二光束干渉顕微鏡を用いる超精密面の粗さ測定法

安達 正明*・八坂 勝彦**・川口 格***

Roughness Measurement of Super Smooth Surface
Using Interference Microscope

Masaaki ADACHI*, Katsuhiko YASAKA** and Itaru KAWAGUCHI***

1. はじめに

最近、急速に成長を遂げつつある超精密切削加工の分野において、光を用いる粗さ測定技術の研究開発の要求が高まっている。この理由は、加工面の評価や加工機の異常診断などを行うためには、柔らかい加工面を非接触に、そして高精度かつ高速に評価することが必要だからである。

この論文では、超精密加工面 ($0.002 \sim 0.01 \mu\text{m}$ RMS) の粗さ評価に応用可能な、干渉コントラスト法を基本原理とする、二光束干渉顕微鏡を用いる新しい粗さ測定法の提案を行っている。

干渉コントラスト法を原理とする粗さ測定法は、これまで主に干渉縞の visibility から粗さを評価する技術として提案されてきた。しかしながら、この方法は超精密面の定量的評価方法にはつぎに示す理由で応用できなかった。その理由は、

- 1) 低い干渉性をもつ光を用いると、干渉画像全体に余分な DC 成分が発生し、visibility を評価基準とする場合、これは評価の誤差原因となる。逆に、高い干渉性をもつ光はスペックルを発生させ、これも評価の誤差原因となる。そのため、DC 成分やスペックルの発生が相対的に大きな誤差となる超精密面の評価は困難となった。
- 2) visibility から評価する方法は、測定面と参照面とからの二つの光が作り出す干渉縞を用いている。今、測定面と参照面とからのそれぞれの光の

強度が異なる場合、この違いも画像全体に余分な DC 成分を生じさせる。ゆえに超精密面の測定は困難となった。

このため visibility を用いる方法は、これまで $0.1 \sim 0.6 \mu\text{m}$ RMS の粗さの評価に用いられた例しかわれわれは知らない¹⁻³⁾。

ここで提案している方法は超精密面の評価を行うために、visibility から粗さを評価する場合の干渉画像と同じものを用いる。しかし、visibility からではなく、干渉縞の sine wave 形変化からのずれを用いて粗さを評価している。干渉光源としては白色光を干渉フィルタリングしたものをを用いており、この場合スペックルは発生しない。また、干渉性の低下による DC 成分は sine wave からのずれを計算対象とするため、粗さの測定結果には影響しない。同じく測定面と参照面とからの反射光量の違いも影響しない。

防振台上に設置した二光束干渉顕微鏡の画像をカメラでコンピュータに取り込んで測定することにより、 $0.002 \sim 0.01 \mu\text{m}$ RMS の粗さ試料を繰返し精度 $\pm 0.001 \mu\text{m}$ 以上で測定することが可能であることがわかった。

2. 理 論

二光束干渉顕微鏡を用いると、測定面と参照面のそれぞれの実像が作る干渉画像を観察できる。今、

Fig. 1 Enlarged images of a rough surface and a reference mirror (adjusted to cross at a small angle $t_0/2$): $h(x)$ is the surface profile, $A(x)$ is the complex amplitude of reflected light

* 兵庫県立工業試験場 神戸市須磨区行平町 3-1-12

** (株)コーガク 大阪市北区梅田 1-12-17

*** 大阪府立大学工学部 堺市百舌鳥梅町 4-804

* Industrial Research Institute of Hyogo Prefecture, Kobe

** Kogaku Corporation, Osaka

*** Faculty of Engineering, University of Osaka Prefecture, Sakai

(Received April 7, 1986)

(Revised June 28, 1986)

