OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	シンクロトロン放射光用集光ミラー作製のための超精密形状測定装置の開発
Author(s)	東, 保男
Citation	大阪大学, 1999, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3169533
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

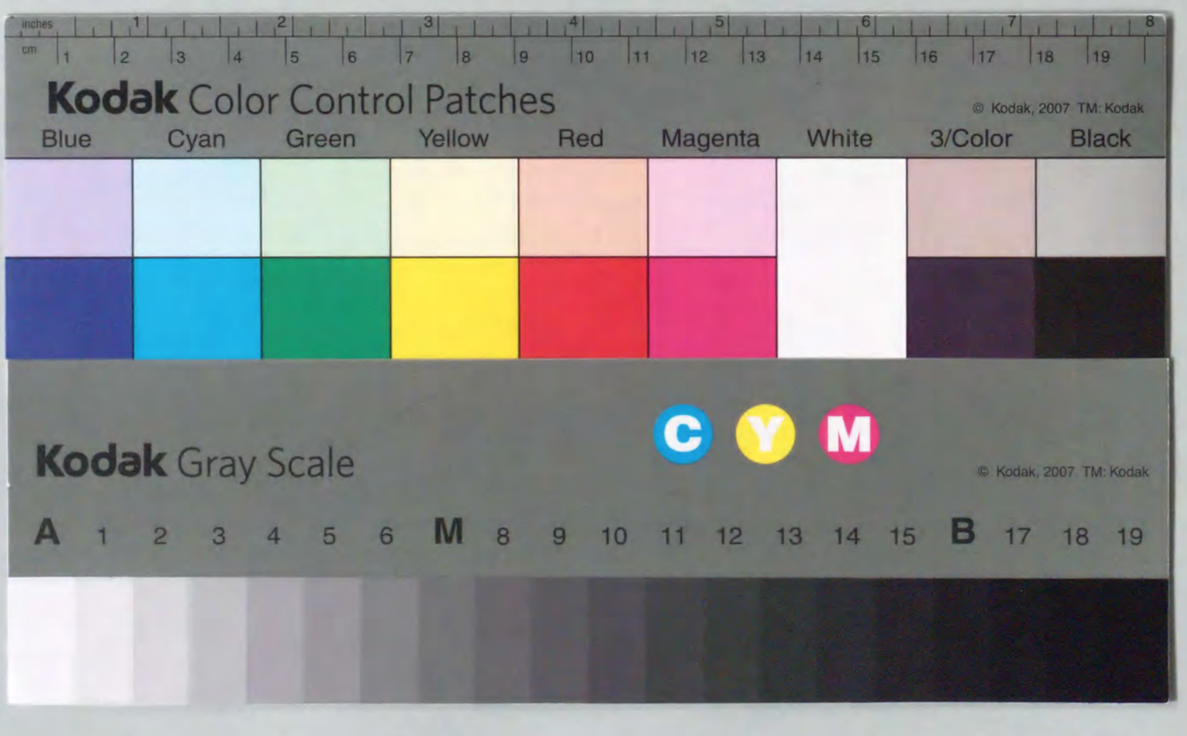
https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

シンクロトロン放射光用集光ミラー作製
のための
超精密形状測定装置の開発

氏家 誠

1999年



シンクロトロン放射光用集光ミラー作製のための超精密形状測定装置の開発

1999年

東　保男

大阪大学博士論文（論文）

シンクロトロン放射光用集光ミラー作製のための超精密形状測定装置の開発

1999年
東　保男

目次

第１章　序論 …… 1

１．１　緒言 …… 1
１．２　シンクロトロン放射光用集光ミラーに求められる特性 …… 2
１．３　超精密形状測定装置開発の意義（他者、従来の測定法） …… 3
１．４　シンクロトロン放射光用集光ミラー製作へのEEMの応用 …… 6
１．５　本論文の構成と概要 …… 8
１．６　結言 …… 10
第１章の参考文献 …… 10

第２章　形状測定装置の測定原理 …… 13

２．１　緒言 …… 13
２．２　傾斜角積分型形状測定法 …… 13
２．２．１　光路の安定性を利用した法線ベクトル測定 …… 14
２．２．２入反射光路同一化による零位法 …… 19
２．３　結言 …… 23
第２章の参考文献 …… 24

第３章　形状測定装置 …… 25

３．１　緒言 …… 25
３．２　形状測定装置の構成 …… 25
３．３　光学系 …… 28
３．３．１　光学系の構成 …… 28
３．３．２　４分割フォトダイオードによる法線ベクトル検出器の分解能 …… 35
３．４　光学系移動ステージ系 …… 43
３．４．１　誤差伝播解析に基づく光学系移動ステージに要求される精度 …… 43
３．４．２　Ｘ．Ｙ．Ｚステージの構成 …… 46
３．４．３　Ｘ．Ｙ．Ｚステージの精度 …… 47
３．４．４　ゴニオステージの構成 …… 48
３．４．５　ゴニオステージの精度 …… 49
３．５　試料支持系 …… 51
３．５．１　試料移動ステージの構成 …… 51
３．５．２　試料ホルダー …… 54

３．６　測定環境の制御 …… 56
３．６．１　測定環境制御の必要性 …… 56
３．６．２　温湿度の制御 …… 59
３．６．３　光路 の屈折率の安定化 …… 64
３．７　結言 …… 69
第３章の参考文献 …… 70

第４章　形状測定装置による凹面鏡の測定方法 …… 72

４．１　緒言 …… 72
４．２　初期設定 …… 73
４．２．１　光軸調整 …… 73
４．２．２　試料位置の調整 …… 75
４．３　測定手順 …… 77
４．４　データ処理 …… 79
４．５　測定の自動化 …… 81
４．５．１　自動化の必要性 …… 82
４．５．２　自動測定システムの構成 …… 82
４．６　結言 …… 87
第４章の参考文献 …… 87

第５章　形状測定装置の性能評価 …… 88

５．１　緒言 …… 88
５．２　傾斜角測定値の再現性 …… 88
５．３　形状測定値の信頼性 …… 90
５．３．１　光路長を変化させた場合の測定値の整合性 …… 90
５．３．２　ミラーを光軸周りに９０度回転した
場合の測定値の整合性 …… 95
５．４　結言 …… 97

第６章　紫外線集光用凹面鏡の形状測定結果 …… 98

６．１　緒言 …… 98
６．２　紫外線集光用ミラーの仕様 …… 98
６．３　形状測定結果 …… 100
６．３．１　公称曲率半径２ｍのミラー …… 100
６．３．２　公称曲率半径３ｍのミラー …… 102
６．４　原子間力プローブ搭載超高精度三次元測定機による

測定結果との比較 …… 107
６．４．１　原子間力プローブ搭載超高精度三次元測定機の原理 …… 107
６．４．２　原子間力プローブ搭載超高精度三次元測定機
での測定結果 …… 108
６．４．３　測定精度の評価 …… 112
６．５　結言 …… 114

第７章　数値制御ＥＥＭによる紫外線集光用ミラーの製作とその形状精度 …… 115

７．１緒言 …… 115
７．２　ＮＣＥＥＭの加工原理 …… 116
７．２．１　ＮＣＥＥＭ加工装置 …… 117
７．２．２　ＮＣＥＥＭ加工手順 …… 124
７．３ＮＣＥＥＭにより製作したミラーの形状評価 …… 125
７．４　結言 …… 129
第７章の参考文献 …… 129

第８章　結論 …… 131

APPENDIX …… 136

謝辞 …… 154

図目次

図２．１　光の反射を利用した表面形状測定の方法 …… 14
図２．２　検出器D_1,D_2の構成 …… 16
図２．３　シリンドリカルレンズと検出器D_2の光学系と結像位置測定 ……18
図２．４　測定箇所の於ける被測定面の法線ベクトルと光線ベクトルを一致させる方法 …… 20
図２．５　50nm/100mmの傾きを測定するための曲率半径に対するf1レンズから被測定面までの距離許容偏差 …… 21
図２．６　各曲率半径（500～10000mm）の測定に於ける曲率半径測定の分解能 ‥22
図２．７　検出器D_2上でのV_3-V_4の値 …… 23
図３．１　測定装置の概略図 …… 26
図３．２　測定装置全体 …… 27
図３．３　光学系の配置 …… 28
図３．４　光学系全体の概念図 …… 31
図３．５　法線ベクトル測定系 …… 32
図３．６　検出器D_2コンポーネントの写真 …… 33
図３．７　スーパーインバーの板上に固定されたレーザ管、ミラー、アイソレータ及びオプチカルファイバーの端部…… 34
図３．８　レーザの安定化のために温度制御された冷却水をレーザ管へ供給するシステム …… 34
図３．９　４分割検出器とレーザスポットの関係 …… 35
図３．１０　ガウス型ビームと１次回折光の強度分布の比較 …… 36
図３．１１　レーザビーム強度分布 …… 37
図３．１２　４分割検出器上でのビーム強度分布 …… 37
図３．１３　各断面におけるレーザビームの強度分布 …… 38
図３．１４　ピンホールの径を計算するための光学配置 …… 40
図３．１５　(a)　OPA128を使用したプリアンプ回路図 ……43
(b) D_1,D_2検出器用作動アンプの概念図 ……43
図３．１６　X, Y, ZおよびD_1検出器の運動誤差と位置誤差と誤差伝播の関係 …… 44

図３．１７　検出器D_1とゴニオメータの回転中心がずれたときの誤差伝播 …… 45
図３．１８　X, Y, Zステージの構成 …… 46
図３．１９　法線測定を利用したステージのピッチング, ヨウイング測定結果
(a)　X軸のピッチング, ヨウイング …… 47
(b)　Y軸のピッチング, ヨウイング …… 48
(c)　Z軸のピッチング, ローリング …… 48
図３．２０　ゴニオメータの概略図 …… 49
図３．２１　ゴニオメータの角度位置決め精度 …… 51
図３．２２　２軸ゴニオメータの5×10^{-7}radステップ送りにたいする検出器D_1の出力 51
図３．２３　試料移動ステージ全体の構成 …… 52
図３．２４　製作した試料移動ステージ …… 53
図３．２５　製作した試料ホルダー …… 54
図３．２６　試料ホルダーの概念図 …… 55
図３．２７　曲率半径5mの凹面鏡を測定する場合の光学系 …… 56
図３．２８　光路中の屈折率分布による光線方向 …… 59
図３．２９　熱伝導、対流熱伝達及び熱ふく射の組み合わせ …… 60
図３．３０　多層壁を通過する1次元熱伝導の概念図 ……62
図３．３１　恒温室の構造 …… 63
図３．３２　恒温室を密閉した後6時間程度経過した後の光路の温度変化 …… 63
図３．３３　光路の屈折率のより安定化のための対策 …… 64
図３．３４　半無限物体の１次元非定常熱伝導 …… 65
図３．３５　銅パイプと恒温室内に0.05℃の温度差がある場合のパイプの内側の時間による熱流量の変化 …… 66
図３．３６　(a)　24時間での装置の温度変化 …… 67
(b)　24時間でのΘ, Φのドリフト …… 67
図３．３７　銅パイプで囲った光路とパイプの外側の空気の温度分布の比較 …… 68
図３．３８　(a)　2.5時間での温度変化、法線測定ドリフト …… 68
(b)　2.5時間での法線測定（Θ, Φ）のドリフト …… 69
図４．１　光軸、光学径Y軸及び試料台Y軸の調整法 …… 73
図４．２　光軸調整のフロー …… 74

図４．３　初期設定として検出器D_1から測定面までの距離を5μmの精度で位置決めする方法 …… 75
図４．４　曲率半径測定を最適化する方法 …… 76
図４．５　零位法を保ちながら測定点を等間隔にするための補正方法 …… 77
図４．６　零位法による測定フロー …… 79
図４．７　データ解析の順序 …… 80
図４．８　本測定法による曲率半径測定誤差 …… 81
図４．９　制御機構部の概略図 …… 82
図４．１０制御系 …… 83
図４．１１測定用メイン画面のレイアウト …… 86
図４．１２零位法による測定時のモニター画面レイアウト …… 86
図５．１　測定ポイント …… 89
図５．２　ゴニオメータによる凹面測定の再現性
(a)　水平方向 …… 89
(b)　垂直方向 …… 89
図５．３　検出器D_1と測定面までの距離を変えたときの法線ベクトルの方向の変化 90
図５．４　検出器D_1からミラー表面までの距離の変化と検出値の関係 ……92
(a)　検出器D_1からミラー表面までの距離Y_0を2985,2993,3015mmで測定したときの反射光線ベクトルの方向
(b)　Y_0を2985,2993,3015mmに変化させたときの法線ベクトルの測定値
図５．５　検出器D_1からミラー表面までの距離をY_0=2990,2991,2992mmで測定したときの光線ベクトルの変化 …… 92
図５．６　Y_0が2990のときのミラーからの反射光の法線ベクトルの測定値を基準にしY_0を2991,2992mmにしたときの反射光の法線ベクトルの測定値との差 ‥94
図５．７　測定距離(Y_0)を0.5mm変化させた時の形状変化 ……95
図５．８　ミラーを90度回転前後の法線測定値の比較 …… 96
（水平方向で測定した後、90度回転し、垂直方向で測定）
図５．９　ミラーを90度回転前後の測定偏差 …… 96
図６．１　紫外線領域における球面ミラーに必要な精度 …… 99
図６．２　公称2mのミラーを測定した結果の等高線図 …… 100

図６．３　鳥瞰図 …… 101
図６．４　理想曲率半径1987.453mmからの偏差の等高線図 …… 101
図６．５　理想曲率半径1987.453mmからの偏差を表した鳥瞰図 …… 102
図６．６　公称曲率半径3mのミラー測定結果の等高線図 …… 102
図６．７　公称曲率半径3mのミラー測定結果の鳥瞰図 …… 103
図６．８　A-A, B-Bライン上での理想曲面2994.5mmからの偏差 …… 103
図６．９　理想球面2998.5mmからの偏差 …… 104
図６．１０　ミラーで反射した光線のY＝2992, 2994.5, 2997mmにおけるX, Z平面上のばらつき …… 105
図６．１１　最小自乗法を用いてスプライン関数による法線ベクトルの補間値と測定した法線ベクトルとの差 …… 106
図６．１２　原子間力方式によるＺ軸の測定方法の概念図 …… 107
図６．１３　50mm角の面測定の測定方向 …… 109
図６．１４　A-A, B-Bライン上を測定した時のデータのばらつきと再現性 …… 110
図６．１５　理想曲率半径1987.4mmからの偏差 …… 111
図６．１６　傾斜角測定法によるA-A, B-Bライン測定値の再現性 …… 112
図６．１７　原子間プローブによる測定と傾斜角測定法による公称2000mmの曲率半径ミラーを測定した結果の比較 …… 113
図７．１　EEM加工の摸式図 …… 116
図７．２　加工装置概略図 …… 117
図７．３　NC EEM加工装置 …… 118
図７．４　送り速度による加工量の変化 …… 119
図７．５　加工幅に及ぼす送り速度の影響 …… 119
図７．６　前加工面の表面粗さ …… 120
図７．７　スポット加工表面の表面粗さ …… 120
図７．８　10mm／minの走査速度による加工表面の表面粗さ …… 121
図７．９　加工痕の位置関係 …… 122
図７．１０　累積加工量と加工量制御変数（送り速度Ts）との関係 …… 123
図７．１１　超精密数値制御加工工程 …… 124
図７．１２　NC EEMにより曲率半径1987.400mmの理想曲面からの偏差 …… 126

(a)　前加工面の曲率半径1987.4mmからの偏差の鳥瞰図
(b)　前加工面の曲率半径1987.4mmからの偏差の等高線図
図７．１３　加工スタート位置の設定方法 …… 127
図７．１４　A-A,B-Bラインでの曲率半径1987.400mmからの偏差 …… 127
図７．１５　NC EEM加工後の曲率半径1987.4mmからの偏差 …… 128
(a)前加工面の曲率半径1987.4mmからの偏差の等高線図
(b)NC EEM加工後の曲率半径1987.4mmからの偏差の等高線図

表目次

表１．１　代表的な放射光ミラーのための形状測定機 …… 3
表２．１　f=200mm、曲率半径 1～7mの凹面が0.1秒傾いた時検出器上で0.01mmの変位にするための光学系の位置 …… 17
表２．２　自乗平均誤差の最大値 …… 20
表３．１　法線ベクトル測定に使用した光学部品 …… 29
表３．２　光源及び検出器D_2のX,Y,Z軸調整装置の仕様 …… 33
表３．３　曲率半径の異なる凹面鏡の測定における各場所のおけるビーム径の変化及び被測定面上のビームスポットの大きさ …… 41
表３．４　法線、結像位置測定に使用したフォトダイオードとオペアンプ …… 42
表３．５　X,Y,Zステージの運動誤差が法線ベクトルの測定誤差に与える要因 …… 44
表３．６　ステージの仕様 …… 47
表３．７　ゴニオメータの仕様 …… 49
表３．８　試料移動ステージの仕様 …… 52
表３．９　測定時間内における温湿度及び圧力変化の許容値 …… 58
表４．１　多項式、スプライン関数により円周形状を補間、積分したときの計算誤差の比較 …… 80
表４．２　スプライン関数により球面形状を補間、積分したときの計算誤差 …… 81
表４．３　制御処理内容 …… 85
表５。１　Y_0を2990mmでのミラーからの反射光の方向と2991,2992mmでの方向の測定値と計算値との比較表 …… 94
表６．１　使用した測定機UAP 3P-5の仕様 …… 108
表６．２　公称2000mmの凹面鏡の測定環境 …… 108
表７．１　加工条件 …… 118
表７．２　送り量とうねり …… 121

第１章　序論

1.1 緒言

近年、シンクロトロン放射光を利用した実験が固体物理学、微細加工技術等多くの分野で活発に行なわれている。シンクロトロン放射光は、その偏光性や平行性に優れ、特に非常に幅広い波長域において従来にない高い強度をもっており、この利用によりすでに多くの注目すべき成果を挙げている。また、最近では加速器の急激な進歩や挿入光源技術の進歩により低エミッタンス放射光が出現している[1-1),(1-2),(1-3)]。放射光の利用では、ほとんどの場合において放射光をそのまま使うのではなく、光源から出る光を光学系で制御して実験に提供する。

真空紫外からＸ線にわたる放射光の輝度の歴史をみてみると、最初の偏向電磁石から超伝導ウイグラー光源に始まり、マルチポールウイグラー、アンジュレータ等の挿入光源が設置されることにより、輝度はさらに２～３桁も高められている。さらに高い輝度の放射光光源を得るために、次世代大型放射光実験施設の建設が、欧州、アメリカ、日本で進められている[Appendix 1]。このように、近い将来３～６桁もの高輝度な放射光の発生が計画されているなかで、それを有効に利用するためには、実験時における放射光ビームのエネルギー幅やビームサイズさらにはエネルギー密度等のパラメータを正確に、しかも任意に制御できることが重要かつ必要である。

これらの技術のなかには反射ミラーの利用が有効であるが、ミラーの形状も実験目的により複雑に変化し、また必要とされる形状精度、およびその表面粗さには厳しいものがある。一方では、強力な放射光の照射による熱歪みについても大きな問題となりつつある。特に短波長光の場合、通常の加工では到底達成できないほど厳しいものである。

現在、各国でミラーの開発がおこなわれているなかで、ミラーの３次元形状を測定精度10 nm以下の超精密形状測定技術が最も難しいとされており、ミラー加工コストの面からみても有効な測定手段が見当たらない．また、加工も最終的には長年培われたノウハウに頼っている傾向がある．放射光技術をさらに強力なものとし、より多くの分野でそれぞれの目的を充分に達成させるためには反射ミラーの製作技術の確立は特に重要であり、また従来にない新しい加工技術の導入が不可欠である。

1.2 シンクロトロン放射光用集光ミラーに求められる特性

シンクロトロン放射は、光速度に近い速さをもった電子や陽電子が磁場の中を通過してローレンツ力によって運動方向がまげられるとき、その加速度運動によって発生する光である。高エネルギーの円形電子加速器では電子エネルギー損失の最大の要因であるが、光を利用する立場からすると、遠赤外からX線に至る広いエネルギー範囲に分布した連続スペクトルをもつ比類のない光源である[1-4]。本研究ではシンクロトロン放射光の持っているスペクトルの中で、紫外線（λ=40～200nm）を集光させるために使用される凹面鏡の形状精度を以下の精度で測定することを目的とする。

良質な集光光学系あるいは結像光学系に必要な条件として[1-5]、

1) 物点から結像点までの光路差の絶対値が、使用する波長の1/4以下であること。
2) アッベの正弦条件を満足すること。

が挙げられる。これらの条件を満足させるためには、1) については形状精度、うねり及び粗さとして、使用波長を40nmとするとP-Vで10nm以下が要求される。2) は球面、非点、及びコマ集差等による結像のぼけを完全になくすことを意味するが、凹面鏡を使用するかぎり満足することはできない。しかし、瀬谷、浪岡等は凹面鏡と凹面回折格子を組み合わせた分光器においてコマ収差を消去するために詳細な解析を行っている[1-6]。彼等の解析結果からも凹面鏡の曲率半径誤差が生ずると、コマ集差の原因になることを示唆している。例えば、凹面鏡と凹面回折格子を使用した分光器で回折格子の分解能を2.5×10^{-4}としたとき、凹面鏡の曲率半径誤差は少なくとも2.5×10^{-5}以上必要である。凹面鏡の曲率半径誤差を面の法線ベクトルの差で表わすとほぼ5×10^{-7}radになる。これらの解析の詳細については、凹面鏡を使用した結像光学系の必要な条件としてAppendix 2に記載する。

以上述べた基本的な結像条件以外に下記の特性に対する必要な条件がある。

1) ミラーの反射率
2) 反射面の表面粗さと散乱の関係
3) 反射ミラーの材料特性

ここに掲げた特性の必要条件の詳細については、Appendix 3に記載する。紫外線用集光ミラーとして使用される凹面鏡は基盤材料として石英ガラスが一般的である[1-7]。また、高反射率を得るために白金や金をコーテングして使用される。紫外線からX線に至る波長の光に対する表面粗さと散乱の関係は、光の波長と入射角をパラメータとして散乱強度についてDebyeが解析した方法[1-8]を用いて必要な表面粗さを決定しているのが現状である。

1.3 超精密形状測定装置開発の意義（他者、従来の測定法）

緒言で述べたように、これらの計画から放射光を利用した研究が益々盛んになっていくことが明らかであり、ミラーに対する要求性能も一層厳しくなることは明らかである。このような状況の中で、現在おこなわれているミラーの形状を結像条件を満足するような精度で測定できるという報告はない。形状測定に関する開発研究は一般的に遅れ気味であると言える。表1.1 に現在までに開発されたミラー形状測定機の代表的なものを挙げる。

表1.1　代表的な放射光ミラーのための形状測定機（干渉を利用したものは省く）

Machine	Country	Measuring Dimensions	Resolusion (nm)	Measuring Probe	Measuring Region(mm)	Remarks
LTP(Long Trace Plofiler) [1-9),(1-10)]	(U.S.A)	2 dimensions	1.2 μrad	Laser	400	Slope Measuerment
Large Size Aspheric Surface Measuring Machine [1-11] (Taylor Hobson Co.)	(England)	3 dimensions	8	Stylus	F320	Contact
CSSP [1-12),(1-13)] (CANON Co.)	(Japan)	3 dimensions＋ Rotary Table	2.1	Stylus	F500	Contact
UA3P [1-14), (1-15)] (MATSUSHITA DENKI SANGYOH Co.)	(Japan)	3 dimensions	10	Atomic Force	200×200	Contact
NH-5 [1-16] (MITAKA KOHKI Co.)	(Japan)	3 dimensions	10	Laser	250×150	(Auto Focus) Z-axis
(Zeiss) [1-17]	(Germany)	3 dimensions	100	Stylus	500×250	Contact

干渉を利用した測定に関しては、干渉に必要な基準面の形状精度の表わし方が基準面全体でλ/20、λ/50 (λ=0.632μm)となっているのが一般的であり、基準面の任意の場所での形状精度が数値で表わされていないのが現状である。たとえば、使用する紫外線の波長を40nmとしたときの凹面鏡を測定する場合10nmの精度が必要であるが、たとえλ/50の基準面を使用したとしても10nm以下の議論ができない。したがって、ここでは干渉を利用した測定は含まれていない。

表1.1の中で、Long Trace Profiler (LTP) 以外の測定機の基本は三次元測定法で、測定精度を向上させるためには各軸の直角度、真直度を理想に近付けることにより達成される。また、Z軸には非接触と接触式が混在している。Canon Super-Smooth Polisher (CSSP) はこれらの方法の極限に近い測定機といえる。接触式のプローブを採用しているが、接触理論から許容できる接触力で測定したにもかかわらず測定面にきずがつく場合があると報告している[1-12]。また、その原因は測定面及びプローブに付着した汚れが原因だとしている。そこで、適当な潤滑油を塗布してきずを防ぎ摩擦係数を30～40%低減して測定再現性を向上させている[1-12]が接触界面での物理現象については触れておらず、接触式プローブの限界だと思われる。この測定機により、曲率半径217mm,φ100mmの凹面鏡の曲率半径を測定し、干渉計で測定した値と比較した結果、差は1.3μmであったと報告している[1-13]。この値は、曲率半径 の絶対測定精度が5×10^{-6}である。この精度は現在の最高値だと考えられる。しかし、反射面としてレイトレースを行った結果とシステム誤差についてはまだ報告されていない。その理由は、装置が複雑で大型であるため測定誤差の解析が非常に困難と考えられる。また、非常に高価な装置になる。

LTP はミラー面のスロープを測定する方法を採用しているただひとつの測定機であり[1-12]、光プローブを採用しているため非接触である。また、光プローブを測定面に沿って2次元で移動させるときステージの運動誤差を光の直進性を基準にして補正している。2次元に於いて160mmの測定長でスロープの測定精度は1×10^{-6}rad以下で、この測定精度を基に曲率半径測定誤差を見積ると1%以下であると報告している[1-10]。しかし、3次元計測を行うための検討はなされているが[1-13]、結果についての報告はない。この測定方法は、3次元測定法が確立すればミラー全面に於いて法線ベクトルの方向を精度よく測定することが可能なため集光状態をより精度よく把握することができると考えられる。

松下電器産業（株）で開発された原子間プローブ搭載3次元測定機UA3Pは[1-14][1-15]、プローブとして原子間力を一定に制御することにより形状測定を行うことに最大の特長がある。測定精度は、座標軸、スケール、センサーそれぞれを3枚の参照ミラーを用いて測定を行った結果、測定精度はA+B×L/500 と推定している。ここで、Aは測定長さに無関係な固有の誤差で20nm、Bは測定長さL(mm)に比例した誤差係数で100nmとしている。原子間力を一定に制御したときの精度は2桁良いはずであるが、A=20nmの位置決め精度は原子間力を検出するシステムが支配しているように考えられる。この測定機を使用して紫外線用ミラーの測定を行う場合、必要な精度が10nmであるため正確なレイトレースができない可能性がある。しかし、他の装置で測定したデータと比較検討できる性能を有していると考えられる。

三鷹光器（株）社製3次元測定機NH-5はプローブとして光を使用してZ軸をオートフォーカス機能により10nmの偏差を測定できるとあるが[1-16]、詳しい報告はなされていない。その他に表に掲げた測定機は一桁精度が劣るため測定精度10nmの測定は不可能である。

以上述べた形状測定装置で紫外線集光用ミラーを測定し、レイトレースを行おうとすると集光点に於いて誤差が発生する可能性がある。

そこで本研究では、ミラーにより反射された光線の追跡が容易にでき、基準面等の人工的な測定治具を使用せずミラーの法線ベクトルの方向を超高精度で測定でき、尚且つ、測定を自動化する形状測定方法の研究を行った。本研究の最終的な目標は次のものである。

（a）電磁波が同じ媒質中では理想的に真っ直ぐ進むと言う物理現象を利用してミラーの法線をppm以下の誤差で評価するとともに10nm以上の精度で形状精度を評価すること。

（b）測定環境を一定とするため測定を完全自動化する。

（c）測定装置を構成している各部の製作誤差や組立誤差による誤差伝播を詳細に検討すると共に、誤差伝播が最小となるような方法を確立する。

（d）曲率半径2000,3000mmの凹面鏡を使用して装置の評価を行う。また、松下電器産業（株）で開発された測定装置で同じミラーを測定し、測定値を比較検討する。

(a)に関する条件は1.2節で述べた。(b)は法線ベクトルの方向を測定するために光を使用するため光路中の屈折率の変化及び装置の温度による変形をなくすためには不可欠である。(c)は装置の製作誤差やシステム誤差を充分検討する必要がある。(d)は、他者で測定方法の異なる測定により同一のミラーを測定し、測定方法の信頼性を検討することである。

1.4 シンクロトロン放射光用集光ミラー製作へのEEMの応用

現在、各国でミラーの開発がおこなわれているが、放射光技術をさらに強力なものとし、より多くの分野でそれぞれの目的を充分に達成させるためには反射ミラーの製作技術の確立は特に重要であり、また従来にない新しい加工技術の導入が不可欠である。

放射光に使用される反射ミラーの形状は、平面、球面、円筒面、回転楕円体面およびトロイダル面が主に使用されている。また、ミラーの材質は硬X線領域では、単一波長にして集光するためにシリコン等の単結晶が使われ、軟X線領域では石英、ガラス、金属、シリコン、SiC[1-18]が集光のために使われている。これらの反射ミラーの加工技術を分析してみると、研削、ラッピングおよびポリシングで行なわれているのが現状である。また、金属ミラーについてはダイヤモンド切削加工やポリシングにより行われている。脆性材料の加工において注目すべきことは、伝統的な作業者の勘と経験によりナノメータ級の加工表面粗さが達成されていることである。形状精度については基準面を使用して、平面、凹面鏡は干渉法により測定されている。しかし、非球面形状の測定は、円近似が可能な断面と円筒基準面との干渉法による２次元的な測定を繰り返す場合がほとんどであった。ある意味では作業者の勘に頼っているところがある。最初に数値制御により球面ミラーの加工が行われたのは1970年後半、米国のパーキンエルマー社のRobert A.Jonesによってなされた[1-19]のが最初である。彼は、コンボリューション（重畳積分）理論を用いるため、加工領域を狭くできるポリシャーを使用してミラー全面を走査して加工を行うことを試みた。加工工程を何回かに分割し、工程毎に測定を繰り返し、測定結果から次の加工量を予測する方法を採用し、加工を行っている。しかし、加工現象そのものの議論はほとんど検討なされておらず、最終的に制御できる加工量や加工面の物性についても述べていない。1988年に米国のCalifornia州にあるNaval Weapons CenterのOPTICAL COMPONENT CENTERを訪問したとき、ミラーの加工はボールフィードポリシング[1-22]法を基本として、加工面の物性を研究していたが詳細については不明である[1-20]。キャノン（株）の根岸らは石英ガラス、単結晶CaF_2、多結晶CVD-SiCの材料について、形状精度80nmPV、表面粗さ0.2nmRMS、の加工精度を最大φ500×200mm、最大傾斜35°の自由形状に対して達成することを目的とした超平滑研磨装置CSSPを開発している[1-23]。この装置は質量約20t、大きさは2.3×3.6×3.7mもあり形状測定と修正研磨を交互にくりかえして目標形状に仕上げる方法を採用している。この装置に採用されている加工方法は、ポリシャーの大きさを従来より小さくし、加工領

域を狭め、加工量をコンボリューション理論に近い方法で行っている。しかし、加工精度が何によって決定されるのかどこまで制御できるのか、また、加工面の物性的評価の詳細な報告はない。一方、三菱電機（株）の鈴木らはポリシャーにポリウレタンを使用し、コロイダルシリカの粉末を研磨材として単結晶Si、石英のミラーを加工している。加工制御はコンボリューション理論を用いて、加工量が時間の関数になることから任意の形状加工を達成することができると報告している[1-22]。ポリシャーを加工面の同一場所に停留したときの加工痕の形状をみると砥粒の運動方向に痕跡がはっきり観察できる。このことは、力学的なエネルギーによる加工が支配的で塑性変形を利用した加工であると考えられる。また加工停留時間が1分当たりの加工深さが0.6μmにも達していることからnmオーダの加工制御は困難と思われる。世界的に見ても加工量を定量的に制御しながらミラーの加工をおこなった報告は非常に少なく伝統的な職人芸により大部分の加工が行われていると言わざるを得ないのが現状である。

しかし、加速器技術の急速な進歩により、低エミッタンス化された高輝度放射光により反射ミラーは形状や表面粗さの問題の他に、通常の材料の耐えうる限界をはるかに越える熱負荷を受ける。すでに、ガラスや石英では熱負荷によりミラーの破壊が起こるまでに至っている。このことは、材料の熱特性は勿論重要であるが、破壊しないまでも加工変質層があると熱負荷により表面性状が変化することは充分考えられる。特に、金属ミラーについてはダイヤモンド切削加工面の加工変質層が熱負荷により変形し、反射面の表面粗さの劣化が生じる。したがって、加工現象を詳細に検討した上でミラーの加工に採用する必要がある。

数値制御 (Numerically Contorolled ; NC) EEM[1-23]は EEM [1-24),(1-25),(1-26),(1-27),(1-28),(1-29] を応用しそれをNC化することによって任意の加工を可能にしたものである。後章で詳しく原理およびその応用について記することにするが、本節ではその概略を述べる。EEMとは、0.1μm以下の微細粉末粒子を何らかの方法で加工対象となる材料表面に供給し、このときに相互に接触した非常に狭い領域で一種の原子間結合を発生しさせ、加工対象物表面の原子を除去していくものである。加工域は、粉末粒子と加工物対象表面の接触した非常に狭い領域中のさらに理想的に界面が形成された領域に限られることからその単位は原子のオーダに近づき、それゆえ加工面の平坦性に関しても原子オーダの精度（タリステップ等による測定によれば5 ÅRmax 以下）で加工を行なうことができる。NC化への技術としては、微細粉末粒子を懸濁させた液中で低弾性体であるポリウレタンゴム球を回転させ

たときの流れによって行なうことにより達成している。これにより粉末粒子の供給を加工物表面上で位置的に制限することが可能となり、加工対象域全域を各点で所定量（ミラー加工の場合は前加工面と目的形状の偏差分）の加工を行ないながら走査することにより任意形状の EEM を可能にしている。そこで、本論文では、傾斜角積分型形状測定機を開発した後に、下記の件について検討する。

(a)紫外線集光ミラーに用いられる溶融石英を加工物として、表面粗さがタリステップ表面粗さ計でノイズレベル以下(0.5nmRmax)に加工すること。

(b)NC EEM に於いて加工量制御関数を求め、指定された場所で2nm以下の加工量が制御できること。

(c)開発した傾斜角積分型形状測定機により前加工面を測定し、指定した形状からの残差をNC EEMにより加工した後、もう一度測定を行いNC EEMの評価を行うこと。

1.5 本論文の構成と概要

本論文は、シンクロトロン放射光用集光ミラー製作のための超精密形状測定装置として新しい方法である傾斜角積分型形状測定法を提案し、測定原理、測定装置の製作および装置の性能について総合的な評価を行った。また、原子オーダの加工が可能な NC EEM を採用して、本測定機により前加工面の形状測定を行ない、理想面からの偏差分を加工除去した。その後、加工面を測定し、本測定方法と NC EEM による加工方法が放射光用集光ミラーの製作方法に有効であることを確かめた。

本論文は、８章で構成されており、各章では次の内容について述べている。

第１章は序論であり、本研究の背景および目的を述べた。

第２章は、新しい測定方法である傾斜角積分法による超精密形状測定装置の測定原理に関して述べた。

本方法は、基本的に光の光路の安定性を利用し、非測定面の任意の箇所の法線ベクトルを超精密に測定することを基本とした測定方法である。そこで、測定した法線ベクトル測定値を使用して被測定面の傾斜角を計算し、それを積分することによって被測定面の形状を求める方法について述べる。また、測定精度を向上するために入反射光路を同一化する零位法について述べる。最後に、測定機の構成要素の運動誤差と法線ベクトル測定誤差による傾斜角への誤差伝播を計算した。光学系の位置決め精度を1μm、法線ベクトルの測定精度を 5×10^{-7} radとして計算した結果、面の傾斜角を5×10^{-7} radの精度で測定しなければならないことが明らかになった。

第３章では測定原理に基づき、設計製作した測定機について述べた。本測定機は、光学系、光学系用移動ステージ系および試料支持台、試料調整系から構成されている。光学系は光源にHe-Ne レーザを使用し、ピンホール（光源とする）から出射した光は光形状を調整した後、試料面で反射し光源と虚像の位置に設置してある４分割フォトダイオード検出器に導かれる。光の位置が検出器上で 10 nm 変位したとき測定面の法線ベクトルが 5×10^{-7} rad 変化するように光学系を設定した。光学系移動用X,Y,Z ステージの摺動面はダブルV溝型を採用し、剛性を保つように設計されている。ピッチング、ヨーイング及びローリングの運動精度については 5×10^{-7} rad以下の再現性を確かめた後、運動誤差を補正して使用した。それぞれのステージの位置決め精度は0.1μmである。水平、垂直方向のゴニオステージの構成は、水平方向ゴニオステージの上面に垂直方向ゴニオステージを組み込み、サーボシステムとロータリーエンコーダにより1.8×10^{-8} rad（0.0036秒）の位置決めを達成した。

試料支持系は光学系と同様にX,Y,Z ステージの上に水平、垂直方向の角度調整用のあおり機構を設けマイクロメータヘッドとピエゾアクチュエータにより 5×10^{-7} rad以下の調整を可能にした。また、光路の温度、気圧および相対湿度の変動による屈折率の変化から発生する法線ベクトル測定誤差を5×10^{-7} rad以下にするためには、それぞれ0.01 ℃、1Pa および1％以下に抑えなければならない事を明らかにした。温湿度の制御は厚さ50mmの断熱材を二重に装置全体を被い、ビニールシートで外部との空気を遮断することにより達成した。気圧変化は大気中であれば音速の速さで伝播するため問題は生じないと考えた。

第４章では凹面ミラー測定方法について述べた。初期設定として、光学系の光軸とミラー中心の法線ベクトルとを一致さる。試料位置は凹面ミラーの曲率半径と同じ距離だけゴニオメータの中心から離してセットする。測定はあらかじめ決めてある測定箇所を、入反射光路が一致するまでゴニオメータとステージで調整する。この操作を全測定箇所について行う。これらの測定手順について述べた後、自動測定システムの構成について述べた。

第５章では測定装置の性能評価をおこなうために、基本となる法線ベクトル測定値の再現性について述べた。本研究で使用する全てのミラーの材質は溶融石英で、光学メーカにより研磨されたものである。また、ミラー面はNC EEM が可能なように、無コーティング面を使用した。曲率半径3mの凹面鏡を使用して10mmメッシュで直径100mmを５回測定し

た結果、全測定ポイントにおいて 5×10^{-7} rad以下の再現性があることを確認した。次に、光路長を変化させた時の法線ベクトル測定値の整合性を調べた結果、計算値と 5×10^{-7} rad以下で一致した。また、装置固有の誤差を検討するためミラーを光軸周りに90°回転した場合の測定値の整合性も調べた結果、面形状にして10 nm 以下で一致した。よって、直径100mmの凹面ミラーを10 nm 以下の測定誤差で形状測定できることを明らかにした。

第６章では紫外線集光ミラーの形状測定結果について述べた。測定したミラーは曲率半径2000、3000mmの凹面鏡で、それぞれ三回測定を行なった結果、測定の再現性は10nm以下であることが明らかになった。また、曲率半径2000mmのミラーを原子間プローブ搭載超高精度三次元測定機により測定した結果、再現性は40nmであった。また、本測定方法との比較では約50nmの差があった。

第７章ではNC EEM の加工原理を述べ、試作した加工装置を用いて溶融石英材料の加工量制御変数を決定した。その結果、1nm以下の加工量を制御できることを明らかにした。次に、光学メーカで研磨された曲率半径2mの紫外線集光用ミラーの形状精度を本測定方法により測定し、理想形状からの偏差を求め、NC EEM により修正加工をおこなった。修正加工後、形状測定をおこなった結果、理想形状からの偏差が10nm以下であった。これらの結果から放射光用集光ミラーの加工システムとして、NC EEM と本測定方法を組み合わせた方法が有効であることを確認した。

第８章では、本研究において得られた結果を総括し、結論を述べた。

1.6 結言

本章では、放射光ビームラインの結像光学系に用いられる集光ミラーの超高精度化の必要性と重要性を指摘し、本研究の目的を明らかにした。

第１章の参考文献

(1-1) 日本物理学会編, シンクロトロン放射光, 日本物理学会 (1990).

(1-2) The Tristan Super Light Facility Conceptual Design Report 1992.KEK Progress Report, December (1992) A/M.

(1-3) X.W.Zhang, T.Mochizuki, S.Yamamoto, H.Kitamura, A.Iida and M.Ando, Design of an Undulator Beam Line NE-3 on the Accumulation Ring for the Photon Energy Ranging 5-25KeV,Workshop on High Heat Load X-Ray Optics,August 3-5 (1989) Argonne National Laboratory.

(1-4) シンクロトロン放射, 日本物理学会編, 培風館 P.3

(1-5) 大柳博之編：シンクロトロン放射光の基礎、丸善、(1996) 359-443

(1-6) T.Namioka,M.Seya,Optical Properties of a Syatem Consisting of a Mirror and a Grating, APPLIED OPTICS,Vol.9,No.2,Februry 1970

(1-7) Photon Favtory Activity Report, ISSN 0912-1803 (1995).

(1-8) Handbook on Synchrotron Rdiation, Vol.1, edited by E.E.Koch, North-Holand Publishing Company (1983) p.173

(1-9) S.C.Irick : Nucl.Instr. and Meth. in Phys. Res.A347 (1994) 226-230

(1-10) S.Qian, W.Jark, P.Z.Takacs, K.J.Randall and W.Yun : Opt. Eng. 34 (1995) 396.

(1-11) 小川秀樹：超精密形状測定の最先端、精密工学会。超精密加工専門委員会第34会研究会資料

(1-12)根岸 真人, 出口 明信, 安藤 学, 滝本 正文, 中村 宣夫：精密工学会, Vol.61, No.12 (1995) p.1725-1729

(1-13)根岸 真人, 出口 明信, 安藤 学, 滝本 正文, 中村 宣夫, 鳴海 宏治, 山本 硯徳：1994年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, p.67-68

(1-14)吉住 恵一, 沖野 芳弘：非球面形状の精密測定システム, 光学, 12 (1983) 450-454.

(1-15)吉住 恵一, 久保圭司：原子間力プローブ搭載超高精度三次元測定機、National Technical Report Vol.39,No.5 (Oct.1993)

(1-16)三鷹光器（株）NHシリーズカタログ

(1-17)Zeiss カタログ

(1-18)Handbook on Synchrotron Rdiation, Vol.1, edited by E.E.Koch, North-Holand Publishing Company (1983) p.180

(1-19)Robert A.Jones:Optimization of computer controlled polishing,APPLIED OPTICS,Vol.16,No.1,January 1977

(1-20)Private Comunication

(1-21)M.Ando,M.Negishi,M.Takimoto,A.Deguchi,N.Nakamura,M.Higomura and H.Yamamoto:Super-Smooth Surface Polishing on Aspherical Optics,SPIE,1720,(1992)2739

(1-22) 鈴木　浩文、小寺　直、島野　裕樹：楕円体ミラーの研磨加工、1992年精密工学

会秋季大会学術講演会講演論文集、107-108
(1-23) 森 勇蔵, 井川 直哉, 奥田 徹, 杉山 和久：EEMによる超精密数値制御加工法, 精密機械, 46, 12 (1980) 1537.
(1-24) 森 勇蔵, 津和 秀夫, 杉山 和久：EEM(Elastic Emission Machining)の基礎研究（第1報）--極微小量弾性破壊の概念とその可能性, 精密機械 43, 5 (1977) 542.
(1-25) 森 勇蔵, 井川 直哉, 杉山 和久, 奥田 徹, 山内 和人：EEM (Elastic Emission Machining)の基礎研究（第2報）--応力場から見た格子欠陥の発生, 増殖の可能性, 精密機械 51, 6 (1985) 1187.
(1-26) 森 勇蔵, 井川 直哉, 奥田 徹, 杉山 和久, 山内 和人：EEMによる超精密数値制御加工法--流体の挙動解析と膜厚分布、精密機械 49, 11 (1983) 1540.
(1-27) 森 勇蔵, 奥田 徹, 杉山 和久, 山内 和人：EEMによる超精密数値制御加工法--流体中の粉末の挙動と加工特性, 精密機械 51, 5 (1985) 1033.
(1-28) 森 勇蔵：Elastic Emission Machiningとその表面, 精密機械, 46, 6 (1980) 659.
(1-29) 森 勇蔵, 山内 和人：原子の大きさに迫る加工, 精密機械, 51, 1 (1985) 12.

