

再突入物体周りの極超音速非平衡流れに及ぼす壁面触媒性の影響について

黒滝卓司\*

Effects of Wall Catalysis on the Non-equilibrium Hypersonic Flow around Reentry Vehicle

by

Takuji Kurotaki

Kamakura Works, Mitsubishi Electric Corporation

ABSTRACT

Effects of surface catalysis on the non-equilibrium hypersonic flow around reentry vehicle are discussed by solving Navier-Stokes equations considering non-equilibrium effects.

Axisymmetric full Navier-Stokes equations which have chemically and thermally non-equilibrium effects are considered by using Park's two-temperature model and the vibrational relaxation model from the SSH theory. For the time integration, an efficient numerical algorithm of an implicit finite difference method is used, which consists of the combination of LU-SGS scheme and the implicit diagonal method for a source Jacobian matrix. For convective terms, AUSMDV scheme generalized into the non-equilibrium flow case is applied.

Effects of catalytic efficiency on aerodynamic heating rates at the wall around OREX are examined in detail. Numerical analyses are performed at several flight altitudes and compared with flight data. Catalytic efficiency of material at the stagnation point is estimated and it is clear that it shows good agreement with data of similar materials of another vehicles such as Space Shuttle.

1. はじめに

大気圏再突入時に飛行物体の受ける空力加熱の問題は、将来実用化されるであろう宇宙往還型の飛行体の設計上非常に重要な問題であり、各種の風洞試験データ及びいくつかの実フライトデータが蓄積されつつある。しかし、実在気体効果を含む飛行時の現象をこれらの実験的手段に頼ることは、コストあるいは技術的な観点から見ると非常に困難であり、今後かなりの予測精度が数値解析に求められるようになると思われる。

実在気体効果を含む流れの解析の際には、壁面における化学的現象を記述する何らかの境界条件を与えることが必要となるが、通常非触媒壁あるいは触媒壁等の極端なケースを考へることが多い。ところが、実際のフライトでは、OREXの例<sup>[1]</sup>に示すように、非常に非触媒壁に近い C/C 材等を使用した機体の場合でも、淀み点熱流束は両者の間にあり、有限触媒効果を考慮しなければならない。

本研究では、昨年度の本シンポにおいて企画されたワークショップ<sup>[2]</sup>の延長として、課題の一つであったOREXを例にとり、極超音速非平衡流れに及ぼす壁面触媒性の影響を考察するとともに、解析値とフライトデータを用いて使用された材料の有限触媒性を推定することを試みる。なお、本研究は、航空宇宙技術研究所との共同研究の一環として行ったものである。

2. 基礎方程式及びスキーム

基礎方程式系として、軸対称の Full ナビエ-ストークス方程式を考へる。気体モデルとして7成分24反応空気モデル (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O, N, NO, NO<sup>+</sup>, e<sup>-</sup>) を用い、e<sup>-</sup>を除く各化学種に連続の方程式を適用する。また、解離反応速度に及ぼす分子振動緩和の影響を入れるため Park の2温度モデル<sup>[3]</sup>を用い、並進・回転及び振動・電子励起エネルギーモードはそれぞれ平衡状態にあるとする(代表温度をそれぞれ T, T<sub>v</sub>

で表わす)。また、流れは定常とし、層流境界層のみを考へる。

これらの仮定のもとに、基礎方程式はデカルト座標系で以下のように表される。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(E - E_v) + \frac{\partial}{\partial y}(F - F_v) + \alpha H = S + \alpha H_v \quad (1)$$

ここに、

$$\alpha = \begin{cases} 0 & : \text{2次元} \\ 1 & : \text{軸対称} \end{cases}$$

$$Q = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho v \\ E_t \\ E_{vib} + E_e \\ \rho s \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ u(E_t + p) \\ u(E_{vib} + E_e) \\ \rho su \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ v(E_t + p) \\ v(E_{vib} + E_e) \\ \rho sv \end{bmatrix} \quad (2)$$

E<sub>v</sub>, F<sub>v</sub> : 粘性項マトリックス

S : ソース項マトリックス

H, H<sub>v</sub> : 軸対称時の対流項及び粘性項マトリックス追加項

ρ : 密度、 u, v : 速度、 p : 圧力

E<sub>t</sub> : 単位体積当たり全エネルギー

E<sub>vib</sub>, E<sub>e</sub> : 単位体積当たり振動、電子エネルギー

添字 s : 気体種 (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O, N, NO, NO<sup>+</sup>); 1 ~ 6

