OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

| | |
|---|---|
| Title | ナノ座標測定における光放射圧マイクロプローブに関する研究 |
| Author(s) | 道畑, 正岐 |
| Citation | 大阪大学, 2010, 博士論文 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://hdl.handle.net/11094/2849 |
| rights | |
| Note | |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

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

The University of Osaka

博士論文

# ナノ座標測定における光放射圧マイクロプローブに関する研究

# DEVELOPMENT OF LASER TRAPPING BASED MICROPROBE SYSTEM FOR NANOCOORDINATE METROLOGY

大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻

道畑 正岐

2009年12月

博士論文

# ナノ座標測定における
# 光放射圧マイクロプローブに関する研究

# DEVELOPMENT OF LASER TRAPPING BASED MICROPROBE SYSTEM FOR NANOCOORDINATE METROLOGY

大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻

道畑 正岐

2009年12月

**論文審査委員会**

主査　**高谷 裕浩**

大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 教授

副査　**竹内 芳美**

大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 教授

副査　**箕島 弘二**

大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 教授

副査　**山内 和人**

大阪大学 大学院工学研究科 精密科学・応用物理学専攻 教授

# 要旨

## ナノ座標測定における光放射圧マイクロプローブに関する研究


この数十年間で、マイクロ加工技術は目覚ましい進歩を遂げ、加工精度はサブμmに達する。一方で、マイクロ部品の幾何形状を評価する技術は、現在もなお未成熟である。近年、ナノCMM (座標測定機) の開発が進んでいるが、精度のボトルネックは測定面の位置を検出するマイクロプローブである。プローブ球のスケールが数十μm以下に達するとスケール効果などで、測定の不確かさが増大する。そこで、本研究では、マイクロ領域でのプローブ球と測定面との特異な現象の理解を深め、高感度なプローブを開発することを本研究の目的とし、レーザトラップ技術を用いた光放射圧マイクロプローブを提案する。

レーザトラップ技術によって直径8 μmのシリカ微粒子を空間に捕捉し、プローブ球として用いる。数値解析によってプローブのばね定数を検証した結果、数十 μN/mと従来のものより小さく、微小な力も検出可能であった。基礎実験としてプローブ球を測定面に接近させると、プローブ球は測定面の極近傍で力学的作用で200 nm程度の変位を受けた。このようにプローブ球と測定面間に微小な力が発生し、本プローブで測定面の位置を検出可能であることが確認できた。また、この検出を高感度にするため、プローブ球を微小振動させる振動プローブを用いた結果、25 nm以下の感度を示した。

次に、プローブシステムを設計試作した。プローブ球の高精度な制御と位置測定が求められる。位置制御はAODによりレーザ焦点位置を制御し、位置測定にはプローブ球の後方散乱光を取得する。また、プローブ信号から現象を理解するため、プローブ球の力学振動モデルを提案した。Langevin方程式を基にばねダンパ系によって表現し、プローブ振動の周波数応答を実験と比較することでその正当性を確認した。そのモデルより実験的にプローブ球のばね定数を求めた結果、数十 μN/mのばね定数が確認され、数値解析とも高い一致を示した。ここで、プローブの基本的性能を向上するため、捕捉光源にラジアル偏光を用いた。これによって、ばね定数の3次元的ばらつきが14%に抑え、作動距離も3.4 mmと従来の10倍以上に拡大できた。また、プローブ性能を評価するため、プローブシステムを搭載可能な測定システムを設計および試作し、その運動性能を評価した。ヘテロダインレーザ干渉計による評価の結果、ステージ運動性能は数十nm程度であり、十分な機能を持つと確認できた。

位置検出の基本的原理を検証した。プローブ球が測定面に接近すると空気の圧縮・膨張により、プローブ球に作用する粘性抵抗が増大する。実験によって、測定面の数μm近傍でプローブ球に働く粘性抵抗係数が急激な変化を確認し、実際にプローブ振動が減衰された。特に、振幅の減衰は急峻で10 nm程度の検出分解能が得られた。一方で、水平面を座標測定する際、プローブに特異な信号が現れる。これは、測定面からの反射光と捕捉光源が干渉し発生する定在波であり、プローブ球のばね定数を変化させる。結果、位置検出の精度の低下を招く。この影響を低減するために、プローブの励振周波数に着目し、ばね定数の変化に鈍感で粘性抵抗係数の変化に敏感な励振周波数を検討したところ、プローブの共振周波数よりも800 Hz程度低い周波数が最適であることが確認できた。これによって測定面を±64 nmで座標測定を可能とした。

また、ダンピング効果がプローブ球と測定面の方向によって、その減衰の程度が異なるという現象を利用して、測定面の位置と法線方向を測定可能なプロービング手法を提案した。プローブ球を水平に2次元振動させ、円軌道を描かせる。2次元振動プローブが測定面に接近すると、振動方向の粘性抵抗力の違いから円軌道が楕円軌道に変化する。この楕円の短軸角度から測定面の法線方向、短軸長さから測定面位置を検出した。その結果、位置検出の分解能は 39 nmが得られ、面の法線方向の角度測定は±1.5 °の精度が得られた。

このように、マイクロ領域での振動プローブと測定面間の粘性抵抗係数の変化という相互作用を明らかにし、約20 nm以下の高感度な位置検出を達成した。また、測定面の位置と法線方向を同時測定可能な新規なプロービング手法を開発し、ナノCMMマイクロプローブとしての有効性を示した。

# ABSTRACT


## Development of laser trapping-based microprobe system for nanocoordinate metrology

In only a few decades, microfabrication technology has grown from nascency into an established manufacturing system with submicrometer accuracy. However, no concomitant development has take place in the evaluation technology for microparts, particularly in three-dimensional (3D) measurement, which is still in development. This realization has recently led to increased focus on the development of technology for practical nano-coordinate measuring machines (nano-CMMs). The key—and hence the bottleneck—in realizing a nano-CMM system is the microprobe system. This is because for features smaller than several dozen micrometers, the probing uncertainty is considerably exacerbated by scaling effects. This study aims to understand the interactions that occur between a probe sphere and a surface at the microscope and to thus realize a microprobe system appropriate for a nano-CMM. To this end, this study explores the possibility of using the laser trapping technique for a practical microprobe system.

The proposed system comprises an optically trapped silica particle of 8 μm diameter serving as the probe sphere. Numerical analysis revealed that the stiffness of the probe system is on the order of several dozen micronewton per meter—much lower than that of conventional probes. This soft probe can therefore detect very small interaction forces. A fundamental study showed that close to a target surface, the surface forces produce a deviation 200 nm in the probe sphere. Thus, the microprobe satisfies the requirements of a surface sensing probe. For increased sensitivity, the probe sphere was oscillated to act as a vibro-probe. Consequently, this vibro-probe achieved a sensitivity better than 25 nm.

A prototype probe system was designed and manufactured. The position of the probe sphere was controlled by shifting the focal point of the trapping laser using an acousto-optic deflector (AOD). The position of the probe sphere was measured by detecting the light backscattered off of it. The behavior of the vibro-probe was modeled as a dynamic mass–spring–damper system using the Langevin equation. The predictions of the proposed model were in good agreement with experimental data. The stiffness measured using this model was on the order of several dozens micronewton per meter. Further, it was found that a radially polarized trapping laser beam reduced the change in the 3D stiffness of the probe in various probing directions by 14% and increased the working distance to 3.4 mm, which is 10 times greater than that of a conventional probe. Next, this probe was integrated with a prototype CMM that was specially designed for evaluating the performance of the probe system. The dynamic properties of the coordinate stage were evaluated by a heterodyne interferometer. The test results showed that the stage had a positioning accuracy of several dozen nanometer.

In the analysis of the system, the principle of position detection was first investigated. Experiments revealed that the viscous drag force on the probe increased drastically during probing due to the compression and expansion of air. Further, it was found that the oscillation of the probe decreased and the sensing resolution was 10 nm by monitoring the probe amplitude. However, the situation was different when the probe interacted with a flat surface normal to the optical axis. The retroreflected and forward scattered light interfered to form a standing wave around the probe sphere and surface. This standing wave affected the stiffness of the probe system and deteriorated the probing accuracy. It was then found that probe accuracy could be increased by controlling the oscillating frequency, which should be set at a value such that the probe is sensitive to damping effect but does not exhibit stiffness fluctuation. Experiments confirmed that the optimum oscillating frequency was approximately 800 Hz lower than the resonance frequency. With this optimization, the position sensing accuracy was ±64 nm.

The damping effect acting on the probe is anisotropic; that is, it varies with the direction in which the probe is oscillated. To exploit this characteristic, a new probing technique is proposed by which the surface position and surface angle can be measured simultaneously. With this technique, the probe is oscillated circularly in the focal plane. And when the probe approaches the target surface, the orbit of the probe oscillation changes from circular into elliptical. The length of the minor axis indicates the position of the surface and the minor axis angle indicates the surface angle. This technique was implemented and achieved a resolution in position detection of 39 nm and an accuracy in surface angle measurement of ±1.5°.

At the microscale, the oscillated microprobe experiences a change in the viscous drag force near a surface, which damps the probe oscillation. The proposed microprobe achieved a resolution of better than 20 nm in measuring the position of a surface and could also simultaneously measure the angle of the surface via the damping effect.

# 目次


**第1章　緒論** . . . . . **1**

1.1 研究背景 . . . . . 1

1.2 三次元座標測定器 . . . . . 3

1.3 ナノCMMとマイクロプローブ . . . . . 4

1.3.1 ナノCMM開発の現状 . . . . . 4

1.3.2 マイクロプローブ開発の動向 . . . . . 6

1.3.3 マイクロプローブの課題点と要求仕様 . . . . . 9

1.4 本研究の目的 . . . . . 12

1.4.1 光放射圧プローブコンセプト . . . . . 12

1.4.2 研究目的 . . . . . 12

**第2章　レーザトラップ技術** . . . . . **13**

2.1 緒言 . . . . . 13

2.2 光放射圧 . . . . . 13

2.2.1 電磁波基礎理論 . . . . . 13

2.2.2 光のエネルギと力 . . . . . 14

2.2.3 光子による力 . . . . . 16

2.3 レーザトラップ技術の歴史的展望 . . . . . 17

2.4 レーザトラップ原理 . . . . . 18

2.4.1 基本原理 . . . . . 18

2.4.2 偏光作用 . . . . . 18

2.5 結言 . . . . . 19

**第3章　数値解析による光放射圧プローブの特性評価** . . . . . **20**

3.1 緒言 . . . . . 20

3.2 光放射圧プローブ基本的特性 . . . . . 20

3.2.1 光線追跡法 . . . . . 20

3.2.2 光線追跡シミュレータ確認 . . . . . 23

3.2.3 光放射圧プローブ基本特性 . . . . . 23

3.2.4 捕捉光源 . . . . . 24

3.3 プロービング時に受ける影響評価 . . . . . 25

3.3.1 FDTD法 . . . . . 26

3.3.2 FDTDシミュレータ確認 . . . . . 29

3.3.3 反射光 . . . . . 29

3.3.4 シャドウ効果 . . . . . 29

3.4 結言 . . . . . 30

**第4章　位置検出基礎実験** . . . . . **31**

4.1 緒言 . . . . . 31

4.2 プローブ球接近実験 . . . . . 31

4.2.1 Linnik干渉計を用いたプローブ球位置測定 . . . . . 31

4.2.2 実験装置 . . . . . 32

4.2.3 反射ミラーの調整 . . . . . 33

4.2.4 プローブ球変位測定 . . . 33
4.2.5 位置検出可能性の検証 . . . 34
4.2.6 標準ガラス球の座標計測 . . . 35
4.3 光軸方向振動プローブ . . . 37
4.3.1 プローブ球の光軸方向振動 . . . 37
4.3.2 実験装置 . . . 38
4.3.3 位置検出 . . . 40
4.4 横方向振動プローブ . . . 40
4.4.1 プローブ球の横方向振動 . . . 40
4.4.2 実験装置 . . . 41
4.4.3 位置検出 . . . 42
4.5 結言 . . . 42

**第5章 プローブシステム設計および試作 . . . 43**
5.1 緒言 . . . 43
5.2 設計の要点 . . . 43
5.2.1 プローブ球の位置制御 . . . 43
5.2.2 プローブ球の位置測定 . . . 44
5.3 光放射圧プローブ光学系 . . . 44
5.4 ラジアル偏光 . . . 46
5.5 ロックイン検出 . . . 47
5.6 プローブユニット試作 . . . 48
5.7 結言 . . . 48

**第6章 座標計測システム設計および試作 . . . 49**
6.1 緒言 . . . 49
6.2 ナノ座標計測システム開発動向 . . . 49
6.3 計測システムの概要 . . . 49
6.4 座標ステージの構成 . . . 50
6.5 スケール校正 . . . 52
6.5.1 ヘテロダインレーザ干渉計 . . . 52
6.5.2 リニアスケールの校正 . . . 53
6.6 座標ステージ運動精度評価 . . . 53
6.7 結言 . . . 57

**第7章 光放射圧プローブの振動特性 . . . 58**
7.1 緒言 . . . 58
7.2 プローブ球捕捉方法 . . . 58
7.3 光軸方向トラップ効率 . . . 60
7.4 プローブ球振動測定 . . . 61
7.5 振動プローブ力学モデル . . . 62
7.6 ばね定数 . . . 64
7.7 環境変化に対するプローブ感度 . . . 65
7.8 結言 . . . 67

**第8章　位置検出原理の検証** . . . . . **69**
8.1　緒言 . . . . . 69
8.2　位置検出原理の解明 . . . . . 69
8.2.1　粘性抵抗係数の変化 . . . . . 69
8.2.2　ダンピング効果を用いた位置検出 . . . . . 70
8.2.3　傾斜面位置検出 . . . . . 71
8.3　水平面位置検出 . . . . . 72
8.3.1　定在波の存在 . . . . . 72
8.3.2　定在波の理論的解釈 . . . . . 72
8.3.3　定在波がプローブに与える影響 . . . . . 74
8.3.4　プローブ励振条件の検討 . . . . . 74
8.4　プローブに起因する不確かさ . . . . . 76
8.5　3次元的検出特性 . . . . . 78
8.6　結言 . . . . . 80

**第9章　測定面位置および法線方向同時測定法** . . . . . **81**
9.1　緒言 . . . . . 81
9.2　測定原理 . . . . . 81
9.3　実験装置 . . . . . 81
9.4　測定原理の確認 . . . . . 83
9.5　位置および法線方向同時測定 . . . . . 84
9.5.1　プローブ励振条件 . . . . . 84
9.5.2　測定性能評価 . . . . . 85
9.6　2次元座標測定 . . . . . 86
9.7　結言 . . . . . 87

**第10章　結論** . . . . . **88**

**付録** . . . . . **91**
I　プローブ球径補正法 . . . . . 91
II　測定面粗計測 . . . . . 92
III　シャドウ効果の影響 . . . . . 95
IV　機能性プローブの試作 . . . . . 96
V　エッジ計測 . . . . . 97
VI　定数リスト . . . . . 98

**参考文献** . . . . . **99**

**関連発表論文** . . . . . **114**

**謝辞** . . . . . **116**

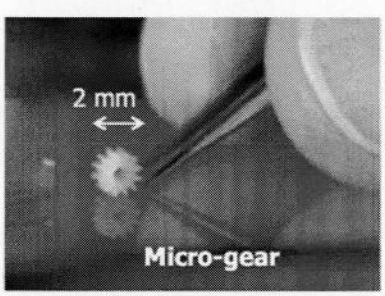
# 第1章　緒論

## 1.1　研究背景

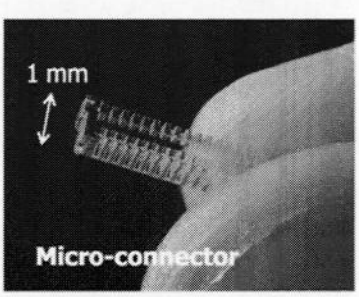
急速に高まる製品の小型化や高精度化への要求を満足すべく加工技術の進歩は著しい[1]。谷口が予測したように[2, 3]、近年ではナノメートルオーダの精度を持った加工技術も多く登場している。MEMS (Micro-electro-mechanical systems)、マイクロマシン (Micro-machine)、μTAS (micro- total analysis systems) などに代表されるサブミリメートル以下のマイクロ部品や構造を扱うシステムも様々提案され、それらを実現する基盤技術の発展が著しい。現在、マイクロ製品または部品と呼ばれるものは機械部品、MEMS、生医学用デバイス、化学分析器、光学部品などの分野にまたがる[4]。図1.1に代表例としてマイクロギア (図1.1(a))、マイクロコネクタ (図1.1(b))、マイクロレンズ (図1.1(c)) を示した。これら様々なマイクロ製品および部品が実現され始めている中で、それらの設計機能を発揮するため評価技術の必要性が指摘されている。特に、機械部品や光学部品などでは形状評価が必要であり[8]、DVDのピックアップレンズなどの光学部品はナノメートルオーダの形状精度が要求される[11]。光学部品はいわゆる2.5次元の構造が多く、これらの形状は一般的には白色干渉計、共焦点顕微鏡、焦点型顕微鏡や触針式形状計測器で評価されている[4, 9-11]。

機械部品に関しては、超精密機械加工[12-16]、マイクロ光造形[17-21]、LIGA procesなどのリソグラフィー技術[22-24]、マイクロ放電加工[25-28]、プラスチック成形技術[29, 30]などマイクロ加工技術の発展により数mm以下の寸法でマイクロメートルオーダの構造をもつというような小型化も実現され始めており[31]、その加工精度はサブマイクロメートルに達する。マイクロ放電加工 (Electro discharged machining, EDM) の電極は直径が1 μmのものも開発され[27]、電極材料の選択やグラファイト粉末を添加するなど加工液の工夫などでその加工精度はサブμmオーダに達する[26]。また、マイクロ光造形法では、光の回折限界によって加工オーダは限定されてきたが、近接場光[17]や2光子吸収[18, 19]などで自由度の高い構造をサブμmオーダで加工することが可能である。超精密機械加工は、エアベアリングや流体軸受、リニアモータや静圧ガイドなどによる精度向上が図られ[13]、超音波楕円振動など加工法の工夫も加え[16]、加工分解能はナノメートルオーダまで達している[14]。現在、ROBOnanoUi (Fanac社)、Ultra Nano100 (Sodic社) など10 nm以下の加工分解能を持つ加工機も商用化されている[15]。プラスチック射出成形技術では、射出時の背圧のフィードバック制御や、高精度な金型を用いることで直径0.15 mm以下のマイクロギア[32]を作成することも可能となっている。

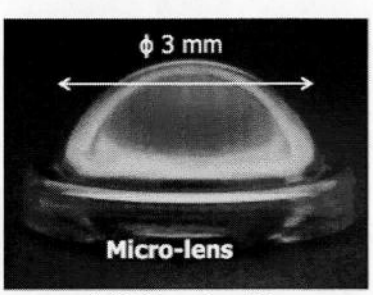
図1.2に示すように、近年、部品の寸法は数mm以下にマイクロ化し、形状は複雑なものを加工可能となっている。このようにマイクロ部品の製造は実現され始めている。しかしながら、これらの評価技術は未成熟である。例えば、5軸のマシニングセンタなどは加工された部品の幾何学的な誤差を評価することが求められている[33]。また、マイクロギアに関しても標準的な形状測定器はなく、その結果、工業規格の整備が遅れ、マスターギアの形状保証も困難な状況である[34, 35]。現状、企業などの現場では2次元や2.5次元的に従来の測定器を用いて測定し、独自の基準を設けて評価している†。このように近年、数mmオーダの部品や製



(a) Micro-gear[5].



(b) Micro-connector[6].



(c) Micro-lens[7].

Figure 1.1: Micro-components.

† 株式会社 樹研工業　原 敏明氏への取材より (2009年6月24日)

品でも厳密な寸法管理体制の整備が求められている[36]。しかしながら、複雑な構造を持ったマイクロ部品の3次元的な形状を高精度に測定する技術は未だに開発段階であり、その開発は急務となっている。

これまでに、マイクロ部品の形状を評価する様々な測定法が提案されてきた。物体表面を"なぞる"表面粗さ計は高い分解能を持ち、マイクロ部品の形状プロファイル測定において活躍しているが[37-40]、3次元の形状を測定するには至っておらず、測定物へのダメージの恐れもある[40]。一方、測定精度が高く、非接触かつ高速測定が可能な点から特に光を用いた顕微鏡が急速に発展した。高速に3次元形状が測定可能な格子パターン投影法 (Fringe projection)[41]や、白色干渉計 (White light interferometer)[42]、共焦点顕微鏡 (Confocal microscopy)[43, 44]、移動焦点 (Focus variation) 顕微鏡[45]、焦点検出型 (Auto-focus) 顕微鏡[46]などが高い性能を示している。しかし、マイクロ部品にも3次元の幾何的な測定が求められ始め、高い空間周波数をもつ構造に対して、光学顕微鏡では形状保証に難がある。広い視野を持ち、かつナノメートルオーダの分解能を持つ電子顕微鏡が測定に用いられ、測長SEM (Critical dimension- scanning electron microscopy, CD-SEM) が開発された[47]。高い性能を持つCD-SEMであるが、数nmに絞った電子ビームを測定面に照射し2次電子などを検出するために真空環境が必須であり、また3次元の形状を保証するまでには至っていない。従来の製品や部品に対して、3次元的な絶対形状の標準器として、座標測定器 (Coordinate measuring machine, CMM) が多くの生産ラインに取り入れられてきた[48]。CMMは製品最終検査やリバースエンジニアリング (Reverse engineering) において重要な役割を果たしているが、従来のCMMはプローブ径が小型なもので1～0.5 mmであり[49]、マイクロ部品を測定することは困難である。これらの現状を打破するために、X線μCT (Computer tomography) が提案され高い期待を集めている[50, 51]。しかし、測定精度が限られ、外乱が多様、測定物が限定されるなど実用化には今すこし時間を要する。一方、ボトムアップ的なアプローチによって、SPM (Scanning probe microscopy) を利用した3次元形状計測が試みられてきた[52-55]。SPMでは、数ナノメートルオーダに先鋭化されたプローブと測定面との間で働く物理的な相互作用力を検出するが、先鋭化されたプローブではアスペクト比が確保できず急な傾斜を持った3次元形状の測定には工夫が必要となる[55]。また測定範囲の拡大が問題点となっている。H.N. Hansenらによってまとめられた図を図1.3に示す。このように、マイクロ部品の3次元的な幾何形状を保証可能な測定器は未だ開発段階である。

3次元形状計測に求められる測定精度はどの程度であるか。従来の部品製品では、寸法精度$10^{-4}$から$10^{-6}$までが様々な測定方法によって保証され、工業規格などが体系化されてきた。その中で従来のCMMは$10^{-5}$以上の相対精度を達成し、その役割を果たしてきた[57]。このようにこれまで、基準寸法1～0.1 mの部品に対しては10～1 μmの精度で形状保証が可能であり、これは従来の加工精度を保証する上でも十分であった。しかし現状および将来的には、上記のようなマイクロ加工技術が発展し、マイクロ部品の基準寸法は数mm以下

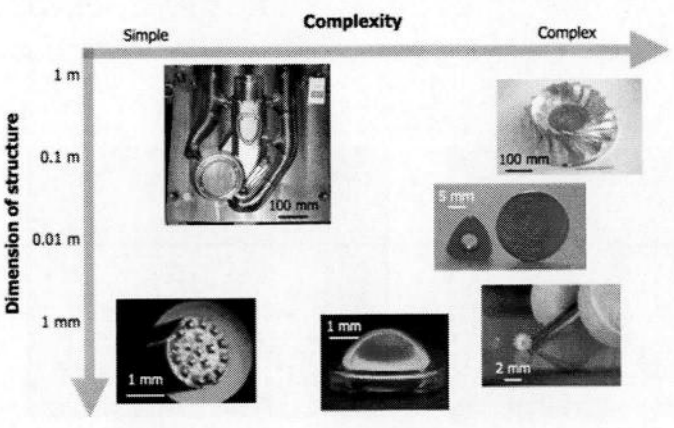



Figure 1.2: Trend in micro products.

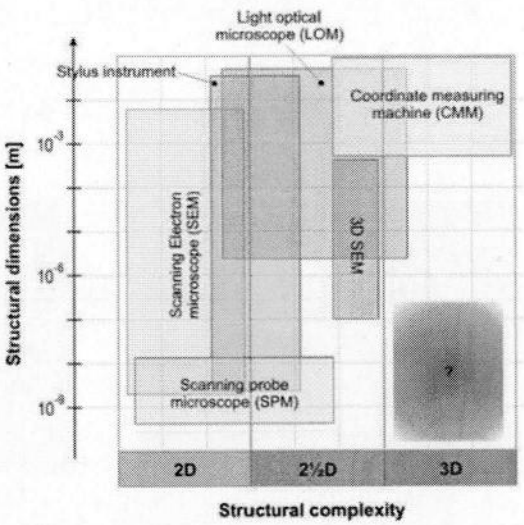



Figure 1.3: Classification of dimensional measurement method by H.N. Hansen et al.[4].

に及ぶ。これに従来の基準を適用すると、基準寸法10〜1 mmに対して100〜10 nmの測定精度が求められる。今後、マイクロ技術の発展のためには、マイクロ部品に対するスケールインターフェース[56, 57]を確立することが重要であり、現在ギャップとなっているマイクロオーダの3次元形状校正技術が求められる[48]。そのために、トレーサビリティー体系の整備が重要となる[58]。したがって、国家的標準を提供する国立研究所が中心となり、従来のCMMの更なる高精度化が多く行われている[59]。

## 1.2 三次元座標測定器 (CMM)

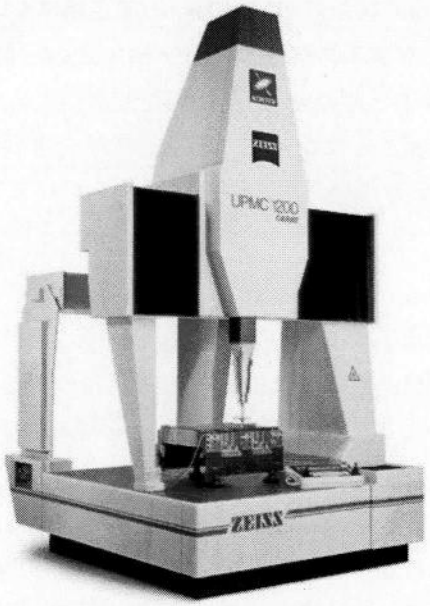
三次元座標測定器 (CMM)とは、日本工業規格 (JIS) によると、プローブシステムを移動させ、測定物表面上の空間座標を決定する能力がある測定システム、とある[60]。更に、拡張的に被測定物の寸法や形状を3次元座標値の点群データとしてとらえ、データ処理により演算し測定値に変換することを基本機能とするものと定義される場合もある [61]。

CMMは1960年にイギリスのFerranti社によって世界で始めて開発された (図1.4) [62]。日本では、Mitutoyo社が1968 年に初めて国産CMMを生産した。更に、1973年にはドイツのZeiss社がコンピュータ制御による自動測定可能なCMMを生産し、飛躍的な需要の高まりを見せた。自動測定CMMは検査工数の低減と品質の向上を可能にし、昨今の3次元形状の計測評価、保証を行う上で最もよく用いられる計測器となった。CMMの一例として、図1.5にZeiss社のUPMC1200 Caratを示す。現在では、CMMは3次元形状評価の標準機として、多くのものづくり現場などで用いられており[48, 58]、その工業規格はJIS B7440やISO10360などに詳しい。CMMの構成はプローブシステムと測定器の構成から10種に分類されている[60]。一般的にCMMは3軸の直交座標を持ち、3軸の垂直自由度とそれに付随する3つの回転自由度から21自由度もつ[63]。そのため、測定不確かさを低減するのは難しく、プローブの測定パス[64]、温度ドリフトの補正方法[65, 66]、プローブ径補正法[67, 68]、校正方法[69-77]など様々な研究により測定不確かさを改善し、高い精度・信頼性を示す測定が試みられている。また、実際は測定不確かさを評価すること自身が容易ではなく、校正用アーティファクトの提案[78, 79]やVirtual CMM[80-84]による測定不確かさ評価法などが提案されている。

CMMを構成する主な要素はプロービングシステム、駆動機構、案内、スケールおよび制御システムなどである。ここで、本論文で用いるプローブを中心とした重要な用語を定義する。

- プロービング (Probing): 座標値を決定させる動作のこと
- プローブ (Probe): プロービング中に信号を発生させる装置
- プローブ球 (Probe sphere): 測定物と接触する球状の機械的な要素
- プローブシャフト (Probe shaft): プローブ球を固定する機械的な要素
- プローブシステム (Probe system): プローブ並びにプローブシャフト、プローブ球で構成されるシステム

Figure 1.4: First coordinate measuring machine by Ferranti [62].




(a) Photograph.

| | | |
|---|---|---|
| Measuring range | X-axis | 1150 mm |
| | Y-axis | 1500 mm |
| | Z-axis | 1000 mm |
| Accuracy | | 1.5 + L/300 μm |
| Resolution | | 0.08 μm |
| Measuring force | | 0.2 N |

(b) Specification.

Figure 1.5: Conventional CMM by Zeiss[5].

## 1.3 ナノCMMとマイクロプローブ

これまでCMMは工業用部品や製品の3次元形状を評価するために開発され、また用いられてきた。その製品は一般的には自動車や家電製品、またそれらの金型などである。つまりこれまでヒューマンスケールの製品や部品に対してCMMは発展を遂げてきた。近年、市場の要求や加工技術の進歩によって製品の小型化は急速に進んでいる。その構成部品の寸法は数mmに達し、これまでのCMMではその形状精度を保証できず、市場要求を満足できていない。そのため、2次元もしくは2.5次元的な測定器を代用し製品を評価しているのが現状である。また、標準的評価装置も未確立であるため、小型部品の工業規格が未整備となっている。その結果として当然、製品の歩留まりは下がり、信頼性も低下する可能性がある。

この状況を打破するため、1991年にK. Takamasuらによって超高精度CMMであるナノCMMのコンセプトと要求仕様が提案された[85]。現在では、多くの企業、研究所や共同プロジェクトなどでナノメートルオーダの精度を持つ超高精度CMMであるナノCMM (nano CMM)†を盛んに開発し、一部商品化され始めている。

### 1.3.1 ナノCMM開発の現状

K. Takamasuらはナノ CMMの重要なファクターはスケール、アクチュエータ、テーブル、ナノプローブ、マテリアルであると述べている[85]。H. Schwenkeらは小型/高精度化するCMMにおいて、プローブシステムがますます重要であると述べた[86]。またナノCMM実現に向けた共通の課題点として、測定器を構成するために必要なナノメートルオーダの形状精度を持つアーティファクトを得ることが非常に困難である。この様に、ナノCMMではスケールが小さくなることによって、通常のCMMと同様の問題に加えて、このような新たな課題を抱える。ここではまず、世界各国で開発されてる最新の高精度なCMMや3次元形状測定器の開発について述べる。

1990年代後半から2000年初頭にかけ、ヨーロッパの国立研究所を中心に多くの高精度CMMが開発され始め、2000年代初頭からヨーロッパなどの国立研究所が高精度なCMMを用いた校正サービスを提供しはじめ[48]、企業や大学がナノCMMの商品化を実現してきた。表1.1に、これまでに発表された高精度化CMMおよび3次元形状測定機について代表的なものをまとめた。2007年にはヨーロッパでNano CMM projectなるもの

† 目標仕様の違いなどから超高精度なCMMに対する統一的な名称は未だ定義されていない。本論文ではその分解能や精度に着目し、ナノCMMと呼ぶ。

Table 1.1: The state of arts ultra accurate coordinate measuring machine.

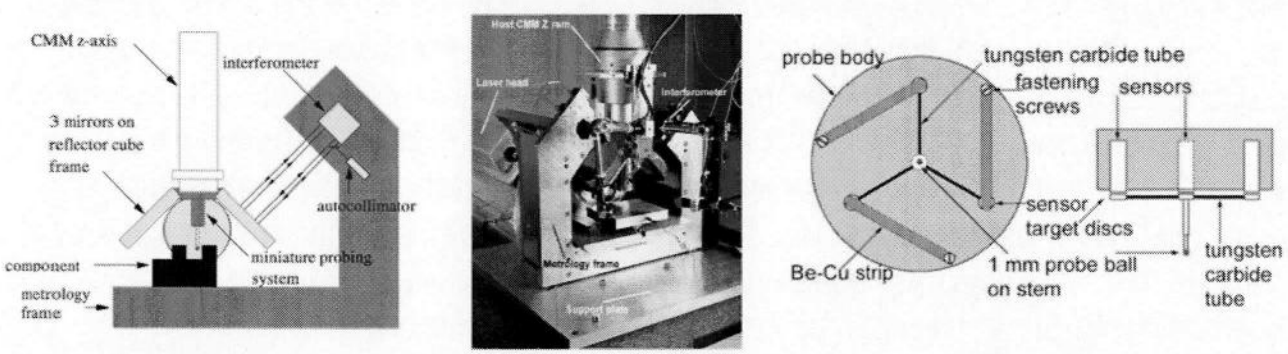
| Name | Institute | Country | Capability | Measuring volume [mm] | Uncertainty [nm] |
|---|---|---|---|---|---|
| μCMM | PTB | German | 3D | 25 × 40 × 25 | 100 |
| Small CMM | NPL | UK | 3D | 50 × 50 × 50 | 100 |
| micro-CMM | METAS | Swiss lands | 3D | 90 × 90 × 38 | 50 |
| ISARA 100 | IBS precision | The Netherlands | 3D | 100 × 100 × 40 | 30 |
| ISARA 400 | IBS precision | The Netherlands | 3D | 400 × 400 × 100 | 45 (1D) |
| Nanocord | Mitutoyo | Japan | 3D | 300 × 200 × 100 | $\pm(300+2L/10^3)$* |
| F25 | Zeiss | German | 3D | 100 × 100 × 50 | 250 |
| Nano-CMM | Eindhoven Uni. | The Netherlands | 3D | 53 × 50 × 4 | 25 |
| UA3P-L | Panasonic | Japan | 2.5D | 100 × 100 × 50 | ±150 |
| 3D-CMM | NIKON | Japan | 2.5D | 400 × 400 × 100 | 20 |
| ALTERA nano | Mycrona | German | 3D | 400 × 400 × 100 | $\pm(200+2L/10^3)$* |
| Volumetric interferometry CMM | KAIST | Korea | 3D | 300 × 300 × 300 | 30 |

*L is measuring length

が始動し[87]、100 nm以下の測定不確かさ実現に向けた測定器の開発からアーティファクトの供給および校正法の確立を目指している。現在までには特徴的な成果は発表されていないが、こういったプロジェクトによって多くの研究機関がCMMの高精度化に向けて研究を加速していることは見て取れる§。その他にもCMMの高精度化に向けて、プローブシステムや位置決めステージなどについて数多くの研究が遂行されている[88-116]。以下に、特に2つの代表的なナノCMMについて、その特徴を紹介する。

イギリスのNPL (国立物理学研究所、National physical laboratory)では、いち早く高精度なCMMの開発に向けた研究が取り組まれ、Small CMMを開発した[88-90]。従来の高精度CMMを利用し、従来プローブシステムの代わりに、三面鏡とその中心にマイクロプローブを取り付けた (図1.7(a))。干渉計の測定中心にプローブ球の中心が来るように設計し、干渉計を用いて三面鏡の変位を測定することでAbbeの誤差を抑えている。干渉計は低膨張材であるInver™で製作されたメトロロジーフレームにセットされ、サンプルも同じフレーム上に設置される。そうして、熱膨張の影響を抑えることができる。また、プローブシステムはマイクロEDMで加工されたヒンジ型プローブを用いている。ヒンジ部分は超硬とベリリウム銅を用いており、ヒンジ部のひずみは3つの静電容量センサで測定される (図1.7(c))。このプローブシステムは特に測定力に重点を置いて設計され、0.1 mN程度の測定力を達成している。現在、このプローブはIBS precision engineering社のISARAシステムにも用いられている[109]。

ドイツのPTB (物理工学研究所、Physikalisch-technische bundesanstalt)では、μCMMと呼ばれるシステムが開発されている[100-101]。エアベアリングと分解能が10 nmのリニアスケールを用いて高精度化を図っている。また測定不確かさを改善するために、Inver™を加工したメトロロジーフレームを導入している。測定時はプローブシステムは固定され、メトロロジーフレーム上に設置された測定物が移動する。メトロロジーフレー




(a) CMM system. (b) Picture of the system. (c) Probe system.

Figure 1.7: Small CMM from NPL[89].

§ euspen2009ではNano CMM projectから多くの研究成果が発表された。

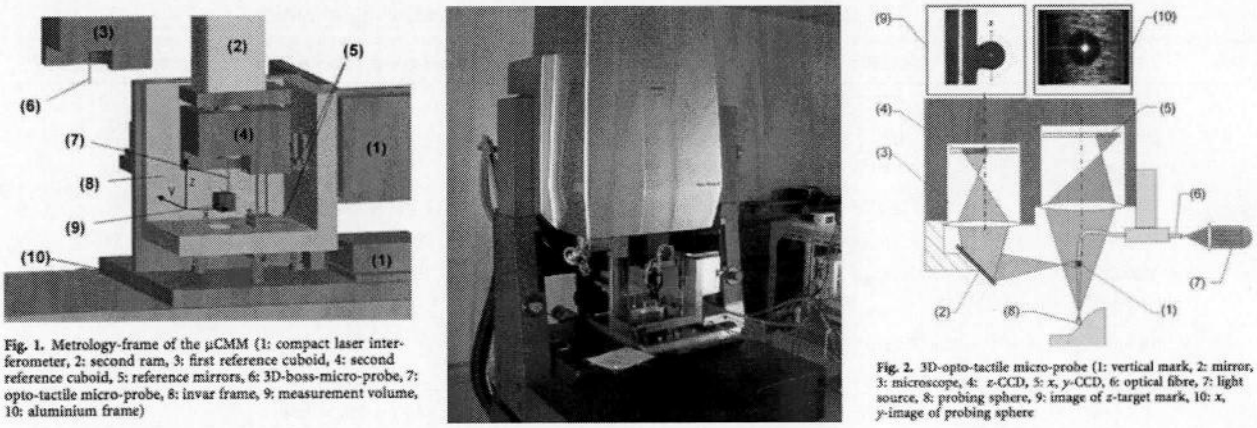



Fig. 1. Metrology-frame of the μCMM (1: compact laser interferometer, 2: second ram, 3: first reference cuboid, 4: second reference cuboid, 5: reference mirrors, 6: 3D-boss-micro-probe, 7: opto-tactile micro-probe, 8: invar frame, 9: measurement volume, 10: aluminium frame)

(a) CMM system.

(b) Picture of the system.

Fig. 2. 3D-opto-tactile micro-probe (1: vertical mark, 2: mirror, 3: microscope, 4: $z$-CCD, 5: $x$, $y$-CCD, 6: optical fibre, 7: light source, 8: probing sphere, 9: image of $z$-target mark, 10: $x$, $y$-image of probing sphere

(c) Probe system.

Figure 1.8: micro-CMM from PTB [100].

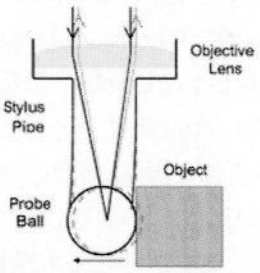
ムには3つの参照ミラーが取り付けられ、プローブシステムにはZerodur®で作られたキュービックが取り付けられており、その2面間をメトロロジーフレームの外側に設置されている6つの干渉計によって変位と角度を測定している (図1.8(a))。プローブシステムは2つ用意され、Opto-tactile micro-probeと3D-boss-micro-probeである。ここでは前者について述べ、後者は次項で述べる。Opto-tactile micro-probeでは、XY軸は光ファイバ先端の球を用いる (図1.8(c))。先端球に光ファイバを通して光を入射し、その後方散乱光をCCDセンサでモニタする。サンプルに接触したときの焦点位置のズレを検出する。Z軸は光ファイバの中腹の球に外部から光入射し、先端球と同様にZ軸変位を検出する。このプローブの3次元不確かさは0.7 μmである。2DのOpto-tactile micro-probeは現在Werth-messtechnik社より商品化されている[119]。

### 1.3.2 マイクロプローブ開発の動向

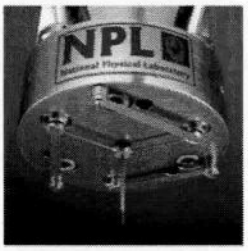
K. TakamasuやH. Schwenkeらは、ナノCMMの実現に向けた最も重要な要素の一つがプローブシステムであると述べている[85, 86]。実際、多くの研究機関が開発に取り組んでいるものの市場要求を満足するプローブシステムは未だほとんど開発されていない[120, 122]。本節では、世界のマイクロプローブ開発動向を述べた後、マイクロプローブにおける現状をまとめる。CMMのプローブはコンタクトプローブと光プローブの2つに大別される。本研究ではコンタクトプローブについて扱うため、本論文では光プローブについては述べない。詳しくは参考文献122、123などによくまとめられている。

1990年代の始めに、ナノCMMの開発と平行して、プローブシステムの開発も盛んとなった。例えば、K. Takamasuらは中空円管の先にプローブ球を真空引きによって捕捉し、接触検出時に変位する球をレーザによって測定した[124, 125]。一方で、この時期最も有望なプローブとして注目されたのは、上で述べたNPLが開発した様なヒンジ型のプローブである。NPLだけでなくオランダのEindhoven大学でもヒンジ型プローブが開発された。彼らは、ヒンジの変位を高精度に測定するために、静電容量センサを用いたり、光てこを用いたりしたが、最終的にはヒンジにピエゾ素子を用いたひずみゲージを埋め込み表面検出の高精度化を図った[126, 127]。このEindhovenのプローブも商用化が進み、XPRESS precision社からGANNEN series†として販売されている[128]。R. Furutaniらは、プローブシャフトの片側に測定用球、他端に変位検出用の球を取り付けた軸をヒンジに取り付けて、変位検出の高感度化を図った[129]。また近年、日本の産業技術総合研究所 (AIST) では、ヒンジを用いて、R. Furutaniと同様のシステムでプローブの表面検出の高精度化を試みている[130, 131]。スイスのMETAS (Swiss federal office of metrology and accreditation、計測工学連邦事務所)では複雑な3次元湾曲ヒンジをマイクロ放電加工によって作成し、その変位を電磁誘導型センサで測定した[107, 132, 133]。その結果3次元的な異方性を数nmにまで低減した[107]。プローブ球にはルビー球を用いているが、現

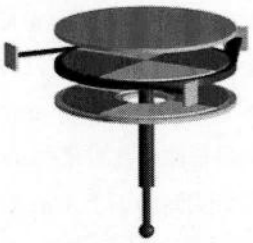
† GANNEN seriesは日本語の"元年"に由来しており、3D metrologyの新時代を担うという意味が込められている。



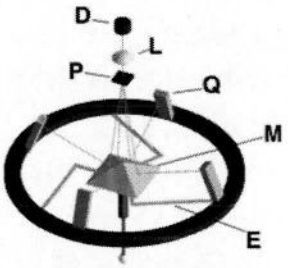

(a) Takamasu probe[124].



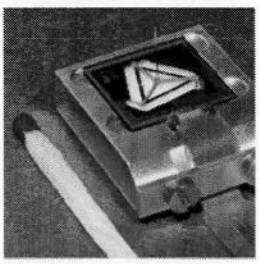

(b) NPL probe[90].



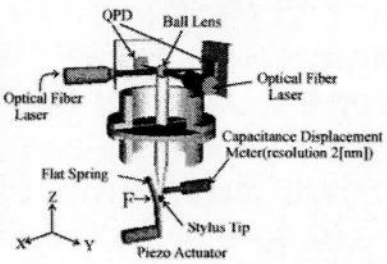
(c) Eindhoven probe[127]. (capacitive sensor)



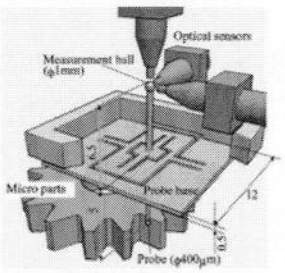

(d) Eindhoven probe[127]. (optical sensor)



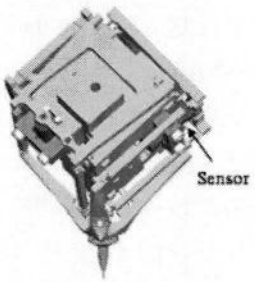
(e) Eindhoven probe[127]. (PZT sensor)



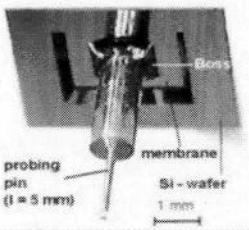

(f) Furutani probe[129].




(g) AIST probe[130].

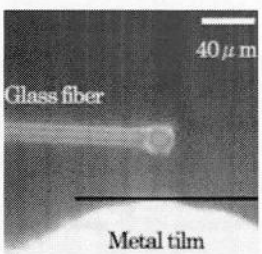



(h) METAS probe[107].

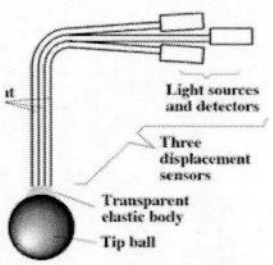



(i) PTB 3D-boss probe[100].

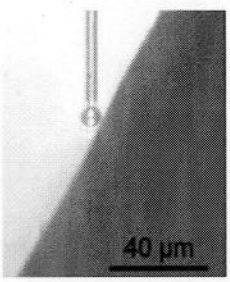
Figure1.9: Micro-probe system structured based on hinge and so on.



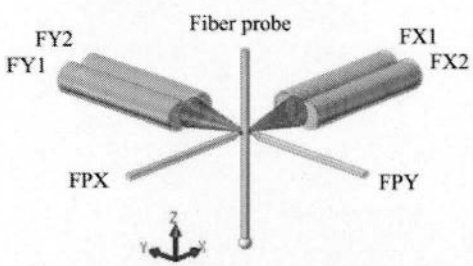

(a) Ikeno grass probe[136].



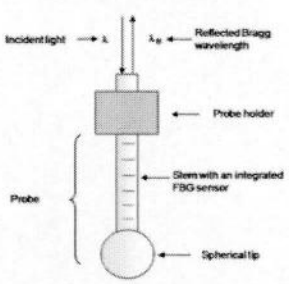

(b) Oiwa probe[138].



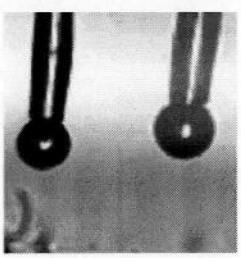

(c) Takaya probe[139].




(d) Murakami probe[140].




(e) Ji probe[142].



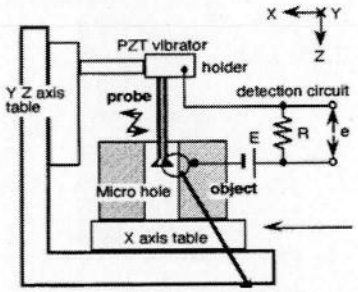
(f) NIST probe[143].

Figure 1.10: Micro-probe system based on optical fiber.

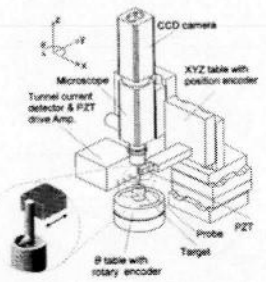
在ガラスやタングステンを用いたプローブ球のマイクロ化に精力している[133]。PTBでは、3D-boss-micro-probeと称し、ヒンジの代わりにシリコンの薄膜を用いた[100, 134]。薄膜内にピエゾ素子でWheatstone bridge回路を組み、検出の高精度化を図った[134]。これらヒンジ型プローブは10 nmオーダもしくはそれ以下の超高分解能を示したが、一方でプローブ径が数百 μm程度であり、次世代のナノCMMプローブとしては不十分である。これまでは、プローブ径を微小化するためにMEMS技術や従来のルビー球などが用いられたが、プローブ径の微細化かつ高真球度が開発のボトルネックとなった。そこで近年、マイクロEDM等の先端技術を用いる例[135]、微小領域では表面張力が支配的になることを利用したガラスの筒の先端をレーザにより球状化する技術[136, 137]、タングステンワイヤの先端球状化[133]などが提案され始めている。

一方で、PTBのOpto-tactile micro-probeを皮切りに、光ファイバを利用したプローブシステムも数多く提案されている。T. Oiwaらは光ファイバ束を用意しその先にプローブ球を接着して、プローブ球の測定面接触を高感度に測定できる工夫をした[138]。また、Y. Takayaらは、5 μm径の光ファイバ先端に直径8 μmプローブ球を光放射圧と静電気力などの表面吸着力による微小力で拘束し、プローブ球からの戻り光を検出するプローブを提案した[139]。H. Murakamiらは直径30 μmの光ファイバに50 μmの接触子を作成し、接触時のファイバのたわみを光学的に測定し、2次元のマイクロプローブを実現している[140, 141]。光ファイバプローブを難しくしている点は、検出信号の取得が難しいということである。そこで、H. Jiらは光ファイバにFBG (Fiber Bragg grating) を用いて、ファイバのひずみを光のスペクトルとして検出する手法を提案した[142]。アメリカのNIST (国立標準技術研究所、National institute of standards and technology) でも光ファイバーを用いたプローブシステムを開発している[143]。しかし、現状では、光ファイバプローブは、Z軸方向の検出が難しく3次元的な等方性は原理的に得にくいこと、プローブシャフトの剛性が低いことが課題として挙げられる。

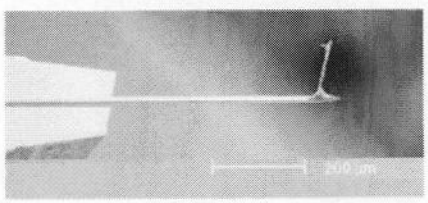
これまではトップダウン型の開発について述べた。他方、ボトムアップ型のプローブも提案されている。ナノスケールの表面計測技術にSPMがあるが、そのSPMプローブを発展させたプローブシステムが開発されている。K. MitsuiらはSTM (Scanning tunnel microscopy、走査型トンネル顕微鏡) 探針の様に先鋭なプローブと測定面間に働くトンネル電流検出型のプローブを提案した[144]。デンマーク工科大学 (DTU) のL. De Chiffreらは従来のCMMにAFM (Atomic force microscopy、原子間力顕微鏡) のカンチレバーを取り付け、3次元構造の表面微細形状の測定を行った[145]。T. MasuzawaはVibroscanning probeを提案した[146, 147]。このプローブは図1.10(a)に示すようなシャープなエッジを持つプローブを加工し、ピエゾ素子によって加振し、高



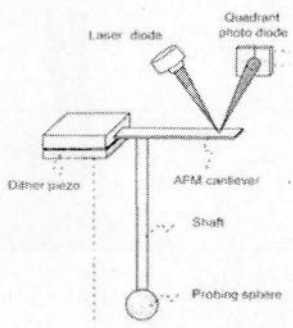

(a) Masuzawa probe[146].



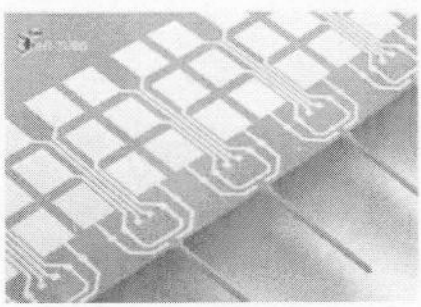

(b) Mitsui probe[144].



(c) Dai probe[148].

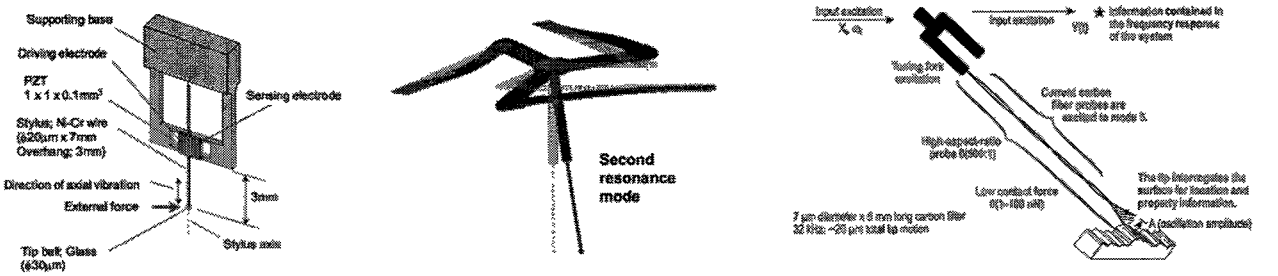



(d) Dai CMM probe[149].



(e) PTB-IHT probe[150].

Figure 1.11: Micro-probe system based on SPM cantilever.




(a) Mitutoyo probe[153].

(b) NPL probe
[R.K. Leach氏より提供].

(c) Insitu Tech. probe[155].

Figure 1.12: Micro-probe system based on vibration system.

アスペクト構造測定用のプローブを実現した。これに似たように、PTBのG. DaiらはAFMカンチレバーに垂直に新たなカンチレバーを設け、水平面と高アスペクト構造の測定を同時に行えるプローブを開発した[148]。従来のAFMのように光てこで検出信号を取得する。また、先端に球を取り付けることでCMMプローブとしての応用を行っている[149]。PTB-IHTの共同開発では、SPMプローブと同様のプローブを用いて形状計測を行うため、カンチレバーの背面にWheatstone bridge回路を組み込み、探針に角度を持たせて配置した[150]。これらのSPMカンチレバーを用いた測定では、従来のSPM技術を用いてSIOS社の高精度ステージ[151]などで精度の良い測定が可能となり、また高アスペクト形状の測定も可能になりつつあるというメリットの一方で、3D検出プローブではないために測定物もしくはプローブシステムを回転させなければならない[52]。したがって、絶対寸法測定のためのナノCMMプローブとしては不確かさの確保が困難である。

プローブ径を小さくすると表面吸着による影響等で、繰返し精度などが著しく低下する[152]。そこで、Mitutoyo社は振動プローブを提案した[153]。ミツトヨのプローブは直径30 μm程度のプローブを金属棒につけ、ピエゾ素子によって加振する。その振動は同様にピエゾ素子の圧電効果を利用して測定する。軸方向に振動するプローブを測定面に接近させると、相互作用によって振動が減衰する。その減衰によって表面を検出する。しかし一方向振動のため、等方性は保証されていない。そこで、NPLのR. LeachらはTriskelion構造を用いて等方的な検出感度をもつ振動プローブ開発を行っている[154]。3本のヒンジに埋め込んだ6つのピエゾアクチュエータによってプローブ球を常に測定面に対して垂直方向に振動させることができるよう設計している。現在剛性の高いプローブシャフトおよびプローブ球の開発を行っている。アメリカのInsituTec Inc.では、振動プローブを更に発展させ、長さ5 mm、太さ7 μmの炭素繊維を用いて、これを振動させ振動モードの変化を基に測定を行っている[155]。これを用いることで従来にない高アスペクトな構造の測定も期待されている。これらの振動プローブは、測定面との吸着による影響を低減できる方法として、近年新たに期待されている。しかし、振動方向による検出感度の依存性やマイクロ流体解析などが求められている[156]。

また、新たなプローブ開発をめざし、ドイツのA. Weckenmannは微細な球状プローブと測定面間のトンネル電流を利用したプローブを提案した[157, 158]。これにより測定力を低減し、形状計測のみならず表面微細形状の測定も可能にした[158]。また、T. PfeiferはCMMプローブにテラヘルツ光技術を組込み位置検出と表面構造の同時測定も提案している[159]。

以上、マイクロプローブ技術の開発についてまとめた。これまでに提案されたマイクロプローブは大別すると、ヒンジ型、SPM型、光ファイバ型、振動型の4つのカテゴリーに分類でき、前者2つは高分解能、後者2つはマイクロ化が特徴である。現在得られている仕様を表1.2にまとめた。

### 1.3.3 マイクロプローブの課題点と要求仕様

ナノCMMの主要素であるマイクロプローブは従来のCMMプローブでは現れなかった課題が存在する。ここではマイクロプローブ特有の課題についてまとめる。

Table 1.2: Specifications of proposed micro-probe.

| | | Capability | Probe diameter | Shaft length | Resolution | Repeatability | Stiffness | Measuring force | Measuring range |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| K. Takamasu | | 2D | 1 mm | < 5 mm | - | 1.1 μm | - | 0.193 mN | 0.4 mm |
| R. Furutani | | 3D | - | - | 31 nm | - | - | 1 mN | - |
| NPL | Hinge probe | 3D | 300 μm | 15 mm | 3 nm | - | 10 N/m | 0.2 mN | XY: ±20 μm<br>Z: 20 μm |
| Eindhoven | PZT<br>hinge probe | 3D | 500 μm | 8 mm | 1 nm | - | XY: 100 N/m<br>Z: 450 N/m | < 1 mN | 25 μm |
| AIST | | 3D | 400 μm | 5 mm | - | 50 nm | 200 N/m | 200 μN | - |
| METAS | Rubby | 3D | 100 μm | - | - | 5 nm | 20 N/m | 500 μN | 25 μm |
| METAS | Glass | 3D | 40 μm | 250 μm | - | 5 nm | 20 N/m | 500 μN | 25 μm |
| PTB | Opt-tactile | 2D | 25 μm | | 0.1 μm | | 0.1 N/m | a few μN | ±0.4 mm |
| PTB | 3D-boss | 3D | 300 μm | 15 mm | XY: 3 nm<br>Z: 5 nm | XY: <10 nm<br>Z: <20 nm | XY: 89 N/m<br>Z: 55 kN/m | XY: 0.5 μN<br>Z: 0.3 mN | - |
| T. Oiwa | | 3D | 1.2 mm | 15 mm | 0.5 μm | 0.36 μm | - | 0.1 mN | - |
| Y. Takaya | Fiber probe | 3D<br>*in water | 8 μm | - | - | 100 nm | 24.2 μN/m | - | - |
| H. Murakami | | 2D | 50 μm | - | 15 nm | - | - | - | 0.35 μm |
| H. Ji | | 3D | 280 μm | 5 mm | 60 nm | - | - | 0.1 μN | - |
| PTB | ACP | 3D | 50 μm | 1 mm | - | 5 nm | - | - | - |
| Mitutoyo | | 3D | 30 μm | 3 mm | - | 0.1 μm | - | 0.15 μN | a few μm |
| Southern Taisan Uni. | | 3D | 0.3 mm | about 7 mm | - | 46 nm | - | 0.1 mN | - |
| A. Weckenmann | | 3D | 0.3 mm | - | 1 nm | 3 nm | - | - | - |

**プローブ径と真球度**　従来のCMMで、測定対象が1 m程度に対するプローブ径が1 mmであると考えると、測定対象が10 mm以下であるナノCMMではそのプローブ径は数10 μm以下であることが望ましい。小径プローブの利点は、プローブ径補正時の誤差低減とアクセシビリティにある。JISにあるように[60]、有限径プローブでは測定後に補正する必要があり、この時に発生する不確かさを低減するには、プローブ径を小さくし、プローブ補正ベクトルを正確に知ることが重要となる。たとえば、図1.13に示すように、プローブ補正ベクトルが不明である場合、補正ベクトルの角度が $\alpha$ [rad]異なれば、誤差は $\delta e$ となる。

$$\delta e = r\sqrt{2(1-\cos\alpha)} \tag{1.1}$$

加えてプローブ条件として、十分な剛性と真球度を持つ必要がある。しなしながら、数μmで高い真球度を持つプローブ球の加工は現在の加工技術をもっても容易ではなく[§]、それを評価する手法も提案されているが[160]、十分な精度を持っていない[†]。

[§] 現在、完全球径に最も近いものはコンピュータのハードディスクに用いるベアリングもしくは、アメリカの重力探査衛星Gravity Probe Bのジャイロスコープに用いられる石英ガラスのベアリング (φ38 mm, 真球度 <19 nm)であると言われる。[日経サイエンス, Vol.12 (2009) pp.64.]

[†] Prof. R.K. Leach (Private communication), 2009年10月28日@Teddington

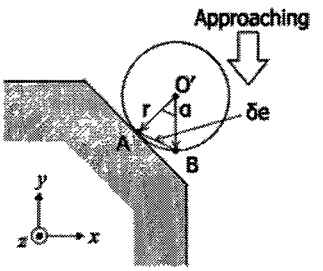



Figure 1.13: Probe compensation.

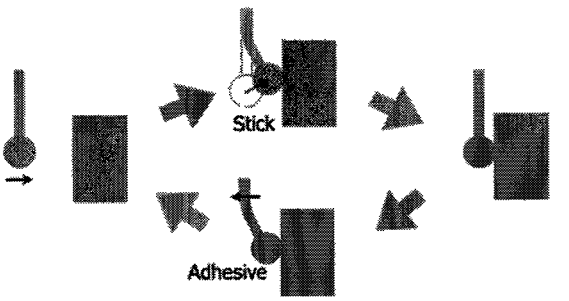



Figure 1.14: Sticking of probe to surface.

**プローブスティック**　プローブのスケールがマイクロメートルオーダに達すると、スケール効果によってプローブの慣性力よりもプローブ球と測定面との吸着力が支配的になってくる。スケール効果とは、物体の形状が小さくなるにつれ、支配力が体積力 (重力や慣性力など) から面積力 (表面張力や摩擦力など) に遷移し始めることを言う。 そのため、数百μmのプローブでは数nmの高分解能は達成されていたが、表面でのキュ着力が発生し、数十μm以下になると分解能や繰返し精度が逆に劣化する傾向がある (表1.2)。また、E.J.C. Bosらによって報告されたように[161]、測定面近傍ではプローブは特殊な挙動を示す。

**測定力**　マイクロ／ナノメートルオーダでは、測定面表面の強度はマクロスケールと異なり、プローブの接触による影響は無視できない。小さいプローブ径では接触面積が小さくなるため、等しい力でも接触圧力は急激に増大する。接触による測定面の弾性変形が起きると、プローブ球が測定面にめり込んだ状態で検出され、位置検出誤差が発生する。測定面の塑性変形は当然避けねばならない。しかし、高速測定を行う時、プローブ球は測定面に接触することが多く、また、高分解能検出のためにプローブに高剛性を付与すると検出時の接触力は増加する。球状プローブが測定面に接触するときの影響はHertzianの式で求められる[162]。

$$|\sigma_{max}| = \frac{1}{\pi}\left(\frac{1.5FE^2}{r^2(1-\nu^2)^2}\right)^{1/3} \tag{1.2}$$

ここで、$\sigma_{max}$は接触面積の最大圧力、$F$は測定力、$r$はプローブ半径、$\nu$はポアソン比および$E$はヤング率である。測定力低減のためにプローブ剛性を下げると、プローブシャフトのたわみによる検出誤差が発生する。

**3次元等方性**　これまでのマイクロプローブの開発において最も困難を要しているのがプロービング特性の3次元等方性である[163]。METASのプローブ (図1.9(h)) は3次元等方性を目的として3次元の複雑な湾曲ヒンジを用いて数nmの等方性の可能性を示した[127]。これまでに、2次元の等方性は比較的検討されているものの、3次元の等方性は課題として挙げられ、非等方性はプローブ不確かさの主要な要因となる。NPLの振動プローブでは等方性を考慮して設計されているが、振動方法の工夫が必要である。A. Weckenmannのトンネル電流プローブではプローブ全表面で検出でき[158]、等方性向上に期待が寄せられる。

上にマイクロプローブにおける問題点を列挙した。この様に多くの問題点がある。次世代のマイクロプローブに要求される仕様を表1.3にまとめた。

Table 1.3: Required specifications for micro-probe.

| | |
|---|---|
| Probe diameter | 10 μm |
| Shaft length | 1 mm |
| Resolution | 1 nm |
| Measuring force | < 100 μN |
| Stiffness | 10 N/m |
| Measuring range | 10 μm |

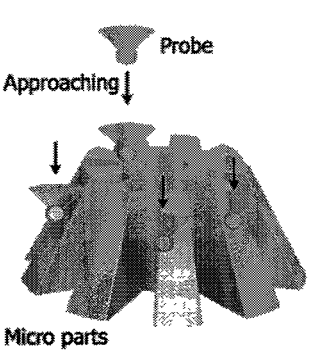



Figure 1.15: Concept of laser trapping probe.

