

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01360

研究課題名（和文）広視野レーザ走査干渉計を用いたワンショット3次元ナノ形状測定システム

研究課題名（英文）Single-shot 3D nano surface profilometry by using wide field laser scanning interferometer

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） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：研究代表者は既存の装置より約400倍広いレーザ走査型干渉計を実現した。参照板に金属薄膜を成膜することで、1枚の干渉縞画像から試験片の形状がナノ精度で決定できる新規のワンショット計測手法も開発した。干渉計測は振動に弱く、極力振動を排除した環境で行われる。このため、測定精度が高いにもかかわらず加工機上で干渉法を適用することはできなかった。本研究では、新規ワンショット計測法が振動に対して極めて強いことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

市販の顕微干渉計は光学顕微鏡をベースとしているために視野が限定的である。これに対して、既開発の広視野レーザ顕微鏡は約400倍視野が広い。干渉計として使用すれば、400倍広い領域のナノ形状計測が可能である。最近開発した新規ワンショット計測法を組み合わせることで、振動に対してロバストな形状計測手法が確立できる。

本研究では、新規ワンショット計測法の振動に対するロバスト性を実験により確認した。本成果は、干渉法を机上計測に適用できることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The principal investigator has realized a laser scanning interferometer with a field of view about 400 times that of existing equipment. We have also developed a new single-shot measurement method that can determine the shape of a sample with nano-accuracy from a single interferogram by forming a metal thin film on the reference plate.

Interference measurements are generally vulnerable to vibration and are performed in an environment that eliminates vibration as much as possible. Therefore, despite the high measurement accuracy, the interferometry could not be applied on the machine tool table. In this study, we showed that the new single-shot measurement method has excellent vibration resistance.

研究分野：機械工学

キーワード：広視野計測 レーザ走査干渉計 広視野レーザ顕微鏡 ワンショット干渉計測 金属成膜参照板 振動
ロバスト ナノ計測

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

観察装置として光学顕微鏡はよく用いられるが、対物レンズを使用するためにその観察視野は狭い。図1にその様子を示した。10倍の対物レンズを使用した場合、その観察視野はおよそ0.5mm四方であり、深さ方向の解像度は30nm程度となる。市販のレーザ顕微鏡も光学顕微鏡をベースに構成されるために、視野は同程度が若干広い程度である。

一方で、機械加工の精度は向上し広い面積を持つ精密部品が登場しているため、広い表面を短時間で観察する要求が強くなっている。

研究代表者は、自身の基礎研究を利用し、広視野レーザ顕微鏡を開発した。図1にはその顕微鏡の観察領域も示している。これまでの光学顕微鏡の視野0.5mm四方を10mm四方に広げるものである。すなわち、従来の光学顕微鏡に比べて400倍広い視野を手に入れたことになる。

しかし、このことにより深さ方向の解像度は8μmほどに低下した。そこで、深さ方向の解像度を向上させるために、広視野レーザ顕微鏡をベースにレーザ走査型干渉計を開発した。これにより、深さ方向の解像度を30nm程度に改善することに成功した。その結果、従来技術に比べて約400倍広い視野空間のナノ精度3次元形状計測を可能とし、これまでは計測が難しかった円筒面全面の形状をレーザ干渉法で求めることを行った。

通常の干渉計測では位相の異なる4枚の干渉縞画像が必要となるが、このような位相シフト法は、広視野計測を主眼とする本手法にとっては、観察時間の増加となり不向きである。近年、位相シフト法によらず1枚の画像から形状を決定するワンショット画像計測法がいくつか試みられている。研究代表者は参照板に金属薄膜を成膜することで、1枚の画像からでも形状が決定できる新規のワンショット形状計測手法を見いだした。このような背景の元、広視野レーザ走査干渉計を用いたワンショット3次元ナノ形状測定システムを構築することを着想した。

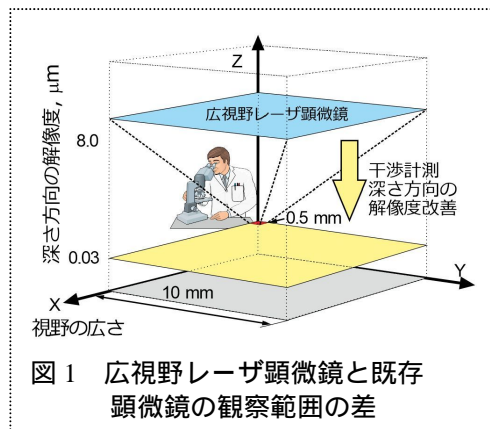


図1 広視野レーザ顕微鏡と既存顕微鏡の観察範囲の差

2. 研究の目的

広視野領域に対しても1枚の干渉縞画像取得のみで全体形状をナノ精度で決定できる、世界初の新規ワンショット形状計測手法を確立し、形状計測システムとして纏め上げることを本研究の目的とした。本研究では、金属と異なる光学特性を有する半導体(シリコンウエハ)やプラスチック材料に対しても本手法の有効性を調べた。ワンショット計測の適用先として工作機械上で計測を行う機上計測を念頭に、振動に対してのロバスト性を調べた。

