

# 高クヌーセン数領域における極超音速希薄流数値解析

小澤宇志, 鈴木俊之, 藤田和央  
宇宙航空研究開発機構

## Analysis on Hypersonic Rarefied Flows in High Knudsen Number Flow Regime

by  
Takashi Ozawa, Toshiyuki Suzuki, and Kazuhisa Fujita (JAXA)

### ABSTRACT

At Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), a hypersonic rarefied wind tunnel (HRWT) has been developed for the purpose of improving understanding of rarefied gas flow characteristics. In this work, we first develop a rarefaction model for pitot pressure measurements for hypersonic rarefied flows. Second, we investigate a measurement method using Patterson-type probes in high Knudsen number flow regime for HRWT.

### 1. 目的および背景

大気圏再突入宇宙機, 惑星探査機, 超低高度衛星(Super Low Altitude Test Satellite: SLATS)等, 様々なミッションにおいて極超音速空力特性評価技術の向上が重要な課題となっている。これまで連続流領域においては, 風洞試験とCFD(Computational Fluid Dynamics)による双方の空力評価が可能であり, その評価技術手法が確立されてきた。しかし, 希薄度が高く, 連続流の仮定が破綻するような領域では, 基本的に空力予測は自由分子流理論やDSMC(direct simulation Monte Carlo)<sup>1)</sup>法等による数値解析に依存してきた。希薄領域では空力特性の表面熱適応係数依存性が高くなるため, 表面熱適応係数不確定性による空力予測誤差が生じる<sup>2)3)</sup>。しかしながら, 表面熱適応係数のデータベースは現在のところ十分に構築されていないため, 解析精度の評価方法に乏しいのが現状である。一方, 最近では超低高度衛星<sup>4)</sup>の開発にともなって極超音速希薄流領域における機体の空力特性評価の高精度化が重要となっており, 希薄空力検証システムの開発が必要である。このような背景のもと, JAXAでは極超音速希薄風洞(Hypersonic Rarefied Wind Tunnel: HRWT)<sup>5)6)</sup>を開発し, 極超音速希薄空力の直接計測システムの確立および表面熱適応係数評価手法の確立を目指している<sup>7)</sup>。

これまでHRWT研究では, HRWTにおける極超音速希薄流の特性を実験と数値計算により総合的に評価してきた<sup>6)</sup>。風洞試験によって得られる気流情報は限定的であるため, 数値解析により気流情報を補填し, マッハ数, クヌーセン数等の気流環境を特定する。実験では, 吊り下げ式球模型を用いた動圧計測, ピトー管を用いた圧力

分布計測を実施し, CFD/DSMC 連成数値計算による気流評価<sup>6)</sup>と融合することにより HRWT 気流検定精度を向上させてきた。その結果, 45 度コニカルノズルを使用することによって HRWT 計測部の気流条件は, コア直径 25 mm, マッハ数 10 以上, クヌーセン数 0.1 以上を達成していることが判明した。

希薄領域では, ピトー圧計測において希薄効果が生じるためピトー圧の補正モデルを構築することが重要である。そこで本研究では, まず 3 本のピトー管を用いてそれぞれの希薄効果を比較検証し, HRWT の気流特性評価技術を向上させるとともに, 連続流から自由分子流領域まで幅広く適用可能なピトー圧希薄補正モデルを構築する。次に, 高クヌーセン数領域における計測・解析手法の確立に向けて Patterson 型プローブによる圧力評価について検証する。

### 2. HRWT 計測手法

JAXA に設置されている HRWT の基本構成(図 1 参照)は, 真空チャンバー, 真空排気系, 気流供給系, 気流加熱装置, ノズル部, 模型支持部, 計測装置である。試験気流は流量計を通った後に気流加熱装置内に流れ込み, その後ノズル部通過時に加速・膨張し, 真空チャンバー内に流れる。真空チャンバーは直径 1.0 m, 長さ 1.5 m であり, 左右と下部に視測窓が設置されている。HRWT の真空排気系は 3 台のターボ分子ポンプ(ULVAC UTM-3303FH, 排気速度 1 台当り 3,300 L/s)と 1 台のドライ真空ポンプ(ULVAC LR300, 排気速度 6,000 L/min)から構成されている。ノズル部はスロート径 1.632 mm, 出口径 100

