

平成23年5月30日現在

機関番号：14301
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2010
 課題番号：19560828
 研究課題名（和文） アルフェン波による帯状流モードの発生機構と非線形ダイナミクス
 研究課題名（英文） Generation mechanism and nonlinear dynamics of zonal modes in Alfvénic wave fluctuations
 研究代表者 李 継全（ Li Jiquan ）
 京都大学・エネルギー科学研究科・准教授
 研究者番号： 00437253

研究成果の概要（和文）：電磁プラズマ中の帯状成分によって支配される物理機構を、非線形 Alfvén 波理論の枠組みで、ジャイロ流体モデルによる多階層電磁乱流シミュレーションを用いて解析した。主な成果としては、以下の4点が挙げられる。(1) 帯状流や GAM、他の二次的な長波長成分との非線形結合の結果、微視的乱流のスペクトル特性が大幅に変形されることを明らかにした。(2) 帯状磁場を含む巨視的磁気島構造が、イオン温度の島構造を崩壊させることで、新しい大域的な短波長のイオンスケール不安定性を誘起することを明らかにした。(3) 早いスケールで起きる磁気リコネクションを説明する理論として、従来の異常抵抗性理論に代わり、新たにクロススケールダイナモによるダイナミクスを提案した。(4) 帯状圧力の揺動が、非局所的なモード結合を通じて、突発的な乱流輸送を誘起することを示した。

研究成果の概要（英文）：Zonal mode physics including convective cells in electromagnetic (EM) plasmas in a framework of nonlinear Alfvén wave theory has been investigated based on gyrofluid simulations of multi-scale EM turbulence. Main findings are summarized as (1) the spectral characteristics of micro-turbulence is significantly modified by the feedback reaction of zonal flows including the GAMs and the secondary low-frequency long wavelength structures through the spectral scattering via nonlinear mode coupling; (2) Larger magnetic island including the zonal fields induces a new global-type short wavelength ion-scale instability due to the collapse of ion temperature island involving the zonal temperature dynamics; (3) A concept of cross-scale dynamo action is proposed as an alternative of the anomalous resistivity theory for fast magnetic reconnection; (4) The zonal pressure corrugation can lead a bursty turbulent transport via nonlocal mode coupling.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	900,000	270,000	1,170,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：プラズマ閉込め；安定性と乱流；帯状流モード；乱流輸送；アルフェン波；
 ジャイロ流体モデル；簡約化MHDモデル；シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

磁場方式による核融合プラズマの研究は JT60 や LHD などのトカマク型装置やヘリカル系装置において精力的に研究され、特にその閉じ込め・輸送特性においては帯状流や空間シアを有するプラズマ流が本質的な役割を果たすことが明らかになってきている。昨今の磁場閉じ込めによる核融合プラズマ研究では、高いベータ値を持ち、かつ定常性能に優れたプラズマの実現が可能になってきている。これらのプラズマ実現の背景にはプラズマの構造形成現象が本質的な役割を果たしていることが知られている。しかし、これまでの研究は、低ベータ値における電磁的ドリフトアルフェン波などの研究を除けば、ミクロスケールの静電的なドリフト波に限られていた。

2. 研究の目的

本研究は、低ベータ近似に基づく静電的ドリフト乱流のドリフトアルフェン波への単純な拡張とは異なった非線形アルフェン波の理論に基づいて、高ベータプラズマにおける帯状流や帯状圧力、および帯状磁場などの帯状モードとそれらが乱流や MHD 過程に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。特に、これまで行った微視的乱流における帯状流の挙動に関する知見に基づいて、電磁モードを含む様々なスケールの揺らぎの複雑な非線形相互作用とそれに伴う輸送を理解することを目的に、アルフェン波による帯状モード発生の物理機構とそれがアルフェン波に与える影響を明らかにすることを目指す。

2. 研究の方法

まず、Alfvén 波中の帯状成分の生成に関する理論モデルとして、帯状流生成の解析で用いた変調解析法を用いた。この方法は、局所的な cascade、または inverse cascade を説明する wave-kinetic モデルとは異なり、非局所的な非線形結合を解析できるという利点がある。

一方、シミュレーション研究においては、まず、非線形電磁乱流を解析することを目的としたジャイロ流体コード、およびジャイロ運動論的 Vlasov コードを開発した。また、トロイダルプラズマ中の GAM のダイナミクスに焦点を当てた、新たなジャイロ流体 closure モデルを提案した。さらに、流れと磁

