

マイクロ三次元幾何標準の実現方法に関する調査研究

佐藤 理*

(平成16年11月26日受理)

A survey on micro metrology for dimensional standard

Osamu SATO

Abstract

Developments of processing technologies for micro-meso scale machine parts have met the needs for the advance of products in two decades. Simple and complex shaped micro mechanical products are manufactured and embedded in many devices. For further developments of industries based on micro system technologies, the innovation of micro-meso dimensional metrology is essential because the mass production of high-quality micro machine parts is possible with precision measurements as that of macro ones. Thus, measuring instruments which can do dimensional measurements of micro-meso scale objects and dimensional standards which can calibrate those apparatuses are required. Since 1990s, corporations and national metrology institutes (NMIs) in Europe, America and Japan have been developing many kinds of micro-meso metrology tools. In this survey, present situation of dimensional metrology in micro-meso scale is reported. First, the requirement of dimensional measurements of micro machine parts is described. Second, some micro-meso metrology tools developed in companies and national laboratories are introduced. Finally, foremost tasks and problems to be solved on the development of micro-meso dimensional metrology tools in NMIJ are discussed, and a course for the establishment of micro dimensional standards is charted.

1. はじめに

製造業において機械部品などの寸法、形状を直接測定できる三次元測定機 (Coordinate Measuring Machine: CMM) は、CAD/CAM/CAEの発展に貢献してきた。CMMは最終製品の検査に用いられるだけでなく、生産途中での検査結果を設計、製造工程へフィードバックすることなどにより、製品開発サイクルの効率化に重要な役割を果たしており、多くの製造ラインにおいてCMMが稼動している。この過程においてCMMによる測定結果の信頼性を高めるためにはCMMの校正を行う必要があり、校正に用いられるブロックゲージ、ステップゲージなどの標準が果たしてきた役割も大きい。

近年、商品性能の向上のためには機械要素の小型化、精密化が必要となっており、このような部品を製造する

技術 (マイクロ加工技術) も実用化された。マイクロ加工技術によって製造される微小機械要素は、MEMSによるマイクロセンサ、マイクロ切削によるマイクロ金型やハードディスク用動圧軸受け、マイクロ金型によって製造される微小光学素子、マイクロEDMによる微細穴 (自動車用エンジンのインジェクションノズル) など多く存在し、すでに市場に出回っている。これらの開発および製造プロセスの効率化においても、工程の各段階での寸法、形状測定および測定結果の活用が重要である¹⁾⁻³⁾。しかし従来の製造工程と比較して、微小機械要素の製造工程ではこのような測定はあまり行われていなかった。

ヨーロッパで行われた調査結果によると⁴⁾、現在では製品の寸法、形状測定を行っているMEMS製造者は全体の27%に留まっている。同調査によると、これらの測定の33%は光学顕微鏡、SEM、SPMといった顕微鏡観察による二次元測定で行われている。これはMEMSが二次元構造を積層する製造プロセスであることから、途中段階

* 計測標準研究部門 長さ計測科

の測定は二次元測定で十分であったからである。一方で寸法、形状測定の25%は三次元測定が行われている。これは現在求められている微小機械要素には「所要の性能を発揮するためには寸法、形状精度が重要」であり、かつハイアスペクト比をもつ三次元構造のものが増えているからである⁵⁾⁻⁸⁾。

MEMSデバイス以外でも、前に例に挙げた動圧軸受けの場合、軸受けにかかる圧力はグループの形状に大きく依存する。そのため製造工程においてグループの形状測定が重要となる。また非球面レンズや回折光学素子用の金型を製造する際にも、型の三次元形状測定と得られた形状誤差を基にした再加工が必要である。これらの用途のためには10mm立方以上の測定範囲を持ち10nmオーダー以上の精度で任意形状を測定できる装置が必要となる^{1), 9)}。

範囲1-10mm程度、分解能および精度0.01-0.1 μ m程度の領域（Micro/Meso領域）を対象とした加工技術の進歩と比較して、計測技術、特に三次元形状計測技術は大きく遅れを取ってきた。そのため各製造者では独自に測定機を開発し、計測を行っている。ここで問題となるのは、各製造者が行っている測定が必ずしも国家標準にトレーサブルでないという点である。MEMS分野の場合を見ても、製造者の89%が自ら行っている測定がトレーサビリティ体系にのっとることが必要であると考えている。しかし実際に用いている標準は企業内規格が26%を占め、国家標準にトレーサブルな測定は全体の34%となっている⁴⁾。この数字は三次元形状測定以外の測定も含めた場合のものであり、Micro/Meso領域における三次元計測だけに限定してみると、国家標準にトレーサブルな測定はほとんど行われていない。

