

超精密非接触表面形状測定法について

Noncontact Surface Profile Measurement for Ultra Precision Machining

佐藤 壽 芳*

Hisayoshi SATO

超精密加工面の表面微細形状を光学装置、走査電子顕微鏡を用いて非接触測定する方法の現状について概観した。対象表面の微細形状は数nmないし10nm台の精度が要求されている。光学的方法としては、各種の干渉法、光格子法等と差動増幅法の組み合わせ等による方法が示されている。一方電子顕微鏡を用いる方法は試料表面を観察する画像を構成している信号の処理によって、微細形状を求める方法が提示されている。それぞれに特徴があるが、所要の精度測定の道が開けつつある状況について解説している。

1. ま え が き

磁気ディスク、回転多面鏡、光ディスク、LSI等これまでに比べてより精度が高く、“超精密加工”された部品をもつ機械類が、周辺に通常にみられる製品に珍しくなくなっている。生産技術の歴史を顧みるとき、それが精度向上の歴史であったことは、しばしば指摘されている^{1,2)}。これらの部品には、nm台の表面粗さの評価が要求されているものもあり、“超精密”と呼ばれるにふさわしい状況であることが改めて認識される。しかもこのすう勢はさらにÅ台の評価にもつながっていきこうとしている。

これらの部品や製品は、すでに広く実用に供されているものも少なくなく、さらに高機能化や新たな開発がすすめられている。この展開の過程における加工技術の開発、改善には、加工精度を評価する計測法の開発が必須である。これは、表面粗さに止まることなく、微細形状、平面度、平行度、角度分割精度等各種の精度が、それぞれの機能に従って対象となる。本稿では、超精密加工にかかわって最もしばしば用いられ、種々の測定法が提案されている表面粗さ、表面微細形状の測定法について展望を試みる。

従来表面粗さ測定装置として最もよく使われてきたのは触針式装置であり、超精密加工面を対象としてもこの動向は変わっていない。その特徴の詳細は文献に譲るが^{3,4)}、触針によって測定されることの結果に対する信頼感、基礎的な方法として技術的な蓄積が進んでいることへの安心感、世界的に評価の高い測定装置が普及しており、測定結果間での比較が可能等の理由がその背景になっている。しかし、この測定法では、鋭い先端の針で超精密加工面を引っかくことになる。その結果、本来非破壊検査であったこの測定法が、加工面に有害な痕跡を残

す恐れが十分にありうるため、測定結果の信頼性にも問題が生じることが指摘されている。

この点の解決をはかるべく、主として光学的な手法による測定法が提案されている。また、電気光学的ともいふべき測定法として、走査電子顕微鏡 (SEM) による方法も展開されている。これらはいずれも、10nm以下を分解能とする方法として提案されており、超精密加工の進展への対応が進められていることが理解される。これらの提案の中には実用化が進められ、すでに市販されているものもあるが、測定値の他の方法による結果との比較、微小な測定値であるだけに測定結果のもつ意味等今後とも吟味すべき問題点も残している。このような観点をふまえながら、まず光学的方法について、その後SEMによる方法について述べることにする。

2. 光学的方法について

表面粗さの非接触光学的測定法にはこれまでも光切断法⁵⁾やその展開による方法⁶⁾、反射強度による方法⁷⁾等が提案されてきているが、分解能において触針式粗さ計に及ばず、その特徴は認められながらも実用に供せられるに至らなかったのが実状であろう。しかし、超精密加工技術がより一般的なものとなるにつれ、加工面に傷をつけるおそれのある触針式粗さ測定法に対し、これと比肩しうる精度で非接触測定を可能とすることへの期待が高まっている。そしてこれに応えるべき試みも一、二にとどまらず発表され、それぞれに実用化への努力が続けられている。これらには、個々に得意とする分野が開けるものと思われるが、以下ではその代表的と思われる幾つかの方法について概観する。

