

Waveness Profilometer of Large Optical Parts Insensitive to the Waveness and Roughness of Reference Mirror

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: Adachi, Masaaki メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/48186

This work is licensed under a Creative Commons
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0
International License.



KAKEN

1992

25

参照面のうねりの影響を受けない大型光学 部品の光干渉式高精度うねり形状測定法

(研究課題番号 0 2 6 5 0 0 2 8)

平成 4 年度科学研究費補助金 (一般研究 C) 研究成果報告書

平成 5 年 3 月

研究代表者 安達正明

金沢大学・工学部・講師

参照面のうねりの影響を受けない大型光学
部品の光干渉式高精度うねり形状測定法
(課題研究番号02650028)

平成4年度科学研究費補助金(一般研究C)研究成果報告書

5
平成4年3月

研究代表者 安達正明
(金沢大学工学部)



8000-24316-4

金沢大学附属図書館

はしがき

大型光学部品の形状測定は、入手し得る最も平面に近い面（参照面）との相対的な間隔を光干渉法等により測定し、参照面が完全な平面であると仮定して、測定対象の形状が測定される。そのため、より平面に近い高精度な大型光学部品等を測定しようとする、参照している平面に近い面が持つ粗さやうねり形状、さらには測定室内の微少な振動や空気の擾乱が、測定結果に及ぼす影響が相対的に大きくなってくる。本研究では、参照面がうねりや粗さを持つことを前提にしながら、また測定環境には不規則振動があり、干渉装置が上下に振動することを前提にしながら、その参照面を用いた光干渉法により、超精密加工面の形状測定を高精度に行なう方法について研究した。当初は上下振動の影響を受けない粗さ形状測定法についての開発（光スキッド法と命名した）を行い、次にこの方法による粗さ形状結果を、デジタル信号処理法で加工することによって、断面形状に回復するための研究を行なった。また、被測定面に反射率の変動がある場合に大きく現われる測定誤差を補正するための方法も研究開発した。当方法を用いて大型光学部品のうねり形状を実際に行なう場合は、低速度、低振動で移動できるテーブル等の開発も必要となった。これらの機器の開発研究も行なっている。本研究は平成2、3、4年度に科学研究費補助金（一般研究C）の援助を受けた。

研究組織

研究代表者：安達正明（金沢大学工学部講師）
研究分担者：竹内望（金沢大学工学部教授）

研究経費

平成2年度	700千円
平成3年度	500千円
平成4年度	300千円
計	1,500千円

研究発表

(1) 学会誌等

- 1) 安達正明, 三木秀司, 中井康秀, 川口格, 上下振動の影響を受けない高精度粗さ測定法(第1報) - オプティカル・スキッド法の提案 -, 精密工学会誌, 56巻, 1号, 140-145p, 平成2年1月.
- 2) 安達正明, 三木秀司, 中井康秀, 川口格, オプティカルスキッド法における反射率の変動が与える測定誤差の補正法, 精密工学会誌, 56巻, 4号, 157-160p, 平成2年4月.
- 3) 安達正明, 三木秀司, 中井康秀, 川口格, 上下振動の影響を受けない高精度粗さ測定法(第2報) - 完全な平面を必要としない断面形状の測定法 -, 精密工学会誌, 56巻, 6号, 130-135p, 平成2年6月.
- 4) 安達正明, 北川洋一, 松本哲也, 竹内望, 逐次3点法の連続形状計測への拡張, 計測自動制御学会論文集, 26巻, 9号, 7-12p, 平成2年9月.
- 5) M. ADACHI, F. MIYAKE, N. TAKEUCHI and N. SUZUKI, Supersmooth-Surface Profilometer using Optical Skid, Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol.26, No.3, 213-218p, 1992 Sept..

(2) 口頭発表

- 1) 安達正明, 光スキッドによる高精度粗さ測定法, 第37回応用物理学関係連合講演会春期大会, 平成2年3月.

(3) 出版物

なし

1 章

研究の背景

現在、超精密加工技術の工業製品への応用はますます広げつつあり、同時に0.1nm Rrms近くの面を加工する技術への展開も進んできている¹⁾。これらの状況から、生産現場においてもサブnmオーダの形状評価を簡単にそして高精度に行うことのできる技術が今後急速に求められるようになると予想される。

光を用いた形状測定法は非接触で高精度測定を可能にする点から、これまで種々の方法が開発されてきている²⁻⁵⁾。WYKO社が生産する縞走差法を用いる装置²⁾は測定領域を目で確認しながら形状を三次元表示できることから広く用いられているようである。しかし、サブnmオーダの形状評価にあたっては設置環境の微小な上下振動や参照ミラーの粗さが無視できない測定誤差を生じさせること、さらに横方向への測定長が9mm以下に制限されることなどの点に乗り越えるべき問題が残っている。ZYGOS社で製品化されているZeeman Laserを用いるヘテロダイン干渉計測法⁶⁾は上下振動の影響を受けない。しかし、横方向の測定範囲は1mm径以下の円周上と非常に狭い範囲に制限される。一方、(株)小坂研究所や(株)東京精密が販売している装置^{7, 8)}は測定長に原理上の制限はないが上下振動の影響を受け易い。以上の点から、光を用いた評価法では、縦分解能0.1nmを持ち、高い横方向分解能と広い横方向測定範囲を持つ高精度な計測装置の開発が課題とされてきた⁹⁾。

ところで、超精密加工面においては、表面粗さ、傷等に加えて、うねり形状も加工面の品質に非常に大きくかわる。特にある種の光学素子では、最も厳しい仕様条件の一つにうねりが取り上げられることも多い。超精密加工の分野ではこのため長い測定域にわたってうねりを高精度に測定できる技術の要求も高い。このうねり測定を光で行おうとする場合は、通常、フィゾー干渉計やトワイマングリーン干渉計が用いられる。接触式では、タリサーフのような移動テーブルを用いる方法もある。これらは共に理想的な平面を必要とし、前者ではそれを参照面として用い、後者ではそれをスライド面として用いる。そして、この平面の理想的形状からのずれは、共に測定誤差として影響する。故に、田中はこのことが高精度測定の限界を決めるとも言っている¹⁰⁾。

もし、このうねり測定を理想的な平面を用いに行えれば、例えば、試料を載せたテーブルの直進移動に伴う上下変動(直進性)に影響されないでうねり測定を正確に行うことができれば、この手法の工業的価値は非常に高いものになる。

故に本研究では、参照面のうねりの影響を受けないで大型光学部品のうねり形状

を高精度に測定するための光干渉式測定法の開発を主テーマとして取り上げている。

以下の第2章では我々が研究開発し、継続して研究を行なっている光スキッド法について取り上げる。光スキッド法は、光干渉法と差動法を組み合わせ、観察面の上下振動の影響ならびに参照ミラーの粗さの影響を除去できるようにした方法であり、0.1nmオーダの縦分解能と1 μ mの横分解能そして広い横方向測定範囲を可能とする方法である。

第3章では、2章で述べた粗さ形状の測定法をうねり曲線の測定が可能な方法へと発展させる方法についての研究内容を、原理ならびにコンピュータシミュレーションの結果を中心にして述べる。この方法は、上下振動の影響を受けず、さらに用いる移動テーブルの直進性に影響されないで、うねり曲線の測定を正確に行うことを可能とする方法である。

第4章では、3章で述べた方法を実際に応用するに当たって生じる問題点を、試作機の製作等を通して探った結果について述べる。

第5章では本測定法が持つ測定誤差について述べる。特に、被測定面が場所によって反射率の違いを持つような場合は、2章で述べた光学系では測定誤差が非常に大きくなる。その誤差の補正法とその補正法を実現するための機器構成について述べる。

第6章は結言である。

2章. 上下振動の影響を受けない粗さ形状の測定原理 (光スキッド法による粗さ形状の測定法)

2.1 粗さ形状の測定原理

図2-1に示すようにある観察面を考え、この観察面を一定速度で右方向に移動させながら、静止した特定の高さの基準面から観察面上の一点までの距離 h_D を連続的に測定すると、断面曲線が得られる。しかし、外部振動によりこの観察面が上下に振動していると、得られる測定信号は断面曲線に振動が重畳したものとなる。そして、この信号から振動振幅以下の粗さを正確に求めることは難しい。このことが従来の光干渉を応用した形状測定装置の欠点であり、最大の問題点であった。

いま、距離 h_D を測定する基準面中の位置Dの近傍に、ある大きさを持つA、B、Cの領域を考え、この領域から見た観察面までの平均距離を h_A 、 h_B 、 h_C とする。すると $(h_A+h_B+h_C)/3$ は測定点の近傍の平均高さを意味する式となり、この式も振動を含む。そこで h_D と $(h_A+h_B+h_C)/3$ の差、すなわち $h_D - (h_A+h_B+h_C)/3$ で与えられる X_D を考え(差動法)、観察面を一定速度で移動させながら X_D を測定すると、振動の影響を受けないで周辺部の高さをゼロとする粗さ曲線が得られる。この測定法はスキッドを用いた触針測定に類似し、結果として観察面の上下振動の影響が除去できるようになった。ここでは各領域における距離の測定を光学式に行なおうとするものであるから、我々はこの方法を光スキッド法と名付けた。

2.2 実験

前節で述べた手法による測定法の精度、問題点を探るために試作機を製作し、実験を行なった。

2.2.1 測定装置

h_A 、 h_B 、 h_C 、 h_D の高さを光を用いて非接触に測定するために、ミロー型の干渉顕微鏡を用いた。そして、測定したい領域の干渉光強度を四つの光センサで測定し、その値から観測面の高さを求める手法を取った。ただし、干渉を利用して微小高さを高精度に測定しようとする場合、光路差の変化に対して光干渉強度が大きく変化するように、光路差を波長の半整数倍近傍に調整すると良い。そこで、対物レンズをピエゾ素子を用いて支持し、ピエゾ素子を通して干渉画像の光路差を波長の半整数倍にコンピュータで連続制御することにした。実際には観察面は三次元であるため、観察面に対する参照面の傾きも二つの成分を持ち、そのため光路差の制御には3個のピエゾ素子が要る。

実験装置の概要を図2-2に示す。図2-2において①は100 Wの超高圧水銀ランプであり、この光は透過波長 $\lambda=546\text{ nm}$ の干渉フィルターを介して準単色光に

される。②は20倍で $NA=0.4$ (分解能 $=0.6 \times \lambda / 0.4 \doteq 0.8 \mu\text{m}$) のミロー型対物レンズである。このレンズは内部に参照ミラーを持ち、参照波面は対物レンズ前方のハーフミラーとレンズの直前に設けられた小さな参照ミラーによって作られ、観察面で反射された光の波面と干渉する。③のa, b, cはピエゾ素子であり、500Vの印加電圧で約25 μm の伸びを持つ。このピエゾ素子が対物レンズの姿勢、結果として参照面の姿勢を制御する。④は試料を水平方向へ動かすためのリニア・アクチュエータであり、26 $\mu\text{m}/\text{s}$ での一定速度移動が行い得る。⑤は④を組み込んだ試料テーブルである。⑥は光センサヘッドである。干渉像は⑦の面上で結像する。結像した光の内、中心部の50 μm 径(観察面上では2.5 μm 径に相当する)のピンホールを抜けた光のみがホトマルDにより電気信号に変換され、 h_D に関係する信号となる。また、3.5mm \times 3.0mmの開口を持つシリコンフォトディテクタA, B, Cは8.0mm間隔で並べられており、これで光電変換された信号は、 h_A , h_B , h_C に関係する信号となる。なお、この対物レンズによる視野は約800 μm である。

2. 2. 2 測定手順と干渉計の制御方法

粗さ形状の測定に先立ち、コンピュータを用いての光路差制御に必要な、干渉光強度等の装置のパラメータを最初に計測する必要がある。手順として、まず干渉像内の干渉縞が $1/2$ 波長以内におさまるように、試料表面をミロー型対物レンズの参照面にほぼ平行に調整する。次に、コンピュータからピエゾ素子を駆動し対物レンズを垂直方向に一波長分だけ動かす。この時、光センサヘッドの各光センサは図2-3に示されるような干渉光強度の正弦波形型変化を測定できる。図中の Y_{\max} と Y_{\min} は最大光強度と最小光強度、またPとP'は変曲点である。この測定で得られる各々の光センサにおける Y_{\max} と Y_{\min} ならびにその時のピエゾ出力値が、干渉計の制御に必要なパラメータである。

実際の粗さ測定においては、これらのパラメータを用いたピエゾ素子による制御動作(後で述べる)により、干渉像の平均光路差は図3のP点近傍に制御される。試料面の凹凸を最大の感度をもって干渉光強度に変換できるこの状態において、光センサヘッドは測定点Dとその周辺部A, B, Cの平均光強度を電気信号に変換する。この電気信号 I_i ($i=a, b, c, d$)は増幅された後、4チャンネル12ビットA/D変換器によって順次デジタル化されコンピュータに入力される。コンピュータは各センサの Y_{\max} と Y_{\min} を用いて、各センサの位置における光路差のP点からのずれ O_i ($i=a, b, c, d$)を次式で計算する。

$$O_i = \frac{\lambda}{2\pi} \sin^{-1} \left(I_i - \frac{Y_{\max} + Y_{\min}}{2} \right) \left\{ \frac{\lambda}{(Y_{\max} - Y_{\min})} \right\} \quad (2-1)$$

