

科学研究費補助金研究成果報告書

平成24年 6月11日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2010

課題番号：19560832

研究課題名（和文） マルチスケールの揺らぎに支配される磁場閉込めプラズマの統計的性質に関する研究

研究課題名（英文） Study on Statistical Characteristics of Magnetic Confined Plasmas dominated by Multi-scale Turbulence

研究代表者

松本 太郎 (MATSUMOTO TARO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究主幹

研究者番号：50354676

研究成果の概要（和文）：磁場閉込めプラズマ中の電子系及びイオン系乱流を始めとした様々な時空間スケールの現象を、比較的條件設定が容易なシミュレーションを通じて再現し、揺らぎの長時間時系列データの統計的解析から得られる複数の統計量と、揺らぎの間歇性及び乱流輸送構造との対応関係等、プラズマの統計的性質が明らかにした。また、1点の揺動計測から得られる相関次元などの時系列データから、間歇性及び乱流構造を同定し得ることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The statistical characteristics of turbulent plasma, such as the relations of several statistics obtained from time series data of perturbations with intermittency of perturbations and turbulent structures, were investigated for multi-scale turbulence driven by electron/ion temperature gradient in magnetic confinement plasma with relatively simple simulation models. It was also found that intermittency of perturbations and turbulent structures could be identified by the statistics obtained at one point, such as the correlation dimension.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	500,000	150,000	650,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：乱流輸送、統計的性質、トカマク、電子温度勾配、イオン温度勾配、帯状流、確率密度関数、ジャイロ流体モデル

1. 研究開始当初の背景

磁場閉込め方式の核融合研究において、閉込め性能を左右する乱流輸送の機構解明とその制御が重要な課題である。近年の研究から、この磁場閉込めプラズマは高い自律性及び高い自由度（複雑性の度合い）を有するため、磁気シア（磁場構造の空間変化率）及び電子/イオン温度勾配等のプラズマ状態を支配するパラメーターに依存して、

- (1) 様々な時空間スケールの揺らぎが等方的に生成・消滅を繰り返す一方で、低頻度だが大きなスケール（時間平均からの逸脱）の間歇的な揺らぎが、雪崩現象を引き起こし、輸送過程に大きな影響を及ぼす
- (2) 様々な時空間スケールの揺らぎの相互作用を通して、帯状流、一般化ケルビンヘルムホルツ (GKH) モード、等の

非等方的な乱流構造が形成されるに伴い、内部輸送障壁を始めとした多様な輸送現象が生成することが明らかとなりつつある。このため、乱流輸送の解析には、そのような揺らぎの間歇性(スケールと頻度の関係)及び非等方の乱流構造をシミュレーションにより再現し、それらのパラメーター依存性を明らかにするとともに、間歇性及び乱流構造を計測から同定することが重要である。特に、将来の核融合炉においては、多くの計測機器を持つ現在の実験装置と比較して、より少ない計測点から乱流輸送を同定することが必要とされる。

プラズマ中の揺動の間歇性は、衝突的統計性(ランダム)に起因するのではなく、むしろ有限の自由度を持つ力学系の非線形性(決定論的カオス性)により支配される。さらに非等方的な乱流構造が形成されると、その背後に存在する揺動の間歇性は、乱流構造との相互作用に依存する。それゆえ、そのような揺動の持つ複雑性を特徴付けるためには、通常行われている周波数スペクトル解析(自己相関、相互相関、三次相関等)だけでは必ずしも十分ではなく、カオス時系列解析等の統計的な手法による解析が有用と考えられる。

このような統計量を用いた輸送研究の国内・国外の動向としては、米国の TEXTOR トカマク型装置及び国内の CHS ヘリカル型装置において、周辺プラズマの揺らぎが持つフラクタル次元等の自由度及びリャプノフ数が示す決定論的統計性が、プラズマの輸送状態の変化を反映することを指摘しているが、実験条件の設定の難しさの問題もあり、乱流構造と統計量との明確な対応や、そのパラメーター依存性は得られていない。また最近、イオン温度勾配(ITG)駆動乱流を中心に、熱流束の間歇性に関連して確率分布の非ガウス成分の重要性が議論されており、確率密度関数(PDF)のテイル成分によって表される間歇性及びそのパラメーター依存性について複数のモデルが提唱されている。