場揺動の間の非線形相互作用を解析することを目的に 5 場の多階層電磁シミュレーションを、磁気島中の多階層電磁乱流のダイナミクスを理解することを目的にジャイロ運動論的 Vlasov シミュレーションを行った。

4. 研究成果

(1) 新しく開発したローカルおよびグローバルなジャイロ流体モデルに基づくシミュレーションコードを用いて、トカマクプラズマにおける GAM モードの半径方向構造とともに、その非線形励起や飽和の物理機構に関する研究を進めた。また、帯状流の無衝突減衰の効果を取り入れたイオン温度勾配 (ITG) モード乱流とそれに伴うイオン系の輸送解析を行うため、従来の 3 場方程式によるジャイロ流体モデルに対する半経験的なクロージャーに対する理論モデルを提案した。また、wave-let 法をジャイロ流体シミュレーションから得られたデータに適用することにより、トロイダル配位において、乱流輸送に重要な役割を果たす GAM は、ITG 揺動の Reynolds 応力に起因する非線形駆動と線形ランダウ減衰やイオン音波との結合の間の競合によって非線形的に励起されることが明らかになった。また、この GAM 不安定性が励起される乱流の閾値は帯状流のそれよりも高いことが判明した。一方、不安定な GAM は、静的な帯状流とは異なり、プラズマが内在的に有するランダウ減衰によって飽和するとともに、イオン音波は ITG 乱流においては減衰する揺動であることも分かった (Fig.1)。さらに、GAM の半径方向の構造は、静的な帯状流よりも短波長であることも分かった。

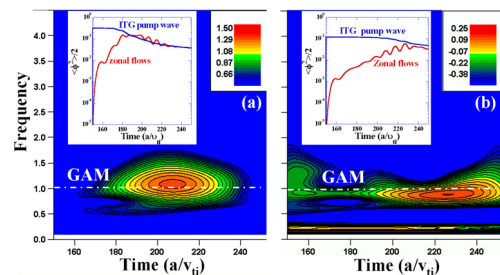


Fig. 1. Wavelet energy analyses for the nonlinear excitation of the GAMs in high q plasmas. The inset graphs are the corresponding time evolution of total zonal flow energy and the pump wave. The standard Cyclone base case parameters are used here except for q value.

(2) 帯状圧力、または有界面と乱流の非線形相互作用によって形成される圧力揺動が微視的な ITG 乱流にどのような影響を与えるかを、シミュレーションによって解析した。一方、圧力揺動の波数が小さい場合は、圧力分布の局所的な平坦化（急峻化）によって、安定化（不安定化）に働くことが明らかになった。また、非線形領域におけるイオンの熱輸送の新たな間欠性がシミュレーションで確認された。この原因を明らかにするために、帯状流の効果をスペクトル解析によって調べた。

(3) 5場のジャイロ流体シミュレーションとモデル解析に基づいてマクロスケールの抵抗性 MHD モードとイオンスケールの乱流との非線形相互作用を調べた。その結果、(1) ミクロな乱流との非線形相互作用による磁気島の振動現象、および、(2) MHD モードと ITG モードが混在した磁気島駆動の ITG モード (MITG と命名) として位置づけられる短波長モードを見出し、これらの背後にある物理機構を明らかにした。(1) については、成長する ITG モードの効果をモデル的に導入した 2 場の簡約 MHD 方程式に基づいた解析を行い、ITG モードが作る分極電場に伴い、振動する電磁トルクが生成され、それによってシミュレーションで見出された磁気島の振動が再現されることが分かった (Fig. 2)。(2) については、基本的な物理機構 (磁気島に伴い複数有界面の出現) を明らかにしたが、さらに、磁気島内における磁場構造とイオン温度分布の凍り付きが破れ、その結果、磁気島内においてもイオン温度勾配が維持され、その結果 MITG モードが励起されることが分かった (Fig.3)。

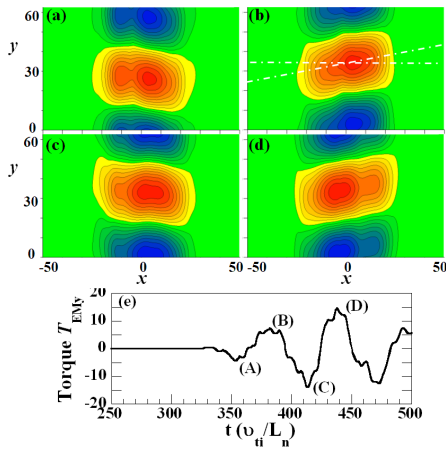


Fig. 2. (a-d) Snapshots of the flux $m=1$ component with maximum oscillation amplitudes in the simulation. (e) Evolution of averaged EM torque.

