

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 8日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2009～2011

課題番号：21654083

研究課題名（和文） プラズマ加速を用いた温室効果ガスの地球外排出

研究課題名（英文） Emission of the greenhouse gas to the outside of the earth using plasma acceleration

研究代表者

安藤 晃（ANDO AKIRA）

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90182998

研究成果の概要（和文）：

地球極域における発散磁場を利用し、磁気ノズル加速を人為的に行うことで二酸化炭素など温室効果ガス種を地球外に排出することを目的として、磁気ノズルによるイオン加速とディタッチメント効果の研究を実施した。二酸化炭素と質量の近いアルゴンのほか、種々の希ガスを動作ガスとして、高周波を用いたプラズマ生成実験とともに、磁気ノズルにおけるイオン加熱・加速効果を検証した。さらに磁気ノズル場中におけるプラズマ流のイオンマッハ数、アルヴェンマッハ数の変化を観測し磁力線からの離脱現象について検討を行った。

研究成果の概要（英文）：

It is possible to emit greenhouse gas, such as carbon dioxide, to outside of the earth by using a divergent magnetic field, that is a magnetic nozzle field, in the north and south pole areas. This research has been performed to clarify the effect of ion acceleration in a magnetic nozzle and detachment from the field.

We have investigated RF plasma production, ion heating and acceleration in a magnetic nozzle using various rare gases. The ion Mach number and Alfvén Mach number of plasma flow in a magnetic nozzle was observed and detachment effect from the magnetic nozzle were investigated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	0	1,400,000
2010年度	1,000,000	0	1,000,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	210,000	3,310,000

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：プラズマ加速、イオン加熱、温暖化ガス、二酸化炭素排出削減、プラズマ応用、地球温暖化

1. 研究開始当初の背景

現在の環境問題の最優先課題として温暖化ガス排出削減問題がある。これは、20世紀

後半からの地球平均気温上昇（温暖化）が人為的な起源による気候変動であり、産業革命以来の化石燃料の大量使用に伴って加速度

的に増えた二酸化炭素など温暖化ガスの排出が原因であるとの議論から、先進国を中心として温暖化ガスの排出削減を行うことを、気候変動枠組条約締約国会議（COP 会議）で議論し条約が締結され、産業界を中心に温室効果ガス削減のための取り組みや研究開発が進められている。

既に排出された二酸化炭素を削減するためには森林を増やすなど自然エネルギーを利用した間接的手法しかないが、近年、地球極域における発散磁場を利用し、人為的に地球外に温室効果ガスを排出できる可能性が示唆されている。これが実現すれば上空大気中の温室効果ガス量を選択的に直接制御しうる手法として非常に有用な手法となる。

この実現のためには極域における発散型磁場を利用し、イオン加熱と磁気ノズル加速を効果的に実施することが有用である。この技術は、宇宙推進技術への応用を目指したイオン加熱と磁気ノズル加速の研究として、すでに基盤技術を有しており、この技術を応用することで、効果的な温室効果ガス排出手法を見出すことが期待できる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、発散型磁気ノズル中におけるプラズマ加速を用いた温暖化ガスの地球外排出手法の研究基盤を確立することである。そのため地球磁場を模擬した磁気ノズル中におけるイオン加速と磁場からの離脱（ディタッチメント）効果を実験的に明らかにすることを目指し実験研究を実施した。

3. 研究の方法

本研究では、主として HITOP 装置を利用し、実験研究を行った。HITOP 装置本体は全長 3.3m、内直径 0.8m の円筒形真空容器で、周囲に 11 個の大型磁場コイルが設置され、最大 1kG の一様磁場が生成できる。また、各コイルに流す電流を独立に制御できるため、磁気ノズル形状を容易に形成することができる。

プラズマ源として MPD (Magneto-Plasma-Arcjet) 装置を備え、密度 $10^{17} - 10^{21} \text{m}^{-3}$ の広範囲な密度条件下での準定常動作が可能である。またこの MPD 装置には外部磁場用の小型

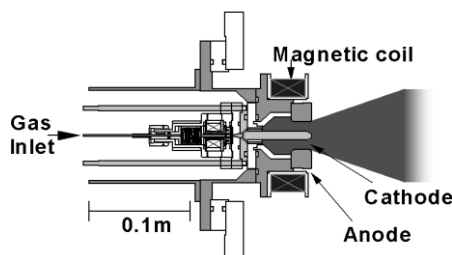


図 1. 外部磁場重畳型 MPD アークジェット

コイルが設置され、最大強度 0.4T の発散型磁場を印加することが出来る (図 1、2 参照)。放電電流や磁場強度を変化させることで、プラズマ流の密度、温度やマッハ数を制御できる。

