

レーザビーム高速走査法を用いる
表面形状測定に関する研究

篠崎 亮

新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程
材料生産開発科学専攻

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の内容と論文の構成	7
第2章 走査光学系	9
2.1 はじめに	9
2.2 傾斜分布および形状測定の原理	10
2.3 走査光学系の比較	12
2.4 走査光学系	14
2.5 凹球面ミラーの球面収差	19
2.6 ビーム追跡による検出面の位置決定	21
2.7 検出面におけるビームの変位	23
2.8 試料面上のビームスポットの軌跡	24
2.9 試料面の位置決め誤差の影響	27
2.10 位置検出素子上のビームスポットの変位	28
2.11 位置検出素子の出力の積分	30
2.12 形状測定における誤差	32
2.13 位置検出素子の出力特性	36
2.14 まとめ	39
第3章 鏡面の形状測定	41
3.1 はじめに	41
3.2 実験装置の構成	41
3.3 位置検出素子の出力特性	43
3.4 位置検出素子の出力における誤差	46
3.5 表面形状を求める式	47
3.6 平面ミラーの測定	48
3.7 ポリゴンミラーの測定	51

3.8	まとめ	52
第4章	粗面の形状測定	54
4.1	はじめに	54
4.2	試料からの反射ビームパターン	55
4.3	試料の傾斜と位置検出素子の出力の関係	59
4.4	実験装置	61
4.5	測定試験	62
4.6	粗面形状測定の数値シミュレーション	65
4.7	平面は入射による反射パターン	72
4.8	まとめ	75
第5章	表面形状特性検査装置への応用	76
5.1	はじめに	76
5.2	触針式表面形状測定器による検査	77
5.3	レーザビーム高速走査法による検査装置	82
5.4	検査装置の出力と形状特性の関係	83
5.5	検査結果	89
5.6	まとめ	92
第6章	結論	94
	謝辞	96
	参考文献	97
	本論文に関する研究発表	98

第1章 序論

1.1 研究の背景

近年の半導体、ハードディスク、その他情報機器の高度化に伴い、その関連部品が高精度化している。これらの加工部品の製造過程において加工精度を維持するためには、その部品表面の品質管理が重要である。加工部品表面の品質管理には、外観検査装置や表面形状測定装置が使われており、その検査結果を製造装置の加工条件にフィードバックすることで、より精密で高品質な加工が可能となる。また、製造される加工部品のインプロセス全数表面検査が可能ならば、工場からの不良品出荷の抑制に大いに効果がある。

従来から、インプロセスの表面検査装置として、半導体ウェハやハードディスク基板表面向けの外観検査装置が知られてる。それらは、レーザビームの散乱 [1] や CCD カメラを用いて、表面に存在する非常に微細な傷や塵を検出することができた。一方で、表面の検査として外観検査のほかに形状検査も重要な項目である。しかし、加工現場の種々の条件から、インプロセスで表面形状を検査する装置の実用例はほとんどない。

インプロセス全数表面形状検査装置を実用化するための要件として次の4点が上げられる。まず、検査される部品の商品価値を下げないために、非接触でなければならない。次に、各製造ラインにおいて形状検査の必要となる工程のすべてに形状検査装置を導入するために、安価でなければならない。次に、製造ライン内で使用するため、加工装置などからくる周囲の機械振動に影響されてはならない。最後に少なくとも1次元形状測定あるいは形状特性検出できることが要求される。なぜなら、形状検査において、研磨面の形状特性は等方的であり、また旋盤やフライス盤による加工では、切削工具の進行方向の形状特性を知ることが重要だからである。

本研究では、ポリゴンミラー (図 1.1) とアルミ製 OPC (Organic Photo Conductor: 有機光導電体) ドラム基板 (図 1.2) のためのインプロセス形

状検査装置の開発を行う．ポリゴンミラーと OPC ドラム基板はレーザプリンタや複写機などの印字機で広く使われている部品である．ポリゴンミラーは多面体ミラーであり，表面はフライス盤により切削加工された後，アルミ蒸着が施され鏡面となっている．OPC ドラム基板は，円筒形をしており，旋盤により切削加工された後，OPC を塗布され，OPC ドラムとしてプリンタなどに組み込まれる．まず，これらの部品が印字機でどのように使われているかを説明する．

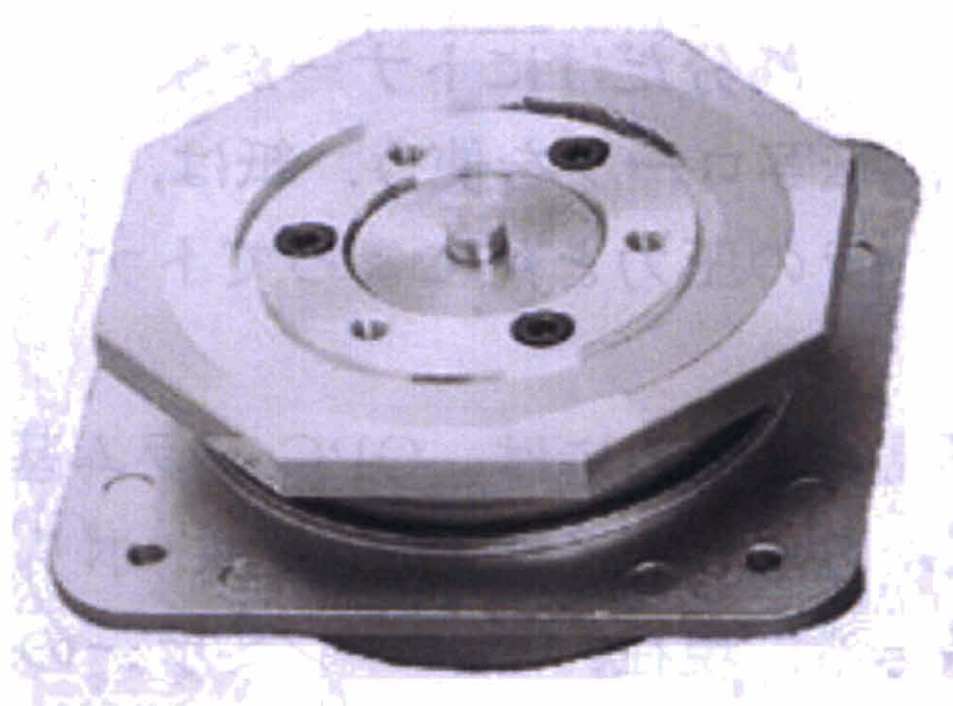


図 1.1: Appearance of a polygonal mirror.

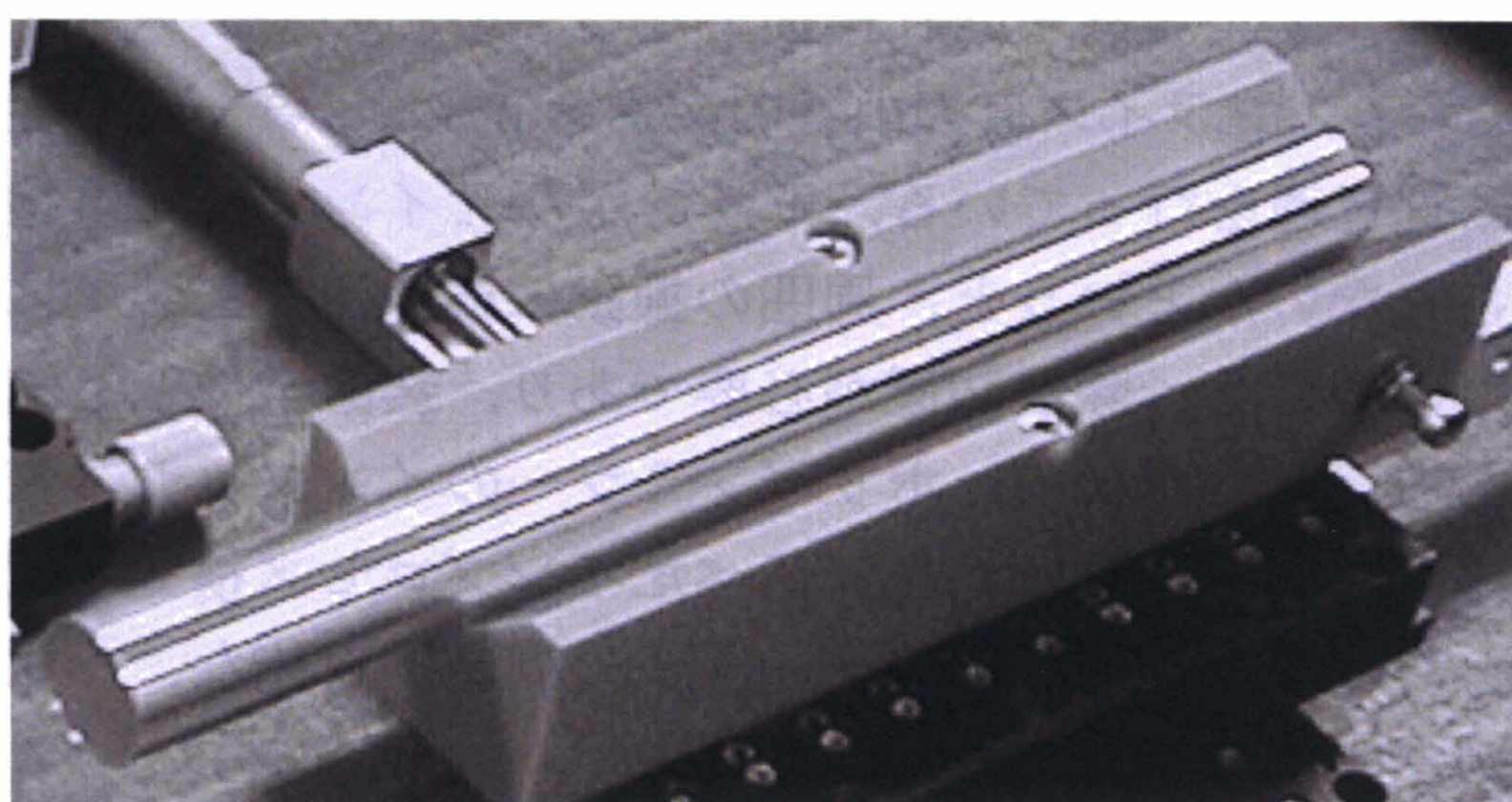


図 1.2: Appearance of an OPC drum substrate.

印字は，OPC ドラム上にトナーを乗せ，そのトナーを紙に押しつけることにより完成される．OPC ドラムにトナーを付着させるために，まず

OPC ドラム全体を帯電させる。次に、帯電した OPC ドラムに向かって、絵や文字となる部分にレーザビームを照射する。OPC ドラム上に現像される絵や文字は、レーザ光源のシャッターとポリゴンミラーの回転による OPC ドラム基板上のビームスポットの走査によって作り出される。OPC ドラムの表面に塗布されている OPC は、そこにレーザビームが照射されると、照射されていない周辺に比べ電位が下がる性質がある。そこに帯電しているトナーを近づけると、OPC ドラム上の電位の低い部分、つまり絵や文字の部分に、電氣的に引き寄せられる。このようにして、OPC ドラム上の絵や文字になる部分だけにトナーが乗るのである。紙へトナーを押しつけるために、転写ローラを使う。紙は、OPC ドラムと転写ローラに挟まれ、転写ローラの圧力と熱によってトナーが紙に移る。こうして印刷が完成する。

高精細な印字を実現するためには、OPC ドラム基板上のビームスポットが良好でなければならない。そのためには、ポリゴンミラーの表面が滑らかである必要がある。現在、ポリゴンミラーの表面形状検査は、製造過程にあるポリゴンミラーの一部を抜き取って行われている。用いる検査装置は主に干渉計である。干渉計によるポリゴンミラーの表面形状の測定結果を図 1.3 に示す。横軸はポリゴンミラー表面上の位置で、縦軸は高さ、単位は nm である。ポリゴンミラーの表面はフライス盤によって加工された後、アルミ蒸着され鏡面となっているので、スライスの切削痕が残っており、フライス痕の山谷の深さを nm オーダーで測定することにより、品質管理を行っている。干渉計がなぜインプロセス検査装置として利用されないかという点、周囲の振動に弱く、加工装置に隣接して設置できないことと、除震装置が必要であり、装置全体として高価になるためである。したがって、ポリゴンミラーのインプロセス表面形状検査装置を作成するためには、先に述べたインプロセス検査装置の条件を満たすとともに、ナノメートルオーダーの測定が可能な、つまり干渉計と同等な測定能力が必要である。

また、印字結果に斑を生じさせないためには、OPC ドラム基板の円筒軸方向の表面形状も重要である。とくに、円筒軸方向に約 1mm 周期のうねりがあると、そのうねりの山で転写ローラの圧力が高くなり、印字結果に斑を生じやすい。OPC ドラム基板の表面形状検査は現在、インプロセスでは人の肉眼による目視検査が行われている。この方法では、検査品質が安定せず、定量的な検査基準もない。定量的な形状測定は、製造過

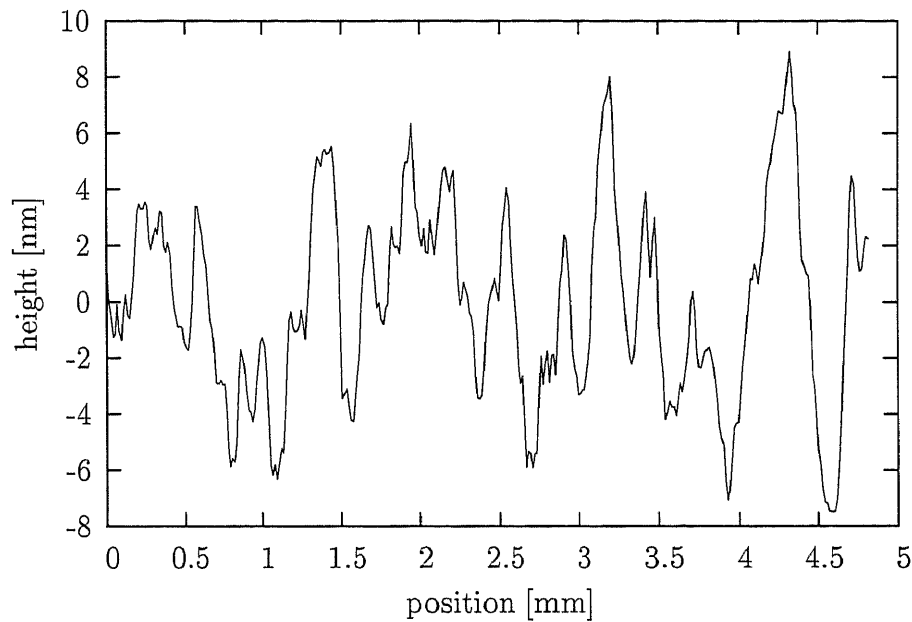


図 1.3: Surface profile of a polygonal mirror measured with the interferometer of Wyko NT3300.

程にある OPC ドラム基板の一部を抜き取って、触針式の形状測定装置で行われている。触針式の形状測定装置による測定結果を図 1.4 に示す。横軸は OPC ドラム基板の円筒軸方向の位置で、縦軸は高さ、単位は μm である。確かに約 1mm 周期のうねりがあり、このうねりの深さを測定することにより OPC ドラム基板の品質管理を行っている。触針式の形状測定装置がなぜインプロセス検査装置として利用されないかという点、まず、この測定装置が接触式であるということである。商品である OPC ドラム基板の表面に、いったん傷を付けてしまうと、それはもはや商品として出荷できない。また、プローブである針の移動速度が数 mm/s と低速で、周囲の振動に影響されやすく、加工装置に隣接して設置できない。したがって、OPC ドラム基板のインプロセス表面形状検査装置を作成するためには、先に述べたインプロセス検査装置の条件を満たすとともに、約 1mm 周期のうねりを検出し、その大きさを定量的に測定する必要がある。

そこで、ポリゴンミラーとアルミ製 OPC ドラム基板のための実用的なインプロセス表面形状検査装置を開発するため、レーザビーム高速走査法について研究した。これは、レーザビームの角度振れを検出することにより試料面の傾斜分布を測定し、その積分から 1 次元表面形状を得る

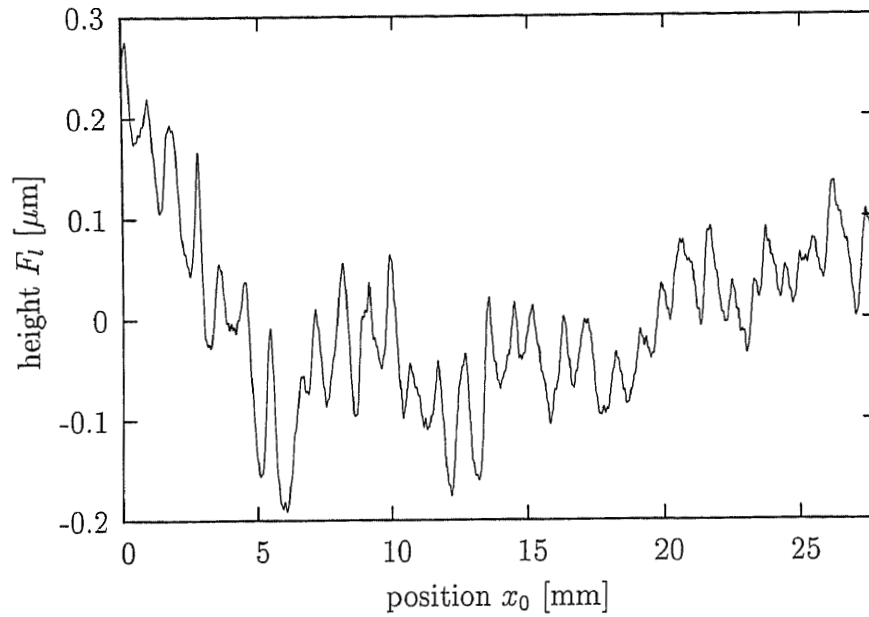


図 1.4: Surface profile of an OPC drum substrate measured by Form Talysurf-S6.

表 1.1: レーザビーム高速走査法と既存の測定装置との比較

条件	触針式	干渉計	レーザビーム 高速走査法
非接触	×	○	○
安価	△	×	○
耐振動性	×	×	○

方法と、レーザビームを高速に走査する光学系からなる。

レーザビームを用いて試料面の傾斜分布を測定する方法はすでにいくつか知られており、最近の研究として、Takacs ら [2] や Weingärtner ら [3] の方法がある。図 1.5(a) に示すように、彼らの方法は、光学系を機械的に平行移動することにより試料面上のビームスポットを走査し、試料面の傾斜分布を測定を測定するものである。測定において平行移動によるステージの機械的な誤差が含まれないような工夫がなされているが、機械的な平行移動では、移動速度が数 mm/s であり、周囲からの振動に不感になるほど高速な測定はできない。一方、図 1.5(b) に示すように、光

光学系を固定し、試料面上のビームスポットのみを走査すれば、 10^3mm/s と高速な測定が可能となる。上記をまとめると表 1.2 となる。高速にビームスポットを走査できる方法として、井村 [4] の、小さなレンズと大きなレンズでアフォーカル系を構成し、小さなレンズに入射するビームに変位を与えることにより、大きなレンズ正面の試料面上でビームスポットを走査し傾斜分布を得る方法がある。類似の光学系を、2.3 節で説明するが、レンズを用いて精密なビームの走査を行うには、光学的収差を補正された高価なレンズが必要となる。

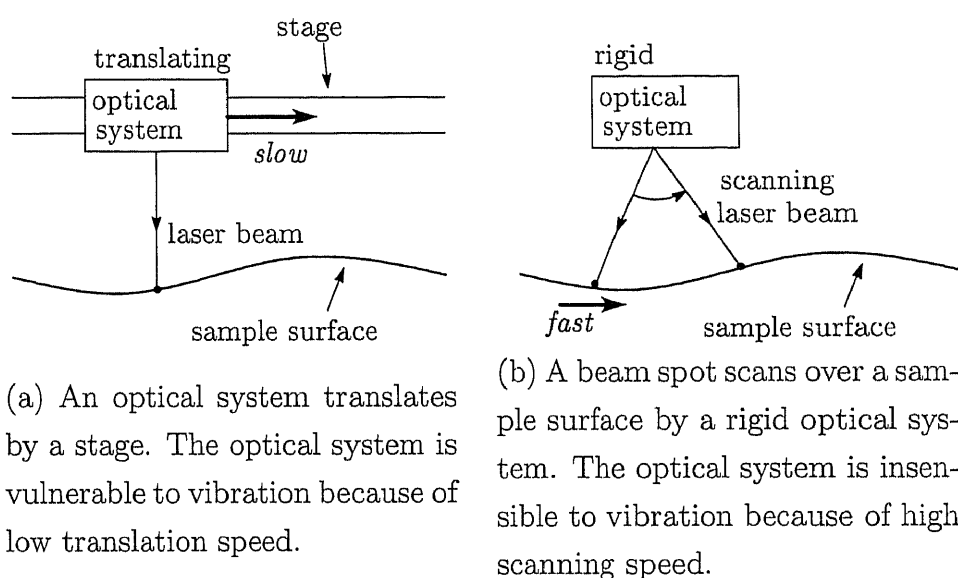


図 1.5: Comparison between the methods of Takacs *et al.* and Weingärtner *et al.*, and a scanning method.

表 1.2: レーザビーム走査法の比較の比較

	光学系	レーザービーム	ビームスポット速度	耐振動性
図 1.5(a)	移動	静止	低速	×
図 1.5(b)	静止	移動	高速	○

レーザービーム高速走査法で用いられる走査光学系は、表 1.1 に示される

ように、非接触であり、基本的には凹球面ミラーと回転するスキャナミラーから成り、安価に構成できる。また、測定時間もミリ秒オーダーと非常に高速なので、測定において除震装置は必要ない。したがって、インプロセス全数表面形状検査装置として応用が可能である。

1.2 研究の内容と論文の構成

レーザビーム高速走査法を用いる表面形状測定に関する研究は、以下の内容により構成される。

レーザビーム高速走査法では、試料面の傾斜に比例したレーザビームの角度振れを検出するために位置検出素子を用いるが、第2章では、試料面から反射したレーザビームを位置検出素子に入射させるための走査光学系を示す。走査光学系の特性を数学的に明らかにするために、走査光学系内のビーム追跡を行い、位置検出素子の出力と試料面の傾斜の関係を導く。また、位置検出素子の出力から表面形状を求めるための積分法を示し、表面形状測定における誤差解析を行う。

第3章ではレーザビーム高速走査法の基本的な測定能力を明らかにするため、鏡面としてポリゴンミラーの表面形状を測定する。まず、位置検出素子の出力が試料面の傾斜に比例することを確認する。次に平面ミラーを測定し走査光学系の歪み成分を得て測定の補正とする。除震装置なしにポリゴンミラーを測定し、干渉計との比較と、繰り返し測定によって、レーザビーム高速走査法が鏡面の測定に対し有効であることを明らかにする。

第4章で、レーザビーム高速走査法による粗面測定が可能かどうか検討する。試料としたOPCドラム基板からの反射ビームは、それが粗面のため、位置検出素子の大きさを超えて大きく広がる。レーザビーム高速走査法でOPCドラム基板を測定したところ、表面形状の振幅は一致しないが、うねり形状特性を検出できることが示される。これは、キルヒホッフ積分に基づいた数値シミュレーションによっても確かめられる。また、シミュレーションによってうねり形状を検出できる原因を解析する。

レーザビーム高速走査法が粗面測定でうねり特性を検出できることを利用して、第5章で、レーザビーム高速走査法をOPCドラム基板の形状特性検査に応用する。形状特性で不良となるOPCドラム基板は、その円筒軸方向の表面形状に約1mm周期のうねり形状を持っているので、位置

検出素子の出力のパワースペクトラムにおいて、空間周期 1mm 付近に閾値を設定すれば良品と不良品を分別できることが示される．良・不良が既知の 10 本の OPC ドラム基板に対し、除震装置を用いずに検査を行い、インプロセスの形状特性検査装置として有効であることを明らかにする．

第2章 走査光学系

2.1 はじめに

本章では、レーザビーム高速走査法で用いられる走査光学系の構成を示し、その特性を理解するために理論的な解析を行う。

まず、2.2 節で、レーザビームの角度振れから試料面の傾斜分布を測定する方法を示す。角度振れ検出は位置検出素子 PSD (Position Sensitive Detector) によって行われ、その出力を積分することにより試料面の表面形状が得られる。試料面の傾斜分布を高速に測定するために、レーザビームを走査する光学系が必要だが、2.3 節で回転するスキャナミラーとレンズを用いる走査光学系と、凹球面ミラーを用いる走査光学系を比較する。レンズを用いる走査光学系で精密なレーザビームの走査を行うためには高価なレンズが必要だが、凹球面ミラーを用いた走査光学系は安価に構成できるので、レーザビーム高速走査法では後者の走査光学系を採用する。節 2.4 では、凹球面ミラーとスキャナミラーを用いた実際的な走査光学系が示される。試料面で反射したレーザビームの角度振れは、凹球面ミラーの共役面である検出面と呼ばれる面で検出される。試料面の配置のために示される実際的な走査光学系には、凹球面ミラーの球面収差と、スキャナミラーの回転角による誤差が含まれている。これらは 2.5 節から 2.7 節で解析される。実際的な走査光学系では可能な光学部品の配置のために凹球面ミラーが光軸に対して傾いている。そのため試料面上のビームスポットの軌跡が湾曲する。その度合いは 2.8 節で求める。試料面に位置決め誤差があると、凹球面ミラーの共役面と検出面が一致しなくなる。この誤差が検出面上のビームスポットの変位に与える影響は、2.9 節で評価する。実際的な走査光学系では、検出面はレンズによって位置検出素子上で像になる。しかし、レンズと検出面の間には回転するスキャナミラーがあるので、レンズの共役面と検出面は一致しない。この効果を考慮した位置検出素子上のビームスポットの変位は、2.10 節で求める。位置検出素子の出力は一定時間間隔でサンプリングされコンピュータに送

られる．一方，スキャナミラーも一定の角速度で回転しているので，試料面上の空間的サンプリング間隔は一定にならない．この影響を考慮した傾斜分布の積分法は2.11節に示される．上記の解析によって得られた位置検出素子上のビームスポットの変位に含まれる試料の傾斜分布に比例しない成分は傾斜分布測定における誤差となる．節2.12で，ある傾斜分布を仮定して，それを積分することにより形状測定における誤差を評価する．節2.13で，位置検出素子上のビームスポットの変位と重心位置の関係を，位置検出素子上のビームスポットの強度分布がガウシアンの場合について解析する．

2.2 傾斜分布および形状測定の原理

試料面の傾斜によって生じるレーザビームの角度振れを検出することにより，1次元の傾斜分布を測定し，それを積分することにより表面形状を得る装置の原理を図2.1に示す．これは，基本的に Evans の傾斜分布測定法 [5] と同様な方法である．

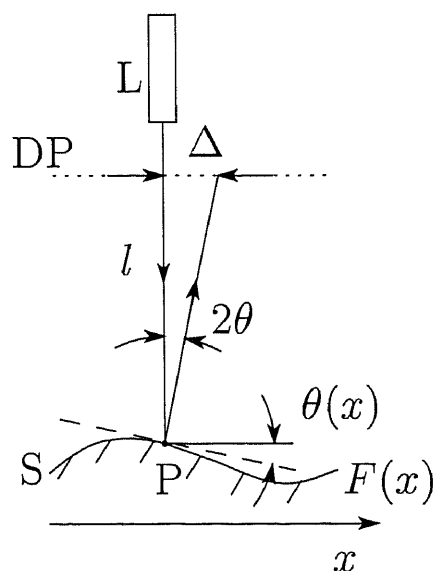


図 2.1: Basic schematic for measurement of a one-dimensional surface profile by detection of angular deflection of a laser beam.

図 2.1 で示されるように光源 L から放射されたレーザビームは試料面 S に入射し、試料面 S 上のビームスポットが x 軸方向に走査する。このとき入射ビームは x 軸に垂直とする。試料面 S の x 軸に沿った 1 次元表面形状および傾斜分布を、図 2.1 に示すように、それぞれ $F(x)$, $\theta(x)$ とする。もし試料面 S 上の各点で $\theta(x) \ll 1$ ならば、1 次元表面形状 $F(x)$ の微分は、

$$\frac{dF(x)}{dx} = \tan \theta(x) \sim \theta(x), \quad (2.1)$$

で与えられる。

今、ビームが試料面 S 上の点 P に入射しているとする。点 P における x 軸方向の傾斜が θ ならば、点 P からの反射ビームは入射ビームと 2θ の角をなす。この反射ビームの角度振れ 2θ は、点 P から距離 l にあり x 軸に平行な面 DP で変位、

$$\Delta = 2\theta l, \quad (2.2)$$

として検出される。面 DP は図 2.1 で点線で示される。この反射ビームの角度振れによる変位 Δ の測定を x 軸に沿った試料面 S 上の各点で実行すれば、変位分布 $\Delta(x)$ を測定できる。この変位分布 $\Delta(x)$ と式 (2.1) は、次式のとおりの 1 次元表面形状 $F(x)$ を与える：

$$F(x) = \int \theta(x) dx = \frac{1}{2l} \int \Delta(x) dx. \quad (2.3)$$

変位分布 $\Delta(x)$ を高速に測定するために、位置検出素子を用いる。位置検出素子の出力 V_p は、その受光面に入射したビームスポットの重心位置に比例するので、面 DP に位置検出素子を配置すれば変位 Δ に比例した値を得ることができる。したがって、式 (2.2) より位置検出素子の出力 V_p と試料面の傾斜 θ の間には、

$$V_p = \alpha \theta, \quad (2.4)$$

の関係がある。ここで α は比例定数である。この比例定数 α は、他で測定された既知の表面形状との比較するか、試料面の傾斜 θ に対する位置検出素子の出力 V_p を測定することで決定できる。比例定数 α を決定すれば、位置検出素子の出力 V_p から、

$$F(x) = \frac{1}{\alpha} \int V_p(x) dx, \quad (2.5)$$

の積分で 1 次元表面形状を計算できる。

2.3 走査光学系の比較

試料面の傾斜によって生じるレーザビームの角度振れによる面 DP 上の変位分布 $\Delta(x)$ を 2.2 節に示される方法にしたがって高速に測定するためには，ビームスポットを試料面 S 上で高速に走査し，反射ビームをすべて位置検出素子に到達させなければならない．この測定を実現する光学系を 2 つ上げ比較する．

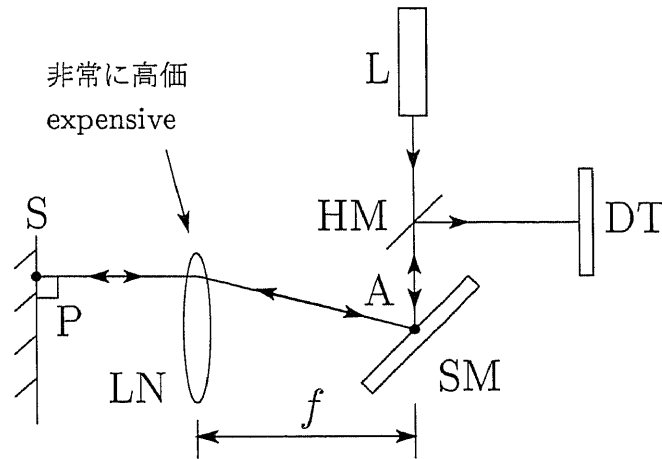


図 2.2: Optical system for scanning a laser beam by use lens LN and scanner mirror SM. The focal distance of lens LN is f .

まず 1 つは，図 2.2 に示されるレンズを用いた走査光学系である．光源 L から放射されたレーザビームは，スキャナミラー SM の回転軸 A に入射する．スキャナミラー SM の回転軸 A はレンズ LN の焦点距離 f に配置されているので，スキャナミラー SM からの反射ビームは，スキャナミラー SM の回転角とは無関係に，レンズ LN と平行に配置された試料面 S 上の点 P に対して垂直に入射する．もし試料面 S が平坦ならば，そこからの反射ビームは入射ビーム光路 A-LN-P を正確に遡る．反射ビームを位置検出素子 DT に入射させるためには，光源 L とスキャナミラー SM の間にハーフミラー HM を挿入すればよい．この走査光学系によって正確なビームの走査と測定を行うためには，レンズ LN の光学的収差が高度に補正されている必要がある．そのようなレンズは非常に高価なので，安価な測定装置を作成するためには他の走査光学系を考えるべきである．

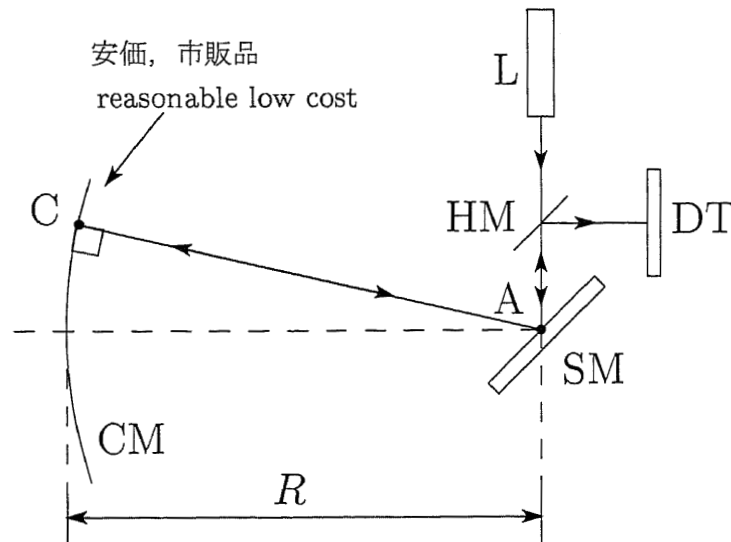


図 2.3: Conceptual optical system for scanning a laser beam by use of spherical concave mirror CM and scanner mirror SM , where R is the radius of curvature of the concave mirror.

