

希薄気体数値風洞 VII. OREX

古浦 勝久* 高平 幹成**

Rarefied Gas Numerical Wind Tunnel VII. OREX

by

Katsuhisa KOURA
National Aerospace Laboratory
Mikinari TAKAHIRA
Daiko Limited

ABSTRACT

The "rarefied gas numerical wind tunnel (RGNWT)" constructed with the universal code described using the null-collision direct-simulation Monte Carlo method is used for the simulation of rarefied gas flows around the orbital re-entry experiment vehicle (OREX). Some aerodynamic characteristics and flowfield properties are presented.

1. 希薄気体数値風洞

スペース・プレーン等の高層大気飛翔体が希薄大気中を飛行する際の空力特性を求めるための「希薄気体数値風洞(RGNWT)」の開発・整備を進めている。希薄気流中の三次元全機シミュレーションには、高精度・高効率シミュレーション手法が必須であり、衝突セル当たりの平均分子数の下限が1程度と小さく計算時間も少ない擬衝突直接シミュレーション・モンテカルロ法 [null-collision (NC) direct-simulation Monte Carlo (DS-MC) method]¹⁾を用いる。計算領域、衝突セルおよびデータセル形状は効率的な(一様)直方体形状を汎用的に用い、計算領域境界での境界条件は、物体上流および上下・左右境界では一様流を、物体下流境界では流れ方向への変化を無視する近似を行う。物体の空力特性を求めるための物体表面セルは衝突セル形状とは独立に物体形状に適した形に分割する。物体表面での気体分子の反射条件は鏡面反射と拡散反射の混合型を仮定する。

気体分子モデルは、最近提案された高精度・高効率分子モデルである Variable Soft Sphere(VSS)モデル²⁾を用いる。なお、分子の回転、振動、解離、電子的励起、電離、輻射などの実在気体効果を高精度・高効率にシミュレートするための分子モデルも開発中である。

2. OREX

「希薄気体数値風洞」を用いて軌道再突入実験機(OREX)回りの三次元希薄流シミュレーションを行った。衝突(データ)セルと物体表面セルを図1に示す。

高エネルギーでの分子間ポテンシャルが不確定なため³⁾、VSS分子モデルにおけるパラメータは剛体球モデルに対応する値を用い、実在気体効果は考慮していない。また、物体表面は一様流温度の拡散壁を仮定する。以下の図は、OREXの直径を基準とする一様流クヌーセン数 $Kn_{\infty}=10, 1, 0.1$, または0.01の希薄流中を一様流マッハ数 $M_{\infty}=27$ (速度比 $S_{\infty}=25$)で飛行する場合に対する迎角 $\alpha=0^{\circ}$ の結果を示す。

$Kn_{\infty}=10, 1, 0.1$, および0.01に対する物体軸(回

* 航空宇宙技術研究所

** 大興電子通信株式会社

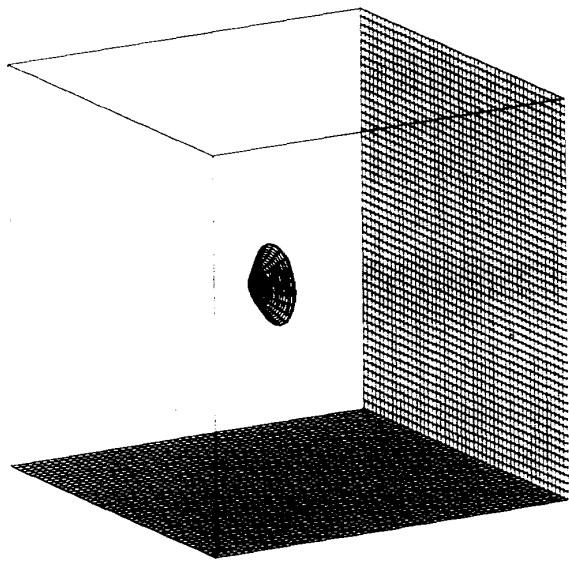


図1 衝突(データ)セルと物体表面セル

転)対称面内の密度および温度分布を各々図2～5に示す。クヌーセン数の減少(高度の減少)と共に物体前方の擾乱領域が減少する。密度は前面激み点近傍で一様流値の数十倍になり、温度は前面激み点前方で一様流値の百倍以上になる。なお、物体後流に一様流温度の数十倍の高温領域がある。

抵抗係数 C_D のクヌーセン数 Kn_∞ による変化を図6に示す。 Kn_∞ の減少と共に抵抗係数も減少する。なお、衝突セル・サイズの減少に対する計算結果の収斂の程度が図上に示してあるが、 $Kn_\infty < 0.1$ では収斂が不十分であるため大きめの値となっていることが分かる。

