



Title	2本の光ファイバから出射した球面波を絶対基準とする位相シフト干渉計
Author(s)	中野, 元博
Citation	大阪大学低温センターだより. 2010, 151, p. 20-26
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/5641
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

「高機能化原子制御製造プロセス教育研究拠点」

拠点リーダー：山内 和人（工学研究科）

事業推進者

氏名	所属・役職	GCOEでの役割
山内 和人	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻、附属超精密科学研究センター）・教授	拠点形成計画総括、新世代製造プロセスによる教育プロジェクト、研究プロジェクトの総括
安武 潔	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻、附属超精密科学研究センター）・教授	実践教育企画総括、機能表面創成プロセスの開発
森田 瑞穂	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・教授	広報総括、次世代半導体電子デバイスの開発
桑原 裕司	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・教授	グローバルコミュニケーション教育企画総括、自己組織化によるナノファブリケーション・ナノデバイスの開発
遠藤 勝義	工学研究科（附属超精密科学研究センター）・教授	運営企画総括・センター運営担当、超精密非球面形状測定法の開発
渡部 平司	工学研究科（生命先端工学専攻、附属超精密科学研究センター）・教授/センター長	産学連携総括・センター運営総括、新機能薄膜・ナノ構造創成プロセスの開発
笠井 秀明	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・教授	国際化支援総括、計算機シミュレーションによるプロセス機能の解明
森川 良忠	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・教授	グローバルコミュニケーション教育企画担当、第一原理計算による超精密加工プロセスの解明とナノデバイスデザイン
菅原 康弘	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・教授	グローバルコミュニケーション教育企画担当、走査型プローブ顕微鏡による各種機能表面評価
垣内 弘章	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・准教授	国際化支援担当、大気圧プラズマによる低温・高速成膜プロセスと薄膜デバイスの開発
中野 元博	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・准教授	実践教育企画担当、計算機シミュレーションによるプロセスデザイン
佐野 泰久	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・准教授	運営企画担当、大気圧プラズマ、触媒応用による次世代半導体デバイス用基板の開発
後藤 英和	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻、附属超精密科学研究センター）・准教授	グローバルコミュニケーション教育企画担当、超純水のみによる低環境負荷型加工・洗浄プロセスの開発
山村 和也	工学研究科（附属超精密科学研究センター）・准教授	産学連携・センター運営担当、大気圧プラズマおよびウェットプロセスによる高機能材料の超精密加工法の開発
志村 孝功	工学研究科（生命先端工学専攻）・准教授	運営企画担当、放射光による表面・界面の結晶学的評価
Yan jun LI	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・准教授	国際化支援担当、走査型プローブ顕微鏡による各種機能表面評価
齋藤 彰	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・准教授	グローバルコミュニケーション教育企画担当、放射光を利用した高機能表面計測・評価システムの開発
大参 宏昌	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻、附属超精密科学研究センター）・助教	実践教育企画担当、大気圧プラズマによるSi系薄膜の高エネルギー形成プロセスの開発
有馬 健太	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・准教授	広報担当、走査型プローブ顕微鏡による各種機能表面原子・電子構造の評価
赤井 恵	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・助教	運営企画担当、自己組織化による表面機能付与
三村 秀和	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・助教	自己点検・評価担当、放射光・EUVL用光学素子の超精密加工と計測・評価
小野 倫也	工学研究科（精密科学・応用物理学専攻）・助教	国際化支援担当、第一原理計算による超精密加工プロセスの解明とナノデバイスデザイン

印：本号で紹介する研究者及び研究グループ関係者
 太字：低温センターから支援を受けている事業推進者

2本の光ファイバから出射した球面波を 絶対基準とする位相シフト干渉計

工学研究科 中野 元博 (内線7277)

