

# 宇宙航空研究開発機構研究開発報告

## JAXA Research and Development Report

---

### 標準模型6分力試験結果を用いたJAXA 1.27m極超音速風洞に おけるデータバラつきに関する再評価

Deviation in Standard Model Force Measurements  
in JAXA 1.27m Hypersonic Wind Tunnel

藤井 啓介, 津田 尚一, 小山 忠勇,  
高間 良樹, 中川 宗敬, 板橋 幸広, 中村 晃祥

Keisuke Fujii, Shoichi Tsuda, Tadao Koyama,  
Yoshiki Takama, Muneyoshi Nakagawa, Yukihiro Itabashi, Akiyoshi Nakamura

2016年11月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# 標準模型 6 分力試験結果を用いた JAXA 1.27m 極超音速風洞 におけるデータバラつきに関する再評価

藤井啓介<sup>\*1</sup>、津田尚一<sup>\*1</sup>、小山忠勇<sup>\*1</sup>、高間良樹<sup>\*1</sup>、中川宗敬<sup>\*2</sup>、板橋幸広<sup>\*2</sup>、中村晃祥<sup>\*2</sup>

## Deviation in Standard Model Force Measurements in JAXA 1.27m Hypersonic Wind Tunnel

Keisuke Fujii<sup>\*1</sup>, Shoichi Tsuda<sup>\*1</sup>, Tadao Koyama<sup>\*1</sup>, Yoshiki Takama<sup>\*1</sup>,  
Muneyoshi Nakagawa<sup>\*2</sup>, Yukihiro Itabashi<sup>\*2</sup>, Akiyoshi Nakamura<sup>\*2</sup>

### Abstract

Re-examination of free stream Mach number calibration data obtained in JAXA 1.27m hypersonic wind tunnel suggests that the perfect gas assumption during nozzle expansion process results in less Mach number deviation throughout the test core region of the tunnel than the assumption of ‘real gas’ in equilibrium with respect to vibrational excitation which has been adopted in the facility. Vibrational relaxation time was then estimated so large that the vibrational energy excitation should effectively be frozen at a point downstream of the throat under typical operating conditions of the tunnel, which supports the validity of the perfect gas assumption in the nozzle flow estimation. Another problem posed by a series of standard model tests is unexpectedly large scatter in the monitored pitot pressure measurements between test campaigns. Analysis in the scatter of pitot pressure measurements suggests that the free stream Mach number which has been assumed constant could actually differs by the test campaign. Consequences of the above aspects to the force measurements are also evaluated by looking up results of HB2 standard model tests and of HRV capsule configuration tests conducted during a period from the year of 2002 to 2016. It suggests that scatters in force measurement could be reduced by adopting perfect gas assumption instead of the real gas equilibrium model, and also shows a possibility of further reduction in the data scatter observed between test campaigns by correcting free stream Mach number obtained only from the nozzle calibration tests by the monitoring pitot pressure measurements in each test blows.

**Keywords:** Hypersonic wind tunnel, deviation in Mach number, aerodynamic force measurement

### 概要

過去に行われた JAXA 1.27 m 極超音速風洞気流校正試験結果における Mach 数の平均値からのずれを再評価したところ、現状のデータ処理で用いられている振動励起エネルギーに関する平衡実在気体モデルに基づいて求められる Mach 数と比べ完全気体モデルに基づいた処理の方がむしろバラつきの小さいことが判明した。そこでこの風洞のノズル流における振動励起緩和時間を推定したところ、ノズルスロート下流のある点より振動励起が保たれたままいわゆる凍結流となることが想定されたが、これは平衡実在気体モデルと比べ完全気体モデルの方が現実により近いことを支持する結果であった。また、一連の標準模型試験を実施することで提議されたもう一つの課題は、複数の試験キャンペーン間におけるモニター用ピトー圧比平均値及び空力特性におけるバラつきである。ピトー圧比計測結果の解析により、現状一定値として扱っていた一様流 Mach 数は試験キャンペーン毎に変化している可能性が確認された。これら二つの問題が空力計測精度に及ぼす影響を評価する目的で、2002 年から 2016 年にわたり行われた HB2 標準模型 6 分力試験及び HRV カプセル形状模型 6 分力試験結果を用いて再評価した。その結果、まず現行の平衡実在気体モデルによる処理と比べ完全気体モデルを基にした処理により空力係数における再現性バラつきを低減させる可能性を示すことができた。また、試験キャンペーン間で変動していると考えられるピトー圧比を動圧推定に活用することによって試験キャンペーン間で見られていた空力係数における再現性バラつきをさらに低減させる可能性が示された。

doi: 10.20637/JAXA-RR-16-004/0001

<sup>\*</sup> 平成 28 年 9 月 14 日受付 (Received 14 September, 2016)

<sup>\*1</sup> 航空技術部門 空力技術研究ユニット (Aerodynamics Research Unit, Aeronautical Technology Directorate)

<sup>\*2</sup> 一般財団法人 航空宇宙技術振興財団 (Japan AeroSpace Technology Foundation)

## 1 序

JAXA 1.27 m 極超音速風洞は、一様流 Mach 数が約 10 である大型の吹出真空吸込間欠式極超音速風洞である。そのため測定部における空気の凝結を防ぐ目的で行われる加熱も、澱み空気温度が約 1000K 程度となるまで行う必要がある。この程度の高温状態となると、空気の主な構成要素である窒素分子と酸素分子のエネルギー分配も低温時の並進・回転に加え、振動モードへの分配が無視できなくなることが知られており、そのため現行のデータ処理においては振動励起の効果を平衡実在気体のカーブフィットにより取り入れたデータ処理を行ってきている。図 1 に模式的に示したように、ピトーレークを用いた気流校正試験により得られたピトー圧分布と風洞澱み状態とから、Mach 数分布、バラつきを平衡実在気体モデルにより求めておき、一般の試験の際には上記 Mach 数が不変のものとして計測された澱み圧、澱み温度とから同じく平衡実在気体モデルのもと、一様流動圧を求める方法を採用している。この時、モニター用としてピトー圧計測は可能であるが、現状のデータ処理では使用していない。

このような処理により、過去に行ったカプセル形状（HRV 模型）の 6 分力試験において、データのバラつきを見る目的で複数回の繰り返し試験を行ったところ、有次元量の再現性は良いものの、空力係数として整理したところバラつきが大きい事象が確認された。つまり空力係数とする際の動圧の推定が通風毎に異なっていることを意味しており、現行のデータ処理で用いられている「平衡実在気体モデル」ではバラつきが大きく、「完全気体モデル」では小さくなることを意味していた（図 2 参照）。この結果のみから完全気体モデルの方が現実に近いモデルであるということとはできないが、現行のデータ処理の基礎となっている平衡実在気体モデルの妥当性を再評価する必要性が確認された。

更にこのカプセル形状の再試験を異なる時期に実施したところ、図 3 に示されるように初回シリーズで得られた再現性によるバラつき（線無しシンボル）と比べ二回目のシリーズで得られた再現性バラつき（実線）は極端に大きなものとなり、また、それはランダムなバラつきというより 2 つの状態のどちらかをとるような結果となった。このことから現行のデータ処理では一定と仮定していたピトー圧比 ( $p_{o2}/p_o$ ) あるいは Mach 数が、通風と通風との間で変動している可能性に関する疑念が生じた。ここで二回目のシリーズで見られた再現性におけるバラつき自体はデータ処理全体を通して見積られる不確かさの範囲内であったものの、単一の試験キャンペーンで得ら

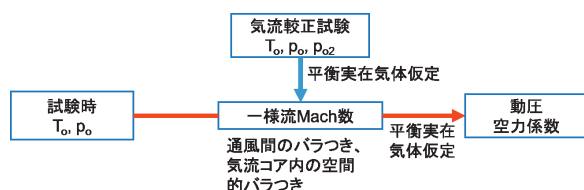
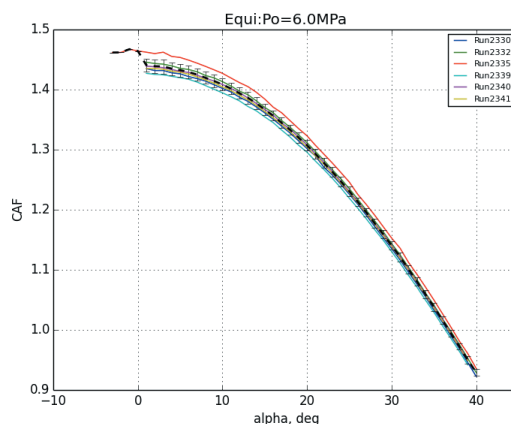


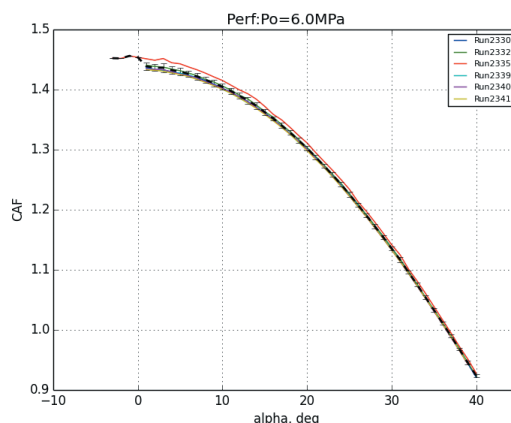
図 1. JAXA1.27m 極超音速風洞における平衡実在気体モデルに基づいた現行のデータ処理手順模式

れる繰り返し誤差のみでは誤差の過小評価をする可能性を示すものであり、繰り返し誤差に関する再検討をする必要性を示している。

極超音速風洞では、これまでに HB-2 形状を利用した標準模型試験を複数年にわたり行ってきており、このような試験キャンペーンをまたいだ繰り返し誤差を評価する



(a) 平衡実在気体モデル（現行）



(b) 完全気体モデル

図 2. HRV 模型の前面軸力係数 ( $C_{AF}$ ) におけるデータ再現性結果 ( $P_o=6\text{MPa}$ )。 (a) : 無次元化する動圧推定に平衡実在気体モデルを仮定したもの、 (b) : 動圧推定に完全気体モデルを仮定したもの

