

超精密加工機における位置決めの高精度化 —環境補正装置によるレーザ測長誤差低減—

Improvement of Positioning Accuracy of Ultra-Precision Machine Tools -Reduction of Laser Measurement Error Using Wavelength Tracking Compensator-

足立 和俊* 山口 勝己* 本田 素郎*
Kazutoshi Adachi Katsumi Yamaguchi Sakuro Honda

(2007年6月14日 受理)

Positioning accuracy of ultra-precision machine tools can be improved by control using a laser interferometer feedback system. The form error generated by machine tools results primarily from measurement error attributable to a change in the laser wavelength caused by the refractive index of the air, which is in turn affected by ambient temperature, humidity, and pressure. A wavelength tracking compensator is developed and adopted to machine tools to reduce the laser measurement error. The compensator can update the precise refractive index continuously and can also correct the error of deadpath length in the optical path. To evaluate the compensation performance, measurements were made of the displacement of the tool relative to a workpiece and of the form error resulting from raster flycutting. Both measurement results show remarkable improvement compared to the case without compensation, meaning that high positioning accuracy was achieved.

キーワード：超精密加工，位置決め，レーザ測長，環境補正，測長誤差

1. はじめに

近年，機械部品に求められる精度向上はとどまることを知らないが，この高精度部品製造能力は経済発展の目覚ましい BRICS 諸国に対して技術的優位に立てる点でもある。

上記の精度向上には，より高精度な位置決め手法を開発する必要があることは明白である。一般に高精度な位置決めは，位置あるいは変位を測定するセンサからの正確なフィードバック情報をもとに達成される。位置決め用のセンサのうちで代表的なものとしてレーザ干渉測長器（以下，レーザ測長器と呼ぶ）が挙げられる。レーザ測長器は，高精度なものではサブナノメ

トルのオーダに達する高分解能を有し，加えて非接触測定，大きな最大測長ストロークといった多くの特長を併せ持っている。しかしながら，レーザ測長器の基準となるレーザ光の波長は真空中では一定であるが，大気中では環境変化（正確には空気の屈折率）に依存して変化する。このため，大気中での計測では，何らかの環境補正を講じない限り測長誤差が発生する。このことは，レーザ測長器を採用した超精密加工機の場合にも同様に起こり得ることである。

複雑形状や微細形状の創成を超精密加工機を用いて行う際には，非常に長い加工時間を必要とする。この加工中の環境変化にともなって生じるレーザ測長誤差の影響は予想以上に大きい。著者らはレーザ測長器を備えた加工機を対象に，恒温・恒湿の環境下での長時間（15時間）の切削実験を実施した。この結果では，

* 機械金属部 加工成形系

空気屈折率の変化(おもに気圧変化が原因)により生じたレーザ測長誤差は, 熱変形以上に形状誤差を生む支配的な要因となり, その大きさは数百 nm ~ 1 mm 超にも達することが判明している¹⁾.

本研究では, 超精密加工機における位置決めの高精度化を目指して, センサとして用いられるレーザ測長器の環境変化にもとづく測長誤差を低減するための環境補正装置の開発を行った. これは, 逐次変化する気圧・温度・湿度を計測してその時点での空気屈折率を求め, その影響を測長に反映させる装置である. この装置を超精密加工機の位置計測系に導入して, 種々の評価を行い, 環境変化に依存しない位置決めについて検討した.

2. 超精密加工機の位置決め誤差

図1にレーザ測長の概念図を示す. レーザ測長器は, 被測定体とともに移動する移動体ミラー M_2 と固定された参照ミラー M_1 との間の光路差の変化(距離の変化)に応じて生じる干涉縞数の積算値を出力する. 位置 Z が M_1 に対してビームスプリッタを挟んで光路差ゼロの位置とすれば, Z から B まで距離 L だけ移動したときの積算値 N は,

$$N = \frac{RLn}{\lambda_v} \quad (1)$$

で表される. 式中の λ_v は真空中でのレーザ波長(定数), R は分解能を示す係数(定数), n は環境中の空気屈折率である.