もう1つは、図 2.3 に示される、凹球面ミラーを用いる走査光学系である。スキャナミラー SM の回転軸 A は、凹球面ミラー CM の曲率中心と一致している。ここで凹球面ミラー CM の曲率半径は R である。光源 L から放射されたレーザービームは、スキャナミラー SM の回転軸 A に入射する。スキャナミラー SM からの反射ビームは、スキャナミラーの回転角とは無関係に凹球面ミラー CM 上の点 C に垂直に入射する。凹球面ミラー CM からの反射ビームは、入射ビーム光路 L - A - C を正確に遡る。したがって、位置検出素子 DT 上のビームスポット位置は、スキャナミラー SM の回転角と無関係に一定である。この凹球面ミラー CM とスキャナミラー SM を用いた走査光学系は、光学的な補正を加えなくとも、球面収差がなくかつ無色で、しかも凹球面ミラーは市販品で十分なので、図 2.2 で示されるレンズを用いた走査光学系に比べ安価に作成できる。

したがって、レーザービーム走査法では、凹球面ミラーを用いた走査光学系を採用することにした。

2.4 走査光学系

図2.3で示した走査光学系には試料面が存在しないので、ここで試料面の傾斜によって生じるレーザビームの角度振れによるビームスポットの変位 Δ を検出するために、試料面を走査光学系の中にどのように配置すればよいかを検討する。

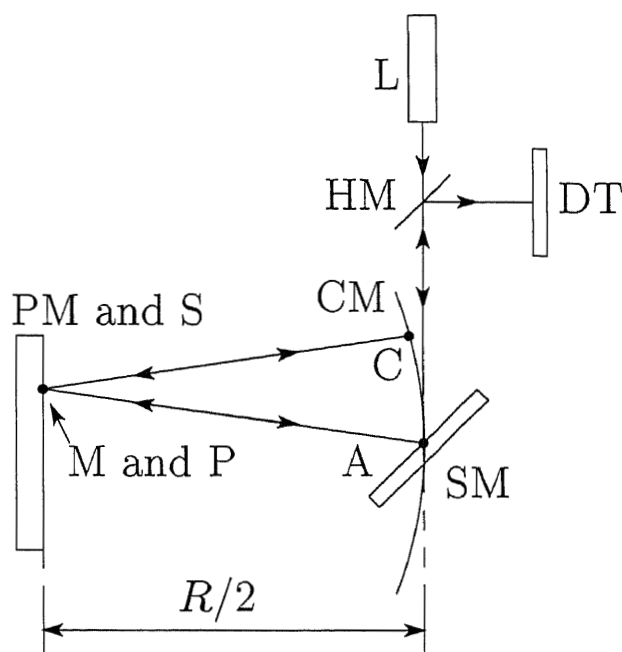


図 2.4: Introduction of plane mirror PM and sample surface S into Fig.2.3. Plane mirror PM and sample surface S are put into incident path A-C and reflected path C-A, respectively. Point M and P are on plane mirror PM and sample surface S, respectively.

図2.4は、図2.3で示される走査光学系の入射ビーム光路 A-C と反射ビーム光路 C-A のそれぞれに、平面ミラー PM と試料面 S を挿入した走査光学系を示している。光源 L から放射されたレーザビームはスキャナミラー SM の回転軸 A に入射し、その反射ビームは、平面ミラー PM 上の点 M を経由して凹球面ミラー CM 上の点 C に入射する。凹球面ミラー CM からの反射ビームは、試料面 S 上の点 P を経由して再びスキャナミラー SM に入射する。スキャナミラー SM が回転することにより試料面 S

上のビームスポットは移動する．もし平面ミラー PM と試料面 S が平坦ならば，試料面 S からの反射ビームは，入射光路を正確に通り，位置検出素子 DT 上のビームスポット位置はスキャナミラーの回転角とは無関係に一定となる．

ここで入射光路長 $L_i = |A-M-C|$ と反射光路長 $L_r = |C-P-A|$ を定義する．凹球面ミラーの性質から無収差な走査光学系の条件は $L_i = L_r = R$ であり，図 2.4 に示される走査光学系はこの条件を満たしている．さらに，光源 L がコリメートされたビームを放射したときに試料面 S 上のビームスポットを最小にするため，つまり傾斜分布測定における横分解能を最大にするために，凹球面ミラー CM と試料面 S の距離を $R/2$ とする．これは凹球面ミラー CM の焦点距離である．

しかし，図 2.4 に示される配置の走査光学系は，平面ミラー PM と試料面 S が同一面内で重なっているため，実際に配置は不可能である．そこで，次に平面ミラー PM と試料面 S と凹球面ミラー CM の可能な配置について考える．図 2.5 に z - x 平面内における可能な配置を示す．ここでデカルト座標系を図 2.5 内左上に示されるように定義する．また，光軸は z 軸に一致しており，試料面 S 上のビームスポットの移動は x 軸に平行である．

図 2.4 と比較すると，図 2.5 では凹球面ミラー CM と試料面 S は互いの距離を $R/2$ に保ちながら，スキャナミラー SM から光軸に沿って離れている．このとき，試料面 S と平面ミラー PM 間の距離は光軸に沿って ΔL であるとする．図 2.5 に示される配置では $L_i = L_r = R$ の条件はもはや満たされないため，たとえ試料面 S が平坦であったとしても，試料面 S 上の点 P で反射したビームは，光源 L から放射されたビームが入射した位置であるスキャナミラー SM の回転軸 A にもどらない．しかし，2.5 節以下で述べる条件に従って ΔL を選ぶと，スキャナミラー SM の回転軸 A を含む x - y 平面において，ビームスポットの変位を最小にできる．この x - y 平面を検出面，DP，と呼ぶことにする．この検出面 DP におけるビームスポットのわずかな変位は，凹球面ミラー CM の球面収差に由来する．球面収差が試料面 S の傾斜分布測定に与える影響については，2.5 節以下で議論する．

検出面 DP 上の点 A と試料面 S 上のビームスポット点 P の距離は，スキャナミラー SM の回転角によって変化するため，試料面 S の傾斜 θ によって生じるビームスポットの変位 Δ は，厳密には $2l\theta$ に等しくない．ここで l は試料面 S と検出面 DP の距離である．この $2l\theta$ からのずれについ

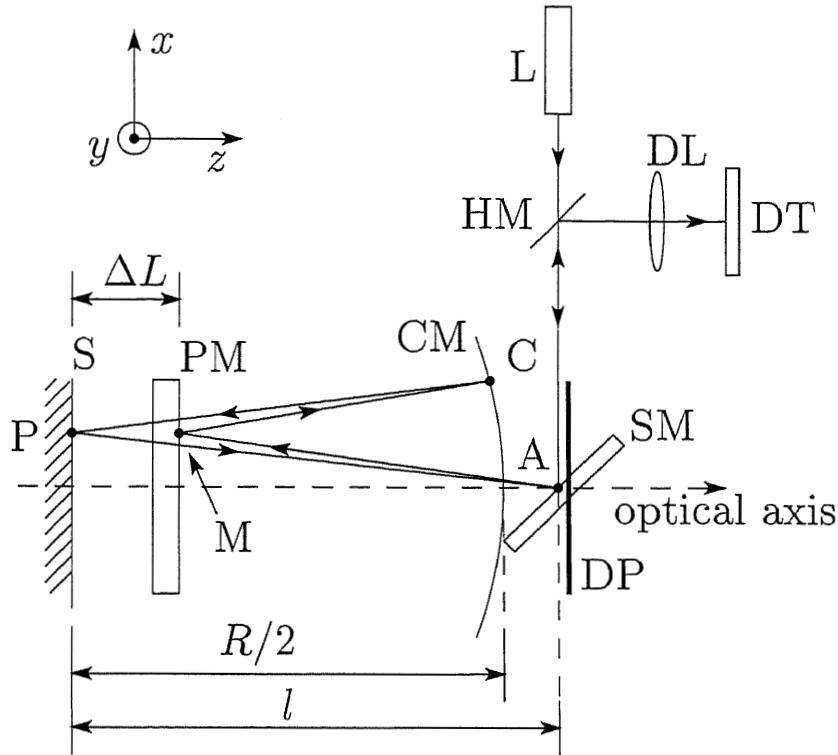


図 2.5: Separation of sample surface S and plane mirror PM in Fig.2.4. Sample surface S is detached from plane mirror PM by ΔL , with the distance between CM and S maintained at $R/2$.

ては、2.7節以下で議論する。

図 2.5 においてはすべてのビーム経路が z - x 面上に含まれ、凹球面ミラー CM と平面ミラー PM がビーム経路を遮っているため、この走査光学系は依然として現実的でない。本論文の実験において実際に使用した走査光学系を図 2.6 に示す。矩形に加工された凹球面ミラー CM は、ビーム経路 A-M を妨げないように、 y 軸方向に位置を変えてある。ビーム経路 M-C は y 軸方向に傾いている。これは平面ミラー PM 上の点 M に入射したビームが凹球面ミラー CM 上の点 C に到達するように、平面ミラー PM が x 軸と平行で点 M を含む軸の周りで傾いているからである。また、平面ミラー PM がビーム経路 C-P を遮らないように、凹球面ミラー CM も x 軸に平行で点 C を含む軸の周りで傾いている。ビーム経路 A-M と P-Q は互いに離れているが、試料面 S を x 軸に平行で点 P を含む軸の周りで傾けることにより、互いに平行である。ここで点 Q はスキャナミ

ラー SM の回転軸上の点である．上記の配置を施すと，スキャナミラー SM の回転によって生じる試料面 S 上のビームスポット点 P の軌跡は直線から逸脱する．これは 2.8 節以下で議論する．試料面 S 上におけるビームスポット径の微調整は，レンズ FL で行われる．

走査光学系の外観は，図 2.7 および図 2.8 に示される．

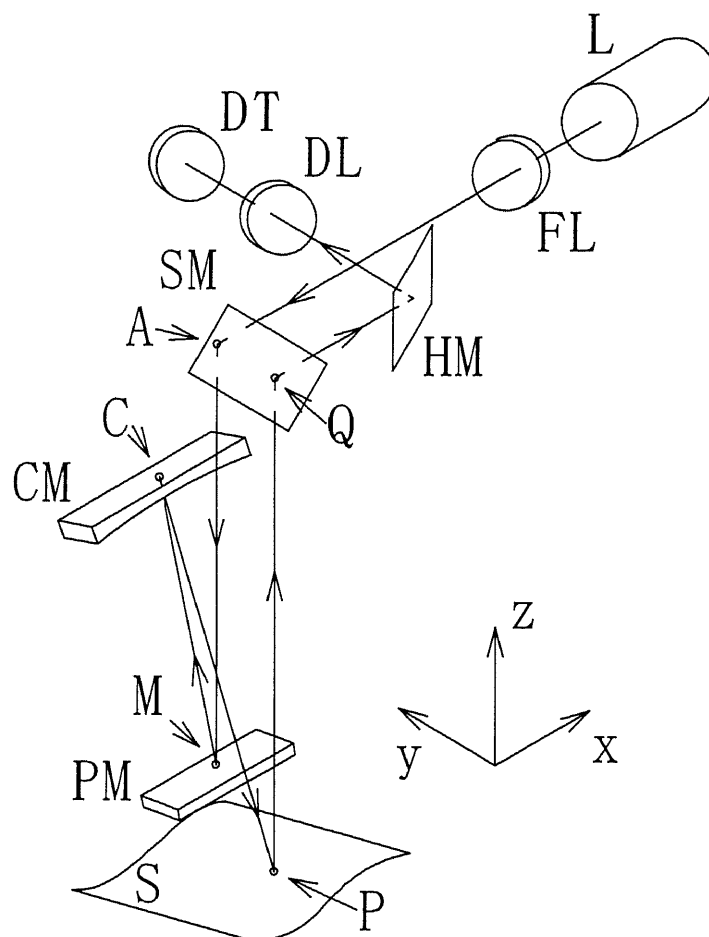


図 2.6: Optical system modified from Fig.2.5. Concave mirror CM is given a displacement and a rotation. Plane mirror PM and sample surface S are given different rotations. Beam paths PM-CM and CM-S are inclined toward y direction.

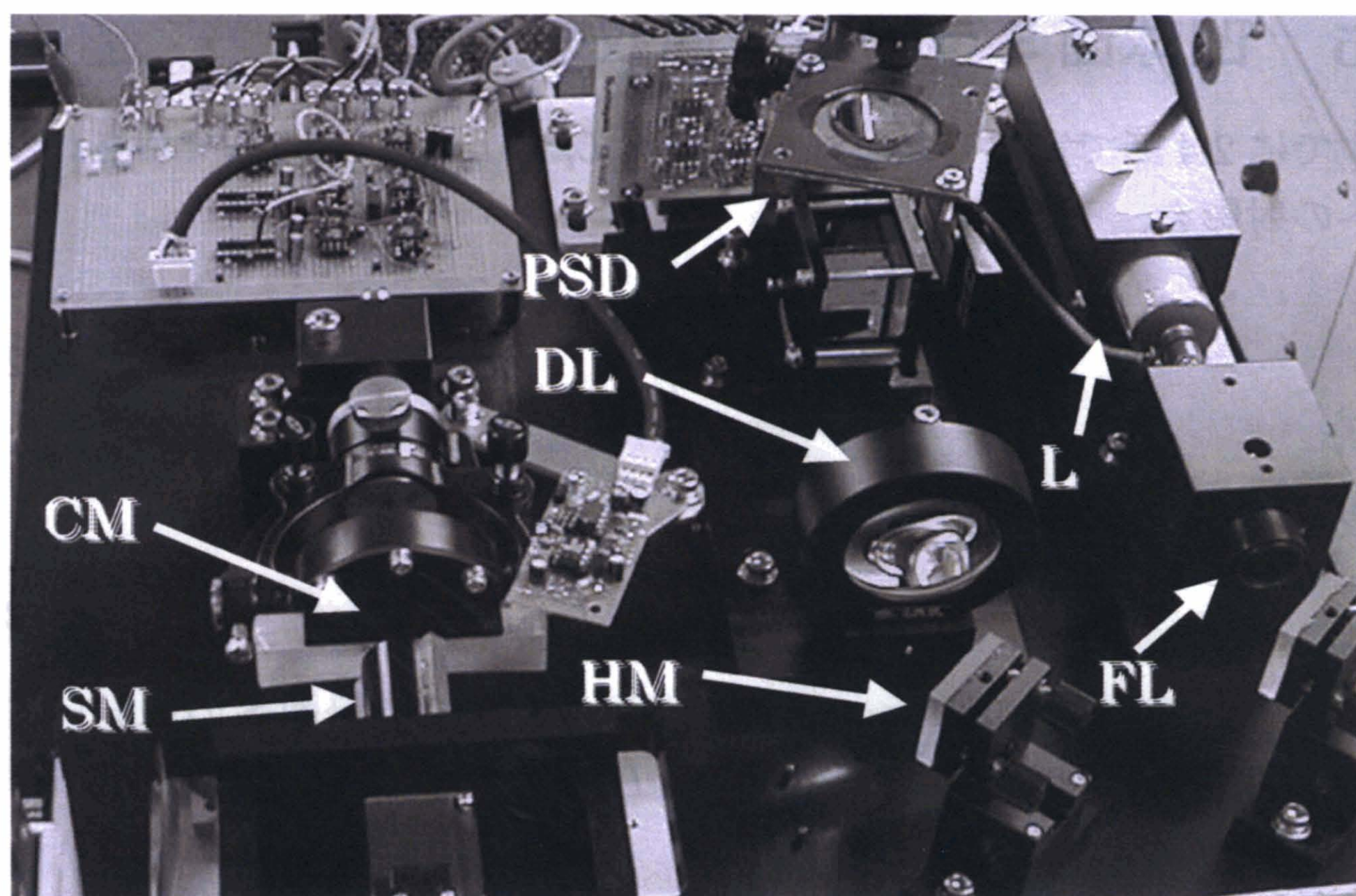


图 2.7: Appearance of the scan optical system of the fast scanning method.

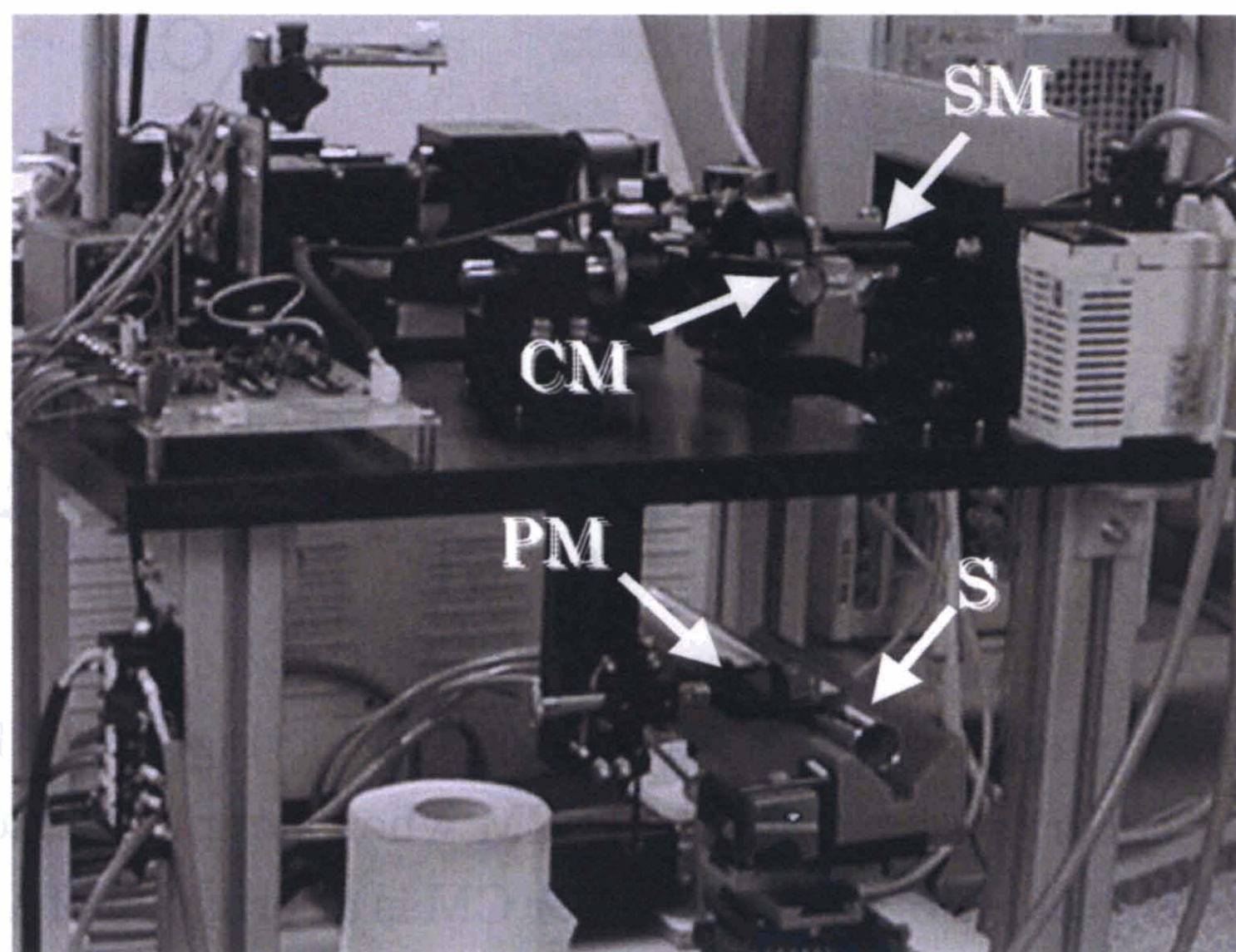


图 2.8: Appearance of the scan optical system of the fast scanning method.

2.5 凹球面ミラーの球面収差

すでに2.4節で定義したビーム光路長 L_i と L_r の，図2.5で示される光軸への射影を，それぞれ，

$$\begin{aligned} L_{0i} &= l + \frac{R}{2} - 2\Delta L, \\ L_{0r} &= l + \frac{R}{2}, \end{aligned} \quad (2.6)$$

と表せば，それらの間には，

$$L_{0r} - L_{0i} = 2\Delta L > 0, \quad (2.7)$$

の関係がある．図2.5に示される検出面 DP 上で試料面 S の傾斜によるビームの変位 Δ を検出するためには， L_{0i} と L_{0r} は凹球面ミラー CM の共役距離であり，

$$\frac{1}{L_{0i}} + \frac{1}{L_{0r}} = \frac{2}{R}, \quad (2.8)$$

を満たす必要がある．検出面 DP がなぜ凹球面ミラー CM の共役面でなければならないのかは，2.6節で詳しく検討する．

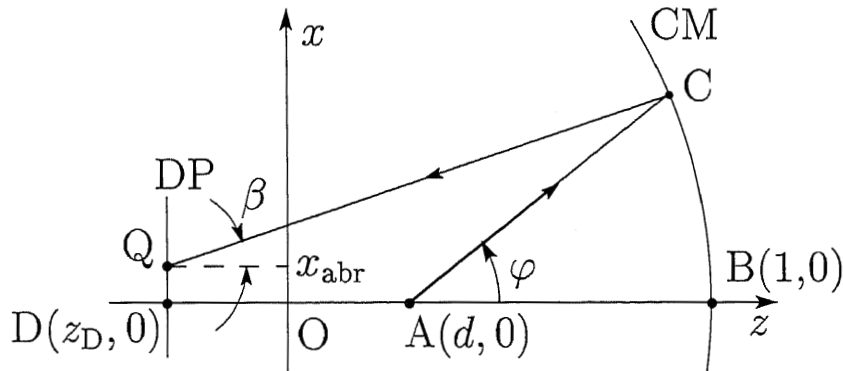


図 2.9: Displacement of the beam spot on detecting plane DP by the aberration of spherical concave mirror CM when sample surface S is flat. The center of curvature of concave mirror CM is at origin O of a Cartesian-coordinate system. Rotation axis A of scanner mirror SM and detecting plane DP is placed at conjugate points of CM.

試料面 S の傾斜分布測定における式 (2.7) の影響を導出するために，図 2.5 を図 2.9 の様に簡単な形に変形する．凹球面ミラー CM の曲率中心は

z - x 平面の原点 O に一致している．以降の計算では，凹球面ミラー CM の曲率半径 R を 1 として規格化する．そのため凹球面ミラー CM と z 軸の交点 B の座標は $B(1,0)$ である．図 2.5 のスキャナミラー SM の回転軸は，図 2.9 において点 $A(d,0)$ とする．点 A から放射されたビームは凹球面ミラー CM 上の点 C に入射する．このビーム経路 A - C は，図 2.5 においてビーム経路 A - M - C から平面ミラー PM を取り除いたビーム経路に相当する．ビーム経路 A - C と z 軸のなす角を φ とする．この角 φ は，スキャナミラーの回転に伴って変化するので，走査角と呼ぶことにする．

凹球面ミラー CM 上の点 C からの反射ビームは検出面 DP 上の点 Q に入射する．このビーム経路 C - Q は，図 2.5 においてビーム経路 C - P - A から試料面 S を取り除いたビーム経路に相当する．図 2.5 から平面ミラー PM と試料面 S を取り除いた状態は平坦な試料面 S を測定するのと等価である．式 (2.7) と式 (2.8) から導かれる関係 $L_{0r} > R > L_{0i}$ から，スキャナミラー SM の回転軸 A の z 軸座標は $0 < d \ll 1$ であり，また L_{0i} は $L_{0i} = 1 - d$ と表すことができる．検出面 DP と z 軸の交点 D の座標を $D(z_D, 0)$ とすれば， L_{0r} は $L_{0r} = 1 - z_D$ と表せ，式 (2.8) から，

$$z_D = -\frac{d}{1-2d} < 0, \quad (2.9)$$

が導かれる．検出面上 DP 上のビームスポット位置 Q は走査角 φ で変化する．ビームスポット点 Q の点 D からの変位は，凹球面ミラー CM の球面収差によって生じる．この変位は，

$$x_{abr} = -d^2\varphi^3, \quad (2.10)$$

で与えられる．ここで $\varphi \ll 1$ である．反射ビーム C - Q と z 軸のなす角 β は，走査角 φ とわずかに異なり，

$$\beta = (1 - 2d)\varphi, \quad (2.11)$$

で与えられる．距離 ΔL と d には，式 (2.7) と式 (2.9) から導かれる，

$$2\Delta L = -z_D + d \sim 2d, \quad (2.12)$$

の関係がある．従って，式 (2.10) と式 (2.12) から，凹球面ミラー CM の球面収差が試料面 S の傾斜分布測定に与える影響は，平面ミラー PM と試料面 S の間の距離 ΔL と走査角 φ の最大値により制限される．また表面形状測定に与える影響については 2.12 節で議論する．

2.6 ビーム追跡による検出面の位置決定

ここでは、試料面 S の傾斜によって生じるレーザービームの角度振れによるビームスポットの変位を検出するのに適切な検出面 DP の位置を光線追跡で求め、それが凹球面ミラーの共役面に一致することを示す。また、同時に検出面 DP における球面収差の影響を厳密に計算する。計算は、図 2.9 にいくつかの変数を追加した図 2.10 に基づいて行う。

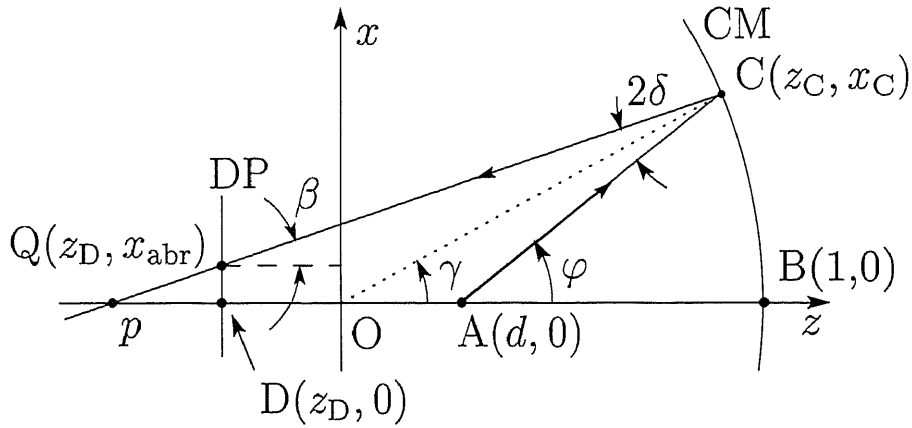


図 2.10: Following parameters are added on Fig.2.9. Angle γ is formed with line segment O-C and A-C, and angle δ is formed with beam path C-Q and A-C. The coordinate of point C on concave mirror CM is denoted by $C(z_C, x_C)$.

まず凹球面ミラー CM 上の点 $C(z_C, x_C)$ の座標を求める。これは線分 A-C, $z = x / \tan \varphi + d$ と、凹球面ミラー CM の表面, $z^2 + x^2 = 1$ の交点から、

$$z_C = \cos \varphi (d \sin \varphi \tan \varphi + \sqrt{1 - d^2 \sin^2 \varphi}), \quad (2.13)$$

$$x_C = \sin \varphi (-d \cos \varphi + \sqrt{1 - d^2 \sin^2 \varphi}), \quad (2.14)$$

である。

つぎに、凹球面ミラー CM 上の点 C で反射するビーム経路 C-Q を表す式を求める。このビームと x 軸のなす角を β , z 軸との切片を p とすると、求める式は $z = x / \tan \beta + p$ と書ける。直線 A-C と直線 C-Q のなす角を 2δ とすると、 $\beta = \varphi - 2\delta$ である。一方、線分 O-C と z 軸のなす角を γ と

すると $\beta = \gamma - \delta$ と書ける. これら2式から δ を消去すると,

$$\beta = 2\gamma - \varphi, \quad (2.15)$$

を得る. 角 γ が $\tan \gamma = x_C/z_C$ で表せることを利用すると, $\tan \beta(\varphi)$ は, 式(2.13)と式(2.14)を使って,

$$\tan \beta(\varphi) = \tan \varphi \frac{1 - 2d^2 \sin^2 \varphi - 2d \cos \varphi \sqrt{1 - d^2 \sin^2 \varphi}}{1 - 2d^2 \sin^2 \varphi + 2d \sin \varphi \tan \varphi \sqrt{1 - d^2 \sin^2 \varphi}} \quad (2.16)$$

と書ける. もし, $\varphi \ll 1$ かつ $d \ll 1$ ならば角 β を表す式として式(2.11)が得られる. 切片 p は直線 C-Q が C(z_C, x_C) を通ることを利用して $z_C = x_C / \tan \beta(\varphi) + p$ から,

$$p(\varphi) = -\frac{d}{1 - 2d^2 \sin^2 \varphi - 2d \cos \varphi \sqrt{1 - d^2 \sin^2 \varphi}}, \quad (2.17)$$

となるので, 凹球面ミラー CM 上の点 C で反射するビーム経路 C-Q を表す式は,

$$z = \frac{x}{\tan \varphi} \frac{1 - 2d^2 \sin^2 \varphi + 2d \sin \varphi \tan \varphi \sqrt{1 - d^2 \sin^2 \varphi}}{1 - 2d^2 \sin^2 \varphi - 2d \cos \varphi \sqrt{1 - d^2 \sin^2 \varphi}} - \frac{d}{1 - 2d^2 \sin^2 \varphi - 2d \cos \varphi \sqrt{1 - d^2 \sin^2 \varphi}}, \quad (2.18)$$

である.

次に, 検出面 DP の z 座標 z_D を決定する. より正確な傾斜分布測定を行うために, 走査角 φ が変化による検出面 DP 上の点 Q の変位が最小になるような検出面 DP の位置 z_D を選びたい. そのためには, $\varphi = 0$ のときに x が停留値となる z 座標を z_D として求めればよい. 式(2.18)を x で解き, φ で微分し, $\varphi = 0$ を代入すると,

$$\left. \frac{dx}{d\varphi} \right|_{\varphi=0} = (1 - 2d) \left(z_D + \frac{d}{1 - 2d} \right) = 0, \quad (2.19)$$

となる. これを z_D について解いて,

$$z_D = -\frac{d}{1 - 2d}, \quad (2.20)$$

という傾斜分布測定に最適な検出面 DP の位置を得る. この位置の検出面 DP は式(2.8)から凹球面ミラー CM の共役面になっていることがわかる.

測定面 DP の位置が $z = z_D$ のとき, 角 φ の変化によって生じる測定面 DP 上の点 Q の x 座標, $x(\varphi) = \tan \beta(\varphi)(z_D - p(\varphi))$ は,

$$x_{abr}(\varphi) = 2d^2 \tan \varphi \times \frac{-1 + \cos \varphi \sqrt{1 - d^2 \sin^2 \varphi} + d \sin^2 \varphi}{(1 - 2d)(1 - 2d^2 \sin^2 \varphi + d \sin \varphi \tan \varphi \sqrt{1 - d^2 \sin^2 \varphi})}, \quad (2.21)$$

である. これは凹球面ミラー CM の収差によって生じる. もし, $d \ll 1$ かつ $\varphi \ll 1$ ならば, 式 (2.21) は最低次で式 (2.10) となる.

2.7 検出面におけるビームの変位

この節では, 試料面 S 上の傾斜によって, 検出面 DP 上のビームスポットがどれだけ変位するかを求める. 図 2.11 は, 図 2.9 に試料面 S を検出面 DP から距離 l の位置に挿入した状態を示している.

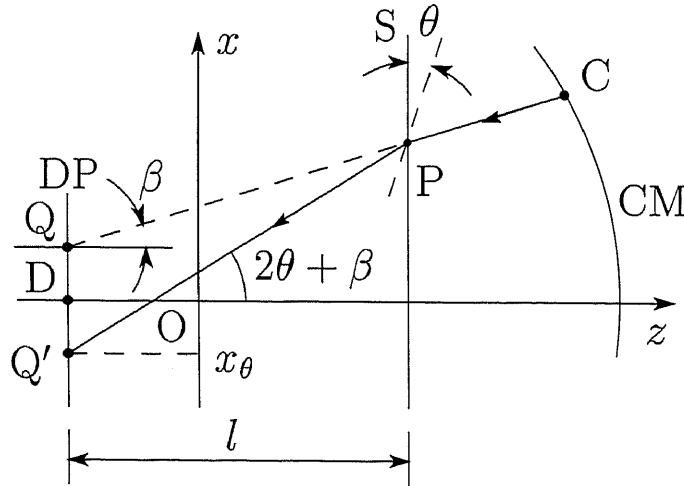


図 2.11: Deflection of the beam spot on detecting plane DP. Sample surface S is inserted into beam path C-Q. The traveling direction of the reflected beam is changed at point P owing to slope θ of sample surface S.

いま, 図 2.11 において試料面 S 上の点 P がレーザビームによって探査されているとする. もし試料面 S が平坦ならば, 凹球面ミラー CM 上の点

Cからの反射ビームは点Pを通過して直進し、検出面DP上の点Qに到達する。このビームは、図2.11において、破線P-Qで表示されており、図2.9で示される状態と等価である。一方、点Pにおける試料面Sの傾斜が θ ならば、ビームは点Pで進行方向を 2θ だけ変えられ、検出面DP上の点Q'に到達する。このとき、ビーム経路P-Q'と z 軸のなす角は $2\theta + \beta$ である。

図2.11から、検出面DP上のビームスポット点Q'の x 座標 x_θ は、

$$x_\theta = l \tan \beta - l \tan(2\theta + \beta) + x_{abr}, \quad (2.22)$$

である。ここで、 x_{abr} は式(2.10)で得られた凹球面ミラーCMの球面収差である。式(2.22)を φ 、 d および θ の最低次数で展開すると、式(2.11)を使って、

$$x_\theta = -2l\theta - 2l\theta\varphi^2 + x_{abr}, \quad (2.23)$$

となる。ここで、 $\theta \ll 1$ 、 $\varphi \ll 1$ および $d \ll 1$ である。式(2.23)の第1項は試料面の傾斜分布を測定するために必要な項である。第2項は、点Pと試料面上の点Dが走査角 φ によって変化するために生じる。第2項が傾斜分布測定に与える影響は、3.4節で示されるように、最大走査角 φ_{\max} を制限を加えれば無視される。また、表面形状測定に与える影響については2.12節で議論する。

2.8 試料面上のビームスポットの軌跡

図2.6で示されるように、凹球面ミラーCMへの入射ビーム経路A-M-Cと反射ビーム経路C-P-Qは、走査光学系において同一面内に存在しない。その結果、試料面S上を走査するビームスポットの軌跡は直線から逸脱する。ここでは、その逸脱量を求める。

図2.6で示される走査光学系の y - z 平面への射影を図2.12に示す。凹球面ミラーCMの曲率中心を y - z 座標系の原点Oとする。実線A-M-C-P-Qは走査角 φ が $\varphi = 0$ のときのビーム経路である。このときビーム経路A-MとP-Qは z 軸に平行とする。ビーム経路M-Cと z 軸のなす角を $\xi - \gamma$ とすると、平面ミラーPMは x 軸に平行で点Mを含む軸の周りで $(\xi - \gamma)/2$ だけ傾いている。点Cからの反射ビーム経路C-Pと z 軸のなす角は、反射の法則より $\xi + \gamma$ である。試料面S上の点Pで反射したビームをスキャ

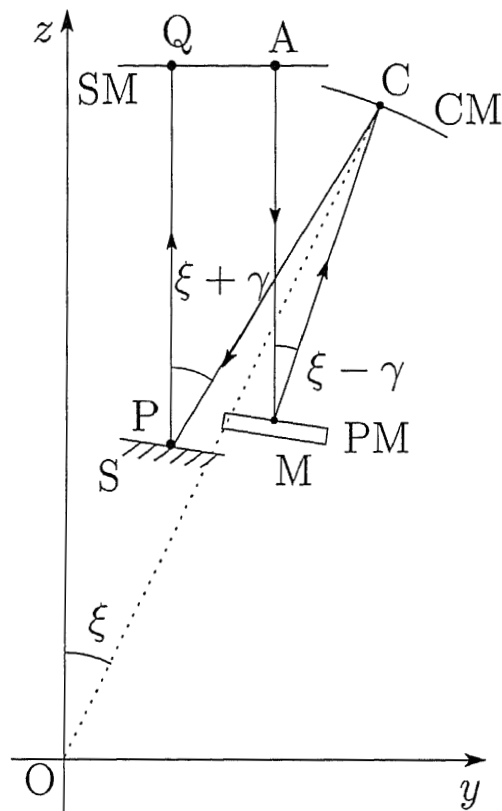


图 2.12: Projection of Fig.2.6 to y - z plane.

