

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05364

研究課題名(和文) 裸眼3Dディスプレイ技術を応用した限定視野下三次元計測法の開発とプラズマへの適用

研究課題名(英文) Development of a 3D measurement system under limited field of view by applying a naked eye 3d display technique and its application to plasma

研究代表者

三瓶 明希夫 (Sanpei, Akio)

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・講師

研究者番号：90379066

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)：裸眼3Dディスプレイで用いられているインテグラルフォトグラフィの技術を応用し、視線方向が限定された視野から三次元構造を同定する計測方法の開発を行った。開発したシステムを微粒子プラズマに適用し、一方向からの計測のみで、微粒子の三次元分布を100ミクロン程度の誤差で再構成可能となった。また、前述の技術に三次元デコンボリューションを組み合わせる事で、逆磁場ピンチプラズマのような連続で半透明な光源分布についても、三次元分布を求める事を可能とした。

研究成果の概要(英文)：We have developed 3D measurement system under limited field of view by applying a naked eye 3d display technique, which is integral photography technique. We applied the developed system to a dusty plasma, and succeeded in distinguishing the 3D structure of a dusty plasma from a single-exposure image obtained from one viewing port with error of 100 micron. Above 3D measurement system is extended to continuous and translucent object, like as RFP plasma, with 3D deconvolution technique.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：三次元計測 インテグラルフォトグラフィ 微粒子プラズマ 画像計測 逆磁場ピンチ

1. 研究開始当初の背景

外部からの透過光、あるいは対象自身の発光を限定された視野から観測し、その結果から三次元構造を再構成する技術が求められている。一般に、Computed Tomography(CT)として知られる再構成技術には、全ての角度からの視線情報が存在するという「完全条件」が必要であるが、現実には完全条件を満たせない状況が多数存在する。プラズマからの放射光を計測して三次元構造を同定しようとする場合は、真空容器に開いたポートによる著しい視野制限が存在する。

Reversed Field Pinch (RFP)においては、多数の共鳴モードが同程度の振幅で存在するためにストキャスティックな磁場構造となる中心領域で、単一モードが大振幅まで成長して磁気島内部に磁気面構造が回復する配位が自己形成されることで軸対称平衡構造中に3Dヘリカル平衡配位が形成される。高 β プラズマにおける自発的な三次元ヘリカル平衡遷移現象の物理機構を解明するために、限られた視野から三次元配位を計測する方法が模索されている。

低温プラズマである微粒子プラズマでは、クーロン結晶や湯川ボールの形成・相転移のような基礎物理の研究と、効率の良いナノ材料や超微粒子の作成といった応用への観点から、三次元構造の計測技術が発展してきた。一方向からの計測によって三次元構造を類推する方法として、シート状のレーザーをスキャンさせて得られた二次元像を重ねたり、カメラの距離やピントを変化させる事などが行われている。しかし、短い時間で空間的に変化する現象に対してはこの方法は使えないため、一定の領域中にある微粒子の三次元構造を同時に把握できる技術が必要である。

インテグラルフォトグラフィは裸眼3Dディスプレイやリフォーカスカメラの原理として知られている。被写体とイメージセンサなどの撮像体との間にマイクロレンズアレイを設置して多眼カメラを作り、その映像からライトフィールドを作成することで限定視野下において被写体の三次元情報を記録することが可能である。そのため、近年は微粒子プラズマの三次元形状計測手法として市販のリフォーカスカメラの利用が試みられている。

2. 研究の目的

本研究では、従来のインテグラルフォトグラフィ技法をプラズマ計測に対して拡張し、三次元構造の同定法を開発する。微粒子プラズマ及びRFPプラズマという空間・時間スケールの全く異なるプラズマに対して技法の適用を試み、普遍的な光学計測法の確立を行う。

3. 研究の方法

インテグラルフォトグラフィ技術を利用

して、微粒子プラズマに最適化された三次元計測システムの開発を行った。図1に撮像と再構成の概念図を示す。微粒子からの散乱光はマルチレンズアレイを通して、視差を持つ二次元イメージアレイとして計測される。PC上で仮想的に再びレンズアレイを通し、ライトフィールドを計算することで、三次元構造を再構成する。

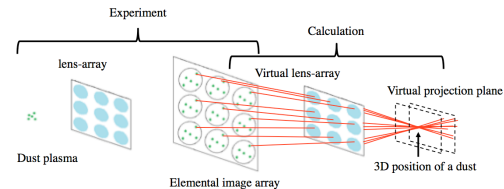


図1: 撮像と再構成の概念図。

RFPプラズマに対しても同様の技法を適用したが、ぼやけた境界を持つ半透明の撮影対象に対しては、従来の技法では再構成結果の自由度が高く、輝度分布を一意に決定できなかった。これを解決するため、インテグラルフォトグラフィとデコンボリューションを組み合わせた技法を開発した。

