

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：37111

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06406

研究課題名(和文)空間直交振幅変調を用いたホログラフィックメモリにおける信号光変復調法に関する研究

研究課題名(英文) Study on signal beam modulation/demodulation method in holographic memory using spatial quadrature amplitude modulation

研究代表者

文仙 正俊 (Bunsen, Masatoshi)

福岡大学・工学部・教授

研究者番号：50412573

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：ホログラフィックデータストレージの大容量化と高速化を目的として、従来は光強度変調のみが施されていた信号光にさらに位相変調を施す空間直交振幅変調について研究を進めた。より簡易・小型な機構・装置による空間直交振幅変調信号光検出法の確立を目指し、主に、光波の干渉を用いない複素振幅分布計測手法である強度輸送方程式(TIE)法を、ホログラム記録媒体から再生された信号光の検出復調法として採用した。信号光検出精度を向上するための位相変調法や検出位相に重畳するノイズの除去法などを新たに考案し、これらの有用性を示した。さらに、従来は複数回の撮像を必要とするTIE法を一回の撮像で実現する手法について検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究開始時点において、記録容量・転送レート向上を目的とした空間直交振幅変調の重要性は認識され始め様々な研究機関において研究が開始されていたが、その実現において重要な要素技術である信号光の非干渉検出や単一撮像による検出に関する重要性はまだ十分には認識されていなかった。本研究課題において、特に強度輸送方程式法を利用した空間直交振幅変調信号光の非干渉計測技術の高精度化に成功したことには学術的に重要な意義がある。

研究成果の概要(英文)：To increase the capacity and transfer rate of holographic data storage, we investigated the spatial quadrature amplitude modulation in which phase modulation is further applied to signal beam in addition to the intensity modulation. Aiming to establish a method to detect the spatial quadrature amplitude modulated signal beam using a simpler and smaller mechanism / device, the transport of intensity equation (TIE) method was employed as a measurement method for the complex amplitude of the signal beam. We have newly proposed a phase modulation method for improving the signal beam detection accuracy and a noise removal method where the noise is typically superimposed on the detection phase by the TIE method. We also demonstrated their usefulness by experiments. Furthermore, we investigated a method to realize the TIE method, which conventionally required multiple imaging, with a single imaging.

研究分野：応用光学

キーワード：ホログラフィックデータストレージ 空間直交振幅変調

### 1. 研究開始当初の背景

近年のデータ量の爆発的増大は留まるところを知らず、2020年には2010年の50倍の40Zバイトにもなるとの予測がある。その一方で、これら保存データの80%はその後アクセスされないコールドデータとも言われ、データ保存にエネルギーを消費しない光メモリがこのコールドデータ保存用途において注目を集めている。データのアーカイブには従来磁気テープやハードディスクが使用されてきた中、近年はBlu-ray Discベースのデータアーカイバーなどが製品化されその重要性が認識され始めている。このような背景において、Blu-ray Discを超える光ディスクの更なる高速・大容量化に最も適した技術として、ホログラム技術を光メモリに応用するホログラフィックデータストレージ(HDS)が期待され、その実現を目指し精力的に研究開発が進められている。このHDSでは、二次元バーコード様に空間的に光強度変調されたデジタルデータのホログラムを記録材料の同一箇所にも多重記録し、更にこの領域を多数形成することで超大容量記録が可能となる。主にフォトポリマ材料における光重合による屈折率変化をホログラム記録に利用し、長寿命でデータの改ざんや誤消去・書換えの恐れが無い光メディアとして、様々なデータのアーカイブ保存に優れた性能を発揮することが期待されている。

一方で、今後益々増え続けるデータのアーカイブにも対応するためには、HDSの更なる大容量化と高転送速度化を実現すべく研究開発を進展させることが必要不可欠である。大容量化の方法として、従来明暗二値で強度変調されていたデータページ(1bit/pixel)を、より多諧調に強度変調しピクセルあたりの情報量を増大する方法がある。更に空間直交振幅変調(Spatial Quadrature Amplitude Modulation: SQAM)と呼ばれる、多値二次元光強度変調と多値二次元光位相変調を組み合わせる信号光変調法を用いることで一シンボルあたりのデータ量を更に増加し大容量・高転送速度を達成する試みも広く研究され始めている。

