

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656559

研究課題名(和文) プラズマ計測のための飛翔型プローブの開発

研究課題名(英文) Development of a flying probe for plasma diagnostics

研究代表者

花田 和明 (Hanada, Kazuaki)

九州大学・応用力学研究所・教授

研究者番号：30222219

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：プラズマ計測用飛翔型のプローブを開発するための基礎研究を実施した。飛翔型プローブとしてプラズマ中に直径10mmのセラミック製、ステンレス製、タングステン製の3種類の球体を投下する実験を行った。投下対象のプラズマは高周波による完全非誘導電流駆動プラズマで、セラミック製は粉砕、ステンレス製は溶融してダイバータ板上に溶着した。また、プラズマ電流は、セラミック製・ステンレス製ではほぼ消滅し、タングステン製で約半分まで降下し、その影響は甚大であることがわかった。球体の軌道を高速カメラで撮影した結果から球体にかかる力と熱入力を測定し、高速電子の数と速度の積を定量的に評価することに成功した。

研究成果の概要(英文)：To investigate the impact to plasmas of a flying probe (FP), spheres made of ceramic, stainless steel (SUS), tungsten (W) of 10mm in diameter were dropping into plasmas maintained non-inductively by RF injection. Every FP is planning to recover. The ceramic FP was completely broken, and the stainless steel FP was melted down partially. The plasma currents were vanishing in the cases of the ceramic and the SUS FPs and became to the half in the case of the W FP. There FPs received heat load and momentum from the plasmas, and the motion can provide us the information of plasma parameters. We observe the motion of the SUS and W FP with a high speed camera and finally we confirm that the momentum gives rise of reaction of evaporating material due to asymmetric heat load derived from high energy electrons. After the consideration, we could get an information on the number of energetic electrons multiplied by electron velocity.

研究分野：核融合学

キーワード：高温プラズマ計測 飛翔型プローブ 高速電子

1. 研究開始当初の背景

静電プローブ法はプラズマの基本物理量である電子密度、温度、電位等を局所的にかつ時間分解能良く計測できるので広く活用されている。一方、高温プラズマではプラズマの汚染やプローブ自体の損傷から適応がほとんどできず大がかりな計測機器による計測が行われてきた。しかしながら将来の核融合炉ではこのような大型の計測機器は導入が困難であり、また中性子による影響から多くの計測器の使用が不可能となることが予想される。そこでデータが必要なタイミングで必要な場所にプローブを導入することで将来の核融合炉にも適応可能な計測器として飛翔型プローブの開発を提案した。

2. 研究の目的

飛翔型プローブのプラズマへの影響を調べるとともに、飛翔型プローブからどのように情報を得るかを考察することが目的である。このためには飛翔型プローブの形状や材質を決定し、実際の実機プラズマ中に導入して情報を得る必要がある。計測の対象は、高周波入射により維持された非誘導電流駆動プラズマとした。このプラズマは高速電子を数多く含み、その平均エネルギーは将来の核融合炉相当の電子温度数十 keV 以上に達しているため影響を調べるのに適しているためである。

3. 研究の方法

飛翔型プローブの形状として、球状を選択した。これは球状以外ではプローブ自体が特定の方向性を持つことになり、基礎的データの収集には不向きと考えたからである。大きさとして将来的に通常のプローブ計測に使用される電子回路を収めることのできる最小限のサイズを考えて直径を 10mm とした。適した材質を調べるためにセラミック、ステンレス、タングステンの3種類のボールを用意した。プラズマへの導入方法として自由落下を選択した。投下したボールは下側の回収配管で受け取り、ゲートバルブを閉めることで放電終了後すぐに回収して表面へのダメージ等を微視的な観測により調査することとした。投下したボールの位置は高速カメラで観測し、可視光やエックス線、電子密度やプラズマ電流に対する影響を調べた。落下と回収に関連する機器を図1にまとめている。

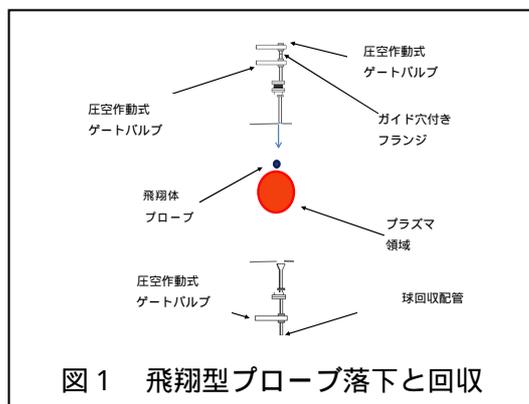


図1 飛翔型プローブ落下と回収

4. 研究成果

最初にセラミック球を投下した。結果としてコアプラズマに到達する前に粉々に粉砕した。発光が始まったのは高速カメラの視野に入る前(図2右図)で、コアプラズマではなく SOL 領域のプラズマによる熱入力で粉砕したと考えられる(図2左図)。

