

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 12 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820366

研究課題名(和文) 惑星大気再突入体の通信ブラックアウト評価に関する研究

研究課題名(英文) A Study on Radio Frequency Blackout of Planetary Atmospheric Reentry Vehicle

研究代表者

高橋 裕介 (Takahashi, Yusuke)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40611132

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：惑星大気再突入時に宇宙機に現れる通信ブラックアウト・プラズマ減衰予測のための数値解析ソフトウェアを開発した。本ソフトウェアは3次元非構造格子データに対応したもので、対象となる宇宙機の形状再現性および自由度の高い構成となっている。また、過去に再突入試験を実施し通信ブラックアウトや通信電磁波の減衰データが得られているミッションに対して、本ソフトウェアを適用することで解析モデルの検証が行われた。その比較から、本解析モデルが実際の環境をよく再現することが確認された。本研究によって、宇宙機の通信視野角や通信時間の定量的評価および機体近傍のプラズマ流・電磁波分布を明らかにすることが可能になった。

研究成果の概要(英文)：An analysis model of plasma flow and electromagnetic waves around a reentry vehicle for radio frequency blackout prediction was developed. The plasma flow properties in the shock layer and wake region were obtained using a newly developed unstructured grid solver that incorporated real gas effect models and could treat thermochemically nonequilibrium flow. To predict the electromagnetic waves in plasma layer, a frequency-dependent finite-difference time-domain method was used. The combined model was validated based on experimental results in atmospheric reentry missions. The prediction performance of the combined model was evaluated with profiles and peak values of the electron number density. The signal losses measured during communication were directly compared with the predicted results. Based on the study, it is suggested that the analysis model could be an effective tool for investigating radio frequency blackout and plasma attenuation in radio wave communication.

研究分野：高速流体・高温気体力学

キーワード：惑星大気再突入 通信ブラックアウト 空力加熱 熱化学非平衡流 プラズマ中の電磁波電波 数値解析的アプローチ 計算科学

1. 研究開始当初の背景

今後需要の増加が期待される有人宇宙飛行やサンプルリターン、ISSなどの惑星軌道上ステーションからの貨物回収において、惑星大気再突入における新しい技術の進展や従来技術のさらなる信頼性の確保は大きな課題である。近年注目される再突入技術の1つに、再突入カプセルの着地・着水点の高精度予測が挙げられる。これは、着地・着水点分散をできるだけ小さく抑えることを目指すものであり、迅速な回収および回収コスト低減化に大きく寄与することが期待される。

地球周回軌道からの大気再突入において、再突入体は非常に高いマッハ数での飛行を経験する。このとき機体に多岐にわたる影響を与えるものが、機体前方に形成される衝撃層である。高い軌道速度で大気へ突入する再突入体は、飛行時において強い衝撃波を前方に生じ、機体は衝撃層に由来する高温のプラズマに包まれる(空力加熱)。このとき宇宙機と地上局・中継衛星との通信に用いる電波は、突入時に形成されるプラズマによって閉じ込められ、送信先アンテナへ到達できなくなることで通信途絶現象(通信ブラックアウト)が生じる。図1に示すように、通信ブラックアウトは、プラズマの存在によって電磁波の反射や回折、減衰が生じ、その進行が阻害されるためである。