ここで空気屈折率 n は, 環境中の温度 $T(^{\circ}\text{C})$, 湿度 $H(\%)$, 気圧 $P(\text{hPa})$ により変化することが知られており, 下記のエドレンの実験式²⁾(誤差 ± 0.01 ppm)によって計算することができる.

$$n = 1 + 3.83639 \times 10^{-7} \times 0.75P \left\{ \frac{1 + 0.75P(0.817 - 0.0133T) \times 10^{-6}}{1 + 0.003661T} \right\} - 5.607943 \times 10^{-10} H(4.07859739 + 0.44301857T + 0.00232093T^2 + 0.00045785T^3) \quad (2)$$

式(2)より, 温度, 湿度, 気圧がそれぞれ単独で 0.1°C , 10% , 0.37 hPa 変化するとき, 空気屈折率 n は約 0.1 ppm 変化するが, これらの値は空気屈折率への影響を知る上での目安となる. n が変化すれば, たとえ距離 L が変わらなくても式(1)の積算値 N は変化することになり, これが測長誤差となって現れる.

レーザ測長器によってフィードバック制御される加工機が指定位置を維持する場合, 加工機は積算値 N が一定値を保つように位置決め制御される. 図1において, 空気屈折率 n_i の状態で距離 L を測長した際に

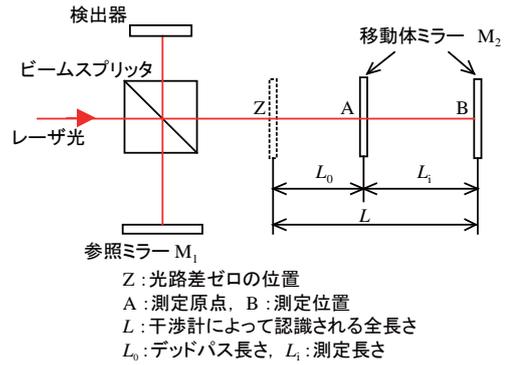


図1 レーザ干渉測長器の基本的配置

A basic optical layout of a laser interferometer system.

生じる積算値を N_1 , その後, 空気屈折率が n_1 から n_2 に変化し積算値が変化すると, 加工機は積算値 N_1 を保つために距離を L' に変化させる. このときの L' は, 次式となる.

$$L' = \frac{\lambda_v}{Rn_2} N_1 = \frac{\lambda_v}{Rn_2} \cdot \frac{RLn_1}{\lambda_v} = \frac{n_1}{n_2} L \quad (3)$$

この結果, 加工機の位置決め誤差 ΔL は, 次式で表され, 屈折率の変化率 $(n_1 - n_2)/n_2$ と光路差ゼロの位置からの距離 L との積で求められる.

$$\Delta L = L' - L = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \right) L \quad (4)$$

年間を通じてみると, 1日における気圧の最大変動幅は約 25hPa にも及ぶ. この場合, 恒温・恒湿下における変化率 $(n_1 - n_2)/n_2$ は約 6.8 ppm (= 25 hPa / 0.37 hPa \times 0.1 ppm) に相当する. 加工機移動軸の最長移動時の L を約 850 mm として位置決め誤差 ΔL を試算すれば, 約 5780 nm となり数 μm に達する非常に大きな誤差となる.

さらに, より正確な測長のためには, いわゆる『デッドパス』も考慮する必要がある. 加工機等に組み込まれた状態でレーザ測長を行う場合, 光路差ゼロの位置 Z を原点として測定することは稀である. 図1に示すように, Z から L_0 だけ離れた A 点(測定上の原点に相当する)において積算値 N をリセットし, その後の移動距離 L_i について N をカウントするのが一般的である. この ZA 間がデッドパスと呼ばれる.

