

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K13525

研究課題名（和文）磁気圏型プラズマにおける自己組織化の物理機構の解明：熱・粒子輸送に着目して

研究課題名（英文）Physical Mechanism of Self-Organization in Magnetospheric Plasmas: Focusing on Heat and Particle Transport

研究代表者

鈕持 尚輝（Kenmochi, Naoki）

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：80781319

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、天体磁気圏が高ベータプラズマを自発的に閉じ込めるメカニズムを解明するため、RT-1装置を用い自発的に形成される高ベータプラズマの熱・粒子特性の解明である。本研究により内向き拡散のメカニズムについて以下に示す2つの新しい知見を得られた。(i)本研究で開発した詳細計測・解析手法により、内向き拡散により自発的に形成されるピークした密度分布を詳細に可視化した。(ii)放電中に中性ガスを入射することで、ピークした密度分布が再構成される際に低周波揺動が励起されることを発見し、揺動の時空間構造の詳細計測から内向き拡散のメカニズムにドリフト波不安定性が関連していることを示唆した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本論文で明らかにした密度分布の自己調整機構は、定常閉じ込め系に共通する長寿命構造の基礎物理における知見を与えることができる。トカマク等の磁場配位とは異なる新概念核融合装置の研究としてはもとより、将来の核融合装置に共通の物理工学課題も含んでおり、高性能な高ベータプラズマ生成とプラズマ閉じ込め物理研究の進展が期待できる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to clarify the thermal and particle characteristics of spontaneously formed high-beta plasma using the RT-1 device in order to investigate the mechanism of spontaneous confinement of high-beta plasma in the celestial magnetosphere. This study provides two new findings on the mechanism of inward diffusion as follows. (i) Detailed visualization of the peaked density profiles spontaneously formed by inward diffusion was achieved by the detailed measurement and analysis method developed in this study. (ii) We found that low-frequency fluctuations are excited when the peaked density profile is reconstructed by neutral gas injection during the discharge, and detailed measurements of the spatiotemporal structure of the fluctuations suggest that the mechanism of inward diffusion is related to drift wave instability.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：磁気圏型プラズマ 自己組織化 熱・粒子輸送 核融合 トムソン散乱計測 深層学習

## 1. 研究開始当初の背景

天体磁気圏は宇宙に偏在する典型的な構造でありながら、閉じ込められるプラズマには多様な運動や構造が現れ、それらはしばしば通常の物理的常識に反する現象として観測される。たとえば、密度勾配に反して粒子が「内側」へ向かって拡散し「(真の) 閉じ込め」が起こる。あるいは、交換型不安定性を引き起こすと考えられる「悪い曲率」をもつダイポール磁場が、強い圧力勾配を持つプラズマを安定に閉じ込める。これらは、磁気圏を作るダイポール型磁場の強い非一様性のために引き起こされる「自明でない構造の自発的形成」(自己組織化と呼ぶ)の現れであるといえることができる。

天体磁気圏のプラズマを倣った RT-1 実験装置によるこれまでの研究から、磁気圏型配位の中で中心ベータが 1 を超える高ベータプラズマの閉じ込めが自己組織化されることが実験的に示されている[代表吉田善章、基盤 S、H23-27]。これまでに、軟 X 線計測などの結果から、高ベータの成分となる非常に高温(~10 keV)の電子と、同程度の密度を持つ低温(~50 eV)の電子が共存し、速度分布関数のマクスウェル分布からの逸脱が示唆されている[M. Nishiura, N. Kenmochi, *et al.*, Nucl. Fusion, 2017]。更に、同装置では粒子の内向き拡散に伴ってベータトロン加速が生じ、イオンの非等方な加熱が起こることを発見している[Y. Kawazura *et al.*, Phys. Plasmas, 2015]。電子の非等方性についても磁気圏の惑星放射線帯における数々の衛星観測の結果が示しているが、RT-1 では計測器の不足から非等方性を考慮した電子温度は未解明であった。これらを踏まえ、磁気圏型プラズマが高ベータプラズマを自己組織化するメカニズムを「問う」ことで、高性能核融合プラズマ閉じ込め、とりわけ D-He<sup>3</sup> の燃焼を可能にする先進的核融合の研究に道が開かれる。