## 1.4 本研究の目的

### 1.4.1 光放射圧プローブコンセプト[164-166]

測定対象がサブミリメートル、プローブ径が数十μmに達すると、スケール効果によって測定面の相互作用がより顕著になり、従来の単純な接触式プローブの原理を用いた位置検出プローブを用いることは困難になる。ナノCMMプローブの開発のために、このマイクロ領域での特性をうまくいかした位置検出プローブの開発が求められる。JISの定義や1.3節の開発例からわかるように、一般的なプローブシステムはプローブシャフトによってプローブ球を保持する機構となっている。また、プローブ球と測定面の接触のセンシングは、プローブシャフト根元にあるセンサで感知するものが多い。本研究で提案するプローブは、これら従来プローブとは異なり、レーザトラップ技術[167]で球状微粒子を空間に保持するものである。プローブ球と測定面は接触せず、しかし、プローブ球と測定面の力学的相互作用でプローブ球位置が変化する。そのプローブ球変位を光学手法で高精度に計測し表面位置を検出する。

本プローブの特徴は次の2つである。ひとつは微細なプローブ径。レーザトラップ技術で扱うことができる粒子は、25 μm以下であり、従来に提案されたマイクロプローブよりも10倍程度小径のプローブ径を得る。もう一つは、高い感度である。プローブ球を捕捉する力が数百pNであるため、測定面とプローブとの間の力学的作用力をpNオーダの高感度でプローブが検出できる可能性がある。

### 1.4.2 研究目的

本論文で提案するプローブでは、10 μm程度のプローブ径であり、スケール効果によって表面吸着など従来では無視できた現象が顕著に現れる。また、非常に小さいばね定数を持つため、表面力を高感度に検出することが出来る。本研究では、以下を研究の目的とする。(1) プローブ球と測定物表面のマイクロオーダ領域における現象理解を深め、(2) 高い精度および感度を持った従来にない全く新規なマイクロプローブを開発する。また、本研究で得られる成果は、将来的にプローブ球の更なるマイクロ化に伴って、マイクロプローブ開発でぶつかるであろうマイクロオーダ特有の現象について理解を深めることに寄与する。

# 第2章　レーザトラップ技術

## 2.1　緒言

本研究で提案する光放射圧プローブの基本技術であるレーザトラップ技術についてまとめる。光放射圧についての物理的基礎を与え、光放射圧による捕捉技術の研究動向について述べる。最後に、レーザトラップ技術およびプローブとしての力学的な作用についての概念を述べる。

## 2.2　光放射圧[169-174]

空間に物体があり、そこに光が存在すると、光は物体に力学的作用を及ぼす。この力の存在は太陽光の圧力による彗星の尾としても知られる。この力は光放射圧 (Optical radiation pressure) または光圧 (Light pressure) と呼ばれ、すでに300年以上前から光の粒子性を唱えたA. Newtonが予測し、それをJ.C. Maxwellによって理論的に定式化されたと言われている。後に、ロシアのP.M. Lebedevが1901年に初めて光放射圧の実験的な測定に成功した[168]§。レーザトラップは、その約70年後の1970年にA. Ashkinによって初めて行われた。本節では、まず光放射圧を理論的に理解する。

光は波動および粒子の2重性を持つ。感覚的には光を波動つまり電磁波として扱うことで直感的に理解しやすいが、しかし、光の吸収や放出、放射などの光学現象を扱う場合、量子論を導入してはじめて記述可能となる。そこでまず波動としての光を捉え、後、量子光学による光放射圧を検討する。

### 2.2.1　電磁波基礎理論

光は電磁波であり、J.C. Maxwellによって定式化された。Maxwellの方程式は以下の4つの積分式によって表現される。

$$\oint_C \mathbf{B}\cdot d\mathbf{l} = \mu \iint_A \left(\mathbf{J} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\right)\cdot d\mathbf{S} \tag{2.1a}$$

$$\oint_C \mathbf{E}\cdot d\mathbf{l} = -\iint_A \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}\cdot d\mathbf{S} \tag{2.1b}$$

$$\oiint_A \mathbf{E}\cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{\varepsilon_0}\iiint_V \rho dV \tag{2.1c}$$

$$\oiint_A \mathbf{B}\cdot d\mathbf{S} = 0 \tag{2.1d}$$

ただし、**E**は電場 (Electric field) の強度、**B**は磁束密度 (Magnetic flux density)、および**J**は電流密度 (Current density) である。また、ρは電荷密度、μは透磁率 (Permeability)、およびεは誘電率 (Permittivity)†である。

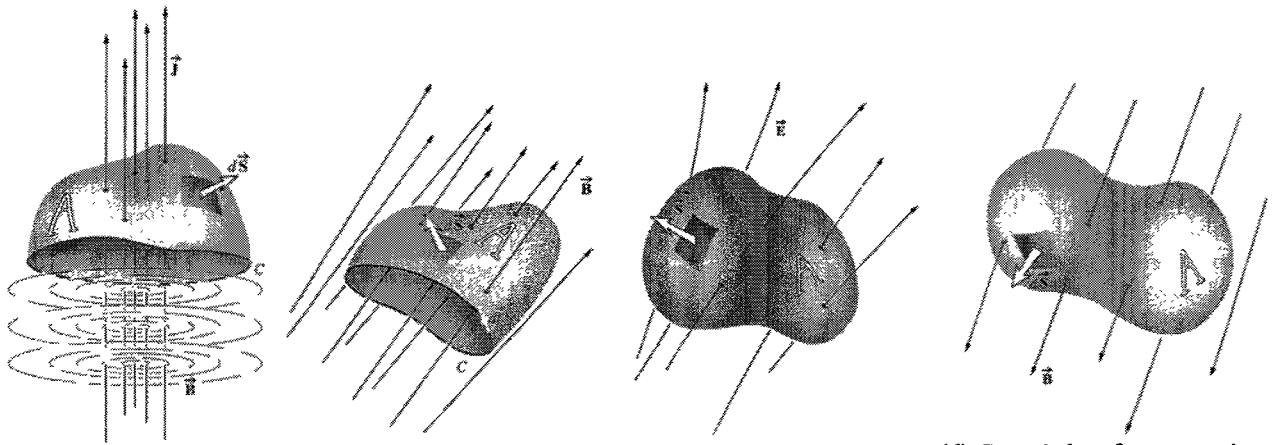
**アンペールの法則**　A.M. Ampereは、図2.1(a)に示すように一端がCの開いた曲面Aを考え、電流Jが作り出す磁場Bは閉じた経路C上の積分によって得られるとした。J.C. Maxwellは、これに対して、たとえ電流が流れなくとも (**J** = 0)、時間変化する電場**E**も磁場**B**を伴うことを発見し、これを変位電流密度とし、これらを電磁誘導の関係を式(2.1a)のようにまとめた。

**ファラデーの法則**　電磁誘導のもう一つの関係式である式(2.1b)はFaradayの法則とも言われる。図2.1(b)に示すように、閉じた積分路Cに発生する誘導起電力 (Induced electromotive force, emf) は、経路Cを端とする開いた領域Aを貫く磁束の時間変化に等しいというものである。これはつまり、時間変化する磁場はそれに付随する電場を持つことを示す式である。

**電気に関するガウスの法則**　K.F. Gaussは、流体の流れを流線で表現するように、電荷によって発生する電束の考え方を導入した。そこで、電場の吸い込みや吹き出しがなければ、閉曲面で囲まれた領域内に曲面を

§ 夏目漱石の小説「三四郎 (1908年)」でも光の力の実験が登場する。

† μは自由空間の透磁率$\mu_0$ (= $4\pi\times10^{-7}$ N·s²/c²)と比透磁率$\mu_r$によって$\mu = \mu_r\cdot\mu_0$で表される。同様に、εは自由空間の誘電率$\varepsilon_0$ (= $8.8542\times10^{-12}$ C²/N·m²)と比透磁率$\varepsilon_r$によって$\varepsilon = \varepsilon_r\cdot\varepsilon_0$で表される。



(a) Ampere's law. (b) Faraday's law. (c) Gauss's law for electricity. (d) Gauss's law for magnetism.

Figure 2.1: Maxwell's equation[169].

貫く電束はゼロであるとし、図2.1(c)にように閉曲面Aを考え、そこに流入、流出する電場**E**によって発生する電荷を式(2.1c)により与えた。

**磁気に関するガウスの法則** 同様に磁場について、磁場は電場のように吸い込みや吹き出しがなく、磁束は常に閉じている。よって、閉曲面Aに流入する磁場と流出する磁場は常に等しく、式(2.1d)を得る。

このように電磁波の振る舞いはそれぞれに検討され、最終的にJ.C. Maxwellにより美しくまとめられた。今日では、式(2.1)はより用いやすい表現方法として微分形式で式(2.2)のように与えられる。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (2.2a) \qquad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.2b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.2c) \qquad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.2d)$$

ここで、**H**は磁場強度、**D**は電束密度、ρは電荷密度および**J**は電流密度である。また、電束密度と電場、および磁束密度と磁場の関係は

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (2.3a)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (2.3b)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}_o \quad (2.3c)$$

ここで$\mathbf{J}_0$は外部から印加された電流源で、光学現象のほとんどの場合では$\mathbf{J}_0 = 0$と考えられる。**P**は誘起分極密度 (または単に分極密度)、**M**は磁荷密度である。式(2.3a)から、電場強度と誘起分極密度の関係は、

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi \mathbf{E} \quad (2.4)$$

であることがわかる。ここで、$\chi$は電気感受率 (Electrical susceptibility) であり、線形、非分散、均一および等方な媒質において、$\varepsilon = \varepsilon_0 (1 + \chi)$ の関係を持つ。電気感受率は分極しやすさの指標となり、真空では0である。また、入射する電場強度**E**が大きいときや誘電媒質が非線形性を示すとき、誘起分極密度は式(2.4)のように単純ではなくなり、

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi \mathbf{E} + \varepsilon_0 \alpha \mathbf{EE} + \varepsilon_0 \beta \mathbf{EEE} + \cdots \quad (2.5)$$

となり、非線形光学現象が発現する。

### 2.2.2 光のエネルギと力

光の単位体積あたりのエネルギ密度Wは、

$$W = \int \mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} dt + \int \mathbf{H} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} dt = \frac{\varepsilon}{2}\mathbf{E}^2 + \frac{\mu}{2}\mathbf{H}^2 \tag{2.6}$$

により与えられ、前項は電気的エネルギ密度、第2項は磁気的エネルギ密度に相当する。また、光のエネルギの流れはポインティングベクトル (Poynting vector) と呼ばれ、

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \tag{2.7}$$

で表される。このポインティングベクトルSとエネルギ密度Wの関係は

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{S} = 0 \tag{2.8}$$

であり、電磁場のエネルギ保存則となる。電場と磁場の振動によって、ポインティングベクトルSは時間的に変動する。このSの光の振動周期時間Tに対する平均強度は単位面積辺りの光強度$I$に等しく、次式で表される[170]。

$$I = \langle \mathbf{S} \rangle = \frac{n}{2}\sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}|\mathbf{E}_0|^2 \tag{2.9}$$

上で述べたように、光は物体 (電荷、誘電体、磁性体) に力学的な作用を及ぼす。電荷$\mathbf{f}_e$、誘電体$\mathbf{f}_d$、磁性体$\mathbf{f}_m$に働く力はそれぞれ、

$$\mathbf{f}_e = \rho\mathbf{E} + \mathbf{J} \times \mathbf{B} \tag{2.10a}$$

$$\mathbf{f}_d = \mathbf{P} \cdot \nabla\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} \times \mathbf{B} \tag{2.10b}$$

$$\mathbf{f}_m = \mu_0 \mathbf{M} \cdot \nabla\mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} \times (\nabla \times \mathbf{H}) \tag{2.10c}$$

となる。ここで、特に式(2.10)はローレンツ力 (Lorentz force) と言われる。(2.10b)の$\partial\mathbf{P}/\partial t$は誘電体中の束縛電荷移動による変位電流 (Displacement current) と呼ばれ、式(2.10a)に比べると電流密度に相当する。

今、誘電体に作用する力を検討するため、式(2.10b)を詳細に考える。誘電体の場合、比透磁率は1として考えられるため、式(2.3a)を用いると、

$$\mathbf{f}_d = \mathbf{P} \cdot \nabla\mathbf{E} + \mu_0 \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} \times \mathbf{H} \tag{2.11}$$

となる。式(2.4)の電気感受率$\chi$を用いると、

$$\mathbf{f}_d = \varepsilon_0 \chi \left( \mathbf{E} \cdot \nabla\mathbf{E} + \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \times \mathbf{H} \right) \tag{2.12}$$

のように変形することが出来る。これをベクトルの恒等式を用いて更に変形すると、

$$\mathbf{f}_d = \varepsilon_0 \chi \left\{ \nabla\left(\frac{1}{2}\mathbf{E}^2\right) + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \right\} \tag{2.13}$$

となる。このように光によって誘電体に作用する力は2種類ある。前項は電場の強度勾配 (光学ポテンシャル) によって作用する力を意味し、勾配力 (Gradient force) と呼ばれる。後項は、光の伝搬方向にベクトルを持つポインティングベクトルの変化に対する力を意味する。光の運動量はS/$c^2$で表せることから、この項は運動量変化であるといえる。この力は物体を押しのける力である散乱力 (Scattering force) と呼ばれる。

### 2.2.3 光子による力

次に、光を光子 (Photon) として考えたときの光放射圧を考える。光子によって与えられる光放射圧は、物体境界で光子に及ぼされる作用 (反射、屈折、散乱など) によって光子が反跳する運動量の変化に起因する。1光子の持つエネルギ$E$と運動量$\mathbf{p}$は

$$E = h\nu \tag{2.14}$$

$$\mathbf{p} = \frac{h\nu}{c} = \hbar\mathbf{k} \tag{2.15}$$

である。ただし、$h$はPlank定数、$\nu$は光の振動数、および$\hbar$は$h/2\pi$である。$\mathbf{k}$は波数ベクトルである。光子の運動量が変化する時、力$\mathbf{F}$が発生する。つまり、$F = d\mathbf{p}/dt$である。今、図2.2に示すように、水平に入射した1光子が屈折率$n$の物体を透過した場合に、光子が物体に及ぼす力$\mathbf{f}$は、入射前、透過後の波数ベクトルをそれぞれ$\mathbf{k}_0$、$\mathbf{k}'$とすると、

$$\mathbf{f} = n\hbar(\mathbf{k}_0 - \mathbf{k}') \tag{2.16}$$

である。次に、単位面積辺りのパワーが$I$であるビームが物体に作用する力を考える。1光子が保有する運動量は式(2.15)である。今、対象となるビーム中に含まれる光子数は$I/h\nu$である。よって屈折率$n$の物体に作用する力は

$$\mathbf{f} = Q\frac{nI}{c} \tag{2.17}$$

と表される。ここで、$Q$は光放射圧の作用効率を表し、0から2の間の値を取る。その物理的な意味は、入射光の単位時間辺りの運動量に対する実際に物体に働く力の割合である。物体に入射した光の散乱や反射は物体の光学条件や環境などによって大きく影響されるため、その影響は$Q$に現れる。

では、図2.3に示す空気と物質Aの境界に強度$I$の光が入射する場合を考える。物質Aが光を完全に反射する場合 ($R$=1)、光放射圧によって物質Aには

$$F = \frac{2n_1 I}{c}\cos\theta \tag{2.18}$$

の力が作用する。ただしθは入射角である。次に、反射率$R$、透過率$T$ ($R+T=1$) の場合に物体に作用する力$F$は、透過光と反射光に分けられ、下向きを正とすると、

$$F = \frac{I}{c}(n_1 R\cos\theta + n_1\cos\theta - n_2 T\cos\phi) \tag{2.19}$$

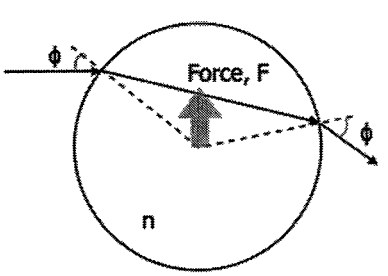
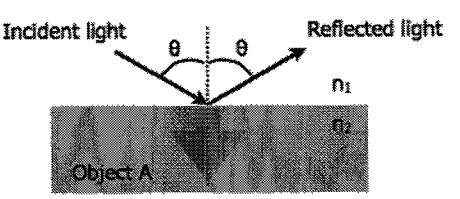
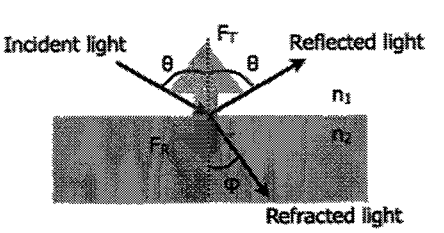



Figure 2.2: Optical radiation force driven by one photon.




(a) Reflection.




(b) Refraction.

Figure 2.3: Generation of optical radiation pressure.

の様になる。ただし、$\varphi$は屈折角である。力Fは、反射率$R$、透過率$T$、入射角度$\theta$、屈折率$n$などによって変化するが、偏光状態によっても変化し、つまり反射率$R$、透過率$T$などに影響が現れる。光吸収を考慮しない場合、その$R$および$T$は後述 (式(2.22)(2.23)) のFresnelの振幅反射率によって与えられる。

## 2.3 レーザトラップ技術の歴史的展望

光放射圧を利用してマイクロオーダの物体を捕捉する技術をレーザトラップと呼ぶ†。レーザトラップは1970年にアメリカのA. Ashkinによって初めて実現された[175]。彼は対向する2つのビームを用いて水中でポリスチレン微粒子を捕捉し、その後、1971年に真空中、空気中環境下で、下方から単一ビームを用いたトラップ (Levitation trap) に成功した[176]。また、1986年に上方から単一ビームを用いて、粒径10 nm ~ 25 μmのポリマー微粒子を水中で3次元的に捕捉した[167]。A. AshkinはこれをSingle-beam gradient force optical trap呼んだが、現在、最も一般的には光ピンセット (Optical tweezers) などと呼ばれ、他のトラップ方法と区別される。図2.4に光放射圧を用いた種々のトラップ技術を示す。本研究では、この光ピンセットを用いたマイクロオーダの物体捕捉技術を主眼をおき、そのため、本論文中では、以降これを特にレーザトラップと呼ぶ。

レーザトラップの実現以降、多数応用例が報告されてきた。まず, A. Ashkinがバクテリアのトラップに成功[177]して以来、バイオテクノロジーへの門戸が開かれた。バイオテクノロジーにおいて一般的にマニピュレーション技術として用いられるようになり、現在マニピュレータも市販されている[178-181]。S.M. Blockはキネシンをマイクロビーズに修飾し特性評価を行ったように[182]、レーザトラップを高感度なトランデューサとして、マイクロビーズに修飾したキネシンやDNA研究への応用が盛んとなった[183, 184]。一方、I. Ishimaruらは2光束で操るマイクロ物体の表面をエバネッセント光 (Evanescent light) を利用して観察した[185]。また、マイクロ球を対象としたトラップ力の解析や特性の理解が進み[186-190]、μTASに将来的に応用を見越したトラップによるマイクロ物体の光駆動技術[191-193]やマイクロ流体の流れ測定[194]、粘性測定[195]、摩擦力測定[196]などが行われた。レーザトラップでは、ナノ粒子からマイクロオーダの細胞まで様々なものが捕捉可能であるが、Mie散乱領域以上では捕捉物体はレーザに対して透明である必要があった。しかし、レーザスポットを物体周辺で高速に円軌道を描がかせ、光ポテンシャルのかご (Cage) を生み出すことによって金属微粒子のトラップも実現されている[197]。トラップされた粒子位置の測定や粒子の位置制御が可能になってくると[198-205]、プローブ技術が大変盛んとなり[206-210]、現在、PFM (Photonics force microscopy) とよばれる顕微鏡は既に市販レベルに達する[180]。他方、粘性抵抗や球の力学特性の理解が進み、質量[211]や粒径[212]、物質[213, 214]による分球技術が盛んとなった。研究分野では、対象を非修飾、非浸食でとらえることができるため、化学分野に応用され始めた。その多くは他の原理と融合され、化学物質を含む液滴をトラップし、液滴の径をWGM (Whispering gallery mode) で測定した例[215]、トラップした物質をRaman散乱によって物質同定している例[216, 217]、また近年、Super-continuum white light[217]、フェムト秒レーザ[218]、Besselビーム[219, 220]などの新しい光源を用いた新技術も提案されている。近年特に、SLM (Spatial light modulator) などの光学要素部品の発展に伴い、光線の波面制御によるマルチトラップや制御が盛んに行われており[221-223]、これはホログラフィックトラップ (Holographic optical tweezers, HOTs) と呼ばれる。また、これまでの伝搬光ではなく、光ファイバ[156, 224, 225]、エバネッセント光[226]、表面プラズモ

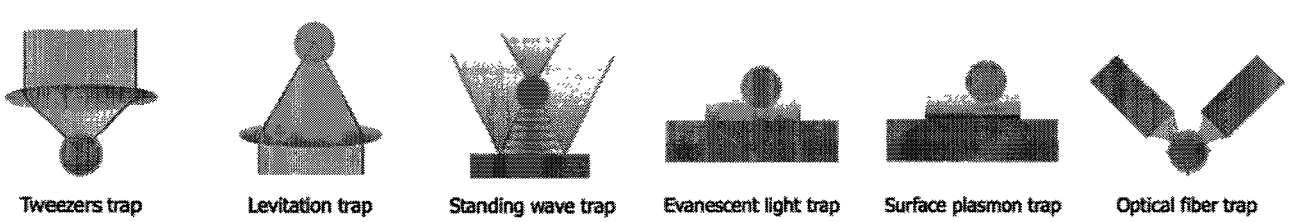



Figure 2.4: Various types of the laser trapping technique.

† 本論文では原子トラップ(Atom trapping)や磁気光学トラップ(Magnet-optical trapping)については言及しない。

ン (Surface plasmon) [227]などによるトラッピングも提案され、その応用が広がりつつある。理論解析によって集光ビームと捕捉粒子の関係が明らかになってきており、レーザトラップがナノ加工に応用されている例[228, 229]もある。このように、レーザトラップ技術は関心を集め、関連技術をまとめたレビュー論文も数多く出版されているので参照されたい[230-233]。

レーザトラップは主に液中で行われる[233]。液中では浮力によって捕捉が容易となり、既に述べたように、生物分野において最も発展した。本研究では、CMMプローブに応用するため、大気中環境で行う必要がある。空気中でのトラップはこれまでにも実現されているが、報告例は少ない[215, 234-240]。その主な原因は、捕捉物体がVan der Waals力などの吸着力によって基板に強力に吸着しており、レーザの光放射圧のみによる捕捉が難しいためである。近年、やや盛んに大気中でのレーザトラップが行われるようになり、国際会議でも独立したセッションとして扱われ始めるなど注目を集め始めている†。

## 2.4 レーザトラップ原理

### 2.4.1 基本原理[172-174]

レーザトラップは、光放射圧を利用して物体を3次元的に捕捉する。図2.5に示されるように集光レーザが物体に入射する時に屈折し、物体境界で光放射圧が物体に作用する。透明物体では入射光の多くが透過屈折するため、放射圧の力成分の多くが物体を上向きに押し上げる方向に働く。発生する光放射圧をすべて足し合わせた力を特にトラップ力と呼び、集光レーザによって球を捕捉する場合、トラップ力は球を集光レーザのレーザスポットに引き寄せる方向に作用する。

光放射圧によって物体に作用する力は散乱力と勾配力として扱われる。前者は、光の伝搬方向に働き、後者は光の伝搬と垂直方向に働く。レーザトラップでは、ビームを強く集光・屈折させ、この勾配力を利用し物体を捕捉する。光軸に対して対象なビームを用いれば、トラップされた球状の粒子は光軸中心に捕捉される。光軸方向に関して、レーザの散乱力によって粒子は下向きに押され、レーザスポットから少し下がった位置に捕捉される。

### 2.4.2 偏光作用

一般的に光は時間平均された強度という形で観察される。しかし、数百THzで光は振動しており、その振動位相への着想が偏光につながる。このように、光の偏光は波動性をもって理解され易い。ある方向 (z方向) に伝搬する単色光を考える。電場ベクトルを$E$、伝搬ベクトルを$\boldsymbol{k}$とすると、

$$\mathbf{E}(z,t) = E_0 \exp(\mathbf{k}z - \omega t) \tag{2.20}$$

と表せる。ここで、$xy$平面内の直交する2つの電場に分けて考えると、

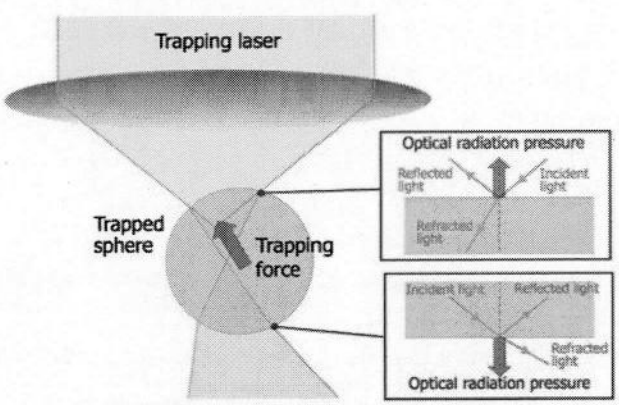



Figure 2.5: Principle of laser trapping.

† SPIE Optics&Photonics 2007@US SanDiegoにて開催された。

$$\mathbf{E}(z,t) = \mathbf{E}_x(z,t) + \mathbf{E}_y(z,t) \tag{2.21a}$$

$$\mathbf{E}_x(z,t) = E_x \exp(\mathbf{k}z - \omega t) \tag{2.21b}$$

$$\mathbf{E}_y(z,t) = E_y \exp(\mathbf{k}z - \omega t + \varepsilon) \tag{2.21c}$$

と表現できる。$\varepsilon$は2つの横波の位相差である。$\varepsilon$の変化と共に直線偏光 ($\varepsilon = n\pi$, $n = 0, 1, 2 \cdot \cdot$)、楕円偏光と変化する。特に、$E_x$と$E_y$が等しく、$\varepsilon$が$\pm\pi/2$の時に円偏光となる。

レーザ光の偏光は光学結晶などを用いて、複屈折や吸収などを用いて制御される。近年、偏光制御技術が進み伝搬するレーザビームの面内の偏光を制御し様々な偏光を作り出すことが実現されている。昔からその存在は理論的に知られていたが、近年注目されるのがラジアル偏光である。ラジアル偏光 (Radial polarization) とは、図2.5に示すように、偏光方向が伝搬するビームの光軸に対して放射方向に振動面を持つ偏光であり、近年、共振器の工夫[241, 242]や、半波長板[243]、フォトニック結晶[244]および液晶[245]など利用したフィルタなどによって実現可能である。またラジアル偏光と対照的に、円周方向に偏光面を持つビームをアジマス偏光 (Azimuth polarization) と言う。

レーザトラップへの応用を考えると、粒子に集光ビームを入射する時、図2.6に示すように直線偏光の場合は粒子表面ではp偏光やs偏光が混在する。ラジアル偏光の場合は全ての面でp偏光、アジマス偏光は全てs偏光となる。ここで、入射光に対して光放射圧は反射光と屈折光の成分に分かれる。前述のように屈折光成分が多いと勾配力が大きくなる。p偏光とs偏光で反射率が異なり、それぞれに対する反射・透過率はFresnelの振幅反射率$r_p$、$r_s$を用いて以下の式で求めることが出来る[169]。

$$R_p = |r_p|^2 \tag{2.22a}$$

$$R_s = |r_s|^2 \tag{2.22b}$$

$$T_s = 1 - R_s \tag{2.22c}$$

$$T_p = 1 - R_p \tag{2.22d}$$

$$r_p = \frac{\sin\theta\cos\theta - \sin\varphi\cos\varphi}{\sin\theta\cos\theta + \sin\varphi\cos\varphi} \tag{2.23a}$$

$$r_s = \frac{-\sin\theta\cos\varphi + \sin\varphi\cos\theta}{\sin\theta\cos\varphi + \sin\varphi\cos\theta} \tag{2.23b}$$

図2.7は入射角度と反射・透過率の関係を表したものであるが、p偏光の方が透過率が高く、よって多くの入射構成分が屈折し、勾配力に寄与する。逆にs偏光では多くの成分が散乱力に寄与する。このように、入射レーザ偏光状態によってプローブ球に作用する光放射圧は大きく変化する[246, 247]。

## 2.5 結言

本章では、光放射圧プローブの根本的な原理となる光放射圧の理論およびレーザトラップ原理について述べ、レーザトラップの歴史的展望を総括した。

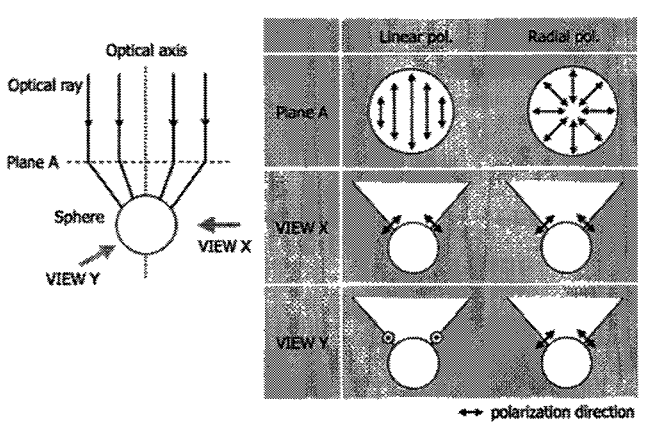



Figure 2.6: Effect of polarization in laser trapping.

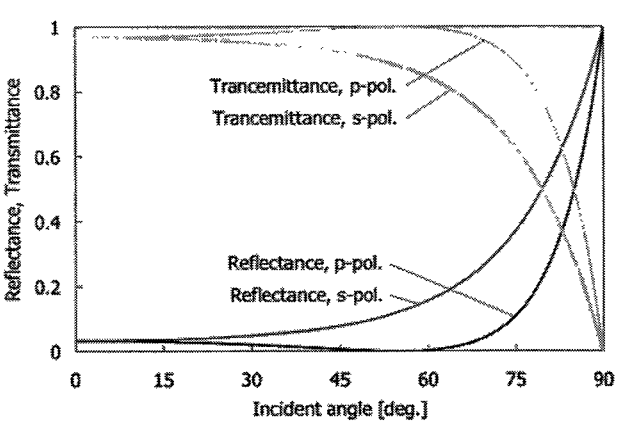



Figure 2.7: Fresnel reflection (n=1.44).

# 第3章　数値解析による光放射圧プローブの特性評価

## 3.1　緒論

レーザトラップ技術を用いたマイクロプローブの基本的特性およびプロービング時に発生する電磁気学的擾乱の影響について数値解析を用いて検討する。

## 3.2　光放射圧プローブ基本的特性

レーザトラップの数値解析手法は多く提案されている[248-258]。代表的には、光線追跡法[248-250]やT-matrix法[251, 252]、FDTD法[255, 256]である。レーザトラップの数値解析は本質的には光放射圧を解析するものであり、2章で述べたように、光放射圧は光と物質の相互作用で発生する。光散乱現象は物体サイズと光波長のオーダにより現象が異なり、波長 ($\lambda$)に対して十分に小さい粒子 ($r < \lambda/15$) はRayleigh散乱、大きい粒子 ($r \approx \lambda$) はMie散乱に分類される[169]。本研究で扱うサイズは約4λである。

本節はプローブの基本的特性を検討する。レーザトラップ特性は捕捉物体と捕捉光源に依るため、光源に関する研究は多岐に渡り、偏光、強度分布および波長などに関して様々な光源が用いられている。最も一般的にはガウシアンビームが用いられるが、特に最近は、Super continuum white light、フェムト秒レーザパルスやBesselビームを用いた例も提案されている。ここでは、捕捉レーザを光線として単純化し、プローブ球に作用する光放射圧を光線追跡法を用いて解析する。

### 3.2.1　光線追跡法 (Ray tracing method)

真球誘電体を対象としたレーザトラップの光線追跡法は1992年にA. Ashkinによってまとめられた[248]。A. Ashkinは直線偏光や円偏光を考慮し、H. Kawauchiらがそれをラジアル偏光にも適用した[250]。本節では、このA. Ashkinの提案した手法を基に解析を行う。

光線追跡解析では、入射ビームを分割した多数の光線として扱い、各光線の軌跡を光線幾何学的に求める。その光線のベクトルが変化する際、そこに力 (光放射圧) を与え、最後にすべての力を合算する。まず、レーザ強度$P$を持った光線が入射角度$\theta$で粒子に入射したときに発生する、散乱力と勾配力について考える。図3.1に示すように、入射した光線は球の内部で散乱を繰返す。反射率を$R$、透過率を$T$とすると、反射屈折を繰返すたびにそのパワーは$P$、$PR$、$PT^2$、$PT^2R$、・・・ (ただし$R+T=1$) と減衰する。2章の式(2.17)で示されたように、レーザパワー$P$の光によって発生する光放射圧は$nP/c$であるため、入射光の進行方向に働く力$F_Z$、入射光の進行方向と垂直に働く力$F_Y$は

$$F_z = \frac{n_1 P}{c} - \left[ \frac{n_1 PR}{c} \cos(\pi - 2\theta) + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n_1 P}{c} T^2 R^n \cos(\alpha + n\beta) \right] \tag{3.1a}$$

$$F_Y = 0 - \left[ \frac{n_1 PR}{c} \sin(\pi - 2\theta) - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n_1 P}{c} T^2 R^n \sin(\alpha + n\beta) \right] \tag{3.1b}$$

となる[259]。これらの力の合力$F_T$は複素場を用いて、

$$F_T = F_Z + iF_Y \tag{3.2a}$$

$$F_T = \frac{n_1 P}{c}[1 + R\cos 2\theta] + i\frac{n_1 P}{c} R\sin 2\theta - \frac{n_1 P}{c} T^2 \sum_{n=0}^{\infty} R^n e^{i(\alpha + n\beta)} \tag{3.2b}$$

となり、$F_T$を更に変形すると、

$$F_T = \frac{n_1 P}{c}[1 + R\cos 2\theta] + i\frac{n_1 P}{c} R\sin 2\theta - \frac{n_1 P}{c} T^2 e^{i\alpha}\left(\frac{1}{1 - Re^{i\beta}}\right) \tag{3.3}$$

ここで、$\alpha=2(\theta-r)$、$\beta=(\pi-2r)$であることに注意して、$F_T$の実数および虚数部に展開すると

$$F_T = F_s + iF_g \tag{3.4a}$$

$$F_s = \frac{n_1 P}{c}\left\{1 + R\cos 2\theta - \frac{T^2[\cos 2(\theta - r) + R\cos 2\theta]}{1 + R^2 + 2R\cos 2r}\right\} \tag{3.4b}$$

$$F_g = \frac{n_1 P}{c}\left\{R\sin 2\theta - \frac{T^2[\sin 2(\theta - r) + R\sin 2\theta]}{1 + R^2 + 2R\cos 2r}\right\} \tag{3.4c}$$

となる。実数部は光線に平行な力である散乱力$F_s$、虚数部は光線に垂直な力である勾配力$F_g$を表す。すべての光線に対して、これら2つの力を求めることで、トラップ力を解析する。

一方で、各光線の持つレーザ強度に関して、対物レンズで絞られた各々の光線は光軸に対して$\varphi$の角度を持って粒子に入射する。対物レンズ入射前のビーム断面の強度分布がガウシアン分布の場合、

$$P(r) = P_0 e^{-2r^2/r_{max}^2} \tag{3.5}$$

で与えられる。今、ビームの光線への分割数を半径方向に$m$、円周方向に$n$とすると、各光線もつの入射前の光強度は次のようになる。

$$\frac{P_0}{mn} e^{-2r^2/r_{max}^2} \tag{3.6}$$

**光軸方向に働く力 (Axial trapping force)** プローブ球がレーザスポットから光軸方向に変位する時に光軸方向に働く力を解析する。プローブ球がレーザスポットから$d_z$変位する場合の幾何学モデルを図3.2に示す。光軸方向をZ軸にとり、XY軸を光軸に垂直方向とした。光軸方向変位の場合、力は軸対称として扱うことができ、図3.2(b)に示す光軸を面内に持つ一断面を考え、それを円周方向に積分することで力を求める。対物レンズによって集光された光線は光軸に対して$\varphi$の角度で集光される。ここで$\varphi_{max}$は対物レンズ開口数$NA$ (Numerical aperture) によって決定される。

$$NA = n\sin\phi_{max} \tag{3.7}$$

$r_{max}$は$NA$と対物レンズの作動距離$H$より、

$$r_{max} = H\tan^{-1}\phi_{max} \tag{3.8}$$

である。レーザスポット、球中心、球表面の光線入射位置の3点を結ぶ三角形に注目すれば、正弦定理より

$$\frac{R}{\sin(\pi - \phi)} = \frac{dz}{\sin\theta} \tag{3.9}$$

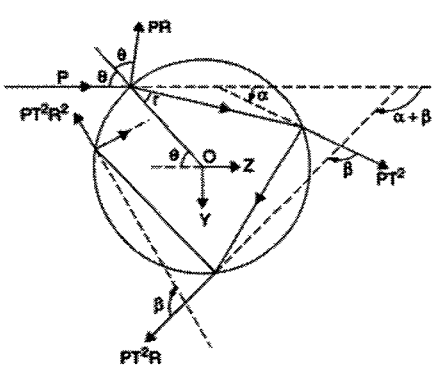
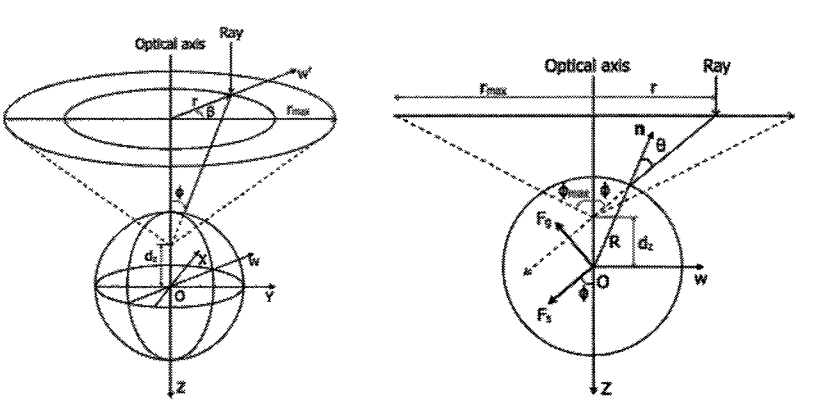



Figure 3.1: Optical path of optical ray at arbitrary incident angle.




(a) Bird view. (b) XZ plane.

Figure 3.2: Geometrical model to analyze axial trapping force.

となり、角度$\varphi$で集光される光線の球への入射角$\theta$が決定する。同時に、Snellの法則より屈折角$r$は

$$\frac{\sin r}{\sin\theta} = n \tag{3.10}$$

となる。物体の反射率および屈折率は光の偏光や入射角によって変化する。それぞれ、反射率$R$および透過率$T$は、2章の式(2.22) (2.23)*を用いて入射角から得られる。

次に各光線の偏光を考える。各光線の偏光成分を$f_p$および$f_s$とすると、直線偏光とラジアル偏光の場合を式(3.11)、(3.12)にそれぞれ示す。

$$f_p = \sin^2\beta \tag{3.11a}$$
$$f_s = \cos^2\beta \tag{3.11b}$$
$$f_p = 1 \tag{3.12a}$$
$$f_s = 0 \tag{3.12b}$$

したがって、各光線について、p偏光とs偏光を考え、それらを足し合わせることで、すべての光線に対する散乱力と勾配力が求められる。ただし、光軸方向変位の場合は、軸対称であるため、光軸から放射方向の力は打ち消され当然0である。いま、光軸方向の力を算出するため、得られる散乱力および勾配力から

$$F_z = F_s\cos\phi - F_p\sin\phi \tag{3.13}$$

を求めてすべての光線による力を足し合わせると光軸方向の力$F_z$が得られる。

**光軸に垂直方向に働く力 (Transverse trapping force)** プローブ球が光軸垂直方向に変位する時に働く光軸に垂直な復元力を考える。レーザスポットからのプローブ球変位を$d_y$としたときの光線の幾何学モデルは図3.3のようになる。光軸方向の場合と同様に始めに入射角$\varphi$を求める。ただし、モデルが軸対称ではないため、球の変位方向 (Y軸) と光線の入射面をなす角度$\gamma$を考える (図3.3(b))。$\gamma$は幾何学的な関係から、

$$\gamma = \cos(\pi - \phi)\cos\beta \tag{3.14}$$

で得られ、これを用いて正弦定理より、

$$\frac{dy}{\sin\theta} = \frac{R}{\sin\gamma} \tag{3.15}$$

の関係が導かれ、入射角$\theta$を得る。この$\theta$からFresnel反射率を用いた反射率$R$と透過率$T$を算出する。偏光の影響を考えるため、球座標に対する光線の入射角を表す変数$\mu$を導入する。$\mu$はZY面と入射面の角度である。

$$\mu = \frac{\tan(\pi - \phi)}{\tan\gamma} \tag{3.16}$$

この$\mu$を用いて偏光による光強度成分を考えると、直線偏光 (式(3.17)) [248]とラジアル偏光 (式(3.18))[250] はそれぞれ、

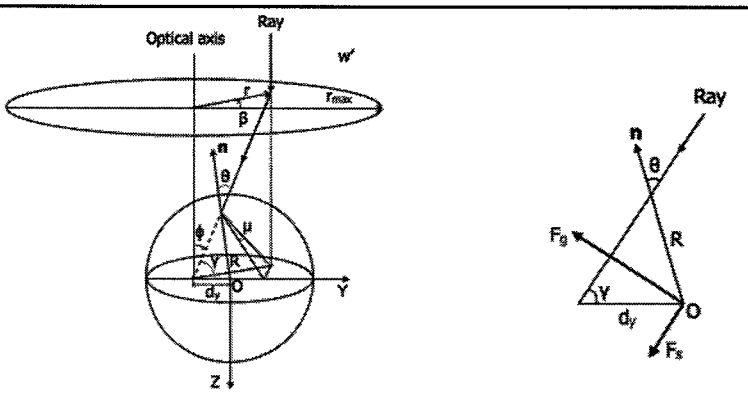
$$f_p = (\cos\beta\sin\mu - \sin\beta\cos\mu)^2 \tag{3.17a}$$
$$f_s = (\cos\beta\cos\mu + \sin\beta\sin\mu)^2 \tag{3.17b}$$
$$f_p = \cos^2\mu \tag{3.18a}$$
$$f_s = \sin^2\mu \tag{3.18b}$$

となる。Y軸方向の復元力を得るため、

$$F_Y = F_s\cos\phi + F_g\sin\gamma \tag{3.19}$$

成分を計算する。ここで、z方向の場合は軸対称であるため、軸円周方向に積分をすることで全光線の力を求めたが、今回は光線を円周角βを0からπまで求め、それを後に2倍することで求めた。

* Subsection 2.4.2 in page 19.




(a) Bird view. (b) Ray incident plane.

Figure 3.3: Geometrical model to analyze transverse trapping force.

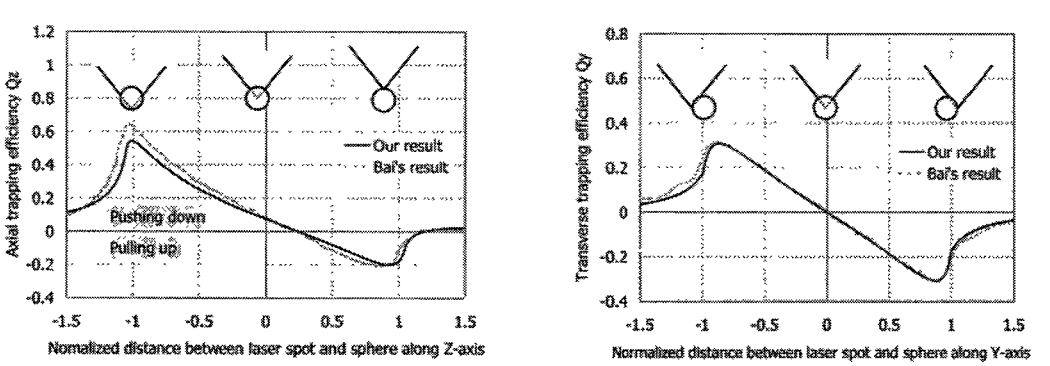
### 3.2.2 光線追跡シミュレータ確認

本研究で作成したシミュレータの実用性を確認するため、結果の比較した。比較対象として、文献249のJ. Baiら結果を用いた。J. Baiらは、任意形状の物体を捕捉するときのトラップ力を解析するため物体のパッチモデルを作成し、そこに入射する光線を解析した[249]。比較は、8 μmのシリカ粒子 (n = 1.44) をNA0.95の対物レンズを用いて、直線偏光 (X軸方向) のガウシアンビームによって捕捉したときのトラップ効率とした。光軸垂直方向の解析では、プローブ球の変位は偏光方向に垂直 (Y軸) とした。光線分割数は半径方向に$m$ = 300、円周方向に$n$ = 400とした。図3.4がその結果であり、(a)は光軸方向、(b)は光軸垂直方向変位を示す。光軸垂直方向についてはトラップ効率はよく一致している。光軸方向に関して、引き上げ方向の最大トラップ効率はほぼ-0.2で一致しているが、$d_z$のマイナス領域ではあまり一致しておらず、本研究の結果はJ. Baiらの結果よりも15%程度低い値を示している。このように光軸方向に若干の違いはあるものの大局的には一致しており、プローブ特性の理解という観点では問題ないと考え、以降、本シミュレータを用いて解析を行った。

### 3.2.3 光放射圧プローブ基本特性

プローブ球の捕捉位置について、光軸方向トラップ効率から式(2.17)を用いてトラップ力を求め、プローブ球質量 (5.25 pg) と釣り合う位置を捕捉位置と考える。図3.4(b)より光軸垂直方向は光軸中心で安定するのに対して、図3.4(a)に見られるように光軸方向はレーザスポットよりやや下方に安定的に捕捉される。これは、前述のように (2章)、散乱力による押し下げ力のためである。またプローブ球の捕捉位置はレーザ強度にも依存し (図3.5)、50 mWを超えると極端に捕捉位置が変化する。これはレーザ強度が低下することによる勾配力の低下によるものと考えられる。このように、光軸方向の捕捉位置はレーザ強度に依存するが、レーザ強度が200 mW以上の範囲は100 mWの変化に対して10 nmと僅かである。

CMMで測定を行う場合、プローブの高速な動作が求められる。プローブシステムが移動したときにプローブがどの程度変位するかを見積もる。プローブシステムが1 mm/sec.で移動したと考える時、Stokes抵抗




(a) Axial trapping efficiency. (b) Transverse trapping efficiency.

Figure 3.4: Comparison of analyzed trapping efficiency by means of ray tracing method.

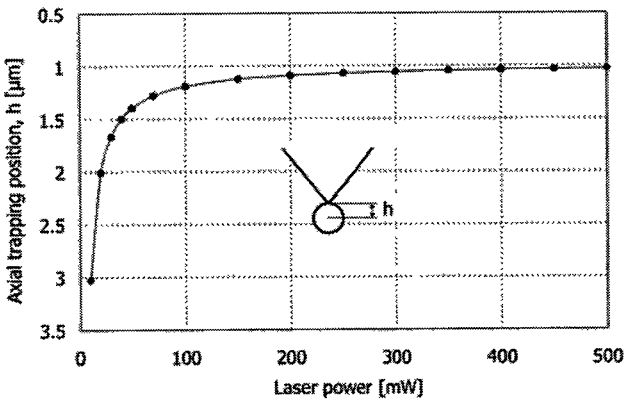


Figure 3.5: Equilibrium axial trapping position.

から見積もられる粘性抵抗による力は1.4 pN程度である。一方で、レーザ強度200 mWで同プローブを捕捉している時の横方向に働く力はQ＝0.2の時で133 pNである。したがって、プローブシステムの移動に伴う粘性抵抗による外力は捕捉力の1%程度であり、その影響は無視できる程に小さい。

ばね定数は位置検出感度を示すプローブシステム指標となるが、プローブのばね定数は、レーザ強度が200 mWの時、光軸方向が52 μN/m、光軸に垂直方向が63 μN/m (偏光方向に垂直)、64 μN/m (偏光方向に平行)である。これは他のプローブ (数十N/m (1章 表1.2参照)) やAFMのカンチレバー (0.01 ~ 100 N/m [257]) などと比較しても遥かに小さく、S/N比を向上させることが出来れば、微小な力に対して高感度に反応するプローブとなりえる。ばね定数の3次元的なばらつきは約20%あり、直線偏光では等方性は得にくい。

また、ばね定数から本プローブシステムの共振周波数を見積もることが出来、ばね定数が150 μN/m (レーザパワー 500 mW) で直径8 μmのシリカ球を用いた場合、共振周波数は約2700 Hz程度になると推定される。ここから、1 nmの分解能を得るためにはプロービング速度が約3 μm/sec.程度であることが予想され、このように、低共振周波数を持つプローブの検出高速化の限界は否めない。

### 3.2.4 捕捉光源

**対物レンズのNAの影響** 対物レンズの開口数 (Numerical aperture, NA) はレンズ特性を示す一つの要素として用いられ、簡単には集光角度を意味する。NAが大きいほどレーザは強く集光され、その結果、焦点距離や作動距離は狭くなる。対物レンズNAの影響を検証するため、NAの変化による最大トラップ効率を計算した。結果を図3.6に示す。光軸方向のトラップ効率について、図に示すように、上向きの力を得るためにはNA0.75以上が必要であり、NA0.95で最大0.2まで得ることが出来る。NAが大きくなると光軸方向の効率増加によって、Y軸方向は逆に効率が下がる。

**ビームプロファイルの影響** トラップ用ビームにはガウシアン強度分布が用いられることが多い。ガウシアン分布は光軸付近に高い強度を持つが、光軸付近の光線は物体を押し下げる散乱力を発生させるため、レーザトラップ技術にとって必ずしも効果的とは言えない。そこで、近軸領域にレーザの強度を持たないドーナツ型強度分布の輪帯ビームを例にとって、ガウシアン分布以外のビームでの効率改善を検討する。ただし、簡単のため、ビーム断面内で強度分布を均一にし、ビーム強度のパターンのみに焦点を当てた。ビーム断面に関わらず、入射エネルギは等しくしている。解析結果を図3.7に示す。横軸はビーム内径と外径の直径の比を示す。ビーム内径が大きくなると光軸方向トラップ効率が大きくなり、最大で2倍程度に達するように、輪帯ビームの効果は大きい。光軸垂直方向の効率は、光軸方向が2倍に上昇すると、約20%減少する。

**ビーム偏光の影響** 2章で述べたように、ビーム偏光状態はトラップ特性に影響を及ぼす。直線偏光では、球の入射時にs偏光とp偏光が混在する。ラジアル偏光の場合、プローブに入射する光はすべてp偏光となる。p偏光はs偏光よりも反射率が低く屈折光が多くなるため、勾配力の要素が大きくなり、その結果、光軸方向トラップ効率が向上する。これはS. Yanらの解析によっても示唆されている[261]。そこで、ラジアル偏

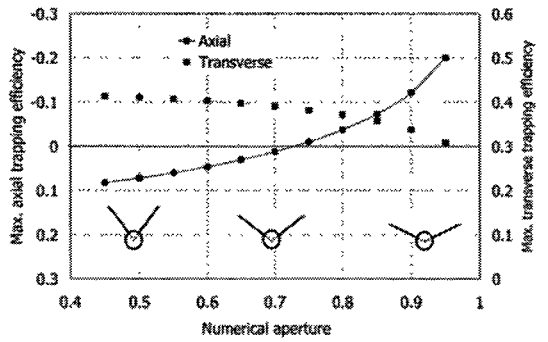



Figure 3.6: Impact of objective NA to trapping efficiency.

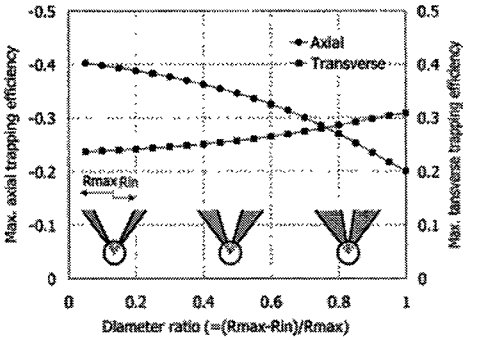
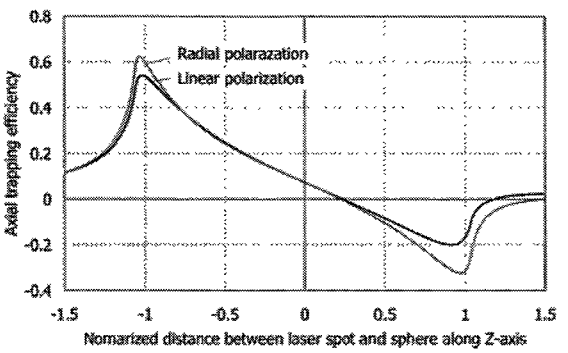
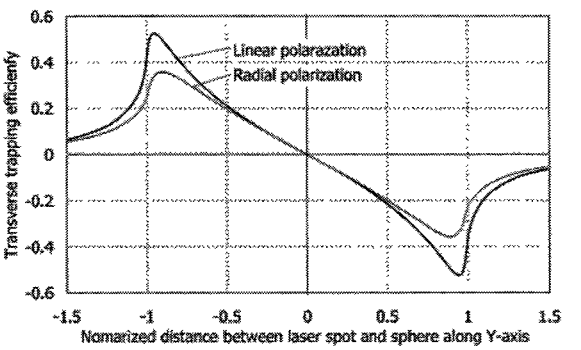



Figure 3.7: Influence of beam intensity profile to trapping efficiency




(a) Axial trapping efficiency.




(b) Transverse trapping efficiency.

Figure 3.8: Polarization effect to trapping efficiency.

光と直線偏光を比較し、トラップ効率を比較する。ただし、単純に偏光のみを比較する目的で、ビームの強度分布はすべてガウシアン分布とした。結果を図3.8に示す。同図(a)の光軸方向については、予想されたようにラジアル偏光ビームを用いることで、最大の光軸方向トラップ効率が1.6倍向上している。また、ばね定数も1.14倍増加している。次に光軸垂直方向では (図3.8(b))、ラジアル偏光ビームを用いることで、最大トラップ効率が0.68倍低下した。これは、光軸方向に光放射圧が働いたことでエネルギ保存によって、光軸垂直方向の効率が低下したものと考えられる。ここで、ばね定数に注目すると、光軸方向と光軸垂直方向のばね定数の差が小さくなり、直線偏光では20%程度であった3次元的なばね定数のばらつきはラジアル偏光では約8%まで減少した。まとめると、ラジアル偏光で光軸方向トラップ効率は大きくなり、3次元的感度の等方性も改善され、本プローブに対して偏光制御、特にラジアル偏光は非常に有用であることがわかる。

## 3.3 プロービング時に受ける影響評価

本プローブは光放射圧によって3次元的に空間捕捉された微粒子をプローブとして用いる。プロービング時、プローブ球は測定面にナノメートルオーダの距離まで接近する。プローブ球が測定面に近接すると、捕捉ビームとプローブ球によって形成される電磁場分布に変化が生じプローブ特性の変化が示唆される[262, 263]。そこで、プロービング時にプローブ球が測定面近傍で受ける光放射圧変化を解析し、プローブ球が受ける影響を明らかにする。プロービング時に発生する影響とは、電磁気学的場が乱される、ということであり、それは具体的には以下のような状況によって起こると考えられる。

- 測定面の反射光がプローブに再入射する
- 入射ビームが遮られる (シャドウ効果 (Shadow effect))

本節では、シャドウ効果や反射光の影響によりプローブに作用する光放射圧の変化を求め、光放射圧プローブの特性を評価する。解析手法は原理的にいかなる散乱問題にも適用可能なFDTD (Finite differential time

domain、有限時間領域差分) 法を用いる。この解析手法ではその解析領域中にいかなる形状、構造の粒子をも構成可能であり、その解析領域を全領域に渡って計算することにより散乱場を求める。

### 3.3.1 FDTD法

FDTD法ではMaxwellの方程式に基づいて散乱場を計算する。ここで、計算する媒質について考える。本研究では、線形、均一かつ等方的な媒質を扱うが、それらの特徴は誘電率ε、透磁率μ、導電率σ、および屈折率nなどで決定される。これらはFDTD法においては場所の関数として取り扱われる。また光の周波数に対して、比誘電率$\varepsilon_r$は複素数であり、すなわち複素比誘電率は

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - i\varepsilon_r'' \tag{3.20}$$

と書き表せる。媒質の屈折率$n$は、媒質中の光の速度$v$と真空中の速度$c$との比で定義されており

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{\varepsilon_o\mu_o}} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o}} \tag{3.21}$$

となる。以上を用いて、式(2.2)を電流源の存在しない場合の構成方程式を用いることによって

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = -\frac{\sigma}{\varepsilon}\mathbf{E} + \frac{1}{\varepsilon}\nabla \times \mathbf{H} \quad \text{(3.22a)} \qquad \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_o}\nabla \times \mathbf{E} \quad \text{(3.22b)}$$

と表すことができる。

**Yeeアルゴリズム** FDTD法はK.S. Yeeによって1966年に提案された電磁場数値解析手法の1つ[264]で、電磁場の逐次的な時間変化を解析する方法である。FDTD 法では解析領域全体をセルと呼ばれる微小直方体に分割し、その全セルに対してMaxwellの方程式を適用して定式化する。FDTD法で波源、散乱体を囲む解析領域で光散乱場を求め、Maxwellの応力理論を適用して光放射圧を求める。FDTDを用いた数値解析アルゴリズムはYeeアルゴリズムと呼ばれるものである。Yeeアルゴリズムでは、Maxwellの方程式を時間並びに空間について差分化をおこなう。このとき一般的に1次中心差分を用い、時空間での電場と磁場の配置は食違い格子[265]による差分法を用いる。つまり、時間差分を$\Delta t$とした時、電場は$t = (n+1)\Delta t$で与えられるのに対し、磁場は$t = (n+1/2)\Delta t$で与えられる。

$$\frac{\mathbf{E}^n - \mathbf{E}^{n-1}}{\Delta t} = -\frac{\sigma}{\varepsilon}\mathbf{E}^{n-1/2} + \frac{1}{\varepsilon}\nabla \times \mathbf{H}^{n-1/2} \quad \text{(3.23a)} \qquad \frac{\mathbf{H}^{n+1/2} - \mathbf{H}^{n-1/2}}{\Delta t} = -\frac{1}{\mu}\nabla \times \mathbf{E}^n \quad \text{(3.23b)}$$

ここで、中心差分により、電場$\mathbf{E}^{n-1/2}$は

$$\mathbf{E}^{n-1/2} = \frac{\mathbf{E}^n - \mathbf{E}^{n-1}}{2} \tag{3.24}$$

であるので、式(3.23)は

$$\mathbf{E}^n = a\mathbf{E}^{n-1} + b\nabla \times \mathbf{H}^{n-1/2} \quad \text{(3.25a)} \qquad \mathbf{H}^{n+1/2} = \mathbf{H}^{n-1/2} - c\nabla \times \mathbf{E}^n \quad \text{(3.25b)}$$

となる。ただし、

$$a = \frac{1 - \sigma\Delta t/2\varepsilon}{1 + \sigma\Delta t/2\varepsilon} \quad \text{(3.26a)} \qquad b = \frac{\Delta t/\varepsilon}{1 + \sigma\Delta t/2\varepsilon} \quad \text{(3.26b)}$$

$$c = -\Delta t/\mu \tag{3.26c}$$

である。閉領域の解析手法であるFDTD法では、本研究のような開放領域の問題を取り扱う場合には仮想境界を設け、これを吸収境界という。吸収境界ではYeeアルゴリズムが用いれないため、解析領域の外壁で反射を起こさないよう仮想境界を設ける必要がある。本研究ではHigdonの吸収境界条件を用いた[266]。安定条件として、時間刻みはCourantの安定条件[265]を用い、空間刻みはセルサイズを波長の1/20とした。

**Maxwell応力**　単位体積あたりの電荷密度を$\rho$するとLorentz力を用いて、領域V内で電荷に対する力は

$$\mathbf{F} = \int_V (\rho\mathbf{E} + \mathbf{J}\times\mathbf{B})dV \tag{3.27}$$

となる。これは1電荷に対する力であり、誘電体全体を考えると、その分極電荷に対する力は以下となる。

$$\mathbf{F} = \int_V \rho_P \mathbf{E} dV \tag{3.28}$$

また誘電体の分極電流、磁化電流によって作用する力は、それぞれ

$$\mathbf{F} = \int_V \mathbf{J}_P \times \mathbf{B} dV \tag{3.29}$$

$$\mathbf{F} = \int_V \mathbf{J}_M \times \mathbf{B} dV \tag{3.30}$$

であり、ある領域内にある誘電体が電磁場から受ける力は以下のように書ける。

$$\begin{aligned}\mathbf{F} &= \int_V \left\{(\rho+\rho_P)\mathbf{E} + (\mathbf{J}+\mathbf{J}_M+\mathbf{J}_P)\times\mathbf{B}\right\}dV \\ &= \int_V \left\{(\rho - div\mathbf{P})\mathbf{E} + (\mathbf{J} + rot\mathbf{M} + \frac{\partial\mathbf{P}}{\partial t})\times\mathbf{B}\right\}dV\end{aligned} \tag{3.31}$$

物質中のMaxwellの方程式から得られる関係式

$$rot\left(\frac{1}{\mu_o}\mathbf{B} - \mathbf{M}\right) = \mathbf{J} + \frac{\partial}{\partial t}\varepsilon_o\mathbf{E} + \frac{\partial\mathbf{P}}{\partial t} \tag{3.32}$$

とMaxwellの方程式を用いて変形すれば、式(3.31)の成分式は

$$F_i = -\frac{\partial}{\partial t}\int_V \left[\varepsilon_o \mathbf{E}\times\mathbf{B}\right]_i dV + \int_V \frac{\partial}{\partial x_j}(\varepsilon_o E_i E_j - \frac{\varepsilon_o}{2}E^2\delta_{ij} + \frac{1}{\mu_o}B_iB_j - \frac{1}{2\mu_o}B^2\delta_{ij})dV \tag{3.33}$$

となる。ただし、$\delta$はクロネッカーのデルタである。ここで、

$$T_{ij} = \varepsilon_o E_i E_j - \frac{\varepsilon_o}{2}E^2\delta_{ij} + \frac{1}{\mu_o}B_iB_j - \frac{1}{2\mu_o}B^2\delta_{ij} \tag{3.34}$$

とする。この$T_{ij}$はMaxwellの応力テンソルと呼ばれる。Gaussの発散定理を用いれば式(3.33)は、

$$F_i = -\frac{\partial}{\partial t}\int_V \left[\varepsilon_o \mathbf{E}\times\mathbf{B}\right]_i dV + \int_S T_{ij} n_j dS \tag{3.35}$$

と書くことができる。ここで、第1項の電磁場運動量の時間的変化を無視すれば、

$$F_i = \int_S T_{ij} n_j dS \tag{3.36}$$

を得る。$T_{ij}$ $n_j$は領域Vを囲む面に垂直に作用する圧力を示し、これによって求められた得られた散乱場 (電磁場の勾配) からトラップ力を計算する。

**入射ビームモデル**　解析領域に与える初期値として、入射ビームの電場を与える。前節で述べられたように大気中のレーザトラップでは高いNAで絞られたビームを必要とする。高次の散乱状態ではMaxwellの方程式が収束しないため、集光ビームを電磁場の数値解的に生成することは容易ではない。集光ビームの表現方法は1976年にL.W.Davisによって Helmholtz方程式から導いたモデルが提案され[267]、その後J.P. Bartonによって発展された[268]。一方、Vector spherical wave functions (VSWFs) を用いてビームを表現する方法も提案されており[269, 270]、T.A. Nieminenはこれを用いたT-matrix法で様々な条件化に置けるトラップ特性の評価を行っている[251, 252, 270]。ここではL.W. Davisの提案した方法を用いた。この方法では、ビームは以下の式で表現される。

$$\nabla^2\mathbf{A} + k^2\mathbf{A} = 0 \tag{3.37a}$$

$$\mathbf{E} = -(i/k)\nabla(\nabla\cdot\mathbf{A}) - ik\mathbf{A} \tag{3.37b}$$

$$\mathbf{H}/\sqrt{\varepsilon} = \nabla\times\mathbf{A} \tag{3.37c}$$

AはHelmholtz方程式の解であり、この解は以下の式で表される。ただし、解析領域 $(x, y, z)$は正規化し、$\xi$は$x/\omega_0$、$\eta$は$y/\omega_0$、$\zeta$はDiffraction lengthと呼ばれ、$z/(k\omega_0)$で表現される。

$$\mathbf{A} = A\hat{x} \tag{3.38a}$$

$$A = \psi(\xi,\eta,\zeta)e^{-i\xi/s^2} \tag{3.38b}$$

ここで、$s = 1/k\omega_0$である。この$A$を式(3.37a)に代入すると、

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial\xi^2} + \frac{\partial^2}{\partial\eta^2} - 2i\frac{\partial}{\partial\xi}\right)\psi = -s^2\frac{\partial^2\psi}{\partial\xi^2} \tag{3.39}$$

この$\psi$は$s$を用いて$\psi_0 + s^2\psi_2 + s^4\psi_4 + \cdots$のように展開できる。つまり、$A$は

$$\mathbf{A} = (\psi_0 + s^2\psi_2 + s^4\psi_4)e^{-i\xi/s^2}\hat{x} \tag{3.40}$$

と表すことができ、これをふまえてAを式(3.37a)に代入し、それぞれの$S^{2n}$の項について方程式をたてると、

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial\xi^2} + \frac{\partial^2}{\partial\eta^2} - 2i\frac{\partial}{\partial\zeta}\right)\psi_{2n} = -\frac{\partial^2\psi_{2n}}{\partial\zeta^2} \tag{3.41}$$

となる。L.W. Davisは3次[267]、J.P. Bartonは$\psi$を5次[268]まで$s$を展開し最終的なビーム表現に関する解析解を与えた。今ここでは、$s$は1次とし、よって、式(3.37b)(3.37c)にある電場磁場の成分式は

$$E_x = E_0\psi_0 e^{-i\xi/s^2} \tag{3.42a}$$

$$E_y = 0 \tag{3.42b}$$

$$E_z = -2E_0 sQ\xi\psi_0 e^{-i\xi/s^2} = -2sQ\xi E_x \tag{3.42c}$$

$$H_x = 0 \tag{3.42d}$$

$$H_y = \sqrt{\varepsilon}E_0\psi_0 e^{-i\xi/s^2} \tag{3.42e}$$

$$H_z = -2\sqrt{\varepsilon}E_0 sQ\eta\psi_0 e^{-i\xi/s^2} = -2sQ\eta H_y \tag{3.42f}$$

となる。なお、$NA$は集光されるビームスポットの径$\omega_0$として評価し、その変換式は以下のRayleighの式で与えられる[272]。

$$2\omega_0 = \frac{k\lambda}{NA} \tag{3.43}$$

ただし、$\lambda$はレーザ波長、$k$はビーム径などに関する比例係数で0.25から0.8の値を取る。

### 3.3.2 FDTDシミュレータ確認

作成された電磁場解析シミュレータの妥当性を評価するため、前節で用いた光線追跡法との比較を行う。条件として、レーザは直線偏光で波長1064 nm、NA0.92とする。また捕捉されるプローブ球の屈折率$n$は1.44とし、粒径は8 μmとした。ビームウエストの光軸垂直方向にプローブ球をシフトさせた時のプローブ球に作用する復元力のトラップ効率を比較した。また、シフト方向は偏光方向に垂直および水平の2方向とした。

**解析モデル**　解析領域は光軸に垂直な面にXY軸をに取り、光軸方向をZ軸とした。解析空間サイズはXY軸方向に22 μmおよびZ軸方向に16 μmとした。それぞれセルサイズはλ/20に設定した。プローブ直径は8 μm、屈折率は1.44である。ビームの偏光方向はX軸と平行とし、波長は1064 nm、ビームウェストは0.4 μmとした。解析はビームウェストを固定し、プローブ球の位置をXおよびY方向に相対的に変位させ、各位置での光軸垂直方向の光放射圧を算出した。

**解析結果**　結果を図3.9に示す。それぞれの値は定性的には一致しており、本研究で用いるFDTDシミュレータの妥当性を示す結果であった。しかしながら、定量的にはトラップ効率が15 - 20%程度の相違が発生している。この比較で一概に評価を下すことは難しいが、光放射圧の定性的な評価は十分行えると判断し、以後本シミュレータを用いて解析を行った。

### 3.3.3 反射光

プローブが測定面に対して垂直面に接近したとき、面からの反射光がプローブに再入射し、反射光によって作用する光放射圧はプローブ球の捕捉位置に影響を及ぼす[273-276]。今回、代表的にシリコンを測定面とし、反射光によってプローブ球に作用する光放射圧を解析し、プローブ球に対する影響を検討した。

**解析モデル**　基本的な解析条件は3.3.2項と同様である。測定面はシリコンウェハとし屈折率n = 3.3を与えた。解析は測定面の位置をZ軸 (光軸) 方向に変化させ、測定面との距離を変化させる。各測定面の位置でプローブ球をZ軸方向に変位させ各位置での光放射圧を求め、Z軸方向の光放射圧がプローブ球質量5.25 pgと釣り合うZ位置を解析した。ただし、セル間は線形補間した。

**解析結果**　結果を図3.10に示す。黒丸が解析結果、点線は予想されるプローブの動きを示す。自由空間ではスポットの1 μm程度下方に位置するプローブ球が測定面に接近すると、測定面からの反射光によって上方へ押し上げられる。そのオーダは数μmオーダと無視できない影響となり得る。水平面からの反射光はプローブのばね定数を変化させるという報告もあり、測定において考慮すべき点である。

### 3.3.4 シャドウ効果

レーザトラップ技術のマイクロプローブへの応用において最も大きな課題の1つは入射ビームが遮られることによってプローブ球が変位するもしくは捕捉から外れることである。この影響をここではシャドウ効果とよぶ。レーザトラップでは、集光ビーム外殻成分が特に勾配力を発生させるため、シャドウ効果によって

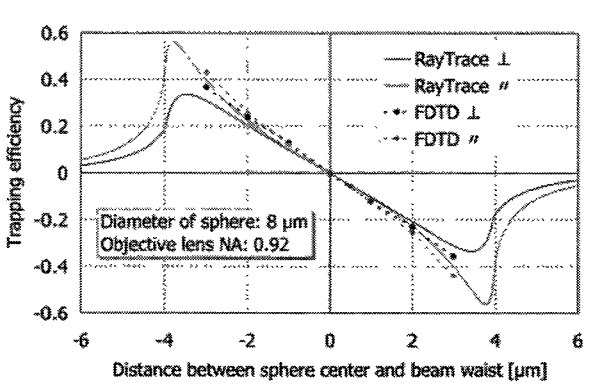



Figure 3.9: Comparison of transverse trapping efficiency between FDTD and ray trace method.

