

1MW アーク加熱風洞における

通信ブラックアウト低減化の数値シミュレーション

Numerical Simulation for Mitigation of Reentry Blackout in 1MW Arc-Heated Wind Tunnel

○ 高澤秀人, 北海道大学, 北海道札幌市北区北 1 3 条西 8 丁目, E-mail :
thide3224@eis.hokudai.ac.jp

高橋裕介, 北海道大学, E-mail:ytakahashi@eng.hokudai.ac.jp

大島伸行, 北海道大学, E-mail:oshima@eng.hokudai.ac.jp

木原尚, 九州大学, 福岡市西区元岡 744 番地, E-mail: kihara.hisashi.679@m.kyushu-u.ac.jp

Hideto TAKASAWA, Hokkaido University, N-13 W-8 Kita-ku, Sapporoshi Hokkaido 060-8628

Yusuke TAKAHASHI, Hokkaido University

Nobuyuki OSHIMA, Hokkaido University

Hisashi KIHARA, Kyushu University, 744 Motoooka Nishiku, Hukuokashi Hukuokaken 819-0395

To investigate the effects of surface catalysis in JAXA/ISAS 1MW arc-heated wind tunnel, we carried out numerical simulations of plasma flow and electromagnetic waves propagation using a coupling approach between computed fluid dynamics (CFD) and frequency-dependent finite-difference time-domain (FD2TD) method. From the results of the plasma flow analysis, it was indicated that reentry blackout occurs for the case of a non-catalytic wall, while reentry blackout does not occur for the case of a finite-catalytic wall. In addition, it was found that the electromagnetic waves propagate around the area where the critical electron number density proceeds. Furthermore, the experimental results using the arc-heated wind tunnel showed the good agreements with the computed results.

1. 諸言

近年, 宇宙輸送ミッションが増え, ますます宇宙開発が活発になっている。宇宙輸送において大気圏再突入は最もクリティカルな段階の一つであり, 宇宙からサンプルを持ち帰る際において避けられない過程である。しかし大気圏再突入における問題の一つに再突入機と地上局の通信が途絶えてしまう, 通信ブラックアウト現象が挙げられる。再突入時の強い衝撃波によって気体が解離・電離することで機体近傍にはプラズマが生じる。通信用電磁波がこのプラズマの影響を受けるため, 通信ブラックアウトが発生することがわかっている。この通信ブラックアウトを低減化することで, 正確な位置情報の補足, 着地点予測精度の向上, 着地着水後の回収コスト削減などの利益が得られる。従って大気圏再突入における安全性向上のため, 通信ブラックアウト現象を回避・低減する方法が求められている。

プラズマ中では正の電荷をもつイオンと負の電荷をもつ電子が運動しているため, 正または負の空間電荷が局所的に表れる。その結果イオンと電子はクーロン力によって引き合い単振動を行う。この単振動の周波数 f_p がプラズマ周波数と呼ばれており, 次式で表される:

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{e^2 n_e}{m_e \epsilon_0}} \quad (1)$$

ここで, n_e は電子数密度, e は電気素量, m_e は電子の質量, ϵ_0 は真空の誘電率である。このことからプラズマ周波数は電子数密度のみの関数となっている。通信ブラックアウトはプラズマ周波数 f_p が通信用の電磁波の周波数 f_{link} を上回るとき, すなわち $f_p \geq f_{link}$ のときに発生する。また, 本研究で用いる電磁波の周波数 $f_{link} = 2.4$ GHz であるため, 以下の式から通信ブラックアウトが生じる臨界電子数密度 $n_{e,crit}$ が計算される。

$$n_{e,crit} = \frac{4\pi^2 \epsilon_0 m_e f_{link}^2}{e^2} = 7.137 \times 10^{16} \text{ 1/m}^3 \quad (2)$$

