

# 光デバイス技術に関する応用研究 (第3報)

## — 補間制御されたナノステージの評価方法 —

石田 正文・木島 一広・布施 嘉裕・岩間 貴司・坂本 貴仁\*

### Applied Study of optical devices technology

Masafumi ISHIDA, Kazuhiro KIJIMA, Yoshihiro FUSE, Takashi IWAMA and yoshihito SAKAMOTO

#### 要 約

ナノステージの動作精度を評価するためには、ステージの位置情報を正確に計測し、指示プログラムのとおり動作したかを確認することが必要となる。本研究では、動作中のステージ各軸の移動量を計測し、このデータを基にコンピュータ画面上に動作の軌跡を再現した。その軌跡と制御プログラムの指示値による指令動作の軌跡とを比較することにより、ナノステージの動作精度を数値として評価する手法の可能性を検討してきた。

昨年度までに、測定環境の温度変化やステージのモータによる発熱が測定に大きな誤差を与えることを確認し、モータとボールネジとの間に断熱対策をとったところ、測定値の変動を約40%減少させることが出来た。今年度は、測定系の振動による測定値への影響を調べると共に、より実際の加工に近い動作として3次元における直線動作および螺旋動作の計測及び評価を行った。その結果、直線動作の評価では全長866 $\mu\text{m}$ の動作で2.2 $\mu\text{m}$ の動作精度が計測され、螺旋動作の評価では7 $\mu\text{m}$ の上昇動作において200nmの動作精度が計測されたことから、評価システムとしての可能性を示すことが出来た。

#### 1. 緒 言

近年、光デバイスの回路形成にはガラス基板中にフェムト秒レーザを照射する方法が研究されている<sup>1)</sup>。

ガラス基板を保持するためにステージが必要であるが、3次元空間に対して様々なパターン(直径、円弧等)で補間され、数nm単位の位置決め精度と共に、高い動作精度で制御できるシステムが要求されている。

これを満たすステージの開発が各メーカーで進められているが、ステージ動作の軌跡を正確に把握し、精度を数値として評価する方法については未だ確立されていない。メーカーが示すステージの仕様についても、真直度や軸平行度が記されているのみで、総合的な精度評価としては、ステージで加工した試作品の精度を測定することで行われており、ステージの動作精度を正確に把握しているとは言えない。

そこで、こうしたステージの動作精度を評価する方法として、ステージ各軸の補間制御の指令値と実際の移動量とから、微細加工への適否を検証する評価システムの構築が求められている。

昨年度までに温度変化による測定値への影響を調べ、測定周囲温度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ の環境下で、モータの発熱に対して駆動部(ボールネジ)が断熱対策してあるステージについては、X・Y同時2軸制御によるナノステージの補間動作で100nm以下の動作精度を計測した<sup>2), 3)</sup>。今年度は、測

定系の振動による測定値への影響を調べると共に、より実際に近い評価としてシステムの可能性を検討するため、3次元での直線動作および螺旋動作について計測・評価を行った。以下、その結果について報告する。

#### 2. 実験方法

##### 2-1 ステージの構成

図1は、本研究で用いたナノステージのシステム図である。

ステージの制御は、PCからのプログラムの指令を、4軸同時制御のパソコンNC基板、各軸用のCCLG-A基板、パルスユニットを経由して、ステージの各軸を独立に制御する構造である。

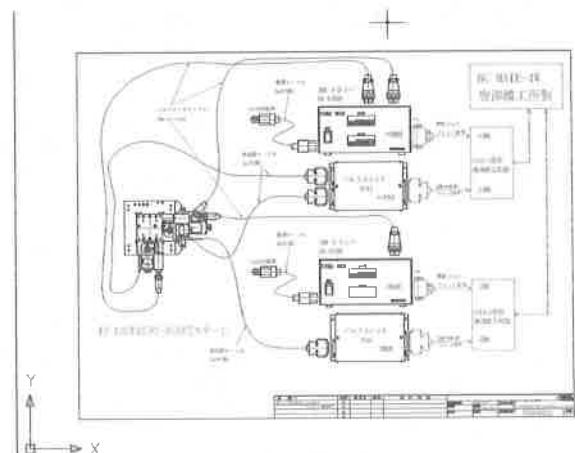


図1 ナノステージの構成図

\*1 株式会社エスシーアイ

表1は、3次元動作を行うために、昨年度のシステムに新たに付け加えたZ軸用ナノステージ（型式FS-1010PZ）の主な仕様である。テーブル移動量は10mm、繰り返し位置決め精度は±20nm、最少分解能は10nmである。φ6mm、リード1mmのボールネジとスケール信号周期4μmのリニアスケールを内蔵している。