### 2. 研究の目的

空間直交振幅変調方式を用いたHDSにおいてデータを再生する際には、光波の強度と位相の両方、つまり複素振幅を検出する必要がある。このため、現状では再生信号光と計測用参照光を用いた干渉計測を利用する場合が多い。具体的には記録データの再生時に複素振幅(振幅及び位相)の計測対象である再生信号光と同時に計測用参照光も撮像素子へ同軸照射し、計測用参照光の位相を一定時間ごとにシフトさせながら複数の干渉縞画像の撮像を行い(通常4枚のマルチショット撮像)、再生光の複素振幅を得るものである。これをそのままHDSシステムに導入すると、転送速度の大幅な低下や振動耐性・複素振幅検出精度の劣化を引き起こし大きな問題となる。記録再生用のみならず再生専用光学系も複雑化・大型化し、実用化に際し大きな問題となりうる。本研究課題では、より簡易・小型・単純な機構・装置による空間直交振幅変調信号光の検出を実現すべく、様々な要素課題について検討を行う。最終的には単一撮像による空間直交振幅変調信号光の検出復調、更には光波の干渉に拠らない検出復調までも実現することを目的とする。

### 3. 研究の方法

図1にSQAMを用いたHDSの概念図を示す。SQAMでは信号光の強度分布と位相分布の両方が、ページデータ内に二次元配列された各シンボル位置で多値変調される。SQAM信号光の生成法もSQAMの実現において重要な検討課題であり、強度変调用SLMと位相変调用SLMの直列配置、一台の強度変调用SLMによる計算機合成ホログラム、二台の位相変调用SLMの並列配置等、多様な方法が提案されている。このSQAM信号光と参照光をフォトポリマ等の記録材料中で重ね合わせホログラム記録を行う。図1において記録されたホログラムへ参照光のみを照射すると参照光がホログラムにより回折され、SQAM信号光が再生される。この信号光は撮像素子で取得されるが、通常の撮像素子は光強度分布のみが取得可能でありSQAM信号光

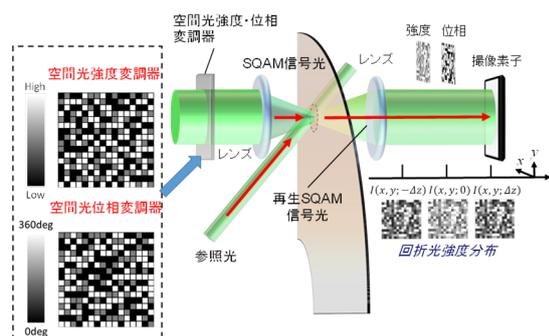


図1 空間直交振幅変調を用いたHDSの概念図。

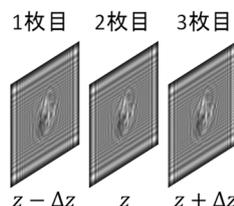


図2 TIE法において取得する三枚の光波回折像の概念図。

の複素振幅を検出することはできない。そこで我々は SQAM 信号光の複素振幅の取得に TIE 法を利用することを提案し検討している。TIE は次の式で表される。

$$\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\partial}{\partial z} I(x, y; 0) = -\nabla_{\perp} \cdot I(x, y; 0) \nabla_{\perp} \phi(x, y; 0) \quad (1)$$

