

平成 23 年 2 月 23 日現在

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19340172

研究課題名 (和文) 短パルス磁気リコネクションと 2 次元画像計測を駆使した粒子加熱・加熱実験

研究課題名 (英文) Experimental Study of Particle Heating and Acceleration by Use of Short Pulse Magnetic Reconnection Experiment and Two Dimensional Image Diagnostics

研究代表者

小野 靖 (ONO YASUSHI)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：30214191

研究成果の概要 (和文)：

本研究では、短パルス高磁場合体実験に磁場、イオン温度、電子温度の 2 次元計測を組み合わせ、磁気リコネクションの粒子加熱・加速をはじめて直接計測した。リコネクションのアウトフローがイオン・電子をアルベーン速度の 70-80% 程度に加速し、リコネクション下流領域に 2 カ所形成されるファーストショックにおいてイオンが選択的に加熱されること、電流シートはオーム加熱により電子を加熱することが判明した。

研究成果の概要 (英文)：

We directly measured for the first time particle heating and acceleration of magnetic reconnection using short-pulse/ high magnetic field merging experiment and 2-D image diagnostics of magnetic field, ion temperature and electron temperature. We found plasma acceleration to 70-80% of Alfvén speed by reconnection outflow, selective ion heating by fast shock at two down-stream of reconnection outflow and electron heating by ohmic heating of current sheet.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	10,000,000	3,000,000	13,000,000
2008 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2009 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

研究分野：プラズマ工学、プラズマ核融合工学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：磁気リコネクション、プラズマ合体、急速加熱、プラズマ加速、2 次元画像計測、ファーストショック、異常抵抗、非熱的粒子加速

## 1. 研究開始当初の背景

磁力線再結合、即ち磁気リコネクションとはプラズマ中の反平行の磁力線同士が X 状につながりかわる現象で、プラズマの磁場構造変化に必要な不可欠なプラズマ基礎過程であ

る。磁気圏観測衛星「ジオテイル」等により、大きな粒子加速・加熱の証拠が示され、太陽観測衛星「ひので」でも高精細な計測により物理解明が進むものと期待される。プラズマ粒子のエネルギー分布を測定すると熱エネ

ルギーよりも高いエネルギーを持つイオン・電子が未知のメカニズムで効率よく加速、加熱されることが観測されている。太陽コロナ、地球磁気圏、降着円盤等の宇宙磁化プラズマの多くに共通する謎は、X点構造に伴なって、1) 磁気エネルギーにも匹敵する極めて大きな加熱、2) 局部的にイオンや電子に偏った加熱、3) 高エネルギー粒子の自己発生である。衛星地点に限られる磁気圏衛星観測ではリコネクション領域の広がり不明で、遠距離からの太陽観測では肝心の磁場がわからない。この限界を超えるため、急成長しているのが、リコネクション室内実験といえる。80年代の電極放電を用いたリコネクション室内実験は開いた磁力線のため低温、低密度、低レイノルズ数 $R$ がネックであったが、東大小野らは、プラズマ閉じ込め能力のあるトーラスプラズマの軸対称合体によって高温・高密度、 $R > 10^3$ の電流シートを形成することに成功し、磁気リコネクションの異常抵抗、3成分効果をはじめとする新しい物理を解明してきた。この成果は図1に示す米国の6つの新装置建設へ波及している。その発展型として、合体プラズマを高磁場化し、イオン温度、電子温度、密度の2次元計測と組み合わせ、粒子加熱・加速をクリアカットに解明するという本申請のポイントを着想した。

## 2. 研究の目的

短パルスながら高磁場のプラズマ合体実験を行うと同時に、従来例のない3種の2次元計測（磁場、イオン温度、電子温度・密度）を組み合わせ、磁気リコネクションのエネルギー変換現象、特に非熱的高エネルギー粒子の解明を行う。具体的に

