

アーク加熱型風洞の数値解析

高木亮治* 和田安弘* 渡辺泰夫*

Numerical Simulation
of Arc Heated Wind Tunnel Flow

by

Ryoji Takaki, Yasuhiro Wada, Yasuo Watanabe
National Aerospace Laboratory

ABSTRACT

A numerical analysis of thermochemical nonequilibrium inviscid flow is made for the arc heated wind tunnel at NAL. The calculation is carried out with the Harten-Yee type TVD scheme, using finite-rate 7 species chemical reactions and the Park's 2-temperature model in order to take account of nonequilibrium thermochemistry. Results of numerical simulations for three models ; perfect gas model, 1-temperature model, and 2-temperature model, are presented and are compared with each other.

1 はじめに

近年、極超音速航空機や宇宙往還機のような高マッハ数の飛しょう体に関する研究・開発が盛んに行われている。しかしこれらの研究・開発においては、地上の風洞設備等で特性を試験するのは非常に困難であり、数値計算による性能予測を必要とする。こういった数値計算においては、計算対象となる飛しょう体の高速性により、強い衝撃波が発生し更にそれによる気流温度が急激に上昇するといった問題が存在する。このような高温気体では実在気体効果と一般に呼ばれている、分子振動励起及び電子励起、また解離・電離といった化学反応が生じる。近年こういった効果を含む高温気体に対し、様々な物理モデルが提唱されており、それらを使用した数値計算も多数発表されている。しかしそこでは物理モデルに関する不十分さの指摘が多い。実在気体効果を含んだ数値計算の信頼性を増すためには、その基盤となる物理モ

デルの改良など、特に基礎実験データによる検証を通じた改良が必要であると考えられている。

そこで筆者らは、比較的詳細な基礎実験データが得られるアーク加熱型風洞を用い、実験データと数値計算の結果とを比較し、物理モデルを含む数値解析の検証を行うことにした。そのためには実験データの供給側となる風洞の特性が解明されていなければならない。そこでここでは数値計算を検証するその準備段階として風洞自体の流れを解析し実在気体効果による影響を調べることにした。またそれと同時に完全気体、1温度モデル、2温度モデルの比較を行った。

2 数値解析法

流体は非粘性、圧縮性の混合気体とし、化学反応モデルとして7化学種、18反応のものを考えた。そのため支配方程式は、一般曲線座標系表示

の2次元オイラー方程式に、各化学種の質量保存の式、及び熱力学的非平衡を扱うために振動エネルギーの式が加わったものとなる [1]。

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u_i \\ E \\ \rho \gamma_s \\ \epsilon_v \end{pmatrix} dV + \int_S \begin{pmatrix} \rho u_j \\ \rho u_i u_j + p \delta_{ij} \\ (E+p)u_j \\ \rho \gamma_s u_j \\ \epsilon_v u_j \end{pmatrix} dS_j$$

$$= \int_V \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dot{w}_s \\ \beta \end{pmatrix} dV + \int_S \begin{pmatrix} 0 \\ \alpha_{ij} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} dS_j$$

化学反応 (\dot{w}_s)、熱的非平衡の効果 (β) は主に右辺のソース項から現れる。また、流れは軸対称流れとしこれによる効果はメトリックの取扱い及び右辺のソース項 (α_{ij}) で表現している。

スキームとしては一般の非平衡流れに拡張され

た Roe の近似リーマン解法を基にした Harten-Yee タイプの TVD スキームを使用した [2][3]。化学反応モデルとして Dunn & Kang のものを用い、熱力学的非平衡に関しては Park の2温度モデルを用いた。この時分子振動緩和については Millikan White による半経験式に collision limiting の修正を加えたものを用いている。今回の計算では温度がそれほど高くないので拡散的振動緩和モデルは使用していない。また解離・再結合といった反応に関しては選択的解離モデルを使用した。時間積分に関しては化学反応のみを陰的に扱う Point implicit 法を用いた。

