

# 極めて強い空気衝撃波背後の緩和流の解析

## Numerical Analysis of Relaxation Flows behind Extremely Strong Air Shock Waves

舩津 賢人 (群馬大・工) 白井 紘行 (群馬大・工)

FUNATSU Masato, School of Engineering, Gunma University

SHIRAI Hiroyuki, School of Engineering, Gunma University

FAX: 0277-30-1509 E-mail: mfunatsu@me.gunma-u.ac.jp

The governing equations for a relaxation region behind strong air shock waves were presented based upon a 4-temperature flow model and were solved numerically as a two-boundary value problem. The transport properties for viscosity, diffusion and thermal conductivity were taken into account in detail, because flow and thermal conditions just behind shock fronts were expected to vary steeply. The change of vibrational and rotational energies of molecules, and free electron energy due to dissociation and recombination reactions of diatomic molecules were also included. The rotational and vibrational temperature distributions calculated were found to agree very well with experiments.

### 1. はじめに

強い衝撃波背後の緩和現象は、高エンタルピー流、高温気体の輻射などの研究と関連して重要である。強い衝撃波背後では激しい反応が起こり、それにより緩和領域の基本構成が決定されるため、できるだけ現実的な反応系を考慮する必要がある。また、熱と流れの変数が急激に変化するので、各物理量の変化率に依存する輸送現象を考慮することが望ましい。このような特性を含め、一般的な支配方程式を示し、極めて強い衝撃波背後の流れを二点境界値法で数値解析した。衝撃マッハ数36, 37.7に対する計算結果をISAS/JAXAの実験結果<sup>1)</sup>と比較すると、分子の振動温度、回転温度ともに一致し、本解析の物理化学過程モデルが妥当であることがわかった。

### 2. 基礎方程式

AOTV に対して Lee<sup>2)</sup>が与えた一般的な基礎方程式系をもとに、一部改良・追加した一次元衝撃波流に対する、全質量保存方程式、全運動量保存方程式、各化学種保存方程式、全エネルギー保存方程式、回転、振動、電子エネルギー保存方程式、状態方程式を用いた。

### 3. 流れのモデル

(1) 流れは空気の一次元定常流、(2) 1 化学種成分、3 3 化学反応を考慮、(3) 4 温度モデル (重粒子並進温度  $T_a$ 、分子回転温度  $T_r$ 、分子振動温度  $T_v$ 、電子温度  $T_e$ ) を用いる。全分子種に対して  $T_a$ 、 $T_r$ 、 $T_v$  は共通と仮定する。(4) 全粒子の運動エネルギーはMaxwell分布を、分子振動と回転準位上の粒子数はBoltzmann分布を仮定する。(5) 輻射エネルギー損失、プリカーサー、電荷分離は無視する。

### 4. 輸送係数と生成項

粘性係数、拡散係数、熱伝導係数については、熱的に非平衡な混合気体に対するYosの公式<sup>3)</sup>を用いた。化学種保存方程式中の生成項は、直接的に化学反応モデルに依存する。基本的にはPark<sup>4)</sup>の推奨にしたがったが、特に重要な二原子分子解離反応については、本論では4温度モデルを採用しているため、 $T_v$ と $T_r$ の寄与を含むJaffe<sup>5)</sup>のモデルを適用した。

回転エネルギー式、振動エネルギー式および電子エネルギー式に含まれる生成項は、それぞれ式(1)~(3)で与えられる。

$$\dot{Q}_R = Q_{T-R} - Q_{RL} \quad \dots (1)$$

$$\dot{Q}_V = Q_{T-V} + Q_{e-v} - Q_{VL} \quad \dots (2)$$

$$\dot{Q}_E = Q_{elas} + Q_{inelas} - Q_{EL} \quad \dots (3)$$

$Q_{T-R}$ は重粒子衝突回転緩和項、 $Q_{T-V}$ は同衝突振動緩和項、 $Q_{e-v}$ は電子衝突緩和項、 $Q_{elas}$ は電子弾性衝突項、 $Q_{inelas}$ は非弾性衝突項である。また、 $Q_{RL}$ 、 $Q_{VL}$ および $Q_{EL}$ は解離・再結合に伴う分子回転と振動および自由電子エネルギーの正味の損失項である。 $Q_{T-V}$ 、 $Q_{e-v}$ 、 $Q_{elas}$ 、 $Q_{inelas}$ に対してはParkのモデル<sup>4)</sup>を使用する。 $Q_{RL}$ 、 $Q_{VL}$ および $Q_{EL}$ はShirai<sup>6)</sup>が提案した方法を適用する。各分子に対して $Q$ を計算することにより最終的な生成項が得られる。分子の回転エネルギーモードと重粒子間のエネルギー交換速度 $Q_{T-R}$ はLumpkin<sup>7)</sup>の方法にしたがった。