OREX表面上の無次元(表面)圧力 $P_w/(\rho_\infty c_\infty^2)$

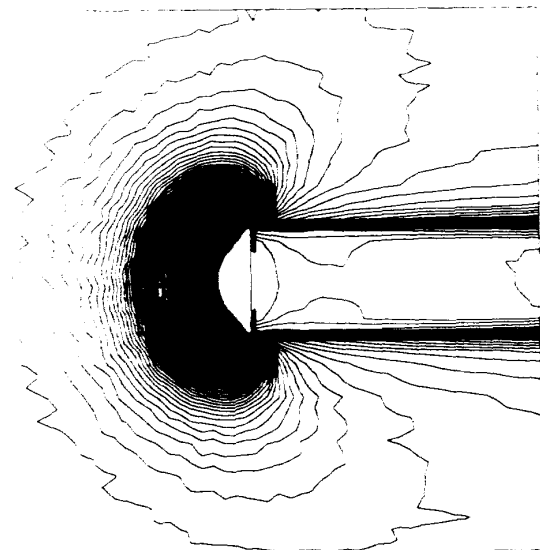


図2(a) 密度分布 ; $Kn_\infty = 10$

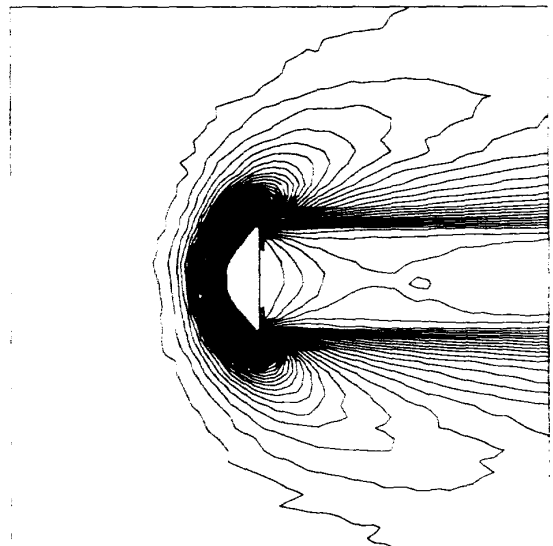


図3(a) 密度分布 ; $Kn_\infty = 1$

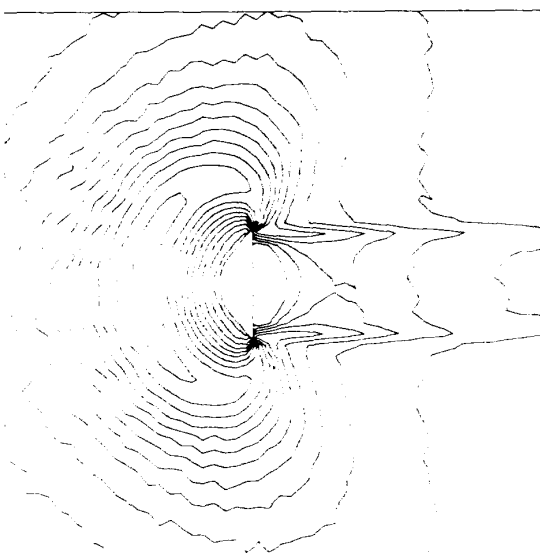


図2(b) 温度分布 ; $Kn_\infty = 10$

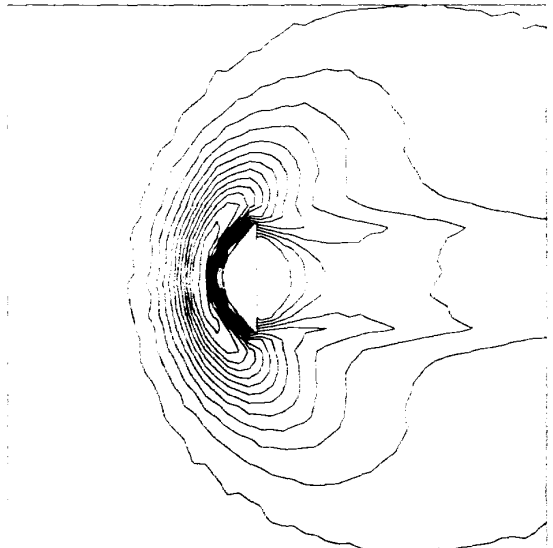


図3(b) 温度分布 ; $Kn_\infty = 1$

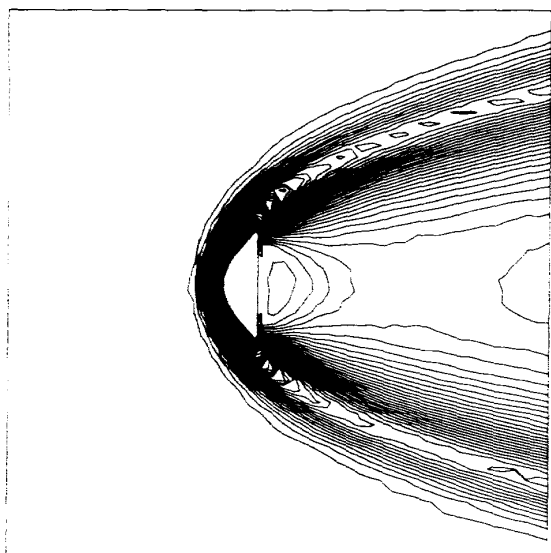


図4(a) 密度分布 ; $Kn_\infty=0.1$

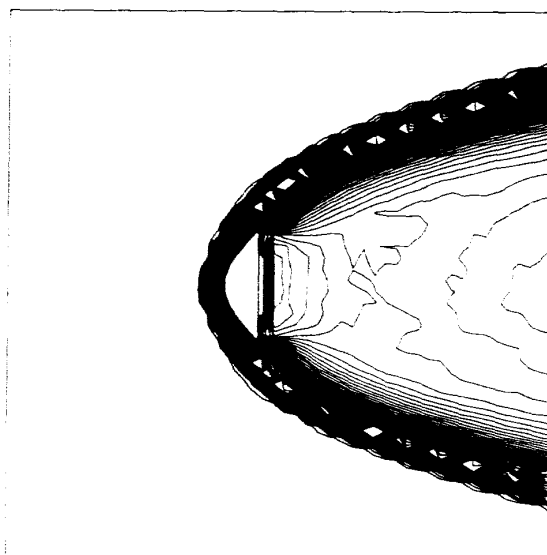


図5(a) 密度分布 ; $Kn_\infty=0.01$

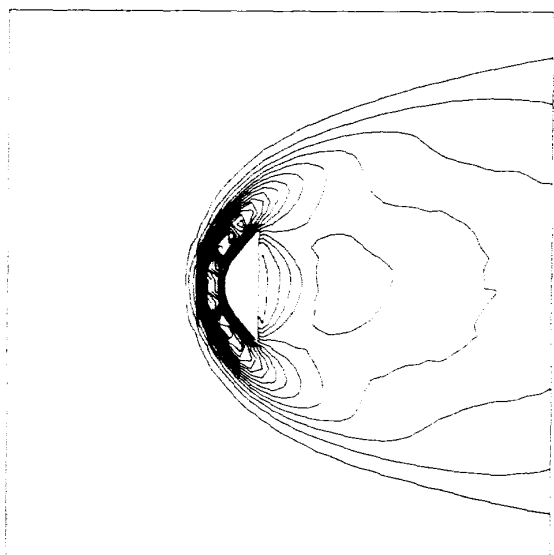


図4(b) 温度分布 ; $Kn_\infty=0.1$