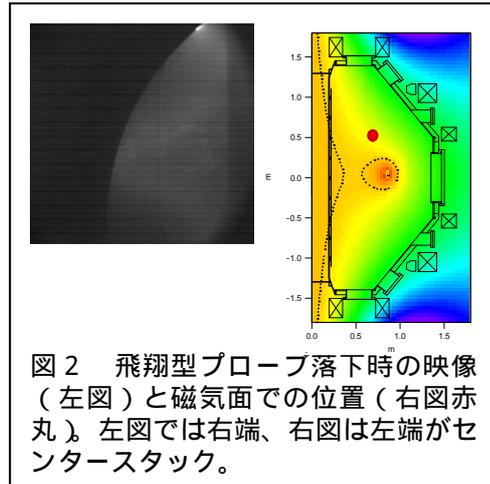


図2 飛翔型プローブ落下時の映像(左図)と磁気面での位置(右図赤丸)。左図では右端、右図は左端がセンタースタック。

ダイバータ領域に設置された静電プローブ列の計測から SOL プラズマからの熱入力によるセラミック球の温度上昇を計算したところセラミック球が粉砕するような温度まで上昇するには数十秒を要することがわかり(図3) SOL プラズマ以外の熱入力が存在することがわかった。

次にステンレス球に投下を行った。投下後の

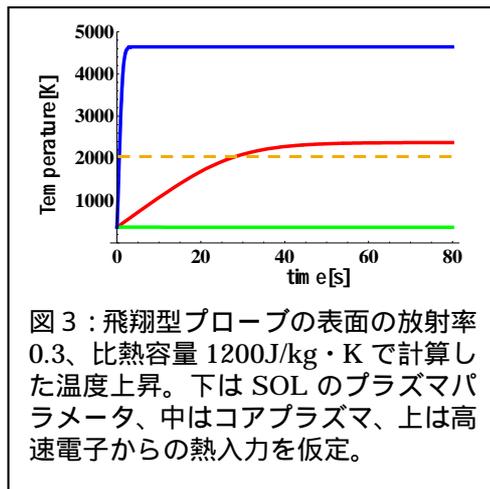


図3: 飛翔型プローブの表面の放射率 0.3、比熱容量 1200J/kg・K で計算した温度上昇。下は SOL のプラズマパラメータ、中はコアプラズマ、上は高速電子からの熱入力を仮定。

ステンレス球は回収配管では回収できず、実験終了後に真空容器内から回収された。写真を図4に示す。明らかに一方向からの熱入力により溶融しており、質量の測定から 60mg の質量欠損が確認された。硬 X 線計測で観測されている 100keV 程度の高速度電子が  $1 \times 10^{14} \text{m}^{-3}$  程度存在しているとすると 33ms で 2000K に達する。このことからセラミック球を粉砕し、ステンレス球を溶融させたのは非誘導電流駆動プラズマ中に存在する高速電

子であることがわかった。回収した飛翔型プローブの様子から、一方向からの熱入力があったことを示している。ステンレス製飛翔型プローブの溶融に必要な熱負荷を短時間 0.5 秒間で受けたと考えると評価すると高速電子の密度とトロイダル方向の速度の積が  $6.6 \times 10^{20} / \text{m}^2/\text{s}$  となった。



図4：回収されたステンレス製の飛翔型プローブの写真。図中点線で囲まれた場所が溶融していた。またダイバータ板上には溶融したステンレスが付着しており、双方の合計とプラズマに暴露する前の質量差から質量欠損が 5mg と算出された。

飛翔型プローブ中に電子回路を仕込んで計測することではなく、飛翔型プローブの軌道を高速カメラで観測することで受ける力を計測し、その結果からプラズマパラメータを得る方法を考察した。計測には融点や熱伝導率の低いステンレスではなく、タングステン製の飛翔型プローブを使用した。高速カメラの映像から加速度を求めたところ、大半径外側方向に 4 mN の加速度が生じていることが分かった。この加速度が溶融したタングステンが蒸発して表面温度程度で噴射による運動量から発生するとすると 5mg の質量欠損が想定される。この蒸発に必要な熱入力をタングステンの蒸発熱  $183 \text{ kJ/mol}$  を用いて計算すると熱入力が 40W と計算できる。この熱入力が高速電子起因だとすると高速電子の密度とトロイダル方向の速度の積が  $3.8 \times 10^{19} / \text{m}^2/\text{s}$  となった。