2.1 ヘテロダイン干渉法

Sommargren⁸⁾はヘテロダイン干渉方式を使った表面微細形状の測定装置を開発している。図1は装置の概要である。試料表面の形状の検出部は図2に示される構成

*東京大学生産技術研究所 第2部

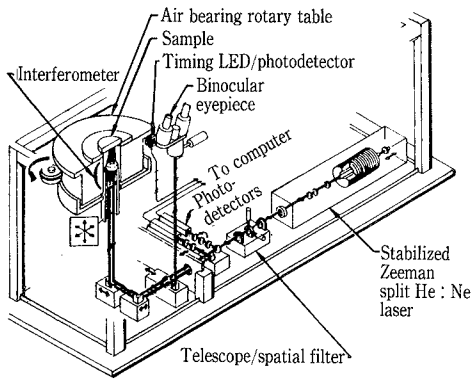


図1 ヘテロダイン干渉法装置

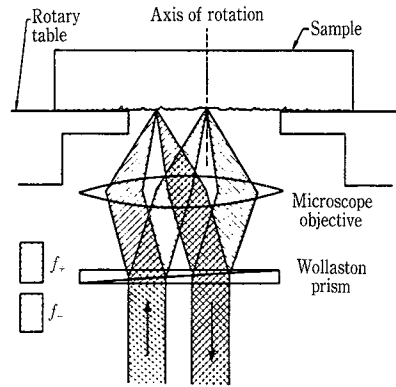


図2 検出部の構成

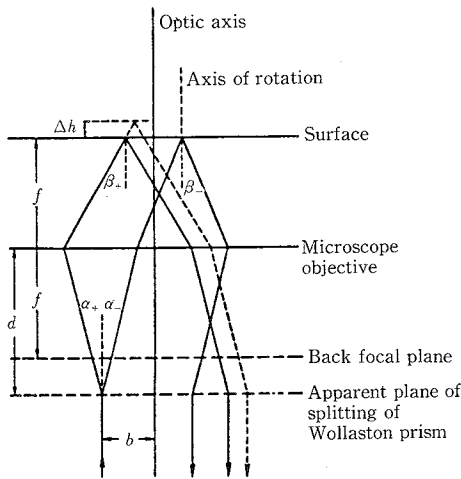
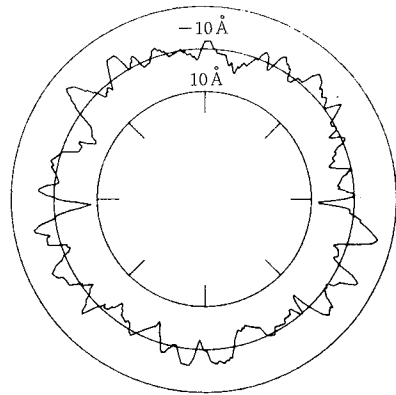


図3 検出部の諸元



Surface profile

2.7 A RMS 15 A P-V 3 A ASTIG

図4 溶融石英基板測定例

によっている。回転する試料の中心軸に一致するように配置された一つの周波数成分の光と、これとわずかに周波数の異なる試料面検出の光とに分けられている。これらの諸元を図3の関係で示すと、検出の光路による試料面の凹凸 Δh は、

$$\Delta h = \frac{\lambda \sqrt{b^2 + f^2}}{4\pi f} \Delta \phi \quad (1)$$

あるいは

$$\Delta h = \frac{\lambda}{8\pi} \sqrt{N.A.^2 + 4\Delta \phi} \quad (2)$$

と求められている。ここで、 $N.A.$ は開口数であり、 $N.A. = 2b/f$ と表され、 $\Delta \phi$ を計測することによって、 Δh が求められることとなる。

図4は溶融石英の研磨表面についての測定結果である。外円、内円が $\pm 10 \text{ \AA}$ を示しており、測定表面形状は 2.7 \AA rms 、 15 \AA pp であるとされている。繰り返し測定精度

表1 触針式測定法との比較

Sample	Height (\AA)		Slope ($\text{\AA}/\mu\text{m}$)		Autocovariance (μm)	
	Optical	Stylus	Optical	Stylus	Optical	Stylus
Fused silica	2.4	2.3	0.6	1.4	27	108
SF-6	23.0	21.3	6.4	12.4	15	16

がよいことについても確認されている。表1は触針式測定装置による測定値との比較であり、形状の比較であるrms値については、よく一致した結果である。他の多くの方法が直線上の表面形状を測定しているのに対し、測定法の原理も関連し、一本の円周上の表面形状が求められる。

2.2 光楯子法

研削面の性状等では、目視によれば加工時の振動の痕

跡が残されていることが明らかであるにもかかわらず、触針式粗さ計を用いても検出されない場合のあることが指摘されていた。これらは、振幅に比べて波長が長いうねりの成分とみられるものであった。図5はこのような場合を考慮し構成された測定系である⁹⁾。装置はロール研削盤上に配置できるようになっているが、ダイヤモンド切削の超精密加工面の測定例も示されている。

図5の光学系は、対象面の傾斜と光沢を光の楕子の原理で拡大検出しているものである。Sは白色光の光源であり、これからの光は対象表面に光点として結ぶように構成されている。これからの反射光はフォトランジスタX₁、X₂に像が結ぶように戻り、面の傾斜による反射光のわずかの相違をこの間の信号から差動的に検出できよ

