

機関番号：17102

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560767

研究課題名 (和文) 乱流プラズマの構造相図の作成

研究課題名 (英文) Phase Diagram of Plasma Turbulence Structures

研究代表者

稲垣 滋 (INAGAKI SHIGERU)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：60300729

研究成果の概要 (和文)：

本研究では、プラズマ乱流の形成する構造を非平衡系における相と見なせる事を示す事を目的とし、直線プラズマ装置において乱流の駆動力、散逸力、微視的スケールを磁場強度、中性粒子密度により変化させ、多チャンネルラングミュアプローブにより、密度揺動を観測した。揺動のパワースペクトルに特徴的な2つのパターンを見だし、更にそれらパターン間を行き来する遷移現象を発見する事で、それぞれのパターンが境界を持つ相と見なせる事を示した。特徴的なモードの強度やモード間の非線形結合強度などにより乱流構造を時空間的に特徴づけ、スペクトル遷移との関連を議論した。実験によって“相図の非平衡系への拡張”の一つの具体例を提示する事ができた。

研究成果の概要 (英文)：

We characterized structures of turbulence in magnetized plasma for a wide range of operational parameters of magnetic field and filling gas pressure and made a phase diagram of plasma states in LMD-U at Kyushu University. We observed density fluctuation spectra with a multi-channel probe array. Different types of spectra and bifurcation phenomena were found in the scanned space of filling gas pressure and magnetic field. Furthermore, the dynamics during transitions between bifurcated states were analyzed. We considered the type of spectrum as an index of the specific state of plasma turbulence and quantified the state by amplitude and total bi-coherence of characteristic low frequency modes. This research is one concrete example of an expansion of the phase diagram in a non-equilibrium system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：プラズマ理工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：プラズマ計測、プラズマ乱流、相図、スペクトル

## 1. 研究開始当初の背景

乱流は現代物理学の最大の問題の一つで

ある。近年、プラズマ乱流の研究が発展し、乱流の謎が解決へと大きく進展する、と期待

されている。従来、中性乱流はコルモゴルフ則の改良等、波数空間での微細化について集中的に研究されてきた。一方、実験室や宇宙のプラズマ乱流では、プラズマ中に巨視的な流れ等の構造を形成する事が知られており、乱流の非線形結合の理解への道を示す。プラズマ乱流による構造形成の例として、1.トロイダルプラズマにおけるドリフト波乱流と剪断流との結合、及びドリフト波乱流とゾーナル流の結合、2.乱流と熱対流との結合による地磁気や太陽磁場の発生（ダイナモ効果）、等がある。

トロイダルプラズマで1982年に発見されたH-modeと呼ばれる構造では、剪断流が形成され乱流が抑制されている事は広く認識されている。このH-modeはL-modeから時間的に急激に変化し、また、粒子や熱の輸送係数が空間的に不連続に変化するため「プラズマにおける分岐、遷移」の研究が世界的に進展した。このH-modeはITER（国際熱核融合実験炉）において、自己点火を目指した実験に用いられるため、現在も活発に研究が行われている。そのITERにおいて、自己点火のための必要条件として、時間変動する剪断流（ゾーナル流）とドリフト波乱流との結合に注目が集まった。乱流の構造形成における物理法則の解明が強く求められるようになり、2004年に日本でプラズマ乱流研究プロジェクトが動きだし、2004年に世界で初めてゾーナル流が観測されると、世界各地でゾーナル流の観測が始められ、米国、ドイツ、フランス、イギリス、台湾で類似の研究プロジェクトが相次いで発足した。プラズマ乱流における構造形成は、今やプラズマ物理学及び核融合工学の中心課題となっている[1]。また、プラズマ乱流は宇宙プラズマにおいても重要であり、プラズマ乱流の非線形結合のダイナモ機構への適用も行われている。

