

令和元年6月4日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18335

研究課題名（和文）磁化プラズマ乱流における3次元流れ場形成の基礎過程

研究課題名（英文）Fundamental processes of formation of three-dimensional flow in magnetized plasma turbulence

研究代表者

佐々木 真 (Sasaki, Makoto)

九州大学・応用力学研究所・助教

研究者番号：70575919

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、強い流れが存在する状況におけるプラズマ輸送の空間分布について重要な機構を明らかにした。流れが強くなるとケルビンヘルムホルツ不安定性に代表される速度不均一由来の不安定性が発生する。本研究では、速度不均一駆動不安定性とドリフト波不安定性との両方を取り込み、「複数不安定性の競合」やその結果として形成される「巨視的流れ構造の選択則」を明らかにした。また、流れと乱流の相互作用について、流れによる乱流捕捉効果が「乱流の空間構造」を規定する鍵となる事を示した。さらに、高エネルギー粒子を含む場合への拡張も行い、高エネルギー粒子駆動の垂直流れが、「磁場方向運動量輸送を駆動する機構」も発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

閉じ込めプラズマには自発的に流れを駆動する機構がある一方、エネルギー注入が普遍的に存在し、それに伴う運動量流入があるため通常強い流れが存在する。従来研究で中心的研究対象であったドリフト波に加え、流れが駆動する不安定性が共存する系を調べた。流れや乱流輸送の空間構造を決める重要な物理機構を明らかにし、核融合プラズマに存在する高エネルギー粒子効果を含む系への拡張を行った。さらに、改善閉じ込めプラズマでしばしば観測される突発的輸送について、複数不安定性の競合を考える事で、その前兆振動と思われる不安定性を発見した。本研究によって、強い流れを伴うプラズマについての輸送の空間構造についての理解を進展させた。

研究成果の概要（英文）：In the series of the study, we clarified important physical mechanisms for the spatial profiles of plasma transport in the presence of strong flows. When the flow becomes strong, the spatial inhomogeneity itself could be a cause of instabilities such as Kelvin-Helmholtz instability and so on. In this study, instabilities that stem from the flow inhomogeneity were considered as well as the drift waves. We elucidated “competition of multiple instabilities”, and “the selection rule of the topology of macroscopic flow”. It was clearly demonstrated that the “turbulence trapping due to flow” is a key to determine the spatial profiles of turbulence. Moreover, we extended the situation to include the energetic particles, and a mechanism was found that the perpendicular flow driven by the energetic particles drives parallel momentum transport to excite the parallel flow.

研究分野：プラズマ輸送

キーワード：閉じ込めプラズマ プラズマ乱流 輸送 帯状流 トロイダル自発回転 構造形成 ダンジェロモード
ドリフト波

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込めプラズマは乱流状態にあるため乱流輸送特性により閉じ込め性能が決まる。プラズマ中の流れは乱流抑制等の重要な効果を持つため、流れ場形成機構を理解する事が喫緊の課題として世界中に認識されている。輸送を伴わない流れの形成機構には乱流による自発的駆動と中性粒子ビーム入射 (NBI) 等の外部運動量注入により形成されるものがある。自発的に駆動される流れとして、ポロイダル流を伴う帯状流やトロイダル自発回転等の研究がそれぞれ進展を見せている。ポロイダル流及びトロイダル流の背景プラズマに与える影響は異なるため、輸送特性を理解するためには、流れ場間の相互作用を取り込み、両者のエネルギー配分を求める事が重要である。トラスプラズマにおける両流れ場は、磁場形状効果によって流れ場間の結合過程が存在する。両流れ場は乱流による駆動力を受けるため、乱流を介して結合している。この過程は従来理論では考慮されておらず、流れ場間相互作用について系統的な研究が必要である。径方向流れ (輸送) ポロイダル流、トロイダル流を同時に考慮し、3次元的流れ構造として捉える必要がある。通常の閉じ込めプラズマには、中性粒子ビーム入射や電磁波入射による外部からの運動量流入が存在する。このような外部からの運動量注入に駆動される流れは、外力の大きさに応じて大きくなるため、外部駆動流れは、乱流抑制効果を持つだけでなく、流れが強い場合はケルビンヘルムホルツ不安定性等の不安定性の自由エネルギー源 (B. N. Rogers, Phys. Rev. Lett. '10) にもなり得、背景乱流の性質自体を変化させる可能性がある。強い流れ場が乱流に及ぼす効果に関して統一的な理解には至っていない。外部運動量注入の結果、実現する3次元的流れ場及び輸送状態の性質について総合的理解が必要である。

