



## 径偏光レーザービームの偏光分布を 高速で完全定量的に評価する手法を開発

### 研究成果のポイント

- ・ 拡張ストークスパラメータと拡張偏光度の概念を用いた完全定量評価手法を新規に開発。
- ・ 偏光分布取得に回転位相子法を採用し、短時間の全自動測定を実現。
- ・ 不要なレーザービーム状態の混入がおおよそ数%の精度で検出可能。

### 研究成果の概要

径偏光レーザービームと呼ばれる偏光分布<sup>\*1</sup>が放射状に分布する新奇レーザービーム(図1a)の完全定量評価手法を開発しました。本研究グループが独自に提案した拡張ストークスパラメータと拡張偏光度<sup>\*2</sup>の概念を用いることにより、従来の研究では行われてこなかった完全定量評価を実現しています。測定系には偏光解析装置(エリプソメータ)でよく使われる回転位相子法<sup>\*3</sup>を採用することにより、径偏光レーザービームの偏光分布を全自動で取得しています。さらに、専用ソフトウェアを開発したことにより、径偏光レーザービームの偏光分布測定から完全な定量評価計算までが短時間(全体で約1分)で行えます。また、本手法は径偏光レーザービームではない不要なレーザービームの混入を、数%程度の精度で検出することができます。

本研究は、径偏光レーザービームやその生成装置の「質」を数値で直接表すことができることを、実証実験を通じて世界で初めて示しました。これにより、レーザーによる物質加工の精緻化・高度化や、高速・大容量光多重通信の実現などへの貢献ができると期待されます。

本研究の成果は、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業 CREST 研究領域「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」(研究総括:伊藤 正 大阪大学教授)研究課題名:「トポロジカル光波の全角運動量による新規ナノ構造・物性の創出」(研究代表者:尾松孝茂 千葉大学教授)、日本学術振興会科学研究費補助金の支援によって得られたものです。

### 論文発表の概要

研究論文名: Full Quantitative Analysis of Arbitrary Cylindrically Polarized Pulses by Using Extended Stokes Parameters (拡張ストークスパラメータによる任意円筒偏光状態の完全定量評価)

著者: 鈴木 雅人<sup>1</sup>, 山根 啓作<sup>2</sup>, 岡 和彦<sup>2</sup>, 戸田 泰則<sup>2</sup>, 森田 隆二<sup>2</sup>

(1 北海道大学大学院工学院 (日本学術振興会特別研究員 (DC2)), 2 北海道大学大学院工学研究院)

公表雑誌 : Scientific Reports (Nature Publishing Group)

公表日 : 日本時間 (現地時間) 2015 年 12 月 10 日 (木) 午後 7 時 (英国時間 2015 年 12 月 10 日 (木) 午前 10 時) (オンライン公開)

## 研究成果の概要

### (背景)

偏光渦レーザーは従来のレーザーとは異なり、ビーム断面内で非一様な偏光分布を持つ新奇レーザービームです。なかでも、図 1 (a) に示した径偏光レーザービームは、集光特性が従来のレーザービームよりも優れており (図 2), 超解像顕微鏡・物質の微細加工・レーザー切削・フィルム上のナノ粒子の検出など、基礎科学から工業的利用にわたる様々な分野での応用が期待されています。このため、径偏光レーザー装置や径偏光レーザービーム変換素子の開発が数多く行われています。しかしながら、それらの径偏光レーザービームの品質を統一的に比較することができる定量的指標はこれまでほとんど存在しませんでした。そこで、本研究グループは、光学分野で偏光状態を評価するために伝統的に使われている「ストークスパラメータ」と「偏光度」を、径偏光レーザービームに適応できるように拡張した「拡張ストークスパラメータ」と「拡張偏光度」を新たに提唱してきました (Opt. Express 22, 16903-16915 (2014))。

### (研究手法)

本研究では、「拡張ストークスパラメータ」と「拡張偏光度」を基にした径偏光レーザービームの品質を測定し、その完全定量的評価を行いました。測定系には、偏光の変化から薄膜の厚さを計測するエリプソメータがよく利用される、回転位相子法を採用しています (図 3)。位相子を回転すると、CCD カメラで取得される像が変わります。この位相子の角度と像の情報をコンピュータで処理することにより、径偏光レーザービームの偏光分布を取得しています。「拡張ストークスパラメータ」と「拡張偏光度」の値はこの偏光分布からコンピュータで計算されます。