E-mail: nakano@prec.eng.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

現在の先端的な科学技術において、例えば極端紫外光リソグラフィーや、X線顕微鏡、重力波検出装置など、大面積にわたってサブナノメートルオーダーの形状誤差しか許されない超高精度ミラーを必要とする領域が拡大しつつある^[1-3]。超高精度ミラーを実現するには、原子単位での加工法の開発とともに、原子オーダーで大面積の表面形状を計測する技術が必要となる。しかし、一般に普及しているフィゾー干渉計に代表されるような実体基準面との比較による干渉計測では、基準面の加工形状精度により制限され、絶対精度は可視光波長の1/50(約十ナノメートル)に留まる。そこで、我々は、点光源回折干渉計(Point Diffraction Interferometer: PDI)、すなわち、微小開口からの回折波面が真球面に近いことを利用して、この球面波を計測の絶対基準とする光干渉計に注目した。回折球面波の真球面度は、実体基準面より遥かに高い精度を有し、PDIは原理的にフィゾー干渉計などの従来法を凌駕する計測法に成り得る。さらに、位相シフト(Phase-Shifting: PS)法を併用することで、ミラーの各計測点の位相差を高精度に求められ、これらを組み合わせた位相シフト型点光源回折干渉計(PS/PDI)は、ミラーの法線方向に対してサブナノメートルオーダーの分解能を実現できる。これまでに開発されたPS/PDI装置は、微小開口としてピンホールを用いるタイプと、シングルモード光ファイバ1本を用いるタイプに分けられる。ピンホールタイプでは(株)ニコンにおいて可視光を用いた球面、非球面ミラーの計測が報告されている^[3]。一方、光ファイバ1本タイプはアメリカのLLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)における計測結果が報告されている^[1]。しかし、これらのPS/PDIでは1つの微小開口で発生した回折球面波が、被検波面と参照波面を兼ねているため、回折球面波の半分の面積に相当するミラーまでしか計測できない。そこで、我々は、より大面積での計測を行うため、シングルモード光ファイバ2本を用いるPS/PDIを新たに提案して、2つの光ファイバ出射球面波で被検波面と参照波面を分離した位相シフト干渉計を構築し、サブナノメートルオーダーの分解能と絶対形状の計測精度を実現したので、その一部をここに紹介する^[4-7]。

2. 2本の光ファイバコアから出射した球面波の真球度

図1に我々が新たに提案したシングルモード光ファイバ2本を用いるPDI光学系を示す。2つの

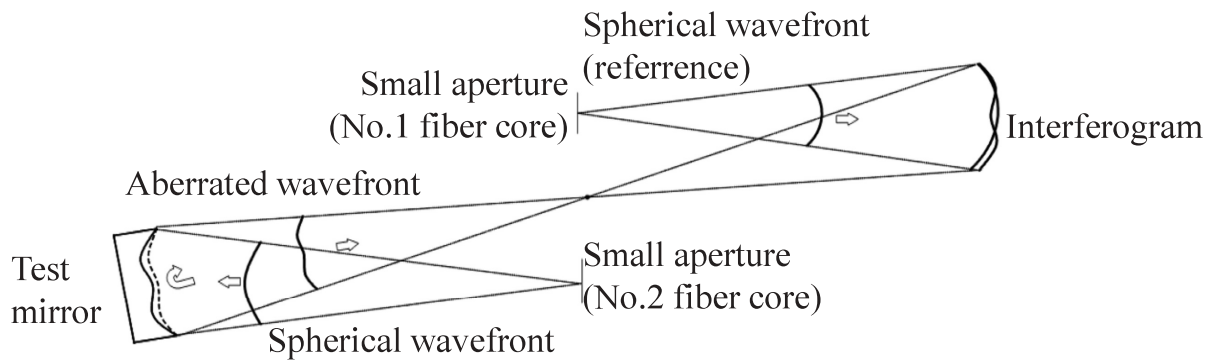


図1 シングルモード光ファイバ2本のコア微小開口から出射する2つの球面波を用いたPDI光学系

光ファイバコア微小開口から出射した球面波の一方が被検ミラーで反射され、その波面と他方の点光源回折球面波を参照波面として干渉させることで超高精度の計測が実現できる。