1) コンデンサー拡充とコイルの小型化という安価な方法で短パルスながら0.2Tのトカマクプラズマの合体を実現し、クリアカットにリコネクション粒子加熱・加速を検証する。  
2) 3つの2次元計測、即ち所有の2次元磁気プローブによる2次元磁場計測、所有の72チャンネルの2次元イオン温度計測、開発中の2次元電子温度計測を駆使して2次元画像データとして場所を特定しつつ、リコネクションの粒子加速・加熱を直接検証する。特に、磁気リコネクションのエネルギー変換として4つの場所・機構：A) リコネクションアウトフローによる粒子加速・加熱、B) ファーストショックやスローショック、C) 電流シートのオーム加熱・各種波動加熱、D) 波乗り加速など周辺波動加速・加熱に絞って、どこでイオン、電子のどちらがどれだけ加速・加熱されるのかを明らかにする。宇宙プラズマの前述の謎解明のため、大きな加熱、高エネルギー粒子の発生機構を見出したい。最終的に加熱・加速の物理は室内実験の2次

元計測を駆使して解明する。

## 3. 研究の方法

独自のトーラスプラズマ合体実験を短パルス・高磁場化する手法に、3種類の2次元計測を組み合わせ、磁気リコネクションのA) アウトフロー、B) 電流シート拡散、C) ショック、D) 周辺波動

の4つのエネルギー解放の差違をクリアカットに解明する。

まず、我々独自のトーラスプラズマ合体方式のリコネクション実験（TS-3装置：大半径0.2m）を高磁場化・低密度化する。コンデンサーを拡充して電源も50kJから0.5MJへと大容量化し、現状の0.05Tより1桁高い0.2Tの再結合磁場（ポロイダル磁場）のリコネクションを実現する。さらに河森が中心となって所有の電子サイクロトロン加熱源10kWを用いて、現状の $10^{20}m^{-3}$ の合体プラズマを $10^{19}m^{-3}$ 台へ低密度化する。第1にアウトフロー速度を高め、高エネルギー粒子の発生が2次元ドップラー流速計や温度計でクリアに現れるようにする。流速計測も容易になり、大きな加熱や高エネルギー粒子発生とアウトフローの関係を明らかにできる。イオン加熱は、エネルギー閉じ込め時間（ $\gg$ リコネクション時間）以下の短時間ながら、核融合燃焼プラズマ生成への応用が考えられる。

## 4. 研究成果

本研究では、短パルス高磁場合体実験に2次元画像診断を組み合わせ、磁気リコネクションの粒子加熱・加速を直接計測し、従来よくわからなかった磁気リコネクションの粒子加熱・加速機構を解明した。

まず、第1ステップとして、コンデンサー拡充とコイルの小型化という安価な方法でトカマクプラズマの合体・磁気リコネクション実験の高磁場化した。コンデンサー電源の容量を200kJ増量すると共にコイルを小型化することにより、最大0.2Tに達するトロイダル磁場を有するトカマク2個を生成・合体させることができた。

図1はトカマクプラズマの合体とそれに伴う磁気リコネクション点の形成、リコネクションアウトフローの極性を示す。X点から下流側の2つの方向にアウトフローが発生し、再結合してX点を取り囲む閉じた磁力線に衝突することがわかる。

図2に実験で用いたTS-3プラズマ合体実験装置の写真と垂直断面図を示す。トロイダル磁場と平衡磁場を印加した状態で2つのPFコイルの電流を立ち下げて2本のトロイダル電流を誘導して、2個のトカマクプラズマを生成する。2個のトカマクは同方向トロイダル電流を持つため、合体がスタートし、トカマクが接触する点では磁気リコネクシ