である。化学反応速度定数は Park によって提唱されたモデル、輸送係数は kinetic theory を基礎にして構築したものをを用いた<sup>[3], [4]</sup>。また、振動・電子エネルギー方程式のソース項に現れる分子振動緩和時間のモデル化には、SSH理論<sup>[5], [6]</sup>を使用した。通常用いられている Landau-Teller 型のモデルでは、並進温度が約8,000K 以上において分子振動緩和時間を過小評価してしまうことが知られているが、SSH理論ではこれを避けることができる。

基礎方程式 (1) は無次元化された後、一般座標系に変換されて解かれるが、本解析では陰的差分法を用いて定式化

\* 三菱電機 (株) 鎌倉製作所

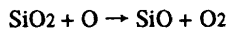
を行い、時間積分には並列計算に適した LU-SGS スキームを用いた<sup>[7]</sup>。ただし、非平衡流の場合には、左辺の反転すべき係数マトリックスにソース項マトリックス  $S$  のヤコビアンが含まれる。これは一般に密なマトリックスとなるため、反転には緩和法等の反復法を必要とする。この非効率性を避けるため、ソース項のヤコビアンを対角行列で近似する Diagonal Implicit 法を組み合わせている<sup>[8]</sup>。また、対流項の評価に関しては、AUSMDVスキーム<sup>[9]</sup>を非平衡流に拡張したものを用いた。ただし、カーバンクル現象を避けるため、衝撃波付近では、Hanel のFVSスキームに切り替えている<sup>[9]</sup>。

### 3. 境界条件

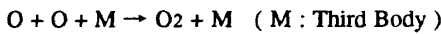
本解析では、壁面境界条件として、壁面に直交する方向での圧力勾配を 0、速度及び温度に関してはすべり無しを仮定し、さらに振動・電子励起温度も壁温  $T_w$  に等しいとした。ただし壁温に関しては、実際のフライトでは、使用されている材料の物性値や厚さに応じて異なる値をとっていると考えられるが、詳細な分布データが未知であるため、個々のフライトデータからの淀み点における推定値を一様分布させた。

今回注目すべき壁面における有限触媒性であるが、前提条件として、O 及び N 原子の再結合のみを考慮し、NO, NO<sup>+</sup>, e<sup>-</sup> は非触媒であると仮定した。今回の解析範囲では、NO<sup>+</sup>, e<sup>-</sup> の壁面付近の質量分率は非常に小さく、事実上空力加熱率には影響しないこと、及び NO 分子の壁面での反応の過程が明確でないことがその理由である。

一般に壁面に衝突する解離した原子が再結合する過程は非常に複雑であり、C/C材の場合、大別して、



のような一次反応と



で表わされるような二次反応が存在する。さらに、両者の反応の割合も壁面上における密度等の気体の状態によって変化することが知られている<sup>[3]</sup>。本解析では、これらの現象を直接モデル化する代わりに、壁面から平均自由行程のオーダーだけ離れた面における、解離原子の拡散による質量流束と壁面で消費される質量のバランスを考える。この場合、壁面境界条件は次式で表わされる。

$$-k_s \rho_s = -\rho D_s \frac{\partial c_s}{\partial \eta} \quad (3)$$

ただし、 $k_s$  は catalytic velocity、 $D$  は拡散係数、 $c$  は質量分率、 $\eta$  は壁面垂直方向座標、添字  $s$  は化学種を表わす。さらに catalytic velocity は、catalytic efficiency  $\gamma$  を用いて、次式で表わされる。

$$k_s = \gamma \sqrt{k T_w / (2\pi m_s)} \quad (4)$$

ここに、 $k$  はボルツマン定数、 $T_w$  は壁面温度、 $m$  は原子質量である。 $\gamma$  は、壁面に衝突する質量流束が壁面における触媒反応で消費される割合を示し、 $\gamma = 0$  の時は非触媒壁に、 $\gamma = 1$  の時は衝突する解離原子がすべて再結合する、いわゆる触媒壁に対応する。catalytic efficiency  $\gamma$  は、一次反応系の

場合には壁面温度の関数となり、壁面における密度にはよらないことが知られている<sup>[3]</sup>。また、本来  $\gamma$  は O, N 原子それぞれに別々に定義すべきものであるが、本解析では同一と仮定した。

(3) 式より、O, O<sub>2</sub>, N, N<sub>2</sub> に対する境界条件は、

$$\begin{aligned} -k_{O_2} \rho_{O_2} &= -\rho D_{O_2} \frac{\partial c_{O_2}}{\partial \eta}, & +k_{O_2} \rho_{O_2} &= -\rho D_{O_2} \frac{\partial c_{O_2}}{\partial \eta}, \\ -k_{N_2} \rho_{N_2} &= -\rho D_{N_2} \frac{\partial c_{N_2}}{\partial \eta}, & +k_{N_2} \rho_{N_2} &= -\rho D_{N_2} \frac{\partial c_{N_2}}{\partial \eta} \end{aligned} \quad (5)$$

