

---

# ナノオーダー位置決め精度を有するX- $\theta$ ステージ

## An X- $\theta$ Stage Having Nano-Meter Order Positioning Accuracy

宮田 弘幸\*      遠藤 英康\*      藤田 滋\*      渡部 寿夫\*      小原 隆\*  
Hiroyuki MIYATA      Hideyasu ENDO      Shigeru FUJITA      Hisao WATANABE      Takashi OBARA  
村山 昇\*      水田 治\*  
Noboru MURAUAMA      Osamu MIZUTA

---

### 要 旨

次世代の高密度光ディスクやフレネルレンズ・HOE等光学素子に必要なナノパターン加工に対応する電子線描画装置への適用を目指し、真空中で使用可能な送り (X) ステージと回転 ( $\theta$ ) ステージを備えた高精度X- $\theta$  ステージを開発している。高い位置決め精度を実現する送りステージには高剛性な摩擦駆動方式を、高速・高精度回転を実現する回転ステージには真空シール付エアスピンドルを採用した。とくに送りステージは、摩擦駆動方式をツイストローラーで構成する独自方式としたことにより、真空環境においてナノメータオーダーの超精密位置決め能力を有する。

### ABSTRACT

A precise X- $\theta$  stage available in vacuum composed of translation (X) stage and rotation ( $\theta$ ) stage is developed aiming to apply electron beam drawing machine which enables nano-patterning required to high density optical disks of the next generation and optical elements such as fresnel lens and HOE. The translation stage adopts high rigidity friction-drive mechanism to bring high positioning accuracy. Also the rotation stage uses air bearing mechanism with vacuum sealing to bring high rotational frequency with accuracy. Especially, the translation stage has ultra precise positioning capability of nano-meter order in vacuum environment by using an unique friction-drive mechanism consisting of twisted rollers.

---

\* 研究開発本部 生産技術研究所  
Manufacturing Technology R&D Center, Research and Development Group

## 1. 背景と目的

近年、光分野においては光ディスクをはじめフレネルレンズやHOE等の回折光学素子のように、スパイラルあるいは同心円状に描かれるパターンが存在する微細パターン加工が要求されている。これらのパターン加工では、直動(X)ステージと回転( $\theta$ )ステージを組み合わせたX- $\theta$ ステージの利用が好適となる。たとえば、光ディスクでは“マスター”と呼ばれる原盤からレプリカを複製して量産するが、原盤作製(マスタリングという)にはレーザービームとX- $\theta$ ステージの組み合わせが利用されてきた。レーザービームスポット径は波長とレンズの開口数(NA)によって決まり、紫外線レーザーを利用すれば200nm程度のビーム径が得られる<sup>1)</sup>。ところが青紫LD世代に続く次世代高密度光ディスクでは、100nmの情報パターンが200nm間隔のスパイラル上に形成されると考えられ、たとえ短波長の紫外線レーザーでもビーム径がパターンより大きくなるためマスタリングに対応できなくなる。

一方、半導体分野では電子ビームを用いて光分野より微細なパターン加工の開発が進められている。電子ビームではレーザーより小さなビーム径が得られ、すでに半導体マスク用の電子ビーム描画装置ではパターン幅100nmレベルが実用化されている。しかし、半導体のパターンは基本的に直線で構成されるため、これら電子ビーム描画装置のほとんどが2軸の直動ステージ(X-Yステージ)を利用しており、これらを使ってスパイラルや同心円パターンを精度良く描画することは困難である。電子ビームとX- $\theta$ ステージの組み合わせが望まれるが、従来のレーザー用X- $\theta$ ステージは大気中の使用を前提にエアスライダやエアスピンドルを使っているため、真空環境が必須の電子ビーム描画装置にそのまま転用することは出来ない<sup>2)</sup>。