この式を用いて得られる各センサ信号におけるずれ $0a, 0b, 0c, 0d$ は h_a, h_b, h_c, h_d の2倍となり、この値を用いて次式の X_D を計算する。

$$X_D = \frac{1}{2}\{0d - \frac{1}{3}(0a+0b+0c)\} \quad (2-2)$$

この X_D は周辺部の高さをゼロとする時の測定点の高さである。それ故、 X_D は床振動ならびに空気の揺らぎ等の影響を殆ど受けない。また測定範囲は、ゼロレベルを基準として $1/8$ 波長、すなわち約 68nm を持つ。以上の処理と計算を行いながら、試料台を横方向に一定速度で動かすことにより、試料の粗さ曲線が測定できる。

次に光路差を P 点近傍に保ち続けるためのピエゾ素子を用いた干渉計の制御方法を述べる。一般に参照面は試料面に対し傾斜しており、また P 点からのずれも持っている。制御によりこれらを補正しなければならない。ピエゾ素子を取るべきこの補正高さ L_i ($i=a, b, c$) は、ピエゾ素子と相似の位置に配置された各光センサの P 点からのずれ $0a, 0b, 0c$ を用いて以下のように計算できる。

$$\begin{aligned} L_a &= \frac{1}{2}\{K_a(0b+0c-2\cdot 0a)-\frac{1}{3}(0a+0b+0c)\} \\ L_b &= \frac{1}{2}\{K_a(0c+0a-2\cdot 0b)-\frac{1}{3}(0a+0b+0c)\} \\ L_c &= \frac{1}{2}\{K_a(0a+0b-2\cdot 0c)-\frac{1}{3}(0a+0b+0c)\} \end{aligned} \quad (2-3)$$

ここで各式の最初のかっこで囲んだ項は傾斜を補正するものであり、後のかっこで囲んだ項は平均高さを補正するものである。そして K_a は、光軸からシリコンフォトディテクタが測定する場所までの距離と、同じく光軸からピエゾ素子の位置までの距離の比により決まる定数である。式(2-3)により計算された値はすでにピエゾ素子に出力されている値に加算され、そして新しいピエゾ素子への制御値として 3 チャンネル 12ビット D/A 変換器を通して出力される。この一連の制御は 16ms ごとに繰り返され、その結果、参照面は試料面とほぼ平行に、そして光路差は P 点近傍に制御され続ける。

2. 2. 3 振動影響の除去性能の評価

干渉像中の中心部と周辺部の光路差の差を取ることで、ならびにピエゾ素子による制御、の二つの処理が持つ外部振動の影響の除去効果を調べた。図2-4(a)は本装置を載せた空気バネ式の除振台を $2\sim 4\text{gal}$ ($1\text{gal} = 1\text{cm/sec}^2$) で振動するように手で叩いた時の振動影響の除去効果を調べたものであり、試料台を横方向に移動させない状態での X_D そして $(0a+0b+0c)/3$ と $0d$ の信号を示す。 $(0a+0b+0c)/3$

と Δd は piezo素子を用いて試料台を制御していても 40 nm以上揺らいでいる。しかし、 X_D は差の演算の結果 peak to peakで 2.0 nm前後しか揺らいでいない。これが完全にゼロでないのは光センサからの電気信号のサンプルホールドが同時でないこと、ならびに測定点に上下振動と同時に発生している横方向の振動があるためと考えられる。図2-4(b)は0.4 galでの定常振動状態下での装置雑音のレベルを示しており、rms値で0.05 nmとなっている。なお、通常の機械加工現場での振動加速度強度は 1 gal前後であり、防振台を設備するとその上では 0.5 gal前後になるようである。

2.2.4 測定結果

次に超精密面の測定を行った。測定では試料台を 26 $\mu\text{m}/\text{s}$ で横方向に移動させている。この時の piezo素子による干渉計の制御は 16 ms間隔であり、試料面上での制御間隔は 0.4 μm となっている。干渉光強度の取り込みならびに式(2-2)の計算は各制御の間に30回行い、それらの値を平均して試料面の形状を求めた。図2-5にシリコンウエファーを繰り返し測定した結果を示す。本装置が peak to peakで 0.2~0.3 nmの非常に高い繰り返し測定精度を持つことを示す。以上の試料以外に、43.1 nmの段差を持つ標準段差試料やコンピュータ用のハードディスクサブストレート（基盤）、そして光学ミラーや表面が清浄なオプティカルフラットの測定を行った。結果を図2-6に示す。図2-6においてはミラーとオプティカルフラットの違いも明確に識別できる。なお、これらの試料の測定時間は一測定当たり約 16 sであった。

以上は横分解能 2.5 μm で測定した結果であるが、最近、さらに He-Neレーザを組み込むことにより開発できた横分解能 1 μm を持つ装置での、ミラー面の10 mmにわたる測定結果を図2-7に示す。

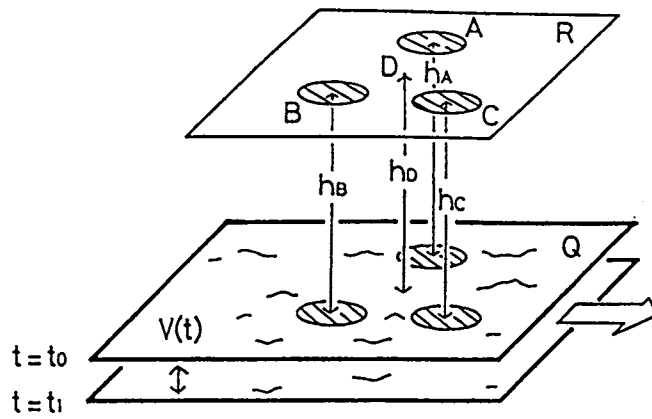
ところで、この測定方法は周辺部の高さをゼロとする時の測定点の高さを求めているため、得られる曲線は粗さ曲線となっている。このことは標準段差試料の測定結果からも容易に分かる。このカットオフ波長は約 930 μm であった。この計算法は第3章で述べられる。

2.2.5 測定誤差

測定精度に影響する可能性を持つ誤差要因について考える。まず、光源の光強度の時間変動があげられる。本装置ではこれは 10 %ぐらいであった。しかし、差動法を取っているため測定結果のゼロレベルは一定であり、平均化処理の効果と合わせるとこの変動は大きく見積っても得られた最大粗さの大きさの 10 %にしか影響しない。次に考えられるものに、測定の途中で粗さが大きくなった時に生じる、各シリコンフォトディテクタ A, B, Cの Y_{max} , Y_{min} の初期学習値からのずれがある。

しかし、P 点の光強度は粗さが大きくなっても変動しないため大きな影響はない。干渉像を用いた高精度測定でよく問題になるものに、参照ミラーの粗さの影響がある。通常、参照面以上の加工精度を持つ試料は測定が困難とされる。本手法では、測定は一点の高さの連続測定であり、全領域の測定を通じて、光学素子の同じ部分を使用される。このため、参照面の粗さの影響はほとんどない。しかし、観察面に反射率の変化がある場合、大きな測定誤差が現れる（この光学系を用いた測定法で生じるものであり、この誤差の補正法を第5章に述べる）。ただし、超精密面は純粹材料を用いて作られるようであり、反射率の変動は無いと思われる。

以上のように光干渉法と差動法を組み合わせた光スキッド法を用いると、非接触で超精密加工面の粗さを外部振動の影響を受けずに高精度に測定できるようになる。



$$X_o = h_o - (h_A + h_B + h_C) / 3$$

図2-1 光スキッド法を用いる粗さ形状の測定原理図。観察面が $V(t)$ で振動していても、 X_o には振動の影響は現れない

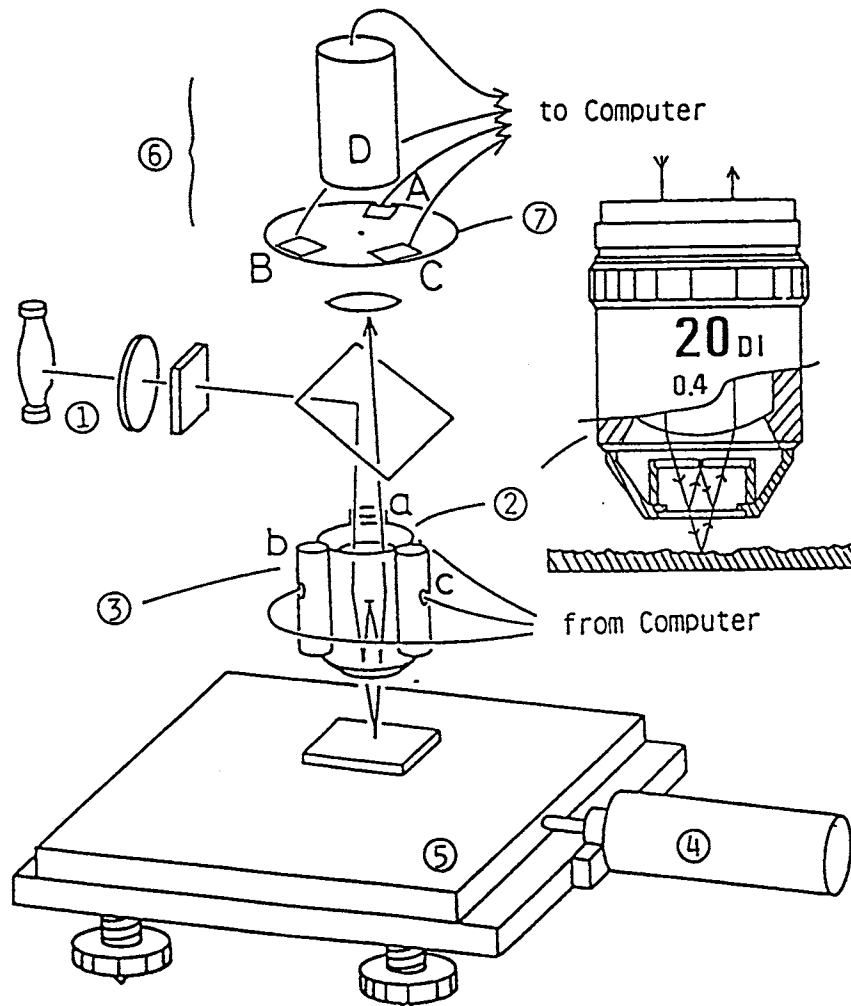


図2-2 測定装置の光学系。①は超高压水銀ランプ、②はミロー型の干涉対物レンズ、③は②の姿勢を制御するための piezo素子、④はDCサーボモーター、⑤は試料テーブル、⑥は光センサーヘッド、⑦は像面。コンピュータは⑥で読み取った干涉信号を基に、②の姿勢を制御し同時に凹凸を測定する