で記述することができ、これらを空間2次精度で離散化した定式化を用いる。具体的には、1時間ステップ前(添字  $n$  で表わす)の密度等の物理量と新しく求められた壁面圧力を用いて、気体の状態方程式から、まず壁面における密度が算出される。

$$\rho_w^{(n+1)} = \frac{3 \left[ p_w^{(n+1)} + \frac{2}{3} \bar{R} T_w \Delta \eta \sum_{s=O, O_2, N, N_2} \frac{A_s^{(n)}}{M_s} \right]}{\left[ \frac{4}{\rho_{j=2}^{(n)}} \sum_{s,j=2} \frac{\rho_{s,j=2}^{(n)}}{M_s} - \frac{1}{\rho_{j=3}^{(n)}} \sum_{s,j=3} \frac{\rho_{s,j=3}^{(n)}}{M_s} \right] \bar{R} T_w} \quad (6)$$

O, O<sub>2</sub>, N, N<sub>2</sub> に対する密度は、(6)式を用いて、

$$\rho_{s,w}^{(n+1)} = \frac{1}{3} \left[ 4 \rho_{s,j=2}^{(n)} \frac{\rho_w^{(n+1)}}{\rho_{j=2}^{(n)}} - \rho_{s,j=3}^{(n)} \frac{\rho_w^{(n+1)}}{\rho_{j=3}^{(n)}} - 2 \Delta \eta A_s^{(n)} \right] \quad (7)$$

から求められる。ただし、(6),(7)式において、 $\bar{R}$  は普遍気体定数、 $\Delta \eta$  は壁面での  $\eta$  方向格子間隔、添字  $w$  は壁面、 $j$  は  $\eta$  方向格子インデックスを表わし、

$$\begin{aligned} A_{O_2} &= + \frac{k_O \rho_{O_2, w}}{D_{O_2}}, & A_{O_2} &= - \frac{k_O \rho_{O_2, w}}{D_{O_2}}, \\ A_{N_2} &= + \frac{k_N \rho_{N_2, w}}{D_{N_2}}, & A_{N_2} &= - \frac{k_N \rho_{N_2, w}}{D_{N_2}} \end{aligned}$$

である。これらのアルゴリズムを解析コードの壁面境界条件に組み込み、最終的に定常解を求める。

なお、流れの流出条件としては、流出面より1格子以上流側の物理量を0次外挿で与えた。

### 4. 解析結果及び考察

解析範囲として、OREX のフライトケースのうち、淀み点空力加熱率のピーク時を含む高度 75.81, 67.66, 63.60, 59.60 km の計4ケースを考え、それぞれのケースに対して、catalytic efficiency  $\gamma$  をパラメータ ( $\gamma = 0, 0.005, 0.01, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0$  及びフライトデータからの  $\gamma$  の推定に必要な値)として、8ないし9個の計算を実施した。公表されているフライト時の諸量を表4.1に示す<sup>[10]</sup>。壁面付近のセルレイノルズ数は、予備的な解析を行って決定し、高度 75.81, 67.66 km のケースでは1、残りのケースでは2とした。また、解析には81×81の格子を用いた。

フライト時の淀み点空力加熱率の履歴と、非触媒壁 ( $\gamma = 0$ ) 及び触媒壁 ( $\gamma = 1.0$ ) を仮定した時の解析結果を図4.1に示す。フライト時の値は、非触媒壁と触媒壁を仮定した値の間にあり、さらにこの仮定値の幅がフライト値そのものと同オーダーであることを考えると、壁面の有限触媒性の重要性が理解できる。

壁面の触媒性の影響を調べる前に、まず高度による流れ場の違いを、特に一様流の希薄性の違いに起因する非平衡性に着目して概観することにする。図 4.2 に、並進・回転温度分布と振動・電子温度分布を示す。この範囲内ではマッハ数の変化が比較的小さいため、物体前方の離脱衝撃波位置はほとんど変化しない。また、温度分布も単にコンター図を比較しただけでは、絶対値の違いはわかるものの、それぞれの高度における流れ場の特徴を把握することは難しい。

そこで、それぞれの高度における淀み点流線上の温度分布を比較してみる。図 4.3 からわかるように、高度が高いケースでは、衝撃層における並進・回転温度と振動・電子温度の差が大きく、強い熱的非平衡性が現われており、逆に低高度のケース（高度59.60 km）では、衝撃層内ではほとんど熱的平衡状態にあることがわかる

