

# H-11 OREXまわりの極超音速流解析 ～極超音速流のワークショップ～

岸本 琢司\* , 金子 進一\*\*

Hypersonic Flow Analysis around OREX  
～ CFD Workshop for Hypersonic Flow ~

by

Takuji Kishimoto  
Gifu Technical Institute,  
Kawasaki Heavy Industries, LTD.

Shinichi Kaneko  
Aerospace Engineering Division,  
Kawasaki Heavy Industries, LTD.

## ABSTRACT

We have carried out hypersonic flow analysis around OREX (Orbiter Re-entry Experiment) by solving axi-symmetric Navier-Stokes Equations. Two different flow conditions as we calculated correspond to a hypersonic wind tunnel test condition on NAL (National Aerospace Laboratory) and a flight condition at altitude 62km, respectively. In these analysis, we did not treat only a perfect gas, but also a chemical equilibrium air to investigate real gas effects at a flight condition.

Our flow solver is based on a finite volume implicit TVD upwind scheme. Convective fluxes are evaluated by modified AUSM (Advection Upstream Splitting Method) scheme with a shock fix procedure using Hanel's flux vector splitting method for a perfect gas and HLLC (Harten-Lax-van Leer) scheme for an equilibrium air in order to remove "carbuncle phenomena", that are unphysical solution often appeared on hypersonic flow analysis around a blunt body. We also adopted a curve-fitting method to estimate thermodynamic and transport properties of an equilibrium air.

### 1. はじめに

純国産ロケットH-IIの打ち上げが成功し、わが国の宇宙開発も新たな一步を踏み出した。宇宙往還機HOPE (H-II Orbiting Plane) もその例外ではなく、その開発はいよいよ本格化し、極超音速実験機HYFLEXや自動着陸実験機ALFLEX等HOPE開発に欠か

せないデータ取得のための試験計画も進行中である。H-II初号機とともに打ち上げられ、大気圏再突入後回収された再突入実験機OREX (Orbiter Re-entry Experiment) も、HYFLEX, ALFLEX同様、HOPE開発のための試験の一環であるが、得られたデータは、HOPEそのものだけでなく、HOPE開発のための設計ツールとして大きな期待をよせられているCFDにとっても非常に貴重なものである。

\* 川崎重工業(株) 岐阜技術研究所

\*\* 川崎重工業(株) 航空宇宙技術本部

今回我々は、現状のNavier-Stokes 解析コードの極超音速流に対する有効性の確認という目的も兼ねて、「極超音速流のワークショップ」に参加しOREXまわりの Navier-Stokes解析を行なったので、以下その概略について報告する。

## 2. 解析手法の概要

今回我々は、完全気体および化学平衡流の解析を実施したが、用いた解析コードは、薄層近似 Navier-Stokes 方程式を有限体積法にもとづくTVD風上差分法により離散化したものである<sup>1, 2)</sup>。

空間の離散化については、各セル内の特性変数 (Characteristic Variables) の勾配に対してminmod関数による制限を加えるMUSCL型TVD法を導入することにより、2次精度を実現している。

対流項流束の評価に関しては、完全気体の解析においては、Flux Vector Splitting の簡便さ・頑丈さと Flux Difference Splitting の高解像度とを合わせ持つことで最近注目を集めている「一粒子的風上法<sup>3)</sup> (Uni-Particle Upwind Scheme)」の1つに数えることのできるAUSMDV法<sup>4)</sup>を採用した。これは、和田らにより提案された手法で、Liouらが提案した一粒子的風上法<sup>5)</sup>の一種であるAUSM (Advection Upstream Splitting Method) 法<sup>6)</sup>の精度を向上させたものである (AUSMDV, AUSMの詳細については、文献4, 5を参照のこと)。これら一粒子的風上法は、鈍頭物体まわりの極超音速解析に特有の数値的不安定現象である「カーバンクル現象」が比較的現れにくいといわれているが、今回の解析ではその発生を完全に抑えることができなかつたので、さらにHanel のFlux Vector Splitting<sup>8)</sup>を用いたShock Fix<sup>4)</sup>の手法も合わせて導入している。

一方、平衡流の解析においては、AUSMDV+Shock Fixの手法を用いてもカーバンクル現象の発生を抑えることができなかつたので、境界層内の解像度はやや低下するがカーバンクル現象の発生しないHLLE (Harten-Lax-van Leer) 法<sup>7)</sup>により対流項流束の計算を行なった。なおHLLE法は、Roe法と同様の手法で平衡流に拡張することができる<sup>8)</sup>。さらに、平衡空気の熱力学的特性 (比熱比, 温度等) および輸送係数 (粘性係数, 熱伝導係数) は、Srinivasanらの Curve-Fit法<sup>9, 10)</sup>により求めている。

