

平成 21 年 3 月 27 日現在

研究種目：若手研究（B）
研究期間：2007～2008
課題番号：19760571
研究課題名（和文）新再突入技術確立に向けた印加磁場による弱電離プラズマ流制御の
粒子シミュレーション
研究課題名（英文）Particle Simulation of Electromagnetic Flow Control on a New Reentry
Technology
研究代表者
葛山 浩（KATSURAYAMA HIROSHI）
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・プロジェクト研究員
研究者番号：80435809

研究成果の概要：アークジェット風洞を用いた宇宙機再突入時の電磁流れ制御の検証実験を粒子および連続流シミュレーションを用いて検証し、電磁流れ制御の物理メカニズムを完全に解明した。この成果により電磁流れ制御を実際の再突入ヒートシールドとして応用するめどがあった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
19 年度	2,600,000	0	2,600,000
20 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	240,000	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：航空宇宙流体力学

1. 研究開始当初の背景

1960 年代に宇宙機再突入時の新しい熱防御方法として、突入時に機体周りに生じる弱電離プラズマ流を磁場印加により制御するシステムが考案された。このシステムでは、電磁力によって機体の曲率半径を見かけだけ大きくすることで能動的に熱防御を行うため、これまで熱防御に使用されていた断熱材やアブレータなど受動的な熱防御から脱却することができる。

当時は、磁場強度の問題から実現性がないと考えられていたが、最近の超伝導磁石の目覚ましい発達により、このシステムが再び注目を集めている。

2. 研究の目的

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部では、この電磁力を用いた流れ制御の宇宙機熱防御システムへの適用を検証する目的で、希薄なアークジェット風洞を用いた電磁流れ制御実験が行われている。本研究では、その物理メカニズムの解明のため、数値解析による検証を行った。

3. 研究の方法

(1) 希薄なアークジェット風洞中（クヌーセン数 0.05 程度）での電磁力流れ制御の振る舞いをみるため、Direct Simulation Monte-Carlo(DSMC)法とローレンツ力に従って粒子を動かす簡単な方法を組み合わせ

た粒子シミュレーションを行った。またこの際流入条件は、一様流入とし、アーク風洞中の代表的な値を用いた。

(2) 電磁力流れ制御におけるホール効果の役割およびそれに関連した流れの非一様性の効果を明らかにするため、(1)で希薄効果の程度を確認した上で、連続流近似を仮定し **Computational Fluid Dynamics(CFD)** を用いてアークジェット自体も含めたアークジェット風洞全体の詳細なシミュレーションを行った。

4. 研究成果

(1) 粒子シミュレーション

[詳細は雑誌論文①で報告済み]

