという脆性材料の利点を活かしつつ、流体抵抗調整めっきにより強い絞り効果を与えて高い剛性を持った高性能空気軸受が得られることを示す。

表2.1 各種軸受の特徴比較

項目	滑り案内	転がり案内	静圧案内 (油潤滑)	静圧案内 (気体潤滑)
運動精度(真直度)	○	○	◎ 平均化効果	◎ 平均化効果
負荷容量	◎	◎	◎	△ 気体の圧縮性
静剛性	◎	◎	◎	△ 気体の圧縮性
移動分解能	△	○	◎ 数 nm	◎ 数 nm
滑かさ(コギング)	× stick-slip	× 転動運動	◎	◎
減衰性(制御性)	△ 固体面接触	× 固体線接触	◎ スクイーズ効果	△ 低粘度
発熱(精度劣化)	× 滑り摩擦	△ 転がり摩擦	× 粘性摩擦	◎
摩擦摩耗(寿命)	×	△	◎ 半永久	◎ 半永久
静粛度(騒音)	△	△	◎	○ 排気音
付帯設備	◎ 不要	◎ 不要	× 給油装置等	○ 高圧エア
クリーン環境	△ 潤滑油使用	△ 潤滑油使用	× 潤滑油使用	◎ クリーンエア
価格(コスト)	○	◎ 大量生産	×	△
保守性	△	◎ 規格化	× 付帯設備の保守	△

◎ 特に優れている ○ 優れている △ 普通 × 劣る

2.2 セラミック多孔質材料と無電解ニッケルめっき

2.2.1 ウレタンフォーム多孔体

一般に多孔質材料といえ、金属粒あるいはセラミック粒を焼結して製作される多孔体を指す。通常の焼結多孔体は、直径数ミクロンの粒が様に分布した多孔質素材であり、これを空気軸受の絞りに用いれば、多孔質内の微小な気孔の壁面での粘性摩擦により大きな流体抵抗が発生する。一方、本研究で検討するセラミック多孔質材料は、ウレタンフォーム多孔体（以下フォーム多孔体）と呼ばれ、製造法も粒径も上記焼結多孔体と大きく異なる素材である。図2.1にフォーム多孔体の製造プロセスの概要を示す。まず、セラミックの泥漿に所望の形状にカットした発泡ウレタンフォームを鑄込み成形することにより、発泡ウレタンの空乏にセラミックを詰める。これを乾燥した後高温で焼結すると発泡ウレタンが焼失し、発泡ウレタンがあった部分が多孔質となる。すなわち、発泡ウレタン素材を反転したような気孔を持つ多孔質が出来上がる。この製造法からわかるように、多孔質にしたい部分のみを発泡ウレタンに置き換えることで部分的多孔質軸受母材を一体製作できるという特徴を有する。このようにして製作したアルミナセラミック製のフォーム多孔体の断面写真を図2.2に示す。写真で黒く見える部分が、埋め込まれた発泡ウレタンが焼結時に焼失してできた気孔である。粒径が数 $100\mu\text{m}$ と非常に大きなセラミック粒（発泡ウレタンの空乏に相当する）の間に複雑な形状の気孔（発泡ウレタンが焼失した部分）が分布している。

このフォーム多孔体を空気軸受の絞りにして用いる場合の問題点について考察する。一般に空気軸受の設計においては、軸受性能の最適化を狙って絞りの流体抵抗値が決められる。すなわち、軸受部の寸法と軸受すきまで決まるすきま内の流体抵抗に対する給気絞りの流体抵抗の比（給気係数）を軸受剛性が最大となるように選ぶ。例えばオリフィス絞りによるスラスト空気軸受ではこの給気係数は2前後の値となる。この観点からフォーム多孔体の流体抵抗を評価すると次のようになる。いま、多孔質材料の流体抵抗を表わす尺度として、単位面積 (cm^2)、単位長さ (cm) の多孔質材料に単位圧力差 ($\text{cm H}_2\text{O}$) をかけた時に単位時間 (sec) に透過する空気の容積 (cm^3) で表わした通気率を定義する。粒径 $2\sim 3\mu\text{m}$ の焼結多孔質の通気率は 10^{-4} (cm/sec) のオーダーであり、空気軸受の設計時には所望の絞り抵抗を得るために焼結体の粒径を選択する。これに対して本フォーム多孔体は、気孔が非常に大きいことから気体に対する粘性抵抗は小さく、通気率は 10^{-2} (cm/sec) のオーダーである。軸受の形状や寸法の設計に依存はするものの、このように低い絞り抵抗のままでは、軸受すきま、および流量の非常に大きな空気軸受となってしまう。つまり、空気軸受用多孔質絞りとしては

フォーム多孔体は流体抵抗が大幅に不足しており、何らかの方法により多孔質の流体抵抗を増加させる方策が必要である。

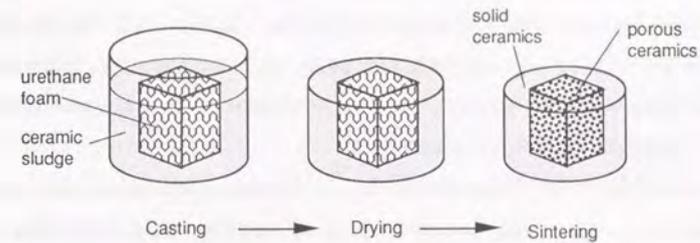


図2.1 ウレタンフォーム多孔体の製造工程概要

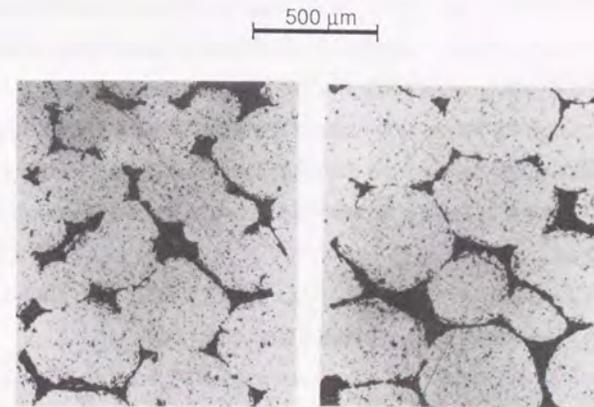


図2.2 セラミック製フォーム多孔体の断面写真

2. 2. 2 無電解ニッケルめっきによる絞り抵抗制御

空気軸受面の表層部に強い絞り効果を持たせることによって軸受剛性やニューマティックハンマに対する安定性などの軸受性能を向上させることができることはすでに述べた。金属多孔質絞りの場合の一般的な方法は、軸受面の研削加工の際に生じる目づまりを巧みに利用するものである。しかしながら、加工中の材料の塑性変形という確率的な現象を利用するために制御性に難があり、また、加工精度と目づまりの程度を両立させることに困難が予想される。他に、通気率の異なる二種類の多孔質素材を貼り合わせて用いる方法が提案されたことがある [Scoles 1964] が、通気性を保ったまま接着するという製作上の難しさから実現されていない。また、多孔質軸受表面に潤滑性のある MoS₂ などの粉末を吹き付け、気孔を目づまりさせて通気性を調整するという原始的な方法も考えられるが、再現性のある生産手段とはなりにくい。

これらに対して本研究では、フォーム多孔体へのめっき膜付着による流体抵抗の制御 [金井 1987A] を試みる。めっき法によれば、軸受の加工工程とめっき工程を独立させることができるため、加工精度の確保と絞り抵抗の調整を独立に制御できる。また、以下に述べる方法をとることにより、軸受面からの深さ方向の膜付着量の制御、軸受面内の流体抵抗の均一化、所望の流体抵抗への正確な調整が可能となる。

無電解ニッケルめっき（以下単にめっきという）は化学反応を利用する付着法なので、電界の存在しえないセラミック材料にも膜付着が可能である。めっき膜の付着量はめっき液と被めっき素材の表面の化学反応の割合に依存するので、温度、時間、および多孔体気孔内のめっき液流量で制御できる。図 2.3 にここで採用した無電解ニッケルめっきの方法、図 2.4 にめっき実験装置の写真を示す。ヒータと攪拌機により温度を所望の値に保った恒温槽内にめっき液を満たした容器を設置する。これに空気軸受パッドとなるフォーム多孔体の軸受面以外の部分をシールして浸す。そして軸受の給気側から負圧をかけることによって多孔質内部へめっき液を浸透させる。負圧の大きさはゼロからマイナス 0.5 気圧程度までバルブの操作により設定可能である。このめっき法には次のような特長がある。

- (1) 軸受パッドの給気側にかかる負圧の大きさによって多孔質内部へのめっき液の浸透量を制御できるので、めっき膜の軸受面からの深さを自在に制御できる。
- (2) 断面積の大きい気孔ほど背圧によるめっき液の流入量が多くなるため、付着するめっき膜が厚くなり、従って、めっき膜の付着によって流体抵抗が軸受面内で均一化されるという効果が期待できる。

- (3) めっきは追加付着可能な付加工であり、めっき途中の任意の時間に試料をめっき液から引き上げ、給気側に高圧空気を接続して軸受パッドの開放流量を測定することにより付着量を確認できる。従って、所望の絞り抵抗まで正確にめっきを行なうことができる。

図 2.5 に、無電解ニッケルめっきを施したフォーム多孔体表層部の拡大断面写真を示す。いずれの試料も、めっき温度 72.5℃、弱背圧で 30 分間めっきしたものである。写真で、表層の気孔部に見える金属光沢の薄膜が付着したニッケル膜である。気孔の開口径が数十 μm 以上と比較的大きい部分では、深さ約 200~300 μm の内部まで気孔側壁全面にめっき膜が形成されており、表層部の空気吹き出し口となる気孔の径を狭めている。空気軸受に用いる際には、これが軸受表層部に強い絞り効果を付与することになる。また、開口径の小さい部分では内部にはほとんどめっき膜は付着しておらず、大きな気孔の側壁には厚く、小さな気孔の側壁には薄くめっき膜が付着することで、表層部絞り抵抗の均一化の効果がわかる。

図 2.6 (a) は、めっき膜の付着の深さ方向の分布を調べるために種々の背圧条件でめっきした多孔体を表層から徐々に平面研削で除去し、大気開放流量の変化を測定した結果である。サンプル A, B, C の順番に後者ほどめっき時の背圧を強く与えている。サンプル A については表層から約 400 μm 研削すると当初のめっきのない状態まで開放流量が回復し、サンプル C では約 400 μm 研削しても開放流量の回復はない。すなわち多孔質の気孔は奥深くまで完全に封止されている。サンプル B は両者の中間的なめっき状態である。このように、めっき時の背圧条件により流体抵抗の深さ方向分布を広い範囲で調整することができることがわかる。

また、図 2.6 (b) は初期透過率の異なる試料にめっき膜を付着させ、30 分毎に開放流量の測定を行なって流量を確認し、所望の開放流量まで流体抵抗を調整した実験結果である。初期透過率が 1 割程度異なる試料が、最終的には同一の透過率に調整されていることがわかる。このように、フォーム多孔体の流体抵抗値は、多孔質軸受パッドの開放流量をモニタしながらめっき時間でめっきの量を制御することにより、所望の値まで正確に調整することが可能である。

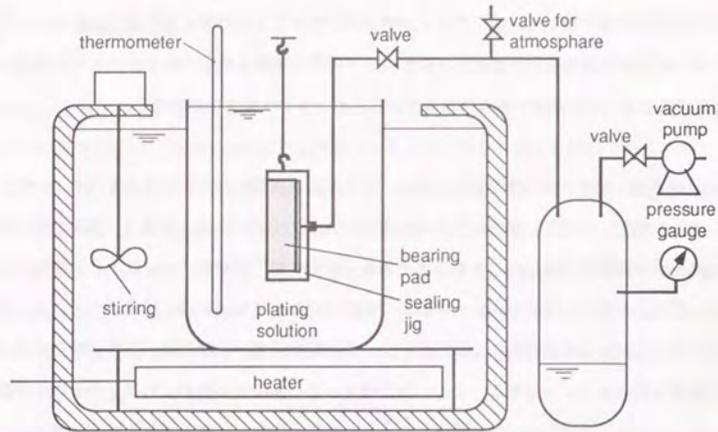


図2.3 セラミック多孔体への無電解ニッケルめっきの方法

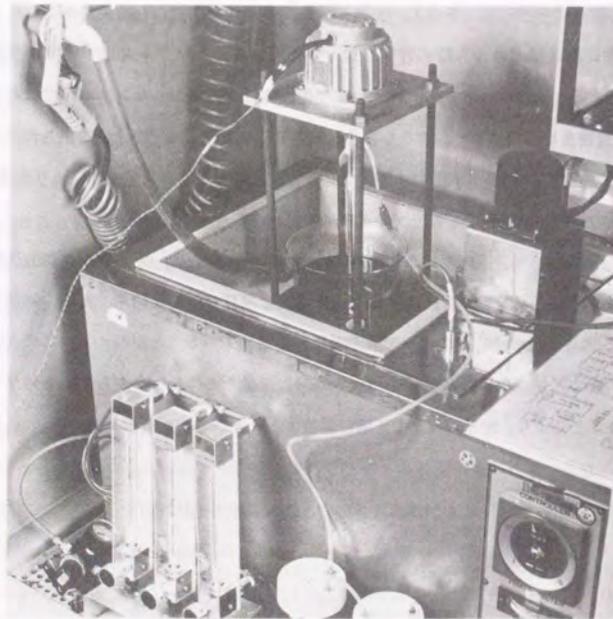


図2.4 無電解ニッケルめっき実験装置の写真

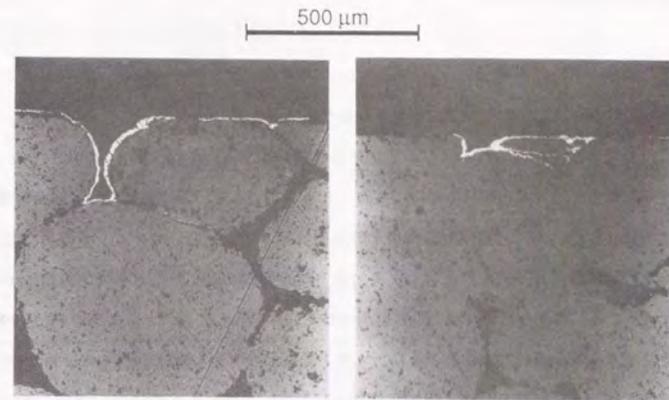


図2.5 無電解Niめっきを施したウレタンフォーム多孔体の断面拡大写真

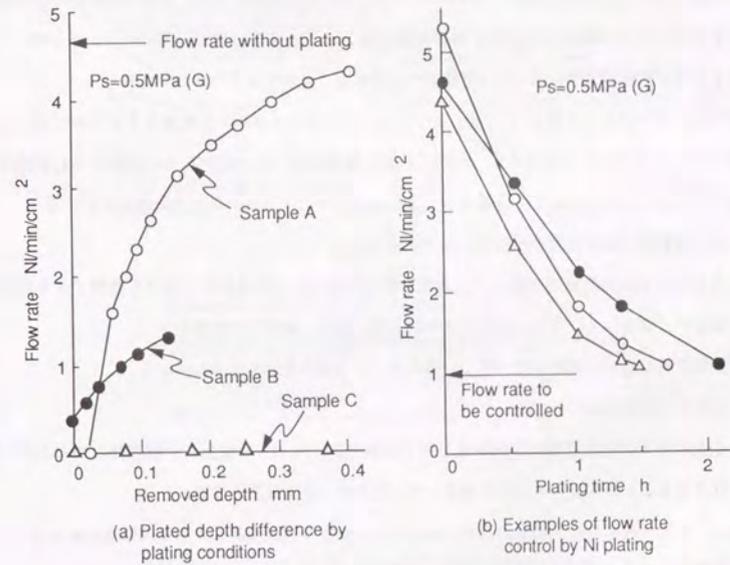


図2.6 無電解ニッケルめっきによる流体抵抗の制御

2.3 空気軸受特性の理論解析

2.3.1 解析モデルと記号

ここでは、特性解析に用いた空気軸受のモデルについて述べる。

空気軸受の特性に関する理論解析はレイノルズ方程式を基本式として数多くなされている。一般にレイノルズ方程式が解析的に解けるのはごく限られた場合であり、多くの解析は、等角写像法 [森 1966]、差分法 [金子 1984]、有限要素法などの数値解析の手法を用いている。多孔質空気軸受の特性に関する理論解析は他の絞り形式に較べて解析された例は少なく、これまでの例は、多孔質を毛細管絞りで見なし、多孔質内の横流れを等価的な横方向の孔として近似するモデル [矢部 1984]、表面目づまりのある多孔質絞りを多数のオリフィスと見なすモデル [岡野 1975] の2つの方法である。ここで扱っためっき付き多孔質は、表層に付着させためっき膜により形状はオリフィスに類似しており、多孔質内部の気孔断面積が大きいことから毛細管のように粘性抵抗は大きくないと考えられる。また、めっき膜によって表層部に強い絞り効果を持たせることから、多孔質内部はほとんど給気圧となっている見なしでよい。これらのことから、ここではオリフィス絞りが比較的低密度に軸受面に分布した空気軸受を仮定して解析を進める。以下の理論解析は、岡野ら [岡野 1975, 十合 1984] が行った解析方法ののちとして軸受の形状などに変形を加えたものである。

理論解析のモデルとして図2.7に示すようなリング状静圧スラスト空気軸受をとりあげる。リング状軸受面の中央部が多孔質であり、内周と外周に緻密体のランド部がある。中央の多孔質部分を <領域 I>、周辺のランド部を <領域 II> とし、多数オリフィスについて次の仮定を設ける。

- (1) 多孔質材料の軸受面以外からの空気の流れはない。
- (2) 多孔質材料の内部の流体抵抗は、表面近傍のめっき部の流体抵抗に較べて無視できる程度に小さい。すなわち、多孔質材料内部の圧力は一定で、給気圧に等しい。
- (3) 多孔質材料表面には断面積の等しい微小オリフィスが均一に分布している。

また、すきま内の流れについては、

- (4) 空気はリング状多孔質部中央からリングの径方向に向かって流出し、軸受部の幅が小さい帯状であることから周方向流れを無視して、径方向一次元流れとする。

を仮定し、他に一般的な空気軸受の解析に用いられる仮定と同様に次のような流れを仮定する。

- (5) 軸受すきま内の流れは粘性が支配的な層流である。
- (6) 軸受すきま内ではすきま方向に圧力勾配はない。

- (7) 流れに相対すべりは生じない。
- (8) 軸受と軸との相対速度は無視する。
- (9) 圧力勾配に対して空気の慣性効果は無視する。

以下の解析で用いる主な記号を表2.2に示す。なお、計算には cgs 単位系を用いている。

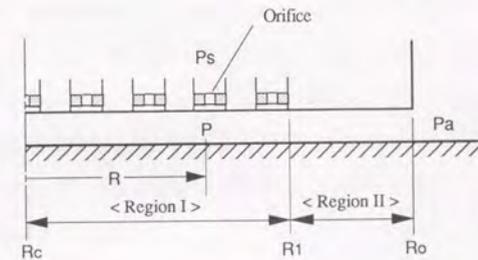
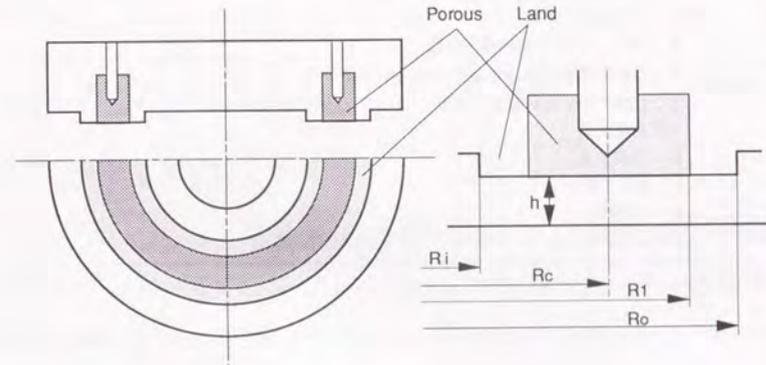


図2.7 リング状多孔質スラスト空気軸受の解析モデル

表2.2 解析に用いる記号

κ : 気体の比熱比 (空気 $\kappa = 1.40$)
g : 重力の加速度 (980 cm/sec^2)
μ : 気体の粘性係数 (空気 $\mu = 1.833 \times 10^{-10} \text{ kg} \cdot \text{sec/cm}^2$)
γ : 空気の比重量 (大気圧、常温の空気 $1.226 \times 10^{-6} \text{ kg/cm}^3$)
c_0 : オリフィスの流量係数
s : オリフィスの断面積
n_0 : 単位面積当たりのオリフィスの数
S : 多孔質部の面積
K_r : オリフィスの流出速度係数
R : 空気の気体定数 (常温で $2927 \text{ cm}^2/\text{K}$)
T : 空気の給気絶対温度 (K)
V : 体積流量
G : 重量流量
h : 軸受すきま
p_s : 給気圧
p_a : 大気圧

2.3.2 多孔質空気軸受の理論解析

多孔質材料表面の一個の仮想オリフィスを通して軸受すきまに流出する空気の重量流量は、オリフィスの断熱噴流の式 [古屋 1989] から、

$$G_{in} = K_r c_0 s \frac{p_s}{\sqrt{RT}} \quad (2.1)$$

与えられる。ここに、 c_0 はオリフィスの流量係数、 s はオリフィスの面積、 R は空気のガス定数、 p_s は給気圧力、 T は空気の給気絶対温度である。また、 K_r はオリフィスの流出速度係数で次式で与えられる。

$$K_r = \sqrt{2g \frac{\kappa}{\kappa-1} \left[\left(\frac{p}{p_s} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p}{p_s} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \quad \frac{p}{p_s} \geq \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (2.2)$$

$$K_r = \sqrt{2g \frac{\kappa}{\kappa+1} \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{2}{\kappa-1}}} \quad \frac{p}{p_s} \leq \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (2.3)$$

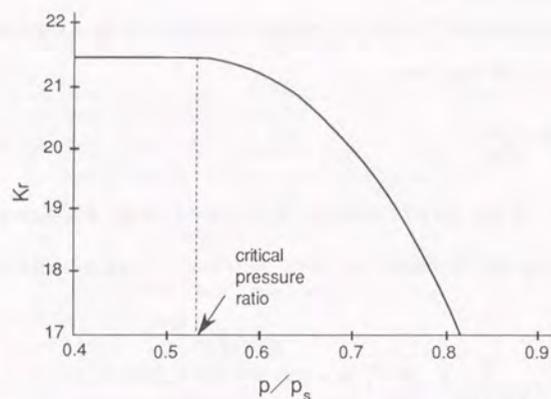
ここに、 κ は気体の比熱比 (定圧比熱/定容比熱) で空気では $\kappa = 1.40$ 、 g は重力の加速度、 p は軸受すきま内の半径位置 $R_c + r$ における圧力である。空気の場合について流出速度係数 K_r を計算すると図2.8となる。オリフィスの入口側と出口側の圧力差が大きく圧力比 (p/p_s) が臨界圧力比 $(2/2.4)^{1.4/0.4} = 0.528$ より小さい時には (2.3) 式から $K_r = 21.44$ と一定であり、給気圧力に比例して流量が増加する。軸受すきま内の圧力が上昇して圧力比 (p/p_s) が臨界圧力比に達すると K_r は (2.2) 式に従って減少するようになり、圧力差に比例して流量が増減しなくなる。給気圧が一定の静圧空気軸受では、軸受すきまが狭くなってすきまの流体抵抗が増加するとすきま内の圧力が臨界圧力比以上に上昇し、流量が減少してくることを意味している。

いま、多孔質部の面積を S 、単位面積当たりのオリフィス数を n_0 とすると、多孔質部から単位時間に軸受すきまに流出する空気重量は、

$$G_{in} = K_r c_0 s n_0 S \frac{p_s}{\sqrt{RT}} \quad (2.4)$$

となる。そして多孔質部の微小環状部分 $2\pi(R_c + r) dr$ からの流出空気重量は次式で与えられる。

$$dG_{in} = K_r c_0 s n_0 \frac{p_s}{\sqrt{RT}} 2\pi(R_c + r) dr \quad (2.5)$$

図2.8 オリフィスからの空気の流れ速度係数 K_r

次に、軸受すきま内の流れについて考える。リング状平行すきま内の流れは周方向に圧力勾配がない径方向の一次元流れを仮定しているため、半径位置 $R_c + r$ における微小環状要素 dr を通る体積流量 V_r は、平行平板間の定常粘性流の公式 [ラウス 1986] から、軸受すきまを h 、圧力を p_r として次式で表わされる。

$$dV_r = \frac{h^3}{12\mu} \left| \frac{dp_r}{dr} \right| dr = -\frac{\pi h^3}{6\mu} (R_c + r) \frac{dp_r}{dr} \quad (2.6)$$

いま、すきま内の流れを等温変化と仮定すると、空気の比重量を大気圧 p_a で γ_a 、圧力 p_r で γ_r とすると、 $\gamma_r = (p_r/p_a) \gamma_a$ の関係から、すきま内の半径位置 $R_c + r$ における重量流量 G_r は次式となる。

$$dG_r = -\frac{\pi h^3 \gamma_a}{6\mu p_a} (R_c + r) p_r \frac{dp_r}{dr} = -\frac{\pi h^3 \gamma_a}{12\mu p_a} (R_c + r) \frac{dp_r^2}{dr} \quad (2.7)$$

従って、幅 dr の微小環状部分における重量流量の変化分としては、上式を r について微分することにより次式を得る。

$$\frac{dG_r}{dr} = -\frac{\pi h^3 \gamma_a}{12\mu p_a} \left[(R_c + r) \frac{d^2 p_r^2}{dr^2} + \frac{dp_r^2}{dr} \right] \quad (2.8)$$

以上より、(2.5) 式の微小環状部分にあるオリフィスから軸受すきまに流入する空気重量と (2.8) 式の軸受すきま内の流れの重量流量の変化が等しいと置くことにより、重量流量に関する連続の方程式を得る。

ここで、微分方程式を導出するために、各変数を新たに、

$$\frac{R_c + r}{R_0} = R, \quad \frac{p_r}{p_a} = P, \quad \frac{p_s}{p_a} = P_s \quad (2.9)$$

と置いて正規化すると、(2.5) および (2.8) 式は、

$$\frac{dG_{in}}{dR} = K_r c_0 s n_0 \frac{2\pi R_0^2 p_a P_s}{\sqrt{RT}} R \quad (2.5)$$

$$\frac{dG_r}{dR} = -\frac{\pi h^3 p_a \gamma_a}{12\mu} \left(R \frac{d^2 P^2}{dR^2} + \frac{dP^2}{dR} \right) \quad (2.8)$$

となる。両者を等しいと置き、パラメータを整理することにより次の軸受すきま内の圧力分布を与える微分方程式が得られる。

$$\frac{d^2 P^2}{dR^2} + \frac{1}{R} \frac{dP^2}{dR} + \Gamma_s \sqrt{\left(\frac{P}{P_s}\right)^2 \frac{2}{\kappa} - \left(\frac{P}{P_s}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}} = 0 \quad \frac{P}{P_s} \geq \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (2.10)$$

$$\frac{d^2 P^2}{dR^2} + \frac{1}{R} \frac{dP^2}{dR} + \Gamma_s \sqrt{\frac{\kappa-1}{\kappa+1} \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{2}{\kappa-1}}} = 0 \quad \frac{P}{P_s} \leq \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (2.11)$$

ここに、 Γ_s は本スラスト空気軸受の特性を示すパラメータで、

$$\Gamma_s = \frac{24\mu c_0 s n_0 R_0^2 P_s}{h^3 \gamma_a \sqrt{RT}} \sqrt{\frac{2g\kappa}{\kappa-1}} \quad (2.12)$$

である。ここで用いる多孔質織りで考えると、軸受面の気孔密度に相当する単位面積当たりのオリフィスの数が決まっており、めっきによってオリフィス断面積を制御することにより最適な Γ_s を選

ぶことになる。上式からわかるように、めっき膜を厚くすればするほど Γ_s は小さくなる。

微分方程式 (2.10) は解析的に解くことが難しいが、第3項を、 A 、 B を定数として圧力 P の2次関数で次式のように近似すると、ベッセルの微分方程式に導くことができる。

$$\frac{d^2 P^2}{dR^2} + \frac{1}{R} \frac{dP^2}{dR} + \Gamma_s (A - BP^2) = 0 \quad (2.10)$$

ここに、 P/P_a が臨界圧力比 0.528 から 0.6 近傍の範囲 (実際の空気軸受での軸受すきま内の圧力の範囲) で上記の近似を行なうと、 $A = 0.268$ 、 $B = 0.0362$ となり、近似による誤差は 0.25% 以下である。新たに w, z を変数として、

$$w = P^2 - \frac{AP_s^2}{B}, \quad z = \frac{\sqrt{\Gamma_s B}}{P_s} R \quad (2.13)$$

とおくと、(2.10') は、

$$\frac{d^2 w}{dz^2} + \frac{1}{z} \frac{dw}{dz} - w = 0$$

と変形されたベッセルの微分方程式に変形され、解は次式で表わされる。

$$w = C_1 I_0(z) + C_2 K_0(z)$$

ここに、 I_0 は0次のBessel関数、 K_0 は0次のNeumann関数である。すなわち、式(2.10')の解は、

$$P^2 = C_1 I_0 \left(\frac{\sqrt{\Gamma_s B}}{P_s} R \right) + C_2 K_0 \left(\frac{\sqrt{\Gamma_s B}}{P_s} R \right) + \frac{AP_s^2}{B} \quad (2.14)$$

と求まる。ここに、 C_1, C_2 は積分定数である。

また、式(2.11)の2階常微分方程式は容易に解くことができ、解は次式で表わされる。

$$P^2 = -\frac{1}{4} \Gamma_s \sqrt{\frac{\kappa-1}{\kappa+1}} \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{2}{\kappa-1}} R^2 + C_3 \ln R + C_4 \quad (2.15)$$

ここに、 C_3, C_4 は積分定数である。

次に、<領域II>のランド部について考える。緻密体部では空気の流入がないので、式(2.8)あるいは(2.8')の重量流量の変化分をゼロと置いて次の微分方程式を得る。

$$R \frac{d^2 P^2}{dR^2} + \frac{dP^2}{dR} = 0 \quad (2.16)$$

この微分方程式は変数分離形に変形して解くことができ、解は次式となる。

$$P^2 = C_5 \ln R + C_6 \quad (2.17)$$

ここに、 C_5, C_6 は積分定数である。

以上より、<領域I>の多孔質部ではオリフィス出口/入口の圧力比が臨界圧力比よりも高いか低いかによって式(2.14)と式(2.15)、<領域II>のランド部では式(2.17)を用いて軸受すきま内の圧力分布を計算することができる。積分定数を定めるための境界条件は、

- (1) 多孔質部中心で圧力変化 $dP/dR = 0$,
- (2) 式(2.14)と式(2.15)の境界では圧力変化が連続,
- (3) 多孔質部とランド部の境界で圧力が連続,
- (4) 軸受端 $R = 1$ で $P = P_a = 1$

を用いる。なお、ここではリング状空気軸受の外周側のみを計算しているが、内周側の圧力分布は多孔質中心円に対して対称と考える。これは、リング半径に対して軸受部の幅が小さいので、外周方向と内周方向は等価な一次元流れを仮定しているためである。

圧力分布が求まると、負荷容量 W は、圧力を軸受面全面について積分することにより

$$W = 2 \int_{R_c}^{R_1} 2\pi P_1 R dR + 2 \int_{R_1}^{R_o} 2\pi P_2 R dR \quad (2.18)$$

と求められる。ここに、 P_1 は多孔質部〈領域 I〉の圧力分布、 P_2 はランド部〈領域 II〉の圧力分布である。

また、軸受剛性 K は、軸受すきま h に対する負荷容量 W の変化率であり、軸受すきま h が大きくなるほど負荷容量 W は減少することから、

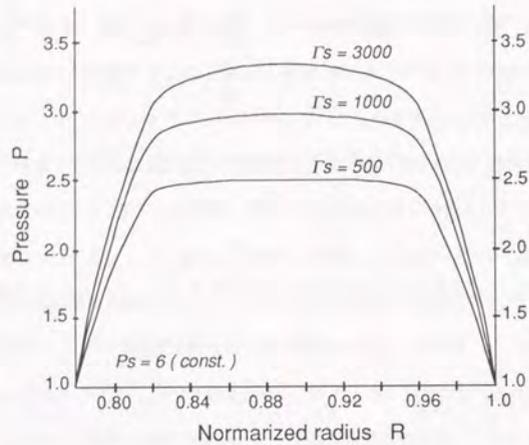
$$K = - \frac{dW}{dh} \quad (2.19)$$

として計算することができる。ここで、圧力分布の計算において、式 (2.12) からわかるように、特性パラメータ Γ_s は多孔質の性質（めっきの量）とともに軸受すきま h の関数になっていることに注意が必要である。

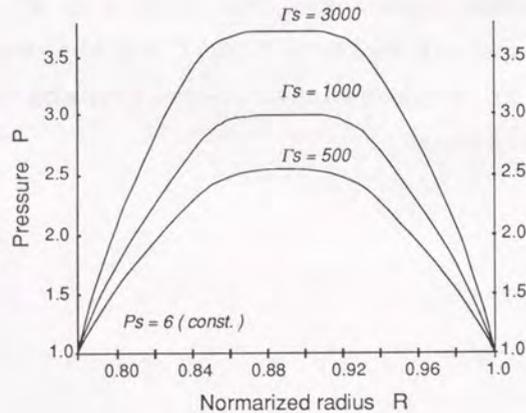
2.3.3 空気軸受の特性に関する考察

図 2.9 に軸受すきま内の圧力分布の計算結果を示す。給気圧力 P_s と軸受すきま h を一定とし、軸受幅に占める多孔質部の比 b/B が (a) 0.65 と (b) 0.35 の場合について、パラメータ Γ_s を変化させた時の径方向圧力分布を示している。パラメータ Γ_s を大きくしていくと、軸受中心部でのすきま内圧力が上昇していくが、多孔質下での径方向の圧力勾配が大きくなる。このため、パラメータ Γ_s を大きくすると負荷容量は大きくできるが、軸受剛性の点では不利な圧力プロファイルとなる。一方、 Γ_s を小さくしていくと、軸受中心部での圧力が低下してしまうために負荷容量は小さくなるが、多孔質下での径方向の圧力降下がほとんどなくなって軸受の高剛性化に有利な台形プロファイルに近づいていく。これから、大きな負荷容量と高い軸受剛性をバランスさせた Γ_s の最適値が存在することがわかる。すでに述べたようにこの多孔質絞りでは、パラメータ Γ_s は多孔体へのめっきの量で決められるので、実際の軸受設計においては軸受の寸法と軸受すきまを決めると、高性能軸受を得るのに最も適しためっき量が求まること意味している。

また、多孔質部の比率については、図 2.9 (a) と (b) の比較から、多孔質部を幅広くとる程、剛性的には有利な台形プロファイルとなることがわかる。ただし、パラメータ Γ_s が同じ値の場合を比較すると、多孔質部を幅広くとる方が中心部の圧力が低下している。従って、同じように軸受中心部の圧力を高めようとするとき、 b/B が大きい時は Γ_s を大きく、 b/B が小さい時は Γ_s を小さくすることになる。すなわち、多孔質部の比率 b/B によってパラメータ Γ_s の最適値（めっき量の最適値）は異なってくるのがわかる。



(a) 多孔質部の比率が大きい場合 ($b/B = 0.65$)



(b) 多孔質部の比率が小さい場合 ($b/B = 0.35$)

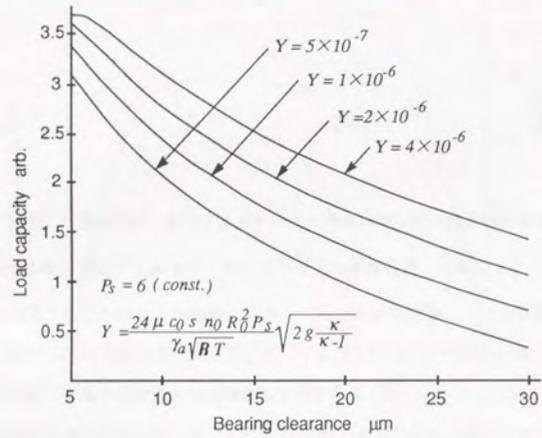
図2.9 軸受内の径方向圧力分布の計算結果

次に、負荷容量に関する計算結果を図2.10に示す。図2.10(a)は、軸受すきまの変化に対する負荷容量の変化を計算した結果である。パラメータ Γ_s は軸受すきま h の関数でもあるため、先の(2.12)式において

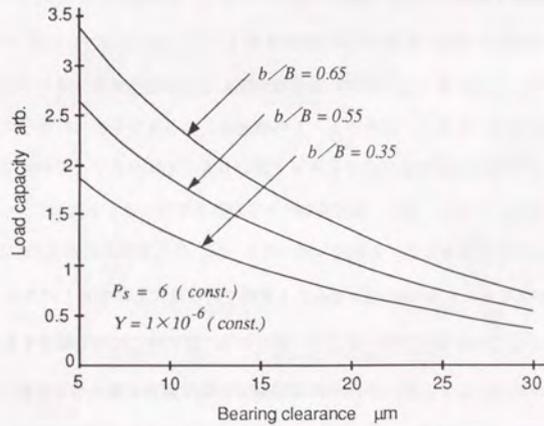
$$\Gamma_s = -\frac{Y}{h^3} \quad (2.20)$$

と置き、 Y を多孔質織りの特性を表す新たなパラメータとしている。軸受すきまを小さくするほど、パラメータ Y を大きくするほど、負荷容量は大きくなるが、 Y をあまり大きくすると狭い軸受すきまにおいて負荷容量が飽和する傾向が現われる。これは、軸受すきま内の圧力上昇によりオリフィス出口の圧力が先に述べた臨界圧力差以下になり、オリフィスの流出速度係数が一定になってしまうこと(図2.8)に対応している。この負荷容量曲線の傾きが軸受剛性であり、設計においては傾き最大となる軸受すきまを選ぶことになる。図2.10(b)は、多孔質部の幅が負荷容量に及ぼす影響を調べた結果である。多孔質幅比 b/B を大きくとるほど負荷容量、および曲線の傾き(軸受剛性)ともに大きくなるのがわかる。

さらに、負荷容量曲線を軸受すきま h で微分することにより、軸受剛性を求める。パラメータ Y に対して軸受剛性最大となる軸受すきまを求めた結果を図2.11(a)に示す。パラメータ Y の値を小さくするほど(めっき量を多くするほど)軸受剛性最大となる軸受すきまは小さい方にシフトし、かつ剛性最大値は大きくなるのがわかる。この結果は、めっきを十分に行なってオリフィス織りの効果を高め、かつ軸受部品の形状精度を高めて狭いすきまを作り出すことが軸受の高剛性化の決め手であることを示している。次に、多孔質幅の比率が軸受剛性に与える影響について調べる。この検討においては先の圧力分布に関する検討で述べたように、多孔質部の比率 b/B によってパラメータ Γ_s の最適値が異なってくるため、 Γ_s を決める要因である軸受すきま h とパラメータ Y のいずれかを固定して考えなければならない。そこで、異なる b/B に対して同じ軸受すきま h において剛性値が最大ピーク値をとるようにパラメータ Y を選び、軸受剛性の最大値を比較した。結果を図2.11(b)に示す。これからわかるように、多孔質幅比を大きくとればとるほど、大きな剛性最大値を得ることができる。

