

平成22年 5月25日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2009

課題番号：20740317

研究課題名（和文） 先進無電極電気推進機対応プラズマ源の研究開発

研究課題名（英文） Plasma Source Development for an advanced electrodeless electric propulsion

研究代表者

高橋 和貴 (TAKAHASHI KAZUNORI)

岩手大学・工学部・助教

研究者番号：80451491

研究成果の概要（和文）：永久磁石配列を用いて発散型磁場配位を形成し強磁場側にガラス管、高周波アンテナから構成されるプラズマ源を設置した、永久磁石利用発散プラズマ源を、直径約76 cm、長さ約100 cmの比較的大口径の真空容器に接続し、プラズマ源から排出されるイオンのエネルギー分布関数、プラズマ密度、プラズマ電位構造の計測を行った。その結果、プラズマ源出口近傍にダブルレイヤーによる電位降下が発生的に形成され、超音速イオンビームが励起されていることが明らかになり、これまでに行われた小型真空容器を用いた実験と比較し、観測された無電極イオン加速は下流域の境界条件の影響を受けていないことを実験的に示し、電気推進機への応用が原理上可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）： Ion energy distribution function, plasma density, and plasma-potential structure are experimentally investigated in a magnetically expanding plasma source using permanent magnets, connected to a large-diameter, 76-cm-diameter and 100-cm-long vacuum chamber. In the machine, a rapid potential drop due to a formation of an electric double layer spontaneously forms and a resulting supersonic ion beam accelerated by the double layer are detected in the downstream diffusion chamber. As a result of a comparison with the previously performed experiments in the small diffusion chamber, the observed electrodeless and electrostatic ion acceleration is found not to be affected by a boundary condition in the diffusion chamber region. The results demonstrate that the source would be applicable to the electric propulsion devices.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：イオン加速，ダブルレイヤー，永久磁石，高周波プラズマ，発散磁場，プラズマ電位構造

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙空間における惑星探査機や衛星の推進エンジンとして電気推進機が注目されている。現行の電気推進機では、プラズマ生成やイオン加速に電極を用いているため長寿命化が大きな課題となっている。一方で、長寿命化が可能な手法として、無電極粒子加速が盛んに研究されている。特に近年、電磁石を利用して形成した発散型磁場配位下でのヘリコン波放電中に、プラズマ中に自己無撞着に形成される非線形電位構造ダブルレイヤー(電気二重層)が観測され、その電位構造でイオンが加速されることが明らかになっており、この現象を電気推進に応用する研究が行われている。

### 2. 研究の目的

上記のダブルレイヤー粒子加速を応用した電気推進に関して、申請者は電磁石の使用による消費電力の増大、重量増大が問題であると指摘している。この問題点を解決可能な電気推進機として、電磁石を使用せずに永久磁石のみで発散型磁場配位を形成することでダブルレイヤーの積極的・制御を実現し、このダブルレイヤーによるイオン加速で推力を得る永久磁石利用発散プラズマ源を提案している。この永久磁石利用発散プラズマ源を電気推進へと応用するためには、まず粒子加速に適した永久磁石による発散型磁場配位下での高密度プラズマ源を開発し、最適化を行う必要がある。また宇宙空間における動作を実証するために、境界条件を無視できる大口径真空容器に対応していることが重要である。そこで今回申請する研究では、大口径真空容器に永久磁石利用発散プラズマ源を接続し、これまでに行った小型真空容器を用いた実験結果と比較することで、下流域の境界条件の効果を検討するとともに、プラズマ源の最適化を行う。

### 3. 研究の方法

内径 75 cm、長さ 100 cm の比較的大型の真空容器を製作し、永久磁石利用発散プラズマ源を接続する。ガラス管周辺には永久磁石アレイを配置し、ガラス管内部で 200 Gauss の一様磁場、ガラス管出口近傍で磁力線が発散する磁場構造を形成する。油拡散ポンプ、油回転ポンプを用いて真空容器内部を  $10^{-6}$  Torr まで減圧した後、マスフローコントローラーを用いてアルゴンガスを導入し、内部圧力を 0.3 - 2 mTorr の範囲で一定とする。ガラス管周辺に高周波ループアンテナを設置し、インピーダンス整合回路を介して



図 1 : 実験装置.

