様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成　21　年　　5 月　14 日現在

研究種目：基盤研究(B)
研究期間：２００６年度‐２００８年度
課題番号：18360447
研究課題名（和文）　パーソナルコンピュータクラスターを用いたトロイダルプラズマの乱流と構造の解析
研究課題名（英文）　Analysis of Turbulence and Structure in toroidal plasma using Personal Computer Cluster

研究代表者　藤澤　彰英(Fujisawa　Akihide)
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

研究成果の概要：
パーソナルコンピューターの並列処理を用いた乱流と構造解析法の開発を行い、CHS の重イオンビームプローブデータの解析から、帯状流と背景乱流との結合、帯状磁場の発見、高速粒子と MHD 不安定性の相互作用の結果による振動帯状流の生成の観測などの新しい知見を得た。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
2006 年度	9,000,000	2,700,000	11,700,000
2007 年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2008 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総　計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

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：磁場核融合

１．研究開始当初の背景

従来プラズマ乱流はドリフト波の集まりと考えられてきた。現在、この考え方はドリフト波と帯状流の集合体として捉える新たなパラダイムへ変遷しつつある。先に、平成１５年度—１８年度に受けた科学研究費（研究題目「２台の重イオンビームプローブによるトロイダルプラズマの構造とダイナミクスの研究」　研究代表者　藤澤彰英）により、トロイダルプラズマ（CHS）に帯状流の存在する事が確認され、このパラダイムシフトは決定づけられ、乱流と帯状流の実験研究が国際的に展開されていた。

２．研究の目的

本研究課題では、プラズマ乱流と帯状流に関連し残された重要課題である「**乱流と帯状流の結合関係**」を実験的に検証すること、あるいは定量化を第一の目的であった。また、ドリフト波が帯状流（イオン流）あるいは帯状

電場を生み出すのであれば、同様に電子流が生成され対称性をもつメゾスケールの帯状磁場が生まれている可能性がある。本研究課題では、「**重イオンビームプローブの磁場揺動計測の開発**」を行い、その潜在的可能性を引き出すことで、「**帯状磁場の存在**」を確かめることを第２の目的としている。

３．研究の方法

平成１７年度に終了したCHS装置での重イオンビームプローブデータの解析をPCクラスターによる並列処理によって行う。

CHSには２台の重イオンビームがトロイダル方向に９０度離れて設置されている。それぞれの重イオンビームプローブは局所的にプラズマの３点が観測可能で、２つの情報を併せることで揺らぎの大域的様子が観測できる。この局所かつ大域的乱流データに対して、「乱流と帯状流の結合」の実証のために必要な先進的解析法を開発し、計算時間の短縮のためPCクラスターによる並列化を試みる。また、帯状磁場の存在証明については、帯状流を同定した方法を重イオンビームプローブの磁場揺動計測に応用し時空間構造を対称性と有限な径方向の波数を持つ事を示す。上記のゾーナル流と乱流の因果関係の探求のところで行った解析を帯状磁場に対しても行い、乱流との因果関係を調べる。

４．研究成果

本研究課題の代表的な成果として、①乱流と帯状流の結合、②帯状磁場の発見、③高速粒子駆動型MHD不安定性と振動帯状流の生成、④クラスターによるデータ処理、の４項目について述べる。

(乱流と帯状流の結合) CHS の重イオンビームプローブによる電場の揺らぎの直接観測データに、バイコヒーレンス、ウェーブレット、ウェーブレットバイコヒーレンスなどの先進的解析法を駆使することで、乱流と帯状流の結合の立証に成功した。時間分解能をもったMoreletのウェーブレットを用いた解析によって、ｉ）帯状流と乱流との間にエネルギー擬似的な保存が成立すること、すなわち、帯状流のエネルギーの増加に従い乱流のエネルギーが減少することが示され (A. Fujisawa et al, JPSJ 2007)、ウェーブレットバイコヒーレンスを用いることで、ｉｉ）帯状流と乱流との結合が間欠的であること、が確かめられている (A. Fujisawa et al., PPCF 2007)。帯状流の位相に依存して、乱流と帯状流の結合の強さが大きく変化すること、詳しく述べると、帯状流成分の局所的な流れの向きがバルクの流れに対し、揃ったときおよび反対方向を向いたとき、乱流の位相は揃い帯状流との結合が大きくなること、一方、帯状流の流れが両者の中間（ゼロ）になっているとき結合は小さくなることが示されている。