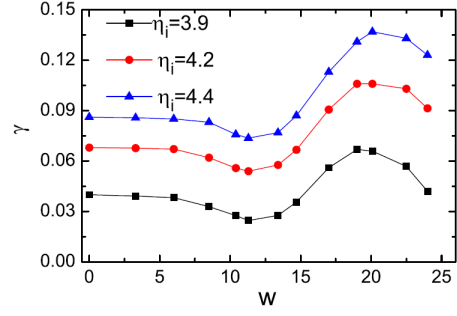


Fig. 3. Dependence of growth rate of the MITG on island width w for different ion temperature gradient.

(4) 静電揺動と電磁揺動が混在した系にどのような運動エネルギーと電磁エネルギーの交換チャンネルが存在するかを解明することを目的に、巨視的な抵抗性 MHD モードと静電的なイオンスケール乱流の非線形相互作用を、5 場のジャイロ流体シミュレーションによって解析した。その結果、微視的乱流の運動エネルギーはクロススケールダイナモの励起を通じて電磁的揺動のエネルギーに変換され、新たな電磁的トルクとして働くことが分かった (Fig. 4)。また、磁気島は、多階層間の相互作用によってもたらされたこの上下振動に反応し、帯状流もまた振動成分として振る舞うことが示された。さらに、その物理機構を解明するために、簡約化された 2 場の方程式による解析を行った。これは、従来の異常抵抗性理論が、十分な物理的根拠を持ったクロススケールダイナモ理論によって説明される可能性を示唆しており、この点については今後検討する予定である。

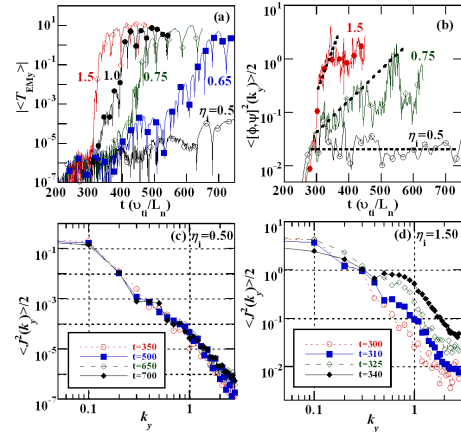


Fig. 4. Time evolution of the cross-scale dynamo action versus the ITG turbulence intensity. (a) Averaged EM torque amplitude; (b) Dynamo driving intensity for a representative of $k_y=0.7$. Dashed straight reference lines label the features of the dynamo action. (c, d) spectra of fluctuating current.

(5) 電磁的なMHD揺動と微視的静電ITG乱流間の非線形相互作用が引き起こす磁場凍結の破れ、即ちジャイロ流体シミュレーションにおけるイオン温度の島構造の崩壊に関する解析を行った。その結果、短波長な磁気島構造によって誘起される新しいITG不安定が確認された。一方で、非線形領域におけるイオン温度の島構造の崩壊メカニズム(Fig. 5)は、磁場に垂直方向と平行方向の輸送のバランスによって説明され、磁場に平行方向の熱輸送に関する効果を考慮したケースとそうでないケースを比較することで立証された。また、間欠的なイオンの熱輸送の特性は、多階層にわたる乱流によって説明されることも示された。

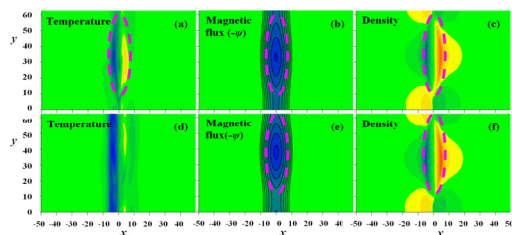


Fig. 5. Contour plots of fluctuating temperature and density and total magnetic flux (negative) for the collapse of temperature island in the simulation.