13.56 MHz、250 W の高周波電力をアンテナに供給することで、誘導結合性プラズマを生成する。プラズマ源内部、下流域に静電イオンエネルギーアナライザ、及びラングミュアプローブ等の各種計測器を設置し、イオンエネルギー分布関数やプラズマ電位構造の計測を行った。また、得られた実験データを、これまでに直径 25cm の小型真空容器で得られたデータと比較することで、下流域の境界条件の効果を検討する。

### 4. 研究成果

図 1 に示す実験装置で、プラズマ源下流域に設置したイオンアナライザを用いて計測したイオンエネルギー分布関数を図 2 に示す。動作ガス圧は 40 mPa としてある。プラズマ電位 ( $\phi_p$ ) 近傍に観測されるバルクイオンに加えて、ビーム電位 ( $\phi_{beam}$ ) 近傍に加速されたイオンビームが励起されていることが観測された。この加速メカニズムを明らかにするために、プラズマ電位の軸方向分布を計測したところ、図 3 に示すような結果が得られた。ここで、□はプラズマ電位、△はイオンビームが観測された場合のビーム電位を表

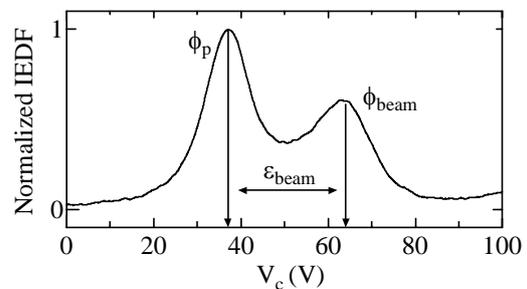


図 2 : イオンエネルギー分布関数計測結果.

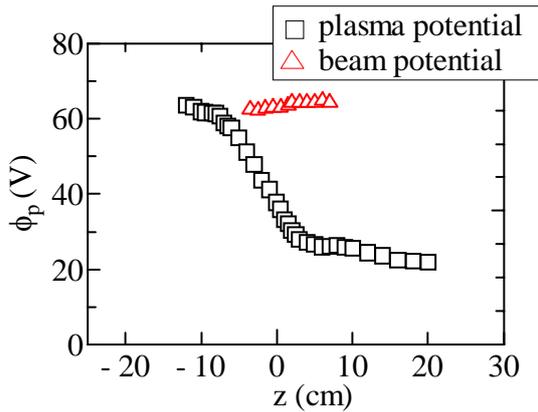


図 3 : プラズマ電位構造の計測結果.

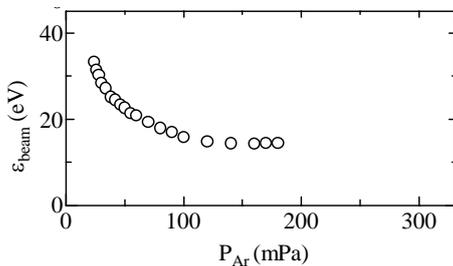


図 4 : ビームエネルギーのガス圧依存性.

している. プラズマ源出口近傍で急激な電位降下(ダブルレイヤー)が生じており, 更に上流域のプラズマ電位と下流域のビーム電位が良い一致を示していることから, 出口近傍のプラズマ電位降下によって静電的にイオンが加速され, 下流域にイオンビームが励起されていることが明らかになった.

また, 図 4 に示すようにイオンビームエネルギーの動作ガス圧依存性の計測を行ったところ, ガス圧が上昇するにつれてビームエネルギーが減少することが明らかになった. また, 永久磁石アレイを外して無磁場での実験を行ったところ, イオンビームは観測されなかった. 以上の結果は, 小型真空容器で得られた結果と同様であり, ダブルレイヤーイオン加速には下流域の境界条件は本質的に影響せず, 発散磁場配位のみで決定されてい

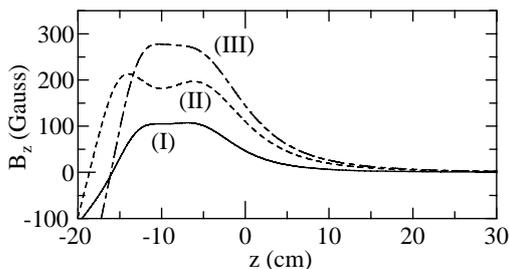


図 5 : 外部印加磁場配位.

