

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22340168

研究課題名（和文）磁化プラズマ電子-イオンハイブリッド温度勾配による乱流輸送新現象

研究課題名（英文）New phenomena on turbulence transport caused by electron-ion hybrid temperature gradient in magnetized plasma

## 研究代表者

金子 俊郎（KANEKO TOSHIRO）

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30312599

## 研究成果の概要（和文）：

高電子温度の電子サイクロトロン共鳴プラズマと低温の熱電子を制御して重畳することで、電子温度勾配（ETG）の形成に成功した。この ETG により高周波揺動（ETG モード）が励起され、さらに低周波揺動（ドリフト波モード）も増幅されることが明らかとなった。バイスペクトル解析を用いることで、ドリフト波モードが ETG モードとの非線形マルチスケール結合によって助長され、さらに ETG 強度を詳細に変化させて調べることで、ETG モードからドリフト波モードへエネルギーが移送されることを明らかにした。一方、磁力線垂直方向の  $E \times B$  フロー速度シアによって、ETG モードおよびドリフト波モードが抑制されることを実証した。

## 研究成果の概要（英文）：

Electron temperature gradient (ETG) perpendicular to magnetic field lines is formed by superimposing high-temperature electrons of an electron cyclotron resonance (ECR) plasma upon low-temperature thermionic electrons. The formed ETG is found to excite a high-frequency fluctuation (ETG mode), and also, to stimulate a low-frequency fluctuation (drift-wave mode) excitement via multi-scale nonlinear interaction, which ultimately causes ETG mode energy to be transferred to the drift-wave mode. Furthermore, the strong  $E \times B$  velocity shear is demonstrated to suppress the ETG mode and drift-wave mode, experimentally.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
2011 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2012 年度	3,300,000	990,000	4,290,000
総計	13,200,000	3,960,000	17,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：電子温度勾配モード，ドリフト波モード，非線形結合，バイスペクトル解析，プラズマ乱流，輸送現象，フロー速度シア

## 1. 研究開始当初の背景

磁化プラズマにおける異常輸送機構の解明とその制御は、磁場閉じ込め核融合研究に

おいて経済的な核融合発電実現の観点から、重要な課題として盛んに研究が行われている。異常輸送はプラズマ中の様々な微視的

安定性が作り出す乱流に起因することが明らかにされつつあり、特にイオン異常輸送を説明するものとしてイオン温度勾配不安定性 (ITG モード) 駆動乱流が提案されているが、この ITG モードによって自己組織的に形成される帯状流によって抑制されることも分かってきている。それに対して、近年、極めて大きな電子異常輸送が閉じ込め性能を劣化させる新たな要因として浮上し、それを説明するモデルとして電子温度勾配 (ETG) 不安定性 (ETG モード) 駆動乱流が理論的な立場から提案された。しかも、ETG モードは ITG モードとは異なり帯状流によっても抑制されにくいことが理論的に報告されており、ETG モードの抑制機構を解明することが現在の核融合閉じ込め研究には必須の課題であると考えられる。

## 2. 研究の目的

以上の研究背景をもとに、本研究においては、電子温度の空間勾配を能動的に制御できる新たな装置を開発し、この電子温度勾配によって発生する不安定揺動 (ETG モード) を観測するとともに、それらが乱流に発展するメカニズムを明らかにする。さらに、イオン密度および温度勾配も制御できる装置を付加し、ドリフト波モードおよび ITG モードの発生とその特性を調べるとともに、ETG モードとこれらのモード間の非線形相互作用によって、モード間でエネルギーが移送される現象を明らかにし、そのメカニズムを解明する。

一方、これらの温度勾配モードを抑制する手法の開発を行う。現在、抑制効果が期待されている帯状流に着目し、外部からの制御によって能動的にイオン又は電子の流れ (フロー) の速度を空間的に変化させる、静的帯状流である「フロー速度シア」を形成できるシステムを上記装置に搭載する。これらのフロー速度シアと温度勾配モードとの関連性を明らかにし、温度勾配モード駆動乱流に対する抑制効果及びそのメカニズムを解明する。

