

# 超精密送り位置決め装置の開発

*Development of ultra-precision positioning system.*



キーワード

超精密工作機械, 油静圧案内, 油静圧ねじ,  
レーザ干渉測長器, 直進精度,  
位置決め精度, nmオーダー



技術開発部  
加工技術部  
上 芳啓

## 摘要

ナノメートルオーダーの加工精度を求められる超精密工作機械への適用を想定し、油静圧案内、油静圧ねじ、レーザ干渉測長システムを組み合わせた送り位置決め装置を試作した。この装置の最大の特長はスライドテーブルと送りねじが全方向に十数マイクロメートルの静圧油膜で支持され、機械的な接触箇所をもたないことにある。この装置の特性を評価したところ200mmストロークでの直進精度は真直成分誤差で50nm以下、回転成分誤差は $2\mu\text{rad}$ 以下、位置決め精度は10nmが得られた。また、機械系の移動分解能は0.1nmにまで達していることが分かった。

## Abstract

An ultra-precision positioning system consisting of hydrostatic slide, hydrostatic screw and laser interferometric measuring system has been developed for machine tools. The advantage of this system is no-contact of the slide-table against any other mechanical parts, even lead screw shaft, with hydrostatic bearings. This system shows quite high accuracy of straight motion and positioning simultaneously. Straightness and angular error of the table are better than 50nm and  $2\mu\text{rad}$  in 200mm stroke respectively. Regarding positioning, 10nm-accuracy and 0.1nm-step are obtained.

## 1. はじめに

現在、光学素子や電子機器、さらにはマイクロマシンといった先端技術と称される分野での部品の加工精度への要求はとどまることを知らず、ナノメートル (nm) のオーダーに入ってきているといっても過言ではない。このような部品を加工する工作機械といえどもそのほとんどは回転する要素 (スピンドル) と直進する要素 (スライド) を組合せることで構成できる。切削や研削など工作機械の母性原則に従うような加工においては、この2つの機械要素の運動精度が高いほど加工精度は向上するといえる。このうちスライドの運動精度を考えてみると、テーブルが傾くことな

く平行移動し、その移動直線上の思いどおりのところに位置決めできるほど高い精度といえる。具体的には、図1に示したテーブルを剛体とみなしたときの運動の6自由度のうち5つの自由度（上下・左右真直度、ピッチング、ヨーイング、ローリング）が拘束されて、より小さいこと、最

後の6つめの自由度である移動方向の位置決めを正確にコントロールできることが高精度の条件であり、これらをより高めるための研究開発を行ってきた。その成果として試作した超精密送り位置決め装置について述べる。

## 2. 構成

装置本体は温度と湿度が管理された室内で、建物の床と絶縁された厚さ2mのコンクリート床上に設置してある。本体は油静圧案内とそれを駆動するACサーボモータ、油静圧ねじ、および位置検出を行うレーザ干渉測長器から成り、図2に外観を示すようにサーボエアマウントによって3点支持されたグラナイト定盤上に構成されている。一方で、NC装置、静圧ユニットなどの付随装置は建物側の床上に設置しており、振動に対しては細心の配慮が施されている。

装置の最大の特長はスライドテーブルが機械的な接触点を全くもたない全油静圧方式にすることで極めて高い精度を実現している点にある。まず、この装置の根幹となる構成要素について説明する。

### 2.1 油静圧案内

案内機構は前出の拘束すべき5自由度の特性を決定づける最も重要な要素である。案内機構としては、ころがり案内や滑り案内が一般的であるが、ここでは精度を最重視して油静圧軸受を採用している。油静圧軸受は十数マイクロメートルの、わずかな隙間に圧力油を介在させることで物体を支持するもので、この油膜の平均化効果によって軸受面の形状精度以上の運動精度を得ることができるばかりでなく、固体同志の接触点をもたないため摩耗が発生せず精度が半永久的に保たれるという特長をもっている。精度を比べれば油の代わりに加圧空気で支持する空気静圧軸受も候補にあげられるが、クリーン度が重視されない切削や研削といった加工機械への適用を想定した場合、剛性や減衰性が良好な油静圧が有利である。