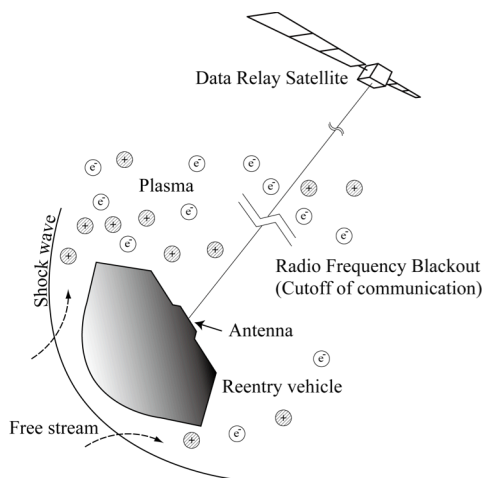


図1. 通信ブラックアウト概略図

高精度着地点予測のために、リアルタイムで再突入機位置を把握することが望ましいと言える。その一方で通信ブラックアウトが生じると、機体追跡が困難になり位置同定ができなくなる。そのため通信ブラックアウトを回避あるいは低減することが重要である。これまでブラックアウト低減化技術として、印加磁場によってアンテナ近傍のプラズマ分布を変化させる Magnet window [Kim 2008]や、大面積膜面を展開することで高高度での十分な空力減速を可能しプラズマ生成低下を図る Inflatable vehicle 技術 [Takahashi 2014]などが提案されている。また、機体設計において通信時間や通信視野角

の定量的評価は、機体形状やアンテナ位置、軌道決定の際の重要な事項となる。このような研究あるいは機体設計の場において、機体近くのプラズマ分布や電磁波分布を詳細に理解することが求められている。

2. 研究の目的

通信ブラックアウト評価を行うにあたって、再突入機近傍の電磁波挙動を明らかにすることが必要である。しかし、プラズマ風洞などの地上設備を用いて再突入時の環境を適切に再現することは難しい。また、実験機を打ち上げ、実飛行試験を行うことは非常にコストが高く、繰り返しできないと言った欠点がある。一方で数値解析はそれらの問題を緩和するとともに、相補的な関係になるものである。また、適切な物理モデル・解析モデルを用いることができれば、電磁波の時空間挙動について詳しい情報を得ることが期待される。

しかし、これまで詳細に調べられた例は少ない。電磁波はプラズマに強く影響されるため、プラズマ流分布を明らかにした上で電磁波挙動を調べる必要がある。プラズマに対しては数値流体力学(CFD)的手法、電磁波に対してはFD2TD法[Kunz 1993]と呼ばれる電磁波解析モデルを用いることは有用である。本研究ではこれらの手法を組み合わせ、再突入機近傍の電磁波挙動とプラズマとの干渉を明らかにする。事前計算として、ESA Atmospheric Reentry Demonstrator (ARD) [Tran 2007]の突入軌道に沿ってプラズマ流・電磁波解析を行った。そこで得られた電磁波の減衰ゲインの実験結果と解析結果の比較が図2である。定性的に良い一致が示されているが、実験では観測されない通信ブラックアウトを解析では予測する結果となった。この理由として、数値解析ソルバーの制限(2次元軸対称仮定)から、計算領域や機体形状、境界条件の再現が十分ではなかったこと;プラズマ予測における物理モデルの不確かさが問題になること;また、電磁波解析において、詳細なアンテナ近傍形状の再現をできていないことなど、いくつかの問題を

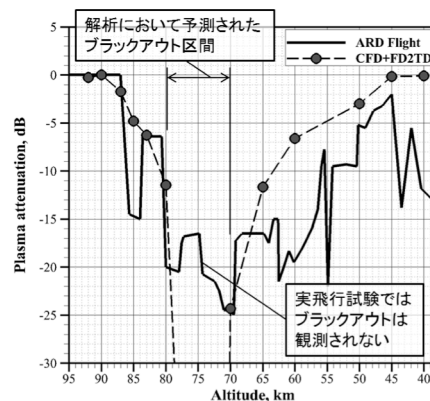


図2. プラズマゲインの比較 (ARD)

有する。以上より、本研究の目的を、数値解析手法を用いて惑星大気再突入機近傍の電磁波挙動を明らかにするとともに、信頼できる通信ブラックアウト・プラズマ減衰評価手法を開発することに設定した。

