

NACHI
**TECHNICAL
REPORT**
Machining

Vol. **21**A2
Sep/2010

マシニング事業

■ 寄稿・論文・報文・解説

超精密工作機械におけるリニアモーター駆動方式と
静圧ねじ方式の特性比較評価

Evaluation of Ultra Precision Cutting Machine
with Linear Motor or Hydrostatic Lead Screw

〈キーワード〉 超精密・工作機械・リニアモーター・
静圧ねじ・高速・高精度

開発本部／制御開発部

朝野 浩伸

Koshin ASANO

要 旨

ナノメートル位置決め精度を持つレンズ金型加工機用超精密工作機械において、“リニアモーター＋油静圧案内”方式と、“回転モーター＋油静圧ねじ＋油静圧案内”方式について、送り速度ごとに機械精度評価指標である、位置偏差変動幅を実測で評価した結果、前者の方式のほうが、低速側での位置偏差変動幅が大きく不利ではあるが、送り速度による差が小さく、高速では有利であることを示した。

また、両方式間の特性差の主要因が、粘性抵抗、ねじ剛性、モーター推力／トルク変動成分の違いによることを示した。

今回の試験を通して、3m/minの送り速度で、ナノメートルレベルの加工が可能であることを、実測で示した。

Abstract

A linear motor with hydrostatic pressure control and a rotational motor with hydrostatic lead screw and hydrostatic pressure control are tested for the fluctuation ranges of location deviation under the condition that each motor is installed in an ultra-precision machine tool with nanometer-level, precise positioning function for the machining of dies for lenses. The fluctuation range of location deviation is an index for machine precision at every feed speed. The measurements indicated that the former method was greatly disadvantageous at lower speed due to the greater fluctuation of location deviation but was advantageous at higher feed speed due to the lesser fluctuation of location deviation.

In addition, the main factors contributing to the characteristic difference between these two methods are viscosity resistance, screw rigidity and the difference in motor thrust and torque fluctuation.

The test has proved that machining at the nanometer level is possible with a feed speed of 3 m/min.

1. 超精密工作機械の送り方式

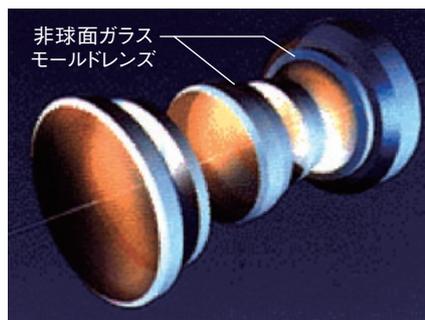
デジタルカメラやDVDなどに使用されている、レンズやその金型の加工には、超精密工作機械が使用され、ナノメートルレベルの加工精度を実現している。しかし、デジタルカメラやDVDの小型化、高性能化にともない、加工物も小型化、複雑化している。



デジタルカメラ



レンズの金型加工ではナノメートルレベルの加工精度を要求される。



非球面ガラス
モールドレンズ

超精密工作機械
＝ナノメートルレベルの加工精度
を実現する工作機械

図1 超精密工作機械の用途例
(レンズ加工)



さらなる高精度化、高速化が求められている、超精密工作機械の直線運動軸の位置決め・送り方式には、いくつかの方式が採用されており、究極の位置決め精度が要求される用途では次の2方式が優れている¹⁾。