計算は航技研にあるアーク加熱型風洞のノズル部に対して行った。ノズルのスロート直径は6 mm、開口比が1.78である。図1に風洞の模式図、また図2に計算格子を示す。格子数は軸方向に200点、半径方向に60点である。計算条件として貯気槽の圧力は7気圧、温度6000°Kであるとし、貯気槽においては熱力学的にも化学的にも

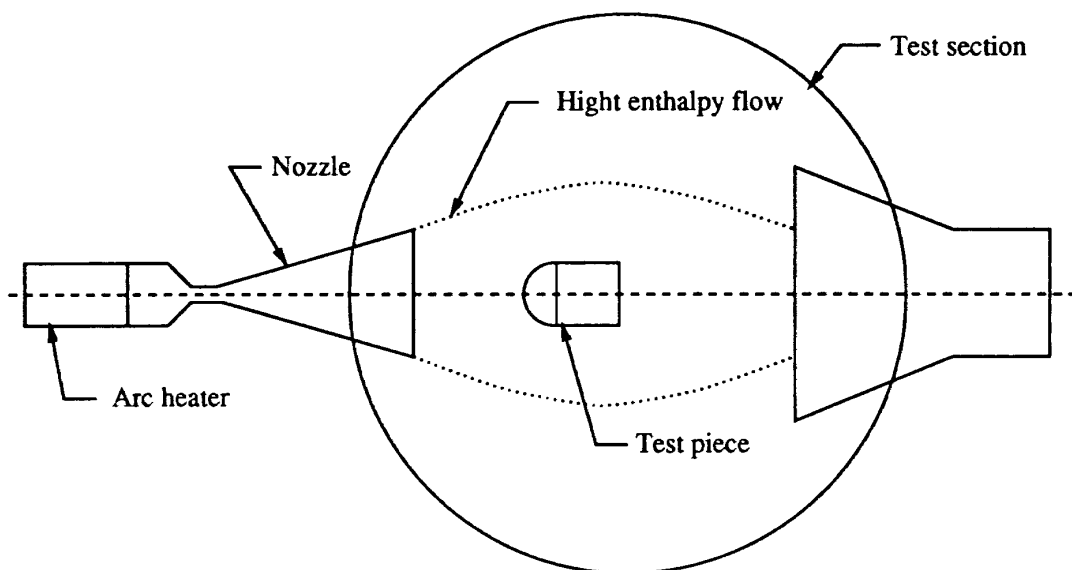


図1 アーク加熱型風洞の模式図



図2 計算格子

平衡であると仮定した。

境界条件は、流入境界については貯気槽条件で固定。ただし速度に関しては内側より外挿した。流出境界は流れが超音速なのでそのまま外挿した。壁面境界は保存則を満足するような壁面での圧力を求め境界条件として与えた。中心軸に関しては軸に対して計算領域の反対側に2点余分の格子を考え、まとめて計算した後対称条件を課すことで精度を維持した。

3 結果と考察

計算は完全気体、1温度モデル、2温度モデルの3種類についてそれぞれ行った。各モデルの計算は、基本的には2温度モデルの計算コードを使用し、1温度モデルの計算は並進温度と振動温度が等しいとして計算、完全気体の計算は化学反応、熱的非平衡の項を排除し C_p 、 C_v が一定として計算を行った。

図3にそれぞれの等マッハ数線図を示す。図において等マッハ数線の間隔は0.1刻みである。これらによるとスロート前半部のノズル壁面より生じた斜め衝撃波が中心軸上でマッハ反射を形成し、