3. 研究の方法

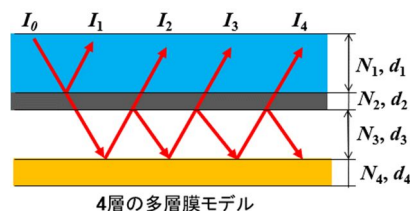
図2に示すフレネル解析で本研究の干渉縞の輝度分布を求めると式(1)のようになる。多重反射によりノコギリ波状輝度分布が構成される。金属よりも反射率が低いシリコンウエハや、ポリエチレンテレフタレート、ポリカーボネート、アクリルの4種類のプラスチックでも、ノコギリ波状輝度分布が生じるかを調べた。また、ガラス参照板に成膜する金属薄膜の厚さの影響を調べた。その結果、観察対象面にはある程度の反射率を有していればそれ以外は特に制限がないことが明らかになった。これは本手法の汎用性を示す重要な研究成果である。

ワンショット干渉計測であることから、参照板と試験片の相対距離を変化させる必要がなく、両者を固定することができる。両者の固定が振動に対して強固であれば、振動下でも両者の相対位置は変化しない。これにより、振動に強い干渉計測法となる可能性がある。この考えが正しければ、干渉計測であるにもかかわらず振動に強い計測法として工作機械上の機上計測に道を開くことになる。そこで、強い振動下でシリコンウ

表1 各層の光学特性

Table.1 Optical constants of layers

	n	k	Thickness
Air	1	0	∞
Glass	1.463	0	1 mm
Fe film	2.54	1.72	0 ~ 50 nm
Air	1	0	0 ~ 1000 nm
Si plate	3.86	0.016	0.28 mm



$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \dots \dots (1)$$

$$R = \frac{I}{I_0} = \left(\frac{r_{12} + r_{23}e^{i\Delta}}{1 + r_{23}r_{12}e^{i\Delta}} \right)^2 \dots (2)$$

$$\Delta = \frac{4\pi n_2 d}{\lambda}, \quad r_{12} = \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2}$$

I : 光強度
 R : 反射率
 r : 振幅反射率
 Δ : 位相差
 λ : レーザ波長(650nm)
 N : 複素屈折率
 $n = n - ik$
 n : 屈折率
 k : 消衰係数

図2 多重反射の光強度

エ八表面の形状計測を行った。

4. 研究成果

以下に項目別にその詳細を記す。

(1) 参照板金属薄膜の厚みの影響

ガラス参照板に成膜する金属を純鉄 Fe に固定して、反射率 (reflectance) とすきま (参照板と試験片の間) の関係をフレネル解析で計算したのが図 3 である。Fe 膜厚が 0 のガラスのみの場合は正弦波状に反射率が変化している。Fe 膜厚 3nm では反射率の変化はフラットになった。Fe 膜厚 15nm 付近で全体的に反射率が低下すると共に、その最大値と最小値の差が大きくなった。

図 4 はコントラストを縦軸に Fe 膜厚を横軸にとり、計算値と実験値を比較したものである。両者ともに Fe 膜厚が 16nm 付近でコントラストは最大となることが分かった。さらにこの図をよく見ると、計算値では Fe 膜厚 3nm でコントラストが急峻に低下しているが、実験値では 0.37 程度の一定値をとっている。この原因は計算では Fe 単体の反射率や複素屈折率などの物性値を使用しているが、実際には Fe 膜厚が 3nm の時に Fe 原子が均一にガラス参照板上に成膜されているとは考え難い。このため計算の過程が現実の状況と異なっているからと考えられる。図 4 を改めてみると、実験で求めた Fe 膜厚 3nm のコントラストは、膜厚が 0 (ガラスのみのコントラストの計算値) の時の値 0.4 に近い。すなわち、Fe 膜厚が 0~5nm の時には Fe 成膜の影響がほとんど現れていないと考えるのが自然なように思われる。

