

平成 21 年 6 月 5 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18760637
 研究課題名（和文） 高温不均一磁化プラズマにおける乱流の非線形過程の定量的・実験的研究
 研究課題名（英文） Quantitative and experimental study of nonlinear processes of turbulence in non-uniform magnetized plasmas
 研究代表者
 永島 芳彦 (NAGASHIMA YOSHIHIKO)
 東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教
 研究者番号：90390632

研究成果の概要：

多スケール乱流間の非線形過程を通じたエネルギー伝達を実験的に解明する研究である。九州大学の直線プラズマ装置では、乱流揺動による運動量輸送量計測器を開発・設置して実験解析を行い、帯状流と乱流間のエネルギー流の定量的観測に成功した。原子力機構 JFT-2M 装置では、乱流の密度包絡線から測地音波モードの情報を抽出してパイスペクトル解析を成功させ、測地線音波固有モードによる磁気面同定法を提案した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	3,600,000	0	3,600,000
2007 年度	100,000	0	100,000
2008 年度	100,000	30,000	130,000
年度			
年度			
総計	3,800,000	30,000	3,830,000

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：プラズマ乱流、ドリフト波、帯状流、パイスペクトル

1. 研究開始当初の背景

核融合プラズマ開発研究では、乱流輸送の物理解明は最重要課題の一つである。磁場閉じ込めプラズマの径方向輸送は、古典的な衝突拡散による輸送よりも 1-2 オーダー程度高いことが実験的に判明し、異常輸送と呼ばれている [Wesson, Tokamaks]。異常輸送の原因として、プラズマ中に励起される乱流による輸送が最も有力な候補となっている。ITER 計画が始動しこれまでの工学設計活動により立案された実験炉が建設中だが、設計活動の基盤となったプラズマの性能に関し

ては経験則から得られた外挿値を用いており、ITER の成否に関して計算機実験では ITER では核燃焼プラズマが得られないとの予測が立った [Science 1995]。しかし帯状流の存在を考慮すれば、ITER で核燃焼プラズマを得られることがやはり計算機実験で明らかになり [Rosenbluth and Hinton PRL 1998]、帯状流を着た乱流の理解が重要になった。ここに、帯状流とはポロイダル・トロイダル対称性を持ち緩やかに時間変化する径方向のポロイダルシア流で、乱流の非線形過程によって励起されまた乱流の飽和レベルに大きな

影響を持つ。トラスプラズマでは、乱流の飽和レベル・乱流輸送量を決定する機構として、帯状流による乱流抑制の影響、さらに混在した時空間スケールの異なる揺動間の非線形過程を通じた粒子・熱・運動量等物理量の伝達の重要性が挙げられている[Itoh, et al. Plasma and Fluid Turbulence 10P 2000]。このように帯状流・乱流系の研究の重要性は飛躍的に高まり、その理解が急務である。

2. 研究の目的

高温不均一磁化プラズマにおけるドリフト波乱流—帯状流システムにおいて、帯状流などの二次的不安定性の生成機構の実験的同定を目的とする。骨子は、乱流 Reynolds 応力による非線形三波過程を通じた帯状流励起機構の解明である。特に、乱流による運動量輸送量 (Reynolds 応力) を定量的に計測し、乱流と帯状流との非線形結合を実験的に同定し、どのような放電条件で帯状流などの二次的不安定性が発生するかを明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

本研究の骨子は、乱流プラズマに対する (1) 物理量の観測と (2) データ解析である。(1) 物理量の観測では、計測器 (プローブ) の開発、初期的揺動計測、乱流観測遂行を行う。(2) データ解析では、演算コードの開発・高速化や解析手法の開発を行う。

実験は主に九州大学の直線プラズマ装置にて行い、また解析手法の開発として直線装置のデータのみならず日本原子力研究開発機構の JFT-2M 装置のデータを対象とする。

直線装置では、多チャンネルの静電ポテンシャルを計測可能な静電プローブを用意し、ポロイダル方向と径方向の電場の振動からレイノルズ応力を算出し、さらにバイスペクトル解析を用いて運動量の輸送に関して定量的な観測を行い、二次的不安定性形成機構 (乱流から帯状流などの不安定性へのエネルギーの流れを同定する) を検証する。