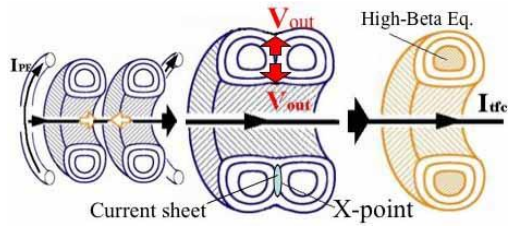


図1 トカマクプラズマ合体による磁気リコネクション実験とアウトフローの方向

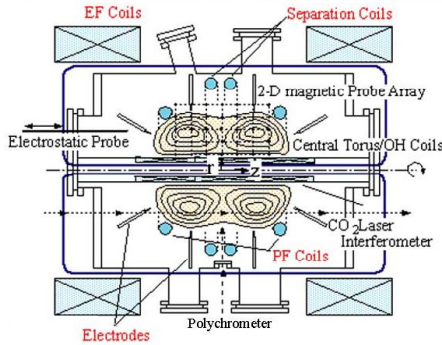
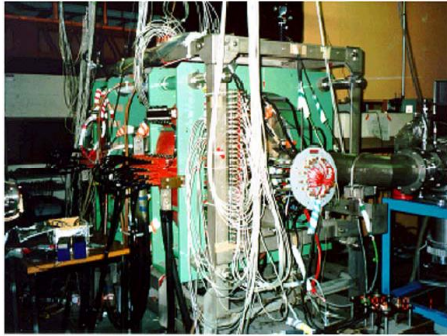


図2 TS-3 トーラスプラズマ合体実験装置の写真と垂直断面図

オンが発生する。合体・磁気リコネクションの速さはセパレーションコイルにより抑制することも、PFコイルの反転電流で促進することもできる。センターコイルによりトロイダル磁場を印加し、ポロイダル磁場もソレノイドコイルで増減することができる。

第2ステップとして従来例のない3種の2次元計測（磁場、イオン温度、電子温度・密度）を開発した。具体的には、1) 2次元磁気プローブによる2次元磁場計測、2) 72チャンネルのトムグラフィー型の2次元イオン温度計測、3) レーザの往復反射と飛行時間差を用いた2次元トムソン散乱計測の開発に成功した。

2次元磁気プローブについては、イオンラーマ半径を下回る最高5mmの空間分解能を有するBz, Btの2成分磁気プローブを構築し、合体プラズマの全体像および高精細な電流シート像が計測できるようになった。図5や図6に計測例を示す。

2次元イオン温度計測については図3に示

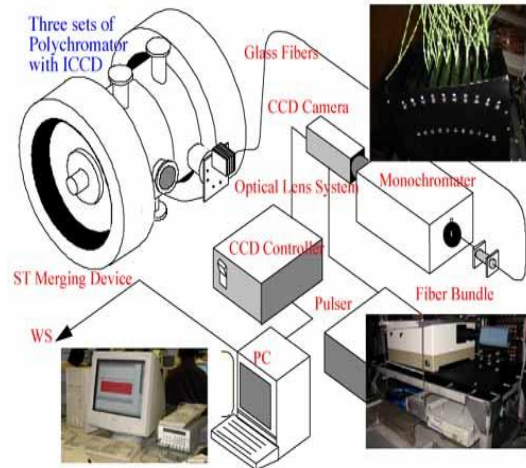


図3 2次元電子温度計測のための光ファイバー、分光器とICCDからなる、72チャンネルのドップラートモグラフィー計測装置

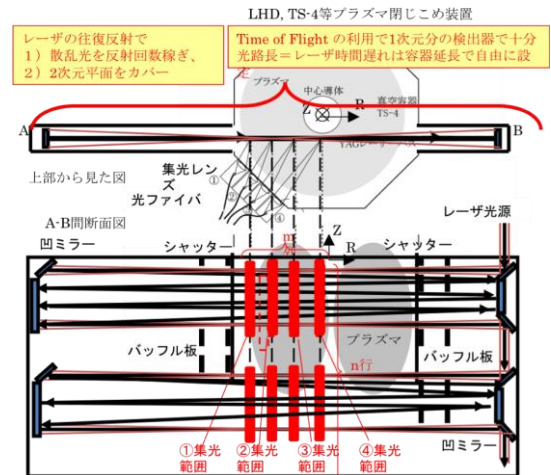


図4 レーザの往復反射と飛行時間差を用いた2次元トムソン散乱計測システム

ようなドップラー温度・流速計測システムを構築した。これは、36ないし72チャンネルの光ファイバーで2次元の視線積分されたプラズマのラインスペクトルを観測し、それを縦方向（スリット長さ方向）に並べ直して1m分光器に入れ、拡大光学系を通してICCDカメラによって2マイクロ秒程度のシャッター時間で観測した。光ファイバー、分光器と拡大光学系、ICCDカメラからなるシステムを適宜組み合わせ、(a)2次元イオン温度、(b)2次元、3次元イオン流速の計測を行えるようになっている。

