

球面・曲率半径標準に関する調査研究

工藤良太*

(2017年6月1日受理)

A survey on sphericity and curvature radius standard

Ryota KUDO

Abstract

The demands for high precision measurement for sphericity and curvature radius of sphere is uprising. In the industry, the object spheres are lens, reference sphere, etc., and absolute accuracy of several ten-nm measurements are needed. On the other hand, the Avogadro project for redefinition of kg succeeded to measure the diameter of single crystal Si sphere within an uncertainty of 1 nm. However, diameter topology is not equivalent to radius of curvature topology (sphericity). To measure sphericity, conventional methods are interferometer and coordinate measurement machine. There are various methods for these methods to be more accurate, and ultraprecision reference sphere is demanded as one of those methods. In this report, examples of high accuracy sphericity and radius curvature of sphere measurement methods developed several national metrology institutes are described.

1. はじめに

球は古代から数学的に厳密に定義され、よく理解されている対象であり、球対称性と呼ばれる対称性を三次元空間内で唯一持っている最も対称性の高い物体である。球の一部である部分球面も想定される球中心からの距離が一定であるという対称性がある。これらの高い対称性により、球・球面は高精度な加工が比較的容易である。

加工された球・球面の工学的な応用法として代表的なものの一つに球面レンズが挙げられる。高精度な加工が可能とはいえ、完全な球面レンズは存在しないが、レンズの表面が数学的に扱いやすい完全な部分球面であると仮定し、そのレンズがどのように理想状態からずれるかという考え方のもとで、歴史的に光学が発展してきた。理論的に球面レンズによる光学系のふるまいとその限界(収差など)が良く知られている。球面レンズの形状偏差は収差要因になるが、曲率半径の誤差は焦点距離の変化として表れるため、曲率半径については光学系の調整

によって誤差の影響を軽減するのが一般的であった。しかしながら昨今、球面レンズの絶対曲率半径の測定の需要が高まってきている。レンズの曲率半径基準となるニュートンゲージの規格は JIS B 7433:1989 で定められている(表1)。表1のように呼び半径に対し、曲率半径の設定範囲が定められているが、その絶対値が必要とされ始めている。

しかしながら現在、レンズ曲率半径の標準技術は確立

表1 校正用ニュートンゲージの寸法(Rのみ)

呼び半径 [mm]	曲率半径 R の設定範囲 [mm]
10	9.8~10.2
20	19.6~20.4
50	49~51
100	98~102
200	196~204
500	490~510
1000	980~1020
∞	∞

* 工学計測標準研究部門長さ標準研究グループ

されていない。計量標準の国際相互承認協定 (Comité International des Poids et Mesures Mutual Recognition Arrangement :CIPM MRA) において校正・測定能力 (Calibration and Measurement Capabilities: CMC 登録) が登録されている。登録情報を国際度量衡局 (Bureau international des poids et mesures : BIPM) の Web 上のデータベースで確認することができる¹⁾。それらの登録情報において、球の直径に関する登録はあるが、レンズや曲率半径の標準に関しては、2016年12月現在、項目は存在するものの、校正・測定能力が登録されている機関はない。

またさらに球面レンズに関する近年の新たな需要として、従来手法では測定が困難な微小な球面レンズの形状やサイズを高精度に測定する技術も求められている。

球面レンズにおいて原理的に発生する収差を、レンズ形状を変化させることにより抑えることができる。形状を変化させたレンズを一般に非球面レンズと呼ぶ。カメラ等の光学系の性能を向上させることなどを目的として、非球面レンズが昨今広く利用されている。非球面レンズは球面レンズに対して対称性が低くなるために、加工も計測も難しい対象である。非球面レンズの性能はその形状で決まるために、加工されたレンズの設計形状からの偏差を評価することが重要である。光学部品 (非球面レンズ等面) の要求加工精度は $\lambda/10$ (50 ~ 100 nm) 程度が一般的に求められている。さらに近年では、光学系の性能向上のために、球面からの偏差である非球面量のみを把握するのではなく、非球面全体の絶対形状計測の需要が高まっている。

非球面レンズや微小球面レンズの加工精度を評価する測定機の測定精度としては、加工精度より高い精度が求められ、例えば20 ~ 30 nm 程度が求められる。上記の目的と精度を達成可能な有力な手法として、マイクロ三

次元測定機 (μ CMM or micro-CMM) などと称される超高精度三次元測定機が挙げられる。

図1に示す装置模式図は、パナソニックプロダクションエンジニアリング株式会社製の超高精度三次元測定機 Ultra-high Accuracy 3-D Profilometer (UA3P) のプローブ部分を示したものである²⁾。この装置は、低接触力プローブがZ軸ステージに取り付けられている三次元測定機である。UA3Pでは、プローブと試料間に働く力が一定となるようにZ軸を制御しながら、試料面を走査し、そのプローブ中心のXYZ座標を取得する。測定可能な試料面の最大傾斜角度は75°であり、非球面レンズや自由曲面を高精度に測定できることから産業界でデファクトスタンダードとなっているといっても過言ではない。原理的には測定範囲10 mm程度で、平面ならば ± 10 nm、同程度の測定範囲で測定角度30°までならば ± 50 nmの精度を達成しうる校正方法を開発している³⁾。この精度は校正用の基準平面や、基準球に依存している。また、試料に対する測定角度が変化することによって、プローブの接触位置が変更されるため、プローブの形状誤差を考慮する必要がある。以上のことから、目標の20 ~ 30 nmの精度を達成することは現状では困難とされている。

UA3Pが取得するXYZ座標情報は、測定対象の形状とプローブ半径が足し合わされたものであり、測定対象の絶対形状を求めるためには、プローブ半径を補正する必要がある。プローブ半径は一般的に直径が校正された高精度基準球を用いて校正されるため、基準球の校正不確かさがプローブ半径の校正不確かさに反映される。一般的に入手可能な最高精度の基準球の直径の校正不確かさは100 nm程度であり、絶対形状測定における不確かさの主要因の一つとなっている。