ナミラー SM 上の点 Q に戻すために、試料面 S は x 軸に平行で点 P を含む軸の周りで $(\xi + \gamma)/2$ だけ傾いている。

試料面 S 上のビームスポットの軌跡の直線からの逸脱量を計算するには、試料面 S と試料面 S へ入射するビーム C-P の交点の y 座標 y_p を図 2.9 で示される走査角 φ の関数として求めればよい。簡単のために、 $\xi \ll 1$, $\gamma \ll 1$ とする。さらに経路長 A-M-C は凹球面ミラー CM の曲率半径と等しい 1 とし、平面ミラー PM 上の点 M はその中点とする。また、試料面 S は x - y 平面に平行で、試料面 S 上の点 P の z 座標は平面ミラー上 PM の点 M の z 座標と等しいとする。

上記の条件より，平面ミラー PM 上の点 M の座標 $M(x_M, y_M, z_M)$ は，

$$\begin{aligned} x_M &= \frac{\varphi}{2}, \\ y_M &= \frac{\xi + \gamma}{2} - \frac{\xi\gamma(\xi - \gamma)}{4}, \\ z_M &= \frac{1}{2} - \frac{\xi^2 + 2\xi\gamma - \gamma - 2}{4}, \end{aligned} \quad (2.24)$$

である．直線 M-C の式は，ビーム経路 M-C が z - x 平面に対し $\xi - \gamma$ ， y - z 平面に対して φ 傾いており，点 $M(x_M, y_M, z_M)$ を通ることから，

$$\frac{x - x_M}{\tan \varphi} = \frac{y - y_M}{\tan(\xi - \gamma)} = z - z_M, \quad (2.25)$$

である．式 (2.25) と凹球面ミラー CM の表面を表す式 $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ から凹球面ミラー CM 上の点 C の座標 $C(x_C, y_C, z_C)$ は，

$$\begin{aligned} x_C &= \varphi \left\{ 1 - \frac{(\xi - \gamma)^2}{4} \right\}, \\ y_C &= \xi - \frac{(\xi - \gamma)\varphi^2}{2}, \\ z_C &= 1 - \frac{(\varphi^2 + \gamma^2)}{2}, \end{aligned} \quad (2.26)$$

である．直線 C-P の y - z 平面への射影は， z - x 平面となす角が $\xi + \gamma$ で，点 $C(x_C, y_C, z_C)$ を通るので，

$$z = \frac{y}{\tan(\xi + \gamma)} + z_C - \frac{y_C}{\tan(\xi + \gamma)} \quad (2.27)$$

である．したがって，試料面 S 上のビームスポットの点 P の軌跡 $y_P(\varphi)$ は， z に z_M を代入して，

$$y_P(\varphi) = \frac{1}{2}(\xi - \gamma) + \varphi^2\gamma, \quad (2.28)$$

となる．第1項は定数項で，第2項が試料面 S 上のビームスポット点 P の軌跡の直線からの逸脱を表している．式 (2.28) から， γ が小さければ，同様に2つのビーム経路 A-M と P-Q が接近していれば，逸脱が小さくなることがわかる．

ここまでの計算では，凹球面ミラー CM の曲率半径を1として計算したが，次元を復活させると，試料面 S 上のビームスポットの軌跡の直線からの逸脱は，

$$\varphi^2 R \gamma, \quad (2.29)$$

である。もし直線からの逸脱が試料面 S 上のビームスポット径 w よりも小さければ、ビームスポットの軌跡は直線であると見なしてもよい。この条件は、

$$\varphi^2 R \gamma < w, \quad (2.30)$$

で与えられる.

2.9 試料面の位置決め誤差の影響

もし試料面 S の位置に z 軸方向の位置決め誤差があると、2.5 節で決定した検出面 DP の位置と、凹球面ミラー CM の共役面が一致なくなり、傾斜分布測定における誤差の原因となる。この節ではその誤差を求める。

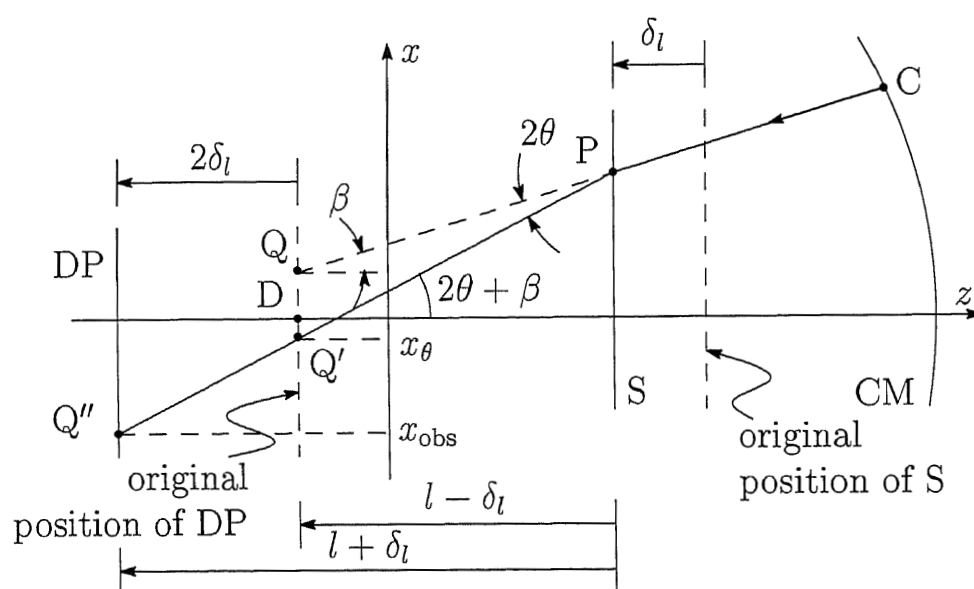


Figure 2.13: Effect of positioning error of sample surface S. The position of detecting plane DP is shifted by $2\delta_l$ if the position of sample surface S has the error of δ_l in z axis direction.

図 2.5 において、試料面 S が z 軸の方向と逆向きに δ_i 移動したと仮定すると、このとき、図 2.11 は図 2.13 のように変形される。図 2.13 において、試料面 S は図 2.11 で表示されているの元の位置から z 軸の負の方向

へ δ_l 移動している. このときに凹球面ミラーCMからの反射ビームが入射する試料面S上の点をあらためて点Pとする. 図2.5において, 試料面Sと検出面DPの距離は $l + \delta_l$ となるので, 図2.13において, 検出面DPは図2.11で表示されている元の位置から z 軸の負の方向へ $2\delta_l$ 移動している. もし試料面S上の点Pにおける試料面の傾斜が θ ならば, 凹球面ミラーCMからの反射ビームは, 点Pで 2θ だけ方向を変え, 元の検出面上の点 Q' を通り, 検出面DP上の点 Q'' に達する.

図2.13から式(2.22)の l を $l - \delta_l$ に置き換えると, 点 Q' の x 座標 x_θ は,

$$x_\theta = (l - \delta_l) \tan \beta - (l - \delta_l) \tan(2\theta + \beta) + x_{abr}, \quad (2.31)$$

である. 移動後の検出面DP上におけるビームスポット点 Q'' の変位 x_{obs} は, 図2.13より

$$x_{obs} = x_\theta - 2\delta_l \tan(2\theta + \beta), \quad (2.32)$$

である. したがって, $\delta_l \ll 1$ ならば, 変位 x_{obs} は最低次数で,

$$x_{obs} = -2(l + \delta_l)\theta - 2(l + \delta_l)\theta\varphi^2 - d^2\varphi^3 - 2\varphi\delta_l, \quad (2.33)$$

と展開される. ここで式(2.10)と式(2.11)を使った. 式(2.33)の第1項と第2項の係数 $l + \delta_l$ は, 試料面Sと検出面DPの距離が, 試料面Sの z 軸方向位置決め誤差のため δ_l だけ変化したことによる. 第4項の $2\varphi\delta_l$ は試料面Sの z 軸方向の位置決め誤差により新たに生じた項である. この第4項は φ の一次関数である. 一方で φ は, 試料面S上のビームスポットの x 座標にほぼ比例している. したがって試料面Sの z 軸方向の位置決め誤差による影響は, 形状測定において x の2次関数として現れる. もし誤差を取り除く必要があるなら, x_{obs} の積分から, 最小二乗法などを使って, 2次関数の成分を減算する必要がある.

2.10 位置検出素子上のビームスポットの変位

図2.5において, レンズDLの共役面はそれぞれ, 位置検出素子DTと検出面DPであった. しかし, 実際にはスキャナミラーSMの回転のために検出面DPとレンズDLの共役面は完全には一致しない. ここでは, 図2.14に基づき, 検出面DPとレンズDLが一致しない場合における位置検出素子DT上のビームスポットの変位 x_d を求める.

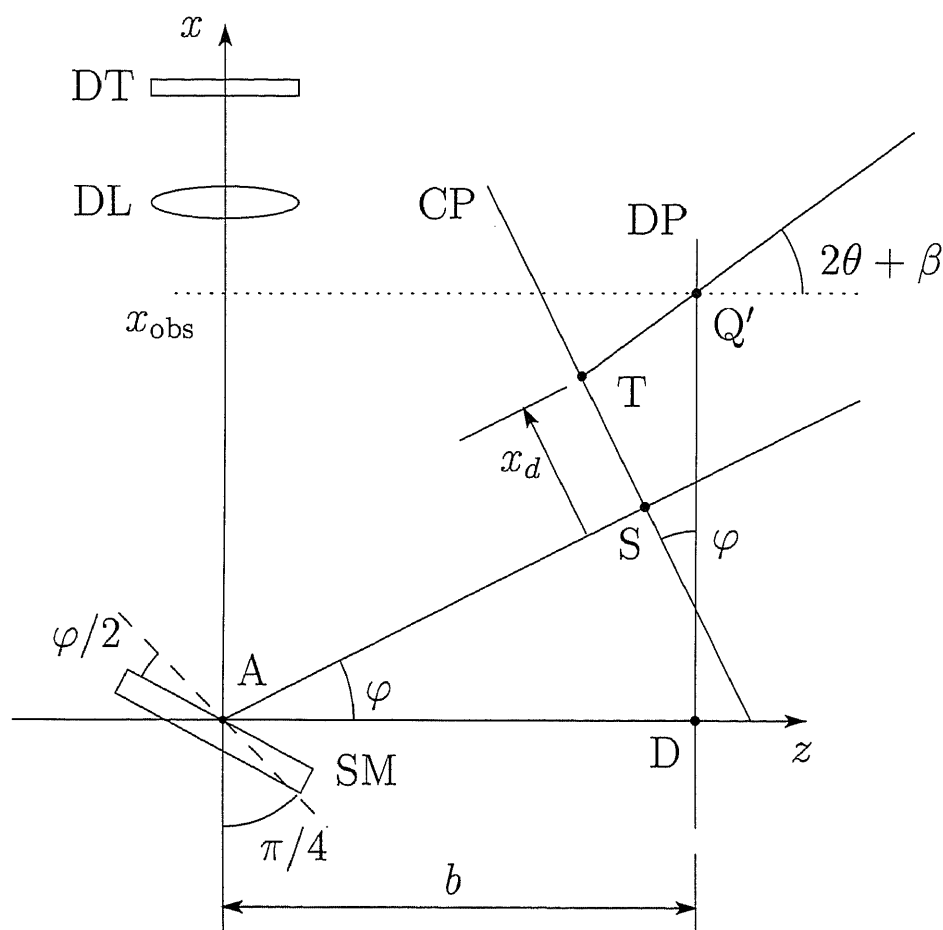


図 2.14: Conjugate planes of lens DL are detector DT and conjugate plane CP. Conjugate plane CP does not coincide with detecting plane DP because of the rotation of scanner mirror SM.

図 2.14 において、レンズ DL の共役面は位置検出素子 DT と共役面 CP である。いま、計算と図示を簡単にするために、スキャナミラー SM の回転軸 A を z - x 座標の原点とし、検出面 DP の z 座標は b であるとする。共役面 CP は走査角が $\varphi = 0$ のとき検出面 DP と一致するが、走査角が 0 以外のときスキャナミラー SM の回転軸 A の周りで φ だけ回転する。試料面 S からの反射ビームは検出面 DP 上の点 Q' をとおり、共役面 CP 上の点 T に入射する。このとき、位置検出素子 DT 上のビームスポットの変位は、共役面 CP 上の変位 $x_d = \overrightarrow{ST}$ に等しい。

共役面 CP 上の点 T の座標を $T(z_T, x_T)$ とすると、図 2.14 から、

$$\begin{aligned} z_T &= -\frac{\tan \varphi}{1 + \tan \varphi \tan(2\theta + \beta)} \left\{ b \left(\frac{1}{\cos \varphi} - 1 \right) \tan(2\theta + \beta) + x_{\text{obs}} \right\} \\ &\quad + \frac{b}{\cos \varphi}, \\ x_T &= \frac{1}{1 + \tan \varphi \tan(2\theta + \beta)} \left\{ b \left(\frac{1}{\cos \varphi} - 1 \right) \tan(2\theta + \beta) + x_{\text{obs}} \right\}, \end{aligned} \quad (2.34)$$

である。ここで $2\theta + \beta$ は、図 2.11 で示されるように、試料面 S 上の点 P が傾斜 θ を持つときのビーム経路 P-Q' と z 軸のなす角で、 x_{obs} は式 (2.33) で与えられる。共役面 CP 上の点 S の座標 $S(z_S, x_S)$ は、

$$\begin{aligned} z_S &= b \cos \varphi, \\ x_S &= b \sin \varphi, \end{aligned} \quad (2.35)$$

なので、共役面 CP 上のビームスポットの変位 x_d は、

$$x_d = \pm \sqrt{(x_T - b \sin \varphi)^2 + (z_T - b \cos \varphi)^2}, \quad (2.36)$$

である。ただし $b \sin \varphi < x_T$ のとき + 符号である。

実際には、図 2.5 で示されるように、検出面 DP はスキャナミラー SM の回転軸 A を含んでいる。これは図 2.14 で $b \rightarrow 0$ としたときと一致する。このとき式 (2.36) は、式 (2.34) を代入し整理すると、

$$x_d = \frac{x_{\text{obs}}}{\cos \varphi \{1 + \tan \varphi \tan(2\theta + \beta)\}}, \quad (2.37)$$

となる。 $\varphi \ll 1$ かつ $d \ll 1$ ならば、式 (2.11) と式 (2.33) から、

$$x_d = -2(l + \delta_l)\theta - (l - 3\delta_l)\theta\varphi^2 - d^2\varphi^3 - 2\varphi\delta_l, \quad (2.38)$$

を得る。式 (2.38) の第 2 項による誤差は、式 (2.33) の第 2 項による誤差よりも小さい。これは、共役面 CP がスキャナミラーの回転によって常に試料面からの反射ビームとほぼ垂直になっているためである。

2.11 位置検出素子の出力の積分

レーザビーム高速走査法を用いた測定装置において、一定間隔で位置検出素子 DT の出力 V_p をサンプリングし、一定角速度でスキャナミラー

SM を回転するのが合理的である．この場合，図 2.5 から明らかなように，試料面 S 上の空間的サンプリング間隔 Δx は一定とならない．したがって，より精密な試料面 S の表面形状を得るには，出力 V_p を積分するときこの効果を考慮する必要がある．ここでは出力 V_p から 1 次元表面形状を得るときに演算すべき積分式を求める．

凹球面ミラー CM の球面収差と試料面 S の z 軸方向位置決め誤差を無視すれば，図 2.11 から試料面 S 上のビームスポット点 P の x 座標は，

$$x = l \tan \beta, \quad (2.39)$$

である．そして，この両辺を微分すると，

$$\Delta x = l\{1 + \beta^2\}\Delta\beta, \quad (2.40)$$

となる．ただし $\beta \ll 1$ とした．位置検出素子 DT の出力 V_p のサンプリング間隔とスキャナミラー SM の回転速度が一定であることから， $\Delta\beta$ は一定である．一方，試料面 S 上の空間的サンプリング間隔 Δx は，式 (2.11) より走査角 φ で変化することがわかる．走査角が $\varphi = 0$ ，これと同様に $\beta = 0$ のときの試料面上の空間的サンプリング間隔を $\Delta x_0 = l\Delta\beta$ とすると，式 (2.40) は，

$$\Delta x = (1 + \beta^2)\Delta x_0, \quad (2.41)$$

と表すことができる．

試料面 S の 1 次元表面形状 F を求めるためには，次の式のように，試料面 S の傾斜分布 θ を式 (2.41) で求めた Δx で積分すればよい：

$$F_j = \sum_i^j \theta_i \Delta x_i = \Delta x_0 \sum_i^j \theta_i (1 + \beta_i^2). \quad (2.42)$$

ここで添え字 i, j は試料面上の位置を表わす．また，位置検出素子 DT の出力 V_p は，式 (2.38) の第 2 項以降のによる誤差を除けば，式 (2.4) のように試料面 S の傾斜分布に比例するので，

$$F_j = \frac{1}{\alpha} \Delta x_0 \sum_i^j V_{pi} (1 + \beta_i^2), \quad (2.43)$$

と書くこともできる．

2.12 形状測定における誤差

走査光学系の設計から生じる傾斜分布測定における誤差は、位置検出素子 DT 上のビームスポットの変位 x_d を与える式 (2.38) の第2項以降で見積もることができる。一方、表面形状測定における誤差を求めるには、位置検出素子 DT 上のビームスポットの変位分布を積分した後に、元の表面形状とどれだけの差があるのかを調べる必要がある。ここでは、レーザビーム高速走査法を用いた1次元表面形状測定に含まれる誤差について検討する。

ある試料面の x 軸に沿った1次元表面形状 $F(x)$ の傾斜分布を $\theta(x)$ とする。これらの間には式 (2.1) の関係がある。また、この表面を走査光学系を使ってビームを走査し、そこから得られる位置検出素子上のビームスポットの変位分布 $x_d(\varphi)$ は、式 (2.38) で与えられるとする。レーザビーム高速走査法で1次元形状測定をしたとき、試料面上の位置 x における元の表面形状との誤差 $\epsilon(x)$ は、

$$\epsilon(x) = F(x) + \frac{1}{2l} \int_{x_0}^x x_d(\varphi) dx', \quad (2.44)$$

で与えられる。ここで x_0 は試料面上の測定範囲の端、つまりビームスポットの走査開始点の x 座標である。試料面の z 軸方向位置決め誤差 δ_l は、走査光学系における本質的な誤差ではないので、これを $\delta_l = 0$ とし、ここで議論する測定誤差評価には含めないとする。このとき、変位分布 $x_d(\varphi)$ の変数である走査角 φ を式 (2.11) で β に変換すると、 x_d は最低次で

$$x_d(\beta) = -2l\theta(\beta) - l\theta(\beta)\beta^2 - \frac{d^2\beta^3}{R}, \quad (2.45)$$

としてよい。ここで、凹球面ミラーの曲率半径 R を使って次元を復活させた。これをさらに式 (2.39) で変数を変換すると、

$$x_d(x) = -2l\theta(x) - \frac{x^2}{l}\theta(x) - \frac{d^2}{R} \frac{x^3}{l^3}, \quad (2.46)$$

となる。この式を式 (2.44) に代入し、式 (2.1) を適用すると、

$$\epsilon(x) = -\frac{1}{2l^2} \int_{x_0}^x x^2 \theta(x) dx - \frac{d^2}{Rl^3} \int_{x_0}^x x^3 dx, \quad (2.47)$$

という、試料面上の位置 x における測定誤差 $\epsilon(x)$ が求められる。

測定誤差 $\epsilon(x)$ の式 (2.47) の第 1 項は, 図 2.5 で示されている走査光学系のパラメータ R , l , d だけではなく試料面の傾斜分布 $\theta(x)$ にも依存している. したがって測定誤差を具体的に求めるためには, 何らかの 1 次元表面形状かその傾斜分布を仮定しなければならない. ここで, 例として正弦波的な 1 次元表面形状 $F(x) = A \sin(ax)$ を測定したときの誤差について評価する. このときの傾斜分布は

$$\theta(x) = aA \cos(ax), \quad (2.48)$$

である. 試料面の中心 $x = 0$ を基準とした誤差を求めたいので, $x_0 = 0$ として積分を実行する.

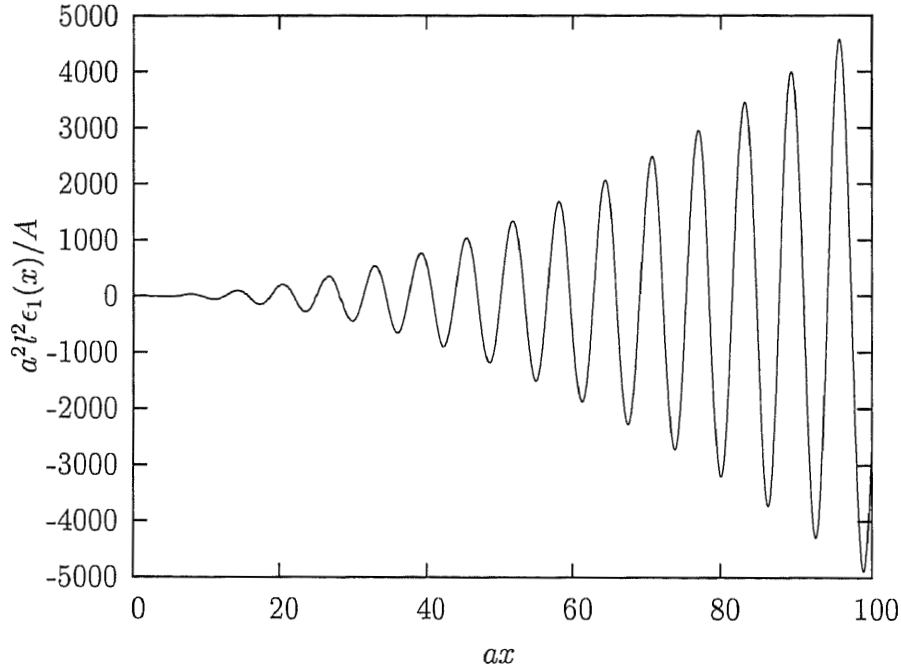


図 2.15: Error $\epsilon_1(x)$ expressed with Eq.(2.49) is plotted. The vertical and the horizontal axis are dimensionless value $a^2 l^2 \epsilon_1(x)/A$ and ax , respectively.

まず, 式 (2.47) の第 1 項を $\epsilon_1(x)$ と表し, その振る舞いについて調べる. 式 (2.47) の第 1 項に式 (2.48) を代入し積分すると,

$$\epsilon_1(x) = \frac{A}{a^2 l^2} \left\{ ax \cos(ax) + \left(\frac{1}{2} a^2 x^2 - 1 \right) \sin(ax) \right\}, \quad (2.49)$$

となる．これをグラフに示すと図 2.15 となる．縦軸と横軸は無次元量で，それぞれ $a^2 l^2 \epsilon_1(x)/A$ と ax である．試料面上の位置 x が大きくなるにつれて，誤差の振幅が大きくなることがわかる．誤差評価をより簡単にするために，式 (2.49) の包絡線を求める．誤差 $\epsilon_1(x)$ は， n を整数として， $ax = \pi/2 + 2n\pi$ のとき極大となるので，これを式 (2.49) に代入すると，

$$\epsilon_1(x) = \frac{A}{a^2 l^2} \left(\frac{1}{2} a^2 x^2 - 1 \right), \quad (2.50)$$

を得る．この式は $ax > 1$ のとき，第 2 項の寄与は急激に小さくなるので，

$$\epsilon_1(x) = \frac{Ax^2}{2l^2}, \quad (2.51)$$

としてもよい．これにより式 (2.47) の第 1 項が与える誤差は試料面上の x 座標の 2 乗で大きくなることがわかる．一般の表面形状は，試料面の全体的な傾斜成分を除けばランダムに波打っており，正弦および余弦波で展開できる．したがって式 (2.51) は， A を表面形状のピークバレー値とすれば，一般の表面形状についても成り立つと考えられる．

次に，凹球面ミラーの球面収差に由来する式 (2.47) の第 2 項について調べる．第 2 項を $\epsilon_2(x)$ と表し，積分すると，

$$\epsilon_2(x) = \frac{d^2}{4Rl^3} x^4, \quad (2.52)$$

となる．よって式 (2.47) の第 2 項が与える誤差は試料面上の x 座標の 4 乗で大きくなることがわかる．しかし，誤差 $\epsilon_2(x)$ は，傾斜分布 $\theta(x)$ とは無関係であり，どんな試料を測定しても測定結果の中に一定の値で含まれる誤差なので，オプティカルフラットなどの精密な基準試料で走査光学系を校正すれば，測定結果から取り除くことができる．

ここで，図 2.5 で示される走査光学系のパラメータに具体的な値を与えて，誤差 $\epsilon_1(x)$ と $\epsilon_2(x)$ の大きさを評価する．凹球面ミラー CM の曲率半径を $R = 400\text{mm}$ ，試料面 S と検出面 DP の距離を $l = 207\text{mm}$ とする．試料面 S と平面ミラー PM の距離 ΔL は式 (2.12) よりほぼ d であり，これを $d = 7\text{mm}$ とする．試料の形状パラメータは $A = 1\mu\text{m}$ とする．上記の条件で式 (2.51) と式 (2.52) に代入すれば，図 2.16 で示されるグラフが得られる．横軸は試料面上の位置で，縦軸は誤差と表面形状の振幅 A の比である．誤差 $\epsilon_1(x)$ と $\epsilon_2(x)$ はそれぞれ細曲線と太曲線で示されている．図中の小さなグラフは， $x = 2.5\text{mm}$ までの拡大図であり縦軸の単位は 10^{-5} で

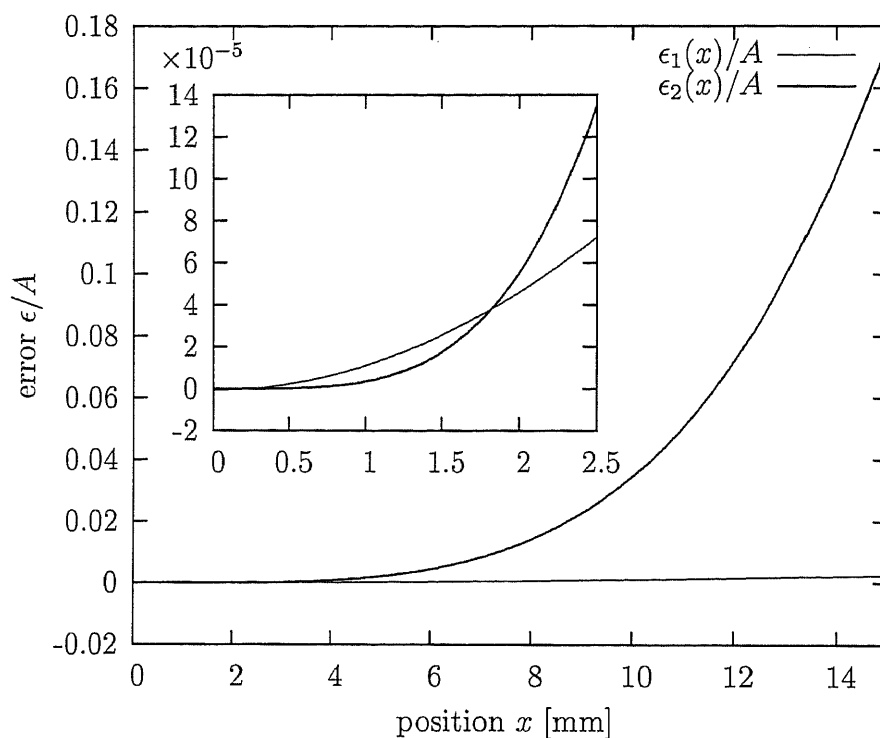


図 2.16: Error $\epsilon_1(x)$ and $\epsilon_2(x)$ are represented with the thin and the thick line, respectively. The horizontal axis is the position on sample surface S, and the vertical axis is the error which is divided by amplitude A of the surface profile. The small graph represents a magnification between $x = 0\text{mm}$ and 2.5mm , and the vertical axis unit is 10^{-5} .

ある。ここから明らかなように、測定範囲が試料の原点から 2mm を超えると誤差 $\epsilon_2(x)$ が測定誤差で支配的になり、 $x = 13\text{mm}$ で測定誤差は表面形状の振幅の 10% に達することがわかる。一方、誤差 $\epsilon_1(x)$ は $x = 15\text{mm}$ でも表面形状の振幅の 0.26% である。

最後に、試料面上の位置 $x = 10\text{mm}$ における誤差 $\epsilon_2(10)$ と表面形状の振幅 A の関係を調べる。これをグラフに表したのが図 2.17 である。表面形状の振幅 A を $0.001\mu\text{m}$ から $1\mu\text{m}$ までプロットした。縦軸と横軸はともに対数軸である。ここから振幅 A が小さくなるにつれて誤差が急激に大きくなることがわかる。とくに、 $0.035\mu\text{m}$ では、誤差 $\epsilon_2(10)$ は表面形状の振幅 A の 100% に達する。したがって、微細な形状を測定するときは、走査光学系を校正することにより、誤差 ϵ_2 を取り除くことが重要である。

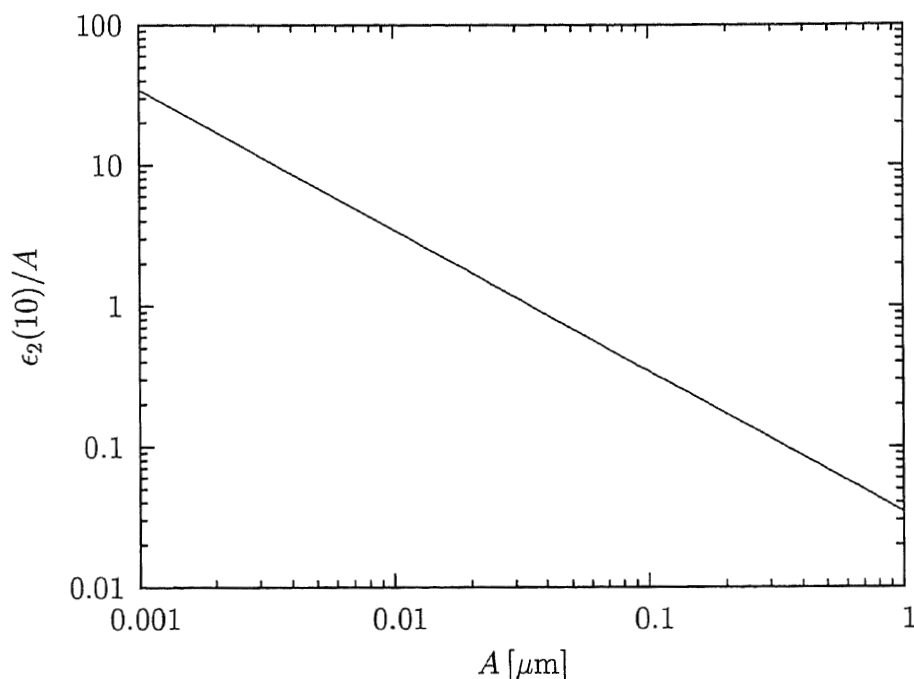


図 2.17: Relation between error $\epsilon_2(10)$ at position $x = 10\text{mm}$ on sample surface S and amplitude A of the surface profile of sample surface S.

2.13 位置検出素子の出力特性

ここでは、試料面 S の傾斜分布によって生じる位置検出素子 DT 上のビームスポットの変位 x_d と、位置検出素子の出力 V_p の関係について詳しく調べる。

図 2.6 において、光源 L とフォーカスレンズ FL を使って放射されるレーザービームが半値幅 h のガウシアンビームであるとする。図 2.5 において、ビームの半値幅 h はフォーカスレンズ FL から放射されたビームが凹球面ミラー CM に達するまでそのままの値で保たれ、試料面 S で最小になり、検出面 DP 達したとき再び半値幅が h に戻る。レンズ DL によって検出面 DP は位置検出素子 DT 上で 1 倍の像となるので、位置検出素子 DT 上においても、レーザービームの半値幅は h である。

位置検出素子 DT の受光面の大きさを $s = 12\text{mm}$ 、位置検出素子 DT 上のビームスポットの半値幅を $h = 5\text{mm}$ として、位置検出素子 DT 上のビームスポットの強度分布 $I(x)$ をグラフに表すと図 2.18 となる。横軸 x は位置検出素子 DT の中心を原点とした位置で、縦軸はビームスポット

の強度である．グラフ内の縦実線は位置検出素子の受光面の境界を表している．図 2.18 から，位置検出素子の外側にもビームスポットが漏れているのがわかる．したがって，式 (2.38) で与えられる変位 x_d と，位置検出素子内におけるビームスポットの強度分布の重心位置 x_b は，厳密には一致しない．

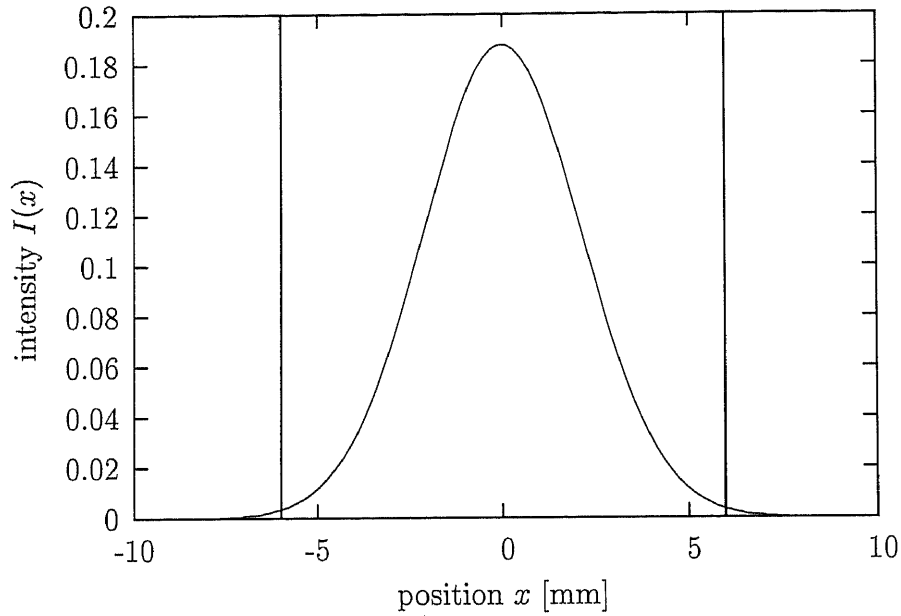


図 2.18: Beam intensity distribution on the PSD. Vertical lines inside the plot area are the boundaries of the PSD. The beam leaks from the PSD.