今, 移動体ミラー M_2 が Z から A まで移動したときの空気屈折率を n_0 , M_2 が Z から B まで移動したときの空気屈折率を n_i とすると, A から B までの移動距離 L_i は, 次式で表される³⁾.

$$L_i = \frac{\lambda_v N_i}{Rn_i} + \left(\frac{n_0 - n_i}{n_i} \right) L_0 \quad (5)$$

すなわち式(5)より, 正確な移動距離 L_i は, 測長器から出力される積算値 N_i のみでは定まらず, 空気屈

折率 n の変化とデッドパス長さ L_0 に関する情報を必要とする。

3. 環境補正装置の開発

(1) 環境補正装置の構成

測長誤差を排除した正確な測長を行うためには、式 (5) によると、刻々と変化する空気屈折率の値と正確なデッドパス長さが必要となる。そこでレーザ光路の近傍での温度、湿度、気圧を計測し、それらの値を式 (2) のエドレンの実験式に代入することでその時点の空気屈折率を算出し、次に式 (5) により距離 L_1 に相当する積算値を計算して加工機の CNC 装置に出力する環境補正装置を開発した。

今回対象とした加工機は、X、Y、Z の並進 3 軸と回転軸 B を有する超精密曲面加工機 (豊田工機製 AHN60-3D) である。本機の X 軸と Z 軸の位置決めにレーザ測長フィードバックを採用している。図 2 に開発した環境補正装置のシステム構成と配置を示す。温・湿度計 (① VAISARA 製 HMP233) と気圧計 (② VAISARA 製 PTB220) は、加工機を覆うエンクロージャの内側に設置され、レーザ光路近傍での温度、湿度、気圧を計測する。計測された環境データは、一定周期の安定した転送を目的に設置したデータ収集ボード (③) を経由して PC ベースの解析装置 (④) に送られる。

解析装置は、式 (2) のエドレンの式を用いて、環境の計測データから正確な空気屈折率をリアルタイムに

算出し、その値をレーザ測長器 (Zygo 製 ZMI-1000) 内に新たに追加した環境補正ボード (⑤) へ出力する。

補正ボードは、リアルタイムに更新される空気屈折率と解析装置で指定されたデッドパス長さをを用いて、レーザ測長器から出力される生の積算値を補正し、その補正値を標準状態 (温度 20 °C, 湿度 50%, 気圧 1013.25 hPa) における積算値に換算して加工機 CNC 装置 (⑥) に送る。これらの計算アルゴリズムは、空気屈折率換算で誤差 ± 0.01 ppm (エドレンの式における誤差に等しい) 以内となるように設計した。

(2) デッドパス長さの推定

レーザ測長系が加工機等に組み込まれた状況では、デッドパス長さの正確な値を直接測定することは難しい。ここでは、環境が変化する状況下で種々のデッドパス長さを設定して補正誤差をモニターし、それが最小になる場合のデッドパス長さを真の値として採用した。その際、短時間で環境を変化させるために環境一定制御チャンバー⁴⁾を利用して、温度と湿度を一定に制御し気圧のみを変化させる実験を行った。

まず、加工機上の原点位置 (デッドパス位置) においてフィードバック制御しない状態で加工機を立ち上げ、加工機がデッドパス長さ L_0 の位置で全く動かない状態を作り出した。次に、この状態で気圧を 0 から 15hPa まで変化させ、その際の軸位置情報 I (補正誤差に相当) を CNC 装置内のサーボチェックボードから取得した。デッドパス長さの設定値 L_0' が真の値 L_0 に一致していれば軸位置情報 I は全く変化しないことになる。

図 3 は、Z 軸の位置情報の変化を異なる 2 つのデッドパス長さの設定値 L_0' について示したものである。 $L_0' = 894$ mm を設定した場合、気圧増加量が 15 hPa に達した時点での位置情報の値は、約 200 nm のずれを示すが、 $L_0' = 849$ mm の場合では約 30 nm と小さく、より真の値に近いと考えられる。同様の実験を L_0' の値を種々に変化させて行い、位置情報 I がゼロになる値を推定した結果、デッドパス長さの真の値として 845 mm を得た。