さらに現状のプローブ校正について述べれば、直径10 mm ~ 50 mmの基準球の25点を、測定点が均等になるように測定することによって行っている (JIS B 7440-5)。基準球の形状不確かさに加え、25点の離散点のみを校正で利用するために、校正された点以外のプローブ位置に外れ値が存在した場合には、測定値の誤差が大きくなる。上記のような現状であるため、基準球の超高精度直径および球面度校正技術を開発したならば、その基準球によりプローブ半径を校正し、プローブ半径分布を詳細に得ることで、UA3Pをはじめとするマイクロ三次元測定機をさらに高精度化することが可能である。

以上、近年さまざまな球面・非球面レンズの高精度化が進められており、その形状測定の基準となる基準球面の高精度化が必須となってきている。本稿では、球面と

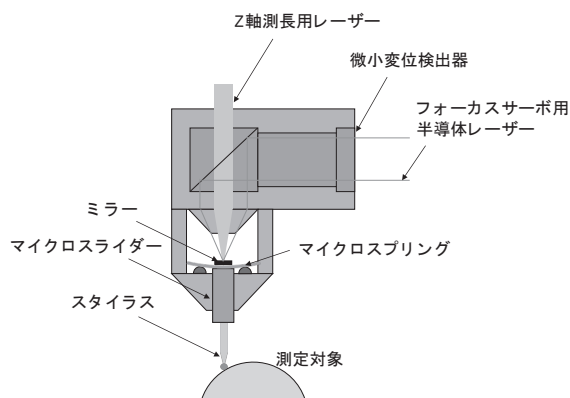


図1 UA3Pの低接触力プローブ

曲率半径の標準構築に向けた調査研究を行ったので報告する。

2. 超高精度三次元測定機の事例

1章に示したパナソニック社 UA3P の他にもさまざまな超高精度三次元測定機が開発され、非球面レンズの測定に用いられている。本章ではそれらの事例について述べる。UA3P と大きく異なる指針により設計された超高精度三次元測定機として、AMETEK 社の TAYLOR HOBSON 事業部が開発した LUPHOScan⁴⁾ がある。本装置は、MWLI 法技術（多波長干渉法：multi-wavelength interferometry）に基づいた測定装置であり、非球面レンズに代表される回転対称光学部品の超精密形状測定を主目的にしているとともに、微小な自由曲面も測定可能である。図2に模式図を示す。この装置はC軸のスピンデル上で試料を回転させながら、MWLI センサ（測長センサ）と試料との距離を一定にしつつ試料上をらせん状にスキャンするようにT軸、Z軸、R軸を制御する。MWLI センサから基準平面ミラー2枚と、基準円筒ミラー、さらに試料までの距離を測定、またT軸と試料の回転角度のデータを測定することで、試料面の三次元的座標を求める。測定可能な最大傾斜角度は90°であり、半球の測定が可能である。精度としては、 $\pm 50 \text{ nm}$ (2σ) の形状測定精度と $\pm 20 \text{ nm}$ (2σ) の測定再現性で測定することができる。製造メーカから報告されているが、装置構成をみると、参照となっている円筒ミラーの面精度の影響をダイレクトに受けると考えられるため、報告された精度値については、検討の余地があると考えている。本装置においても、参照円筒面という曲面の精度が高精

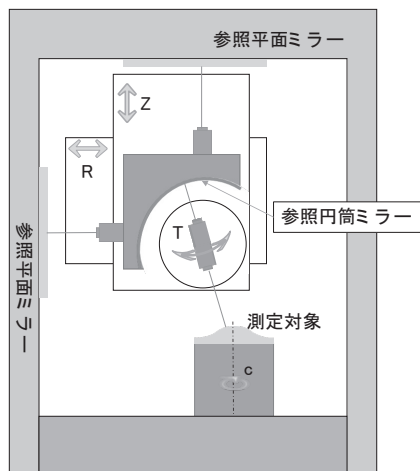


図2 TAYLOR HOBSON LUPHOScan 模式図

度化のためのポイントとなっている。

各国の国家計量標準機関（National Metrology Institute: NMI）でも超高精度三次元測定機の開発が報告されている^{5),6)}。ここでは、スイスのNMIであるMETASで開発された超高精度三次元測定機に^{6),7)}ついて述べる。METASの装置はプローブを固定し、被測定物を固定したステージが移動する。ステージにXYZ軸に直交する三面鏡が備えられており、固定されたプローブに被測定物が接触したときのステージ変位量をアッペオフセットが0となるように配置されたレーザー干渉計によって測定する⁵⁾。プローブヘッドはサブmNの低接触力を実現している。この装置においても、プローブの形状・半径が絶対精度に対し重要な意味を持つため、後述の方法でプローブ形状・半径を補正している。後述のような誤差分離手段を講じることで、90 mm × 90 mm × 38 mm の可動範囲全域で50 nm以下の不確かさを実現している^{6),7)}。

3. 球の直径測定法

1, 2章で述べた通り、 μCMM による非球面レンズ等の絶対形状測定を高精度化するためには、プローブ半径校正が必須であり、そのために用いられる基準球の直径（曲率半径）校正の高精度化も求められている。

一般的な球直径測定技術として挙げられるのは万能測長機である。この装置はアッペの原理に従った測長機であり、並行平板で物理的に挟み込まれる球の二点間の距離を測長する。物理的な接触による変形の影響が考えられるが、ヘルツの弾性接触理論を用いて、補正と不確かさの計上が行われている。一般的な二点直径測定の不確かさは数百nm程度である⁸⁾。

