

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22686085

研究課題名(和文)低周波波動による高ベータプラズマの加熱とフロー駆動

研究課題名(英文)Heating and flow drive by low frequency waves in high beta plasmas

研究代表者

井 通暁(Inomoto, Michiaki)

東京大学・新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：00324799

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,600,000円、(間接経費) 5,580,000円

研究成果の概要(和文)：プラズマ合体時に発生する磁気リコネクションは、イオンサイクロトロン周波数帯から低域混成周波数帯までの広範な揺動をプラズマ中の高ベータ領域に直接励起することができ、エネルギー変換の一部を担う。ガイド磁場のある場合には、単色大振幅磁場揺動が運動論的アルヴェン波として励起されるが、この揺動が担うエネルギーはイオン加熱の支配的要因ではない。ガイド磁場の無い場合には、極低周波の巨視的な揺動が励起されており、これはシアアルヴェン波としてイオンフローを直接的に駆動し、最終的にイオン温度に至るエネルギーフローの大部分を担いことから、高ベータプラズマ加熱手段として有効であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Low frequency waves are excited in the high beta region of magnetically confined plasmas by magnetic reconnection during plasma merging process. These waves partly contribute to the conversion from magnetic energy to ion thermal energy. When the reconnection includes significant guide magnetic field perpendicular to the reconnection magnetic field, monotonic large-amplitude waves are excited as kinetic Alven waves. However, these waves are not dominant factors providing the observed ion heating. On the other hand, when there is no guide field, very low frequency waves are globally excited. These shear Alven waves directly drive ion flows and eventually provide conversion from magnetic to ion thermal energy. It is concluded that these very low frequency waves work for the heating method for high beta plasmas.

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・核融合 プラズマ加熱 高ベータプラズマ

1. 研究開始当初の背景

ベータ値が 30%を超えるような高ベータプラズマにおいては、端部付近に急峻な密度勾配が形成されている。このため、低周波の波動以外は、中心部に到達するためにプラズマ中でのモード変換が必要となるため、波動による中心加熱は容易ではない。その一方で、アルヴェン固有モードによる高エネルギー粒子損失を抑制するためには、低周波波動がプラズマ中で効率的に散逸・吸収されることが望ましいとされている。このような観点から、高ベータ配位において低周波波動をプラズマへのパワー源として積極的に利用するための研究を実施することには大きなメリットがあると考えられる。

別の観点として、東京大学において提案・研究されてきた磁気リコネクションによる加熱・フロー駆動に関する実績を挙げることができる。これは、プラズマ合体の際に磁気リコネクションを介して磁気エネルギーがプラズマの熱あるいは運動エネルギーに効率的に変換され、最終的に流れのある高ベータ配位を安定に形成できることを示すものであるが、この結果を敷衍すれば、高ベータプラズマの磁場構造に対して適切な低周波摂動を与えることによって同様の加熱・プラズマフロー駆動が可能であることが期待できる。磁気リコネクションを起源とするプラズマ加熱・加速機構は、太陽コロナや太陽風においてもその存在が指摘されており、位相混合やショック等の機構が提案されているが、詳細はいまだ解明されておらず、衛星観測や室内実験との連携による研究が進展している。

2. 研究の目的

本研究は、東京大学 TS-3 装置等を用いて形成された高ベータプラズマ（球状トカマク：ST、磁場反転配位：FRC）において磁気リコネクション由来の低周波揺動がプラズマ加熱・フロー形成にどのように寄与しているかを解明し、さらには外部からの低周波波動印加による加熱・フロー形成の可能性を検証し、高ベータ炉心プラズマへの適用を目指すものである。

TS-3 プラズマ合体装置においては、磁気リコネクションによる顕著なイオン加熱が観測されているが、その加熱量は従来のリコネクションモデルに見られるようなアウトフローのみでは説明できず、波動が大きな役割を担っていると考えられる。既に報告されている「スリングショット」効果についても、新たに波動としての取り扱いを導入することによって散逸機構を定量化することが可能になると考えられる。磁気リコネクション発生時には、さまざまなモードの波動が同時に励起されていると予想されるが、本研究では高ベータプラズマへのパワー付与に最も効果的であるモードを同定し、対応する散逸機構（イオンサイクロトロン共鳴、トランジ