直線磁場プラズマにおいても揺動のスペクトルが定性的に大きく変化する事が発見された。九州大学直線プラズマ装置(LMD-U)にて中性のアルゴン粒子圧を変化させていくと、3-4mTorrを境界に中性粒子圧が高い場合と低い場合でスペクトルが質的に異なる（詳細は後述する）。この結果から直線プラズマにおいても幾つかの特徴的な乱流状態があり、その乱流状態は外部制御パラメータのわずかな違いで急激に変化するという分岐的な性質を持つ事が示唆される。乱流状態は波の非線形相互作用に起因するため、乱流状態と外部制御パラメータとの相関から、非線形相互作用をゾーナル流やストリーマー等も包括して総合的に整理できる。また、プラズマにおいて乱流は勾配による自由エネルギーによって駆動されたため、乱流は非平衡系における不均一性のインデックスとなり得る。このため外部制御パラメータ

空間における乱流状態は不均一性を繰り返した相図であると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、プラズマ乱流の形成する構造を非平衡系における相と考え、外部制御パラメータによってプラズマ乱流はどのような相を持つのかを明らかにすることを目的とする。

“相”とは、平衡系において定義されている概念であり、“不均一性”が存在する非平衡系では定義できない。しかし、遠非平衡系であるトロイダルプラズマについては、L-mode, H-modeと呼ばれる質的に異なる構造が存在し、プラズマは相転移のようにその二つの状態間を遷移する事が知られている。また、異なる構造間では乱流の状態も質的に異なる（L-modeでは乱流が強く、H-modeでは乱流が抑制されている）ため、不均一性を乱流の状態という形で繰り返す事で相図は非平衡系へと拡張可能である。

制御核融合を目指したトロイダルプラズマに限らず、実験室プラズマや宇宙プラズマの観測から、磁化不均一プラズマの持つ構造の多様さが認識され、プラズマ乱流と構造の物理的理解が強く求められている。本研究では、プラズマ中の構造を乱流の特徴的な状態として記述できる、という描像を直線プラズマに適用可能である事を実証し、あわせて少数の巨視的パラメータ空間の中に相図としてまとめられることを示す。

具体的には、直線プラズマを用いてプラズマ乱流実験を行う。乱流の駆動力、散逸力、微視的スケールを外部制御パラメータ（加熱入力、磁場強度、中性粒子密度）により変化させ、多チャンネルマルチラングミュアプローブにより、乱流構造（ストリーマー、ゾーナル流、楕状スペクトル）を観測する[2-6]。乱流の周波数-波数分解、確率密度関数、パイスペクトル解析によるモード間の非線形結合強度などにより乱流構造を時空間的に特徴づけ、その特徴的な量と外部制御パラメータとの相関関係を探求する。実験によって“相図の非平衡系への拡張”の具体例を提示する事を目標とする。

## 3. 研究の方法

本研究における要素は、(a)外部パラメータを広範囲に変化させた実験（外部制御実験）、及び(b)乱流状態を特徴づける量の探求（乱流解析）、そして(c)それらの統合（相図作成）である。

外部制御実験は九州大学の直線プラズマ装置(LMD-U)にて行う。図1にLMD-Uの概要を示す。LMD-Uでは3kW（最大10kW）のヘリコン波により中心電子温度2-4eV、中心電子密度 $\sim 1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ のアルゴンプラズマを

生成する。プラズマ半径は~6cm、プラズマ長は 3.74m である。磁場強度は 0.09T (最大 0.18T) である [2,6]。外部パラメータとして以下を制御する。(1) 加熱入力を制御し、プラズマ乱流を駆動するための勾配を制御する、(2) 中性粒子密度制御により乱流の衝突減衰率を制御する、そして(3)磁場強度を変えて、ドリフト波の固有モードスケールであるイオンラマ半径を制御する。乱流解析は、マルチチャンネル計測によるイオン飽和電流及び浮動電位揺動に対して行う。モード解析、バイコヒーレンス解析等を行う。相図の作成では得られた結果を用いて総合的な理解を行う。一連の作業を繰り返し、より説得力のある相図を作成する。

