

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04011

研究課題名(和文) 波長キャリアと空間キャリアの融合によるチャンネルド偏光計測法の新展開

研究課題名(英文) Development on channeled polarimetry utilizing spectral and spatial carries

研究代表者

岡 和彦 (OKA, KAZUHIKO)

弘前大学・理工学研究科・教授

研究者番号：00194324

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,900,000円

研究成果の概要(和文)：チャンネルド偏光計測法は、偏光状態の波長ないし空間分布を、波長キャリアないし空間キャリアを利用して測定する方法である。本研究の目的は、この波長ないし空間キャリアを柔軟に活用する新たな偏光計測・制御法を開発することであった。第1の成果は、この原理に基づくハイパー分光ミューラー行列偏光計の開発である。第2に、高次移相子とチャープパルスを用いた偏光およびリング状光格子の超高速回転法も開発した。

研究成果の概要(英文)：Channeled polarimetry is the method for measuring spectrally- or spatially-resolved polarization-distribution utilizing spectral or spatial carriers. This project aimed to develop new types of channeled polarization measurement and control techniques based on novel and flexible use of spectral and/or spatial carriers. We developed hyperspectroscopic Mueller-matrix polarimeters using both spatial and spectral carriers. In addition, ultrafast rotations of polarization and ring-shaped optical lattice were realized by use of a high-order retarder and a chirped pulse.

研究分野：光波センシング・応用光学

キーワード：チャンネルド偏光計測 ハイパー分光計測 ミューラー行列計測 分光偏光計測 撮像偏光計測 偏光制御

1. 研究開始当初の背景

近年、半導体や光学機器の製造現場からバイオテクノロジー・ナノテクノロジー・リモートセンシング・コンピュータビジョンに至るまで、幅広い分野で偏光計測が利用されるようになった。これに伴い、偏光計測自体の性能や機能に、多種多様な要求がなされるようになった。これらの要求を、旧来からの代表的な偏光計測法である回転検光子/補償子法や偏光変調法などだけではすべてを満たすことは困難である。そこで最近になって、新しい原理に基づく偏光計測法がいくつか提案されてきた。その一つにチャンネルド偏光計測法がある。

チャンネルド偏光計測法とは、被測定光の偏光状態の情報が変調された擬似正弦的なキャリア成分を分光器やカメラなどから得られる光強度分布の中に発生させ、そのキャリア成分の振幅や位相から被測定光の偏光状態の波長分布や空間二次元分布を求める計測法である。このタイプの偏光計の基本例として、我々が先に発表した分光偏光計測のためのチャンネルド偏光計の光学系を図1に示す。この系では、従来法における偏光変調素子の代わりに、2つの高次移相子を用いている。高次移相子の性質は、波長に強く依存するため、分光器での波長走査と同時に移相子の特性の(等価的な)変調も行われる。このため偏光変調素子を陽に用いなくても、分光偏光計測が可能となる。したがって、偏光変調素子に起因する様々な欠点が無い。また、光の偏光状態についてのすべてのパラメータの波長分布が同時かつ独立に決定できる。すなわち偏光の波長分布のスナップショット(ワンショット)計測が可能となる。一方、撮像偏光計測では、複屈折プリズムやサバル板を用いて、分光偏光計測と同様の原理を2次元空間(画像)で実現している。

この計測法により、従来法では不可能であった様々なタイプの偏光計測器を次々と実現できるようになった。我々はこれまでに、上記の特長を生かして、鉛筆サイズの超小型分光偏光計、応答時間20msの高速分光エリプソメトリ、眼底観測のための撮像偏光計などを開発してきた。

