

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800283

研究課題名(和文) マルチスケールプラズマ乱流におけるマイクロメソスケール渦の形成・消失過程の解明

研究課題名(英文) Elucidation of generation and dissipation processes of micro-meso-scale eddies in multi-scale plasma turbulence

研究代表者

前山 伸也 (Maeyama, Shinya)

名古屋大学・理学研究科・助教

研究者番号：70634252

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙や核融合装置などで観測される磁場閉じ込めプラズマでは、密度・温度勾配を駆動源とする不安定性が存在し、それにより生じた揺動は乱流を作り出す。本研究では、質量の重いイオンの運動に起因する長波長の乱流と、質量の軽い電子の運動に起因する極短波長の乱流が共存する際に、両者の間で相互作用が存在することを明らかにした。これら大きくスケールの異なる乱流(マルチスケールプラズマ乱流)を数値シミュレーションに基づき詳しく解析し、乱流混合や電子の運動論的応答により、イオンと電子の中間的なスケールの構造(サブイオンスケール構造)が形成され、それを介して両スケールの乱流が相互作用するという物理機構を解明した。

研究成果の概要(英文)：In magnetically confined plasma observed in space and fusion devices, density and temperature gradients drive instabilities and associated turbulence. This research clarifies the existence of cross-scale interactions between long-wave-length turbulence due to the dynamics of heavy ions and extremely short-wave-length turbulence due to the dynamics of light electrons. Such a multi-scale turbulence involving different two injection scales has been investigated by means of numerical simulations. We revealed that the mechanism of cross-scale interactions via sub-ion-scale structure, namely intermediate scale between electron and ion scales, which is generated by turbulent mixing or kinetic response of electrons.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：プラズマ乱流 磁化プラズマ マルチスケール物理 非線形相互作用

### 1. 研究開始当初の背景

磁場閉じ込めプラズマ中で生じる乱流は、電子の運動に起因する極微細なスケールと、イオンの運動に起因する比較的大きなスケールの異なる微視的不安定性を内在するマルチスケール乱流物理である。従来の研究では、モデルの単純化および数値解析負荷の軽減の観点から、両者のスケール分離を仮定した単一スケール乱流解析が多く行われ、核融合プラズマにおける乱流輸送現象に関する理解が進んできた。

一方、スケールの離れた両乱流間の相互作用(マルチスケール相互作用)の有無についても継続的に議論がなされ、理論モデルによる予測[1,2]や、人為的にスケールを近づけた低質量比シミュレーションによる解析[3,4]などが行われていたが、現実的なスケールの取り扱いや両者の中間的なスケールの構造を正しく分解できないといった問題が依然として残されていた。

- [1] S. I. Itoh and K. Itoh, Plasma Phys. Controlled Fusion 43, 1055 (2001).
- [2] C. Holland and P. H. Diamond, Phys. Plasmas 11, 1043 (2004).
- [3] J. Candy, et al., Plasma Phys. Control. Fusion 49, 1209 (2007).
- [4] T. Görler and F. Jenko, Phys. Rev. Lett. 100, 185002 (2008).

### 2. 研究の目的

本研究では、水素・電子実質量比における大きくスケールの離れた電子・イオンスケール乱流間のマルチスケール相互作用の有無を明らかにすること、および、両者の中間的なスケールの構造(マイクロメソスケール渦またはサブイオンスケール構造と呼ぶことにする)の形成・消失という観点からマルチスケール相互作用の物理機構を明らかにすることを研究目的とした。

### 3. 研究の方法

代表者らは、非常に高解像度・高精度の大規模シミュレーションを必要とするマルチスケール乱流解析に取り組むために、「京」コンピュータにおける5次元位相空間並列化、3次元トラスネットワークにおける区分化プロセス配置最適化、通信と演算のパイプライン化オーバーラップ[5]などの先進的な超並列計算手法を開発した。これにより並列計算性能の大幅な向上を実現したジャイロ運動論的シミュレーションコード GKV[6]を用いて、電子・イオン実質量比におけるマルチスケール乱流の直接数値シミュレーションを行うとともに、非線形相互作用を詳細に評価することでマルチスケール相互作用の物理機構を解析した。

- [5] S. Maeyama et al., Plasma Fusion Res. 8, 1403150 (2013).
- [6] T.-H. Watanabe and H. Sugama, Nucl. Fusion 46, 24 (2006).

