

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：12201

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K17777

研究課題名（和文）レーザー励起空中散乱ボクセルを用いた自由空間ポリュメトリックディスプレイの研究

研究課題名（英文）Free-space volumetric display using laser-excited light scattering voxels in air

研究代表者

熊谷 幸汰（Kumagai, Kota）

宇都宮大学・オプティクス教育研究センター・助教

研究者番号：90879628

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：自由空間フルカラー体積映像描画の実現に向けて、空气中に生成されたフェムト秒レーザー励起ボクセルの光散乱特性を評価した。空气中でボクセルを励起する光源と着色する光源の検討を通じ、波長515nmフェムト秒レーザーの集光照射で得られるボクセルのスペクトルと色、形状を同時に観察できる光学系を構築した。これらの評価から、ボクセルの色が入射光の偏光状態と波長に依存することが分かり、これまで発光型として利用されてきたレーザー励起空中ボクセルの、光散乱型としての利用可能性を示した。さらに、励起パルスと着色パルスに任意の時間差を与えることができるダブルパルス光学系へ拡張し、散乱光強度の増強を検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザー励起によるポリュメトリックディスプレイは、ボクセルを空气中に直接生成することで、本来物体が有する体積的な3D情報を映像として提示できる技術である。しかし、ボクセルの色は、材料（空気）に依存するため、青白色のみの表現に留まっていた。本研究では、これまでボクセルとしてその自発光のみ利用されてきたレーザー励起空中ボクセルの散乱光を評価し、色表現可能な光散乱型ボクセルとしての有用性を示した。

研究成果の概要（英文）：We evaluated the light scattering characteristics of femtosecond laser-excited voxels generated in air for the realization of free-space full-color volumetric display. Through the investigation of light sources for excitation and colorization of voxels in air, we constructed an optical system that enables simultaneous observation of the spectrum, color, and shape of a voxel obtained by focused irradiation of a 515-nm femtosecond laser. From these evaluations, we found that the voxel color depends on the polarization state and wavelength of the incident light, indicating that laser-excited aerial voxels, which have been used as light-emission voxels, can be used as light-scattering voxels. Furthermore, we extended the system to a double-pulse optical system in which the excitation pulse and the coloring pulse can be given arbitrary time differences, and investigated the enhancement of the light scattering intensity of a voxel.

研究分野：ヒューマンインタフェースおよびインタラクション関連

キーワード：ポリュメトリックディスプレイ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ポリュメトリックディスプレイは、体積的画素(ボクセル)を描画することで映像を実世界に直接表示するため、ひとの奥行き知覚を一挙に満たす 3D 映像提示を可能にする。とくに、自由空間中へ体積映像表示できるポリュメトリックディスプレイは、実世界と映像空間がシームレスに繋がっているため、AI と人とのインタラクティブな対話を実現するインタフェースになり得る技術として注目されている。

これまでに自由空間中へのフルカラー体積映像を実現する方法は、ボクセルをレーザーや音波で補足する方式と、フェムト秒レーザー励起プラズマの自発光を用いて生成する方式がある。補足する方式のボクセルは、照明光を与えることで可視化される光散乱型であり、照明光の色変化のみで映像をカラー化できる。生成する方式は、補足方式に比べユーザや物体との接触によりボクセルが消滅しないことに加え高速走査できるため、堅牢でひとの目にとってのリアルタイム観察できる体積映像を実現する可能性がある。しかし、フェムト秒レーザー励起により空気中に生成されたボクセルは、励起対象となる空気に依存して青白色のみの色表現に留まっており、カラー化に課題があった。

### 2. 研究の目的

本研究では、自由空間に色表現可能な体積映像を表示できるポリュメトリックディスプレイの実現に向けて、空気中のフェムト秒レーザー励起ボクセルの光散乱特性を評価し、映像描画への有用性を実証する。

### 3. 研究の方法

本研究では、ボクセル形状、色、スペクトルを同時に観察できる実験光学系の構築、入射パルスの偏光とボクセル形状および色、スペクトルの関係調査、入射パルスエネルギーに対するボクセル色の観察を実施した。

### 4. 研究成果

#### 実験光学系の構築

図 1 に示す実験光学系を構築した。第二次高調波発生により波長 1030 nm から 515 nm に変換された緑色フェムト秒レーザーの集光照射によりボクセルを形成した。形成されたボクセルは、光軸と垂直方向から、CMOS イメージセンサーによりその拡大像、分光器によりスペクトル分布を計測された。集光に至る過程に半波長板を配置することで、入射パルスの直線偏光方向を変化させた。