### 5. 計算法と境界条件

保存方程式系は平衡状態と計算距離を用いて無次元化した。得られた放物型微分方程式系を一般化し、輸送項と反応に伴うエネルギー変動項を無視した3温度モデルに対してRunge-Kutta-Gill法で初期値問題を解いた。得られた結果を初期分布として、SAR法で方程式系を解いた。分割数は1,000点である。衝撃波直後の境界条件として $T_a$ はRankine-Hugoniot値、他の温度は適当な初期値を、化学組成は空気と同じとした。十分下流の境界条件は平衡条件で与えた。

### 6. 計算結果

衝撃マッハ数  $M=36$ 、初期圧力  $p_1=0.3$ Torr、初期温度  $T_1=300$ K で得た緩和領域の温度分布を図1に示す。図には実験結果も示した。計算結果から、反応領域では各温度の値が大きく異なり、極度の熱的非平衡状態にあることがわかる。回転と振動温度は重粒子並進温度よりずっと低いこと、特に回転温度はParkのモデルによる結果よりずっと低く、ま

た緩和時間も大幅に短縮されている。緩和の最終領域では  $T_v$  と  $T_r$  のかなり著しい温度上昇が起こっている。これは次の理由による。図2のモル分率分布に示しているように、この領域では急激に再結合反応が発生し  $N_2$  と  $NO$  分子が生成されている。この反応のために、分子の振動と回転モードは大量のエネルギーを獲得するのである。図1において、ISAS/JAXAの実験結果と本解析の温度分布を比較した。本解析では4温度モデルを採用しているために、 $N_2$  と  $N_2^+$  分子の温度を独立して計算することができないが、回転と振動温度は  $N_2$ 、 $N_2^+$ 、 $NO$  のモル分率の重み付き平均で計算している。一方、図2からわかるように、衝撃波面から1mm程度下流ではすでに  $N_2^+$  の粒子数が他の分子の粒子数に卓越しており、ほとんどの回転と振動エネルギーは  $N_2^+$  分子が有していることになるので、回転と振動温度の計算値は、 $N_2^+$  の実験と比較すべきである。本モデルによる計算からは、明らかに実験と良く一致する結果が得られている。同図にはISAS/JAXAがParkの反応モデルを用いて計算した回転と振動温度の分布も示したが、本モデルの方がはるかに一致性の良いことがわかる。まったく同様に、衝撃マッハ数37.7、初期圧力0.3Torrに対する計算結果も実験結果と比較した(図3)。この場合も、上述と同様に振動と回転温度に対する計算結果は実験と大変良く一致し、本解析に用いたモデルは極めて現実的であることを示している。本解析の場合、緩和最終領域の振動と回転温度の上昇は衝撃マッハ数36の場合よりずっと顕著であり、この現象は衝撃マッハ数に極めて強く依存することがわかる。本解析はParkのモデルと比較してはるかに短い緩和距離を与えているが、これは主に解離反応に対する反応速度定数の違いに起因している。また、振動と回転温度の計算と実験との一致性は、Shiraiの提案した解離・再結合反応に伴う分子の振動と回転エネルギーおよび自由電子のエネルギー変動に対する論理的モデルが妥当であることを示している。

## 7. まとめ

強い空気衝撃波背後の緩和流を支配する基礎方程式を示した。Jaffeの提案した3温度の寄与を含む二原子分子の解離反応速度、Shiraiの提案した解離・再結合反応に伴う分子振動、回転エネルギーと自由電子エネルギーの変動を含めて、二点境界値法で数値解析した。極めて強い空気衝撃波、すなわち衝撃マッハ数35以上の条件で得た本モデルを用いた解析結果はISAS/JAXAの実験結果と良好に一致した。