磁気圏型プラズマは、トカマクやヘリカルなど従来の核融合プラズマとは全く異なる領域に位置づけられ、内向き拡散や悪い曲率磁場による安定閉じ込めなど常識に反する現象が起こる。磁気圏型配位は宇宙の典型的な構造であるから、この領域における物理現象を解明することの学術的意義は大きい。本研究が明らかにしようとしている現象は、一様な磁場中では縮退しているプラズマの根本的な性質の発現であり、効率的なプラズマ生成・閉じ込めに応用できる。温度の非等方性に考慮した速度分布関数の詳細計測に基づく議論は、磁気圏型プラズマの物理に新たな知見を与え、先進核融合へと繋がる先駆的な学術研究となる。

## 2. 研究の目的

天体磁気圏が高ベータプラズマを自発的に閉じ込めるメカニズムを解明するため、本研究では RT-1 装置を用い自発的に形成される高ベータプラズマの熱・粒子特性を明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

局所電子温度・密度分布を非接触・干渉かつ幅広い温度密度領域で計測できる(1)レーザートムソン散乱計測や(2)イメージング計測のトモグラフィ法を開発し、(3)得られた電子温度・密度情報を元に局所的な熱・粒子の輸送特性を解明し、自己組織化との関係を明らかにする。

## 4. 研究成果

上記(1)-(3)の研究により、それぞれ以下の成果を得た。

(1) 磁気圏型プラズマで世界初となるレーザートムソン散乱計測システムを開発し、RT-1 プラズマの電子温度・密度の計測に成功した。これにより、RT-1 に既存の計測器では不可能であったプラズマ中心部の計測により、ダイポールコイルを浮上させて高ベータプラズマを形成した際に、浮上前に比べてバルク電子の局所温度は大きく変化しない(72 eV から 79 eV)が、局所密度が 3 倍( $0.4 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$  から  $1.3 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ )に増加していることが明らかになった。

(2) 深層学習を用いたトモグラフィ法を開発し、ライン比分光イメージング計測に適用し、内向き拡散により自発的に形成されるピークした密度分布を詳細に可視化した(図 1)。中性ヘリウムの発光ラインペア(波長 388nm, 447nm)を用い、高速カメラで計測した視線積分画像を、上記のトモグラフィ法により局所値に再構成した。それぞれの波長の発光量の局所値の比を取ることで、ライン比分光法により電子密度の局所値を求め、内向き拡散によりコイル付近の高磁場領域にピークした密度分布が形成されていることが明らかになった。

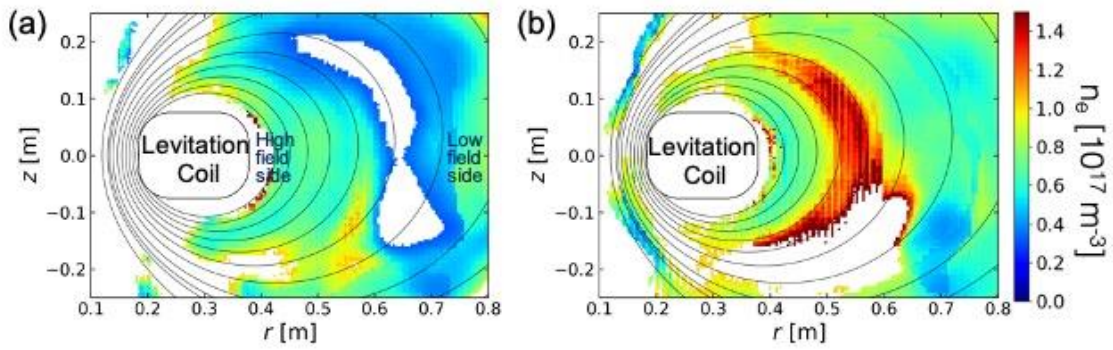


図 1. ライン比分光イメージング計測と深層学習によるトモグラフィを用いて得られた局所密度分布。内向き拡散(a)前、(b)後で密度分布のピーキングが起きていることを明らかにした。