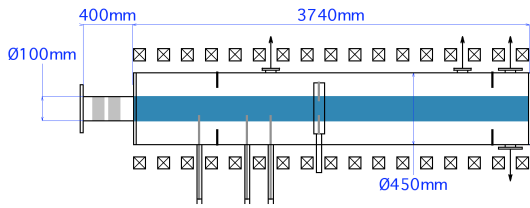


図1 九州大学直線プラズマ装置 LMD-U

#### 4. 研究成果

##### 中性粒子密度制御実験

入射中性ガス量及びガス排気速度の調整による 1-6mTorr までの中性粒子密度制御をアルゴンプラズマで行った。中性粒子制御に関しては、中性粒子分布をモンテカルロコードによってシミュレーションし、計測と比較する事でガス注入、排気系の配置の有効性を確認した。シミュレーションでは中性粒子に関するフォッカープランク方程式を解き中性粒子の分布関数を求めた。

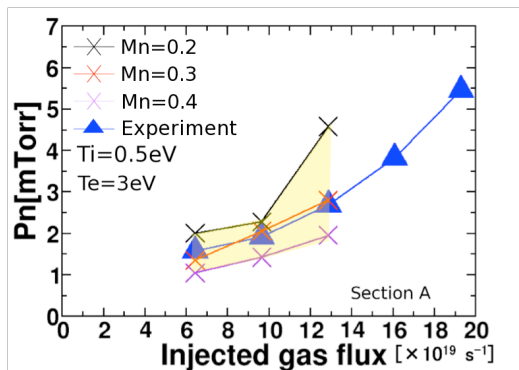


図2 中性粒子シミュレーションと実験観測との比較

LMD-U ではマノメータにより中性粒子圧を計測しており、シミュレーション結果と実験との比較が可能である。直接計測を行っていないイオン温度、イオンマッハ数について、適当な仮定を用いてシミュレーションを行い、それら仮定の下でのシミュレーションの有効性を確認した。図2に入射ガス量により放電中の中性粒子圧力はどのように振る舞

うかを示す。マッハ数を 0.2-0.3 と仮定するとシミュレーション結果は実験結果とよく一致する事が分かった。

##### スペクトル相図と自発的スペクトル遷移

LMD-U において中性粒子圧と磁場強度を変化させる事で、密度揺動のスペクトル相図を作成した。64ch プロブアレイ計測による密度揺動スペクトルの変化を図3に示す[11]。図3(a)では特徴的な2つのパターンが観測される。スペクトルのピークが一直線上に並び全てのピークが同一の位相速度で電子反磁性方向に伝搬しており、孤立波を示すパターン、スペクトルが広がりイオン反磁性方向に伝搬する波が存在し、波の自己相関時間が短く、乱流状態と呼べるパターンである。特に後者のパターンはストリーマーが出現する際に観測される。このパターン変化が徐々に起こるのか、急激な変化を伴うのかは相を考える際に非常に重要である。LMD-U では図3(b)に示すように、ストリーマー(乱流)相と孤立波相との中間領域で遷移現象が観測される。この遷移はカusp型分岐によって定性的に説明でき(後述)、ストリーマー相と孤立波相の間に境界が存在する事が明らかになった。この事実は、乱流に対して相図の概念を拡張できるというアプローチを強くサポートする。