(2) 反射率の低いプラスチック表面での測定

本ワンショット干渉法を使いこれまで金属表面の形状を測定し問題なく測定できることを確認してきた。本手法の適用範囲を広げるために、反射率が低い半導体 (シリコン, Si) やプラスチックに対して測定を行った。

表 2 には、試験片表面の反射率等を示す。Si で反射率は 35% で、プラスチックの PET, PC, PMMA では反射率はそれぞれ、9%、6%、4% に低下する。この中で、半導体の Si は問題なく本手法が適用できた。反射率が 4% と最低の PMMA について求めた干渉縞を図 5 に示す。この図の赤い横線に沿った干渉縞輝度分布を図 6 に示す。輝度値のピークが両側の暗点のどちら側に偏るかで、試験面の傾斜方向が識別できるのが本手法のキーとなる。図 6 ではわずかではあるが 7% ほど右側に偏っていることが分かった。図 7 には、PMMA 表面 (10mm × 8mm) の干渉縞全景と、この干渉縞を自作の解析ソフトにかけて求めた形状を示す。カラーチャートの範囲は 0~107.9 μm である。所々白くなっているのは縞解析が不可能であった領域である。全体的に左側から右側に向かって形状が高くなっていることが分かる。その他材料のピークの偏りは、Si で 33%、PET で 9%、PC で 6% であった。プラスチックの反射率は低いのでピークの偏り量は少なくなるが、本研究で使用したものでは本手法の適用が可能であった。

(3) 機上計測に向けた振動ロバスト性

本干渉計測システムは、ワンショット計測のた

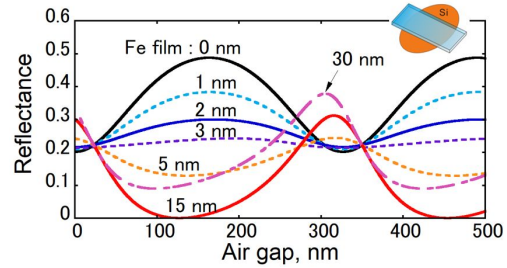


図 3 Fe 膜厚と反射率の関係

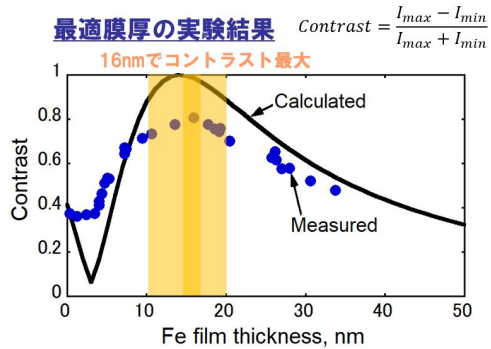


図 4 最適膜厚の解析と実験の比較

表 2 試験片の光学特性と表面粗さ

Table 2 Optical constants of the specimen and their roughness				
試験片	Si	PET	PC	PMMA
反射率	35 %	9 %	6 %	4 %
透過率	0 %	90 %	36 %	0 %
屈折率	3.85	1.63	1.58	1.49
消衰係数	0.016	0	0	0
粗さ Ra	17 nm	20 nm	38 nm	26 nm
粗さ Rz	746 nm	1840 nm	1150 nm	2390 nm

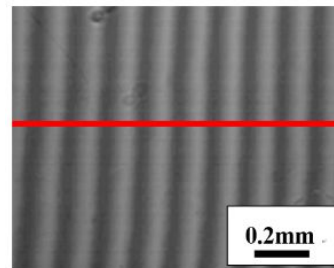


図 5 PMMA の干渉縞 (反射率 4%)

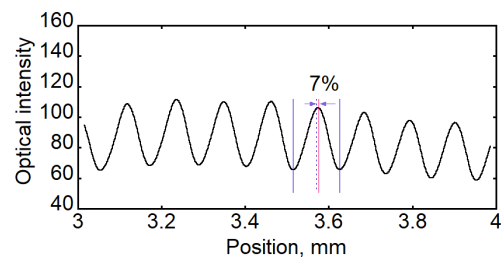


図 6 PMMA の輝度分布 (右シフト)