ここで，位置検出素子 DT 上のビームスポットの変位 x_d と，重心位置 x_b の関係について調べる．位置検出素子 DT 内のビームスポットの重心位置 x_b は，

$$x_b = \frac{\int_{-\frac{s}{2}}^{+\frac{s}{2}} x \exp \left\{ -\frac{(x - x_d)^2}{2\sigma^2} \right\}}{\int_{-\frac{s}{2}}^{+\frac{s}{2}} \exp \left\{ -\frac{(x - x_d)^2}{2\sigma^2} \right\}}, \quad (2.53)$$

で与えられる．この重心位置 x_b に比例した値が位置検出素子の出力 V_p として出力される．ここで標準偏差 σ は，

$$\sigma = \frac{h}{2\sqrt{2\log 2}}, \quad (2.54)$$

である．位置検出素子 DT 上のビームスポットの変位 x_d が位置検出素子の受光面の大きさ s とビームスポットの半値幅 h より十分小さいときの重心 $x_{b\epsilon}$ は，式 (2.53) から，

$$x_{b\epsilon} = \left\{ 1 - \frac{s \exp\left(-\frac{s^2}{8\sigma^2}\right)}{\sqrt{2\pi}\sigma \operatorname{erf}\left(\frac{s}{2\sqrt{2}\sigma}\right)} \right\} x_d, \quad (2.55)$$

となり，位置検出素子 DT におけるビームスポットの重心位置 $x_{b\epsilon}$ は，ビームスポットの変位 x_d に比例していることがわかる．ここで関数 erf は，

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt, \quad (2.56)$$

で定義される誤差関数である．位置検出素子 DT 上のビームスポットの変位 x_d と，重心位置 x_b の比例関係が保たれていれば，位置検出素子の出力 V_p は試料面 S の傾斜情報を含んでいる変位 x_d に比例しているとしてよい．

つぎに，位置検出素子 DT の受光面の大きさを $s = 12\text{mm}$ ，位置検出素子 DT 上のビームスポットの半値幅を $h = 5\text{mm}$ の条件で，式 (2.53) で表されるビームスポットの重心位置 x_b と，位置検出素子 DT 上のビームスポットの変位 x_d の間にどの程度比例関係が保たれるのか調べる．ビームスポットの重心位置 x_b と，式 (2.55) で表される変位 x_d が小さいときの重心位置 $x_{b\epsilon}$ をグラフに表すと，図 2.19 となる．横軸は位置検出素子 DT 上のビームスポットの変位 x_d で，細曲線は重心位置 x_b ，太直線は重心位置 $x_{b\epsilon}$ である．このグラフから変位 x_d が大きくなるにつれてビームスポットの重心位置 x_b は，線形 $x_{b\epsilon}$ からの逸脱が大きくなり，比例関係が失われることがわかる．

ビームスポットの重心位置 x_b の線形からの逸脱の度合いは $1 - x_b/x_{b\epsilon}$ から求められる．これをグラフに表したのが図 2.20 である．このグラフから，位置検出素子上の変位 x_d を，位置検出素子の出力 V_p を使って 1% 以内の誤差で測定しようとするとき，測定可能な変位は $x_d = \pm 1.1\text{mm}$ であることがわかる．

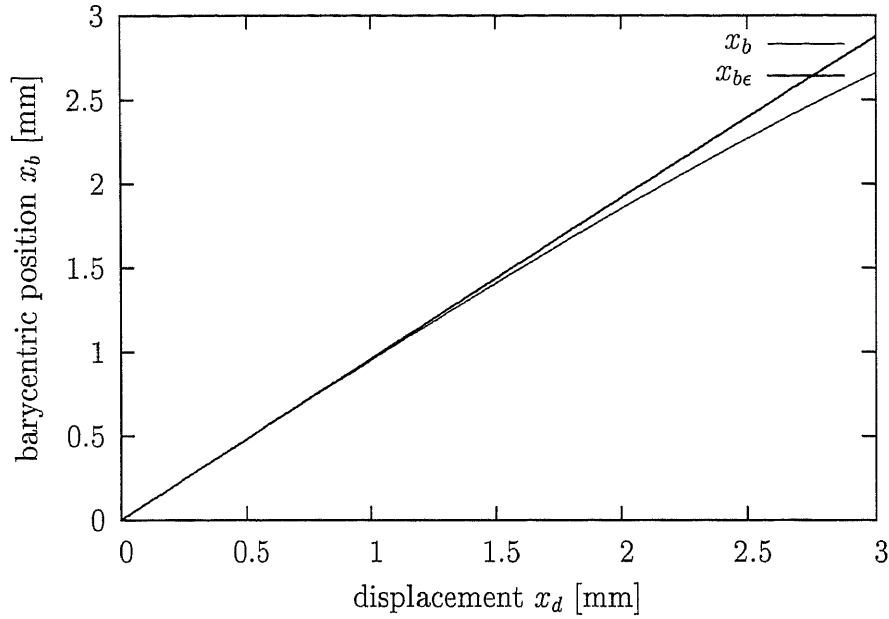


図 2.19: Barycentric position x_b and x_{be} respect to displacement x_d on the PSD. Barycentric position x_b given by Eq.(2.53), and barycentric position x_{be} given by Eq.(2.55) on the condition of $x_d \ll 1$ are represented with thin and thick line, respectively.

2.14 まとめ

本章では，レーザビーム高速走査法で用いられる走査光学系の構成を示し，その特性を理論的に解析した．

傾斜分布測定は試料面から反射したレーザビームの角度振れを検出することにより行う．検出には位置検出素子 PSD を用いた．傾斜分布を高速に測定するために，基本的に，凹球面ミラーとスキャナミラーからなる走査光学系を提案した．凹球面ミラーの曲率中心がスキャナミラーの回転中心と一致していれば理想的に無収差光学系となるが，実際に作成可能な走査光学系はわずかに異なる．この走査光学系で平坦な試料面を測定したとき，試料面からの反射ビームの変位が最小となる面があり，それは凹球面ミラーの共役面だった．この面を検出面と呼び，レーザビームの角度振れを，検出面上のビームスポットの変位として検出できることを示した．検出面上と位置検出素子上のビームスポットの変位は理論的に解析した．位置検出素子の出力から表面形状を得るための数値積分

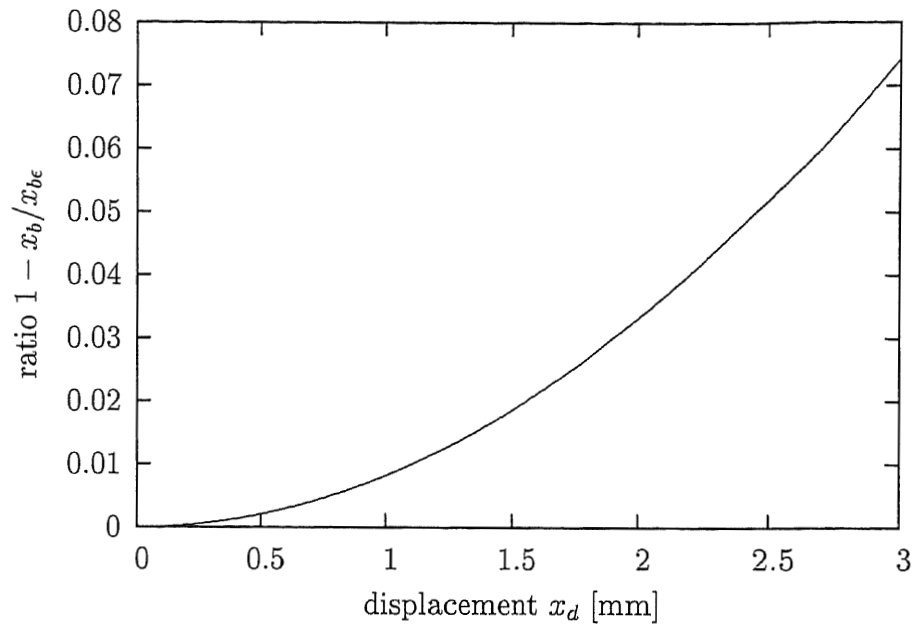


図 2.20: Ratio $1 - x_b/x_{be}$ respect to displacement x_d on the PSD.

法を示した。傾斜分布を仮定して、それを積分することにより、形状測定における誤差を解析した。最後に、位置検出素子上のビームスポットの変位と重心位置の関係を、位置検出素子上のビームスポットの強度分布がガウシアンの場合について解析した。

第3章 鏡面の形状測定

3.1 はじめに

本章では、レーザビーム高速走査法の基本的な測定能力を示すために、鏡面の測定をおこなう。試料はレーザプリンタやコピー機などで使われているポリゴンミラーである。

まず、3.2節で、実験装置の構成を示す。回転するスキャナミラーを用いることで高速に測定でき、実験で除震装置の必要がないことが示される。節3.3では、位置検出素子 PSD の出力が、試料面 S の傾斜に比例していることを確認し、その比例定数を求める。節3.4で、幅 5mm のポリゴンミラーを測定するときに生じるであろう誤差について調べ、3.5節で位置検出素子の出力から表面形状を得るための数値積分法を示す。節3.6で、走査光学系で使われた光学部品の歪みを取り除くため、基準平面として平面ミラーを測定される。最後に3.7節でポリゴンミラーが測定し、干渉計との比較を行う。

3.2 実験装置の構成

本章で使用する実験装置における走査光学系のパラメータは図3.1に示されるように、以下の通りであった。

光源 L は出力 5mW の He-Ne レーザ光源で、そこから放射されたレーザビームをフォーカスレンズ FL によって半値幅 $h = 5\text{mm}$ のガウシアンビームにコリメートした。凹球面ミラー CM の直径は 80mm で、曲率半径は $R = 400\text{mm}$ 、表面精度は $\lambda/4$ だった。また図3.1に示されているように 80mm×15mm の矩形に加工されてるものを使用した。スキャナミラー SM と、平面ミラー PM および HM の表面精度は $\lambda/10$ だった。凹球面ミラー CM と試料面 S の距離は $R/2 = 200\text{mm}$ であり、これは凹球面ミラー CM の焦点距離だった。この条件によって、試料面 S 上のビームス

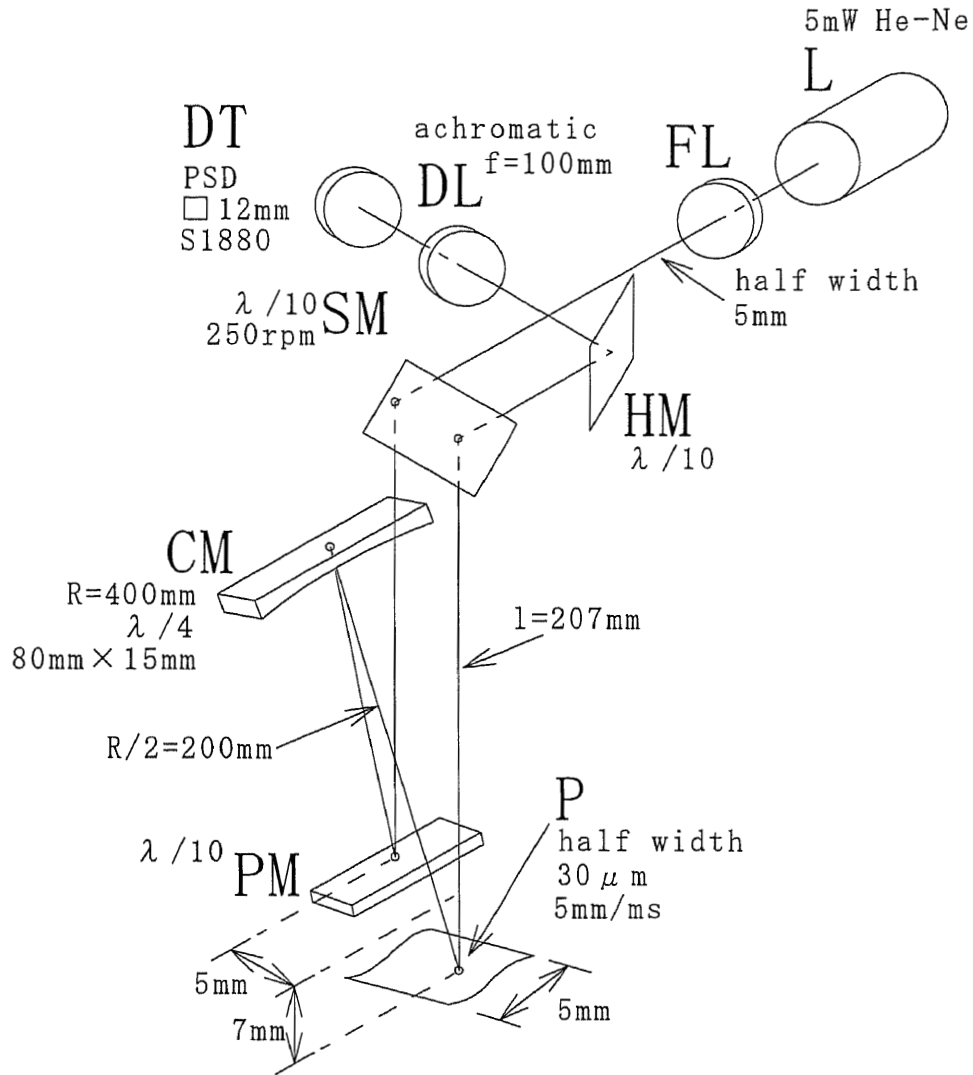


図 3.1: Configuration of the setup.

ポットの半値幅は $w = 30\mu\text{m}$ だった。試料面 S と平面ミラー PM の距離は $\Delta L = 7\text{mm}$ だった。式 (2.12) から ΔL はパラメータ d にほぼ等しく、したがって $d = 7\text{mm}$ である。試料面 S と検出面 DP の距離 l は、式 (2.6) と式 (2.8) から得られる、

$$\frac{1}{l + R/2 - 2\Delta L} + \frac{1}{l + R/2} = \frac{2}{R}, \quad (3.1)$$

から計算され $l = 207\text{mm}$ だった。レンズ DL は色消しレンズで、その焦点距離は 100mm だった、このレンズ DL によって検出面 DP は位置検出素子 DT 上に 1 倍の像となった。

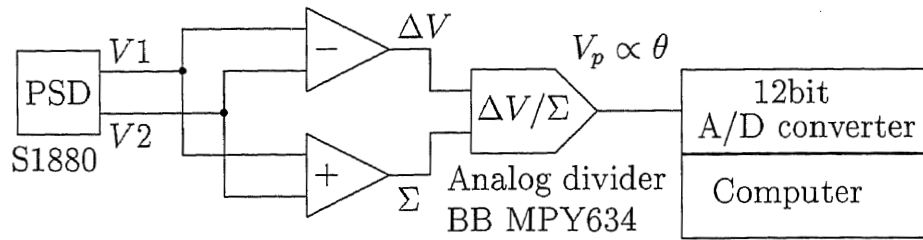


図 3.2: Signal flow diagram outputed from PSD.

使われた位置検出素子 DT は浜松ホトニクス株式会社の 2 次元 PSD 型式 S1880 だった。その受光面是一片が $s = 12\text{mm}$ の正方形で、位置検出分解能は $1.5\mu\text{m}$ だった。したがって、試料面 S の傾斜検出分解能は $0.0015/l = 7 \times 10^{-6}$ だった。位置検出素子 DT の出力には 2 つの電流出力があり、それらはオペレーションアンプで 2 つの電圧出力 $V1$, $V2$ に変換される。図 3.2 に示されるように、出力 $V1$ と $V2$ の差動から得られる ΔV は、位置検出素子上のビームスポットの位置に比例するとともに、入射ビームの全光量にも比例する。一方、出力 $V1$ と $V2$ 和 Σ は入射ビームの全光量にのみに比例する。したがって、除算 $\Delta V/\Sigma$ が位置検出素子上のビームスポットの位置に比例する出力 V_p を与える。除算は米 Burr Brown 社のアナログ除算器 MPY634 を用いた。出力 V_p は 12bit のアナログ/デジタルコンバータを通してコンピュータに送られ、演算された。

スキャナミラー SM は速度制御可能なサーボモータに取り付けられ、250rpm の角速度で回転していた。試料面 S とスキャナミラーの距離は $l = 207\text{mm}$ なので、試料面 S 上のビームスポットの走査速度は約 5mm/ms である。一方、本章の最後で測定されるポリゴンミラーの幅は 5mm である。したがって、この試料面の測定時間は 1ms なので、その逆数である 1kHz の振動に対して不感だった。このことより、実験には除震台などを一切用いなかった。

3.3 位置検出素子の出力特性

ここでは、試料面の傾斜と位置検出素子の出力の関係を調べ、位置検出素子が試料面の傾斜を測定できることを確認する。

図 2.20 から、位置検出素子 DT の大きさ $s = 12\text{mm}$ 、その上のビームスポットの半値幅 $h = 5\text{mm}$ の条件で、位置検出素子 DT 上のビームスポッ

トの変位 x_d を、位置検出素子 DT の出力 V_p を使って 1% 以内の誤差で測定しようとするとき、測定可能なビームスポットの変位は $x_d = \pm 1.1\text{mm}$ であることがわかる。ここでビームスポットの変位 $x_d = 1.1\text{mm}$ は、試料面 S と検出面 DP の距離が $l = 207\text{mm}$ であることと式 (2.38) から、試料面 S 上の傾斜で $\theta_d = 0.0027$ に相当する。

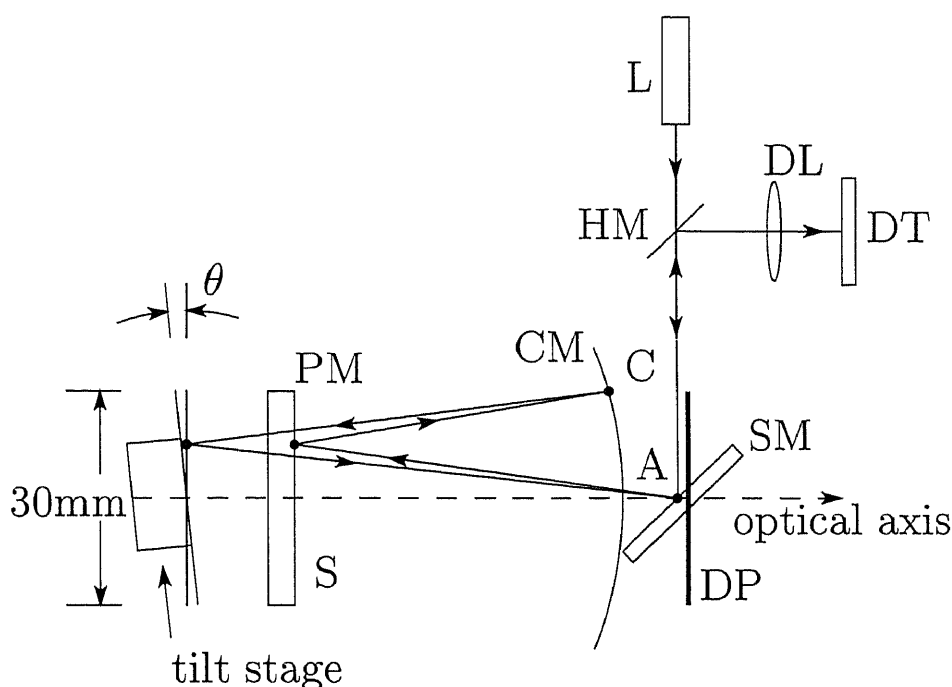


図 3.3: Sample surface S is a plane mirror, and is tilted by a tilt stage. Measurement region is 30mm.

そこで、位置検出素子 DT 上でビームスポットの変位が 1mm 程度となるような傾斜を試料面 S に与えたときの、位置検出素子の出力 V_p の変化を調べた。図 3.3 のように、平面ミラーを試料面 S として、それを傾斜ステージで θ_d の傾斜を与えた。より正確な試料面 S と位置検出素子の出力の関係を得るために、ビームスポットが試料面 S 上を 30mm にわたって走査している状態で、試料面 S に傾斜を与えたときの位置検出素子 DT の出力 V_p の平均値 \bar{V}_p を測定した。出力 V_p を図 3.4 に示す。横軸は平面ミラー上の位置である。試料面 S に傾斜を与えると出力 V_p は図 3.4 に示される波形を保ったまま、平均値 \bar{V}_p が増減する。平均出力 \bar{V}_p の測定における安定

性を調べるために、200回連続の測定を行ったところ、測定の標準偏差は0.0029Vだった。試料面Sに与える傾斜は $\theta_d = 0$ から0.0024までとした。この傾斜は、先に計算したように、誤差1%以内の傾斜測定が可能な範囲である。傾斜 θ_d に対する $\overline{V_p}$ のグラフを図3.5に示す。ダイヤモンド印は測定した箇所を示し、実線は、最小二乗法から得た直線である。測定結果と最小二乗直線でもっとも離れている測定箇所は、角度で $3.6 \times 10^{-5} \text{rad}$ だった。平均出力 $\overline{V_p}$ の測定における標準偏差は $2.4 \times 10^{-6} \text{rad}$ に相当した、一方で、傾斜ステージの傾斜角度の読みに $5.8 \times 10^{-5} \text{rad}$ の誤差があった。したがって位置検出素子の出力の平均値 $\overline{V_p}$ は試料面Sに与えた傾斜 θ_d に誤差の範囲内で比例しており、式(2.4)の比例定数は $\alpha = 1190$ 、つまり

$$\overline{V_p} = 1190\theta_d, \quad (3.2)$$

だった。

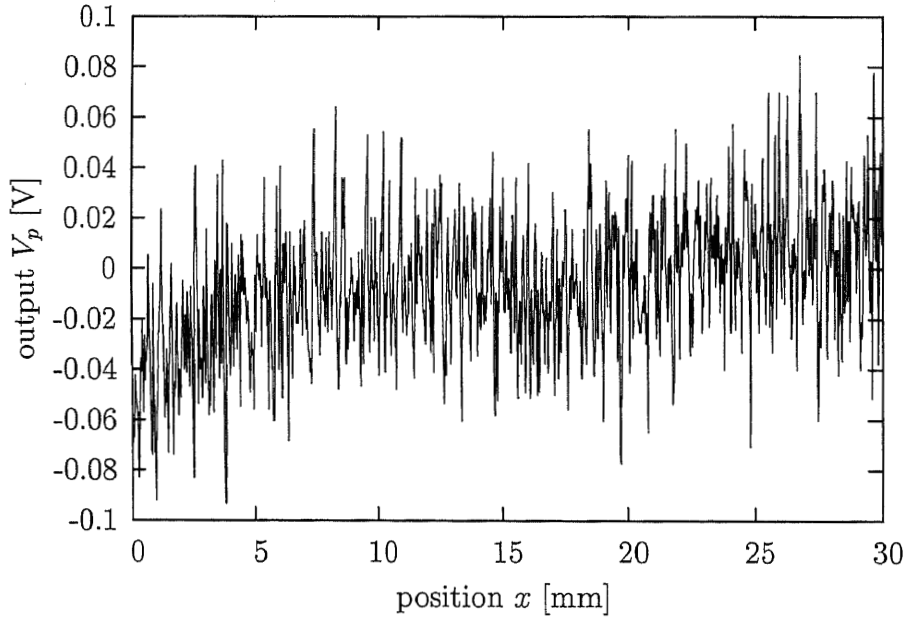


図 3.4: Output V_p from the PSD on the scannign of a plane mirror.

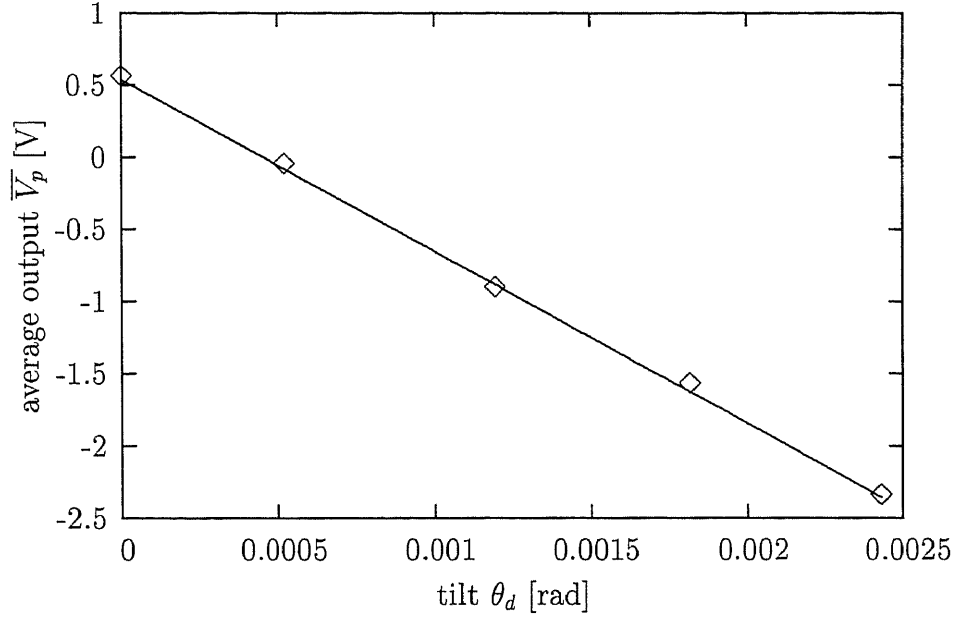


図 3.5: Diamond marks are measured. Solid line is least square line of $\overline{V}_p(\theta_d) = -1190\theta_d + 0.536$.

3.4 位置検出素子の出力における誤差

ここで、試料面 S として幅 5mm のポリゴンミラーを測定するときの誤差について検討する。

実験で使用する測定装置において、試料面 S の z 軸方向位置決め誤差 $\delta_l = 0.4\text{mm}$ 以下にできた。このとき試料面 S と検出面 DP の距離 $l = 207\text{mm}$ に対して、誤差 δ_l は 10^{-3} なので、式 (2.38) において第 1 項の係数 $(l + \delta_l)$ は l と見なすことができ、1次元表面形状は式 (2.38) の第 1 項の積分によって得られる。

式 (2.38) の第 2 項は走査角 φ に依存する誤差である。幅 5mm にわたって形状測定を行ったので、最大走査角は $\varphi_{\max} = 2.5/207 \sim 10^{-2}$ だった。値 $\varphi_{\max}^2 \sim 10^{-4}$ は実験で用いた 12bi アナログ／デジタルコンバータの分解能よりも小さかったので、式 (2.38) 第 2 項は無視できた。また、図 2.16 からも、形状測定におけるこの項の誤差が、試料面 S の振幅に対して 7×10^{-5} 程度であることがわかる。

式 (2.38) 第 3 項は凹球面ミラー CM の球面収差による。第 3 項と第 1 項の比は、凹球面ミラー CM の曲率半径 R を使って次元を復活させると

$[d^2\varphi^3/(2l\theta)]/R$ である。実験で測定されるポリゴンミラーはVeeco社の干渉計Wyko NT3300であらかじめ測定されていた。それによると、測定されたポリゴンミラーの傾斜分布の二乗平均平方根は $\theta_{\text{rms}} \sim 10^{-4}$ だった。したがって第3項と第1項の比は $d^2\varphi_{\text{max}}^3/(2l\theta_{\text{rms}})/R \sim 10^{-6}$ となるので、凹球面ミラーCMの球面収差は無視することができた。

式(2.38)第4項は、試料面Sの z 軸方向位置決め誤差に由来し、走査角 φ に比例している。第1項と第4項の比は、 $\delta_l\varphi_{\text{max}}/(2l\theta_{\text{rms}}) \sim 10^{-1}$ だった。節2.9で述べたように、式(2.38)第4項の積分における z 軸方向位置決め誤差の影響は、表面形状測定における2次関数成分となる。そこで、この位置決め誤差成分を最小二乗法で求め、位置検出素子の出力 V_p の積分から減算することによって、誤差の補正とした。

また、試料面Sの試料全体としての傾きは、位置検出素子の出力 V_p の直流成分となる。したがって、その積分は、表面形状測定において1次関数成分となる。そこで、この成分を最小二乗法を使って求め、位置検出素子の出力 V_p の積分から減算することによって、試料の傾き補正とした。

試料面S上のビームスポットの軌跡の直線からの逸脱は、式(2.29)で与えられる。図2.6の実験装置において、 y 軸方向に沿った平面ミラーPM上の点Mと試料面上の点Pの距離は5mmであった。また凹球面ミラー上の点Cと試料面上の点Pの距離はほぼ200mmなので、ビーム経路M-CとC-Pのなす角 γ は $\gamma = 5/200$ だった。したがって、試料面S上のビームスポットの直線からの逸脱の最大値は $\varphi_{\text{max}}^2 R \gamma \sim 0.001\text{mm}$ となる。一方、試料面S上のビームスポットの半値幅は $w = 0.03\text{mm}$ なので、不等式(2.30)を満たす。したがって試料面S上のビームスポットの軌跡はほぼ直線であると見なすことができた。

位置検出素子の出力の線形性は、ポリゴンミラーの傾斜分布の二乗平均平方根は $\theta_{\text{rms}} \sim 10^{-4}$ であることと、図2.20および図3.5から十分保たれていると考えられた。

3.5 表面形状を求める式

スキャナミラーSMの回転速度が一定であり、位置検出素子の出力 V_p のサンプリング間隔も一定なので、試料面S上における空間的サンプリング間隔は一定にならない。この条件での積分は式(2.43)に示した。この式に含まれる φ^2 は、最大で $\varphi_{\text{max}}^2 \sim 10^{-4}$ と小さかった。したがって、

試料面 S 上における空間的サンプリング間隔を一定と見なし，試料面 S の表面形状を得るための積分を，

$$F_{pj} = \frac{1}{\alpha} \sum_i^j V_{pi} \Delta x, \quad (3.3)$$

とした．ここで係数 α は，式 (3.2) で与えられており，また空間的サンプリング間隔は $\Delta x = 0.00118\text{mm}$ だったので，表面形状を求めるための積分，式 (3.3) は，

$$F_{pj} [\text{nm}] = 0.990 [\text{nm/V}] \sum_i^j V_{pi} [\text{V}], \quad (3.4)$$

となる．

3.6 平面ミラーの測定

実験で測定されるポリゴンミラーにおける表面形状の二乗平均平方根は，干渉計 Wyko NT3300 で測定した結果， 3.5nm だった．一方，実験装置で使用した凹球面ミラー CM の表面精度は $\lambda/4 \sim 160\text{nm}$ で，またスキャナミラー SM と平面ミラー PM，HM の表面精度は $\lambda/10 \sim 63\text{nm}$ だった．したがって，表面形状測定において，走査光学系で使われる光学部品の歪みを無視することはできなかった．これらの光学部品の歪みの影響を，大きさ $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ ，表面精度 $\lambda/20 \sim 32\text{nm}$ の平面ミラーを基準平面として測定することによって見積もった．

基準平面を幅 5mm にわたって測定したときの，位置検出素子 DT の出力 V_p は図 3.6 だった．横軸は基準平面上の位置で，縦軸は位置検出素子 DT の出力で単位はボルト [V]，そのプロファイルは基準平面の傾斜分布に比例した値に加え，光学部品の歪みが含まれている．位置検出素子の出力 V_p を式 (3.4) に従って積分したのは図 3.7 だった．縦軸は表面形状で単位は nm ，また曲線は得られたプロファイルの 2 次関数成分である．ここから基準平面の表面には微細な構造があることがわかった．これは，基準平面の加工時に生じた研磨痕であると考えられる．この加工特性を調べるために，図 3.8 で示される位置検出素子の出力 V_p のパワースペクトラムを計算した．横軸は空間的周期 λ_s で，縦軸はそのパワーである．その結果，空間周期が $\lambda_s < 0.24\text{mm}$ の領域が研磨痕による特性であるらし

いことが推測された．そこで，走査光学系で使われた光学部品の歪みに由来する成分を得るために，位置検出素子の出力 V_p を積分して得られた図 3.7 のプロファイルを幅 0.24mm で平均化した．さらに，基準平面の z 軸方向位置決め誤差を補正するために 2 次関数成分を減算し，こうして得られる形状をプロファイル G とした．プロファイル G を図 3.9 に示す．プロファイル G は，大きさ 50mm×50mm，表面精度 $\lambda/20 \sim 32\text{nm}$ の平面ミラーのごく一部である 5mm の領域から得たので，この基準平面として用いた平面ミラーの形状情報はほとんど含まず，走査光学系で使われる光学部品の歪みであると考えられた．

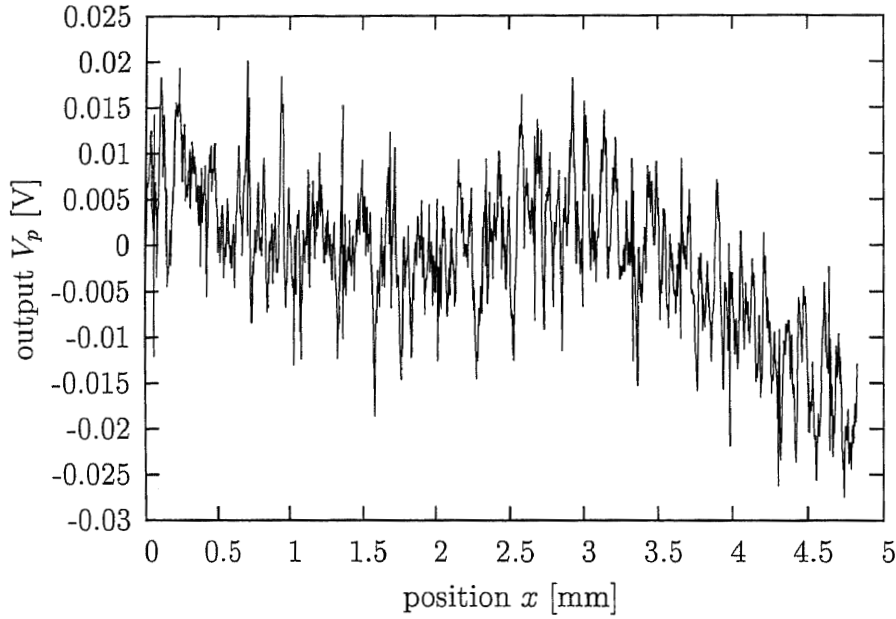


図 3.6: Output V_p from the PSD on the measurement of a standard flat plane having a surface flatness of $\lambda/20$. Horizontal axis is position, and vertical axis is output V_p whose unit is volt. Profile of output V_p is proportional to the slope distribution of the standard flat plane.