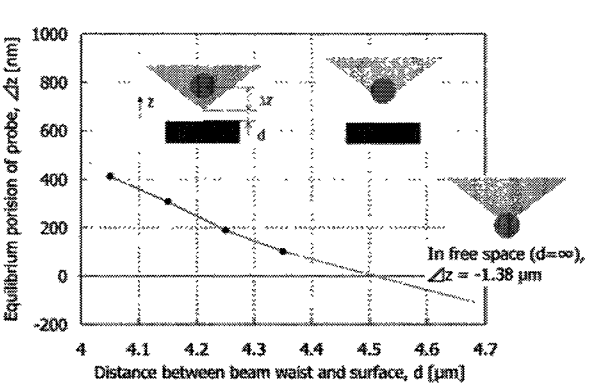



Figure 3.10: Analysis of equilibrium axial trapping position near flat surface.

プローブ球が捕捉状態から外れてしまうという可能性がある。しかしR. Nambiarらの実験によると、シャドウ効果によって直ちにプローブが捕捉から外れることはなく、始めはプローブ球の安定捕捉位置が変位する[277, 278]。これを利用して彼らは捕捉プローブの位置制御を試みた。ここでは、シャドウ効果によって生ずるプローブ球の光軸方向変位に関する影響を検討した。

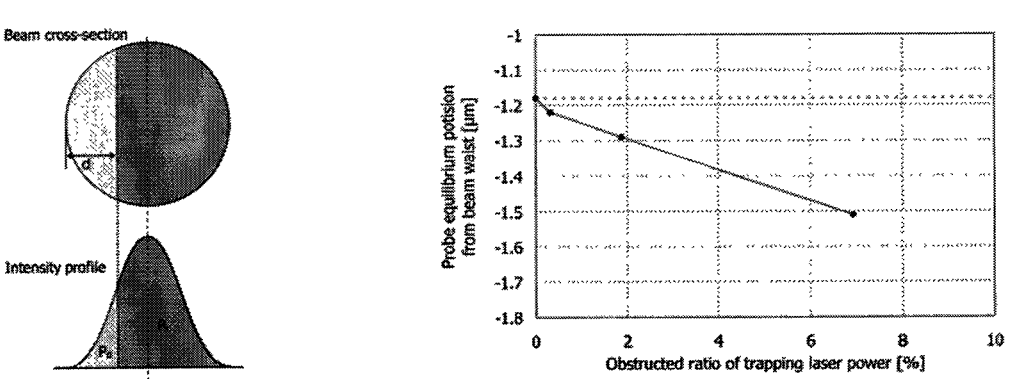
**解析モデル**　前解析と同様に、基本的な解析条件は3.3.2項と同じである。ただし、初期値として与えるビームをX軸方向から遮断、つまり遮られた部分の初期電磁場成分を0とした。ここでビーム遮断の程度を示すパラメータとして遮断率を導入する。図3.11(a)に示すように、ビーム断面を端から距離$d$だけ遮断したとき、遮断されたビーム強度$P_d$の全体の強度$P_0$の割合 (%) を遮断率とした。解析は各遮断率でプローブ球をZ軸方向に変位させ、Z軸方向の光放射圧がプローブ質量と釣り合うZ軸方向の位置を解析した。ただし、セル間は線形補間した。このようにして、遮断率とプローブZ方向の捕捉位置の関係を求めた。

**解析結果**　図3.11(b)は解析結果を示す。黒丸が解析値、赤い点線は初期の捕捉位置を示す。レーザが遮光されると、入射ビーム強度が減少するため、光線追跡の図3.5に見られたように光軸方向の捕捉位置は変化する。しかし、光線追跡法によれば100 mWに対して10 nmの変化であった。図3.11(b)では数%の遮光に対して数百nmの変化が見られる。これは、レーザの外殻成分の遮光のため勾配力が低下することが考えられ、つまり散乱場の大きな乱れが軸方向の捕捉力を低下させた可能性が高い。このように、シャドウ効果はプローブ球の位置および特性を大きく変化させる可能性がある。

## 3.4　結言

本章では、数値解析手法を用いて光放射圧プローブの持つ基本的な特性およびプロービング時に発現する電磁場擾乱による影響について検討した。以下に得られた成果と知見をまとめる。

- 光線追跡シミュレータを構築し、光軸変位するプローブ球に作用する光軸方向の力および、光軸垂直方向に変位するプローブ球に働く光軸垂直方向の力を解析した。
- レーザトラップにより直径8 μmの微粒子に作用する力のオーダは数百pNであった。ばね定数はレーザ強度によって可変であり、50 ~ 150 μN/m程度であった。それによる検出速度が数μm/sec.と見積もられた。
- 捕捉光源について、光軸方向トラップ効率は高NA対物レンズ、輪帯ビーム、ラジアル偏光を用いると改善できる。ラジアル偏光を用いることで、ばね定数の3次元的なばらつきを8%程度に低減可能であった。
- 電磁気学的に光散乱を解析しMaxwell応力で光放射圧を求めるFDTDシミュレータを構築した。
- プローブ球が水平面に近接すると、測定面からの反射光がプローブ球に光放射圧として作用する。その力は測定面に対する反発力となりプローブ球の捕捉位置が無視できない影響を受ける可能性がある。
- 測定中に捕捉レーザが遮光されるシャドウ効果について、プローブ球の光軸方向の捕捉位置の変化を検討した。ガウシアンビームを用いた場合、レーザ強度が遮光されると、そのエネルギ損失が10%以下であってもレーザトラップの散乱場が乱されプローブ球捕捉位置に変化が生じる。




(a) Obstructed ratio.　　(b) Analyzed result.

Figure 3.11: Analysis of axial trapping position shift due to shadow effect.

# 第4章　光放射圧プローブによる位置検出基礎実験

## 4.1　緒論

光放射圧で捕捉されたマイクロ粒子を用いた測定面位置検出の可能性について実験的に検証し、プローブの高感度化を検討する。

## 4.2　プローブ球接近実験

位置検出プローブはプローブ球(もしくは接触子)を測定面に接近させ、接触した時に受ける変位を測定することで表面位置を検出する。レーザトラップの捕捉力はpNオーダである、一方で測定面とプローブ球との接触による吸着力はnNオーダに達する。そのため、本プローブは測定面に非接触で検出する必要がある。したがって、測定面との相互作用でプローブ球が感知可能な力学的作用を受ける必要がある。この際生じる変位を高精度に測定することが高感度の位置検出を可能にする。本節は、プローブ球変位の測定法を提案し、プローブ球と測定面との相互作用を確認することを目的とする。

### 4.2.1　Linnik干渉計を用いたプローブ球位置測定[164-166]

高感度な位置検出のためには、高精度なプローブ球変位測定が必要である。レーザトラップで捕捉された微粒子の変位測定手法は多く提案されており[186, 198, 279-286]、ナノメートルの高分解能を達成する手法もあるが、一般的に測定範囲が狭い。3次元の広範囲にかつ高分解能にプローブ変位を測定する手法は確立されていない。そこで、本研究では新規にプローブの変位を3次元にかつ広範囲に測定する手法を提案する。

高分解の変位測定として干渉法がある。そこで、もっともシンプルで高分解能なMichelson干渉計の原理を用いる。ただし、対物レンズの集光レーザを用いるため、単純なMichelson干渉計ではレンズ収差などの影響により測定できない。そこで、図4.1に示すMichelson干渉計に顕微鏡光学系を組み込んだLinnik干渉計の原理[162]を用いる。Linnik干渉計によるプローブの変位測定原理を述べる。今、プローブが基準位置から測定面の法線方向に変位Δを与えられたとする (図4.2)。プローブ頂点から$k$の位置点Pでの光路長変化を考えると、プローブ変位によって得られる光路長変化は$\delta_k$であり、プローブ半径を$r$とした時$\delta_k$は幾何学的関係より以下で与えられる。

$$\delta_k = \sqrt{r^2 - k^2} + \Delta\cos\omega - \sqrt{r^2 - (k + \Delta\sin\omega)^2} \tag{4.1}$$

ただし、$\omega$は光軸とプローブ球変位方向間の角度である。次に参照面との位相差を考える。高NAの対物レンズではプローブ球へ入射する光の入射角が大きくなり、位相差の補正が必要となる。この補正は傾斜補正係数 (OCF, Obliquity correction factor) によって行える[287]。このOCFはNA factorとも呼ばれ、対物レンズのNAなどに依存する。OCFは対物レンズの瞳関数を$\cos^n\theta$、$\alpha = \sin^{-1}NA$とすると、次式で与えられる[287]。

$$OCF = \left(\frac{2n+2}{2n+1}\right)\left(\frac{1-\cos^{2n+1}\alpha}{1-\cos^{2n+2}\alpha}\right) \tag{4.2}$$

無収差の時$n = 1/2$であり、レンズの振幅透過率が一定の時$n = 0$ (Herschelの条件[288]) を取る。このOCFを用いて、変位$\delta_k$による位相差$\varphi_P$は

$$\phi_p = \frac{4\pi}{\lambda}(\delta_k + Z_p) \times OCF \tag{4.3}$$

となる。ただし$Z_P$は初期位相であり、変位0の時のプローブ球上P点と参照ミラーの光路差である。光路差$\varphi_P$によって生じる干渉縞強度$I_P$は

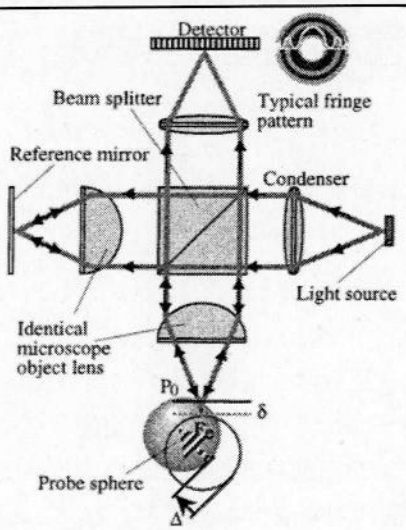



Figure 4.1: Configuration of Linnik interferometer.

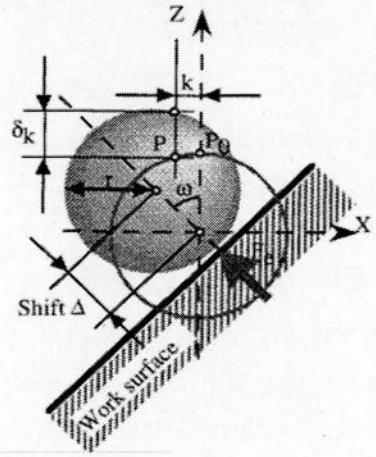


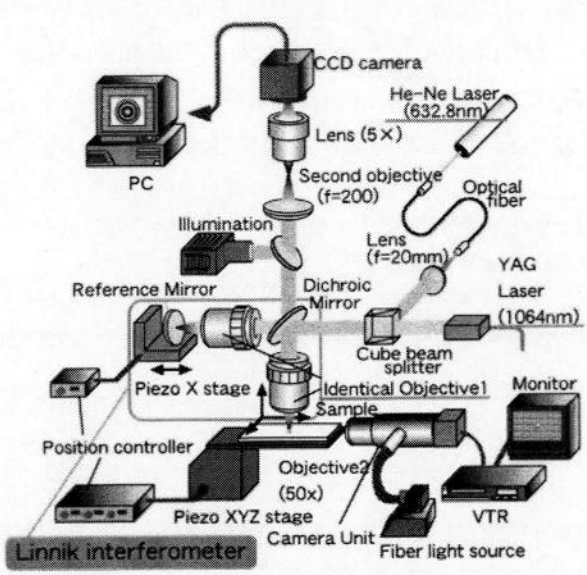

Figure 4.2: Displacement of probe sphere by wall.

$$I_P = (a_R^{\,2} + a_P^{\,2})\left(1 + \frac{2a_R a_P}{a_R^{\,2} + a_P^{\,2}}\cos^2\phi_P\right) \tag{4.4}$$

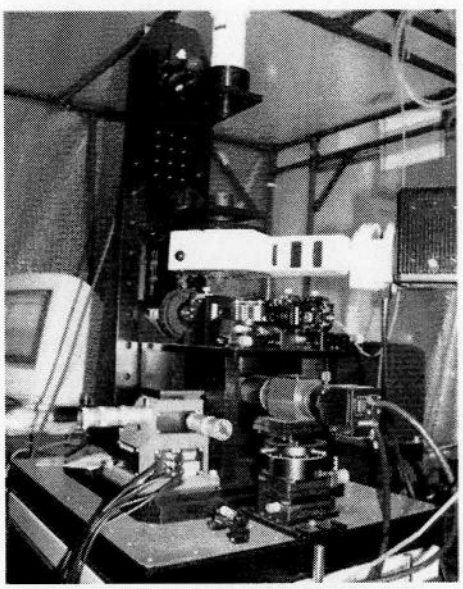
となる。ただし、$a_R$、$a_P$はそれぞれ参照光と物体光の振幅である。これより、干渉縞の明暗はλ/4×OCFの周期で反転することがわかる。この$I_P$を測定することでプローブ球の変位量を測定する。

### 4.2.2 実験装置

本実験に用いた装置について述べる。光学系は大きく3つの機能を持ち、1つはレーザトラップ光学系である。レーザトラップ用にはパルス発振と連続発振を切り替え可能なTEM$_{00}$モードのNd:YAGレーザを用いた。測定には連続発振を用いた。偏光は直線偏光、波長は1064 nmである。対物レンズはNA0.95のものを用い、焦点距離が2.0 mmで作動距離が0.3 mmである。プローブ球には8 μmの球状シリカ球を用いた。Nd:YAGレーザはダイクロイックミラーで反射され、対物レンズに入射し、プローブ球を捕捉する。トラップ方法については後述するが、この実験ではJ. Ikenoらが提案したパルスレーザを用いる手法[240]を採用した。2つ目の機能は観察光学系で、上面観察は照明光、上面CCD、無限遠補正顕微鏡からなり、側面観察は顕微鏡ユニットを用いた。最後に、Linnik干渉計である。干渉計用光源には波長633 nmのHe-Neレーザを用いた。参照ミラー用にもプローブ球捕捉用と同様の対物レンズを用い、参照ミラーには裏面反射を防ぐためにウェッ




(a) Schematic illustration.



(b) Photograph.

Figure 4.3: Experimental setup of the optical system integrating the laser trapping system and Linnik interferometer.

ジ基板を用いた。参照ミラーはピエゾステージ上に設置され光軸方向に位置調整可能である。He-Neレーザはダイクロイックミラーによって振幅分割され、プローブ球と参照ミラーで反射後、上面観察CCD上に干渉光が結像し、干渉像はPCに取り込まれる。また、測定サンプルはプローブ捕捉用の対物レンズの下の3軸XYZステージに設置される。XYZステージはピエゾとマイクロメータにより微動、粗動を持ち、ストロークは20 μm、4 mm、分解能は5 nm、0.05 μmである。

### 4.2.3 参照ミラーの調整

Linnik干渉計では集光ビームを用いているため、コントラストの高い明瞭な干渉縞を得るためには、プローブ球捕捉時の球表面位置と参照ミラーを同じ位置に合わせるように調整する必要がある。まず位置検出に先立ち、実際にプローブ球を捕捉し、干渉信号を確認することで最適な参照ミラーの位置を検討した。

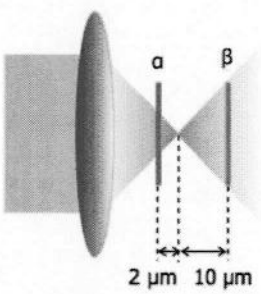
**実験** 捕捉レーザ強度を約100 mWに調整し、プローブ球を捕捉する。参照ミラーの位置が、参照用対物レンズの焦点からレンズに2 μm近い位置(α)と10 μm遠い位置(β)の2通りの場合を考える。それぞれの位置からレンズに向かって500 nmの距離を20 nmピッチで参照ミラーを接近させたとき干渉縞の変化を観察した。

**結果** 図4.4 (b)(c)にα、βそれぞれの参照ミラー初期位置におけるCCD像、同図(d)(e)に同図(b)(c)で示した明暗の位置での干渉縞の変化を示す。スポットから近い方位置 (α) では明瞭な干渉縞を得ることができ、また参照ミラー変位に対応する干渉縞の変化が見られる。一方で、スポットから10 μm離れた位置 (β) では参照ミラー変位に対する干渉縞の変化はほとんど見られなかった。光線追跡解析で予想されたように、プローブ球はレーザスポットから約1 μm下方に捕捉され、つまり、プローブ球表面はレーザスポットよりも1～2 μmほどレンズに近い位置にある。位置 (β) で信号変化が正常に取得できなかった原因は、プローブ球の信号光と参照光の強度比が偏り、干渉縞のコントラストが落ちたためであると考えられる。よって、参照ミラーはスポットから数 μmレンズ寄りに設置することでコントラストの高い干渉縞が得られることが確認された。

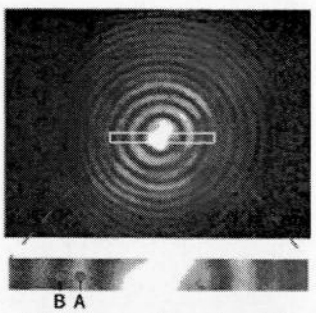
### 4.2.4 プローブ球変位測定

次に、Linnik干渉計によってプローブ球変位を測定可能かを調べる。

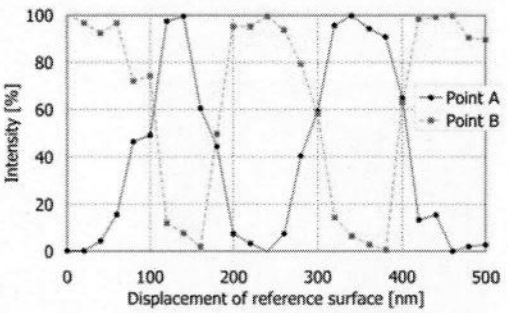
**実験** スライドガラス上に設置したプローブ球をピエゾステージで光軸垂直方向 (X軸) と光軸方向 (Z軸) に変位させ、干渉縞の変化を観察した。前の実験同様、20 nmピッチで500 nmの変位を与えた。



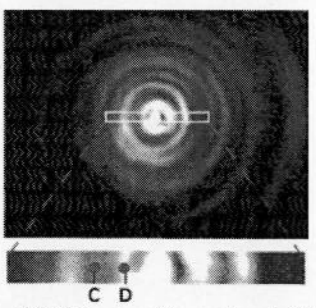

(a) Configuration of mirrors.



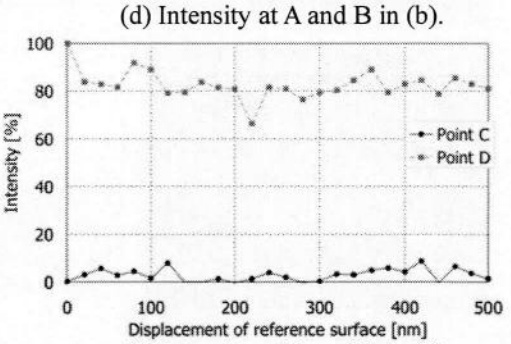

(b) Fringe pattern at point α.




(d) Intensity at A and B in (b).




(c) Fringe pattern at point β.




(e) Intensity at C and D in (c).

Figure 4.4: Adjustment of reference mirror.

**結果**　図4.5に光軸方向変位、図4.6に光軸垂直方向変位を与えた時の干渉縞の変遷を示す。両図(b)-(d)には明、暗、明と3つの干渉縞の変化を示している。図中凡例のRightおよびLeftはプローブ球の左右の位置を表し、同図(a)ではAL1、AR1として示した。また、両図(b)-(d)には式(4.4)より求めた干渉縞強度を合わせて示す。式(4.2)のOCFのパラメータ$n$に関して、OCFの値は理論値と実験値の相違が大きく、古くから最近まで議論されており[287, 289-292]、絶対的な値を決定するのは容易ではない。そこで本研究では、K. Creath [290]の実験値を参考に$n = 1.7$とした。Z軸について、図4.5(a)の縦断する点線を見れば、明暗の変化がよくわかる。また、その明暗の変遷も理論式とよく一致しており、光軸方向のプローブ球の位置が測定できていることが確認できた。次に、X軸に関してであるが、X軸も図4.6(a)を見ると明暗の変化が見て取れる。しかしながら、干渉光強度の変遷 (図4.6(b)) は理論値とはズレがあり、過大に示す傾向が見られた。この要因はプローブ球形状、He-Neレーザのアライメント、プローブ球をスライドガラス上に置いていること、参照面に球を用いていないこと、参照ミラーの調整などが考えられる。理論値との完全な一致は見られなかったものの、相対的な変化は見られるため、このシステムを用いて位置検出の実験を行った。

### 4.2.5　位置検出可能性の検証

本プローブを用いた表面位置検出の可能性を検証すべくプロービングを行った。

**実験**　図4.7(a)に示すように、ガラス球の頂点からX軸方向に約65 μm位置でZ方向にプロービングをする。その後、X軸方向に一度プローブ球をガラス球から離して、次は、X軸方向にプロービングした。測定対象にはNISTによって提供されている標準球を用いた。材料はソーダライムガラスで、ガラス球の公称直径は168±8.4 μmである。ガラス球はXYZステージ上に設置され、プローブ球に対して相対的な変位を与える。

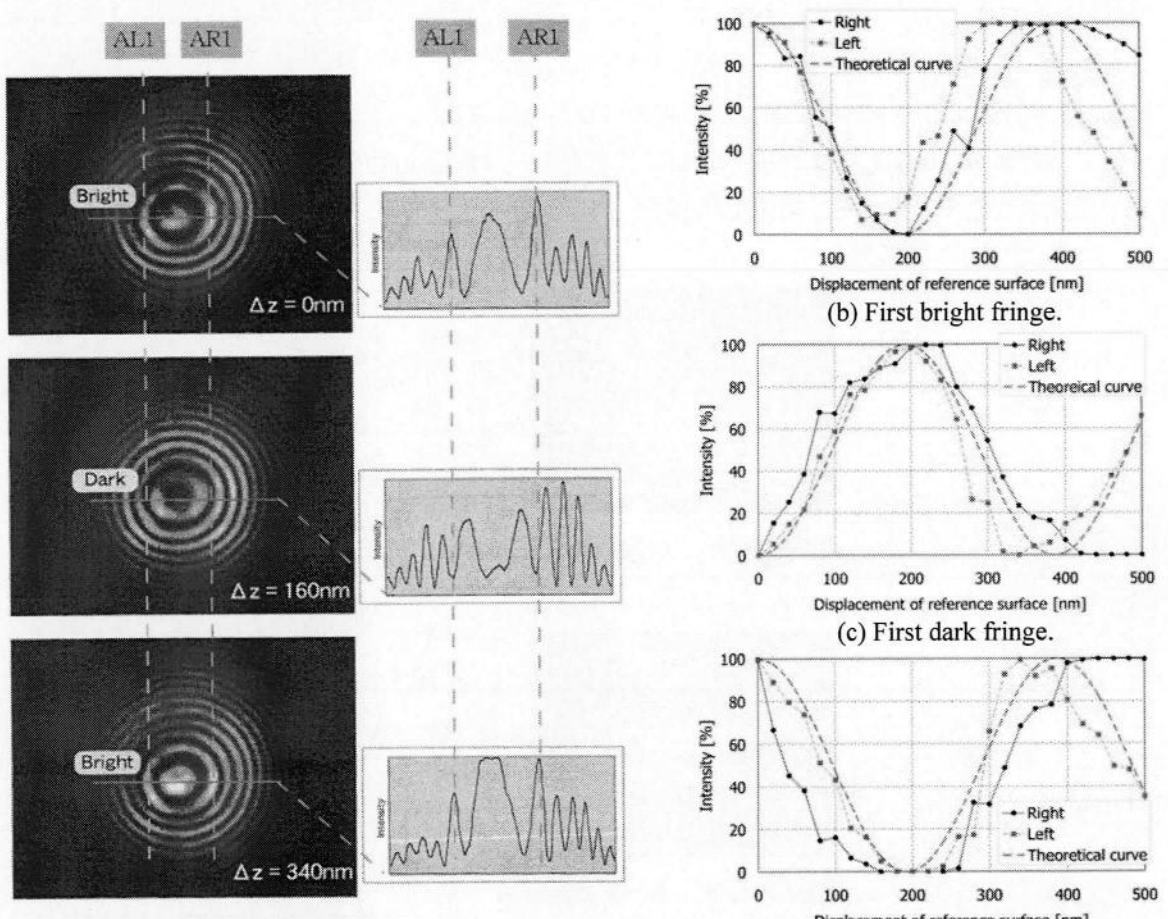



Figure 4.5: Intensity fringe pattern change by probe sphere displacement along with axial direction.

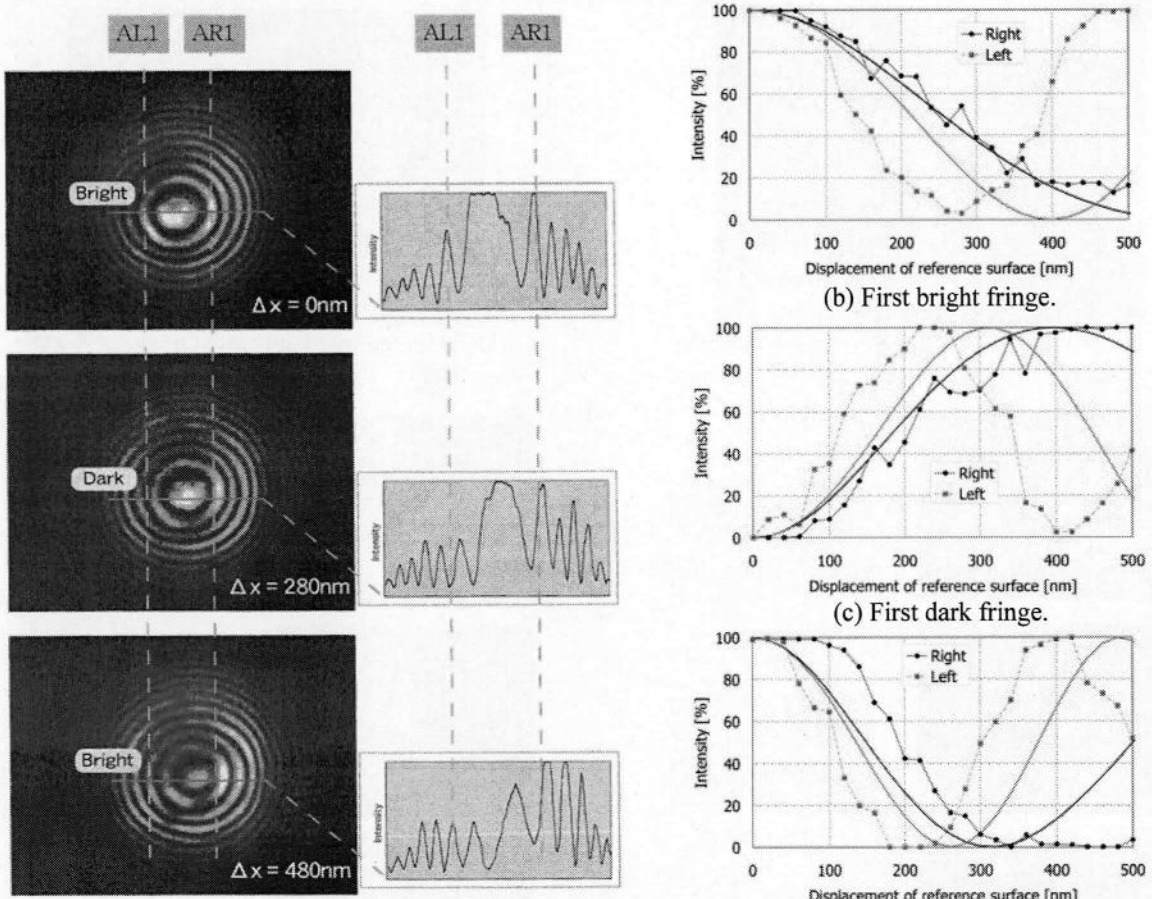



Figure 4.6: Intensity fringe pattern change by probe sphere displacement along with transverse direction.

**結果**　CCDで取得された干渉縞の変化および干渉強度の定点観察 (AL1) 結果を図4.7(b)(d)、図4.8に示す。X、Z軸変化の場合ともにプローブ球が測定面に近接すると干渉縞は全体に偏りが生じ、また干渉縞明暗の反転も確認できた。このようにプローブ球が測定面に近づくと何らか (Unknown) の力でプローブ球が200 nm程度変位する。しかし、変位量が微小であるため、CCD観察では変位方向を確認することは困難であった。

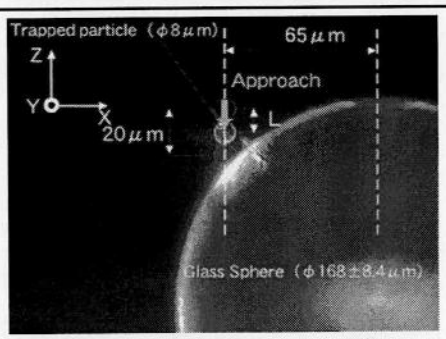
干渉縞測定から、レーザトラップされたプローブ球を測定面に近接させることで、力学的作用によってプローブ球は数百nm変位し、そのプローブ球変位を測定することで測定面の位置を検出することが出来た。

### 4.2.6　標準ガラス球の座標計測

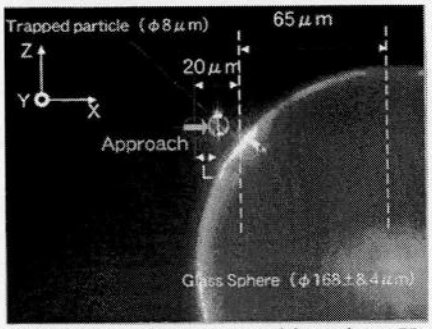
本プローブによる位置検出が可能であった。そこで次に、標準ガラス球の座標計測を行った。

**実験**　干渉縞明暗を観察する方法を用いてガラス球表面を検出し座標測定を行った。座標点検出時のプロービング条件は、上の基礎実験で得られたように干渉縞の明暗が反転した時点とする。プロービングはZ軸上方から測定面に向けて行った。Y軸の測定位置は、ガラス球のほぼ中心をY軸原点 (Y=0 μm) とし、Y=60、50、40、0、-50、-60 μmの6つの断面上で、X軸10 μmのピッチで合計69点の測定を行った。測定ではガラス球をプローブ球に対して相対的にマイクロメータを用いて駆動し、その値を基に検出点に座標付けした。

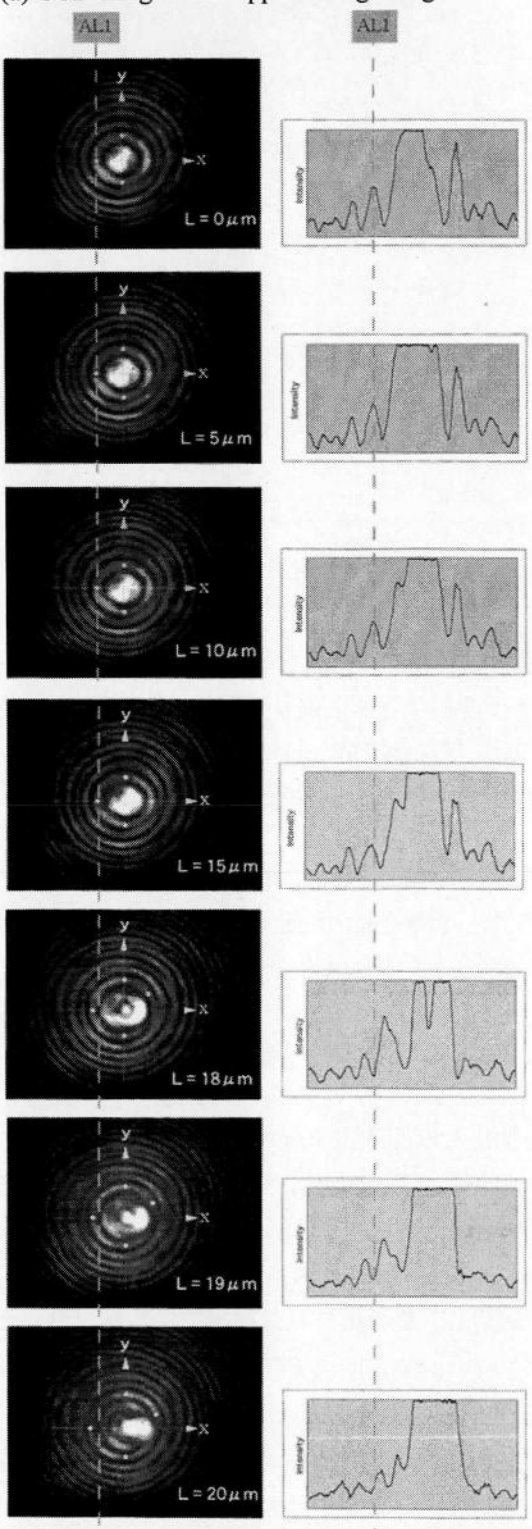
**結果**　測定によって得られた値から球面のフィッティングを行い、測定面の半径を算出したところ、84.2 μmであった。測定サンプルに用いたガラス球の公称半径は84±4.2 μmであることから、測定データの妥当性が確認された。測定データからガラス球の中心座標を求め、その中心座標から各検出座標点の球半径方向に関する誤差を求めた。測定点とフィッティングで得たガラス球半径の最大誤差は27.8 μmと大きい値を示した。Y=60、50、40 μmの断面の測定値を図4.9に示す。凡例のカッコ内は断面頂上 (X=0 μm) の傾斜面角度を示し



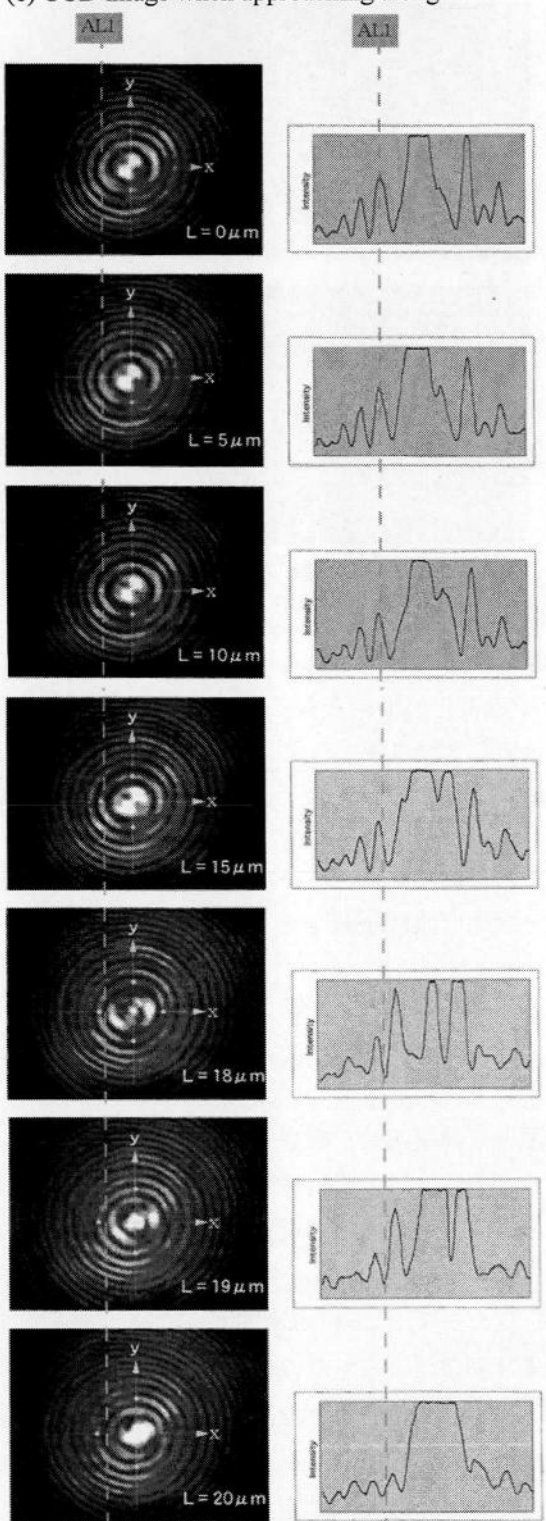

(a) CCD image when approaching along Z-axis.




(c) CCD image when approaching along X-axis.

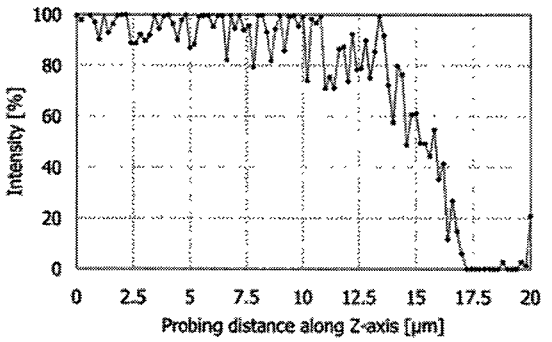



(b) Fringe pattern change approaching along Z-axis.

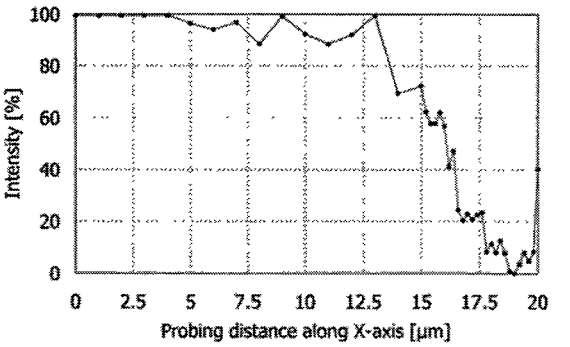



(d) Fringe pattern change approaching along X-axis.

Figure 4.7: Intensity fringe pattern change when probing to standard sphere along X- or Z- axis.




(a) Approaching along Z-axis.




(b) Approaching along X-axis.

Figure 4.8: Interference intensity change at first bright fringe when probing to standard glass sphere surface.

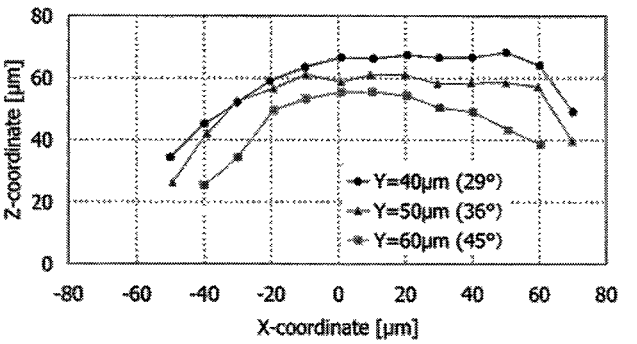



Figure 4.9: Detected coordinate on the standard glass sphere.

ている。図に示すように、測定された断面は必ずしも半円を描いておらず、半球の頂上部 (X=0 μm) から X=40 μmでは形状をトレースできていないため平坦な値をとっている。特に傾斜が浅い断面 (Y=40 μm)ではその傾向は顕著である。光放射圧プローブでは、プローブ座標系の原点はプローブの初期位置にあり、そこからλ/4×OCFだけプローブがシフトしたときに表面位置の座標検出を行う。シフト量は測定面との相互作用力とプローブのばね定数に依存する。3章の解析で得られたように直線偏光を用いたプローブは20%程度の3次元的ばね定数のばらつきがある。また、プローブ球の変位方向によってプローブ球変位測定感度が異なり、光軸と測定面のなす角度に依存して測定精度が悪くなると考えられる。

## 4.3 光軸方向振動プローブ

4.2節の実験によって本プローブが位置検出可能であったが、その感度は低く、高精度な位置検出には課題が残った。AFMでは、コンタクトモードやタッピングモードなど複数の測定モードが存在する[260]。タッピングモードを用いることで、測定面との接触力も極端に低下し、高分解能化も期待できる。本節では、検出の高感度化を目的とし、プローブ球に光軸方向の微小振動を与える振動プローブを提案する。プローブ球の振動状態を観察し、その状態変化の観察による測定面の検出を実施する。

### 4.3.1 プローブ球の光軸方向振動[293-295]

プローブ球に光軸方向振動を与える駆動方法について述べる。光放射圧は非常に微弱な力であるため、プローブ球が捕捉状態から外れないよう、光放射圧と同等の駆動力が求められる。そこで本研究では、プローブ球駆動に捕捉レーザとは別に同軸でLDを入射し、同じ光放射圧でプローブ球を駆動する。LDの光強度を変調させることで作用する光軸方向の光放射圧を変調させ、周期的変位を与える。

次に光軸方向に振動するプローブ球の変位測定法について述べる。プローブ球の光軸方向の変位測定に関して、前節のLinnik干渉計は用いず、プローブ球からの後方散乱光強度を取得する。プローブ球の励振周波数は数百Hzであり、一般的なCCDを用いた干渉計測では応答が追いつかないためである。そこで、信号の応答性を考慮しPD (Photodiode) を用いる。PDは受光量に応じた光電流を出力する素子である。M.E.J. Friese

らによって提案されたPDによる光軸方向の変位測定方法[279]について説明する。信号光には捕捉プローブ球の後方散乱光を用いる。アライメントは、光軸とPDの中心軸を合わせ、PD出力が最大となるように調整する。また光軸方向は、後方散乱光の照射領域がPDの有効面積より大きくなるように調整する。その他、レンズなどの構成は図4.10に示す。後方散乱光をPDで検出する平均光強度$P_{ave}$は

$$P_{ave} = P_{total}\left(\frac{R_{det}}{R_{im}}\right)^2 \tag{4.5}$$

となる。ここで、$P_{total}$は散乱光の全光量、$R_{det}$はPD有効受光領域の半径、$R_{im}$は散乱光照射部の半径である。プローブ球が光軸方向位置に変化した時、散乱光の広がり角$\theta$が変化しないと仮定すると、

$$R_{im} = (L - Z)\tan\theta \tag{4.6}$$

となる。$Z$はチューブレンズの集光点とPDの受光面との距離、$\Delta Z$はプローブ球変動によるチューブレンズのスポット位置の変位である。また、本光学系で得られる縦倍率$M_l$は

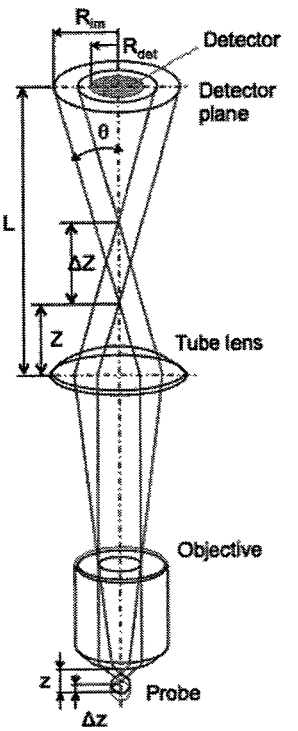


Figure 4.10: Probe axial position measuring system.

$$M_l = \frac{\Delta Z}{\Delta z} \tag{4.7}$$

である。ここで、$\Delta z$はトラップ粒子の光軸方向変位であり、$M_l$は横倍率である。したがってPDの出力値変化$\Delta P_Z$は、上の3式を利用すると、

$$\Delta P_z = \frac{\Delta P_{ave}}{\Delta z}dz = \frac{2P_{ave}M_l}{L-Z}dz \tag{4.8}$$

となる。プローブ位置の微小変位$\Delta z$に対してPDの出力変化$\Delta P_Z$は線型となる。この手法によりプローブ球の光軸方向変位を測定する。

### 4.3.2 実験装置

図4.11(a)に本実験に用いた光学系を示す。レーザトラップには前節と同様のNd:YAGレーザを用いる。本実験では、プローブ球の捕捉効率を向上するため、ガウシアンビームの光軸中心を遮光し、輪帯ビームとする。レーザ光軸中心部の光線はプローブ球を下方に押し下げる散乱力成分として働くため、輪帯ビームを用いることでレーザトラップの光軸方向のトラップ効率改善が期待できる。遮光マスクはガラスに金属膜を蒸着したものを用いた。遮光マスク入射時のレーザ径は3.6 mmで、中央部の直径1.6 mmを遮光する。プローブ駆動に用いるLDは波長が687 nmで、10 mWの強度変調を与える。対物レンズ、プローブ球、観察系、ステージなどは先節と同様である。プローブ球位置測定用の信号光は捕捉用Nd:YAGレーザの後方散乱光を利用する。プローブ球表面で反射されるLDを遮断するため、赤外透過フィルタを用いた。後方散乱光の取得はPDを用い、その信号はPCに取り込まれる。

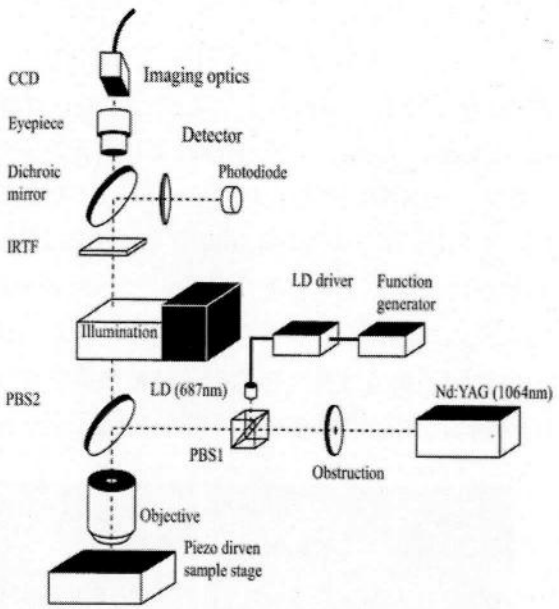
**輪帯ビームの確認**　輪帯ビームを用いた場合の効果について述べる。図4.11(b)に遮光マスク前後のレーザ断面強度分布とその強度プロファイルを示す。遮光マスクを通過したレーザは、光回折の影響によって中心部分はピークを持つが、中央部の強度分布が全体的に低くなっていることが確認できた。輪帯ビームの効果を確認するため、ガウシアンビームと光軸方向トラップ効率を比較する。トラップ効率はプローブ球を捕捉可

能な最小レーザ強度のとき、光軸方向に働く光放射圧とプローブ球が釣り合うという仮定のもと、捕捉レーザの強度を徐々に下げていき、プローブ球が捕捉状態から外れた瞬間のレーザ強度を測定し、式(4.9)を用いて算出した[234]。

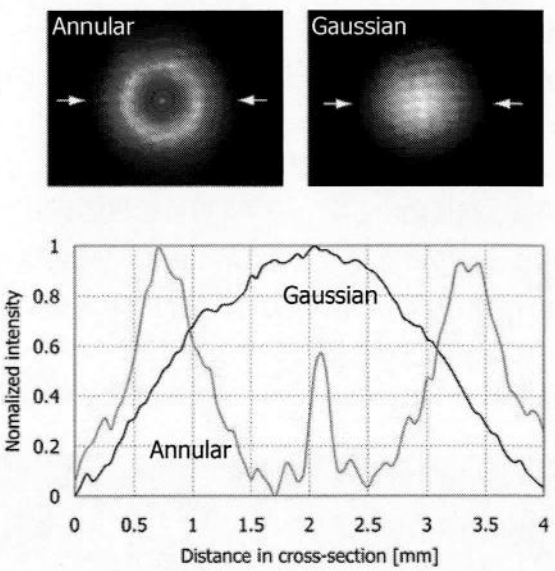
$$Q = \frac{4/3\pi r^3 \sigma g}{nI/c} \tag{4.9}$$

実験の結果、プローブ球捕捉に必要な最小レーザ強度はガウシアンビームでは121 mW、輪帯ビームでは64 mWであり、最大光軸方向トラップ効率は0.013と0.025であった。したがって輪帯ビームによって光軸方向トラップ効率はおおよそ2倍に改善された。遮光マスクによる輪帯ビームを用いることで約半分のレーザ強度でプローブの捕捉状態を保つことができ、トラップ効率の向上を図ることが出来た。

**光軸方向振動の確認**　LDの強度変調を10 mW、86 Hzで与えたときのPDの出力信号とその信号をFFT解析した結果を図4.12に示す。Nyquistの定理を考慮し、サンプリングレートは2.5 kHzとした。図4.12(a)では信号波形が明らかではなくS/N比は低いが、周期的変動が確認できる。また、この時間波形のFFT解析結果より、プローブが86 Hzで振動していることが確認でき、周波数領域では十分なS/N比を得ることができた (図4.12 (b))。これらより、LD強度変調によるプローブ駆動と、PDによる光軸方向のプローブ変位測定が確認できた。また、周波数成分では十分なS/N比が得られたことから、今後の実験では信号の周波数スペクトルに注目し、PSD (Power spectrum density) のピーク強度を振動振幅の目安として用いる。

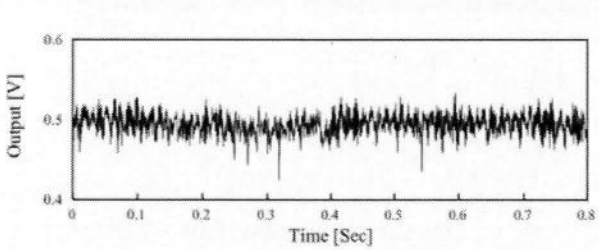



(a) Optical system.

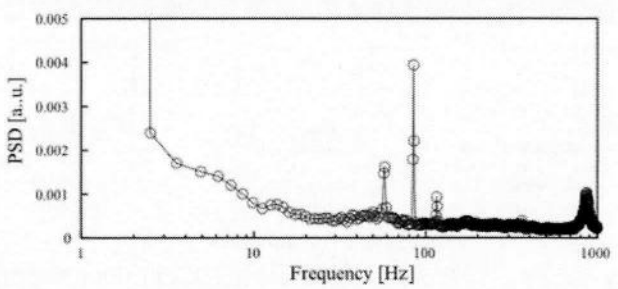



(b) Intensity profile of beam cross-section.

Figure 4.11: Optical system for axially oscillated probe.




(a) Time domain.




(b) Frequency domain.

Figure 4.12: Probe signal of axially oscillated probe.

### 4.3.3 位置検出

光軸方向振動プローブの位置検出性能を評価する。プローブ球に500 Hzの振動を与え、4.2節で用いた公称直径168 μmのガラス球にプローブ球を接近させたときのプローブ球振動変化を観察した。まずプローブ球をガラス頂上付近に接近させたときの信号を図4.13(a)に示す。図中に示すZの値は、プローブ球を測定面に近接させた後、ピエゾステージZ軸によってガラス球をプローブ球に近づけた時のピエゾステージの値である。ピエゾステージは25 nmのピッチで光軸 (Z軸) 方向移動させ、信号の変化を確認した。図に示すように、ガラス球の表面をプローブ球に接近させていくとピーク信号が減衰している。4150 nmから更に25 nm接近させると振動ピークが完全にノイズに埋もれ、プローブ球振動が大きく減衰していることがわかる。測定面の傾斜による検出感度劣化が起きないか確認するため、同様の実験を45 °の傾斜を持った面においても行った。その結果が図4.13(b)であるが、図4.13(a)と同様に、測定面を25 nmピッチで接近させるに従って、振動が減衰していくことが確認された。これより、光放射圧プローブは様々な傾斜面に対して25 nm以上の感度を持つことが確認され、プローブを振動させることによる高感度化が実証できた。

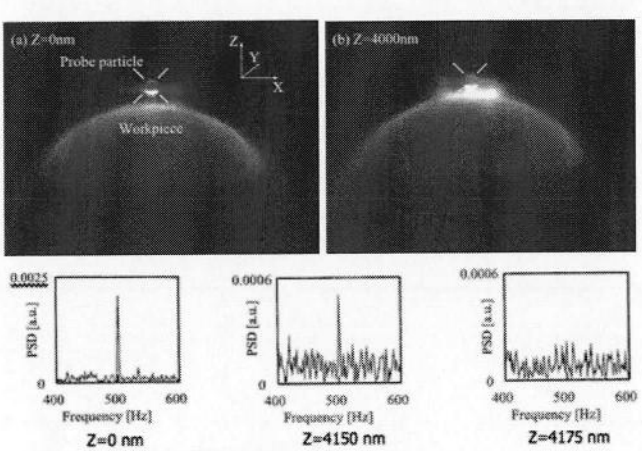
## 4.4 横方向振動プローブ[296, 297]

NSOM (Near-field scanning optical microscopy) などでは光検出プローブが測定面に数百nmまで近づく必要がある。この時、表面位置を検出するため、先端先鋭化プローブを横方向に振動させ、プローブに作用するShare forceを感知して表面を高感度に検出する[298, 299]。前節では光軸方向にプローブを振動させ位置検出を行った結果、25 nm以上の高感度が示された。本研究でもプローブの更なる高感度化を検討するため、プローブ球横振動による位置検出を行う。なお、横振動とは光軸垂直方向を指す。

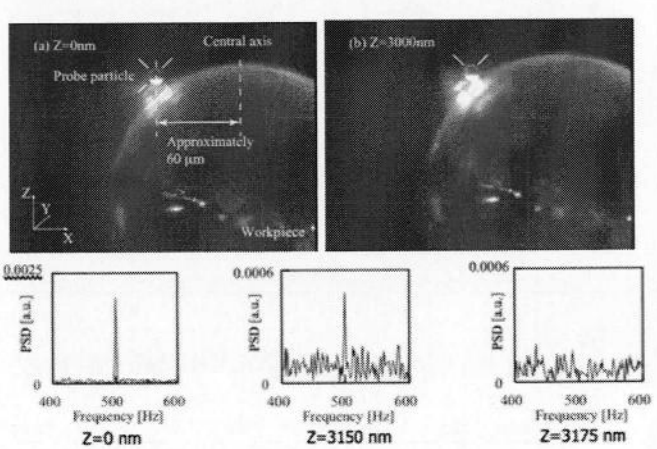
### 4.4.1 プローブ球の横方向振動

プローブ球に横方向振動を与える。その駆動方法の検討は後で詳しく述べる*。ここではプローブ球がレーザスポットに引込まれるという特性を利用して、AOD (Acousto-optical deflector) により集光レーザの焦点位置を焦平面内で変動させ、焦点方向に働く光放射圧でプローブ球を駆動した。AOD原理は後述する。

次に、横振動するプローブ球の位置測定手法について信号検出システムを図4.14に示す。PDの光軸方向の調整は、後方散乱光の照射領域がPDの有効面積よりもわずかに大きくなる程度に調整する。水平方向は、PDの有効面積の半分が後方散乱光の照射領域に覆われるように光軸からシフトさせ調整する。このシフトの方向は測定の対象となる方向である。このときのPDの有効面と後方散乱光の照射領域の幾何関係は図4.14内右上のようになる。プローブ球の横方向変位$\Delta x$により結像面が顕微鏡の倍率に対応した$M_t\Delta x$ ($M_t$: 顕微鏡




(a) On flat surface.




(b) On 45 °-tilted surface

Figure 4.13: Position sensing with axially oscillated probe.

* Subsection 5.2.1 in page 47.

倍率) だけ変位する。PD受光面においても散乱光分布が$M_t\Delta x$だけそのまま平行移動するとみなした時の信号の線形性、つまりPDの受光量変化を幾何学的関係から求めた。ただし、後方散乱光の強度分布を均一とした。PDの有効径を1.5 mm、後方散乱光の照射領域の径を2.0 mmとする。図4.14内右下にその結果を示す。図よりディテクタ面の中心付近において受光量の線形が保たれており、端の領域では線形性から外れていることがわかる。しかし、実際にプローブ球が振動する領域、約-0.1~0.1 mmの範囲ではほぼ線形が保たれており、本実験においてPDを用いた信号検出が適用可能であると考えられる。

### 4.4.2 実験装置

図4.15に本実験に用いた光学系を示す。光学系の基本構成は前節と同様であるため、変更点を述べる。まず、プローブ球を横振動させるためAODを導入しレーザ角度を偏向するが、レーザスポットを偏向するには対物レンズの後ろ側焦点の入射角度を変える必要がある。AODによるレーザの偏向を対物レンズと一致させるため、リレーレンズ系を用いてAODの偏向中心と対物レンズの後ろ側焦点を光学的な共役位置に配置した。AODはガウシアンビームに対して最も高い効率を発揮するように設計されており、よって本実験では輪帯ビームは用いず直線偏光のガウシアンビームを用いた。次に、プローブ球の位置を測定するために、前節ではNd:YAGレーザの後方散乱光を用いた。本実験ではNd:YAGレーザは偏向するため使用できない。そこで波長633 nmのHe-Neレーザを Nd:YAGレーザと同軸入射し、He-Neレーザの後方散乱光をPDによって受光する。受光器のアライメントは上述の通りである。散乱するNd:YAGレーザやノイズ光を遮光するため、干渉フィルタを用いてHe-Neレーザ以外のPDへの光入射をカットする。

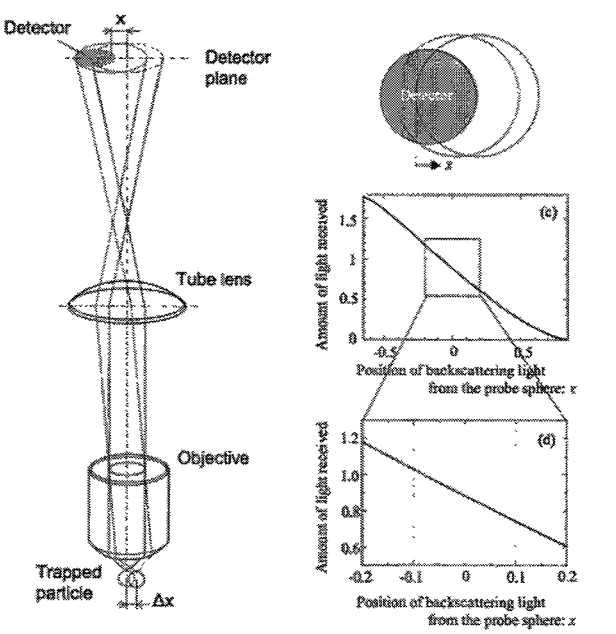



Figure 4.14: Probe transverse position measuring system.

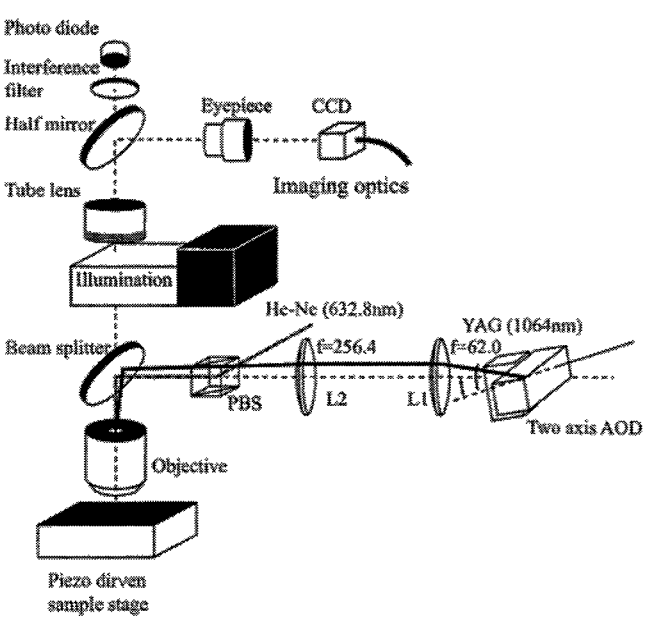
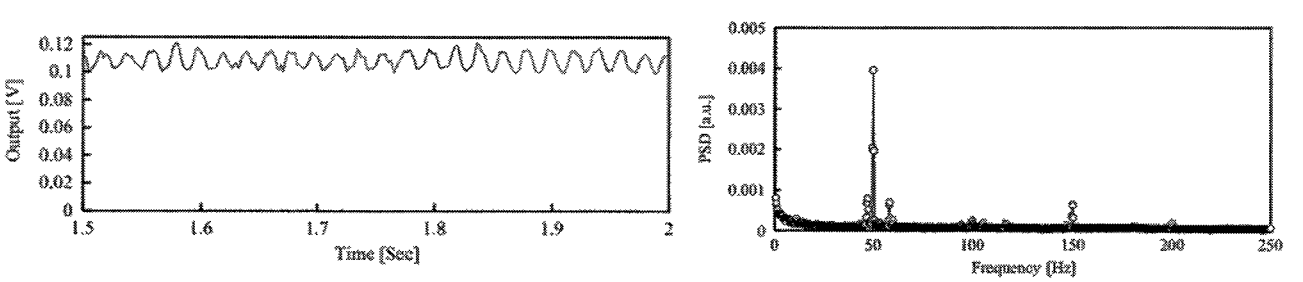



Figure 4.15: Optical system for transversely oscillated probe.




(a) Time domain.

(b) Frequency domain.

Figure 4.16: Probe signal for transversally oscillating probe.

**光軸方向振動の確認**　プローブ球に800 nmの変位を50 Hzで与えたときのPD出力信号とその信号をFFT解析した結果を図4.16に示す。サンプリングレートは2.5 kHzである。信号波形が周期的に変動し、ほぼ正弦波をであることが確認できる。この時間信号のFFT解析結果より、プローブ球の50 Hzでの正弦振動を確認でき、十分なS/N比を得ることができた。前節同様にこのPSDのピーク値を信号振幅の目安として用いた。以上より、AODを用いたレーザ偏向によるプローブ駆動と、PDによる横方向プローブ変位の測定が確認できた。

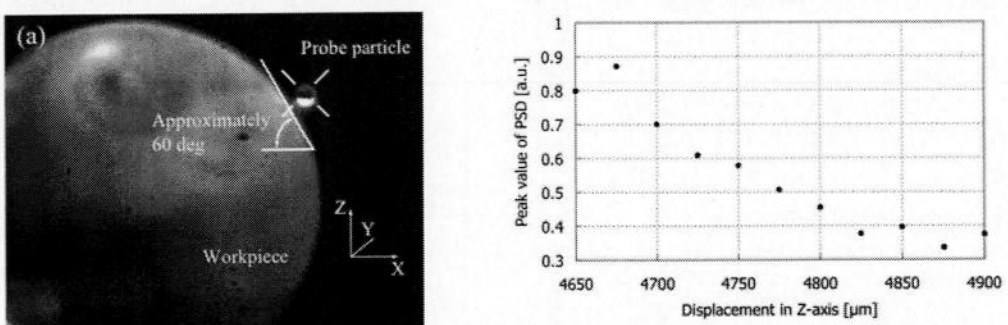
### 4.4.3　位置検出

横振動プローブの位置検出特性を評価するため、プローブ球に周波数100 Hzで振幅40 nmの振動を与え、測定面にプローブ球を接近させたときの振動挙動変化を観測した。これまでと同様の直径168 μmの標準球を測定サンプルに用いた。ガラス球の傾斜角度60 °、45 °付近でZ方向からプローブを接近させた。図の横軸は前節と同様に、マイクロステージでプローブ球にガラス球を近接させた後、ピエゾステージによって微動した値を示す。光軸方向振動の時と同様にピエゾステージを25 nmピッチで移動させ、信号変化を確認した。図4.17に60 °時の図と信号変化を示す。図に示すように、プローブ振動が25 nm進むごとに振幅が徐々に減衰することが確認できた。この傾向は45 °の面においても確認された。このように横振動プローブも角度を持った面を25 nmの高感度で位置検出可能であることが確認され、振動プローブの高感度化が確認できた。

## 4.5　結言

本章では、光放射圧プローブによる位置検出の可能性を評価するとともに、位置検出感度の高感度化の検討を行った。以下に得られた知見をまとめる。

- レーザトラップによって直径8 μmの球状シリカ微粒子を3次元的に捕捉可能であり、プローブ球として用いた。また、Linnik干渉計を用いてプローブ球の200 nm程度の変位を測定可能であった。
- プローブ球が測定面近傍に接近すると、力学的作用が働き、プローブ球の捕捉位置が数百nmオーダで変化することがわかった。この力を用いて、光放射圧プローブによる表面位置検出が可能であった。
- 遮光マスクを用いて生成した輪帯ビームを用いることで、ガウシアンビームに比べて光軸方向トラップ効率を2倍に改善することができた。
- レーザトラップされたプローブ球にLDによる光放射圧で駆動し、光軸方向振動を与えた。捕捉レーザであるNd:YAGの後方散乱の光量を測定することでプローブ球の光軸方向の位置を測定した。これを光軸方向振動プローブとし、本振動プローブを測定面に接近させると、振動が減衰し、その感度は25 nm以上であることが確認された。
- AODを用いて対物レンズのレーザスポットを焦平面で振動させることでプローブ球の横方向の位置を制御する。プローブ球に同軸入射するHe-Neレーザの後方散乱光の光量を測定することで、横方向のプローブ球の位置を測定した。これを横方向振動プローブとし、プローブ球を測定面に接近させると、光軸方向と同様に、振動が減衰がみられた。また、その感度は25 nm以上であることが確認された。




(a) CCD image of probing.　(b) Amplitude of probe oscillation.

