

令和 2 年 5 月 20 日現在

機関番号：15201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14897

研究課題名(和文)直線磁化プラズマにおける乱流・流れ・孤立渦の3体系ダイナミクスの解明

研究課題名(英文)Clarification of dynamic interaction among turbulence, flow, and solitary eddy in a linear magnetized plasma

研究代表者

荒川 弘之(Arakawa, Hiroyuki)

島根大学・学術研究院理工学系・准教授

研究者番号：00615106

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、直線磁化プラズマ乱流実験において、乱流(ドリフト波タイプ)と流れ(帯状流)に加えて乱流よりも寿命が長く、周方向及び径方向にローカルな構造である“孤立渦”による3体系のダイナミクスを解明した。流れが、乱流の基本モードとその高調波の位相関係を変調することで、孤立渦の生成・消滅を引き起こすことを明らかにした。加えて、孤立渦形成と同期して、孤立渦よりも寿命が短く、波数が大きいコヒーレント構造が4次的に形成されることを発見した。孤立渦とコヒーレント構造の粒子輸送は同程度であり、孤立渦に加えてコヒーレント構造も輸送に大きく関わっていることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果による、孤立渦形成機構の解明により、これまで考えられてきた乱流と流れの2体系の乱流物理理論を、孤立渦を加えた3体系に拡張する指標ができた。加えて、孤立渦に伴うコヒーレント構造の観測とこれらの輸送の評価により、4次的効果を含めた多体の乱流物理の重要性を示した。本研究成果を基礎として、核融合プラズマにおいても、閉じ込め改善・新しい制御手法の開発ができる可能性がある。加えて物理的共通点が知られている惑星流体等、中性乱流理論への寄与も期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we clarified dynamics among turbulence (drift wave type), flow (zonal flow) and a solitary eddy in a linear magnetized plasma. The solitary eddy is a perturbation with circumnavigating motion localized radially and azimuthally. The solitary eddy is organized/damped in synchronization with the phase modulation of the fundamental drift wave type mode and nonlinearly excited modes. The modes are modulated by the flow fluctuations. In addition, it was observed that a coherent structure with a shorter life and a larger wave number was formed at the formation of the solitary eddy. The amplitudes of particle transport by the solitary eddy and the coherent structure are close, which indicates that the coherent structure would have great impact on the turbulent transport.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：プラズマ乱流 孤立渦 帯状流 プラズマ計測 レーザー誘起蛍光法

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 核融合プラズマ、宇宙プラズマ、実験室プラズマにおいて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事が知られている。これまでの研究で、磁場に垂直な周方向流れ(帯状流)が乱流(ドリフト波)を抑制し、乱流(ドリフト波)が流れ(帯状流)を駆動する事が明らかになり、乱流と流れの相互作用が輸送やプラズマの性能を考える上で重要であることが分かってきた(参考論文①)。これにより、乱流と流れの2体系の理解が進んできた。特に、核融合プラズマにおいては閉じ込め改善に重要な役割を果たすことが知られており、そのダイナミクスの理解が強く求められている。

(2) 木星等の惑星流体における乱流と流れの共存系では、乱流よりも寿命が長く、空間的に局在した“孤立渦”の存在が広く知られている。プラズマ中の流れと惑星中の流れには、物理的共通点がよく知られており(参考論文①)、磁場閉じ込めプラズマでの孤立渦の観測が求められていた。

(3) 近年、荒川ら(参考論文②)は、直線磁化プラズマ発生装置を用いた研究において、乱流・流れと共存する孤立渦の観測に初めて成功した。さらに、観測された孤立渦が流れに非常に大きな影響を与える結果が得られた。孤立渦の形成は、プラズマの輸送や性能を考える上で新たな鍵となる可能性がある。この理解には、従来の乱流と流れの相互作用に加え、孤立渦の効果を取り込んだ3体系のダイナミクス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、乱流と流れに“孤立渦”を加えた3体系のダイナミクスを解明する。3体系における孤立渦の役割を明らかにする為に、種々の乱流状態で3者を系統的に観測し、3体系のエネルギー分配則、3者間の駆動・減衰力の変化、孤立渦の直接的な輸送への寄与を定量的に実測する。さらに、孤立渦の生成・消滅時における、これらの時間的变化を得ることで、3者間の因果関係を明らかにし、輸送ダイナミクス則にせまる。