レーザビーム高速走査法における形状測定で，使用した光学部品の歪みによる誤差を取り除くためには，つぎの手順で測定を行えばよい：(1) 位置検出素子の出力 V_p を式 (3.4) に従って数値積分する．(2) 試料の z 軸方向位置決め誤差を取り除くため， V_p の積分結果から 2 次関数成分を減算する．(3) さらに光学部品の歪みによる誤差を取り除くために，プロファ

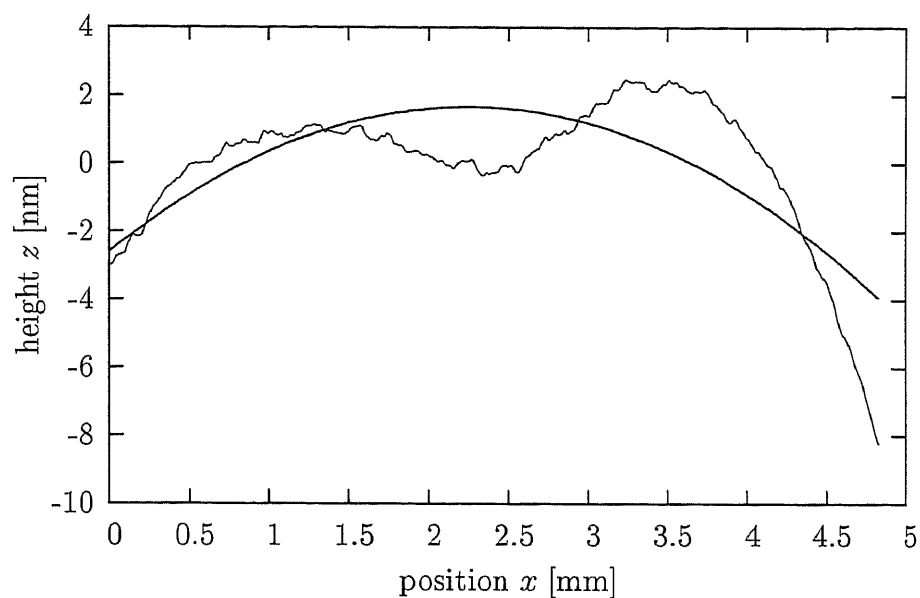


図 3.7: A thin line is integral of output V_p from the PSD on the measurement of the standard flat plane. Thick curved line a quadratic component of the thin line.

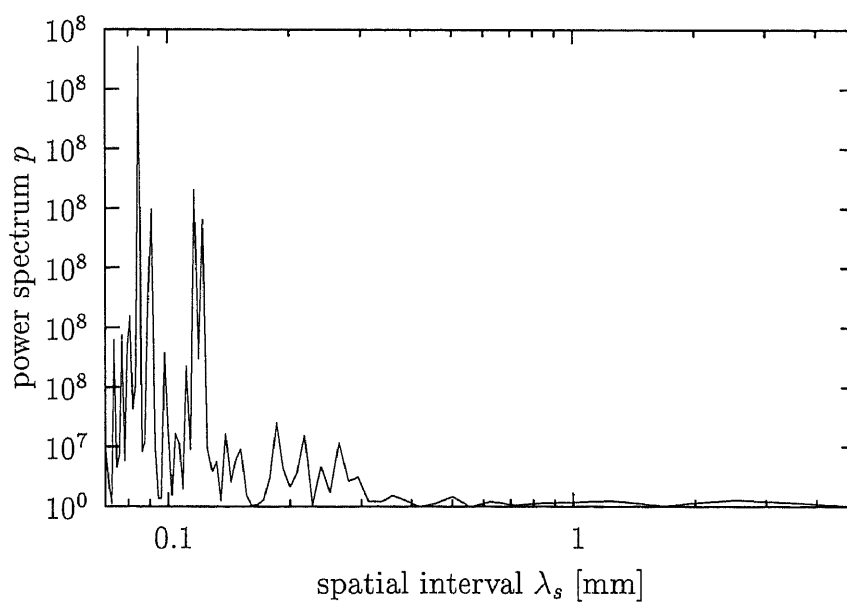


図 3.8: Power spectrum of output V_p on the measurement of the standard flat plane. Horizontal axis is spatial interval λ_s .

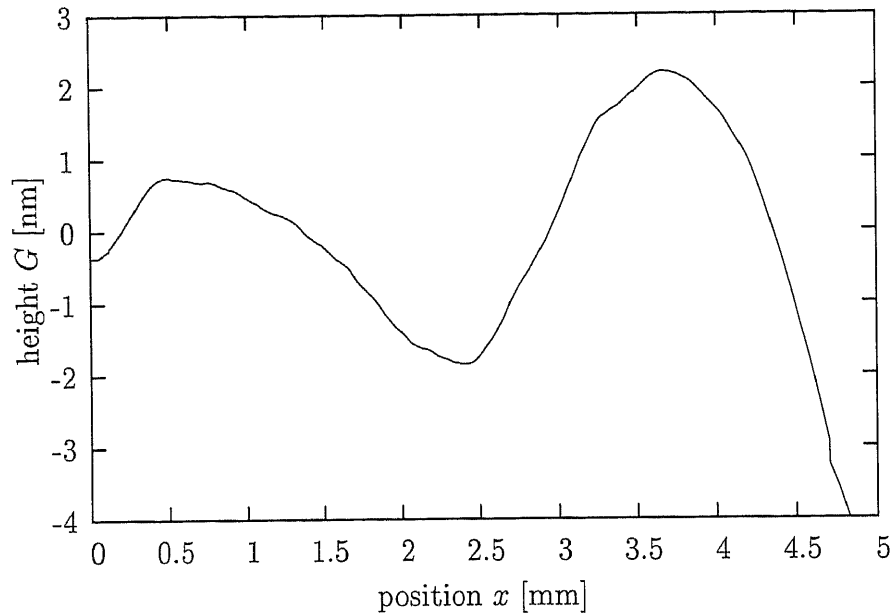


図 3.9: Profile G , which shows the influence of the surface distortion of optical components used in the setup.

イル G を減算する.

3.7 ポリゴンミラーの測定

最後にポリゴンミラーの表面形状を測定した.

ポリゴンミラーを測定したときの位置検出素子 DT の出力 V_p を図 3.10 に示す. 横軸はポリゴンミラー上の位置で, 縦軸は位置検出素子 DT の出力, 単位はボルト [V] である. 3.6 節で平面ミラーを測定したときの図 3.6 に比べ大きな振幅になっていることがわかる. 平面ミラーが研磨によって加工されたのに対し, ポリゴンミラーがフライスによって加工されているためであると考えられた.

図 3.10 に示される位置検出素子の出力 V_p から, 3.6 節で述べた測定の手順 (1)-(3) で得られる表面形状を図 3.11 に示す. 太線はレーザビーム高速走査法による測定結果で, 細線は干渉計 Wyko NT3300 による測定結果である. 両者の差は, 二乗平均平方根で 0.98nm だった.

レーザビーム高速走査法による表面形状測定の安定性を調べるために, 20 回の繰り返し測定を行った. その結果, 各測定結果のばらつきは, 二

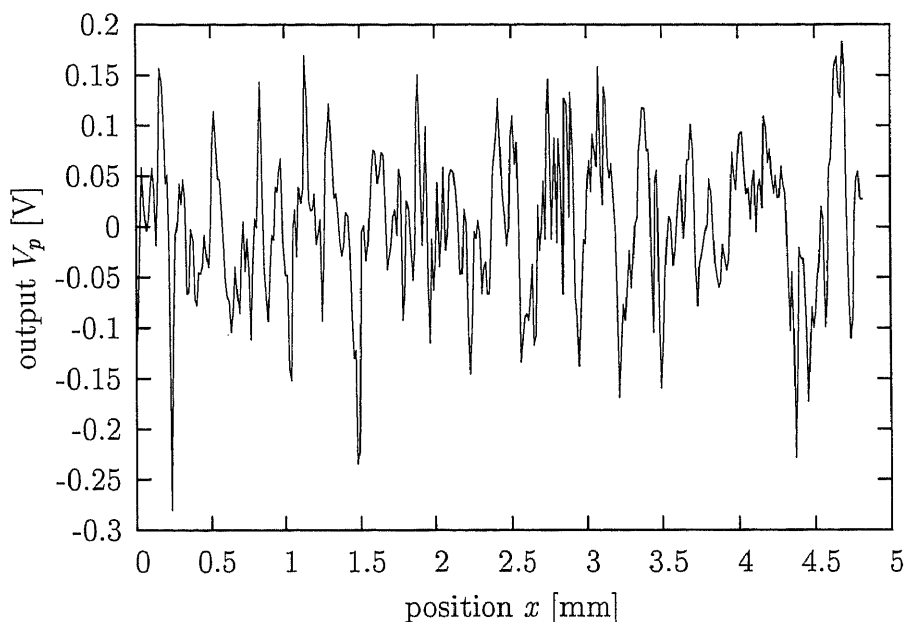


図 3.10: Output V_p from the PSD on the measurement of a polygonal mirror. Horizontal axis is position, and vertical axis is output V_p whose unit is volt. Profile of output V_p is proportional to the slope distribution of the polygonal mirror.

乗平均平方根で 0.31nm だった。

3.8 まとめ

レーザビーム高速走査法の基本的な測定能力を示すために、鏡面としてポリゴンミラーの表面形状測定をおこなった。

まず、実験装置の構成を示した。レーザビーム高速走査法は測定時間が 1ms と非常に高速で、その結果、形状測定において除震装置は必要なかった。検出面におけるビームスポットの変位を検出するために、位置検出素子 PSD が使われた。位置検出素子の受光素子上のビームスポットのその変位と、位置検出素子の出力の関係について調べた。その結果、ビームスポットの変位が小さければ、位置検出素子の出力はビームスポットの変位に比例することがわかった。また、これと同時に傾斜分布測定のための比例定数を決定した。幅 5mm のポリゴンミラーを測定するに当たり、実験装置で考えられる理論的な誤差を評価したところ、試料の z 軸

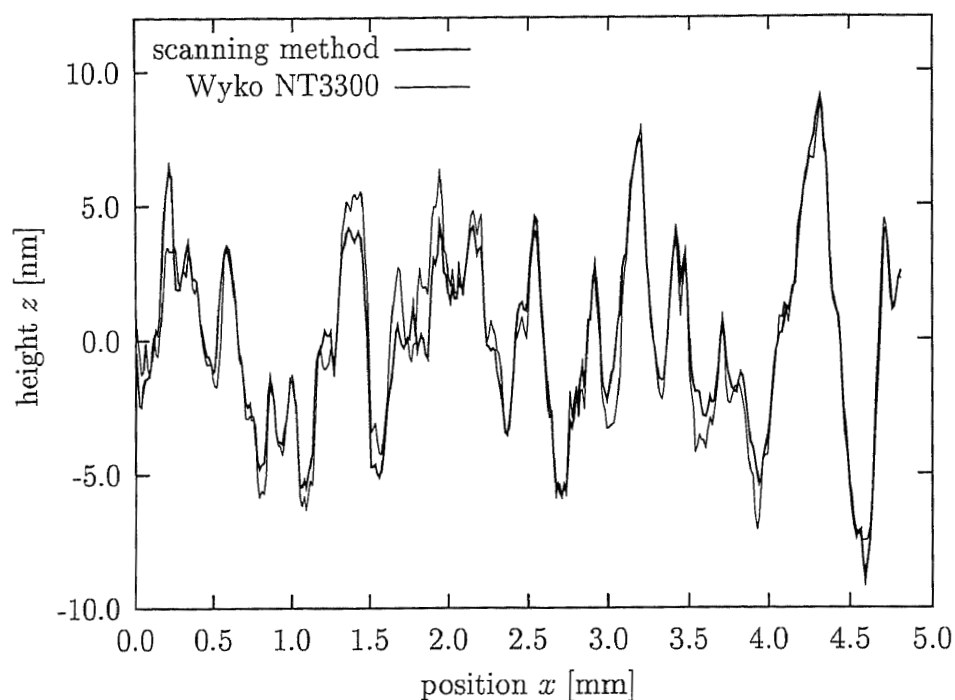


図 3.11: Measured surface profile of the polygonal mirror. Profile measured with the fast scanning method is plotted with thick line, and profile measured with Wyko NT3300 is plotted with thin line.

方向位置決め誤差が無視できないことがわかった。この誤差は、測定結果から2次関数成分取り除くことにより補正した。走査光学系で用いられた光学部品に由来する誤差は平面ミラーを基準平面として測定することにより得られるプロファイルを、測定結果から減算することにより補正した。最後に、ポリゴンミラーを測定し、干渉計 Wyko NT3300 による測定結果と比較した。両者の測定結果の差は二乗平均平方根で 0.98nm だった。また、繰り返し誤差は二乗平均平方根で 0.31nm だった。こうして、レーザビーム高速走査法はポリゴンミラーのような鏡面の測定に対し有効であることがわかった。

第4章 粗面の形状測定

4.1 はじめに

本章では、レーザビーム高速走査法で粗面測定が可能かどうか検討する。試料として測定されるのは、アルミ製 OPC(Organic Photo Conductor: 有機光導電体) ドラム基板である。ただし、OPC ドラム基板の形状検査については5章で述べる。

OPC ドラム基板は粗面なので、鏡面とは異なり、そこからの反射ビームは位置検出素子の大きさよりも広がる。レーザビーム高速走査法の検出面における広がった反射パターンの解析は、4.2節で CCD カメラを使って行われる。ここで、反射パターンは、細かいパターンと幅の広いパターンに分類される。節 4.3 で、反射パターンの中で最も明るい幅の広いパターンの位置に位置検出素子を配置すれば、OPC ドラム基板全体の傾斜を検出できることが示される。レーザビーム高速走査法を用いた測定装置を 4.4 節で示す。節 4.5 でレーザビーム高速走査法による OPC ドラム基板の形状測定を行う。触針式形状測定装置 Form Talysurf-S6 による測定結果を比較すると、表面形状は一致しないが、約 1mm 周期のうねり特性は一致していることがわかる。節 4.6 では、Form Talysurf-S6 の測定結果から、検出面における反射パターンをシミュレーションによって計算し、レーザビーム高速走査法による測定を数値的に再現する。その結果、シミュレーションにおいても、レーザビーム高速走査法の実験結果と矛盾はなく、表面形状は一致しないが、約 1mm 周期のうねり特性は一致していることが示される。4.7 節で、再びシミュレーションによって、なぜ約 1mm 周期のうねり特性を検出できるのかを調べる。

4.2 試料からの反射ビームパターン

測定された OPC ドラム基板の外観を図 1.2 に示す. OPC ドラム基板は旋盤によって切削加工されていたため, その表面に非常に細かな切削痕がある. それを確認するため, Taylor Hobson 社の触針式形状測定装置 Form Talysurf-S6 で OPC ドラム基板表面の円筒軸方向を 2mm にわたって測定した. これを図 4.1 に示す. 横軸は OPC ドラム基板上の位置, 縦軸は高さで単位は μm である. ここから, 表面形状に 3.2 節で述べた実験装置のビーム径 0.03mm よりも細かい構造があることがわかる. また約 0.1mm 周期で表面形状にピークが認められが, これは, 旋盤の切削工具の送り周期である. さらに, 切削工具の送りに静的誤差があり, OPC ドラム基板の表面形状に約 1mm 周期のうねりが現れることがある. レーザビーム高速走査法による表面測定では, 旋盤工具の送り周期よりも大きな約 1mm 周期うねり特性を検出したいので, 試料面である OPC ドラム基板のビームスポットの半値幅を約 0.2mm とした.

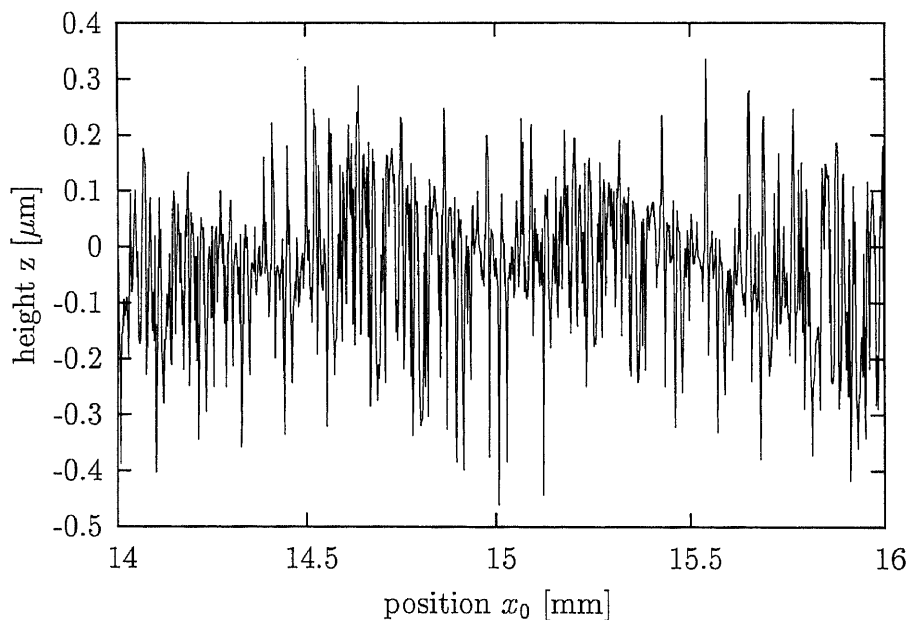


図 4.1: Surface profile of a OPC drum substrate measured with Form Talysurf-S6.

図 2.5 において, 試料面 S 上にガウシアンビームが入射したとき, そ

のビームスポット径よりも細かい構造があると、そこからの反射ビームのパターンは2.13節で示したようなガウシアン分布にはならず、検出面 DP 上で大きく広がる。検出面 DP 上の反射ビームのパターンは、レンズ DL によって位置検出素子上で1倍の像となるので、検出面 DP 上と位置検出素子上のビームの反射パターンは同一であると考えてよい。よって、反射ビームのパターンを検出面 DP 上で調べることにした。

検出面 DP における反射パターンを調べるために、図 2.5 で、図 2.9 に示される走査角を $\varphi = 0$ としたときと等価な図 4.2 の実験装置を用いた。光源 L は He-Ne レーザで、そこから放射されたビームはフォーカスレンズ FL をとおり、ミラーで方向を変え試料面 S 上の点 P に垂直に入射する。フォーカスレンズ FL の出口でのビームの半値幅は 5mm で、試料面上で半値幅が 0.2mm になるようフォーカスレンズ FL を調整した。ビーム経路 FL-P の長さは 200mm だった。試料面 S 上の点 P からの反射ビームは試料面 S に平行な検出面 DP に達する。検出面 DP は、図 4.2 の実験装置ではスクリーンであり、スクリーン上の反射パターンを CCD カメラで観測した。点 P と検出面 DP の距離は $l = 207\text{mm}$ だった。また、反射経路 P-DP がミラーと重ならないようにするため、入射経路 FL-P と反射経路 P-DP は y - z 面内で角度をつけた。ここでデカルト座標を図右上のように定義する。また、試料面 S 上の x 座標を x_0 と表示し、スクリーン上の x 座標を x_1 と表示した。試料面 S としての OPC ドラム基板は x ステージによって x 軸方向に移動できた。 x ステージによる OPC ドラム基板の移動は、レーザビーム高速走査法における試料面 S 上のビームスポットの走査に対応する。

図 4.2 の実験装置によって観測された検出面 DP 上の反射ビームのパターンを図 4.3 に示す。図の上部に反射パターンを、下部に反射パターンの強度分布を示す。中央部の2つの正方形は位置検出素子の受光面の大きさである $12\text{mm} \times 12\text{mm}$ を表している。横軸は検出面 DP 上の位置である。ここから、OPC ドラム基板からの反射ビームは、位置検出素子の大きさを超えて広がっており、強度の異なる細いパターンの集まりであることがわかった。細いパターンは、それぞれがほぼ等間隔で現れていることから、旋盤の切削工具の送りによる OPC ドラム基板表面の微細で周期的な構造によって生じていると考えられた。

つぎに、図 4.2 の x ステージを 0.05mm 間隔で移動したときの検出面 DP 上における反射パターンの変化を図 4.4 に示す。それぞれの図の大き

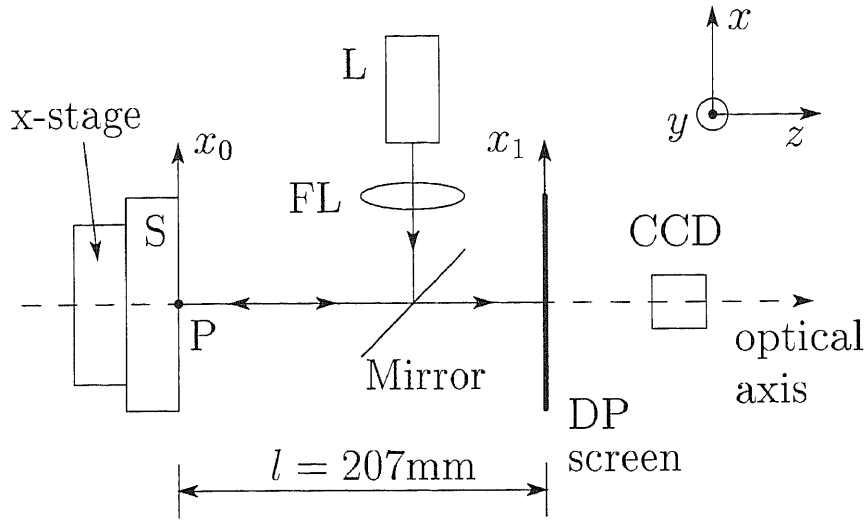


図 4.2: Experimental setup which is equivalent to the condition of $\varphi = 0$ in Fig.2.5. An OPC drum substrate as sample surface S is mounted on a x-stage.

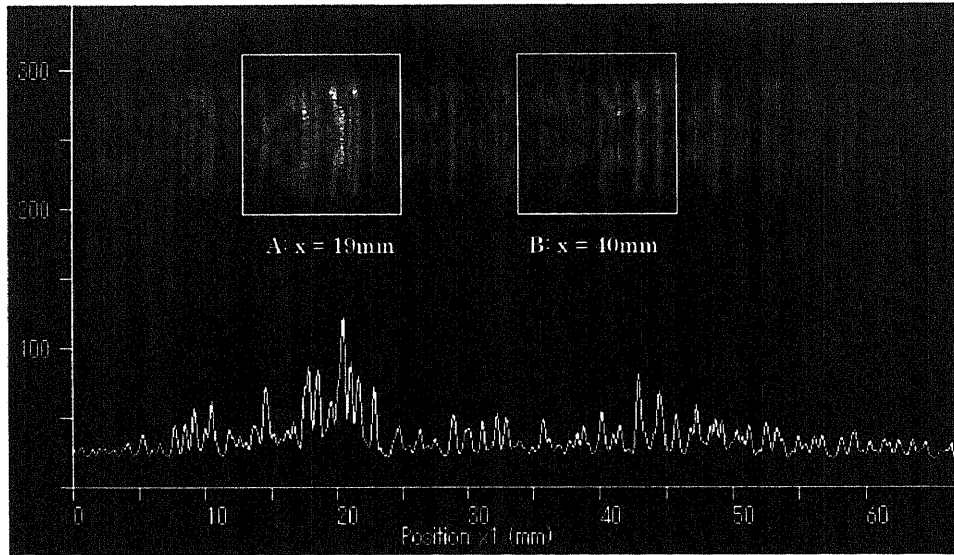


図 4.3: Upper part of the figure is a reflection pattern on detecting plane DP, and lower part is an intensity distribution of the reflection pattern. A square in the figure represents the PSD size of 12mm.

さは、位置検出素子の大きさに対応する。ここから、反射パターンに含まれる細かいパターンが、OPC ドラム基板上のビームスポットの位置の移動によって徐々に変化する事がわかった。

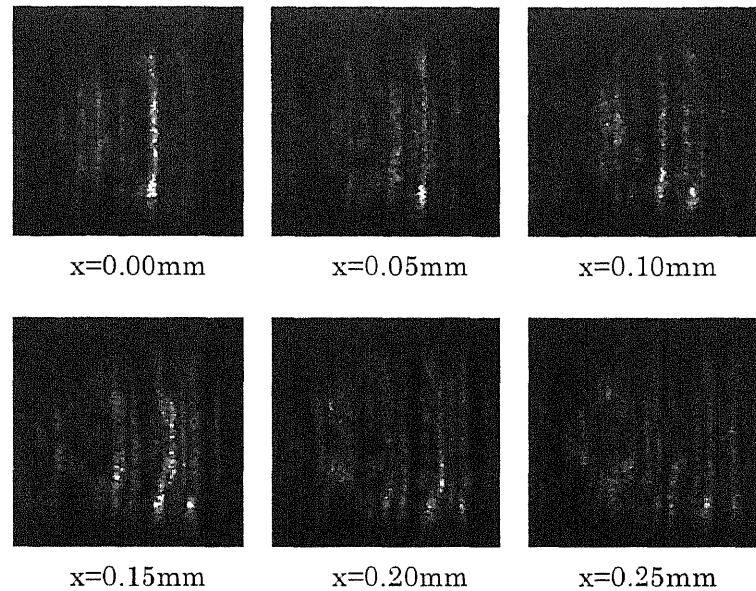


図 4.4: Variation of narrow patterns when a beam spot moves on a surface of OPC drum substrate. Values x below each figures are the position of the beam spot.

OPC ドラム基板上のビームスポットの位置の移動による細かいパターンの変化の平均的な特性を調べるために、図 4.2 の実験装置で x ステージを 0.05mm の間隔で 30mm 移動し、その都度 CCD カメラによって観測された 600 の反射パターンを平均化した。反射パターンの平均強度分布を図 4.5 に示す。横軸は検出面 DP 上の位置である。ここから反射パターンの平均的な強度分布には、位置 $x = 10, 19, 32, 43\text{mm}$ 付近のピークのような幅の広いパターンで現れる特性があることがわかった。この幅の広いパターンは、フラウンホーファー回折と、OPC ドラム基板表面の非常に微細な構造によると考えられた。

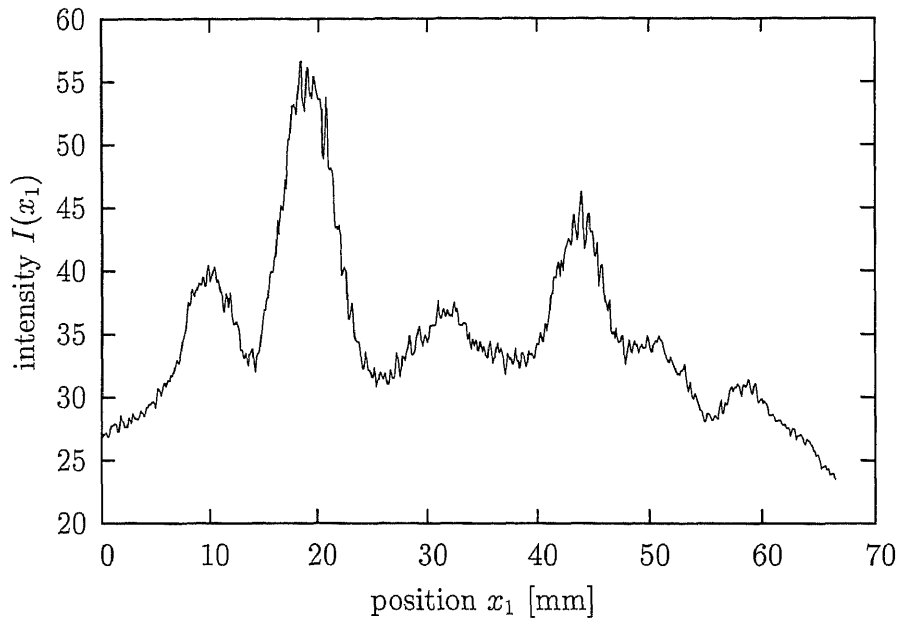


図 4.5: Average intensity distribution of reflection patterns reflected from an OPC drum substrate, which is observed with CCD camera on detecting plane DP.

4.3 試料の傾斜と位置検出素子の出力の関係

ここでは、OPC ドラム基板上的のビームスポットの移動なしに、OPC ドラム基板全体に傾斜を与えたとき、位置検出素子の出力が与えた傾斜に比例するかどうか調べる。

ビームスポットを移動せずに OPC ドラム基板に傾斜を与えたとき、その傾斜が小さければ、検出面 DP 上における反射パターン全体は、OPC ドラム基板に与えた傾斜に比例して x_1 軸方向に平行移動する。このとき、位置検出素子 DT を表す図 4.3 の正方形内の反射パターンの重心位置を求めれば、位置検出素子の出力を得たのと同様である。そこで、反射パターンの平行移動量が x_d のときの、正方形内の反射パターンの重心位置 x_b を計算した。計算は、図 4.3 に示される反射パターンにおいて、位置検出素子の中心が、図 4.5 で示される幅の広いパターンの中で最も明るい $x_1 = 19\text{mm}$ の幅の広いパターンの位置に一致しているときと、幅の広いパターンのない位置 $x_1 = 40\text{mm}$ に一致しているときについて行った。図 4.3 において、検出面 DP 上で $x_1 = 19\text{mm}$ に位置する位置検出素子は A

として, $x_1 = 40\text{mm}$ 位置する位置検出素子は B と示されている. 反射パターンの平行移動量は $\pm 2.08\text{mm}$ までとした. これは, 試料面 S と検出面 DP の距離が $l = 207\text{mm}$ であることから, 試料面 S が $\theta_d = \pm 0.00502\text{rad}$ 傾いたのに等しい.

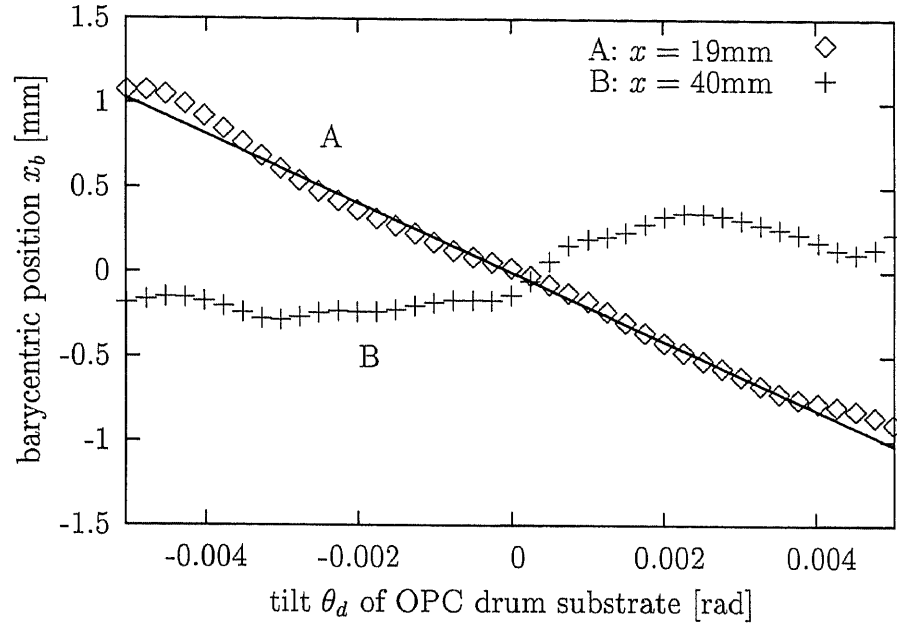


図 4.6: Barycentric position x_b inside a rectangle shown in Fig.4.3 when an OPC drum substrate tilts. A solid line is a least squer line of $x_b = -203\theta_d$.

計算結果を図 4.6 に示す. 横軸は反射パターンの試料面 S の傾斜 θ_d , 縦軸は正方形内の反射パターンの重心位置 x_b で, 位置検出素子の重心の平均値を x_b の原点としている. ダイヤモンドマーク \diamond は位置 $x_1 = 19\text{mm}$ の幅の広いパターンに, 十字マーク $+$ は幅の広いパターンのない位置 $x_1 = 40\text{mm}$ に関して計算したものである. 図で示されるように, $x_1 = 19\text{mm}$ の幅の広いパターンにおける重心位置 x_b は, 試料面 S の傾斜 θ_d に関してほぼ線形であるのに対して, 幅の広いパターンのない位置 $x_1 = 40\text{mm}$ における重心位置は, 試料面 S の傾斜と無関係な振る舞いをしている.

この結果から, OPC ドラム基板上でのビームスポットの移動なしに OPC ドラム基板に傾斜を与えたとき, 反射パターンのなかで最も明るい幅の広いパターンの位置に位置検出素子を配置すれば, その出力は与えた傾斜に比例すると考えられた.