### 3. 研究の方法

通信ブラックアウト評価を行うにあたって、再突入機近傍の電磁波挙動を明らかにすることが必要である。電磁波はプラズマに強く影響されるため、プラズマ流分布を明らかにした上で電磁波挙動を調べる必要がある。プラズマに対して数値流体力学(CFD)的手法、電磁波に対しては電磁波解析手法のFD2TD法を用いることが有用であることは上で述べた。ここでは、これらの手法を組み合わせ、再突入機近傍の電磁波挙動とプラズマとの干渉を調べる。

再突入機周りのプラズマ気流諸量と電磁波挙動を予測する数値解析モデルの開発を進める。対象とする宇宙機が3次元的な形状、あるいは複雑な形状であっても柔軟に対応できるようなソルバーの開発方針とした。現在、ブラックアウト予測ツールを構成するプログラムは主には以下の2つとそれぞれのデータをつなぐデータコンバートプログラムである：

- (1) RG-FaSTAR-v2 (プラズマ流解析) : JAXAにおいて開発が進められている圧縮性流体解析ソフトウェアであるFaSTAR-v5.0.1[Hashimoto 2012]をベースに、応募者によって実在気体効果や化学反応、高温領域の輸送係数モデル、熱的非平衡モデルが組み込まれたバージョンとなっている。非構造格子に対応しており、高い形状再現性を示す。計算機リソースを効率的に運用するために、領域分割法とMPIを用いた並列化が実装される。
- (2) Arcflow/Arcwave (電磁波解析) : 北海道大学において応募者によって開発されたスクリプトコードであり、FD2TD法がベースとなっている。プラズマ中における電磁波の挙動を再現される。並列化手法として、領域分割法およびMPI、OpenMP (ハイブリッド並列も可) が用いられている。
- (3) RG-FaSTAR→Arcwave 間のデータコンバートプログラムの開発を実施する。

これらに加えて、解析モデルの検証をおこなう必要がある。内容として、また過去に行われた実飛行試験結果との比較を行ない、本解析モデルの検証を行う。また、アーク加熱風洞やICP風洞などのプラズマ風洞設備を利用し、プラズマ中における通信特性を実験的に取得する。解析結果と比較し、電磁波解析モデルの検証を行う。

### 4. 研究成果

第一の検証対象を NASA RAM-C として、衝撃波背後において形成されるプラズマ流挙動を調べた。加えて、その電子数密度分布などの流れ場情報を電磁波解析空間にマッピングし、電磁波の挙動を明らかにした。電磁波は、機体前方に形成される強い衝撃層では反射・減衰するが、機体後方の膨張領域においてはほぼプラズマによる障害がなく伝播

