

光学的方法による
小径穴測定に関する研究

1998年8月

丸山六男

光学的方法による
小径穴測定に関する研究

1998年3月

丸山六男

目 次

第1章 序 論	1
1. 1 研究の背景	2
1. 2 小径穴の測定法	5
1. 2. 1 テーパを応用した小径穴の内径測定	5
1. 2. 2 小穴測定顕微鏡	5
1. 2. 3 弾性ある針金による小穴測定	6
1. 2. 4 Perflektometerを検出器とした小穴の内径測定	6
1. 2. 5 三次元座標測定機用小型測定子	6
1. 2. 6 触針による細穴内部形状測定	6
1. 3 本研究の目的と本論文の構成	9
第2章 斜入射光線の反射を利用する小穴内径測定法	10
2. 1 緒 言	11
2. 2 測定原理と測定装置の構成	12
2. 2. 1 光学系の構成	12
2. 2. 2 測定原理	13
2. 2. 3 測定装置の構成と要素の仕様	14
2. 3 測定条件の設定および画像処理の方法	16
2. 3. 1 測定条件の設定および試料のセッティング	16
2. 3. 2 画像数の算出	18
2. 4 実験方法	20
2. 4. 1 画像処理	20
2. 4. 2 測定装置の校正	20
2. 4. 3 フェルール内径の測定	20
2. 4. 4 粗面の測定	21
2. 5 実験結果および考察	23
2. 5. 1 画像処理の結果について	23
2. 5. 2 測定装置の校正結果について	25
2. 5. 3 フェルール内径の測定結果について	26
2. 5. 4 測定値に及ぼす表面粗さの影響について	27
2. 6 検 討	29
2. 7 結 言	29

第3章 斜入射光線反射法の小径穴真円度測定への適用	30
3.1 緒言	31
3.2 測定原理および測定装置	31
3.2.1 測定装置の構成と原理	31
3.2.2 結像点の検出および感度	33
3.2.3 回転テーブルの運動誤差の影響	34
3.2.4 試料設定におけるアライメント誤差の影響	36
3.3 測定原理の検証	37
3.3.1 リングゲージの測定	37
3.3.2 運動誤差の補正	38
3.3.3 中心軸の傾き誤差の補正	41
3.4 小径穴の真円度測定	42
3.5 測定結果および測定装置についての検討	47
3.5.1 真円度の測定結果について	47
3.5.2 測定装置について	47
3.6 結言	48
第4章 小径穴の簡易型測定装置の提案と試作	49
4.1 緒言	50
4.2 測定装置の構成	50
4.2.1 構成要素の配置	50
4.2.2 構成要素の仕様	51
4.3 内径の測定および結果	52
4.4 真円度の測定	55
4.4.1 真円度の測定法	55
4.4.2 測定値に及ぼす回転基準の誤差	56
4.4.3 真円度の測定	56
4.5 結言	63
第5章 結論	64
参考文献	67
付録	70
謝辞	76

第 1 章

序 論

第1章 序 論

1.1 研究の背景

工業製品では穴と軸の組み合わせにより機能する部品が数多く用いられている。図1.1に示すように、長野県精密工業試験場が県内の企業を対象に行った測定技術に関する調査¹⁾において、回答企業の約半数が丸物の内外径に関して高い精度を要求されたことがあると報告されていることからそのことがうかがえる。

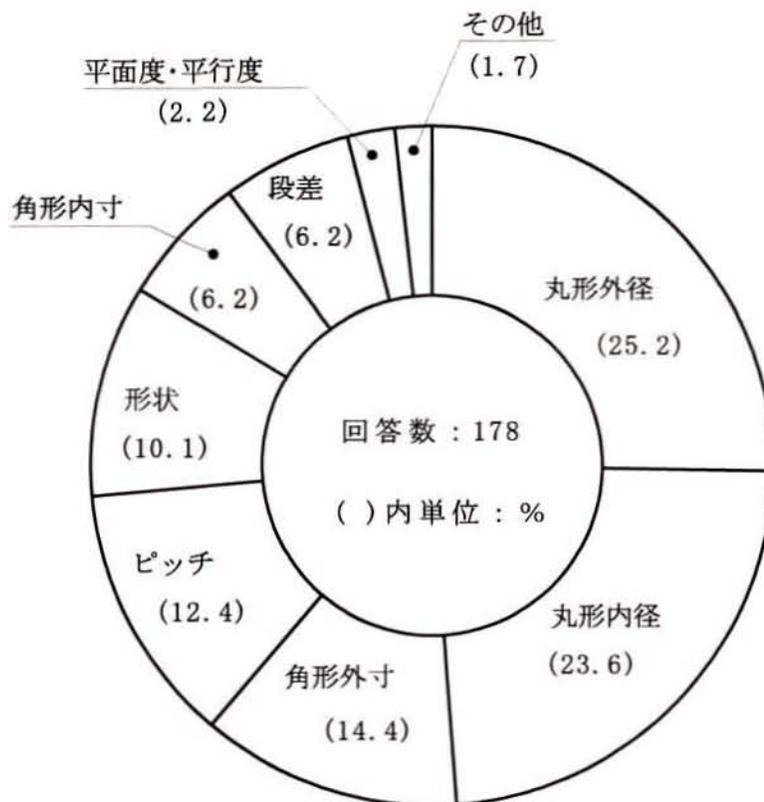


図1.1 高精度が要求される形体

寸法や形状の測定において外側形体の測定は、著しく高い精度や複雑な形状でない限り、既存の測定機器により対応が可能なが多く、外側マイクロメータを用いた μm 単位の測定が加工現場において日常的に行われている。一方、穴や溝のような内側形体は測定困難な場合が多い。そのため、古くから穴の測定を目的とした測定機器の開発が行われてきているが、後述するように依然として課題が残されている。加えて、近年は医療機器²⁾やOA機器などを中心に工業製品の高集積化、小型化、軽量化が求められていることから、微小部品や微細な加工が施された部品の測定を要求されることが多くなっている。

小径穴の内径や形状を測定する場合、光学式測定顕微鏡や投影検査器、三次元座標測定機が汎用的に使用され、それらの測定器で分解能が不足する場合には走査電子顕微鏡が用いられることがある。

光学式測定顕微鏡の分解能は対物レンズで定まる。メーカ資料³⁾に記載された金属顕微鏡用対物レンズについて一例を示すと分解能は $0.29\mu\text{m}$ となっていて、理論的にはその大きさまでの穴径が測定可能である。一方、光学式測定顕微鏡による測定は試料の端面や偶然得られた影によるため、機能面である内面の測定ができない。また、仮に端面と内面で径や形状に差がない試料であっても、実際の試料では端面の表面性状(表面粗さなど)やバリ、面取りなどの影響により穴の輪郭が不明瞭なことが多いため、必要とされている場所を測定している保証がなく、それらの影響が顕著なときには測定不可能となる。さらに、照明系が適切でないとならない影が生じ輪郭が曖昧になる。

投影検査器は試料の影や表面の反射光をスクリーン面に拡大投影し、その像から寸法や形状を測定する機構である。したがって、光学式測定顕微鏡と同様の問題がある。また、拡大投影された像による測定のため、解像度は数 μm ⁴⁾程度である。

三次元座標測定機は、シャンクの先端に球を取り付けたプローブを試料に接触させて測定することから光学式測定顕微鏡で指摘したような端面に関する問題はない。しかし、接触式の測定方法のためシャンクには測定力が加わるので剛性や強度の点で制約があり、その径と長さには限界がある。現在、一般に入手可能な小型のプローブは、球径が 0.3mm 、シャンクの長さが 2mm 程度である。

走査電子顕微鏡は、光学式測定顕微鏡に比べてはるかに高い分解能を有する⁵⁾が、測定は試料端面に限られる。また、試料が導体でないと測定不可能であるため、セラミックス、樹脂といった不導体を測定する場合は、金や白金パラジウムなどを試料表面に蒸着させる必要がある。さらに、それは真空中での測定が必要なため、試料の交換や測定部位の変更などを簡単

に行うことができず、実用機としては不都合である。

このような状況を背景に、本研究では小径穴の内面を対象にした内径および真円度の新しい測定法を提案する。また、それに基づく測定装置を試作して小径穴を有する試料の内径および真円度の測定実験を行い、測定方法の実証を行う。

1. 2 小径穴の測定法

穴の径や形状を測定対象にしたとき、汎用的に用いられる測定器として光学式顕微鏡や投影検査器、三次元座標測定機について上述した。これらの他、穴の内径や形状の測定を目的とした機器が考案され実用化されているが、多くは内径数mm以上を測定対象としている。ここでは、1mm以下の内径を有する小穴の測定が可能な機器および方法について概要を述べる。なお、一般的な名称のない測定器については、特に支障のない限り、文献やカタログに記載されたものを使用する。

1. 2. 1 テーパを応用した小径穴の内径測定

図1. 2にテーパを応用した小径穴の内径測定器の例として、Diatest(西ドイツDiatest社)⁶⁾の構造を示す。これは、二つに割られた測定子を先端が円すい状の針により押し広げ、測定子を内面に接触させて内径を測定する機構になっている。内径の値は針の後ろ側に付けられた検出器により読みとられる。メーカーのカタログ値では最小径が0.47mmと記されている。測定子と針は一体型になっていて、これを交換することで大きな径まで測定可能である。使用方法が簡便であることから広く使用されている。

テーパを直接用いた測定器としては、円すい状の針を直接穴に差し込み、針が穴に進入した長さから内径を測定するものがある。これは、穴の口元の形状誤差等の影響により測定精度は低い。

1. 2. 2 小穴測定顕微鏡

図1. 3に小穴測定顕微鏡⁷⁾の構造を示す。これは、ガラス棒先端を球形に丸めた測定子を穴の内面に接触させて内径を測定するものである。測定子と内面の接触は内面にできた測定子の反射像とその影法師を接触させて行う。文献⁷⁾では球径が30 μ mと100 μ mがあり、前者を内径0.05~0.5mmに用い、後者を0.5~2mmに用いると記されている。測定子がガラス製であることから金属製に比べて強度面で劣るのは避けられない。

1. 2. 3 弾性ある針金による小穴測定

図1. 4に弾性ある針金による小穴測定装置⁸⁾を示す。これは、曲げが許される針金の先端に付けられた球状の測定子を穴の内面に接触させて内径を測定するものである。内径は測定子上部に付けられた線または点のマークを顕微鏡で観察して行う。文献8)では、“細い針金と小さい測定子を使用できるため、0.1mm程度の内径が測定可能である。”と記されているが、長い穴の場合は測定子に付けられたマークの観察が困難になると予想される。

1. 2. 4 Perflektometer を検出器とした小穴の内径測定

図1. 5に原理を示すPerflektometer⁹⁾は光学的な測定子の名称である。下部から照明された十字線Sを穴の内面で反射させ、その反射像Sr⁺と十字線Sの像S⁻を顕微鏡で観察する。試料を移動させて内面と光軸CCが一致したとき、反射像Sr⁺と像S⁻が合致することから内面の位置が読みとられ、同様に反対側の面の位置を読みとることで内径が測定される。優れた装置であるが、測定の際は必ず試料の移動を伴うため、真円度測定等には応用しにくいと考えられる。

この測定原理を応用した微小径深穴用光学式内径測定装置¹⁰⁾も開発されていて、アスペクト比80の小径穴の測定に成功したと報告されている。

1. 2. 5 三次元座標測定機用小型測定子

小物の寸法や形状を測定するために三次元座標測定機用として研究が行われている接触型の測定子を図1. 6¹¹⁾および図1. 7¹²⁾に示す。

図1. 6の測定子は十字形薄板の中央部に長さ2mm、 ϕ 0.1mmのシャンクを取り付け、その先端に0.125mmの球を接着した構造になっている。球と試料の接触の検出は十字形薄板のたわみを光学式変位センサでとらえて行う。

図1. 7の測定子は吸気型ボールプローブと呼ばれ、真空圧力により円管先端に小さな球が吸い付けられている。球が試料に接触すると球と管の間に隙間が生じ、管内圧力が変化することから接触を検知する機構である。

1. 2. 6 触針による細穴内部形状測定¹³⁾

穴に挿入した触針に一定の周期と振幅の振動を与えて穴の内面に近づけると、触針と内面の接触、非接触が周期的に繰り返されるようになる。接触時間のデューティー比から触針と内面との距離をもとめ、内面形状を測定する。

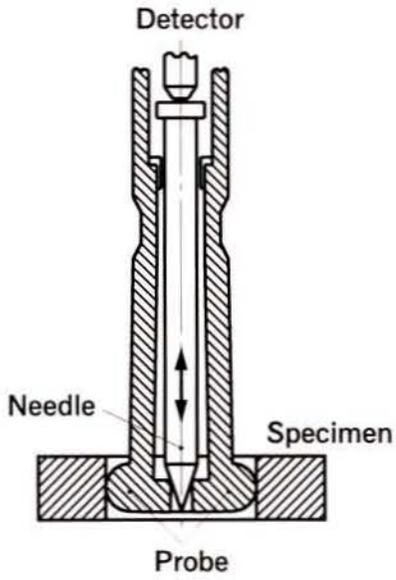


図1.2 Diatest

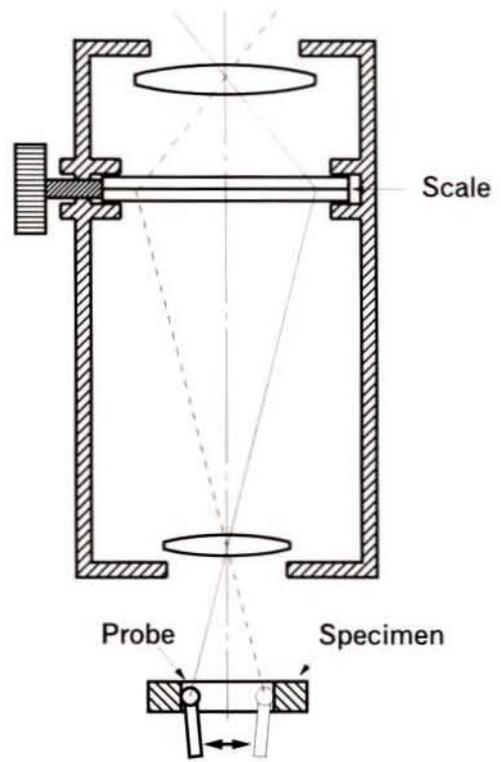


図1.3 小穴測定顕微鏡

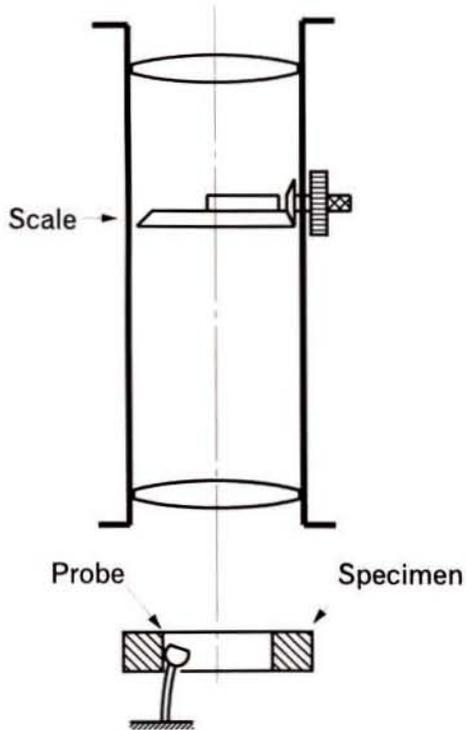


図1.4 針金による小穴測定

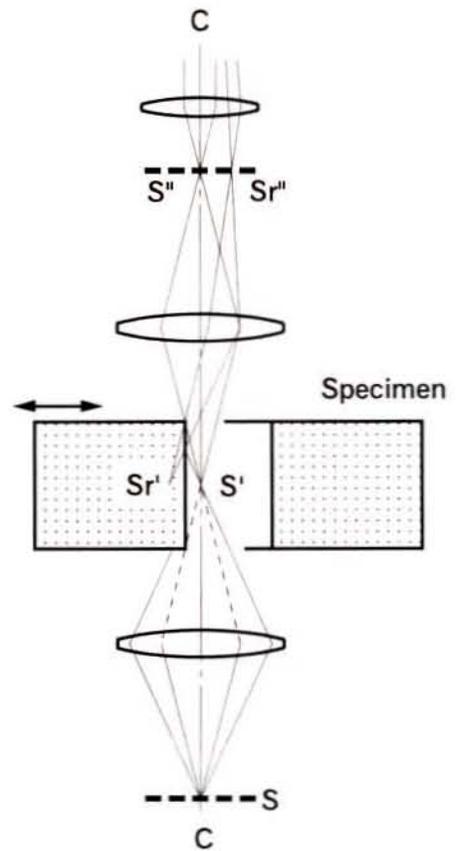


図1.5 Perflektometer

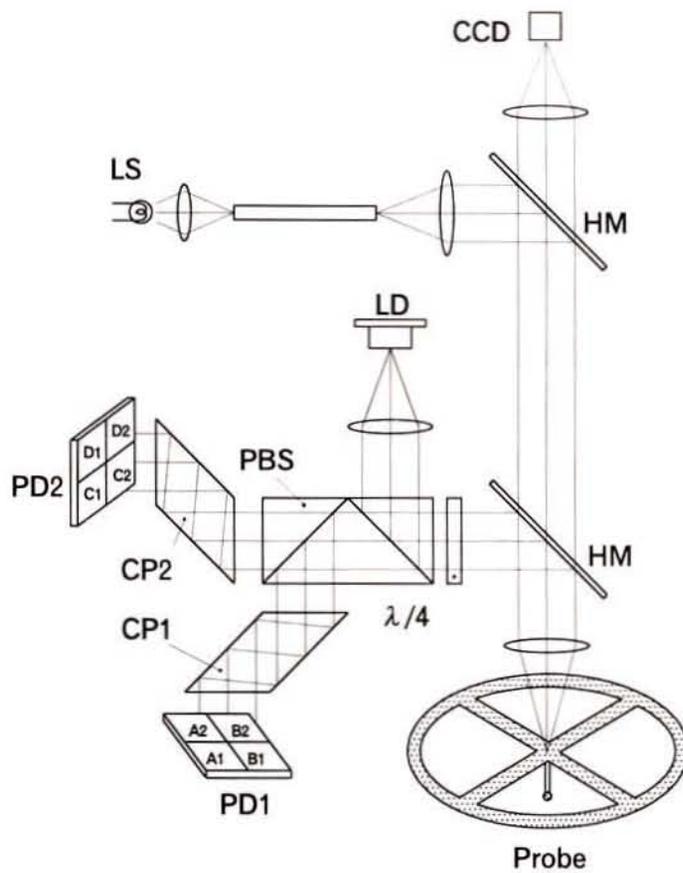


図1.6 三次元座標測定機用微小プローブ

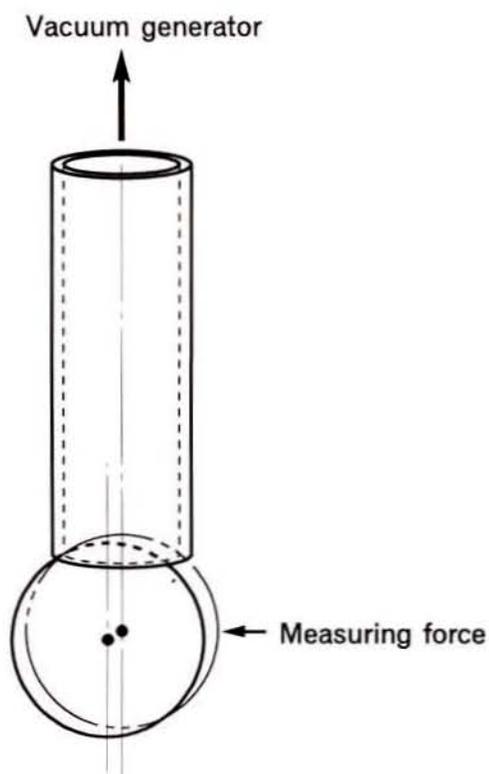


図1.7 吸気型ボールプローブ

1.3 本研究の目的と本論文の構成

医療機器やOA機器、産業用ロボットなどを中心に工業製品の高集積化、小型化、軽量化が進められていることから、微小部品や微細な加工を施された部品が求められている。呼応して、それらを対象にした測定技術や加工技術が要求されているが、従来技術での対応が困難な課題も多い。