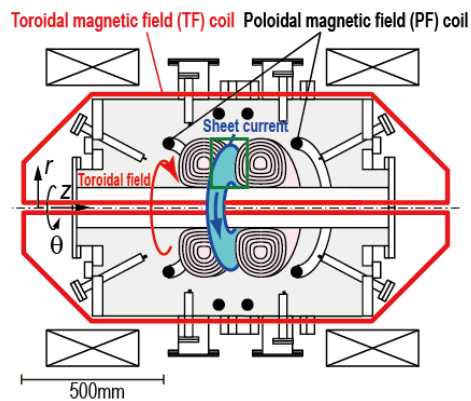


図1：TS-3 プラズマ合体実験装置

ットタイム減衰、位相混合等)を見出すことを予定している。

3. 研究の方法

本研究では、主として図1に示す TS-3 プラズマ合体実験装置を用いて、高ベータプラズマにおける低周波波動励起、フローの誘起と熱化過程の検証を行う。

(1) プラズマ合体時の磁気リコネクションが誘起する低周波揺動の検出と分散関係の同定を行う。TS-3 装置においては、磁気リコネクションによる顕著なイオン加熱が観測されているが、トロイダル方向のガイド磁場の存在によってその特性が大きく変化することが粒子シミュレーション等により予測されている。ガイド磁場の存在はまた、プラズマ中の低周波波動の伝播方向や位相速度にも影響を与えることから、広範なパラメータ領域において波動の励起条件を探ることが可能となる。新たに開発した高周波磁気プローブアレイを用いて、10MHz 程度までの磁場揺動分布を多地点同時計測することによって、波動の励起・伝搬の様子を観測する。実験に平行して、プラズマ中の波の分散関係および減衰に関する数値計算を実施し、実験結果を定量的に評価する手法を確立する。

(2) 本研究で新たに発見された磁気リコネクション中に励起される低周波 (~2MHz) 大振幅磁場揺動の起源を明らかにするため、静電揺動計測を実施する。高周波絶縁プローブを用いて低域混成共鳴周波数 (40MHz) 以下程度の周波数帯の静電揺動のスペクトルを測定することで、磁気リコネクション散逸領域近傍でのドリフト不安定性の発生についての検証を行う。電流シート内部での分散関係を明らかにし、なぜ磁気リコネクションの際に特定の周波数の波動のみが強く励起されるのかを検証する。

(3) 磁気リコネクション中に励起される低周波大振幅磁場揺動の原因として、強いガイド磁場下での無衝突リコネクションにおいて顕著となる磁場方向の電子加速による二流体不安定性を指摘することができる。そ

ここで発光分光計測に基づく高速電子の検出を行い、波動の発生原因の同定を行う。

(4) フローおよび熱化プロセスを解明するため、イオン温度および流速の時間発展を多点同時計測するシステムの開発を行う。二次元光電子増倍管アレイを用いることで、高時間分解能 (>1MHz) のイオン温度・流速時間発展を多地点同時測定することが可能となり、これまで明らかになっていなかった加熱メカニズムの詳細を解明することができる。トムソン散乱による電子温度分布計測と組み合わせることによって、磁気リコネクションおよび波動の励起と電子/イオン加熱およびプラズマ中のフロー駆動との関連性を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 磁場揺動を観測するにあたり、測定用コイルの巻数、素線材料等を検討し、10MHz以下程度の磁場揺動ベクトルを測定可能なプローブアレイを複数作成し、プラズマ合体実験装置に装着した。このプローブを用いて磁気リコネクション領域内外での揺動計測を実施した結果、リコネクションする磁場に直交する磁場成分 (ガイド磁場) の有無という二種類のプラズマ合体について、異なった周波数帯の磁場揺動の発生が確認された。ガイド磁場の無い場合には、水素放電において図2 (a)に示すような400kHz以下の周波数を持つ磁場揺動がリコネクション領域を含む比較的広い範囲で観測された。一方で、ヘリウムやネオンを用いた放電においては図2 (b)のように明確な揺動が検出されなかったことから、つなぎ変わった磁力線の張力による収縮運動がシアアルヴェン波を励起したと考えられる。このシアアルヴェン波はトロイダル方向のシアフローを直接的に駆動しているが、その径方向分布はリコネクション時の二流体効果の影響を受けるため、初期磁場構造に強く依存することが確認された。流速・電流・圧力の分布を計測した結果、リコネクション時の磁場の極性に依ってイオンフロー分布が変化すること、さらにイオンフローがプラズマ電流の一部を担い、高ベータ