さらに化学的非平衡性の違いをみるために、非触媒壁ケースを仮定した場合の O, N 原子の淀み点流線上分布を図 4.4 に示す。O 原子は全ケースにおいて衝撃層内において完全に解離し、境界層内においても再結合せず、いわゆる化学的非平衡性が現われている。しかし、N 原子の場合を見ると、高度によって衝撃層内の解離の割合が異なり、かつ境界層内の再結合の様子も異なっており、高度が低くなるにつれて化学的非平衡性が弱くなる。従って、解析範囲内において流れを強いて分類すれば、高度の大きいケースは、熱的にも化学的にも非平衡性の強い流れ、高度の小さいケースは、熱的にはほぼ平衡だが、化学的には非平衡な流れと考えることができる。

次に、壁面における触媒性の淀み点空力加熱率への影響

を図 4.5 に示す。横軸に catalytic efficiency  $\gamma$  を取り、縦軸にトータルな空力加熱率  $q_w$  の他に、伝導、拡散による寄与及びフライトデータを並記した。いずれの高度の場合においても非触媒条件 ( $\gamma = 0$ ) 近傍の変化が特に大きく、 $10^3$  オーダーのわずかな変化に対して敏感に応答する。これは、主として拡散による熱流束変化によるためである。また、catalytic efficiency が 0.1 程度になると空力加熱率はほぼ一定値に達する。

各々のケースについて、それぞれの非触媒条件 ( $\gamma=0$ ) での空力加熱率で規格化したものが図 4.6 である。各高度を通じて、catalytic efficiency の変化に対する空力加熱率の変化の傾向はほぼ同一である。しかし高度の高いケースの方が、catalytic efficiency が増加するにつれて空力加熱率の増加する割合が大きい。図 4.3 からわかるように高度 75.81 km のケースでは、壁面における解離原子の割合が大きく、非触媒条件時に約56% に達しているのに対し、高度 59.60 km のケースでは約 27% 程度である。従って、高度の高い方が、壁面の触媒反応によって再結合すべき解離原子が多く存在していることにその原因があるものと思われる。

図 4.7 は、高度 63.60 km のケースにおける、O, N 原子の壁面付近の淀み点流線上分布を、catalytic efficiency  $\gamma$  をパラメータとして比較したものである。catalytic efficiency が増加するに従い、壁面上に存在する解離原子が再結合のために消費される割合が増えるため、質量分率は減少していく。catalytic efficiency が 0.1 程度になるともはや壁面上には再結合すべき解離原子はほとんど存在しなくなり、これ以上 catalytic efficiency が増えても空力加熱率はこれ以上増加しないことが理解できる。

表 4.1 OREX フライト時条件

フライト時間 t (sec)	高度 H (km)	速度 U <sub>∞</sub> (m/sec)	温度 T <sub>∞</sub> (K)	圧力 P <sub>∞</sub> (N/m <sup>2</sup> )	淀み点 壁面温度 T <sub>w</sub> (K)	マッハ数 M <sub>∞</sub>
7431.5	75.81	7245.7	206.82	2.1717	928	25.04
7451.5	67.66	6720.3	225.99	7.892	1251	22.22
7461.5	63.60	6223.4	237.14	14.02	1413	20.09
7471.5	59.60	5561.6	248.12	23.60	1519	17.55