測定技術を考えてとき、外側形体の寸法や形状の測定に関しては、著しく複雑な形状でない限り、既存の測定機器での対応可能な場合が多い。一方、内側形体では、それが単純な形状をした穴あるいは溝であっても測定困難なことが多く、とりわけそれらが高アスペクト比を有する場合には従来技術での対応が不可能である。

このような背景から本研究の目的は、工業製品で多用され重要な部品となっている穴を対象に、小径で高アスペクト比を有する場合の内径と真円度の高精度な測定を実現することにある。本研究が当面目標とする測定対象は内径が0.1～1mmで高アスペクト比を有する貫通した小径穴であり、その目標精度は内径、真円度ともに1 μ mである。

第1章では”序論”として、小径穴の内面の測定を研究対象にした背景と必要性を述べている。また、従来の測定方法と現在進められている研究を考察している。

第2章では”斜入射光線の反射を利用する小穴内径測定法”として、目標とする小径穴の内径測定を達成するため、新たに考案した斜入射光線の反射を用いた測定法の原理とそれに基づき試作した測定装置の構成を述べる。光ファイバコネクタの構成部品であるフェルールを試料にした測定実験を行い、考案した方法により高アスペクト比を有する小径穴の内径が測定可能なことを実証する。また、試作した測定装置の現状の測定精度と測定面の表面粗さの影響について述べる。

第3章では”斜入射光線反射法の小径穴真円度測定への適用”として、第2章で述べた測定原理を応用した小径穴の真円度測定法を提案する。そして、試作した測定装置においてリングゲージやフェルールを試料にした実験から、提案した測定法が小径穴の真円度測定に有用なことを述べる。加えて、測定装置の現時点での測定精度を示す。

第4章では”小径穴の簡易型測定装置の提案と試作”として、第2章および第3章で述べた原理と方法を用いた小径穴を対象にした内面の内径および真円度測定法を簡易に実現するための試みを述べる。

第5章では”結論”として、第4章までの研究結果を整理し、今後の課題を述べる。

第 2 章

斜入射光線の反射を利用する小穴内径測定法

第2章 斜入射光線の反射を利用する小穴内径測定法

2.1 緒言

小穴の内径測定には光学式測定顕微鏡や投影検査器による影法師法が広く用いられている。それらの測定器で分解能や精度の点で不十分な場合には、電子顕微鏡が用いられる場合がある。光学式測定顕微鏡などはいずれも小穴の内面を直接測定する方法ではないため、測定対象は穴の端面となり、それが内径とみなせるような薄い試料にあげられた小穴の場合に適した測定器と言える。穴の内面を直接測定する測定器としては、測長機や三次元座標測定機、空気式コンパレータ、電気式コンパレータなどがあるが、それらの測定器では測定子の大きさやそれを支えるシャンク部の長さ等により、測定可能な穴の径や長さには大きな制約がある。現在、汎用機として最も実用性が高いと考えられる小穴の内径測定器としては、Perflektometer (Leitz社)¹⁴⁾と呼ばれる光学装置がある。しかし、測定可能な穴の長さには限界がある。その他に光波干渉を用いたもの¹⁵⁾や三角測量方式のもの¹⁶⁾が提案されているが、測定可能な最小内径は前者で20mm、後者で9.5mmと報告されていて、比較的大きな内径を測定対象にしている。

上述した内容からすれば、従来技術では小径で長い穴の測定が困難な課題といえる。そこで、本研究ではアスペクト比(穴の長さ/内径)が大きく、貫通した小穴の内径測定を行うことを目的に、斜入射光線の反射を利用した新たな測定方法の提案を行う。目標とした内径は、他の測定機器では測定が困難な0.1～1mmとする。提案する測定方法は、小穴内面に大きな入射角で照射した光の正反射光をCCDカメラ(以下、CCDと称する。)により捕捉し、幾何光学的な原理に基づく解析から、小穴内径を測定するものである。性能の確認のため、光ファイバコネクタに用いられるアスペクト比が大きいフェルール(内径0.125mm、長さ約10.5mm)を試料に、測定実験を行う。また、表面粗さが測定値に及ぼす影響についても検討を行う。

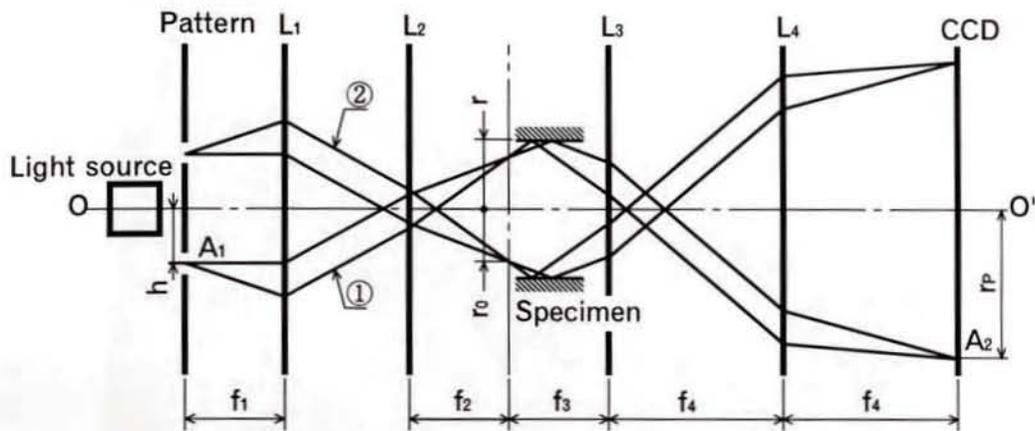


図2.1 本測定装置の光学系

2.2 測定原理と測定装置の構成

2.2.1 光学系の構成

図2.1に光学系の配置および測定原理を示す。図において L_1 , L_2 , L_3 および L_4 は、四つのレンズを示す。簡単のため、レンズはすべて薄肉レンズとして示す。光学系は試料の内面に光線を照射する投光用光学系と試料の内面で反射した光線を捕捉するための受光用光学系からなる。

投光用光学系は、光源、パターン、レンズ L_1 および L_2 からなる。パターンは4個のピンホール付きの薄板である。受光用光学系は、レンズ L_3 , L_4 およびCCDからなる。それぞれの光学素子は次のような位置関係に配置する。

パターンはレンズ L_1 の前側焦点位置に置く。レンズ L_3 は、その前側焦点がレンズ L_2 の後側焦点と一致する位置に置く。レンズ L_4 は、その前側焦点がレンズ L_3 の像側主点と一致する位置に置く。CCDは、撮像面がレンズ L_4 の後側焦点となるように置く。レンズ L_1 からの光は平行であるからレンズ L_1 と L_2 との相対位置は、投光用光学系の機能に無関係であり、任意の位置に配置できる。試料はレンズ L_2 と L_3 の間に設けた試料台に置かれる。

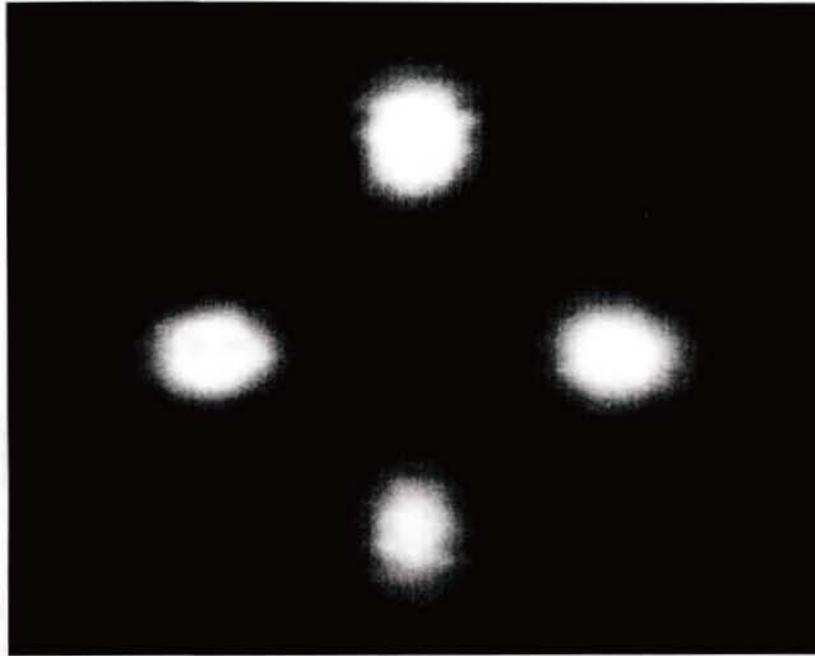


図2.2 CCDで得られた測定像

2.2.2 測定原理

図2.1に示す光学系による測定原理は、以下のように説明される。なお、図2.1では説明を簡単にするため、4本の光線のうち①および②の2本の光線を示す。

パターンはレンズL₁の前側焦点位置にあるので、ピンホールA₁からの光①は、レンズL₁で光軸OO'に対し角度をもった平行光となる。レンズL₁からの光はレンズL₂で集光し、試料面に入射する。試料面での正反射光はレンズL₃を通過し、光軸OO'に対して角度をもった平行光となってレンズL₄に至る。レンズL₄を通過した光はCCDに結像する。同様に他の3本の光線もCCD上に結像する。図2.2にCCDで得られた測定像の例を示す。

レンズL₁～L₄を薄肉レンズとして、幾何光学的に解析すると¹⁷⁾、CCDにおける結像位置A₂の光軸OO'からの距離 r_p と試料の半径 r との関係は式(2-1)で表される。

$$r = \frac{f_3}{2f_4} r_r + \frac{f_2}{2f_1} h \quad (2-1)$$

式(2-1)において、 h は光軸OO'からピンホールA₁までの距離であり、 f_1, f_2, f_3, f_4 はそれぞれレンズL₁, L₂, L₃, L₄の焦点距離とする。

CCDでは r_p の大きさが画素数として得られるため、内径を長さ寸法として直接得ることができない。そこで、4個の結像点により作られる円の半径 r_p を画素数で表した r_N に置き換えると式(2-1)は、CCDの1画素を長さに変換する換算係数を導入して、式(2-2)で表される。

$$r = G \frac{f_3}{2 f_4} r_N + \frac{f_2}{2 f_1} h \quad (2-2)$$

ただし、 G : r_p と r_N の換算係数

式(2-2)において右辺第1項の $G (f_3/f_4)$ および第2項の $(f_2/f_1) h$ を適当な標準試料を用いてあらかじめ校正しておくことにより、式(2-2)は r_N を変数とする一次式で表せ、 r_N から試料の半径 r が求められる。

2. 2. 3 測定装置の構成と要素の仕様

図2. 3に演算装置も含めた測定装置の構成を示す。光源は調光機能付150Wのハロゲンランプである。レンズ L_1 は4倍のエクステンダを組み合わせた焦点距離 $f_1=64\sim 640\text{mm}$ のズームレンズである。レンズ L_2 、 L_3 および L_4 は、市販されている写真用単焦点レンズである。それぞれの焦点距離は $f_2=70\text{mm}$ 、 $f_3=70\text{mm}$ 、 $f_4=135\text{mm}$ である。CCDは、(789×493)画素、2/3インチ、モノクロ仕様である。画像処理装置は、(512×512)画素、256階調、2画面仕様である。

試料を保持する試料台は、光軸に対する2軸のチルト機構および3軸の平行移動機構で構成する。

パターンは図2. 4に示すように、 $\phi 0.9\text{mm}$ の円周を 90° 分割する位置に $\phi 0.1\text{mm}$ のピンホールが4個あけられた薄板である。

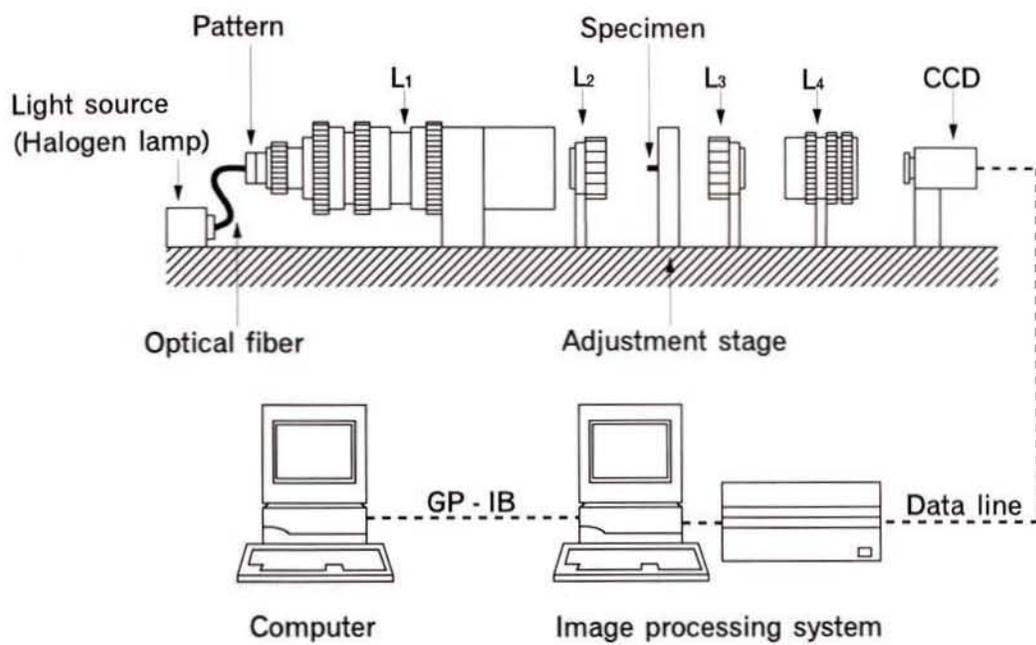


図2.3 測定装置の構成

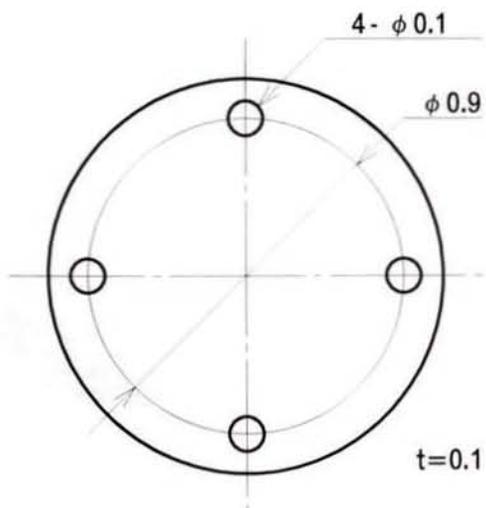


図2.4 パターンの寸法

2.3 測定条件の設定および画像処理の方法

2.3.1 測定条件の設定および試料のセッティング

内径測定を可能にする条件は二つある。一つ目の条件は測定位置が特定可能なことであり、図2.1において、その条件はレンズL₂による集光位置 r_0 と試料の r がほぼ等しいことである。幾何学的に f_1 , f_2 , h および r_0 の間の関係を導き、 $r_0 \approx r$ とすると一つ目の条件は式(2-3)で表される。

$$f_1 \doteq \frac{h \times f_2}{r} \quad (2-3)$$

式(2-3)の関係を図2.5に示す。

二つ目の条件は反射光が試料に遮られることなくCCDに到達することである。図2.6に示すように試料の長さを a とし、その限界状態として内面端部の内径測定を想定した場合、二つ目の条件を満足する反射角の条件は、 $\alpha_0 > \tan^{-1} a/2r$ となり、正反射光を用いることから入射角に関して $\alpha_0 > \tan^{-1} a/2r$ が必要となる。ここで、 $\alpha_0 = \tan^{-1} f_1/h$ であるから、式(2-4)が得られる。

$$f_1 \doteq \frac{a \times h}{2r} \quad (2-4)$$

一般に、 r の公称値は知られているから、式(2-3)および式(2-4)を用いることができる。

正確な内径の測定を行うためには、試料の中心軸と光軸とを合致させることが不可欠である。そこで、本測定装置では試料台に姿勢と位置との調整機構を付加し、二つの軸合せを可能にしている。

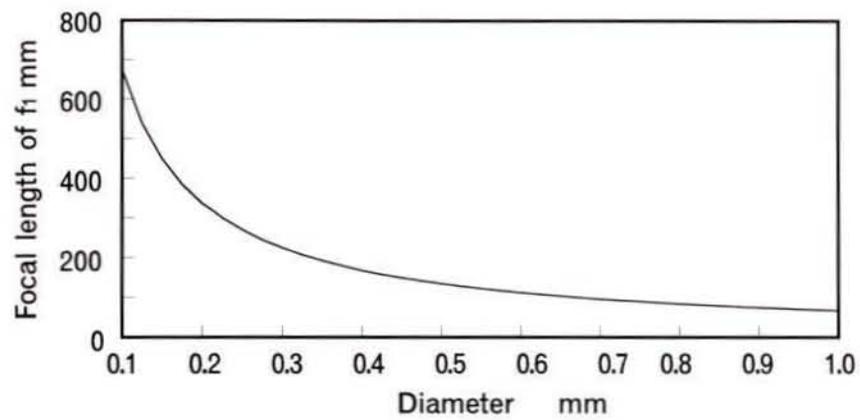


図2.5 測定内径に適合するレンズ L_1 の焦点距離

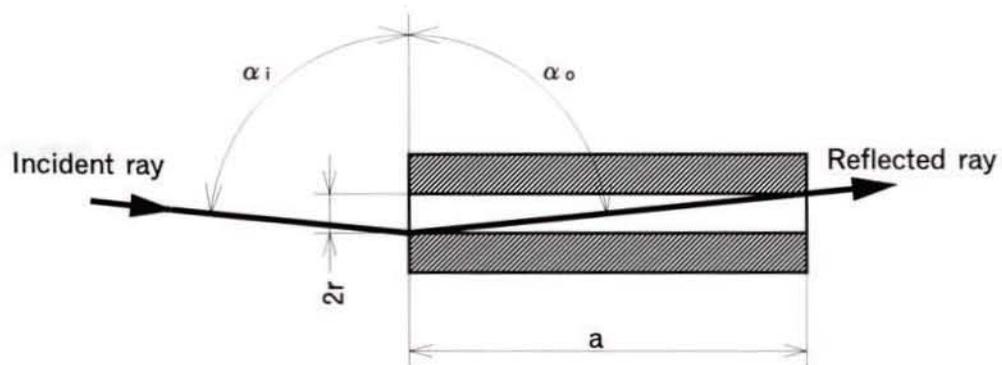


図2.6 反射光の通過条件

2.3.2 画像数の算出

CCDにより得られた画像データから r_N を得るためには、適当な画像処理が要求される¹⁸⁾。ここで採用した画像処理の手順を次に示す。

(1) ウィンドウ処理

CCDからの画像データを画像処理装置に取り込みモニタで観察しながらウィンドウ処理を行い、不要な画像データを削除する。ウィンドウの範囲は目視による。

(2) 結像点の抽出

図2.7にウィンドウ処理後の濃度データの一例を示す。ここでの画像処理の目的は、結像点とノイズを分離し、結像点の中心座標を検出することにある。図2.7から適当なしきい値を選択することで4個の結像点とノイズとが分離可能であることが推測されることから、固定しきい値処理によりノイズの除去を行う。測定対象により画像の濃度分布が異なるので、適当なしきい値を一義的に定めることができない。そこで、濃度の最頻値をしきい値の初期値として、4点の結像点が抽出されるまで一定値を加算しながら逐次処理を行う。加算幅は図2.7に示す濃度のピーク値と最頻値の差の1/10とする。ラベリングされた一つの連結領域の画素数が数点以内と小さい場合にはノイズとして除去する。ただし、結像点の抽出を効率的に行うため、最終的なしきい値は2.5。1項の実験結果により決定する。

(3) 結像点の中心座標値および画素数 r_N の算出

4個の結像点の中心座標は、式(2-5)で表される画像の濃度を考慮した重心(g_x, g_y)により求める。

$$g_x = \frac{\sum_i \sum_j x_i \times b_{ij}}{\sum_i \sum_j b_{ij}} \quad (2-5)$$
$$g_y = \frac{\sum_i \sum_j y_i \times b_{ij}}{\sum_i \sum_j b_{ij}}$$

