

平成21年 3月31日現在

研究種目： 基盤研究（B）
 研究期間： 2006～2008
 課題番号： 18340183
 研究課題名（和文） 高速プラズマ流の加熱・加速制御技術の確立と先進宇宙プラズマ推進機開発
 研究課題名（英文） Development of heating and acceleration technology in a fast-flowing plasma and application to an advanced space plasma thruster
 研究代表者
 安藤 晃（ANDO AKIRA）
 東北大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号： 90182998

研究成果の概要： 本研究は、次世代の大型宇宙ロケットシステムとして期待されている推力可変のプラズマ推進システムを開発するため、高速プラズマ流中のイオンを高周波により加熱し、加熱されて得た熱エネルギーを、磁気ノズルを用いて推進エネルギーへと変換する手法を開発するものである。本研究によりその原理検証に世界で初めて成功し、プラズマ密度や高周波の周波数特性、磁気ノズル形状や推進剤に対する依存性など、実機設計に必要な重要な知見を得ることが出来た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
2007年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2008年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野： 数物系科学
 科研費の分科・細目： プラズマ科学・プラズマ科学
 キーワード： プラズマ応用、宇宙プラズマ推進、高周波イオン加熱、磁気ノズル、VASIMR、HITOP

1. 研究開始当初の背景

プラズマを用いた電気推進機は小惑星探査や有人火星探査などの次期宇宙開発計画にとって必要不可欠な推進システムであり、様々な研究開発が進められている。特に大電力動作が可能な先進宇宙航行用電気推進機では、従来の航空宇宙研究で重要視された燃料工学や流体力学の知識だけでは不十分であり、プラズマ生成、制御、加熱、計測、理論シミュレーションなど総合的なプラズマ理工学の知見が不可欠なものとして、両者の技術融合を積極的に進めていく必要があった。

先進宇宙推進機として推力と比推力が状況に応じて変化出来る推進システムの開発が急務であり、このロケット技術の実現にとって重要な高密度プラズマの生成や高速で移動するイオンの加熱が難しく、十分な成果が得られていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、先進宇宙推進機として期待される、推力と比推力が可変のプラズマロケット技術を実現するために、
 (1)高速で移動するプラズマ流中のイオン加熱手法の確立、

- (2)磁気ノズル配位を用いた流れ方向エネルギーへの変換手法の確立、
- (3)磁場からのプラズマ離脱の検証、を進め、推力可変推進機システムの有効性を明らかにし、その実現に寄与することである。

3. 研究の方法

上記目的を達成するために、具体的研究手法として以下の項目を実施した。

- (1)東北大学のHITOP(High Density Tohoku Plasma)装置に設置されたMPD(Magneto-Plasma-Dynamic)高密度プラズマ流発生装置にて超音速高密度プラズマ流を生成し、その下流部にイオン加熱用のアンテナを設置しイオン加熱を行う。種々のアンテナ形状や磁場配位を試み、効率のよいイオン加熱手法を確立する。
- (2)加熱部下流に設置された磁気ノズル部を用いて、イオン加熱により増加した、流れに垂直なエネルギーを流れ方向のエネルギーへと変換する。その結果得られた推力や比推力を算定し、磁場形状と動作条件(流速や磁場強度、初期密度や温度等)に対して最適な加熱と加速が行われる条件を明らかにする。
- (3)宇宙船内の磁場コイルで発生した磁力線からプラズマ中のイオンが有効に離脱できるかどうかを実験的に検証を行う。また上記のエネルギー変換効率も含め磁気ノズル配位の最適な条件を見出す。

4. 研究成果

(1)実験装置

HITOP装置(全長3.4m, 直径0.8m)において、その最上流部にMPDアークジェットをプラズマ源として設置し、イオンマッハ数約1程度の高速プラズマ流を形成した(図1)。真空容器外部には11個の大型外部磁場コイルを用いて種々の磁場形状を生成することが可能である。また、MPD下流約0.6mのところに設置した右巻き形状のヘリカルアンテナにインバータ型電源を用いて高周波電流を給電し、イオンサイクロトロン周波数帯の波動を励起し、磁場中でイオンと同方向に回転する電磁波動をプラズマ流中に励起することで、高速プラズマ流中のイオンを選択的に効率良く加熱した。

