



レーザー光のらせん度をすばやく精密に測定する方法を開発

研究成果のポイント

- ・超広帯域光渦パルス^{*1}の軌道角運動量スペクトル^{*2}測定を秒単位で実現。
- ・1%以下の軌道角運動量成分の混入、軌道角運動量スペクトルの波長依存性を評価可能。
- ・多重光通信^{*3}、精密加工、非線型分光^{*4}などへの応用が期待される。

研究成果の概要

波面がらせんをなす光は「光渦」と呼ばれ、光ピンセット、レーザー加工、光通信、量子情報処理などの応用により注目されています。らせん位相板^{*5}や液晶位相変調器^{*6}を用いると、レーザー光に光渦レーザー光（以下では「光渦」と略す。）に変換することができます。この変換の際、さまざまな原因により、異なるらせん度の成分が混じることがありますが、光通信、量子情報処理^{*7}などの応用にはこのようならせん度の成分（軌道角運動量スペクトル）を精密に測定することが不可欠です。設計通りの光渦がどの程度精度よくできているかを判別する方法は、これまでもありましたが、時間がかかり、また、さまざまな波長成分を含む光渦のらせん度測定には適していませんでした。

北海道大学大学院工学研究院の森田隆二教授、山根啓作研究員（現准教授）、戸田泰則教授らの研究グループは、光渦と通常の平面波との干渉像から、らせん度の成分分布を示す軌道角運動量スペクトルを高速かつ精密に測定する方法を開発し、それを波長が 600–950 nm にわたる超広帯域の超短光渦に適用しました。これにより、波長分解された光渦のらせん度分布を精密に測定することに成功しました。また、本手法を混成タイプ光渦^{*8}にも用い、世界で初めて、異なるらせん度の成分間の位相差^{*9}を測定することにも成功しました。以上の成果により、複数のらせん度が混合された光渦を用いる多重光通信・量子情報処理・レーザー加工などにおいて、すばやく、また精度よくらせん度分布を測定することが可能になり、本手法はこれらの光情報処理・レーザー加工応用の最適設計指針を与える測定法として期待されます。

本研究の成果は、独立行政法人科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 GREST 研究領域「先端光源を駆使した光化学・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 : Frequency-resolved measurement of the orbital angular momentum spectrum of femtosecond ultra-broadband optical-vortex pulses based on field reconstruction (電場再生法によるフェムト秒超広帯域光渦パルス軌道角運動量スペクトルの周波数分解測定)

著者 : Keisaku Yamane^{1,2}(山根 啓作), Zhili Yang³(楊 執理), Yasunori Toda^{1,2}(戸田 泰則), Ryuji Morita^{1,2}(森田 隆二)

(1 北海道大学大学院工学研究院, 2 JST CREST, 3 北海道大学大学院工学院)

公表雑誌 : New Journal of Physics (Deutsche Physikalische Gesellschaft / Institute of Optics)

公表日 : 日本時間 2014 年 5 月 8 日 (木) 午前 1 時 (英国時間 2014 年 5 月 7 日 午後 5 時)

研究成果の概要

(背景)

光の波面がらせんをなす光は「光渦」と呼ばれ、軌道角運動量(物体を公転させるような力に対応し、らせん度により表される)を持つ光として知られています(図1)。光渦のもつ軌道角運動量の力学的性質からは、光ピンセット、レーザー加工といった応用がなされています。また、光の粒子である光子1個のもつ軌道角運動量は $m\hbar$ (\hbar : プランク定数/ 2π , m は整数)と表されます。通常の光は偏光^{*10}による2つの独立な状態しかとれないのに対して、光渦は m の値により無限の独立な状態をとることができます。このような性質は、特に多重光通信(図2)、量子情報処理などに応用できることから注目されています。

