

高速飛翔体周囲プラズマによる通信障害の 電磁場ドリフト作用による抑止

所属：東海国立大学機構 名古屋大学 大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻

助成対象者：杵淵 紀世志

概要

極超音速飛行時に機体周囲に生じるプラズマによって引き起こされる通信途絶現象に対し、実験的・数値的な緩和手法の実証を最終目的とした研究を展開する。本研究では、プラズマ中における電波干渉を模擬するプラズマ風洞を新たに構築し、電波の送受信に成功、プラズマ中を電波が減衰しながら伝搬することを確認した。また、減衰の周波数依存性について理論との一定の整合が確認された。数値解析においては高高度の希薄環境下における弱電離プラズマを解くためのスキームを実装・発展させ、実際の再突入フライト結果と計算結果が一致することを確認し、希薄な弱電離プラズマの高精度解析に成功した。

abstract

This study aims to demonstrate experimental and numerical methods for mitigating communication blackout caused by plasma surrounding a vehicle during hypersonic flight. A plasma wind tunnel was newly developed to simulate radio wave interference in a plasma environment. Attenuation of radio waves in plasma was confirmed. The frequency dependence of this attenuation was found to be consistent with theoretical predictions. In the numerical analysis, a scheme was developed and implemented to solve the behavior of weakly ionized plasma in a rarefied high-altitude environment. The numerical results showed good agreement with actual reentry flight data.

研究内容

背景

宇宙旅行や高速旅客機が実現され始めている．宇宙機が宇宙から地球へ帰還する際に遭遇する極超音速の高速飛行中では，機体に衝突した高速気流が圧縮され，非常に高い温度となり，機体の周囲はプラズマに包まれる．このプラズマは通信に使用される電波と干渉し，機体は通信途絶（ブラックアウト）に遭遇する．このような通信途絶は NASA の有人宇宙船であるスペースシャトルの再突入でも観測されており，極超音速飛行中の安全性における重要な課題である．通信途絶の発生は飛行プロファイルにも依存するが，近年の有人月探査ミッション Artemis の有人宇宙船 Orion の再突入でもこの課題は解決されておらず，通信途絶現象の緩和手法の開発が求められている [1]．

目的と手法

ブラックアウト中においても電波の伝搬経路を確保するため，本研究では電磁界の印加によってプラズマを制御する手法を提案する．この手法の実証実験に先立って，プラズマ風洞を製作し，アンテナを備えた小型供試体を用い，極超音速飛行中の機体周囲プラズマに相当する環境の再現を試みた．図 1 に実験装置を示す．プラズマ源で電離・加速された高速プラズマ流は送信アンテナを内部に有した供試体を包み込み，電波の進行を阻害する．送信アンテナは真空チャンバ外部の信号発生器によって駆動される．受信アンテナは真空チャンバの外に配置されており，電波はプラズマによって減衰されつつ，電波に対してほぼ透明な窓を通して受信される．受信した信号はスペクトラムアナライザによって評価される．特に受信電力を評価することによって，プラズマによる減衰を評価することができる．プラズマと電波の干渉理論では一定の厚さのプラズマ層を通過する際，i) プラズマ周波数が大きく，ii) 電子-重粒子衝突周波数が小さく，iii) 電波の周波数が低いほど，減衰が大きくなる．

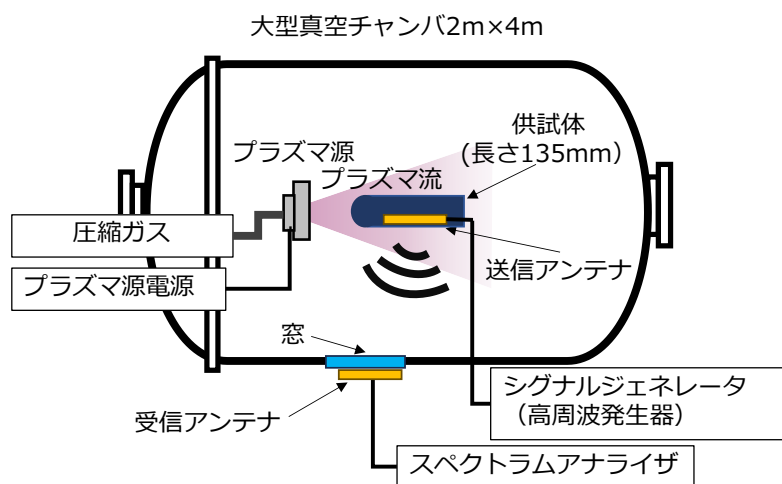


図 1 実験装置の概要図

これら減衰を支配する 3 つのパラメータとプラズマ流速など流体力学的なパラメータと合わせて調整することでフライトと相似な環境が構築可能となる。

実験室で構築できる環境では実際の飛行を完全には模擬できず，実際のフライト条件を考慮するためには数値解析が不可欠であり，極超音速気流特有の熱化学的非平衡流の解析手法の発展も必要である．本研究では，特に宇宙空間に近い高高度での飛行に向けて DSMC(Direct simulation Monte Carlo)法と呼ばれる解析手法を採用した．再突入時に見られる弱電離プラズマは，従来の DSMC 法では解析が多大な計算資源を要し現状不可能である．これを解決するため，DSMC 法をベースとしつつ荷電粒子の取り扱いについて新たな手法の提案と開発を進めた．

結果

極超音速飛行体に相当する模型として，鈍頭供試体を作成し，プラズマ中に配置し耐性を確認した．図 2 にこの様子を示す．電波を十分に透過する，エポキシ系樹脂の供試体でもプラズマ試験において問題がないことが確認された．次にマイクロストリップアンテナを供試体の内部に配置し，図 1 に示した実験系を作成，複数の周波数においてプラズマ中伝搬による電波の減衰を測定した．なお，金属製真空チャンバ内

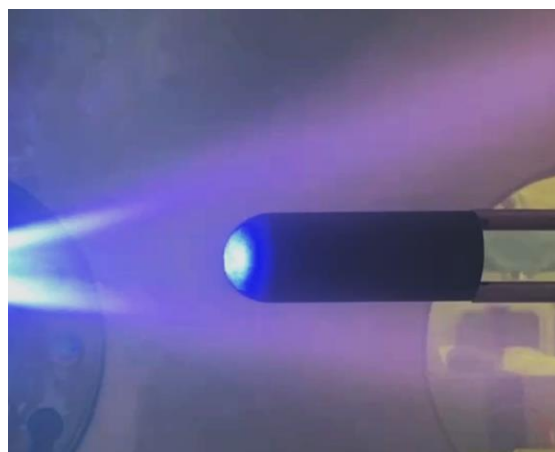


図 2 高速プラズマ流中の飛行体模型

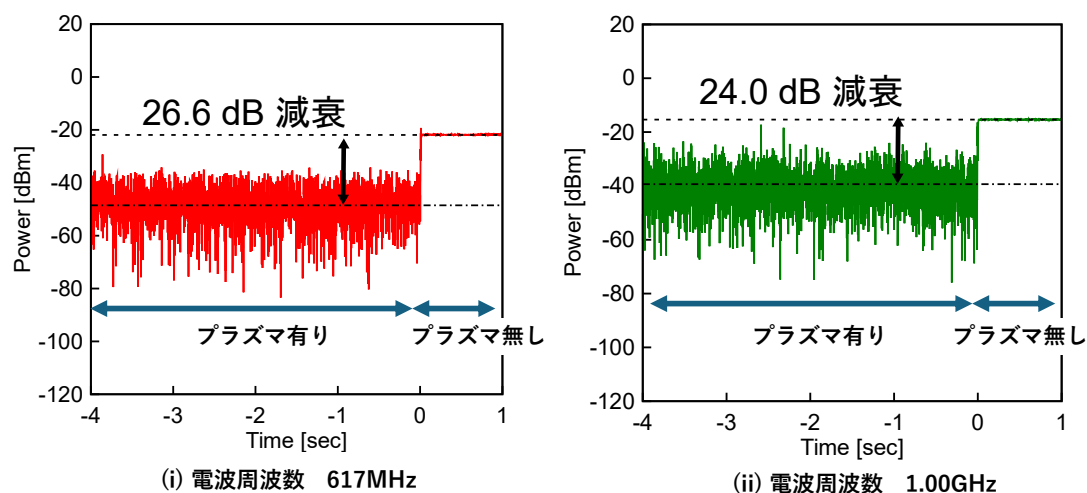


図 3 電波強度の時間変化 ((i) 617MHz (ii) 1.00GHz)

部での反射等の影響は確認されなかった．ここで結果の代表例として，プラズマによる減衰を経て受信された電波強度(電力)の時系列データについて，617MHz，1GHz の 2 つの周波数間の比較を図 3 に示す．時間軸はプラズマ風洞の作動停止時を 0.0sec とした．図 3 ではプラズマによる減衰時の時間平均電力を黒色一点鎖線で，プラズマが存在しないときの平均電力を黒破線で示している．プラズマによる減衰は強度比（デシベルでの差）で評価した．まず，プラズマの存在によりいずれの周波数においても明確な減衰が確認された．周波数依存性としては，617MHz ではプラズマによる減衰が 26.6dB なのに対し，1.00GHz のときの減衰は 24.0dB である．前述したように，プラズマと電波の干渉理論から周波数が低いほど減衰は大きくなる．本実験でも同様の傾向が認められた．ただし，今回取得された結果は依然として限定的であり，減衰を支配するプラズマ特性の取得はできておらず，今後の課題となる．

次に数値解析の結果を示す．従来の DSMC 法では実際の分子群を数値的な代表粒子で代表して解く都合上，弱電離プラズマにおけるイオンや電子などの微量化学種を解くことができない．そこで Species Weighting Scheme[2]を用いて，各化学種について異なる重み（1 つの粒子が代表する分子数）を設定可能とした．ただし，化学反応と分子の回転・振動エネルギーについても考慮が必要である．そこで Split-merge method[2]のコンセプトに基づき，これらの非平衡特性を考慮しつつ，保存則が満足されるようにスキームを独自に構築した．計算には米国 Sandia National Laboratories のオープンソースコード SPARTA を使用した．単一セルでの検証の後，再突入試験 OREX のフライト(高度 105km-高度 92km)を対象とした解析を行った．得られた結果の例として，高度 92km での電子数密度場を図 4 に示す．Species Weighting Scheme により従来の DSMC 法では取得できなかった連続的な電子数密度場が得られている．

解析により求めた電子数密度とフライト中に静電プローブによって計測された電子数密度との比較を行い，計算結果と一致していることが確認された．

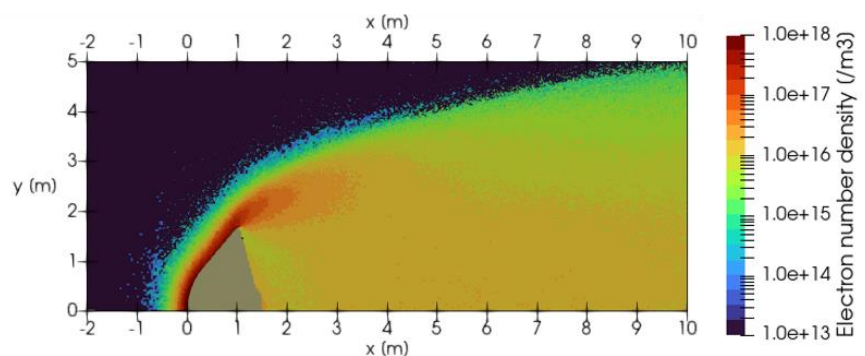


図 4 再突入試験 OREX 高度 92km 条件での
電子数密度場

今後

今回の実験装置の構築により，プラズマ気流と飛行体模型を含めたプラズマ-電波干渉実験によって電波の減衰の評価が十分に可能であることが確認された．プラズマ気流の特性については未だ十分に調査できていない．実験での直接計測と数値解析を組み合わせ，その特性を明らかにし，実際のフライトと相似なプラズマ条件の作成を行う．プラズマ特性を明らかにした後に，電磁界印加による電波減衰抑制の実証実験を行う計画である．最終的には実験結果と数値シミュレーションを組合せ，ブラックアウト干渉緩和手法の物理を体系化し，実飛行環境における提案手法の効果について議論を進める．

引用文献

- [1] 杵淵紀世志，シャルトン ヴィルジル，森本貴大，“宇宙輸送系におけるプラズマと電波の干渉問題，” プラズマ・核融合学会誌，第 101 巻，第 5 号，pp. 145-153，2025 年．
- [2] I. D. Boyd, “Conservative species weighting scheme for the direct simulation Monte Carlo method,” Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 10, No. 4, pp. 579-585, 1996.

本助成に関わる成果物

[口頭発表]

- 1 . Takato Morimoto, Virgile Charton, Eiichiro Yamaoka and Kiyoshi Kinefuchi, “Simulation of High Altitude Rarefied Hypersonic Flow with Large Species Density Variation Based on DSMC Method,” 12th International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD12), Kobe, Japan, July 2024.
- 2 . Takato Morimoto, Virgile Charton, and Kiyoshi Kinefuchi, “Simulation of Hypersonic Flight Using an Enhanced Reactive Species Weighting Scheme for the Direct Simulation Monte Carlo Method,” 4th International Conference on High Temperature Gas Dynamics, Beijing, October 2024.
- 3 . 森本貴大，Virgile Charton，山岡勲一郎，杵淵紀世志，「Reactive Species Weighting Scheme を用いた DSMC 法による再突入弱電離プラズマ解析」，日本航空宇宙学会関西・中部合同秋期大会，名古屋，2024 年 11 月．最優秀学生賞受賞
- 4 . 森本貴大，Virgile Charton，山岡勲一郎，杵淵紀世志，「DSMC 法による固体ロケット

噴煙/再突入機周囲における希薄プラズマ流解析」, 2024 年度 KDK シンポジウム, オンライン, 2025 年 3 月.