ただし、 $I(x, y; 0)$  と  $\phi(x, y; 0)$  は  $z = 0$  における光波の強度分布および位相分布であり、 $\nabla_{\perp} = (\partial/\partial x)\hat{x} + (\partial/\partial y)\hat{y}$  は伝搬方向に垂直な面における 2 次元の微分演算子である。この式は、光波伝搬における光強度と位相の関係を示しており、これを用いることで光強度計測のみから光波の位相分布を求めることが可能となる。グリーン関数を利用した解法や有限差分法による数値解法等いくつかの解法が提案されているが、我々はフーリエ変換を利用し(1)式を変形した次の式により信号光位相を算出している。

$$\phi(x, y; 0) = -kF^{-1} \left[ q_{\perp}^{-2} F \left[ \nabla_{\perp} \cdot I(x, y; 0)^{-1} \nabla_{\perp} F^{-1} \left[ q_{\perp}^{-2} F \left[ \frac{\partial I(x, y; 0)}{\partial z} \right] \right] \right] \right] \quad (2)$$

ただし、 $F$  と  $F^{-1}$ 、 $q_x$  および  $q_y$  はそれぞれフーリエ変換と逆変換、 $x$  方向および  $y$  方向の空間角周波数を表しており、 $q_{\perp}^2 = q_x^2 + q_y^2$  である。この式中の  $\partial I(x, y; 0)/\partial z$  は、例えば図 2 に示すように、 $z = \pm\Delta z$  における強度分布を計測し、これらを用いた数値微分  $\{I(x, y; \Delta z) - I(x, y; -\Delta z)\}/(2\Delta z)$  により近似できる。以上より、 $z = -\Delta z, 0, \Delta z$  における 3 枚の信号光強度分布を撮像し(2)式を利用することで、信号光位相分布を干渉計測に抛らずに求めることが出来る。2 枚の信号光強度分布を用い前進差分法により微分値を近似し撮像回数を低減したり、さらに光学系にも工夫を施して一回の撮像で複素振幅検出を実現する試みもある。以上の方法の実現可能性や有用性が本研究課題で明らかにされた。以下、「4. 研究成果」欄にて説明する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 高精度な信号光検出を可能とする信号光位相変調法についての検討

SQAM 信号光の複素振幅分布を TIE 法により検出する場合について数値シミュレーションを行った。ここで、信号光中の各シンボル位置において位相は 4 値に、強度は振幅比が 2:1 の 2 値にランダム変調されている。また、 $\Delta z = 1\text{mm}$ 、波長  $\lambda = 532\text{nm}$  を仮定した。図 3(a) のように離散的に位相変調された信号光を TIE 法により検出する場合、検出位相分布は変調位相に対し大きく歪んでいることが図 3(b) より見て取れる。一方で、図 3(c) では信号光位相が空間的に正弦波型に変調されており、隣接するシンボルの位相は  $0^\circ$  で連続して接続されている。この時の TIE 法による検出位相が図 3(d) であり検出位相は変調位相と近い分布を示していることが分かる。図 3(e) に図 3(a)~(d) の変調位相および検出位相において、SQAM 変調領域のシンボル上に実線で示した位置における位相値を示す。この図では正弦波型の変調位相と検出位相は重なっており、連続的位相変調を採用することで、TIE 法により SQAM 信号光の変調位相を高精度に検出できることが明らかとなった。