テーブルは図3の横断面図で静圧軸受部と示した面で静圧支持されており、移動方向以外の動きは拘束されるが、移動方向へは滑らかな動きが得られる。また静圧カップリングと示した面ではベースからテーブルへの圧力油の供給を行っている。これにより移動時の運動精度に微妙な影響を与える可能性のある油供給ホースをテーブルにつなぐ必

要がない。図から分かるように左右には完全な対称構造をとっており、圧力や熱による変形が運動精度へ影響を及ぼしにくくなっている。

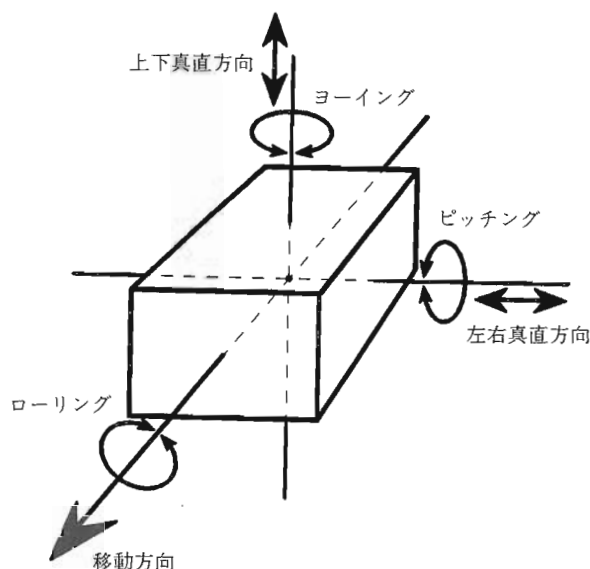


図1. 直進運動の自由度

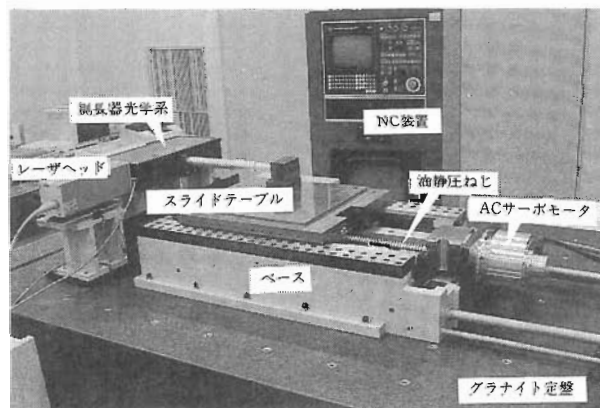


図2. 超精密送り位置決め装置

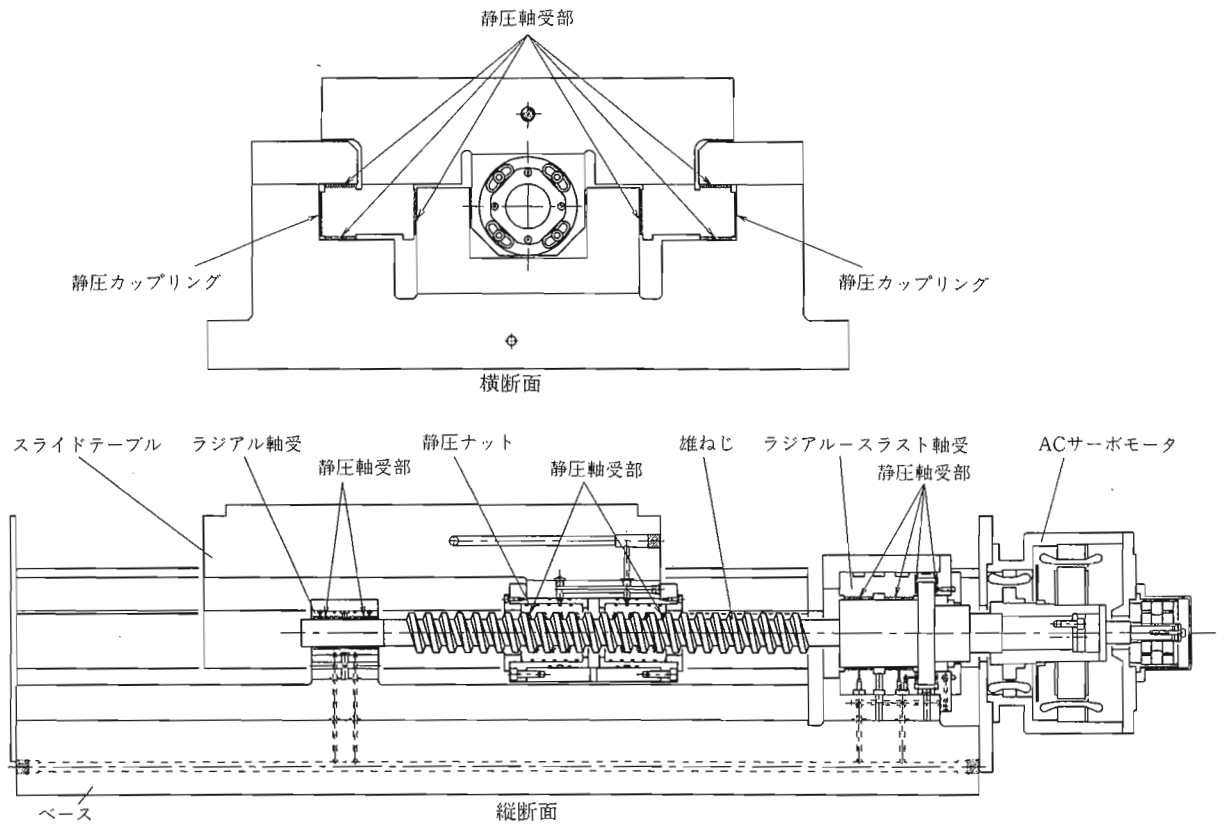


図3. 超精密送り位置決め装置の断面

## 2.2 油静圧ねじ

油静圧ねじは、テーブルの送りねじに油静圧案内における油膜の平均化効果をもたせたもので、この装置のキーポイントといえる部位である。一般に超精密と称される工作機械には吟味された高精度なボールねじが送りねじとして多用されているが、多数の転動する鋼球との接触という擾乱をとまなうため、nmオーダーでみると問題が残る。その点、油静圧ねじは接触が無く、精度ならびに精度寿命の点でもボールねじを含めた他の送り機構と一線を画する。

雄ねじは外径 $\phi 36\text{mm}$ 、ピッチ $10\text{mm}$ の台形ねじで、図3縦断面図のように片端をラジアル、他端をラジアルスラストの静圧軸受で支持されACサーボモータでダイレクトドライブされている。いわば、静圧スピンドルのシャフト中央部にねじが切つてあるような形態をとっている。また、多岐にわたる加工工程に対してもねじ軸に対するラジアル軸受の同軸度、スラスト軸受の直角度を保つため、加工用のセンタには、ジルコニアセラミックス製の打ち込みセンタを使用し摩耗や劣化を抑えている。

ナットは、図4に示すように一対の静圧軸受を対向させる形のダブルナット方式をとっている。それぞれのナットは詳細図のように外周部に供給された作動油が微小段差を利用した面絞りを通って片側フランク面にらせん状に設け