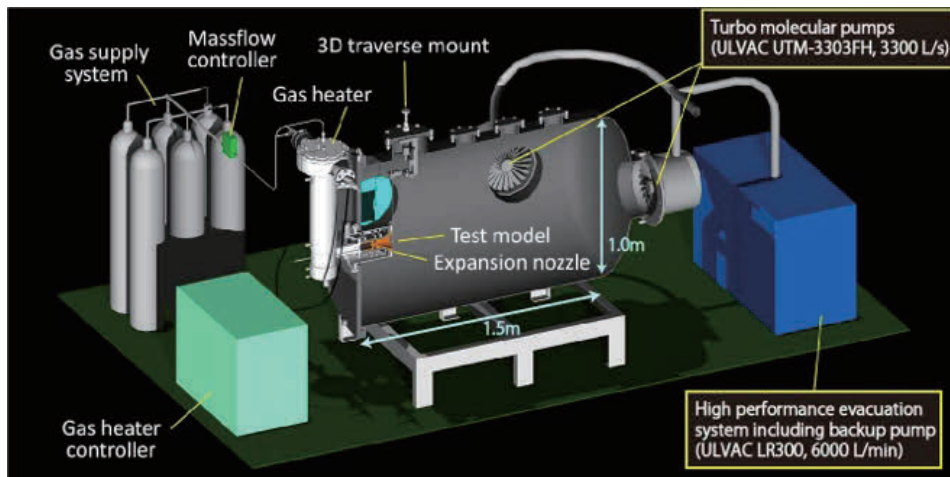


図 1 JAXA100mm 極超音速希薄風洞の概要(上)と写真(下)。

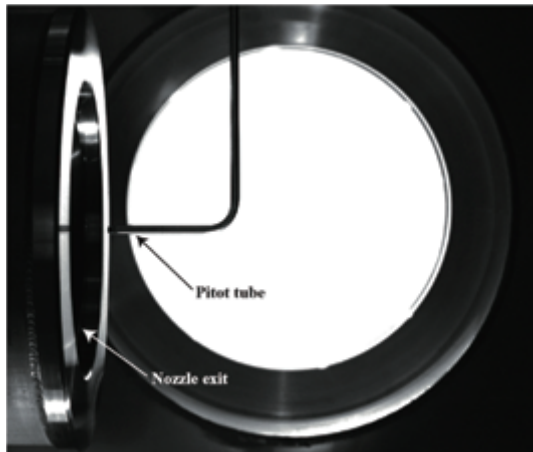


図 2 HRWT ピトー圧計測写真.

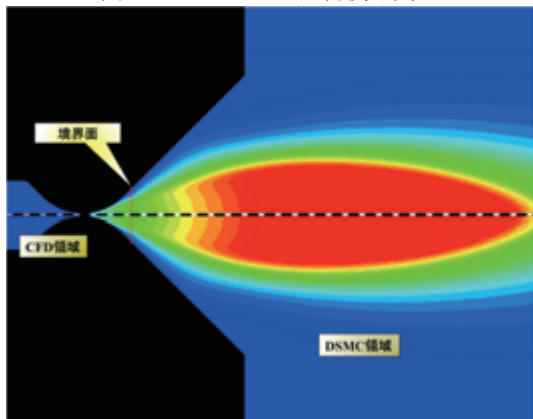


図 3 CFD-DSMC 連成計算領域.

mm (開口比 3755), 半頂角 45 度の銅製コンカルノズルである. ノズルスロート上流の淀み部において, 気流の全温度と全圧を K 型熱電対とキャパシタンスマノメータを用いてそれぞれ計測する. ノズル壁面温度は, ノズル壁面近傍の冷却水温度を K 型熱電対で計測することにより決定する. また, HRWT の試験条件は, 質量流量と全温度を設定する事により決定される. 本試験では, 窒素ガスのみを使用し, 質量流量 0.08 g/s の条件で試験を実施した.

本研究では, HRWT 気流特性評価に向けてピトー管を用いた圧力計測を行う. ピトー管は, 表 1 のように(A)外径( $d_o$ ) 4.0 mm, 内径( $d_i$ ) 2.0 mm, 長さ( $L_{pit}$ )56 mm のステンレス管, (B)外径 1.6 mm, 内径 1.0 mm, 長さ 30 mm のステンレス管, (C)外径 0.8 mm, 内径 0.3 mm, 長さ 30 mm の銅管, の合計 3 本を使用し, 気流動圧計測を行い希薄効果を評価する. ピトー管は真空チャンバー上部の 3 軸移動装置に接続して HRWT 試験部の圧力分布を計測する (図 2 参照). また, 真空チャンバーの右側と下側の観測窓には CCD カメラが設置されており, 画像処理法によりピトー管の計測位置を決定することができる.