これよりも大きな領域（Macro領域）および小さな領域（Nano領域）と比較すると、Macro領域では前述したCMMがすでに測定範囲1mm-1m、測定不確かさ1 μ m程度の測定能力を有しており、CMMやゲージ類を用いた校正サービスがすでに提供されている。またNano領域においてもSEM、SPMなどを用いて測定範囲100nm-10 μ m、測定不確かさ0.1nm程度の校正サービスが近年開始された。しかし両者の校正範囲は重複しておらず、Micro/Meso領域には校正体系の欠落がある（図1）。そこで各国NMIではMicro/Meso領域における校正サービスを提供するべく、研究を進めている^{1)-3), 10)-15)}。計量標準総合センター（NMIJ）においても国内製造者に対してこの領域での校正体系を構築することが急務である。そこで調査研究では微小機械部品等の評価のため、10mm立方程度の範囲、ナノメートルオーダーの精度で任意形状を校正できる三次元幾何標準の現状を調査し、実現のための課題と校正方法について考察した。

表1 各領域で求められる三次元測定

	Nano	Micro/Meso	Macro
サイズ	100nm-10 μ m	10 μ m-10mm	10mm-1m
分解能	10 μ m	1nm	0.1 μ m
不確かさ	0.1nm	10nm	1 μ m

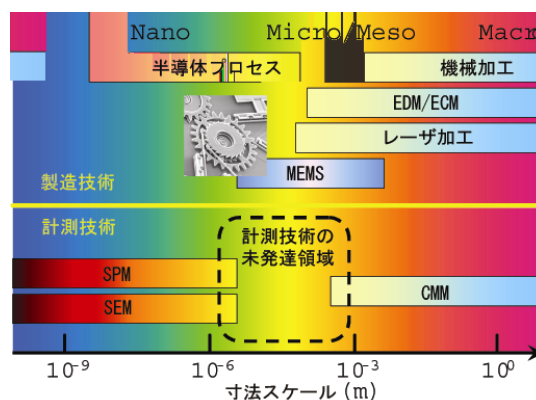


図1 校正サービスのギャップ

2. 微小機械要素と測定需要

2.1 測定需要

機械要素の小型化に対する需要は精密機械産業を中心として従来からあり、近年のマイクロ加工技術の発展が微小機械要素の製造を可能とした。現在実用化されているマイクロ加工を簡単に表2に示す。

近年市場に出回っている微小機械要素には様々な用途、形状、材質のものがあり、測定が必要となる要素にも前に例に挙げた動圧軸受けやマイクロ金型、光学素子、マイクログループアレイ、コンタクトプローブ、インジェクションノズルなど、多く存在する⁸⁾。これらの測定では、

自由度 二次元/三次元

プロービング 接触式/非接触式

検査方法 抜き取り/全数

と、異なる測定需要が存在する。これらの要求を単一の測定装置で満たすことは不可能であり、各企業ではそれぞれの目的に応じた測定機を用いている。例えば微小光学素子の場合、マイクロ金型を用いてガラスあるいは樹

表2 実用化されたマイクロ加工

加工法	MEMS, マイクロEDM/ECM, マイクロ切削・研削, レーザ加工など
加工対象	シリコン, 鉄, 非鉄金属, ガラス, 樹脂
加工寸法	1mmオーダー
加工分解能	10nmオーダー
加工精度	0.1 μ m以下

脂を成型する。この製造工程では型製造、成型、成型後の各段階で、

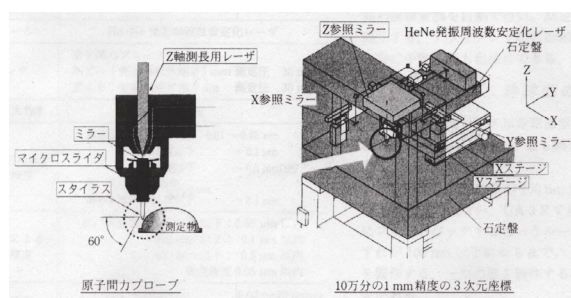
- ・表面粗さ計
- ・SEM
- ・触針式三次元測定装置
- ・非接触三次元測定装置

などを用いて型の形状精度、成型時の変形量、成型後の形状精度を測定し、補正を行うことで光学素子の性能を確保している¹⁶⁾。

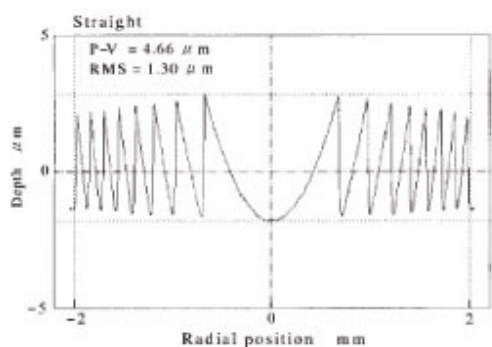
微小機械要素を製造する場合には工程の各段階で適切な測定を行うことにより、製造プロセスを管理することが重要である。従来の製造業では測定範囲1mm-1m、測定不確かさ1 μ m-1mm程度のCMMで十分であったのに対し、微小機械要素製造分野では測定範囲1-10mm程度、測定不確かさ0.01-0.1 μ m程度の寸法、形状測定が求められている。次項ではMicro/Meso領域で寸法、形状測定が可能な装置についていくつか紹介する。