そこで、著者らは次世代の高密度光ディスクマスタリング用途や光学素子等のナノパターン加工への応用を考え、電子ビーム描画装置用X- $\theta$ ステージの開発を進めてきた。ここでは、真空環境下で動作可能なX- $\theta$ ステージ機構と高精度制御によりナノオーダーの位置決め精度を達成したので、その構成技術について紹介する。

## 2. 技術

### 2-1 全体構成

Fig.1に開発したX- $\theta$ ステージの構成図を示す。直線運動する移動台(Xステージ)上にターンテーブル( $\theta$ ステージ)が搭載された形になっており、さらにX- $\theta$ ステージ全体は定盤上の真空チャンバ中に設置されている。なおパターン描画領域は最大 $\phi$ 200mmを想定し、ターンテーブルサイズもそれに合わせた大きさとした。

真空チャンバ(750<sup>W</sup>×500<sup>D</sup>×550<sup>H</sup>mm)は、ロータリーポンプとターボ分子ポンプで排気を行ない、X- $\theta$ ステージ設置状態で10<sup>-4</sup>Paオーダーの真空度を確保している。これは電子ビーム描画の試料室として十分な真空度であり、真空チャンバ天板に電子銃ユニットを取り付けて描画装置となる。

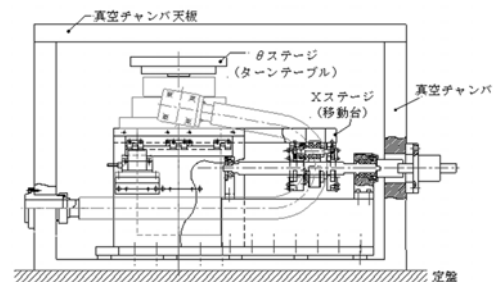
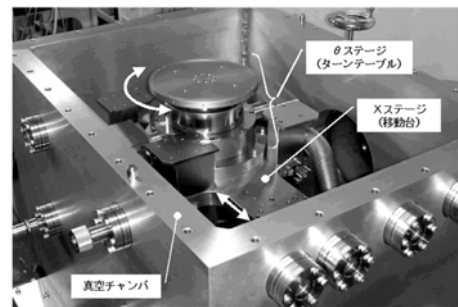


Fig.1 The X- $\theta$  stage.

### 2-2 Xステージ

#### 2-2-1 Xステージの機構

Xステージには高い位置決め精度に加え、電子ビーム描画用のため真空環境での稼働が要求される。さら $\theta$ ステージ回

転振動の影響を受けにくくするために高い剛性も望まれる。

Fig.2に各種送り機構と位置決め性能のトレンドを示す。横軸をストロークと分解能の比、縦軸を分解能としてプロットしたものである。位置決め分解能の目安を1nm、ストロークの目安を100mmに設定し、分解能を得るために伝達要素は摩擦駆動方式、真空環境で使用するためにガイド要素は転がりガイド方式を選定した。

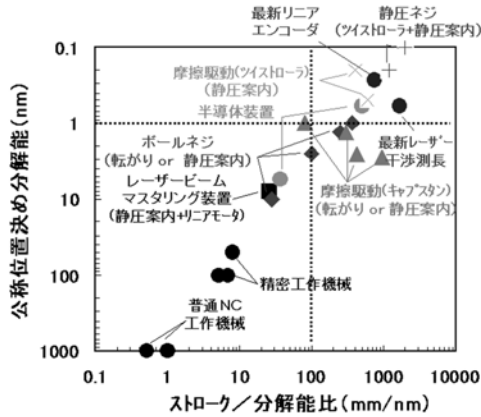


Fig.2 Positioning ability trend in linear stages.