2. 研究の目的

磁場閉じ込めプラズマにおける乱流輸送特性の解明には、乱流に大きな影響を与える流れ場を理解する事が重要である。輸送を伴わない流れにはポロイダル方向とトロイダル方向の流れがあり、それぞれ研究が進展している。ポロイダル流とトロイダル流は乱流を介して結合しているため、独立ではなく、両者の相互作用を考える必要がある。本研究では、この流れ場間の相互作用を取り込み、3次元的流れ場形成の基礎過程を明らかにする。流れ場間相互作用として、「磁場形状に起因する過程」と「乱流を介した非線形過程」を対象とし、乱流シミュレーションおよび理論解析を用いてそれぞれの特性を明らかにする。その上で、乱流輸送の空間分布を与える物理機構の理解を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、円筒型プラズマおよびトラスプラズマにおける簡約流体乱流シミュレーション、ジャイロ運動論や波動運動論に基づく理論計算を問題に応じて選択する。簡約流体乱流シミュレーションでは自発駆動3次元流れ場の非線形駆動力及び、流れ場間結合を担う物理機構を明らかにする。さらに、流れ場自体が不安定性の源となる程に外部駆動力を大きくし、ドリフト波乱流と流れ駆動不安定性間の競合過程を調べ、実現する乱流場に応じた流れ場形成機構の特性を調べる。大域の流れと乱流との相互作用には波動運動論を、高エネルギー粒子駆動帯状流解析にはジャイロ運動論を用いる。

4. 研究成果

本研究では、磁場方向流れ場及び磁場と垂直方向の流れとの干渉を担う基礎過程を明らかにした。流れが強いプラズマにおける流れ場形成機構を理解すべく、従来の中心的課題であったドリフト波に加え、速度不均一駆動不安定性との両方を自己無撞着に取り込んだモデルを基礎に研究を行なった。速度不均一駆動不安定性とドリフト波の競合や、「巨視の流れ構造の選択則」、「プラズマ輸送特性」を明らかにした。不安定性の競合の結果、それぞれの不安定性が駆動する粒子輸送や運動量輸送の性質が変化するため、密度分布や流れ構造に遷移が現れる事を示した。さらにトロイダルプラズマにおける複数不安定性競合を考えた。改善閉じ込めプラズマ状態でしばしば観測される突発輸送の前兆振動は、トロイダルリターン流による速度不均一不安定性に酷似していることがわかった。また、流れと乱流の相互作用について、流れによる乱流捕捉効果が「乱流の空間構造」を規定する鍵となる事を示し、従来の帯状流・乱流相互作用のモデル [Diamond, PPCF '05] を乱流の空間構造を解像可能なモデルへの拡張に成功した。乱流は流れ曲率の正の領域で排斥され、負の領域に捕捉される事を示し、実験研究への提案を行った。さらに、高エネルギー粒子を含む場合への拡張も行い、高エネルギー粒子駆動帯状流が、「磁場方向運動量輸送を駆動する機構」も発見した。本機構は、垂直流れ自体が平行流を直接駆動する素過程である。さらに、高エネルギー粒子駆動帯状流と乱流の相互作用シミュレーションを行い、帯状流による乱流捕捉によって乱流の長距離伝播が生じ、輸送障壁を崩壊させる可能性がある事を示した。本機構で運ばれる乱流強度は turbulence spreading と同程度と大きな影響であることがわかった。以上のように、本研究によって、強い流れが存在するようなプラズマにおける3次元的流れ場の形成と、その結果として実現する乱流の空間分布についての物理機構を明らかにすることができた。

5. 主な発表論文等

・ M. Sasaki, N. Kasuya, K. Itoh, Y. Kosuga, M. Lesur, K. Hallatschek, S.-I. Itoh

Toroidal momentum channeling of geodesic acoustic modes driven by fast ions
Nucl. Fusion, 57, 036025 (6 page) (2017).