ミットヨ社では、アッペの原理を満たしつつ真空光路を有するレーザー干渉測長機⁹⁾を適用することにより、高精度直径測定を達成している。この装置は、球を万能測長機と同様に二点で挟み、接触プローブ面を精密に測長しながら二点間の直径測定を行う。拡張不確かさは球直径2 mm以上10 mm未満で60 nm、10 mm以上40 mm以下で $(24+2.6 \times L) \text{ nm}$ である。ここでLは呼び寸法のmm単位での数値を入力する¹⁰⁾。

一般に二点直径の測定を球の全領域で実施することは現実的ではない。ベ어링球の工業規格（ISO 3290-1:2014, ISO 3290-2:2014, JIS B 1501:2009, JIS B 1563:2009）においては、通常異なる10点以上の二点直径測定を行うことで平均直径を求める。当然のことながら、10点程度のみでの二点直径測定では球の全領域を代表するにはほど遠い。そこで、球面度も併せて評価する

ことが広く行われている。球面度評価については後に詳述するが、球の複数断面の真円度測定を実施し、真円度の結果を直径のばらつきとして、球直径の不確かさの要因に加えることが一般的に行われている。

次にレーザー干渉計技術を利用した超高精度球直径測定法について述べる。例として挙げるのは産業技術総合研究所に設置してあるアボガドロプロジェクト用シリコン球直径測定装置である¹¹⁾。単結晶シリコン球の体積を利用してキログラムの定義を改定しようという取り組み（アボガドロプロジェクト）用に開発された装置である¹¹⁾⁻¹⁴⁾。この装置では、球の体積を測定するために部分的な二点直径の分布を求める。二点直径測定は、非接触レーザー干渉測定技術を用いて行う。図3に原理図を示す。図3に示した通り、シリコン球の直径 D は、エタロン間の距離 L からエタロンと球の間の距離を引くことによって求められる。真空環境であり、球全面に渡って直径測定を行うことができる。不確かさは1 nm 程度である。その装置図を図4に示す。

各国NMIでも球の直径の校正サービスを供給してい

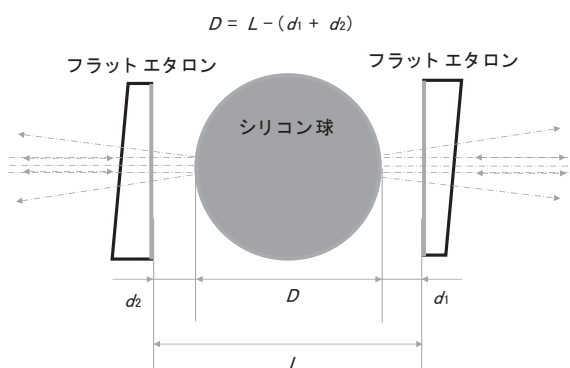


図3 超高精度球直径測定原理図

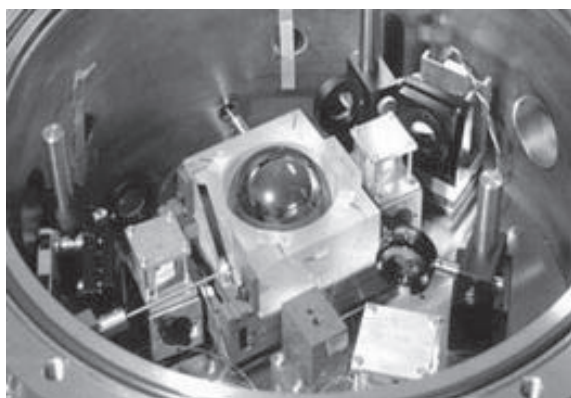


図4 超高精度球直径測定装置¹¹⁾

る。CIPM MRAに登録している各国NMIの球の直径に関するCMCのうち代表的な例をまとめる。簡単な比較のため、直径30 mmの球での測定不確かさを表2に挙げる。表2に示される通り、特にドイツ（PTB）とアメリカ（NIST）の測定・校正能力が高い。日本においては、球の直径の標準はCIPM MRAに登録していない状況である¹⁾。

4. 球面度について

4.1 球面の評価について

球に関する代表的なパラメータを挙げると以下の3種である。

- ・ 直径
- ・ (曲率) 半径
- ・ 球面度

このうち、直径と曲率半径は、完全な球体であれば等価な情報を持っているといえる。直径/2=曲率半径となる。しかし一般的な人工物においてはこの等式は成立しない。以下にその二次元における例を示す。図5にルーローの三角形と言われる二次元形状を示す。ルーローの三角形は、平行線により挟み込むと、どのように回転しても二点で挟み込んだ長さが一定である、という性質を持つ。それでいながら三角形の名が示す通り、三か所に

表2 各国NMIの球直径の校正能力

国名		不確かさ (k=2)	測定手法
ドイツ	PTB	10 nm	1-D comparator and 2 contacting probes
スイス	METAS	80 nm	1-D comparator and flat probe
イギリス	NPL	110 nm	Mechanical probe with interferometric sensing
アメリカ	NIST	26 nm	Mechanical stylus & laser displacement interferometer scale

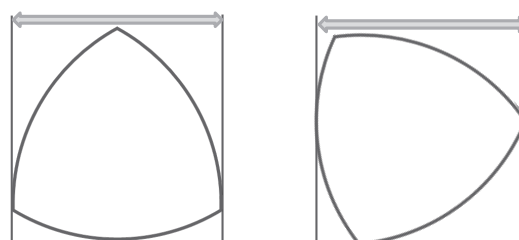


図5 ルーローの三角形

鋭角が存在する。つまり二点直径が一定でありつつ、曲率半径が一定ではない極端な例の一つがルーローの三角形である。この事例が端的に示す通り、二点直径が一定であるという条件のみでは、直感的に円もしくは球であると判断しがちであるが、実際にはそうとは限らない。このことから、球の形状を完全に把握したい場合には、二点直径値の分布のみでは不十分であることが分かる。

