

アーク加熱風洞内の模型周りのプラズマ流れによる 通信ブラックアウト現象に関する数値解析的研究

Numerical study of radio frequency blackout caused by a plasma flow around a test model
in an arc-heated wind tunnel

- 河野有哉, 九大院, 〒 819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744
Lee Chae-Hyun, 九大学, 〒 819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744
木原 尚, 九大工, 〒 819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744
安倍 賢一, 九大工, 〒 819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744

Yuya Kawano, Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395 Japan

Lee Chae-Hyun, Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395 Japan

Hisashi Kihara, Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395 Japan

Ken-ichi Abe, Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395 Japan

The radio frequency blackout that occurs during a spacecraft re-entry is a complicated phenomenon that is not well understood, and thus requires more detailed studies. In this paper, a numerical study of flow fields around a test model in an arc-heated wind tunnel was performed. Furthermore, the electromagnetic field simulation using a frequency dependent finite difference time domain (FD2TD) method was also performed to clarify the behavior of radio waves. To discuss the validity and further improvement of the simulation, the obtained results are compared with some experimental data.

1. 緒言

昨今の宇宙開発の中で、ソユーズ宇宙船での宇宙飛行士の地球への帰還や、はやぶさプロジェクトにおけるカプセルなど大気圏再突入を伴うミッションの需要が増えてきており、今後活発になっていく有人の宇宙開発ではさらにその必要性が加速すると考えられる。このような再突入を伴うミッションでは、再突入機と地上局との間で機体の正確な位置やその他のデータを送受信することが、ミッションの安全性の向上や着地・着水後の速やかな機体の回収、精度の高い軌道制御のために必要となる。

しかし、宇宙機が大気圏に再突入する際、機体前面に形成される強い衝撃波により加熱圧縮された気体がプラズマ化し、そのプラズマが機体の周囲を取り囲む。そのプラズマ中では電波の反射や回折、減衰が起こることが知られており、これによって通信に使用される電波が影響を受け、通信途絶（通信ブラックアウト）が発生する可能性がある⁽¹⁾。従って、大気圏突入中でも地上局や通信中継衛星を利用して絶えることなく通信が行える環境を実現することが、より高精度で安全な飛行体の運用回収において重要であり、そのためには通信ブラックアウト現象について深く理解することが必要不可欠である。

本研究室ではこれまで、上記のような惑星大気圏突入時の高温空気力学に関する研究として、本研究室が所有する 20 kW 級アーク加熱風洞を用いた種々の実験や、風洞内の流れ場に関する数値シミュレーションが行われてきた。その中で、Takahashiら⁽²⁾によって、流体解析と電磁波解析を連成する流体解析システムが構築された。この解析手法では、流体解析で得られた電子数密度等のプラズマパラメータを電磁場解析の計算空間にマッピングし、マクスウェル方程式を解くことで電磁波挙動を計算する。ここで、電磁場解析には FD2TD(Frequency Dependent Finite Difference TimeDomain)⁽³⁾法が用いられている。

本研究では、この数値解析システムを用いて、本研究室所有のアーク加熱風洞内に設置された模型周りの流れ及び電磁波解析を行う。得られた計算結果を、別途最近実施された通信ブラックアウトの再現実験及びトリプルプローブ法を用いた電子数密度の測定実験の結果と比較し、現在の予測精度を評価すると