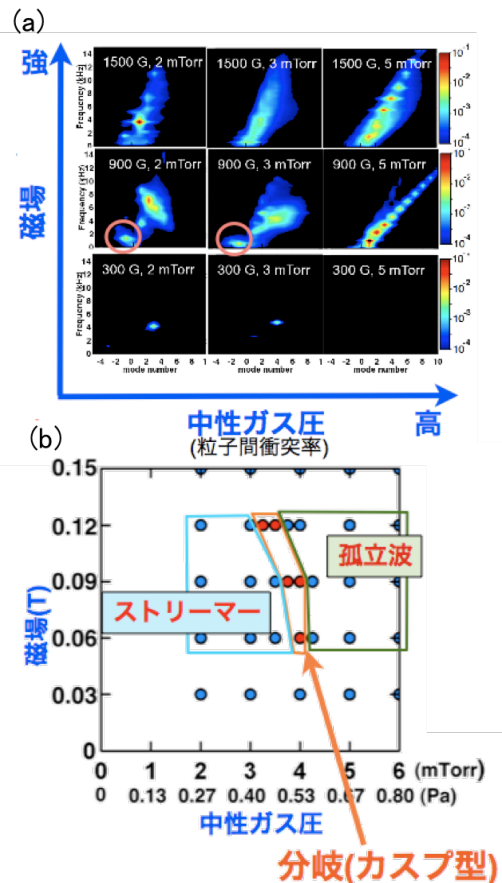


図3 LMD-U における乱流スペクトル相図

遷移領域で観測される典型的な遷移現象を図4に示す。図4(a)は放電中に揺動がある状態( $\alpha$ )からある状態( $\beta$ )へと遷移を繰り返している事を示す。図4(b)(c)はそれぞれの状態のパワースペクトルと時間発展パターンを示す。 $\alpha$ 相は周方向モード  $m=-1$  の揺動が存在し、ストリーマー相の性質を備え、 $\beta$ 相は孤立波相の特徴を持つ。それぞれの状態でスペクトルは質的に異なる。この遷移の時間スケールを波数空間にモード分解した波の時間発展を解析する事で明らかにした[7]。遷移の際、 $m=2$  の揺動が最初に変化し始める事を観測した。低  $m$  から高  $m$  への遷移の伝搬の時間遅れは順カスケードの時間スケールと矛盾しない事を確認した。

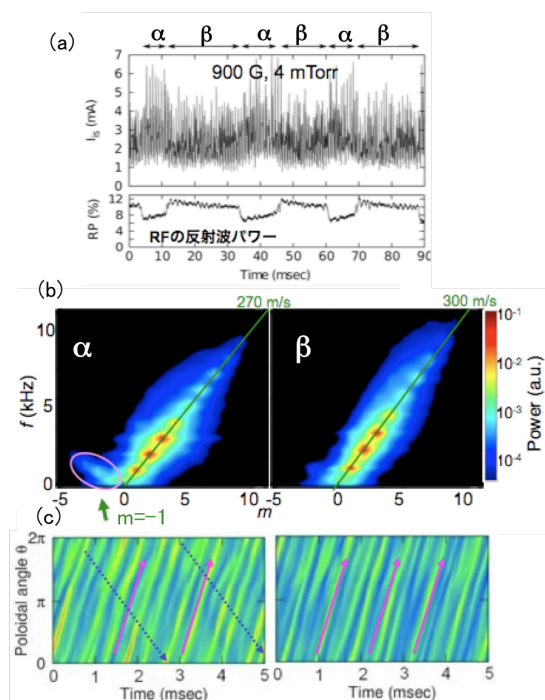


図4 典型的なスペクトル遷移現象

#### 相の特徴付け

相の性質を定量的に議論するため相を特徴づける物理量を探求した。イオン反磁性方向に伝搬する周方向モード数  $m=1$  の構造の強度、バイコヒーレンスやトータルバイコヒーレンスによるモードの非線形結合度、確率分布関数を用いた統計的性質による整理を試みた[9,12]。

イオン方向に伝搬するモードはストリーマー形成に関して重要な役割を担っていると考えられており、このモードで相図を整理する事はストリーマーの形成機構解明にも大きく寄与すると考えられる。このモードはストリーマー相で大きく、孤立波相で小さくなり、図5(a)に示すように明瞭な分岐を示す[11]。この分岐現象は磁場強度により変化するため、 $m=-1$  モードの強度は図5(b)のようなカस्प面構造を持つと考えられる。

揺動の内部の非線形結合状態を調べるためにパワースペクトル解析を行った。孤立波の方が揺動間の非線形結合が強い。また主モードに関するトータルバイコヒーレンスも明瞭な分岐を示す[9]。