円、もしくは球形状に近ければ近いほど、上記の問題の影響は少なくなる。つまり直径値の分布が形状そのものに近くなる。そこで球がどれほど球に近いのかという指標である球面度が重要になるが、球面度は幾何公差としての規定がない。現状、産業界においては、鋼球に関する球面度 (ISO 3290-2:2014 Annex A) により、「2もしくは3赤道面の、真円度の最大値を球面度とする」とある。例を挙げると図6に示すような赤い3ラインを評価することになる。この評価方法では球全体の情報は不明である。超高精度三次元測定機のプローブ半径の校正をするための基準球としては、プローブと基準球の接触点の分布が面として必要である為、面としての情報が得られていることが望ましい。ISO規格では、評価していない面情報が不確かさ要因として大きなものになる可能性

があることに問題点がある。

球面全体の球面度を表す指標としては、図7の球の断面図に示すような球の平均直径からの偏差を用いたものが考えられる。定義としては例えば真円度の定義を三次元に拡張したものが考えられる。具体的には、球の直径分布を得て、平均直径により球の実形状に最小二乗球を描く。描かれた球の中心を共有する最大内接球と最小外接球を考える。ここでは、この最大内接球と最小外接円の半径の差を球面度と呼ぶことにする。このような球面度の定義であれば、球全面の影響を考慮することができる。

プローブ半径を基準球により校正する場合、プローブで全球を一括スキャンすることはできないため、実際には、接触点の部分球面分布に対応する部分曲率半径が必要となる。部分曲率半径は真球からの形状誤差(球面度)により平均直径/2(図8(a))とは必ずしも一致しない(図8(b))。したがって、例えば、図3に示すような超高精度な直径測定装置により、平均直径が高精度に校正されていたとしても、球面度の悪い基準球の場合は、プローブ半径校正の不確かさが大きくなってしまう。つまり、プローブ半径校正用の基準球においては、直径値(曲率半径値)と球面度の両方の評価が重要である。

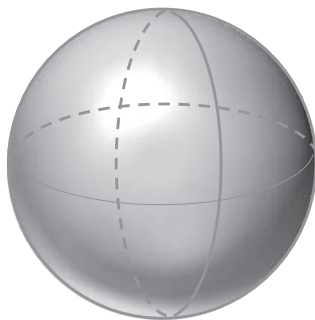


図6 球の3赤道面

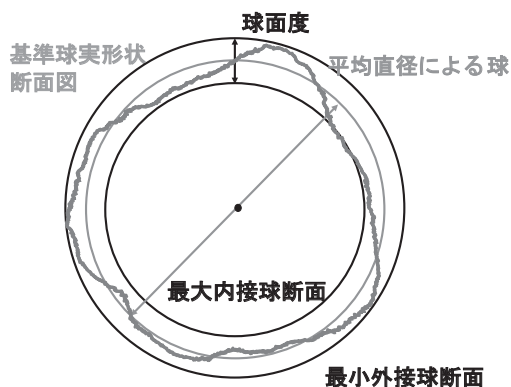


図7 球面度の定義

4.2 部分球面の評価が可能な球面干渉計

部分球面の形状情報を得ることができる装置として球面干渉計がある。図9に示すのは産業技術総合研究所内のZygo社製球面フィゾー干渉計である。干渉計は部分球面の形状偏差を得ることができるが、参照球面との比較測定であるため、参照球面形状が不確かさ要因となる。また、測定領域が参照球面のNAによって限定され、測定対象によっては必要な測定領域を一括して測定できない例があるという問題点がある。

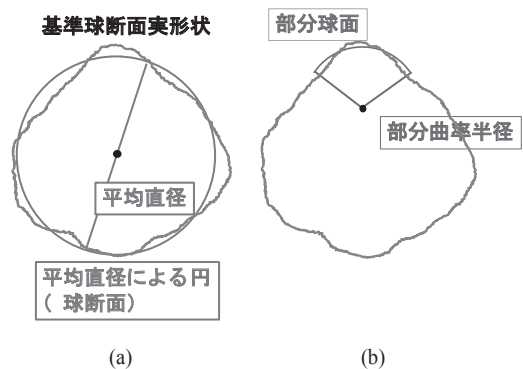


図8 球面度(実形状からのずれ)による部分曲率半径の平均直径からのずれ

4.3 干渉計二球面法による参照面形状の補正

部分球面の偏差形状測定時に、参照球面形状が不確かさ要因になるという問題点に関しては、二球面法などの絶対校正手法が存在する¹⁵⁻²⁰。図10に基本的な二球面法の模式図を示す。図10Aは参照球面による集光点(キャッツアイポイント)に平面ミラーを置いたものである。このとき、参照球面形状から発する波面と平面ミラーにより180度反転した波面が混在した情報が得られる。図10B、Cは測定対象試料を参照球面との共焦点位置に設置させた図であるが、Cでは試料がBの状態に対して180度回転した状態で設置してある。B,Cの測定値結果にはそれぞれ試料形状と参照球面の情報が含まれる。これらA,B,Cの情報を得て、連立方程式を解く。具体的にはCの測定結果を180度回転させることにより、Bと同一の試料形状および参照球面形状を180度回転させた情報が重畳している情報を得て、BとC(反転)の足し算からAの情報を引くことにより、参照球面の形状を補正できるようになる。本手法により、産業技術総合研究所においては、部分球面を不確かさ4.2 nmで測定することができる。

またさらに、球面度の良い球をランダムに回転させながら干渉計により部分球面測定して、すべての測定情報に含まれる系統的な成分を参照球面の情報として得る手法もある。(ランダムボール法)²¹⁻²³。

4.4 スティッチング干渉計

部分球面のみしか測定できないという問題の解決法としては、スティッチング²⁴⁻³⁰がある。QED Technologies社が開発したAspheric Stitching Interferometer (ASI (Q))