第2章 形状測定装置の測定原理

2.1 緒言

前章で述べたように、放射光用ビームラインに設置される分光器の性能は凹面鏡の曲率半径の絶対値およびミラー各場所に於けるうねりにより結像性能が左右されることがわかった。

そこで、光波干渉のように基準面を用いることなく、光路の安定性を利用し、被測定面上の各点の法線を測定し、面の傾きを求め、それを補間、積分することにより面の形状を求める測定機を開発した[(2-1),(2-2),(2-3),(2-4)]。以下、本測定方法を傾斜角積分型測定法と呼ぶ。本測定方法では、X,Y,Z軸を用いた3次元直交座標を利用した測定や干渉系で測定する方法と比較すると、曲率半径 5mのミラーであれば絶対曲率半径を10^5 以下の精度で、ミラー表面のうねりを 50nm / 100 mm 以下で測定できる。測定原理から考えて被測定物の大きさに依存しない測定法である。また、 光線追跡に必要な法線ベクトルを直接測定するため、形状精度もさることながら、集光鏡による放射光の集光計算用のデータとして使用できることが大きな特長である。

開発した測定機は、曲率半径 1～7 m の紫外線集光用凹面鏡の任意の点の法線ベクトルを 5×10^{-7}rad（50nm / 100 mm の傾斜角測定） 以下、ミラーの法線ベクトル測定位置精度を 0.2 μm 以下で測定することを目標とする。この目標値は平行光が凹面鏡で反射した場合 、集光点での光線追跡誤差が 1 μm 以下にあたる。本章では、光の直進性を利用して被測定面の法線ベクトルの方向を測定する方法について述べる。次に、法線ベクトルは補間、積分することにより形状を得る方法について述べる。最後に補間、積分計算に於ける測定誤差の伝播について検討する。

2.2 傾斜角積分型形状測定法

本研究における表面形状の測定法は次の通りである。被測定面上のある点への入射光とその点での反射光とが重なるように光源の位置、角度を調整すると、その点の法線ベクトルは光線のベクトルと等しくなる（図2.1）。この法線ベクトルより、被測定面の傾きを求める。

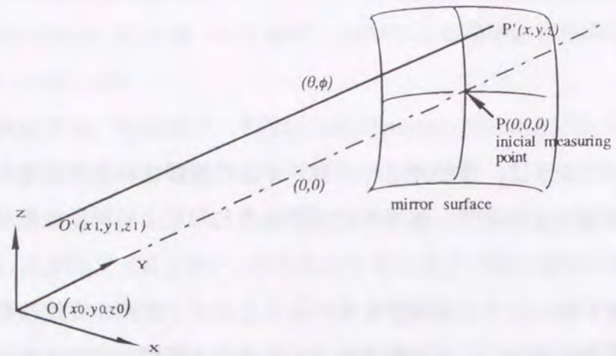


図2.1　光の反射、直進性を利用した表面形状測定の方法

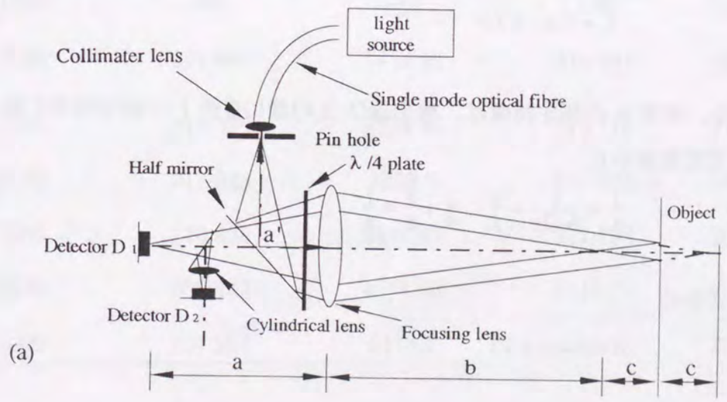
P(*0,0,0*)は最初の測定点とし、その時の法線ベクトルと光線ベクトルが一致した時の光源の位置調整用座標系のY軸を一致させ、座標値をO(X_0, Y_0, Z_0)、X軸周りとZ軸周りの角度を(*0,0*)とする。点P'(*x,y,z*)での測定に於けるO'(X_1, Y_1, Z_1),(θ_1, ϕ_1)は各ベクトルを一致させた時の光源位置及び角度を表わす。

このようにして、被測定面上の各点における面の傾きと光源位置を求める。この面の傾きは特定の点でしか測定されていないので、それを補間し、任意の点での面の傾を計算できるようにし、その傾きを積分することにより、被測定面の表面形状を求める。

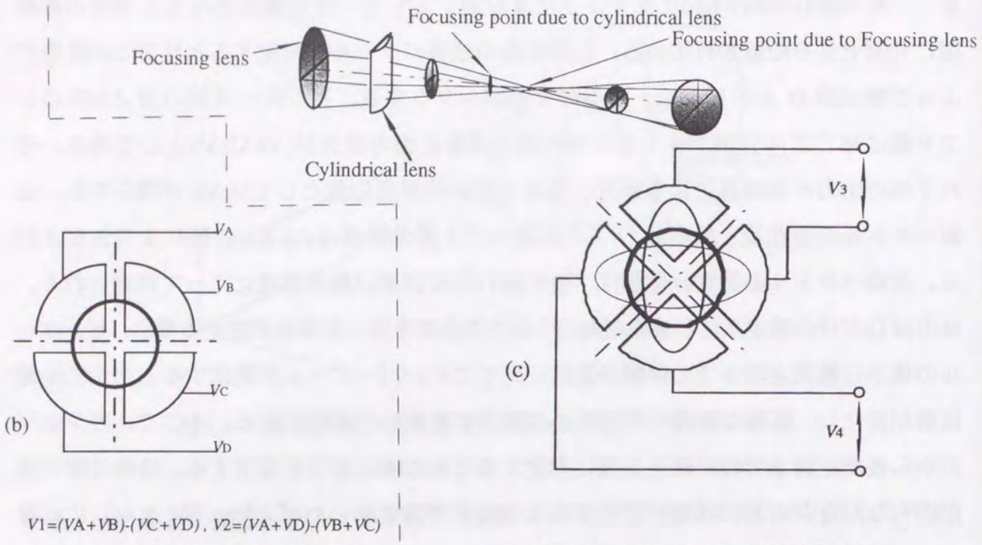
2.2.1　光路の安定性を利用した法線ベクトル測定

表面の法線ベクトルの方向を測定する光学系を図2.2 に示す。測定系に於ける座標はビーム進行方向をy 軸、水平及び垂直方向をx,z 軸と定義する。直線偏光された平行光がピンホールを通ることによりフラウンフォーファー回折が起こり光が広がっていく。その後、ビームスプリッターで90°曲げられ、円偏光に変換するためλ/4 板を通し、結像レンズに達する。ピンホールから結像レンズまでの距離をa'とする。結像レンズを出た光は光路長がb +2cの所で結像するように結像レンズを配置する。被測定面はb+c の場所に置く。光は被測定面で反射する。反射した光はc 点で一端結像し、再び同じ結像レンズ、λ/4 板を通って直線偏光に変換し、波面が90°回転することにより、ビームスプリッターを直進して光位置検出器（以下検出器と呼ぶ） D_1 上に結像させる。ピンホールの位置を光源の位置と定義し、検出器 D_1 の位置は結像レンズにより結像する位置に

置く。検出器D_1は図2.2(b)に示すような４分割フォトセンサで構成されX,Z 座標の各象限に分割セルを配置されている。被測定面の法線ベクトルが変化すると光てこの原理によって検出器 D_1 上のピンホール像の位置がシフトする。ピンホール像の X,Z方向のシフト量に応じて４分割フォトセンサの各セル毎に出力変化V_A, V_B, V_C, V_D として現れ、それぞれの出力の加減算により水平、垂直方向の位置変化量としてV_1, V_2 が得られる。法線ベクトルの変化量と検出器 D_1 上の位置シフト量の関係はa',a,b,c の値により決定される。法線ベクトルの測定分解能は、検出器 D_1の位置変位検出感度によって決定される。検出器D_1だけの測定系だと被測定面のうねりや曲率を持った面を測定する場合、ピンホールの像から被測定面までの距離が変化し光てこのレバーアームが変化するとともに結像位置が変化し、正確な法線ベクトルの測定ができない可能性がある。そこで、ピンホールから被測定面までの距離を正確に測定するために検出器D_2を使用する。結像位置の変化からなんらかの光の状態が変化するような光学系を用いればよい。図2.2（c）に結像位置を測定するための光学系を示す。図2.2（a）に示すように検出器D_1の前にハーフミラーを置いて光を分割させ、シリンドリカルレンズを用いて結像させる。図2.2（c）に示すように、検出器D_2上では被測定面までの距離が短くなれば光の断面形状が垂直方向に長い楕円形状に、距離が長くなれば水平方向に長い楕円形状になり検出器D_1と同じ方法で光の断面形状の変化、つまり結像位置の変化をV_3, V_4 の変化として測定することができる。D_2 検出器の場合、４分割フォトセンサの配置はX,Z 軸に対して45° 傾ける必要がある。



(a) 法線ベクトルの方向を測定するための光学系全体図



(b) 法線ベクトルの方向を検出するための4分割フォト検出器D_1

(c) シリンドリカルレンズを用いた結像位置検出用4分割フォト検出器D_2

図2.2　検出器D_1,D_2の構成

図2.2 を基にして法線ベクトルを測定する場合のa',a,b,c 等の寸法及び使用する結像レンズ焦点距離の決定方法について詳細に述べる。被測定面が角度 θ だけ傾くと、検出器D_1 上の像の変位量 L は、

$$L = 2ac\theta / b \tag{2-1}$$

だけ変位する。角度 θ の測定精度は、検出器D_1 上の像の変位 L の測定精度に依存する。また、レンズ光学系から、

$$\frac{1}{a'} + \frac{1}{b+2c} = \frac{1}{f}\ ,\ \frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \tag{2-2}$$

測定条件の式から

$$a + b + c = Y_0 \tag{2-3}$$

となる。ここで、f はレンズの焦点距離、Y_0 は検出器D_1 から被測定面までの距離、a' はピンホールの位置からレンズの中心までの距離を表わす。

(2-2)及び(2,3) 式から、(2-1) 式は、

$$L = \frac{2c\theta f}{b - f} \tag{2-4}$$

上式を連立させて解くと、

$$c^2\left(\frac{4f^2\theta^2}{L^2} + \frac{2f\theta}{L}\right) + c\left(\frac{4f^2}{L} + f - \frac{2fY_0\theta}{L} - Y_0 f\right) - f^2 = 0 \tag{2-5}$$

が成り立ち、最初にf,Lを決めればa,a',b,cの寸法を得ることができる。

表2.1 に f = 200 mm のレンズを使用し、法線ベクトルが5×10^{-7}rad 変化した場合、位置検出器として使用する4分割フォトダイオード上で10nm 変位するとして1～7 m までの凹面鏡を測定するときの光学系の寸法を示す。使用した4分割フォトダイオードの分解能については、3章3節で詳しく述べる。表以外の曲率半径のミラーを測定するときは f 値を変えれば同じ測定精度で測定することができる。

表2.1　f = 200mm 、曲率半径１～７m の凹面が5×10^{-7}rad（0.1秒）傾いた場合検出器上で 10nmの変位にするための光学系の位置

Y_0 (mm)	a (mm)	b (mm)	c (mm)	a' (mm)
1000	300	600	100	266.667
2000	231.886	1454.49	313.662	221.257
3000	219.375	2264.46	516.116	212.917
4000	213.943	3068.9	717.225	209.297
5000	210.896	3871.07	917.768	207.264
6000	208.942	4673.08	1118.27	205.962
7000	207.584	5474.1	1318.53	205.056

また、結像位置は、半透鏡、円筒レンズ、検出器D_1 と同一の構成をもつ検出器 D_2 の

光学系により測定できる。結像位置の分解能は図2.3 から主集光レンズの焦点距離を f_1、シリンドリカルレンズの焦点距離 と f_1 による焦点からの距離を それぞれf_2 ,h とし、シリンドリカルレンズによる焦点の距離を e、シリンドリカルレンズを通った光が真円になる場所から f_1 による焦点位置への距離を g とおくと、

$$\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=\frac{1}{f_1} \quad , \quad \frac{1}{e}+\frac{1}{h}=\frac{1}{f_2} \tag{2-6}$$

が成り立ち、 b が Δb だけ変化したときの Δe、Δh は、

$$\Delta e=\frac{f_2^2}{(h+f_2)^2}\frac{f_1^2}{(b-f_1)^2}\Delta b \tag{2-7}$$

$$\Delta h=\frac{f_1^2}{(b-f_2)^2}\Delta b \tag{2-8}$$

となる。 b が Δb 変位した時 検出器D_2 上では像が真円にならず楕円になる。f_2 によって曲げられる方向と f_2 に作用されない方向との光の形状の長さの比で表わすと、

$$K=\frac{(e+\Delta e)\left\{\dfrac{f_1(b+\Delta b)}{(b+\Delta b-f_1)}-(a-g)\right\}}{(h+\Delta h)\left\{\dfrac{f_1(b+\Delta b)}{(b+\Delta b-f_1)}-(a-g)-(h+\Delta h)-(e+\Delta e)\right\}} \tag{2-9}$$

となる。検出器D_2 上での形状変化、$\Delta K/\Delta h$ は結像位置測定の感度を表わしf_2を小さくすれば感度を大きくすることができる。

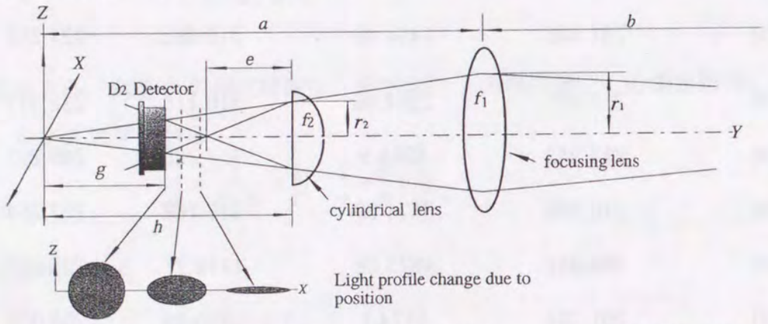


図2.3 シリンドリカルレンズと検出器D_2 による結像位置測定
結像位置と検出器D_2の位置の変化によりD_2 上の光の
断面形状が変化する。

2.2.2 入反射光路同一化による零位法

本測定方法の基本は、光の直進性を利用して被測定面の傾斜角を超精密に測定することである。傾斜角を超精密に測定する方法として測定点での法線ベクトルの方向を測定する方法を採用する。測定点における法線ベクトルと入射光路を一致させると、反射光路も法線ベクトルと一致するため光線の出射点と反射光線の位置を同一点にすることができる。また、被測定面の測定基準点における X,Y,Z 方向の位置との関係がわかっていれば、法線ベクトルとX,Y,Z 座標値とで補間、積分することにより形状を得ることができる。

本測定方法による測定手順は、図2.2でまず法線ベクトル測定用光学系と被測定面の傾き、位置を調整し、光学系の光線方向、光学系のY軸移動方向、被測定面の中心の法線方向を一致させる。ピンホールの像をD_1上に結像させる。その時の光学系の位置を基準位置　O(0,0,0)、Θ_0(0,0)とする。次に、光学系を (θ, ϕ)だけ傾け、ビーム検出器の出力 V_1, V_2, V_3, V_4 が零となるように、光学系を X,Y,Z　軸方向に移動させる。角度 (θ, ϕ)とX,Y,Z軸方向の変位A,B,Cより、被測定面上の測定点の X,Y座標及び傾きが求まる（図2.4）。測定点の座標 (x , z) は、

$$(x, z)=(\{(Y_0-C)\tan\phi+A\}\cos\phi, \{(Y_0-C)\tan\theta+B\}\cos\theta\cos\phi) \tag{2-10}$$

面の傾き　$\partial y/\partial z$　、$\partial y/\partial x$ は、

$$\partial y/\partial z=\tan\phi/\cos\theta \quad , \quad \partial y/\partial x=\tan\theta \tag{2-11}$$

測定値 θ, ϕ, A,B,C にはそれぞれ測定誤差が含まれている。それらの x、z、$\partial y/\partial x$、$\partial y/\partial z$ への誤差伝播を考慮する必要がある。そこで、曲率半径3000mm、直径100mmの凹面鏡を測定したとき、法線ベクトルの測定値 θ, ϕの測定精度を 5×10^{-7}radとし、 A,B,C Y_0それぞれの測定精度を1 μmとした場合の誤差伝播を自乗平均誤差で計算した結果の最大値を表2.2 に示す。計算結果から、上記測定精度での誤差伝播の量は、測定値 θ, ϕ よりは充分小さいため、表面の傾きを5×10^{-7}radの精度で測定できることが明らかである。

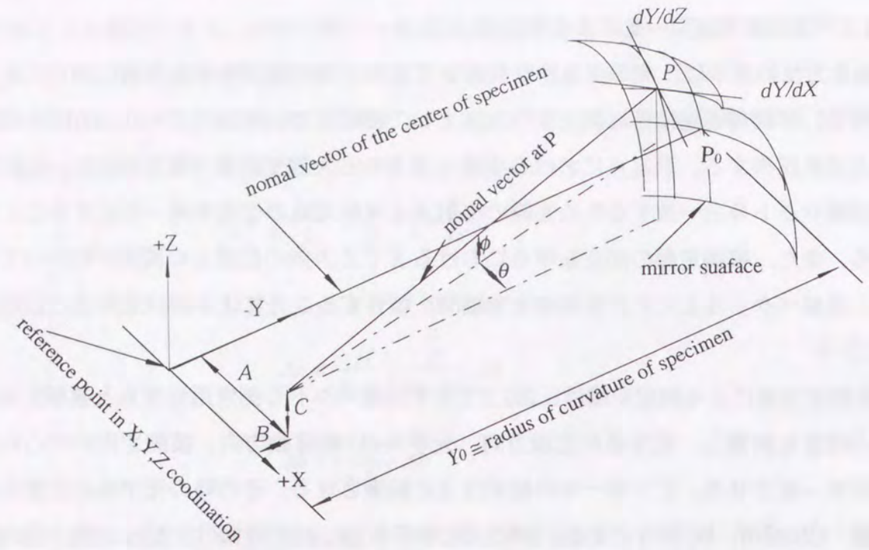


図2.4　測定箇所に於ける被測定面の法線ベクトルと光線ベクトルを一致させる方法
初期条件として点P_0において両ベクトルを一致させ、次に任意の点Pを測定する場合、θ,ϕ を移動しただけでは入反射光路がずれたらθ, ϕ, A,B,C に位置を調整して入反射光路を同一化する。その時の角度及び位置測定精度はそれぞれ5×10^{-7}rad及び1μmである。

表2.2　自乗平均誤差の最大値

Mean square error function	Maximam of mean square error
$\sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial\theta}\right)^2(d\theta)^2+\left(\frac{\partial x}{\partial\phi}\right)^2(d\phi)^2+\left(\frac{\partial x}{\partial C}\right)^2(dC)^2+\left(\frac{\partial x}{\partial A}\right)^2(dA)^2+\left(\frac{\partial x}{\partial Y_0}\right)^2(dY_0)^2}$	(x) 2.887μm
$\sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial\theta}\right)^2(d\theta)^2+\left(\frac{\partial Z}{\partial\phi}\right)^2(d\phi)^2+\left(\frac{\partial Z}{\partial C}\right)^2(dC)^2+\left(\frac{\partial Z}{\partial B}\right)^2(dB)^2+\left(\frac{\partial x}{\partial Y_0}\right)^2(dY_0)^2}$	(z) 2.886μm
$\sqrt{\left(\frac{\partial\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)}{\partial\theta}\right)^2(d\theta)^2+\left(\frac{\partial\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)}{d\phi}\right)^2(\partial\phi)^2}$	$(\partial y/\partial x)$ 4.849×10^{-7} rad
$\sqrt{\left(\frac{\partial\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)}{d\theta}\right)^2(d\theta)^2}$	$(\partial y/\partial z)$ 4.849×10^{-7} rad

被測定物の曲率半径を1000 mmから10000 mmまでとし、また大きさを直径100mmの測定を行なう場合、形状測定精度を0.05 μm／100mm 以下にするためには、各測定点における b（集光レンズから被測定物表面までの距離）の偏差を計算する。この計算をおこなう時の条件としてゴニオメータ角度位置決め精度を5×10^{-7}radとし、各測定における曲率半径に対する誤差から生じる法線ベクトルの変化を5×10^{-7}rad以下にするためには、

$$5\times10^{-7} > P(dx,dy) / Y_0 \qquad (2\text{-}10)$$

にしなければならない。ここで $P(dx,dy)$ は測定点位置誤差、Y_0 は曲率半径を表わす。よって、b の変化により許容できる量は、b の誤差をdbとして、

$$\pm5\times10^{-7} > P(dx,dy) / b - P(dx,dy) / (b \pm db) \qquad (2\text{-}11)$$

が成り立つ必要がある。(2-11) 式を満足するためには dbを図2.5に示す値以下に制御しなければならない。b の精度は曲率半径1000 mm に於いても0.1 mm オーダの精度で問題がないことを表わしている。実際の測定において被測定物の形状精度は普通の光学研磨されたものを用いるため、b の誤差を0.1mm以下にする事は容易であると思われる。

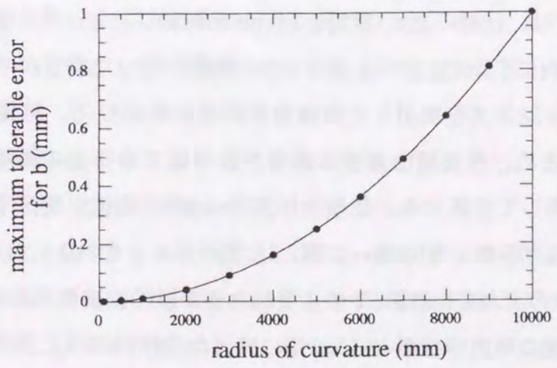


図2.5　50nm/100mmの傾きを測定するための曲率半径に対するf_1レンズから被測定面までの距離許容偏差　（測定物の直径100mm）

一方では、本測定は基本的に光てこの原理を利用しているためbの変化に対して法線ベクトルの測定精度がどう変化するか検討する必要がある。(2-4) 式で求められる法線ベクトルの測定精度は5×10^{-7}radである。測定する曲率半径が500mm～10000mm、直径がφ100mmの凹面鏡を上記の法線ベクトル測定精度で測定したとき、理想的な曲率を持った凹面鏡だとすると各曲率半径に対する分解能を表わした結果を図2.6に示す。結果から曲率半径が2000,3000及び5000mmではそれぞれ2×10^{-5},3×10^{-5}及び5×10^{-5}である。

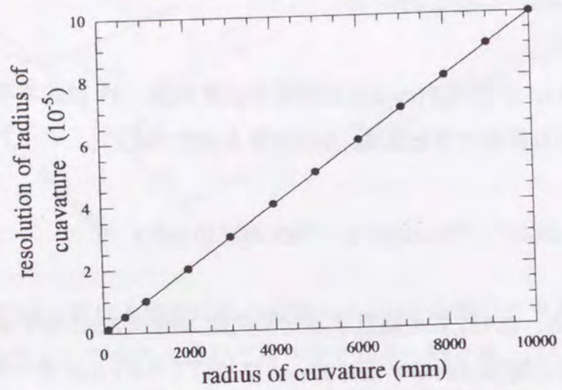


図2.6 各曲率半径(500～10000mm)の測定に於ける曲率半径測定の分解能
各曲率半径が理想的である面を5×10^{-7} radの法線ベクトル測定精度としたときの曲率半径の分解能。

実際の測定に於いては、任意の測定点に於けるdbを測定しようとする曲率半径において図2.5に示す許容値内にすることから、図2.6の分解能を持った測定が可能となる。そこで、シリンドリカルレンズを使用した結像位置測定法において、結像位置の変化はdbによる変化であるため、検出器D_2の検出感度が許容値であるdbの距離以下であるかを具体的に数値を使用して計算する。曲率半径3000mmの凹面鏡を測定する場合、シリンドリカルレンズの焦点距離f_2を102 mm、図2.3に於けるh,gを219.4、110.8 mmとすると図2.2 に於けるV_3, V_4の出力変化は図2.7 のようになる。横軸は被測定面の曲率半径を、縦軸は検出器D_2 上の光の断面形状が db により、真円から楕円形状に変化した時のセンサー各セルの出力変化の加減算の結果を表わす。この場合、dbがゼロを基準とした。以上の結果から、X,Y軸の位置決め精度のようにμm オーダの測定精度は必要ないことが明らかになった。この結果は本測定方法の一つの大きな特長であることを示している。

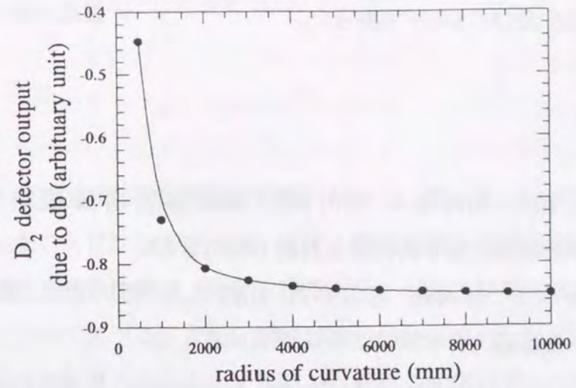


図2.7 検出器D_2 上でのV_3- V_4 の値
db がゼロの時、V_3- V_4出力をゼロとして、$-db$ にすると検出器D_2 上では縦長の楕円形状となりV_3- V_4 出力はマイナスとなり検出可能である。

2.3 結言

本章では、傾斜角積分型測定法の測定原理について述べた後、凹面ミラーを測定する場合の測定精度について検討をおこなった。本測定原理の特長は基準面を必要とせず、被測定面の大きさに依存しないことである。法線ベクトルを測定し、補間、積分することにより形状を求めることから、測定箇所における法線ベクトルの測定法として、法線ベクトルと光線ベクトルを一致させる方法を採用した。そのために、光が測定箇所での入反射光路を同一化する方法を提案した。反射光の位置検出器として4 分割フォトダイオードを使用し、1～6mの曲率半径での法線ベクトルの方向が5×10^{-7} rad変化したとき、位置検出器上で10nm変位するような光学系の配置を計算した。また、測定誤差からの誤差伝播を計算した。以上の結果から次の結論が得られた。

（1）本測定法は法線ベクトルを測定し、補間、積分することにより形状を求める。
（2）本測定原理の特長は、基準面を必要とせず、被測定面の大きさに依存しない。
（3）本測定原理による形状精度は、法線ベクトル測定精度が支配する。
（4）法線ベクトルの測定誤差を5×10^{-7} rad、X,Y,Zステージの位置決め誤差を1μmとしたとき、形状精度は、50nm/100mm以下であることが明らかとなった。
（5）曲率半径が、2000,3000及び5000mmの曲率半径測定分解能を計算した結果、それ

ぞれ2×10^{-5},3×10^{-5}及び、5×10^{-5}であった。

第２章の参考文献

(2-1) 森 勇蔵, 杉山 和久, 山内 和人, 西川 和仁, 酒井 啓至, 本郷 俊夫, 東 保男：昭和59年度精機学会春期大会学術講演会前刷 (1984) p.403

(2-2) 本郷 俊夫, 東 保男, 森 勇蔵, 杉山 和久, 山内 和人, 西川 和仁, 酒井 啓至：昭和59年度精機学会春期大会学術講演会前刷 (1984) p.405

(2-3) T.Hongo, Y.Mori, Y.Higashi, K.Sugiyama, K.Yamauchi, K.Nishikawa andK.Sakai: Development of High Accuracy Profile Measuring System for Focusing Mirror of SOR(Synchrotron Orbital Radiation), Proc.Int.Nat.Symp. on MQCP. (1984) p152-157.

(2-4) 森 勇蔵, 杉山 和久, 山内 和人, 西川 和仁, 酒井 啓至, 本郷 俊夫, 東 保男：シンクロトロン放射光用ミラーの超精密形状測定装置の開発, 精密機械, 51, 11, (1984) p.96-101.

第３章　形状測定装置(3-1), (3-2), (3-3), (3-4)

3.1 緒言

本章では、前章で述べた測定誤差の見積に基いて、コンピュータ制御による自動形状測定機を開発したことについて述べる。まず、測定装置全体の構成について述べた後、法線ベクトル測定光学系の構成、光学系移動ステージおよび試料支持系の構成および製作精度の詳細について述べる。また、測定環境について検討した結果、本測定方法ではレーザ光を空気中で伝搬させるため、光路の屈折率の変化は測定誤差の大きな要因となる。そこで、屈折率の変化と光路の温度、湿度および気圧との相関関係について検討した結果、測定環境の安定化が必要であることが明らかになった。よって、測定環境の安定化を行った結果について述べる。最後にデータ処理方法について述べる。

3.2 形状 測定装置の構成

測定装置の概略図を図3.1 に示す。装置全体は測定環境を安定させるために断熱材で製作した恒温室の中に設置した。恒温室の大きさは8m（長さ）×2.5m（高さ）×1.5m（幅）である。測定装置の構成は、基盤となるコンクリートブロック（7m（長さ）×0.8m（高さ）×0.7m（幅）；Base）を恒温室の中央に据え付けた。また、床からの熱侵入を防ぐため2本のH形鋼（100mm×100mm、t=10mm、L=7m）の上に設置し、床とコンクリートブロック間には断熱材を敷き詰めた。測定時には恒温室内は外部と完全に空気の入出がないように断熱材の継ぎ目はコーキングを行った。また、法線ベクトル測定に光検出器を使用するため恒温室内は完全な暗室状態にしてある。この基盤用コンクリートブロックの重量は約13 t である。このコンクリートブロックの上に法線ベクトル測定系（光学系及び光学系移動ステージを含む）及び被測定物調整用の試料台系を固定する。これらの装置をコンクリートブロックに固定するために、コンクリートブロックを製作する時点で上面に厚さ30mmの鉄板を鉄筋と熔接で固定した後、上記の寸法の型枠にコンクリートを流し込み固定した。法線ベクトル測定系の構成は、鉄板の上面に600mm×600mm厚さ150mm、平面度0.5μmの石定盤を固定し、Y,Xテーブルを設置した。テーブルのガイドはダブルV溝で構成され、剛性、真直性を保つように設計されている。

その上面にθ ゴニオメータ、Z軸ステージを設置した。次に、φゴニオメータを設置した。法線ベクトル測定用光学系はφゴニオメータ上に設置し、検出器D_iはφゴニオメータの回転中心に置かれている。コンクリート上面から検出器D_iまでの高さは約800mmである。光源としてHe-Ne レーザを使用し、レーザの強度変化及びレーザ管から出射する位置の安定化のためレーザ管は恒温室内に設置して断熱材で囲って尚且つ水冷した。レーザの電源は熱源であるため恒温室の外に設置した。レーザ管から出射した光は単一モードオプチカルファイバーでピンホールまで導いた。熱源であるモータは水冷し、恒温室内の温度安定化を図った。測定系の重量は約250Kgである。

試料台は、コンクリートブロック上面の鉄板に長さ6mのガイドレールを設置し、試料台が測定系のφゴニオメータの回転中心から1～6mの間、移動でき任意の場所で固定できるようにした。試料台の構成はX,Y,Zテーブル及び試料をX,Z軸周りの角度調整機構及び試料ホルダーである。また、φゴニオメータの回転中心から被測定面までの距離はレーザ測長機により測定できるようになっている。試料台を固定した後、光路は温度の安定化をより促進するために銅パイプで囲う。試料台の総重量はおおよそ300kgである測定に必要な動作及びデータ採取は総てコンピュータ制御により完全自動化した。

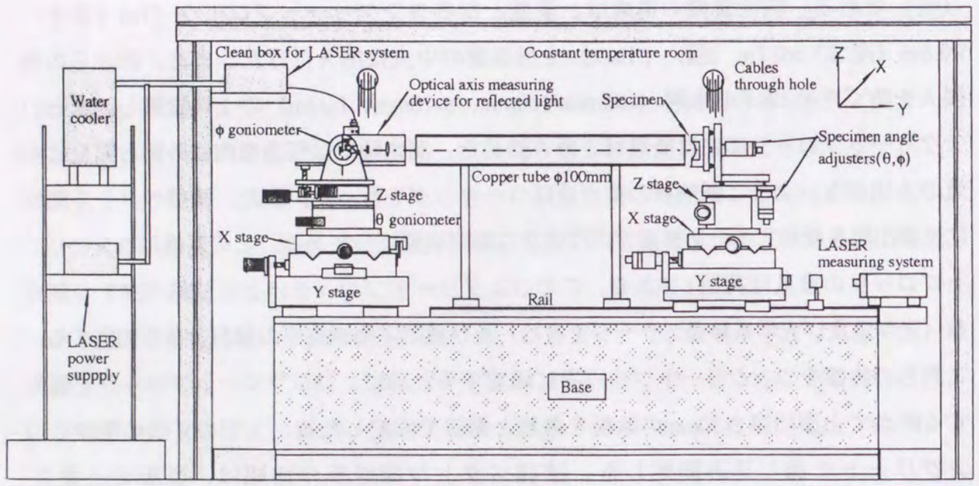


図3.1 測定装置の概略図

測定系の制御用ケーブルは恒温室の側壁にφ100mmの穴を開けて外部に設置してある制御系に接続されている。この穴の隙間からの熱流入を防ぐため断熱材で隙間を埋めた。測定装置全体は製作されてから5年以上経過した後、完全自動化された装置である。図3.2 は曲率半径2mの凹面鏡を測定するためにセットされた測定機を試料台の方から法線ベクトル測定系を見た写真である。法線ベクトル測定系、試料台系及び制御系の詳細については次節で述べる。

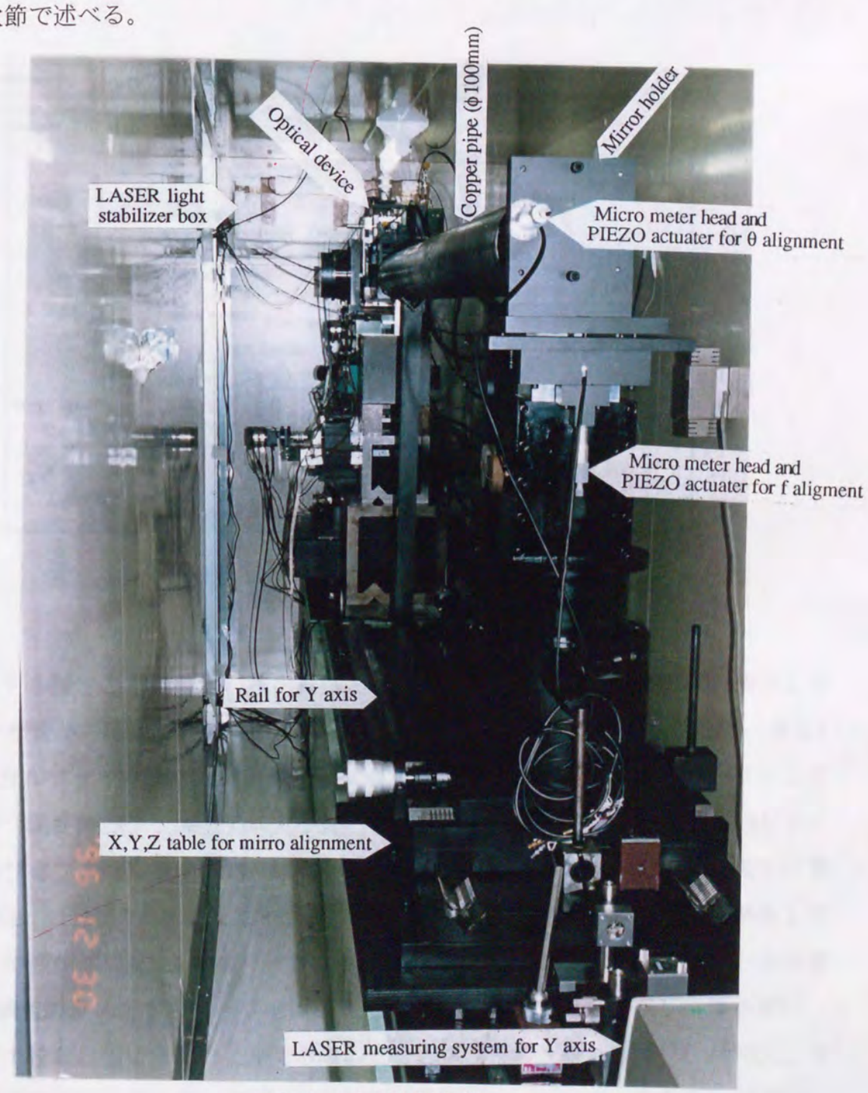


図3.2　測定装置全体

3.3 光学系

3.3.1 光学系の構成

本測定に使用する光波には、横単一モードHe-Neレーザを採用した。このレーザシステムは、波長と強度の安定性を0.1 %以下に保証している。図3.3 に光学系の配置を示す。

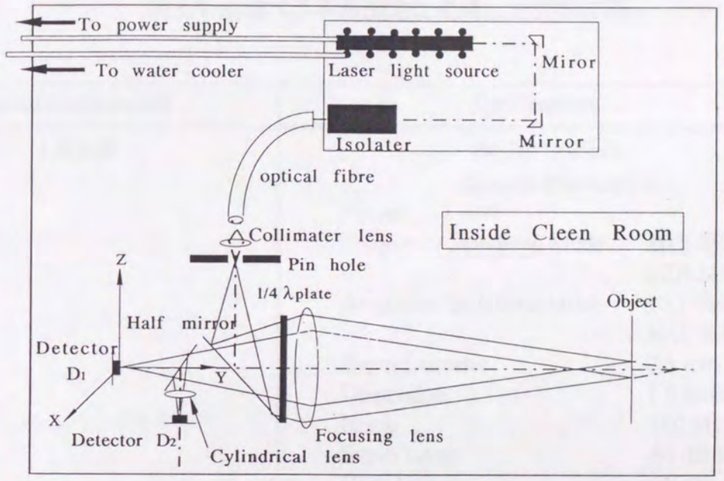


図3.3　光学系の配置

法線ベクトル測定の座標系は、検出器D_1を原点とし、X軸回りをϕ,Z軸回りをθと定義する。レーザ管から出射したビームをオプチカルアイソレータを通過させた後、長さ1mのオプチカルファイバーに入射させる。ファイバーから出た光は、コリメータレンズで集光させ（開き角23°）、集光点にピンホールが置かれている。ピンホール、コリメータレンズ及びオプチカルファイバーはZ軸方向と光軸方向を一致させるための3点支持調整機構を介し、ピエゾアクチュエータとマイクロメータヘッドにより、X, Y平面上で0.1 μm以下の微調が可能な2軸のテーブル上に固定されている。また、ピンホール位置のZ方向の調整のためX,Yステージ全体が上下できるようようにガイドレールを設け、手動で任意の位置に固定することができる。ビームスプリッターとλ/4板は一体化し、Y方向に正確に移動できるようにダブルV溝をガイドにした。ピンホールから出た光は、ビームスプリッターにより90°曲げられ、 1/4 波長板を通過した後、集光レンズを通る。

集光レンズはY方向に調整できるようにガイドとスケールを設け簡単に位置決めが行えるようにした。その後、被測定面上で反射し、集光レンズを通ってビームスプリッターを直進し、ハーフミラーを通り検出器 D_1で受光することによって法線測定をおこなう。一方、ハーフミラーで分割された光はシリンドリカルレンズを通して検出器D_2 で受光され、ピンホールから被測定面までの距離の変化を測定する。図3.4に使用した光学部品の仕様を示す。

表3.1 法線ベクトル測定に使用した光学部品

Optical compornents	Spcifications
LASER	He-Ne LASER (Spectra-Physics Co.) Power 1 mW Frequency Stabilized Mode ±0.5 MHz/min ±2.0 MHz/hr Amplitude Stabilized Mode ±0.1 %/min ±0.1 %/hr Beam Diameter 0.5 mm Dispersion 1.6 mrad Noize -100 dB at 50/60 Hz Servo Loop -90 dB 5 kHz High Voltage -70 dB 24 kHz
Optical isolater	Isolation >80dB,Isolation loss 1.8dB
Optical fibre	Single mode fibre, 1m length
Colimater lens	f=10mm,ϕ15mm
Beam splitter	BK-7,15×15×15 mm
l/4 plate	Quartz,10×10mm,transmission ratio >99%
Focusing lens	BK-7,f=200mm,ϕ50mm
Half mirror	BK-7,AR coat
Cylindrical lens	BK-7,f=102mm,10×5mm,t=3.3mm
Water cooler for Laser tube	EZL-80(TAITEC CO.),10l/min,Controlled temperature 0.02℃

また、使用する光がレーザで尚且つ、集光レンズ上でのレーザ光の径が小さいため単一レンズを使用した。光学系の配置の基準は検出器D_1で、垂直方向（ϕ）のゴニオメータの回転中心と水平方向（θ）のゴニオメータ回転中心の交差する位置に置かれている。

被測定面の曲率半径により、集光レンズの位置とレンズの交換は簡単に変えることができる。また、検出器D_2とシリンドリカルレンズも同じように交換や調整ができるように、X, Yテーブル上に組み立てられている。図3.4 に光学系のセットアップと調整機構の概念図を示す。測定するミラーの曲率半径が変わる毎に、ピンホール、ビームスプリッター、集光レンズ及びシリンドリカルレンズの位置を変更する必要があるため、これらの光学部品は必要な位置決め精度で調整可能なように設計されている。

光学系の調整方法は、まずアイソレータの偏光面とレーザの偏光面を一致させるためにレーザ管を回転させ、アイソレータから出たレーザ光の強度が最高になるようにした後、ファイーバーとの軸合わせを行った。レーザ強度の測定には、浜松フォトニクス社製のPINフォトダイオードG116を使用した。次に、ファイバーから出た光の軸とコリメータレンズの軸を合わせ、コリメータレンズの焦点距離15mmの位置にピンホールを設置した。これらの軸合わせはピンホールから出た光がフラウンフォーファー回折を起こすため、回折リング像の4次まで目視で観察して行った。ファイバー端部、コリメータレンズ及びピンホールの光軸調整後、ピンホールからでた光軸がZ軸と平行になるように3点支持調整機構で調整する（以下ピンホールの位置を光源の位置とする）。次に、図3.4のベースプレートの上面をY軸と平行にし、基準面として光学系の調整を行う。それぞれの光学系の位置は総て検出器D_1を基準にする。検出器D_1はベースプレート上面から40mmの高さに設定してある。まず集光レンズを固定する。その後、検出器D_2用にハーフミラーを仮固定し、ビームスプリッターも同様に仮固定する。λ/4板は偏光面を45°回転させた位置で固定した。このλ/4板により円偏光に変換する。この状態で光源から出た光をビームスプリッターで90°曲げた後、ベースプレート上面と平行に尚且つ40mmの高さになるようにビームスプリッターの高さ及び傾きを調整する。この状態で平面鏡を試料台に固定し、集光レンズから出た光を反射させ検出器D_1に導く。この時、入反射光路が一致するように反射鏡を調整する。入反射光路の測定は、集光レンズから約50mm反射鏡側で厚さ100μmの透明フィルムを光路に挿入し、フィルム表面での散乱による光で位置測定を行った。入反射光路の同一化の精度は約100μmである。この状態で検出器D_1のV_A, V_B, V_C, V_Dがほぼ一定になるまで光源の位置とビームスプリッターの位置を調整する。その後、ハーフミラーの微調とシリンドリカルレンズ及び検出器D_2の調整を行う。これらの調整は被測定面の曲率半径に従って調整を行う必要がある。図3.5に法線ベクトル測定系の写真を示す。