### (研究成果)

実証実験では、本研究室が独自に開発した径偏光レーザービーム生成実験系 (コヒーレント結合系) により生成された径偏光レーザービームの評価を行いました。その結果、生成された径偏光レーザービームは「拡張ストークスパラメータ ( $S_1^E$ )」が 1.00, 「拡張偏光度」が 0.99 と評価されました。理想的な径偏光レーザービームは「拡張ストークスパラメータ ( $S_1^E$ )」が 1.00 であり、「拡張偏光度」も 1.00 であることから、この結果より、本研究グループが生成した径偏光レーザービームは、理想的な径偏光レーザービームとほぼ同様の質の高い偏光分布を有していると言えます。さらに、実際の測定結果と理論的な解析結果とを比較することにより、本手法は径偏光ではない不要なレーザービームの混入を数%程度の精度で検出できることを示しました。

測定系は、コンピュータによる自動制御を実施しているため、測定開始から「拡張ストークスパラメータ」と「拡張偏光度」を求める定量評価計算までが約 1 分で行えます。また、径偏光レーザービーム以外の偏光渦レーザービームの偏光分布も本手法により完全定量評価を行うことができます。論文内では、その他の偏光渦レーザービームについても完全定量評価を行い、径偏光レーザービームの場合と同様の精度・時間で測定が行えることを確認しています。

### (今後への期待)

本研究成果は、径偏光レーザービームの品質を統一的に比較することができる定量的指標 (「拡張ストークスパラメータ」と「拡張偏光度」) が実際に有効であることを示しています。この定量的指

標により、現在数多く存在する径偏光レーザービームの生成装置や変換素子の質を統一的に比較することが可能になり、径偏光レーザービームの物質加工や高速・大容量光多重通信などへの産業応用を加速できると期待されます。また、フィルム上のナノ粒子の検出などに代表される応用は、径偏光レーザービームの偏光状態変化を検出することが重要です。「拡張ストークスパラメータ」と「拡張偏光度」はその変化を定量的に表すことができることから、さらに精密・正確な粒子検出をすることができると考えられます。

## お問い合わせ先

所属・職・氏名：北海道大学大学院工学研究院応用物理学部門 教授 森田 隆二(もりた りゅうじ)

TEL : 011-706-6626 FAX : 011-706-6626 E-mail : morita@eng.hokudai.ac.jp

ホームページ：<http://iphys3-ap.eng.hokudai.ac.jp/>

### 〔用語解説〕

#### 1. 偏光分布

レーザービームは電磁波である。この電磁波が波として振動する向き（特に電磁波のうち電波が波として振動する向き）を示したものが「偏光」もしくは「偏光状態」である。そして、レーザービームの断面内において、偏光がどのように向いているのかを様々な場所で示したものが「偏光分布」である。

#### 2. 拡張ストークスパラメータと拡張偏光度

ストークスパラメータと偏光度は光学において伝統的に使われている偏光状態の定量的指標である。本研究グループでは、それらを径偏光レーザービーム（図 1a）に適應できるように拡張した「拡張ストークスパラメータ」と「拡張偏光度」を新たに提案した。拡張ストークスパラメータは一般的に 3 個のパラメータの組 ( $S_1^E$ ,  $S_2^E$ ,  $S_3^E$ ) で、拡張偏光度は一つのパラメータ ( $P^E$ ) で示されるが、理想的な径偏光レーザービームは  $S_1^E=1$ ,  $S_2^E=0$ ,  $S_3^E=0$ ,  $P^E=1$  で表されるため、最も重要なパラメータは（第一）拡張ストークスパラメータ  $S_1^E$  と拡張偏光度  $P^E$  の二つであると考えられる。

#### 3. 回転位相子法

回転位相子法は、レーザービームの偏光状態を取得するために使われる方法の一つである。図 3 にあるように、位相子（偏光状態を変換する素子）と偏光子（ある方向の偏光状態のみを透過させる素子）のペアの後に、CCD カメラなどのレーザー強度を測ることができる装置を置く。そして、位相子の回転角度を変化させ（他の素子は回転させずに固定する）、回転角度とレーザー強度の組となった情報を複数取得し、コンピュータ処理により偏光状態を算出する。