以上の結果を総合して、電子温度勾配モード駆動乱流に起因する新たな現象とフロー速度シアによるこれらのモードの抑制機構を解明することを本研究の目的とする。

## 3. 研究の方法

実験は図 1 に示す直線型装置である Qr-Upgrade Machine を用いて行った。軸方向中心近傍に設置されたグリッド電極を境に左側をプラズマ生成領域、右側を実験領域とする。装置左端のホーンアンテナから周波数 6 GHz、電力 0–300 W のマイクロ波を入射し、アルゴン (Ar) を作動ガスとした電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 放電によって磁気ミラー領域 (共鳴磁場強度 2.14 kG) でプラ

ズマを生成し、グリッドを通して実験領域に流入させる。具体的にはプラズマ生成領域において ECR 放電により電子温度の高いプラズマ ( $\sim 3.5$  eV) を生成し、これにタングステンホットプレートから放出される低温熱電子 ( $\sim 0.2$  eV) を実験領域において重畳する。生成領域と実験領域の境界に配置した形状の異なる 2 枚のグリッドに負バイアス  $V_{g1}$ 、 $V_{g2}$  を印加して実験領域への ECR プラズマの流入量を制御することにより、熱電子重畳 ECR プラズマの各パラメータを制御することができ、局所的な ETG を形成できる。さらに、電子源印加電圧  $V_{ee1}$ 、 $V_{ee2}$  を変化させ、実験領域のプラズマ空間電位を制御することによって、半径方向電場による  $E \times B$  フロー速度シアも容易に形成可能となる。

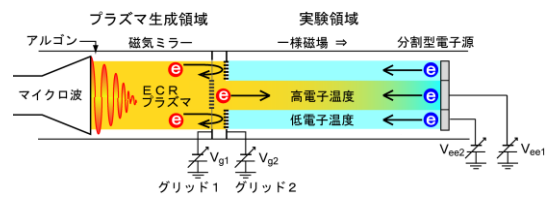


図 1: 実験装置図。

## 4. 研究成果

上述の直線型装置において、高電子温度の電子サイクロトロン共鳴プラズマと低温の熱電子を、2 種類のグリッド電極を用いて空間制御して重畳した。その時の電子温度および電子密度の半径方向分布を図 2 に示す。 $V_{g2} = 0$  V の場合、電子温度および電子密度ともにプラズマ中心領域 ( $r = 0$  cm) から周辺領域 ( $r = -2$  cm) に向かって緩やかに減少していき、急峻な ETG は形成されていない。それに対して、 $V_{g2} = -30$  V の場合は、グリッドの境界位置に相当する  $r = -1 \sim -1.5$  cm の領域において、急峻な電子温度勾配が形成されることが分かった。このとき、電子密度は大きくは変化していない。従って、電子密度勾配を一定に維持しながら、ETG を制御して形成することに成功したといえる。

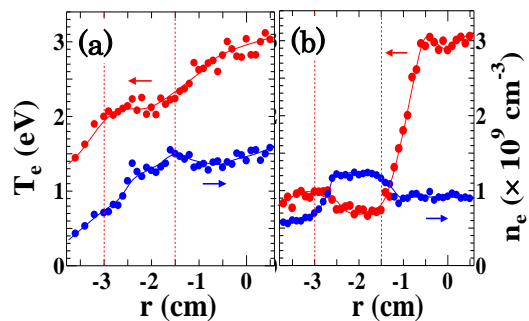


図 2: 電子温度および電子密度の半径方向分布。(a)  $V_{g2} = 0$  V, (b)  $V_{g2} = -30$  V.

ETG を形成した場合に、プラズマ中の  $r = -1.5 \text{ cm}$  の位置で測定したプローブの電子飽和電流の周波数スペクトルを図 3 に示す. ETG 強度が大きい  $V_{g2} = -30 \text{ V}$  の時に、周波数が  $0.4 \text{ MHz}$  程度の高周波揺動が励起されることが明らかになった. また、その揺動強度が、ETG 強度に依存して変化することも観測されたため、この高周波揺動は ETG モードであると結論づけられる. ETG を形成した時、高周波揺動と同時に周波数が  $7 \text{ kHz}$  程度の低周波揺動も観測され、その揺動強度が ETG 強度に比例して増大することが分かった. この低周波揺動は、密度勾配が存在することで形成されているため、ドリフト波モードであると考えられる.