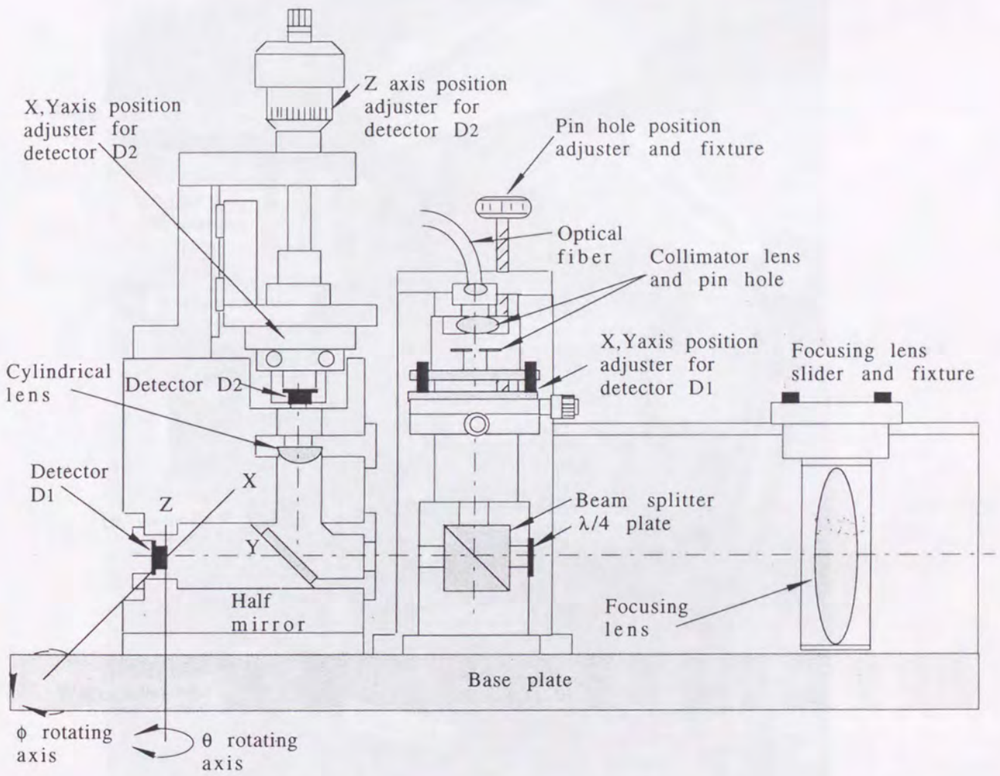


図3.4　光学系全体の概念図

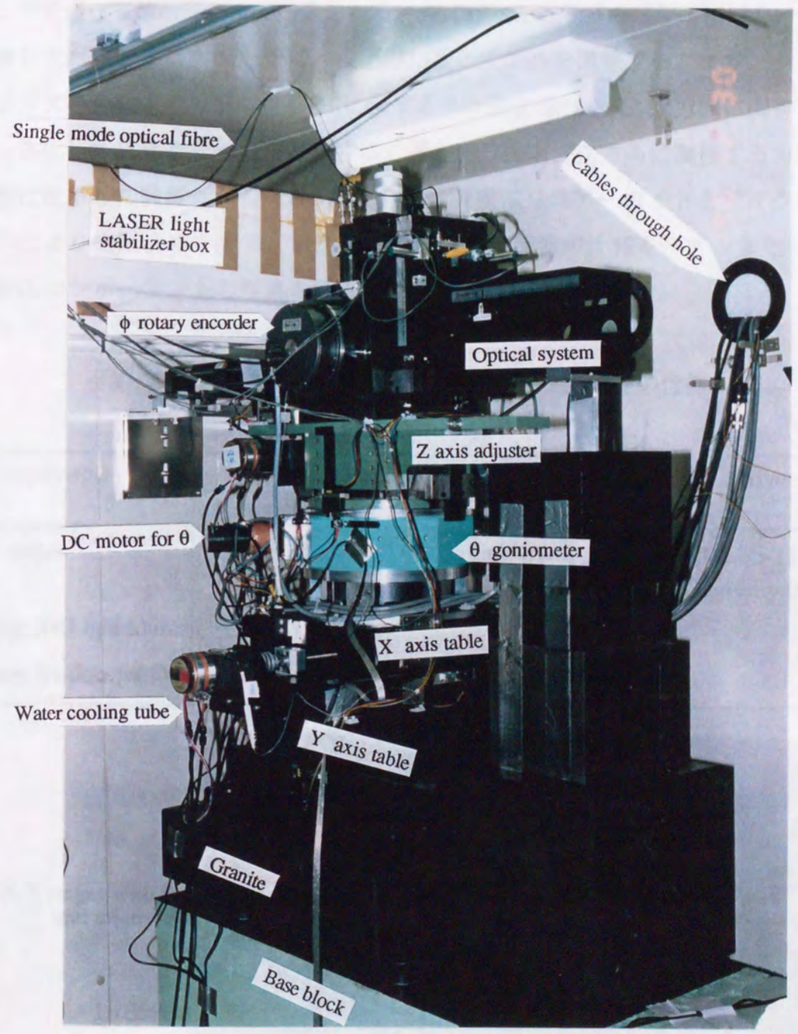


図3.5 法線ベクトル測定系

検出器D_1から被測定面までの距離の変化を測定するための検出器D_2は、図3.4に示す場所に設置した。ビームスプリッターからのビームはハーフミラーにより一方は検出器D_1へ他方は検出器D_2へ1:1で分割される。検出器D_2側へ分割されたビームはシリンドリカルレンズを通って検出器D_2上で結像される。先に述べた光学系の調整時にはハーフミラーは設置して調整をおこなった後に、検出器D_2系の光学系を調整する。まず、シリンドリカルレンズを光軸上に設置し、図3.6に示すような検出器D_2をX,Y,Z方向に調整できる機構と一体化した装置を光軸上に設置する。検出器D2をX,Y,Z方向に調整する方法は光源の調整に使用した装置と同じである。Z方向の調整はリニアーガイドとマイクロメータヘッドにより位置決めできる。表3.2にX,Y,Z軸調整装置の仕様を示す。また、図3.6に検出器D_2 コンポーネントの写真を示す。

表3.2　光源及び検出器D2のX,Y,Z軸調整装置の仕様

Compornents	Sroke		PIEZO driver
	Micrometer head	PIEZO actuater	
X,Y stages	10mm	10μm	M-2629 (MESS-TEK CO.) Gain 30,Linearity 0.01%
Z stage for Light source	50mm	-	-
Z stage for detector D_2	25mm	-	-

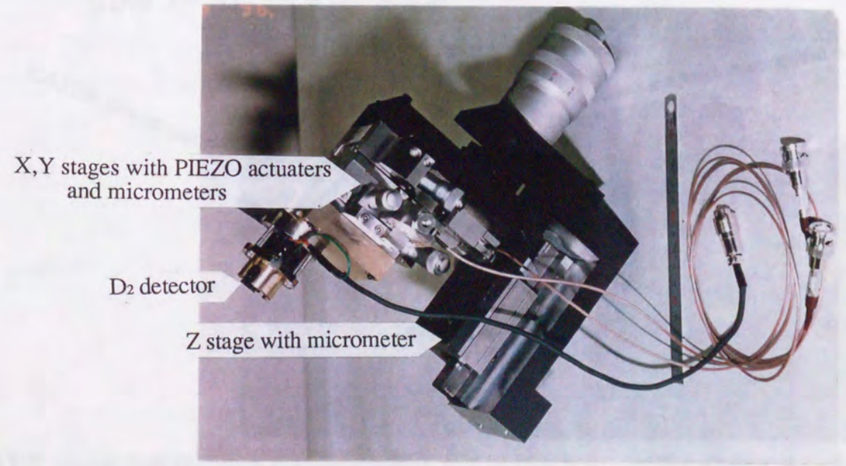


図3.6　検出器D_2 コンポーネントの写真

恒温室内の温度変化および対流を最小にするために、レーザ電源は恒温室の外に設置し、レーザ管は管の外側に銅パイプを巻き付け、0.02°C 以下にコントロールされた水を2000 cc / min流して冷却を行なった。レーザ管とアイソレータおよびオプチカルファイバー入り口までを温度変化によるレーザの不安定さを防ぐため、熱膨張係数 1×10^{-7}のスーパーインバーの板に固定し、厚さ50 mmの発泡スチロールで完全に覆った。レーザ管は恒温室の中に設置したが、測定装置に熱影響がないように離した場所にセットした。図3.7にスーパーインバーの板に固定されたレーザ管等を示す。図3.8は光学系回りとレーザ管を一定の温度に保つための冷却システムの写真を示す。冷却水温度制御装置で20℃に制御された冷却水を直径10mm厚さ1mmのチューブでレーザ管へ送る。チューブの外側を厚さ10mmの断熱材で覆った。

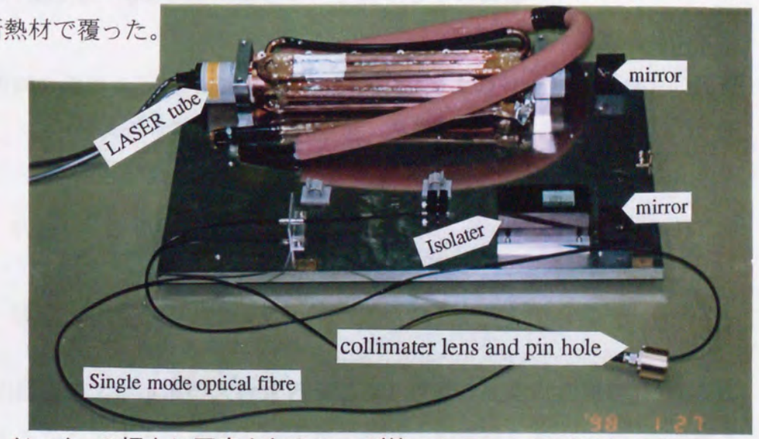


図3.7　スーパーインバーの板上に固定されたレーザ管、ミラー、アイソレータ及びオプチカルファイバーの端部

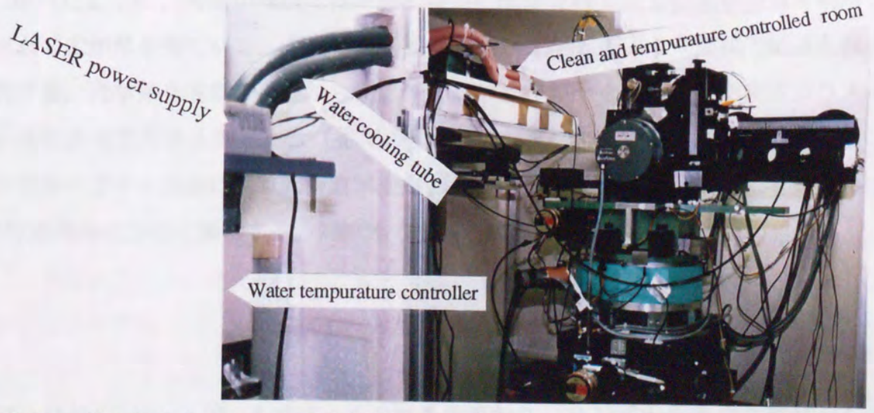


図3.8 レーザの安定化のために温度制御された冷却水をレーザ管へ供給するシステム

3.3.2 4分割フォトダイオードによる法線ベクトル検出器の分解能

本測定方法の分解能は4分割検出器上での光のスポットと4分割検出器の関係を図3.9に示す。

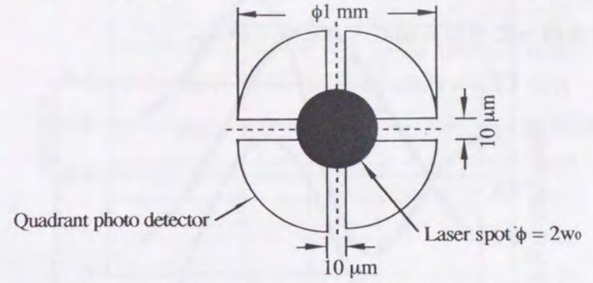


図3.9　4分割検出器とレーザスポットの関係

法線ベクトルの方向の偏差を5×10^{-7}radとしたときの検出器上のレーザスポットの変位を10 nmと設定した。レーザスポットが変位したとき、水平方向 (θ)、垂直方向(ϕ)の光量の変化は、

$$V_1(\theta) = (V_A + V_B) - (V_C + V_D) \tag{3-1}$$

$$V_2(\phi) = (V_A + V_C) - (V_B + V_D) \tag{3-2}$$

と表わされる。検出器上のスポットの大きさとスポット位置が変化した時のV_1,V_2の出力変化にどう関係するか計算する。また、レーザスポットの変位に対してV_1,V_2の最大出力変化を得るためのレーザスポットの大きさを計算する。

既に述べたように、光源から出た光が検出器D_1に伝送されるまでに回折現象を利用してビームの広がりを得ている。そこで、光源から出た光がどのような形状で伝送されるか検討する。光学系を波動の観点から検討する。ファイバーを通ってきた光はコリメータレンズによってガウス型ビーム（平面波）となる[3-5]。次に、ピンホールを通るとフラウンフォーファー回折により回折波が発生（球面波）する。計算を簡単にするために1次回折光のみについて議論する。回折光の広がり角θ_wは、

$$\theta_w = 1.22\,\lambda / D \tag{3-3}$$

ここで、Dはピンホール径、λはビームの波長を表わす。(3-3)式からガウス型ビームの発散角は、ちょうど開口径Dがガウス型ビームの最小スポット径wであると考えた場合

とほぼ同程度になる。図3.10ではガウス型ビームとフラウンフォーファー回折光の強度分布を比較した結果を示すが、ほぼ同程度の強度分布を示していることがわかった。よって、今後は広がりを持ったガウス型ビームとして扱う。

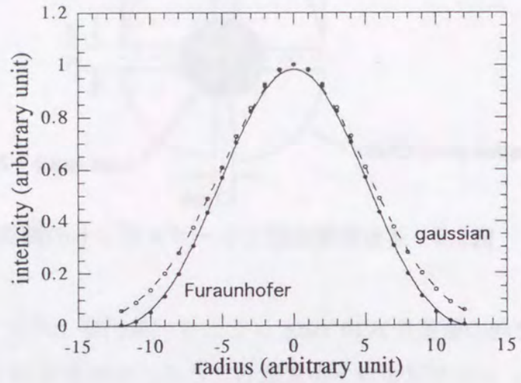


図3.10 ガウス型ビームと1次回折光の強度分布の比較

使用するピンホールから出た光を単一モードで強度分布はガウス分布であるとして式で表すと、

$$I = I_0 \exp\left(\frac{-2r^2}{\omega_0^2}\right) \tag{3-4}$$

となる。I_0は中心の強度、rは中心からの距離、ω_0は強度が$1/e^2$となるビーム半径を表す。ビーム中心の断面を図3.11(a)に示す。

このガウスビームを検出器上で４分割し、任意の測定点における分割セル間の光強度差が同一になるようにゴニオメータ、X,Y,Zステージを調整し、ビームの位置及び測定座標系からの傾きを測定することにより、被測定面の法線ベクトルの方向を求める。ここでは、検出器D_1上でのガウス型ビームスポットの大きさが法線ベクトルの方向の測定感度に与える影響を検討し、最高感度になるビームスポット径が存在するかどうか調べる。次に、検出器D_1上のビームスポット径を求めた後、ピンホールの径を計算し、最後に被測定面でのビームスポット径を計算する。使用する検出器D_1の分割部の不感帯幅は10 μmである。上図のガウスビームの強度変化が大きい場所を検出器の分割箇所にくるようにすれば、測定感度をあげることができる。上図を微分すると図3.11(b)のようになる。

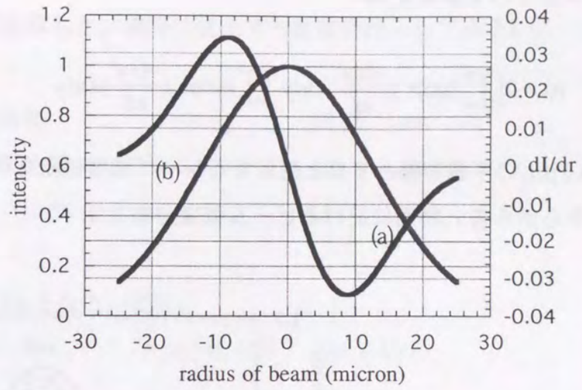


図3.11 レーザビーム強度分布 (a) 強度分布 (b) 微分値

dI/drが大きい場所は0.36 ($2\omega_0$)である。検出器の不感帯幅は10μmであるから、$2\omega_0$ = 55.55 μmの時、最高感度をもつことができる。図3.12に検出感度域のビーム断面形状を示す。

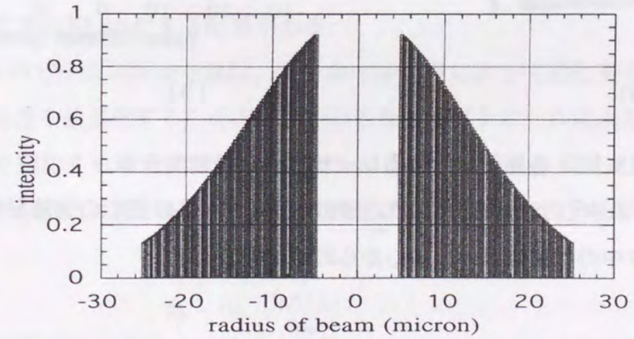


図3.12 ４分割検出器上でのビーム強度分布

レーザビームの強度をP_aとし、ガウスビームとすると、

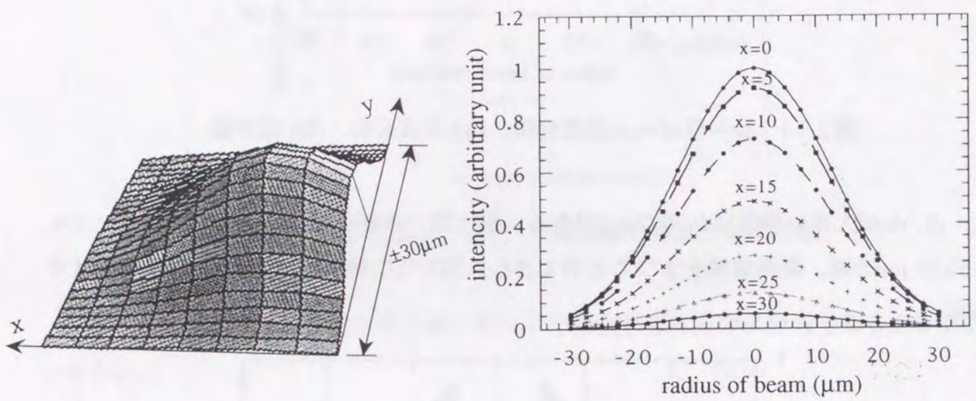
$$p_a = \frac{-\omega_0^2}{2}\pi \int_{\frac{1}{e^2}}^{I_0} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) dI \tag{3-5}$$

が成り立つ。上式の積分値をレーザ出力強度として、実際の測定に使用される割合は検

出不感帯幅中に照射される強度 p_nは、

$$p_n = 2\int_{-5}^{5}\int_{-\infty}^{\omega_0} I_0 exp\ (\frac{-4xy^2}{\omega_0^2})dxdy \int_{-5}^{5}\int_{-5}^{5} I_0 exp\ (\frac{-4xy^2}{\omega_0^2})dxdy \qquad (3\text{-}6)$$

で計算できる。10 μmの不感帯幅とすると使用するレーザ強度は全体の65.63 %になる。図3.13はビーム中心から各 r 断面に於けるビーム強度分布を示す。



(a) (b)

図3.13 各断面におけるレーザビームの強度分布
(a) ビーム中心から20mm離れた所の断面 (b) 各断面での強度分布。
グラフ中の数字はビーム中心からの距離を表わす。

本測定では、検出器上で0.01 μmビームが移動した時の左右および上下の検出器出力の差が必要である。0.01 μm 移動した時の左右の出力変化はビームが検出器の中心にあるとき、次式で表わされる。

$$P_d = \frac{\int_{4.99}^{\omega_0}\int_{-\omega_0}^{\omega_0} I_0 exp\ (\frac{-4xy^2}{\omega_0^2})dxdy}{\int_{5.01}^{\omega_0}\int_{-\omega_0}^{\omega_0} I_0 exp\ (\frac{-4xy^2}{\omega_0^2})dxdy} \qquad (3\text{-}7)$$

ここで、P_d は左右２分割した ビームを0.01μmだけ動かした時の強度比である。実際の

検出器は４分割であるが、２分割よりは感度がよくなるはずであるため、ここでは２分割の検出器として計算した。実際に使用する数値を代入してみる。

レーザビームの直径	55.55	μm
４分割検出器の不感幅	10	μm
レーザ強度	1	mW

とするとP_dは、0.2%となる。また、

$$P_d = (V_A + V_B) - (V_C + V_D) \qquad (3\text{-}8)$$

であるから差動アンプの利得は60 dB以上の性能が必要であることを示している。また、４分割検出器では、分割部の不感帯のエッジ部にガウスビームの強度変化が一番大きい場所を一致させることにより検出感度を最大限に上げることができる。

前項で述べた光学系を使用するとき、検出器は集光レンズにより絞られたレーザビームが結像する場所に設置される。設定した分解能を達成するためには、検出器D_1上のビームスポット径を55.53 μmにする必要がある。

検出器D_1上のビームスポット径は、ピンホールの径によって変化する。そこで、ビームスポットの径を最適化するための計算をおこなう。ピンホールによるフラウンフォーファー回折を観測する場合には、ピンホールの半径をω_ϕ、光の波長をλとして入射波がピンホールに垂直に入射する場合は、回折強度が最初にゼロになる方向θ_ϕは、

$$\theta_\phi = \sin^{-1}(\frac{0.61\lambda}{\omega_\phi}) \qquad (3\text{-}9)$$

であたえられる。一方では集光レンズで光を集光した場合、焦点の位置ではビームウエストと呼ばれる双曲線になっている。双曲線上のビームには漸近線が考えられ、この漸近線の作る角2θを広がり角とし、ビームウエストにおけるビーム半径をω_0とすると、

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi\omega_0} \qquad (3\text{-}10)$$

となる。

上式のω_ϕ,ω_0に同じ数値を代入して計算した結果、ほとんど差がない。そこで、ピンゴールの場合もビームウエストとして扱い、レンズによる集光点の計算を行なう。

図3.14はピンホールの計算をするために、第2章の図2.2 を変形したものである。

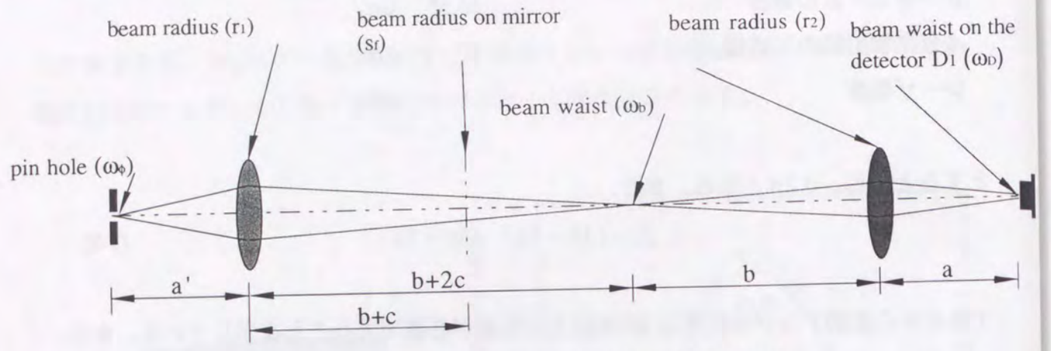


図3.14ピンホールの径を計算するための光学配置

図に示すω_D,r_2,ω_b およびr_1は、検出器D_1上のビーム径、被測定面で反射したビームが集光レンズに入射したときの径およびピンホールから出射したビームの集光レンズ上の径を表わす。ω_ϕはピンホールの径を表わす。また、図中のa',a,bおよびcは図2.2と同じである。被測定面の位置は$b+c$の位置にセットしたことになり、被測定面上でのビーム径を計算することができる。

検出器D_1上のビームスポットω_Dをϕ55μmとすると、r_2の径は、

$$r_2 = a \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{\pi\omega_b}\right) \tag{3-11}$$

と表わされる。ω_b,r_1およびω_ϕはそれぞれ、

$$\omega_b = \frac{\lambda}{\pi \sin\left(\frac{r_2}{b}\right)} \tag{3-12}$$

$$r_1 = (b+2c) \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{\pi\omega_b}\right) \tag{3-13}$$

$$\omega_i = \frac{\lambda}{\pi \sin\left(\frac{r_1}{a}\right)} \tag{3-14}$$

となり、上式から、検出器上のビーム径を決めればピンホールの直径を決定することができる。表3.3に各曲率半径の凹面鏡を測定する場合のビーム半径の変化とそれぞれの凹面鏡の測定におけるピンホール径の最適値を示す。また、被測定面上のビームスポットの径を計算した結果を示す。法線ベクトルの方向の測定値は被測定面の有限の大きさの平均値を測定することが明らかになった。

表3.3 曲率半径の異なる凹面鏡の測定における各場所におけるビーム径の変化および被測定面上のビームスポットの大きさ

radius couvature of specimen (mm)	r_2 (mm)	ω_b (mm)	r_1 (mm)	ω_ϕ (mm)	S_ϕ (mm)
1000	2.41	0.05	3.22	0.017	1.61
2000	1.86	0.15	2.67	0.017	1.24
3000	1.76	0.25	2.57	0.017	1.18
4000	1.72	0.35	2.52	0.017	1.15
5000	1.69	0.45	2.50	0.017	1.13
6000	1.68	0.56	2.48	0.017	1.12
7000	1.67	0.659	2.47	0.017	1.11

表3.4はフォトセンサー、オペアンプの仕様を、図3.15(a)、(b)は製作したD_1、D_2 用のプリアンプ、および差動アンプの回路図を示す。このアンプは、４分割の検出器からのシグナルをＩ/Ｖ変換した後、被測定面に立てた法線の水平方向の成分 $(V_A + V_B) - (V_C + V_D)$、および垂直方向成分 $(V_A + V_C) - (V_B + V_D)$を測定するために必要な和差演算を行い、演算結果はA/Dコンバータを通して計算機にデータが取り込まれる。また、４分割各チャンネルのシグナルも取り込まれ、光軸合わせの時に使用する。ゲインは 80 dBと 100 dB のどちらかの増幅回路をスイッチを使用して選択できる。使用周波数帯域は 200 Hz 以下である。PIN型フォトダイオードから出力される電流は

$$I_p = e\eta P_0 / hn \tag{3-15}$$

で表わされる。ここで、I_pは出力電流、e、η は電子のチャージ量および効率を表す。P_0はレーザの入射パワーを表わし、hはプランク定数 $(6.625 \times 10^{-34} J.s)$、nは入射光の振動数を表す。使用するレーザ強度を上式に代入すると計算できるが、被測定面のガラ

スの反射率を約 4 % とし、受光部に不感帯があるため受光強度を全体強度の 50 % とすると、$I_p = 2.5 \times 10^{-6}$ A となる。そこで、プリアンプの帰還抵抗を 250 kΩ とすると 0.625V の出力が得られる。この値は、レーザビームが検出器の中央にあるときの全体出力値である。レーザスポットの位置が10 nm 上下左右どちらかに変位した時のプリアンプ出力値は計算上では 6.25×10^{-6} V（全出力の0.001 %）となる。よって差動アンプのゲインを60、80 dB にすると差動アンプの出力は、それぞれ0.006、0.06 Vとなる。レーザはAmplitude Stabilized Mode で使用した。

表3.4　法線、結像位置測定に使用したフォトダイオードとオペアンプ

Components	Type and Specifications
Silicon Photodiode	S1557 (HAMAMATSU Photonics Co.)
Preamp	OPA111(128) Thermal Drift : 0.5 mV/ °C Resistance : 500 kΩ (Variable) (BURR BROWN Co.)
Differential Amp	OP 27 Thermal Drift : 0.2 mV/ °C (BURR BROWN Co.)

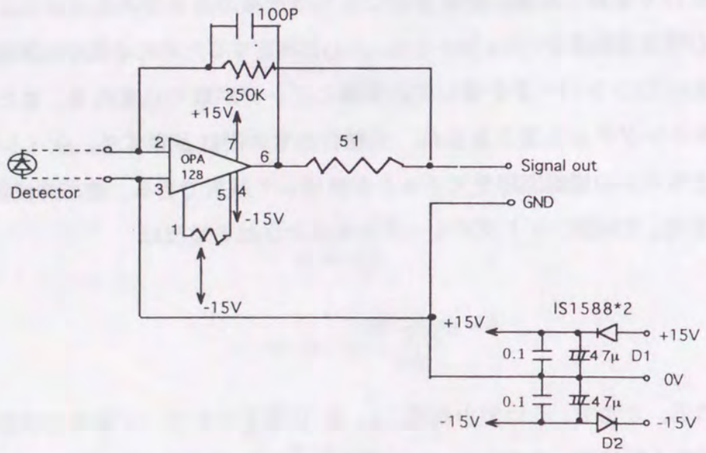


図3.15(a)　OPA128を使用したプリアンプ回路図

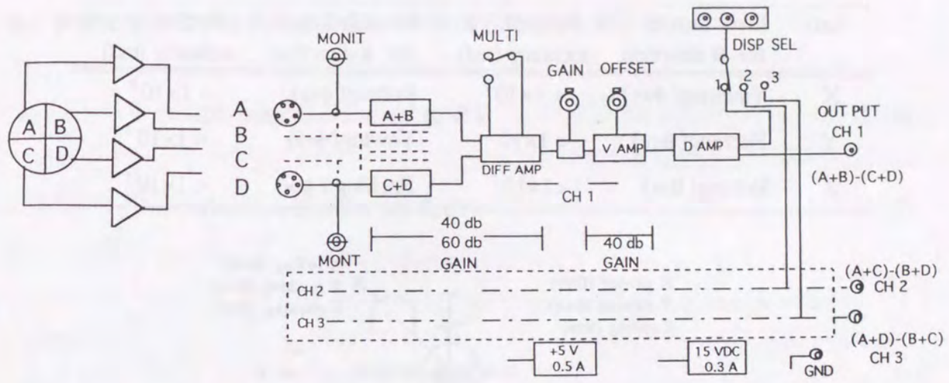


図3.15(b)　D_1 , D_2 検出器用差動アンプの概念図

3.4 光学系移動ステージ系

3.4.1　誤差伝播解析に基づく光学系移動ステージに要求される精度

3節で述べたように、誤差伝播解析を自乗平均誤差から計算した結果、曲率半径5600 mmの凹面を測定する場合、ゴニオメータの角度位置決めは少なくとも5×10^{-7} rad以下、X, Y, Z ステージの位置決め誤差は1 μm 以下が要求される。このオーダの位置決めは、現有の測定器を使用することにより容易に達成することができる。しかし、図3.16 に示すようにX, Y, Z 軸ステージのピッチング、ヨウイングおよびローリングにより法線ベクトル測定値に誤差を発生する。ステージのどのような運動誤差が法線ベクトルの測定誤差を発生する要因となるかX, Y, Z軸についてまとめると表3.5のようになる。この要求精度を満足することは非常に困難であるため、運動誤差が1×10^{-7} radの確度で測定でき尚且つ運動の再現性が$\pm1\times10^{-7}$ rad以下であれば補正することにより法線ベクトルの方向を5×10^{-7} radの精度で測定することができる。

表3.5　X, Y, Z ステージの運動誤差が法線ベクトルの測定誤差になる要因

Axis	Error factors for θ direction	Reqired accuracy (rad)	Error factors for ϕ direction	Reqired accuracy (rad)
X	Yawinng(θ_{XY})	< 1×10^{-7}	Rolling(ϕ_{XR})	< 1×10^{-7}
Y	Pitching(θ_{YP})	< 1×10^{-7}	Yawing(ϕ_{YY})	< 1×10^{-7}
Z	Rolling(θ_{ZR})	<1×10^{-7}	Pitching (ϕ_{ZP})	< 1×10^{-7}

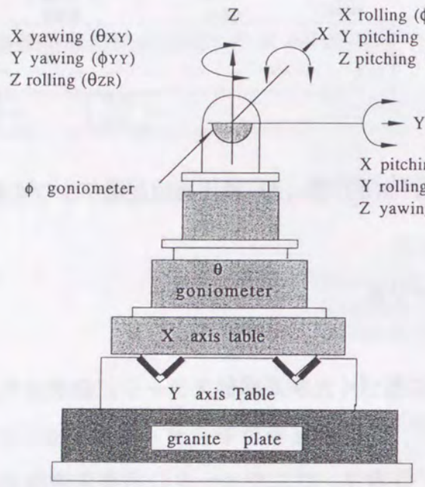


図3.16　X, Y, Z および検出器D_1の運動誤差と位置誤差と誤差伝播の関係

上図から、法線ベクトルの測定誤差になりうるステージの運動誤差は水平方向の法線ベクトル誤差 $d\theta$ 、垂直方向の法線ベクトル誤差 $d\phi$ とすると、各ステージの運動誤差は、

$$d\theta = \theta_{XY} + \theta_{YP} + \theta_{ZR} \tag{3-16}$$

$$d\phi = \phi_{XR} + \phi_{YY} + \phi_{ZP} \tag{3-17}$$

となり、この$d\theta$、$d\phi$を5×10^{-7} rad以下にする必要がある。

検出器 D_1 および検出器 D_2 と各ゴニオメータの回転中心がずれていたときの測定誤差について、水平方向回転用ゴニオメータを例にして解析を行う。図3.17 に示すように、検出器 D_1 の位置がゴニオメータの回転中心から dX_θ、dY_θ だけずれたとし、厳しい条

件である曲率半径500 mm、直径100 mmのミラーを測定する場合を検討する。ゴニオメータを θ_g 回転したとき、光軸の角度は変化しないが、被測定面上での位置と距離が変わる。被測定面上での位置偏差をdP_m、距離偏差をdY_mとすると、

$$dP_m = \sin^2\theta_g\, dX_\theta + \sin^2\theta_g\, dY_\theta \tag{3-18}$$

$$dY_m = \sin\theta_g\, dX_\theta + \sin\theta_g\, dY_\theta \tag{3-19}$$

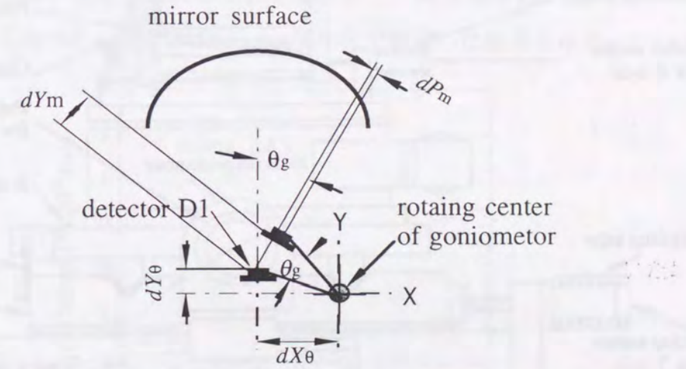


図3.17　検出器D_1とゴニオメータの回転中心がずれたときの誤差伝播

曲率半径500 mmの凹面鏡を測定する場合、測定ポイントが0.25 μm ずれると法線ベクトルが5×10^{-7} rad変化するため、 dP_m、dY_m を0.25 μm 以下にする必要がある。θ_g を5.7°として(3-19), (3-20)を計算すると、dX_θ、dY_θ は約12 μm となる。

また、X, Y, Z ステージの直角度の精度は、被測定面上での位置誤差を0.25 μm 以下にしなければならないため、5×10^{-7} rad以下でなければならない。曲率半径が2000,3000及び5000 mmの面を測定するためには、2×10^{-6},3.75×10^{-6}及び5×10^{-6} radの直角度が必要である。同様に、θ およびϕゴニオメータの回転軸方向とX, Z ステージの移動方向の平行度も同じ精度が要求される。

3.4.2 X, Y, Z ステージの構成

図3.18 にステージの構成を示す。平面度0.5 μm 以下の石定盤の上にYステージ、その上面にXステージを組立、θゴニオメータの上面にZステージをセットした。各ステージの仕様を表3.6のように設定した。ステージ駆動用に使用したパルスモータはオリエンタルモータ（株）社製UDX5807を、モータドライバーはシグマ光機（株）社製のMARK-5を使用した。位置決めは0.01μm/pulseである。位置測定はハイデンハイン（株）社製LID101のガラススケールを使用し、スケールカウンターには同社のEXE660を使用した。

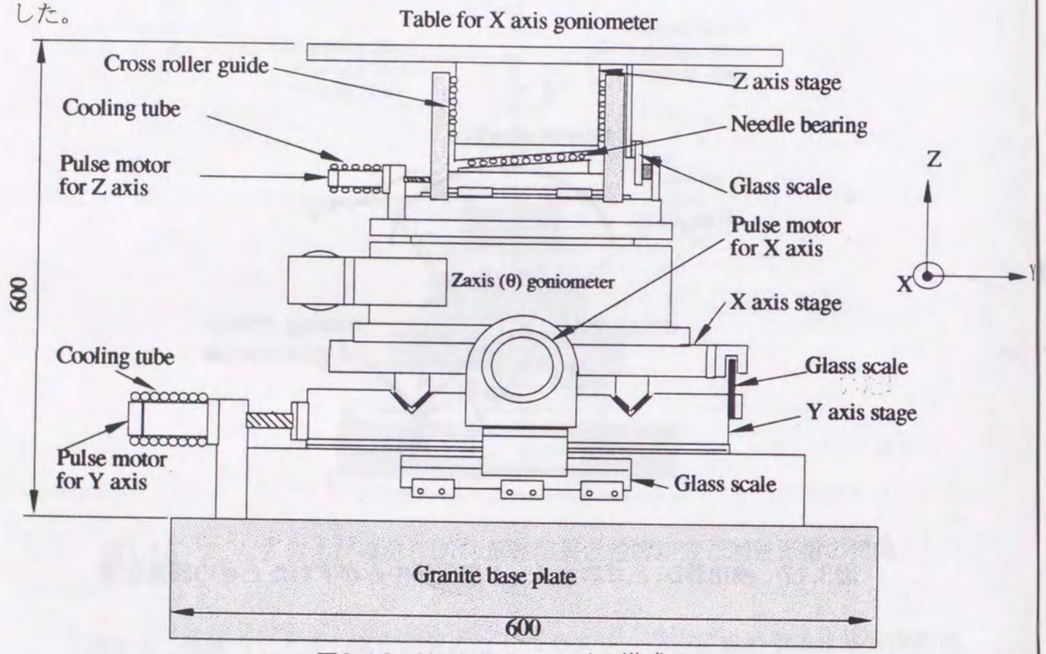


図3.18 X, Y, Z ステージの構成

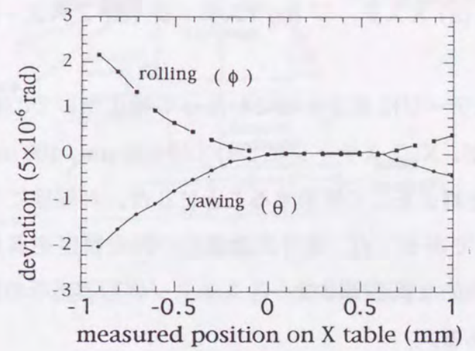
表3.6 ステージの仕様

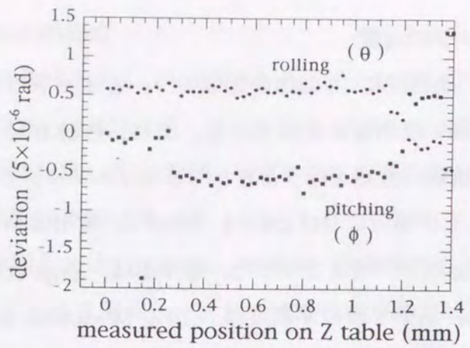
Stage axis	Traveling Distance (mm)	Positioning (μm)	Pitch, Yaw (rad)	Motor	Control
X	100	0.1	10^{-7}	Pulse motor	Open loop
Y	100	0.1	10^{-7}	Pulse motor	Open loop
Z	20	0.1	10^{-7}	Pulse motor	Open loop

3.4.3 X, Y, Zステージの精度

X, Y, Z の直角度は、組立時に 12 面体の光学ミラーとオートコリメータを使用して±5×10^{-7} radの精度で各軸の直角度を出している。次に、各軸のピッチング、ヨウイングおよびローリングは、実際の測定を行うときと同じセットアップで各軸を単独で動かし、移動テーブルの位置とその場所におけるθ、φ 方向の D_i 検出器からの出力の変化を測定して真直度誤差を10^{-7}rad以下の精度で求めた。基準面は、Zygo 社製の干渉計に用いられる基準平面を使用した。基準平面の平面度は1/ 20 λ (λ =0.6328 μm)で、直径 100 mmである。本測定に必要な基準面はうねりによる傾斜が、5×10^{-7} rad以下である必要があるが、使用した基準平面は 0.05 μm / 100 mm 以下の傾斜誤差であると思われる。

測定は往復 3 回行ない再現性があることを確認した。測定長さは5 mmピッチおよび0.1mm ピッチでおこなった。図3.19は0.1 mm ピッチで測定した結果を示す。





(c)

図3.19　法線測定を利用したステージのピッチング、ヨウイング、ローリング測定結果

(a) Xステージ (b) Yステージ (C) Zステージ

測定結果から、Yステージは測定全域にわたって補正無しで0.025 μm / 100 mm以下の真直度エラーであるが、X, Zステージについては0.05 μm / 100 mmの真直度誤差より大きいため、各位置ごと補正をして使用することにした。再現性については0.025 μm / 100 mm以下の真直度誤差であるため、充分設計通りの測定精度を満足することができる。また本測定では、平均的な誤差ではなく各ステージのある場所の誤差を正確に把握することが非常に重要である。

3.4.4　ゴニオステージの構成

図3.19 に示すように、水平方向ゴニオメータ（θ 方向）はX、Yステージの上に組み立てた。垂直方向ゴニオメータ（φ 方向）はZ 軸の上に組み立てられている。表3.7にゴニオメータの仕様を示す。また、図3.20 にゴニオメータの配置図を示す。水平、垂直ゴニオメータの回転中心は2 μm 以下で合わせた。使用した駆動用モータは山洋電気（株）社製DCモータ（U508(T),80W) を使用した。角度位置決め制御はS.G.I（株）社製のNANO DRIVE UNIT(SF-1)を使用した。

表3.7　ゴニオメータの仕様

Goniometer	System	Resolution (rad)	Driver	Control system
θ	HUBER 420	1.8×10^{-8}	DC motor	closed loop
φ	home made	1.8×10^{-8}	DC motor	closed loop

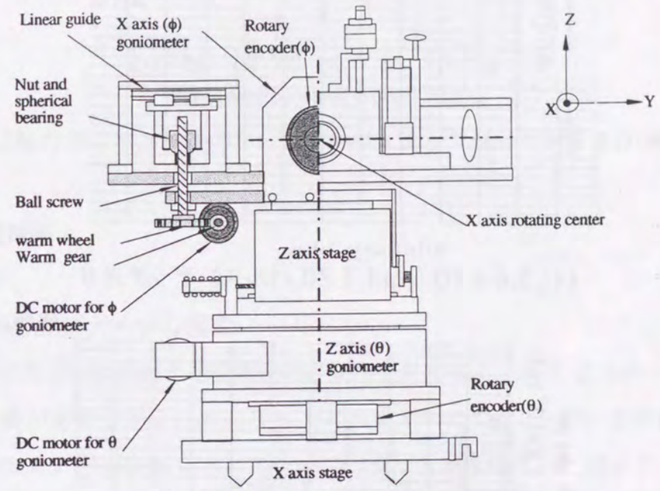
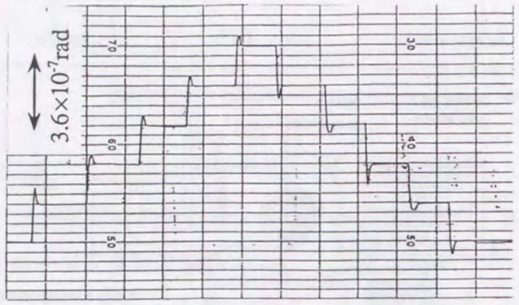