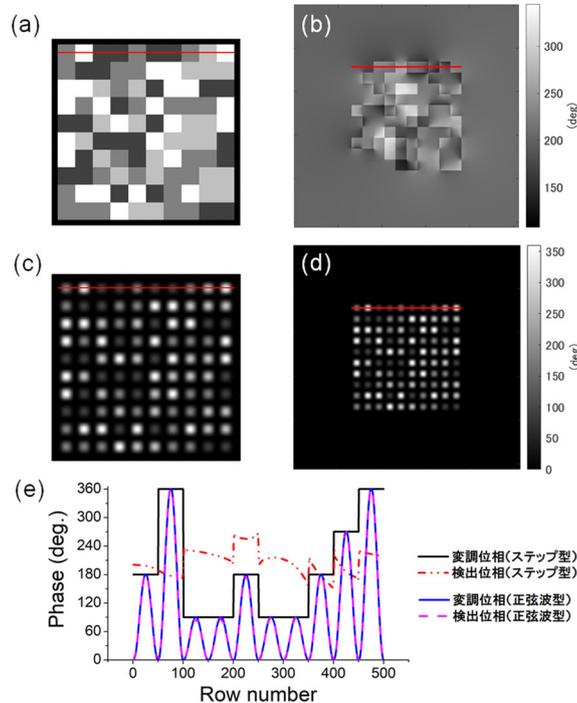


図 3 SQAM 信号光の TIE 法による検出シミュレーション結果. (a) ステップ型変調位相分布. (b) TIE 法により検出されたステップ型変調位相分布. (c) 正弦波型変調位相分布. (d) TIE 法により検出された正弦波型変調位相分布. (e) (a)~(d) の変調位相および検出位相上に示された実線上の位相.

##### (2) 強度輸送方程式法により検出した位相分布に現れる霧状のノイズの推定法および除去法の検討

TIE の計算に用いる信号光の強度分布画像をカメラにより取得する場合、散乱光・迷光やカメラにお

けるノイズが信号光強度分布に重畳し、TIE法による検出位相にはこのノイズに起因する靄状のノイズがしばしば発生する。これが検出位相の精度劣化に及ぼす影響は大きく、本研究課題ではこのノイズを推定しさらに除去する技術を提案しその有用性を明らかにした。以下、信号光強度分布に対し平均 0 で標準偏差がそのピクセルにおける強度値の 3% のガウシアンノイズを加えシミュレーションを行う。

図 4(a) は TIE 法に用いる 3 枚の信号光強度分布画像の各ピクセルに独立に上記ノイズが重畳された場合に、TIE 法により検出された SQAM 信号光の位相分布である。靄状のノイズが変調位相分布を覆い、検出位相精度に悪影響を与えていることが分かる。このノイズは、その発生原理上、SQAM 変調位相と比較して空間的に緩やかに変化するという特徴がある。また、特に強度画像に重畳するノイズが比較的小さな場合には、TIE 法により得られる位相分布はあたかも SQAM 変調位相と靄状ノイズの和のように近似的に振る舞う。ところで、信号光位相変調法として連続的位相変調を採用する場合、隣接するシンボルの境界における信号光変調位相は前述のように  $0^\circ$  としている。これはシンボル境界部の検出位相はノイズによる寄与のみであることを意味しており (図 4(b) 右図)、シンボル内領域ではシンボル境界位相を線形に接続し補間することで靄状ノイズを推定できると考えられる。TIE 法により得られた位相分布である図 4(a) からこの方法により推定された靄状の位相を減算することで、図 4(c) のように SQAM 信号光位相分布を回復することが出来る。図 4(d) のように各シンボルの複素振幅をコンスタレーションダイアグラムにプロットすると、空間直交振幅変調されたシンボル群を分離可能なことが分かる。

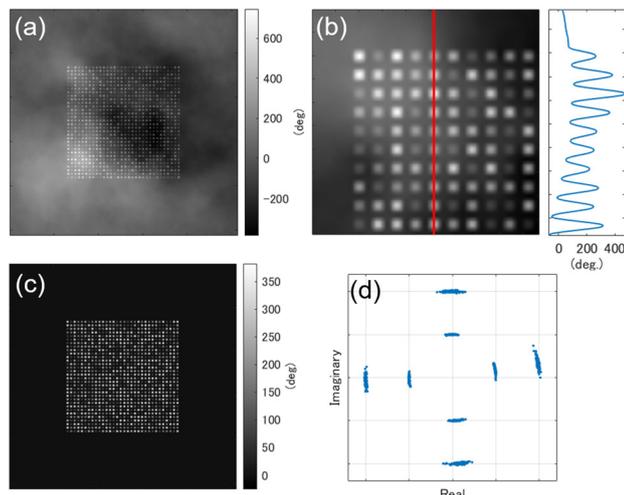


図 4 TIE 法に用いる SQAM 信号光強度分布に 3% のガウシアンノイズを重畳した場合のシミュレーション結果. (a) TIE 法による検出位相分布. (b) (a) の SQAM 変調領域左上部の拡大図と、実線で示す左から 5 番目のシンボル列中心部の位相分布. (c) 提案手法によりノイズが除去された位相分布. (d) コンスタレーションダイアグラム.

