

令和 6 年 5 月 21 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03508

研究課題名(和文)直線磁化プラズマにおける高次非線形構造形成による輸送ダイナミクスの解明

研究課題名(英文)Transport dynamics in linearly magnetized plasmas through the formation of higher-order nonlinear structures

研究代表者

荒川 弘之(Arakawa, Hiroyuki)

九州大学・医学研究院・准教授

研究者番号：00615106

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)：本研究では、直線磁化プラズマ実験において、ドリフト波周波数帯に生成された乱流中の高次非線形構造による輸送を評価した。外部制御パラメータである中性粒子ガス圧と磁場強度を系統的に変化させ、種々の乱流条件において、周方向に均一な流れ、低次非線形構造、高次非線形構造による動的なエネルギー移送を評価した。種々の乱流条件でのエネルギー移送の強弱は各構造のエネルギー分布と異なり、エネルギーが小さい構造でもプラズマ全体に影響する条件を複数観測した。関連研究として、半径方向10chのラングミュアプローブ制作、及び、ベクトルトモグラフィーにより2次元の流れベクトル場を再構成する手法の開発とその実証を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プラズマ乱流輸送の研究では、これまで乱流(ドリフト波)と流れ(帯状流)の相互作用が中心で、高次非線形構造の影響はほとんど無視されてきた。しかし最近の研究で、特定の条件下では高次非線形構造がプラズマ全体に重要な影響を与えることがわかってきた。本研究では、系統的に外部制御パラメータを変化させ、種々の乱流条件において高次非線形構造と流れ、基本波構造とのエネルギー移送を評価した。その結果、エネルギーが相対的に小さい高次非線形構造でもプラズマ全体に大きく影響する条件が複数得られた。本研究により、乱流輸送理論の改善や磁場閉じ込め核融合炉の性能向上に寄与する可能性がある。

研究成果の概要(英文)：We evaluated energy transport driven by higher-order nonlinear structures in frequency regime of drift waves in linearly magnetized plasmas. Under systematically varied neutral gas pressure and magnetic field strength, we assessed temporal energy transfer among azimuthal flow, lower-order nonlinear structures, and higher-order nonlinear structures. The magnitude of energy transfer has nonlinear relation with the energy of each structure; multiple conditions were observed where structures with lower energy still influenced the entire plasma. As a related study, we developed the radially Langmuir probes with 10 channels and a reconstruction method for two-dimensional flow vector fields using vector tomography.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：プラズマ乱流 帯状流 乱流輸送 輸送ダイナミクス 高次非線形構造 レーザー誘起蛍光法 ベクトルトモグラフィー

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

核融合プラズマ、宇宙プラズマ、実験室プラズマでは、密度勾配や温度勾配で励起される乱流(ドリフト波)によって輸送が生じる。また乱流は、乱流自身を抑制する磁場に垂直な周方向流れ(帯状流)を駆動する。この乱流と流れの相互作用は、磁場閉じ込め核融合プラズマにおいて閉じ込め改善に重要な役割を果たすことが知られている[1]。

一方、物理的共通点がよく知られている木星等の惑星流体では、乱流と流れに加え、乱流よりも寿命が長く、空間的に局在した“孤立渦”や、乱流よりも寿命が短い“飛沫”の生成・消滅が観測されている。近年の研究代表者らによる直線磁化プラズマでも、3次的・4次的に形成した孤立渦(研究論文[2,3])や飛沫(研究論文[2,4])の発見・観測を行った。成果として、孤立渦や飛沫の生成・消滅が流れの強弱を決めており、プラズマ全体の輸送を支配することが分かった。即ち、高次非線形構造形成に伴う輸送の理解が重要であることを示した。種々の乱流状態においても、高次非線形構造形成によるプラズマ全体の輸送への影響を明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、直線磁化プラズマ乱流実験において高次非線形構造形成による輸送ダイナミクスを系統的に理解する。このため以下の点を目的とする。

- (1) 種々の乱流状態において、乱流と流れ、高次非線形構造の生成・競合、及び、粒子・エネルギー輸送のダイナミクス評価を行う。
- (2) 種々の乱流状態における高次非線形構造の輸送への影響を整理する為、“輸送マップ”作成を行う。