らせん位相板や液晶位相変調器を用いると、レーザー光を光渦に変換することができます(図3)。この変換の際、さまざまな原因により、異なるらせん度の成分が混じることがあります。設計通りの光渦がどの程度精度よくできているかを測定する方法は、これまでもありましたが、誤差の影響も受けやすく時間がかかり、また、さまざまな波長成分を含む超広帯域や超短の光渦のらせん度測定には適していませんでした。光通信、量子情報処理などの応用には、このようならせん度の成分(軌道角運動量スペクトル; 図4)を精密に測定することが必要です。

(研究手法)

私たちの研究グループは、フェムト秒^{*11}の超短パルスから、600-950 nmにわたる超広帯域パルスを発生させ、その一部から超短光渦パルスを、また別の一部から干渉参照平面波パルスを生成しました。これら2パルスに関し、ある波長成分のみをとりだし、小さな角度をつけて干渉させると、光渦と平面波とでできる特徴的な干渉像が得られます(図5)。この干渉像を空間フーリエ変換^{*12}し、一つの交流成分のみを取りだし、空間フーリエ逆変換^{*13}を行うと、ある波長における光渦電場の振幅と位相とを求めることができます(電場再生法)。この振幅、位相情報から、光渦にどのようならせん度成分(軌道角運動量成分)が含まれているを示す軌道角運動量スペクトルを求めることができます。私たちは、この手続きを高速化し、ある波長の軌道角運動量スペクトルを秒単位で求めることができました。

(研究成果)

本手法を用いて、波長分解された光渦のらせん度分布を精密に測定し、これまでの軌道角運動量測定では困難であった1%以下のモードの混入も、測定できることを明らかにしました。また、 $m=0$ の

成分の混入が多くなると、光渦の特異点^{*14}が分裂することが知られていますが、そのような場合でも、本手法により再生された位相分布からその分裂をきれいに観測できていることがわかります（図6）。さらに本手法を混成タイプ光渦にも用い、世界で初めて、異なるらせん度の成分（軌道角運動量成分）間の位相差を測定することにも成功しました（図7）。

干渉像をとる際の波長成分を変え測定することにより、広い波長領域（600–950 nm）にわたっての波長分解軌道角運動量スペクトル（らせん度分布）も求めることができ、これにより軌道角運動量スペクトルの波長依存性も定量化することができました（図8）。この結果は、私たちが以前に実証した超広帯域光渦発生法（Opt. Express 17, 14517–14525（2009））が、軌道角運動量分散をほとんど与えない優れた方法であることを示しています。

（今後への期待）

以上の成果により、複数のらせん度が混合された光渦を用いる多重光通信・量子情報処理や、非線型分光、高強度電場と物質との相互作用実験などにおいて、すばやく、また精度よくらせん度分布を測定することが可能になり、本手法はこれら応用の最適設計指針を与える測定法として期待されます。また、特に革新的な光情報処理やレーザー加工技術の開発につながる可能性があります。さらに、特異な振る舞いを示すことで知られている非整数光渦^{*15}に適用すれば、軌道角運動量スペクトル分解を行うことができるとともに、軌道角運動量成分ごとの位相関係も測定できるので、その特異な伝播特性の解明につながります。

本研究の成果は、独立行政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化学・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。

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. 光渦/光渦パルス

通常の光は波面（位相が等しい点がなす曲面）が平面もしくは球面に近いが、波面がらせんになるような光を光渦という。このような光渦をある時間間隔のみ光るようにしたものを光渦パルスという。また、その時間間隔が短くなると、波長成分の広がりが大きくなり、超広帯域光渦パルスとなる。

2. 軌道角運動量/軌道角運動量スペクトル

光は波面に垂直な方向に運動量を持つので、らせん状の波面をもつ光渦は、「光の進行方向を軸とした公転を行わせる力」をもつ。この力に対応するのが軌道角運動量である光子一個の軌道角運動量は $m \hbar$ (\hbar : プランク定数/ 2π , m は整数) で与えられ、無限の種類値を取り得る。軌道角運動量が異なると、一波長中のらせんの巻き数や向きが異なる。したがって、軌道角運動量を測定することは、光のらせん度を測定することに対応する。光をそれぞれの軌道角運動量（らせん度）の成分に分解したときの、それぞれの成分の光強度に対応するのが軌道角運動量スペクトルである。