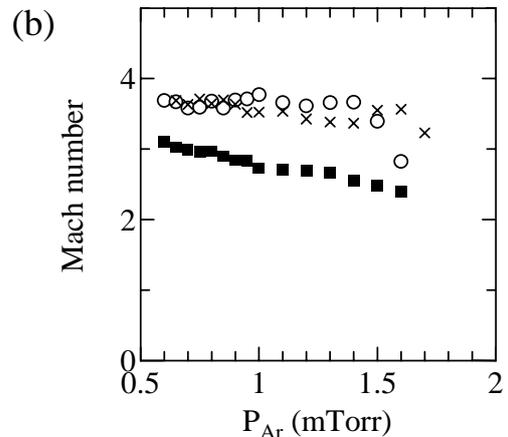
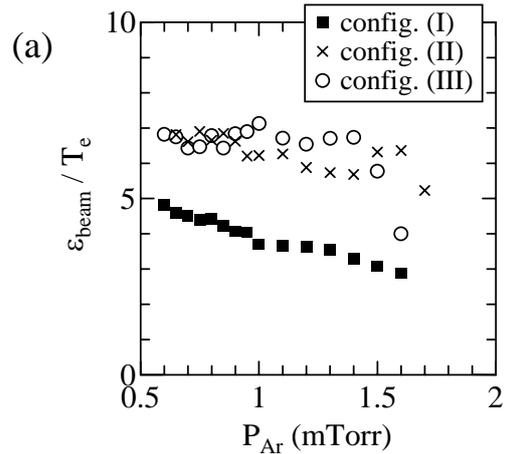


図 6 : (a)電子温度で規格化したイオンビームエネルギー(ダブルレイヤー強度), (b)イオンマッハ数.

ることが明らかになった. すなわち, 宇宙空間でもダブルレイヤーイオン加速が実現できる可能性が示唆されたといえる.

加えて, 上記の永久磁石利用発散プラズマ源の最適化を目的として, 永久磁石による磁場強度を増強した実験を行った. ここでは, 図 5 に示すような 3 種類の磁場配位を適用し, 各配位においてプラズマ源出口でのイオンエネルギー分布関数の計測を行い, そこからイオン加速エネルギー, ダブルレイヤー強度, マッハ数を評価した. 図 6 (a) に電子温度で規格化したイオンビームエネルギー, すなわちダブルレイヤー強度, 6 (b) にはイオン音速で規格化したイオンマッハ数の計測結果を示す. 図 5 の磁場配位 (I), (II), (III) での計測結果をそれぞれ, ■, ×, ○ で示している. これより, ダブルレイヤー強度とイオンマッハ数は動作ガス圧にはさほど依存しておらず, ほぼ一定の値を示していることが分かる. 一方, 磁場強度を 100 G 程度から 200 G, 270 G 程度に増強した磁場配位 (II), (III) の場合には, ダブルレイヤー

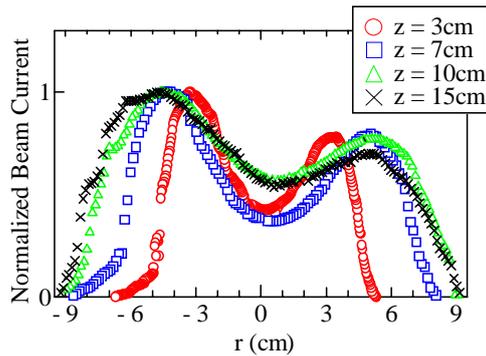


図 7: イオンビーム電流の半径方向分布計測結果.

強度とイオンマッハ数の両者ともに増大していることが明らかになった. 今回の課題における永久磁石利用発散プラズマ源では, イオンマッハ数は最大で 3.8 を示し, 発散磁場配位中ダブルレイヤーイオン加速では最大の速度を示すことが明らかになった.