上：並進・回転温度分布  
下：振動・電子励起温度分布

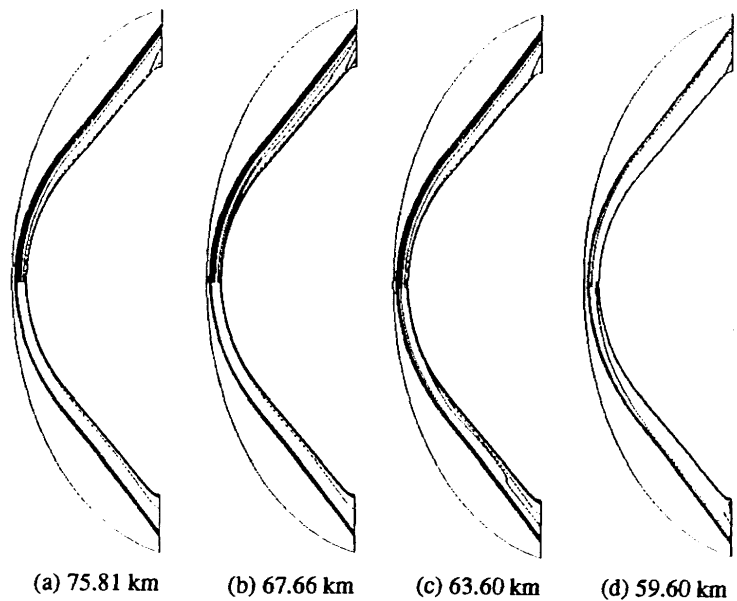


図 4.2 各高度における流れ場（非触媒壁）

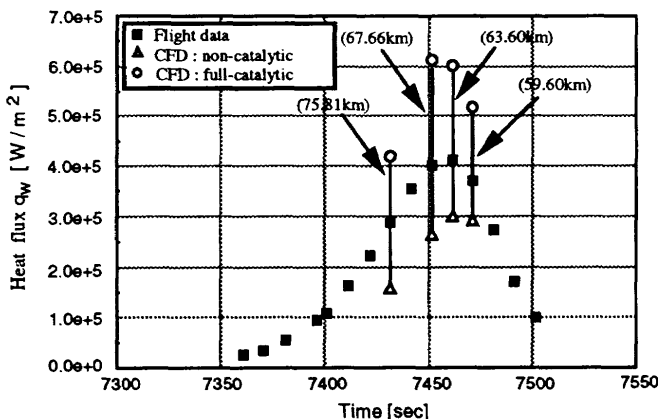


図 4.1 OREX 淀み点空力加熱率フライトデータ及びCFD 解析値

以上の議論では、主として淀み点における空力加熱率に対する影響について考察を加えてきたが、OREX の機体表面全体のcatalytic efficiency による空力加熱率に対する影響を高度 59.60 km の場合について図 4.8 に示す。横軸は機体中心線に垂直に周方向に取った座標である。一般に、淀み点付近において強い非平衡性を示す流れも、後方に進むにつれ徐々に平衡状態に近づいて解離原子の再結合が進む。従って、壁面の触媒性の影響は後方に行くにつれ小さくなると予想される。しかし、OREX 程度の比較的小型なカプセル形状では、解離原子の再結合が起こり始める前の状態、すなわち frozen な状態のまま気体は通り過ぎてしまい、結局、非触媒条件では解離原子の割合はほとんど同じに保たれる。そのため、解析した高度範囲の中で最も一様流密度が大きく、後方において平衡状態に近づきやすいと予想される低高度のケースでも、図 4.8 で見られるように、いままで見てきた淀み点付近の傾向が機体全体に対してはほぼあてはまる。

解析値とフライトデータを用いて推定した材料のcatalytic efficiency  $\gamma$  の推定値を図 4.8 に示す。この推定値は、図 4.5 において、解析から得られた  $\gamma$  に対する淀み点空力加熱率の曲線と、フライトデータからの測定値との交点から求められる。図 4.9 には、他の同様な材料に関するデータも並記した<sup>[11]</sup>。この中で、Scott 及び Kolodziej & Stewart によるデータは地上での試験であり、Zoby, Guputa & Simmonds によるデータはスペースシャトルのフライトデータからの推定値である。これらのデータと今回の推定値を比較する

と、オーダー的には概ね良い一致を見ており、フライトデータの測定値と解析値両者の精度が妥当であることが実証されたと考えられる。今後、予測計算に使用するモデルの精度向上のため、他のフライトデータ及び種々の手法を用いた同様な解析結果の蓄積が待たれる。また、フライト実験とは独立した地上における材料実験によるデータの取得も、今後重要になってくるものと思われる。

## 5. 結論

高度変化による再突入物体周りにおける極超音速流れ場の非平衡性の変化を、OREXを例にとり、解析により明らかにした。

壁面における有触媒性を示すパラメータとしてcatalytic efficiency  $\gamma$ を導入し、空力加熱率に及ぼす影響を考察した。その結果、(1) 流れ場の非平衡性の強弱にかかわらず、 $\gamma = 0.1$  程度で淀み点空力加熱率はほぼ一定値に達する。(2) 空力加熱自体の増加の程度は、壁面付近の解離原子の割合、従って、流れ場の非平衡性と強い相関があることが明らかとなった。

解析値とフライトデータより、catalytic efficiency  $\gamma$  を推定した。推定値は、既存のデータと比較して、材料そのものは異なるが、オーダー的には概ね良く一致していることが確認された。今後、他のフライトデータ及び種々の手法を用いた同様な解析結果の蓄積が待たれる。また、フライト実験とは独立した地上における材料実験によるデータの取得も、今後重要になってくるものと思われる。