### 4. 研究成果

#### (1) 電子・イオンスケール乱流間マルチスケール相互作用の発見

プラズマ乱流を記述する第一原理的方程式であるジャイロ運動論に基づき、電子スケールからイオンスケールまで扱うマルチスケール乱流シミュレーションを実施した。これにより得られた乱流揺動が作り出す電子熱輸送フラックスの空間スペクトルを図1に示す。マルチスケール乱流解析の結果を、スケール分離を仮定した低解像度のイオン単一スケール乱流解析、または、小ボックスサイズの電子単一スケール乱流解析のスペクトルと比較すると、電子温度勾配モードに起因する高波数の乱流揺動が抑制されていること、および、イオン温度勾配モードに起因する低波数の乱流揺動が増大していることが見て取れる。このことは、両スケールの乱流間に明らかに相互作用が存在することを示している。また、それにより電子熱輸送の大きさも大幅に(～数倍程度)変化し、マルチスケール相互作用がプラズマ閉じ込め特性にインパクトを与えうることを明らかにした。

このような乱流間の相互作用は、磁化プラズマ中ではExBドリフトや沿揺動磁場移流のような非線形性を介してのみ起こりうる。そこで、非線形マルチスケール相互作用を解析するために、波と波の非線形相互作用を定量的に評価する三波結合伝達解析[7]の手法を適用した。この手法は、乱流揺動二乗振幅(揺動エントロピー)の保存則を記述するエントロピーバランス方程式に基づいて、非線形性によるエントロピー伝達関数を記述するものである。三波結合伝達解析により、イオン温度勾配モードに起因するイオンスケール

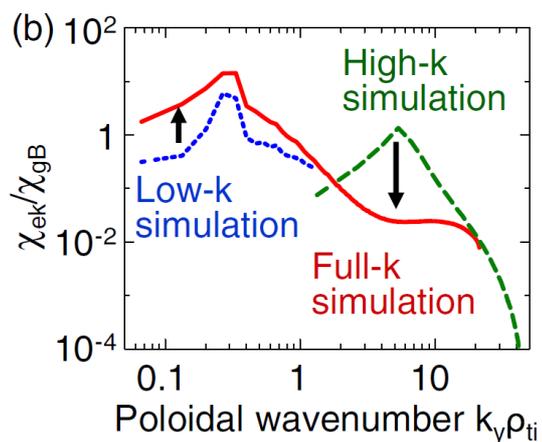


図1 電子熱輸送係数のポロイダル方向波数スペクトル。実線、点線、破線がそれぞれマルチスケール乱流解析、イオン単一スケール乱流解析、電子単一スケール乱流解析の結果を表す。マルチスケール乱流解析では電子スケール熱輸送の低減およびイオンスケール熱輸送の増大が観測された。[5. 主な発表論文等〔雑誌論文〕より引用]

の乱流渦が電子温度勾配モードの安定化に寄与することを明らかにした。また、マルチスケール乱流ではイオン単スケール乱流に比べて帯状流（プラズマを閉じ込めている磁気面上様な静電ポテンシャルにより作られる流れ。イオン温度勾配モードを抑制する働きがあることが知られる）が相対的に弱いこと、このとき乱流から帯状流へのエントロピー伝達率が低下していることを示した。

以上の結果は、従来スケール分離が仮定されてきた電子・イオンスケール乱流間にマルチスケール相互作用が存在すること、非線形性を介した渦の形成・消失過程としてマルチスケール相互作用が理解されることを示した革新的な成果であるといえる。

[7] M. Nakata, et al., Phys. Plasmas 19, 022303 (2012).

(2) 非線形相互作用解析の新手法の開発とその適用によるマルチスケール相互作用の物理機構の解明

三波結合伝達の手法を用いることで、マルチスケール相互作用の一端が明らかとなったが、ジャイロ運動論における三波結合伝達は、2千億格子点を超える膨大な位相空間情報を多時間ステップに渡り蓄えておく必要があること、乱流間の相互作用解析には単一の波だけでなく集団的なモード間の相互作用を評価する必要があることなどの数値的・理論的困難性により、マルチスケール相互作用の系統的な解析は依然として課題であった。そこで、Hermite/Laguerre 多項式を用いた粒子分布関数の流体モーメント展開に基づく三波結合伝達関数の流体近似手法を新たに開発した。これにより、数値計算量の大幅な削減に成功し、インタラクティブな乱流相互作用解析が可能となった。さらに、波数空間をいくつかの部分空間に分け、それらの間のエントロピーの授受を評価する部分空間伝達関数を定式化した。これは、中性流体乱流の解析などで広く用いられるセル平均伝達率を非等方スペクトルの場合に一般化したものである。具体的には、部分空間としてイオンスケール乱流成分、電子スケール乱流成分、帯状流成分などと分解することで、乱流・帯状流間の集団的な相互作用を定量評価できる。