- (1) 回転モーター＋静圧ねじ＋静圧案内方式
- (2) リニアモーター＋静圧案内方式

NACHIの超精密機械でもこの2方式を採用しており、用途ごとの加工精度、速度、形状などの要求に応じて使い分けている。

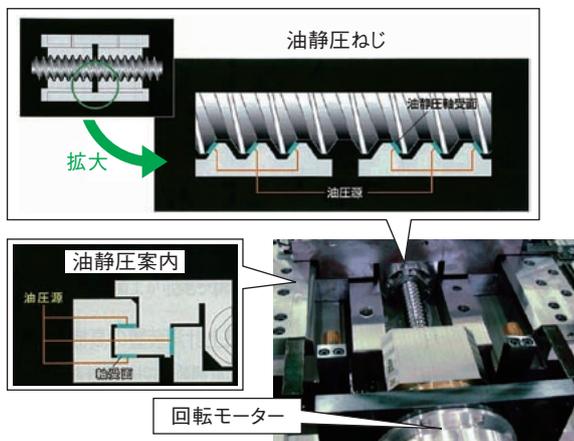


図2 回転モーター＋静圧ねじ＋静圧案内方式

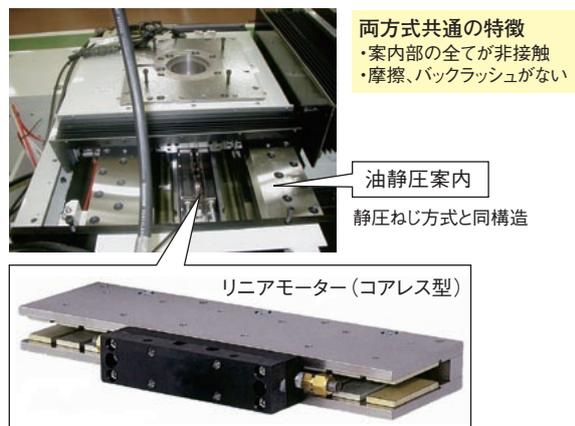


図3 リニアモーター＋静圧案内方式

このような用途による使い分けを的確に行なうためには、両方式間の特性差の把握が必要であり、また、その特性要因を調べることで、相互の改良法を見出すことができる。

実際の加工に求められる機械精度としては静止位置決め精度だけではなく加工速度での精度特性が重要である。

また、リニアモーターについてはボールねじ送りとの比較は多く報告されているが、静圧ねじとの比較は多くは行なわれていなかった。

そのため、NACHIでは先の(1)、(2)の方式について、実機を用いて、とくに送り速度の違いによる特性比較と、その特性差要因の推定を行なった。

2. 評価方法

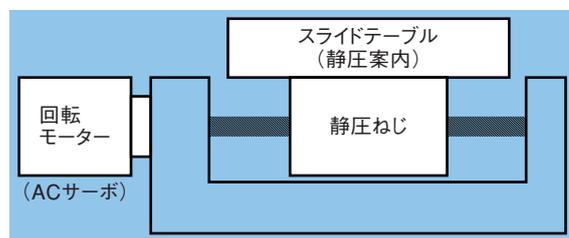
評価にはNACHIの超精密加工機“ナノアスファ”を使用した。

送り軸が回転モーター＋静圧ねじ＋静圧案内方式（以降、静圧ねじ方式と略称する）の機械および同型機でリニアモーター＋静圧案内方式（以降、リニアモーター方式と略称する）の機械を使用し、同一軸（X軸）で比較評価した。



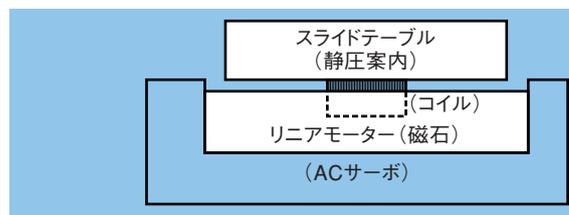
図4 超精密加工機 ナノアスファ

図5に静圧ねじ方式の評価システム構成を示す。図6にリニアモーター方式の評価システム構成を示す。両システムともに摩擦はほとんどゼロである。図7に評価システムの制御・位置検出部の構成を示す。制御・位置検出部は両評価システム共通である。コントローラは NACHI Nucleus PNC-XP を使用した。位置検出分解能は34pm (pm=10⁻¹²メートル) であり、精度評価には十分高い分解能である。



テーブル質量 : 約250kg
 モーター極ピッチ : 1mm (直線軸換算)
 ねじ剛性 : 約 100N/μm
 粘性抵抗 : 約 40000N/m/sec

図5 静圧ねじ方式の評価構成



テーブル質量 : 約250kg
 モーター極ピッチ : 48mm
 粘性抵抗 : 約 4N/m/sec

図6 リニアモーター方式の評価構成

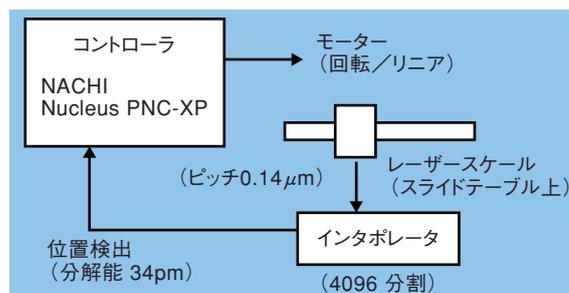


図7 制御・位置検出部の評価構成

機械精度の評価尺度として、一定速度送り中の位置偏差変動幅を測定した(図8)。

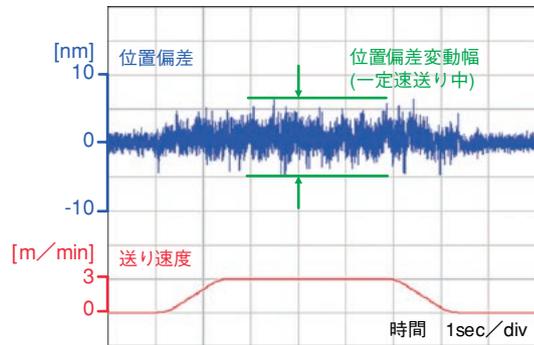
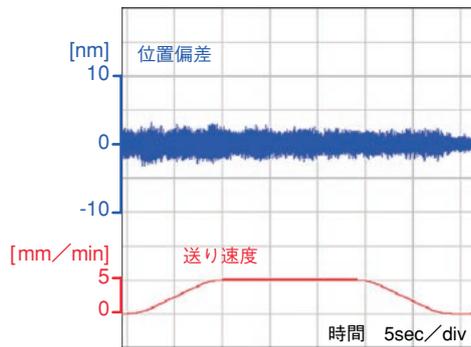