時間積分に関しては、1次精度のFlux Vector Splittingの手法とGauss-Seidel緩和法による陰解法を用いている。

## 3. 解析結果

本解析は、今回の「極超音速流のワークショップ」で与えられた課題のうち、OREXの高度62kmでの飛行条件に対応したOREX-Aのうちの平衡流 (OREX-A-2) および完全気体 (OREX-A-3), NAL極超音速風洞試験に対応したOREX-Bについて計算を行なったものである。なお、解析はすべて軸対称流で層流を仮定している。

用いた計算格子は、OREX本体のまわりに周方向, 半径方向それぞれ100点ずつとられている (図1)。さらに、肩付近での計算の困難さを避けるために、最大径から後方部分をそのまま円柱で埋めている。

以下に、OREX-A, Bの解析結果について簡単に紹介する。

### (1) OREX-A

この課題は、OREXの飛行条件の中で最大空力加熱が生じると予想される再突入軌道点に対応するもので、完全気体および平衡流について解析を行なった。与えられた解析条件は、以下のとおり。

- ・高 度: 62 km
- ・一様流速度: 6374 m/s
- ・大気圧力: 17.26 Pa
- ・大気温度: 251.0 K
- ・壁 温 度: 1500 K

図2~5および表1にOREX-Aの解析結果の例を示す。

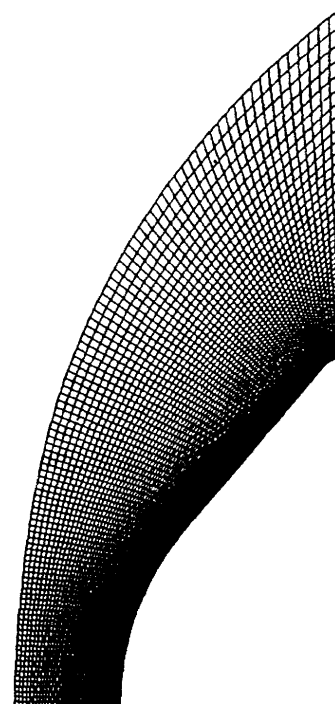


図1. OREXまわりの計算格子

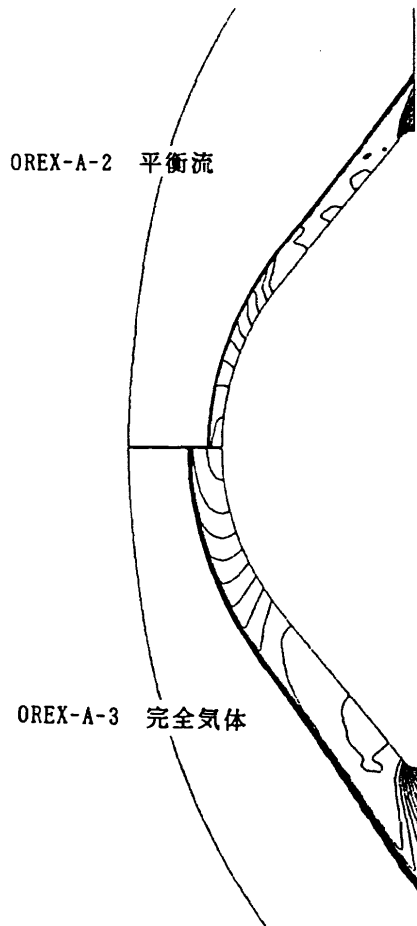


図 2. OREX-A 等圧線図

表 1. OREX-A 抵抗係数

	完全気体	平衡流
圧力抵抗 $C_{Dp}$	1.2067	1.2082
粘性抵抗 $C_{Dv}$	0.0058	0.0046
全抵抗 $C_D$	1.2125	1.2128