(6) 一般的なMHD揺動とミクロの乱流とのマルチスケールシミュレーション研究の一環として、簡約MHDモデルに基づいて、ダブルティアリングモード(DTM)の非線形不安定性の物理機構の研究を進展させた。本研究では、緩やかなラザフォード領域後の急激なDTMの成長を二次的な不安定性として捉え、構造駆動の変調不安定性による物理機構の提案を行った。特に、このモデルによって、シミュレーションで観測されているポテンシャル流の速い成長と磁束の緩やかな成長の二つ異なった時定数の成長のダイナミクスを自己無撞着に説明できることが分かった。今後、DTMもITGなどのマルチスケールのシミュレーション研究を推進する予定である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 30 件)

- ① Z. X. Wang, J. Q. Li, J. Q. Dong, Y. Kishimoto, Stabilization of ion temperature gradient driven instability by a vortex flow, *Phys. Plasmas*, 査読有, Vol.18,2011,012110 (13pp)
- ② Jiquan Li and Y. Kishimoto, Wave-number spectral scaling law of drift wave-zonal flow turbulence in gyrofluid simulations, *Phys. Plasmas*, 査読有, Vol.17, 2010, 072304 (8pp)

- ③ Jiquan Li and Y. Kishimoto, Cross-scale dynamo action in multi-scale plasma turbulence, *Plasma and Fusion Research*, 査読有, Vol.5, 2010, 031 (3pp)
- ④ K. Imadera, Y. Kishimoto, Jiquan Li, Global Profile Relaxation and Entropy Dynamics in Turbulent Transport, *Plasma and Fusion Research*, 査読有, Vol.5, 2010, 019 (3pp)
- ⑤ Kenji Imadera, Y. Kishimoto, Jiquan Li, and T. Utsumi, Gyrokinetic study of the local entropy dynamics in turbulent plasmas with zonal flow, *Plasma and Fusion Research*, 査読有, Vol. 5, 2010, S2050 (4pp)
- ⑥ M. Janvier, Y. Kishimoto and Jiquan Li, Investigation of the trigger mechanism in the explosive nonlinear growth of the Double Tearing Mode, *Plasma and Fusion Research*, 査読有, Vol.5, 2010, S2056 (4pp)
- ⑦ M. Janvier, Y. Kishimoto and Jiquan Li, Mechanism of Structure-Driven Nonlinear Instability of Double Tearing Mode in Reversed Magnetic Shear Plasmas, *Plasma and Fusion Research*, 査読有, Vol.5, 2010, 038 (3pp)
- ⑧ K. Imadera, Y. Kishimoto, D. Saito, Jiquan Li, T. Utsumi, A numerical method for solving the Vlasov-Poisson equation based on the conservative IDO scheme, *Journal of Computational Physics*, 査読有, Vol.228, 2009, 8919-8943
- ⑨ Z.X.Wang, J.Q.Li, J.Q. Dong, Y. Kishimoto, Generic Mechanism of Microturbulence Suppression by Vortex Flows, *Phys. Rev. Letts.*, 査読有, Vol. 103, 2009, 015004(4pp)
- ⑩ Z.X.Wang, J.Q.Li, Y. Kishimoto, J.Q. Dong, Magnetic-island-induced ion temperature gradient mode, *Phys. Plasmas*, 査読有, Vol.16, 2009, 060703 (4pp)
- ⑪ Jiquan Li, Y. Kishimoto, Y. Kouduki, Z. X. Wang, M. Janvier, Finite frequency zonal flows in multi-scale plasma turbulence including resistive MHD and drift wave instabilities, *Nucl Fusion*, 査読有, Vol. 49, 2009, 095007 (9pp)
- ⑫ K. Uzawa, Jiquan Li, and Y. Kishimoto, Global characteristics of zonal flows due to the effect of finite bandwidth in drift wave turbulence, *Phys. Plasmas*, 査読有, Vol. 16, 2009, 042304 (8pp)
- ⑬ Jiquan Li, Y. Kishimoto, Role of secondary