うになっている。フォトランジスタX₄は、光沢による反射の強さの変化を検出している。またフォトランジスタX₄は、光源の強度の変化を監視している。

この場合については、対象表面の形状、これに当たる光点の径等の関係がモデル化され、表面の形状を求める過程が詳細に検討されている。すなわち、図6は幅2hの光束が振幅2Aの正弦波状の表面に当たるとき、その反射光がスクリーン上に当たる状況を模型的に示している。この場合、幾何学的な関係から、

$$y = \frac{1}{2L} \int q dx \quad (3)$$

によって表面形状yが求められる。図にも示されるようにLはスクリーンと対象面の距離、qは光束中の一線素に注目したときの、光束中心からの距離である。図5の検出器の信号の処理によってこの関係が求められ、アルミ合金の超精密切削加工面の測定例として、図7が求められている。加工条件、測定条件の詳細は、明らかではないが、互いに相関のある形状がえられ、加工条件との関連を考える上で期待のもてる測定結果となっている。

図8は、Teagueらによってまとめられた、各種の光学的方法による粗さ検出可能な領域の図¹⁰⁾に、上記の方法による領域を重ねたものである。この方法による領域は、粗さの波長、振幅の比、光と粗さの波長の比としてみたとき、これまでの方法に比べて、はるかに小さい領域の測定が可能となっていることがわかる。

2.3 ミラウ干渉法

最近になってミラウの干渉法を用いた方法が開発され¹¹⁾、製品も市販されている。光学系の基本的構成は図9に示すとおりであり、測定に関する動作は図10のプロッ

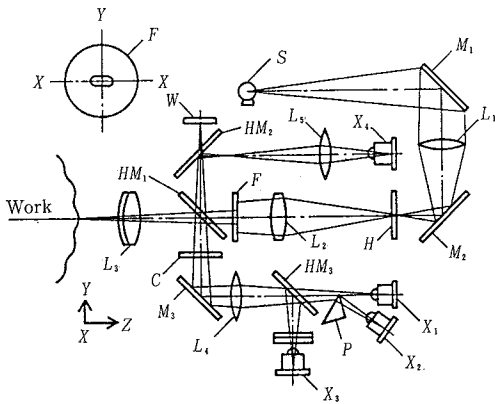


図5 光楕子法の光学系

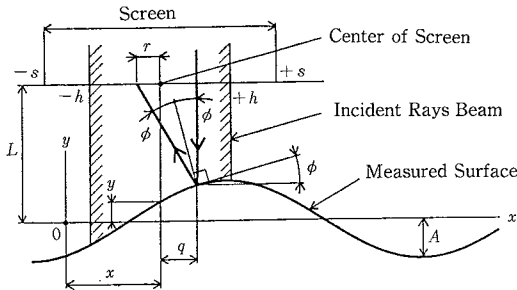


図6 検出部の構成

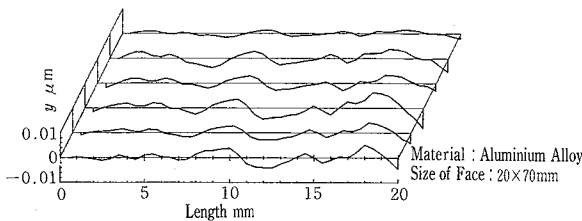


図7 回転多面鏡ダイヤモンド切削面の測定例

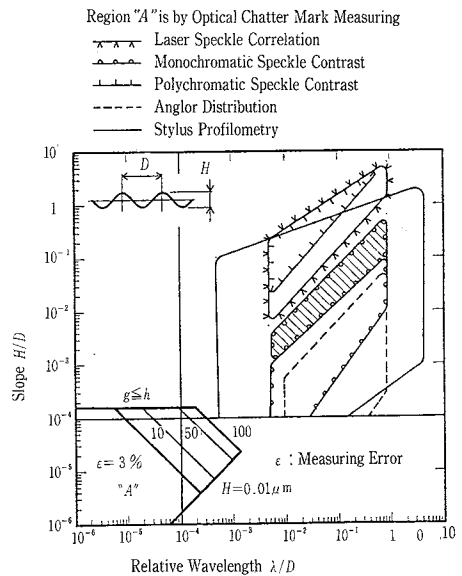


図8 測定可能領域の比較

ク線図にもとづいている。CIDイメージセンサで対象表面を10,20倍に拡大観察し、それぞれの視野は 0.56×0.56 mm, 0.28×0.28 mmである。イメージセンサの素子数は 384×244 で、観察には 244×244 が用いられている。干渉計はPZTにより一様速度で駆動され、その際、水平走査に同期がとられている。これによって作られた干渉縞像をマイクロコンピュータ内にとりこみ、位相検出の処理を行って、これに比例する値として表面形状を検出している。

