

卒業論文要旨

大気圏突入流れにおける励起非平衡計算の検証

システム工学群

航空エンジン超音速流研究室 1220002 浅井友彰

1. はじめに

宇宙機が地球へ帰還する際、高速で大気圏に突入するため、機体前方で強い衝撃波が発生し、衝撃波背後の機体は過酷な加熱環境に曝される。この環境から機体を保護するために、アブレータや耐熱タイル等を用いた熱防御設計を行う必要がある。設計にあたってはアーク加熱風洞を用いた風洞実験や数値計算による加熱量の正確な予測が重要であり、予測精度を向上させることで、熱防御設計の最適化を図ることができる。

しかし、大気圏突入時の流れ場は極超音速、高温、高圧であることから風洞実験による直接計測は困難である。また数値計算による予測の場合には、流れ場の詳細な再現のために熱化学非平衡性や励起非平衡性を考慮した計算を行う必要がある。

供試体を実際に大気圏突入させることで加熱環境を調査した例として、1965年にNASAが行ったFIRE IIと呼ばれる実験がある⁽¹⁾。実験ではアポロ司令船を模した形状の供試体を秒速約11.3kmで大気圏に突入させ、高度約84kmから約70km、約54km、約41kmの3区間において輻射スペクトルや壁面加熱率等の計測が行われた。この実験で得られたデータは数値計算コードのベンチマーク等によく用いられている⁽²⁾。

本研究では、FIRE IIについて流体衝突輻射計算コードを用いて電子励起非平衡計算を行い、電子励起平衡計算結果との比較を行うことで大気圏突入流れの数値的な再現における、電子励起非平衡計算の検証を行う。

2. 数値計算法

2.1 流れ場計算

流れ場計算は、軸対称2次元N-S・熱化学非平衡・衝突輻射結合計算コードと輻射輸送計算コードを用いた⁽³⁾。計算において考慮する化学種はN, O, N₂, O₂, NO, N⁺, O⁺, N₂⁺, O₂⁺, NO⁺, e⁻の11化学種である。支配方程式の離散化は有限体積法、数値流束にはSLAUスキーム、粘性流束は2次精度中心差分を用い、2次精度MUSL法によって空間次元高次精度化を行った。時間積分は1次精度Euler陽解法を用いた。熱化学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するParkの2温度モデル⁽⁴⁾を参考に振動-電子励起温度から電子温度を分離した3温度モデルを用いた。振動-電子励起温度と電子温度の緩和にはLeeの緩和時間⁽⁵⁾を用いた。電子励起非平衡性を考慮するための衝突-輻射モデルには、Ogino等によって開発された空気プラズマ用の衝突輻射モデル⁽³⁾を用いた。

2.2 輻射計算

吸収係数と放射係数はMatsuyamaの構築した計算コード⁽⁶⁾を電子励起非平衡計算用に拡張し、line-by-line計算によって求めた。壁面入射スペクトル分布を求めるため、セル中心から壁面垂直方向に光線を引き、光線上で輻射輸送方程式を解いた⁽⁷⁾。

3. 計算条件

本計算で用いる計算格子を図1に示す。格子点は61×61点であり、衝撃波付近と壁面境界層内での物理過程を正確に計算するために、計算格子を衝撃波面と壁面付近に寄せている。主流条件はFIRE II実験における1634.0秒(高度76.42km)での計測値⁽⁸⁾を用いて、主流速度11,360 m/s、主流密度 $3.72 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ 、主流温度195Kとし、大気組成は、質量分率換算でN₂を0.767、O₂を0.233とした。壁面は615Kの等温、触媒壁としている。計算にあたっては、流れ場計算と輻射計算の結合は行わず、流れ場計算の定常解を求めてから輻射計算を1回行った。

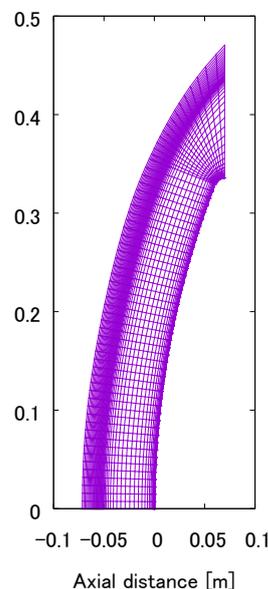


Fig.1 Computational grids

4. 計算結果

図2に淀み流線上での並進-回転温度、振動-電子励起温度、自由電子温度の分布図を示す。衝撃波背後において並進-回転温度が急上昇し、48,000Kに達している。また、振動温度、自由電子温度と広範囲で温度非平衡となっていることが確認できる。

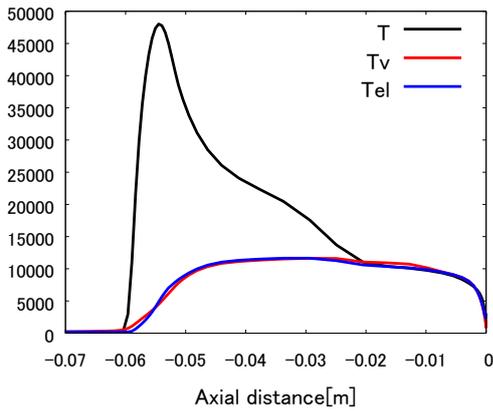


Fig.2 Axial profiles of different temperatures.