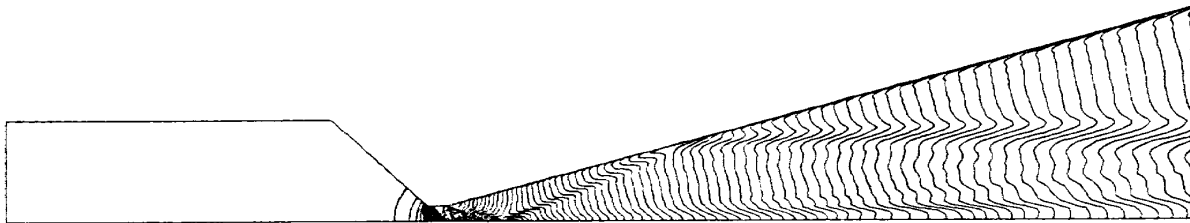


図3 (a) 等マッハ数線図 (2温度モデル)

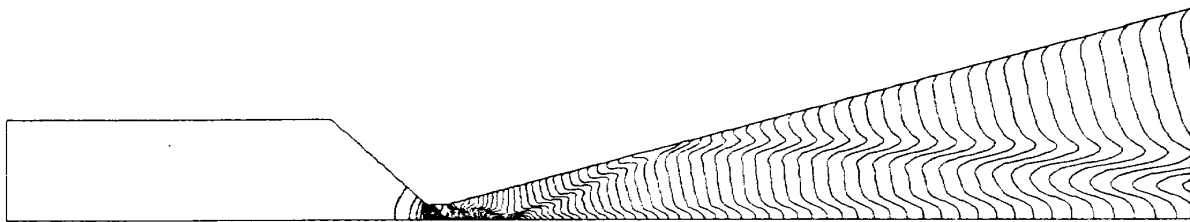


図3 (b) 等マッハ数線図 (1温度モデル)

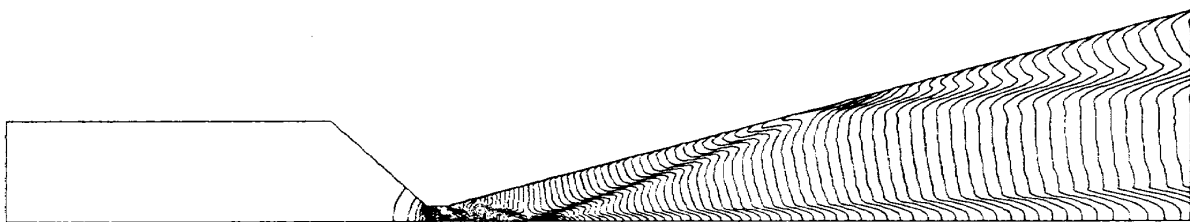


図3 (c) 等マッハ数線図 (完全気体)

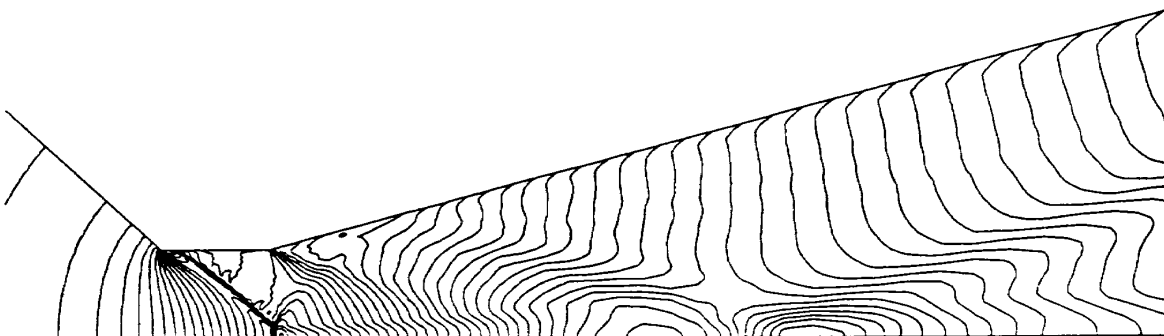


図3 (d) 等マッハ数線図 (スロート付近拡大図)