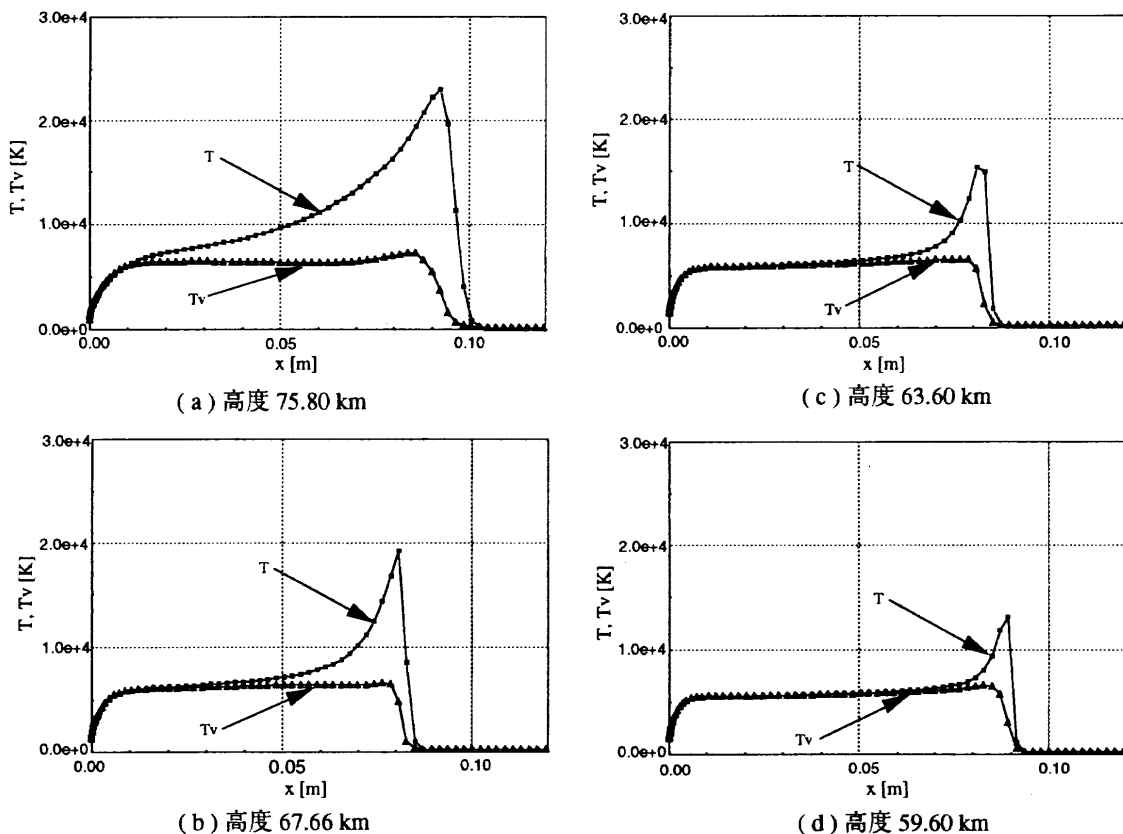
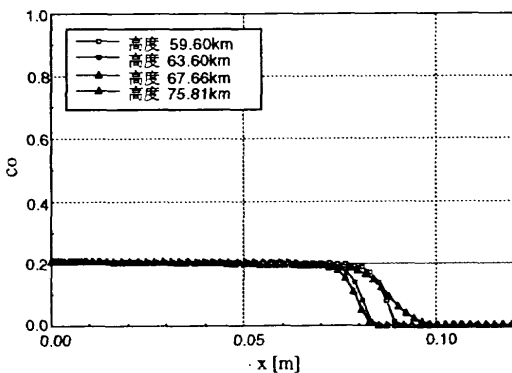


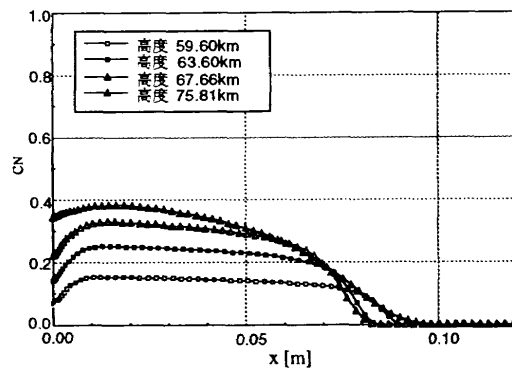
図 4.3 淀み点流線上温度分布 (非触媒壁)