プラズマの蓄積熱エネルギー W_{\perp} 測定には $Z=2.33m$ の位置に設置した反磁性コイル(コイル内径400mm)を用い、また、電子温度及び密度計測にはラングミュアプローブを、イオン温度計測には加熱領域通過後($Z=2.33m$)と加速領域通過後($Z=3.13m$)に設置した静電エネルギー分析器を用いて測定を行った。

(2)実験結果

①高速プラズマ流中のイオンサイクロトロン共鳴加熱

図1に示すような磁気ビーチ配位中におい

て、約1msecの準定常プラズマ中に高周波を励起し、加熱実験を行った。高周波励起と

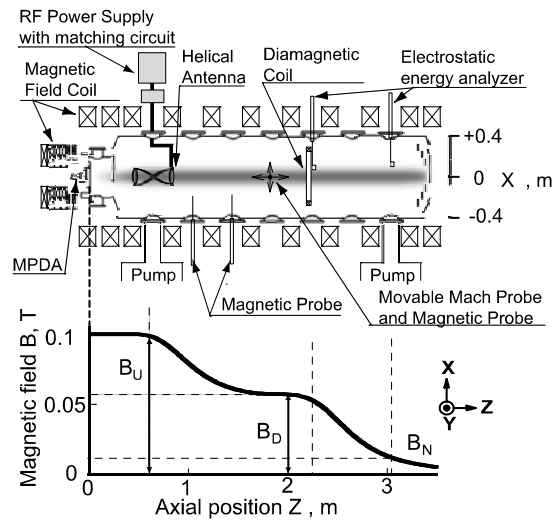


図1 HITOP装置概略と磁場配位

もに急激にプラズマの蓄積熱エネルギー W_{\perp} が上昇し、MPDAにより生成された高速プラズマ流の高周波加熱が起こっていることが確認された。図2にアンテナ直径を変えた際に観測された熱エネルギーの増加率 $\Delta W_{\perp}/W_{\perp}$ の磁場(B_D)依存性を示す(実験条件: 作動ガス He、励起周波数 $f_{RF}=238kHz$)。

W_{\perp} の増加率($\Delta W_{\perp}/W_{\perp}$)が最大となる最適な磁場 B_D はイオンサイクロトロン共鳴条件($\omega/\omega_{ci}=1$)を満たす磁場強度よりもやや弱磁場側であった。この傾向は励起周波数を変えた際にも現れており、プラズマ流に起因するドップラー効果の影響と考えられた。

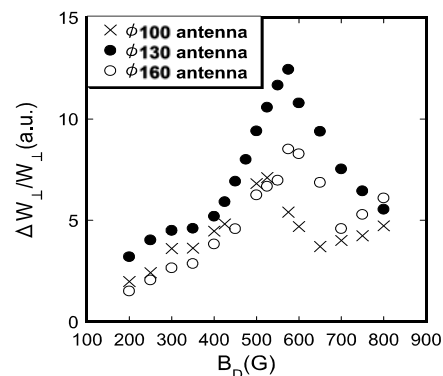


図2 アンテナ直径に対する加熱効率の変化

②発散型磁気ノズルによるプラズマ加速

最も加熱効率の良かった直径130mmのアンテナを用いてイオンサイクロトロン共鳴加熱を行い、増加したプラズマ流中の熱エネルギー W_{\perp} を発散型磁気ノズルを通過させることにより、流れのエネルギーへ変換することを試みた。