(3) 内向き拡散を駆動する低周波揺動の存在を発見するとともにその時空間特性を明らかにし、超高ベータプラズマが自己組織化する物理機構への理解を深めた。

放電中に中性ガスを入射することで、ピークした密度分布が再構成される際に低周波揺動が励起されることを発見し、揺動の時空間構造の詳細計測から以下の3点が明らかにした。

- ① プラズマ圧力の上昇に伴い、低周波揺動の強度と周波数が上昇する。
- ② 内向き拡散中には 1kHz の電子反磁性方向に伝搬する揺動が発生し、内向き拡散が終了しピークした密度が形成された後は 1kHz の揺動は消え、イオン反磁性方向に伝搬する 0.7kHz の揺動が支配的になる。
- ③ トロイダル方向の位相速度はトロイダルドリフト速度と同程度であり、プラズマ圧力の上昇に伴いその速度も上昇する。

揺動の伝搬方向が密度分布形状に依存することから、ドリフト波不安定性との関連が示唆される。本論文で明らかにした密度分布の自己調整機構は、定常閉じ込め系に共通する長寿命構造の基礎物理における知見を与えることができる。トカマク等の磁場配位とは異なる新概念核融合装置の研究としてはもとより、将来の核融合装置に共通の物理工学課題も含んでおり、高性能な高ベータプラズマ生成とプラズマ閉じ込め物理研究の進展が期待できる。

本研究で得られた知見を基に、高ベータプラズマの自己組織化にフローが与える影響も調査するため、プラズマフローのアクチュエーターとして RT-1 装置へのプラズモイド入射のためのプラズマガン設計・製作も進めており、今後の研究に繋げる。