JFT-2M のデータには既に帯状流の観測データが含まれているため、帯状流と乱流の結合や帯状流の線形的性質に関わる解析手法の開発を行う。

4. 研究成果

(成果と雑誌論文を番号で対応させています)

九州大学の直線プラズマ装置では、種々の運転領域で観測を実施した。磁場を固定し中性ガス圧を低下させた実験で、乱流が遷移する臨界放電条件にて、微視的ドリフト波揺動

(7-8 kHz) と低周波帯状流 (~0.4 kHz) の共存系を見出した(5)。高磁場かつ背景中性粒子圧力が比較的低いことが発現の条件であり、中性粒子とバルクイオンとの衝突による運動量散逸が帯状流励起と関連している可能性がある。臨界放電条件にて詳細な非線形解析の結果、ドリフト波の径方向波数が帯状流の周波数で変調され、ドリフト波の波面が規則的にたわみ、理論で予測されたパラメトリック変調不安定性が実際に起こることを見出した。また、ドリフト波間、ドリフト波-帯状流間の非線形エネルギー移送関数の符号を評価し、ドリフト波間では順カスケード(4)、ドリフト波-帯状流間では帯状流の強度が極大値を持つ空間点で帯状流への逆カスケードを同定した。さらに移送関数の符号がスペクトル空間・実空間内で変化し、帯状流を介した揺動の非局所的・非線形のエネルギー伝達が起こり得ることを発見し、乱流プラズマの位相空間・実空間の自律構造形成過程への理解を飛躍的に進展させた(3)。さらに、径方向位置をスキャン可能な Reynolds 応力測定プローブをポロイダル方向に複数増設し、乱流遷移が発生している放電にて実験解析を行い、遷移後に低周波(200-600 Hz) のポロイダル対称なポテンシャル揺動が増大し、ポロイダル方向に積分したポテンシャルと、レイノルズ応力の間に関連がみられた(2)。

原子力機構 JFT-2M 装置の研究では、帯状流の一種である測地線音波固有モードの挙動に関連して主に2点の研究を行った。1つは、乱流密度揺動の包絡線から測地音波モードの情報を抽出し、バイスペクトル解析が可能であることを示した。特に、乱流密度揺動のみを用いて包絡線解析を適用することにより、一般に静電ポテンシャル計測の困難な高温高密度プラズマのコア部における帯状流研究に大きな道を拓いた(6)。もう1つは、測地音波固有モードが最外殻磁気面で反射される可能性から、測地音波モードがプラズマ境界で節を構成する可能性を実験的に示した。本研究は、これまで検定が困難と考えられてきた高温プラズマのような静電プローブを挿入できないプラズマにて実験的に最外殻磁気面検定法の可能性を世界で初めて提案した(1)。

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)

1. (査読有り) Nagashima Y, Itoh K, Fujisawa A, Shinohara K, Itoh S-I, Ido T, Yagi M, Hoshino K, Ejiri A, Takase