一方で、電子温度の2次元計測のために、2次元トムソン散乱計測の開発を行った。これはYAGレーザを図4のように半径(R)方向に往復反射させて2次元空間(R-Z平面)をカバーするとともに、飛行時間差の稼げるように一往復のレーザパスを介して隣りあう計測点の散乱光を一つの分光器で検出する



ことにより、1次元計測分の分光器数で2次元計測を行う提案である。過去、5本のレーザを用いた2次元計測は存在するものの、飛行時間差を用いて単一レーザと1次元分の分光器数で安価な2次元計測を行った例は今回が初めてである。

第3ステップとして、短パルスながら0.2Tのトカマクプラズマの合体実験を行い、2次元画像データを駆使して、場所を特定しつつ、リコネクションの粒子加速・加熱を直接検証を行った。

まず1にドップラー流速計測システムを駆使して、磁気リコネクションのイオン加速機構の解明を行った。高ガイド磁場の球状トカマク2個を軸対称合体させると、図5左下のように、磁気リコネクションは $t=30\text{-}50\mu\text{sec}$ で発生することがわかる。

実際にドップラー分光計測装置を用いて測定したX点領域のプラズマ流速分布を図5上に示す。合体実験の際のX点領域のプラズマ流速を計測すると、アルペーン速度の70%程度のフローを検出され、アウトフロー起源の粒子加速現象はリコネクション下流領域で立証できた。図5左上を見ると、アウトフロー速度は電流シート幅よりやや広い10cm程度の幅があり、最大50km/sec程度であることがわかる。これは、再結合するポロイダル磁場で定義されるアルペーン速度の70%-80%程度に相当する。電流シートとの長さ方向のアウトフロー速度分布を示すのが図5右上である。X点の左右でアウトフロー速度が反転していることがわかる。

さらに興味深い点は、アウトフロー速度はリコネクション下流の $r=8\text{cm}$ 付近と $r=26\text{cm}$ 付近で急減している点である。この付近の流速分布はファーストショックの形成であると説明できる。電子密度の半径方向分布を見ると、流速が急減する付近で電子密度が急増していることがわかり、ファーストショックの特徴である流速の急減と密度の急上昇が同時に観測された。ファーストショック面は放電毎に微妙に移動することもわかってきた。図6右上のように短い間隔で設置したペアの静電プローブをスキャンして、ショック面の検出に成功した。静電プローブのペアは $r=14\text{cm}$ 付近と $r=20\text{cm}$ 付近で、電子密度の急峻な立ち上がりを検出しており、ファーストショックであると考えられる。図6左のように磁場強度 $B$ も急増しており、この部分で $n/B$ を計算するとその比が一定であることがわかり、ランキン・ユゴニオの関係式を満たしている。

第3に、2次元イオン温度計測システムを駆使して、磁気リコネクションのイオン加熱現象を解明した。高ガイド磁場トカマク( $I_{\text{tfc}}=35\text{kA}$ )のリコネクション時のイオン温度の $r$ - $z$ 平面分布と対応するポロイダル磁気面、