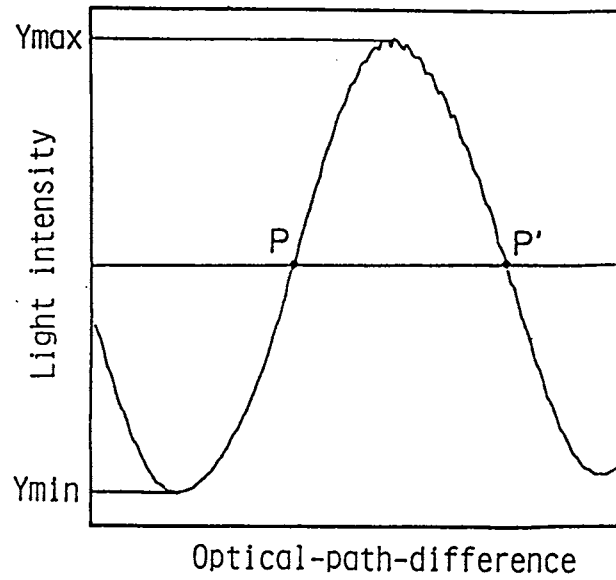


図2-3 干渉対物レンズを上下に動かした時の干渉光強度の変化. 光路差をP点やP'点に持ってきた時, 最も高感度は干渉光強度から光路差を測定できる

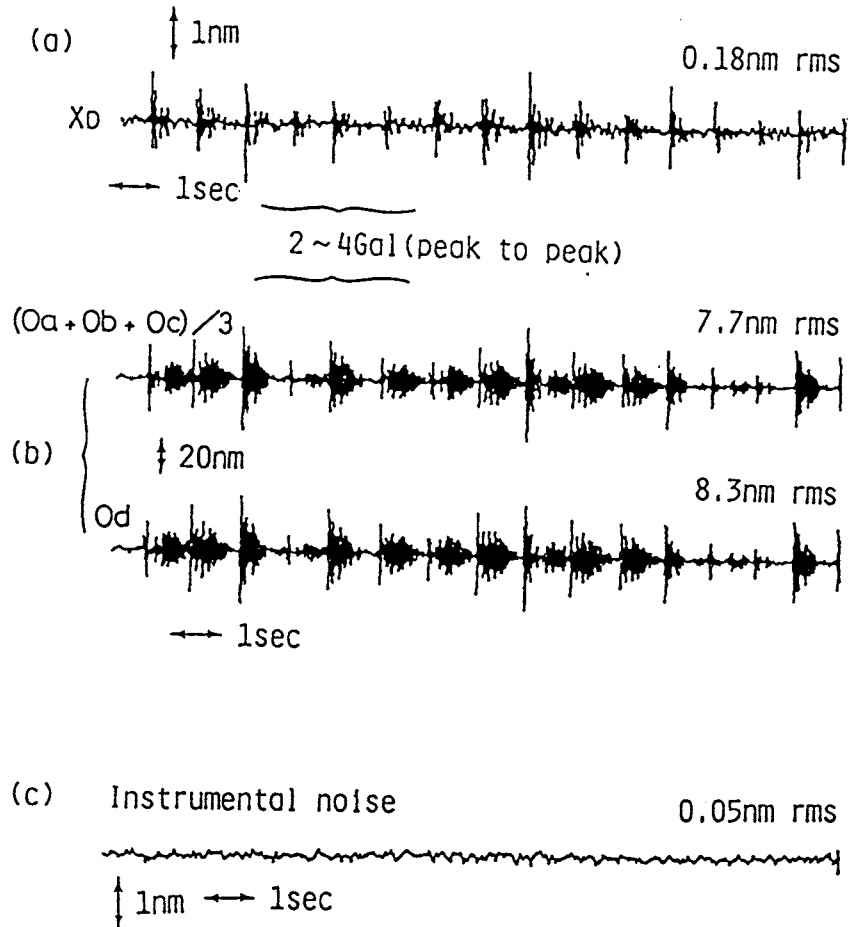


図2-4 振動下における信号. (a)は装置が載っている除振台を手で軽く叩いた時(2~4 gal)の信号. (b)は0.4 galの定状振動下での信号

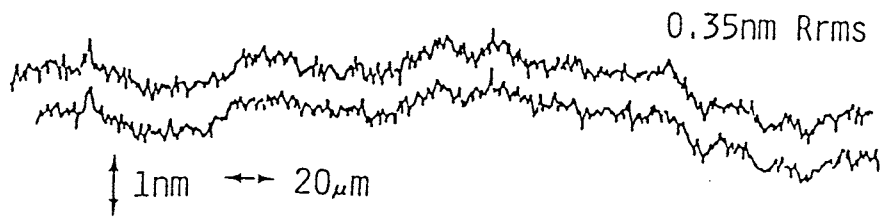


図2-5 シリコンウェファーの形状の繰り返し測定結果

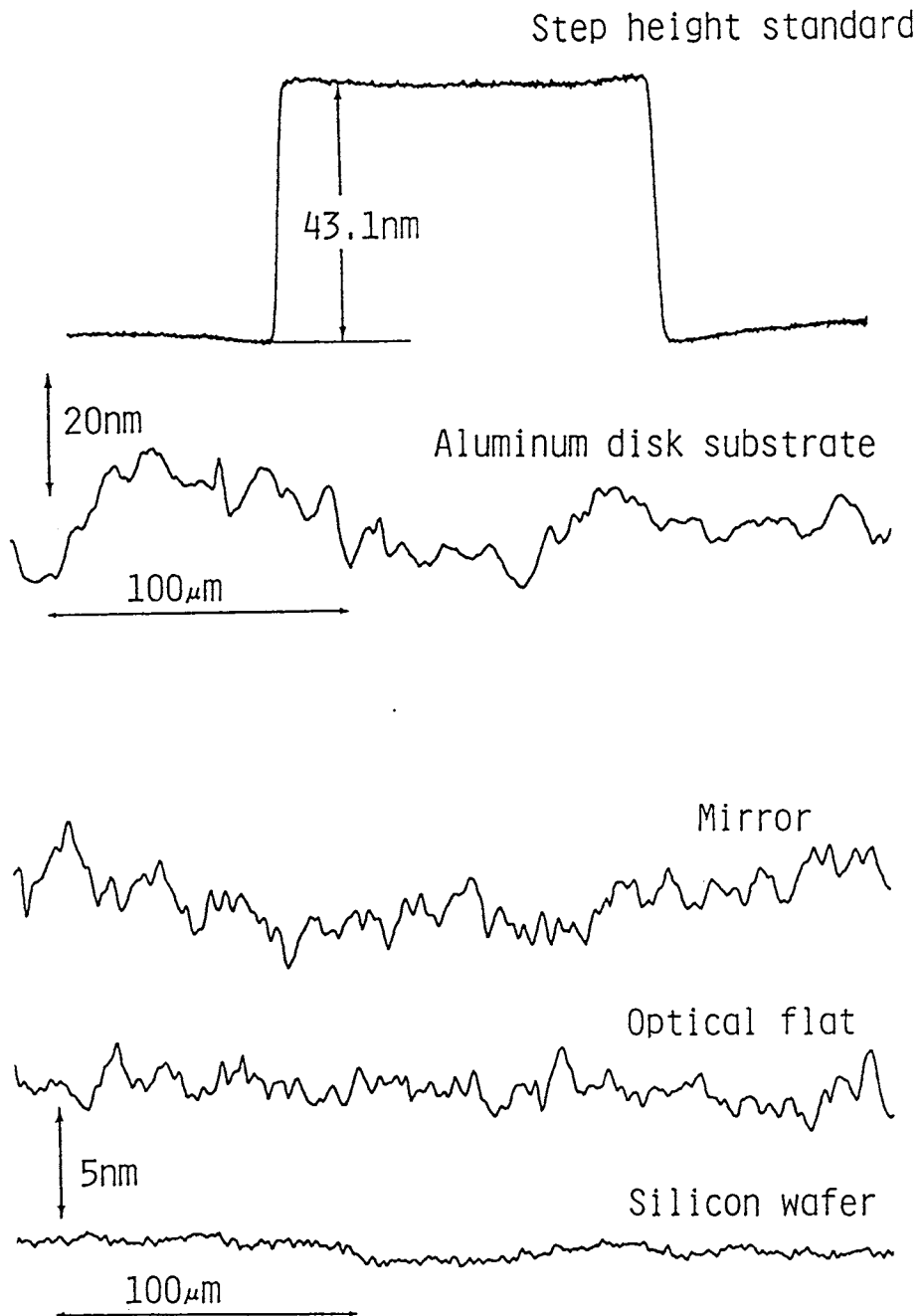


図2-6 各種の超精密面の測定結果

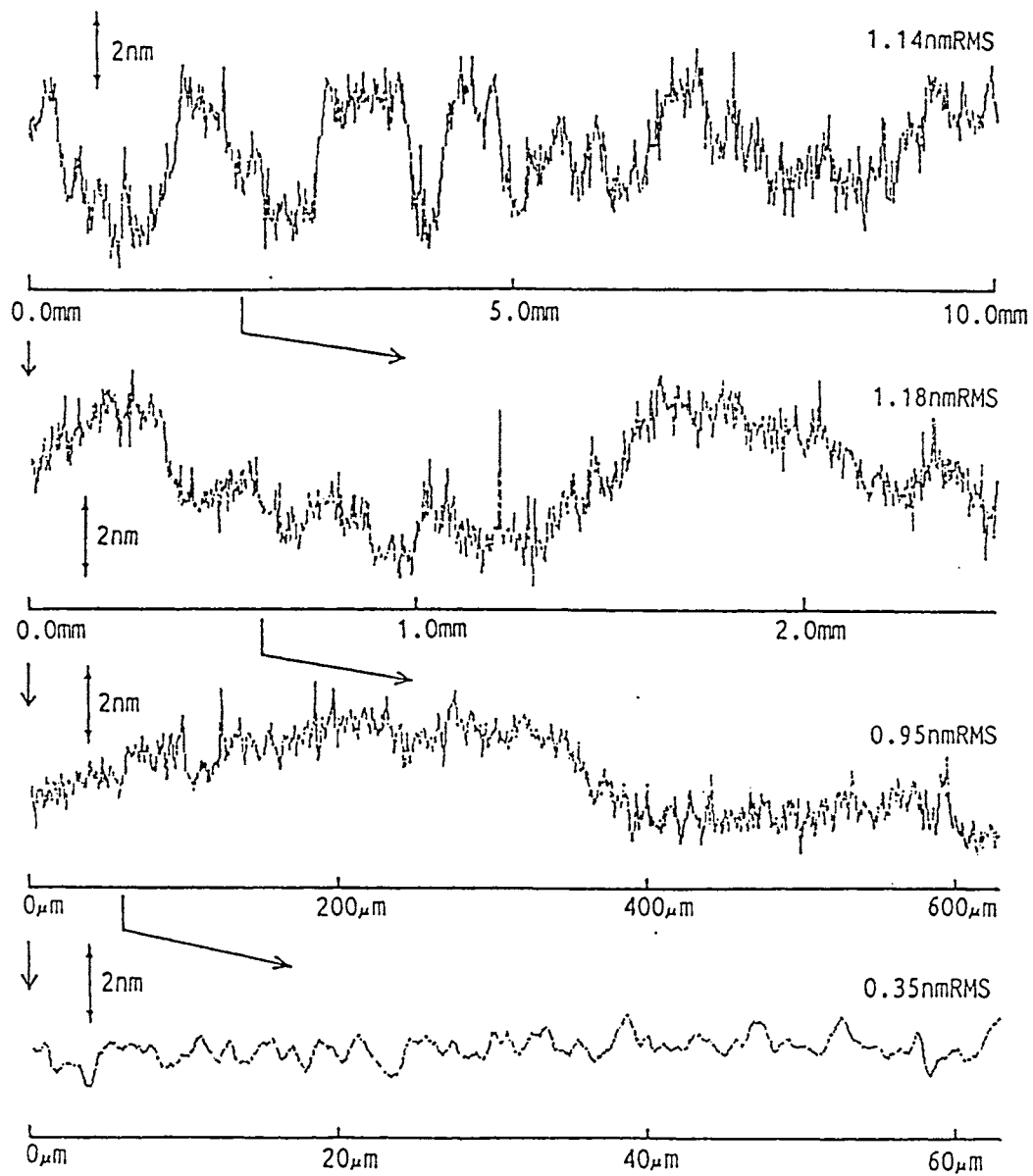


図2-7 光学ミラーの形状の10mmにわたる測定結果（横分解能1μm）

次に、前章で述べた粗さ形状測定法とデジタル信号処理技術を組み合わせることにより可能となった、理想平面を用いないうねり曲線の測定法について述べる。

3.1 断面曲線の測定原理

2章で述べた方法はその原理ゆえに、図3-1に示すように実際の凹凸 h_D に対し、測定される信号 X_D が低周波数成分のカットオフを受ける効果を与えた。しかし、このカットオフの特性を正確に求めることができれば、この効果をコンピュータを用いたデジタル信号処理により打ち消すことが可能となり、測定された曲線からうねり曲線を求めることができると考えられる。そこで、以下にこのカットオフ特性の理論的な計算を行う。

2章で用いた光センサヘッドは図2-1に示したように、周辺部の高さを計算するための h_A 、 h_B 、 h_C の測定領域が測定点を中心とする三回対称となる場所であった。ここで用いる光センサヘッドは測定方向 x に沿ったカットオフ特性の正確な理論計算が行い得るように図3-2に示す構造とした。なお、図において h_A は観察面と参照面の光路差の制御に用いるだけであり、周辺部の高さは h_B と h_C からのみ求めるものとする。

最初にこの光センサヘッドを用いて、振幅1を持ち単一波長からなる正弦波形状を観測した時の差動出力を計算した。図3-3において、観察面の正弦波形状の波長を λ_w 、またDの位置における正弦波の位相を ψ 、そしてシリコンフォトディテクタB、Cの検出幅を $2W$ 、またBとCの間隔を $2S$ とし、観察面はEの方向に移動するとした。そして、カットオフ特性（減衰率）の波長による効果を調べた。いま図においてセンサBが測定する平均高さ h_B は、 $\alpha = 2\pi W/\lambda_w$ ならびに $\beta = 2\pi S/\lambda_w$ を用いると次式のように計算できる。

$$\begin{aligned} h_B &= \frac{1}{2\alpha} \int_{-\alpha}^{\alpha} \sin(\psi - \beta + x) dx \\ &= \frac{1}{2\alpha} \left[-\cos x \right]_{\psi - \beta - \alpha}^{\psi - \beta + \alpha} \\ &= \frac{1}{2\alpha} \{ \cos(\psi - \beta - \alpha) - \cos(\psi - \beta + \alpha) \} \\ &= \frac{1}{\alpha} \sin \alpha \cdot \sin(\psi - \beta) \end{aligned} \quad (3-1)$$

故に、Bの中心部の一点において元の波形が持つ $\sin(\psi - \beta)$ の変化が $\sin \alpha / \alpha$ 倍されることになる。同じく図3-3のセンサCが測定する高さ信号は次式となる。

$$h_c = \frac{1}{\alpha} \sin \alpha \cdot \sin(\psi + \beta) \quad (3-2)$$

二つのセンサの中心における平均高さは $(h_B + h_C)/2$ である。故にこのレベルをゼロとする低周波数成分のカットオフ処理後の高さ X_D は次式となる。

$$\begin{aligned} X_D &= \sin \psi - \frac{1}{2}(h_B + h_C) \\ &= \sin \psi \left[1 - \frac{1}{\alpha} \sin \alpha \cdot \cos \beta \right] \\ &= \sin \psi \cdot T(\lambda_w) \end{aligned} \quad (3-3)$$