以上、本研究課題では連続的位相変調と空間線形補間による靄状ノイズの除去技術により、TIE 法を用いて SQAM 信号光を高精度に検出できることを明らかにした。

### (3) 単一撮像による空間直交振幅変調信号光の検出

単一撮像による空間直交振幅変調信号光の検出法についてもシミュレーションによる検討を行った。図 5(a) には偏光子アレイ付きカメラを用いたシングルショット TIE 法の概念図を示す。直交する偏光成分が異なる光路長を伝搬するような光学配置を採用し、この偏光子アレイ付きカメラにより得られた強度分布を、画素の補間を行い 2 枚の光強度分布へ再構成することで TIE 法に利用することができる。図 5(b) のコンスタレーションダイアグラムより、3 枚の回折強度分布を利用する場合と比較し位相検出精度は若干劣化するものの、SQAM シンボル群を分離識別できていることが分かる。

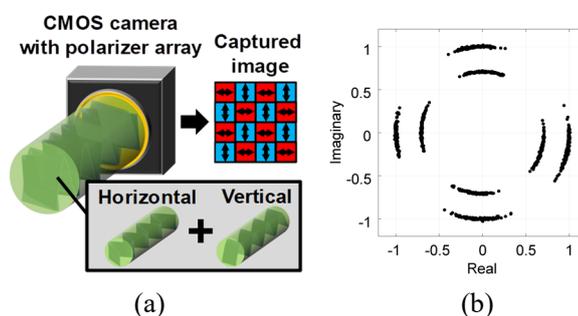


図 5 単一撮像による空間直交振幅変調信号光の検出. (a) 偏光子アレイ付きカメラによるシングルショット TIE 法 (b) コンスタレーションダイアグラム.

### (4) 実験による提案技術の実証

フォトポリマ材料中にホログラム記録し再生された SQAM 信号光が TIE 法により検出可能であることを実験により確認した。光源として波長 532nm の半導体励起固体レーザを用い、ホログラム材料には厚さ 400 $\mu\text{m}$  のフォトポリマを使用した。信号光の位相変調には LCOS-SLM を用いた。本実験では信号光強度分布は一樣とした。SQAM 信号光は縦 15 シンボル横 15 シンボル、計 225 シンボルの 2 次元パターンで構成され、各シンボルのサイズは SLM 面において 320 $\mu\text{m}$ ×320 $\mu\text{m}$ とした。図 6(a)に正弦波型位相変調による 4 値変調位相分布を示す。ホログラム記録後に参照光照射により再生された SQAM 信号光をステップングモータ上に

設置されたカメラにより撮像した。このカメラで  $z = -5, 0, 5\text{mm}$  の光軸方向位置における 3 枚の SQAM 信号光の強度分布を撮像し TIE の計算に用いた。図 6(b)の検出位相から空間線形補間法を用いて霽状ノイズを除去すると図 6(c)の位相分布が得られ、これをコンスタレーションダイアグラムにプロットすると図 6(d)が得られた。図 6(c)では霽状ノイズが取り除かれた位相分を視認でき、また図 4(d)ではシンボル群が分離識別可能であることが分かる。以上より、連続的位相変調および空間線形補間法による霽状ノイズ推定および除去を行うことで、SQAM 信号光の複素振幅分布を TIE 法によって高精度に検出できることが実験により確認された。

