

研究種目：若手研究 (A)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19686050
 研究課題名 (和文) MHD加速部付き誘導結合型高周波プラズマ風洞の原理実証実験
 と性能予測解析
 研究課題名 (英文) Experimental Demonstration of Inductively Coupled Plasma Tunnel with
 MHD Accelerator and Numerical Prediction of Its Performance
 研究代表者
 藤野 貴康 (FUJINO TAKAYASU)
 筑波大学・大学院システム情報工学研究科・講師
 研究者番号：80375427

研究成果の概要 (和文)：誘導結合型高周波プラズマ風洞内のプラズマ特性を解析するための電磁流体コードを開発した。その解析コードを用いて、高周波電力の投入電力や周波数がプラズマ特性に与える影響を明らかにした。次に、円筒形 MHD 加速機の 3 次元電磁流体解析を実施し、MHD 相互作用による流れの加速を確認するとともに、その相互作用に起因した流れの 3 次元構造を明らかにした。MHD 加速機を持つ小型誘導結合型高周波プラズマ噴流装置を製作し、外部磁場を印加しない条件下で装置を試運転し、超音速プラズマ流れをこの装置で生成できることを確認した。

研究成果の概要 (英文)：A computational magnetohydrodynamic (MHD) code for analyzing plasma characteristics in inductively coupled high frequency plasma tunnels has been developed in this study. Influences of input power and frequency of high-frequency power source on the characteristics of inductively coupled plasma have been clearly understood from numerical simulations using the computational code. Three-dimensional numerical simulations of a cylindrical-shaped MHD accelerator have been carried out, and the numerical simulations have revealed that the MHD interaction induces three-dimensional flow structures as well as accelerates plasma flow. Test runs of a small-scale inductively coupled plasma jet facility fabricated in the present study have been conducted under the condition without applying the magnetic field, and then it has been confirmed from the test runs that the facility can produce super-sonic plasma flow.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	9,500,000	2,850,000	12,350,000
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	12,000,000	3,600,000	15,600,000

研究分野：プラズマ工学，電磁流体力学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：誘導結合型プラズマ，電磁流体加速機，高エンタルピー風洞，

1. 研究開始当初の背景

近年、アークプラズマ風洞に変わる高エンタルピー風洞として、誘導結合型高周波プラズマ風洞の研究・開発が国内外で進められている。誘導結合型高周波プラズマ風洞は、高周波電力による無電極プラズマ生成方式であるため、アークプラズマ風洞装置で問題となる電極のスパッタリング現象等に起因した不純物混入の問題を回避できる。また、アーク風洞で、二酸化炭素やメタンなどの炭素を含む気体を気流に用いる場合、電極に炭素が付着し、電極間の絶縁破壊、ひいては装置の破壊に至ってしまうが、誘導結合型高周波プラズマ風洞は無電極プラズマ生成方式であるため、このような問題も回避でき、火星等の他の惑星突入シミュレータとしても利用可能である。

一方で、誘導結合型高周波プラズマ風洞は、そのプラズマ生成方式に起因して、アークプラズマ風洞に比べプレナム圧を高めることが難しく、アークプラズマ風洞に比べると気流のエントルピーは低く抑えられてしまう。

このような背景の下、研究代表者は、誘導結合型高周波プラズマ風洞の高エンタルピー化のために、誘導結合型高周波プラズマ風洞に MHD（電磁流体）加速部を組み合わせることを提案している。

2. 研究の目的

本研究は、MHD 加速部付き誘導結合型高周波プラズマ風洞を開発するための第一段階とし、まず一つ目の目的として、(1) 高エンタルピー誘導結合型高周波プラズマの電磁流体解析を行い、高周波電力の印加電力や周波数などの運転条件がプラズマに及ぼす影響を解明する。

誘導結合型高周波プラズマ風洞のプラズマ生成部の流路形状は、一般的に円筒形である。それに続く MHD 加速部の流路形状も、形状の不連続性に起因した流れの不均一性を極力回避するためには、円筒形であることが望ましい。一方で、円筒形 MHD 加速機を対象とした多次元解析はこれまで実施されたことはなく、円筒形 MHD 加速機内の電磁流体挙動は理解されていない。そこで、本研究の二つ目の目的として、(2) 円筒形 MHD 加速機の 3次元電磁流体解析を実施し、MHD 加速機による気流の高エンタルピー化を数値解析的に実証するとともに、円筒形 MHD 加速機内の 3次元電磁流体挙動を明確にする。本研究の三つ目の目的は、(3) 小型の実験装置を製作し、MHD 加速部付き誘導結