2.2 測定装置

図2(a)は松下電器産業が開発したUltra-high Accuracy 3-DProfilometer (UA3P) である。この装置は原子間カプローブと名づけられたプローブがZ軸ステージに取り付けられている。試料表面-プローブ間に働く原子間斥力が一定となるようにZ軸を制御し、試料表面を走査する。



(a) UA3P¹⁷⁾



(b) UA3Pによるマイクロ金型の測定¹⁶⁾

図2 UA3P

走査時のXYステージおよびZ軸ステージの変位量をレーザー干渉計で測定する。図2(b)はUA3Pを用いてマイクロフレネルレンズ成型用金型を測定した結果である。UA3Pはステージ変位量をレーザー干渉計で測定するため、長さの標準にトレーサブルな測定装置であり、

測定範囲 100mm×100mm×35mm

測定精度 100nm以下

を実現している¹⁷⁾。

UA3PはZ上方からプローブを接近させ表面形状を走査するため、傾斜角60°の斜面までしか測定できない。したがって垂直側面を持つ微細穴やハイアスペクト比をもつ機械要素の測定には不向きである。このようなハイアスペクト比を持つ微細形状は自動車エンジンのインジェクションノズルなどにも用いられ、近年測定の需要が高まっている。このような部品の測定を行うため、松下電器産業では共振型パイロスキャン法(RVS法)を利用した測定機の開発も行っている⁶⁾(図3)。

図4はニコンが開発した超精密形状測定機である¹⁸⁾。この測定機はMetrology Frameを導入し、ステージ変位量測定用のレーザパスを真空にすることで、測定範囲400mm×400mm×100mmに対し測定精度19.5nmを実現している。この装置もZ上方からプローブを接近させる方式であり、完全な三次元測定を行うことは難しい。

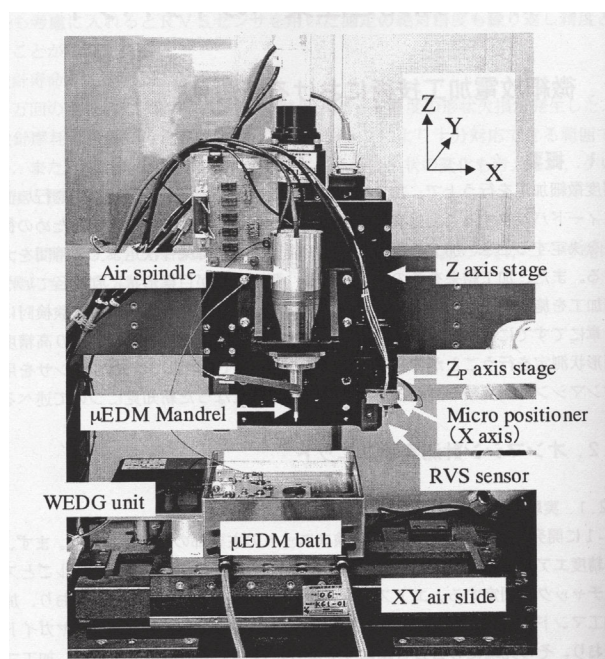


図3 RVSプローブを持つ三次元形状測定装置⁶⁾

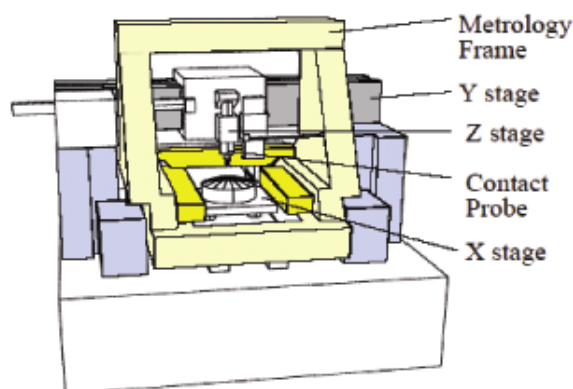


図4 Ultra-precise CMM, “Super-MASTER”¹⁸⁾

微小部品の測定では表面の破損を避けるために、測定時のプローブ接触力をできるだけ小さくしたい。そのため非接触測定に対する需要も大きい。図5(a)は三鷹光器が開発した非接触三次元測定装置NH-3Pである¹⁹⁾。この装置はステージ走査型レーザープローブ式であり、試料表面にレーザスポットの焦点が合ったときのステージ変位をリニアスケールで測定する。図5(b)はNH-3Pを用いてマイクロフレネルレンズ成型用金型を測定した結果である。

NH-3Pは測定範囲150mm×150mm×10mmの測定範囲を持つ。しかし測定精度は100nm程度にとどまっており、垂直面の測定ができないという制限もある。

微小機械要素の三次元形状測定における一番の問題はプロービングシステムである。大手測定機メーカーであるミツトヨでも超音波振動を用いた高精度、小接触力プローブ^{20), 21)}をもつ新しいCMMの開発を行っている(図6)。

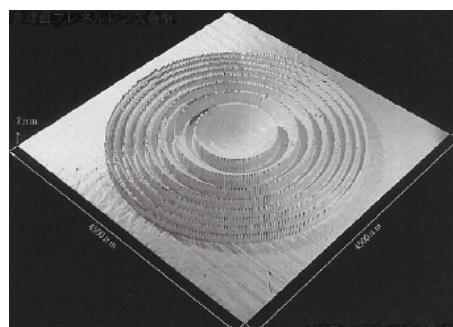
ここで例に挙げた以外にもSEM画像観察によって測定を行っている例も多くある(図7)。