ステンレス製での飛翔型プローブの評価は、高速電子がトロイダル方向にのみドリフトしていることを仮定している点で過大評価であり、タングステン製の場合には蒸発熱しか考慮していない点で過小評価となっている。これらのことから、飛翔型プローブにより、非誘導電流駆動プラズマの高速電子の密度とトロイダル方向の速度の積が  $3.8 \times 10^{19} - 6.6 \times 10^{20} / \text{m}^2/\text{s}$  の範囲にあることが分かった。これはプラズマ電流密度に換算すると  $6-100 \text{ A}/\text{m}^2$  に相当する。

## 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 10 件)

Santanu Banerjee, H. Zushi, and N. Nishino, Y. Nagashima, K. Hanada, M. Ishiguro, T. Ryoukai, S. Tashima, T. Inoue, K. Nakamura, H. Idei, M. Hasegawa, A. Fujisawa and K. Matsuoka : Fast visible imaging and edge turbulence analysis in QUEST, Review of Scientific Instruments, 査読有, 83 巻, 2012, 10 E 524 1-3  
DOI:10.1063/1.4729080

Hiroshi IDEI, Hideki ZUSHI, Kazuaki HANADA, Evgeniya KALINNIKOVA, Kazuo NAKAMURA, Akihide FUJISAWA, Yoshihiko NAGASHIMA, Makoto HASEGAWA, Keisuke MATSUOKA, Tsuyoshi KARIYA, Tsuyoshi IMAI, Ryutaro MINAMI, Naoaki YOSHIDA, Mizuki SAKAMOTO, Hideo WATANABE, Kazutoshi TOKUNAGA, Akira EJIRI, Masatsugu SAKAGUCHI, Masaki ISHIGURO, Saya TASHIMA, Atsushi FUKUYAMA, Hiroe IGAMI, Shin KUBO, Mitsutaka ISOBE, Kenichi NAGAOKA, Hideya NAKANISHI, Nobuhiro NISHINO, Shoji KAWASAKI Hisatoshi NAKASHIMA, Aki HIGASHIJIMA, Yuichi TAKASE, Takashi MAEKAWA, Osamu MITARAI, Mitsuru KIKUCHI and Kazuo TOI : ECW/EBW Heating and Current Drive Experiment Results and Prospects for CW Operation in QUEST, Plasma Fusion Res., 査読有, 7 巻, 2012, 2402112 1-7,

Makoto Hasegawa, Kazuo Nakamura, Kazutoshi Tokunaga, Hideki Zushi, Kazuaki Hanada, Akihide Fujisawa, Hiroshi Idei, Shoji Kawasaki, Hisatoshi Nakashima, Aki Higashijima : A Plasma Shape Identification with Magnetic Analysis for the Real-time Control on QUEST, IEEJ 電気学会論文誌 A, 査読有, 132 巻, 2012, 7 477-484,

Kazuaki Hanada, Hideki Zushi, Hiroshi Idei, Kazuo Nakamura, Masaki Ishiguro, Saya Tashima, E. I. Kalinnikova, Mizuki Sakamoto, Makoto Hasegawa, Konosuke Sato, Naoaki Yoshida, Hideo Watanabe, Kazutoshi Tokunaga, Yoshihiko Nagashima, Aki Higashijima, Shoji Kawasaki, Hisatoshi Nakashima, Haiqing Liu, Osamu Mitarai, Takashi Maekawa, Atsushi Fukuyama Yuichi Takase, J. Qian : QUEST experiments towards steady state operation of spherical tokamaks, IEEJ 電気学会論文誌 A 査読有, 132 巻, 2012, 7 490-498,

S. Tashima, H. Zushi, M. Isobe, H. Idei, S. Okamura, K. Hanada, K. Nakamura, A. Fujisawa, K. Matsuoka, M. Hasegawa, Y. Nagashima, S. Kawasaki, H. Nakashima, A. Higashijima and QUEST team : Non-inductive current drive by EC waves in an inboard

poloidal magnetic field null configuration on the Spherical Tokamak QUEST, Proc. 22nd International Toki Conference November 19 - 22, 2012, 査読有, 2013, 8巻, 2402118-1・2402118-5  
H. Takahashi, K. Hanada, M. Ishiguro, H. Zushi, H. Fujisawa, K. Nakamura, H. Idei, Y. Nagashima, M. Hasegawa, S. Kawasaki, H. Nakashima, A. Higashijima, Y. Takase, A. Fukuyama, O. Mitarai, X. Gao, and H.Q. Liu : Measurement of ion saturation current and floating potential profile in divertor region on QUEST, Proc. 22nd International Toki Conference November 19 - 22, 2012, 査読有, Proc. 22, 2012

H. Q. Liu, K. Hanada, N. Nishino, R. Ogata, M. Ishiguro, X. Gao, H. Zushi, K. Nakamura, A. Fujisawa, H. Idei, M. Hasegawa, and QUEST Group: Cross-field motion of plasma blob-filaments and related particle flux in an open magnetic field line configuration on QUEST, Journal of Nuclear Materials, 査読有, 438巻, 2013, S513-S517

