

卒業論文要旨

大気圏突入流れにおける非平衡流体の数値シミュレーション

システム工学群

航空エンジン超音速流研究室 1200080 瀧日 葵

1. 緒論

近年の宇宙ミッションは多岐にわたるが、国際宇宙ステーションなどのように宇宙環境を利用することを目的としたものと、衛星や他の惑星の探査を目指すものに大別できる。

惑星探査技術の一つとしてサンプルリターンがある。これは大気や土壌など何らかの物質をサンプルとして精密に分析するため、惑星から持ち帰る技術を指す。打ち上げ時のカプセルの小型簡略化、低コスト化のため、カプセルは地球周回軌道に投入されることなく、高い飛行速度で直接地球大気に突入することが多い。そのため、カプセルの前方に強い衝撃波が形成され、衝撃波とカプセル表面の間の衝撃層は高温気体流れとなる。その結果、カプセルは高温気体に包まれ厳しい加熱環境に晒される⁽¹⁾。

加熱による飛行体及び内部サンプルの破損を防ぐための対策として熱防御材を前面に塗布する。信頼性の高い熱防御をするためには、加熱量を事前に精密に予測することが重要となる。加熱量を予測する手段の一つとして、衝撃風洞で再突入流れ場を再現し、加熱量を直接計測する方法がある⁽²⁾。これは、信頼性は高いが計測できる情報には限度がある。一方、コンピューターを使った数値計算により加熱量を求める数値流体力学では信頼性の検証は必要であるが、任意の時空間データを取得可能である。そのため、コンピューターを使った数値シミュレーションと実験の両面から考察し、情報を補い合うことは、データ精度の向上や信頼性の確保につながる。

そこで、本研究では大気圏突入時の流れ場を数値的に再現し熱化学非平衡性について調査することを目的とする。まず、熱化学非平衡の流れ場における熱流束を算出し、緩和時間の違いによる対流熱流束の変化を比較する。次に、化学反応の追加による輻射熱流束の変化を比較、考察することで新たな熱化学非平衡性の標準モデルについて検討する。

2. 数値計算法

2.1 流れ場

高度 80km を秒速 9km で飛行する球体を想定し、計算には熱化学非平衡コードを用いた。支配方程式は 2 次元軸対称 Navier-Stokes 方程式を用いた。支配方程式の離散化は有限体積法を用いて行い、数値流束評価には SLAU⁽³⁾法を用いた。粘性流速は 2 次精度中心差分により評価した。空間高次精度化には 2 次精度 MUSCL⁽⁴⁾法を用いた。時間積分は陽解法で行った。熱化学非平衡モデルは並進温度と回転温度が平衡、振動温度と電子励起温度が平衡と仮定し、Park の 2 温度モデル⁽⁵⁾を用いた。このモデルでは励起分布に平衡を仮定する。

2.2 輻射場

計算対象に入射する輻射強度は SPRADIAN⁽⁶⁾を用いて接平板近似の下、淀み流線上で輻射輸送方程式を解いて求めた。

得られた輻射強度を波長と立体角について積分して熱流束を求めた。化学種の励起状態が平衡のときは Boltzman 分布に従うとした。

2.3 計算条件

計算対象が対称形であることから半径 1m の半球とし、計算格子は格子点数を 51×51 点とした。計算格子を図 1 に示す。流入条件は高度 80km における国際標準大気のと密度を用いて主流温度を 198.6K、主流密度を $1.85 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ 、主流速度を 9000m/s とした。流出境界は自由流出とし、半球の壁面温度は 300K とした。