4. 環境補正時の位置決め性能の評価

(1) 工具-工作物間相対変位による評価

レーザ測長フィードバックを採用した加工機の場合、図 4 の模式図に示すように、環境の変化にともない発生した位置決め誤差 ΔL は、工具-工作物間の相対変位 ΔD として現れ、加工時には切削面に転写され形状誤差となる。このため、環境補正時の位置決め性能の

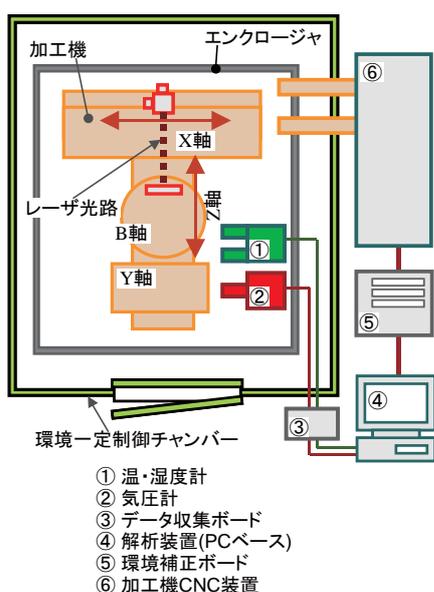


図 2 環境補正装置のシステム構成

Schematic of precision machining system with a wavelength tracking compensator.

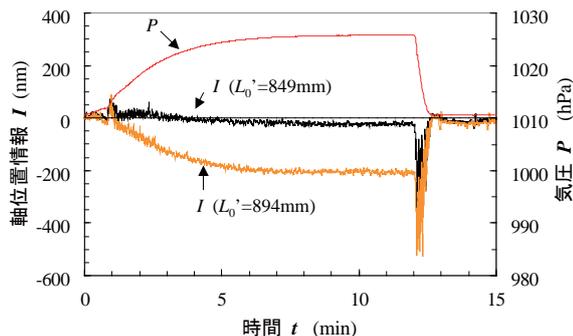


図3 気圧変化時の CNC から得た軸位置出力値
Position output data of Z-axis obtained from CNC controller in varying atmospheric pressure artificially.

評価を，加工機を特定の位置で停止させた時の工具－工作物間の相対変位 ΔD を測定することで行った。

相対変位の測定は，図4に示すように工作物を固定する位置にブロックゲージを，工具位置に静電容量型変位計 (ADE 製 マイクロセンス 3401HR，測定分解能 2.5 nm，温度ドリフト 50 nm/°C) を設置し，変位計からの出力をローパスフィルタ (カットオフ周波数 1 Hz) を介してパソコンに取り込むことで行った。

まず，環境補正を行わない場合の相対変位を検証した。図5に，15時間にわたり測定した相対変位 ΔD ，環境の計測データから式(4)を用いて推定した位置決め誤差 ΔL ，およびこのときの気圧変化 P を示す。図中の相対変位 (あるいは位置決め誤差) のマイナス方向は，変位計がブロックゲージに接近する方向 (Z軸が縮む方向) である。

温度 T と湿度 H は一定に管理されており，それぞれの変動は図5に最大変化量 (PV 値: Peak to Valley) で記載したとおり，温度 PV: 0.03 °C，湿度 PV: 1.12% であった。両者の変化は空気屈折率 n の変化で 0.03 ppm と 0.01 ppm に相当する。一方，気圧 P は PV: 1.88 hPa 変化しており， n の変化では 0.51 ppm に相当し，空気屈折率 n の変化への寄与の約 93% を占めていることになる。この結果，予想される位置決め誤差 ΔL の変化曲線は，気圧 P の変化を反映した様相を呈している。なお， P の増加は n の増加を招くので，式(4)において ΔL はマイナスとなるため， ΔL の変化曲線は P の曲線の増減を反転させたような形となる。

図5より，相対変位の実測値 ΔD は PV: 364 nm，位置決め誤差の推定値 ΔL は PV: 357 nm であった。両者の PV 値はほぼ一致し，変化の様子は酷似しており， ΔD が ΔL に起因して発生したことを裏付けている。各測定点における相対変位 ΔD と位置決め誤差 ΔL との差に注目すると，両者の差は最大 60 nm 程度存在した。このことは，空気屈折率の変化が原因で発生する