2. 研究の目的

我々は上記研究の過程で、チャンネルド偏光計測の基本原理は、単なる既存の偏光計の置き

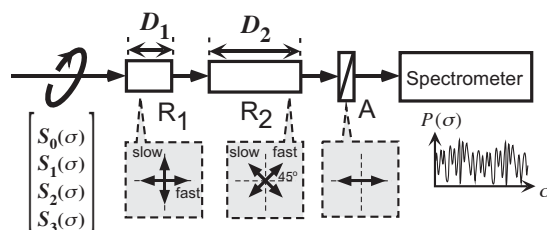


図1 分光偏光計測用チャンネルド偏光計

換えだけでなく、もっと幅広い光計測・制御用途に利用し得ることに気がついた。もし、高次移相子などの特殊な偏光光学系によって生成された波長キャリアないし空間キャリアを柔軟に活用することができれば、新たな光計測・制御法が実現できる。そこで本研究では、このチャンネルド偏光計測法の基本原理そのものに改良を加え、この計測法を大きく発展させることを目的とした。そして、本法が応用可能な光計測・制御分野の拡大を目指した。

3. 研究の方法

本研究では、まず、理論的な考察に基づき、高次移相子などの根本的な性質の解明を図った。そしてそれに基づき、以下に列挙する新しい偏光計測・制御法の開発や性能向上を行った。

- (1) チャンネルド偏光計測原理に基づくハイパー分光ミューラー行列偏光計
- (2) チャンネルド偏光計測法の基本精度の向上
- (3) 高次移相子とチャープパルスを用いた超高速偏光回転制御
- (4) 高次移相子とチャープパルスを用いたリング状光格子の超高速回転制御
- (5) リング状光格子の高速回転制御による光マニピュレーション

なお、各々の具体的な内容と成果は、次節に述べる。

4. 研究成果

- (1) チャンネルド偏光計測原理に基づくハイパー分光ミューラー行列偏光計の開発

本研究の開始より前に我々が開発してきたチャンネルド偏光計は、偏光状態の「波長分布のみ」、もしくは「空間分布(偏光画像)のみ」のいずれかしか測定できなかった。一方で、多くの試料の偏光特性は、波長と位置の両方に依存をしている。このため本研究では、試料の偏光特性を、波長と空間の座標をまとめた2次元ないし3次元での分布を、高効率に測定できる偏光計の実現を目指した。なお、偏光状態ではなく光強度(スペクトル)の波長-空間分布を求めるものはハイパー分光器と呼ばれ、近年盛んに研究がなされている。これに対して、本研究で目的としたのは、チャンネルド偏光計とハイパー分光器の原理を組み合わせることにより、高速測定が可能なハイパー分光「偏光」計を実現することである。

ちなみに、通常のハイパー分光器にたとえば図1のチャンネルド偏光計を単純に組み合わせただけでも、ハイパー分光偏光計を作るとは原理上可能である。しかしながらこのアプローチでは、時間・波長・空間のいずれかの分解能が大幅に犠牲になってしまう。この理由は、2次元 CCD で3次元情報を取得するハイパー分光器では、もともといずれの座標軸も分解能が高くないことにある。もしこれ

に、波長ないし空間キャリアの一方のみを用いる既存のチャンネル偏光計を単純に組み合わせると、そのキャリア方向の座標軸での分解能が大幅に低くなり、実用的ではない。そこで本研究で我々は、この問題の解決策として、波長キャリアと空間キャリアの両方を同時に活用する新たな偏光光学系を導入した。

さらにこの研究に際し我々は、試料の偏光特性を測定する際に、一般的な偏光計測で用いられる4要素のストークスパラメータの測定ではなく、 $4 \times 4 = 16$ 要素のミューラー行列のすべてを求めることを目的とした。ミューラー行列とは、試料の入射光の偏光状態と射出光の偏光状態を結びつける行列である。これまでのチャンネル偏光計測では多くの場合4要素のストークスパラメータのみを求めていたが、これだけでは試料の射出光の偏光特性を調べたのにすぎない。近年の偏光計測の応用分野の急速な拡大に伴って、単なるストークスパラメータの測定だけでなく、線形試料の偏光特性が完全に求められるミューラー行列全体を測定できる方法の重要性も急速に増している。そこで本研究では、ミューラー行列のハイパー分光測定を目的とした。なお、先の研究で我々は、波長分布のみのミューラー行列測定法を開発している。今回の研究はこの原理をハイパー分光計測に拡張したものにもなっている。