ただし、 x_i, y_j : 画素の座標

b_{ij} : 各画素の濃度

第2章 斜入射光線の反射を利用する小穴内径測定法

2.1 緒言

小穴の内径測定には光学式測定顕微鏡や投影検査器による影法師法が広く用いられている。それらの測定器で分解能や精度の点で不十分な場合には、電子顕微鏡が用いられる場合がある。光学式測定顕微鏡などはいずれも小穴の内面を直接測定する方法ではないため、測定対象は穴の端面となり、それが内径とみなせるような薄い試料にあげられた小穴の場合に適した測定器と言える。穴の内面を直接測定する測定器としては、測長機や三次元座標測定機、空気式コンパレータ、電気式コンパレータなどがあるが、それらの測定器では測定子の大きさやそれを支えるシャンク部の長さ等により、測定可能な穴の径や長さに大きな制約がある。現在、汎用機として最も実用性が高いと考えられる小穴の内径測定器としては、Perflektometer (Leitz社)¹⁴⁾と呼ばれる光学装置がある。しかし、測定可能な穴の長さに限界がある。その他に光波干渉を用いたもの¹⁵⁾や三角測量方式のもの¹⁶⁾が提案されているが、測定可能な最小内径は前者で20mm、後者で9.5mmと報告されていて、比較的大きな内径を測定対象にしている。

上述した内容からすれば、従来技術では小径で長い穴の測定が困難な課題といえる。そこで、本研究ではアスペクト比(穴の長さ/内径)が大きく、貫通した小穴の内径測定を行うことを目的に、斜入射光線の反射を利用した新たな測定方法の提案を行う。目標とした内径は、他の測定機器では測定が困難な0.1~1mmとする。提案する測定方法は、小穴内面に大きな入射角で照射した光の正反射光をCCDカメラ(以下、CCDと称する。)により捕捉し、幾何光学的な原理に基づく解析から、小穴内径を測定するものである。性能の確認のため、光ファイバコネクタに用いられるアスペクト比が大きいフェルール(内径0.125mm、長さ約10.5mm)を試料に、測定実験を行う。また、表面粗さが測定値に及ぼす影響についても検討を行う。

r_N は得られた4個の中心座標から最小二乗法により算出する。なお、図心による中心座標の算出方法もあるが、精度良く中心座標を得るため、後述する実験結果から重心を採用する。

2. 4 実験方法

2. 4. 1 画像処理

2. 3. 2項(2)および(3)に示す処理を効率的にかつ精度良く行うためには、ラベリングに要する演算回数が最小で、しきい値に依存せずに4個の結像点の中心座標を得る必要がある。そこで、しきい値を11段階に変えて得られる半径値 r の違いについて実験を行う。また、図心による半径値 r と重心によるそれとの比較を行う。

2. 4. 2 測定装置の校正

式(2-2)の右辺第1項の $G(f_3/f_4)$ および第2項の $(f_2/f_1)h$ の値を直接得るため、標準試料を用いて校正を行う。標準試料としては内径の知られたリングゲージが本来望ましいが、JIS規格¹⁹⁾では ϕ 1mm未満のリングゲージが定められておらず、入手が困難である。測定装置は4本の光線のうち向かい合う2本を用いるとすきま測定が可能である。そこで、標準試料として複数のブロックゲージを密着させて作製したすきま(以下、標準すきまと称する。)を用いた。標準すきまの寸法は測定装置の測定範囲を考慮して、0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0mmの10種である。

実験対象とした焦点距離 f_1 は、64, 100, 200, 400, 640mmの5種である。なお、CCDはX方向とY方向において画素の大きさが異なることから、2方向を個別に校正する。

2. 4. 3 フェルール内径の測定

実際の試料として光ファイバコネクタ部品のフェルールを用いる。図2. 8にフェルールの形状および寸法を示し、表2. 1に測定実験の割付けを示す。反復Rは一連の測定実験の回数を示す。焦点距離FはレンズL₁の焦点距離設定値 f_1 であり、その水準は測定対象内径を ϕ 0.125mmとしているので、図2. 5にしたがって $f_1=400, 640$ mmとする。試料Wは同一ロットからランダムに選択した5個である。測定位置Pは図2. 8に示す端部近傍P₁および中央部P₂である。

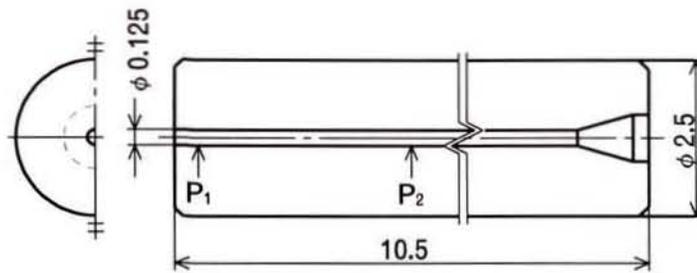


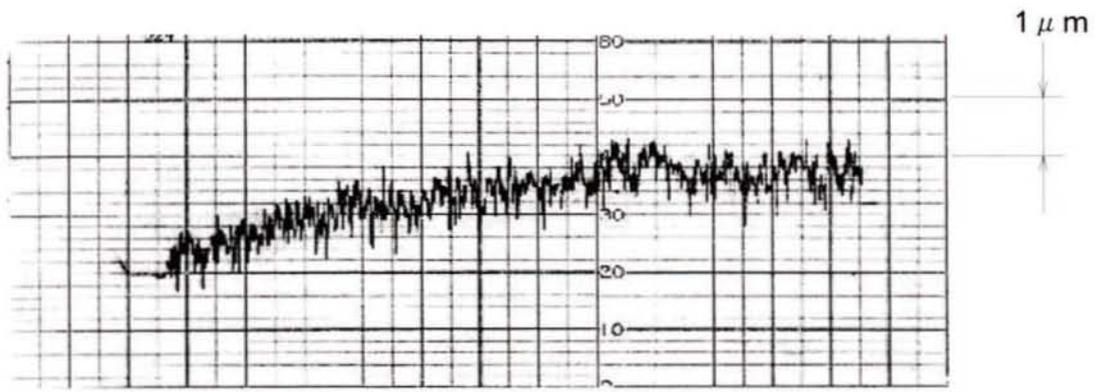
図2.8 フェルールの形状および寸法

Table 2.1 Measurement of hole diameter of ferrule

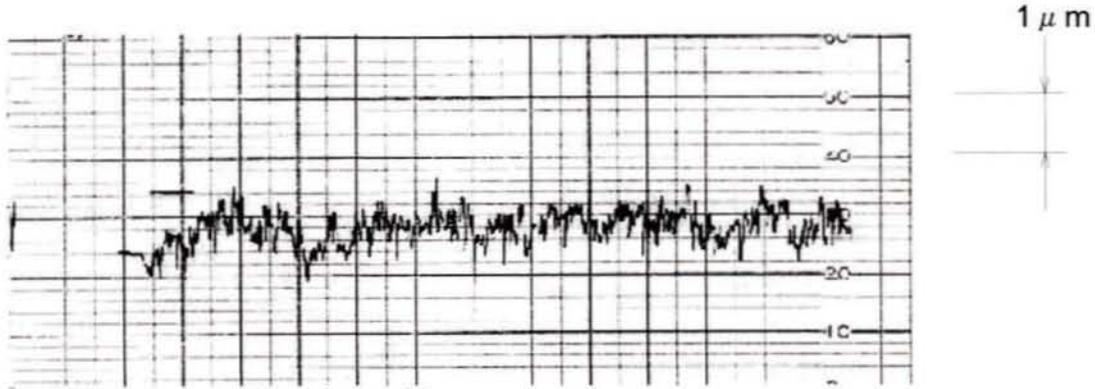
Factor		Level of factor
Replication	(R)	2
Focal length of f_1	(F)	2
Specimen	(W)	5
Measurement position	(P)	2
Repetition	(n)	2

2.4.4 粗面の測定

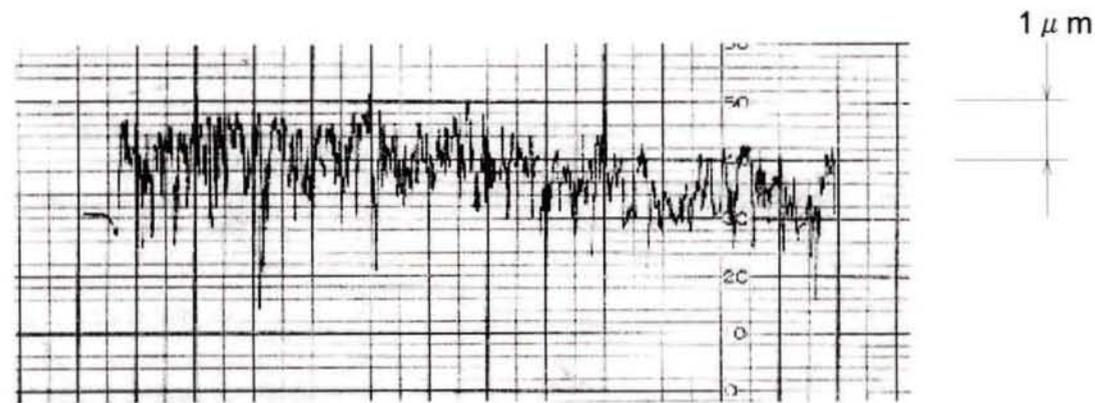
光の反射を応用した測定装置は、測定面の表面性状の影響を受けやすいことが指摘されている²⁰⁾。ここでは、表面性状を表す要因の一つである表面粗さを対象に、それが測定値に与える影響について実験を行う。小穴内面の表面粗さを直接測定するのは困難であることから、試料として研磨紙により測定面を不規則な粗さに調整したブロックゲージを用いる。表2.2に試料の表面粗さの算術平均粗さRaおよび最大高さRyの測定結果を示し、図2.9に粗さ測定の記録を示す。ただし、試料K_iは通常のブロックゲージである。



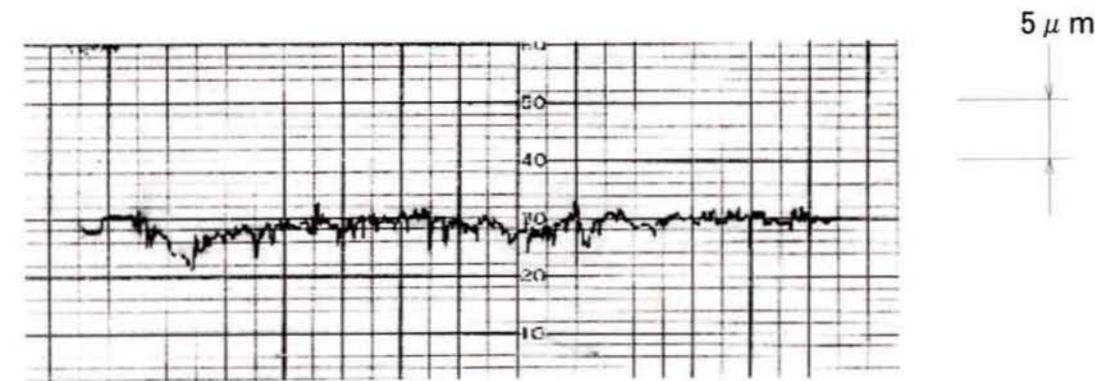
Specimen K₂



Specimen K₃



Specimen K₄



Specimen K₅

図2.9 表面粗さの測定記録

Table 2.2 Specimens for examining influence of surface roughness

Specimen	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅
Ra(μm)	0.01	0.10	0.19	0.34	0.54
Ry(μm)	0.08	0.8	1.6	2.7	4.6

この実験では図2. 1に示す光線①を試料台に設置したブロックゲージに照射し、測定装置の光軸OO'と直交する方向にブロックゲージを0.05mmピッチで変位させて結像点の移動量を検出する。変位量はリニアエンコーダタイプの測長センサ(最小表示値:0.1μm)により設定する。

2. 5 実験結果および考察

2. 5. 1 画像処理の結果について

図2. 10にしきい値を変えて得られたフェルールの内径測定における偏差値を示す。ここで、偏差値は得られた11個の内径の平均値からの差を意味する。横軸の単位は図2. 2に示す4個の結像点を得られる最小しきい値(最小濃度値)とピーク濃度値との間を10等分した比で示す。

図2. 10によれば、しきい値の設定により、内径の測定値には差異がある。しかし、この測定装置では1画素が約3μmに当たるので、その差異はわずかとなっている。図2. 10(c)において横軸が0の場合を除き、偏差はレンジで1μm程度である。1μmは換算すると0.3画素である。したがって、結像点の抽出に用いるしきい値は最小しきい値に対して10~20%程度の余裕をとれば十分であると考えられる。また、図心による値と重心による値との差は小さく、大きく見積もっても0.1μmであるが、ばらつきは小さい方が望ましいことから、濃度を考慮した重心の値を採用するのが適当と考えられる。そこで、以下の実験では最小しきい値に対し20%加算した値で4個の結像点を抽出し、それらの中心座標を重心により求める。

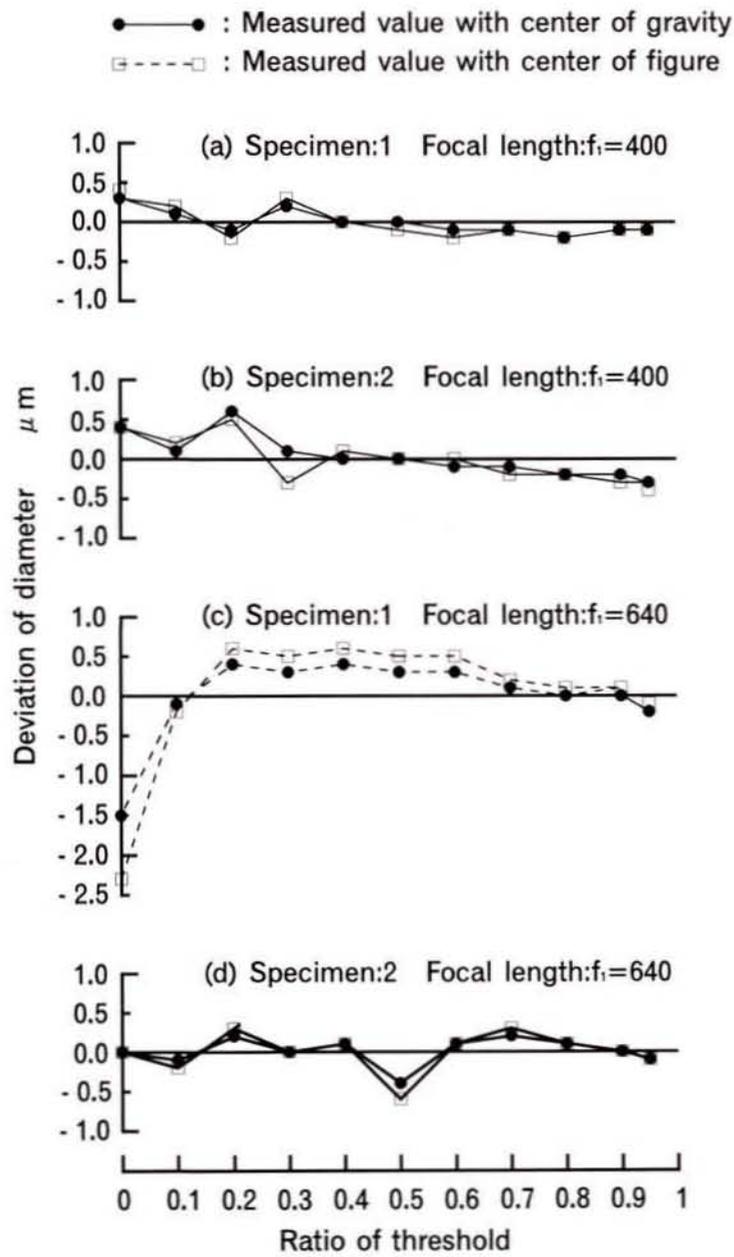


図2.10 内径の測定値におよぼすスレッシュホルドの影響

Table 2.3 Analysis of variance on calibration test of apparatus

(Unit: $0.1 \mu\text{m}^2$)

Factor	S	f	V
β	25684.6	1	25684.6
e	1.0	6	0.2
Total T	25685.6	7	

S : Sum of squares, f: Degree of freedom, V: Variance
 β : Regression term, e: Error term

2. 5. 2 測定装置の校正結果について

表2. 3に標準すきまを用いてx方向を校正した場合の分散分析結果を示す. そのときの校正式を式(2-6)に示す.

$$r = 0.0019731 r_s + 0.03616 \quad (\text{mm}) \quad (2-6)$$

校正式における誤差分散 $V_{\epsilon'}$ は, 回帰項の偏差平方和を S_{β} , 誤差項の不偏分散を V_{ϵ} , 標準すきまの個々の寸法を M_i , その個数を c として式(2-7)で表される²¹⁾.

$$V_{\epsilon'} = \frac{V_{\epsilon}}{\frac{1}{u}(s_{\beta} - V_{\epsilon})} \quad (2-7)$$

ただし,

$$u = c \sum_{i=1}^c (M_i - M_m)^2, \quad M_m = \frac{\sum_{i=1}^c M_i}{c}$$

表2. 3の数値により計算を行うと校正式における誤差分散は, $V_{\epsilon'} = 0.64 \mu\text{m}^2$ となる. 複数回の校正実験結果に基づいて誤差分散を総合的に評価すると, 大き目にみてそれは, $V_{\epsilon'} = 1.0 \mu\text{m}^2$ である.

Table 2.4 Analysis of variance on measured value of hole diameter

(Unit: 0.1 μm^2)

Factor	S	f	V
R	627.2	1	627.2
F	7296.2	1	7296.2
W	1206.4	4	301.6
P	819.2	1	819.2
e_3	6184.8	32	193.3
e_4	89.0	40	2.2
Total T	16222.8	79	

S : Sum of squares, f: Degree of freedom, V: Variance

2. 5. 3 フェルール内径の測定結果について

表2. 4にフェルールの内径測定値の分散分析の最終結果を示す. 表2.4における e_3 は, 検定の結果, 効果の認められなかった反復R, 焦点距離F, 試料Wおよび測定位置Pに関する交互作用をプールしたものである. また, e_4 は測定の繰返し誤差を表す. 表2. 4からフェルールの内径測定における誤差を求める. 測定誤差の要因としては反復R, 焦点距離F, 測定位置P と考えられる. したがって, 測定誤差の σ_a はそれぞれの要因の純分散として得られる σ_R^2 , σ_F^2 , σ_P^2 , σ_{e3}^2 , σ_{e4}^2 から式(2-8)で表される.

$$\sigma_a = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_F^2 + \sigma_P^2 + \sigma_{e3}^2 + \sigma_{e4}^2} \quad (2-8)$$

ここで, 分散の期待値は式(2-9)²²⁾で表される.

$$\begin{aligned} E(V_R) &= \sigma_{e4}^2 + 2\sigma_{e3}^2 + 40\sigma_R^2 \\ E(V_F) &= \sigma_{e4}^2 + 2\sigma_{e3}^2 + 40\sigma_F^2 \\ E(V_P) &= \sigma_{e4}^2 + 2\sigma_{e3}^2 + 40\sigma_P^2 \\ E(V_{e3}) &= \sigma_{e4}^2 + 2\sigma_{e3}^2 \\ E(V_{e4}) &= \sigma_{e4}^2 \end{aligned} \quad (2-9)$$

式(2-9)から式(2-10)得て、それぞれの純分散が計算される。

$$\begin{aligned}
 \sigma_R^2 &= \frac{V_R - V_{e3}}{40} \\
 \sigma_F^2 &= \frac{V_F - V_{e3}}{40} \\
 \sigma_P^2 &= \frac{V_P - V_{e3}}{40} \\
 \sigma_{e3}^2 &= \frac{V_{e3} - V_{e4}}{2} \\
 \sigma_{e4}^2 &= V_{e4}
 \end{aligned}
 \tag{2-10}$$

表2.4の数値を用いて式(2-10)から得られる純分散は $\sigma_R^2=10.84 \mu\text{m}^2$, $\sigma_F^2=177.57 \mu\text{m}^2$, $\sigma_P^2=15.64 \mu\text{m}^2$, $\sigma_{e3}^2=95.52 \mu\text{m}^2$, $\sigma_{e4}^2=2.22 \mu\text{m}^2$ となる。これらを式(2-8)に代入して $\sigma_a=1.7 \mu\text{m}$ を得る。ここで、測定対象の内径に応じて焦点距離を最適に定めれば焦点距離Fの影響は除かれるので、測定誤差は、 $\sigma_a=1.0 \mu\text{m}$ となる。 σ_a は前節で得た校正式における誤差を考慮していない。それを含めた測定誤差 σ_T は、誤差の伝播法則により、式(2-11)で表される。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_a^2 + V_{e'}} \tag{2-11}$$

式(2-11)により、焦点距離Fの影響を含めた場合の測定誤差は、 $\sigma_T=2.3 \mu\text{m}$ であり、その影響を考慮しない場合には、 $\sigma_T=1.4 \mu\text{m}$ である。CCDの1画素が $3 \mu\text{m}$ 程度の感度であることを考慮すれば、測定誤差は小さく、本研究の方法が満足できる結果をもたらしていることが分かる。

2.5.4 測定値に及ぼす表面粗さの影響について

測長センサの値と結像点の移動量とにより、表面粗さに違いをもたせた5個のブロックゲージそれぞれについて直線回帰式を求める。通常のブロックゲージ K_i の直線回帰式における誤差を基準とし、表面粗さの影響についての検討を行う。直線回帰式における誤差 σ は、測定装置の校正時と同様に式(2-7)から得られる誤差分散 $V_{e'}$ を用いて式(2-12)より求める。

$$\sigma = \sqrt{V_{e'}} \tag{2-12}$$

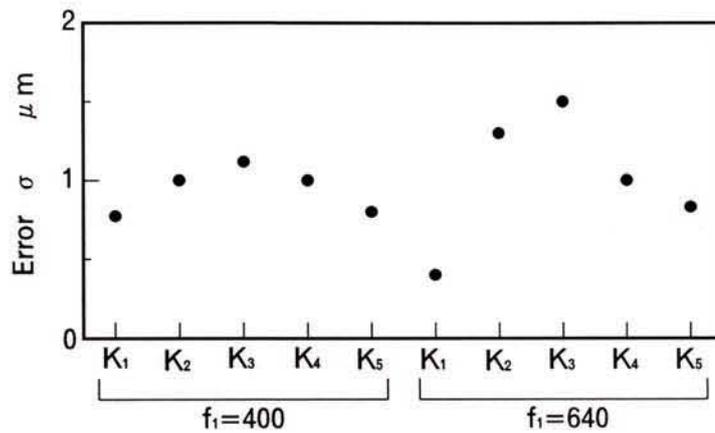


図2. 11 測定値に及ぼす表面粗さの影響

図2. 11にブロックゲージごとの誤差を示す. 図から, 表面粗さが悪化すると誤差は大きくなる傾向にあるが, すべてについて σ は $1.5\mu\text{m}$ 以下であり, 表面粗さはそれほど大きな影響を与えていないことが確かめられる. 表面粗さの影響を大きく受けないのは, 光の入射角が大きい
ため, 粗面であつても十分な反射光が得られたことによると考えられる.