上記の新たに開発した三波結合伝達の流体近似や部分空間伝達解析の手法を用いて、研究成果(1)で実施したマルチスケール乱流シミュレーションにおけるスケール間相互作用の詳細解析を実施した。マルチスケール乱流解析において帯状流の生成が相対的に弱まる原因について解明するため、帯状モードに対する非線形エントロピー伝達を評価した結果を図2に示す。ここで、乱流揺動のスケールの大小（イオン Larmor 半径スケールの長波長揺動か、電子 Larmor 半径スケールの短波長揺動か）および、揺動エントロピーの粒子種（イオン分布関数の揺動エントロ

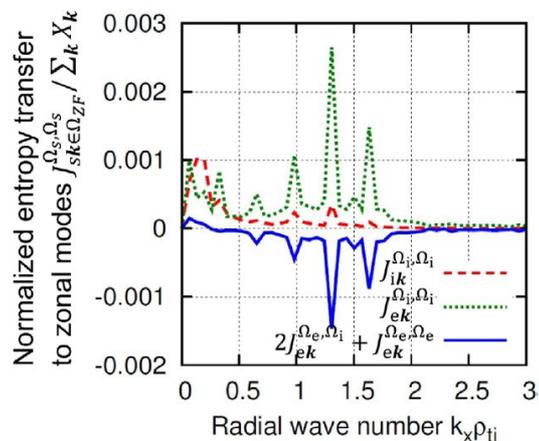


図2 帯状モードに対する非線形エントロピー伝達の径方向波数スペクトル。破線、点線、実線がそれぞれ長波長乱流揺動によるイオンのエントロピー伝達、長波長乱流揺動による電子のエントロピー伝達、短波長揺動による電子のエントロピー伝達を示す。電子スケールの短波長揺動は、特に高波数の帯状モードを減衰させるように働く。[ 5 . 主な発表論文等〔雑誌論文〕より引用 ]

ピーか、電子分布関数の揺動エントロピーか)で分けて、帯状モード生成への寄与を評価した。まず、長波長乱流揺動によるイオンのエントロピー伝達は長波長の帯状モードを生成するように働き、これは典型的なイオン温度勾配モード乱流による帯状流生成と解釈される。一方、長波長乱流揺動による電子のエントロピー伝達は、長波長のみならずイオン Larmor 半径程度の短波長帯状モードをも生成していることが分かる。スペクトルに見られるいくつかのピークは磁気シアを持つ平衡磁場中で磁力線方向一様なモードが作り出す径方向ねじれ構造[8]と対応している。イオン温度勾配モード中の運動論的電子はその速い磁力線方向への運動に起因してモード構造を磁力線方向に引き延ばし、このような径方向ねじれ構造および対応する短波長帯状流を形成すると考えられる[9]。そして、短波長乱流揺動による電子のエントロピー伝達は、このような短波長帯状流を減衰させる働きがある（図2中で負の値をとる）ことが示された。

以上の結果から、極短波長の電子スケール乱流と比較的長波長のイオンスケール乱流のマルチスケール相互作用は、波数空間内での長距離相互作用というよりはむしろ、両者の中間的なサブイオンスケール構造（イオン温度勾配モードの作る短波長乱流渦や短波長帯状流など）を介して起こることが示された。その際、イオンスケール乱流における運動論的電子効果の重要性が明らかとなった。

[8] S. C. Cowley, et al., Phys. Fluids B 3, 2767 (1991).

[9] J. Dominski, et al., Phys. Plasmas 22, 062303 (2015).

(3) マルチスケール乱流の普遍的理解に向けた他種不安定性解析への展開

先の2つの研究成果はイオン温度勾配モードと電子温度勾配モードについての解析であり、サブイオンスケール構造を介したマルチスケール相互作用という新たな知見が得られた。マルチスケール乱流物理の理解をさらに推し進めるため、他種不安定系として、電子熱輸送の候補の一つとして近年研究が進められているマイクロティアリングモードに注目した。その理由は、マイクロティアリングモードはイオン Larmor 半径程度のポロイダル波数を持つイオンスケールの不安定性であるが、同時に半径方向に局在した電流シート構造を持つため、そのような局在構造は一種のサブイオンスケール構造と見なせて、電子スケール乱流の影響を受けやすいだろうと着想したためである。マイクロティアリングモードに関する解析を行うためのコード間ベンチマークや線形理論解析[5]、主な発表論文等〔雑誌論文〕、安定性パラメータスキャンといった準備を進め、マイクロティアリングモードと電子温度勾配モードのマルチスケール相互作用に関する初期的な解析に成功した(図3)。その結果、電子温度勾配モードの成長とともにマイクロティアリングモードが減衰すること、このとき同時にマイクロティアリングモードの持つ局所電流シート構造が破壊されることなどが示唆された。

