

2020年5月7日

光の振動方向によって異なる反射の様子を 世界で初めてスローモーション動画に記録

本学電気電子工学系 粟辻安浩教授，大学院生 佐々木みか，井上智好らの研究グループは，光の振動方向と光の反射率に関する法則に従う，超高速な光の振る舞いのスローモーション動画記録に世界で初めて成功しました。3次元画像技術であるホログラフィー^{*1}を応用した超高速イメージング技術を用いて，異なる物質の境界面で反射する光が，その振動方向ごとに異なる振る舞いを示す様子の記録・観察を達成しました。

この研究成果は，2020年5月6日に，英国Nature Researchが出版する科学誌「Scientific Reports」に掲載されました。

ポイント

- ✓ ブリュースター角^{*2}で入射する直線偏光^{*3}の超高速な振る舞いのスローモーション動画記録に世界で初めて成功した。
- ✓ 3次元画像技術であるホログラフィーを応用した光伝播の動画記録・観察と偏光情報の取得が可能なイメージング技術の新たな可能性を示した。
- ✓ 全反射顕微鏡に新たな機能を付加した超高速全反射動画顕微鏡の創出へ展開することで，生体分子など超高速機能の解明や理解への貢献が期待される。

研究の背景

2018年にノーベル物理学賞を受賞した，極めて短い時間だけ光を照射できる超短パルスレーザー^{*4}は，最先端の情報通信，微細加工，医療など幅広い分野で利用されています。そのような最先端技術のさらなる発展に向け，極めて短い時間で発生する物理現象や光化学反応のメカニズム解明を助ける超高速イメージング技術が求められています。中でも，超短パルスレーザーが出射する光パルスの伝播を画像，特に動画像によりスローモーション観察することは，高性能光ファイバーによる光通信の大容量高速化，パルスレーザーの性質を利用した加工技術の高精度微細化など様々なレーザー利用技術の基盤となり，有益

です。

本学 栗辻安浩教授，大学院博士前期課程 佐々木みか，大学院博士後期課程 井上智好らの研究グループは，3次元画像技術であるホログラフィーと超短パルスレーザーを組み合わせた，光パルスの伝播をスローモーション動画に記録可能な技術に関する研究を行ってきました。また，人の目では判別できない，光がもつ偏光情報も同時に記録する技術を近年開発しました。この技術は，偏光情報の取得のために，1度の記録で4種類の超高速動画画像を同時に記録します。しかしながら，この技術を用いた，偏光の超高速な振る舞いの記録と結果の定量評価は未報告でした。

研究の内容

本研究では，超短光パルスが伝播する様子の動画記録とスローモーション観察に加え，その光の振動方向を可視化できる超高速イメージング技術を用いて，異なる物質の境界面で反射する光が，その振動方向ごとに異なる振る舞いを示す様子を記録しました。記録対象として，空気とガラスの境界面にブリュースター角で入射する直線偏光の光パルスを採用しました。ブリュースター角での偏光の特異な振る舞いは約200年前に発見され，光学に関するほとんどの教科書で紹介されているほど広く知れ渡っていますが，ブリュースター角で入射する光の振る舞いを静止画ではなく動画で記録した例はこれまでにありませんでした。

本研究で用いた技術は，超短光パルスの伝播の様子のスローモーション動画記録と偏光情報の取得が可能です。その特徴は，直線偏光の干渉の性質を利用してホログラムを記録する点です。ホログラフィーにおいて，記録対象の情報を持った物体光と参照光とで偏光方向が同じ場合には再生像が明るくなります。一方，物体光と参照光の偏光方向が直交している場合には再生される像は暗くなります（図1）。ホログラムを空間的に区切り，この干渉の性質を全区画で同時に記録することで，一度の記録で物体光を構成する複数の偏光成分の振る舞いをスローモーション動画として観察できます。

本研究では，光パルスを空気とガラスの境界面にブリュースター角で入射させるために，立体的な光路を構築しました。入射させる光パルスの偏光方向は， p 偏光成分と s 偏光成分の大きさが等しい 45° 直線偏光に調整しました。 s 偏光成分（本研究では 0° 偏光成分）のみが反射光として現れる様子スローモーション動画で観察できました（図2）。