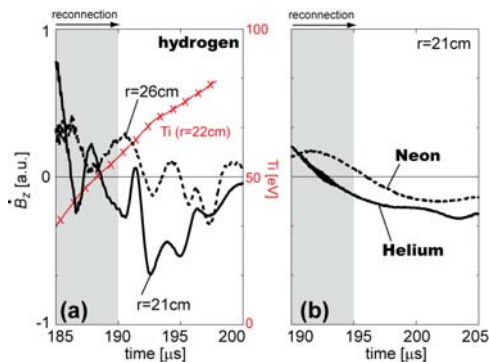


図2: ガイド磁場の無い場合の磁場揺動信号例 ((a) 水素放電, (b) ヘリウムおよびネオン放電)

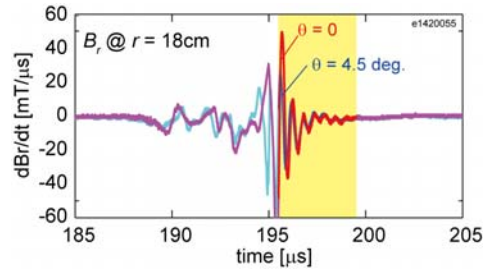


図3: ガイド磁場のある場合の磁場揺動信号例 (水素放電)

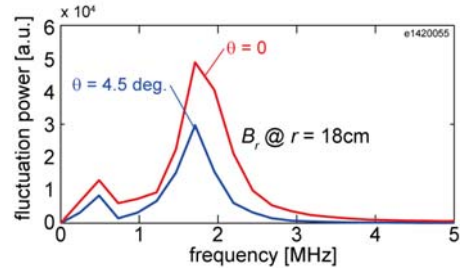


図4: ガイド磁場のある場合の磁場揺動スペクトル

平衡状態の維持に寄与していることが明らかとなった。

(2) 一方で強いガイド磁場の存在下では、リコネクション中に図3に示すような非常に単色性の強い大振幅磁場揺動が検出された。図4に示す磁場揺動スペクトルによると、揺動はイオンサイクロトロン周波数よりもやや高い2MHz近傍にピークを持つ非常にコヒーレントなものであることがわかる。これらの実験結果から、磁気リコネクションは、局所的な磁場構造や発生する不安定性に応じて広帯域の揺動を発生することが可能なドライバーとしての役割を果たしていることが明らかとなった。ガイド磁場が存在する場合の分散関係の数値解析から、検出された揺動は運動論的アルヴェン波であったと考えられる。また、静電揺動計測では、大振幅磁場揺動の発生に先駆けて低域混成共鳴周波数帯の揺動の発生が確認されており、電流シート周辺部におけるドリフト不安定性をきっかけとして最終的に大振幅揺動が駆動されている。低周波揺動の発生に伴う加熱・フローの発生を観測するため、光電子増倍管を用いた時間発展ドップラー分光システムを1視線から8視線へと拡張した。これによって、イオン加熱/フローの発生について空間分解能を有した高時間分解計測が可能となった。ガイド磁場下でのリコネクションではヘリウム放電において最大40km/s程度の径方向イオンフローが発生した後に下流領域でのイオン温度が上昇することが確認された。