図8 位置偏差変動幅の評価

3. 評価結果

図9、図10に測定データ例を示す。

静圧ねじ方式



リニアモーター方式

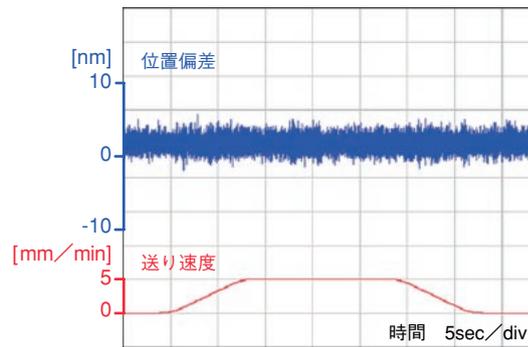
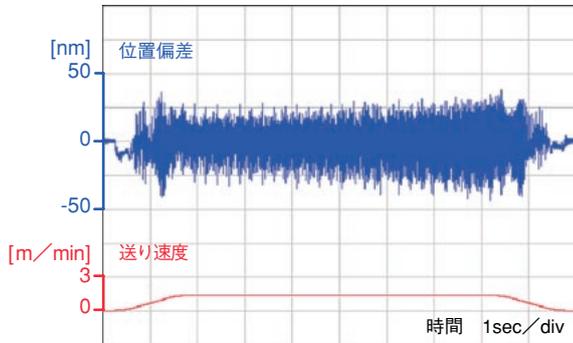
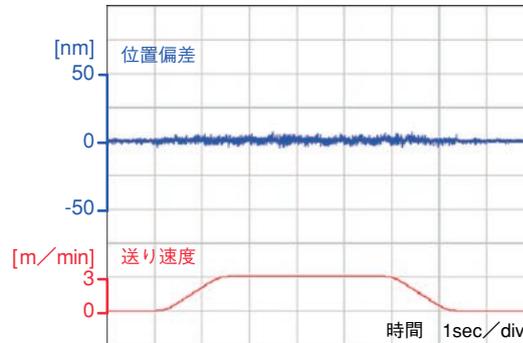


図9 低速(0.005m/min)送りの測定データ

静圧ねじ方式



リニアモーター方式



静圧ねじ方式では機械仕様上の限界速度のため測定は送り速度1.5m/minまで

送り速度3m/minでの測定データ

図10 高速送りの測定データ

4. 特性差要因の推定

両方式の特性差要因として、構造上の違いから3つの要因が考えられる。

- ①粘性抵抗は静圧ねじ(油静圧)のほうがリニアモーター方式より大きい。
- ②剛性は静圧ねじ(油静圧)のほうがリニアモーター方式より大きい。
- ③モーターの磁極に起因する推力/トルクの変動成分(周期)が違う。

これら要因のうち、③について簡単に説明する。実測データから、両方式ともにモーター1極対移動量当たり、2周期の位置偏差変動があることが分かっている(図12)。モーターの構造上からこれは磁極に起因する推力/トルクの変動成分と考えられる。変動のメカニズムは両方式に共通だが、変動周期の違いが特性差要因の一つになっていると考えられる。

これら①～③の特性差要因を想定したシミュレーションモデル²⁾に、実際に評価時に使用した機械の定数、制御定数を設定してシミュレーションした結果を図13に示す。この結果は実測評価結果(図11)と傾向が一致する。

