

## アーク加熱風洞内の模型周りの流れ場・電磁波解析

### Numerical analysis of flow and electromagnetic fields around a probe in an arc heated wind tunnel

- 小森 一矢, 九大院, 〒819-0395 福岡市西区元岡 744, E-mail:komori@aero.kyushu-u.ac.jp  
 木原 尚, 九大, 〒819-0395 福岡市西区元岡 744, E-mail:kihara@aero.kyushu-u.ac.jp  
 安倍 賢一, 九大, 〒819-0395 福岡市西区元岡 744, E-mail:abe@aero.kyushu-u.ac.jp  
 Kazuya Komori, Kyushu University, 744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan  
 Hisashi Kihara, Kyushu University, 744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan  
 Ken-ichi Abe, Kyushu University, 744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

Numerical simulation of plasma flow around a probe in an arc-heated wind tunnel was performed to obtain plasma parameters that are necessary for electromagnetic wave analysis. By using frequency dependent finite difference time domain (FD2TD) method, electromagnetic wave analysis was performed. It was clarified that a frequency has a great influence on the area where communication is available. Moreover, the results of the analysis and the communication test conducted in the laboratory experiment were compared. The behaviors of the electromagnetic waves in an arc-heated wind tunnel were investigated and generally good agreement was obtained between the simulation and the experiment.

#### 1. 緒言

国際宇宙ステーション (ISS) からの人員・物資の回収や、小惑星からのサンプルリターンミッションにおいて、再突入体の位置追跡や着陸・着水後の速やかな機体の回収を行う技術の確立が求められている。現在、再突入体の位置同定には、GPS 衛星やイリジウム衛星通信網の利用がある。しかしながら、これらの電磁波を使った追跡では、再突入時の衝撃波に由来する機体近傍のプラズマによって、電磁波の反射や回折、減衰が起こり、地上局や中継衛星との通信途絶 (通信ブラックアウト) が起こる可能性がある。したがって、再突入時の通信可能性の評価は非常に重要であり、中継衛星の位置を適切に選ぶことによって、通信ブラックアウトの回避が可能になることが期待される。しかしながら、実機を用いた再突入時の通信実験はコストの面からも現実的ではなく、数値解析は有効な手法と考えられる。

通信可能性の評価を行うには、中継衛星や地上局と再突入体の位置関係を考慮したうえで、3 次元電磁波挙動の予測を行う必要がある。そのため本研究では、Takahashi ら<sup>(1)</sup>によって、流体解析と電磁波解析を錬成する流体解析手法が構築された。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波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。電磁波解析には FD2TD(Frequency Dependent Finite Difference Time Domain)<sup>(2)</sup> 法を用いる。しかしながら前述したとおり、再突入時の通信実験はコストの面から難しく、解析結果の実験との比較が難しい。そこで本研究では、本研究が所有するアーク加熱風洞を解析対象とし、風洞内の模型周りの流れ場・電磁波解析を行い、通信実験の結果と比較することで解析の妥当性の評価を行うことを目的とする。

#### 2. 20kW アーク加熱風洞

本研究が所有する 20kW アーク加熱風洞の概略図を Fig.1 に示す。アーク加熱風洞は、アークヒータ、測定室、真空排気系、冷却系、気体供給系、電源、コントロールパネルで構成される。試験気体として、アルゴン、窒素、酸素を使用することができ、窒素と酸素の混合気体を使用することで疑似空気を使った試験を行うことも可能である。今回は実験ケースの単純化のために試験気体として窒素を使用した。