4.4 実験装置

レーザビーム高速走査法を用いた測定装置において OPC ドラム基板を測定するため、図 2.5 に基づいた実験装置を以下のように構成した。

試料面 S は 5.2 節で述べたアルミ製 OPC ドラム基板だった。ビームスポット点 P は、スキャナミラー SM の回転によって、OPC ドラム基板の円筒軸方向に 30.3mm 走査した。光源 L は出力 5mW の He-Ne レーザ光源で、そこから放射されたレーザビームはフォーカスレンズ FL の出口で半値幅 5mm のガウシアンビームだった。凹球面ミラー CM の直径は 80mm で、曲率半径は $R = 400\text{mm}$ 、表面精度は $\lambda/4$ だった。また図 2.6 に示されているように 80mm×15mm の矩形に加工されているものを用いた。スキャナミラー SM と、平面ミラー PM および HM の表面精度は $\lambda/10$ だった。凹球面ミラー CM と試料面 S の距離は $R/2 = 200\text{mm}$ とした。試料面 S 上のビームスポットの半値幅は、フォーカスレンズ FL で調整でき、 $w = 0.2\text{mm}$ と $w = 0.05\text{mm}$ の場合について実験した。試料面 S と平面ミラー PM の距離は $\Delta L = 7\text{mm}$ とした。式 (2.12) から ΔL はパラメータ d にほぼ等しく、 $d = 7\text{mm}$ である。試料面 S と検出面 DP の距離 l は、式 (3.1) に従って $l = 207\text{mm}$ だった。レンズ DL は、色消しレンズで、その焦点距離は 100mm であり、このレンズ DL によって検出面 DT がディテクタ DT 上で等倍の像となるよう配置した。

位置検出素子 DT は浜松ホトニクス株式会社の 2 次元 PSD 型式 S1880 だった。位置検出素子上のビームスポット位置を検出するために、位置検出素子の出力を受光光量で除算する必要があるが、除算は米 Burr Brown 社のアナログ除算器 MPY634 を用いた。こうして得られる出力 V_p は 12bit のアナログ/デジタルコンバータを通してコンピュータに送られた。

スキャナミラー SM はサーボモータに取り付けられ、570rpm の角速度で回転してするように調整した。試料面 S とスキャナミラー SM の距離は 207mm だったので、試料面 S 上のビームスポットの走査速度は 15mm/ms だった。よって、実験装置は 30.3mm の測定領域を 2ms で測定できた。このために測定装置は 500kHz 以下の振動に対して不感になるので、測定において除震装置を用いなかった。

4.5 測定試験

レーザビーム高速走査法による測定のために、まず位置検出素子の出力 V_p と OPC ドラム基板に与えた傾斜 θ_d の関係について調べる。

位置検出素子の位置は、4.3 節の議論に従って、最も明るい幅の広パターンを検出できるよう調整した。図 3.3 で示されるように、OPC ドラム基板を試料面 S とし、それに傾斜ステージを使って θ_d の傾斜を与える。より正確な位置検出素子の出力と試料の傾斜の関係を調べるため、ビームスポットを走査している状態で、位置検出素子 DT の出力 V_p の平均値 $\overline{V_p}$ を測定した。OPC ドラム基板に与える傾斜は $\theta_d = 0\text{rad}$ から 0.0052rad までとした。傾斜 θ_d に対する平均出力 $\overline{V_p}$ のグラフを図 4.7 に示す。ダイヤモンド印は測定した箇所を示し、実線は、最小二乗法から得た直線である。ここから、位置検出素子の平均出力 $\overline{V_p}$ は OPC ドラム基板に与えられた傾斜 θ_d に比例しており、その関係は

$$\overline{V_p} = 171\theta_d, \quad (4.1)$$

であることがわかった。実験における試料面 S 上の空間的サンプリング間隔は $\Delta x = 0.00740$ なので、表面形状 F_p を求めるための数値積分は、式 (3.4) を求めたのと同様の方法で係数を計算すると、

$$F_{pj} [\mu\text{m}] = 0.0433 [\mu\text{m}/\text{V}] \sum_i^j V_{pi} [\text{V}], \quad (4.2)$$

である。ここで添え字 i, j は試料面 S 上の位置を表している。

実験装置で、OPC ドラム基板上的のビームスポットの半値幅が $w = 0.2\text{mm}$ の場合について形状測定を行った。測定された位置検出素子の出力 V_p から、式 (4.1) を使って得られた傾斜分布を図 4.8 に示す。図の横軸は、OPC ドラム基板上的の位置である。また、式 (4.2) を使って得られた表面形状 F_p は図 4.9 である。比較のため、Form Talysurf-S6 の測定結果に空間周期 0.25mm のカットオフを持つローパスフィルタを施した OPC ドラム基板の表面形状 F_l を図 4.10 に示す。レーザビーム高速走査法で測定された図 4.9 で示されるプロファイル F_p は、Form Talysurf-S6 による測定結果 F_l の図 4.10 に比べ、10 倍程度の大きな振幅を持っていた。レーザビーム高速走査法と Form Talysurf-S6 とで、OPC ドラム基板上的の同一箇所を測定したのではないが、10 倍の違いは非常に大きい。これは、OPC ドラム基

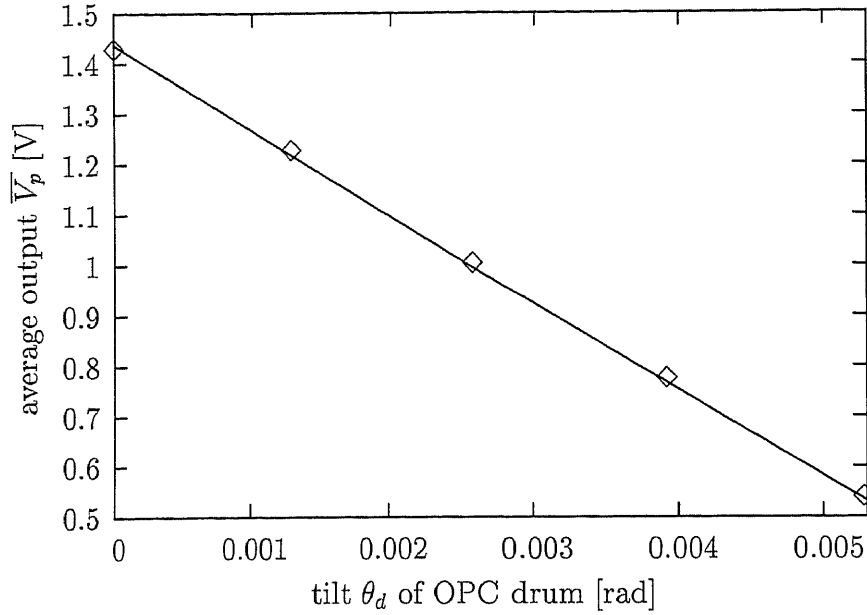


図 4.7: Average output \bar{V}_p from the PSD when the tilt of OPC drum is θ_d . Solid line is a least square line of $f(\theta_d) = -171\theta_d + 1.44$.

板上でビームを走査したときに生じる図 4.4 で示されるような検出面 DP 上のパターンの変化が、必ずしも OPC ドラム基板表面の傾斜に依存していないためであると考えられる。一方、図 4.10 のプロファイルに F_l は、約 1mm 周期で繰り返されるうねりが存在するが、レーザビーム高速走査法で測定された図 4.9 のプロファイル F_p でも同様のうねりを確認することができた。

OPC ドラム基板には、約 1mm 周期のうねり以外にも、図 4.1 で示したように、旋盤の切削工具の送りによる 0.1mm 周期の振幅も存在する。レーザビーム高速走査法で切削工具の送りを検出できるか確認するため、OPC ドラム基板上のビームスポットの半値幅を $w = 0.05\text{mm}$ として測定した。測定された位置検出素子の出力 V_p から、式 (4.1) を使って得られた傾斜分布を図 4.11 に示す。図の横軸は、OPC ドラム基板上的位置である。また、式 (4.2) を使って得られたプロファイル F_p は図 4.12 である。図 4.12 から直接 0.1mm の切削工具の送りを確認するのは難しいので、図 4.12 で示されるプロファイルのパワースペクトラムを計算した。それを図 4.13 に示す。横軸は空間周期で、縦軸は強度である。図において空間周期 $\lambda_s = 1\text{mm}$ 付近にピークが存在するが、これはビーム径 $w = 0.2\text{mm}$

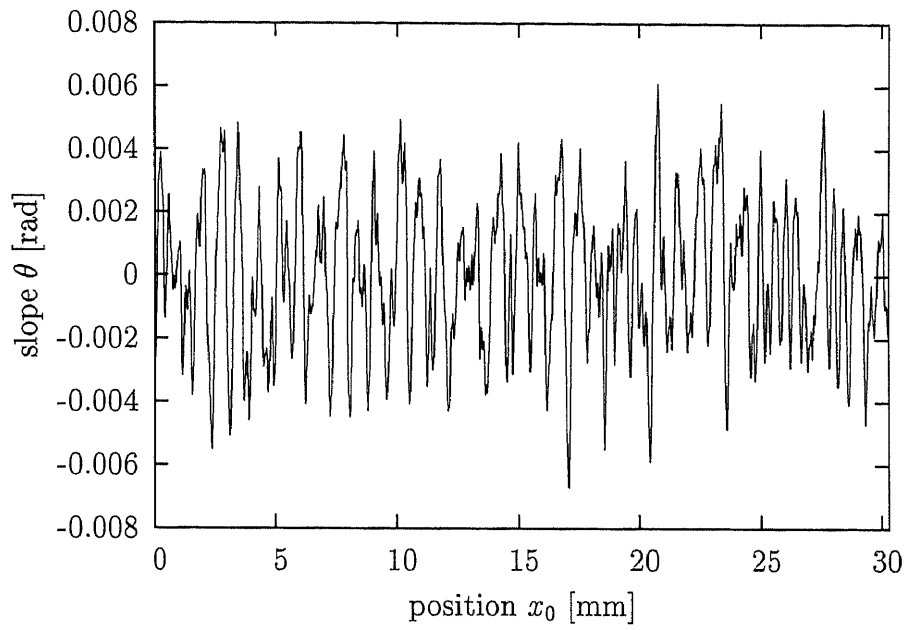


図 4.8: Slope distribution of an OPC drum substrate measured with the fast scanning method.

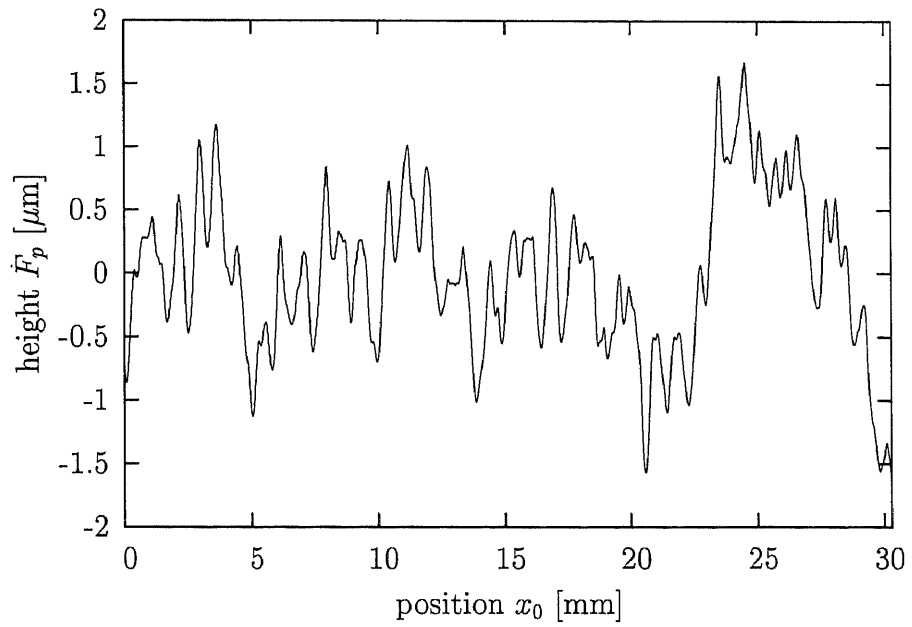


図 4.9: Surface profile of an OPC drum substrate measured with the fast scanning method.

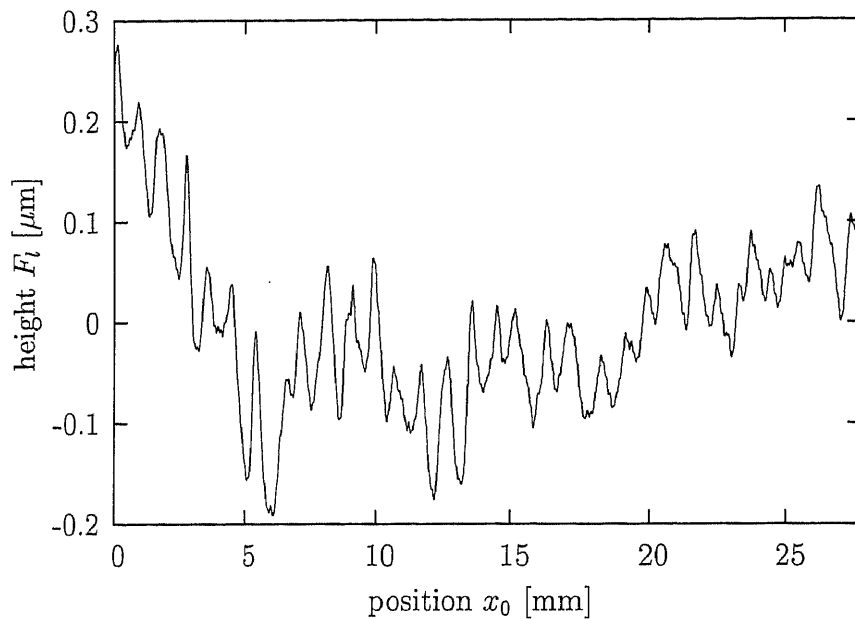


図 4.10: Surface profile measured by Form Talysurf-S6 processed with low pass filter having a cut off of 0.25mm-spatial period.

における測定であられたうねり特性である。また、空間周期 $\lambda_s = 0.1\text{mm}$ 付近にピークがあるが、これが 0.1mm の切削工具の送りによって生じた形状特性である。

以上のことから、レーザビーム高速走査法を用いた測定装置の出力の積分のプロファイルは、元の形状をそのまま再現することはできないが、OPC ドラム基板の表面形状の周期的特性を検出できることがわかった。

4.6 粗面形状測定の数値シミュレーション

実験で測定される OPC ドラム基板は図 4.1 で示したように、すでに Form Talysurf-S6 で測定されているが、レーザビーム高速走査法を用いた測定装置で OPC ドラム基板上の同一個所を測定し、元の形状と比較するのは非常に困難である。そこで Form Talysurf-S6 の測定結果から検出面 DP 上の反射パターンを数値シミュレーションで計算し、シミュレーションから得られる表面形状と、Form Talysurf-S6 の測定結果を比較した。

OPC ドラム基板は旋盤により切削加工されているため、その円周方向の形状はほぼ一定であると考えられる。そこで、数値シミュレーション

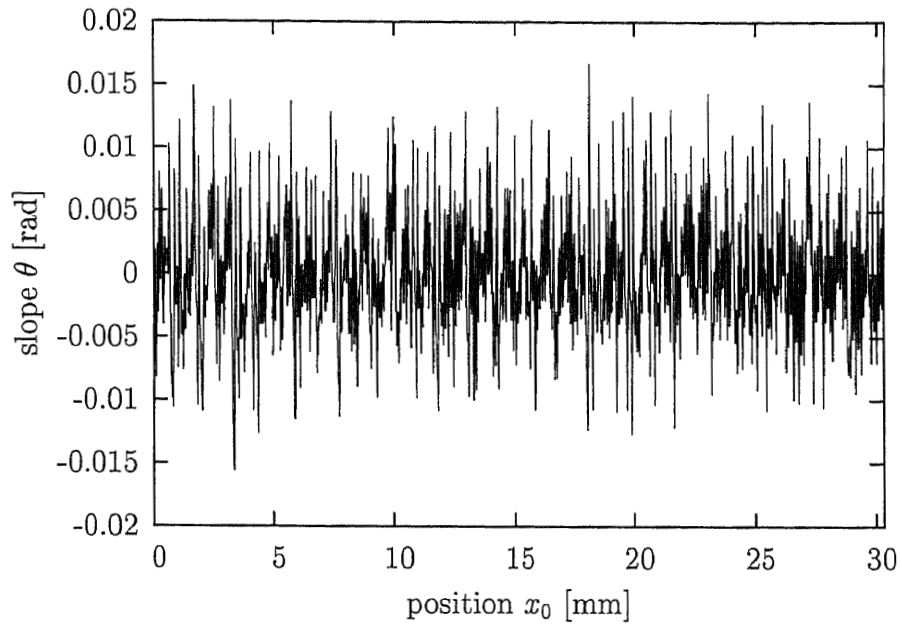


図 4.11: Slope distribution θ of an OPC drum substrate measured by the fast scanning method with beam diameter $w = 0.05\text{mm}$.

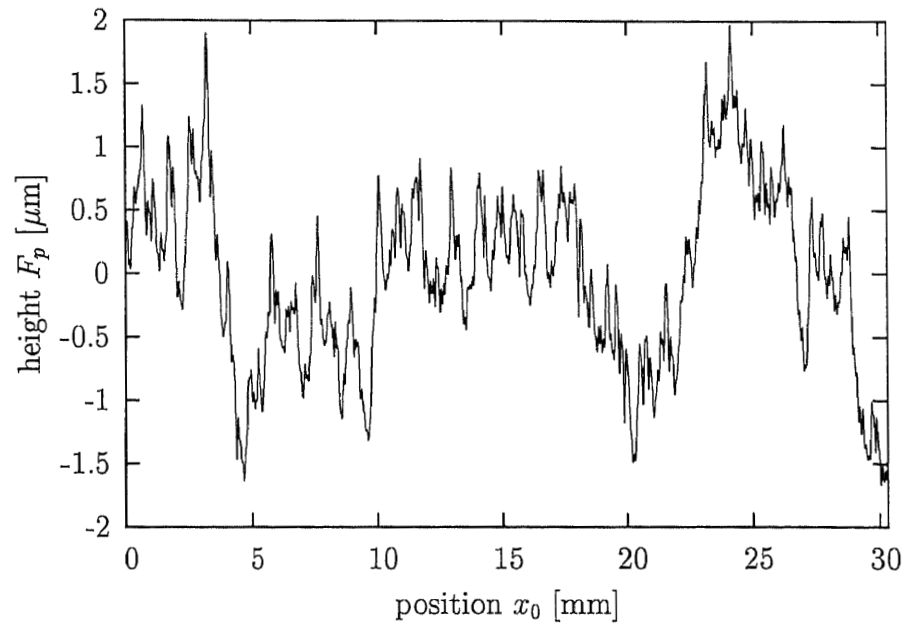


図 4.12: Surface profile F_p of an OPC drum substrate measured by the fast scanning method with beam diameter $w = 0.05\text{mm}$.

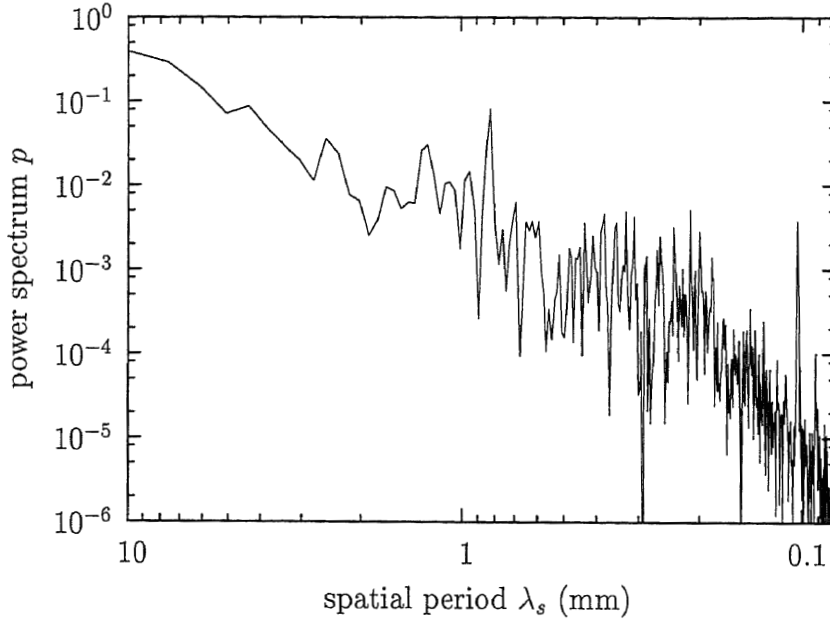


図 4.13: Power spectrum of slope distribution θ measured by the fast scanning method with beam diameter $w = 0.05\text{mm}$.

は OPC ドラム基板の円筒軸方向の 1 次元で行なった。シミュレーションの基礎方程式は、1 次元のキルヒホッフ積分、

$$u(x_1, l) = \sqrt{\frac{i}{\lambda}} \int_{\Sigma} u(x_0, 0) \frac{e^{-ikr} \cos \beta + 1}{\sqrt{r}} dx_0, \quad (4.3)$$

だった。図 4.14 に示すように、 x_0 は試料面 S 上の座標、 x_1 は検出面 DP 上の座標で、それぞれの面は互いに平行である。 $u(x_0, 0)$ と $u(x_1, l)$ はそれぞれ試料面 S と検出面 DP における光電界分布である。試料面 S 上点から検出面 DP 上の点へのベクトルを \vec{r} とすと、その大きさは $r = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + l^2}$ である。ここで l は、試料面 S と検出面 DP の距離で、図 4.2 の実験装置同様 $l = 207\text{mm}$ とした。波数ベクトル \vec{k} は反射ビームの波面に垂直で、その大きさは $k = 2\pi/\lambda$ である。ここで λ は光源の波長で $\lambda = 632.8\text{nm}$ とした。角 β は、波数ベクトル \vec{k} とベクトル \vec{r} の成す角である。光電界分布 $u(x_0, 0)$ の強度分布は、図 4.15 に示すように、試料面 S 上でビームスポットが半値幅 h が $h = 0.2\text{mm}$ のガウス分布であるものを仮定した。また、図 4.2 のレンズ FL でビームの半値幅が 5mm かつレンズ FL から試料面 S までの距離が 200mm なので、入射ビームの波面は図 4.15 のように $\alpha = 0.2/8$ の広がりを持つ球面波を仮定した。したがって、光電界分

布 $u(x_0, 0)$ の位相分布も球面波を考慮する必要があった。図 4.15 における試料面上の点 P の位相の球面波による寄与 p_s は、点 P の座標を x_0 とすれば、

$$p_s = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{1}{\cos(\alpha/2)} - 1 \right) \frac{x_0}{\tan(\alpha/2)},$$

で与えられる。さらに試料面 S の表面形状 F が光電界分布 $u(x_0, 0)$ の位相へ与える寄与 p_F は、点 P で、

$$p_F = -\frac{2\pi}{\lambda} \frac{2F(P)}{\cos(\alpha/2)},$$

である。以上より光電界分布 $u(x_0, 0)$ は、

$$u(x_0, 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x_0^2}{2\sigma^2}\right) \exp\{-i(p_s + p_F)\}, \quad (4.4)$$

とした。ただし、 σ は標準偏差で $\sigma = h/(2\sqrt{2\log 2})$ である。入射ビームは球面波なので、試料面上の各点で入射ビームの波数ベクトル \vec{k}_i の向きは異なる。図 4.15 における試料面上の点 P の傾斜が θ のとき、反射ビームの波数ベクトル \vec{k} は、入射ビームの波数ベクトル \vec{k}_i との成す角が $\alpha - 2\theta$ となるようにを決めた。積分領域 Σ は $\pm 4\sigma$ とした。数値積分は台形公式を用いた。計算で使われる試料面 S の幅は x_0 軸に沿ってに 28mm、試料面 S 上のグリッド間隔は、正確な積分を実行するために、波長 λ の 1/10 よりも小さな 5×10^{-5} mm とした。検出面 DP は x_1 軸に沿って幅 100mm、グリッド間隔は 0.02mm とした。試料面 S 上の 0.02mm 間隔、幅 26mm に関して反射パターン $I_s(x_{1i})$ が計算された。ここで計算された反射パターンは 1301 あり、添え字 i は 1 から 1301 をとる。

計算された 1 つの反射パターンの強度分布 $I_s(x_1)$ を図 4.16 示す。横軸は検出面 DP 上の位置である。図 4.3 で示される CCD カメラで観測した反射パターンと同様に多くの細かいパターンが確認できた。

つぎに、反射パターンの平均強度分布 $\bar{I}_s(x_1) = 1/1301 \cdot \sum_i I_s(x_{1i})$ を図 4.17 に示す。検出面 DT 上の位置 $x_1 = 0$ mm に幅の広いパターンを確認できた。これは、CCD カメラによって得られた反射パターンの平均強度分布、図 4.5 の $x_1 = 19$ mm に位置する幅の広いパターンに対応する。平均強度分布、図 4.17 には、図 4.5 の $x_1 = 32$ mm に対応する幅の広いパターンを確認できないが、これは、Form Talysurf-S6 の触針測定で OPC ドラム基板表面の非常に微細な成分が失われたためだと考えられる。

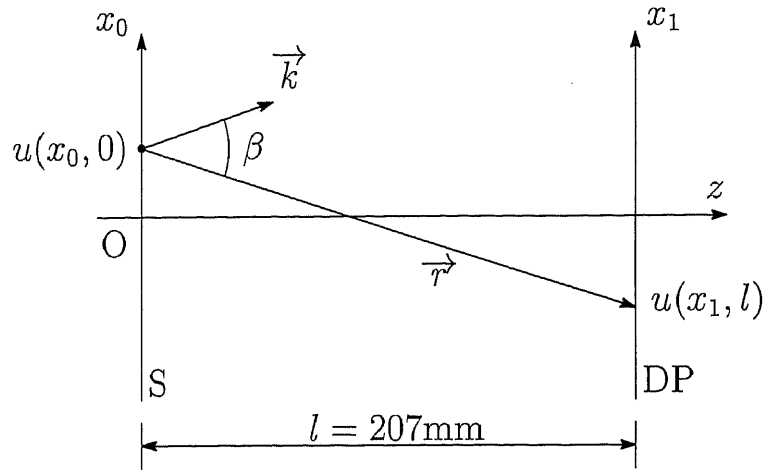


図 4.14: Parameters for the simulation.

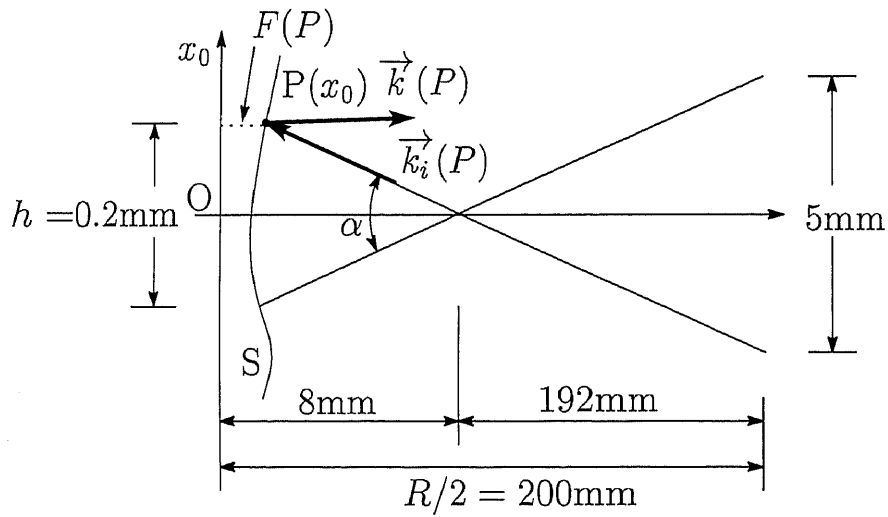


図 4.15: Wavefront of the incident beam.

以上のように、反射パターンのシミュレーションから CCD カメラで観測される反射パターンと類似した結果を得たので、つぎに、節 4.5 のレーザービーム高速走査法の実験で、位置検出素子の出力の平均値 \bar{V}_p と OPC ドラムの傾斜 θ_d の関係、図 4.7 を得た実験に等価な計算を行う。位置検出素子の出力の平均値 \bar{V}_p は、このシミュレーションでは反射パターンの平均強度分布 $\bar{I}_s(x_1)$ の重心位置 x_b に対応する。図 4.17 に示されるように、位置検出素子が反射パターンの平均強度分布 $\bar{I}_s(x_1)$ の $x_1 = 0$ に位

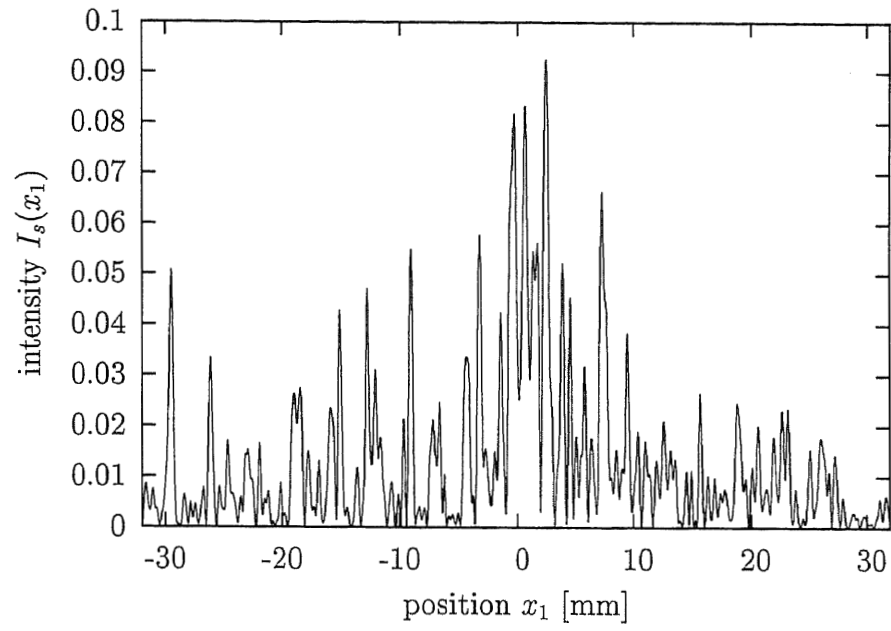


図 4.16: Intensity distribution of simulated reflection pattern on detecting plane DP.

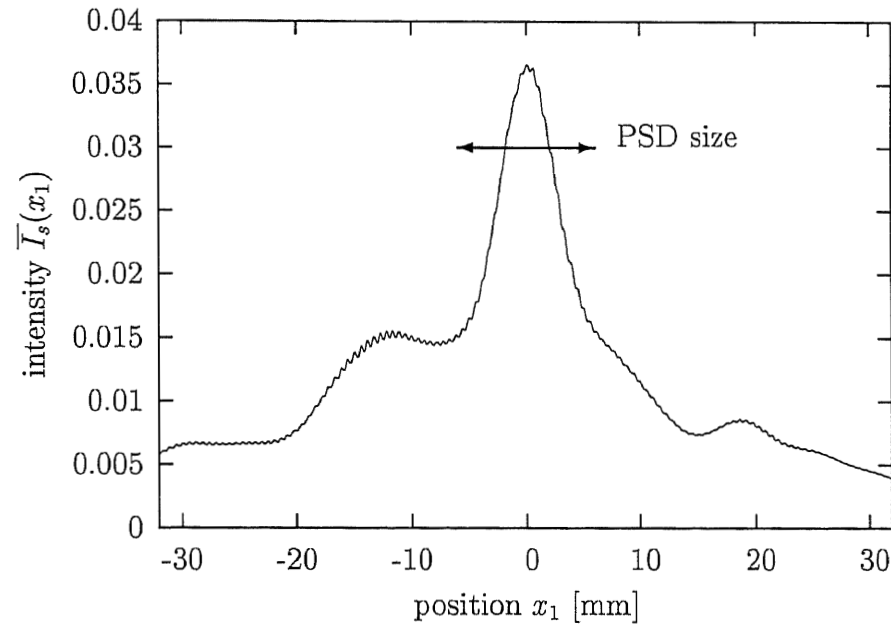


図 4.17: Average intensity distribution of simulated reflection patterns on detecting plane DP.

置する幅の広いパターンに配置されているとし、位置検出素子の大きさである 12mm の内側で重心位置 x_b を計算した。OPC ドラム基板に傾斜を与えることは、与えた傾斜が小さいとき、反射パターンの平均強度分布 $\overline{I}_s(x_1)$ を x_1 方向への平行移動するのに等しい。計算で、平行移動量を $x_d = \pm 2\text{mm}$ とした。これは、OPC ドラム基板に $\theta_d = \pm 0.0048\text{rad}$ の傾斜を与えたのに対応する。計算された重心位置 x_b と OPC ドラム基板に与えた傾斜 θ_d の関係を図 4.18 に示す。横軸は反射パターンの平均強度分布 $\overline{I}_s(x_1)$ の平行移動を OPC ドラム基板の傾斜 θ_d に換算した量で、縦軸は重心位置 x_b である。ここから、重心位置 x_b は OPC ドラム基板の傾斜 θ_d に線形で、最小二乗直線の計算から、

$$x_b = -157\theta_d, \quad (4.5)$$

の関係があることがわかった。

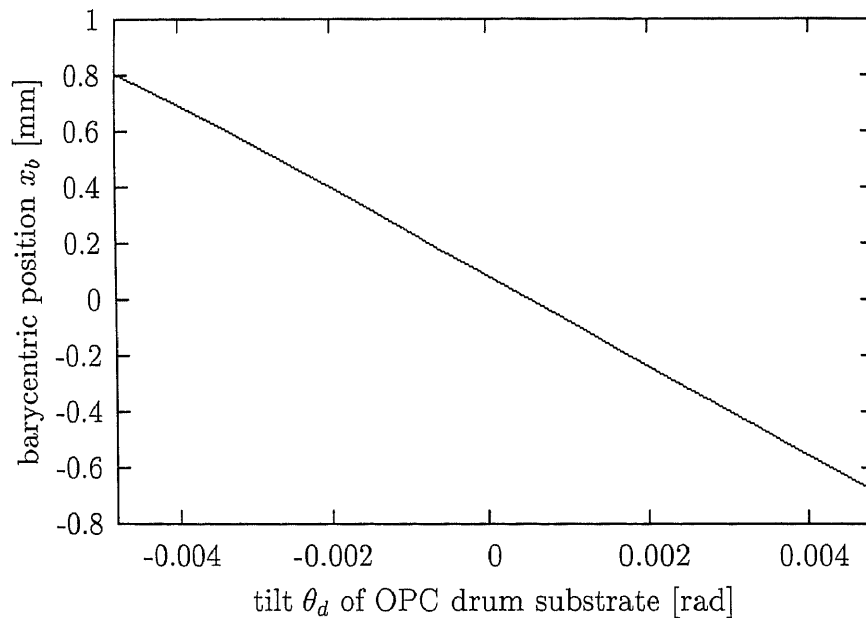


図 4.18: Barycentric position x_b of a wide pattern on average distribution $\overline{I}_s(x_1)$ when the tilt of an OPC drum substrate is θ_d .

シミュレーションで計算された反射パターン $I_s(x_{1i})$ の重心位置 x_{bi} から、式 (4.5) を使って、OPC ドラム基板表面の円筒軸方向の傾斜分布を計算したのが、図 4.19 である。横軸は、OPC ドラム基板上の位置で、縦

軸は各点の傾斜 θ である．この傾斜分布 θ を積分して OPC ドラム基板の 1 次元表面形状 F_s を求めると，図 4.20 となった．レーザビーム高速走査法の，ビームの半値幅 $w = 0.2\text{mm}$ 場合に得た図 4.9 の測定結果 F_p と比較すると，振幅はほとんど等しかった．また，Form Talysurf-S6 で得た図 4.10 で示される表面形状 F_l と同様に約 1mm 周期のうねり特性を持っている．従って，シミュレーションにおいても，レーザビーム高速走査法を用いた測定装置の出力の積分のプロファイルは，元の形状をそのまま再現することはできないが，OPC ドラム基板の表面形状の周期的特性を検出できることが示された．

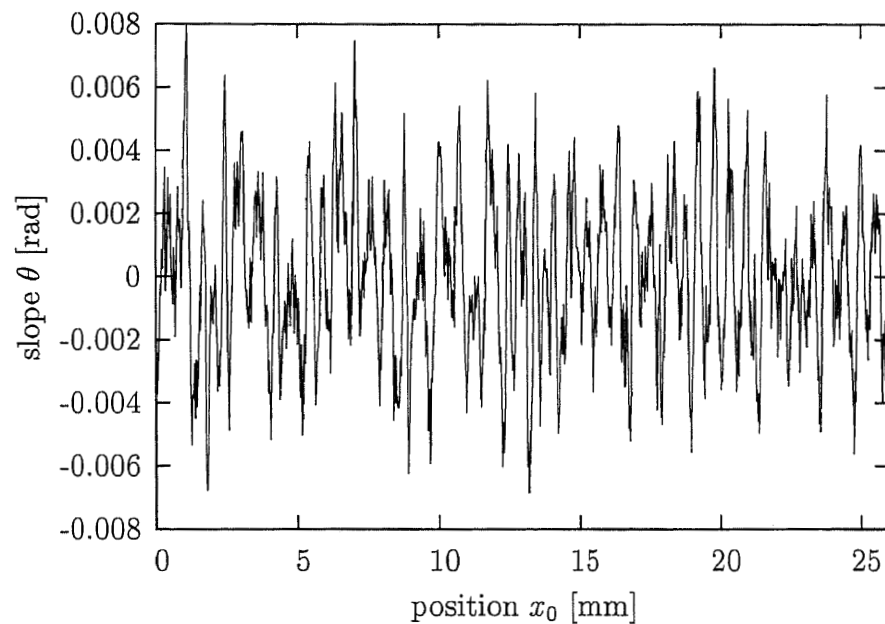


図 4.19: Slope distribution θ of a OPC drum substrate calculated from numerical simulated reflection patterns.

