

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25年 5月30日現在

機関番号：15501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22760624

研究課題名（和文） 電磁力を用いた革新的エアロキャプチャー技術の数値解析的検討

研究課題名（英文） Numerical Study of an Innovative Aero-capture Technology using Electrodynamic force

研究代表者

葛山 浩 (KATSURAYAMA HIROSHI)

山口大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：80435809

研究成果の概要（和文）：電磁力エアロキャプチャーの実現性を検証するため、粒子計算を行った。その結果、高々度の極超音速希薄再突入流れ中で、十分に大きい抗力増加と熱流束の減少が達成でき、電磁力を用いたブレーキングが十分に可能であることが分かった。この成果を受け、電磁力発生的高度依存性を連続流計算を用いて定量的に調べた。結果として、地球突入の際には、高度82km程度以下で非常に大きな電磁力を得られるが、それより高度が高くなると雪崩電離が起きなくなるため、電磁力が発生できなくなる可能性がある事がわかった。

研究成果の概要（英文）：We performed a particle simulation to investigate the feasibility of the electro-dynamic aero-capture. The results showed that the large electro-dynamic drag increase and heat flux reduction are achievable in hypersonic rarefied reentry flows at high altitudes. Therefore, the electro-dynamic braking is found to be feasible. From this result, we investigated the altitude variations of the electro-dynamic force quantitatively using continuum flow simulations. The results showed that large electro-dynamic force generates at altitudes lower than 82 km in earth entries, but the force will vanish at higher altitudes because of the deactivation of avalanche ionizations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学、航空宇宙工学

キーワード：惑星突入流れ、エアロブレーキング、希薄流、電磁流体力学

1. 研究開始当初の背景

これまで外惑星探査や地球帰還時に宇宙船を軌道投入あるいは大気突入させる際には、化学推進による減速が行われてきたが、

膨大な推進剤が必要なため、別の方式が求められてきた。

その有力な方式として、膜面を展開して抗力を制御するエアロキャプチャー方式があ

るが、クリアすべき工学的な課題も多く、まだ実現していない。そこで、本研究では、全く新しい電磁力を用いた減速方式（電磁力ブレーキング）を提案し、その実現性を調べる。

電磁力ブレーキングの概念図を図1に示す。このシステムでは、機体に磁石かコイルを埋め込み、惑星突入時に機体周りに生じる弱電離プラズマ流に電磁作用を起こす。これにより生じたローレンツ力は、機体の曲率半径を見かけだけ大きくし（つまり離脱衝撃波が機体から遠ざかる）、その反力により機体を減速させる。また、機体の見かけの曲率半径の増加により、高温流れが脇に逸れるため、機体への熱負荷は減少する。

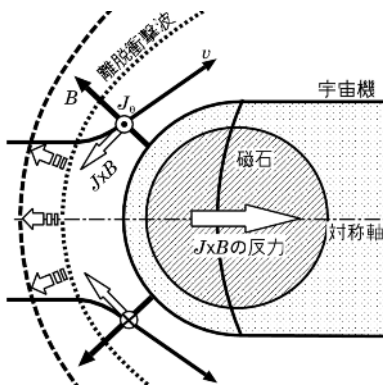


図1 電磁力ブレーキング概念図

2. 研究の目的

(1) 粒子計算を用いて、高々度の極超音速希薄流れ中の電磁力ブレーキングのシミュレーションを行い、発生する電磁力、抗力増大と熱流束低減効果の予想を行う。

(2) 様々な高度でホール効果を考慮した定量的な計算を行い、電磁力発生限界高度を明らかにする。

3. 研究の方法

目的(1)については、ホール効果を見捨てた簡単な電磁力発生モデルと組み合わせた粒子計算(DSMC計算)を高度80kmについて行う。また、連続流計算も合わせて行い、目的(2)で行う連続流計算の妥当性も検証する。

目的(2)については、粒子計算では計算コストがかかるので、高度80kmで連続流計算(CFD)と粒子計算(DSMC)の結果を比較し、連続流計算で生じる誤差を検証した上で、ホール効果を考慮した連続流計算を高度80km-90kmの範囲で行う。

4. 研究成果

(1) 高度80kmでの粒子計算結果

図2に計算格子と印加磁場形状を示す。ハヤブサカプセルと同形状の機体が高度80kmおよび速度12km/sで地球大気突入すると仮定し、磁場はよどみ点で0.1T程度を印加する。