今回拡散容器を大口径化したことで, 広範な領域でのイオンビーム計測が可能になった. そこで, 下流域におけるイオンビームの空間分布計測を行った. 図 7 には代表的な  $z$  軸方向位置におけるイオンビーム電流の半径方向分布計測結果を示す. 下流域  $z = 3\text{ cm}$  から  $7\text{ cm}$  にかけてはイオンビームの半径が拡がりを示すのに対して,  $z = 10\text{ cm}$  以降はほぼ変化していないことが観測された. これらのデータからイオンビームの半径を求め, 単純な磁場発散プラズマのプラズマ半径予測値との比較を行った. 図 8 の  $\square$  は図 7 から求めたイオンビームの半値幅 (FWHM) であり, 実線はプラズマ半径の予測値である. これを見ると,  $z = 10\text{ cm}$  以降では, イオンビームの軌道が予測値から大きく外れていることが伺える. すなわち,  $z = 10\text{ cm}$  近傍においてダブルレイヤーによって加速されたイオンビームが磁力線から逸脱 (デタッチメ

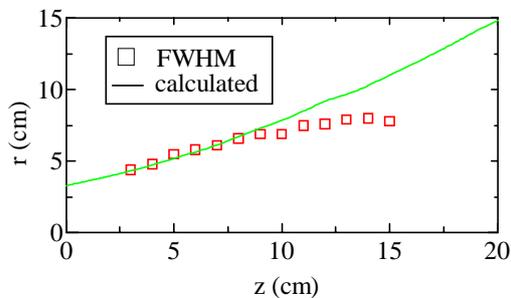


図 8: イオンビーム半径 ( $\square$ ) の計測結果と磁場発散プラズマのプラズマ半径予測値 (実線).

ント)している可能性が示され, 電気推進への応用の可能性が示唆されたといえる. 今後, その詳細な条件やメカニズムを明らかにする必要がある.

#### 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 13 件)

1. K. Takahashi, Y. Shida, and T. Fujiwara, *Magnetic-field-induced enhancement of ion beam energy in a magnetically expanding plasma using permanent magnets*, Plasma Sources Science and Technology (査読有り), vol. 19, pp. 025004-1 - 025004-7 (2010).
2. K. Takahashi, T. Kaneko, R. Hatakeyama, and A. Fukuyama, *Characteristics of electron cyclotron waves creating field-aligned and transverse plasma-potential structures*, Plasma Physics and Controlled Fusion (査読有り), vol. 51, pp. 125007-1 - 125007-11 (2009).
3. K. Takahashi and T. Fujiwara, *Observation of weakly and strongly diverging ion beams in a magnetically expanding plasmas*, Applied Physics Letters (査読有り), vol. 94, pp. 061502-1 - 061502-3 (2009).
4. K. Takahashi, Y. Shida, T. Fujiwara, and K. Oguni, *Supersonic ion beam driven by permanent-magnets-induced double layer in an expanding plasma*, IEEE Transactions on Plasma Science (査読有り), vol. 37, pp. 1532 - 1536 (2009).
5. K. Takahashi, C. Charles, R. Boswell, W. Cox, and R. Hatakeyama, *Transport of energetic electrons in a magnetically expanding helicon double layer plasma*, Applied Physics Letters (査読有り), vol. 94, pp. 191503-1 - 191503-3 (2009).
6. K. Takahashi, K. Oguni, H. Yamada, and T. Fujiwara, *Double layer formation in a low-pressure argon plasma expanded by permanent magnets*, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES (査読有り), vol. 8, pp. 1269 - 1272 (2009).
7. T. Sasaki, K. Takahashi, K. Oguni, and T. Fujiwara, *Spatial characterization of the plasma density in a magnetically expanding plasma using permanent magnets*, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES (査読有り), vol. 8, pp. 724 - 727 (2009).
8. 高橋和貴, Christine Charles, Rod Boswell, Wes Cox, 畠山力三, 伊藤裕紀, 志田寛, 藤原民也, 発散プラズマ中ダブルレイヤー形成に関する粒子挙動, スペースプラズ

