

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26249012

研究課題名(和文) レーザ走査型干渉技術を用いた円筒表面ナノレベル観察システム

研究課題名(英文) Profilometry system at nano level for whole cylinder surfaces by laser scanning interferometry technique

研究代表者

新田 勇 (Nitta, Isami)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：30159082

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,900,000円

研究成果の概要(和文)：申請者らがこれまで開発した広視野レーザ干渉計では、従来は計測が難しかった広い円筒全面のナノレベル形状計測を可能とした。しかし、レーザ干渉法では複数枚の干渉縞像を必要とする位相シフト法を用いる必要が広い表面計測では不便であった。本研究では、金属薄膜付き参照板を用いることで、1枚の干渉縞画像から表面形状を求めることができる簡便な新規方法を提案した。その測定原理を理論と実験の両面から調べ、広視野レーザ干渉計の測定原理の妥当性を示すことができた。さらに、この新原理に基づいて、表面形状をナノレベルで解析するプログラムを作成した。

研究成果の概要(英文)：With the wide field of view laser interferometer we developed, we could measure a whole cylindrical surface at a nano-level which was conventionally difficult to measure. However, in the laser interferometry, especially for wide surface measurement, it is inconvenient that it is necessary to use a phase shift method which requires from three to five interference fringe images. In this study, we proposed a simple new method that can obtain the surface profile from one interference fringe image by using a reference plate coated with metal thin film. We have investigated the measurement principle both theoretically and experimentally, and showed the validity of the measurement principle of the wide - field laser interferometer. Furthermore, based on this new principle, we developed the program to construct the surface profiles from the image of the interference fringes at a nano-level.

研究分野：工学

 キーワード：機械要素 レーザ走査干渉計 円筒面 広視野レーザ顕微鏡 シュリンクフィッタ ナノ計測 広領域  
空気静圧軸受

### 1. 研究開始当初の背景

これまでに広視野レーザ顕微鏡を開発し、円板、円筒、球面などの通常の装置では測定しにくい表面全面の高精度観察方法を開発してきた。開発当初の広視野レーザ顕微鏡の欠点としては、深さ方向の分解能が数  $\mu\text{m}$  と低いことが挙げられた。これは、広視野化と深さ方向の分解能が光学上トレードオフの関係にあることに起因している。しかし、レーザの干渉技術を利用することで、この欠点を克服できる。これまでに、走査型レーザ干渉技術の実験を行い、有効性を確認した。さらに、最近発見した新規な方法でレーザ干渉縞間を取得することで、一般的な位相シフト法を使わなくても、表面形状を 10nm 程度の精度で求められる可能性を得た。以上に示すように、円筒表面全面を高精度に計測するハードウェアやソフトウェア技術を世界に先駆けて着実に集積してきた。

### 2. 研究の目的

独創的な広視野レーザ顕微鏡を創り上げ、円筒面全面を高精度に画像化する手法を世界で初めて開発した。この装置では、広い視野を確保するために独自のシュリンクフィット技術援用レーザ走査方式を用いた。微細レーザスポットによる横方向の高い空間分解能に加え、新たにレーザ干渉技術を加えることで、深さ方向の分解能もナノレベルに高めることに成功した。レーザ干渉法では複雑な位相シフト法を用いるが、研究代表者はナノレベルの高さ情報を決定する格段に簡便な新規方法を発見した。これまでの基礎研究の総仕上げとして、通常では測定しにくい円筒面全面の表面形状を、ナノレベルで短時間に計測するためのハードとソフトをシステムとして統合した、広視野レーザ走査型干渉計を世界に先駆けて実現することを目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 使用した実験装置

実験装置の外観を図 1 に示す。本実験装置は、広視野レーザ顕微鏡、回転機構（空気静圧軸受）、参照板から構成されている。

実験装置の光路を図 2 に示す。レーザ波長は 488nm である。レーザ発振器から射出されたレーザは、コリメータレンズを通して平行光束にされ、偏光ビームスプリッタを通過する。その後、1/4 波長板を通過したレーザは直線偏光の光から円偏光の光へと変換される。走査用平面ミラーを用いて走査されたレーザは、 $f\theta$  レンズにより観察対象に集光される。反射光は再び 1/4 波長板を通過し、直線偏光に変換され、偏光ビームスプリッタで受光素子方向へと進んでいく。そして、集光レンズによって集光された光はピンホールを通過し、光強度を電圧に変換することで画像としてディスプレイ上に表示している。