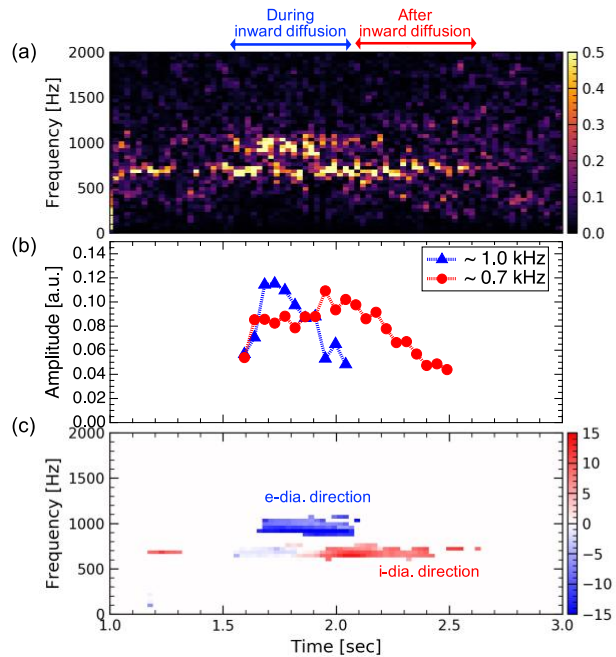


図 2. 周方向に 45 度離れた 2 つの磁気プローブにより計測された (a) 磁気揺らぎのパワースペクトル密度、(b) 1kHz と 0.7kHz 成分の磁気揺らぎの強度、(c) 位相差の時間発展図。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Kenmochi N., Ida K., Tokuzawa T., Yasuhara R., Funaba H., Uehara H., Den Hartog D. J., Yamada I., Yoshinuma M., Takemura Y., Igami H.	4. 巻 12
2. 論文標題 Preceding propagation of turbulence pulses at avalanche events in a magnetically confined plasma	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 6979
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-10499-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Kenmochi N., Yokota Y., Nishiura M., Saitoh H., Sato N., Nakamura K., Mori T., Ueda K., Yoshida Z.	4. 巻 62
2. 論文標題 Inward diffusion driven by low frequency fluctuations in self-organizing magnetospheric plasma	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 026041 ~ 026041
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1741-4326/ac412c	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ueda Kenji, Nishiura Masaki, Kenmochi Naoki, Yoshida Zensho, Nakamura Kaori	4. 巻 92
2. 論文標題 Calibration of coherence imaging spectroscopy using spectral line sources	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 073501 ~ 073501
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0043875	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kenmochi N., Minami T., Mizuuchi T., Takahashi C., Weir G. M., Nishioka K., Kobayashi S., Nakamura Y., Okada H., Kado S., Yamamoto S., Ohshima S., Konoshima S., Ohtani Y., Nagasaki K.	4. 巻 10
2. 論文標題 Reformation of the Electron Internal Transport Barrier with the Appearance of a Magnetic Island	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 5-1~5-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-019-56492-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Nishiura M., Tanaka K., Kubo S., Saito T., Kenmochi N., Nuga H., Seki R., Shimozuma T., Yoshimura Y., Igami H., Takahashi H., Tsujimura T.I., Yanai R., Tatematsu Y.	4. 巻 15
2. 論文標題 Collective Thomson scattering with 77, 154, and 300 GHz sources in LHD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 C01002 ~ C01002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/15/01/C01002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 MORI Takahiro, NISHIURA Masaki, YOSHIDA Zensho, KENMOCHI Naoki, KATSURA Shotaro, NAKAMURA Kaori, YOKOTA Yuuki, TSUJIMURA Toru I., KUBO Shin	4. 巻 14
2. 論文標題 Simulation of Electromagnetic Wave Propagation in a Magnetospheric Plasma	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 3401134 ~ 3401134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.3401134	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 KENMOCHI Naoki, NISHIURA Masaki, NAKAMURA Kaori, YOSHIDA Zensho	4. 巻 14
2. 論文標題 Tomographic Reconstruction of Imaging Diagnostics with a Generative Adversarial Network	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1202117 ~ 1202117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.14.1202117	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nishiura M., Yoshida Z., Kenmochi N., Sugata T., Nakamura K., Mori T., Katsura S., Shirahata K., Howard J.	4. 巻 59
2. 論文標題 Experimental analysis of self-organized structure and transport on the magnetospheric plasma device RT-1	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 096005 ~ 096005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/ab259a	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kenmochi N., Nishiura M., Yoshida Z., Yamada I., Funaba H., Sugata T., Nakamura K., Katsura S.	4. 巻 89
2. 論文標題 Nd:YAG laser Thomson scattering diagnostics for a laboratory magnetosphere	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 10C101 ~ 10C101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5037473	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nakamura K., Nishiura M., Takahashi N., Yoshida Z., Kenmochi N., Sugata T., Katsura S., Howard J.	4. 巻 89
2. 論文標題 Coherence-imaging spectroscopy for 2D distribution of ion temperature and flow velocity in a laboratory magnetosphere	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 10D133 ~ 10D133
