

# 高エンタルピー流れワークショップまとめ

山本行光 (航技研)

保阪陽子、斉藤亜希子 (三向ソフトウェア開発)

## Summary of High Enthalpy Flow Workshop

by

Yukimitsu YAMAMOTO

National Aerospace Laboratory

and

Yoko HOSAKA, Akiko SAITO

Sanko Software Ltd.

### Abstract

In the perspective of Japanese space projects, the knowledge of high enthalpy and high Mach number flow, occurring during the atmospheric reentry of space vehicles, has regained recently considerable interest. The need to support aerodynamic design of space vehicles under the environments where experiment is very difficult and costly, has driven the use of numerical simulation. Hence, high enthalpy flow workshop was held at NAL in June, 1995 for axisymmetric flow problems. This paper summarizes the computational results of OREX real gas flow problem and discusses the detailed comparison of each numerical results.

#### 1. はじめに

平成7年度6月に行われた第13回航空機計算空気力学シンポジウム特別企画「高エンタルピー流企画セッション及びワークショップ」<sup>1)</sup>の成果をさらに有意義なものとするため、ワークショップ各応募者から計算結果のデジタルデータの提供を受けた。また本企画の後にも、平成7年11月に第1回米国-ヨーロッパ高速流のデータベース・ワークショップにおいて、OREX課題に対する幾つかの計算結果の寄与<sup>2), 3)</sup>が得られた。さらにその後DSMC法及びVSL法によるOREX実飛行解析<sup>4)</sup>もなされた。今回はこれらを統合して、OREXの課題に関するより厳密な比較検討を実証し、詳細な結果のレビューを行ったので報告する。

#### 2. 高エンタルピー流れワークショップ

##### OREX課題計算のまとめ

OREXの課題設定を図1及び表1に示す。今回はOREX課題に関する実在気体非触媒ケース、及び完全気体ケースについての計算結果の比較検討を実施した。デジタルデータは航技

研 山本行光、同、高木亮治氏、日産自動車 関野展弘氏、三菱電機 黒滝卓司氏、名古屋大学 村上桂一氏、同、中森一郎氏から提供していただいた。また東北大学 長友英夫氏からもデータを提供していただいたが、データが読み込めなかったため割愛した。なお、上記提供者の所属は平成7年6月現在でのワークショップ参加当時のものである。なお今回の空力加熱分布に関する比較では、熱伝導係数を以下に示すように統一した値を使用した。

壁面上での粘性係数  $\mu_w$

$$\mu_w = C \cdot (T_{wall}/273.0)^{1.5} \cdot (1.0 + 110.0/273.0) / (T_{wall}/273.0 + 110.0/273.0)$$