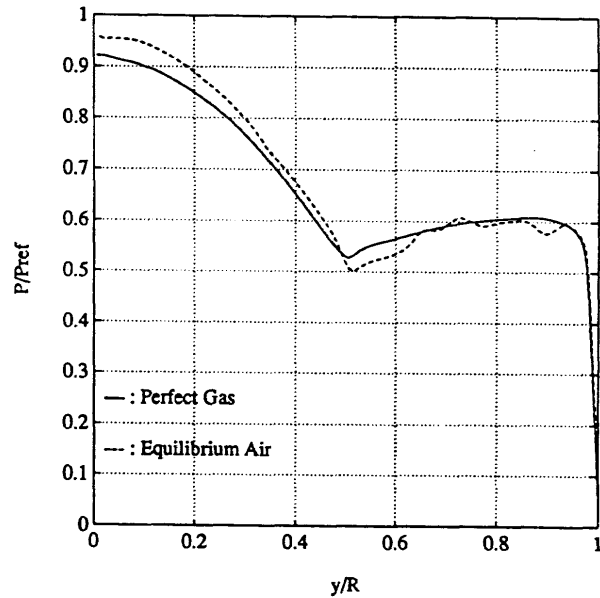


図 3. OREX-A 表面圧力分布

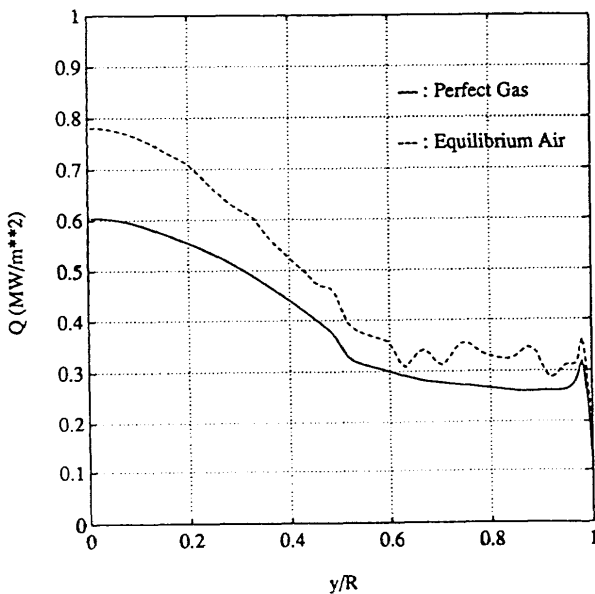


図 4. OREX-A 表面空力加熱分布

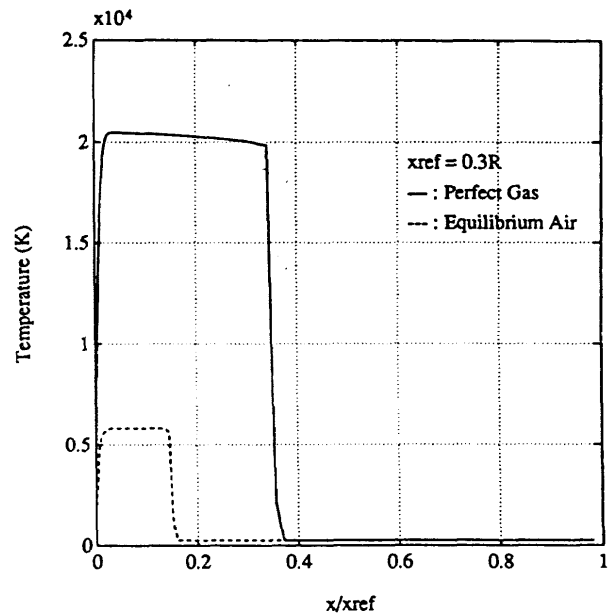


図 5. OREX-A よどみ点流線上の温度分布

(2) OREX-B

この課題は、NAL極超音速風洞試験に対応したもので、完全気体についてのみ解析を行なった。与えられた解析条件は、以下のとおり。

- ・マッハ数： 7.1
- ・一様流温度： 62.53 K

- ・レイノルズ数：  $6.518 \times 10^6 / m$
- ・一様流速度： 1125 m/s
- ・一様流圧力： 432.9 Pa
- ・壁温度： 300 K