微小開口から出射した光の回折による波面の複素振幅は、Huygens-Fresnelの原理の数式による表現であるHelmholtz-Kirchhoffの積分定理を、開口による回折に適用したFresnel-Kirchhoffの回折積分式より求めることができる。出射端の光ファイバコア微小開口上の複素振幅がガウシアン状の分布を持つと仮定して計算した結果を図2(a)に示す。回折波面の強度に関する角度分布は、開口上の強度分布を反映し、ほぼガウシアン状の出射パターンになっている。また、ピンホールタイプのように微小開口上の複素振幅を一様と仮定して計算される中心の明るい部分 (Airy Disk) の大きさと比較してより広い角度領域で明るく、光ファイバコア微小開口は、ピンホールタイプに比べ

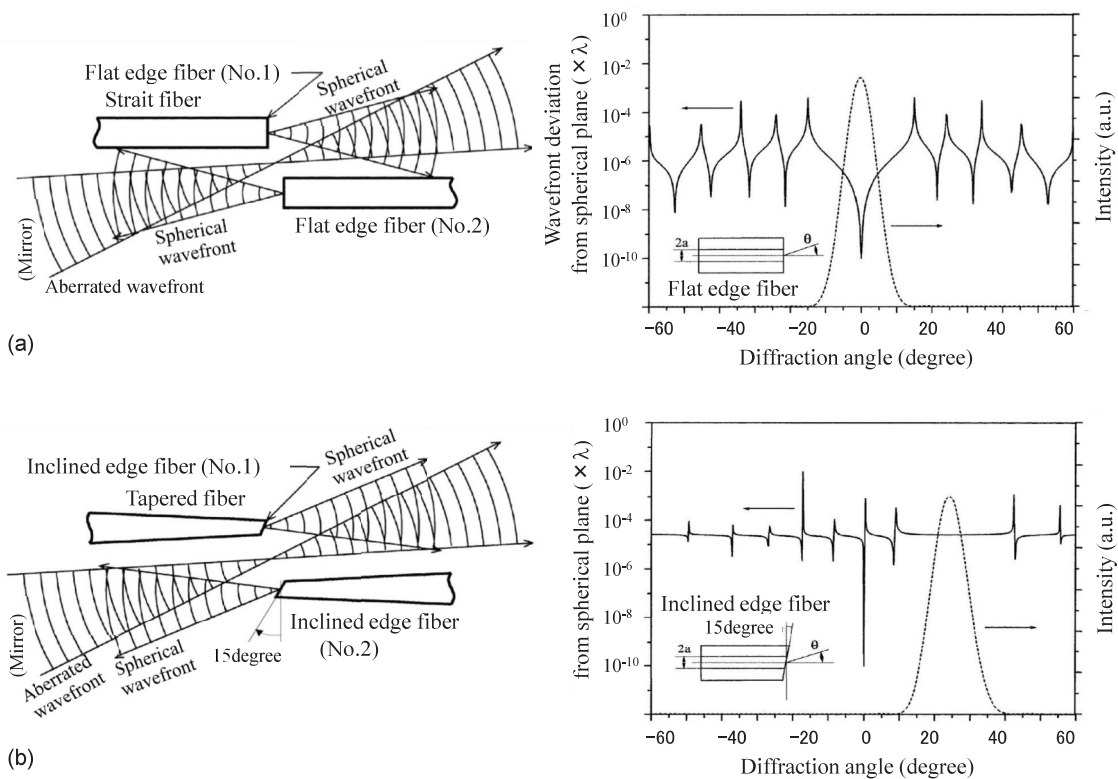


図2 シングルモード光ファイバ2本のコア微小開口から出射した球面波 (左図) および回折積分式で計算した波面の光強度 (右図点線) と位相分布 (右図実線) : (a) ファイバ切断のみのコアから出射した波面、(b) 斜め研磨したコアから出射した波面