表 1 ピトー管形状

Index	$d_i$ [mm]	$d_o$ [mm]	$d_i/d_o$	$L_{pit}/d_i$
(A)	2.0	4.0	0.50	28
(B)	1.0	1.6	0.625	30
(C)	0.3	0.8	0.375	100

### 3. 数値解析手法

HRWT における気流は, ノズル膨張部において希薄化が進むことにより連続流から非連続流へと遷移する. そのため本研究では連続流領域は CFD コードを使用し, 希

薄流領域では DSMC 法に基づく解析コードを使用する CFD-DSMC 連成計算を行う. CFD 計算は JONATHAN (JAXA's Optimized Nonequilibrium AeroThermodynamic Analysis (JONATHAN)コードを用い, DSMC 計算は MOTIF (Modeling Of Transitional - Ionized Flows)コードを使用する. 両解析コードの詳細については文献 6)に与えられているため本稿では省略する.

CFD-DSMC 連成計算の計算領域の一例を図 3 に示す. まず, CFD ノズル流計算を行い, 非連続領域において DSMC 計算を行う. CFD 計算における試験ガス流量, 全圧, 全温度などの流入境界条件は計測値を使用し, DSMC 流入境界条件は収束した CFD 解析結果をもとに与えられる. 図に見られるように, CFD-DSMC 境界は, ノズルスロート部をわずかに過ぎたノズル拡張部のクヌーセン数が 0.01 付近に設定し, 結果が境界に依存しないような境界を選定する. 本稿の数値解析では, 気流は窒素ガス 100%とし, 窒素の回転・振動モードは考慮する. しかし, 化学反応や電子励起等は気流温度が 1,000 度以下であるためその影響は無視でき, 本稿では考慮しない. CFD 計算では, スリップ拡散反射モデルをノズル壁面に用い, DSMC 計算では Maxwell 完全拡散反射モデルを気体とノズル表面の相互作用に用いる. DSMC 計算では R-T (Rotation-Translation), V-T (Vibration-Translation) エネルギー遷移は, BL (Borgnakke -Larsen)モデル<sup>8)</sup>で考慮し, 温度依存の回転・振動衝突数を用いる. さらに, 衝突セルに関しては多階層構造を導入し, 本稿では 2 階層で計算を行う.

ピトー管周りの流れ場は二次元軸対称 DSMC 数値解析により評価し, Patterson 型プローブ周りの流れ場は二次元 DSMC 数値解析により評価する. 流入条件は DSMC ノズル流計算による HRWT 試験部の流れ場より与えられ, 一様と仮定する. 淀み温度の範囲は計測可能な 280~750 K とする. また, ピトー管や Patterson プローブの表面は室温で完全拡散反射と仮定する. ピトー管の形状は基本的には HRWT 計測で使用するものと同一とするが, 管長依存性評価の場合は管長のみ変化させる. Patterson プローブ解析に関しては図 4 のような 3 種類のプローブで比較検証する. プローブ A, B, C のスリット幅はそれぞれ 1.4, 0.14, 0.05 mm である.

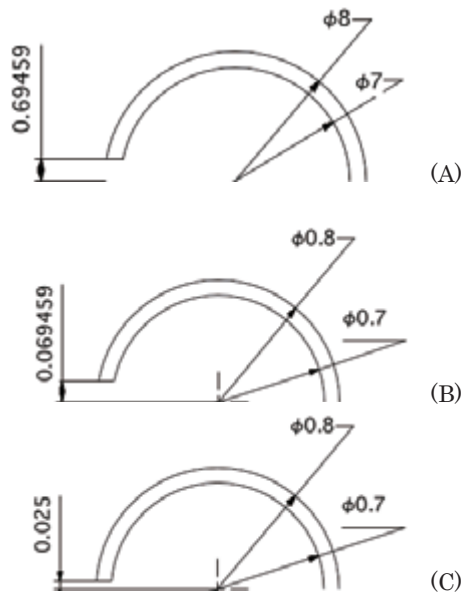


図 4 Patterson プローブ形状の比較.

