

レーザトラッピングプローブによるナノ3次元座標測定



研究ノート

高谷裕浩*, 三好隆志**

Nano Three Dimensional Coordinate Measurement using Laser trapping Probe

Key Words : Microparts, Nano-CMM, Probe, Lasertrapping, Radiation pressure.

1. はじめに

マイクロマシン技術は将来の基盤技術としての発展が期待されている技術であり、世界的規模の研究・開発が進められている。特に近年の半導体製造技術をベースにした立体的なフォトファブ리케이션や異方性エッチングなどを駆使したプロセス技術の発達にはめざましいものがある。例えば、光、機械、電気、材料などを融合しマイクロ化したマイクロオプトメカトロニクス¹⁾やマイクロダイナミカルシステム²⁾など、より複雑で実用性の高いものが現れてきている。

マイクロマシンを構成するマイクロ部品の互換性を保つためには、形状精度、寸法精度、幾何公差などの3次元形状評価に基づいた精度管理が必要不可欠である。また、加工技術の高度化や加工精度管理の観点からも、マイクロ部品の3次元形状計測技術が果たす役割は大きいものと考えられる。そのため、

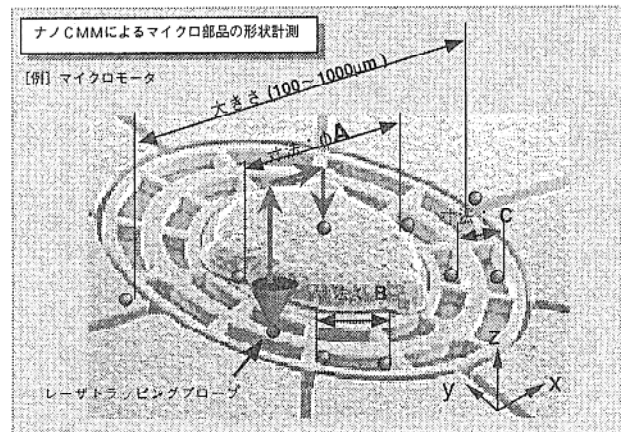


図1 レーザトラッピングプローブによる3次元座標測定の基本構想

表1 ナノCMM用位置検出プローブの基本仕様

ナノCMM	測定範囲 分解能 精度	(10mm) ³ 10nm 50nm
位置検出プローブ	プローブ球直径 プローブ球真球度 位置検出分解能 測定力	10μm 10nm 10nm 10 ⁻⁵ N



*Yasuhiro TAKAYA
1963年10月24日生
1992年北海道大学・大学院工学研究科・精密工学専攻・博士後期課程修了
現在、大阪大学・大学院工学研究科・機械システム工学専攻、助教授、博士(工学)、光応用加工計測
TEL 06-6879-7320
FAX 06-6879-7320
E-Mail takaya@mech.eng.osaka-u.ac.jp



**Takashi MIYOSHI
1944年1月25日生
1967年北海道大学・工学部・精密工学科卒業
現在、大阪大学・大学院工学研究科・機械システム工学専攻、教授、工学博士、精密加工計測
TEL 06-6879-7319
FAX 06-6879-7320
E-Mail miyoshi@mech.eng.osaka-u.ac.jp

複雑な微小形状に適応できる汎用性の高いマイクロ部品用の3次元座標測定機、すなわちナノCMM (Coordinate Measuring Machine)³⁾の開発が重要な課題となっている。

ナノCMMは、図1に示すような微小な3次元位置検出プローブにより座標位置を高精度に検出することによって、マイクロ部品の寸法や幾何形状の計測を実現するものである。従って、ナノCMMとその位置検出プローブの基本仕様には、表1に示すような測定範囲や精度などが要求される。特に位置検出プローブの仕様はプローブ径10μm以下、真球度

10nm以下, 位置検出分解能10nm以下および測定力 10^{-5} N以下と大変厳しく, これまでナノCMM用位置検出プローブの開発を困難にしてきた最大の問題点となってきた.

そこで本研究は, レーザトラッピング技術⁴⁾と光干渉法を用いることにより, (1)真球度の高い直径数 μm のプローブ球を3次的に安定して保持できる, (2)プローブ球は光放射圧の力学的釣り合い状態で保持されるため, 1nN以下の極めて小さい力が検出できる, (3)縦方向の測定分解能に優れた光干渉法によってプローブ球の任意方向への微小変位を縦方向変位として検出するため, nmオーダの3次的な位置検出分解能が期待できる, ナノCMMレーザトラッピングプローブを提案している. 本稿では, レーザトラッピングプローブの原理と大気環境中における位置検出原理の検討および標準ガラス球の測定実験について簡潔に紹介する.