図9 Zygo 球面干渉計

という装置が市販されている。また、装置名にAspheric(非球面の)の語が入っていることから分かるように、この装置は非球面形状も測定することができる。試料面全体が一括で測定できないものを対象としており、部分領域(サブアパチャー)毎に測定データを得る。その後スティッチング技術により一括測定不可能な球面もしくは非球面形状を得ることができる。参照面と試料面の間にVariable optical null device (VON)³⁰を挿入することで、球面波を非球面波に変換し、測定可能非球面量を増大させ、非球面形状測定を実現している。またVONの利用にはサブアパチャー数を減少させて短時間で測定できるという利点もある³¹。

サブアパチャースティッチングの各区分領域における測定繰り返し精度は、4.2節で述べた球面フィゾー干渉計と同様高い。測定時間が短いことも利点である。しかし、参照面の形状誤差、区分データの繋ぎ合わせに伴う誤差が伝搬し、スティッチされた全体を見るとスティッチング端部の不確かさを増している懸念がある。スティッチング技術の精度評価のために、全球のスティッチングが可能かどうか、また全球スティッチングと部分球スティッチングではどのような差が生じるかのテストをすることが一案として考えられる。

5. 各国NMIの球直径と球面度測定に対するアプローチ

各国NMIの球の直径と球面度を対象とする測定アプローチの例として、アメリカのNISTの球面干渉計と、ドイツのPTBのアボガドロプロジェクト用干渉計、スイスのMETASのプローブ球校正技術を紹介する。

5.1 球面度と曲率半径を同時に測定する技術(NIST)³²

アメリカのNISTが開発したeXtremely accurate CALIBration InterferometeR (XCALIBIR)と呼ばれる球

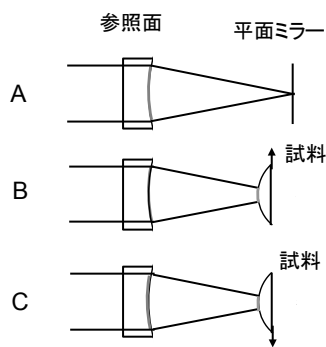


図10 二球面法の三配置

面フィゾー干渉計は、球面の形状偏差を測定するだけでなく、球の部分平均曲率半径を直接測定する。共焦点位置において、形状偏差を測定しながら、試料の共焦点位置からキャッツアイポイントまでの距離を、3つの距離計を用いて精密に測定する。この距離が、試料測定部の部分平均曲率半径と一致する。単一位置もしくは複数の位置における曲率半径を基準としながら、各測定位置の形状偏差を、最小二乗法をベースとしてスティッチングすることにより球全体の球面度と半径の情報を得る。形状測定と、部分平均曲率半径測定の模式図を図11に示す。単一位置による部分平均曲率半径測定の不確かさは40 nmと見積もられている。しかしながら、文献³²⁾で報告されている事例においては、全球形状のPV値(約70 nm)と比較して、球の162か所の等間隔位置における曲率半径の算出結果が大きくばらついている(2σで175 nm)。さらに、部分平均曲率半径の測定値と、スティッチングによって得た情報からの部分曲率半径の計算値が大きく異なっている。このため球全体の形状が正しく得られているという保証を与えるに至っていない。この問題の原因として、本技術は測長技術に依存しているため、測長技術由来の誤差に弱いことがあげられる。具体的にはデッドパス(距離計の測定される光路長と参照光路長の差)に由来する不確かさの影響が96 nmと評価されることが報告されている³³⁾。また、スティッチング技術由来の誤差も反映されていると考えられる。

5.2 球面度と曲率半径を同時に測定する技術(PTB)³⁴⁾⁻³⁶⁾

次に、ドイツPTBの例を述べる。この装置は球を両側面から超高精度な参照球面を用いてフィゾー干渉計によって計測し、球面からの形状偏差を取得する(図12)。高精度に直径情報を得ることができる装置でもある。図3、図4で示された産業技術総合研究所の装置同様、アボガドロプロジェクト用に開発された装置である。直

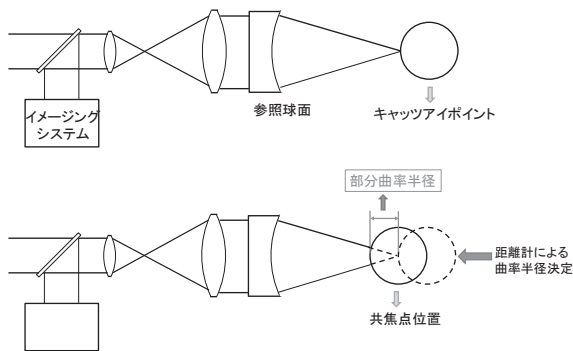


図11 曲率半径測定の模式図

径の不確かさは1.0 nmと報告されている。球面度に関しては、シリコン球の形状偏差情報かつシリコン球を設置していない場合の参照レンズ由来の測定情報を、球面調関数とツェルニケ関数を利用してスティッチングすることにより求めている。局所的な(θ と ϕ が固定された)曲率半径の不確かさは1.1 nmと報告されている。球面度の不確かさは明確に記載されていないが、不確かさ5 nmと報告されているCSIROの真円度測定を最小二乗球フィットした結果との比較はよく一致している。以上のように球直径、曲率半径、球面度のすべてを高精度に測定できる装置であるが、この装置は超高精度な参照球面を二つと、真空チャンバーを兼ねそろえているコストの高い装置である。また、精度と分解能の高い出力結果を追求すると計算機の負荷が高くなり、非常に多くのメモリと計算時間を必要とする点もデメリットとして挙げられる。産業応用性としては、限定された範囲でしか利用されない。

5.3 プローブ3つを相互に測定するプローブ半径校正技術(METAS)^{6),7)}

最後にスイスMETASのプローブ半径校正技術について述べる。この例は球の全球データを得るわけではないが、マイクロ三次元測定機の高精度化に寄与するプローブ校正の技術である。METAS開発のマイクロ三次元測定機により、プローブ同志を接触させて、極低接触力でプローブを測定する。このとき3つのプローブを相互に