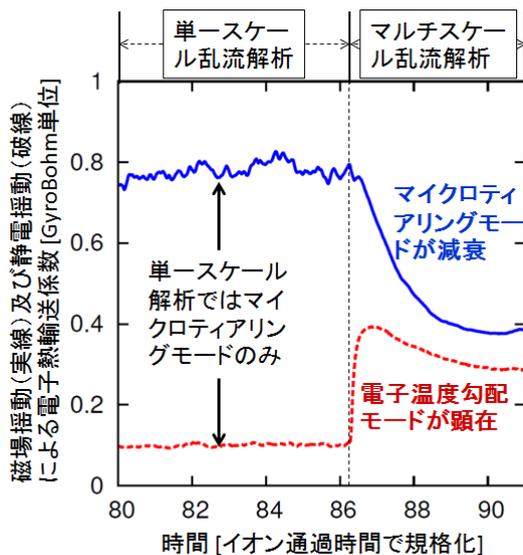


図3 マイクロティアリングモードと電子温度勾配モードを含むマルチスケール乱流解析の一例。時刻  $t=86$  以前は低解像度単一スケール乱流解析、 $t=86$  以降は高解像度マルチスケール乱流解析における電子熱輸送の時間発展を示す。マルチスケール乱流解析では、電子温度勾配モードの成長とともにマイクロティアリングモードによる磁場揺動に起因する電子熱輸送の低減が観測された。〔5. 主な発表論文等〔学会発表〕の図を基に改変〕

(4) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト、および今後の展望

本研究で得られたイオン温度勾配モードと電子温度勾配モード間のマルチスケール相互作用は、期せずして同時期に米国で行われたマルチスケール乱流シミュレーションの結果[10]と整合するものであった。彼らは実験との比較に重点を置き、実験における熱輸送を説明するにはマルチスケール乱流解析が必要である、との結論を得たが、その機構解明には至らなかった。一方、本研究により解明された物理機構は彼らの実験結果をも説明しうる候補であり、マルチスケール相互作用の理論的理解を大きく進展させた。

また、我々の理論研究と彼らの実験研究の成果を契機として、欧州のJET装置、米国のDIII-D装置といった大規模実験におけるマルチスケール相互作用の議論が先のIAEA核融合エネルギー会議でなされ、ITERベースラインシナリオにおいてもマルチスケール相互作用の存在が予見される[11]など、核融合研究へのインパクトをもたらした。

これまでのマルチスケール乱流解析はイオン温度勾配モードと電子温度勾配モード間の相互作用解析に限られていた。その他の例として補足電子モードと電子温度勾配モードの間の相互作用解析[12]などが行われたが、短波長の揺らぎを扱うのみに留まっており、依然、他種不安定性におけるマルチスケール乱流の理解は課題として残されている。本研究課題で開拓した、モード構造の奇パリティや局所電流シートといった特徴的な違いを持つマイクロティアリングモードを含む系の解析への展開は先駆的なものであり、マルチスケール乱流相互作用の普遍的理解というプラズマ科学の進展に資するとともに、ITERやJT-60SAといった次世代核融合装置で想定される電子熱輸送機構の解明にも貢献する重要な研究課題である。

[10] N. T. Howard, et al., Phys. Plasmas 21, 112510 (2014).

[11] C. Holland, et al., Nucl. Fusion 57, 066043 (2017).

[12] Y. Asahi, et al., Phys. Plasmas 21, 052306 (2014).