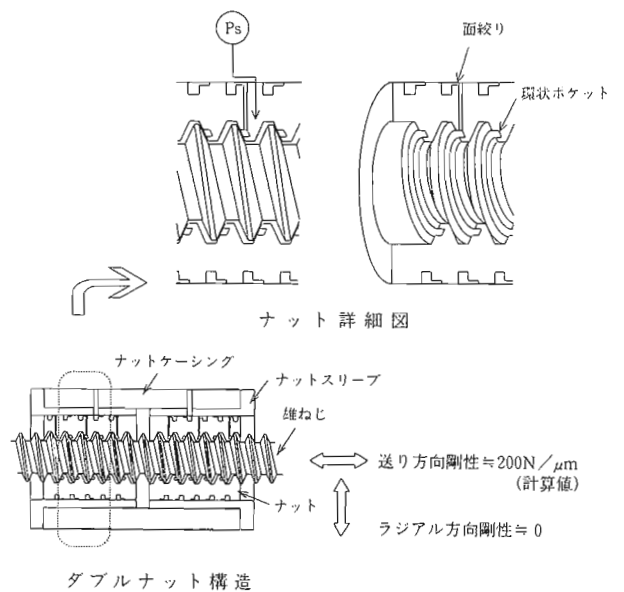


図4. 静圧ナットの構造

た1本のポケットに供給される構造になっている。こうすることによって有効軸受面積が大きくなり送り方向の剛性が上がる一方で、ラジアル方向に積分したポケット内圧力はゼロとなるためラジアル方向の剛性を理論上ゼロにすることができる。雄ねじの曲がりやねじの形状誤差を軸受隙間で吸収できるため、テーブルの直進精度がねじ軸による影響を受けない理想的な駆動機構といえる。なお、ナット

のフランク面は、専用のねじラップ装置により最終仕上げを行っている。

### 2.3 測長フィードバック系

テーブルの直進方向の位置検出には、分解能5nmの2周波レーザー干渉測長器を使用し、駆動用のモータには低速での回転速度むらが極めて小さいACサーボモータを用いて

いる。位置制御は高速高精度のNC装置をコントローラとし、インナーループに速度制御、アウトラープに位置制御をもつフルロード制御としている。レーザの波長変化の影響を抑えるため、前述のように温度と湿度を管理しており、空気のゆらぎにはレーザの光路をカバーリングすることで対処している。

## 3. 特性

試作した超精密送り位置決め装置の特性を評価した結果について説明する。

### 3.1 直進精度

#### (1) 真直成分誤差

テーブル移動時の上下・左右方向の真直成分誤差を測定した結果を図5に示す。測定基準は $\lambda/20$ の平面度が保証された320mmのガラス製ストレートエッジとし、熱変形の影響を低減するため、数時間にわたる試運転の後テーブルに固定した静電容量型変位計で測定した。また、数十ナノメートルのレベルになれば、測定基準自体の形状誤差が測定値に大きく影響を与えることは明白であるため、図に示した結果は、反転法を利用してストレートエッジの形状成分を差し引いた。これによれば200mmストロークで上下方向成分は43nm、左右方向では25nmとなった。ただしこの値には純粋な平行移動成分だけでなく回転成分誤差の影響が含まれている。

上下方向の測定結果には、数ナノメートルのねじ成分が現れているが、これは静圧ねじと静圧案内への油供給が共通になっているため雄ねじの振れ回りによる流量変化で圧力変動が生じテーブル浮上量が変動するためである。このことはテーブル自重に無関係で圧力変動の影響が相殺される左右方向でこの現象が現れていないことから分かる。

#### (2) 回転成分誤差

テーブル移動時の回転成分誤差としてピッチング、ヨーイング、ローリングの3成分を光電式オートコリメータで測定した。ローリングは真直成分の測定基準としたストレートエッジ、他は固定鏡をターゲットとした。測定結果を図6に示す。細かいノイズは、停止時のノイズ幅に相当するため平均レベルで

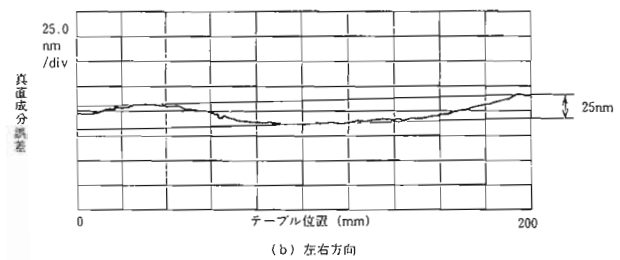
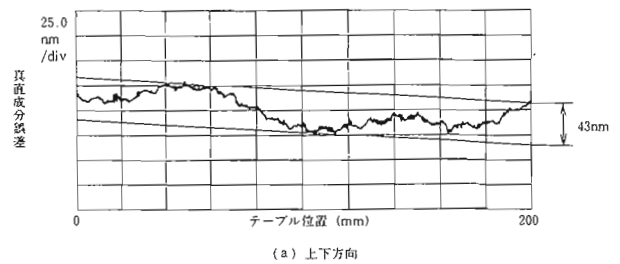