ただし、 $T(\lambda_w)$ は波長 λ_w に関するフィルタリング関数（カットオフ特性を表す関数となる）である。この関数に $2S=7.44\text{mm}$ 、 $2W=3.5\text{mm}$ とレンズの倍率20倍から、観測面上の寸法に換算した W と S の値 $W=88 \mu\text{m}$ 、 $S=186 \mu\text{m}$ を代入し図示すると図3-4となる。

ところで、図3-4は観察面を単一波長の正弦波と仮定して計算したフィルタリング関数である。一般に、任意の形状はフーリエ変換の理論が示すように正弦波型変化の有限個もしくは無限個の和で示される。任意の形状の場合においても、式(3-4)で用いた積分は四則演算の和との交換法則を満たすため、上記の議論は各フーリエ成分に関してもそのまま成立すると考えられる。このため $T(\lambda_w)$ はこの光センサヘッドのカットオフ特性を表す関数となる。

そこで、 $T(\lambda_w)$ をコンピュータ内で発生させ、この関数のマイナス1乗となる関数を計算し、これを用いるデジタル信号処理を、差動法によって得られた信号に施すと、低周波数成分が回復でき断面曲線が得られることになる。これをブロック図で示すと図3-5のようになる。すなわち、矩型の凹凸を有する $h_D(x)$ を光スキッド法を用いて測定すると、フィルタリング関数 $T(\lambda_w)$ のカットオフ特性により、 $X_D(x)$ となり、低周波数成分が減る。しかしコンピュータを用いて、 $T^{-1}(\lambda_w)$ のフィルタリングを行うと、低周波数成分を回復でき元の $h_D(x)$ を得る。この $h_D(x)$ を用いると正確なうねり曲線を測定できる（ $h_D(x)$ が得られるため断面曲線が求められるように感じられるが、 D は一点の高さの測定であり、 B 、 C は y 方向にも広がりを持った面の平均高さ（線のデータでなく）の測定であるため、正確な断面曲線は求まらない。ただし図3-2のように測定方向と垂直な方向に同じ形状を持つ試料の場合は断面曲線が求まる。もしくは B と C に y 方向に広がりを持たない光センサを用いれば、通常の面においても断面曲線が測定可能となる）。

さらに、この測定においては入力データは測定点の高さと周辺部の高さの差である。このため、移動テーブルの直進に伴う上下の変動は一切、関与しない。すなわち、移動テーブルの直進性に影響されないで超精密面のうねり測定が行い得る。

3. 2 実験

3. 2. 1 コンピュータシミュレーションによる測定原理の確認

装置を用いての実験に先立ち、距離信号の取り込みから形状の回復までの各処理段階での信号形状を調べるため、コンピュータシミュレーションを行った。測定面の形状を段差、長波長の正弦波、短波長の正弦波の3個の成分からなるとした。シミュレーション結果を図3-6に示す。(a)は想定した測定面の形状であり、(b)は測定ヘッドのセンサA、B、Cの大きさを示す。また(c)はこの測定ヘッドを走査する範囲を示し、(d)はこのヘッドが(a)を測定した時に得られる(c)の範囲での差動出力 X_D である。(e)は(a)の形状を(c)の幅だけ取り出し、この形状に $T(\lambda_w)$ のフィルタリングを行って得られた形状である。また(f)は測定の結果得られる X_D の出力である(d)の形状に $T(\lambda_w)^{-1}$ のフィルタリングを行って回復した形状である。さらに(g)は(a)と(f)の差である。測定面の形状を変えた場合を図3-7に示す。図3-6、図3-7共に(d)と(e)は測定領域の周辺部を除いて完全に重なっている。さらに(g)の信号も測定領域の周辺部を除き直線である。周辺部で形状が異なるのはデジタルフィルタリングで左端と右端が連続するとして扱うからであり、シミュレーションの結果からこの領域はセンサの配列間隔の大きさに限定されることが分かる。このため、この周辺部を取り除いて考えれば良い。以上の結果から本手法の妥当性が確認できる。

3. 2. 2 測定装置

実験で用いた装置は2.2.1で述べたものとほとんど同じであり、センサヘッド形状のみが異なっている。用いた装置の概要図を図3-8に示す。

3. 2. 3 測定結果

図2-6でも示した標準段差試料を測定した結果を図3-9に示す。(a)は光スキッド法の出力の $X_D(x)$ であり、(b)は低周波数成分を回復した $h_D(x)$ である(この試料は測定方向に垂直な方向には形状の変化がないため、断面曲線を求めた)。この結果からうねり測定が正しく行い得ることが分かる。また、オブティカルフラット面を測定して得られた低周波数成分カットオフ後の $X_D(x)$ 、ならびにコンピュータのデジタル信号処理を用いて低周波数成分を回復して得られたうねり曲線を図3-10に示す。3分後、再度 $X_D(x)$ を測定し、この $X_D(x)$ を用いて得られたうねり曲線を同じく図3-8に点線で示した。ほぼ同じ形状が得られており、この測定法が再現性の良いことを示している。同じくオブティカルフラットの異なる部分に関し同様の測定をしたものを図3-11に示す。

3.3 雑音について

後半で用いたデジタル信号処理は図3-4で示される $T(\lambda\omega)$ を1に戻す処理を行うため、低い周波数成分に関して大きな増幅を行う。この結果、低周波数成分のS/N（信号強度対雑音強度比）の良いことがこのうねり測定法の必要条件となる。通常の測定における信号の電気雑音に関しては、熱雑音ならびに散弾雑音そしてフリッカー雑音が良く知られている。しかし熱雑音や散弾雑音はフリッカー雑音に比べて相対的に高周波数成分が多く、ここで問題となる低周波数成分は少なく、フリッカー雑音のみが大きく影響する可能性を持つ。フリッカー雑音についても図3-10を見る限り測定結果の再現性は高く、あまり影響がないようである。その他に影響が考えられるものとしては、低周波数成分の雑音の一種と考えられる信号増幅回路のドリフトがある。この影響は図3-10の繰り返し測定には現れにくいものであるが、超低ドリフト仕様のオペアンプ等の使用により、この種の雑音は防げると考えられる。

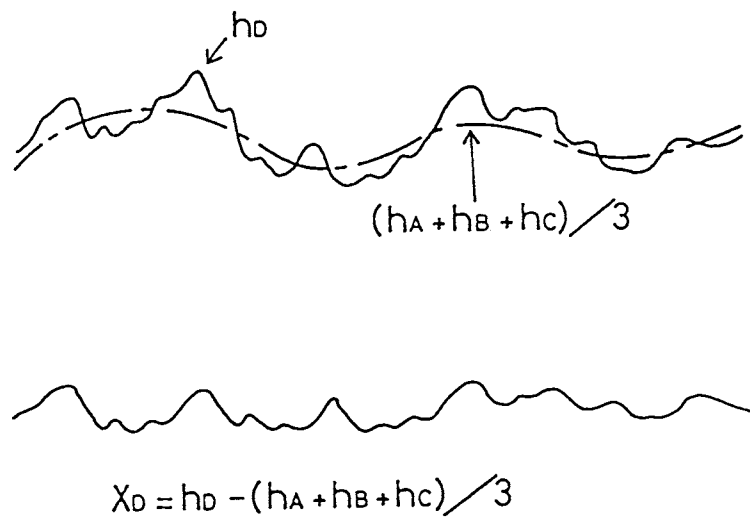


図3-1 光スキッド法が持つ空間振動数のカットオフ効果

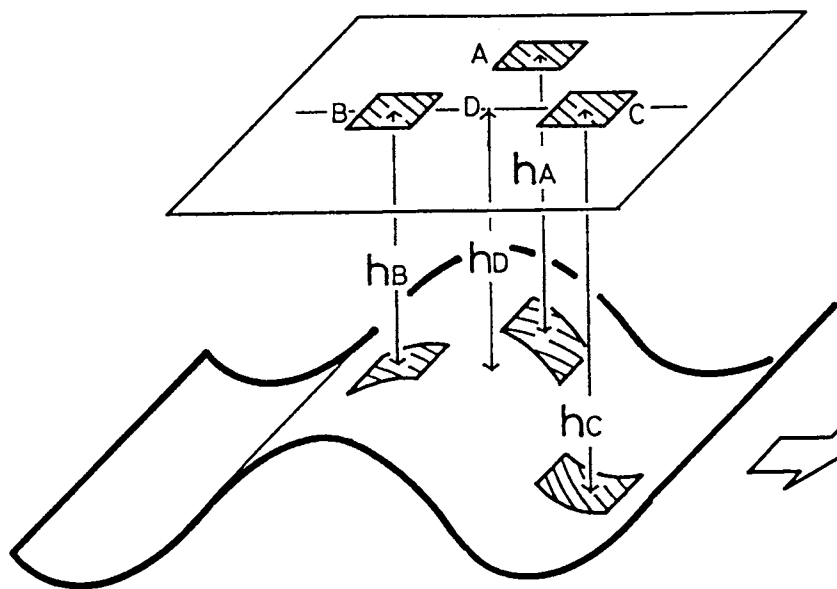


図3-2 新しい光センサヘッドにおける光センサの配置と正弦波形状を測定する時の各光センサの測定点の位置

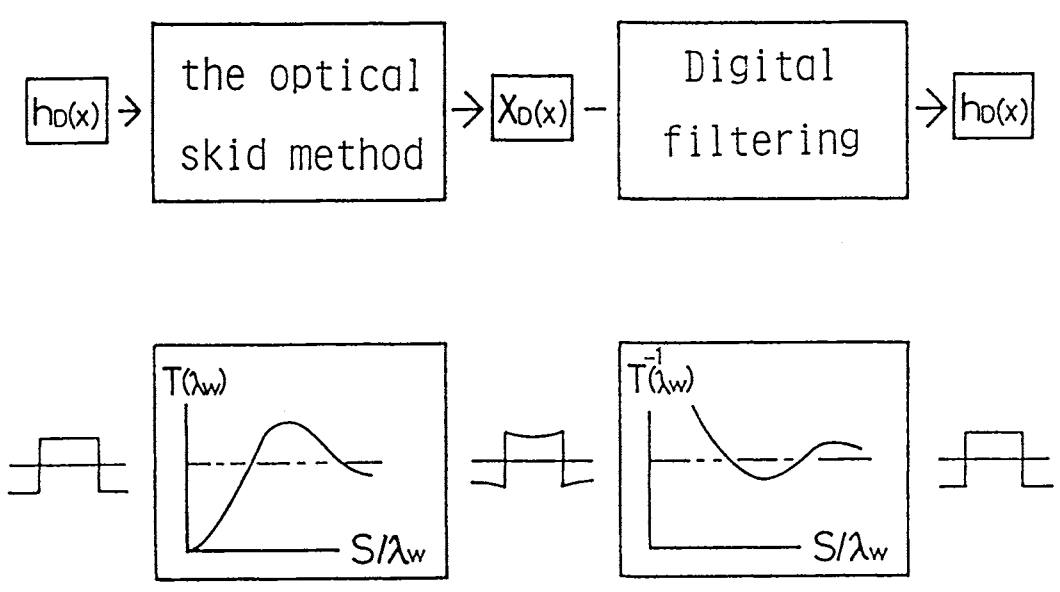


図3-5 光スキッド法による測定結果 X_D から h_D を求めるため処理のブロック図。下は矩形形状の測定信号が回復される様子を示している

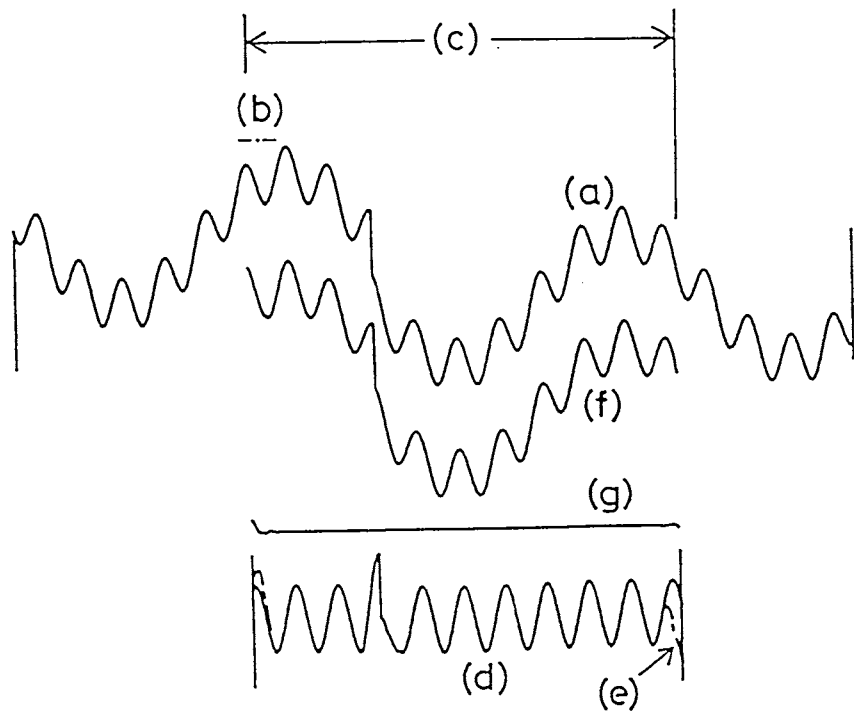


図3-6 断面形状測定のコピュータシュミレーション(その1)