3. 多重光通信

主に光ファイバー中に異なるモードの光を伝播させることによる光通信の方法。多重化することにより、伝送容量を高くすることができる。波長多重化が一般的であるが、ここでは、軌道角運動量の異なるモードを多重に伝播させる空間多重化を意味している。

4. 非線型分光

光電場の2乗や3乗・・・に依存した相互作用を物質に生じさせ、その物性を測定する手法の一つ。

5. らせん位相板

中心軸のまわりに厚みがらせんに沿って変わる光学素子。中心軸のまわりの回転に対して厚みが $m\lambda$ (λ は光の波長) だけ変化すると、 $m \hbar$ の軌道角運動量を持つ光渦を生成することができる。

6. 液晶位相変調器

電圧を印加すると位相を変化させることができる液晶のピクセルが2次元的に配置した素子。平面波と光渦の干渉パターンをこの液晶位相変調器に描き、そこへ平面波を照射すると、光渦を生成することができる。

7. 量子情報処理

量子力学に基づいて状態が決定する情報の操作のこと。通常の光の場合、偏光（たとえば右回り円偏光、左回り円偏光）により光は2つの独立な量子状態をとる。これに対し、光渦の場合、偏光が同じであっても、軌道角運動量の違いにより、無限個の独立な量子状態を取り得る。

8. 混成タイプ光渦

同程度の強度をもつ複数の軌道角運動量成分が混在したような光渦。たとえば、通常ドーナツ型である光渦の右半分のような光渦をここでは混成タイプ光渦とよぶ。

9. 位相差

光電場は波としても記述できるので、振幅と位相をもつ。振幅の2乗は光の強度に比例する。振幅は光電場の波の山・谷を決める量である。異なる軌道角運動量成分の電場間の位相の差が、ここでいう位相差である。

10. 偏光

真空中や空気中での光は独立な2つの振動方向成分に分解できる。この分解の度合い（振動の様子）表すのが偏光である。2つの独立な成分として右回り円偏光・左回り円偏光や水平偏光・鉛直偏光がとられる。

11. フェムト秒

時間の単位で 10^{-15} 秒が1フェムト秒である。この時間内に光は0.3/1000ミリしか進まない。

12. 空間フーリエ変換

長さに依存する関数を、長さと共に波数の関数に変換する操作。空間的な変化を、振動の波長により分解する操作である。

13. 空間フーリエ逆変換

空間フーリエ変換の逆操作。波数に依存する関数を、波数と共に長さの関数に変換する操作。

14. 特異点

光渦の中心は位相が決定できない特異な点（位相特異点）となる。位相特異点では、光は強度を持たず暗点となる。

15. 非整数光渦

混成タイプ光渦の一種であるが、軌道角運動量の平均をとると、その指数 m が整数ではなく非整数になるような光渦のこと。レーザー加工や光情報処理の応用で注目されている。