2.6 検 討

画像処理の方法の検討においては、予備実験としてフィルタ処理や平滑化処理等も試みた。詳細は省略するが、結像点の中心座標値におよぼすそれらの影響は、レンジで0.2画素程度であった。しかし、反射率が著しく低い試料や表面に規則的な粗さを有する試料などを測定対象とした場合、ノイズレベルが高くなることが予想され、新たな画像処理方法の検討も必要と考えられる。

CCDは分割型のセンサであることから、測定誤差の改善や感度の向上を図るためには、約2倍である本光学系の倍率を高めることが一つの方法として考えられる。一方、それを行うことにより、画像の質を損ね精度の低下を招く可能性があることから、高感度化が期待される非分割型センサの採用も検討する必要がある。

試料のアライメントは結像点の目視により行った。測定結果から判断すれば、そのことによる問題点は少ないと考えられるが、アライメント誤差が測定誤差に及ぼす影響を明確にする必要がある。

一般に、光学的な測定装置では、光源の選択も重要な要素である。今後、その適否についての検討が必要である。

2.7 結 言

本測定法の原理と試作した測定装置の性能を確認するため、幾つかの実験を行った。その結果は次のとおりである。

- (1) 4本の光線を大きな入射角で試料内面に照射し、その反射光をCCDで検出して幾何光学的な解析から内径を評価する方法、すなわち斜入射光線の反射を利用する小穴の内径測定装置を試作した。
- (2) 本測定装置により光ファイバコネクタの構成部品であるフェルール（公称内径が0.125mm、長さが10.5mm）の試料を対象にした実験を行い、本測定法により高アスペクト比（約90）の貫通穴の内径測定が可能であることを確認した。
- (3) フェルールを試料にした実験により、本測定装置の測定誤差は標準偏差で $2.3\mu\text{m}$ であり、特定の条件下では、それが $1.4\mu\text{m}$ であることを示した。
- (4) 研磨紙により測定面を不規則な粗さに調整したブロックゲージを試料に用いた実験から、本測定法は試料表面の粗さの影響を受けるものの、そのことによる測定誤差は小さいことを示した。

第 3 章

斜入射光線反射法の小径穴真円度測定への適用

第3章 斜入射光線反射法の小径穴真円度測定への適用

3.1 緒言

工業製品の高集積化にともない、小型化した部品や微細な加工を施した部品の必要性が高まり、そのための加工技術の開発が行われている^{23), 24)}。同時に、加工には必ず測定が伴うことから、小型部品、微細加工部品を対象にした測定技術の開発が求められている。

小さな形体の測定を行う場合、軸のように外側の寸法や形状の測定には既存の測定機器を用いることが比較的容易である。一方、穴、溝といった内側形体の場合には光学式測定顕微鏡や小さな測定子を用いた三次元座標測定機等によることが多い。しかし、前者は機能面である内側の測定ができないことや後者は測定子の大きさの制限を受けることなどの問題があり、十分な測定が困難である。このような背景から、第2章において小穴の内径を対象にした斜入射光線の反射を用いた測定法について述べた。ここでは $\phi 0.1\text{mm} \sim \phi 1\text{mm}$ 程度の内径で、かつ高アスペクト比の穴の真円度測定法を提案しその検討結果を述べる。

適切な光学系を用いて光軸と平行に置かれた平面に光を斜めに照射してその正反射光をCCDに結像させたとき、CCDにおける反射光の結像位置は光軸と平面との距離に依存する。本章では、第2章で述べたこの原理を応用し、試料回転用の装置を付加することによって穴内面の真円度測定を可能として行く。回転テーブルにセットした試料の小径穴内面に光を照射し、試料が回転したとき、形状偏差から生じる内面の変位がCCDで検出され、その結果から真円度を評価することができる。実験では、真円度が既知のリングゲージを標準試料とした測定や内径 0.125mm 、長さ約 10.5mm の小径穴を有する試料の測定を行い、本測定装置により小径穴内面の真円度測定が可能なことを確認した。また、回転テーブルの運動誤差などの補正により、高精度な真円度測定が可能なことを示した。

3.2 測定原理および測定装置

3.2.1 測定装置の構成と原理

図3.1に測定装置の光学系および座標系を示す。この光学系は第2章の図2.1の場合と同様である。光源、ピンホールおよびレンズ L_1 、 L_2 は投光用光学系で、レンズ L_3 、 L_4 およびCCDは受光用光学系である。それぞれの素子は次のように配置されている。

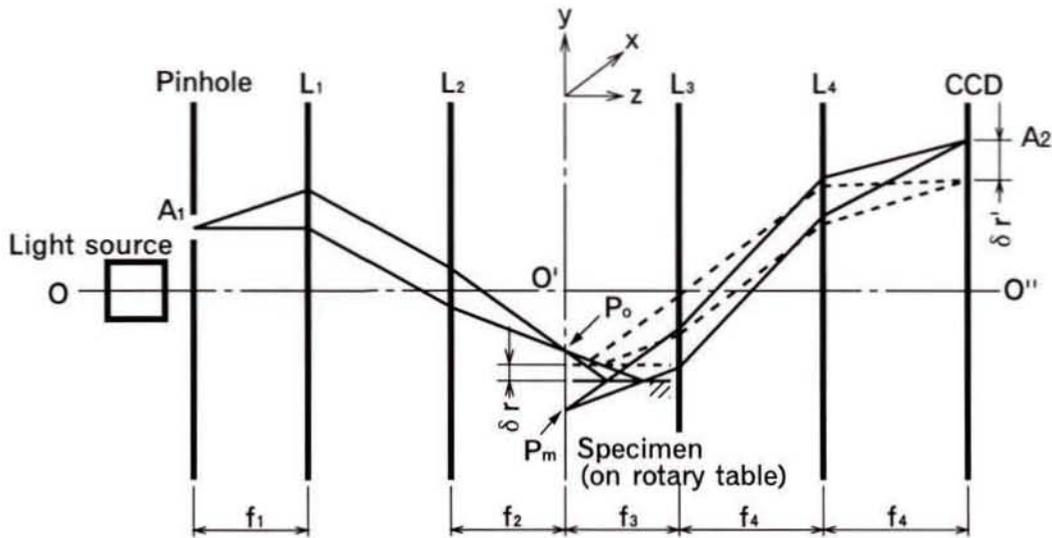


図3.1 測定装置の光学系とその座標系

ピンホールはレンズ L_1 の前側焦点位置にあり、レンズ L_2 は L_1 に対して適宜配置する。レンズ L_3 は、その前側焦点が L_2 の後側焦点と一致する位置に置く。 L_4 は、その前側焦点が L_3 の像側主点と一致する位置に配置する。CCDはレンズ L_4 の後側焦点位置に配置する。

試料を載せる回転テーブルはレンズ L_2 と L_3 の間に置かれたステージに設置する。図3.2にその構成を示す。ステージは回転テーブルの位置を調整するために、 x 、 y および z 方向への移動機構を備えている。試料は回転テーブル面に取り付けられた試料台にセットされる。試料台は試料と回転テーブルの中心軸のアライメント用の x 、 y 軸の微動機構に保持される。回転テーブルには高精度仕様の玉軸受を用いている。回転はACサーボモータと減速機により制御され、回転角の分解能は 0.1° である。CCDは1/3インチ(41万画素)、画像処理装置は (512×512) 画素、256階調である。

ピンホール A_1 からの光は、レンズ L_1 および L_2 を通り、点 P_0 に集光しながら測定面に照射される。測定面での正反射光はレンズ L_3 および L_4 によりCCD上の A_2 に結像する。幾何光学的な原理から集光点 P_0 の測定面に関する鏡像 P_m を新たな点光源として考え、鏡像 P_m から受光用光学系に向かう光路を計算することで結像点 A_2 の位置を求めることができる。簡単のために光学系を薄肉レンズで構成されたものと仮定した場合、測定面の移動量 δr と A_2 の変位量 $\delta r'$ の間に

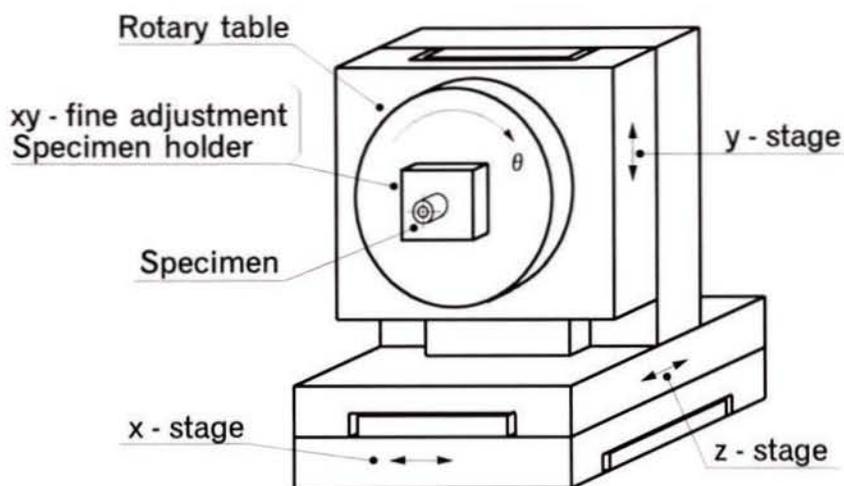


図3.2 試料台の構成

は式(3-1)の関係が成り立つ。

$$\delta_r = \frac{f_3}{2 f_4} \delta_r' \quad (3-1)$$

δ_r' はCCDにおいて画素数 δ_N として得られることから、1画素を長さに変換する感度係数 G を導入して式(3-1)は式(3-2)に書き換えられる。

$$\delta_r = G \frac{f_3}{2 f_4} \delta_N \quad (3-2)$$

円筒状の試料を回転させたとき、円の形状偏差は δ_N の変化量として検出することができ、それを式(3-2)を用いて δ_r に変換して解析することにより試料の真円度が評価可能となる。

3.2.2 結像点の検出および感度

画像処理によりCCD上の結像点 A_2 を検出する。画像処理により結像点の位置を得る手法はいくつか考えられるが、ここでは、第2章で良好な結果が得られた画像の濃度を考慮した重心点を結像点とする。

式(3-2)における δ_v の係数は、回転テーブル面にセットしたブロックゲージを測定面とし、それをy軸方向に平行移動させたときの移動量 δ_r と結像点の変位量 δ_v により求める。ブロックゲージの移動量 δ_r はリニアエンコーダタイプの測長センサ(分解能:0.1 μm)により検出する。その結果、係数は0.60 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ である。

3. 2. 3 回転テーブルの運動誤差の影響

回転テーブルを基準にして円形状の測定を行う場合、その運動誤差と試料の形状偏差が重ね合わさったデータが得られる。そのため、あらかじめ運動誤差を評価し、データからそれを除いて形状偏差を評価する必要がある。

運動誤差を評価する手法はいくつか提案されている^{25),26),27),28)}が、ここでは球を標準試料(以下、標準球と称する。)とした評価を行う。標準球は市販の円筒形状測定機(Rank Taylor Hobson:TALYROND300)による測定により0.1 μm 以下の真円度値の結果を得ている $\phi 8$ のルビー球を使用する。

運動誤差には径方向の誤差と軸方向の誤差がある。径方向の運動誤差は、回転テーブルに仮想的な基準軸を想定したとき、基準軸と直交する方向への平行移動によるものと基準軸に対する回転軸の角度誤差によるものがある。同様に、軸方向の運動誤差には基準軸方向への平行移動によるものと角度誤差によるものがある。このうち径方向の運動誤差が真円度測定に直接影響を及ぼすことから、その評価を行う。

図3. 3に標準球を回転テーブルに取り付けて回転させたときに発生する運動誤差を示す。回転テーブルの回転角を θ とし、基準軸と直交する方向および基準軸方向への平行移動による誤差を $e_r(\theta)$ および $e_a(\theta)$ 、角度誤差に起因する誤差を同様に $e_r'(\theta)$ 、 $e_a'(\theta)$ とする。このとき、基準軸から角度 ϕ の位置に付けられた検出器Kで得られるデータ $E(\theta)$ は一般に式(3-3)で表される。

$$E(\theta) = \{e_r(\theta) + e_r'(\theta)\} \sin \phi + \{e_a(\theta) + e_a'(\theta)\} \cos \phi \quad (3-3)$$

式(3-3)において検出器Kの位置を $\phi \doteq \pi/2$ とすると第2項は近似的に消去され、式(3-3)は式(3-4)に書き換えられる。

$$E(\theta) \doteq e_r(\theta) + e_r'(\theta) \quad (3-4)$$

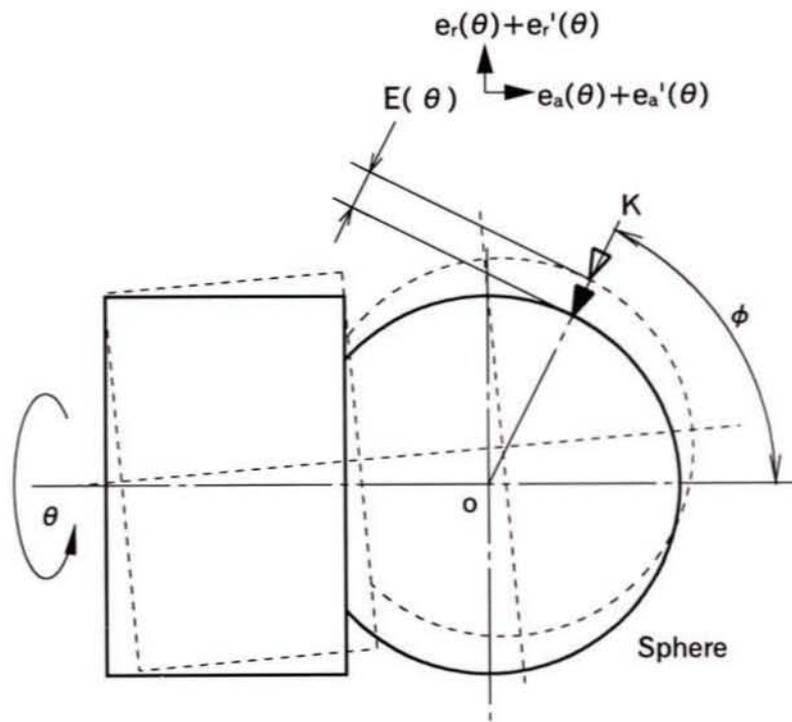


図3.3 回転テーブルの運動誤差

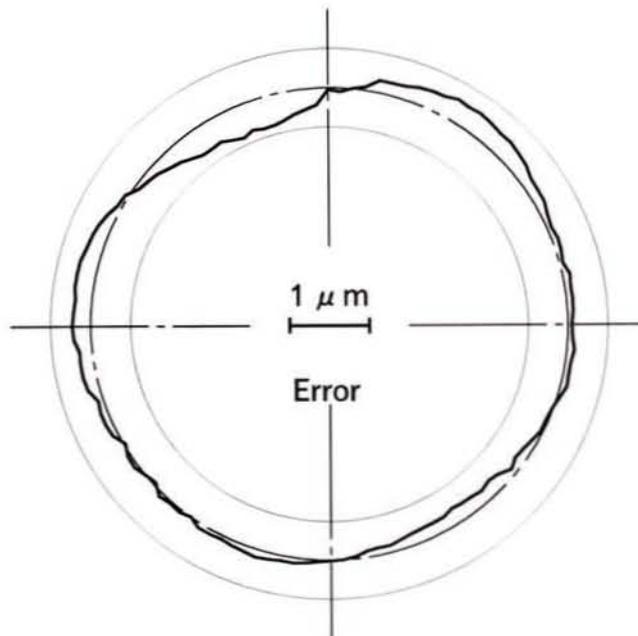


図3.4 回転テーブルの径方向の運動誤差(標準:球)

式(3-4)から近似的に軸方向の運動誤差の影響を受けることなく径方向の運動誤差が測定されることが分かる。

標準球を回転テーブルにセットし、差動変圧器型の電気マイクロメータ(分解能:0.01 μm)を検出器として、標準球の真円度を測定する要領で運動誤差の測定を行う。図3.4にフーリエ級数のあてはめにより標準球と回転テーブルの偏心補正を行った後の結果を円形状にして示す。

図3.4において一点鎖線を基準円とし、運動誤差 $E(\theta)$ をそこからの偏差として実線で示す。偏差の最大幅で運動誤差を評価すると0.7 μm である。このときのサンプリング間隔は 3° 、データ総数は120である。

3.2.4 試料設定におけるアライメント誤差の影響

試料の中心軸と回転テーブルの中心軸を一致させてセットするのは困難であるから、測定値には偏心による誤差と二つの軸の傾きによる誤差が含まれる。前者は、一般に行われるフーリエ級数のあてはめなどにより、実用上問題のない程度に補正可能であるが、後者については光の反射の性質を考慮した検討を要する。

図3.5に試料の中心軸が傾いた場合の測定面における光の反射の状況を図3.1の座標系に合わせて示す。図において、中心軸の傾き角を ω 、傾きの無い測定面を S_0 、 ω の傾きを有する測定面を S_ω 、集光点 P_0 の測定面 S_ω に関する鏡像を P_m' 、集光点 P_0 および測定面の光軸からの距離を r_0 および r 、レンズ L_3 の鏡枠をBとする。

光軸に対し傾きを有する測定面に入射した光の反射は三次元的に扱う必要があるが、真円度を測定する場合の変位の検出がy軸方向であることを考慮して、ここでは反射光のyz軸方向成分についてのみ考える。z軸回りの回転テーブルの回転角を θ としたとき、鏡像 P_m' のyz座標は幾何光学的関係から式(3-5)で表すことができる。

$$\begin{aligned} y(\theta) &= r_0 + (r - r_0) \{ \cos 2\omega(\theta) + 1 \} \\ z(\theta) &= -2(r - r_0) \sin 2\omega(\theta) \end{aligned} \quad (3-5)$$

式(3-5)から中心軸の傾きの影響は二つの特徴を有することがわかる。一つ目は鏡像 P_m' からの光により得られるCCDにおける変位量 δ にフーリエ級数をあてはめたとき、傾きの影響は2次の係数に反映されることである。二つ目は、式(3-5)において $(r-r_0) \neq 0$ のとき、 $y(\theta) \neq r_0$ 、 $z(\theta) \neq 0$ となり、集光点 P_0 の位置と測定面の位置が近い場合には中心軸の傾きの影響が小さいことである。