図 1 実験装置(レーザ顕微鏡と静圧軸受)

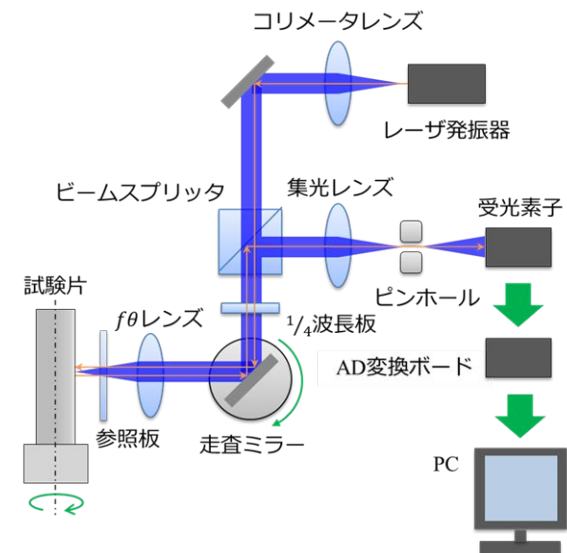


図 2 広視野レーザ顕微鏡の光路概略

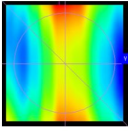
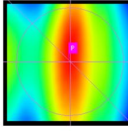
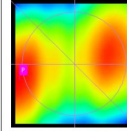
試験片である円筒の回転機構には、空気静圧軸受を使用した。空気静圧軸受は、スラスト軸受を使用した回転台と、それに重ねられた 3 枚のプレートから構成される台に設置されている。この 3 枚のプレートは、それぞれが板バネと調整ネジによって支えられており、このネジを回転させることで空気静圧軸受の 3 軸周りの回転姿勢を調整できる。また、空気静圧軸受の先端部には XY ステージが設置されており、これによって取り付けられた円筒試験片の回転中心位置を補正した。

#### (2) 金属薄膜参照板

使用した参照板は、Fe、Cr、Cu の 3 つの金属を成膜したスライドガラスである。各参照板の概要を表 1 に示す。スライドガラスのサイズは、76 mm×26 mm、厚さ 1.2 mm から 1.5 mm である。また、各金属の屈折率と消衰係数および、平面測定用レーザ干渉計 (F601, Fujinon, 基準面精度 32 nmPV) を用いて測定した各参照板における面精度も表 1 に示す。消衰係数は、媒質において光の吸収を考える際に、光の減衰を表すパラメータである。吸収がある場合、その系の屈折率  $N$  は複素屈折率として与えられ、吸収のないときの屈折率  $n$  と消衰係数  $k$  を用いて以下の式で表される。

$$N = n \cdot ik \quad \dots (1)$$

表1 金属薄膜参照板の概要

	Cr 薄膜参照板	Cu 薄膜参照板	Fe 薄膜参照板
成膜時間	8 分	10 分	10 分
屈折率	2.75	1.14	2.54
消衰係数	3.30	2.54	1.72
表面状態			
全面 PV	573 nm	421 nm	438 nm
全面 Ra	119 nm	82 nm	75 nm

次に、参照板の金属薄膜での多重繰り返し反射を考える。図3に示すように、媒質 a に単位強度の光が入射するとき、媒質に入らずに反射する光を  $\rho_{0a}$  とする。また、厚さ  $d$  の媒質界面で反射した光は、位相差を生じる。位相差  $\delta$  は、光の波長  $\lambda$  を用いて式(2)で表される。

$$\delta = 2 \pi n d / \lambda \quad \dots (2)$$

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_{0a} + \tau_{0a}\rho_{ab}\tau_{a0} e^{-i2\delta} + \tau_{0a}\rho_{ab}^2\rho_{a0}\tau_{a0} e^{-i4\delta} + \dots \\ &= \rho_{0a} + \tau_{0a}\rho_{ab}\tau_{a0} e^{-i\delta} \{ 1 + (-\rho_{0a}\rho_{ab})e^{-i2\delta} + (-\rho_{0a}\rho_{ab})^2e^{-i4\delta} + \dots \} \\ &= \rho_{0a} + \frac{\tau_{0a}\rho_{ab}\tau_{a0}e^{-i\delta}}{1 + \rho_{0a}\rho_{ab}e^{-i2\delta}} \\ &= \frac{\rho_{0a} + \rho_{ab}e^{-i2\delta}}{1 + \rho_{0a}\rho_{ab}e^{-i2\delta}} \quad \dots (3) \end{aligned}$$