本研究では、2種類のハイパー分光偏光計を試作した。第一の構成を図2に示す。波長走査光源から発せられた光は、まず1枚の偏光子Pおよび2枚の高次移相子 $R_1$ と $R_2$ を含む波長キャリアを使う偏光変調器(PSG)を透過し、次に試料に入射する。試料入射光の偏光状態は、高次移相子の強い波長分散により、波長軸に対して細かく変調されている。一方、試料を射出した光は、空間キャリアを使う偏光解析器(PSA)を透過する。このPSAの中のレンズ $L_1$ と $L_2$ によって、試料の射出面は、撮像素子(Image Sensor)に結像される。この際、2枚のレンズの間に置かれている第1のサバル板 $SP_1$ 、広帯域半波長板AHPW、第2のサバル板 $SP_2$ 、および検光子Aによって、結像された像に細かい干渉縞が形成される。ここで、試料から射出した光の4つのストークスパラメータの情報は、干渉縞を空間キャリアとして変調される。一方、試料に入射す

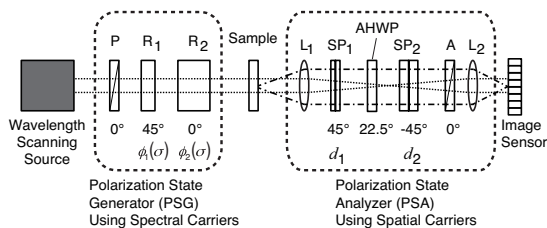
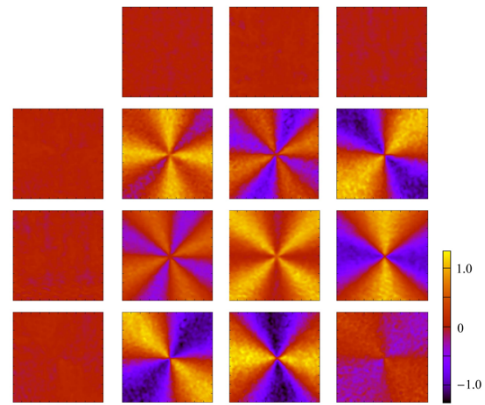
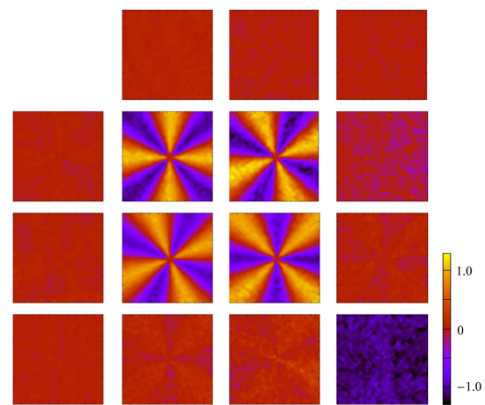


図2 ミューラー行列測定のためのチャンネルドハイパー分光偏光計



(a)  $\lambda = 488 \text{ nm}$



(b)  $\lambda = 633 \text{ nm}$

図3 ミューラー行列の測定結果 (a)と(b)はそれぞれの波長での2次元空間分布

る光のストークスパラメータの情報は、得られる像の波長軸に対する振動(波長キャリア)に変調される。したがって、得られる像を波長1次元と空間2次元の座標軸に沿ってフーリエ解析すれば、試料のミューラー行列の16要素それぞれについて、波長1次元と空間2次元(都合3次元)の分布を得ることができる。試作した実験系での測定結果の例を図3に示す。この実験では軸対称波長板をサンプルとし、測定結果の中から2つの波長の結果のみを載せている。この結果から、波長ごとの空間分布違いが明確にわかる。