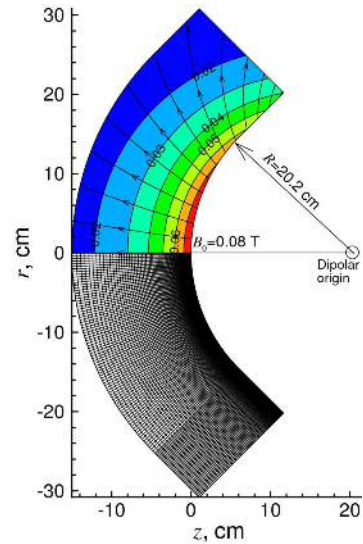


図2 計算格子と印加磁場

図3に磁場を印加する前の、よどみ線状の温度分布を示す。

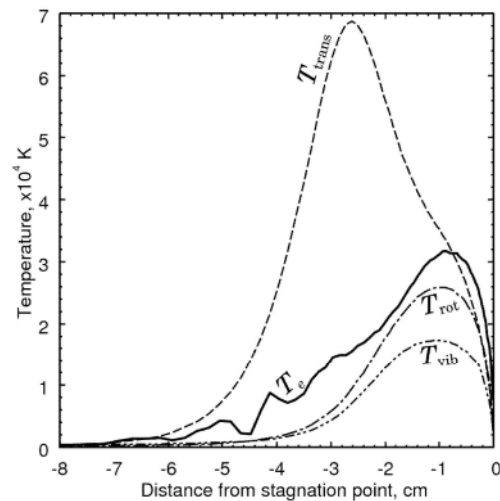


図3 よどみ線上での温度分布

極超音速希薄流れに特徴的な、非常に強い温度非平衡の特性がよく捉えられおり、開発した粒子コードが妥当であることがわかる。

図4に磁場を印加しない場合の、よどみ線上の電気伝導度をDSMCとCFDについて示す。CFDは、DSMCより電子温度を過小評価してす

るため、電気伝導度が小さくなるが、DSMC と

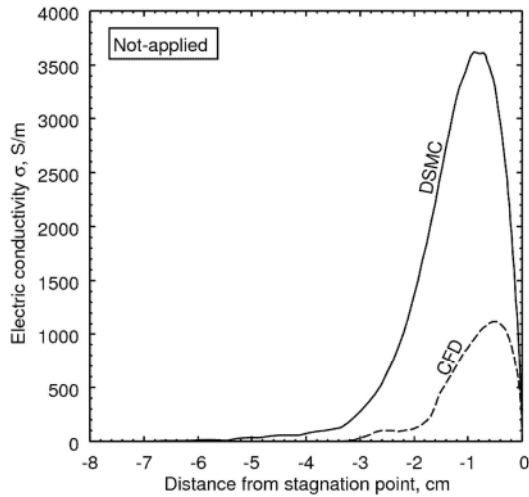


図 4 よどみ線上の電気伝導度分布

CFD の両方で、電気伝導度は 1,000S/m を超えており、発生しうる電磁力と流れの慣性力の比である磁気相互パラメータは $Q=45 \gg 1$ となる。このため、高度 80km および速度 12km/s のハヤブサ突入条件は、非常に大きい電磁力の発生が期待できる流れ場である事がわかった。