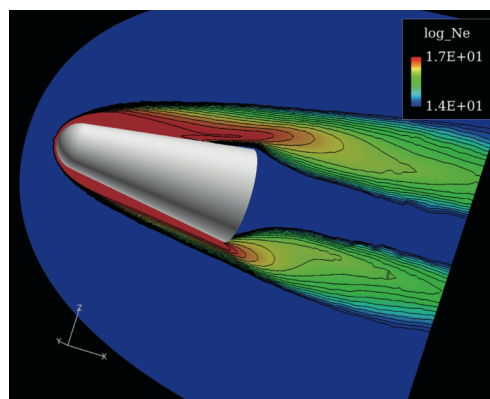


図3. RAM-C の電子数密度

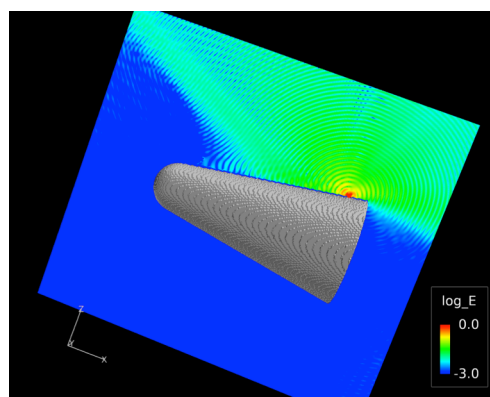


図4. RAM-C 近傍の電磁波挙動

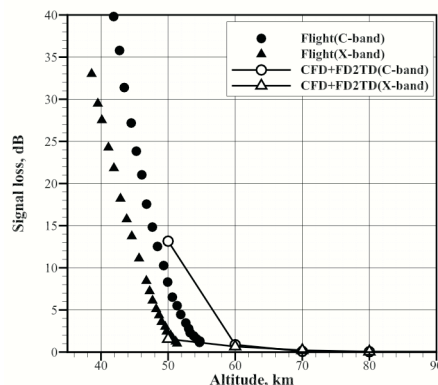


図5. RAM-C ミッションにおけるプラズマゲインの実験値と解析値の比較

することが示唆された。

さらに、図5に示すように、RAM-C 再突入ミッションで実測された電子数密度分布や電磁波の減衰ゲインに、数値解析結果の比較を行った。数値解析結果は実測値をよく再現し、本解析モデルは合理的であったと判断される。

加えて、ESA ARD も検証対象の1つとしている。ESA ARD ミッションは地球周回軌道からの典型的な大気再突入軌道であった他、機体と中継衛星との通信を介して再突入プラズマによる電磁波減衰ゲインが取得されている。ESA ARD はアポロコマンドモジュールの縮小形状である。すなわち、このような鈍頭形の再突入カプセルは、これまで多くの再突入ミッションで用いられてきたような典型的なカプセル形状であり、今後の利用も期待されるものである。広く利用される形状かつ典型的な再突入軌道での電磁波挙動を調べることは、今後の再突入カプセル開発においても有効な知見になると考えられる。

高度 85km における ARD 周りの電子数密度分布を図5に示す。機体前方の衝撃層に高い密度のプラズマ領域が現れている。図6は高度 85km における ARD 周りの電磁波挙動（電場分布）である。実条件と同じ位置の機体側面にアンテナが設置されており、電磁波が発信されている。NASA RAM-C のケースと同様に、機体前方の衝撃層で電磁波伝播が阻害される一方で、後方には進行することが確認される。

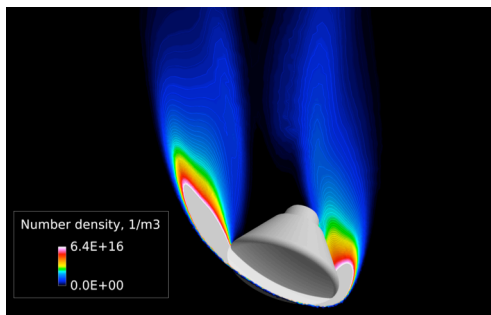


図5. ARD 周りの電子数密度分布

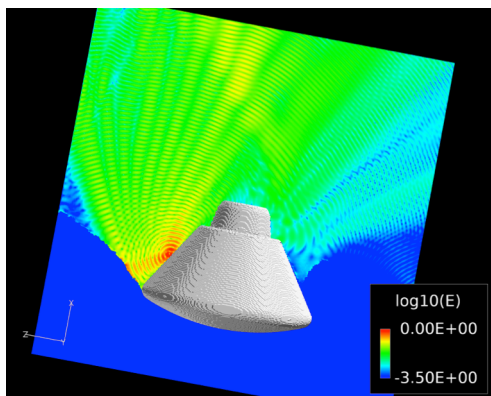


図6. ARD 周りの電磁波挙動（電場分布）

本研究において開発した解析モデルの検証としては、上述の通り、実飛行試験（NASA RAM-C や ESA ARD）による通信電波の減衰ゲイン履歴や電子数密度分布などの計測データと解析結果の比較を実施した。今後の取組として、DLR（ドイツ航空宇宙センター）において取得されたアーク加熱風洞を用いたプラズマ気流中における通信実験データを利用して、本解析コードのより精緻な検証を行う。