$$C = 17.1126 \times 10^{-6}$$

壁面上での熱伝導率係数

$$K_w = \mu_w \cdot (1.4/0.4) \cdot R/Pr$$

$$R = 287.0 \quad \text{ガス定数}$$

$$Pr = 0.72 \quad \text{プラントル数}$$

従って、空力加熱分布の比較は各計算に用いられるそれぞれの物性値モデルとは異なるため物体表面近傍の温度勾配の比較を示しているとみなされる点に注意を要する。

#### Problem II-1 OREX 高々度非触媒ケース

等温度線図の比較を図2に示す。温度ケースは一様流の温度  $T_\infty$  (186.9K) で無次元化されている。図で中央部の空白の領域は、無次元化温度でスケールの上限を上回っていることを示す。よどみ点流線に沿う並進、回転の温度分布は図3に示される。温度の最高値は20000~25000Kで、分布は相似であるが衝撃波層の厚みがそれぞれの計算結果によって異なるため、最高温度のあらわれる位置がずれている。同じく、よどみ点流線に沿う窒素分子 ( $N_2$ )、酸素原子 (O)、酸化窒素 (NO) の質量分率の分布を図4に示す。窒素分子 ( $N_2$ ) は物体表面に近づくにつれ徐々に減少していくが、表面近傍の最低となる位置及びその値は異なる。酸素原子 (O) は酸素分子が解離するため徐々に増加し、表面近傍で一様流の酸素分子の質量分率に近づいていくが、それぞれの計算結果において増加の傾向が異なる。酸化窒素 (NO) の分布は各計算とも違いが大きい。OREX表面に沿う空力加熱(温度勾配)分布は、図5に示される。各計算とも大きな開きを見せる。逆に表面圧力分布は一次量であるため、図6に見られるように各計算結果とも非常に一致する。なお分布の横軸はOREX半径方向の高さをm単位で示したものである。よどみ点流線に沿う温度分布を図7に示す。図は表面から0.2mmまでの温度分布を拡大したもので、温度勾配の分散が、空力加熱の値に大きく寄与していくことが判明する。もちろん真の空力加熱は各計算によって用いられる熱伝導係数等の物性値によっても異なってくるので、断定的な結論は避けたい。

#### Problem II-2 OREX 中高度、非触媒ケース

よどみ点流線に沿う並進・回転の温度分布を図8に示す。高々度のケースに比較して、最高温度の値、及び位置のずれはあるものの、分布形状はおおむね良好である。窒素分子及び酸素原子の質量分率も図9に示されるように良く一致する。但し、表面に沿う温度勾配の分布は、図10に見られるように、なお大きくずれている。図11の表面圧力分布は高高度ケースと比較してさらに良く一致するようになる。表面近傍よどみ点流線

に沿う温度分布は図12に見られるように傾きが異なるため、真の空力加熱計算にも大きく影響する。

#### Problem II-3 OREX 中高度、完全気体ケース

表面に沿う圧力及び温度勾配・分布を図13、図14に示す。圧力についてはほぼ一致するが、温度勾配については、空力加熱計算に用いられる熱伝導係数等、物性値の値の差は小さくなると考えられるにも関わらず、温度勾配分布の差は大きい。

#### 3. OREX飛行実験のVSL、DSMC法との比較

ワークショップで得られた結果の比較をより有意義なものとするため、ナビエ・ストークスコードとは異なる希薄気体DSMC法、及びVSL法との比較を行った<sup>4)</sup>。高々度OREX飛行条件でのDSMC法と著者らのNSコードの比較結果を図15~17に示す。図15は等マッハ線図の比較、図16はよどみ点流線に沿う並進・回転温度分布、図17はよどみ点流線に沿う各化学種の質量分布の比較である。ほぼ良好な一致が得られた。但し、温度分布については最高値は若干異なる。3つの異なる高度でのOREX表面空力加熱分布のDSMC、VSL法との比較を図18に示す。VSL法では高々度におけるSlip効果や、低高度での触媒性の影響を考慮している。高度93km及び84kmの空力加熱分布はおおむね良好な一致を示すものの、高度60km付近ではNSコードがVSLコードに比べて、空力加熱を高く見積もっている。なお、よどみ点上の空力加熱の飛行推定値は黒丸で示されている。非触媒計算の値よりも高くなるのは有限触媒性の影響と考えられる。

#### 4. まとめ

高エンタルピー流れワークショップで得られたOREXの計算結果をデジタルデータとしてまとめ、より厳密な比較を行った。表面圧力分布については良好な一致を示すものの、空力加熱分布の指標である表面近傍の温度勾配については各計算結果に大きな差がでてくる。またよどみ点流線に沿う温度分布、質量分率も非平衡性の高まる高々度領域では違いが大きくなる。