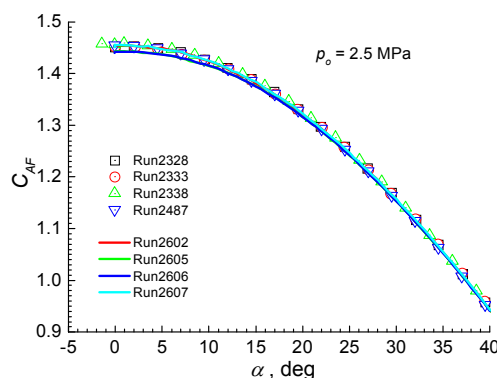


図 3. HRV 模型全面軸力係数 ( $C_{AF}$ ) のデータ再現性比較  
初回試験キャンペーン：線無しシンボル、  
2 回目試験キャンペーン：実線

ための有効な情報源となると考えられる。実際、過去に実施された HB2 標準模型試験においても同様な現象の現れることが分かってきた。例えば JAXA-RR-04-035E<sup>1)</sup> にまとめられた 2001 年度に実施された HB-2 六分力試験では  $p_0=1\text{MPa}$ ,  $\alpha=15\text{deg}$  における  $C_{AF}$  のバラつきが  $2\sigma$  相当で 0.011 という結果であるのに対し、そのうち実施された複数回の HB-2 試験結果とを合わせた  $C_{AF}$  のバラつき  $2\sigma$  相当は 0.04 程度であり 3 倍以上の結果となっている。気流校正試験結果と 6 分力計測において想定される個々の precision limit とから予測される precision limit が  $0.006 \times 2$  と見積もられる<sup>1)</sup> のに対し ( $C_{AF}@\alpha=15\text{deg}$  の  $p_0=6\text{MPa}$ )、通風実測値のバラつきでは  $0.012 \times 2$  と得られている。そのため、複数の試験キャンペーンにわたりピトー圧比 ( $p_{02}/p_0$ ) 及び空力係数におけるバラつきを再評価することで、極超音速風洞の実質的な不確かさ評価のための基盤とする必要がある。以上まとめると、

- 極超音速風洞気流校正における平衡実在気体モデル適用の妥当性を再評価する
- 通風間、試験キャンペーン間におけるピトー圧比 ( $p_{02}/p_0$ ) あるいは動圧の揺らぎ量を評価する
- 標準模型 HB2 形状を代表とし上記の空力特性への影響を評価する

ことをここでの目標とする。

## 2 気流校正試験結果の再考

### 2.1 試験データ

検討に使用した気流校正データは、JAXA-RR-05-041<sup>2)</sup> において利用された 1999 年実施の「高温側校正領域気流検定試験」(Run751-Run794) 及び 2000 年実施の「低温側校正領域気流検定試験」(Run1112-Run1166) を再度検証することとした。

### 2.2 データ処理における気体モデル

校正試験結果を再考するにあたり、これまで JAXA 極超音速風洞気流校正において、「実在気体効果」を考慮する目的で、AEDC VKF tunnel C において採用されている Boudreau<sup>3)</sup> による近似式によりピトー圧から Mach 数を推定する手続きを行っている。この近似には、風洞激み状態が高温であるため生じる、(i) 窒素・酸素分子の振動エネルギーの励起を考慮したことと、高圧であるために無視できなくなる (ii) 分子間ポテンシャルの効果を考慮したものである。

しかしながら高温・高圧の状態からノズルにより急激に膨張する流れにおいて、分子間衝突が急激に減少するため分子のエネルギー分配に非平衡の発生することが知られており、特にノズル流においてはその非平衡性が急激に進行するためスロート直下であたかも凍結流となる (Nozzle freezing)<sup>4)</sup>。実際 JAXA 極超音速風洞における非平衡膨張過程を下記の通り推定した。平衡状態及び緩和に関する計算は GALCIT report FM2001.004<sup>5)</sup> に従い、ガス種  $r$  の衝突によるガス種  $s$  の振動緩和時間  $\tau_{sr}$  を Milikan and White<sup>6)</sup> による関係式

$$\ln A_1 \tau_{sr} p = A_2 \mu_{sr}^{1/2} \theta_{vs}^{4/3} (T^{-1/3} - A_3 \mu_{sr}^{1/4})$$

により求め、それからガス種  $s$  の振動緩和時間  $\tau_s$  を  $\tau_{sr}$

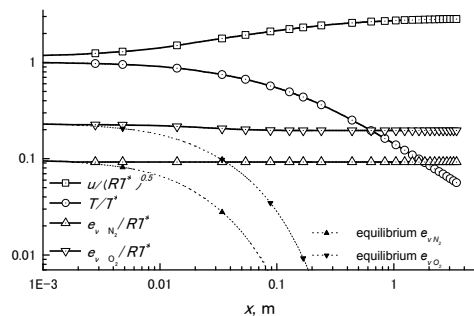
の平均により求めた：

$$\tau_s = \frac{\sum_r N_r}{\sum_r N_r / \tau_{sr}}.$$

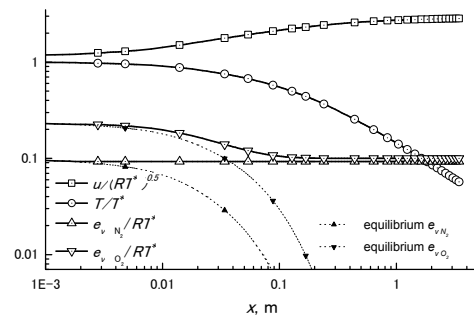
ここで、 $A_1 = 9.8625 \times 10^2 \text{ (Pa}^{-1}\text{s}^{-1})$ 、 $A_2 = 3.67 \times 10^{-2} \text{ (mol}^{1/2} \text{ kg}^{-1/2} \text{ K}^{-1})$ 、 $A_3 = 8.435 \times 10^{-2} \text{ (K}^{-1/3} \text{ mol}^{1/4} \text{ kg}^{-1/4})$  であり、 $\theta_{vs}$  は振動特性温度、 $\mu_{sr}$  は等価分子量  $\mu_{sr} = \frac{M_s M_r}{M_s + M_r}$  である。この緩和時間を用いて、振動エネルギー  $e_v$  は下記の方程式を解くことにより得た：

$$\frac{\partial e_v}{\partial t} = \frac{e_v^* - e_v}{\tau_{sr}}$$

またここで、 $e_v^*$  は平衡振動エネルギーであり、簡単のため計算にあたりノズル形状はスロート部で二次曲線のコニカルノズルを想定した。激み状態として  $T_0=1000\text{K}$ 、 $p_0=1\text{MPa}$  及び  $10\text{MPa}$  のケースで、常に気体状態方程式として  $pV = nRT$  が成り立つものと仮定し計算したところ、振動凍結が発生しにくい最も高圧の環境下においてもスロートから 100mm 程度下流において凍結を始めることが予測された (図 4)。このような状況では、ノズルによる体積膨張で並進・回転エネルギーが低い値となっても  $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$  の振動エネルギー (それぞれ  $\nabla$ 、 $\Delta$  印) は高い値のままほぼ一定値をとっており、振動エネルギーから並進・回転エネルギーへの供給が行われず、結果的に完全気体のエネルギー配分に近くなるものと予測される。そのため、上述 (i) の効果を「平衡」として取り入れてしまうことにより現実と異なるモデルを扱っていることとなる。一方では (ii) の効果は完全気体では評価できないため、理想的には (i) の効果は考慮せず、(ii) の効果のみを取り入れたモデルの再構築が望ましいと考えられる。しかしここでは時間的制約等により、まずこれまでの平衡実在気体モデルと、完全気体モデルの 2 通りのみで評価するにとどめることとする。



(a)  $p_0=1\text{MPa}$



(b)  $p_0=10\text{MPa}$

図 4. ノズル膨張流における振動エネルギーの変化 (点線は平衡の場合の振動エネルギーを示す)



### 2.3 校正試験結果再考

気流校正試験において RR-05-041 で定めた気流コア ( $x=100\text{mm}\sim 900\text{mm}$ ,  $\phi 600\text{mm}$ ) で得られたピトー圧比 ( $=p_{o2}/p_o$ ) すべての計測点で局所 Mach 数を求めその平均及び分散を図 5 及び表 1 に示す。図中、1999 年実施の「高温側校正領域気流検定試験」を青色シンボルで、2000 年実施の「低温側校正領域気流検定試験」を緑色シンボルで示している。ここで高温側校正試験での澱み温度範囲は  $1020\text{K}\sim 1120\text{K}$ 、低温側校正試験では  $900\text{K}\sim 1020\text{K}$  である。また、図 5 中の水平の破線は完全気体における Mach 数一定としたときの  $\pm 2\sigma$  相当、赤色または水色の破線は平衡実在気体における Mach 数一定とした時の  $\pm 2\sigma$  相当をあらわす。

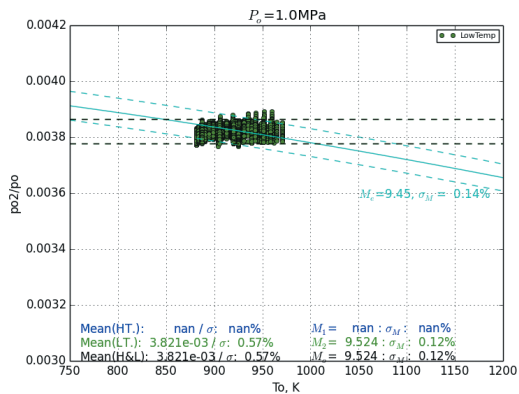
平衡実在気体効果の特徴である澱み点温度への依存性は、実験結果からは確認できず、その結果バラつき（標準偏差）も完全気体を仮定して求めた場合よりもいずれ

のケースでもやや大きな値となっている。更に高温側の気流校正結果と低温側の結果では、完全気体を仮定した場合の Mach 数において大きな差異がなく、同一の Mach 数として両試験結果を合わせた平均・標準偏差で評価できる。表 1 に「完全気体」「総合」の欄に示される Mach 数は、高温領域・低温領域に分けて評価された Mach 数と比べほぼ同程度の偏差に収まることが分かった。これは平衡実在気体効果を仮定した場合低温側と高温側とで平均の Mach 数が大きく異なるため、領域に分けて評価せざるを得なかったことと対比できる。