この流れ場に磁場を印加した場合の並進温度分布を図 5 に示す。電磁力により、衝撃層が大きく増大し、機体の見かけの曲率半径が増大している様子を捉えられている。

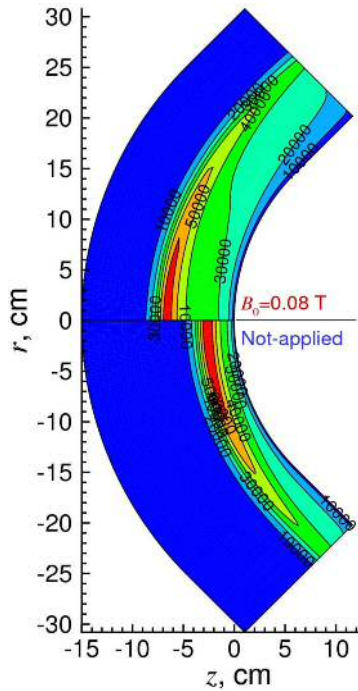


図 5 並進温度分布 (DSMC) (上) 磁場あり (下) 磁場なし

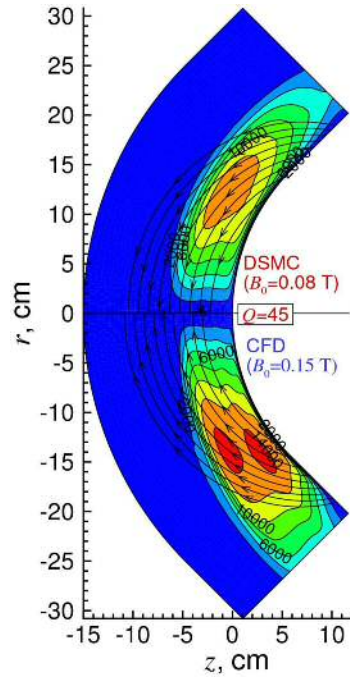


図 6 電磁力の分布 (上) DSMC (下) CFD

図 6 に DSMC と CFD の電磁力の分布を示す。CFD は DSMC より電気伝導度が小さくなるため、0.15 T の磁場を印加し、両者とも $Q=45$ に一致させてあるが、CFD を用いても発生する電磁力の分布に大きな違いはないことがわかる。

最後に、図 7 および図 8 に電磁力による抗力増大効果と熱流束低減効果を示す。電磁力によるブレーキング効果により、全抗力は、20 (DSMC)-40 (CFD) %程度増加し、熱流束も 50%程度減少する事がわかった。

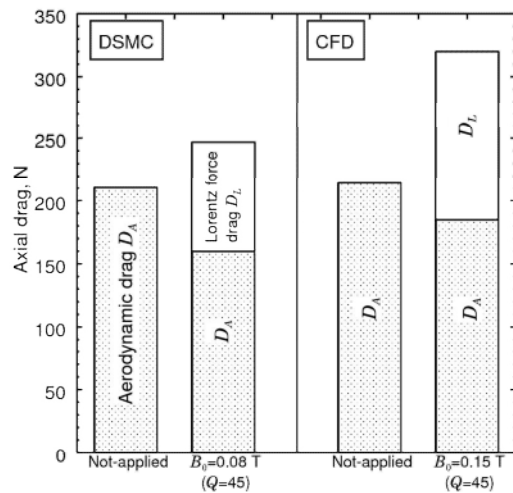


図 7 抗力増大効果

結果として、高度 80km 程度の極超音速希

薄領域においても、十分大きな電磁力の発生

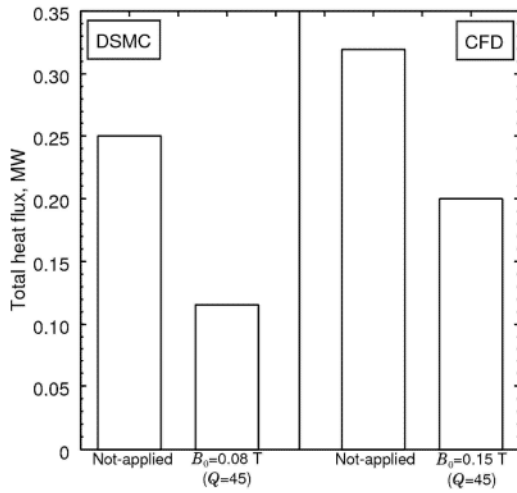


図8 熱流束低減効果

が見込まれ、電磁力ブレーキングが非常に有効である可能性が示唆された。

(2) 電磁力ブレーキングの高度依存性

(1)の結果で、高々度の極超音速希薄領域で十分な電磁力が発生できることがわかったので、電磁力ブレーキングの高度依存性を調べた。この研究では、発生する電磁力を定量的に評価するため、ホール効果を組み込んだ詳細な解析を行った。

なお、ホール効果を組み込んだ粒子計算は計算コストが非常にかかるため、流体計算はDSMCではなく、CFDを用いて行った。(1)の結果により、CFDにより予想される電磁力は、DSMCの予測より大きくなる可能性はあるが、これは今後の課題とする。

図9に用いた計算格子と磁場形状を示す。この計算では、ハヤブサカプセルと同サイズの球体カプセルが速度12km/sで地球に突入すると仮定し、高度80-90kmでの電磁力ブレーキングを調べた。