その反射波がノズル壁及び中心軸付近のスリップ面で繰り返し反射され下流に延びている様子が観測できる。この様子を模式的に示したのが図4である。これは壁に沿って膨張する流れが、本来ならスロートの入り口を回ったところで軸に平行な流れになるのが、軸付近の流れにより幾分壁の方向に進路が曲げられ、それを平行な流れにするため斜め衝撃波が発生したと考えられる。3つのモデルを比較した場合、マッハシステムの位置及びマッハ数等の違いにより反射波が反射する場所、角度等に違いが生じ、そのために下流の流れの様子がそれぞれ異なっていることが分かる。

図5に中心軸上の各化学種の成分比分布を示す。図は2温度モデルのものであるが、1温度モデルの結果もほとんど違いはない。貯気槽から出発した気体は流速の増加に伴い垂直衝撃波のところまで温度が下がり続け、窒素原子の再結合反応による N 、 NO の減少、 N_2 、 O の増加が見られる。酸素原子が増加するのは酸素原子の再結合反応が顕著になる程には温度は下がっていないのに、 NO が反応して N_2 になる分 O が増加しているためである。マッハ反射による垂直衝撃波のためスロート

中程で一時的に温度が上昇し、今度は逆に窒素の解離反応が行われるようになる。今回の計算においては衝撃波直後の反応遅れといったものはほとんど認められない。その後再び温度が下がるためスロート上流と同じように窒素の再結合反応が行われるが、密度の急激な減少のため反応が凍結し、一般に凍結流と言われる流れになり組成比は変化せず出口まで流れている。

図6に中心軸上の並進温度および振動温度の分布を示す。図では貯気槽の温度で無次元化してある。これよりスロート下流では熱的にも非平衡な状態であることが分かる。また衝撃波で並進温度は増加するのに対して、振動温度は逆に減少している。これは選択的解離モデルを使用しているためである。つまり並進温度の急激な上昇に伴って窒素分子が次々と解離するが、その際選択的に振動エネルギーの高いものから解離していくので振動温度が急激に減少するのである。スロート下流で一時的に並進温度が上昇している所は、ちょうど壁からの反射波が中心軸付近で再び反射されている地点である。