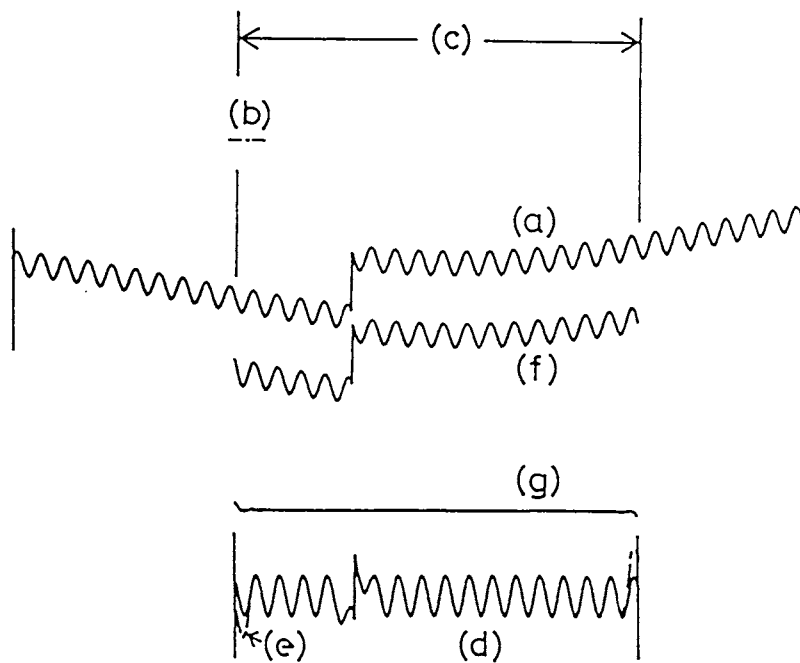


図3-7 断面形状測定のコピュータシュミレーション(その2)

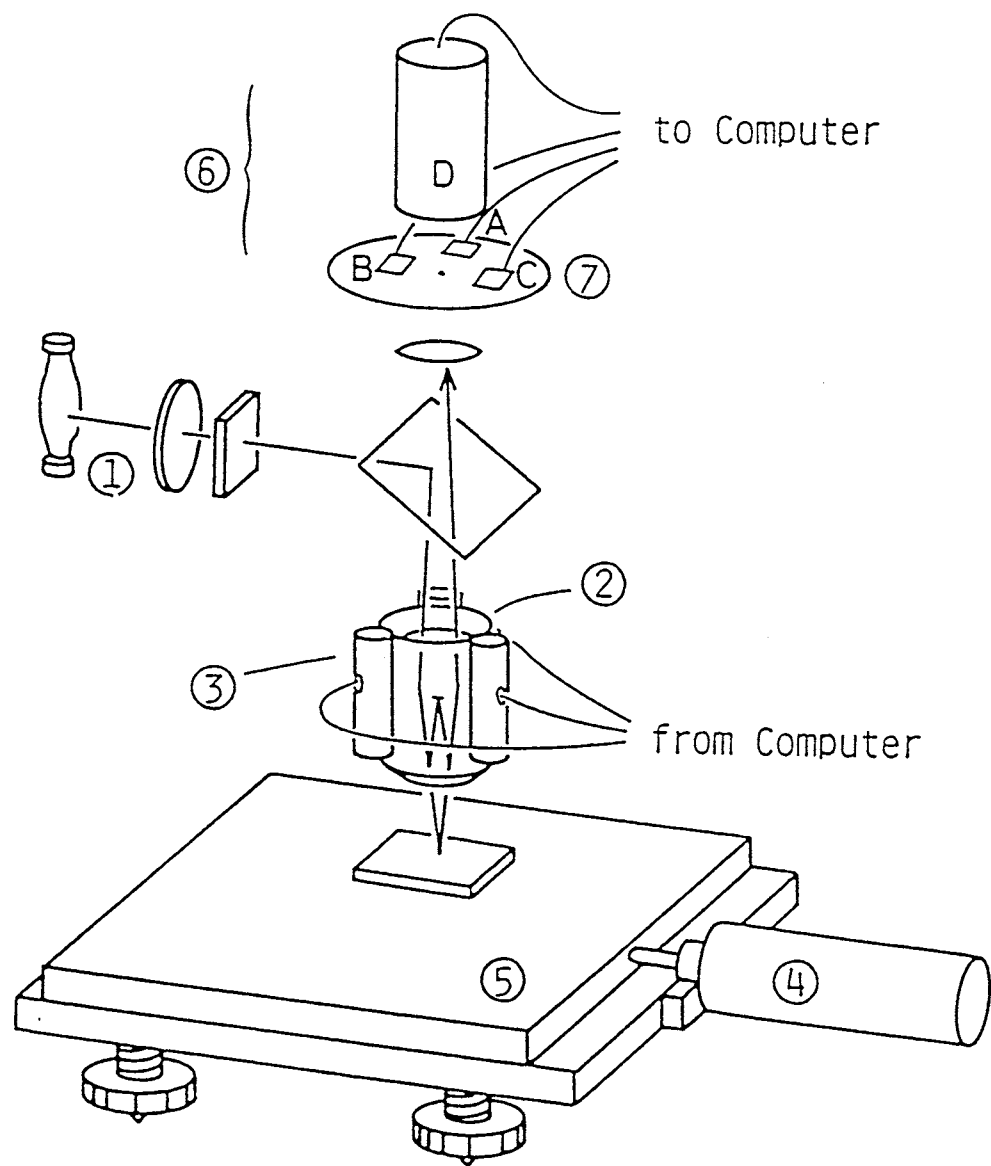


図3-8 うねり曲線を測定するための光学系。詳細は
図3-2の説明を参照のこと

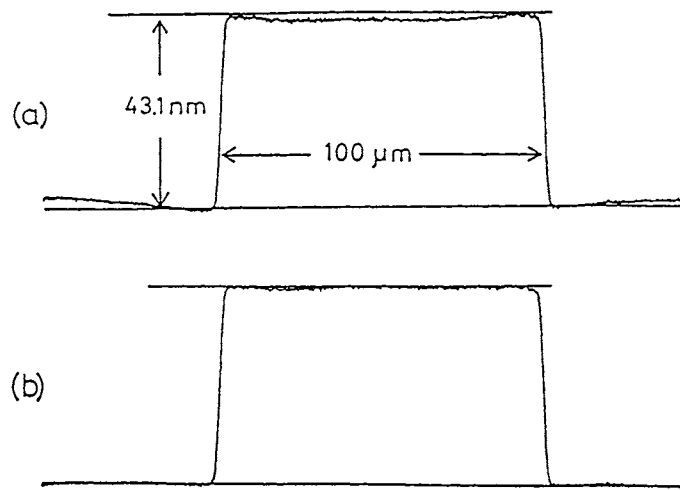


図3-9 標準段差試料の測定結果。(a)光スキッド法による出力結果、(b)デジタル信号処理を用いて低周波数成分を回復した形状

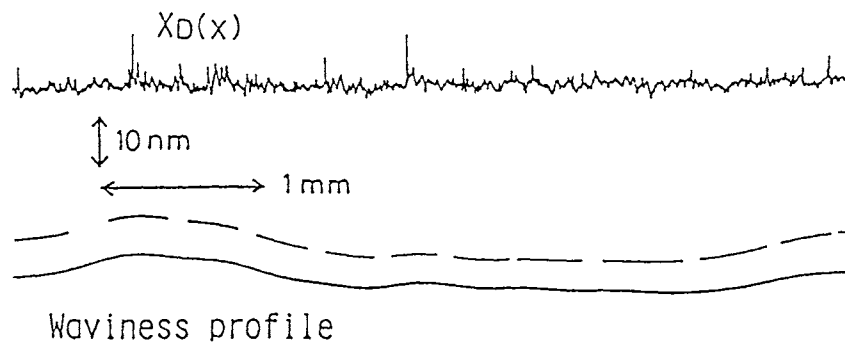


図3-10 オプティカルフラット面のうねり形状の測定結果。繰り返し測定した結果を点線で示す

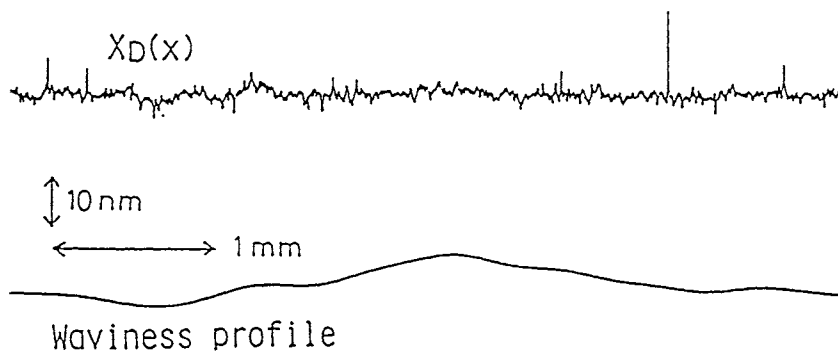


図3-11 オプティカルフラット面の違う場所でのうねり形状測定結果

前章ではうねり形状測定を簡単な実験機で行い基本特性を調べたが、大型光学部品のうねり形状を正確に測定するためには、長い距離を低速で移動させることのできる移動テーブル、光センサの高精度な位置決め、電気増幅系の高安定化等の問題を解決する必要がある。ここでは、それぞれの点の改善法についての研究内容を述べる。

4. 1 低速一定速度での移動テーブルの製作

本研究方法は測定原理の上からは、外部振動や空気の擾乱等による外乱の影響を受けないようになっている。しかし、測定精度を徐々に高くして行くと、外乱が種々の所で影響し始める。これは高精度計測を行なう上では常に直面する問題でもある。個々の問題点をつぶして行くしかない。具体例を次に述べる。商用周波数(60 Hz)の雑音信号が、研究室周辺の動力源からの外乱振動や誘導雑音として測定環境には通常存在する。我々の場合も感度の拡大と共に、これが開発中の計測装置内に入り込み、無視できない強度となってきた。そこで60 Hz以上の信号の除去回路をローパスアクティブフィルターを用いて作製した。その結果、60 Hz以上の信号は大きく減衰することになる。しかし、高い空間周波数成分を持つ形状も同時に測定しにくくなるため、試料テーブルに低速移動方式を組み込んで測定対象物の高周波数成分をなるべく測定できるようにする必要がある。この場合、テーブルの移動スピードを $v \mu\text{m}/\text{s}$ とすると空間周波数 ν が $\nu = 60/v$ (本/ μm)以上の成分の情報が大きく減衰する。本研究ではゆったりした大きな形状(低周波数形状成分が主となる)の高精度計測が目的であるから、空間周波数は一般に小さいものを中心に扱う。しかし、より低速の一定速度移動テーブルを用いることにより、この ν を非常に大きくでき、より断面形状に近いものを測定できると考えられる。

そこで、低速低振動で長距離移動ができる試料テーブルの開発を試みた。最初は、低いピッチのボールネジおよび大きな減速比を持つギヤを用いて低速テーブルを試作した。この場合、減速ギヤから発生する振動が光干渉計測での雑音レベルを相当上回るものとなり、一般的なDCモータではだめなことが分かった(光学部品を扱う国内の有名メーカ数社の移動テーブルもだめであった。これらはテーブルを移動させながらの干渉計測は考えていないようである)。また減速機から発生する振動の問題以外に、摺動面の摩擦等により、非常に低速では移動がギクシャクした動きとなることが分かった。この動きは一般的な潤滑剤を用いても解決できなく、その振幅は、モータとボールネジ間の接続強度とダンピング特性に強く関係しているようである。この問題は摺動面にエアベアリングを使うことにより大幅に改善できると考えられるが、非常に高価となる。このため、ここでは低速移動用で低振動タ

タイプのDCモータを手をつくして探し、入手して開発を行なった。

入手したモータは、回転角度の検出のためのロータリエンコーダと、回転速度の検出のためのタコジェネレータの二つを装着するものであり、減速機も低振動とするための遊星ローラが付いたものである。また、速度制御は専用の制御ボードで行え、計測機本体から移動距離を指令するデータと同時に、移動速度に関係する一定周波数のパルスを入力してやる方式である。このモータと制御ボードの使用により、低振動、低速、長距離移動が可能となった。最終的には低振動で移動距離120mm、秒速20 $\mu\text{m}/\text{s}$ の移動テーブルが製作できた。

4.2 光センサマスクの製作とその横方向分解能

本測定法では光センサの形状による周波数特性を、コンピュータのデジタル信号処理により補正し、断面形状を測定する手法を採る。故に、光センサの形状データは非常に高い精度のものが求められる。本研究では形状精度をかせぐため、放電加工によるセンサマスクの加工を行なった。マスクの形状サイズを図4-1に示す。このマスクの後方にSiフォトディテクタを配置し、光センサとした。マスクは一体の抜き型であるため、アパッチャー間の相対位置が高精度に決められる。

このマスクの横分解能に関する考察を行なった。測定対象表面は種々の波長のうねり成分を持っている。光センサのアパッチャーの横幅は、このうねり成分の読み取り特性に空間周波数(波長の逆数)を介して影響する。第3章では中心部の光センサの幅はゼロに近いとして、計算ならびにセンサヘッドの製作を行なった。しかし、ここでは相当に幅広のセンサマスクを用いている。幅広のセンサマスクはある意味でうねり特性の読み取りには大きく影響することはないと考えられる。しかし、通常の形状測定に関しては影響は大きい。そこでセンサマスクの形状による横方向分解能を検討しておく必要がある。