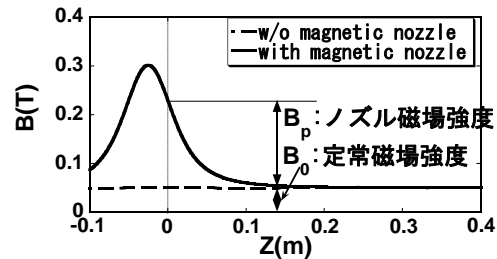


図 2. MPD 出口部小型磁場コイルの磁場重畳で形成される磁場分布。Z=0 は MPD カソードチップ先端。

本研究ではこの MPD 装置の動作ガスとしてヘリウム、アルゴン等希ガスをを用い、高周波を用いたプラズマ生成実験を行い、磁化プラズマ中での波動励起とプラズマ化への検討を行った。さらに、磁気ノズルにおけるイオン加速効果を検証するため、磁気ノズル場へプラズマ流を流入させ、各ガス種における流速やイオンマッハ数、アルヴェンマッハ数などマッハ数変化を観測した。

さらに磁場強度変化から磁力線からの離脱現象について検討を行った。電荷を持った荷電粒子は磁場に巻き付く性質があるため、磁力線に沿った運動は磁気モーメント保存則に従ったエネルギー変換を行い、加速され磁力線方向に運動する。しかし、急激に発散する磁場中では粒子は磁気モーメント保存則に従ったエネルギー変換を行わず、粒子ラーマ半径が磁場の変化の特性長を超えたところで磁場に沿った動きをしなくなる。電子とイオンではこの動きに差が生じ電荷分離による電場が発生する結果粒子が磁力線から離脱できなくなる現象が懸念されている。本研究ではこの効果を明らかにするために、プラズマ流中の磁場強度分布を計測し、磁場形状を変化させながら移動する現象について実験的に検証を行った。

4. 研究成果

(1) MPD プラズマ生成と磁気ノズル重畳効果

HITOP 装置に設置された MPD プラズマ源に動作ガスとして、ヘリウム、ネオン、アルゴン、クリプトンの各希ガスを導入し、プラズマ流の生成を行った。各ガス種に対し生成されたプラズマ流の密度と流速を計測した結果を図 3 に示す。

放電電流の増加と共に密度、流速は増加するが、ヘリウム及びアルゴンはネオン、クリプトンより高密度のプラズマが得られている。また、プラズマ流にはアルヴェン臨界速

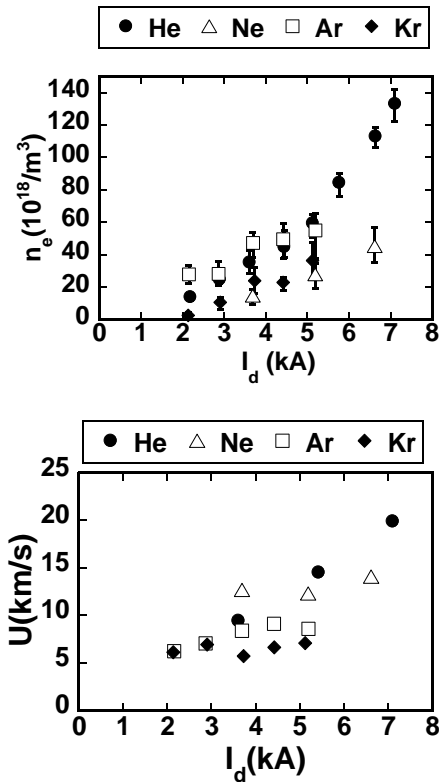


図3. プラズマ密度及び流速の測定結果
測定位置: $Z=1.3\sim 1.8\text{m}$, 作動ガス: He, Ne, Ar, Kr, 背景磁場: $B_0=50\text{mT}$

度が存在し、電離エネルギーと運動エネルギーが一致するところで速度上限が存在することが指摘されており、図3の結果はほぼその速度で上限となり放電電流が増加しても一定となる結果が得られている。

地球外への離脱速度に対応するプラズマ流速に上限があることは問題となりうるが、このMPDに発散型磁場を重畳すると、図4に示すように臨界速度(アルゴンの場合は 8.7 km/s)を越えて流速が増加していることがわかる。