3. 研究の方法

- (1) 効率的なデータ収集を行うため、半径方向にラングミュアプローブを複数並べた計測器を制作した。直径約 10 cm の円柱状アルゴンプラズマ(長さ約 4 m)に 10ch のプローブを半径方向に 5 mm 間隔で並べた。製作したプローブアレイを、既設の周方向に 64ch 並べたプローブ(半径一定、中心から 4 cm)と同期計測した。複数の中性粒子ガス圧条件で、乱流構造観測を行なった。

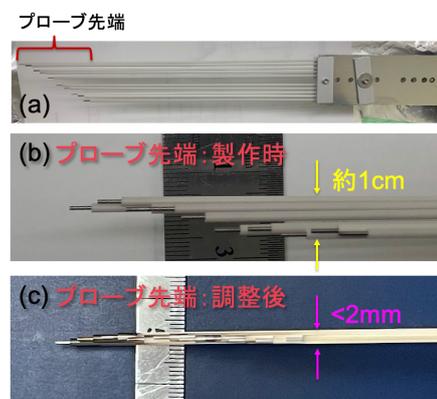
- (2) 流れの定量評価のため、レーザー誘起蛍光法により 2 次元絶対値流れ計測手法の開発・実証を行った。

- (3) 外部制御パラメータ(磁場強度、中性粒子ガス圧)制御により、種々の乱流状態を生成し、半径方向ラングミュアプローブおよび周方向ラングミュアプローブを用いて取得した。種々の乱流状態に対して 2 次元空間構造の時間変化再構成、及び構造弁別を行った。得られた構造間のエネルギー移送を評価した。磁場強度、中性粒子ガス圧変化に対するエネルギー及びエネルギー移送評価によりその強度分布を可視化した。

尚、(1)の新規計測器を用いた乱流計測では、磁場強度・中性粒子ガス圧スキャン時に既存のデータ収集系の故障などにより、十分なデータ取得ができなかった。このため、以前取得していた半径方向に駆動するプローブによる乱流計測データを用いて上記解析を行なった。

4. 研究成果

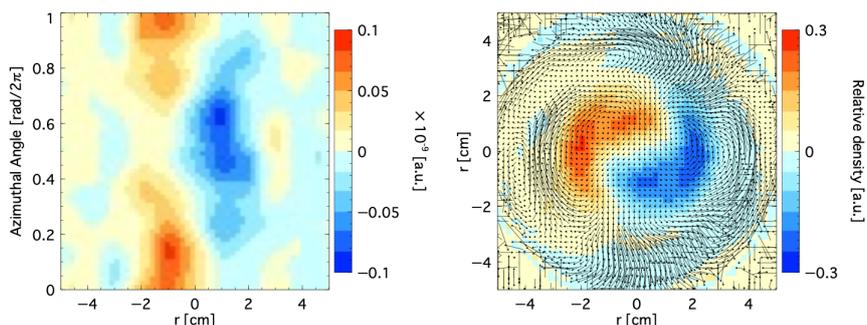
- (1) ラングミュアプローブの制作：右図に、製作した半径方向ラングミュアプローブアレイを示す。半径方向に 5 mm 間隔で 10 ch 配置した。タングステン線(直径 0.8 mm)をアルミナ絶縁管(外径 1.8 mm)により絶縁している。タングステン線の先端部分がアルミナ絶縁管と接触し、プローブ面積が広くなることを避けるため(理由：プローブ先端はプラズマと接触することにより、溶けてアルミナ部分に付着することでアルミナ表面が導電性となる)に、直径 0.1 mm のタングステン線をスポット溶接機によりタングステン線に巻きつけた。プローブはプラズマ円柱の軸方向の流れに対して最小の断面積になるように設置した。プローブ先端部分の並びは、製作当初は、1 cm 程度の幅があったが、絶縁管の固定方法の改良により 2 mm 未満の配置精度になるように調整した。複数の中性粒子ガス圧条件で、製作した新規計測器