もに問題点を明らかにし、さらなる高精度化への指針を得ることを試みる。

2. 流れ場のモデル化

流れ場については、層流、定常および連続とし、熱化学的非平衡流を仮定する。流れ場は 4 温度モデルを用いて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で記述される。温度は並進、回転、振動および電子温度の 4 温度に分けられ、電子励起温度は電子温度に等しいと仮定する。NS 方程式は全質量、運動量、全エネルギー、化学種質量、振動・回転・電子エネルギー保存則で構成される。粘性係数や熱伝導係数、拡散係数などの輸送係数は、Chapman-Enskog 近似に基づき多成分、多温度に拡張した Gupta のモデル⁽⁴⁾から計算される。拡散係数は Curtiss and Hirschfelder の式⁽⁵⁾により記述される。化学種間の衝突断面積は Gupta⁽⁴⁾、Fertig⁽⁶⁾⁽⁷⁾らのモデルを採用する。また、イオン種と電子に対して両極性拡散を考慮する。化学種には空気流に関する 11 化学種 (N_2 , O_2 , NO , N_2^+ , O_2^+ , NO^+ , N , O , N^+ , O^+ , e^-) を扱い、これらの化学種による化学反応は 49 反応を考慮する。化学反応速度定数は Park のモデル⁽⁸⁾⁽⁹⁾を用いる。内部エネルギー交換に関して、並進-回転、並進-振動、並進-電子、回転-振動、回転-電子および振動-電子間のエネルギー交換を考慮する。重粒子衝突反応による回転・振動エネルギー損失は非選択的解離モデルで評価する。また、電子衝突解離および電離反応による電子エネルギー損失を考慮する。支配方程式はセル中心有限体積法を用いて離散化される。非粘性数値流束の評価には SLAU2⁽¹⁰⁾ スキームを用いる。空間精度については MUSCL 内挿法により 2 次精度としている。粘性数値流束には 2 次精度中心差分法を用いる。時間積分法には陰解法を用い、時間積分スキームは、LU-SGS 法とともに point implicit 法を用いる。流入条件として、Takahashi⁽¹¹⁾の研究によって得られたアークヒータ内部の気流データを用い、後方には流出条件を用いる。壁面については十分に水冷されている銅製プローブをシミュレートするため完全触媒性を仮定し、すべりなし 300 K の等温条件とする。また、本研究室が行っている通信実験では、模型の設置位置をノズルの向きと垂直な方向に動かして、

データの取得を行っている。それに対応するために、実験と同じ位置関係に模型を設置した計算を行う。その際、毎回計算格子を作成しなおすのではなく、流入条件を平行移動させて入力する。

3. 電磁場のモデル化

電磁波の挙動はマクスウェル方程式を用いて表現され、アンテナの設計など電磁場の解析によく用いられている FD2TD 法を採用した。本研究では、電磁波解析に必要な比誘電率や電気伝導率などのプラズマパラメータは、流体解析で得られたデータをマッピングすることで与える。計算領域は x 方向に 0.2 m, y 方向に 0.3 m, z 方向に 0.3 m の直方体とし、この領域内に試験体を内包する。格子点は x, y, z 方向それぞれに等間隔で 200 点ずつ設定した。境界条件については全ての境界面に対して Mur の吸収境界条件⁽¹²⁾ を適用する。今回の解析では送信アンテナの位置を試験体側面部である $x = 0.08$ m の地点として解析を行った。

4. プラズマ周波数と臨界電子数密度

プラズマ中の電子は式 (1) で表されるプラズマ周波数 f_p で単振動している。

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{e^2 N_e}{m_e \epsilon_0} \right)^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 e は電子の電荷、 N_e は電子数密度、 m_e は電子の質量、 ϵ_0 は真空の誘電率である。

電波がプラズマ中を減衰することなく伝播するか、プラズマによって遮断されるかを定める境界となる周波数を遮断周波数と言い、一般にプラズマ周波数 f_p と一致することが知られている。

また、式 (1) から分かるように、遮断周波数は周囲の電子数密度 N_e のみに依存することから、この値が通信の可否を大きく左右する重要なパラメータである。周波数 f の電波を遮断するプラズマの最小の電子数密度を臨界電子数密度といい、次のように求められる。

$$N_{e,crit} = \frac{4\pi^2 m_e \epsilon_0 f^2}{e^2} \quad (2)$$

5. シミュレーション結果とその考察

5.1 通信ブラックアウト実験との比較

本研究室のアーク加熱風洞は、流入気体の体積流量と入力電流を操作することができる。今回の実験では、作動流体に窒素を用い、体積流量を 40 L/min, アーク電流を 180 A とした。また、通信機器は、送信機を直径 50 mm, 長さ 80 mm の円柱形の無酸素銅製の模型に格納して風洞内部へ、受信機を風洞外部に設置してアーク気流をはさんだ通信環境を構築した。送信機を格納した模型は風洞内部でノズル出口から $x = 40$ mm の位置で主流と垂直方向に任意に移動できるようにし、模型のノズル中心線からの距離 y を数通り変化させて実験を行った。通信機の周波数は 2.4 GHz である。このとき、式 (2) から得られる臨界電子数密度は約 7.14×10^{16} ($1/m^3$) である。

上記の実験条件を Tab.1 にまとめる。なお、数値シミュレーションの解析条件はすべてこの実験条件と同じである。

Fig.1 に模型のノズル中心線からの距離 $y = 0$ mm のケース、Fig.2 に $y = 50$ mm のケースの、マッハ数と電子数密度の分布を示す。電子数密度は分布が見やすいように対数表示している。マッハ数と電子数密度の分布を見比べると、アークジェットの内側だけでなく、計算領域の広い範囲で電子数密度が高くなっているが、プローブの下流側にわずかに電子数密度が低い領域