図1および2に粒子シミュレーションによる希薄効果検証の結果を示す。

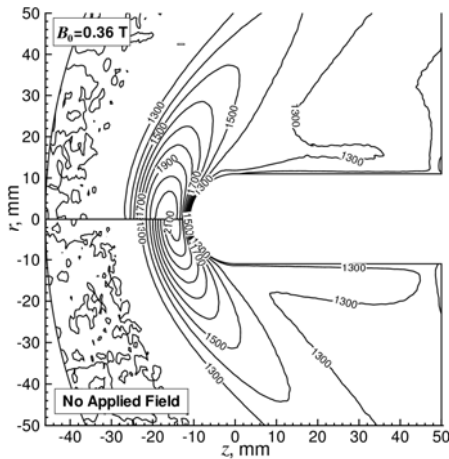


図1 温度等高線の磁場印加の有無による相違

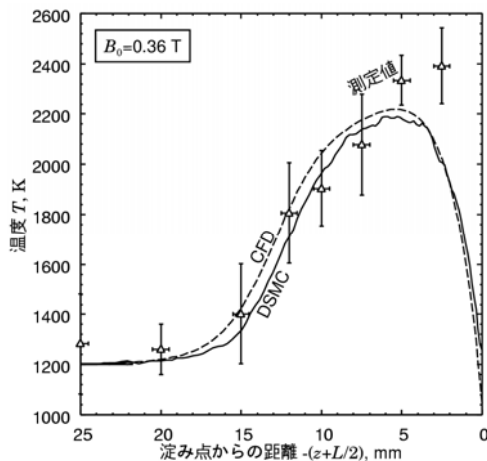


図2 対称軸上の温度分布

図1に示すように、磁場印加によって衝撃波層が前方に押し出されていることがわかる。また、図2に示すように、DSMCとCFDの結果に大きな違いは見られず(流入マッハ数が0.2程度と小さいため)、連続体近似で十分に流れの構造を再現できることがわかつ

た。結果として、この計算が測定値をほぼ再現でき、印加磁場による衝撃波層増大と機体模型にかかる抗力の増加効果の確認を得ることができた。しかし、ローレンツ力の反力による抗力の増加は実験値の3倍程度も大きく見積もられた。

(2) ホール効果と流れの非一様性の影響

[詳細は学会発表②, ④で報告および学術誌に二編を投稿準備中]

実験と計算の抗力増大の差異を検証するため、ホール効果を考慮し、かつアークジェット自体も含めて流れ全体を詳細に再現するCFD解析を行った。

(2-1) 一様流れ(絶縁境界なし)

アークジェット気流中での流れの非一様性を議論する前に、一様気流中での結果を示す。磁場 B およびホールパラメータ C_H 、温度 T 、および周方向電流 J_θ の分布を図3-5に示す。ホール効果を無視した場合は、周方向(θ 方向)起電力 $E_\theta = (\mathbf{v} \times \mathbf{B})_\theta$ に従って J_θ が誘起され ($J_\theta > 20,000 \text{ A/m}^2$)、衝撃波離脱距離が2.5倍になるのに対し、ホール効果を考慮した場合は J_θ は $r-z$ 方向に散逸し、衝撃波離脱距離の増加が消える。結果として、物体に対して十分に大きい径を持つ一様で本来理想的なアークジェット気流は、電磁流れ制御を実験的に調べるには適していないことがわかる。

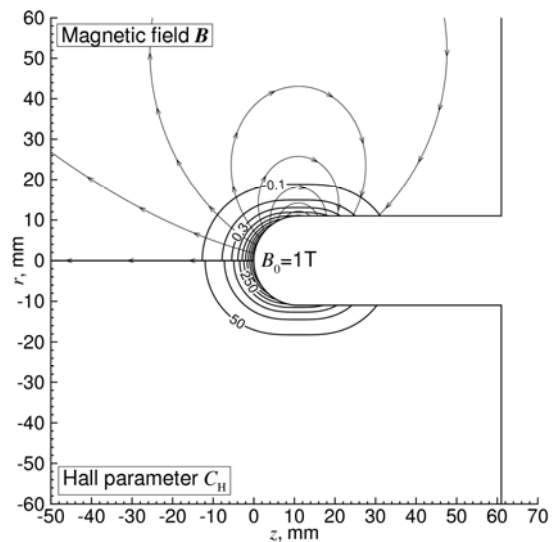


図3 印加磁場とホールパラメータ

(2-2) 人工的な非一様流れ(人工絶縁プルーム境界あり)