ここでは図4-2に示すようなセンサマスクを取り上げた。光干渉信号はアパッチャーの幅を通して平均されたものが光センサ信号となる。故に、図の下に示す振幅 f_0 を持つ二つの形状は光センサ信号の上では f_1 と f_2 となり、読み取り信号は空間周波数の高いものが大きく減衰することになる。この減衰特性は3章で述べた方法で評価することができる。その結果を実験による結果と比較したものを図4-3に示す。実験では特定空間周波数を持つ面として大型の形状部品がないため、分光器内で用いられる回折格子の面を取り上げた。実験結果と理論地的一致は良く、この結果を元に3章と同じようにして補正を行い得ることが分かった。

4.3 センサ信号増幅器のドリフトと改良

低速移動テーブルを用いて長い時間に渡って形状を測定する場合、センサ信号の増幅器のドリフトがうねり信号に大きく影響することは、ほぼ予想されていた。そ

ここで低ドリフトタイプのオペアンプへの変換を行なっている。2章での実験に用いていた356Fタイプの高入力インピーダンスタイプのものからOP07タイプの低ドリフトタイプのオペアンプへと変換することによって、長時間における変動を大幅に低減することが可能となった。同時にコンデンサや抵抗の交換も行なっている。ノイズレベルの低減結果を図4-4に示す。図は30分間、増幅器のアイドリングを行なってから、約13分間の出力を元にノイズレベル（ドリフト特性）を表示したものであり、上の二つの結果は交換前のもの、下の二つは交換後のものである。大幅な低減がなされていることが分かる。

4.4 うねり測定における測定誤差の原因

以上の検討ならびに移動テーブルの試作結果を用いて、大型光学部品の形状測定を行なった。測定対象物はシリコンウェファーであり、測定長は約22.8mmである。光センサ出力信号の繰り返し測定の結果を図4-5に示す。測定時間は約10分間である。また、光センサ出力信号より断面形状を求めた場合の繰り返し測定結果を図4-6に示す。一方、移動テーブルを駆動しない状態でのノイズ出力の結果を図4-7に示す。ノイズ出力においては、まだドリフト信号が観測されているようである。図4-5の光センサ出力信号には殆ど違いは見られないが、断面形状においては、同じように一部に、ドリフトの影響とおもわれる雑音信号が見られる。この雑音信号が干渉系の制御の不完全さによるものか否かを確認するために、同じ部分の測定で制御が不完全な場合と完全な場合の光センサ信号および、作動信号を調べた。その結果、光センサ信号は制御の不完全さのために生じるノイズが一方にのみ見られるが、作動信号は両者ほぼ同じであり、制御の不完全さが影響していないことが分かった。このことは制御の不完全さによるノイズは高周波信号であり、うねり測定で大きく影響する低周波数信号でないことが、その理由と考えられる。

その他に考えられる誤差の要因として、形状測定に先だつての光振幅測定における測定誤差がある。この誤差は作動信号のDC成分として結果に影響するものであり、それ故、その影響は大きい。この振幅測定の結果の妥当性を確認するために図4-8に示す振幅測定結果のグラフィック表示を行なっている。図中の正弦波形がピエゾ素子を伸縮させた場合の、それぞれの光センサにおける干渉光強度であり、正弦波形を囲む上下のバーが振幅測定に用いた干渉光強度の最大値と最小値である。この測定値の精度がうねり測定結果に与える影響の大きいことは述べた通りである。しかし、現在この測定精度の向上に関しての良い方法は残念ながら、見いだしてはいない。