Figure 4.17: Position sensing with transversely oscillated probe.

# 第5章　プローブシステム設計および試作

## 5.1　緒言

プローブ球の振動減衰の現象に対する理解を深め、高感度なマイクロプローブを実現するため、本章ではプローブシステムの設計および試作を行う。

## 5.2　設計の要点

### 5.2.1　プローブ球の位置制御

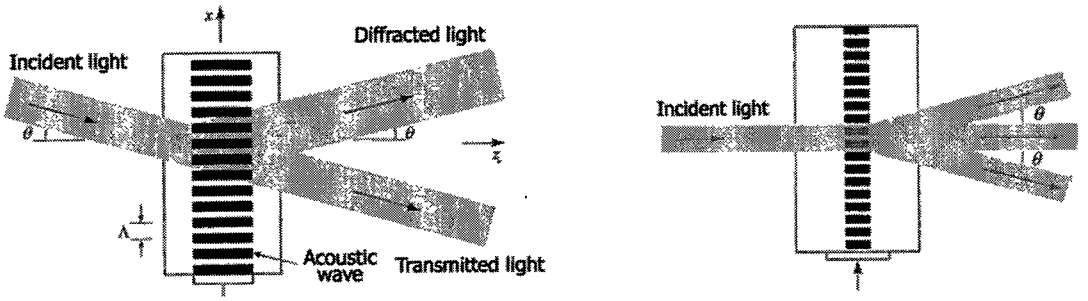
レーザトラップによって捕捉された粒子の制御手法は様々提案されている。先述のように集光ビームを意図的に遮光したり[277]、対向ベッセルビームを用いて[236]、光学ポテンシャルをコントロールすることで、粒子を捕捉する例もある。本研究では、波長に対して比較的大きな粒子を空気中で安定捕捉するために強く集光されたビームが必要になり、上述の例は適用困難である。そこでスポットに集光されることを考慮したレーザ焦点偏向による制御を検討する。スポットの偏向方法はガルバノミラー[203]、焦点可変レンズ[301]、液晶レンズ[300]、SLM (Spatial light modulator) [199]、電気光学素子[202]、音響光学素子[284]を利用した方法がこれまでに提案されている。

まず、液晶およびSLMは焦点位置を3次元的に変化させることができ、特にSLMでは複数のスポットを発生させることができる。近年、SLMを用いた多くの研究成果が報告されている†。しかし、これらの方法は素子のレーザ耐力が低く、弱い強度のレーザしか用いることができない。大気中で安定に粒子を捕捉するためには、対物レンズ後で数百mWのレーザ出力が要求されるため、素子に入射する段階では、少なくとも1 W程度が必要である。次にガルバノミラーは、2組のミラーを機械的に偏向させてビームを制御するため、大きい偏向角を得ることは可能である。しかし、機械動作のため高周波数に対応できない。本研究で求める制御の周波数帯域は、プローブ共振周波数が数千Hzから考えると、10 kHz程度が必要である。現在一般的に得られるガルバノミラーの有効帯域は1-2 kHzであり、本研究には適さない。焦点可変レンズも同様に周波数帯が適さず、また光軸方向のみに可変であることから本研究では用いなかった。電気光学素子は、荷電すると屈折率が変化する特殊な素子を用いる。高周波数帯域まで対応可能であり、入射ビームをそのまま偏向するため、エネルギのロスが数%と小さい。この様にメリットが大きいものの比較的高価であるため、レーザトラップ技術への適用例は少ない。最もよく用いられている方法が音響光学偏向器である。AODは結晶素子に超音波振動を与えて擬似的な回折格子を発生させ、回折角度を変えることでビームを偏向する。超音波振幅を変えることで回折効率を変化させ、透過光強度も制御可能なAOM (Acousto- optical modulator) としても用いることができる。本研究ではこのAODを用いて、プローブ球の位置制御を行う。

AODの原理を述べる [302]。AODはその名の通り音響光学効果 (Acousto- optical effect)を利用した光偏向器である。$TiO_2$結晶素子にピエゾアクチュエータを用いて音響平面波を与える。図5.1(a)に示すように、調和的音波にともなう屈折率変化は光散乱に影響を及ぼし、その相互作用はBragg回折と呼ばれる。光と音の波長をそれぞれ$\lambda$、$\Lambda$、光の入射角を$\theta$とするとBragg条件は$\sin\theta = \lambda/2\Lambda$で表せ、この条件を満たす$\theta$をBragg角という。特に薄い音響平面波に光が入射するとき (図5.1(b)) はRaman-Nath回折といわれ、AO素子は回折格子として働く。この時のBragg条件は$\sin(\theta/2) = \lambda/2\Lambda$で満たされるため、よって1次回折光の偏光角は$\lambda/\Lambda$となる。音響波の波長を音響波の速度$v$と周波数$f$で表すと、$v/f$となるため、走査角$\delta\theta$は音響波の周波数変化$\delta\theta$を用いて、

$$\delta\theta = \lambda f / \delta v \tag{5.1}$$

† 近年のHolography optical tweezersと呼ばれるものにはほとんど使用されていると言って過言ではなく、ここでは特に示さないが実際かなり多くの発表が行われている。




(a) Bragg diffraction. (b) Raman-Nath diffraction.

Figure 5.1: Acousto-optical effect[302改].

となる。Bragg反射の反射率$R$は

$$R = \sin^2 \sqrt{\frac{\pi^2}{2\lambda^2}\left(\frac{L}{\sin\theta}\right)^2 MI} \tag{5.2}$$

で表される。ただし、$M$は音響素子の物質パラメータ、$L/\sin\theta$は光侵入距離、$I$は音響波の強度である。

### 5.2.2 プローブ球の位置計測

捕捉プローブ球の位置を測定する方法もこれまでに多く研究され、特にPFM (Photonic force microscopy) では、プローブ球位置の測定精度が計測精度に寄与するためよく検討されている[279-286]。本研究でも、プローブ球位置を高精度に計測することは重要である。プローブ球変位はシャドウ効果や反射光によって数μmオーダに及ぶ。また、プローブ球の制御は数十nmの分解能を持つ。つまり、数十nm以下の測定分解能が求められる。現在、プローブ球の変位計測には次の方法が提案されている。CCDを用いた直接観察[285]、前方散乱光[198]または後方散乱光[279]を用いる方法、および蛍光染色による暗視野観察[273]である。

まず、前方散乱光取得は構成上不可能である。蛍光染色による手法はプローブ球の特殊加工が必要となり、かつ精度が低い。CCDによるプローブ球の直接観察は、本プローブの動きをとらえるためには10 kHz程度の応答性が求められ、そのためには高速CCDカメラを用いる必要がある。高速CCDは寸法が大きく、プローブシステムの巨大化を招くこと、および十分な光量を得るために対向照明が望ましいが、構成上対向照明は難しく、採用困難であった。したがって、本研究では後方散乱光を用いた測定を行う。後方散乱光の取得方法も種々提案されているが、マイクロオーダ微粒子の3次元変位を広範囲に測定できる方法は未だ提案されていない。4章で用いた後方散乱光の受光量を制御する手法は線形性は低いものの高感度で応答性も高い。しかし、一方向のみの測定が可能であり、3次元的な変位を受けた場合、それらの影響が重複し、測定が正しく行えない。そこで本論文では基本的にはこの方法を用いるが、実験目的に応じ、2次元方向に測定可能なQPDやPSDも適宜用いた。基礎実験として6、7章ではPDとQPDを用いた。8章ではPSDを用いた。

## 5.3 光放射圧プローブ光学系

プローブシステムの光学系は4つの機能が求められる。光学系を図5.2に示す。まずレーザトラップである。捕捉用レーザには波長1064 nm、直線偏光、最大出力2 W、$TEM_{00}$シングルモード、連続発振のイットリウムファイバレーザを用いた。プローブシステムの小型化のためファイバレーザが適している。偏光方向は最もAODの効率が高くなる方向に設定している。ファイバから出た光はコリメータレンズによって直径1 mmにコリメートされる。その後、対物レンズの後方開口よりも少し大きくなるよう、リレーレンズ系によってビーム径が約4 mmに広げられる[233]。ハーモニックセパレータを経て対物レンズに入射する。ハーモニックセパレータは、捕捉レーザ ($\lambda = 1064$ nm) を反射し、位置検出用LD ($\lambda = 640$ nm) を透過する様に設計されている。偏光制御は、光学系の図5.2のAの箇所に軸対象偏光変換フィルタ[244]を挿入することで行われる。

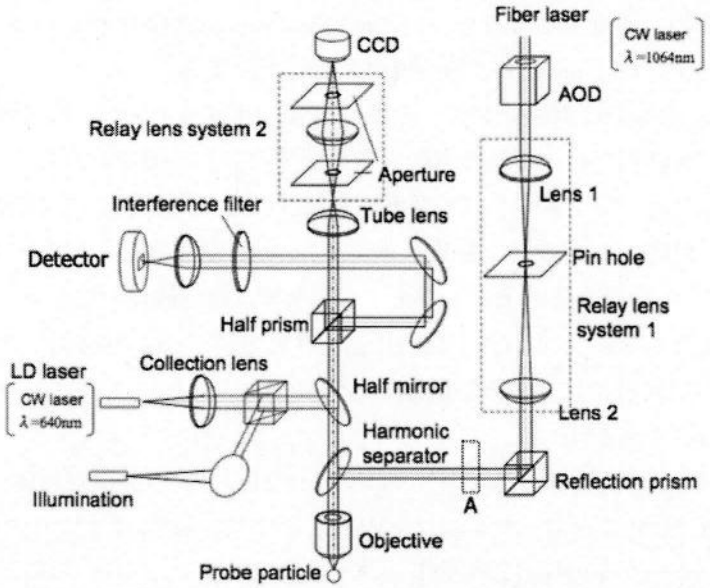



Figure 5.2: Optical system of the probe base on the laser trapping technique.

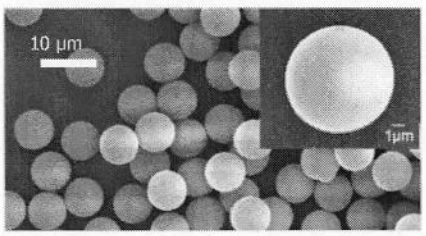



Figure 5.3: Silica particles for probe sphere.

プローブ球用には直径8 μmの球状シリカ微粒子を用いる。LCDスペーサ用に開発されたこの微粒子は、図5.3に示すように、高い真球度と狭い幅の粒径分布を持つ。

次にプローブ球制御である。プローブ球を水平振動させるため、2軸のAODを用いて捕捉レーザを偏向させる。リレーレンズ系を用いてAODの偏向面と対物レンズの後ろ側焦点面を光学的共役にすることで、対物レンズへのレーザ入射方向が制御され、対物レンズの焦点位置はシフトする。このようにAODを用いてプローブを焦点面内で自由に位置制御可能となる。ここでAODの偏向角に対する対物レンズの焦点位置の関係を確認する。AODの偏光角はAODドライバからのFM変調信号で回折密度を変化させることで制御する。本研究で用いたAODドライバの基準信号は周波数27 MHz、振幅50 Vである。1次回折光は最大±8 MHzの周波数変化に対して±13.5 mrad偏向する。つまり、周波数変調$\Delta f$に対する偏向角変化$\Delta\theta$は

$$\Delta\theta[mrad] = \frac{27}{16}\Delta f[MHz] \tag{5.3}$$

という関係を持つ。対物レンズのレーザスポット位置変化$\Delta x$はピンホール面上での変位$\Delta x'$と共役であり、対物レンズの焦点距離$f$とLens2の焦点距離$f_2$より、

$$\Delta x[mm] = \frac{f}{f_2}\Delta x'[mm] \tag{5.4}$$

となる。ピンホール面でのスポットの変位量はLens1によって次の式により決定される。

$$\Delta x'[mm] = f_1 \tan\Delta\theta[rad] \tag{5.5}$$

今、式(5.3) (5.4) (5.5)を用いると、

$$\Delta x[mm] = f\frac{f_1}{f_2}\frac{27}{16}\Delta f[MHz]\times 10^{-3} \tag{5.6}$$

ここで、AODドライバの周波数変調は、ファンクションジェネレータの入力信号によって制御されている。このファンクションジェネレータの振幅1 $V_{P\text{-}P}$に対してAODドライバの周波数は18 MHz変化する。ファンクションジェネレータの信号振幅V [mV]と$\Delta f$の関係は、$\Delta f$ [MHz] = 18 × $10^{-3}$ $V$ [$mV_{P\text{-}P}$]である。この関係とそれぞれのレンズの焦点距離、$f_1$ = 62 mm、 $f_2$ = 256.4 mm、$f$ = 1.8 mmを考えると

$$\Delta x[nm] = 13.2V[mV_{P-P}] \tag{5.7}$$

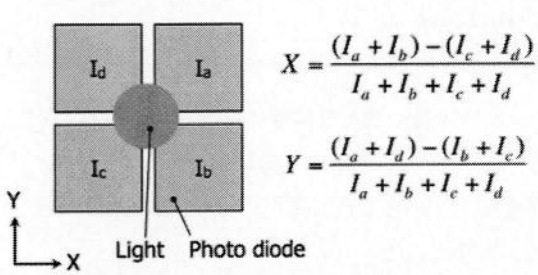
となり、ファンクションジェネレータで1 $mV_{P\text{-}P}$の信号を入力すると、13.2 nm (26.4 $nm_{P\text{-}P}$) の振幅でレーザスポットは移動する。このように焦平面内でスポットは15 nm程度の分解能で制御可能である。

3つ目の機能はプローブ球の上面観察である。結像系は対物レンズ、結像レンズ、リレーレンズ、CCDから成り立っている。対物レンズ焦点近傍で捕捉されたプローブ球の像は対物レンズ及び、結像レンズによって、結像レンズの焦点面に結像される。さらにリレーレンズによって像転写され、CCD面に拡大されて結像される。このときの総合倍率について述べる。対物レンズの焦点距離$f$、結像レンズの焦点距離$f_1$、リレーレンズの焦点距離$f_2$、リレーレンズにおける像転写の距離をそれぞれ$a$、$b$とする。まず、物体像は対物レンズ、結像レンズによって$f_1/f$に拡大される。次にリレーレンズによって$b/a$に拡大される。よってCCD面での拡大率は$f_1/f \times b/a$となり、実際の設計ではCCD面で230倍に拡大される様設計した。また、プローブ球はテレセントリック照明法を用いて白色光源によって照明される。

最後は振動プローブ球の位置測定である。測定用光源は捕捉レーザとは別にLDを用いる。LDは直線偏光、波長640 nm、最大出力10 mWで、ファイバによってプローブユニット内に入射する。LDはまずコリメートされた後、ハーフミラー、ハーモニックセパレータを透過し、対物レンズにより集光されプローブ球に捕捉レーザと同軸入射する。プローブ球表面で散乱したLDを再度対物レンズで集光し上面に伝搬する。その後方散乱光を光検出器で受光することでプローブ球の位置測定を行う。この際、捕捉レーザや照明光の検出器への入射を防止するため、干渉フィルタによってノイズ光をカットしLDのみ透過させる。上記のようにレーザトラップされた粒子の後方散乱光の検出には様々提案されており、状況に応じて使い分けられている。本節ではPD、QPDを用いた。PDは4章で述べた†。ここではQPDについて述べる。4分割フォトダイオード (Quadrant photodiode) はPDを4つの素子に分割し、単純な光量だけでなく、後方散乱光の平面位置情報を出力することができる。その構造は図5.4の様になっており、4つのフォトダイオード出力と増幅・演算回路による四則演算によって光スポットのX、Yの変動を出力し、プローブ球の光軸垂直方向のプローブ球の変位を取得できる[204]。また、以降、プローブ信号 (Probe signal) とは、この光検出器の出力信号を指す。

## 5.4 ラジアル偏光 (Radial polarization)

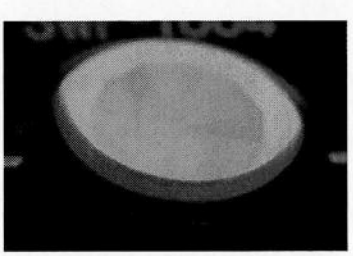
レーザトラップではプローブ球捕捉に数百mWのレーザ強度を必要とするため、安全性の低下や測定物へのダメージが懸念される。捕捉レーザ強度を低くするには高い光軸方向トラップ効率が要求される。3章の数値解析によってp偏光が支配的なラジアル偏光、ビーム中央部に光強度を持たない輪対ビームなどで、光軸方向のトラップ効率の改善策を見い出した。4章では遮光マスクを用いた輪帯ビームによって光軸方向トラップ効率が2倍に改善できた。しかし、遮光マスクではガウスビームの大部分の強度を反射によって失うため光学系全体の効率は改善されない。また、アキシコンレンズ (Axicon lens) を用いて輪帯ビームを生成する手法も提案されており[303, 304]、理論的には高効率を得ることが出来る。しかし実際、アキシコンレンズの成形精度がビーム変換の強度効率に影響し、高い効率が得られない。そこで、本研究ではラジアル偏光の導入を検討した。ラジアル偏光は偏光成分がビーム断面上で光軸に対して放射状に位置している[305]。ビーム中心部では光の位相が180 °違うビームが集まるため、お互いに打ち消し合い、輪帯ビームとなる[243]。



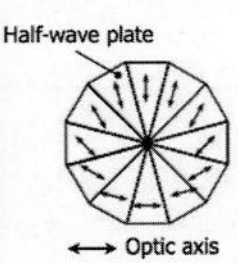

$$X = \frac{(I_a + I_b) - (I_c + I_d)}{I_a + I_b + I_c + I_d}$$

$$Y = \frac{(I_a + I_d) - (I_b + I_c)}{I_a + I_b + I_c + I_d}$$

Figure 5.4: Quadrant photo diode.



(a) Photograph.




(b) Configuration.

Figure 5.5: Polarization conversion fileter.

† Subsection 4.3.1 in page 41 and subsection 4.4.1 in page 44.

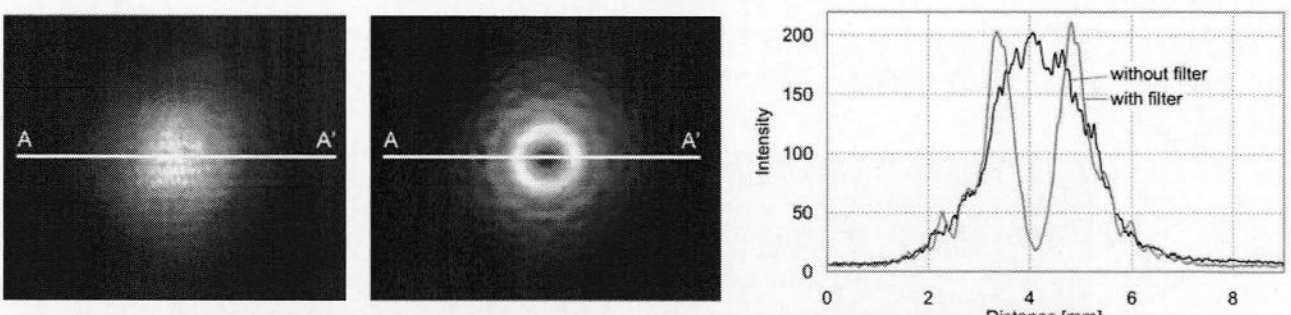
ラジアル偏光ビームを生成するため、本研究では図5.5に示すフォトニック結晶で製造された12枚のλ/2板がケーキのピース状に整列したフィルタを用いる[244]。直線偏光を入射すると偏光方向を光軸放射状に変換する。このフィルタではビームの損失は少なく95%以上の透過率をもつ。図5.2の光学系に示すハーモニックセパレータの直前のAの箇所に設置する。図5.6にラジアル偏光素子を導入前後のビーム断面強度とそのプロファイルを示す。直線偏光ではガウシアンビームであるのに対して、ラジアル偏光では輪帯ビームであることが確認できる。図5.6(c)の強度プロファイルでは、輪帯ビームであることが明らかにわかる。次に、両偏光の対物レンズ焦点のスポットを比較する。A.R. Zakharianらによる数期解析結果と共に図5.7に示した。直線偏光では、図5.7(a)に示すように電場成分のEy成分が顕著に出ており、4つに分割したようなスポットを示した。ラジアル偏光ではEz成分が顕著に現れ、2分割したような分布を示した†。同図(b)(d)のEyとEzの解析解とよく一致しており、軸対称フィルタが機能し、ラジアル偏光が生成されていることが確認できた。

## 5.5 ロックイン検出法 (Lock-in detection)

本研究では振動プローブによる高感度化を行うが、数値解析より光放射圧プローブはきわめて低いばね定数を持ち、そのため、外乱やブラウン運動の影響を受けやすく、S/N比が低くなる。そこで、プローブ信号のS/N比を改善するために、ロックイン検出法を導入する。プローブ信号は様々な周波数のノイズを受け、それによって位置検出精度が劣化する。ロックイン検出は、いわゆるヘテロダイン技術を用いており、検出信号から参照信号の周波数成分のみを抽出する方法である。その原理を説明する。検出信号を$S\times\sin(\omega t+\alpha)$であるとし、参照信号を$\sin(\omega t+\beta)$であるとする。参照信号を2つに分けて0°と90°の位相差を持たせる。それを検出信号に積算すると、

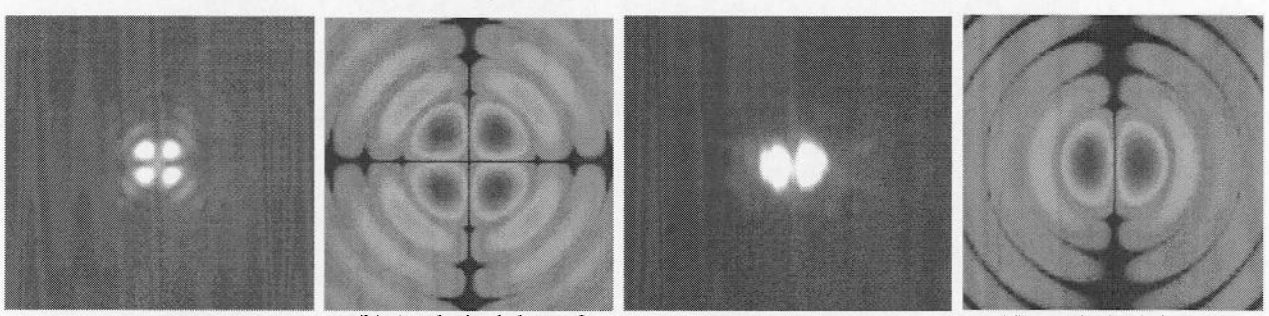
$$S\sin(\omega t+\alpha)\sin(\omega t+\beta)=S\frac{\cos(\beta-\alpha)-\cos(2\omega t+\alpha+\beta)}{2} \tag{5.8a}$$

$$S\sin(\omega t+\alpha)\cos(\omega t+\beta)=S\frac{\sin(\beta-\alpha)-\sin(2\omega t+\alpha+\beta)}{2} \tag{5.8b}$$




(a) Linear polarization. (b) Radial polarization. (c) Intensity profile.

Figure 5.6: Cross-sectional intensity distribution of radial and linear polarized beam.



(a) Experimental data of linear polarization. (b) Analytical data of linear polarization[306]. (c) Experimental data of radial polarization. (d) Analytical data of radial polarization[306].

Figure 5.7: Comparison of intensity profile of laser focus.

†ラジアル偏光は集光レーザ焦点では電場Ez成分の光軸伝搬方向の成分のみになる。そのため、Z偏光とも呼ばれる。

となる。右辺の前項は検出信号と参照信号の位相差を表し、後項は信号と検出の2倍の周波数を持った成分となる。両信号をローパスフィルタに通すと、両方とも右辺の前項、つまり時間変化のない (tを含まない) 直流成分のみが残る。この直流信号をそれぞれ、$X = S/2 \times \sin(\beta-\alpha)$、$Y = S/2 \times \cos(\beta-\alpha)$とおき、この$X$と$Y$を用いて、検出信号の振幅$S$と位相遅れ$\varphi$は

$$S = \sqrt{X^2 + Y^2} \tag{5.9a}$$

$$\phi = \beta - \alpha = \tan^{-1}(Y/X) \tag{5.9b}$$

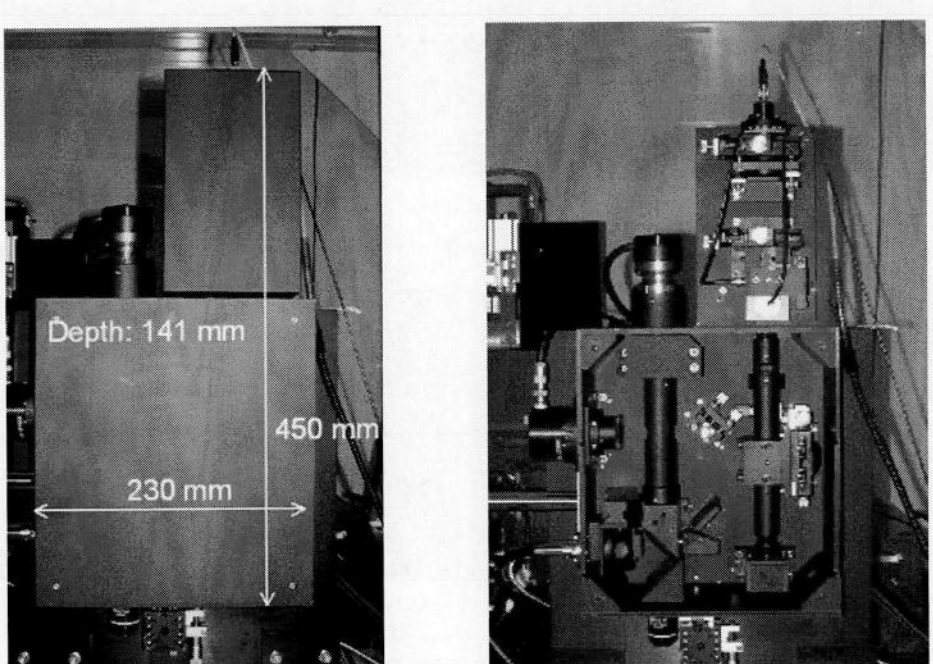
によって得られる。これによって、外乱などの影響を低減し、ノイズ等に埋もれた信号も高いS/N比で測定可能である。本研究では、信号光は光検出器電流出力のIV変換後の電圧信号を用い、参照信号はAODに送られる励振用電圧信号を用いる。

## 5.6 プローブユニットの構成

本章で設計された光放射圧プローブを用いて座標測定を行うために、上述の光学系をステージに搭載可能な小型ユニットを試作した。図5.8に構築されたプローブユニットの写真を示す。同図(a)は外観を(b)は内部の光学系を示している。プローブユニット上方から入射した捕捉用レーザがユニット下端に位置する対物レンズによって集光され、そこでマイクロ微粒子を捕捉しプローブ球として機能する。システムのレーザエネルギ効率は、ファイバレーザ出射時と対物レンズ後で約25%である。レーザの大部分はAOD (約60%損失) および対物レンズ (約30%損失) で損失する。パッケージは後述のステージベースと同様のS45Cが用いられており、表面はレイデント処理[307]が施されている。重量は約13 kgであり、寸法は450 mm (高) × 141 mm (奥) × 230 mm (幅)となっている。

## 5.7 結言

本章では、光放射圧プローブシステムの設計および試作を行った。プローブ球の位置制御にはAODを用いて制御分解能13.5 nmとした。プローブ球の位置は位置測定用光源であるLDの後方散乱光をPDおよびQPDを用いて検出し、測定する。このプローブシステムを用いて、7章以降、振動プローブの測定面近傍での振る舞いを観測し、位置検出原理の解明およびその原理を応用した高感度なマイクロプローブを開発する。




(a) Appearance (dimension). (b) Inside (Optical system).

Figure 5.8: Constructed unit of the micro-probe using laser trapping technique.

# 第6章　座標計測システム設計および試作

## 6.1　緒論

プローブの性能評価には、高精度かつ高分解能なステージシステムが必須である。本章では、5章で述べたプローブユニットを搭載可能なステージシステムの設計および試作を行い、その運動性能を評価する。

## 6.2　ナノ座標測定システムの開発動向

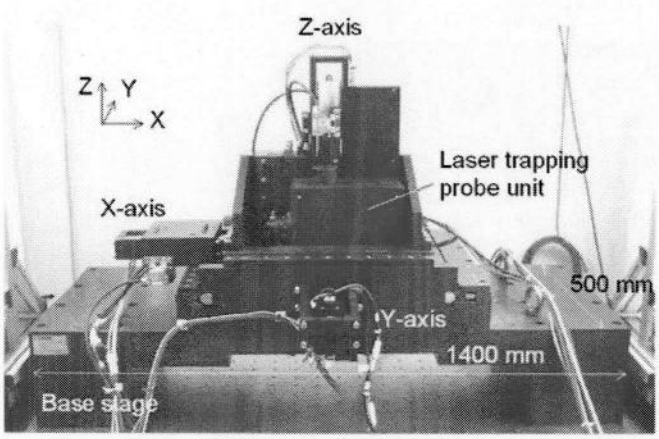
ステージシステムは工作機械などにおいても重要であるため盛んに研究されており、その進歩により加工機の精度は著しく向上した[61]。しかし、測定器に用いるシステムは加工機のそれよりも一桁上の性能が求められる。K. Takamasuらが述べているように、ナノCMMの重要な要素はプローブ、アクチュエータ、テーブル、スケールである[85]。本研究ではマイクロプローブの開発を行うが、その他の3要素と完全に切り離すことは難しく、プローブの性能を正しく評価するためには、高精度なステージシステムは欠かせない。1990年代プローブ開発が盛んであったヨーロッパでは、近年、企業などでの開発が目覚ましく、Eindhoven大学[92, 308]、SIOS社 NMM1[151]、Carl Zeiss社[110]、NPL[89]、PTB[100]などが数ナノメートル以下の分解能と100 mm程度のストロークおよび100 nm以下の3次元不確かさのステージシステム構築し、それによってプローブ開発が益々盛んになっている。高精度な座標ステージは干渉計などを用いてAbbe誤差をゼロにするメトロロジーフレームを取りれ不確かさ低減を達成している。アジアでもステージの開発は行われており、国立台湾大学のK.C. Fanは有限要素法を用いて構造解析を行っている[94, 95]。東京大学のK. Takamasuらはフリクションドライブを用いたシステム開発を行い[309]、Mitutoyo社のNanocordでも同様に用いられている[114]。静岡大学では、直交3軸ではなくパラレルメカニズム構造を用いたステージを提案している[310]。産業技術総合研究所 (AIST) でも現在マイクロCMM (M-CMM) を試作しており、K. Takamasuらは2009年に新たにマルチプローブ法[314]を用いたステージの評価方法を報告した[311]。

## 6.3　計測システム装置の概要

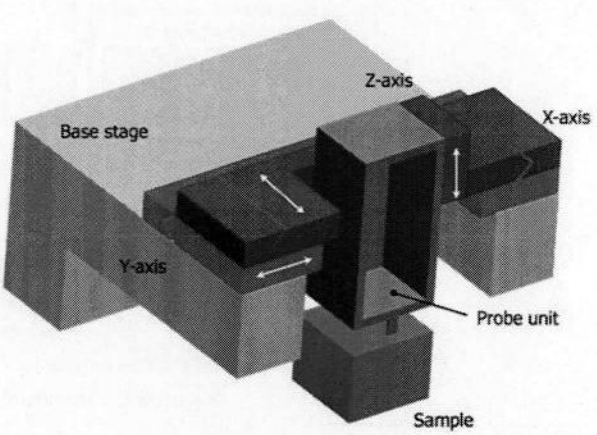
図6.1に本研究で試作した装置の写真を示す。本システムは大きく分けて4つに分類できる。

I. 位置検出プローブ：測定物の表面を検出するセンサの役割を果たす。
II. 位置決めステージ：位置検出プローブを移動させ、検出された点に座標付けを行う。
III. ステージベース：位置検出プローブと位置決めステージを支える。
IV. 制御システム：ステージのフィードバック制御を行い、またプローブ信号および座標付けを行う。

ステージベースはゲートタイプとなっている。ステージベースの下にワークを運ぶステージが位置し、測定対象はステージベース下部のプローブ球の下で計測される。ステージベースは、計測器を支えるため、荷




(a) Photograph of system.




(b) Illustration of system configuration.

Figure 6.1: Coordinate measuring system with the probe unit.

重による歪が少なくなるようにFEM (Finite element method、有限要素法) よって解析されている。材料は炭素鋼S45Cが用いられ、表面はレイデント処理[307]が施されている。ステージのサイズは210 mm (高) × 1400 mm (幅) × 500 mm (奥) である。ステージ制御を司る制御盤は、ステージ全軸を統括制御するPMACコントローラ、電流増幅・フィードバックコントロールを行うモータアンプ・コントローラ、ステージ位置検出信号を処理するエンコーダ回路、各装置に電力を供給する電源部から構成されている。計測系を制御するコンピュータはプローブ信号の取込、ステージへのコマンドの送信、ステージ位置座標の取得などを行う。制御ソフトはLabVIEWを用いた。ステージ制御はPMAC†によって行われる。ステージ位置を測定するリニアスケールの値は32bitバイナリで直接コンピュータに送信される。また計測器の周辺機器として、クリーンブースによって計測器全体は覆われており、Class5000程度のクリーン度を保っている。環境温度はCarl Zeissで校正された分解能 5 mKのサーミスタ温度計によって測定されている。本システムはパッシブ制御の除振台上に設置され、外部振動から守られている。パッシブ制御の除振台のため、低周波数に共振ピークが存在する。プローブユニット内AODへの振動信号はコンピュータからGPIB接続されたファンクションジェネレータにコマンドを送ることで行う。そのプローブ球位置情報は光検出器によって読み取られ、A/D変換ボードを介し制御用コンピュータに送られる。この際、プローブ信号とファンクションジェネレータの基準振動信号を同期させることで、プローブ信号のロックイン検出を行う。一方で、ステージの制御命令はUSB接続されたPMACコントロールユニットに送られる。そのコマンドによってシャフトモータでステージを駆動する。その運動はリニアスケールによって読み取られ、PCに位置情報として送られるほか、回路内にも送られフィードバック制御される。全体の構成図を図6.2に示す。

## 6.4 座標ステージの構成

本計測器の位置決めステージについて述べる。その構造は、図6.1(b)に示すようにXYZの直交3軸構成であり、各軸がそれぞれ積み重ねられたスタック構造となっている。X軸ステージとY軸ステージは水平に構成され、Y軸が下段、X軸が上段に位置する。XY軸と直交する様にX軸にZ軸ステージが設置されている。Z軸にプローブユニットを取付けプローブ球が装置下部にある測定試料にアクセスするため、X、Y軸は中央がくり貫かれた井戸型ステージとなっている。対称井戸型にすることで、力学的に優れ、温度ドリフトも最小に抑えることができる[312]。各ステージの材料はS45C、表面レイデント処理で統一されている。3軸ステージの総重量は約360 kgであり、これらステージはステージベース上に搭載、固定される。

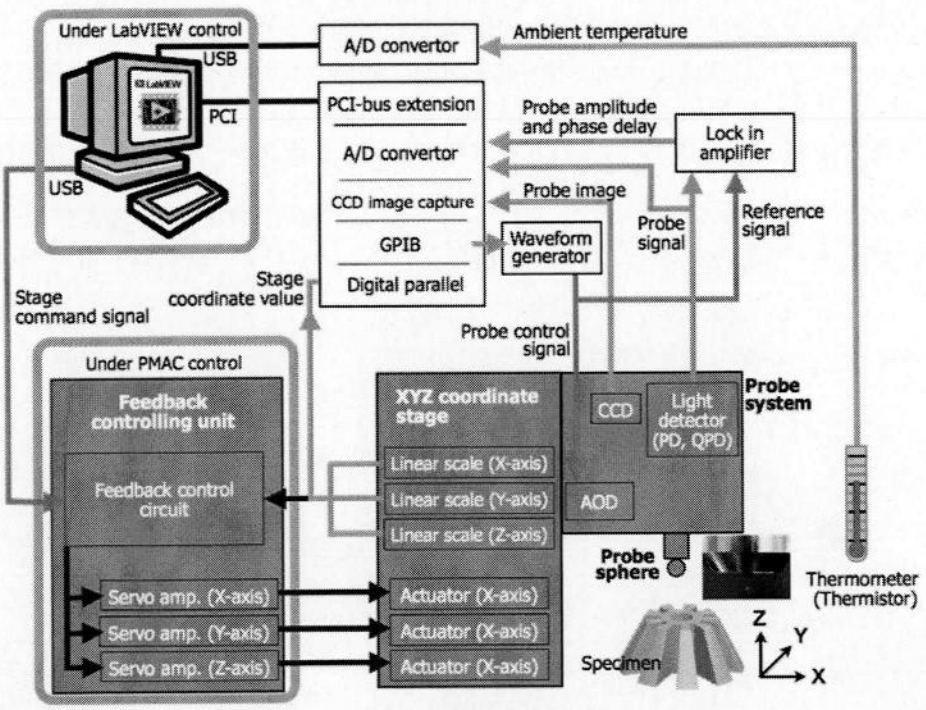



Figure6.2 : Integrated coordinate measuring system.

† PMACとはProgrammable multi axis controllerの略であり、アメリカの Delta Tau社によって開発されたステージ制御用のパッケージである。

**ステージ駆動**　本ステージを駆動する駆動系にはリニアモータを採用し、特に構造上シンプルで高効率であるシャフトモータを用いた。その動作原理は、軸となるシャフトは磁石をN極同士、S極同士を接合した構造になっている。このシャフトを取り囲む様にコイルが存在する。シャフトは固定部、コイルが可動部である。そのコイルに電流が流れるとその周辺に磁界が発生し、いわゆるFlemingの法則によってシャフト軸方向に推力が発生し、コイル側が移動する。シャフトモータの特徴は、バックラッシュがなくロストモーションが低い、磁束が360度全て推力として働くため高効率である、動作ムラ、コギングが発生しない、コイルとシャフトが非接触であり、無音動作、メンテナンスフリー、および摩擦熱やコンタミネーションの発生がない、位置決め特性がよく高速・高精度運動特性に優れる、シンプルな構造であるため取付けが容易であるなどである。シャフトモータは各軸のステージ中心に取付けられる。このシャフトモータ駆動により、ステージは10 mm/sec.から10 nm/sec.以下と幅広い速度でステージ移動が可能である。

**ステージガイド**　ステージガイドにはクロスローラガイドを用いている。ガイドの精度はステージの真直度や位置決め分解能、位置決め精度、繰返し精度および運動特性などに関係する最も重要な要素の一つである。クロスローラガイドは、精密研削加工されたV溝転送面をもつ軌道台 (ガイド) と精密ローラを交互に直交させて組み込んだローラケージで構成される。摩擦抵抗が極めて小さく、静摩擦と動摩擦の差がほとんどないため微小送りにも正確に追随し、低速から高速まで安定した動作が可能となる。また、ローラとガイドが線接触となるため高剛性、高負荷容量が実現可能である。

**リニアスケール**　ステージ運動量はリニアスケールによって読み取られる。リニアスケールは、レーザスケールによる信号をインターポレータが32bitバイナリ信号に変換し出力する。ここでまず、レーザスケールの原理を説明する。本レーザスケールは最も分解能が高いと言われる格子干渉型のスケールであり、その概念図を図6.3に示す。まずLDを偏光ビームスプリッタ (PBS, Polarization beam splitter) でs偏光とp偏光に分割する。分割された光はホログラム格子によって回折される。ホログラム格子がX軸方向に$d$だけ変位すると回折光の位相が$2\pi md/P$ ($m$: 回折次数 (以降 $m$=1)、$P$: 格子ピッチ) シフトする。回折光は$\lambda/4$板と反射ミラーによって偏光方向を転換して同一光路を経て再びPBSに入射する。このため、2度の回折を受けた光は$2(2\pi d/P)$の位相変化を受ける。分割された光は共に回折するが、回折方向が逆であるため、位相変化は$2(2\pi d/P)$と$-2(2\pi d/P)$となる。PBSで干渉される2つのビームは$4(2\pi d/P)$の位相差を持つ。偏光子を抜けた干渉光はPDに入射する。PDが検出する干渉光強度$I$は

$$I = 2 + 2\cos(4(2\pi d / P)x + \phi) \tag{6.1}$$

となる。つまり、ホログラム格子が格子ピッチ分だけ移動した時、PDの検出する信号は4周期分の変化が生じる。したがって、格子ピッチ$P$が0.55 μmであることから、検出信号周期は138 nm程度となる。PDによる検出信号をインターポレータにより内挿することで、0.14 nmの分解能で変位検出が可能となる。インクリメンタル方式であるリニアスケールは、基本的には絶対位置を検出することができない。これを補うために、リニアスケールは内蔵原点を有しており検出ヘッドが内蔵原点を通過することでスケール原点を認識する。本リニアスケールの原点再現度は±0.1 μmである。このリニアスケールが本システムの基準スケールとなる。

**ステージ幾何特性**　本位置決めステージの幾何性能を表6.1に示す。本位置決めステージは40 mmのストロークを持ち、位置決め分解能4.0 nmおよび位置決め精度±5 nmという高精度なステージである。分解能や繰返し精度はZ軸が最も優れているものの、真直度などは若干劣り、ピッチ、ヨー、ロールといった運動偏差も大きくなっている。後に5章で試作したプローブユニットを統合した時の位置決め特性を評価する。

**Abbeの誤差**　Abbeの誤差とは、計測不確かさを招く代表的な誤差要因の一つであり、Abbeの原理に基づいている。Abbeの原理とは「高精度な長さ測定システムを実現するには、測定すべき長さを測定システムの目盛り線と同一線上に置かなければならない[312]」というものである。このズレをAbbeオフセットといい、超高精度CMMではメトロロジーフレームを用いたAbbeオフセットフリーなる設計が多い。Abbeの原理を本システムにおいて考えると、座標点を検出するプローブ球の位置と座標付けを行う位置決めステージのステージ軸およびリニアスケールは同一線上になくてはならない。しかし、X軸はステージの運動軸とプローブ中心が約92 mm、Y軸は約70 mm、Z軸も約70 mm程度ずれている。そのため、最大で100 nm程度のAbbe誤差が発生する可能性がある。

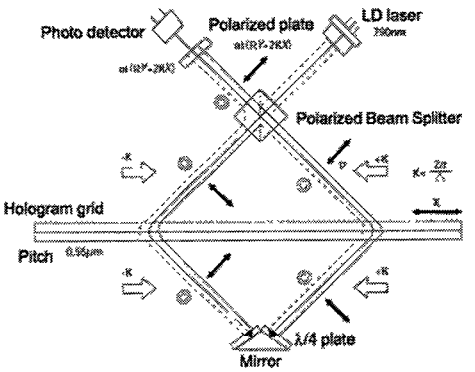



Figure 6.3: Structure of linear scale.

Table 6.1: Geometrical property of the coordinate stage.

| Nano-positioning stage | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Dimention (H×W×D) | | 512×610×500 (mm) | | |
| Weight | | 360 kg | | |
| | | X-axis | Y-axis | Z-axis |
| Stroke | | ± 20 mm | ± 20 mm | ± 20 mm |
| Resolution | | 4.0 nm | 4.0 nm | 3.5 nm |
| Accuracy | | ± 4.5 nm | ± 4.5 nm | ± 3.0 nm |
| Repeatability | | ±4.5nm | ±4.5nm | ±3.0nm |
| Pitch | | 0.24 arcsec | 0.28 arcsec | 0.28 arcsec |
| Yaw | | 0.26 arcsec | 0.22 arcsec | 0.28 arcsec |
| Roll | | 0.18 arcsec | 0.28 arcsec | 0.28 arcsec |
| Straightness | Horizontal | 80 nm/40mm | 100 nm/40mm | 230 nm/40mm |
| | Vertical | 150 nm/40mm | 130 nm/40mm | 180 nm/40mm |
| Max traveling speed | | 10 mm/s | 10 mm/s | 10 mm/s |

## 6.5 スケール校正

本計測器は長さ基準としてリニアスケールを各軸に搭載しており、このリニアスケールの読みをフィードバックすることで位置決め制御および座標付けを行う。本節ではこのリニアスケールの校正を行う。本研究では、校正の基準としてCarl Zeiss社で校正されたヘテロダインレーザ干渉計 (計測分解能2.5 nm) を用いた。

### 6.5.1 ヘテロダインレーザ干渉計

**干渉計原理** ヘテロダイン干渉は、周波数の僅かに異なるレーザを干渉させ、そのビート信号の変化により計測を行う。直交した偏光成分を持ち僅かに周波数の異なる入射光はレーザヘッド内で信号光、参照光の2つに分割される。信号光は、偏光ビームスプリッタにより$E_1$と$E_2$の光に分光される(式 (6.2))。

$$E_1 = A_1 \cos(2\pi f_1 t + \phi_1) \tag{6.2a}$$

$$E_2 = A_2 \cos(2\pi f_2 t + \phi_2) \tag{6.2b}$$

$E_2$のビームは光学系内で光路を180度転換され、$E_1$のビームが測定対象に設置された反射ミラーによって反射し、光学系内のPBSに再入射する。反射ミラーが変位すれば、光$E_1$はドップラー効果により周波数シフト$\pm df_1$を起こす。この2つの光を干渉させPCで干渉信号を受け取る。参照光と信号光の干渉光強度は

$$I = \left\langle |E_1 + E_2|^2 \right\rangle = \frac{A_1^2 + A_2^2}{2} + 2A_1A_2\cos(2\pi(f_2 - f_1)t + \phi_2 - \phi_1) \tag{6.3a}$$

$$I = \left\langle |E_1 + E_2|^2 \right\rangle = \frac{A_1^2 + A_2^2}{2} + 2A_1A_2\cos(2\pi(f_2 - f_1 \mp df_1)t + \phi_2 - \phi_1) \tag{6.3b}$$

となる。ここで、$f_2$ - $f_1$をビート周波数とよび、$df$はドップラーシフトによる周波数変化である。この$\delta f$を検出することで測定物の変位を知る。

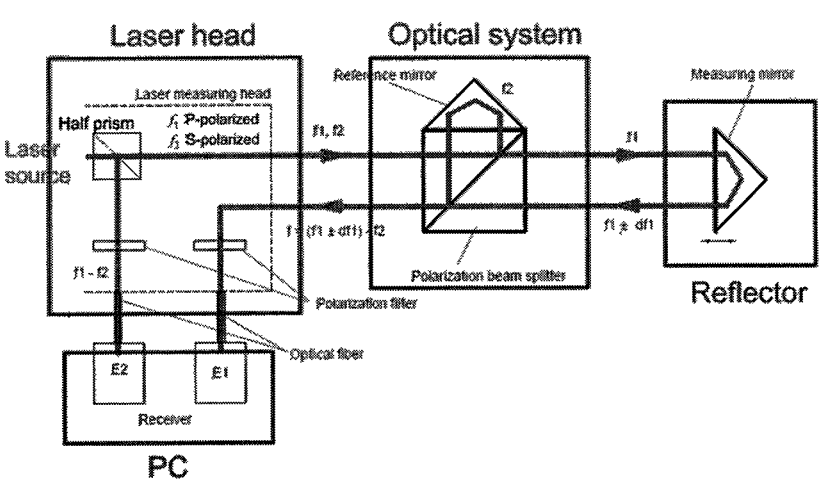



Figure 6.4: Configuration of heterodyne interferometer.

**測定方法**　レーザ干渉計の設置方法から述べる。測定はXYZ各軸別々に行う。レーザ干渉計で計測するポイントは位置検出を行うプローブ球の位置が望ましい。プローブ球は対物レンズ先端であり、装置の構造上測定困難である。そのため、対物レンズを取り外しそこに治具に取付け、プローブユニットから吊り下げるように反射ミラーを固定した。図6.5に干渉計計測時の概要を表す写真を示す。干渉計のレーザヘッドは定盤に治具を取り付け固定した。干渉用光学系は空気の乱れによる測定誤差低減のため可能な限り反射ミラーに近づけた。X軸の計測時には、Y軸方向に出射したレーザがミラーによりX軸方向に90 °偏向される。この反射ミラーの位置はプローブ位置よりも約70 mm下に位置する。Y軸計測の構成は、Y軸方向に出射したレーザが干渉計光学系を経て反射ミラーに入射する。反射ミラーの取付けはX軸の場合と同様である。Z軸計測の場合、反射ミラーは対物レンズの位置に反射面が下に向くように設置される。Y軸方向に進むレーザ光がミラーにより上向きに向けられ、反射ミラーに入射する。計測は、干渉計の設置・調整後、測定環境を安定させるため数時間その状態を保ったあと行われる。計測中は環境温度計測を行いレーザ波長を補正し、計測前後で干渉計レーザ光軸のアライメントを確認した。

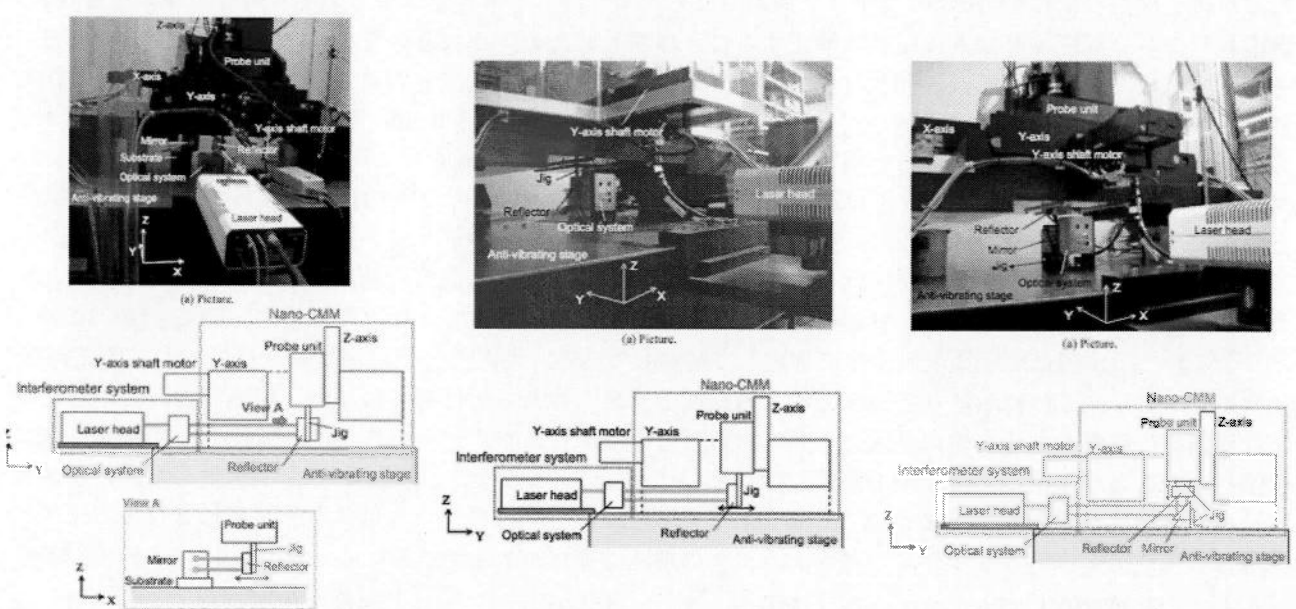
### 6.5.2　リニアスケールの校正

本システムの基準スケールとなるリニアスケールの値を校正するため、ステージ運動時の変位を干渉計と比較した。方法は、各軸の座標基準値0から1 mm、100 μm、10 μm、1 μmをストロークとして10回往復運動を行う。各座標点に移動後、数秒間待機した安定位置を位置決めの値とした。干渉計とリニアスケールの値を比べ校正の補正値をもとめる。なお、干渉計計測のサンプリング周波数は20 Hzとした。

代表例として、各軸10 μmストローク時の計測データを図6.6(a)-(c)に示した。リニアスケールの値と干渉計計測に誤差が発生している。測定結果から得られたXYZ軸各軸に対する補正値を図6.6(d)に示す。このリニアスケールと干渉計の補正値は、おおよそ0.985であるが、ストローク10 μm以下では相違が見られる。これは、ストロークが小さくなることで、ステージ運動の相対誤差が大きくなるためであると考えられる。例えば10 μmストローク時は、20 nmの誤差で0.002程度の相違が生じる。ステージの校正という目的から、ここでは0.985を校正値とした。これ以降、リニアスケールの値にこれ乗算することで座標値を求めた。

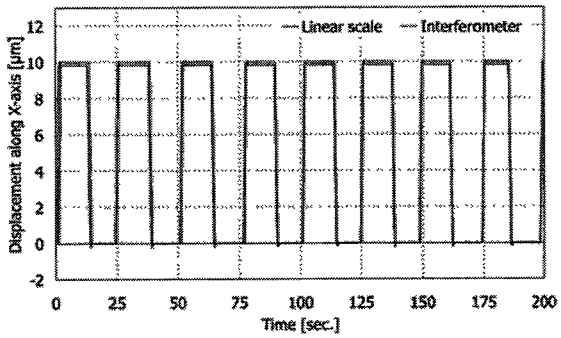
## 6.6　座標ステージ運動特性評価

座標ステージの運動特性評価を行う。位置検出を行うための様々な特性を把握する必要があり、位置検出ステージの特性評価方法も数多く提案されている[308, 314, 315]。W.G. WeekersはCMMステージの誤差を静的誤差 (Quasi statics error) と運動誤差 (Dynamic error) に分類した[316]。前者はステージの幾何学的誤差、装置の剛性に起因する誤差および温度ドリフト、後者は加速度依存の誤差、自己および外力による振動とした。本研究でも、これらについて検討を行う。まず、位置決めステージの周波数特性および温度ドリフトの

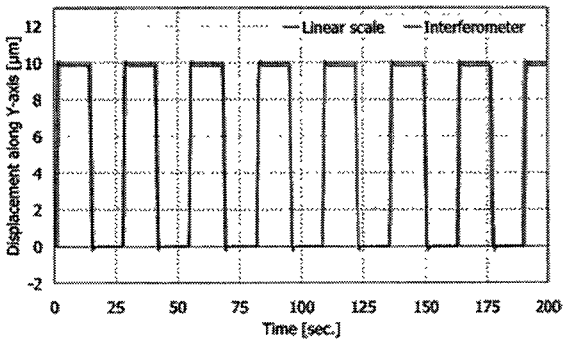



(a) X-axis.　(b) Y-axis.　(c) Z-axis.

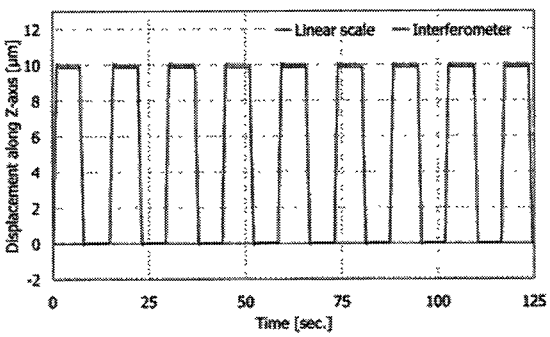
Figure 6.5: Configuration of linear scale calibration with heterodyne interferometer.




(a) X-axis.




(b) Y-axis.




(c) Z-axis.

| | X-axis | Y-axis | Z-axis |
|---|---|---|---|
| 1 mm | 0.9853 | 0.9852 | 0.9852 |
| 100 μm | 0.9853 | 0.9853 | 0.9850 |
| 10 μm | 0.9834 | 0.9854 | 0.9861 |
| 1 μm | 0.9781 | 0.9998 | 1.0076 |
| Average | 0.9830 | 0.9889 | 0.9909 |

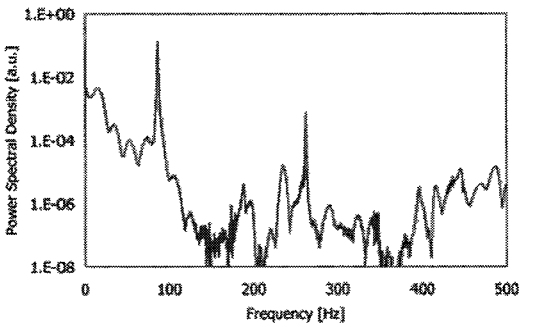
(d) Data.

Figure 6.6: Repetitive stage motion for comparing linear scale and heterodyne interferometer.

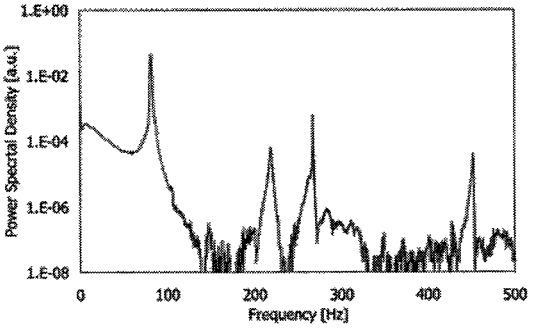
影響について評価する。次に、ステージの基本的な運動特性として、位置決め分解能 (Resolution)、繰返し位置決め精度 (Repeatability)、位置決め精度 (Accuracy)、ロストモーション (Lost motion)について評価を行う。

**周波数特性評価**　周波数特性の評価方法として、ハンマリング試験を行った。ステージを停止した状態で、外部から衝撃を与えたときのステージの応答を見る。ステージはPID制御により任意の位置に定在するためにフィードバック制御は常に動作している。そのため、ゲインの調整などによってステージはある周波数で大きな応答を示す。これにより外部振動に対する安定性を評価した。サンプリングレートを5000 Hzとし、6秒間の計測を行った。計測結果を図6.7に示す。X軸Y軸に関して100 Hz付近で高いピークが見られしかし、Z軸では見られない。つまり、このピークは先に述べた干渉計測用の反射ミラーの取付け方法による共振現象であると考えられる。次に全ての軸において約220 HzおよびXY軸で約260 Hzでピークが見られる。これらがフィードバック制御によるピークであると考えられる。これらの周期ノイズが計測に影響を及ぼすと考えられるため、測定結果は0.5 Hzをカットオフ周波数としたローパスフィルタによるノイズ信号の除去を行う。

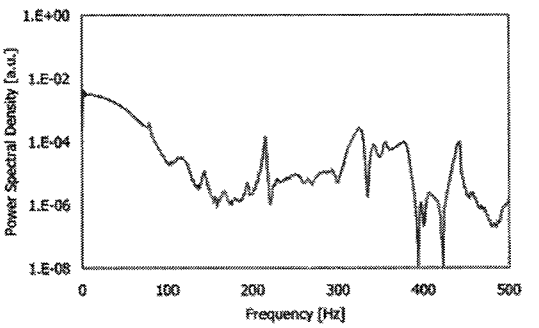
**温度ドリフト**　温度ドリフトは単純に補正することは難しいため、それ自体を小さくすることが望まれる。そのためには、熱源の分離、低膨張材料の採用、同一材料の使用、構造上の熱対称性設計などの対策が提案されている[312]。本装置はステージベースも含めると1400 mm (幅) × 500 mm (奥) × 717 mm(高)と比較的大きく、温度変化の影響も大きくなる。対称構造や同一材料 (S45C (線膨張係数：約$11\times10^{-6}$)) で設計するという対策は施されているが温度ドリフトは避けられない。そこで、温度ドリフトの影響によってプローブ位置がどの程度変化するのかを調べるため、数時間の間、環境温度と装置のドリフト量について計測を行った。干渉計計測、温度計測のサンプリングはそれぞれ1 Hz、0.25 Hzとした。温度計測にはサーミスタを用いた。また、環境温度変化を与えるため、室温を室内のエアコンディショナーにより上昇させた。結果を図6.8に示す。干渉計に示す値は環境温度の変化に対応して増減している。ただし、環境温度の変化に対してほぼ同時に対応しており、これは単純な膨張収縮による温度ドリフトであるとは考えにくい。環境温度が変化した時に計測結果に影響を与える他の要因についての考察を行う。リニアスケールの誤差に関して、対称構造や低膨張材などにより温度や環境変動の影響を受け難いよう設計されており、気圧の変化や空気の乱れによるスケールの誤差はnmオーダである。また、温度特性に関して、リニアスケールはスケール基材となるガラスと半導体レーザの検出ヘッドがからなるが、ガラスの熱膨張率は$-0.7\times10^{-6}$であり、一方の検出ヘッドの熱膨張は数十℃の温度変化に対して100 nm以下である。次に、干渉計計測における温度変化が寄与する要素は、温度変化に伴う屈折率変化や干渉計光学系・治具、反射ミラーの熱膨張などがある。これらの影響が計測結果




(a) X-axis.

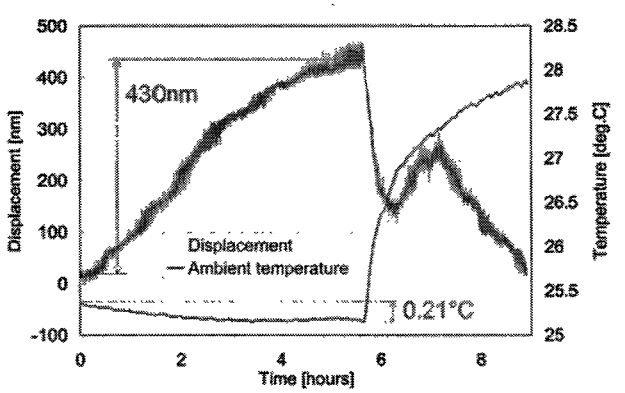



(b) Y-axis.

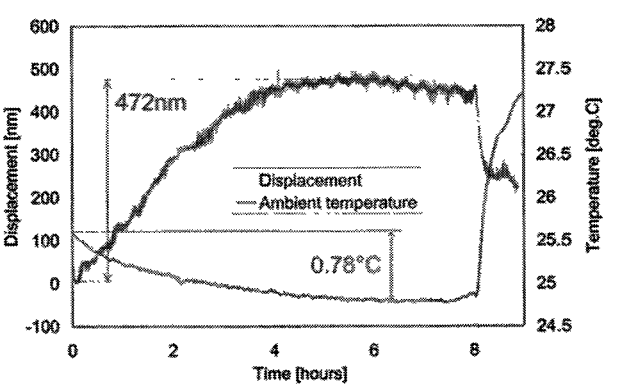



(c) Z-axis.

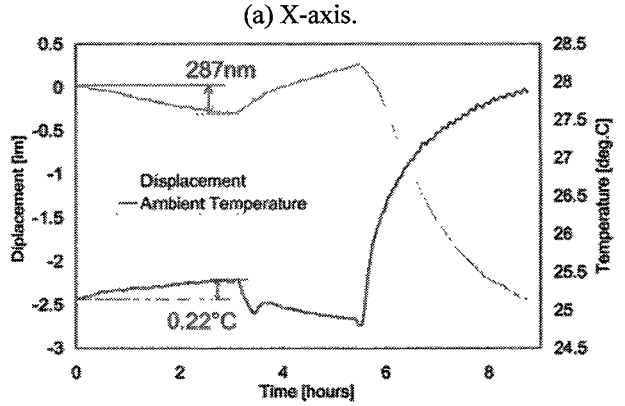
Figure 6.7: Frequency characteristics of coordinate stage examined by means of hammering test.



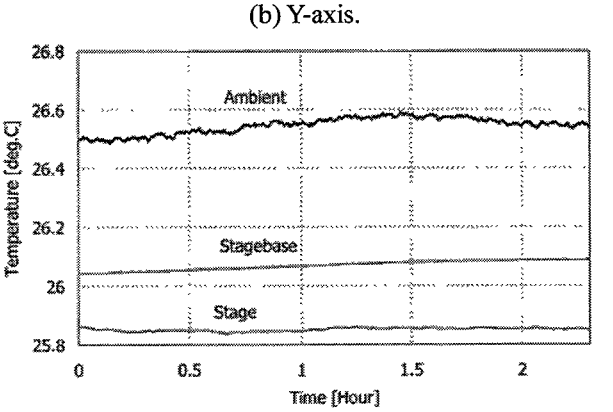

(a) X-axis.




(b) Y-axis.




(c) Z-axis.




(d) Typical rom temperature during measurement.

Figure 6.8: Thermal drift of coordinate stage.