表1 ステージの仕様

仕様 (型式 FS-1010PZ)	
テーブルサイズ	120mm×120mm
テーブル移動量	10mm
繰り返し位置決め精度	±20nm
走り平行度	—
最少分解能	10nm
最大移動速度	10mm/sec
ボールネジ	φ6mm, リード1mm
移動ガイド	クロスローラガイド*
駆動モータ	□28mm, 5相PM
耐荷重	5Kg
内蔵スケール信号周期	4μm
内蔵スケール素材	クォーツガラス (TQZ)

### 2-2 測定系の振動による測定値への影響

測定系の振動は、ステージを停止させた状態でレーザーヘッドからカウンタへ通ずる光ファイバーを軽くさわる程度でも数100nmの測定値の変動を生じる。

そこで測定系の振動の有無が測定値に与える影響を、防振ゴムの有無で検討した。

写真1は、設置した状況である。

恒温槽内に設置した石定盤の上にコーナーキューブとレーザーヘッドからなる測定系を固定し、1秒間隔でレーザーヘッドとコーナーキューブとの距離を測定した。恒温槽内の温度は25℃で一定とし、防振ゴムの使用の有無だけ条件を変えて、それぞれ測定を行った。



写真1 測定の状況（除振ゴムありの時）

### 2-3 ナノステージの補間動作の計測

写真2は、今回用いたナノステージ及び測定系である。レーザー干渉測長計（㈱東京精密製DISTAX）により、ステージの移動量（変位量）をリアルタイムに計測した。

ここで用いたレーザー干渉測長計は、最小分解能が10nmである。ステージの3軸それぞれの計測用として、3個のコーナーキューブをステージ上にセットし、レーザー干渉計は門型の架台に固定してある。コーナーキューブは、レーザー干渉測長計から発するレーザー光を反射させるためのもので、3軸を同時に動作させた時にも同一点を測定するために、3軸について調整を行い固定した。



写真2 ステージ及び測定光学系

計測する動作は、原点から(500, 500, 500) (μm)までの3次元直線動作と、螺旋動作の2種類とした。

動作の指示は、パーソナルコンピュータからGコードを利用し、各軸用に独立した制御基板、モータドライバを通じて行った。

## 3. 結果及び考察

### 3-1 測定系の振動による測定値への影響

ステージ移動用X・Y軸ステッピングモータを励磁した状態でモータからの発熱がステージの安定性にどの程度影響を及ぼすのかを検討した。

図2は、除振の有無による測定値の変動の違いを測定した結果である。横軸は時間(s)であり、縦軸に測定値の変動量(nm)を示す。

図のように、測定値の変動の最大値は除振されていない場合の316nmに対して、除振されている場合には約10nmまで減少している。

今回の実験において除振の有無以外の条件は同一のため、この測定値変動量の変化は振動による違いが原因であると言える。

また、測定値が変動する速さも1秒間隔のサンプリング

グに対して約300nmと大きい。昨年度、除振台の上にステージを載せて行ったステージの温度による測定値への影響では、5分間で約40nmの変動であることから、測定系（レーザヘッド及び反射鏡）が振動することによる測定値の変動は、熱によるそれに比べて遙かに早く影響を及ぼしていると言える。