したがって通信ブラックアウト低減のためには電子数密度を減らすことが重要となる。

通信ブラックアウト低減化手法の一つとして, 触媒性再結合反応を用いる方法が考えられる。この反応では機体の表面物質が触媒として働き, 解離・電離した気体原子, 電子などが壁に衝突して再び壁から離れる際にペアを作り再結合する。Jung ら^[1]は大気圏再突入機 ARD に対して触媒性再結合反応を考慮した数値解析を実施した。ここでは表面触媒によって, 機体後流の電子数密度が減少し, 通信ブラックアウト低減効果が数値的に示唆された。しかし, 触媒性再結合反応による通信ブラックアウト低減はまだ実験的には実証はされていない。

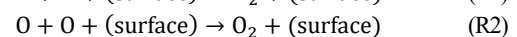
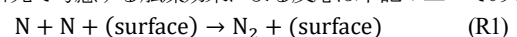
本研究のゴールの一つは, アーク加熱風洞を用いた触媒性再結合反応による通信ブラックアウト低減化の実験の実証である。対象は比較的实际の再突入環境を再現できる ISAS 1MW アーク加熱風洞などの大型アーク加熱風洞である。本研究では, その風洞試験に向け, 数値解析を用いて触媒性再結合反応の挙動に関する知見を得ること, 実際に実験を行い試験結果と比較することを目的とする。ISAS 1MW アーク加熱風洞に対し, 風洞内部のプラズマ流・電磁波解析を行い, 気流条件が触媒性に与える影響を明らかにする。

2. 解析手法

2.1 プラズマ流解析

流れは定常, 連続, 層流とし, 熱化学的非平衡を考え温度モデルは Park の 2 温度モデル, 化学種は Air 系 11 化学種 ($N_2, O_2, N_2^+, O_2^+, N, O, N^+, O^+, NO, NO^+, e^-$) 49 反応を考慮する。流れ場は熱化学的非平衡流に拡張した Navier-Stokes (NS) 方程式と状態方程式により表す。実在気体を考慮した圧縮性 NS 方程式は全質量, 運動量, 全エネルギー, 化学種質量, 振動・電子エネルギー保存則で構成される。

本研究で考慮する触媒効果による反応は下記の二つである。



有限触媒壁モデル^[2]は拡散による質量流束と気体分子運動論による壁面に衝突する原子の質量のつり合いにより決定される。壁面

に衝突した原子のうち再結合する割合を示す触媒性再結合係数 γ を用いて、モデル式は(3)のように表される。 $\gamma = 0$ で触媒性再結合反応が起こらない非触媒壁条件となり、 $\gamma = 1$ で壁面に衝突した原子が全て反応を起こす有限触媒壁条件となる。

$$-\rho D_s \frac{dC_s}{dn} + \gamma \rho_s \sqrt{\frac{R_s T_w}{2\pi}} = 0 \quad (3)$$

解析にはJAXAと北海道大学が開発した圧縮性CFDコードRG-FaSTAR³⁾を用いた。この解析コードは様々な格子形状に対応した非構造格子ソルバーであり、解析対象が複雑な形状であっても比較的容易に格子を生成することが可能である。また、領域分割法と合わせたMPI並列が実装されており、大規模計算も十分に可能である。計算機は九州大学情報基盤研究開発センターのスーパーコンピュータシステムITOを利用した。ノード数は8、1ノード当たりの並列数は36とした。

本研究ではISAS 1MW アーク加熱風洞のテストチャンバーに通信機器格納モデルを設置した状況を数値的に再現する、風洞の運転条件は空気流かつ入力電流 450 A、流入質量流量 18 g/s である。

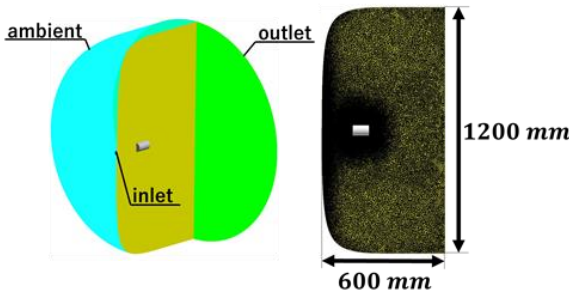


Fig. 2.1 Computational domain, grids, and boundary conditions for plasma flow simulation