プラトー部(加熱部)下流部($Z=2.33m$)と、

発散型磁気ノズル下流部($Z=3.13\text{m}$)に設置した静電エネルギー分析器を用いて、磁力線と垂直方向のイオン温度と平行方向のイオン温度を計測した。

図3に印加高周波電力を変化させた場合の依存性を示す。加熱部下流($Z=2.33\text{m}$)では、加熱によって増加した熱エネルギー(磁場に垂直なエネルギー成分)が強く増加しているのがわかる。一方で、磁気ノズル下流部($Z=3.13\text{m}$)では、磁力線と垂直方向の温度は加熱部下流より減少する一方で推進エネルギー(磁場に平行なエネルギー成分)が増加しており、磁気ノズルによって熱エネルギーから推進エネルギーへと変換されているのが確認された。このとき、垂直方向の温度減少は断熱不変量 μ 一定の条件で予想される値とほぼ一致した。印加する高周波電力を変化させたとき、印加電力の上昇とともにほぼ線形に推進エネルギーが上昇しており、この手法によって比推力を変化させることが出来ることが実験的に初めて示された。

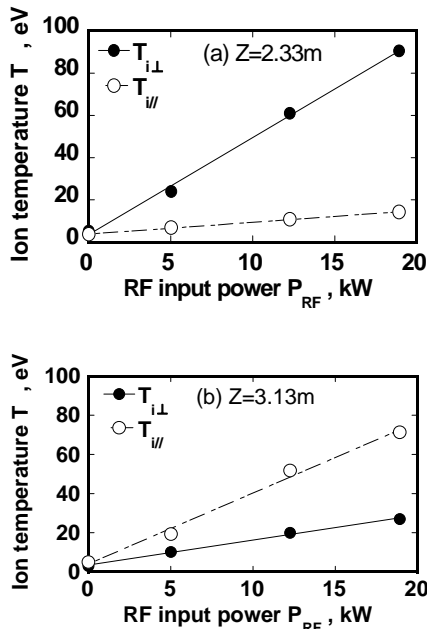


図3 イオン温度 (T_{\parallel} と T_{\perp})の高周波電力依存. $f_{\text{RF}}=0.24\text{MHz}$, $n_e=1.0\times 10^{17}\text{m}^{-3}$, $B_D=57.5\text{mT}$, and $B_N=17.2\text{mT}$.

③磁気ノズル最適化による高速イオン噴射実験

さらに、磁気ビーチ配位と発散型磁気ノズルの複合磁場配位において、発散型磁気ノズルに対しノズル形状の最適化を図った。ICRF加熱領域通過後($Z=2.33\text{m}$)での垂直方向のイオン温度 T_{\perp} が約 90eV まで上昇したプラズマ流に対し、ノズル形状を $B_D-B_N=575-281\text{G}$ 、 $575-172\text{G}$ 、 $575-69\text{G}$ の3通り形成してそれを通過する際のエネルギー変化を観測した。磁気ノズル領域通過後($Z=3.13\text{m}$)での流れに平

行方向のイオン温度 T_{\parallel} を測定した結果、図4に示すように、 $1000-575-69\text{G}$ の磁場配位を用いた時にICRF加熱により増加した熱エネルギーを $T_{\parallel}=93\text{eV}$ の推進エネルギーとして噴射することに成功し、比推力 7420 秒を達成した。

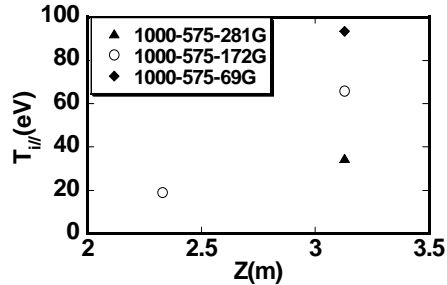


図4 磁気ノズル最適化によるイオン推進エネルギーの変化

④高比推力を目指した水素プラズマ実験

磁気ノズル形状を最適化することによって従来よりも高比推力を達成することが出来たが、先進宇宙推進機としての高い性能を目指し、さらに高速な粒子加速を行うために、推進剤をヘリウムよりも質量の軽い水素へ変更し実験を行った。