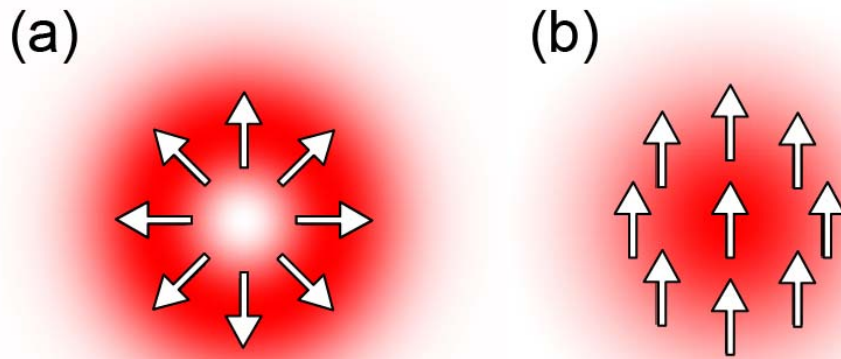
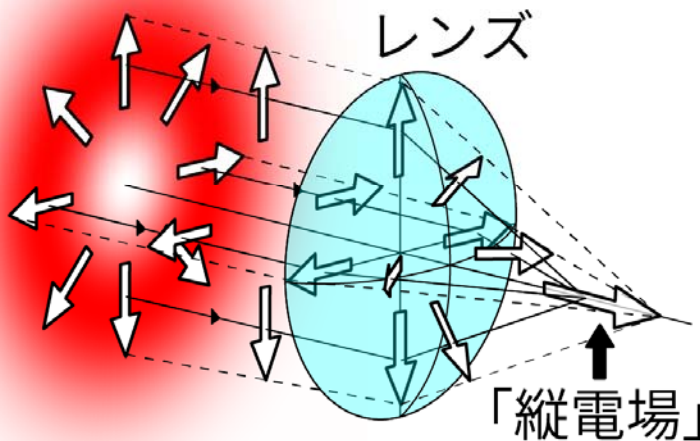


図1 径偏光レーザービームの説明図。(a)は径偏光レーザービームのビーム断面イメージ図を示し、(b)は従来の空間的に一様な直線偏光レーザービームの断面イメージ図を示す。赤色のグラデーションはレーザーの光の強さを示し、矢印はレーザービームの波の振動の向き（偏光）を示す。径偏光レーザービームを評価するには、ビーム断面内のあらゆる位置における矢印の向き（偏光分布）を知る必要がある。

### 立体イメージ



### 側面イメージ

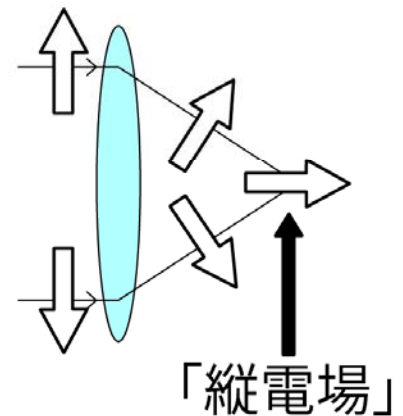


図2 径偏光レーザービームの優れた集光特性。径偏光レーザービームは対物レンズ等で集光することにより、通常のレーザービーム理論では有り得ないとされる「縦電場」と呼ばれるビームの伝播方向に振動する光を集光点に作り出すことができる。この特性を利用した応用が様々な分野で提案され、実証実験が行われている。

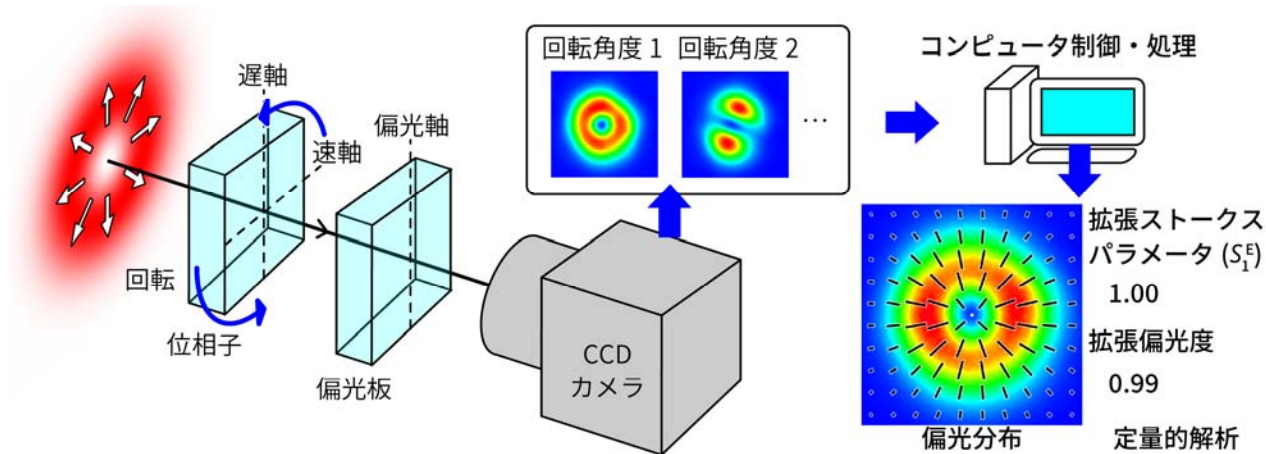


図3 回転位相子法による偏光分布取得法。位相子を回転すると CCD カメラで取得する像が変化する。様々な角度で得られた像をコンピュータで処理することにより、偏光分布を取得することができる。特に、位相子の回転を自動ステージとコンピュータで制御し、偏光分布取得及び完全定量評価を行う専用プログラムを開発したことにより、ワンクリックで全ての測定を自動で行うことができる。