

# ラスター切削における形状誤差要因の解明 —気圧変化によるレーザ測長誤差の影響—

## *Clarification of Error Components for Form Accuracy in Raster Flycutting —Effect of Laser Positioning Error caused by Atmospheric Pressure Fluctuation—*

山口 勝己\*      足立 和俊\*      本田 索郎\*  
*Katsumi Yamaguchi   Kazutoshi Adachi   Sakuro Honda*  
村田 一夫\*  
*Kazuo Murata*

(2003年7月7日 受理)

An investigation into the effect of fluctuations in environmental conditions on the degradation in form accuracy of finished products is carried out using ultra-precision aspheric generator with a laser interferometric measurement system. This study mainly addresses the correlation between the profile error of a finished surface and air pressure changes during raster flycutting. Cutting experiments are carried out in a precisely air-conditioned environment maintained with temperature change of  $\pm 0.04^{\circ}\text{C}$ , humidity change of  $\pm 1\%$  and natural pressure fluctuation. Experimental results indicate that deviations of the surface profile from the reference line increase in proportion to those of air-pressure drift. In addition, the form accuracy is determined solely by the magnitude of air-pressure deviations. Consideration of the atmospheric compensation error confirmed that the deviation of the surface profile results from incorrect tool positioning caused by laser measurement error in proportion to the change in air pressure during machining.

キーワード：超精密加工，形状精度，レーザ干渉計，測長誤差，環境補償，気圧，ラスター加工

### 1. はじめに

レーザ干渉測長器は，超高精度・非接触測定・設置の簡便さといった利点を活かし，超精密加工機の位置決め制御をはじめ，超精密測定機や半導体製造装置のステージ移動量測定などに幅広く応用されている。また，超精密加工機は，光学素子の高精度・高機能化（青色レーザ等短波長への対応，コンパクト型ピックアップのようなハイブリッド機能）への流れを受け，高精度な自由曲面加工や複雑な微細加工への対応が迫られ，加工法は従来の軸対称非球面を対象とした旋盤型加工からフライス型加工へと移行している。

図1に示すラスター加工はフライス型加工の典型例

であり，工作物の移動方向（X軸）と工具の切込み方向（Z軸）に同時2軸制御された回転工具を用いて，上下方向（Y軸）を固定したXZ平面内での加工を行い，これをY軸方向に順次繰り返して自由曲面を創成する技術である。ラスター加工の特徴は，加工時間が旋盤型加工に比べ非常に長く，環境の経時変化の影響を受けやすい点にあり，加工精度について言えば，Y軸方向の形状精度がX軸方向に比べ総じて劣る。

当初，この主な原因は，環境温度の変化にともなう加工機の熱変形が，工具-工作物間の相対運動に誤差として加算され，その誤差が顕著に現れる方向がY軸方向に相当するためと考えていた。しかし，形状精度の優劣が天候に左右されるといった現象，以前から指摘されているレーザ測長時の環境補正の重要性<sup>1-3)</sup>などから，温湿度が管理された環境下では，加工機の熱