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5037124	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 N. Kenmochi , M. Nishiura , Z. Yoshida , H. Nuga , T.I. Tsujimura , Y. Mizuno
2. 発表標題 Application of Generative Adversarial Networks for Plasma Diagnostics and Heating Control System
3. 学会等名 The 30th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 N. Kenmochi , Y. Yokota , M. Nishiura , H. Saitoh , N. Sato , K. Nakamura , T. Mori , K. Ueda , Z. Yoshida
2. 発表標題 Inward Diffusion Driven by Low Frequency Fluctuations in Self-Organizing Magnetospheric Plasma
3. 学会等名 28th IAEA Fusion Energy Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈞持尚輝, 横田侑己, 西浦正樹, 齋藤晴彦, 佐藤直木, 森敬洋, 上田研二, 吉田善章
2. 発表標題 磁気圏型プラズマの自己組織化における 低周波揺動が駆動する内向き拡散の実験解析
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈞持尚輝, 西浦正樹, 吉田善章, 辻村亨, LHD実験グループ
2. 発表標題 敵対的生成ネットワークを用いた プラズマ計測・加熱制御手法の開発
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naoki KENMOCHI, Masaki NISHIURA, Toru Ii TSUJIMURA, the LHD Experimental Group, the RT-1 Experimental Group
2. 発表標題 Generative adversarial networks for plasma diagnostics and heating control
3. 学会等名 The 29th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈞持尚輝, 西浦正樹, 中村香織, 上田研二, 吉田善章
2. 発表標題 深層敵対的生成ネットワークを用いた線積分型イメージング計測における局所分布再構成
3. 学会等名 第36回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Kenmochi, M. Nishiura, K. Nakamura, K. Ueda, Z. Yoshida
2. 発表標題 Deep learning for tomographic reconstruction of imaging diagnostics
3. 学会等名 3rd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Kenmochi, Y. Yokota, M. Nishiura, H. Saitoh, K. Nakamura, T. Mori, Z. Yoshida
2. 発表標題 Characteristics of uphill diffusion with low frequency fluctuation in dipole magnetic field
3. 学会等名 46th European Physical Society Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Nishiura, K. Tanaka, S. Kubo, T. Saito, N. Kenmochi, H. Nuga, R. Seki, T. Shimosuma, Y. Yoshimura, H. Igami, H. Takahashi, T. I. Tsujimura, R. Yanai, Y. Tatematsu, LHD experiment group
2. 発表標題 Collective Thomson scattering with 77, 154, and 300 GHz sources in LHD
3. 学会等名 Laser Aided Plasma Diagnostics 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 釘持尚輝, 西浦正樹, 吉田善章, 桂将太郎, 中村香織, 森敬洋, 横田侑己
2. 発表標題 ダイポール磁場中の粒子のアップヒル拡散と揺動特性
3. 学会等名 第35回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 Naoki Kenmochi, Masaki Nishiura, Zensho Yoshida, Tetsuya Sugata, Shotaro Katsura, Kaori Nakamura, Takahiro Mori, Yuuki Yokota
2. 発表標題 Uphill Diffusion with Low Frequency Fluctuation in Dipole Magnetic Field
3. 学会等名 The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research & The 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 劔持尚輝, 西浦正樹, 吉田善章, 菅田徹也, 桂将太郎, 中村香織
2. 発表標題 ダイポール磁場中の密度揺動と粒子の内向き拡散特性
3. 学会等名 第12回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Kenmochi, M. Nishiura, Z. Yoshida, I. Yamada, H. Funaba, T. Sugata, K. Nakamura, and S. Katsura
2. 発表標題 Nd:YAG laser Thomson scattering diagnostics for laboratory magnetosphere
3. 学会等名 High Temperature Plasma Diagnostics Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Nishiura, Z. Yoshida, N. Kenmochi, T. Sugata, K. Nakamura, S. Katsura, K. Shirahata, Y. Yokota, T. Mori, C. Michael, J. Howard
2. 発表標題 Experimental approach for understanding self-organized plasma transport in laboratory magnetosphere RT-1
3. 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Nishiura, Z. Yoshida, N. Kenmochi, T. Sugata, K. Nakamura, S. Katsura, C. Michael, J. Howard
2. 発表標題 Progress in the Dipole Plasma Experiment RT-1
3. 学会等名 19th International Congress on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

プラズマ理工学講座ホームページ <a href="http://www.ppl.k.u-tokyo.ac.jp/index.html">http://www.ppl.k.u-tokyo.ac.jp/index.html</a> Researchmap <a href="https://researchmap.jp/nkenmochi/">https://researchmap.jp/nkenmochi/</a>
--

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

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			
米国	ウィスコンシン大学			
ドイツ	マックス・プランク・プラズマ物理学研究所			
オーストラリア	オーストラリア国立大学			