図3.20　ゴニオメータの概略図

3.4.5 ゴニオメータの精度

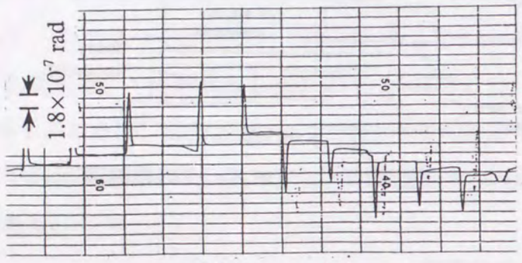
ゴニオメータの角度位置決めはDC モータとロータリイエンコーダを用いてフィードバック制御を行った。1パルス1.8×10^{-8} radで設計されているが、1.8×10^{-7} rad以下の絶対精度があることを確認した。測定方法は、ゴニオメータに長さ300 mm の棒を取付け、9×10^{-9} rad、1.8×10^{-8} radおよび3.6×10^{-8} radの送りを行なったときの変位を静電容量型センサーで測定した。測定はゴニオメータを 1 時間 の間、角度で± 5° の間を連続往復運動させてならし運転を行なった後、開始した。それぞれの変位は、0.012 , 0.05 および0.1 μmであることから、角度に変換すると4×10^{-8} rad, 1.6×10^{-7} rad および3.3×10^{-7} rad である。図3.21に分解能測定結果を示す。図より1.8×10^{-8} radはステップごとにオーバシュートしているが、定常状態では正確に角度位置決めがおこなわれていることが確認できた。次に、2 軸のゴニオメータにより5×10^{-7} radのステップ送りに対するDi検出器の作

動出力との関係を測定した。測定は、D1検出器から約5 m離れた試料台にλ / 20 の平面度を有する反射コーテング膜無しの平面ミラーを取付け、光学系を調整した後に行なった。図3.22 にその結果を示す。２軸共に5×10^{-7} radのステップ送りに対して差動出力は5 Vの変化を示す。この結果から、D1検出器の分解能は1×10^{-7} rad以下であることがわる。本測定方法は零位法を採用しているため作動出力の直線性には関係ないが、分解能は必要である。



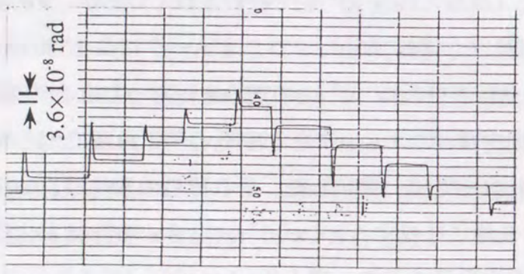
arbitrary unit

(1) 3.6×10^{-7} rad（ 20 パルス）ピッチ送り



arbitrary unit

(2) 1.8×10^{-7} rad（ 10 パルス）ピッチ送り



arbitrary unit

(3) 3.6×10^{-8} rad（ 2 パルス）ピッチ送り

図3.21　ゴニオメータの角度位置決め精度

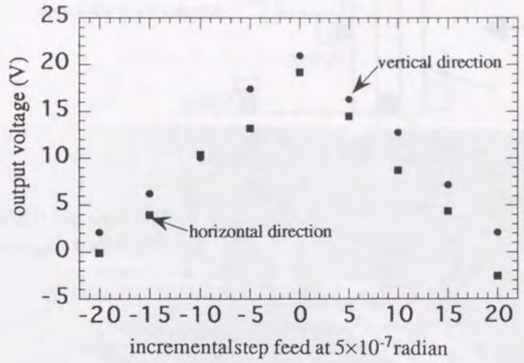


図3.22　2軸のゴニオメータの5×10^{-7} radステップ送りに対するD1検出器の出力

3.5 試料支持系

3.5.1 試料移動ステージの構成

ミラー形状測定時の最初の初期設定に必要な要素として、X, Y, Z ステージおよびθ、φのあおり調整が必要である。リニアーガイドを用いた7 mストロークの移動テーブル上にX,Y,Z軸のステージを組立た。ステージはダブルV溝を用いたガイドにより構成されている。また、試料のX,Z軸回りの角度調整機構をZ軸ステージの上面に設置した。角度調整機構の構成は、３点支持を基本にして、２点は円錐上の穴を加工した板間に直径5mmの鋼球で位置決めし、１点にマイクロメータヘッドとピエゾアクチュエータを取付け角度の初期設定を行う。ピエゾアクチュエータは、Queensgate Instruments 社製AX100 を２台使用した。このピエゾアクチュエータは、分解能が1nm で指令値に対するフィードバック機能を有している。ピエゾアクチュエータの操作はGP-IBによりコンピュータ制御が行えるようにした。初期設定精度は、X, Y, Z方向位置決めは1μm 、角度調整が可能な最小角度は2.5×10^{-7} rad以下である。図3.23 にステージ全体の構成を示す。表3.8 に試料移動ステージの仕様を示す。図3.24に製作した試料移動ステージの写真を示す。

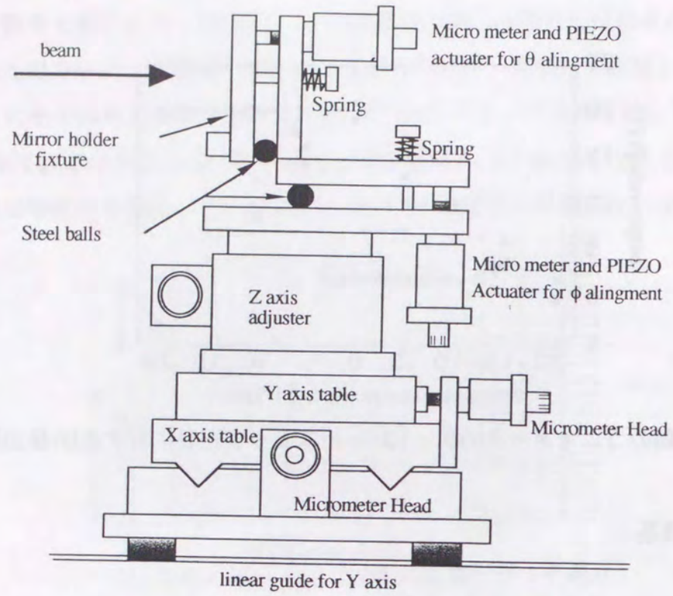


図3.23　試料移動ステージ全体の構成

表3.8　試料移動ステージの仕様

Elements	System	Stroke mm	Resolution μm,(rad)	Remarks
X,YStages	Micrometer Head	25	1	Hand Operation
Z　Stage	Worm Wheel,Worm gear	20	1	Hand Operation
θ,ϕ Rotation	Micrometer Head	5	0.005	Hand Operation
	PIEZO Actuaters (AX100) Queensgate Inst. Co.	0.01	(10^{-8})	Auto

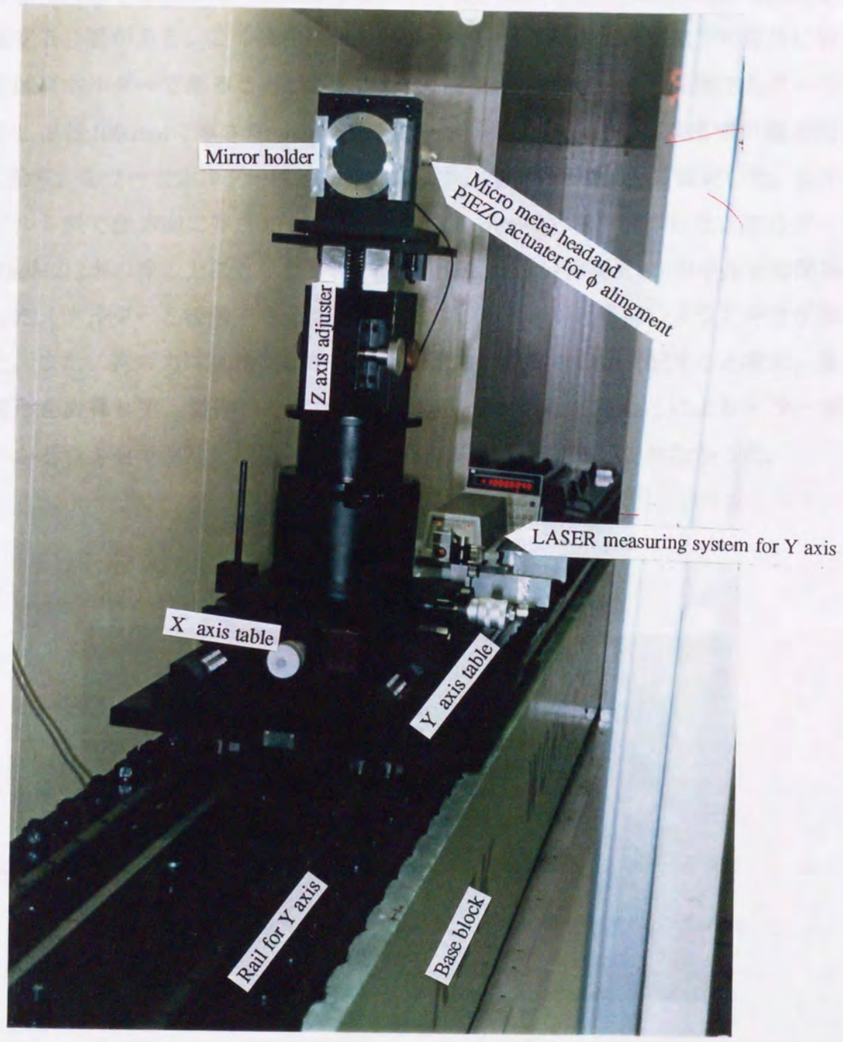


図3.24 製作した試料移動ステージ

3.5.2 試料ホルダー

試料ホルダーは、試料を変形することなく試料支持系に取付ける必要がある。本測定では、曲率半径2 mおよび3 m の凹面鏡を測定するためのホルダーを製作した。測定機の性能を調査するために一度試料を測定した後、試料を90°回転して2回の測定データを比較する必要がある。この操作により凹面鏡がナノメータオーダ以下の変形に留まるような試料ホルダーであることが要求される。図3.25は製作した凹面鏡ホルダーの写真を示す。直径100 mmで厚さ30 mmの凹面鏡のホルダーと、角度調整機構の概念図を図3.26に示す。ミラーとホルダーは速乾性のエポキシ接着材を使用して固定した。ホルダーは、アルミ製で径方向に厚さ50 mm、軸方向に40 mm の寸法で製作した。ホルダーは、直径10mmの2本の棒の上にセットし、Y軸方向に動かない程度に4本のボルトで間接的に固定した。ホルダーと接触する面は拘束力に対して変形が起きないようにキサゲ加工を行った。また、拘束力は試料及びホルダーの重力によるものが支配すると考え、重力による変形を計算して、製作したホルダーである。90°回転することによりミラーが変形しないかどうかを干渉計を使用して測定した結果、変化は観察されなかった。

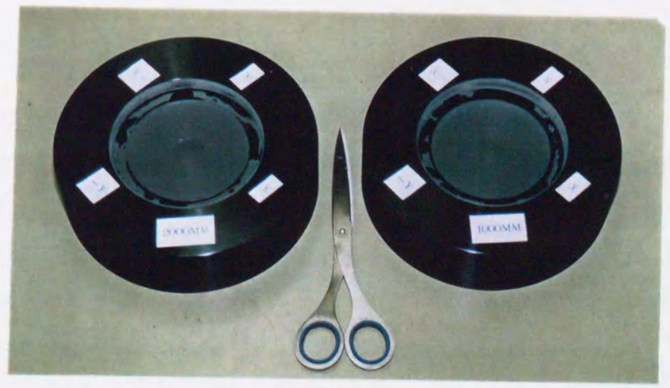


図3.25　製作した試料ホルダー（曲率半径2 mの凹面鏡取付け後）

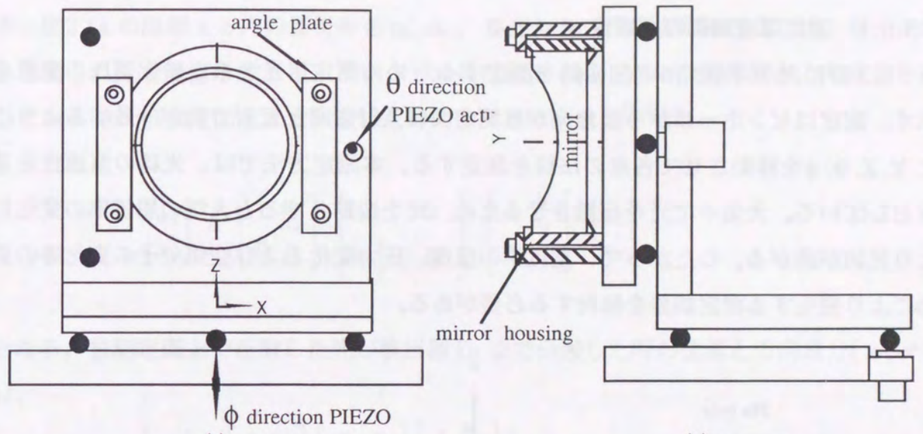


図3.26　試料ホルダーの概念図

(a) 測定用ミラーはミラーハウジングに接着で固定されている

(b) ミラーハウジングは板で角度調整用機構に固定

3.6 測定環境の制御

3.6.1 測定環境制御の必要性

図3.27に曲率半径5 mの凹面鏡を測定するための測定用光学系と検出器D_1の配置を示す。測定はピンホールから出た光が被測定面に入射方向と反射方向が一致するようにX, Y, Z, θ, φを移動させて各点の法線を測定する。本測定方法では、光線の直進性を基本としている。大気中で光を伝搬させるため、光を波動とすると大気の屈折率の変化により光線が曲がる。したがって、空気中の温度、圧力変化および空気分子の変化等の変動により発生する測定誤差を検討する必要がある。

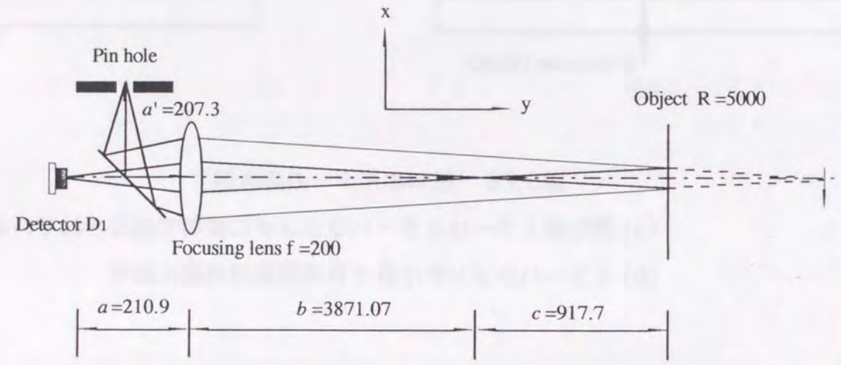


図3.27　曲率半径５mの凹面鏡を測定する場合の光学系

空気の揺らぎの影響を検討するため、まず光線行列による光線の空間位置と方向成分の計算をおこなう。光源から出射した光線（Y方向）を追跡していく場合、光線の接線が各点で波面の法線と一致することから被測定面までの距離L_aを伝わった後の位置x_aは波面x'を方向成分として、

$$x_a = \int_0^{La} x'(y)dy \tag{3-20}$$

で与えられる。もし、屈折率の分布に変化があると波面が変化し、x_aの値が変わる。x_aの厳密解は屈折率分布変化から波面を計算して求める。高精度な恒温室を考えると、ほ

ぼ光路長 L_a 全体にわたって一様な x' (y) の変化と考えられる。恒温室内の 屈折率分布変化の一様性については恒温室内の温度、湿度および圧力測定結果に基いて妥当性を示す。図3.14 の距離 a, b 内の屈折率を n_a, n_b 、集光レンズの焦点距離を f、ピンホールから出射した光を光源とすると、ピンホールの位置で (x_0, x'_0) の空間位置と方向成分を有している時、被測定面上まで伝搬した時の位置と方向成分[3-5]は、

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_1' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{a}{n_a} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{b}{n_b} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_0' \end{bmatrix} \tag{3-21}$$

となる。被測定面上で反射した光が検出器 D_1 まで伝搬した時の位置と方向成分(x_d, x'_d) は、

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_d' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{a}{n_b} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{b}{n_a} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_1' \end{bmatrix} \tag{3-22}$$

となり、零位法のため(3022)式は(3-21)式とほぼ等しくなる。光源から出射した光が 検出器 D_1 に到達する時間中に屈折率の変化が起こることは考えられないが、同一測定面の各点を測定中に屈折率の変化がどこまで許されるか検討する。(3-21) 式の計算結果は、

$$x_1 = x_0 (1 - a / n_a f) + x'_0 \{ b / n_b (1 - a / nn_a f) + a / n_a) \tag{3-23}$$

$$x'_1 = -x_0 / f + x'_0 (-b / n_b f + 1) \tag{3-24}$$

となる。また、 n_a, n_b が Δn_a, Δn_b 変動したときの x_1, x'_1 の誤差 Δx_1, $\Delta x'_1$ は、

$$\Delta x_1 = (\partial x_1 / \partial x_a) \Delta n_a + (\partial x_1 / \partial n_b) \Delta n_b \tag{3-25}$$

$$\Delta x'_1 = (\partial x'_1 / \partial n_a) \Delta n_a + (\partial x'_1 / \partial n_b) \Delta n_b \tag{3-26}$$

となる。曲率半径5 mの凹面鏡を測定するときの条件は、a = 210.896, b = 3871.07、a' = 207.264, f = 200 mm であり、 n_a, n_b を一般的な空気の屈折率を1.00273とし、また x'_0 を

0.025とする。n_a, n_bが10^{-9}, 10^{-8}, 10^{-7} 変化したときの Δx_1 はそれぞれ 0.1, 1および 10 nm であった。

気体を構成している分子の分極率 α、分子の和Nとすれば、光の屈折率 n、真空の誘電率e_0とは、ローレンツ-ローレンスの関係式で結ばれ[3-6]、次 式になる。

$$n^2 - 1 / n^2 + 2 = N\alpha / 3\, e_0 \qquad (3\text{-}27)$$

e_0 は真空誘電率を表す。エドリンは[3-7], [3-8]上式から圧力、温度及び相対湿度の変化と屈折率の変化の関係式を、

$$(n\text{-}1)TPH = 271.8\times 10^{-6}(P/101325)(293.15/T)[1+0.54\ (X\text{-}0.0003)]\text{-}10^{-8}H \qquad (3\text{-}28)$$

とした。T、P、H、Xはそれぞれ圧力 (Pa)、温度(K)、相対湿度(%)、CO_2 濃度(ppm)を表わす。光路長を5 mとした時、屈折率の変化による検出器 D_1 上で10 nm（5×10^{-7} radの法線測定）以下にするためには、屈折率の変化は10^{-7}以下にしなければならないことを既に述べた。その内容について(3-28) 式から計算すると、測定時間内における大気の変動は、表3.9 以下にする必要がある。

表3.9　測定時間内における温湿度および圧力変化の許容値

Items	Value	Units
Temperature	0.02	K
Pressure	1	Pa
Humidity	1	%
CO_2	21	ppm

次に、光路中の場所による屈折率のばらつきによる測定誤差を検討する。図3.28 に示すように屈折率が場所により変化しているとすると、屈折の法則からn, θ を屈折率と入射角とすると、

$$n_1\sin\theta_1 = n_2\sin\theta_2 = n_3\sin\theta_3 \cdots n_{n-2}\sin\theta_{n-2} = n_{n-1}\sin\theta_{n-1} = n_n\sin\theta_n \qquad (3\text{-}29)$$

が成り立ち、

$$n_1\sin\theta_1 = n_n\sin\theta_n \qquad (3\text{-}30)$$

(3-30) 式が示すように、光路中の温度の変動による屈折率の変化により光路が安定しない。したがって、測定中に光路の温度分布の変動が0.02°C 以下であれば光路の安定性を利用した測定が可能である。

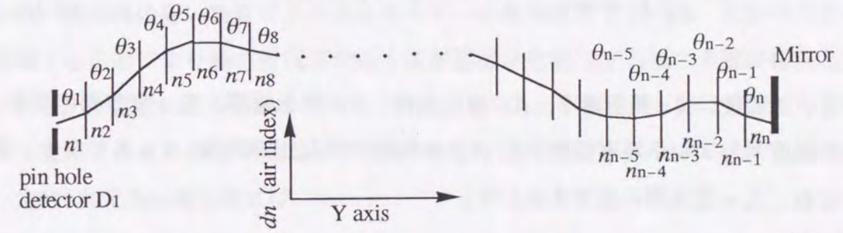


図3.28　光路中の屈折率分布による光線方向

3.6.2 温湿度の制御

そこで、これらの条件を達成するために、温度変化が±0.5°C / day である部屋の中に図3.1 に示すような恒温室を設置した。恒温室を設計する場合、２種類の温度安定化の方法が考えられる。代表的な恒温室は外部との熱の移動をなくしたうえで空調機を用いて温湿度の制御を行う方法である。一方では温度制御が必要な空間を温度変化の少ない空間からの熱の移動を最小限に抑えて一定温度空間を達成する方法が考えられる。前者は絶対温度及び湿度の制御が可能であるが高価な装置が必要である。本測定で要求される恒温室は温湿度が一定であることが重要であり、絶対温湿度の必要性はない。しかし、被測定物の熱膨張を考えると20～25°Cの温度にする必要がある。この温度は恒温室を設置する部屋全体の空調機で設定可能である。したがって、本恒温室は温度制御がある程度おこなわれた空間（本実験の場合±0.5° C / day ）に設置し、恒温室を取り囲む壁を通

して熱の移動がおこなわれないようにする必要がある。

熱の移動は、熱伝導、対流熱伝達、熱ふく射の3形態のうちの一つ、あるいはそのいくつかが重なった形でおこる。対流熱伝達の基本的なメカニズムは、伝熱面に接する流体の薄い層を通しての熱伝導である。熱伝導、対流熱伝達のいずれに対してもフーリエ(Fourie)の法則[3-8]が適用できるが、対流熱伝達の場合には、その温度勾配を計算するためには流体力学が必要となる。熱ふく射は全く別の物理的メカニズムであって、電磁波によるエネルギーのやりとりである。これら3つの伝熱形態がすべて存在する系を図3.29に示す。この場合、壁を通って熱伝導で流れる熱量は、壁表面からの対流熱伝達と熱ふく射の組み合わせで持ち去られる。エネルギーバランスの式は、

$$-kA\left(\frac{dT}{dy}\right)_{Wall\ surface} = hA(T_w-T_\infty)+F_\varepsilon F_G sA(T_W^4-T_S^4) \qquad (3\text{-}31)$$

と書ける。ここで、k= 熱伝導率、A= 単位面積、h= 熱伝達率、T_w = 壁表面の温度、T_∞ = 流れの温度、F_ε = ふく射率係数、F_G = 立体幾何学的な形態係数、s = ステファンボルツマン定数、T_w = 壁表面の温度を表わす。

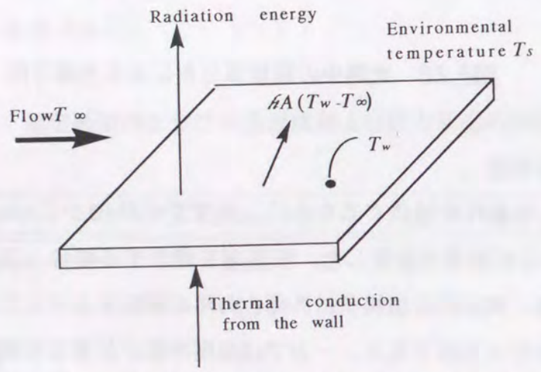


図3.29 熱伝導、対流熱伝達および熱ふく射の組み合わせ

図3.29に示す 熱の移動の組み合わせにおいて、ある空間を壁で完全に仕切って恒温室を製作する場合、壁を通って流れる熱量が恒温室内の温度変動を支配すると考える。直交座標系における3次元熱伝導方程式の一般式は熱伝導率が一定の場合には、

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\frac{\dot{q}}{k}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \qquad (3\text{-}32)$$

と表わされる。ここで、$\alpha = k/\rho c$ （ρ ,cは壁の密度と比熱）は物質の温度伝導率とよばれ、αの値が大きい物質ほど、内部に熱が伝播する速さが速い。このことは、αを構成している諸量を検討すれば明らかである。αが大きいということは、熱伝導率が大きくエネルギー輸送速度が速いか、あるいは、物質の熱容量ρcが小さいかのどちらかである。熱容量が小さいということは、物体の中を移動する熱量のうち、わずかな部分がその物質に吸収されるだけでも、その部分の温度を上昇させ、残りの大部分の熱が、更に遠くへ伝えられることになる。また、qは単位体積あたりの発熱量を表わす。以上の結果から、熱伝導の悪い物質により熱エネルギーの輸送速度を遅くし、比熱の大きい物質を使用することにより熱を吸収させる方法が恒温室を製作する場合の壁の材料として要求される。恒温室の壁の設計をおこなうため、(3-32)式を利用するには複雑であるため、実用上重要と考えられる発熱なしで定常1次元熱伝導方程式を用いて計算することにした。定常1次元熱伝導方程式は、

$$q = -kA\frac{\partial T}{\partial x} \qquad (3\text{-}33)$$

となる。ここで、qは単位時間当たりの熱移動量を、$\partial T/\partial x$ は熱の流れる方向の温度勾配である。上式は、単位面積、単位時間あたりの熱移動量は、その場所の温度勾配に比例することを表わし、フーリエの法則と呼ばれている。恒温室を平板の壁で製作した場合、平板の板厚をΔx_p、恒温室を取り囲む平板の外壁の温度をT_1、内壁の温度をT_2とすると、(3-33)式において熱伝導率を一定とみなしうるとき上式を積分すると、

$$q = -\frac{kA}{\Delta x}(T_2-T_1) \qquad (3\text{-}34)$$

と表わされる。次に多層壁を使用したときの解析は、熱流量がどの部分でも同じでなければならないことから、各層の温度勾配から熱流量を表わすと3層の場合、

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\Delta x_1/k_1A + \Delta x_2/k_2A + \Delta x_3/k_3A} \qquad (3\text{-}35)$$

と表わされる。図3.30には各層を通過する1次元熱伝導にによる温度勾配の概念図を示す。

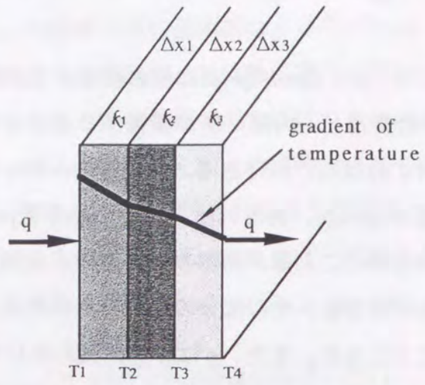


図3.30 多層壁を通過する1次元熱伝導の概念図

以上より、熱流量を低減するためには、$\Delta x/kA$ の値をできるだけ小さくすればよい。本恒温室の空間は長さ 7 m、幅 1.5 m、高さ 2.2 mであり、容積は23.1m^{2}である。この空間を常温常圧の空気が充満しているとすると、空気の比熱及び密度は241cal/kgK,1.29 29kg/m^{3}であり恒温室を0.01℃上昇させるためには71.97Wの熱量が必要である。よって恒温室の内外での温度差が最大0.5℃あるとすると壁を通って入ってくる熱量を71.97W以下にする必要がある。(3-34)式において、qを71.97W、温度差T_2- T_1を0.5℃とすると分母は約0.007W/℃でなくてはならない。恒温室の壁材及び床の断熱材として鐘淵化学（株）社製の断熱材であるエペロン・Pを使用した。この断熱材の熱伝導率は0.05W/m·Kであり、恒温室の床及び壁の面積は71m^{2}である。(3-35)式を使用して計算すると壁の厚さは約20mmとなる。実際には床と空間の温度差や製作時に避けられない隙間等により熱流量が増大することは明らかである。そこで、図3.31に示す壁の構造で恒温室を製作した。エペロン・P材（厚さ50 mm）を空気層を10 mm 設けて2重に全面を囲い、継ぎ目は全てコーキングを行った。その外側をビニールシートで覆い外気と完全に遮断した。床にはエペロン・P材を敷き詰め、測定装置のコンクリートベースは100×100mm、厚さ5mm、長さ7mのH型鋼2本の上に設置し、床からの熱侵入をできるだけ少なくした。湿度及びCO_2の制御は特別にはおこなわないが、恒温室を設置してある部屋全体の環境に合わせるため、恒温室内で作業を行った後、扇風機で空間を撹拌し密閉した。

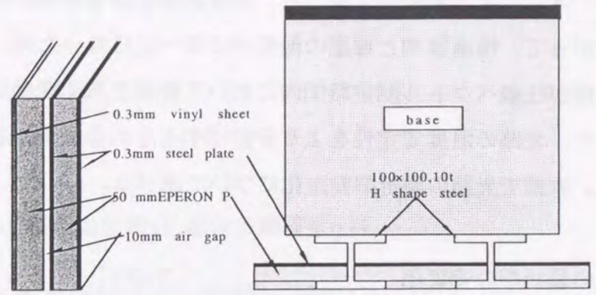


図3.31 恒温室の構造　(a)側 壁、天井の構造　(b) 床の断熱構造

また、光学系駆動用モータ等の熱源は0.02°Cにコントロールされた冷却水を10ℓ/minの流量でX,Y,Z軸θ,φ軸駆動用モータを冷却し、断熱材で覆った。図3.32は恒温室を密閉した後、光学系集光レンズ付近、被測定面付近及び光路の中央の温度を約6時間に渡って測定した。温度測定はサーミスタを使用し、湿度測定器はバイサラ（株）社製HMP230を使用した。サーミスタの測定確度を確認するためHP社製水晶温度計と比較した。その結果、サーミスタ温度計は0.02℃の確度があることがわかった。

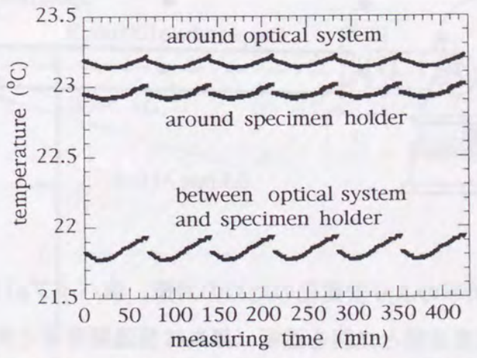


図3.32 恒温室を密閉した後6時間程度経過した後の光路の温度変化

測定結果から、恒温室を設置している部屋の空調機がオン、オフ運転することにより急激な温度変化が発生することがわかった。また、中央の空気の温度が測定装置周辺と比較して約1.5℃低いことがわかった。これだけの温度制御では屈折率の変化及び測定装置の温度変化による法線ベクトル測定に誤差が含まれることが明らかである。問題は、

空調機のオン、オフによる変動が大きこと、空気と測定装置の周辺の温度差があることである。したがって、恒温室内と部屋の温度がほぼ一定になった後、空調機をオフにして恒温室の温度が法線ベクトル測定時間内において要求される変動以下になるかどうか確認した。また、光路の温度安定性をより安定にするための設計が必要であることが明らかになった。次節で光路の屈折率安定化について述べる。

3.6.3 光路の屈折率の安定化

図3.32の温度変化を光路屈折率の変動に換算すると要求される10^{-7}以下の変動を満足していない。そこで、恒温室を密閉し、空調を停止した後に温度測定を開始した。約2日経過したところでほぼ恒温室内が安定し温度分布の差が少なくなった。しかし、この温度安定化の方法は外気の温度変化に敏感であると考え、光路のより一層の温度安定化による屈折率の変化をおさえるために図3.33に示すように光路を銅パイプで囲み、パイプと光学系と試料台の隙間はアルミフォイルを3重に巻いて密封した。

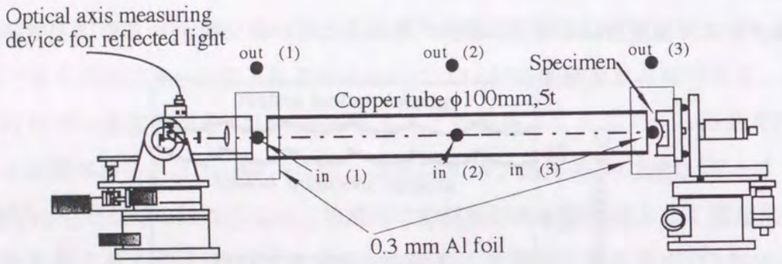


図3.33 光路の屈折率のより安定化のための対策。銅パイプφ150mm, 厚さ 5mmとアルミフォイルで恒温室空間と光路を遮断（黒丸は恒温室空間と光路の温度測定点）

この物理的意味を考察する。(3-32)式を半無限平板の1次元非定常熱伝導として解析すれば、使用した銅パイプの温度分布や熱の流れが時間的にどう変化するかの目安が得られる。この場合の熱伝導方程式は(3-31)式から、

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \qquad (3\text{-}36)$$

となる。また初期条件と境界はそれぞれ、

$$T(x,0) = T_i$$
$$T(0,t) = T_0 \qquad t>0 \qquad (3\text{-}36)$$

での解と(3-36)式から任意の位置xにおける熱流量q_xは、

$$q_x = -kA\frac{(T_0-T_i)}{\sqrt{\pi\alpha t}}\exp(-x^2/4\alpha t) \qquad (3\text{-}37)$$

と得られる。表面(x=0)での熱流量q_0は、

$$\dot{q}_0 = \frac{kA}{\sqrt{\pi\alpha t}}(T_0-T_i) \qquad (3\text{-}38)$$

となる。図3.34に示すように、銅パイプの厚さが5mmであるので半無限物体の銅表面から5mm深さをxとし、パイプと恒温室内の温度差を0.05°Cとする。パイプの内側すなわち光路に流れる熱量を計算すると図3.35のようになる。銅のk及びαはそれぞれ385W/m・K,1.1×10^{-4}mm^2/sである。

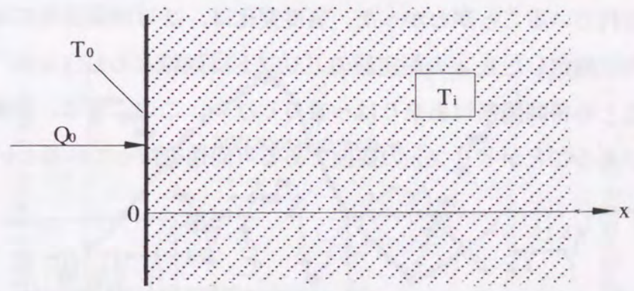


図3.34　半無限物体の1次元非定常熱伝導

図3.35 から、恒温室の温度とパイプ内側の温度が同じになれば、熱流量はゼロになるはずである。1時間経過した後もまだ熱流量があることから両者に温度差があることがわかる。よって、パイプで光路を囲むことにより1時間以内の光路の温度変化は低減されることが期待できる。

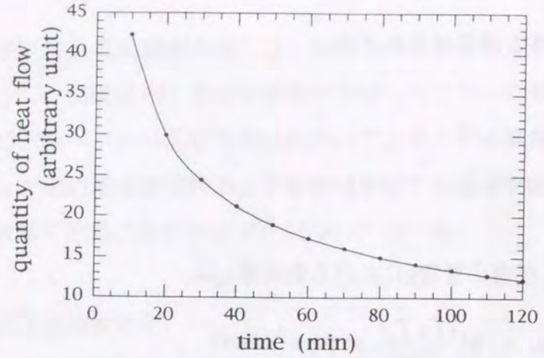
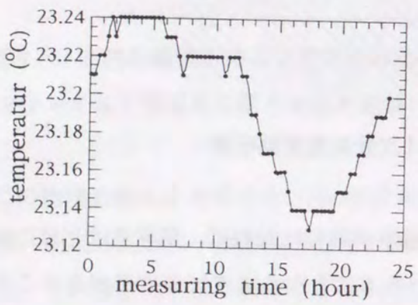
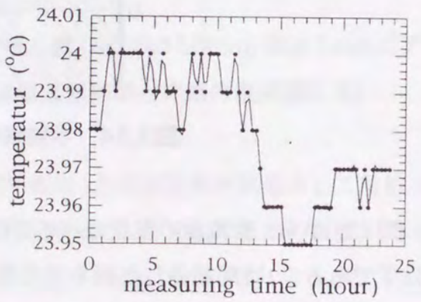


図3.35 銅パイプと恒温室内に0.05°Cの温度差がある場合のパイプの内側の時間による熱流量の変化（半無限物体の1次元非定常熱伝導方程式を用いて計算した）

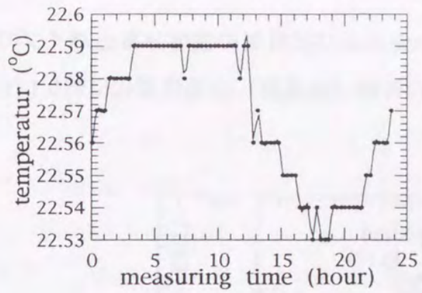
以上述べたように、光路の屈折率安定化をおこなった後、装置全体の安定性を確認するために、曲率半径3mの法線ベクトルを測定できるように光学系を調整し、恒温室を密閉してから2日後に温度測定を行い、屈折率の変化を計算して測定精度を見積った。図3.37は、冷却を行っているφ方向駆動用DCサーボモータ、レーザ管およびX軸移動テーブルと恒温室の中央部の温度測定結果を示す。測定時間は24時間である。測定結果から温度変化はほぼ0.1°C以下で、特に発熱体であるレーザ管やモータの温度が冷却によりコントロールされていることがわかった。温度変化は、ほぼ恒温室外の温度変化に追従している。同時に測定したθ, φの測定値のドリフトは両軸とも$\pm 2.5 \times 10^{-6}$ radであった。装置の温度変化との相関関係はあまりはっきりしない。このことは、装置の場所により絶対温度に差があることがドリフトの要因である可能性を持っているといえる。



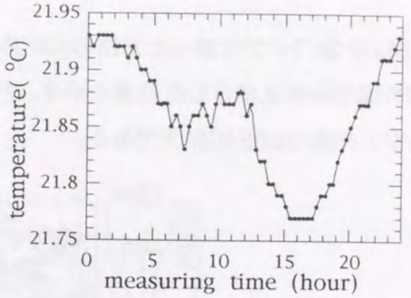
DC motor for X axis table



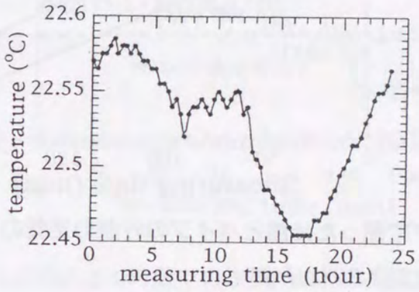
LASER tube



X axis table



Air



Specimen holder

図3.36(a) 24時間での装置の温度変化

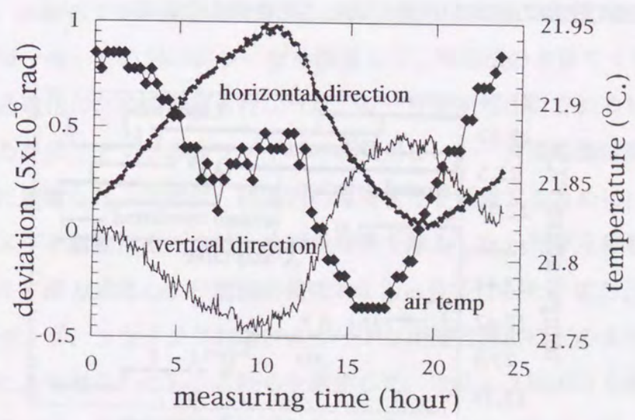


図3.36(b) 24時間でのθ, φの変動と光路の温度変化

図3.37はパイプで囲った光路の光学系側、中央および試料側の温度分布とパイプの外側の温度分布を測定した結果を示す。パイプの外側（恒温室）の温度変化は約0.1 °Cあるが、光路は0.05 °C以下である。

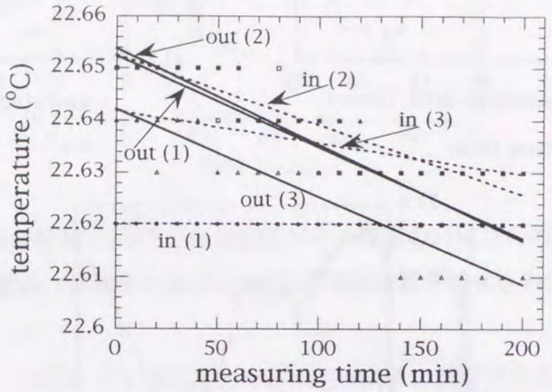


図3.37 銅パイプで囲った光路とパイプの外側の空気の温度分布の比較
測定点は図3.32に示す。

図3.38は、2.5 時間での各点の温度変化とθ, φのドリフトを精密測定した結果を示す。この間における空気の温度変化は 0.05 °C 以下であり、装置は0.02°C以下である。θ, φのドリフトは2.5×10^{-7} radであった。これらの測定結果から2時間以内の測定時間であれば、5×10^{-7} radの精度で法線の測定が可能であることを示している。

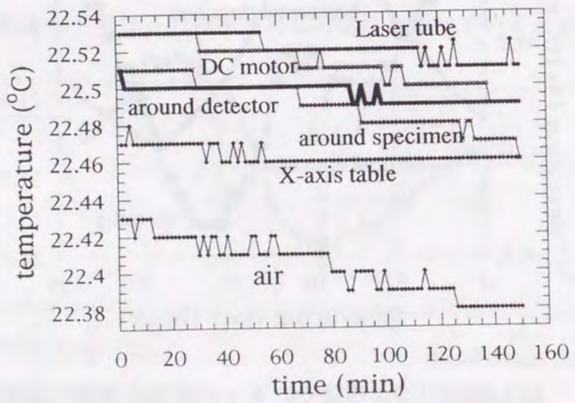


図3.38(a) 2.5時間での温度変化

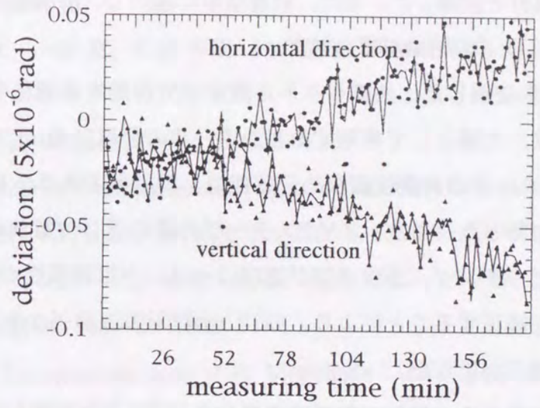


図3.38(b) 2.5時間での法線ベクトル測定値の変動

3.7 結言

本章では、設計製作した形状測定装置の概要について述べた後、本測定が光の直進性を利用した測定方法であるため、測定環境制御の必要性について検討を行った。

測定装置は、法線ベクトル測定用光学系、試料台および恒温室で構成されている。光学系の中で、単一モードの He-Ne レーザを使用して、零位法の方法で４分割検出器による分解能の、最適化のための計算を行なった。レーザ管から出射されるレーザの位置安定性を確保するため、オプチカルファイバーを使用し、レーザ用電源は発熱体であるので恒温室の外に設置した。同様に、恒温内の温度変化を低減するために、X,Y,Z ステージ及びゴニオメータ駆動用モータは、冷却水で熱を除去した。光学系移動ステージは剛性の高いダブルＶ溝方式にし、位置決め精度を0.1μm 以下にした。また、それぞれのステージのピッチング、ヨウイングおよびロウリングが測定精度にどのように影響するか誤差伝播解析により明らかにし、これらを測定した。次に、２軸のゴニオメータと法線ベクトル検出器D_1の、必要位置精度を明らかにした。

試料支持系の構成は、測定試料の軸調整が可能なように、X,Y,Zステージと２軸回転機構である。この支持系は、光学系のゴニオ回転中心から500mm の位置から7000mm ま

で移動可能である。２軸の微小な回転調整は、ピエゾアクチュエータにより行う。

本測定法は光線の直進性を基本としているため、温度、湿度および気圧の変化により屈折率が変化する。そこで、大気の揺らぎの影響をエドリンの式と光線行列により、光線の空間位置と方向成分を計算した。また、計算結果に基いて、恒温室の設計製作を行った。以上の結果から、以下の結論が得られた。

（１）4分割検出器を使用した、法線ベクトル測定の分解能を最適化するための計算を行った結果、光源として使用するピンホールの径は55.5μm である。

（２）2軸のゴニオメータの角度位置決め分解能は、設計値である5×10^{-7}rad以下を充分満足する値であった。また、X,Y,Zステージの繰り返し位置決め精度は0.1μm以下であり、ピッチング、ヨウイング及びローリングは再現性があり、これらをの運動誤差を補正することにより、5×10^{-7}rad以下の法線ベクトル測定が可能であることを明らかにした。

（３）光線行列の計算から、光路の屈折率の変化を10^{-8}以下に制御が必要であることを明らかにした。また、エドリンの式から、屈折率を10^{-8}以下に制御するために、温度変化、圧力、CO_2および相対湿度変化の計算結果は、それぞれ、0.02℃、1Pa , 21ppm および１％である。

（４）ミラーを1回測定する時間を40分として、この間の光路の温度変化を測定した結果、0.02℃以下であった。また、同時に法線ベクトルの測定値の変動を測定した結果、5×10^{-7}rad以下であり、本形状測定装置は法線ベクトルを5×10^{-7}rad以下で測定できる性能を有していることからが明らかになった。

第３章の参考文献

(3-1) 森 勇蔵, 杉山 和久, 山内 和人, 西川 和仁, 酒井 啓至, 本郷 俊夫, 東 保男：昭和59年度精機学会春期大会学術講演会前刷 (1984) p.403

(3-2) 本後 俊夫, 東 保男, 森 勇蔵, 杉山 和久, 山内 和人, 西川 和仁, 酒井 啓至：昭和59年度精機学会春期大会学術講演会前刷 (1984) p.403

(3-3) T. Hongo, Y. Mori, Y. Higashi, K. Sugiyama, K. Yamauchi, K. Nishikawa and K. Sakai: Development of High Accuracy Profile Measuring System for Focusing Mirror of SOR (Synchrotron Orbital Radiation), Proc. Int. Nat. Symp. on MQCP. (1984)

p.p.152-157

(3-4) 森 勇蔵, 杉山 和久, 山内 和人, 西川 和仁, 酒井 啓至, 本郷 俊夫, 東 保男：シンクロトロン放射光用ミラーの超精密形状測定装置の開発, 精密機械, 51, 11, (1984) p.p.96-101

(3-5) 藤岡 知大, 小原 實, 斉藤 秀明, 光の量子エレクトロニクス, コロナ社 (1991) p.p.91-96.