• M. Sasaki, N. Kasuya, K. Itoh, S. Toda, T. Yamada, Y. Kosuga, Y. Nagashima, T. Kobayashi, H. Arakawa, K. Yamasaki, A. Fujisawa, S. Inagaki, S.-I. Itoh
Topological bifurcation of helical flows in magnetized plasmas with density gradient and parallel flow shear
Phys. Plasmas, 24, 112103-1, 112103-6 (2017).

• M. Sasaki, K. Itoh, K. Hallatschek, N. Kasuya, M. Lesur, Y. Kosuga, S.-I. Itoh
Enhancement and suppression of turbulence by energetic-particle-driven geodesic acoustic modes
Scientific Reports, 7, 16767-1, 16767-7 (2017).

• M. Sasaki, T. Kobayashi, K. Itoh, N. Kasuya, Y. Kosuga, A. Fujisawa, S.-I. Itoh
Spatio-temporal dynamics of turbulence trapped in geodesic acoustic modes
Phys. Plasmas, 25, 012316-1, 012316-5 (2018).

• M. Sasaki, K. Itoh, Y. Kosuga, J. Dong, S. Inagaki, T. Kobayashi, J. Cheng, K. Zhao, S.-I. Itoh
Parallel flow driven instability due to toroidal return flow in H-mode plasmas
Nuclear Fusion, 59, 066039 (2019).

[雑誌論文] (計 11 件)

[1] M. Sasaki, N. Kasuya, K. Itoh, K. Hallatschek, M. Lesur, Y. Kosuga, S.-I. Itoh
A branch of energetic-particle driven geodesic acoustic modes due to magnetic drift resonance
Phys. Plasmas, 23, 102501-1, 102501-7 (2016).

[2] M. Sasaki, N. Kasuya, K. Itoh, Y. Kosuga, M. Lesur, K. Hallatschek, S.-I. Itoh
Toroidal momentum channeling of geodesic acoustic modes driven by fast ions
Nucl. Fusion, 57, 036025 (6 page) (2017).

[3] M. Sasaki, N. Kasuya, S. Toda, T. Yamada, Y. Kosuga, H. Arakawa, T. Kobayashi, S. Inagaki, A. Fujisawa, Y. Nagashima, K. Itoh, S.-I. Itoh
Multiple-instabilities in magnetized plasmas with density gradient and velocity shears
Plasma Fusion Res., 12, 1401042-1, 1401042-7 (2017).

[4] M. Sasaki, N. Kasuya, K. Itoh, S. Toda, T. Yamada, Y. Kosuga, Y. Nagashima, T. Kobayashi, H. Arakawa, K. Yamasaki, A. Fujisawa, S. Inagaki, S.-I. Itoh
Topological bifurcation of helical flows in magnetized plasmas with density gradient and parallel flow shear
Phys. Plasmas, 24, 112103-1, 112103-6 (2017).

[5] M. Sasaki, K. Itoh, K. Hallatschek, N. Kasuya, M. Lesur, Y. Kosuga, S.-I. Itoh
Enhancement and suppression of turbulence by energetic-particle-driven geodesic acoustic modes
Scientific Reports, 7, 16767-1, 16767-7 (2017).

[6] M. Sasaki, T. Kobayashi, K. Itoh, N. Kasuya, Y. Kosuga, A. Fujisawa, S.-I. Itoh
Spatio-temporal dynamics of turbulence trapped in geodesic acoustic modes
Phys. Plasmas, 25, 012316-1, 012316-5 (2018).