### 3. 研究の方法

(1) 種々の乱流状態について系統的な観測のため、外部制御パラメータである磁場強度と中性粒子ガス圧及びプラズマ生成パワー制御を行い、ラングミュアプローブ(径方向多点プローブ、周方向多点プローブ)を用いて観測を行った。アルゴンガスを用い、プラズマ入力パワーは3 kWで、磁場強度は、300 Gから1500 G、中性粒子ガス圧は、2 mTorr(0.27 Pa)から6 mTorr(0.80 Pa)まで変化させた。

(2) 孤立渦の駆動力と、孤立渦による乱流と流れの減衰・駆動への寄与、これに伴う輸送の変化を明らかにする為、周方向多点ラングミュアプローブを用いた時空間フーリエ変換による素過程分解を行った。流れと孤立渦形成に伴い、条件付き平均を行うことで、個々のモードにおける位相・振幅変調を導出した。バイスペクトル解析により、孤立渦生成に伴う非線形結合の観測を行った。孤立渦生成に伴うコヒーレント構造の励起・減衰の2次元観測を行うため、乱流揺動観測のための1次元Template法(参考論文③)を2次元へ拡張した。

(3) イオン流れ・温度計測の為、レーザー誘起蛍光法(LIF法)の高時間分解能化とS/N(信号とノイズの強度比率)改善を行った。加えて、大幅なS/N改善のため、トモグラフィーの技術を応用したベクトルトモグラフィー(参考論文④)をレーザー誘起蛍光法(LIF法)へ適用した。

### 4. 研究成果

(1) 孤立渦の生成・消滅が、乱流(ドリフト波タイプモード)と、その高調波間の位相変調に起因することを明らかにした。これにより、孤立渦形成の因果関係が分かった。

孤立渦と乱流、流れの弁別は、(a)径方向駆動ラングミュアプローブと周方向多点ラングミュアプローブによる孤立渦検出による条件付き平均、(b)周波数弁別、(c)乱流とその高調波の位相速度に沿ったガリレイ変換、により行った。更に、これらの構造の時空間フーリエ変換による素過程分解を行った。これらの解析により、乱流とその高調波間の位相変調及び振幅変調は、流れの変動と同期していることが分かった。乱流とその高調波間の位相変調及び振幅変調をそれぞれ一方の値を固定することで、何れが孤立渦形成により本質的に関わっているか調査を行った。結果、位相変調のみを行った場合には、孤立渦の形成を模擬できたが、振幅変調だけでは、孤立渦の生成・消滅を説明できなかった。位相変調がより孤立渦の形成に重要であることが分かった。以上から、流れによって乱流とその高調波の位相変調を引き起こすことが、孤立渦の駆動に重要な役割を果たすことが明らかとなった。

一方、これまでの研究で、孤立渦が流れを加速することが分かっている(参考論文②)。これらから、3体系における孤立渦の因果関係が明確となった。即ち、(a)乱流の基本モードから位相速度がそろった高調波が形成され、加えて流れ(帯状流)が駆動される、(b)流れは乱流を介して孤立渦を形成する、(c)孤立渦は流れを加速する、関係が分かった。

(2) 外部制御パラメータである磁場強度(ラーマ半径)・中性粒子ガス圧(イオン-中性粒子衝突周波数)を変化させ、乱流・流れ・孤立渦の3体系における系統的な理解を行った。

外部制御パラメータ変化により、乱流(ドリフト波タイプモード)と流れ(帯状流)の強度マップを作成した。帯状流強度は600 G、2 mTorr 付近において最大となり、中性粒子ガス圧及び磁場強度が増加するにつれてパワーが減衰していた。900 G以下の磁場強度における中性粒子ガス圧(イオン-中性粒子衝突周波数)依存性は、数値シミュレーションによる結果と矛盾ない結果であった[参考論文⑤]。磁場強度の増加により、ストリーマーの形成(2 mTorr, 900 G条件)[参考論文⑥]や、密度勾配及び乱流揺動強度の増加が観測され、帯状流の最大パワー条件は、これらの強度ピーク条件とは異なっていた。