\* 生産技術部 精密機械グループ

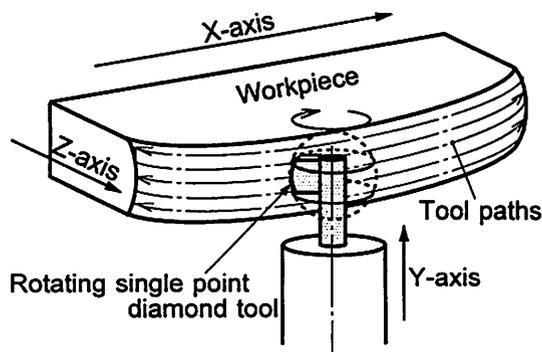


図1 ラスター切削加工時の工具の運動軌跡

Scheme of raster flycutting showing relative motion between tool and workpiece

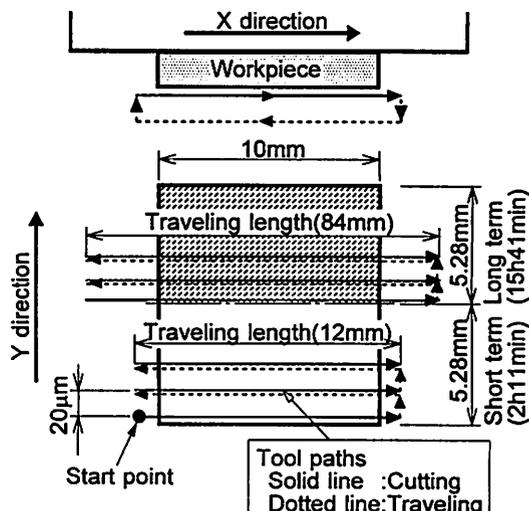
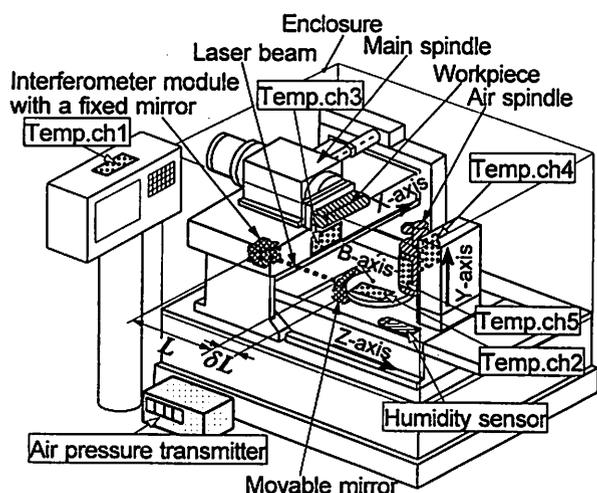


図3 平面ラスター切削実験の加工手順

Procedure for generating a flat surface by raster flycutting



Temp.ch1~ch5 : Temperature sensors (ch1~ch5)

図2 機械構成の概要と環境センサーの配置

Main components of aspheric generator and atmospheric measurement system

変形ではなく、むしろ気圧の変化にともなうレーザ測長誤差が形状精度を決定する主要な要因と考えられた。

本研究では、環境(特に気圧)の変化にともなうレーザ測長誤差が形状精度に及ぼす影響を解明するため、ラスター切削後の加工面の形状評価より、形状誤差と気圧変動との関係を明らかにするとともに、レーザ干渉測長の原理より導出した、環境補正誤差の関係式を用いて両者(形状誤差と気圧変動と)の因果関係について検討した。

## 2. ラスター切削実験

### (1) 実験方法

#### (A) 超精密加工機

図2に超精密加工機(豊田工機製 AHN60-3D)の概観を示す。加工機は恒温・恒湿室に設置され、さらに加工領域はエンクロージャで仕切られ、その中の温度

表1 ラスター切削条件

Raster flycutting conditions

被削材	無酸素銅 (10.00mm×10.56mm 純度99.99%)
工具	単結晶ダイヤモンド完全Rバイト (ノーズ半径 R=5mm)
工具回転数	5000rpm
被削材送り速度	50mm/min
切込み深さ	3µm
加工方向	一方向(上向き切削)
Y方向加工ピッチ	20µm
切削液	油脂混合型不水溶性切削油のミスト噴霧
総加工時間	2時間11分と15時間41分の2通り

はより高精度に管理されている。

ラスター切削加工は、レーザ測長システム(ZYGO社製 ZMI-1000, 分解能1.24nm)を採用したX, Z軸, リニアスケール採用のY軸, Y軸上のエアスピンドル(工具回転軸)を用いて行った。

#### (B) 加工環境の計測

図2に気圧, 温度, 湿度の各センサーの位置を示す。気圧計は、エンクロージャ内外での気圧計の読みが一致していることを確かめた上、実験の邪魔にならない外側に設置した。温度と湿度のセンサーはエンクロージャ内に設置し、加工時の恒温・恒湿性能の確認に用いた。