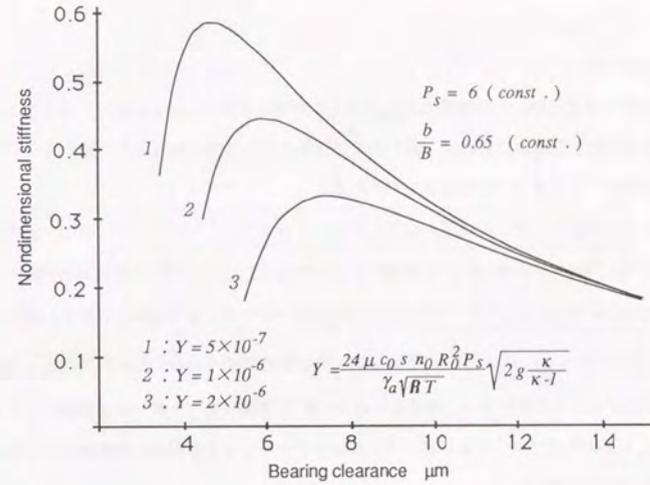


(a) パラメータ Γ_s と負荷容量特性

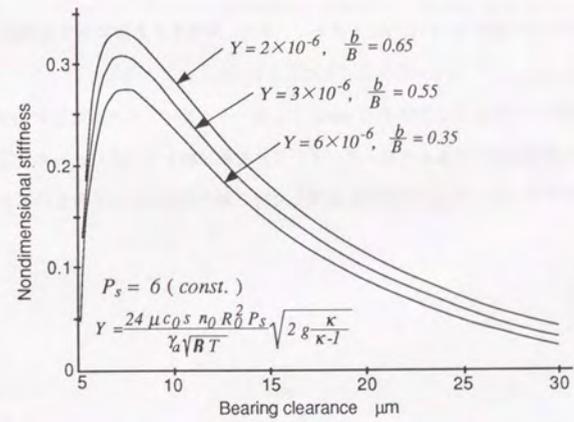


(b) 多孔質部幅の負荷容量特性に及ぼす影響

図 2.10 負荷容量に関する計算結果



(a) 剛性最大値を与える軸受すきま



(b) 一定の軸受すきまで軸受剛性最大を与える Y 値と多孔質幅比率

図 2.11 軸受剛性に関する計算結果

2.4 軸受特性の基礎的実験

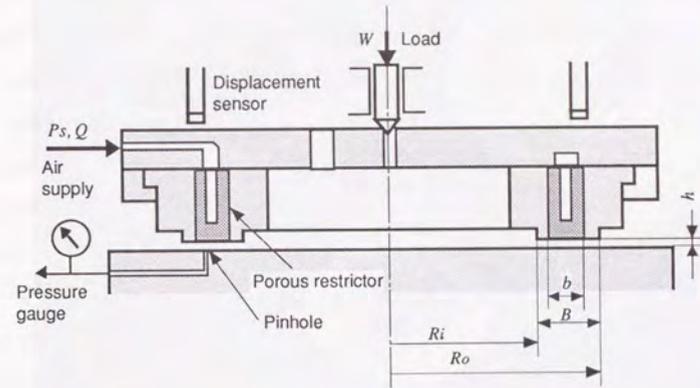
2.4.1 実験方法

前節の解析結果の実験的検証と具体的な空気軸受の設計指針を得ることを目的に、本セラミック多孔質織りの軸受特性を実験的に求める。図2.12に実験方法と実験試料の仕様、図2.13に実験用軸受パッドの写真、図2.14に実験装置の写真を示す。

実験試料は多孔質部分を円環状に鋳込み成型したリング形スラスト軸受パッドである。基本検討用の大きな寸法のものと同章で検討する空気静圧ナットのねじ1山に相当する等価試料である。前節の理論解析に対応するように、リング状軸受部の総幅 B に対するリング状多孔質部分の幅 b の比率 b/B を 0.35 、 0.55 、 0.65 の3種類準備した。多孔質部中心の円周状に背面から給気孔を明け、高圧空気が供給される。また、軸受面には先の第2.2節で述べた絞り抵抗調整めっきを施している。図2.13の写真でリング状に黒く見える部分がセラミック多孔体に無電解ニッケルめっきを施した多孔質織りの部分である。

実験は、給気圧 P_s をゲージ圧 0.5 MPa 一定とし、実験試料の中心におもりにより荷重を加え、軸受パッドのすきま方向の変位を静電容量形非接触微小変位計 (ADE社製 MICROSENSE 3046A、プローブセンサ径 5.3 mm) 2本で測定した。そして荷重 W に対する軸受すきま h の変化から、その軸受すきまにおける軸受剛性 $k=dW/dh$ を求めた。また、軸受すきま h に対する流量 Q をフロー式流量計で測定した。

また、軸受面に対向する受圧面に直径 0.5 mm のピンホールを設け、これに圧力計を接続して軸受すきま内の圧力を直接測定できるようにした。そして、実験試料をマイクロメータ式送りテーブルに搭載し、軸受部をピンホール上で径方向に走査した時の軸受面内の圧力分布をペンレコーダに記録した。



	2R0 (mm)	2Ri (mm)	b/B	note
Sample A	4.5	3.5	0.65	nut equivalent
Sample B	2.5	1.6	0.55	
Sample C	4.3	3.4	0.35	

図2.12 多孔質空気軸受特性の実験方法

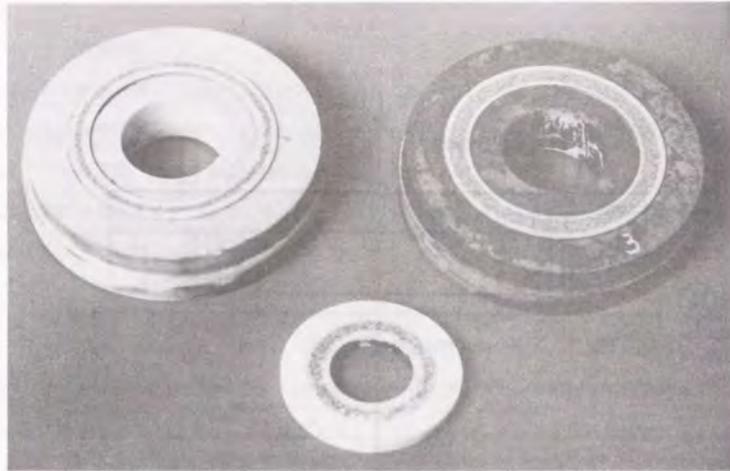


図2.1.3 実験試料の多孔質空気軸受パッド
(右から順にサンプルA, B, C)

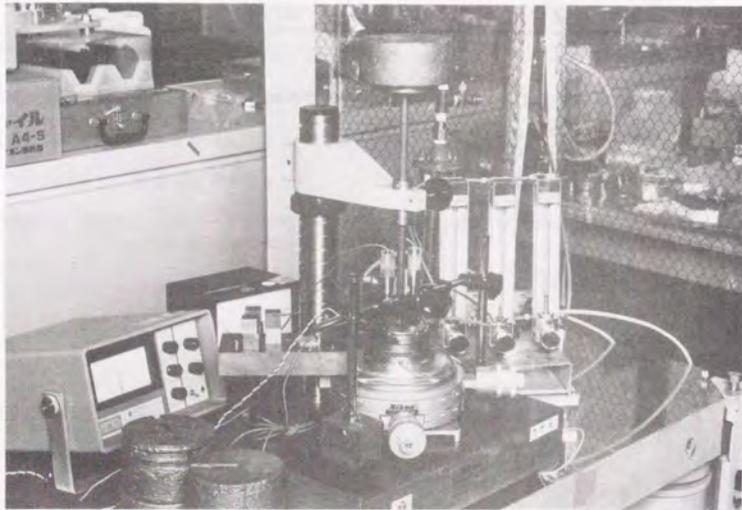


図2.1.4 実験装置の写真

2.4.2 実験結果と考察

各実験試料の軸受剛性 K と流量 Q の測定結果を図2.1.5に示す。軸受剛性は、軸受すきま h に対して軸受面積 A 、給気圧 P_s の値で測定された剛性 k を正規化した無次元剛性 $K (=kh/AP_s)$ で表わしている。これにより、試料のサイズ(軸受面積)や給気圧に無関係に軸受特性を評価することができる。図において b/B を 0.65 と大きくとった時、無次元剛性 K は 0.5 に到達している。前節の理論計算(図2.1.1(a))よりもやや低い値であるが、従来の空気軸受で達成された値[杉山1985, 吉本1991]と較べると、比較的高い剛性を持つとされている表面絞りの2倍以上、最も高剛性が得られる複合絞りより高い無次元剛性が得られている。このことから、本多孔質絞りは高剛性化に有利な空気軸受であるといえる。また給気流量 Q は、空気軸受の理論通り軸受すきまの3乗にはほぼ比例している。これらの結果は空気軸受の設計において、 b/B を大きく、すなわち軸受部を幅広く多孔質とすることで剛性を高くでき、浮上すきまを小さくすることで流量を低く抑ええられることを示している。

図2.1.6は、ピンホールによる軸受内圧力の直接測定の結果である。各測定カーブは、無次元剛性が最大となる軸受すきまを中心に荷重により軸受すきまを $\pm 1\mu\text{m}$ 変位させ、それぞれの場合に軸受パッドをピンホール上で径方向に手動で走査した時の圧力分布である。図2.1.6に示すデータには実験が手動の走査のために走査速度むらに起因するふらつきはあるものの、対称で滑らかな圧力分布が得られている。この結果は軸受すきまへの多孔質絞りからの良好な給気を示している。この場合、軸受すきま内の圧力分布がピンホールの大きさ分だけ平均化されて測定されていると考えられことを考慮して先の理論計算結果(図2.9)と比較すると、理論解析の方がやや台形に近いプロファイルであるが、両者は概ね一致していると考えてよい。これは、先の理論解析が実用上は問題ない程度に妥当であることを示している。

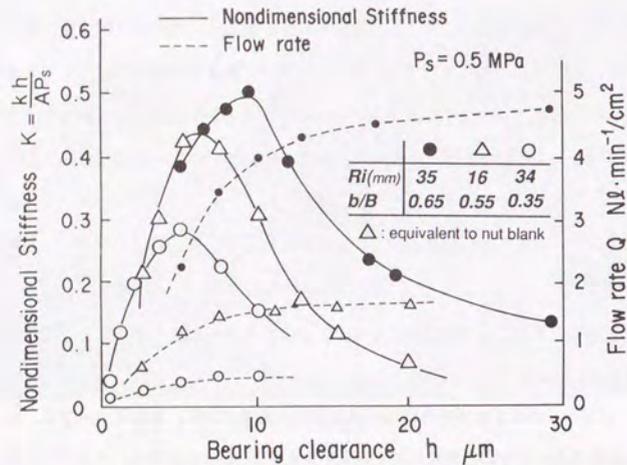


図2.15 剛性および流量の測定結果

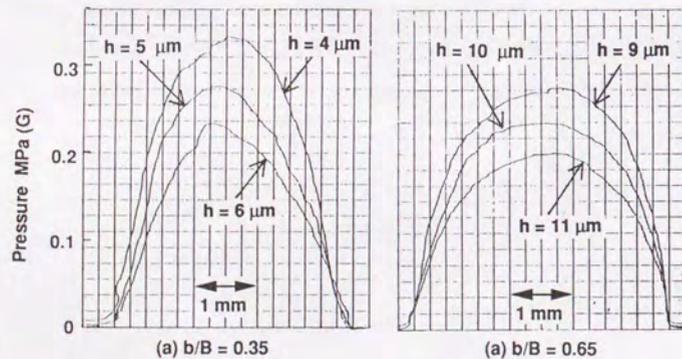


図2.16 軸受内の圧力分布の測定結果

2.5 本章の結論

ウレタンフォームの鋳込み成型・焼結によって得られるセラミック多孔体に無電解ニッケルめっきを施し、これを絞りとする空気軸受を検討した。理論解析と実験により、高性能の空気軸受を実現できることを検証した。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) セラミック製ウレタンフォーム多孔体を空気軸受の絞りを用いるとき、表層部の絞り抵抗は無電解ニッケルめっきにより自在に調整できる。この時、軸受面からの絞りの深さの制御、およびめっき量の正確な調整が可能である。
- (2) めっき付きセラミック多孔質絞りは、多数オリフィス絞りの空気軸受モデルにより近似できる。理論計算におけるオリフィスの絞り径がフォーム多孔体へのめっき量に対応しており、軸受すきまに応じて最適な絞り抵抗を得るめっきの量が存在する。高剛性化の指針は、軸受すきまを狭くし、これに対応してめっき量を増やして表層部に強い絞り効果を付与することである。これにより、上記の結論(1)と合わせて、目的の負荷容量と高い軸受剛性をもつ空気軸受を容易に得ることができる。
- (3) リング状スラスト軸受においては、軸受面をできるだけ広く多孔質にするほど、高い軸受剛性が得られる。実験により得られた性能は、多孔質幅の比率が0.65のリング状スラスト空気軸受において、無次元剛性0.5以上である。

本セラミック多孔体はベアリングパッド素材の所望の部分のみを自在に多孔質にでき、軸受すきまに応じた最適絞り抵抗を調整できるので、空気軸受の設計自由度が非常に大きく複雑な形状の空気軸受などへの応用が期待できる。

第 3 章

空気潤滑超精密ねじ送り機構

- 3. 1 緒論
- 3. 2 空気静圧送りねじの基本構造
- 3. 3 空気静圧送りねじ
 - 3. 3. 1 空気静圧送りねじの設計
 - 3. 3. 2 母材の製造と加工法の検討
 - 3. 3. 3 空気潤滑送り機構
- 3. 4 空気潤滑ねじ送り機構の特性評価と考察
 - 3. 4. 1 空気静圧送りねじの軸方向静剛性
 - 3. 4. 2 空気潤滑ねじ送り機構の移動分解能
 - 3. 4. 3 空気潤滑ねじ送り機構の送り精度
- 3. 5 ねじ送り機構の位置決め制御
 - 3. 5. 1 空気潤滑ねじ送り機構の動特性
 - 3. 5. 2 位置決め制御
- 3. 6 本章の結論

3. 1 緒論

位置決め機構において最も一般的に用いられる運動伝達要素は、ボールねじや滑りねじに代表される送りねじである。送りねじは、規格化、標準化がなされ、これを用いれば長いストロークの送り機構を容易に構成することができる。ねじ送り機構を超精密領域の位置決めに応用しようとする試みは枚挙にいとまがなく、アプローチの方法も多種多様である。多くは、機構に内在する固体摩擦によって引き起こされる非線形性を何らかの方法で補償しようとするもので、構成部品の徹底的な高精度化 [岡田 1985] やねじの振れ回りの付加ばね機構による吸収 [高橋 1987]、制御系の高度化による非線形補償 [内田 1988A, 米澤 1989, 青木 1990] などの方法がある。しかしながらこれらの方法では、製造方法が技巧的になったり、機構や制御系が複雑となるなどの欠点があるため、近年多く用いられるのは、長いストロークを送るための粗動機構と短いストローク内で微細な位置決めを行なう微動機構を組み合わせる方法である。特に、高精度を要求される代表例の半導体露光装置用の位置決めステージでは、ねじ送り粗動機構と圧電素子による微動機構の組み合わせ [森山 1984, Moriyama 1988, Kouno 1988, 河野 1989, 米澤 1989, Koga 1990 など] が多用されている。この場合、機構が多段となるために剛性が低下し易く、送りねじにとっては可動部質量が大きくなるという欠点もあり、剛性確保のための機構設計に細心の注意が必要である。他方粗微動を一体化し、単一の機構で超精密位置決めを行なう試みとしては、空気静圧案内とリニアモータ [辻 1984, 1985, 杉山 1985, 木下 1986, 末松 1990]、あるいは、摩擦駆動 [高橋 1988, 諸貫 1988, 大塚 1989, 山口 1990 など] と組み合わせるダイレクトドライブ方式がある。しかしながら、前者ではねじ送りに較べて変位縮小機能が無い分駆動トルクを大きくできない、駆動方向の剛性低下は否めないなどの欠点があり、後者では駆動部の磨耗による寿命に問題がある。このような背景の中で、送りねじ自体の超高精度化は基本要素そのものに技術革新をもたらす意味で有力なアプローチである。

ナットが加圧流体を介してねじ軸に非接触支持される静圧送りねじは、

- (1) 固体摩擦に起因するスティックスリップやバックラッシュが皆無であるため送りねじ自体に高い移動分解能を持たせることができる。
- (2) ねじ軸とナットの形状誤差が流体膜で平均化されるため送り精度が向上する。
- (3) 摩擦が皆無であるため恒久的な高精度送りが可能となる。

などの特長を有する。このため長ストロークの超高精度送り機構を単一のねじ送り機構で実現でき、機構の単純化による小形化、可動部の軽量化による高速化、経済化など多くの効果が期待できる。

当初、全ての機構案内部に油静圧軸受を用いた位置決めテーブルが夢の機械として提唱 [Rumberger 1968]、紹介 [横川 1974] されて以来、まず油を作動流体とする静圧送りねじの研究 [局 1982, 1983, 大塚 1983, 水本 1982, 1983] と開発が行なわれ、すでに超精密加工の分野で一部実用に供されている。

さらに、潤滑流体として取り扱いが容易な空気を用いれば、装置が小形化できる、高速動作でも発熱がない、クリーンな環境で使用できるなどの利点がある。このため、空気潤滑の静圧送りねじ (以下空気静圧送りねじという) の研究が行なわれてきた。空気の粘性係数は潤滑油の数千分の一から一万分の一と極めて低いことから、高性能の空気軸受を得るためには $10\mu\text{m}$ 前後の狭くかつ一様な軸受すきまを確保することが必須である。従って、空気静圧送りねじの研究は、いかにして狭いねじすきまを製作するかを主課題として、モデル化や高精度の加工法など様々の試みがなされてきた。例えば、1リードのめねじによる剛性測定 [里見 1982A]、空気静圧ねじをコニカルスラスト軸受として特性解析を行ない設計指針を与えた研究 [荒井 1982]、これに基づく空気静圧ねじの試作例 [小林 1983]、モールド法によりおねじ基準でナットを製作して軸受すきまを作り出す方法 [古川 1983]、ナットフランクに浅い溝を設けて表面紋りとする高剛性化の試み [水本 1987] などが代表的研究例である。しかしながら、スパイラル状の内面という元来複雑な形状であるナットフランクに空気軸受の紋りを精度良く加工あるいは取付けることは非常に困難であり、いずれの試みも剛性向上には限界があった。実際、前記の中で最も高剛性が得られた試作例では、ねじ加工の精度を確保するために専用ラッピング機まで準備して、粗加工、中仕上げ加工、最終仕上げ加工の3段階ラッピングを行なっている [伊庭 1987] にもかかわらず、おねじの外径 60mm の大型ねじでも剛性は $10\text{N}/\mu\text{m}$ であったと報告されている。このような状況から、実用的なサイズで十分な剛性と負荷容量を持った空気静圧送りねじを経済的に実現することはほとんど不可能とされてきた。

本章では、実用に耐える軸方向剛性を持った空気静圧送りねじを実現することを目的に、ナットフランクに形成する空気軸受の紋りの形式、外部からの給気の方法、ねじ山の形状など、基本的な空気静圧送りねじの構造に立ち戻って検討を加える。そして、前章で述べたセラミック製多孔質紋り空気軸受を応用し、ねじ山の形状を角ねじとした空気静圧送りねじの基本構造を提案する。このコンセプトに従って空気静圧送りねじとこれで駆動される全空気潤滑テーブルを試作し、位置決め機構としての静特性、動特性、位置決め特性を評価する。これらの結果から、空気潤滑ねじ送りにより、超微細な分解能をもつ長ストロークの位置決め機構を実現できることを示す。

3.2 空気静圧送りねじの基本構造

空気静圧送りねじの最大の問題点はその軸方向剛性および負荷容量の低さである。静圧空気軸受において剛性と負荷容量を増加させる手段は、単純に軸受面積を拡大すること、給気圧力を高圧化すること、および軸受性能そのものとして単位面積当たり空気軸受剛性を向上させることである。ここでは、まず空気静圧送りねじにおける軸受面積について論じ、次に、軸受性能の向上について検討する。

(1) ねじ山の形状と空気軸受の面積

従来、静圧送りねじには、台形ねじが常識として用いられてきた。空気軸受の負荷容量は軸受面積に比例するので、静圧送りねじの軸方向負荷容量は、はめあい状態にあるフランク（空気軸受部）をねじの軸線に直角な面に投影した時の面積に比例する。従って、台形ねじではリード角に加えてフランク角の分だけ投影面積が減少する。さらに、フランク角とリードとは一定の幾何学的関係が保たれていなければならないため、ある軸方向長さ（ナットの長さ）内に収納できるねじ山の数が制限される。リード角とフランク角を小さくすればするほど一定の長さの静圧ナットにおける軸受部の投影面積は大きくなり、フランク角0度の角ねじにおいて最大となる。さらに、角ねじにおいてはねじ山のアスペクト比をリードに無関係に変えることができ、軸受面積の拡大を容易に図ることができる。

以上の関係を具体例で定量的に述べると次のとおりである。図3.1はJIS B 0216メートル台形ねじの形状を示し、図3.2は、上記の投影軸受面積の計算例である。ねじ山の角度30°のメートル台形ねじにおいて、呼び径（おねじの外径）を24mm、ナットの長さを25mmに固定して軸直角面への投影軸受面積を計算する。これに対して、ひっかけり高さを台形ねじと同じP/2にとった角ねじ（ねじ山断面形状が正方形）と、ねじ山の頂の幅を台形ねじと同じにした角ねじの場合の投影面積を計算し、ねじのピッチに対してプロットしている。図3.2からわかるように、台形ねじに対して前者の角ねじで投影軸受面積は2倍、後者の角ねじで約2.7倍に増加する。この場合、角ねじ相互の比較では、投影面積の増加率はねじ山断面形状のアスペクト比の増大に対応している。また、ねじの形状が同じならば、ピッチを小さくすることによる投影面積増大の効果は小さいことがわかる。このように、静圧送りねじでは、ねじ山形状をアスペクト比の大きい角ねじにすることが、単位長さ当たりの軸受面積の大幅な増加に極めて有効であることが明かとなる。

なお、角ねじの場合、ナットにラジアル方向分力がほとんど働かないため送りねじ自体に求心性

がなく、単独部品として機能しないという問題がある。しかしながら、送り機構として考えた時、送り方向以外の残り5軸は別の案内機構と組み合わせれば問題はない。逆に、高精度送り機構としては、ねじ軸の曲がり運動精度に及ぼす悪影響を除くという効果が期待できる。また、フランク角が0度であるため、直線案内と組み合わせて送り機構を組み立てる際に、直線案内に対するねじ軸の平行度、ナットとねじ軸の同芯度に対する余裕は台形ねじに比較して大きく緩和されるという効果も期待できる。

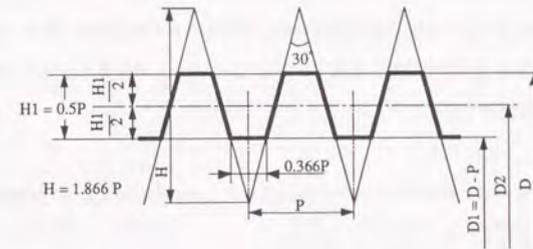


図3.1 メートル台形ねじ（JIS B 0216、ねじ山の角度30°、フランク角15°）

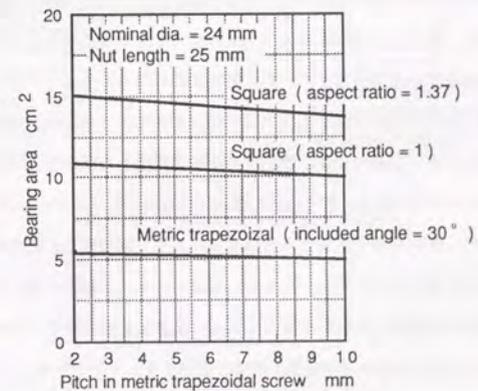


図3.2 静圧送りねじにおける軸方向投影軸受面積の比較

(2) 絞りの形式と給気構造

次に、空気静圧送りねじにおいて空気軸受の性能を向上するための絞りの形式と給気構造について検討する。従来、多く用いられてきた自成絞り、表面絞り、オリフィス絞り等を静圧送りねじに適用しようとすると、ナットフランクに、孔、溝、オリフィスなどの複雑な加工が必要である。ナットフランクは、スパイラル状の内面であり、従来の絞りを精度良くそこに形成することは非常に困難な加工を伴う。これらに比べて、多孔質絞りを用いればフランクは通常の固体接触滑りねじと同様の単なる面となり、絞り加工の複雑さは大幅に軽減される。また、給気孔は外部と多孔質部をつなぐ単なる接続孔でよく、厳しい加工精度を要求されることはない。このように、多孔質絞りは静圧ナット用空気軸受として形状や給気構造を最も単純化できる絞り形式である。また前章で述べたように、多孔質絞りは軸受部全体に給気できることから給気効率を高くできるため、高い単位面積当たり軸受剛性を期待できる。

さらに、前記の角ねじと前章のセラミック多孔質絞りとを組み合わせると、相乗的に次のような効果を生み出すことができる。

- 1) フランク角が0度のスパイラル面であるために、加工工具の運動精度をワークに転写する加工法の適用が可能となる。この時、ワークが角ねじであれば、ねじ軸半径方向の加工分力は発生しないので、形状加工の精度とピッチ精度の向上が期待できる。
- 2) 空気静圧送りねじは両面拘束のスラスト軸受がスパイラル状に連続したものであり、ねじ加工のピッチ精度、フランクの形状精度で空気軸受のすきまが決定されてしまう。さきに述べたように空気軸受では軸受すきまに応じて最大剛性の得られる絞り抵抗が存在するため、加工精度で決まるねじすきまに応じて後で絞り抵抗を調整する手段は、最適な絞り抵抗の設定に非常に有効である。具体的には、静圧ナット多孔質部への前章で述べた無電解ニッケルめっきは、送りねじ用空気軸受の絞り抵抗の最適化に有効に利用することができる。
- 3) セラミックスは、脆性材料であるため金属材料に比べて高精度加工に有利であり、かつ多孔質部の加工における目づまりがない。また、比重が小さく比剛性が高いので送り機構の回転部イナーシャや可動部質量負荷を小さくできる、熱膨張係数が小さいので高精度機構に有利である、腐食の心配がないなどの特長を有効に利用することができる。

以上の検討に基づいて提案する空気潤滑送りねじの基本構造を、従来のものと比較して図3.3に示す。図のように、ねじ山の断面形状は長方形であり、ねじ山の部材剛性が確保できる程度にアスペクト比を大きくする。多孔質にしたい部分のみを多孔体にできるというウレタンフォーム多孔体の特徴を利用して、フランクひっかかり部を部分的にスパイラル状の多孔質とする。これで、ひっかかり部にはランドを有するスラスト静圧軸受が形成されおり、空気もれ防止の封止は一切不要である。給気孔は、ナット外周から多孔質部に通じる孔であり、ナットねじ山の中心付近に外周部から穴明けによって形成できる。

以上述べた本構造の狙いと効果をまとめて図3.4に示す。

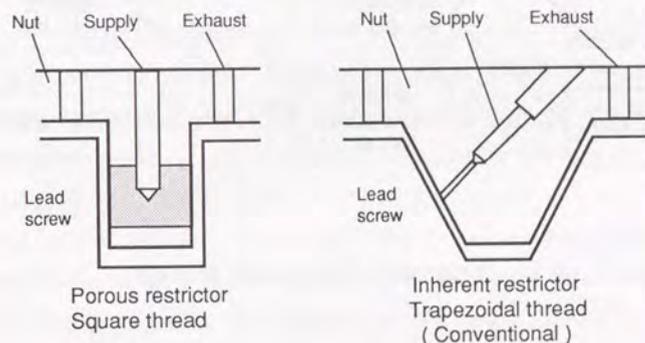


図3.3 空気静圧送りねじの基本構造

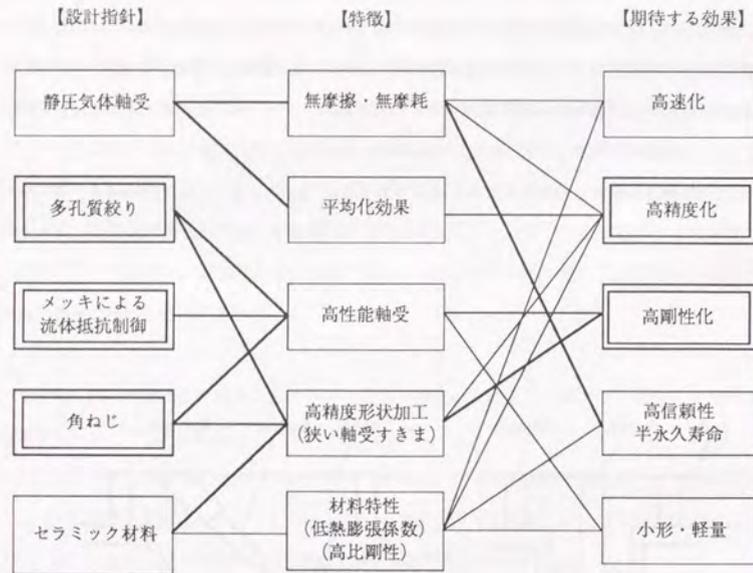


図3.4 空気静圧送りねじの設計における狙いと効果

3.3 空気静圧送りねじ

3.3.1 空気静圧送りねじの設計

第3.2節で述べた基本構造を基に設計した空気静圧送りねじを図3.5, その設計諸元を表3.1に示す。ナットフランクに帯状の多孔質絞りを配置し、ナット外周面より給気孔をあける。ナット外周,あるいはナットケース内周に給排気孔をつなぐようにスパイラル状の溝を形成し、給排気チャンネルとする。多孔質部の表層で絞られた高压空気により、ねじ軸フランクとナットフランクとの間にスラスト静圧空気軸受を形成する。排気効率を上げるためにナット谷部に大きめの排気孔を設ける。ねじ軸の外径は、送りねじとして実用レベルの2.5mmと小形化し、内径は1.5mmで、ねじ山に約1.7という高いアスペクト比を持たせる。ねじ山のひっかり高さは4.5mm、リードは6mmである。ナットのフランク加工も考慮した上で有効はめ合いねじ数は4とし、この結果、軸受面積は24cm²である。また給排気の効率を確保するために給気孔は48個、排気孔は17個設けている。前章の結果からナットフランクの多孔質部の割合は大きくとることが望ましいが、ウレタンフォームの加工と鋳込み成型の際のウレタンの配置精度の制限 — 弾力性に富むウレタンフォームの高精度形状加工は難しく、円環が太鼓状やつづみ状になりやすい。このためにねじ山の山頂内周部や谷底内周部が多孔質になってしまうと、そこから高压空気がぬけてしまうので空気軸受として機能しなくなる — から、多孔質の径方向の幅はひっかり部の0.55とした。ダブルナット式とするために、樹脂により片側フランクを封止した2つのナットを圧力側フランクを逆にしてスペーサを介して結合する。これにより、2つのナット間のスペーサを厚さ調整することにより、組み立て時にも軸受すきまを調整可能とする。また、各ナットには、仕上げ研削加工後の最終工程で、前章で述べた(図2.3)絞り抵抗調整めっきを施す。

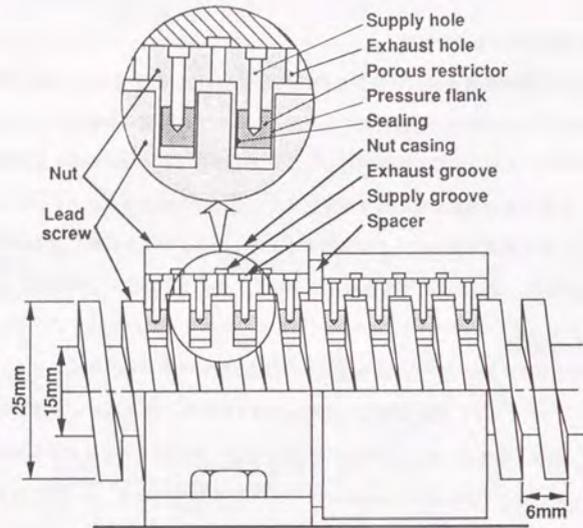


図3.5 設計したセラミック製空気静圧送りねじの概要

表3.1 セラミック製空気静圧送りねじの設計諸元

	Lead Screw	Nut
Thread	Thread profile = Square, Pitch (Lead) = 6 mm Thread height = 5 mm,	Thread overlap = 4.5 mm
Material	Alumina-Ceramic	Porous Alumina-Ceramic Ratio b/B = 0.55 in flank
Dimensions	Major dia. = 25 mm Minor dia. = 15 mm Thread len. = 470 mm	Outer dia. = 30 mm Length = 30 mm, Double Nut No. of engagement = 4/Nut

3.3.2 母材の製造と加工法の検討

空気静圧ナットの製造プロセスを図3.6に示す、まず、筒状にカットした発泡ウレタンに泥漿鋳込みを行ない、乾燥・仮焼結すると、筒状多孔質部が緻密体に埋め込まれた円筒母材が得られる。この仮焼結の段階では旋削加工や穴明け加工が容易である。そこで、円筒母材の中心に穴明けを行なうと、ねじ山になるべき半径位置に多孔質がサンドイッチされた円環ができる。これに旋削によりねじ加工を行なってねじの形状を作り上げ、その後本焼結を行なう。そして、強く焼き固められたセラミックスに後述の仕上げ研削加工を施し、最後に絞り抵抗調整のための無電解ニッケルめっきを行なってナット母材が完成する。

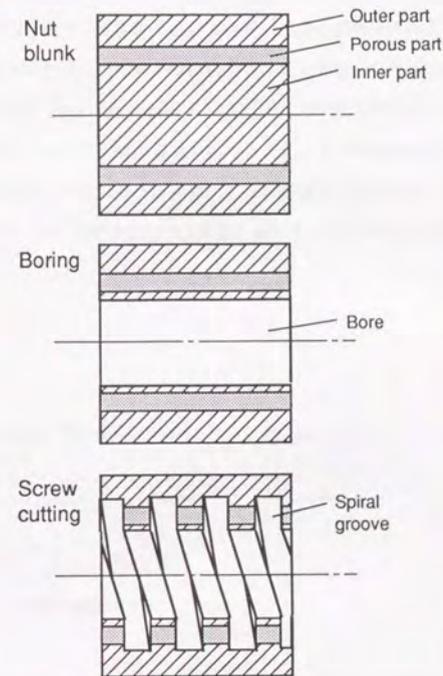


図3.6 空気静圧ナットの製造プロセス

形状精度確保の上で最も重要な仕上げ加工では、セラミック材料を研削加工でき、かつナットの内面加工ができる程度に工具が小さいことを考慮して、歯科工具によるダイヤモンド研削を適用する。歯科工具のスピンドルは30万rpmという超高速回転が可能であり、小さい刃先（ダイヤモンドバー）でも高い加工速度が得られる。図3.7に加工法の概念と予備加工実験の結果を示す。エアータービンにより高速回転するダイヤモンドバーの端面を加工点とし、歯科工具の運動をワークに転写する加工法により加工精度の向上を狙う。予備検討としてセラミックワークの平面研削面を歯科工具で研削して加工精度を比較した。図3.7の測定データにおいて、左側は平研面、右側は歯科用工具による研削面であり、ほぼ同等の面精度が得られていることがわかる。これから、歯科用工具による研削加工がセラミックねじ加工に適用できることを確認できた。

図3.8に実際の空気静圧ナット試作品におけるセラミック角ねじフランクの加工精度測定例を示す。実際の加工には、工具の刃先剛性を高め、保持が容易となるように歯科用工具を改造した専用工具をねじ研削盤工具台に取付け、刃先をねじの径方向にトラバース運動させながらナットとねじ軸のフランクを研削した。図3.8において、(a)はねじ軸のフランク、(b)はナットフランクの測定結果である。いずれの研削面にもセラミックスに特有の微小なクローズドポアがあり、ナットフランクでは多孔質部の大きな気孔が観測される。研削されたフランクの径方向形状精度は、ねじ軸フランクで1 μm 程度、ナットフランクでは多孔質部の影響を受けて2~3 μm 程度であることがわかる。

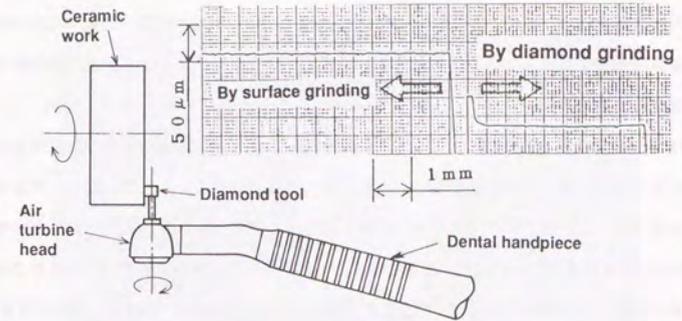


図3.7 仕上研削加工の概念と予備加工結果

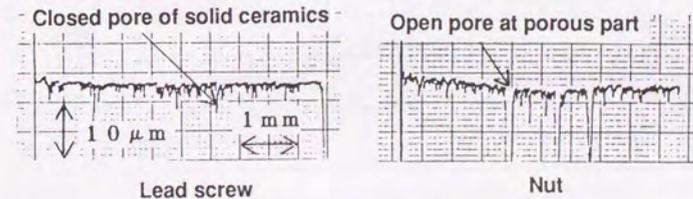


図3.8 静圧ナット試作品のフランクの加工精度

3. 3. 3 空気潤滑ねじ送り機構

完全非接触のねじ送り機構の実現と本空気静圧送りねじの性能評価を目的に試作した一軸テーブルを図3.9に示す。また、一軸テーブルとセラミック空気静圧ナットの外観を図3.10に示す。

テーブルは、送りねじ、直進/回転案内各部に空気軸受を用い、荷重の支持、運動の拘束・伝達・変換全てを非接触空気潤滑している。空気軸受としては、送りねじはもちろん、直進案内用エアスライダや回転部のラジアル/スラスト軸受にもセラミック多孔質紋りを用いている。

図3.9に示すように、直進案内とねじ軸を平行に配置し、直進エアスライダと空気静圧ナットをねじ締結により強固に結合・一体化する。この時、先に角ねじの利点として述べたように組み立てにおける直進案内、ねじ軸、ナット相互の平行度や同芯度の組み立て精度は比較的余裕があり、本試作品では $10\mu\text{m}$ 程度で十分である。両端支持部とナットケース以外の直進案内、送りねじなどの主要部は全てセラミック材料で構成し、軽量化と高精度・高剛性を狙っている。可動部質量は 3.4kg である。外形寸法は、長さ 600mm ×幅 200mm ×高さ 250mm であり、有効移動ストロークは 210mm である。

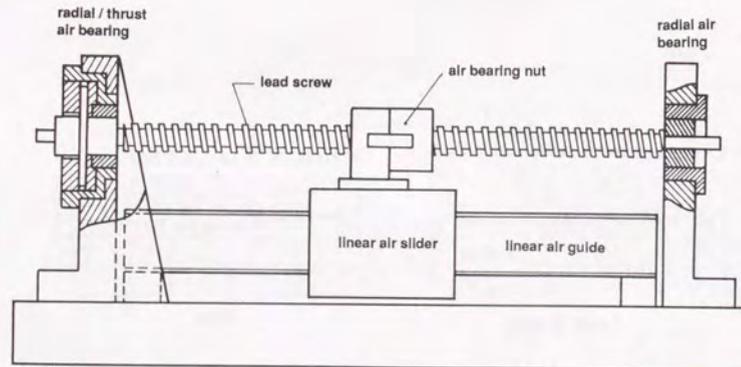


図3.9 完全に空気潤滑された一軸ねじ送り機構

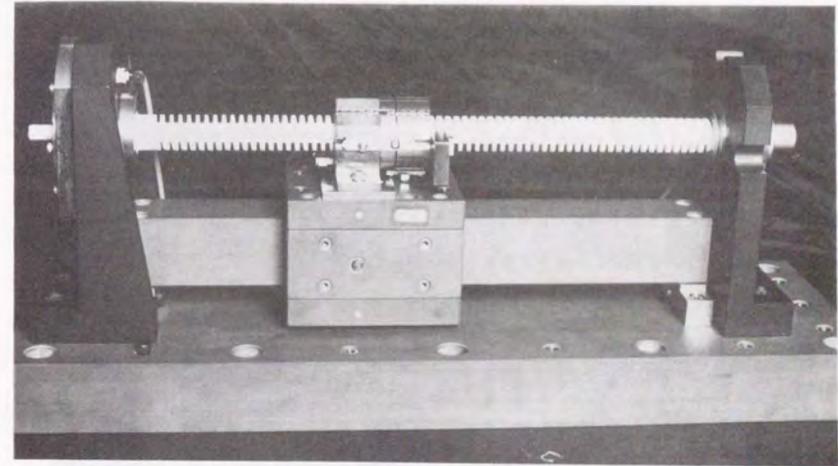
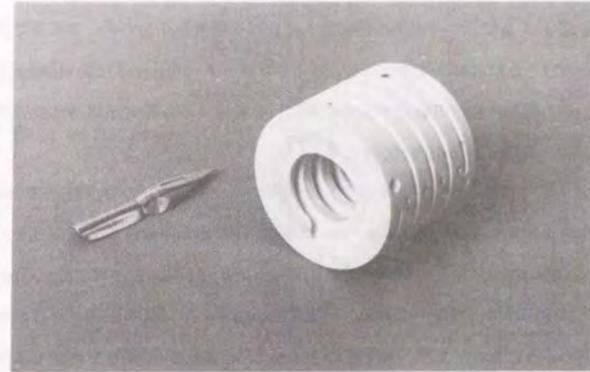