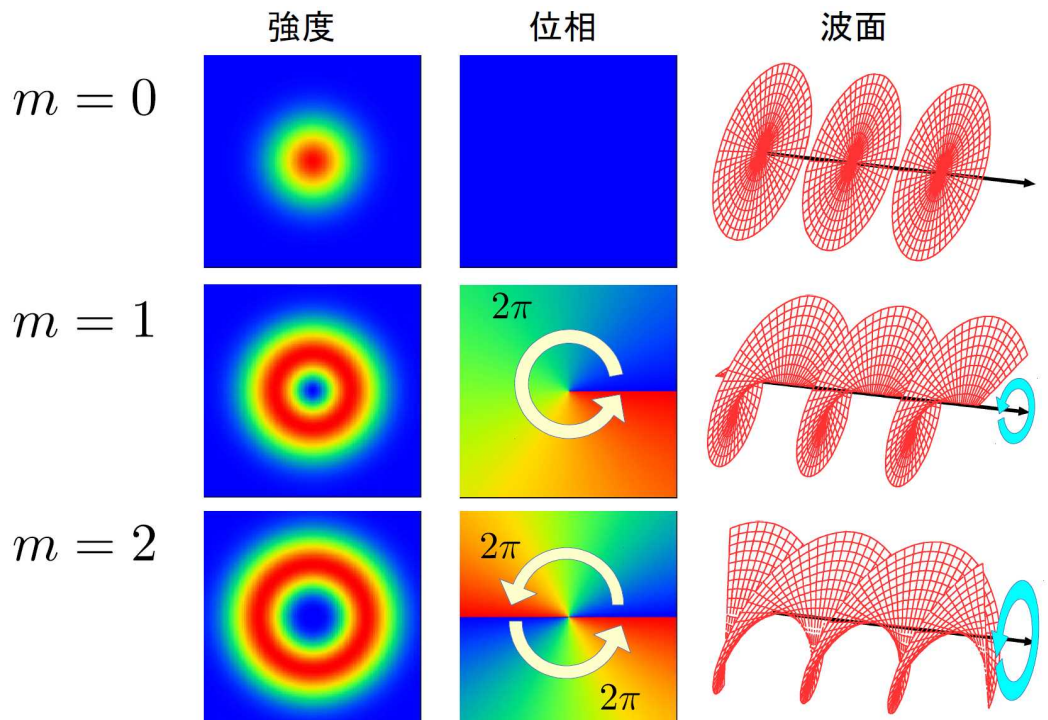


図1 光渦レーザー光の説明図。左から順に軌道角運動量を表す指数 m 、光渦レーザー光（光渦）のビーム断面内強度分布、位相分布、波面（等位相面）と軌道角運動量（円形矢印で表される）。波面のらせん度が違いが軌道角運動量の違いを生じさせる。