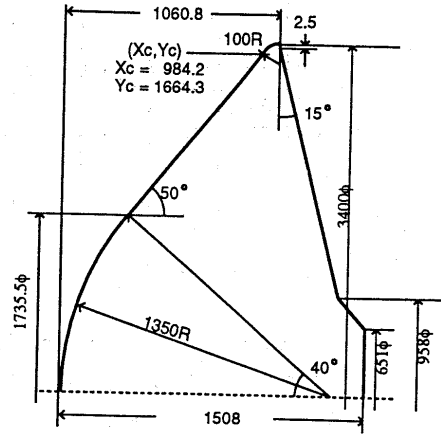
一方、DSMC法やVSL法との比較では、著者らのNSコード計算結果とおおむね良好な一致が得られた。他のNS計算結果との比較は紙面の都合上割愛するが、NSコード以外の計算法による解析も、今後実在気体解析を進める上で非常に有効な手段として取り上げられよう。

今回はOREXの課題を中心に報告したがOREXの計算結

果を提供していただいた方々はもちろんのこと「高エンタルピー流れワークショップ」の他の課題についてもデータを提供していただいた方々にも深く感謝する。今後航技研資料として報告してゆきたい。

参考文献

- 1) 第13回航空機計算空気力学シンポジウム論文集特別企画「高エンタルピー流れ企画セッション及びワークショップ」航空宇宙技術研究所特別資料SP-29、1996年1月
- 2) 高木亮治「OREX課題に対するナビエ・ストークスコードによる計算」第1回米国-ヨーロッパ高速流に関するデータ・ベースワークショップ米国ヒューストン大学 1995年 11月、私信
- 3) J. N. Moss, J. M. Price and G. Bird "DSMC Calculations for OREX Flowfields T12-95.1 Condition" First US-European High Speed Flow Field Database Workshop, University of Houston, USA Nov. 6-9, 1995, Private Communication.
- 4) R. N. Gupta, J. N. Moss and J. M. Price "Assessment of Thermochemical Nonequilibrium and slip Effects for Orbital Reentry Experiment (OREX)" AIAA Paper 96-1859, June, 1996



OREX Configuration(Unit:mm)

図1 OREX形状寸法

	$U_\infty$	$T_\infty$	$P_\infty$	$T_{wall}$
II.1	7450m/s	186.9K	0.169N/m <sup>2</sup>	540K
II.2	5562m/s	248.1K	23.60N/m <sup>2</sup>	1519K
II.5	5562m/s	248.1K	23.60N/m <sup>2</sup>	1519K

- II.1 LamInar Non-equilibrium, Non Catalytic
- II.2 LamInar Non-equilibrium, Non Catalytic
- II.5 Laminar Non React