- Y, Uehara K and Miura Y, " *Boundary of geodesic acoustic eigenmode in the vicinity of the magnetic separatrix* ", Plasma Physics and Controlled Fusion **51**, No.5, (2009) 065019
2. (査読有り) **Yoshihiko NAGASHIMA**, Sanae -I. ITOH, Shunjiro SHINOHARA, Masayuki FUKAO, Akihide FUJISAWA, Kenichiro TERASAKA, Yoshinobu KAWAI, Naohiro KASUYA, Masatoshi YAGI, Shigeru INAGAKI, Takuma YAMADA and Kimitaka ITOH, " *Observation of the parametric modulatory instability between the drift wave fluctuation and azimuthally symmetric sheared radial electric field oscillation in a cylindrical laboratory plasma* ", Physics of Plasmas **16** (2009), 020706
 3. (査読有り) **Yoshihiko NAGASHIMA**, Sanae -I. ITOH, Kimitaka ITOH, Akihide FUJISAWA, Shigeru INAGAKI, Yoshinobu KAWAI, Shunjiro SHINOHARA, Masayuki FUKAO, Takuma YAMADA, Kenichiro TERASAKA, Takashi MARUTA, Kunihiro KAMATAKI, Hiroyuki ARAKAWA, Masatoshi YAGI, Naohiro KASUYA, George R. TYNAN, Patrick H. DIAMOND, and Yuichi Takase, " *Reynolds Stress Measurements for Investigation of Nonlinear Processes of Turbulence in the Large Mirror Device and in the Large Mirror Device Upgrade* ", Journal of Plasma and Fusion Research (2009) in press
 4. (査読有り) **Yoshihiko Nagashima**, Sanae -I. Itoh, Shunjiro Shinohara, Masayuki Fukao, Akihide Fujisawa, Kenichiro Terasaka, Yoshinobu Kawai, Naohiro Kasuya, George R. Tynan, Patrick H. Diamond, Masatoshi Yagi, Shigeru Inagaki, Takuma Yamada and Kimitaka Itoh, " *Coexistence of Zonal Flows and Drift Waves in a Cylindrical Magnetized Plasma* ", Journal of the Physical Society of Japan **77**, No.11, (2008) 114501
 5. (査読有り) **Yoshihiko NAGASHIMA**, Sanae -I. ITOH, Shunjiro SHINOHARA, Masayuki FUKAO, Akihide FUJISAWA, Kenichiro TERASAKA, Yoshinobu KAWAI, Naohiro KASUYA, Masatoshi YAGI, Shigeru INAGAKI, Takuma YAMADA and Kimitaka ITOH, " *Nonlinear energy transfer of drift wave fluctuation in a cylindrical laboratory plasma* ", Plasma and Fusion Research **3** (2008), 056
 6. (査読有り) **Nagashima Y**, Itoh K, Itoh S -I, Fujisawa A, Yagi M, Hoshino K, Shinohara K, Ejiri A, Takase Y, Ido T, Uehara K, Miura Y and JFT-2M group, " *In search of zonal flows by using direct density fluctuation measurements* ", Plasma Physics and Controlled Fusion **49**, No.10, (2007), pp.1611-1625.
- [学会発表](計12件)
1. **Y. Nagashima**, S. -I. Itoh, K. Itoh, A. Fujisawa, S. Inagaki, Y. Kawai, S. Shinohara, M. Fukao, T. Yamada, K. Terasaka, T. Maruta, K. Kamataki, H. Arakawa, M. Yagi, N. Kasuya, G.R. Tynan, P.H. Diamond, and Y. Takase, " *Reynolds stress measurements for investigation of nonlinear processes of turbulence in the Large Mirror Device and Large Mirror Device Upgrade* ", 14th International Congress on Plasma Physics (Fukuoka, Japan, Sep. 08-12, 2008) FB.01-X-3
 2. **Y. Nagashima**, S. -I. Itoh, S. Shinohara, M. Fukao, A. Fujisawa, K. Terasaka, T. Nishijima, M. Kawaguchi, Y. Kawai, N. Kasuya, G.R. Tynan, P.H. Diamond, M. Yagi, S. Inagaki, T. Yamada, K. Kamataki, T. Maruta and K. Itoh, " *Coexistence of the drift wave spectrum and low-frequency zonal flow potential in cylindrical laboratory plasmas* ", 35th European Physical Society Conference on Plasma Physics (Hersonissos, Crete, Greece, June 09-13, 2008); Europhysics Conference Abstracts (2008), P5.158
 3. **Y. Nagashima**, S. -I. Itoh, S. Shinohara, M. Fukao, A. Fujisawa, K. Terasaka, T. Nishizima, M. Kawaguchi, N. Kasuya, Y. Kawai, G.R. Tynan, P.H. Diamond, M. Yagi, S. Inagaki, T. Yamada, T. Maruta, K. Kamataki, and K. Itoh, " *Coexistence of zonal flows and drift wave turbulence in a linear plasma* ", (口頭) 第63回日本物理学会年会 (2008) 25pRE-5
 4. **Y. Nagashima**, A. Fujisawa, S. Inagaki,