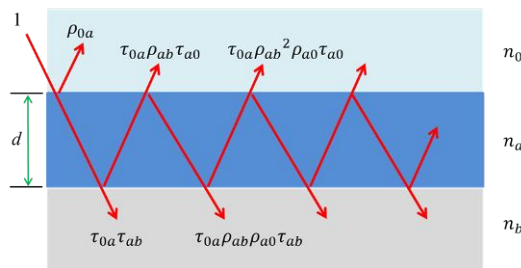


図3 レーザ光の金属薄膜での多重反射

さらに、入射後に媒質底面で反射し、媒質上部から出ていく光は、 $\tau_{0a}\rho_{ab}\tau_{a0} e^{-i2\delta}$  となる。同様に、複数の反射光を考慮すると、最終的な反射光のフレネル係数は式(3)で示される。これにより、媒質 a における反射光強度を算出することができる。多層膜の場合、算出された反射光を新たに上の層の入射光とみなし、このような演算を繰り返すことで最終的な反射光強度が求められる。本実験では、反射光が測定表面と参照板底面の面間距離に対して、どのような挙動を見せるのかを調べるために、金属薄膜厚さを変数として数値シミュレーションを行った。

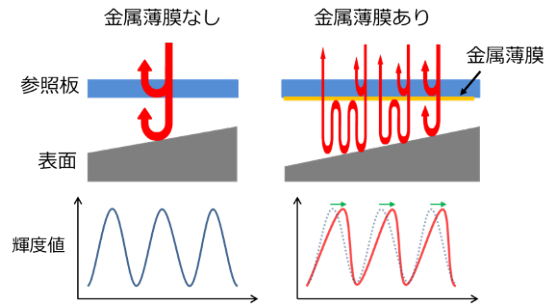
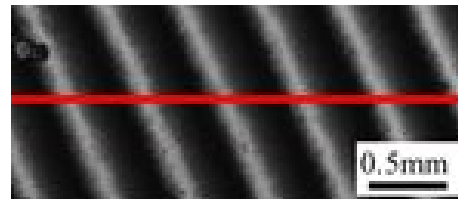


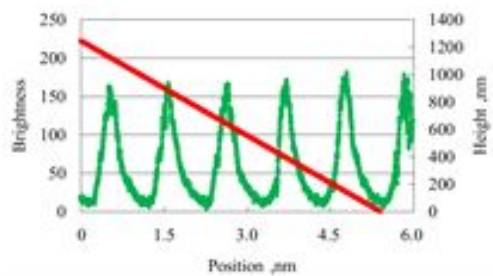
図4 ノコギリ波状の輝度分布

(3) ノコギリ波状干渉縞輝度分布の解析

通常、金属薄膜を付けない参照板により観察できる干渉縞の輝度分布は正弦波状となる。しかし、参照板に金属薄膜を成膜すると、図4に示すようなノコギリ波状の輝度分布が得られることをこれまでに確認している。この特殊な輝度分布は、成膜された金属薄膜面と試験片表面間におけるレーザーの多重反射に起因する。先行研究で、ノコギリ波状の輝度分布にフーリエ変換を適用した結果、正弦波の成分波形を足し合わせることで、ノコギリ波状の波形の再現に成功した。これによって、ノコギリ波の発生原因が多重反射であるということが証明された。そして、このノコギリ波の頂点の偏りは、表面の傾斜方向と対応していることが実験的に明らかとなっている。図5に過去の研究で取得した干渉縞画像とその輝度分布、および測定表面の傾斜方向を示す。図5(b)の赤線が表面の傾斜を表している。輝度分布の頂点は左側にシフトしている。このような性質を利用することで、1枚の干渉縞画像から表面の傾斜方向が分かる。従来の位相シフト法では複数枚の干渉縞画像を取得することが必要である。しかし、本手法によれば、1枚の干渉縞画像から表面形状を決定することができる。