図5は $Z=2.33\text{m}$ において水素プラズマに対してプラズマ蓄積エネルギー W_{\perp} の下流磁場強度 B_D 依存性を測定した結果である。ヘリウム動作時と同様にサイクロロン共鳴磁場近傍で W_{\perp} のピークが表れ、ICRF加熱が起こっていることが示された。またこのピークは共鳴磁場(点線)よりも小さく、高速プラズマ流に起因するドップラーシフト効果も観測された。

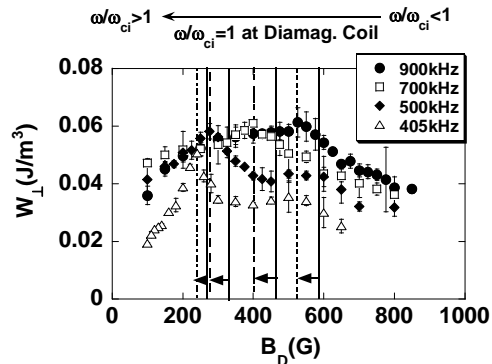


図5 水素プラズマにおけるプラズマ蓄積エネルギーの B_D 依存性

水素プラズマとヘリウムプラズマでの加熱効率の密度依存性を比較した結果を図6に示す。図の縦軸は W_{\perp} の増加率 $(\Delta W_{\perp}/W_{\perp})$ を、励起された波動のエネルギー $(\propto |\vec{B}|^2)$ で規格化した値である。水素プラズマの方がヘリウムプラズマよりも高い密度まで効率よく加

熱が行われていることが分かる。これは、ICRF 加熱を効率よく行うためには、衝突過程による損失効果が少ない条件が有利となるため、イオンサイクロトロン周波数 $f_{ci} >$ イオン-イオン衝突周波数 ν_{ii} という条件を満たす必要があるが、同じ磁場強度で比較すると水素の方が高密度でもこの条件を満足するためと考えられる。

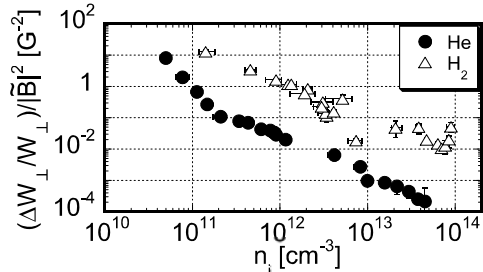


図6 水素プラズマおよびヘリウムプラズマにおける $(\Delta W_{\perp}/W_{\perp})/|\bar{B}|^2$ の密度依存性

さらに、水素プラズマにおいても磁気ノズル加速現象が観測され、励起周波数 $f_{RF}=900$ kHz、高周波投入電力は 6.9kW、プラズマ密度 $n_i=1.5 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ において、イオン温度 $T_{i\perp}$ は 60eV まで上昇し、発散型磁気ノズルによって $T_{i\parallel}=51\text{eV}$ のエネルギーで噴射することに成功した。その結果、水素プラズマを用いることで、ヘリウムプラズマの時に比べて高比推力となる 11420 秒を達成した。得られた成果を表1にまとめる。

表1 水素及びヘリウムでの結果比較

	He	H
f_{RF} (kHz)	238	900
B (G)	1000-575-69	1000-525-112
P_{RF} (kW)	19	6.9
$T_{i\parallel}$ (eV)	93	51
U_{\parallel} (km/s)	73	112
F (mN)	22	14
I_{sp} (s)	7400	11400

⑤大電力 ICRF 加熱

将来の有人惑星探査計画では、ロケットエンジン一台あたり 4MW の高周波投入電力を利用することを想定としている。そこで ICRF 加熱への投入電力を従来よりも増強し、大電力条件での加熱効率の検討を行った。図7に反磁性コイルで計測したプラズマ蓄積エネルギー W_{\perp} の投入電力依存性を示す。