てより大きな開口で真球度が低下しない。本研究で用いたコア直径 $4\ \mu\text{m}$ の可視光シングルモードファイバに波長 $\lambda = 632.8\ \text{nm}$ のHe-Neレーザーを導入した場合について計算すると、コアから出射した回折球面波は約 20° 以内が明るい放射特性を持ち、波面の真球面からのずれは右図中の実線で示されたとおり、 10^{-5} 以下と高精度な絶対基準となり得ることが分かる。

図1に示した光ファイバ2本タイプのPS/PDIの場合、出射光を全て被検ミラーに入射させて計測できるので、曲率半径 $1.5\ \text{m}$ の球面ミラーの場合、直径 $0.5\ \text{m}$ 程度の大面积を評価できることになる。図1の光学系では、2つの球面波を逆向きに出射するように光ファイバコアを配置するとともに、被検ミラーからの反射波の集光点を2本の光ファイバの間に位置するように調整しなければならない。超高精度計測を実現するためには、生じる干渉縞の本数を少なくする必要があり、ファイバ2本の端面距離を可能な限り、近接させたい。そこで、本研究で用いたクラッド直径 $125\ \mu\text{m}$ のシングルモード光ファイバを先鋭化エッチングした後、クラッド層が $5\ \mu\text{m}$ 程度残る先端部を約 15° 斜めに研磨して微小開口を形成することで、コア間を $30\ \mu\text{m}$ 程度まで接近させて計測できるように工夫した。図2(b)に斜め研磨した先鋭化ファイバ2本のコア微小開口から出射した球面波(左図)および回折積分式で計算した波面の光強度(右図点線)と位相分布(右図実線)を示す。Fresnel-Kirchhoffの回折積分式より 15° 傾斜した微小開口から出射した球面波を求めた結果は、 $\text{NA}0.2$ 以上の範囲で回折球面波の真球面からのずれ量が 10^{-5} 程度と見積もられた。従って、この球面波を計測の絶対基準とした位相シフトPDIは、サブナノメートルオーダーの超高精度な形状計測が可能である。

3 . 光ファイバ2本タイプのPS/PDI計測装置構成

図3に、計測球面波と参照球面波を出射する点光源として2本の光ファイバコアを用いたPS/PDI装置の構成を示す。安定した環境で計測するため、装置全体を恒温室内の防振台上に構築した。しかし、恒温室内での空気の流れによる光路の屈折率分布の変化が、計測のランダムノイズとして現れたため、熱源となる光源以外を発泡スチロール製の遮風/断熱ボックスによって覆った。光源には、波長 $632.8\ \text{nm}$ の直線偏光He-Neレーザーを用いた。本光学系では光アイソレータを用いて戻り光を除くことでレーザー強度の変動を抑制している。次に、半波長板によって偏光方向を調整し、偏光ビームスプリッターによりレーザー光を2つに分岐した。図中の2つの対物レンズを用いてコア径 $4\ \mu\text{m}$ のシングルモード光ファイバ