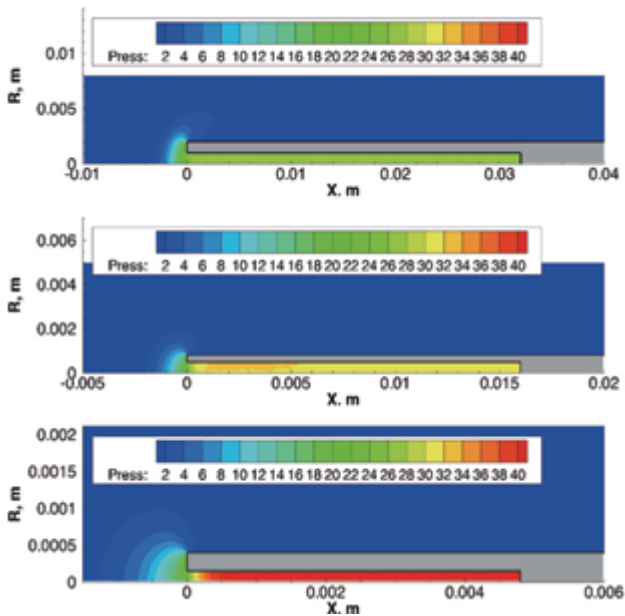


図5 ピトー管周りの圧力分布の比較：ピトー管 A(上), B(中), C(下).

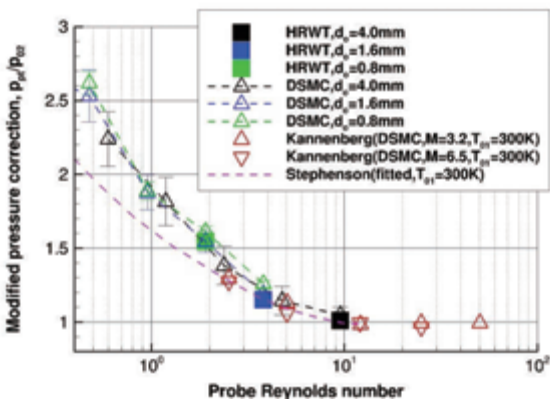


図6 HRWT 計測と DSMC 数値解析によるピトー圧レイノルズ数依存性の比較.

## 4. 結果と考察

### 4. 1. ピトー圧解析

HRWT 試験では 3 種類のピトー管を使用し、ノズル出口から 17mm 下流の計測部においてノズル半径方向のピトー圧分布計測を行った。まず、 $y, z$  の 2 方向でピトー圧分布計測を行ったところ、良い一致が得られ、ノズル流の等方性が確認された。次に、ピトー管 A, B, C のピトー圧分布を比較したところ、管径が小さくなるほどピトー圧が高くなる現象が確認された。希薄気体のピトー圧計測において注意すべき点は、希薄度が高くなると希薄効果によってピトー圧補正が必要になることである。希薄効果はピトー管前方にできる衝撃層背後のレイノルズ数  $Re_2$  ( $=\rho_2 v_2 d_0 / \mu_2$ ) で評価され、この変数が 10 より低い希薄領域では、希薄度が高くなるにつれてピトー圧  $p_{pt}$  が衝撃層背後の全圧  $p_{02}$  より高くなる希薄効果が生じる。HRWT ピトー圧計測では、管径が小さくなるほど希薄効果が増大し、ピトー圧が高くなっていることが推定される。

そこで本稿では、HRWT 計測部ピトー圧計測に及ぼす希薄効果を評価するため、HRWT 計測部の流れ場条件におけるピトー管周りの流れを DSMC 数値解析により評価

した。数値解析では、3 種類のピトー管によるレイノルズ数依存性を評価するため、管長と内径の比 ( $L_{pt}/d_i$ ) を 16 に統一して流れ場を比較した(図 5 参照)。図に見られるように、管径が小さくなるにつれて、ピトー管の内部の圧力が高くなっている。ピトー管 A の場合、流れ場は連続流近傍であるため、衝撃層は薄く、管径で正規化された衝撃波離脱距離も短い。3 ケースを比較すると、希薄化に伴い、衝撃層が広がり、より拡散した流れ場になっていくことがわかる。つまり、クーゼン数が高くなるにつれて、正規化された衝撃波離脱距離は長くなる。結果として、拡散し弱まった衝撃波は圧力損失の減少へとつながり、ピトー圧の増加となる。すなわち、HRWT のピトー圧計測において、希薄効果が生じていることがわかる。