が形成されている。プローブ近傍に注目すると、どちらのケースもプローブの周囲の電子数密度が先に示した臨界電子数密度を上回っていることが分かる。この結果は、いずれのケースも今回実験で用いた 2.4 GHz の周波数の電波が遮断され、通信ブラックアウトが生じることを予測している。しかし、実際に通信実験では、 $y = 0$ mm のケースでは通信ブラックアウトは生じたものの、 $y = 50$ mm のケースでは生じなかった。つまり、今回の数値シミュレーションでは少なくとも $y = 50$ mm のケースではプローブの周囲において電子数密度が大きく見積もられていることが分かった。

Tab. 1: Experimental and computational conditions.

Working gas	N ₂
Arc current	180 A
Volume flow rate	40 L/min
Distance from nozzle outlet to probe	$x = 40$ mm
Distance from nozzle center line to probe	$y = 0, 50$ mm
Radio frequency	$f = 2.4$ GHz

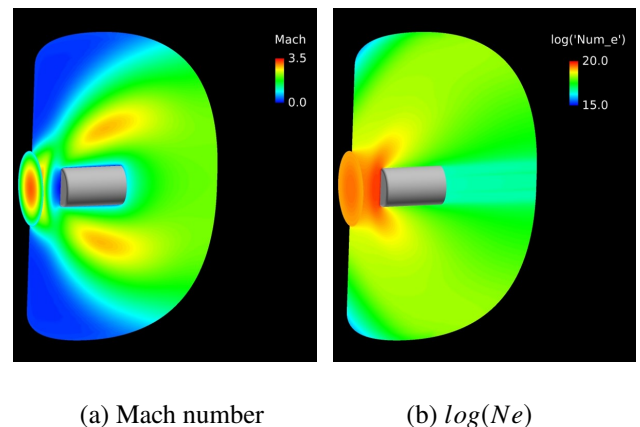


Fig. 1: Flow-field distributions for case $y = 0$ mm.

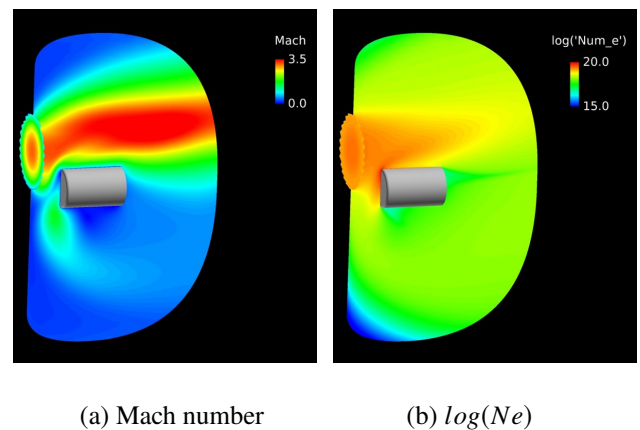


Fig. 2: Flow-field distributions for case $y = 50$ mm.

5.2 電子数密度測定実験との比較

前述の通信実験では、通信可否の確認および通信ができた場合の受信電波の電界強度の測定のみ可能であった。続いて、同じアーク加熱風洞を用いた、トリプルプローブ法による電子数密度の測定実験⁽¹³⁾との比較を行った。実験では、ノズル出口から 40 mm 下流の平面で、ノズル中心線から主流と垂直面の半径方向に $r = 0 \sim 25$ mm の領域の複数の点での電子数密度を測定した。

実験での測定結果 (experiment) と、同じ位置での数値シミュレーションの結果 (CFD) を比較して Fig.3 に示す。縦軸の電子数密度は対数表示している。

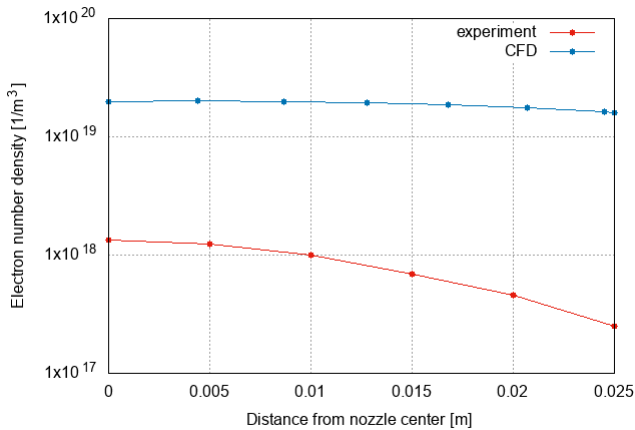


Fig. 3: Comparison of electron number density between CFD and experiment.