表 1

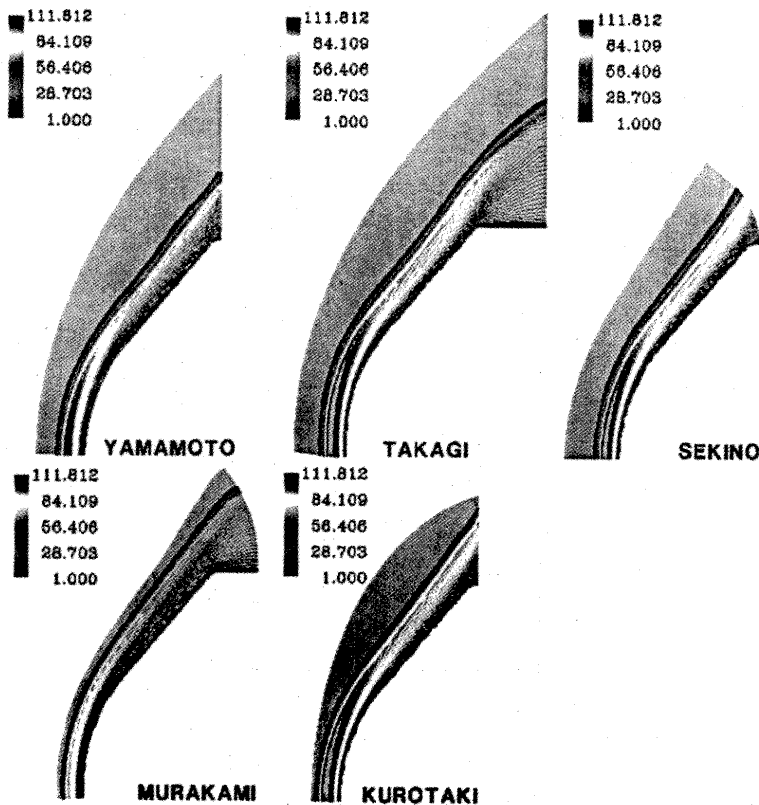


図2 OREX高々度飛行条件 等温度線図

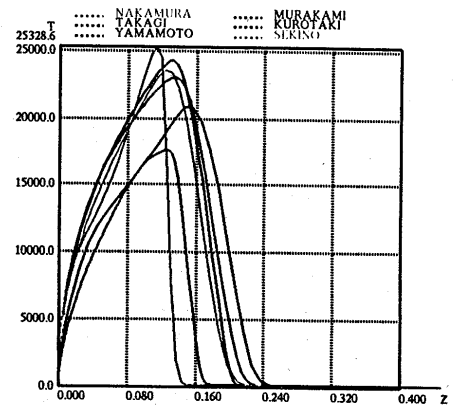
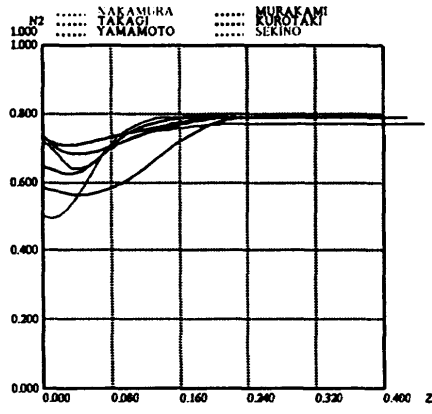
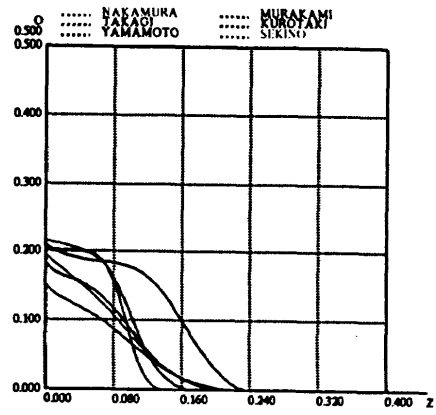


図3 OREX 課題II-1よどみ点流線に沿う並進・回転温度分布

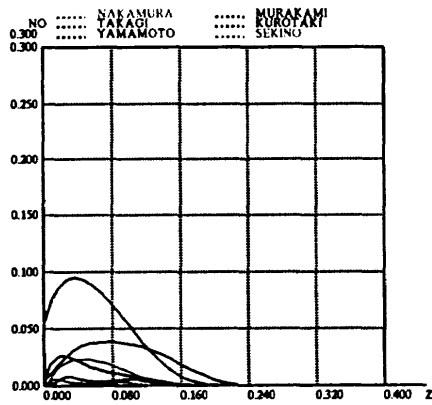


(a) 窒素分子 (N<sub>2</sub>)



(b) 酸素原子 (O)

図4 OREX 課題II-1 よどみ点流線に沿う質量分率分布



(c) 酸化窒素 (NO)

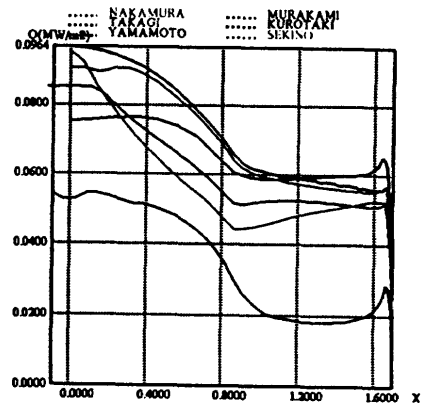


図5 OREX 課題II-1

表面空力加熱分布 (熱伝導係数統一値仮定)