2. レーザトラッピングプローブの基本原則

レーザトラッピングプローブの基本原則は, 光放射圧によって3次的に捕捉された微小球(マイクロプローブ球)が有する力学的な特性と, 外力が作用したときの微小球の変位を検出する干渉計に基づいている.

2.1 マイクロプローブ球の力学特性

図2はマイクロプローブ球の外力に対する力学的挙動を示している. 図2(a)は, 集光レーザ光の入

射によってその境界面上に発生する光放射圧, $f_1, f_2, \dots, f_{i-1}, f_i, f_{i+1}, \dots, f_n$ の合力 F_t が上向きのトラップ力として作用する様子を示している. このときトラップ力 F_t は重力 F_g と釣り合って光軸上で3次的に安定して捕捉されている. 次に, 図2(b)のようにマイクロプローブ球に外力 F_e が作用して変位を受けると, トラップ力 F_t は, 向き, 大きさともに変化し, F_t と F_g の合力 F_{total} が F_e と釣り合う. この状態から F_e の作用が解放されると力学的釣り合い状態が破れるため, 図2(c)のようにプローブ球は F_{total} によって加速度を受けて F_{total} の方向に変位し始め

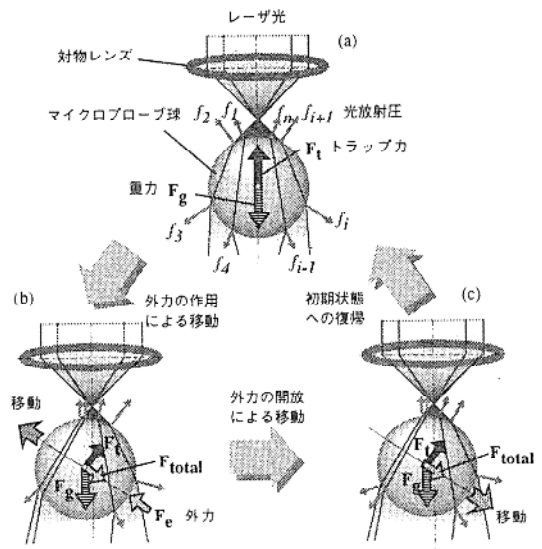


図2 レーザトラッピングプローブの力学的挙動

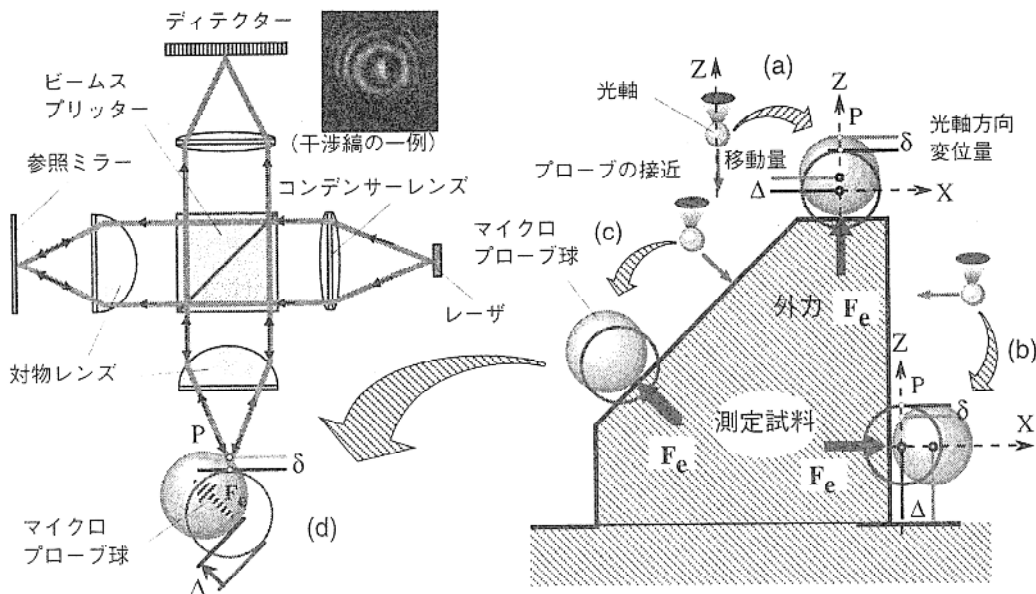


図3 レーザトラッピングプローブの位置検出原理

る、プローブ球の変位とともに F_L が変化し、再び図2(a)の安定した位置に戻る。以上のように、マイクロプローブ球はあたかも3次元的なバネに取り付けられた球のような振る舞いを示し、プローブ球中心位置座標を安定して保持しながら、被測定物の位置座標を検出することができる。そのバネ定数の大きさは $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ N/m}$ オーダーの大きさであり、AFM用のカンチレバーのバネ定数(0.005~0.1N/m程度⁵⁾)と比較してみても、非常に高感度なカセンサとしての特性を有していることがわかる。以上のような力学特性は、マイクロプローブ球が極めて小さい測定力が要求されるナノCMM用位置検出プローブに適していることを示している。