4. 研究成果

微粒子プラズマに最適化された三次元計測システムの開発を行った。撮像体には、市販のデジタル一眼レフカメラ D810 に内蔵されている CMOS イメージセンサ (36M Pixel, 36mm×24mm) を利用した。イメージセンサ内の有効画素を最大限に利用するため、被写体(微粒子)、レンズアレイ、イメージセンサの間の距離とレンズの焦点距離を最適化した。レンズアレイには、焦点距離 35mm, 大きさ 2.2mm 角の凸レンズが横(x方向)9個×縦(y方向)6個で配置されたものを制作した。光軸の方向をz軸とすると、この系によって撮影可能な範囲は、z軸方向はレンズアレイから 55-143mm, x-y平面は面積で 24mm²である。

座標が既知の点光源に対して試験的に行った実験および計算の結果からは、xおよびz方向の測定誤差はそれぞれ、10 μ m以下、100 μ m程度であった。

微粒子プラズマの実験装置には、平行平板型のRFプラズマ装置を用いた。圧力 80Pa 窒素放電プラズマ中に、直径 6.5 μ mの球形単分散のポリマー微粒子を捕捉させた。微粒子を観測するための光散乱光源には、波長 532nm, 出力約 10mW, ビーム径 4mmの小型レーザーを用いた。プラズマ中に微粒子が浮遊している様子を撮影した画像の一部を図2に示す。図の中心付近には、あるマイクロレンズを通してイメージセンサ上に結像した5個の光点が存在する。図の周辺部には、他のマイクロレンズに対応した像が認められる。図2の結果からライトフィールドを計算し、輝度がピークを取る座標が点光源の位置と見なせる。微粒子の三次元座標を求めた結果を

図 3 に示す. z 軸の値はレンズアレイからの距離を表している. 平均粒子間距離は $780 \mu\text{m}$ 程度であり, 他の計測と矛盾ない結果が得られている.

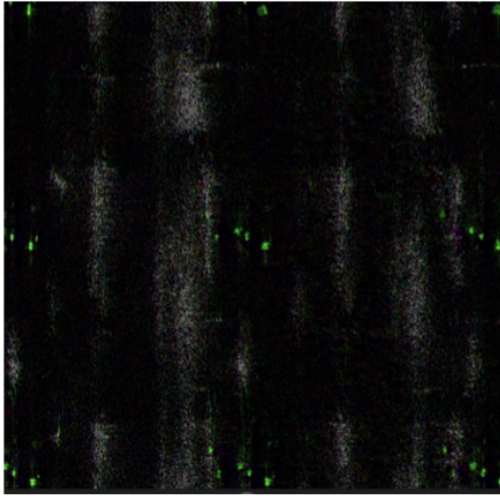


図 2: レンズアレイを通して撮影された微粒子 (一部を拡大).

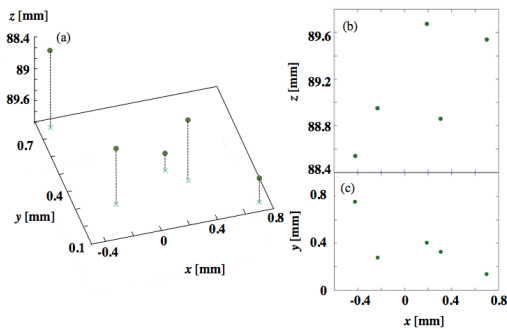


図 3: 再構成された微粒子の三次元位置.
(a)鳥瞰図, (b) x - z 平面, (c) x - y 平面

RFP プラズマのような連続光源をマルチレンズを通して撮影し, インテグラルフォトグラフィによって三次元ライトフィールドを作成すると, ライトフィールドは連続的に分布する点光源から伸びる円錐が重なり合っている状態として得られる. この円錐を既知の点像分布関数とみなして, Lucy-Richardson deconvolution を適用することにより, 計測対象である半透明な連続光源の三次元分布を一方向から得る事が可能となった.

空間上に三つの点光源を仮定し, 間隔 d の 7 つのピンホールを持つカメラで撮影する. 得られた像からライトフィールドを計算すると, 図 4(a) の分布が得られる. ここでピンホールは $z=0$ に置かれている. 得られたライトフィールドに Lucy-Richardson deconvolution を適用し, 200 回繰り返し計算をした結果, 連続的なライトフィールドか

ら点光源を再構成する事ができた (図 4(b)).