解析格子と境界条件をFig. 2.1に示す。格子は非構造格子で約2,738万点。モデル近傍と流入口に詳細領域を設定した。アーク加熱風洞ノズル出口（流入部）のinlet部の流れ諸量は半径方向の分布を持っており、高橋ら⁴⁾のアーク加熱気流解析によって求められた。また境界条件として ambient に等温 (300 K)、等圧条件 (10 Pa)、outlet に流出条件を用いる。通信機器格納モデルは直径 50 mm で長さ 80 mm の円柱であり、ノズル出口から 150 mm、ノズル中心線から 0 mm に位置させた。

2.2 電磁波解析

電磁波解析にはFD2TD法を用いた。この手法では波源を囲むように解析領域を設定し、解析領域全体を微小直方体に分割する。その格子に合わせて空間的に離散化し、Maxwell方程式を解く。具体的には、ある時間ステップにおける電場の値から、次の時間ステップにおける磁場を求める。さらにその値をもとに次の時間ステップにおける電場を求めるといった流れを繰り返して時間ステップを進める方法である。

ISAS 1MW アーク加熱風洞内部の電磁波挙動解析には、北海道大学で開発された電磁波解析ソフトウェア Arcflow/Arcwave³⁾を用いた。この電磁波解析は1wayカップリングであり、プラズマ流解析で得られた電子衝突周波数分布を電磁波計算空間にマッピングする。周波数は今後行う実験条件とそろえるため2.4 GHzとした。

Fig. 2.2 に解析領域を示す。x 方向の解析領域は通信機器格納モデル先端から前方に 200 mm、後方に 380 mm で指定している。解析格子は構造格子で、格子数は 3200 万点である。通信機器格納モデル

の壁面には境界条件として、導電条件を設定する。解析領域外壁は仮想境界であるため、反射が起こらないように吸収境界条件を用いる。この吸収境界には Differential-based absorbing boundary condition の一種である Mur の一次吸収境界条件⁵⁾を用いる。

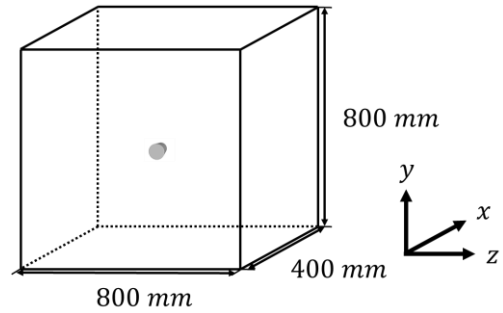


Fig. 2.2 Computational domain for electromagnetic waves simulation

エラー! 参照元が見つかりません。 Fig. 2.3 にアンテナの位置を示す。プラズマ流解析の結果と実際に用いる模型を考慮し、モデル前面から 50 mm の赤丸をアンテナ位置とした。