(帯状磁場の発見) 地磁気生成は物理学上の歴史的な問題であり自然界に多数みられる乱流が関わる構造形成の一例と考えられる。トロイダルプラズマの閉じ込め研究では、プラズマ乱流が生成する帯状流の存在が実際に観測され、プラズマ閉じ込めの物理の新展開として注目されている。ところで、磁場閉じ込めプラズマ中では、帯状流は帯状電場と等価であるので、乱流が磁場成分を伴っている場合帯状磁場の存在が予想される（実際にそうした理論も提唱されている）。CHS では、重イオンビームプローブを使った磁場の揺動を観測が開発され（A. Fujisawa et al., PPCF)、磁場揺動の計測が ECR プラズマで行われた。磁場揺動のスペクトル中の低周波帯部分（0.5kHz-1.5kHz）について、ｉ）長距離相関がありn=0の特徴を持っていること、ii)径方向に1-2cmの波数をもつこと、が確かめ

られており帯状の構造をもつことがしめされている。また、ウェーブレットバイコヒーレンス解析によって、　iii）帯状磁場構造は背景乱流と結合していること、も確認されている。それゆえ、この実験観測は、乱流が実際に大域的な磁場を生成することを示した初めてのものである。

(高速粒子駆動型 MHD 不安定性と振動帯状流の生成) CHS では中性粒子ビーム入射によって維持される低密度の放電においてフィッシュボーン不安定性のような、疑似周期的な（モード数　m=2/n=1 を主体とする）MHD 不安定性の非線形発展が観測されている。この再現性のより現象について条件付き平均法を用い内部電位と電子密度の非線形発展の様子を重イオンビームプローブによって観測した。その結果、q=2 の有理面上での磁場構造の変形につれ高速ビームがプラズマの外側に向かって輸送されるとともに、(振動する）ビーム損失が起こることが示唆され、それと伴ってビームの直接損失による、対称性のある振動電場あるいは振動流がおきること、すなわち、**i) 振動帯状流が形成されていること**、が判明した。この実験観測は、燃焼プラズマにおいて重要となる MHD 不安定性と共鳴して起こるα粒子の損失が作り出す電場構造がプラズマの性質を大きく変えることを示唆する重要な知見をもたらしてい

(**クラスターによるデータ処理)** Mapple 社製 XserveQuadXeon(2.66GHz)９台からなるクラスターを用いた乱流データ解析法の開発を行った。一つ計算機あたり４つの CPU があるために３６の CPU を用いた並列処理が可能である。乱流の解析は、基本的に、時系列データの処理であるために、クラスターを構成する CPU に、分割した時系列データを割り当てて解析させることでほぼ完全な並列計算が可能である。たとえば CHS の時系列データ 100ms を 100 台の CPU に 1ms ごとのデータとして分割して与え計算を行い、処理されたデータを一つのコンピュータに収集し統合することで、解析時間は 100 分の１になる。本研究ではウェーブレット解析について並列処理を行い、計算時間の著しい改善が得られることが確認されている。今後、計測機器の進歩による、多チャンネル計測や速いサンプリングタイムなどデータ量の増加が予測される。この進歩に対応したデータのためには、クラスターを用いたデータ処理が必須となり、その重要性はさらに増してゆくと考えられる。

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 11 件）

1) **A Review of Zonal Flow Experiments**
Akihide Fujisawa, Nuclear Fusion **49** 013001 (2009)

2) **Experimental Studies of Zonal Flow and Field in Compact Helical System Plasma**
A. Fujisawa et al., Physics of Plasmas **15** 055906 (2008)

3) **Zonal flow driven by energetic particle during magneto-hydro-dynamic burst in a toroidal plasma**
S. Ohshima, A. Fujisawa, A. Shimizu, H. Nakano, H. Iguchi, Y. Yoshimura, K. Nagaoka, T. Minami, M. Isobe, S. Nishimura, C. Suzuki, T. Akiyama, C. Takahashi, M. Takeuchi, T. Ito, T. Watari, R. Kumazawa, S-I. Itoh, K. Itoh, K. Matsuoka, S. Okamura, Plasma Physics and Controlled Fusion **49** 1945-1952 (2007).