バイスペクトル解析を用いて ETG により励起された高周波揺動と低周波揺動の相関

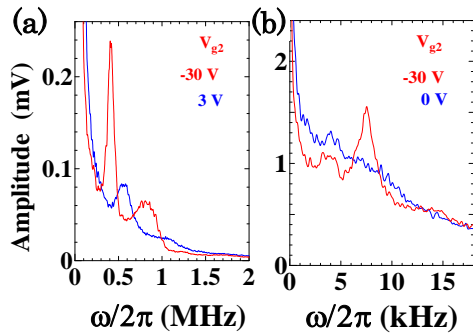


図 3: (a)高周波数密度揺動スペクトルおよび(b)低周波数密度揺動スペクトルの電子温度勾配依存性.  $r = -1.5 \text{ cm}$ .

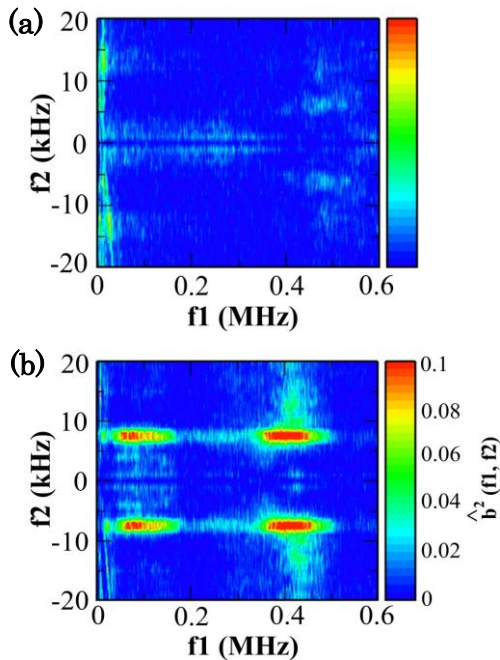


図 4: 高・低周波数密度揺動間のバイコヒーレンス. (a)  $V_{g2} = 0 \text{ V}$ , (b)  $V_{g2} = -30 \text{ V}$ .

関係を調べた (図 4). ETG が形成されていない場合 ( $V_{g2} = 0 \text{ V}$ ) には、二つの揺動間に顕著なバイコヒーレンスは観測されなかったが、ETG 強度を増大させることによって、これらの二つの揺動間に特徴的な強いバイコヒーレンスが観測されることが分かった. 従って、ETG は、電子が関与する高周波揺動のみならず、その高周波揺動との非線形結合により低周波揺動に対しても作用することが明らかとなった.

図 5 に ETG によって励起された高周波 (ETG モード) および低周波 (ドリフト波モード) 密度揺動の (a) 規格化振幅強度 ( $\tilde{I}_{es} / \bar{I}_{es}$ ) と (b) バイコヒーレンスの電子温度勾配 ( $\nabla T_e$ ) 依存性を示す.  $\nabla T_e$  が増加することで ETG モードの強度が大きくなるが、 $\nabla T_e$  が  $0.7 \text{ eV/cm}$  を超えると次第に飽和していくことが分かった. 一方、ドリフト波モードの場合には、 $\nabla T_e > 0.7 \text{ eV/cm}$  において揺動強度が増大する傾向を示した. さらに、図 5(b) より、 $\nabla T_e \sim 0.7 \text{ eV/cm}$  以上で ETG モードとドリフト波モードのバイコヒーレンスが急激に大きくなることが明らかになった. これらの結果から、ETG モードの揺動強度が閾値を超えることでドリフト波モードとの非線形結合が助長され、エネルギーが移送されることでドリフト波モードが増幅されたと考えられる.

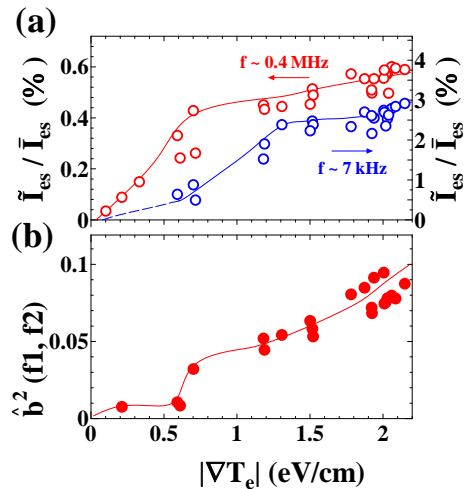


図 5: 高・低周波密度揺動における (a) 規格化振幅強度と (b) バイコヒーレンスの電子温度勾配 ( $\nabla T_e$ ) 依存性.