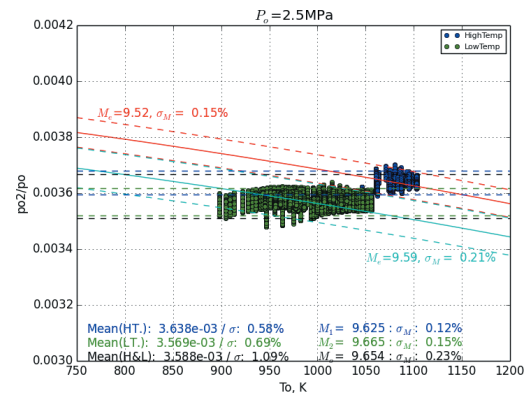
これらの 2 回の気流校正結果からは、平衡実在気体モデルを用いた Mach 数推定よりも、完全気体モデルをもとにした Mach 数推定の方が結果にばらつきが少なく、また推定された Mach 数における澱み点温度依存性の低いことが分かった。

表 1 気流コア全域平均 Mach 数及び標準偏差（カッコ内）

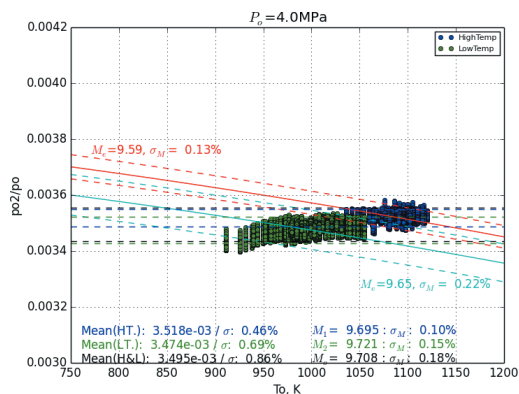
Po, MPa	平衡実在気体		完全気体		
	高温	低温	高温	低温	総合
1		9.45(0.14%)		9.52(0.12%)	(9.52(0.12%))
2.5	9.52(0.15%)	9.59(0.21%)	9.63(0.12%)	9.67(0.15%)	9.65(0.23%)
4	9.59(0.13%)	9.65(0.22%)	9.70(0.10%)	9.72(0.15%)	9.71(0.18%)
6	9.65(0.15%)	9.69(0.21%)	9.75(0.11%)	9.76(0.17%)	9.76(0.16%)



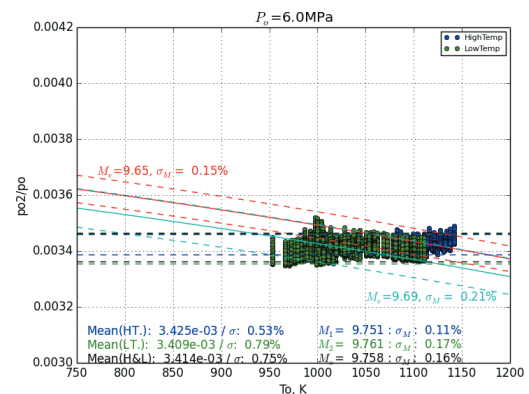
(a)  $p_o=1\text{MPa}$



(b)  $p_o=2.5\text{MPa}$



(c)  $p_o=4\text{MPa}$



(d)  $p_o=6\text{MPa}$

図 5. 気流校正試験計測結果（コア内全域）

図中青色シンボルは 1999 年実施高温側試験結果、緑色シンボルは 2000 年実施低温側結果を示す。

### 3 過去のHWT2風試ピトー圧計測結果まとめ

#### 3.1 モニター用気流校正試験結果

通風と通風、あるいは試験キャンペーン間でピトー圧のバラつきがあることが分かってきたため2012年の標準模型試験以降、図6のようにモニター用ピトー圧計測を行うこととしてきた。ピトー圧計測位置は、ノズル出口面より $x=900\text{mm}$ 、床面より1271mm位置 $(x,y,z) \sim (900\text{mm}, 186\text{mm}, 71\text{mm})$ としており、模型投入により気流が乱される前までの間のデータを参考値として取得するものである。そこで、気流校正試験データのうち、 $x=900\text{mm}$ 断面のみのデータを抽出し、バラつきの評価を行ったものを図7、表2に示す。

$x=900\text{mm}$ 断面内で推定されたMach数平均値は風洞コア内平均値と比べほぼ同程度となったが、カッコ内に示される標準偏差は最大で校正試験全体で得られた標準偏差(表1)の約半分程度となる結果であった。 $x=900\text{mm}$

の結果の試験機会の少なさを考えると、ここで得られた標準偏差は主に空間的なバラつきによるものであり、校正試験全体で得られた標準偏差がこの断面での標準偏差より大きいことは、通風毎のバラつきが空間的バラつきと同程度に大きいことを意味していると考えられる。

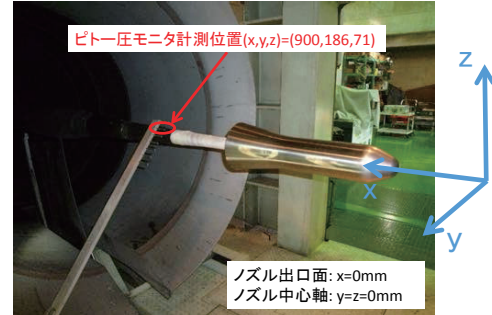
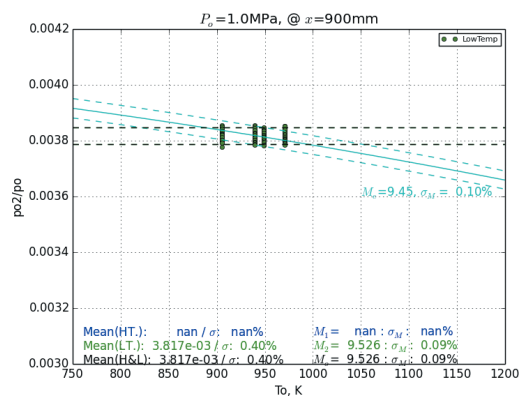


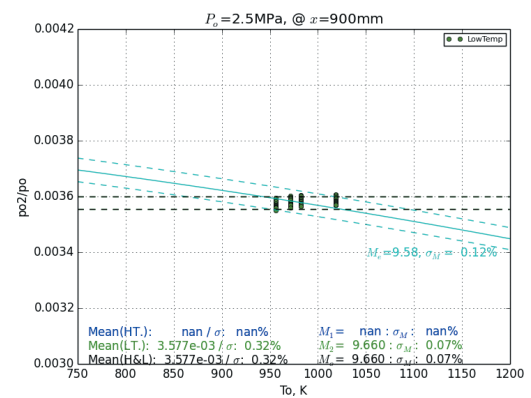
図6. HB2標準模型試験におけるピトー圧モニタ計測

表2.  $x=900\text{mm}$ 断面内平均Mach数及び標準偏差(カッコ内)

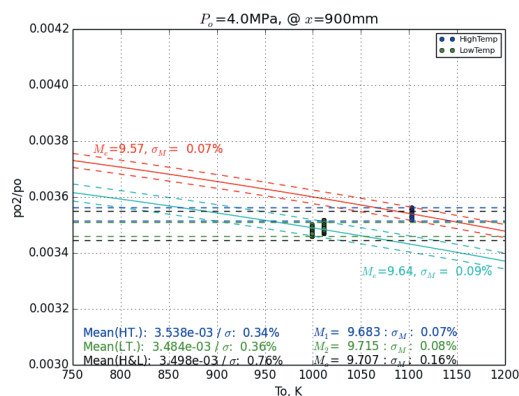
Po, MPa	平衡実在気体		完全気体		
	高温	低温	高温	低温	総合
1		9.45(0.10%)		9.53(0.09%)	
2.5		9.58(0.12%)		9.67(0.07%)	
4	9.57(0.07%)	9.64(0.09%)	9.68(0.07%)	9.72(0.08%)	9.71(0.16%)
6		9.69(0.08%)		9.75(0.09%)	



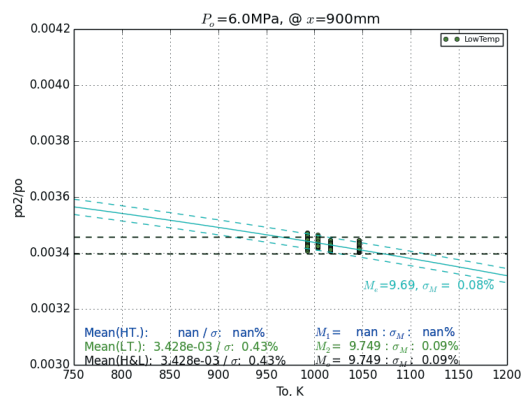
(a)  $p_o=1\text{MPa}$



(b)  $p_o=2.5\text{MPa}$



(c)  $p_o=4\text{MPa}$



(d)  $p_o=6\text{MPa}$

図7. 気流校正試験計測結果( $x=900\text{mm}$ 断面)

図中青色シンボルは1999年実施高温側試験結果、緑色シンボルは2000年実施低温側結果を示す。

### 3.2 標準模型試験等におけるピトー圧モニタ計測

図 6 から分かるようにピトー圧モニタ計測位置は、模型の影響を大きく受ける位置であるため、模型投入以前の値で評価する必要がある。代表的なピトー圧モニタ計測時間履歴は図 8 の様に、通風開始から 8 秒程度でほぼ安定しているため模型投入時期を  $t=8$  秒とすることが多い。そのためここでは特に断らない限りピトー圧モニタ計測は  $t=7$ s から  $t=8$ s までの平均値を用いて整理することとする。

ここで再整理する過去に実施された HB2 標準模型試験、及び HRV カプセル模型試験の一覧を表 3 に示す。同表中、試験番号 HWT01-11 (S00) 及び HWT04-03 (S01) 試験では、モニター用ピトー圧計測位置に関して記録が残っていないため、必ずしも気流コア内に位置しているかの確認が取れていない。

各試験で得られたモニタピトー圧と風洞澱み圧との比を風洞澱み温度に対して整理したものを図 9 に示す。併せて気流校正から求められた Mach 数の気流におけるピトー圧比を、実線（完全気体関係）、破線（平衡実在気体）で示す。またそれぞれの標準偏差を平均値との比にしたものを表 4 に示す。図中 HB2 試験における計測を▼、HRV 試験時における計測を●で示す。図中実線は気流校正時結果を基に完全気体モデルで求めた等 Mach 数、破線は平衡実在気体モデルでの等 Mach 数におけるピトー圧比である。これらにより、特に  $p_0=1$ MPa 及び 6MPa の条件においては、複数回の試験キャンペーンにわたり取得したピトー圧比は、気流校正試験で得られたバラつき以上に大きく変動していることが分かる。また、 $p_0=2.5$ MPa や 4.0MPa のケースでは標準偏差が気流校正試験時と比べ同程度となっているが、いずれの澱み圧条件においても平均値が 2%~3% 程度高い値となっており、気流校正時におけるバラつきの範囲を大きく超えていることが分かった。