(3-6) 物理学辞典, 培風館, (1986) p.p.2282-2283

(3-7) Norman Bobroff: Residual errors in laser interferometry from air turbulence and nonlinearity, APPLIDE OPTICS, Vol. 26, No. 13, 1 July (1987)p.p.2676-2681

(3-8) 大島　耕一、松下　正、小林　康徳、根岸　完二、小木曾　建、熱設計ハンドブック、朝倉書店、 p3～20 (1982)

(3-9) Edlen.B: The refractive index of air, Metrologia.2 (1966) p.p.71-80

第４章　形状測定装置による凹面鏡の測定方法

4.1 緒言

2章および3章で述べた、光線の直進性を用いた傾斜角測定による形状測定原理に基づく形状測定装置を設計製作した。

測定対象とする放射光用集光ミラーの形状は凹面であるので、凹面鏡の測定方法について述べる。本測定機で測定するミラーは、すでに光学メーカーで超精密加工された凹面鏡で、尚且つ、曲率半径が干渉測定によりほぼわかっているものとする。凹面鏡を測定するためには、最初に測定する点である面の中心の法線ベクトルと光線ベクトル及び光学系の移動に使用するX,Y,Z軸のY軸方向とを5×10^{-7}rad以下に一致させる。この調整は本測定において最も重要な測定手順である。

次に、測定する凹面鏡の平均曲率半径を求める。その後、検出器D_1から最初の測定点までの距離を凹面鏡の平均曲率半径と一致させる。この設定により凹面鏡を全面測定したとき被測定面の法線ベクトルは曲率誤差分だけずれることになる。したがって、零位法により測定する場合、光学系のX,Y,Z軸の調整量を最小にすることができる。よって測定時間を短縮することができると共に各軸に含まれる運動誤差による測定精度の低下を防ぐことができる。

本章では、まず、初期設定の方法について詳細に述べる[4-1),(4-2),(4-3)]。初期設定が終わると、法線ベクトルの測定をおこなうが、その測定手順及びデータ処理について述べた後、本研究の大きな目的である測定の自動化について述べる。

本測定は光線の直進性を基本としているため、作業者が測定機を操作すると大気の密度変動が発生し、屈折率が変化する。したがって、測定期間中に大気の密度変動を最小にするためには、遠隔操作をおこなう必要がある。そのためには、ピンホールの位置調整、ゴニオメータおよびX,Y,Z ステージの制御、測定ミラーの法線ベクトルと光線ベクトルの一致を完全な自動化システムにすることが必要不可欠である。また、できるだけ短時間で測定をおこなうことも非常に重要である。そこで、自動化の必要性と自動測定システムの構成について述べる。

4.2 初期設定

4.2.1 光軸調整

光学系のY軸（光軸方向）と試料移動ステージ全体を移動するためのガイドレールの平行性は組立時に、～5×10^{-5}rad程度に組み立てられている。零位法で法線を測定する場合、被測定面の形状が理想的な形状からずれているとX,Y,Z 軸および2軸のゴニオメータを動かして光線ベクトルと被測定面の法線ベクトルを一致させる必要がある。Y 軸ステージを動かして零位法を達成するとき、初期設定において、Y軸ベクトル、光線ベクトルおよび測定点での法線ベクトルが一致していないと、測定場所がずれることによって測定精度が悪化する。したがって、光線ベクトルとX,Y,Z ステージの座標軸を5×10^{-7}rad以下に合わせる必要がある。図4.1に２段階の光軸調整方法を示す。

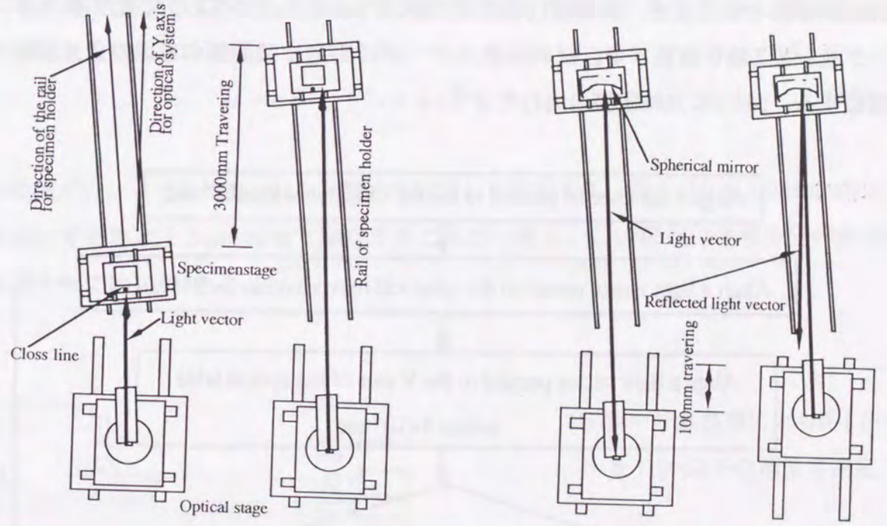


図4.1　光軸、光学系Y軸及び試料台Y軸の調整法
(a) クロスラインを用いて5×10^{-5}radの精度で調整する方法
(b) 凹面鏡を利用して5×10^{-7}radの精度で調整する方法

ステージの座標軸と光線ベクトルのずれを一致させる方法について述べる。光学系のY軸と試料移動ステージのY軸及びレールの軸は10^{5}radで調整する。試料台にクロスの卦

がき線を入れ、集光レンズから出射した光がクロスラインの中心に当たるように調整する。次に、試料移動ステージを図4.1に示すように約3m手動で移動する。その時、光がクロスライン上から移動すればレールの軸と光軸がずれていることがわかる。そこで光がクロスライン上でどちらの方向に移動したか測定し、移動した距離との関係でずれ量を計算する。次に計算結果から光学系のX,Z軸の移動とθ,φ ゴニオメータの回転と試料台のX,Y,Z軸を移動することによって軸合わせを行なう。この作業は3～4回行なうことにより10^{-5}rad程度に両軸を合わせることができる。最終的には被測定面の最初に測定する点の法線ベクトルと光学系のY軸及び光線ベクトルのずれを5×10^{-7}rad以下に調整する。凹面鏡を測定する場合、この調整を行なうことにより測定点のX,Zの位置が1μm以下の精度で測定できる。最初の測定点における法線ベクトルと光線ベクトル及びY軸方向を5×10^{-7}rad以下に調整するためには、試料移動ステージに凹面鏡を取付ける。光学系のY軸を100mm移動させたとき、検出器D_1の変位が5×10^{-7}rad以下になるように光学系のゴニオメータ及びX,Z軸を調整する。試料移動ステージは固定し凹面鏡のあおりとX,Z軸のみを調整する。図4.2に光軸調整の流れを示す。

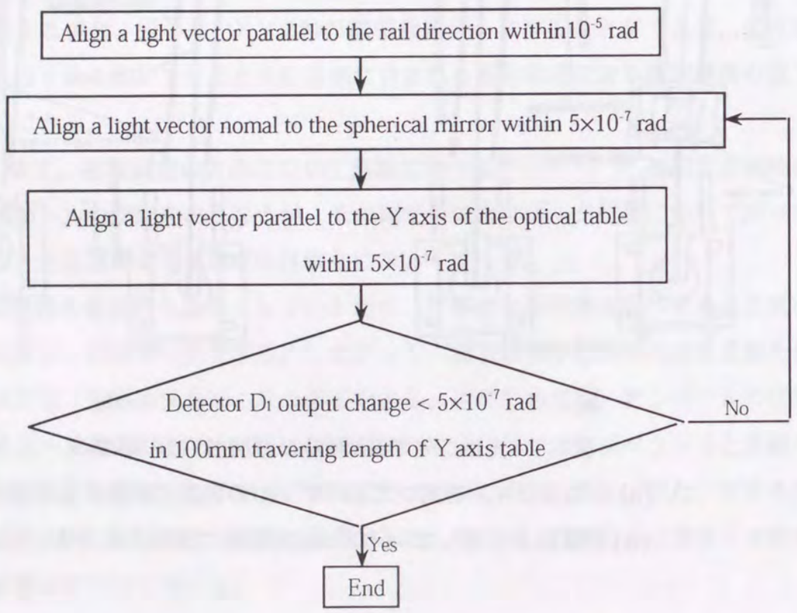


図4.2 光軸調整のフローチャート

光軸調整は、実際に形状測定をおこなう環境条件と同一でおこなう必要がある。そこで、調整は凹面鏡をセットした後、恒温室を密閉し温度、圧力を測定し、これらが0.02℃/30min,1Pa以下で安定した状態を確認した後、調整を行なう。調整は総て外部から遠隔操作で行なう。

4.2.2 試料位置の調整

前節で述べた光軸調整後、被測定物上の測定点から光学系までの距離を測定しセットする必要がある。図4.3 に示すように、光学系の検出器D_1（θ,φの回転軸）からミラー中心までの距離は、まず、検出器D_1から集光レンズホルダーの端までをマイクロメータで測定し（L_1）、ホルダーの端からミラーの中心まで棒マイクロメータで測定する（L_2）。測定後、棒マイクロメータは３次元測定機で校正する。この時ミラーの位置は光学系側にできるだけ近づけておく。次に、半径Rのミラーを測定するときには、検出器D_1からの距離をRにしなければならないから、

$$L_3 = R - (L_1 + L_2) \qquad (4\text{-}1)$$

の距離だけレーザ測長機（ＨＰ社製）で測定して固定する。例えばR＝3000mmのミラーを測定する場合±５μm 程度で固定することができる。この精度は曲率半径の絶対測定精度として約10^{-6}である。

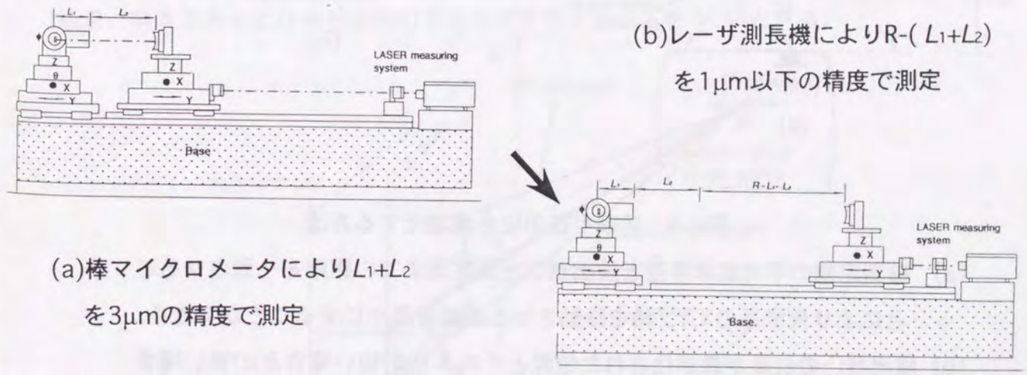


図4.3 初期設定として検出器D_1から測定面までの距離を5μmの精度で位置決めする方法

超精密光学研磨された凹面鏡の曲率半径は理想形状から数%以上ずれている可能性がある．本測定で測定を行なう場合、被測定面の曲率をあらかじめ光学メーカで測定した上で超精密形状測定を行なう。被測定面の平均曲率半径と、検出器 D_1 から測定ポイントまでの距離を合わせることができればよい。図4.4 に示すように、数%の曲率半径 誤差をもつ被測定物の曲率半径Rと検出器 D_1 から測定ポイントまでの距離 Y_0（形状測定の初期値）をできるだけ一致させる方法を示す。

検出器 D_1 から被測定面のミラーの中心位置で距離を曲率半径に合わせる。θ,ϕ 方向ゴニオメータにより、ミラーの外径まで独立に動かす。その時、検出器 D_1 の出力のプロファイルは、Y_0 とミラーの真の曲率半径 R との関係で３種類のプロファイルになる。$Y_0 < R$、$Y_0 > R$ の場合はそれぞれ偶関数の関係になる。また、$Y_0 \approx R$にセットできたとすると、ミラー全面をスキャンしても検出器 D_1 出力変化は理想形状からの誤差だけになるはずである。

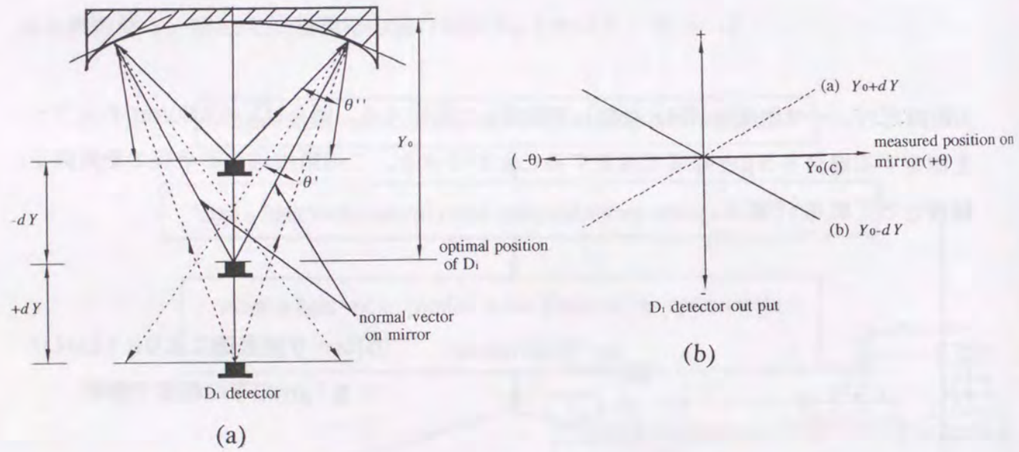


図4.4　曲率半径測定を最適化する方法

（a） 被測定物の平均曲率半径と検出器D_1と測定面までの距離を一致させることにより光学系のX,Y,Z軸を移動させる距離を最小にすることができる。

（b） 検出器D_1の位置が最適化された位置とそれよりdY短い場合とdY長い場合の検出器D_1の出力変化を表わす。零位法のためにはX,Y,Z軸を移動させる必要が生じる。

そこで、Y軸を移動して検出器 D_1 出力が変化しないように、θ,ϕ 各方向のゴニオメータ およびミラーの傾きを微調整する。微調の方法は、まず光学系を距離Ｒの場所でθ,ϕ方向に回転する。次に、検出器 D_1出力が上下左右ほぼ対象になるようにミラーのあおりを調整する。そして、θ,ϕ軸単独で正負方向に 5×10^{-5}rad程度、5×10^{-6}radステップ動かしたときの法線を測定する。ほぼ対称の法線測定が達成されたら、θ,ϕ 各方向の ゴニオメータを回転させ、ミラーの最外部に光線を移動させる。そこで、図4.4に示すように検出器 D_1の出力は (a) あるいは (b)のどちらかの出力結果になる。(a) の場合は被測定物の曲率半径がY_0より大きい場合を示す。また、(b) の場合はY_0の距離が長い場合を示す。そこで、光学系のY 軸を調整し、検出器 D_1 出力がゼロに一番近い距離を探す(c)。この作業を行うことにより被測定物の平均的な曲率半径が測定できる。測定精度は検出器 D_1 から被測定物までの距離測定精度によって決まる。距離測定精度を5μm だとすると、曲率半径 2m、3m および 5m のミラーを測定する場合の曲率半径の精度はそれぞれ、2.5×10^{-6} m、1.7×10^{-6} m および10^{-6} mとなる。この値は他の測定方法では到底達成出来ない精度である。

4.3　測定手順

零位法による測定のためのアルゴリズムをもう少し具体的に考える。

図4.5 に示すように、前節で述べた方法で初期設定をおこなった後、ミラー中心位置のX,Z 軸の原点とする。ステージのY軸は初期設定をおこなった位置を Y_1（検出器 D_1 からミラー表面までの距離）とおく。今、ミラー上に点（X,Y,Z）点の法線を測定した結果、垂直方向および水平方向のアナログアウトプットを V_1, V_2とする。

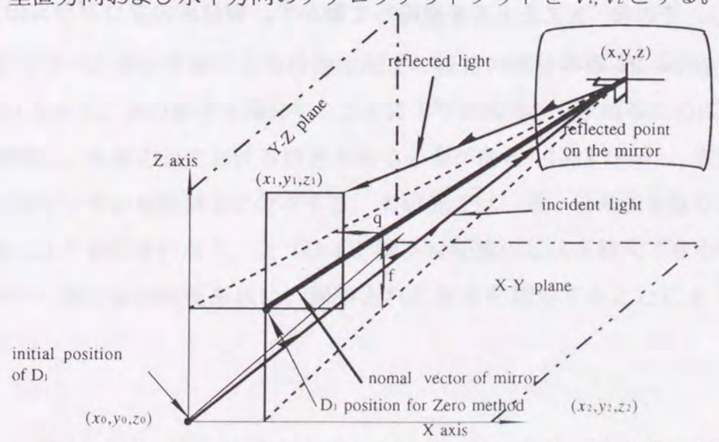


図4.5 零位法を保ちながら測定点を等間隔にするための補正方法

ここでV_1、V_2 は第２章、図2.2 (b)に示すD_i検出器からの差動出力で下記の演算結果である。

$$V_1=(V_a+V_b)-(V_c+V_d) \quad (4\text{-}2)$$

$$V_2=(V_a+V_c)-(V_b+V_d) \quad (4\text{-}3)$$

であったとすると、法線からのズレは第3章図3.22から、

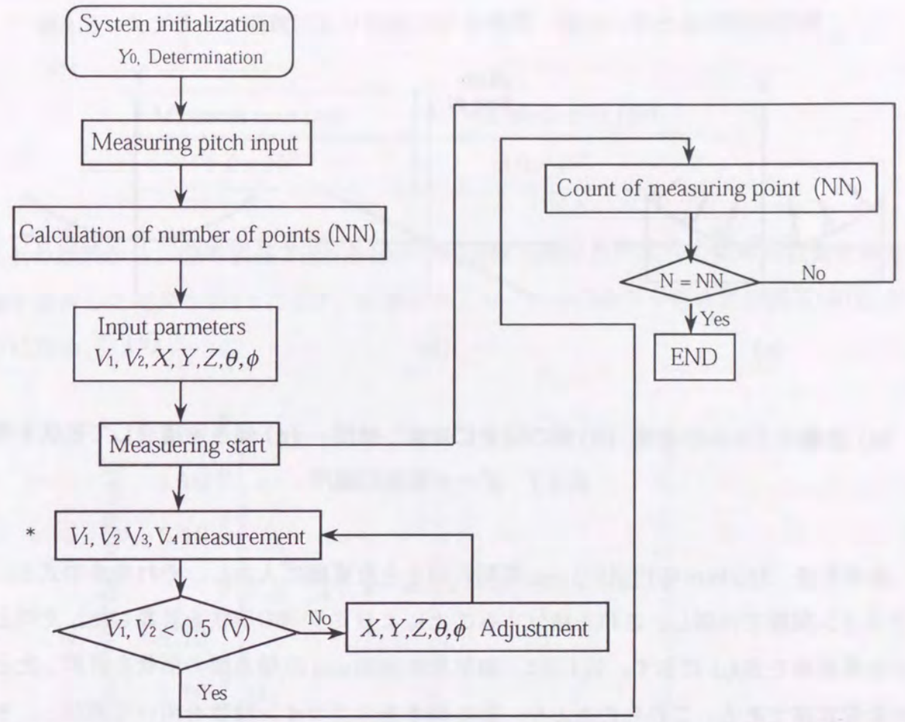
$$\theta = (V_1/0.5)\times5\times10^{-6}\text{rad}、\ \phi = (V_2/0.5)\times5\times10^{-6}\text{rad} \quad (4\text{-}4)$$

である。初期設定からのずれは大きくても5×10^{-5}rad 以下であるので、図のようにY 方向の位置は固定し、X,Z およびび水平、垂直回転角θ,ϕを調整することによりV_1,V_2 を初期の設定値にあわせる。そのためには、まずアナログ出力を角度に変換し、図のようにアナログ出力の半分の値の角度を動かし、法線の傾きを水平、垂直それぞれについて合わす。その後、Y軸との切片の位置を決定するためにX,Z を微調する。微調整量は、

$$X(\text{mm}) = Y\times V_2 \times 0.0000048/0.5 \quad (4\text{-}5)$$

$$Z(\text{mm}) = Y\times V_1 \times 0.0000048/0.5 \quad (4\text{-}6)$$

になれば初期設定値の値、すなわち零位を保つことになり、水平・垂直の測定ポイントも等間隔に測定することができる。法線の傾が2.5×10^{-5}rad以上ある場合は、Y軸を60mmの範囲で動かし、その後　X,Zを上式を使用して動かす。零位法のプログラムのフローチャートは図4.6のようになる。

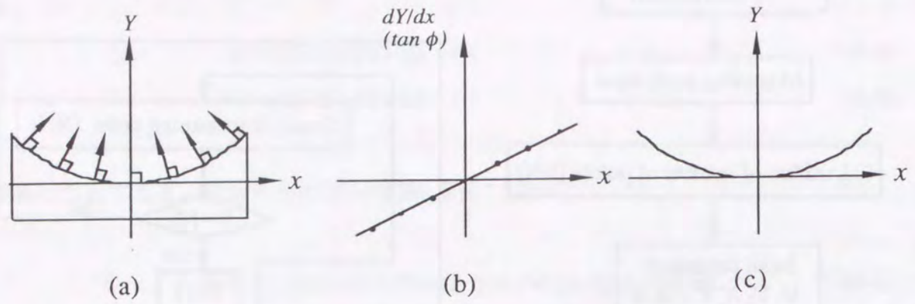


＊：V_1, V_2 の取り込みはゴニオが停止してから5秒待ち5回測定の平均値を比較.

図4.6　零位法による測定フローチャート

4.4 データ処理

３節で述べた測定手順により被測定面上の特定の位置の傾 $\partial y/\partial x$,$\partial y/\partial z$ が測定できる（図4.7(a)）。面の傾きを積分することにより表面形状を求めるためには、傾きのデータを補間し、任意の点における傾きを知る必要がある （図4.7(b)）。表面形状の測定精度はこのデータの補間精度に依存する。本研究では、最小自乗法を取り入れたスプライン関数により補間を行なう。スプライン関数は任意の形状を補間できる関数の一つである[Appendix 3]。測定面の表面形状は、補間された傾きを積分することにより得られる（図4.7(c)）。



(a) 法線ベクトルの測定 (b) 面の傾きに変換し補間 (c) 傾きを積分して形状を得る

図4.7 データ解析の順序

曲率半径 5600mm の円周の5 mm 間隔の傾きを計算機に入力し、それを多項式と、スプライン関数で補間し、これを積分することによりミラーの形状を計算した。そのときの計算誤差を表4.1 に示す。表4.2は、曲率半径5600 mm の球表面の形状を計算したときの計算誤差である。これらの表より、面の傾きをスプライン関数を用いて補間し、それを積分することにより、表面形状を十分な精度で計算できることが分かる。表面形状の測定精度は、表面の傾きの測定精度に依存する。表面の傾きの測定誤差が常に同一符号で5×10^{-7}radの場合には、表面形状の測定誤差は 50nm/100mm となる。しかし、表面の傾きの測定誤差は正負両符号で存在すると考えるべきで、その場合、補間に際し、最小自乗法を用いているため、解析誤差は小さくなる。その妥当性を示すために、傾きのデータにランダムに$\pm5\times10^{-7}$radの誤差を与え、解析した結果、表面形状の計算誤差は3×10^{-2}nm/100mm 以下となった。

表4.1 多項式、スプライン関数により円周形状を補間、積分したときの計算誤差

Interpolating function	Maximum error(nm)
Polynominal	5.0×10^{1}
Spline function	3.0×10^{-3}

表4.2 スプライン関数により球面形状を補間、積分したときの計算誤差

Minimum error (nm)	Maximum error (nm)
1.0×10^{-3}	3.0×10^{-2}

以上の結果から、曲率半径 1 mから10m の凹面鏡を測定した場合の曲率半径測定の分解能を計算した結果を図4.8に示す。計算結果より、10mの曲率半径の測定誤差は0.02％以下になる。

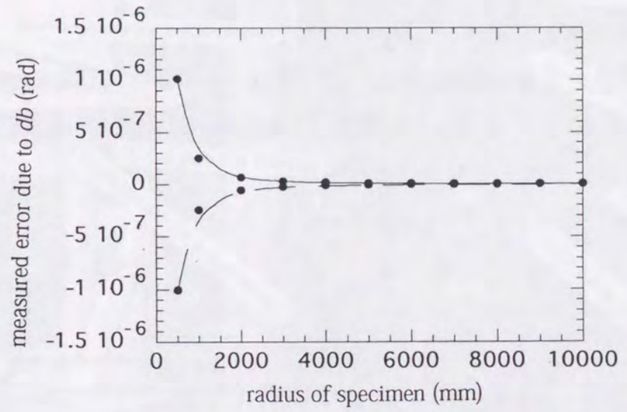


図4.8 本測定法による曲率半径測定誤差

測定した法線ベクトルから傾きを計算し、スプライン補間より補間し、これを積分したときの形状誤差から求めた曲率半径測定誤差。
法線ベクトル測定精度、光源の位置決め精度は5×10^{-7}rad,1 μmとした。

4.5 形状測定の自動化

4.5.1 自動化の必要性

本測定の測定誤差を生ずる主な原因は、

1．光の直進性を利用した測定方法であるため大気の密度変動よる屈折率に変化による測定誤差。

2．温度変化により生ずる装置の熱ドリフト。

である。所定の測定精度を達成するためには、測定装置の温度変化及び光路の環境変化による屈折率変化を設計値以下にする必要がある。すでに述べたように、この値は温度及び湿度で0.02℃、1%以下である。もし、測定者が操作すると、測定者からの輻射熱が～50W ある。また、測定装置を測定者が触るため熱伝導により測定装置の温度分布が変化して測定誤差になる。測定者が全ての調整箇所を調整しようとすると移動しなければならなくなり、測定室の床の変動を生じる可能性がある。したがって、初期設定を含めて測定は、自動化が必要不可欠であると同時に測定時間を最短にする必要がある。

4.5.2 自動測定システムの構成

初期設定から零位法による形状測定を総てコンピュータ制御によりおこなうためのシステムについて述べる。図4.9 に制御機構部概略構成図を示す。表4.3 に制御処理内容について示す。また、図4.10に制御系の写真を示す。

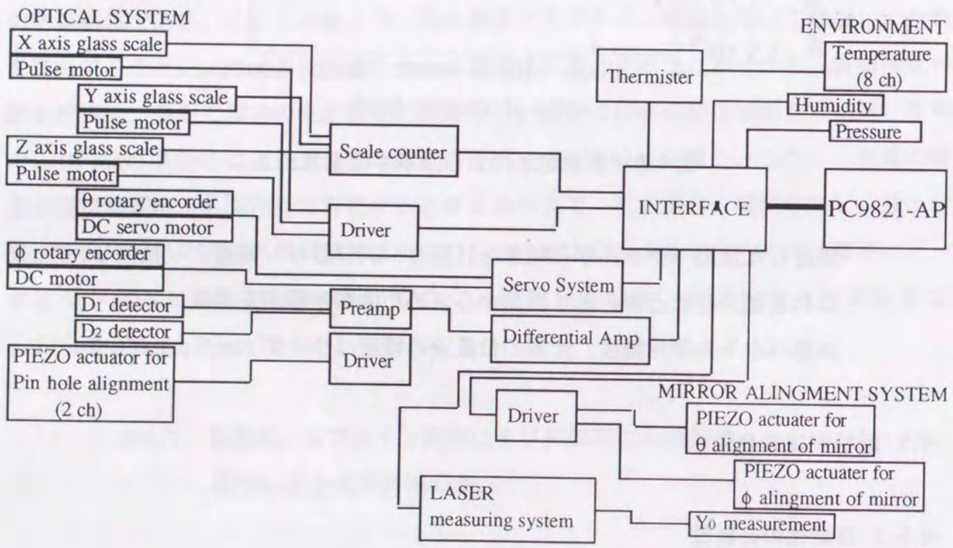


図4.9 制御機構部の概略図

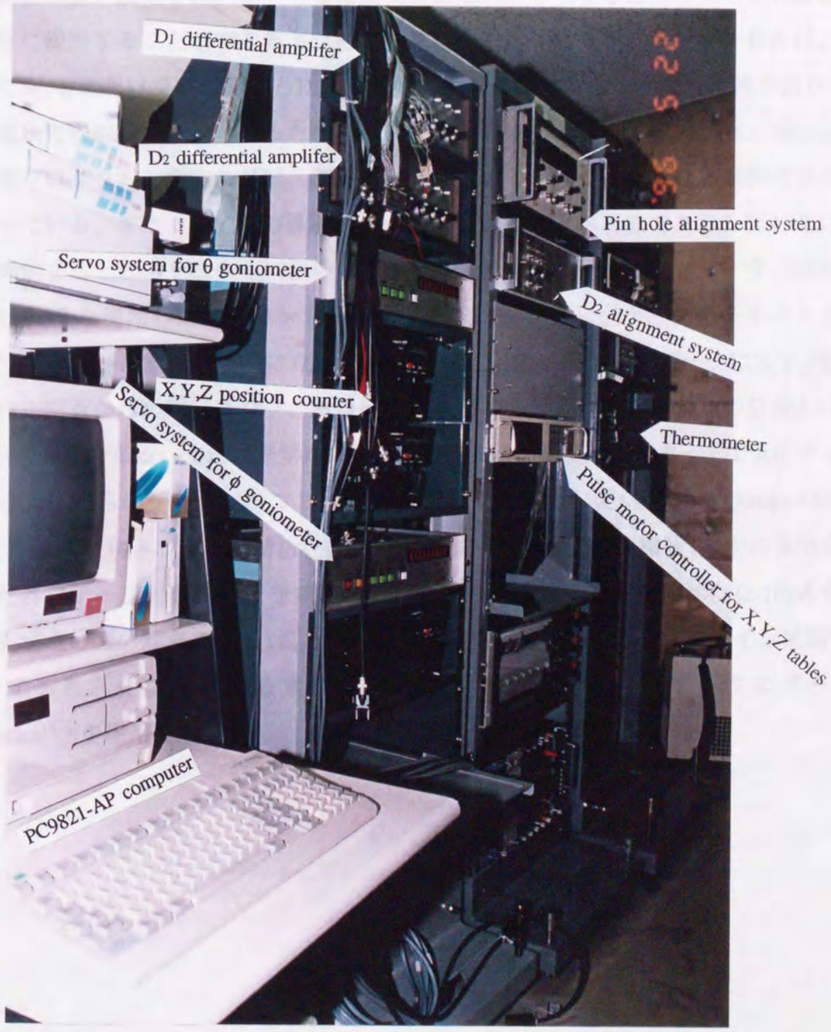


図4.10 制御系

初期設定、試料調整および零位法による形状測定のためのソフトウエアーは計算機上で選択できるようにした。図4.11にメインメニューの画面を示す。１：は、初期設定をおこなうためのソフトウエアーで各デバイスを単体で操作でき、光軸および法線ベクトルの超精密調整に使用する。また、温湿度測定およびステージやゴニオメータの運動誤差の測定に使用することができるようになっている。２：のミラースキャン動作は、非零位法でθ,φ軸だけを動かすことにより被測定物の平均的な曲率半径と、検出器D_1と被測定面までの距離を一致させるために作成したプログラムである。３：は、零位法による測定プログラムで測定エリア、測定ピッチを入力し、法線測定精度も選択できるようになっている。また、X,Y,Z の移動スピードもかえることが可能である。図4.12 に零位法で測定するときのモニター画面のレイアウトを示す。メインコンピュータにはNEC製 PC9821 AP を使用した。このシステムでは法線ベクトル測定データをテキストデータとしてメモリーに記憶する様になっている。形状測定に使用するデータはX,Y,Z軸の固定された原点からのピッチング、ヨウイング及びローリングと各測定点の位置とゴニオメータの角度である。また、光学系、試料系及び光路の温度はモニター上で常にチェックできる。これらのデータは、フロッピーデスクを媒体としてMacintosh Quadra 650 のハードディスクに移されデータ解析を行う。解析は、各測定点の座標値を7次の多項式で表わした各ステージの運動誤差を補正した後に取り込み、第２章で述べた(2-10)式をもとに、測定点の面の傾きを(2-11)式で計算した。計算した面の傾きをスプライン補間[4-4]し積分することにより形状を求めた。解析用に用いた基本ソフトウエアーはMathematica[4-5]を使用した。

表4.3 制御処理内容

System	Instruments	Data Handring	Number of Channels	I / O
Detector D_1	Quadrant Photo Detector	A / D	7	Parallel I /O
Detector D_2	Quadrant Photo Detector	A / D	7	Parallel I /O
Pin HoleX,Y Adjustment	PIEZO Actuater	D / A	2	Parallel I /O
Specimen θ,ϕ Adjustment	PIEZO Actuater	D / A	2	Parallel I /O
X,Y,Z Stage Drive	Pulse Motor	Pulse Generater	3	GPIB
Goniometer θ,ϕ Drive	DC servo Motor	Closed Loop System	2	RS232C
Temperature	Thermister VAISALA Co.	A / D HMP230	8	GPIB
Humidity	Hygrometer HP Co.	A / D	1	Parallel I /O
X,Y,Z Scale	Glass Scale LIP 100	BCD	3	Parallel I /O
Goniometer θ,ϕ Encord	Rotary Encorder ROD 800	BCD	2	RS232C

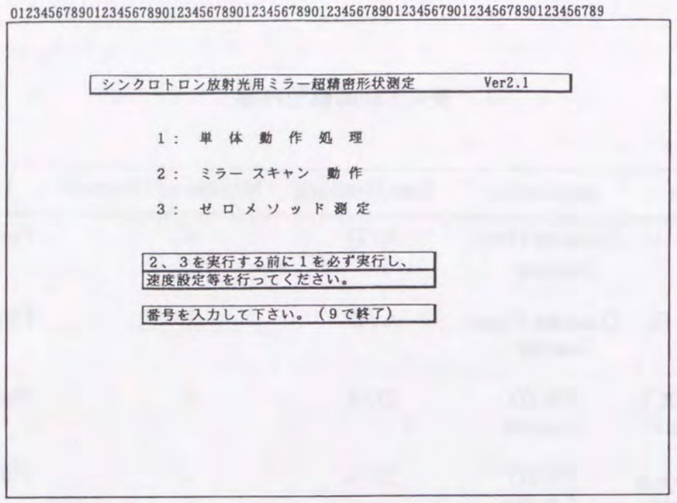


図4.11 測定用メイン画面のレイアウト

1: 光軸の調整を行なうときに使用　2: 検出器D_1と被測定面の平均曲率半径との最適化に使用　3: 零位法による形状測定に使用

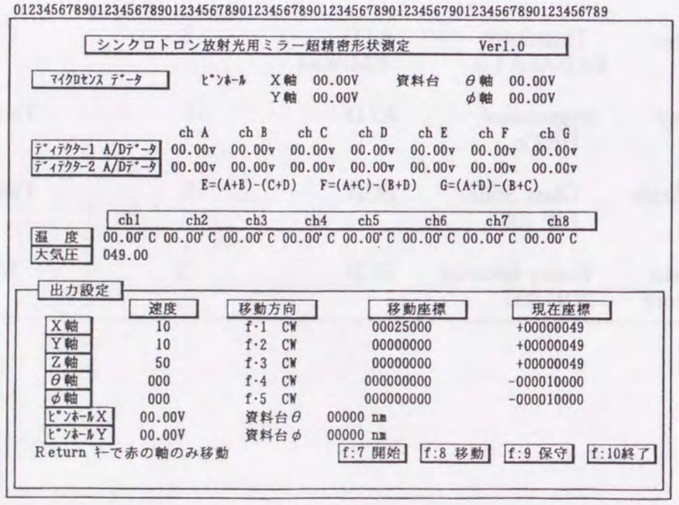


図4.12 零位法による測定時のモニター画面レイアウト

各点の法線ベクトルの方向を測定するときのθ,φ,A,B,Cの値を表示。
温湿度の表示及び検出器D_1,D_2の値を表示する。

4.6 結言

本章では、まず、入反射光路同一化による零位法を用いた凹面鏡の形状測定を行うための初期設定について検討を行った。次に、測定手順とデータ処理及び自動測定システムの検討を行った結果、次の結論を得た。

（1）入反射光路同一化の方法として、凹面鏡を使用することが有効であることが確認できた。

（2）凹面鏡の平均曲率半径と、D_1検出器から凹面鏡までの距離を一致させる方法を確立した。この作業を行うことにより、入反射光路同一化のための、各ステージの移動距離を短くでき、測定時間を短縮できる。

（3）データ処理に必要な、D_1検出器から凹面鏡までの距離を3μmの精度で測定できる。

（4）零位法による測定手順を開発した。

（5）これらの操作を測定者が行うことにより、大気が変動し、測定精度が悪化する。そのために、初期設定から零位法による法線ベクトル測定を自動化する必要がある。そこで、自動計測システムを開発した。

第4章の参考文献

(4-1) 森 勇蔵, 杉山 和久, 山内 和人, 西川 和仁, 酒井 啓至, 本郷 俊夫, 東 保男：昭和59年度精機学会春期大会学術講演会前刷 (1984) p.403

(4-2) 本郷 俊夫, 東 保男, 森 勇蔵, 杉山 和久, 山内 和人, 西川 和仁, 酒井　啓至：昭和59年度精機学会春期大会学術講演会前刷 (1984) p.405

(4-3) T.Hongo, Y.Higashi, K.Sugiyama, K.Yamauchi, K.NishikawaandK.Sakai:International Symposium on Metrogy for Quality Control in Production,Tokyo (1984) p.716

(4-4) 酒井　啓至：1984年大阪大学工学部精密工学科卒業論文

(4-5) A System for Doing Mathematics by Computer (Second Edition),Wolfram Research,Inc.