図：製作した半径方向ラングミュアプローブアレイ。

と既設の 64 ch 周方向プローブで時空間データを取得し、既存の乱流計測データと比較して矛盾がないことを確認した。

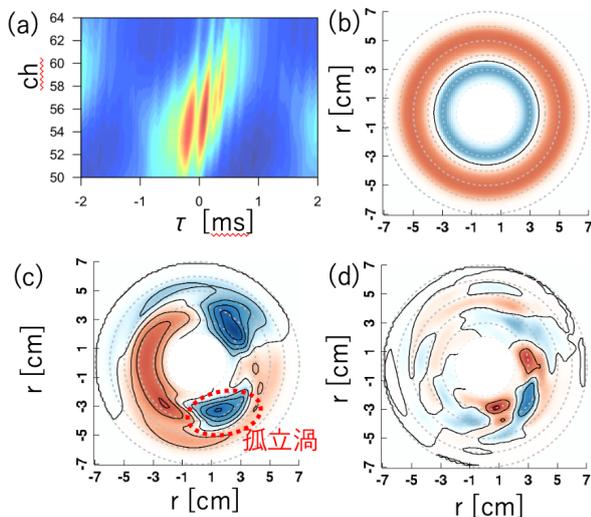
- (2) 2次元絶対値流れ計測手法の開発：医療分野で主に利用されているトモグラフィー技術を活用した、局所の2次元流れ構造の観測手法開発、及び原理実証を行なった。レーザー誘起蛍光法とラングミュアプローブにより乱流揺動を同時計測した。トモグラフィーは、原理上、対象断面をさまざまな角度からの線積分データを取得する必要があるが、本研究で対象とするプラズマ構造が周方向に回転する特性を利用して、実験室系で1方向のみのレーザー入射及び蛍光強度取得だけで必要なデータが得られる形とした[6]。結果として、現実的な実験時間で流れベクトル導出に必要なデータ取得が可能となった。プラズマの回転は、ラングミュアプローブにより乱流構造の位相を検知することで得た。これにより、プラズマ断面のさまざまな角度からのレーザー誘起蛍光に相当する線積分データを得た。周方向モード数による低次モードの抽出を行なってノイズ弁別を行なった。結果として、2次元流れベクトル構造観測及び揺動によるレイノルズ応力を得た[7]。



左図：線積分された速度ベクトルとプラズマ密度。右図：再構成されたプラズマ密度揺動(カラー)と、速度ベクトル(矢印)。

- (3) 2次元空間構造の時間変化再構成と弁別：周方向ラングミュアプローブを用いてプラズマの揺動変化を検出し、半径方向プローブのデータとの条件付き平均により2次元空間構造の時間変化再構成及び特異値分解による構造弁別を行なった。詳細を次に示す。

まず、プラズマ揺動の基本モードを元に、周方向ラングミュアプローブデータをプラズマ系にガリレイ変換した。次に、1次元テンプレート法を改良した2次元テンプレート法により、揺動変化を高精度に抽出した。2次元テンプレートによる周期的な揺動変化の検出を元に、半径方向プローブのデータとの条件付き平均を行い、2次元空間構造の時間変化を再構成した。得られた2次元空間構造の時間変化から周方向流れ(周方向モード数0)の弁別、及び特異値分解により、基本モードとそれに同期した高調波や、高周波数成分の弁別を行なった。右図に弁別された帯状流、ドリフト波と孤立渦、高次非線形構造を示す。この乱流条件では、孤立渦は3次の非線形構造であることを示した[8]。また、高次非線形構造の時間変化を明らかにし、右図の条件では孤立渦内に高次非線形構造が捕捉される様子を示した[9]。



図：(a) 2次元テンプレート。弁別された(b)帯状流れ、(c)ドリフト波と孤立渦、(d)高次非線形構造。

- (4) エネルギー移送評価：乱流構造の弁別を行なったことにより、構造間のエネルギー移送[10]を評価した。上記、帯状流、ドリフト波と孤立渦、高次非線形構造では、高次非線形構造の励起が孤立渦により行われ(エネルギーが移送され)、この反作用として、高次非線形構造が孤立渦のエネルギーを減衰させることを観測した。

- (5) 磁場強度、中性粒子ガス圧制御によるエネルギー及びエネルギー移送マップの作成：磁場強度(300-1500 G)、中性粒子ガス圧(2-6 mTorr)制御により観測された、種々の乱流条件において、上記(3)と同様に2次元空間構造の再構成を行なった。乱流構造の外部制御パラメータ変化を明らかにするため、得られたデータを(時間方向に)結合し、特異値分解を行なった。時間変化の特