Fig.3に開発した摩擦駆動機構部の構造を示す。中央の駆動軸に対し、従動軸を傾けて取り付けるツイストローラ摩擦駆動方式とし、従動軸を3本持つ独自の構造を採っている。駆動軸回転用のDCモータを真空チャンバ外に設置するため、駆動軸は真空シールを経てチャンバ外に引き出している。また真空シールには磁性流体を利用している。

移動台のガイド機構は有限長クロスローラ軸受けとした。動作時の移動台姿勢精度を確保するため、軸受け用ローラの外径誤差は $0.1\mu\text{m}$ 以内に揃えた。

真空中でのガス放出を防ぐため、ツイストローラ摩擦駆動機構をはじめ真空チャンバ内に位置するXステージ構成要素は全て非磁性ステンレスで製作した。また可動部には蒸気圧が低いフッ素系グリスを使用している。

Table 1にXステージ機構部の性能を示す。Xステージ剛性の指標は、 $\theta$ ステージ回転により発生する加速度（偏芯加速度と呼ぶ）の大きさで評価できる。従動軸を3本にしたことで、従来のレーザービーム用X- $\theta$ ステージに比べ偏芯加速度を1/2に抑えることができた。また、ピッチング等の姿勢精度に関しても良好な値が得られた。

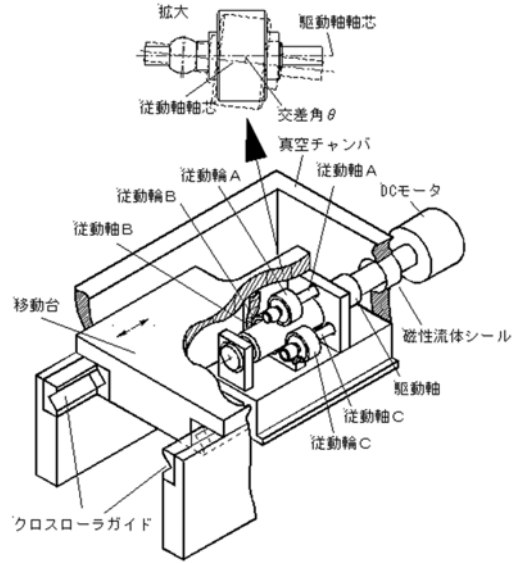


Fig.3 Friction drive mechanism with twisted rollers.

Table 1 Characteristics of the X stage.

可動範囲	180mm	$\theta$ テーブル回転中心基準
偏芯加速度	$1.1\text{m/s}^2$	ワーク重量720g, 偏芯 $60\mu\text{m}$ 時
ピッチング	4.9秒	0~110mmで測定
ヨーイング	3.1秒	
真直度	$0.46\mu\text{m}$	
高さ変動	$1.89\mu\text{m}$	

### 2-2-2 Xステージの制御

Fig.4にXステージ送り制御系のブロック図を示す。実際にパターンを描画する場合は、移動中のダイナミックな位置決め精度が要求される。そこで溜まりパルス方式のサーボ制御系に、速度フィードバックを追加した方式を採用した。位置検出用のレーザースケールは分解能 $2.7\text{nm}$ である。

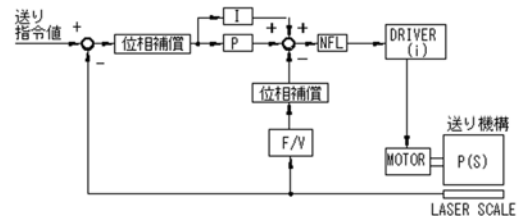


Fig.4 Control block diagram.

現状の電子銃ビーム電流とフォトレジスト感度から考え

ると描画速度の上限は2m/s程度である。最内周描画位置を $r=20\text{mm}$  ( $\theta$  ステージ回転中心基準), 最小描画パターンを幅100nm・間隔200nmのスパイラルと仮定すれば,  $\theta$  ステージの最大回転数は約1000rpm, Xステージの最大移動速度は約 $3.2\mu\text{m/s}$ となる。おおむねこの領域で性能が得られるように制御系を構成した。