3. Micro/Meso領域の校正

Macro 領域における三次元幾何形状に対してはCMMを用いた測定がすでに広く行われており、校正サービスについても提供されている。またNano領域においてもNMIJではAFMに基づく測定機を開発し、国際比較、国内比較を経て校正サービスを開始するに至っている。各国NMIにおいてもCMMおよびMicroscopic methodに基づくMacro, Nano領域での校正サービスを行っている。これに対して両者の中間領域であるMicro/Meso 領域での校正サービスはほとんどのNMIで行われていない。この節ではMicro/Meso領域での校正サービスの状況について述べる。



(a) NH-3P



(b) NH-3P によるマイクロ金型の測定¹⁶⁾

図5 三鷹光器の三次元測定機¹⁹⁾

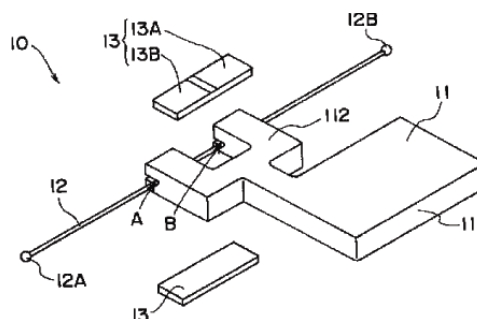


図6 超音波振動を用いた高精度タッチプローブ²⁰⁾

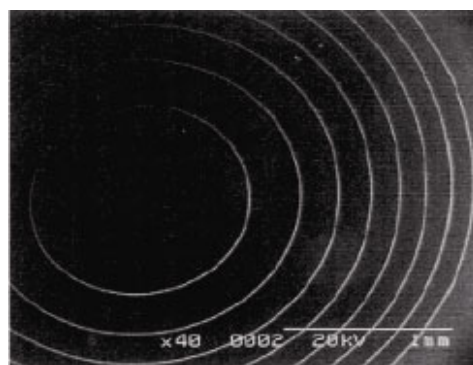


図7 SEMによるマイクロ金型の測定¹⁶⁾

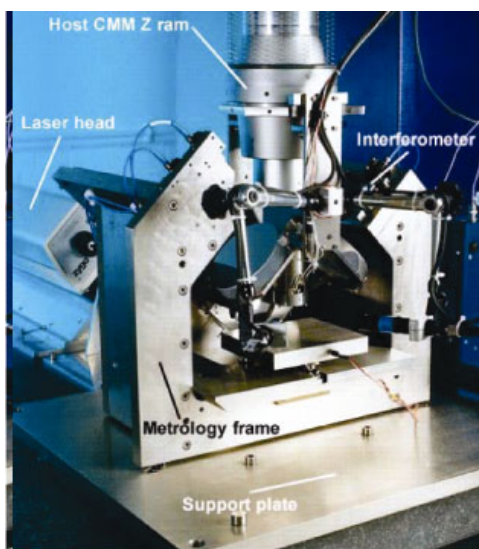
3.1 各国NMIの例

この項では各国NMIにおけるMicro/Meso領域の校正状況について述べる。ここではNPL（英）、PTB（独）、METAS（スイス）、NIST（米）およびNMIJ（日）の現状について述べる。

3.1.1 NPL

NPLでは1990年代からMacro領域のCMMをMicro/Meso領域に利用する研究を行ってきた。一連の研究を通してステージ変位量測定系の構築ならびにプローブの開発が進められ、その結果専用のCMM（Small CMM）を開発し（図8(a)）、この領域の校正サービスをSmall CMMによって提供している。

NPLのSmall CMMは従来型CMMのZステージに三面鏡とマイクロプローブ（図8(b)）とからなるフレームを取り付けたものである。このフレームは外部CMMによって移動し、固定された被測定物にプローブが接触したときのステージ変位量をアップオフセットが0となるように配置されたレーザ干渉計によって測定する。取り付けられているプローブはマイクロEDMによって加工された



(a) Small CMM



(b) マイクロプローブ

図8 NPLの校正装置



図9 Optical dimensional standard²³⁾

ものであり、プローブ径50 μm 、スタイラス長2000 μm 、接触力0.1mNと微細かつ低接触力のものである。プローブ由来の不確かさは50nm程度を実現している。

NPLはこのSmall CMMを用いて校正範囲50×50×50mm、不確かさ50–100nmの校正サービス（依頼試験）を提供している²²⁾。しかし標準については、二次元画像測定機校正用の標準²³⁾（図9）を供給しているものの、三次元形状については標準の供給までには至っていない。