図5. 真直成分誤差

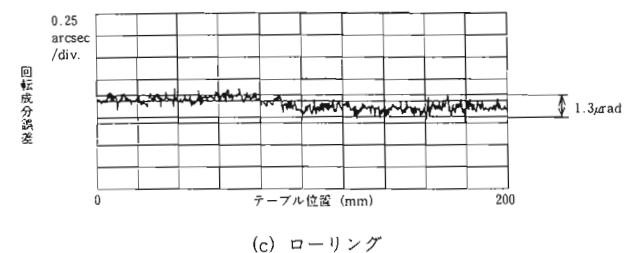
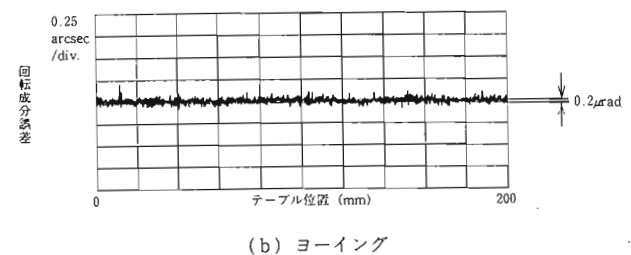
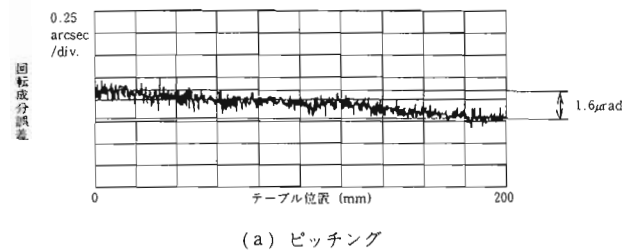


図6. 回転成分誤差

評価すると、200mmストロークにおいてピッチング、ヨーイング、ローリングはそれぞれ1.6, 0.2, 1.3 $\mu$ radとなった。実際に送りねじを組み込む以前に油静圧案内の直進精度を修正する場合には、測定が容易であることからオートコリメータを使用するが、このときの値と油静圧ねじを組み込んでから測定した値に差は認められなかった。このことから、回転成分誤差へのねじ軸の影響はないものと考えられる。

### 3.2 位置決め精度

本装置が絶対値指令に対して動作できる最小単位を評価するため位置決め分解能の測定を行った。測定はテーブルの任意の位置からNC装置により、プラスマイナス方向10パルスのステップ移動指令を繰り返し、それに対するテーブルの変位を静電容量型変位計で検出した。ステップ量を10および5nmとしたときの結果が図7で、5nmの測長分解能までの指令に対してミスパルスやロストモーションもなく応答している。

また、測長範囲内全域にわたっての位置偏差を調べた結果が図8で、10mmステップの移動指令を送ったときのテーブルの各停止位置で300点のデータを取り平均値を黒丸、ばらつきとして $\pm 3\sigma$ をエラーバーで示している。ばらつきを含めて10nm以下であることが確認できた。

これらのことからレーザ測長器基準で10nm程度の位置決め精度が期待できるものと考えられる。ただし、位置が制御されているのはあくまでレーザ光が反射される反射鏡部分としかいえず、実際に加工機へ適用する場合、工具加工点に近い部位を測長のターゲットとするなど、アッペの誤差に対する配慮が必要となる。

### 3.3 移動分解能

レーザ干渉測長器を利用した位置決めではテーブルの移動分解能が測長器の分解能にまで達していることが分かった。これからすると送り駆動系自体の移動分解能はさらに高いことが予想される。そこで、ストロークは極めて狭い範囲に限られるものの、レーザ干渉測長器より分解能の高い微小変位計を測長器に代用することで駆動系の移動分解能を評価してみた。