合型高周波プラズマ風洞の原理実証実験を行うことである。

3. 研究の方法

(1) 幅広い温度範囲・圧力範囲を扱える誘導結合型高周波プラズマ解析コードを開発し、その解析コードを用いて誘導結合型高周波プラズマの数値解析を実施する。

(2) 円筒形 MHD 加速機の 3次元電磁流体数値解析コードを開発し、内部の電磁流体挙動を数値解析によって調べる。

(3) 小型の MHD 加速部付き誘導結合型高周波プラズマ噴流装置を製作し、実験的研究を行う。

4. 研究成果

(1) 高エンタルピー誘導結合型高周波プラズマの電磁流体解析

本研究では、地球大気や火星大気への突入シミュレータとして期待されている高エンタルピー誘導結合型高周波プラズマ風洞を研究対象としている。この風洞のプラズマ生成部の数値解析を行うためには、多化学種からなる弱電離プラズマのエントルピーや密度などの熱力学的特性や熱伝導、粘性係数、電気伝導率などの輸送特性に関する精度の高いデータが、幅広い温度・圧力条件に対して必要となる。そこで、まず、研究代表者は、幅広い温度・圧力範囲にわたってこれらの熱力学・輸送特性データを取得することが可能な計算コードを開発した。図 1 にその計算コードで得られた火星大気の主成分である CO₂ 気体の平衡組成と温度の関係を示す。また図 2 に CO₂ 気体の熱伝導率と温度の関係を示す。本計算コードの信頼性の検証は、他の研究者の計算結果との比較により行った。温度 3 万度程度までは、いずれの圧力においても他の研究者によって得られた信頼性の高い計算結果とほぼ同じ結果が得られた。

ここで開発した熱力学特性・輸送特性計算コードは、統計熱力学および Chapman-Enskog 法に基づいたものであり、本研究で対象とする窒素、酸素、炭素などの原子・分子（荷電粒子含む）のみならず、産業応用分野で利用される様々な作動ガスを対象とした熱プラズマ解析にも幅広く応用できる。実際に、研究代表者は、ここで開発した計算コードを大電力遮断機内の SF₆ アークプラズマの解析にも利用している。

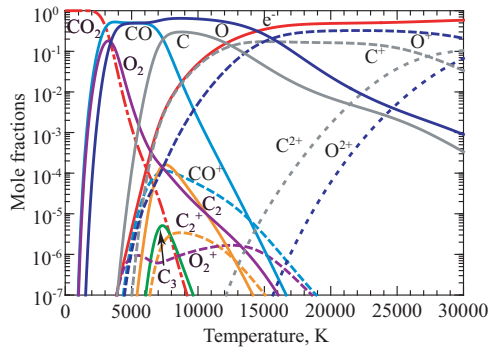


図1 1 atmにおけるCO₂気体の平衡化学組成

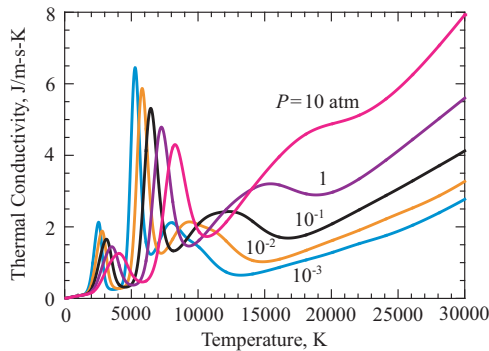


図2 種々の圧力に対するCO₂気体の熱伝導率

上記の熱力学特性・輸送特性計算コードを研究代表者が開発した2次元電磁流体解析コードに組み込むことで、誘導結合型高周波プラズマ生成部の電磁流体解析を実施した。ここでは、Von Karman Instituteにある高エンタルピー惑星突入シミュレータ用誘導結合型高周波プラズマ風洞を対象とした。作動気体は、火星大気突入シミュレータとしての運転を想定し、火星大気の主成分であるCO₂とした。まず熱化学平衡を仮定した誘導結合型CO₂プラズマに対して、コイルへの投入電力やその周波数、背圧といった作動パラメータがプラズマに及ぼす影響を調べた。