- マ研究会講演論文集 (査読無し), pp. 29 - 32 (2009).
9. K. Takahashi, K. Oguni, H. Yamada, and T. Fujiwara, *Ion acceleration in a solenoid-free plasma expanded by permanent magnets*, Physics of Plasmas (査読有り), vol. 15, pp. 084501-1 - 084501-4 (2008).
  10. K. Takahashi, C. Charles, R. Boswell, and R. Hatakeyama, *Radial characterization of the electron energy distribution in a helicon source terminated by a double layer*, Physics of Plasmas (査読有り), vol. 15, pp. 074505-1 - 074505-4 (2008).
  11. K. Takahashi, T. Kaneko, and R. Hatakeyama, *Double layer created by electron cyclotron resonance heating in an inhomogeneously magnetized plasma with high-speed ion flow*, Physics of Plasmas (査読有り), vol. 15, pp. 072108-1 - 072108-5 (2008).
  12. K. Takahashi, H. Yamada, and T. Fujiwara, *Expanding plasma source using permanent magnets for generation of supersonic ion beam*, Proceedings of International Interdisciplinary-Symposium on Gaseous and Liquid Plasmas (査読有り), pp. 115 - 118 (2008).
  13. K. Takahashi, T. Kaneko, and R. Hatakeyama, *Polarization reversal of electron cyclotron waves creating plasma-potential structures in laboratory plasmas*, Proceedings of the XXIX General Assembly of the International Union of Radio Science (査読有り), CD (2008).

[学会発表] (計 24 件)

1. 高橋和貴, 小国薫, 谷川隆夫, 篠原俊二郎, 藤原民也, 高密度ヘリコン波プラズマ中のダブルレイヤー粒子加速, 平成 21 年度スペースプラズマ研究会, 2010 年 3 月 11 日, ISAS/JAXA (神奈川県).
2. 高橋和貴, ダブルレイヤーイオン加速の大出力化へ向けて, 平成21年度東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会, 2010 年 2 月 23 日, 東北大学 (宮城県).
3. 高橋和貴, 志田寛, 藤原民也, ダブルレイヤーイオン加速制御法の模索, 宇宙関連プラズマ研究会 2009, 2009 年 12 月 16 日, ISAS/JAXA (神奈川県).
4. 高橋和貴, 志田寛, 藤原民也, ダブルレイヤー駆動イオンビームへの発散磁場の効果, 第 26 回プラズマ核融合学会年会, 2009 年 12 月 3 日, 京都国際交流会館 (京都府).
5. 五十嵐勇一, 高橋和貴, 藤原民也, ダブルレイヤー駆動イオンビームの空間分布に関するプラズマ電位構造計測, 第 26 回プラズマ核融合学会年会, 2009 年 12 月 2 日, 京都国際交流会館 (京都府).
6. K. Takahashi, Y. Shida, and T. Fujiwara, Enhanced ion acceleration due to the presence of neutralizing electrons in a magnetically expanding plasma, The 7th General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association 2009 and the Asia-Pacific Plasma Theory Conference 2009, 2009 年 10 月 29 日, アウガ (青森県).
7. T. Sasaki, K. Takahashi, and T. Fujiwara, Electron energy distributions in a radiofrequency plasma expanded by permanent magnets, The 7th General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association 2009 and the Asia-Pacific Plasma Theory Conference 2009, 2009 年 10 月 28 日, アウガ (青森県).
8. K. Oguni, K. Takahashi, Y. Shida, and T. Fujiwara, High-power operation of a magnetically expanding plasma using permanent magnets, The 7th General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association 2009 and the Asia-Pacific Plasma Theory Conference 2009, 2009 年 10 月 28 日, アウガ (青森県).
9. Y. Igarashi, K. Takahashi, and T. Fujiwara, Detailed measurement of the plasma-potential structure in a magnetically expanding plasma, 平成 21 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2009 年 8 月 21 日, 東北文化学園大学 (宮城県).
10. K. Oguni, K. Takahashi, and T. Fujiwara, Ion acceleration in a high-density rf plasma expanded by permanent magnets, 平成 21 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2009 年 8 月 21 日, 東北文化学園大学 (宮城県).
11. 高橋和貴, 五十嵐勇一, 志田寛, 藤原民也, 永久磁石利用発散プラズマ中のダブルレイヤーイオン加速, 電気学会 プラズマ・パルスパワー・放電合同研究会, 2009 年 8 月 6 日, 同志社大学 (京都府).
12. 高橋和貴, Christine Charles, Rod Boswell, Wex Cox, 畠山力三, 藤原民也, 発散プラズマ中ダブルレイヤー形成に関する粒子挙動, 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 平成20年度スペースプラズマ研究会, 2009 年 3 月 5 日, ISAS/JAXA (神奈川).
13. 高橋和貴, 藤原民也, 発散磁場配位中ダブルレイヤー形成による無電極静電イオン加速, 2008 年 12 月 16 日, 宇宙関連プラズマ研究会 2008, ISAS/JAXA (神奈川).
14. 小国薫, 高橋和貴, 藤原民也, 永久磁石利用発散型プラズマ源の基礎特性, 電気学会プラズマ研究会, 2008 年 10 月 31 日, 東北大学 (宮城県).
15. 高橋和貴, 山田弘, 藤原民也, 永久磁石利