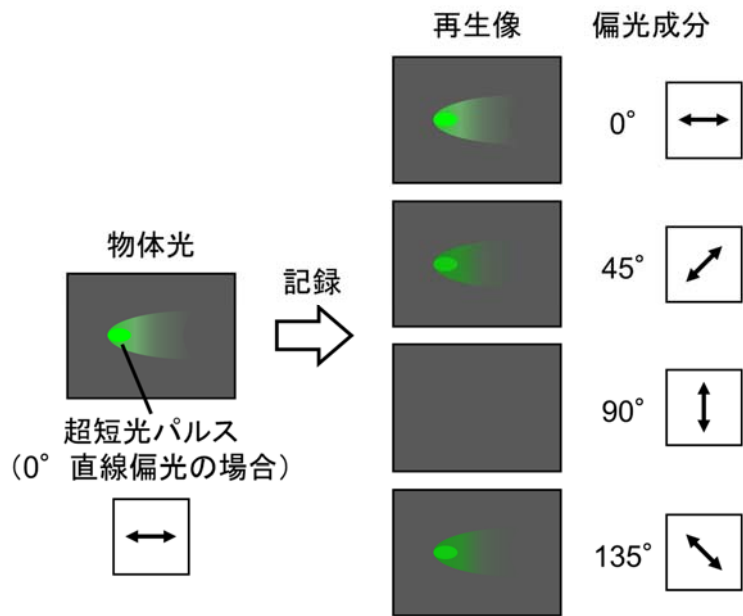
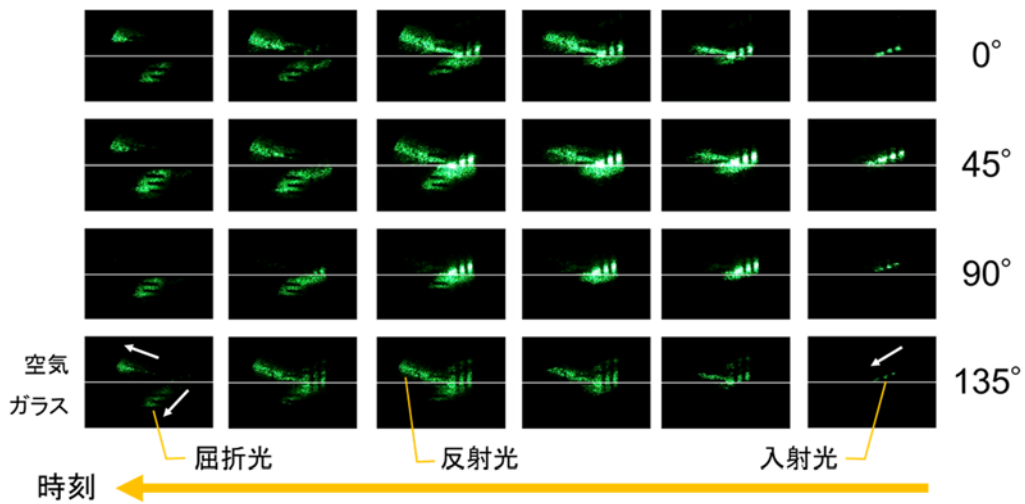


図1 伝播する光パルスの偏光情報を取得する手法の概念図



【図の見方】

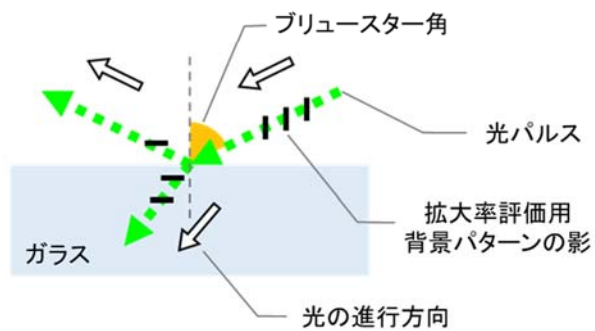


図2 空気とガラスの境界面にプリュースター角で入射する超短光パルスの伝播のスローモーション観察

今後の展開

今後の課題としては、得られる偏光情報の高精度化が挙げられます。これは、高解像度写真乾板を記録材料に用いることにより、再生結果の定量評価の厳密さに限界があることが要因です。今後は記録材料に撮像素子を用いたデジタル記録を目指します。さらに、生命科学で単一分子観察などの超解像観に用いられている全反射顕微鏡に新たな機能を付加した超高速全反射動画顕微鏡への展開により、単一分子の超高速ダイナミックスの新たな機能解明への貢献が期待されます。