K. Hanada, H. Zushi, N. Yoshida, N. Yugami, T. Honda, M. Hasegawa, K. Mishra, A. Kuzmin, K. Nakamura, A. Fujisawa, H. Idei, Y. Nagashima, O. Watanabe, T. Onchi, H. Watanabe, K. Tokunaga, A. Higashijima, S. Kawasaki, H. Nakashima, Y. Takase, A. Fukuyama, O. Mitarai, and Y. K. M. Peng : Particle balance in long duration RF driven plasmas on QUEST, Journal of Nuclear Materials, 査読有, 2015, DOI:10.1016/j.jnucmat.2015.01.03

K. Hanada, N. Yoshida, H. Zushi, K. Nakamura, A. Fujisawa, H. Idei, Y. Nagashima, H. Watanabe, M. Hasegawa, S. Kawasaki, H. Nakashima, A. Higashijima, O. Watanabe, Y. Takase, A. Fukuyama, O. Mitarai, M. Peng and the QUEST team : Investigation of progression from low to high hydrogen recycling during long duration discharges on a spherical tokamak, QUEST, Proc. 25th Fusion Energy Conference (FEC 2014), 2014.10.13-18, St. Petersburg Russian Federation, 査読有, E X, 2014, P1-3

Masaki Ishiguro, Kazuaki Hanada, Hiqing Liu, Ryota Ogata, Mitsutaka Isobe, Saya Tashima, Hideki Zushi, Khonosuke Sato, Akihide Fujisawa, Kazuo Nakamura, Hiroshi Idei, Mizuki Sakamoto, Makoto Hasegawa, Yuichi Takase, Takashi Maekawa, Yasuaki Kishimoto, Osamu Mitarai, Shoji Kawasaki, Hisatoshi Nakashima and Aki Higashijima : Investigation of Non-inductive Plasma Current Start-up by RF on QUEST, Journal of Physics Conference Series, 査読有, 511巻, 2014, 012041,

012041-6,  
DOI:10.1088/1742-6596/511/1/012041

〔学会発表〕(計5件)

Kazuaki Hanada: Recent QUEST experiments on non-inductive current drive and plasma-wall interaction towards steady state operation of spherical tokamak, 7th IAEA Technical Meeting on Steady-State Operation of Magnetic Fusion Devices, 14-17 May 2013; Aix en Provence, France

Kazuaki Hanada: Power balance estimation in long duration discharges on QUEST, A3 Foresight Program Workshop on Critical Physics Issues Specific to Steady State Sustainment of High-Performance Plasmas, 19-24 May, 2013, Beijing, China

Kazuaki Hanada : Recent progress on non-inductive driven plasma start-up and investigation towards EBWCD on QUEST, International Spherical Torus Workshop 2013, The King's Manor York, UK 16-19 September 2013

K. Hanada, H. Zushi, N. Yoshida, N. Yugami, T. Honda, M. Hasegawa, K. Mishra, A. Kuzmin, K. Nakamura, A. Fujisawa, H. Idei, Y. Nagashima, O. Watanabe, T. Onchi, H. Watanabe, K. Tokunaga, A. Higashijima, S. Kawasaki, H. Nakashima, Y. Takase, A. Fukuyama, O. Mitarai, and Y. K. M. Peng : Particle balance in long duration RF driven plasmas on QUEST, 21st International Conference on Plasma Surface Interactions 2014, 2014年05月26日~2014年05月30日  
Ishikawa Ongaku-do

K. Hanada, N. Yoshida, H. Zushi, K. Nakamura, A. Fujisawa, H. Idei, Y. Nagashima, H. Watanabe, M. Hasegawa, S. Kawasaki, H. Nakashima, A. Higashijima, O. Watanabe, Y. Takase, A. Fukuyama, O. Mitarai, M. Peng and the QUEST team : Investigation of Progression from Low to High Hydrogen Recycling during Long Duration Discharges on a Spherical Tokamak, QUEST, 25th Fusion Energy Conference (FEC 2014), 2014.10.13-18  
St. Petersburg Russian

〔図書〕(計1件)

花田 和明 他、小特集：球状カトマク研究の進展 2.最近の研究成果と研究動向 2-2.プラズマ - 壁相互作用、ダイバータ研究 Journal of Plasma and Fusion Research Vol.88, No.12 December 2012, 2012, 777

〔その他〕

ホームページ等

[www.triam.kyushu-u.ac.jp](http://www.triam.kyushu-u.ac.jp)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

花田 和明 (HANADA KAZUAKI)  
九州大学・応用力学研究所・教授  
研究者番号：30222219