

## 論文の内容の要旨

論文の題目 再突入極超音速プラズマ流の  
電磁気力による制御に関する研究

氏名 松下 健治

### (1) 研究の背景

地球低軌道からの再突入飛行体は宇宙ステーションへの輸送システムそして将来の宇宙活動のために不可欠である。そのような飛行体の設計において重要な問題のひとつが空力加熱に対する熱防御である。

再突入飛行における高い熱負荷は、飛行体前面に発生する強い衝撃波によって加熱された高温の空気によるものであるが、低軌道からの再突入においても、このような高温の空気は弱電離している。プラズマ物理学によれば、電磁場を用いることによりこのような電離した空気を制御することが可能である。このようなアイデアに基づいて、最近多くの研究が行われている。そのひとつが飛行体表面での空力加熱を低減する熱防御システムである。

### (2) 研究の目的

現在までこの電磁場によって空力加熱を低減する熱防御システムについて様々な観点から研究が行われているが、いずれも特定の飛行環境下での研究に終始しており、実際の地球低軌道からの再突入状態における様々な飛行環境下での系統的な検討は行われていない。本研究では実際の地球低軌道からの再突入状態においてこの熱防御システムが実現可能であるかどうかを検証することを目的とし、様々な実飛行環境下における熱防御システムの効果について包括的に調査し、その結果重要な影響を与えると判明した後述のホール効果による影響について詳しく調べることにした。検証には数値シミュレーションの技法を用いる。実飛行状態のサンプルとしてスペースシャトルの再突入状態を使用し、磁気による効果を決定するパラメータを実飛行状態で見積もり、そのパラメータを用いて熱防御システムの効果を検討した。

### (3) 制御の原理

始めに磁気による熱防御システムの原理を簡単に説明しておく。図1のように、磁気  $\mathbf{B}$  が

印加された軸対称な鈍頭物体に対してプラズマの流れ  $\mathbf{V}$  が当たっている状態を考える。オームの法則により、プラズマの流れが磁力線を横切るとき軸対称面に垂直な方向（周方向）に電流  $\mathbf{J}$  が流れる。そして、このような電流に対して磁気が作用して図 1 に示されたようなローレンツ力  $\mathbf{F}$  が働く。このローレンツ力の方向はおおむね流れに逆らう方向に働いており、ローレンツ力によって流れが減速されることになる。流れが減速されることにより衝撃層が広がり、物体表面での温度勾配が減少して熱流束が減少することになる。

磁気を強くすると上記の効果が増加するものの、同時にホールパラメータと呼ばれるパラメータが大きくなり、ホール電流と呼ばれる電流が軸対称平面内を流れる（このような効果をホール効果と呼ぶ）。ホール電流が流れると、それに応じて周方向に流れる電流が減少する。そのため、ホール電流が流れて周方向に流れる電流が減少すると流れに対する減速力が低下し、磁気による熱防御の効果が減少する。

熱防御の効果は周方向の電流による物体表面での温度勾配の減少とホール電流への電流散逸のバランスで現れる。そのバランスはインタラクションパラメータ  $Q = \frac{\sigma_r B^2 L}{\rho_\infty V_\infty}$  とホール

パラメータ  $\beta_e = \frac{eB}{m_e v_{e,in}}$  により決まるため、両パラメータの見積もりが重要となる（ただ

し、 $\sigma$  は電気伝導度、 $B$  は磁気の強さ、 $L$  は代表長さ、 $V_\infty$  は代表速度、 $v_{e,in}$  は電子の衝突周波数である）。本研究では実飛行状態での両パラメータを見積もった上で、熱防御システムの効果を検討した。

#### （４）実飛行状態での予測

##### （４．１）解析手法

本研究では地球再突入機の実飛行状態の流れ場を予測・解析することで熱防御システムの有効性を調べる。実飛行状態のサンプルとしてスペースシャトルの再突入軌道を使用することにした。

本解析では検討対象とする物体として、スペースシャトルのノーズ半径と同じ半径の半球を考え、この物体周りの極超音速流れを数値的に解析する。我々の関心がよどみ点付近にあるためである。熱防御の効果は上記パラメータのみではなく磁場の配位そのものに強く依存する。物体周りに印加する磁場に関しては様々な印加の仕方が考えられるが、この研究では最も基本的と考えられる磁気双極子を球の中心に置いた場合を考える。以下の議論はこの磁気配位に対してのみ成り立つことに注意されたい。磁気の強さが強くなればなるほど流れ場に対する効果が大きくなるのであるが、この解析ではよどみ点での磁気の強さを実現性を勘案して 0.1T とした。図 2 にスペースシャトルの典型的な再突入経路が示してあり、この中の 4 つのケースの飛行状態について予測を行うこととした。