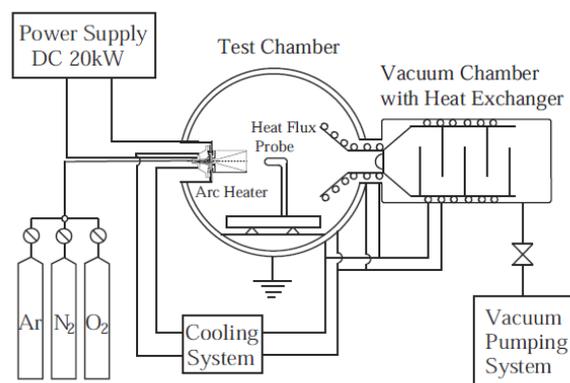


Fig.1 Schematic view of 20kW arc-heated wind tunnel

#### 3. 流れ場のモデル化

##### 3. 1 支配方程式および数値解析法

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 Yos<sup>(3)</sup>の式から計算される。拡散係数は Curtiss and Hirschfelder<sup>(4)</sup> の式により記述される。化学種間の衝突断面積は Gupta and Fertig ら<sup>(5)(6)</sup>のモデルを採用する。また、イオン種と電子に対して両極拡散を考慮する。化学種としては基本的に空気流に関する 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として 49 反応を考慮している。ただし、前述の通り本研究ではこのうち窒素に関するもののみ使用する。化学反応速度定数は Park のモデルを用いる。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 のスキームを用いる。空間精度については MUSCL 内挿法により 2 次精度とする。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。

### 3. 2 境界条件

流入条件として、Takahashi<sup>®</sup>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。試験体表面は触媒性を仮定し、すべりなし 300K の等温条件とする。

また、本研究室で行っている通信実験では、模型の設置位置をノズル中心軸に垂直な方向に動かして、データの収集を行っている。本研究では実験と同じ位置関係での計算を行うが、その際には流入条件を平行移動させて入力することにより対応する。

### 3. 3 計算格子

今回の解析では、ノズル間距離 40mm の位置に直径 50mm の円柱模型が設置されているモデルを作成した。Fig.2 に作成した 3 次元格子を示す。2 次元軸対称格子を中心軸周りに回転させて、3 次元格子を作成する。その際、中心軸上に特異線が存在するため、重合格子法を適用しており、中心軸付近では、軸対称ではない格子を用いる。格子点数はそれぞれブロック 1: 100×20×20、ブロック 2: 100×173×60、ブロック 3: 100×20×20 である。

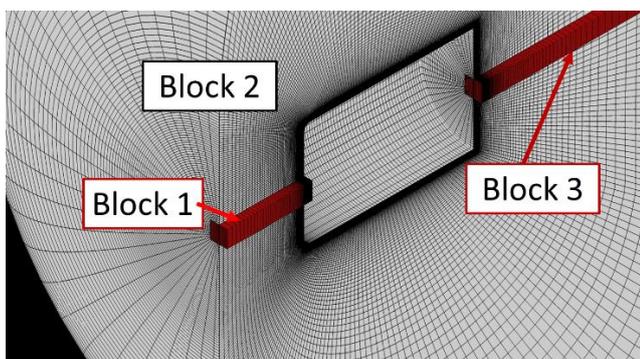
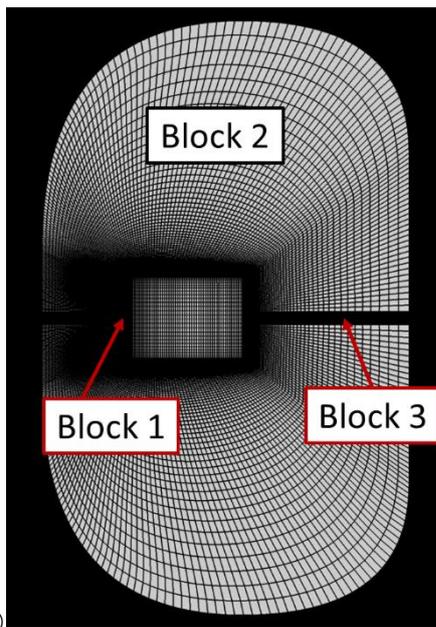