徴が近い構造をまとめて低次モード(主に基本波構造)、高次モード(主に高次非線形構造)としてエネルギー及びエネルギー移送を評価した。

結果として、低ガス圧条件の方が高ガス圧条件よりも高次モードのエネルギーが大きい傾向にあった。この変化が大きい中性粒子ガス圧・磁場強度の境界は研究代表者らが過去に示した乱流パワースペクトル遷移の外部制御パラメーター[11]におおよそ一致していた。加えて、低ガス圧条件では、周方向モード数-1(ストリーマー構造に關係)が主な構造間のエネルギー移送であるのに対して、高ガス圧条件では、周方向に均一な流れ(帯状流)による乱流構造変化と高次モードとのエネルギー移送が優位になっている様子が観測された。これは中間的な磁場強度(900 G)で主に観測され、その他のより弱い(より強い)磁場強度条件になるにつれてエネルギー移送が小さくなる傾向が得られた。尚、周方向に均一な流れのエネルギーは、高ガス圧条件では低ガス圧条件と比べて比較的小さい条件である。

以上により、低次モード・高次モード、流れのエネルギーマップの強弱が、エネルギー移送マップの強弱とは異なっていることを明らかにした。これまでは特定の外部制御パラメータで高次モードが乱流構造変化に大きく寄与する場合があることを示していたが、本研究により、高次モードのエネルギーが小さい複数の条件でも、効率的にエネルギー移送が行われ、プラズマ全体の輸送に影響を及ぼしていることを明らかにした。