このことから、動作中のステージの位置を逐次計測し、その軌跡を正確に再現するためには、除振が重要であることが確認された。

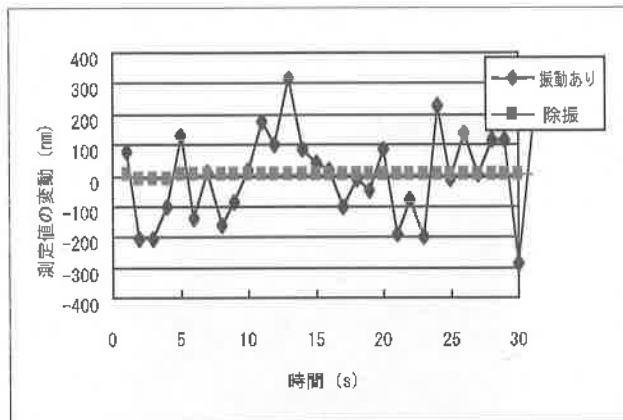


図2 除振の有無による測定値変動量の違い

### 3-2 3次元直線運動の精度測定

ステージ各軸の基本動作であると考えられる直線動作について、速度一定として測定を行った。

(0, 0, 0) から (0.5, 0.5, 0.5) (単位はそれぞれmm) まで、毎秒5 $\mu$ mで移動させた。

ステージの3次元直線動作の全体を確認するために、測定結果をもとにステージ動作の軌跡を3Dグラフとして再現した結果を図3に示す。

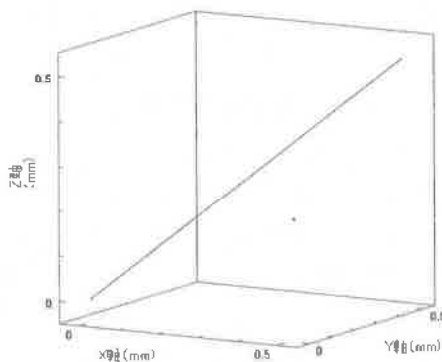


図3 3次元直線運動の軌跡

今回再現に使用したソフトウェアは、視野を自由に選択することができ、全方向から確認をすることが可能である。

また、図4はX軸の時間変化を示している。

横軸は時間 (s)、縦軸は各軸の測定値 (mm) である。

ほぼ等速に直線で動作していると言える。

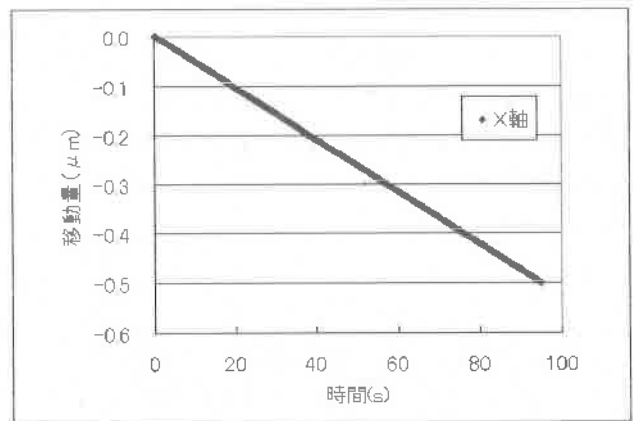


図4 X軸測定値の時間変化

直線動作の評価として、指定した速度での理想直線と、各軸の測定値との差を求めた。

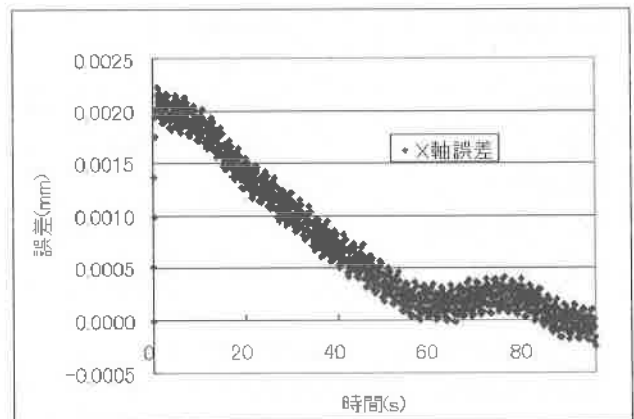


図5 理想直線とX軸測定値との差

図5は、そのうちX軸について求めた結果である。

横軸は動作開始からの時間(s)、縦軸は理想直線と測定値との差である。

誤差は動作開始直後の、1.2s後に最大値2.2 $\mu$ mとなり、その後誤差は減少傾向となり、測定終了時には-248nmであった。

測定開始直後に誤差が大きくなったのは、プログラムの指示を基にした理想値はスタート開始直後から等速運動を想定しており、実際のステージは指示された速度まで加速するのに必要な時間があるためと考えられる。