また、気流校正試験結果ではピトー圧比に総温度依存性のない結果となっていたにもかかわらず、特に  $p_0=1$ MPa のケースにおいてはピトー圧比の分布があたかも総温度依存性のあるようにも見える。このことに関しては 4.1 に示す通り HWT15-53 (S07) 試験において総温度依存性確認を別途実施している。

### 3.3 試験キャンペーン毎のピトー圧バラつき

一様流 Mach 数が同一であれば本来各試験キャンペーンでピトー圧比計測値は同一の分布をとるはずであるが、実際には大きく異なっているように見受けられる。この評価のために Student の  $t$ -テスト<sup>7)</sup> をピトー圧比 ( $p_{02}/p_0$ ) に対し行ってみることとした。これは同一の分散でありながら平均値が異なる 2 つの分布において、その平均値の差が有意であるかを評価するためのものである。二つの分布 A,B 間の Student の  $t$  値は、“pooled variance”  $s_D$  を用いて、以下の通り定義される：

$$t \equiv \frac{\bar{x}_A - \bar{x}_B}{s_D}$$

ここで、

$$s_D \equiv \sqrt{\frac{\sum_{i \in A} (x_i - \bar{x}_A)^2 + \sum_{i \in B} (x_i - \bar{x}_B)^2}{N_A + N_B - 2}} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_B} \right)$$

この二つの平均値の差が、単一の分布からのサンプリングで発生する確率としての significance は、 $1 - A(t|v)$  と表され、 $A(t|v)$  は、

$$A(t|v) = \frac{1}{v^{1/2} B\left(\frac{1}{2}, \frac{v}{2}\right)} \int_{-t}^t \left(1 + \frac{x^2}{v}\right)^{-\frac{v+1}{2}} dx$$

ここで、 $B$  はベータ関数である。そこでこの様にあらわされる significance を各試験キャンペーン間で評価した。表 3 で略記されているように S00~S11 の表記で試験キャンペーン間の結果を表 5-1~5-4 に示す。ただし  $p_0=4$ MPa 以外のケースではサンプル数が 4 以上のもののみを載せている。

各試験キャンペーンに限った標準偏差は、表 4 に示される過去データ全体から求まる標準偏差と比べ小さい傾向がはっきり見られ、単一の試験キャンペーンからのみ得られるバラつき評価では過小評価する可能性があることが分かる。次に significance に関しては  $p_0=1$ MPa における S00/S07 間で 0.17、 $p_0=2.5$ MPa における S07/S08 間で 0.15、 $p_0=6$ MPa における S01/S07 間で 0.35 の結果の他は  $N \geq 4$  の試験キャンペーン間での significance はいずれも極めて小さく、同一の分布を持つ測定結果とはいいがたいことが分かる。このことから、試験キャンペーン毎に極超音速風洞気流は異なるピトー圧比を有していたとすることが妥当と考えられる。

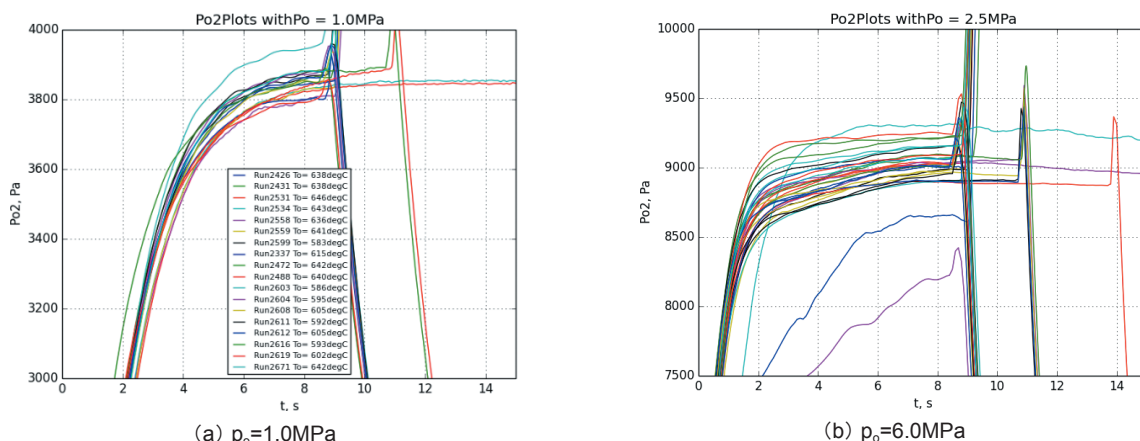


図 8. モニター用ピトー圧計測時間応答

表 3. 再整理された HB2 標準模型試験、HRV カプセル模型試験ケース

	Run	Po, Mpa	To, degC	試験期間	試験		Run	Po, Mpa	To, degC	試験期間	試験				
S00	1461	4.0	762	2002.1.11 - 1.25	HWT01-11 (HB2)	S07	2743	2.5	681	2016.1.18-2.12	HWT15-53 (HB2)				
	1462	2.5	715				2744	2.5	683						
	1463	2.5	722				2745	5.9	739						
	1465	1.0	680				2746	1.0	644						
	1466	4.0	765				2747	3.9	719						
	1467	2.5	742				2748	5.9	783						
	1468	1.0	681				2749	2.5	704						
	1470	1.0	661				2750	1.0	652						
	1471	1.0	658				2751	1.0	678						
	1473	1.0	665				2752	3.9	775						
	1475	6.1	791				2753	3.9	727						
	1477	6.1	766				2754	3.9	751						
	1478	6.1	765				2755	2.5	742						
	1480	2.5	724				2756	1.0	636						
	1481	1.0	683				2757	5.9	721						
S01	1482	4.0	745	2004.6.23-7.9	HWT04-03(HB2)		2758	5.9	754	2012.4.16 - 4.25	HWT12-01 (HRV)				
	1483	1.0	670				2759	1.0	677						
	1486	6.1	794				2760	3.9	742						
	1487	6.1	797				2761	2.5	689						
	1488	6.1	792				2762	3.9	697						
	1786	1.0	648				2763	2.4	710						
	1787	6.0	624				2764	3.9	764						
	1789	6.0	691				2765	3.9	776						
	1790	6.0	762				2766	2.5	741						
	1791	6.0	745				2767	3.9	736						
	1792	6.0	736				2768	5.9	729						
	1793	4.0	789				2769	1.0	654						
	1794	2.5	756				2770	3.9	790						
	1795	6.0	756				2771	2.4	740						
	S02	1796	1.0			658	2012.9.3- 9.7	HWT12-103 (HB2)	2772			5.9	765	2012.10.16 - 11.1	HWT12-05 (HRV)
1797		4.0	707	2773	3.9	726									
1798		6.0	766	2774	3.9	763									
1799		1.0	654	2775	1.0	687									
1800		2.5	714	2776	3.9	714									
1801		1.0	654	2777	3.9	754									
1802		1.0	656	2778	3.9	708									
1803		1.0	643	2336	5.9	745									
S03		2426	1.0	638	2012.9.3- 9.7	HWT12-103 (HB2)			2337	1.0	615	2014.11.17 - 11.21	HWT14-52 (HB2)		
		2427	6.0	738					2338	2.4	694				
		2428	2.4	692					2339	5.9	704				
		2429	6.0	729					2340	5.9	753				
		2430	2.4	692					2341	5.9	746				
S04		2431	1.0	638	2013.9.5 - 9.11	HWT13-101 (HB2)			2342	2.4	683	2015.8.31 - 9.4	HWT15-51 (HB2)		
		2530	4.0	712					2343	2.4	674				
	2531	1.0	646	2344			5.8	763							
	2532	5.9	736	2345			2.4	710							
	2533	2.4	689	2346			5.8	725							
S05	2534	1.0	643	2013.11.6 - 11.15	HWT13-102 (HB2)	2347	2.4	670	2015.2.10 - 2.13	HWT14-02 (HRV)					
	2553	5.9	752			2348	5.8	740							
	2554	3.9	730			2349	2.4	696							
	2555	2.4	676			2350	5.8	730							
	2556	5.9	729			2470	4.0	735							
	2557	2.4	703			2471	4.0	709							
	2558	1.0	610			2472	1.0	642							
	2559	1.0	609			2473	5.9	744							
S06	2560	5.9	753	2014.11.17 - 11.21	HWT14-52 (HB2)	2474	5.9	743	2015.8.31 - 9.4	HWT15-51 (HB2)					
	2561	3.9	710			2487	2.4	677							
	2562	2.4	677			2488	1.0	640							
	2597	2.4	664			2604	1.0	595							
S07	2598	5.9	704	2015.8.31 - 9.4	HWT15-51 (HB2)	2605	2.4	670	2015.2.10 - 2.13	HWT14-02 (HRV)					
	2599	1.0	583			2606	2.4	670							
	2600	3.9	696			2607	2.4	665							
	2669	2.4	702			2608	1.0	605							
S08	2670	2.4	688	2015.8.31 - 9.4	HWT15-51 (HB2)	2609	2.4	660	2015.2.10 - 2.13	HWT14-02 (HRV)					
	2671	1.0	642			2610	2.4	670							
	2672	5.9	744			2611	1.0	592							
	2673	1.0	624			2612	1.0	605							
S09	2674	5.9	727	2015.8.31 - 9.4	HWT15-51 (HB2)	2613	2.4	683	2015.2.10 - 2.13	HWT14-02 (HRV)					
						2614	2.4	655							
						2616	1.0	593							
						2617	2.4	682							
S10				2015.8.31 - 9.4	HWT15-51 (HB2)	2618	2.4	669	2015.2.10 - 2.13	HWT14-02 (HRV)					
						2619	1.0	602							
						2620	2.4	648							