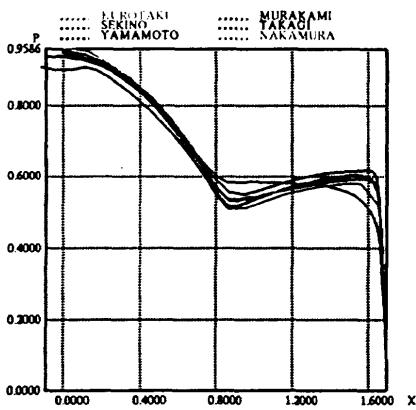


図6 OREX 課題II-1  
表面圧力分布

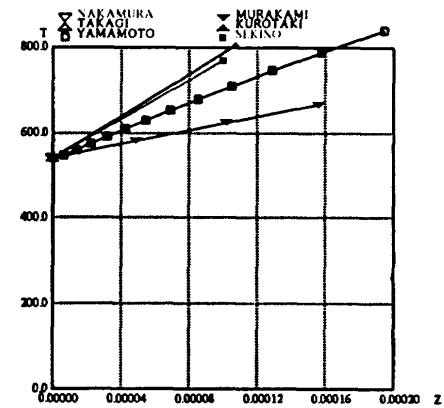


図7 OREX 課題II-1

よどみ点流線に沿う表面近傍並進・回転温度分布

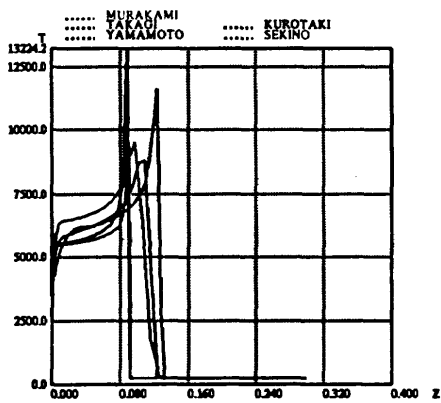
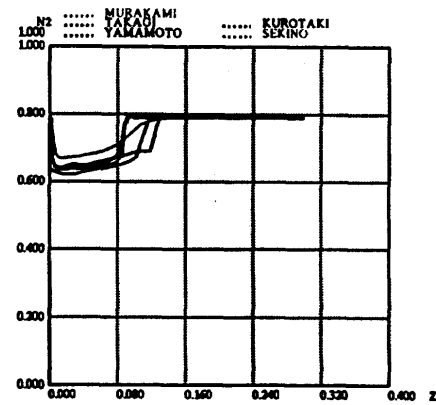


図8 OREX 課題II-2  
よどみ点流線に沿う並進・回転温度分布



(a) 窒素分子 (N<sub>2</sub>)

図9 OREX 課題II-2  
よどみ点流線に沿う質量分率分布

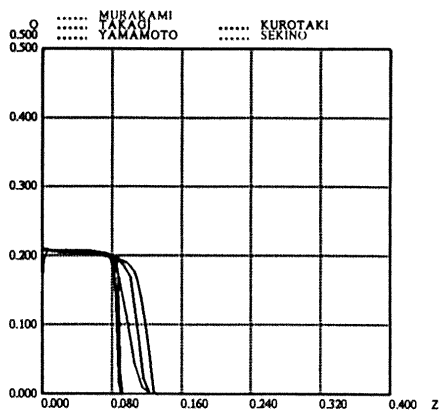


図9 OREX 課題II-2 (b) 酸素原子(O)よどみ点流線に沿う質量分率分布

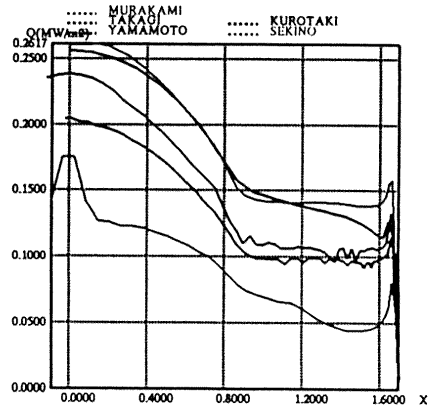


図10 OREX 課題II-2 表面に沿う空力加熱分布(熱伝導係数統一値仮定)