コントローラには柔軟性のあるパーソナルコンピュータ

を使用し、変位計には井川らによって開発されたサブnmの分解能を有する反射光電式変位計<sup>1)</sup>を使用した。図9は測定のプロック図であり、変位計の位置信号はA/D変換後コンピュータで処理され、位置制御信号はD/A変換されACサーボモータを速度制御するフルクロード制御を行っている。このときセンサの高周波ノイズを低減するため20回の測定平均値をテーブル位置としており制御の1サイクルは、約1.3msecとなっている。その結果が図10であり、1nmさらには0.2nmのステップ指令まで非線形的な挙動を示すこともなく対応できることが分かった。なお測定は図9のように制御ループ内の変位計の出力をとらえているため変位計出力のドリフト成分はキャンセルされている。言い換えれば、停止指令時には、変位計出力が一定となるように、テーブルを微小駆動していることになる。

これによれば、送り駆動系自体がサブnmの移動分解能を備えていることが実証されたことになる。

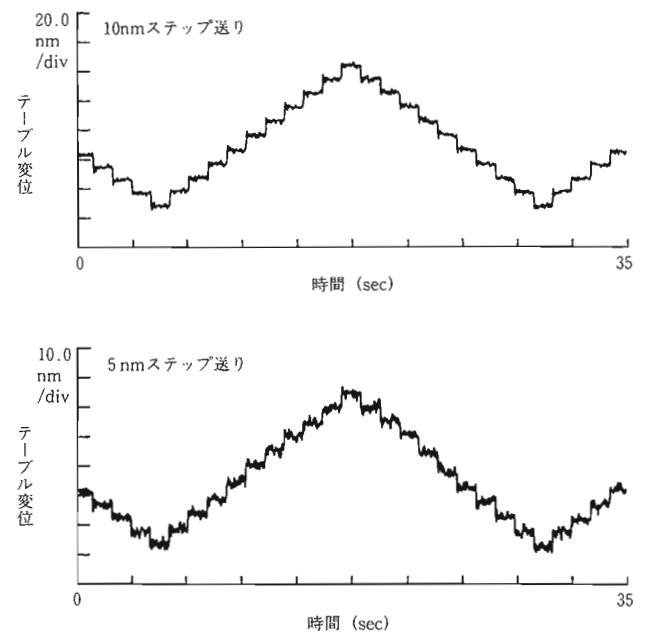


図7. 位置決め分解能

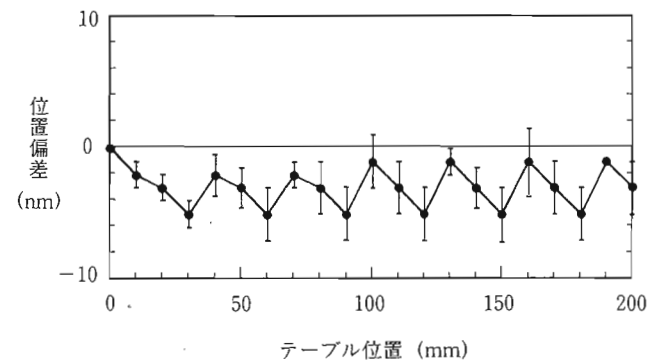


図8. 位置決め偏差

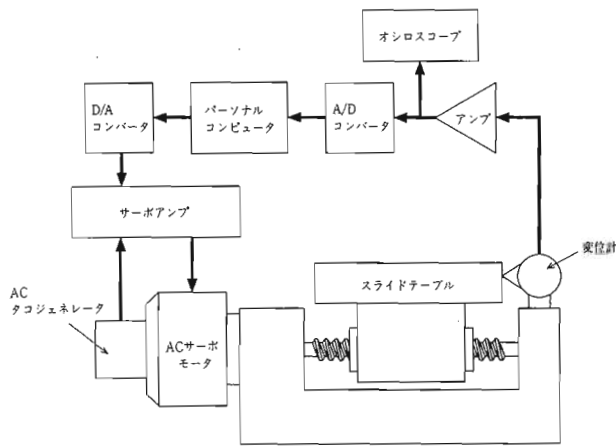


図9. 移動分解能測定のプロック図

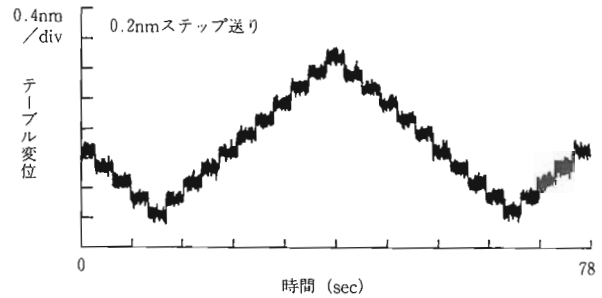
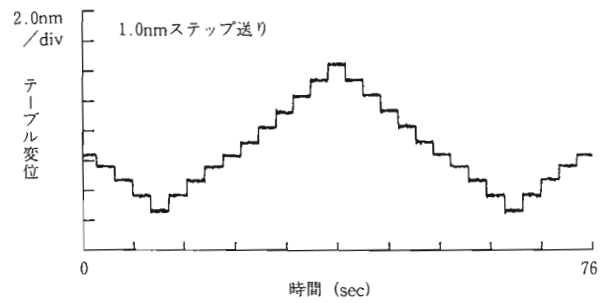