[7] M. Sasaki, K. Itoh, T. Ido, A. Shimizu, T. Kobayashi, H. Arakawa, N. Kasuya, A. Fujisawa, S.-I. Itoh
Evaluation of measurement signal of Heavy Ion Beam Probe of energetic-particle driven geodesic acoustic modes
Plasma Fusion Research, 13, 3403040 (2018).

[8] M. Sasaki
Trapping of turbulence clumps by geodesic acoustic modes
AIP Proc, 1993, 20007 (2018).

[9] M. Sasaki, K. Itoh, T. Kobayashi, N. Kasuya, A. Fujisawa, and S.-I. Itoh
Propagation direction of geodesic acoustic modes driven by drift wave turbulence
Nuclear Fusion, 58, 112005 (2018).

[10] M. Sasaki, K. Itoh, Y. Kosuga, J. Dong, S. Inagaki, T. Kobayashi, J. Cheng, K. Zhao,
S.-I. Itoh
Parallel flow driven instability due to toroidal return flow in H-mode plasmas
Nuclear Fusion, 59, 066039 (2019).

[11] M. Sasaki, Y. Camenen, A. Escarguel, S. Inagaki, N. Kasuya, K. Itoh, and T. Kobayashi
Formation of spiral structures of turbulence driven by a strong rotation in magnetically
cylindrical plasmas
Phys. Plasmas, 26, 042305 (2019).

〔学会発表〕(計 32 件：国内 17 件、国際 15 件)

国内学会

(1) 佐々木真

「直線磁化プラズマ乱流シミュレーションによる軸方向流れ駆動不安定性の時空間構造」
プラズマシミュレーションシンポジウム (NIFS) (2016) 9 月

(2) 佐々木真, 糟谷直宏, 登田慎一郎, 小菅佑輔, 小林達哉, 荒川弘之, 山田琢磨, 稲垣滋,
矢木雅敏, 伊藤公孝, 伊藤早苗

「直線磁化プラズマ乱流シミュレーションによるドリフト波と軸方向流れ駆動不安定性の競
合」, 日本物理学会秋季大会 (金沢大学) 15PKA-11 (2016) 9 月 15 日

(3) 佐々木真, 伊藤公孝, 糟谷直宏, 小菅佑輔, Maxime Lesur, 伊藤早苗

「高速イオン駆動測地線音波による乱流の捕捉」
プラズマ核融合学会年会, 11 月 30 日 (2016) (東北大) 30aC06

(4) 佐々木真, 糟谷直宏, 登田慎一郎, 小菅佑輔, 小林達哉, 荒川弘之, 山田琢磨, 稲垣滋,
矢木雅敏, 伊藤公孝, 伊藤早苗

「直線プラズマ乱流シミュレーションの現状と計画」
核燃焼プラズマ統合コード研究会, 2016 年 12 月 8 日 (九大)

(5) 佐々木真, 伊藤公孝, 糟谷直宏, 小菅佑輔, Maxime Lesur, 伊藤早苗

「高速イオン駆動測地線音波による乱流捕捉」
閉じ込め・輸送研究会 2016 12 月 15-16 日 (2016) (NIFS)

(6) 佐々木真, 糟谷直宏, 小菅佑輔, 伊藤公孝, 小林達哉, 登田慎一郎, 山田琢磨, 稲垣滋,
永島芳彦, 矢木雅敏, 伊藤早苗

「密度勾配と平行方向速度シアを伴うプラズマにおける乱流と流れ場の生成」
日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大) 18pC33-5(2017) 3 月 18 日

(7) 佐々木真, 糟谷直宏, 伊藤公孝, 登田慎一郎, 山田琢磨, 小菅佑輔, 永島芳彦, 小林達哉,
荒川弘之, 山崎広太郎, 藤澤彰英, 稲垣滋, 伊藤早苗