インバータ型電源を高出力化し、印加電力を 50kW まで上げた結果、 W_{\perp} が飽和する傾向が観測された。これは投入電力の増加によってプラズマ流中のイオンの運動エネルギーが高くなり、イオンラーマー半径が大きくな

ったためにプラズマ中から損失していることが原因と考えられた。共鳴磁場強度 575G、イオン温度 100eV とすれば、イオンラーマー半径はおよそ 6cm 程度となり、イオンラーマー半径がプラズマ径(約 5cm)と同程度となっている。この現象はプラズマ中に方向性エネルギー分析器を挿入して確認した。

ラーマー半径の増加によりプラズマ中のイオンが磁力線を横切り損失してしまい、投入電力の増大に対してプラズマの熱エネルギーが徐々に飽和する傾向になったと考えられる。この現象を抑制するためには、より高い磁場強度と高周波数でのイオン加熱を行う必要がある。

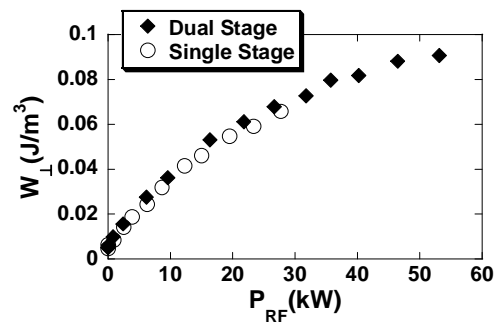


図7 プラズマ蓄積熱エネルギー W_{\perp} の投入電力 P_{RF} 依存性

さらに、磁気ノズルにおいて加速されたプラズマ中のイオンは磁力線に沿って下流部に流れ、最終的には磁力線から離脱することになる。この際、電子とイオンとの挙動が異なるため電場が発生しイオンを減速する可能性がある。

プラズマとして磁場からの離脱を起こすにはプラズマの流れ圧が磁気圧より高くなる必要があり、この際アルヴェンマッハ数が1を越える流れが形成される。このアルヴェンマッハ数を計測する簡便な手法としてアルヴェンマッハプローブを新たに開発し、その動作特性を計測した。また発散型磁場形状を変え、アルヴェンマッハ数が1を越えるプラズマ流の形成に成功し、離脱現象に関して検討を行った。

(3)まとめ

先進宇宙推進機の実現を目指し、東北大学の HITOP 装置において高比推力化および高密度 ICRF 加熱に関する実験を行った。その結果、推進剤としてヘリウム及び水素を用い、高速プラズマ流中のイオンサイクロトロン加熱と磁気ノズルによるプラズマ加速現象を実験的に検証し、その高効率化に関する研究を実施した。水素を用いることでヘリウムに比べ高い加熱効率を得ること、さらに軽量の水素プラズマは高速に加速され1万秒以上の高比推力を達成した。また、投入電力を増

強した ICRF 加熱にはイオンラーマー運動の影響によるプラズマ熱エネルギーの飽和現象が観測され、また磁気ノズルからのプラズマの離脱現象など今後の研究課題が明らかとなった。