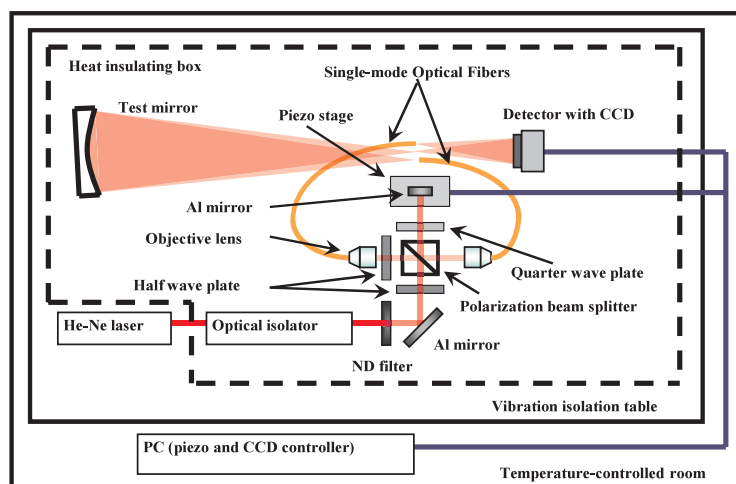


図3 シングルモード光ファイバ2本タイプのPS/PDI装置構成図

を用いた。本光学系では光アイソレータを用いて戻り光を除くことでレーザー強度の変動を抑制している。次に、半波長板によって偏光方向を調整し、偏光ビームスプリッターによりレーザー光を2つに分岐した。図中の2つの対物レンズを用いてコア径 $4\ \mu\text{m}$ のシングルモード光ファイバ

2本に導入し、ファイバ他端から計測波面と参照波面とを独立して出射させた。

計測対象のミラーで反射された被検波面と参照波面の干渉縞は、被検ミラーの形状情報のみを持つ。この干渉縞を位相シフト法により解析するため、ガラスレスCCDを用いて光強度データの取得を行った。ここで、位相をシフトするために偏光ビームスプリッターにより分岐した計測波面側の光路上に平面ミラーを設置して、そのミラーをマウントした1軸ピエゾステージをCCDカメラと連動させて0～3の範囲で位相シフトし、 $\pi/2$ 毎に7枚撮影した干渉縞から初期位相分布を算出した。さらに、空気のゆらぎ等によるランダムノイズを除去するため、初期位相分布は100回の平均値として取得した。

4. 凹面ミラーの計測結果と精度

直径200 mm、曲率半径1500 mmの球面形状の凹面ミラーを計測対象とし、本PS-PDI装置を用いて計測した結果を図4に示す。図4(a)は、片方の光ファイバコアから出射させた計測波面を被検ミラーで反射させた被検波面の光強度分布をCCDで計測した結果であり、ガウシアン状に分布している。図4(b)は(a)の被検波面と他方の光ファイバコアから出射させた参照波面との干渉縞であり、図4(c)はCCD上の初期位相を100回平均で算出した結果である。計測対象の凹面ミラー