一方、模型と同程度の径を持つアークジェットプルームを使った実験では、電磁流れ制

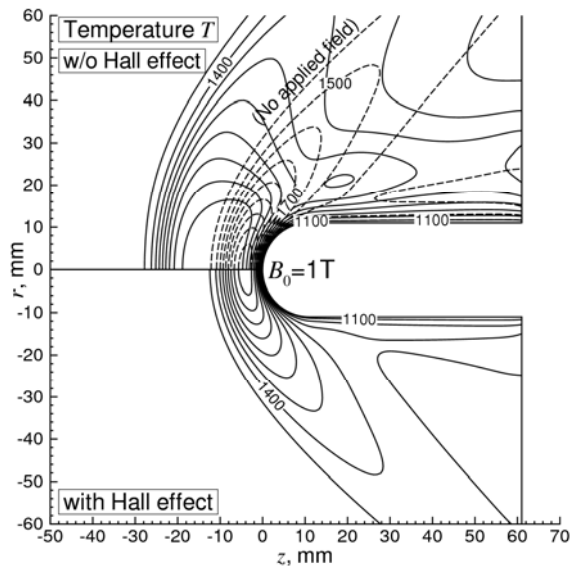


図4 一様流れ場中での温度分布

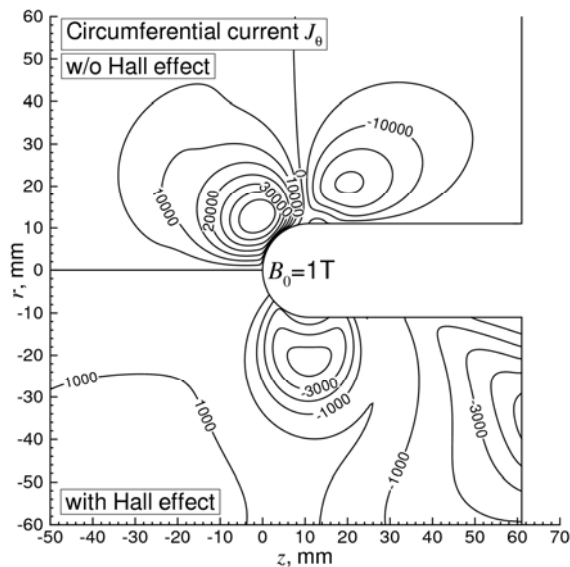


図5 一様流れ中での J_θ 分布

御による衝撃波離脱距離および抗力の増加が計測されている。そこで、このプルームの非一様性を模擬するため、半径方向距離 $r_i = D$ (鈍頭物体の径) の位置に人工的な絶縁境界を置く。 T 、 J_θ 、およびホール電場 $|E_H|$ の分布を図6-8に示す。プルーム境界を設置した流れ場では、ホール効果を見捨てた場合と同程度の $J_\theta > 20,000 \text{ A/m}^2$ が誘起され、衝撃波離脱距離が二倍に増加する。この理由は、一様な流れ場では E_H がほとんど消滅しているのに対し、プルーム境界がある場合は、境界によって r - z 方向電流が妨げられ、 500 V/m を越える E_H が誘起されるためである。このため、実際のアークジェットプルームでも、半径方向の電気伝導的非一様性 (つまり不明瞭な絶縁境界) のおかげで E_H が生じ、 $E_H \times B$ ドリフ