### 3-3 螺旋動作の測定と評価

X-Y平面において直径20 $\mu$ mの円を描きながら、Z軸が20 $\mu$ m上昇する螺旋動作を測定した。移動速度は、曲線にそって毎秒500nmである。

測定値を基に軌跡を再現した結果が、図6であり、測定値と理想値を比較した結果が図7である。

想円の外側を通過していることが分かる。

また、X方向、Y方向でそれぞれ理想値と測定値を比較した結果が図9、図10である。

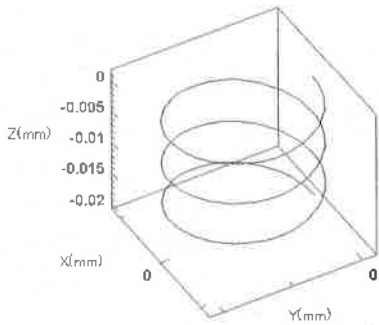


図6 螺旋動作の軌跡

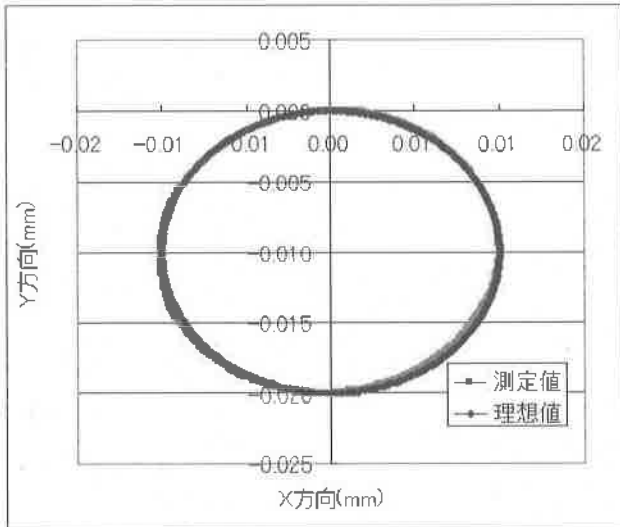


図7 X-Y平面での測定値と理想値

理想円と測定円はほぼ一致しており、両方向とも光軸のずれによる誤差が蓄積していないことから、円運動の測定を行っても測定に影響がないことが明らかになった。

したがって、今回のシステムによる3次元螺旋動作の測定が十分に可能性があることを確認できた。

螺旋動作における円運動の軌跡について、半径方向の誤差がどの程度かを評価した結果が図8である。

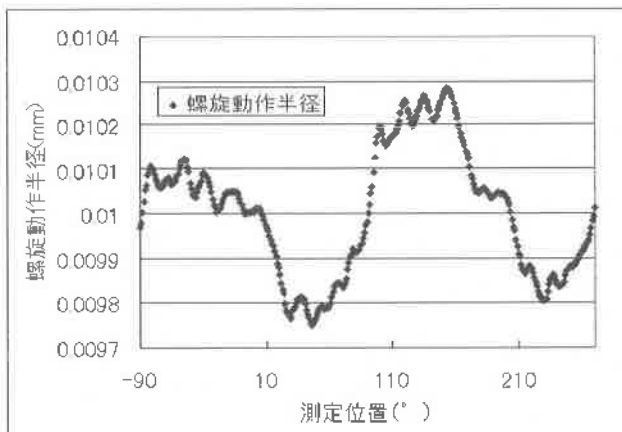


図8 半径方向の歪み

この図から、螺旋動作円の軌跡は約46.3°の位置で約250nm理想円の内側をとおり、153°の位置を約280nm理

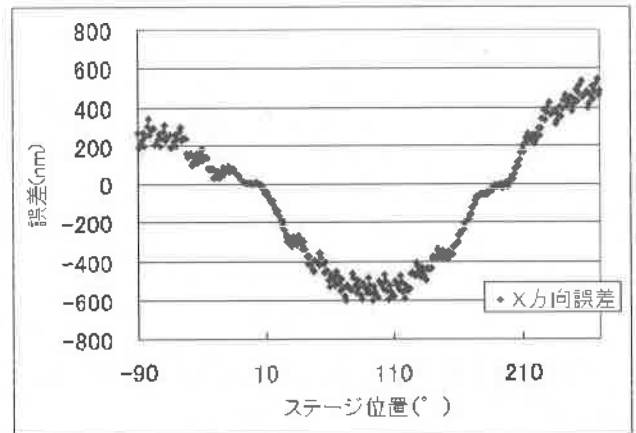


図9 X方向の誤差

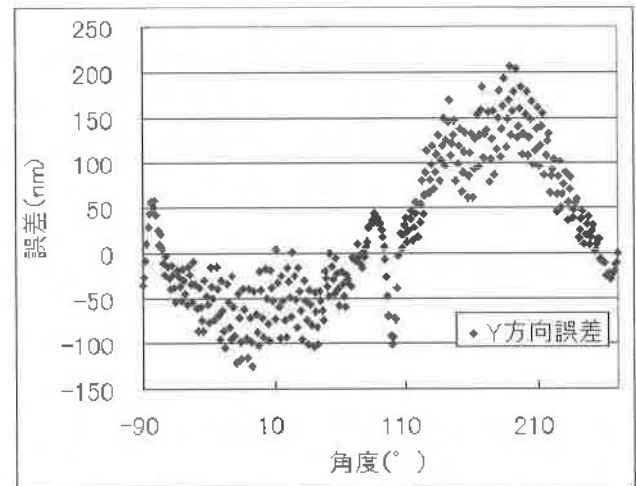


図10 Y方向の誤差

その結果、X方向では最大で600nm、Y方向では206nmの誤差であった。

螺旋動作中のZ軸について理想値と測定値を比較した結果が図11、理想値と測定値との差(誤差)の変化を比較した結果が図12である。

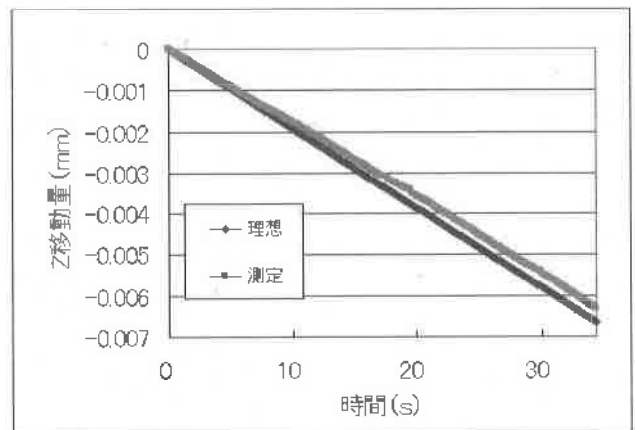


図11 螺旋動作中のZ軸の動作