図2 光渦多重通信。複数の光渦を重ね合わせるにより、情報を多重化し伝送容量を高める。

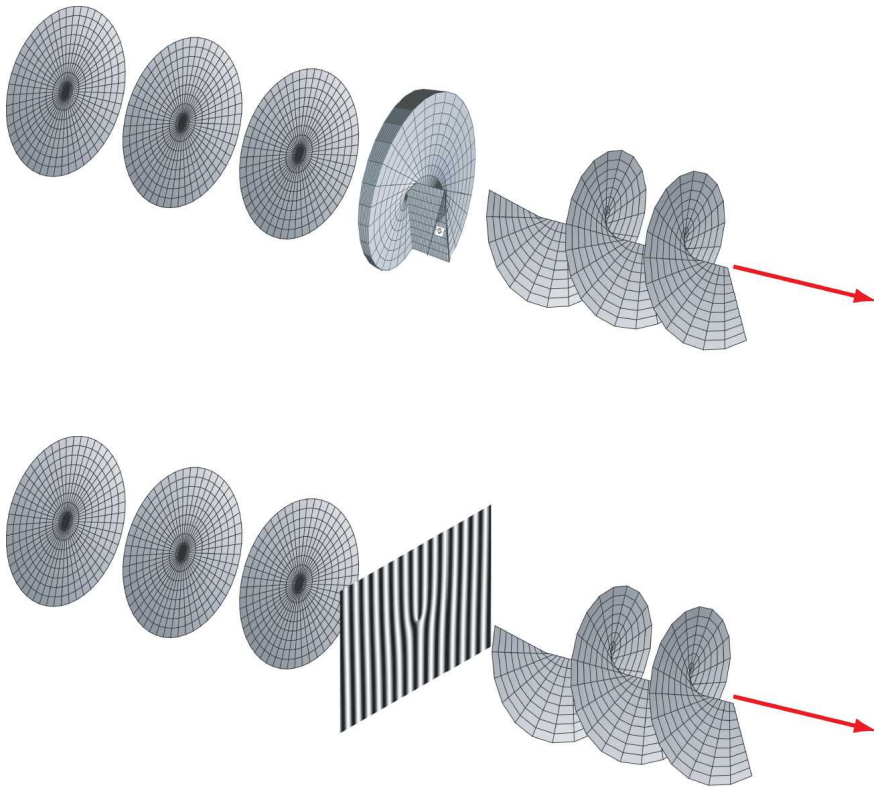


図3 (上図)らせん位相板に平面波レーザー光を入射すると、光渦レーザー光に変換できる。(下図)液晶位相変調器上にホログラム(光渦と平面波との干渉像)を作製し、そこに平面波レーザー光を照射すると光渦レーザー光に変換できる。

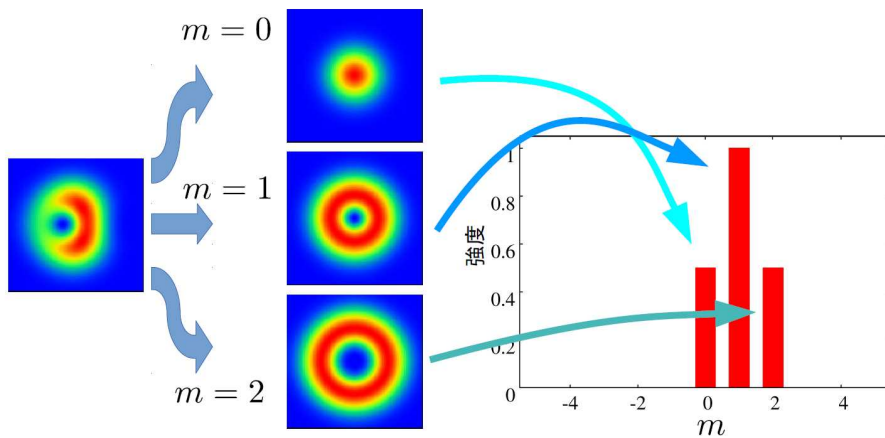


図4 軌道角運動量スペクトルの説明図。重ね合わされた光渦(左)を基本光渦成分に分解し、それぞれの成分の強度をグラフにしたのが、軌道角運動量スペクトルである(ここでは横軸は軌道角運動量を表す指数 m となっている)。(右)らせん度成分の強度分布に対応する。