Key Words: roughness measurement, interference, visibility

Fig. 1 に示すように、参照面を測定面の平均面に対して $t_0/2$ 傾けた状態、すなわち、傾斜による縞を作っている状態を考える。

測定面からの反射光 $A_1(x)$ は、測定面の height function を $h(x)$ 、光の振幅、波数および角振動数を a_1, k, ω とすると次式で表わされる。

$$A_1(x) = a_1 \exp j\{-2kh(x) - \omega t\} \quad (1)$$

また、参照面の反射光 $A_2(x)$ は、光の振幅を a_2 として

$$A_2(x) = a_2 \exp j\{kt_0x - \omega t\} \quad (2)$$

となる。ゆえに干渉光強度 $I(x)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} I(x) &= |A_1(x) + A_2(x)|^2 \\ &= |A_1(x)|^2 + |A_2(x)|^2 \\ &\quad + 2a_1a_2 \cos\{kt_0x + 2kh(x)\} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで $h(x)=0$ の時の干渉光強度 $I_0(x)$ 、すなわち粗さのないときの sine wave 形変化は次式となる。

$$I_0(x) = |A_1(x)|^2 + |A_2(x)|^2 + 2a_1a_2 \cos(kt_0x) \quad (4)$$

ゆえに、 $I(x)$ の sine wave 形変化からのずれの 2 乗 $D(x)^2$ は、

$$\begin{aligned} D(x)^2 &= \{I_1(x) - I_0(x)\}^2 \\ &= \{2a_1a_2[\cos\{kt_0x + 2kh(x)\} \\ &\quad - \cos(kt_0x)]\}^2 \\ &= 4a_1^2a_2^2 \sin^2\{kh(x)\} \sin^2\{kt_0x + kh(x)\} \end{aligned} \quad (5)$$

となる。ゆえに $D(x)^2$ の全測定領域 $(-L \sim L)$ の平均 $\bar{D}^2$ は次式となる。

$$\begin{aligned} \bar{D}^2 &= \frac{8a_1^2a_2^2}{L} \int_{-L}^L \sin^2\{kh(x)\} \sin^2\{kt_0x \\ &\quad + kh(x)\} dx \end{aligned} \quad (6)$$

今、ここで測定の対象としているのは超精密な加工面である。そこで簡単化のために粗さが小さいとして、 $kh(x) \ll 1$ 、ゆえに、 $\sin^2\{kh(x)\} \doteq \{kh(x)\}^2$ および $\sin^2\{kt_0x + kh(x)\} \doteq \sin^2(kt_0x)$ として近似すると $\bar{D}^2$ は次式となる。

$$\bar{D}^2 = \frac{8a_1^2a_2^2}{L} \int_{-L}^L \{kh(x)\}^2 \sin^2(kt_0x) dx \quad (7)$$

ここで $h(x)$ は $\sin^2(kt_0x)$ に比べ短周期で変化する関数であり、その振幅の期待値は x に独立と考えられるから、積分の前に出せる。また L については、 $\sin(kt_0x)$ の周期の整数倍を採ることにすると (7) 式は次式に簡単化される。

$$\bar{D}^2 = 8a_1^2a_2^2k^2 \overline{h(x)^2} \quad (8)$$

このようにして $\bar{D}^2$ と $\overline{h(x)^2}$ の関係が得られた。ただし、(8)式を用いて、 $\bar{D}^2$ から $\overline{h(x)^2}$ を求めるために

は、反射光の振幅に関する因子 $a_1^2a_2^2$ が求められなければならない。この $a_1^2a_2^2$ は (3) 式から光強度の最大値 $I_{\max}$ 、最小値 $I_{\min}$ を用いて次式のように求まる。

$$a_1^2a_2^2 = \left(\frac{I_{\max} - I_{\min}}{4} \right)^2 \quad (9)$$

(9) 式を (8) 式に代入して $\overline{h(x)^2}$ を求めると次式が得られる。

$$\overline{h(x)^2} = \frac{2\bar{D}^2}{K^2(I_{\max} - I_{\min})^2} \quad (10)$$

以上のようにして、干渉画像より超精密面の粗さを求めることができる。

3. 実験 験

3.1 実験装置

実験に用いた干渉顕微鏡は、ニコン製金属顕微鏡に MIROU 形対物レンズを取り付けたものである。この顕微鏡の画像は外部振動により大きく揺らぐ。そこで防振のため、固有振動数 1.2 Hz の空気ばね式除振台上に顕微鏡を載せてある。