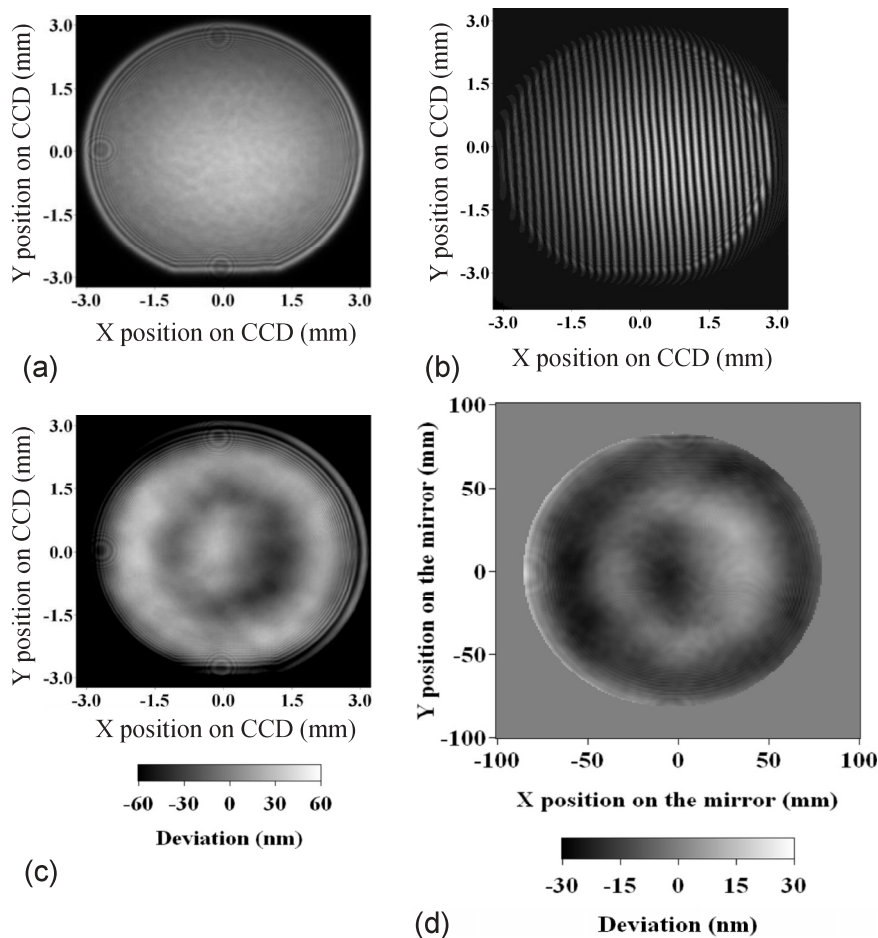


図4 凹面ミラーの計測結果：(a) 被検ミラー反射光強度分布、(b) 参照光との干渉縞、(c) CCD上の初期位相を100回平均で算出した結果、(d) デジタルホログラフィにより復元解析した被検ミラー形状

で反射された被検波面はその波面形状を変えながら伝播するため、厳密にはCCD上で計測された波面と計測対象ミラーの表面形状とは一致しない。そこで、CCD上で得られた被検波面の図(c)に示した位相分布と図(a)の強度分布を基に、計測対象ミラー上での波面をHelmholtz-Kirchhoff積分を用いたデジタルホログラフィ解析法^[6]によって復元した。

被検ミラー上での波面を復元するには、復元する位置である被検ミラーの座標を決める必要がある。この座標に関しては、曲率中心を干渉縞解析で求めた被検波面の集光点とし、曲率半径は設計値の1500 mmとした。本デジタルホログラフィで復元解析した結果、得られた計測対象の凹面ミラーの絶対形状を設計球面からの差として図4(d)に示した。

次に、被検ミラーの計測精度を評価するため、同じセッティングを保持したまま複数回の計測を行い、その再現性を評価した。室内の温度を一定にするため、実験のセッティングを終えてから5時間後に1回目の計測を行い、その後6時間の間隔を置いて計測した結果との差で評価したところ、空気の揺らぎによる誤差が重畳していたが、PV値で0.5 nm、rms値で0.12 nmの精度で一致が得られた。

さらに、被検ミラーを一度計測してから光軸回りに回転して再セッティングし、その回転前後の計測結果の差で絶対形状の計測精度を評価した。図5(a)に回転前、(b)に回転後の復元計算結果を、そして、(c)に回転前後の差を計算した結果を示す。各図中の3箇所の印の中心が、被検ミラーの設置角度を決定するために貼付した丸印の位置である。図5(c)から、被検ミラーの支持点と姿勢の変化に伴う弾性変形の影響や復元計算に伴う誤差の重畳が考えられるが、被検ミラー回転前後の絶対形状は、PV値で2.0 nm、rms値で0.85 nmの精度で一致している。