Fig.2 Three-dimensional grid of test piece

### 4. 電磁波のモデル化

電磁波の挙動はマクスウェル方程式を用いて表現され、再突入周りのプラズマのような分散性媒質（周波数依存）におけるマクスウェル方程式の数値的表現法として FD2TD 法<sup>®</sup>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。また透磁率は真空中での値と等しいと仮定する。計算領域は x 方向に 0.18m, y 方向に 0.2m, z 方向に 0.1m 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 100 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<sup>®</sup>を適用する。今回の解析では発信アンテナの位置を試験体の下流側である x=0.12m の地点として解析を行った。また通信周波数は本研究室が所有するアンテナと同じ 2.4GHz とテストケースとして 30GHz の 2 種類で解析を行った。通信周波数  $f$  と臨界電子数密度  $n_{e,crit}$  の関係は電気量  $e$  と電子 1 個当たりの質量  $m_e$  と真空中での誘電率  $\epsilon_0$  を用いて以下の式 (1) で表される。

$$f = \sqrt{\frac{e^2 n_{e,crit}}{\epsilon_0 m_e}} \quad (1)$$

今回の場合臨界電子数密度は、2.4GHz では  $7.15 \times 10^{16} \text{ 1/m}^3$ 、30GHz では  $1.19 \times 10^{19} \text{ 1/m}^3$  である。

### 5. 結果・考察

本研究室のアーク加熱風洞は、流入気体の質量流量と入力電流を操作することができる。今回の数値解析では、通信実験で使用している条件と合わせるため、質量流量を 1.25g/s とし、入力電流を 150A とした。

Fig.3~6 は模型がノズルの中心線から 50mm ずれた位置にある場合の計算結果である。図の点線がノズルの中心線を示している。Fig.3 は並進温度分布を Fig.4 はマッハ数分布を示している。模型の前方に衝撃波が生じていることが分かる。しかしながら、ここで生じている衝撃波は、再突入時のような不連続面が見られず、超音速から亜音速にゆっくりと変化している。これは、気流の密度が小さく、気流温度が高いため、粘性係数が大きいことが原因であると考えられる。

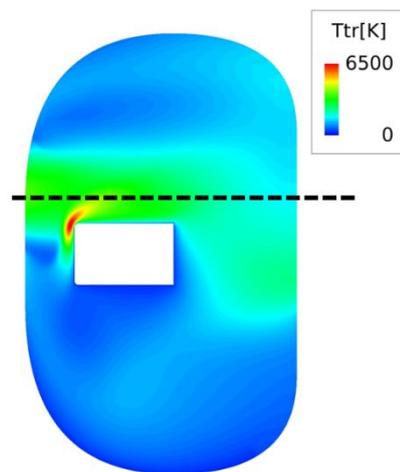


Fig.3 Translational temperature distribution

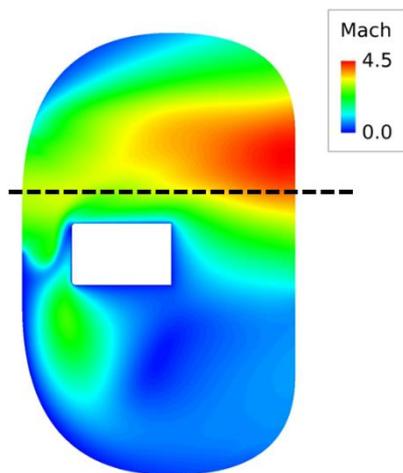


Fig.4 Mach number distribution

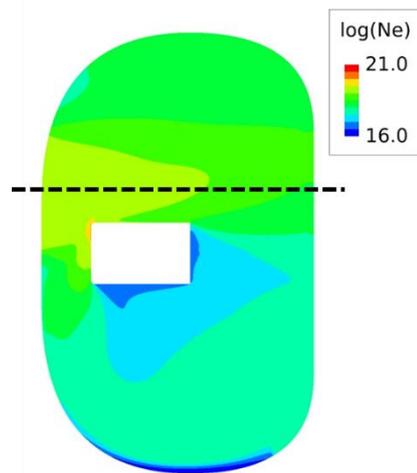


Fig.6 Electron number density distribution

Fig.5 は電子温度, Fig.6 は電子数密度の分布を示している. 模型の前方では電子数密度が上昇し, 他の場所では, 下流に向かうにつれて電子数密度が減少していることが分かる. このことから模型の前方に流れがぶつかることで, 気体が圧縮されて電離反応が促進され, それ以外の場所では気体の拡散が進むことで再結合反応が促進されていると考えられる. また, 並進温度やマッハ数分布との比較から, 電子は他の粒子と比べて拡散が大きいことが分かる. また通信試験で使用したアンテナの臨界電子数密度は  $7.15 \times 10^{16} \text{ 1/m}^3$  であり, ほとんどの領域で電子数密度が臨界電子数密度を超えているため, 計算結果からは通信ブラックアウトが起こることが予想される.