第５章　形状測定装置の性能評価

5.1 緒言

性能評価で、X,Y,Z ステージおよび２軸のゴニオメータを動かさずにおこなった法線の測定誤差は、測定時間を2時間としても2.5×10^{-7}rad以下であり、十分満足できる性能であることが分かる。このドリフトは装置全体のドリフトと考えられるため、検出器 D_i の分解能は5×10^{-8}rad程度と考えられる。本章では、X,Y,Z軸を動かして測定をおこない、本研究の目的である零位法での測定精度を評価した結果について述べる。まず、曲率半径が３m の凹面鏡を被測定面にして零位法により θ,ϕ ゴニオメータ及びX,Y,Zステージを駆動して 測定面を 10 mm メッシュで法線測定を繰り返し、測定データの再現性を検討した。次に、ミラーの中心の水平、垂直方向の法線を測定し、ミラーを 90^{o} 回転した後、同じ測定をおこなうことにより測定値の信頼性を検討した。

最後に、法線ベクトルの方向を検出する検出器 D_i とミラー測定表面までの距離を１mm ステップで移動した時の法線測定値の精度を検討した。これらの測定をおこなうことにより、零位法により自動測定したときの測定データの信頼性について検討した。

5.2 傾斜角測定値の再現性

θ,ϕ ゴニオメータ及びX,Y,Z軸を自動制御することにより、曲率半径３m に光学研磨された凹面鏡を10 mm メッシュで法線ベクトルを５回測定して、装置の再現性をチェックした。測定方法は光路長をミラーの平均曲率半径に調整し、図5.1に示すミラー上の測定ポイントの1番から順番に45番まで測定した。本測定の測定点数は45ポイントである。45ポイントを１回測定する中で、各点での測定回数は5回に設定した。測定では1秒間隔でデータを取り込んだ。測定に使用したミラーの外径は直径 100 mm 厚さ 15 mm である。ミラーの材質は溶融石英で、測定面は無コーティング面である。各ポイントで５回測定を行なった場合の θ,ϕ 方向の法線ベクトルの方向の測定結果を図5.2 に示す。縦軸は各測定ポイントでの法線ベクトルの角度ばらつきを表わし、横軸は測定位置を表わす。測定結果から5×10^{-7}rad以上の再現性を 有していることが確認できた。

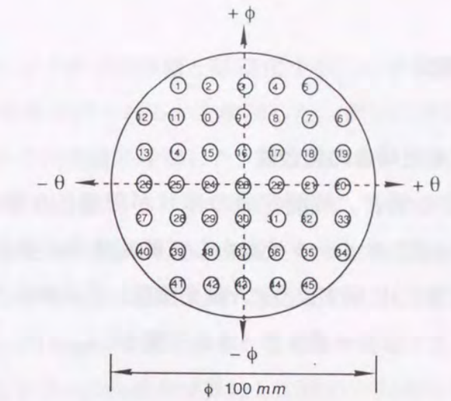


図5.1 測定ポイント

測定間隔は10mmピッチで測定

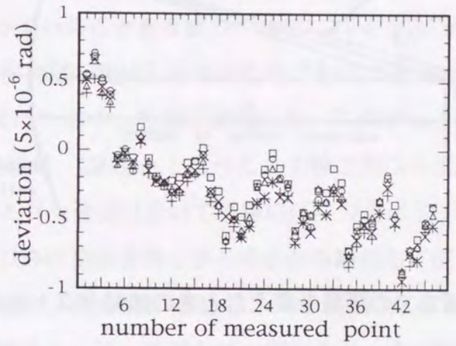


図5.2 (a)凹面測定におけるθ方向法線ベクトルの測定値の再現性

（1面45ポイントを5回測定した結果）

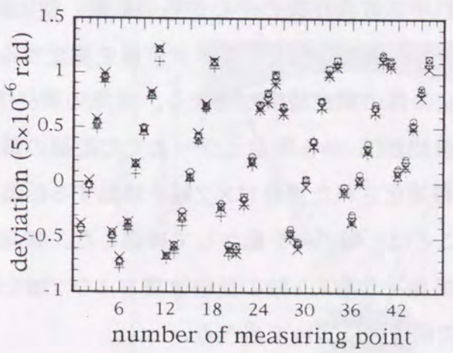


図5.2 (b)　凹面測定におけるϕ方向法線ベクトルの測定値の再現性

（1面45ポイントを5回測定した結果）

5.3 形状測定値の信頼性

5.3.1 光路長を変化させた場合の整合性

零位法で法線を測定する場合、被測定面の形状が理想的な形状からずれているとX,Y,Z ステージおよびθ,φゴニオメータを動かして測定する必要がある。その手順を以下に示す。本測定では、図5.3に示すようにY軸を移動して法線の方向を測定すると移動した距離だけ 検出器 D_1 上ではレーザスポットの位置が、

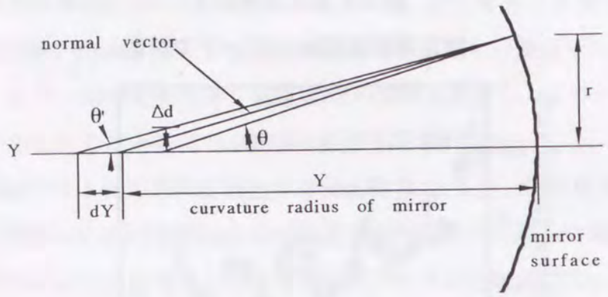


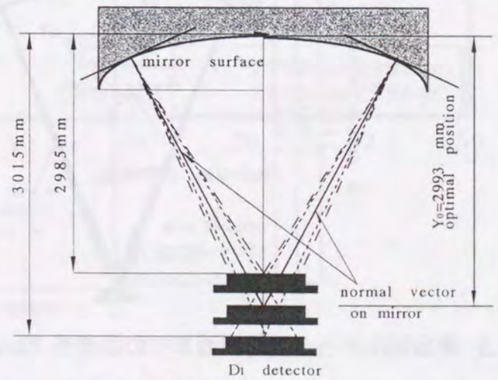
図5.3 検出器D_1と測定面までの距離を変えたときの法線ベクトルの方向の変化

$$\Delta d=\tan^{-1}(r/Y)-\tan^{-1}(R/Y+dY)\times 0.01\ (\mu m)$$

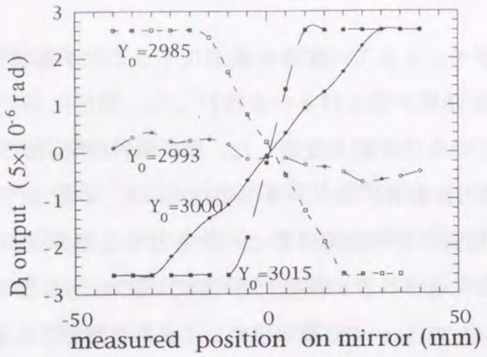
だけ変位する。この変位量は法線ベクトルの方向の変化量として上式のように表わされる。ここで、r,Y,dY はそれぞれ被測定面の中心からの距離、検出器 D_1 から測定ミラーまでの距離、および移動した距離を表わす。この変位量を測定することにより、Y 軸を所定量移動すれば法線測定の際の測定精度が決まる。実際の零位法の測定ではX,Z軸も移動する必要があるが、検出器 D_1 から測定ミラーまでの距離の最適化はY 軸を使用して行なう。 Y軸の位置が最適化された場合はX,Z軸を移動する距離を最短とすることができる。したがって、ここではY 軸のみを動かして確認した。被測定面は 3 m の凹面鏡を使用した。以下、測定準備を含めてY軸の最適位置およびY軸を最適位置からずらした場合での法線ベクトルの同値性について述べる。

光学研磨された凹面鏡の曲率半径は理想形状から数%以上ずれている可能性がある。本測定方法で測定を行なう場合、第4章で述べたように被測定面の平均的な曲率半径と、

検出器D_1 から測定ポイントまでの距離を最適化することが重要である。そこで、第4章の図4.3に示すような結果が得られるかを検討した。測定に用いた被測定面は曲率半径が約 3 m と言われている凹面鏡を使用した。図5.4(a) に検出器D_1と凹面鏡表面までの距離を変化させたときの反射光線ベクトルの変化を示す。図に示すように平均曲率半径を2993mmとする。光路長を平均曲率半径と一致させると各測定ポイントにおける法線ベクトルの方向はθ,φゴニオメータの回転だけで検出器D_1の出力を零にすることができる。そこで、光路長を2985,3015mmの位置へ移動して法線を測定した場合、それぞれのミラーからの反射光の方向はミラーの法線を境界にして逆の方向を示す。以上の関係を確認するため実験をおこなった。図5.4(b)に検出器D_1の 各距離での測定結果を示す。縦軸は各光路長における法線ベクトルの方向の変化を表わし、横軸は測定ポイントを表わす。曲率に数%の誤差を持っていることを考慮し、最初はY_0 を 3015 mm で測定をおこなった。しかし、検出器D_1 の出力は一定にならないため、3000,2985mm を測定した結果、両方の測定データの 値 がミラーの中心を境に反転した。このデータの傾きからミラーの真の曲率半径を 計算した結果、2993mmとなったので検出器D_1の位置を動かし測定を行なった。その結果結果、ミラー全面に於いて法線のばらつきは約 1.5×10^{-6}radになった。図の中で、Y_0 = 2993 mm 以外は測定点がミラー中心から離れるに従って検出器D_1 上でのビームスポット中心が移動し、測定限界を越えて一定の値になっている。Y_0 = 2993 mmで測定したデータを観察すると、データがうねっているが、この原因はミラーの表面が正しい曲率でないことを表わしている。これらの結果から、実際のミラーを自動でなおかつ零位法による測定をおこなう時の検出器D_1 から被測定面までの距離の最適化ができることを明らかにした。また、光路長を変化させた場合の法線ベクトルの方向の測定値についての整合性を明らかにした。



(a)



(b)

図5.4 検出器D_1からミラー表面までの距離の変化と検出値の関係

(a)検出器D_1から測定面までの距離Y_0を2985,2993,3000,3015mmで測定したときの反射光線ベクトルの方向

(b) Y_0を2985,2993,3000,3015mmに変化させたときの法線ベクトルの測定値

Y_0=2993mmが最適値でほぼ平均曲率半径である

次に、同じ曲率半径のミラーを使用し、検出器D_1をY軸方向に1mmステップで移動させたとき、同一測定ポイントの法線ベクトルの測定値が光路長に関係なく正確に測定できるかどうか調べた。検出器D_1からミラー表面までの距離を Y_0=2990,2991,2992 mmになるようにY軸を動かして法線ベクトルのθ,ϕ方向を測定した。Y_0=2990 mm で測定した法線ベクトルを基準にしてその他の距離で測定したデータを解析すると、5×10^{-7}radの精度で一致していることがわかった。図5.5に測定方法を示す。

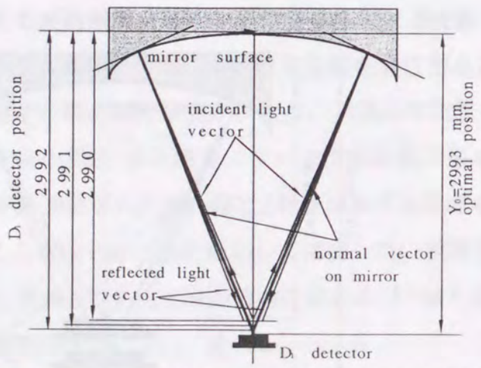
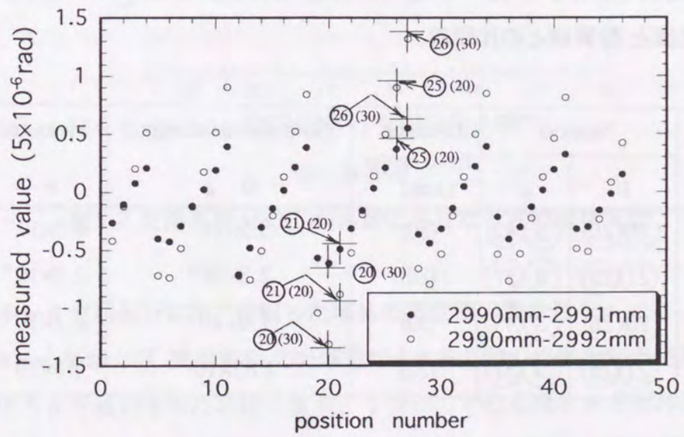


図5.5 検出器D_1からミラー表面までの距離を Y_0=2990,2991,2992 mm で測定したときの光線ベクトルの変化

図5.6 に、各距離での法線測定結果を示す。縦軸は検出器D_1からミラー測定点での距離を2990 mm で測定したミラーからの反射光の方向とY_0を2991 mm および2992 mm で測定した反射光の方向の差を、横軸は図5.1 の測定点番号を示す。図中の丸印の中の数字は測定ポイントを、括弧内の数値はミラーの中心からの距離を表わす。また、黒丸は光路長を2990mmと2991mmで法線ベクトルの方向を零位法で測定したときのXおよびZステージの移動量dxと光路長Y_0から求めた角度の差を表わし、白抜き丸は2990mmと2992mmでの角度の差を表わす。クロスラインは計算値を表わす。表5.1は、図5.5に示す測定結果と計算結果をまとめたものである。比較した測定値はミラーの中心から半径20mm,30mm の場所でのX,Zステージの移動量と光路長から求めた反射光の方向と計算値との差を示す。

以上の測定結果から、本研究の目的である被測定面の法線ベクトルの方向を5×10^{-7}rad以下の精度でX,Y,Zステージ及びθ,ϕのゴニオメータを調整しながら測定する零位法で測定が可能であることが明らかになった。



(θ方向)

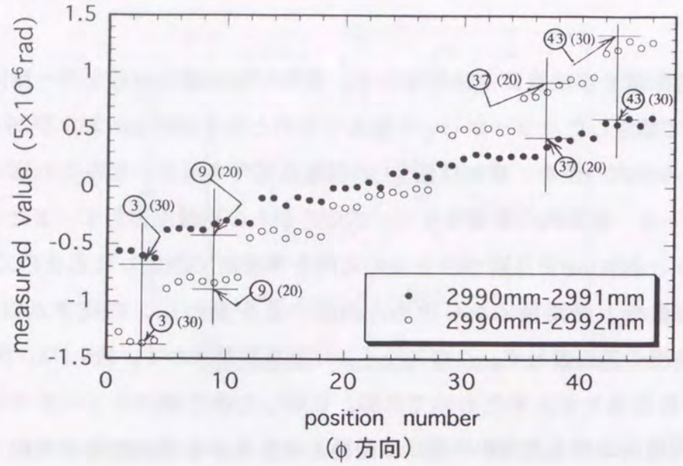
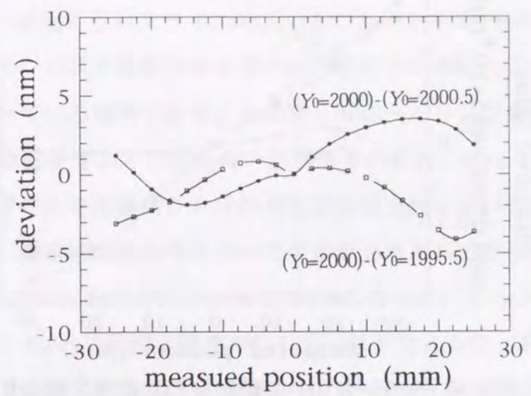


図5.6　Y_0が2990mmのときのミラーからの反射光の方向の測定値を基準にしてY_0を2991,2992mmにしたときの反射光の方向の測定値との差。黒丸は2990mmと2991mmの差。白抜き丸は2990mmと2992mmの差クロスラインは計算値、丸印の中の数値は測定場所を示す。

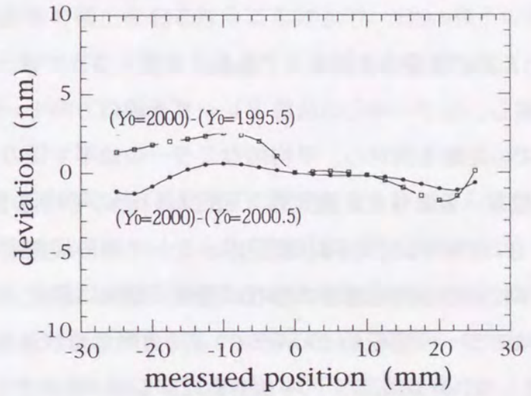
表5.1 Y_0を2990mmでのミラーからの反射光の方向と2991,2992mmでの方向の測定値と 計算値との比較表

Difference	Number		Distance from center (mm)	Caluculated value(rad)	Measured value (rad)	
Y_0 (mm)	θ	φ		θ , φ	θ	φ
2990-2991	⑳㉖	③㊸	(30)	3.5×10^{-6}	3.0×10^{-6}	3.6×10^{-6}
2990-2991	㉑㉕	⑨㊲	(20)	2.3×10^{-6}	2.3×10^{-6}	2.15×10^{-6}
2990-2992	⑳㉖	③㊸	(30)	7.0×10^{-6}	6.7×10^{-6}	6.5×10^{-6}
2990-2992	㉑㉕	⑨㊲	(20)	4.65×10^{-6}	4.5×10^{-6}	4.25×10^{-6}

図5.7 は光路長を最適値である2993mmから ± 0.5mm させたときの3回の形状測定をおこない、2993mmでの形状測定値から2992.5,2993.5mmでの形状測定値の差を A - A , B - B ライン上で表わしたものである。縦軸は測定した法線ベクトルの方向から第4章で述べたデータ処理方法により形状を求めた値の差を表わす。横軸は測定ミラーの中心からの距離を表わす。



A - A line



B - B line

図5.7 光路長を ±0.5mm 変化させたときの形状変化

5.3.2 ミラーを光軸周りに90°回転した場合の測定値の整合性

θ,φ ゴニオメータおよび 検出器D_1 の分解能がθ,ϕ 各方向の法線測定の絶対精度が一致しているかどうかを検討するために、まず、ミラーの中心を通る θ 方向および φ 方向それぞれの法線ベクトルの方向を測定し、その後ミラーを 90°回転して同じ測定を行ない、ミラー回転前後の法線測定結果を比較してθ,ϕ方向の測定確度を調べた。測定結果を図5.8 に示す。再現性は ± 5×10^{-7}radである。縦軸は各測定点における法線ベクトルの方向の測定値で、ミラー中心の法線ベクトルの方向をゼロとした。横軸は測定ミラーの中心からの距離を表わす。

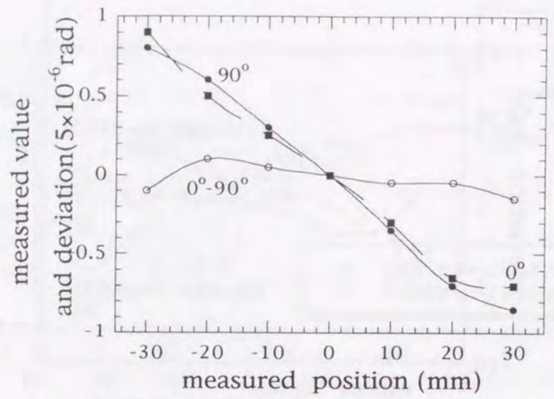


図５.８　ミラーを90°回転前後の法線測定値の比較

（水平方向（θ）で測定した後、90°回転し、垂直方向で測定）

本測定をおこなうための準備は次の通りである。まず、ゴニオメータ、X,Y,Z 移動テーブルを初期状態に戻し、ミラー中心の法線とレーザ光線の方向を一致させた後、ミラー表面から検出器までの距離を測定し、平均的なミラーの曲率半径の長さとミラー表面から検出器までの距離を一致させた。測定は３回行ないその平均値で検討した。図5.9 は回転前後の A - A、B - B ライン上の同じ測定ポイントでの形状測定値の差を表わす。縦軸は各測定ポイントにおける回転前後の形状の差を、横軸は測定ミラーの中心からの距離を表わす。黒丸はミラーの回転前のA-Aラインのθ方向の形状から回転後のB-Bラインのφ方向の形状を差し引いた値を示す。中抜き丸は回転前のB-Bラインのφ方向の形状から回転後のA-Aラインのθ方向の形状を差し引いた値を示す。

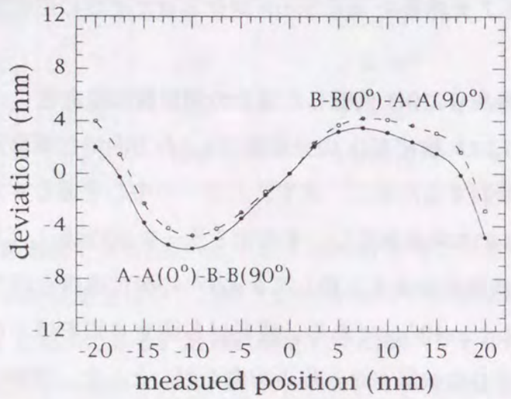


図5.9 ミラーを90°回転前後の測定偏差

測定方法は、ミラー表面にクロスラインの入ったプレートをミラーサポートリングに張り付けた。ラインのクロスする部分をミラーの中心に合わせた。この位置はちょうどレーザビームが当たっている場所である。その後、サポートリングを90度回転した。回転後のミラー中心の位置精度および回転角の精度はそれぞれ、5μm、10^{-3} rad 程度であり、この位置決め誤差による法線ベクトルの測定誤差は充分小さいことは確認したうえで測定をおこなった。測定は回転後のミラーの変形量を考慮してミラーの中心から半径20mmを測定した。測定は回転前と同じ方法で3回おこなった。データ解析はまず各々3回の測定を解析した。3回の法線測定精度が5×10^{-7}rad以下であることを確かめた後、3回の平均値を回転前後で比較した。以上の結果から、絶対形状測定誤差の大きさは±5nmである。図5.9の誤差分布から機差や、披測定物の試料台への固定方法を考慮した法線ベクトルの方向の測定値の補正をおこなうことにより、±2nm以下の絶対測定精度で形状測定をおこなうことができる可能性があることが明らかになった。

5.4 結言

本章では、本研究の目的である零位法での測定精度を評価した結果について述べた。直径100mmで、曲率半径3mの無コーティング凹面鏡を測定対称物として、まず、装置の再現性をチェックした。次に、光路長を変化させた場合の測定値の整合性を調べた。また、法線ベクトル測定値の信頼性を明らかにするため、ミラーを光軸回りに90度回転した場合の測定値の整合性を調べた。その結果、以下の結論を得た。

（１）10mmメッシュで法線ベクトルを5回測定した結果、各測定ポイントでの測定値のばらつきは、5×10^{-7}rad以下であった。

（２）検出器D_1からミラー表面までの距離を、2990,2991及び2992mmで法線ベクトルを測定した値と計算値を比較した結果、5×10^{-7}rad以下の精度で一致した。

（３）光軸回りに90度回転した場合の測定値の整合性を調べた結果、絶対形状測定誤差の大きさは±5nmである。測定誤差分布から誤差の要因として、機差が考えられ、測定値を補正することにより、±2nm以下の絶対測定精度で形状測定できる可能性がある。

第６章　紫外線集光用ミラーの形状測定結果

6.1 緒言

第５章で述べたように、製作した測定装置は、5×10^{-7} radの法線ベクトルを測定することが可能であることを実証した。また、凹面鏡の曲率半径を10^{-6}の精度で測定できることも実証した。これらの結果から、本装置は測定法の理論解析による予測と同等の測定分解能を有していることが明らかになった。

本章では、本研究の目的であるシンクロトロン放射光用集光ミラー用の凹面鏡の形状測定を行った結果を述べる。まず、紫外線および軟X線に用いられるミラーの仕様について述べる。次に、開発した形状測定装置を使用して、紫外線集光用ミラーとして使用可能な凹面鏡の形状を測定した結果について述べる。測定したミラーは2枚で、その曲率半径は公称値が2 mおよび3 mである。測定した各ミラーの法線ベクトルから、形状を求めた後、本測定による平均的曲率半径を計算し、公称曲率半径からの偏差を求めた。また、曲率半径が公称値3 mのミラーについては、平行光が垂直入射し、反射した時の光線追跡を行った結果についても述べる。

本測定による測定結果の妥当性について検討を行う上で、他の方法で測定した測定結果と比較検討することは有効である。干渉法による測定は基準面がλ／50としても10 nm程度の分解能である。また、基準面の絶対精度は明らかでなく本測定値との比較はできない。松下電器産業（株）で開発された原子間プローブを搭載した三次元測定装置は、測定精度が、本測定方法と同程度と言われている。よって、曲率半径が2 mの凹面鏡を原子間プローブ搭載の三次元測定装置と本測定法である傾斜角積分型形状測定装置で測定し、測定結果の比較検討を行った。

6.2 紫外線集光用ミラーの仕様

紫外線集光用ミラーとして第１章で述べた、凹面鏡と凹面回折格子を用いた瀬谷-波岡型分光器で使用される凹面鏡の形状について検討する。凹面鏡の形状を検討するにあたって、凹面鏡と回折格子の配置は理想的であるとする。また、光源、回折格子の曲率半径も理論値とする。凹面鏡の曲率半径が結像状態に与える影響は既に述べたが、具体的に曲率誤差を用いて検討する。

Appendix 2 の図1 に示した分光器を例に検討する。まず、Appendix 2の式 (4) を使用して回折格子への入射角および回折角を計算する。ここで使用する光は一次光を考え、

$\lambda = 800$ Å, $ss = 0.4166$ μm, $m = 1$

とすると、Appendix 2 の図1 の回折格子の入射角 α、回折角 β はそれぞれ41.733 , 28.267 °になる。次に、凹面鏡の曲率半径が理想値よりずれていたとすると、結像位置での変位及びコマ収差がどう変化するかをAppendix 2 の(11)、(12) 式を使用して計算する。凹面鏡の曲率が ± 100 mmずれたとして以下の数値を用いて計算する。記号はAppendix 2 の図1 から引用した。

$D = 3123$ mm　　$\varphi = 35^\circ$

$\rho = 5600 \pm 100$ mm　　$R = 998.8$ mm

$\theta = 42.5^\circ$　　$\alpha = 41.733^\circ$

$\beta = 28.267^\circ$

計算結果を図6.1 に示す。図から± 10 mm 以下の偏差だと結像位置及びコマ収差がほとんど現れない。この値は平均的な値ではなく凹面鏡の各反射点での絶対値でなければならない。したがって、凹面鏡の曲率半径の精度は± 0.1 %の精度が必要であることが明らかである。また、凹面鏡の法線ベクトルの精度は各点において$\pm5\times10^{-6}$ rad以下でなければならない。

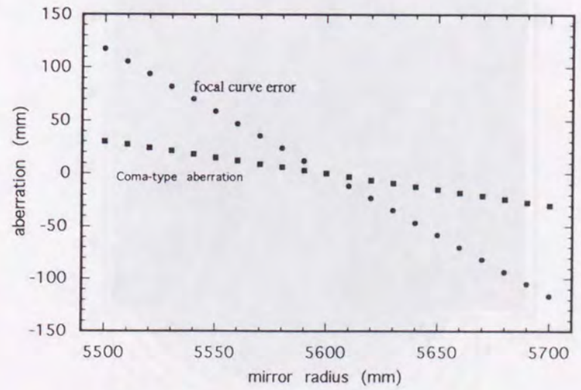


図6.1　紫外線領域における球面ミラーに必要な精度

既に述べたような、凹面鏡と凹面回折格子を用いた分光器では曲率半径が2～7 mの凹面鏡が使用されている。そこで、本章では曲率半径が約 2 m および3 m の凹面鏡を測定する。

6.3 形状測定結果

公称曲率半径が2 m 及び3 m の凹面ミラーの測定を零位法により測定した。ミラーの材質は溶融石英で、測定後 NC EEM が可能なように無コーテングのミラーを使用した。

測定はまず2 m のミラーについて行った．測定回数は 5 回で、解析に使用する法線ベクトルおよびX, Zステージの移動距離は1秒間隔で 5 回測定した値の平均値を用いた。測定環境は 3 日前から総ての電源をオンにし、ミラーをセットした後、測定機各部の温度をモニターしながら、温度変化が0.01°／30 min 程度に収まってから初期設定を開始した。測定前にミラー表面をアルコールで超音波洗浄を行った。ミラーセットから温度が一定になるまで約 2 日かかった。まず光学系のX, Y, Zステージのならし運転を行うため2～3 回測定を行い、その後初期設定を行い、本番の測定を開始した。ミラーの大きさは直径100 mmで 5 mmピッチで測定した。測定時間は2 m, 3 mのミラーとも30分／回であった。

6.3.1 公称半径2m のミラー

図6.2 に50 × 50 mm の範囲で測定した法線ベクトルから面形状に変換した後の等高線図を示す。また、図6.3 にその鳥瞰図を示す。

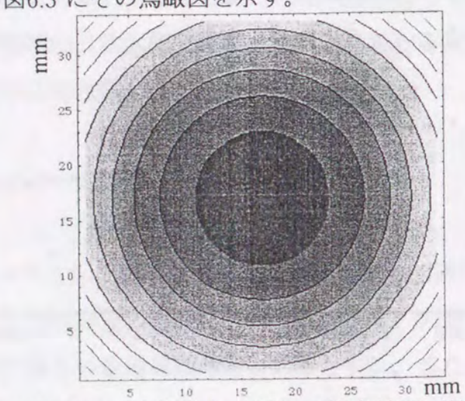


図6.2 公称 2 m のミラーを測定した結果の等高線図（等高線間隔： 26μm）

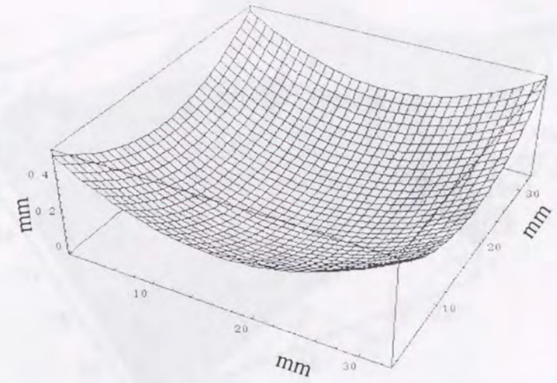


図6.3 鳥瞰図

次に、平均的な曲率半径を計算した結果、1987.453 mmであった。図6.4 及び図6.5 に理想曲率半径1987.453 mmからの形状偏差を等高線図及び鳥瞰図を示す。図からわかるように、± 50 nm の偏差があることがわかった。

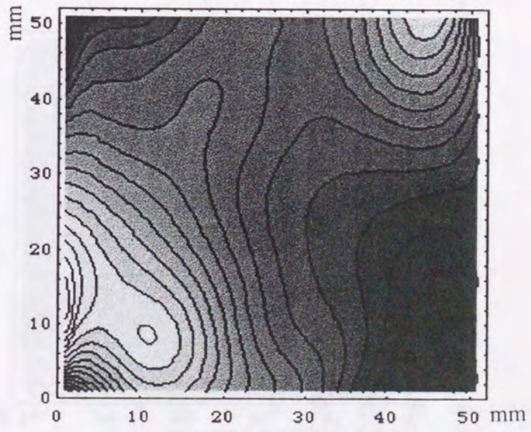


図6.4 理想曲率半径1987.453 mm からの偏差の等高線図（等高線間隔：9 nm）

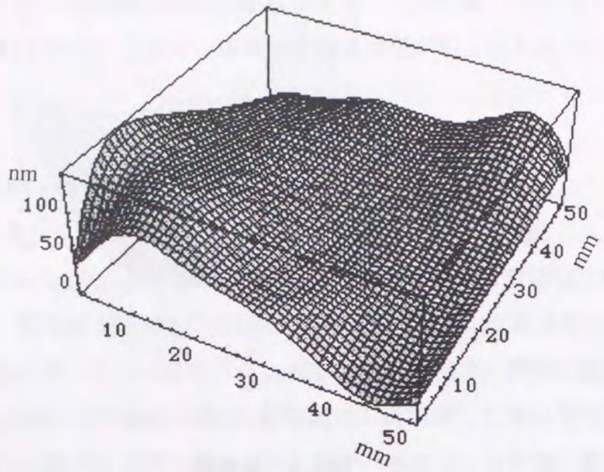


図6.5　理想曲率半径1987.453 mm からの偏差を表わした鳥瞰図

6.3.2 公称曲率半径3 m のミラーの形状測定

図6.6 に50 × 50 mm の範囲で測定した法線ベクトルから面形状に変換した後の等高線図を示す。また、図6.8 はその鳥瞰図を示す。

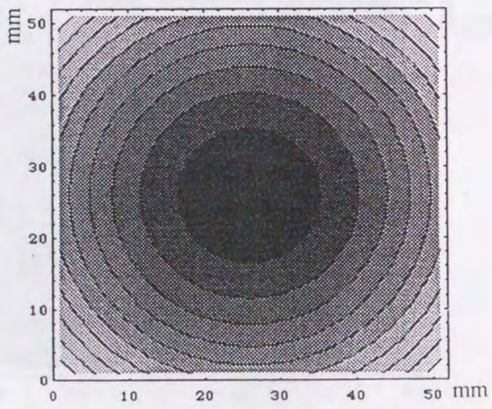


図6.6　公称曲率半径３mのミラー測定結果の等高線図（等高線間隔：　17μm　）

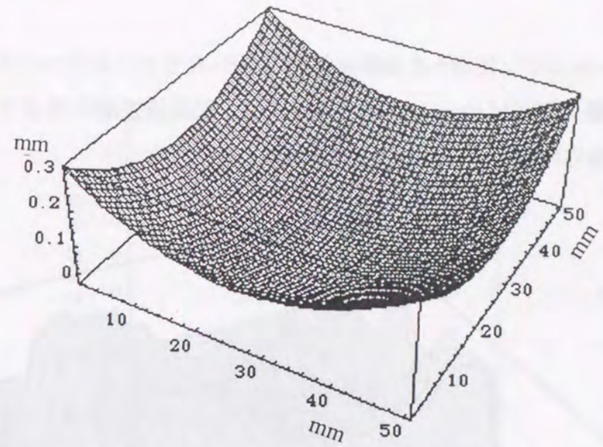
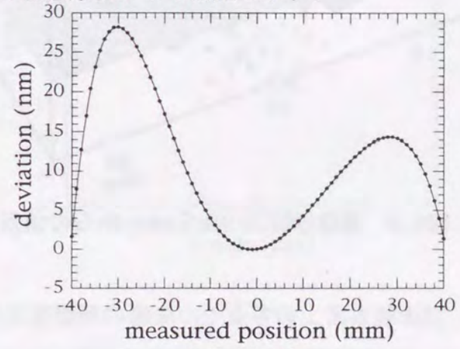
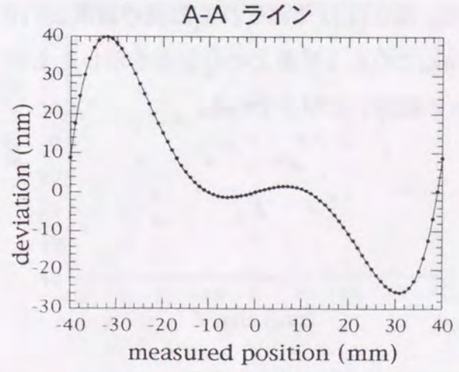


図6.7　公称曲率半径3mのミラー測定結果の鳥瞰図

図6.8 は平均的曲率半径を計算した結果、2994.5 mであった。そのときのA - Aライン及びB - B ライン上の理想形状からの偏差を示す。



A-A ライン



B-B ライン

図6.8　A-A, B-B ライン上での理想曲面2994.5 mm からの偏差

図6.8 より、A - A ラインに沿った曲率半径の方がB - B ラインに沿った半径より小さく、理想球面からの最大偏差は40 nmである。図6.9 は、凹面鏡表面の各点での理想球面（R = 2994.5 mm）からの偏差を示したものである。

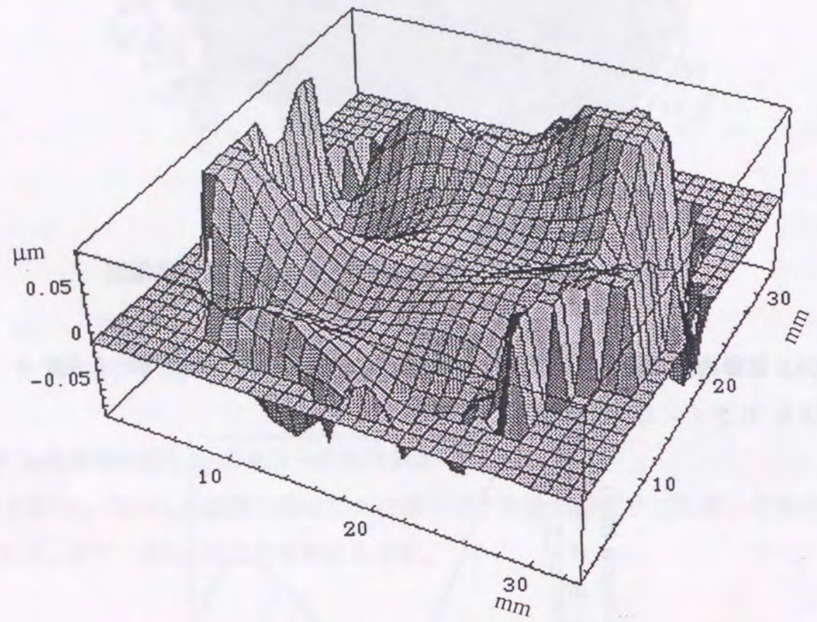
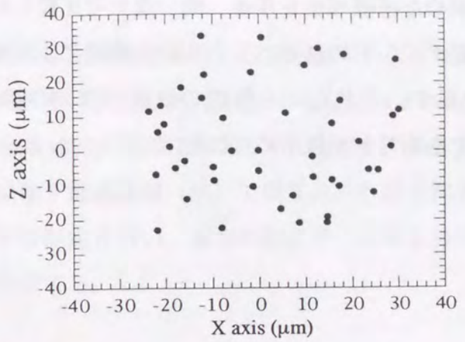
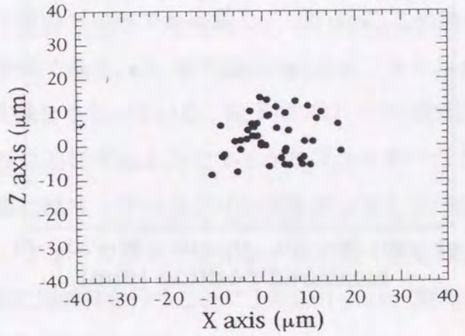


図6.9　理想球面2998.5 mm からの偏差

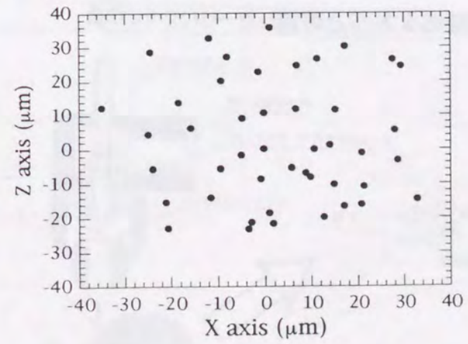
凹面鏡の結像性能は、凹面鏡表面上の各点での法線の理想球面の法線からの偏差に依存していると考えられる。図6.11 はそれぞれ凹面鏡の表面上の各点での法線方向と、Y = 2992、2994.5、2997 mmでのX, Z平面上での分布を示したものである。これらの平面と法線との交点は30 μm の範囲に広がっている。



Y = 299 2 mm



Y = 2994.5 mm



Y = 2997 mm

図6.10　ミラーで反射した光線のY = 2992、2994.5、2997 mm における X, Z平面上での分布

これらのデータの信頼性と正確さを確かめるため、測定した法線ベクトルとスプライン関数により補間して求めた法線ベクトルを、同一点上で比較した。その結果を図6.11に示す。この図は各測定ポイントの法線ベクトルから補間により求めた各点の法線ベクトルを差し引いた値を示す。これらの２種類の法線ベクトルのデータの差は各点で5×10^{-9} rad／80 mm 以内であることが確かめられた。

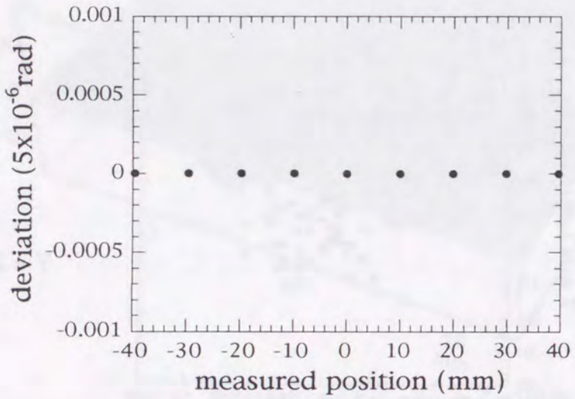


図6.11　最小自乗法を用いてスプライン関数による法線ベクトルの補間値と測定した法線ベクトルとの差

6.4 原子間力プローブ搭載超高精度三次元測定機による測定結果との比較

光路の安定性を利用した本測定機により公称曲率半径 2 m および3 m の凹面ミラーを測定した結果、平均曲率半径が1998.453 mmおよび2994.5 mmとなった。測定誤差の伝播解析から、± 5 nm 程度の絶対精度で測定されたと思われる。しかしその確証は得られない。そこで本節では松下電器産業（株）で開発された原子間力プローブ搭載超高精度三次元測定機による形状測定を行い、双方の測定データを比較することにより本研究の測定方法の妥当性を検討する。

6.4.1 原子間力プローブ搭載超高精度三次元測定機の原理

測定に使用した測定機は、松下電器産業（株）社製 UA3P-5 である。本測定機は図6.13に示すような原子間力プローブを搭載し、200 mmの広範囲に渡って、0.01 μm の測定精度を実現した測定機である。X, Y 平面の決定はオプチカルフラット面を基準とし、座標測定はレーザ測長機をもちいている。原子間プローブの詳細は、ダイヤモンドプローブを被測定物のうねりに追従するようにマイクロスライダーが上下する機構になっている。スライダーの上部にはマイクロスプリングを介してミラーが取付けてあり、ミラーの上下による変位を、フォーカスサーボ用レーザと微小変位検出器により検出し、Z軸測長用レーザの測定値に加減算を行うことにより0.01 μm のZ軸測定精度を達成している。表6.1 に使用した測定機の仕様を示す。

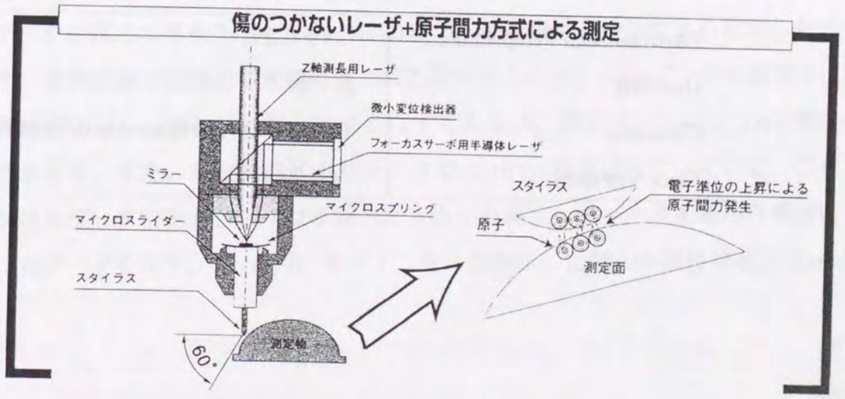


図6.11　原子間力方式によるＺ軸の測定方法の概念図

表6.1　使用した測定機 UAP 3P-5 の仕様

Measuring Region	200(X) × 200(Y) × 45(Z) mm
Positioning	He-Ne LASER $\Delta\lambda < 10^{-9}$
Probe	Atomic Force Senser (ϕ = 2μm Diamond)
Maximum measured Surface Angle	60^{o}
Probing resolution	0.01~0.05 μm at measured surface angle < 30 degree
X,Y Axis positioning error	0.05 μm in 100 × 100 mm region
Measuring Speed	0~6 mm/sec

6.4.2 原子間プローブ搭載超高精度三次元測定機での測定結果

公称曲率半径2000 mm、直径100 mmの凹面鏡を測定した。測定範囲は50 mm角とし、測定ポイントは1 mmピッチで測定スピードは4 mm／secで行った。図6.13 に測定方向を示す。測定環境を表6.2 に示す。特に測定温度は傾斜角積分型測定法で測定する温度と±0.3 ℃以下に合わせ、熱膨張による測定物の変形の差をなくした。

表6.2　公称2000 mmの凹面鏡の測定環境

Environmental Temperature	23 ± 0.2°C
Humidity	36 ~ 67 %
Cleanness	Class 10000 (particles size 0.5 μm)
Floor Vibration	< 0.2 cm/s^2

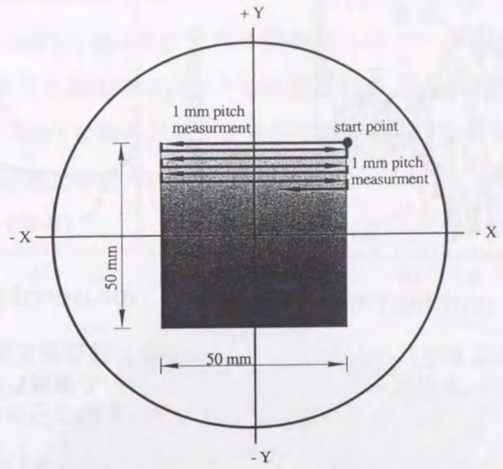
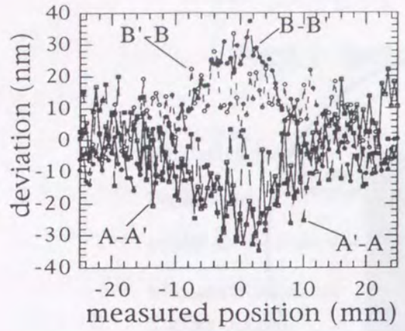


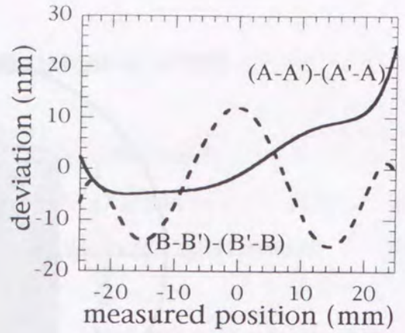
図6.13　50 mm角の面測定の測定方向

表6.2 に示す測定環境で試料を測定機上にセットし2時間放置した後、測定を開始した。測定は2種類行った。まず、A - A、B - B ライン上での測定を行った後、50 mm角の面を1 mmピッチで4回測定した。測定データは測定機に搭載されているソフトウエアーのベストフィット・プログラムにより計算した結果を表している。

図6.14 にA - A, B - B ライン上で測定した結果を示す。横軸は測定位置を、横軸は曲率半径1987.396mmからの偏差量を表わす。(a) は、ライン上を往復して測定した結果を(a-1)、(a-2)は、それらのデータを最小自乗法により補間したデータを示す。往復測定での同一位置における測定値の差は±10 nm程度ばらついている。(b)は、一回の測定におけるデータのばらつきを(b-1)に示し、(b-2)は、(b-1)を最小自乗法により補間したデータを示す。被測定面は超精密に光学研磨された面であるので、1 mmピッチの測定では隣接する測定値のばらつきは1 nm以下であるはずであるが、測定データは ± 5 nm 程度のばらつきがある。また、測定方向によりデータが ±10 nm程度ばらついている。これらのデータは生データであり、(c) は4回一定方向から測定したデータを最小自乗法により補間したデータを示す。A - A, B - B ラインを4回測定した時の再現性は最大32 nmであった。