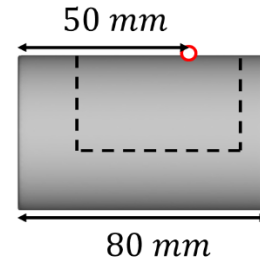


Fig. 2.3 Position of antenna

3. 解析結果と考察

3.1 プラズマ流解析

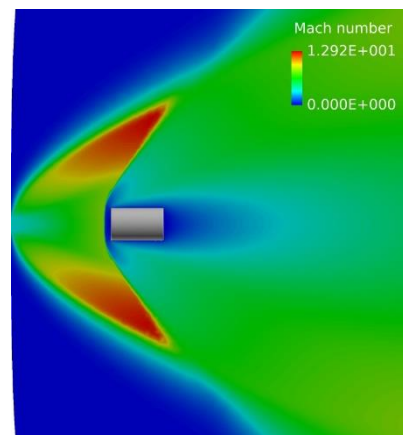


Fig. 3.1 Distributions of mach number

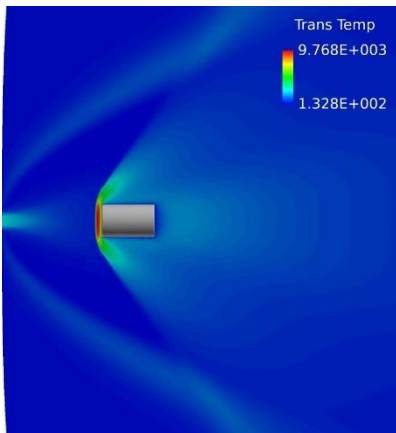
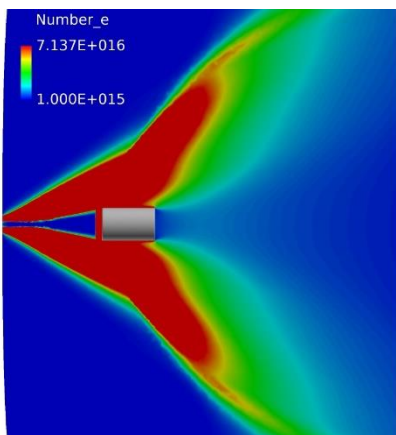
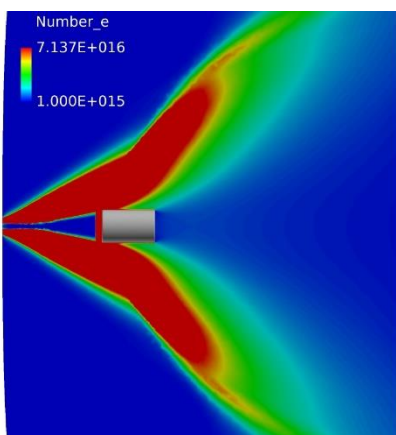


Fig. 3.2 Distributions of translation temperature [K]

Fig. 3.1 にモデル中心断面上のマッハ数分布, Fig. 3.2 に並進温度分布を示す。モデル前面で強い衝撃波が生じていることが確認できる。モデルの上部, 下部でマッハ数の高い領域が存在しており, これは流れがテストチャンバー内の低圧領域に向かって膨張することによって生じる。また, 衝撃波部分で圧縮されているため, 衝撃波背後でマッハ数が低下していることがわかる。加えて衝撃波背後で温度が上昇していることが確認できた。



(a) Non-catalytic wall ($\gamma = 0$)

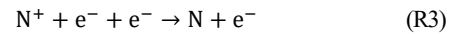


(b) Finite-catalytic wall ($\gamma = 1$)

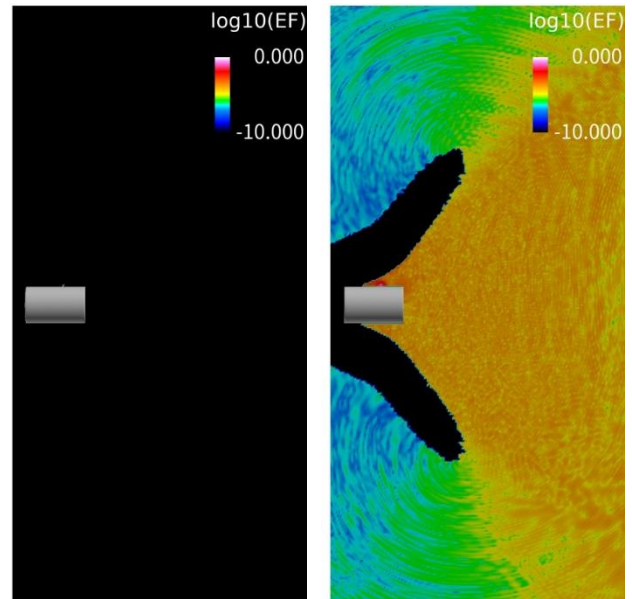
Fig. 3.3 Distributions of number density of electrons [$1/m^3$]