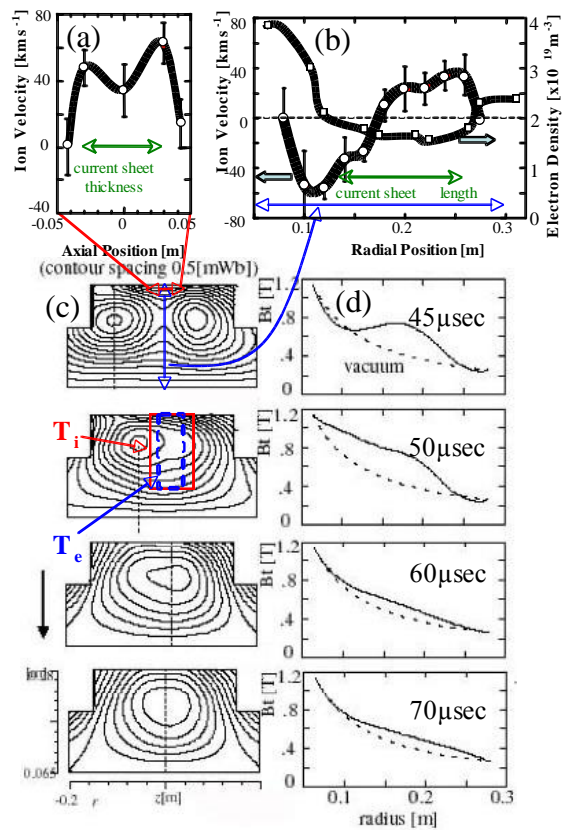


図5(a)リコネクション下流領域のアウトフロー速度の軸方向分布と(b)中心対称平面におけるアウトフロー速度と電子密度の径方向分布、(c)2次元磁気プローブ列で計測したポロイダル磁気面と(d)トロイダル磁場の径方向分布。

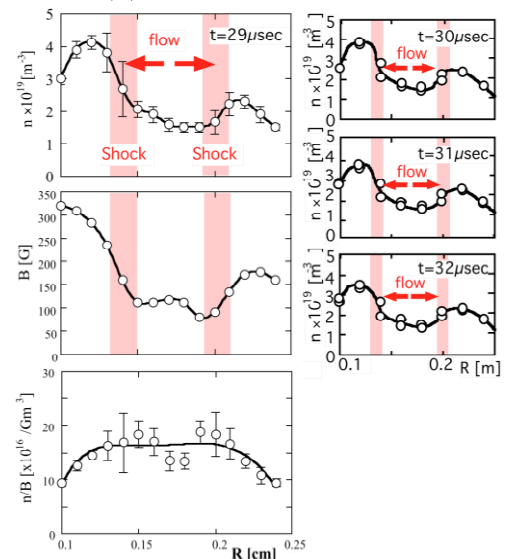


図6 ペアプローブで計測したファーストショック付近の電子密度の半径方向分布(右上)、15放電平均した電子密度(左上)、磁場(左中)および $nB$ の半径方向分布(左下)

トロイダル電流密度を図7に示す。測定領域は、図5における赤枠に相当する。合体中は磁気リコネクション下流領域の2カ所できつ

きりと高イオン温度領域が形成されることがわかる。これはまさに図5に示したファーストショックの位置にあたる。以上の結果により、磁気リコネクションのイオン加熱機構は、磁気リコネクションのアウトフローがファーストショックを介して熱化しているものと解釈できる。イオン熱エネルギーはリコネクションの後には再結合した磁力線に沿って拡散し、最終的に合体が終了したトカマクプラズマ中に閉じ込められる。

イオン温度、電子温度、熱エネルギーの時間変化を図9に示す。磁気リコネクションの加熱パワーはガイド磁場の高い  $I_{tfc}=35\text{kA}$  の場合でも  $4\text{MW}$  に達している。核融合プラズマであれば大型トカマク用の中性粒子ビーム入射装置のパワーに相当する。ガイド磁場の低い場合は、イオン加熱パワーはさらに増加する。これは、磁気リコネクションアウトフローの速度がガイド磁場によって低下す

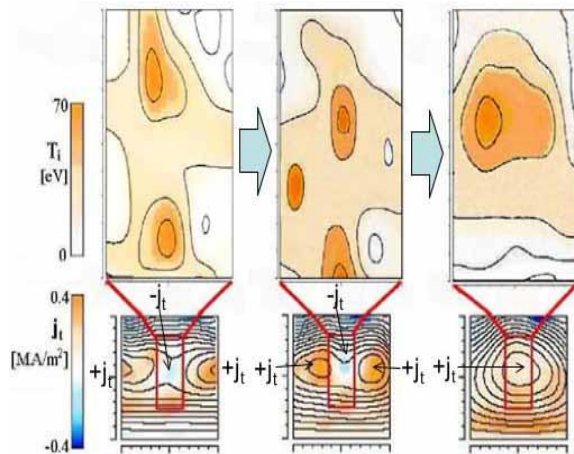


図7 開発した2次元ドップラー温度計で計測した高ガイド磁場トカマク( $I_{tfc}=35\text{kA}$ )のリコネクション時のイオン温度の  $r$ - $z$  平面分布と対応するポロイダル磁気面、トロイダル電流密度