#### 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 6 件)

S. Maeyama, et al., "Cross-scale interactions between turbulence driven by electron and ion temperature gradients via sub-ion-scale structures", Nuclear Fusion 57, 066036 (2017). (査読あり, DOI: 10.1088/1741-4326/aa687c)

S. Maeyama, et al., "Benchmark of electromagnetic gyrokinetic codes in

high performance fusion plasma”, Plasma and Fusion Research 11, 2403011 (2016). ( 査読あり, DOI: 10.1585/pft.11.2403011 )  
前山伸也, スーパーコンピュータ「京」で切り拓くプラズマ乱流研究の新展開, プラズマ・核融合学会誌 91, 589-596 (2015). ( 査読無し, [http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF\\_JS/PF/jspf2015\\_09/jspf2015\\_09-589.pdf](http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JS/PF/jspf2015_09/jspf2015_09-589.pdf) )  
S. Maeyama, et al., “Cross-Scale Interactions between Electron and Ion Scale Turbulence in a Tokamak Plasma”, Physical Review Letters 114, 255002 (2015). ( 査読あり, DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.255002 )  
S. Maeyama, et al., “Improved strong scaling of a spectral/finite difference gyrokinetic code for multi-scale plasma turbulence”, Parallel Computing 49, 1-12 (2015). ( 査読あり, DOI: 10.1016/j.parco.2015.06.001 )  
前山伸也, “ハイパフォーマンスコンピューティングの進展によるプラズマ乱流研究のブレークスルー”, RIST NEWS 57, 15-23 (2014). ( 査読無し, <http://www.rist.or.jp/rnews/57/57s3.pdf> )

〔学会発表〕(計 31 件)

S. Maeyama, et al., “Gyrokinetic analysis of the effects of electron-scale turbulence on ion-scale micro-instabilities”, 26th IAEA Fusion Energy Conference, 17-22 Oct. 2016, Kyoto, Japan (国際学会).  
S. Maeyama, “Cross-Scale Interactions between Electron and Ion Scale Turbulence”, 21st Joint EU-US Transport Task Force Meeting, 5-8 Sep. 2016, Leysin, Switzerland (国際学会, 招待講演).  
前山伸也, “運動論モデルを用いた研究:(運動論的)バレーニングモードの安定性”, 平成 27 年度 MHD 研究会, 2015 年 12 月 16 日, 核融合研(招待講演).  
前山伸也, “核融合プラズマにおける電子/イオンスケール乱流”, 博多ワークショップ - 数値解析と計算科学の協働を目指して -, 2015 年 6 月 13 日, 博多(招待講演).  
S. Maeyama, “Multi-scale simulations of electron- and ion-scale turbulence in magnetic fusion plasma”, Plasma Conference 2014, 2014 年 11 月 18-21 日, 新潟(招待講演).  
S. Maeyama, et al., “Multi-Scale ITG/TEM/ETG Turbulence Simulations with Real Mass Ratio and Beta Value”,

25th IAEA Fusion Energy Conference, 13-18 Oct. 2014, Saint Petersburg, Russia (国際学会, 招待講演).  
前山伸也, “プラズマ乱流のマルチスケールシミュレーション研究”, 第 10 回核融合エネルギー連合講演会, 2014 年 6 月 19-20 日, つくば(招待講演).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)  
取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ

Shinya Maeyama's website,  
<http://www.p.phys.nagoya-u.ac.jp/~smaeyama/>  
名古屋大学教員データベースシステム,  
[http://profs.provost.nagoya-u.ac.jp/view/html/100008165\\_ja.html](http://profs.provost.nagoya-u.ac.jp/view/html/100008165_ja.html)

プレスリリース・報道情報

科学新聞, “核融合プラズマ中の乱流によるマルチスケール相互作用 名古屋大などスパコン「京」用いて発見”, 2015 年 7 月 24 日.  
日刊工業新聞, “核融合のプラズマ乱流解明 電子・イオン相互作用 名大など”, 2015 年 7 月 15 日.  
財経新聞, “名大、スパコン「京」で核融合プラズマ中の乱流の相互作用を明らかに”, 2015 年 7 月 10 日.  
名古屋大学・日本原子力研究開発機構・核融合科学研究所共同プレスリリース, “核融合プラズマ中の乱流が織り成すマルチスケール相互作用 - スーパーコンピュータ「京」で得られた新発見 -”, 2015 年 7 月 8 日.

外部表彰

前山伸也, プラズマ・核融合学会第 21 回学術奨励賞(2016 年 11 月).  
前山伸也, PLASMA2014 若手優秀発表賞(2014 年 11 月).  
前山伸也, 平成 26 年度日本原子力研究開発機構理事長表彰・研究開発功績賞(2014 年 10 月).  
前山伸也, 第 10 回核融合エネルギー連合講演会若手優秀発表賞(2014 年 6 月).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前山 伸也(MAEYAMA, Shinya)  
名古屋大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号: 70634252

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者