試作したもう一方のハイパー分光偏光計は、スナップショット測定を目的としたものである。上述の図2の光学系は波長走査に時間がかかるため、静的な試料しか測定することができない。このため、試料の偏光特性が時間と共に変動する場合には、この原理はそのままでは使えない。そこで我々は、このような用途のために、図2の系の光源を白色光源に、そして撮像素子をイメージ分光器にそれぞれ置き換えた第二の系も試作した。この系を用いると、空間軸は1次元だけにな

るが、スナップショットで試料のミューラー行列の 16 要素の波長と空間の分布を求めることができる。第二の系の有効性は、動的光弾性解析により、実験で確かめられた。

## (2) チャネルド偏光計測法の基本精度の向上

過去に我々は、チャネルド偏光計測法の安定度を大幅に改善する方法として自己較正法を見だし、その有効性を一部のチャネルド分光偏光計で示してきた。ところが、その後研究を進めていくと、たとえ自己較正法をもちいても、ある種のチャネル偏光計では、測定系の不安定さを取り除ききれないことが判明した。そこで本研究において我々は、この不安定さが生ずる状況を徹底的に調べた。そして、最終的にその原因が、光学システム内に存在する環境要因の微妙な不均一さによることを突き止めた。チャネルド偏光計に用いられる特殊偏光素子は環境変動に極めて敏感なため、測定系の中に微妙な不均一さ（勾配）があってもそれが有意な誤算を生じていたのである。この問題を可決するために我々は、チャネルド偏光計測法の基本光学系について、設計／制作方法を変えた。この変更に加え、光学系の細かな改良とノウハウを積み重ねることにより、測定誤差の低減に成功した。

## (3) 高次移相子とチャープパルスを用いた超高速偏光回転制御

本稿の最初に述べたように、チャネルド偏光計測法は、高次移相子を活用する計測法である。高次移相子自体は古くからその存在は広く知られていたが、これまで他の偏光計測・制御などの用途では、その使用が極力避けられてきた。なぜなら高次移相子が持つ強い波長依存性などは、従来の偏光計測法では大きな誤差原因、あるいは強い性能制限の要因になるためである。ところがチャネルド偏光計測法では、この高次移相子の波長依存性をむしろ積極的に利用している。例えば図 1 の系では、高次移相子によって波長軸に対して偏光変調されたスペクトルをマルチチャンネル型分光器で取得することにより、スナップショットでの分光偏光計測を可能としているのである。

ところでこのようなチャネルド偏光計測法の研究を遂行する過程で我々は、高次移相子の強い波長依存性の別の利用法に気がついた。具体的には、マルチチャンネル型分光器の代わりに、超高速な波長走査が可能になれば、また新しい高次移相子の利用法を開拓できる可能性がある。この観点に基づき我々は、以下に述べるチャープパルスを用いた超高速偏光回転制御を提案した。

偏光方位が高速に回転する直線偏光は、偏光計測や光通信などの様々な分野で利用されている。このような光は、一般には機械的に回転する偏光素子や能動的に変調された

電気光学変調素子などを用いて生成されている。ただし電気光学変調素子を用いた場合であっても、回転周期を ns 領域より短くするのは容易ではなかった。そこで我々は、この制約を緩和し、より高速な偏光回転を実現する目的で、チャープパルスと高次移相子を用いる偏光方位の新たな回転法を提案した。この光学系では、まず超短パルス発振器からの光パルスをパルスストレッチャーに透過させる。この射出光は、瞬時周波数が時間に対してほぼ線形に増加ないし減少するチャープパルスとなる。この光を、高次複屈折移相子などで構成される光学系に透過させると、偏光状態を直線に保ったままその方位が超高速で回転する光を発生することができる。この偏光の回転周期は、高次移相子によって直交偏光成分間に付けられる時間差によって決まるので、fs~ps 領域の周期での回転を実現できる。