(a) 干渉縞画像



(b) 輝度分布

図5 実験で得られたノコギリ波



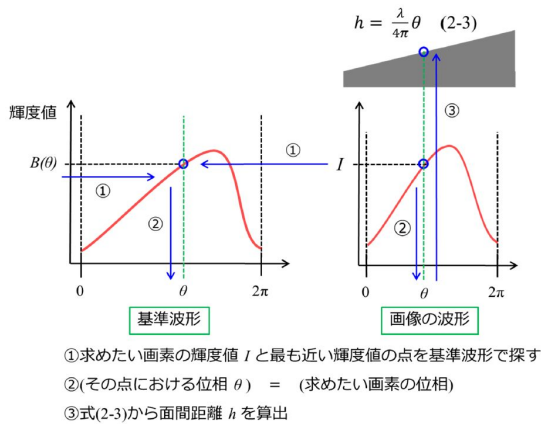


図 6 等高線間の形状算出

図 6 にノコギリ波状干渉縞から形状を算出する手順を説明する。まず、参照板金属薄膜によって理論的に求まる干渉縞輝度分布の基準波形と、実験により求まる「画像の波形」の横軸長さを合わせる。そして実験により求めた輝度値を見て、その輝度値と最も近い輝度値を基準波形において探す。探した基準波形の輝度値における位相を注目画素の位相とした。なお、画像における波形の振幅は、波形によって異なるため、基準波形の輝度値を適宜調整する。

位相が明らかになったら、面間距離  $h$  を算出する。その際、ノコギリ波の傾斜方向、いわゆるノコギリ波の向きによって隣の干渉縞との高低差が異なるため、ノコギリ波の向きから試験片表面の傾斜の向きを判断した。

#### (4) 全周形状計測した円筒試験片

本実験で使用した円筒試験片の外観を図 7 に示す。この円筒試験片は、旋盤によって直径 10mm に削り出された後に、電解複合研磨によって鏡面加工がなされている。測定時には、試験片を 4 本のねじを用いて円盤状のアダプタ上に固定し、前述した XY ステージ上に取り付ける。

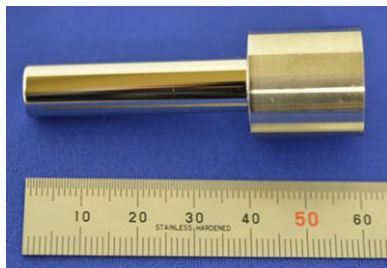


図 7 円筒試験片

#### (5) 円筒試験片の観察結果

本実験で得られた干渉縞画像を図 8 に示す。前述したように、画像は円筒の平面展開図のように捉えることができ、縦が円周方向、横が母線方向と対応している。また、緑枠内

の拡大図、および赤線部の輝度分布を示している。輝度分布を見ると、波形のピーク位置が偏りを持ったノコギリ波となっていることが確認できる。ノコギリ波の発生が確認できたため、これの特性を利用して、1 枚の画像からの効率的な形状測定を試みる。