3.1.2 PTB

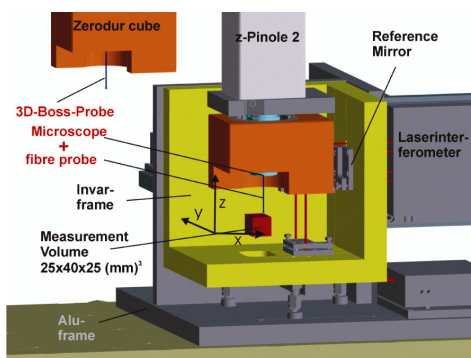
PTBではMicro/Meso領域での三次元形状校正サービスは提供していない（2004年10月現在）。PTBでも1990年代から研究が行われており、この研究は、

- (1) CMMの測定範囲拡大
- (2) SPMの測定範囲拡大

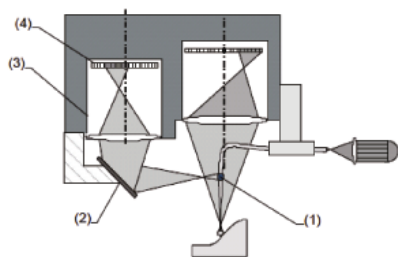
の二つの方式に分かれる。前者はNPLと同様Macro領域の測定手法の拡大、後者はNano領域の測定手法の拡大と捉えることができる。本稿では前者について紹介する。後者については文献¹²⁾を参照されたい。

PTBの3D Micro Measuring Device（3D-MMD）を図10に示す。NPLのSmall CMMと異なり、3D-MMDで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。ステージには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プオフセットが0となるように配置されたレーザ干渉計によって測定する。プローブには光ファイバプローブ（図10(b)）やMEMSで作成したプローブ（図10(c)）を用いている。

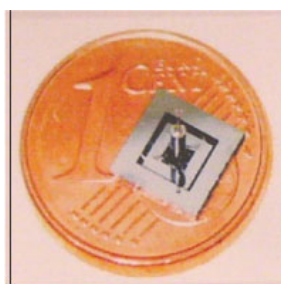
3D-MMDは25×40×25mmの測定範囲を持つ。不確かさについては100nm以下を目標としており、現在、測定不確かさの小さいプローブの開発を課題として残している。これについては新しく開発したMEMSプローブが良好な結果を示しており¹³⁾、近い将来校正サービスを開始できると推測される。



(a) 3D Micro Measuring Device: 3DMMD

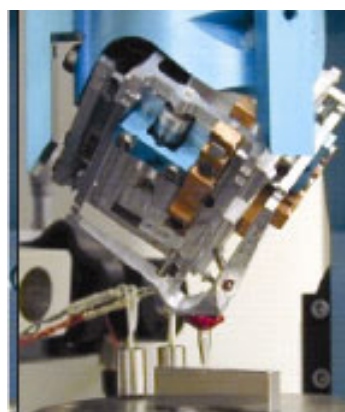


(b) 光ファイバプローブ

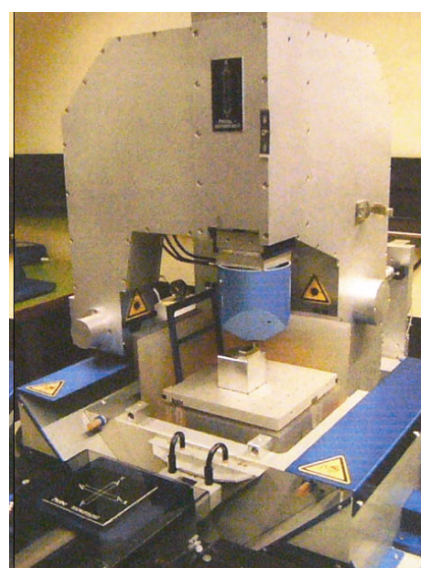


(c) MEMS プローブ

図10 PTBの校正装置



(a) μ-CMMのプローブ



(b) μ-CMM

図11 METASの校正装置

3.1.3 METAS

PTBと同様、METASでもMicro/Meso領域の三次元形状測定について研究しているものの、校正サービスは未提供である。METASでは0.1–20mmの範囲の表面形状や直径0.1mm、深さ2mm程度の微細穴、細溝などを100nm程度の不確かさで測定可能なCMM (μ-CMM) の開発を目指したプロジェクトを実行している。このうちプローブについては2003年3月にプロジェクトを完了し²⁴⁾、メカニカルプローブ(図11(a))を完成させている。またμ-CMM本体についても2004年12月にプロジェクト完了予定である²⁵⁾。現在METASではPhilips製Ultra precision CMM²⁶⁾を導入し、これにメカニカルプローブを搭載したμ-CMMを所有している(図11(b))。

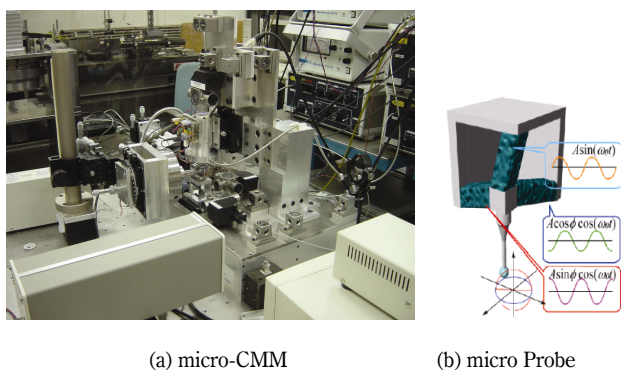
PTBの3D-MMDと同様、μ-CMMではプローブを固定し、被測定物を固定したステージが移動する。ステージには三面鏡が備えられており、固定されたプローブに被