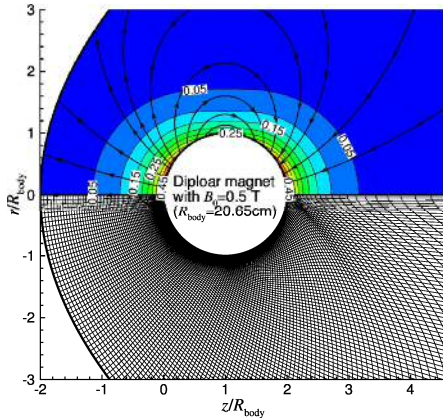


図9 球体カプセル周りの格子と磁場

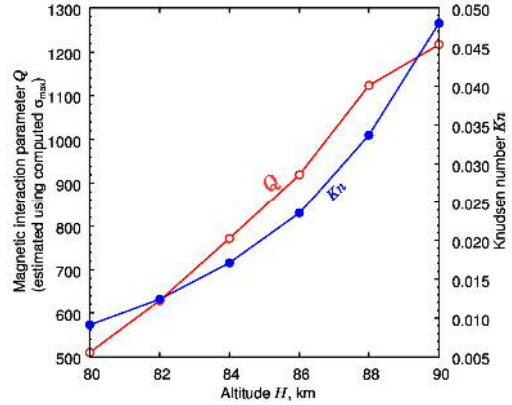


図10 QとKnの高度依存

図10に磁場印加前のQパラメータとクヌーセン数Knの高度依存性を示す。高度の増加と共に電気伝導率は線形に減少するが、密度減少(つまりKn数の増加)による流れの慣性力の減少により、Qパラメータは高度と共に増加する。結果として、高度80-90kmにおいて、Qは常に500以上となり、大きい電磁力発生が期待できる流れ場となっている。