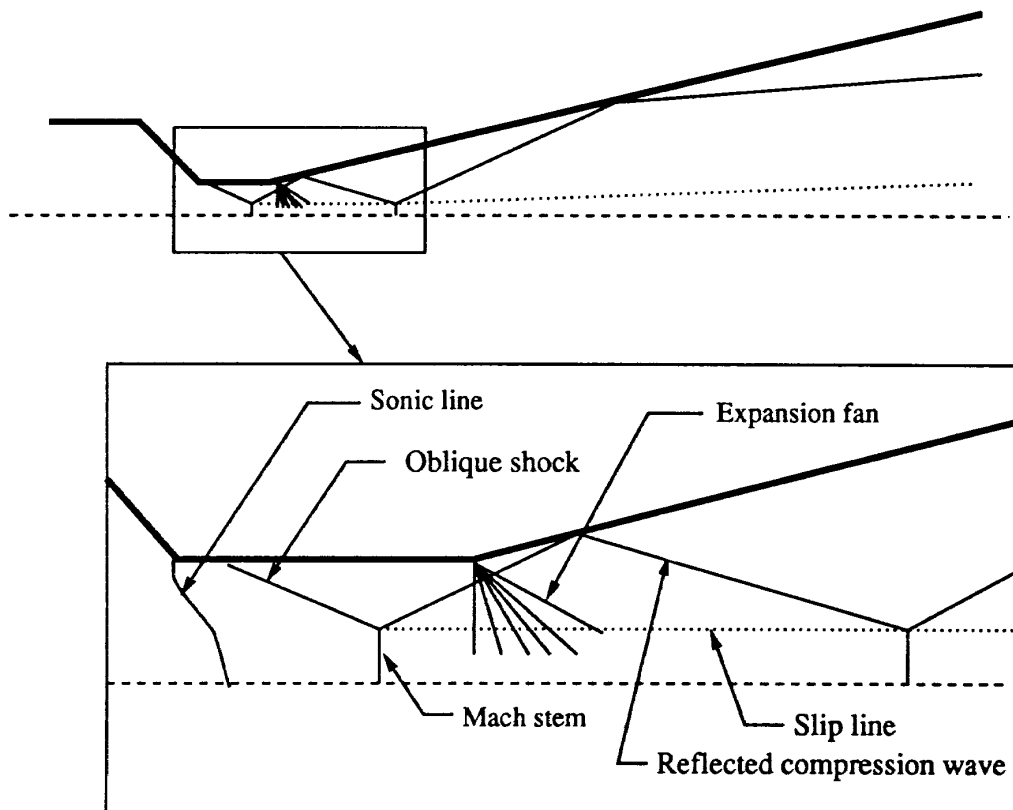


図4 流れの模式図

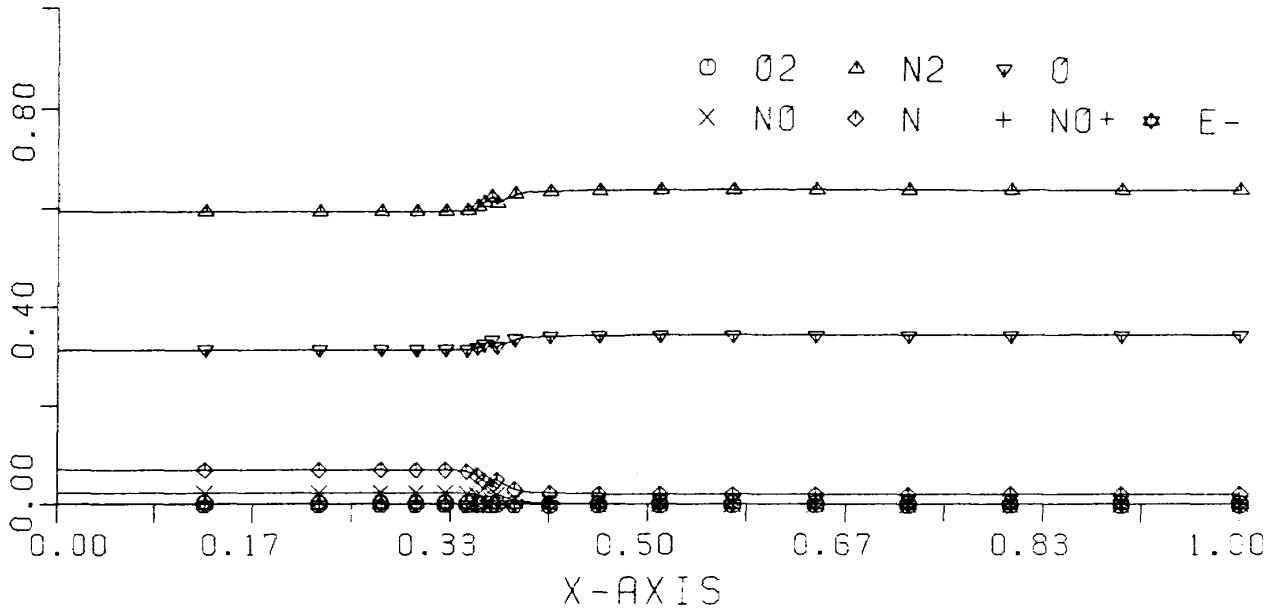


図5 (a) 化学種の成分比分布 (2温度モデル)

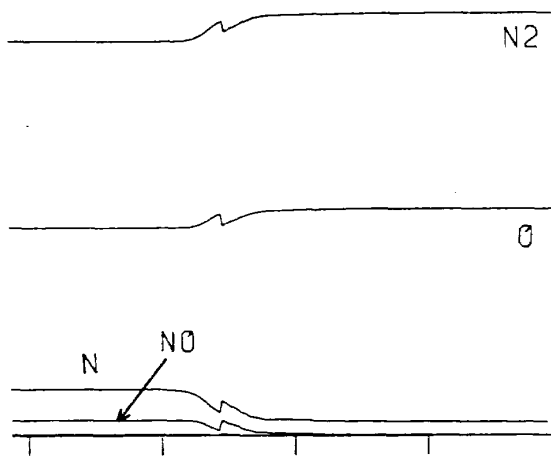


図5 (b) 化学種の成分比分布
(スロート付近拡大図)