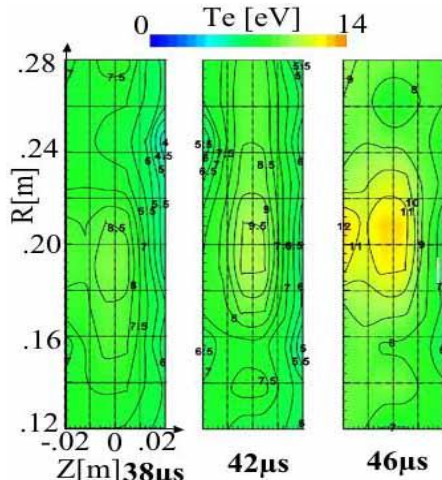


図8 高ガイド磁場トカマク( $I_{tfc}=35\text{kA}$ )のリコネクション時の  $X$  点付近の電子温度の  $r$ - $z$  平面分布

る為と考えられる。低ガイド磁場のトカマクは低ベータ状態で安定であるため、リコネクション加熱後、低ガイド磁場トカマクが緩和現象を起こし、数十アルベーン時間の間に低ベータ状態に回帰する。

第4に、磁気リコネクションの電子加熱機構の解明を行った。図5の青枠に相当する部分の電子温度の2次元分布を図8に示す。これを見ると電子温度は概ねリコネクション点 ( $X$  点) あるいは電流シートの中でピックアップしていることがわかる。しかしながら、加熱パワーはイオン加熱に比べると1, 2ケタは小さく、電子温度上昇も  $15\text{-}20\text{eV}$  程度に留まっている。このことは、電子加熱の原因が電流シートのオーム加熱であることを示している。

第5にリコネクション加熱のスケールング則を解明した。イオン温度上昇分、即ちイオン加熱エネルギーは、再結合するポロイダル磁場強度の二乗に比例することである。これは、リコネクションのイオン加熱がリコネクションアウトフローによって加熱されるため、アウトフロー速度はほぼアルベーン速度であるため、概ね再結合磁場強度に比例するので、アウトフローがファーストショックにより熱化すると考えられるので、イオン加熱エネルギーは再結合磁場の二乗に比例する事が説明できる。

第6に中性粒子ビーム装置とコンデンサー電源を導入し、ビーム引きだし電極のコンデ

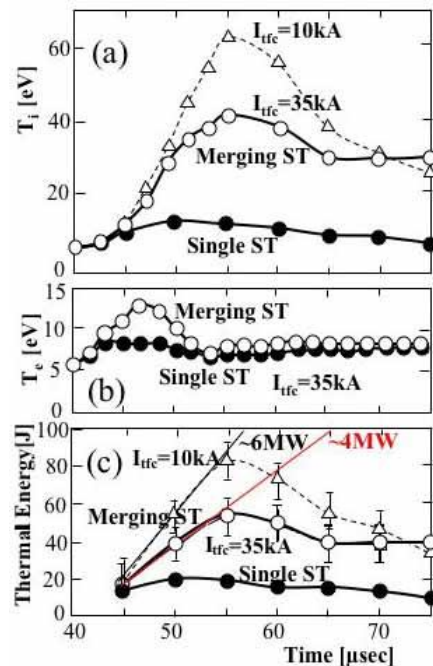


図9  $I_{tfc}=35\text{kA}$  の合体トカマク、単独トカマクの(a)イオン温度、(b)電子温度、(c)熱エネルギーの時間変化 (参考に  $10\text{kA}$  の合体トカマクのイオン温度を示す)。