干渉画像のコンピュータへの取り込みは、浜松ホトニクス社製計測用 TV カメラ C-1000 を用いている。カメラコントローラにはコントラストの増強回路およびバックグランド信号の除去回路が装着されている。20 倍の対物レンズを用いたとき、このカメラを用いて観測面上で 500 μm の領域を 256 点に分けてサンプリングが可能となる。レンズは $NA=0.4$ であり光の波長 λ は 560 nm であるからレンズの分解能は 0.84 μm となる。ゆえに、このシステムの分解能はサンプリング間隔により決められ約 2 μm となる。サンプリングされた光強度信号は 8 bit A/D 変換を受け 256 階調で量子化される。

取り込んだ画像データに関する sine wave 形変化の除去は取り込みデータの低周波数成分 (sine wave 形変化を与える) を FFT (Fast Fourier Transform) を用いて分離除去することにより行っている。この処理および $\bar{D}^2$ の計算は 16 bit マイクロコンピュータを利用している。

3.2 測定結果

測定した試料はステンレス材を研磨したものを中心とする 9 点である。干渉計は画像内に傾斜による縞が 3 本現れるように調整し、結果として、二つの拡大像の交差角度は約 2×10^{-3} rad となっている。9 点の全試料に関し、本手法で測定したデータと、従来の触針粗さ計で測定したデータとを比較したものを Fig. 2 に示す。顕微鏡による測定値は干渉画像中の五つの場所についての測定値の平均である。一つの測定点にお

Fig. 2 Comparison of the rms roughness measurements by a interference microscope and by a stylus

ける繰返し精度は $\pm 0.001 \mu\text{m}$ 以上であり、五つの場所についての平均値の繰返し精度は $\pm 0.0005 \mu\text{m}$ 以上であった。また測定時間は 1 試料当たり約 5 秒であった。触針測定は Taylor Hobson 社タリサーフ 6 を用い、値は二つの場所の平均である。共に cut off 長は 0.08 mm としている。Fig. 2 の直線はデータの分布を見やすくするために記入してある。

ところで、粗さについての二つの測定結果を比較する場合、1) 二つの測定が完全に同じ場所での測定でないこと、2) 粗さそのものが場所によるばらつきの大きい物理量であること⁴⁾、などを考えあわせると、

本方法による測定値は、触針による測定値とよく対応すると思われる。

4. おわりに

二光束干渉顕微鏡を用いる新しい超精密面の粗さ測定法の提案を行っている。本方法はつぎの三つの特徴をもっている。

- 1) 光を用いた非接触測定である。そのため表面を傷つけず、柔らかい材質の表面でも測定が可能である
- 2) 超精密面の粗さ測定に有用である。共振周波数 1.2 Hz の防振台の上に顕微鏡を載せることにより、 $0.002 \sim 0.01 \mu\text{m}$ RMS の粗さ測定が可能である
- 3) 画像データをコンピュータで処理しているため、操作が簡単で高速である

参 考 文 献

- 1) C.R. Munnerlyn and M. Latta: Rough Surface Interferometry Using a CO_2 Laser Source, Appl. Opt., 7-9, 1858/1859 (1968)
- 2) W.B. Ribbens: Interferometric Surface Roughness Measurements, Appl. Opt., 8-11, 2173/2176 (1969)
- 3) P.J. Chandley: Determination of the Standard Deviation of Height on a Rough Surface Using Interference Microscopy, Opt. Quant. Elect., 11, 407/412 (1979)
- 4) 塚田, 金田, 椎野: 表面粗さ検査値の信頼性, 設計製図, 18-104, 19/26. (1983)