4) **Reconstruction method of local density fluctuation for heavy ion beam probe measurements**

H. Nakano, A. Fujisawa, A. Shimizu, S. Ohshima, H. Iguchi, Y. Yoshimura, T. Minami, Review of Scientific Instruments **78** 063502 (2007).

5) **Experimental progress on zonal flow physics in toroidal plasmas**
A. Fujisawa, T. Ido, A. Shimizu, S. Okamura, K. Matsuoka,H. Iguchi, Y. Hamada, H. Nakano, S. Ohshima, K. Itoh, K. Hoshino, K. Shinohara, Y. Miura, Y. Nagashima, S.-I. Itoh, M. Shats, H. Xia, J.Q. Dong, L.W. Yan, K.J. Zhao, G.D. Conway, U. Stroth, A.V. Melnikov, L.G. Eliseev, S.E. Lysenko, S.V. Perfilov, C. Hidalgo, G.R. Tynan, C. Holland, P.H. Diamond, G.R. McKee, R.J. Fonck, D.K. Gupta and P.M. Schoch, Nuclear Fusion **47** S718-S725 (2007),

6) **Experimental Evidence of a Zonal Magnetic Field in a Toroidal Plasma**
A. Fujisawa, K. Itoh, A. Shimizu, H. Nakano, S. Ohshima, H. Iguchi, K. Matsuoka, S. Okamura, T. Minami, Y. Yoshimura, K. Nagaoka, K. Ida, K. Toi, C. Takahashi, M. Kojima, S. Nishimura, M. Isobe, C. Suzuki, T. Akiyama, Y. Nagashima, S.-I. Itoh, and P. H. Diamond, Physical Review Letters **98** 165001 (2007)

7) **Evaluation of local magnetic field fluctuation in a toroidal plasma with heavy ion beam probe**
A. Fujisawa, A. Shimizu, H. Nakano, S. Ohshima, Plasma Physics and Controlled Fusion **49** 845-855 (2007)

8) **Intermittent characteristics in coupling between turbulence and zonal flows**
A. Fujisawa, A. Shimizu et al., Plasma Phys. Control. Fusion **49** 211 (2007).

9) **Causal Relationship between Zonal Flow and Turbulence in a Toroidal Plasma**
A. Fujisawa, A. Shimizu et al., Journal of Physical Society of Japan **76** 033501 (2007)

10) **Recipe for Fabricating Zeolite Ion Source for Plasma Probing**
A. Fujisawa, A. Shimizu, H. Nakano, S. Ohshima, H. Iguchi, Japanese Journal of Applied Physics **46** 1710 (2007).

11) **Observation of internal coherent mode structure using heavy ion beam probe**
S. Ohshima, A. Fujisawa, A. Shimizu and H. Nakano, Review of Science Instruments **77** 10F517 (2006)

12) **Development of Zeolite Ion Source for Beam Probe Measurements of High Temperature Plasma**
S. Ohshima, A. Fujisawa, A. Shimizu, H. Nakano, Review of Scientific Instruments **77** 03B704 (2006)

13) **Spectrograph of Electric Field Fluctuation in Toroidal Helical Plasma**
A. Fujisawa, K. Itoh, A. Shimizu et al., Plasma Physics and Controlled Fusion **48** S31 (2006)

14) **Properties of turbulence and stationary zonal flow on transport barrier in CHS**
A Fujisawa, A Shimizu, H Nakano et al., Plasma Physics and Controlled Fusion **48** A365 (2006)

15) **Turbulence and transport characteristics on a barrier in a toroidal plasma**
A. Fujisawa, A. Shimizu, H. Nakano et al., Plasma Physics and Controlled Fusion **48** S205 (2006)

〔学会発表〕（計　22　件）
1) **Oscillatory Zonal Flows Driven by Interaction between Energetic Ions and CHS Fishbone-like Instability**
A. Fujisawa, US-Japan JIFT Workshop on Energetic Particle Physics in Toroidal Plasmas, December 15-17, 2008 Toki, Japan

2) **Experimental Confinement Studies Beyond ITER**
A. Fujisawa, 18^{th} International Toki Conference, December 9-12, 2008 Toki Japan