測定物が接触したときのステージ変位量をアップオフセットが0となるように配置されたレーザ干渉計によって測定する。

現在の装置は100×100×50mmの可動範囲を持つ。プローブ由来の不確かさも含まれた測定の不確かさは100nm程度を達成しており、近い将来に不確かさ50nm程度の校正サービスを提供できるとしている¹⁵⁾。

3.1.4 NIST

NISTではマイクロ加工分野での米国企業の競争力を高めるという戦略から、Micro/Meso領域の測定装置と標準の確立が必要であるととらえている。NISTでもMacroとNanoの中間領域にはmicro-CMMが適していると考えており³⁾、マイクロ加工におけるCAD/CAM/CAEに不可欠なツールとして開発を進めている。



(a) micro-CMM (b) micro Probe
図12 micro-CMM

3.1.5 NMIJ

NMIJでもCMMによる幾何学量の校正範囲拡大によってMicro/Meso領域における校正サービスの提供を計画している(標準整備計画:2-幾何学量12)。また産総研全体で見ると、ファインファクトリー研究グループがマイクロファクトリによって製造される微小機械要素の評価用にマイクロ形状測定機(micro-CMM)を開発している²⁷⁾。この測定機も各国のNMIと同様にCMMに基づく機構である。図12はファインファクトリー研究グループが開発中の測定機(micro-CMM)である。micro-CMMは被測定物を固定したX-Yステージとプローブを搭載したZステージから構成される。micro-CMMではプローブが被測定物が接触したときのX-YステージおよびZステージの変位量をそれぞれのレーザ干渉計によって測定する。

3.2 各国NMIの例のまとめ

各国NMIにおけるMicro/Meso領域での三次元形状測定の実現状況をまとめる。

ヨーロッパ各国ではMacro領域の測定機であるCMMを元にMicro/Meso領域で三次元測定が可能な測定機を完成させつつあり、これを用いて、

校正範囲 50mm立方程度

不確かさ 100nm以下

の校正サービスを開始済み、もしくは開始間近である。しかしすでに校正サービスを提供しているNPLも含め、Macro領域におけるブロックゲージ、ステップゲージのような標準の提供はなされていない。そのため標準供給を通じた微小機械要素の三次元形状測定におけるトレーサビリティ体系は未整備のままである。ヨーロッパと比較して日米は研究途上である。NISTおよびNMIJでもCMMを元にした測定機の開発を計画しているものの、校正サービスの提供までには時間を要するというのが現状である。

4. マイクロ三次元幾何標準の実現

調査研究の最後として、マイクロ三次元幾何標準の実現に向けたシナリオを示し、至急解決すべき課題と将来の展望について述べる。

4.1 シナリオ

すでに様々な微小機械要素およびこれらを測定するための装置が市場に出回っており、各装置を用いて独自に検査が行われている。この現状を踏まえ、マイクロ三次元幾何標準の校正においても最終的には、

- ・国家標準にトレーサブルなゲージの供給による測定機の校正体系

の確立を目標とする。早急に校正サービスを提供し、かつ上記の校正体系を構築するためには以下の段階を経る必要があると考察した。

キャッチアップ マイクロ三次元測定機を所有し、依頼試験による校正サービスを開始する(現在のNPLと同段階)

高精度化 マイクロ三次元測定機を改良し、機構の校正によって校正能力を向上する

標準供給他のマイクロ 三次元測定機を校正できる標準を供給する(Macro領域のCMMと同レベルの標準供給体系の構築)

以下、各段階について述べる。

4.2 キャッチアップ

第一段階は先行しているヨーロッパ各国に追いつくことである。ヨーロッパのNMIではすでに測定範囲50mm立方程度、不確かさ100nm以下の国家標準にトレーサブルな測定装置を保有しており、校正サービスを提供できる段階まで到達している。NMIJでもこれと同等の装置を保有し、少なくとも現在NPLで提供されているものと同程度の校正サービス(依頼試験)を提供できる体制を整える必要がある。この段階では各製造者が持ち込むマスタにNMIJで値付けし、ユーザは各自で所有する測定機を用いてマスタとの比較測定を行うという方式でトレーサビリティを確保する。

先行するヨーロッパの例や1990年代からなされてきた研究結果を踏まえると、この段階で保有する装置としては、

- ・レーザ干渉計によるステージ変位測定系
- ・接触式微細プローブ

を備えた、CMMに基づく測定機が妥当であり、この考えは前述した標準整備計画にも取り入れられている。短期

間で校正装置を保有するには民間企業が開発した測定機を購入するか、もしくはNPLのように既存のCMM上に追加のメトロロジーフレームを備えるという方法が考えられる。どちらの場合でも以下の二つの課題を解決する必要がある。