解析結果から、高エンタルピー風洞のプラズマ生成部で誘導結合型高周波プラズマを利用するような状況では、図3に示すように高周波電磁界の強い領域でプラズマの温度が高くなるのではなく、対流効果によって中心部分に温度の高い領域が発生することがわかった。また、投入電力を増すと温度は全体的に上昇し、図4に示すように出口近傍の化学種分布も投入電力に大きく左右されることがわかった。さらに、電源周波数を高くすると、表皮効果の影響を強めるため、対称軸付近の温度は減少すること、また背圧値は温度分布に大きな影響を与えないが、化学組成には大きな差を生み出すことがわかった。

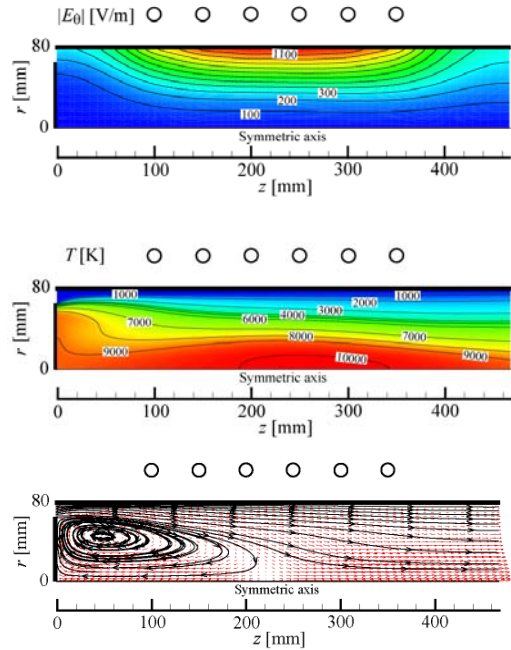
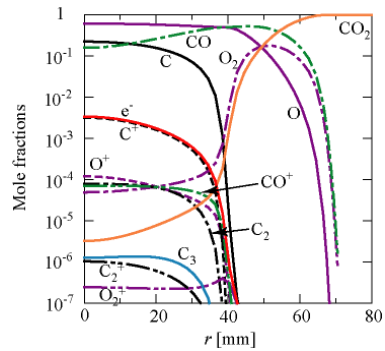
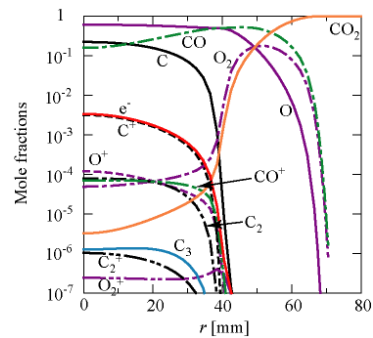


図3 高周波電力100 kW、励起周波数450 kHz、流量8 g/s、背圧20 kPaにおける電界分布(上図)、温度分布(中図)、及び流れの様子(下図)



(a) 投入電力 40 kW



(b) 投入電力 160 kW

図4 (a)投入電力40 kW、(b)投入電力160 kWにおける流路出口付近の化学種組成(高周波電力周波数450 kHz、流量8g/s、背圧20 kPa)

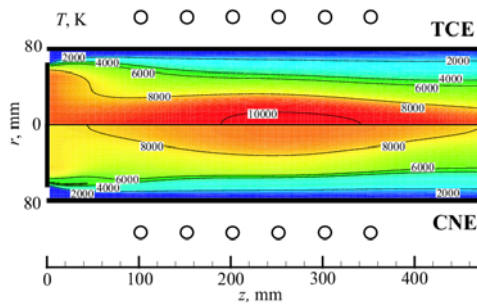


図5 温度分布に及ぼす化学非平衡性の影響 (上図：化学平衡モデル(TCE)，下図：化学非平衡モデル(CNE)，いずれの場合でも，高周波電力 100 kW，励起周波数 450 kHz，流量 8 g/s，背圧 20 kPa)

次に有限化学反応速度モデルを用いて，化学非平衡性の影響を調べた．その結果，流れが速い対称軸近傍で化学非平衡性が最も強く現れることがわかった．また，図5に示すように，対称軸近傍の温度は化学的な非平衡性の影響により，化学平衡を仮定した場合に比べて大きく低下することがわかった．さらに，投入電力の増加，背圧の低下に対して，化学非平衡性の影響が強まることも本解析から明確に示された．