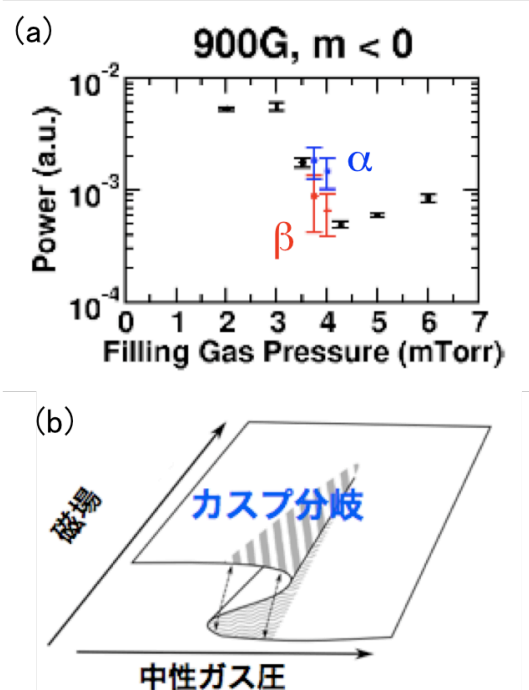


図5  $m=-1$  モード強度の中性粒子圧依存性(a)及びカस्प面における分岐の説明図(b)

#### 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] (査読済み計 12 件)

- [1] S. Inagaki, 他 19 名  
Transport Dynamics and Multi-Scale Coupling of Turbulence in LHD  
Plasma Fusion Res. 3 (2008) S1006
- [2] T. Yamada, S.-I. Itoh, T. Maruta, N. Kasuya, S. Shinohara, Y. Nagashima, M. Yagi, K. Terasaka, S. Inagaki, 他 4 名  
Experimental Study of Drift Wave Turbulence on Linear Plasma  
Plasma Fusion Res. 3 (2008) 044
- [3] K. Kamataki, S.-I. Itoh, Y. Nagashima, S. Inagaki, 他 6 名  
Observation of Zonal Flow Type Oscillation in Linear Cylindrical ECR Plasmas  
Plasma Fusion Res. 3 (2008) 047
- [4] K. Kamataki, S.-I. Itoh, Y. Nagashima, S. Inagaki, 他 6 名  
Dynamics of Drift and Flute Modes in Linear Cylindrical ECR Plasma  
J. Plasma and Fusion Res. Series 8 (2009) 82.
- [5] Y. Nagashima, S.-I. Itoh, K. Itoh, A. Fijisawa, S. Inagaki, 他 13 名

Reynold Stress Measurements for Investigation of Nonlinear Process of Turbulence in the Large Mirror Device,

J. Plasma and Fusion Res. Series 8 (2009) 50

[6] T. Yamada, S.-I. Itoh, S. Inagaki, 他11名  
Measurement of Nonlinear Mode Couplings in the Large Mirror Device-Upgrade

J. Plasma and Fusion Res. Series 8 (2009) 87.

[7] H. Arakawa, K. Kamataki, S. Inagaki, 他11名  
Observations of abrupt changes in the fluctuation spectrum on LMD-U

Plasma Phys. Control. Fusion 51 (2009) 085001.

[8] S. Inagaki, 他10名

Internal Transport Barrier Formation Induced by Edge Perturbation on LHD

Nucl. Fusion 50 (2010) 064012

[9]. T. Kobayashi, S. Inagaki, 他10名

Bi-spectral analysis of density and potential fluctuations in a high neutral density cylindrical plasma

Plasma and Fusion Research Special Issue (2010) 5, S2047

[10] S. Inagaki, 他10名

Characterization of bifurcation induced by long distance correlation between heat flux and temperature gradient in toroidal plasmas

Plasma Phys. Control. Fusion 52 (2010) 075002

[11] H. Arakawa, S. Inagaki, 他9名

Bifurcation of the plasma turbulence on LMD-U, Plasma Physics and Controlled Fusion, Vol. 52, No. 10, (2010), 105009