Fig. 3.3 に非触媒壁 ($\gamma = 0$) と有限触媒壁 ($\gamma = 1$) における電子

数密度分布を示す。この図において凡例の上限値を通信ブラックアウトが生じる臨界電子数密度 $n_{e,crit} = 7.137 \times 10^{16} 1/m^3$ にしており, 図の赤い部分は通信が遮断されてしまう領域である。この図から触媒性を付加した場合, モデル後流, 特にモデル近傍の電子数密度が減少していることがわかる。これは触媒性再結合反応(R1)(R2)により N,O が減少し, (R3)の電子衝突電離反応の逆反応により電子数が減少したこと, 流入気体の密度が高く触媒効果が後流に影響を与えるほど十分に反応できたことが理由であると推察する。



3.2 電磁波解析



(a) Non-catalytic wall ($\gamma = 0$) (b) Finite-catalytic wall ($\gamma = 1$)

Fig. 3.4 Distributions of electric field magnitude

プラズマ流解析により得られたプラズマ諸量をマッピングし, 電磁波解析を行った。Fig. 3.4 エラー! 参照元が見つかりません。に, 非触媒壁 ($\gamma = 0$) と有限触媒壁 ($\gamma = 1$) における電場ベクトル絶対値の常用対数分布を示す。プラズマ流解析から予測できるように, 非触媒壁のケースでは通信ブラックアウトが生じ電磁波が完全に遮断された。有限触媒壁のケースでは, 衝撃波によって生じた機体前面の臨界電子数密度以上の領域により電磁波が遮断されている。しかし反射や回折により回り込むことで, 大きく減衰はしているが通信ブラックアウトが生じないことが確認できた。

4. 通信試験

4.1 実験内容

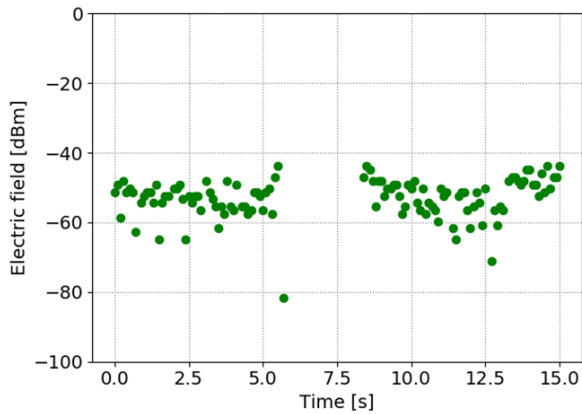
本実験は, 触媒性再結合反応による通信ブラックアウト低減実証のために行われた。使用したアーク加熱風洞は ISAS 1MW アーク加熱風洞である。風洞の運転条件は空気流かつ入力電流 450 A, 流入質量流量 18 g/s である。通信機は 2.4GHz の周波数帯のものを使用した。通信機格納モデルは数値解析モデルと同じで直径 50 mm で長さ 80 mm の円柱形状である。また受信機は風洞の真空チャンバー外部に固定した。加えて今回は触媒性再結合反応による差異を確認するため, 低触媒材料であるセラミック^[6]と高触媒材料である銅^[7]をそれぞれ前面に塗布した 2 つのモデルを用いた。

モデルは初めプラズマ気流外に待機させておき, ノズル出口 150 mm 下流・ノズル中心線 0 mm の位置の気流に投入する。2 秒間気流投入した後, 再び待機位置に戻す。このときの受信機の通信状