図6～8にOREX-Bの解析結果の例を示す。



図6. OREX-B 等圧線図

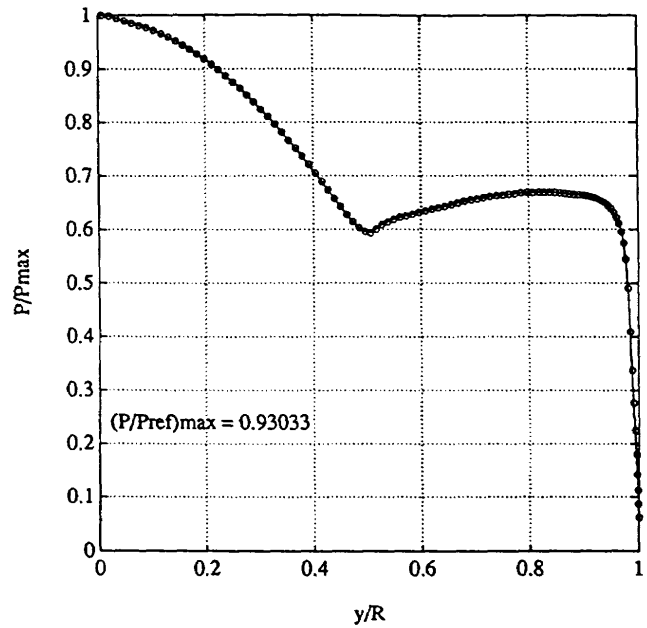


図7. OREX-B 表面圧力分布

4. おわりに

以上、「極超音速流のワークショップ」の課題であるOREXまわりの極超音速流解析の結果について簡単に紹介してきた。

今回の解析では、「カーバングル現象」に代表される鈍頭物体まわりの極超音速流解析に特有の数値的不安定現象が、Riemann Solverをはじめとする数値解法そのものの影響を受けるだけでなく、用いた計算格子の点数あるいは最小格子間隔等にも大きく左右されることがわかり、あらためて鈍頭物体まわりの極超音速流解析の難しさを痛感させられた。

今後HOPE設計作業の本格化とともに、このような解析への期待はますます高まっていくのは明らかであり、このワークショップへの参加を機会に高精度で効率的な極超音速流解析システムの構築をめざして、今後一層研究に力を注いでいきたいと考えている。

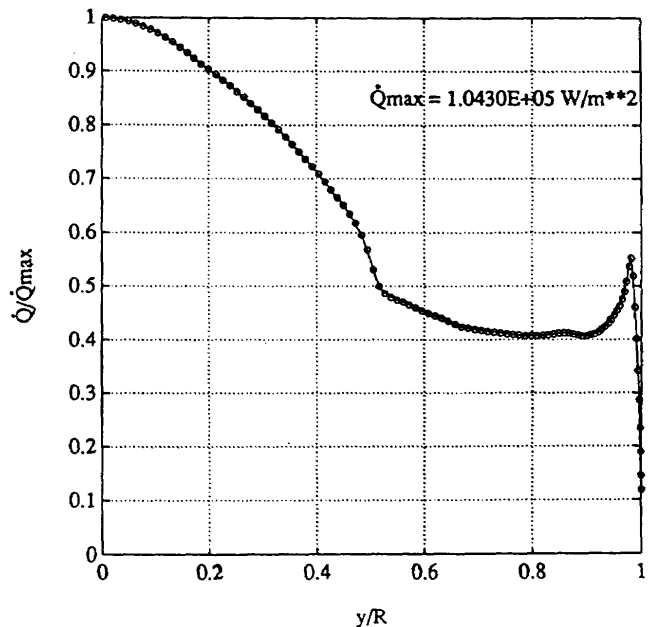


図8. OREX-B 表面空力加熱分布

参考文献

- 1) Sawada, K., and Takanashi, S., "A Numerical Investigation on Wing/Nacelle Interferences of USB Configuration", AIAA paper 87-0455, 1987.
- 2) 岸本琢司, 花光明, "設計における数値解析の活用について(その9) - 極超音速平衡流の解析 -", 第9回航空機計算空気力学シンポジウム論文集, NAL SP-16, 1991.
- 3) 嶋英志, 城之内忠正, "設計における数値解析の活用について(その12) - 粒子的風上法とその応用 -", 第12回航空機計算空気力学シンポジウム論文集, To be appeared.
- 4) Wada, Y., and Liou, M.-S., "A Flux Splitting Scheme with High-Resolution and Robustness for Discontinuities", AIAA paper 94-0083, 1994.

- 5) Liou, M.-S., and Steffen, C.S., "A New Flux Splitting Scheme", *Journal of Computational Physics*, vol.107, 1993.
- 6) Hanel, D., and Schwane, R., "An Implicit Flux Vector Splitting Scheme for the Computation of Viscous Hypersonic Flow", AIAA paper 89-0274, 1989.
- 7) Einfeldt, B., Munz, C.D., Roe, P.L., and Sjogreen, B., "On Godunov-Type Method near Low Densities", *Journal of Computational Physics*, vol.92, 1991.
- 8) Vinokur, M., and Montagne, J.-L., "Generalized Flux-Vector Splitting and Roe Average for an Equilibrium Real Gas", *Journal of Computational Physics*, vol.89, 1990.
- 9) Srinivasan, S., Tannehill, J.C., and Weilmuenster, K.J., "Simplified Curve Fits for the Thermodynamic Properties of Equilibrium Air", ISU-ERI-Ames-86401, ERI Project 1626, CFD 15, 1986.
- 10) Srinivasan, S., and Tannehill, J.C., "Simplified Curve Fits for the Transport Properties of Equilibrium Air", NASA CR-178411, 1987.