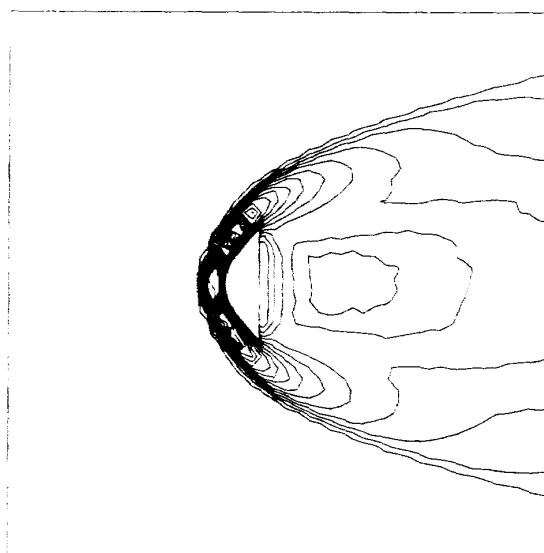


図5(b) 温度分布 ; $Kn_\infty=0.01$

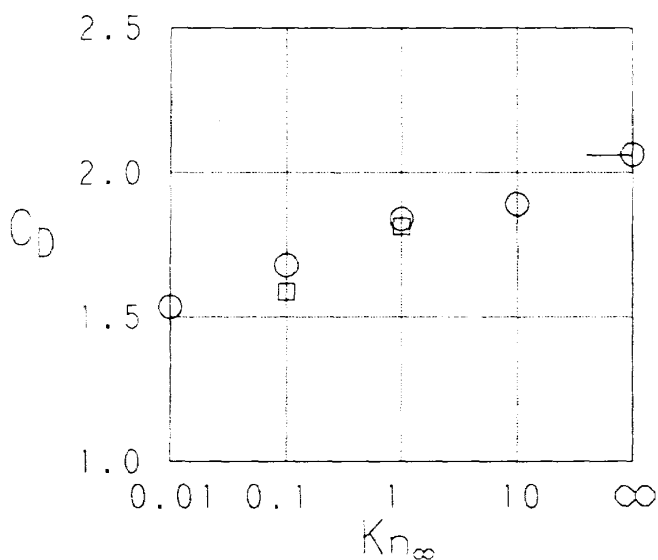


図6 抵抗係数 ; ○, 衝突セル=計算領域/
50×50×50 ; □, 衝突セル=計算領域/
100×100×100

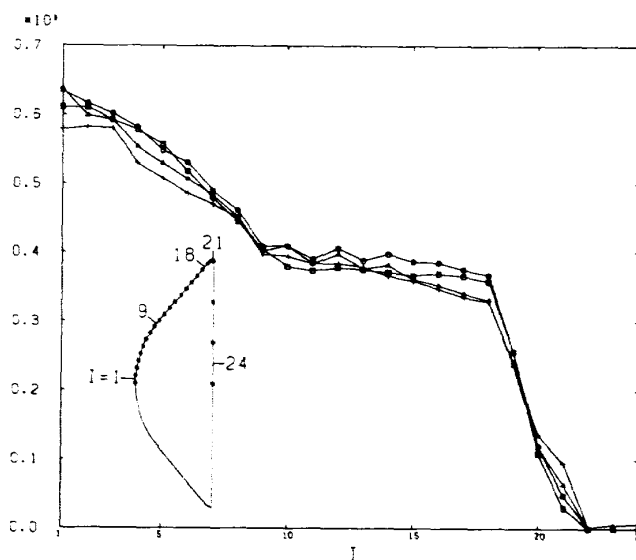


図7 表面圧力分布 ; □, $Kn_\infty=10$; ○, $Kn_\infty=1$;
△, $Kn_\infty=0.1$; +, $Kn_\infty=0.01$

および無次元（表面）熱伝達 $Q/(1/2\rho_\infty c_\infty^3)$ の分布を各々図 7 および図 8 に示す。ここに、 ρ_∞ および c_∞ は一様流密度と熱速度である。無次元圧力は Kn_∞ にあまり依存しないが、無次元熱伝達は Kn_∞ の減少と共にかなり減少する。なお、両者とも円錐部での減少は緩やかである。

謝 辞