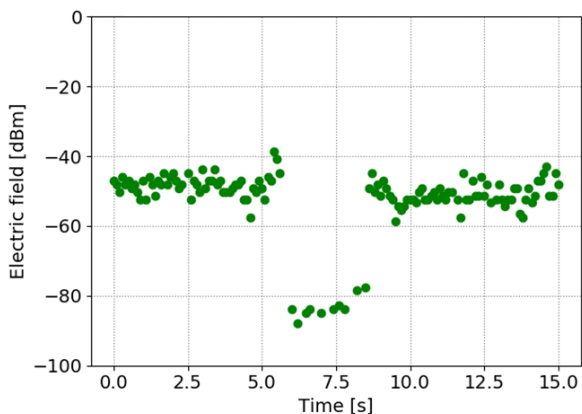
況を記録する。

4.2 実験結果

モデルは $t = 5$ s に待機位置から移動を開始し、 $t = 6$ s に気流投入位置に到着した。その後気流の中で 2 秒間停止し、待機位置に向けて移動した。Fig. 4.1 にセラミックと銅のモデルそれぞれの通信強度の測定結果を示す。



(a) Low catalyst material (Ceramic)



(b) High catalyst material (Copper)

Fig. 4.1 Profiles of Electric field in experiment

低触媒材料のセラミックモデルでは気流投入位置に到達すると同時に通信が遮断されているが、プラズマ気流外に出ると通信が復活している。このことからプラズマによって通信ブラックアウトが生じたことが確認できる。一方、高触媒材料の銅モデルは気流投入位置に到達しても、プラズマ減衰が生じるものの通信が途切れることなく続いていたことがわかる。この結果は数値解析の予測と定性的に一致しており、数値解析モデルの妥当性を裏付けるものとなっている。

5. 結言

本研究では、触媒性効果による通信ブラックアウト低減実証を目的とした通信試験に向けて、ISAS 1MW アーク加熱風洞に対してプラズマ流・電磁波解析を行った。さらにその結果に基づいてセットアップしたプラズマ風洞実験との比較を行った。触媒性を加えることでモデル後流、特にモデル近傍の電子数密度が減少することが確認できた。今回対象とした風洞運転条件では、非触媒壁 ($\gamma = 0$) のときはブラックアウトが生じるが、有限触媒壁 ($\gamma = 1$) のときはブラックアウトが生じないことがわかった。また電磁

波解析から通信用電磁波が前面の臨界電子数密度の領域を回り込み、電波することが確認できた。さらに解析条件と同じ条件で試験を実施した結果、数値解析の予測と定性的に一致する結果を得られた。

今後の課題として、触媒性再結合係数である γ 同定のための試験や数値解析が挙げられる。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 17K14871, 17KK0123 の助成を受けて行われた。本解析結果は、宇宙航空研究開発機構が所有する高速流体解析ソフトウェア「FaSTAR」を利用することにより得られたものである。本研究は九州大学情報基盤研究開発センター研究用計算機システムの HPCI を利用した (課題番号: hp190033)。実験に協力頂いた九州大学河野有哉氏に感謝する。

参考文献

- [1] M. Jung, “Numerical Study of Plasma Flows and Radio Frequency Blackout for Reentry Vehicle,” 工学院, 九州大学. 博士論文. (2018).
- [2] 久保田弘敏, 鈴木宏二郎, 綿貫忠晴, 宇宙飛行体の熱気体力学, 東京大学出版 会. (2002).
- [3] Y. 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, 015201 (15pp). (n.d.). doi:10.1088/0022-3727/49/1/015201.
- [4] 高橋裕介, 榎尚也, 木原尚, 山田和彦, 下田孝幸, “ISAS 1MWアーク加熱風洞におけるアーク加熱気流について,” 宇宙航行の力学シンポジウム. (2018).
- [5] G. Mur, Absorbing Boundary Conditions for the Finite-Difference Approximation of the Time-Domain Electromagnetic-Field Equations, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. EMC-23 (1981) 377–382. doi:10.1109/TEMC.1981.303970.
- [6] M. Balat-Pichelin, L. Bedra, O. Gerasimova, P. Boubert, Recombination of atomic oxygen on α -Al₂O₃ at high temperature under air microwave-induced plasma, *Chemical Physics*. 340 (2007) 217–226. doi:10.1016/j.chemphys.2007.09.019.
- [7] A. Grumet, J. Anderson, The effects of surface catalysis on the hypersonic shock wave/boundary layer interaction, 6th Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference. (1994). doi:10.2514/6.1994-2073.