イオンリングにより最終的に 15kV, 0.4MW という定格を上回る中性粒子ビームの生成に成功し、トーラスプラズマに人為的に高エネルギー粒子を導入した。25kV, 07MW の中性粒子ビームを入射して O ポイントに局所的に運動量を与えたところ、壊れるはずの O ポイントが安定に維持できることがわかった。これは高速粒子の導入による電子温度の上昇か安定性の向上を意味し、その効果はガイド磁場の無い場合に顕著になる。

#### 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 37 件)

- ① M. Inomoto, Y. Ono, “Merging formation and current amplification of field-reversed configuration”, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Volume 2, Issue 4, 424-430, (2007).
- ② E. Kawamori, T. Sumikawa, H. Imanaka, R. Imazawa, K. Yamashita, T. Hayamizu and Y. Ono, “Sustainment of FRC-equilibrium by use of a centre solenoid in TS-4”, Nuclear Fusion, Vol. 47, No.9, 1232-1237, (2007).
- ③ Y. Ono, R. Imazawa, H. Imanaka, Y. Hayashi, S. Ito, M. Nakagawa, T. Yamada, M. Inomoto, A. Ejiri, Y. Takase, T. Asai, T. Takahashi, H. Sakakita, S. Kiyama, Y. Hirano, H. Koguchi, C. Z. Cheng, “Ion and Electron Heating Characteristics of Magnetic Reconnection in TS-3 and UTST Merging Startup Experiments”, Fusion Energy 2008, EX/P9-4, (2008).
- ④ T. Yamada, R. Imazawa, S. Kamio, R. Hihara, K. Abe, M. Sakumura, Q. H. Cao, H. Sakakita, H. Koguchi, S. Kiyama, Y. Hirano, C. Z. Cheng, M. Inomoto, Y. Takase, Y. Ono, “Double Null Merging Start-up Experiments in the University of Tokyo Spherical Tokamak”, to be published in Fusion Energy 2010.

[学会発表] (計 146 件)

- ① Y. Ono: “Transient and Explosive Magnetic Reconnections in TS-3 and 4 Merging Experiments”, The US-Japan Symposium on Plasma Merging and Magnetic Reconnection, St. Michael MD, USA, Mar. 2007 (Invited).
- ② Y. Ono: “Current Sheet Dynamics in TS-3 and TS-4 Tokamak Reconnection

Experiments”, The 9th International Workshop on the Interrelationship between Plasma Experiments in Laboratory and Space, Palm Cove Resort, Cairns, Australia, Aug. 2007 (Invited).

- ③ Y. Ono: “Three Dimensional Magnetic Reconnection in Torus Plasma Merging Experiment”, The 10th International Workshop on the Interrelationship between Plasma Experiments in Laboratory and Space (IPELS), Stockholm, Sweden, June 8-11, 2009 (Invited).
- ④ Y. Ono: “3-D Fast Reconnection in TS-3 and 4 Merging Experiments”, Proceedings of 2009 US - Japan Workshop on Reconnection, Oct. 5 - 7 2009, Fluno Center for Executive Education WI USA (Invited).
- ⑤ Y. Ono: “Laboratory Magnetic Reconnection Experiments (Invited)”, 38<sup>th</sup> Scientific Assembly of the Committee on Space Research (COSPAR 2010), D24-0015-10, (Bremen, Germany) 18-15 July, 2010.

[図書] (計 1 件)

小野靖, 数理工学社, 電気磁気学, 2011 年 (予定), 200 ページ

[その他]

ホームページ等

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

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

小野 靖 (ONO YASUSHI)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授 研究者番号: 30214191

(2)研究分担者

(3)連携研究者

井 道暁 (INOMOTO MICHIAKI)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授 研究者番号: 00324799

山田 琢磨 (YAMADA TAKUMA)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教 研究者番号: 90437773

常田 佐久 (SAKU TSUNETAKA)

国立天文台・教授 研究者番号: 50188603

真柄哲也 (MAGARA TETSUYA)

国立天文台・研究員 研究者番号: 00437196