用語解説

1. ホログラフィー

光の干渉と回折を利用して、物体からやってくる光のすべての情報を記録・再生できる3次元画像技術です。私たちが物体を見るときに認識している、物体を透過または物体で反射した光を物体光と呼びます。物体光と基準となる光（参照光）を干渉させ、干渉した光の明るさ分布を高解像写真乾板で干渉縞画像として2次元に記録します。干渉縞画像を記録した高解像度写真乾板がホログラムです。記録に用いた参照光と同じ光をホログラムに照射すると物体光が再生され、奥行きを含む物体の3次元像を観察できます。

2. ブリュースター角

ブリュースター角とは、異なる物質の境界面に光を斜めに入射させるとき、特定の振動方向の光が反射されない入射角です。境界面に垂直で入射光・反射光を含む面を入射面と呼びます。入射角をブリュースター角にしたとき、入射面内で電場が振動する光は反射せず、反射光の電場の振動方向は入射面に垂直になります。電場の振動方向が入射面と平行な光を p 偏光、電場の振動方向が入射面に垂直な光を s 偏光と呼びます。偏光については、以下で解説します。

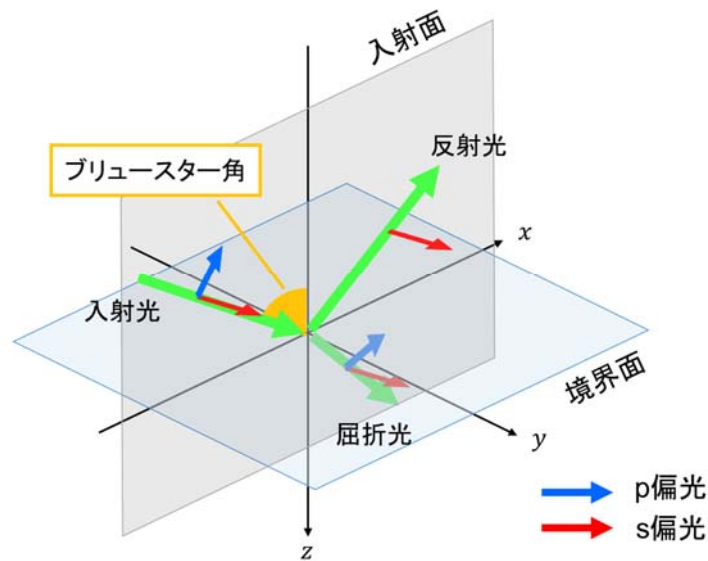


図3 ブリュースター角の説明図

3. 偏光

光は電磁波の一種であり、電場と磁場が振動しながら空間を伝わっていきます。電場(または磁場)の振動方向は、自然光などではバラバラです。一方で、レーザー光など特殊な光では、電場の振動方向が1方向にそろっています。このような光を直線偏光と呼びます。

4. 超短パルスレーザー

発光時間の極めて短い光を放つレーザーです。10兆分の1秒程度以下の時間だけ光を放つことができるフェムト秒パルスレーザーなどがあり、超高速現象の計測用光源や材料の微細加工に用いられます。フェムトは1000兆分の1を表す接頭辞です。

謝辞

本研究は、独立行政法人日本学術振興会(JSPS) 科学研究費補助金基盤研究(A)「フェムト秒光パルスの偏光伝播の顕微動画像記録・観察とその超高速現象観察への応用」の支援を受けて行なったものです。

論文情報

・タイトル

“Motion-picture recording of ultrafast behavior of polarized light incident at Brewster's angle”

- 著者

Mika Sasaki, Atsushi Matsunaka, Tomoyoshi Inoue,
Kenzo Nishio, and Yasuhiro Awatsuji

- 掲載誌

Scientific Reports

- DOI

[10.1038/s41598-020-64714-w](https://doi.org/10.1038/s41598-020-64714-w)

- アブストラクト URL

<https://doi.org/10.1038/s41598-020-64714-w>

問い合わせ先

< 研究に関すること >

京都工芸繊維大学電気電子工学系

教授 栗辻 安浩 (あわつじ やすひろ)

TEL : 075-724-7444 E-mail : awatsuji@kit.ac.jp