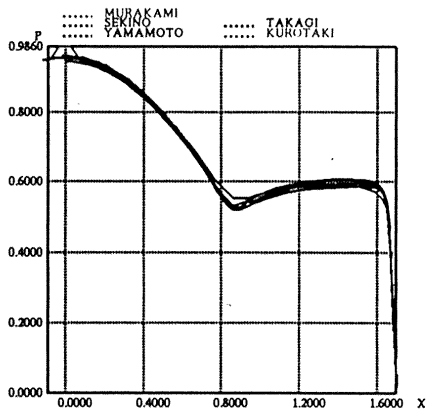


図11 OREX 課題II-2 表面圧力分布

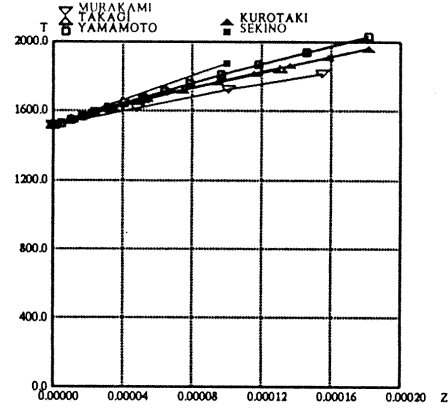


図12 OREX 課題II-2 よどみ点流線に沿う表面近傍並進・回転温度分布

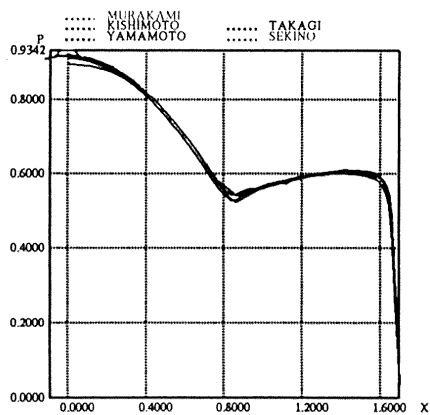


図13 OREX 課題II-5 表面圧力分布

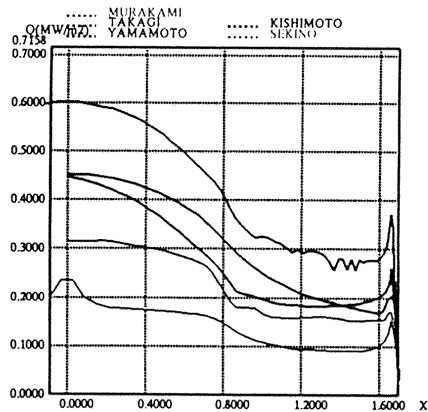


図14 OREX 課題II-5 表面に沿う空力加熱分布(熱伝導係数統一値仮定)