図10. 移動分解能

#### 4. 油静圧ねじの小ピッチ化

最後に現状取り組んでいる開発の話題として、油静圧ねじの小ピッチ化について述べる。油静圧ねじを小ピッチ化することにより加工機としての精度、具体的には、移動分解能の向上と輪郭精度の向上を期待することができる。移動分解能に関しては、回転分解能がほぼ限界に達していると考えられるACサーボモータの負担を負荷イナーシャを含めて軽減できるため、位置決め誤差の低減につながる。また、モータ1回転あたりの送り量を小さくすることで、スライド送り速度へのモータ回転速度むらの影響を低減することができるため、もう一つの輪郭精度の向上が図れる。これら以外にも同じナット長さあたりのねじ条数を増やすことができるため送り方向剛性の向上、小型化の効果も得られる。

試作した小ピッチねじは、外径φ36mmは変更せずにピッチだけを10mmから6mmへほぼ半減させたもので、加工精度や供給圧による変形を考慮して決定した。これまでは主にナットの加工精度上の問題から小ピッチ化が進んでいなかったが、今回は加工法や構造を見直すことで10mmピッチの静圧ねじと同等の加工精度を得ることができた。

試験は、高精度な油静圧案内をそのまま活かすことを考え、組み込んであった10mmピッチの雄ねじを抜き取り、テーブル上面に小ピッチねじ用ナットハウジングを固定して行った。まず分解能向上への効果を調べるため、移動分解

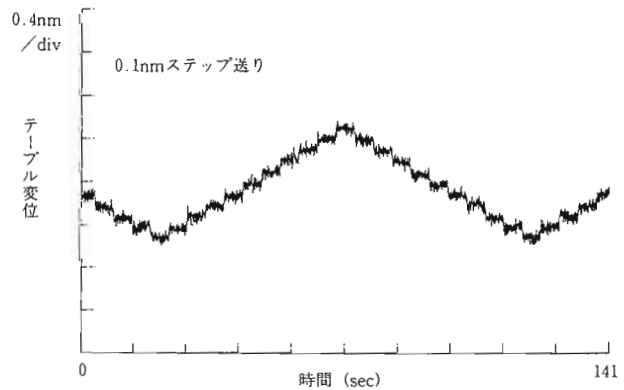


図11. 移動分解能 (小ピッチ油静圧ねじ)