参考文献

- [1] Gupta, R.N., Moss, J.N. and Price, J.M., "Assessment of Thermochemical Nonequilibrium and Slip Effects for Orbital Reentry Experiment (OREX)", AIAA Paper 96 1859, 1996.
- [2] Kurotaki, T., "Numerical Analysis of Thermochemical Nonequilibrium Hypersonic Flow", NAL SP-29, pp.114-121, 1996.
- [3] Park, C., Nonequilibrium Hypersonic Aerothermodynamics, John Wiley & Sons, Inc., 1990.
- [4] Gnoffo, P.A., Gupta, R.N. and Shinn, J.L., "Conservation Equations and Physical Models for Hypersonic Air Flows in Thermal and Chemical Nonequilibrium", NASA TP-2867, 1989.
- [5] Schwartz, R.N., Slawsky, Z.I. and Herzfeld, R.N. "Calculation of Vibrational Relaxation Times in Gases", J. Chem. Phys., 20, PP. 1591-1599, 1954.
- [6] Thivet, F., Perrin, M.Y. and Candel, S., "A Unified Nonequilibrium Model for Hypersonic Flows", Phys. Fluids, A3, pp. 2799-2812, 1991.
- [7] Yoon, S. and Kwak, D., "Implicit Methods for the Navier-Stokes Equations", Computational Technology for Flight Vehicles, Vol. I, pp.535-547, 1990.
- [8] Eberhardt, S. and Imaly, S., "A Diagonal Implicit Scheme for Computing Flows with Finite-Rate Chemistry", AIAA Paper 90-1577, 1990.
- [9] Wada, Y. and Liou, M.-S., "A Flux Splitting Scheme with High-Resolution and Robustness for Discontinuities", AIAA Paper 94-0083, 1994.
- [10] NAL SP-29, 1996.
- [11] Gupta, R.N., "Stagnation Flowfield Analysis for an Aeroassisted Vehicle", Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 30, pp. 14-21, 1993.

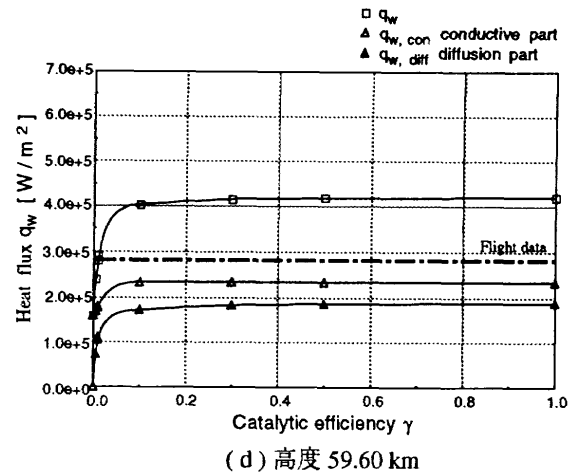


(a) O 原子質量分率

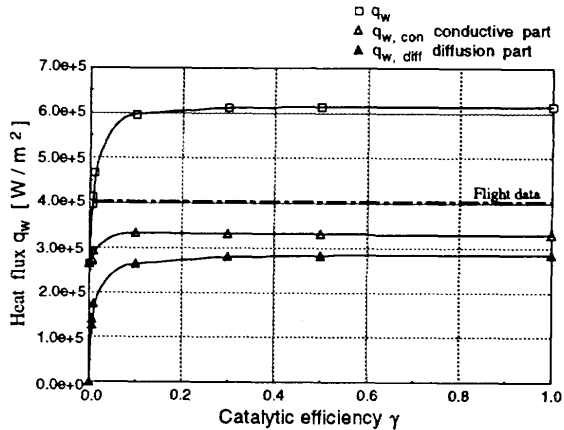


(b) N 原子質量分率

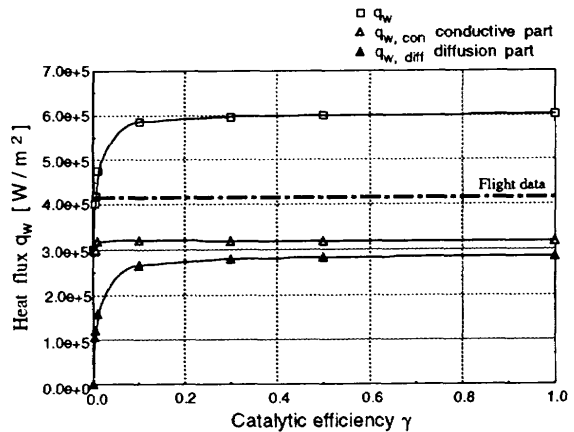
図 4.4 淀み点流線上解離原子質量分率 (非触媒壁)