- long wavelength structures in the saturation of electron temperature gradient driven turbulence, *Phys. Plasmas*, 査読有, Vol. 15, 2008, 112504 (10pp)
- ⑭ Jiquan Li, Y. Kishimoto, Gyrofluid simulation of ion-scale turbulence in tokamak plasmas, *Commun. Comput. Phys.*, 査読有, Vol.4, 2008, 1245-1257
- ⑮ Zheng-Xiong Wang, Xiaogang Wang, J. Q. Dong, Y. Kishimoto, and J. Q. Li, Shear flows induced by nonlinear evolution of double tearing modes, *Phys. Plasmas*, 査読有, Vol.15, 2008, 082109 (7pp)
- ⑯ Johan Anderson, Jiquan Li, Yasuaki Kishimoto, Eun-jin Kim, Quasilinear analysis of the zonal flow back-reaction on ion-temperature- gradient mode turbulence, *Phys. Letts. A*, 査読有, Vol.372, 2008, 5987-5990
- ⑰ Jiquan Li, Y. Kishimoto, N. Miyato, K. Miki, J. Anderson, B. R. Shi, Gyrofluid simulation on the nonlinear excitation and radial structure of geodesic acoustic modes in ITG turbulence, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 査読有, Vol.123, 2008, 012027 (11pp)
- ⑱ K. Miki, Y. Kishimoto, N. Miyato and J. Q. Li, A model of GAM intermittency near critical gradient in toroidal plasmas, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 査読有, Vol.123, 2008, 012028 (14pp)
- ⑲ K. Uzawa, J. Q. Li, Y. Kishimoto, Global nature of zonal flow due to the finite band, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 査読有, Vol.123, 2008, 012031 (10pp)
- ⑳ K. Miki, Y. Kishimoto, Jiquan Li, N. Miyato, Dynamics of turbulent transport dominated by the geodesic acoustic mode near the critical gradient regime, *Phys. Plasmas*, 査読有, Vol.15, 2008, 052309 (14pp)
- 21 Y. Kishimoto, A. Sugahara, J.Q. Li, Remote collaboration system based on large scale simulation, *Fusion Engineering and Design*, 査読有, Vol.83, 2008, 434(4pp)
- 22 K. Uzawa, Y. Kishimoto, and Jiquan Li, Effect of Wave-type mean flow on the modulational process of zonal flow instability, *J. Phys. Soc. Jpn.*, 査読有, Vol.77, 2008, 034501(9pp)
- 23 K. Uzawa, Jiquan Li, and Y. Kishimoto, Spectral effect of zonal flows and enhanced growth rate, *Plasma and Fusion Research: Rapid Communications*, 査読有, Vol.3, 2008, 011 (3pp)
- 24 Bingren Shi, Jianlong Lin, Jiquan Li, Tokamak resistive magneto- hydrodynamic ballooning instability in the negative shear regime, *Chin.Phys.*, 査読有, Vol.27, 2007, 1399 – 1404
- 25 J Q Dong, Y. X. Long, Z. Z. Mou, and J. H. Zhang, Jiquan Li Magneto- hydrodynamic flow layer formation in development of resistive double tearing mode, *Phys. Plasmas*, 査読有, Vol.14, 2007, 114501 (4pp)
- 26 K. Miki, Y. Kishimoto, N. Miyato, J. Q. Li, Intermittent transport associated with geodesic acoustic mode near the critical gradient regime, *Phys. Rev. Letts*, 査読有, Vol.99, 2007, 145003 (4pp)
- 27 J. Anderson, J. Li, Y. Kishimoto, Effects of parallel ion motion on zonal flow generation in ion- temperature- gradient mode turbulence, *Phys. Plasmas*, 査読有, Vol.14, 2007, 082313 (6pp)
- 28 T. Matsumoto, J. Q. Li, Y. Kishimoto, Characteristics of ETG-driven Turbulence Dominated by Zonal Flows, *Nucl. Fusion*, 査読有, Vol.47, 2007, 880-885
- 29 N. Miyato, Y. Kishimoto, J. Q. Li, Turbulence suppression in the neighbourhood of a minimum- q surface due to zonal flow modification in reserved shear tokamaks, *Nucl. Fusion*, 査読有, Vol. 47, 2007, 929-935
- 30 Bingren Shi, Jiquan Li, Magneto-hydrodynamic high-n ballooning mode instability of an analytic axisymmetric toroidal equilibrium with arbitrary aspect ratio, *Chin. Phys. Lett.*, 査読有, Vol. 24, 2007, 490-493
- [学会発表] (計 17 件)
- ① Jiquan Li, Multi-scale turbulence interaction through cross-scale dynamo generation by micro-scale turbulent flow in plasmas, *20th International Toki Conference*, Dec. 7-10, 2010, Ceratopia Toki, Gifu, Japan
- ② Y. Kishimoto, Magnetic reconnection triggered by structure driven nonlinear instability and its application in understanding fusion and astrophysics plasma events, *US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection MR2010*, Dec. 6-9, 2010, Hotel Nikko Nara, Japan)
- ③ Jiquan Li, Gyro-fluid simulation of cross-scale dynamo generation in multi-scale MHD and micro-turbulence, *Opening*