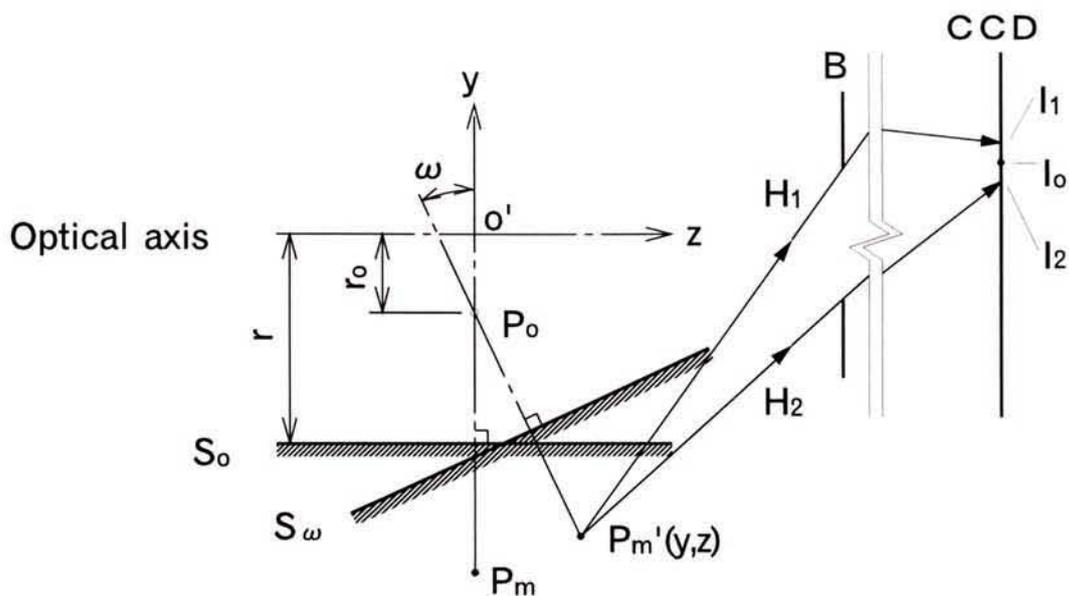


図3.5 測定面が傾きを有する場合の反射光

なお、鏡像 P_m' からの光のCCDでの結像位置は、鏡枠Bを通過することのできる限界の光線 H_1 および H_2 を想定してそれらがCCDに到達する位置 I_1 , I_2 を求め、 I_1 , I_2 の y 軸方向に関する中点 I_0 として扱う。

3.3 測定原理の検証

3.3.1 リングゲージの測定

測定原理の検証を行うためには真円度が既知な小径の標準を用いた評価結果から判断するのが望ましいが、そのような試料は得にくい。そこで、上述の円筒形状測定機による測定から真円度が $0.2\ \mu\text{m}$ であることを確認している $\phi 3.8$ のリングゲージを標準に用いる。

リングゲージの内径は本測定装置の測定範囲を越えるため、光軸と試料の中心軸を一致させると照射した光がリングゲージの測定面に当たらない。そこで、リングゲージの中心軸を光軸から y 軸方向にずらしてセッティングし測定を行う。図3.6に測定値 δ_r にフーリエ級数のあてはめを行い、リングゲージと回転テーブルの偏心補正を行った後の形状偏差を示す。このときの真円度値は $1.7\ \mu\text{m}$ である。

なお、サンプリング条件は標準球測定時と同様である。

3.3.2 運動誤差の補正

図3.4のデータを用いて径方向の運動誤差を補正する場合、補正值と補正対象データの位相が一致していることおよび補正值にノイズ成分が含まれていないことが条件となる。前者については、回転テーブルの分解能が 0.1° であることからその条件は満たされているものと判断される。後者については運動誤差 $E(\theta)$ から高次のフーリエ係数まで求めて効果の大きい次数を抽出して補正值とし、その影響を避ける。図3.7に回転テーブルの運動誤差 $E(\theta)$ にフーリエ級数のあてはめを行って得た係数 a_i および b_i から式(3-6)により計算される振幅 c_i を示す。

$$c_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2} \quad (3-6)$$

図3.7において5次以上の次数では振幅が $0.05 \mu\text{m}$ 以下であることから2次から4次までの成分を補正值とする。

図3.6に示すリングゲージの測定結果に対し、図3.4の運動誤差の補正を行った結果を図3.8に示す。また、図3.9にフーリエ係数から得られる振幅 c_i を示す。運動誤差の補正により、真円度は $1.6 \mu\text{m}$ から $1.2 \mu\text{m}$ に向上したが、この値はリングゲージの真円度 $0.2 \mu\text{m}$ に対し依然として大きい。これは、運動誤差補正後の2次成分に関する振幅が $0.25 \mu\text{m}$ と大きいことを考慮すると、回転テーブルの中心軸に対して試料が傾いてセットされていたためと考えられる。そこで、次項でその補正について述べる。

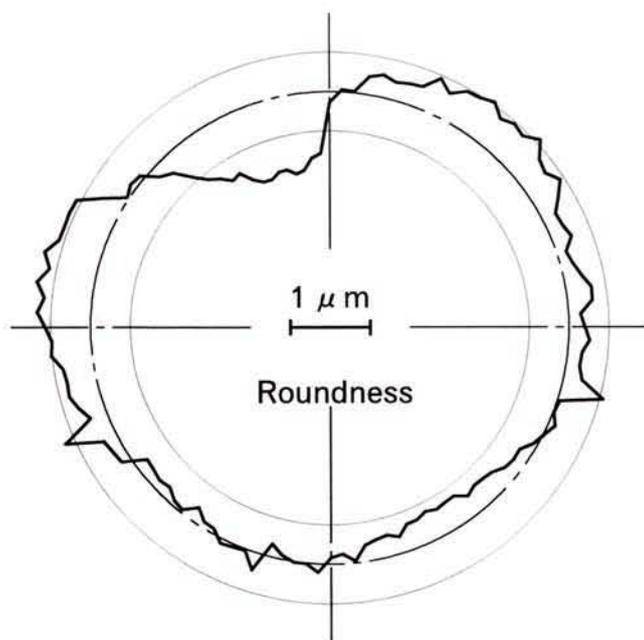


図3.6 リングゲージの真円度

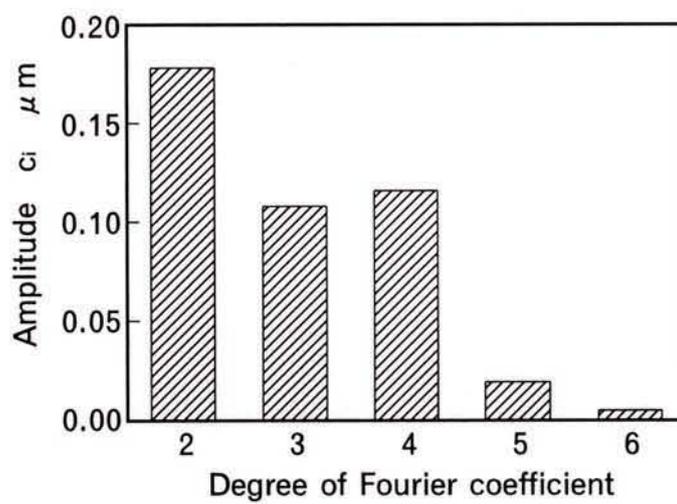


図3.7 回転テーブルの警報項運動誤差に関する振幅

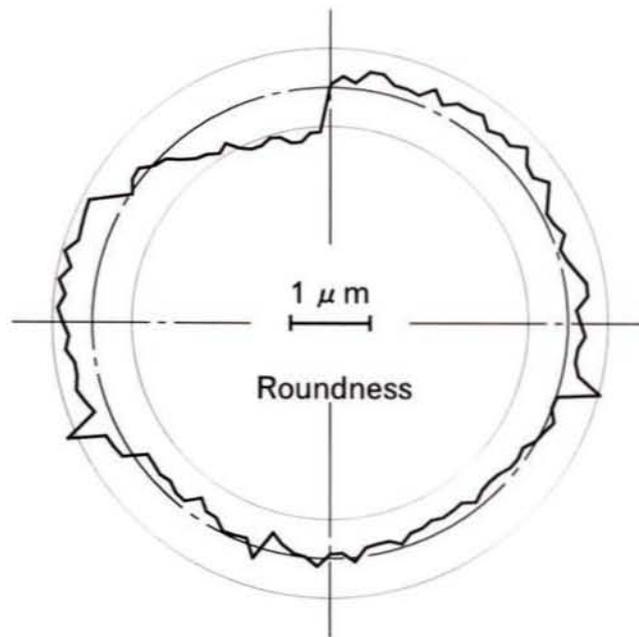


図3.8 リングゲージの真円度
(回転テーブルの径方向運動誤差補正後)

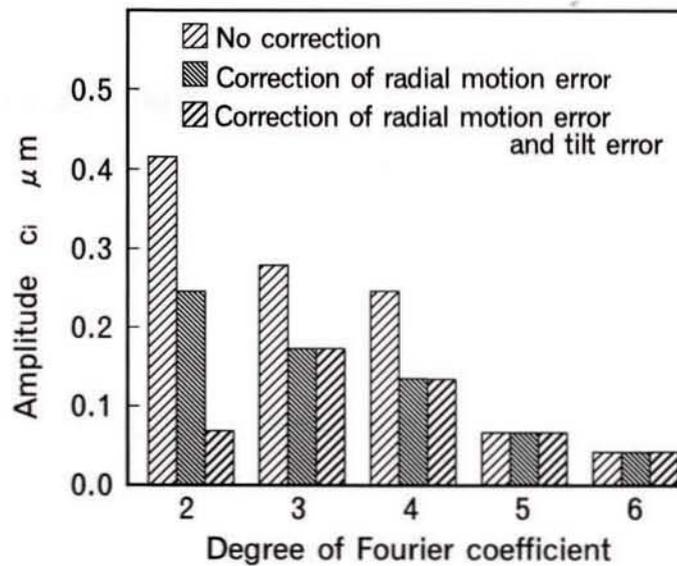


図3.9 リングゲージの形状偏差に関する振幅

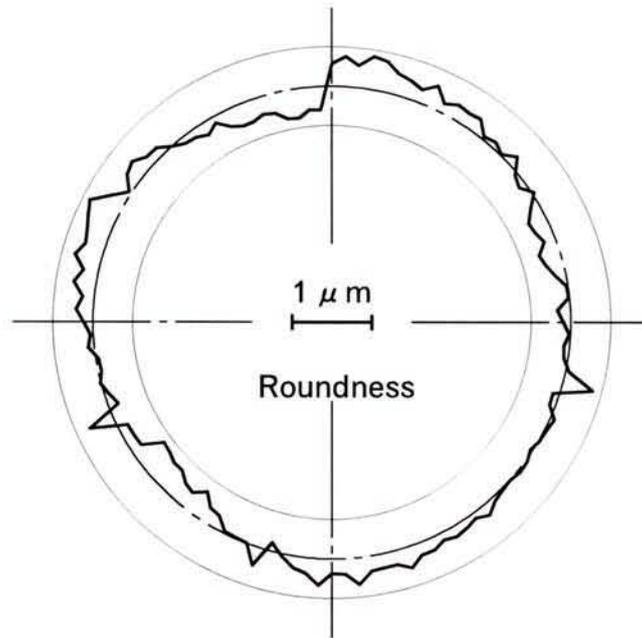


図3.10 リングゲージの真円度
(回転テーブルの運動誤差および中心軸の傾き補正後)

3.3.3 中心軸の傾き誤差の補正

図3.6に示すリングゲージの測定結果に対し、運動誤差と傾きによる誤差を同時に補正した結果を図3.10に示す。二つ誤差の補正により真円度は $0.8\mu\text{m}$ となる。また、図3.9に示すように、2次成分に関する振幅は $0.07\mu\text{m}$ となっている。

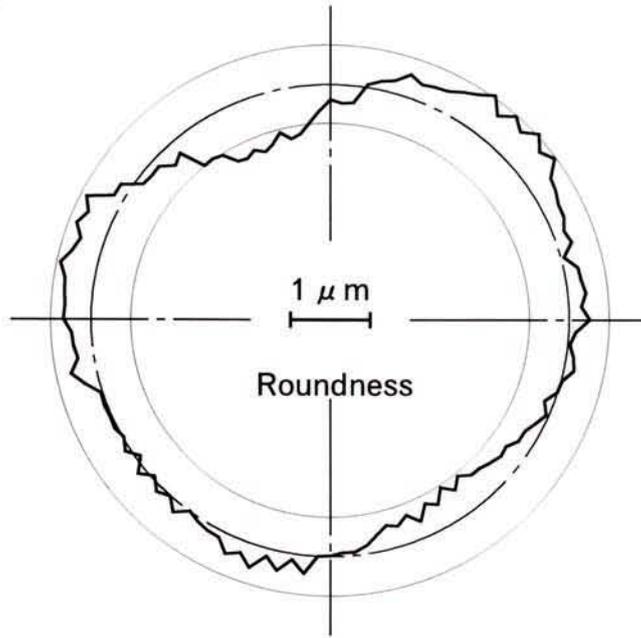
なお、補正に際して必要な式(3-5)におけるパラメータは、リングゲージの真円度測定と同時に得た端面の振れから推定した $\omega=5^\circ$ とその位相および便宜的に定めた $(r-r_0)=0.1\text{mm}$ を用いている。

3.4 小径穴の真円度測定

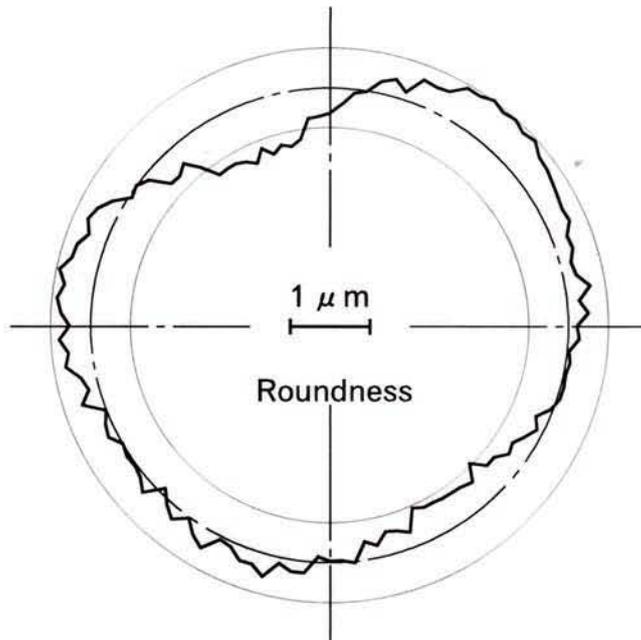
小径穴を有する試料として第2章の図2.8と同じ形状をした光ファイバコネクタ部品のフェルールを2個用い、リングゲージと同様のサンプリング条件により測定を行う。図3.11にフェルール1について偏心補正を行った後の結果を示す。図中、(a)、(b)はフェルール1に関する測定の繰返しであり、それらの真円度はいずれも $1.3\mu\text{m}$ となっている。また、図3.12に回転テーブルの径方向の運動誤差の補正を行った後の結果を示す。このときの真円度は(a)、(b)共に $0.6\mu\text{m}$ である。図3.13および図3.14にフェルール2についての結果を示す。前者が運動誤差補正前で真円度は $1.6\mu\text{m}$ であり、後者が運動誤差補正後で真円度は $1.0\mu\text{m}$ である。

フェルール1で行った繰返しの測定についての問題はなく、また、二つのフェルールは運動誤差の補正により真円度が向上している。

図3.15および図3.16にフェルール1およびフェルール2に関する運動誤差補正前と補正後の振幅 c_i を示す。フーリエ係数の2次成分はリングゲージの場合に比較して小さい。これは、光学系の調整により、3.2.4項で述べた $(r-r_0) \approx 0$ の条件が成立していることによると考えられる。



(a)



(b)

図3.11 フェルール1の真円度

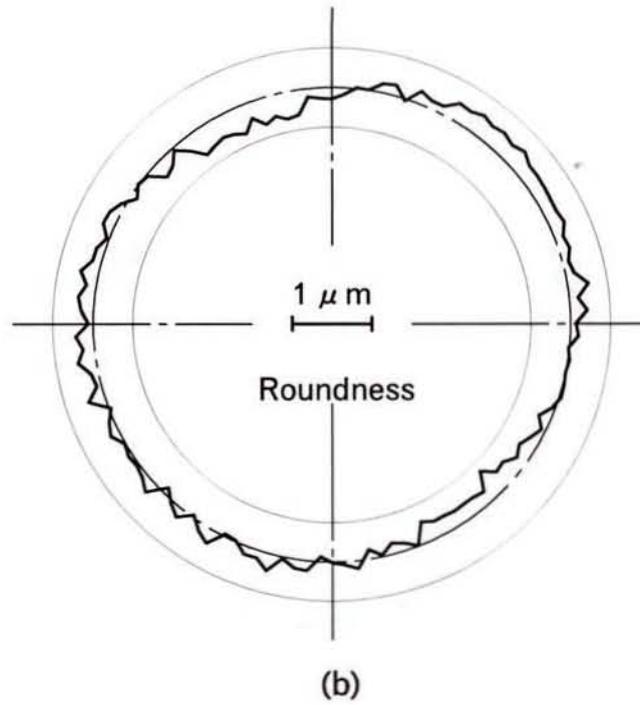
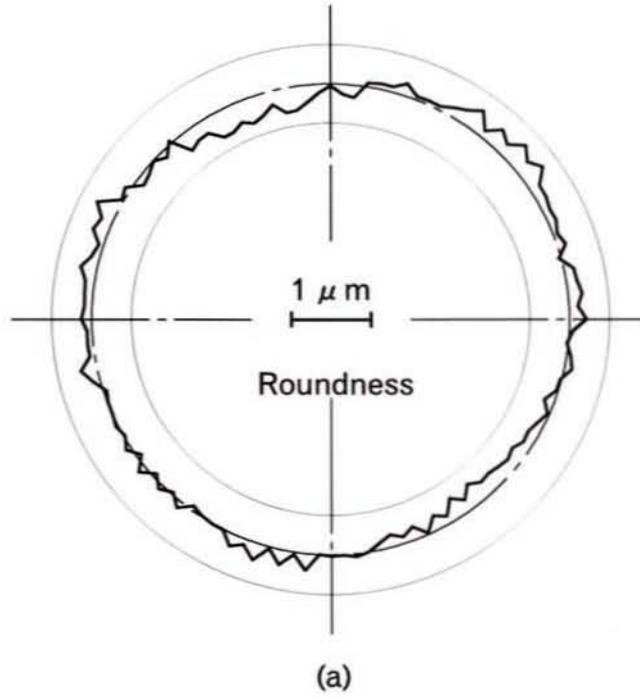


図3.12 フェルール1の真円度
(回転テーブルの径方向運動誤差補正後)