図 6 は高周波・低周波密度揺動における (a) 規格化振幅強度 ( $\tilde{I}_{es} / \bar{I}_{es}$ ) と (b) バイコヒーレンスの垂直方向電場 ( $E_z$ ) に対する依存性を示している.  $E_z$  によって形成される  $E \times B$  シアの強度が十分強くなると ETG モードとドリフト波モードが抑制されることを観測した. ETG モードの揺動強度は、イオン反磁性ドリフト回転と  $E \times B$  回転の方向が一

致する弱い正電場 (0.3 V/cm) の領域で最大となっており, このときドリフト波モードとのバイコヒーレンスも最大となっていることから, ここでは非線形結合によってドリフト波モードから ETG モードへのエネルギー移送が生じ, ETG モードが増幅されたと考えている。

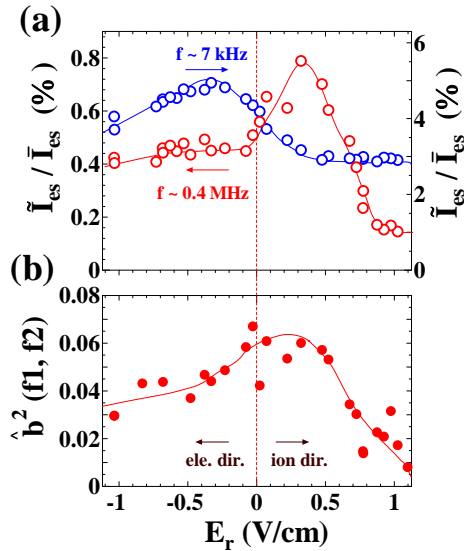


図 6: 高・低周波密度揺動における(a)規格化振幅強度と(b)バイコヒーレンスの垂直方向電場( $E_r$ )依存性。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① R. Hatakeyama, C. Moon, S. Tamura, and T. Kaneko, “Collisionless Drift Waves Ranging from Current-Driven, Shear-Modified, and Electron-Temperature-Gradient Modes”, Contributions to Plasma Physics, 査読有, Vol.51, No. 6, pp. 537-545, 2011. DOI: 10.1002/ctpp.201010156
- ② T. Kaneko and R. Hatakeyama, “Measurements of Mode Structure of Shear-Modified Drift Wave Using Y- and  $\Gamma$ - Shaped Electrostatic Probes”, Contributions to Plasma Physics, 査読有, Vol. 50, No. 9, pp. 796-801, 2010. DOI: 10.1002/ctpp.201010134
- ③ R. Hatakeyama, T. Kaneko, and W. Oohara, “New Aspects on Plasma Wave and Instability Phenomena in Basic-Plasma Experiments”, Journal of Plasma Physics, 査読有, Vol. 76, No. 3-4, pp. 513-523, 2010. DOI:10.1017/S0022377809990717
- ④ C. Moon, S. Tamura, T. Kaneko, and R. Hatakeyama, “Observation of Electron Temperature Gradient Driven

Low-Frequency Instabilities in Magnetized Plasma”, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES, 査読有, Vol. 9, pp. 436-440, 2010.

[http://www.jspf.or.jp/JPFRRS/PDF/Vol9/jpfrs2010\\_09-436.pdf](http://www.jspf.or.jp/JPFRRS/PDF/Vol9/jpfrs2010_09-436.pdf)

- ⑤ C. Moon, T. Kaneko, S. Tamura, and R. Hatakeyama, “Control of Electron Temperature and Space Potential Gradients by Superposition of Thermionic Electrons on Electron Cyclotron Resonance Plasmas”, Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol. 81, No. 5, pp. 053506-1-4, 2010. DOI: 10.1063/1.3433553

[学会発表] (計 25 件)