用発散プラズマ中のダブルレイヤー形成, 日本物理学会2008年秋季大会, 2008年9月21日, 岩手大学(岩手県).

16. T. Sasaki, K. Takahashi, K. Oguni, and T. Fujiwara, Spatial characterization of the plasma density in a magnetically expanding plasma using permanent magnets, International Congress on Plasma Physics 2008, 2008年9月9日, Fukuoka International Congress Center (Fukuoka, Japan).
17. K. Takahashi, K. Oguni, H. Yamada, and T. Fujiwara, Double layer formation in a low-pressure argon plasma expanded by permanent magnets, International Congress on Plasma Physics 2008, 2008年9月9日, Fukuoka International Congress Center (Fukuoka, Japan).
18. K. Takahashi, C. Charles, R. Boswell, and R. Hatakeyama, Electron energy distribution functions correlating with the formation of a helicon double layer, International Congress on Plasma Physics 2008, 2008年9月9日, Fukuoka International Congress Center (Fukuoka, Japan).
19. K. Takahashi, H. Yamada, and T. Fujiwara, Expanding plasma source using permanent magnets for generation of supersonic ion beam, International Interdisciplinary-Symposium on Gaseous and Liquid Plasmas, 2008年9月3日, Tohoku University (Miyagi, Japan).
20. 佐々木智世, 高橋和貴, 向川政治, 高木浩一, 藤原民也, Density profile of a magnetically expanding plasma using permanent-magnet arrays, 電気関係学会東北支部 平成20年度連合大会, 2008年8月22日, 日本大学工学部(福島県).
21. 小国薫, 高橋和貴, 向川政治, 高木浩一, 藤原民也, Basic characteristics of an expanding plasma using permanent magnets, 電気関係学会東北支部 平成20年度連合大会, 2008年8月22日, 日本大学工学部(福島県).
22. 高橋和貴, 山田弘, 藤原民也, 永久磁石利用ヘリコンプラズマ中の静電粒子加速, 電気関係学会東北支部 平成20年度連合大会, 2008年8月21日, 日本大学工学部(福島県).
23. K. Takahashi, T. Kaneko, and R. Hatakeyama, Polarization reversal of electron cyclotron waves creating plasma-potential structures in laboratory plasmas, The XXIX General Assembly of the International Union of Radio Science, 2008年8月15日, Hyatt Regency Hotel (Chicago, USA).
24. 高橋和貴, 小国薫, 佐々木智世, 山田弘,

藤原民也, 永久磁石を用いた発散プラズマ中超音速イオン流形成, 第7回核融合エネルギー連合講演会, 2008年6月20日, 青森市民ホール(青森県).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高橋和貴 (TAKAHASHI KAZUNORI)  
岩手大学・工学部・助教  
研究者番号: 80451491