#### (C) 切削実験条件

ラスター切削実験は、図3に示す試料形状の無酸素銅の平面加工とし、試料の最下部左端より加工を開始し、最初に試料の下半分を短時間(2時間11分)で、引き続き上半分を長時間(15時間41分)で削ることで行った。これら加工時間の異なる切削実験は、表1に示

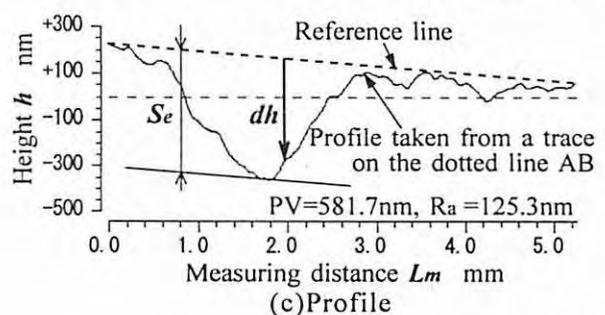
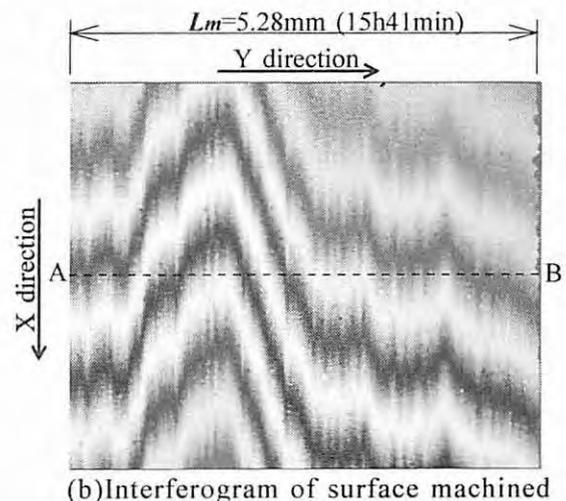
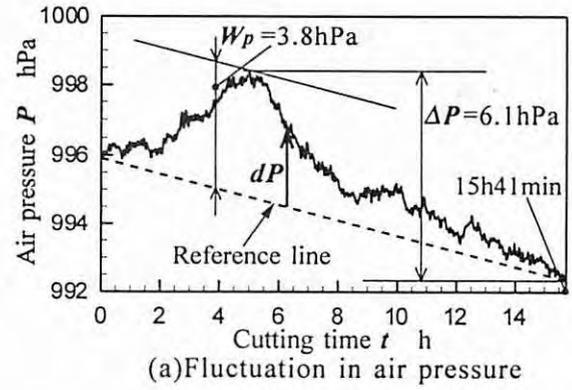
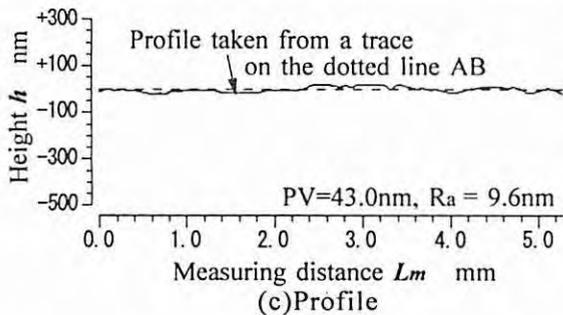
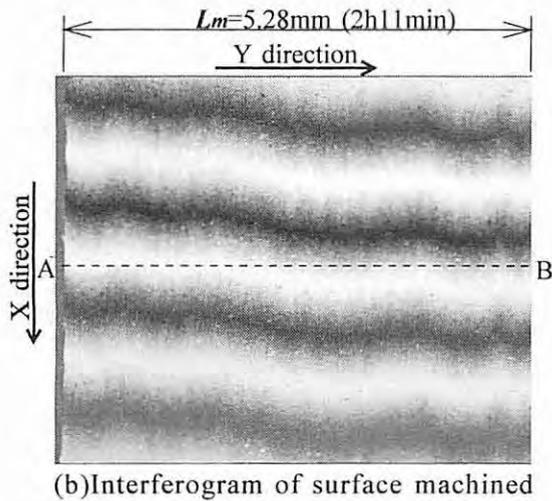
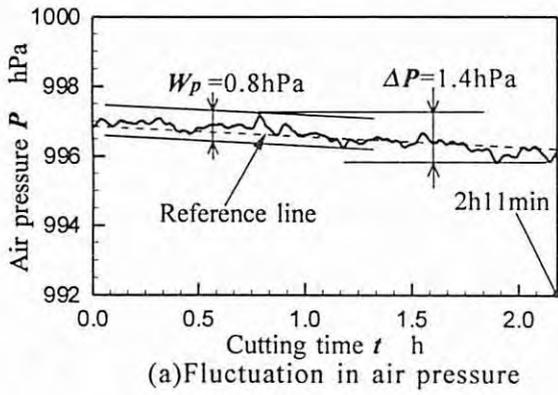