## 参考文献

- 1) 海老沼雄太, 大津広敬, 藤田和央, 佐藤俊逸, 安部隆士: 大気中の極めて強い衝撃波背後の温度計測, 第42回宇宙科学技術連合講演会, Preprint No.98-2D9, pp. 1-6, 1998.
- 2) Lee, J.-H.: Basic Governing Equations for the Flight Regimes of Aeroassisted Orbital Transfer Vehicles, *Prog. Astro. Aero.*, Vol. 96, pp. 3-53, 1985.
- 3) Yos, J. M.: Transport Properties of Nitrogen, Hydrogen, Oxygen, and Air to 30,000K, AVCO Corp., Technical Memorandum RAD TM-63-7, 1963.
- 4) Park, C.: *Nonequilibrium Hypersonic Aerothermodynamics*, John & Wiley Sons, New York, 1990.
- 5) Jaffe, R. L.: Rate Constants for Chemical Reactions in High-temperature Nonequilibrium Air, *Prog. Astro. Aero.*, Vol. 103, pp. 123-151, 1986.
- 6) Shirai, H.: Changes of Vibrational and Rotational Energies of Diatomic Molecules by Dissociation and Recombination Reactions, and the Effects on Strong Shock Layers, *Theoretical*

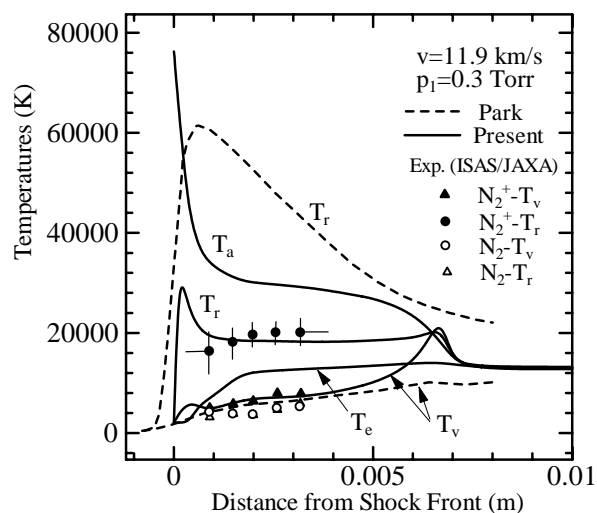


Fig. 1 Temperature Profiles for  $v=11.9\text{km/s}$

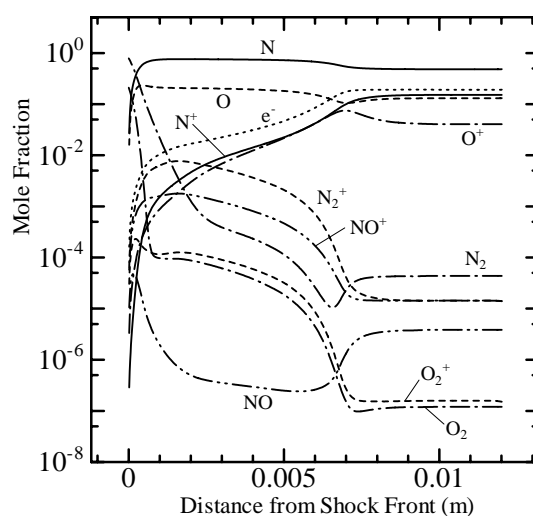


Fig. 2 Mole Fraction Profiles for  $v=11.9\text{km/s}$

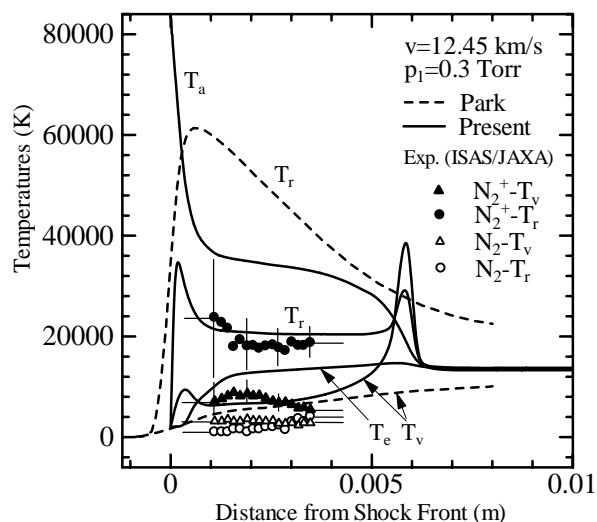


Fig. 3 Temperature Profiles for  $v=12.45\text{km/s}$

*Applied Mechanics*, Vol. 46, pp. 245-250, 1997.

- 7) Lumpkin, F. E., III: Development and Evaluation of Continuum Models for Translational-rotational Nonequilibrium, Ph. D. Thesis, Stanford University, 1990.