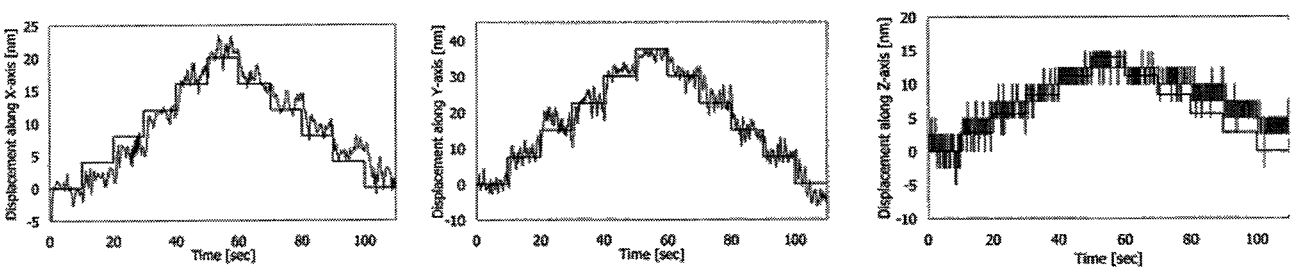
にどの程度影響を及ぼすかを見積もることは容易ではない。図6.8の結果は装置の熱膨張と上記の要因の重複によるものと考えられる。これらを踏まえて、今回、温度ドリフトの評価については最も最悪の場合を想定し、その大きさを推定した。測定結果のXYZ軸熱膨張は、1231 nm/°C、622 nm/°C、2087 nm/°C であった。1 °Cの温度変化によってμmオーダの変位を起こしてしまっており、これは大きな計測誤差の原因となる。実験室の通常の温度変化は図6.8(d)に示すように0.1 °C/hour程度であり、測定速度の向上などの対応が必要となる。測定毎に温度環境が異なるため、座標系の基準位置が異なる。

**位置決め分解能**　位置決め分解能とは、ステージを駆動する際の最小の移動量と定義される。スケール分解能は0.14 nmであるが、ガイドの摩擦などによって最小の駆動可能な量は大きくなる。これを評価する方法として、位置決めステージにステップ運動コマンドを送り、その動きを干渉計で計測する。その計測結果から、分解可能な最小のステップ幅を求めることで、位置決め分解能を評価した。干渉計のサンプリングレートは20 Hzとし、測定後0.5 Hzのローパスフィルタで処理した。ステージの移動速度は700 μm/sec.、ステップ数は5、ステップ移動後の10秒間停止した。XYZ各軸の結果を図6.9に示す。XYZ軸の最高分解能はそれぞれ3.8 nm、5.6 nm、2.0 nmと高い分解能を示した。Y軸がもっとも低い分解能を示した理由として、3軸スタック構造の最も下に位置しており、摩擦力が大きく制御が最も困難であったためであると考えられる。結果として、nmオーダの位置決め分解能の性能を持つことが検証できた。

**繰返し位置決め精度**　繰返し位置決め精度は、位置決めステージの基本特性を表す上でもよく用いられる評価項目の一つである。その定義は同じ目標値に向かって位置決めを複数回行った際に生じる最大位置決め誤差である。図6.6に示した実験結果を基に繰返し精度を評価する。原点から1 μmを目標値とし、10回位置決めを行った座標値の最大値と最小値の差を繰返し精度とする。位置決め座標と繰返し精度を表6.2にまとめる。ただし、Y軸の10thのデータは外部ノイズによる影響を大きく受けたため、評価には用いなかった。その結果、X軸Y軸は3 nm、Z軸は9 nmという結果となった。Z軸がXY軸に比べて約3倍低い精度であるのは、Z軸が構造上XY軸と異なるためであると考えられる。図6.1(b)に見られるように、Z軸は対称構造ではなく、重心が駆動軸とずれてしまい、したがって、ピッチングや真直度の影響をより顕著に受けやすくなることで繰返し精度の悪化を招いたと考える。繰返し位置決め精度に関して、本ステージは十分な性能を持つ。

**位置決め精度**　位置決め精度は、入力されたコマンド値とステージが実際に位置決めした座標値との誤差として定義される。よって実験では、複数位置で位置決めを行い、各位置決め誤差の絶対値を位置決め精度としている。インターバルを100 nmと500 nmの2種類で5回ずつ位置決めを行い評価した。ステージ移動速度などはこれまでと同様である。目標座標と位置決め座標との差をまとめたものを表6.3示す。XYZ軸それぞれ17 nm、17 nm、20 nmの位置決め精度であり、高い位置決め精度をもつことが確認された。

**ロストモーション**　ステージの運動精度は、繰返し精度と位置決め精度に加えて、ロストモーションの3つで特徴付けられることが多い。ロストモーションとは、ある目標値に対して、異なるアプローチの方向で位置決めを行った時に発生する誤差である。この評価方法として、位置決め精度と同様に100 nmと500 nmのインターバルで往復ステップ運動を行う。5回のステップで通過する4つの座標点に関して、ロストモーション




(a) X-axis.　(b) Y-axis.　(c) Z-axis.

Figure 6.9: Positioning resolution of coordinate stage.

Table 6.2: Positioning repeatability of coordinate stage.

| | X | Y | Z |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.977 | 0.999 | 1.000 |
| 2 | 0.975 | 0.998 | 0.999 |
| 3 | 0.976 | 0.999 | 1.000 |
| 4 | 0.976 | 0.999 | 1.001 |
| 5 | 0.976 | 1.000 | 1.004 |
| 6 | 0.976 | 0.999 | 1.005 |
| 7 | 0.977 | 0.999 | 1.007 |
| 8 | 0.977 | 0.998 | 1.007 |
| 9 | 0.978 | 1.000 | 1.007 |
| 10 | 0.978 | 1.016 | 1.008 |
| Max | 0.978 | 1.000 | 1.008 |
| Min | 0.975 | 0.998 | 0.999 |
| Repeatability | 0.003 | 0.003 | 0.009 |

Table 6.3: Positioning accuracy of coordinate stage.

(a) 100 nm interval for X-axis.

| | Stage | Command | Difference |
|---|---|---|---|
| 1st | 88 | 98 | -10 |
| 2nd | 200 | 197 | 3 |
| 3rd | 310 | 295 | 15 |
| 4th | 394 | 393 | 1 |
| 5th | 489 | 492 | -2 |
| | Accuracy | | 15 |

(b) 100 nm interval for Y-axis.

| | Stage | Command | Difference |
|---|---|---|---|
| 1st | 88 | 99 | -11 |
| 2nd | 204 | 198 | 6 |
| 3rd | 309 | 297 | 12 |
| 4th | 394 | 396 | -2 |
| 5th | 488 | 494 | -7 |
| | Accuracy | | 12 |

(c) 100 nm interval for Z-axis.

| | Stage | Command | Difference |
|---|---|---|---|
| 1st | 95 | 99 | -5 |
| 2nd | 205 | 198 | 7 |
| 3rd | 301 | 297 | 3 |
| 4th | 407 | 396 | 11 |
| 5th | 516 | 495 | 20 |
| | Accuracy | | 20 |

(d) 500 nm interval for X-axis.

| | Stage | Command | Difference |
|---|---|---|---|
| 1st | 475 | 492 | -17 |
| 2nd | 982 | 983 | -1 |
| 3rd | 1458 | 1475 | -17 |
| 4th | 1965 | 1966 | -1 |
| 5th | 2455 | 2458 | -3 |
| | Accuracy | | 17 |

(e) 500 nm interval for Y-axis.

| | Stage | Command | Difference |
|---|---|---|---|
| 1st | 481 | 494 | -13 |
| 2nd | 988 | 989 | -1 |
| 3rd | 1474 | 1483 | -10 |
| 4th | 1969 | 1978 | -9 |
| 5th | 2455 | 2472 | -17 |
| | Accuracy | | 17 |

(f) 500 nm interval for Z-axis.

| | Stage | Command | Difference |
|---|---|---|---|
| 1st | 503 | 495 | 7 |
| 2nd | 992 | 991 | 1 |
| 3rd | 1492 | 1486 | 5 |
| 4th | 1967 | 1982 | -15 |
| 5th | 2490 | 2477 | 13 |
| | Accuracy | | 15 |

Table 6.4: Lost-motion of coordinate stage.

(a) 100 nm interval for X-axis.

| Position | Approach | | Difference |
|---|---|---|---|
| | + | - | |
| 100 | 88 | 104 | 16 |
| 200 | 200 | 203 | 3 |
| 300 | 310 | 312 | 2 |
| 400 | 394 | 398 | 4 |

(b) 100 nm interval for Y-axis.

| Position | Approach | | Difference |
|---|---|---|---|
| | + | - | |
| 100 | 88 | 104 | 16 |
| 200 | 204 | 200 | 4 |
| 300 | 309 | 311 | 2 |
| 400 | 394 | 397 | 4 |

(c) 100 nm interval for Z-axis.

| Position | Approach | | Difference |
|---|---|---|---|
| | + | - | |
| 100 | 95 | 97 | 2 |
| 200 | 205 | 218 | 13 |
| 300 | 301 | 313 | 13 |
| 400 | 407 | 404 | 3 |

(d) 500 nm interval for X-axis.

| Position | Approach | | Difference |
|---|---|---|---|
| | + | - | |
| 500 | 475 | 467 | 8 |
| 1000 | 982 | 977 | 5 |
| 1500 | 1458 | 1455 | 3 |
| 2000 | 1965 | 1963 | 1 |

(e) 500 nm interval for Y-axis.

| Position | Approach | | Difference |
|---|---|---|---|
| | + | - | |
| 500 | 481 | 477 | 5 |
| 1000 | 988 | 975 | 13 |
| 1500 | 1474 | 1462 | 12 |
| 2000 | 1969 | 1964 | 5 |

(f) 500 nm interval for Z-axis.

| Position | Approach | | Difference |
|---|---|---|---|
| | + | - | |
| 500 | 503 | 497 | 6 |
| 1000 | 992 | 991 | 1 |
| 1500 | 1492 | 1488 | 4 |
| 2000 | 1967 | 1962 | 5 |

Table 6.5: Positioning resolution of coordinate stage.

| | X-axis | Y-axis | Z-axis |
|---|---|---|---|
| Resolution | 3.8 nm | 5.6 nm | 2.0 nm |
| Repeatability | 3 nm | 3 nm | 9 nm |
| Accuracy | 17 nm | 17 nm | 20 nm |
| Lost motion | 16 nm | 16 nm | 13 nm |
| Thermal drift | 1231 nm/℃ | 622 nm/℃ | 2087 nm/℃ |

を評価した。なお評価には、位置決め精度で計測したデータを用いた。結果を表6.4に示す。XYZ軸それぞれ16 nm、16 nm、13 nmという結果を得た。したがって、本ステージでは、測定時のアプローチ方向による誤差は16 nm以下と考えられる。

## 6.7 結言

本章は、5章で試作されたプローブシステム性能評価のための3次元座標測定システムを設計および試作し、その運動性能をヘテロダインレーザ干渉計を用いて評価した。得られた結果を表6.5にまとめた。これより、本研究で試作したステージがナノメートルオーダの運動性能を持つことが確認され、マイクロプローブ性能を評価するという目的において十分な性能を示した。

# 第7章　光放射圧プローブの振動特性

## 7.1　緒論

光放射圧プローブの基礎的な特性の評価および振動特性のモデリングと評価を行う。

## 7.2　プローブ球捕捉方法

プローブ球として用いるマイクロシリカ微粒子をレーザトラップで基板上から大気中に引上げるが、大気中で実現するのは容易ではない。レーザトラップでは、基板に散布されたマイクロ微粒子をレーザで空気中に捕捉する。レーザで作用する光放射圧はpNオーダであるのに対し、微粒子と基板間に働く力はnNからμNのオーダであるため、単純にレーザによる力のみでは微粒子を空気中に持ち上げれない。液中で行われるレーザトラップは基板との吸着力は低く、かつ浮力による上向きの力がトラップを支援する。大気中でのレーザトラップを実現するために、何らかの工夫を施す必要がある。ここでは、その方法を提案する。そこでまず、基板とその上に散布された粒子の間に働く力、原子間力、静電気力、液架橋力について考える。

**原子間力**　原子間力は、原子もしくは分子同士の引きつけ力で、ロンドン分散力やイオン相互作用、Van der Waals力などに分類される。なかでもVan der Waals力は、物質がnmオーダに接近する時、永続的に作用する力として重要な力である。原子間の対ポテンシャルは逆6乗の法則として得られ、これを積分することで2つの物質間に作用するVan der Waals力を推定することができる。物質特性はHamaker定数という物質固有の定数によって与えられる。粒子と平面基板間に働く原子間力 (Van der Waals力) は以下の式で与えられる[317]。

$$F = \frac{Hr_1}{6z^2} \quad (\text{ただし、} z \ll r_1) \tag{7.1}$$

ここで、$H$はHamaker定数、$r_1$は粒子の半径、$z$は粒子間もしくは粒子と基板の距離を表す。2種材料のHamaker定数は、それぞれの材料のHamaker定数を$A_{11}$、$A_{22}$とする時、

$$A_{12} = \sqrt{A_{11} \cdot A_{22}} \tag{7.2}$$

によって求める[318]。式(7.1)は理想的な平坦面の原子間力を求めているが、現実には物質は表面粗さをもつ。そこで、式(7.1)に表面粗さを補正した式は、以下のようになる[318]。

$$F' = \frac{z}{z+b}\frac{Hr_1}{6z^2} \tag{7.3}$$

ただし、$b$は表面粗さに関するパラメータで、2物質の表面粗さ$b_1$、$b_2$を用いて、$b=(b_1+b_2)/2$で得られる。

**静電気力**　静電気力は電荷を帯びた物質に働く引力または斥力であり、以下の式で与えられる[322]。

$$F = \frac{1}{2}\varepsilon |E|^2 = \frac{\sigma_s}{2\varepsilon} \tag{7.4}$$

$\varepsilon$は誘電率、$E$は電場強度、$\sigma$は表面電荷密度である。静電気力は、物質単独では電荷を帯びていなくても、物体同士が接触することに起因する電位差、接触電位などでも発生し、金属などの様に自由電子が自由に動き回れる物質では極端に小さくなるが、誘電体などの物質では比較的大きい。

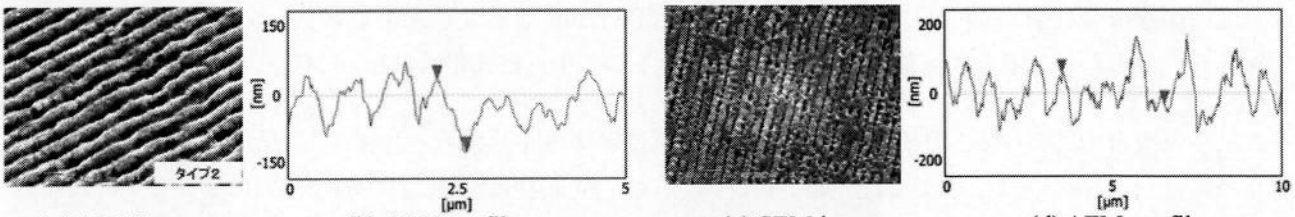
**液架橋力**　物質の表面をμmオーダで見ると、その表面の水蒸気密度は空間のそれとは遥かに大きいことが知られている。液架橋力は、その水蒸気によって発生する水の表面張力による力である。したがって、湿度

や温度に影響を受けやすく[321]、表面の化学特性や形状[320]によっても大きく変化する。この力は古くから知られ、実験などを通して、調べられ議論されているが、未だ定式化は難しい[317]。

これらの複合力によって、粒子に働く力はμNオーダに達する[319-324]。よって、大気中で微粒子を捕捉するためには、これらの力を光放射圧程度にまで下げるか、粒子の吸着力に打ち勝つ外力によってサポートする必要がある。ここで、従来提案のレーザトラップ方法について述べる。1つ目は、超音波振動エネルギを用いた手法である。A. Ashkinが初めて大気中でのLevitation trapに成功した方法であり[176]、R. Omoriらも初めて大気中のレーザトラップを実現した[234]。基板上に粒子を散布し、その基板を数十kHz以上の超音波周波数で加振する。すると、超音波が粒子に与えるエネルギが基板との吸着力に匹敵し、時に上回る。その結果、吸着が緩くなった粒子を捕捉するか、振動により基板から飛び跳ねた粒子を捕捉する。この手法は、簡易なシステムで実現でき、超音波振動を調整することで、吸着力が強くても対応可能である。しかし、任意の粒子を確実に捕捉することは難しい。2つ目は、ドイツのR. ThurnとW. Kieferらが初めて行った方法であり[235]、現在は液滴を捕捉するのによく用いられる。彼らは、数μmの穴を底に空けたシェーカーに微粒子を入れ、振動するシェーカーの底から落ちてくる微粒子をLevitation trapした。液滴トラップではこれを応用し[215]、霧吹きによって空間に散布された液滴を捕捉する方法が一般的である。2006年にはD. McGloinが、この方法でシリカ球のHolographicトラップに成功した[325]。この方法は、大量の粒子を必要とし、任意粒子の選択的なトラップは不可能である。3つ目は、J. Ikenoらによって考案された方法であり[240]、本研究の基礎実験 (4章) でも用いた。J. Ikenoはレーザアブレーションによって微粒子の基板吸着からの脱出を図った。具体的には、レーザパルスを用いて粒子近傍の基板上でレーザアブレーションを起こし、そのアブレーションの爆発力で粒子を飛散させ、飛散した粒子を捕捉する。この手法は、任意粒子を捕捉可能であるという点で優れているが、しかし、捕捉確率は高くなく、レーザアブレーションによる粒子の損傷の恐れがある。

本研究では、任意粒子を確実に選択捕捉できる技術が求められる。そこで、従来法のような外力エネルギによる粒子の飛散を図るのとは逆のアプローチで、吸着力自身の低減を試みた。要点は以下の3つである。(1) 基板に超硬を用いる。(2) 基板にナノオーダの周期溝を形成する。(3) プローブ球のシリカにメチルコーティングを施す。(1) に関して、上で述べたように基板と粒子間には原子間力が働くが、基板に超硬を採用することでHamaker定数が小さくなる。$SiO_2$のHamaker定数は26であり、鉄FeのHamaker定数は16.4である。よって式(7.2) より、シリカと超硬間のHamaker定数は20.6となる。また、導電性物質である超硬を用いることで、静電気力の低下が期待できる。次に (2) に関して、H. Sawadaらはフェムト秒レーザを用いた自己組織的な加工法を提案した[326]。この方法では、フェムト秒レーザの波長程度の周期で、数十nmの溝を加工することができ、この周期溝は吸着特性を大きく変化させる。この基板を用いて粒子に対する吸着も低減することが報告されている[327]。そこで本手法では、8 nmRaの表面粗さを持つ超硬基板に対し、同加工を実施し、図7.1の様な表面を得、周期800 nm、溝深さ約200 nmの周期溝を施し、原子間力および液架橋力の低減を図った。式(6.3)によると、200 nmの粗さを持つ基盤に数nmの表面粗さの粒子が50 nmの距離にある時、表面吸着力は1/3程度に低減される。最後に、プローブ球の材料としてシリカガラスを用いており、シリカの表面は通常は、-OHのヒドロキシル基で覆われている。シリカが吸水材料として用いられることでわかるように、ヒドロキシル基は親水性を示す。そこで、撥水性をもつメチル基($-CH_3$)をシリカ球の表面にコーティングすることで液架橋力の低減を図った。

**実験**　上記基板と粒子を用いて、大気中のトラップの実験を行った。環境は、室温25°C程度で実験中の平均湿度30%である。超硬の周期形状基板にメチルコートされたシリカ球を散布する。レーザのスポットをプローブ球中心から上方約30 μmに移動する。そのまま、レーザスポットをプローブに向けて接近させ、レーザの求心力によってプローブ球捕捉可能かを調べた。 レーザパワーは400mWとし、サンプル数は20とした。また、比較のために、周期形状を生成していないシリコン基板、超硬基板、周期形状を施したシリコン基板に対しても同様の実験を行った。




(a) SEM image. (b) AFM profile. (c) SEM image. (d) AFM profile.

Figure 7.1: Carbide (a)(b) and silicon (c)(d) substrate with periodic groove pattern.

Table 7.1: Success trapping probability on various types of substrate.

| No. | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| Structure type | Flat | | Patterned | |
| Surface property*1,2 | 2 nm Rq | 8 nm Rq | 800 nm × 200 nm | 800 nm × 200 nm |
| Material | Silicon | Carbide | Silicon | Carbide |
| Trapped probability | 0% | 0% | 0% | 85% |

*1 Surface roughness for flat surface
*2 Pitch × depth of groove for patterned surface

**結果** 結果を表7.1に示す。提案した基板とシリカ球を用いることで85%の高確率でプローブ球を捕捉することが可能であった。具体的には20個の粒子のうち17個の粒子の捕捉に成功した。3つの粒子が捕捉できなかった理由として、基板の周期構造と粒子の位置関係によって、部分的に吸着力が大きくなる場合がある[328]ためであると考えられる。周期形状を持たない基板では捕捉が出来なかったことから周期形状が大きく吸着力低減に寄与し、また材料選択も重要な要素であったことが明らかになった。

## 7.3 光軸方向トラップ効率

空気中のレーザトラッピングは高いレーザ強度を必要とする。レーザパワーが大きいと、プローブをぬけた前方散乱光が測定物に吸収された場合、測定物が損傷を受けたり熱膨張を引き起す。または安全性の為に低出力が望ましい。レーザ出力を低減するためには、光軸方向トラップ効率を向上する必要がある。レーザの強度分布や偏光を制御することで、光軸方向のトラップ効率を向上することが出来る。そこで、ここでは光軸方向トラップ効率の測定を行い、最適な入射レーザを検討した。

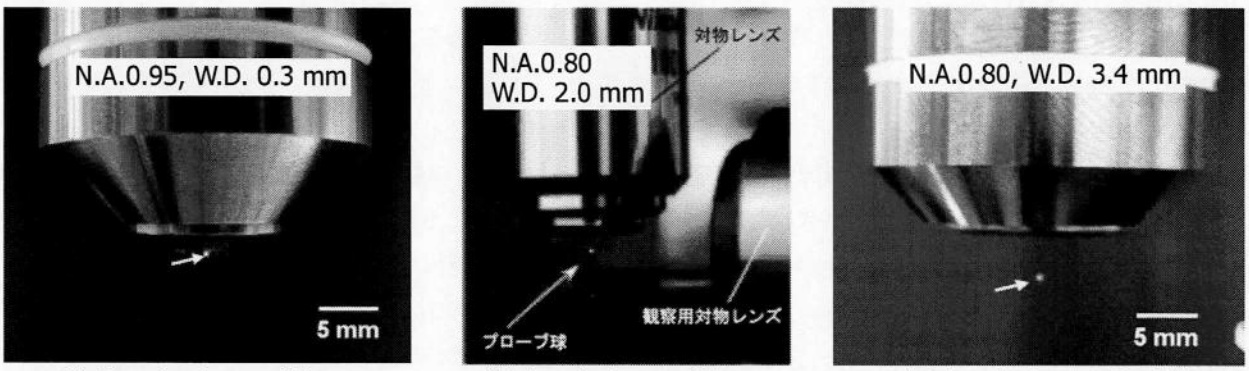
横方向トラップ効率は、流体抵抗による方法[190]、強制振動による方法[329]などが提案され、比較的正確に測定された例が報告されている。光軸方向トラップ効率に関して、現在用いられている方法は1つである。4章で述べたが再度確認すると、プローブ球捕捉状態でレーザ強度を下げていき、レーザトラップの拘束からプローブ球が逃れた瞬間のレーザパワーを測定する。その時の光放射圧と捕捉された微粒子の重力が等しいという仮定の元、式(4.9)からトラップ効率を算出する*。R. Omoriらの報告によれば[330]、溶液中などで周辺溶媒の粘性抵抗が大きいほど、外乱の影響が抑えられ精度良く測定することができる。しかし、空気中など、粘性抵抗の低い状態ではブラウン運動などの影響が顕著になり、光放射圧とプローブ球の重力が釣り合う前にブラウン運動による力でプローブ球が捕捉状態から外れてしまい、光軸方向のトラップ効率が低く見積もられてしまう。空気中レーザトラップであるため、光軸方向トラップ効率が過小評価されてしまい定量的な評価は困難であるが、レーザによる影響を定性的に評価する目的でこの方法で実施する。

**実験** 直線偏光とラジアル偏光の2つの偏光ビームで光軸方向トラップ効率を測定した。測定方法は、プローブ球捕捉状態から捕捉レーザの強度を徐々に下げていき、プローブ球が捕捉状態から外れた瞬間のレーザパワーを測定し、式(4.9)より算出する。プローブ球は8 μmとし、初期ビーム強度は400 mW程度とした。

* Subsection 4.3.2 in page 39.

Table 7.2: Axial trapping efficiency.

| | Trapping beam condition | | Minimum trapping power [mW] | Axial trapping efficiency | Simulated axial trapping efficiency |
|---|---|---|---|---|---|
| | Intensity profile | Polarization | | | |
| Experiment 1 | Gaussian | Linear | 121 | 0.013 | 0.20 |
| | Annular | Linear | 64 | 0.025 | 0.25 |
| Experiment 2 | Gaussian | Linear | 95 | 0.017 | 0.20 |
| | Annular | Radial | 38 | 0.041 | 0.37 |




(a) Gaussian beam of linear polarization with objective of NA0.95.

(b) Annular beam of linear polarization with objective of NA0.80.

(c) Annular beam of radial polarization with objective of NA0.80.

Figure 7.2: Laser trapping in air.

**結果**　本実験 (Experiment 2) で得られた測定結果に加え、4章で求めた直線偏光のガウシアンビームと輪帯ビームの2つの結果 (Experiment 1) も併記し、また、光線追跡法による解析値もまとめ表7.2に示す。まず、解析結果と実験結果は10倍程の定量的な違いは見られるものの、定性的にはほぼ一致した。これにより、ばらつきは大きいものの妥当な実験結果が得られていることがわかる。次に、強度分布について、ガウシアンビームを輪帯ビームにすることで、光軸方向トラップ効率は実験的には190%程度の増加を確認した。ビーム偏光に関して直線偏光からラジアル偏光にすると、250%の光軸方向トラップ効率の向上が認められた。単に光軸方向のトラップ力を上げるにはレーザ強度を増加すればよい。しかし、トラップ効率を向上させることが出来た結果、捕捉に用いる対物レンズのNAを低下することができ、つまり同時に、図7.2に示すように作動距離を増加することができる。このように輪帯ビーム (同図(b)) やラジアル偏光ビーム (同図(c)) を用いてNA0.80の対物レンズによる大気中のトラップ可能となり、また、プローブシステムの作動距離を0.3 mmから3.4 mmに拡大することが可能となった。

## 7.4　プローブ球振動測定

5章で設計試作されたプローブシステムの動作確認をプローブ球の制御および位置測定することで行う。プローブ球の振動制御は横方向および光軸方向の2方向とし、プローブ球位置測定はPDとQPDを用いた2通りの場合を考える。

**横方向のPDによる測定**　プローブ球を1000 Hzの周波数、300 nmの振幅で励振した時の時間信号を図7.3(a)に示す。正弦波の励振に対してプローブ信号も正確な正弦波を示している。また、時間信号をFFT解析した周波数成分を同図(b)に示す。1000 Hzの励振に対して、高調波の2000 Hzの信号が数%現れているが、高いS/N比で信号を取得できている。また図7.3(c)は励振振幅を増加させたときのプローブ信号の線形性を示す。励振振幅500 nm程度までは線形性を保つがそれ以上は緩やかに非線形になる。これより、プローブ球の励振およびプローブ球位置測定が500 nmの振幅まで正確に行われていることが確認できた。

**光軸方向のPDによる測定**　プローブ球を周波数900 Hz、AODに入力する電圧変調900 mVで光軸方向にプローブ球を励振した。時間信号を図7.4(a)に、その周波数成分を同図(b)に示す。正弦波の励振に対し、プ

ローブ信号はやや乱れた波形を示した。しかし周波数成分は横振動と同様に高調波が数%含まれているものの高いS/N比を示した。図7.4(c)に示すように振幅の線形性が200 mVであり、時間信号波形の乱れはこれが原因と考える。光軸方向は特に線形性が低い。この原因を探るため、図7.5(a)に示すように3 μm程度に先鋭化されたガラスプローブの先にシリカ球を光硬化性樹脂で接着し、そのガラスプローブをZ軸のピエゾステージでレーザスポットに対して相対的に移動し、プローブ信号の変化を見た。その結果を図7.5(b)に示す。今回の実験ではプローブ球中心とレーザスポットの位置関係は明確に判断できないため、横軸のどの時点がプローブ捕捉位置であるかわからないが、いずれにしてもZ方向に対してプローブ信号の線形性領域はかなり狭いことがわかる。これも図7.3(a)の時間信号の波形の乱れに影響していると考えられる。

**横方向のQPDによる測定**　プローブ球を2000 Hzの周波数、300 nmの振幅でX軸およびY軸方向に励振した時の時間信号をそれぞれ図7.6(a)(d)に示す。数%程度の相互干渉を見せるが、X軸とY軸の励振がそれぞれ独立に測定できている。次にそれぞれの周波数成分を図7.6(b)(e)に示す。縦軸が対数表示であることに注意すると、高調波成分は無視できるほど小さく高いS/N比を得られている。図7.6(c)(f)にXY軸の振幅線形性を示す。それぞれ、600 nm程度の振幅線形性が得られた。ただし、同励振振幅に対するXY軸の感度が異なる。これはQPDの増幅回路による差であるため、以降の実験ではX軸の信号に1.4を補正数として乗じた値を用いる。以上より、QPDを用いた2軸のプローブ運動を測定可能であることが検証された。

## 7.5　振動プローブ力学モデル

本プローブは振動プローブとして提案するものであり、プローブ振動の周波数特性を把握することは位置検出時の物理現象を理解する上でも必要不可欠である。以下にブラウン運動および強制励振モデルについて述べる。レーザトラップで空間に捕捉された粒子は質点$m$として見なされ、光放射圧によるばね力$k$によってレーザスポット中心に引込まれる。その際、周辺流体の粘性抵抗$D$を受ける。シングルビームで捕捉される単一プローブ球に関して、プローブ球の捕捉状態では、プローブ球はブラウン運動によるランダム力により微小変位を繰返す。これはLangevin方程式[331]によってよく表されることが知られている[232]。

$$m\ddot{x} + D\dot{x} + kx = \sqrt{2k_B TD}\eta(t) \tag{7.5}$$

ただし、$x$はブラウン運動によって揺らぐプローブ球の軌跡、$m$はプローブ球質量、$D$は粘性抵抗係数、$k$はばね定数、$k_B$はBoltzmann係数、$T$は絶対温度である。右辺は特にブラウン運動によるランダム力を意味する。また特に、$\eta(t)$は

$$\langle \eta(t) \rangle = 0;\ \langle \eta(t)\eta(t') \rangle = \delta(t-t') \tag{7.6}$$

という特性を持つ。つまり時間$t$と$t'$において相関を持たない。ここで、$x$に関してFourier変換によって周波数領域に変換すると、

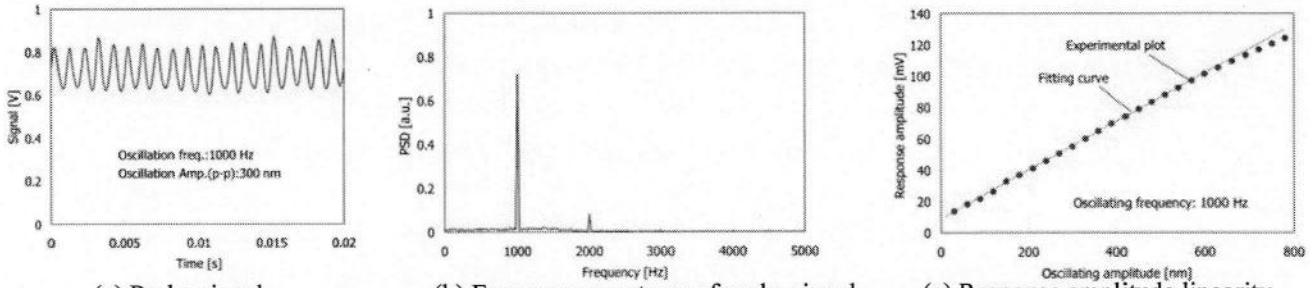
$$\tilde{x} = \int_{-T_m/2}^{T_m/2} e^{i2\pi f_k t} x(t)dt \qquad f_k \equiv k/T_m \quad \text{k: integer} \tag{7.7}$$

となる。$T_m$はサンプリング時間である。これを式(7.5)に適用すると、

$$\tilde{x} = \frac{\sqrt{2D_e}\tilde{\eta}_k}{\omega_n^2 - (2\pi f_k)^2 - i4\pi f_k \xi \omega_n};\quad \omega_n = \sqrt{k/m},\ \xi = D/2\sqrt{mk},\ D_e = k_B TD/m \tag{7.8}$$

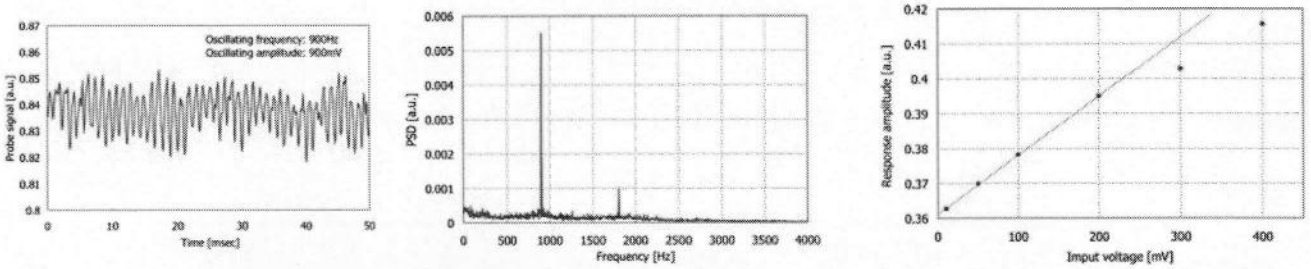
である。これよりプローブのパワースペクトルは

$$P_k = \langle |\tilde{x}|^2/T \rangle = \frac{2D_e/(2\pi)^4}{(f_n^2 - f_k^2)^2 + (2f_k f_n \xi)^2} \tag{7.9}$$



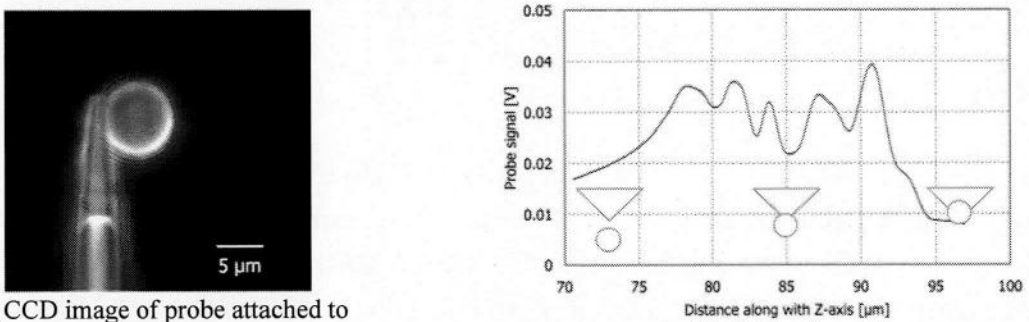

(a) Probe signal. (b) Frequency spectrum of probe signal. (c) Response amplitude linearity.

Figure 7.3: Probe signal of transversally oscillating probe



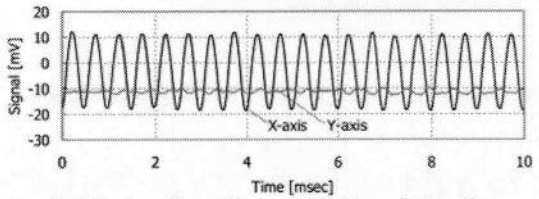

(a) Probe signal. (b) Frequency spectrum of probe signal. (c) Response amplitude linearity.

Figure 7.4: Probe signal of axially oscillating probe

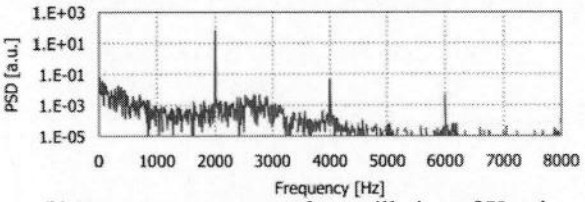



(a) CCD image of probe attached to glass probe. (b) Calibration data.

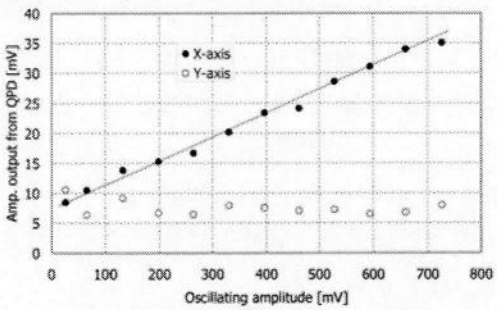
Figure 7.5: Probe signal of axially oscillating probe



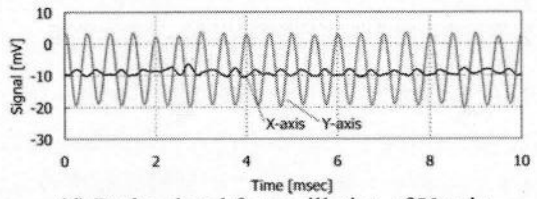

(a) Probe signal for oscillation of X-axis.



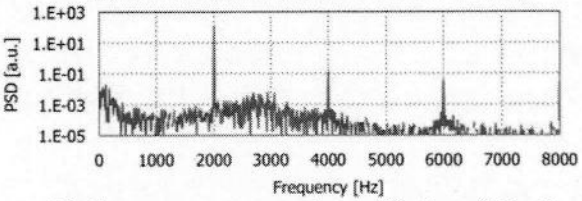

(b) Frequency spectrum for oscillation of X-axis.



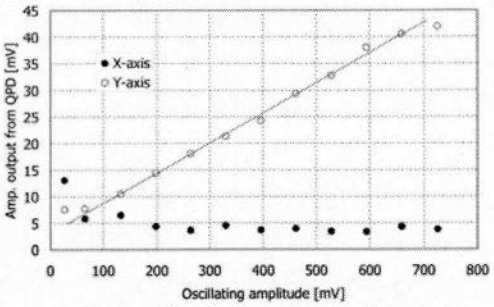

(c) Amplitude linearity for X-axis.




(d) Probe signal for oscillation of Y-axis.




(e) Frequency spectrum for oscillation of Y-axis.




(f) Amplitude linearity for X-axis.

Figure 7.6: Probe signal detected by QPD for oscillation along either X- or Y-axis.

となる。また、一方で、レーザのスポット変位によって強制的にプローブ球に振動を与える強制振動モデルでは、正弦波振動するレーザスポット変位によるバネ力が式(7.5)に加わり、

$$m\ddot{x} + D\dot{x} + k(x - A\sin ft) = \sqrt{2k_B TD}\eta(t) \tag{7.10}$$

となる。ただし、$x$はプローブ球の変位、$A\sin ft$はレーザスポット変位である。正弦波振動による外力によって、プローブ球も同様に調和振動応答を示すと認めると、プローブ振動は振幅を$X$、位相遅れを$\varphi$として、

$$x = X\exp i(2\pi ft - \phi) \tag{7.11}$$

と表せる。ここで、スポット変位によるバネ力に比べてブラウン運動の力は微小であるため、式(7.10)の右辺は無視することが出来る。式(7.11)を式(7.10)に代入して、解を求めると、振幅と位相は

$$X = \frac{f_n^{\,2}A}{\sqrt{(f_n^{\,2} - f^2)^2 + (Df/2\pi m)^2}} \tag{7.12a}$$

$$\phi = \cos^{-1}\frac{f_n^{\,2} - f^2}{\sqrt{(f_n^{\,2} - f^2)^2 + (Df/2\pi m)^2}} \tag{7.12b}$$

となる。$f_n$は共振周波数であり、

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{7.13}$$

という関係を持つ。

**実験**　上記モデルを検証するため、プローブ球のブラウン運動と強制励振に対する応答振動を測定した。受光器は高感度測定可能なPDを用い、サンプリングレートは20 kHzとした。プローブ球の捕捉レーザパワーは450 mWとした。まず、ブラウン運動は光軸垂直方向の直線偏光と平行な方向のブラウン運動を測定し、得られた時間信号をFFT解析によって周波数成分を求めた。次に、強制励振についても同様に、光軸垂直の直線偏光と平行方向に変位を300 nmで励振した。励振周波数を50 Hz間隔で100 Hzから6000 Hzまで取得し、それぞれの周波数においてロックイン検出によって応答振幅と位相遅れを測定した。

**結果**　ブラウン運動および強制振動の周波数応答を図7.7、7.8に示す。ブラウン運動は式(7.9)、強制励振は式(7.12)によってフィッティングで得られた曲線も示した。両方ともモデル式とよく一致し、また、ブラウン運動と強制励振それぞれから得られた共振周波数は2851 Hz、2950 Hzであり100 Hzの誤差は生じたものの4%以下の誤差で一致した。この共振周波数のズレや、ブラウン運動は非常にノイズが大きい理由を考察すると、ブラウン運動ではプローブ球は3次元的に変位していることに依ると考えられる。PDは1方向変位のみを測定しておりモデル式と一致を見せたが、他方向の振動もプローブ信号に混在し重畳するため、共振点がややずれ、またノイズが大きくなると考えられる。

## 7.6　ばね定数

プローブのばね定数は位置検出精度に大きく寄与してくる。1章の表1.2に示した様に、位置検出プローブは約100 N/m程度のばね定数を持つ。また一方でAFMのプローブは数N/m程度である。一般的には高精度な測定を行うためには、高いばね定数を設定することで測定のばらつきを低くすることができる。しかしながら、ばね定数が大きいと位置検出の測定力が大きくなるというトレードオフの関係である。本プローブでは、ばね定数が一般的なプローブよりも遥かに小さいことが3章で予測された。測定の精度(ばらつき)は大きくなるが、その反面、プローブが測定面に接近したときの影響または挙動を高感度に知ることができる。この様に、プローブのばね定数を知ることは非常に重要である。ばね定数を測定した。

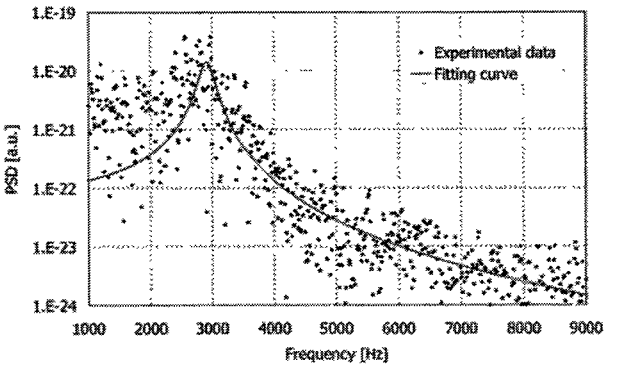
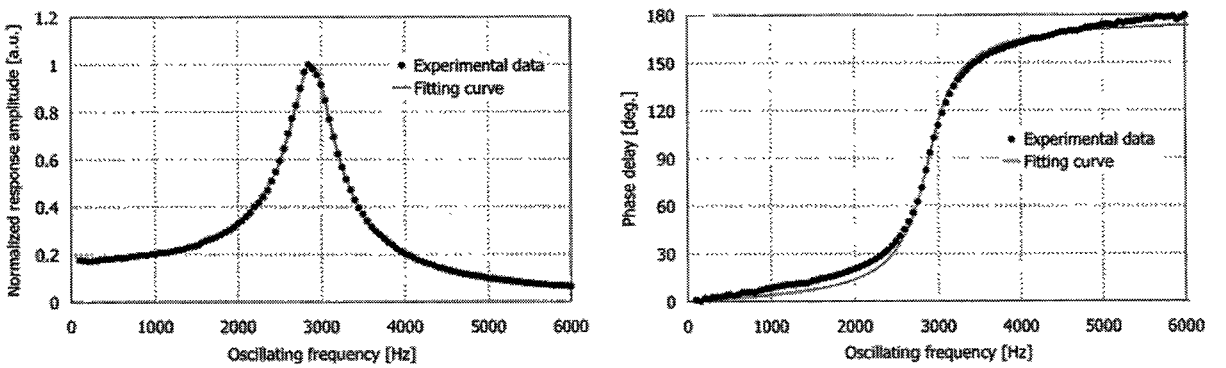



Figure 7.7: Frequency spectrum of probe fluctuation due to brownian motion.




(a) Response amplitude. (b) Phase delay.

Figure 7.8: Frequency response of transversally oscillating probe.

**実験**　強制励振によって得る周波数応答に式(7.12)のモデル式の最小自乗フィッティングを行うことで、共振周波数$f_n$の推定を行った。フィッティングのパラメータは$f_n$と$D$とし、フィッティングアルゴリズムは非線形最小2乗問題の一般的なLevenberg-marquardt (LM) 法†を用いた。$f_n$を推定後、式(7.13)によってばね定数を求めた。プローブ球は8 μmとし、対物レンズはNA0.95を用いた。捕捉ビーム条件として直線偏光およびラジアル偏光に対し、レーザ強度を変化させ光軸方向および光軸垂直方向のばね定数を測定した。ただし、直線偏光に関しては偏光方向と平行な方向を振動方向とした。次に、プローブの2次元平面上のばね定数の均一性を確認するため、光軸垂直方向に対して180 °方位のばね定数を測定した。偏光は直線および円偏光とした。

**結果**　代表的な周波数応答を図7.9に、ばね定数を図7.10に示す。プローブのばね定数は数十μN/mオーダで、かつレーザ強度変化に線形であることが確認され、光線追跡解析とも一定の統計誤差を持って相関を持つことがわかった。解析との誤差は、レンズ収差、照射レーザ強度の過小評価[332]、レーザアライメント、粒径および粒子形状誤差などが考えられる。また、直線偏光では光軸方向と光軸垂直方向では30%程度の差があるのに対し、ラジアル偏光では14%であり、3次元的なばね定数のばらつきが改善されており、3次元的な等方性が向上している。次に、2次元の等方性に関して、直線偏光では5%程度のばらつきがあるのに対して、円偏光では2%程度に改善されており、円偏光を用いることで2次元的な等方性が高まることも確認できた。

## 7.7　環境変化に対するプローブ感度

式(7.10)に従えば、本プローブシステムの特性はばね定数$k$と粘性抵抗係数$D$により可変である。そこで、本プローブシステムがばね定数や粘性抵抗係数の変化にどの程度の感度を持つのかを検証する。ばね定数は前節の結果を用い、粘性抵抗係数は環境圧力を変化させることで制御した。

始めにレーザ強度変調に伴う横振動のばね定数の変化の感度について図7.11に示されるようにレーザ強度が590 mWから200 mWに変化したときにばね定数が184 μN/mから60 μN/mまで変化しており、その変化の感

† 非線形問題に対して最適解を求める1手法。特徴は最急降下法のロバスト性とNewton法の収束の速さを併せ持つ。MATLAB, Octave, gnuplotなどでも用いられている一般的な手法である。

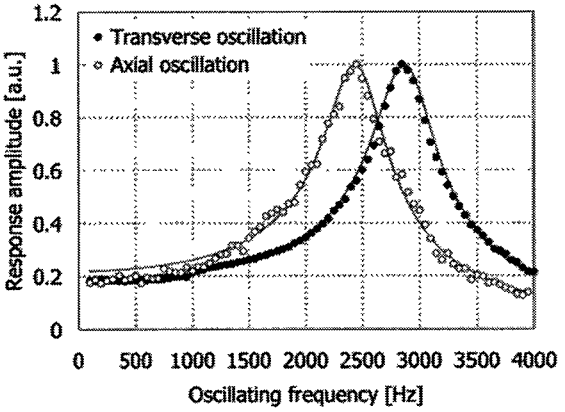
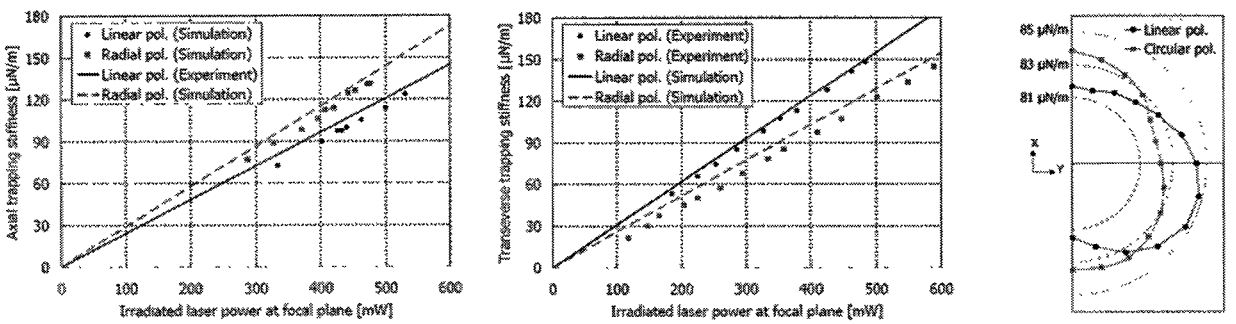



Figure 7.9: Frequency response of axially and transversally oscillating probe.




(a) Axial stiffness. (b) Transverse stiffness. (c) Transverse uniformity.

Figure 7.10: Stiffness of probe system.

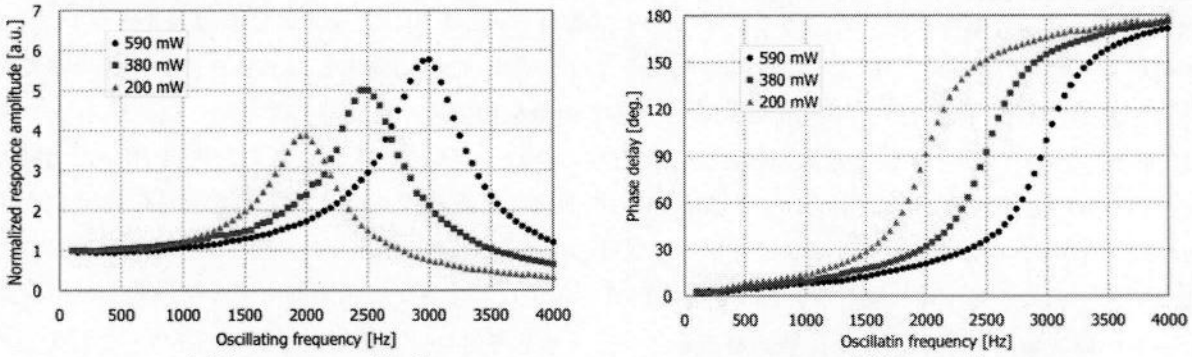
度は0.32 μN/(m·mW)であった。図7.12に本実験で用いるレーザ強度の時間的変化を示しているが、1.5時間辺りの変化は13 mW程度であるため、ばね定数のばらつきは 4 μN/mであり400 mWでプローブを捕捉している時に3%以下の安定性を有している。

**実験** 環境圧力を変化させ粘性抵抗係数の影響を調べた。粘性係数$\eta$は気体圧力には依存せず、温度によって変化する。その関係式はSutherlandの式で与えられる[333]。

$$\eta = \eta_o \left(\frac{T_o + c}{T + c}\right)\left(\frac{T}{T_o}\right)^{\frac{3}{2}} \tag{7.14}$$

ここで、$\eta_o$は温度$T_o$での粘性係数である。Boyle-Charlesの法則により気体圧力を下げると、閉空間内の温度は低下する。このようにプローブ球環境圧力変化から粘性係数を変化させた。図7.13に示すようなアクリル製のケースを作成した。ケースは対物レンズを通すゲージポート、内部圧力測定のBourdon管、真空引きのための排気バルブがある。ケース内は油回転式ポンプにより真空状態にする。圧力を順次下げていくときの周波数応答を取得し、フィッティングにより粘性抵抗係数を測定し、Stokes則から粘性係数を推定した。

**結果** 周波数応答を図7.14に示し、各圧力下で測定された粘性係数を表7.3に示す。ただし、粘性係数は大気圧時を1とし相対値を表示した。環境気体の圧力低下とともに測定の粘性が低下しているのが確認できる。100 kPaから1 kPaに変化したとき測定された粘性抵抗係数は半分に低下した。このように粘性抵抗係数が1/2に変化した時、プローブ球の応答振幅は共振点で約2倍以上に大きくなり、定量的な評価は行えなかったが、粘性抵抗係数変化に対して感度よく応答するプローブであることは確認できた。




(a) Response amplitude. (b) Phase delay.

Figure 7.11: Frequency response with variable trapping laser power.

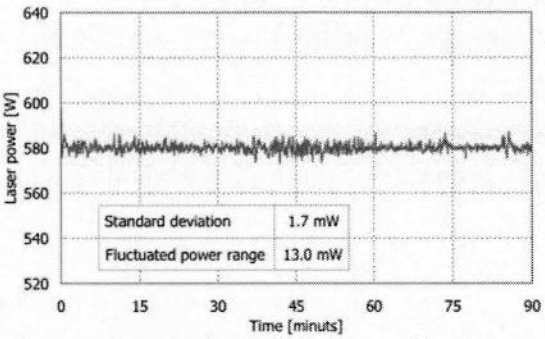



Figure 7.12: Intensity stability of trapping laser power.

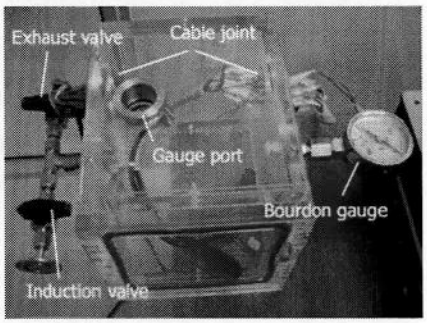
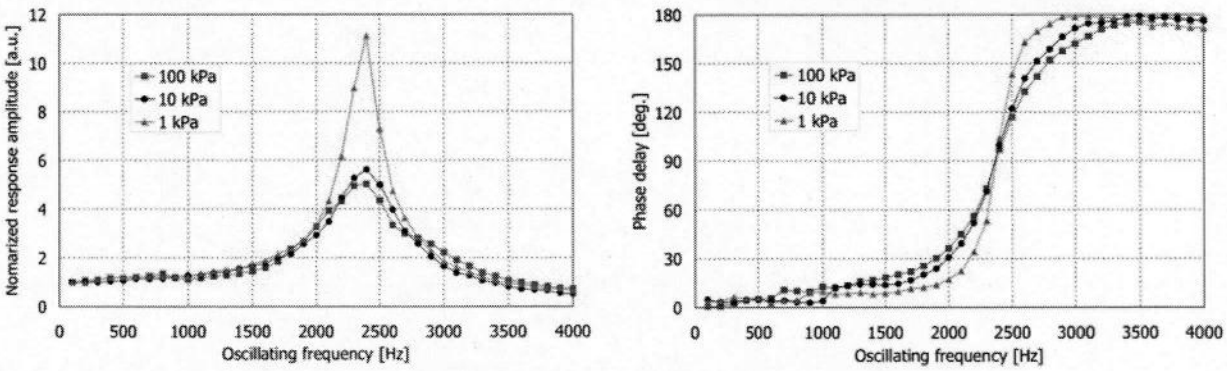



Figure 7.13: Acrylic acid resin box for vacuum environment.




(a) Response amplitude. (b) Phase delay.

Figure 7.14: Frequency response with variable atmospheric pressure.

Table 7.3: Relative viscous drag coefficient for variable atmospheric pressure.

| Pressure [kPa] | 100 | 10 | 3 | 1 | 0.1 |
|---|---|---|---|---|---|
| Relative viscos drag coefficient | 1 | 0.77 | 0.50 | 0.40 | 0.24 |

## 7.8 結言

ここでは、振動プローブの特性を評価した。シリカマイクロ球の大気中トラップ方法を提案した。また、振動プローブのモデルを構築し、レーザ強度や粘性抵抗係数に対して振動変化することがわかった。以下に得られた知見をまとめる。

- 大気中でのレーザトラップ方法を提案した。プローブ球と測定面の吸着力を低減するために、プローブ球にメチルコーディングを施し、基板材料には超硬を採用した。また、基板表面に数百nmの周期的な溝構造を加工することでVan der Waals力や液架橋力の影響を低減し、その結果、85%の高い確率で任意のプローブ球を選択的に捕捉可能となった。

- 光軸方向トラップ効率を測定した。ガウシアンおよび輪帯ビームを用い、偏光には直線偏光とラジアル偏光を用いた。輪帯ビームにすることで光軸方向のトラップ効率は2倍に向上した。また、ラジアル偏光を用いることで2.5倍のトラップ効率改善に成功し、作動距離を10倍以上に改善した。
- PDとQPDを用いたプローブ球の光軸方向および横方向のプローブ球変位を測定した。PDを用いた光軸方向変位は線形性が低く乱れた波形を示し、200 mVの励振までは線形性を持って測定可能であった。横方向はPDおよびQPDともに正確に高いS/N比でプローブ球の位置を測定することが可能であった。
- 振動プローブの力学モデルに関して、Langevin方程式を基礎にバネダンパ系振動モデルを構築した。振動プローブの周波数応答を測定した結果、モデルとよく一致しており、本モデルによってプローブ球の運動を表現できていることがわかった。
- プローブばね定数測定の結果、光線追跡法で得られた結果と10%以下の誤差で一致した。また、ラジアル偏光によって3次元のばね定数のばらつきを14%にすることが出来た。円偏光を用いることで、光軸に対して水平面上の2次元のばね定数のばらつきを2%程度に改善した。
- 最後にプローブ球の環境変化に対する感度を検証した。レーザ強度変動に対するばね定数の感度は0.32 μN/(m·mW)と安定であり、定量的な評価は困難であったが、粘性抵抗係数変化に高感度な変化を示した。

# 第8章　位置検出原理の検証

## 8.1　緒言

光放射圧振動プローブが測定面近傍で相互作用力を受け振動減衰するという現象を用いて位置検出の高感度化が示された。本章では、振動プローブが測定面近傍で経験する振動減衰について、その現象を理解するとともに、測定面近傍でのプローブ特性を評価する。

## 8.2　位置検出原理の解明

4章において振動プローブが測定面に接近すると振動が減衰することが確認された。プローブ球に何らかの相互作用が働き、プローブ球の振動運動が防げられている。プローブ球に作用する力は何であろうか。例えばプローブ顕微鏡では、ナノメートルオーダに先鋭化されたプローブが原子間力、磁力、摩擦力、トンネル電流などを検知する。特にAFMタッピングモードでは、カンチレバーが測定面に接近する過程で、順に、流体抵抗によるダンピング、静電気力、水蒸気層のダンピング、Van der Waals力 (引力)、クーロン力 (反発力) などが作用する[260]。プローブ半径や材質およびばね定数、プローブ先端と測定面の距離に応じて支配的な作用力は異なる。液中トラップでは、プローブ球が面に近づくと表面力 (Suface force) が作用し[334, 335]、プローブに働く粘性抵抗係数が増大することが知られており、またNSOMで用いられるShare forceでは水蒸気層による粘性抵抗によってプローブ先端と表面との近接を測定する[336-338]。

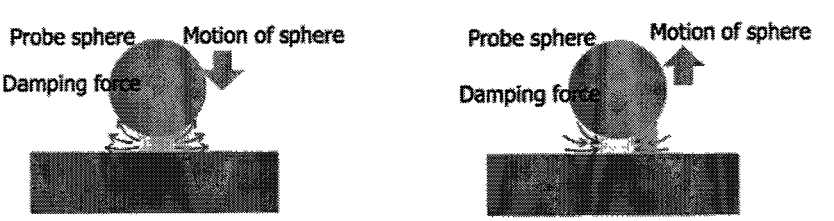
本プローブについて考えた場合、3章の数値解析からプローブ球が測定面に接近すると、反射光により反発力を受けることからも、数nmの距離で働く原子間力による力であるとは考えにくい。集光レーザの生成する強い電磁場によってプローブ球が双極子のような振る舞いをする場合、静電気力が働く可能性はあるが、光放射圧に匹敵する力が作用するとは考えにくい。マイクロオーダでは物質表面の水蒸気層の存在が知られており[339, 340]、水蒸気によってプローブ球の振動減衰が予想される。AFMタッピングモードのカンチレバーにおいても知られているが、振動物体が物質に接近すると、物体間の気体が高速に圧縮膨張を繰返すことで、振動物体の振動が減衰する。図8.1(a) に示されるように、振動物体と壁面間の気体が物体の移動に伴って圧縮されると、反発力が振動するプローブ球に作用する。また、プローブ球が壁面から離れる場合も同様である。このとき、気体の粘性抵抗によってこの抵抗力が異なる。気体の粘性が高い"ネバネバ"な気体の場合、プローブ球に作用する力は大きくなり、粘性が小さい"サラサラ"な気体の場合、作用力は小さくなる。また、気体圧力が下がり高い真空状態になると、ほとんど粘性力は作用しない。

本節では、このダンピング効果を確かめるため、1次元振動をプローブ球に与え測定面に接近させることで、振動減衰の現象を調査する。

### 8.2.1　粘性抵抗係数の変化[342]

球が十分広い自由空間で振動している時、周囲流体から受ける粘性抵抗はStokes抵抗であることがよく知られており、レーザトラップにおいてもよく用いられている。粘性抵抗係数を$D$とするとStokes抵抗は、

$$D = 6\pi r\eta \tag{8.1}$$




(a) Compression.　(b) Expansion.

Figure 8.1: Damping effect imposing the probe sphere.

である。ただし、$r$はプローブ球の半径、$\eta$は粘性係数である。しかし、基板や測定面に近接すると、Stokes抵抗は適用できない。そこで文献341に示されるように、補正項をもうける。劈開面に対して水平に振動している時 (8.2b)、垂直に振動している時 (8.2c) はそれぞれ、

$$D = 6\pi r\eta' \tag{8.2a}$$

$$\eta' = \frac{\eta}{1 - \frac{9}{16}\frac{r}{h} + \frac{1}{8}\left(\frac{r}{h}\right)^3 - \frac{45}{256}\left(\frac{r}{h}\right)^4 - \frac{1}{16}\left(\frac{r}{h}\right)^5} \tag{8.2b}$$

$$\eta' = \frac{4}{3}\eta\sinh\alpha\sum_{n=1}^{\infty}\frac{n(n+1)}{(2n-1)(2n+3)}\left[\frac{2\sinh(2n-1)\alpha + (2n-1)\sinh 2\alpha}{4\sinh 4(n+1/2)\alpha - (2n+1)^2\sinh^2 2\alpha} - 1\right] \tag{8.2c}$$

$$\alpha = \cosh^{-1}(h/r) = \ln\left\{h/r + \sqrt{(h/r)^2 - 1}\right\} \tag{8.2d}$$

となる。これを図8.2(a)に示す。ただし、十分遠方の値で正規化した。このように振動プローブが測定面に接近すると、10 μm程度遠方から影響を受けはじめ、数μm近傍で粘性抵抗が急激に増大する。

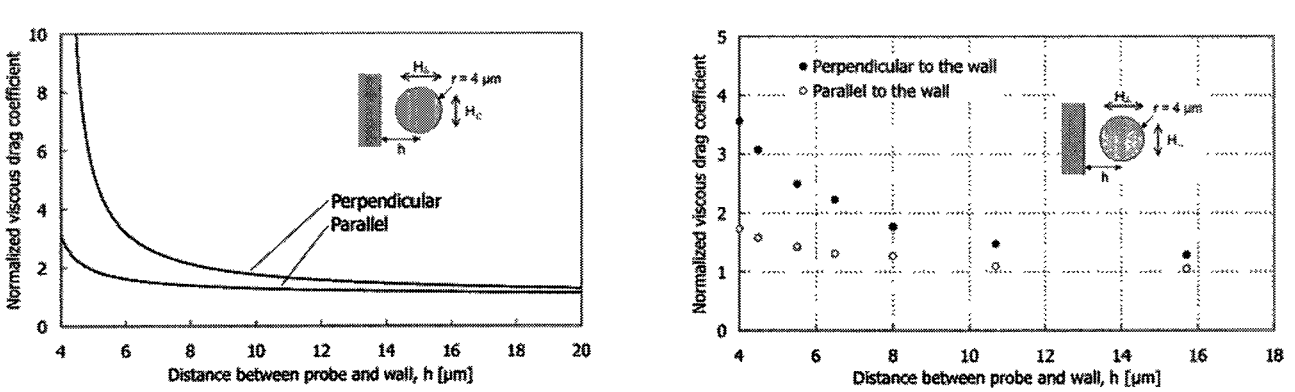
**実験**　測定面へプローブ球を接近させたときの粘性抵抗係数の変化を測定する。測定面にはシリコンの劈開面を用い、垂直面に対して水平方向にプローブ球を接近させた。振動方向は面に対して垂直および平行とする。プローブ球には8 μmのシリカ球を用い、対物レンズはNA0.95を用いた。また、PDを用いてプローブ球位置を測定した。手順はプローブ球を測定面に接近させ、各々の位置で周波数応答を取得し、式(7.12)で$D$および$f_n$をパラメータにフィッティングを行い、粘性抵抗係数$D$を推定する。

**結果**　実験結果を図8.2(b)に示す。測定値は自由空間での粘性係数で正規化した。両振動方向とも粘性抵抗係数は測定面に近づくにつれ増加した。垂直方向は平行方向より粘性抵抗係数の増加率が高いという事実は定性的に一致するが、式(8.2)と定量的一致は見られなかった。式(8.2)内の$\eta$は温度や湿度 (付録VI) および表面材質に影響される[334]。本実験では温度や湿度の測定は行っていない。結果として、振動するプローブ球が測定面に接近すると、水蒸気層による粘性抵抗が増大することが示された。

## 8.2.2　ダンピング効果を用いた位置検出

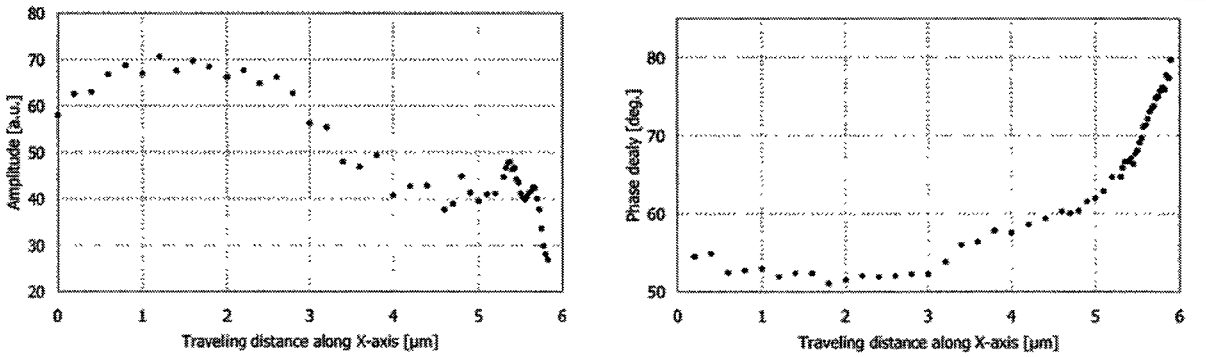
測定面数μmの近傍でプローブ球は粘性による抵抗力を受けることがわかった。次に、振動するプローブ球を測定面に接近させた時のプローブ球の振動状態の変化を確認し、振動プローブを用いた表面の位置検出の特性について評価する。

**実験**　前項と同様の条件で実験を行う。ただしプローブ球の振動は、現象がより顕著に現れる測定面と垂直方向とした。共振周波数1700 Hzに対して周波数1000 Hz、振幅200 nmで励振した。測定面の10 μm程度離れた位置から200 nm間隔で測定面にプローブ球を接近させ、変化が大きくなると50 nm間隔に変更した。それぞれの位置で振幅と位相を取得し、同条件で位置検出を5回くりかえした。




(a) Analytical curve.　(b) Experimental data.

Figure 8.2: Viscous drag coefficient change near surface.




(a) Response amplitude. (b) Phase delay.

Figure 8.3: Damping of probe oscillation during probing to surface.