これらの背景から、乱流輸送を支配する揺動の統計的特性を解明すること、及びそれらの特性と間歇性及び乱流構造との対応関係を広範なパラメーター領域において系統的に明らかにすることが、学術的観点のみならず、今後の核融合プラズマの輸送制御の観点からも重要である。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、磁場閉込めプラズマ中の電子系及びイオン系乱流を始めとした様々な時空間スケールの現象を、比較的條件設定が容易なシミュレーションを通じて再現し、揺らぎの長時間時系列データの統計的解析から得られる複数の統計量と、揺らぎの間歇性及び乱流輸送構造との対応関係を明

らかにするとともに、トカマク型及びヘリカル型等の実験装置における揺動計測データにも同様の解析を適用して比較検証する。これにより、マルチスケールの揺らぎに支配されたプラズマの統計的性質を明らかにするとともに、1点の揺動計測による時系列データから、間歇性及び乱流構造を同定する手法を構築することである。

3. 研究の方法

当研究グループでは、これまで原子力機構が推進している数値トカマク(NEXT)研究計画の一環として、電子温度勾配(ETG)駆動乱流のシミュレーションから、揺動のフラクタル次元と帯状流の支配性との関係を解明すると共に、様々な統計量の解析ツールを開発した。本研究課題ではこれらの知見及び資産を活用し、

- (1)シミュレーションにおいて輸送に関連する揺動(電場、圧力、熱流束、等)の時系列データに統計的な解析手法を適用し、得られる統計量(フラクタル次元、リャプノフ数、等)を求め、そのパラメーター(温度勾配、磁気シア、等)への依存性を系統的に明らかにする
- (2)それら統計量の変化と、輸送を支配する間歇性及び乱流構造(帯状流、GKH、等)との対応関係を明らかにし、統計量から輸送現象の同定手法を構築する
- (3)トカマク及びヘリカルを始めとする実験装置における計測データに対して、統計的に解析する

を行った。

実験装置におけるプラズマでは、輸送を支配する時空間スケールの異なる様々な揺らぎが相互作用しているため、本研究では、

- (1)電子系：電子のラーマー半径程度の短波長持つ電子温度勾配(ETG)駆動モード
- (2)イオン系：イオンのラーマー半径程度の波長を持つイオン温度勾配(ITG)駆動モード

の異なるスケールの揺動を主な対象としたシミュレーションを行い、比較検討を行った。また、電磁流体力学的スケールを持つ揺動も間歇性を持ち、高い自由度を有すると考えられるため、

- (3)MHD：プラズマ半径の数十～数分の一程度の構造を持つ電磁流体力学的モード

の揺動の取り扱いも視野に入れた。

4. 研究成果

(1)これまでトカマクプラズマにおいて、帯状流の生成に伴って乱流輸送が低減されることは知られていたが、生成された帯状流がどのような影響を及ぼし、どのような微視的

乱流構造をもたらしかについては明らかではなかった。そこで、温度勾配が駆動する微視的揺らぎにより生成された帯状流が副次的に及ぼす相互作用に着目し、運動論効果を含む流体モデルを用いて非線形相互作用を考慮した三次元シミュレーションを実施し、乱流構造の解明を進めた。