4.7 平面は入射による反射パターン

ここでは，OPC ドラム基板上でビームスポットを走査したときに得られる，検出面 DP 上の反射パターンの変化が，必ずしも OPC ドラム基板表面の傾斜分布に依存していなにかかわらず，なぜ約 1mm 周期のうねりが検出できたのかを数値シミュレーションで調べる．

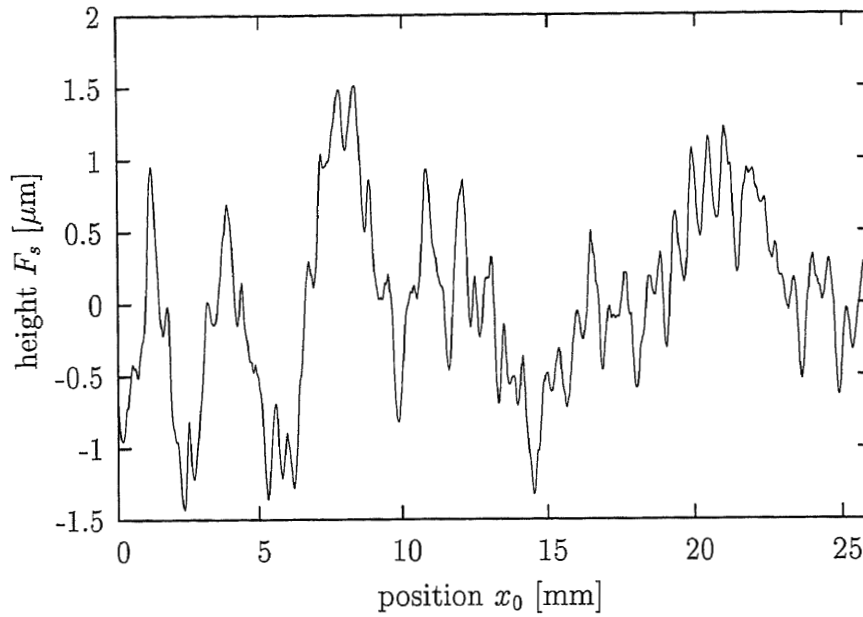


図 4.20: Surface profile F_s of a OPC drum substrate calculated from numerical simulated reflection patterns.

シミュレーションは4.6節で述べた条件で行うが、試料面SであるOPCドラム基板上的光電界分布 $u(x_0, 0)$ のために、半値幅 0.2mm のガウシアン分布をもつ平面波、を仮定した。シミュレーションにおいて、OPCドラム基板に平面波を入射したときの検出面DP上の反射パターンには、球面波の場合に比べ、細いパターンの数がきわめて少なく、OPCドラム基板上でビームスポットが移動するときのパターンの変化もきわめて小さかった。そのため、OPCドラム基板上的各点からの反射パターンの違いを確認しやすかった。

シミュレーションで得られた反射パターンの強度分布を図4.21に示す。図4.21には、OPCドラム表面上のビームスポットの位置 x_0 が表示されており、その上の小さな図が対応する反射パターンの強度分布である。それぞれの図の横軸は検出面DP上の位置 x_1 で、原点を中心に幅が 20mm である。OPCドラム基板上的位置 $x_0 = 16.60\text{mm}$, 17.72mm , 18.84mm の反射パターンの強度分布に注目すると、それぞれのプロファイルは非常に似通っていた。つまり、OPCドラム基板上でビームスポットが約 1mm 移動するごとに、類似した反射パターンが繰り返されると考えられた。この 1mm 周期の反射パターンの繰り返しが4.6節のシミュレーションで得

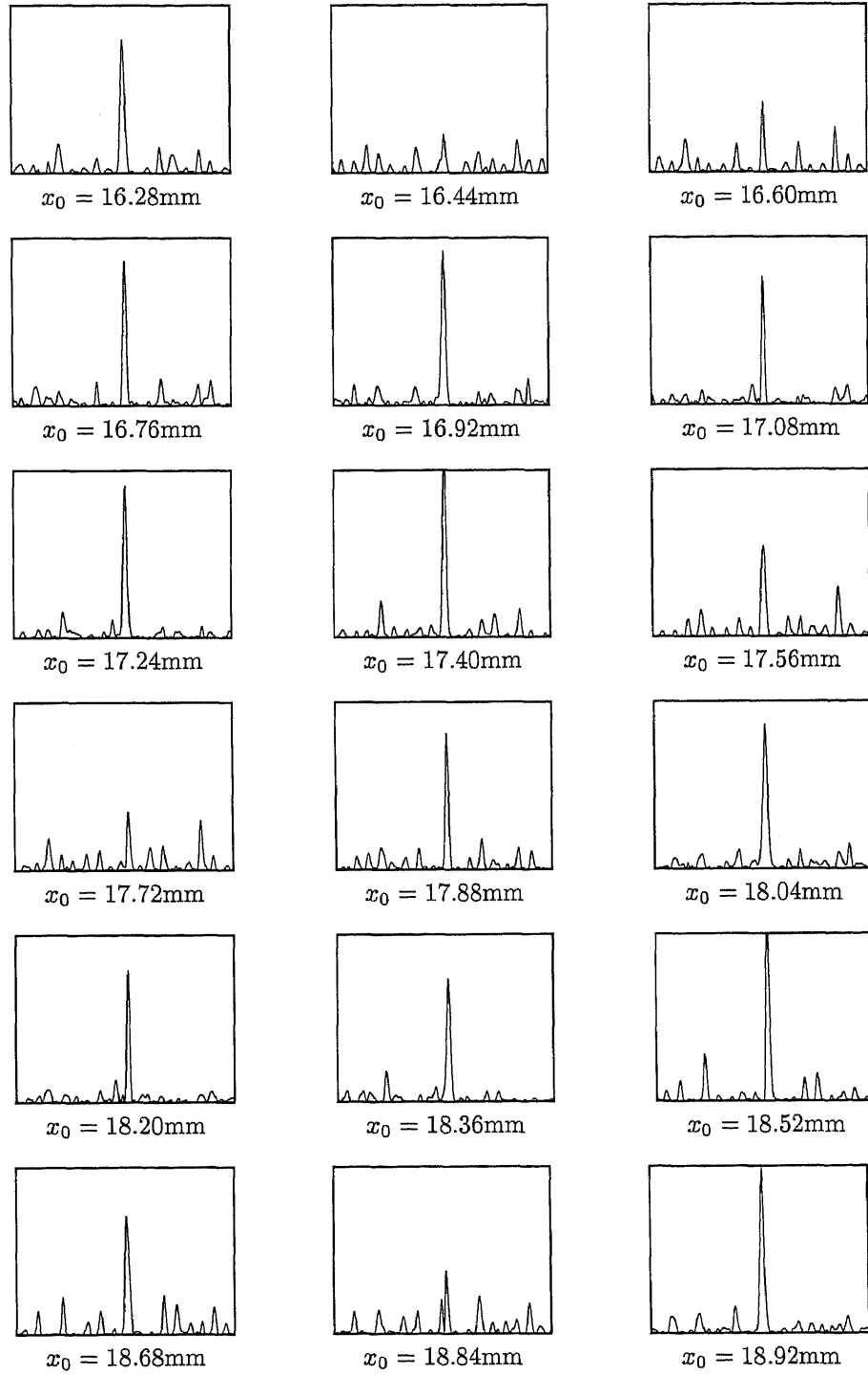


図 4.21: Simulated reflection pattern when a plane wave is incident into OPC drum substrate.

た図 4.10 で示される 1 次元表面形状のプロファイルにおいて約 1mm 周期の振幅となって現れたのだと考えられた。

4.8 まとめ

レーザビーム高速走査法で粗面測定が可能かどうか検討した。

レーザビームを OPC ドラム基板に入射したとき、そこからの反射ビームは、OPC ドラム基板の表面が粗面であるために、大きく広がった。検出面上での反射パターンを CCD カメラを使って解析した。反射パターンは、細かいパターンと幅の広いパターンに分類されることがわかった。反射パターンの中で最も明るい幅の広いパターンの位置に位置検出素子を配置すれば、OPC ドラム基板全体の傾斜を検出できることがわかった。レーザビーム高速走査法を用いた測定装置により OPC ドラム基板の 1 次元表面形状を測定し、触針式形状測定装置 Form Talysurf-S6 で測定された表面形状と比較したところ、形状の振幅は一致しないが、約 1mm 周期のうねり特性は一致していることがわかった。また、OPC ドラム基板上のビームスポットを小さくすれば、切削工具の送りである約 0.1mm 周期の特性を検出できることがわかった。レーザビーム高速走査法を用いた測定装置で Form Talysurf-S6 で測定されたのと同じ個所を測定するのは非常に困難なので、数値シミュレーションによってレーザビーム高速走査法による測定を再現した。その結果、シミュレーションによって得られた 1 次元表面形状の振幅は、実際のレーザビーム高速走査法によって得られた表面形状の振幅と同程度であった。また、約 1mm 周期のうねり特性は一致していた。再びシミュレーションによって、なぜ約 1mm 周期のうねり特性を検出できたのかを調べたところ、反射パターンが約 1mm の周期で類似したパターンを繰り返すためだとわかった。

第5章 表面形状特性検査装置への応用

5.1 はじめに

本章では、レーザビーム高速走査法をアルミ製 OPC ドラム基板のための形状特性検査装置に応用する。

OPC ドラムはレーザプリンタ、ファクシミリ、コピー機などで幅広く利用されており、今日の生活ではなくてはならない精密部品の一つになっている。OPC ドラムの製造過程において、その基板表面や有機光導電体の塗布後の状態を検査するために、CCD カメラによる自動かつ全数の外観検査が行われているが、この検査は OPC ドラム表面の埃や傷などの物理的欠陥や塗布された有機光導電体色むらを検出するのみである。一方、OPC ドラム基板の表面形状特性は、触針式の形状測定装置を用いた抜きとり検査を行うか、あるいは人の肉眼による目視検査によるしかなかった。工場から不良品の出荷を抑制するためには、抜きとり検査では不十分である。また人の目視検査は検査品質が不安定かつ定量的でないので、OPC ドラム基板の製造現場ではインプロセスで定量的な検査が可能な形状特性検査装置の要求があった。

第4章の結果にしがえば、レーザビーム高速走査法を用いた装置は、OPC ドラム基板表面の形状特性を検出できる。さらに、レーザビーム高速走査法は測定時間が非常に短く、除震装置や特別な測定室を必要としない。したがって加工設備に隣接してレーザビーム高速走査法を用いた装置を設置したとしても、加工装置の機械的振動は装置による測定への影響はほとんどない。これらのことから、レーザビーム高速走査法を用いた測定装置はインプロセスの形状検査装置への応用が期待できる。

まず5.2節で、形状特性が不良となる OPC ドラム基板が、どのような形状をしており、どのような不良を引き起こすのか説明する。不良 OPC ドラム基板には円筒軸方向表面形状に約 1mm 程度の周期的うねりがあり、

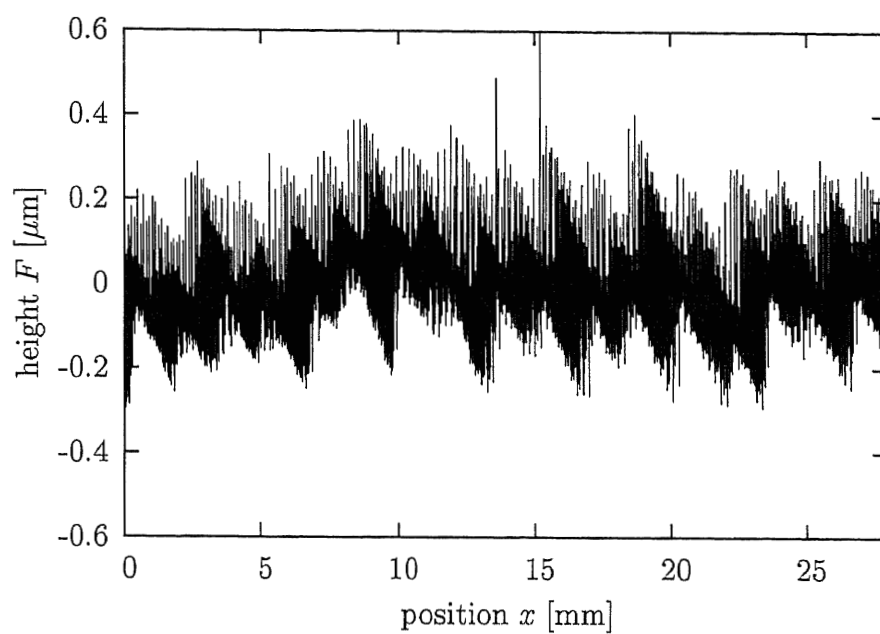
これが印字不良を起こす原因となる。OPC ドラム基板の形状特性検査のため、不良原因となる 1mm 周期のうねりを検出し、良・不良の 2 値化をする方法を示す。それには OPC ドラム基板表面形状のパワースペクトラムが使われる。レーザビーム高速走査法を OPC ドラム基板の形状特性検査に応用するための実験装置の構成は 5.3 節に示す。OPC ドラム基板の表面は微細な構造を持っているため、そこからの反射ビームは、鏡面の場合と異なり、大きく広がる。この状態における位置検出素子の出力のパワースペクトラムでも形状特性検査に使えることが 5.4 節で示される。最後に 5.5 節で、レーザビーム高速走査法を用いた装置による OPC ドラム基板の形状特性検査が行われる。

5.2 触針式表面形状測定器による検査

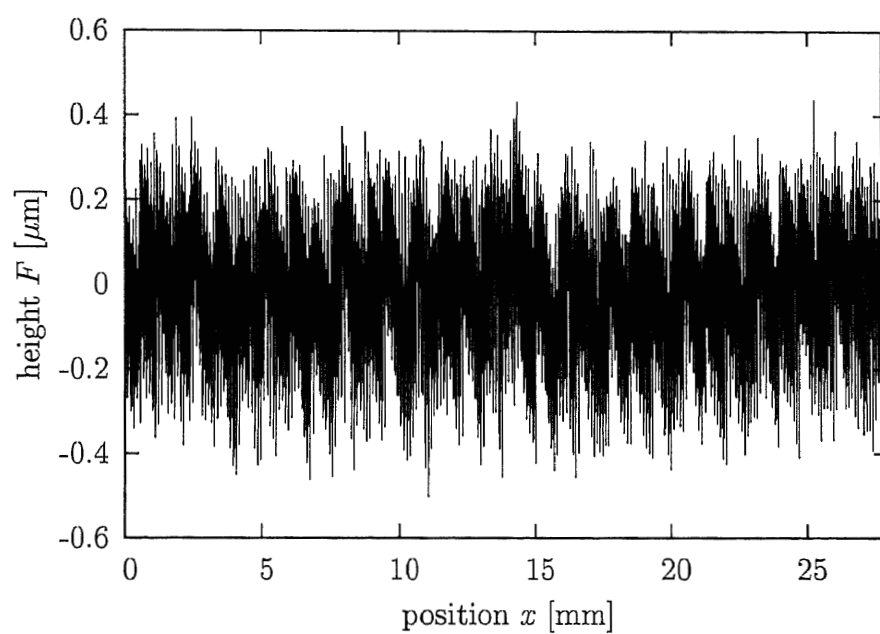
試料としたのは直径 25mm、長さ 250mm の円筒形状で、旋盤により加工されたアルミ製 OPC ドラム基板だった。これらの OPC ドラム基板は、すでに人の肉眼による形状特性検査によって、良品と不良品に分別されていた。

良品と不良品の違いを確認するために、OPC ドラム基板の円筒軸方向、幅 28mm の表面形状を Taylor Hobson 社の触針式形状測定装置 Form Talysurf-S6 で測定した。OK1 とラベルした良品の OPC ドラム基板と NG1 とラベルした不良の OPC ドラム基板の表面形状 F を図 5.1 に示す。横軸は OPC ドラム基板表面円筒軸方向の位置で、縦軸は高さで単位は μm であり、図 5.1 の上部が良品 OPC ドラム基板 OK1、下部が不良 OPC ドラム基板 NG1 である。ともに振幅 $0.4\mu\text{m}$ 程度に荒れているように見えるが、これは旋盤の切削工具による加工痕である。表面形状測定から、旋盤の切削工具の送りはおおよそ 0.1mm から 0.25mm であることがわかった。図 5.1 から不良 OPC ドラム基板 NG1 が良品 OPC ドラム基板 OK1 よりも切削が深いのがわかるが、ここからは明確に良品と不良品の違いを確認できない。

つぎに、旋盤の切削工具の送り周期を平均化し、良品と不良 OPC ドラム基板の違いを際立たせるために、空間周期 0.25mm をカットオフとするローパスフィルタを図 5.1 で得られた表面形状 F に施した。これを図 5.2 に示す。図 5.2 の (a) と (b) はそれぞれ、図 5.1 の (a) と (b) に対応する。ここからわかるように、図 5.2(b) で示される不良 OPC ドラム基板 NG1

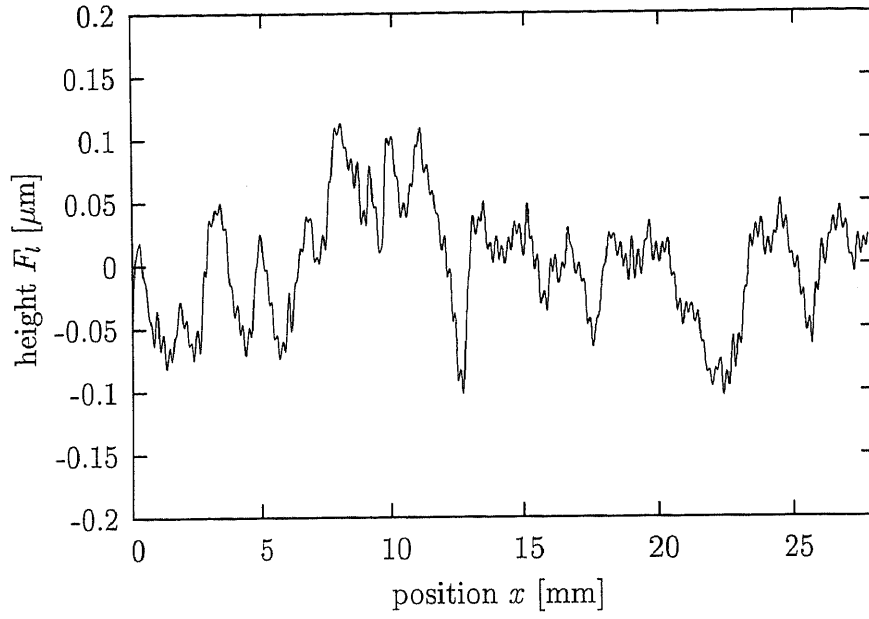


(a) OPC drum substrate OK1.

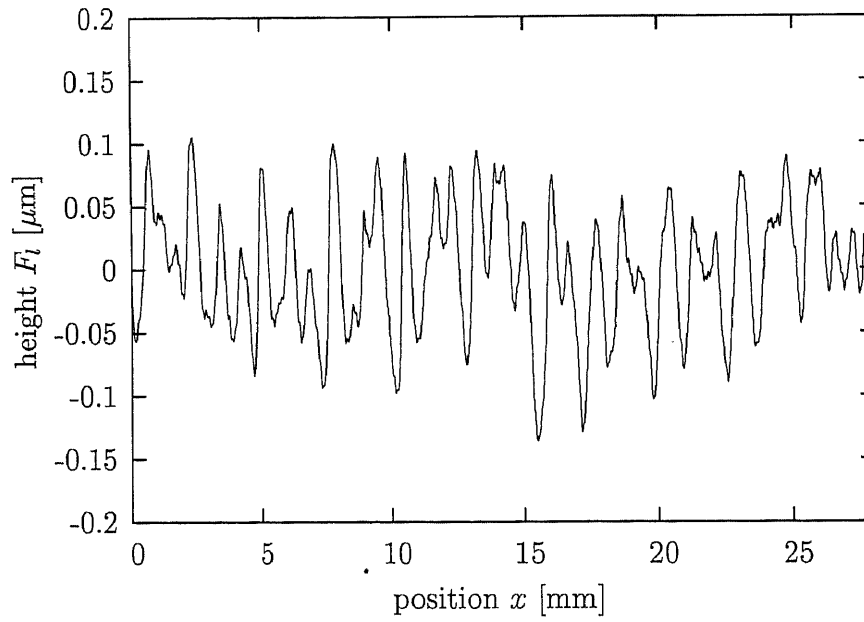


(b) OPC drum substrate NG1.

図 5.1: Surface profiles F of OPC drum substrates OK1 and NG1 OPC, which are measured with Taylor Hobson model Form Talysurf-S6.



a) OPC drum substrate OK1.



b) OPC drum substrate NG1.

図 5.2: Surface profiles F_l of OPC drum substrates OK1 and NG1 processed with low pass filter having a cut off of 0.25mm-spatial period.

には、旋盤の切削工具の送り周期とは無関係な、およそ1mm周期のうねり形状が認められるが、図5.2(a)で示される良品 OPC ドラム基板 OK1 には、そのようなうねりは存在しない。測定によって、同様の周期的うねりが他の不良 OPC ドラム基板にも存在することがわかった。この周期的うねりは旋盤の静的機械精度によって生じると考えられる。

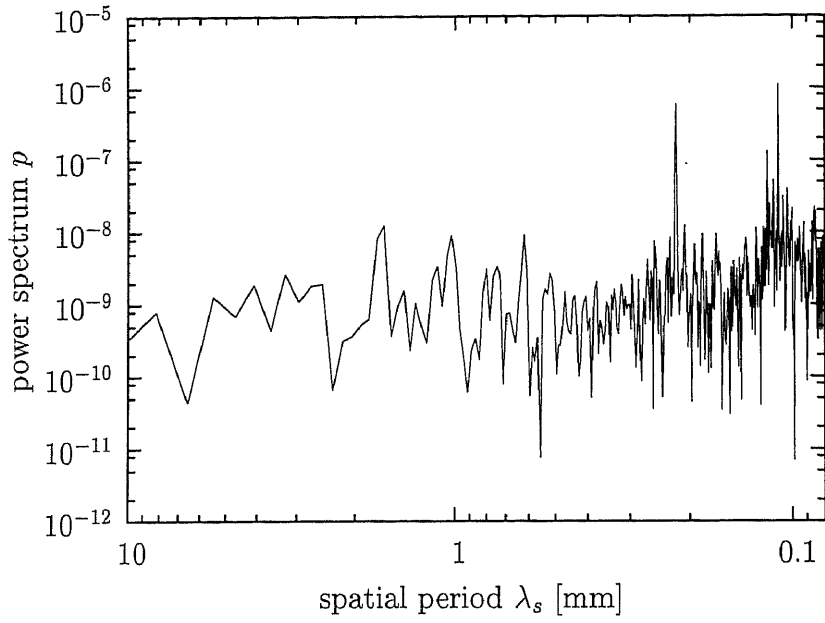
OPC ドラム基板表面円筒軸方向に1mm周期のうねりがあると、それを用いたレーザプリンタやコピー機などの印字結果に悪影響を及ぼす。印字は、帯電した OPC ドラムに付着したトナーを転写ローラによって紙に強く押しつけることにより行われる。OPC ドラムに1mm周期のうねりがあると、その形状の山となる部分に紙が転写ローラによって強く押しつけられ、結果として印字結果にまだらを生ずる。さらに、OPC ドラム基板へ均一に有機光導電体を塗布できない。しかし、OPC ドラム表面に10mm周期程度のうねりがある場合、OPC ドラム上のうねりは転写ローラの圧力によって変形し、紙への圧力が一定となり、印字に悪影響がない。また、OPC ドラム基板へ均一に有機光導電体を塗布することができる。

以上のことから、OPC ドラム基板を検査し、その中から不良 OPC ドラム基板を分別するには、表面形状特性として空間周期1mm近傍のうねりを検出すればよいことがわかる。

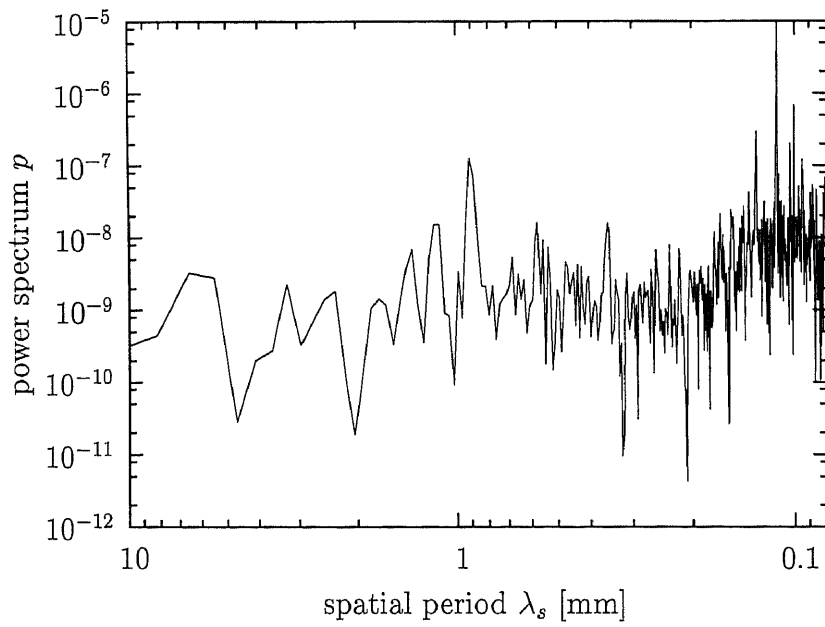
OPC ドラム基板の形状特性の良・不良は、その円筒軸方向表面形状にローパスフィルタを施し、図5.2で示されるプロファイルを得れば、その外観から判断できる。しかし、人を介さない自動検査を行うには、単純な良・不良判定が可能な2値化が必要である。ここでは、2値化可能な形状特性検査の方法を考える。

OPC ドラム基板の形状特性を調べるために、Form Talysurf-S6 で得た OPC ドラム基板の表面形状 F のパワースペクトラムを計算した。これを図5.3に示す。図5.3の上部(a)が良品 OPC ドラム基板 OK1 で、下部(b)が不良 OPC ドラム基板 NG1 の傾斜分布のパワースペクトラムであり、それぞれ図5.1の(a)と(b)に対応する。どちらの場合についても、空間周期 $\lambda_s = 0.1\text{mm}$ から 0.25mm にかけていくつかのピークが確認できるが、これは旋盤の切削工具の送り周期によるもので、不良原因とはならない。不良 OPC ドラム基板 NG1 の不良原因となる1mm周期のうねりは、図5.3(b)において、空間周期 $\lambda_s = 1\text{mm}$ 近傍のピークとして検出されている。

以上のことから、OPC ドラム基板の形状特性を検査するには、OPC ド



a) OPC drum substrate OK1.



b) OPC drum substrate NG1.

図 5.3: Power spectrums p of the surface profile F measured with Form Talysurf-S6.

ラム基板の円筒軸方向の表面形状を測定し、そのパワースペクトラムの空間周期 $\lambda_s = 1\text{mm}$ 近傍に閾値を設定することにより、良・不良の判定すればよことがわかった。

5.3 レーザビーム高速走査法による検査装置

ここで、レーザビーム高速走査法を OPC ドラム基板の形状特性検査に応用した実験装置の構成を図 5.4 に示す。

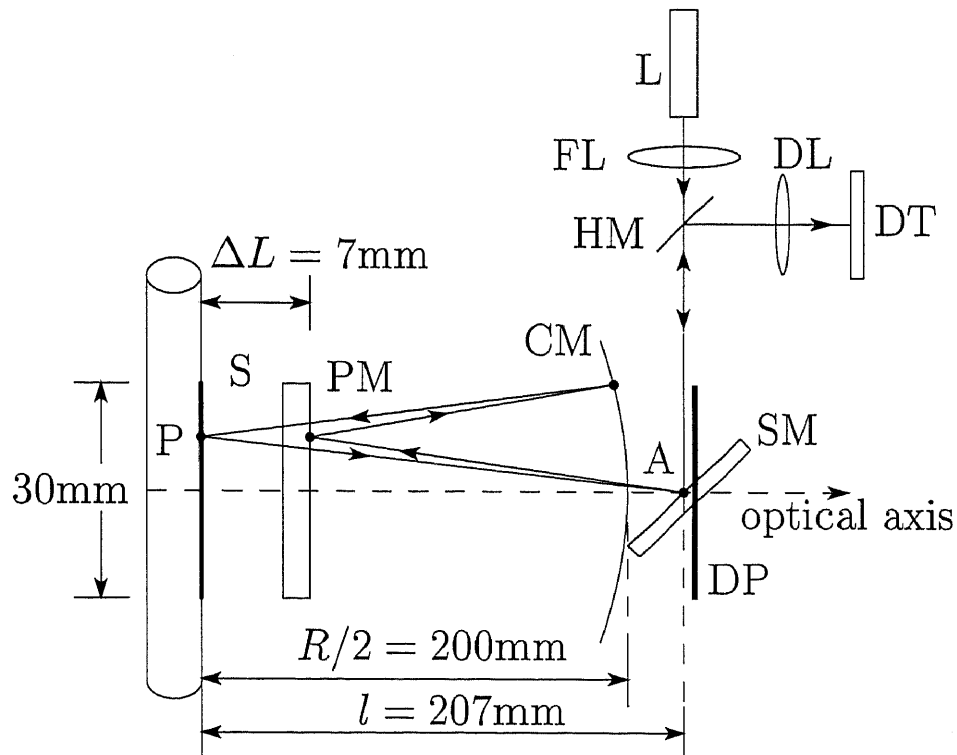


図 5.4: Configuration of a scan optical system for the inspection of surface profile's properties of OPC drum substrates.

試料面 S は 5.2 節で述べたアルミ製 OPC ドラム基板だった。ビームスポット点 P は、スキャナミラー SM の回転によって、OPC ドラム基板の円筒軸方向に 30.3mm 走査した。

光源 L は出力 5mW の He-Ne レーザ光源で、そこから放射されたレーザビームはフォーカスレンズ FL によって半値幅 5mm のガウシアンビー

ムにコリメートされた。凹球面ミラー CM の直径は 80mm で、曲率半径は $R = 400\text{mm}$ ，表面精度は $\lambda/4$ だった。また図 2.6 に示されているように 80mm×15mm の矩形に加工されているものを用いた。スキャナミラー SM と、平面ミラー PM および HM の表面精度は $\lambda/10$ だった。凹球面ミラー CM と試料面 S の距離は $R/2 = 200\text{mm}$ とした。不良原因となる 1mm 周期のうねりを検出するためには、試料面 S 上のビームスポットの半値幅は $w = 0.2\text{mm}$ でも十分だが、Form Talysurf-S6 の測定結果と特性を比較するため、検査装置では試料面 S 上のビームスポットの半値幅は、 $w = 0.05\text{mm}$ とした。試料面 S と平面ミラー PM の距離は $\Delta L = 7\text{mm}$ とした。式 (2.12) から ΔL はパラメータ d にほぼ等しく、 $d = 7\text{mm}$ である。試料面 S と検出面 DP の距離 l は、式 (3.1) に従って $l = 207\text{mm}$ だった。レンズ DL は、色消しレンズで、その焦点距離は 100mm であり、このレンズ DL によって検出面 DP が位置検出素子 DT 上で等倍の像となるよう配置した。

位置検出素子 DT は浜松ホトニクス株式会社の 2 次元 PSD 型式 S1880 だった。位置検出素子上のビームスポット位置を検出するために、位置検出素子の出力を受光光量で除算する必要があるが、除算は米 Burr Brown 社のアナログ除算器 MPY634 を用いた。こうして得られる出力 V_p は 12bit のアナログ/デジタルコンバータを通してコンピュータに送られた。

スキャナミラー SM は速度制御可能なサーボモータに取り付けられ、570rpm の角速度で回転してするように調整した。試料面 S とスキャナミラー SM の距離は $l = 207\text{mm}$ だったので、試料面 S 上のビームスポットの走査速度は 15mm/ms だった。よって、実験装置は 30.3mm の測定領域を 2ms で測定できた。このために測定装置は 500kHz 以下の振動に対して不感になるので、測定において除震装置を用いなかった。

5.4 検査装置の出力と形状特性の関係

節 5.3 で述べた走査光学系の構成において、OPC ドラム基板上を走査するビームスポットの半値幅は 0.05mm であるが、OPC ドラム基板の表面は切削加工されているので、図 4.1 で示されるように、0.05mm の幅の中にさらに細かな構造があった。図 5.3 で示した実験装置における検出面 DP 上の OPC ドラム基板からの反射ビームの分布を、図 5.5 に示す。図の上部に反射ビームのパターンを、下部に反射ビームパターンの強度分布

を示す．中央部の正方形は位置検出素子の受光面の大きさ $12\text{mm} \times 12\text{mm}$ を表している．横軸は検出面 DP 上の座標で，縦軸は反射ビームパターンの強度である．4章の OPC ドラム基板上のビームスポットの半値幅を 0.2mm としたときに得られた図 4.3 の反射パターンと比べると，細いパターンのそれぞれの，半値幅 0.05mm のときの図 5.5 では大きくなっているが，反射ビームが位置検出素子の大きさを超えて広がっていたのは同様だった．

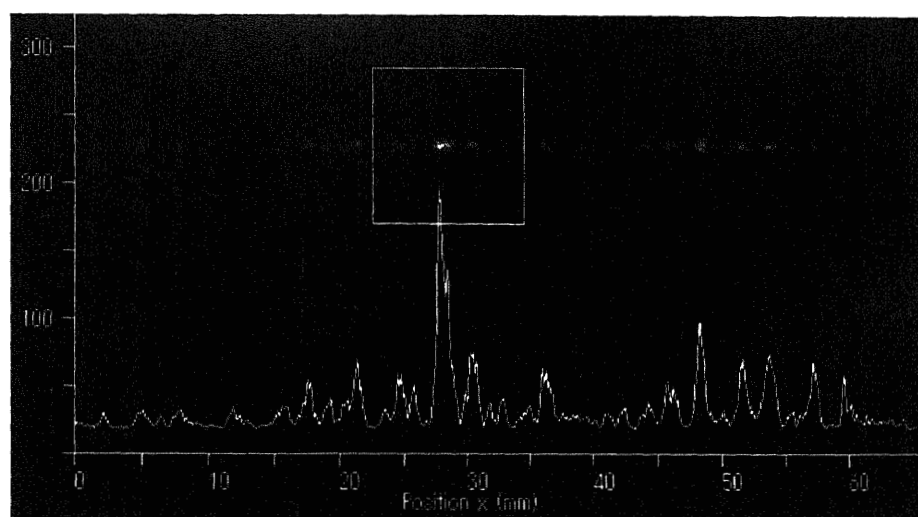


図 5.5: Upper part of the figure is a reflection pattern on detecting plane DP, and lower part is an intensity distribution of the reflection pattern. A square in the figure represents the PSD size of 12mm .