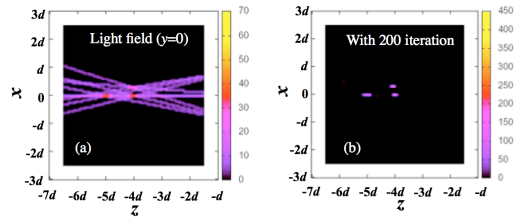


図 4: マルチピンホール像から計算されるライトフィールド(a)とデコンボリューション結果(b).

閉じ込め改善や輸送現象について調べる為に, 画像計測システムと吸収法を組み合わせた二次元電子温度分布計測システムを用いて, 二次元電子温度画像の時間変化計測を行った. その結果, 周辺磁場揺動が単一モードの成長を示すタイミングでは, 温度勾配が急峻になり, 輸送障壁の形成を示唆する結果が得られた (図 5 参照). 横軸はモードパワーの集中度合いを表すスペクトラムインデックス (N_s) であり, N_s が 2 以下の時にヘリカル変形が生じるが, 電子温度勾配は N_s が 1.7 で顕著な変化が見られた.

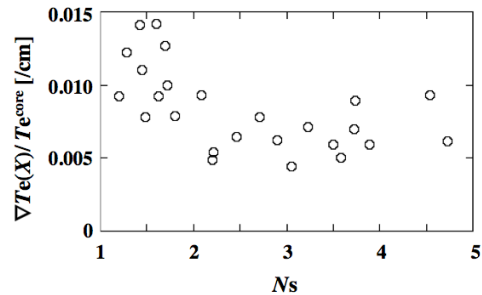


図 5: 電子温度勾配のスペクトラムインデックス依存性

開発したシステムによって, 微粒子プラズマ及び熱核融合プラズマの三次元構造を一方向からのみ, かつスキャン等の時間を要しない計測で再構成できるようになったのは重要な成果であると考えられる. この手法により三次元的構造の時間発展を計測可能となるため, 微粒子プラズマ中においては, 微粒子の三次元構造の時間発展を詳細に計測する. RFP プラズマにおいては, ヘリカル磁気面の内部構造の時間発展を詳しく調べると共に, ヘリカル構造への遷移現象を細密に検討することで明らかにする. 他の閉じ込め配位における磁場構造の遷移現象との比較を行うことで, ヘリカル配位高 β プラズマにおける遷移現象の普遍的特性の抽出を目指す.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 15 件)

- [1] A. Mohri, A. Sanpei, “Repeatable Intense Beam Generation of Micro-Particles Attached with 10^7 Electrons”, Plasma Fusion Res. vol.13, 1406042 (2018). DOI:10.1585/pfr.13.1406042 (査読有)
- [2] Akio Sanpei, Tomohito Kigami, Hiroki Kanaya, Yasuaki Hayashi, and Mai Sanpei, “Levitation of Microorganisms in the Sheath of an RF Plasma”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.46 pp.718-722 (2018). DOI: 10.1109/TPS.2017.2753850 (査読有)
- [3] S. Yamada, H. Himura, T. Kato, S. Okada, A. Sanpei, S. Masamune, “Two-dimensional macroscopic shapes of lithium ion and electron plasmas after elapse of two-fluid plasma state”, Non-Neutral Plasma Physics vol.10, 020016 (2018). DOI: 10.1063/1.5021581 (査読有)
- [4] K. Furukawa, H. Himura, S. Okada, A. Sanpei, S. Masamune, “Observation of macroscopic stability of weakly magnetized Li^+ ion beams near the Brillouin density limit”, Non-Neutral Plasma Physics vol.10, 020002 (2018). DOI: 10.1063/1.5021567 (査読有)
- [5] Y. Takeiri et al. (A. Sanpei (131 番目 /187 人中)), “Extension of the operational regime of the LHD towards a deuterium experiment”, Nucl. Fusion vol.57 102023 (2017). DOI: 10.1088/1741-4326/aa7fc2 (査読有)
- [6] Akio Sanpei, Kazuya Tokunaga, Yasuaki Hayashi, “Design of an Open-Ended Plenoptic Camera for Three-dimensional Imaging of Dusty Plasmas”, Jpn. J. Appl. Phys. vol.56, 080305 (2017). DOI: 10.7567/JJAP.56.080305 (査読有)
- [7] Akio Sanpei, Kanae Nishimura, Yusuke Aoki, Sadao Masamune, Haruhiko Himura, Satoshi Ohdachi, Naoki Mizuguchi, “Features of the Electron-Temperature Distribution in a Low-Aspect-Ratio Reversed Field Pinch Plasmas”, Journal of the Physical Society of Japan, vol.86, p.063501 (2017). DOI: 10.7566/JPSJ.86.063501 (査読有)
- [8] T. Onchi, A. Fujisawa, A. Sanpei, H. Himura, S. Masamune and RELAX team, “Permutation entropy and statistical complexity in characterising low-aspect-ratio reversed-field pinch plasma”, Physica Scripta, vol.92, p.055601 (2017).