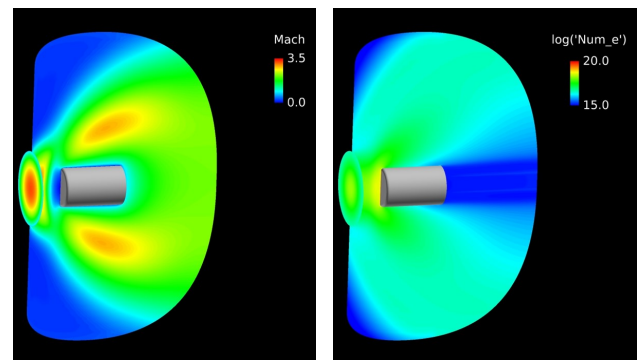
Fig.3 から、シミュレーションでは実験の測定値に比べ 10 倍から 100 倍ほど電子数密度が大きいことが分かる。また、実験の測定値では半径方向に大きい勾配を持っているが、シミュレーションでは半径方向の勾配は小さくなっている。この結果は、前述した通信実験との比較において、シミュレーションでは電子数密度を大きく見積もっているという考察と合致する。

これまでの考察から、シミュレーションでプローブ周辺の電子数密度が大きく見積もられる大きな原因の一つは、流入部の境界条件として用いているノズル出口の電子数密度の分布にあると考えられる。そこで、本研究では試験的に流入部の電子数密度が小さくなるようにその分布を意図的に変化させて再度シミュレーションを行い、その影響について調査した。具体的には、Fig.3 を参考に、それぞれの r の位置でシミュレーションのオリジナルの値を何倍すれば実験の測定値に近づくかを調べ、それを r の関数として作成した。その関数を、流入部に境界条件として用いている電子数密度の分布に乘以、ノズル出口の電子数密度分布として用いた。

Fig.4 に、実験結果をもとに修正した流入条件を用いたシミュレーション結果を示す。なお、模型のノズル中心線からの距離は $y = 0$ mm のケースである。マッハ数の分布は前節で示したオリジナルの結果と大きな違いはない。このことから、ノズル出口の流れ場の分布のうち、電子数密度やそれに伴って他の粒子の数密度のみを意図的に変化させて流れ場のシミュレーションを行っても、電子数密度や電子温度以外の速度場への影響は小さいと考えられる。電子数密度は予想通り、前節で示したオリジナルの結果と比べ全体的に小さくなっており、プローブの周囲に臨界電子数密度を下回る領域が存在することが分かる。

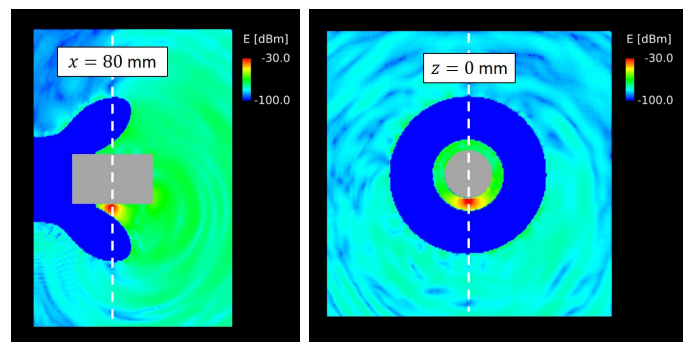
Fig.5 に、流れ場のシミュレーション結果をもとにした電磁場のシミュレーションを行って得られた、電界 E [dBm] の分布を示す。左側は主流と平行でノズルの中心を通る断面 ($z = 0$ mm)、右側は主流と垂直でアンテナの位置を通る断面 ($x = 80$ mm) での分布を示している。ノズル出口からプローブ前方にかけての電子数密度が大きい領域では電波は全く伝播していない。しかし、このような電子数密度が大きい領域はプローブを完全に包み込んでおらず、プローブの下流側は電子数密度が比較的低くなっており、プローブ周辺を含むその他の領域では電波が伝播していることが分かる。

前述の通り、このケースの通信実験では通信ブラックアウトが生じた。このシミュレーション結果は一見すると、広く電波が伝播しているようであるが、実験で用いた通信機器が受信できる電界強度の下限が経験的におよそ -90 dBm であるので、その前後まで電波が減衰しているこの結果は、比較的实验の結果に近いと思われる。



(a) Mach number (b) $\log(N_e)$

Fig. 4: Flow field distributions for case $y = 0$ mm with modified inflow boundary condition.