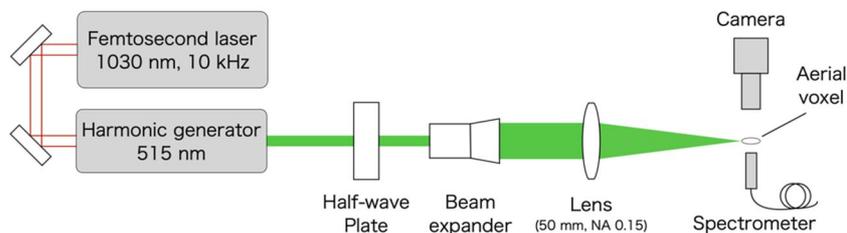


図 1 実験光学系。

#### ボクセル形状と色の観察

入射パルスの偏光方向に対するボクセル形状と色の関係を調査した。図 2 示すように、ボクセルは、入射パルスの偏光方向と水平をなす方向を 0 degree とし、垂直方向に向かって角度を変えながらカメラを用いて観察された。レーザーパルスは、入射エネルギー 24  $\mu\text{J}$ 、繰り返し周

波数 10 kHz で空气中に照射された。撮像されたボクセルより、ボクセル色は偏光方向が観察方向と垂直をなす方向に近づくに従い緑色に変化し、わずかに軸方向サイズの拡がりが見られた。撮像されたボクセルの光軸方向に沿った画素値を RGB ごとに取得すると、入射パルスの偏光方向と観察方向が 90° のときに、G と B が最大値を取り、0° のときに最小値を取ることが観察された。

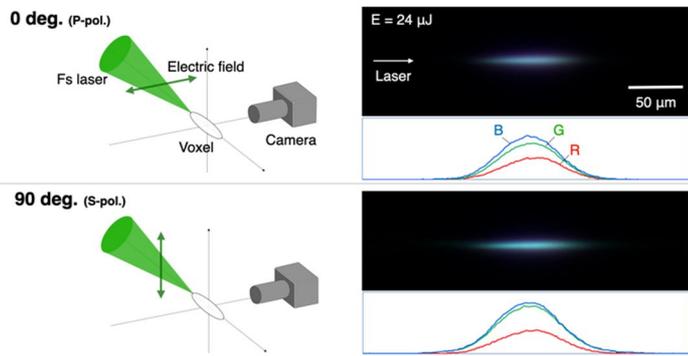


図 2 観察方向と 0° および 90° をなす直線偏光を有するパルス照射で形成されたレーザー励起空中ボクセル。

### スペクトルの観察

入射パルスの偏光方向に対するボクセルのスペクトルの関係を調査した。レーザーパルスは、入射エネルギー 99 μJ、繰り返し周波数 10 kHz で空气中に照射された。図 3 の左に示すように、入射パルスの偏光方向と分光器による計測方向が 0° をなすときのボクセルのスペクトルは、可視光を網羅するスペクトル分布を示した。一方で、図 3 の真ん中と右に示すように、スペクトルは、偏光方向が計測方向と垂直をなす角度に近づくにつれて、514 nm に光強度の増加が観察され、90° で最大値を取った。

以上より、励起パルスの波長とおおよそ一致する光強度の増加が観察されたこと、光散乱が偏光依存性を有することから、これは、ボクセルに入射パルス自身が光散乱することで得られた色変化と考えられる。

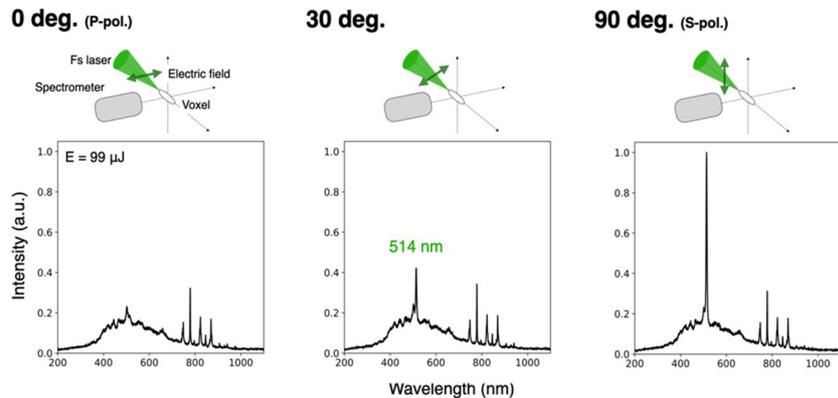


図 3 観察方向と 0°、30°、90° をなす直線偏光を有するパルス照射で形成された、レーザー励起空中ボクセルのスペクトル分布。

### 入射パルスエネルギーに対するボクセル色の観察

異なる入射パルスエネルギーを用いて、ボクセル色の変化を観察した。パルスエネルギーは、13 μJ、17 μJ、24 μJ、28 μJ、37 μJ が用いられ、繰り返し周波数は 10 kHz であった。結果より、入射パルスエネルギーの増加とともに、緑色の散乱光と自発光の光強度が共に増加することが観察された。散乱光成分をより増強するためには、励起パルスと照明パルス間の時間差やそれぞれの空間強度分布を制御する方針が考えられる。