なお、低速側ではシミュレーション結果のほうが実測より位置偏差変動幅が小さくなるが、今回シミュレーションでは、外力変動の影響を含めていないためと考えられる。

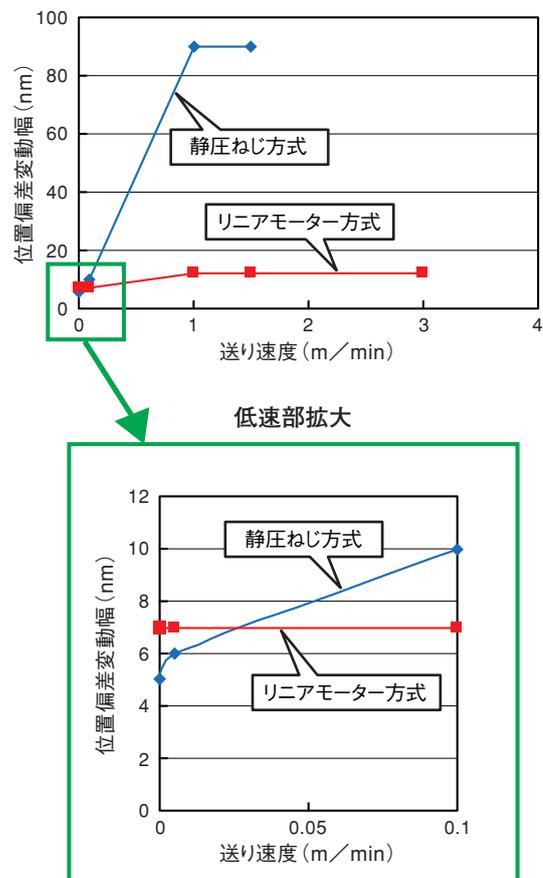
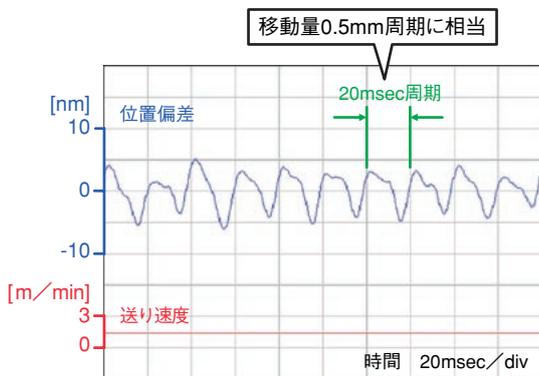


図11 実測評価結果(送り速度と位置偏差変動幅の関係)

静圧ねじ方式



リニアモーター方式

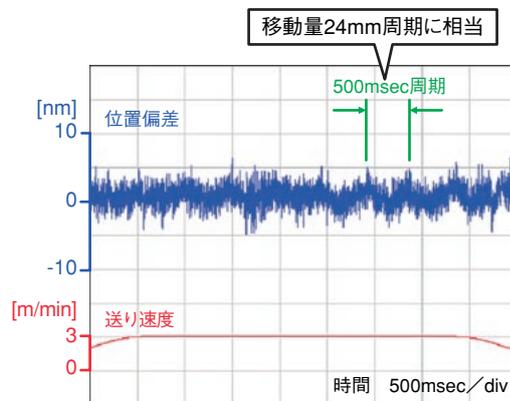


図12 位置偏差の変動成分

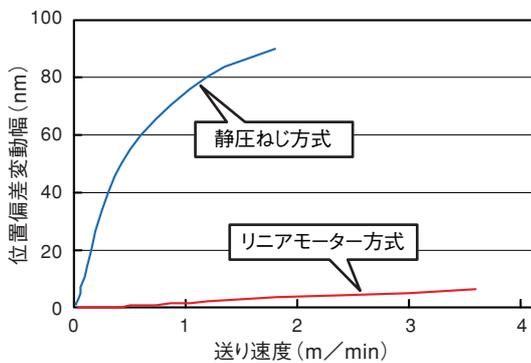


図13 シミュレーション結果

5. 実験の結果

リニアモーター方式と静圧ねじ方式について、送り速度による位置偏差を実測評価した結果、リニアモーター方式のほうが、低速側での位置偏差変動幅が大きく不利であるが、送り速度による差が小さく、高速では有利であることを示した。また、両方式間の

特性差の主要因が、粘性抵抗、ねじ剛性、モーター推力/トルクの変動成分の違いによることを示した。さらに、今回の試験を通して、3m/minの送り速度でナノメートルレベルの加工が可能であることを実測で示すことができた。

6. 今後のさらなる高速・高精度化にむけて

高速ではリニアモーター方式が有利であることは一般的に認知されているが、ナノメートルレベルの精度を持つ油静圧送り機構でも同様であることを確認した。一方、静止・低速や外乱特性も重要であり、とくに外乱特性では静圧ねじ方式が有利であることが報告されている³⁾。

それぞれの方式に長所・短所があり、両方式の特性差や共通特性を解析することで相互の改良をすすめ、今後のさらなる高速・高精度化の要求にこたえていきたい。

参考文献

- 1) 水本 洋：近未来技術展望「超精密工作機械の位置決め技術について」
NACHI-BUSSINESS news、Vol.4 A1、August (2004)
- 2) 朝野浩伸：超精密工作機械におけるリニアモーター駆動の特性と評価、
日本機械学会関東支部 山梨講演会 (2008)
- 3) 金井巨光：超精密工作機械の位置決め機構の現状、
精密工学会秋季大会シンポジウム資料 (2003)