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) Akira Ando, Tatsuya Hagiwara, Toshihiro Komagome, Kunihiko Hattori, Masaaki Inutake,
"Generation of supersonic and super-Alfvénic flow by using ICRF heating and a magnetic nozzle",
Plasma Fusion Res. Vol.3, S1018_1-5 (2008), (査読有).
- (2) Akira Ando, Tatsuya Hagiwara, Masakazu Domon, Takahiro Taguchi,
"High Power Ion Heating in Helium and Hydrogen Plasmas for Advanced Plasma Thrusters",
Proc. of the 26th Int. Symp. on Space Tech. and Science/Int. Symp. on Space Tech. and Science, ISTS2008-b-49, pp.1-5 (2008), (査読有).
- (3) Kunihiko HATTORI, You NOGUCHI, Akira ANDO and Masaaki INUTAKE,
"A Multi-Reflection Type Visible-Laser Interferometer for High Density Plasma Measurements",
Plasma and Fusion Research, Vol.2, pp.S1048_1-4 (2007), (査読有).
- (4) Hiroyuki Tobar, Akira Ando, Masaaki Inutake, Kunihiko Hattori,
"Characteristics of electromagnetically accelerated plasma flow in an externally-applied magnetic field",
Physics of Plasmas, Vol.14, pp.093507_1-10 (2007), (査読有).
- (5) A.Ando, T.Hagiwara, Y.Kasashima, K.Hattori, M.Inutake,
"Development of Advanced Plasma Propulsion with ICRF Heating and Magnetic Nozzle",
Advances in Applied Plasma Science, Vol.6, pp.97-100 (2007), (査読有).
- (6) A.Ando, M.Inutake, K.Hattori, M.Shibata, Y.Kasashima,
"ICRF heating and plasma acceleration with an open magnetic field for the advanced space thruster",
Transaction of Fusion Science and Technology, Vol.51, pp.72-74 (2007), (査読有).

- (7) A.Ando, H.Tobar, M.Shibata, H.Isobe, K.Hattori, M.Inutake, K.Nemoto, H.Higaki, M.Ichimura,
"Plasma flow measurement by Mach probes in GAMMA10",
Transaction of Fusion Science and Technology, Vol.51, pp.217-219 (2007), (査読有).
- (8) M. Inutake, A. Ando, K. Hattori, H. Tobar, T. Makita, H. Isobe, and T. Komagome,
"Transonic plasma flow passing through a magnetic mirror",
Transaction of Fusion Science and Technology, Vol.51, pp.141-146 (2007), (査読有).
- (9) M. Inutake, A. Ando, K. Hattori, H. Tobar, T. Makita, M. Shibata, Y. Kasashima and T. Komagome,
"Generation of supersonic plasma flows using an applied-field MPD arcjet and ICRF heating",
Plasma Physics and Controlled Fusion, Vol.49, pp.A121-A134 (2007), (査読有).
- (10) Akira Ando, Masaaki Inutake, Motoi Hatanaka, Kunihiko Hattori, Hiroyuki Tobar and Tsuyoshi Yagai,
"Alfvén wave excitation and single-pass ion cyclotron heating in a fast-flowing plasma",
Physics of Plasmas, Vol.13, pp.057103_1-7 (2006), (査読有).
- (11) A.Ando, M.Shibata, Y.Kasashima, K.Hattori, and M.Inutake,
"Magnetic Nozzle Acceleration in a Fast-flowing Plasma for the VASIMR Thruster",
Proc. 25th Int. Symp. on Space Tech. and Science, ISTS2006-b-42, pp.1-6 (2006), (査読有).

[学会発表] (計 20 件)

- (1) 安藤 晃, "宇宙を開拓するプラズマ推進"、プラズマ科学シンポジウム 2009 (PSS-2009/SPP-26)、名古屋、2009年2月3日。
- (2) 安藤 晃、他 "Measurement of super-Alfvénic plasma flow by using an Alfvén Mach probe"、プラズマ科学シンポジウム 2009 (PSS-2009/SPP-26)、名古屋、2009年2月2日。
- (3) 條 真悟、他 "アルヴェンマッハプローブの特性評価と高速プラズマ流計測"、プラズマ・核融合学会第25回年会、宇都宮、2008年12月4日。
- (4) 安藤 晃、他 "アルヴェンマッハプローブによる高速プラズマ流計測"、日本物理学会 2008年秋季大会、盛岡、2008