一方で、孤立渦は、4 mTorr以上の乱流の基本波モードとその高調波の位相速度が揃った条件で形成されることが本研究で明らかになっている。この条件は、帯状流強度が相対的に小さい条件である。孤立渦は流れに大きな影響を及ぼすことが分かっているため、帯状流強度が小さい場合においても、孤立渦形成により、乱流輸送が大きく変化する可能性があることを明らかにした。

(3) 孤立渦の減衰過程には、乱流よりも寿命が短く、周方向及び径方向にローカルな構造であるコヒーレント構造が関与する可能性が得られた。

コヒーレント構造の2次元構造を、1次元テンプレート法[参考論文③]を拡張した解析手法開発により得た。コヒーレント構造は、乱雑な構造ではなく、孤立渦構造と同期して形成されるコヒーレントな構造を持つことが分かった。また、コヒーレント構造は、孤立渦と同じ周方向及び径方向にローカルな構造となり、ラーマ半径よりも小さい構造が観測された。加えて、ベクトル解析により、コヒーレント構造は、孤立渦と非線形結合していることがわかった。

また、孤立渦とコヒーレント構造の強度変化を比較したところ、コヒーレント構造は孤立渦の形成より遅れて生成することがわかった。加えて、孤立渦は内向きの粒子輸送に対して、コヒーレント構造は外向きの粒子輸送となることがわかった。これらにより、コヒーレント構造は孤立渦による速度勾配に起因する不安定性により励起される可能性が得られた。不安定性の候補としてケルビンヘルムホルツ不安定性等が考えられ、いずれも孤立渦を減衰する効果を持つ不安定性であり、コヒーレント構造は孤立渦の減速に寄与する役割をもつと考えられる。

乱流と流れ、孤立渦の3体系では、孤立渦は流れを加速し、また流れは乱流を介して孤立渦を形成することが研究成果(1)で分かっている。これは、流れおよび孤立渦構造がより強くなる過程を示している。孤立渦の減衰過程の可能性が得られたことにより、孤立渦が流れに与える影響がコヒーレント構造の形成で小さくなることから、コヒーレント構造形成が流れの揺動の周期を決めている可能性が得られた。以上から乱流と流れ、孤立渦の3体系に加えて、コヒーレント構造の4体系を考えることが、より一貫した物理過程になると考えられる。本成果により、4体系の乱流物理を切り開くとともに、その重要性が明らかになった。

(4) レーザー誘起蛍光法(LIF法)によるイオン流れ・温度の絶対値測定を行うため、S/Nの改善及びベクトルトモグラフィによる基礎的測定を行った。

LIF法では、レーザー波長スキャンにより、イオン速度分布関数を求める。この際、90°C程度に熱した円筒形のヨウ素封入管へレーザー光を入射することで、レーザー波長に応じた吸収ピークから絶対波長を見積もった。これにより、レーザー波長計測の高速かつ同期計測(約50Hz)を行えるようにした。また、自動ステージによる空間スキャンの高速・効率化を行った。蛍光計測時の背景光削減の為、受光フィルターの狭帯域化を行った。加えて、高透過光ファイバーの採用、アイソレーションアンプの採用により、ノイズ低減・高信号化を行った。また、プラズマへ直接挿入する静電プローブを付いた流れ計測手法である、マッハプローブをLIF法で補正可能な位置に新たに設置し、検証を行った。

トモグラフィの技術を応用したベクトルトモグラフィをレーザー誘起蛍光法(LIF法)へ適用した。乱流数値シミュレーション結果を用い、多点ラングミュアプローブとLIF法との条件付き平均により、計測を行った際に得られる結果を模擬した。これにより、準秩序構造を持つ乱流条件においてレイノルズ応力が再現可能なことを明らかにした。ベクトルトモグラフィ実証実験も同様に行い、プラズマの端部分において、これまで得られなかった平均流速の観測に成功した。局所乱流構造の観測には、より統計量を増やす必要があり、レーザー機器の長時間(数時間以上)の安定化も課題となることが分かった。