図11-13に高度80-84kmの並進温度分布の変化を示す。

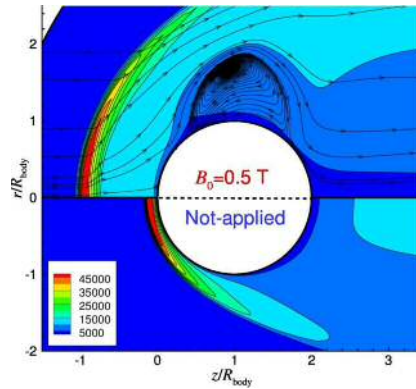


図11 並進温度分布 (高度80km) (上) 磁場あり、(下) 磁場なし

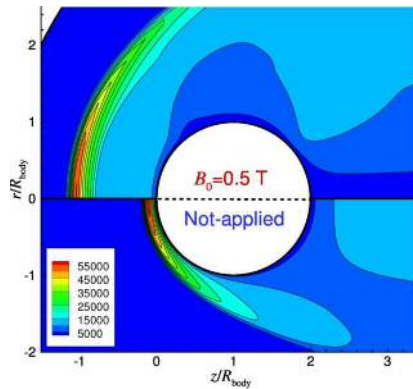


図12 並進温度分布 (高度82km) (上) 磁場

あり、(下) 磁場なし

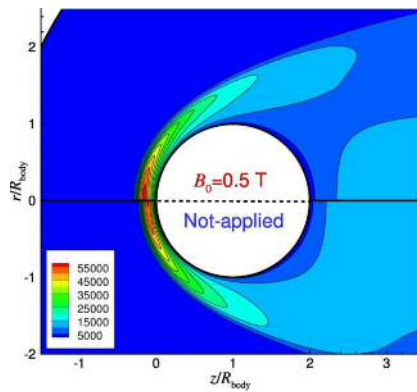


図 13 並進温度分布 (高度 84km) (上) 磁場あり、(下) 磁場なし

高度 82km までは、磁場印加により非常に大きな衝撃層の増大が合われるのに対し、高度 84km では、それがほとんど消滅しているのがわかる。

図 14 に電磁力による抗力 D_L と純粋な空力抵抗 D_A の高度依存性を示す。

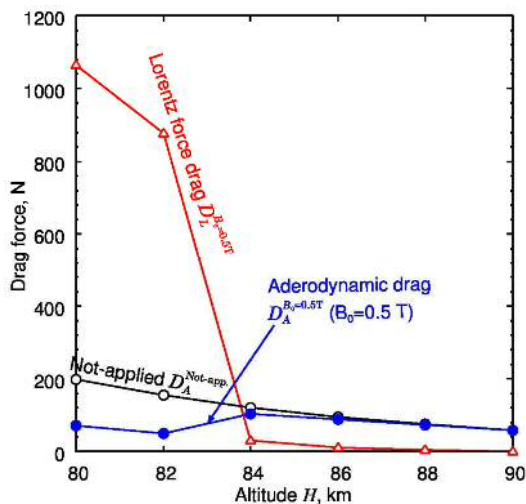


図 14 抗力の高度依存性

高度 82km までは、 D_A の 6 倍程度大きい D_L が生じているのに対し、高度 84km ではそれが急激に消滅しているのがわかる。

高度 82km と 84km での磁場を印加する前の流れ場は、両者ともホールパラメータが、20-80 程度と大きな値を持ち、磁場の異方性により電磁力を発生しづらい流れ場であるが、両者に大きな違いは見当たらない。このため、磁場を印加した後の流れに、大きな違いが生じ、これが高度 84km での急激な電磁力の消滅につながっていると考えられる。その例として、図 15 に高度 82km でのよどみ線状での温度分布を、図 16 に電離度の分布を

示す。

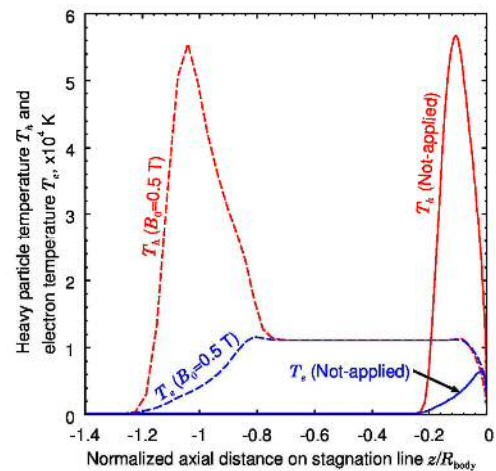


図 15 よどみ線状の温度分布 (高度 82km)

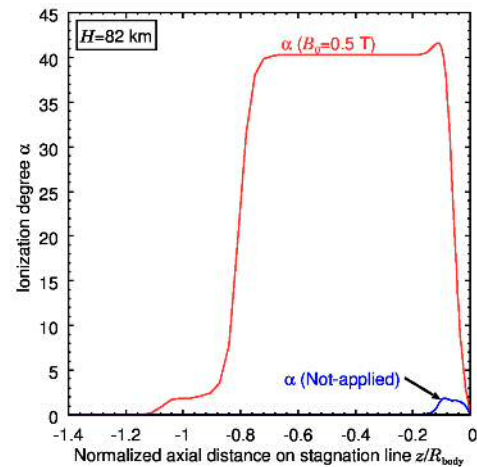


図 15 よどみ線状の電気伝導度分布 (高度 82km)

高度 82km の場合は、電磁力による衝撃層の増大により、電子温度 T_e が、重粒子温度 T_h に近づく平衡領域が増加し、 T_e が 10,000K 程度まで増加する領域が生じる。これにより、雪崩電離が起こり、図 15 に示すように、電離度 α が急激に増加する。この急激な電離促進は、ホール効果を著しく減少させるため、より大きな電磁力が発生する。このため、ますます衝撃層が増大し (つまり平衡領域が拡大する)、再び雪崩電離が起こる領域が広がる。このメカニズムを繰り返すことにより、高度 82km では、大きな電磁力が発生すると考えられる。一方、高度 84km では、図 13 に見られるように若干の衝撃層の増大は見られるものの、 T_e が 10,000K を超えるほど平衡領域が大きくなるため、雪崩電離が生じず、衝撃層中のホール効果が大きいままで、大きい電磁力が発生しないと考えられる。

結果として、高々度の極超音速希薄領域においては、雪崩電離が電磁力ブレーキングを有効にするトリガーとなっており、電磁力が高度によって不連続に変化する可能性があるという非常に重要な事実が初めて明らかになった。

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 5 件)

① H. Katsurayama, and T. Abe, “Thermochemical Nonequilibrium Modeling of a Low-Power Argon Arcjet,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 113, No. 5, pp. 053304-1-18, 2013. DOI: 10.1063/1.4776765 (査読有り)