(3) 図5に示すように、規格化リコネクション速度は磁場揺動強度に伴って増加するという傾向が観測されている。ガイド磁場存在下での単色磁場揺動の振幅は最大でリ

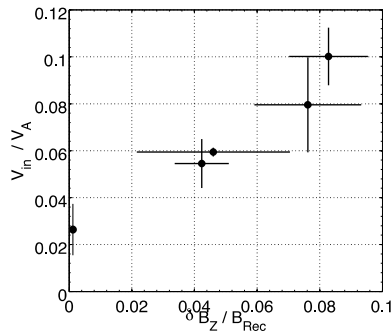


図5：ガイド磁場のある場合の磁場揺動とリコネクション速度の関係

コネクション磁場の20%以上に達しており、局所的な磁場構造変化が磁気リコネクションそのものに影響を与えているためであると考えられる。このようにガイド磁場の存在下では磁気リコネクションが非定常現象として発現し、その際のリコネクション電場による強い電子加速が揺動発生に大きく寄与する。不純物/バルクイオンの線スペクトル発光分布測定を行ったところ、励起エネルギーの高い線スペクトルの発光がリコネクション点近傍のごく狭い領域に局在して確認された。これは、リコネクション電場に平行なガイド磁場の存在によって電子が効率的に加速され、局所的にイオンを励起したものと考えられる。このような高エネルギー電子とプラズマ中の熱的な電子との間の相対速度は、電子の熱速度に比べて十分大きくなると見積もられ、その際に発生する速度空間における二流体不安定性が運動論的アルヴェン波を励起しているものと考えられる。

以下に本研究によって得られた成果の総括を示す。プラズマ合体時に発生する磁気リコネクションは、イオンサイクロトロン周波数帯から低域混成周波数帯までの広範な揺動をプラズマ中の高ベータ領域に直接励起することができ、エネルギー変換の一部を担う。ガイド磁場のある場合には、リコネクション電場によって加速された高速電子による不安定性に由来する2MHz近傍の単色大振幅磁場揺動が運動論的アルヴェン波として励起されており、過渡的な高速リコネクションをもたらしている。ただし、この揺動が担うエネルギーはイオン加熱においては支配的ではなく、磁場エネルギーを熱に変換する別のプロセスが存在することが示唆される。一方でガイド磁場の無い場合には、極低周波(~数百kHz)の巨視的な揺動が励起されており、これはシアアルヴェン波としてイオンフローを直接的に駆動し、最終的にイオン温度に至るエネルギーフローの大部分を担うことから、高ベータプラズマ加熱手段として有効であると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計16件)