我々は提案したこの原理に基づく実験系を試作し、4ps の回転周期での超高速偏光回転制御を実証した。

## (4) 高次移相子とチャープパルスを用いたリング状光格子の超高速回転制御

我々は、上述した超高速偏光回転の原理をさらに発展させ、偏光だけでなく光の断面強度分布も超高速で回転できる技術を提案した。

トポロジカルチャージが異なる 2 つの光渦を同軸で重ねると、両者の干渉によりリング状の光格子と呼ばれる回転対称なレーザースポットが生成される。今回我々は、軸対

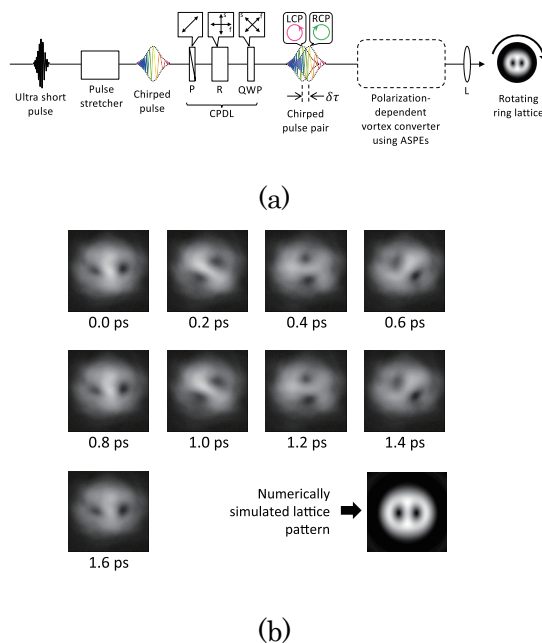


図 4 高次移相子とチャープパルスを用いたリング状光格子の超高速回転制御

(a) 光学系の概要、(b) 実証実験の結果

称偏光素子によるリング状光格子の生成法に、(3)で述べた高次移相子とチャープパルスを用いた超高速偏光回転制御の技術を組み合わせることにより、数 ps の周期で高速回転するリング状光格子を生成する事に成功した。この方法では、軸対称偏光素子に直交偏光を入れるとそれぞれが異なるトポロジカルチャージに変換されることを利用して、リング状光格子を生成する。そして、この直交偏光の間に、高次移相子とチャープパルスを利用して周波数シフトを与えると、最終的に生成されるリング状光格子を超高速に回転させることができる (図 4)。

(5) リング状光格子の高速回転制御による光マニピュレーション

上記(4)にて説明した軸対称偏光素子を利用したリング状光格子の回転制御法は、超高速回転に限らず、様々な回転速度での光マニピュレーションに活用できる汎用的な方法である。我々は、この光学系を実際に光マニピュレーションに利用し、その有効性に関する研究を行った。

対物レンズ等で集光されたレーザービームを用いる光マニピュレーションは、近年顕微鏡下での微小物体の制御法として、生物学やマイクロマシン等の分野で急速に広がりつつある。これに伴い光マニピュレーションには、単なる微小物体の捕捉だけでなく、捕捉された物体に様々な運動をさせることが求められるようになってきた。レーザー光で捕捉された微粒子の回転法としては、スピン角運動量を持つ円偏光を使う方法や軌道角運動量を持つ光渦を使う方法が研究されているが、これらの方法では捕捉された微粒子の回転速度や回転方向の制御性に難があった。これに対して、リング状光格子でその微粒子をトラップさせる方法には、捕捉した微小物体の回転速度や回転方向などを容易に制御できるという特徴がある。