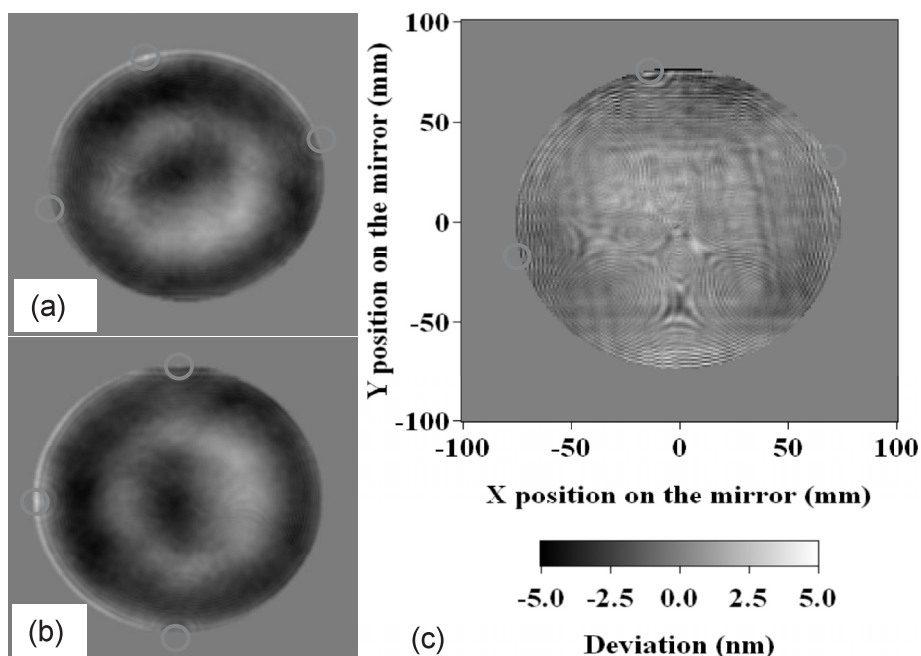


図5 被検ミラー回転前後の再現性精度 rms 0.85 nm : (a) 回転前、(b) 回転後、(c) 回転前後の差

5 . おわりに

本研究では、2本のシングルモード光ファイバから出射した回折球面波を絶対基準とするPS/PDIを新たに開発した。実体基準面を用いない本位相シフト干渉計測法により、凹面ミラーの絶対形状をサブナノメートルの超高精度で計測できることを実証した。本方法は、球面ミラーのみならず非球面ミラーの超高精度計測へ応用展開することが可能である。すなわち、非球面の形状計測の場合、ガラスレスCCDで分解できる干渉縞を被検面の形状に応じて2本の光ファイバコア出射端の設置位置を工夫することで得て、デジタルホログラフィで復元解析するために必要な2本の光ファイバコア端面の位置情報を計測すれば、どのような非球面形状であっても回折球面波を絶対基準とするPS/PDI計測が可能である。今後、自由曲面の超高精度計測法を開発して、様々な科学技術の発展へ寄与できる高性能なミラー加工へ応用展開していく。

謝辞

本研究はグローバルCOEプログラム（高機能化原子制御製造プロセス教育研究拠点）の支援を得て行われました。ここに謝意を表します。デジタルホログラフィ復元解析には、大阪大学サイバーメディアセンター大規模計算機システムを利用しました。本計測にご協力いただきました工学研究科 精密科学・応用物理学専攻 元教授 片岡俊彦先生、山内和人教授、押鐘寧助教、井上晴行助教、元大学院学生 松浦敏晋氏、中村崇亮氏、岡垣覚氏、宇高和明氏、小川尚利氏に感謝します。

参考文献

- [1] G. E. Sommargren, OSA TOPS on Extreme Ultraviolet Lithography, 4 (1996) 108.
- [2] K. A. Goldberg, J. Vac. Sci. Technol. B, 16 (1998) 3435.
- [3] K. Otaki, K. Ota, I. Nishiyama, T. Yamamoto, Y. Fukuda, S. Okazaki: J. Vac. Sci. Technol. B, 20 (2002) 2449.
- [4] 押鐘, 片岡, 遠藤, 野口, 井上, 中野, 精密工学会誌, 69 (2003) 678.
- [5] T. Matsuura, S. Okagaki, T. Nakamura, Y. Oshikane, H. Inoue, M. Nakano, T. Kataoka, Opt. Rev., 14 (2007) 401.
- [6] T. Matsuura, S. Okagaki, Y. Oshikane, H. Inoue, M. Nakano, T. Kataoka, Surf. Interface Anal., 40 (2008) 1028.
- [7] T. Matsuura, K. Udaka, Y. Oshikane, H. Inoue, M. Nakano, K. Yamauchi, T. Kataoka, Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A, 616 (2010) 233.