- M. Fukao, Y. Kawai, T. Yamada, K. Kamataki, T. Maruta, M. Yagi, S. Shinohara, K. Itoh and S.-I. Itoh, "Multi-channel Reynolds stress probes", (ポスター) 第 24 回プラズマ・核融合学会年会 (2007) 28aB15P
5. Y. Nagashima, S.-I. Itoh, S. Shinohara, M. Fukao, A. Fujisawa, K. Terasaka, T. Nishijima, M. Kawaguchi, Y. Kawai, N. Kasuya, G.R. Tynan, P.H. Diamond, M. Yagi, S. Inagaki, T. Yamada, K. Kamataki, T. Maruta and K. Itoh, "Identification of the parametric modulatory instability of the drift wave zonal flow system in a cylindrical magnetized plasma", 49th Annual Meeting of the American Physical Society Division of Plasma Physics, (Orlando, Florida, USA, November 12-16, 2007); Bulletin of the American Physical Society, Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, 2008, YP1.00073
 6. Y. Nagashima, K. Itoh, A. Fujisawa, S.-I. Itoh, M. Yagi, K. Hoshino, K. Shinohara, T. Ido, Y. Miura, A. Ejiri, Y. Takase and JFT-2M group, "Advanced studies by using the geodesic acoustic mode measurements: experimental identification of the separatrix location and search for zonal flows from the envelope of turbulent density fluctuations", 34th European Physical Society Conference on Plasma Physics (Warsaw, Poland, July 02-06, 2007); Europhysics Conference Abstracts (2007), P2.047
 7. "変調不安定性を利用した密度揺動による zonal flow 観測", 永島芳彦, 伊藤公孝 A, 伊藤早苗, 他, (口頭) 日本物理学会春季大会 (2007) 20pQE-12
 8. "高密度直線プラズマ中のドリフト波乱流実験 VIII (揺動の非線形解析)", 永島芳彦, 篠原俊二郎, 伊藤公孝, 他, (口頭) 日本物理学会春季大会 (2007) 19aQC-4
 9. Y. Nagashima, S.-I. Itoh, S. Shinohara, T. Nishijima, K. Kawaguchi, K. Terasaka, T. Yamada, T. Maruta, Y. Kawai, M. Yagi, K. Itoh, A. Fujisawa, G.R. Tynan, "Drift wave turbulence in helicon high density linear plasma II: fluctuation dynamics", 48th Annual Meeting of the American Physical Society Division of Plasma Physics, (Philadelphia, USA, October 30-November 3, 2006); Bulletin of the American Physical Society, Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, 2006, JP1.00087
 10. シンポジウム講演: "プラズマ揺動計測による乱流輸送の研究", Y. Nagashima (口頭) 第 23 回プラズマ・核融合学会年会(2006) 学術シンポジウム II 5
 11. "Large Mirror 装置における乱流の遷移過程の観測", 永島芳彦, 伊藤公孝, 伊藤早苗, 他, (口頭) 第 10 回プラズマ・核融合学会九州支部会 (2006) A-1
 12. "プラズマ乱流の実験研究", 永島芳彦, 伊藤公孝, 伊藤早苗, 他, (口頭) RIAM Forum 2006
- 〔その他〕
- 第 3 回日本物理学会若手奨励賞を受賞 (日本物理学会領域 2、2009 年 3 月)
- 第 11 回学術奨励賞 (飯吉厚夫特別賞) を受賞 (プラズマ・核融合学会、2006 年 11 月)
- 招待講演: Special Plasma Physics Seminar, Y. Nagashima Mayer Hall, University of California, San Diego, May 16th, (2007)
6. 研究組織
- (1) 研究代表者

永島 芳彦 (NAGASHIMA YOSHIHIKO)
 東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教
 研究者番号: 90390632
 - (2) 研究分担者

なし
 - (3) 連携研究者

なし
 - (4) 研究協力者

・伊藤 早苗 (Sanae -I. Itoh)
 九州大学・応用力学研究所・教授
 研究者番号: 70127611

・伊藤 公孝 (Kimitaka Itoh)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・
教授
研究者番号：50176327

・藤澤 彰英 (Akihide Fujisawa)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・
准教授
研究者番号：60222262

・G. R. Tynan : University of California,
San Diego・Center for Energy Research・
教授

・P. H. Diamond : University of California,
San Diego・Department of Physics, and
Center for Astrophysics and Space
Science・教授