図4 短時間加工時の気圧変化と加工面の形状変化  
Correlation between the figure profile of machined surface and the fluctuation in air pressure in a short-term cutting

図5 長時間加工時の気圧変化と加工面の形状変化  
Correlation between the figure profile of machined surface and the fluctuation in air pressure in a long-term cutting

す共通の切削条件下で行っており、加工時間の長短を実現するため、工具のX軸方向切削送り行程の長さ、工具の非加工（もどり）時の送り速度を変えている。なお、加工実験に先立ち2日間の温度慣らしを実施した。

以下に、実験で使用した計測器の詳細を示す。

- 温度センサー : 白金測温抵抗体 (Pt100, JIS A級)
- 温度記録計 : アドバンストレコーダ (チノー製 AR2767)
- 気圧計 : デジタルマノメータ (コスモ計器製)

- 湿度計 : サーモレコーダ (ダバイエスベック製 RS-10)
- 形状測定機 : 三次元構造解析顕微鏡 (Zygo社製 NewView100)

(2) 実験結果

約18時間に及ぶ実験時の温度  $T$  と湿度  $H$  は、それぞれの変化量が P-V 値\*1) で  $\Delta T = 0.08^\circ\text{C}$  と  $\Delta H = 2\%$  と、非常に高精度に管理されていた。ここでは管理されていない気圧の変化と形状変化との関連について調べた。

\*1) Peak-to-valley の略、最大値と最小値の差

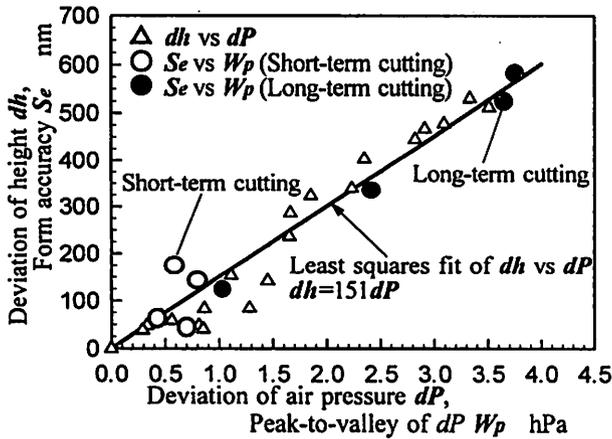


図6 形状の変動量と気圧の変動量との関係

Height deviation in figure profile as a function of air-pressure deviation

(A) 短時間加工と長時間加工との比較

図4と図5は、気圧変化や形状変化を短時間加工と長時間加工について比較したもので、両図(a)に加工中の気圧Pの変化を、(b)に加工後に測定した切削面上の干渉縞写真を、(c)に干渉縞を基に解析された断面曲線(写真中央部の破線AB上の形状変化)を示す。

図4(c)、図5(c)の断面曲線より、気圧変化の大きい長時間加工時の形状精度(PV=581nm)は、短時間加工時(PV=43nm)に比べ明らかに劣っている。図5(b)、(c)の長時間加工時の干渉縞の形や断面曲線は、図5(a)の気圧変化に対し時間的な遅れもなく忠実に運動しており、切削面の形状変化がやはり気圧変化に支配されていると推測できる。