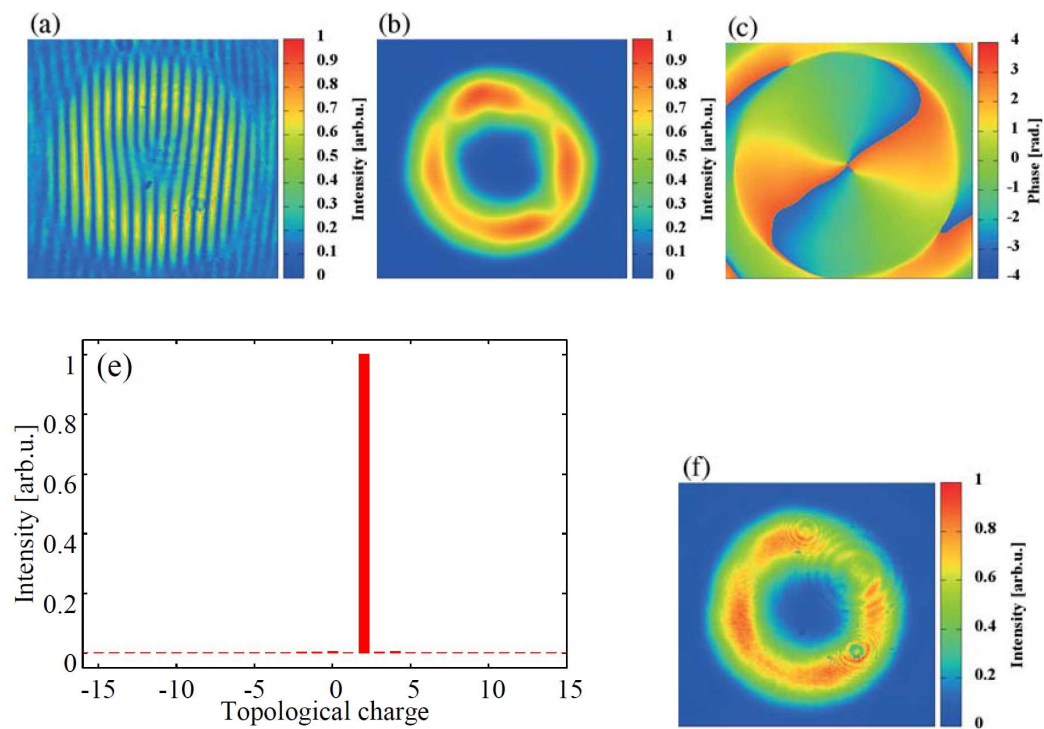


図5 波長 700 nm のにおける (a) 光渦と平面波との干渉像, (b) 測定により再生された光渦強度分布 (ビーム断面図), (c) 測定により再生された光渦の位相, (e) 軌道角運動量スペクトル (らせん度成分の分布), (f) 直接測定した光渦強度分布 (ビーム断面図); 再生結果 (b) は精度よく (f) を再現されていることが分かる。