トにより J_θ が誘起されるメカニズムによって、衝撃波離脱距離と抗力の増加が生じていると推定できる。

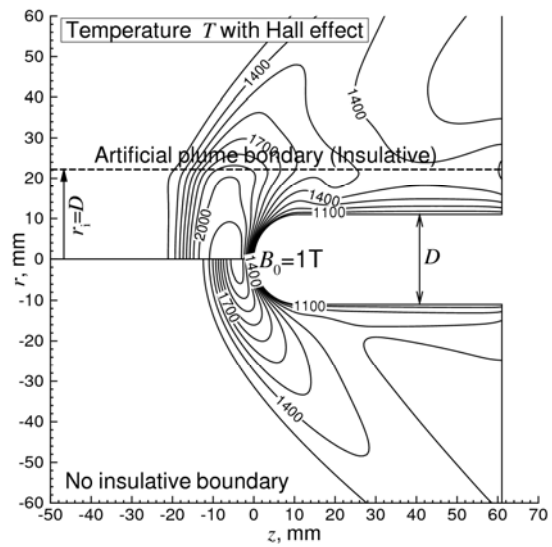


図6 人口絶縁境界流れ中での温度分布

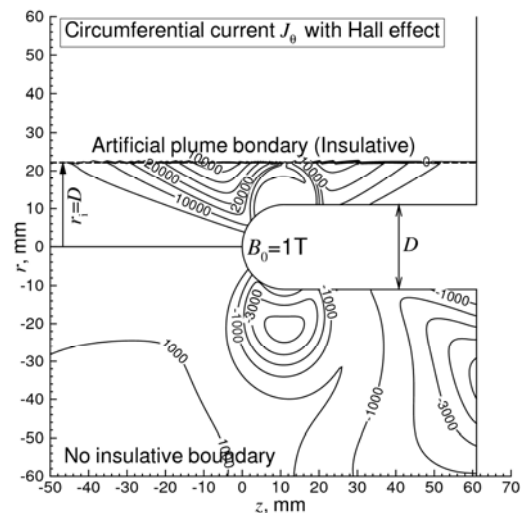


図7 人口絶縁境界流れ中での J_θ 分布

(2-3) アーク気流

次に、この「電磁流れ制御には、半径方向に電気伝導的非一様性が必要である」という仮説を検証するため、測定で使われたアークジェットプルームをシミュレートする。

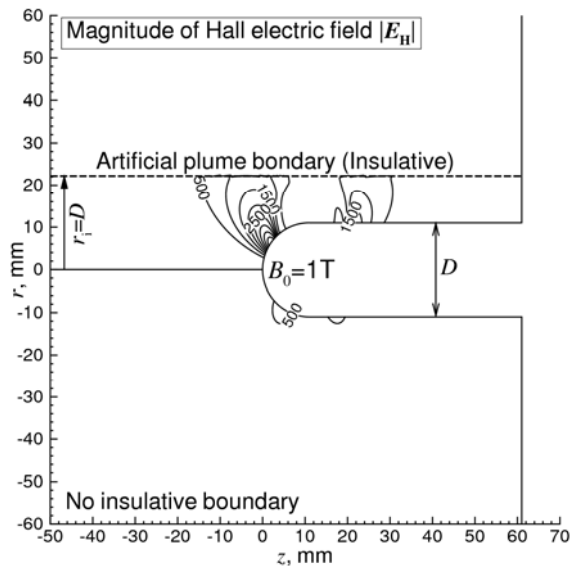


図8 人口絶縁境界流れ中での $|E_H|$ 分布

磁場印加前の T とマッハ数 M を図9に示す。希薄効果により衝撃波前縁は不明瞭ではあるが、その前縁近傍で $T=3,000\text{ K}$ 、 $M=3$ 程度となる。澱み点近傍では衝撃波圧縮により $T\approx 8,000\text{ K}$ 程度の高温になる。これらの値は測定値より大きく、計算は実験の動圧を再現できていないと考えられる。鈍頭物体が受ける抗力は実験値の二倍程度となり、測定値の定量的な評価にはアークジェットコンストラクターでの流入条件や連続流近似などの物理モデルを見直す必要がある。しかし、 T はプルーム外側領域で 500 K まで減少しており、半径方向の非一様性の効果を議論することは十分に可能である。

電気伝導度 σ と C_H を図10に示す。化学反応はコンストラクターからほぼ凍結しており、電子は拡散によりプルーム外側領域に輸送される。結果として σ は、よどみ点付近での 850 S/m からプルーム外側領域での 50 S/m まで減少し、プルームは半径方向に顕著な電気伝導的な非一様性を持つ。プルーム境界付近で C_H が比較的大きな値をもつ理由は、電子密度の低下のためであるが、この領域は E_H が誘起される部分ではないため電磁流れ制御に及ぼす影響は少ない。また、よどみ点付近の σ および C_H は一様流れの計算とほぼ同程度の大きさを持つ。