[12] H. Arakawa, S. Inagaki, 他10名

”Probability Density Function of Density

Fluctuations in Cylindrical Helicon Plasmas”,

Plasma and Fusion Research, Vol. 5, (2010), S2044

〔学会発表〕 (計 36 件)

[1] S. Inagaki, 他 13 名

Two-Dimensional Spatial Structure of Plasma Turbulence in LMD-U

35th European Physical Society Conference on Plasma Physics, 2008/06/12, Crete Greece

[2]. S. Inagaki, 他 10 名

Density and potential fluctuation structures in LMD-U

14th International Congress on Plasma Physics, 2008/09/09, Fukuoka, Japan

[3] H. Arakawa, K. Kamataki, S. Inagaki, 他 11 名

Observation of turbulence transitions in Ar plasmas on LMD-U

2008 Autumn Meeting of the Physical Society of Japan, 2008/09/22, Iwate Univ., Iwate, Japan

[4] S. Inagaki, 他 12 名

Radial Interaction in Dynamic Heat Transport of LHD Plasmas

22nd IAEA Fusion Energy Conference, 2008/10/14, Geneva, Switzerland

[5] Y. Sawanaga, S. Inagaki, 他 4 名

Analysis of neutral particle in linear turbulent plasma device LMD-U

25th Annual Meeting of the Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research, 2008/12/03, Utsunomiya, Japan

[6] H. Arakawa, K. Kamataki, S. Inagaki, T 他 11 名

Observation of transition phenomena of spectra of density fluctuation in LMD-U

12th Assembly of Kyushu-Okinawa-Yamaguchi Branch, Japan Society of Plasma Science and Fusion Research, 2008/12/22, Kyushu Univ., Fukuoka, Japan

[7] Y. Sawanaga, S. Inagaki, 他 4 名

Analysis of neutral particle in linear turbulent plasma device LMD-U

12th Assembly of Kyushu-Okinawa-Yamaguchi Branch, Japan Society of Plasma Science and Fusion Research, 2008/12/22, Kyushu Univ., Fukuoka, Japan

[8] H. Arakawa, K. Kamataki, S. Inagaki, 他 12 名

Observation of transition dynamics in turbulence spectrum on LMD-U

64th Annual Meeting of the Physical Society of Japan, 2009/03/28, Rikkyo Univ. (Ikebukuro Campus), Tokyo, Japan

[9] H. Arakawa, S. Inagaki, 他 9 名

Phase diagram of plasma turbulence structures on LMD-U

2009 Autumn Meeting of the Physical Society of Japan, 2009/09/28, Kumamoto Univ.

[10] S. Inagaki, 他11名

Internal transport barrier formation

induced by edge perturbation on LHD

12th International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers, 2009/9/31, Princeton University, USA

[11] H. Arakawa, S. Inagaki, 他 9 名

Temporal sequences in the evolution of fluctuations on LMD-U

51th Annual Meeting of the American Physical Society Division of Plasma Physics, 2009/11/4 Hyatt Regency Atlanta, Atlanta, GA, USA

[12] T. Yamada, S.-I. Itoh, S. Inagaki, 他9名

Nonlinear mode couplings in a cylindrical magnetized plasma

19th International Toki Conference, 2009/12/09, Toki, Japan

[13] T. Kobayashi, S. Inagaki, 他10名

Bi-spectral analysis of density and potential fluctuations in a high neutral density cylindrical plasma

19th International Toki Conference, 2009/12/09,

Toki, Japan

[14] H. Arakawa, S. Inagaki, 他10名  
Probability distribution function of density fluctuation in cylindrical helicon plasma  
19th International Toki Conference, 2009/12/09, Toki, Japan

[15] M. Shimoda, S. Inagaki, 他9名  
Statistical properties of radial particle flux in LMD-U  
13th Assembly of Kyushu-Okinawa-Yamaguchi Branch, Japan Society of Plasma Science and Fusion Research, 2009/12/23, Yamaguchi Univ., Yamaguchi, Japan

