



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Mitigation of Reentry Communication Blackout and Aerodynamic Heating through Gas Injection
Author(s)	宮下, 岳士
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16840号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16840
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99685
Type	doctoral thesis
File Information	Takashi_Miyashita_review.pdf, 審査の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 宮下 岳士

審査担当者 主 査 准教授 高橋 裕介
副 査 教 授 永田 晴紀
副 査 教 授 田坂 裕司

学位論文題名

Mitigation of Reentry Communication Blackout and Aerodynamic Heating through Gas Injection
(再突入時における通信ブラックアウトと空力加熱のガス噴射による同時低減)

本論文は新しい大気突入技術を実証している。宇宙機は高い軌道速度を有することから、大気突入において機体前方に強い衝撃波を生じ高温プラズマに包まれる。このとき機体と地上局・中継衛星との通信電磁波は、大気突入プラズマによる反射、回折、減衰によってその進行が阻害され、通信ブラックアウト (通信途絶) が生じる。合わせて、高温プラズマによる空力加熱が生じ、機体表面には強い入熱が発生する。本研究では、ガス噴射によって機体表面近傍および後流に低温かつ低プラズマ密度のガス層を形成し、その領域を電磁波伝播経路とすることで通信ブラックアウト低減効果を実証すると同時に、空力加熱低減効果も示した。したがって、本論文で実証する技術は、大気突入において従来二つの大きな課題であった、空力加熱と通信ブラックアウトを同時に低減し得るものである。

本論文は全七章から構成されており、各章の要旨を以下に述べる。

第一章では、上述の本研究の背景と動機、目的を述べている。

第二章では、本論文で重要な試験設備に位置づけられるアーク加熱風洞について詳説している。アーク加熱風洞は持続的にプラズマ気流と高加熱環境を再現できる地上実験設備であり、通信ブラックアウトや加熱研究において広く用いられてきた。ここで本論文におけるアーク風洞実験の役割を整理している。

第三章では、本論文で用いる数値流体解析モデル・電磁波伝播解析モデルについて述べるとともに、それによって明らかにしたガス噴射による通信ブラックアウト低減メカニズムを説明する。対象はドイツ航空宇宙センター (DLR) のアーク加熱風洞 L3K である。風洞によって生成される空気プラズマ気流の電子数密度は高く、通信周波数の臨界値を上回る。この風洞気流に対し風洞模型表面から窒素ガス噴射を与えると、不足膨張気流による低温・低プラズマ密度層を形成することを、上述の高速流体および電磁波伝播モデルを用いて示した。電磁波はこの領域を伝播可能となり、すなわち通信ブラックアウト低減が示された。

第四章では、JAXA 宇宙科学研究所 (ISAS) アーク加熱風洞を用いた通信ブラックアウト低減の実証実験と、数値解析について記している。ガス噴射機構を備え、通信機を格納した風洞実験模型をアーク加熱気流中に投入し、ガス噴射を行うことで、通信ブラックアウトの再現および通信回復を確認した。噴射流量を変更したときの低減効果の傾向も明らかにしている。合わせてアーク加熱気流を数値的に再現し、高温風洞気流と低温ガス噴射との相互作用を明らかにした。低温の噴射ガスが模型アンテナ格納部を覆うため、アーク加熱気流がもたらす通信ブラックアウトと加熱の同時

低減を示した。

第五章では、DLR アーク加熱風洞 L2K によって生成されるアルゴンプラズマ気流を用いて、スケールアップした通信および加熱の同時計測実験と、数値計算による再現を行った。ガス噴射中の通信の改善と、表面温度上昇率の低下が見られた。L2K を用いることで高頻度通風が可能となり、通信減衰がプラズマの影響であることの検証や、実験の再現性の確認が行われ、本技術による同時低減効果を実証するものとなった。数値計算では、アーク加熱気流の特性を利用した新しい放電場・高速気流モデリングを実施し、大幅な計算コスト削減を達成している。その解析モデルは過去に行われた気流計測結果と比較・検証し、今回の目的に対して十分な精度を有することも示している。数値計算によって、低温ガス層が断熱層かつ電磁波伝播経路として作用することが確かめられた。一方、噴射ガス流量の増大によってガス層が壁面から浮き上がることが確認されている。これは主流に対して噴射ガスの運動量が高いためであり、下流において流量増によって加熱低減効果は減少する様子も明らかにした。

第六章では、大気突入実験 RAM C を対象に、実飛行環境下における本技術の有効性について述べている。機体の先端および側面からガス噴射を行うことで、局所的な低温・低プラズマ密度領域が形成されることを確認した。特に側面噴射の効果は大きく、機体後縁に至る広い範囲に低減効果が現れることを明らかにした。本手法が大気突入時において低減効果が期待できることも示した。

第七章は結論であり、本研究の総括を記載するとともに今後の研究の展開について述べている。

これを要するに、著者はガス噴射を用いた新しい大気突入技術を実験的および数値的に実証し、その設計指針を見出した。本提案技術は、プラズマ気流における不足膨張流を利用することで、大気突入時における通信ブラックアウトおよび空力加熱の同時低減をもたらすものである。これらは、より柔軟な大気突入ミッション創出に貢献し、宇宙工学および流体力学の発展に寄与する成果である。よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。