図3.10 空気潤滑ねじ送り機構と空気静圧ナットの外観

3.4 空気潤滑ねじ送り機構の特性評価と考察

3.4.1 空気静圧送りねじの軸方向静剛性

空気静圧送りねじの最大の弱点であった軸方向静剛性を測定した。測定方法を図3.11に、また、実験装置の写真を図3.12に示す。空気静圧ナットにレバー機構を介してロードセルでスラスト荷重を与え、回転を固定したねじ軸に取付けた電気マイクロメータ（Feinpruf社製 Millitoron）によりナットとねじ軸の軸方向相対変位（軸受すきまの変化）を測定する。給気圧は通常の空気軸受の使用範囲である0.4 MPa (G) ~ 0.6 MPa (G)である。

図3.13に荷重・変位特性の測定結果を示す。給気圧が0.5 MPa (G)の時、軸方向の静剛性は中立点（無負荷時のバランスする点）で3.2 N/μmであり、中立点から変位するに従って若干増大する。給気圧が0.4 MPa (G)の時軸方向静剛性は2.7 N/μm、0.6 MPa (G)の時3.7 N/μmと、軸方向静剛性と給気圧は比例関係にある。この軸方向静剛性の値から本空気静圧送りねじの軸受すきまを推定すると以下ようになる。まず、軸受面積2.4 cm²、給気圧0.5 MPaを用いて単位面積、単位圧力当たりの剛性値を計算し、軸受すきまに対する無次元剛性を算出する。この関係を前章2.4節の空気軸受特性測定結果（図2.15）上にプロットしてみると、ナット等価試料の特性曲線との交点から平均的な軸方向の軸受すきまは1.0 μm ~ 1.1 μmと推定される。

さらに、軸受すきまの状態を詳しく調べるために、ダブルナットの片側だけに給気した場合の荷重・変位特性を測定した。結果を図3.14に示す。データ中の変曲点はナットとねじ軸の機械的な接触開始点と考えられ、中立点から機械的接触点までのすきまは6 μm ~ 6.5 μmである。いま、軸受すきまの状態を、図3.15のように考える。ナットとねじ軸が機械的に接触しない範囲のすきまを有効すきま、機械的接触後にも残るすきまを無効すきまと呼び、上記の剛性が得られる見かけ上の軸受すきま1.0 μm ~ 1.1 μmを平均すきまと呼ぶこととする。ここで、議論を単純化するために、平均すきま = 有効すきま + 無効すきま / 2 と考えると、図3.15からわかるように、無効すきまは両側で7 μm ~ 10 μmである。この無効すきまは、ねじ加工のピッチ誤差、フランクの形状誤差、組立誤差などの累積値として現われるものであり、ナットとねじ軸の加工精度や組立精度を向上させることにより、軸受すきまをさらに狭められることを意味している。すなわち、本空気静圧送りねじの軸方向静剛性は、加工精度を向上させて軸受すきまを狭めることによりもっと高い値まで向上させることが可能である。

また、負荷容量は、図3.13においてナットとねじ軸の接触を示す変曲点から評価できる。この

変曲点は明瞭ではないが、給気圧0.5 MPa (G)で負荷容量は300 N程度と考えられる。なお、中立点における予圧荷重は、図3.14より約110 Nであることがわかる。

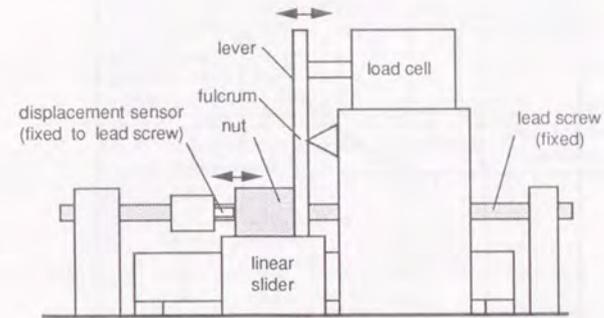


図3.11 軸方向静剛性の測定方法

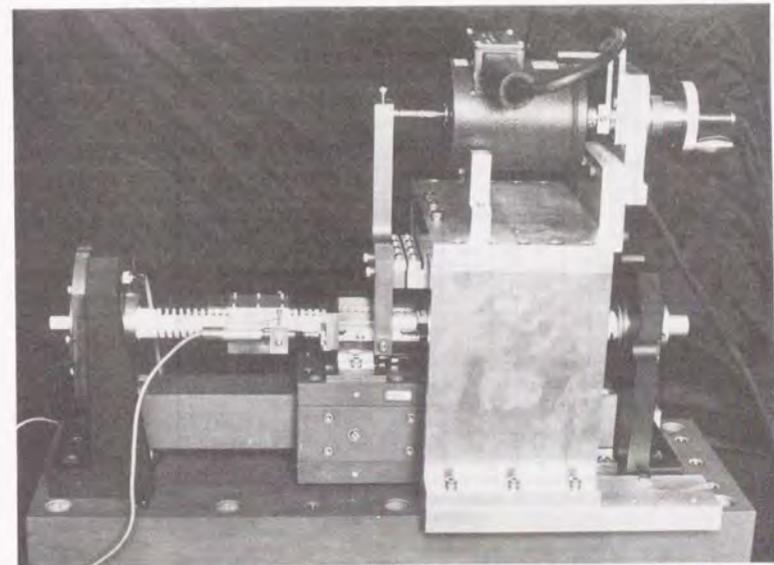


図3.12 軸方向静剛性の測定の様子

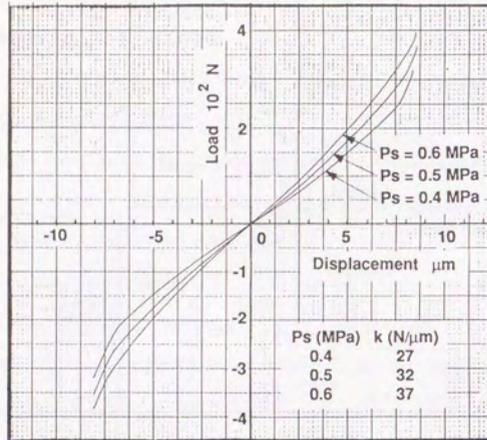


図3.13 空気静圧送りねじの軸方向静剛性

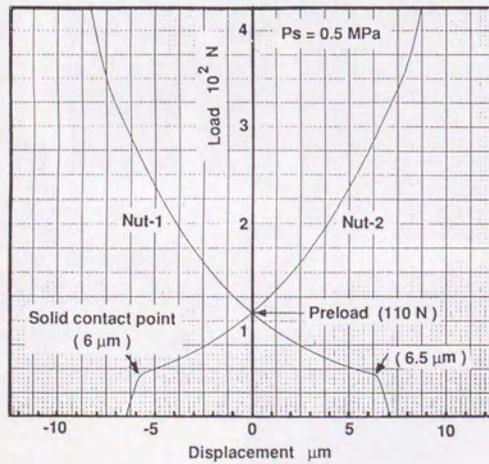


図3.14 片側ナット給気時の荷重・変位特性

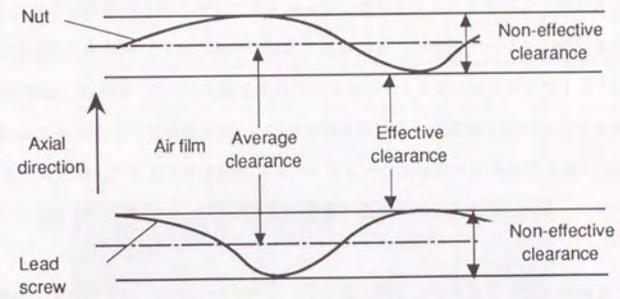


図3.15 軸受すきまのモデル (軸受部をつるまき線に沿って展開)

3. 4. 2 空気潤滑ねじ送り機構の移動分解能

送り機構から固体摩擦を排除することにより、どこまで静的な移動分解能を向上できるかを微小変位の範囲で測定する。測定方法を図3.16、実験装置の写真を図3.17に示す。一軸空気潤滑ねじ送りテーブルのねじ軸を治具を介して圧電素子 (PI社製 Model P-173) で微小回転させ、その時のナットの直進変位を静電容量形非接触微小変位計 (ADE社製 MICROSENSE 3046A, プローブセンサ径 5.3 mm) で測定する。この方法によれば、実験系にも固体摩擦の発生はなく、圧電素子を歪ゲージによるヒステリシス補償モードで用いることにより入力変位の線形性を確保している。また、微小回転変位を伝達するレバー機構は、変位換算を容易にするために、圧電素子の変位が百分の一に縮小されてナットの直進変位となるような幾何学的関係を選んでいる。例えば、圧電素子 $6\mu\text{m}$ の変位でねじ軸は 10 万分の 1 回転し、送りねじのリードが 6mm なのでナットは 60nm 変位する。なお、非接触微小変位計の出力は機械式のペンレコーダに接続しているので、測定出力には 40Hz 程度のローパスフィルタが挿入されているのと等価であり、ここでは静的変位を測定していることになる。

圧電素子に連続的に変化するアナログ電圧を印加したときの回転変位・直進変位変換特性の測定結果を図3.18(a)に示す。ねじ軸の微小な回転に対してナットは線形性良く直進運動していることがわかる。観測される微小な変動幅から推定すると、移動分解能は数ナノメートルと考えられる。次に、圧電素子に $0.45\mu\text{m}$ のステップ変位を与え、この時のナットのステップ状直進変位特性を図3.18(b)に示す。図からわかるように、 4.5nm の直進ステップ変位を十分に分解していることから、本機構の直進移動分解能は 5nm 以下と考えられる。ただし、本測定においては上述のように高い周波数の動きがカットされているので、ここで言う移動分解能はあくまで静的な特性と考えなければならない。

以上の結果は、ねじ軸のいかなる回転角においても達成可能である。ねじ送り機構は、元来長ストローク用の駆動要素であること、および、ねじ軸回転角を十分に細かく分割できれば上記測定結果のように超微小送りが可能なことから、空気潤滑ねじ送り機構は、数百ミリメートルの長いストロークにわたってナノメートルオーダーの移動分解能を持つ超精密送り機構を実現できる可能性を示している。

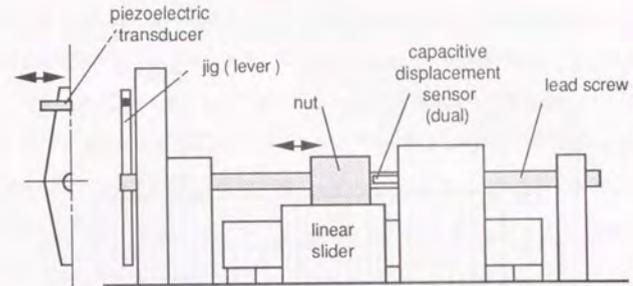


図3.16 移動分解能の測定方法

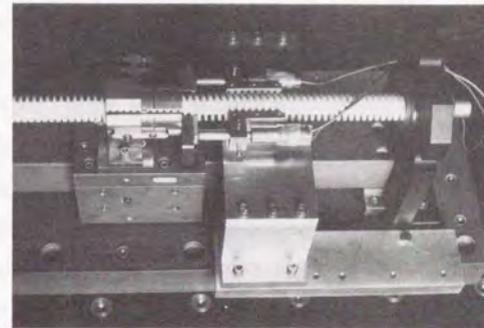
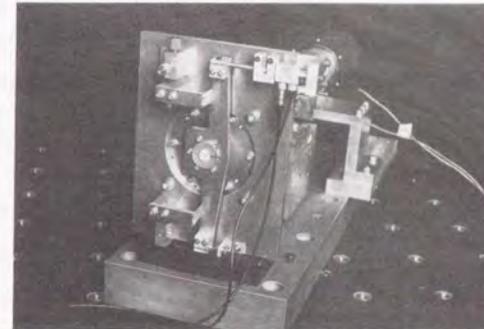


図3.17 移動分解能測定の様子

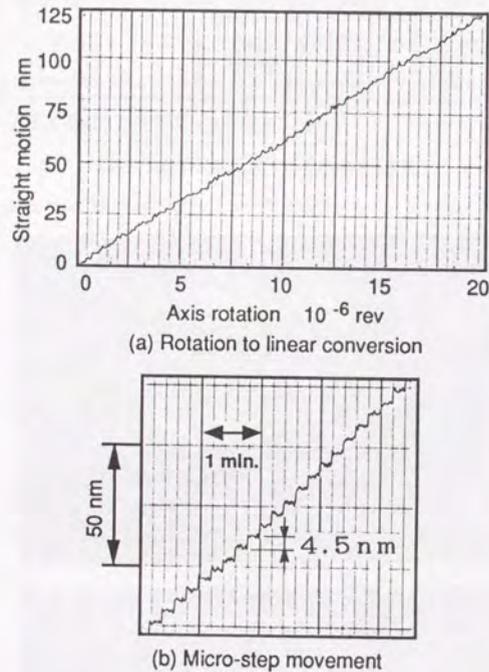


図3.18 空気潤滑ねじ送り機構の移動分解能

3.4.3 空気潤滑ねじ送り機構の送り精度

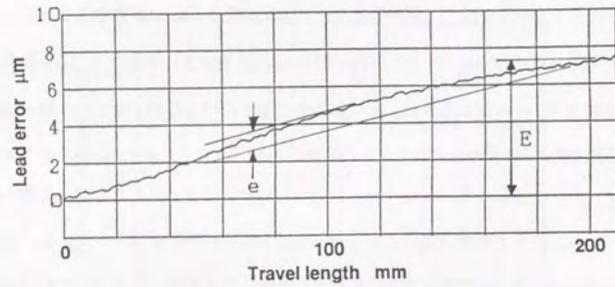
送り精度を JIS で定める精密ボールねじの送り精度に関する規定 [日本規格協会 1990] に従って評価する。ねじ軸にロータリエンコーダ (4万パルス/回転) と駆動用 DC モータを取付け、レーザ式自動リード測定機 [平田 1981] により軸回転角とナット直進変位の関係を測定した。

図 3.19 (a) に累積リード誤差、同図 (b) にこれを累積代表リードで補正しかつ 10 倍のスケール拡大を行なった結果を示す。累積代表リード誤差 ΔE は $7\mu\text{m}$ 、有効ねじ長さ 210mm 内のリード誤差の変動 e は $1.3\mu\text{m}$ 、1 リード内の変動 e_{max} (よろめき) は幅で $0.2\mu\text{m}$ 弱であった。累積代表リード誤差 ΔE とその変動 e は、主にねじ研削加工に用いたねじ加工機の送り精度に起因しており、ねじ加工機の送り精度を高めることで減少できる。図 3.20 はその結果を示すデータで、ねじ加工機をオーバーホールした後に本送りねじを加工した場合の送り精度である。累積代表リード誤差 ΔE が $1.7\mu\text{m}$ 、リード誤差の変動 e が $0.63\mu\text{m}$ と大幅に誤差が減少している。これらの空間周波数の低い誤差は、位置決めテーブルに組み立てたあとでも制御ソフトウェアによる補正が容易であるために問題は小さい。高精度位置決めに用いる上で最も深刻な誤差は、空間周波数の高いよろめき e_{max} である。ボールねじの最上級グレードである C0 級ボールねじに対するよろめきの JIS 許容値が $3\mu\text{m}$ と規定されていることを考慮すると、上記の $0.2\mu\text{m}$ というよろめきの値はこれより 1 桁以上良い精度が得られていることになる。

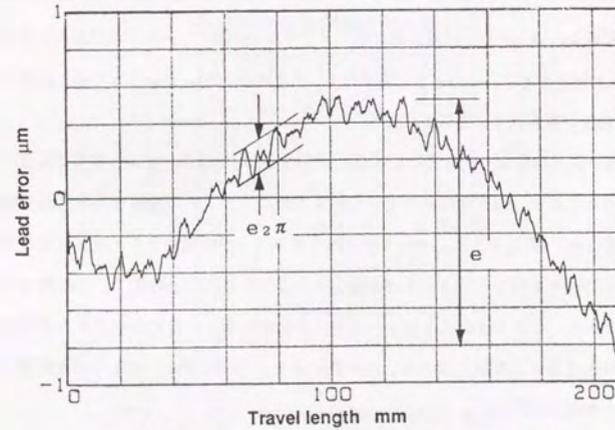
このような高い送り精度は、空気膜による部品誤差の「平均化効果」によってもたらされている。本空気静圧送りねじにおける平均化効果を評価するために、ナットの運動を基準にねじ軸のピッチ誤差を測定してみた。図 3.21 は、ナットからねじ軸フランクに電気マイクロメータのプロブを当てた状態でねじ送りを行なうことにより測定したねじ軸単体の部品精度で、平均的なピッチ誤差は約 $2.3\mu\text{m}$ である。これと上記よろめきの測定値を比較すると、はめ合い数 8 の空気静圧送りねじにおける平均化効果は 1 桁以上であり、空気膜による「平均化効果」がよろめき低減に大きく貢献していることが確認される。

さらに、リード誤差の空間周波数を解析することにより、よろめきに含まれる周波数成分を調べる。図 3.22 は、図 3.19 のデータからねじ軸の 1~2 回転の範囲を周期とするリード誤差の周期成分を抽出した結果である。図 3.22 からわかるように、この範囲の周期成分の変動振幅は上記のよろめき測定値と同程度の値となっている。このことから、よろめきの大部分は 1 回転、および 2 回転の周期成分で占められていることがわかる。この内 2 回転成分は、使用したねじ加工機の親

ねじのリード1.2mmに対応しており、ねじ加工の精度向上により本空気静圧ねじの送り精度を更に向上させることが可能であることを示している。

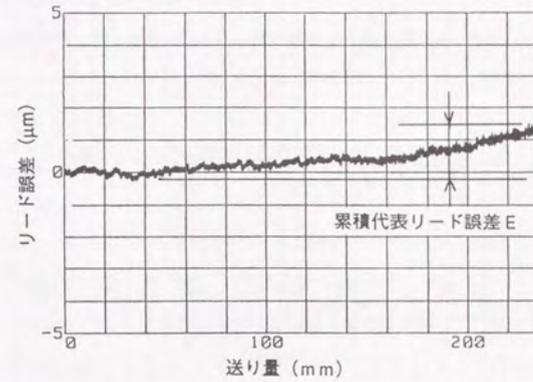


(a) Cumulative lead error

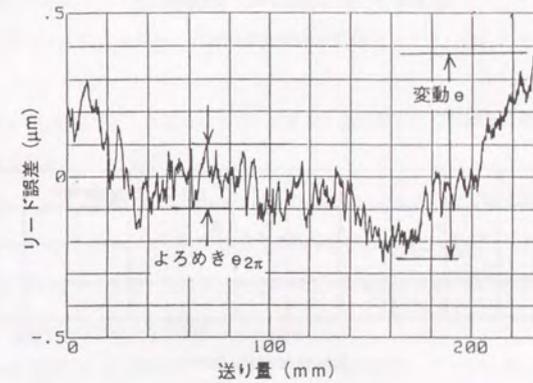


(b) Magnified cumulative lead error compensated by subtracting a typical interpolation line

図3.19 空気静圧送りねじの送り精度 (I)



(a) 累積実リード誤差



(b) 累積代表リードで補正、拡大

図3.20 空気静圧送りねじの送り精度 (II)

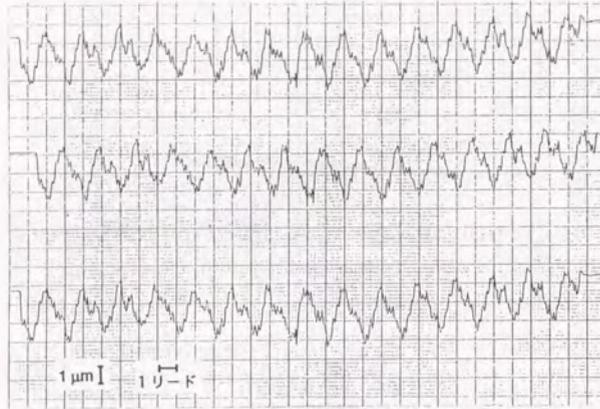


図3.2.1 ねじ軸単体のピッチ誤差

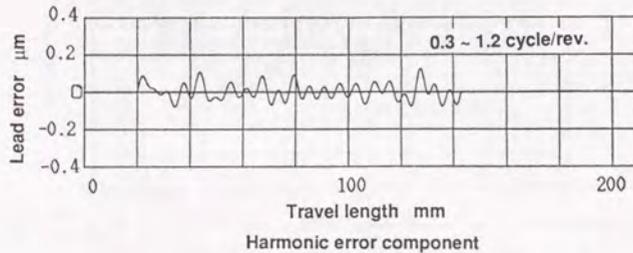


図3.2.2 周期誤差成分の抽出

3.5 ねじ送り機構の位置決め制御

3.5.1 全空気潤滑ねじ送り機構の動特性

全空気潤滑の送り機構を位置決めに応用する際の特性を把握することを目的に、3.3.3節で述べた空気潤滑一軸テーブルにDCモータを取付け、動特性の測定を行なった。実験系を図3.2.3に示す。DCモータには、小型で大きなトルクが得られ、トルク変動の比較的小さいプリントモータを用いた。従って、系にはモータロータを支えるボールベアリングの転がり摩擦、および、ブラシの微小な滑り摩擦が付加されている。変位の測定には、可動部のナットに取付けた加速度ピックアップを用いた。実験は、DCモータに正弦波を加えて周波数をスイープし、加速度ピックアップの出力をFFTアナライザ(HP社製 HP 3562A)で周波数解析することにより、モータ入力からナット変位までの一巡伝達関数を求めた。空気軸受系の供給圧力は0.5 MPa (G)である。

図3.2.4に示す測定結果からわかるように、25 Hz、200 Hz、300 Hz、600 Hz、および700 Hzの近傍に共振点が観測される。ここで、25 HzはDCプリントモータの特性から計算される一次遅れである。残る各共振点は、各空気軸受への供給圧力を変化させたときの共振周波数の変化、ハンマリングによる各部、各方向の共振周波数探査などの方法により、次のように同定される。

- (1) 200 Hz：可動部(ナットとスライダ)の質量と空気静圧ねじの軸方向剛性で決まる可動部の軸方向並進モード
- (2) 300 Hz：反モータ側支持板(片持ち梁)の部材剛性で決まるねじ軸支持点での軸方向共振モード
- (3) 600 Hz：ねじ軸の質量とスラスト軸受の剛性で決まるねじ軸の軸方向並進モード
- (4) 700 Hz：ねじ軸のねじり振動モード

なお、これらの共振モードの同定は、一軸テーブルを集中質量、ダッシュポット、ばねでモデル化して4次の運動方程式を求め、ねじ軸回転からナット並進までの一巡伝達関数をシミュレートした結果と極めて良い一致が見られる[福田1990]。これは、系に固体摩擦に起因する非線形要素が非常に小さいことを如実に示す結果である。

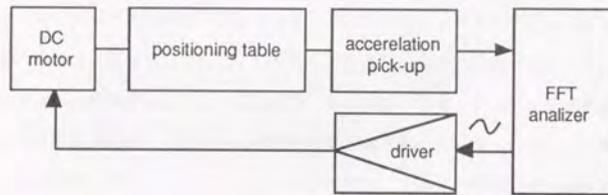


図3.2.3 一軸テーブル動特性測定のプロック図

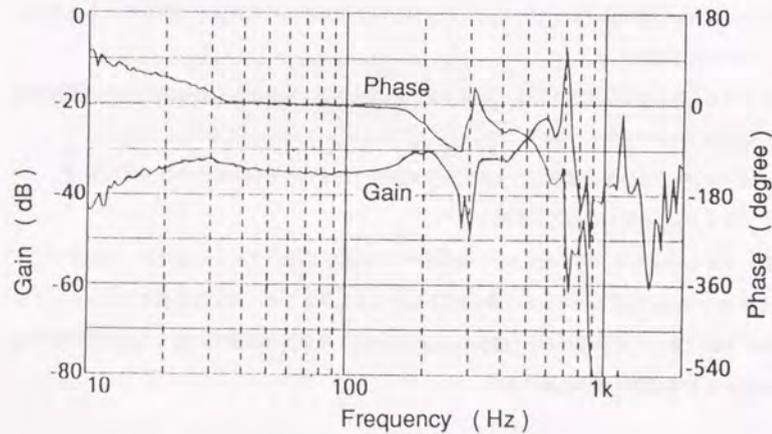


図3.2.4 モータ入力からナット変位までの一巡伝達関数測定結果

3.5.2 位置決め制御

空気潤滑ねじ送り機構は、固体摩擦による非線形要素が極めて小さい線形位置決め系である。前節の動特性測定結果から、DCモータの取付けによって若干の非線形要素は付加されるものの、この特性は維持されていると考えられる。従って、比例要素、積分要素、微分要素を制御要素とする最も一般的なフィードバック位置決め制御系（以下PID制御）が有効に適用できると考えられる。これを検証するため、PID制御による位置決め実験を行なった。

位置決め制御系のブロック図を図3.2.5に示す。直進エアスライダにプレーンミラーを取付け、レーザ干渉計（HP社製5527A System）により変位を測定する。レーザ測長の分解能は $\lambda/128 = 4.94 \text{ nm}$ である。そして、図3.2.5のブロック図に示すように、この測定変位をフィードバック量とする制御系を構成した。制御系のPID演算には市販のデジタルサーボボード（HP社製5507A option 036）を使用し、ソフトウェアサーボ制御系を構成している。サーボサンプリング周期は $250 \mu\text{sec}$ である。また位置決め特性を把握するために、制御系各点の制御量をモニタするプログラムを付加し、動作状態がトレースできるようにした。

図3.2.6に移動量 30 mm の場合の位置決め特性を示す。目標位置、モータへの制御出力（PID演算結果）、および、テーブル位置（レーザ測長位置）をトレースしている。PID要素のゲインなどの制御パラメータは前節の動特性に基づいて最適化を図ったもので、加減速等の制御条件は図中に示すとおりである。加速、定速、減速、整定の各領域が明瞭に観測され、目標位置と測定位置は同一曲線上に重なっている。ストローク 30 mm の位置決めに必要な時間は約 0.35 秒 である。

次に、微小変位の位置決め特性について実験を行なった。図3.2.7に変位 100 nm の往復ステップ送りを行ない、テーブルの変位を外部から静電容量式非接触微小変位計で測定した結果を示す。ここで、制御パラメータは先の 30 mm 送りの場合と全く同一である。この波形写真のように、ロストモーションが全く無い 100 nm の微小送りが再現性良く高速に行なわれている。このことから、本位置決め系ではゲインの切り替えなどの制御パラメータの変更無しに長ストロークから微小領域まで位置決めが可能であることがわかる。これは、系に内在する非線形摩擦要素が非常に小さいゆえに、この領域までは系の線形性が十分に保たれていることを示している。

さらに、図3.2.8は、本位置決め系で分解可能な最小ステップ変位 10 nm のステップ位置決め結果である。制御ループに組み込まれているレーザ測長計の測定変位と、外部に設置した静電容量式非接触微小変位計の出力を示している。この時の制御パラメータも先の場合と全く同一である。図3.2.8(a)のレーザ測長計の出力から、 $\pm 1 \text{ LSB}$ のフィードバック制御が正確になされている。

状況がわかる。この出力と同図 (b) の外部センサ出力と比較すると、両出力は良く一致している。その一つの現われとして、最終ステップには何らかの原因により入った外乱が、両出力に同じ波形の乱れとして観測することができる。これらの結果から、本制御法により、 10nm のステップ送りが実現されていることが明かである。なお、この微小領域においては、図 3.28 (a) の目標位置に対するテーブル追従の数十 msec の遅れ、同図 (b) のステップ変位時の立ち上がり波形の傾きから、送り機構系の特性がやや変化しているものと推定される。これは、DC モータ取付けにより付加されたボールベアリングとブラシの固体摩擦の影響によるものと考えられる。二見らがボールガイドの微小変位領域での特性として指摘 [二見 1989] しているように、数十ナノメートル領域ではボールの弾性変形が系のばね定数を支配するようになる。本送り機構においてもモータ部のボールベアリングの挙動が系の微小領域におけるばね定数を変化させ、上記の現象が現われていると考えられる。

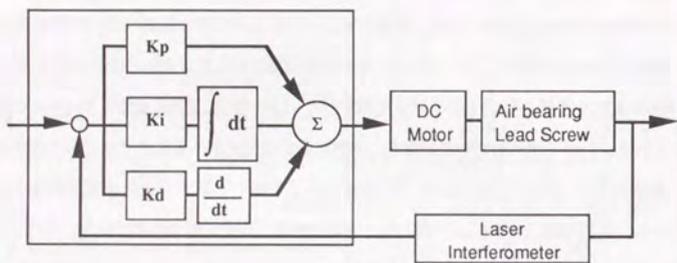


図 3.25 位置決め制御系のブロック図

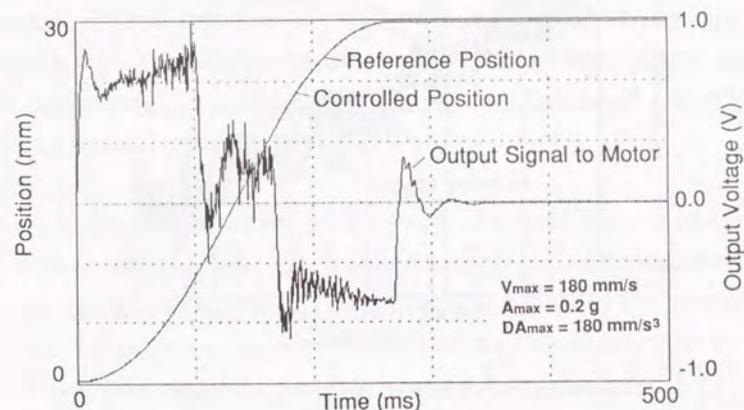


図 3.26 30mm ステップ送りの位置決め特性

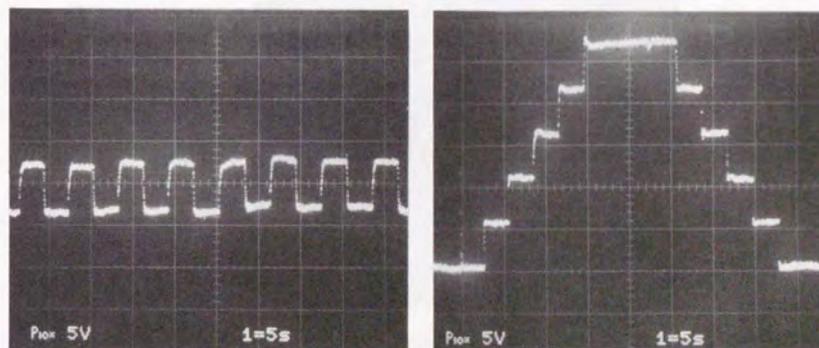
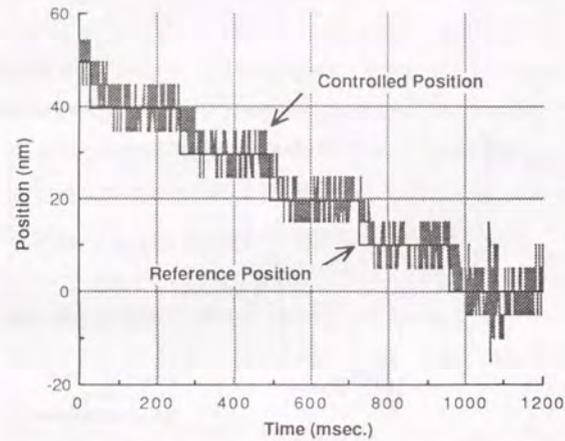
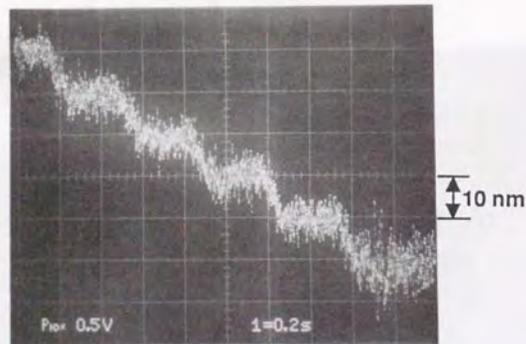


図 3.27 100ナノメートルステップの往復運動



(a) 系に組み込まれたレーザー測長計の出力トレース (分解能 $\lambda/128$)



(b) 静電容量式非接触微小変位計で外部から測定した変位特性 (1 kHz フィルタ使用)

図3.28 10ナノメートルステップ送り特性

3.6 本章の結論

セラミック多孔質体を空気軸受の紋りに用い、ねじ山を角ねじとする空気静圧送りねじを提案した。基本構造や加工法等の検討に基づいて空気静圧送りねじ、および全空気潤滑送り機構を設計・試作し、性能を評価した。空気潤滑ねじ送り機構の静特性として、軸方向静剛性と負荷容量、移動分解能、送り精度を測定した。また、送り機構にDCモータとレーザー測長計を取付け、動特性を測定するとともに、位置決め制御を試みた。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) ねじ山の形状に角ねじ、空気軸受に多孔質紋りを採用する基本構造が静圧送りねじの高剛性化に極めて有効である。角ねじ化により台形ねじに対して2~3倍の軸受面積増加が可能であり、無電解ニッケルめっき付きセラミック製の多孔質紋りを併用することで、空気静圧送りねじ用空気軸受において高剛性化に必須の狭い軸受すきまと最速紋り抵抗を実現することができる。なお、歯科用工具を用いるダイヤモンド研削が、セラミック製角ねじのフランク仕上げ加工に有効である。
- (2) 設計・試作したおねじの外径2.5 mmの空気静圧送りねじにおいて、給気圧0.5 MPa(G)で、軸方向静剛性3.2 N/ μm 、負荷容量300 Nを得、実用可能な空気静圧送りねじが実現できることを示した。
- (3) 案内、支持、駆動の全ての部分を多孔質空気軸受で空気潤滑するねじ送り機構により、静的な移動分解能5 nmを得た。
- (4) JISに規定する送りねじの送り精度として、ストローク210 mmに対して、累積代表リード誤差1.7 μm 、変動0.63 μm 、よろめき0.2 μm を得、空気潤滑により部品形状誤差に対して1桁以上の平均化効果を確認した。
- (5) 全空気潤滑ねじ送り機構は線形特性を持ち、通常のPID制御により高速、高精度な位置決めが可能であることを実験により示した。30 mmストロークを0.35秒で位置決めでき、同一の制御パラメータで10 nmの微小変位までステップ送りが可能である。

以上により、提案・試作した空気静圧ねじ送り機構が長ストローク・超高分解能の位置決めに極めて有効な手段であることを明かにした。

第 4 章

X線露光装置における精密位置決め

- 4. 1 緒論
- 4. 2 X線露光の原理とパラメータの定義
- 4. 3 解像力に対するギャップの影響
 - 4. 3. 1 半影ぼけの影響
 - 4. 3. 2 フレネル回折の影響
- 4. 4 X線露光における重ね合わせの誤差解析
 - 4. 4. 1 機械的位置合わせ誤差
 - 4. 4. 2 物理的位置合わせ誤差
 - 4. 4. 3 放射光X線露光における重ね合わせ誤差
- 4. 5 シンクロトロン放射光X線露光の生産性
 - 4. 5. 1 放射光X線パワーの計算
 - 4. 5. 2 スループットの計算
- 4. 6 本章の結論

4.1 緒論

半導体LSIの微細化, 高集積化は留まることなく進展を続けている。例えば, 代表的LSIであるDRAMの集積度は3年で4倍のペース発展を続けており, そのパターンルールの動向をプロットすると, 図4.1のように5~6年で線幅が半分となるスピードで微細化している。このような状況の中で, LSIのパターンを形成するリソグラフィ技術については, 波長400nm~200nmの紫外線を用いるフォトリソグラフィが用いられており, 短波長化と高NA化によりその適用領域を延ばしてきた。しかしながら, 早晚, 露光に用いる紫外線の波長と焦点深度で制限される解像力の限界に到達すると考えられている。1972年にH. I. Smithらが提案 [Spears 1972A, 1972B] したX線リソグラフィは, 波長1nm前後の軟X線を用いることによりフォトリソグラフィの解像限界を越える高い解像力を持ったリソグラフィ技術として注目を集め, 研究開発が活発に行われてきた。特に, 露光用のX線としてシンクロトロン軌道放射光 (Synchrotron Orbital Radiation) を用いれば, その高輝度, 高い指向性, 高安定性, 選択可能な広いスペクトルなどの特徴を有効に利用することにより, 次世代の高性能リソグラフィ技術を実現できる可能性を有している [Haelbich 1983, Heuberger 1988, Kitayama 1989, Warlaumont 1989]。

しかしながら, このような微細領域のリソグラフィにおいては, 微小なパターン幅に応じた厳しいパターンの重ね合わせ精度が要求される。パターンの線幅と重ね合わせ余裕度はLSIの高集積化によって同じ効果を持ち, 重ね合わせ精度の向上は極めて重要な位置づけにある。これまでの重ね合わせ性能の実績を図4.1から読み取ると, パターンルール2 μm ~サブミクロンに対して重ね合わせ精度 $\pm 0.4\mu\text{m}$ ~ $\pm 0.2\mu\text{m}$, 即ち最小線幅の1/5が達成されてきており, 現状のパターンルールである0.6 μm ~0.5 μm においては, 最小線幅の1/4程度の $\pm 0.15\mu\text{m}$ という状況である。位置合わせの難しさから最小線幅に対する合わせ余裕の割合は徐々に大きくなってきているものの, 将来のクォータミクロンルール時代には, 最小線幅の1/3程度, 即ち, 重ね合わせ精度 $\pm 0.1\mu\text{m}$ ~数十ナノメートルが要求されることになろう [Ishihara 1988]。

一方, X線露光はX線吸収体のパターンをX線を透過する薄膜上に形成したX線マスクをウエハに近接させて配置し, 軟X線によってウエハ上のレジストを露光する1:1近接露光法である。このため, 解像力はマスクとウエハのギャップに強く依存する。また, マスクとウエハの機械的な位置決め, 位置合わせの精度がマスク上のパターン配置精度とともにパターンの重ね合わせ精度を強く支配する。フォトリソグラフィではマスク上のパターンを屈折光学系でウエハ上に縮小投影するので,

マスクの位置決め要求精度は縮小倍率の分だけ緩和される。また, 電子ビーム直接描画では, ウエハ上のマークの位置を基準にして電子ビームの偏向によりパターン描画位置を制御できるのでウエハ自体の位置決め要求される精度は比較的緩い。これらに比べて, X線露光におけるマスクやウエハの位置決め精度は, 1:1でパターンの重ね合わせ精度に反映されるため, 位置決め要求される精度は非常に厳しいものとなる。

本章では, X線露光における, 解像力, 重ね合わせ精度, 生産性を支配する要因について論じ, X線露光装置において機械的位置決め要求される条件を明かにする。

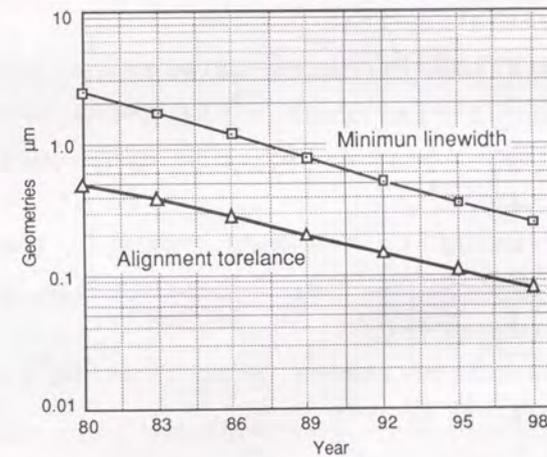


図4.1 LSIのパターンルールと合わせ余裕度の変遷と動向

4.2 X線露光の原理とパラメータの定義

X線露光の基本原理を図4.2に示す。X線マスクは、X線を透過する薄膜上にX線を吸収する重金属のボタンを形成したものである。露光の原理は単純で、X線マスクをレジストを塗布したウエハに近接させて平行に配置し、X線マスクの上方から波長 1nm 前後の軟X線を照射する。マスク上のX線吸収体のボタンの影がウエハ上に投影され、透過したX線がウエハに塗布されたレジストを露光する。各種回路図形を層状に形成する集積回路のボタン転写では、既にウエハ上に形成されているボタンに対して、露光するボタンの位置合わせが必要である。

X線露光の性能を論じるための基本的パラメータを図4.3を用いて定義する。X線源とマスク間の距離を $D(\text{mm})$ 、マスクとウエハ間のギャップを $g(\mu\text{m})$ とする。

- (1) X線源がスポット径 $2r(\text{mm})$ の有限な大きさを持っているとき、マスク上で光源スポットを見込む角を $\kappa(\text{rad})$ とすると、 $\kappa=2r/D$ である。このとき、マスク上の点はある広がりを持ってウエハ上に投影され、この拡がりを半影はけ δ と呼ぶ [Spears 1972A, 石原 1980]。この δ は解像力を支配するパラメータである。
- (2) マスクに入射するX線がマスク面の法線に対してある入射角 ϕ の方向から入射されると、マスク上の点はウエハ上である量だけ面方向にシフトした点に投影される。この位置シフトをランアウト ζ と呼ぶ [McCoy 1976, 石原 1980]。この ζ は、転写ボタンの位置精度に関係するパラメータである。
- (3) シンクロトロン放射光を用いると、その強い指向性と可干渉性のために、X線吸収体のエッジでフレネル回折が起こる。回折したX線がウエハ上である広がり ϵ を持ち、互いに干渉するために解像力に強い影響を与える。