- Ceremony of Fusion Simulation Center & 4th International Workshop on Fusion Theory and Simulation*, Oct. 20-22, 2010, Beijing, China
- ④ Yasuaki Kishimoto, 乱流輸送における分布緩和とエントロピーダイナミクス, 2010 Autumn annual conference of the Physical Society of Japan, Sept 23-26, 2010, Osaka.
- ⑤ Jiquan Li, Multi-scale turbulence simulation in magnetic fusion plasma, *The Joint International Conference of the 7th Supercomputing in Nuclear Application and the 3rd Monte Carlo (SNA + MC2010)* (Hitotsubashi Memorial Hall, Oct. 17-21, 2010, Tokyo, Japan
- ⑥ Jiquan Li, Nonlinear Interaction Mechanisms of Multi-scale Multi-mode MHD and Micro-turbulence in Magnetic Fusion Plasmas, *23rd IAEA Fusion Energy Conference*, Oct. 11-16, 2010, Daejeon, Korea
- ⑦ Jiquan Li, K. Imadera, P. Hilscher, S. Miyata, Yasuaki Kishimoto, Wave-number spectral characteristics of the drift wave turbulence dominated by zonal flows, *2010 Autumn annual conference of the Physical Society of Japan*, Sept 23-26, 2010, Osaka, Japan
- ⑧ Jiquan Li, Gyrofluid Simulation on the Dynamics of Magnetic Island and Zonal Flows in Mixed Resistive MHD and Ion-Scale Turbulence, *7th Asia Plasma and Fusion Association (APFA) & Asia Pacific Plasma Theory Conference in 2009 (APPTC)*, October 27-30 2009, Aomori, Japan
- ⑨ Yasuaki Kishimoto, Magnetic island induced ITG instability in multi-scale MHD and micro-turbulence, *51st Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics*, Nov. 2-6, 2009, Atlanta, Georgia, USA
- ⑩ Jiquan Li, Zonal flow dynamics and transport characteristics in mixed-scale MHD and ITG turbulence, *2009 Autumn annual conference of the Physical Society of Japan(JPS)*, Sept 25-28, 2009, Kumamoto, Japan
- ⑪ Jiquan Li, Dynamics of multi-scale MHD and ion turbulence interaction, *2009 Spring annual conference of the Physical Society of Japan(JPS)*, March 27-30, 2009, Tokyo, Japan
- ⑫ Jiquan Li, New Characteristics of Zonal Flows in Multi-scale Plasma Turbulence, *22th IAEA Fusion Energy Conference*, 13-18 October 2008, Geneva, Switzerland
- ⑬ Y. Kishimoto, Multi-scale transport dynamics dominated by multiple dissipation mechanisms near the critical gradient, *22th IAEA Fusion Energy Conference*, 13-18 October 2008, Geneva, Switzerland
- ⑭ Jiquan Li, Finite frequency zonal flow in Multi-scale MHD and ITG turbulence, *50th APS Annual Meeting of the Division of Plasma Physics*, November 17-21, 2008, Dallas, Texas, USA
- ⑮ Yasuaki Kishimoto, Global zonal flow eigen-mode with spatial localization due to the finite band width, *50th APS Annual Meeting of the Division of Plasma Physics*, November 17-21, 2008, Dallas, Texas, USA
- ⑯ Jiquan Li, Nonlinear interaction and turbulent transport in mixed scale MHD and ITG fluctuations, *14th International Congress on Plasma Physics (ICPP2008)*, September 8-12, 2008, Fukuoka, Japan.
- ⑰ Y. Kishimoto, Wave packet formation and large-scale structure of finite band width zonal flows, *2008 Autumn annual conference of the Physical Society of Japan(JPS)*, Sept 20-23, 2008, Iwate, Japan
- [その他]
ホームページ等
<http://www.center.iae.kyoto-u.ac.jp/kishi/result/index.html>
6. 研究組織
(1)研究代表者
李 継全 (Li Jiquan)
京都大学・エネルギー科学研究科・准教授
研究者番号 : 00437253
- (2)研究分担者
岸本 泰明 (Kishimoto Yasuaki)
京都大学・エネルギー科学研究科・教授
研究者番号 : 10344441