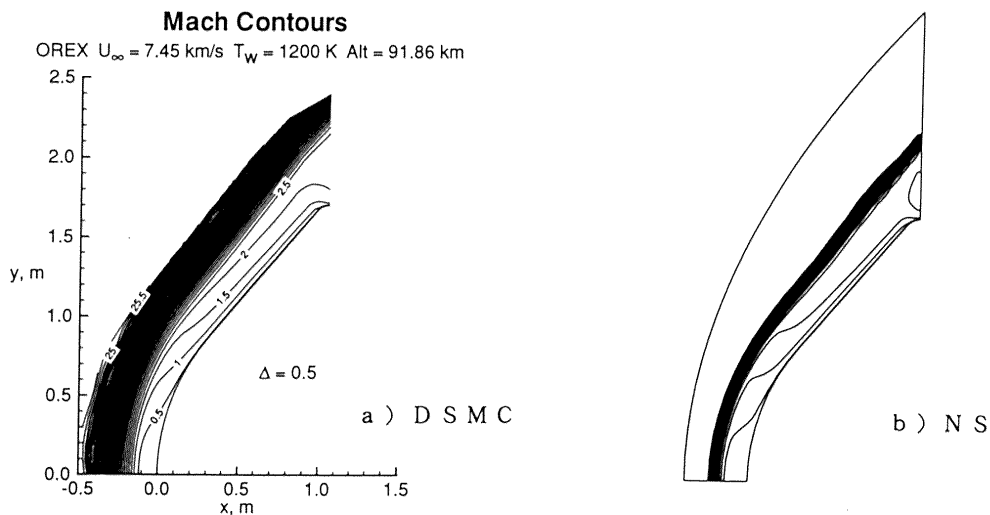


図15 OREX 高々度飛行条件等マッハ線図 DSMC法とNSコード計算結果の比較

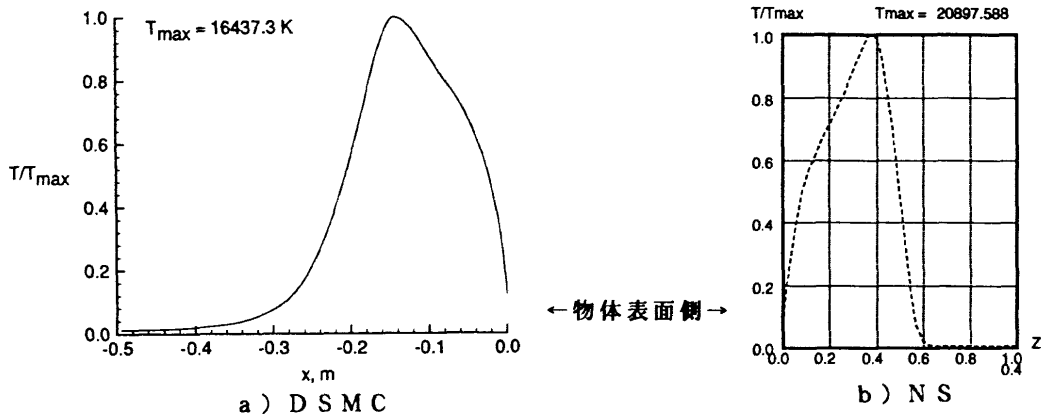


図 16 OREX 高々度飛行条件 よどみ点流線に沿う並進・回転温度分布  
DSMC法とNSコード計算結果の比較

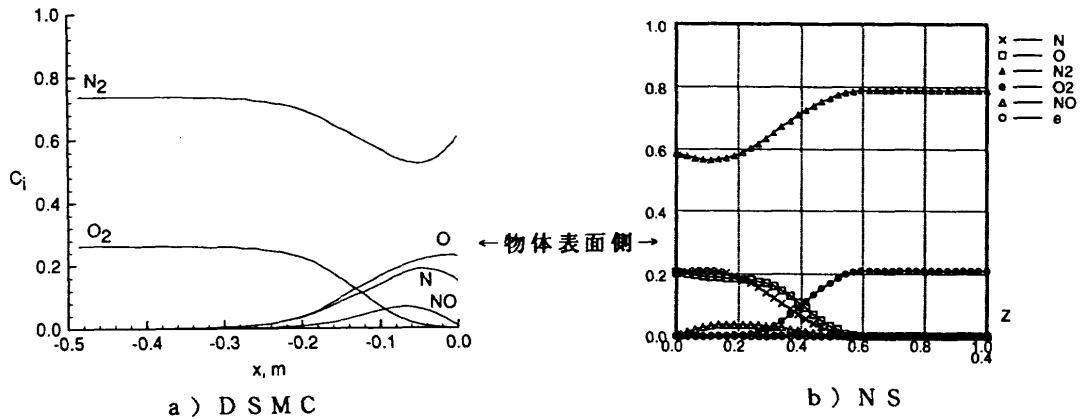
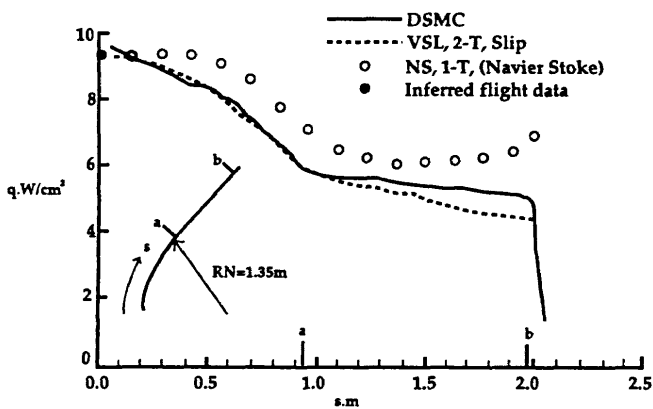
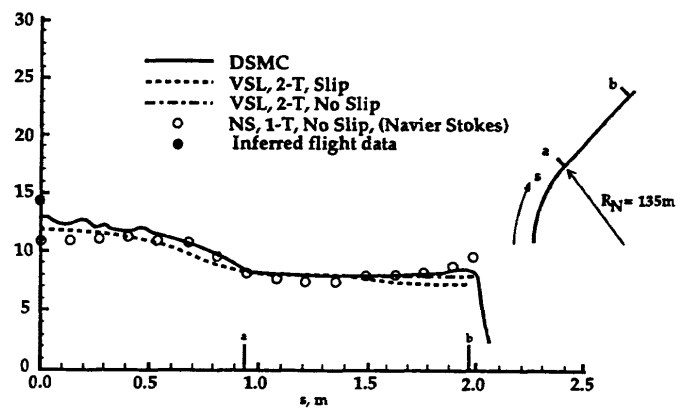


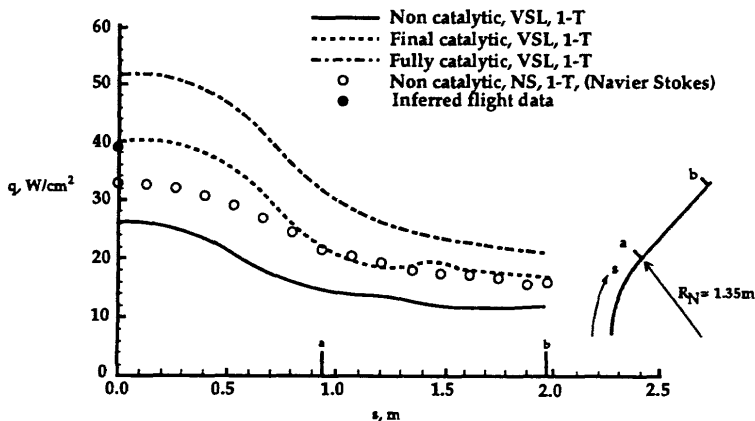
図 17 OREX 高々度飛行条件 よどみ点流線に沿う質量分率分布  
DSMC法とNSコード計算結果の比較  $U_\infty = 7.45 \text{ km/s}$   $T_w = 1200 \text{ K}$   $\text{Alt} = 91.86 \text{ km}$



(a) Alt = 92.82km ( $Kn_\infty = 0.0086$ )



(b) Alt = 84.01km ( $Kn_\infty = 0.0016$ )



(c) Alt = 59.60km ( $Kn_\infty = 7.35 \times 10^{-3}$ )

図 18 OREX 表面空力加熱分布の  
DSMC、VSL法との比較  
from Ref. 4)