**結果** 得られた振幅と位相の変化を図8.3に示す。横軸はプローブ球の測定面への移動距離を表す。まず、応答振幅の減少および位相遅れの増加が確認でき、プローブ振動のダンピング現象が見られた。応答振幅に関して、4 μm程度遠方から徐々に減衰し1 μm以下で急激に変化している。特に近傍で振幅変化に線形性が見られ、その傾きは126 a.u./μmであった。それらの点のばらつきが0.79 a.u.であったため、6 nmの変化を分解可能である。次に位相に関して、3 μm程度遠方から変化しはじめ1 μm以下で急激な変化を示した。その同様に傾きを求めると、25 deg./μmであった。信号のばらつきは0.55 deg.であり、それらから分解能は22 nmであった。位相遅れについて閾値を80 °と定め、5回の繰返し測定を行った結果、検出された点のばらつきは13.7 nm (σ)であった。

このように、本実験によって、振動プローブが測定面近傍で水蒸気層のダンピング効果によって振動減衰され、その時の振幅と位相値を観測することで高い検出感度が示された。

測定長さについて考察する。測定長さとは、一般的には、プローブ球と測定面の接近点からプローブ信号を取得可能なプローブの押し込み距離である。本プローブでは、測定面との接触がないため、一般的な定義とは異なる。そこで、プローブ信号が線形変化する距離を測定長さとすると、図8.3より振幅で100 nm程度、位相で500 nm程度であった。この線形変化の領域に閾値を設定し、測定面の位置を検出する。

### 8.2.3 傾斜面位置検出

振動プローブで20 nm程度の分解能で表面位置を検出可能であることを示した。次に、3次元形状を測定するために、角度を持った表面の位置検出を行う。

**実験** 振幅に着目し、30 °、45 °、60 °に傾いた測定面に対してプローブを接近させ位置検出を行った。実験装置は4.4節のものを用いた。対物レンズはNA0.95を用いた。振動は横振動、励振周波数500 Hz、プロービングは光軸方向とし、25 nm間隔で応答振幅を取得した。測定面に直径168 μmの標準ガラス球を用いた。

**結果** 図8.4に振幅減衰の結果を示す。横軸は振幅が最も減衰した点を0とし、マイナス方向からプラス方向に向かって位置検出を行っている。60 °、45 °では振幅減衰が確認できるが、30 °では振幅減衰がほとんど見られない。45 °以上の傾斜を持った面では位置検出が高感度に可能であるが、光軸に対して垂直に近い面では、明確な振幅減衰が確認できなかった。

水平面の位置検出が困難であった理由は以下が考えられる。1つは3章で検討されたように、反射光によってプローブが接近しにくくなること。次に、プローブ信号の乱れが挙げられる。プローブ球位置測定のLDがプローブ球を透過 (前方散乱) して、測定面で反射した光が再度対物レンズによって集光され、PDに入射するためにPDの受光量が増え振幅変化が不明確になっている。最後に、定在波の影響である。トラップレーザの

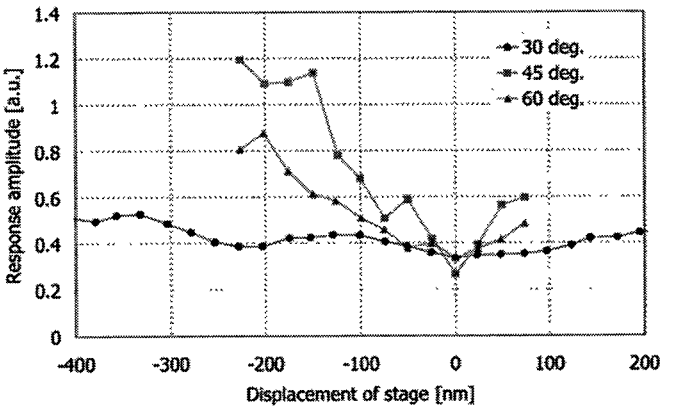


Figure 8.4: Difference of probing characteristic by inclinations of surface.

前方散乱光と測定面の反射光が光干渉し、プローブ球周辺に定在する電場分布が生成される[269-272]。その定在波がプローブ球に作用し、プローブ球の振動状態に何らかの変化を与えていることが考えられる。

水平面の測定は検出が困難であった。これを解決することは3次元プローブとしては必要不可欠である。

## 8.3 水平面位置検出

### 8.3.1 定在波の存在

P. Zemanekらは光軸に対して垂直な面にプローブ球を接近させ、測定面からの反射光と捕捉レーザとでプローブ球周辺に定在波を生成させるStanding wave trapを行っている[273]。そのプローブ球の位置的挙動は定在波に影響を受け、周期的に変動することが報告されている。本研究でも、水平面の測定時に同様の影響が発生している可能性が高く、それが前節でみられた位置検出特性に反映していると考えられる。そこで、定在波がプローブ球に与える影響を調査する。

**実験** 直径8 μmのシリカ球をNA0.95の対物レンズを用いて、直線偏光のガウシアンビームで捕捉した。このプローブ球の下方にシリコンウェハを水平に設置し、そのシリコンウェハに対して光軸方向にプロービングを行ったときの、プローブ球の光軸方向の変位を検出器PDを用いて測定した。レーザ強度は400 mWとした。測定を5回繰り返し行い現象の再現性も確認した。

**結果** 図8.5に、任意の位置からプローブ球を水平面に接近させたときのプローブ信号を示す。横軸は座標ステージZ軸の移動量を示し、移動量が増えるほど測定面に接近している。図のように、測定面に近づくと反射光量が大きくなる。また、プローブ信号はのこぎり波状の波形を示し、つまり、プローブ球が光軸方向に沿って上下に振動してる。このノコギリ波上の挙動はP. Zemanekらの示す結果と一致していることから、定在波によるものであると考えられる。5回の実験の再現性は高く、波形はほぼ一致している。次に、プローブ信号の周波数成分を解析するためFFT解析を行った結果を図8.6(a)に示す。534 nmに鋭いピークを持ち、捕捉レーザの波長が1064 nmであることから、おおよそ半波長分の周期である。また、ステージの移動距離100 μmに渡ってこのノコギリ波の周期をカウントした度数分布を図8.6(b)に示す。平均の周期はFFT解析と同様に534 nmであり、標準偏差は16 nmであった。捕捉レーザの波長は1064 nmであり、定在波の周期は半波長分となることから、正確に定在波の影響が現れている。このように、定在波からの外力を受けて、プローブ球の平衡位置がシフトするという現象がみられ、その再現性の高さが確認された。

### 8.3.2 定在波の理論的解釈

定在波について理論的に考える。図8.7の様に、集光されたビームが粒子をぬけて測定面で反射するモデルを考え、反射光と捕捉レーザが光干渉することで、プローブ球周辺に定在波が生成される。ガウシアンビー

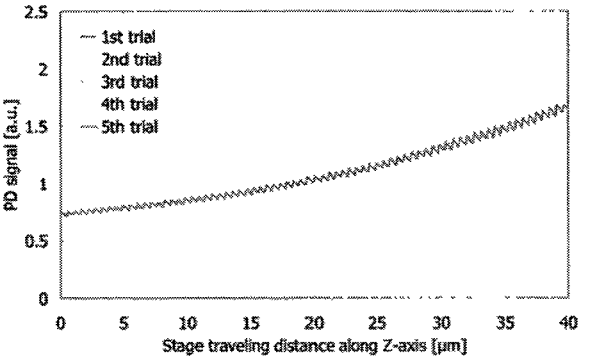
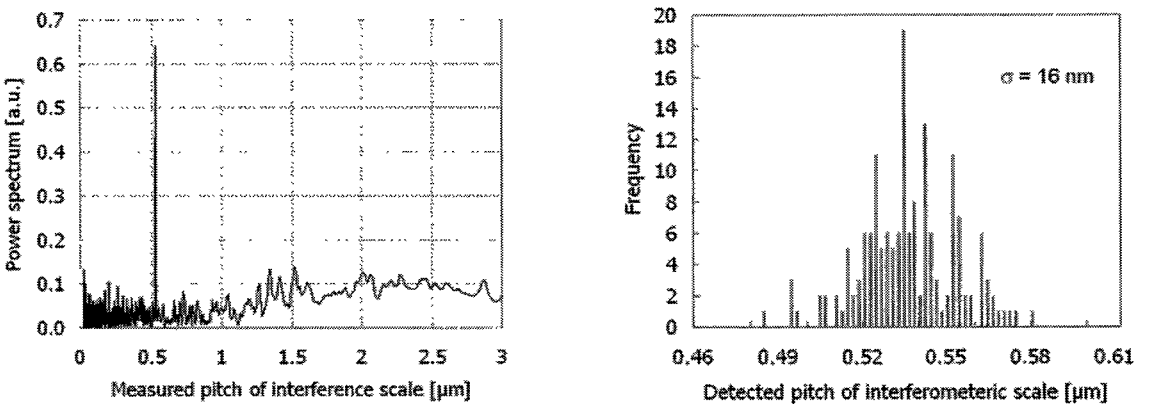



Figure 8.5: Affected probe signal by standing wave.




(a) Spatial frequency. (b) Measured pitches of standing wave.

Figure 8.6: Spatial pitches of standing wave.

ムでは近軸において強度が支配的となる。そこで単純のため、近軸のみの定在波を考える。入射光を$E_i$、反射光を$E_r$としたとき、

$$E_i = E_1 \cos(kz + \varepsilon) \tag{8.3}$$

$$E_r = E_2 \cos(-kz + \pi + \varepsilon) \tag{8.4}$$

となり、これらの重ね合わせを考え、強度を取ると、

$$I(z) = I_a[1 + \alpha \cos(4\pi z/\lambda)] \tag{8.5}$$

となる。これより定在波の強度分布の空間周波数は$z = \lambda/2$の時であることがわかる。波長1064 nmの捕捉レーザを用いた時の定在波強度周期は532 nmとなり、上の実験とよく一致する。W. Muらによると、プローブ球が定在波によって受ける定在波横断方向の力は式(8.5)を微分した

$$F_s = A\sin(4\pi x/\lambda) \tag{8.6}$$

で与えることができる[343]。3章の数値解析で、プローブ球がスポットから光軸方向にずれるときのプローブ復元力は、数 μmの範囲では十分線形であると見なすことができ*、

$$F = kx \tag{8.7}$$

となる。プローブ球は捕捉レーザと定在波から光放射圧による力を受ける。定在波の位相は式(8.5)に見られるように測定面を基準として動く。よって、測定面とプローブ球の相対位置が変化すると式(8.6)と式(8.7)による力のバランスが変化する。レーザトラップによってレーザスポット近傍に捕捉されるプローブ球に定在

* Subsection 3.2.2 in page 23.

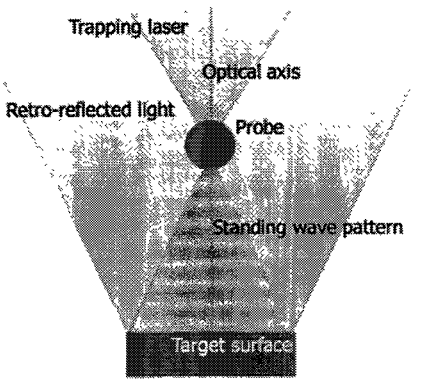
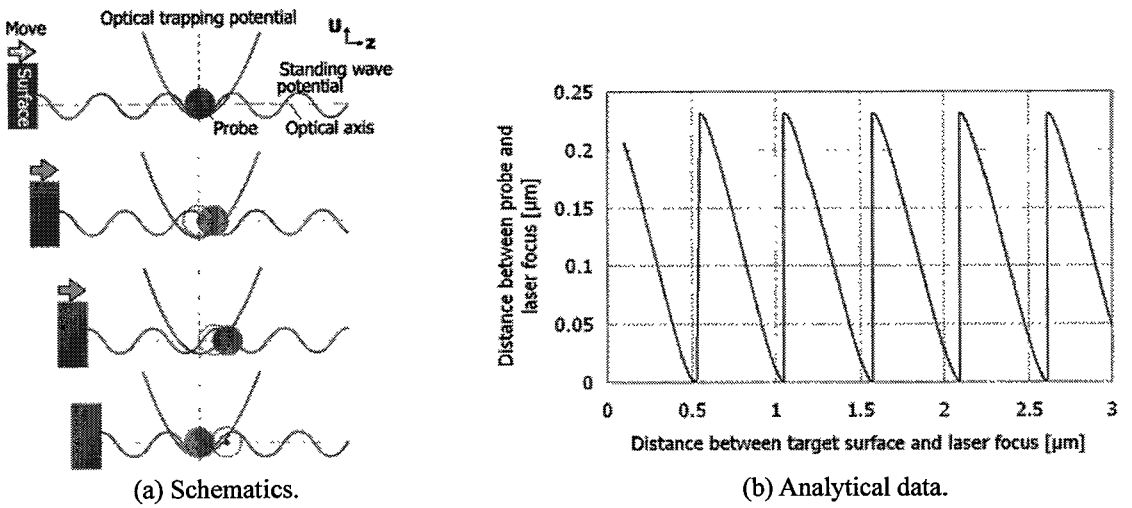



Figure 8.7: Standing influence near flat surface.




(a) Schematics. (b) Analytical data.

Figure 8.8: Estimated probe behavior in the standing wave.

波による外力が働き、プローブ球が変位する。変位が大きくなると、レーザトラップのばね力が定在波による力を上回り、再びレーザスポット近傍に引き寄せられる。このようにプローブ球はレーザトラップの平衡位置からシフトする (図8.8)。これらの見積りでは、プローブ球の変動周期は捕捉レーザの半波長であり、レーザ強度に依存するがプローブ球の変位量は数百nmである。

### 8.3.3 定在波がプローブ球に与える影響

定在波がプローブ球に位置変化を与えることがわかった。これは定在波による外力によるものであり、つまりプローブ球に外力が働くと式 (7.10)の右辺にはブラウン運動よりも大きな外力が加わる。その結果、プローブの力学的挙動も変化する。このプローブに作用する影響を調べるためプローブ共振周波数を求めた。

**実験** プローブ球に振幅300 nmの横振動を与え、光軸に水平方向に設置された測定面に対して、垂直方向にプローブ球を接近させ、約100 μm遠方から50 nm間隔で周波数応答を取得した。取得応答からフィッティングにより共振周波数を求めた。測定面にはシリコンウェハを用い、捕捉レーザ強度は200 mWとした。

**結果** 結果を図8.9に示す。約530 nmの周期で共振周波数の150 Hz程度の変化が確認できた。定在波によってプローブ球に外力が作用するが、その外力は空間的な分布を持ち、したがって、空間位置によって共振周波数が異なる。その結果、共振周波数がの周期的な変化が見られた。

### 8.3.4 プローブ励振条件の検討

定在波中でプローブ球のばね定数$k$が変化する。この場合、図8.10に示すように周波数応答は変化する。例えば、定在波の存在する状況下において共振周波数で励振している場合、プロービング中に振動プローブの応答振幅や位相が変化することが確認できる。一方で、励振周波数を共振周波数から離れた1000 Hz程度に

すると、ばね定数変化の影響は少なくなる。本プローブは、前節で確かめたように水蒸気層から受ける粘性抵抗力によるダンピング力を利用して表面位置を検出する。そこで、図8.11に粘性抵抗係数$D$のみを変化させたときの周波数応答の変化を示す。粘性抵抗係数が増加すると振幅の減衰が見られる。位相は励振周波数を境に遅れもしくは進みの影響が現れる。図8.3で振幅励振の方が分解能が高かった理由は、図8.11に見られるように応答振幅が粘性抵抗係数の変化の影響を受けやすいためであるとわかる。ここで、水平面を検出する際に必要なことは、定在波によるばね定数変化の影響を受けにくく、ダンピングによる粘性抵抗係数の変化の影響を受けやすい周波数帯域を選択することである。共振周波数より高い周波数では、応答振幅や位相がばね定数変化の影響を受ける。粘性抵抗係数の変化のみの影響を受けるには共振周波数よりも1000 Hz程度低い周波数が適している。この励振条件で定在波の影響を少なくしつつ、粘性抵抗の影響を顕著にし、分解能の高い位置検出が期待できる。そこで、実験的に励振周波数を変化させ、位置検出特性を評価する。

**実験**　プローブ横振動で座標検出を行う。まず、プローブ球捕捉後に周波数応答を測定し、それより共振周波数を推定した。今、共振周波数が2200 Hzである条件で水平面の検出実験を行った。振動振幅は260 nmとし、水平面に対して垂直にZ軸の座標検出を行う。プローブ球は連続的に測定面に接近させ、アプローチの速度は1.4 μm/sec.とした。座標検出は位相の値が急激に変化した時 (この場合0 °) を閾値とし、測定面にはシリコンウェハを用いた。座標検出は5回繰り返し行った。

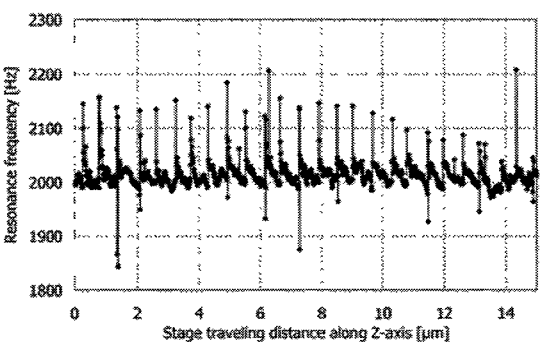
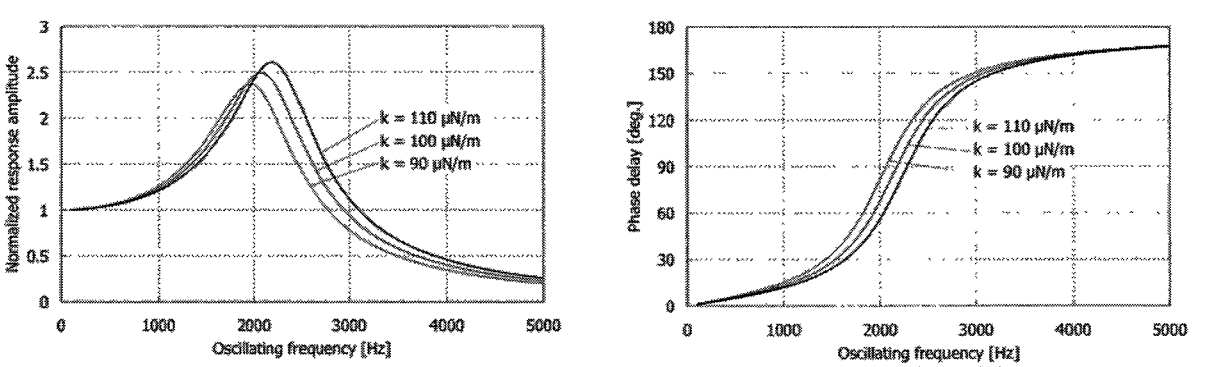
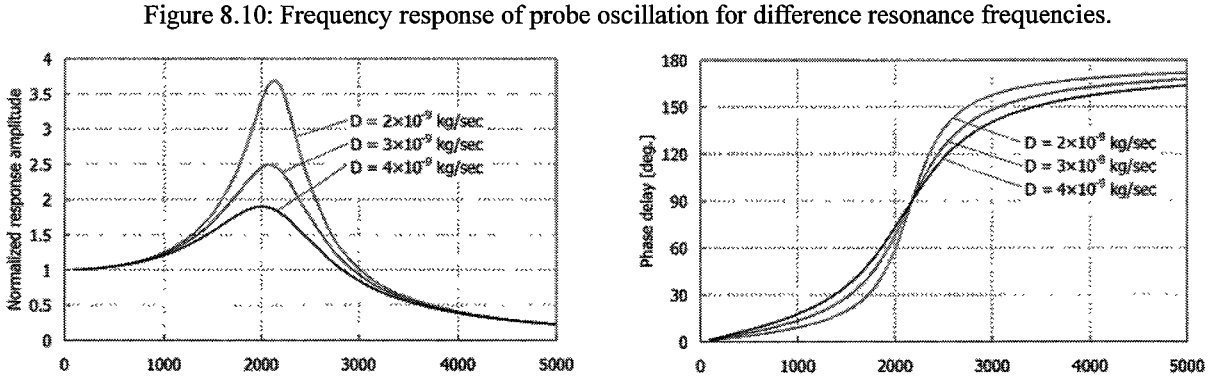



Figure 8.9: Periodic shift of resonance frequency of the probe due to the standing wave.




(a) Response amplitude.　　(b) Phase delay.

Figure 8.10: Frequency response of probe oscillation for difference resonance frequencies.




(a) Response amplitude.　　(b) Phase delay.

Figure 8.11: Frequency response of probe oscillation for difference viscous drag coefficients.

**結果**　プロービング時の信号波形を図8.12に示す。2300 Hzの励振周波数では位相と振幅共に周期的な変動が確認できる。励振周波数1000 Hzでは振幅変化は依然として見られるが位相変化は抑えられている。振幅の変動はPDの検出特性のためである。4章で触れたがPDを用いた測定では振動方向以外のプローブ球の変位もプローブ信号に含まれる。そのためプローブ球が定在波によって光軸方向に位置変動している影響が振幅として現れていると考えられる。Z軸座標検出結果を表8.1に示す。この結果は1回目の検出座標を基準として相対的な誤差を示している。表より、ばね定数の影響を受けやすい周波数 (2300 Hz) では、500 nmオーダの大きな誤差が現れている。これは定在波の1周期分に相当し、定在波の影響が現れている。一方で、ばね定数変化の影響を受けにくい周波数 (1000 Hz) では、高い精度で座標を検出できている。これらより、励振振幅を選択すると定在波の影響を抑えた位置検出が行えることがわかる。

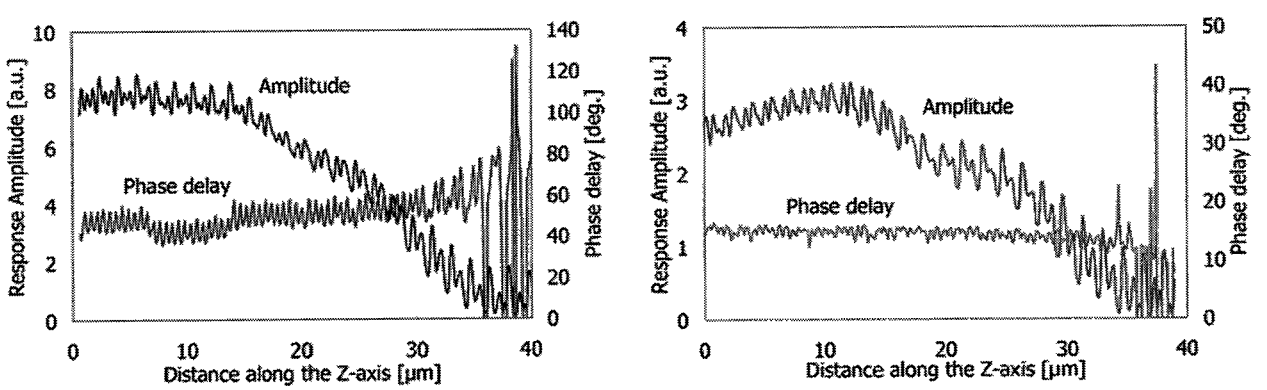
次に、最適な励振条件を見いだすため、様々な励振周波数でZ軸の座標位置を測定した。

**実験**　励振周波数は800 Hzから2900 Hzまでの広い範囲を300 Hz間隔で行った。プローブ共振周波数は2200 Hzであり、その他の条件は前実験と同様である。

**結果**　表8.2に5回繰返し検出された座標測定結果の平均値と標準偏差を示している。また、平均値は1400 Hz時を基準とし、他の周波数は相対値を示す。共振周波数から数百Hz下げた1100 ~ 1700 Hz程度の周波数で励振すると、安定した座標検出値を示し、ばらつきも低い。特に1400 Hzでは最も低いばらつきを示した。しかし共振周波数よりも高いもしくは1000 Hz以下の低周波数では検出座標値も様々であり、ばらつきが大きい。これらは定在波の影響を受け、ばらついたと考えられる。以上より、共振周波数よりも800 Hz程度低い周波数で位置検出を行うと、高い精度の検出が可能であることが確認された。

## 8.4　プローブに起因する不確かさ

光放射圧プローブの性能を評価するために繰返し精度を評価する。これまでの実験より、定在波の影響を受け最もばらつきの大きいと考えられる水平面で評価し、その後、様々な傾斜を持った面についても評価を行う。励振の条件は前節の手法に従う。




(a) 2300 Hz of oscillating frequency.　　(b) 1000 Hz of oscillating frequency.

Figure 8.12: Behavior of probe oscillation when probing to flat surface ($f_n$=2200 Hz).

Table 8.1: Detected coordinate for 2300 Hz and 1000 Hz of oscillating frequency.

| | Detected coordinate difference from the first detection | |
|---|---|---|
| Trial | 2300 Hz | 1000 Hz |
| 1st | 0 nm | 0 nm |
| 2nd | +500 nm | -3 nm |
| 3rd | -1 nm | +5 nm |
| 4th | +559 nm | +1 nm |
| 5th | +580 nm | +2 nm |

Table 8.2: Detected coordinate for various oscillating frequencies.

| | Ditected coordinate on the Z-axis | |
|---|---|---|
| Oscillating frequency [Hz] | Average [μm] | S.D. [nm] |
| 800 | -20.78 | 3379 |
| 1100 | +0.020 | 27 |
| 1400 | 0.000 | 14 |
| 1700 | -0.007 | 21 |
| 2000 | +1.648 | 24 |
| 2300 | -0.251 | 251 |
| 2600 | -2.221 | 36 |
| 2900 | -3.399 | 216 |

**実験**　プローブ横振動でシリコンウェハ水平面の座標検出を行う。共振周波数2200 Hzに対して、励振周波数1500 Hzとし、振幅は260 nmとした。アプローチ速度は1.4 μm/sec.とし、100回の繰返し検出を行った。位置検出は同様に位相値を用い、位相0 °を閾値とした。

**結果**　100回検出された座標値の平均を0とした相対的な誤差の度数分布を図8.13に示す。この値はステージの繰返し誤差も含みZ軸ステージの繰返し精度は9 nmであった。測定値分布の標準偏差は32 nmであった。これより、本プローブによる位置検出は±32 nm程度の精度を持つ。これまでの実験で得られた値よりも大きな値を示した理由として、ステージ誤差や動的な測定を行った影響が最も大きいと考えられる。また、アプローチ速度は1.4 μm/sec.に対してプローブ信号のサンプリングレートが200 Hz程度であったためサンプリングレートを上げる必要がある。

次に、様々な傾斜角度を持つ面に対して座標測定を行い、傾斜面に対する測定のばらつきを評価した。

**実験**　先ほどと同様のプローブ条件を用いた。測定サンプルにはベアリング用の超硬球 (Ra: 19 nm) を用いて、頂点付近の断面のプロファイルを測定した。それぞれの場所で5回測定を行い、平均値と標準偏差を算出した。平均値を検出座標とし、得られた測定値にフィッティングを行い断面プロファイルを推定し、そのプロファイルから座標検出点の面傾斜角度を求めた。

**結果**　測定された座標を図8.14(a)に示し、それぞれの検出点でのばらつきを同図(b)に示した。まず、超硬面に対しても高精度に位置検出が行えた。また、40 °以上の傾斜を持つ面に対しても同等の測定精度を示した。これより、上記プローブチューニング手法を用いることで±30 nmの精度で座標検出プローブとして機能することがわかった。

これまで、測定対象としてシリコンウェハやベアリング球を用いた。それらの表面粗さは20 nmRaと低い。実際は、マイクロ金型は数十nm～数nmオーダであり[344]検出可能であるが、マイクロギアなどの表面粗さは最大100 nm程度に達する。そこで、粗い面を持った表面に対して位置検出の繰返し精度を評価した。

**実験**　測定サンプルには超硬基板を用い、表面粗さは120 nmRa、21 nmRaのものを用いた。それぞれの表面SEM観察像とAFMによる断面プロファイルを図8.15および8.16に示した。AFM計測によって得られた表面粗

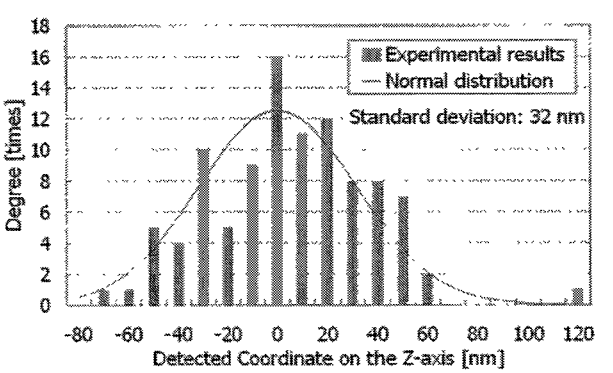
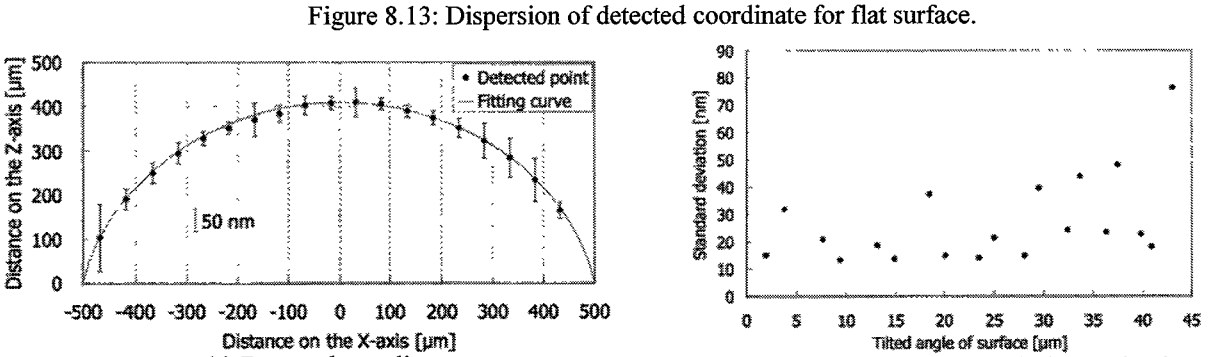



Figure 8.13: Dispersion of detected coordinate for flat surface.




(a) Detected coordinate.　(b) Standing deviation for each detected point.

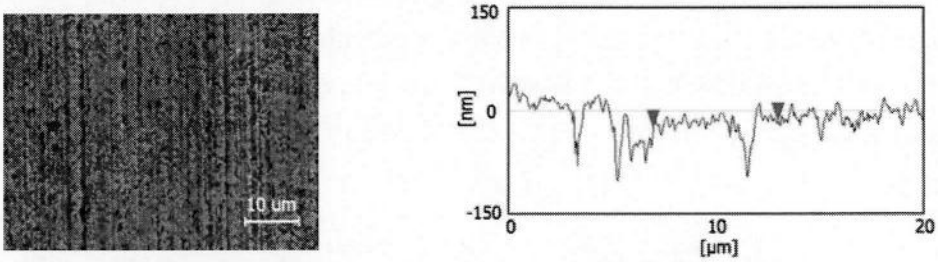
Figure 8.14: Detection property for tilted surface.

さの値は表8.3に示す。表には参考にシリコンウェハも併記した。光放射圧プローブは本質的に光学現象に基づいている。そのため定在波などの影響を受ける。そこで、表面の散乱光に対する位置検出特性を評価するため、正反射光成分の割合も表8.3に示す。また、この値はNd:YAGレーザの平行光を測定面に垂直入射し正反射光を取得した。同レーザ強度の入射光に対しての正反射光成分の強度をシリコンウェハの値で正規化している。プロービング条件は同様であり、5回の繰返し検出を行った。

**結果**　測定された座標値のばらつきを表8.3に示す。図のように、表面粗さ21 nmRaの面に対してはシリコンウェハと同等の測定精度を示した。120 nmRaの粗さ面に対してもプローブ球振動のダンピングによる測定面の位置検出は可能であった。しかしながら86 nmと検出のばらつきが大きくなっている。表8.3より、この面では正反射光もほとんどなく表面光散乱が支配的である。このスペックル光がプローブ球にランダムな光放射圧を作用し、座標検出性能が低下したと考えられる。光を用いる場合、金属面スペックルは常に課題点として挙げられる[118, 122, 123]。その上で、本プローブでは実験的に以下の結果であった。100 nmRaオーダの表面を持った測定面に対しては位置検出精度が低下する現象が見られたが、数十nmの表面に対しては精度良い位置検出が可能であった。

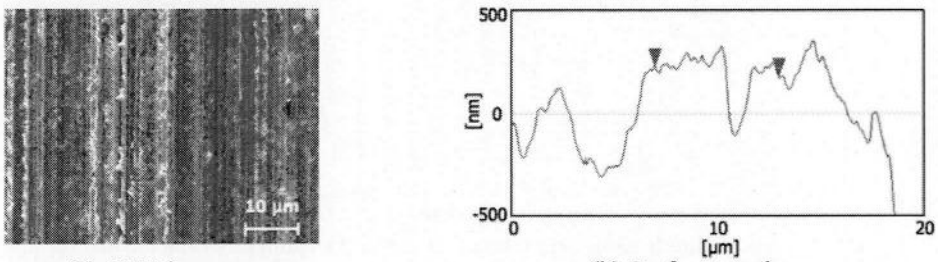
## 8.5　3次元的検出特性

光放射圧プローブを用いた3次元位置検出を評価するため、粒径の保証されている標準球を測定した。用いたガラス球は公称直径が直径553±17 μmで標準偏差が29 μmのソーダライムガラスである。3次元形状を測定するため、XとYの両方向に90 °の位相差を与え、正弦波励振した。この時、9章で後述される方法によって、振幅の最も小さい値を検出し、その振動を基に位置検出を行った。ここでビーム偏光はラジアル偏光とした。2次元で振動させるため、プローブの後方散乱光の検出にはQPDを使用した。与えた振動振幅は300




(a) SEM image.　(b) Surface topology.

Figure 8.15: Employed surface having roughness of 21 nmRa.




(a) SEM image.　(b) Surface topology.

Figure 8.16: Employed surface having roughness of 120 nmRa.

Table 8.3: Sensing repeatability for surfaces having certain roughness.

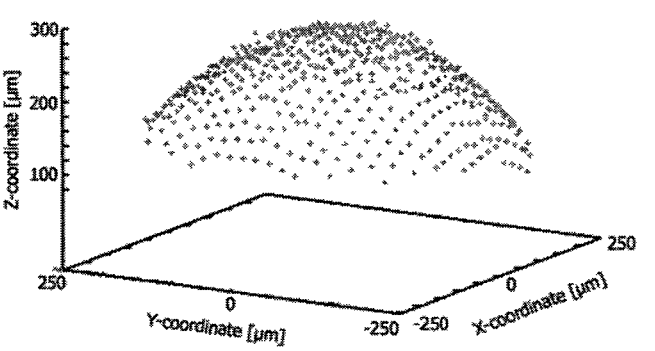
| | | Sample 1 | Sample 2 | Sample 3 |
|---|---|---|---|---|
| Roughness | RMS | 142 nm | 26 nm | < 1 nm |
| | Ra | 120 nm | 21 nm | < 1 nm |
| Relative amount of light scattering per one of silicon wafer | | 0.09 | 1.2 | 1 |
| Sensing repeatability (ρ) | | 86 nm | 32 nm | 32 nm |

nm、励振周波数は1500 Hzとした。共振周波数は2300 Hzである。測定手順は、始めにガラス球の中心付近にプローブ球を位置させ、あらかじめ設定したXYの測定点509点で測定を行った。アプローチはZ方向にアプローチし、プロービング速度は5 μm/sec.とした。振動振幅のしきい値を初期振幅の50%として、XYZ座標値を取得した。座標を検出するとZ軸上30 μm上方にもどり、次の測定点に移動する。この手順に基づいてLabVIEWを用いた完全自動計測とした。測定結果が得られた後、球面フィッティング処理し、球の中心点($x$, $y$, $z$)と半径$r$を推定する。測定で得られた直交座標系の値を極座標に変換し、極座標系でプローブ径の4 μmを補正する。補正された測定点の値を直交座標系に変換し、再度球面フィッティングを行い最終的なガラス球の半径$r$を測定した。式(8.8)に直交−極座標の変換式を示す。

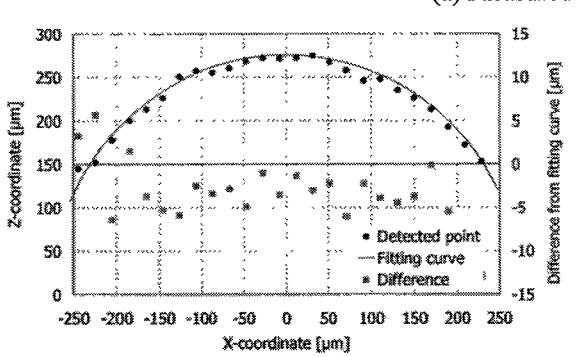
$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r\sin\theta\cos\phi \\ r\sin\theta\sin\phi \\ r\cos\theta \end{pmatrix} \tag{8.8a}$$

$$\begin{pmatrix} r \\ \theta \\ \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{x^2+y^2+z^2} \\ \cos^{-1}\left\{x/\sqrt{x^2+y^2+z^2}\right\} \\ \cos^{-1}\left\{x/\sqrt{x^2+y^2}\right\} \end{pmatrix} \tag{8.8b}$$

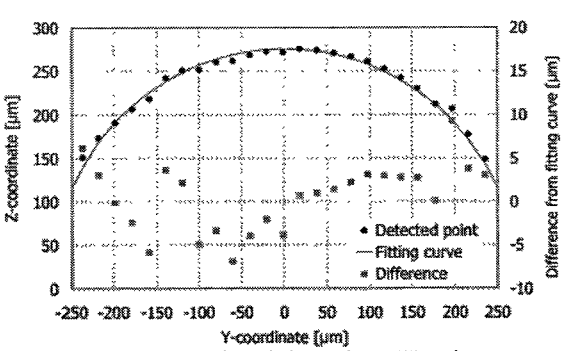
測定に要した時間は3時間で、その間の環境温度変化は最大で0.291 °Cであった。得られた結果を図8.17(a)に示す。上記の方法によって得られたガラス球の半径は565.47 μmであり、標準球径553±17 μmを考えても妥当な測定結果が得られた。図8.17(b)(c)に得られたX軸、Y軸方向の断面を示す。フィッティングによって得られた球面との球半径方向との差も同時に示した。4章の基礎実験で得られた値と比較しても、振動プローブを用いることで球の表面を高精度に測定可能であった。全体的に±5 μm程度フィッティングカーブとの差が見られた。断面図からもわかるが、すべての測定点に置いて正確に座標測定が行えたとはいえず、ゴミなどの表面散乱の影響や定在波の影響などによって、大きな誤差を持った検出点がある。これは本プローブの感度が高く様々な影響を受け取るためであると考えられる。総じて、それらの誤検出点も含んでしまったために、ガラス球半径の測定誤差などが発生していると考えられる。




(a) Measured coordinate values.




(b) Cross-sectional data along Y-axis.




(c) Cross-sectional data along X-axis.

Figure 8.17: Three-dimensional measurement of glass sphere.

## 8.6 結言

本章では、光放射圧振動プローブを用いた位置検出原理を解明し、高精度な位置検出のための検討を行い、最終的に標準ガラス球の3次元座標測定を行い3次元位置検出特性を評価した。以下に本章で得られた知見を示す。

- 振動プローブは測定面近傍で振動減衰を受けて表面の位置検出を行うが、この振動減衰を起こす原因は、測定面近傍に存在する水蒸気層によるプローブ球に作用する粘性抵抗力の増大であることがわかった。したがって、本振動プローブでは表面近傍でのダンピング効果を利用して表面位置を検出する。また、振動減衰は応答振幅が位相変化よりも急峻であり、位置検出の分解能は20 nm以下、繰返し再現性は13.7 nm (σ)と高感度検出が可能であった。
- 水平面を位置検出する際、測定面からの反射光と捕捉レーザが干渉することで、プローブ球と測定面周辺に定在波の発生を確認した。この定在波は、プローブ球の位置変動を引き起す、プローブのばね定数を変化させるなどの影響を与える。
- プローブ励振条件として、ばね定数変化の影響を受けにくく、粘性抵抗係数変化の影響を受けやすい励振周波数を検討した。解析による推定を基に実験による検証を行った結果、共振周波数よりも800 Hz程度低い周波数で励振する時が最もばらつきの小さい検出が可能であった。
- 上記の励振条件による表面位置検出のばらつきを評価した。水平面から40 °の傾斜を持つ測定面に対して約±64 nm (2σ)のばらつきで位置検出が可能であった。本プローブでは表面粗さが100 nmRa程度の面であっても位置検出可能であったが、位置検出のばらつきが増大した。
- 本手法を用いて、公称径553±17 μmガラス球の3次元座標測定を行った。本プローブを用いて3次元座標測定可能であり、509点の座標測定結果から得られたガラス球径は565.47 μmであった。球面から数μmの誤差を持つ検出点もあったが、本プローブの位置検出原理を用いた高感度な座標検出が可能であった。

# 第9章　測定面位置および法線方向同時測定法

## 9.1　緒言

本章では、座標測定における新規なプロービング手法を提案する。座標測定では、測定後プローブ径補正が必要であり、検出された座標点からプローブ球の半径をプローブ検出ベクトルの方向に補正する[60]。光放射圧プローブを応用し、測定面の位置と角度を同時に測定可能なプロービング手法を提案する。

## 9.2　検出原理

プローブ球の受けるダンピング効果の度合いがプローブ球の振動方向に依存することを利用する。プローブ球を光軸に対して水平面内で円軌道の公転運動させ、測定面接近にともなう円軌道の歪みを利用して測定面位置と法線方向を測定する。位置検出の概念図を図9.1に示す。プローブ球に円軌道運動を与えるため、X軸とY軸で90 °位相の異なる正弦振動を与える。つまり、X軸、Y軸に沿ったプローブ球の運動方程式は

$$m\ddot{x} + D_x\dot{x} + k_x(x - 2A\sin 2\pi ft) = F_x(t) \tag{9.1}$$

$$m\ddot{y} + D_y\dot{y} + k_y(y - 2A\cos 2\pi ft) = F_y(t) \tag{9.2}$$

である。自由空間において粘性抵抗はStokes則に従うとすれば$D_x = D_y$である。また、プローブ球のX軸とY軸のばね定数が等しい時$k_x = k_y$となる。ブラウン運動による影響は無視できるため、プローブ球の運動軌道は円形を描く($X_x = X_y$, $\varphi = 90$ °)。測定面近傍での粘性抵抗係数はプローブ球の振動方向に依存して変化の程度が異なるため、プローブ球が測定面近傍に接近すると$D_x$はもはや$D_y$とは異なる。伴って、応答振幅にも相違が生じ、運動の軌道は楕円形となる($X_x \neq X_y$, $\varphi \neq 90$ °)。この時、壁面に対して垂直方向が最も粘性抵抗が大きいので振動減衰も最大となり、楕円の短軸方向は壁面垂直方向、長軸は壁面平行方向となる。この楕円短軸の傾き$\theta$は、次式で表される[169]。

$$\theta = \frac{1}{2}\tan^{-1}\frac{2X_xX_y\cos\varphi}{X_x^{\,2} - X_y^{\,2}} \tag{9.3}$$

これが測定面の法線方向を表す。この角度を用いて、元座標系$(x, y)$を楕円運動の長短軸に垂直な座標系$(x', y')$に変換すると、

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = R_\theta \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad R_\theta = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \tag{9.4}$$

となる。ただし、$R_\theta$は変換行列である。これによって変換された測定面垂直方向の振動波形$A_{min}$を用いて、短軸方向の振幅を求め、測定面の位置検出を行う。

## 9.3　実験装置

本実験に用いた装置について述べる。レーザトラップの捕捉レーザに$TEM_{00}$モード、波長1064 nmのNd:YAGレーザを用いた。対物レンズはNA0.95を用い、焦点距離1.8 mmおよび作動距離0.3 mmである。プローブ球には8 μmのシリカ球を用いた。Nd:YAGレーザはAOD通過後、λ/4板を用いて直線偏光から円偏光に変換され、ビームスプリッターで反射後、対物レンズに入射しプローブ球を捕捉する。位置検出の2次元平面内の等方性を重視するため円偏光を用いた。レーザ強度は対物レンズ後で250 mWとなるよう調整した。プローブ球の制御には2軸制御AODを用いており、AODと対物レンズの後ろ側瞳が光学的に共役である。レーザ偏向によりプローブ球は焦平面内で2次元的に制御可能である。また、リレーレンズ中央のピンホールでAODの他の回折光を遮断している。プローブ球の位置測定用光源には波長633 nmのHe-Neレーザを用い

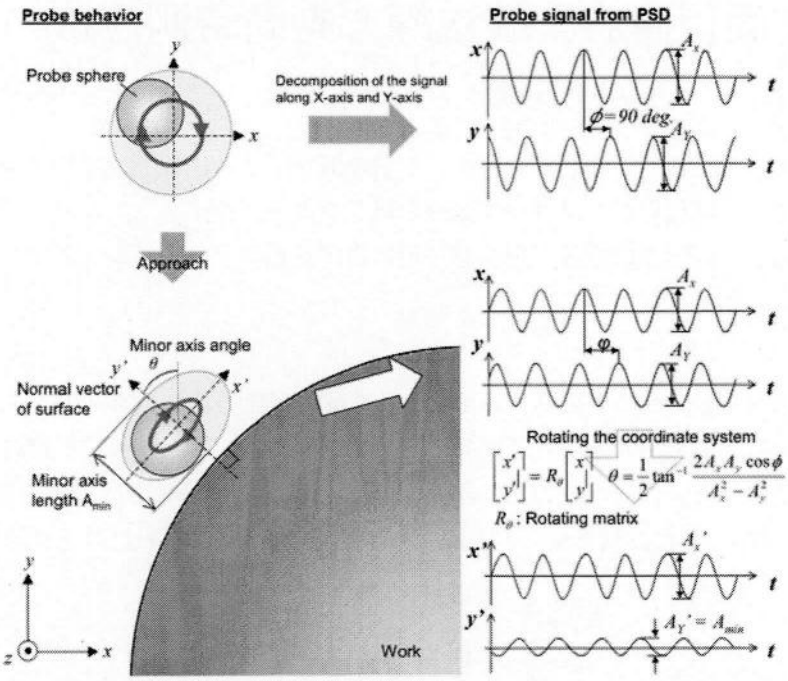
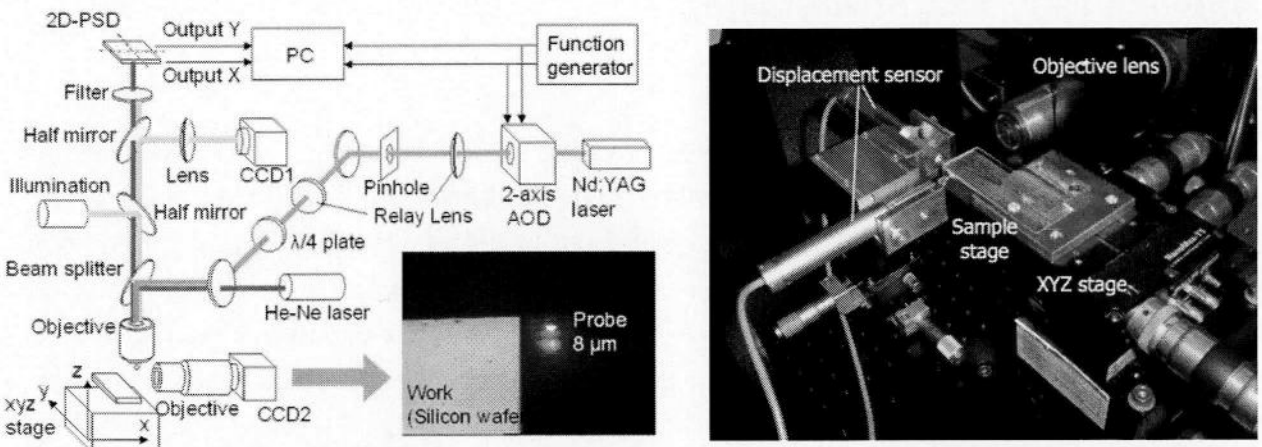



Figure 9.1: Principle of surface sensing using circular motion.

ており、後方散乱光の検出はPSDを用いた。PSD直前の干渉フィルタでノイズ光は遮断され、PSDから出力されるXYの2軸信号はPCに取り込まれ処理される。また、測定サンプルはプローブ捕捉用対物レンズ下の3軸XYZステージに設置される。XYZステージはピエゾとマイクロメータにより微動、粗動を持ち、ストロークは20 μm、4 mm、分解能は5 nm、0.05 μmである。ステージのXY軸移動に関して、マイクロメータによる粗動の移動量は図9.2(b)に示すように2つの電気マイクロメータ (分解能0.1 μm) によって測定された。観察光学系で、上面観察は照明光、上面CCD、無限遠補正顕微鏡からなり、側面観察は顕微鏡ユニットを用いた。PSD (Position sensitive detector) はセンサ面内の光量の重心を電流出力する光検出素子である。光を受光すると光電流を発生し、その位置と出力値の関係は図9.3内のXとYである。PSDの特徴は、光の重心位置を出力するため、光量変化が出力に影響しないことである。本プローブで光量が変化する場合は、プローブ球の光軸方向の変位、もしくは測定面からの反射光の再入射である。つまり、PSDを用いることでこれらの影響を排除した情報を取得可能であり、対物レンズ焦点面内でのプローブ球の動きのみを観察可能となる。

**振動変化確認**　まずPSDがプローブ球の平面内振動を測定可能であるかを確かめる。直径8 μmのシリカ球をNd:YAGレーザで捕捉し、AODによる光偏向でプローブ球に振動を与える。X方向に周波数100 Hzで振幅500 nmを与える。その時の波形は図9.4(a)に示す。正弦波振動に対して精度良くプローブ球の位置が測定できて




(a) Optical system.　　(b) XYZ stage.

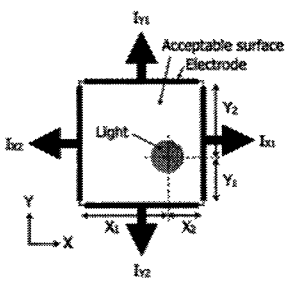
Figure 9.2: Optical system and setup for circular motion probe.

いることが確認できた。次に、このX軸プローブ信号のFFT解析による周波数成分を図9.3(b)に示す。周波数100 Hzの振動に対して正確に100 Hzが確認できた。最後に、X軸に与える振幅を変えたときの応答振幅を図9.3(c)に示す。入力変化に対して線形に出力信号が得られていることが確認できた。また、X方向振動に対してY軸にも若干の値が出ているが、その影響は数%であった。同様にY軸に対しても検証し、正確な振動を測定可能であることが確認できた (図9.9(d)-(f))。また、PSDのXY軸の検出感度はほぼ等しいため、補正は行わず出力をそのままプローブ信号として用いた。

## 9.4 測定原理の確認

まず、測定面に対して垂直方向と平行方向に振動させたプローブ球の振動変化を確認するため、周波数応答を取得する。垂直面を持つシリコン劈開面に対してプローブが水平にプロービングを行う。プローブ球が十分離れた位置から徐々に接近させ、十分遠く、測定面から11 μm、6 μmと測定面に十分近くの4点で測定した。この時の振幅の周波数応答の変化を図9.5に示し、1700 Hzで励振したときの応答振幅変化を図9.6に示す。測定面に対して垂直振動の振動減衰が最も大きい。つまりプローブ球の振動減衰を2軸で確認し、比較することでプローブ球と測定面の位置関係を知れる。

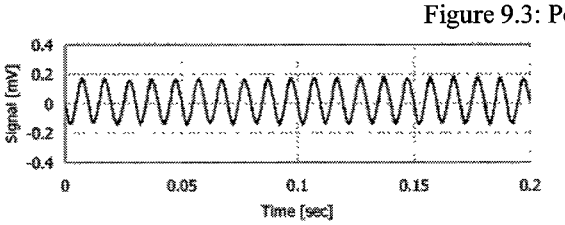
次に、円軌道の楕円軌道への変化することを実験的に確かめる。原理確認のため、図9.4の図より最も振幅減衰率の大きい共振周波数1800 Hzで励振した。励振振幅を512 nmとする。プローブ光軸に平行な面を、X



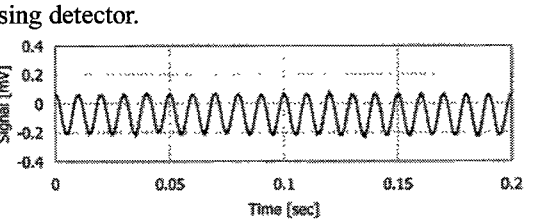

$$I_{X1}=\frac{X_1 I_0}{X_1+X_2} \quad I_{Y1}=\frac{Y_1 I_0}{Y_1+Y_2} \quad I_{X2}=\frac{X_2 I_0}{X_1+X_2} \quad I_{Y2}=\frac{Y_2 I_0}{Y_1+Y_2}$$

$$X=\frac{I_{X1}-I_{X2}}{I_{X1}+I_{X2}} \quad Y=\frac{I_{Y1}-I_{Y2}}{I_{Y1}+I_{Y2}}$$

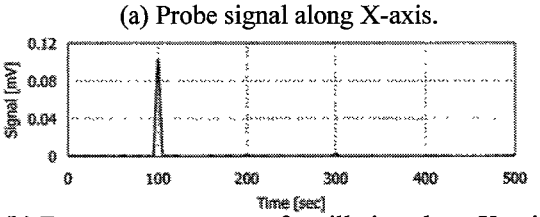
Figure 9.3: Position sensing detector.



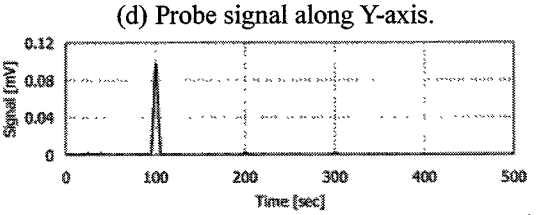

(a) Probe signal along X-axis.



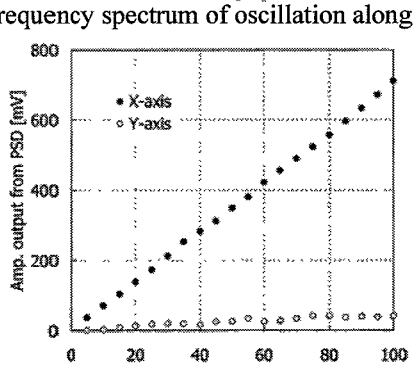

(d) Probe signal along Y-axis.



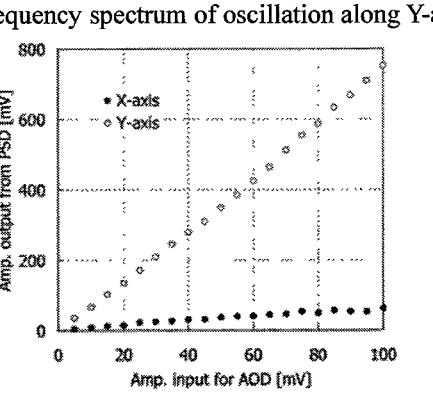

(b) Frequency spectrum of oscillation along X-axis.




(e) Frequency spectrum of oscillation along Y-axis.

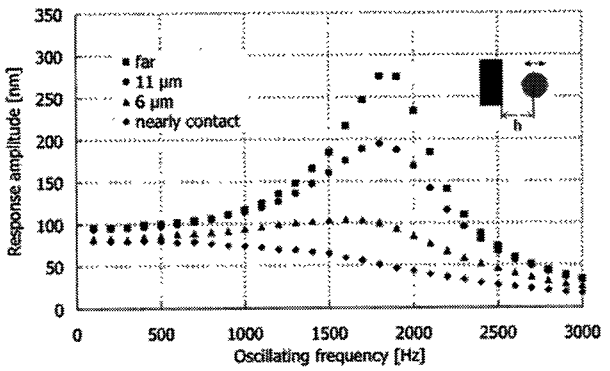



(c) Amplitude linearity for oscillation along X-axis.

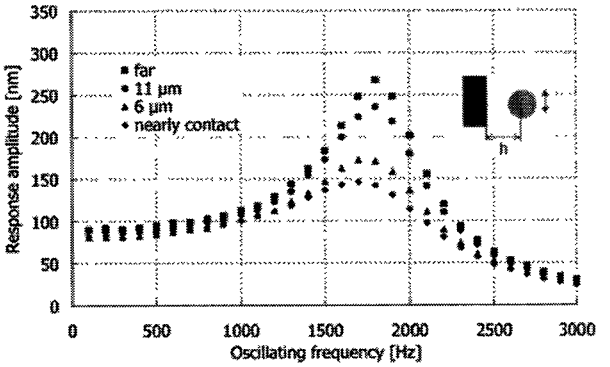



(f) Amplitude linearity for oscillation along X-axis.

Figure 9.4: Probe signal detected by PSD for oscillation along each X- or Y-axis.




(a) Perpendicular to surface.




(b) Parallel to surface.

Figure 9.5: Frequency response of amplitude on several distances from surface.

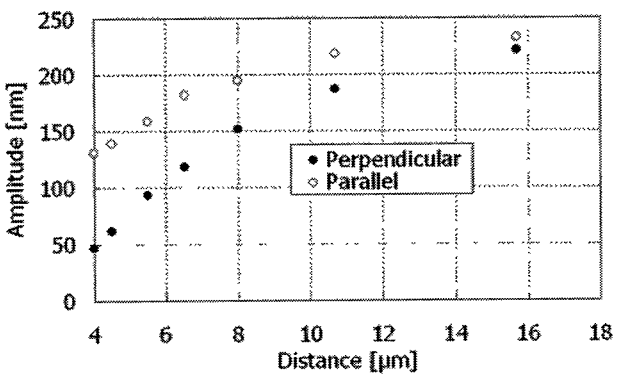



Figure 9.6: Response amplitude decrease near surface.

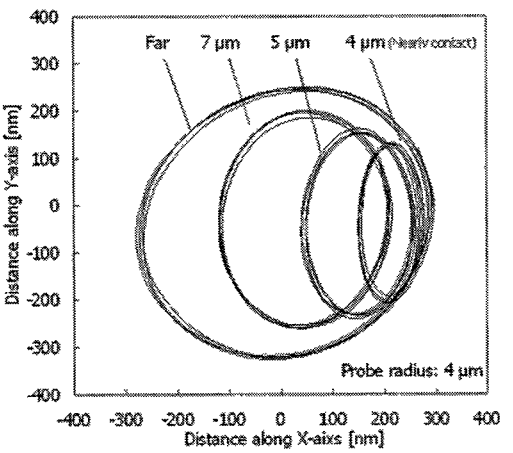



Figure 9.7: Probe orbital change during probing.

軸負から正方向に接近させた時のプローブの軌道変化を確認する。測定面としてシリコンウェハの劈開面を用いた。軌道の変化を図9.5に示す。プローブ振動は測定面が接近すると面垂直方向の振動が特に減衰され、円軌道が楕円に近づく。短軸は測定面と垂直 (X軸に平行) な方向であった。

## 9.5 位置および法線方向同時測定

### 9.5.1 プローブ励振条件

8章の1方向振動では、ばね定数変化の影響を避け、粘性抵抗係数の変化による位置検出を行うため、共振周波数よりも800 Hz程度低い周波数で励振した。2次元振動ではプローブ球の運動軌道変化を基に面測定する。そこで、2次元振動プローブの精度を高めるため、再度励振条件について考える。共振周波数よりも800 Hz低い周波数励振でプロービングするとき、ダンピング効果により応答振幅と位相は共に変化する (式(7.12))。法線方向測定には式(9.3)より振幅および位相を用いる。ここで注意すべきことは、励振周波数によってプロービング中の角度履歴が異なることである。図9.8に共振周波数1800 Hzのプローブを様々な励振周波数でプロービングする時の測定角度履歴を示す。式(8.2)と式(7.12)を用いて解析的に求めた。すべて最終的に0 °に収束するが、プロービング過程に示す値が異なる。これが測定誤差を生むと考えられる。

**実験** 励振周波数に依存する面法線方向測定の誤差について検討する。プローブの共振周波数は1960 Hzで、励振周波数を1800 Hz、1910 Hz、1960 Hz、振幅は512 nmとした。垂直面に対して0 °の方向 (X軸方向) から水平にプロービングした時の面角度を測定する。測定面はシリコンウェハの劈開面を用い、ピエゾステージに設置した測定面を20 nm間隔でプローブ球に接近させ、短軸角度を求めた。

**結果** 図9.9に実験結果をプロットで解析値を実線で示す。図のように測定値は、共振周波数励振のときは遠方から平均的に0 °であるが、励振周波数が共振周波数よりずれると検出角度がずれる。約160 Hzだけ共振周

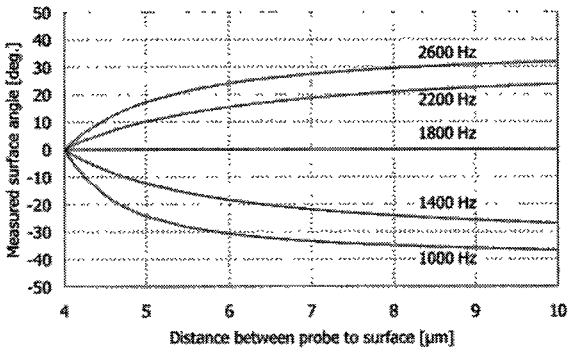



Figure 9.8: Measurement property of surface angle with various oscillating frequencies.

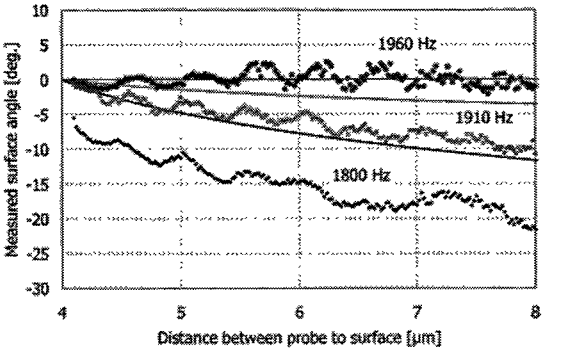



Figure 9.9: Experimental result of surface angle measurement properties.

波数からずれた励振周波数では最終的な測定結果にも誤差が生じている。このように解析解と実験値は定量的には一致が見られないが定性的傾向には一致し、この影響が励振周波数によるものであることがわかる。

この誤差原因として、測定値として現れる角度は、単純な測定面から受ける粘性抵抗による軌道変化 (振幅変化) に加えて、位相遅れも同時に変化するためである。共振周波数で励振したときは、式(7.12)や図8.10より、粘性抵抗が変化しても位相がπであり、式(9.2)のcosφが一定である。したがって同式中の角度θの変化を単純な振幅変化として扱え、測定誤差が少ないと考えられる。よって、本実験では以後、励振条件として励振周波数は共振周波数に合わせた。

## 9.5.2 測定性能評価

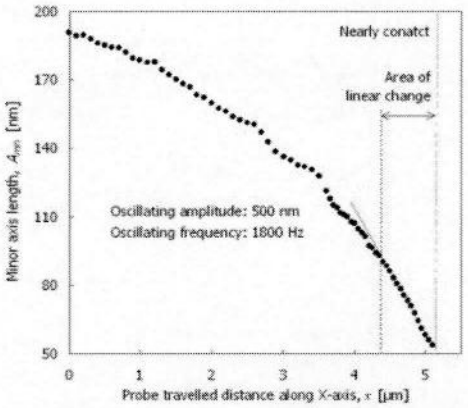
これまでの測定原理を励振条件を用いて、基礎測定を行い本提案プローブの測定面の位置と法線方向測定の性能を評価した。

**測定面位置検出** プローブ光軸垂直平面内においてシリコン劈開面の角度αを0 °、つまりX軸と平行とし、この面の位置検出を行うことで2次元振動プローブの位置検出特性を調べた。ピエゾステージを用いて50 nm間隔で測定面をプローブに接近させ、各点において短軸長さの50回平均と標準偏差を求めた。プローブの励振条件は励振周波数が共振周波数である1800 Hz、振幅が512 nmである。測定した短軸長さの変化を図9.10に示す。測定面への接近による短軸長さの減衰が確認できた。また、検出点近傍において短軸長さの変位はほぼ線形と見なせ、この傾きから見られるプローブの検出感度は0.018 μm/nmであった。これは測定面との距離が18 nm変化するとプローブの短軸長さが1 nm変位ことを意味する。振動プローブの短軸長さのばらつきが1.1 nmであるため、プローブの位置検出分解能は39 nmと見積もれる。また、短軸長さ65 nmをしきい値として、8回の繰返し検出の結果、最大誤差は42 nm、その標準偏差は13 nmであった。

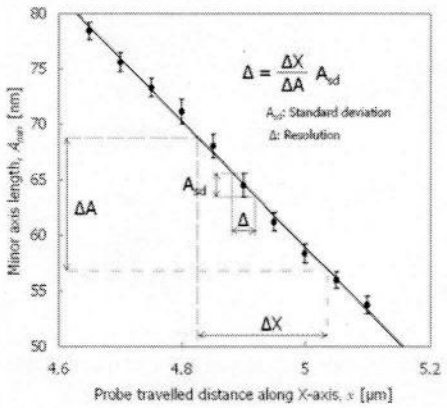
**測定面法線方向測定** 測定面法線方向測定について調べた。実験の条件は先ほどと同様である。ただし、測定面の角度αは1 °、12 °、23 °、32 °、43 °とし、これは上面観察CCDで取得画像から求めた。短軸長さ65 nmを閾値として、検出時の測定角度を測定面角度とした。検出点から3 μm離れた位置からの面法線方向検出特性を図9.10に示す。測定面法線方向と2次元振動プローブの測定した角度を表9.1にまとめる。特徴として、数μm遠方からでも測定角度を正確に示しており、測定精度3 °で測定が可能であった。また、1 °傾いた面に対して8回の繰返し測定を行った結果、法線方向測定のばらつきの最大値は2.4 °で標準偏差は0.8 °であった。

以上より、2次元振動プローブを用いた測定面の位置と法線方向測定の可能性を示した。位置検出では、1次元振動プローブよりも若干の感度の低下が見られたが40 nmの分解能を示すことができた。また、法線方向測定は数°の誤差が発生し精密計測において正確であるかは議論するところであるが、測定面の方向を遠方から知ることが出来るという機能は、プローブ径補正のみならずCMMにおいて測定戦略上有用である。

ただし、本研究で提案した手法は2次元方向の法線方向を測定するものであり、3次元プローブとしては更なる振動の工夫が求められる。

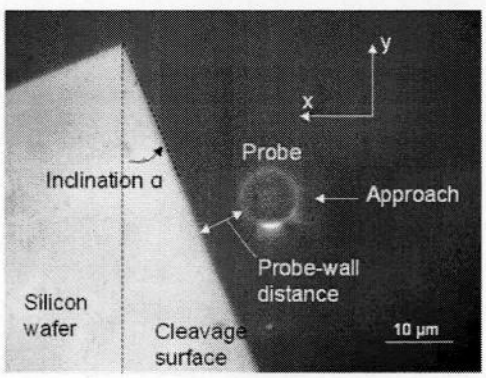



(a) Decrease of length.