- ① 牛木知彦、井通暁、小口治久、“プラズマ合体時の磁気リコネクションにおける軟X線放射の観測”、電気学会論文誌A、Vol. 134、No. 9 (2014) 掲載予定、査読有
- ② 郭学瀚、井通暁、小野靖、“スライド型2次元トムソン散乱計測を用いた球状トカマク合体時の電子加熱の定量的評価”、電気学会論文誌A、Vol. 134、No. 9 (2014) 掲載予定、査読有
- ③ H. Itagaki, T. Asai, M. Inomoto, Ts. Takahashi, “Mitigation of rotational instability of high-beta field-reversed configuration by double-sided magnetized plasmoid injection”, Phys. Plasmas 21, 030703 (2014)、査読有
doi: 10.1063/1.4868434
- ④ T.G Watanabe, Y. Ono, T. Yamada, S. Kamio, Q.H. Cao, H. Itagaki, K. Takemura, K. Yamasaki, K. Ishiguchi, M. Inomoto, “Plasmoid-Induced Pull Reconnection Experiments in University of Tokyo Spherical Tokamak”, Plasma and Fusion Res. 8, 2401148 (2013)、査読有
DOI: 10.1585/pfr.8.2401148
- ⑤ H. Itagaki, M. Inomoto, S. Kamio, Q.H. Cao, K. Takemura, K. Yamasaki, T.G. Watanabe, T. Yamada, “Development of a Quasi-steady Equilibrium Field System for Plasma Merging ST Startup Experiments on the UTST Device”, Plasma and Fusion Res. 8, 1402139 (2013)、査読有
DOI: 10.1585/pfr.8.1402139
- ⑥ M. Inomoto, S. Kamio, A. Kuwahata, T.G. Watanabe, K. Yamasaki, K. Kadowaki, T. Ito, Y. Kaminou, T. Yamada, Y. Ono, “Initiation of Impulsively Fast Magnetic Reconnection Induced by Current Sheet Ejection”, Plasma and Fusion Res. 8, 2401112 (2013)、査読有
DOI: 10.1585/pfr.8.2401112
- ⑦ K. Yamasaki, S. Kamio, K. Takemura, Q.H. Qao, T.G. Watanabe, H. Itagaki, T. Yamada, M. Inomoto, Y. Ono, “Experimental Study of Two-fluid Effect during Magnetic Reconnection in the UTST Merging Experiment”, Plasma and Fusion Res. 8, 2401130 (2013)、査読有
DOI: 10.1585/pfr.8.2401130
- ⑧ M. Inomoto, A. Kuwahata, H. Tanabe, Y. Ono, “Excitation and propagation of electromagnetic fluctuations with ioncyclotron range of frequency in magnetic reconnection laboratory experiment”, Phys. Plasmas 20, 061209