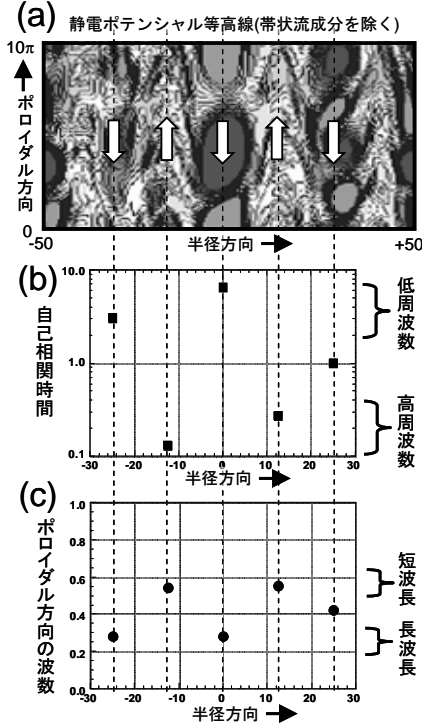


図1 帯状流の背後の乱流構造
(a) 静電ポテンシャル等高線(帯状流成分を除く)
(b) 自己相関時間
(c) ポロイダル方向の波数

長時間シミュレーションデータを解析することにより、まず微視的な揺らぎ同士の相互作用により帯状流が生成した後、次に帯状流と微視的な揺らぎ間で副次的な相互作用が生じることにより新たな揺らぎが生成されることを示した。この揺らぎに対して、統計解析及びスペクトル解析を詳細に行うことにより、乱流輸送が低減した静的な帯状流の背後には、図1に示されるように、自己相関時間で特徴づけられる時間スケール及びポロイダル方向の波数で特徴づけられる空間スケールが帯状流の方向に依存して半径方向に異なる層が存在し、それぞれ渦の生成と消滅を繰り返しながら帯状流に添って互いに反対方向に移動していることを明らかにした。更に、各々の層の時系列データの自己相関解析を進めた結果、電子の密度勾配により発生する電子ドリフト波が帯状流によるドップラーシフトを受けることにより、帯状流の向きに依存して長波長・低周波数の波と短波長・高周波数の波が生成されることを突き止め、帯状流とその背後に存在する乱流構造が互いに強く結びついていることを明

らかにした。

(2) トカマクプラズマ中の乱流輸送は、ポロイダル方向の電場の揺らぎと圧力の揺らぎの間の同調によって引き起こされるが、帯状流による輸送低減の微視的な物理機構は明らかでなかった。一般的に、二つの物理量の揺らぎの変位に対する確率密度が正負がほぼ等しいガウス分布を形成していても、「間歇的」に互いが同調することにより、それらの積は間歇的に大きな正值を示し、時間平均では正となり得ることが知られている。

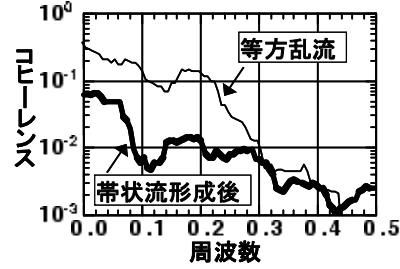


図2 電場と圧力のコヒーレンス(等方乱流と、(1)で明らかにした帯状流のため生じた短波長・高周波数領域との比較)

それゆえ、このような間歇的な輸送現象をシミュレーションにより再現し、揺らぎの長時間時系列データの統計的解析を行うことにより、帯状流生成による熱流束低減の微視的な物理機構の解明を目指した。乱流の統計的解析を行うためには十分な集合が必要であるため、これまでに開発してきた非線形流体シミュレーションコードを高並列化することにより長時間の時系列データを取得し、ポロイダル方向の電場の揺らぎと圧力の揺らぎの同調により引き起こされる間歇的な熱流束を解析した。次に、両者の揺らぎの同調の状態について帯状流の有無による変化を評価するために、2つの揺らぎのコヒーレンスと位相差に着目して相互相関解析を行った。図2に示されるように、帯状流のない等方乱流の場合、揺らぎの同調の強さを示すコヒーレンスは高い値を示し、正味の熱流束を生み出しており、この特性は半径方向に依存しない。一方、(1)で明らかにした帯状流形成後の短波長・高周波数の領域ではコヒーレンスは、幅広い周波数領域に渡って減少している。この解析により、電場と圧力の揺らぎが互いにより独立して発展する結果として、熱流速が低減され得ることを初めて示すことができた。

一方、帯状流形成により生じた長波長・低周波数の領域では、2つの揺らぎのコヒーレンスは等方乱流の場合よりも高くなるが、図3に示されるように、2つの揺らぎの位相差が正味の熱流束を生み出さない位置(位相が $-\pi/2$)に幅広い周波数領域に渡って固定されることを明らかにした。

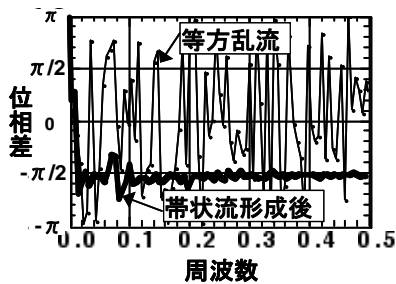


図3 電場と圧力の位相差 (等方乱流と、(1)で明らかにした帯状流のため生じた長波長・低周波数領域との比較)

以上により、プラズマ乱流の統計的解析に必要な長時間シミュレーションを実現することにより、トカマクプラズマにおいて帯状流が形成されると、その流れの向きに依存して、それぞれ異なる2つの微視的な物理機構により乱流輸送が低減されることを解明するとともに、帯状流によるプラズマ乱流渦の剪断による輸送低減の概念を、乱流統計学の視点から明らかにした。