図11は磁気ディスク用のダイヤモンド超精密切削加工面を測定した例である。この方法の特徴として測定対象を面として把握する結果、その形状が図11にみられるように3次元的に計測されることであり、検出の速度もCIDの走査速度によることから、画像処理の速度を別にすれば、触針式のような機械的な検出方法に比べ速いといえる。測定分解能として、Ni-Znフェライトの基板等

で2.2nm rmsの測定が報告されている。デジタル処理の結果として数値的に非常に精度のよい値が示されているが、この方法に限らず、数値的に処理されている場合の問題点として、分解能を対象の実態との関連で把えてどこまで意味のあるものとするかについての検討、この見地から各種の方法相互の関連の確認等が課題と考えられる。

2.4 臨界角法

超精密加工に対応しうる高精度の検出性能を備えた方法としてコンパクトディスク用に開発された臨界角法を用いる提案があり¹²⁾、実用化も進められている。図12はこの方法の原理を示している。基本的には対象表面に絞られた光点の焦点からのずれを検出するものである。測定面が合焦点位置にある場合、反射光は平行光として臨界角プリズムに入る。このときプリズムの斜面角度が光軸に対し全反射の臨界角であると、平行光は全反射して二つのダイオードに同一の光量となって到達し、差動増幅器の出力は零となる。測定面が前後に移動した場合には、全反射するか透過するかの状態となり、二つのダイオードに異なった光量の光が到達し、差動増幅器には正または負の出力がえられることになる。実際の光学系の構成は図13のようにこの効果を拡大しうる構成とされ、触針式の測定装置の触針ヘッドの代わりにこれを付ける形で測定が行われている。

図14は溝の深さ約 $0.8 \mu\text{m}$ 、溝の幅約 $10 \mu\text{m}$ を触針式粗さ計とこの測定法によって測定した結果である。臨界角

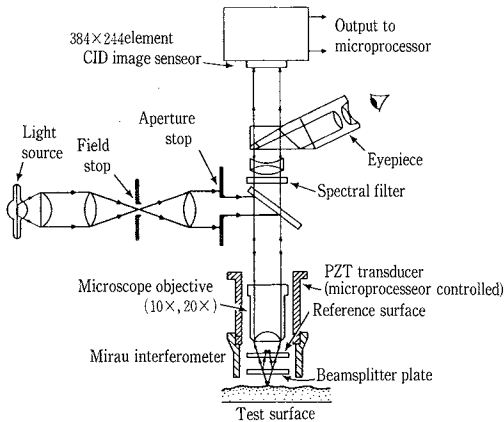


図9 ミラウ干渉法装置

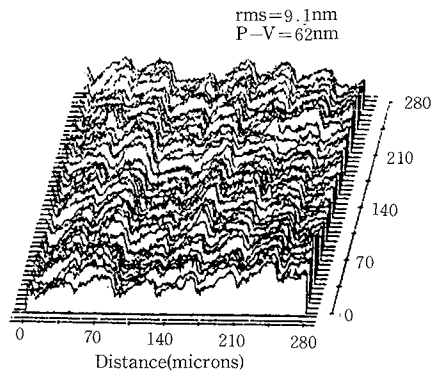


図11 磁気ディスクダイヤモンド切削面の測定例

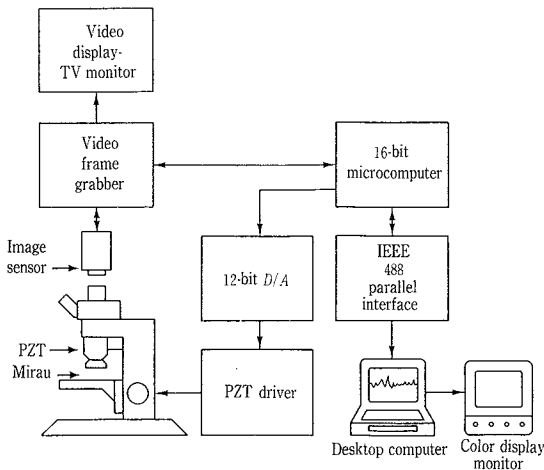


図10 計測処理系のブロック線図

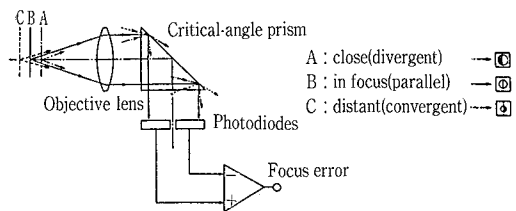


図12 臨界角法の原理

法による結果は形状に過渡的な応答を含めた変形がみられるから、どこまでを振幅とみるかによって計測値に幅がありうるが、触針法による値が $0.82\mu\text{m}$ に対し、臨界角法によっては $0.84\mu\text{m}$ とえられている。溝の端部、低部にみられる波形の変形は、回折、傾斜部と平坦部の接続箇所に対するフォトディテクタの出力補正不能等によっているとみられる。図15は従来は測定が難しかったVTR用テープの粗さの測定例である¹³⁾。このような検討の結果として、この方法の分解能は 20nm 、線型域 $\pm 1\mu\text{m}$ であることが確かめられている。図15は3次元測定の結果を示しているが、ミウラ干渉法の場合と異なり、触針法と同様に1本1本の粗さ曲線を繰り返し、機械的