(2) 3次元解析による円筒形MHD加速機内の電磁流体挙動の解明

図6に本解析で対象とした連続電極MHD加速機の流路形状を示す．円筒形流路を持ち，電極構成はファラデー型連続電極である．なお，以下で示す解析結果は，誘導結合型プラズマ生成部2次元解析とMHD加速部の3次元解析を結合したものではない．現在までのところ，誘導結合型高周波プラズマ生成部と円筒形MHD加速部を結合して解析を行うと数値計算が不安定になり，解を得ることができていない．その原因の一つとして，誘導結合型高周波プラズマ生成部のプラズマ条件にみあったMHD加速機の電極構成になっていないことが考えられるので，今後，電極配置の検討（ファラデー分割電極，ホール型分割電極）を行う予定である．以上の理由のもと，以下で示す解析では，米国NASAのMAPXプロジェクトで開発された矩形MHD加速機的设计運転条件を参考にして，MHD加速機入口条件を与えた．印加磁束密度は2

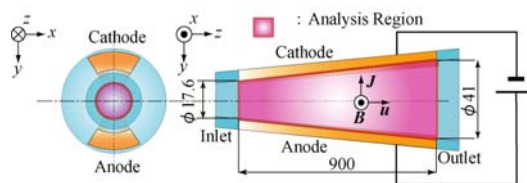
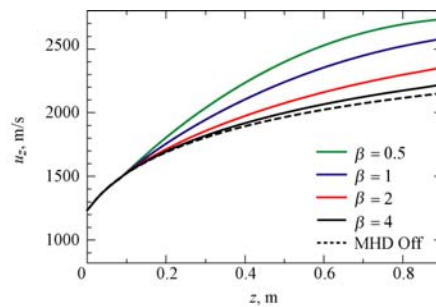
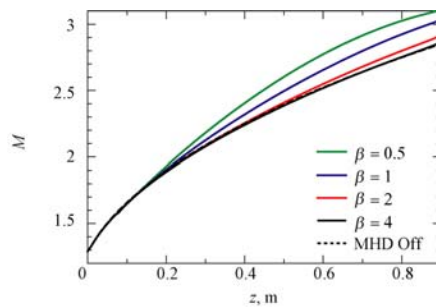


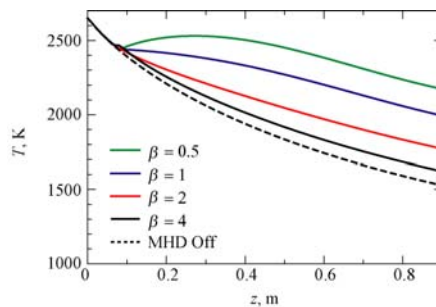
図6 解析対象とした円筒形連続電極ファラデー型MHD加速部の流路形状(単位, mm)



(a)



(b)



(c)

図7 電極間電圧 200V における MHD 加速部内の (a)軸方向流速，(b)マッハ数，(c)温度の中心軸に沿った一次元分布

Tとし，作動気体は N_2/O_2-K (カリウム添加)，MHD加速部の入口マッハ数 1.3，入口圧力 3.1 atm，入口温度 2650 Kに設定した．

図7に電極間電圧 200 V での (a)軸方向流速，(b)マッハ数，(c)温度の中心軸に沿った一次元分布を示す．また，これらの図にはMHD加速を行わない場合のそれぞれの分布も併せて示してある．図中の β はプラズマのホールパラメータを意味しており，この解析では， β 値をパラメトリックに変化させ，その影響を調べた．図7からわかるように，MHD加速部を設けることで流れの速度・マッハ数は増加している．しかし，流路内で発生するジュール加熱に起因して温度は増加してしまう．そのため，MHD加速で速度を増加させても単調にはマッハ数の増加には繋がらない．すなわち，MHD加速環境下では高速化と高マッハ数化は必ずしも同時に

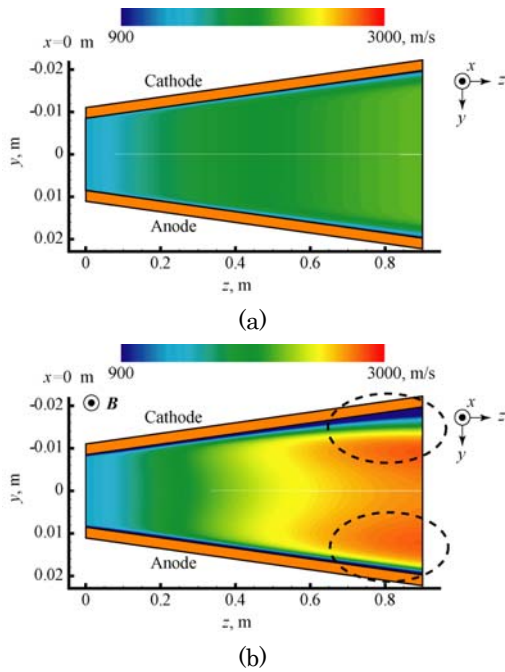


図8 電極間電圧 200 V における磁場に垂直な断面 (y - z 平面, $x=0$) での z 方向流速 2 次元分布 ((a)MHD 加速なし, (b)MHD 加速あり ($\beta=0.5$))