- (1) 長さ標準にトレーサブルかつ測定不確かさの小さいステージ変位測定系の構築
- (2) 微細かつ低接触力で不確かさの小さいマイクロプローブの実装

前者についてはNMIJの保有技術で解決可能である。NMIJではすでにNano領域の形状測定機である測長AFMにおいて、三面鏡あるいは五面鏡とレーザ干渉計を用いたステージ変位測定系を実現しており、この技術を転用することで前者の課題を解決できる。後者のマイクロプローブについては、ヨーロッパでの前例から開発に時間を要すると予想している。

これについては測定機メーカ、他の研究機関と協力し、開発期間を短縮する必要がある。

上記の装置を保有した上でMacro領域のCMM、Nano領域の測長AFMとの同等性比較を行い、測定範囲50mm立方程度、不確かさ100nm以下の校正サービスを開始する。

4.3 高精度化

第二段階では保有する測定機の高精度化を行い、NMIJでの校正能力向上を図る。CMMによる三次元測定の不確かさが 10^{-6} 程度 ($1\mu\text{m}/1\text{m}$) であるのに対し、NPLなどでのMicro/Meso領域での三次元測定の不確かさは 10^{-4} 程度 ($100\text{nm}/1\text{mm}$) である。最終的な標準供給のためにはこの領域での測定不確かさをさらに小さくする必要がある。そのためには、

- (1) 機構の改良
- (2) プローブの改良
- (3) 装置の校正

などが必要となる。

機構の改良点として、測定ループの改良、フレームの熱膨張対策、ステージの安定駆動、測定範囲の拡大などが挙げられる。

プローブについては多くの改良が必要である。今後も機械要素の微小化、微細化は進むと予想され、これを測定するプローブもより小径、低接触力かつ小さい不確かさのものが求められる。マイクロプローブやより小さなナノプローブの実現を目指して多くの研究が国内外で行われており、さまざまな原理に基づくものが提案されている²⁹⁾⁻³⁰⁾。NPLがマイクロEDMを用いて、またPTBが

MEMSによってマイクロプローブを実現したように、今後のマイクロ加工技術の進歩によって現在提案中のマイクロプローブが実用化されると考えられる。

MacroのCMMではマスターボールの測定によるプローブの校正やゲージ測定による21個の幾何パラメータの校正を行い、測定不確かさを小さくしている。マイクロ三次元測定機の高精度化においてもプローブおよび幾何パラメータの校正が重要である。

これらの高精度化手法を導入することにより、三次元測定の不確かさ50 nm/1mm 以下を実現する。

4.4 標準供給

第三段階では他の装置を校正するための標準を供給する。この段階ではMacro領域でのブロックゲージやステップゲージ、Nano領域における一次元グレーティングのような標準を値付けし、供給することで各ユーザが保有する装置による測定値のトレーサビリティを確保することが目的となる。

2節で述べたように微小機械要素製造の現場ではすでに市販されている測定機を用いた寸法、形状測定が行われており、ゲージ類を供給することでこれらの装置を現場で校正できるようになる利点は大きい。Macro領域の校正ではブロックゲージのような端度器が広く用いられている。Micro/Meso領域でも段差試料の測定結果^{12), 22)}をブロックゲージ測定のように利用できれば、Macro領域と同様の校正が可能となる。また三次元幾何形状測定空間的な不確かさを評価するために、ボールプレート³¹⁾やホールプレートのような標準も必要があると考えている。これらの標準を10nm/1mmオーダの不確かさで値付けし、供給する。

5. まとめ

近年、微小機械要素の製造における三次元形状測定が求められている場面が増えている。民間企業では独自に測定機の開発を行い、製品の測定をしているのに対して、標準供給は遅れを取っている。そのため各国とも標準の整備を進めている段階にある。他国の標準整備状況を見ても、ヨーロッパではCMMを基にした測定機を開発し、校正サービス提供を実現しつつあるものの、標準供給までには至っていない。この分野において日米は遅れを取っているものの、ヨーロッパ各国と同様、CMMに基づく装置によって校正サービス提供を計画している。

NMIJでも早急にマイクロ三次元幾何標準の整備が必要であり、本調査研究では早期の校正サービス開始と将

来の標準供給体系構築を狙って、

- (1) マイクロ三次元測定機の保有と校正サービスの提供
 - (2) マイクロ三次元測定機の高精度化
 - (3) 標準への値付けと供給
- という展望を示した。

