

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

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、飛翔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) が生じたり、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。

代表者らはすでに 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 程度まで飛翔するため、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。すでに未反応流ではハイブリッド法の妥当性を確認しているが、DSMC 領域におけるプラズマを含む反応モデルの構築する必要がある。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目指す。

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は物理的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欠点がある。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。そこで代表者らは、以下2種の手法を比較・評価する方針にて研究を進めることとした。

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手法(LARSEN)を用い、より正確な電子数密度場を解像し直すことを試みる。ここでDSMCは流線を得る目的でしか使用しておらず、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と呼ぶ。

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条件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と呼ばれる手法の実装を行った。この手法はBoydらにより提案されたもので、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。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

まずCFD-DSMC-LARSENを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コールドフロー(反応なし)流れに適用し、CFD単体で得られた解と、CFD-DSMC-LARSENを用いて得られた解との比較を行った。結果、CFD単体の解析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。

次に、CFD-DSMC-LARSENの手法としての適用範囲を見極めるため、DSMCにおいて、全化学種・反応を含む忠実な条件で実施したケースと、単純化されたケースの二つの解の比較を行った。単純化されたケースは、計算負荷を下げるため、扱う化学種をモル分率の大きい5種までに限定し、化学反応を考慮していない。その結果、単純化されたケースで十分精度の高い結果が得られた。この結果は、DSMCによって得られる速度場はモル分率の高い数種類の分子の寄与が大きいことを示しており、計算精度を担保したまま計算時間の短

縮に成功したと言える。DSMC の実行時に、化学反応などの流れ場の形成に寄与が小さい処理を省き、本手法の効率化を図ることが可能となる。

Species Weighting Scheme

次に Species Weighting Scheme について述べる。まず本スキームを従来の DSMC コードに導入し、処理が複雑な分子間衝突の実装を完了し、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。そして小型ノズルの計算に適用し、凍結流としての処理ではあるが電子数密度場を得ることに成功した。従来の DSMC では計算が破綻する結果であったため、LARSEN による後処理等に頼ることなくロケットエンジンルームに相当する解析を実施できたことは一つの成果である。現在、化学反応の処理を実装し、同様に検証を進めている。

他にも、単純な無反応流を対象として、CFD-DSMC 手法そのものの計算精度の向上と計算コスト削減の検証を行った。前述の真空中への小型ノズルからのコールドフロー流れを対象に、DSMC の流入境界の格子点数を増加させることで実験値との誤差を最小に抑えることに成功した。また、従来用いられてきた CFD のメッシュ数を最大約 1/20 まで減少させてパラメトリックスタディを行ったところ、メッシュ数が結果の精度にほとんど影響しないことがわかった。これにより、CFD において一部の連続流領域のみ十分正確に解像出来ていれば、ノズルから離れた解析領域のメッシュはさほど粗くても問題ないことが示された。この結果は今後のハイブリッド手法における CFD の大幅な計算時間短縮に貢献できる可能性がある。

以上、CFD-DSMC のハイブリッド手法で化学反応流を解くための改良を行い、その有効性を示した。今後、これまでの成果を基に一層の精度・計算コストの最適化を図り、化学反応流を解いて得られた電子数密度場から、FD2TD 法を通して電波伝播の解析までを完了させ、公開されている実際のロケット飛行中の噴煙損失による電波減衰のデータとの比較を行っていく。

公表状況 (Publications) :

(論文)

1. V. Charton, et al., “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, Under review.

(口頭)

2. V. Charton, et al., “Investigation on the Simulation of a Nozzle Flow Ionization in a Rarefied Atmosphere Using a Post-computation Approach,” The 34th International Symposium on Space Technology and Science, June 2023.
3. V. Charton, et al., “Contribution of a Hybrid NS-DSMC Methodology for Rarefied Jet

Flow Simulations,” The 11th Asian Joint Conference on Propulsion and Power, March 2023.

4. 山岡叡一郎, 他, 「反応流への発展に向けたハイブリッド NS-DSMC 法によるノズル流解析の最適化」, 第 37 回数値流体力学シンポジウム, 2023 年 12 月.
5. V. Charton, 他, 「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, 2024 年 3 月 (発表予定) .
6. V. Charton, et al., “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, July 2024, (To be presented).