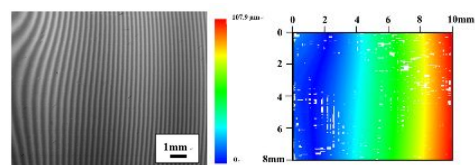


図 7 PMMA 表面の干渉縞と表面形状カラーバーの範囲は 107.9 μm

め試験片表面と参照板を固定したままで計測が可能であり、振動環境下でも両者の相対的な位置が変わらなければ、安定した干渉縞が取得できるはずである。この強みを実験的に検証した。図8は実験に使用した Si 試験片と参照板である。2 インチの Si ウエハを 1/4 に割断したものを試験片とし、形状を安定させるために銅板に両面テープで固定した。市販レーザ干渉計 F601 で平面度を計測したところ高低差で約 2.6 μm であった。参照板は光学平行平面基板 (BK7, $\square 25\text{mm}$, 厚み 5mm) であり、その片面に Fe 薄膜を成膜した。これら試験片は図9に示す治具により、両者の相対的な位置が変化しないように固定した。両試験片のすきま (空気層) は約 0.28mm である。

次に機上計測を模擬するために、万能フライス加工テーブルの振動を計測した。図10に示すとおり加工テーブル上下方向の加速度は $\pm 0.3 \text{ m/s}^2$ であった。広視野レーザ顕微鏡の試験片移動ステージの振動値が、万能フライスの振動値と同程度であればそのまま使用できる。広視野レーザ顕微鏡試験片移動ステージの振動を計測したところ図10に示すとおり、 $\pm 0.05 \text{ m/s}^2$ と一桁小さい値であった。そこで、小型マブチモータをステージに固定して振動値を増加させた。このとき振動値は万能フライスと同じく $\pm 0.3 \text{ m/s}^2$ まで増加した。次に、広視野レーザ顕微鏡移動ステージに取り付けた参照板の表面変位を測定した (図11)。ステッピングモータを励磁しただけでステージが移動していない状態の変位は PV 値で 200nm であった。ステージを移動させた場合は案内面の凹凸のために変位は PV 値で 800nm となった。結局、広視野レーザ顕微鏡の移動ステージの振動が一番大きな影響を及ぼすことが分かった。

上記のような大きな振動下で取得した干渉縞を図12に示す。参照板の Fe 成膜部分はこの図で少し暗い部分であり、縦長となっている。Fe 成膜以外の干渉縞の縦方向の輝度分布をみると、正弦波に近い形となっている。これに対して Fe 成膜部ではピークが左側に偏っていて、輝度分布はノコギリ波状になっている。したがって、振動環境下でも本手法が適用できることが分かる。

図13は Si 試験片の本手法による縦方向の形状を市販レーザ干渉計のものと比較した結果である。図に示した Si 試験片上の三カ所の形状に対してこのような比較を行った。この結果を見ると、市販レーザ干渉計 F601 の測定結果との差はわずか 20nm であった。図12は 10mm 走査の広視野レーザ顕微鏡を使用したものであるが、50mm 走査のものも使用した。この場合は、両者の差は約 30nm と若干測定精度が悪化した。しかし、振動振幅が 800nm である振動環境下での計測であることを考えれば、機上計測に適用できる可能性は十分に示せたものと考えられる。

(5)まとめ

顕微タイプ干渉計は光学顕微鏡をベースとしているために視野が限定的である。これに対して、これまでに開発した広視野レーザ顕微鏡は視野を約 400 倍に広げるものである。干渉計として使用すれば、400 倍広い範囲の形状をナノ