### 0 deg. (S-pol.) 90 deg. (S-pol.)

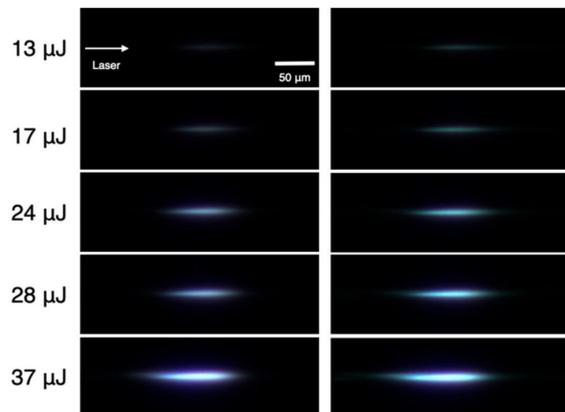


図 4 観察方向と 0° および 90° をなす直線偏光を有するパルス照射を用いて、異なる照射パルスエネルギーで形成されたボクセル。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Tatsuki Mori, Kota Kumagai and Yoshio Hayasaki
2. 発表標題 Aerial volumetric display with 10 kHz femtosecond laser excitations
3. 学会等名 Information Photonics 2022 (IP2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kota Kumagai and Yoshio Hayasaki
2. 発表標題 Colored voxels of laser-excited aerial volumetric display
3. 学会等名 Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2022 (DH2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tatsuki Mori, Kota Kumagai and Yoshio Hayasaki
2. 発表標題 Centimeter-sized volumetric display with femtosecond laser excitations to various gas
3. 学会等名 The 22nd International Meeting on Information Display (IMID2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kota Kumagai and Yoshio Hayasaki
2. 発表標題 Color volumetric display with laser-driven aerial voxels
3. 学会等名 The 22nd International Meeting on Information Display (IMID2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshio Hayasaki, Tasuki Mori, Kota Kumagai
2. 発表標題 Volumetric display with holographic-femtosecond laser drawing
3. 学会等名 25th Congress of the International Commission for Optics (ICO) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kota Kumagai and Yoshio Hayasaki
2. 発表標題 Aerial Volumetric Display with Femtosecond-Laser-Driven Colored Voxels
3. 学会等名 29th International Display Workshops (IDW '22) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keisuke Numazawa, Kota Kumagai, and Yoshio Hayasaki
2. 発表標題 Femtosecond-laser-excited micro-clouds voxel for volumetric display
3. 学会等名 Laser Display and Lighting Conference 2023 (LDC2023) in OPTICS & PHOTONICS International Congress 2023 (OPIC2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 熊谷幸汰, 早崎芳夫
2. 発表標題 レーザー励起空中ポリュメトリックディスプレイにおける画素の色表示
3. 学会等名 第16回新画像システム・情報フォトニクス研究討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 熊谷幸汰, 早崎芳夫
2. 発表標題 フェムト秒レーザーと液晶空間光変調素子を用いた体積映像表示
3. 学会等名 立体メディア技術研究会 (3DMT) (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 沼澤啓亮, 熊谷幸汰, 森建基, 早崎芳夫
2. 発表標題 霧箱を用いたフェムト秒レーザー励起体積的ディスプレイ
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2022 (OPJ2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森建基, 熊谷幸汰, 早崎芳夫
2. 発表標題 気体型励起体積ディスプレイの発光特性の評価
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2022 (OPJ2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 沼澤 啓亮, 熊谷幸汰, 早崎芳夫
2. 発表標題 マイクロ雲をボクセルとする体積的ディスプレイの検討
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 熊谷幸汰, 早崎芳夫
2. 発表標題 自由空間カラーボリュメトリックディスプレイに向けたフェムト秒レーザー励起空中ボクセルの散乱光評価
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 熊谷幸汰
2. 発表標題 実空間体積映像の実現に向けて
3. 学会等名 第8回板橋オプトフォーラム, 第3回UU-COREセミナー基礎講座(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kota Kumagai
2. 発表標題 Aerial volumetric display with femtosecond laser excitations
3. 学会等名 The 2nd International Workshop on Optics, Biology, and Related Technologies (IWOB2022)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森建基, 熊谷幸汰, 早崎芳夫
2. 発表標題 レーザー励起空中体積ディスプレイの大画面化と画素数増加
3. 学会等名 第16回関東学生研究論文講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Kota Kumagai web  
<https://kotakumagai.uu-core.com/>

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
研究協力者	早崎 芳夫  (Hayasaki Yoshio)	宇都宮大学  (12201)	

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