これらの希薄効果の結果を、ピトー圧比 ( $p_{pt}/p_{02}$ ) の衝撃層背後のレイノルズ数 ( $Re_2$ ) 依存性として図 6 に示す。図では管長依存性を除外するため、HRWT の実験データは管長比 16 の値で正規化されている。また、DSMC 数値解析では、数密度を変化させることにより、レイノルズ数依存性を評価している。図に見られるように、3 種類のピトー管の計算結果は良い一致を示しており、さらに  $2 \leq Re_2 \leq 10$  の範囲で HRWT 計測結果と良い一致を示している。また、図 6 では Stephenson<sup>9)</sup> の計測結果及び Kannenberg 等<sup>10)</sup> の数値解析結果 ( $300 \text{ K}, M \leq 6.5$ ) と比較している。レイノルズ数が 3 よりも高い領域では両ケースの差は小さいが、さらに希薄な領域では HRWT の方が希薄効果が大きい(圧力比が高い)結果となっている。この相違はマッハ数依存性に由来すると考えられる。Stephenson と Kannenberg の場合、マッハ数が 6.5 以下であるのに対して、HRWT 試験部ではマッハ数は 10 を超えているため、低レイノルズ領域において、より高い圧力比になると考えられる。

本研究では DSMC 解析結果をもとに、管径に依存するピトー圧希薄補正モデルを以下の様に提案した。まず、衝撃層背後の全圧  $p_{02}$  を下式で計算する。

$$p_{02}/p_1 = \left[ \frac{(\gamma+1)^2 M^2}{2(2\gamma M^2 - \gamma + 1)} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \frac{2\gamma M^2 - \gamma + 1}{\gamma + 1} \quad (1)$$

式中の  $\gamma$  は比熱比である。次に、希薄効果 ( $R = p_{pt}/p_{02}$ ) を衝撃層背後のレイノルズ数  $Re_2$  を用いた従来の対数補正 (Log-Correction) モデル及びブリッジング関数 (Bridging Formula: BF) を用いて評価する。対数補正モデルは、パラメータ  $A, B$  を用いた下記の式で評価する。

$$\log_{10} R = A - B \log_{10}(Re_2) \quad (2)$$

BF 関数は、下記の半経験式で評価し、正弦二乗モデルを適用する。

$$R = R_{FM} + (R_{CNT} - R_{FM}) \sin^2 \phi \quad (3)$$

$$\phi = \begin{cases} 0, & \text{if } Re_2 < 10^{-ab} \\ \pi(a + b \log_{10} Re_2), & \text{if } 10^{-ab} \leq Re_2 \leq 10^{(1-2a)/2b} \\ \pi/2, & \text{if } Re_2 > 10^{(1-2a)/2b} \end{cases} \quad (4)$$

下付き文字の CNT, FM はそれぞれ連続流 (Continuum), 自由分子流 (Free-Molecular) を意味する。対数補正モデルのパラメータ  $A, B$  は Stephenson のデータに対して最小二乗法を用いてこれらの係数を決定する。BF モデルのパラメータ  $a, b$  に関しては DSMC 数値解析結果に最小二乗法を用いてこれらの係数を決定する。自由分子流の極限值は Hughes 等<sup>11)</sup> の理論モデルから得られ、連続流極限值は 1 とする。

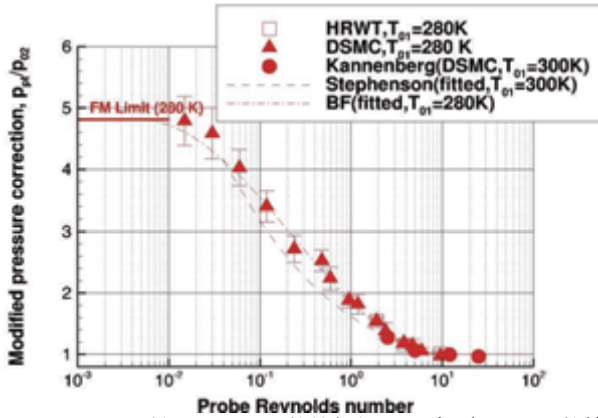


図 7 HRWT 計測, DSMC 数値解析, モデル(BF と対数補正モデル)のピトー圧レイノルズ数依存性の比較.