磁場重畳により密度変化は大きくはないが流速とイオン温度、電子温度が増加していることが観測され、これが磁気ノズル磁場中

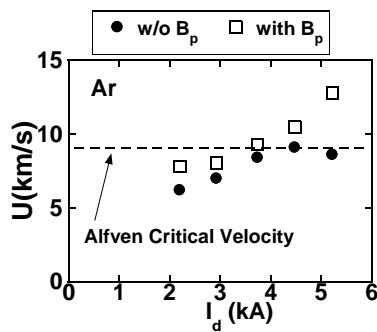


図4. 外部磁場重畳時のプラズマ流速変化。
Ar, $B_0=50\text{mT}$, $B_p=100\text{mT}$

でプラズマ流の加速につながったことが示された。

(2) 発散型磁気ノズルからのプラズマ離脱

磁気ノズルにより加速され他荷電粒子が磁力線から離脱する際に、電子とイオンとの質量差から電荷分離が生じ、イオンを減速する電場が発生し、離脱できない可能性が示唆されている。このプラズマ離脱問題を解決する手法として、アルヴェンマッハ数 MA が1を超える超アルヴェン速プラズマ流を生成し、磁力線をプラズマ流と共に変形させ離脱させる手法が考えられている。

その指標としてアルヴェンマッハ数が1を越えるプラズマ流を生成した。ここでアルヴェンマッハ数 M_A とはイオンマッハ数 M_i と共にプラズマの流れを特徴づける重要なパラメータであり、それぞれ下式で表される。

$$M_i = \frac{U}{C_s} = \frac{U}{\sqrt{(\gamma_i T_i + \gamma_e T)/m_i}} \quad (1)$$

$$M_A = \frac{U}{V_A} = \frac{U}{B/\sqrt{\mu_0 n_i m_i}} \quad (2)$$

U はプラズマ流速、 C_s はイオン音速、 V_A はアルヴェン速度を表している。ここで、(2)式は(3)式のように変形でき、 M_A はプラズマ流のエネルギー (E) と磁気エネルギー (W_m) の比を表していると考えることが出来る。

$$M_A = \sqrt{\frac{n_i m_i U^2 / 2}{B^2 / 2\mu_0}} = \sqrt{\frac{E}{W_m}} \quad (3)$$

M_A が1を超える条件下では、プラズマの流れのエネルギーが磁気エネルギーよりも大きくなることを示す。すなわち、 M_A が1を超えるような超アルヴェン速プラズマ流を生成すれば、プラズマ流が磁力線を歪ませて移動し、プラズマ流が磁力線を引き伸ばし離脱できる。また、その際には大きな磁場変動が観測されると予測される。

この効果を明らかにするため、HITOP装置の下流部に発散型磁場を形成し、MPDプラズマを用いて磁場変動量とマッハ数変化を観測した。

その際の磁場分布と、観測されたアルヴェンマッハ数 M_A 及び磁場変動量を図5, 6にそれぞれ示す。MPDプラズマ生成部に図2に示す重畳磁場を印加しなかった場合、 M_A は1より小さく、重畳磁場印加時では、下流において M_A が上昇し、最大で1.6程度になっており、超アルヴェン速プラズマ流の生成が確認できた。磁場を重畳することによって M_A が上昇したのは、重畳磁場(磁気ノズル)によってプラズマ流の加速と加熱が起きたからだと考えられる。

この2つの条件 (M_A が1より小さい場合と

大きい場合)における軸方向の変動磁場 ΔB の測定結果(図6)を見ると、重畳磁場無しの実験条件では変動磁場が常に負方向なのに対して、重畳磁場有りの実験条件においては $Z=1.7\text{m}$ で負方向から正方向に変化することが観測できた。この際、 $\Delta B > 0$ (変動磁場が正方向)は流れの方向と同じ方向の変動磁場を、 $\Delta B < 0$ (変動磁場が負方向)は流れの方向に対して逆向きの変動磁場を表す。変動磁場が負方向となるのは電子とイオンのラーマ運動によるプラズマの反磁性効果が原因であると考えられ、この現象は通常のプラズマ流で生じる現象である。それに対して変動磁場が正方向となった理由は、プラズマ流が磁力線を引き伸ばすことにより磁場分布が変化し、正方向の変動磁場が観測されたと考えられる。プラズマ流によって磁力線が引き伸ばされたということはすなわち、電子、イオンが共に磁力線から離脱することを示しており、超アルヴェン速プラズマ流条件下ではプラズマ離脱が起こることが初めて実証された。

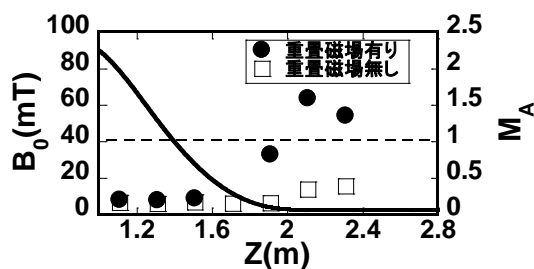


図5. アルヴェンマッハ数 M_A の測定結果

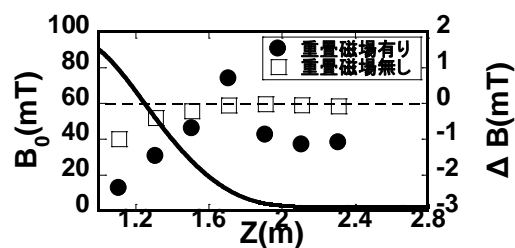


図6. 軸方向変動磁場 ΔB の測定結果

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5件)