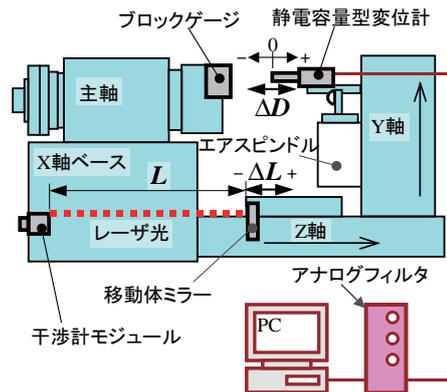


図4 工具－工作物間相対変位測定系の概略
Setup of the measurement of relative displacement between tool and workpiece.

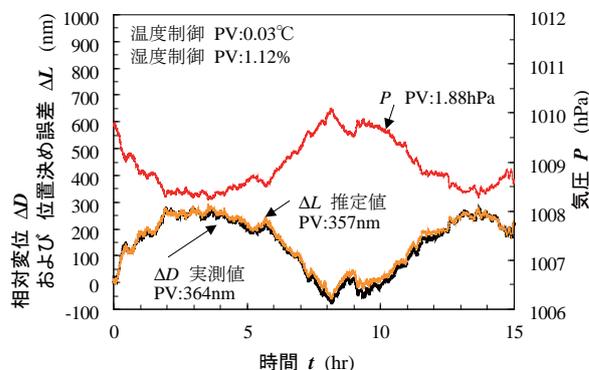


図5 環境補正なしの場合の工具－工作物間相対変位
Relative displacement between tool and workpiece without wavelength tracking compensator.

位置決め誤差 ΔL を排除できれば，工具－工作物間の相対変位 ΔD を少なくともこのオーダ (60 nm 程度) まで改善できる可能性があることを示している。

次に，環境補正装置を使用した状態で測定した工具－工作物間の相対変位 ΔD を図6に示す。ここでは，環境データのサンプリング間隔を1秒，測定時間を60時間，デッドパス長さ L_0 を前章で推定した真の値 845 mm に設定した。また，図には補正装置を使用しないときに予想される位置決め誤差 ΔL とこの間の気圧 P の変化を併記した。

図6より，相対変位の実測値 ΔD は PV: 53 nm であり，補正装置を使用しないときに予想される位置決め誤差 $\Delta L = 2350$ nm の約 1/40 と著しく小さな値となっている。この結果は，環境補正を行うことによって位置決め精度が大幅に向上したことを示している。

(2) 加工実験による評価

環境補正の有効性をラスタ切削実験で検証した。ラスタ切削は，図7に示すように，X軸 (工作物の移動方向) と Z軸 (工具の切込み方向) に同時2軸制御される回転工具を用いて，Y軸 (上下方向) を固定

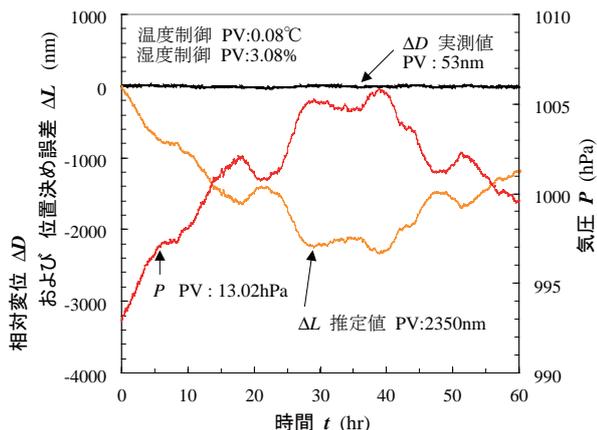


図6 環境補正時の工具-工作物間相対変位
Relative displacement between tool and workpiece with wavelength tracking compensator.