以上がX線露光の基本性能を支配する基本パラメータである。これ以外の各種パラメータはその都度、必要に応じて定義して用いることとする。

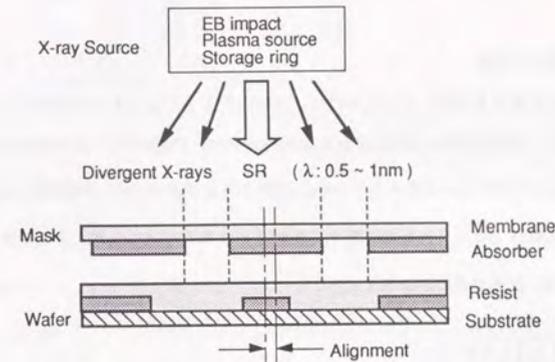


図4.2 X線露光の原理

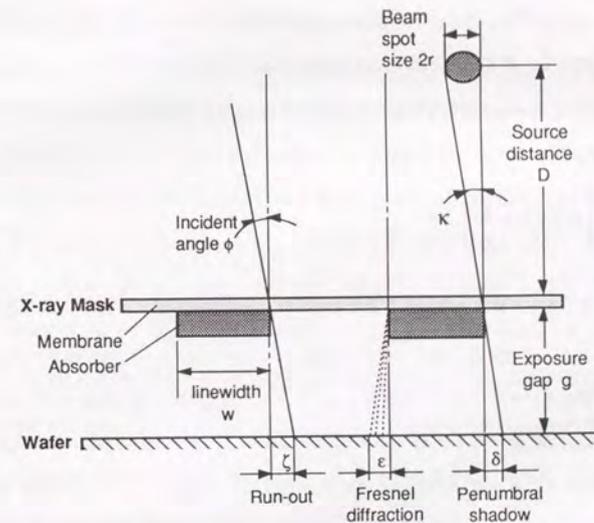


図4.3 X線露光における主要パラメータ

4.3 解像力に対するギャップの影響

4.3.1 半影ぼけの影響

X線露光において解像力を制限する主な要因は、光源の大きさに起因する半影ぼけ、マスク吸収体のエッジにおけるフレネル回折、X線の照射によりレジストや下地基板から放出される二次電子、およびX線に対するマスクのコントラストである。半影ぼけ δ の大きさは、線源のスポット径 $2r$ 、線源とマスクとの距離 D 、マスクとウエハ間のギャップ g 、あるいはマスク上より光源スポットを見込む角度 κ により、次式で表わされる。

$$\delta = 2r \left(\frac{g}{D} \right) = \kappa g \quad (4.1)$$

点光源からの発散X線を用いる場合には、(4.1)式で半影ぼけを表わせることは幾何学的に明らかである。そして、電子線励起X線源やプラズマX線源を用いるX線露光では、この半影ぼけが解像力を支配する最大の要因とされてきた[石原1980, Une1987]。

シンクロトロン放射光を用いる場合の半影ぼけを求めるためにはマスクに入射する放射光の立体角を評価する必要がある。図4.4の模式図により放射光の指向性について検討する。まず、縦方向の放射光の角度分散はGaussian分布で近似され、放射角 ψ (rad.)の標準偏差 σ (rad.)は次式で表わされる[Winick1982]。

$$\sigma = \frac{1}{\gamma} \left(0.2 + 0.4 \frac{\lambda}{\lambda_c} \right) \quad (4.2)$$

ここに、 γ は相対エネルギー係数と呼ばれる量であり、リングの電子蓄積エネルギーを E 、電子の質量を m 、光速を c としたとき $\gamma = E/mc^2$ で表わされる。また、 λ_c はリングの放射光スペクトルを決める臨界波長と呼ばれるパラメータで、蓄積電子のエネルギー、軌道半径、偏向磁場の強さで決まる。リソグラフィに適した波長である1nm近傍の軟X線領域にピークを持つSuper-ALIS[Hosokawa1989]を光源に想定して、 $E = 0.6 \text{ GeV}$ から $\gamma = 1.2 \times 10^3$ 、 $1/\lambda_c = 1/3$ を代入すると、 σ は 0.28×10^{-3} となる。Gaussian分布で広がる光束の広い範囲が露光に寄与するとして 3σ まで考慮しても、放射光のマスクへの縦方向の入射角 κ は1mrad以下と極めて小さいことがわかる。

次に、横方向については、図4.4においてリング内で光速に近い速度で運動する電子から角度 θ

で放出される放射光の持つ角度 ϕ (typical opening half angle)は次式で与えられる[Winick1982]。

$$\tan \phi = \frac{\sin \theta}{\gamma(\beta + \cos \theta)} \quad (4.3)$$

ここに、 γ は前出の相対エネルギー係数、 β は電子の速度と光速の比 v/c でほぼ1である。従って、電子軌道の接戦方向($\theta = 90^\circ$)では、 $E = 0.6 \text{ GeV}$ において $\phi = 1/\gamma = 0.85 \text{ mrad}$ となる。

まず、図4.5に示すような最も単純なビームラインの場合を考える。光源から $D \text{ mm}$ 離れたマスク上にいる観測者には、もし、 $2D\phi > 2r$ ならば電子軌道の半径方向に $2r \text{ mm}$ 離れた位置2点から放出される光を同時に、つまり光源スポット全体を観測できる。いまX線露光要の光源として設計されたリングSuper-ALISでは、光源スポット径が 2 mm 程度なので、上記の条件を満たす線源距離は、 $D > (2/1.7) \times 10^3 = 1,180 \text{ mm}$ となる。通常のビームラインはこれよりも長くなるので、半影ぼけの量は式(4.1)で $\kappa = 2\phi$ として評価でき、次式で表わされる小さい値となる。

$$\delta = 2\phi g \quad (4.4)$$

しかしながら、ビームラインで横方向の放射光が集光された場合には半影ぼけを考慮する必要が出てくる。図4.6は、X線ミラーの反射によって放射光を集光するビームラインの構成例である。放射光の集光角を $2\theta_0$ とし、マスク面上から光源スポット全体を見込む角度を評価する。いま、光源で $2\theta_0$ の角度分散を持った光を露光領域 $2R$ に集光したとき、露光領域のマスク面に $2\theta'$ の広がり角を持った光が入射するとする。ビームライン集光光学系の構成をマスク面に入射する光束によって、平行系、収束系、発散系に分類し、各光学系においてマスク面上から光源スポット全体を見込む角度 $2\theta'$ を作図すると、図4.7のようになる。ここに、 L_0 は光源と集光ミラーの距離、 L_1 は集光ミラーとマスクの距離、 L_2 は集光ミラーの焦点距離である。一方、集光角 $2\theta_0$ と露光フィールド $2R$ の関係を同じパラメータで作図すると図4.8のように表わされる。これらから、図4.7における θ' と r の比は、図4.8における θ_0 と R の比と同じであることがわかる。即ち、光学系の構成に無関係に $\theta'/r = \theta_0/R$ が成り立ち、半影ぼけは集光角と露光フィールドの比により、

$$\delta = 2\theta'g = 2r \left(\frac{\theta_0}{R} \right) g \quad (4.5)$$

で表わすことができる。線源スポット径 $r=2\text{mm}$ 、露光フィールド $2R=25\text{mm}$ とし、マスク・ウエハ間のギャップをパラメータとして半影はけの量を計算した結果を図4.9に示す。これからわかるように、放射光を光源としてもビームラインに集光光学系を導入すると、半影はけは無視できない大きさとなり得る。ただし、現状で最大集光可能と考えられる 50mrad (約3度)の集光を行なっても、ギャップ $30\mu\text{m}$ で半影はけは 60nm であり、解像力への影響としては後述のフレネル回折の方が大きい。もし、将来的に、非常に強いウエハ上のX線強度が得られる大角集光を用いたり、 $0.1\mu\text{m}$ 以下の極微細パターンを露光しようとする場合には、半影はけも無視できない解像力支配要因として考慮する必要がある。

ここで露光に要する時間を考えてみると、ウエハ上のX線の強度は集光角に比例するため、レジスト感度を一定とすると露光時間は $1/\theta_0$ に比例する。すなわち、図4.9に細線で示す露光時間を見ればわかるように、解像力と露光時間はトレードオフの関係となっている。従って、高い解像力と生産性を両立させるためには、マスクとウエハ間の狭いギャップを実現することが唯一の方法であることがわかる。

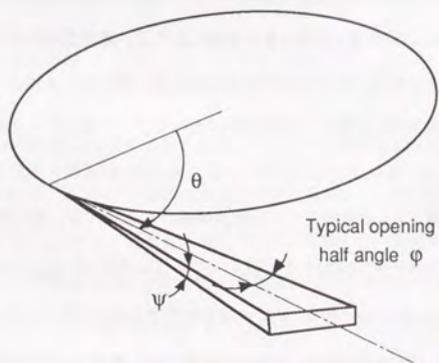


図4.4 シンクロトロン放射光の指向性

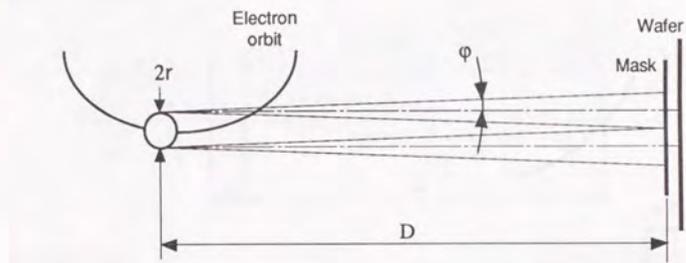


図4.5 単純ビームライン

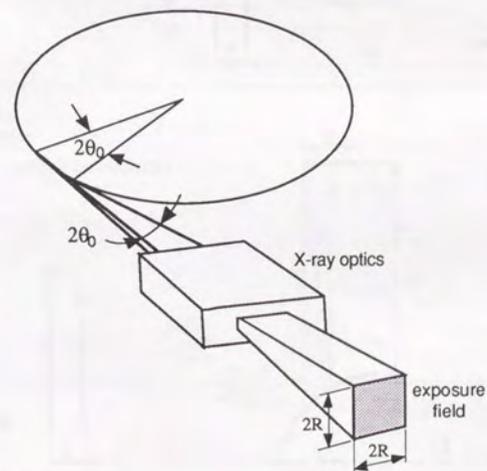


図4.6 X線ミラーによる集光ビームライン

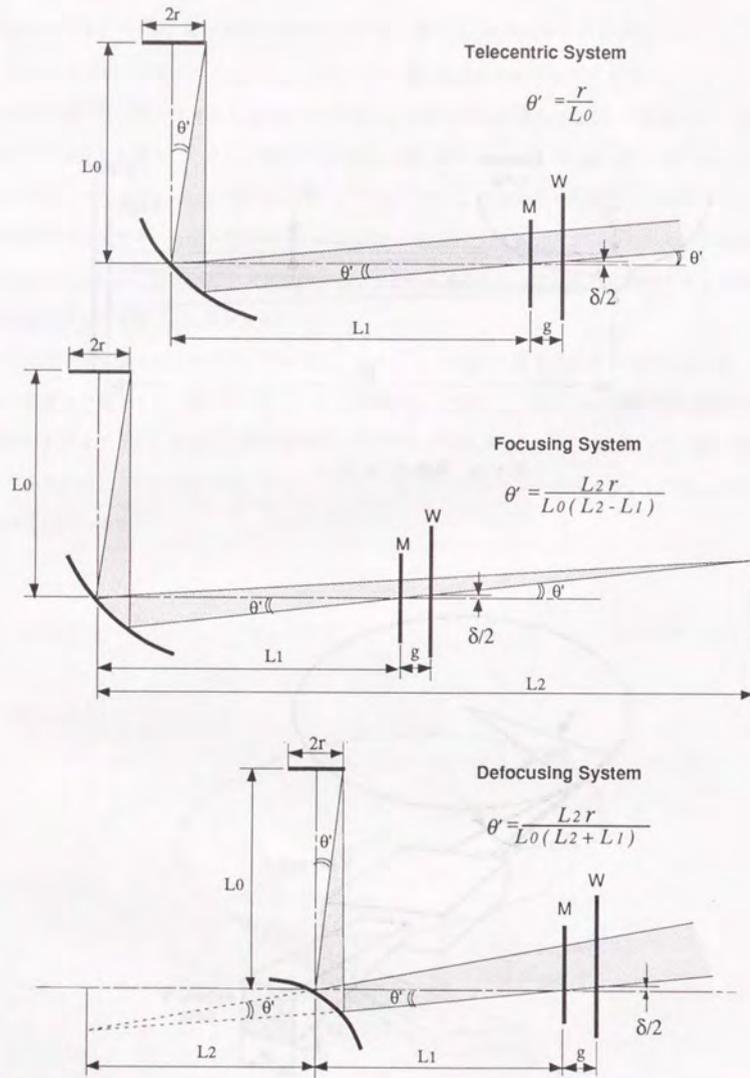


図4.7 光源スポットを見込む角

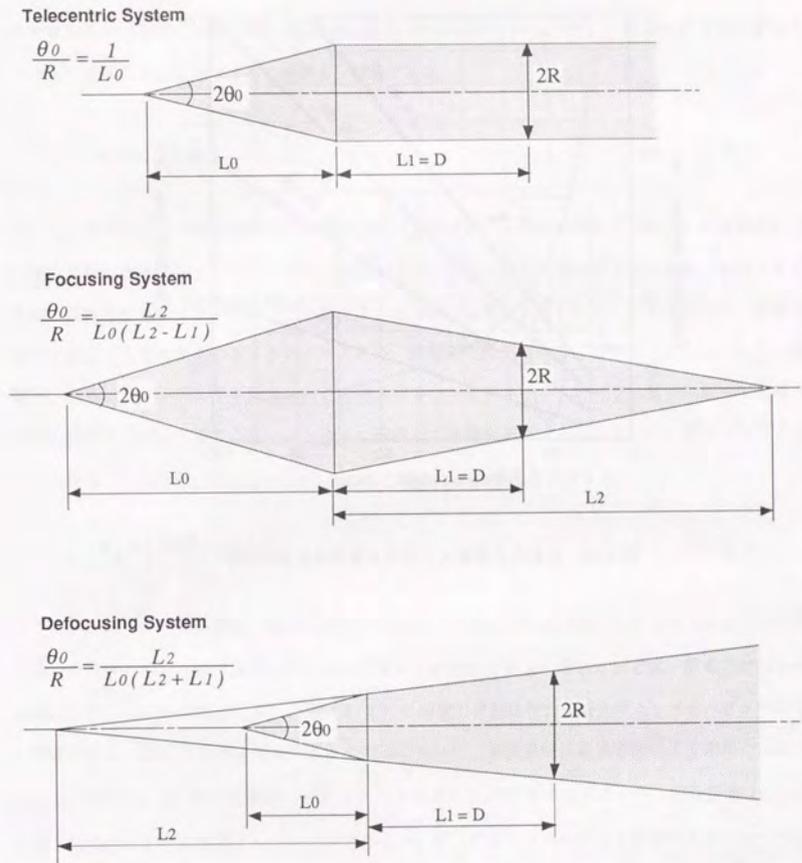


図4.8 集光角と露光フィールドサイズ

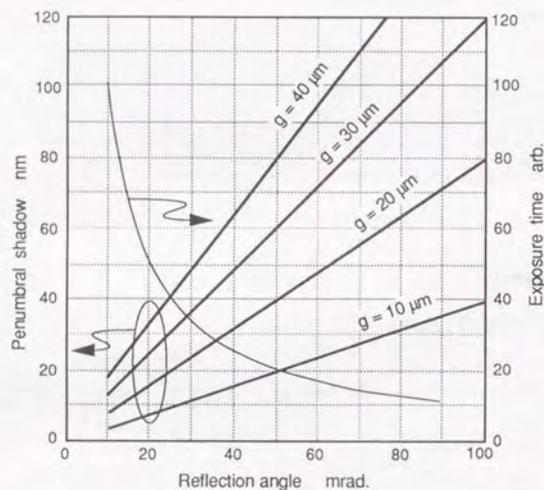


図4.9 放射光X線露光における集光角と半影はけ

4.3.2 フレネル回折の影響

シンクロトロン放射光は強い指向性を持った可干渉性の光なので、マスク上のX線吸収体エッジにおいてフレネル回折が起こり、解像性に影響を及ぼす。フレネル回折の解像力への影響は種々検討がなされているが [Atoda 1983, Silverman 1983, Suzuki 1989, Oertel 1991], 解像可能な最小線幅を w とし次式によって近似するのが最も一般的である。

$$w = A \sqrt{\frac{g\lambda}{2}} \quad (4.6)$$

ここに、 A はレジストの特性などで決まる定数、 g はマスク・ウエハ間のギャップ、 λ は露光に寄与するX線の波長である。このように、解像力はギャップと波長の積の平方根に比例して低下するため、短波長を用いて狭いギャップで露光するほど高い解像力が得られる。しかしながら、短波長側では照射するX線が高いエネルギーとなるため、基板から放出される二次電子（オージェ電子、光電子）が増加してレジストを露光し、この結果解像力を低下させる。オージェ電子に比べて光電子の発生効率の方がはるかに大きいことから、解像力の限界を基板から放出される光電子のレジスト中での飛程で代表させ、次のようにグルンレンジ R_g で表わすことができる。

$$R_g = \left(\frac{0.046}{\rho} \right) E_p^{1.75} \quad (4.7)$$

ここに、 ρ はレジストの密度、 E_p は光電子のエネルギーで照射されるX線のエネルギーから電子の結合エネルギーを差し引いた量である。これは、エネルギーの低い長波長を用いるほど高い解像力が得られることを示している。式(4.6)、式(4.7)の解像力波長依存性を露光ギャップをパラメータとして図示すると図4.10のようになる。この図において、長波長側は露光実験により求めた実験式 [Suzuki 1989] で、 $g\lambda$ のべき乗は $1/2$ よりやや小さい $1/2.3$ となっている。短波長側はレジストをPMMAとしたときのグルンレンジである。いま、マスクコントラストやビームラインでのX線の減衰抑制などの点で有利な波長帯 $0.7 \sim 1 \text{ nm}$ を用いるとき、解像限界は露光ギャップ $50 \mu\text{m}$ で $0.2 \mu\text{m}$, $30 \mu\text{m}$ で $0.15 \mu\text{m}$ となることがわかる。

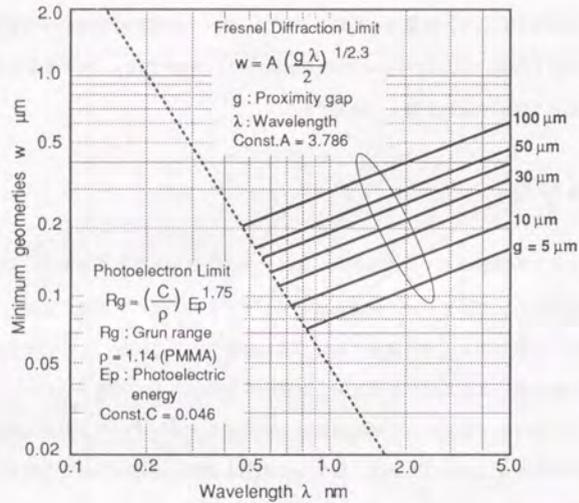


図4.10 放射光X線露光の解像力波長依存性

以上、解像力に対する露光ギャップの影響をまとめると、次のとおりである。

- (1) 点光源においてウエハ上のX線強度を上げるために線源距離を近づけると半影はけが大きくなって解像力が低下する。放射光を用いると線源距離を長くとれるために半影はけを極めて小さくできるが、X線強度を上げるための集光を行なうと無視できない半影はけが生じ得る。結局、生産性を確保したまま解像力を上げるためには、機械的に露光ギャップを狭くすることが唯一の方法である。
- (2) 放射光X線リソグラフィにおける最大の解像力支配要因は、X線吸収体エッジにおけるフレネル回折であり、露光波長と露光ギャップがその量を決める。露光波長はマスクコントラストの確保やレジスト中での光電子のエネルギーなど別の要因で決められるため、高い解像力を得るには必然的に狭い露光ギャップが要求される。

4.4 X線露光における重ね合わせの誤差解析

4.4.1 機械的位置合わせ誤差

ウエハ上に転写されたバタン相互の位置ずれは、種々の原因による誤差が累積されたものである。始めに機械的な位置決め誤差によって発生するバタンの位置ずれについて幾何学的な解析を行なう[石原 1980]。

まず最も一般的な解を求めるために、点光源からの発散X線によるX線露光の場合の幾何モデルと座標系を図4.1.1に示す。ウエハの中心を原点とする直交座標系を図のように設定し、理想的な平面をもつ剛体のマスクとウエハをあるギャップをもって配置したとき、マスク上の極座標で表わした点 $P(R, \theta)$ がX線に対する影としてウエハ上の点 P' に投影される。いま、異なる露光レベル間でのマスクのウエハに対する相対位置誤差を互いに独立な軸ごとに、並進変位の $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 、各軸まわりの回転で表わされる姿勢誤差の $\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\theta$ とする。これらの誤差がウエハ上で引き起こす位置ずれ誤差は以下のように表わされる。

- (1) X線の中心光軸(Z軸)に垂直な平面内の位置誤差 $\Delta x, \Delta y$ は、そのまま露光フィールド全体に一樣なバタンの並進位置ずれベクトル Δv を生じる。(図4.1.2-a, b)

$$\Delta v = (\Delta x, \Delta y) \quad (4.8)$$

- (2) Z軸まわりの回転誤差 $\Delta\theta$ は、円周の接戦方向に半径 R に比例して露光フィールドの外周にいくほど大きくなるバタンの位置ずれベクトル Δt を生じる。(図4.1.2-c)

$$\Delta t = (-R \sin\theta \Delta\theta, R \cos\theta \Delta\theta) \quad (4.9)$$

- (3) マスクに入射するX線がある入射角 ϕ を持っている時、図4.3で示したようにマスクバタンは半径方向に ζ だけシフトした位置に転写される。このランアウトは、X線入射角 ϕ あるいは線源距離 D と露光ギャップ g により、 $\zeta = \phi g = (R/D)g$ で表わされる。ランアウト自体は再現性があればバタンの位置ずれとならないが、ギャップが露光レベル間で Δz だけ変化すると、半径方向の位置ずれ Δr_z が生じる。これをランアウト誤差と呼ぶ。(図4.1.2-d)

$$\Delta r_z = \left(\frac{R \cos\theta}{D} \Delta z, \frac{R \sin\theta}{D} \Delta z \right) \quad (4.10)$$

- (4) ウエハ面に対するマスク面の傾き誤差 $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ は二種類の位置ずれ誤差を引き起こす。一方は, $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ に伴って生じるギャップ変化によるランアウト誤差で, 次式で表わされる。
(図4.12-e, f)

$$\Delta r_\alpha = \left(\frac{R^2 \sin\theta \cos\theta}{D} \Delta\alpha, \frac{R^2 \sin^2\theta}{D} \Delta\alpha \right) \quad (4.11)$$

$$\Delta r_\beta = \left(\frac{R^2 \cos^2\theta}{D} \Delta\beta, \frac{R^2 \sin\theta \cos\theta}{D} \Delta\beta \right) \quad (4.12)$$

他方は $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ で面内の並進方向に生じるいわゆるコサイン誤差で, $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ が小さい値であるとして,

$$\Delta y_\alpha = \left(0, -2R \sin\theta \left(\frac{\Delta\alpha}{2} \right)^2 \right) \quad (4.13)$$

$$\Delta x_\beta = \left(-2R \sin\theta \left(\frac{\Delta\beta}{2} \right)^2, 0 \right) \quad (4.14)$$

で表わされる。このコサイン誤差は $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ についての2次の項であり, 他の誤差要因に比べて十分に小さいと考えてよい。

以上より, マスクがウエハに対して空間的に誤差を持って位置決めされたとき, ウエハ上の転写パターンに生じる位置ずれ $\Delta\varepsilon$ は, 次のような誤差成分のベクトル和となる。

$$\Delta\varepsilon = \Delta v + \Delta t + \Delta r_z + \Delta r_\alpha + \Delta r_\beta \quad (4.15)$$

図4.13は, 式(4.15)で表わされる位置ずれを図中に示した各軸方向の誤差成分に対して2次元, および3次元表示したものである。これから, 機械的位置決め誤差によって生じる位置ずれには以下の性質があることがわかる。

- (1) マスクあるいはウエハの面方向誤差 Δx , Δy , $\Delta\theta$ に対してギャップ方向誤差 Δz , $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ が引き起こす位置ずれは, パラメータ R/D 倍だけ小さい。従って, 面方向に対してギャップ方向に要求される位置決め精度はパラメータ R/D で決められる値だけ緩和される。
- (2) 露光フィールドの大きさ R は, ギャップ設定(並進 z)と姿勢制御(面内回転 θ , および傾

き α, β) への要求精度を示すパラメータであって, 露光フィールドが大きくなるほど厳しい位置決め精度が要求される。

- (3) 位置ずれの現われ方は, 露光領域内の角度位置に対して周期的である。

各誤差要因は互いに独立な制御軸方向にとっているのので, 引き起こされる位置ずれ誤差は独立事象と見なせる。各軸方向の位置決め誤差が正規分布に従う確率で発生すると考えると, ウエハ上に発生する位置ずれの大きさは各誤差成分の二乗和となる。また, ベクトルの方向は, 通常のLSIが矩形パターンで設計され, XY方向の位置ずれを問題にするため, 合成ベクトルの直交XY方向成分 ΔX , ΔY を考えるのが適当である。従って, 式(4.8)~(4.13)から点 P' で発生する位置ずれの大きさは, X方向, およびY方向に以下の式(4.16), (4.17)となる。

$$\Delta X = \sqrt{(\Delta x)^2 + (R \sin\theta \Delta\theta)^2 + \left(\frac{R \cos\theta}{D} \Delta z \right)^2 + \left(\frac{R^2 \cos\theta \sin\theta}{D} \Delta\alpha \right)^2 + \left(\frac{R^2 \cos^2\theta}{D} \Delta\beta \right)^2} \quad (4.16)$$

$$\Delta Y = \sqrt{(\Delta y)^2 + (R \cos\theta \Delta\theta)^2 + \left(\frac{R \sin\theta}{D} \Delta z \right)^2 + \left(\frac{R^2 \sin^2\theta}{D} \Delta\alpha \right)^2 + \left(\frac{R^2 \sin\theta \cos\theta}{D} \Delta\beta \right)^2} \quad (4.17)$$

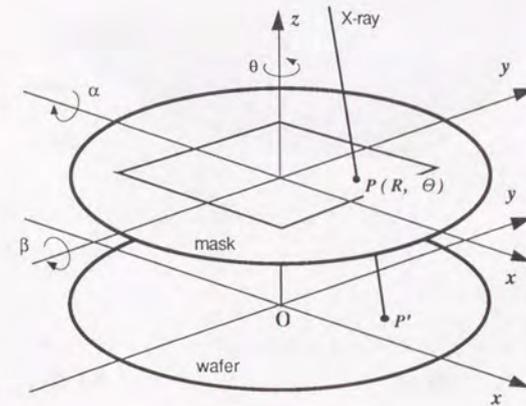


図4.11 座標系の定義

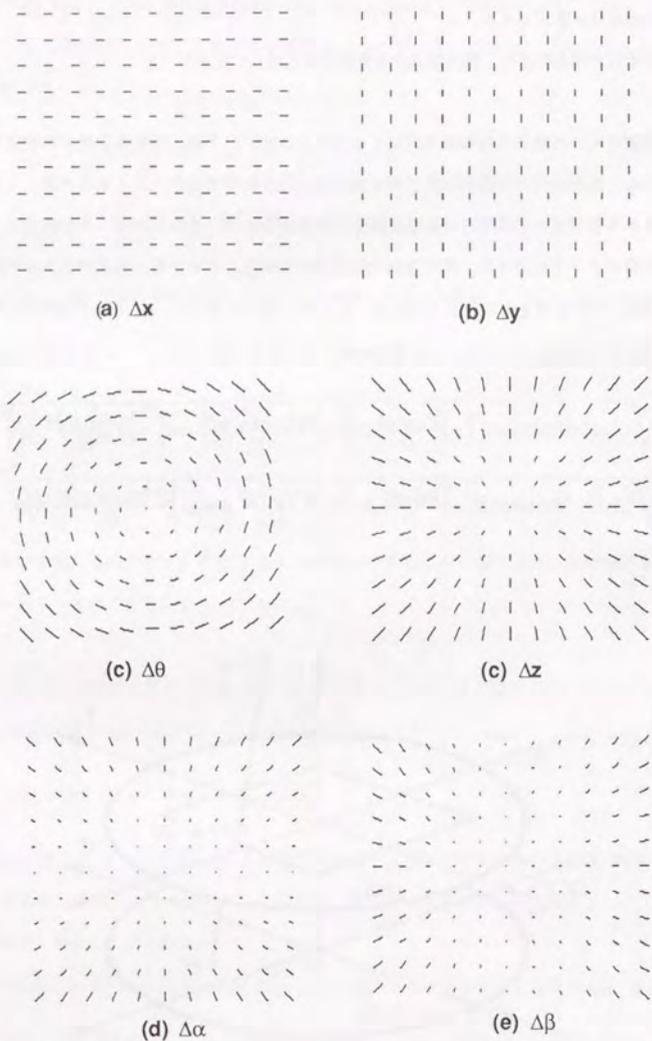
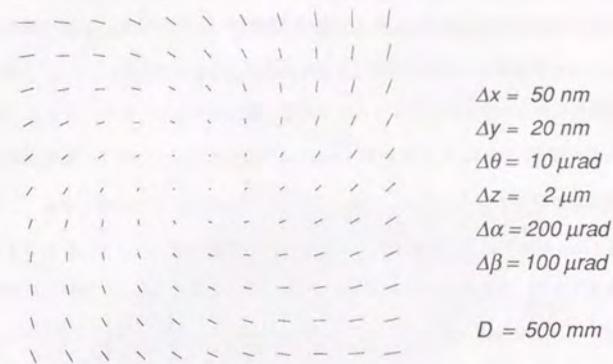
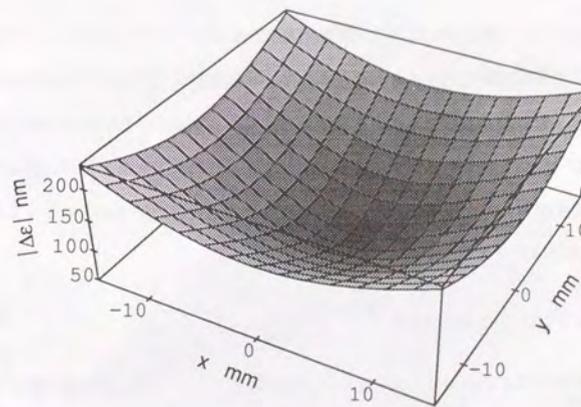


図4.12 各軸方向の誤差がウェハ上で引き起こす位置ずれ誤差の分布



2次元表示



3次元表示

図4.13 位置ずれ誤差のベクトル和

$\Delta x = 50 \text{ nm}$, $\Delta y = 20 \text{ nm}$, $\Delta \theta = 10 \mu\text{rad}$, $\Delta z = 2 \mu\text{m}$, $\Delta \alpha = 200 \mu\text{rad}$, $\Delta \beta = 100 \mu\text{rad}$,
 $D = 500 \text{ mm}$ で計算した時の位置ずれマップ

以上述べた点光源からの発散X線を想定した一般解に対して、シンクロトロン放射光を光源とした場合には、放射光の特性とビームラインのX線光学系を考慮した若干の変形が必要となる。このためには、マスクに入射するX線の入射角 ϕ の条件を検討することとなる。以下の検討において座標系は、図4.1.1を回転させ、X軸を水平、Y軸を鉛直にとるものとする。

まず、放射光出口からの光をそのままマスクまで導く最も単純なビームライン方式（図4.5）を考える。放射光の垂直方向の広がり角 ψ が 1 mrad 以下と極めて小さいので、露光領域全体を照射するために線源距離 D を大きくすると、パラメータ R/D は極めて小さい値となる。しかし、縦方向に $20\sim 30\text{ mm}$ の露光領域を照射するために数十メートルのビームラインを設けることは工業的には非現実的であり、実際にはマスク・ウエハ一体走査の方式となる。この時、Y方向のX線の入射角 ϕ は $2\sim 3 \times 10^{-4}\text{ rad}$ と非常に小さいので R/D をゼロと置き、X方向のみランアウト誤差を有効としてよい。式(4.1.6)はそのまま用い、式(4.1.7)は次のように表わされる。

$$\Delta Y = \sqrt{(\Delta y)^2 + (R \cos \theta \Delta \theta)^2} \quad (4.17)$$

次に、ビームラインにX線ミラーによる反射集光光学系を導入する方式（図4.6）では、水平X方向はX線ミラーで平行光束にコリメートできるので、X軸方向のX線の入射角 ϕ はゼロにすることができる。鉛直Y軸方向は放射光をマスク上で縦方向に拡大あるいは走査するため、Y方向にはパラメータ R/D (D はX線ミラーとマスクの距離) で表わされる入射角を持つ。従って、ランアウト誤差による位置ずれの方向は上記と逆となり、式(4.1.6) X方向を以下のように書き直し、式(4.1.7) Y方向はそのまま用いる。

$$\Delta X = \sqrt{(\Delta x)^2 + (R \sin \theta \Delta \theta)^2} \quad (4.16)$$

以上の他にもビームラインの光学系として様々な構成が考えられるが、どのような場合でも、マスクへのX線入射角 ϕ 、あるいはパラメータ R/D によりランアウト誤差の項を評価することができる。図4.1.4は、ランアウト誤差のある方向とこれを無視できる方向について露光領域の第1象限に現われるX方向の位置ずれ ΔX を比較したもので、大きな差異が認められる。しかしながらこれは差異を顕著に示すために故意に小さい線源距離で計算しているためであって、放射光を用いると点光源の場合よりも D を十分に大きくできるのでその差は大きくない。図4.1.5は、線源距離 D と

して 200 mm と 2 m を想定し、いずれもランアウト誤差のある方向の位置ずれ ΔX を比較したものである。これからわかるように、ランアウト誤差は線源距離を大きくすると急激に小さくなる。これは、X線露光装置において露光ギャップ制御に要求される再現性（ギャップ絶対量ではない）は、放射光を用いる場合には点光源の場合に比べて大きく緩和されることを示している。

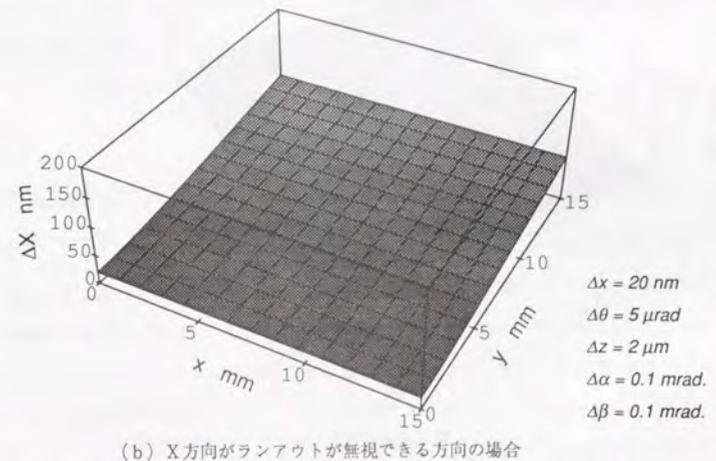
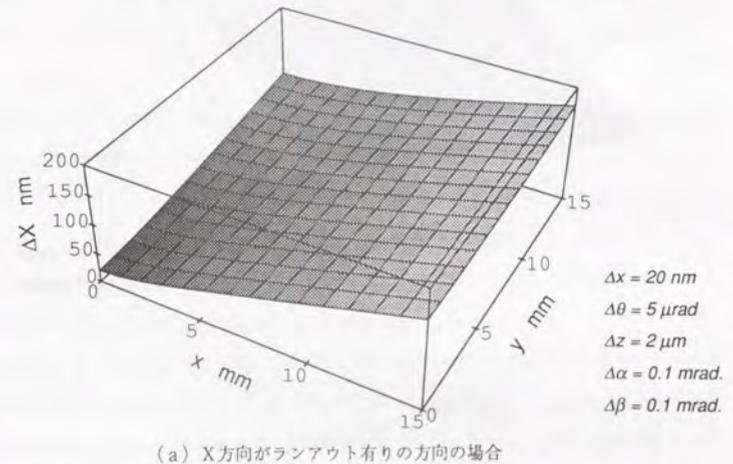


図4.1.4 ランアウト有無による位置ずれ誤差の差 ($D = 200\text{ mm}$ で計算)

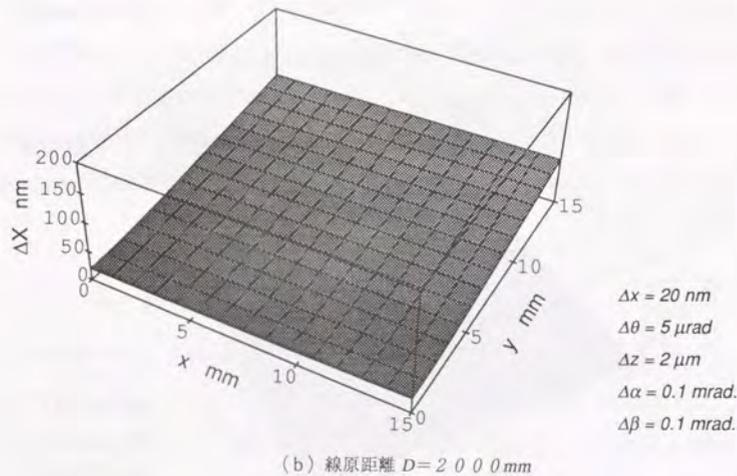
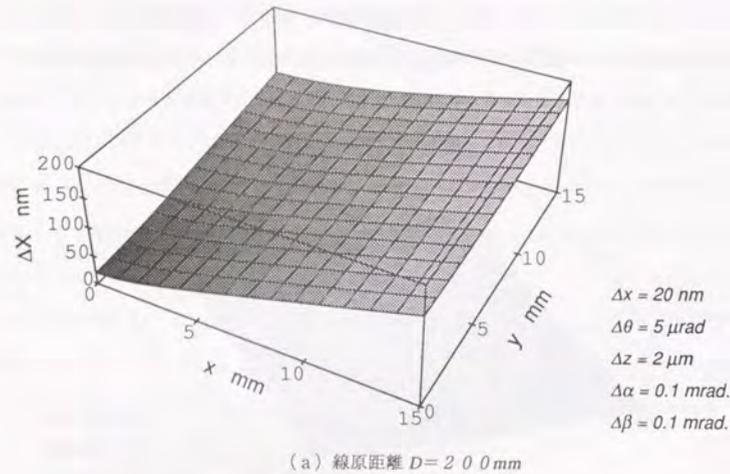


図4.15 線源距離の差によるランアウト誤差の差

4.4.2 物理的位置合わせ誤差要因

前節では理想的平面を持つ剛体の試料を仮定して位置ずれの誤差要因について論じた。実際には、試料には材料力学的要因や熱的要因等の原因による変形や歪が入っており、重ね合わせ誤差を発生する。このため、パタンの重ね合わせ精度を見積る場合、前節の幾何学的誤差に加えて、これらの誤差要因を補正項として加える必要がある。以下、各種歪に起因する位置ずれ誤差要因について考察を加える。

(1) マスク精度

異なる露光レベルのX線マスク上のパタンの間に重ね合わせの誤差があると、そのままウエハ上のパタン重ね合わせ誤差となる。従って、マスク誤差は独立した新たな誤差要因として付け加えることになる。X線マスク上パタンの位置誤差が持つ性質を明らかにするため、その構造と製造プロセスに注目する。典型的なX線マスクの構造と製造プロセスを図4.16に示す。種々のパタン位置誤差が各製造工程で発生するが、支配的な誤差要因は、電子線描画におけるパタン配置誤差、および製造プロセス中に発生するマスク基板の変形である。