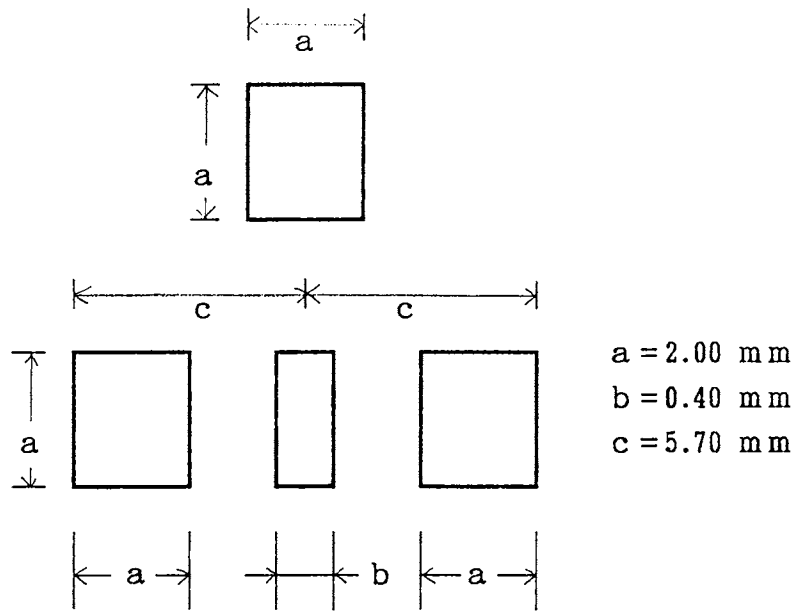


図4-1 放電加工で作製した光センサマスクの形状

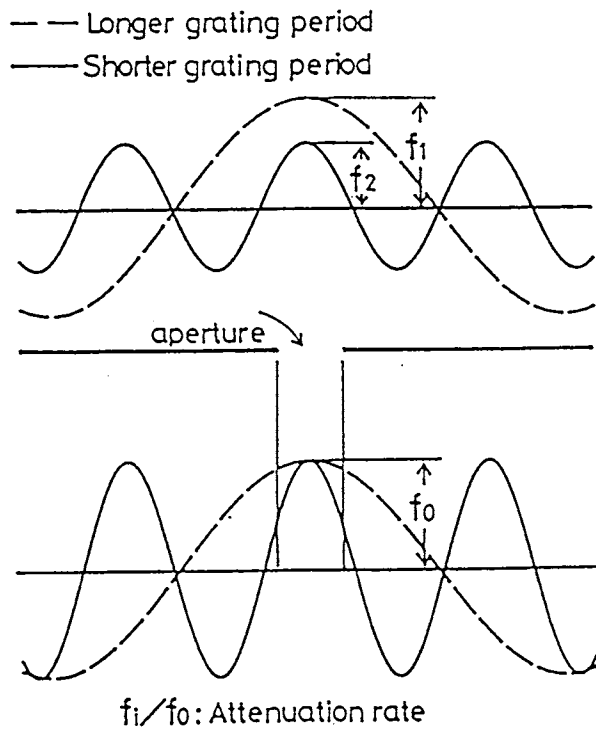


図4-2 光センサの広いアパチャーが測定する平均された干渉光強度

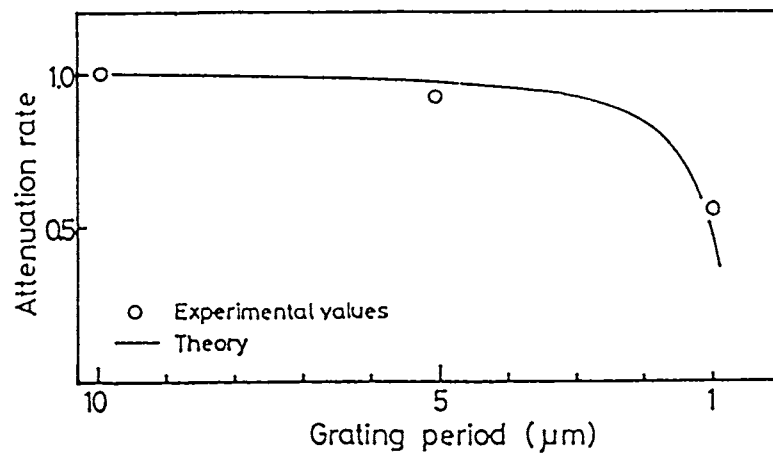


図4-3 光センサヘッドの読み取り特性の理論値と実験値の比較

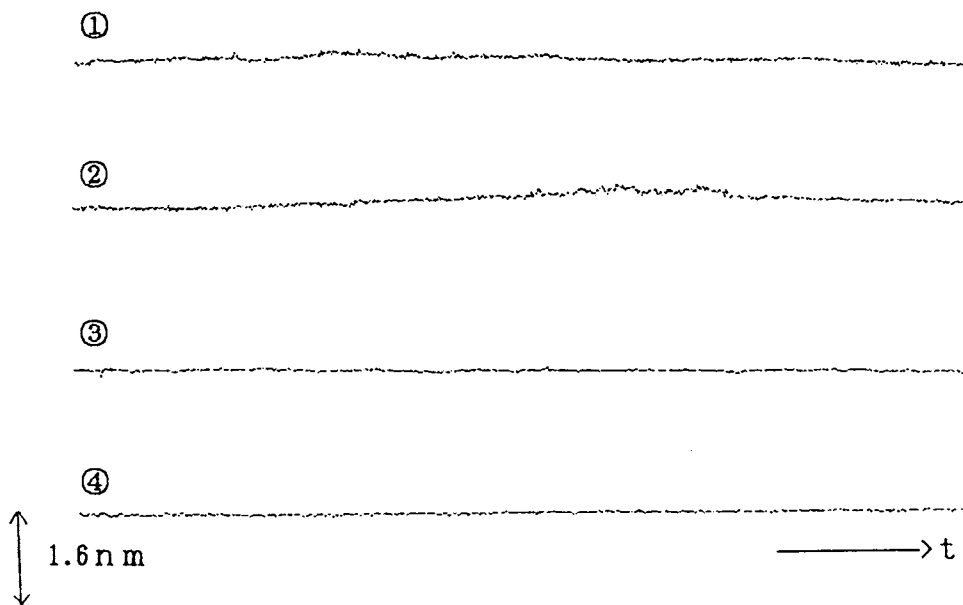


図4-4 OPアンプ変更前と変更後のドリフト測定(12分間)
 ①②は変更前でOPアンプはLF356, ③④は変更後でOPアンプはOP07

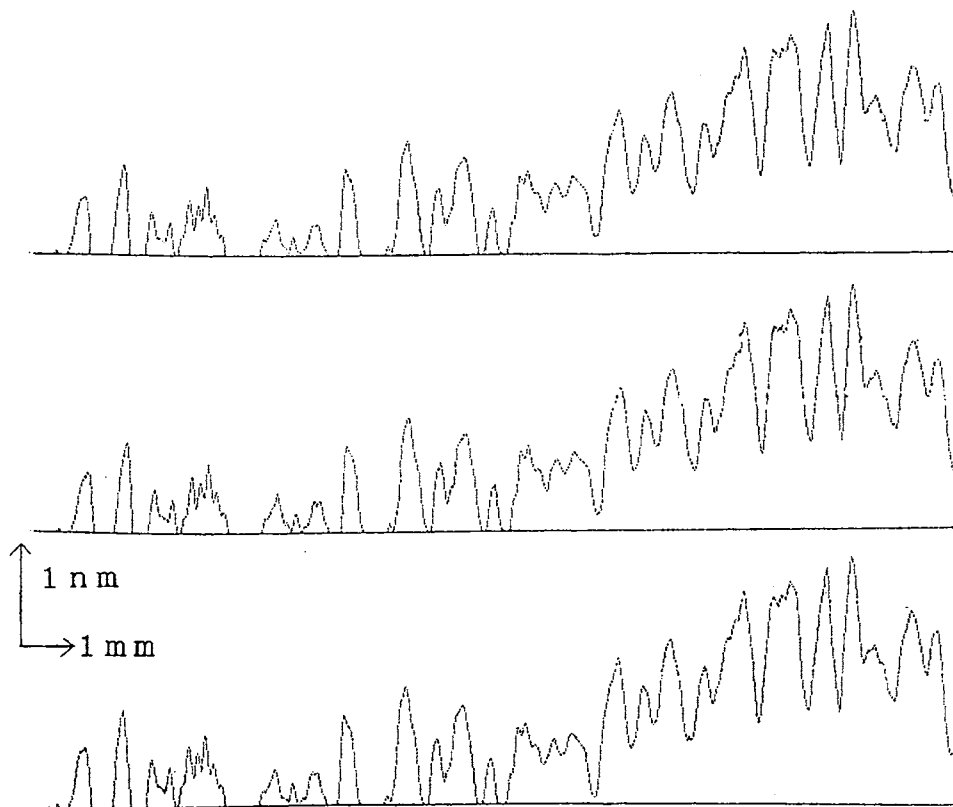


図4-5 光センサ出力信号の繰り返し出力の再現性

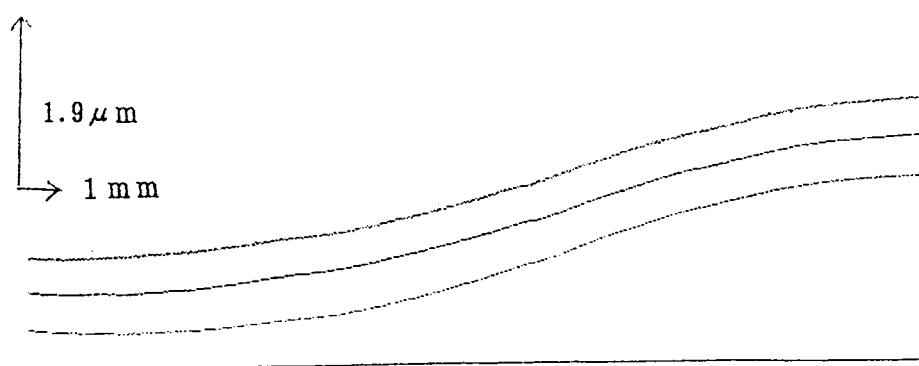


図4-6 うねり形状の繰り返し測定（測定時間10分間）

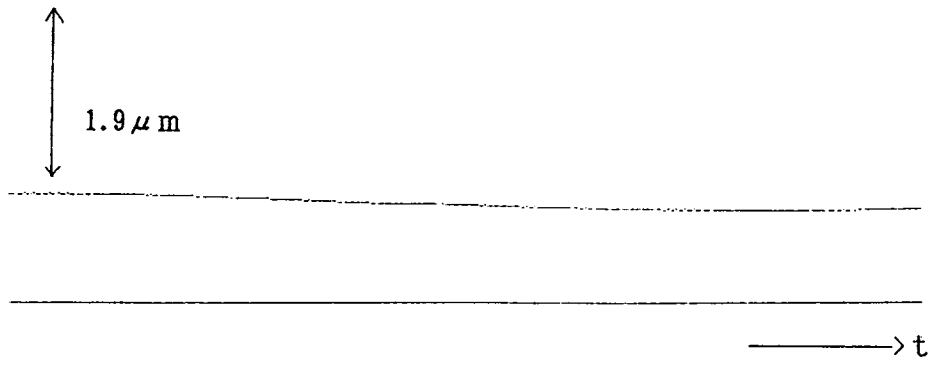


図4-7 ノイズ出力（測定時間10分間）

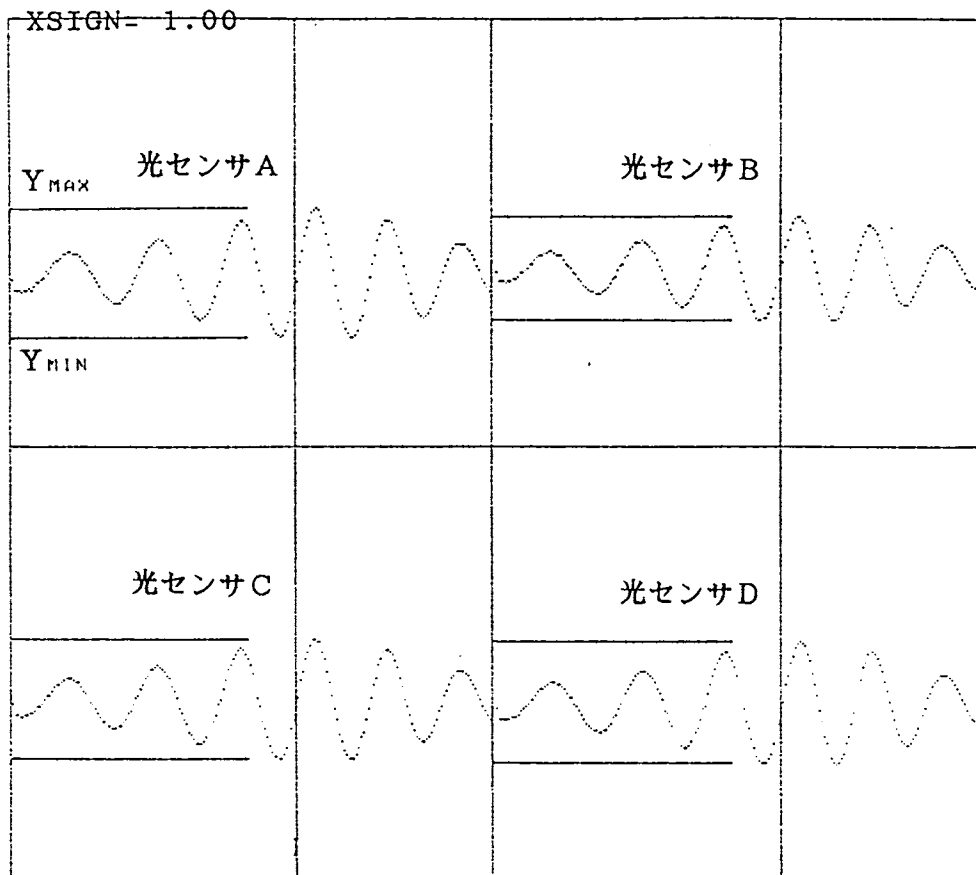


図4-8 振幅測定に用いた光強度変化から求めたY_{MAX}, Y_{MIN}値

5. 1 測定面に反射率の変動がある場合とその補正

光スキッド法による測定では、一つの干渉状態の干渉光強度から光路差を求めて凹凸測定を行うため、測定箇所の一部に反射率の変化があるとこれが大きな測定誤差を引き起こす。しかし、偏光を利用すると物理的には一つの干渉計で二つの干渉状態を発生させることができ、この干渉方法を光スキッド法に組み込むと、反射率の変動の影響をほぼ補正できることが分かった。この新しい方法と装置について述べる。

5. 2 反射率による測定誤差の補正法の原理

干渉計では、光路差が変化すると干渉光強度は図 5-1 の実線に示す変化をする。オプティカル・スキッド法ではこの変化における I_{\max} , I_{\min} を粗さ計測に先だつて最初に一回だけ計測する。その後、これらの値を用いて干渉顕微鏡画像全体の光強度の平均が図の P 点近傍にくるように、参照面の位置をピエゾ素子を通してコンピュータ制御する。この状態で、測定面の反射光強度が場所によらず一定であると仮定して、画像の中心に位置する測定点の光路差と、この測定点の周辺の領域における光路差を干渉光強度から同時に求める。そしてこれらの差を取ることで測定面の上下振動に影響されずに凹凸の測定を行う。以上の制御と計測を連続して繰り返しながら、測定箇所を一方向に走査することにより粗さ曲線を得ている。

ところが走査中の一点において測定点の反射率が小さくなるとその点における干渉光強度と光路差の関係は図 5-1 の点線のように変化してしまう。反射光強度が最初の I_{\max} , I_{\min} の計測時と同じとして干渉光強度から光路差を求めると、実際には光路差が変化していなくても干渉光強度が低下し P 点では図 5-1 の $\Delta\phi$ の測定誤差を生じる。この時、光路差の位相が π だけ違う P' 点ではこの誤差は符号が異なる $\Delta\phi$ となる。故に P 点と P' 点の干渉状態で同時に光路差を求めると、これらの値を用いて測定誤差を大幅に低減できると考えられる。

そこで次に $\Delta\phi$ と $\Delta\psi$ の計算を行った。まず観察面からの反射光の複素振幅 $A(x, t)$ を、振幅の絶対値 a 、干渉光の波数 k 、角周波数 ω 、測定面の凹凸 $h(x)$ を用いて次のように表す。

$$A(x, t) = a \exp [i\{-2kh(x) - \omega t\}]$$

同じく参照光の複素振幅 $B(t)$ を、振幅の絶対値 b 、位相 δ を用いて

$$B(t) = b \exp [i\{\delta - \omega t\}]$$

と表す。すると、P 点での干渉光強度 $I_p(x)$ は $\delta = \pi/2$ とすると次式となる。

$$I_p(x) = |A(x,t) + B(t)|^2 \\ = a^2 + b^2 - 2ab \sin\{2kh(x)\}$$

この $I_p(x)$ より $\sin\{2kh(x)\}$ を求めると

$$\sin\{2kh(x)\} = - \frac{I_p(x) - (a^2 + b^2)}{2ab} \quad (5-1)$$

となる。いま反射率に変動があり、振幅の絶対値が a から $a(x)$ になった時、 $h(x)$ は本当は

$$\sin\{2kh(x)\} = - \frac{I_p(x) - \{a(x)^2 + b^2\}}{2a(x)b} \quad (5-2)$$

から計算されるべきである。式(5-2)で計算すべき所を式(5-1)で計算して得られた凹凸を $h'(x)$ とすると、(5-2)式の $h(x)$ との関係は両式から $I_p(x)$ を消去して次となる。

$$\sin\{2kh'(x)\} = \frac{a(x)}{a} \sin\{2kh(x)\} - \frac{a(x)^2 - a^2}{2ab} \quad (5-3)$$

ところで p' 点近傍では、 $2kh(x)$ と $2kh'(x)$ の位相が共に π だけ違うためこの関係が次のようになる。

$$\sin\{2kh'(x)\} = \frac{a(x)}{a} \sin\{2kh(x)\} + \frac{a(x)^2 - a^2}{2ab} \quad (5-4)$$

いま、 $\Delta\phi$ と $\Delta\psi$ を解析的に取り扱うため、測定面の粗さが小さいとして $\sin\{2kh(x)\} \doteq 2kh(x)$ と近似すると（波長を 546 nm 、 $h(x)$ を 9.0 nm とすると $2kh(x) \doteq 0.21$ となり、この近似は 0.7% の誤差しか生じない）、 p 点近傍では式(5-3)より

$$2kh'(x) = \frac{a(x)}{a} 2kh(x) - \frac{a(x)^2 - a^2}{2ab}$$

となる。故に $\Delta\phi$ は次式となる。

$$\Delta\phi = 2kh'(x) - 2kh(x) \\ = \left\{ \frac{a(x)}{a} - 1 \right\} 2kh(x) - \frac{a(x)^2 - a^2}{2ab} \quad (5-5)$$

同様に $\Delta\psi$ は式(5-4)より次式となる。

$$\Delta\psi = \left\{ \frac{a(x)}{a} - 1 \right\} 2kh(x) + \frac{a(x)^2 - a^2}{2ab} \quad (5-6)$$

式(5-5), (5-6) において測定面と参照面は反射率が同程度として $a = b = a(x)$ とすると第1項は第2項の $2kh(x)$ 倍であり、 $2kh(x) < 0.2$ の場合には $1/5$ 倍以下となる。

$h(x)$ がより小さくなれば、大きさの殆どは第2項が占めるようになり、P点とP'点での誤差は絶対値がほぼ等しく、符号が逆の成分として影響することが分かる。

そこで、P、P'の二つの干渉状態において干渉光強度を同時に測定し、それらの光路差を平均することによって、 $\Delta\phi$ と $\Delta\psi$ を殆ど打ち消すことが可能となり、反射率にあまり影響されないで精度良く測定点の光路差を求めることができることになる。

5.3 測定装置の構成

波長板は偏光方向により屈折率が異なるため、我々は波長板を用いることにより、一つの干渉計で偏光方向により光路差が異なる二つの干渉状態を同時に実現できると考えた。

作製した装置を図5-2に示す。基本光学系にリニーク型の干渉顕微鏡を用いる。超高圧水銀灯からの光を干渉フィルターに通して準単色光($\lambda=546\text{nm}$)にしたものを偏光板を用いて水平方向から $\pi/4$ の方向の直線偏光にする。参照光路に $\lambda/4$ 波長板を挿入してあり、直線偏光の内、水平偏光成分ならびに垂直偏光成分に関して、往復で位相が π だけずれた二つの参照波面が作られるようにしている。観測光路中の位相補正板はガラス板であり、 $\lambda/4$ 波長板による干渉像の歪を補正している。測定面からの反射光には水平偏光成分と垂直偏光成分に位相差は殆どなく、参照光の同じ偏光方向成分の光と干渉した後、偏光ビームスプリッタにより分離される。そして、それぞれのセンサヘッドで干渉光強度が測定される。ここで piezo素子は先にも述べたが干渉計をP点近傍に制御するためのアクチュエータである。これらの制御方法と粗さ測定方法の詳細は2章を参照されたい。

5.4 反射率の異なる試料の測定結果

まず、この装置で piezo素子を駆動し光路差を強制的に変化させた場合にセンサヘッド1と2で同時に測定される干渉光強度の変化を調べた。結果を図5-3に示す。ほぼ正確に光路差が π だけずれている二つの干渉状態が実現されていることが分かる。

次に、反射率が場所によって変化している試料として固定磁気ディスクヘッド¹¹⁾を取り上げて形状測定を行った。このヘッドは磁気記録部に二種類の材料を用いており、場所によって反射率が異なっている。この干渉顕微鏡写真を図5-4に示す。干渉縞の変化より材料の境界ではあまり段差を持たず反射率のみ変化していることが分かる。この表面の形状を線a、bの2つの経路に沿って測定した。結果を図5-5に示す。b'はb近傍での繰り返し測定結果である。センサヘッド1のみから求められた見掛けの光路差は、反射率が異なる場所に大きな矩形段差を持つ。しかし、 π だけ位相差が異なるセンサヘッド2から求められた見掛けの光路差と平均す

ると（平均をプロファイルとして示した），矩形段差は消えほぼ平坦な表面形状が得られる．この形状は線 a，b の 2 つの測定経路ともほぼ同じである．この結果は図 5 - 4 の干渉縞が意味するほぼ平坦な形状と矛盾なく一致する．

なお，反射率の変動率は図 5 - 5 の結果から逆算すると 27% と見積られた．

5. 5 結言

上下振動の影響を受けないで高精度に粗さ曲線を測定する方法として，第 2 章に提案した光スキッド法では測定点の反射率の変動により測定誤差が生じた．この誤差を補正するための方法とその結果について述べた．結果を以下にまとめる．