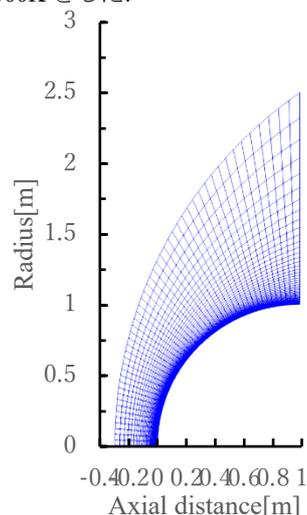


Fig.1 Mesh around the hemisphere

3. 流れ場計算結果

3.1 緩和時間

緩和時間の違いとして、Park 修正の有無で比較する。図 2 の(a)に Park 修正を行っていないとき、(b)に Park 修正を行ったときの淀み流線上の温度を示す。T は並進-回転温度、T_v は振動-電子励起温度である。Park 修正を行っていないときの淀み点における並進-回転温度は約 2900K、振動-電子励起温度は約 3600K であり、最高温度は衝撃波背後で約 26000K、対流熱流束は 0.215MW/m²であった。それに対し、Park 修正を行ったときの淀み点における並進-回転温度は約 1600K、振動-電子励起温度は約 2200K であり、最高温度は衝撃波背後で約 28000K、対流熱流束は 0.255MW/m²となった。

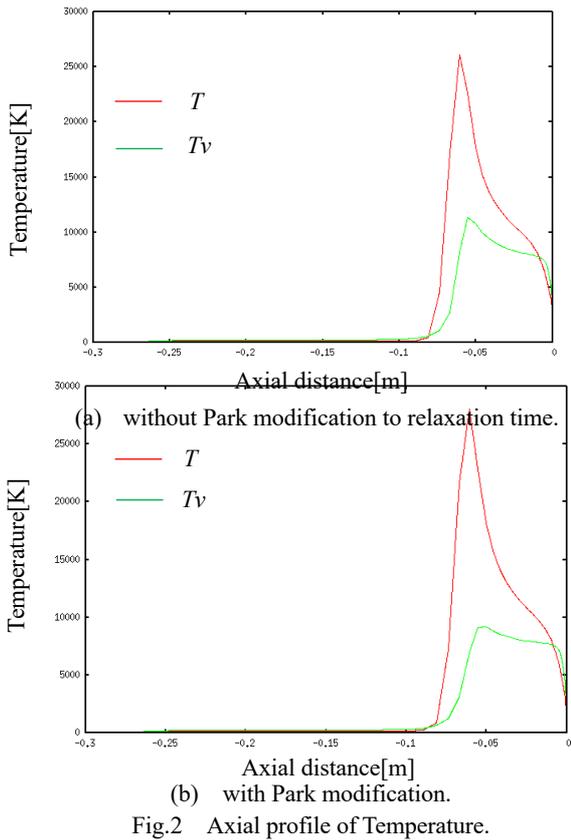


Fig.2 Axial profile of Temperature.

3.2 熱化学非平衡と励起分布非平衡

図 3 に流れ場が熱化学非平衡のときと励起分布非平衡のときの淀み流線上の温度を示す。Neq は熱化学非平衡、Cr は励起分布非平衡である。励起分布非平衡を考慮したとき、熱化学非平衡と比べ衝撃層の厚さに変化がみられた。淀み点における対流熱流束は 0.255MW/m^2 から 0.246MW/m^2 となった。

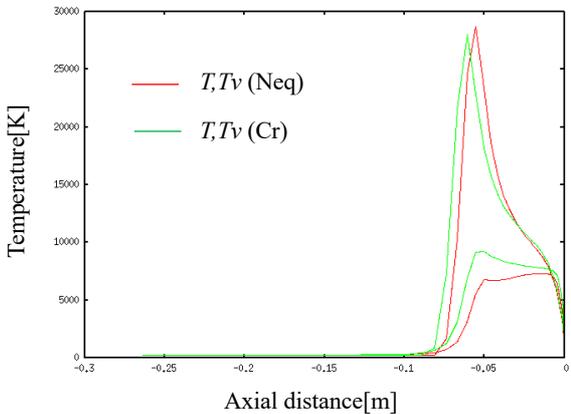


Fig.3 Axial profile of Temperature.