電子線描画はX線マスク基板(シリコンウエハ)上の基準マークの位置を検出しながらウエハの位置、電子線の偏向角を制御することにより描画パタンの位置決めを行なう。通常、電子線の偏向により描画する領域は2mm角程度であり、試料の移動により描画フィールドをつなぎあわせてパタンを形成していく。従って、描画されたパタン位置精度は、描画フィールド間移動におけるウエハの位置決め精度、描画フィールド内の電子線の偏向精度やドリフト等で支配されており、X線露光の露光フィールド内にはランダムに分布するパタン位置の誤差を発生すると考えるのが妥当である。

$$\Delta v_{EB} = (\Delta x, \Delta y) \tag{4.18}$$

電子線描画によるパタン形成後のX線マスク製造プロセスにおいても、様々の変形が発生する。X線マスクは、X線を透過する厚さ1~2μmの軽元素メンブレン上に厚さ0.5~1μmの重金属のX線吸収体パタンが載っているという特異な構造を持っている。このため、外力や内部応力に対して非常に変形しやすい構造体である。特に図4.16の製造プロセス中、基板の中央部を裏面からバックエッチングして露光領域を含むウインドウ部を薄膜化する工程において無視できないパタンの位置ずれが生じる。これは、メンブレンとその上の吸収体薄膜に残留する応力によってシリコン基板やメンブレンに発生する歪である。形成された薄膜の内部応力により基板の薄板に発生する歪は、

図4.17のモデルから、材料力学的に次式で計算される。

$$\delta = \text{Const.} \frac{(1 - \nu^2)}{2E_s} \left(\frac{t_f}{t_s} \right) \sigma_f$$

ここに、 δ は基板側の面内歪、 ν はポアソン比、 t_f 、 t_s はそれぞれ薄膜と基板の厚さ、 E_s は基板のヤング率、 σ_f は薄膜内に残留する内部応力である。X線マスクにおける内部応力による変形はその構造と製造プロセスから二種類に大別される。一つは、シリコン基板の一部をバックエッチ除去した時にメンブレン薄膜に内在する応力が引き起こすシリコン基板の伸縮歪である。これは、ボタン位置の半径 R に比例する径方向の変位であり、見かけ上、式(4.10)のランアウト誤差と同じ性質の位置ずれを発生する。これをX線マスクの製造プロセスにおけるグローバル歪と呼び、 μ_i を係数として次式で表わす。

$$\Delta r_{GLOBAL} = (\mu_1 R \cos \theta, \mu_1 R \sin \theta) \quad (4.19)$$

ここに、 μ_1 は、1mm厚のシリコン基板を用い、2 μm 厚のSiNメンブレンにたるみを発生しない程度の引っ張り応力を持たせると、 10^{-6} オーダの値となる。

他方は、吸収体の内部応力がその基板であるメンブレン状薄膜に引き起こす歪である。これは、吸収体パタンの配置に強く依存して局部的に発生する。これをX線マスクのローカル歪と呼び、前記の電子線描画誤差と同様に露光領域内でランダムに分布する位置ずれと考えるのが妥当である。

$$\Delta v_{LOCAL} = (\Delta x, \Delta y) \quad (4.20)$$

これまでに種々のローカル歪に関する報告があるが [Yanof 1986, Ohki 1989, 1990, 1991], 面内歪の大きさは吸収体の内部応力に比例し、かつそのボタン配列の性質に強く依存する。メモリのような規則性の強いボタンでは歪は小さく、ASICのような不規則なボタンでは大きく現われる。先の材料力学モデルにおいて、2 μm 厚のSiNメンブレン、0.7 μm 厚のTa吸収体という構成で内部応力を $2 \times 10^{-8} \text{ dyne/cm}^2$ 程度に制御すると、歪は数十ナノメートルのオーダと計算される。このようにX線マスクの製作においては、X線吸収体の内部応力低減が高精度化のための重要な技術的課題である。

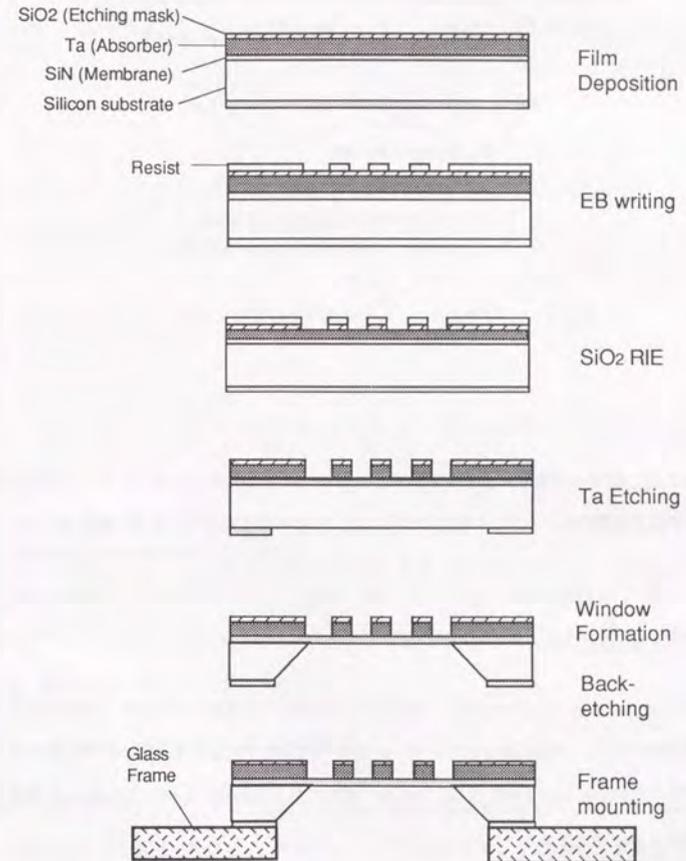
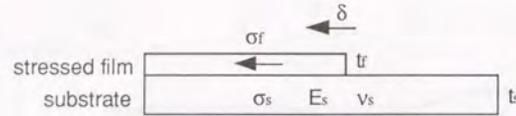


図4.16 X線マスクの製造プロセス



$$\delta = C \frac{1 - \nu_s^2}{2E_s} \left(\frac{t_f}{t_s} \right) \sigma_f$$

σ_s : stress in the film
 ν_s : Poisson's ratio for substrate
 E_s : Young's modulus of the substrate
 C : constant determined by pattern feature

図4.17 内部応力による面内歪の材料力学モデル

(2) ウエハ歪

ウエハの歪には二種類の位置ずれ誤差要因が考えられる。半導体製造プロセスにおいてウエハ表面には薄膜が高温で堆積され、ウエハにはそりが生じる。ウエハにそりがある状態で露光されると、図4.18のモデルから、 t をウエハの厚さ、 ρ をそりの曲率半径として、

$$\Delta R \approx \frac{t}{2} \left(\frac{R}{\rho} \right)$$

で計算されるパタンのピッチ変化が生じる。加えて、そりによって誘起されたギャップ変化によるランアウト誤差が生じる。真空吸着などの手段によりウエハのそりを矯正すると、先のX線マスクの場合と同様に内部応力による歪が生じる。これら二種類の誤差要因によるウエハ歪は μ_2 を係数として次式で表わすのが適当である。

$$\Delta r_{WPROC} = (\mu_2 R \cos \theta, \mu_2 R \sin \theta) \quad (4.21)$$

ウエハに $10 \sim 20 \mu\text{m}$ を越えるような大きなそりがあると、前記のピッチ変化は 10^{-5} オーダの大きな値と計算されるが、これを $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 程度の平坦度に矯正すれば、 μ_2 は 10^{-6} オーダの値となる。

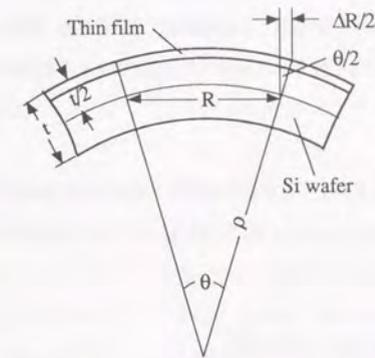


図4.18 ウエハのそりによるピッチ変化

(3) 露光プロセス中のX線マスクの熱歪

放射光をX線マスクに照射すると、マスク上の吸収体が放射光エネルギーを吸収して温度が上昇し、このためにマスクに熱歪が発生する。マスクメンブレンの熱膨張係数と温度上昇で決まる係数を μ_3 として、熱歪による位置ずれを次式で表わす。

$$\Delta r_{THERMAL} = (\mu_3 R \cos \theta, \mu_3 R \sin \theta) \quad (4.22)$$

真空中での露光では、メンブレン上に孤立した吸収体に蓄積される熱の伝導媒体がないため、マスクには非常に大きな温度上昇が生じ、無視できない位置歪が発生する [Heinlich 1983]。そこで、熱の媒体として気体を導入し、露光中にマスクに最も近接して配置されるウエハをヒートシンクとしてマスクの温度上昇を避けるという手段を取る。このマスクの冷却効果は、用いる気体の平均自由行程と圧力、および露光ギャップに比例することが実験的に確かめられている [Kaneko 1986]。圧力 50 Torr 以上、ギャップ $30 \mu\text{m}$ 以下の条件で、通常の露光以上の露光量を照射した時、X線マスクの温度上昇は、He ガスの場合約 0.1°C 、窒素ガス (空気) の場合約 0.5°C に押さえることがで

きる。この時、 μ_3 は 10^{-6} オーダーの値となる。

なお、マスクとウエハの熱膨張率が異なり、露光レベルごとに露光中の温度が異なれば、これらの膨張差に相当する分の位置ずれが発生する。これを避けるために露光雰囲気温度を常時一定に保てるように露光装置は恒温チャンバに収納して使用する。これにより、温度の変動は $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 程度に抑えられるので、温度差による位置ずれは無視できる程度に小さい値と見てよい。

(4) 試料の平坦度の影響

マスク、あるいはウエハに平坦度不良があるとランアウト誤差が発生する。この位置ずれは、(4.10)式において、平坦度不良によるギャップ変動とパラメータ R/D で決まる量を係数を μ_4 と置いて次式で表わす。

$$\Delta r_{\text{FLATNESS}} = (\mu_4 R \cos \theta, \mu_4 R \sin \theta) \quad (4.23)$$

点光源発散X線を用いる場合には、この誤差は深刻な要因となるが、放射光によるX線露光では、先に4.4.1節で述べたように、パラメータ R/D が小さい値となるので、試料の平坦度を数マイクロに抑えれば、 μ_4 は 10^{-7} オーダーの非常に小さい値となる。

4.4.3 放射光X線露光における重ね合わせ誤差

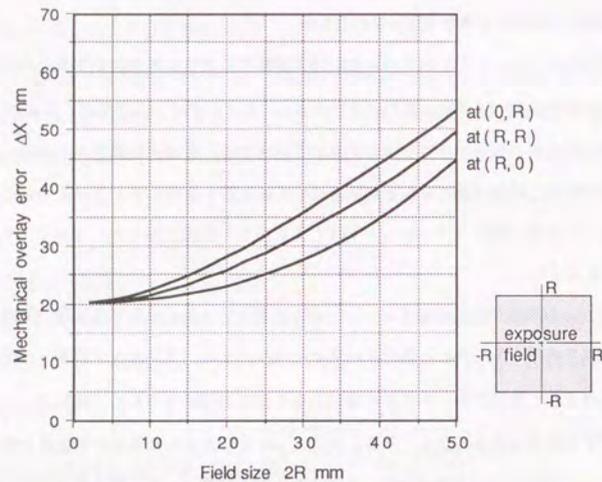
前節までの考察をもとに、シンクロトン放射光X線露光における重ね合わせ誤差の見積りを行なう。露光フィールド $2R \times 2R \text{ mm}$ をパラメータとし、ビームライン光学系は、図4.6の集光・拡大系で、X線ミラーからX線マスクまでの距離を $2m$ とする。各誤差要因の大きさとして、個別の実験値、内外の報告、経験的数値をもとに算定した結果を表4.3に示す。これをもとに全ての誤差要因を総合化した結果を図4.19に示す。いずれもX方向の位置ずれで示しており、Y方向についても同様に考えてよい。

図4.19(a)は機械的位置決め誤差によってのみ引き起こされる位置ずれ誤差、同図(b)はその他の物理的誤差要因も全て含めた総合重ね合わせ精度である。ランアウト誤差、回転誤差、多くの物理的誤差のように露光フィールド R の関数となる誤差要因があるため、露光フィールド周辺に行くほど位置ずれ誤差は大きくなる。いま、 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ を重ね合わせ誤差の限界値と考えると、図4.19(b)の位置ずれ誤差最悪値から、重ね合わせ精度を確保できる最大露光フィールドサイズは 25 mm となることがわかる。

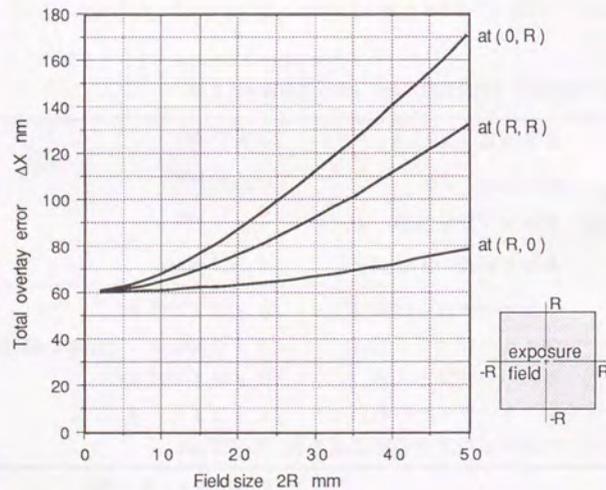
表4.3 重ね合わせ精度見積における各誤差要因の大きさ

機械的 誤差要因	並進誤差 $\Delta x, \Delta y$	$\pm 20 \text{ nm}$
	回転誤差 $\Delta \theta$	$\pm 2 \mu\text{rad}$
	ギャップ設定誤差 Δz	$\pm 2 \mu\text{m}$
	あおり誤差 $\Delta \alpha, \Delta \beta$	$\pm 0.1 \text{ mrad}$
物理的 誤差要因	マスクのグローバル歪	$\pm 4 \times 10^{-6} R$
	マスクのローカル歪	$\pm 40 \text{ nm}$ (含EB描画誤差)
	ウエハのプロセス歪	$\pm 2 \times 10^{-6} R$
	マスク・ウエハの熱歪	$\pm 1 \times 10^{-6} R$
	マスク・ウエハの平面度不良	$\pm 2 \mu\text{m}$

R: 露光フィールド半径



(a) 機械的位置決め誤差に起因する位置ずれ



(b) 物理的誤差要因も含めた総合重ね合わせ精度

図4.19 重ね合わせ誤差の見積り

4.5 シンクロトロン放射光X線露光の生産性

4.5.1 放射光X線パワーの計算

電子蓄積リングからの放射光パワーは、Schwingerの理論に基づいてGreenが導出した実用式によると、 $\psi = 0$ において次式で与えられる [Winick 1982].

$$P_0 = 3.918 \times 10^{-27} \frac{\gamma^8}{\rho^2} H_4(y) \left[\frac{\text{mW}}{\text{sec mA mrad}(\theta) \text{ mrad}(\varphi) \text{ A}} \right] \quad (4.24)$$

ρ : 電子の軌道半径

$$\gamma = E/mc^2 = 1.957 \times 10^3 E \text{ (GeV)}$$

$$H_1(y) = y^1 H_0(y), H_0(y) = K_{2/3}^2(y/2), K: \text{ベッセル関数}$$

$$y = \lambda c / \lambda = \varepsilon / \varepsilon_c, \lambda_c: \text{臨界波長}, \varepsilon_c: \text{臨界エネルギー}$$

$$B\rho = 33.35E \text{ (GeV) kGm}, \varepsilon = 12.398 / \lambda \text{ (A) KeV}$$

この式を、電子蓄積リング Super-ALIS のリングパラメータ；ビームエネルギー $E = 0.6 \text{ GeV}$ 、偏向磁場 $B = 3.0 \text{ Tesla}$ 、臨界波長 $\lambda_c = 17.2 \text{ A}$ 、を用いて計算した結果を図4.2.0に示す。これをもとに、ウエハ上のレジスト単位面積に投入される放射光のエネルギー密度を求める。ビームラインは、図4.6に示されるような理想的な集光・拡大X線光学系を想定する。いま、リングの蓄積電流が $I \text{ mA}$ の時、角度 $2\theta_0$ 、 $\psi_0 \text{ mrad}$ に放射されるパワー $P_1 = 2 I \theta_0 \psi_0 P_0$ を集光・拡大し、発光点からある距離 D にある単位面積に投入する。ビームラインやX線マスクなどでの放射光のトータル減衰率を η とし、単位を mW/sec から mJ に書き換えて、使用する波長範囲分だけ積分すると、単位面積に投入される放射光のエネルギー密度は次式となる。

$$e_0 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} 2 I \theta_0 \psi_0 P_0 \eta d\lambda \left[\frac{\text{mJ}}{\text{cm}^2} \right] \quad (4.25)$$

実際には、露光フィールドはある大きさを持っているため、上記で計算された値を露光フィールド面積で除した値がレジストに投入されるX線エネルギー密度となる。(4.25)式を用い、露光システムの構成として以下のような仮定のもとに、ウエハ上でのX線エネルギー密度 e_0 を求める。

- (1) リングの平均蓄積電流 $I = 250 \text{ mA}$
- (2) ビームライン光学系は図4.6を想定し、水平方向の集光角 $2\theta_0 = 3^\circ$ (52.4 mrad.)
また、縦発散角 $\psi_0 = 0.3 \text{ mrad.}$ を使用
- (3) ビームラインの真空系を図4.21のように想定し、各X線減衰要素を次のように仮定。
X線ミラーの反射率50%, 2枚構成
X線取り出し窓の厚さ; $Be = 25 \mu\text{m}$, $SiN = 2 \mu\text{m}$
大気圧Heの長さ = 150 cm , 空気層の厚さ = 1.5 mm
X線マスクメンブレン; $SiN = 2 \mu\text{m}$

計算結果を図4.22に示す。各要素の減衰率は、質量吸収率を μ , 比重を ρ , 厚さを t として

$$\eta = \exp(-\mu \rho t)$$

より求めている。ここで、質量吸収係数にはHenkeのデータ[Henke 1982]を用いている。また、積分した波長範囲は 0.67 nm (SiのK吸収端) から 1.8 nm である。

上記(3)の仮定によると、各減衰要素におけるX線透過率は、2枚のX線ミラーにおける反射で25%, Be窓で25%, Heで63%, SiN取り出し窓で85%, エアギャップで85%, X線マスクのSiNメンブレンで74%である。この結果、リング出口の放射光が理想的に集光された場合のパワーの約8%がウエハ上に到達し、X線エネルギー密度として約 83 mJ/cm^2 が得られる。

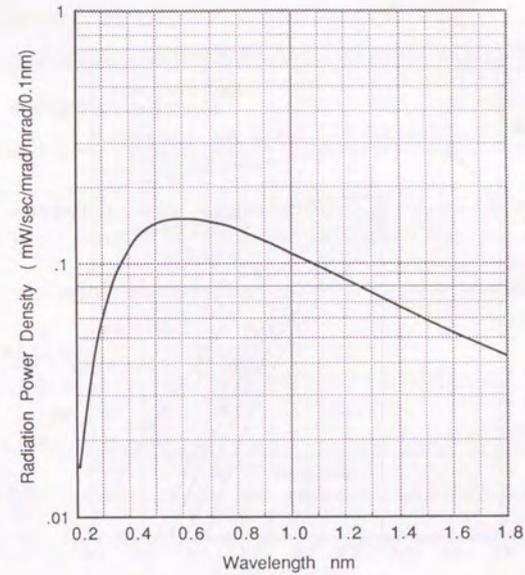


図4.20 リング出口の放射光パワースペクトル

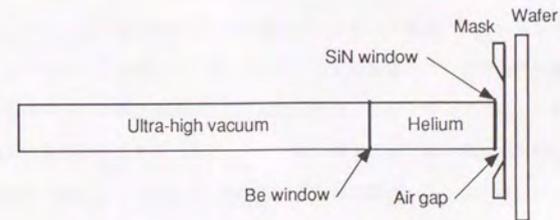


図4.21 ビームライン真空系

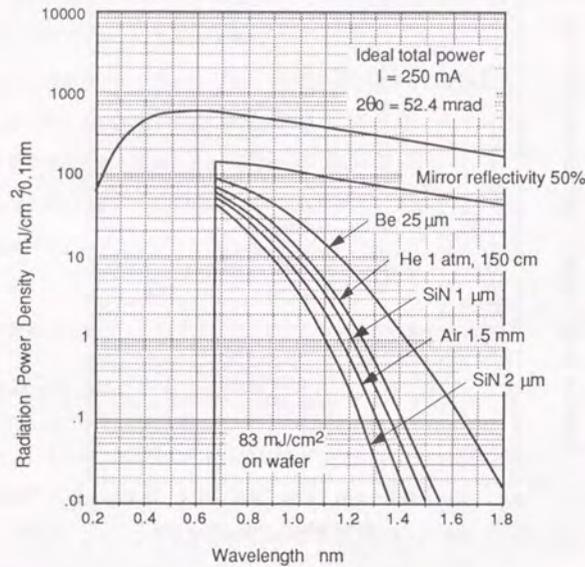


図4.22 ウエハ上のX線エネルギー密度

4.5.2 スループットの計算

前節の放射光パワーの計算結果を基に、放射光X線露光システムのスループットを求める。まず、ウエハ1枚を露光するのに要する処理時間には次のようなファクタがある。

- (1) T_{LP} : ウエハのローディングやプリアライメントなどに要する時間。露光装置の周辺機器の充実度、自動化度で決まる値である。
- (2) T_{SA} : ウエハのステップ移動時間 T_S とアライメントに要する時間 T_A の和。露光装置のウエハ位置決めステージの高速性、アライメント機構の動作速度などで決まる。
- (3) n : ウエハあたりのショット数。使用するウエハの径を D_0 インチ、ショット当たりの露光領域 (フィールド) を $2R \times 2R$ mm とすると、ショット数は概ね次式で計算される。

$$n = \frac{\pi (25.4D_0)^2}{16R^2} = 125 \left(\frac{D_0}{R}\right)^2 \quad (4.26)$$

- (4) T_E : ウエハ当たりの露光時間。まず、レジストの感度を k (mJ/cm^2) として1ショット当たりの露光時間 τ を求める。式(4.25)で求めた放射光エネルギーを露光フィールドに投入すると、ウエハ上でのX線エネルギー密度 e_1 は e_0 を露光フィールド面積で除した値となる。従って、1ショット当たりの露光時間は $\tau = kR^2 / 25e_0$ となり、ウエハ1枚当たりの露光時間は、

$$T_E = n\tau = 5D_0^2 \left(\frac{k}{e_0}\right) \quad (4.27)$$

となる。すなわち、露光時間はウエハサイズ、レジスト感度、X線エネルギー密度で決まり、フィールドサイズに無関係である。ただし、上記の計算は、一定の角度分集光した放射光がフィールドサイズの幅に照射される、すなわちフィールドサイズに応じてビームラインが最適の横方向照射幅を与えることになっている。現実には、縦方向の照射幅はフィールドサイズに合わせて変化させられるが、横方向の照射幅は露光システムの最大フィールドサイズに固定となると考えられるので、小さいフィールドを露光する場合には周辺のX線エネルギーは露光に使用されないこととなる。

以上をまとめて、ウエハ1枚当たりの処理時間は次式により計算される。

$$T_W = T_{LP} + n T_{SA} + T_E \quad (4.28)$$

計算結果を図4.2.3に示す。これからわかることは次のとおりである。

- (1) 露光フィールドを小さくするとショット数が急激に増加するため、露光装置の動作に要する非露光時間が急激に増加する。
- (2) フィールド当たりの露光時間はフィールド面積に比例して大きくなるが、ウエハ当たりの露光に要する時間は、フィールドサイズに無関係にウエハサイズ、X線エネルギー密度、レジスト感度で一義的に決まる。
- (3) フィールドを大きくしていくと処理時間は減少していくが、露光時間がドミナントになるに従って処理時間は飽和し、露光時間に収束していく。

以上の検討をもとに、具体的に、予測されるスループットを計算することができる。先に仮定した計算パラメータを基に計算したスループットを図4.2.4に示す。これからわかるように、露光フィールドを大きく取るとスループットは高くなるが、露光時間に律束されて徐々に飽和してしまう。逆に、露光フィールドを小さくしていくと、露光装置が位置決めを行なっている時間の割合が急激に増加するために、スループットは急激に低下する。このような領域では、位置決め機構の動作速度がスループットを支配するドミナントな要因となる。

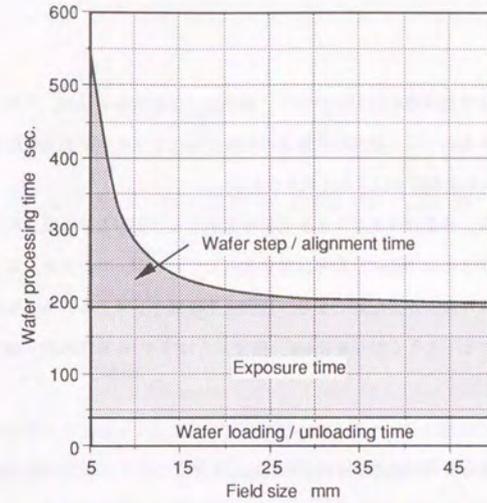


図4.2.3 ウエハ処理時間

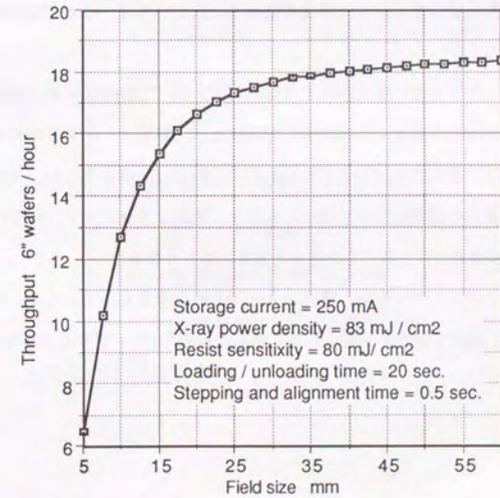


図4.2.4 スループットの計算結果

4.6 本章の結論

X線露光装置における位置決めの役割について、解像力、重ね合わせ精度、スルーブットの観点から検討し、X線露光においては、機械的位置決め性能が露光システムの基本性能を強く支配することを明らかにした。得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 解像力については、半影はけとフレネル回折を考慮する必要がある。従来の点光源からの発散X線を用いる場合には半影はけが解像力を支配していたが、シンクロトロン放射光を用いる場合にはフレネル回折が支配的となる。放射光X線露光システムにおいて解像力 $0.2\mu\text{m}$ を確保するためには、大きくても $50\mu\text{m}$ 、望ましくは $30\mu\text{m}$ 以下の狭い露光ギャップの設定が必要である。
- (2) バタン重ね合わせ誤差のウエハ面上での現われ方は、マスクとウエハの相対的な位置関係から解析される。重ね合わせ精度確保のためには、マスクとウエハ間の6軸方向の空間的位置決めが必要である。この時、面方向の位置合わせとギャップ設定の要求精度の比は、X線のマスクへの入射角で評価される。シンクロトロン放射光を用いれば、この入射角が極めて小さくできるので、ギャップ制御に要求される再現性は発散X線の場合に比べて大きく緩和される。なお、実際の総合重ね合わせ精度の見積りに当たっては、種々の物理的誤差要因も考慮する必要がある。
- (3) X線露光のスルーブットは、露光時間と非露光時間に分けて評価される。露光時間は、X線エネルギー密度、レジスト感度、ウエハサイズで決まり、露光フィールドの大きさに依存しない。非露光時間は、露光フィールドサイズのほぼ2乗に反比例するため、スルーブット確保のためには、位置決め機構によるウエハのステップ移動とアライメント動作に高速性が要求され、その要求は露光フィールドを小さくするほど厳しくなる。
- (4) 重ね合わせ精度とスルーブットは、露光フィールドの大きさをパラメータとしてトレードオフの関係があり、適用するバタン幅に応じて最適な露光フィールドサイズが存在する。

第5章

シンクロトロン放射光用X線露光装置への応用

5.1 緒論

5.2 X線露光装置の設計

5.2.1 放射光X線露光システムと露光装置の基本設計

5.2.2 位置決め制御方法の設計

5.2.3 放射光X線露光装置の構成

5.3. 放射光X線露光装置の試作と特性評価

5.3.1 空気潤滑ねじ送りによるたて形XYステージ

5.3.2 光ヘテロダイン干渉による位置ずれ計測

5.3.3 空気潤滑送り機構による位置合わせ制御

5.4 露光実験による装置性能の評価

5.4.1 解像力の評価

5.4.2 位置合わせ精度の評価

5.4.3 テストデバイスの露光実験

5.5 本章の結論

5.1 緒論

X線露光装置は、X線マスクとウエハを近接させて平行に配置し、マスク上のボタンをウエハに転写するための装置で、最も重要な機能はマスクとウエハの位置合わせ（アライメント）である。ウエハのサイズが小さかった初期には、ウエハの全面を一度に露光する一括露光方式もとられていた[石原 1980, Yamazaki 1978, 1979, 1980, 山崎 1980, Fay 1986]が、ウエハが大口径化しX線マスクの精度が問題にされるようになってからは、ウエハを順次ステップ移動させながらマスクボタンを逐次転写していくステップアンドリピート方式が採用されている。装置の構成要素としては、X線源が時代とともに変遷してきた。初期には、電子線をターゲットにあてて特性X線を励起する電子線励起形を用いるX線露光装置が試作された[Yamazaki 1978, 石原 1980, 山崎 1980, 吉原 1981, Kinoshita 1982, Hayasaka 1985, Macclintosh Jr 1986, Fay 1987, Suzuki, K. 1987]。その後、ウエハ上のX線強度の向上を狙ってプラズマX線源の開発が進められ[Economou 1981, Okada 1984, Yoshihara 1986]、これを搭載したX線露光装置の開発が行われた[Une 1987, 宇根 1987, 1988, 谷口 1989C, Taniguchi 1989]。しかしながらいずれのX線源を用いても十分なX線強度が得られず、実用的なスルーブットが達成できる見通しが得られなかった。このため、これまでのX線露光装置は実験室で研究用に利用する装置の域を出ることはできなかった。

このような状況下、1980年代後半になって、シンクロトロン放射光がX線露光用の光源として注目を集め始めた。放射光によるX線転写実験は、歴史的には古い[Spiller 1976, Aritome 1978, Betz 1989, 難波 1981]が、本格的に取り上げられ始めたのは、電子蓄積リングの小型化の検討が始まってからである。放射光を用いれば、強い指向性を持った非常に強力なX線が得られるので、光源さえ産業用に利用可能な程度に小型化されれば、高精度、高スルーブットのX線露光システムが実現できるためである。

シンクロトロン放射光を光源とする場合には放射光が水平方向に放射されるので、露光装置はマスクとウエハを鉛直平面に沿って保持・位置決めするたて形機構となる。このため、放射光用X線露光装置は、「たて形X線ステップ」、あるいは、「たて形X線アライナ」と呼ばれ、内外の研究機関で研究開発が進められている[Cullmann 1987, 1988, Kouno 1988, 河野 1988, Koga 1990]。研究対象となる要素技術は、高速高精度の位置決め機構、マスクとウエハ相対位置検出、およびこれらの要素を用いた位置決め制御である。この内、マスクとウエハの相対位置検出方法については、従来の点光源X線露光装置の時代も含めると、光学顕微鏡によるマークボタン拡大像のエッジ検出に

よるもの[Kawaguchi 1982, Deguchi 1986B, Hayasaka 1985, Bobroff 1986, 谷口 1989B, 宮武 1989A, 1989B]、回折格子やフレネルゾーンプレートからの回折光強度を利用するもの[Flanders 1977, 1983, Austin 1978, Fay 1979, 1986, Feldman 1981, 1982, 1983, Nelson Jr. 1980, Lyszezarsz 1981, Kinoshita 1983, 服部 1986, 猪城 1987, 内田 1988B, 1989, Uchida 1989, 1990, 田畑 1989, 宇根 1989A, 1989B, Une 1990, 田中 1989, Tanaka 1990]、回折・干渉光の位相を検出するもの[Ito 1986, 宇根 1989C, Suzuki 1989B, 鈴木 1991A, 1991B, 石橋 1990]、と著しい数の方法が提案されている。一方、位置決め用の機構については、ほとんどの場合ボールねじで駆動されるたて形XYステージに圧電素子駆動の微動機構が搭載される方式が採用されている[Cullmann 1987, Kouno 1988, 内田 1988A, Koga 1990]。このように活発な研究開発がなされて来たにもかかわらず、クォータミクロン領域で実用できる精度を有し、高速動作が可能なたて形X線ステップの実現には到っていない。この現状は、装置の基本となる位置決め機構としてブレイクスルーとなる技術が必要であることを示唆している。

第3章までに空気軸受を基本要素とする非接触送り機構が、長ストロークにわたって高い移動分解能、運動精度、高速性を兼ね備えた位置決め機構となりうることを示した。また、第4章ではX線露光装置において機械的位置決めに要求される条件を明かにした。本章においては、先に述べた非接触空気潤滑機構を、超高分解能の位置検出法として研究されてきた光ヘテロダイン干渉技術と組み合わせて放射光用X線ステップに应用する。露光システムの構成、露光装置の目標性能の設定、位置決め/位置合わせ制御のアルゴリズムなどの検討に基づいて露光装置を設計・試作し、次に、装置各部の特性評価、露光実験による装置性能の評価を行う。そして、クォータミクロン領域に適用可能な性能を達成することにより、空気潤滑位置決め機構が高速、高精度位置決め用に有用であることを示す。

5.2 X線露光装置の設計

5.2.1 放射光X線露光システムの基本設計

シンクロトロン放射光を用いるX線露光システムは、光源としての電子蓄積リング、ビームライン、X線マスク、および露光装置から構成される。露光システムの基本性能は解像力、重ね合わせ精度、およびスループットである。これらの性能を決める設計要因として、露光波長の選択、露光ギャップ、露光フィールドサイズなどがある。また、放射光を用いるX線露光特有の機能として、露光領域のたて方向拡大、および露光雰囲気を選択があり、ビームラインと露光装置で機能分担がなされる。次々世代の半導体集積回路製造への適用をねらいとする放射光X線露光システムの主な目標仕様を表5.1に示す。目標基本性能は、解像力 $0.2\mu\text{m}$ 、重ね合わせ精度 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 以下、可能な限り高いスループットの確保である。

(1) 解像力の設定

従来の点光源からの発散X線を用いる場合には半影はけにより解像力が制限されていたが、放射光X線露光では半影はけは無視できる程度に小さくなり、マスク吸収体エッジにおけるフレネル回折が解像力の支配要因となることを第4章で述べた。図5.1は、露光ギャップをパラメータに露光波長と解像力の関係を示した第4.3.2節の図4.1.0を再掲したもので、露光システムの設計点を二重丸で示している。 $0.7\text{nm} \sim 1\text{nm}$ の波長を用い、解像力 $0.2\mu\text{m}$ を保証するために、露光ギャップは $30\mu\text{m}$ とする。

(2) 重ね合わせ精度とスループットの目標設定

半導体チップサイズの拡大動向とスループット確保の点からはフィールドサイズを大きくとるシステムが好ましいが、重ね合わせ精度上は厳しいものとなることを第4章で示した。第4.4節の総合重ね合わせ精度に関する図4.1.9(b)とスループットに関する図4.2.4を合成して図5.2に再掲する。位置ずれの誤差要因、装置の動作速度、露光時間などのパラメータの設計値は、前章に準じている。図5.2からわかるように、本システムではフィールドサイズを可変とし、目標重ね合わせ精度 $\pm 0.1\mu\text{m}$ に対応して最大 25mm 角まで露光可能とする。

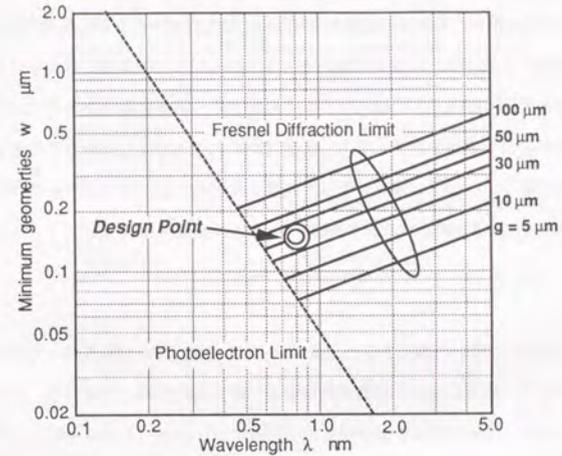


図5.1 解像力の設計点

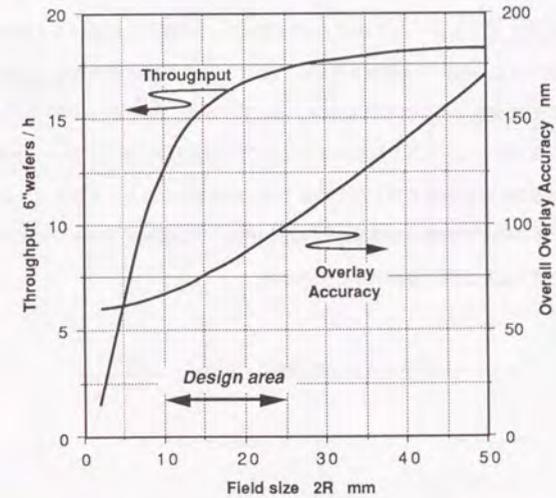


図5.2 重ね合わせ精度・スループットの設計点

(3) 露光領域拡大

放射光は水平面に強い指向性を持って放射されるため、露光領域のたて方向拡大が必要である。方法としては、放射光のX線ミラーによる走査、マスク・ウエハの一体走査が考えられる。前者はマスクとウエハを静止状態で露光でき、露光中アライメントサーボが容易であるが、たて方向にランアウトが生じる分ギャップ制御が重要となる。後者はランアウトの点では有利であるが、露光中のアライメント監視が難しく、機構も複雑となって装置が大形化する。本システムでは位置合わせ精度を重視して、前者の放射光走査方式を採用する。

(4) 露光雰囲気

マスクとウエハを真空中に置いて露光すると、第4.4.2節で述べたようにX線マスクに放射光照射による温度上昇が生じ、熱歪によって位置ずれが発生する。このため、熱媒体としてのガス雰囲気での露光が必須である。X線の減衰を最小限に押さえるには、減圧ヘリウム中露光方式が最も好ましいが、装置の操作性や機構設計の自由度の点で難しさがある。本システムでは装置性能を重視し、大気中露光方式を選択する。

以上の結果をもとに設計された放射光露光システムの構成を図5.3に示す。放射光を電子蓄積リングから露光装置に導くビームラインには2枚のX線ミラーが導入されている [Kaneko 1989]。第一ミラーは水平方向の広い角度の放射光を反射してウエハ上のX線強度を高めるための集光ミラーであり、反射による短波長カットの役割も持つ。第二ミラーは、水平方向に平行光束を作り出すとともに、微小に揺動させることにより放射光をたて方向に走査する。第二ミラーの下流、Be窓までは超高真空、その下流マスク裏面の取り出し窓までは大気圧Heであり、マスクとウエハは大気中に配置される。アライメントのための光学系は大気圧He中に、露光中アライメントサーボが可能なように露光用X線を遮らない配置に設計する必要がある。

表5.1 露光システムの目標性能と主な仕様

Resolution	0.2 μm
Alignment accuracy	$< \pm 0.1 \mu\text{m}$
Wavelength	0.7 ~ 1 nm ($\lambda_p = 0.8 \text{ nm}$)
Exposure gap	30 μm
Field size	up to 25 mm x 25 mm X-ray vertical scan with mirror
Exposure environment	Normal atmosphere
Wafer size	$\phi 4$ -, 6-inch

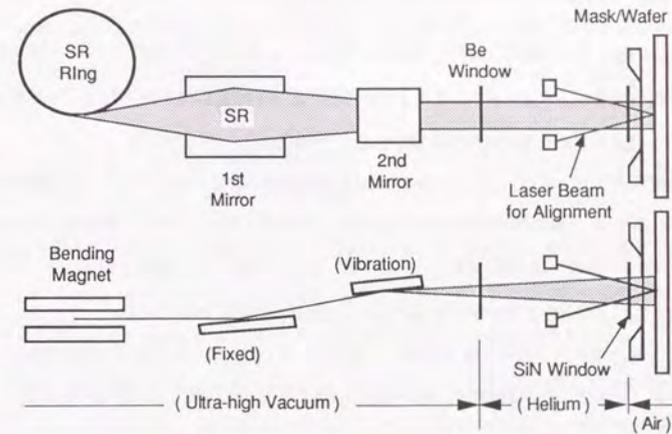


図5.3 放射光X線露光システムの構成

5.2.2 位置決め制御方法の設計

X線ステッパの基本機能であるギャップ設定、位置合わせの演算は、第4.4.1節の機械的位置ずれ誤差を表わす(4.15)式を、変数 $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \theta$ について解くことにほかならない。変数が6個あるため、位置合わせ制御には、最小限互いに独立な6個の位置ずれ情報の計測が必要である。いま、測定される位置ずれベクトルを $\Delta \varepsilon$ 、各変数(駆動軸)の駆動ベクトルを Δd とすると、 A を6行6列の変換係数マトリックスとして、

$$\Delta \varepsilon = A \Delta d \quad (5.1)$$

を Δd について解けばよい。この6元連立一次方程式は、 $|A| \neq 0$ のとき解を持ち、駆動ベクトルは、

$$\Delta d = A^{-1} \Delta \varepsilon \quad (5.2)$$

と求められる。従って、X線露光装置の機能は、空間的な6軸方向にマスクとウエハの相対位置を駆動できる機構を設け、 $|A| \neq 0$ となるような位置計測系を配置して6個の位置ずれを測定し、上記(5.2)式より求めた量だけ位置を駆動することである。