我々は前節で述べた軸対称偏光素子によって生成されたリング状光格子を用いて、顕微鏡下でポリスチレンラテックス粒子の回転制御を行うための実験系を幾種か試作した。なお、この実験系では回転速度を適切に選ぶため、チャープパルスの代わりに電気光学変調器を用いた。軸対称偏光素子を用いるリング状光格子を光マニピュレーションに利用した場合には、過去の他の研究の方法に比べて、トラップされた粒子の位置を極めて安定に制御することができる。このため、単に高速かつ一定速度で回転させることだけでなく、適応的に回転速度を変化させたり、逆回転させたり、さらには回転途中で静止させたりすることも可能である。

なお、この研究と並行して、軸対称偏光素子によって生成された光渦の物理に関する研究も理論と実験の両面から進めた。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 14 件)

- ① M. Suzuki, K. Yamane, M. Sakamoto, K. Oka, Y. Toda, and R. Morita, "Generation of arbitrary axisymmetrically polarized pulses by using the combination of 4-f spatial light modulator and common-path optical system," *Opt. Express*, Vol. 26 (2018) 2584-2598, 査読有, DOI: 10.1364/OE.26.002584.
- ② K. Oka, K. Sayama, and H. Michida, "Hyperspectroscopic Mueller-matrix polarimeter based on channeled polarimetry," *Proc. SPIE*, Vol. 10407 (2017) 104070M, 査読有, DOI: 10.1117/12.12273723.
- ③ K. Yamane, K. Iwasa, K. Kakizawa, K. Oka, Y. Toda, and R. Morita, "Generation of intense ultrafast-rotating ring-shaped optical lattices with programmable control of rotational symmetry," *Proc. SPIE*, Vol. 10252 (2017) 102520F, 査読有, DOI: 10.1117/12.2275015.
- ④ M. Suzuki, K. Yamane, K. Oka, Y. Toda, and R. Morita, "Analysis of the Pancharatnam-Berry phase of vector vortex states using the Hamiltonian based on the Maxwell-Schrödinger equation," *Phys. Rev. A*, Vol. 94 (2016) 043851, 査読有, DOI: 10.1103/PhysRevA.94.043851.
- ⑤ K. Yamane, M. Sakamoto, N. Murakami, R. Morita, and K. Oka, "Picosecond rotation of a ring-shaped optical lattice by using a chirped vortex-pulse pair," *Opt. Lett.*, Vol. 41 (2016) 4597-4600, 査読有, DOI: 10.1364/OL.41.004597.
- ⑥ M. Suzuki, K. Yamane, K. Oka, Y. Toda, and R. Morita, "Full quantitative analysis of arbitrary cylindrically polarized pulses by using extended Stokes parameters," *Scientific Reports*, Vol. 5 (2015) 17797, 査読有, DOI: 10.1038/srep17797.
- ⑦ K. Oka, Y. Haga, and H. Michida, "Snapshot Mueller-matrix spectropolarimeter using spectral and spatial carriers," *Proc. SPIE*, Vol. 9613 (2015) 96130E, 査読有, DOI: 10.1117/12.2189698.
- ⑧ 岡 和彦, "空間キャリアを用いたチャネルド偏光計測法に基づくスナップシヨット偏光分布計測," *光学*, Vol. 44 (2015) 187-192, 解説記事, 査読有.

[学会発表] (計 31 件)

