

レーザ干渉測長器の環境依存性について

キーワード：レーザ干渉測長器、環境補償、温度、湿度、気圧、超精密加工

はじめに

レーザ干渉測長器（以後『レーザ測長器』と略す）は、超高精度・非接触測定・設置の簡便さといった特徴を生かし、超精密ステージの移動量測定や位置制御に数多く用いられています。その応用範囲は、超精密加工機をはじめ、非球面形状測定器、超高精度三次元測定器などの超精密測定機器、電子ビーム・レーザビーム描画装置、ステッパー、ボンダー、ICハンドラ等の半導体製造装置に及んでいます。

このように、応用範囲の広いレーザ測長器ですが、高精度な測定を行う場合、測定時の空気屈折率の変化を補償する必要があります。この補償に対する注意を怠れば、レーザ測長器は非常に大きな測長誤差を生じます。

ここでは、レーザ測長原理と測長誤差を解説するとともに、レーザ測長器を備えた超精密加工機を応用例として取り上げ、レーザ測長誤差と加工誤差との関係を検討します。

レーザ測長原理とレーザ測長誤差

図1に基本的なレーザ測長系を示します。レーザ測長では、可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に応じて生じる干渉縞数 N をカウントしてミラー M_2 の移動距離を求めます。

図1において、 Z を M_1 に対してビームスプリッターをはさんで光路差ゼロの位置とすれば、 Z から距離 L だけ移動したときのカウント数 N は、

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

となります。ここで、 λ_v は真空中のレーザ波長(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す。

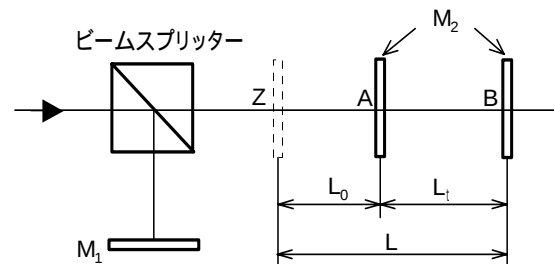


図1 レーザ測長の概念図

ところが、ミラー M_2 が Z から B (距離 L の位置)まで移動する間に空気屈折率 n が変化すると、カウント数 N を示す式は少し複雑になります。さらに、通常のレーザ測長では光路差ゼロの位置 Z から測定することは稀で、図1のように、 Z から(デッドパスと呼ばれる) L_0 だけ離れた A においてカウンターをゼロにリセットし、その後の移動距離 L_t について N をカウントするのが一般的です。

今、空気屈折率が n_0 のときに移動体ミラー M_2 が Z から A まで移動した場合の干渉縞カウント数を N_A 、屈折率が n_t の状態では M_2 が Z から B まで移動したときのカウント数を N_B としますと、 A から B までの移動によるカウント数 N は、次の(2)式のように表されます。

$$\begin{aligned} N &= N_B - N_A \\ &= \frac{R(L_0 + L_t)n_t}{\lambda_v} - \frac{RL_0n_0}{\lambda_v} \end{aligned} \quad (2)$$

(2)式を変形し L_t について整理すると、

$$L_t = \frac{\lambda_v}{Rn_t} N - \left(\frac{n_t - n_0}{n_t} \right) L_0 \quad (3)$$

となります。

(3)式より、空気屈折率 n が変化するとき、右辺第2項はゼロにはならず、移動距離 L_t は、レーザ測長器から出力されるカウント数 N だ

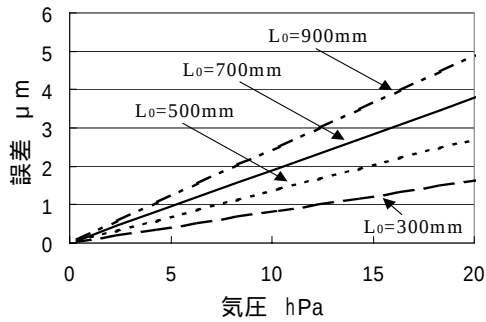


図2 気圧変化とレーザ測長誤差との関係

けでなく、空気屈折率 n の変化やデッドパス長さ L_0 の影響を受けることがわかります。これが測長誤差を生む原因となります。

また、空気屈折率 n は、環境中の温度 T ()、湿度 H (%)、気圧 P (mmHg:1mmHg $\approx$ 1.333hPa)により変化することが知られており、(4)式に示すエドレンの式によって計算が可能です。

$$n = 1 + 3.83639 \times 10^{-7} P \left\{ \frac{1 + P(0.817 - 0.0133T) \times 10^{-6}}{1 + 0.003661T} \right\} - 5.607943 \times 10^{-10} H (4.07859739 + 0.44301857T + 0.00232093T^2 + 0.00045785T^3) \quad (4)$$