(B) 形状誤差と気圧との関係

図5(b)、(c)の干渉縞や断面曲線は、加工された試料表面の形状測定データに対し、最小自乗法等を利用し基準面あるいはゼロ点を計算している。このため、形状変化と気圧変化との関係を定量的に評価しようとするならば、新たな統一的な基準を採用する必要がある。ここでは、気圧Pや高さhの大きさを、図5(a)、(c)に示すような、加工の開始点と終了点を結ぶ直線を基準に測った気圧の変動量dPや高さの変動量dhを用いて評価した。この場合、dhは設計形状(この場合直線)と実際の形状との偏差で形状誤差に相当することになる。

図6にdhをdPで整理した結果を△印で示す。図6より、dhとdPの間には強い相関が認められ、両者の関係は原点を通る直線で近似可能である。形状精度の観点からdh-dP間の直線関係を見れば、形状精度を加工時間内のdhの最大値と最小値の差で与えると、形状精度Seは、図5(a)の変動量dPのP-V値である

変動幅Wpの大きさによって決まり、図6に示した直線上に並ぶはずである。図6の○印(短時間加工)と●印(長時間加工)は4回のラスタ切削実験後のSeとWpの関係を示したものであるが、いずれもほぼ直線上に載っている。以上より、形状誤差dh(または形状精度Se)は気圧の変動量dP(または変動幅Wp)に比例する。

3. レーザ測長誤差から見た実験結果の考察

(1) レーザ測長原理と測長誤差

一般に、干渉測長器を用いて移動距離を測定するとき、図2に示すように、被測定体とともに移動するミラー(移動体ミラー)と固定された参照ミラー(干渉計と一体)との間の光路差の変化に応じて生じる干渉縞数を積算して移動距離を求める。

光路差ゼロの位置から距離Lだけ移動したときの積算値(干渉次数)Nは、

$$N = \frac{MLn}{\lambda_v} \dots\dots\dots (1)$$

また、Nの変化は(1)式的全微分で与えられ、

$$\delta N = \frac{Mn}{\lambda_v} \delta L + \frac{ML}{\lambda_v} \delta n \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで、λ<sub>v</sub>は真空中のレーザ波長、Mは分解能を示す係数、nは環境中の空気屈折率である。

この(2)式はレーザ測長原理を示したもので、通常、空気屈折率の変化が無いもの(δn=0)として用いられ、距離の移動量δLは積算値の変化δNとして計測されることになる。δnが無視できない場合には、(2)式の右辺第二項が左辺のδNに加算されるため、レーザ測長誤差となる。

一方、空気屈折率nは、環境中の温度T(°C)、気圧P(mmHg: 1mmHg≅1.333hPa)、湿度H(%)により変化することが知られており、以下のエドレンの実験式(誤差±0.01ppm)で計算できる<sup>4)</sup>。

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

さらに、当所の加工機のように、指定位置を維持する(δN=0となる)ようフィードバック制御される場合には、以下の(4)式となり、

$$\delta L = -\frac{L}{n} \delta n \dots\dots\dots (4)$$

空気屈折率の変化 $\delta n$ は、直接加工機の位置の変化 $\delta L$ (位置決め誤差)として現れる。

## (2) 環境変化と形状誤差との関係

気圧、温度、湿度などの環境が変化すると、空気屈折率 $n$ は(3)式に従って増減(変化 $\delta n$ が発生)する。空気屈折率の変化 $\delta n$ はレーザ測長誤差((2)式の右辺第二項)を引き起こすばかりか、(4)式のように位置決め誤差(工具と工作物間の相対距離の変化)をもたらす。そして、工具-工作物間の相対距離の変化は、最終的に切削面の形状誤差として現れることになる。図5や図6の場合を例に以上の関係を検証してみる。