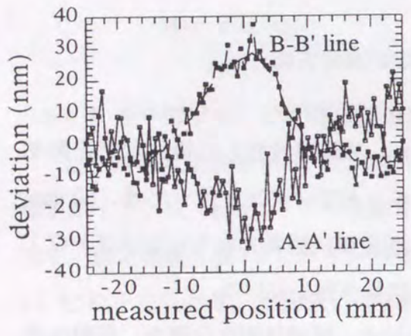


（a-1）往復測定したときのデータのばらつき

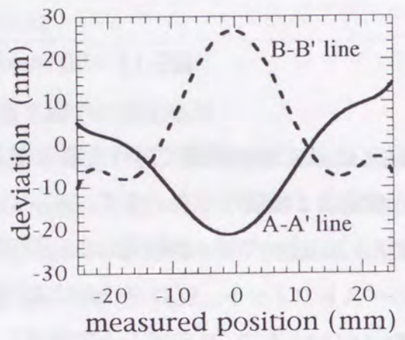


（a-2）往復測定間の差を最小自乗法で補間したデータ

（a）往復測定したときのデータのばらつき

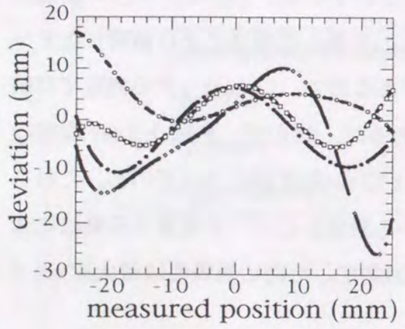


（b-1）測定データ

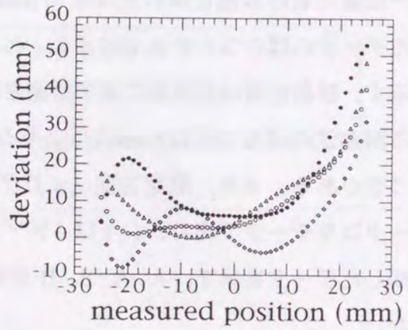


（b-2）測定データを最小自乗法で補間したデータ

（b）隣接する測定ポイントでのデータのばらつき



（c-1）A - A ライン

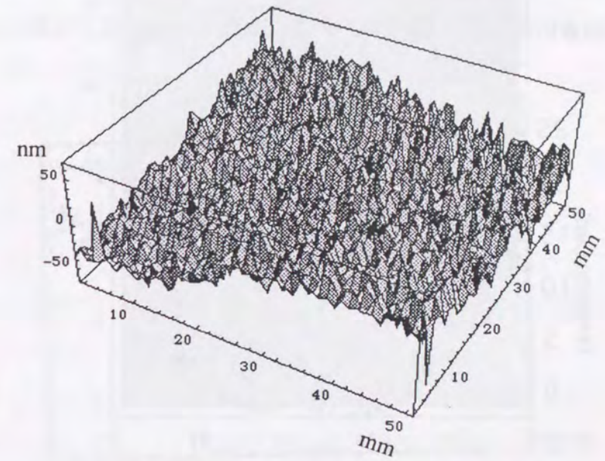


（c-2）B - B ライン

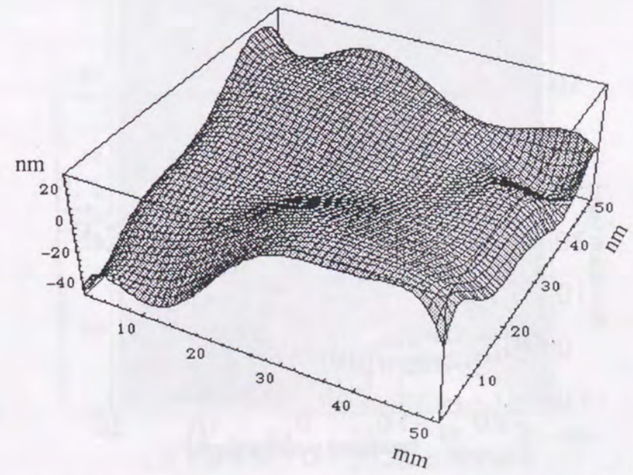
（c）A - A,B - Bライン上を測定した時の再現性

図6.14　A - A , B - B ライン上を測定した時のデータのばらつきと再現性

図6.15は50 mm角の面を1 mmピッチで４回測定したデータの平均値を曲率半径1987.396 mmの理想面からの偏差をプロットした図である。(a)は測定値の生データをプロットした図を表し、(b)は筆者が最小自乗法により補間した値をプロットした図である。理想曲率面からの偏差は最大40 nmであった。



（a）測定生データの理想面からの偏差

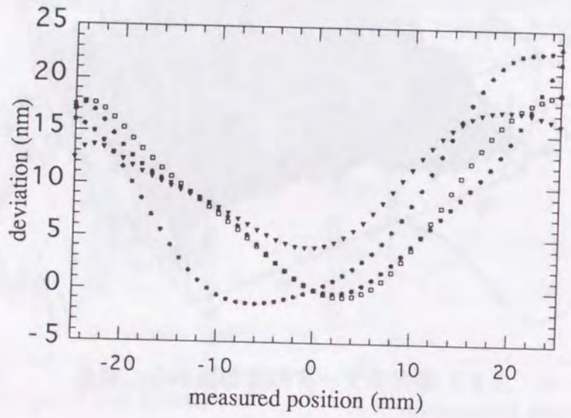


（b）測定データを最小自乗法により補間した時の偏差

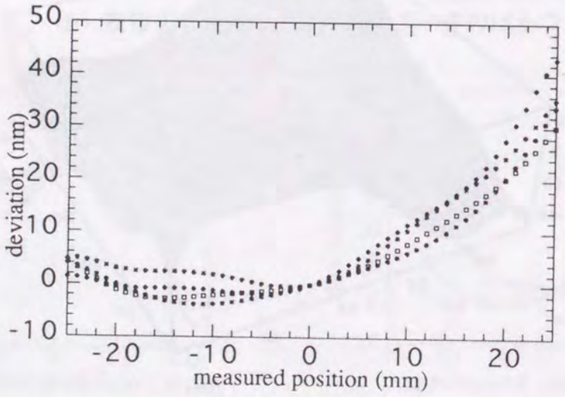
図6.15　理想曲率半径1987.396 mm からの偏差

6.4.3 測定精度の評価

図6.16 は同じ試料を傾斜角測定法による A - A, B - B ラインを４回測定し、原子間プローブを用いた測定の時と同じ理想曲率半径からの偏差の再現性を表した図である。原子間プローブを用いた測定では再現性が32 nm であったが、傾斜角測定法では8 nmであった。また、両者の測定値の整合性を比較すると ± 10 nm 以下であった。



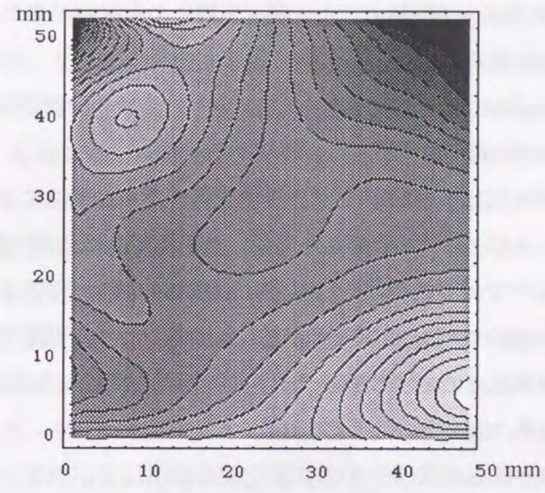
A - A ライン



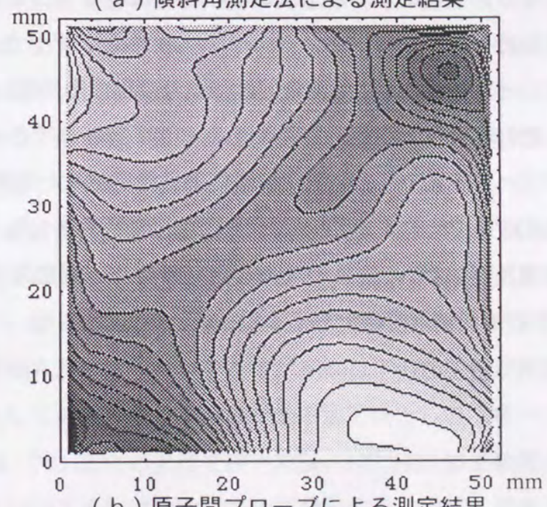
B - B ライン

図6.16　傾斜角測定法による A - A, B - B ライン測定値の再現性

図6.17 は、両者で測定した結果を理想曲率半径1987.396 mmからの偏差を等高線図で表わした図である。(a) は本研究で開発した傾斜角積分型測定法、(b) は原子間プローブを用いた測定結果を表す。等高線間隔は約3 nmを表している。両者の形状の差はおよそ20 nmである。



(a) 傾斜角測定法による測定結果



(b) 原子間プローブによる測定結果

図6.17　原子間プローブによる測定と傾斜角測定法による公称2000 mmの曲率半径のミラーを測定した結果の比較（1987.396 mmからの偏差）

6.5 結言

本章では、まず、紫外線及び軟Ｘ線に用いられるミラーの仕様について検討した。次に、開発した形状測定装置を使用して、紫外線集光用ミラーとして使用可能な凹面鏡の形状測定を行い、測定結果について検討した。また、本測定による測定結果の妥当性について、原子間プローブ搭載の三次元測定装置による測定結果と比較検討した。その結果、以下の結論が得られた。

（1）直径100mmのミラーを2mmピッチで測定したときの、測定時間は40分であった。また、測定の再現性は5×10^{-7}rad以下であった。

（2）公称曲率半径2m及び3mのミラーを測定し、最小自乗法によるスプライン関数を用いてミラー形状を計算した結果、最も理想曲面に近い曲率半径は、2m及び3mのミラーで、それぞれ、1987.453及び2998.500mmであった。

（3）測定した法線ベクトルを最小自乗法によるスプライン関数を用いて補間したデータからの測定点における法線ベクトルの値と、測定した法線ベクトルの値を比較した結果、5×10^{-8}rad以下であった。

（4）公称曲率半径3mのミラーの形状測定値を使用して、ミラーへ平行光を入射し、反射した光のレイトレースを行った結果、A-Aライン及びB-Bライン方向の集光点におけるビームの広がりは、それぞれ、20,35μmであった。

（5）原子間プローブ搭載の三次元測定装置により公称曲率半径2mのミラーを測定した結果、最も理想曲面に近い曲率半径は、1987.396mmであった。

（6）原子間プローブ搭載の三次元測定装置による測定結果と本測定原理及び測定方法での測定結果を比較すると、絶対値で20nmの差があった。

以上の測定結果及び、4章の結果から、本測定原理及び測定方法が当初の目的である50nm/100mm以下の形状精度で測定できることがわかった。

第７章　数値制御EEMによる紫外線集光用ミラーの製作とその形状精度

7.1 緒言

数値制御 EEM[7-1), (7-2)]（NC EEM と呼ぶ）は EEM の原理を応用しそれを NC 化することによって任意形状の加工を可能にしたものである。EEM とは、0.1 μm 以下の微細粉末粒子を何らかの方法で加工対象となる材料表面に供給し、このときに相互に接触した非常に狭い（数十 Å 程度の）領域で一種の原子間結合を発生させ、加工対象物表面の原子を除去していくものである。これより、加工に用いる微細粉末粒子はその材質が加工対象となる表面原子との反応性に富むものであり、しかも接触時に形成された界面が強固であり同時に加工対象物原子の母材側との結合の開放に対して促進的であるような物性を持つものが採用される。加工域は、粉末粒子と加工物対象表面の接触した非常に狭い領域中のさらに理想的に界面が形成された領域に限られることから、その単位は原子のオーダに近づき、それゆえ加工面の平坦性に関しても原子オーダの精度（タリステップ等による測定によれば5 Å Rmax 以下）で加工を行うことができる。NC 化への技術としては、微細粉末粒子を懸濁させた液中で低弾性体であるポリウレタンゴム球を回転させたときの流れによって微細粉末粒子の供給を行う加工ヘッドが開発されている。これによれば、粉末粒子の供給を加工物表面上で位置的に制限することが可能となり、加工対象域全域を各点で所定量（ミラー加工の場合は前加工面と目的形状の偏差分）の加工を行いながら走査することにより任意形状の EEM を可能にしている。

本研究で開発した傾斜角測定法による超精密形状測定機を用いて凹面鏡を測定した結果、原子間プローブを利用した測定機と同等あるいはより高精度に形状測定が可能であることを述べてきた。測定結果から、50 × 50 mm角の面積において± 5 nmの絶対値測定が可能であることが明らかになった。そこで、5 nm以下の加工量が制御可能で、尚且つＸ線用反射ミラーとしての表面粗さを達成できる加工法としては唯一 NC EEM 以外見当たらない。本章では、NC EEM の原理を述べた後、NC EEM 加工装置の概要及びそれを使用して表面粗さ及び加工量制御特性について検討する。次に、前章で測定した公称曲率半径2000 mmの凹面ミラーを使用して、理想曲率半径1987.396 mmからの偏差分を NC EEM により加工し、傾斜角測定法により加工後の形状を測定し、NC EEM の放射光用ミラーの加工に対する精度を検討する。

7.2 NC EEMの原理

図7.1 に示すように、微細粉末粒子を水に一様に分散させた懸濁液の中で、ポリウレタン回転球を工作物表面に近づけ、そのときに生じる回転球と工作物間の流体軸受け的流れを用いて液中の粉末粒子を工作物表面に安定に到達させ、微小面積でのEEMを可能にしている。NC EEMでは、その微小な加工領域を制御理論(7-3), (7-4), (7-5), (7-6), (7-7)に基づいて、加工物表面を順次走査し、工作物表面の各点における加工量が各点の取り代に等しくなるように計算、制御することにより実現する。

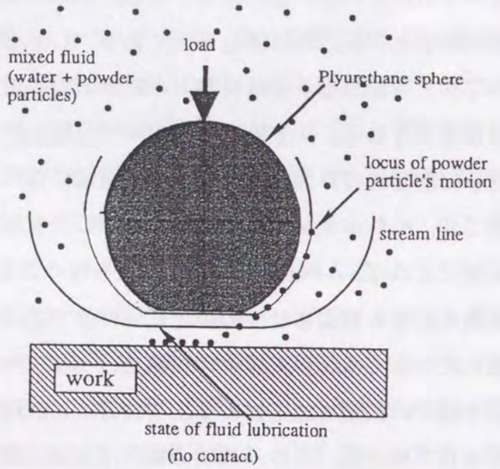


図7.1 EEM加工の模式図

NC EEMの原理は、大阪大学で既に理論解析およびその妥当性が実験で確かめられている。(7-3), (7-4), (7-5), (7-6), (7-7)したがって、ここでは制御理論については述べない。NC EEM加工に於いて、ポリウレタンと加工物表面のすきまは荷重と流体の動圧との釣り合いによって自動的に保たれ、流れの状態と粉末粒子の分散状態が安定であれば、単位時間当りの作用粉末数も安定となり、単位時間当りの加工量も安定となる。それゆえ、任意の位置での加工量はポリウレタン球の加工物表面での滞留時間又は送り速度によって制御することができる。この制御を行いながら、ポリウレタン球で加工対象物全域を走査することにより任意曲面の高精度な創成が可能となる。本加工ではポリウレタン球の送り速度を加工量制御のための変数として使用する。

7.2.1 NC EEM 加工装置

加工装置概略図を図7.2 に、図7.3に加工装置の写真を示す。EEMを生じさせるために、回転球と工作物間の流体軸受的流れが利用されるが、粉末による工作物表面の引っかきを防止するには、常に粉末粒径以上の流体膜厚の保持が必要である。そこで、そのような条件を広範囲で設定できるように、球の回転用に無段変速モータを用い、スピンドルはエアー軸受けを採用した。また、加工荷重及び回転球は任意のものが使用できる。本研究では回転球としてポリウレタンゴムを耐水性及び弾性率の点から使用している。加工ヘッド部は工作物表面の凹凸にならうように、十字バネを介してNC工作機械主軸頭に取付けている。

次に、加工現象の安定性が重要であるため、NC EEM装置全体をクリーンルーム（クラス10000）に設置し、加工液を23 ± 0.1°Cに温度制御した。

加工量および加工幅はタリステップ（テーラーホブソン社製）で測定し、形状は本研究で開発した傾斜角測定法を用いて測定した。

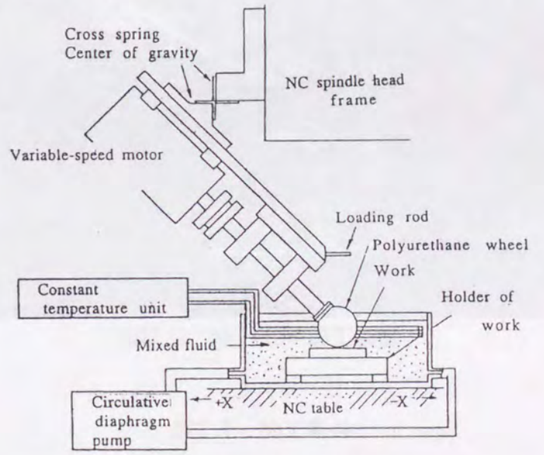


図7.2 加工装置概略図

数値制御加工を行うには、加工量および加工領域が一定の加工条件で安定していることが必要である。そこで、これら加工現象の安定性について検討する。

加工現象の安定性を検討するための加工条件を表7.1 に示す。加工量（加工痕最大深さ）と送り速度との関係を図7.4 に示す。ここで送り速度はX軸方向（ポリウレタン回転方向と直角方向）の送り速度である。Y軸送り（ポリウレタン回転方向と平行）は

0.02 mm と一定にしている。これより、加工量は送り速度と良好な関係を持ち、送り速度と加工深さは双曲線で表され、これは加工量制御理論と一致している。送り速度が20 mm／min での加工量は0.5 nm ± 0.2 nmであり、送り速度を制御することで加工量を1 nm の精度で選択しうることがわかる。また、送り速度5, 10, 15及び20 mm／min での加工を30時間行った後、5 mm／min での加工を再度行い再現性を検討した結果、1 nmの再現性を確認した。

次に、図7.5 より、加工幅は送り速度には依存せずほぼ一定であり、加工量が多くなっても、加工領域は同一形状を保つことがわかる。

以上より、本加工法は加工量制御理論に最も必要な加工現象の長期間安定性を満足しており実験結果から1 nm 以下の加工精度が得られることを確認した。

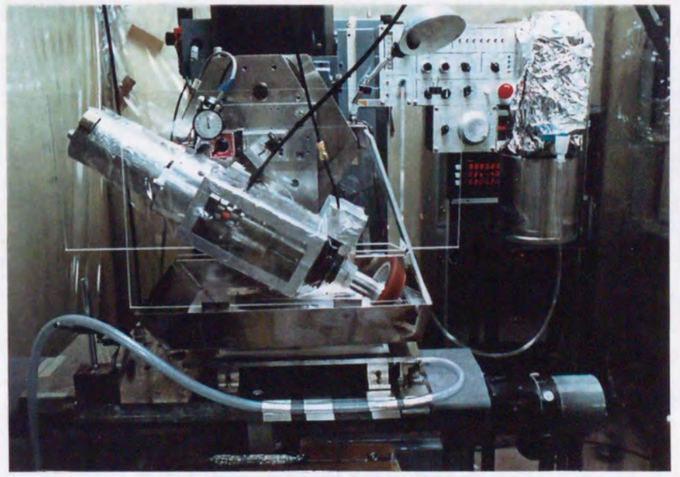


図7.3　NC EEM 加工装置

表7.1　加工条件

Workpiece	Fused Quartz
Powder Particle	SiO_2　0.12μm (10.0 Wt％)
Load	1000 gw
Rotating Speed	350 rpm
Diameter Polyurethane	150 mm
Saphere	
Constant Temperature	23 ℃
Scanning Speed	5, 10, 15, 20 mm/min
Stroke (Y direction)	20 μm

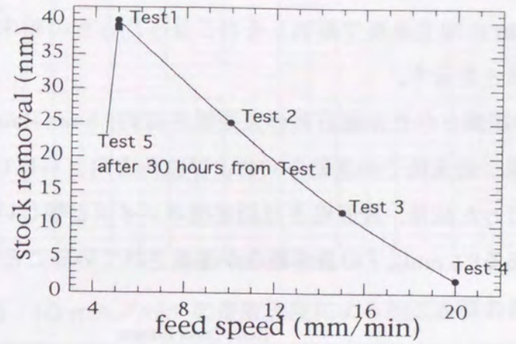


図7.4　送り速度による加工量の変化

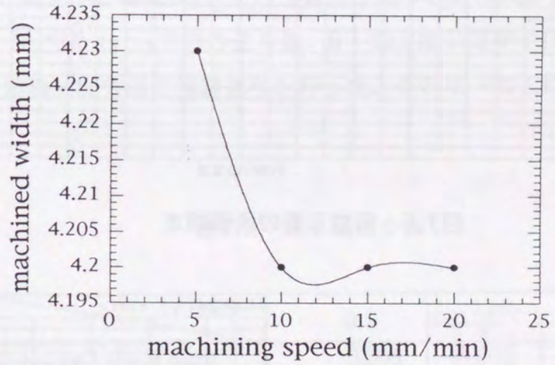


図7.5　加工幅におよぼす送り速度の影響

次に、加工面表面粗さについて測定を行った。測定にはタリステップを用い、加工前、スポット加工及び0.02 mmピッチで走査し、面加工を行った加工面を測定した。図7.6 は加工前表面粗さを示す。図7.7はスポット加工を行ったときの粉末粒子の運動方向及び直角方向の表面粗さを示す。スポット加工時の加工痕の大きさを干渉計を用いて測定した結果、4.2 mm であった。紫外線用集光用ミラーを加工する場合、加工によってうねりが発生すると集光特性が悪化する。数値制御加工を行う場合、加工装置を工作物全面で走査するが、その時のX方向への送り速度の変化、y方向へのストロークΔyの値によっ

ては、加工面にうねりの生成される可能性がある。そこで、図7.8 に示すように、X方向へは10 mm／minで連続送りを行い、y方向へのストロークΔyによるうねりの生成を測定した．10 mm／min の加工速度で面加工をおこなったときの粉末粒子の運動方向および直角方向の表面粗さを示す。

図7.6, 7, 8 から光学研磨された溶融石英の表面粗さは約1.5 nm RmaX でる。その面をスポット加工した結果、粉末粒子の運動方向および直角方向ともに1 nm Rmax 以下である。また、面加工を行った結果、表面粗さは測定機のノイズと等しい結果となり、タリステップの分解能である0.5 nm以下の表面粗さが達成されていることがわかる。

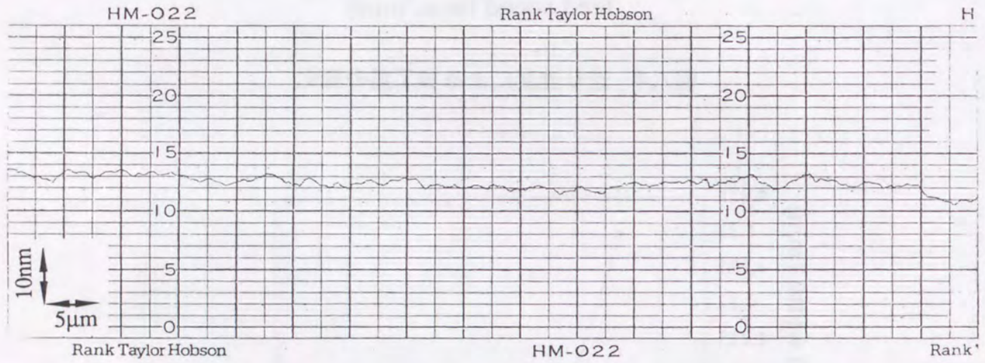
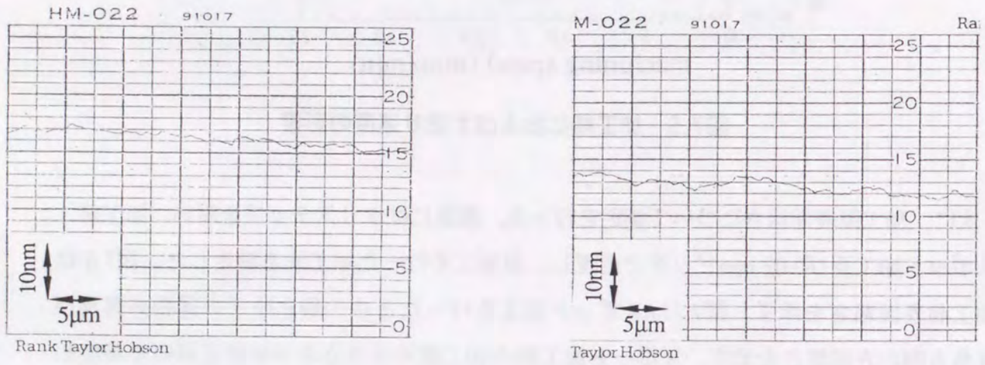


図7.6　前加工面の表面粗さ



(a) 粉末粒子の運動方向　　(b) 粉末粒子の運動方向と直角方向

図7.7　スポット加工表面の表面粗さ

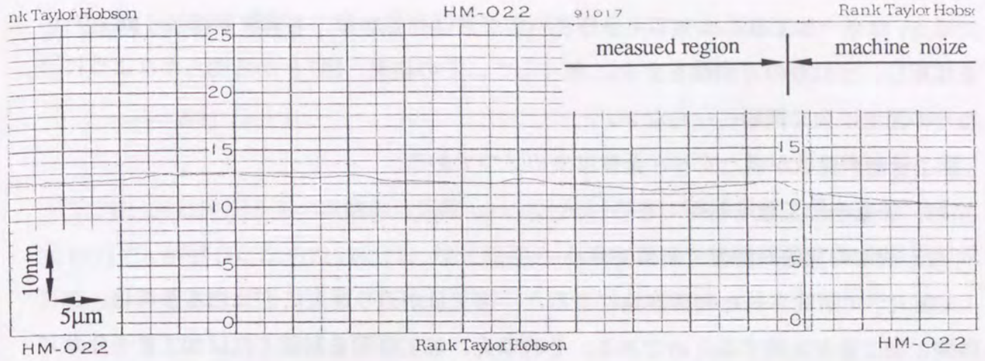


図7.8　10 mm／min の走査速度による加工表面の表面粗さ
矢印に示す場所は前加工面のうねりであり、他の場所は
タリステップの測定分解能以下である。

表7.1の条件で加工した場合のy方向送り量とうねりとの関係を表7.2 に示す。ここでの理論値とは、$S^2/8R$（s：y方向の送り量、R：加工痕の曲率半径）を用いて計算した値である。Rは実際にx方向に連続送りを行ったときの単一加工条件痕の測定値を用いている。

表7.2　送り量とうねり

Δy (mm)	0.1	0.05	0.02
Calculate Value h (μm)	0.006	0.001	0.0001
Experiment Value h (μm)	-	-	<0.0002

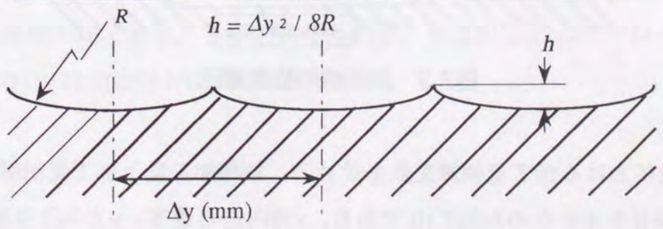


表7.2 より、0.1 μm 以下のうねりにするには表7.1 の加工条件では2 mmの送り量で十分であり、0.01 μm以下にするには1 mm以下の送り量が望ましい。実際の数値制御加工

ではΔyは単一加工痕に比べて十分小さい値が選ばれるから、本実験では0.02 mmのΔyを採用し、うねりの方向性を完全に無くした。その結果、図7.8から明らかなようにうねりの発生は全く問題にならない。

加工量制御変数が満たすべき条件は次の二つである。

(1) 任意の加工量を制御できる

(2) 通常の数値制御盤で制御できる

大阪大学で研究された制御理論によると、加工量が送り速度に逆比例するのは、加工時間に加工量が比例するためである。それゆえ、加工時間を制御すれば加工量を任意に選べると結論づけている。加工時間を制御する方法として、本研究では送り速度機能を用いる。すなわち図7.9に示す方法で加工装置を加工領域の大きさに比べて微小な一定量だけ一定送り速度で工作物に対して送り、次にその位置から送り速度を変化させ、その送り速度を制御する過程を順次繰り返して工作物全面を加工する。結局、本研究では加工量制御変数として送り速度を利用する。

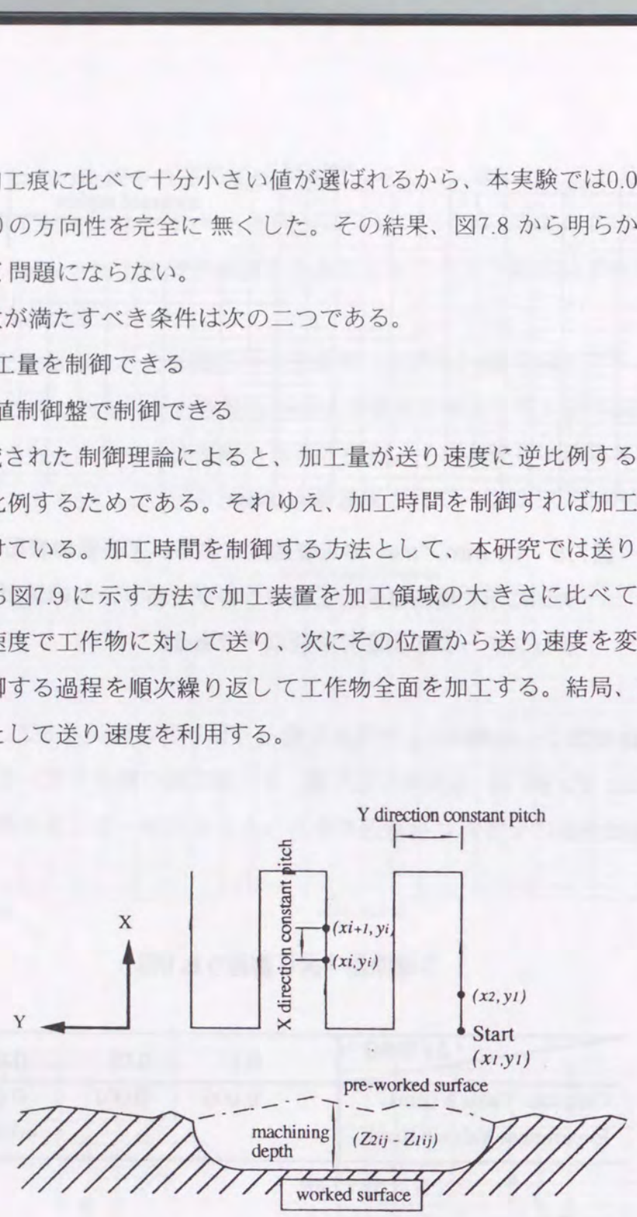


図7.9 加工痕の位置関係

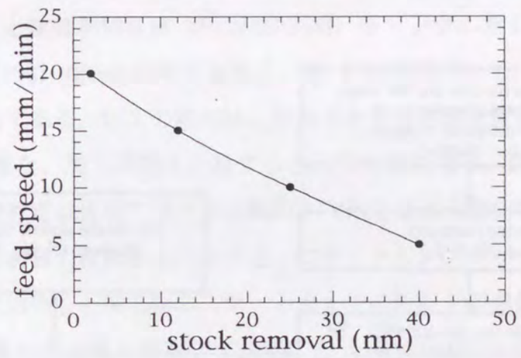
次に、本実験における加工量制御変数を求める。累積加工量と加工量制御変数（送り速度T_s）との関係を求めたのが図7.10である。x方向送り速度、y方向送り量Δyはそれぞれ5, 10, 15, 20 mm/min、20 μm/strokeであり、x方向送り量Δxを100 μm/step各点（x_i, y_i）で一定送り速度でポリウレタン球を移動させている。これより、累積加工量Z_aと送り速度T_sは式(7-1)のような安定した関係を示しており、T_sを制御することによりZ_aを

±1 nm以上の精度で容易に数値制御しうることが明らかになった。

$$Z_a = K\,(1/T_s) + b \tag{7-1}$$

ここで、Kは図7.10での双曲線の係数 (μm/s)、bは$T_s = 0$での累積加工量 (μm)である。式(7-1)でbがゼロにならないのは、加工時間T_m (s/step)とT_s (s/step)の間に次の関係が成り立つからである。

$$T_m = H(T_s) = T_s + Ft \tag{7-2}$$



T_s=21.171-0.60158Z+0.0082858Z-8.3822×10^{-5}Z

図7.10 累積加工量と加工量制御変数（送り速度T_s）との関係

ここで、Ft (s/step)はΔxの送りを与えるのに要する時間とNC工作機械へのデータ転送等に要する時間の和である。T_sがゼロであれば、当然加工量Z_aはゼロとなるはずであるから、式(7-1), (7-2)よりbは次のようになる。

$$b = K \cdot Ft \tag{7-3}$$

本実験におけるbは、図7.10より0.1 nm以下であるため無視する。以上により、本加工法は使用機械の精度を超えた加工が可能であって、母性原則によらない加工であることが確認できる。

7.2.2 NC EEM 加工手順

本加工法の手順を図7.11 に示す。傾斜角積分型形状測定法により超精密測定した公称曲率半径2000 mm の凹面鏡を工作物とする。測定された工作物の寸法、形状 Z_1を計算機に入力し、所用の寸法、形状 Z_2からの各(x, y)座標における差$(Z_2 - Z_1)$を計算し、これを必要な加工量 $G(x, y)$とする。ただし、本研究では前加工面を5 mm 間隔で測定し、各測定点間はスプライン補間によりx方向の一定送り量Δxを100 μm, y方向ストローク量Δyを20 μmとして前加工面を決定した。次に、$G(x, y)$ に対応する加工量制御変数すなわち送り速度を次式により計算する。

$$T_{s\,dx,dy} = \{K / G(x,y)\} - b \qquad (7\text{-}4)$$

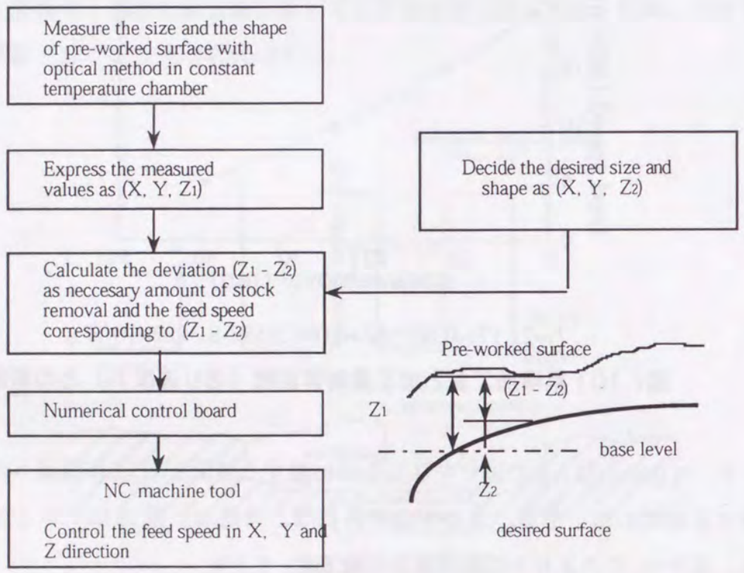


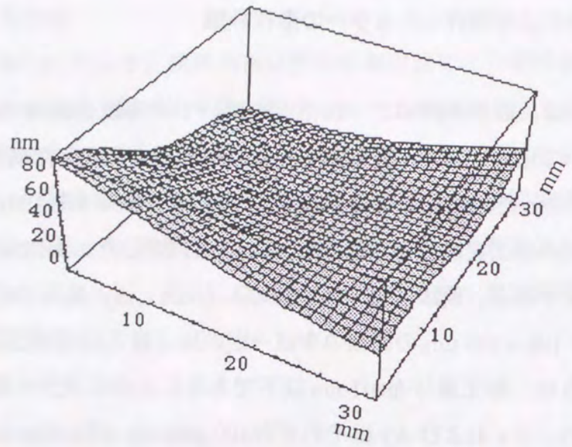
図7.11　超精密数値制御加工工程

ここで、Kおよびbは各加工条件において図7.8のように実験的に決定できる値である。式 (7-4)を用いて計算された送り速度によりNC工作機械の各軸の送りを制御して、数値制御加工を行う。本研究では、上記の考え方に基づいたNCシステムを使用している。

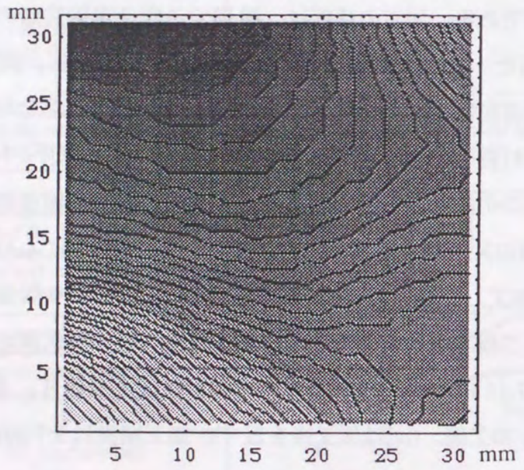
7.3 NC EEM により製作したミラーの形状評価

上記の制御理論、数値制御加工システムを用いて凹面鏡を超精密NC EEMにより加工した結果について以下に示す。公称2000 mm の凹面鏡を測定した結果、平均曲率半径は1987.396 mm であった。図7.12 に各点G (x, y) での真の曲率半径1987.396 mmからの加工量を表す。今回の加工実験の面積は30 × 30 mm と設定した。最大加工深さは約80 nmで材質は溶融石英である。前加工面の測定値の入力はΔx, Δy 共に100 μm 間隔でスプライン補間を行い、100 × 100 μm の面積の中は一定の加工量として加工した。この面積は図7.11 に示すように、加工量分布が1 nm 以下であることから充分の精度で加工できるはずである。なお、Δx および Δy はそれぞれ100 μm/step, 20 μm/strokeであり、パソコン（NEC PC 9821）と数値制御装置（FUNAC 15M）をリンクしたシステムを用いた。図7.12は、曲率半径1987.400mmの理想曲面に、NC EEMを使用して、修正加工を行う前加工面を表わした図である。加工の精度は、使用する数値制御装置の送り機能の関係から2 nm になった。また、加工時間を計算すると約72時間になる。図7.13 に示すように、加工のための初期設定は被加工物を加工機のX, Y軸と傾斜角測定時のX, Zを一致させ、加工開始点は同じ材質の材料を加工物の近くにセットし、スポット加工を行うことにより、スポット加工の中心と加工物のスタート点までの距離を顕微鏡により測定し、その距離分だけ加工機のX, Y軸を移動して決定した。NC EEM により曲率半径を1987.396 mmを目標として加工した後、傾斜角積分型形状測定法により測定した。測定工程は加工前の測定と同じ工程で同じ条件で３回測定した平均値の形状測定結果を図7.14 および図7.15に示す。図7.14 はA - A, B - B ラインでの形状偏差を表す。また、図7.15は理想曲面からの偏差を(a) 加工前、(b) は加工後を表す。加工精度は±7 nm 以上の精度で加工されている。

以上の結果から、超精密NC EEM により形状補正加工を行った後の形状測定結果から明らかなように、必要加工量が変化する場合の数値制御理論の妥当性が示されたと同時に、本加工法が±7 nm 以上の精度で可能であることが明らかになった。



(a)



(b)

図7.12　NC EEM により曲率半径1987.400 mm の理想曲面からの偏差

（a）前加工面の曲率半径1987.400 mm からの偏差の鳥瞰図

（b）前加工面の曲率半径1987.400 mmからの偏差の等高線図

（線間隔 ：2 nm）

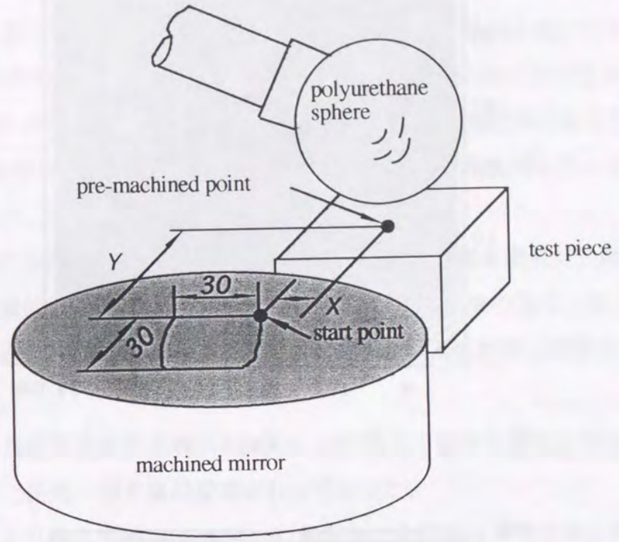


図7.13　加工スタート位置の設定方法

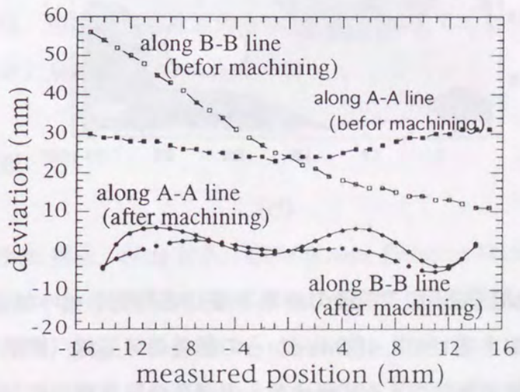
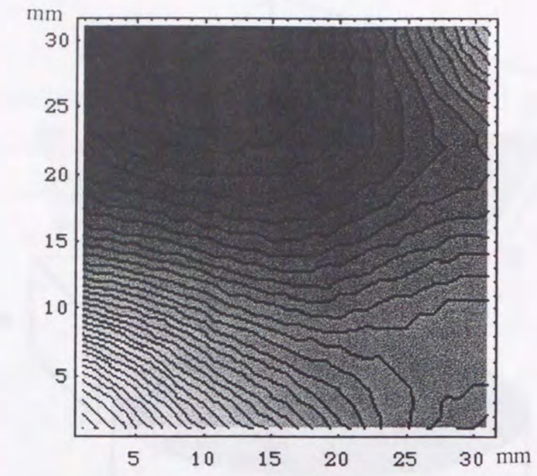
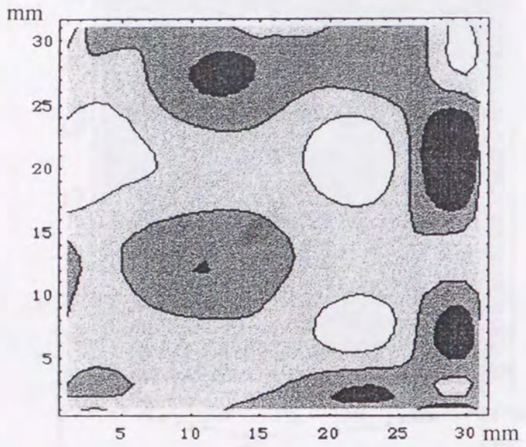


図7.14　A - A, B - B ラインでの 曲率半径1987.400 mmからの偏差



(a)



(b)

図7.15　NC EEM 加工前後の曲率半径1987.400 mmからの偏差
(a) 加工前曲率半径1987.400mmからの偏差の等高線（線間隔：2nm）
(b) 加工後曲率半径1987.400mmからの偏差の等高線（線間隔：2nm）

7.4 結言

本章では、NC EEMの原理を述べた後、設計製作したNC EEM加工装置を用いて溶融石英を加工物として、加工表面粗さ及び加工量制御特性について検討した。次に、前章で測定した公称曲率半径2000mmのミラーを加工物として、理想曲率半径1987.400mmからの偏差分をNC EEMにより除去加工を行った。その後、本形状測定法により加工後の形状を測定し、NC EEMの放射光用ミラーの加工にた委する精度を検討した。その結果、以下の結論が得られた。

（1）NC EEM を行うために、必要な条件を満足する加工装置を開発し、制御理論の妥当性を実験的に証明するために、表7.1に示す加工条件の基で、加工量制御変数として、送り速度を用いることで加工量を1nm以上の精度で制御できることを証明した。

（3）加工現象の長期間安定性を調べるため、30時間送り速度を変化させながら連続加工を行った結果、加工量の変動が1nmであった。

（4）NC EEM により曲率半径1987.400mmに修正加工を行い、本形状測定機により形状を測定した結果、5nmの形状精度を得た。また、表面粗さはポリウレタン球の送り方向と、その直角方向ともタリステップの測定分解能（０．５ｎｍ）以上を得た。

（5）本加工時間は3 日間であったが、加工後の形状測定結果から、加工現象の長期間安定性を証明した。

（6）NC EEM は、加工機の母性原理を使用しない加工であるため、加工可能な工作物の大きさに制約がない。

第７章の参考文献

(7-1) 森 勇蔵，津和 秀夫，杉山 和久：EEM (Elastic Emission Machining)の基礎研究（第１報）-- 極微小量弾性破壊の概念とその可能性，精密機械，43，5 (1977) 542.

(7-2) 森 勇蔵，井川 直哉，杉山 和久，奥田 徹，山内 和人：EEM (Elastic Emission Machining)の基礎研究（第２報）-- 応力場から見た格子欠陥の発生増殖の可能性，精密機械，51，6 (1985) 1187.