実際の装置設計においては、上記の一般化された基本式をブレイクダウンし、より効率的な構成を検討する。第4.4.1節の検討結果に述べたように、面方向とギャップ方向の位置合わせに要求される精度はパラメータ R/D (放射光X線リソグラフィでは $1/100 \sim 1/500$) だけ異なる。そこで、各要求精度に応じて面方向とギャップ方向に別の位置合わせ方式をとることとし、(5.2)式において面方向3軸とギャップ方向3軸を分離して考える。そして、第2章で述べた空気潤滑テーブルの優れた特長(高速性、高い運動精度、高い移動分解能)を十分に活用することを考慮する。

<空気潤滑位置決め機構の運動面を基準とするギャップの設定>

従来の点光源からの発散X線を用いるX線露光装置ではランアウト誤差低減のために、ほとんどの場合露光フィールドごとのギャップ設定・露光中ギャップサーボ方式が採用されてきた。放射光を用いる場合には、ギャップ設定に要求される精度は大幅に緩和されるので、露光フィールドごとのギャップ設定・制御の必要性は低く、マスク面とウエハ面を個別に設定する方式で十分なギャップ精度が得られると考えられる。これは、装置動作の高速化にとって極めて有利な条件である。

ギャップ方向の駆動軸 z, α, β を同一直線上にないZ方向3軸 z_1, z_2, z_3 で置き換え、マスク面内、あるいはウエハ面内の同一直線上にない3点において、マスク面、あるいはウエハ面の高さ h_1, h_2, h_3 を測定する。この時、高さの基準は空気潤滑テーブルで構成したXYステージの運動平面とする。あらかじめ校正された基準の高さを h_0 とし、Z方向3軸の駆動量を $\Delta h_i = h_i - h_0$ ($i=1 \sim 3$)、 B を3行3列の変換マトリックスとすると、

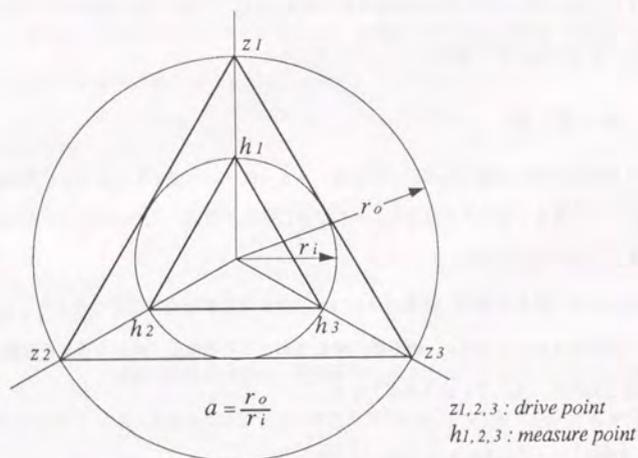
$$\Delta z = B^{-1} \Delta h \quad (5.3)$$

から求めた量だけ位置を駆動すれば、マスク面、あるいはウエハ面をXYステージ運動面に平行に設定することができる。以下この処理をレベリングと呼ぶ。なお、上記の演算は、制御用計算機に能力があれば、面の方程式を解いてもよい。

変換マトリックス B の要素は、駆動点 z_1, z_2, z_3 と高さ測定点の配置で決まり、 $|B| \neq 0$ となるように選ばなければならない。例えば、図5.4のような相似正三角形の頂点を駆動点、測定点とする配置とすれば、(5.3)式は次式となる。

$$\begin{bmatrix} \Delta z_1 \\ \Delta z_2 \\ \Delta z_3 \end{bmatrix} = \frac{4}{27} \begin{bmatrix} 1+2a & 1-a & 1-a \\ 1-a & 1+2a & 1-a \\ 1-a & 1-a & 1+2a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \Delta h_3 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

ここに、 a は駆動点/測定点の半径位置の比である。このとき、駆動点、測定点ともに半径位置は大きくなるほうが高精度化に有利である。なお、駆動点と測定点は、係数行列式の値がゼロとならなければどこにとってもよいが、3点の作る三角形内に制御したい領域が含まれるような配置が精度および制御の収束性の上で望ましい。以上により、マスク、およびウエハに対する基準高さ h_0 を所望の露光ギャップに対応してあらかじめ校正しておけば、両者に対するレベリングが完了した時点で、ギャップ設定が完了する。



$$\begin{bmatrix} \Delta z_1 \\ \Delta z_2 \\ \Delta z_3 \end{bmatrix} = \frac{4}{27} \begin{bmatrix} 1+2a & 1-a & 1-a \\ 1-a & 1+2a & 1-a \\ 1-a & 1-a & 1+2a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \Delta h_3 \end{bmatrix}$$

a : 駆動点/測定点の半径位置の比

図5.4 ギャップ設定のための駆動点・測定点配置例

<面内の位置決め/位置合わせ制御>

装置の最も重要な機能である面内の位置合わせを考える。面内位置合わせは極めて高い精度が要求されるためにダイバイダイのアライメントが必須であるとともに、X線露光では比較的露光時間が長いので、機構のドリフトを考慮して露光中の継続的なサーボ制御が望ましい。従って、露光とアライメントサーボが両立できる方式を考える必要がある。

露光ギャップが設定された状態で、残る駆動軸 x, y, θ について、面内の互いに独立な位置ずれ Δv ($\Delta v_1, \Delta v_2, \Delta v_3$) を測定し、 $\Delta v = 0$ となるように3軸を駆動する。先と同様に、 C を3行3列の変換マトリックスとして、

$$\Delta d_{xy\theta} = C^{-1} \Delta v \tag{5.5}$$

により各軸の駆動量が求まる。変換マトリックス C の要素を決めるアライメントマークの配置には様々の組み合わせが考えられる。図5.5のように露光フィールド周辺(スクライブライン)に、位置ずれ $\Delta v = (\Delta X_2, \Delta Y_1, \Delta Y_3)$ を検出するマーク(後述の光ヘテロダイン検出用回折格子を想定)を配置すると、(5.5)式は次のように単純になる。

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 1/2 \\ 0 & 1/2R & -1/2R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_2 \\ \Delta Y_1 \\ \Delta Y_3 \end{bmatrix} \tag{5.6}$$

ここに、 R はアライメントマーク位置の半径である。回転軸 θ の駆動は、マスク側、ウエハ側のいずれでもよいが、回転中心を露光フィールド中心に一致させられるという意味でマスク側を選ぶ方が演算が上式のように単純になる。

この場合、位置ずれ計測は露光領域半径に直角な方向、すなわち使用する線形回折格子の長手方向が半径方向となっており、試料の物理的な伸縮誤差に鈍感な配置となっている。もし、露光領域半径の方向の位置ずれ計測を2点以上導入すればバタンのピッチ変化を測定できるため、X線露光におけるランアウトを利用して等方的な伸縮歪による誤差を補正することも可能[石原1980]である。ただし、ランアウトの小さい放射光X線露光ではその効果は小さい。

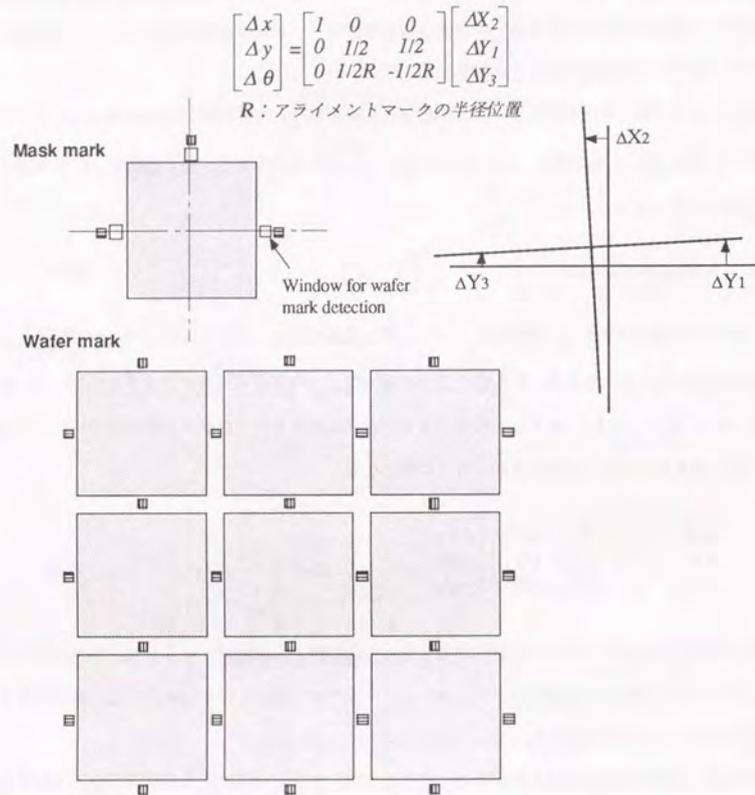


図5.5 面内位置合わせのためのアライメントマーク配置例

＜転写パタンの位置ずれ誤差要因の分析＞

ウエハ上に転写されたパタンの位置ずれ測定値から6つの制御軸方向の位置決め誤差を分離し、各誤差要因を分析することも装置の精度向上のために重要な手続きである。このために、前出の(5.1)式を有効に利用することができる。一般的な発散X線光源の場合において、ウエハ上の3点 $P_i (R_i, \theta_i)$, $P_j (R_j, \theta_j)$, $P_k (R_k, \theta_k)$ におけるXY方向の位置ずれの測定値を $(\Delta X_i, \Delta Y_i)$, $(\Delta X_j, \Delta Y_j)$, $(\Delta X_k, \Delta Y_k)$ とすると、(5.1)式は次のように表わされる。

$$\begin{bmatrix} \Delta X_i \\ \Delta X_j \\ \Delta X_k \\ \Delta Y_i \\ \Delta Y_j \\ \Delta Y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{i1} & a_{i2} & a_{i3} & a_{i4} & a_{i5} & a_{i6} \\ a_{j1} & a_{j2} & a_{j3} & a_{j4} & a_{j5} & a_{j6} \\ a_{k1} & a_{k2} & a_{k3} & a_{k4} & a_{k5} & a_{k6} \\ b_{i1} & b_{i2} & b_{i3} & b_{i4} & b_{i5} & b_{i6} \\ b_{j1} & b_{j2} & b_{j3} & b_{j4} & b_{j5} & b_{j6} \\ b_{k1} & b_{k2} & b_{k3} & b_{k4} & b_{k5} & b_{k6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta \theta \\ \Delta z \\ \Delta \alpha \\ \Delta \beta \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

ここに、変換マトリックスAの各要素は、式(4.16), (4.17)から $n = i, j, k$ として、

$$\begin{aligned} a_{n1} &= 1, a_{n2} = 0, a_{n3} = \frac{R_n \sin \theta_n}{D}, a_{n4} = \frac{R_n \cos \theta_n}{D}, a_{n5} = \frac{R_n^2 \cos \theta_n \sin \theta_n}{D}, a_{n6} = \frac{R_n^2 \cos^2 \theta_n}{D} \\ b_{n1} &= 0, b_{n2} = 1, b_{n3} = \frac{R_n \cos \theta_n}{D}, b_{n4} = \frac{R_n \sin \theta_n}{D}, b_{n5} = \frac{R_n^2 \sin^2 \theta_n}{D}, b_{n6} = \frac{R_n^2 \sin \theta_n \cos \theta_n}{D} \end{aligned}$$

と表わされる。具体例として、露光中心に対して R を半径とする円周上の120度分割の3点, $P_1 (R, -\pi/6)$, $P_2 (R, \pi/2)$, $P_3 (R, -5\pi/6)$ において、位置ずれ量が $(\Delta X_1, \Delta Y_1)$, $(\Delta X_2, \Delta Y_2)$, $(\Delta X_3, \Delta Y_3)$ と測定されたすると、(5.7)式の解は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta \theta \\ \Delta z \\ \Delta \alpha \\ \Delta \beta \end{bmatrix} = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 & \sqrt{3} & 0 & -\sqrt{3} \\ \sqrt{3} & 0 & -\sqrt{3} & 3 & 0 & 3 \\ 1/R & -2/R & 1/R & \sqrt{3}/R & 0 & -\sqrt{3}/R \\ \sqrt{3} & 0 & -\sqrt{3}D/R & -D/R & 2D/R & -2D/R \\ -2\sqrt{3}D/R^2 & 0 & 2\sqrt{3}D/R^2 & -2D/R^2 & -4D/R^2 & -2D/R^2 \\ 2D/R^2 & -4D/R^2 & 2D/R^2 & -2\sqrt{3}D/R^2 & 0 & 2\sqrt{3}D/R^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_i \\ \Delta X_j \\ \Delta X_k \\ \Delta Y_i \\ \Delta Y_j \\ \Delta Y_k \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

ここに、 D は線源距離である。これにより、装置各駆動軸や検出チャネルの状況判断等、装置の診断を行なうことができる。ただし、放射光を用いる場合には、一部平行光束となるために $|A| = 0$ となることがあるので注意を要する。

5.2.3 放射光X線露光装置の構成

放射光露光装置は、マスクとウエハのハンドリング、位置決め、位置合わせを行なう多軸の位置決め装置であり、もっとも重要な機能はマスクとウエハの相対位置の空間的位置合わせである。従って装置は、多軸の位置駆動機構、変位の計測系、およびこれらを用いて位置決めを行なう制御系から構成される。設計した放射光X線露光装置の駆動軸の構成を図5.6、各軸の仕様を装置の動作シーケンスに対応させて表5.2に示す。

装置は、マスク位置決め機構とウエハ位置決め機構から構成し、いずれにも6軸方向の駆動軸を持たせる。マスク位置決め機構は6軸の微動機構で、マスクのレベリング、アライメント光軸へのマスクのアライメント、面内回転方向のファインアライメントに用いる。ウエハ位置決め機構は、たて形XYステージとその上に搭載された4軸のウエハ微動機構から成る。XYステージはマスク面やウエハ面上の非接触微小変位計の走査、ウエハの定速移動やステップ移動、マスクとのファインアライメント等に用い、その運動面は、ギャップ設定など種々の位置決め基準となる。ウエハ微動機構は、回転軸とチルト軸を持ち、ウエハのブリアライメントとレベリングに用いる。XYステージは第3章で論じた空気潤滑送り機構であり、有効ストローク 200mm を移動分解能 5nm で制御する。マスクとウエハのその他の駆動軸は、板ばねによる弾性案内と圧電素子駆動を組み合わせた微動機構であり、有効ストロークの必要に応じてレバー式変位拡大機構を付加している。なお、ウエハの面内回転軸にはステップモータによるねじ送り機構を用いている。機構の剛性を上げて共振点を高めること、圧電素子特有のヒステリシスを変位センサと組み合わせることで除去すること、および多軸機構に発生しやすい軸間干渉を低減することに留意して設計を行なう。各微動軸の有効ストロークは第4.4節の誤差解析に基づいて表5.2に示すように定め、位置決め制御分解能は並進軸で $0.1\mu\text{m}$ 、回転軸で $1\mu\text{rad}$ としている。

計測系は、XYステージの側方に配置したレーザー干渉測長計 (HP社製 5527A System)、マスク位置決め機構の後方に層状に配置した目視顕微鏡、ブリアライメント光学系、ファインアライメント光学系、およびマスクとウエハの近傍に配置した静電容量形非接触微小変位計 (ADE社製 MICROSENSE 3046A, センサ径 5.3mm) から構成する。ブリアライメント光学系は、マスクおよびウエハをファインアライメントで検出可能な範囲内に位置決めするための検出光学系3チャンネルである。試料上に形成した回折格子にレーザービームを照射し、反射回折光を光电検出する。回折格子を走査した時の回折強度プロファイルの解析による位置計測と、照射レーザービームに振動を与えた時の回折光強度の位相検波により位置を計測する方法を併用している。ファインアライメント光

学系は、露光領域の周辺に配置された位置合わせ用回折格子に対応する後述の光ヘテロダイン干渉光学系3チャンネルである。静電容量形非接触微小変位計は、XYステージによって走査されることにより、所定位置でのマスク面あるいはウエハ面の高さを測定し、第5.2.2節で述べたマスクとウエハのレベリング、ギャップ設定を行なう。

設計・試作したX線露光装置の具体的構成を図5.7に示す。装置はプロトタイプ機であるモデルI [Ishihara 1989, 石原 1990] と、その改良形のモデルII [Ishihara 1991, 鈴木 1991] の2種類を設計、試作した。駆動軸構成等が若干異なるものの、基本的な設計思想は同一である。X線マスクは、出来合いの平面度を損なうことのないようマスクステージ上3点に配置した永久磁石で点接触吸着する。永久磁石の吸着面を球形とし、X線マスクガラスフレームの対応する位置に貼り付けられ純鉄製のヨークを3点吸着する際にX線マスクに外力が働かないようになっている。一方ウエハは、オートローダからウエハステージ上のウエハチャックに真空吸着される。この時ウエハはマスクと異なり外力により平面度を矯正することが重要である。このためウエハチャックには、平面度矯正力に優れた膜シール付きピン支持形チャックを用いている。ウエハオートローダは、ウエハ裏面の真空吸着によるハンドリング、ウエハ切り欠き (ファセット) 面の機械的押しつけによるオリエンテーション機構などから構成する。ウエハは、モデルIではマスク位置決め機構の側面で前方から、モデルIIではXYステージ背面からウエハステージに供給される。この状態からウエハは表5.2に示したシーケンスに従って、ローダでの機械的押しつけ、ブリアライメント位置検出系とレーザー干渉計による位置決め、露光位置での光ヘテロダイン検出信号による位置合わせという順番で、ミリメートル領域からナノメートル領域に順次位置決めされる。

以上述べた放射光X線露光装置の構成において、装置の性能を支配する主要部は、空気潤滑XYステージと光ヘテロダイン干渉式位置計測系である。これら主要部の特性と位置決め制御について次節で詳しく述べる。

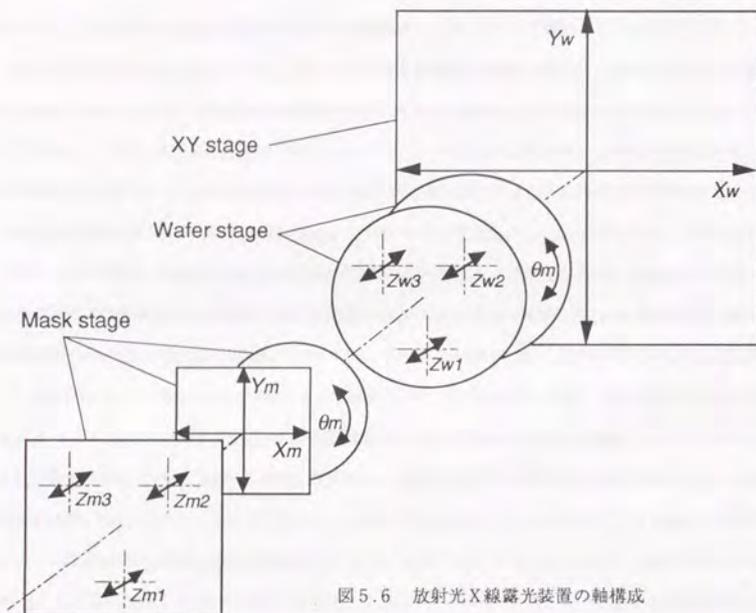
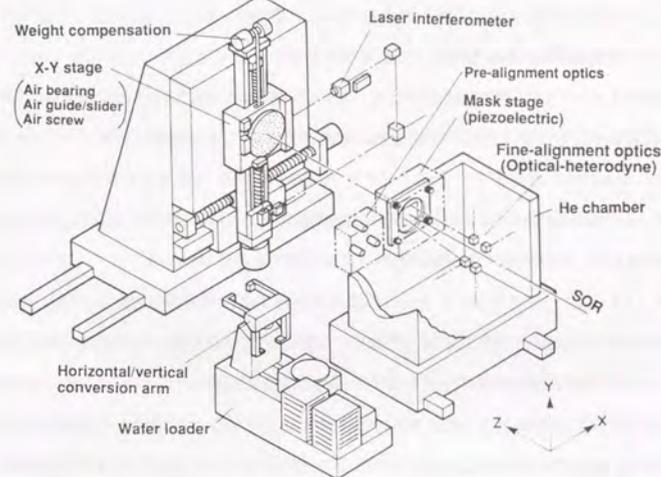


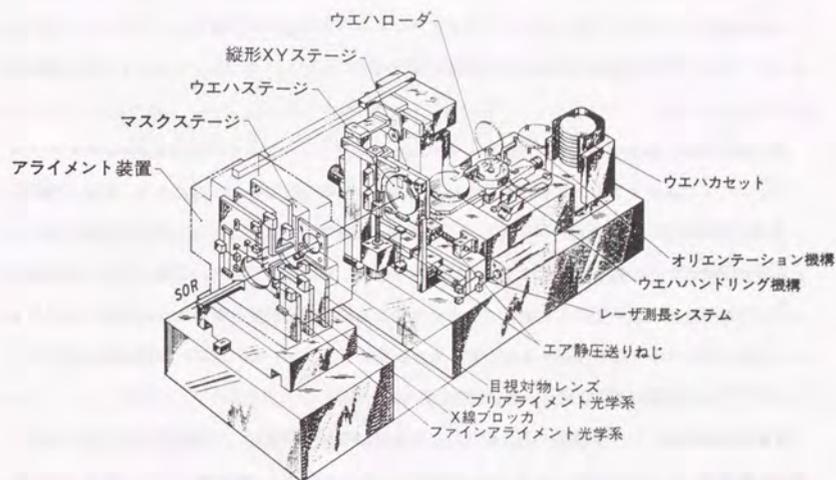
図5.6 放射光X線露光装置の軸構成

表5.2 放射光X線露光装置の仕様 (動作シーケンス順, 各軸移動分解能/ストローク)

Sequence	Mask Stage	Wafer Stage	XY stage	Position Sensor
Mask Leveling	Tilting Zm1, Zm2, Zm3 0.1 μm / ±150 μm	—	XY stage x, y 5nm / 200mm	Capacitance sensor 0.1 μm / ±50 μm
Mask Alignment	Linear / rotation Xm, Ym, θm 0.1 μm / ±20 μm 1 μrad / 1 mrad	—	—	Prealignment optics 0.1 μm / ±5 μm
Wafer Leveling	—	Tilting Zw1, Zw2, Zw3 0.1 μm / ±20 μm	XY stage x, y 5nm / 200mm	Capacitance sensor 0.1 μm / ±50 μm
Wafer Prealign	—	Rotation θw 1 μrad / ±17 mrad		Prealignment optics 0.1 μm / 300 μm
Wafer Stepping	—	—		Laser interferometer 5nm / 200mm
Fine Alignment	Mask rotation θ 1 μrad / ±1 mrad	—	—	Optical-heterodyne interferometry 5nm / ±1.7 μm



(a) モデル I



(b) モデル II

図5.7 試作した放射光X線露光装置

5.3 放射光露光装置の試作と特性評価

5.3.1 空気潤滑ねじ送り機構によるたて形XYステージ

たて形XYステージは、直進/回転の案内・支持部、駆動部の全ての部分に第2章で述べたセラミック多孔質紋り空気軸受を適用した完全非接触機構である。露光装置の2種のモデルに対応して2種のタイプを試作した。モデルIIについてはその詳細を図5.8に示す。モデルIIにおいてウエハをステージ背面から供給するためにウエハ駆動機構全体が後方に倒れるようにしたことにより構造が異なるものの、空気潤滑の全面採用という設計思想は両者同じである。

図5.7(a)と図5.8を用いてステージの構造を説明する。逆T字形、あるいはL字形をしたX軸可動部を下部の空気軸受で水平方向に案内し、X軸可動部のたて軸でY軸可動部を鉛直方向に案内する。XY面方向は空気軸受パッドをガイドバーの両面に配置したはさみ込み式、Z方向は可動部に取付けた永久磁石の吸引力と空気軸受パッドの浮上力をバランスさせる片面案内方式である。磁気吸引力は、軸受すきまの変化に対する作用力の変化の割合を空気軸受の百倍以上鈍感にできるため、磁気吸引力を空気軸受への一定荷重として作用させることにより、空気軸受に高い剛性を付与している。ただし、Z方向案内面が、モデルIでは純鉄製イケール面で一面案内、モデルII形ではX軸可動部たて軸および別に付加した副ガイドである点が両モデルで異なる。なお、たて形であるため、Y軸可動部を定張力ばね(三光発条社製N形コンストン)でつるすことによる重力補償機構を付与している。

送り駆動系は、第3章で述べた空気静圧送りねじであり、フルストローク200mmからナノメートルオーダーの微動まで本XYステージでウエハの位置決めを行なう。これにより、粗動/微動の2段構成を不要とし、可動部の軽量化を図っている。機構設計に当たっては、空気静圧送りねじによる駆動点が可動部の重心に作用するように部品を配置している。ただし、X軸については可動部自体のY方向位置により重心点が変わるため、できるだけ重心駆動となるように設計するとともに、X軸のピッチング剛性を高めることに十分な配慮を行なっている。他に、主要部品にはアルミナセラミックスを用いて軽量化と温度安定性を狙っている。

位置決め制御は、レーザ測長の微分信号による速度制御(大移動)、目標位置近傍でのレーザ干渉計位置信号による位置制御($\pm 10\mu\text{m}$ の範囲)、光ヘテロダイン検出信号による位置決め制御(マスクとの位置合わせ、後述)を順次切り替える。制御系は第3章で述べたPIDを制御要素とするデジタルソフトウエアサーボ系である。

XYステージは、露光装置における位置決め基準となっているので運動精度が非常に重要である。本来、空気軸受を案内とする機構は空気膜の平均化効果により高い運動精度が得られるという特長を有しており、本ステージの重要な狙いである。図5.9は、機構の運動精度測定例であり、同図(a)はモデルI、(b)はモデルIIのX軸に関するZ方向真直度を電気マイクロメータで測定した結果である。X、Y軸の各方向に関する真直度は、この測定例のように200mm移動で0.2~0.3 μm と良好であり、最悪値で0.4 μm であった。一方、ピッチング、ヨーイングに関しては、空気軸受案内の構造により差異が見られた。すなわち、欠み込み両面拘束案内となっているヨーイング方向の誤差が小さくて1 arcsec前後、磁気吸引力と空気軸受浮上力の釣り合いを用いた片面案内内であるピッチング方向の誤差が大きくて3~4 arcsecであった。

次に、位置決め特性を測定した結果を示す。図5.10は、移動量20mmの場合のたて形XYステージの動作特性であり、(a)は大移動の速度波形、(b)は位置決め安定特性を示している。最大加速度値0.1g、最大移動速度100mm/sにおいて、20mmのストロークを位置決めするのに要する時間は約0.4秒である。ステージがたて形2軸となり、かつ可動部質量が約5倍になっているにもかかわらず、第3章の一軸モデルに比べて遜色ない性能が得られている。これは、空気静圧送りねじを回転駆動するモータにとつての慣性負荷はほとんどが軸の慣性モーメントであり、並進質量負荷の影響は小さいためである。

図5.11に、20nmの微小ステップ送り特性を静電容量形非接触微小変位計を用いて測定した結果を示す[金井1991]。20nmの微小ステップを十分に分解しており、バックラッシュ、ヒステリシスなどは全く観測されない。ただし、位置決め中に数~10nmの微小な位置の変動が観測される。図5.12は、XYステージへの高圧空気の給気を停止し、可動部がマグネットにより案内に吸着された状態で、可動部の位置を静電容量式非接触微小変位計とレーザ干渉測長計で測定した変位出力の比較である。これからわかるように、レーザ測長出力には大気の影響、温度変化等に起因する幅15nm程度の変動がある。このレーザ測長出力で位置決め制御を行なっているためにステージ位置は常時微小に変動しており、これが図5.11の変動分として現われていることがわかる。

図5.13に、静電容量式非接触微小変位計で測定したXYステージの繰り返し位置決め精度を示す。位置決め位置の繰り返し再現性を3 σ 値で表わした精度は約 $\pm 1.5\text{nm}$ である。装置としてマスクとウエハ最終的な位置合わせは、後述の大気の影響の少ない光ヘテロダイン干渉式位置検出系の信号を用いるので、上記の値はステップ位置決め精度として十分な値である。

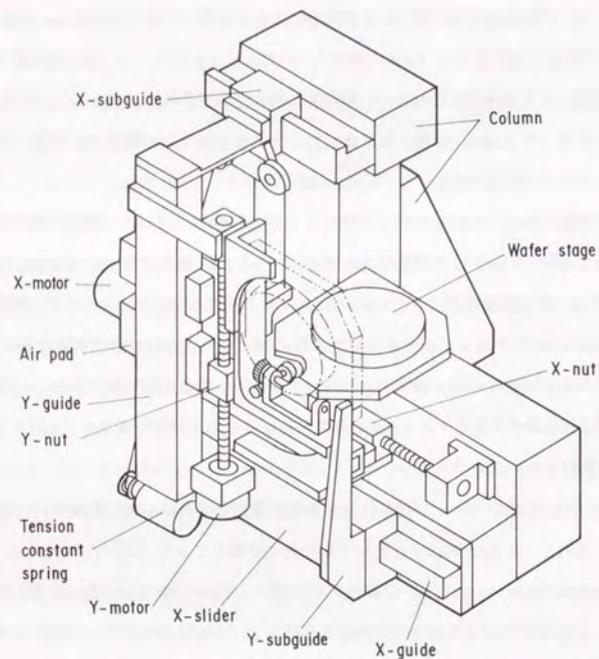


図5.8 空気潤滑たて形XYステージモデルIIの詳細
(ウエハステージが後方に倒れた状態)

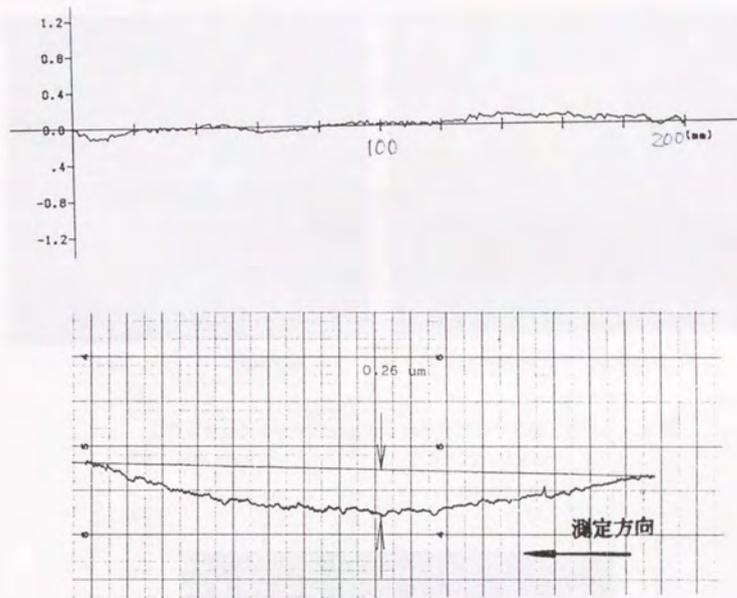
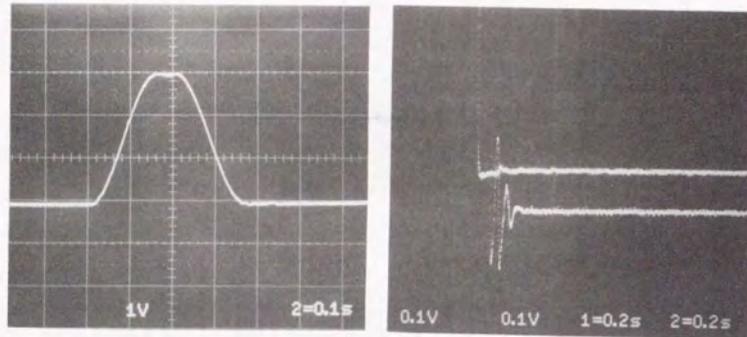


図5.9 XYステージの運動真直度



(a) 速度波形 (V : 33mm/sec/div) (b) 整定波形 (V : 1 μ m/div)

図5.10 たて形XYステージの20 mm ステップ位置決め特性

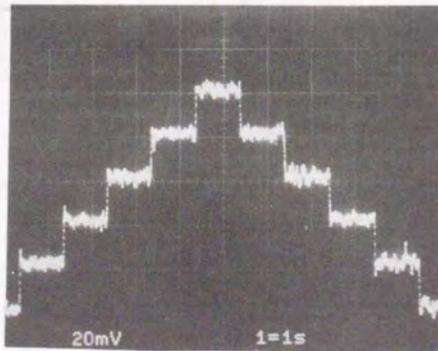


図5.11 たて形XYステージの20 nm 微小ステップ移動特性 (V : 20 nm/div)

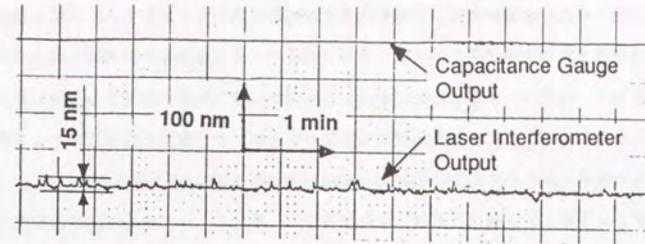


図5.12 レーザ干渉測長と静電容量形非接触微小変位計の出力比較

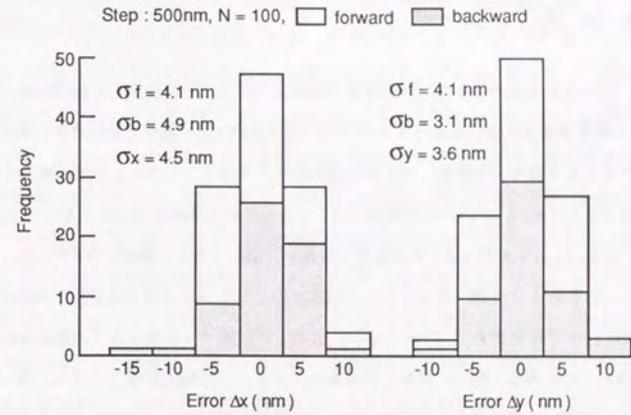


図5.13 たて形XYステージの位置決め再現性

5.3.2 光ヘテロダイン干渉による位置ずれ計測

マスク・ウエハの相対変位検出は、位置検出感度が極めて高いことはもちろん、検出精度が露光層ごとに変化するウエハ表面状態、マスク・ウエハ間のギャップ変動などに影響されないことが重要である。そこで、従来から多用されているマーク画像のエッジ検出を利用する方法に較べて、光の回折・干渉を利用することにより高い検出分解能が得られ、かつ変位を位相情報として得ることのできる光ヘテロダイン干渉式位置検出法 [Suzuki 1989B, 鈴木 1991A] を適用する。

光ヘテロダイン干渉式位置検出方式は、周波数の僅かに異なるレーザ光をマスクとウエハ上に設けた回折格子に対称な一次回折角の方向から入射し、回折格子面の法線方向への回折光が相互に干渉して生成するビート信号の位相情報を回折格子の横方向変位計測に利用する。マスクおよびウエハの回折格子からのビート信号の位相を各々独立に検出して両者の差を求めると、回折格子のピッチを p 、相互の位置ずれを Δx とした時、位相差 $\Delta\phi$ は、

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{\Delta x}{p/2} \quad (5.9)$$

で表わされる。この式からわかるように検出信号は周期的で位置ずれに比例した線形特性となる。図 5.1.4 に、X線露光装置における光ヘテロダイン干渉位置検出系の構成と回折格子の配置、検出される光ヘテロダイン干渉ビート信号、および位置検出特性を示す。マスク上の回折格子は SiN 薄膜上に形成した Ta のパタン、ウエハの回折格子はシリコンに刻んだ段差である。ピッチ $6\mu\text{m}$ (モデル I) あるいは $6.8\mu\text{m}$ (モデル II) の回折格子を用い、図のような正弦波信号の位相差を分解能 1° (モデル I) あるいは 0.5° (モデル II) で検出する。(5.9) 式より位置検出感度は、モデル I で約 8.3nm 、モデル II で約 4.7nm となる。このように本マーク検出方式の特徴は位置検出感度が極めて高いことである。他に、対称光学系なのでギャップ変動に影響されない、同一の光路を進む 2 ビームの位相差を検出するので大気の影響を受けない、位相検出なのでウエハ表面反射率変化の影響が小さい等の特徴がある。

X線露光装置では本ヘテロダイン干渉検出系の出力で最終的な位置合わせ制御を行なうため、ヘテロダインビート信号の変動は装置の位置合わせ性能に直接的な影響を与える。そこで、ウエハプロセスを想定して種々のコーティングを施した回折格子マーク付ウエハにマスクを重ね、マスクとウエハの回折格子からのヘテロダインビート信号の位相差のばらつきを位相解析器 (HP社製 HP 5372A) で測定した。

結果を図 5.1.5 に示す。ここで測定された変動には、マスクおよびウエハの機械的振動と位置ド

リフト、光ヘテロダイン干渉位置検出系の光学的・電気的な変動などが含まれる。図 5.1.5 からわかるように、3種類のコーティングに対してヘテロダインビート信号の振幅は大きく変化するものの、位相差検出値の変動幅の変化は小さく、本検出法がウエハ面の反射率の影響をうけにくいことを示している。これらのウエハ表面状態に対して位相差の変動は σ 値で $2.1 \sim 2.7$ 度であり、変位に換算すると $1.8\text{nm} \sim 2.2\text{nm}$ に相当する。実際には、これら以外の表面状態もあることを考慮して、本位置検出系のヘテロダインビート信号位相差の変動幅を 3 度とすると、変動は変位に換算して約 7.5nm (3σ 値) と考えられる。

本検出法は光の回折・干渉現象を利用するため、ウエハ上に塗布したレジストの膜厚が回折光の強度に影響し、回折光強度が小さくなると検出信号の S/N 比を低下させる。そこで、レジスト膜厚と位相差信号の変動幅の関係を調べた。ウエハ上に塗布されたレジストの膜厚がヘテロダインビート信号に及ぼす影響を測定した結果を図 5.1.6 に示す。図 5.1.6 (a) はレジスト膜厚に対するウエハヘテロダインビート信号の強度 (振幅) の変化、同図 (b) はレジスト膜厚に対するヘテロダインビート信号の位相差変動幅の変化である。図中、実線のカーブは、レジストの屈折率とレーザの波長から計算される回折光強度の周期的変化を示したものである。測定値には検出チャンネルに依存するばらつきがあるものの、図の (a) と (b) の結果比較から信号強度と位相差の変動には相関があることがわかる。図 5.1.7 はこれらの測定値をヘテロダインビート信号の S/N 比と位相差変動幅の関係として再プロットしたグラフである。ここで、S/N 比の定義におけるノイズレベルは、ウエハを装着しない状態でのウエハ側検出信号の振幅を用いている。これは、本方式ではマスク信号とウエハ信号を空間的に分離しているため、両信号の相互干渉が最大の S/N 比低下要因であるためである。図 5.1.7 から S/N 比が、約 4 より小さくなると位相差の変動が急激に大きくなるのがわかる。この結果は、光ヘテロダイン干渉方式が位相検出であっても、最低限の検出信号 S/N 比が確保できる程度の回折光強度が必要であることを示している。従って、本装置で数ナノメートルという高い位置合わせ精度を得るためには、一定以上のヘテロダインビート信号強度が得られる範囲の適切なレジスト膜厚を選ぶことが必要条件となる。図 5.1.7 (a) がレジスト膜厚選択の指針を与えるデータであり、また、膜厚選択範囲は周期的に存在する。