実現できるとは限らない。

今回の解析では、連続電極を採用したが、分割電極を採用すれば、流れ方向に電気的負荷条件を細かく制御でき、ジュール加熱を抑えることが可能になる。従って、分割電極を採用すれば、連続電極よりも高マッハ数での運転が可能になると推測する。それ故、電極配置に関する検討を今後行う予定である。

連続電極ファラデー型 MHD 加速機の場合、プラズマのホールパラメータが高いほど流体の加速が難しくなることが図 7 からわかる。このことから、連続電極ファラデー型 MHD 加速機では、ホールパラメータが高くなりやすい低圧かつ高磁場での運転は好ましくないと考える。

図 8 に MHD 加速を行った場合と行わない場合での磁場に垂直な断面 (y - z 断面, $x=0$) での流速 2 次元分布の比較を示す。また図 9 に流路出口付近の円形断面での流速ベクトル及び y 方向速度分布を示す。なお、図 8、図 9 の MHD 加速を行ったときの結果はホールパラメータの値を 0.5 に設定したときに得られたものである。これらの図からわかるように、MHD 加速を行うと、流れは円形断面において周方向の一様性を失い、また磁場に垂直な断面では壁面付近の境界層が y 方向に非対称になる。図は省略するが、これらの流体構造は、軸方向に誘起されるホール電流の影響及び円形断面でのファラデー電流の不均一性に起因するものである。周方向の流体の不均一性は、MHD 相互作用が強いほど顕著になると推測される。それ故、MHD 加速部

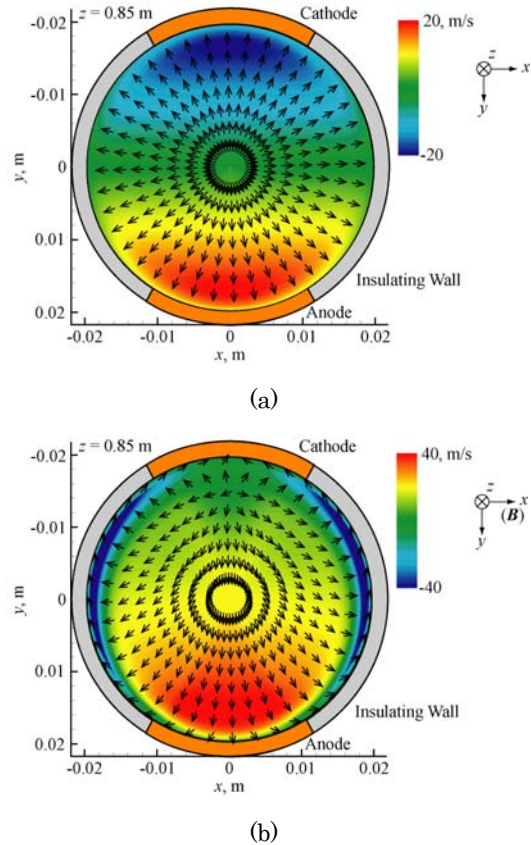


図9 電極間電圧 200 V における流路出口付近円形断面 (x - y 平面) での流速ベクトルおよび y 方向速度分布 ((a)MHD 加速なし, (b)MHD 加速あり ($\beta=0.5$))

から流出する気流に対して周方向の一様性を強く要求するような場合には、過度な MHD 相互作用は避ける必要がある。

(3) MHD 加速部付き小型誘導結合型高周波プラズマ噴流実験の現状報告

図 10 に今回新たに製作した MHD 加速部付き誘導結合型高周波プラズマ噴流装置の流路構成写真を示す。この写真には電源系統の設備が含まれていないが、貯気槽部と MHD 加速部の間の石英管部に誘導コイルを設置し、プラズマ生成を行う。本研究で使用する高周波電源は最大投入電力 1 kW、励起周



図 10 MHD 加速部付き誘導結合型高周波プラズマ噴流装置の流路構成写真

波数 13.56 MHz であり、MHD 加速部に用いる直流電源は最大投入電力 1.5 kW である。なお写真に示された電磁石は、MHD 加速流路内に最大 1.3 T の磁場を印加できる。