謝 辞

本調査研究を行うにあたり東京大学大学院工学系研究科、高増潔教授より援助を受けたことを感謝いたします。また有益な情報提供ならびに助言をいただいた東京電機大学工学部、古谷涼秋教授、先進製造プロセス研究部門ファインファクトリ研究グループ、岡崎裕一グループリーダー、同、小倉一朗研究員ならびに黒澤富蔵室長を始めとした計測標準研究部門長と計測科幾何標準研究室の皆様にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) G. N. Peggs, A. J. Lewis, S. Oldfield, "Design for a compact highaccuracy CMM," *Cirp Annals 1999 - Manufacturing Technology*, pp. 417-420, 1999.
- 2) G. Peggs, A. Lewis, R. Leach, "Measuring in three dimensions at the mesoscopic level," *ASPE 2003 Winter Topical Meeting*, pp. 53-57, 2003.
- 3) E. Amatucci, N. Dagalakis, B. Damazo, M. Davies, J. Evans, J. Song, C. Teague, T. Vorbuerger, "An overview of nano-micro-meso scale manufacturing at the national institute of standards and technology (NIST)," *Nanotribology: Critical Assessment and Research Needs*, pp. 259-269, 2003.
- 4) "Microsystem Technology Standardisation Roadmap," <http://www.memstand.org/>
- 5) G. Peggs, "Nanotechnology Keynote - Metrology at the extremes," *euspen 2004*, p 221, 2004.
- 6) 山本正樹, ハイアスペクト比マイクロ部品用形状測定技術の開発, 東京大学博士論文, 2002.
- 7) 財団法人マイクロマシンセンター, マイクロマシンの計測評価法, 2000.
- 8) 財団法人マイクロマシンセンター, 社団法人日本機械工業連合会, 平成14年度スケールインターフェースに関する調査研究事業報告書, 2003.
- 9) 高増潔, nano-CMM の開発, *機械と工具*, Vol. 39, No. 10, pp. 28-32, 1995.
- 10) A. Lewis, S. Oldfield, G. N. Peggs, "The NPL Small

- CMM - 3-D measurement of small features," *Laser Metrology and Machine Performance*, pp. 197-207, 2001.
- 11) S. Cao, U. Brand, T. Kleine-Besten, W. Ho.mann, H. Schwenke, S. Butefisch, S. Buttgenbach, "Recent developments in dimensional metrology for microsystem components," *Microsystem Technologies*, Vol. 8, No. 1, pp. 3-6, 2002.
- 12) G. L. Dai, F. Pohlenz, H. U. Danzebrink, M. Xu, K. Hasche, G. Wilkening, "Metrological large range scanning probe microscope," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 75, No. 4, pp. 962-969, 2004.
- 13) V. Nesterov, U. Brand, "The Nonlinear Mechanical and Elastical Properties of Silicon 3D Micro Probes," *euspen 2004*, pp. 242-243, 2004.
- 14) F. Meli, M. Fracheboud, S. Bottinelli, M. Bieri, R. Thalmann, J-M. Breguet, R. Clavel, "High precision, low force 3D touch probe for measurements on small objects", *euspen 2003*, pp. 411-414, 2003.
- 15) F. Meli, A. K"ung, "Performance of a low force 3D touch probe on an ultra precision CMM for small parts," *euspen 2004*, pp. 270-271, 2004.
- 16) 鈴木浩文, 超精密・マイクロガラスレンズの成形技術と超合金型の精密研削技術—光通信・AV・表示デバイス用光学部品の加工事例—, 高エネ研メカ・ワークショップ報告集, <http://lcdev.kek.jp/GLC/MechWS02/Suzuki.pdf>
- 17) 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*, Vol. 68, No. 3, pp. 361-366, 2002.
- 18) H. Shiozawa, Y. Fukutomi, T. Ushioda, S. Yoshimura, "Development of ultra-precision 3D-CMM based on 3-D metrology frame," *Proceedings of the Thirteenth Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering*, pp. 15-18, 1998.
- 19) 三浦勝弘, レーザプローブによる表面粗さ・形状測定, *機械と工具*, Vol. 46, No. 23, pp. 22-26, 2002.
- 20) 特開2000-055643.
- 21) 特開2001-091206.
- 22) A. Lewis, S. Oldfield, G. N. Peggs, "The NPL Small CMM - 3- D measurement of small features," *Laser Metrology and Machine Performance V*, pp. 197-207, 2001.
- 23) http://www.npl.co.uk/length/dmet/services/ms_optical_standards.html
- 24) <http://www.aramis-research.ch/e/7529.html>
- 25) <http://www.aramis-research.ch/e/14089.html>

- 26) http://www.cft.philips.com/html/projects/precision/ultra_precision.htm
- 27) 小倉一朗, 岡崎祐一, 小型座標計測装置のための三次元接触角検出プローブの開発第2報, 2004 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, G65, 2004.
- 28) 高谷裕浩, 佐藤憲章, 高橋哲, 三好隆志, 清水浩貴, 渡辺万次郎, ナノCMM レーザトラッピングプローブに関する研究(第1報)ー3次元位置検出の基本原理ー, 精密工学会誌, Vol. 66, No. 7, pp. 1081-1086, 2000.
- 29) K. Enami, M. Hiraki, K. Takamasu, “Nano-Probe Using Optical Sensing”, IMEKO-XVI World Congress, pp. 345-348, 2000.
- 30) E. Bos, I. Widdershoven, H. Haitjema, “Calibration and redesign of a nano probe based on MST technology,” *euspen* 2004, pp. 17-18, 2004.
- 31) 大澤尊光, 高辻利之, 黒澤富蔵, 幾何学ゲージ持ち回り比較の問題ーボールプレート2国間国際比較を通してー, 精密工学会誌, Vol.67, No. 2, pp.256-264, 2001.