T を図11に示す。磁場印加により衝撃波離脱距離が増加し、その程度は $r_i = D$ の人工絶縁プルーム境界を設置した一様流れ(図6)とほぼ一致している。 $|E_H|$ と J_θ を図12に示す。衝撃波の背後付近で $|E_H|$ と J_θ はそれぞれ 500 V/m と $20,000\text{ A/m}^2$ の値をとり、やはり $r_i = D$ の人工絶縁プルーム境界を設置した一様流れの場合と一致する。結果として、プルームの半径方向の非一様性は人工絶縁プルーム境界と同じ役割をはたしており、この非一様性が E_H と J_θ を誘起し、強いホール効果を持

つアークジェットプルーム中での電磁流れ制御を可能にしている事がわかった。

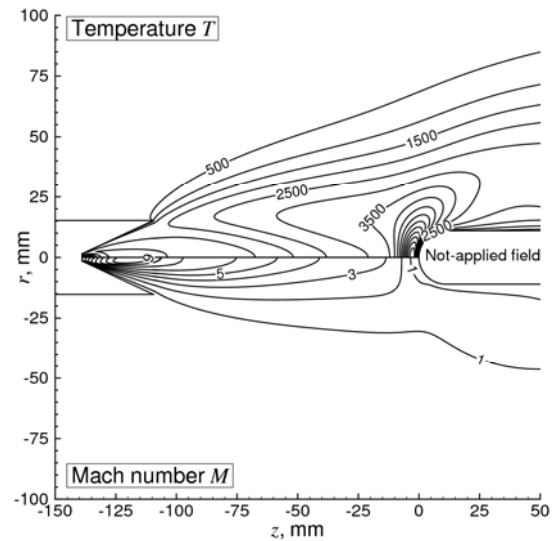


図9. アーク気流中での温度とマッハ数分布

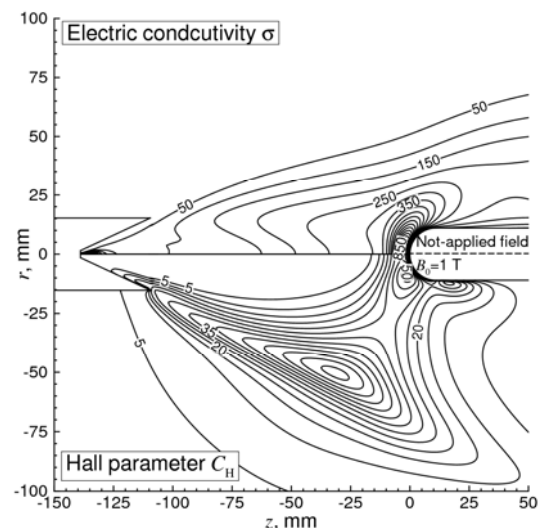


図10 アーク気流中での σ と C_H 分布

(2-4) 熱防御性能

図11に示す T 分布では、衝撃波層内でジュール加熱により温度が上昇するため、よどみ点付近の最高温度は $T_{\max}\approx 10,000\text{ K}$ となっている。従って、この流れ場では、衝撃波離脱距離の増加により高温流れが物体の両脇にそれる効果よりも、ジュール加熱の効果が大きく、物体への加熱負荷は磁場印加により