した XZ 面内での加工を行い、これを Y 軸方向に繰り返すことで自由曲面等を創成する方法である。旋削による軸対称形状加工等に比べて長い加工時間を要し、環境変化の影響を受けやすいことが特徴で、その影響は総加工時間の環境変化が反映される Y 軸方向 (ライン AB) の形状誤差に現れる。

ラスター切削実験は、NiP めっきを施した 10 mm 角試料の平面加工とし、試料の最上端より下端に向けて約 23 時間の加工を実施した。加工後のライン AB 上の形状誤差をレーザ干渉計 (Zygo 製 GPI-XPHR) によって測定した。その他の加工条件をまとめて表 1 に示す。

図 8 に加工面 Y 軸方向の形状精度 E (実測値) を示す。図には、環境変化から予測される位置決め誤差 ΔL (推定値) と気圧変化 P (実測値) を併記した。

環境補正による形状誤差は PV 値で 91 nm であり、本来発生すると予想される形状誤差 468 nm が大幅に低減されている。このように、実際の加工の状況においても環境補正により位置決め精度が向上し、長時間にわたり安定した加工を行うことができる。

5. まとめ

レーザ測長フィードバック機構を採用した超精密加工機における位置決めの高精度化を図ることを目的として、測長誤差を低減するための環境補正装置を開発した。開発した装置を加工機の位置計測系に導入して環境補正を行い、軸停止時工具-工作物間相対変位測定及び平面形状のラスター切削加工実験を通して評価を行った。その結果、補正を行わない場合と比較して加工機の位置決め精度が著しく改善されることが実証

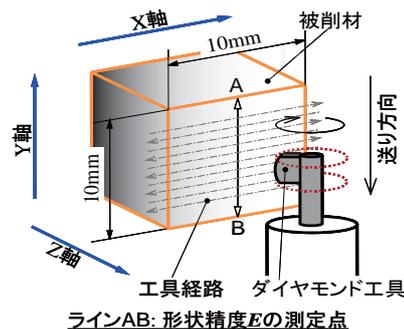


図7 ラスター切削概略図
Schematic view of raster flycutting.

表1 ラスター切削条件
Raster flycutting conditions.

被削材質	銅試料上に施した無電解 NiP めっき層
工具	単結晶ダイヤモンド工具 ノーズ半径 2mm 回転半径 18mm
切削速度	565m/min (5000min ⁻¹)
送り速度	240mm/min (48μm/rev)
切込み深さ	3μm
Y 方向送り間隔	15 μm
総切削時間	22 時間 49 分 (アップカット)
切削液	鉋物油 (ミスト)

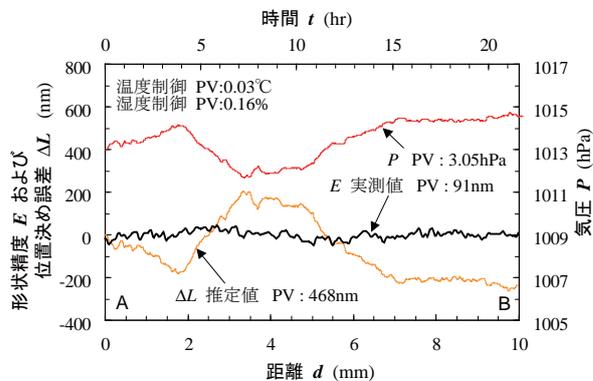


図8 NiP めっき面のラスター切削後の形状精度
Form error on the electroless NiP layer machined by raster cutting.

できた。

参考文献

- 1) 山口勝己, 足立和俊, 本田索郎: 大阪府立産業技術総合研究所報告, No.17 (2003) p.57.
- 2) Zygo Corporation: ZMI Optical Wavelength Compensator Accessory Manual, OMP-0233F.
- 3) 田中敬一, 清野昭一: 精密機械, 40 (1974) p.716.
- 4) 山口勝己, 村田一夫, 足立和俊, 大川裕蔵, 小栗泰造, 船上 誠, 藤野 仁, 島田尚一, 井川直哉: 2004 年度砥粒加工学会学術講演会論文集, (2004) p.427.