「プラズマ乱流における流れ場トポロジーの分岐シミュレーション」
プラズマシミュレーションシンポジウム, 2017 年 9 月 8 日, 核融合研

(8) 佐々木真, 糟谷直宏, 伊藤公孝, 登田慎一郎, 山田琢磨, 小菅佑輔, 永島芳彦, 小林達哉,
荒川弘之, 山崎広太郎, 藤澤彰英, 稲垣滋, 伊藤早苗

密度勾配と磁場方向速度シアを伴うプラズマにおける乱流と流れトポロジー分岐」
プラズマコンファレンス 2017, 2017 年 11 月 21 日, 姫路, 21Dp-04

(9) 佐々木真, 伊藤公孝, Klaus Hallatschek, 糟谷直宏, Maxime Lesur, 小菅佑輔, 伊藤早苗

「高エネルギー粒子駆動測地線音波による乱流の抑制・増長効果」
統合コード研究会 (2017 年 11 月 29 日, 九大応力研)

(10) 佐々木真

「測地線音波と乱流の時空間ダイナミクス」
フロンランナーシンポジウム 伊藤公孝先生御退職記念 (2018 年 1 月 11 日, 核融合研)

(11) 佐々木真, 小林達哉, 伊藤公孝, 糟谷直宏, 小菅佑輔, 藤澤彰英, 伊藤早苗

「測地線音波に捕捉された乱流の時空間ダイナミクス」
日本物理学会年会，東京理科大学野田キャンパス，2018年3月23日，23aK608-5

(12) 佐々木真，伊藤公孝，小林達哉，糟谷直宏，藤澤彰英，伊藤早苗
「ドリフト波と相互作用する測地線音波の伝播方向」
日本物理学会秋季大会，同志社大学，2018年9月10日，10aC102-8

(13) 佐々木真，A. Escarguel，Y. Camenen，稲垣滋，伊藤公孝，糟谷直宏，小林達哉
「プラズマ回転不安定性におけるスパイラル構造の形成」
プラズマシミュレーションシンポジウム，核融合研，2018年9月13日，P-12（ポスター）

(14) 佐々木真，糟谷直宏，伊藤公孝，登田慎一郎，山田琢磨，小菅佑輔，永島芳彦，小林達哉，荒川弘之，山崎広太郎，藤澤彰英，稲垣滋，伊藤早苗
「Chirality of helical flows in magnetized plasmas」
統合コード研究会，2018年11月30日，九大応力研（口頭）

(15) 佐々木真
「プラズマ乱流における螺旋流のカイラリティ」
プラズマ核融合学会第35回年会，2018年12月4日，大阪大学（招待講演）

(16) 佐々木真，A. Escarguel，Y. Camenen，稲垣滋，伊藤公孝，糟谷直宏，小林達哉
「円筒型磁化プラズマにおける回転駆動乱流による螺旋構造の形成」
プラズマ核融合学会第35回年会，2018年12月5日，大阪大学（ポスター）

(17) 佐々木真
「磁化プラズマにおける乱流の時空間構造」
日本物理学会年会，2019年3月14日，九州大学伊都キャンパス（招待講演）

国際会議

(18) M. Sasaki, N. Kasuya, K. Itoh, Y. Kosuga, K. Hallatschek, M. Lesur, S.-I. Itoh
"Toroidal momentum transport by geodesic acoustic modes driven by fast ions"
6th Asia Pacific Transport Working Group International Conference, Seoul (Korea), C0-5
(oral) (2016) June. 23, Korea University

(19) M. Sasaki, N. Kasuya, Y. Kosuga, K. Itoh, K. Hallatschek, M. Lesur, S.-I. Itoh
"A new branch of geodesic acoustic modes driven by fast ions"
26th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2016) TH/P4-12. Japan (Kyoto)