Fig.7 は各周波数での電磁波解析で得られた電場の分布である. アンテナの周波数が 2.4GHz の場合, 電子数密度の分布から予想される通り, 電磁波はアンテナを出てすぐに減衰してしまっていることが分かる. この計算と同じ条件で行った通信試験でも, 通信ブラックアウトが起きているため, この位置に関しては試験結果を正しく予想できている. ただし妥当性の評価を行うには, 今後より多くのケースについて試験を実施して計算との比較を行う必要がある. また, 周波数が 30GHz の場合, 比較的電子数密度の小さい領域に電磁波が伝播していることが分かる. このことから, アンテナの周波数によって通信可能な領域が変化していることが確認された.

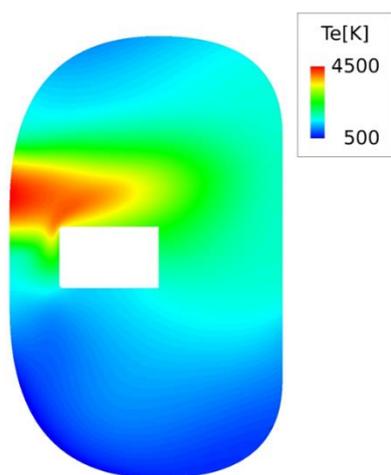


Fig.5 Electrical temperature distribution

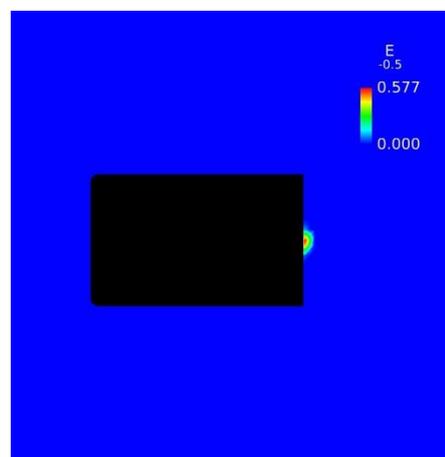


Fig.7 Electromagnetic waves behavior around test piece  
(f=2.4GHz)

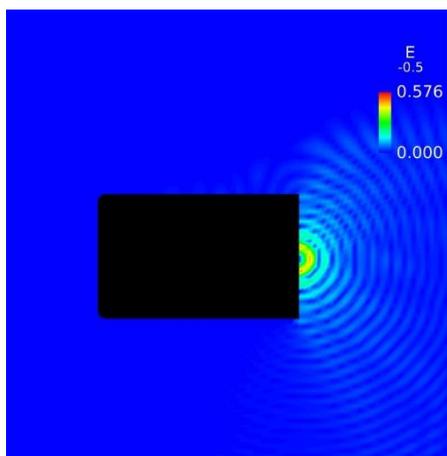


Fig.8 Electromagnetic waves behavior around test piece  
(f=30GHz)

## 6. 結論

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を行い、模型周りの流れ場と電磁波解析に必要なプラズマパラメータの分布を得た。そして流体解析で得られたプラズマパラメータを基に電磁波解析を行った。さらに、解析結果と本研究室で行った通信試験との比較を行い、実際の通信試験の結果と一致する解析結果を得ることができた。また、電磁波解析の結果、アンテナからの周波数が変わると通信可能な領域が変化することを確認できた。今後は、さらに実験との比較を進め、解析の妥当性を検証して行く予定である。

## 謝辞

本研究は主に九州大学情報基盤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) 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.
- (2) Kunz, K. S. and Luebbers, R. J., *Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*, CRC Press, Boca Raton, (1993), pp.11-27.
- (3) 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
- (4) 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.
- (5) Fertig M., Dohr A. and Frühauf H. -H., AIAA Paper 1998-2937, 1998.
- (6) 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.
- (7) 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
- (8) Takahashi, Y., "Numerical Study of heat and expansion Processes of Plasma Flows in Arc-Heated Wind Tunnels," (2011)

- (9) 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.