<参考論文>

- ① P. Diamond et. al., Plasma Physics and Controlled Fusion, 47, 5, R35-R161 2005.
- ② H. Arakawa et. al., Scientific Reports, 6, 33371, 2016.
- ③ S. Inagaki et al., Plasma Fusion Res. 9, 1201016, 2014.
- ④ J. Howard, Plasma Physics and Controlled Fusion, 38, 4, 1996.
- ⑤ N. Kasuya et.al., Physics of Plasmas 15, 052302, 2008.
- ⑥ H. Arakawa et.al., Plasma Physics and Controlled Fusion, 52, 105009, 2010.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Arakawa Hirotyuki, Inagaki Shigeru, Kosuga Yusuke, Sasaki Makoto, Kin Fumiyoshi, Hasamada Kazunobu, Yamasaki Kotaro, Kobayashi Tatsuya, Yamada Takuma, Nagashima Yoshihiko, Fujisawa Akihide, Kasuya Naohiro, Itoh Kimitaka, Itoh Sanae I	4. 巻 14
2. 論文標題 Ion temperature measurement by laser induced fluorescence spectroscopy in panta	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 1450 ~ 1454
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/tee.22962	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 Arakawa H., Sasaki M., Inagaki S., Kosuga Y., Kobayashi T., Kasuya N., Yamada T., Nagashima Y., Kin F., Fujisawa A., Itoh K., Itoh S.-I.	4. 巻 26
2. 論文標題 Roles of solitary eddy and splash in drift wave/zonal flow system in a linear magnetized plasma	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physics of Plasmas	6. 最初と最後の頁 052305 ~ 052305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5094577	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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 荒川弘之, 佐々木真, 稲垣滋, 小菅佑輔, 小林達哉, 山田琢磨, 永島芳彦, 藤澤彰英, 伊藤公孝
2. 発表標題 直線磁化プラズマにおける磁場強度-中性粒子ガス圧制御による帯状流変化
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荒川弘之, 佐々木真, 稲垣滋, 藤澤彰英, 寺坂健一郎, 山崎広太郎
2. 発表標題 ベクトルトモグラフィーによる乱流中の準秩序構造観測
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 H. Arakawa, S. Inagaki, M. Sasaki, Y. Kosuga, T. Kobayashi, N. Kasuya, Y. Nagashima, T. Yamada, A. Fujisawa, S.-I. Itoh, K. Itoh
2. 発表標題 Wave, flow and vortex: the third structure in drift wave turbulence
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 荒川弘之, 佐々木真, 稲垣滋, 小菅佑輔, 小林達哉, 金史, 挟間田一誠, 河内裕一, 山田琢磨, 永島芳彦, 山崎広太郎, 藤澤彰英, 伊藤公孝, 伊藤早苗
2. 発表標題 直線磁化プラズマにおけるドリフト波・帯状流・孤立渦による飛沫生成機構
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒川弘之, 佐々木真, 稲垣滋, 小菅佑輔, 金史良, 小林達哉, 永島芳彦, 山田琢磨, 山崎広太郎, 藤澤彰英, 伊藤早苗, 伊藤公孝
2. 発表標題 Observation of excitation/damping mechanism on solitary eddy in a linear magnetized plasma
3. 学会等名 Plasma Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 木村俊介, 荒川弘之, 稲垣滋, 金史良, 挟間田一誠, 張博宇, 山崎広太郎, 山田琢磨, 永島芳彦, 佐々木真, 糟谷直宏, 小菅佑輔, 藤澤彰英
2. 発表標題 レーザー誘起蛍光法を用いたイオン温度計測のための高速波長スキャン
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会九州・沖縄・山口支部 第 21 回支部大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

本研究結果を発表した、Plasma Conference 2017 (姫路市, 2017年11月20日-11月24日)において、2017年度プラズマ・核融合学会賞若手学会発表賞を受賞した。本研究結果を発表した論文、H.Arakawa et.al, "Roles of solitary eddy and splash in drift wave - zonal flow system in a linear magnetized plasma", Physics of Plasmas, 2019は、Physics of PlasmasのEditor's Selections from "Nonlinear phenomena, turbulence, transport" に選ばれた。

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)	九州大学・応用力学研究所・助教  (17102)	
研究協力者	稲垣 茂  (Inagaki Shigeru)	九州大学・応用力学研究所・教授  (17102)	
研究協力者	小菅 佑輔  (Kosuga Yusuke)	九州大学・応用力学研究所・准教授  (17102)	