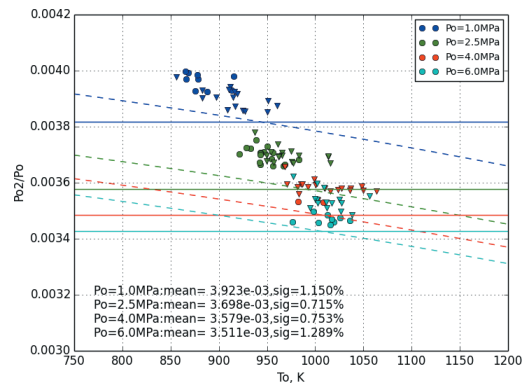


図 9. ピトー圧比計測結果

モニター用ピトー圧計測として表 3 における S02~S11 までを集計したもの。

表 4. ピトー圧比 ( $p_{o2}/p_o$ ) 及び標準偏差

モニター用ピトー圧計測は表 3 における S02~S11 までを集計したもの。

Po, MPa	気流校正試験(気流コア内)			モニター用ピトー圧計測
	高温側試験	低温側試験	高温・低温 合算	
1	-	0.00382 (0.57%)	0.00382 (0.57%)	0.00392 (1.15%)
2.5	0.00364 (0.58%)	0.00357 (0.69%)	0.00359 (1.09%)	0.00370 (0.72%)
4	0.00352 (0.46%)	0.00347 (0.69%)	0.00350 (0.86%)	0.00358 (0.75%)
6	0.00343 (0.53%)	0.00341 (0.79%)	0.00341 (0.75%)	0.00351 (1.29%)

表 5-1. モニター用ピトー圧比 t-test 結果 ( $p_o=1\text{MPa}$ )

				S00	S01	S07	S10
Mean Val.	$\sigma/\text{Mean, \%}$		N	7	6	7	4
3.86E-03	0.32	S00	7	1.00	0.00	0.17	0.00
3.96E-03	0.57	S01	6	0.00	1.00	0.00	0.05
3.87E-03	0.35	S07	7	0.17	0.00	1.00	0.00
3.99E-03	0.26	S10	4	0.00	0.05	0.00	1.00

表 5-2. モニター用ピトー圧比 t-test 結果 ( $p_o=2.5\text{MPa}$ )

				S00	S07	S08	S10
Mean Val.	$\sigma/\text{Mean, \%}$		N	4	8	6	7
3.62E-03	0.32	S00	4	1.00	0.00	0.00	0.00
3.69E-03	0.37	S07	8	0.00	1.00	0.15	0.00
3.67E-03	0.48	S08	6	0.00	0.15	1.00	0.00
3.72E-03	0.45	S10	7	0.00	0.00	0.00	1.00

表 5-3. モニター用ピトー圧比 t-test 結果 ( $p_o=4\text{MPa}$ )

S07 以外はサンプル数 5 以下であるものの参考値として載せている。

				S00	S01	S04	S07	S09
Mean Val.	$\sigma/\text{Mean, \%}$		N	3	2	2	15	2
3.51E-03	0.43	S00	3	1.00	0.10	0.12	0.00	0.29
3.59E-03	1.04	S01	2	0.10	1.00	0.44	0.87	0.28
3.55E-03	0.31	S04	2	0.12	0.44	1.00	0.00	0.26
3.58E-03	0.32	S07	15	0.00	0.87	0.00	1.00	0.00
3.53E-03	0.05	S09	2	0.29	0.28	0.26	0.00	1.00

表 5-4. モニター用ピトー圧比 t-test 結果 ( $p_o=6\text{MPa}$ )

				S00	S01	S07	S08
Mean Val.	$\sigma/\text{Mean, \%}$		N	6	7	6	8
3.42E-03	0.30	S00	6	1.00	0.00	0.00	0.00
3.54E-03	1.16	S01	7	0.00	1.00	0.35	0.00
3.52E-03	0.57	S07	6	0.00	0.35	1.00	0.00
3.47E-03	0.38	S08	8	0.00	0.00	0.00	1.00

## 4 HB2 六分力試験再評価

### 4.1 HWT15-53 試験

以上の様に試験キャンペーン毎に気流の異なる可能性が確認されたことから、小規模の試験キャンペーンを多数行うのと並行して、まとまった試験数を行う比較的大規模のキャンペーンを定期的に行う必要性が考えられた。そこで、2016.1.18~2.12の期間でHB2標準模型(図10)を用い、計36試験の六分力試験をHWT2において実施した(表3, S07試験)。

ここで、3.1において指摘された様に様々な試験で得られたピトー圧比に総温度依存性があるように見られたことについて、この単一の試験キャンペーンであるHWT15-53試験において総温度依存性がみられるかの確認を行うこととし、この試験キャンペーンにおいて極力総温度の異なる通風となるよう試験ケースを設定した。この試験に

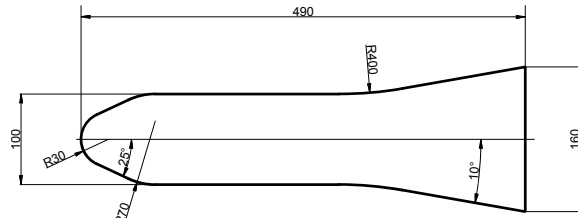


図 10. HB2 標準模型 (D=100mm)

において  $t=7\sim 8$  秒間で確認されたピトー圧を、澱み圧との比の形式で図11に示す。特に今回のHWT15-53に注目すると総温度依存性は見られないことが分かる。

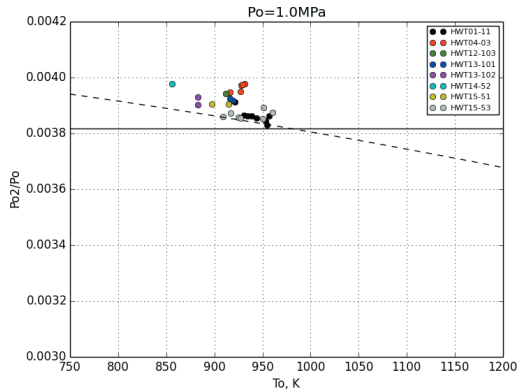
次に空力特性計測におけるバラつきの評価をするにあたり、まずは気流校正試験で得られた気流コア内での平均 Mach 数  $\overline{M}_{cal}$  と、通風時に計測される澱み点圧力  $p_0$ 、温度  $T_0$  とから平均的な動圧を求め、それによる無次元化を行うことで空力係数として整理した。よって、例えば平衡実在気体モデルによる垂直力係数、完全気体モデルによる垂直力係数は下記の様にあらわされる：

$$C_{N\ eq} = \frac{F_N}{q_{eq}(\overline{M}_{cal\ eq}, p_0, T_0) S_{ref}} \quad (eq.1)$$

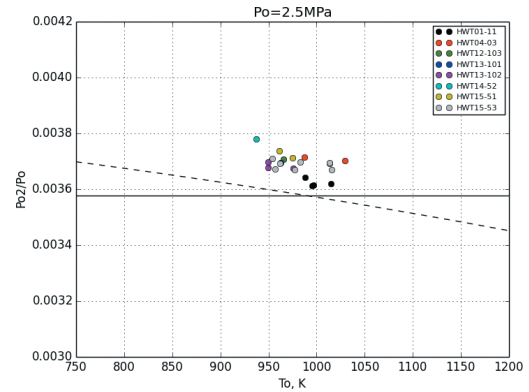
$$C_{N\ pf} = \frac{F_N}{q_{pf}(\overline{M}_{cal\ pf}, p_0) S_{ref}} \quad (eq.2)$$

ここで、 $\overline{M}_{cal\ eq}$ 、 $\overline{M}_{cal\ pf}$  はそれぞれ平衡実在気体モデル、完全気体モデルを用いて気流校正試験におけるピトー圧比分布より求めた平均一様流 Mach 数としている。

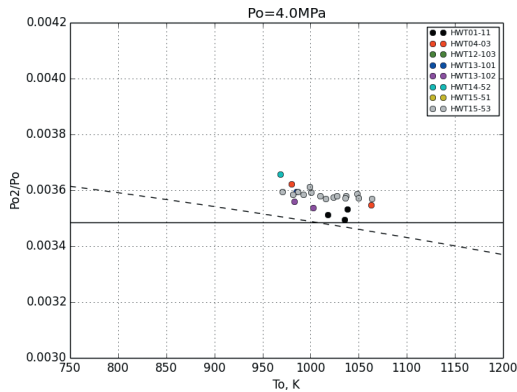
この試験キャンペーンで得られた  $p_0=6\text{MPa}$  における前面軸力係数  $C_{AF}$  を、平衡実在気体を仮定し気流校正試験結果から得られた一様流 Mach 数及び気流澱み圧、澱み温度から求め、図12(a)に示す。一方で、完全気体を仮定し、Mach 数、澱み圧から求めた前面軸力係数を図12(b)に示す。両者の比較から、平衡実在気体を仮定した結果(a)より完全気体を仮定した結果(b)の方がバラつきが小さくなっていることが分かる。一方で、平衡仮定による  $C_{AF}@ \alpha=0\text{deg}$  の総温度依存性を



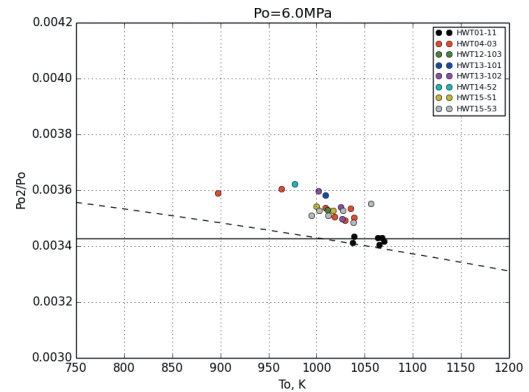
(a)  $p_0=1.0\text{MPa}$



(b)  $p_0=2.5\text{MPa}$



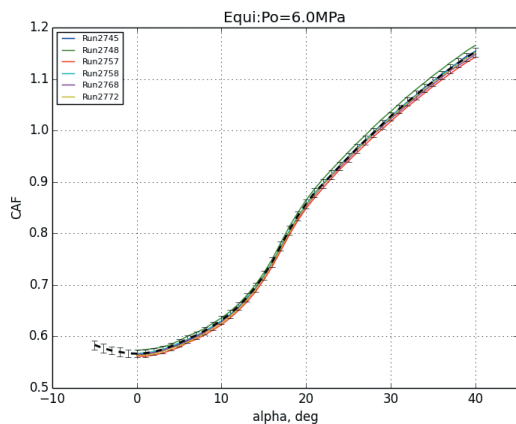
(c)  $p_0=4.0\text{MPa}$



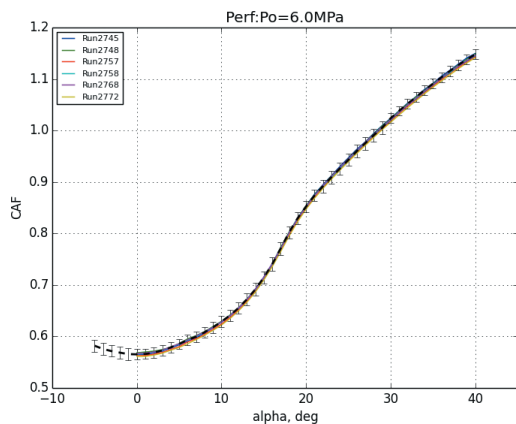
(d)  $p_0=6.0\text{MPa}$

図 11. 試験キャンペーン毎のピトー圧比の総温度依存性

示す図 13 に見られるように、平衡仮定で求められた空力係数バラつきには、気流澁み温度と相関のあることが分かったため、平衡仮定では動圧推定における総温度の効果を現実より強く評価してしまっていることにより、この大きなバラつきが生じているものと考えられる。このことは、気流校正試験においてピトー圧比に総温度効果が見られなかったこと、また振動エネルギーのノズル流における凍結予測とも整合する。平衡流を仮定した処理と、完全気体を仮定した処理とで見られたバラつきの違いに