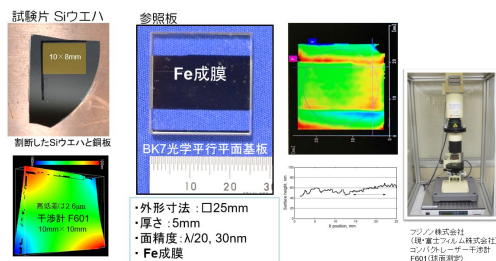


図8 振動ロバスト性実験の試験片

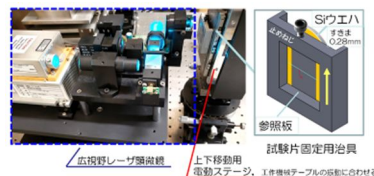


図9 試験片取り付け治具と顕微鏡

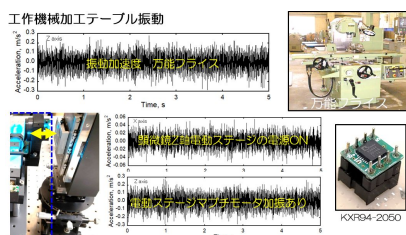


図10 最適膜厚の解析と実験の比較

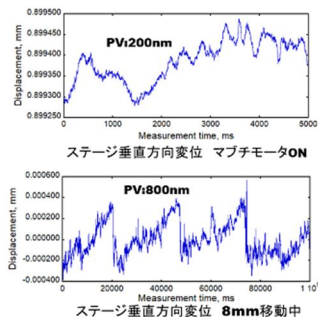


図11 顕微鏡ステージの振動振幅

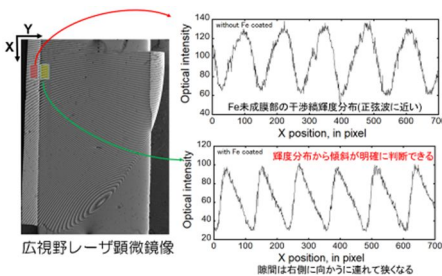


図12 干渉縞とノコギリ波状輝度分布

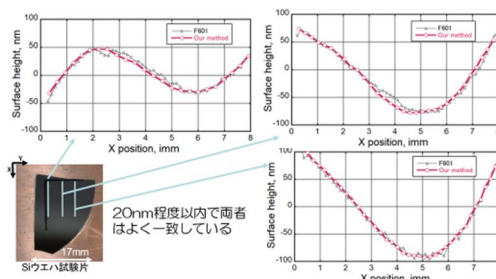


図13 三カ所の試験片形状の比較

精度で決定できる。最近開発した新規ワンショット計測法を組み合わせることで、振動に対してロバストな形状計測手法が確立できる。

本研究では、金属と異なる光学特性を有する半導体（シリコンウエハ）やプラスチック材料に対しても本手法の有効性を確認した。次に、新規ワンショット計測法の振動に対するロバスト性を実験により確認した。この成果は、干渉法を机上計測に広げる研究成果である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ohara Yuta, Tsukiyama Yosuke, Nitta Isami	4. 巻 52
2. 論文標題 A novel single shot interferometry with a wide field of view by reference plates coated with various metals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 345 ~ 355
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.precisioneng.2018.01.015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 新田勇, 佐藤拓也, 月山陽介
2. 発表標題 シングルショット干渉法に適した金属薄膜
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Isami Nitta, Takuya Sato, Yosuke Tsukiyama
2. 発表標題 3D surface profile measurement by single shot interferometry with wide field of view
3. 学会等名 International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2019 (ATEM'19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新田勇, 佐藤拓也, 月山陽介
2. 発表標題 広視野シングルショット干渉法によるプラスチック表面の形状計測
3. 学会等名 2019年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuya Sato, Yosuke Tsukiyama, Isami Nitta
2. 発表標題 3D surface profile measurement of materials with varying reflection coefficients by single shot interferometry
3. 学会等名 The 8th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 目黒宙, 新田勇, 月山陽介
2. 発表標題 広視野レーザー顕微鏡への光切断法の導入～形状計測範囲の拡大～
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越学生会第49回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤龍介, 月山陽介, 新田勇
2. 発表標題 シングルショット干渉計測のための干渉編解析方法の検討
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越学生会第49回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 新田勇, 月山陽介
2. 発表標題 形状計測範囲拡大のための広視野レーザー顕微鏡への光切断法の導入
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第57期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊陽介, 月山陽介, 新田勇
2. 発表標題 広視野シングルショットレーザ干渉計に及ぼす振動の影響
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部第57期総会・講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 佐藤拓也, 月山陽介, 新田勇
2. 発表標題 広視野レーザ干渉計を用いたナノ形状計測（非対称干渉縞に及ぼす参照板厚さの影響）
3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Isami Nitta, Takuya Sato, Yosuke Tsukiyama
2. 発表標題 Single-shot measurement of 3D surface profiles using wide field view laser microscope
3. 学会等名 ICPE2018 (17th International Conference on Precision Engineering) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 新田勇, 月山陽介
2. 発表標題 振動に強いシングルショットレーザ干渉計測の検討
3. 学会等名 2020年度精密工学会秋季大会学術講演会(オンライン開催)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Isami Nitta, Yosuke Tsukiyama
2. 発表標題 Vibration insensitive single-shot interferometry using a wide-field laser microscope
3. 学会等名 ICPE2020(18th International Conference on Precision Engineering)(オンライン開催)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本田逸人, 月山陽介, 新田勇
2. 発表標題 広視野レーザー顕微鏡への光切断法の導入
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越学生会第50回学生員卒業研究発表講演会(オンライン開催)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 新田勇, 月山陽介
2. 発表標題 粗面形状のレーザー干渉計測の検討
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会(オンライン開催)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 新田勇 他	4. 発行年 2021年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 319
3. 書名 トライボロジーの評価・制御・応用展開	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	月山 陽介 (TSUKIYAMA Yosuke)		
研究協力者	菅野 明宏 (KANNO Akihiro)		
研究協力者	小俣 公夫 (KOMATA Kimio)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関