



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_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 宮下 岳士

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)

宇宙機が地球に帰還する際、大気圏への突入速度は極超音速領域に達し、宇宙機の前面には強い衝撃波が形成される。この衝撃波によって気流が断熱圧縮されることで、宇宙機は厳しい空力加熱環境に曝される。また、高温によって周囲の気体分子の励起・乖離反応が促進され、宇宙機の周囲の気流はプラズマ化する。このとき、無線通信はこのプラズマによって阻害されることとなり、通信ブラックアウトとして知られる通信途絶現象が生じる。大気突入過程に生じる空力加熱と通信ブラックアウトの問題は、宇宙輸送技術の信頼性における課題であり、搭載機器や回収したサンプルの保全、宇宙機の状態や位置情報の捕捉、着地点予測精度の向上の観点から回避もしくは低減することが求められる。

プラズマ中の電子の数密度が通信周波数によって定まる臨界値を上回る場合、電磁波はその内部に伝播することが不可能となる。そのため、通信ブラックアウトの低減においては、通信機器周辺の電子数密度を低下させ、機体を覆うプラズマに外部との通信のための「窓」を形成することが重要である。本研究ではガス噴射によって機体表面にガス層を形成し、その内部を電磁波伝播経路とすることによる通信ブラックアウトの低減効果を対象とした。このガス層は低温であるため、周囲の高温気流による入熱を防ぐ断熱（フィルム冷却）効果も期待できる。したがって、本手法は大気突入中における2つの大きな課題である空力加熱と通信ブラックアウトを同時に低減し得る手法であると考えられる。

ガス噴射による通信ブラックアウト低減は、冷温ガスによるプラズマの再結合反応の促進や求電子性ガスによる電子数密度の低下といった方針で検討されていた。ガス層の形成による手法はガス種に依存せず、組み合わせることで低減効率の向上が期待できる一方で、その効果の検証は行われていない。そこで本研究では、ガス噴射による通信ブラックアウトの低減効果を数値解析と風洞実験によって実証し、低減メカニズムを明らかにする。加えて、空力加熱との同時低減についても評価する。

第1章では、研究の背景および目的について述べる。

第2章では、大気突入環境を模擬する地上試験設備であるアーク加熱風洞について紹介する。アーク加熱風洞は、超音速試験装置の中でも比較的長時間にわたって持続的にプラズマ気流と厳しい加熱環境を再現できることから、通信ブラックアウト実験に適している。関連する先行研究について述べたのち、本研究におけるアーク風洞実験の役割について整理する。

第3章では、本研究で実施する数値流体解析 (CFD) モデル、電磁波伝播解析 (CEM) モデルについて述べる。また、アーク加熱風洞実験による低減効果実証の前解析として実施した数値解析による検証について示すとともに、ガス噴射による低減メカニズムについて記述する。解析対象はドイツ航空宇宙センター (DLR) が保有するアーク加熱風洞 L3K とした。風洞気流は高エンタルピーな空気プラズマであり、実験モデル周囲の電子数密度は高く、2.4GHz の通信周波数における臨界値を上回っていた。これに対しモデル上面から窒素ガス噴射を与えると、窒素ガスは周囲の低圧環境に向かって断熱的に膨張し、主流によって移流することで後流に電子数密度の小さい領域が形成された。CFD 解析結果に基づいた CEM 解析によって、電磁波はガス層内部を伝播可能であり、通信ブラックアウトの低減効果が示唆された。

第4章では、宇宙科学研究所 (ISAS) が保有するアーク加熱風洞にて行った通信ブラックアウト低減効果の実証実験と CFD 解析について記載する。通信ブラックアウト低減効果について実験的に実証した例は少ない。本研究ではガス噴射機構を搭載し、通信機を格納した実験モデルをアーク気流中に投入し、ガス噴射による通信

状況の改善を観測することを目的とした実験を行った。ISAS アーク加熱風洞において通信ブラックアウトの再現および、ガス噴射中の通信の回復を確認することができた。また、噴射流量の増加に伴い、低減効果も増大することが示された。実験時の流れ場を CFD 解析によって再現し、高温な風洞気流と低温なガス噴射との相互作用を明らかにした。噴射ガスはマッハディスクを伴って急激に膨張しており、ガス内部の温度は 20 K 程度の低温であった。そのため、高温主流によって加熱される前にモデル近傍から後方へと移流され、プラズマを含まない低温ガス層がアンテナ格納部を覆うため、通信ブラックアウトと加熱の同時低減効果が見られた。一方で、噴射部直上や前方においてはガス層前面における主流の圧縮によって高温となり、局所的に壁面熱流束の高い領域が確認された。

第 5 章では、DLR が保有するより大型のアーク加熱風洞 L2K を使用した、スケールアップした実験について示す。L2K にはより大型の実験モデルが投入できるため、通信と加熱の同時計測を行い、ガス噴射がもたらす同時低減効果についての実証実験を行なった。気流にはアルゴンプラズマを使用した。ISAS 実験同様に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 によって高頻度で実験を実施できたため、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、本手法による同時低減効果を示すことができた。CFD 解析では L2K アーク気流を再現するため、アーク加熱器内部気流のモデル化を実施した。アーク気流は半径方向に偏りを持っており、中心部は高温高速であるのに対し、壁面付近では低温低速である。放電場連成 CFD 解析によってコアフロー分布の再現が行われるが、本研究では高コストな放電場計算を回避するため、アーク加熱部における流入条件を平衡計算によって与えた。温度場がガウス分布に従うと仮定し、最高温度と勾配を気流診断結果に整合するようにフィッティングした。このモデルによって得られた電子数密度は通信減衰が見られたという実験結果に整合する程度に大きく、本研究における CFD 解析として十分な精度であった。CFD 解析結果から、同様に低温ガスによって形成される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。一方で、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た。これは主流に対して噴射の運動量が大きいためであり、下流においては流量増によって加熱低減効果は減少する様子が見られた。

第 6 章では、過去に実施された大気圏再突入実験である RAM C 機体を対象に、本手法のフライト環境下における有効性について述べる。アーク加熱気流は再突入同等の加熱環境や電子数密度を与えるが、気流マッハ数や電子生成メカニズムなどが異なるため、本手法の実環境での効果を CFD 解析によって検証した。対象とした軌道は高度 70km であり、実験において通信途絶が確認された領域である。機体の先端と側面からガス噴射を行うことで、局所的な低温低電子数密度領域が形成されることが確認された。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がわかった。また、ガス噴射の際に機体に反作用として与えられる推力は、機体に加わる空気力に比べ十分小さかった。したがって、本手法は大気突入時において低減効果が期待できると言える。

第 7 章は結論であり、低減効果の数値解析による検討、風洞実験による実証およびフライト環境下での有効性検証にわたる本研究の総括を行う。ならびに、今後の研究展開についても述べる。