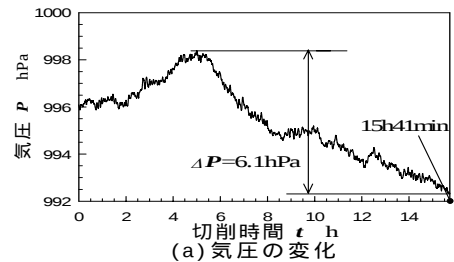
図2は、温度 T と湿度 H をそれぞれ20と50%に固定し、気圧 P のみを1013hPaから1033hPaまで20hPa増加させた場合のレーザ測長誤差と気圧の変化量との関係を、異なるデッドパス長さ L_0 について試算したものです。たとえサブnmの分解能を持ったレーザ測長器で計測した場合でも、気圧が変化するだけで μ mオーダの測長誤差が生じることがわかります。

超精密加工機における加工誤差への影響

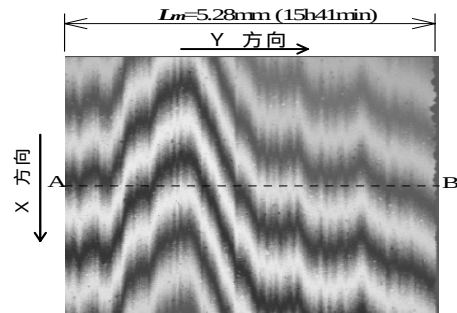
当研究所の超精密加工機(豊田工機株式会社製AHN60-3D)は、X軸・Y軸・Z軸の直線軸とB軸の回転軸を持つ自由曲面加工機で、このうちX軸とZ軸(切込み軸)にレーザ測長を採用しています。

図3に同加工機で回転工具を用いてラスタ一切削¹⁾した際の(a)環境の気圧変化、(b)加工面の干渉縞写真、(c)干渉縞写真のラインAB上の断面曲線を示します²⁾。この加工は、温度と湿度をそれぞれ 20 ± 0.04 と $50 \pm 1\%$ に管理した環境で、加工時間約16時間で無酸素銅を削ることで行いました。

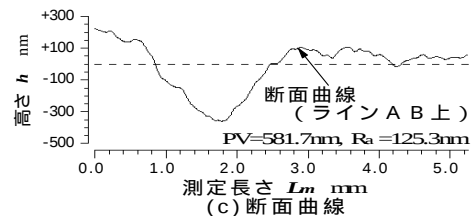
図3(b)、(c)の干渉縞の形や断面曲線の変



(a) 気圧の変化



(b) 加工面の干渉縞



(c) 断面曲線

図3 気圧変化と形状誤差との関係

化の様子(気圧変化の上下を反転させたような形状)は、図3(a)の気圧変化に対し時間的な遅れも無く忠実に連動しています。これは、恒温・恒湿の環境下で空気屈折率が気圧変化にのみ依存して変化し、レーザ測長を採用している切込み軸(Z軸)が位置決め誤差(レーザ測長誤差)を発生し、その誤差が被削材に転写された結果として生じたものです。

まとめ

以上のように、環境補償を実施しないと大きなレーザ測長誤差や加工誤差が発生します。当研究所では、レーザ測長誤差を抑止することを目的に、温度・湿度に加え気圧を一定に制御できる(空気屈折率を一定に保つ)環境一定制御チャンバーの開発や空気屈折率の変化を補正可能な環境補正装置の開発を進めています。ご興味のある方は是非ご相談下さい。

参考文献

- 1) 本田索郎: 大阪府立産業技術総合研究所 Technical Sheet No. 03002
- 2) 山口勝己: 大阪府立産業技術総合研究所報告 第17号 17(2003)