4. 輻射場計算結果

4.1 輻射加熱の計算結果

図 4 に励起分布が平衡のときと非平衡のときの輻射スペクトルの計算結果を示す。輻射熱流束は平衡のとき $5.849 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ であったのに対し、非平衡では $5.584 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ であった。

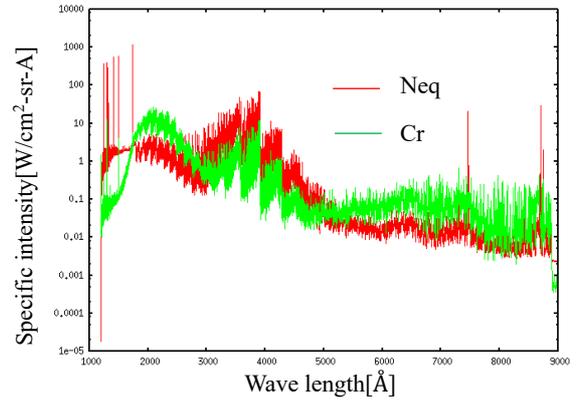


Fig.4 Spectrum of radiation intensity

4.2 化学反応の追加

追加した化学反応と反応速度係数 A , n , E を表 1 に示す。反応速度定数 k を以下に示す。図 5 に化学反応追加前後の輻射スペクトルの計算結果を示す。

$$k = AT \exp(-E/T). \quad (2)$$

追加の前後で輻射スペクトルに変化がみられた。

Table 1 Reaction rate coefficient

| Reaction | A | n | E_a |
|---|----------|-----|-------|
| $\text{O}_2(a) + \text{N} = \text{O} + \text{NO}$ | 6.46(09) | 1 | 2057 |

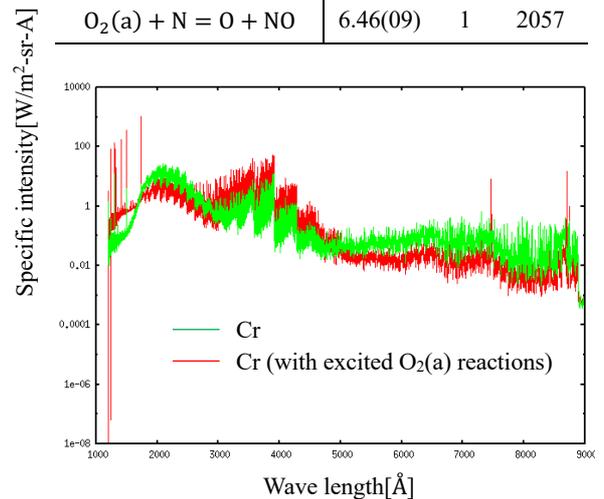


Fig.5 Spectrum of radiation intensity

5. 結論

大気圏突入時のカプセル周りの流れ場の熱化学非平衡性について調査を行った。緩和時間の違いにより、最高温度や淀み点における温度で変化がみられた。それに伴い対流熱流束も変化した。熱化学非平衡流れにおいて、励起分布が非平衡であると考慮したとき対流熱流束や輻射熱流束の低下がみられた。励起状態の化学種を含む化学反応の追加により、長波長側で輻射強度が低下した。これらのことから、緩和時間や励起分布非平衡性、励起状態の化学種を含む化学反応などが加熱量に影響を及ぼすと考えられる。

従来の熱化学非平衡の標準モデルでは励起分布非平衡性や励起状態の化学種を含む化学反応は扱っていないため、これらの加熱量への影響を検証することは、より精密な加熱量予測につながると考えられる。

参考文献

- (1) 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.
- (2) Palumbo, G., Craig, R. G., Whiting, E.W and Park, C.,

“MEASURED SPECIFIC INTENSITY FROM 130 To 900nm AT THE STAGNATION POINT OF A MODEL IN ARCJET FLOW OF 7.8km/sec”, *J. Quant. Spectrosc. Radit. Transfer*, Vol. 57, No. 2, (1997), pp. 207-236

- (3) Kitamura, K. and Shima, E., “A New Pressure Flux for AUSM-Family Schemes for Hypersonic Heating Computations”, AIAA Paper 2011-3056, (2011)
- (4) Van Leer, B., “Towards the Ultimate Conservation Difference Scheme V, A Second-Order Sequel to Godunov’s Method”, *Journal of Computational Physics*, Vol. 23, No. 3, (1979), pp. 101-136
- (5) Park, C., *Nonequilibrium Hypersonic Aero thermo dynamics*, John Wiley and Sons, Inc., New York, (1989)
- (6) Fujita, K. and Abe, T., “SPRADIAN, Structured Package for Radiation Analysis : Theory and Application”, JAXA ISAS Report No. 669, (1997)