(3)トカマクプラズマでは、プラズマ温度の半径方向の勾配や磁力線の傾きの半径方向の変化率 (磁気シア) など様々なパラメータに依存して、揺らぎ同士の同調が間歇的に大きな乱流輸送を引き起こす一方、揺らぎ同士の相互作用が帯状流構造を自己無撞着に形成しているが、この間歇性と帯状流構造との対応関係は時空間スケールや乱流輸送の大きさだけでは説明できなかつた。それゆえ、様々な条件下で乱流輸送の間歇性を定量的に特徴づけ、帯状流構造との対応関係を明らかにすることが、乱流輸送の包括的理解に重要である。

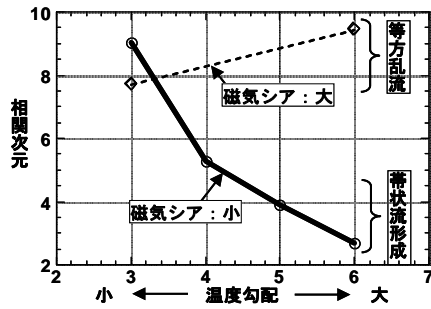


図4 熱流束の相関次元

上述の(2)において一見ランダムなガウス分布を成している圧力の揺らぎと電場の揺らぎが実はランダムではなく互いに同調することにより大きな熱流束を生み出していることに着目し、プラズマ中の乱流輸送の間歇性は、ランダムな衝突的統計性に起因するのではなく、カオス理論に基づいて、有限の自由度を持つ力学系の決定論的非線形性に支配されると考え、そのような複雑な間歇性を特徴付けるためには、通常時系列データに

対して適用されている周波数スペクトル等の解析だけでは十分ではなく、カオス時系列解析手法の一つである相関次元を評価することが有効であると考えた。

それゆえ、(2)で開発したコードを用いて広範なパラメータ領域において乱流シミュレーションを遂行し、得られた長時間の時系列データに対して、新たに開発した相関次元解析コードを適用することにより、乱流輸送の間歇性と帯状流構造との対応関係を詳しく調べた。図4に示されるように、磁気シアが大きく、かつ温度勾配が小さい場合、殆ど帯状流を伴わない等方乱流が出現し、大きな間歇性を有する熱流束が乱流輸送を生み出している状況では高い相関次元を示しているが、帯状流が形成されると共に、相関次元が劇的に減少することを明らかにした。

次に、帯状流によるドップラーシフトが相関次元に与える効果を解析した。帯状流が形成されると、その背後には半径方向に時空間スケールの異なる領域が交互に存在するが、図5に示されるように、共鳴面の位置や帯状流、揺動の時空間スケールに強く依存せず、相関次元がほぼ一定であることを解明した。さらに、相関次元は静電ポテンシャル、電場、圧力、熱流束等の揺らぎ等に依らず、どの物理量に対してもほぼ一定であることを明らかにした。

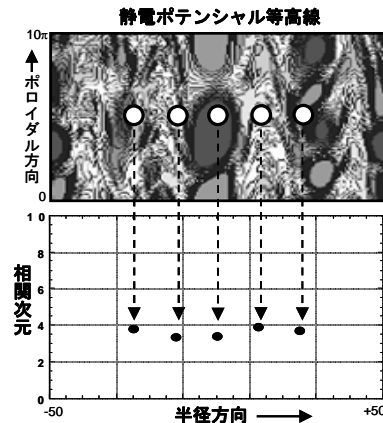


図5 帯状流形成後の、時空間スケールに依存しない相関次元

将来の核融合炉においては、多くの計測機器を持つ実験炉と比較して、より少ない計測データから揺動を同定し、それに伴う乱流輸送の評価やその制御によるプラズマ性能の向上が必要となるが、1点の計測による揺らぎの時系列データから、カオス理論や乱流統計力学に基づく相関次元やコヒーレンス、位相の概念をプラズマ乱流シミュレーションに適用し、間歇性及び帯状流構造を同定する手法を構築した。

(4)次に、京都大学のヘリカル型装置 (ヘリオトロンJ) において、低閉込め状態から高閉込め状態への自発的遷移において変化する

る乱流揺動の統計的性質を調べるため、静電プローブの計測データから、半径方向の粒子束を解析した。遷移前の周辺プラズマの確率密度関数はテイル成分を持つのに対し、遷移後はテイル成分が抑制され、正味の粒子束も内向きへと反転するなど、周辺プラズマ乱流の統計的特性が明かとなった。