(20) M. Sasaki, K. Itoh, K. Hallatschek, N. Kasuya, M. Lesur, Y. Kosuga S.-I. Itoh
"Enhancement and suppression of turbulence by energetic-particle-driven geodesic acoustic modes"
7th Asia Pacific Transport Working Group International Conference, Nagoya (Japan), CP-4
(poster) (2017) June. 6, Nagoya University

(21) M. Sasaki, N. Kasuya, K. Itoh, S. Toda, T. Yamada, Y. Kosuga, Y. Nagashima, T. Kobayashi, H. Arakawa, K. Yamasaki, A. Fujisawa, S. Inagaki, S.-I. Itoh
"Topological bifurcation of turbulence driven flows in magnetized plasmas"
9th Festival de Theorie, Aix-en-Provence, Jun. 29 (2017), oral

(22) M. Sasaki, K. Itoh, K. Hallatschek, T. Kobayashi, N. Kasuya, M. Lesur, Y. Kosuga, S.-I. Itoh
"Trapping of turbulence clumps by geodesic acoustic modes"
16th International workshop on H-mode Physics and transport barrier, St. Petersburg, Sep. 13 (2017), poster

(23) M. Sasaki, K. Itoh, T. Ido, N. Kasuya, A. Shimizu, A. Fujisawa, S.-I. Itoh
"Evaluation of line-integral effect of Heavy Ion Beam Probe measurement of energetic-particle driven geodesic acoustic modes"
26th International Toki Conference, Toki, P1-72 (poster) (2017) Dec. 5

(24) M. Sasaki, K. Itoh, N. Kasuya, S. Inagaki, T. Kobayashi, A. Fujisawa, S.-I. Itoh

Parallel flow driven instability due to toroidal return flow in H-mode plasmas
APTWG 2018, 13, June, Chengdu (A-IV3) (invited)

(25) M. Sasaki

Summary talk on Model reduction and experimental validation (for session E)
APTWG 2018, 15, June, Chengdu

(27) M. Sasaki, T. Kobayashi, K. Itoh, N. Kasuya, Y. Kosuga, A. Fujisawa, S. Inagaki,
S.-I. Itoh

Spatiotemporal dynamics of turbulence with zonal flows
European Physical Society, 45th Conference on Plasma Physics, P1.1095 (Prague, Czech):
poster

(28) M. Sasaki, T. Kobayashi, K. Itoh, N. Kasuya, Y. Kosuga, A. Fujisawa, S. Inagaki,
S.-I. Itoh

Enhancement and suppression of turbulence by energetic-particle-driven geodesic acoustic
modes
EFTSOMP, (Prague, Czech): invited

(29) M. Sasaki, T. Kobayashi, K. Itoh, N. Kasuya, Y. Kosuga, A. Fujisawa, S.-I. Itoh
Spatiotemporal dynamics of turbulence with zonal flows

EASW8 2018, 1, August, (Daejeon, Korea): invited

(30) M. Sasaki, N. Kasuya, K. Itoh, S. Toda, T. Yamada, Y. Kosuga, Y. Nagashima, T.
Kobayashi, H. Arakawa, K. Yamasaki, A. Fujisawa, S. Inagaki, S.-I. Itoh

Selection of flow chirality in drift-mode and D' Angelo-mode fluctuations
AAPPS-DPP, 14 November (2018): invited

(31) M. Sasaki, T. Kobayashi, K. Itoh, N. Kasuya, Y. Kosuga, A. Fujisawa, S. Inagaki,
S.-I. Itoh

Spatial structure of turbulence and flows in magnetically confined plasmas
Max-Planck Princeton Conference, February 17 (2019): talk

(32) M. Sasaki

On the spatial profile of turbulence in magnetically confined plasmas
ISEE (Nagoya, Japan), Feb 27, (2019), invited talk

6 . 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：伊藤公孝

ローマ字氏名：Itoh Kimitaka

研究協力者氏名：糟谷直弘

ローマ字氏名：Kasuya Naohiro

研究協力者氏名：小林達哉

ローマ字氏名：Kobayashi Tatsuya

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。