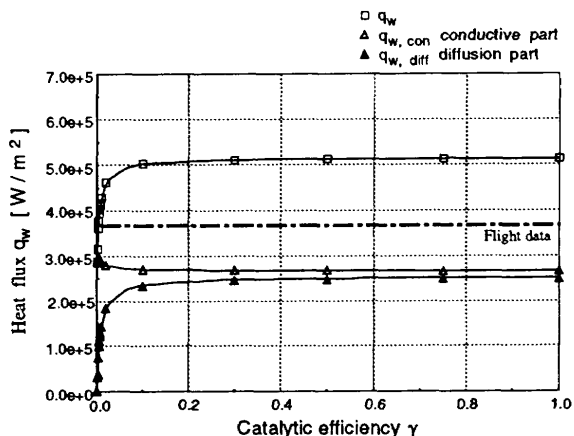
(d) 高度 59.60 km



(b) 高度 67.66 km



(c) 高度 63.60 km



(a) 高度 75.80 km

図 4.5 Catalytic Efficiency  $\gamma$  の淀み点空力加熱率に与える影響

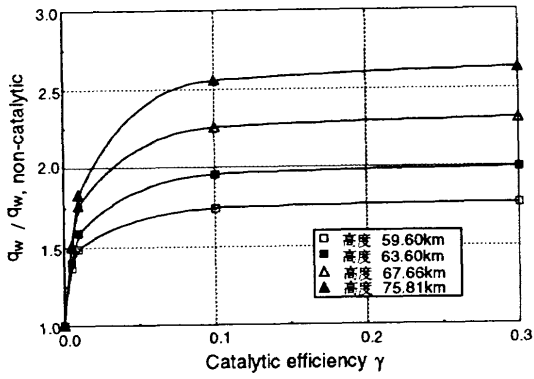


図 4.6 高度変化による壁面触媒性の影響の比較

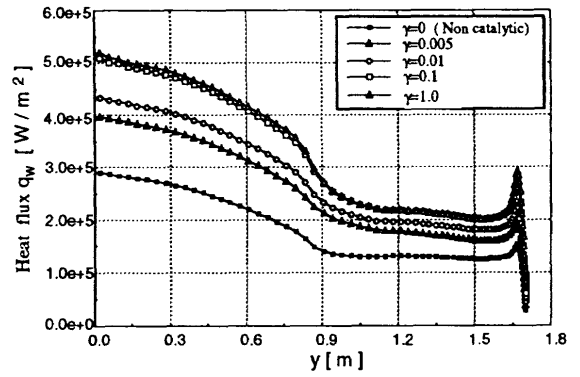
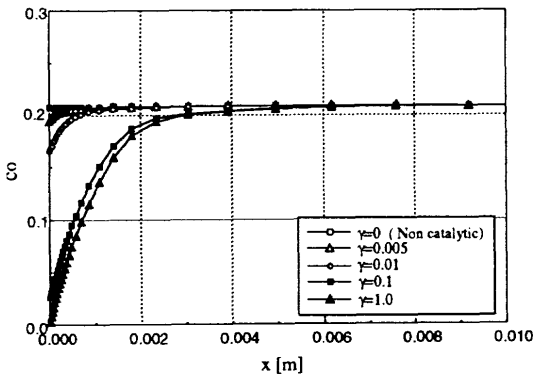
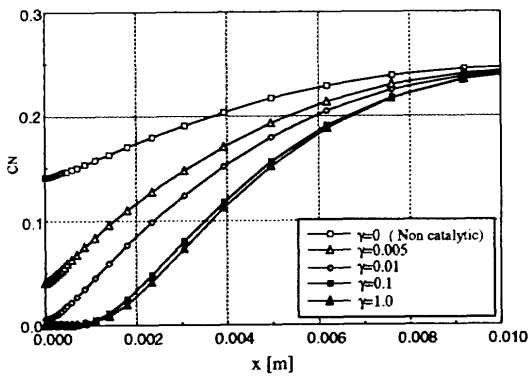


図 4.8 壁面触媒性の空力加熱率分布に与える影響 (高度59.60 km)



(a) O 原子質量分率



(b) N 原子質量分率

図 4.7 淀み点流線上解離原子質量分率 (高度 63.60 km)

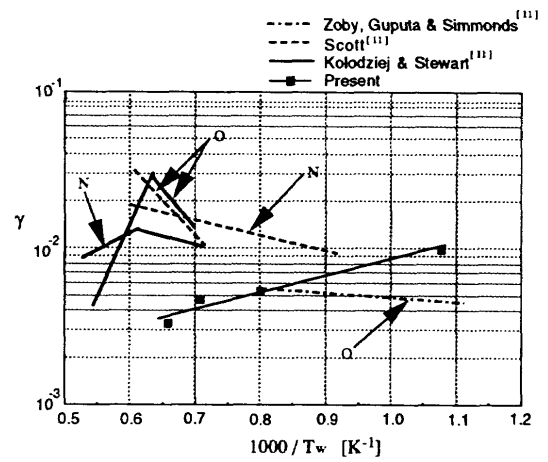


図 4.9 Catalytic Efficiency  $\gamma$  推定値及び他の値との比較