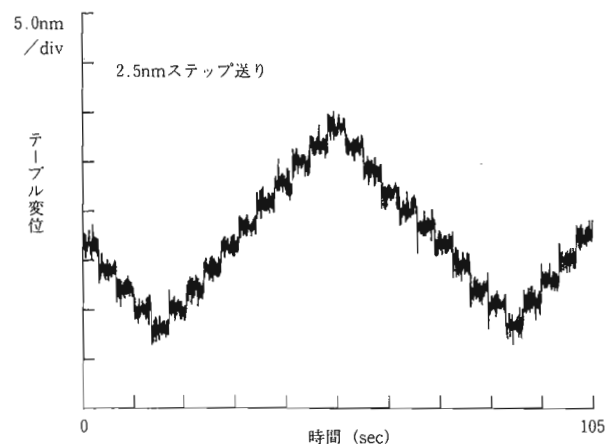


図12. 位置決め分解能 (小ピッチ油静圧ねじ)

能の評価時と同じセッティングで微小ステップを測定した結果を図11に示す。これによれば10mmピッチのねじのときに比べ停止時の安定性が向上し、0.1nmのステップが分かるまでに達した。このレベルは変位計の分解能とほぼ同等であり、制御の限界ともいえる。位置決め安定性向上にともない、レーザ干渉測長器を2.5nm分解能の高性能タイプに変更し、位置決め分解能を調べた。その結果、図12のように測長分解能の2.5nmまでのステップに対応できることが確認された。また、測長範囲における位置偏差を調べた結果が図13で、10mmステップの各停止時における300点のデータは測長器の分解能にあたる1パルス2.5nmから外れることは稀であり、 $\pm 3\sigma$ を示すエラーバーをみても安定していることが分かる。偏差に周期性があるのは、コントローラの数値処理上の問題であることを確認している。以上のように油静圧ねじの小ピッチ化は位置決めの安

定化に効果があったといえる。

さらに、この試験装置によって直進精度の上下方向真直成分誤差に出ていた雄ねじの振れ回りによる影響も、静圧ねじと静圧案内への作動油供給経路を独立させることで排除できることが確認された。今後はこれらの結果をふまえた設計が望まれる。

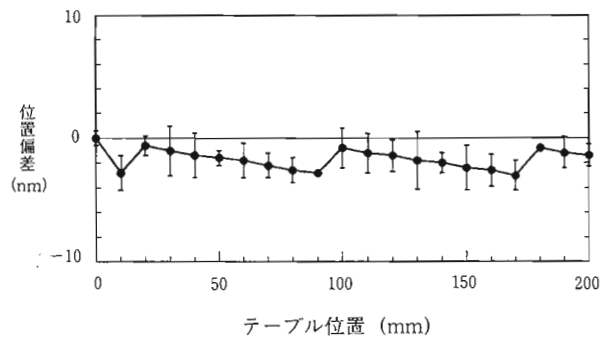


図13. 位置決め偏差 (小ピッチねじ)

## 5. おわりに

試作した超精密送り位置決め装置では、200mmのストロークにわたって極めて高い直進運動精度と10nm以内の位置決め精度、移動分解能については0.1nmつまり1オングストロームを得ることができた。 $\mu\text{m}$ オーダのストロークでは、よく知られているように電歪素子を利用した位置決め装置でこのレベルは十分可能といえる。しかし、ようやくnmオーダの移動分解能を有する機械が話題になってきている現状を考えれば、スライドテーブルとしては最高レベルの結果が得られたことになる。これらの結果から、単一駆動方式の機械としては限界に近い領域にまで達しているともいえる。しかし、位置決め精度は、あくまでレーザ干渉測長器を基準にしたものであり、絶対精度が保証されているわけではない。絶対精度の保証には、測長器自身の高安定化と補正技術が必要となる。

今後は、加工機への適用試験を行うが、本機のもつ移動分解能を活かせる測長器との融和を図り、直進運動精度誤差をはじめアッペの誤差、熱変形などを補償する技術など

ソフト面の充実を含めてシステムとして研究開発を進めることで、加工精度が向上するものとする。

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、貴重なご助言をいただきました鳥取大学、水本洋教授に深く感謝の意を表します。

なお、本論文は、通商産業省工業技術院の産業科学技術研究開発制度に基づき実施されている「超先端加工システムの研究開発」の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構から超先端加工システム技術研究組合への委託事業によりまとめたものである。

## 文献

- (1) 井川直哉他. 精密工学会誌, 53 (6), 891 (1989)



上 芳啓