(7-3) 森 勇蔵，井川 直哉，奥田 徹，杉山 和久：EEMによる超精密数値制御加工法，精

密機械，46, 12 (1980) 1537.
(7-4) 森 勇蔵，井川 直哉，奥田 徹，杉山 和久，山内 和人：EEMによる超精密数値制御加工法流体の挙動奇跡と膜厚分布，精密機械，49, 11 (1983) 1540.
(7-5) 森 勇蔵，奥田 徹，杉山 和久，山内 和人：EEMによる超精密数値制御加工法流体中の粉末の挙動と加工特性，精密機械，51, 5 (1985) 1033.
(7-6) 森 勇蔵：Elastic Emission Machiningとその表面，精密機械，46, 6 (1980) 659.
(7-7) 森 勇蔵，山内 和人：原子の大きさに迫る加工，精密機械，51, 1 (1985) 12.
(7-8) 吉住 恵一，久保 圭司：原子力間プローブ搭載超高精度三次元測定機，Natl. Tech. Rep., 39 (1993) 598-603.
(7-9) K. Yoshizumi, T. Murao, J. Masui, R. Imanaka and Y. Okino: Ultrahigh accuracy 3-D profilometer, Appl. Opt., 26 (1987) 1647-1653.
(7-10) 吉住恵一：超高精度三次元測定機の精度校正法，光学，20 (1991) 687-695.

第８章　結論

本論文では、放射光ビームラインの結像光学系に用いられる集光ミラーの超精密形状測定を大阪大学で開発された傾斜角測定型超精密形状測定法の測定原理に基く自動測定装置を開発すること。また、理想的な放射光集光ミラーの表面創成に、原子オーダの加工制御が可能な、NC EEM を使用することが考えられる。そこで、傾斜角測定型超精密形状測定法とNC EEM による放射光集光ミラーの加工システムを検討すること。以上の２点を重視して研究が行われたものである。

本研究から得られた結論を総括すると次のようになる。

第１章では、本研究の背景となるシンクロトロン放射光を用いた研究が益々盛んになることから、集光用ミラーの超高精度化の必要性と重要性を指摘し、本研究の目的を明らかにした。

第２章では、開発した形状測定法は、光波干渉のように基準面を使用することなく、光の直進性を利用し、被測定面上の各点の法線を測定し、面の傾きを求め、それを積分して面の形状を求める方法で傾斜角積分型形状測定法と呼ぶことにした。測定方法は、光源の位置、光線の方向を調整すると、その光線ベクトルが法線ベクトルとして求まる。このような測定面の法線ベクトルの求め方を入反射光路同一化による零位法とした。法線ベクトルより、光の入射点の傾きが求まる。この操作を繰り返して、面上の各点の傾きを求める。この面の傾きは特定の点の傾きを計算できるようにし、傾きを数値積分することから、面の形状を求める。次に、測定方法による測定手順について述べ、零位法を達成するために、測定光学系として２軸のゴニオメータ、X, Y, Z ステージを用いた。また、各測定点における法線ベクトルを絶対精度で5×10^{-7} rad以下の測定を達成するために、誤差伝播を自乗平均誤差により計算を行った。たとえば、曲率半径5600 mm の凹面鏡を測定する場合、ゴニオメータ、ステージの位置決め誤差は5×10^{-7} rad、1 μm以下にしなければならない。

第３章では、まず製作した超精密測定装置の概要について述べた。装置は、法線ベクトル測定用光学系、試料台および温湿度調整用恒温室で構成されている。光学系の中で単一モードの He-Ne レーザを使用して零位法の方法で４分割検出器による分解能を最高

にするための計算を行なった結果、ピンホールの径は55.5μmになった。レーザ管から出射されるレーザの発熱による位置不安定性をさけるため、光路にオプチカルファイバーを使用し、レーザ用電源は発熱体であるので恒温室の外に設置した。同様にX,Y,Zステージ駆動用モータは冷却水で熱を除去した。

光学系移動ステージは剛性の高いダブルV溝方式にし、位置決め精度を0.1μm以下にした。また、それぞれのステージのピッチング、ヨウイングおよびロウリングが測定精度にどのように影響するか誤差伝播解析により明らかにするとともに、これらを測定した。その結果、測定データを基に実際の測定では補正をすることにより測定精度を維持できることを示した。次に、2軸のゴニオメータと法線ベクトル検出器の位置精度を明らかにした結果、4μm以下で各ゴニオの回転中心に合わせる必要があることがわかった。各ゴニオの角度位置決め精度は1.8×10^{-7}rad以下であった。これらは、法線ベクトルを0.1秒以下で測定できる値である。

試料支持系の構成は、測定試料の軸調整が可能なように、3軸ステージと2軸あおり機構で構成されている。支持系は光学系のゴニオ回転中心から500mmの位置から7000mmまで移動可能である。2軸のあおりはピエゾにより外部から2.5×10^{-7}rad以下の微調が可能である。

本測定法は光線の直進性を基本としているため、温度、湿度および気圧の変化により屈折率が変わることが影響する。そこで、大気の揺らぎの影響を伝送行列による光線の空間位置と方向成分を計算した結果、屈折率変化を10^{-8}以下に制御しなければならないことがわかった。また、エドリンの式から屈折率変化を10^{-8}以下に制御するためには温度変化及び圧力、CO_2、相対湿度変化の最大値を計算した結果、0.02℃及び1Pa, 21ppm, 1%となった。直径100mmのミラーを5mmピッチで測定しようとすると約30分かかる。この時間中の大気の変化をほぼ満足しており、実際に法線ベクトルの測定を同一場所で行なった結果2.5×10^{-7}rad以下の変動であった。この値は装置全体の揺らぎも含んでいるため、法線ベクトルを5×10^{-7}rad以下で測定するには十分な値である。

第4章では、設計製作した測定装置を使用して、実際に超精密加工された凹面鏡を測定するための測定方法について述べた。

測定のための初期設定は、初期調整として測定機の光学系のX,Y,Zステージにより決定される座標を基準にして光線ベクトルとY軸を5×10^{-7}rad以下で一致させる方法について検討した。また、凹面鏡を利用して調整することが有効であることを提案した。試料

調整は、試料の平均曲率半径と、検出器D_1から試料表面までの距離を一致させることにより、X,Y,Zステージを動かす距離を最短にすることができ、測定精度および測定時間を短縮できることを述べた。その方法は、ミラー上をθ, φ方向に単独でゴニオメータで動かして検出器D_1のアウトプットの変化が最小になることで確認できる。本測定によるミラーの曲率半径の絶対誤差は10^{-6}程度である。データ処理は、ゴニオメータの回転角度から面の傾きを計算し、傾きのデータから任意の点における傾きを知るために、多項式とスプライン関数で補間、積分することにより表面形状を得た。多項式とスプライン関数を使用した補完精度および、積分したときの計算誤差の検討を行った結果、表面形状を充分な精度で計算できることを明らかにした。

以上の結果から、本測定原理による形状測定精度は法線ベクトルの測定精度に支配されることがわかった。例えば、光出射用ピンホール位置や検出器の位置等の位置決め精度は1μm程度で充分であることがわかった。法線ベクトルを5×10^{-7}rad以下で測定すれば0.05 μm / 100 mmの傾きを測定できることを明らかにした。

次に、零位法による形状測定の測定手順について述べた。理想面からのずれは、検出器D_1及びD_2のアウトプットが変化することで確認できるから、これらの値を初期設定したときの値にX,Y,Zステージおよびθ, φゴニオメータを動かすことから、初期設定値にするアルゴリズムを開発した。

これらの操作を測定者がおこなうと、大気の揺らぎや測定装置の変動をきたし、想定精度を悪化させる。そのためには、自動化による測定機の遠隔操作が必要不可欠である。よって、遠隔操作を自動でおこなうために、初期設定から零位法による形状測定をコンピュータコントロールによる自動計測システムを開発した。本システムは、メインメニューから初期設定の光学調整、試料位置の調整および零位測定を選ぶことができる。今迄、述べてきた測定原理、設計製作した装置の性能と初期設定の方法により試料表面の任意の点の法線ベクトルを5×10^{-7}rad以下で測定できることがわかった。

第5章では、測定装置の性能評価をおこなった。性能評価は形状測定の初期設定から法線ベクトル測定までを自動化した上で行った。性能評価として、傾斜角測定値の再現性、形状測定値の再現性およびミラーを90°回転した場合の測定値の整合性について検討した結果、法線ベクトルの測定精度は5×10^{-7}rad以上であることが確認できた。また形状精度の絶対測定精度はφ100mmのミラー測定において5nm以下であった。

第6章では、紫外線集光用ミラーの仕様について検討をおこなった。ミラーの表面粗

さはレーリーの結像条件から紫外線の波長を10nmとすると2.5nm以下ににする必要がある。また、全反射をおこさせるためには、Lorentz - Dorudeの式から臨界角が決定される。紫外線の場合、斜入射にすることにより全反射を達成することができる。凹面鏡を使用する場合、水平、垂直方向を別々に集光する必要があり、２枚の凹面鏡が必要である。具体的に、曲率半径3mの凹面鏡を使用する場合、曲率半径の半径誤差による焦点の位置を計算した場合、65度の入射で曲率半径が±100mm変化すると±20nm変化することがわかった。

曲率半径が約2mおよび3mと言われている溶融石英製ミラー（反射コーテイング膜無し）を零位法で測定した結果をまとめると次のようになる.

１）2mmピッチで測定した時の測定時間は約40分であった。
２）5回測定した時の再現性は、X、Z移動量は0.5μm以下、法線ベクトルは5×10^{-7}rad以下であった。
３）公称曲率半径2mおよび3mの凹面鏡を測定し、最小自乗法によるスプライン関数を用いて測定面の形状を計算した結果、最も理想曲面に近い曲率半径はそれぞれ1987.453および2998.500mmであった。
４）測定した法線ベクトルを最初自乗法によるスプライン関数を用いて補間したデータと測定値を測定点で比較した結果、5×10^{-8}rad以下であった。
５）公称曲率半径3mのミラーを測定した後、測定値からレイトレースをおこなった結果、A - AラインおよびB - Bライン方向のビームの広がりはそれぞれ20,35μmであった。

次に原子間プローブを用いた超精密三次元測定機による曲率半径２mのミラーを1mmピッチで50mm角を測定した結果、この測定機の性能について下記のことがわかった。

１）1mmピッチで測定したとき、隣接する測定値のばらつきが±5nmあるため、測定データを最小自乗法により補間をおこなった。
２）同じ測定線上を測定方向を逆にした場合、測定値が10nm以上異なる。
３）測定機の再現性を検討するため４回測定をおこない、A - AラインおよびB - Bライン上について比較した結果、最大32nmの差があった。

４）曲率半径の測定結果は1987.396mmで誤差は最大40nmであった。

原子間プローブによる曲率半径の測定結果と本研究で開発した傾斜測定法による測定結果を比較すると、約20nmの差があった。どちらの測定値が真の値に近いか現時点ではわからない。しかし、傾斜角測定法による測定結果のばらつきは原子間プローブを用いた測定の30%以下であったこと、ミラーを90度回転させて測定した場合のデータの整合性は6nmであったことから、本測定による測定値の方が信頼性が高い。

以上の結果から、本測定原理および測定方法を使用することにより、当初の目的である披測定面の形状を50nm/100mmで測定できることが明らかになった。また本測定原理、測定方法および測定装置が超精密形状測定法として妥当な方法であることを確認した。

第７章では、EEMを利用して、単一の装置により工作物を任意形状に高精度で加工できる理想的な超精密数値制御加工を提唱し、その概念を述べるとともに制御理論を導き、実際に加工を行い、本加工法の有効性を実験的に示した。

（１） 加工量が加工量制御変数と安定な関係にあり、加工痕形状が互いに影響しない加工法における累 積加工量を理論的に求め、これに基づいて制御理論を導き、本加工法に必要な条件を明らかにした。
（２）必要条件を満足する加工装置を開発し、加工量制御変数として送り速度を用いることで加工量±1nm以上の精度で制御しうることを示した。
（３）制御理論の妥当性を実験的に証明した。

次に、制御理論、数値制御加工システムを用いて、本研究で開発した形状測定機により公称2000mmの凹面鏡の前加工面を5nmの精度で測定し、30mm角の領域を理論加工精度を2nmで加工をおこなった結果、

（４）加工面を形状測定機により測定した結果、5nm以上の形状精度であった。
（５）表面粗さはX,Y方向ともタリステップの測定分解能である0.5nm以下であった。

以上より、本加工法において最も必要な条件は、前加工面が高精度で測定可能なことである。また、加工機の母性原理を使用しない加工であるため加工可能な工作物の大きさには制約がない。

Appendix

Appendix 1

放射光施設の現状と将来

表1は過去10年の間に建設された放射光、および現在構想されている計画の一覧表である[1]。X線領域のリングとしては、European Synchrotron Radiation Facirity（ESRF、仏）とAdvanced Photon Souce（APS、米）がすでに動いており、日本でもSPring-8が最近、供用を開始した。また、真空紫外線、軟X線領域では、台湾と韓国に建設された。軟X線の領域では、各国で新計画が提案されていることは注目に値する。とくに、中国（上海）とスイスの計画はほぼ認めれているといってよい。

このような新規計画と平行して、従来の放射光の高輝度化も進められていることも注目に値する。高エネルギー加速器研究機構では電子ビームの収束を強化することによって低エミッタンスを実現し、輝度を1桁改善する高輝度化計画が1997年に完成した。同様な計画はNational Synchrotron Light Souce(NSLN,米) や Stanford Synchrotron Radiation Laboratory（SSRL、米）でも検討されている。これらの計画から放射光を利用した研究が益々、盛んになっていくことが明らかであり、ミラーに対する要求性能も一層厳しくなることは明らかである。

放射光施設一覧

Ring Name(Country)	Energy (GeV)	Emittance (mm-rad)	Ring Length (m)	Status
SSRF(Chaina)	2.2	4.3	345	Under Consideration
DIAMOND(England)	3.0	14	345.6	Under Consideration
Super-ACO(France)	0.8	36	72	1987
ESRF(France)	6	4	850	1992
SOLEIL(Germany)	2.15	2.7	336	Under Consideration
BESSYII(Germany)	0.9-1.9	5	194.4	1997
ELETTRA(Italy)	1.5-2	7	259	1993
Spring-8(Japan)	8	7	1436	1997
TOKYO Uni.(Japan)	2	5	388	Under Consideration

PLS(Korea)	2	12	280.6	Under Consideration
LSB(Spain)	2.5	8.3	251.8	Under Consideration
MAXII(Sweden)	1.5	9	90	1995
TLS(Taiwan)	1.3-1.5	19	120	1993
ALS(U.S.A)	1.3-1.9	3.4	196.8	1992
APS(U.S.A)	7.0-7.5	8.2	1104	1995
KEKPF(Japan)	2.5-3.0	27	185	1997
SPEAR-3(U.S.A)	3	17	234.5	Under Consideration

参考文献

(1) 木原 元央, 第三世代高輝度放射光実験施設の開発と今後, 応用物理, 66, 11 (1997) 1225-1228

Appendix 2

シンクロトロン放射光用集光ミラーに求められる特性の詳細

1． X線結像光学の必要な条件

良質な集光光学系に必要な条件として[1]、

1）物点から結像点までの光路差の絶対値が、波長の四分の1以下であること。

2）アッベの正弦条件を満足すること。

が挙げられる。1）の条件は、一点から出たX線が異なる光路を経た後、結像面でX線の位相がお互いに強め合うことを意味する。また、2）は光軸に垂直な物体面上の物点の結像が、光路によって変わらないための条件で、物点から光学系を見込む角をα、像点から光学系を見込む角をα'としたとき、

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\alpha'} = \text{constant} \tag{1}$$

が成り立つ必要がある。これらの条件は反射面の形状により決定される。また、反射面の表面粗さとX線の散乱の関係を理解する必要がある。以下シンクロトロン放射光用集光ミラーの設計に必要なパラメータの決定方法についての基本的なことについて要約する。全反射を起こさせるための条件は、

$$\frac{n_1(\sin i_c)}{n_2} > 1 \tag{2}$$

となるようなX線の入射角i_cと反射面物質の屈折率n_1、真空の屈折率n_2から決定される。また、反射面の特定の原子の共鳴角振動数ω_κと輻射電場（ここではX線）の角振動数ωがわかれば屈折率nの分散式は[2],[3]、

$$n = 1 + \frac{qe^2}{2\varepsilon_0 m}\sum_\kappa \frac{N_\kappa}{\omega_\kappa^2 - \omega^2 + i\gamma_\kappa\omega} \tag{3}$$

であらわされる。ここで、N、m、qeは単位体積当りの原子数、電子質量および電子の

電荷をあらわし、γ_kは電子の減衰係数をあらわす。X線光学系に用いられる反射面には可視光に比べて波長（0.5～300Å）が極端に短いことから、ω が ω_k に近づきわずかながら屈折率が1より小さくなる。反射面で全反射を起こさせる条件として(2)式が満足されなければならない。つまり、反射面への入射角は反射面すれすれに入射しないと全反射が起こらない。紫外線および真空紫外領域に於いてコーティング材料としてよく用いられる金や白金などの直入射での反射率は、およそ 30 nm を境にしてそれより短波長側ではきわめて小さくなる。したがって、約 30 nm 以上の領域は、反射光学素子を直入射で使用できる。一般の凹面回折格子分光器においては、総ての収差をゼロにすることはフェルマーの定理から不可能であり、球面収差および非点収差が残る。分光器では、波長分散方向に尖鋭なスペクトル像を得ることが重要なので、スペクトルのフォーカスを最優先し、つぎにコマ収差をできるだけ小さくするような光学系配置がとられる。図1は凹面鏡と凹面回折格子を用いた分光器の設定に関するパラメータを示す。これらのパラメータを用いて瀬谷、浪岡等[4]が行なった計算を基に凹面鏡の形状誤差による結像状態について検討する。

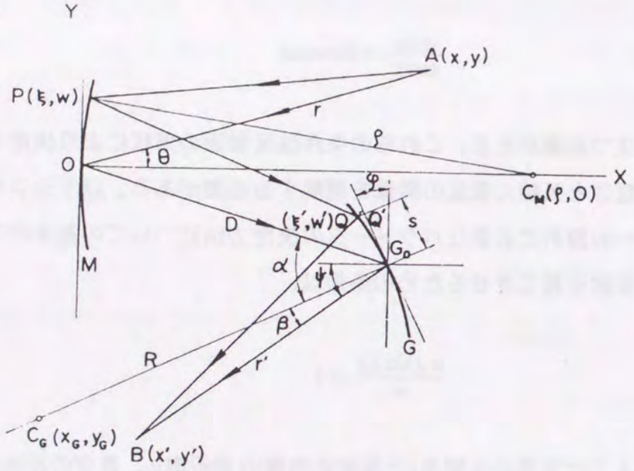


図1　凹面鏡、凹面回折格子を用いた分光器の配置

図1では緯線方向のみについて検討をおこなう。点A はポイント光源を表し、凹面鏡の曲率半径、光が反射する点を それぞれ ρ 、P(ξ,w) と表す。凹面鏡で反射された光が曲率半径 Rの 凹面回折格子上の点 Q(x',w') で反射し、点 B(x',y') で結像するとする。また、凹面鏡の中心 OをXY 座標の原点とする。

点 A から O 点までの長さ、点 G_0 から B 点までの長さをそれぞれ r, r'とする。また、凹面回折格子におけるスペクトル結像の関係から、

$$\sin\alpha + \sin\beta = \frac{m\lambda}{ss} \tag{4}$$

と表わされる。ここで、α , βはそれぞれ入射角、反射角を表わし、m は回折次数を、ssは回折格子の定数を表わす。次に、フェルマーの原理から、

$$r' = \cos^2\beta \left[\frac{\cos\alpha + \cos\beta}{R} + \frac{\cos\alpha}{a_1\rho} \left(2 - \frac{\rho}{r}\cos\theta\right) \right] \tag{5}$$

ここで、

$$a_1 = \frac{1}{\rho\ \cos(\theta+\varphi)} \left[\rho\ \cos\theta\ - D\ \left(2 - \frac{\rho}{r}\cos\theta\right) \right] \tag{6}$$

が成り立つ。上式から凹面鏡の曲率半径の誤差により r' が変化する。また、凹面鏡中で曲率が変化すると像点が変化することがわかる。すなわち、凹面鏡の各点での曲率および法線の方向の誤差は、式 (4) から α ,β が変化することになるため、分光器の分解能を低下させる。一方では像の集光特性が低下するため分光した光の強度を低下させる。よって、分光器の中で凹面鏡以外の性能が等しいとすれば、分光器の性能は凹面鏡の曲率誤差および各点での法線の方向のずれによって低下する。

次に、コマ収差について考察する。回折格子上の G_0 から離れた任意の点 Qで反射した光が結像する点での変位 Δp は、

$$\Delta p = r'\sec\beta \left(\frac{dF}{ds}\right) \tag{7}$$

と表わされる。ここで, Fはフェルマーの関数を、s はG_0から回折格子上で光が反射する点Qまでの距離を表わす。コマ収差をゼロにするためには、

$$\left(\frac{dF}{ds}\right) = 0 \tag{8}$$

とすればよい。浪岡等の計算結果から、

$$r = \frac{1}{2}(\rho + \Delta)\cos\theta \tag{9}$$

として、回折格子の曲率半径と凹面鏡の曲率半径の関係を、

$$\frac{\rho}{R} = \left[-\frac{2\sin\theta\ \cos^2\alpha\ \cos^2\beta}{\cos^2\theta\ \sin\theta\ (\cos\alpha + \cos\beta)} \right]^{\frac{1}{2}} \tag{10}$$

とすれば、単色光においてコマ収差をなくすことができる条件であると計算している。

この分光器で凹面鏡の形状精度が結像にどう反映されるか検討する。凹面鏡の曲率半径が Δ だけ変位していたとすると、(8) 式は、

$$r = \frac{1}{2}(\rho + \Delta)\cos\theta \tag{11}$$

と表される。ここで、$\Delta / \rho \ll 1$ とすると、結像位置 r'

$$r' = \frac{R\cos^2\beta}{\cos\alpha + \cos\beta} + \frac{4R^2\Delta}{\rho^2\cos^2\theta\ (\sec\alpha + \sec\beta)^2} \tag{12}$$

となり、右辺第２項分だけ変位する。これがコマ収差である。この収差は曲率半径の絶対値が設計値より異なっている場合に起こるのは当然であるが、凹面鏡上で光が反射する場所の曲率半径誤差によっても起こりうる現象である。図2 は高エネルギー加速器研究機構物質構造研究所にあるフォトンファクトリービームライン[5]に設置されている１m瀬谷-浪岡型分光器の光学系を示す。この分光器は２種類の凹面回折格子を使い分けることにより400～3500 Å および400～1700 Å の分光が可能である。この分光器に使用されている凹面鏡の曲率半径は5600mm である。ミラーの材質は溶融石英で直径100mm である。この分光器の性能を理解するために使用されている凹面鏡の曲率半径を超精密測定する要望が高まった。そこで、本論文で述べた測定原理を用いた測定方法の実現性を確かめるために製作したプロトタイプの測定機で測定をおこなった。この測定機の測定精度はほぼ50nm / 100mm の傾斜を測定することができたが、測定は手動でおこなった。

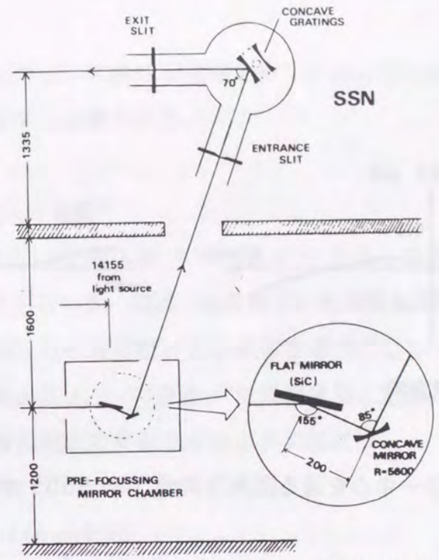
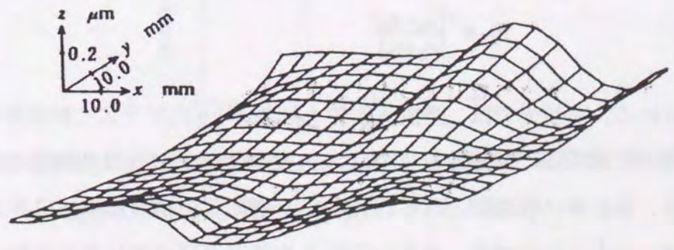
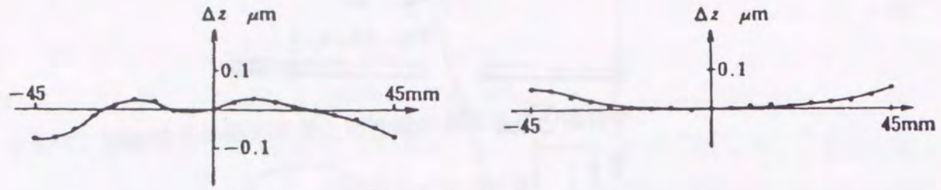


図2　フォトンファクトリーBL-11C に設置されている瀬谷-浪岡型分光器

図3は、図2に示す凹面鏡の形状測定結果を示す[6]。(a) は測定形状が要求される曲率半径5600mmからの偏差が大きいため、凹面鏡表面の各点で、理想球面からの偏差が最も小さい曲率半径を計算した結果、5555 mmであり、それからの形状偏差を示したものである。(b) はミラーの中心を通る直角方向に於ける理想球面（R=5555 mm）からの形状偏差を示す。(c) はミラー面全体の法線ベクトルの方向から求めた曲率半径の分布を表す。これらの測定結果から、凹面鏡の形状誤差からコマ収差が現われていることが明かである。この原因は、現状では曲率半径を絶対値で尚且つ高精度で測定できないためだと考えられる。また、ミラーの加工においても数値制御による nm オーダの超精密加工の報告は非常に少ないのが現状である。

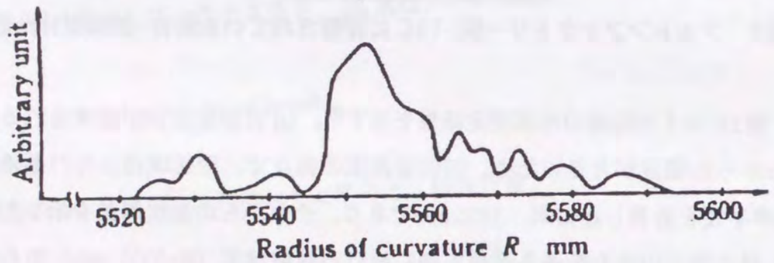


(a) 曲率半径（R= 5555 mm ）からの偏差



水平方向　　垂直方向

(b) ミラー中心を通る直角方向の（R= 5555 mm ）からの偏差



(c) 曲率分布

図3　曲率半径（R= 5600mm）に加工された 凹面鏡の形状精度測定結果

2. ミラーの反射率[7][8]

光が屈折率 n_1 の媒質から n_2 の鏡面に垂直入射する場合の反射率 $\mathcal{R}_l$は、

$$\mathcal{R}_l = \frac{|n_2 - n_1|^2}{|n_2 + n_1|} \tag{13}$$

と表わされる。可視光では、垂直入射でも屈折率1.5のガラスで振幅反射率は0.2で4％の光が表面で反射する。X線に対しては、物質中の電子との相互作用のために、必ず吸収がおこり、屈折率は複素数となる。しかし、虚数部の消衰係数 k は非常に小さく、屈折率 n もほとんど１に近づき、真空のそれとの差がほぼゼロになり反射がおきないため斜入射にする。原子番号の大きい物質ほど消衰係数が一般的に小さいため、反射面には金、

白金等がよく使用される。しかし、X線の吸収端を持つため必要な波長に合わせて入射角および反射面の物質を決定する必要がある。

3. 反射面の表面粗さと散乱の関係[9]

表面粗さとX線の波長および光の入射角をパラメータとして散乱強度についてDebye(1914)が解析した方法をもちいる。彼は、結晶格子の熱振動を評価するデバイワラー係数と同形の式をもちいて散乱光と表面粗さとの関係を導きだしている。散乱ベクトルと格子の変位をかけた値を表面粗さrms の自乗σ^2に比例すると定義している。すると、光の波長とほぼ同じ程度の表面粗さで反射させたときの強度は、

$$I = I_0 \exp\left[-\frac{(4\pi\sigma \sin\theta_A)^2}{\lambda^2}\right] \tag{14}$$

と表わされる。ここで、θ_A, λ はそれぞれ入射角、光の波長を表わす。また、I、I_0は、入射光の強度, 反射強度を表わす。図4 は (14) 式から rms 表面粗さ σと波長λ の比 (σ/λ) にたいして反射強度がどのように変わるかを示したもので、垂直入射したX線の反射強度の減衰を表わしている。rms表面粗さσをX線波長 λで割った値を 横軸にとり、縦軸を反射率（デバイワラー係数）で表わした時、反射率を８０％まで確保するためには、(σ/λ) < ４％だから、波長１０nm のX線では、σは 0.4 nm 以下が要求される。

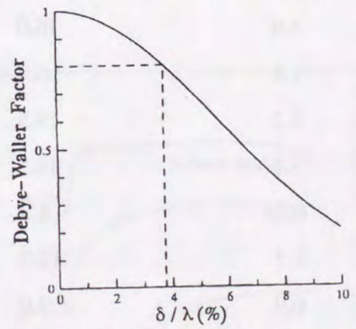


図4　X線の反射損失の計算に使われるデバイワラー係数の表面粗さ依存性
横軸は、rms 表面粗さσの波長に対する割合

4. 反射ミラーの材料特性

近年放射光の高輝度化に伴い、ミラーの熱変形が無視できなくなった。いくら超精密なミラーを加工しても熱により形状が変化すれば意味がない。理想的には、熱伝導率が無限に大きくて、線膨張係数が無限に小さければ熱変形は問題にならない。しかし、現実にはそのような物質は存在しない。有限の値をもつ物質の中で、k（熱伝導率）／α（線膨張係数）指数が大きいほどミラー用の物質として優れていると言える。k / α 指数を表2に示す[10]。

表2　ミラー材の物理的性質

Material	K(W/cm-K)	α (10^{-6}/ K)	K/α (10^{5}W/cm)
Diamond	6.0	1.5	40.0
CVD-SiC	2.0	2.9	6.7
W	1.7	4.6	3.7
Super Invar	0.12	0.36	3.3
Zerodur	0.016	0.05	3.2
Mo	1.4	5.1	2.7
Si	1.0	4.0	2.5
Cu	4.0	16.0	2.5
Ir	1.6	6.7	2.4
Ag	4.3	19.5	2.2
Au	3.1	14.5	2.1
Os	0.86	4.8	1.8
Be	2.1	12.7	1.7
Cr	0.9	7.0	1.3
Al	2.4	24.0	1.0

K : Thermal conductivity , α : Linear thermal expansion cofficient

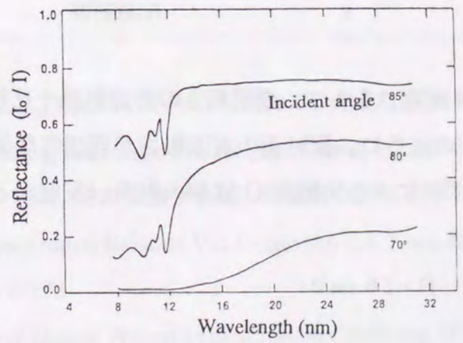
表より熱変形に対してはダイヤモンドが一番優れた材料といえる。次にSiCが挙げられる．Si, Cuは同じ指数を示すが、Siは、線膨張係数がCuの25％である。単結晶Siの超精密加工は他の材料と比較して多くの研究がなされているため充分な冷却をおこなえば非常に有効な材料である。今後、益々高輝度化する放射光用ミラー材料としてダイヤモンド、SiC,Si ,Cu 等が有望であると言える。

5. VUV および軟 X 線領域と硬 X 線に用いる集光ミラーの特性

VUVおよび軟X線領域として、真空紫外線物理国際会議では10eV ～2KeVとしている。これ以上の高エネルギー側を硬X線と呼んでいる。エネルギーを波長に変換するには、

$$\lambda = \frac{c\,h}{E} \qquad (15)$$

を用いる．ここでλは波長を表わし、c、 h およびEは光速度,プランク定数及び光子エネルギーを表わす。軟X線領域の高エネルギー側で波長は6.2 Å となる。図5にミラーの材料として使用されている石英及びSiCの軟X線領域での反射率を示す。入射角を85、80、70、60° に変化させた。縦軸は光の波長を、横軸は反射光強度Iと入射光強度 I_0 の比を表わしている[11]。



石英

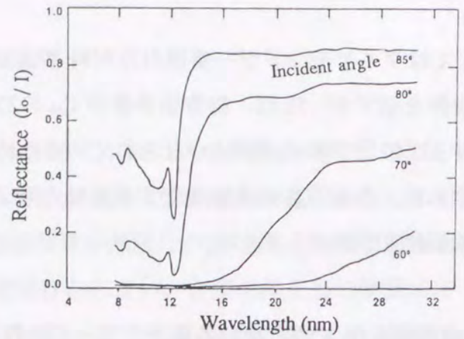


図5　石英及びSiCの入射角と反射率の関係

両方の材料とも約12nmの波長が臨界である。式 (2) から、白金を反射面としたとき、真空紫外線（VUV）,軟Ｘ線（Soft X-ray）および硬Ｘ線（Hard X-ray）での屈折率および臨界角（Grazing Angle）を計算すると表3のようになる。

表3　白金を反射面としたときの波長と屈折率、臨界角の関係

Region	Wavelength（Å）	RefractiveIndex（n）	Grazing Angle(deg)
VUV	100	0.9553	17.19
Soft X-Ray	49.59	0.9893	8.389
Hard X-Ray	6	0.999528	1.76

実際の反射面は必ず表面粗さをもつ。表面粗さの許容範囲を見積るには、レイリーの結像条件を用いて、図6のように、反射面の表面粗さが理想的な面からｈだけずれていたとする。このとき、ずれによる光路差Ｄは斜入射角（反射面と入射光との角度）をθとすると、

$$D = 2h \sin\theta \qquad (16)$$

となる．レイリー結像条件、　$D < (1/4)\lambda$を使用すると、

$$h = \lambda / (8 \sin\theta) \qquad (17)$$

となり、波長が短くなればなるほど表面粗さとうねりに対する条件が厳しくなる。

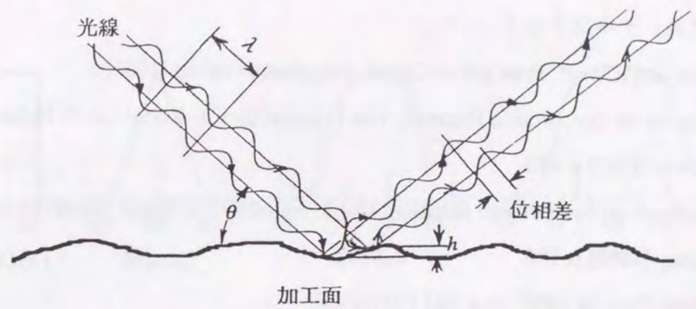


図6　表面粗さおよびうねりによる光路差(12)

以上のことから、真空紫外線 、軟Ｘ線および硬Ｘ線に用いられるミラーの特性をまとめると、

(a)　波長が短くなるほど表面粗さやうねりを小さくする必要がある。

(b)　波長が短くなるほど入射角が斜入斜になり、大面積のミラーが必要になってくる。

(c)　益々、高輝度化される放射光に必要なミラーとして熱歪みを少なくするミラー材料や冷却技術が必要になってくる。

となる。

参考文献

(1) A.G.Michette and C.J.Buckley:X-RAY SCIENCE AND TECHNOLOGY, Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, (1980) P.254

(2) シンクロトロン放射, 日本物理学会編, 培風館 (1986) P.59

(3) Handbook on Synchrotron Rdiation,Vol.1,edited by E.E.Koch,North-Holand Publishing Company (1983) P.173

(4) T.Namioka,M.Seya,Optical Properties of a Syatem Consisting of a Mirror and a Grating, APPLIED OPTICS,Vol.9,No.2,Februry 1970

(5)PHOTON FACTORY ACTIVITY REPORT ,1982/1983,V-15

(6)森　勇蔵、杉山　和久、山内　和人、西川　和仁、酒井　啓至、本郷　俊夫、東保男：シンクロトロン放射光用ミラーの超精密形状測定装置の開発、精密機械, 51,11,P.96-101.

(7)石田 興太郎, X線光学の基礎, シンポジュウム「X線光学における超精密技術の現状と将来」テキスト p.5

(8) E.Born and E.Wolf, Principle of Optics, Pergamon, Oxford (1965)

(9) Handbook on Synchrotron Rdiation, Vol.1, edited by E.E.Koch, North-Holand Publishing Company (1983) p.173

(10) Handbook on Synchrotron Rdiation, Vol.1, edited by E.E.Koch, North-Holand Publishing Company (1983) p.180

(11) V.Rehn:Proc. of SPIE , vol.582 (1985) 238.

(12) Handbook on Synchrotron Rdiation, Vol.1, edited by E.E.Koch, North-Holand Publishing Company (1983) p.179

B-Spline　を用いたスプライン補間

スプライン関数には基底関数の違いにより、いくつかの表現方法があり、その内の一つの基底関数が B-Spline であり、局所的な台をもつ基底である。たとえば、ある実数列があった場合の具体的な形は図7 のようにになる。

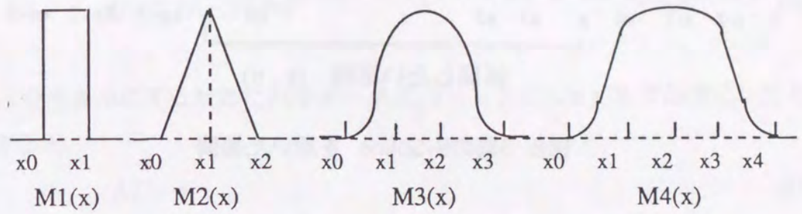


図7　種々の実数列の具体的な形

ここで、Mr *(x)* の r は、B-Spline の階数で、各階数によって形が異なる。また、この実数列x_0, x_1, x_2, x_3, x_4はB-Spline をつくるための接点と呼ばれるものである。式で表わすと、

$$M_{1j}(x) = \begin{cases} (\xi_j - \xi_j - 1)^{-1} & (\xi_{j-1} < x < \xi_j) \\ 0 & (\text{その他}) \end{cases} \tag{18}$$

$$M_{rj}(x) = \frac{(x-\xi_{j-r})M_{r-1,j-1}(x) + (\xi_j - x)M_{r-1,j}(x)}{\xi_j - \xi_{j-r}} \tag{19}$$

となり、ここでM_{rj} *(x)* は接点 $\xi_{j-r}, \xi_{j-r+1}, \ldots\ldots, \xi_j$に対して定義された階数rの B-Spline である。以上のようにして B-Spline が求まるわけであるが、今回は３階の B-Spline を用いた。

補間したい区間内に適当に節点を定め、B-Spline を作るわけであるが、節点を $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n$ とし、３階の B-Spline を用いると、補間に必要な B-Spline を作るためには図8のようになる。

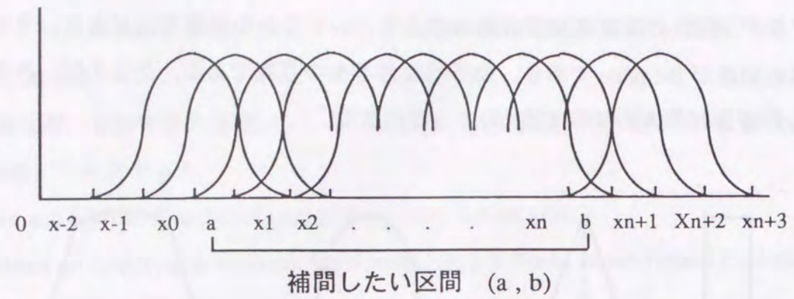


図8 3階のB-Spline を用いた補間

B-Spline の階数（今回は階数３）×２＝６個の付加接点が必要となる。このように付加接点を導入することにより、$n+3$ 個の B-Spline が決定される。$n+3$ 個の B-Spline を用いてスプライン関数を表現すると、

$$S(x) = \sum_{i=1}^{n+3} C_i M_{3i}(x) \tag{20}$$

と表わせる。これに各点のデータ (x_i, y_j) (i = 1, 2, 3, ...n)を代入すると、

$$\sum_{i=1}^{n+3} C_i M_{3i}(x_j) = y_j \qquad (j=1,2,.....n) \tag{21}$$

を得る。これを行列表現により、

$$A\,C = y \tag{22}$$

と表し、これを解いて B-Spline の係数行列 C を求める。これらの値を(20)式に代入すればスプライン関数により容易に補間値が求まる。

二次元データは、X方向、Y方向にそれぞれ節点をつくる。たとえばX方向にm個、Y方向にn個とすると、X方向の B-Spline Mx_3 は$m+3$個、y方向の B-Spline My_3 は$n+3$個できる。ただし B-Spline の階数を３階とし、また付加節点は６個とすると、スプライン関数は、

$$S(x,y) = \sum_{i=1}^{m+3} \sum_{j=1}^{n+3} C_{ij} Mx_{3i}(x) My_{3j}(y) \tag{21}$$

と表せる。次に与えられたデータが誤差を含むものとして、最小自乗法を用いてデータの平滑化を試みる。与えられたデータを F_r (r = 1, 2, ...n) とすると、残差の２乗和は、

$$Q = \sum_{r=1}^{n} (S(x_r,y_r)\text{-}Fr)^2 \tag{22}$$

である。Qを最小にするためにパラメータ C_{ij} (i = 1, 2, ..., n + 3) で偏微分したものをゼロとすると、

$$A\,C = d \tag{23}$$

が得られる。ここに、

$$C = (C_{11}, C_{21}, ..., C_{m+3\ 1}, ..., C_{m+3\ n+3})^T \tag{24}$$

である。この C を解き得られた解を (21)式に代入すればスプライン関数ができる。これに (x, y) を代入すれば補間値を求めることができる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始ご指導、ご助言を賜わりました大阪大学森勇蔵教授に深甚の謝意を表します。また、本研究の遂行ならびに本論文をまとめるにあたり、有益なご教示を賜わりました大阪大学片岡俊彦教授に厚く感謝致します。また、本研究を随行するにあたり、常に、ご助言、ご討論を頂き、本論文をまとめるにあたっては、その内容についてご検討いただき、懇篤なるご校閲ならびに適切なるご教示を賜わりました、大阪大学山内和人助教授、遠藤勝義助教授に心より感謝の意を表します。また、数々のご教示を賜わった、大阪大学杉山和久助教授に対し深く感謝の意を表します。

本研究の機会を与えて戴いた高エネルギー加速器研究機構共通研究施設長近藤健二郎教授に深く感謝いたします。

高エネルギー加速器研究機構共通研究施設工作センター長人見宣輝教授には本研究に対して長期間にわたり多大なご指導ならびにご支援を戴きました。ここに深く感謝の意を表します。

元高エネルギー物理学研究所工作センター本郷俊夫助教授、元工作センター長小島融三教授、小泉晉教授には本研究に対して長期間にわたり多大なご指導ならびにご支援を戴きました。ここに深く感謝の意を表します。

高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所福島靖孝助教授には、本研究に対して長期間にわたり多大なご指導ならびにご教示を戴きました。ここに深く感謝の意を表します。

本研究を行なうにあたり、ご協力を戴きました高エネルギー加速器研究機構共通研究施設工作センター藤野武夫助教授に深く感謝いたします。高エネルギー加速器研究機構物質工学研究所安藤正海教授及び東京大学理学部教授大田俊明教授ならびに難波秀利助手には、放射光及び光学系についてご指導を戴きました。ここに感謝いたします。実験装置の自動化に御協力を戴きました、エスジーインスツルメンツ株式会社布留川春夫氏、斉藤氏に深く感謝いたします。実験装置の製作に際してご協力を戴きました高エネルギー加速器研究機構共通研究施設工作センターの皆様に深く感謝いたします。特に移動テーブルの製作組立におきましては同センターの川又弘史氏、高富俊和氏ならびに小池重明氏に多大な協力を戴きました。ここに深く感謝いたします。特に、本論文作成にあたっては、須藤とみ子氏にご協力いただいたことを記し、感謝いたします。