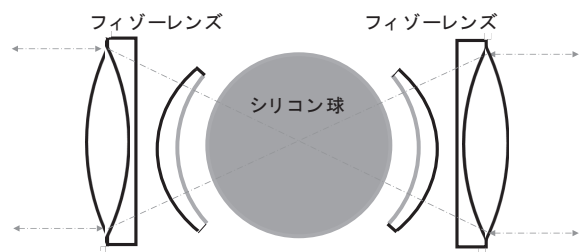


図12 PTBの球測定装置模式図

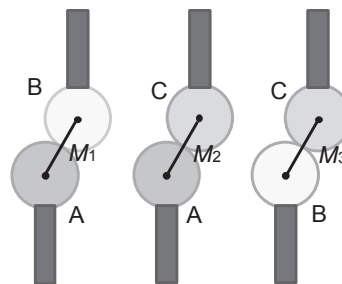


図13 プローブの相互測定

測定する（図13）。ある相対位置における測定された部分半径値を用いて連立方程式を解くとプローブの部分曲率半径が分かる。式(1)に上記の連立方程式を記載する。Mは測定値、Rはそれぞれのプローブの部分半径、A,B,Cは3つのプローブを表す添え字、 α は特定の測定位置を示す。この式を変形し、Rについて解くことで、3つのプローブの部分曲率半径が得られる。部分曲率半径を、 α を変化させながら算出し、各値をつなぎ合わせることで、プローブ形状の3Dマップが判明する。プローブの部分半径校正の精度は5 nmである。この手法を三球面法と呼称する。測定装置全体では50 nmの不確かさとなる。三球面法によりプローブの曲率半径校正ができるというメリットは非常に価値が高い。逆に三球面法のデメリットを挙げるとすると、プローブ3つの相互測定の際、上下反転させる必要があるため、高度な取り付けの再現性が求められることである。

$$\begin{aligned} M_1(\alpha) &= R_A(\alpha) + R_B(\alpha) \\ M_2(\alpha) &= R_A(\alpha) + R_C(\alpha) \\ M_3(\alpha) &= R_B(\alpha) + R_C(\alpha) \end{aligned} \tag{1}$$

5.4 代表的な球測定技術まとめ

以上に述べた球測定技術を、基準球の校正という視点によってまとめると表3のようになる。

直径もしくは半径の精度という観点では、一般的な万能測長機はマイクロ三次元測定機の基準球の直径校正技術として、精度が不十分である。また、プローブ球校正に必要な球面度の評価もできない。その他の手法においては、基準球の直径校正のために十分な精度があると考えて差し支えない。NIST、PTBの手法においては、基準球の球面度の評価も可能である。METASの手法は基準球の校正技術ではないが、プローブの半径と球面度の

評価を可能にする技術であるといえる。一方、上記基準球の校正技術等を産業界で広く利用可能にするためにはさらに汎用性・コストの観点が重要である。汎用性・コストにおいて産業界で広く利用可能と考えられるのは、表3の中では、万能測長機のみである。よって、現状では直径測定の精度、球面度評価、汎用性とコストの要件を満たす産業応用性の高い基準球の校正手法もしくはプローブ形状校正手法は確立されていない。

6. まとめ

球面と曲率半径の標準構築に向けた調査研究を行った。球面・曲率半径標準は、産業界で広く利用されているレンズ、三次元測定機の高精度化のために、重要な標準である。超高精度三次元測定機のさらなる高精度化のための標準技術（主に基準球）という観点に基づいて調査すると、産業応用のために、標準を供給するうえで重要な4つの項目、具体的には①基準球の直径測定精度、②球面度評価、③汎用性、④コストのすべての項目を満たす測定手法は現状存在しないと思われる。

本調査研究をもとに、球面・曲率半径標準に関する今後の産業技術総合研究所 NMIJ の取り組み展望を以下に示す。

1) 全球面の球面度評価法の開発

汎用的なフィゾー球面干渉計を用いた全球面の干渉計データステッチング技術の開発に取り組む。

2) 平均化による長さ標準に基づいた高精度球直径決定技術の開発

低熱膨張ブロックゲージを基準として、高精度に球直径に値付けをする。これを球の複数点において行い、高精度に平均的な球直径を求める。

表3 代表的な球測定技術のまとめ

	測定されるパラメータ	直径測定の精度	球面度評価	汎用性・コスト
万能測長機	二点間直径	△	×	○
ミットヨ社 (真空光路干渉計)	二点間直径	○	×	×
アボガドロプロジェクト (産総研)	二点間直径	◎	×	×
XCALIBIR (NIST)	部分曲率半径 球面度	○	○	×
両面球面干渉計 (PTB)	部分直径 球面度	◎	◎	××
三球面法 (METAS)	部分曲率半径	○	△	× (汎用性) ○ (コスト)

3) 球面度平均化による高精度基準球を用いたプローブ校正技術の開発

高精度に平均直径が決定された基準球を用い、プローブ半径の校正を試みる。基準球を回転させ複数回プローブ校正を行うことで球面度の影響を平均化することで高精度化を目指す。このプローブ校正技術によってプローブ半径の高精度な3Dマップを構築する。

以上の技術開発によって、直径、球面度、汎用性、コストの4点を考慮した高精度基準球を開発する。

上記のような技術開発ののち、中長期の目標として、開発する基準球のさらなる高精度化を目指す。具体的には、産業技術総合研究所の保有技術である密度測定法(液中ひょう量法と圧力浮遊法)³⁷⁾⁻⁴⁰⁾と精密質量測定法を組み合わせることによる、球平均直径の高精度測定技術を検討中である。球の密度と質量を高精度に決定し、高精度に体積Vを求め、そこから球の体積の式 $V = 4/3 * \pi r^3$ を逆算することによって球の平均的な半径を高精度に求めることができる。密度比較技術である圧力浮遊法の相対不確かさ 0.3×10^{-6} 程度と電子天秤を用いた精密質量測定法の相対不確かさ 0.3×10^{-6} 程度から、体積を相対不確かさ 0.4×10^{-6} 程度で求められると見積もられる。このことから例えば直径30mm程度のシリコン球の平均半径を10nm以下の精度で評価できることが見込まれる。”