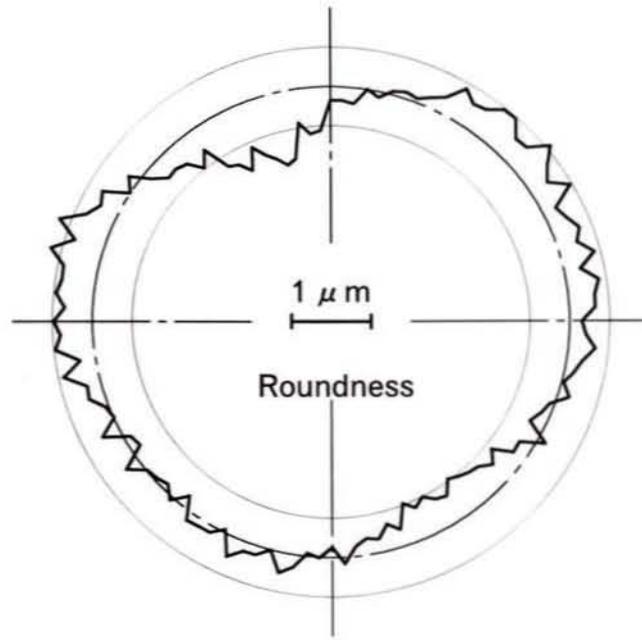


図3.13 フェルール2の真円度

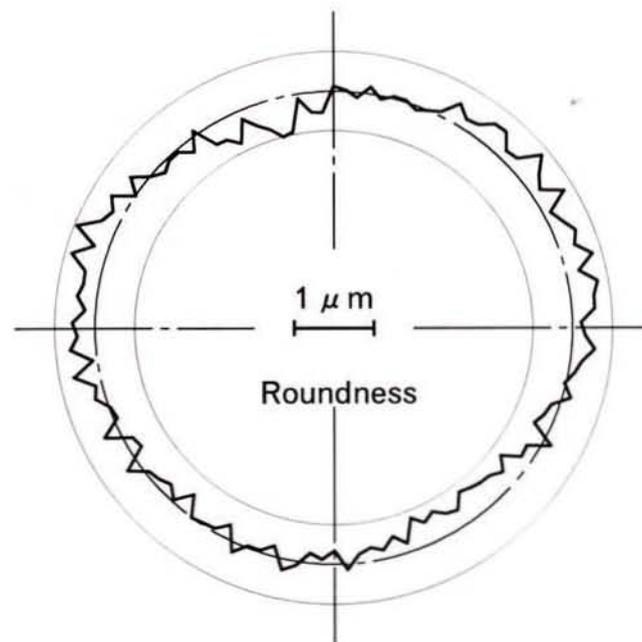
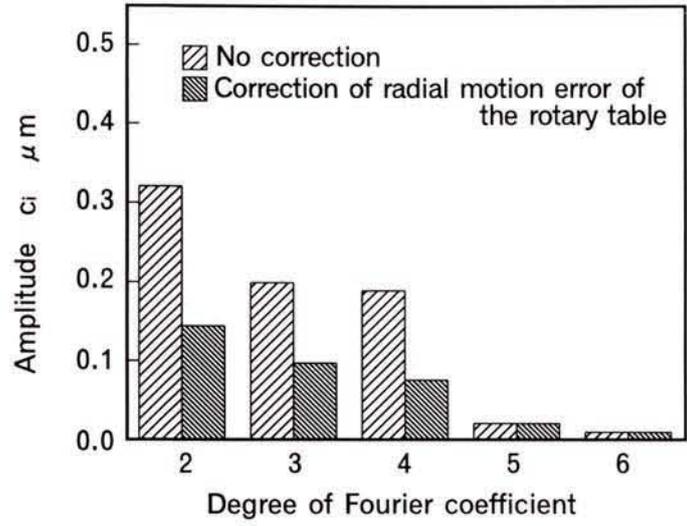
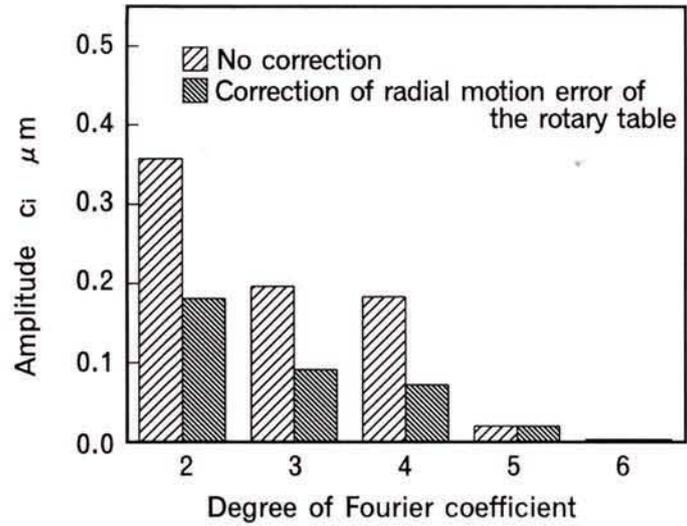


図3.14 フェルール2の真円度
(回転テーブルの径方向運動誤差補正後)



(a)



(b)

図3.15 フェルール1の形状偏差に関する振幅

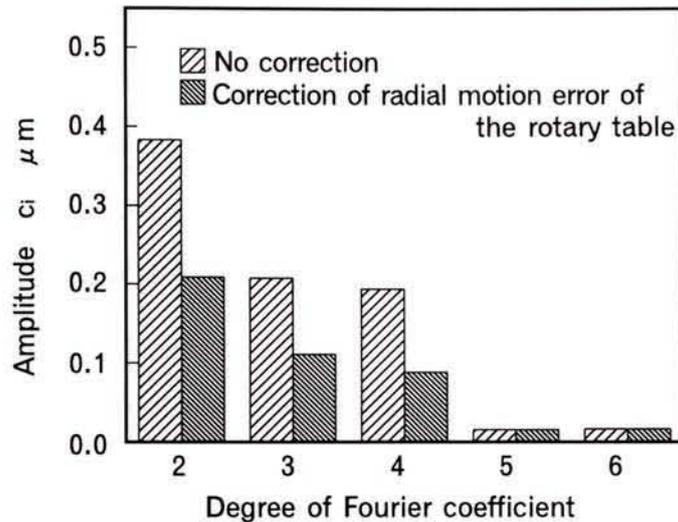


図3. 16 フェルール2の形状偏差に関する振幅

3. 5 測定結果および測定装置についての検討

3. 5. 1 真円度の測定結果について

図3. 6に示すリングゲージと図3. 11および図3. 13に示すフェルールの形状偏差の傾向は位相および大きさが一致している。これは、リングゲージおよびフェルールが図3. 4に示す回転テーブルの運動誤差の影響を同じ程度受けていることによると考えられる。このことから、本研究で提案している測定方法が小径穴の真円度測定に有効であるといえる。

試作した測定装置の繰返し精度は図3. 11に示すフェルール1の測定結果からするときわめて良好である。また、そのことと図3. 10に示すリングゲージの測定結果から判断すると本測定装置の測定精度は、現状で $1\mu\text{m}$ 程度と考えられる。

3. 5. 2 測定装置について

本測定装置は試作段階にあり、光学系の構成要素は市販の製品を用いている。光学的な測定装置は光学系の設計が性能に影響することから、最適なレンズ構成についての詳細な検討が必要と考えられる。また、3. 2. 3節で述べた運動誤差を考慮するとより高精度な回転テーブルの導入が必要である。さらに、3. 2. 4節で述べたアライメント誤差の影響を最小限にとどめるためにはチルト調整機構は不可欠な要素といえる。今後、これらの課題を解決することで、本測定法は、より高精度な真円度測定の要求に対しても応えることが可能と考えられる。

3.6 結 言

高アスペクト比を有する小径穴の内面の真円度測定法を提案し、その測定原理を確認するためいくつかの実験を行った。その結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 第2章で示した斜入射光線の反射を利用した小径穴の内径測定装置に、回転テーブルを付加した小穴内面の真円度測定装置を試作した。
- (3) 真円度が既知のリングゲージ($\phi 3.8$)を試料にした実験から、試作した測定装置により内面の真円度測定が可能なことを確認した。
- (4) 光ファイバコネクタの部品であるフェルール(呼び内径0.125mm, 長さ10.5mm)を試料にした実験を行い、斜入射光線反射法により小径で高アスペクト比を有する小穴内面の真円度測定が可能なことを確認した。
- (5) フェルールを試料に実験から、試作した測定装置の繰返し精度が良好なことを確認した。また、リングゲージを試料にした実験から、本測定装置は現状で $1\mu\text{m}$ 程度の精度を有することを示した。さらに、光学系の構成や回転テーブルの運動誤差、試料のアライメント誤差を考慮することで本測定法はより高精度な測定にも対応可能なことを示唆した。

第 4 章

小径穴の簡易型測定装置の提案と試作

第4章 小径穴の簡易型測定装置の提案と試作

4.1 緒言

工業製品に対する要求はその用途により多様であるが、機能性、安全性、低価格は共通的な課題であり、測定機器についてもその例外ではない。とりわけ、測定機器は必要とされながらも製造機器に比べて直接的に付加価値を生み出さないという認識があり、どちらかといえば簡易化、低価格化への要求が強いように考えられる。このような背景から本研究では、第2章および第3章で述べた原理と方法を用いた小径穴を対象にした内面の内径および真円度測定を目的とした測定装置の簡素化についての提案を行う。その要点は以下の3項目である。

- (1) 光学系の変更によるレンズ点数の低減
- (2) 単レンズの使用
- (3) 回転機構の簡素化

試作した測定装置を用いて光ファイバコネクタの部品であるフェルールを試料にした内径測定および真円度測定の実験を試みる。

4.2 測定装置の構成

4.2.1 構成要素の配置

図4.1に試作した測定装置の光学系を示す。光学系の機能は第2章および第3章で示した図2.1および図3.1と基本を同じくしているが、光学系の簡素化を図るため、投光用光学系のレンズを2本から1本にして試料測定面に光を入射させている。そのため、投光用光学系が図2.1および図3.1と異なるレンズ配置となる。受光用光学系は同一である。なお、パターンは図2.4と同じものを用いるので光は4本となるが、図4.1では簡単のため、2本で示している。レンズ L_1 および L_2 の焦点距離を f_1 および f_2 として、パターンとレンズ L_1 の間隔を $(a_1 + f_1)$ とし、レンズ L_1 と L_2 の間隔を $(f_1 + a_2 + f_2)$ とする。レンズ L_3 の焦点距離を f_3 として、レンズ L_2 と L_3 の間隔を f_3 とする。 a_1 および a_2 は、パターンに設けられたピンホール A_1 の光軸からの高さを h 、レンズ L_1 を通過した光が集光する位置の光軸からの高さを r_0 （通常は試料の内径の公称値を選ぶ。）としたとき、式(4-1)で表される。

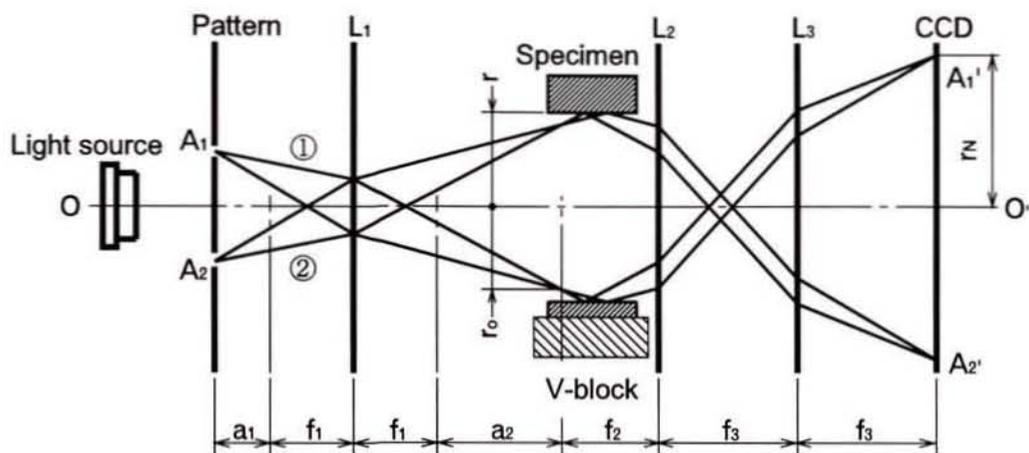


図4.1 測定装置の光学系

$$\begin{aligned}
 a_1 &= f_1 \frac{h}{r_o} \\
 a_2 &= f_1 \frac{r_o}{h}
 \end{aligned}
 \tag{4-1}$$

試料を保持するためのVブロックは、レンズL₁とL₂の間に置かれた2軸のチルトおよび3軸の平行移動を有するアライメント機構上に置く。試料を回転させるためのプーリおよびステッピングモータからなる回転機構も同じ位置に置く。

4.2.2 構成要素の仕様

レンズL₁、L₂およびL₃は単レンズであり、それらの焦点距離はf₁=75mm、f₂=20.5mm、f₃=200mmである。光源は出力10mw、赤色の半導体レーザーである。パターンは、φ0.1mmのピンホールを4個φ0.9mmの円周上に90°ピッチで配置した薄板であり、第2章の図2.4と同一である。Vブロックの角度は90°である。CCDは(510×492)画素、1/2インチ、モノクロ仕様である。画像処理装置の仕様は(512×512)画素、256階調、2画面である。

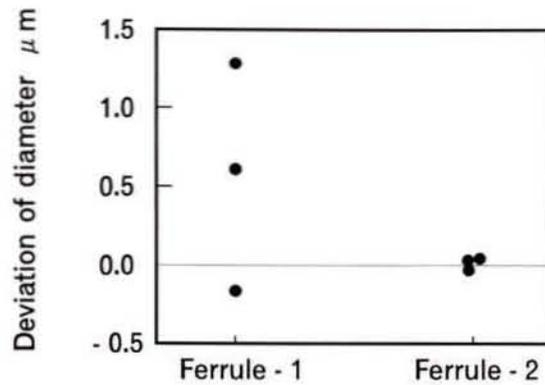


図4.2 フェルールの内径測定結果

4.3 内径の測定および結果

図4.1に示す光学系において、結像位置 A_i' の光軸 OO' からの距離を画素数で表した r_N 、試料半径の公称値を r_o 、CCDの1画素を長さに換算する係数を G としたとき、試料の内径 r は式(4-2)で表される。

$$r = G \frac{f_2}{2 f_3} r_N + \frac{r_o}{2} \quad (4-2)$$

内径の測定は、CCDで得た測定像から4点の結像点を抽出し、最小二乗法により半径 r_N を算出して式(4-2)により試料半径 r に換算して行う。これは第2章で示した方法と同じである。

試料として、第2章の図2.8に示す形状のフェルールを2個用いる。それらの3回の繰返し測定の結果を図4.2に示す。フェルール2の測定値のばらつきは小さいが、フェルール1は $1.5 \mu\text{m}$ の範囲でばらついている。この原因をCCDで得られた測定像から検討する。

図4.3および図4.4にフェルール1およびフェルール2の測定像の濃度分布を示す。いずれも光源に用いた半導体レーザーの発光特性³¹⁾の影響により、 A_1' 、 A_2' に比べて A_3' 、 A_4' の濃度が低い。また、光軸と試料の中心軸のアライメント誤差により、図4.3における結像点 A_3' の濃度が他に比べ低く、しかもひずみを有している。このような場合、第2章の2.3.2項で述べた結像点の抽出において設定する濃度のスレッシュホールドにより、計算されるその位置が異なる。その結果、フェルール1では内径の測定値がばらつくと考えられる。ただし、CCDの分解能が約 $1.1 \mu\text{m}/\text{pixel}$ であることを考慮すれば、ばらつきの大きさ $1.5 \mu\text{m}$ は1.4画素程度であり、僅かである。

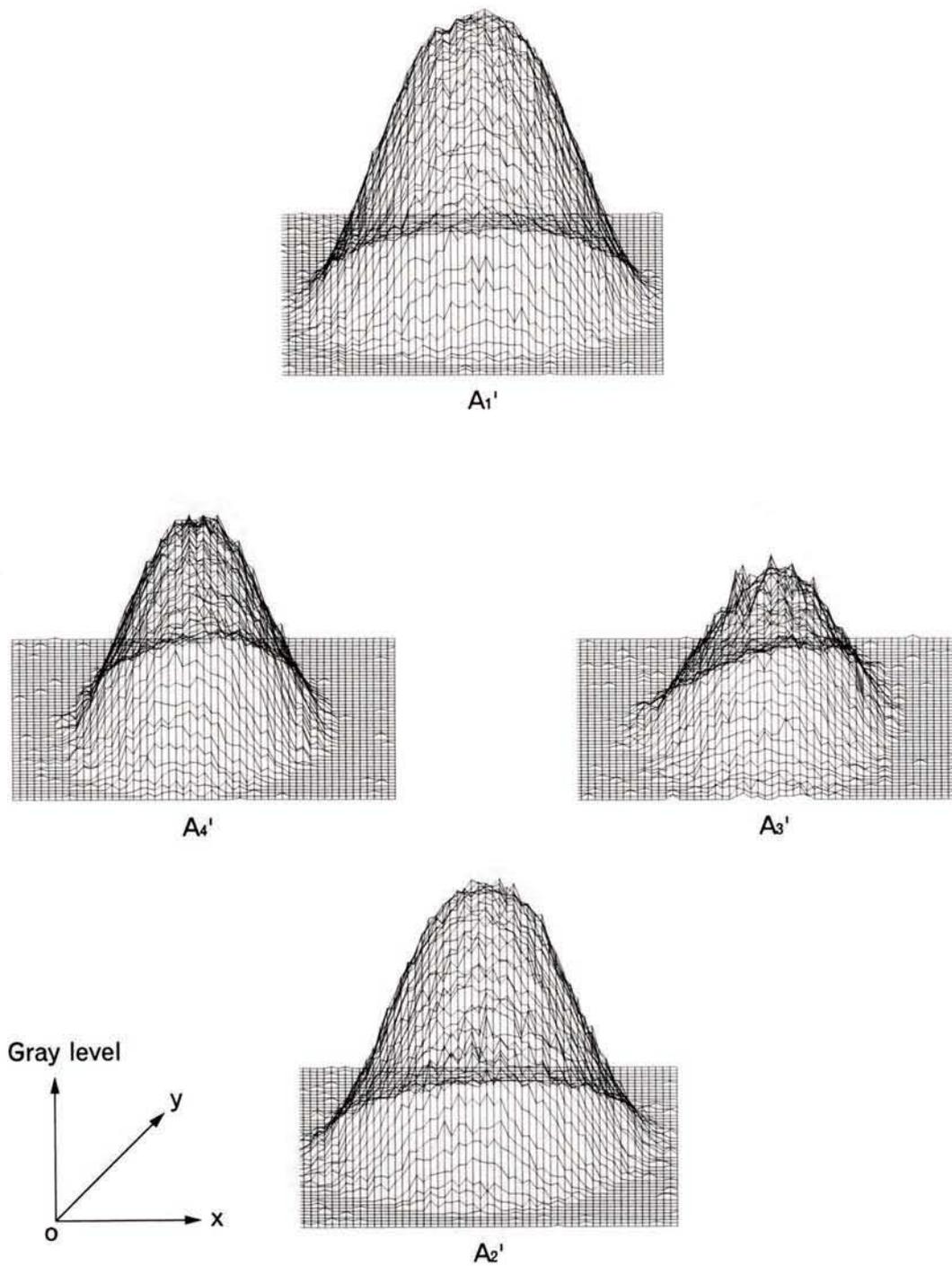


図4.3 測定像の濃度分布(フェルルール1)

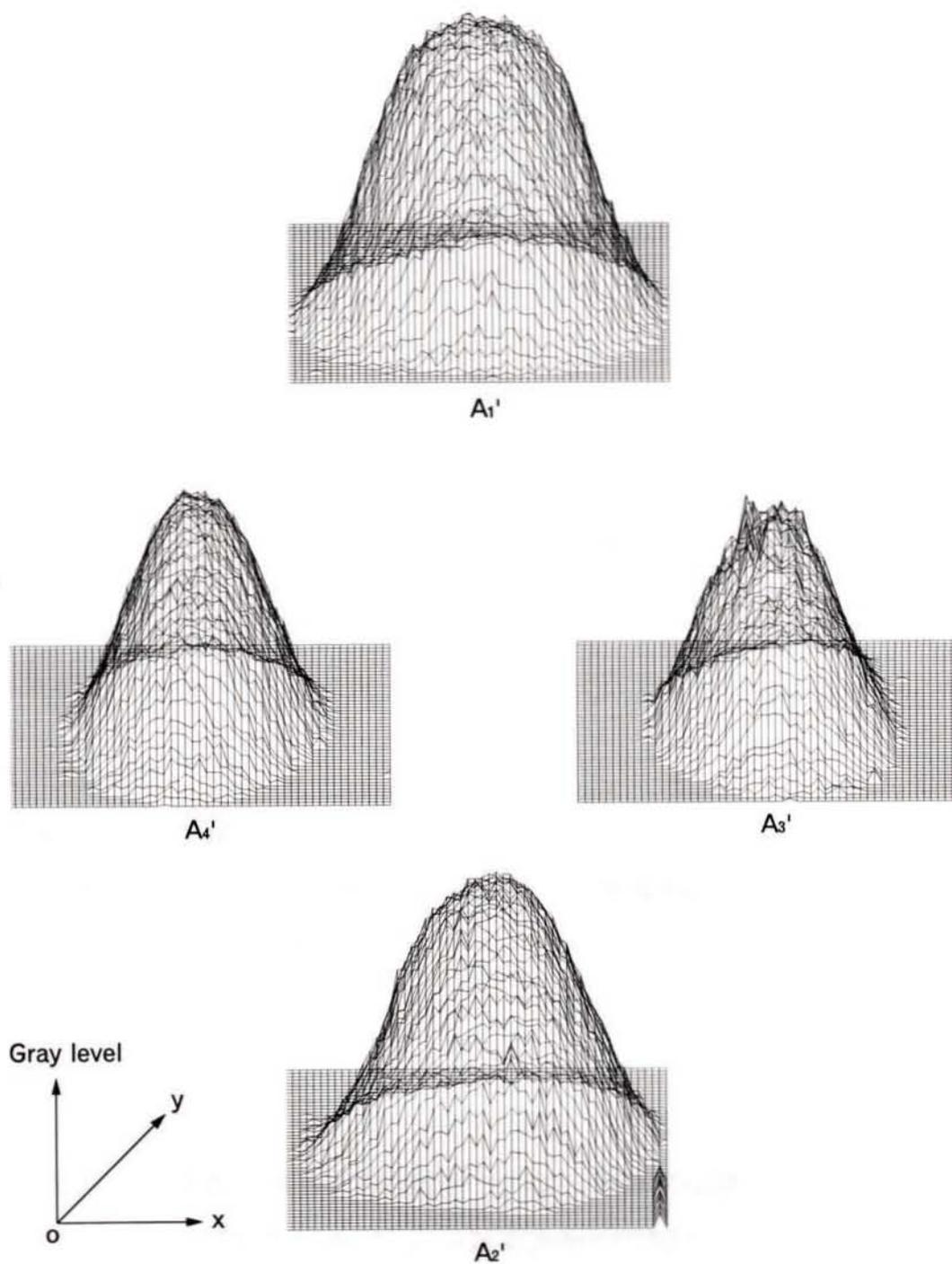


図4.4 測定像の濃度分布(フェルール2)