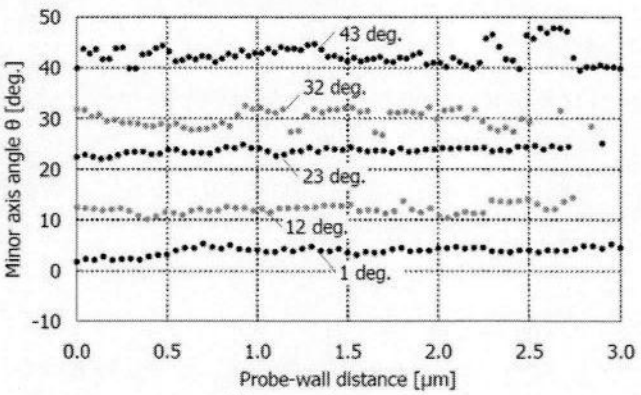



(b) Near surface.

Figure 9.10: Damping of minor axis length of elliptic orbit.




(a) CCD image.




(b) Experimental data.

Figure 9.11: Experiment of measuring surface angle.

Figure 9.1: Accuracy of angle measurement of surface.

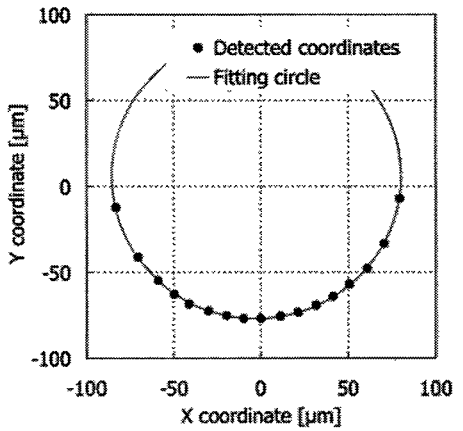
| Working inclined angle [deg.] | 1 | 12 | 23 | 32 | 43 |
|---|---|---|---|---|---|
| Measured angle [deg.] | 2 | 12 | 23 | 31 | 40 |
| Error [deg.] | -1 | 0 | 0 | 1 | 3 |

## 9.6 2次元座標測定

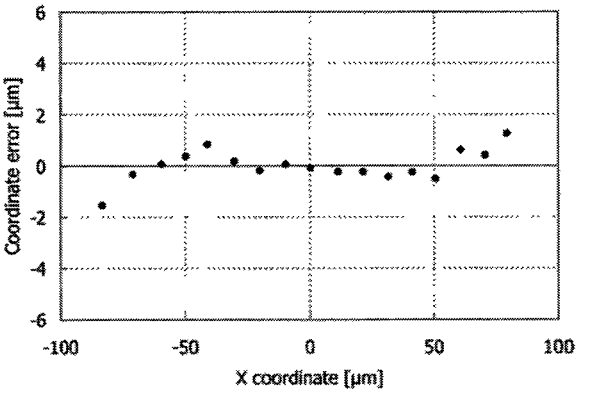
光放射圧プローブの座標測定性能を検証するため、2次元振動を用いたXY軸の2次元座標測定を行った。測定対象として、NISTトレーサブルな直径約168±8.4 μmのソーダライムガラス球の1断面を測定した。

**実験** プローブ球は固定しガラス球を相対的に移動させる。プローブ励振条件は励振振幅512 nmとし、励振周波数2000 Hz@共振周波数とした。これまで同様、検出のしきい値は64 nmとして、その時の短軸長さと短軸角度を測定した。ガラス球の測定位置は最大直径となるよう、CCD像からガラス球のほぼ赤道上となる位置に設定した。プロービング方向はY軸方向とし、X軸は50 μm間隔で測定した。また、本測定では座標値のスケールとして、マイクロメータを用いているため、高い測定精度は保証できない。そこで、まず、1点を11回繰返し測定し、どの程度の繰返し精度が得られるのか検証した。しきい値はこれまでと同様で65 nmとした。その結果、繰返しの最大誤差は0.58 μm、標準偏差は0.19 μmであった。

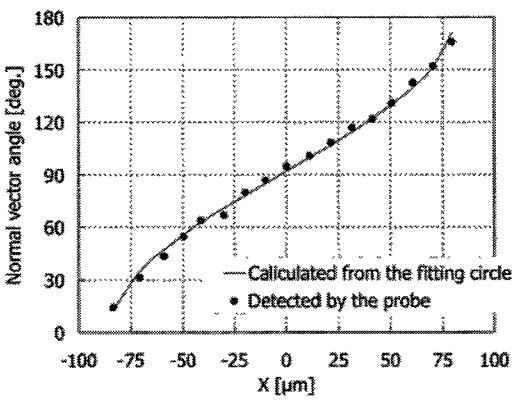
**結果** 上記条件でガラス球の断面形状を測定した。図9.12(a)に測定座標値とそこかれ得られたフィッティング円を示す。また同図(b)に測定座標とフィッティング円とのY軸座標値の偏差を示す。偏差を見ると最も外側では傾斜角度が大きいため相対的に誤差が大きくなっているが、角度が浅い部分に関してフィッティング円との偏差は±1 μm以内に収まっており、本位置検出手法が機能していることが確認できた。次に、各座標検出点で測定した法線角を図9.12(c)に示す。比較対象として、位置検出によって得られたフィッティング円を用い、測定結果との偏差を同図(d)に示した。測定面の角度によらず、法線角度を測定することができた。



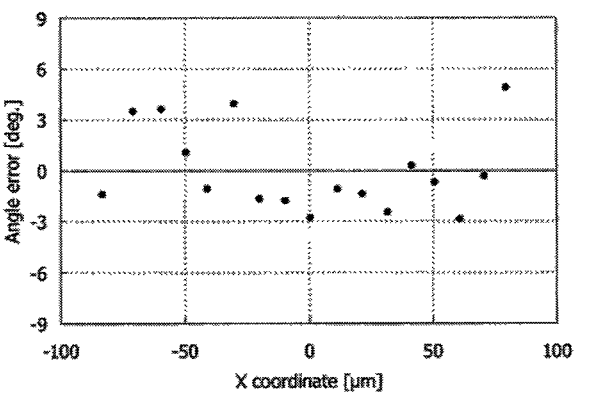

(a) Detected coordinate.




(b) Difference from fitting curve along Y-axis.




(c) Measured surface angle.




(d) Difference of surface angle from fitting curve.

Figure 9.12: 2D coordinate measurement using circular motion probing.

また、フィッティング円との差は最大で4.9 °、絶対値平均で2.0 °であり、上の基礎実験でも見られたように、現状数°の正確さにとどまりはしたが、2次元振動プローブの原理の検証は出来た。

## 9.7 結言

本章では、測定面近傍でプローブ球が受ける粘性抵抗係数変化のプローブ振動方向異方性を利用し、2次元的に振動させたプローブ球による測定面の位置を法線方向の同時計測手法を提案した。以下に得られた知見を示す。

- 粘性抵抗力の振動方向異方性を確認した。測定面に垂直振動は平行振動よりも強くダンピング効果を受け、大きな振動減衰を受けた。2次元の円軌道を持つプローブを測定面に接近させたところ、円軌道が歪み楕円軌道になり、検出原理の確認が出来た。
- 励振条件について検討し、測定面法線方向測定の誤差低減のため、粘性抵抗係数の変化を受けても位相が変化しない共振周波数を励振条件にすることで、正確な面法線方向測定が可能であることを確かめた。
- シリコンウェハの壁かい面を測定した結果、位置検出の分解能は39 nm、繰返し再現性は13 nmであった。また約10 °間隔の5種類面法線角度を測定したところ、±1.5 °の精度で繰返し再現性は0.8 °であった。
- 標準ガラス球の1断面を2次元座標測定した。サブμmの精度を持つステージを用いて測定した結果、今後の高精度化は必要であるが、本手法を用いた位置と法線方向の同時測定の有用性を示した。

# 第10章　結論

本研究では、数ミリメートル以下の微細な部品の3次元幾何形状を評価可能なナノCMMの主要構成要素であるマイクロプローブに関して、レーザトラップ技術によって光放射圧で空間に捕捉された球状シリカ微粒子をプローブ球とする、従来とは本質的に異なる原理を用いた光放射圧プローブを提案するものである。本論文では、"本提案プローブを用いて測定面の位置を検出可能か"という最も根源的な課題解決に始まり、直径8 μmのシリカ球と測定面と間のマイクロ/ナノメートルスケールで発現する現象理解、プローブによる位置検出の高感度化に取り組んだ成果をまとめている。以下、本論文で述べた内容を総括する。

1章「緒論」では、マイクロ加工技術の発展に伴い現れてきたナノメートルオーダの3次元形状計測の必要性を述べ、その中でナノCMMの位置づけを明らかにした。また、ナノCMMおよびマイクロプローブの世界的な開発動向をまとめ、マイクロプローブ開発で解決すべき課題点を挙げ、満足すべき要求について提案した。最後に本研究の目的を述べた。

2章「レーザトラップ技術」ではまず、1970年から始まったレーザトラップ技術進展を総括した。次に、光放射圧の理論を与え、レーザトラップの基本的な原理を述べた。

3章「数値解析による光放射圧プローブの特性評価」は、目的に応じた2つの数値解析シミュレータを開発し、プローブ球に働く光放射圧を解析した。まず、自由空間で捕捉されたプローブ球に作用する光放射圧を光線追跡法を用いて解析した。プローブ球に作用するトラップ力およびばね定数のオーダはそれぞれ数百pN、数十μN/mであった。また、光源の持つ性質がレーザトラップに与える影響を検討し、輪帯ビームおよびラジアル偏光の光軸方向トラップ効率への効果を見いだした。これによって、ラジアル偏光を用いてばね定数のばらつきを8%以下に抑えることができ、3次元等方性の改善に期待が持てる。次に、プロービング中にプローブが体験する、光散乱場の乱れが与える影響についてFDTD法を用いて解析した。測定面からの反射光による外力で、プローブ球は測定面とは逆方向に押し戻される。また、プロービング中シャドウ効果によって、安定な捕捉位置が変化する。このような測定中に遭遇するであろう状況で、プローブ球が変異するという現象を確認することができた。

4章「位置検出基礎実験」では、光放射圧プローブの位置検出の可能性を確かめるため、シンプルにプローブ球を測定面へ近づけ、プローブ球が受ける影響を評価した。結果、"何らか"の力学的作用によってプローブ球に200 nm程度の変位が生じ、それをLinnik干渉計で測定可能であり、本プローブを用いた測定面の表面位置を検出可能であった。次に、プローブの高感度化を達成するため、光軸方向もしくは光軸垂直方向(横方向)にプローブ球を振動させる振動プローブを提案した。振動プローブを用いることで、振動方向に関わらず、測定面の近傍でプローブ球の振動減衰が確認できた。その検出感度は25 nm以下であり、プローブ球に微小振動を与えることで、高感度化を実現した。

5章「プローブシステム設計および試作」では、振動プローブが測定面近傍で受ける作用力を詳細に調査し、そのマイクロスケールで起きる現象を理解することを念頭に、光放射圧プローブシステムの設計と試作を行った。設計の要点となるのは、(1) 高精度なプローブ球の位置制御、(2) 高精度なプローブ球の位置測定、および (3) 高効率なプローブ球の捕捉である。(1)に関して、捕捉レーザの焦点位置をシフトするためにAODを用いた。AODは高い応答周波数を持ち横方向に数十nmの分解能でプローブ球を制御可能である。またAODの回折効率を制御することでプローブ球の光軸方向の位置制御も可能である。(2)に関して、プローブ球が測定面近傍で受ける微小な作用力の影響を高精度に測定する必要がある。そのため、プローブ球から放たれる後方散乱の光量をPDで受光し、プローブ球位置を測定する。光軸方向もしくは横方向にプローブ球が変位する時の後方散乱光の変化を検出可能な位置にPDを調整することで、高分解能なプローブ位置測定が出来る。また、外乱による影響を取り除くため、ロックイン検出を用いて参照周波数に同期した特定の周波数のプローブ信号を得る。(3)の高効率な捕捉に関して、3章で得られた結果からラジアル偏光が光軸方向ト

ラップ効率に効果的である。そこで、本研究でもラジアル偏光ビームを用いた。以上、設計されたプローブシステムを試作し、450 mm (H) × 141 mm (D) × 230 mm (W) の小型プローブユニット作成した。

6章「座標計測システム設計および試作」では、5章で試作したプローブユニットを搭載可能な座標測定システムを設計した。マイクロプローブの性能を評価するためには、数十nmオーダ以下の繰返し精度や位置決め精度が必要となる。駆動にはシャフトモータ、ガイドには高精度に加工されたクロスローラガイド、およびスケールとして分解能0.14 nmのリニアスケールを採用した。ヘテロダイン干渉計を用いてリニアスケール値の校正およびステージ運動精度の評価を行った結果、数十ナノメートルオーダの運動精度が保証された。

7章「光放射圧プローブの振動特性」では、位置検出に関わる振動プローブの基本的な特性を評価した。始めに、光放射圧として最も基礎的な機能であるプローブ球の捕捉方法とトラップ効率を評価した。捕捉方法に関して、プローブ球と基板の吸着力を低減するというアプローチで、プローブ球表面に疎水性コーティングを施し数百nmの溝構造をもった超硬基板を用いた。結果、85%という高確率で任意のプローブ球を捕捉可能な技術を実現した。光軸方向トラップ効率に関して、ラジアル偏光の効果を確認し、直線偏光ガウシアンビームに比べ2.5倍に改善された。次に、振動プローブの運動やプロービング時に発生する現象を理解するため、振動プローブ球の力学モデルを提案した。レーザトラップされたプローブ球のブラウン運動はLangevin方程式で表現されることがよく知られている。これに強制振動系を加えた、バネダンパ系の運動方程式を提案し、実験的に取得したプローブ振動の周波数応答と比較した結果、良く一致し、モデルの有効性を確認した。この力学モデルに従ってばね定数の測定を行った結果、ラジアル偏光を用いることで3次元的なばね定数のばらつきが14%と出来た。またレーザの強度を変化させることで50から150 μN/mの間で横方向ばね定数を変化させることができ、ばね定数の安定性は0.32 μN/(m·mW)と高い。一方で、プローブ振動は粘性抵抗係数を変化に感度良く応答することも明らかとした。

8章「位置検出原理の検証」では、プローブ振動減衰の現象を詳細に検討した。プローブ球が測定面近傍で受ける粘性抵抗力に着目し、プローブ振動減衰を評価した。まず、測定面から数μmの近傍で粘性抵抗係数が急峻に変化する現象を見いだした。次にプローブ振動減衰を確認したところ、振幅が減衰し位相が遅れるという“ダンピング効果による位置検出原理”を明らかにした。特に振幅では分解能が10 nm以下と高い分解能を示すことができた。一方で、水平な測定面からの反射光によって発生する定在波がプロービング精度を低下させる働きを受け、その克服を検討した。定在波はプローブ球に外力を与え、プローブのばね定数に変化を与える。プローブの励振周波数に着目し、粘性抵抗によるダンピング効果を受けやすく、ばね定数による影響を受けにくい周波数帯域を選択し、位置検出実験を実施した。その結果、共振周波数よりも800 Hz程度低い周波数で励振すると、測定面の傾斜角度に関わらず±30 nm程度のばらつきで測定面の表面位置の検出を行うことが出来た。最後に、直径約550 μmのガラス球の座標測定を通して3次元マイクロプローブとしての有用性を確かめた。

9章「測定面位置および角度同時測定法」では、前節で明らかになったダンピング効果に関して、プローブ球の振動方向によってその影響の度合いが異なることを利用して、測定面の位置と法線方向が同時測定可能な手法を提案した。2次元のプローブ球位置制御により円軌道を描く。その2次元振動プローブでプロービングすると、円軌道が楕円軌道になり、測定面の位置を面法線方向を測定できる。このプロービング手法を評価した結果、位置検出分解能39 nm、角度測定精度± 1.5 °を実現した。また2次元の座標計測を通して、位置と角度の同時測定手法の有効性を示した。

本論文では、従来の提案されているプローブに比べて非常に “やわらかい” プローブを用いて、表面位置検出に対する調査を遂行した。一般的には、高い分解能と精度で位置検出を行うためには、プローブの持つばね定数は高くなければならない、という常識に反するプローブである。しかしながら、従来の “堅い” プローブであれば検出困難である、水蒸気層のダンピング効果による測定面との相互作用力が検出可能であるということを見いだし、その現象を用いることで数十nm以下の分解能を達成することが可能であった。ま

た、このダンピング効果がプローブ振動に対して異方性を持つことを利用して、従来に無い測定面の位置および法線方向を同時に測定可能なプローブ手法を開発した。このように、マイクロメートルオーダで特に顕著になるダンピング効果をうまく利用することで、“やわらかい” プローブでも高分解能検出が可能であり、また新たな表面検出手法を提案できた。

本研究で提案したマイクロプローブの今後の課題について述べる。まず、位置検出の確かさである。本プローブは測定面の光学的特性 (例えば、光沢面からのスペックルおよび、表面スクラッチやゴミからのノイズ光など) に対して敏感である。この影響がプローブ球にランダム力を与え、分解能や検出精度、および誤検出 (表面付近でないのに振動が変化する) に対するボトルネックとなっている。よって、これらの不可避な影響に対して鈍感に振舞う条件を求め、かつ粘性抵抗係数に対して高感度な検出を行うことが望ましい。それが可能となれば、100 nmRa以上の大きな表面粗さの測定面に対しても位置検出を高精度に行え、位置検出の分解能は数nmに達することも可能であると思われる。次に、プローブ球の落下に関する問題である。シャドウ効果に代表されるようにプローブ球周辺の電磁場が著しく変化する場合、もしくは空気の乱れが大きい場合、プローブ球はレーザトラップから外れて落下する。一旦、測定物の凹面にプローブ球が落下すると取り除くことは難しく、測定物汚染につながる。この課題は、ナノCMMのマイクロプローブとして本質的な課題となり、これによって測定対象が限定される。最後に、プローブ球径の補正である。1章で述べたようにプローブ径補正時に測定不確かさを拡大する。プローブ球の真球度をナノメートルオーダの高精度に評価する方法は全てのマイクロプローブ開発における課題である。また、非接触の位置検出を行う本プローブは、位置検出時のプローブ球と測定面の絶対的な距離を計測する必要がある。経験的にその距離は数十nmから数百nmであると予想され、この絶対距離は近接場光などを用いて計測の可能性がある[263, 345]。

マクロスケール (サブミリメートル領域) では、測定面と接触して始めて位置を検出する。ナノスケールでは、原子間力やトンネル電流などのナノオーダの現象を利用する。本プローブの位置するところは、マクロとナノの間のいわゆるメソスケールである。マイクロ・メソスケールでの “表面” とは一体なにを指すのであろうか。まずはこれを議論することが、次世代のマイクロプローブを発展させることの鍵となるのかもしれない†。1章でマイクロプローブの現状をまとめたが、このようなメソスケールの特性を利用したプローブは未だ提案されていない。というのも、マイクロプローブで表面の位置を検出することは本当に難しい。本研究では、その1つとして、マイクロ領域で特に顕著なダンピング効果などを利用して表面位置を検出した。この領域の特性を理解し、その特性を巧みに利用したプローブシステムは、製品/部品のマイクロ化が進む中で将来的に必須となるであろう。

† 余談ではあるが、哲学的には我々人間も “内” と “外” の境界、つまり、「わたしは誰なのか」 を見分けることは難しい。そのために人は常に葛藤をくりかえしているのである。(鷲田清一 著「じぶん・この不思議な存在」(講談社) より)

# 付録

## I　プローブ球径校正方法

レーザトラップ技術を利用する光放射圧プローブでは、測定毎にプローブ球が異なる。プローブ球の真球度や直径を正確に知ることは測定の不確かさを低減する上でも重要であり、実計測に置いてもプローブ球の径の校正を行うことから測定は始まる。レーザトラップ技術とWGM (Whispering gallery mode) を利用した高精度な粒径評価方法が提案されている[215, 231]が、ここでは、システム変更を必要としないプローブ振動モデルを用いた簡易なプローブ球径の校正方法を提案する。

既に述べられた様にプローブ振動はバネダンパ系によってよく表現することができる。また、その周波数応答は共振周波数を用いて特徴づけられている。共振周波数は式(7.13)で表されるようにばね定数とプローブの質量で決定される。ばね定数は本質的にはプローブ径とレーザ強度によって決定されることは3章の数値解析で検証された。一方、共振周波数はプローブとレーザを含む系によって決定される。それらの関係はプローブ質量によって結ばれる。プローブ球が完全な真球であると仮定すると、プローブ質量$m$は

$$m = \rho g \frac{4}{3} \pi r^3 \tag{I.1}$$

となる。ここで、$\rho$は密度、$g$は重力加速度、$r$はプローブ半径である。光線追跡法によりばね定数とプローブ径の関係は求めることができ、

$$k = \alpha d^2 + \beta d + \gamma \tag{I.2}$$

ただし、$\alpha$、$\beta$、$\gamma$はレーザ強度などに依存し、数値解析から求められる定数である。これと実験で得られた共振周波数を式(7.13)に代入し、繰返し計算することで、直径を得る。

$$d = \sqrt[3]{3k / 2\pi\rho f_n^2} \tag{I.3}$$

式(I.3)では、粘性抵抗などの測定周辺環境に依存する項は含まれていない。つまり本手法は、原理的に環境変化に影響されず正確な計測を行うことが出来、環境に対してロバストであることが期待される。

**実験**　本手法を検証する。同一粒子に対して異なる測定手法を比較することが望ましいが、非常に困難であるため、今回は統計的な手法によって行う。100個の粒子に対して粒径を測定し、マイクロ粒子径の標準的な測定法であるコールター法 (5000個) およびSEM観察 (80個) による測定と比較した。対物レンズはNA0.95を用いた。プローブ球を捕捉後に周波数応答の測定し、式(7.12)とのフィッティングから共振周波数を求める。プローブ径測定中はレーザ強度を常に測定しており、その平均値を用いて式(I.2)を用いて、ばね定数を求める。バネ定数と共振集は数から式(I.3)を用いて粒径を見積り、それを式(I.2)に用いて再度計算する。式(I.2)の初期値は4 μmとし、プローブ球の密度$\rho$は2000 kg/m$^3$とした。

**結果**　実験によって得られた粒径の分布を図I.1に示す。まず、オーダとしては、コールター法やSEM観察と一致し、本手法による粒径校正法の正確さが検証された。コールター法では8.5から9 μmにかけて分布を持っているが、コールター法測定時の粒子濃度が高すぎることによる影響と考えられる。それは、SEM観察でも分布が余り広くないことからも確認できる。このように、統計的に本手法の有効性を確認した。

**実験**　環境変化に対するロバスト性を評価するために、環境温度に変化を与えながら同一プローブに対して繰返し粒径測定を行った。対物レンズ用に穴をあけた20 mm × 20 mm × 20 mmの断熱性の高い箱を用意し、

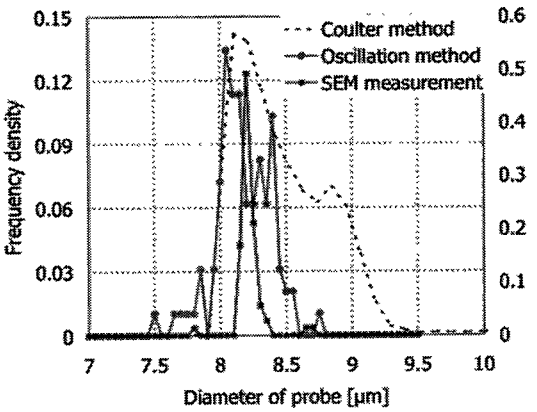



Figure I.1: Histogram of particle diameter measured by several methods.

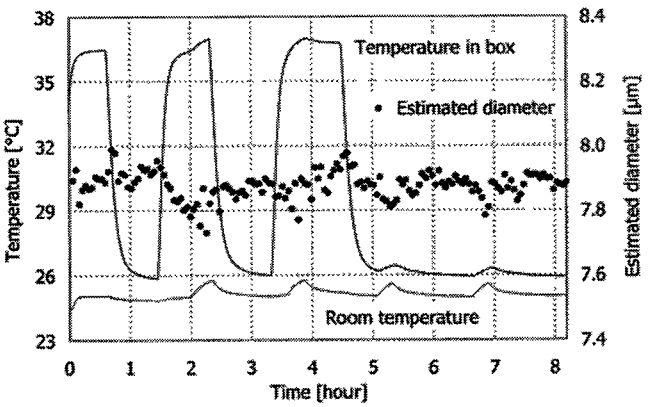



Figure I.2: Particle diameter measurement with changing ambient temperature.

プローブ球を捕捉後、対物レンズに箱を通して、周辺との温度を遮った。また、箱の内部には発熱体および温度センサを入れ、箱の中の温度を変化させ、測定することができる。

**結果** 図I.2に結果を示す。横軸は時間変化を表し、黒プロットは測定された粒径、黒の実線は箱内部の温度、青の実線は箱外部の周辺環境の温度変化を示す。図より、粒径計測の結果は箱内部の温度とは相関を持たず、環境にし対してロバストな測定であることがわかった。ただし、粒径計測の測定値自体は数百nmの範囲でばらつき精密度が欠ける測定結果となった。粒径測定値のばらつきは図I.2より外気温約1 °の変化に対して相関を持つことから、レーザパワーメータが温度の影響を受け入射レーザ強度の値を見誤ったためであると考えられる。

このように、本手法を用いてプローブ径を±100 nm以下の精度で推定可能であることが検証された。ただし、本手法はプローブ球が完全に球径であることが仮定しており、現在、直径数μmの粒子の真球度を評価する方法はない。そのため、この仮定のもとの測定であることを注意する必要がある。

# II 測定物粗計測

1章で指摘したように、プローブと測定面の相対的な距離を測定/観察可能な技術は実用上重要となる。本節では、光放射圧プローブを用いて、測定面から離れた位置で粗形状を計測する手法を提案する。

## 測定原理

8章で、プローブ球と測定面との間に生じる定在波について述べた。プローブの前方散乱光と測定面からの反射光が光干渉し、時間依存しない定在波が測定面とプローブ球の周辺に生成される。光軸上の定在波の強度分布は式(8.5)によって表すことが出来る*。また、この定在波によってプローブ球が光軸方向の周期的な変位を受けることは8.3.1項の図8.5より確かめられた。プローブ球は定在波から外力を受け、プローブ球と測定面の相対的な距離が変化するとともに、周期的な空間位置変動を受ける。また、その現象の再現性は非常に高かった。式(8.5)に注目すると、定在波は$z=0$から余弦波状に生成され、この定在波周期はレーザの波長$\lambda$によってのみ決定される。レーザトラップの力と定在波による力を比較し、プローブ球の光軸方向の変位を解析的に求めた結果は8.3.2項で述べられ、図8.7に示した。これによると、プローブ球は捕捉レーザの半波長ごとに200 nm程度の急峻な変化をする。

プローブ球が測定面上を平行にスキャンする時、プローブ球と測定面の距離が相対的に変化する。その相対変化は定在波によって、プローブ球の位置情報として現れる。そのプローブ信号の変化を測定することで、測定面の形状を回復できる。

* Subsection 8.3.2 in page 81.

## 測定性能

本プローブを用いた3次元形状計測の能力を評価するために、定在波の影響をどの程度の精度で取得可能であるか、どういった状況で取得できないかを確認する。

**定在波検出精度**　プローブ球を捕捉し、水平に設置されたシリコンウェハに対し、プローブ球を光軸に沿って垂直に一定速度0.42 μm/sec.で、距離約270 μmだけプローブ球を測定面に接近させる。その時に受けたプローブ信号の周期的変動のピッチを測定した結果を8章図8.5(c)に示した。平均値は534 nmで標準偏差は16 nmであった。まず、本プローブは定在波を16 nmのばらつきで測定可能であったことがわかる。次に、その測定精度に関して、理論的には平均値は1064 nmの半波長である532 nmであるが、測定値は2 nmの誤差があった。これは、レーザ光軸とステージ運動軸のズレの影響 (< 1 nm)、リニアスケール精度の影響 (< 1 nm) など考えられるが、主要な要因が何であるかを明確にすることは出来なかった。以降この534 nmを定在波による位置変動の基準値として用いた。

**測定レンジ**　本提案手法がどの条件で測定面形状を測定可能であるかを評価する。本質的には、測定面の反射光を利用した測定法であるため、反射光強度が測定に影響を及ぼす。反射光の強度は遠方になるほど低下すると考え、測定面からどの距離まで定在波が取得可能であるかを検証した。これまで同様にシリコンウェハを水平面として用い、プローブ球を測定面にほぼ接触状態になるまで接近させ、その状態から光軸方向に沿ってプローブ球を測定面から離していくときに定在波から受ける影響を下べた。この時のレーザ強度は400 mWとした。その時のプローブ信号を図II.1に示す。約500 nmで周期変動を受けるため、全体としてノイズがのったような信号を示すが、内挿図に示すように、プローブ信号は定在波の影響を正確に測定している。250 μmを超えるとノコギリ波状の信号がノイズに埋もれはじめプローブ球位置の急峻な変化を測定することが困難になる。測定面の光学特性や捕捉レーザの強度によって依存するため、一意に垂直方向測定レンジを決定できないが、最大で数百 μm以上であることが確認された。

次に、測定面が傾斜するとプローブ球に返る反射光量も当然減少し、図II.1で求められた垂直方向の測定レンジも短くなることが予想される。そこで、傾斜面に対して、傾斜角度によって垂直方向の測定レンジがどの程度影響受けるのかを測定した。測定方法は先ほどと同様に、40 °までの傾斜面に対して測定を行った。その結果を図II.2に示す。傾斜角10 °までは150 μmを超えた測定レンジを示したが、15 °以上になると極端に測定レンジが短くなり、30 °以上ではほとんど遠方からの測定は困難であった。この結果は、集光レーザが粒子を通過した後の前方散乱光分布に大きく影響される。本手法は測定面からの反射光量に大きく影響を受け、測定面角度に対して10数°という測定限界が見られたが、傾斜の少ない面に対しては数百μmの垂直方向測定レンジを示した。

**測定分解能**　本手法の最小単位は捕捉レーザの半波長である532 nmである。当然、捕捉レーザの波長を短くすることで数百nmオーダでその最小"メモリ"を改善できる。最終的にプローブ信号を干渉計測のようにアン

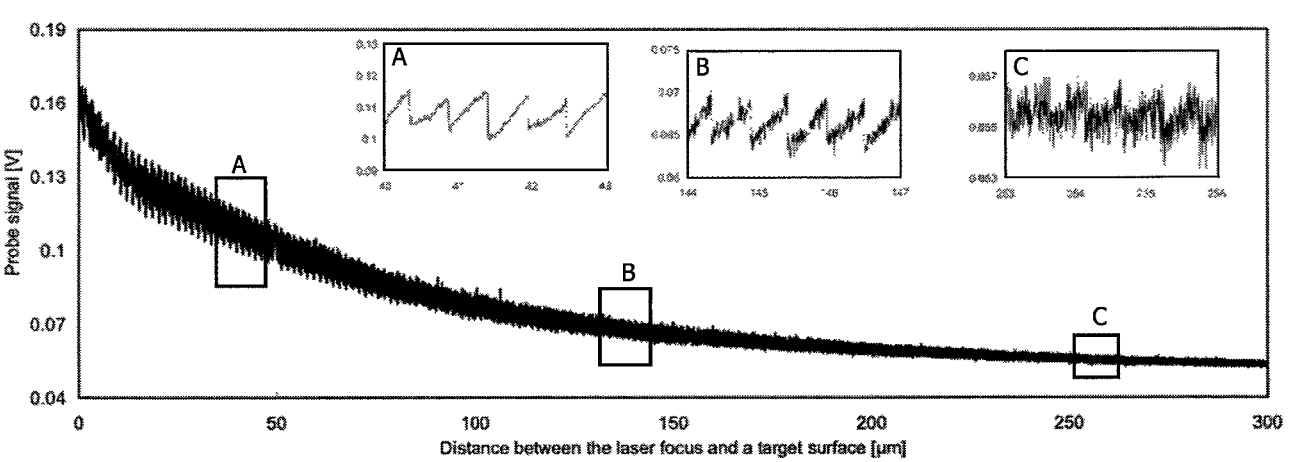



Figure II.1: Axial measurable range of standing wave.

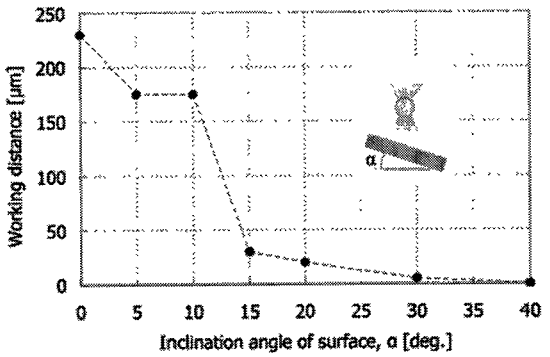


Figure II.2: Measurable range of inclined surfaces.

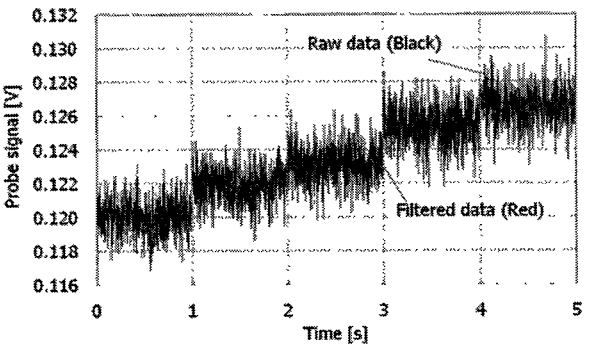


Figure II.3: Resolution of sensing the standing wave.

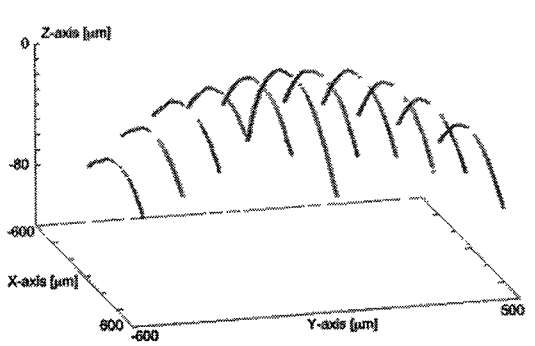
ラップ (Unwrap) して形状を推定するため、実験的な分解能は微細な測定面位置の変化に対して、プローブ信号が読み取れる最小変化量となる。ここで、実験的に測定の分解能を評価する。これまでの実験と同様の配置で、プローブ球と測定面を50 μm程度離した状態で、プローブ球を測定面に対して10 nm変位させるその時のプローブ信号を図II.3に示す。黒い線がプローブ信号であり、赤い線はその信号をローパスフィルタによって処理したものである。図よりプローブ球と測定面の10 nmの相対的な距離変化をプローブ信号は明確に分けることができ、本測定手法の分解能は10 nm程度であった。

## マイクロレンズ測定

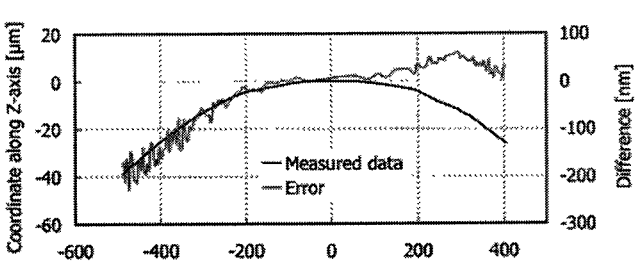
これまでに測定の特性を評価した。それをふまえて実際にマイクロレンズの形状の測定を行う。測定結果は、共焦点顕微鏡の測定結果と比較した。

**実験** 測定サンプルには直径2 mmで曲率半径が約2.5 mmの平凸マイクロレンズを用いた。プローブ球のZ軸は測定面頂上付近から約10 μmの高さにセットし、マイクロレンズ上方をX軸方向にシングルスキャンしマイクロレンズ形状のプロファイルを測定する。それをY軸 -500 μmから500 μmまで100 μm間隔で11 line測定する。本手法は相対距離変化を測定するため、各lineの高さを合わせる必要がある。そこで、1 line測定後、X = 0 の位置にプローブを戻す。次のlineまでY軸に沿って高さ変化を測定し、line間のZ軸座標を合わせた。また、各lineともX = 0で測定面から10 μmの高さに調整し直したあとスキャンした。プローブ球の移動速度は5.6 μm/sec.とし、プローブ信号のサンプリングレートは10 kHzとした。レーザ強度は400 mWとし、対物レンズにはNA0.95を用いた。マイクロレンズは共焦点顕微鏡の測定結果と比較する。そこで、両測定器によって測定されたデータをそれぞれ球面フィッティングし、擬似的なレンズの中心位置を算出し測定位置を一致させ、測定位置の一致を図った。

**結果** 本手法の測定結果を図II.4(a)に示す。このように、本手法を用いてマイクロレンズの形状を評価可能であった。次にY = 0のlineで本手法と共焦点顕微鏡の測定値の結果を比較する。図II.4(b)には、本手法で測定したプロファイルを黒の実線で示し、共焦点顕微鏡との差を赤の実線で示した。本手法で得られた結果よ



(a) Measured result.



(b) Cross-sectional profile.

Figure II.4: Measurement result of micro-lens by using standing wave.

り正確なプロファイルを測定できていることが確認でき、また、共焦点顕微鏡との差は±150 nm程度であった。したがって、本手法を用いた測定面形状の粗計測手法として高い有用性が示された。

## III　シャドウ効果の影響

入射ビームが遮られることによって、プローブ球が変位するもしくは捕捉から外れる。この影響をシャドウ効果とよぶ。3.3.4項の電磁場解析でこの影響を検討した結果、レーザ強度が10%以下でプローブ球は無視できない程の変位を受ける。ここでは、シャドウ効果によってプローブが受ける影響を実験的に検証する。

**実験**　実際の測定では、対物レンズ出射後の集光レーザが測定物によって遮られる。検証実験においてそれを定量的に制御することは難しい。そこで、本実験では、対物レンズ入射前のレーザを遮断することで擬似的なシャドウ効果を作り出し、その影響を検討した。実験装置は、9章で用いた光学系を用いる。ただし以下の2点に関して変更した。レーザの偏光は円偏光ではなく直線偏光を用いた。また、プローブ球の光軸方向変位を測定するため、新たに横観察顕微鏡ユニットを用いたプローブ球測定システムを導入した。図7.5に示したようにPDを用いた光軸方向変位測定はその測定可能範囲が狭い。そこで、LDを光軸垂直からプローブ球に入射し、その後方散乱光を用いてプローブ球の光軸方向の変位を測定した。後方散乱光はPDで受光し、4.4.1項で述べた調整方法を応用し測定した。またプローブ信号は、7.4節で述べたガラスプローブを用いてXYZの3軸ピエゾステージを基準にあらかじめ値を校正した。レーザの遮断は、鉄の薄板をステッピングモータに取り付け行った。遮断する薄板の端面はPSDのX軸に平行で、エッジの進行方向はY軸に垂直方向である。また、遮断量のパラメータとして、4.4.1項で述べた遮断率を用いた。遮断率はステッピングモータの値と対物レンズ前のレーザ強度を測定することで校正した後、シャドウ効果の実験を行った。初期レーザ強度は対物レンズ後で250 mWとした。ビーム径約4 mmの位置でステッピングモータを200 μm間隔ですすめ、変化が大きくなると100 μm間隔に変更してデータを取得した。6回の繰返し測定を行い、平均値とばらつきを求めた。

**結果**　ビームを遮光した時のプローブ球の3次元的な変位を示す結果を図III.2に示す。プロットは実験によって得られた平均値、エラーバーは繰返し測定の標準偏差を示す。また、XY平面内の変位について、CCDの観察よりプローブ球の移動方向について確認した。CCD観察より、ビームシャッターによりY軸正から負方向に遮断した時、プローブ球は正方向に変位した。つまり、座標測定で考えると、プローブ球はレーザが遮断された方向に向かって変位することがわかった。次にシャドウ効果によるプローブ球変位量について、4.4.1項の数値解析で見られたように、Y軸、Z軸ともに10%弱からプローブ球は変位を顕著な影響を受け始める。その後レーザの遮断率に応じて線形に変化する。この傾きより、Y軸およびZ軸でプローブ球変位は

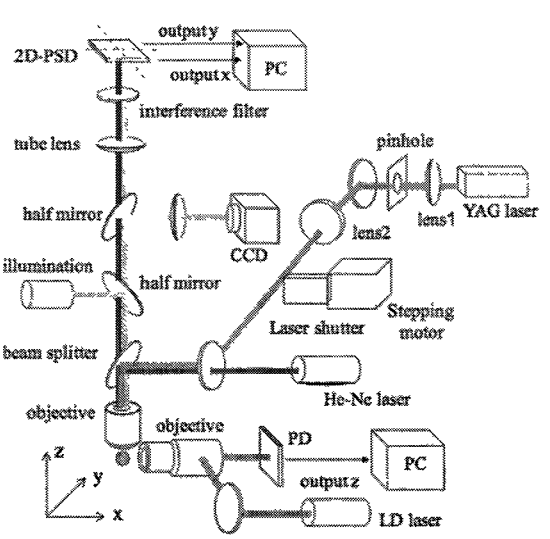



Figure III.1: Optical system.

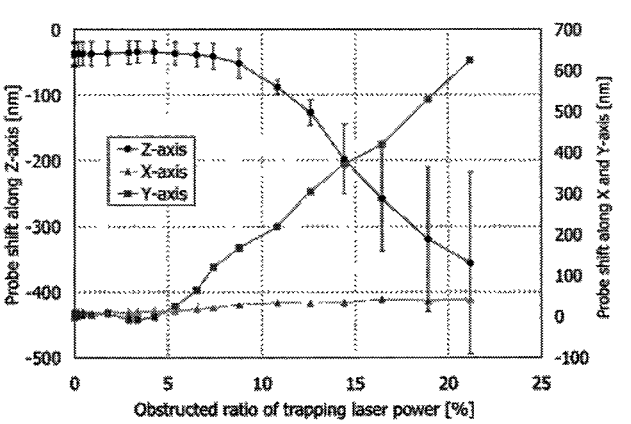



Figure III.2: Probe displacement due to shadow effect.

遮断率1%に対してそれぞれ37 nm、26 nmであった。このように数%の変化で数十nmの影響を受け、座標測定において考慮すべき課題点となる結果であった。ここで特徴的な点として、Y軸方向のプローブ球変位の繰返し測定のばらつきは小さく、変動係数 (Coefficient of variation) は3%以下であった。対照的にZ軸では、変動係数が200%以上にも及ぶ。この原因について考察する。まず、シャドウ効果によってレーザ強度が低下し、レーザの強度のばらつきが相対的に大きくなる。また、プローブ球を捕捉する力が弱くなり、ブラウン運動による影響が現れ始める。横方向は左右からの拘束力があり、横方向は光軸方向よりもばね定数が大きい。一方で，光軸方向はレーザ強度の変動などの影響を受けやすく、その結果ブラウン運動の影響が顕著になり、実験値がばらついた可能性がある。このようにシャドウ効果による影響は3次元異方的である。最後にトラップ球の捕捉限界について、20%のレーザ強度を遮断されてもプローブ球が捕捉状態から外れることはなかった。しかし、それ以上遮断するとプローブ球は落下した。このように、シャドウ効果が光放射圧プローブに与える影響は極めて重要であり、捕捉レーザを透過しない物質の測定最小物を計測する場合、シャドウ効果の影響に十分な注意を払った計測パスを設計する必要がある。

## IV　機能性プローブの試作

マイクロ部品の測定に対応するため、同一プラットフォーム上で様々な原理のプローブシステムを用いた測定が提唱されている[91, 346]。従来の測定システムではプローブシステムの交換でこれを実現する。例えば、SIOS Meßtechnik社のNMM-1では、高精度なステージシステムに焦点検出型顕微鏡、原子間力顕微鏡、白色干渉計、触針式プローブおよびCMMプローブを搭載し、マルチな測定を実現している†。しかし、これらのプローブシステムは各測定毎に交換の必要があり、その度に測定の座標系が異なる。

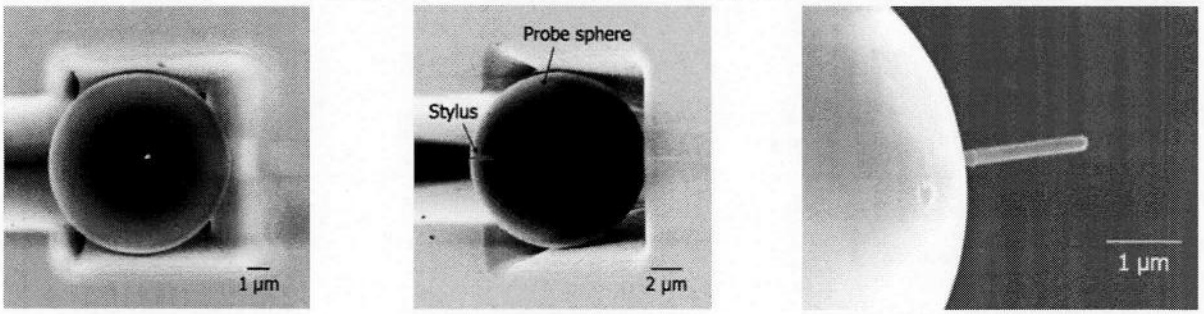
本研究で提案する光放射圧プローブを用いると、従来の座標測定に加え、プローブ走査による形状測定(付録II) が可能である。また、プローブ球を容易に変更可能であり、球状の座標測定プローブおよび先端先鋭なプローブを用いることで表面の微細な形状計測を同一座標系で行える可能性がある。ここでは、微細形状測定用のプローブスタイラスを試作した。

従来用いている球状プローブ球に先鋭な探針を付加する。カーボンナノチューブ[347]やウィスカー[348]を取り付ける方法およびCVD (Chemical vapor deposition) やPVD (Physical vapor deposition) などで成長させる方法が考えられる。プローブスタイラスは測定毎に用いるために、同様の性質および形状を持つプローブを多く生産する技術が好ましい。そこで本研究ではデポジションを用いた方法を採用する。具体的にはFIB-CVD (Focused ion beam induced CVD) 法[349]を用いた。FIB-CVDではエッチングガスの種類によって$SiO_2$、タングステン、カーボンなどのデポジションが可能であるが、本研究ではフェナントレン (Phenanthrene, $C_{14}H_{10}$) ガスを用いたDLC (Diamond like carbon) の探針を加工した。フェナントレンがガリウムイオンビームで分解され、部分的にアモルファスと結晶を持つDLCが蒸着する。本手法で加工可能なDLCのピラー (Pillar) の最小径は80 nmが報告されており、ヤング率 (Young's modulus) は600 GPaを超える[350]。このように探針として十分なスケールと強度特性を持つ。

**加工手順**　FIBによりシリコンウェハにプローブ球固定用の溝を加工し、静電気マイクロマニピュレータを用いて、その溝にプローブ球を設置する。その後、ウェハごとFIBの真空チャンバーに挿入し、FIB-CVD法によってプローブ球に探針をデポジションした。

**結果**　ガリウムイオンビームを1点に120秒間照射し、直径8 μmのシリカ球上にDLCピラーを作製した。そのピラーのSIM (Scanning ion microscopy) 像を図IV.1に示す。同図(c)からわかるように直径約200 nm、長さ約3 μmのピラーが精度良く作製できた。

† E. Langlotz: "Precise measurements with nanomeasuring machine NMM-1", *Microparts Interest Group Workshop*, NPL, Teddington, UK, 27-28 October (2009)　より




(a) Top view. (b) Bird view. (c) Fabricated stylus.

Figure IV.1: SIM image of Probe stylus for measuring nano-surface structure fabricated by FIB-CVD.

このように、様々なプローブスタイラスを用いることで、同一のシステム・座標系で粗計測、座標測定および微細形状測定まで行える可能性があり、マイクロ部品のスケールインターフェースを構築可能な計測システムが期待できる。

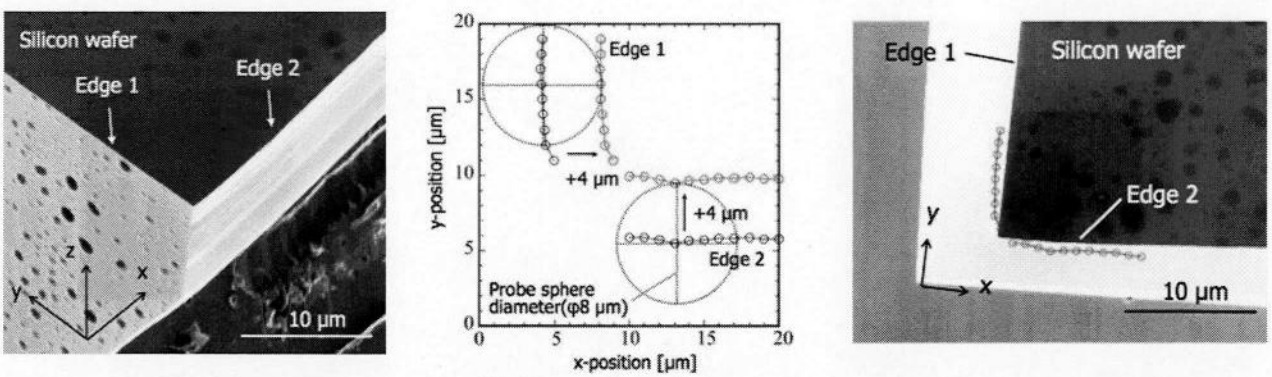
# V エッジ計測

8章において位置検出原理を検討した。測定面近傍で粘性抵抗が増加することによるダンピング効果によってプローブ球の振動が減衰する。その減衰を計測することで、表面位置を高分解能に検出可能であった。8章で述べたようにダンピング効果は周辺空気の圧縮と膨張によって発生するため、その程度は測定する形状に依存する。8章では、平面の位置検出を行ったが、ここでは、エッジの計測を行う。

**実験** 図V(a)に示すシリコンウェハの劈開面を利用したエッジの座標計測を行う。プローブ球の振動方向は測定面に垂直とし、共振周波数約1700 Hzに対し、励振は1000 Hz、振幅は約190 nmとした。振動の位相遅れに着目し、位相が75 °遅れたときを閾値とした。また、プローブの信号は25 nmのピッチで取得し、各プロービング点は1 μm間隔とした。座標値の基準は4章でも用いたXYZピエゾステージの値である。座標位置を検出後、プローブ球の半径4 μmを補正した。

**結果** 図V(b)に検出点の座標値、同図(c)に測定面のSIM像と比較した図を示す。両図ともZ軸方向からの図を示している。結果より、エッジ部分においてダンピングの影響が小さくなり、座標検出点が1 μm程度ずれていることが確認できる。計測位置がエッジ部分であるため、ダンピング時の空気の圧縮膨張が起こりにくくダンピング効果が他の部分よりも起こりにくい状態になっているためであると予想できる。

このように、光放射圧振動プローブの位置検出ではダンピング効果の形状依存が見られ、エッジ部分ではダンピングが起こりにくいというような傾向が見られた。




(a) Bird view. (b) Detected coordinate. (c) Comparison with SIM image.

Figure V: Measurement of edge of silicon wafer.

# VI　定数リスト

- 光速 (Light speed)

$$c = 2.99792458 \times 10^{8} \ m/s$$

- プランク定数 (Plank constant)

$$h = 6.62606896 \times 10^{-34} \ J \cdot s$$

- ボルツマン定数 (Boltzmann constant)

$$k_B = 1.380658 \times 10^{-23} \ J/K$$

- 真空中の誘電率 (Permittivity of free space)

$$\varepsilon_0 = 8.85418782 \times 10^{-12} \ N/V^2$$

- 真空中の透磁率 (Permeability of free space)

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \ N/A^2$$

- 空気の粘性係数 (Viscosity of air)

Table: 飽和水蒸気の物性値

| 温度 Tempearture | 飽和水蒸気圧力 Saturated vapor pressure | 密度 Density | 粘性係数 Viscosity | 動粘性係数 Dynamic viscosity |
|---|---|---|---|---|
| ℃ | MPa | kg/m³ | Pa·s | m²/s |
| 60 | 0.01992 | 0.1302 | $1.12 \times 10^{-5}$ | $8.59 \times 10^{-5}$ |
| 80 | 0.04736 | 0.2934 | $1.19 \times 10^{-5}$ | $4.04 \times 10^{-5}$ |
| 100 | 0.1013 | 0.5977 | $1.26 \times 10^{-5}$ | $2.10 \times 10^{-5}$ |
| 120 | 0.1985 | 1.121 | $1.32 \times 10^{-5}$ | $1.18 \times 10^{-5}$ |
| 140 | 0.3614 | 1.966 | $1.40 \times 10^{-5}$ | $0.713 \times 10^{-5}$ |
| 160 | 0.6181 | 3.259 | $1.48 \times 10^{-5}$ | $0.454 \times 10^{-5}$ |
| 180 | 1.003 | 5.159 | $1.56 \times 10^{-5}$ | $0.302 \times 10^{-5}$ |
| 200 | 1.555 | 7.862 | $1.65 \times 10^{-5}$ | $0.210 \times 10^{-5}$ |
| 220 | 2.320 | 11.62 | $1.74 \times 10^{-5}$ | $0.149 \times 10^{-5}$ |
| 240 | 3.348 | 16.76 | $1.82 \times 10^{-5}$ | $0.109 \times 10^{-5}$ |
| 260 | 4.694 | 23.73 | $1.91 \times 10^{-5}$ | $0.0806 \times 10^{-5}$ |
| 300 | 8.593 | 46.20 | $2.12 \times 10^{-5}$ | $0.0458 \times 10^{-5}$ |

Table: 空気(大気圧)の物性値

| 温度 Tempearture | 密度 Density | 粘性係数 Viscosity | 動粘性係数 Dynamic viscosity |
|---|---|---|---|
| ℃ | kg/m³ | Pa·s | m²/s |
| -100 | 1.984 | $1.19 \times 10^{-5}$ | $5.98 \times 10^{-6}$ |
| -50 | 1.533 | $1.46 \times 10^{-5}$ | $5.93 \times 10^{-6}$ |
| -20 | 1.348 | $1.62 \times 10^{-5}$ | $1.20 \times 10^{-5}$ |
| 0 | 1.251 | $1.73 \times 10^{-5}$ | $1.38 \times 10^{-5}$ |
| 20 | 1.166 | $1.82 \times 10^{-5}$ | $1.56 \times 10^{-5}$ |
| 40 | 1.091 | $1.91 \times 10^{-5}$ | $1.75 \times 10^{-5}$ |
| 60 | 1.026 | $2.01 \times 10^{-5}$ | $1.96 \times 10^{-5}$ |
| 80 | 0.968 | $2.10 \times 10^{-5}$ | $2.17 \times 10^{-5}$ |
| 100 | 0.916 | $2.19 \times 10^{-5}$ | $2.39 \times 10^{-5}$ |
| 120 | 0.869 | $2.28 \times 10^{-5}$ | $2.62 \times 10^{-5}$ |
| 140 | 0.827 | $2.35 \times 10^{-5}$ | $2.85 \times 10^{-5}$ |
| 160 | 0.789 | $2.43 \times 10^{-5}$ | $3.08 \times 10^{-5}$ |
| 180 | 0.754 | $2.51 \times 10^{-5}$ | $3.33 \times 10^{-5}$ |
| 200 | 0.722 | $2.59 \times 10^{-5}$ | $3.59 \times 10^{-5}$ |
| 250 | 0.652 | $2.78 \times 10^{-5}$ | $4.62 \times 10^{-5}$ |
| 300 | 0.596 | $2.95 \times 10^{-5}$ | $4.95 \times 10^{-5}$ |
| 350 | 0.548 | $3.12 \times 10^{-5}$ | $5.69 \times 10^{-5}$ |
| 400 | 0.508 | $3.28 \times 10^{-5}$ | $6.45 \times 10^{-5}$ |
| 500 | 0.442 | $3.58 \times 10^{-5}$ | $8.10 \times 10^{-5}$ |
| 600 | 0.391 | $3.86 \times 10^{-5}$ | $9.88 \times 10^{-5}$ |
| 800 | 0.319 | $4.38 \times 10^{-5}$ | $1.37 \times 10^{-4}$ |
| 1000 | 0.265 | $4.84 \times 10^{-5}$ | $1.83 \times 10^{-4}$ |
| 1200 | 0.232 | $5.28 \times 10^{-5}$ | $2.27 \times 10^{-4}$ |
| 1400 | 0.204 | $5.68 \times 10^{-5}$ | $2.78 \times 10^{-4}$ |
| 1600 | 0.183 | $6.05 \times 10^{-5}$ | $3.31 \times 10^{-4}$ |
| 2200 | 0.144 | $6.99 \times 10^{-5}$ | $4.86 \times 10^{-4}$ |

# 参考文献


[1] 増沢隆久: “マイクロ化の流れ”, 生産研究, Vol.58, No.2 (2006) pp.81-82.

[2] N. Taniguchi: “Current status in, and future trends of, ultraprecision machining and ultrafine materials processing”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.32 Iss.2 (1983) pp.573-582.

[3] 谷口紀男: “超精密加工技術の発達と今後の課題 -ナノテクノロジーとの関連-”, 日本機械学会誌, Vo.87, No. 791 (1980) pp.15-22.

[4] H.N. Hansen, K. Carneiro, H. Haitjema, L.De Chiffre: “Dimensional micro and nano metrology”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.55, Iss.2 (2006) pp.721-743.

[5] Carl Zeiss Inc.: http://www.zeiss.com

[6] Web article from RAPID today: http://www.rapidtoday.com/micro.html

[7] 株式会社ロータステクノ: http://www.lotus-techno.com/

[8] T. Pfeifer, R. Freudenberg, G. Dussler, B. Broccher: “Quality control and process observation for the micro assembly process”, *Measurement*, Vol.30 No.1 (2001) pp.1-18.

[9] S.C.H. Thian, W. Feng, Y.S. Wong, J.Y.H. Fuh, H.T. Loh, K.H. Tee, Y. Tang, L. Lu: “Dimensional measurement of 3D microstruture based on white light interferometer”, *Journal of Physics: Conference Series, International Symposium on Instrumentation Science and Technology*, Vol.48 (2006) pp.1435–1446.

[10] J.F. Nichols, M. Shilling, T.R. Hurfess, “Review of MEMS metrology solutions”, *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, Vol.13 (2008) pp.344-359.

[11] 三船博庸, 宮下隆明: “マイクロレンズ技術とその評価”, *O plus E*, Vol.24, No.7 (2002) pp.750-757.

[12] D. Dornfeld, S. Min, Y. Takeuchi, “Recent advances in mechanical micromachining”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.55, Iss.2 (2006) pp.745-768.

[13] 厨川常元: “ナノ精度マイクロ機械加工の現状と将来”, 精密工学会誌, Vol.75, No.1 (2009) pp.62-63.

[14] 鈴木浩文, 山形 豊, 樋口俊郎: “超精密加工システムの最新動向”, 精密工学会誌, Vol.72, No.4 (2006) pp. 417-421.

[15] 竹内芳美: “超精密マイクロ切削加工”, 日刊工業新聞社 (2008)

[16] T. Moriwaki, E. Shamoto, “Ultrasonic elliptical vibration cutting”, *CIRP Annals -Manufacturing Technology*, Vol. 44, Iss.1 (1995) pp.31-34.

[17] 梶原優介, 稲月友一, 高橋 哲, 高増潔: “エバネッセント光を利用したナノ光造形法に関する研究 (第2報) : 定在エバネッセント光を利用した微細周期構造創製”, 精密工学会誌, Vol.73, No.8 (2007) pp.934-939.

[18] S. Kawata, H.B. Sun, T. Tanaka, K. Takada: “Finer features for functional microdevices”, *Nature*, Vol.412, No. 6848 (2001) pp.697-698.

[19] S. Maruo, K. Ikuta: “Submicron manipulation tools driven by light in a liquid”, *Applied Physics Letter*s, Vol.76, No.19 (2000) pp.2656-2658.

[20] 西野秀昭, 三好隆志, 高谷裕浩, 高橋 哲, 林 照剛, 木村景一: “液晶マスクを用いた非積層マイクロ光造形法に関する研究 (第2報) -液晶動画像を用いた薄層型積層造形-”, 精密工学会誌, Vol.69, No.10 (2003) pp. 1417-1422.

[21] V.K. Varadan, X. Jiang, V.V. Varadan: “Microstereolithography and other fabrication techniques for 3D MEMS”, Wiley (2001)

[22] 高村章三, 阿部宗光: “リソグラフィと機械加工の融合で金型加工の新境地を切り開く”, 日経エレクトロニクス, No.6 (2006) pp.64-69.

[23] E.W. Becker, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Maner, D. Miinchmeyer: Fabrication of microstructures with high aspect ratios and great structural heights by synchrotron radiation lithography, galvanoforming, and plastic moulding (LIGA process), *Microelectronic Engineering*, Vol.4 (1986) pp.35-56.

[24] H. Becker, U. Heim: "Hot embossing as a method for the fabrication of polymer high aspect ratio structures", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 83 (2000) pp.130-135.

[25] 増沢隆久: "放電加工", 精密工学会誌, Vol.75, No.1 (2009) pp.68-69.

[26] M. Kunieda, B. Lauwers, K.P. Rajurkar, B.M. Schumacher: "Advancing EDM through fundamental insight into the process", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.54, Iss.2 (2005) pp.64-87.

[27] 中村卓弘: "1 μmが当たり前の精密ワイヤ加工とその技術", 型技術学会誌, Vol.21, No.8 (2006) pp.122-123.

[28] 毛利尚武: "放電加工技術の新展開", 精密工学会誌, Vol.71, No.5 (2005) pp.537-540.

[29] M. Heckele, W.K. Schomburg: "Review on micro molding of thermoplastic polymers", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol.14 (2004) pp.R1-R14.

[30] 伊藤嘉亮: "マイクロ成形金型とマイクロ射出成形", 型技術, Vol.24, No.7 (2009) pp.33-36.

[31] L. Alting, F. Kimura, H.N. Hansen, G. Bissacco: "Micro engineering", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.52, Iss.2 (2003) pp.635-657.

[32] "マイクロ金型を用いた超小型歯車の製造", 精密工学会誌, Vol.69, No.9 (2003) pp.1217-1220.

[33] 堤 正臣: "多軸加工の高度化に向けた技術開発状況", 型技術, Vol.24, No.1 (2009) pp.49-51.

[34] 小島秀芳, 小笠原真智: "超微小歯車", 精密工学会誌, Vol.69, No.3 (2003) pp.337-340.

[35] 林 輝, 小笠原宏臣, 前田憲次, 澁谷吉晴: "特殊マスターギヤを用いた歯形検査", 日本機械学会 機素潤滑設計部門講演論文集 (2004) pp.63-66.

[36] 高谷裕浩: "3次元微小形状のナノ加工計測", 塑性と加工, Vol.44, No.510 (2003) pp.708-712.

[37] P.M. Lonardy, D.A. Lucca, L.De Chiffre: "Emerging trends in surface metrology", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.52, Iss.2 (2003) pp.635-657.

[38] 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 (2002) pp.361-366.

[39] R.K. Leach, C. Giusca: "Traceable measurement of areal surface texture", *Proc. 4M conference* (2008)

[40] K. Hidaka, A. Saito, S. Koga: "Study of a micro-roughness probe with ultrasonic sensor", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.57, Iss.1 (2003) pp.489-492.

[41] E. Savio, L. De Chiffre, R. Schmitt: "Metrology of freeform shaped parts", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.57, Iss.2 (2007) pp.810-835.

[42] 佐藤 敦: "白色干渉法を利用した最新の表面形状評価技術", 表面技術, Vol.57, No.8 (2006) pp.554-558.

[43] H.J. Jordan, M. Wegner, H. Tiziani: "Highly accurate non-contact characterization of engineering surfaces using confocal microscopy", *Measurement Science and Technology*. Vol.9 (1998) pp.1142-1151.

[44] 河田 聡: "超解像の光学", 学会出版センター (1999)

[45] R. Danzl, F. Helmli, S. Scherer: "Focus variation -A new technology for high resolution optical 3D surface metrology", *The 10th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing* (2009)

[46] 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 (2002) pp.22-26.

[47] 大高 正: "電子線を用いた半導体微細寸法計測技術の進歩と将来展望", 電子情報通信学会, Vol.102 No.622 (2003) pp.33-38.

[48] 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, Vol.3 No.4 (2005) pp.559-568.

[49] Renishaw: http://www.renishaw.com/

[50] M. Bartscher, U. Hilpert, J. Goebbels, G. Weidemann: "Enhancement and proof of accuracy of industrial computed tomography (CT) measurements", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.56, Iss.1 (2007) pp.495-498.

[51] S. Carmignato, D. Dreossi, L. Mancini, F. Marinello: "Testing of x-ray microtomography systems using a traceable geometrical standard", *Measurement Science and Technology,* Vol.20 (2009) 084021.

[52] C.D. Savio, S. Dejima, H.U. Danzebrink, T. Gotszalk: "3D metrology with a compact scanning probe microscope based on self-sensing cantilever probes", *Measurement Science and Technology*, Vol.18 (2007) pp.328-333.

[53] M. Yamamoto, H. Takeuchi, S. Aoki: "Dimensional measurement of high aspect ratio micro structures with a resonating micro cantilever probe", *Microsystem Technologies*, Vol. 6 (2000) pp.179-183.

[54] H.-U. Danzebrink, G. Dai, F. Pohlenz, G. Wilkening: "Overview of the metrological scanning probe microscopes at PTB", *Microscopy and Microanalysis*, Vol.11 (2005) pp.2-5.

[55] J. Garnaes, P.-E. Hansen, N. Agersnap, J. Holm, F. Borsetto, A. Kühle, "Profiles of a high-aspect-ratio grating determined by spectroscopic scatterometry and atomic-force microscopy", *Applied Optics*, Vol.45 (2006) pp. 3201-3212.

[56] 高増 潔: "知的計測技術によるメソスケール形状測定", 精密工学会誌, Vol.74, No.3 (2008) pp.213-216.

[57] 高谷裕浩: "ナノ3次元形状計測技術", 表面技術, Vol.56, No.12 (2005) pp.780-786.

[58] 大澤尊光, 高辻利之, 佐藤 理: "ものづくり産業を支える高精度三次元形状測定 -測量トレーサビリティ体系の構築と標準化-, *Synthesiology*, Vol.2, No.2 (2009) pp.101-112.

[59] 黒澤富蔵: "ディメンジョナルナノメトロロジーの世界動向と日本の戦略", 砥粒加工学会誌, Vol.48, No.5 (2004) pp.237-240.

[60] JIS B7440 (2003)

[61] 精密工学会 超精密位置決め専門委員会: "次世代精密位置決め技術", フジテクノシステム (2000)

[62] R.J. Hocken: "Coordinate measuring machines and systems", CRC (1995)

[63] M. Abbe, K. Takamasu, S. Ozono: "Reliability on calibration of CMM", *Measurement*, Vol.33 (2003) pp.359-368.