(a) 平衡実在気体モデル



(b) 完全気体モデル

図 12. 単一 HB2 模型試験キャンペーン中における空力係数  $C_{AF}$  の試験毎のバラつき

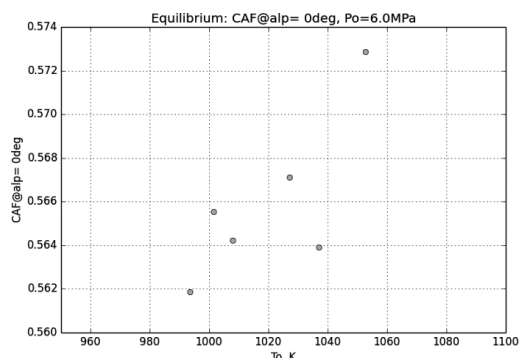
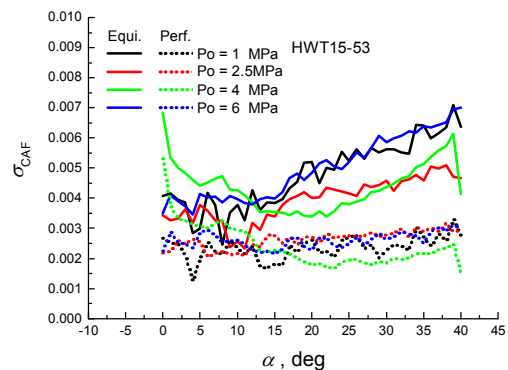


図 13. 平衡実在気体モデルを基に処理された空力係数  $C_{AF}@\alpha=0deg$  の総温度依存性 (HB2 模型)

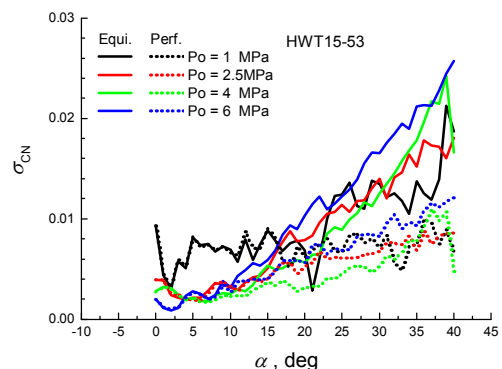
関して、各澁み圧条件において前面軸力係数、垂直力係数いずれにも同様の傾向がみられており (図 14)、現在行われている平衡実在気体モデルによる Mach 数一定の仮定と比べると、完全気体モデルによる Mach 数一定の仮定がより現実に近い状況であると推測される。

#### 4.2 過去における標準模型試験データ再評価

単一の試験キャンペーン内で得られる空力係数におけるバラつきと、複数の試験キャンペーンにまたがって得られるバラつきとの比較のため、完全気体を仮定し求めた Mach 数から推定した動圧を用いて導出した前面軸力係数及び垂直力係数を図 15 に示す。破線は考えている全試験キャンペーンを通して求めた標準偏差を、実線は試験数 5 回以上である HWT01-11, HWT04-03, HWT15-53 の 3 試験キャンペーン毎に求めた標準偏差を表す。例えば図 (c) に示される  $P_o=1MPa$  の  $C_N$  におけるバラつきに関して、同図中に示されていない試験キャンペーンで得られたデータも含め得られた標準偏差 (破線) は単独の試験キャンペーンで得られる標準偏差と比べ極めて大きくなり得ることが分かり、各試験キャンペーンにおける分布が異なっていることを示している。一部例外があるものの、他のケースを見ても試験キャンペーン毎で得られるバラつきと比べ、全試験キャンペーンを通して求められるバラつきが極めて大きいことが分かる。このことから単一の試験キャンペーンで得られるバラつきの評価だけでは過小評価となる可能性があると言える。



(a) 前面軸力係数標準偏差



(b) 垂直力係数標準偏差

図 14. 単一の HB2 模型試験キャンペーン中に得られた空力係数標準偏差における平衡実在気体モデル (実線) と完全気体モデル (破線) の差

4.1 の通り単一の試験キャンペーンにおいては、一様流動圧の推定を平衡実在気体から完全気体の仮定とすることでバラつきを低減させることができたが、同様の比較を複数の試験キャンペーンに亘り行くと、図 16 に示されるように必ずしも完全気体の仮定の方が少ないバラつきとはならないことが分かる。この傾向における差異についての原因の特定はできていないが、動圧変動への気流総温度  $T_0$  の寄与にくらべ、試験キャンペーン毎に（原因不明であるものの）発生するピトー圧比  $p_{02}/p_0$  における変動による効果がより支配的となっていることを意味しているものと考えられる。

これまでの空力係数導出処理では eq.1 又は eq.2 の様に、過去に実施された気流校正試験結果で得られたピトー圧比分布から求めた一様流（平均）Mach 数が常に一定であるという仮定のもとで行われていた。しかし校正試験で得られたピトー圧比の空間分布におけるバラつきと比べ、ピトー圧比における通風毎のバラつきの大きいことが確認されたため、一様流 Mach 数が通風毎あるいは試験キャンペーン毎に異なったものとなっていると考える必要がある。ここで、4.1 で見られたように平衡実在気体モデルより完全気体モデルの方がより現実に近いと考えられることから、完全気体モデルに限定して

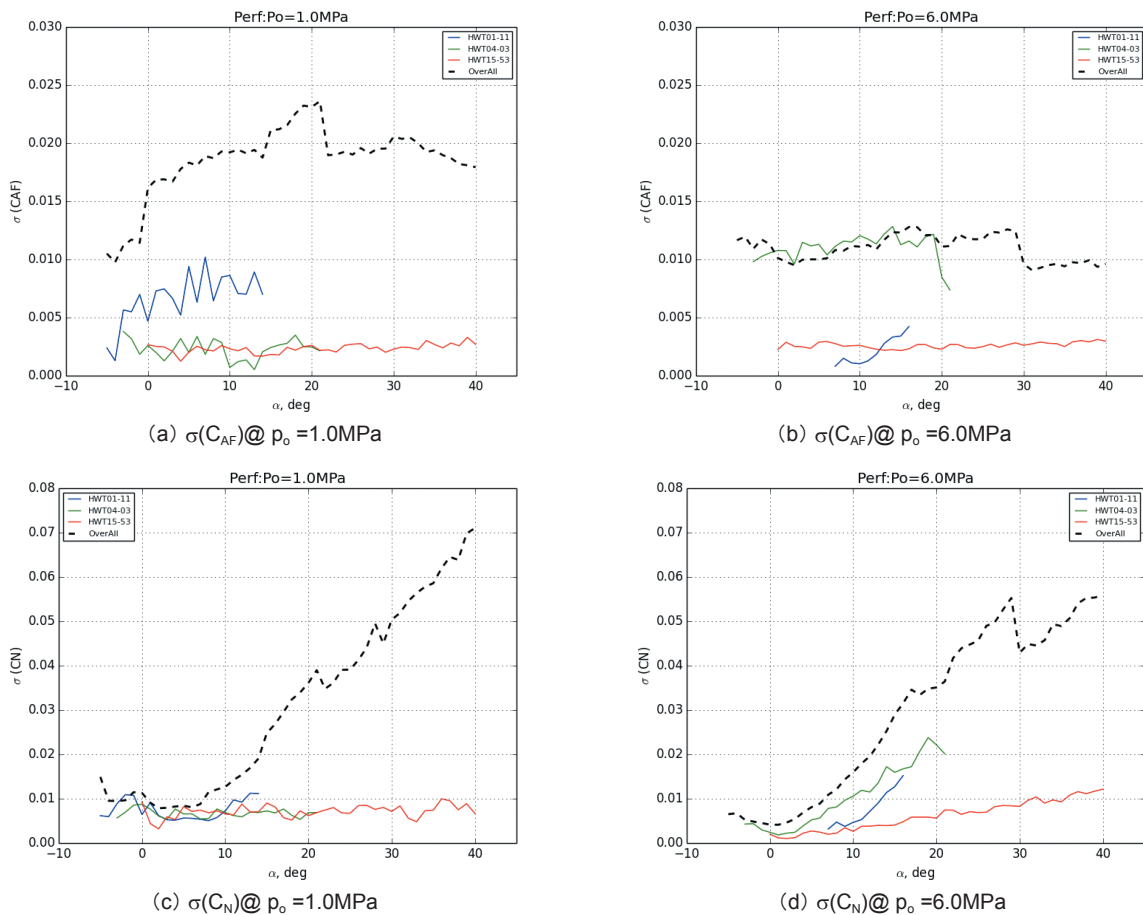


図 15. HB2 模型試験キャンペーン（S00: 青線, S01: 緑線, S07: 赤線）毎の完全気体モデルを基にした空力係数における標準偏差

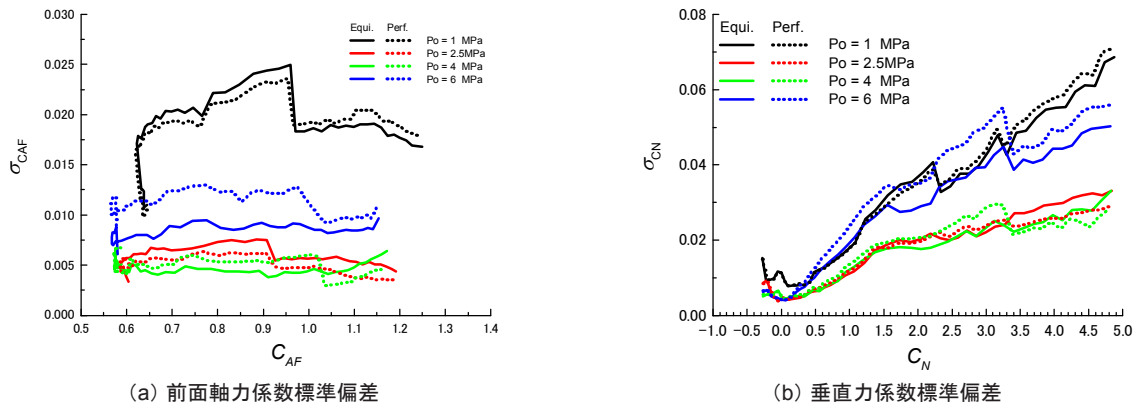


図 16. HB2 模型試験、空力係数標準偏差における平衡実在気体モデルと完全気体モデルとの差異



考えるとする。ここで、気流校正試験において気流コア部全体の平均 Mach 数（表 1）とモニター用ピトー計測断面（ $x=900\text{mm}$ ）内における平均 Mach 数（表 2）とを比較すると、差異は最大でも 0.01 ~ 0.02 と差異が小さいため、モニター用ピトー計測位置での Mach 数をコア内平均 Mach 数と近似できるものと考えた。そのように近似される試験毎の一樣流 Mach 数と澁み圧とから動圧  $q$  を推定し、それと校正試験結果を基に求めている平均的（完全気体）一樣流動圧  $q_0$  との比に