<引用文献>

1. H. Diamond et al., "Zonal flows in plasma—a review." *Plasma Physics and Controlled Fusion* 47.5 (2005): R35.
2. H. Arakawa et.al., "Roles of solitary eddy and splash in drift wave-zonal flow system in a linear magnetized plasma", *Physics of Plasmas*, Vol. 26, (2019), 052305.
3. H. Arakawa et.al., "Eddy, Drift Wave and Zonal Flow Dynamics in a Linear Magnetized Plasma", *Scientific Reports*, Vol. 6, (2016), 33371.
4. H. Arakawa et.al., "Dynamic interaction between solitary drift wave structure and zonal flows in a linear cylindrical device". Vol. 53.11 (2011), 115009.
5. J. Howard. "Vector tomography applications in plasma diagnostics." *Plasma physics and controlled fusion* 38.4 (1996): 489.
6. H. Arakawa et al., "Reynolds force evaluation of quasi-coherent structure by tomographic laser-induced fluorescence spectroscopy." *Plasma and Fusion Research* 18 (2023): 1401032-1401032.
7. H. Arakawa, et al., "Observation of Quasi-Periodic Two-Dimensional Velocity Fields in Plasma Using Tomographic Laser-Induced Fluorescence Spectroscopy." *Plasma and Fusion Research* 18 (2023): 1201086-1201086.
8. H. Arakawa, et al., "Formation Process of a Solitary Vortex in a Zonal Flow-Drift-Wave Dynamics." *Plasma and Fusion Research* 17 (2022): 1301106-1301106.
9. H. Arakawa et al., "Identification of trapping finer-scale fluctuations in a solitary vortex in linear magnetized plasma." *Plasma Physics and Controlled Fusion* 65.11 (2023): 115002.
10. M. Sasaki et al., "Evaluation of abrupt energy transfer among turbulent plasma structures using singular value decomposition." *Plasma Physics and Controlled Fusion* 63.2 (2020): 025004.
11. H. Arakawa et al., "Bifurcation of the plasma turbulence on LMD-U." *Plasma Physics and Controlled Fusion* 52.10 (2010): 105009.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 ARAKAWA Hiroyuki, SASAKI Makoto, INAGAKI Shigeru, LESUR Maxime, KOSUGA Yusuke, KOBAYASHI Tatsuya, KIN Fumiyoshi, YAMADA Takuma, NAGASHIMA Yoshihiko, FUJISAWA Akihide, ITOH Kimitaka	4. 巻 17
2. 論文標題 Formation Process of a Solitary Vortex in a Zonal Flow - Drift-Wave Dynamics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1301106 ~ 1301106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.17.1301106	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 ARAKAWA Hiroyuki, SASAKI Makoto, INAGAKI Shigeru, FUJISAWA Akihide	4. 巻 18
2. 論文標題 Reynolds Force Evaluation of Quasi-Coherent Structure by Tomographic Laser-Induced Fluorescence Spectroscopy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1401032 ~ 1401032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.18.1401032	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 Nagashima Yoshihiko, Fujisawa Akihide, Yamasaki Kotaro, Inagaki Shigeru, Moon Chanho, Kin Fumiyoshi, Kawachi Yuichi, Arakawa Hiroyuki, Yamada Takuma, Kobayashi Tatsuya, Kasuya Naohiro, Kosuga Yusuke, Sasaki Makoto, Ido Takeshi	4. 巻 92
2. 論文標題 A Proposal to Evaluate Electron Temperature and Electron Density Fluctuations Using Dual Wavelength Emission Intensity Tomography in a Linear Plasma	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 033501 ~ 033501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.92.033501	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 Kawachi Y., Inagaki S., Sasaki M., Kosuga Y., Yamasaki K., Kobayashi T., Kin F., Yamada T., Arakawa H., Nagashima Y., Moon C., Kasuya N., Fujisawa A.	4. 巻 28
2. 論文標題 Dynamic interaction between fluctuations with different origins in a linear magnetized plasma	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 112302 ~ 112302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0065887	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 Tokuda S., Kawachi Y., Sasaki M., Arakawa H., Yamasaki K., Terasaka K., Inagaki S.	4. 巻 11
2. 論文標題 Bayesian inference of ion velocity distribution function from laser-induced fluorescence spectra	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-00138-4	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 Arakawa Hiroyuki, Sasaki Makoto, Inagaki Shigeru, Lesur Maxime, Kosuga Yusuke, Kobayashi Tatsuya, Kin Fumiyoshi, Yamada Takuma, Nagashima Yoshihiko, Fujisawa Akihide, Itoh Kimitaka	4. 巻 65
2. 論文標題 Identification of trapping finer-scale fluctuations in a solitary vortex in linear magnetized plasma	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma Physics and Controlled Fusion	6. 最初と最後の頁 115002 ~ 115002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6587/acfb3	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 ARAKAWA Hiroyuki, SASAKI Makoto, INAGAKI Shigeru, TERASAKA Kenichiro, KAWACHI Yuichi, KIN Fumiyoshi, YAMADA Takuma, NAGASHIMA Yoshihiko, FUJISAWA Akihide	4. 巻 18
2. 論文標題 Observation of Quasi-Periodic Two-Dimensional Velocity Fields in Plasma Using Tomographic Laser-Induced Fluorescence Spectroscopy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1201086 ~ 1201086
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.18.1201086	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 KODAHARA Takumi, SASAKI Makoto, KAWACHI Yuichi, JAJIMA Yuki, KOBAYASHI Tatsuya, YAMADA Takuma, ARAKAWA Hiroyuki, FUJISAWA Akihide	4. 巻 18
2. 論文標題 Analysis of Turbulence Driven Particle Transport in PANTA by Using Multi-Field Singular Value Decomposition	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1202036 ~ 1202036
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.18.1202036	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 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山田琢磨, 菊田航介, 荒川弘之, 佐々木真, 西澤敬之, 文贊鎬, 永島芳彦, 小菅佑輔, 糟谷直宏, 藤澤彰英
2. 発表標題 多チャンネル計測による直線プラズマの乱流解析
3. 学会等名 日本物理学会 2024年春季大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	佐々木 真 (Sasaki Makoto) (70575919)	日本大学 (32665)	
研究協力者	山田 琢磨 (Yamada Takuma) (90437773)	九州大学 (17102)	
研究協力者	稲垣 滋 (Inagaki Shigeru) (60300729)	京都大学 (14301)	
研究協力者	伊藤 公孝 (Itoh Kimitaka) (50176327)	中部大学 (33910)	
研究協力者	永島 芳彦 (NAGASHIMA YOSHIHIKO) (90390632)	九州大学 (17102)	

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			
フランス	Universite de Lorraine			