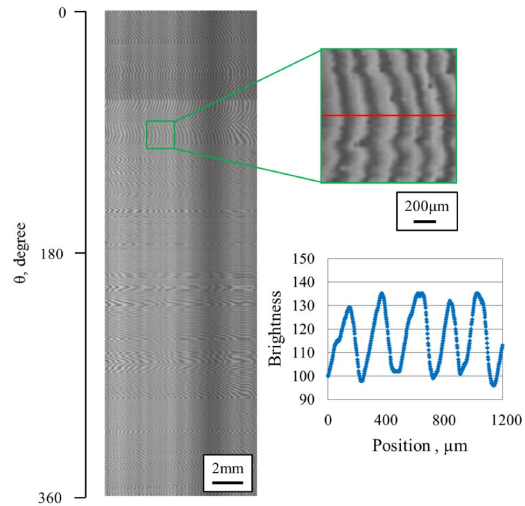
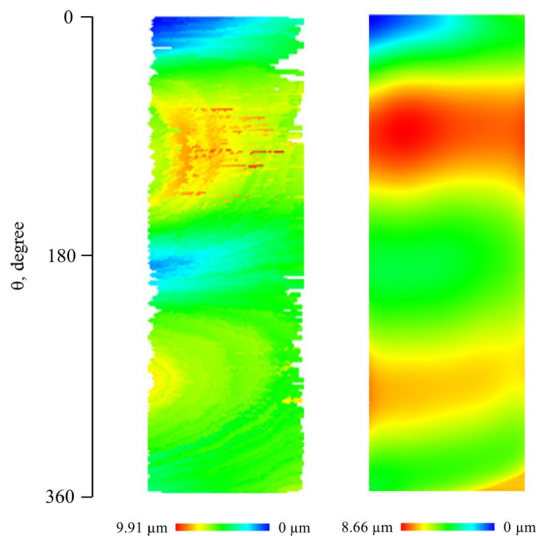


図 8 干渉縞画像 (Fe 薄膜参照板)



(a) Fe 薄膜参照板 (b) 関数近似結果 (n=6)

図 9 形状計算結果

本測定の表面形状測定結果の一例を図 9 に示す。一部画素に形状に変換できないところがあったが、滑らかな三次元形状を算出することができた。形状測定に要する時間は 5 分足らずであり、これまでの測定に数十時間を要していた問題を改善することに成功した。図 9 (b) は、一部で形状が算出できない部分があったので、関数近似してその部分を補った結果である。

#### (6) 実際の形状計測への利用

前節までで、円筒を測定対象とし、ノコギリ波を用いることで1枚の画像から効率的な形状測定に成功した。円筒では、回転体ということもあり干渉縞密度が画像の場所によって大きく変化するため、円筒と参照板の位置補正が測定の難易度を高めていた。そのため、円筒を対象とする場合、2つの位置を厳密に制御できるような機構を装置内に組み込む必要があると考えられる。

一方で、平面を対象とした形状測定をしてみる。図10に鏡面加工を施したSUS304平板を測定した結果を示す。平面を対象とした場合は、 $10 \times 8 \text{mm}^2$ の広範囲でも円筒よりも干渉縞密度の調整が容易である。図10(b)の結果を見ても、少ない干渉縞で表面形状を明確に算出できていることがわかる。このことから、円筒に限らず、非接触での形状測定が望ましい対象物であれば、広視野レーザ干渉計は広い視野と高い平面分解能を持つため、既存の測定方法よりも高効率な測定が可能である。

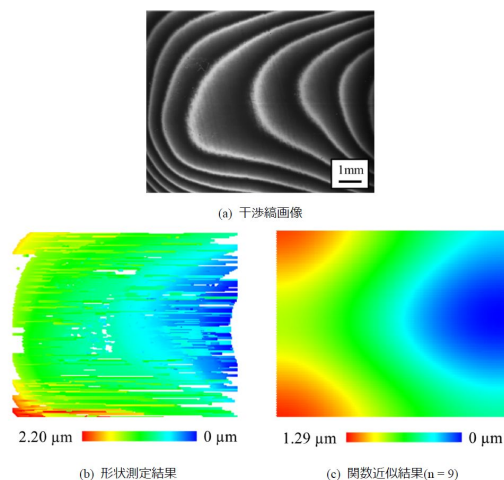


図10 平板の表面形状

#### 4. 研究成果

これまで開発した広視野レーザ顕微鏡は、従来は測定しにくかった円筒面全面を高精度に画像化することができる。微細レーザスポットによる横方向の高い空間分解能に加え、新たなレーザ干渉技術により、深さ方向の分解能もナノレベルに高めることに成功している。

従来、レーザ干渉法では複雑な位相シフト法を用いるが、本研究では金属薄膜付き参照板を用いることで、1枚の干渉縞画像からナノレベルの表面高さを求めることができる簡便な新規方法についてその測定原理を調べた。その結果、広視野レーザ干渉計の測定原理の妥当性を示すことができた。また、表面形状を解析するプログラムを作成することができた。以下に具体的な結論を示す。