上に述べた 4 つの状態における気流条件について、本研究では 2 種類のコードを併用し

て予測を行った。第一のコードは低磁気レイノルズ数モデルの熱量的に完全な気体についての電磁流体コードに、一般化されたオームの法則を組み合わせた、磁気的作用を解析するための「磁気コード」、第二のコードは熱化学非平衡計算を含んだ Navier-Stokes コードを基とした  $Q$ 、 $\beta e$  を予測するための「実在気体コード」である。予測手順はまず、上記気流状態で実在気体コードを用いて実フライト状態での  $Q$ 、 $\beta e$  を予測する。そして、予測された  $Q$ 、 $\beta e$  のよどみ点付近での代表値を磁気コードに織り込んで、磁気による効果を含めた解析を行った。

#### (4. 2) 予測結果 –ホール効果を考慮しない従来手法に基づいて–

実在気体コードによる解析によって、 $Q$ 、 $\beta e$  の代表値を求め、その値を磁気コードに織り込んで解析を行った。まず、現在の標準的な手法であるホール効果を考慮しない解析を行った。その結果、熱防御の効果として最大のケースで 23%熱流束が減少することがわかった。ただし、 $\beta e$  は各ケースとも 1 より大きな値をもちホール効果が現れる可能性を示している。

#### (4. 3) 予測結果 –ホール効果を考慮した場合–

ホール効果がどのように影響を与えるのかを調べるために磁気コードをホール効果を含めた解析ができるように改良し、前節と同じ予測解析をホール効果を含めて行った。その結果、ホール効果によって熱流束の様子が変化し、熱防御の効果は最大のケースでも 0.2% であることがわかった。この予測より実飛行環境下ではホール電流による影響は大きく、熱防御の効果をうち消してしまうことが判明した。

#### (5) 熱防御効果が現れる飛行条件の検討

以上により、スペースシャトルの飛行経路では、ホール効果により熱防御の効果がうち消され最大のケースでも 0.2% しかないことがわかった。そこでシャトルの飛行条件にこだわらずに熱防御効果が現れうる飛行条件を検討する。

#### (5. 1) インタラクションパラメータ、ホールパラメータと熱流束の関係

まず、インタラクションパラメータ、ホールパラメータについて、それによるよどみ点での熱流束の変化を調べる。その結果を図 3 に示す。この図では熱流束は  $Q$ 、 $\beta e$  がともにゼロの場合の値について正規化されており、 $Q$  が大きいほど、または  $\beta e$  が小さいほど熱流束減少の効果が大きくなることを示している。

#### (5. 2) 飛行高度、飛行速度とインタラクションパラメータ、ホールパラメータの関係

続いて、飛行高度、飛行速度に対する  $Q$ 、 $\beta e$  の変化について調べた。高度を 70、60、50km、速度を 8、7、6、5km/s として予測計算を行った。よどみ点での磁気の強さを 0.1T

とした場合についての  $Q$ 、 $\beta e$  を図 4 に示す。 $Q$  については、速度が速いほど電気伝導度が大きいこと、高度が高いほど密度が低いこと  $Q$  が大きくなることを示している。また、 $\beta e$  については、速度が速いほど圧縮により密度が高くなるため、また高度が低いほど密度が高くなるため  $\beta e$  が小さくなることを示している（密度が高くなると電子の衝突周波数が増し、 $\beta e$  が小さくなる）。

### (5. 3) 飛行高度、飛行速度と熱流束の関係

(5. 1)、(5. 2) で得られた結果をもとに  $Q$ 、 $\beta e$  を介して飛行高度、飛行速度に対する熱流束の変化を調べることができる。この結果を図 5 に示す。飛行速度が速いほど衝撃層が高温となって電離度が増し、電気伝導度が大きくなって  $Q$  が増すので熱流束の低減効果が大きくなることがわかる。ただし、熱防御の効果は最大のケースでも 2.4% である。電子密度の推定には実際の値に対して不確定性があるため、電子密度が仮に推定値の 5 倍であるとして解析した場合の熱流束を図 6 に示す。図 6 によると熱防御の効果はどの飛行条件でもノミナル値より大きくなり最大のケースで 11% で、電子密度の熱流束に対する影響が大きいことがわかる。磁気の強さの影響を見るため、磁気の強さを 3 倍にしたときの熱流束を図 7 に示す。熱防御効果が最大のケースで高々 6.5% ではあるが磁気を調節することで熱防御の効果を大きくすることができる可能性を示している。