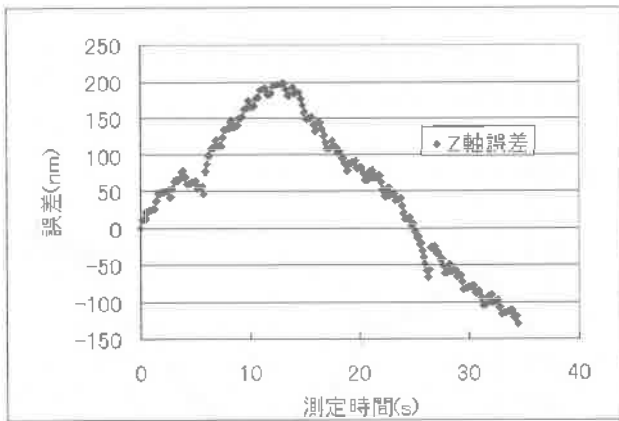


図12 Z軸の誤差

Z軸は測定開始から徐々に誤差が大きくなり最大200nmの誤差が生じていたことが分かった。

#### 4. 結言

ナノステージの動作精度を数値化して評価するために、レーザ干渉測長計を用いてステージの動作を測定し、測定値とプログラムの指示を基にした理想値とを比較するシステムの可能性について検討した。

- (1) 測定系が十分に振動対策されている場合には、対策していない時に比べて測定値の変動が1/10に抑えられ、安定した測定が出来ることが分かった。
- (2) 3次元の直線動作を測定し、動作開始直後の加速時間が原因と考えられる $2.2\mu\text{m}$ の誤差を計測した。
- (3) ステージの螺旋動作についても、光軸のずれによる大きな誤差なく測定することが出来た。
- (4) 螺旋動作の測定値とプログラムによる指示値を基にした理想値とを比較し、X方向で最大600nm、Y方向で206nm、Z方向で200nmの誤差を計測できた。

以上の結果から、本研究で用いたシステムによって、3次元動作の軌跡を測定し、理想値と測定値の比較によってステージの動作精度を数値として評価できる可能性を示すことが出来た。

また、精度の高い測定・評価を行うためには、周囲温度ならびにステージの駆動モータによるステージ温度の変動と、振動に対して十分に対策する必要があると考えられる。

なお、今回測定された誤差については、動作させる前に行うステージの制御設定をさらに適切に行うことで小さくすることが可能と思われる。

#### 参考文献

- 1) レーザー学会編：先端レーザーテクノロジー，日経技術図書株式会社p. (1992)
- 2) 石田正文・木島一広・布施嘉裕・吉澤徹・坂本貴仁：山梨県工業技術センター研究報告，vol.18，p.44 (2004)
- 3) 中山信一・石田正文・木島一広・布施嘉裕・坂本貴仁：山梨県工業技術センター研究報告，vol.19，p.82 (2005)