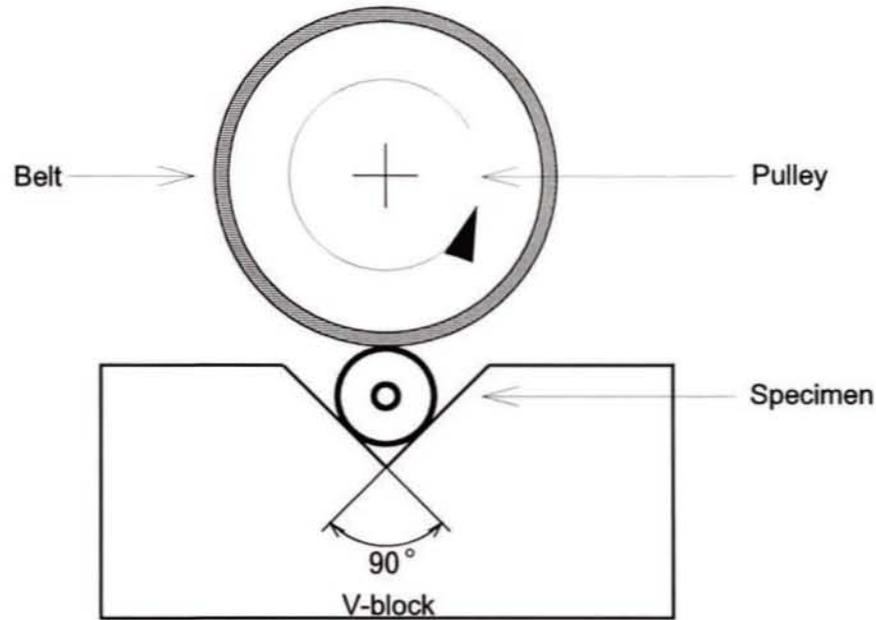


図4.5 試料の回転機構

4.4 真円度の測定

4.4.1 真円度の測定法

図4.5に試料のVブロックへの試料のセット状況と回転機構を示す。回転はステッピングモータの軸に取り付けたプーリ(外径70mm)をフェルルールに軽く押しつけて行う。ステッピングモータ軸の振れの影響やプーリと試料間の滑りを避けるため、その外周には断面が円形状の樹脂ベルトを取り付けている。

Vブロック上に試料を保持し、アライメント機構の調整により、光軸と試料の中心軸の調整を行う。ステッピングモータにより角度の割り出を行いながらCCDの結像点を検出する。CCDにおける結像点の変位を画素数で表した δ_N と試料内面の光軸方向への変位 δ_r の関係は式(4-2)を参照して式(4-3)で表される。

$$\delta_r = G \frac{f_2}{2f_3} \delta_N \quad (4-3)$$

試料一回転分の δ_N から δ_r を得て真円度の評価を行う。

4. 4. 2 測定値に及ぼす回転基準の誤差

試作した測定装置は試料の回転基準をその外側とVブロックとしている。このような場合、一般に次の3点が真円度測定の結果に直接影響を及ぼすと考えられる。

- (1) Vブロックの幾何偏差
- (2) 試料外側の形状偏差
- (3) 試料外側の円筒に対する穴の同軸度

(1)のVブロックの平面度などの幾何偏差は高精度なVブロックを用いることで実用上解決できると考えられる。(2)の試料外側の形状は複数の周波数成分をもつひずみ円で形成されていると考えられる。このような場合、Vブロックや馬乗りゲージなどを用いた三点法による真円度測定^{29),30)}で指摘されているように、Vブロック上での試料の回転状況はVブロックの角度と試料形状の周波数成分に依存して複雑になる。(3)の試料外側の円筒に対する穴の同軸度は、1回転を1周期とする周波数成分として測定結果に影響を与える。(2)、(3)はいずれも測定対象である試料固有の問題であることから事前に回避するのは難しく、測定データを解析するなかで処理する必要がある。本研究ではその方法として4. 4. 3項で述べる二つを試みる。

4. 4. 3 真円度の測定

試作した測定装置は4個のピンホールを設けているので、図4. 6に示すように試料に関して位相が $\pi/4$ づつ異なった位置で測定値 $\delta_{r1}(\theta)$, $\delta_{r2}(\theta+\pi/2)$, $\delta_{r3}(\theta+\pi/4)$, $\delta_{r4}(\theta+3\pi/4)$ が同時に得られる。そこで、一つ目の評価法として4個のデータの平均値から真円度の評価を行い、回転基準に起因する誤差の軽減を図る。平均値は、 $\delta_{r1}(\theta)$, $\delta_{r2}(\theta+\pi/2)$, $\delta_{r3}(\theta+\pi/4)$, $\delta_{r4}(\theta+3\pi/4)$ の位相を揃えた後のデータを $T_1(\theta)$, $T_2(\theta)$, $T_3(\theta)$, $T_4(\theta)$ として式(4-4)から $T_m(\theta)$ として得る。

$$T_m(\theta) = \frac{T_1(\theta) + T_2(\theta) + T_3(\theta) + T_4(\theta)}{4} \quad (4-4)$$

図4. 7および図4. 8にフェルール1およびフェルール2の測定結果を示す。細線が $T_1(\theta)$, $T_2(\theta)$, $T_3(\theta)$, $T_4(\theta)$ を示し、それらの平均値 $T_m(\theta)$ を太線で示す。平均値 $T_m(\theta)$ から真円度を評価するとフェルール1およびフェルール2はそれぞれ $0.8\mu\text{m}$ および $0.4\mu\text{m}$ である。表4. 1に $T_i(\theta)$ ごとに評価した場合の真円度を併せて示す。

なお、このときのサンプリング間隔は 10° 、データ数は各 δ_n ごとに36個である。

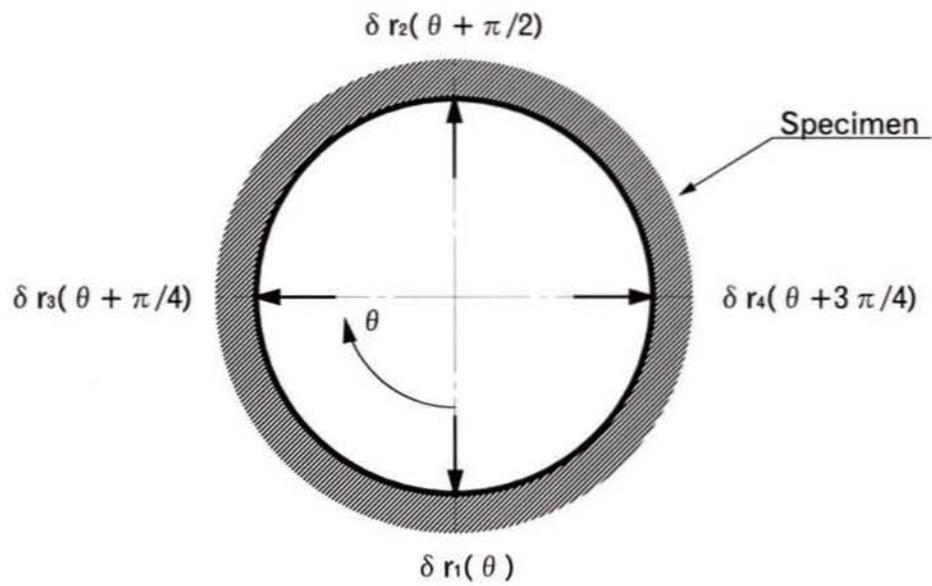


図4.6 データのサンプリング位置

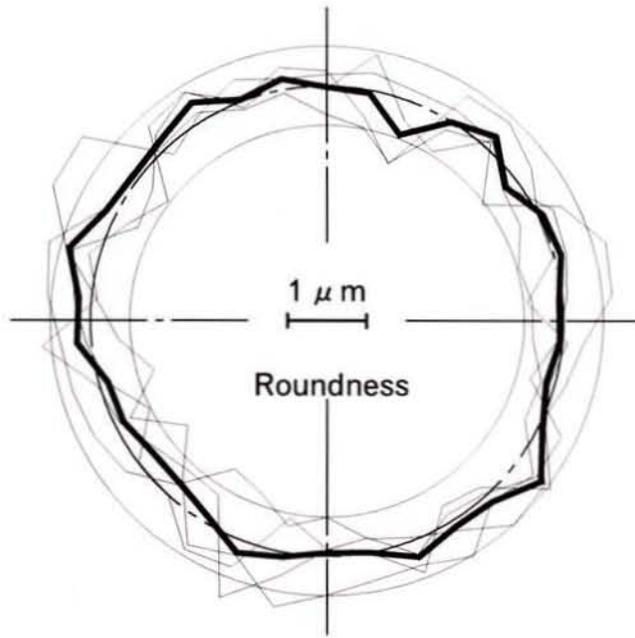


図4.7 フェルール1の真円度

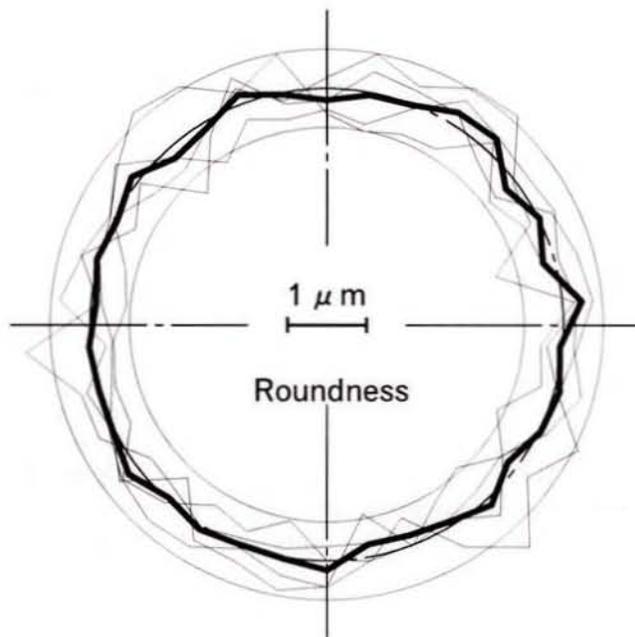


図4.8 フェルール2の真円度

Table 4.1 Roundness of ferrule

(Unit: μm)

Specimen	$T_1(\theta)$	$T_2(\theta)$	$T_3(\theta)$	$T_4(\theta)$	$T_m(\theta)$
Ferrule-1	1.4	1.2	1.7	1.5	0.8
Ferrule-2	1.2	1.3	1.4	1.4	0.4

表4.1において平均値 $T_m(\theta)$ からの評価値は $T(\theta)$ のそれに比べ小さな値になっている。フェルルール2ではその傾向が顕著であり、平均化は回転基準の誤差を軽減するに有効な結果をもたらしていると考えられる。

二つ目は直径法による評価である。これは、内径を二点法により全周にわたって測定し、その最大値と最小値の差から真円度を評価するもので、回転基準を要しない測定方法である。本測定装置は中心に対して向き合う $\delta_{r1}(\theta)$, $\delta_{r2}(\theta + \pi/2)$ および $\delta_{r3}(\theta + \pi/4)$, $\delta_{r4}(\theta + 3\pi/4)$ から直径 D_{12} および D_{34} を得ることができ、直径法による評価が可能である。図4.9および図4.10に縦軸を直径 D_{12} , D_{34} の平均値からの偏差として、フェルルール1およびフェルルール2の測定結果を示す。また、表4.2にそれらの評価値を示す。

Table 4.2 Roundness of ferrule (Estimation with deviation of diameter)

(Unit: μm)

Specimen	D_{12}	D_{34}
Ferrule-1	0.8	3.6
Ferrule-2	0.6	2.7

表4.2において真円度は D_{12} に比べ D_{34} により評価した方が大きい値となっている。これは、 D_{12} と D_{34} が図4.3および図4.4に示す A_1' , A_2' と A_3' , A_4' に対応していることを考慮すれば A_1' , A_2' と比べて A_3' , A_4' の濃度が低く、 A_3' 側の分布にひずみやノイズがあることから D_{34} に若干の誤差が

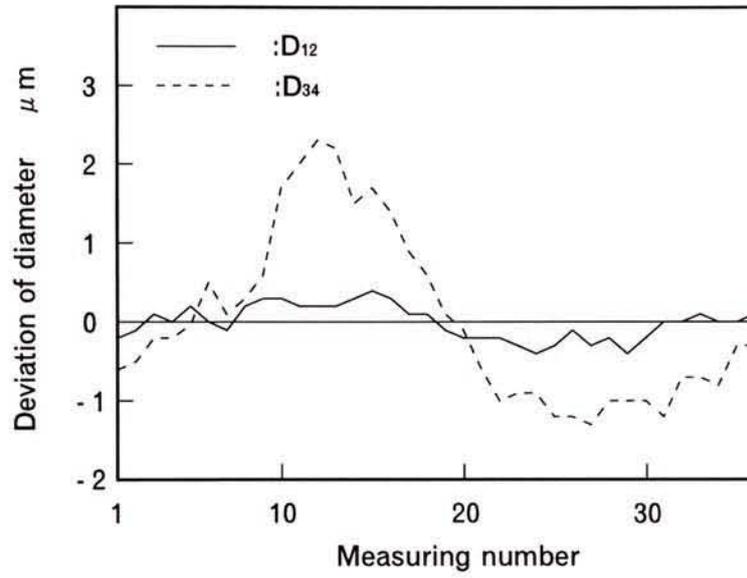


図4.9 フェルール1に関する直径の偏差

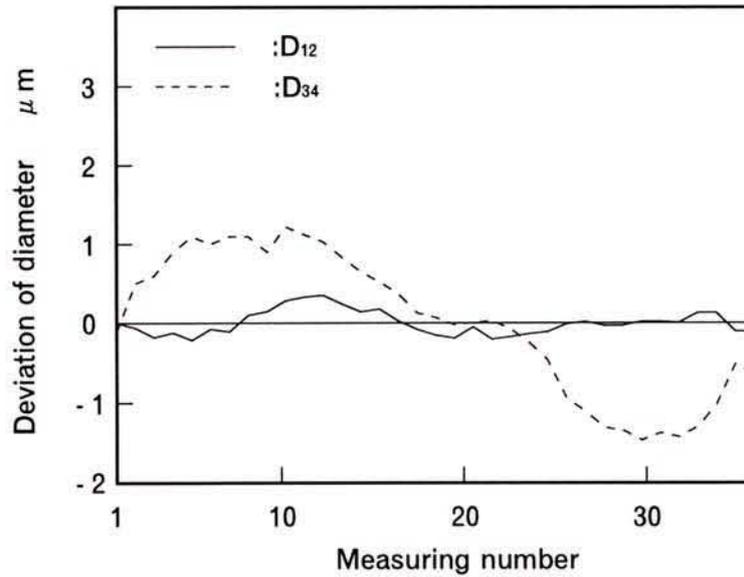


図4.10 フェルール2に関する直径の偏差

含まれたものと考えられる。

平均化による方法では半径差として真円度が評価され、直径法では直径差としてそれが評価されるため、形式的には前者に対し後者の評価値が2倍になる。 $T_m(\theta)$ と D_{12} から得られる真円度を比較したとき、フェルール1では同じ値で、フェルール2では後者が前者の1.5倍となっている。二点法による直径測定では、試料が3次、5次といった奇数次の周波数成分で形成されている場合、すべての方向でそれが等しく得られる。図4. 11および図4. 12に示すフェルール1およびフェルール2の $T_m(\theta)$ に関する周波数成分の振幅を見たとき、フェルール1は3次、5次の奇数次成分が大きいですが、フェルール2ではそのような傾向がない。そのため、フェルール2の方が二つの評価法において整合性のある真円度が得られたと考えられる。

直径法は形状偏差を測定しないために上述したような問題を有するが、回転基準を必要としないという特徴に着目すれば、加工方法等から奇数周波数成分が小さいと推測される試料については有効な方法と考えられる。

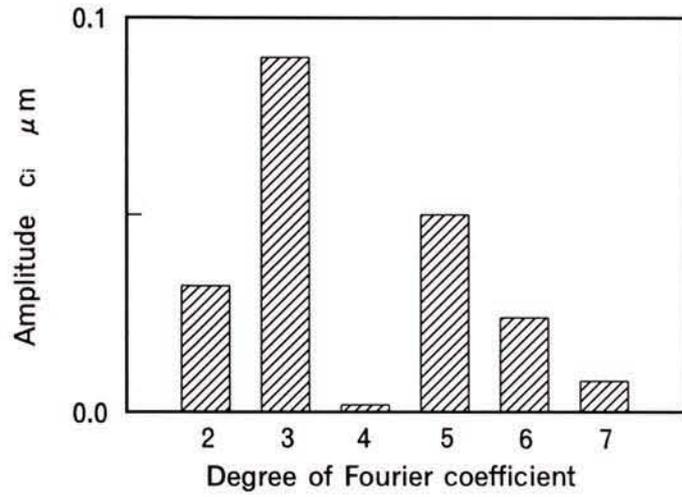


図4.11 フェルルール1の形状偏差に関する振幅

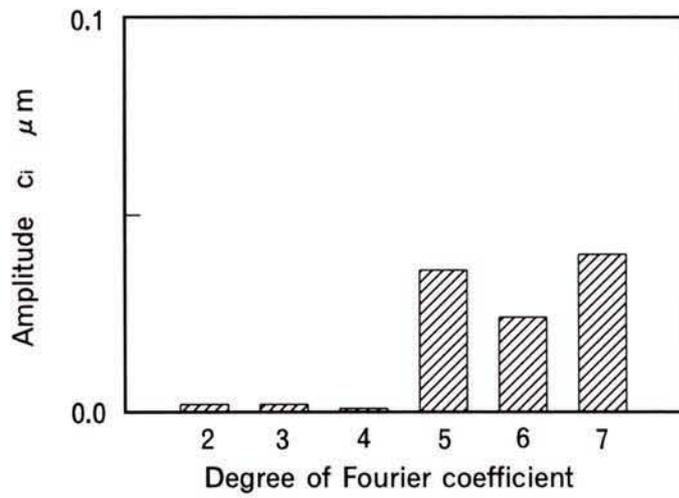


図4.12 フェルルール2の形状偏差に関する振幅

4.5 結 言

高アスペクト比を有する小径穴の内径と真円度の評価が行える測定装置を提案した。

- (1) 試作した測定装置は第2章および第3章で述べた測定装置に比較してレンズ系や回転機構の簡素化を図っているが、機能的に十分なことを確認した。
- (2) 小径で高アスペクト比を有する試料として光ファイバコネクタの部品であるフェルールを用いた実験では、光源の強度分布の不均一さや光軸と試料のアライメント誤差の影響を受けたと考えられる結果が得られたが、これらは光源のレンズ系の改良やアライメント調整法の検討などにより改善可能と考えられる。
- (3) 回転基準に起因する誤差を回避するために、4本の光線を同時に用いてそれらを平均化する方法と直径法を用いた。そして、平均化処理により誤差の軽減が可能なみとおしを得た。また、直径法については試料内面が奇数次の周波数成分が小さい形状の場合に有効なことを示した。

第 5 章

結 論

第5章 結 論

従来技術では対応が困難である小径穴の内面を対象にした内径および真円度の新しい測定法として斜入射光線反射法を提案した。

第1章では本研究の背景となった今日的な要求を述べ、小径穴の内面を対象にした測定法の研究に関する必要性を示した。また、汎用的に使用される測定器として光学式測定顕微鏡や三次元座標測定機等の特徴を述べ、小径穴を測定対象にしたときのそれらの問題点を指摘し、加えて、高分解能を要する場合に用いられることのある走査電子顕微鏡についても考察した。さらに、従来からある小径穴測定法と現在研究が進められている測定法について概要を示し、それらの適用範囲などを述べた。