### (6) 結論

磁気力を用いた熱防御システムについて理論的検討を行った。実飛行を想定した計算を行い、 $Q$ 、 $\beta e$  を見積もった上で、この見積もり値を用いて磁気を印加した場合の計算を行った結果、これまでの標準的な手法であるホール効果を考慮しない解析では熱防御の効果が最大 23% 現れることがわかった。しかし、ホール効果を考慮した解析を行ったところ結果は大きく異なり熱防御の効果は高々 0.2% であった。従ってスペースシャトルの実飛行環境下ではホール効果が無視できず、ホール効果により熱防御システムの効果がかなりうち消されてしまうことが判明した。

続いて、シャトルの飛行条件にこだわらずに熱防御の効果が現れる飛行条件を調べた。その結果、速度が速い条件ほど熱防御の効果が現れるが、実用的飛行条件では、その効果は最大でも 2.4% と大きくない。しかし、電子密度の推定には大きな誤差が含まれることから、もし本予測値より電子密度が大きければ適度な熱防御の効果を期待できる。また、磁気を調節することでも改善の余地がある。とはいうものの、熱防御の効果は依然として小さい。ただし、これらの結論は本研究で仮定された磁気配位に依存していて、磁気配位を変えれば状況が変化する可能性がある。

これまでホール効果を考慮しないまま熱化学非平衡、磁気変動などの詳細な研究が数多くなされてきているが、まず単純なモデルでよいのでホール効果による熱防御効果減少の影響が少ない磁気配位を検討し、その上で詳細な検討を行うことが必要である。