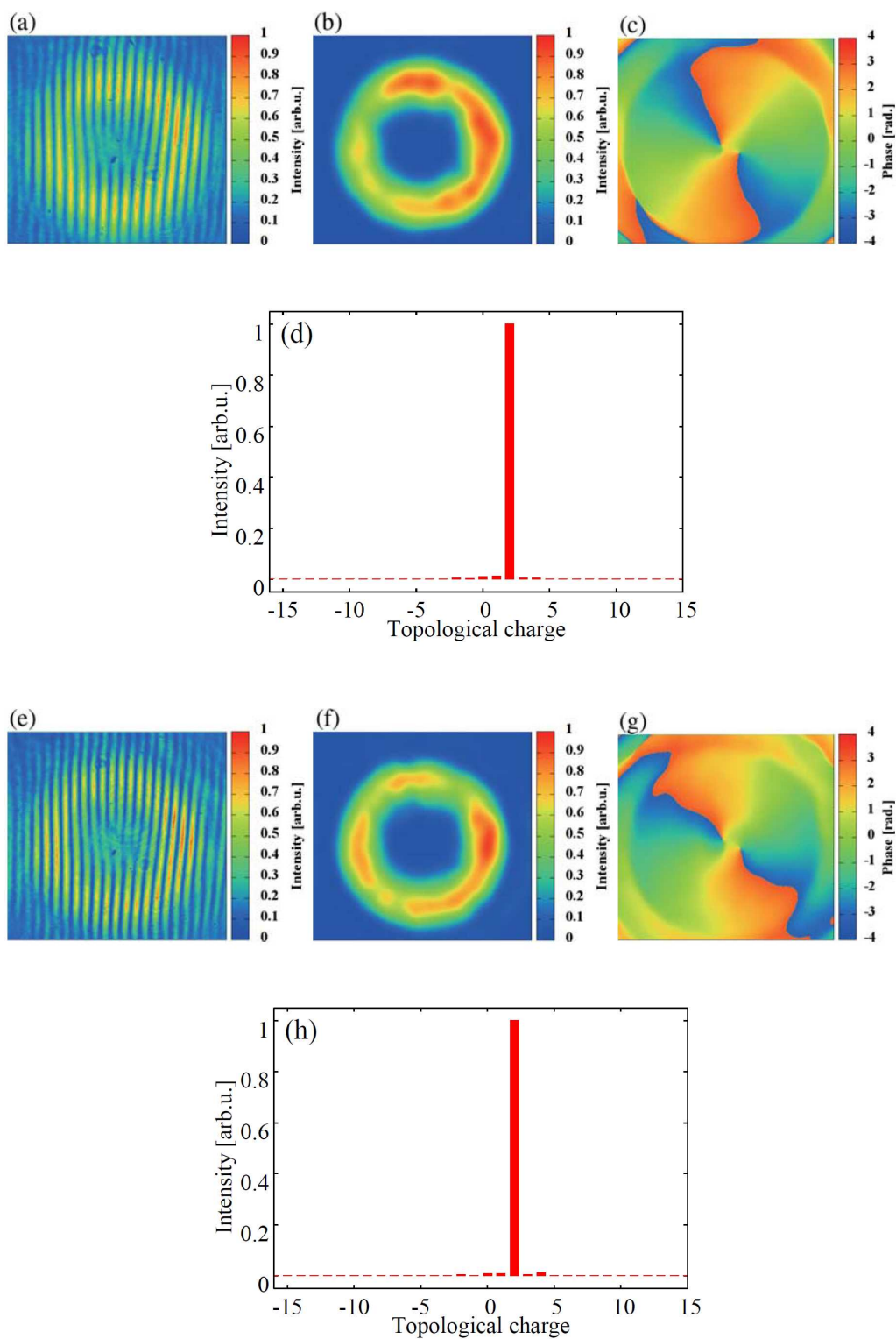


図6 波長 800 nm のおける (a) 光渦と平面波との干渉像, (b) 測定により再生された光渦強度分布 (ビーム断面図), (c) 測定により再生された光渦の位相, (d) 軌道角運動量スペクトル (らせん度成分の分布)。波長 900 nm のおける (e) 光渦と平面波との干渉像, (f) 測定により再生された光渦強度分布 (ビーム断面図), (g) 測定により再生された光渦の位相, (h) 軌道角運動量スペクトル (らせん度成分の分布)。再生された位相分布 (c), (g) を見ると, 光渦の位相特異点の分裂が分かる。