- (2013)、査読有
doi: 10.1063/1.4811469
- ⑨ T. Ii, M. Inomoto, K. Gi, T. Umezawa, T. Ito, K. Kadowaki, Y. Kaminou, Y. Ono, “Stability and confinement improvement of an oblate field-reversed configuration by using neutral beam injection”, Nucl. Fusion 53, 073002 (2013)、査読有
doi:10.1088/0029-5515/53/7/073002
- ⑩ S. Kamio, K. Yamasaki, K. Takemura, Q. H. Cao, T. G. Watanabe, H. Itagaki, T. Tsutsui, K. Ishiguchi, R. Imazawa, T. Yamada, C. Z. Cheng, M. Inomoto, Y. Takase, Y. Ono, “Electron Acceleration by Magnetic Reconnection During Spherical Tokamak Merging Experiment”, 電気学会論文誌 A 133-A, 166-172 (2013)、査読有
doi: 10.1541/ieejfms.133.166
- ⑪ S. Kamio, N. Suzuki, Q. H. Cao, T. G. Watanabe, K. Abe, M. Sakumura, K. Ishiguchi, R. Imazawa, T. Yamada, M. Inomoto, Y. Ono, “Development of Multi-channel Doppler Spectroscopic Measurement System Using 8x8 Mutli-anode Photomultiplier Tube Assembly”, Review of Scientific Instruments 83, 083103 (2012)、査読有
doi: 10.1063/1.4739774
- ⑫ 桑波田晃弘、田辺博士、伊藤慎悟、井通暁、小野靖, “磁気リコネクションを介した異極性プラズマ合体実験における低周波磁場揺動の計測”, 電気学会論文誌 A 132-A, 233-238 (2012)、査読有
DOI: 10.1541/ieejfms.132.233
- ⑬ T. G. Watanabe, Y. Ono, T. Yamada, S. Kamio, Q. Cao, N. Suzuki, K. Ishiguchi, M. Inomoto, “Magnetic Helicity Injection Mechanism for Double-Null Startup of the UTST Spherical Tokamak Plasmas”, Plasma and Fusion Res. 6, 1202131 (2011)、査読有
DOI: 10.1585/pfr.6.1202131
- ⑭ A. Kuwahata, H. Tanabe, S. Ito, M. Inomoto, Y. Ono, “Low Frequency Magnetic Fluctuations during Magnetic Reconnection in Laboratory Experiment”, Plasma and Fusion Res. 6, 1201127 (2011)、査読有
DOI: 10.1585/pfr.6.1201127
- ⑮ S. Kamio, Q. H. Cao, K. Abe, M. Sakumura, N. Suzuki, T. Watanabe, K. Ishiguchi, R. Imazawa, T. Yamada, M. Inomoto, Y. Ono, “Multipoint Spectroscopic Measurement of Spherical Tokamak Heating by Magnetic Reconnection in UTST”, Plasma and Fusion Res. 6, 2402033 (2011)、査読有
DOI: 10.1585/pfr.6.2402033
- ⑯ M. Inomoto, K. Abe, T. Yamada, A. Kuwahata, S. Kamio, Q. H. Cao, M. Sakumura, N. Suzuki, T. Watanabe, Y. Ono, “Development of Effective Power Supply Using Electric Double Layer Capacitor for Static Magnetic Field Coils in Fusion Plasma Experiments”, Review of Scientific Instruments 82, 023502 (2011)、査読有
doi: 10.1063/1.3553283
- [学会発表] (計16件)
- ① M. Inomoto, TS group, “Overview of UTST/TS-4 experiments”, The Second A3 Foresight Workshop on Spherical Torus (ST), 2014/1/6, Tsinghua Univ. Beijing, China
- ② M. Inomoto, S. Kamio, A. Kuwahata, Y. Ono, TS group, “Laboratory Experiment of Magnetic Reconnection between Merging Flux Tubes with Strong Guide Field”, 2013 AGU Fall meeting, 2013/12/9, Moscone center, San Francisco, CA, USA
- ③ M. Inomoto, T. Ii, A. Kuwahata, T. G. Watanabe, K. Yamasaki, M. Annoura, Y. Kaminou, Y. Ono, “Current profiles of high-beta compact toroids formed by plasma merging”, 2013 US-Japan Workshop on “Advanced controll and Confinement Improvement of Innovative Compact Toroidal Configurations”, 2013/9/24, 神戸国際会議場 (兵庫県)
- ④ M. Inomoto, S. Kamio, A. Kuwahata, T. G. Watanabe, K. Yamasaki, B. Gao, Y. Ono, “Laboratory experiment of magnetic reconnection in the presense of strong guide field”, 12th International Workshop on Interrelationship between Plasma Experiments in the Laboratory and in Space (IPELS2013), 2013/7/4, 白馬東急ホテル (長野県)
- ⑤ 井通暁、神尾修治、桑波田晃弘、渡辺岳典、伊藤大智、門脇和丈、竹村剛一良、山崎広太郎、山田琢磨、小野靖, “磁気リコネクション室内実験における非定常性と高速化”, 日本物理学会第68回年次大会, 2013/3/26, 広島大学 (広島県)
- ⑥ M. Inomoto, T. Yamada, S. Kamio, H. Itagaki, Q. H. Cao, T. G. Watanabe, K. Yamasaki, K. Takemura, A. Wang, Y. Takase, Y. Ono, “Overview of UTST plasma merging experiment”, The First A3 Foresight Workshop on Spherical Torus (ST), 2013/1/15, Seoul National Univ, Seoul, Korea
- ⑦ M. Inomoto, Y. Hayashi, H. Tanabe, T. Ii, A. Kuwahata, T. Ito, K. Kadowaki, Y. Kaminou, T. Yamada, Y. Ono, “Initiation of impulsively fast