「希薄気体数値風洞」による OREX シミュレーションは NAL/NASDA 共同研究の一環として行われた。また、シミュレーション結果の一部は航空宇宙技術研究所数理解析部制作によるアニメーション「Monte Carlo Simulation of OREX」に収録されており、アニメーション作成に協力された藤野敦志氏に感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) K. Koura, Phys. Fluids **29**, 3509 (1986); Prog. Astronaut. Aeronaut. **117**, 25 (1989); Phys. Fluids A2, 1287 (1990).
- 2) K. Koura and H. Matsumoto, Phys. Fluids A **3**, 2459 (1991).
- 3) K. Koura and H. Matsumoto, Phys. Fluids A (in press).

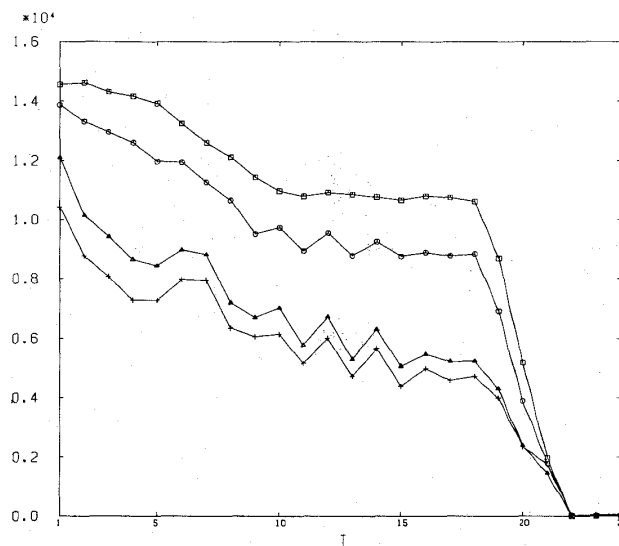


図 8 表面熱伝達分布 ; □, $Kn_\infty=10$; ○, $Kn_\infty=1$; △, $Kn_\infty=0.1$; +, $Kn_\infty=0.01$