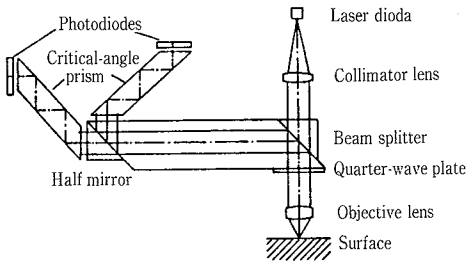


図13 検出部の構成

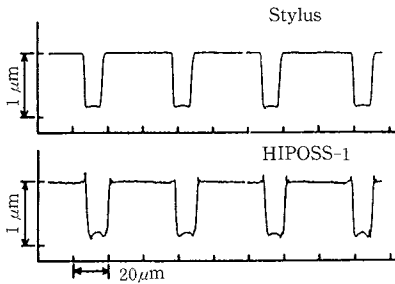


図14 触針式測定法との比較

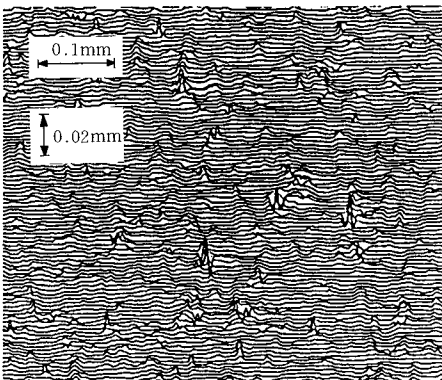


図15 VTR用テープ裏面の測定例

な走査で測定しているの、測定時間は要している。しかし、光センサ部の周波数特性は高いので、走査法の改善により計測時間の短縮の余地は残されている。

3. 走査電子顕微鏡 (SEM) による方法について

以上にのべた光学的な方法では、いずれもその分解能を光の波長以下にまであげること成功しているが、これを模索する一つの段階では、光学顕微鏡に対する電子顕微鏡の分解能向上の類似性から、SEMによる表面形状測定に関する研究が進められた。すなわち、電子顕微鏡による微細表面の観察画像は、信号の性質もあって立体感のあるものとなっている。しかし、これが観察画像としては平面であるのに対し、信号処理その他の手法を介することによって表面形状そのものを求めることを試みるものであった。

3.1 反射電子信号による方法

電子顕微鏡の反射電子信号が試料表面の形状に関する情報を含んでいることは早く指摘されていたが¹⁴⁾、これの具体化には、SEM自体の開発と性能向上、演算増幅器のマイクロチップ化、マイクロコンピュータの開発等周辺の状況が熟して初めて可能となった面もある。最も理解しやすい形としては、図16に断面形状を示す粗さ試験片の反射電子画像が図17のように傾斜による明暗によって表示されることに根拠をおいている¹⁵⁾。すなわち、

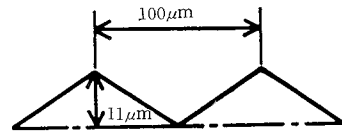


図16 粗さ試験片断面形状

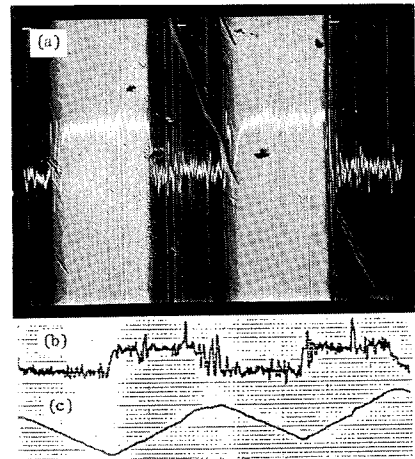


図17 粗さ試験片の反射電子画像とその信号処理

信号検出素子が 1 個の場合、図18の曲線に示すように、片側のある範囲の走査方向傾斜角で反射電子の信号の強さがこれに比例する関係がみられる。したがって、この信号を走査方向長さで積分することによって面の形状が求められる。また上記比例関係は検出素子を走査ビームに対し配置して線型域を図18曲線Cのように広げ、感度をあげることが可能になる。またこの場合には試料の成分の影響も除くことが可能となる。図17で表面形状は同図(C)のように求められている。