上述のような技術によって校正された高精度基準球を利用することによってプローブを校正し、マイクロ三次元測定機を高精度化する。マイクロ三次元測定機は汎用性の高い装置であるため、その高精度化により多岐にわたる産業界への貢献が可能になると思われる。この研究開発により中長期的には例えば本稿に挙げた球面および非球面レンズの加工後製品の高精度化が見込まれる。さ

らには自由曲面の物体の加工の高精度化が達成される(図14)。

謝辞

本調査研究を行うにあたり、高辻利之工学計測標準研究部門部門長ならびに尾藤洋一長さ標準研究グループリーダー、近藤余範主任研究員、長さ標準、ナノスケール標準、幾何標準研究グループの皆様にご助言を頂きました。深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) BIPM key comparison database appendix C <http://kcdb.bipm.org/AppendixC/search.asp?iservice=L/DimMet.2.4.3> 2016/12/22
- 2) 吉住恵一, 久保圭司, 竹内博之, 半田宏治, 葛西孝昭, “ナノメートルを測る原子間力プローブ搭載超高精度三次元測定機”, 精密工学会誌, **68**(3) 361-366, 2002.
- 3) 吉住恵一, “超高精度三次元測定機の精度校正法”, 光学, **20**(10) 687(57)-695(65), 1991
- 4) TAYLOR HOBSON 製品一覧 Lumphoscan <http://www.taylor-hobson.jp/products/33/64.html> 2016/12/22
- 5) 佐藤理, “マイクロ三次元幾何標準の実現方法に関する調査研究,” 産総研計量標準報告, **3**(4) 559-568, 2005.
- 6) Rudolf Thalmann, Felix Meli and Alain Küng, “State of the Art of Tactile Micro Coordinate Metrology”, Applied Sciences 2016, **6**, 150doi:10.3390/qpp6050150
- 7) AKüng, F Meli and R Thalmann, “Ultraprecision micro-CMM using a low force 3D touch probe” Meas. Sci. Technol. **18**(2) 319-327 (2007)
- 8) Mahr 製品 PRECIMAR LINEAR 100 <https://www.mahr.com/ja/%E8%A3%BD%E5%93%81%E3%81%A8%E3%82%B5%E3%83%BC%E3%83%93%E3%82%B9/Mahr-%E6%B8%AC%E5%AE%9A%E8%A3%BD%E5%93%81%E8%A3%BD%E5%93%81/Precimar---%E3%83%AF%E3%83%BC%E3%82%AF%E3%82%B7%E3%83%A7%E3%83%83%E3%83%97%E3%81%A8%E8%A8%AD%E5%AE%9A%E3%83%A6%E3%83%8B%E3%83%83%E3%83%88/Precimar-LINEAR-100/> 2016/12/22
- 9) M.Sawabe, F. Maeda, Y. Yamaryo, T. Simomura, Y. Sayuki, T. Kubo, H. Sakai, S. Aoyagi, “A new vacuum interferometric comparator for calibrating the fine linear