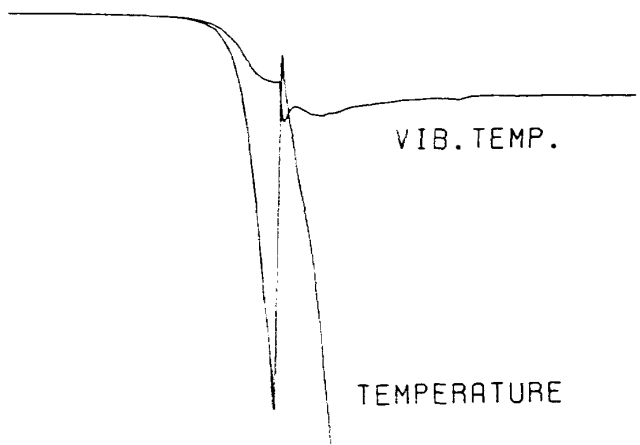


図6 (b) 並進温度及び振動温度分布
(スロート付近拡大図)

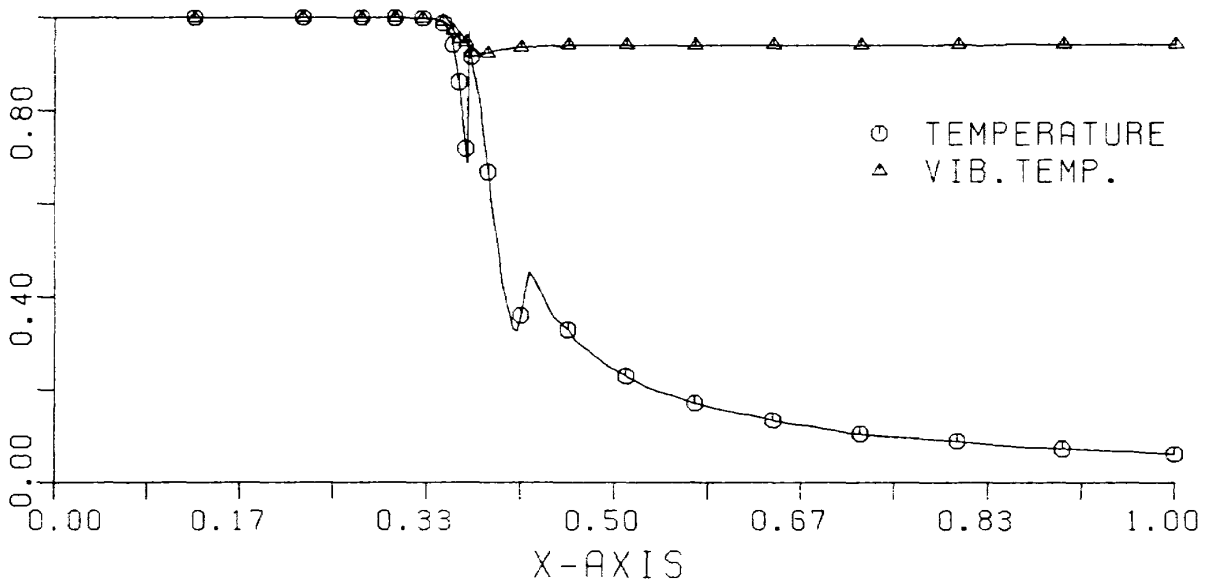


図6 (a) 並進温度及び振動温度分布

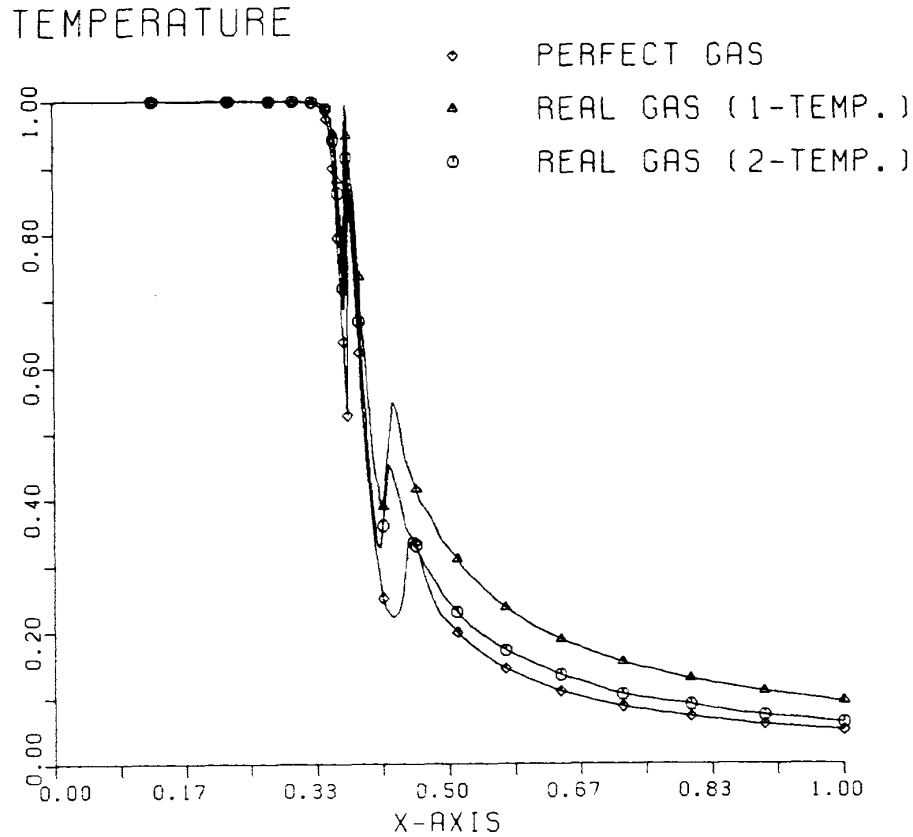


図7 並進温度分布のモデルによる比較

図7に中心軸上の温度分布の比較を示す。スロート入り口の温度が下がる付近において、再結合で熱が発生する2温度モデルや1温度モデルの方が完全気体と比較して温度が高いのがよく分かる。また、スロート下流でも内部自由度といった余分なエネルギーを持たない分、完全気体は温度が一番低い。2温度モデルと1温度モデルを比較してみた場合、並進温度と振動温度を一つの温度で近似する1温度モデルの温度の方がこの場合2温度モデルの並進温度より高い。

4 まとめ

実在気体効果を含むソルバーを開発し、それを用いてアーク加熱型風洞の流れを解析した。2温度モデル、1温度モデル、完全気体の3つのモデルで計算を行ったが、モデルの違いで流れの様子が変化していることが分かった。今後は供試体などの測定部を含めた計算、粘性流への拡張、実験データによる計算の検証などを予定している。

参考文献

- [1] Peter A. Gnoffo, Roop N. Gupta and Judy L. Shinn, *Conservation Equations and Physical Models for Hypersonic Air Flows in Thermal and Chemical Nonequilibrium*, NASA TP-2867 (1989).
- [2] H. C. Yee, R. F. Warming and A. Harten, *Implicit Total Variation Diminishing (TVD) Schemes for Steady-State Calculations*, J. of Comput. Phys. vol 57, pp. 327-360 (1985).
- [3] Y. Wada, H. Kubota, S. Ogawa and T. Ishiguro, *A Diagonalizing Formulation of General Real Gas-Dynamic Matrices with A New Class of TVD Schemes*, AIAA Paper 88-3596CP (1988).