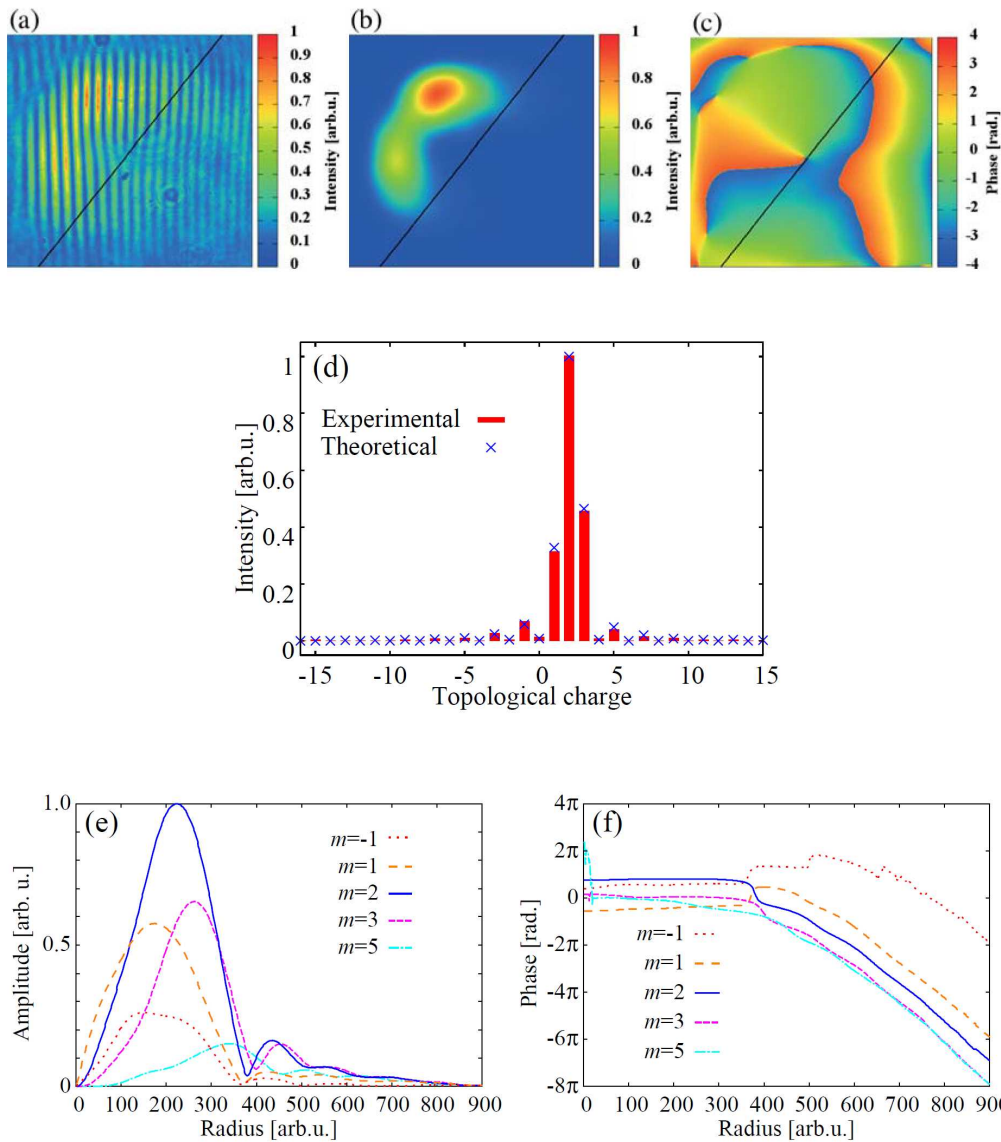


図7 波長 700 nm のにおける (a) 混成光渦と平面波との干渉像, (b) 測定により再生された光渦強度分布 (ビーム断面図), (c) 測定により再生された光渦の位相, (d) 軌道角運動量スペクトル (らせん度成分の分布)。再生された電場の (e) 振幅と (f) 位相。軌道角運動量に分解された成分の位相関係を初めて明らかにした結果である。

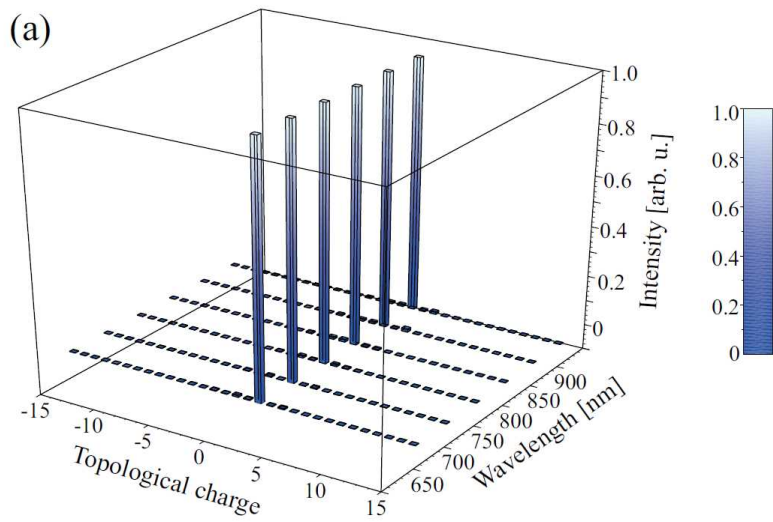


図8 超広帯域光渦パルスから得られた、複数の波長分解された軌道角運動量スペクトル (650–900 nm)。軌道角運動量スペクトルの波長依存性を議論することができる。

※図5～図8は、CC BY ライセンスに帰属します。