- ① K. Oka, "Channeled Polarimetry --- Snapshot and Compact Method for Polarization Measurement," Taiwan-Japan Bilateral Symposium in Optics for Intelligent Information Science & Technology: Biophotonics & Agricultural Photonics (2018) INVITED.
- ② R. Morita, M. Suzuki, K. Yamane, K. Oka, and Y. Toda, "Generation of arbitrary axisymmetrically polarized pulses with a broadband spectrum," Photonics West (2018) INVITED.
- ③ K. Oka, "Channeled Polarimetry --- Snapshot Method for Spectroscopic or Imaging Polarimetry," The Twelfth Japan-Finland Joint Symposium on Optics in Engineering, (2017), PLENARY.
- ④ 岩佐 康平, 柿澤 康平, 山根 啓作, 岡 和彦, 戸田 泰則, 森田 隆二, "sub-mJ 級超高速回転リング状光格子の発生," 2017 年秋季第 78 回応用物理学会秋季学術講演会 講演予稿集 (2017).
- ⑤ K. Oka, K. Sayama, and H. Michida, "Hyperspectroscopic Mueller-matrix polarimeter based on channeled polarimetry," SPIE Optics+Photonics (2017).
- ⑥ K. Yamane, K. Iwasa, K. Kakizawa, K. Oka, Y. Toda, and R. Morita, "Amplification of ultrafast-rotating ring-shaped optical lattices," Conference on Lasers and Electro-Optics/Europe and the European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC) (2017)
- ⑦ K. Yamane, K. Iwasa, K. Kakizawa, K. Oka, Y. Toda, and R. Morita, "Generation of intense ultrafast-rotating ring-shaped optical lattices with programmable control of rotational symmetry," Optical Manipulation Conference (2017).
- ⑧ 柿澤 康平, 岩佐 康平, 山根 啓作, 岡 和彦, 戸田 泰則, 森田 隆二, "高強度・超高速回転リング状光格子の発生," 第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (2017).
- ⑨ 小原 威吹, 坂本 盛嗣, 山根 啓作, 森田 隆二, 岡 和彦, "軸対称偏光子を用いたトラップ粒子の回転制御 (II)," 第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (2017).
- ⑩ 小原 威吹, 坂本 盛嗣, 山根 啓作, 森田 隆二, 岡 和彦, "光渦の干渉パターンを用いた微小粒子の回転制御," 第 52 回応用物理学会北海道支部/第 13 回日本光学会北海道支部合同学術講演会 (2017).
- ⑪ K. Oka, M. Sakamoto, K. Yamane, N. Murakami, and R. Morita, "Generation of broadband optical vortex and ring-shaped optical-lattice using axially symmetric polarization elements," ISOT2016 International Symposium on Optomechatronic Technologies (2016) INVITED.
- ⑫ 柿澤 康平, 山根 啓作, 岡 和彦, 戸田 泰則, 森田 隆二, "光渦パルスのチャープ特性を利用したプログラマブル超高速回転リング状光格子の生成," 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 (2016).
- ⑬ K. Yamane, K. Kakizawa, K. Oka, Y. Toda, and R. Morita, "Ultrafast rotation of ring-shaped optical lattice in picosecond regime," Europhoton Conference: Solid State, Fibre, and Waveguide Coherent Light Sources (2016)
- ⑭ 永井 美祐, 坂本 盛嗣, 山根 啓作, 森田 隆二, 岡 和彦, "チャープパルスを用いた直線偏光の偏光方位の超高速回転," 第 63 回応用物理学会春季学術講演会 (2016).
- ⑮ 小原 威吹, 坂本 盛嗣, 山根 啓作, 森田 隆二, 岡 和彦, "軸対称偏光子を用いたトラップ粒子の回転制御," 第 63 回応用物理学会春季学術講演会 (2016).
- ⑯ 道田 洋司, 岡 和彦, "イメージング分光器を用いたチャンネルド偏光計測原理に基づくハイパースペクトルミューラー行列偏光計," Optics & Photonics Japan (2015)
- ⑰ 佐山 広太, 岡 和彦, "波長走査光源を用いたチャンネルド偏光計測原理に基づくハイパースペクトルミューラー行列偏光計," Optics & Photonics Japan (2015)
- ⑱ K. Oka, Y. Haga, and H. Michida, "Snapshot Mueller-matrix spectropolarimeter using spectral and spatial carriers," SPIE Optics+Photonics (2015).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岡 和彦 (OKA, Kazuhiko)

弘前大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：00194324

### (2) 研究分担者

山根 啓作 (YAMANE, Keisaku)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：50447075