次に、図3に淀み流線上のモル分率分布を示す。衝撃波背後から壁面まで、常に各化学種のモル分率が変化しており、衝撃層内全域で化学非平衡となっていることが確認できる。

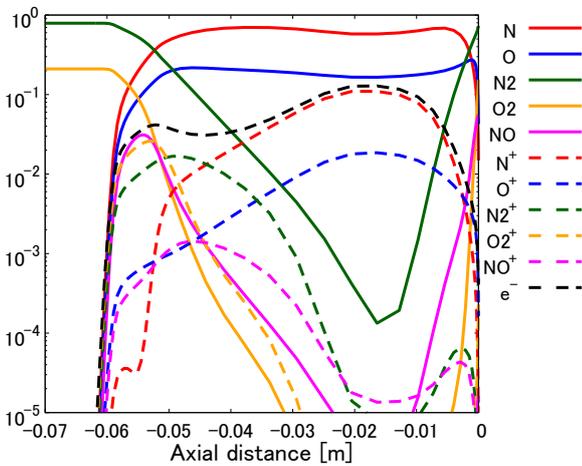


Fig.3 Axial profiles of Mole fractions.

続いて、淀み点での壁面入射スペクトルについて電子励起平衡計算との比較を図4に示す。非平衡計算では、平衡計算と比較して線スペクトルの強度が減少したことが確認できる。線スペクトルは主に原子の電子遷移によって放出、吸収されることから、衝撃層内の主組成であるNについて励起状態の密度が平衡計算と異なることが考えられる。

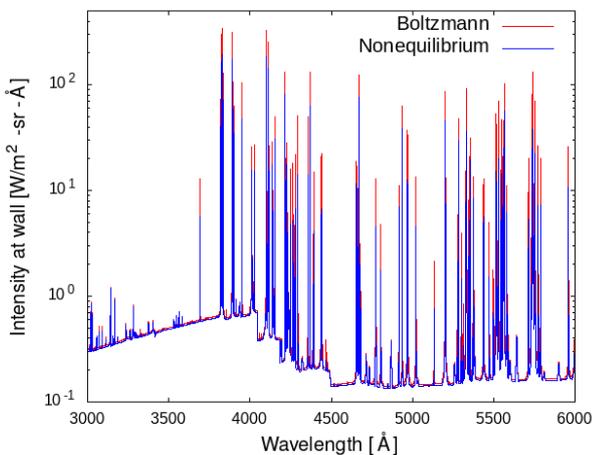


Fig.4 Wall-incident spectra between Boltzmann equilibrium calculation and nonequilibrium calculation.

そこで、N原子について平衡計算と励起状態分布の比較を行った。振動-電子励起温度最高点である淀み流線上の壁面から0.029mの点での励起状態分布を図5に示す。図5から平衡分布と比較して各励起状態の割合が低く、基底状態の割合が高くなったことが確認できる。特に高準位の励起種において平衡分布との差が顕著である。この要因として、輻射による脱励起が自由電子衝突による励起を上回っていることが考えられる。

以上より、非平衡領域における励起状態のNの割合が平衡計算と比較して低かったことが線スペクトル強度の低下につながった事が考えられる。

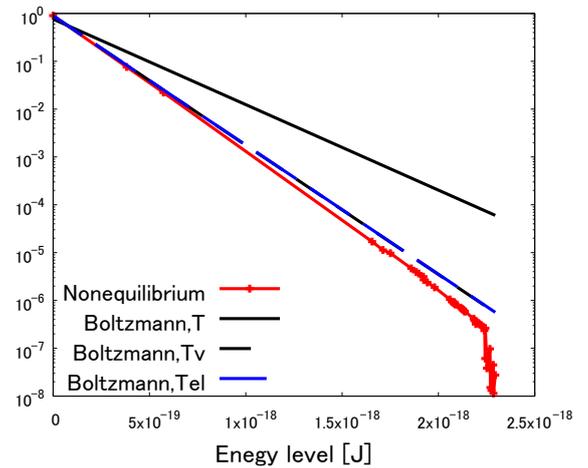


Fig.5 Excited state distribution of N atoms at the point 0.029 meters perpendicular to the wall surface on the stagnation streamline.

5. まとめ

大気圏突入流れにおける電子励起非平衡性の検証を目的として、FIRE II 実験の流れ場について電子励起非平衡計算を行い、壁面入射スペクトル分布について電子励起平衡計算と比較した。その結果、主に3800Å以上の波長域に分布する線スペクトルの強度が減少したことが確認された。N原子の励起状態分布の比較から、原因は非平衡領域内で基底状態の原子の割合が平衡計算と比較して高かったためだと考えられる。

流れ場の励起状態分布が平衡分布と異なり、スペクトル分布に有意な差が生まれたことから、大気圏突入流れにおいて電子励起非平衡性の考慮は有効であると考えられる。今後は、流れ場と輻射輸送を結合して計算を行い、輻射輸送が流れ場に与える影響や輻射吸収による励起分布の変化等を調査していきたい。

6. 文献

- (1) Lewis, J.H., Jr. and Scallion, W.I., NASA TN-D-3569, (1966)
- (2) Leonardo, C. S., and Iain, D. B., AIAA Paper 2007-4044, (2007)
- (3) Ogino, Y. and Ohnishi, N., Shock Waves, Vol. 21, issue 3, pp. 289-299, June, (2011)
- (4) Park, C., John Wiley and Sons, Inc., New York, (1989)
- (5) Bourdon, A., Phys. Rev. E 55, 4634, (1997)
- (6) Matsuyama, S., PhD thesis, Tohoku University, (2004)
- (7) 砂辺一行, 高知工科大学 修士学位論文, (2021)
- (8) Cauchon, D.L., Mckee, C. W. and Cornette, E. S., NASA TM X-1389, (1967)