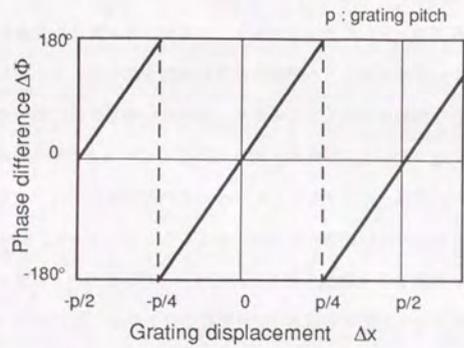
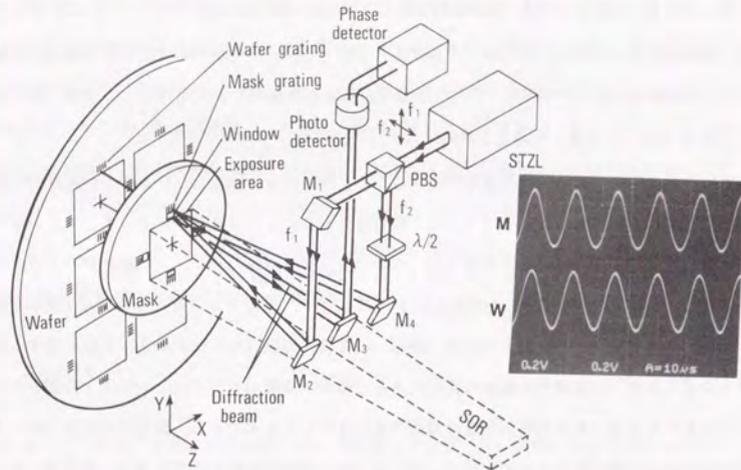


図5.14 回折格子と光ヘテロダイン干渉による位置検出

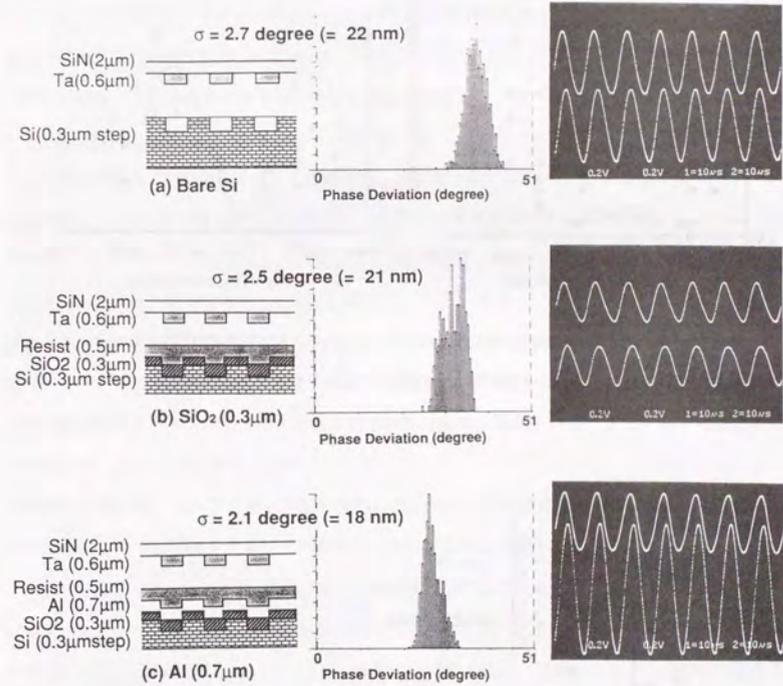
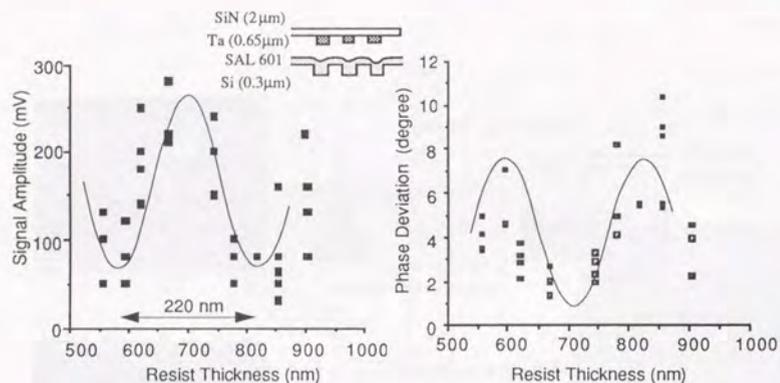


図5.15 ヘテロダインビート信号の変動に対するウエハ表面状態の影響



(a) 信号強度 (振幅) の変化 (b) 位相差検出値のばらつき

図 5.16 レジスト膜厚がヘテロダインビート信号に及ぼす影響

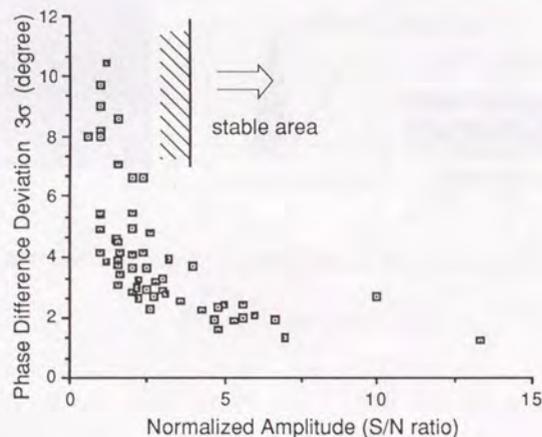


図 5.17 ヘテロダインビート信号の振幅と S/N 比

5.3.3 空気潤滑送り機構による位置合わせ制御

露光装置の最終的な位置合わせは、光ヘテロダイン検出信号をフィードバック信号とする空気潤滑送り機構の位置決め制御により行なう。ここでは、光ヘテロダイン検出信号のサンプリング周波数が位置決め制御の安定性に及ぼす影響について論じる。

モデル I 機では光ヘテロダイン検出における位相差演算時間が約 3.4 msec. と低速なため、検出信号のサンプリング周波数は約 300 Hz と比較的低速である。このため、フィードバック信号切り替え時に制御系が不安定になりやすく、サーボ剛性も得にくい。光ヘテロダイン検出信号を位置決めサーボ制御系の目標値として与え、サーボ系のクロズドループは常にレーザ干渉計からのフィードバックとすることで制御計を安定に動作させる方式も考えられるが、5.3.1 節で述べたレーザ波長の大气による揺らぎの問題を回避できない。そこで、制御信号の切り替え時に約 100 msec. の両信号同時フィードバック時間を設け、さらに、X 軸と Y 軸の制御信号切り替えをシーケンシャルに行なうことにより、制御切り替えの安定化を試みた。図 5.18 は、レーザ干渉計による位置決め制御から光ヘテロダイン検出信号による位置合わせ制御への切り替え特性であり、レーザ測長信号と光ヘテロダイン検出信号を示している。おおむね安定な制御切り替えができているが、鉛直 Y 軸には重力補償のアンバランスによると考えられる波形の乱れが観測される。また、XY 位置合わせの所要時間は、約 0.5 秒を要している。

モデル II 機では、光ヘテロダイン検出信号のサンプリング周波数を約 650 Hz と高速化し、かつ、切り替え時の位置補正量をレーザ測長サーボの状態のまま小さくするというソフトウェア処理を施した。図 5.19 に、モデル II 機における制御切り替え動作の波形を 2 例示す。いずれも X、Y 軸のレーザ干渉測長信号である。位置決め制御の高速化と安定化が図られ、X Y 軸の位置合わせサーボは、約 0.1 秒で完了している。また、位置合わせ時のサーボ剛性もサンプリング周波数が高い分だけゲインが高められ、高剛性となっている。

以上より、固体摩擦がなく、減衰係数の小さい空気潤滑送り機構の位置決め制御においては、サンプリング周波数の高速化が必須であり、かつ、周波数さえ高くすれば高速の位置決めが可能であることがわかる。

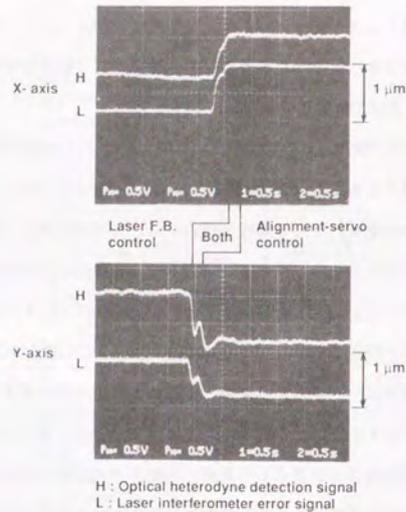
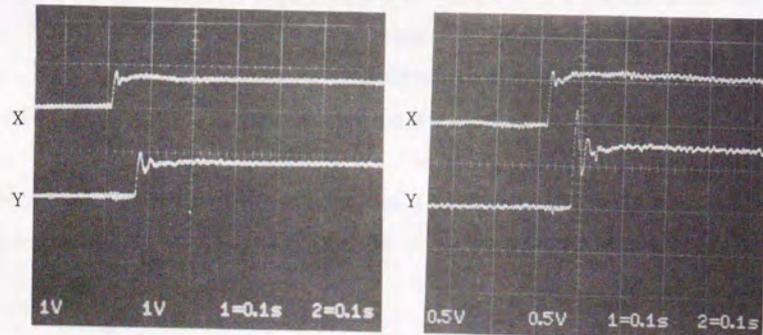


図5.1.8 位置合わせ制御切り替え特性 (モデルI)



例1 (V: 1 μm/div)

例2 (V: 0.5 μm/div)

図5.1.9 位置合わせ制御切り替え特性 (モデルII)

5.4 露光実験による性能評価

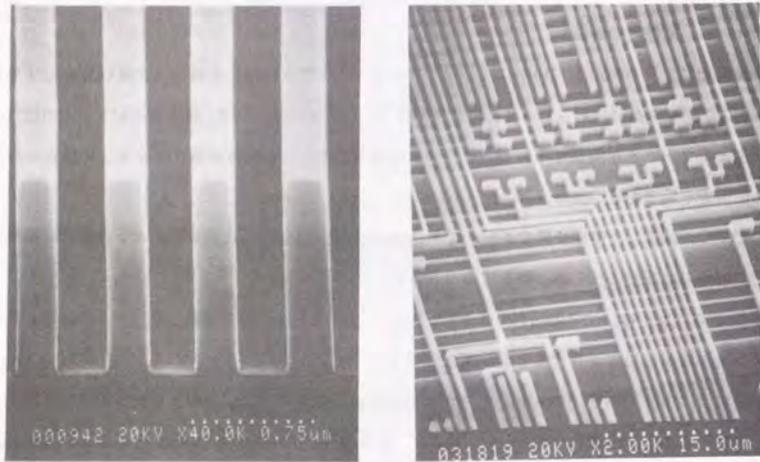
5.4.1 解像力の評価

X線露光によりウエハ上にいかに微細なボタンを形成できるかは、X線マスク吸収体の形状やコントラスト、マスクに照射されるX線の波長、露光ギャップの設定状態、露光量とレジストの特性、など種々のファクタが関係する。このうち、露光装置としての寄与は露光ギャップの設定と露光中の位置安定性である。

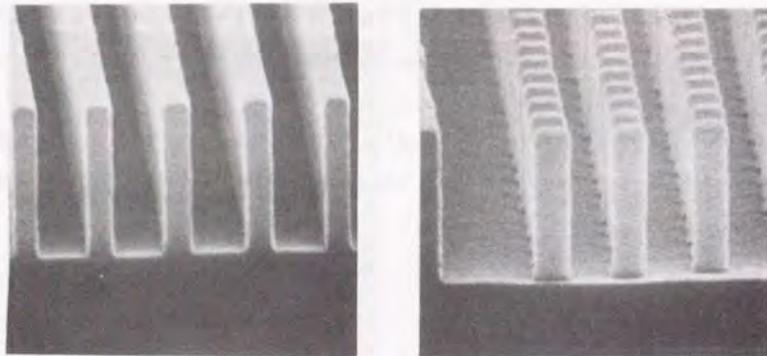
ここでは、試作した露光装置でギャップ30 μmを設定して転写した種々のボタンのSEM写真を示し、解像力の評価に代える。図5.2.0に種々の転写ボタンを示す。

図5.2.0 (a)は、化学増幅形のネガ形レジスト SAL 601を用いて形成したボタンである。左側はフレネル回折の影響からすると最も解像の難しいラインアンドスペースボタンで、線幅、スペース幅共に0.2 μmである。アスペクト比が高く側壁が垂直な0.2 μmボタンが良好に形成されており、放射光によるX線露光の高解像性、および、装置の30 μmギャップの設定と安定な位置決めがなされていることを裏打ちしている。右側の写真は、テストデバイスの配線ボタンで、最小線幅は0.2 μmである。段差越えボタンが線幅の細りもなく形成されており、焦点深度が非常に深いためにステップカバレッジが良好であるというX線露光の特長がよく現われている。図5.2.0 (b)は別のネガ形レジスト RAY-PNのボタンである。左側は、0.2 μmライン/0.4 μmスペースボタン、右側は、0.2 μmコンタクトホールの反転ボタンである。コンタクトホールの反転ボタンは実際のLSIではありえないボタンであるが、放射光によるX線露光の高い解像力を示す例として示している。

以上の転写ボタンの写真からわかるように、試作したX線露光装置は、良好なギャップ設定性能と位置決め安定性を有しており、当初目標とした解像力0.2 μmが十分に確保されているものと評価される。



(a) SAL 601 レジスト, 左: $0.2\ \mu\text{m}$ line & space パタン, 右: テストデバイスの配線パタン
(NTT LSI 研究所, 出口公吉主幹研究員提供)



(b) RAY-PN レジスト, 左: $0.2\ \mu\text{m}$ line / $0.4\ \mu\text{m}$ space, 右: $0.2\ \mu\text{m}$ hole の反転パタン
(NTT LSI 研究所, 岡田育夫主幹研究員提供)

図 5.20 放射光 X 線露光による転写パタンの例

5.4.2 位置合わせ精度の評価

装置の総合的な位置合わせ性能を露光実験により評価する。位置合わせ用の回折格子を形成したシリコンウエハ上にレジストを塗布し、放射光 X 線露光装置を用いて位置合わせを行ないながらパタンを転写する。マスクとウエハ上にはあらかじめ位置測定用の十字パタンを配置しておき、ウエハ上の位置測定用パタンと、マスク上の位置測定用パタンが転写されたレジストパタンの間隔を、ウエハ上で光波干渉式座標測定機（ニコン製 LAMPAS 2I）を用いて測定する。露光フィールド内の 8~9 点を多数の露光フィールドについて測定し、多点のデータを統計処理することにより位置合わせ精度を求める。ここで、光波干渉式座標測定機の測定再現性は $\pm 30\ \text{nm}$ (3σ , カタログ値) である。

図 5.2.1 に、モデル 1 機の評価結果を示す。露光フィールドサイズは $8\ \text{mm}$ 角、測定点はフィールド内 $4\ \text{mm}$ ピッチの格子点 9 点である。同図 (a) は、あらかじめフォトステッパにより焼き付けられている下層パタンと X 線で転写された上層パタンの位置合わせ精度を求めた結果である。この場合の位置ずれ誤差には、マスク誤差、下層パタンに含まれるフォトステッパの誤差、ランアウト、露光装置の機械的位置合わせ誤差、測定誤差など全ての誤差要因が含まれる。このため図の右側の位置ずれマップに示すように平均転写位置のシフトが現われる。そこで、露光フィールド内の測定点ごとの位置ずれ平均値に対する位置ずれデータの分散を求め、装置の位置合わせ再現性として評価した。位置合わせ再現性に含まれる誤差は、露光装置の機械精度、露光フィールド間のウエハパタンに含まれる誤差、および測定誤差である。結果は、 3σ 値で約 $\pm 0.1\ \mu\text{m}$ であった。

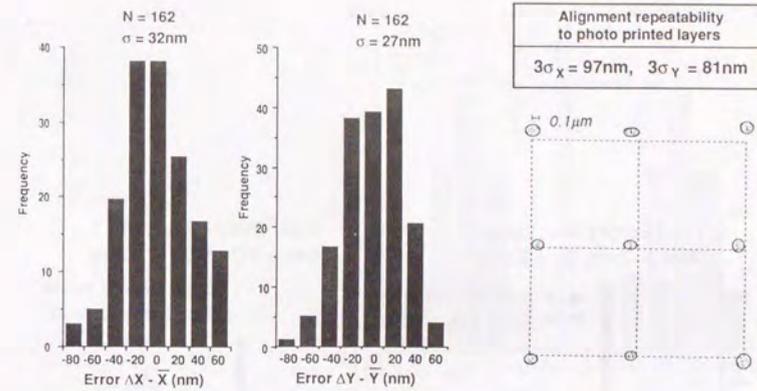
次に、図 5.2.1 (b) は、上記からマスク誤差、フォトステッパ誤差などの X 線露光装置以外の誤差要因を除去するため、同一のマスクを用い、同一露光フィールドで回折格子マークの位置合わせ点を 1 ピッチずらせた 2 層を重ねて露光し、転写されたレジストパタン相互の位置を測定することにより求めた位置合わせ精度である。この二重露光法は、X 線露光と X 線露光の間の重ね合わせ精度を測定するもので、かつ、同一のマスク、同一の露光フィールドを用いるのでマスクやウエハの誤差は除かれ、純粋に装置自身の機械精度を表わしている。図のように位置合わせ精度、すなわち光ヘテロダイン信号による空気潤滑送り機構の位置決め精度は、位置ずれの平均値として X 方向が最悪値で $41\ \text{nm}$ 、ばらつきとして Y 方向が最悪値で $\pm 81\ \text{nm}$ (3σ 値) であった。

また、ウエハの表面状態が位置合わせ精度に及ぼす影響について調べた。図 5.2.2 は、前記と同様の二重露光法による評価法を、様々のコーティングが施されたウエハに適用したときの位置合わせ精度である。ウエハ表面が SiO_2 膜とアルミニウム膜のいずれの場合に対しても、位置ずれの平

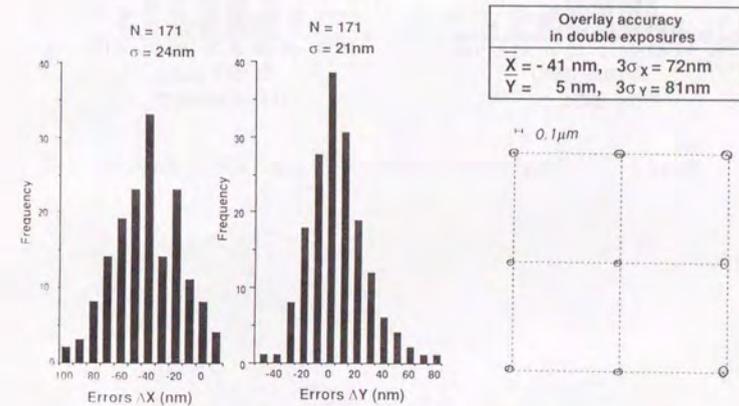
均値と変動 (3σ) の和が $\pm 100\text{nm}$ となっており, ウエハ表面状態の違いによる明瞭な差異は認められない。

次に, モデルII機について位置合わせ性能を評価した。結果を図5.23に示す。モデルI機の場合と同様に, 図5.23(a)はフォトステッパで露光された下層に対するX線露光層の位置合わせ精度, 図5.23(b)は二重露光法による露光装置の機械精度である。この場合, 露光フィールドのサイズは, 12mm 角とモデルI機での実験に対して5割大きくなっており, 位置合わせはより難しい条件である。モデルII機は, モデルI機に対して, ウエハチルト機構の追加(ウエハ面を放射光に対してより直角にできる), マスクのアライメント光軸へのアライメント機能の追加(マーク位置が検出用レーザスポット位置に常にアライメントされる), 光ヘテロダイン検出用レーザ光源のパワー倍増による信号強度の増大(S/N比の向上), 同光学系の安定性向上, アライメントサーボ剛性の向上(5.3.3節に既述), などの対策が施されていることから, 位置合わせ性能は向上している。フォト露光層に対する位置合わせ再現性は $\pm 70\text{nm}$ (3σ 値), 二重露光により評価した位置合わせ精度は $\pm 35\text{nm}$ (3σ 値) と極めて良好な値である。この $\pm 35\text{nm}$ という値は, バタン位置測定に用いた光波干渉式座標測定機の検出再現性 $\pm 30\text{nm}$ とほぼ同等となっており, 位置合わせ精度データは測定の限界に到達していると考えられる。

以上の実験結果より, 試作したX線露光装置(モデルII機)の下層ボタンに対する位置合わせ精度は $\pm 70\text{nm}$ (3σ), 光ヘテロダイン検出信号による空気潤滑ねじ送り機構の位置決め精度(装置の純機械的な位置決め繰り返し精度)は $\pm 35\text{nm}$ (3σ) と評価する。ただし, 露光実験により評価しているため, この位置決め精度は露光時間に相当する時間内の平均位置であり, 高い周波数の微小な機構の振動は平均化されていると考えるのが妥当である。さらに, 本装置を実デバイスの露光工程に適用するときには, ウエハ表面のトポロジーが多様に変化するため, 光ヘテロダイン検出信号の劣化は避けられない, このような, 実プロセス適用上の問題点への対処が今後の課題と考えられる。



(a) フォト露光層に対する位置合わせ精度



(b) 二重露光による位置合わせ精度評価

図5.21 モデルI機的位置合わせ性能評価結果

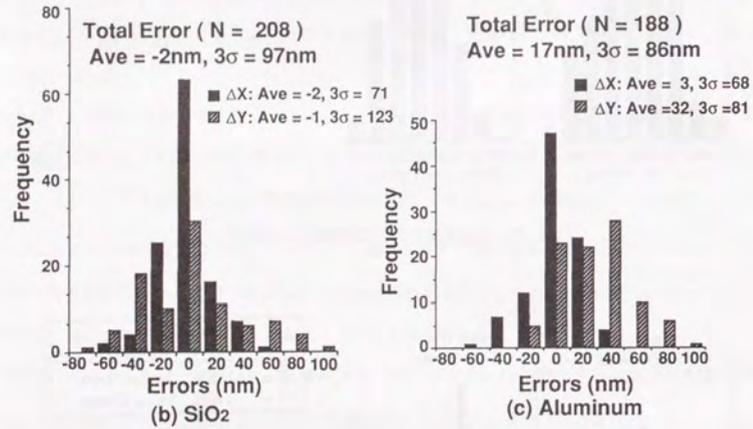
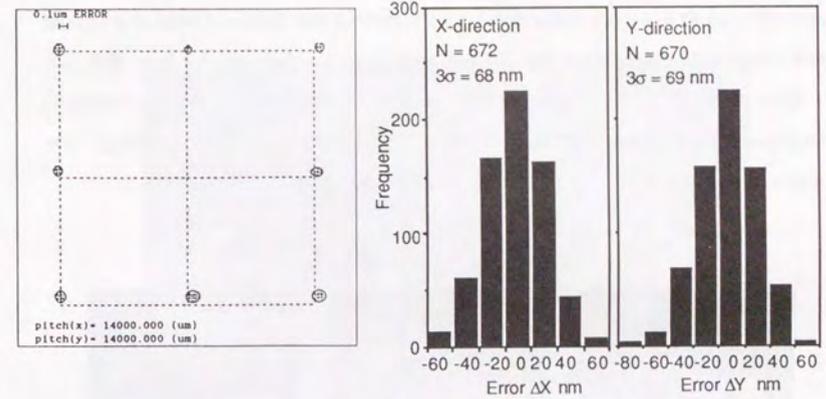
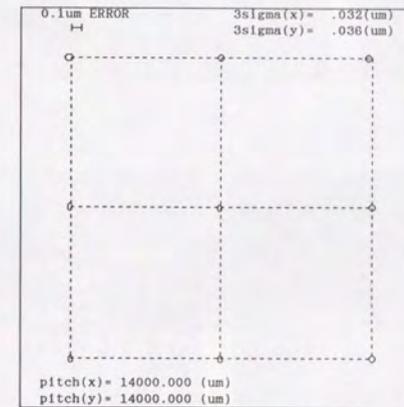


図 5.2 2 ウエハ表面の位置合わせ精度に及ぼす影響 (モデル I 機使用)



(a) フォト露光層に対する位置合わせ精度



(b) 二重露光による位置合わせ精度評価

図 5.2 3 モデル II 機の位置合わせ性能評価結果

5.4.3 テストデバイスの露光実験

装置のプロセス適用性確認を目的に、微細なバタンを有するテストデバイスの露光工程に本露光装置を適用した。図5.24は、X線露光をMOSプロセスの全5層に適用して製作した $0.2\mu\text{m}$ 級の微細バタンを含むリングオシレータ回路各層のX線転写レジストバタンである。また、図5.25は、製作されたリングオシレータの写真である。この結果、回路の正常動作が確認され [Yoshikawa 1990, Deguchi 1990, 出口 1990]、本装置のフィジビリティを確認することができた。今後は、より大規模なLSIのプロセスへの適用と装置信頼性の向上が課題である。

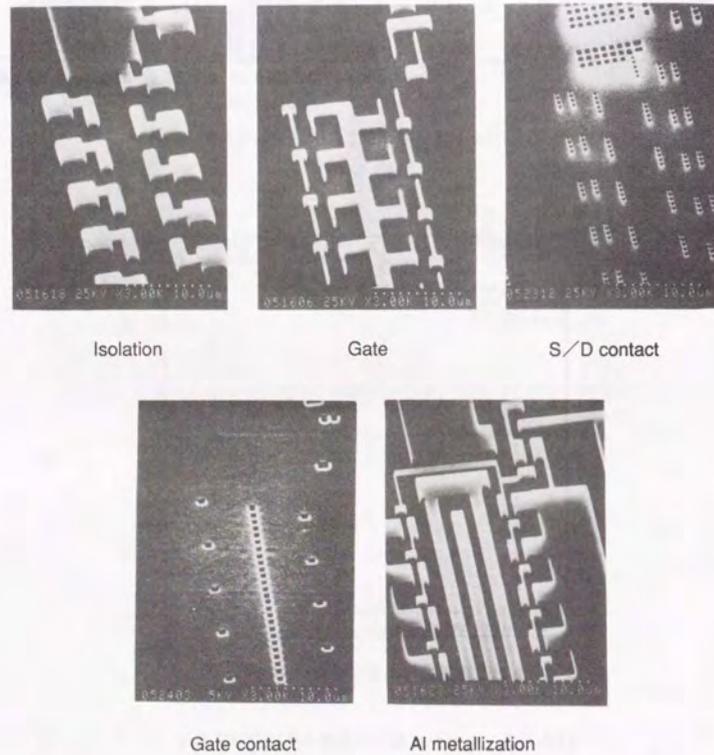


図5.24 試作デバイス各層のレジストバタン [Deguchi 1990, 出口 1990]
(NTT LSI 研究所, 出口公吉主幹研究員提供)

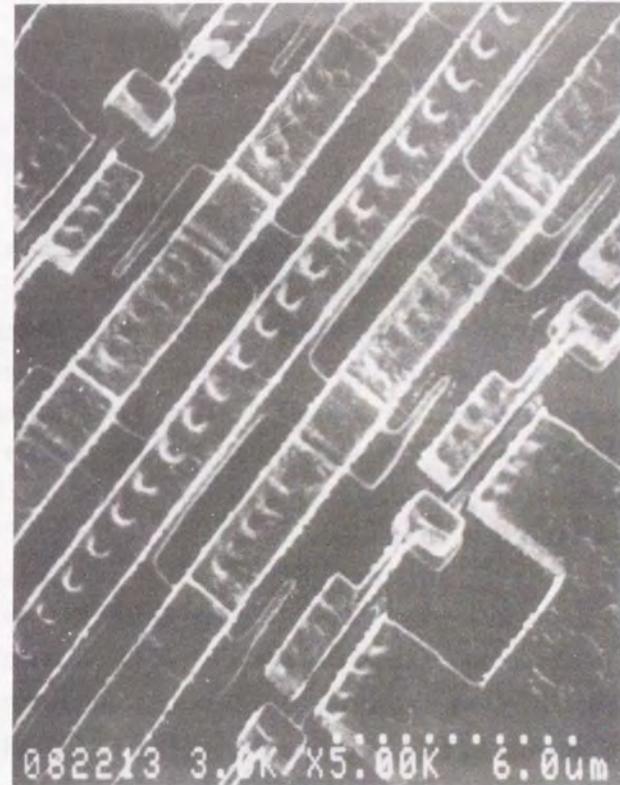


図5.25 試作されたリングオシレータ
(NTT LSI 研究所, 出口公吉主幹研究員提供)

5.5 本章の結論

第3章までに検討した全空気潤滑送り機構を、第4章でのX線露光装置における位置決め条件の検討結果に基づいて、シンクロトロン放射光X線露光装置に応用し、以下の結果を得た。

- (1) X線露光装置の基本構成は、互いに独立な6個の変位計測系と互いに独立な6軸方向の駆動系を組み合わせた位置決め装置として設計される。位置決め制御における6軸の駆動量は、上記計測量を変数とする6元連立一次方程式の解として与えられる。この一般化された解に対して、要求精度、要求速度などを考慮して、駆動機構と変位計測系を具体化することになり、X線露光装置を構成できる。ここにシンクロトロン放射光X線露光装置では、ギャップ方向の要求精度の余裕度が大きいことから、ギャップ方向3軸と面方向3軸の位置決め系を分離して効率的に設計できる。
- (2) シンクロトロン放射光を光源とするため形X線露光装置を設計、試作した。装置の基本要素として、ウエハ位置決め用ため形XYステージに空気潤滑ねじ送り機構を応用した。空気潤滑送りXYステージの運動面を基準とする露光ギャップの設定、レーザ干渉測長信号によるステップ位置決め、光ヘテロダイン干渉検出信号によるマスクとの位置合わせ制御を行ない、良好な動作特性を得た。動作速度は、露光フィールド間のステップ移動として0.4秒、XY軸位置合わせ制御として0.1秒が達成できた。
- (3) 露光実験により、ため形X線露光装置の性能を評価した。0.2 μ mバタンの良好な転写特性から、30 μ mの露光ギャップ設定、および、位置決め制御（位置合わせ制御）の安定性が確認でき、解像力は0.2 μ m以下と評価される。位置合わせ性能については、重ね合わせ露光実験により、下層ボタンに対する位置合わせ再現性として精度 ± 70 nm（3 σ 値）が得られた。また、種々の誤差要因を除去した二重露光法より、マスクに対するウエハの純機械的な位置決め繰り返し精度は ± 3.5 nm（3 σ 値）と評価できる。
- (4) 以上の性能をもとに、本X線露光装置を実際のデバイス試作プロセスに適用して良好な結果を得、露光装置のフィージビリティを確認することができた。

以上により、空気潤滑位置決め機構、および関連する技術はクォータミクロン領域に適用可能なシンクロトロン放射光X線露光装置の構成技術として有用な性能を有していることを明かにした。

第6章

本論文の総括

6.1 本研究のまとめ

6.2 今後の課題と展望

6.1 本研究のまとめ

本研究は、位置決め機構の高性能化にあたって、機構内部から固体摩擦を排除するというアプローチにより位置決め機構の高速化、高精度化を達成しようとする試みであり、送りねじを含む位置決め機構の空気潤滑を扱っている。本論文は、基本要素である空気軸受の材料から、空気軸受単体の特性、送りねじの空気軸受による非接触化、全空気潤滑ねじ送り機構の試作、そのX線露光装置への応用と、材料、部品から装置へと論旨を展開している。各章、節において得られた結論をまとめると以下のとおりである。

- (1) 位置決め機構の基本要素である案内において、静圧気体軸受は高精度化のために最適な要素の一つであり、剛性の問題を解決すれば超精密送り機構実現の有力な手段となる。

セラミック泥を発泡ウレタンに鋳込み、成形、焼結することにより製作されるセラミック製の多孔質材料は、素材を部分的に多孔質にできるという特徴、およびセラミック材料自体の高精度で目づまりのない被加工性、高い比剛性、低熱膨張率、などの特長を利用して、空気軸受用の絞りとして有効に利用することができる。そして、空気軸受への適用に際してその高性能化に極めて有用な方法は、セラミック多孔体の表層部に無電解ニッケルめっきを施すことによって空気軸受としての絞り抵抗を自在に制御することである。

このめっき膜付きのセラミック多孔体の空気軸受としての特性は、多数オリフィス絞りの静圧スラスト空気軸受モデルにより解析される。理論解析によって明らかとなる高剛性の空気軸受を達成する指針は、軸受すきまを狭め、それに応じて絞り抵抗を高めることである。これは、本セラミック多孔質軸受においては部品の加工精度を高めて狭い軸受すきまを実現し、無電解ニッケルめっきによって軸受表層部に強い絞り効果を与えることに対応している。実際、空気軸受特性の基礎実験から、軸受すきまに応じてめっきにより絞り抵抗を最適化することにより、無次元剛性0.5という高剛性の空気軸受が得られることが明らかとなる。

- (2) 案内機構の基本要素であるスラストベアリング、ジャーナルベアリング、直進案内などには、高精度化に有利な空気軸受が広く用いられている。しかしながら、らせん案内である送りねじは、その形状の複雑さゆえに狭い空気軸受すきまを実現することが難しく、十分な剛性が得られないことを理由に気体潤滑から取り残されてきた。位置決め用送り機構要素として最も一般

的な送りねじを気体潤滑できれば、長ストロークかつ超高分解能を兼ね備えた超精密送り機構を実現できるはずである。

そこで、高性能空気静圧送りねじ実現の新たなコンセプトとして、先にその特性を明らかにしためっき付きセラミック製多孔質絞りをを用い、かつねじ山を角ねじ化した基本構造を提案する。これに基づいて設計・試作した空気静圧送りねじでは、おねじの外径2.5mmの実用的サイズで3.2N/μmの軸方向静剛性が達成できる。この空気静圧送りねじを駆動要素に用いた全空気潤滑ねじ送り機構の静的な移動分解能は5nmである。また、空気膜の平均化効果により、送り精度は部品精度に対して1桁以上高精度化される。制御対象としてみると、機構内部に固体摩擦という非線形要素がないために、通常のPID線形フィードバック制御を適用でき、かつ長ストロークから超微小送りまで同一の制御パラメータにより、高速かつ安定な位置決め制御が可能である。これらの結果から、全空気潤滑ねじ送り機構は、ストロークの大きい超精密領域の送り機構として極めて有力な手段であると結論される。

- (3) X線露光の原理に基づいて、マスクとウエハの位置決めに要求される機能と性能を系統的に解析すると、X線露光装置の高性能化においては機械的な位置決めが極めて重要な役割を果たすことが明らかとなる。

X線露光の解像力は、点光源発散X線を用いる場合には半影ぼけの条件、シンクロトロン放射光を用いる場合にはフレネル回折の条件から、マスクとウエハ間の露光ギャップで支配される。高い解像力が得られるとされる放射光X線リソグラフィでも、解像力0.2μmを余裕をもって確保するには露光ギャップ30μm程度の狭いギャップが必要である。

バタンの重ね合わせ誤差のウエハ面上での現われ方は、マスクとウエハ相互の空間的な位置関係から解析され、位置合わせには互いに独立な6軸方向の位置決め(位置合わせ)が必要である。この時、ギャップ方向と面方向の要求精度比はマスクへのX線の入射角で決められる。このため、平行に近い光束を用いる放射光X線リソグラフィでは、ギャップ方向の位置決めへの要求精度が点光源発散X線を用いる場合に比べて大幅に緩和される。また、実際のシステム化に当たっては、マスク自身のバタン配置誤差、マスクやウエハの熱歪など物理的な位置ずれ誤差要因も考慮する必要がある。

スルーブットは、露光時間とそれ以外の非露光時間に分離して評価される。露光に要する時間は、露光フィールドサイズによらず、ウエハ上のX線強度、レジストの感度、およびウエハ

のサイズで一律に決まる。それ以外のウエハ処理時間は、露光フィールドサイズの2乗にほぼ反比例するため、スループット確保のためには、ウエハのステップ位置決めとマスクとの位置合わせに高速性が要求される。ここに、バタンの重ね合わせ精度とスループットが露光フィールドサイズをパラメータとしてトレードオフの関係にあり、適用するバタンルールに応じて最適な露光システムの設計がなされる。

- (4) シンクロトン放射光を用いる X線露光装置にここで検討した位置決め技術を適用し、その有効性を確認する。X線露光装置の基本構成は、互いに独立な6軸方向の位置計測値を変数とする6元連立一次方程式の解に基づいて、互いに独立な6軸を駆動する位置決め装置として設計される。このとき、位置決め機構への要求精度の違いを考慮して、ギャップ方向3軸と面方向3軸を個別に設計することが効率的である。

X線露光装置を設計、試作、評価した結果、以下の結論が得られる。空気潤滑ねじ送り機構を用いた空気潤滑たて形XYステージは、その高い運動精度からギャップ設定の基準として有効である。また、レーザー干渉測長によるウエハステップ位置決め、光ヘテロダイナミクス干渉式マーク検出信号によるマスクとの位置合わせともに安定に制御でき、これらに要する時間は0.5秒と高速の位置決めが可能である。

試作機のX線露光装置としての性能は、実際に露光実験を行なうことにより評価される。微細バタンの転写性能として高品質の $0.2\ \mu\text{m}$ バタンが得られることから、狭いギャップと安定な位置決めがなされていることが確認できる。また、露光実験による位置合わせ性能の評価結果は、下層バタンに対する位置合わせ再現性が $\pm 70\ \text{nm}$ 、位置決め機構の純機械的な位置決め繰り返し精度が $\pm 35\ \text{nm}$ であり、全空気潤滑ねじ送り機構による位置決めが有効に動作していることが実証される。さらに、試作したX線装置を実際のテストデバイスの露光プロセスに適用して良好な結果が得られ、本装置とここに適用した位置決め技術が、 $0.2\ \mu\text{m}$ 領域の微細バタン転写用X線露光装置の構成技術として有効であることが検証される。

6.2 今後の課題と展開

空気潤滑送り機構、およびX線露光装置に関する今後の課題と展開は以下のことが考えられる。

(1) 空気潤滑ねじ送り機構の超高精度化について

空気潤滑ねじ送り機構自身の送り精度については、第3章においてねじ軸1回転当たりのリード誤差である「よろめき」で評価したとき $0.2\ \mu\text{m}$ であることを示した。この精度はねじ軸の回転角を基準に、ある直進変位の絶対量を正確に送る精度としては十分な値とはいえない。このため、本送り機構のX線露光装置への適用に際しては、ナットの直進変位をレーザ干渉計で測長し、これをフィードバック量とするクローズドループ方式を用いた。しかしながらこの方法では、くさびによる変位の縮小、すなわち入力変位を大幅に縮小して出力変位を発生できるというらせん案内機構本来の特長を十分に生かしているとはいいがたい。加えて、第5章で明らかにしたように、位置決め用に現状で入手可能なレーザ干渉測長計を大気中で用いる限り、大気の揺らぎによるレーザの波長変動が引き起こす位置決め点の変動は避けることはできない。もし、ロータリエンコーダによって検出したねじ軸の回転角をフィードバック量とするセミクローズドループ方式によって、クローズドループ制御の場合と同等以上の精度で位置決め制御が可能ならば、変位縮小機能を十分に生かしながら、かつ、大気の揺らぎの影響による位置決め点の変動の問題を解決できるはずである。さらに、セミクローズド方式の方がクローズドループ方式よりも経済的であることは明らかである。これを実現するためには、空気潤滑ねじ送り機構自体の絶対送り精度を超高精度化することが課題となる。

そこで、第3章で指摘したように、本空気潤滑ねじ送り機構では空気膜の平均化効果が大きく作用して部品単体のピッチ精度よりも1桁高い送り精度が得られていることに着目する。この「平均化効果」がもたらす有効性は、本空気潤滑ねじ送り機構の部品加工に用いたねじ加工機の送り精度（工作機械の親ねじの精度）よりも、加工されたねじ部品で構成した送り機構の送り精度（子供の精度）が1桁改善されることにある。従って、空気静圧送りねじを親ねじとするねじ加工機によって空気静圧送りねじ（子供）を加工し、これで空気潤滑ねじ送り機構を構成すれば、親の空気潤滑ねじ送り機構より1桁高い精度を持った空気潤滑ねじ送り機構が得られることになる。さらに、親のねじ加工機の送りねじを、再度子供の空気静圧ねじで置き換え、孫となる空気静圧送りねじを加工して、これで空気潤滑ねじ送り機構を構成するというプロセスを繰り返せば、

機構の送り精度は、原理的には際限なく極限精度に近づいていくものと考えられる。

上記の方法を、空気静圧送りねじ高精度化における「子孫方式」と呼ぶとすれば、「機械で製作された機械はそれを製作した親機械の精度を越えられるか？」という命題に対して「可能である」という解を与える例と成り得る。

なお、「子孫方式」によって送りねじの加工精度を向上できれば、軸受すきまをより狭くし、めっきによって再度絞り抵抗を最適化することになり、軸方向静剛性をさらに高めること、および、給気流量を大幅に低減できることはもちろんである。

(2) 空気軸受における微小振動の問題について

超微小な変位を問題とする領域において、空気軸受を用いる位置決め機構の弱点は、位置決め状態で残留する微小振動を除去することの難しさである。

空気軸受では粘性の非常に低い気体を潤滑流体に用いるために、機構の内部に粘性減衰はほとんど期待できない。また、微小な変位の領域では、位置決め制御において減衰項となる速度が極めて小さくなるために速度検出が困難となり、速度帰還によって電気的に大きな粘性減衰効果を持たせることも難しくなる。このため、外乱や負荷変動に対する位置決め系の安定性を高くできないという問題がある。この問題に対する一つのアプローチは、本研究において示したように、直進変位を直接検出しこれをフィードバックする位置決め制御によって位置を整定させる方法であり、位置検出系の検出感度近傍までの位置決め安定性は達成することができる。しかしながら、大きな負荷変動がある機械への適用した場合に十分なサーボ剛性が得られるかどうか、あるいは、より高い周波数領域での微小振動を除去できるかどうかは、機構および制御系の応答特性をどこまで高くできるかにかかってくる。さらに、空気軸受においては、圧縮性流体を用いることによるニューマチックハンマの問題もあり、これは、空気の流れをどこまで完全層流に近づけられるかという問題となる。

そこで、潤滑流体を液体とし、機構自体に減衰性をもたせるというアプローチが考えられる。ここで、潤滑流体として潤滑油を用いると、空気に比べて設備がおおがかりとなる、クリーンな環境で利用できない、高速運動で発熱があるなどの問題が多いため、ここでは、水潤滑が有力な候補となる。本研究で用いている多孔質が比較的大きな気孔であるために液体潤滑が可能と考えられること、軸受主要部の素材がセラミックスであるために錆びの問題が小さいこと、などが水潤滑を有力とする根拠である。水潤滑によって本静圧送りねじにより高い剛性と減衰性を付与す

るというアプローチにより、 1 nm 領域での位置決めに応用可能な流体潤滑ねじ送り機構を実現できる可能性は大きいと考えられる。

(3) X線露光装置の課題と展望について

X線リソグラフィは、シンクロトロン放射光という光源を得て、産業用のリソグラフィ手段として始めて現実味を帯びてきたといえる。その最大の理由は、ウエハ上のX線強度を非常に強くできるために、実用に耐える生産性が得られる見通しが得られつつあることである。

さらに、X線露光装置における位置決め観点から見ると、露光ギャップ制御の余裕度が大きくなったことが重要な利点である。これは、従来の点光源発散X線の場合に必要なとされた狭くかつ一律なギャップ設定精度を得るための露光中のギャップサーボ、あるいはステップ移動ごとのマスクあるいはウエハの退避など、スループットを大幅に低下させる諸動作が不必要となるためである。本研究で示したように、放射光X線露光装置では、露光ギャップの設定はウエハごとの初期設定のみで済ませても、その位置さえ安定に維持しておけば、ギャップ変動が重ね合わせ精度に与える影響は極めて小さい。

これらのことから、X線露光装置の開発に残された課題は、面方向の位置決め、位置合わせ精度を極限まで高めることである。このために必要な技術は、位置決め機構のさらなる高剛性化と高精度化、位置計測系の高分解能化とウエハ表面変化への適応性増大、およびこれらを用いる位置決め制御の安定化である。また、対象とする変位が極めて微小な領域となっているため、温度変動、外部振動など装置が設置される環境対策も益々重要となる。なお、第5章で述べたように、得られた位置合わせ精度の評価結果がボタン位置測定装置の計測分解能とコンパラブルとなってきていることから、測定精度のより高精度な評価法の研究も必要となっている。

これらの研究開発を継続し、技術を高度化することにより、シンクロトロン放射光を用いるX線露光装置、およびX線リソグラフィは生産用の実用技術に発展していくことが期待できる。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、熱心な御指導と御教示を頂いた東京大学 工学部 精密機械工学科 新井民夫教授に深く感謝の意を表します。また、論文を査読頂き、貴重な御教示を頂いた東京大学 工学部 高野政晴教授、大園成夫教授、樋口俊郎助教授、ならびに河東田隆助教授に深く感謝申し上げます。

本研究は、NTT LSI 研究所におけるX線露光システムの研究開発の一環として行なわれたものであり、研究を進めるに当たって多くの方々の御指導、御鞭撻、御協力、御叱咤を頂きました。

最初に、本研究の主要部である空気潤滑機構の研究開発に当たって、長年に亘って常にパートナーとして共に議論し、アイデアを出し、行動を共にして頂いたNTT LSI 研究所 金井宗統主任研究員に心より感謝申し上げます。

NTT LSI 研究所 向井久和前所長（現在沖電気工業）、池田博昌所長、近藤衛元集積加工研究部長（現在NKK）、早坂東亜元特殊加工研究室長（現在安全管理室長）、北山豊樹主席研究員（現在三菱電機）、吉原秀雄主席研究員（プロジェクトチームリーダー）には、高い立場からのご指導と激励を頂きました。また、X線露光装置の研究開発に当たっては、機構部を前出の金井宗統主任研究員、計測系を鈴木雅則主任研究員、制御系を福田真主任研究員に担当頂き、熱心な議論と御意見を頂きました。また、同所第三プロジェクトチームの皆様には共にX線露光システムの研究開発を行なうメンバーとして様々の御意見を、微細加工研究部の出口公吉主幹研究員にはX線露光装置のユーザとしての御意見を頂きました。ここに、心からの謝意を表します。

また、精密位置決め機構とX線露光装置の製作にあたって、ウレタンフォーム多孔体やステージ機構を製作頂いたTOTO（株）、セラミックスの加工、機構の組立、調整、測定など装置の製作に多大な御協力を頂いた日本精工（株）に対し、ここに御礼申し上げます。

参考文献

参 考 文 献

Aoyama, H. and Shimokobbe, A. : Development of a High Precision Straight Motion System - 2nd Report, Control of Three Degrees of Freedom - , Bull. JSPE, 21, 2 (1987) 113.