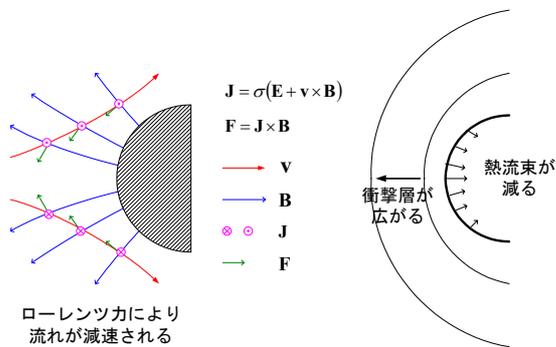


図 1：制御の原理

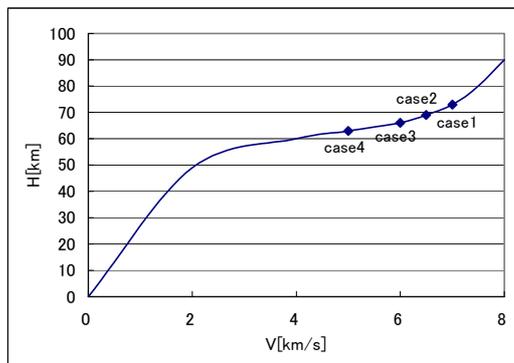


図 2：実飛行経路

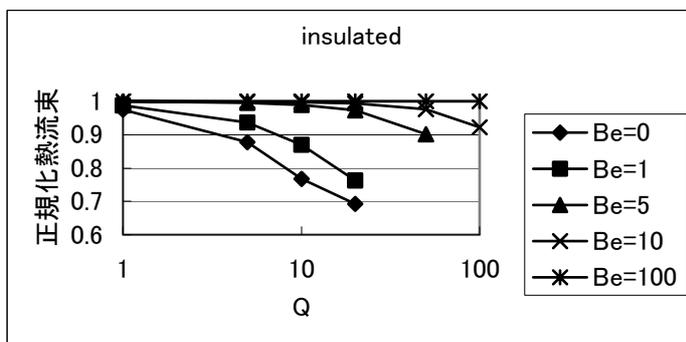


図 3：インタラクションパラメータ、ホールパラメータに対する正規化された熱流束

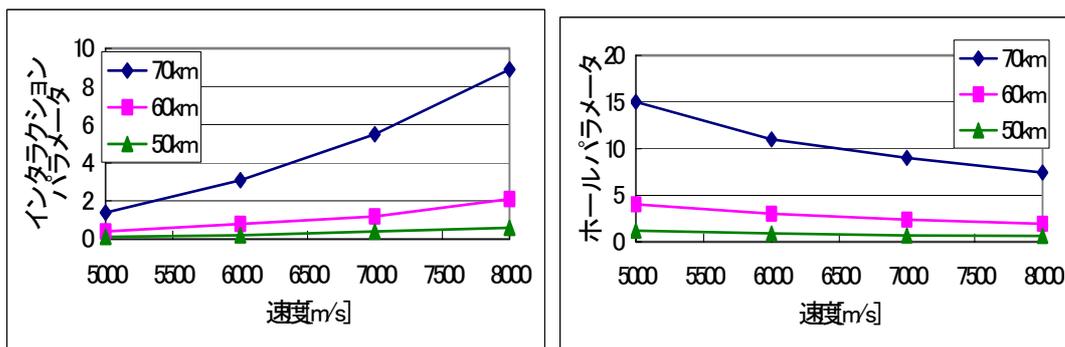


図 4：飛行高度、飛行速度に対するインタラクションパラメータ、ホールパラメータ

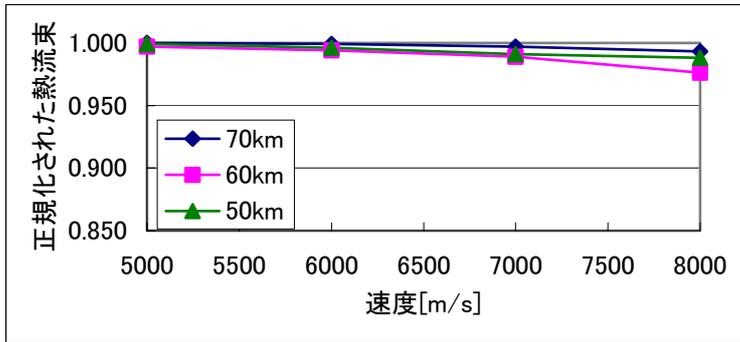
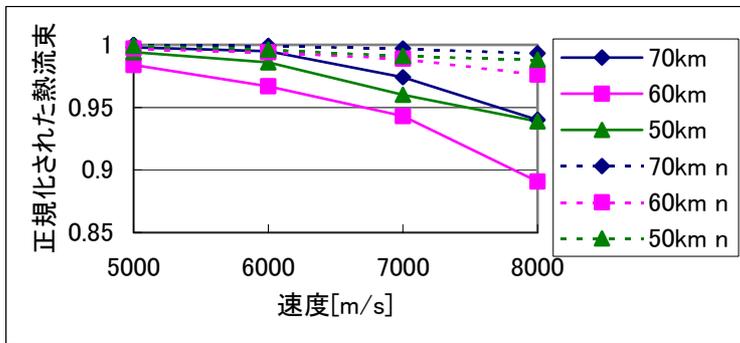


図 5：飛行高度、飛行速度に対する正規化された熱流束（ノミナル）

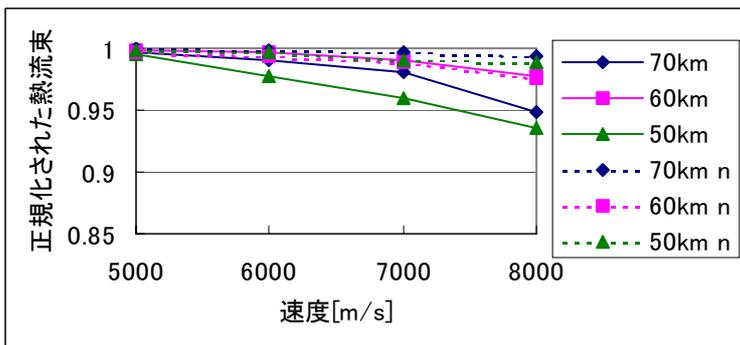


(凡例の例)

70km : 高度 70km ・ 電子密度 5 倍

70km n : 高度 70km ・ ノミナル)

図 6：飛行高度、飛行速度に対する正規化された熱流束（電子密度 5 倍）



(凡例の例)

70km : 高度 70km ・ 磁気 3 倍

70km n : 高度 70km ・ ノミナル)

図 7：飛行高度、飛行速度に対する正規化された熱流束（磁気 3 倍）