近年においては、JAXA において開発が進められている高効率ソルバー-FaSTAR など汎用的な圧縮性流体ソルバーの開発によって、従来難しかった高マッハ数領域での3次元・詳細形状周りの流体解析が可能になりつつある。加えて、新しい再突入機開発や様々なブラックアウト低減技術が提案されており、通信ブラックアウト評価法を機体設計や低減化の研究に組み入れる価値が高まった状況であると言える。

当該分野におけるこれまでの研究では、CFD を用いて再突入機近傍の電子数密度を調べ、臨界電子数密度（電磁波が進行できなくなる臨界値）と比較するに留まっていた。しかし、電磁波はプラズマ近傍において反射や回折、減衰などの特徴的な現象を生じ、実際の伝播挙動は複雑である。すなわち、CFD 単体で通信ブラックアウト評価を適切に行うことは難しく、電磁波解析手法の組み合わせが必要である。このことは、再突入時における通信時間や通信視野角に対して定量的評価が可能になり、新たな設計自由度を与え得る。

#### 〈引用文献〉

- ① M. Kim, M. Keidar, and I.D. Boyd. "Analysis of an Electromagnetic Mitigation Scheme for Reentry Telemetry Through Plasma". *Journal of Spacecraft and Rockets*, 45(6):1223-1229, November-December 2008.
- ② Y. Takahashi, K. Yamada and T. Abe, "Examination of Radio Frequency Blackout for an Inflatable Vehicle during Atmospheric Reentry", *Journal of Spacecraft and Rockets*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Vol. 51, No. 2, March 2014, pp. 430-441. DOI: 10.2514/1.A32539.
- ③ K. S. Kunz and R. J. Luebbers. *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*. CRC Press, Boca Raton, 1993.
- ④ P. Tran, J. C. Paulat, and P. Boukhobza. "Re-entry Flight Experiments Lessons Learned - The Atmospheric Reentry Demonstrator ARD". *Nato Report, RTO-EN-AVT-130-10*, pages 10-1 - 10-46, June 2007.

- ⑤ A. Hashimoto, K. Murakami, T. Aoyama, K. Ishiko, M. Hishida, M. Sakashita, and P.R. Lahur. "Toward the Fastest Unstructured CFD". *AIAA Paper 2012-1075*, 2012.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Yusuke Takahashi, "Advanced validation of CFD-FDTD combined method using highly applicable solver for reentry blackout prediction", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Institute of Physics, Vol. 49, No. 1, 2016, 085203 (15pp). DOI: 10.1088/0022-3727/49/1/015201. (査読あり)
- ② Yusuke Takahashi, Reo Nakasato, and Nobuyuki Oshima, "Analysis of Radio Frequency Blackout for a Blunt-Body Capsule in Atmospheric Reentry Missions", *Aerospace*, Vol. 3, No. 1, 2, 2016. (査読あり)
- ③ Yusuke Takahashi, Kazuhiko Yamada and Takashi Abe, "Prediction Performance of Blackout and Plasma Attenuation in Atmospheric Reentry Demonstrator Mission", *Journal of Spacecraft and Rockets*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Vol. 51, No. 6, December 2014, pp. 1954-1964. DOI: 10.2514/1.A32880. (査読あり)
- ④ 中里玲王, 高橋裕介, 大島伸行, "大気圏再突入時における ESA ARD 周りのプラズマ流・電磁波解析", JAXA-SP-15, 2016. (in press) (査読なし)
- ⑤ 中里玲王, 高橋裕介, 大島伸行, 溝渕泰寛, 村上桂一, "大気圏突入時における ESA ARD 周りの高エンタルピー流に関する非構造格子解析モデルの検証", JAXA-SP-14-010, pp. 145-149, 2015. (査読なし)

[学会発表] (計 11 件)