移動中の位置決め精度は,  $\theta$  ステージ1回転毎のXステージ目標位置からのずれ量 (ピッチ変動と呼ぶ) で評価した。Fig.5に,  $\theta$  ステージを1200rpmで回転させた状態でのXステージのピッチ変動を示す。移動速度が増加するにつれてピッチ変動が悪化するが, 移動速度 $4\mu\text{m/s}$ で $8.1\text{nm}(3\sigma)$ が得られた。図より, 最小描画パターン幅100nmと間隔200nmに対し, 描画中の位置決め誤差はそれぞれ10%・5%以下となる。

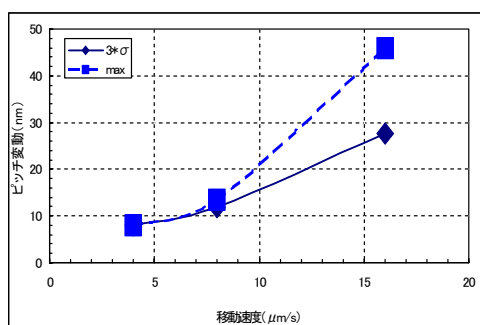


Fig.5 Relationship between moving speed and positioning capability.

## 2-3 $\theta$ ステージ

$\theta$  ステージには高回転・高精度が得られることと真空環境での稼働が要求される。最大 $\phi 200\text{mm}$ の描画ワークに対応するため, 回転性能に優れた大型のエアスピンドルに対し真空対応の改良を施し $\theta$  ステージとして使用した。

Fig.6に $\theta$  ステージ構造を示す。エアスピンドル全体を真空カバーで覆いさらに回転軸とカバーの隙間は磁性流体で真空シールしている。真空カバーには真空チャンバ外部に通じる配管が用意され, エアスピンドルへの空気供給・排気のほか, 信号ケーブル等の取り出しもこの配管経由で行われる。また回転駆動モータの磁場を遮断するため, ケース主要部分には磁気シールドが施されている。ワーク保持のため回転軸上面にターンテーブルを搭載している。

Fig.7に $\theta$  ステージの回転変動データを示す。回転精度を高精度に制御するためPLL制御でモータを駆動しており, 当

面の $\theta$  ステージ最大回転数と想定される1000rpmはもとより3000rpm近傍にわたり, 真空環境中でも大気中と同等な低い回転変動量が得られた。Table 2に $\theta$  ステージの性能を示す。

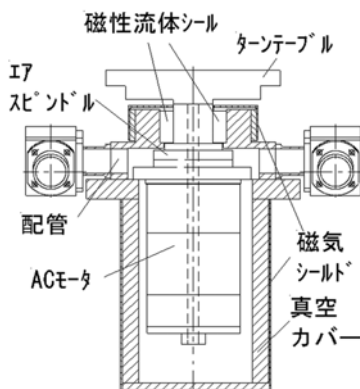


Fig.6 The  $\theta$  stage.

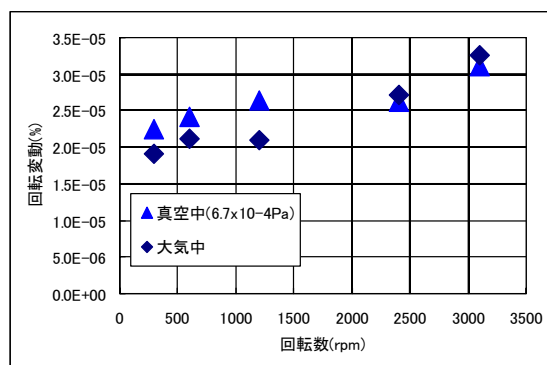


Fig.7 Rotational jitter of the  $\theta$  stage.

Table 2 Characteristics of the  $\theta$  stage.