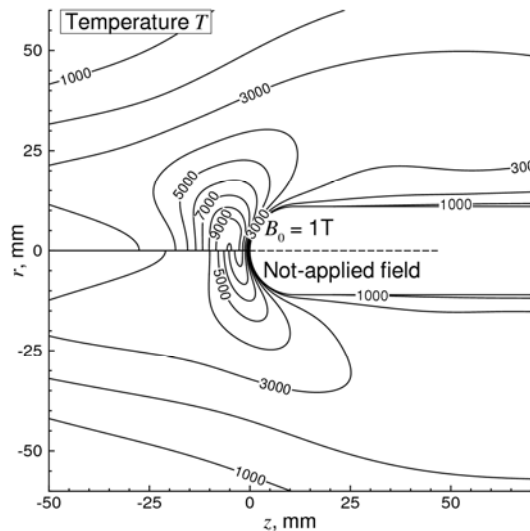


図 11 アーク気流中での温度分布

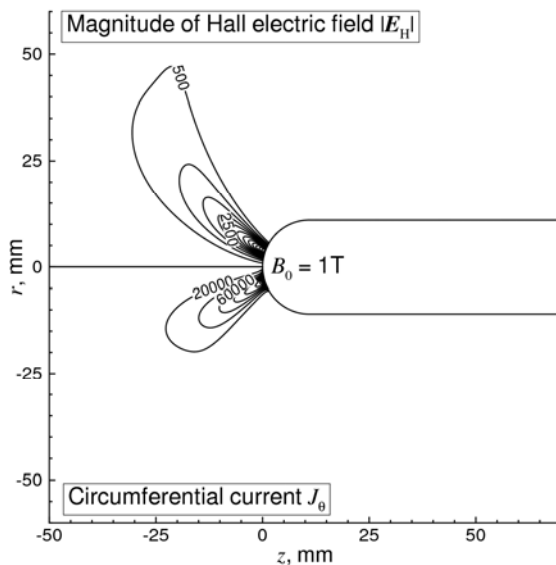


図 12 アーク気流中での $|E_H|$ と J_θ

4%程度増加する。一方、抗力はローレンツ力の反力により 12%の増加を示す。従って、ホール効果が強いと予想される高高度の希薄領域では、電磁力による流れ制御は、直接的な加熱負荷減少による熱防御を期待するよりも、エアロブレーキングとして使用する方が有用であるだろう。

5. まとめ

電磁力流れ制御の物理メカニズムを数値解析により明らかにすることを目的に研究を行った。計算結果は、磁場印加によって衝撃波層および模型にかかる抗力が増大することを示し、これまでの実験値の妥当性が証明された。また、「クヌーセン数が比較的大きい流れ場では、ホール効果により電流が散逸する傾向があり、電磁力を有効に生じさせるためには、電流散逸を防ぐため流れ中に絶縁とみなせる境界が必要」であることが始めて

明らかになった。さらに、アークジェット気流の実験ではブルームの境界が、実際の再突入条件下では衝撃波の前縁が、この「流れ中の絶縁境界」の役割を果たしていることを示した。

以上の研究成果により、電磁力による流れ制御の連続流条件下での物理メカニズムが完全に明らかになり、この成果を受けて、宇宙航空研究開発機構の安部教授らのグループは、超伝導磁石を用いた再突入実フライト試験を計画するに至っている。

6. 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 Katsurayama, H., Kawamura, M., Matsuda, M., and Abe, T., "Kinetic and Continuum Simulations of Electromagnetic Control of a Simulated Reentry Flow," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 45, No.2, pp. 248-254, 2008. (査読有)

[学会発表] (計 4 件)

- ① Otsu, H., Katsurayama, H., and Abe, T., "Trajectory Analysis of Electromagnetic Aerobraking Flight Based on Rarefied Flow Analysis," *Proceedings of 26th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, AIP Conference Proceedings, Vol. 1084, pp.766-771, Kyoto, Jan. 2009.
- ② Katsurayama, H., Konigorski, D., and Abe, T., "Numerical Simulation of Electromagnetic Flow Control in a One-Kilowatt Class Argon Arcjet Windtunnel," 39th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, AIAA Paper 2008-4016, Seattle, June, 2008.
- ③ Katsurayama, H., Konigorski, D., and Abe, T., "Numerical Simulation of Electromagnetic Flow Control in an Arcjet Plume," 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA Paper 2008-1392, Reno, Jan., 2008.
- ④ Katsurayama, H., Abe, T., and Otsu, H., Konigorski, D., "Numerical Study of the Electromagnetic Control of a Weakly Ionized Flow around a Blunt Body: Role of an Insulative Boundary in the Flow," 38th AIAA Plasmadynamics and Lasers

Conference, AIAA Paper 2007-4529,
Miami, June, 2007.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

葛山 浩 (KATSURAYAMA HIROSHI)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇
宙科学研究本部・プロジェクト研究員
研究者番号 : 80435809

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし