

CFD/DSMC ハイブリッド流体解析と FD2TD 電波解析による ロケット噴煙中プラズマによる電波障害予測

Prediction of Radio Frequency Interference by Plasma in Rocket Plume Using
CFD/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：CHARTON, Virgile（名古屋大学航空宇宙工学専攻）

charton.virgile.u7@a.mail.nagoya-u.ac.jp

担当：モデル構築，計算結果検証

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

山岡 叡一郎（名古屋大学航空宇宙工学専攻）

yamaoka.eiichiro.h4@s.mail.nagoya-u.ac.jp

担当：モデル構築，計算結果検証

研究目的 (Research Objective):

ロケットエンジンが噴射す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。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、欧の Vega ロケットではテレメトリ（飛行中の各種データ）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。

代表者はこれまで 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、M-V ロケットの後継のイプシロンロケットの開発、運用にも貢献した。一方、現在の解析は飛行高度 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、この課題の解決が求められている。原因はロケット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 における連続流の仮定が破綻したためと考察している。

そこで本研究では、従来の CFD に加え、希薄領域に DSMC (Direct Simulation Monte-Carlo) を採用する。DSMC は一般に多大な計算コストを要すが、高密度の燃焼ガスが存在するロケット内部および近傍は CFD により計算コストを抑えた解析を実現し、下流部に DSMC を適用することでハイブリッド化し希薄膨張流れを解析する。すでに無反応流ではハイブリッド法の妥当性を実験結果との比較で確認しているが、DSMC 領域におけるプラズマを含む反応モデルの構築が必要である。本研究では電離を含む反応に関し、DSMC の流れ場から抽出した流線上での化学反応の再計算や、DSMC では解像が困難な本課題で重

要となる微量の荷電粒子に重み付けを加えるなどの手法により、計算負荷と解析精度を両立した独自の解析法の構築を行った。

計算手法 (Computational Aspects):

CFD と DSMC は共に化学反応を含む流れを解くことが可能である。化学反応を含む従来の DSMC は物理に忠実なモデルであるが、微量化学種を正確に表現するよう調整を行うと計算負荷が大幅に高くなる。したがって、本研究ではロケットエンジンのプルームが含む微量な荷電粒子に着目するため、これを解くには新たな手法・スキームの導入が必要である。そこで本研究では、以下 2 種の手法を用いて、ロケット噴煙中プラズマの取得を図った。

第一の手法として、従来の DSMC を実施した後、その解から抽出した流線のプロファイルに沿って化学反応を再計算する化学反応ソルバ LARSEN を用い、より正確に電子数密度場を解像し直すことを試みた。ここで DSMC は流線を得る目的でしか使用しておらず、荷電粒子の分布を取得するための化学反応計算は LARSEN が担う。これにより、微量な荷電粒子の分布も解像可能となる。以下これを CFD-DSMC-LARSEN と呼称する。

LARSEN では、流線抽出に基づくことから流れに渦が存在しない等の制約や仮定を多く伴うため、計算対象が限定されてしまう可能性がある。そこで、第二の手法として、Species Weighting Scheme(SWS)と呼ばれる手法の実装を行った。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(数値粒子あたりの物理粒子数)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。Species Weighting Scheme は微量粒子捉える過剰な計算コストを抑えつつ微量化学種を正確に計算できる利点を持ち、LARSEN に依らず CFD-DSMC のハイブリッド手法だけで速やかに反応流の計算が可能となることが期待される。

研究成果 (Accomplishments) :

CFD-DSMC-LARSEN

前年度に、現象が単純な真空チャンバ内における数 cm スケールの小型ノズルによる微量種を含む仮想的な多成分凍結流(反応なし)を対象とし、CFD 単体で得られた解と CFD-DSMC-LARSEN で得られた解との比較を行った。CFD 単体では不自然な挙動を示していた電子数密度の分布が、CFD-DSMC-LARSEN では改善され、本手法が高高度を飛行中のロケットのような希薄大気中のノズル反応流の解析に適している可能性が示された。

今年度は、M-V ロケット 7 号機第 3 段(高度 180km)を対象に CFD-DSMC-LARSEN 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。電波減衰の様子はロケットの機体軸と基地局方向のなす角度であるルックアングルに対する減衰の大きさで整理できる。流体-電波伝搬連成解析の結果、希薄効果を取り込むことにより、CFD のみを用い

た場合と比べてフライト結果に近い減衰-ルックアングルの関係が取得された。CFD-DSMC のハイブリッド手法によって、バックフローと呼ばれる軽量の分子がプルームから機体前方側に押し返される希薄流特有の現象が流体解析の結果で確認されており、電子を含むプルーム形状が変化したこと由来すると考えられる。ただし、フライト結果と比較すると過小評価の結果を示している。CFD 領域における化学反応モデルや CFD, DSMC 境界の設定について今後より詳細な調査が必要である。