(a) E (dBm) at $z = 0$ mm (b) E (dBm) at $x = 80$ mm

Fig. 5: Electric strength distributions for case $y = 0$ mm with modified inflow boundary condition.

6. 結論と今後の展望

本研究室が所有する 20kW アーク加熱風洞内の模型周りの流体解析及び電磁場解析を行った。また、通信実験や電子数密度の測定実験の結果との比較を行い、数値シミュレーションの妥当性の評価や精度向上に向けたいくつかの議論が可能になった。本研究により以下のことが得られた。

- アーク加熱風洞内の流れ場に関して、実験とシミュレーションの両方でデータを取得し、それらを比較する環境を構築できた。
- 従来のシミュレーション結果は電子数密度を大きく見積もっている可能性が高いことが分かった。
- 実験での測定結果を参考にノズル出口での電子数密度を修正すると、比較的通信実験と近いシミュレーション結果が得られた。
- 今後ノズル内部の流れ場を再検証する際に、参考にできる数々の知見を得た。

本研究でさらに通信ブラックアウトに関して詳しい考察をするためには、反応定数や輸送定数などのモデルを再考したうえでノズル内部の流れ場も含めて再検討したり、電波に関してより定量的な実験データを取得したりすることなどが必要になると思われる。このような検証、考察を重ねることで通信ブラックアウト現象のより詳しい理解に貢献することが、本研究の今後の展望である。

謝辞

本研究は主に九州大学情報基盤研究開発センターの研究用計算機システムを利用しました。

参考文献

- (1) Ryback J. and Churchill R. "Progress in Reentry Communications" IEEE Trans Aerospace Electronic System V7 pp879-894 1971
- (2) Takahashi, Y., Yamada, K. and Abe, T., " Examination of Radio Frequency Blackout for an Inflatable Vehicle During Atmospheric Reentry," Journal of Spacecraft and Rockets, 51 (2014) , pp. 430-441.
- (3) Kunz, K. S. and Luebbers, R. J. ,Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics, CRC Press, Boca Raton, (1993), pp.11-27.
- (4) Gupta R. N., Yos J. M., Thompson R. A. and Lee K. -P., "A Review of Reaction Rates and Thermodynamic and Transport Properties for an 11-Species Air Model for Chemical and Thermal Nonequilibrium Calculations to 30000K," NASA RP-1232, August 1990
- (5) Curtiss C. F. and Hirschfelder J. O., "Transport properties of Multicomponent Gas Mixture," *Journal of Chemical Physics*, Vol. 17, No. 6, June 1949, pp. 550-555.
- (6) Fertig M., Dohr A. and Frühauf H. -H., AIAA Paper 1998-2937, 1998.

- (7) Fertig M., Dohr A. and Frühauf H. -H., "Transport Coefficients for High-Temperature Nonequilibrium Air Flows," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 15, No. 2, April-June 2001, pp. 148-156.
- (8) Park C., "Review of Chemical-Kinetic Problems of Future NASA Missions, I: Earth Entries," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 7, No. 3, July-September 1993, pp. 385-398.
- (9) Park C., Jaffe R. L. and Partridge H., "Chemical -Kinetic Parameters of Hyperbolic Earth Entry," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 15, No. 1, January-March 2001, pp. 76-90.
- (10) Kitamura K., Shima E., "Towards shock-stable and accurate hypersonic heating computations: A new pressure flux for AUSM-family schemes" *Journal of Computational Physics*, 245, 62-83, 2013
- (11) Takahashi, Y., " Numerical Study of heat and expansion Processes of Plasma Flows in Arc-Heated Wind Tunnels," Doctoral thesis, Aeronautics and Astronautics, Kyushu University, (2011)
- (12) Mur, G., " Absorbing Boundary Conditions for the Finite-Difference Approximation of the Time Domain Electromagnetic-Field Equations," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, EMC-23 (1981), pp. 377-382.
- (13) Lee Chae Hyun, " Experimental Measurement of plasma characteristics in an arc-heated wind tunnel through triple Langmuir method," Bachelor thesis, Aerospace Engineering Course, Kyushu University, (2019)