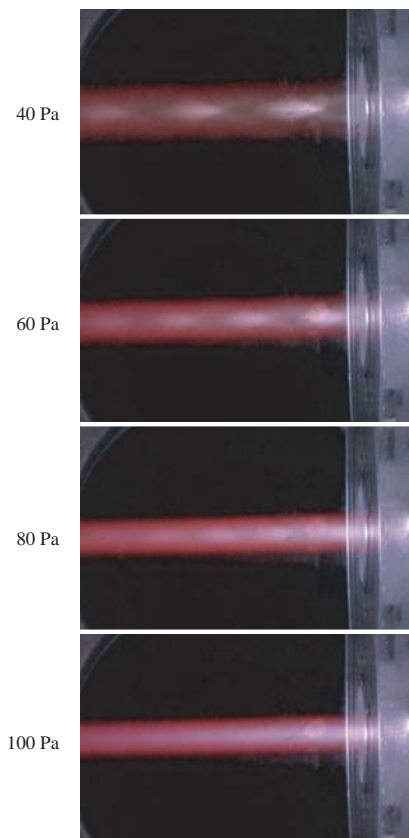


図 11 MHD 加速部付き誘導結合型高周波プラズマ噴流装置の流路構成写真

当初の予定よりも実験装置の製作に多くの時間を要してしまい、現段階では、磁場を印加しない条件下で誘導結合型高周波プラズマ噴流装置を試験運転するに留まっている。図 11 にその試験運転で得られたプラズマ噴流写真を示す。このときの作動気体は Ar であり、投入高周波電力は 200 W、周波数は 13.56 MHz である。なお、図中の圧力の値は排気タンクの圧力（背圧）を示す。この図から、背圧の低い条件下で、超音速流れが不足膨張状態にあるときにみられる典型的な流れの構造が確認できる。すなわち、本装置によって MHD 加速機実験で要求される超音速流れを生成できることが確認できた。しかしながら、磁場を印加する段階で、構造的な問題により小型排気チャンバー及び MHD 加速機が破損してしまった。現在、再設計過程にあり、MHD 加速機の運転は今後の課題とさせて頂く。

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 1 件)

- ①松本裕介, 藤野貴康, 石川本雄: 「超音速領域に誘導コイルを持つ小型非平衡高周波プラズマ風洞の二次元数値解析」, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 56, No. 650, pp. 116-122, 2008. (査読付き)

[学会発表] (計 6 件)

- ① T. Fujino and M. Ishikawa: “Numerical Simulation of MHD Flow Control in Mars Entry Flights,” 17th International Conference on MHD Energy Conversion, Kanagawa, Japan, September 14, 2009, 3-1(CD-ROM).
- ② N. Iozaki, T. Fujino and M. Ishikawa: “Magnetohydrodynamic Simulation of Inductively Coupled CO₂ Plasma,” 40th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, San Antonio, U.S.A., June 22, 2009, AIAA-2009-3737 (CD-ROM).
- ③ S. Hirayama, T. Fujino, M. Ishikawa: “Three Dimensional MHD Simulation of SF₆ Arc Plasma under Externally Applied Magnetic Field,” 電気学会放電・静止器・開閉保護合同研究会, 2009年6月23日, 名古屋, ED-09-65 SA-09-52 SP-09-21 (pp. 97-101).
- ④ 磯崎名朗, 吉野智之, 藤野貴康, 石川本雄: 「誘導結合型高周波CO₂プラズマの電磁流体シミュレーション」 第52回宇宙科学技術連合講演会, 2008年11月7日, 神戸, 3J06 (pp. 2319-2324, CD-ROM).
- ⑤ Y. Matsumoto, T. Yoshino, T. Fujino and M. Ishikawa: “Numerical Analysis of MHD Flow Control under Ground Experimental Condition,” 39th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, Seattle, U.S.A., June 25, 2008, AIAA-2008-4219 (CD-ROM).
- ⑥ 磯崎名朗, 吉野智之, 藤野貴康, 石川本雄: 「高次近似輸送係数モデルを用いた誘導結合型高周波プラズマの電磁流体解析」 電気学会新エネルギー・環境研究会, 2008年9月30日, 長岡, FTE-08-15 (pp. 23-28).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤野貴康 (TAKAYASU FUJINO)

筑波大学・大学院システム情報工学研究科・講師
研究者番号: 80375427