(1) 金属薄膜付き参照板を用いた干渉を多層膜干渉モデルと見なすことで、ノコギリ波状

の干渉縞を理論的に算出できた。

(2) ノコギリ波状干渉縞の向きを利用することで、1枚の画像から表面形状を算出することができた。このことは、従来必要とされていた位相シフト法が不要であることを意味する。

(3) 円筒面以外を測定対象とした場合でも、本手法は、広い視野の形状を1枚の画像から測定可能である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

新田勇, 福島直幸, 江淵倫太郎, 月山陽介, 広視野レーザ顕微鏡による円筒内外面とカムの全周観察, 精密工学会誌, 査読有, 82巻11号(2016), pp.976-982.

〔学会発表〕(計8件)

佐藤拓也, 渡辺敏博, 月山陽介, 新田勇, 広視野レーザ干渉計を用いた非金属の表面形状計測, 日本機械学会北陸信越支部第46回学生員卒業研究発表講演会, 金沢大学(石川県・金沢市), 講演番号 PS2-54, 2017年3月8日発表。

渡辺敏博, 佐藤拓也, 月山陽介, 新田勇, 広視野レーザ干渉計を用いた円筒表面ナノ形状測定手法の開発, 2016年度精密工学会北陸信越支部学術講演会, 新潟大学(新潟県・新潟市), 講演番号 C21, 2016年11月12日発表。

加藤桂介, 大原佑太, 月山陽介, 新田勇, 広視野レーザ干渉計における粗面の計測手法の開発, 日本機械学会2016年度年次大会, 九州大学(福岡県・福岡市), 講演番号 S1170302, 2016年9月12日発表。

新田勇, 大原佑太, 月山陽介, 広視野レーザ走査型干渉計を用いた新規干渉縞パターンを観察, 2016年度精密工学会秋季大会学術講演会, 茨城大学(茨城県・水戸市), pp.27-28, 2016年9月6日発表。

渡辺敏博, 笹崎康則, 月山陽介, 新田勇, 広視野レーザ干渉計による円筒表面ナノ形状測定手法の開発, 日本機械学会第16回機素潤滑設計部門講演会, グランディア芳泉(福井県・あわら市), pp.169-172, 2016年4月19日発表。

笹崎康則, 渡辺敏博, 月山陽介, 新田勇, 広視野レーザ干渉計を用いた円筒表面におけるナノレベル形状測定の再現性, 日本機械学会北陸信越支部第45回学生員卒業研究

表講演会，信州大学（長野県・松本市），講演番号 67，2016 年 3 月 4 日発表。

渡辺敏博，佐久間俊介，月山陽介，新田勇，円筒表面形状のナノレベル測定を目指した広視野レーザ干渉計の開発 - 円筒面上の微小痕観察による性能評価 - ，日本機械学会年次大会 2015，北海道大学（北海道・札幌市），講演番号 S1110105，2015 年 9 月 14 日発表。

Isami Nitta, Yosuke Tsukiyama, Naoyuki Fukushima, Nanoscale measurement of whole cylinder surface with laser microscope with wide field of view, ICPE2014，ホテル日航金沢（石川県・金沢市），pp.830-835，2014 年 7 月 24 日発表。

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

出願状況（計 1 件）

名称：レーザ走査型干渉計及び表面形状の計測方法

発明者：新田勇，月山陽介

権利者：新潟大学

種類：特許

番号：特許願 2014-109489

出願年月日：2014 年 5 月 27 日

国内外の別：国内

○取得状況（計 2 件）

名称：カム表面の観察方法

発明者：新田勇

権利者：新潟大学

種類：特許

番号：特許第 5716459 号

取得年月日：2015 年 3 月 27 日

国内外の別：国内

名称：円筒面の形状計測方法

発明者：新田勇，小俣公夫

権利者：新潟大学，(株)オプセル

種類：特許

番号：特許第 5748414 号

取得年月日：2015 年 5 月 22 日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://tribo.eng.niigata-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

新田 勇 (NITTA, Isami)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：30159082

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

菅野 明宏 (KANNO, Akihiro)

小俣 公夫 (KOMATA, Kimio)

月山 陽介 (TSUKIYAMA, Yosuke)