- ① 文賛鎬, 畠山力三, 金子俊郎, “電子温度勾配モード飽和に起因するドリフト波モード変調に対する非線形結合の効果”, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島県東広島市, 2013 年 3 月 29 日.
- ② 金子俊郎, 文賛鎬, 畠山力三, “基礎プラズマ実験装置による磁化プラズマ揺動非線形結合解析 (招待講演)”, 第 16 回若手科学者によるプラズマ研究会, 茨城県那珂市, 2013 年 3 月 5 日.
- ③ 金子俊郎, “ナノバイオ融合プラズマプロセスにみる非平衡性と新機能材料創成”, 第 1 回自然科学研究機構 コロキウム, 神奈川県箱根町, 2013 年 2 月 6 日.
- ④ 金子俊郎, “磁化プラズマ揺動の非線形結合機構解明と構造制御ナノ物質形成への応用 (招待講演)”, プラズマ核融合学会九州・沖縄・山口支部第 16 回支部大会, 福岡県春日市, 2012 年 12 月 23 日.
- ⑤ 文賛鎬, 畠山力三, 金子俊郎, “磁化プラズマ中電子温度勾配駆動不安定揺動間の非線形結合の同定”, プラズマ・核融合学会 第 29 回年会, 福岡県春日市, 2012 年 11 月 27 日.
- ⑥ C. Moon, R. Hatakeyama, T. Kaneko, “Suppression of electron temperature gradient mode and drift wave mode via controlled  $E \times B$  velocity shears in magnetized plasma”, 11th Asia Pacific Conference on Plasma Science and Technology & 25th Symposium on Plasma Science for Materials, 京都府京都市, 2012 年 10 月 2 日.
- ⑦ 文賛鎬, 畠山力三, 金子俊郎, “直線型磁化プラズマにおける電子温度勾配モードとドリフト波モードの非線形結合解析”, プラズマパルスパワー合同研究会, 岩手県盛岡市, 2012 年 8 月 9 日.
- ⑧ T. Kaneko, Q. Chen, S. Takahashi, and R. Hatakeyama, “Control of



Nanoparticle Synthesis Using Physical and Chemical Dynamics of Gas-Liquid Interfacial Non-Equilibrium Plasmas (Invited)”, 39th European Physical Society Conference on Plasma Physics and 16th International Congress on Plasma Physics, Stockholm, Sweden, 2012年7月4日.

- ⑨ 文 贊鎬, 畠山力三, 金子俊郎, “磁化プラズマ中電子温度勾配モードとドリフト波揺動の非線形結合解析”, 第9回核融合エネルギー連合講演会, 兵庫県神戸市, 2012年6月28日.
- ⑩ 文 贊鎬, 金子俊郎, 畠山力三, “磁化プラズマ中電子温度勾配モードに対するガス圧力の効果”: Plasma Conference 2011 (プラズマ・核融合学会第28回年会/応用物理学会第29回プラズマプロセッシング研究会/日本物理学会(領域2)2011年秋季大会), 石川県金沢市, 2011年11月22日.
- ⑪ C. Moon, T. Kaneko, and R. Hatakeyama, “Suppression of Electron Temperature Gradient Mode by Controlled  $E \times B$  Velocity Shears in Magnetized Plasmas”, 64th Annual Gaseous Electronics Conference, Salt Lake City, USA, 2011年11月14日.
- ⑫ T. Kaneko, C. Moon, and R. Hatakeyama, “Effects of  $E \times B$  Velocity Shear on High and Low Frequency Fluctuations Excited by Electron Temperature Gradient”, URSI General Assembly and Scientific Symposium of International Union of Radio Science, Istanbul, Turkey, 2011年8月13日.
- ⑬ 文 贊鎬, 金子俊郎, 畠山力三, “磁化プラズマ中電子温度勾配駆動プラズマ不安定性の波数計測”, 日本物理学会第66回年次大会, 新潟県新潟市, 2011年3月25日.
- ⑭ 文 贊鎬, 金子俊郎, 畠山力三, “電子温度勾配駆動プラズマ不安定性に対する  $E \times B$  シアの効果”, 第27回プラズマ・核融合学会年会, 北海道札幌市, 2010年11月30日.
- ⑮ 文 贊鎬, 金子俊郎, 畠山力三, “磁化プラズマ中電子温度勾配モードによる低周波揺動の変調”, 日本物理学会2010年秋季大会, 大阪府堺市, 2010年9月23日.

[その他]

ホームページ

<http://www.plasma.ecei.tohoku.ac.jp>

機関リポジトリ

<http://ir.library.tohoku.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

金子 俊郎 (KANEKO TOSHIRO)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 30312599

### (2) 研究分担者

加藤 俊顕 (KATO TOSHIAKI)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 20502082

畠山 力三 (HATAKEYAMA RIKIZO)

東北大学・大学院工学研究科・名誉教授

研究者番号: 00108474

### (3) 連携研究者 なし