この方法によれば、画面は電氣的に走査されるから、1本の粗さ曲線についても、画面全体についても、走査と同時に高速に粗さ曲線が求められるし、観察倍率の変更によって分解能があげられ、10nmを求めることも容易である。較正も標準粗さ試験片を試料室内に配置して簡単に行えるし、粗さ曲線を求めた個所を顕微鏡画像上で明示できる点も他の方法にない特徴である。

試料表面形状は一般的には図17のように一方向への傾斜を持っているとは限らず、任意の方向に傾斜している。

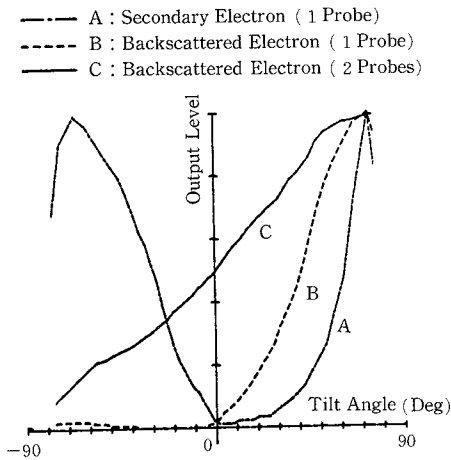


図18 表面傾斜角と信号出力

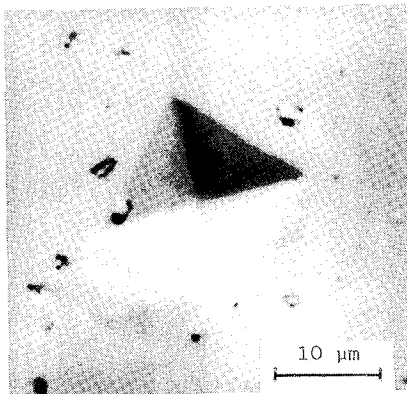


図19 ヴィッカース硬さ試験圧痕の反射電子画像

菊川らは走査に直角方向の傾斜と信号出力を 4 個の検出素子それぞれに対して較正しておき、反射電子信号のデジタル計算処理によって疲労破面の表面形状を求めることを試みている¹⁸⁾。この研究は先駆的なものであるが、電子計算機の記憶容量、計算機の使いやすさ等の点から、高速簡便処理、3次元測定、分解能の確認、測定装置としての機能等について問題点を残していたものと思われる。

最近筆者らは、球状試料を標準として、4個の検出器によって対象試料との画像信号強度を比較することにより観察面の法線を検出し、これから形状を求めることを試みている¹⁹⁾。図19は任意の方向に傾斜をもつ試料の代表例であるヴィッカース硬さ試験圧痕の反射電子画像である。図20は上記方法によって求められた法線の水平方向成分を表示している。また図21は、これから求められた形状の3次元表示例である。図21で示される圧痕の一断面をとると、圧子の押しこみによる圧痕周辺のもり上りも検出されている。一方圧痕の先端角は圧子のそれとは必ずしも一致しておらず、測定結果の精度限界の確認等は今後の課題である。

3.2 立体画像法

電子顕微鏡を観察表面の形状測定に使うことについては、両眼の視差による立体の認識と観点を同じにする立

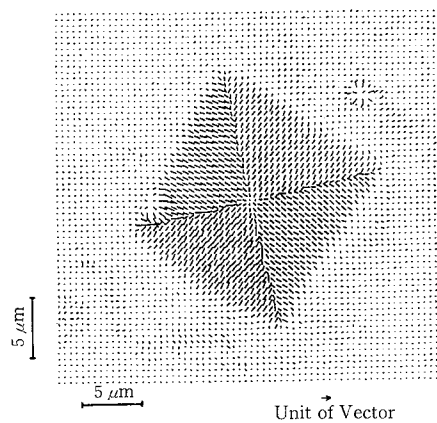


図20 図19に対する法線の水平方向成分の表示

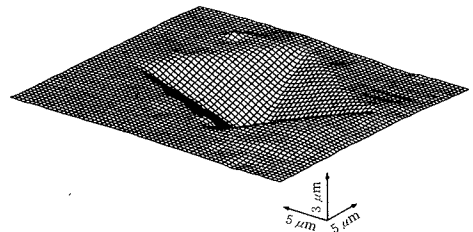


図21 図20から求めた3次元形状表示

体観察の手法を装置化する試みがある¹⁹⁾。図22はその構成図である。試料台を±5ないし±10°の範囲で傾斜させて2つの角度に対しとれる画像信号を一旦記憶し、これを再生表示するとき、2つの角度の画像を交互に表示、これに同期してPLZTシャッターを作動させて立体画像が観察できるようにしている。