2.2 干渉計によるマイクロプローブ球変位検出

レーザートラッピングプローブが被測定物から外力の作用を受け、マイクロプローブ球が基準位置から移動するとき、被測定物の位置座標が検出される。図3は、被測定物の位置座標が検出の際に受けるマイクロプローブ球の移動量 Δ と、それによって生ずる点Pの微小変位 δ の検出方法を示している。図3(a)、(b)および(c)に示すように、マイクロプローブ球表面上の微小変位 δ を検出することによって、任意の傾きを持った面の3次元的な位置を高感度に検出することが可能となる。

そこで本研究では、微小変位 δ の非接触検出法として、高倍率の対物レンズで微細な部分に干渉法を適用することを目的としているLinnik干渉計を採用した。図3(d)にLinnik干渉計の基本構成を示す。ビームスプリッターで透過光と反射光に振幅分割された光は、それぞれ高倍率の顕微鏡対物レンズで集光されてプローブ球上面および参照ミラーで反射し、検出器においてプローブ球上面の高低差に応じた干渉縞を形成する。干渉縞強度分布の周期的な変化によって、マイクロプローブ球の光軸方向の微小変位 δ が検出される。

3. 大気中レーザートラッピングプローブの実現

まず、大気中におけるレーザートラッピング実験を行い、プローブ球の3次元的な捕捉を確認した。本実験では、プローブ球として用いる直径約 $8 \mu\text{m}$ のシリカ微粒子をガラス基板表面に直接散布し、集束YAGレーザー光(波長 1064 nm)を上方から入射する方法を試みた。シリカ微粒子には 5.254 pN の重力が作用するが、対物レンズの開口数(N.A.)が0.80以上

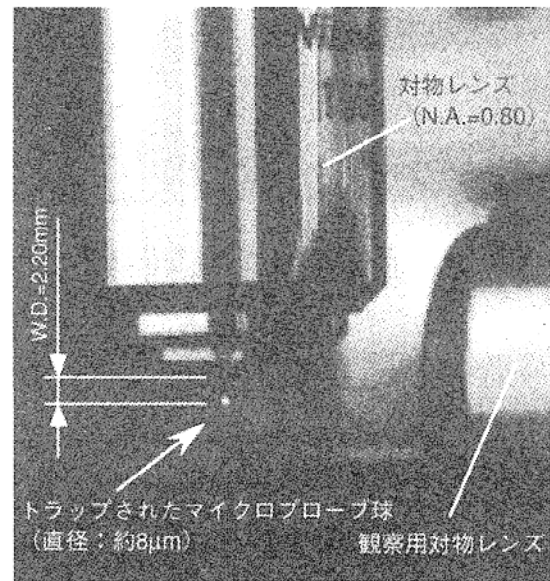


図4 大気中レーザートラッピング実験

の対物レンズを用いれば、それと釣り合う上向きのトラップ力を発生させることができる。N.A. 0.80の対物レンズによって大気中におけるレーザートラッピングを実現した様子を図4に示す。大気中ではガラス基板表面とシリカ微粒子の間には強い吸着力が作用している。まず、この吸着力からシリカ微粒子を解放するため、出力 0.8 W のYAGレーザー光をQ-SW周波数 10 kHz (ピークパワー 10 kW)で発振させ、プローブ球をガラス基板表面から浮上させる。次に、出力 100 mW 以下の連続発振(CWモード)に切り替え、プローブ球を対物レンズの下端より約 2.2 mm の位置で安定して保持する。図4は対物レンズ直下に保持されているプローブ球(の散乱光)を撮影したものである。

4. 標準マイクロガラス球の測定実験

公称粒径 $168 \pm 8.4 \mu\text{m}$ の標準マイクロガラス球を測定試料として、レーザートラッピングプローブを用いた測定実験を行った。なお本実験では、より安定したトラッピングが可能な、N.A. 0.95の対物レンズを用いた。図5(a)~(d)に、レーザートラッピングプローブを標準マイクロガラス球に接近させる様子と接近前とはほぼ接触(完全な接触がどこかは確認できない)した位置における干渉縞を示す。マイクロプローブ球が試料表面に接近する前の位置(図5(a))では、干渉縞は同心円状のパターンとなっているが、試料に近接した位置(図5(c))では干渉縞パターン