[64] H.-T. Yau, C.-H. Meng, "Automated CMM path planning for dimensional inspection of dies and molds having complex surfaces", *International Journal of Machine tools and Manufacture*, Vol.35, No.6 (1995) pp.861-876.

[65] J.-P. Kruth, P. Vanherck, C. VandenBergh: "Compensation of static and transient thermal errors on CMMs", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.50, Iss.1 (2001) pp.377-380.

[66] 大西 徹, 高瀬省徳, 高増 潔: "現場環境における三次元測定機の高度化に関する研究 (第1報) -温度ドリフトの評価および補正-", 精密工学会誌, Vol.73, No.2 (2007) pp.270-274.

[67] J.R.R. Mayer, Y.A Mir, F. Trochu, A. Vafaeesefat, M. Balazinski, "Touch probe radius compensation for coordinate measurement using kriging interpolation", *Proc. Institution of Mechanical Engineers. Part B. Journal of engineering manufacture*, Vol.211, Part B (1997) pp.11-18.

[68] W.T. Estler, S.D. Phillips, B. Borchardt, T. Hopp, M. Levenson, K. Eberhardt, M. McClain, Y. Shen, X. Zhang, "Practical aspects of touch-trigger probe error compensation", *Precision Engineering*, Vol.21, Iss.1 (1997) pp.1-17.

[69] 大西 徹, 高瀬省徳, 高増 潔: "現場環境における三次元測定機の高度化に関する研究 (第2報) -直角誤差補正-, 精密工学会誌, Vol.73, No.7 (2007) pp.818-822.

[70] 和合 健, 米倉勇雄: "CMMによるボールプレートの値付け校正", 岩手県工業技術センター研究報告, Vol.12 (2005) pp.115-119.

[71] 山畑利行, 新保栄一: "三次元測定機の信頼性向上に関する研究", 千葉県産業支援技術研究所研究報告, No.2 (2004) pp.17-19.

[72] K. Takamasu, R. Furutani, S. Ozono: "Basic concept of feature-based metrology", *Measurement*, Vol.26 (1999) pp. 151-156.

[73] A. Balsamoa, M. Di Ciommoa, R. Mugnoa, B.I. Rebagliaa, E. Riccib, R. Grellab: "Evaluation of CMM uncertainty through monte carlo simulations", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.48, Iss.1 (1999) pp.425-428.

[74] 高増 潔, 佐藤 理, 下嶋 賢, 古谷涼秋: "座標測定機のアーティファクト校正 (第3報) -校正後の測定の不確かさの推定-", 精密工学会誌, Vol.71, No.7 (2003) pp.890-894.

[75] 高増 潔, 野坂健一郎, 阿部 誠, 古谷涼秋, 大園成夫: "空間座標の比較測定によるCMMの校正 (第2報) -パラメトリックエラー推定値の信頼性-", 精密工学会誌, Vol.66, No.4 (2003) pp.578-583.

[76] M.G.A. van Veghel, R.H. Bergmans, H.J. Nieuwenkamp: "Traceability of a linescale based micro-CMM", *Proc. euspen* 2008, Vol.2 (2008) pp.263-271.

[77] K. Takamasu, S. Takahashi, M. Abbe, R. Furutani: "Uncertainty estimation for coordinate metrology with effects of calibration and form deviation in strategy of measurement", *Measurement Science and Technology*, Vol.19 (2008) 084001.

[78] U. Neuschaefer-Rube, M. Neugebauer, W. Ehrig, M. Bartscher, U. Hilpert: "Tactile and optical microsensors: test procedures and standards", *Measurement Science and Technology*, Vol.19 (2008) 084010.

[79] B. de la Maza, F. Pereda, T. Ventura: "On the development of fiducials mark design and calibration methods for micro- and nano-CMM multi-probe and multi-orientation measurement strategies", *Proc. euspen* 2009 (2009) pp. 323-326.

[80] M. Trenk, M. Franke, H.I. Schwenke: "The "Virtual CMM", a software tool for uncertainty evaluation -Practical application in an accredited calibration lab", *Proc.ASPE* (2004)

[81] H.N. Hansen, L. De Chiffre, J. Fugl: "Tolerancing issues in micro manufacturing", *Proc. euspen* 2008, Vol.2 (2008) pp.317-320.

[82] B. van Dorp, H. Haitjema, F. Delbressine, R. Bergmans, P. Schellekens: "Virtual CMM using monte carlo methods based on frequency content of the error signal", *Proc. SPIE*, Vol.4401 (2001) pp.158-167.

[83] 進士忠彦, 下河辺 明, 佐藤海二, 王 葆春, 林 慎一朗, 成 曄: "仮想三次元測定機の研究: 慣性力と駆動力による動的誤差の評価", 日本機械学会 年次大会講演論文集 (2000) pp.181-182.

[84] 荻野 健, 阿部 誠: "Virtual CMMによる座標測定の不確かさ推定 (第1報) -校正済み円筒による検証-, 2006年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2007) N18.

[85] K. Takamasu, S. Ozawa, T. Asano, A. Suzuki, R. Furutani, S. Ozono: "Basic concepts of Nano-CMM", *The Japan - China Bilateral Symposium on Advanced Manufacturing Engineering* (1996) pp.155-158.

[86] H. Schwenke, F. Härtig, K. Wendt, F. Wäldele: "Future challenges in coordinate metrology addressing metrological problems for very small and very large parts", *IDW Conference*, Knoxville (1999)

[87] Nano-CMM project: http://www.nanocmm.net/

[88] G.N. Peggs, A.J. Lewis, S. Oldfield: "Design for a compact high-accuracy CMM", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.48 (1999) pp.417-420.

[89] R. Leach, J. Haycocks, K. Jackson, A. Lewis, S. Oldfield, A. Yacoot: "Advances in traceable nanometrology at the National Physical Laboratory", *Nanotechnology*, Vol.12 (2001) pp.R1-R6.

[90] R.K. Leach, J. Murphy, A. Wilson: "Design of a co-ordinate measuring probing system for characterising three-dimensional micro-structures", *NPL report*, CBTLM 30 (2004)

[91] Z. Vít, Z. Prokop: "Multi-sensor coordinate measuring machine and internet virtual multi-sensor measuring machine in CMI Prague", *Proc. 9th ISMQC*, (2007) pp.126-130.

[92] M.M.P.A. Vermeulen, P.C.J.N. Rosielle, P.H.J. Schellekens: "Design of a high-precision 3D-coordinate measuring machine", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.47, Iss.1 (1998) pp.447-450.

[93] E. Kirkland, T.R. Kurfess, S.Y. Liang: "A optical coordinate measuring machine for nanoscale dimensional metrology", *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligence Informatics*, Vol.8, No.1 (2004) pp. 39-44.

[94] K.C. Fan, Y.T. Fei, X.F. Yu, Y.J. Chen, W.L. Wang, F. Chen, Y.S. Liu, "Development of a low-cost micro-CMM for 3D micro/nano measurements", *Measurement Science and Technology,* Vol.17 (2006) pp.524-532.

[95] K.C. Fan, Y. Fei, X. Yu, W. Wang, Y. Chen, "Study of a noncontact type micro-CMM with arch-bridge and nanopositioning stages", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,* Vol.23 (2007) pp.276-284.

[96] 白石利治, 三井公之: "マイクロ部品形状測定装置の開発 -装置の校正ならびに測定結果-", 精密工学会誌, Vol.64, No.9 (1998) pp.1395-1399.

[97] 白石利治, 北野賢一, 川田昌義, 三井公之: "マイクロ部品の形状・寸法測定に関する研究 (装置の改良ならびにプローブの校正と寸法測定結果)", 日本機械学会論文集(C編), Vo.68, No.673 (2002) pp.2783-2790.

[98] S.W. Kim: "New design of precision CMM based upon volumetric phase-measuring interferometry", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.50, Iss.1 (2001) pp.357-360.

[99] S.W. Kim, H.G. Rhee, J.Y. Chu: "Volumetric phase-measuring interferometer for three-dimensional coordinate metrology", *Precision Engineering*, Vol.27 (2003) pp.205-215.

[100] S. Cao, U. Brand, T. Kleine-Besten, W. Hoffmann, H. Schwenke, S. Butefisch, S. Buttgenbach: "Recent developments in dimensional metrology for microsystem components", *Microsystem Technologies*, Vol.8 (2002) pp. 3-6.

[101] U. Brand, J. Kirchhoff: "A micro-CMM with metrology frame for low uncertainty measurements", *Measurement Science and Technology*, Vol.16 (2005) pp.2489-2497.

[102] 寒河江 英利, 遠藤弘之, 渕上明弘, 新保晃平, 稲田 久: "走査レンズ金型の高精度仕上げ加工技術", *Ricoh Technical Report*, No.31 (2005) pp.52-58.

[103] K. Takamasu, R. Furutani, S. Ozono: "Development of nano-CMM (Coordinate measuring machine with nanometer resolution), *Proc. 6th IMEKO world congress* (1997) pp.34-39.

[104] K. Yoshizumi, T. Murao, J. Masui, R. Imanaka, Y. Okino: "Ultrahigh accuracy 3-D profilometer", *Applied optics*, Vol.26, No.9 (1987) pp.1647-1653.

[105] H. Tsutsumi, K. Yoshizumi, H. Takeuchi: "Ultrahigh accurate 3-D profilometer", *Proc. SPIE*, Vol.5638 (2005) pp. 387-394.

[106] F. Meli, A. Kung: "Performance of a low force 3D touch probe on an ultra precision CMM for small parts", *Proc. euspen 2004* (2004) pp.270-271.

[107] A. Kung, F. Meli, R. Thalmann: "Ultraprecision micro-CMM using a low force 3D touch probe", *Measurement Science and Technology*, Vol.18 (2007) pp.319-327.

[108] 小倉一朗: "マイクロファクトリ用オンマシン測定システム", 計測と制御, Vol.47, No.9 (2008) pp.751-756.

[109] ISARA system by IBS precision engineering: http://www.ibspe.com/ibs_precision_engineering_uk/ibs_isara.html

[110] F25 by Carl Zeiss: http://www.zeiss.com/f25

[111] NanoCMM by Eindhoven University: http://www.nanocmm.eu/

[112] ALTERA nano by Mycrona: http://www.mycrona.de/

[113] E.J.C. Bos, F.L.M. Delbressine, H. Haitjema: "High-accuracy CMM metrology for micro systems", *Proc. 8th IMEKO world congress*, (2003) pp.8-15.

[114] 新井雅典: "高精度微細形状計測を目指すNANOCORDシステム", 機械と工具, Vol.50, No.1 (2006) pp. 110-111.

[115] H. Shiozawa, Y. Fukutomi, T. Ushioda, S. Yoshimura: "Development of ultra-precision 3D-CMM based on 3-D metrology frame", *Proc. 13th ASPE* (1998) pp.15-18.

[116] J. Stoup, T. Doiron: "Measurements of large silicon spheres using the NIST M48 coordinate measuring machine", *Proc. SPIE*, Vol.5190 (2003) pp.277.

[117] H. Schwenke, F. Waldele, C. Weiskirch, H. Kunzmann: "Opto-tactile sensor for 2D and 3D measurement of small structures on coordinate measuring machines", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.50, Iss.1 (2001) pp. 361-364.

[118] M. Wissmann, H. Schwenke, U. Neuschaefer-Rube: "Speckle correlation method for 3D-deflection measurement of the tactile optical microprobe.", *Proc.ASPE* (2006) pp.79-82.

[119] Fiber probe WFP by Werth-messtechnik: http://www.werth.de/

[120] A. Weckenmann, T. Estler, G. Peggs, D. McMurtry: "Probing systems in dimensional metrology", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.53, Iss.2 (2004) pp.657-684.

[121] A. Weckenmann, G. Peggs, J. Hoffmann: "Probing systems for dimensional micro- and nano-metrology", *Measurement Science and Technology*, Vol.17 (2006) pp.504-509.

[122] H. Schwenke, U. Neuschaefer-Rube, T. Pfeifer, H. Kunzmann: "Optical methods for dimensional metrology in production engineering", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.51, Iss.2 (2002) pp.685-699.

[123] W.T. Estler, K.L. Edmundson, G.N. Peggs, D.H. Parker, "Large-scale metrology -An update", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.51, Iss.2 (2002) pp.587-609.

[124] 高増 潔, 郭 志徹, 鈴木昭洋, 平木雅彦, 古谷涼秋, 大園成夫: "吸気型ボールプローブの開発 (第1報) -基本的構成-", 精密工学会誌, Vol.64, No.8 (1998) pp.1153-1157.

[125] 郭 志徹, 高増 潔, 平木雅彦, 古谷涼秋, 大園成夫: "吸気型ボールプローブの開発 (第2報) -空気トリガセンサ式プローブの評価実験-", 精密工学会誌, Vol.66, No.4, (2000) pp.614-618.

[126] H. Haitjema, W. Pril, P.H.J. Schellekens: "A silicon-etched probe for 3-D coordinate measurements with an uncertainty below 0.1 μm", *IEEE Transaction on instrumentation and measurement*, Vol.50, No.60 (2001) pp. 1519-1523.

[127] H. Haitjema, W.O. Pril, P.H.J. Schellekens: "Development of a silicon-based nanoprobe system for 3-D measurements", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.50, Iss.1 (2001) pp.365-368.

[128] Gannen series XP, XM by XPRESS precision eingineering: http://www.xpresspe.com/

[129] 古谷涼秋, 高本智行, Y.W. Cho: "光学的変位検出による高感度プローブの開発 (第1報) -平面内変位検出感度の評価-", 精密工学会誌, Vol.67, No.10 (2001) pp.1670-1674.

[130] 小倉一朗, 岡崎祐一, J.C.M. Diaz: "微小形状測定機の開発に関する研究(第３報)", 2008年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (2008) pp.239-240.

[131] 小倉一朗, 岡崎祐一: "マイクロファクトリ用微細形状測定プローブの開発", 2009年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (2009) pp.781-782.

[132] 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", *Proc. euspen Int. Topical Conference* (2003)

[133] A. Kung, F. Meli: "Versatile probes for the METAS 3D micro-CMM", *Proc. euspen 2008*, Vol.2 (2008) pp. 338-342.

[134] G. Dai, S. Butefisch, F. Pohlenz, H.-U. Danzebrink: "A high precision micro/nano CMM using piezoresistive tactile probes", *Measurement Science and Technology*, Vol.20 (2009) 084001.

[135] D.Y. Sheu: "Micro-spherical probes machining by EDM", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol.15 (2005) pp.185-189.

[136] 高階大樹, 池野順一, 大森康雄, 渋谷秀雄, 鈴木章彦: "レーザ光線による微小ガラス球の作製とその応用に関する研究", 2006年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2007) pp.333-334.

[137] 吉田慎吾, 池野順一: "レーザによるガラスの微細成形加工に関する研究", 砥粒加工学会学術講演会講演論文集 (2008) pp.237-238.

[138] T. Oiwa, T. Tanaka: "Miniaturized three-dimensional touch trigger probe using optical fibre bundle", *Measurement Science and Technology*, Vol.16 (2005) pp.1574-1581.

[139] S.I. Eom, Y. Takaya, T. Hayashi: "Novel contact probing method using single fiber optical trapping probe", *Precision Engineering*, Vol.33 Iss.2 (2009) pp.235-242.

[140] 村上 洋, 甲木昭雄, 鬼鞍宏猷, 佐島隆生: "光ファイバプローブを用いた微小径穴形状精度測定システムの開発 -装置の試作および評価実験-", 2008年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (2008) pp.35-36.

[141] 村上 洋, 甲木昭雄, 鬼鞍宏猷, 佐島隆生, 近藤英二: "光ファイバプローブを用いた微小径穴形状精度測定システムの開発 -精度評価-", 2009年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2009) pp.203-204.

[142] H. Ji, H.-Y. Hsu, L.X. Knog, A.B. Wedding: "Development of a contact probe incorporating a Bragg grating strain sensor for nano coordinate measuring machines", *Measurement Science and Technology*, Vol.20 (2009) 095304.

[143] B. Muralikrishnan, J.A. Stone, J.R. Stoup: "Fiber deflection probe for small hole metrology", *Precision Engineering*, Vol.30 (2006) pp.154-164.

[144] 郷田 純, 三井公之: "プローブを用いた微細部品の形状・寸法測定技術", 精密工学会誌, Vol.74, No.3 (2008) pp.226-229.

[145] L. De Chiffre, H.N. Hansen, N. Kofod: "Surface topography characterization using an atomic force microscope mounted on a coordinate measuring machine", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.48, Iss.1 (1999) pp. 463-466.

[146] T. Masuzawa, B.J. Kim, C. Bergaud, M. Fujino: "Twin-probe vibroscanning method for dimensional measurement of microholes", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.46, Iss.1 (1997) pp.437-440.

[147] B. Kim, T. Masuzawa, T. Bourouina: "The vibroscanning method for the measurement of micro-hole profiles", *Measurement Science and Technology*, Vol.10 (1999) pp.697-705.

[148] G. Dai, H. Wolff, F. Pohlenz, H.-U. Danzebrink, G. Wilkening: "Atomic force probe for sidewall scanning of nano- and microstructures", *Applied Physics Letters*, Vol.88 (2006) 171908.

[149] G. Dai, F. Pohlenz, S. Butefisch, F. Hartig, H.-U. Danzebrink: "Measurements of micro gear using a nano CMM", *Proc. euspen 2008*, Vol.2 (2008) pp.366-370.

[150] E. Peiner, M. Balke, L. Doering, U. Brand: "Tactile probes for dimensional metrology with microcomponents at nanometre resolution", *Measurement Science and Technology*, Vol.19 (2008) 064001.

[151] SIOS Meßtechnik: http://www.sios.de

[152] G. Dai, S.Butefisch, F. Pohlenz, U. Brand, H.-U. Danzebrink, H. Bosse: "Characterization of micro/nano CMM probes", *Proc. euspen 2009* (2009) pp.291-294.

[153] K. Hidaka, P.H.J. Schellekens: "Study of a small-sized ultrasonic probe", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.55, Iss.1 (2006) pp.567-570.

[154] J.D. Claverley, R.K. Leach: " A vibrating micro-scale CMM probe for measuring high aspect ratio structures", *Proc. HARMST* (2009)

[155] M.B. Bauza, R.J. Hocken, S.T. Smith, S.C. Woody: "Development of a virtual probe tip with an application to high aspect ratio microscale features", *Review of Scientific Instruments*, Vol.76 (2005) 095112.

[156] S. Tanaka, Y. Takaya, T. Hayashi: "Numerical analysis of fluid resistance exerted on vibrating micro-sphere controlled by optical radiation pressure", *Proc. SPIE*, Vol.7038 (2008) 70381R.

[157] A. Weckenmann, J. Hoffmann, A. Schuler: "Development of a tunnelling current sensor for a long-range nano-positioning device", *Measurement Science and Technology*, Vol.19 (2008) 064002.

[158] J. Hoffmann, A. Weckenmann, Z. Sun: "Electrical probing for dimensional micro metrology", *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol.1 (2008) pp.59-62.

[159] T. Pfeifer: "Terahertz based imaging for inspection and spectroscopic analysis", *Plenary talk in the 10th IMEKO world congress* (2009).

[160] L.-C. Chen: "Automatic 3D surface reconstruction and sphericity measurement of micro spherical balls of miniaturized coordinate measuring probes", *Measurement Science and Technology*, Vol.18, No.6 (2007) pp. 1748-1755.

[161] E.J.C. Bos, P.H.J. Schellekens: "Aspects of tactile probing on a micro scale", *Proc. euspen 2009*, (2009) pp. 167-170.

[162] R.K. Leach: "Fundamental principles of engineering nanometrology", Elsevier (2009).

[163] E.J.C. Bos, R.W.P. Heldens, F.L.M. Delbressine, P.H.J. Schellekens, A. Dietzel: "Compensation of the anisotropic behavior of single crystalline silicon in a 3D tactile sensor", *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.134 (2007) pp. 374-381.

[164] Y. Takaya, S. Takahashi, T. Miyoshi: "Development of the nano-CMM probe based on laser trapping technology", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.48, Iss.1 (1999) pp.421-424.

[165] Y. Takaya, H. Shimizu, S. Takahashi, T. Miyoshi: "Fundamental study on the new probe technique for the nano-CMM based on the laser trapping and Mirau interferometer", *Measurement*, Vol.25, No.1 (1999) pp.9-18.

[166] 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) -3次元位置検出の基本原理-", 精密工学会誌, Vol.66, No.7 (2000) pp.1081-1086.

[167] A. Ashkin, J.M. Dziedzic, J.E. Bjorkholm, S. Chu: "Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles", *Optics Letters*, Vol.11 (1986) pp.288-290.

[168] P. Lebedew: "Untersuchungen über die Druckkräfte des Lichtes (Investigations on the pressure forces of light)", *Annalen der Physik*, Vol.311, Iss.11 (1901) pp.433-458.

[169] E. Hecht: "Optics 4th Edition", Addison Wesley (2001)

[170] 澤田廉士, 羽根一博, 日暮英治: "光マイクロマシン", オーム社 (2002).

[171] 大津元一: "現代光科学I", 朝倉書店 (1994)

[172] B.E.A. Saleh, M.C. Teich (訳者: 尾崎義治, 朝倉利光): Fundamentals of Photonics (基本 光工学1), 森北出版 (2008)

[173] 三澤弘明, 松尾敏樹: "レーザマニピュレーション", 精密工学会誌, Vo.68, No.11 (2002) pp.1393-1397.

[174] 古川裕光: "レーザマニピュレーションの原理", レーザ加工学会誌, Vo.11, No.1 (2004) pp.2-6.

[175] A. Ashkin: "Acceleration and trapping of particles by radiation pressure", *Physical Review Letters*, Vol.24, No.4 (1970) pp.156-159.

[176] A. Ashkin, J.M. Dziedzic: "Optical levitation by radiation pressure", *Applied Physics Letters*, Vol.19, No.8 (1971) pp.283-285.

[177] A. Ashkin, J.M. Dziedzic, T. Yamane: "Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams", *Nature*, Vol.330, No.6150 (1987) pp.769-771.

[178] ARRYZ technology: http://www.arryx.com/

[179] Elliot science: http://www.elliotscientific.com/

[180] JPK Instruments: http://www.jpk.com/nanotracker-tm.387.html

[181] Molecular Machines & Industries: http://www.molecular-machines.com/

[182] S.M. Block, L.S.B. Goldstein, B.J. Schnapp: "Bead movement by single kinesin molecules studied with optical tweezers", *Nature*, Vol.348 (1990) pp.348-352.

[183] K.C. Neuman, E.A. Abbondanzieri, R. Landick, J. Gelles, S.M. Block: "Ubiquitous transcriptional pausing is independent of RNA polymerase backtracking cell", *Cell*, Vol.115 (2003) pp.437-447.

[184] S.C. Kuo, M.P. Sheetz: "Force of single kinesin molecules measured with optical tweezers", *Science*, Vol.60, (1993) pp.232-234.

[185] 八十川利樹, 石丸伊知郎, 小林宏明, 石崎勝己: "近接2光束ピンセットによるマイクロ粒子断層像計測技術", 精密工学会誌, Vol.71, No.12 (2005) pp.1595-1599.

[186] C. Deufel, M.D. Wang: "Detection of forces and displacements along the axial direction in an optical trap", *Biophysical Journal*, Vol. 90 (2006) pp.657-667.

[187] J.H.G. Huisstede, K.O. van der Werf, M.L. Bennink, V. Subramaniam: "Force detection in optical tweezers using backscattered light", *Optics Express*, Vol.13, No.4 (2005) pp.1113-1123.

[188] W.H. Wright, G.J. Sonek, M.W. Berm: "Radiation trapping forces on microspheres with optical tweezers", *Applied Physics Letters*, Vol.63, No.6 (1993) pp.715-717.

[189] L.P. Ghislain, N.A. Switz, W.W. Webb: "Measurement of small forces using an optical trap", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol.65, No.9 (1994) pp.2762-2768.

[190] W.H.Wright, G.J.Sonek, M.W.Berns: "Parametric study of the forces on microspheres held by optical tweezers", *Applied Optics,* Vol.33 (1994) pp.1735-1748.

[191] E. Higurashi, H. Ukita, H. Tanaka, O. Ohguchi: "Optically induced rotation of anisotropic micro-objects fabricated by surface micromachining", *Applied Physics Letters*, Vol.64 (1994) pp.2209-2210.

[192] 池野順一, 澤木大輔, 森 幸博, 堀内 宋: "レーザ光線を用いた微粒子の配列法に関する研究 (第1報 水中における複数粒子の配列と運動制御)", 日本機械学会論文集(C編), Vol.65, No.636 (1999) pp.3452-3457.

[193] M.E.J. Friese, T.A. Nieminen, N.R. Heckenberg, H. Rubinsztein-Dunlop: "Optical alignment and spinning of laser-trapped microscopic particles", *Nature*, Vol.394 (1998) pp.348-350.

[194] B.A. Nemet, M. Cronin-Golomb: "Microscopic flow measurements with optically trapped microprobes", *Optics Letters*, Vol.27, No.15 (2002) pp.1357-1359.

[195] R. Ługowski, B. Kołodziejczyk, Y. Kawata: "Application of laser-trapping technique for measuring the three-dimensional distribution of viscosity", *Optics Communications*, Vol.202 (2002) pp.1-8.

[196] Y. Inoue, S. Shoji, H. Furukawa, O. Nakamura, S. Kawata: "Pico-Newton friction force measurements using a laser-trapped microsphere", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.37 (1998) pp.L684-L686.

[197] K. Sasaki, M. Koshioka, H. Misawa, N. Kitamura, H. Masuhara: "Optical trapping of a metal article and a water droplet by a scanning laser beam" *Applied Physics Letters*, Vol.60, No.7 (1992) pp.807-809.

[198] A. Pralle, M. Prummer, E.-L. Florin, E.H.K. Stelzer, J.K.H. Horber: "Three-dimensional high-resolution particle tracking for optical tweezers by forward scattered light", *Microscopy Research and Technique*, Vol.44 (1999) pp. 378-386.

[199] T. Ota, S. Kawata, T. Sugiura, M.J. Booth, M.A.A. Neil, R. Juskaitis, T, Wilson: "Dynamic axial-position control of a laser-trapped particle by wave-front modification", *Optics Letters*, Vol.28, No.6 (2003) pp.465-467.

[200] E. Higurashi, R. Sawada, T. Ito: "Axial and lateral displacements of a microsphere based on the critical-angle method", *Japanese Journal of Applied Phys*ics, Vol.37 (1998) pp.4191-4196.

[201] Y. Otani, Y. Hirai, Y. Mizutani, N. Umeda, T. Yoshizawa: "Light-driven micromanipulator and its application for 3D fabrication", *Proc.SPIE*, Vol.6374 (2006) 63740N1.

[202] M.T. Valentine, N.R. Guydosh, B.Gutiérrez-Medina, A.N. Fehr, J.O. Andreasson, S.M. Block, "Precision steering of an optical trap by electro-optic deflection", *Optics Express*, Vol.33, No.6 (2008) pp.599-601.

[203] K. Sasaki, M. Koshioka, H. Misawa, N. Kitamura, H. Masuhara: "Pattern formation and flow control of fine particles by laser scanning micromanipulation", *Optics Letters*, Vol.16, No.19 (1991) pp.1463-1465.

[204] R.M. Simmons, J.T. Finer, S. Chu, J.A. Spudich: "Quantitative measurements of force and displacement using an optical trap", *Biophysical Journal*, Vol.70 (1996) pp.1813-1822.

[205] D.G. Grier: "A revolution in optical manipulation", *Nature*, Vol.424 (2003) pp.810-816.

[206] L.P. Ghislain, W.W. Webb: "Scanning-force microscope based on an optical trap", *Optics Letters*, Vol.18, No.19 (1993) pp.1678-1681.

[207] M.E.J. Friese, A.G. Truscott, H. Rubinsztein-Dunlop, N.R. Heckenberg, "Three-dimensional imaging with optical tweezers", *Applied optics*, Vo.38, No.31 (1999) pp.6597-6603.

[208] M. Sery, P. Jakl, J. Jezek, A. Jonas, P. Zemanek, M. Liska: "The use of an optically trapped microsphere for scanning details of surface", *Proc.SPIE*, Vol.5259 (2003) pp.166-169.

[209] L. Malmqvist, H.M. Hertz: "Trapped particle optical microscopy", *Optics Communications*, Vol.94 (1992) pp. 19-24.

[210] E.L. Florin, A. Pralle, J.K.H. Hörber, E.H.K. Stelzer: "Photonic force microscope based on optical tweezers and two-photon excitation for biological applications", *Journal of Structural Biology*, Vol.119 (1997) pp.202–211.

[211] T. Hariyama, Y. Takaya, T. Miyoshi: "New mass measurement methods of aerosol particle using vibrating probe particle controlled by radiation pressure", *Proc. SPIE*, Vol.5993 (2005) pp.154-161.

[212] 道畑正岐, 高谷裕浩, 林 照剛: "レーザトラッピングプローブを用いたナノ3次元形状計測に関する研究(第4報) -プローブキャリブレーション法の提案- , 2008年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (2008) pp.473-474.

[213] 富岡英樹, 大森康雄, 池野順一, 澁谷秀雄, 今村保男, 伊吹山正浩: "レーザトラッピングを用いた微粒子の分別に関する研究", 2005年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2006) pp.491-492.

[214] A. Terray, J.D. Taylor, S.J. Hart: "Optical chromatographic sample fractionation", *Proc.SPIE*, Vol.7400 (2009) 74000O.

[215] K.J.Knox, J.P.Reid, K.L.Hanford, A.J.Hudson and L.Mitchem: "Direct measurements of the axial displacement and evolving size of optically trapped aerosol droplets", *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, Vol.9 (2007) pp.S180–S188.

[216] P.R.T. Jess, V. Garcés-Chávez, D. Smith, M. Mazilu, L. Paterson, A. Riches, C.S. Herrington, W. Sibbett, K. Dholakia: "Dual beam fibre trap for Raman micro- spectroscopy of single cells", *Optics Express*, Vol.14, No.12 (2006) pp.5779-5792.

[217] P. Li, K. Shi, Z. Liu: "Manipulation and spectroscopy of a single particle by use of white-light optical tweezers", *Optics Letters*, Vol.30, No.2 (2005) pp.156-159.

[218] B. Agate, C. Brown, W. Sibbett, K. Dholakia: "Femtosecond optical tweezers for in-situ control of two-photon fluorescence", *Optics Express*, Vol.12, Iss.13 (2004) pp.3011-3017.

[219] D. McGloin, K. Dholakia, "Bessel beams: Diffraction in a new light", *Contemporary Physics*, Vol.46 (2005) pp. 15-28.

[220] J. Arlt, V. Garces-Chavez, W. Sibbett, K. Dholakia: "Optical micromanipulation using a Bessel light beam", *Optics Communications*, Vol.197, Iss.4-6 (2001) pp.239-245.

[221] J.E. Curtis, B.A. Koss, D.G. Grier: "Dynamic holographic optical tweezers", *Optics Communications*, Vol.207, Iss.1-6 (2002) pp.169-175.

[222] H. Melville, G. Milne, G. Spalding, W. Sibbett, K. Dholakia, D. McGloin: "Optical trapping of three-dimensional structures using dynamic holograms", *Optics Express*, Vol.11, Iss.26, (2003) pp.3562-3567.

[223] R.L. Eriksen, P.C. Mogensen, J. Glückstad: "Multiple-beam optical tweezers generated by the generalized phase-contrast method", *Optics Letters*, Vol.27, No.4 (2002) pp.267-269.

[224] S. Collins, R. Baskin, D. Howwitt: "Microinstrument gradient-force optical trap", *Applied Optics*, Vol.38, Iss.28 (1999) pp.6068-6075.

[225] K. Taguchi, H. Ueno, T. Hiramatsu, M. Ikeda: "Optical trapping of dielectric particle and biological cell using optical fibre", *Electronics Letters*, Vol.33, No.5 (1997) pp.413-414.

[226] A.R. Clapp, A.G. Ruta, R.B. Dickinson: "Three-dimensional optical trapping and evanescent wave light scattering for direct measurement of long range forces between a colloidal particle and a surface", *Review of Scientific Instruments*, Vol.70 Iss.6 (1999) pp.2627-2636.

[227] M. Righini, G. Volpe, C. Girard, D. Petrov, R. Quidant: "Surface plasmon optical tweezers: tunable optical manipulation in the femtonewton range", *Physical Review Letters*, Vol.100 (2008) 186804.

[228] Y. Takaya, K. Hida, T. Miyoshi, T. Hayashi: "A novel surface finishing technique for microparts using an optically controlled microparticle tool", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.55, Iss.1 (2006) pp.613-616.

[229] C.B. Arnold, E.R. McLeod: "Optical trap assisted direct write nanolithography", *Proc. SPIE*, Vol.7400 (2009) 74001V.

[230] M. Righini, C. Girard, R. Quidant: "Light-induced manipulation with surface plasmons", *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, Vol.10 (2008) 093001.

[231] J.B. Wills, K.J. Knox, J.P. Reid: "Optical control and characterisation of aerosol", *Chemical Physics Letters*, Vol. 481 (2009) pp.153-165.

[232] K. Berg-Sørensen, H. Flyvbjerg: "Power spectrum analysis for optical tweezers", *Review of Scientific Instruments*, Vol.75, Iss.3 (2004) pp.594-612.

[233] K.C. Neuman, S.M. Block: "Optical trapping", *Review of Scientific Instruments*, Vol.75, Iss.9 (2004) pp. 2787-2809.

[234] R. Omori, T. Kobayashi, A. Suzuki: "Observation of a single-beam gradient- force optical trap for dielectric particle in air", *Optics Letters*, Vol.22 No.11 (1997) pp.816-818.

[235] R. Thurn, W. Kiefer: "Raman-microsampling technique applying optical levitation by radiation pressure", *Applied Spectroscopy*, Vol.38, No.1 (1984) pp.78-83.

[236] M. Guillon, O. Moine, and B. Stout, "Longitudinal optical binding of high optical contrast microdroplets in air", *Physical Review Letters*, Vol.96 (2006) 143902.

[237] G. Roosen, C. Imbert: "Optical levitation by means of two horizontal laser beans: A theoretical and experimental study", *Physics Letters*, Vol.59A, No.1 (1976) pp.6-8.

[238] J. Huisken, E.H.K. Stelzer: "Optical levitation of absorbing particles with a normally Gaussian laser beam", *Optics Letters*, Vol.27, No.14 (2002) pp.1223-1225.

[239] V.G. Shvedov, A.S. Desyatnikov, A.V. Rode, W. Krolikowski, Y.S. Kivshar: "Optical guiding of absorbing nanoclusters in air", *Optics Express*, Vol.17, No.7 (2009) pp.5743-5757.

[240] 池野順一, 澤木大輔, 森 幸博, 堀内 宋: "レーザ光線を利用した3次元微小構造物の組立技術に関する研究 (第1報 空中における微粒子の操作法と組立法の提案)", 日本機械学会 (C編), Vol.64, No.627 (1998) pp. 4434-4439.

[241] A.V. Nesterov, V.G. Niziev, V.P. Yakunin: "Generation of high-power radially polarized beam", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol.32 (1999) pp.2871-2875.

[242] Y. Kozawa, S. Sato: "Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism", *Optics Letters*, Vol.30, No.22 (2005) pp.3063-3065.

[243] G. Machavariani, Y. Lumer, I. Moshe, A. Meir, S. Jackel: "Efficient extracavity generation of radially and azimuthally polarized beams", *Optics Letters*, Vol.32, No.11(2007) pp.1468-1471.

[244] 井上喜彦, 小澤祐市, 佐藤俊一, 佐藤 尚, 川嶋貴之, 川上彰二郎: "フォトニック結晶素子を用いた軸対称偏光ビーム", 第32回光学シンポジウム (2007)

[245] M. Stalder, M. Schadt: "Linearly polarized light with axial symmetry generated by liquid-crystal polarization converters", *Optics Letters*, Vol.21, No.23 (1996) pp.1948-1951.

[246] T. Wohland, A. Rosin, E.H.K. Stelzer: "Theoretical determination of the influence of the polarization on forces exerted by optical tweezers", *Optik*, Vol.102, No.4 (1996) pp.181-190.

[247] R.S. Dutra, N.B. Viana, P.A. Maia Neto, H.M. Nussenzveig: "Polarization effects in optical tweezers", *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, Vol.9 (2007) pp.S221-S227.

[248] A. Ashkin, "Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime", *Biophysical Journal*, Vol.61 (1992) pp.596-582.

[249] J. Bai, T. Miyoshi, Y. Takaya, S. Takahashi, "Computer simulation for laser trapping on micro-particles with arbitrary shape", *International Journal of Japan Society of Precision Engineering*, Vol.33 (1999) pp.363-368.

[250] H. Kawauchi, K. Yonezawa, Y. Kozawa, S. Sato, "Calculation of optical trapping forces on a dielectric sphere in the ray optics regime produced by a radially polarized laser beam", *Optics Letters*, Vol.32 (2007) pp.1839-1841.

[251] T.A. Nieminen, N.R. Heckenberg, H. Rubinsztein-Dunlop, "Forces in optical tweezers with radially and azimuthally polarized trapping beams", *Optics Letters*, Vol.33 (2008) pp.122-124.

[252] T.A. Nieminen, V.L.Y. Loke, A.B. Stilgoe, G. Knoner, A.M. Brańczyk, N.R Heckenberg, H. Rubinsztein-Dunlop: "Optical tweezers computational toolbox", *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, Vol.9 (2007) pp.S196-S203.

[253] F. Gittes, C.F. Schmidt: "Interference model for back-focal-plane displacement detection in optical tweezers", *Optics Letters*, Vol.23, No.1 (1998) pp.7-9.

[254] D. Bonessi, K. Bonin, T. Walker: "Optical forces on particles of arbitrary shape and size", *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, Vol.9 (2007) pp.S228-S234.

[255] S.Y. Sung, Y.G. Lee: "Trapping of a micro-bubble by non-paraxial Gaussian beam: computation using the FDTD method", *Optics Express*, Vol.16, No.5 (2008) pp.3463-3473.

[256] W.L. Collett, C.A. Ventrice, S.M. Mahajan: "Electromagnetic wave technique to determine radiation torque on micromachines driven by light", *Applied Physics Letters*, Vol.82, No.16 (2003) pp.2730-2732.

[257] D.A. White: "Numerical modeling of optical gradient traps using the vector finite element method", *Journal of Computational Physics*, Vol.159, Iss.1 (2000) pp.13-37.

[258] V. Wong, M.A. Ratner: "Explicit computation of gradient and nongradient contributions to optical forces in the discrete-dipole approximation", *Journal of the Optical Society of America B*, Vol.23, No.9 (2006) pp.1801-1814.

[259] H.C. van de Hulst: "Light Scattering by Small Particles", Dover Publications (1981)

[260] 奥村公平: "原子間力顕微鏡とその応用", 豊田中央研究所*R&D*レビュー, Vol.31, No.2 (1996) pp.1-13.

[261] S. Yan, B. Yao: "Radiation forces of a highly focused radially polarized beam on spherical particles", *Physical Review A*, Vol.76 (2007) 053836.

[262] T. Ota, T. Sugiura, S. Kawata: "Surface-force measurement with a laser-trapped microprobe in solution", *Applied Physics Letters*, Vol.80, No.18 (2002) pp.3448-3450.

[263] W. Inami, Y. Kawata: "Photon force analysis for a spherical particle near a substrate illuminated by a tightly focused laser beam", *Journal of Applied Physics*, Vol.94, No.4 (2003) pp.2183-2187.

[264] K. Yee: "Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media", *Antennas and Propagation*, AP-14, No.3 (1996) pp.302-307.

[265] 宇野 亨: "FDTD法による電磁界およびアンテナ解析", コロナ社 (1998)

[266] R. Higdon: "Absorbing boundary conditions for difference approximations to the multi-dimensional wave equation.", *Mathematics of Computation*, Vol.47, No.176 (1986) pp.437-459.

[267] L.W. Davis: "Theory of electromagnetic beams", *Physical Review A*, Vol.19, No.3 (1979) pp.19-21.

[268] J.P. Barton, D.R. Alexander: "Fifth-order corrected electromagnetic field components for a fundamental Gaussian beam", *Journal of Applied Physics*, Vol.66, No.7 (1989) pp.2800-2802.

[269] P.C. Waterman: "Symmetry, unitarity, and geometry in electromagnetic scattering", *Physical Review D*, Vol.3, No. 4 (1971) pp.825-839.

[270] M.I. Mishchenko: "Light scattering by randomly oriented axially symmetric particles", *Journal of the Optical Society of America A*, Vol.8, No.6 (1991) pp.871-882.

[271] T.A. Nieminen, H. Rubinsztein-Dunlop, N.R. Heckenberg: "Calculation and optical measurement of laser trapping forces on non-spherical particles", *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, Vol.70 (2001) pp.627-637.

[272] 菅原健太郎: "走査型プローブ顕微鏡による線幅標準に関する調査研究", 産総研計量標準報告, Vol.4, No. 4 (2006) pp.285-292.

[273] P. Jákl, M. Serý, J.Jezek, A. Jonás, M. Liska, P. Zemánek: "Behaviour of an optically trapped probe approaching a dielectric interface", *Journal of Modern Optics*, Vol.50 No.10 (2003) pp.1615-1625.

[274] H. Fujiwara, H. Takasaki, J. Hotta, K. Sasaki: "Observation of the discrete transition of optically trapped particle position in the vicinity of an interface", *Applied Physics Letters*, Vol.84, No.1 (2004) pp.13-15.

[275] A. Jonás, P. Zemánek, E.-L. Florin: "Single-beam trapping in front of reflective surfaces" *Optics Letters*, Vol.26, No.19 (2001) pp.1466-1469.

[276] P. Zemanek, A. Jonas, P. Jakl, J. Jezek, M. Sery, M. Liska: "Theoretical comparison of optical traps created by standing wave and single beam", *Optics Communications*, Vol.220 (2003) pp.401-412.

[277] B. Liesfeld, R. Nambiar, J.C. Meiners: "Particle transport in asymmetric scanning-line optical tweezers", *Physical Review E*, Vol.68 (2003) 051907.

[278] R. Nambiar, A. Gajraj, J.-C. Meiners: "All-optical constant-force laser tweezers", *Biophysical Journal*, Vol.87 (2004) pp.1972-1980.

[279] M.E.J. Friese, H. Rubinsztein-Dunlop, N.R. Heckenberg, E.W. Dearden: "Determination of the force constant of a single-beam gradient trap by measurement of backscattered light", *Applied Optics*, Vol.35 Iss.36 (1996) pp. 7112-7116.

[280] A. Rohrbach, E.H.K. Stelzer: "Three-dimensional position detection of optically trapped dielectric particles", *Journal of Applied Physics*, Vol.91, No.8 (2002) pp.4574-4588.

[281] J.K. Dreyer, K. Berg-Sørensen, L. Oddershede: "Improved axial position detection in optical tweezers measurements", *Applied Optics*, Vol.43, No.10 (2004) pp.1991-1995.

[282] W. Denk, W.W. Webb: "Optical measurement of picometer displacements of transparent microscopic objects", *Applied Optics*, Vol.29, No.16 (1990) pp.2382-2391.

[283] F. Gittes, C.F. Schmidt: "Interference model for back-focal-plane displacement detection in optical tweezers", *Optics Letters*, Vol.23, No.1 (1998) pp.7-9.

[284] K.C. Vermeulena, J. van Mamerena, G.J.M. Stienen, E.J.G. Peterman, G.J.L. Wuite, C.F. Schmidt: "Calibrating bead displacements in optical tweezers using acousto-optic deflectors", *Review of Scientific Instruments*, Vol.77 (2006) 013704.

[285] S. Keen, J. Leach, G. Gibson, M.J. Padgett: "Comparison of a high-speed camera and a quadrant detector for measuring displacements in optical tweezers", *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, Vol.9 (2007) pp.S264-S266.

[286] S.F. Tolić-Nørrelykke, E. Schäffer, J. Howard, F.S. Pavone, F. Jülicher, H. Flyvbjerg: "Calibration of optical tweezers with positional detection in the back focal plane", *Review of Scientific Instruments*, Vol.77 (2006) 103101.

[287] C.J.R. Sheppard, K.G. Larkin: "Effect of numerical aperture on interference fringe spacing", *Applied Optics*, Vol. 34, No.22 (1995) pp.4731-4734.

[288] 鶴田匡夫: "第7 光の鉛筆 6 ハーシェルの条件", *O plus E*, Vol.278 (2003) pp.86-92.

[289] C.F. Bruce, B.S. Thornton: "Obliquity effects in interference microscopes", *Journal of Scientific Instruments*, Vol. 34 (1957) pp.203-204.

[290] K. Creath: "Calibration of numerical aperture effects in interferometric microscope objectives", *Applied Optics*, Vol.28, No.15 (1989) pp.3333-3338.

[291] J.F. Biegen: "Calibration requirements for Mirau and Linnik microscope interferometers", *Applied Optics*, Vol.28, No.11 (1989) pp.1972-1974.

[292] D.-S. Wan, J. Schmit, E. Novak: "Effects of source shape on the numerical aperture factor with a geometrical-optics model", *Applied Optics*, Vol.43, No.10 (2004) pp.2023-2028.

[293] 上北将広, 三好隆志, 高谷裕浩, 高橋 哲: "レーザトラッピングによるナノCMMプローブに関する研究 (第9報) -輪帯ビームプロファイルの検討-", 2001年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (2001) pp.630.

[294] 上北将広, 三好隆志, 高谷裕浩, 高橋 哲: "レーザトラッピングによるナノCMMプローブに関する研究 (第10報) -強制振動型プローブの提案-", 2001年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2002) pp.719.

[295] M. Nishikara, Y. Takaya, S. Takahashi, M. Uekita, T. Miyoshi: "Probing technique for microparts using optically trapped particle by annular beam", *Proceedings of International Symposium on Photonics in Measurement* (2002) pp.103-108.

[296] 西川正俊, 三好隆志, 高谷裕浩, 高橋 哲: "レーザトラッピングによるナノCMMプローブに関する研究 (第11報) -横方向強制振動型プローブの応答特性-", 2002年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2003) pp.465.

[297] K. Imai, Y. Takaya, T. Miyoshi, T. Ha, K. Rimura: "Position sensitivity of micro probe with transverse vibration using optical trap", *Proceedings of International Symposium on Photonics in Measurement* (2004) pp.277-284.

[298] S. Davy, M. Spajer, D. Courjon: "Influence of the water layer on the shear force damping in near-field microscopy", *Applied Physics Letters*, Vol.73, No.18 (1998) pp.2594-2596.

[299] F.M. Huang, F. Culfaz, F. Festy, D. Richards: "Effect of the surface water layer on the optical signal in apertureless scanning near field optical microscopy", *Nanotechnology*, Vol.18 (2007) 015501.

[300] J. Liesener, M. Reicherter, T. Haist, H.J. Tiziani: "Multi-functional optical tweezers using computer-generated holograms", *Optics Communications*, Vol.185, Iss.1-3 (2000) pp.77-82.

[301] 水谷康弘, 桑野亮一, 大谷幸利, 梅田倫弘, 吉澤 徹: "可変焦点レンズを用いたフォーカス法による三次元形状計測", 精密工学会誌, Vol.72, No.9 (2006) pp.1152-1156.

[302] B.E.A. Saleh, M.C. Teich (訳者: 尾崎義治, 朝倉利光): Fundamentals of Photonics (基本 光工学2), 森北出版 (2008)

[303] Y. Song, D. Milam, W.T. Hill III: "Long, narrow all-light atom guide", *Optics Letters*, Vol.24, No.24 (1999) pp. 1805-1807.

[304] A. T. O'Neil, I. MacVicar, L. Allen, M. J. Padgett: "Intrinsic and extrinsic nature of the orbital angular momentum of a light beam", *Physical Review Letters*, Vol.88, No.5 (2002) 053601.

[305] R. Dorn, S. Quabis, G. Leuchs: "Sharper focus for a radially polarized light beam", *Physical Review Letters*, Vol. 91, No.23 (2003) 233901.

[306] A.R. Zakharian, P. Polynkin, M. Mansuripur, J.V. Moloney, "Single-beam trapping of micro-beads in polarized light: Numerical simulations", *Optics Express*, Vol.14 (2006) pp.3660-3676.

[307] レイデント工業株式会社: http://www.raydent.co.jp/

[308] M. Gruhlke, H. Rothe: "Combining coordinate measurement and nanometrology for large- range nanoscale metrology", *Proc. of SPIE*, Vol.6648 (2007) 66480I.

[309] K. Takamasu, M. Fujiwara, H. Naoi, S. Ozono: "Friction drive system for nano-CMM", *Proc. Mechatronics 2000*, (2000) pp.565-568.

[310] 大岩孝彰: "パラレルメカニズムを用いた三次元座標測定機 -基本原理と運動学-", 精密工学会誌, Vol.64 No.12 (1998) pp.1791-1795.

[311] 楊 平, 柴田周作, 高橋 哲, 高増 潔, 佐藤 理, 大澤尊光, 高辻利之: "高精度CMMの開発 (第1報 XYステージの評価)", 2009年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (2009) pp.725-726.

[312] 中沢 弘: "やさしい精密工学 高精度化のための公理・原理", 工業調査会 (1991)

[313] C. Elster, I. Weingärtner, M. Schulz: "Coupled distance sensor systems for high-accuracy topography measurement: Accounting for scanning stage and systematic sensor errors", *Precision Engineering*, Vol.30, Iss.1 (2006) pp.32-38.

[314] W. Gao, Y. Arai, A. Shibuya, S. Kiyono, C.H. Park: "Measurement of multi-degree-of-freedom error motions of a precision linear air-bearing stage", *Precision Engineering*, Vol.30, Iss.1 (2006) pp.96-103.

[315] M. Fujiwara, A.Yamaguchi, K. Takamasu, S. Ozono: "Evaluation of stage of Nano-CMM", *Initiatives of Precision Engineering at the Beginning of a Millennium*, (2001) pp.634-638.

[316] W.G. Weekers, P.H.J. Schellekens: "Assessment of dynamic errors of CMMs for fast probing", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.44 Iss.1 (1995) pp.469-474.

[317] H.V. Brussel, J. Peirs, D. Reynaerts, A. Delchambre, G. Reinhart, N. Roth, M. Wecke, E. Zussman: "Assembly of microsystems", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.49, Iss.2 (2000) pp.451-472.

[318] 奥山喜久夫, 増田弘昭, 諸岡成治: "微粒子工学", オーム社 (1992)

[319] K. Sasaki, K. Horio, H. Masuhara: "In situ measurement of adhesion force between a single microparticle and surface using radiation pressure of pulsed laser light", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.36 (1997) pp.L721-L723.

[320] 水口由紀子, 宮本賢人: "原子間力顕微鏡による固体表面 -粒子間の付着力測定と解析-", *Konica Minolta Technology Report*, Vol.1 (2004) pp.19-22.

[321]藤 正督, 高橋 実: "粒子の表面物性と粒子間付着力", セラミックス基盤工学研究センター年報, Vol.2 (2002) pp.9-16.

[322] L.-O. Heim, J. Blum, M. Preuss, H.-J. Butt: "Adhesion and friction forces between spherical micrometer-sized particles", *Physical Review Letters*, Vol.83, No.16 (1999) pp.3328-3331.

[323] 安藤泰久, 田中敏幸, 伊藤二郎, 角田和雄: "ナノメートルスケールの表面形状と摩擦力・引き離し力の関係", 日本機械学会(C編), Vol.65, No.637 (1999) pp.3784-3791.

[324] 宮崎英樹, 笠谷岳士, 古谷野宏一, 佐藤知正: "微小物体に働く付着力", 日本機械学会(C編), Vol.64, No.620 (1998) pp.1250-1257.

[325] D.R. Burnham, D. McGloin: "Holographic optical trapping of aerosol droplets", *Optics Express*, Vol.14, No.9 (2006) pp.4175-4181.

[326] 沢田博司, 川原公介, 二宮孝文, 黒澤 宏, 横谷篤至: "フェムト秒レーザによる微細周期構造の形成", 精密工学会誌, Vol.69, No.4 (2003) pp.554-558.

[327] 沢田博司: "フェムト秒レーザによる機能表面の創成", 精密工学会誌, Vol.72, No.8 (2006) pp.951-954.

[328] 福西晃朗, 森 康雄, 沢田博司: "微細周期構造をもつ平板の付着力", 粉体工学会2004年度秋期研究発表会講演論文集 (2004) pp.34-35.

[329] Z. Ding, G. Lai, T. Sakakibara, S. Shinohara: "Determination of the spring constant of an optical trap by external sinusoidal excitation and lock-in detection", *Journal of Applied Physics*, Vol.88 (2000) pp.737-741.

[330] R. Omori, T. Kobayashi, S. Miyamoto, A. Suzuki: "Measurements of optical trapping efficiency for micron-sized dielectric particles in various surrounding media", *Optical Review*, Vol.3 (1996) pp.11-13.

[331] 市村 浩: "統計力学", 裳華房 (1971)

[332] N.B. Viana, O.N. Mesquita, A. Mazolli: "In situ measurement of laser power at the focus of a high numerical aperture objective using a microbolometer", *Applied Physics Letters*, Vol.81 No.10 (2002) pp.1765-1767.

[333] 高橋 徹: "空気圧の基礎と応用", 東京電機大学出版局 (1995)

[334] M. Vilfan, I. Musevic, M. Copic: "AFM observation of force on a dielectric sphere in the evanescent field of totally reflected light", *Europhysics Letters*, Vol.43, No.1 (1998) pp.41-46.

[335] T. Ota, T. Sugiura, S. Kawata: "Surface-force measurement with a laser-trapped microprobe in solution", *Applied Physics Letters*, Vol.80, No.18 (2002) pp.3448-3450.

[336] M. Gauthier, M. Tsukada: "Damping mechanism in dynamic force microscopy", *Physical Review Letters*, Vol.85, No.25 (2000) pp.5348-5351.

[337] K. Yum, Z. Wang, A.P. Suryavanshi, M.-F. Yu: "Experimental measurement and model analysis of damping effect in nanoscale mechanical beam resonators in air", *Journal of Applied Physics*, Vol.96, No.7 (2004) pp.3933-3938.

[338] P.K. Wei, W.S. Fann: "The effect of humidity on probe-sample interactions in near-field scanning optical microscopy", *Journal of Applied Physics*, Vol.87, No.5 (2000) pp.2561-2564.

[339] C. Gomez-Navarro, F. Moreno-Herrero, P.J. de Pablo, J. Colchero, J. Gomez-Herrero, A.M. Baro: "Contactless experiments on individual DNA molecules show no evidence for molecular wire behavior", *PNAS*, Vol.99, No.13 (2002) pp.8484-8487.

[340] N.H. Thomson: "Imaging the substructure of antibodies with tapping-mode AFM in air: the importance of a water layer on mica", *Journal of Microscopy*, Vol.217, Pt.3 (2005) pp.193-199.

[341] J. Happel, H. Brenner, "Low Reynolds number hydrodynamics with special applications to particulate media", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. (1965)

[342] 今井敬次郎, 高谷裕浩, 三好隆志: "レーザトラッピングによるナノCMMプローブに関する研究 (第13報) -横方向強制振動型プローブの振動検出系の改良-", 2004年度精密工学会春季大会学術講演会講演会講演論文集 (2005) pp.1031-1032.

[343] W. Mu, Z. Li, L. Luan, G.C. Spalding, G. Wang, J.B. Ketterson: "Force measurement on microspheres in an optical standing wave", *Journal of the Optical Society of America B*, Vol.25, No.5 (2008) pp.763-767.

[344] 林 偉民, 大森 整, 安斎正博: "金型表面品位改善法の検討", 型技術, Vol.22, No.8 (2007) pp.168-169.

[345] W. Inami, Y, Kawata: "Analysis of the scattered light distribution of a tightly focused laser beam by a particle near a substrate", *Journal of Applied Physics*, Vol.89, No.11 (2001) pp.5876-5880.

[346] A. Weckenmann, J. Hoffmann: "A novel pseudo-tactile 3D zero indicating probe for nanometrology", Force measurement on microspheres in an optical standing wave", *Proc. 9th ISMQC*, (2007) pp.173-177.

[347] H. Nishijima, S. Kamo, S. Akita, Y. Nakayama, K.I. Hohmura, S.H. Yoshimura, K. Takeyasu: "Carbon-nanotube tips for scanning probe microscopy: Preparation by a controlled process and observation of deoxyribonucleic acid", *Applied. Physics. Letters*. Vol.74, No.26 (1999) pp.4061-4063.

[348] H. Kado, K. Yokoyama, T. Tohda: "Atomic force microscopy using ZnO whisker tip", *Review of Scientific Instruments*, Vol.63, Iss.6 (1992) pp.3330-3332.

[349] S. Matsui, T. Kaito, J. Fujita, M. Komuro, K. Kanda, Y. Haruyama: "Three-dimensional nanostructure fabrication by focused-ion-beam chemical vapor deposition", *Journal of Vacuum Science & Technology B*, Vol.18, Iss.6 (2000) pp.3181-3184.

[350] J. Fujita, M. Ishida, T. Ichihashi, Y. Ochiai, T. Kaito, S. Matsui: "Growth of three-dimensional nano-structures using FIB-CVD and its mechanical properties", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, Vol.206 (2003) pp.472-477.

# 関連発表論文

## 原著論文

- **Masaki Michihata**, Terutake Hayashi, Daisuke Nakai and Yasuhiro Takaya: "Micro-displacement sensor using an optically trapped micro-probe based on the interference scale, *Review of Scientific Instruments*, Vol.81 Issue 1 (2010) 015107.
- **Masaki Michihata**, Terutake Hayashi and Yasuhiro Takaya: "Measurement of axial and transverse trapping stiffness of optical tweezers in air using radially polarized beam", *Applied Optics*, Vol.48, Issue 32, (2009) pp. 6143–6151.
- **Masaki Michihata**, Yuto Nagasaka, Terutake Hayashi and Yasuhiro Takaya: "Probing technique using circular motion of a microsphere controlled by optical pressure for a nanocoordinate measuring machine", *Applied Optics*, Vol.48, Issue.2, (2009) pp.198-205.
- **Masaki Michihata**, Yasuhiro Takaya and Terutake Hayashi: "Development of the nano-probe system based on the laser trapping technique", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol.57 Issue 1, (2008) pp.493-496.
- **Masaki Michihata**, Yasuhiro Takaya and Terutake Hayashi: "Nano position sensing based on laser trapping technique for flat surfaces", *Measurement Science and Technology*, Vol.19, No.8, (2008) 084013.

## 国際会議

### 査読あり

- **Masaki Michihata**, Daisuke Nakai, Terutake Hayashi and Yasuhiro Takaya: "Nano-dimensional measurement using optically trapped probe enhanced by interferometric scale", *XIX IMEKO World Congress*, 6-11 September 2009, Lisbon, Portugal, pp.1929-1934.
- **Masaki Michihata**, Yasuhiro Takaya and Terutake Hayashi: "Dynamic properties of a micro-sphere optically trapped in air by radially polarized laser beam", *The International Society for Optical Engineering, Optics & Photonics*, 2-6 August 2009, San Diego Convention Center, San Diego, California, United States, 74001U.
- Yasuhiro Takaya, **Masaki Michihata** and Terutake Hayashi: "New probing system for the nano-CMM using radiation pressure controlled microsphere", *International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instrument*, 29 June - 2 July 2009, Saint-Petersburg, Russia, Vol.1, pp.72-76.
- **Masaki Michihata**, Yasuhiro Takaya and Terutake Hayashi: "Development of the nano-probe system based on the laser trapping technique", *The 58th CIRP General Assembly*, 24-30 August 2008, Manchester, UK, STC-P: P2, pp. 493-496.
- **Masaki Michihata**, Yasuhiro Takaya, Terutake Hayashi and Takashi Miyoshi: "Measurement of oscillating condition for 3D probing accuracy of microparts using the laser trapping probe for the nano-CMM", *International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instrument*, 24-27 September 2007, Tohoku University, Sendai, Japan, pp.453-456.
- **Masaki Michihata**, Yasuhiro Takaya, Takashi Miyoshi and Terutake Hayashi: "Evaluation of laser trapping probe properties for coordinate measurement", *The International Society for Optical Engineering, Optics East*, 1-4 October 2006, Boston, Massachusetts USA, 6326-70.

### 査読なし

- **Masaki Michihata**: "Development of circularly oscillated micro-probe system based on the laser trapping technique", *Microparts interest group workshop*, 29-29 October 2009, National physical laboratory, London, UK.
- **Masaki Michihata**: "Development of the measuring instrument for 3-dimensional micro-objects by using the laser trapping probe", *Association of Pacific Rim Universities*: *Doctoral Student Conference*, 13-19 July 2008, Far Eastern National University, Vladivostok, Russia.

## 国内学術講演会

- **道畑正岐**、高谷裕浩、林 照剛：ナノ三次元座標測定のための光放射圧マイクロプローブに関する研究、2009年度関西地方学術講演会講演論文集、千里ライフサイエンスセンター、2009年5月、pp.69-70.
- **道畑正岐**、高谷裕浩、林 照剛：レーザトラッピングプローブを用いたナノ3次元形状計測に関する研究 (第4報) ～プローブキャリブレーション法の提案～、2008年度精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集、中央大学、2009年3月、pp.473-474.
- 中井大介、林 照剛、**道畑正岐**、高谷裕浩：レーザトラッピングプローブを用いた長作動距離スキャニングに関する研究 (第2報) ～定在場中に存在するプローブ特性の評価～、2008年度精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集、中央大学、2009年3月、pp.459-460.

- **道畑正岐**、高谷裕浩、林 照剛：円運動レーザトラッピングプローブを用いたナノ3次元位置検出 (第2報) ～位置検出および角度計測の分解能の検討～、2008年度精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集、東北大学、2008年9月、pp. 237-238.
- **道畑正岐**、高谷裕浩、林 照剛、中井大介：光放射圧を利用したマイクロプローブによるナノ三次元座標測定に関する研究、日本機械学会2008年度年次大会講演論文集、横浜国立大学、2008年8月、Vol.4、pp.249-250.
- **道畑正岐**、高谷裕浩、林 照剛：レーザトラッピングプローブを用いたナノ3次元座標計測器の開発 (第3報) ～測定面光学特性の影響～、2007年度精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集、明治大学、2008年3月、pp.473-474.
- **道畑正岐**、高谷裕浩、林 照剛、中井大介：レーザトラッピングプローブを用いたナノ3次元形状計測に関する研究 (第2報) ～プロービング精度の検証～、2007年度精密工学会秋期大会学術講演会講演論文集、旭川市ときわ市民ホール、2007年9月、pp.671-672.
- **道畑正岐**、高谷裕浩、三好隆志、林 照剛：レーザトラッピングプローブを用いたナノ3次元座標計測器の開発、2006年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集、芝浦工業大学、2007年3月、pp.313-314.
- **道畑正岐**、高谷裕浩、三好隆志、林 照剛：レーザトラッピングプローブを用いた高精度3次元座標計測に関する研究、2005年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集、東京理科大学、2006年3月、pp.1053-1054.

# 謝辞

本研究は、大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 高谷研究室にて、高谷博士着想の下、大気環境下でレーザトラップ技術を用いたマイクロプローブを開発するというチャレンジングな研究テーマであり、多くの先輩諸氏および著者が行った研究をまとめたものです。

本研究を遂行するにあたり、大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 教授 故 三好隆志 博士には、研究における御指導のみならず、研究遂行に対する姿勢など得難いたくさんのことを与えて頂きました、謹んで深謝の意を表します。三好先生に本成果をお見せできなかったこと、非常に悔やまれます。

大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 教授 高谷裕浩 博士には、7年間に渡り終始熱心な御指導を賜りました。また研究生活の上で、困難に挫けない勇気、未知な現象に対する好奇心、自由に研究を行える環境、そして数えきれない程のチャンスを与えて頂きました。心より感謝の意を表します。

大阪大学大学院 工学研究科 教授 竹内芳美 博士、箕島弘二 博士、山内和人 博士には、非常にご多忙にも関わらず快く副査をお引受け下さり、ご校閲および誠に有益なご意見を賜りました。感謝の意を表します。

大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 助教 林 照剛 博士には、常に丁寧な御指導を賜りました。また、日常の議論は本研究の遂行において誠に貴重なものでした。そして、普段から研究生活における活力を与えて頂きました。ここに感謝の意を表します。

高谷研究室 事務官 延里裕子さんにも、研究室に配属された当初より、懇切丁寧に研究費や旅費の会計処理、研究生活に関わる多くのことについて便宜をはかって頂きました。誠にありがとうございました。

本論文で示された成果はまぎれもなく私個人で得られたものではなく、多くの先輩および後輩諸氏が多大な情熱と知恵を持って真摯に取組んできた成果であります。その成果を、ここに学位論文としてまとめることが出来たことを光栄に思うと同時に、この機会を与えてくださりました高谷博士に改めて感謝の意を表します。また、その得られた成果を全てまとめきることが出来ませんでしたが、知恵、経験および知見などを後輩に伝えて頂いた先輩諸氏、および非常に困難な実験を根気よく丁寧に行って頂いた後輩諸氏に深く感謝致します。

キヤノンマシナリー株式会社の沢田博司 博士、川原公介 氏には、レーザトラップを行う際の粒子散布用基板にフェムト秒レーザによる周期構造の加工をお願い致しました。日常業務のお忙しい中、また、突然のお願いにも関わらず、快く加工のお手伝いを頂きまして、ありがとうございました。

株式会社 東海テックの細貝利夫 氏には、プローブ球の位置測定を行う際に最も重要なQPDの信号処理の回路を作製頂きました。非常にご多忙にも関わらず、回路作製からアドバイスまで丁寧にご対応頂きまして感謝しております。

これまでの研究において様々な方々にお世話になりました。特に、先輩の今井敬次郎さんには大変お世話になりました。今井さんの残してくださった成果なしにこの論文はないと行っても過言ではありません。卒業後も色々と気にかけてくださり、大変感謝しております。また、同期の今堀秀晃くん、針山達雄くん、檜田健史郎くんと交わした議論が後に多くの教訓を与えてくれました。また他にも、同じ機械工学専攻の博士課程のみなさん、研究室のみなさん、学会関連でお世話になりました先生や先輩方、DeMaMech交換留学中に色々博士課程の心得を教えてくださいました先輩方、イタリアデザインサマースクールをキッカケに領域を超えた発想をくれたみなさん、数え上げるときりがありませんが、数年に渡る研究生活を全うするにあたり発想や活力を与えてくださいましたことに、感謝します。

最後に、自由に好きなことをやらせてくれ、また、経済的にもサポートをしてくれました両親 父正博 母きぬよ、姉 眞紀子、兄 紳太郎に深謝の意を示します。

2009年12月　道畑 正岐