DOI:10.1088/1402-4896/aa6689 (査読有)

- [9] S. Masamune, A. Sanpei, et al, “Improved Low-Aspect-Ratio RFP Performance with Active MHD Control and Associated Change in Magnetic Topology in RELAX”, Proc. of the 25th IAEA Fusion Energy Conference, EX/P5-22, p.316 (2016). indico:IAEA-CN-234-0315 (査読有)
- [10] H. Himura, S. Nakata, A. Sanpei, “Applicability of micro-channel plate followed by phosphor screen to charged particles”, Rev. Sci. Instrum. vol.87, 063306 (2016). DOI:10.1063/1.4954406 (査読有)
- [11] Y. Hayashi, M. Kawano, A. Sanpei, S. Masuzaki, “Mie-Scattering Ellipsometry System for Analysis of Dust Formation Process in Large Plasma Device”, IEEE Transactions on Plasma Science, vol.44, pp.1032-1035 (2016). DOI:10.1109/TPS.2016.2542349 (査読有)
- [12] A. Sanpei, N. Takao, Y. Kato, Y. Hayashi, “Initial result of three-dimensional reconstruction of dusty plasma with integral photography technique”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.44 pp.558-561 (2016). DOI:10.1109/TPS.2015.2498942 (査読有)
- [13] K. Ida et al., (A. Sanpei (68 番目/120 人中)), “Overview of transport and MHD stability study: focusing on the impact of magnetic field topology in the Large Helical Device”, Nucl. Fusion, Vol.55, 104018 (2015). DOI:10.1088/0029-5515/55/10/104018 (査読有)
- [14] Akio Sanpei, Yukihiro Soga, Kiyokazu Ito, Haruhiko Himura, “Phase space analysis for dynamics of three vortices of pure electron plasma trapped with Penning Trap”, Non-neutral Plasma vol.9, 030002(4p) (2015). DOI:10.1063/1.4923111 (査読有)
- [15] H. Himura, T. Noichi, S. Nakata, S. Kawai, A. Sanpei, “Improvement of Confinement Times of Lithium Ion and Electron Plasmas in BX-U”, Non-neutral Plasma vol.9, 050004(4p) (2015). DOI:10.1063/1.4923123 (査読有)

[学会発表] (計 27 件)

- [1] A. Sanpei, et al., “Reconstruction of 3D SXR emissivity structure with integral photography technique -possible application to 3D tearing mode structure in toroidal plasmas-”, US-Japan MHD Workshop “Toward development of integrated studies of 3D magnetic field effects in fusion devices”, 3/5-9 2018,

Naka, Japan

[2] A. Sanpei, et al., "Levitation and Crystallization of Microorganisms in an RF Plasma", Fine particle plasma workshop2017, 12/11-12 2017, Toki, Japan

[3] A. Sanpei, "Identification of 3-D structure of Low-A RFP with imaging technique", 26th International Toki Conference, 12/5-8 2017, Toki, Japan

[4] A. Sanpei, "Measurements of 3-D Structure in Plasmas with Integral Photography Technique", Plasma Conference 2017, 11/20-24 2017, Himeji, Japan

[5] A. Sanpei, et al., "MHD studies in low-A RFP with SXR imaging diagnostic", US-Japan CT workshop 2017, 11/7-9 2017, Yokohama, Japan

他 22 件

[図書] (計 1 件)

[1] Yasuaki Hayashi and Akio Sanpei et al., "Ellipsometry - Principles and Techniques for Materials Characterization", InTech, pp.1-20 (2017). DOI: 10.5772/intechopen.70278

[その他]

ホームページ等

<https://www.hyokadb.jim.kit.ac.jp/profile/ja.2f965ca8f50ea3fc94f675f4fcb5670b.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三瓶 明希夫 (SANPEI AKIO)

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・講師
研究者番号：90379066

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

政宗 貞男 (MASAMUNE SADA0)

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授
研究者番号:00157182

林 康明 (HAYASHI YASUAKI)

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授
研究者番号:30243116

比村 治彦 (HIMURA HARUHIKO)

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・准教授
研究者番号:30311632