表面形状は、他にジョイスティック等により、表面位置を指示、これを画像処理の手法によって求めている。しかし、装置が大がかりになること、ジョイスティックの指示で分解能が上らないこと、処理に時間がかかること等は問題点であろう。最近、試料台を傾斜させることはせず、走査ビームを走査ごとに傾斜させ、構成される二つの画像を偏光眼鏡を通してみることで立体画像が観察できる顕微鏡が作られている¹⁹⁾。比較的簡単な装置で構成できることは特徴であろう。しかし、現在までのところ、この方法では測定装置として簡単な操作で表面形状を求められるまでには至っていない。

3.3 2次電子信号による方法

反射電子信号を用いる検出法に対し、顕微鏡の画像の性能として高倍率を得られることを理由として、2次電子信号を用いる方法も開発されている²⁰⁾。これは、図23のように2つの2次電子信号検出器A、Bを設置した顕微鏡で標準球を観察すると、2つの信号の和、差の値と図23に示す角度位置に対して図24の関係が得られることによったものである。この結果を実験的に整理し、

$$\tan\theta = k \frac{A^2 - B^2}{(A_n + B_n)^2} \quad (4)$$

なる関係が求められることからθを求め、さらに形状を創成できることが示されている。ここで、kは定数、A_n、

B_nは図23に示すように、試料周辺の水平面を対象に求められる2つの検出器の2次電子信号である。75°の範囲までθに対し測定結果が比例的に求められることが示されているが、この場合でも(4)におけるkがいくらに求められるかは示されておらず、較正にかかわることとしての問題が残ろう。また反射電子信号との比較でみると、図17の粗き試験片について雑音性の高い信号になっていることが指摘されている¹⁹⁾ことを考えるとき、測定分解能の高さとの関連も検討の余地があるものと思われる。図25はコンパクトディスクの金型面の測定結果であり、μm台のピットの形状が求められている。この場合の平面について求められた粗き曲線は、2 nm以下の結果が求められている。

4. む す び

nm台の分解能をもつ光学式、ならびにその延長上にある走査電子顕微鏡による表面形状測定法について概観し

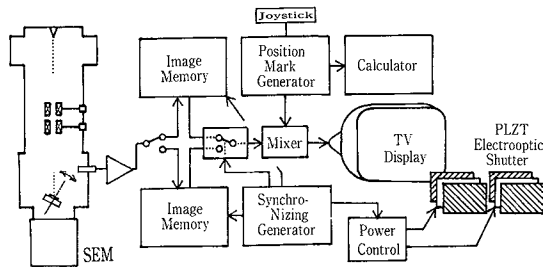


図22 立体観察装置の構成

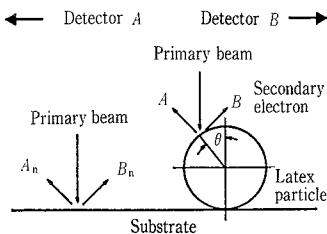


図23 2次電子と入射角の諸元

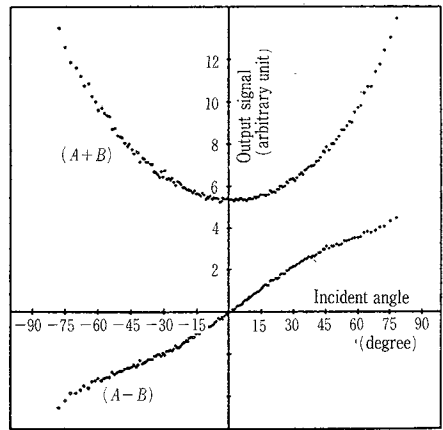


図24 入射角と2次電子信号出力

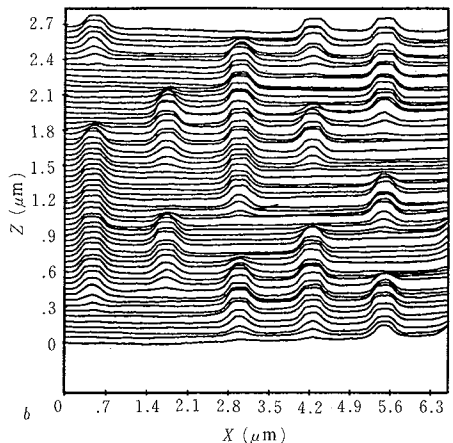


図25 コンパクトディスク金型面の測定例

表 2 測定法の特徴

方 法	縦分解能 (nm)	横分解能 (μm)	3次元測定	測定時間	演算処理	市販	
光学的 方法	ヘテロダイン干渉法 ⁸⁾	0.1	2	×	短	無	×
	光柵子法 ⁹⁾	2	5	△	長	無	×
	ミラウ干渉法 ¹¹⁾	0.5(rms)	1.5	○	短	有	○
	臨界角法 ¹²⁾	20	2	○	長	無	○
SEM 法	反射電子信号法 ^{15),18),19)}	5	0.006	○	短	有	○
	立体画像法 ^{16),17)}	30	0.003	△	長	有	○
	2次電子信号法 ²⁰⁾	2	0.006	○	短	有	○