1. 波長板と偏光を利用することにより，物理的に一つの干渉計を用いて二つの干渉状態を実現できることが分かった．

2. 1 の方法を光スキッド法に組み込むことにより，反射率による測定誤差の大幅な補正が行い得た．

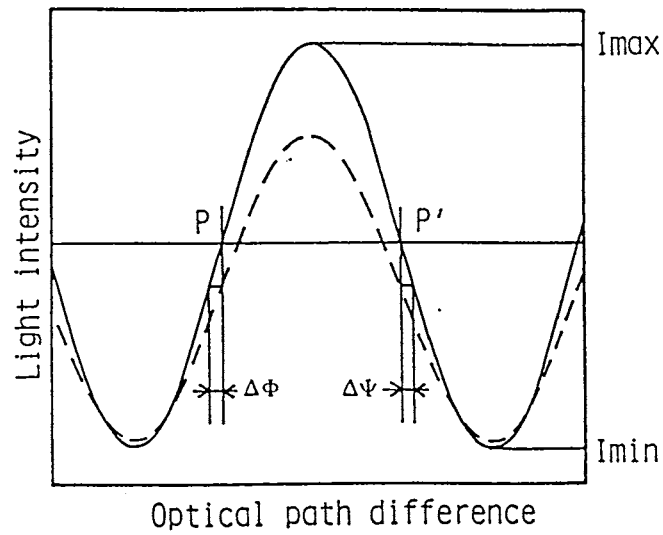


図5-1 反射率が変化した時の光路差の変化と干渉光強度

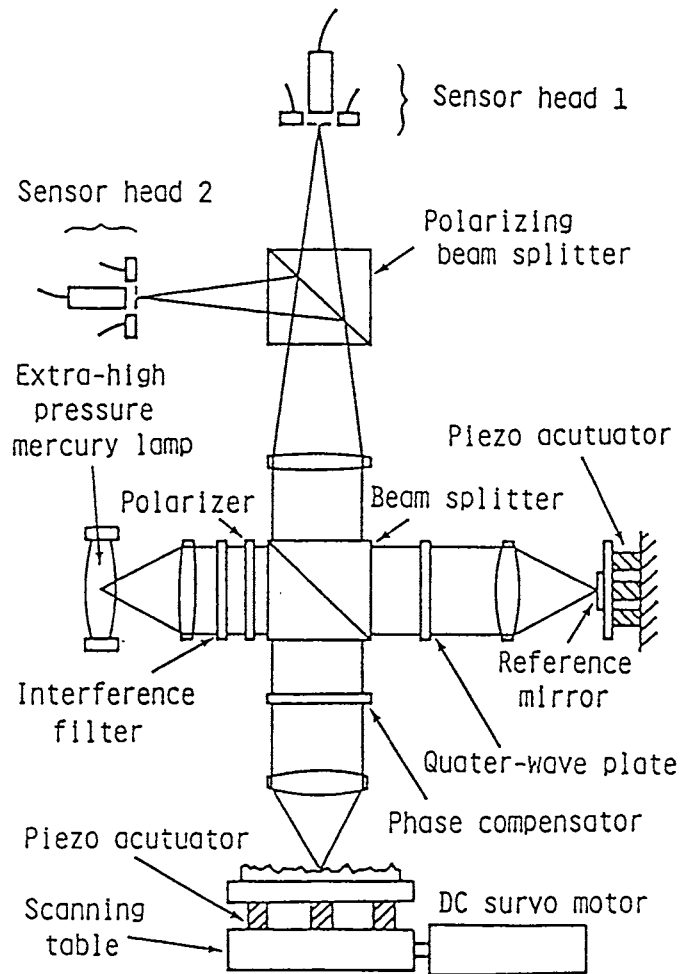


図5-2 反射率変動がある面を測定するための光学系

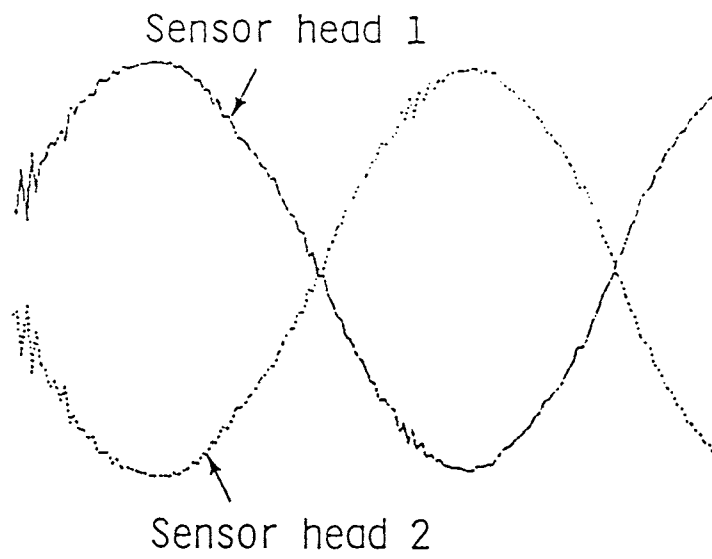


図5-3 偏光を用いた二つの干渉計からの干渉信号の変化

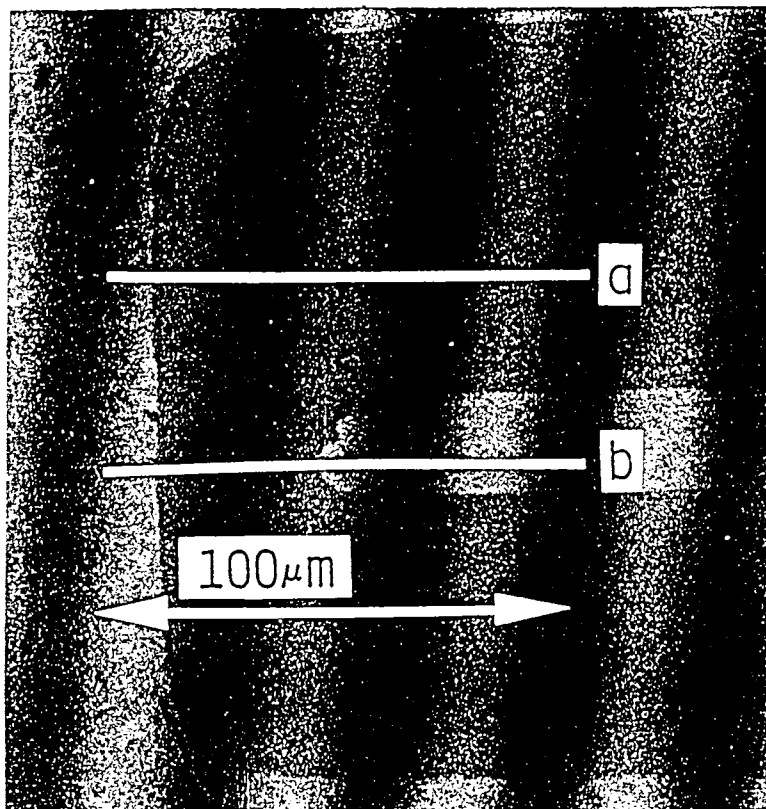


図5-4 反射率に違いを持つ超精密加工面の干渉顕微鏡像

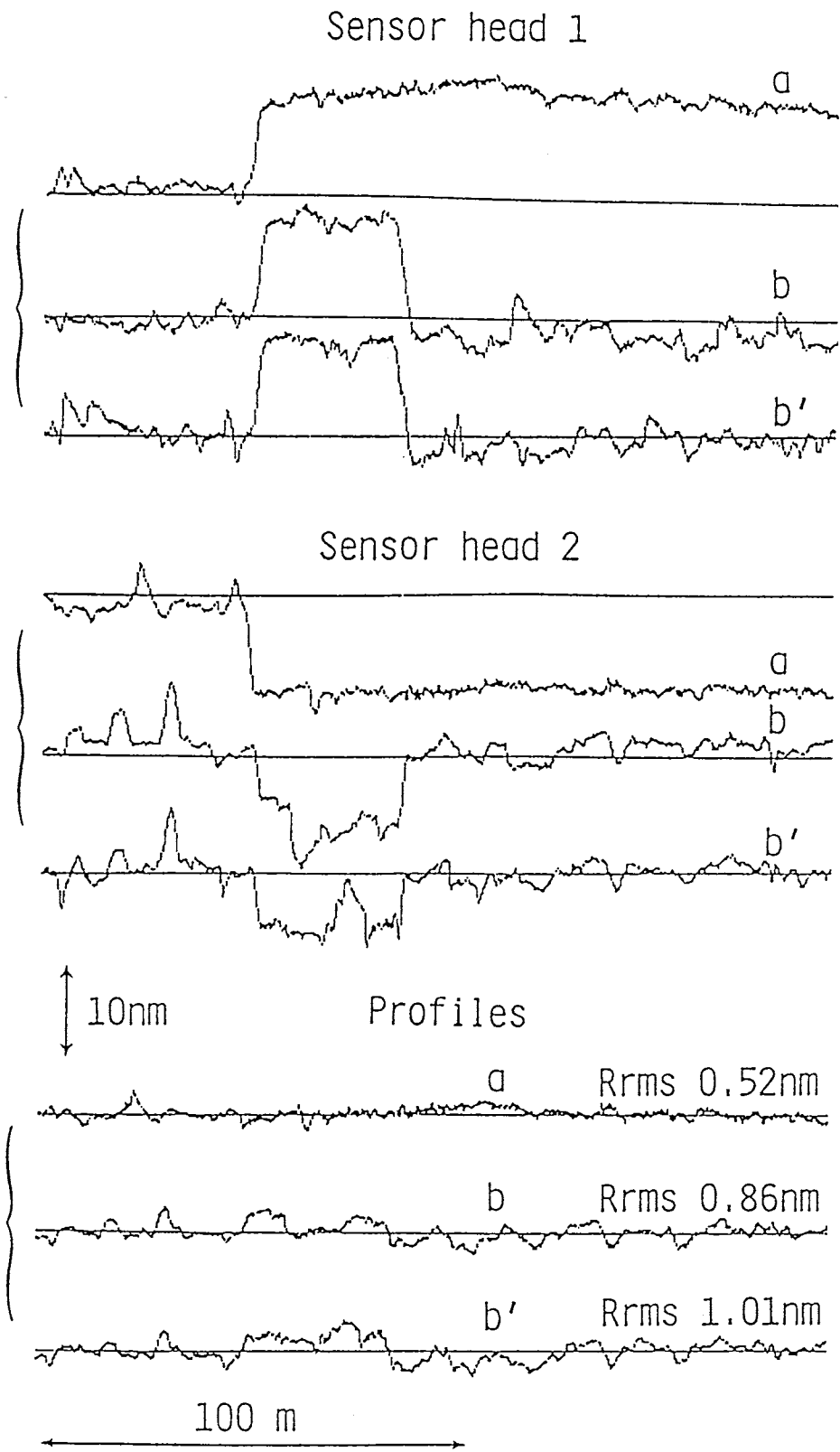


図5-5 二つのセンサヘッドでの反射率に違いを持つ
超精密加工面の形状測定結果

上下振動のある環境下においても長い測定域に渡って超精密面の形状評価を行い得る，新しい粗さ測定法（光スキッド法）を提案し，その実験結果について述べた．

また，理想的な平面を必要としないうねり曲線測定法について述べた．この方法は，光スキッド法が持つ低周波数成分のカットオフ効果を，デジタル信号処理によってキャンセルする方法であり，理想的な参照面を必要とせず，さらに移動型試料テーブルの直進性ならびに床振動の影響を受けないで，超精密加工面の高精度うねり測定を可能とする方法である．

参考文献

- 1) J.M.Bennett, J.J.Shaffer, Y.Shibano and Y.Namba : Float polishing of optical materials, Appl. Opt., 4, 26(1987) 696.
- 2) 安達正明, 八坂勝彦: シャーリング干渉顕微鏡を用いた超精密加工面のRMS粗さと自己相関関数の測定, 精密工学会誌, 53, 1(1987) 65.
- 3) S. N. Jabr : Surface-roughness measurement by digital processing of Nomarski phase-contrast images, Opt. Lett., 10, 11(1985) 526.
- 4) F.laeri and T.C.Strand : Angstrom resolution optical profilometry for microscopic objects, Appl. Opt., 26, 11(1987) 2245.
- 5) 松賀機器(株)販売「TOPO3D」. 論文は例えば B. Bhushan, J. C. Wyant and C.L.Koliopoulos : Measurement of surface topography of magnetic tapes by Mirau interferometry, Appl.Opt., 24, 10(1985) 1489.
- 6) キヤノン販売(株)「ZYGO 5500」. 論文は G. E. Sommargren : Optical heterodyne profilometry, Appl. Opt., 20, 4(1981) 610.
- 7) (株)小坂研究所「非接触微細形状測定器」. 論文は小沢則光, 河野嗣男, 三井公之, 武者徹, 宮本紘三 : 非接触光学式微細形状測定ヘッド(HIPOSS-1), 精密工学会誌, 52, 12(1986) 2080.
- 8) (株)東京精密「サーフコム920A」
- 9) 宮田威男 : 超精密加工技術と短波長光学部品への応用, 応用物理, 58, 6(1989) 842.
- 10) 田中充 : 最近のナノメートル計測技術, 光波干渉計について, 応用物理, 56 [6] (1987) 734.
- 11) 固定ディスクヘッド (HRHCA1 Series), アルプス電気(株)製.