また、このイオン及び電子温度勾配が駆動する乱流の統計的特性、そして JFT-2M トカマク装置における重イオンビームプローブによって得られたデータの統計的特性を比較検証し、シミュレーションから得られた帯状流の弱い電子系及びイオン系乱流と JFT-2M の L モードプラズマの揺動の確率密度関数が相似形であること等を明らかにした。

(5) イオン系のグローバルランダウ流体シミュレーションを行い、運動論的バルーニングモードが支配的となるベータ領域で、低波数の共鳴面において強い帯状磁場の生成と共に、帯状流の生成が見られることを明らかにした。また、これらの乱流構造の変化により、共鳴面付近にてイオンの熱輸送を低減させることを明らかにした。

次に、トカマク周辺領域の高閉じ込めモードや反転磁気シアトカマク中の内部輸送障壁など強いプラズマ流を伴う輸送障壁が形成される状況において、プラズマ流と乱流間のマルチスケール相互作用の役割を明らかにするために、相空間ラグランジアンや変分原理などの現代的手法により、強いプラズマ流を伴う輸送障壁形成のシミュレーションへの道を開く簡約化モデルを構築した。

更に、強いプラズマ流が存在する場合において、簡約化運動論モデルから評価される密度、温度や流速などの流体的諸量と実験的に観測される物理的な流体的諸量との間の関係式を、強いプラズマ流を含む簡約化運動論モデルに基づき、形式的に厳密な表現を摂動展開することにより導き、簡約化モデルを用いた理論・シミュレーションの結果と、実験結果との精度の良い比較を可能にした。

また、共役変数法を用いることによりハミルトン力学構造を持たない常微分方程式系に対してハミルトン・リー摂動理論を適用した。

(6) 高波数乱流と低波数 MHD モードの相互作用により生じる揺動の統計的性質の解明を視野に入れ、円柱トカマクプラズマの固有値問題の大規模並列計算を実現することにより、従来の研究では解らなかつた複素平面上における固有値の詳細なスペクトル及びそれらの抵抗値依存性を明らかにした。

抵抗性 MHD モードの固有値は複素数に成り得ることが知られているため、抵抗性 MHD モードの複素平面上の安定固有値を含めた数

万～数十万の全ての離散固有値の分布及びそれぞれの固有値に対応する固有関数を解析した。

様々な磁場の空間分布に対して抵抗性 MHD モードの固有状態を詳細に調べた結果、実軸上の不安定モード及び連続スペクトルに相当する非局在化モードを含む全モードの固有値とその固有関数を明らかにするとともに、プラズマ周辺部、プラズマ中心部、及び不安定モードが共鳴する磁気面付近にそれぞれ局在化する3つのモードが、臨界安定状態として存在することを解明した。これらの結果により乱流プラズマにおいて非線形的に不安定モードと相互作用し得る安定モードの全容を初めて明らかにすると共に、特に臨界安定なモードは運動論的な効果により不安定化し得るため、運動論的な効果を考慮したシミュレーションに対しては線形段階においても重要であることを示した。

次に、従来の研究では固有値の分布構造は抵抗の大きさに依存しないと考えられていたが、今回開発したコードを用いて固有値分布の抵抗値依存性を精度良く解析を行うことにより、低い抵抗を有するプラズマにおいては、僅かな抵抗値の変化により、固有値分布が変化することを世界で初めて明らかにした。これは、電気抵抗の僅かな値の変化により、安定モードとの相互作用によるエネルギーの減衰が変化することに対応しているため、高温トカマクプラズマの非線形効果には、高温に対応した低い電気抵抗が重要な役割を果たしていることを意味している。

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 8 件)

- ① Taro MATSUMOTO, Jiquan Li, Yasuaki KISHIMOTO, Characteristics of ETG-driven turbulence dominated by zonal flows, Nuclear Fusion, 査読有, 47, 2007, 880-885
DOI: 10.1088/0029-5515/47/8/020
- ② S. WATANABE, K. NAGASAKI, T. MIZUUCHI, et. al., Study of Edge Plasma Characteristics at H-mode Transition in Heliotron J, Plasma and Fusion Research, 査読有, 2, 2007, S1059_1-5
DOI: 10.1585/pfr.2.S1059
- ③ Taro MATSUMOTO, Jiquan Li, Yasuaki KISHIMOTO, Characteristics of Turbulent Fluctuations in the presence of Zonal flows, 九州大学応用力学研究所研究集会報告, 査読無, 19FP, 2007
- ④ Shinji TOKUDA, The Conjugate Variable Method in the Hamilton-Lie Perturbation Theory - Applications to