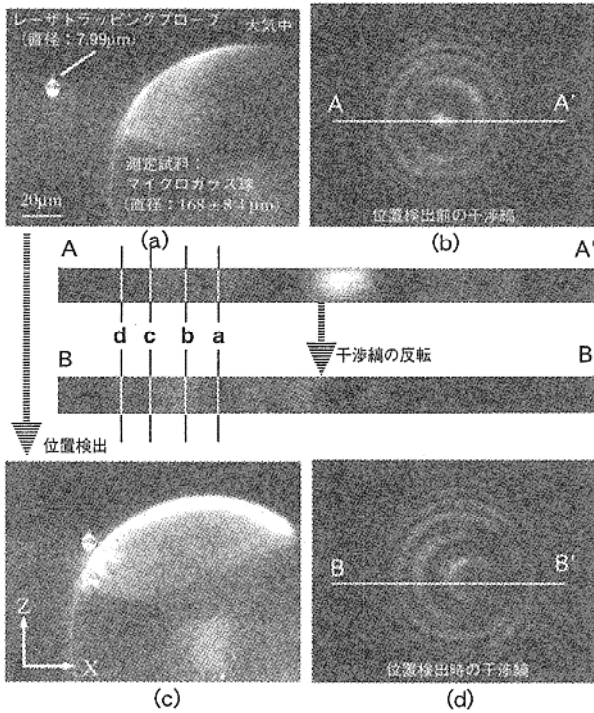


図5 標準マイクロガラス球の測定と干渉縞変化

の強度分布に変化が生じている。干渉縞強度分布の変化を拡大して示した、A-A'およびB-B'を比較すると、a, b, c, dのそれぞれの干渉縞の明暗がほぼ入れ替わっていることが確認でき、標準マイクロガラス球への近接によってマイクロプローブ球が微小変位を受けていることが確認される。

図6に、上述の干渉縞変化に基づいて標準マイクロガラス球の位置座標測定を行った結果とその最小自乗近似円および最小自乗近似円からの距離を示す。得られた最小自乗近似円の半径 $69.42\mu\text{m}$ は、標準マイクロガラス球の公称半径 $84\mu\text{m}$ と約 $15\mu\text{m}$ の差があり、標準マイクロガラス球の保証精度よりも大きい誤差が生じている。しかしながら、最小自乗近似円からの距離の標準偏差が $0.213\mu\text{m}$ と小さいことから、測定結果は被測定物の幾何学的な特徴である円の位置座標を検出しているといえる。

5. おわりに

ナノCMM用レーザトラッピングプローブの基本原理および大気中における3次元位置検出の基本特性について紹介した。なお、今回の測定結果の誤差要因は、ステージの位置決め誤差や干渉計の分解能不足など、測定系の多岐にわたっているため、現段階ではレーザトラッピングプローブの正確な座標位

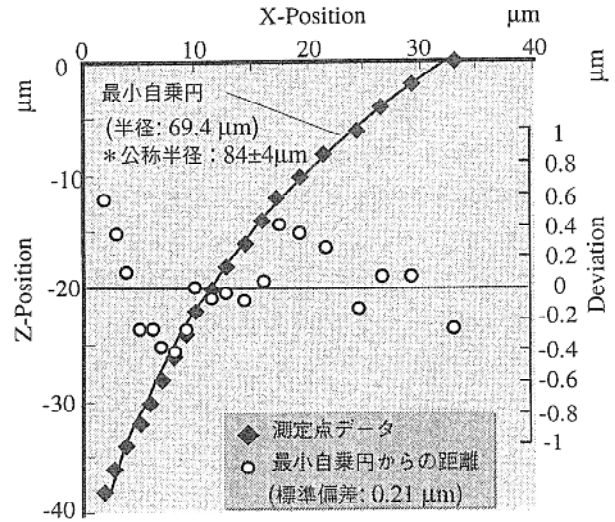


図6 標準マイクロガラス球の測定結果

置検出精度を議論することはまだできないが、位置座標検出プローブとしての基本特性を有していることは確認された。今後、測定系を構成する各々の要素について測定精度への影響を解析し、ナノメートルオーダの位置検出精度の実現へ向けた新たな取り組みを行っていかうと考えている。

参考文献

- 1) 江刺正喜：光マイクロマシン総論, Oplus E, 20, 1 (1998) 27.
- 2) R. S. Muller : MICRODYNAMICAL SYSTEMS, Edited by Bharat Bhushan, Micro/Nanotribology and Its Applications, Kluwer Academic Publishers, (1997) 579.
- 3) Kiyoshi Takamasu, et al. : Basic Concepts of Nano-CMM (Coordinate Measuring Machine with Nanometer Resolution), Proceeding of The Japan-China Bilateral Symposium on Advanced Manufacturing Engineering, (1996) 155.
- 4) A. Ashkin : Acceleration and trapping of particles by radiation pressure, PHYSICAL REVIEW
- 5) G. Y. Chen, R. J. Warmack, T. Thundat, and D. P. Allison : Resonance response of scanning force microscopy cantilevers, Rev. Sci. Instrum., Vol.65, No.8, pp.2762-2768 (1994).