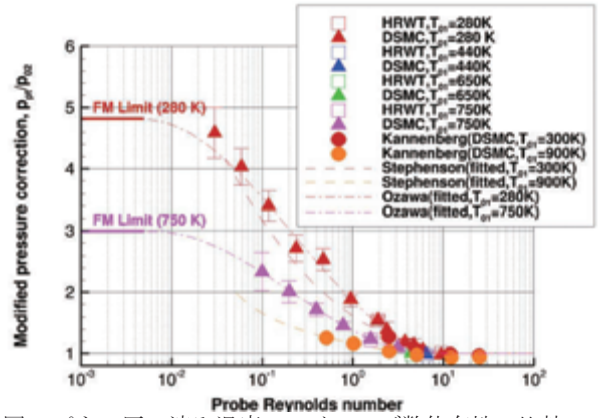


図 9 ピトー圧の淀み温度・レイノルズ数依存性の比較.

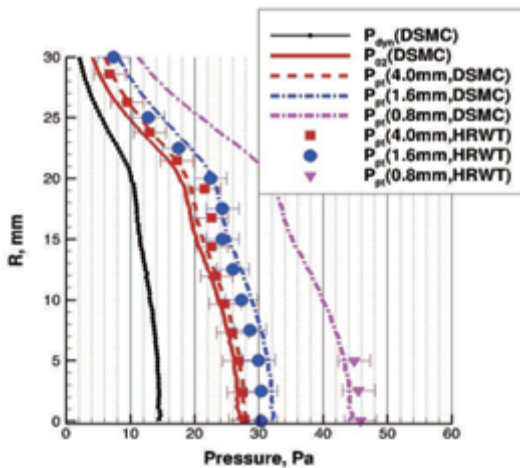
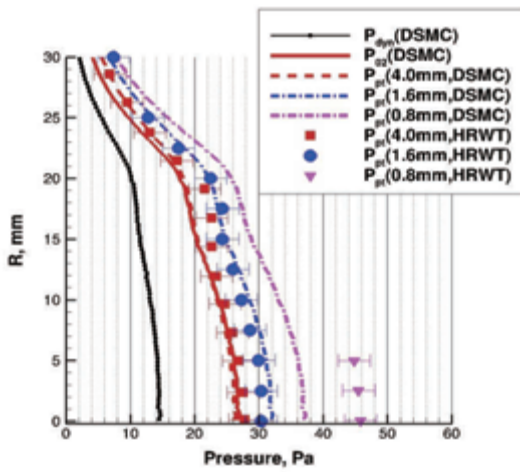


図 8 HRWT 試験気流圧力分布の計測結果と解析結果の比較 : 対数補正モデル(上), BF モデル(下).

図 7 において HRWT, DSMC, Stephenson データを用いた対数補正モデル, BF モデルの間で非加熱気流の場合の希薄効果を比較する. 非加熱気流の場合, パラメータ A, B はそれぞれ 0.199, 0.213, パラメータ a, b はそれぞれ 0.342, 0.146 の値が得られた. 図より BF モデルは, マッハ数 10 以上の HRWT 計測結果と DSMC 計算結果により得られる希薄効果を, 連続流から自由分子流領域までの幅広い領域において良く表現していることがわかる. 一方, Stephenson のデータより得られた従来の対数補正モデルは連続流近傍では希薄効果を良く表現できるが, 高クヌーセン数領域では表現できない. これらの解析を踏まえ, HRWT におけるピトー圧希薄補正には BF モデル

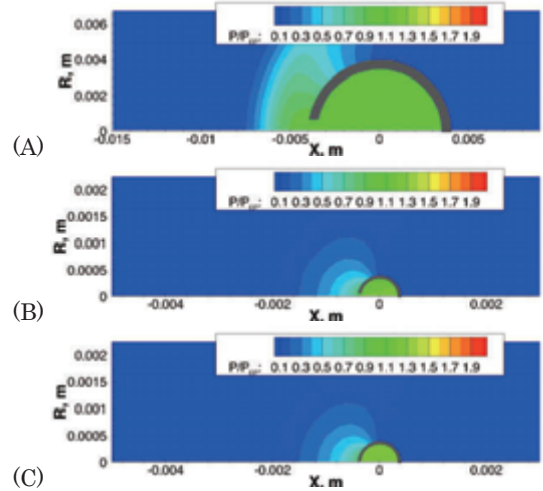


図 10 Patterson 型プローブ周りの圧力比( $p/p_{02}$ )分布の比較 : プローブ A(上), B(中), C(下).