- Plasma Physics -, Plasma and Fusion Research, 査読有, 3, 2008, 057_1-10
DOI: 10.1585/pfr.3.057
- ⑤ Naoaki MIYATO, B. D. SCOTT, D. STRINTZI, and Shinji TOKUDA, A Modification of the Guiding-Centre Fundamental 1-Form with Strong EXB Flow, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, 78, 2009, 104501_1-13
DOI: 10.1143/JPSJ.78.104501
- ⑥ Taro MATSUMOTO, Shinji TOKUDA, Eigenvalue Spectrum of MHD Modes in Cylindrical Tokamak Plasma with Small Resistivity, Journal of Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research SERIES, 査読有, Vol.9, 2010, 568-573
http://www.jspf.or.jp/JPFrs/PDF/Vol9/jpfrs2010_09-568.pdf
- ⑦ Naoaki MIYATO, B. D. SCOTT, D. STRINTZI, and Shinji TOKUDA, A Modification of the Guiding-Centre Fundamental 1-Form with Strong EXB Flow, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, 78, 2009, 104501_1-13
DOI: 10.1143/JPSJ.78.104501
- ⑧ Taro MATSUMOTO, Jiquan Li, Yasuaki KISHIMOTO, Statistical Characteristics of ITG-driven turbulence dominated by zonal flows, Fusion Science and Technology, 査読有, 60-1T, 2011, 75-79
<http://epubs.ans.org/?a=12408>

[学会発表] (計 8 件)

- ① 松本太郎, 徳田伸二, 円柱トカマクにおける抵抗性 MHD モードのスペクトル, 2007 年 11 月 2 日, 岐阜県土岐市
- ② Taro MATSUMOTO, Resistive MHD spectrum in cylindrical tokamak plasmas with small resistivity, The 6th General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association, 2007 年 12 月 5 日, インド国グジャラート州
- ③ Taro MATSUMOTO, Eigenvalue Spectrum of MHD Modes in Cylindrical Tokamak Plasmas with Small Resistivity, 14th International Congress on Plasma Physics 2008, 2008 年 9 月 11 日, 福岡県福岡市
- ④ Shinji TOKUDA, The Conjugate Variable Method in Hamilton-Lie Perturbation Theory - Some Applications to Plasma Physics -, 14th International Congress on Plasma Physics 2008, 2008 年 9 月 11 日, 福岡県福岡市
- ⑤ Naoaki MIYATO, Fluid moments in

- modified guiding-centre coordinates, 7th General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association, 2009 年 10 月 28 日, 青森県青森市
- ⑥ Taro MATSUMOTO, Eigenvalue Spectrum of MHD Modes in Cylindrical Tokamak Plasma with Small Resistivity, 7th General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association, 2009 年 10 月 30 日, 青森県青森市
- ⑦ Taro MATSUMOTO, Statistical Characteristics of ITG-driven turbulence dominated by zonal flows, 1st Meeting of International Youth Conference on Fusion Energy, 2010 年 10 月 9 日, 韓国大田市
- ⑧ Naoaki MIYATO, Effects of strong ExB flow on gyrokinetics, 23rd IAEA fusion Energy Conference, 2010 年 10 月 13 日, 韓国大田市

[その他]

ホームページ等

<http://www-jt60.naka.jaea.go.jp/theory/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 太郎 (MATSUMOTO TARO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究主幹
研究者番号: 50354676

(2) 研究分担者

長崎 百伸 (NAGASAKI KAZUNOBU) (H19)

京都大学・エネルギー理工学研究所・教授
研究者番号: 20237506

(H20→H21: 連携研究者)

李 継全 (LI JIQUAN) (H19)

京都大学・エネルギー科学研究科・准教授
研究者番号: 00437253

(H20→H21: 連携研究者)

徳田 伸二 (TOKUDA SHINJI) (H20-22)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究職
研究者番号: 60354578

宮戸 直亮 (MIYATO NAOAKI) (H20-22)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究副主幹
研究者番号: 80370477

(3) 連携研究者

岸本 泰明 (KISHIMOTO YASUAKI) (H19-22)

京都大学・エネルギー科学研究科・教授
研究者番号: 10344441