走査するビームスポットの半値幅が 0.05mm の場合でも，実験装置が OPC ドラム基板の形状特性を検出するかどうか調べるために，OPC ドラム基板表面上のビームスポットを実験装置で走査したときに得られる位置検出素子の出力分布 V_p を，図 5.3 で示された良品 OPC ドラム基板 OK1，と不良 OPC ドラム基板 NG1 について測定した．これを図 5.6 に示す．横軸は OPC ドラム基板上的位置で，縦軸は位置検出素子の出力である．節 5.2 で述べたように，OPC ドラム基板の表面形状特性検査は表面形状のパワースペクトラムを用いる．表面形状は，レーザビーム高速走査法では，位置検出素子の出力 V_p の積分で得られるプロファイル F_p に対応するので，プロファイル F_p のパワースペクトラムを計算した．これ

を図 5.7 に示す。横軸は空間周期 λ_s で、縦軸は強度である。図の上部 (a) が良品 OPC ドラム基板 OK1, 下部 (b) が不良 OPC ドラム基板 NG1 のである。得られたパワースペクトラムは、形状測定装置 Form Talysurf-S6 の測定結果 F から得られた図 5.3 と比較すると、欠陥原因となる空間周期 $\lambda_s = 1\text{mm}$ におけるピークと、旋盤の切削工具の送りにより生ずる空間周期 $\lambda_s = 0.1\text{mm}$ から 0.25mm のピークを明確に検出できた。しかし、図 5.7 で示されるプロファイル F_p のパワースペクトラムには空間周期の 2 乗 λ_s^2 に比例してパワー値が大きくなる特性があった。このままでは、良・不良判定のために、空間周期の 2 乗 λ_s^2 に比例した閾値を設定しなければならないので不便である。そこで、良・不良判定のために、どのようなパワースペクトラムがよいのかを考える。プロファイル F_p のフーリエ変換は、

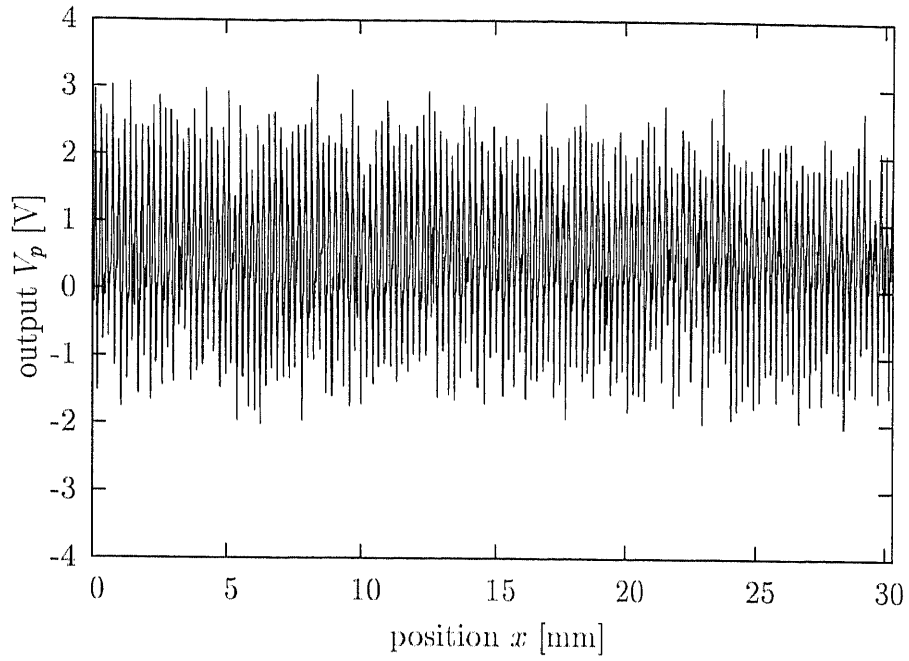
$$a(k) = \int F(x) \exp(-ikx) dx, \quad (5.1)$$

である。ここで $k = 2\pi/\lambda_s$ で、 $a(k)$ はフーリエ係数である。したがってプロファイル F_p のパワースペクトラムは、 $a^2(k)$ である。これは空間周期の 2 乗 λ_s^2 に比例して多くなる特性があった。プロファイル $F_p(x)$ の微分のフーリエ変換は、

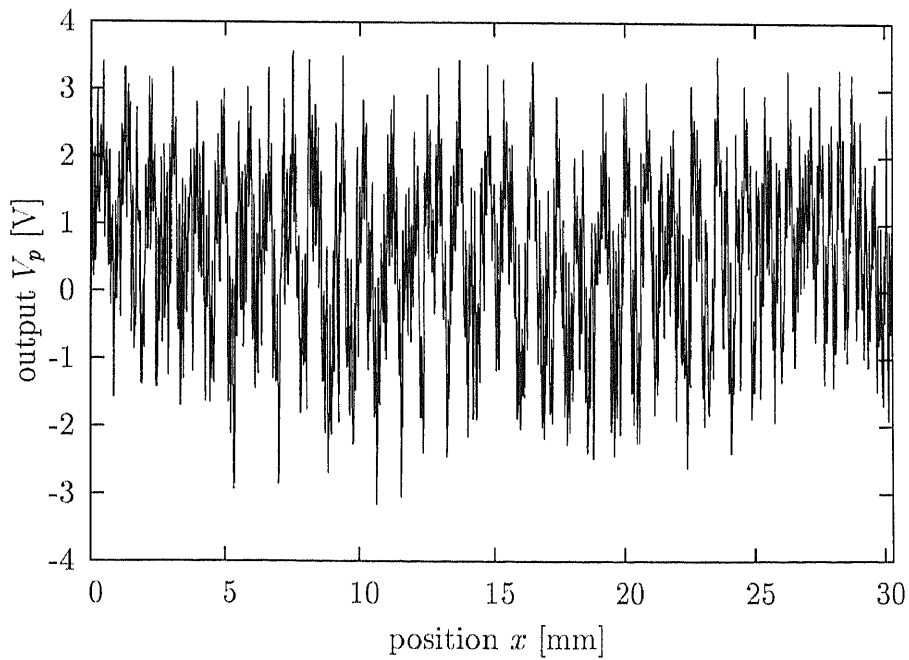
$$i \frac{a(k)}{\lambda_s} = \int \frac{dF(x)}{dx} \exp(-ikx) dx, \propto \int V_p(x) \exp(-ikx) dx, \quad (5.2)$$

となる。プロファイル $F_p(x)$ の微分は出力 V_p なので、出力 V_p のパワースペクトラムは $a^2(k)/\lambda_s^2$ となり、空間周期の 2 乗 λ_s^2 に比例しなくなる。そこで位置検出素子の出力分布 V_p のパワースペクトラムを計算した。その結果を図 5.8 に示す。図の上部 (a) が良品 OPC ドラム基板 OK1, 下部 (b) が不良 OPC ドラム基板 NG1 における出力 V_p のパワースペクトラムである。得られたパワースペクトラムは、もはや空間周期の 2 乗 λ_s^2 に比例していないので、OPC ドラム基板の良・不良を判別するために、一定値の閾値を設定することができる。

したがって、レーザビーム高速走査法では、位置検出素子の出力 V_p のパワースペクトラムに対し、閾値を設定することで、OPC ドラム基板の形状特性検査が可能であることがわかった。

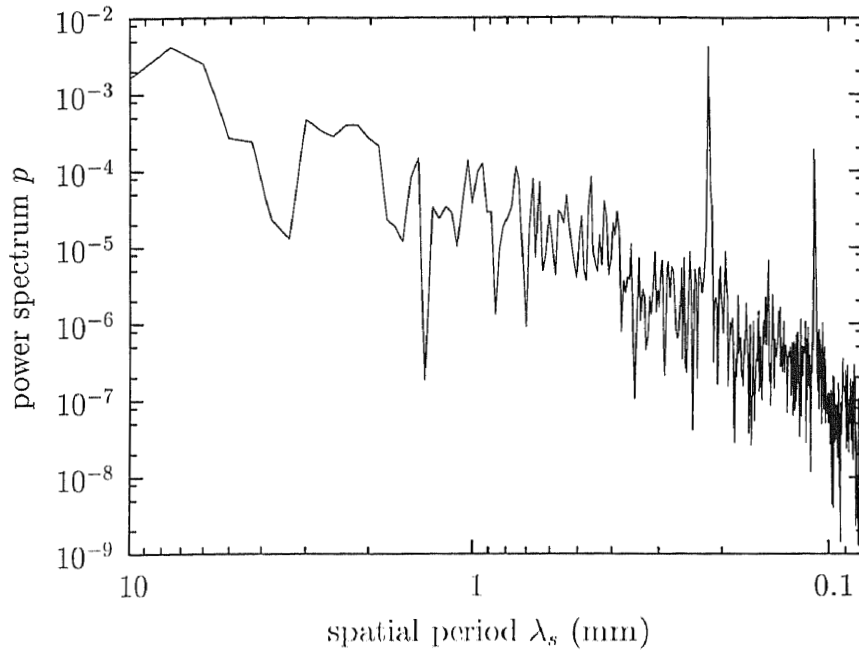


a) OPC drum substrate OK1.

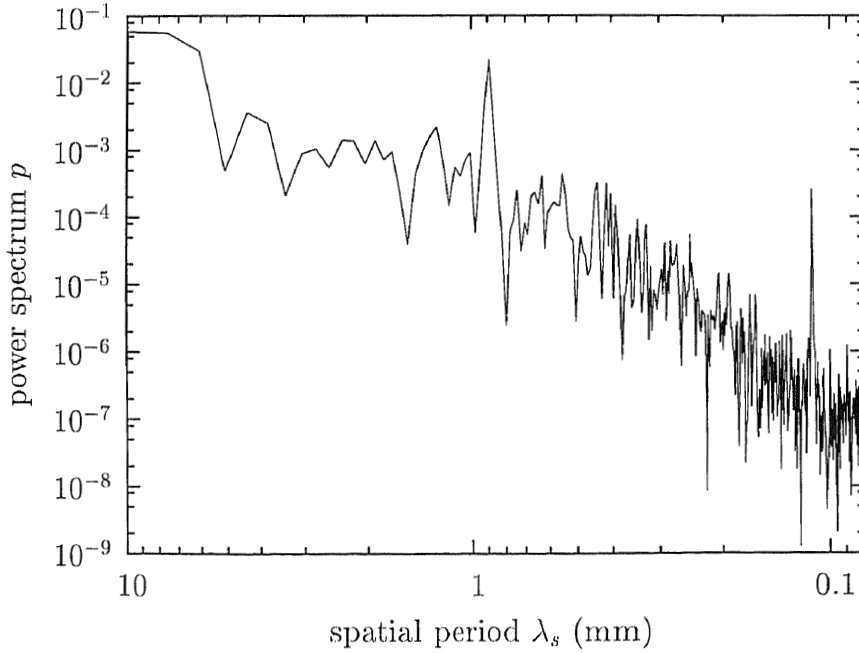


b) OPC drum substrate NG1.

図 5.6: Output V_p from the PSD.

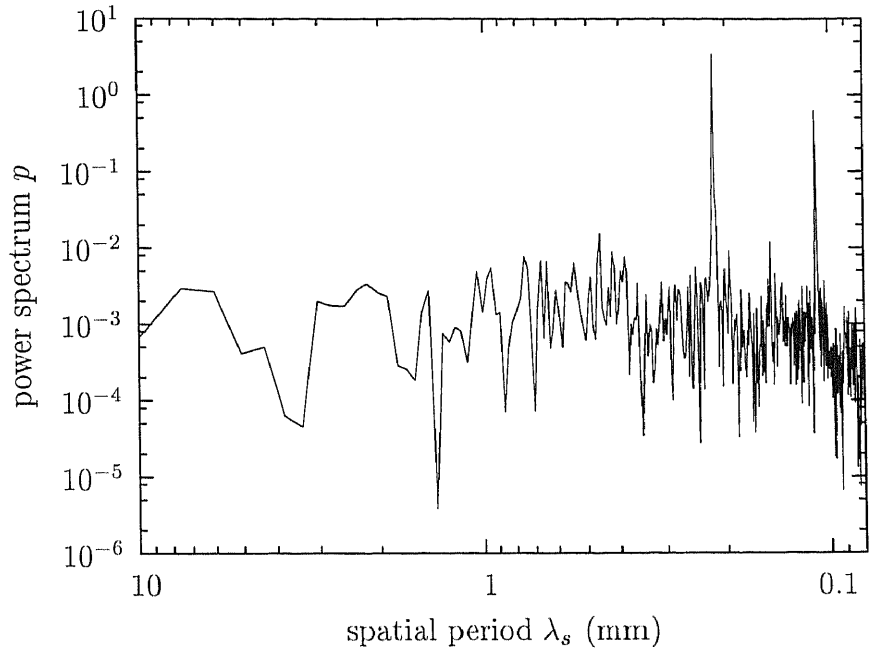


a) OPC drum substrate OK1.

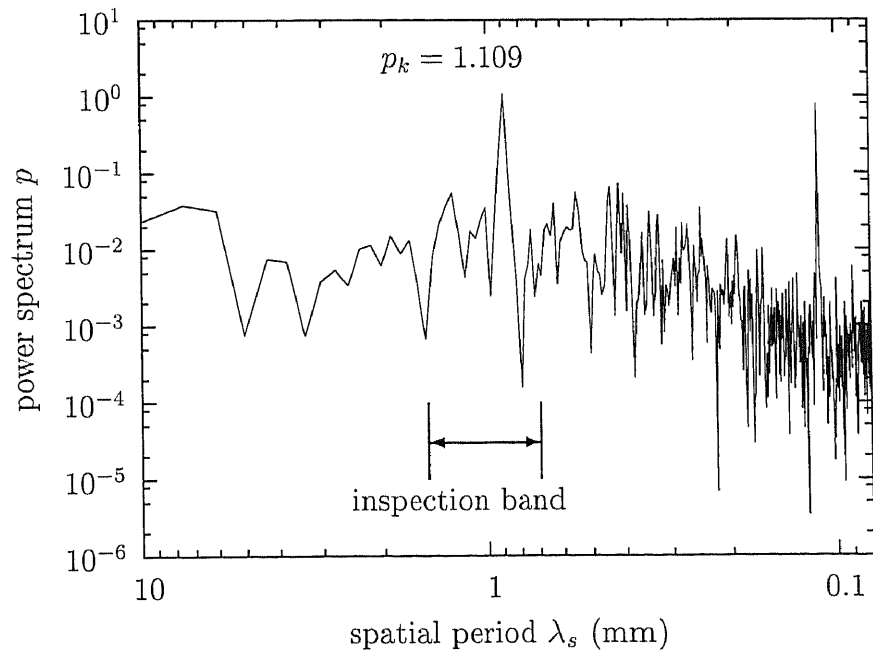


b) OPC drum substrate NG1.

図 5.7: Power spectrum p of profile F_p obtained by integrate of output V_p shown in Fig.5.6.



a) OPC drum substrate OK1 region B.



b) OPC drum substrate NG1 region C.

図 5.8: Power spectrum p of output V_p shown in Fig.5.6.

5.5 検査結果

レーザビーム高速走査法による OPC ドラム基板の形状特性検査を試験した。検査される OPC ドラム基板は、すでに人の肉眼により形状特性を目視検査した良品 4 本と不良品 6 本である。これらの OPC ドラム基板はそれぞれ OK1~4, NG1~6 とラベルした。それぞれの OPC ドラム基板は、図 5.9 に示されるように、その表面上の 3 つの異なる境域を検査された。3 つの境域は A, B, C とラベルし、領域 A と C はそれぞれ OPC ドラム基板の端部で、領域 C は中央部である。

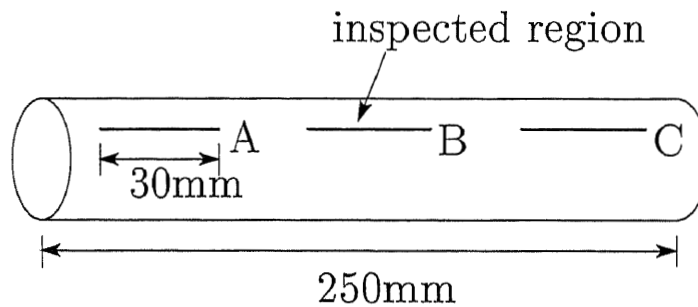


図 5.9: Inspected region A, B and C of a OPC drum substrate.

それぞれの OPC ドラム基板のそれぞれの領域 A, B, C で位置検出素子の出力分布 V_p のパワースペクトラム p がコンピュータによって数値計算された。この際に、より正確なパワースペクトラムを得るために Welch のデータ窓 [6] が使われた。出力分布 V_p パワースペクトラム p から、図 5.8(b) で示されるように、空間周期 $\lambda_s = 0.7\text{mm}$ から 1.5mm で、最大ピーク値 p_k を決定した。ここで図 5.8(a) は良品 OPC ドラム OK1 の領域 B の、(b) は不良 OPC ドラム NG1 の領域 C のパワースペクトラムだった。それぞれの OPC ドラムにおけるピーク値 p_k を表 5.1 にまとめる。表の最右列の DV は、それぞれの OPC ドラム基板における領域 A, B, C のピーク値 p_k の最大値である。OPC ドラム基板の良・不良は、この DV 値に対して閾値を決定することにより行われた。

DV 値に対する閾値は次のように決定した。表 5.1 から、不良 OPC ドラム基板の中で最も小さな DV 値を持つのは、OPC ドラム基板 NG2 の領域 B で $p_k=0.121$ 、そして良品 OPC ドラム基板の中で最も大きな値を持つのは、OPC ドラム基板 OK4 の領域 C で $p_k=0.039$ だった。図 5.10(a) に

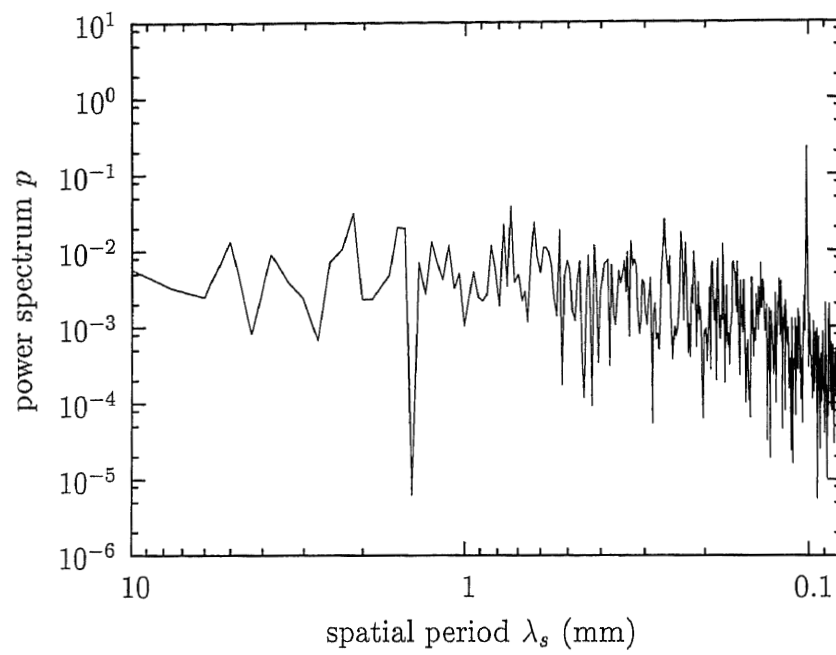
表 5.1: Peak value p_k of the power spectrum p between spatial period λ_s of 0.7mm and 1.5mm.

Drum	A	B	C	DV
OK1	0.006	0.008	0.002	0.008
OK2	0.038	0.032	0.012	0.038
OK3	0.006	0.012	0.010	0.012
OK4	0.025	0.015	0.039	0.039
NG1	0.060	0.099	1.109	1.109
NG2	0.014	0.121	0.019	0.121
NG3	0.058	0.029	0.563	0.563
NG4	0.080	0.142	0.574	0.574
NG5	1.091	0.234	0.208	1.091
NG6	0.297	0.138	0.490	0.490

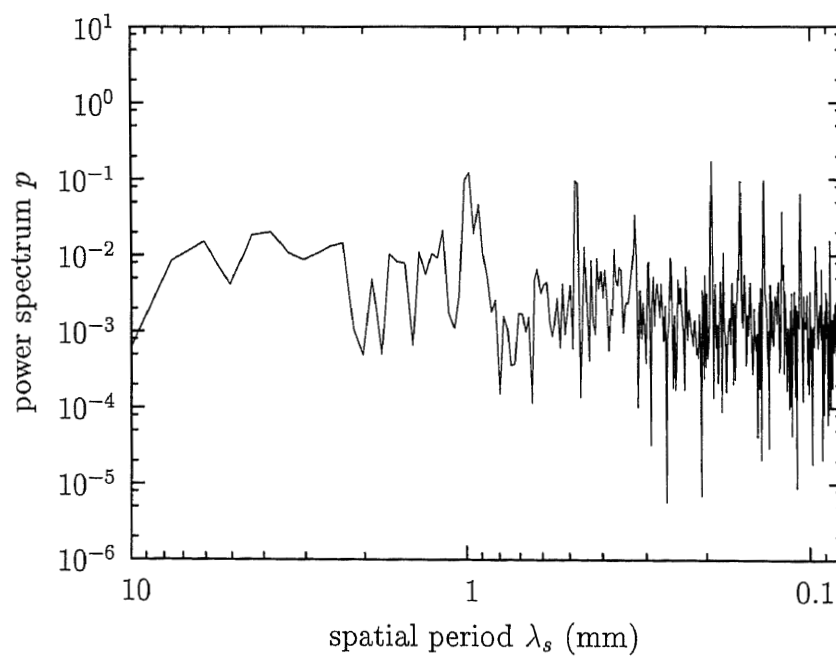
表 5.2: Results obtained by repeating the measurement 1000 times for region C of OPC drum substrate OK4 and region B of OPC drum substrate NG2.

drum region	$\langle p_k \rangle$	σ	
region C of OK4	3.89×10^{-2}	5.74×10^{-4}	$\langle p_k \rangle + 6\sigma = 4.23 \times 10^{-2}$
region B of NG2	1.19×10^{-1}	5.59×10^{-3}	$\langle p_k \rangle - 6\sigma = 8.55 \times 10^{-2}$

OPC ドラム基板 OK4 の領域 C の, (b) に OPC ドラム基板 NG2 の領域 B のパワースペクトラムを示す. ここから, OPC ドラム基板 NG2 の領域 B が確かに 1mm 周期のうねり特性を持っていることがわかる. 良否判定基準となる閾値を決定するために, この 2 つの領域に対して, 1000 回の連続検査を行い, ピーク値 p_k の出現頻度を調べた. OPC ドラム基板 NG2 領域 B のピーク値 p_k の出現頻度を図 5.11 に示す. 表 5.2 に示されるように, 1000 回の連続検査における OPC ドラム基板 NG2 領域 B と OK4 領域 C のピーク値 p_k の平均値 $\langle p_k \rangle$ は, それぞれ 1.19×10^{-1} と 3.89×10^{-2} で, 標準偏差 σ はそれぞれ 5.59×10^{-3} と 5.74×10^{-4} だった. したがっ



a) OPC drum substrate OK4 region C.



b) OPC drum substrate NG2 region B.

図 5.10: Power spectrum p of output V_p .

て、図5.12に示されるように、検査された10本のOPCドラム基板において、閾値を0.042から0.086に設定すれば、 6σ 以上の確度で、良品と不良品を分別できることがわかった。

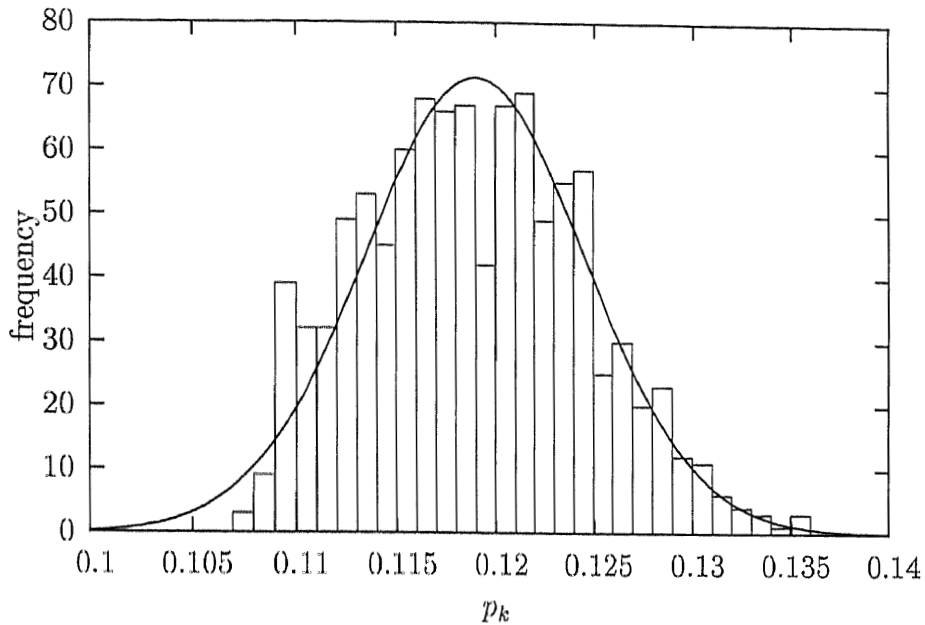


図 5.11: Frequency of occurrence of peak value p_k and equivalent Gaussian function on the measurement of region B of OPC drum substrate NG2.

5.6 まとめ

レーザビーム高速走査法をOPCドラム基板の形状特性検査に応用した。

形状特性で不良となるOPCドラム基板は、その円筒軸方向の表面形状に約1mm周期のうねり形状を持っていた。Form Talysurf-S6の測定から、OPCドラム基板の表面形状のパワースペクトラムで、空間周期1mm付近に閾値を設定すれば良品と不良品を分別できることがわかった。レーザビーム高速走査法を用いた測定装置では、OPCドラム基板からの反射ビームが大きく広がるが、その出力 V_p のパワースペクトラムはForm Talysurf-S6から得られるそれと同様な特徴を持っており、形状特性検査に利用できることがわかった。形状検査の試験は10本のOPCドラム基板に対して行なった。その結果、レーザビーム高速走査法を用いた検査

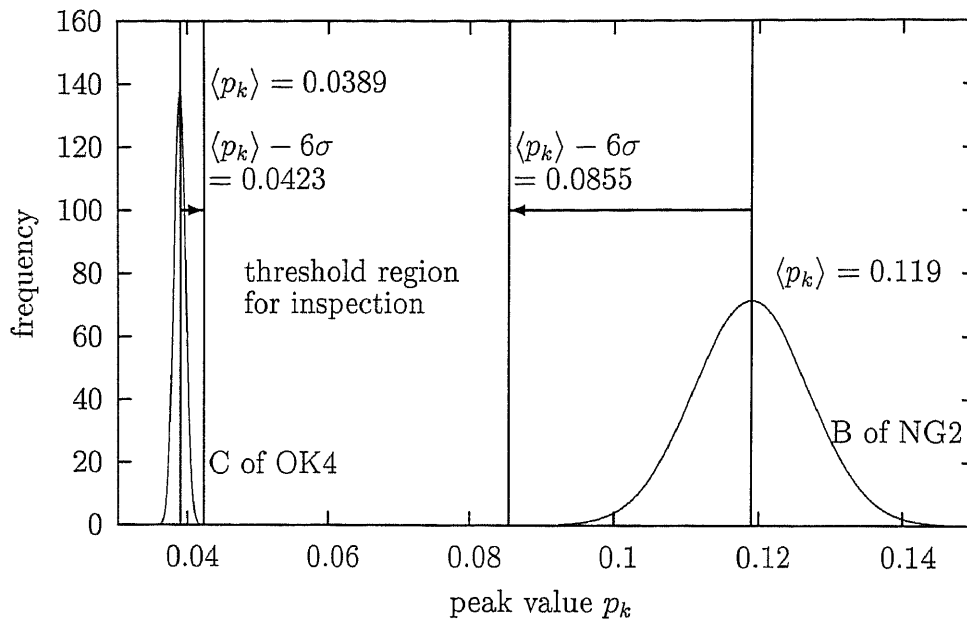


図 5.12: A region of acceptable threshold values for an inspection having 6σ accuracy. Two equivalent Gaussian functions with regard to frequency of occurrence of peak value p_k is from region C of OK4 and region B of NG2. Gaussian function of region C of OK4 divided by 5 is shown in this figure because its value is much larger than Gaussian function of region B of NG2.

装置は 6σ 以上の確度で、良品と不良品を分別できることがわかった。また、この装置による検査時間は 2ms と短かったので、検査において除震装置は必要なかった。

第6章 結論

試料面の傾斜に比例したレーザービームの角度振れを検出し、その積分により1次元表面形状を測定する方法と、レーザービームを高速に走査する光学系から構成されるレーザービーム高速走査法を用いる表面形状測定に関して研究した。

レーザービームの角度振れは位置検出素子によって検出した。試料面から反射したレーザービームを位置検出素子に入射させるための走査光学系を示し、位置検出素子の出力と試料面の傾斜の関係を数学的に明らかにした。表面形状を求めるための積分法を示し、表面形状測定における誤差解析を行った。

次に、レーザービーム高速走査法の基本的な測定能力を明らかにするため、鏡面としてポリゴンミラーの表面形状を測定した。測定時間が1msと短いので除震装置なしに測定できた。測定結果を干渉計と比較したところその差は二乗平均平方根で0.98nmだった。また返し誤差は二乗平均平方根0.31nmだった。したがって、レーザービーム高速走査法は鏡面の測定に有効であることが示された。

次に、レーザービーム高速走査法による粗面測定が可能かどうか検討した。試料としたOPCドラム基板からの反射ビームは、それが粗面のため、位置検出素子の大きさを超えて広がった。反射パターンのCCDカメラによって解析した。レーザービーム高速走査法でOPCドラムを測定したところ、測定された表面形状の振幅は元の形状と一致しないが、うねり形状特性を検出できることがわかった。このことは、キルヒホッフ積分に基づいた数値シミュレーションによっても確認できた。再びシミュレーションによってうねり形状を検出できた原因を解析し、類似した反射パターンの周期的な繰り返しがうねり形状特性となって現れることがわかった。

レーザービーム高速走査法が粗面測定でうねり特性を検出できることを利用して、レーザービーム高速走査法をOPCドラム基板の形状特性検査に応用した。形状特性で不良となるOPCドラム基板は、その円筒軸方向の

表面形状に約 1mm 周期のうねり形状を持っていたので、位置検出素子の出力のパワースペクトラムにおいて、空間周期 1mm 付近に閾値を設定し良品と不良品を分別した。良・不良が既知の 10 本の OPC ドラム基板に対し、除震装置なしに検査を行い、 6σ 以上の確度で分別した。したがって、レーザビーム高速走査法はインプロセスの形状特性検査装置として有効であることが示された。

謝辞

本論文の作成および研究を進めるに当たり、多忙の中を常に親切にご指導ご助言を頂いた新潟大学工学部教授佐々木修己博士に厚く御礼申し上げます。また、論文構成について詳細にご指導を頂いた新潟大学工学部教授関根征士博士，同教授佐藤孝博士，同教授菊池久和博士，同助教授鈴木孝昌博士に心より感謝申し上げます。

研究のために実験室をお貸し頂いた元長岡技術科学大学教授栗田政則博士に心より感謝申し上げます。切削加工についてご助言を頂いた新潟大学工学部助教授横山和宏助博士に心より感謝申し上げます。Form Talysurfでの試料計測をお引き受けくださった新潟大学工学部教授新田勇博士，新潟大学工学部機械システム工学科トライボロジー研究室所属の自然科学研究科菅野明宏様，同長岡泰様に心より感謝申し上げます。Wyko NT3300による試料の測定について丁寧にご指導を頂いた新潟県工業技術総合研究所下越技術支援センター主任研究員杉井伸吾様に心より感謝申し上げます。ポリゴンミラーを試料としてご提供頂いた株式会社オプセル代表取締役小俣公夫様に心より感謝申し上げます。実験装置作成・設計に関してご助言を頂いたアサノ巧機代表浅野和光様，有限会社本田製作所代表取締役本田健次様，魚健様に心より感謝申し上げます。実験の補助をして頂いた元長岡技術科学大学大学院加賀谷智様に心より感謝申し上げます。そして，新潟大学工学部電気電子工学科佐々木・鈴木研究室の皆様にも心より感謝申し上げます。

研究の遂行と実験装置作成・設計に関してご援助ご助言を頂いた，株式会社コアシステム代表取締役小野寺正臣様，ならびに社員の皆様にも心より感謝申し上げます。

最後に妻にも。

参考文献

- [1] 岩田哲也, 篠崎亮, “メディア上欠陥の光学式検査装置による解析,” IDEMA Japan News, **36**, pp.12-17 (1999)
- [2] P. Z. Takacs, S. K. Feng, E. L. Church, S. Qian, and W. Liu, “Long trace profile measurements on cylindrical aspheres,” in *Advances in Fabrication and Metrology for Optics and Large Optics*, J. B. Arnold and R. E. Parks, eds., Proc. SPIE **966**, pp.354-364 (1988).
- [3] I. Weingärtner, M. Schulz and C. Elster, “Novel scanning technique for ultraprecise measurement of topography,” in *Optical Manufacturing and Testing III*, H. P. Stahl, ed., Proc. SPIE **3782**, pp.306-317 (1999).
- [4] 井関敏之, “形状測定装置,” 特開平 08-261734.
- [5] J. D. Evans, “Method for approximating the radius of curvature of small concave spherical mirrors using a He-Ne laser,” *Appl. Opt.*, **10**, pp.995-996 (1971).
- [6] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, *Numerical Recipes in C : The Art of Scientific Computing* (Cambridge University Press, Cambridge, 1988).

本論文に関する研究発表

- [7] Ryo Shinozaki, Osami Sasaki and Takamasa Suzuki, "Fast scanning method for one-dimensional surface profile measurement by detecting angular deflection of a laser beam," Appl. Opt., **43**, pp.4157-4163 (2004).
- [8] 篠崎亮, 佐々木修己, 鈴木孝昌, "高速走査法を用いたレーザ光束角度振れ検出による1次元表面形状測定装置," 第51回応用物理学関係連合講演会, 28pR13, 東京 (2004).
- [9] Ryo Shinozaki, Osami Sasaki and Takamasa Suzuki, "One-dimensional surface profile measurement with a fast scanning method by detecting angular deflection of a laser beam," Photonic Asia, 5633-05, Beijing (2004), Proceedings of SPIE, **5633**, pp.31-39 (2005).
- [10] 篠崎亮, 佐々木修己, 鈴木孝昌, "レーザビーム高速走査法を用いたOPCドラム表面形状検査装置," 第52回応用物理学関係連合講演会, 31pZF15, 埼玉 (2005).
- [11] 篠崎亮, 佐々木修己, 鈴木孝昌, "レーザビーム高速走査法を用いたOPCドラム基板のためのインプロセス非接触形状特性検査装置," 2005年度精密工学会秋季大会, K63, 京都 (2005)
- [12] Ryo Shinozaki, Osami Sasaki and Takamasa Suzuki, "In-process inspection of surface profile's properties by detecting a laser beam deflection," Opt. Eng., **44**, (2005) accepted.
- [13] 篠崎亮, 岩田哲也, "形状測定装置," 特許出願済み