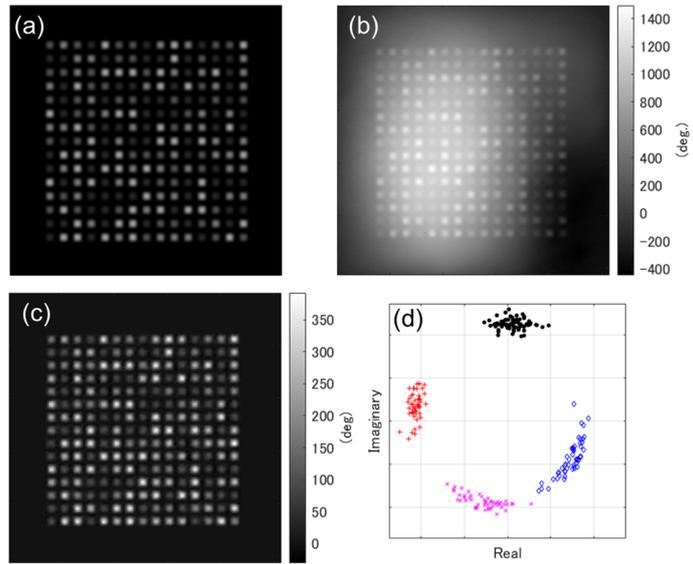


図 6 フォトポリマ中にホログラム記録し再生された SQAM 信号光複素振幅分布の TIE 法による検出結果。(a) 変調位相分布. (b) TIE 法により検出された位相分布. (c) 霽状ノイズが除去された信号光位相分布. (d) コンスタレーションダイアグラム.

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 1件）

1. 著者名 Masatoshi Bunsen, Shosei Tateyama	4. 巻 27
2. 論文標題 Detection method for the complex amplitude of a signal beam with intensity and phase modulation using the transport of intensity equation for holographic data storage	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 24029 ~ 24042
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.27.024029	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 3件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 田代和也、文仙正俊
2. 発表標題 偏光依存光路長制御を用いたシングルショット強度輸送方程式法による空間直行振幅変調信号光検出
3. 学会等名 2021年第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 角田総一郎、文仙正俊
2. 発表標題 偏光子アレイ付きカメラを用いた空間直交振幅変調信号光の非干渉シングルショット検出の検討
3. 学会等名 2019年第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Soichiro Sumida, Masatoshi Bunsen
2. 発表標題 Numerical investigation on non-interferometric single-shot detection of SQAM signal beam with pixelated polarization camera
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2019 (ISOM'19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 文仙正俊
2. 発表標題 空間直交振幅変調を用いたホログラフィックメモリ
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第40回年次大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 角田総一郎、文仙正俊
2. 発表標題 強度輸送方程式法による空間直交振幅変調信号光のシングルショット検出に向けた基礎実験
3. 学会等名 映像情報メディア学会マルチメディアストレージ研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masatoshi Bunsen, Shosei Tateyama, Soichiro Sumida
2. 発表標題 Detection Method of Complex Amplitude of Signal Beam for Intensity- and Phase-modulated Holographic Memory
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2018（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shosei Tateyama, Soichiro Sumida, and Masatoshi Bunsen
2. 発表標題 Phase detection of SQAM signal beam with sinusoidal phase modulation by transport of intensity equation
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 角田総一郎, 文仙正俊
2. 発表標題 固定回路を用いた強度輸送方程式法による空間直交振幅変調信号光復調の検討
3. 学会等名 平成30年度応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 文仙正俊, 立山翔生
2. 発表標題 ホログラフィックメモリにおける空間直交振幅変調信号光の非干渉型検出法に関する検討
3. 学会等名 電子情報通信学会磁気記録・情報ストレージ研究会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shosei Tateyama, Kazutaka Kanno, Masatoshi Bunsen
2. 発表標題 Detection of Spatially Quadrature Amplitude Modulated Signal with Multilevel Intensity and Phase Modulation by Transport of Intensity Equation Method
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2017(国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 立山翔生, 菅野円隆, 文仙正俊
2. 発表標題 強度及び位相に多値変調を施した信号光の強度輸送方程式による検出
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------