を適用し, 半径方向のピトー圧分布を解析結果 (DSMC+BF モデル)と HRWT 計測結果と比較する. その結果を図 8 に示す. 図に見られるように従来の対数補正モデルを用いた解析結果は, ピトー管 C のケースで計測結果と一致しなかったが, BF モデルを用いた場合, 3 ケースすべてにおいて圧力分布は計測結果とそれぞれ良い一致を示している. ピトー管 A の圧力分布は,  $p_{02}$  の分布とほぼ一致しており, 連続流に近いことがわかる. 一方, ピトー管 C の場合, ピトー圧は  $p_{02}$  よりも 60%以上高い値になっているため, ピトー圧計測において希薄効果を考慮することが必要不可欠であり, DSMC+BF モデルを用いることによってその効果を評価できることが判明した.

次に, 気流を加熱した淀み温度 750 K の場合の希薄効果を図 9 に示す. DSMC 数値解析で得られた BF モデルのパラメータ a, b はそれぞれ 0.357, 0.160 である. 加熱した場合, 希薄効果による圧力比は非加熱の場合と比べて小さくなり, 自由分子流領域において約 3.0 である. また, 本ケースにおいても BF モデルを用いることにより全領域において希薄効果を評価できることがわかった.

#### 4. 2. Patterson 型プローブ解析

HRWT の気流環境における Patterson 型プローブによる高クヌーセン数領域計測の可能性について, DSMC 数値解析により検証した. 数値解析では, スリット長がスリット幅に比べて十分に長く, またプローブのスリットと一様流の迎角が  $0^\circ$  と仮定した. 一様流の温度, 速度はそれぞれ HRWT 試験部の値(11.4 K, 747.5 m/s)を用い, 数

密度を変化させることによりレイノルズ数依存性を評価した。また、プローブ表面の温度は 290 K と仮定した。プローブはスリット幅がそれぞれ 1.4, 0.14, 0.05 mm の 3 種類を使用した(図 4 参照)。図 10 に HRWT 試験部の気流条件における 3 種類の Patterson プローブ周りの流れ場の比較を示す。プローブ A ではプローブ前方に弱衝撃波が生じ、プローブ前方の温度は 300 K 以上となる。プローブ B と C を比較した場合、流れ場に大きな相違はなく、プローブ前方において圧力が緩やかに上昇する。HRWT 試験部の条件ではプローブ圧力はそれぞれ 30 Pa 程度まで上昇するため、計測可能な範囲と考えられる。迎角  $0^\circ$  の自由分子流領域におけるオリフィスプローブ圧( $p_o$ )は、流れ場の速度分布関数が平衡と仮定した場合、速度比  $s$  を用いて下記の式で評価することができる<sup>12)</sup>。

$$\frac{p_o}{p_1} \sqrt{\frac{T_1}{T_o}} = e^{-s^2} + s\sqrt{\pi} [1 + \text{erf}(s)] \quad (5)$$

HRWT 試験部の条件では  $p_o(\text{FM})$  は約 29 Pa であり、DSMC 数値解析の結果とほぼ一致している。

次に、流れ場の数密度を変化させ、プローブ圧のレイノルズ数依存性を評価した。その結果を図 11 に示す。レイノルズ数が小さくなり、自由分子流に近づくほどプローブ圧は小さくなる。また、スリット幅が小さいほどプローブ圧のレイノルズ数依存性は高いことが解る。さらに、DSMC 数値解析によるプローブ圧を自由分子流のプローブ圧理論値と比較した結果、プローブ A, B に関してはレイノルズ数が 5 以下において理論値との差は最大で 15% 程度であり、レイノルズ数が小さくなるほどその差も小さくなる。プローブ C に関しては、15~25% 程度数値解析結果の方が理論値よりも高いプローブ圧を予測している。この原因としては、アスペクト比(スリット幅/壁面厚さ)が 0.5 と小さいことが原因と考えられる。これらの結果を踏まえると、HRWT では Patterson 型プローブの使用により自由分子流の理論値との比較が可能であることがわかる。また、レイノルズ数の特定に関してはスリット幅が小さい方が望ましいが、アスペクト比に留意する必要がある。