3) **Study of Energetic Ion Driven Instability using Heavy Ion Beam Probes on Compact Helical System**
S. Ohshima, A. Fujisawa, A. Shimizu, H. Nakano, H. Nishimura and CHS group, 50th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, November 17-21, 2008, Dallas, Texas

4) **Oscillatory Zonal Flows Driven by Interaction between Energetic Ions and CHS Fishbone Instability**
A. Fujisawa, S. Ohshima A. Shimizu, H. Nakano, H. Iguchi, K. Itoh, S. Okamura, K. Matsuoka, T. Minami, Y. Yoshimura, K. Nagaoka, C. Takahashi, S. Nishimura, M. Isobe, C. Suzuki, T Akiyama, CHS group, 22nd IAEA Fusion Energy Conference, October 13-18 2008 Geneva, Switzerland

5) **Turbulence Measurements and Discovery of Zonal Magnetic Field using HIBPs in CHS**
Akihide Fujisawa, Kimitaka Itoh, Akihiro Shimizu, Haruhisa Nakano, Shinsuke Ohshima, Harukazu Iguchi, Shoichi Okamura, Keisuke Matsuoka, CHS group, International Congress on Plasma Physics September 8-12 2008 Fukuoka Japan

6) **Experimental Achievements in Plasma Confinement and Turbulence**
A. Fujisawa, 2nd International ITER Summer School 2008, July 22-25, 2008, Fukuoka Japan

7) HIBP **を用いた複数の高速イオン励起不安定性の内部構造解明**
大島慎介、藤澤彰英、清水昭博、中野治久、CHS **グループ、２００８年3月２２日-２６日，近畿大学（東大阪市）**
8) **トロイダルプラズマにおける帯状磁場構造の発見**
藤澤彰英、伊藤公孝、清水昭博、中野治久，大島慎介，吉村泰夫、井口春和、岡村昇一，松岡啓介、ＣＨＳグループ、日本物理学会第 63 **回年次大会，２００８年3月２２日-２６日，近畿大学（東大阪市）**

9) CHS **における高速イオン励起不安定性時の内部構造発展の観測**
大島慎介、藤澤彰英、清水昭博、中野治久、CHS **グループ、プラズマ・核融合学会 第２４回年会 ２００７年１１月２７日-３０日 イーグレひめじ（姫路市）**

10) CHS **プラズマの放射崩壊時における** HIBP **を用いた揺動解析**
中野 治久、藤澤 彰英、清水昭博、大島 慎介、吉村 泰夫、 南 貴司、 鈴木 千尋、CHS **グループ、プラズマ・核融合学会 第２４回年会 ２００７年１１月２７日-３０日 イーグレひめじ（姫路市）**

11) **Experimental Studies of Zonal Flow and Field in CHS Plasma**
A. Fujisawa, K. Itoh, A. Shimizu, H. Nakano, S. Ohshima, H. Iguchi, K. Matsuoka, S. Okamura, T. Minami, Y. Yoshimura, K. Nagaoka,K. Ida, K. Toi, C. Takahashi, M. Kojima, S. Nishimura, M. Isobe, C. Suzuki, T Akiyama, T. Ido, Y. Nagashima, S.-I. Itoh, and P. H. Diamond, 49th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, November 12-16, 2007, Orlando, Florida

12) **Zonal Flows and Fields Generated by Turbulence in CHS**
A. Fujisawa, K. Itoh, A. Shimizu, H. Nakano, S. Ohshima, K. Matsuoka, S. Okamuara, CHS-group, 17th International Toki Conference, October 15-19, 2007, Toki, Japan

13) **Zonal Flow Driven By High-Energy Particle during Nonlinear MHD**
S. Ohshima, A.Fujisawa, A.Shimizu, H.Nakano and CHS group, 11th IAEA Technical Meeting on H-mode Physics and Transport Barriers, September 26-28, 2007, Tsukuba, Japan