Aritome, H., Matsui, S., Moriwaki, K., Hasegawa, S. and Namba, S. : Fabrication of Optical Devices by X-ray Lithography Using Synchrotron Radiation, Proc. 8th Int. Conf. Electron and Ion Beam Sci. Technol., Electrochemical Society, Princeton, New Jersey (1978) 468.

Atoda, N., Kawakatsu, H., Tanini, H., Ichimure, S., Hirata, M. and Hoh, K. : Diffraction Effects on Pattern Replication with synchrotron Radiation, J. Vac. Sci. Technol. B1(4), Oct.-Dec. (1983) 1267.

Austin, S., Smith, H. I. and Flanders, D. C. : Alignment of X-ray Lithography Masks Using A New Interferometric Technique — Experimental Results —, J. Vac. Sci. Technol. 15, 3 (1978) 984.

Betz, H., Fay, K. H., Heuberger, A. and Tisher, P. : Calculation of the Optimum Electron Energy of a Dedicated Storage Ring for X-ray Lithography, IEEE Trans. ED-26 (1979) 693.

Blondeel, E. and Soneys, R. : Externally Pressurized Bearing with Valiable Gap Geometries, Gas Bearing Symposium (1988) E2.

Bobroff, N., Tibbetts, R., Wilczynski, J. and Wilson, A. D. : Optical alignment microscope for x-ray lithography, J. Vac. Sci. Technol. B 4, 1 (1986) 285.

Cullmann, E., Cooper, K. A. and Vach, W. : An x-ray stepper for production lithography, SPIE, Vol. 773 (1987) 2.

Cullmann, E. : Experimental Results with A Scanning Stepper for Synchrotron-based x-ray Lithography, J. Vac. Sci. Technol. B 6, 6 (1988) 2132.

Deguchi, K., Kanai, M. and Kinoshita, H. : A Step-and Repeat X-Ray Lithography System SR-1 — 3. Positioning Mechanism System —, Bull. JSPE, 18, 3 (1984A) 199.

Deguchi, K., Takeuchi, N. and Kinoshita, H. : A Step-and Repeat X-Ray Lithography System SR-1 — 4. Mark Detecting Characteristics —, Bull. JSPE, 18, 1 (1984B) 197.

Deguchi, K., Takeuchi, N. and Kinoshita, H. : A Step-and Repeat X-Ray Lithography System SR-1 — 5. Overlay Accuracy —, Bull. JSPE, 18, 1 (1984C) 197.

Deguchi, K., Horiuchi, T., Tanaka, A. and Yoshikawa, A. : Resist Process for SOR Lithography, NTT Review, 2, 4 (1990) 108.

Economou, N. and Flanders, D. C. : Prospects for High Brightness X-ray Sources for Lithography, J. Vac. Sci. Technol. 19, 6 (1981) 868.

- Fay, B. S., Tritel, J. and Frichet, A. : Optical alignment system for submicron x-ray lithography, *J. Vac. Sci. Technol.* 16, 6 (1979) 1954.
- Fay, B. S. and Novak, W. T. : Advanced X-ray Alignment System, SPIE, Vol. 632 (1986) 146.
- Fay, B., Labrie, J. and Bijawat, S. : A Practical Submicron Lithography System Using A Conventional Source X-Ray Stepper, SPIE, Vol. 773 (1987)
- Feldman, M., White, A. D. and White, D. L. : Application of zone plate to alignment in microlithography, *J. Vac. Sci. Technol.* 19, 4 (1981) 1224.
- Feldman, M., White, A. D. and White, D. L. : Application of Zone Plate to Alignment in Microlithography, SPIE, Vol. 333 (1982) 124.
- Feldman, M., White, A. D. and White, D. L. : Application of Zone Plate to Alignment in Microlithography, *Optical Engineering*, 22, 2 (1983) 203.
- Flanders, D. C., Smith, H. I. and Austin, S. : A New Interferometric Alignment Technique, *Appl. Phys. Lett.*, 31, 7 (1977) 426.
- Flanders, D. C. and Lyszczarz, T. M. : A precision wide-range gap measurement technique, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1 (1983) 1196.
- Futami, S. and Furutani, A. : Nanometer Positioning Using AC Linear Motor and Rolling Ball Guide, *Bull. JSPE*, 24, 3 (1990) 184.
- Fukuda, M., Suzuki, M. and Ishihara, S. : Evaluation of A Vertical X-Ray Stepper, *Microcircuit Engineering*, 13 (1991) 305.
- Goto, H. and Sasaoka, T. : Vertical Micro Positioning System Using PZT Actuators, *Bull. JSPE*, 22, 4 (1988) 270.
- Haelobich, R. P., Silverman, J. P., Grobman, W. G., Maldonado, J. R. and Warlaumont J. M. : Design and Performance of an X-ray Lithography Beam Line at a Storage Ring, *J. Vac. Sci. Technol. B*1(4) (1983) 1262.
- Hayasaka, T., Ishihara, S., Kinoshita, H. and Takeuchi, N. : A step-and-repeat x-ray exposure system for 0.5 μm pattern replication, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 3, 6 (1985) 1581.
- Heinrich, K., Betz, H. and Heuberger, A. : Heating and Temperature-Induced Distortions on Silicon X-Ray Masks, *J. Vac. Sci. Technol. B*1, Nov. (1983) 1352.
- Henke, B. L., Lee, P., Tanaka, T. J., Shimabukuro, R. L. and Fujikawa, B. K. : Atomic Data and Nuclear Data Tables 27 (1982) 1.

- Heuberger, A. : X-ray lithography, *J. Vac. Sci. Technol.*, B 6, 1, Jan/Feb (1988) 107.
- Hosokawa, T., Kitayama, T., Hayasaka, T., Ido, S., Uno, A., Shibayama, A., Nakata, J., Nishimura, K. and Nakajima, M. : NTT Superconducting Storage Ring, Super-ALIS, *Rev. Sci. Instrum.* 60(7), July (1989) 1783.
- Ishihara, S. : High Precision Positioning for Submicron Lithography, *Bull. JSPE*, 21, 1 (1987) 1.
- Ishihara, S., Kitayama, T. and Yoshihara, H. : X-ray Lithography for Quarter-Micron Structures, Extended Abstract of 1st Micro Process Conf., Tokyo (1988) 72.
- Ishihara, S., Kanai, M., Une, A. and Suzuki, M. : A vertical stepper for synchrotron x-ray lithography, *J. Vac. Sci. Technol.*, B7(6), Nov/Dec (1989) 1652.
- Ishihara, S., Kanai, M., Une, A. and Suzuki, M. : An X-ray Stepper for SOR Lithography, *NTT Review*, 2, 4 (1990) 92.
- Ishihara, S., Kanai, M., Suzuki, M. and Fukuda M. : An Advanced X-ray Stepper for 1/5 mm SR Lithography, *Microcircuit Engineering* 14 (1991) to be published.
- Itoh, J. and Kanayama, T. : A new interferometric displacement-detection method for mask-to-wafer alignment using symmetrically-arranged three gratings, *J. Appl. Phys.*, 25 (1986) L487.
- Kanai, M., Takeuchi, N. and Kinoshita, H. : An Elastic Fine Positioning Mechanism Applied to Contactless X-Y Table, *Bull. JSPE*, 17, 4 (1983) 265.
- Kaneko, T., Suzuki, M., Ozawa, A. and Ohkubo, T. : Measurement of Mask Temperature Rise and Distortion in SR Lithography, Extended Abstract of the 17th Conf. on SSDM, Tokyo (1985) 353.
- Kaneko, T., Itabashi, S., Saitoh, Y., Yoshihara, H. and Kitayama, T. : A Beamline and Its Components for SR Lithography, *JJAP Series 3, Proc. of 1989 Intern. Symp. on MicroProcess Conf.* (1989) 116.
- Kawaguchi, E., Takeuchi, N. and Ishihara, S. : A Step-and Repeat X-Ray Lithography System SR-1 — 2. Alignment System —, *Bull. JSPE*, 16, 3 (1982) 197.
- Kinoshita, H., Ishihara, S., Hayasaka, T. : A Step-and-Repeat X-Ray Lithography System SR-1 — 1. System Design —, *Bull. JSPE*, 16, 3 (1982) 195.
- Kinoshita, H., Une, A. and Iki, M. : A dual grating alignment technique for x-ray lithography, *J. Vac. Sci. Technol. B* 1, 4 (1983) 1276.
- Kitayama, T., Hayasaka, T., Yoshihara, H. and Ishihara, S. : Synchrotron X-ray Lithography System Using A Compact Source, SPIE Vol. 1089 (1989) 159.

- Koga, K., Nomura, J., Yasui, J., Terui, Y., Nagano, H., Fujita, K., Kusumoto, K., Nakano, K., Nakanishi, S., Mizuguchi, S., Aoki, S., Yamamoto, K., Yamaguchi, Sato, T., Matsuo, K. and Yanagida, K. : High-performance synchrotron x-ray stepper, *J. Vac. Sci. Technol. B* 8, 6 (1990) 1633.
- Kouno, E., Tanaka, Y., Iwata, J., Tasai, Y., Kakimoto, E., Okada, K., Suzuki, K., Fujii, K. and Nomura, E. : An x-ray stepper for synchrotron radiation lithography, *J. Vac. Sci. Technol. B* 6(6), Nov/Dec (1988) 2135.
- Lyszczarz, T. M., Flanders, D. C., Economou, N. P. and DeGraff, P. D. : Experimental evaluation of interferometric alignment techniques for multiple maskregistration, *J. Vac. Sci. Technol.* 19, 4 (1981) 1214.
- MacIntosh Jr, R. B., Hughes, G. P., Krenzer, J. L. and Conti Jr, G. R. : X-ray Step-and-Repeat Lithography System for Submicron VLSI, *SPIE Vol. 632* (1986) 156.
- McCoy, J. H. and Sullivan P. H. : Mask Alignment for the Fabrication of Integrated Circuits Using X-ray Lithography, *Solid State Technol.*, Sept. (1976) 59.
- Mizumoto, H., Usuki, M. and Matsubara. : An Aerostatic Lead screw with a Surface Restriction System, *Bull. JSPE*, 23, 2 (1989A) 105.
- Mizumoto, H., Matsubara, T., Hata, N. and Usuki, M. : An Aerostatically Controlled Restrictor for Obtaining an Infinite Stiffness Aerostatic Thrust Bearing, *Bull. JSPE*, 23, 3 (1989B) 205.
- Mori, H. and Yabe, H. : Theoretical Investigation of Externally Pressurized Gas-Lubricated Porous Journal Bearing with Surface-Loading Effect, *Trans. ASME, J. of Lubrication Tech.*, April (1973) 195.
- Moriyama, S., Harada, T. and Takanashi, A. : Precision X-Y Stage with a Piezo-driven Fine-table, *Bull. JSPE*, 22, 1 (1988) 13.
- Murakami, S., Matsuura, T., Ogawa, M. and Uehara, M. : Laser Step Alignment for A Wafer Stepper, *SPIE*, Vol. 538 (1985) 9.
- Nelson Jr, D. A., Dimilia, V. and Warlaumont, J. : A wide-range alignment system for x-ray lithography, *J. Vac. Sci. Technol.* 19, 4 (1981) 1219.
- Oertel, K. H., Weiss, M. and Huber, H.-L. : Investigation of the Process Latitude for Sub-half micron Pattern Replication in X-ray Lithography, *Microelectronic Engineering*, 13 (1991)
- Ohki, S., Kakuchi, M., Matsuda, T., Ozawa, A., Ohkubo, T., Oda, M. and Yoshihara, H. : Ta/SiN-Structure X-Ray Masks for Sub-Half-Micron LSIs, *JJAP*, 28, 10 (1989) 2074.
- Ohki, S. and Yoshihara, H. : High-Precision X-Ray Mask Technology, *JJAP*, 29, 11 (1990) 2600.

- Ohki, S., Oda, M., Kakuchi, M. and Yoshihara, H. : High-Accuracy X-Ray Masks with Sub-Half-Micron 1M-DRAM Chips, *Microelectronics Engineering*, 13, 1-4 (1991) 251.
- Okada, I., Saitoh, Y., Itabashi, S. and Yoshihara, H. : A Plasma X-ray Source for X-Ray Lithography, *J. Vac. Sci. Technol. B* 4(1) Jan/Feb (1986) 243.
- Rumberger, J. H. and Wertwijn, G. : Hydrostatic Lead Screws, *Machine Design*, April 11, (1968) 218.
- Silverman, J. P., Grobman, W. G., Maldonado, J. R. and Warlaumont J. M. : X-ray Lithography Exposures Using Synchrotron Radiation, *SPIE Vol. 393* (1983) 99.
- Silverman, J. P. et al. : Fabrication of fully scaled 0.5- μm n-type metal-oxide semiconductor test devices using synchrotron x-ray lithography, *J. Vac. Sci. Technol.*, B6(6), Nov/Dec (1988) 2147.
- Spears, D. L. and Smith, H. I. : High Precision Pattern Replication Using Soft X-rays, *Electron. Lett.* 8, 4 (1972A) 102.
- Spears, D. L. and Smith, H. I. : X-Ray Lithography - A New High Resolution Replication Process, *Solid State Technol.* 15, 7 (1972B) 21
- Spiller, E., Eastman, D. E., Feder, R., Grobman, W. D., Gudat, W. and Topalian, J. : Application of Synchrotron Radiation to X-ray Lithography, *J. Appl. Phys.*, 47 (1976) 5450.
- Suzuki, K., Matsui, J., Okada, K., Endo, N. and Iida, Y. : Half Micron CMOS Device Fabrication Using Hybrid Lithography with X-Ray and Optical Steppers, *SPIE*, Vol. 632 (1986) 139.
- Suzuki, M., Kaneko, T. and Saitoh, Y. : Replicated resist pattern resolution with synchrotron orbital radiation, *J. Vac. Sci. Technol.*, B7(1), Jan/Feb (1989A) 47.
- Suzuki, M. and Une, A. : An optical-heterodyne alignment technique for quarter-micron x-ray lithography, *J. Vac. Sci. Technol.*, B7(6) (1989B) 1971.
- Tanaka, Y., Kouno, E. and Iwata, J. : An Alignment System for X-ray Lithography, *Microelectronics Engineering*, 12 (1990)
- Taniguchi, M. and Funatsu, R. : Wafer-Surface Flattening Control with Piezo Actuators, *Bull. JSPE*, 22, 1 (1988) 66.
- Taniguchi, M., Funatsu, R., Inagaki, R., Okamoto, K., Kenbo, Y., Kato, Y. and Ochiai, I. : X-Ray Exposure System with Plasma Source for Microlithography, *SPIE*, Vol. 775 (1989)
- Uchida, N., Takahashi, Y., Yamada, N. and Horokawa, T. : A Vertical X-Y Stage for X-Ray Lithography using SOR, *Bull. JSPE*, 23, 1 (1988) 102.

- Uchida, N., Ishibashi, Y., Hirano, R., Kikuri, N. and Tabata, M.: A Dual Grating Alignment Method Insensitive to Mask-Wafer Gap Vibration, Bull. JSPE, 23, 1 (1989) 140.
- Uchida, N., Ishibashi, Y., Hirano, R. and Kikuri, N.: A Gap Setting Method for X-Ray Lithography Using Dual Gratings, Bull. JSPE, 24, 2 (1990) 136.
- Unc, A., Suzuki, M., Okada, I., Saitoh, Y. and Yoshihara, H.: High Throughput and Accuracy X-Ray Stepper with Plasma Source, SPIE, Vol. 773 (1987) 45.
- Unc, A., Takeuchi, N. and Torii, Y.: A high-accuracy alignment technique using single- and double-pitch dual gratings, J. Vac. Sci. Technol. B 8, 1 (1990) 51.
- Warloulmont, J.: X-ray lithography — On the path to manufacturing —, J. Vac. Sci. Technol. B 7, 6 (1989) 1634.
- Winick, H. and Doniach, S.: Synchrotron Radiation Research, Plenum Press, NY (1980).
- Yamazaki, S., Nakayama, S., Hayasaka, T. and Ishihara, S.: X-ray exposure system using finely position adjusting apparatus, J. Vac. Sci. Technol. 15, 8 (1978) 987.
- Yamazaki, S. and Hayasaka, T.: X-Ray Lithography, Proc. 11th Conf. on SSD, Tokyo (1979), JJAP, 19, Supplement 19-1 (1979) 35.
- Yamazaki, S., Nakayama, S., Ishihara, S. and Sasayama, S.: High Accuracy X-Ray Lithography System, Bull. JSPE, 14, 3 (1980) 137.
- Yanof, A. W., Resnick, D. J., Jankoski, C. A. and Johnson, W. A.: X-Ray Mask Distortion: Process and Pattern Dependence, Proc SPIE, Vol 632 (1986) 118.
- Yoshihara, H., Okada, I., Saitoh, Y. and Itabashi, S.: Characteristics of a gas-puff z-pinch plasma x-ray source, SPIE Proc. Vol. 448 (1986) 60.
- Yoshikawa, A., Horiuchi, T., Deguchi, K., Miyake, M., Yamamoto, E., Sakakibara, Y. and Kitayama, T.: Synchrotron Radiation Lithography Applied to Fabrication of Deep-Submicron NMOS Devices at All Exposure Levels, Microelectronic Engineering 11 (1990) 233.
- ホリカワ, O., 安原健次, 長田秀次, 下河辺明: アクティブエアベアリングの動剛性制御, 精密工学会誌, 55, 3 (1989A) 569.
- ホリカワ, O., 長田秀次, 下河辺明: ジャーナル型アクティブエアベアリング—ラジアル方向2自由度の制御, 精密工学会誌, 55, 11 (1989B) 2063.
- ラウス, H. 著, 有江幹男訳: 流体工学, 工学図書 (1986)

- 青木芳人, 川瀬佳洋, 深田茂生, 大塚二郎: ねじ駆動による超精密位置決め (第1報) — すべりねじとボールねじによる基礎的研究 —, 精密工学会誌, 56, 11 (1990) 2033.
- 青山尚之, 下河辺明: 高精度な直線運動に関する研究 (第2報) — 3自由度制御直動システム —, 精密機械, 51, 4 (1985A) 848.
- 青山尚之, 渡辺一郎, 下河辺明: 高精度な直線運動に関する研究 (第3報) — 5自由度制御直動システム —, 精密機械, 51, 12 (1985B) 2277.
- 青山尚之, 渡辺一郎, 堆浩太郎, 下河辺明: 超高精度直線運動機構 (第1報) — 機構の試作と2自由度制御 —, 精密工学会誌, 54, 2 (1988) 329.
- 荒井隆, 稲崎一郎, 青山藤詞郎, 米津栄, 伊庭剛二: 静圧空気送りねじの開発, 日本機械学会論文集, 820, 16 (1982) 51.
- 猪城真, 竹内信行, 宇根篤暢, 鳥居康弘: 回折格子による高精度位置合わせ法 (第1報) — 単一・2重回折格子による位置合わせ —, 精密工学会誌, 53, 5 (1987) 717.
- 石橋頼幸, 平野亮一, 西田純, 内田憲男: 光ヘテロダイン干渉法によるマスクとウエハの位置ずれおよびギャップ検出法, 1990年度精密工学会春季大会学術講演会論文集 (1990) 765.
- 石原直: X線露光用位置合わせ法の研究, 精密機械, 46, 8 (1980) 1003.
- 石原直, 金井宗統: セラミック空気静圧ねじの開発 (III), 1989年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, (1989) 683.
- 石原直, 金井宗統, 宇根篤暢, 鈴木雅則: SOR用縦形X線ステップの開発, 昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, (1987) 599.
- 石原直, 宇根篤暢, 金井宗統, 鈴木雅則, 福田真, 小俣富士夫: SOR用たて形X線ステップの開発, 精密工学会誌, 57, 3 (1991) 459.
- 石原直, 宇根篤暢, 金井宗統, 鈴木雅則: SOR用X線ステップ, NYYR&D, 39, 4 (1990) 581.
- 糸目谷享, 青山藤詞郎, 稲崎一郎: ダイアフラムを用いた自動調整絞り空気軸受の負荷特性, 1989年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集 (1989), 401.
- 伊庭剛二: 超精密スラスト空気軸受とその実用例: 設計・製図, 25, 11 (1990) 427.
- 伊庭剛二: 静圧ねじの構造とその応用: 機械の研究, 36, 7 (1984) 793.

- 宇根篤暢, 鈴木雅則, 岡田育夫, 斎藤保直, 吉原秀雄: プラズマX線源を搭載したX線露光装置, SDM87-65 (1987) 19.
- 宇根篤暢, 鈴木雅則, 岡田育夫, 斎藤保直: プラズマX線源形高速高精度X線露光装置, 研究実用化報告37, 3 (1988) 267.
- 宇根篤暢, 猪城真, 竹内信行, 鳥居康弘: 回折格子による高精度位置合わせ法 (第2報) — 倍ピッチ2重回折格子によるギャップ・位置検出 —, 精密工学会誌, 55, 1 (1989A) 130.
- 宇根篤暢, 猪城真, 竹内信行, 木内一秀: 回折格子による高精度位置合わせ法 (第3報) — 単一・倍ピッチ2重回折格子のプロセス適用性 —, 精密工学会誌, 55, 6 (1989B) 1047.
- 宇根篤暢, 鈴木雅則: 光ヘテロダイン式高精度位置合わせ法, 1989年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集 (1989C) 661.
- 宇根篤暢, 鈴木雅則: ヘテロダイン計測用2波長半導体レーザの開発, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集 (1990) .
- 内田憲男, 高橋良彦, 山田昇, 広川利夫: 自重補償機構を備えた縦形の超精密XYステージ, — 摩擦の影響を考慮した位置決め —, 精密工学会誌, 54, 5 (1988A) 884.
- 内田憲男, 石橋頼幸, 平野亮一, 菊入信孝, 田畑光雄: 二重回折格子による間隙変化に鈍感なマウクとウエハの位置合わせ法, 精密工学会誌, 54, 10 (1988B) 1951.
- 内田憲男, 石橋頼幸, 平野亮一, 菊入信孝: 回折格子によるマウクとウエハの間隙設定法, 精密工学会誌, 55, 5 (1989) 902.
- 大塚二郎, 高橋道郎, 白田孝, 東福真, 青木芳人: 摩擦駆動による精密位置決め研究 (第2報) — 台形速度制御 —, 精密工学会誌, 55, 1 (1989) 123.
- 大塚二郎, 局又太郎, 羽村雅之: 静圧ねじの研究—修正台形ねじ山形の場合—, 精密機械, 49, 8 (1983) 1083.
- 岡田正思: 高精度XYステージ, 精密機械, 51, 1 (1985) 104.
- 岡野真, 十合晋一: 多孔質静圧気体軸受の静的特性, 潤滑, 20, 5 (1975) 393.
- 金井宗統, 石原直: セラミック空気静圧ねじの開発 (I), 昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, (1987A) 595.
- 金井宗統, 石原直: セラミック空気静圧ねじの開発 (II), 昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, (1987B) 597.

- 金井宗統, 小俣富士男, 福田真, 石原直: 高精度縦形XYステージ, 1989年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, (1989) 407.
- 金井宗統, 石原直: セラミック製空気静圧送りねじの開発, 精密工学会誌, 56, 12 (1990) 2201.
- 金井宗統, 福田真, 石原直: SOR用たて形XYステージ, 1991年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, (1991) 369.
- 金子礼三: 流体潤滑の数値計算における離散値化手法, 潤滑, 29, 9 (1984) 633.
- 河島巖, 十合晋一, 佐藤定男, 玉田紀治: 多孔性セラミック気体軸受の特性 (第1報), 精密工学会誌, 56, 10 (1990) 1853.
- 木下博雄, 金井宗統, 出口公吉, 齊藤忠男: 空気浮上式高速XYステージの試作, 精密工学会誌, 52, 10 (1986) 1713.
- 小林功, 稲崎一郎, 青山藤詞郎, 伊庭剛二: 全静圧空気潤滑テーブルシステムの開発, 日本機械学会論文集, 830, 164 (1982) 223.
- 小暮賢司, 金子礼三, 大谷幸司: T溝形表面紋り軸受の特性, 日本機械学会論文集, 48, 428C (1982) 583.
- 小山武志, 青山藤詞郎, 稲崎一郎: 多孔質セラミックス静圧空気軸受の負荷特性, 日本機械学会論文集, 55, 551C (1989) 750.
- 河野英一, 田中良治, 岩田穰治, 柿本恵未, 田崎義幸, 梅垣淳一: シンクロトロン放射光を用いた大気中X線露光装置の開発, 1989年度精密工学会春季大会学術講演会論文集 (1989) 685.
- 里見忠篤, 山本見: 空気式静圧送りねじに関する研究 (第2報) — 1リード分のめねじを用いた場合の静剛性 —, 精密機械, 51, 10 (1985A) 1915.
- 里見忠篤: 空気式静圧案内に関する研究—電磁力制御による振動減衰性の改善と自動振動防止—, 精密機械, 51, 12 (1985B) 2259.
- 下河辺明, 青山尚之, 片桐創一, 梅澤清彦: 静圧直線案内のベルト駆動 (第1報) — 直線運動精度 —, 精密工学会誌, 53, 6 (1987) 915.
- 末松正典, 藤井崇男, 川原敦志, 谷本智昭, 松本敏雄, 渡辺秀明: リニアモータによる超精密位置決め技術の開発, 精密工学会誌, 56, 10 (1990) 1829.
- 杉山定夫, 後藤博史: X線露光用空気静圧浮上式XYステージの開発, 昭和60年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集 (1985) 221.

- 鈴木雅則, 宇根篤暢: 光ヘテロダイン干渉式位置検出法, 精密工学会誌, 57, 2 (1991A) 267.
- 鈴木雅則, 宇根篤暢: 光ヘテロダイン干渉式ギャップ検出法, 精密工学会誌, 57, 6 (1991B) 1072.
- 鈴木雅則, 金井宗統, 福田真, 石原直: SOR リソグラフィ用 X 線ステッパの開発, 1991 年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, (1991) 365.
- 高橋道郎, 大塚二郎, 小野一也, 白田孝, 東福真: 摩擦駆動による精密位置決め研究 (第 1 報) — 構造とトラクション特性 —, 精密工学会誌, 54, 4 (1988) 715.
- 田中信章ほか: 多孔質空気軸受式直線ガイド, 昭和 60 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集 (1985), 330.
- 田中良治, 岩田穠治, 河野英一, 鈴木克美, 岡田浩一: 差動型 L F Z P 法による X 線露光装置における位置ずれ検出, 1989 年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集 (1989) 665.
- 谷口素也, 稲垣見, 見坊行雄, 久瀨朝広, 船津隆一: ピエゾ素子駆動形ウエハ変形チャックを用いたウエハ平面平坦化制御, 精密工学会誌, 55, 5 (1989A) 921.
- 谷口素也, 稲垣見, 見坊行雄, 岡本啓一, 船津隆一: 斜方結像光学系を用いたウエハ X 線露光装置用アライメントパターン検出法, 精密工学会誌, 55, 9 (1989B) 1687.
- 谷口素也, 船津隆一, 稲垣見, 岡本啓一, 加藤靖夫, 落合勲: プラズマ線源方式 X 線露光システムの開発, 1989 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集 (1989C) 283.
- 谷口素也, 池田稔, 稲垣見, 船津隆一: 6 自由度微動機構による超精密ウエハ位置決め, 精密工学会誌, 56, 6 (1990) 1094.
- 田畑光雄, 東条徹: 市松格子を用いた二重回折格子法位置合わせ (第 1 報) — アライメント性能評価 —, 精密工学会誌, 55, 7 (1989) 1235.
- 辻道緒, 小柴美仁, 日戸興史: 8 インチウエハ対応静圧浮上式 X Y ステージの開発, 昭和 61 年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集 (1986) 549.
- 局又太郎, 山本見: 静圧送りねじの研究 (第 2 報) — 自動調心機能を持つものの試作 —, 精密機械, 48, 10 (1982) 1341.
- 局又太郎, 山本見, 蚊戸俊一, 竹内克之: 静圧送りねじの研究 (第 3 報) — 加工の容易さと静剛性の向上を目的とするものの試作研究 —, 精密機械, 49, 7 (1983) 889.
- 出口公吉, 竹内信行, 木下博雄: X 線露光装置 SR-1 のアライメント性能評価, 精密機械, 51, 5 (1985) 1040.

- 出口公吉, 堀内敏行, 田中啓順, 吉川昭: SOR リソグラフィ用レジストプロセス, NTT R & D, 39, 4 (1990) 601.
- 十合晋一, 岡野真, 秋山好胤: 多孔質静圧気体軸受—その性能に関する実験的研究—, 潤滑, 17, 6 (1972) 360.
- 十合晋一: 気体軸受—設計から製作まで—, 共立出版, (1984).
- 十合晋一: 精密工学会「高剛性空気軸受の調査研究分科会」資料 (1990).
- 難波進: 放射光による微細加工, 加速器とその応用, 日本物理学会編, 丸善 (1981) 295.
- 日本規格協会: JIS B 1192-1990 精密ボールねじ, JIS ハンドブック 機械要素 (1990) 919.
- 日本機械学会: 気体軸受に関する調査研究分科会報告, (1972).
- 野村登, 山下一博, 竹本豊樹: ホログラフィ法によるステッパ用ナノメータ検出法, SSD85-108 (1985) 35.
- 服部秀三, 内田悦行, チトニス, B.: モアレ干渉を用いた超精密自動位置決め技術, 精密機械, 51, 9 (1985) 1795.
- 平田二郎, 山口利明, 林信秀, 井手和男: ボールねじリード精度の精密測定, 潤滑, 26, 8 (1981) 533.
- 福田真, 石原直, 金井宗統: セラミックス空気静圧ねじの開発 (IV), 1990 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, (1990) 781.
- 福田真, 金井宗統, 石原直: 空気静圧ねじ送り機構の制御, SICE'91, July, Yonezawa (1991) 353.
- 二見茂, 古谷彰浩: ナノメータ位置制御システムの研究, 吉田ナノ機構プロジェクト研究論文集, 新技術事業団, 平成 3 年 3 月 (1991) 33.
- 古川勇二, 大石進: モールド法による空気静圧送りねじの設計原理と試作: 昭和 61 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集 (1986) 875.
- 古屋善正, 村上光清, 山田豊: 流体工学, 朝倉書店 (1989) 77.
- 辺見信彦, 和田真一, 青山尚之, 長田秀治, 下河辺明: 6 軸微動機構の研究, 精密工学会誌, 55, 4 (1989) 761.
- 本郷健, 原田正躬, 宮地隆太郎: 圧電素子可変絞りをを用いた静圧気体スラスト軸受の研究, 潤滑, 32, 12 (1987) 894.

- 松本秀樹, 山口城治, 青山尚之, 下河辺明: 超高精度直線運動機構(第2報) — 5 自由度の制御 —, 精密工学会誌, 54, 10 (1988) 1945.
- 水兼正博: ファインセラミックスによる精密運動要素の開発, 精密工学会誌, 54, 7 (1988) 1245.
- 水谷隆, 岡本清和, 大庭信男, 張玉武: デジタルサーボ系におけるサンプリング間隔の影響に関する基礎的考察, 精密工学会誌, 56, 6 (1990) 1100.
- 水本洋, 松原十三生, 久保昌臣: 静圧ねじの試作(第1報) — 絞り特性および有効軸受面積の解析 —, 精密機械, 48, 10 (1982) 1291.
- 水本洋, 松原十三生, 久保昌臣: 静圧ねじの試作(第2報) — スラストおよびラジアル剛性の解析 —, 精密機械, 49, 6 (1983) 760.
- 水本洋, 松原十三生, 牧本良夫: フランク面にステップを持った空気静圧ねじの試作, 精密工学会誌, 53, 4 (1987) 646.
- 水本洋, 松原十三生, 畑直秀, 薄木雅雄: 自動調整絞りの使用による空気静圧軸受の高剛性化に関する研究, 精密工学会誌, 55, 1 (1989A) 135.
- 水本洋, 松原十三生, 藪谷誠: 自動調整絞り付高剛性空気静圧軸受の動特性に関する研究, 精密工学会誌, 55, 9 (1989B) 1694.
- 水本洋, 山本久隆, 奥野勝則, 松原十三生, 川上隆一: 排気制御絞りによる空気静圧軸受の無限剛性化, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集(1990), 77.
- 宮武勤, 浜田史郎: 色収差2重焦点装置による高精度位置検出(第1報), 1989年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集(1989A) 667.
- 宮武勤, 浜田史郎: セレクタフレネルレンズによる高精度位置検出(第1報), 1989年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集(1989B) 665.
- 宮地隆太郎, 原田正躬, 林孝: フィールドダンパを付加した静圧気体スラスト軸受の応答特性, 990年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集(1990) 75.
- 宮地隆太郎, 原田正躬: 能動型静圧気体スラスト軸受の過渡応答特性, 精密工学会誌, 56, 6 (1990) 1111.
- 森美郎, 矢部寛, 大西邦彦, 雨森宏一: 長方形静圧気体スラスト軸受の理論, 日本機械学会論文集(第3部), 32, 233 (1966) 154.
- 森美郎, 矢部寛, 山藤英実: 多孔質静圧気体ジャーナル軸受の理論解析, 日本機械学会論文集(第3部), 35, 271 (1968) 666.

- 森山茂夫, 原田達男, 高梨明紘: 圧電素子アクチュエータを備えた超精密微動台, 精密機械, 50, 4 (1984) 718.
- 諸貫信行, 古川勇二, 久保博義: 空気静圧軸受の利用による超精密案内面の設計と評価, 精密工学会誌, 55, 5 (1989) 908.
- 諸貫信行, 古川勇二: 摩擦駆動による精密送り機構に関する研究, 精密工学会誌, 54, 11 (1988) 2113.
- 矢部寛ほか: 表面絞り形スラスト軸受の特性, 日本機械学会論文集, 45, 398C (1979) 100.
- 矢部寛, 北浜正法, 森美郎: 多孔質静圧気体スラスト軸受の基礎特性に関する研究, 潤滑, 26, 1 (1981) 49.
- 山口将明, 清水弘幸, 竹内芳美, 稲田久, 佐田登志夫: 摩擦駆動による精密送り装置の開発, 精密工学会誌, 56, 1 (1990) 146.
- 山崎新一, 中山了, 石原直, 篠山伸彌: 高精度X線露光装置の開発, 精密機械, 46, 4 (1980) 473.
- 山本規徳, 中杉幹夫: 多孔質エアベアリングの特性と応用例, 精密工学会講演会資料「最近の高性能非接触軸受」(1988) 23.
- 横川和彦, 畠山昇: 静圧ねじ — 外国の文献から —, 精密機械, 40, 6 (1974) 64.
- 吉原秀雄, 石原直, 早坂東亜, 松尾誠太郎, 木下博雄: X線露光技術, 研究実用化報告, 30, 7 (1981) 1843.
- 吉本成香: サブミクロン軸受すきまで動作する静圧気体スラスト軸受, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集(1990) 73.
- 吉本成香: 空気軸受の高性能化とその応用, 精密工学会誌, 57, 4 (1991) 589.
- 渡辺一郎, 青山尚之, 下河辺明: 能動空気軸受 — 浮上方向の位置と振動の調整密制御 —, 精密工学会誌, 54, 2 (1988) 329.