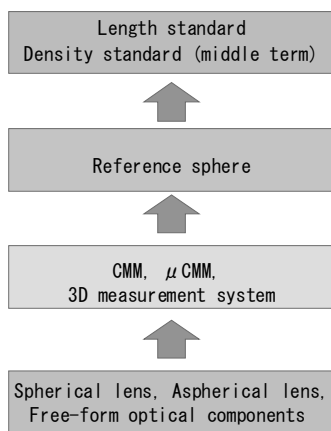


図14 開発球のトレーサビリティ

- encoders and scales”, *Precision Engineering*, 28(3) 320-328 (2004)
- 10) Mitutoyo Japan カタログダウンロード Catalog NO. 10006(2) マスターボール (球) JCSS 校正サービス http://www.mitutoyo.co.jp/support/service/catalog/10_service/10006.pdf 2016/12/22
 - 11) P. Becker, H. Friedrich, K. Fujii, W. Giardini, G. Mana, A. Picard, H-J. Pohl, H. Riemann and S. Valkiers, “The Avogadro constant determination via enriched silicon-28,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 20, p. 092002, 2009.
 - 12) B. Andreas, Y. Azuma, G. Bartl, P. Becker, H. Bettin, M. Borys, I. Busch, P. Fuchs, K. Fujii, H. Fujimoto, E. Kessler, M. Krumrey, U. Kuetgens, N. Kuramoto, G. Mana, E. Massa, S. Mizushima, A. Nicolaus, A. Picard, A. Pramann, O. Rienitz, D. Schiel, S. Valkiers, A. Waseda and S. Zakel, “Counting the atoms in a ²⁸Si crystal for a new kilogram definition,” *Metrologia*, vol. 48, pp. S1-S13, 2011.
 - 13) Y. Azuma, P. Barat, G. Bartl, H. Bettin, M. Borys, I. Busch, L. Cibik, G. D’Agostino, K. Fujii, H. Fujimoto, A. Hioki, M. Krumrey, U. Kuetgens, N. Kuramoto, G. Mana, E. Massa, R. Mees, S. Mizushima, T. Narukawa, A. Nicolaus, A. Pramann, S. A. Rabb, O. Rienitz, C. Sasso, M. Stock, R. D. Vocke Jr, A. Waseda, S. Wundrack and S. Zakel, “Improved measurement results for the Avogadro constant using a ²⁸Si-enriched crystal,” *Metrologia*, vol. 52, pp. 360-375, 2015.
 - 14) G. Mana, E. Massa, C. P. Sasso, M. Stock, K. Fujii, N. Kuramoto, S. Mizushima, T. Narukawa, M. Borys, I. Busch, A. Nicolaus, and A. Pramann, “The correlation of the NA measurements by counting ²⁸Si atoms,” *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 44, p. 031209, 2015.
 - 15) A. E. Jensen, “Absolute calibration method for laser Twyman-Green wave-front testing interferometers,” *J. Opt. Soc. Am.* **63**, p. 1313A, 1973.
 - 16) G. Schulz and J. Schwider, “Interferometric testing of smooth surfaces,” *Prog. Opt.* **13**, pp. 93-167, 1976.
 - 17) B. E. Truax, “Absolute interferometric testing of spherical surfaces,” in *Advances in Fabrication and Metrology for Optics and Large Optics*, *Proc. SPIE* **966**, pp. 130-137, 1988.
 - 18) K.-E. Ellsner, R. Burow, J. Grzanna, and R. Spolaczyk, “Absolute sphericity measurement,” *Appl. Opt.* **28**, pp. 4649-4661, 1989.
 - 19) J. E. Greivenkamp and J. H. Bruning, “Phase shifting interferometry,” in *Optical Shop Testing, 2nd Edition*, D. Malacara, ed., pp. 577-580, Wiley, New York, 1992.
 - 20) L. A. Selberg, “Absolute testing of spherical surfaces,” in *Optical Fabrication and Testing Workshop, OSA Technical Digest Series* **13**, pp. 181-184, 1994
 - 21) R. E. Parks, C. J. Evans, and L. Shao, “Calibration of interferometer transmission spheres,” in *Optical Fabrication and Testing Workshop, OSA Technical Digest Series* **12**, pp. 80-83, 1998.
 - 22) Ulf Griesmann, Quandou Wang, Johannes Soons, Remi Carakos, “A simple ball average for reference sphere calibration”, *Proc. SPIE* 5869, *Optical Manufacturing and Testing VI*, 58690S, (2005)
 - 23) R. E. Parks, “A Practical Implementation of the Random Ball Test,” in *Frontiers in Optics*, *OSA Technical Digest (CD)* (Optical Society of America, 2006), paper OFMC12.
 - 24) Chunyu Zhao, James H. Burge, “Stitching of off-axis sub-aperture null measurements of an aspheric surface”, *Proc SPIE* 7069, *Interferometry XIV: Techniques and Analysis*, 706316, (2008)
 - 25) 久米達哉、長橋進也、上田明、原田健太郎、中村典雄、” 測量網を用いた加速器のアライメント評価における誤差見積もり”, *Proceedings of the Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Vol.10, SUP114, (2013)
 - 26) Donald Golini, Greg Forbes, Paul Murphy, “METHOD FOR SELF-CALIBRATED SUB-APERTURE STITCHING FOR SURFACE FIGURE MEASUREMENT”, U.S. Patent, US6,956,657 B2, Oct. 18, 2005
 - 27) 根岸真人、保坂光太郎、堆浩太郎、”近似参照形状を用いたステッチ・アルゴリズムの開発”, *精密工学会誌*, 81(6) 555-561, 2015
 - 28) Shanyong Chen, Shengyi Li, Yifan Dai, and Ziwen Zheng, “Iterative algorithm for subaperture stitching test with spherical interferometers,” *J. Opt. Soc. Am. A* **23**, 1219-1226 (2006)
 - 29) Shanyong Chen, Shuai Xue, Yifan Dai, and Shengyi Li, “Subaperture stitching test of large steep convex spheres,” *Opt. Express* **23**, 29047-29058 (2015)
 - 30) M. Tricard, A. kulawiec, M. Bauer, G. DeVries, J. Fleig, G. Forbes, D. Miladinovich, P. Murphy, “Wubaperture stitching interferometry of high-departure aspheres by incorporation a variable optical null”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* **59** (2010) 547-550
 - 31) 近藤余範, “表面形状の計測技術と標準に関する調

- 査研究,”産総研計量標準報告,8(3)299-310,2011.
- 32) U. Griesmann, J. Soons, and Q. Wang, D. Debra, “Measuring Form and Radius of Spheres with Interferometry” CIRP Annals - Manufacturing Technology volume 53, issue 1, 2004, Pages 451-454
 - 33) T. L. Schmitz, C. J. Evans, A. Davies, W. T. Estler, “Displacement Uncertainty in Interferometric Radius Measurements”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, volume 51, Issue 1, 2002, Pages 451-454
 - 34) Guido Bartl, Michael Krystek, Arnold Nicolaus and Walter Giardini, “Interferometric determination of the topographies of absolute sphere radii using the sphere interferometer of PTB”, Measurement Science and Technology, 21(11) 115101 (8pp) (2010)
 - 35) Guido Bartl, Michael Krystek and Arnold Nicolaus, “PTB’s enhanced stitching approach for the high-accuracy interferometric form error characterization of spheres”, Measurement Science and Technology, 25(6) 064002 (8pp) (2014)
 - 36) Naoki Kuramoto, Kenichi Fujii, Arnold Nicolaus, Guido Bartl, Malcolm Gray, Peter Manson, and Walter Giardini, “Diameter Comparison of a Silicon Sphere for the International Avogadro Coordination Project”, IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL.60, NO. 7, 2615-2620 (2011)
 - 37) K. Fujii, A. Waseda, and N. Kuramoto: Development of a silicon density standard and precision density measurements of solid materials by hydrostatic weighing, Measurement Science and Technology, 12 (12), 2031-2038 (2001)
 - 38) K. Fujii: Present state of the solid and liquid density standards, Metrologia, 41, S1-S15 (2004)
 - 39) Waseda and K. Fujii: Density comparison measurements of silicon crystals by pressure-of-flotation method at NMIJ, Metrologia, 41 (2), S62-S67 (2004).
 - 40) Waseda and K. Fujii: Density Comparison of Isotopically Purified Silicon Single Crystals by the Pressure-of-Flotation Method, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 60 (7), 2539-2543 (2011)