- magnetic reconnection induced by current sheet ejection”, 22nd International Toki Conference “Cross-Validation of Experiments and Modeling for Fusion and Astrophysical Plasmas”, 2012/11/19, セラトピア土岐 (岐阜県)
- ⑧ M. Inomoto, T. Ii, H. Oka, Y. Kaminou, H. Tanabe, A. Kuwahata, Y. Ono, and TS group, “Generation of toroidal shear flow in oblate FRCs formed by counter-helicity plasma merging”, CT2012 - Advanced Controls and Diagnostics for Confinement Improvement of Compact Toroids, 2012/9/25, Newport Beach, CA, USA
- ⑨ 井通暁、桑波田晃弘、高博シン、小野靖、”磁気リコネクション室内実験における電流シート近傍の波動励起”, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012/9/19, 横浜国立大学 (神奈川県)
- ⑩ M. Inomoto, Y. Hayashi, Y. Ono, “Fast magnetic reconnection with plasmoid / current sheet ejection events in laboratory experiment”, 39th COSPAR Scientific Assembly, 2012/7/18, Mysore, India
- ⑪ M. Inomoto, A. Kuwahata, B. Gao, H. Tanabe, T. Ito, Y. Ono, and TS group, “Excitation of Large-amplitude magnetic Fluctuation in Plasma Merging Experiment”, US-Japan Workshop on Magnetic Reconnection MR2012, 2012/5/24, Princeton, NJ. USA
- ⑫ 井通暁、桑波田晃弘、高博シン、小野靖、”磁気リコネクション室内実験における電流シート近傍の磁場および静電揺動計測”, 日本物理学会第 67 回年次大会, 2012/3/26, 関西学院大学 (兵庫県)
- ⑬ 井通暁、小野靖、林由記、田辺博士、桑波田晃弘、TS グループ、”磁気リコネクション室内実験の進展”, 日本天文学会 2012 年春季大会, 2012/3/22, 龍谷大学 (京都府)
- ⑭ M. Inomoto, A. Kuwahata, S. Ito, H. Tanabe, Y. Hayashi, P. Copinger, T. Ii, B. Gao, T. Ito, T. Yamada, Y. Ono, “Excitation of Low Frequency Electromagnetic Waves in Magnetic Reconnection Laboratory Experiment”, Fifth Hinode Science Conference, 2011/10/13, Cambridge, Massachusetts, USA
- ⑮ M. Inomoto, Y. Hayashi, S. Ito, P. Copinger, S. Kamio, H. Tanabe, T. Ii, A. Kuwahata, Q.H. Cao, H. Itagaki, H. Sakamoto, A. Matsuda, S. Inoue, K. Gi, N. Suzuki, G. Watanabe, T. Yamada, Y. Ono, “Wave and Plasmoid Mediated Reconnections in Laboratory

Experiments”, 11th International Workshop on Interrelationship between Plasma Experiments in the Laboratory and in Space(IPELS), 2011/7/15, Whistler, Canada

- ⑯ M. Inomoto, H. Imanaka, Y. Hayashi, S. Ito, Y. Ito, H. Nonaka, H. Tanabe, T. II, K. Suzuki, A. Kuwahata, T. Sakamoto, A. Matsuda, A. Azuma, Y. Nemoto, A. Ohsaki, T. Asai, Y. Ono, “Kinetic behaviors of energetic ions in oblate field-reversed configuration”, 23rd IAEA Fusion Energy Conference, 2010/10/15, Daejeon, Korea

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

小野靖・井通暁研究室ホームページ

<http://tanuki.t.u-tokyo.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井 通暁 (INOMOTO MICHIAKI)

東京大学・新領域創成科学研究科・准教授
研究者番号：00324799

(2) 研究協力者

神尾 修治 (KAMIO SHUJI)

自然科学研究機構・核融合科学研究所・助教 (平成 24 年度まで東京大学・新領域創成科学研究科・博士後期課程)
研究者番号：80795525

伊井 亨 (II Toru)

東京大学・工学系研究科・博士後期課程

桑波田 晃弘 (KUWAHATA AKIHIRO)

東京大学・工学系研究科・博士後期課程

板垣 宏知 (ITAGAKI HIROTOMO)

東京大学・新領域創成科学研究科・博士後期課程

渡辺 岳典 (WATANABE TAKENORI)

東京大学・新領域創成科学研究科・博士後期課程

山崎 広太郎 (YAMASAKI KOTARO)

東京大学・工学系研究科・博士後期課程