回転範囲	60~3100rpm
回転変動	$3.3 \times 10^{-5}$ % (Max)
動作真空度	$6.7 \times 10^{-5}$ Pa (Max)

## 2-4 回転振れ計測部

重量バランスを完全に保つことが出来ないため,  $\theta$  ステージのターンテーブルはわずかに回転振れを起こす。特にパターン描画時はターンテーブル上に偏心が残った状態でワークを搭載するため回転振れ量が増大する可能性が高い。回転振れは描画パターン精度に影響を及ぼすので, 高精度パターン描画では回転振れの影響を除去する必要があると考えられる。

そこでターンテーブル回転振れ量を検出するため、分解能1.2nmのレーザー干渉測長器を用いて、Fig.8に示すようにX・Y2方向において回転時のターンテーブル回転振れ量を検出する計測ユニットを構築した。

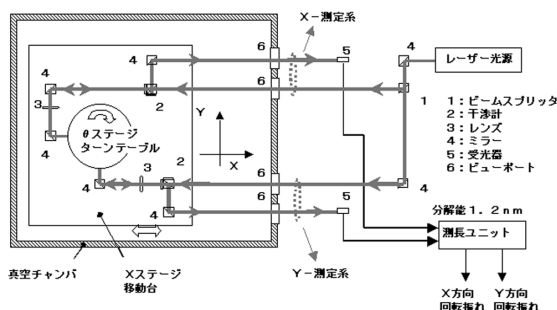


Fig.8 Measuring unit of radial runout.

Fig.9に実際のターンテーブル回転振れの様子を示す。Fig.9上段は、ターンテーブル一回転ごとに繰り返し発生する固定的な成分を抜き出したもので、大きさは約 $5\mu\text{m}_{pp}$ である。繰り返し発生する回転振れは描画パターン我真円度に影響する。一方、Fig.9下段は、ターンテーブル一回転ごとに違った状態でランダムに発生する非繰り返し成分を抜き出したものであり、大きさは約 $12\text{nm}_{pp}$ である。非繰り返し回転振れは、半径方向の描画パターンの間隔精度に影響する。

電子銃の偏向電極にこれら振れ量検出値をフィードバックし、ターンテーブル回転振れの影響をキャンセルしてパターン描画を行うことが可能になる。

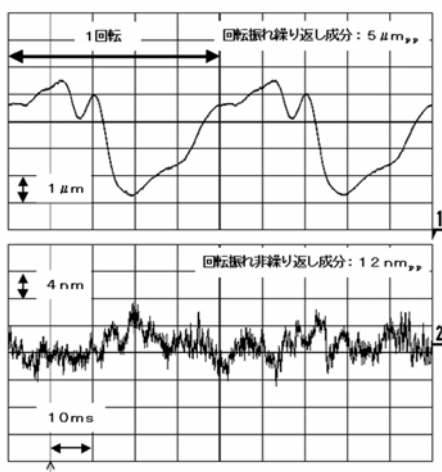


Fig.9 Measured radial runouts of the turntable. (above:repeative runout, below:non repetitive runout)

### 3. 成果

電子ビーム描画装置（描画速度2m/s）に適用可能なX- $\theta$ ステージを開発し、描画時相当の真空度において以下の結果を得た。

#### (1) Xステージ

独自のツイストローラ摩擦駆動機構の採用と速度フィードバック付き溜まりパルスサーボ制御の採用により、 $4\mu\text{m/s}$ 以下の移動速度で位置決め精度8.1nm以内を達成した。

#### (2) $\theta$ ステージ

大気中と同様な回転数(60~3100rpm)・低回転変動( $10^{-5}\%$ 台)を達成した。

#### (3) 計測部

ターンテーブル回転振れを1.2nm分解能で検出するユニットを構築した。

### 4. 今後の展開

大電流電子銃を搭載して高速描画を実現するために、制御方式を改良（PLL方式etc）してXステージの速度域を拡大する。また、回転振れなどによる描画精度への影響は実際のパターン描画により明らかにしていく。

#### 参考文献

- 武田実：Deep UVマスタリング技術，光アライアンス，Vol.10 No.7，(1999)，pp.6-8.
- 田畑 他：平成11年度成果報告書 ナノメータ制御光ディスクシステムの研究開発，光産業技術振興協会次世代光メモリ推進機構，(2000)，pp.145-174.