① N. Tanaka, T. Matsuno, T. Funaoui, A. Ando, Y. Tauchi, H. Nakano, K. Tsumori, Y. Takeiri, “Laser measurement of H^+ ions in a field-effect-transistor based radio frequency ion source” Review of Scientific Instruments **83**

02A731/1-3 (2012) (査読有) DOI: 10.1063/1.3680549

② A. Ando, R. Aramaki, N. Takahashi, S. Jo, and N. Tanaka, “Measurement of a super-Alfvénic plasma flow passing through a diverging magnetic field” Proc. of the 8th International Conference on Open Magnetic System for Plasma Confinement, **1** 20-20 (2010) (査読有)

③ A. Ando, A. Komuro, T. Matsuno, K. Tsumori, and Y. Takeiri “Radio frequency ion source operated with field effect transistor based radio frequency system” Review of Scientific Instruments **81** 02B107/1-3 (2010) (査読有) DOI: 10.1063/1.3279306

④ Akira ANDO, Atsushi KOMURO and Chan Ho MOON, “RF plasma Production by Using FET Inverter Power Supply” Frontier of Applied Plasma Technology, **2** 67-70 (2009) (査読有)

⑤ R. Aramaki, S. Jo, N. Takahashi and A. Ando, “Production of a super-Alfvénic plasma flow in a diverging magnetic nozzle” Proc. of 7th General Scientific Assembly of the Asia Plasma and Fusion Association (APFA2009) and Asia-Pacific Plasma Theory Conference (APPTC2009) **1** 103-103 (2009) (査読無)

[学会発表] (計13件)

① 大川耕平, 高橋直大, 橋間裕子, 渡部 博, 伊澤裕紀, 田中のぞみ, 安藤 晃, “飛行時間法による高速プラズマ流の流速測定”, 日本物理学会第67回年次大会, 兵庫県西宮市(関西学院大学西宮上ヶ原キャンパス), 2012年3月25日

② 橋間裕子, 高橋直大, 大川耕平, 渡部 博, 伊澤裕紀, 安藤 晃, “超音速プラズマ流におけるイオン比熱比の推定”, 日本天文学会2012年春季年会, 龍谷大学(京都府京都市), 2012年3月19日

③ N. Tanaka, T. Matsuno, T. Funaoui, A. Ando, Y. Tauchi, H. Nakano, K. Tsumori, Y. Takeiri, “Production and Measurement of Negative Hydrogen Ions in a FET based RF Ion Source”, 21st International Toki Conference, Toki, Gifu, Japan, November 28, 2011

④ 高橋直大, 橋間裕子, 大川耕平, 渡部 博, 伊澤裕紀, 田中のぞみ, 安藤 晃, “磁場重畳

型MPDアークジェットに対する磁気ノズル形状効果”, Plasma Conference 2011, 石川音楽堂(石川県金沢市), 2011年11月23日

⑤ A. Ando, “Ion acceleration for space propulsion”, 14th International Conference on Ion Sources, Gairdini-Naxos, Italy, September 16, 2011 (招待講演)

⑥ 荒巻良介, 高橋直大, 橋間裕子, 丸子祥弘, 安藤 晃, 田中のぞみ, “超アルヴェン速プラズマ流とプラズマ脱離現象”, プラズマ・核融合学会第27回年会, 北海道大学(北海道札幌市), 2010年12月1日

⑦ 安藤 晃, 荒巻良介, 高橋直大, 田中のぞみ, “磁気ノズル加速におけるアルヴェン臨界速度”, 日本物理学会第66回年次大会, 大阪府立大学(大阪府堺市), 2010年9月25日

⑧ Naohiro TAKAHASHI, Ryosuke ARAMAKI, and Akira ANDO, “Plasma acceleration in a magnetic nozzle and measurement of Alfvén critical velocity”, 電気関係学会東北支部連合大会, 八戸工業大学(青森県八戸市), 2010年8月27日

⑨ 條 真悟, 荒巻良介, 高橋直大, 安藤 晃, “各希ガス種を用いた高速プラズマ流生成とパラメータ計測”, プラズマ・核融合学会第26回年会, 京都市国際交流会館(京都府京都市), 2009年12月2日

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

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・教授

研究者番号：90182998

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：