Species Weighting Scheme

SWS については、前年度までに無反応かつ内部エネルギーモードが励起されない条件下に限った分子間衝突の DSMC コードへの実装が完了し、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。本コードを使用し小型ノズルの多成分凍結流を対象とした計算を実施、電子数密度場を得ることに成功した。

ロケット噴煙への適用に先立ち、より詳細に SWS の適用可能な範囲について検証を行った。SWS では微量化学種を示す代表粒子の数を、重みを変更することにより人為的に増加させる。増加に従って、相対的に主要化学種の代表粒子が減少し、正しい現象が捉えられなくなる可能性がある。そこで、微量化学種粒子の増加上限を調査した。結果、微量化学種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が DSMC との比較によって確認された。ここでは、衝突対選択においてすべての粒子を等しく扱った。また、衝突対選択プロセスに補正を加えることによって、微量化学種粒子の増加に影響されない、より広範囲に適用可能なスキーム構築を試みた。すべての化学種に対し十分な衝突回数を確保するため、衝突の試行回数と衝突採択の確率に重みを考慮した補正を加えることにより、微量化学種粒子の個数に影響されずに解を得ることに成功した。

SWS を用いた CFD-DSMC ハイブリッド手法についてイプシロンロケット 3 号機の 3 段目（高度 240km）を対象とし、予備計算を実施した。これまで不可能だった CFD-DSMC のみを用いた計算によってプラズマ場の取得に成功した。ただし、本計算ではタイムステップによる計算時間の制約上、電子の質量を人為的に 1000 倍に設定している。本ハイブリッド手法によっても、前述したバックフローなどの希薄効果が確認され、より膨張したプラズマの挙動が得られた。FD2TD 法を用いた電波の減衰計算では、CFD のみによるプラズマ結果との差異を確認できなかった。この結果より、ノズルのごく近傍のプラズマが電波減衰に対して支配的であるという知見が新たに得られた。現在設定している希薄度の基準ではこの高い電子数密度領域を捉えきれておらず、CFD と DSMC 境界の算出方法についての検証が今後の課題として識別された。

本課題のプラズマ-電波干渉は、再突入時に強い衝撃波によって機体周囲に形成される弱電離プラズマによっても発生する。したがってこのようなプラズマの特性を適切に捉えることも課題となっている。そこで、本研究で開発した SWS を用いた DSMC を用いて再突入体の解析を行った。ただし、化学反応に加え、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。Split-merge method のコンセプトに基づき、これらの非平衡性を考慮しつつ、保存則が満足されるようにスキームを独自に発展させた。過去に日本にて実施された再突入試験 OREX のフライトデータ(高度 105km-高度 92km)を対象とした。フライト中に静電プローブによって取得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。この結果により SWS の計算手法に妥当性が示された。

以上、CFD-DSMC の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、CFD-DSMC ハイブリッド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、初めて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・検証によりモデル改良を継続し、より精度の高い予測手法の確立を目指す。

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. Virgile Charton, Julien Labaune and Kiyoshi Kinefuchi, “Investigation on the Hybrid NS-DSMC Simulation of a Nozzle Flow Ionization in a Rarefied Atmosphere using a Post-computation Approach,” Journal of Evolving Space Activities, 2024 Volume 2 Article ID: 153. <https://doi.org/10.57350/jesa.153>
2. Virgile Charton, Eiichiro Yamaoka, Takato Morimoto and Kiyoshi Kinefuchi, “Species Weighting Scheme in Direct Simulation Monte Carlo Applied to Jet Plume Simulations,” Journal of Computational Physics, Under review. Available at SSRN: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5164932>

(口頭)

1. Virgile Charton, 森本貴大, 山岡叡一郎, 杵淵紀世志, 「Hybrid NS-DSMC/Species Weighting Scheme の希薄大気中ノズル流への適用」, 第 63 回航空原動機・宇宙推進講演会/北部支部 2024 年講演会/第 5 回再使用型宇宙輸送系シンポジウム, 札幌, 2024 年 3 月.
2. Virgile Charton, Takato Morimoto and Kiyoshi Kinefuchi, “Prediction of In-Flight Telemetry Attenuation by an Ionized Solid Rocket Engine Plume at High Altitude using a Continuous-Rarefied Simulation Methodology,” 2024 AIAA Aviation and Aeronautics Forum and Exposition, AIAA paper 2024-4597, July 2024. <https://doi.org/10.2514/6.2024-4597>
3. 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.
4. 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.

5. 森本貴大, Virgile Charton, 山岡勸一郎, 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.
6. 山岡勸一郎, 森本貴大, Virgile Charton, 杵淵紀世志, 「高高度における固体ロケットプルーム解析のための Species Weighting スキームの DSMC 法への適用」, 宇宙輸送シンポジウム, 相模原, 2025 年 1 月.