- ① Yusuke Takahashi, Reo Nakasato and Nobuyuki Oshima, "NUMERICAL ANALYSIS OF RADIO FREQUENCY BLACKOUT FOR ATMOSPHERIC REENTRY VEHICLE USING CFD-CEM COMBINED METHOD", *ECCOMAS Congress 2016*, Crete Island, Greece, 5-10 June, 2016. (発表決定)
- ② Yusuke Takahashi and Nobuyuki Oshima, "Development of Analysis Tools for Space Vehicle in Atmospheric Reentry Mission", *Korea-Japan CFD Workshop*

2015, Kasuga, Fukuoka, Japan, December 16-17, 2015.

- ③ Reo Nakasato, Yusuke Takahashi, and Nobuyuki Oshima, "Numerical Study of Plasma Flow around a Reentry Vehicle during Atmospheric Reentry with an Unstructured Grid Solver", *Proceedings of the ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015*, AJK2015-13593, Seoul, Korea, July 26-31, 2015.
- ④ Yusuke Takahashi, "Numerical Study of Plasma Flow and Blackout for Atmospheric Reentry Vehicle", 10th year commemorative Seoul National University and Hokkaido University symposium on Mechanical and Aerospace Engineering, November, 28, 2014, Hokkaido University, Sapporo, Japan.
- ⑤ Yusuke Takahashi and Nobuyuki Oshima, "Evaluation of Radio Frequency Blackout for Atmospheric Reentry Vehicle with CFD and FD2TD Combined Model", *The 4th East Asia Mechanical and Aerospace Engineering Workshop*, Oct, 24-25, 2014, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong.
- ⑥ ジョンミンソク, 木原尚, 安倍賢一, 高橋裕介, "迎角を考慮した Atmospheric Reentry Demonstrator 周りのプラズマ流・通信ブラックアウト解析", 平成 27 年度衝撃波シンポジウム, 1A4-4, 熊本大学, 熊本, 3/7-9, 2016.
- ⑦ ジョンミンソク, 木原尚, 安倍賢一, 高橋裕介, "3次元流体・電磁波連成解析システムを用いた Atmospheric reentry demonstrator 周りのプラズマ流解析", 第 29 回数値流体力学シンポジウム, C01-3, 九州大学, 春日市, 福岡, 12/15-17, 2015.
- ⑧ 中里玲王, 高橋裕介, 大島伸行, "大気圏再突入時における ESA ARD 周りのプラズマ流・電磁波解析", 第 47 回流体力学講演会/第 33 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2E02, 東京大学生産技術研究所, 東京, 平成 27 年 7/2-3 (2015)
- ⑨ 高橋裕介, Abhinav Kumar Jha, 大島伸行, "大気再突入機の通信ブラックアウト予測モデルの検証", 第 58 回宇宙科学技術連合講演会, 2I17, 長崎, 11/12-14, 2014.
- ⑩ 高橋裕介, Daniel Sors Raurell, 大島伸行, "有迎角再突入体のプラズマ流・通信ブラックアウト解析における予測性能評価について", 日本機械学会 2014 年度年次大会, S1910104, 東京, 9/8-10, 2014.
- ⑪ 中里玲王, 高橋裕介, 大島伸行, 溝渕泰寛, 村上桂一, "大気圏突入時における ESA ARD 周りの高エンタルピー流に関する

る非構造格子解析モデルの検証”，第 46 回流体力学講演会／第 32 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム，2C11，弘前文化センター，青森，平成 26 年 7/3-4 (2014)。

〔図書〕(計 1 件)

- ① Yusuke Takahashi, “Arc-Heated Wind Tunnel”, Encyclopedia of Plasma Technology, 2016. (in press)

〔その他〕

- ① 高エンタルピー流解析ソフトウェア『RG-FaSTAR』の開発

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 裕介(TAKAHASHI, Yusuke)

北海道大学大学院工学研究院・助教

研究者番号：40611132