## 5. おわりに

本研究では、まずピトー圧計測及びピトー管周りの流れ場数値解析により極超音速希薄風洞(HRWT)の気流特性評価を行った。極超音速希薄領域( $M>10$ )におけるピトー圧希薄効果を検証し、連続流から自由分子流領域まで適用可能な BF 関数を用いたピトー圧希薄補正モデルを確立した。次に、Patterson 型プローブの DSMC 数値解析を行い、HRWT 気流条件において自由分子流のプローブ圧理論値との一致性を検証した。その結果、スリット幅 1.4 mm 以下においてレイノルズ数評価が可能であることが判明した。

今後は、まず Patterson 型プローブ圧のアスペクト比依存性・迎角依存性を評価し、次にアルミ箔等を使用したスリット幅が可変な Patterson 型プローブを製作し、計測結果と解析結果を比較検証する予定である。

## 謝辞

本研究は科研費(15K06611)の助成を受けたものである。

## 参考文献

- 1) Bird, G. A., *Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows*, Clarendon, Oxford, England, U.K., 1994.

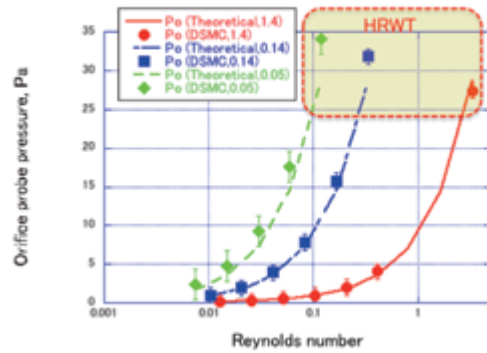


図 11: Patterson 型プローブによる圧力のレイノルズ数依存性の比較。

- 2) Fujita, K., Inatani, Y., and Hiraki, K., "Attitude Stability of Blunt-Body Capsules in Hypersonic Rarefied Regime," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 41, No. 6, 2004, pp. 925-931.
- 3) Ozawa, T., Takayanagi, H., Suzuki, T., and Fujita, K., "Analysis of Rarefied Aerodynamic Effects for Mars Entry Missions," AIAA Paper 2012-3101, 43rd AIAA Thermophysics Conference, New Orleans, Louisiana, June 25-28, 2012.
- 4) Fujita, K. and Noda, A., "Rarefied Aerodynamics of a Super Low Altitude Test Satellite," AIAA Paper 2009-3606, 2009.
- 5) Fujita, K., Suzuki, T. and Ozawa, T., "Development of a Pilot Model of Hypersonic Rarefied Wind-Tunnel," 27th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, *AIP Conference Proceedings*, edited by D. A. Levin, I. J. Wysong, and A. L. Garcia, Vol. 1333, pp. 407-412, 2011.
- 6) Ozawa, T., Fujita, K., and Suzuki, T., "Development of an Aerodynamic Measurement System for Hypersonic Rarefied Flows," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 86, No. 1, 2015, 015105.
- 7) Ozawa, T., Suzuki, T., and Fujita, K., "Aerodynamic Measurements and Computational Analyses in Hypersonic Rarefied Flows," *AIAA Journal*, 2015 (in press).
- 8) Borgnakke, C. and Larsen, P. S., "Statistical Collision Model for Monte Carlo Simulation of Polyatomic Gas Mixture," *Journal of Computational Physics*, Vol. 18, No. 4, 1975, pp. 405-420.
- 9) Stephenson, W. B., "Use of the Pitot Tube in Very Low Density Flows," AEDC-TR-81-11, Arnold, AFS, TN, Oct. 1981.
- 10) Kannenberg, K. C. and Boyd, I. D., "Monte Carlo Computation of Rarefied Supersonic Flow into a Pitot Probe," *AIAA Journal*, Vol. 34, No. 1, 1996, pp. 83-88.
- 11) Hughes, P. C. and deLeeuw, J. H., "Theory for the Free Molecule Impact Probe at an Angle of Attack," 4th International Symposium on Rarefied Gas Dynamics: Toronto, Canada., July 1964, edited by J. H. deLeeuw, Vol. 1, Academic, New York, 1965, pp. 653-676.
- 12) Enkenhus, K. R., Harris, E. L., and Patterson, G. N., "Pressure Probes in Free Molecule Flow," UTIA Report No. 62, June, 1959.