第2章では斜入射光線の反射を用いた小径穴の内面の内径測定法の原理を示し、それに基づく測定装置を試作した。その測定装置により、内径0.125mm、長さ10.5mmの小径穴を有する光ファイバコネクタ部品のフェルールを試料として内径測定の実験を行った。その結果、提案した測定法により高アスペクト比を有する小径穴の内径測定が可能であることを実証した。また、表面の粗さを調整した試料を用いた実験を行い、本測定法は表面粗さの影響を受けにくいことを示した。

第3章では第2章で示した内径測定法を応用した小径穴内面の真円度測定法を提案した。試作した測定装置によりリングゲージを標準試料とした測定実験を行い、本測定法が真円度測定に有効であることを示した。また、フェルールを試料にした実験から本測定法により高アスペクト比を有する小径穴内面の真円度測定が可能であることを実証した。

第4章では第2章および第3章で実証した測定法を簡易に、かつ低コストに実現するための測定装置を提案した。試作した測定装置は小径穴の内径測定と真円度測定の二つの機能を有している。フェルールを試料にした実験から機能を損なうことなく光学系と回転機構の簡素化が図れたことを確認した。

以上で述べたように、本研究の当初の目標は達成された。今後の課題として精度の向上および測定範囲の小径方向への拡大が考えられる。

精度の向上については受光素子を含めた光学系の最適化、高精度な回転テーブルの採用、アライメント機構の付加が必要である。光学系の最適化は、使用する光の波長の選択とそれに

適した収差の少ないレンズ系による構成が考えられ、受光素子としては開発が進んでいる高分解能CCDの採用が検討課題である。

測定範囲の小径側への拡大については光線の入射角を大きくすることで対応可能であるが、同時に細い光束が必要になるため、そのための新たな投光用光学系が必要と考えられる。

参考文献

第1章

- 1) 丸山六男, 尾坂一, 増田雪也: 計測技術アンケート調査結果, 長野県精密工業試験場研究報告, 4(1991)127.
- 2) 例えば赤松映明: 人工心臓開発の動向-その構造と機能-, 日本機械学会誌, 92, 3(1989)198.
- 3) 斉藤晴治: 金属顕微鏡の使い方と写真の取り方, NIKON TECHNICAL BULLETIN, 8(1990)12
- 4) J I S B 7 1 8 4 -1972
- 5) 副島啓義: 電子線マイクロアナリシス, 日刊工業新聞社, (1987)28.
- 6) 青木保雄: 精密測定(1), コロナ社, (1986)182.
- 7) 久保田稔: 測定顕微鏡, 日刊工業新聞社, (1962)57
- 8) イー・アー・グリゴリエフ(小泉袈裟勝ほか訳): 小孔測定, コロナ社, (1955)69.
- 9) 青木保雄: 精密測定(1), コロナ社, (1986)101
- 10) 秋山伸幸, 北野哲彦, 吉田昌弘, 藤本穎助, 幸平博喜, 福島忠男: 微小径深穴用光学式内径測定装置の開発, 精密工学会誌, 62, 4(1996)584.
- 11) 花岡健一, 若林優治, 尾坂一, 丸山六男: 小物部品用三次元測定機の開発(第3報), -接触プローブの評価-, 1997年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, J17(1997)433
- 12) 鈴木昭洋, 古谷涼秋, 平木雅彦, 高増潔, 大園成夫: 吸気型ボールプローブの開発(第3報), -小型プローブの評価-, 1997年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, K18(1997)359
- 13) 澤本嘉正, 増沢隆久, 藤野正俊: バイブロスキャニング法による細穴内部形状測定の高速度化, 1994年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, A62(1994)763.

第2章

- 14) 文献9)と同じ
- 15) 植木正明, 大岩彰, 金田良作: 光波干渉式内径絶対測定装置, 昭和59年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集(1984)913.
- 16) 鬼鞍宏猷, 桑原義治, 中村泰三, 佐島隆生, 今関義朗, 甲木昭雄, 山田靖二: 光学式内径測定器の開発-光学的解析, 基礎実験, 試作及び性能試験-, 精密工学会誌, 61, 2 (1995)248.
- 17) 近藤文雄: レンズの設計技法, 光学工業技術研究組合, (1979).
- 18) 例えば, 田中弘: 画像処理応用技術, 工業調査会, (1989).
- 19) J I S B 7 4 2 0-1997
- 20) 田中敏幸, 鮎沢隆, 丸山六男: 光変位センサの変位検出特性, 先端加工学会誌, 12(1993)103.
- 21) 朝香鐵一ほか: 測定法の改善と測定誤差の評価, 日本規格協会, (1979).
- 22) 飯塚幸三: 工業計測における測定精度と許容差, 日本機械学会誌, 77, 667(1974)595.

第3章

- 23) 増沢隆久, 藤野正俊: ワイヤEDGによる細軸の加工, 昭和60年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集, 130(1985)379.
- 24) 河部繁, 池田博通, 山岸光, 新井亮一: 微小深穴加工技術の研究(第2報)-ドリルの切れ味評価-, 1997年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, E13(1997)155
- 25) 垣野義昭, 石井信雄, 山本謙, 奥島啓式: 軸の回転精度に関する研究(第2報), 工作物回転型主軸の測定法, 精密機械, 44, 6(1978)730.
- 26) 後藤充夫, 飯塚幸三: 真円度測定機の誤差特性の解析, 精密機械, 44, 10(1978)1265.
- 27) R.R.Donaldson: A Simple Method for Separating Spindle Error from Test Ball Roundness Error , Annals of the CIRP, 21, 1(1972)125.
- 28) D.J.Whitehouse: Some Theoretical Aspects of error separation techniques in surface metrology , Journal of physics E : Scientific Instruments , 9(1976)531.

第4章

- 29) 中田孝, 山本晃:円筒形工作物の真円度測定法, 機論, 53-5(1950) 159.
- 30) 小尾誠, 小林隆志, 古川進:三点法による真円度測定法の一考察, 日本機械学会論文集 (C編), 54, 506(1988) 2475.
- 31) 末田哲夫:光学部品の使い方と留意点, オプトロニクス, (1993) 128.

PSDの変位検出特性

1 はじめに

フォトダオイオードの光起電効果を利用したPSDは、その表面に照射された光のスポット位置などを電気信号として検出することができるセンサであり、次のような特徴を有している。

- (1) 光の重心位置が位置信号として得られる
- (2) 連続した位置信号が得られる
- (3) 応答性に優れる
- (4) 二次元の位置検出が可能である
- (5) 光の強度が検出できる

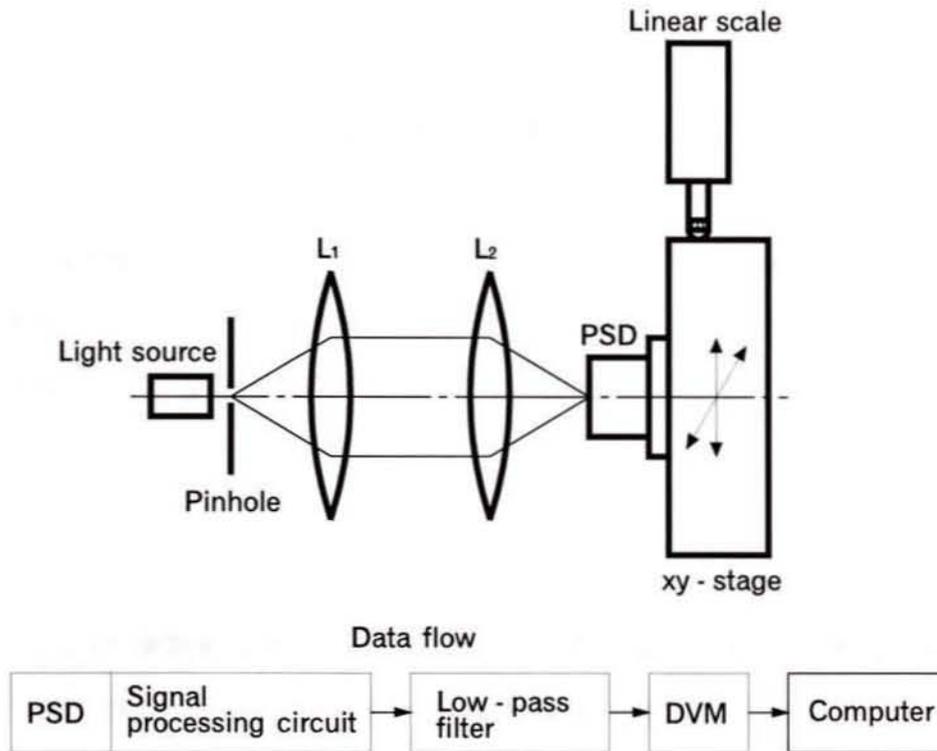
”斜入射光線の反射を利用する小穴内径測定法”，”斜入射光線反射法の小径穴真円度測定への適用”および”小径穴の簡易型測定装置の提案と試作”の研究においては、分割型であるCCDをセンサとして用いている。CCDとPSDを比較したとき、(4)、(5)は共通で、(1)～(3)において後者に優位性があると考えられる。そこで、ここではCCDに代わるセンサとしてPSDを用いる場合を想定して、センサに一義的に要求される特性である出力のドリフトおよび直線性について検討する。

2 実験方法

2.1 実験装置

図付-1に実験装置の構成を示す。光学系の配置は、ピンホールをレンズ L_1 の前側焦点位置に置き、PSDをレンズ L_2 の後側焦点位置に置く。レンズ L_1 および L_2 の間隔は、光が平行であるから、適宜配置している。

PSDは、有効受光面が $4.1\text{mm}\times 4.1\text{mm}$ 、位置分解能が $3\ \mu\text{m}$ の二次元検出用で、信号処理回路を付属したタイプである。ローパスフィルタはゲインが26dB、カットオフ周波数は5.5Hzである。光源は150Wのハロゲンランプである。レンズ L_1 は焦点距離が60mmの単レンズであり、



図付-1 実験装置の構成

L_2 はN.Aが0.25, 作動距離が9mm, F21.1の顕微鏡用対物レンズである. ピンホールは穴径が0.2mmである. PSDをx, y方向に変位させるためのxyステージは移動範囲が15mmのマイクロメータヘッド付きで, その移動量は最小表示値が $0.1 \mu\text{m}$, 測長範囲が10mmのリニアエンコーダタイプのセンサにより検出することができる.

なお, 実験の温度環境は, $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ である.

2.2 ドリフトの実験

ドリフトは, PSDに光スポットを照射し, xyステージを固定したままの状態でもそこからの出力をコンピュータにより記録する. 記録は, 実験装置すべての電源投入の数分後から開始し, 30秒間隔で, 180分間とする. 光スポットは記録開始時点でx, y2方向のPSDの出力が零となる位置とする.

なお、実験はローパスフィルタ以降の装置が1チャンネルであることからx, y方向を個別に行う。

2.3 直線性の実験

直線性は、x方向、y方向それぞれについて、広範囲、中範囲および狭範囲において実験を行う。広範囲は $\pm 350 \mu\text{m}$ の範囲を $50 \mu\text{m}$ ピッチ、中範囲は $\pm 100 \mu\text{m}$ の範囲を $10 \mu\text{m}$ ピッチ、狭範囲は $\pm 10 \mu\text{m}$ の範囲を $1 \mu\text{m}$ ピッチでの検出とする。x方向の検出の際にはy方向における原点位置および $\pm 100 \mu\text{m}$ の三箇所の位置で実験を行い、y方向の検出はx方向に準じて行う。PSDの原点位置はx, y方向の出力が共に零となる位置とする。これらの実験は、3.1節のドリフトの結果を考慮し、実験装置に電源を投入してから90分後に開始する。

3 実験結果

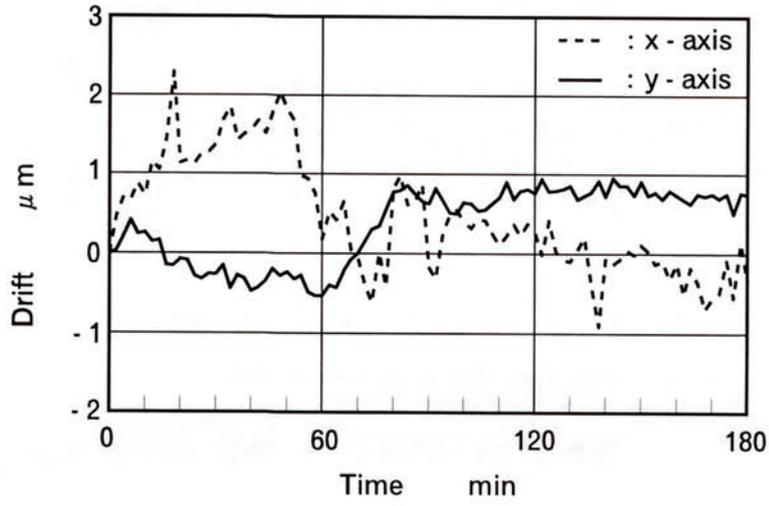
3.1 ドリフトについて

図付-2にドリフトの実験結果を示す。PSDからの出力は電圧であるが、変位に関する値を評価するため、図の縦軸は2.3節の実験で得られた感度を用いて長さに変換して示す。図から明らかなように、x方向とy方向ではドリフトの発生状況が異なっている。x方向は60分を境に変化の状況が異なるものの安定した状態になく、急激な変化が継続して現れている。一方、y方向は80分経過後安定している。定常状態になってからのy方向のドリフトはレンジで $0.3 \mu\text{m}$ である。

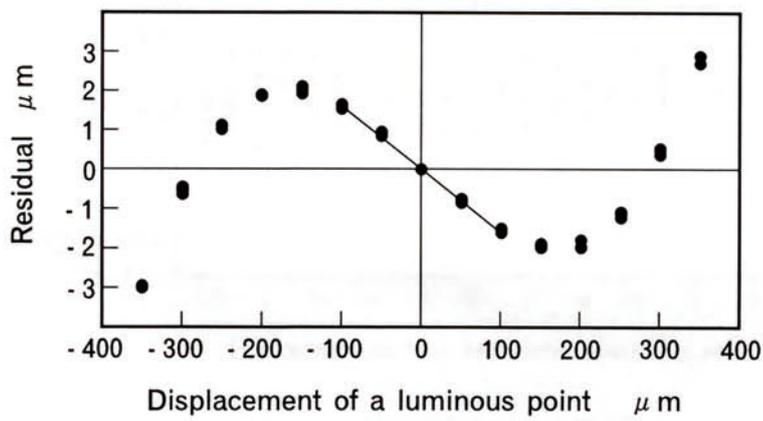
3.2 直線性について

図付-3、図付-4および図付-5にy方向に関する広範囲、中範囲および狭範囲の測定結果を示す。図はいずれもx方向が原点位置の場合である。図における縦軸はリニアエンコーダの指示値を真値とし、それとPSDの出力により直線回帰を行った後の残差で示している。直線性を残差の最大幅で評価すれば、広範囲においてそれは $5.9 \mu\text{m}$ である。同様に中範囲および狭範囲では $0.6 \mu\text{m}$ および $0.4 \mu\text{m}$ である。また、感度を直線回帰式の比例項で表せば、それは広範囲、中範囲および狭範囲において $29.3 \mu\text{m}/\text{V}$ 、 $28.8 \mu\text{m}/\text{V}$ および $28.7 \mu\text{m}/\text{V}$ である。広範囲は直線性がよくないため、感度が他に比べて僅かに異なる。

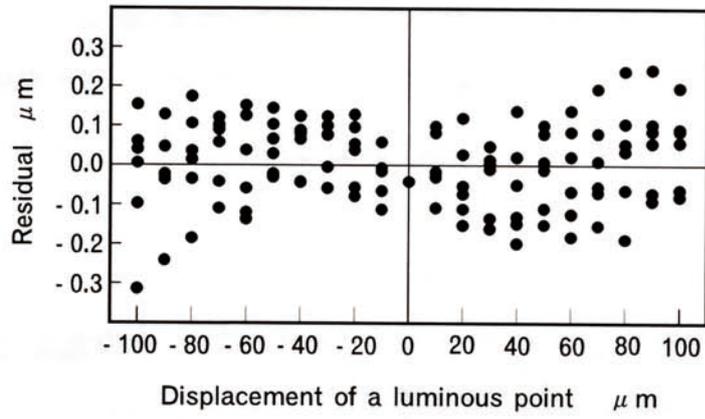
x方向については図を省略して述べる。広範囲、中範囲および狭範囲の直線性は、y方向と同様に評価して $5.5 \mu\text{m}$ 、 $0.6 \mu\text{m}$ および $0.4 \mu\text{m}$ である。また感度は広範囲、中範囲および狭範囲において $30.2 \mu\text{m}/\text{V}$ 、 $29.8 \mu\text{m}/\text{V}$ および $29.7 \mu\text{m}/\text{V}$ である。



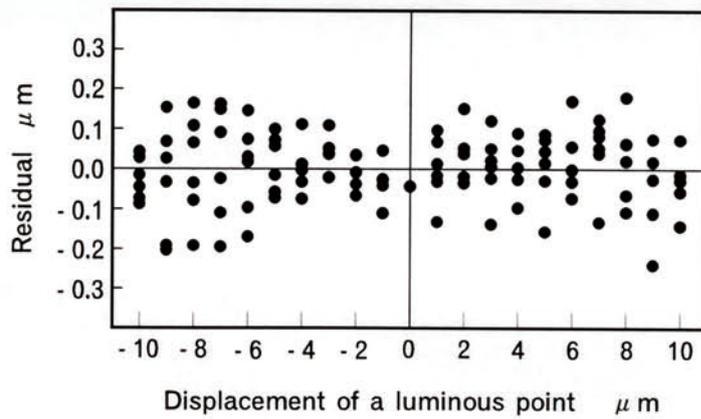
図付-2 ドリフト



図付-3 広範囲における残差



図付-4 中範囲における残差



図付-5 狭範囲における残差

原点以外の+100 μ mおよび-100 μ m位置における直線性と分解能は, x, y方向ともに, 原点位置とほぼ同様の結果である.

4 おわりに

CCDに代わるセンサとしてPSDの可能性を検討するため, そのドリフトおよび直線性について実験を行った. ドリフトに関してはx方向とy方向の状況が大きく異なっていて, 前者のレベルではセンサとして利用するのが困難と考えられる. 直線性については約 $\pm 100 \mu$ mが使用可能範囲と考えられ, 光ファイバコネクタの構成部品であるフェルールの内径0.125mmの測定に関して十分な広さと言える.

特性は機種による違い, 同一機種間でのばらつきが予想される. 今後それらを考慮した実験が必要である. また, 温度環境, 光源の波長およびPSDへの入射光量はその検出特性に及ぼす影響についても検討を要する.

謝 辞

本研究を行うにあたり、計画からまとめまで細部にわたり懇切な指導をいただいた本研究の指導教官である信州大学工学部 賀勢晋司教授および研究指導と鞭撻をいただいた副指導教官である深田茂生助教授に心からお礼申し上げます。

本研究に関し懇切な論文審査をいただいた信州大学工学部 田中道彦教授、宮入圭一教授および小林光征教授にお礼申し上げます。

本研究を実施するにあたり、実験装置の設計製作、試料提供および実験に多大なご協力をいただいた株式会社五味工業 五味信社長、五味克廣専務および高島産業株式会社 遠藤千昭取締役開発部長、島津進氏をはじめ、二社の関係の方々にお礼申し上げます。

信州大学博士課程への入学にご配慮いただきました長野県商工部 渡辺雅文商工部長、小山征一郎工業課長をはじめ工業課の皆様にお礼申し上げます。また、そのきっかけを与えていただいた大久保表面技術研究所 大久保敬吾氏(元長野県精密工業試験場長)ならびに長野県中小企業情報センター 山田富重氏(前長野県精密工業試験場長)にお礼申し上げます。

博士課程在籍中、常に温かい励ましと指導をいただいた長野県精密工業試験場 宮澤武矩場長、神林幹生管理部長、小野道彦研究技監および鮎澤隆測定部長にお礼申し上げます。

本研究の開始時から共同研究者として時を惜しむことなく研究の計画から遂行にあたっていただいた長野県精密工業試験場測定部 尾坂一研究員にお礼申し上げます。また、ご協力いただいた測定部の皆様にお礼申し上げます。