14) **帯状流とダイナモに関するプラズマ研究**
藤澤彰英、日本天文学会２００７年秋期年会 ２００７年9月２６日—9月２８日、岐阜大学（岐阜市）

15) **帯状流と乱流の間欠的結合について**
藤澤彰英、清水昭博、中野治久，大島慎介，井口春和，吉村泰夫、永岡賢一，南貴司、秋山毅志，磯部光孝，鈴木千尋，西村伸，岡村昇一，松岡啓介、伊藤公孝、ＣＨＳグループ
第６２回日本物理学会年次大会、２００７年９月２１日-２４日、北海道大学（札幌市）

16) CHSバーストのHIBPによる時空間構造観測
大島慎介、藤澤彰英、清水昭博、中野治久、CHSグループ、日本物理学会第６２回年次大会, ２００７年3月１８日-２１日　鹿児島大学（鹿児島市）

17) CHSにおける密度上昇時のHIBPによるプラズマ観測
中野 治久、 藤澤 彰英、 清水 昭博、 大島 慎介、 井口 春和、吉村 泰夫、 南 貴司、 ＣＨＳグループ、日本物理学会第６２回春期大会, ２００７年3月１８日-２１日　鹿児島大学（鹿児島市）

18) CHSにおける帯状流とGAMのHIBP観測
藤澤彰英、清水昭博、中野治久, 大島慎介, 井口春和, 吉村泰夫、永岡賢一, 南貴司、秋山毅志,磯部光孝, 鈴木千尋, 西村伸, 岡村昇一, 松岡啓介、伊藤公孝、ＣＨＳグループ、日本物理学会第６２回春期大会, ２００７年3月１８日-２１日　鹿児島大学（鹿児島市）

19) **Experimental Progress on Zonal Flow Physics**
A. Fujisawa, T. Ido, A. Shimizu, S. Okamura, K. Matsuoka, Y. Hamada, K. Hoshino, Y. Nagashima, K. Shinohara, H. Nakano, S. Ohshima, Y. Miura, K. Itoh, S. –I. Itoh, M. Shats, H. Xia, J. Q. Dong, L. W. Yan, K. J. Zhao, G. D. Conway, *U. Stroth, A. Melnikov, L.G. Eliseev, S.E. Lysenko and S.V. Perfilov, C. Hidalgo, G. R. Tynan, *G. R. Mckee, C. Holland, *R. J. Fonck, *D. K. Gupta, P. H. Diamond, 21st IAEA Fusion Energy Conference, Octobar 16-22, 2006, Chengdu, China

20) **Reconstruction Method of Local Density Fluctuations in Measurements Using Heavy Ion Beam Probe in CHS**
H. Nakano, A. Fujisawa, A. Shimizu, S. Ohshima, H. Iguchi, T. Minami, Y. Yoshimura, K. Nagaoka, K. Matsuoka, S. Okamura, CHS Group, 3rd Japan-Korea Seminar on Advanced Diagnostics for Steady-State Fusion Plasma, Aug. 31-Sept. 3, 2006, Miyagi Japan

21) **Experimental Observations of Zonal Flows and Turbulence in a Toroidal Plasma**
A. Fujisawa,A. Shimizu, H. Nakano, S. Ohshima, K. Itoh, Y. Nagashima[1], S.-I. Itoh[1], H. Iguchi, Y. Yoshimura, T. Minami, K. Nagaoka, C. Takahashi, M. Kojima, S. Nishimura, M. Isobe, C. Suzuki, T Akiyama, T. Ido, K. Matsuoka, and S. Okamura, 13th International Congress on Plasma Physics, May 22-26 2006, Kiev Uklaine

22)トロイダルプラズマでの乱流と帯状流の実験研究
藤澤彰英
日本地球惑星科学連合２００６年大会、２００６年5月１４日-１８日、幕張メッセ国際会議場（千葉市）

9) **Observation of internal coherent mode structure using HIBP**
S. Ohshima, A.Fujisawa, A.Shimizu, H.Nakano, 16th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics, May 7-11, 2006, Williamsburg, Virginia

〔図書〕（計　1　件）
1)**Experimental Achievements on Plasma Confinement and Turbulence**, A. Fujisawa, in 2nd ITER International School, American Institute of Physics, 2009.

６．研究組織
(1)研究代表者
藤澤　彰英（Fujisawa Akihide）
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

(2)研究分担者
清水　昭博 (Shimizu Akihiro)
核融合科学研究所・大型ヘリカル研究部・助教
研究者番号：00390633

(3)連携研究者