[16] T. Kobayashi, S. Inagaki, 他10名  
Bi-spectral analysis of density and potential fluctuations in a low neutral density cylindrical plasma  
13th Assembly of Kyushu-Okinawa-Yamaguchi Branch, Japan Society of Plasma Science and Fusion Research, 2009/12/23, Yamaguchi Univ., Yamaguchi, Japan

[17] H. Arakawa, S. Inagaki, 他10名  
Observation of change of fluctuation phase velocity in LMD-U  
13th Assembly of Kyushu-Okinawa-Yamaguchi Branch, Japan Society of Plasma Science and Fusion Research, 2009/12/23, Yamaguchi Univ., Yamaguchi, Japan

[18] S. Inagaki, 他 8 名  
Statistical properties of fluctuation-driven transport in LMD-U  
65th Annual Meeting of the Physical Society of Japan, 2010/03/20, Okayama University, Okayama, Japan

[19] T. Kobayashi, S. Inagaki, 他9名  
Nonlinear coupling analysis of density and potential fluctuations in LMD-U  
65th Annual Meeting of the Physical Society of Japan, 2010/03/23, Okayama University, Okayama, Japan

[20] H. Arakawa, S. Inagaki, 他10名  
Dynamics of transition of fluctuation phase velocity in LMD-U  
65th Annual Meeting of the Physical Society of Japan, 2010/03/23, Okayama University, Okayama, Japan

[21] T. Kobayashi, S. Inagaki, 他10名  
Dependence of non-linear coupling of density fluctuation on magnetic field strength in LMD-U  
2010 Autumn Meeting of the Physical Society of Japan, 2010/09/24, Osaka Prefecture Univ.

[22] S. Inagaki, 他10名  
Statistical characteristics of particle flux during the spectrum transition in LMD-U  
2010 Autumn Meeting of the Physical Society of Japan, 2010/09/24, Osaka Prefecture Univ.

[23] K. Kawashima, Y. Miyoshi, S. Oldenbürger,

S. Inagaki, 他12名

Evaluation of electron temperature fluctuation using two different probe techniques in plasma assembly for nonlinear turbulence analysis (PANTA)

20th International Toki Conference, 2010/12/08, Toki, Japan

[24] T. Kobayashi, S. Inagaki, 他11名  
Observation of Nonlinear Coupling between Low Frequency Coherent Modes and Background Turbulence in LMD-U

20th International Toki Conference, 2010/12/08, Toki, Japan

[25] H. Arakawa, S. Inagaki, 他9名  
Spatio-temporal evolutions of different phase velocities on LMD-U

European Physical Society 37th Conference on Plasma Physics, 2010/06/23, Dublin, IRELAND.

[26] S. Inagaki, 他 12 名  
Radial Structure of Fluctuation in Electron ITB Plasmas of LHD

23rd International Atomic Energy Agency Fusion Energy Conference, 2010/10/14, Daejeon, KOREA

[27] H. Arakawa, S. Inagaki, 他5名  
Nonlinear evolution of solitary wave in LMD-U  
66th Annual Meeting of the Physical Society of Japan, 2011/03/24, Niigata University

[28] K. Kawashima, S. Inagaki, 他14名  
Measurement of electron temperature fluctuations using triple probe method on Plasma Assembly for Nonlinear Turbulence Analysis (PANTA)  
66th Annual Meeting of the Physical Society of Japan, 2011/03/24, Niigata University

[29] Kobayashi, S. Inagaki, 他11名  
Observation of nonlinear couplings on spectral transition regime in LMD-U

66th Annual Meeting of the Physical Society of Japan, 2011/03/24, Niigata University

[30] S. Inagaki, 他7名  
Status of plasma turbulence research in PANTA device

66th Annual Meeting of the Physical Society of Japan, 2011/03/24, Niigata University

(以上の他 6 件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

稲垣 滋 (INAGAKI SHIGERU)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：60300729