よって各通風における空力係数を再整理することとした。図 17 は迎角  $\alpha=0\text{deg}$  の前面軸力係数（動圧  $q_0$  を仮定）を  $p_0=1\text{MPa}$ ,  $2.5\text{MPa}$ ,  $4\text{MPa}$ ,  $6\text{MPa}$  のケース毎に動圧比  $q/q_0$  に対しプロットしたものである。これにより、特に圧力計測精度の影響の最も小さいと考えられる  $p_0=6\text{MPa}$  のケースにおいて  $C_{AF}@ \alpha=0\text{deg}$  と  $q/q_0$  との強い相関を見ることができ、モニター用ピトー計測結果による Mach 数補正を行うことにより空力係数バラつきを低減させることの可能性を示している。同様の傾向は垂

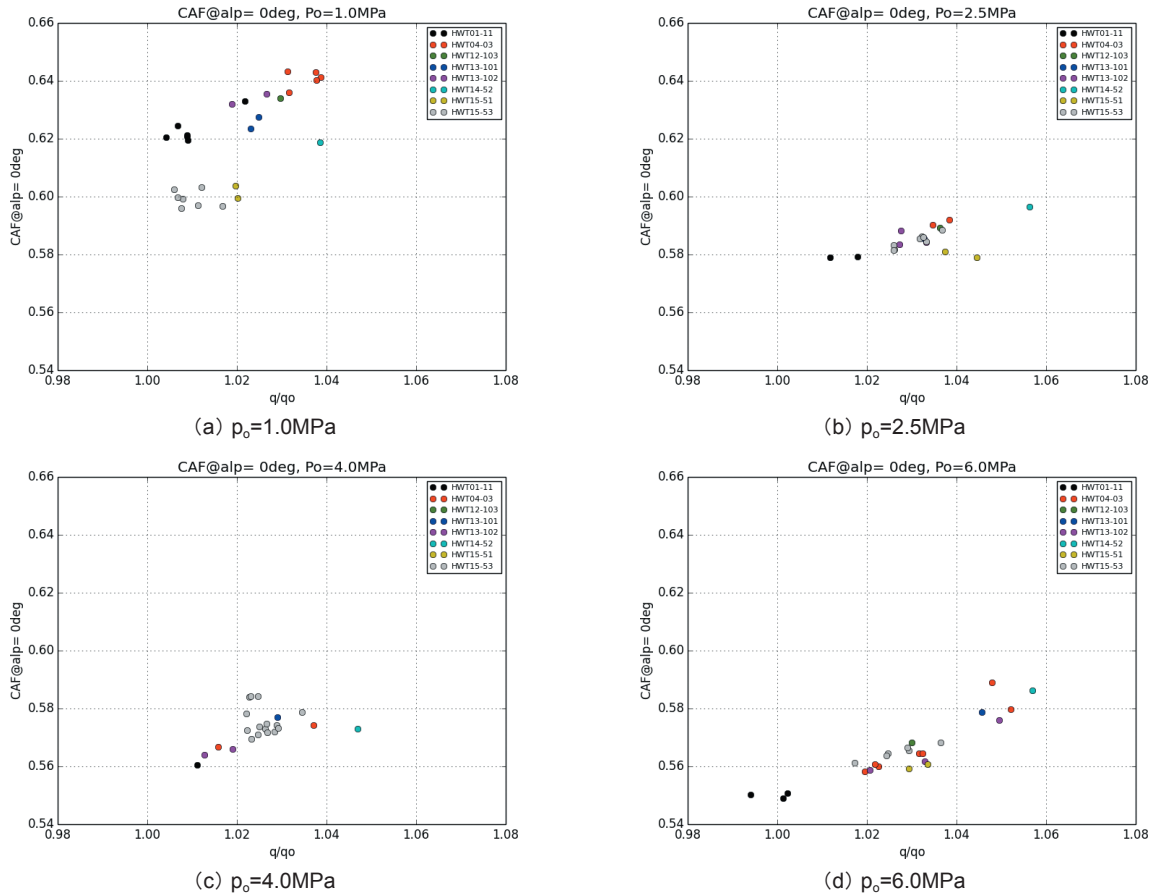


図 17. 計測されたモニター用ピトー圧比と前面軸力係数（完全気体モデル）との相関

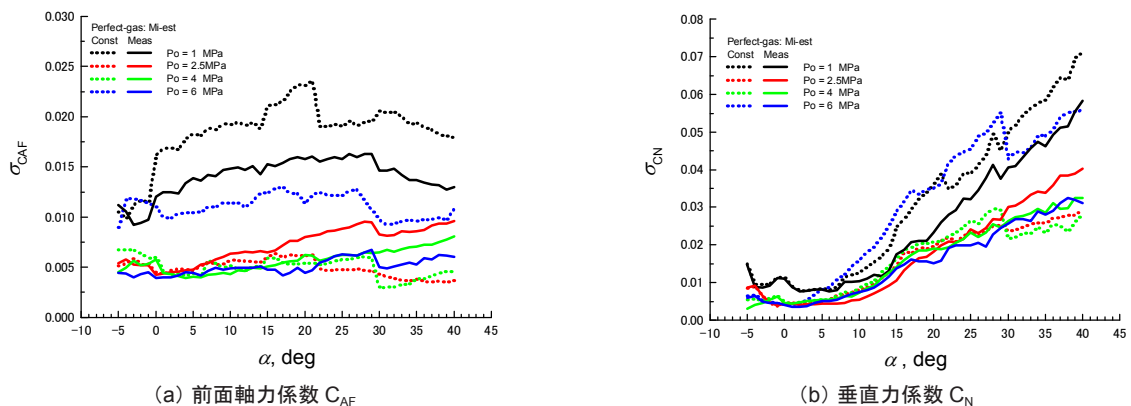


図 18. モニター用ピトー圧比計測値による動圧補正の、HB2 模型空力係数バラつきへの効果  
気流校正試験の平均 Mach 数により導出（破線）と、モニター用ピトー圧比からの通風毎の Mach 数を用いて導出（実線）

直力係数でも見られる。そこで、最も直接的な補正として、計測されたモニター用ピトー圧比で求まる通風毎の Mach 数を用いて導出した空力係数から標準偏差を求め（実線）、気流校正試験の平均 Mach 数により導出した空力係数の標準偏差（点線）とを迎角ワイズに比較したものを図 18 に表す。これによれば  $p_0=2.5\text{MPa}$ ,  $4\text{MPa}$  の条件では大きな差異は見られないものの、特に  $p_0=6\text{MPa}$  におけるバラつきの大部分がモニター用ピトー圧による補正により低減されることが分かった。激み圧によって、この補正の空力係数標準偏差への影響が異なる原因については不明だが、ピトー圧計測精度および実際に発生するキャンペーン毎のピトー圧変動の大きさの違いが影響すること考えられるので、今後さらに調査する必要がある。

## 5 HRV カプセル六分力試験再評価

### 5.1 HRV カプセル試験結果

HB2 標準模型以外の形状でありながら単一の形状での試験回数の比較的多い HRV 形状での 6 分力試験は表 3 中 S08 ~ S10 の通りである。これは図 19 に示されるカプセル形状の模型であり、HB2 と比べ空力特性が大きく異なるため HB2 形状で見られた傾向が他の形状においても見ることができるかを確認する目的に適合すると考えた。

本形状試験では試験キャンペーン毎に異なる条件での試験を主体としていたためキャンペーン間の比較が困難であったため、まずは HWT12-01 試験キャンペーン (S08) において、平衡実在気体と完全気体を仮定した場合との空力係数の比較を行った（図 20）。図から、HB2 標準模型試験のケースと同様に平衡実在気体による動圧推定では総温度の効果を取り込みすぎることによってバラつきが大きくなっていることが分かる。

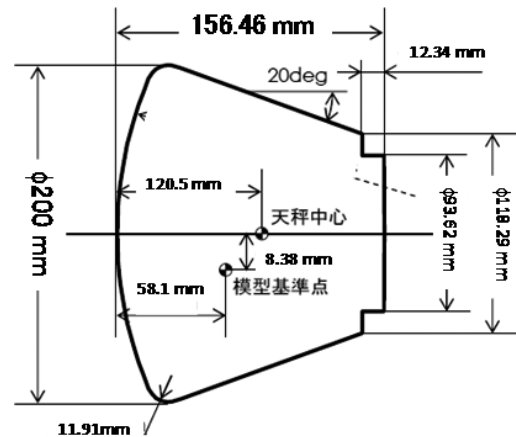
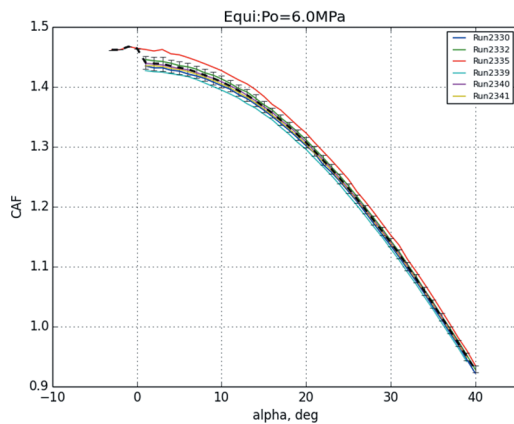
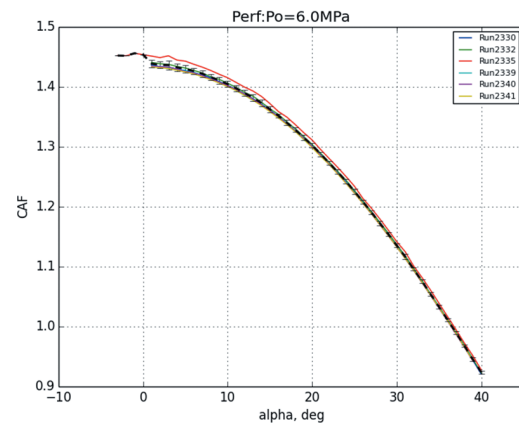