まず最初に、空気屈折率の変化 $\delta n$ を(3)式を用いて試算すれば、実験時の環境変化は、気圧で $\Delta P=6.1\text{hPa}$ 、温度で $\Delta T=0.08^\circ\text{C}$ 、湿度で $\Delta H=2\%$ であり、 $n$ の変化に換算すれば、それぞれ $1.65\text{ppm}$ 、 $0.08\text{ppm}$ 、 $0.02\text{ppm}$ に相当する。空気屈折率の変化 $\delta n$ の94%が気圧変化の寄与分となり、気圧変化の影響が支配的なことが分かる。

次に、気圧が変化する際の工具-工作物間の相対運動について見てみると、(3)式より、気圧が増加すると、空気屈折率 $n$ は増加する( $\delta n > 0$ )。このとき(4)式より $\delta L < 0$ となり、工具-工作物間の相対距離は減少し過切削が起こることになる。この関係は、図5(a)と(c)の対比から定性的ではあるが明確に確認できる。

さらに、図6に示す形状誤差と気圧変動の比例関係を検討する。(4)式を参照すれば、工具と工作物間の相対距離の変化 $\delta L$ は空気屈折率の変化 $\delta n$ に比例する。正確には、(4)式右辺の $\delta n$ の係数 $L/n$ は逐次変化するが、 $L$ や $n$ の変化率はppmオーダーと極僅かであり、係数 $L/n$ はほぼ一定値とみなされる。

この結果、 $\delta n$ が気圧 $P$ の変化に比例すれば、最終的に工具と工作物間の相対距離の変化 $\delta L$ が気圧 $P$ の変化に比例し、図6の比例関係を裏付けることになる。

温度 $T$ と湿度 $H$ が一定( $T$ や $H$ の変化が極僅かで $n$ への寄与が極微小)で気圧のみが変化する場合、(3)式より空気屈折率 $n$ の微係数 $\delta n/\delta P$ は一次式 $C_1P+C_2$ ( $C_1$ 、 $C_2$ は定数)で示されるが、定数項 $C_2$ が一次項の係数 $C_1$ に比べ非常に大きく(例えば、 $H=50\%$ 、 $T=22^\circ\text{C}$ 、 $P$ の単位がhPaのとき $C_2/C_1 \cong 10^7$ )、 $P$ が変化し

ても微係数は一定とみなされ、 $\delta n$ が気圧 $P$ の変化に比例することになる。

以上のように、温度と湿度が一定の場合、気圧の変化に比例して空気屈折率が変化し、さらに空気屈折率の変化に比例して工具と工作物間の相対距離が変化するため、工具と工作物間の相対運動軌跡が転写される切削面では、その形状誤差は気圧の変化に比例することになる。

## 4. おわりに

以上を総合すれば、温度( $\pm 0.04^\circ\text{C}$ )や湿度( $\pm 1\%$ )が管理された環境下で、高分解能レーザ測長器を備えた工作機械を用いた超精密加工においては、①切削面の形状誤差は加工中の気圧の変動に比例し、②その形状誤差を生じる主な原因が、気圧変動にともなうレーザ測長の誤差であることを明らかにした。

一方で、このように無視できない形状誤差を生むレーザ測長誤差を補償する技術の確立は緊急の課題でもある。(2)式を参考にすれば、レーザ測長誤差が環境変化にともなう空気屈折率の変化 $\delta n$ ((2)式の右辺第2項)によって生じることから、 $\delta n$ を限り無くゼロにすることが第一の対策で、 $\delta n$ を容認するのであれば、(2)式の右辺第2項を左辺に正確に反映させることが第二の対策となる。

当研究所では、これらの対策技術として、気圧を含む環境の一定制御技術や環境の補正方法について引き続き研究を進めていく。

## 参考文献

- 1) C. R. Steinmetz: Precision Engineering, 12, 1, 12 (1990)
- 2) S. Hosoe: Precision Engineering, 17, 4, 258 (1995)
- 3) 磯崎克己: 第4回超先端加工システム技術シンポジウム予講集, 122 (1992)
- 4) Zygo Co., ZMI Optical Wavelength Compensator Accessory Manual OMP-0233F, 13 (1998)