- 年 9 月 22 日.
- (5) Akira Ando, et al. "Experimental Study of ion heating and acceleration in a fast-flowing plasma for the advanced plasma propulsion", International Congress on Plasma Physics, Fukuoka, 11 September, (2008).
 - (6) Shingo Jo, et al. "Characteristics of an Alfvén Mach Probe in a Fast-Flowing Plasma", International Interdisciplinary-symposium on Gaseous and Liquid Plasmas, Sendai, 6 September, (2008).
 - (7) Akira Ando, et al. "Ion Heating and Acceleration in Helium and Hydrogen Plasmas for Advanced Plasma", International Interdisciplinary-symposium on Gaseous and Liquid Plasmas, Sendai, 6 September, (2008).
 - (8) Shingo JO, et al. "Evaluation of Alfvén Mach probe in a fast-flowing plasma", 電気関係学会東北支部連合大会、福島、2008 年 8 月 22 日.
 - (9) Akira Ando, et al. "Generation of supersonic and super-Alfvénic flow with an open magnetic field", The 7th International Conference on Open Magnetic System for Plasma Confinement, Daejeon, Korea, 15 July, (2008).
 - (10) 土門正和、他 "超アルヴェン速プラズマ流の生成とアルヴェンマッハプローブ計測"、第 7 回核融合エネルギー連合講演会、青森、2008 年 6 月 21 日.
 - (11) Akira Ando, et al. "High Power Ion Heating in Helium and Hydrogen Plasmas for Advanced Plasma Thrusters", The 26th International Symposium on Space Technology and Science, Hamamatsu, 8 June, (2008).
 - (12) 萩原達也、他 "高速プラズマ流でのイオン加熱手法の開発"、平成 19 年度宇宙輸送シンポジウム、相模原、2008 年 1 月 29 日.
 - (13) 萩原達也、他 "宇宙推進応用を目指したプラズマ流イオン加熱手法の開発"、プラズマ・核融合学会第 24 回年会、姫路市、2007 年 11 月 27 日.
 - (14) Akira Ando, et al. "Generation of supersonic and super-Alfvénic flow by using ICRF heating and a magnetic nozzle", The Joint Conference of 17th International Toki Conference (ITC) on Physics of Flows and Turbulence in Plasmas and 16th International Stellarator / Heliotron Workshop (ISHW), Toki, 16 October, (2007).
 - (15) A. Ando, et al. "Development of Advanced Plasma Propulsion with ICRF Heating and

Magnetic Nozzle", The 6th Int. Symp. of Applied Plasma Science, Nikko, 25 September, (2007).

- (16) Akira Ando, et al. "Ion heating and acceleration experiment in hydrogen plasma for the VASIMR-type Thruster", The 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, 20 September, (2007).
- (17) Tatsuya Hagiwara, et al. "Experiments of Ion Acceleration in a Magnetic Nozzle for an Advanced Plasma Thruster", The 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, 19 September, (2007).
- (18) T.Hagiwara, et al. "Generation of supersonic and super-Alfvénic flow using RF heating and a magnetic nozzle", The 28th Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Prague, Czech Republic, 17 July, (2007).
- (19) 犬竹正明、他 "磁気ノズルによる遷音速流の生成と宇宙推進機への応用"、プラズマ・核融合学会第 23 回年会、つくば市、2006 年 12 月 1 日.
- (20) 笠嶋悠司、他 "先進型プラズマ進機開発を目指した高速プラズマ流での ICRF 加熱と磁気ノズル加速"、プラズマ・核融合学会第 23 回年会、つくば市、2006 年 11 月 28 日.

[その他]
なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

安藤 晃 (ANDO AKIRA)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90182998

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

犬竹 正明 (INUTAKE MASA AKI)

東北大学・大学院工学研究科・名誉教授

研究者番号：90023738

服部 邦彦 (HATTORI KUNIHICO)

日本工業大学・共通教育系・講師

研究者番号：90261578

市村 真 (ICHIMURA MAKOTO)

筑波大学・数理物質科学研究科・教授

研究者番号：10151482

武藤 敬 (MUTOH TAKASHI)

核融合科学研究所・プラズマ加熱研究系・教授

研究者番号：90115949

船木 一幸 (FUNAKI IKKOU)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部

宇宙輸送工学研究系・准教授

研究者番号：50311171