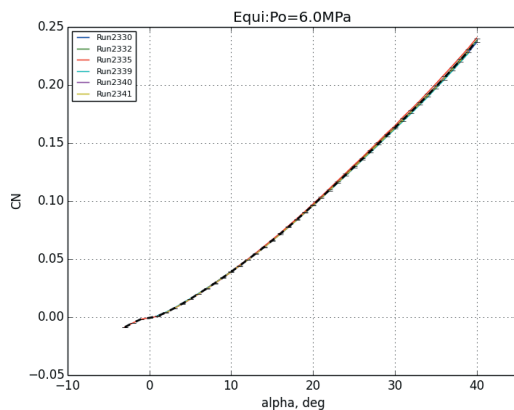
図 19. HRV カプセル模型諸元



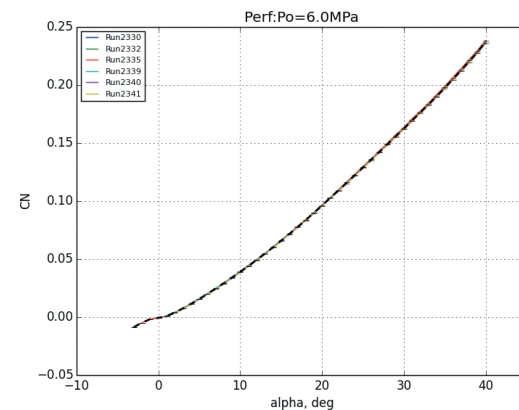
(a) 平衡実在気体モデル ( $C_{AF}$ )



(b) 完全気体モデル ( $C_{AF}$ )



(c) 平衡実在気体モデル ( $C_N$ )

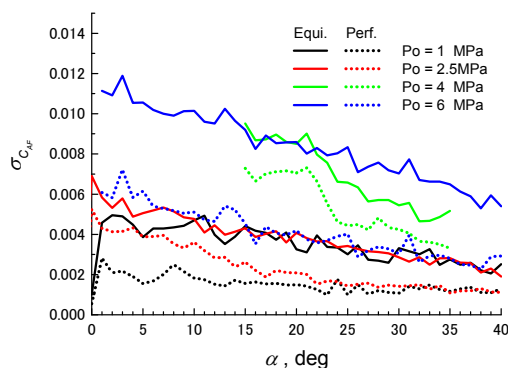


(d) 完全気体モデル ( $C_N$ )

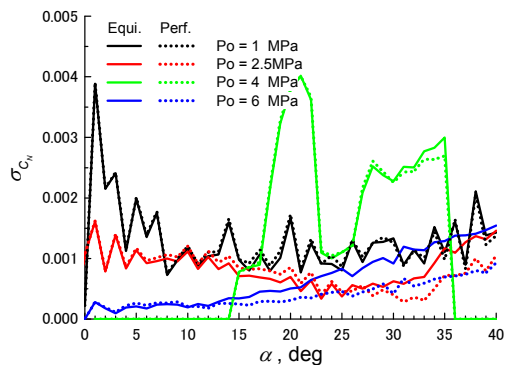
図 20. HRV カプセル模型空力特性バラつきへの平衡実在気体モデル・完全気体モデルの影響

更に試験間のバラつきを標準偏差で評価すると、図 21 に示される通り HB2 試験結果と同様に特に  $p_0=6\text{MPa}$  のケースにおいて、前面軸力係数  $C_{AF}$ 、垂直力係数  $C_N$  ともに平衡実在気体モデルより完全気体モデルにより、バラつきが小さくなっていることが分かる。

モニター用ピトー圧比計測値を用いた動圧の補正に関しては、ピトー圧計測と共に実施した試験数が十分にあるものが少ないため、このモデルにおける評価が難しかった。今後この HRV カプセル模型を用いた力試験の際に定まった位置でのモニター用ピトー圧計測も併せて実施することで動圧補正に関する有効性確認のためのデータ取得を実施していく必要がある。



(a) 前面軸力係数 ( $C_{AF}$ ) 標準偏差



(b) 垂直力係数 ( $C_N$ ) 標準偏差

図 21. HRV カプセル模型の空力係数標準偏差における平衡実在気体モデルと完全気体モデルとの差異

## 6 まとめ

過去に実施された気流較正試験、HB2 標準模型試験、HRV カプセル模型試験で得られたピトー圧、空力係数に関する結果を再整理することで、以下のことを確認した：

- 振動エネルギーのノズル膨張流中の緩和時間を推定することで、JAXA1.27m 極超音速風洞におけるノズル流は振動エネルギーとしてはほぼ凍結流に近いことを確認した。そのため、現在取り入れられている平衡実在気体モデルによる気流較正結果処理よりもむしろ完全気体モデルによる処理の方が現実に近いモデルとなっている可能性を確認した。
- 気流較正試験により得られたピトー圧比データからは、平衡実在気体効果の特徴である澁み点温度への依存

性は確認できず、また完全気体モデルによる Mach 数の標準偏差は、平衡実在気体モデルによる標準偏差と比べ小さい上、平衡実在気体モデルでは低温側領域と高温側領域とで分けた評価をせざるを得なかったところ、完全気体モデルでは低温側・高温側試験結果も同一の Mach 数として評価できることが分かった。

- 気流較正試験結果からは、気流コア内の平均 Mach 数と、モニター用ピトー圧計測断面 ( $x=900\text{mm}$ ) における平均 Mach 数とはほぼ同程度であった。
- 2001 年度から 2016 年度にかけて行われた HB2 標準模型試験、HRV カプセル模型試験において取得されたモニター用ピトー圧比におけるバラつきを評価したところ、当初想定されていた気流較正試験結果におけるバラつきを上回る範囲で変動していることが分かり、さらにその平均値も気流較正試験で得られたバラつきを越えて異なっていることが分かった。
- 試験キャンペーン毎で得られたモニター用ピトー圧比分布に関して、Student の t-テストを行ったところ、極めて低い significance となる結果であり、ピトー圧比計測結果は、同一の分布を持つものとはいいがたく、試験キャンペーン毎にピトー圧比が変動していることが推測された。
- モニター用ピトー圧比には、単一の試験キャンペーン (HWT15-53) において気流総温度依存性は確認されなかった。
- HB2 標準模型を用いた力計測試験において、平衡実在気体モデルに基づいて導出した動圧を用い得られた空力特性における試験間バラつき (標準偏差) は、完全気体モデルに基づいて得られたバラつきと比べ大きい上、気流総温度との相関がみられ、平衡実在気体モデルでは動圧推定における総温度の効果を現実より強く評価してしまっているものと考えられる。
- 複数の HB2 試験キャンペーンに亘る評価においては、平衡実在気体モデルに基づいた処理と、完全気体モデルに基づいた処理とで、バラつき (標準偏差) の観点では大きな効果は見られず、動圧変動に及ぼす総温度の効果 (平衡実在気体モデルの場合) 以上に、試験キャンペーン毎に発生するピトー圧比変動がより支配的となっていると考えられる。
- 測定されたモニター用ピトー圧比から得られる一様流 Mach 数・動圧で補正をかけることにより、複数の HB2 試験キャンペーンに亘った空力係数標準偏差が低減することを確認した。
- HB2 標準模型形状と異なる HRV カプセル形状の模型周りの空力係数の通風毎のバラつきにおける平衡実在気体モデルと完全気体モデルの影響を確認することができ、HB2 標準模型と同様に完全気体モデルではより標準偏差が小さくなる結果が得られた。

## 参考文献

- 1) Kuchi-ishi, S., Watanabe, S., Nagai, S., Tsuda, S., Koyama, T., Hirabayashi, N., Sekine, H. and Hozumi, K. "Comparative force/heat flux measurements between JAXA hypersonic test facilities using standard model HB-2 (Part 1: 1.27m hypersonic wind tunnel results)," JAXA-RR-04-035E, Mar.2005

- 2) 小山忠勇、永井伸治、津田尚一、平林則明、関根英夫、穂積弘一、渡利實 “1.27m 極超音速風洞マッハ数校正試験” JAXA-RR-05-041 2006 年 2 月
- 3) Boudreau,A.H., “Performance and operational characteristics of AEDC/VKF tunnels A, B and C,” AEDC-TR-80-48, 1981
- 4) Vincenti,W.G. and Kruger,C.H., “Introduction to physical gas dynamics,” Krieger publishing co., 1965
- 5) Fujii,K. and Hornung,H.G. “A procedure to estimate the absorption rate of sound propagating through high temperature gas,” California Institute of Technology GALCIT report FM 2001.004, Aug.2001
- 6) Millikan,R.C. and White,D.R., “Systematics of vibrational relaxation,” The journal of chemical physics, 39(12) pp.3209-3213, 1963
- 7) Press,W.H., Teukolsky,S.A., Vetterling,W.T. and Flannery,B.P., “Numerical Recipes in C,” 2<sup>nd</sup> ed. 1992, Cambridge Univ.Press



宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-16-004

## JAXA Research and Development Report

標準模型6分力試験結果を用いたJAXA1.27m極超音速風洞におけるデータバラつきに関する再評価  
Deviation in Standard Model Force Measurements in JAXA 1.27m Hypersonic Wind Tunnel

---

発 行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)  
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1  
URL: <http://www.jaxa.jp/>

発 行 日 平成28年11月7日  
電 子 出 版 制 作 松枝印刷株式会社

©2016 JAXA

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工作することを禁じます。

Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

---