た。表2は上記の方法について特徴をまとめている。最近走査型トンネル顕微鏡が開発され²¹⁾、Åの分解能をもつことが示され、さらに分解能の向上がはかられている。ミラウの干渉方式による装置もÅの分解能をもつことが主張されているが、これら相互の方法で同一試料に同じ結果がえられるかとなると、疑問を感ぜざるをえないというのが現状であろう。nm台、Å台の振幅は、これまでμm位までのところでわれわれが理解する振幅と同じでよいかということも再考の要があらうし、検討を要する課題であろう。しかし、今後はますますこのような形状測定の必要性が高まることは明らかであり、一層使いやすい装置の実現が望まれるところである。また、一つの測定装置ですべてが理解される状況でもないため、多様な方法による比較、検証が望まれる。意をつくしえなかったところも少なくないが、拙文が超精密加工技術の進展に寄与すれば幸いである。(1987年3月24日受理)

参 考 文 献

- 1) 岩田一明：設計生産システムの現状と問題点，機誌，79-692，昭51-7，618-623
- 2) 谷口紀男：超精密加工の動向，'80工作機械関連機器技術者会議，日本能率協会，昭55-7，0-1
- 3) 川端文雄：触針法による表面形状の計測技術，機械の研究，33-7，昭56，814-820
- 4) 坂井誠：最近の表面粗さ測定機とその応用，機械の研究，36-10，昭59，1102-1108

- 5) G. Schmälz : Technische Oberflächenkunde. Springer, 1936
- 6) 三井公之, 佐藤壽芳：表面あらさの実時間測定に関する研究，機論，44-377，昭53-1，321-329
- 7) 関口博, 竹山秀彦, 村田良司, 松崎寛司：切削仕上げ面あらさのインプロセス測定に関する研究，機論，43-374，昭52-10，3893-3900
- 8) G. E. Sommargren : Optical Heterodyne Profilometry, Appl. Opt., 20-4, Feb.15, 1981, 610-618
- 9) Y. Sakai, S. Ogata, and S. Asai : Optical Measuring Instrument for Chatter Marks, Annals CIRP, 33-1, 1984, 407-412
- 10) E. C. Teague, T.V.Vorburger, and D. Maystre : Light Scattering from Manufactured Surface, Annals CIRP, 30-2, 1981, 563-569
- 11) J. C. Wyant, C. L. Koliopoulos, B. Bhushan, and D. Basila : Development of a Three-Dimensional Noncontact Digital Optical Profiler, Trans. ASME, J. Trib., 108-1, Jan. 1986, 1-8
- 12) 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, 52-12, 昭61, 2080-2086
- 13) 桜井功：表面の微細形状測定の実際，ツールエンジニア, 28-3, 昭61, 92-98
- 14) 菅沼忠雄：22年間の夢—3次元測定ができるSEMの開発—Boundary, 22-1, 昭61, 18-21
- 15) 佐藤壽芳, 大堀真敬：走査電子顕微鏡 (SEM) による表面粗さ測定の研究，機論C, 49-438, 昭58-2, 227-233
- 16) Y. Kato, S. Fukuhara and T. Komoda : Stereoscopic Evaluation and Three Dimensional Measurement for Scanning Electron Microscopy, Proc. 10th Ann. SEM Symp.1, March 1977, 41-48
- 17) 立体視電子顕微鏡 サンヨー電子カタログ 1986
- 18) 菊川真, 城野政弘, 安井一雄, 安達正晴, 福田裕：走査電子顕微鏡による疲労損傷についてのマイクロ定量的測定，材料, 23-252, 昭49-9, 708-715
- 19) 大堀真敬, 佐藤壽芳：走査電子顕微鏡 (SEM) による表面形状測定の研究 (法線検出法による), 機論C, 52-483, 昭61-11, 2974-2980
- 20) T. Sukanuma : Measurement of Surface Topography Using SEM with Two Secondary Electron Detectors, J. Electron Microsc., 34-4, 1985, 328-337
- 21) G.ピーニッヒ, H.ローラー：走査型トンネル顕微鏡, サイエンス, 15-10, 昭60, 10-17