② M. Kawamura, Y. Nagata, H. Katsurayama, H. Otsu, K. Yamada, and T. Abe, “Magnetoaerodynamic Force on a Magnetized Body in a Partially-Ionized Flow,” *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 50, No. 2, pp. 347-351, 2013. DOI: 10.2514/1.A32279 (査読有り)

③ M. Kawamura, H. Katsurayama, H. Otsu, K. Yamada, and T. Abe, “Magnetic Field Configuration Effect on Aerodynamic Heating of a Magnetized Body,” *Journal of Spacecraft and Rockets*, (査読有り), Vol. 49, No. 2, pp. 207-211, 2012. DOI: 10.2514/1.A32116 (査読有り)

④ H. Katsurayama, and T. Abe, “Numerical Investigation of a Drag Increase Achievable in Electrodynamic Aerobraking of a Reentry Vehicle,” *AIP Conference Proceedings*, (査読有り), Vol. 1501, pp. 1477-1484, 2012. DOI: 10.1063/1.4769713 (査読有り)

⑤ H. Katsurayama, and T. Abe, “Particle Simulation of Electromagnetic Aerobraking in a Hypersonic Rarefied Regime,” *AIP Conference Proceedings*, (査読有り), Vol. 1333, pp. 1301-1306, 2011. DOI: 10.1063/1.3562823

(査読有り)

[学会発表] (計 10 件)

① 葛山浩, 安部隆士, “極超音速希薄遷移流れ中での電磁力エアロブレーキングの粒子計算,” 平成 24 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 1C2-2, 北九州, 2013 年 3 月 13-15 日.

② H. Otsu, H. Katsurayama, D. Konigorski, and T. Abe, “Effect of the Strong Magnetic Field on the Electrodynamic Heat Shield System for Reentry Vehicles,” 43rd AIAA Plasmadynamics and Laser Conference, AIAA Paper 2012-2731, Orleans, Louisiana, USA, June 25-28, 2012.

③ 葛山浩, 安部隆士, “電磁力を用いたエアロブレーキングの粒子シミュレーション,” 相模原, 平成 23 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 3C3-4, 柏, 2012 年 3 月 7-9 日.

④ 葛山浩, 安部隆士, “ハヤブサ形状カプセルの極超音速希薄気体流れ中での電磁力ブレーキングの数値解析,” 平成 23 年宇宙航行の力学シンポジウム論文集, 相模原, 2011 年 12 月 19-20 日.

⑤ H. Katsurayama, T. Abe, and D. Konigorski, “DSMC Simulation of Electrodynamic Aerobraking on a Reentry Capsule in a Hypersonic Rarefied Regime,” 42nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, AIAA Paper 2011-3467, Honolulu, Hawaii, USA, June 27-30, 2011.

⑥ H. Otsu, H. Katsurayama, D. Konigorski, T. Abe, “Impact of the Lift Force by Electrodynamic Flow Control on the Reentry Trajectory,” 42nd AIAA Plasmadynamics and Laser Conference, AIAA Paper 2011-3466, Honolulu, Hawaii, USA, June 27-30, 2011.

⑦ H. Katsurayama, and T. Abe, “Particle Simulation of Electrodynamic Aerobraking on a Reentry Capsule,” 28th International Symposium on Space Technology and Science, ISTS 2011-e-39, Okinawa, Japan, June 5-12, 2011.

⑧ 葛山浩, 安部隆士, “電磁力を用いたエアロブレーキングの DSMC 解析による予備的調査,” 平成 22 年度衝撃波シンポジウム講演論文集, 相模原, 2011 年 3 月 16-18 日. (東日本大震災のため, 講演集のみ発行し, 講演会は中止)

⑨ 葛山浩, 安部隆士, “電磁力を用いた新しいエアロキャプチャーの粒子シミュレーションによる検討,” 第 54 回宇宙科学技術連合講演会論文集, 2G11, 静岡, 2010 年 11 月 17-19 日.

⑩ H. Katsurayama, and T. Abe, “Particle Simulation of Electrodynamic Aerobraking on a Reentry Capsule,” 41st Plasmadynamics and Lasers Conference, AIAA Paper 2010-4491, Chicago, Illinois, USA, June 28-July 1, 2010.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

葛山 浩 (KATSURAYAMA HIROSHI)
山口大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 80435809

(2) 研究分担者

()
研究者番号:

(3) 連携研究者

()
研究者番号: