

NS-DSMC ハイブリッド流体解析と FD2TD 電波解析による ロケット噴煙中及び再突入機周囲プラズマによる電波障害予測

Prediction of Radio Frequency Interference by Plasma in Rocket Plume and Surrounding
Re-Entry Vehicles Using NS-DSMC Hybrid Flow Analysis and FD2TD Analysis

研究代表者：杵淵 紀世志（名古屋大学航空宇宙工学専攻）

kiyoshi.kinefuchi@mae.nagoya-u.ac.jp

研究分担者：森本 貴大（名古屋大学航空宇宙工学専攻）

morimoto.takato.c8@s.mail.nagoya-u.ac.jp

担当：モデル構築，計算結果検証

CHARTON, Virgile（名古屋大学航空宇宙工学専攻）

担当：モデル構築，計算結果検証

研究目的 (Research Objective):

固体燃料ロケットエンジンから噴射される高温のプルーム中にはプラズマが含まれていることが知られている．このプラズマは電波を反射するため，飛行中のロケットと地上間の通信に障害を引き起こし，噴煙損失と呼ばれ問題視されている．過去の複数の打ち上げにおいて通信障害が確認されており，日本では M-V ロケットにおいてロックオフ（レーダからのロスト）が生じたほか，欧州の Vega ロケットではテレメトリ信号（飛行中の各種計測データの送信信号）が受信できないなど，ロケットの運用において解決すべき重要な課題となっている．

これまでは Navier- Stokes 方程式に基づく CFD (数値流体解析) と FD2TD (電波伝搬解析) の連成により飛行中の電波減衰の定量予測に成功しており，M-V ロケットの後継のイプシロンロケットの開発，運用に役立てられている．一方，現在の解析は CFD のみで計算可能な飛行高度 100km 未満に留まっており，これ以上の高度では予測が困難であることがわかっている．ロケットは通常高度 200km 程度まで飛行するため，原因であるエンジンのノズルからの膨張流れが高高度では一層希薄化し，CFD における連続体の仮定が破綻するという課題の解決が求められている．

そこで本研究では，高密度領域であるロケット内部および近傍は従来の連続体仮定に基づく CFD により計算コストを抑えた解析を実現し，希薄領域となる下流部には運動論的手法である DSMC (Direct Simulation Monte-Carlo) 法を採用する．このような NS-DSMC ハイブリッド手法によって複数化学種の希薄膨張流を予測することを目的とする．DSMC 領域ではプラズマを含む多化学種を考慮できる計算手法を構築し，計算負荷と精度を両立する．これにプラズマの周波数分散性を考慮した FD2TD 法による電波解析を組み合わせ，フライトデータとの比較を通じて実用性を検証する．さらに構築した手法は再突入時のプラズマ-電波干渉問題へ応用し，これらにより宇宙輸送における安全性の向上に貢献する．

計算手法 (Computational Aspects):

FD2TD(Frequency Dependent FDTD)法による電波解析は、流体計算によって取得された電子数密度などのプラズマ流の特性を入力として使用する。燃焼ガスが支配的なロケットノズル内部から近傍までは、既存の Navier-Stokes 方程式に基づく CFD コードによって化学反応を含めた解析を行う。燃焼ガスの流れは希薄大気への膨張に伴い連続体仮定を満たせなくなるため、密度勾配あるいは Chapman-Enskog 展開の摂動項の大きさに基づいて連続体・希薄流域の境界を設定する。超音速流れでは擾乱が上流へ伝播しないため、この境界において CFD の結果から Maxwell 速度分布関数を仮定した流入境界条件を設定し、下流の希薄流域には Boltzmann 方程式に基づく DSMC 法を適用し、上流からの一方向カップリングによって境界条件を与えることが可能である。この NS-DSMC ハイブリッド手法を用いて希薄プラズマ流を解析する。

本研究の対象である固体ロケットのプルームは 27 種の化学種を含む多化学種混合ガスの流れである。また、通信途絶の予測に重要である電子やイオンのモル分率は極めて小さい。粒子法の特長上、DSMC でこのような微量な化学種を計算するには、粒子ごとの重みの違いを扱うための特別なスキームが必要となる。そこで本研究では、Conservative species weighting scheme (SWS) と呼ばれる手法を採用する。

各粒子に固有重みを割り当て、同一化学種のすべての粒子が同じ重みを持つように設定する。固有重みにグローバル重み（数値粒子あたりで代表される分子の数）を乗じることで実際の重みを得る。ここでは Boyd (J. Thermophys. Heat Transf., 1994) により提案された Split-merge method を採用し、各衝突での運動量とエネルギーの双方を明示的に保存させることで物理的な整合を確保する。この Conservative SWS の実装により、微量化学種を表す代表粒子を十分にセル内に確保できるため、微量化学種をより正確に計算でき、NS-DSMC のハイブリッド手法によって電子数密度を得ることが可能になる。

研究成果 (Accomplishments) :

DSMC コード SPARTA に Conservative SWS を実装し、0 次元、1 次元シングルセルでの検証と 2 次元のノズルモデルによる検証によって、正しく実装できていること、および運動量及びエネルギー保存が閉鎖系内で成立していることを確認した。

ロケット噴煙への適用に先立ち、SWS の適用可能な範囲について検証を行った。重み付け後の、微量化学種の代表粒子の占める割合が全代表粒子に対して約 10%を超えない場合、解の誤差が許容範囲内であることを DSMC との比較によって確認した。さらに、衝突対選択における重みの考慮の方法を示し、これまで非自明であった本スキームの適切な実装指針を明らかにした。マイクロノズルからの噴流と円錐物体との干渉をテストケースに用いて、微量化学種のモル分率を 2%とした場合の振る舞いを調査した。得られた微量化学種の数密度分布を図 1 に示す。結果として、Conservative SWS を用いた場合でも、使用しない場合と同じ流れ場が再現されることが明らかに

なった。

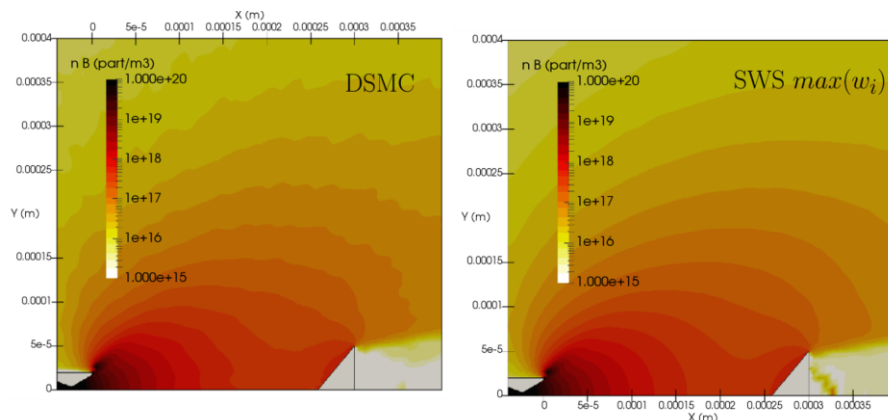


図1 微量化学種の数密度分布. 左が従来の DSMC, 右が Conservative SWS を適用した結果を示す. (公表状況 1 より引用, 改変)

これらの構築されたコードを用いて, M-V ロケット 7 号機第 3 段 (高度 180 km) を対象に NS-DSMC (Conservative SWS) を用いた噴煙プラズマ取得と, FD2TD を用いた電波減衰予測を行った. まず, CFD 解析において, 乱流・化学反応相互作用 (TCI) モデルを適用し, TCI なしの場合と比較して, プルームコア部の電子モル分率が増大し, 高ルックアングル側での電子モル分率の急峻な勾配が形成されることが確認された. DSMC 計算では電子質量が非常に小さいためタイムステップが厳しく制限される. そこで本研究では, タイムステップの制約を緩和するため, 電子質量を 1000 倍にして計算を実行した. NS-DSMC によって希薄効果に伴う軽量化学種の膨張が再現され, 電子もロケット前方方向へ拡散する様子が得られた. FD2TD による電波減衰計算の結果, 減衰が急増するルックアングルがフライトデータと整合した. CFD のみの場合と比べ, 電子プルーム領域が高ルックアングル側へ遷移し, 実データにより近づくことが確認された. 一方, 高ルックアングル域では減衰の整合性が得られておらず, ノズル近傍の高い電子数密度の領域は捉えられたものの, 電子の拡散により急峻な空間電子数密度勾配が再現されず, 電子数密度が過剰に評価されている可能性がある. この原因として, 電子質量の仮定や凍結流仮定, NS-DSMC 境界設定付近の流れ場の影響が考えられており, 引き続き調査が必要である.

本課題の流体-電磁界連成解析手法は, 固体ロケットモータの問題のみならず, 再突入機周囲のプラズマと電波の干渉問題にも適用可能である. CFD-FD2TD のカップリングを極超音速飛行実験機 RAM-C-II の条件に適用し, 機体ノーズ半径が電波減衰に与える影響を評価した. 流体解析の結果は RAM-C-II フライト実験の電子数密度データと良好に一致し, 手法の妥当性を確認した. ノーズ半径を 4 条件で変化させた解析では, ノーズ半径の縮小に伴い衝撃層が薄くなり電子数密度が低下すること, および 0.26 GHz では電波減衰がノーズ半径の縮小に伴い単調に低減される一方, 5.8 GHz では電波とプラズマの干渉効果により必ずしも単調な関係とはならないことが

示された。機体設計においてノーズ形状が空力特性のみならず電波伝搬特性にも影響を及ぼすことが示された。

以上、NS-DSMC ハイブリッド手法で希薄領域を含む化学反応流を解くための改良を進め、構築した手法を用いて固体ロケットプルーム中のプラズマ場が取得され、本手法と FD2TD を用いた高高度ロケット噴煙における電波減衰の予測結果を得た。希薄効果が観察された一方、電波減衰については十分な解析精度が得られていない部分もあり、引き続きフライトデータとの比較・検証により計算手法の改良を継続し、より精度の高い予測手法の確立を目指す。

公表状況 (Publications) :

(査読付き学術論文)

1. Takato Morimoto, Kiyoshi Kinefuchi, Effect of the vehicle nose radius on radio wave-plasma interference in hypersonic flight, Physics of Plasmas 32, 063901, 2025, doi:10.1063/5.0242370
2. Virgile Charton, Eiichiro Yamaoka, Takato Morimoto, Kiyoshi Kinefuchi, Species weighting scheme in direct simulation Monte Carlo applied to jet plume simulations, Journal of Computational Physics, 114354, 2025, doi:10.1016/j.jcp.2025.114354

(査読付き解説)

3. 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, Vol.101, No.4 145-153, 2025.
4. シャルトン ヴィルジル, 杵淵紀世志, 飛行中ロケットプルームの連続・希薄反応流解析, 日本航空宇宙学会誌, 73 巻 6 号 187-193, 2025.