

JAXA マッハ5 極超音速風洞 HB-2 標準模型試験

平林則明、小山忠勇、津田尚一、渡利實、関根英夫、木伏淳子
(宇宙航空研究開発機構 風洞技術開発センター 極超音速風洞セクション)

HB-2 standard model test at JAXA Mach5 hypersonic wind tunnel

Noriaki HIRABAYASHI, Tadao KOYAMA, Shoichi TSUDA,
Minoru WATARI, Hideo SEKINE, Junko KIBUSHI
(JAXA WINTEC HWT SECTION)

概要

JAXA風洞技術開発センターの0.5m極超音速風洞(HWT1)においてM5のHB-2標準模型力試験を実施した。HB-2標準模型及びスティングは今回HWT1用に新たに製作したもので、当風洞所有の内挿天秤を用いて測定部の模型支持装置に装着し、澱み点圧力 $Po=1.0, 1.5\text{MPa}$ において六分力データ及びベース圧力を取得した。試験ピッチ角は $\pm 20^\circ$ の範囲で、模型支持装置の制御モード(ピッチ&ポーズ、擬似スイープ)によるデータ比較も行った。得られた結果は他風洞のそれと比較して概ね妥当な結果であった。また、試験に先立って行った光学観測装置受光部改修の機能確認試験も併せて実施した。

1. はじめに

JAXA風洞技術開発センターでは、M5、M7の試験が可能な0.5m極超音速風洞(HWT1)、M10の1.27m極超音速風洞(HWT2)、M10、M12の0.44m極超音速衝撃風洞(HST)といった3つの極超音速風洞を擁している。これら3つの風洞を同一形状標準模型で統一的に評価するためにHB-2標準模型を用いた力計測試験を順次実施している。HWT2(2001年4月)、HST(2005年5月)に引き続き、今回0.5m風洞用のHB-2標準模型を新たに製作し、M5の力試験を実施したのでその結果について報告する。

2. 風洞及び試験模型

試験を実施した極超音速風洞(1)~(3)の概略図を図1に示す。また、試験に供したHB-2標準模型を図2に示す。模型の基準胴体直径は $d = \phi$

48mm、全長235.2mm(4.9d)、底面直径 ϕ 76.8mm(1.6d)で ϕ 1.0mmのベース圧力測定孔を上下左右4点(中心円直径:PCD= ϕ 40mm)設けている。模型を内挿天秤に取り付けるコレット部には、ジルコニア断熱材を介して模型からの入熱による天秤温度上昇を防ぐための工夫が施されている。スティングはHB-2標準模型と同時製作したもので直径 ϕ 24mm(0.5d)、全長383mmであり、強度上の問題からスティング直径についてはAEDC推奨値⁴⁾(0.3d)を満足していない。

HWT1測定部の模型支持装置に装着した試験模型の状況を図3-1に示す。また、図3-2はベース圧測定用キュライトセンサの取り付け状況を示したもので、センサは底面板に配管接続固定し模型内に収納して、センサ信号線をスティング内に通して計測装置へ導いている。

3. 試験条件及び測定項目

試験は、0.5m極超音速風洞（HWT1）のM5ノズルを用いて実施した。澱み点圧力は $P_o=1.0, 1.5\text{MPa}$ の2ケースで、澱み点温度は $T_o = 723\text{K}$ （ノミナル値）で、通風時間60秒で行った。今回実施した試験ケースを表1に示す。ピッチ角 $\pm 20^\circ$ の範囲を三等分し一部重複させた基本変角パターンを中心とした22ケースについて再現性を含めて24RUN実施した。

通風時の測定項目は、風洞基準量、六分力測定、ベース圧測定、模型ピッチ姿勢角制御モードによるデータ比較、シュリーレン画像取得等である。事前確認項目として、スティング・天秤撓み測定、模型支持系ピッチ角較正、模型重量測定（全装備重量1.751kgW）等を実施した。

六分力測定に使用した天秤は当風洞所有の $\phi 18$ LMC-6522-18S-Z70（日章電機製）で、試験期間の最初と最後の2回、二次校正を実施した。ベース圧測定に使用したセンサは、Kulite XCS-093-5A（測定レンジ：5psi）4台で模型内取付前にセンサ較正を1回実施している。

4. 試験結果

4. 1 事前確認結果

通風試験実施前に確認すべき項目のうち、ピッチ角較正結果を図4に示す。模型支持系の角度検出器出力値に対するクリノメータ計測値を表したもので直線性もよく、誤差も $\pm 0.04^\circ$ 以内で健全な状態にあることが確認できる。

スティング・天秤撓み測定結果を図5に示す。模型に垂直力荷重及びピッチングモーメントを負荷した時の撓み量をクリノメータで測定したもので、僅かなヒステリシスが見られるものの直線性は良く、模型、スティング及び勘合部の加工精度も良い状態である。

ベース圧測定に使用したキュライトセンサの較正結果を図6に示す。模型に取り付ける前に真空チャンバーに入れて行ったもので、高精度圧力計（デジクォーツ）読み値に対するセンサ出力電

圧値を表しており、試験時のベース圧測定範囲においては直線性も良く精度よく近似できている。

4. 2 模型制御モードによる試験データ比較

HWT1の模型支持装置は、ジンバル・ストラット方式を採用している。制御系は各々独立で構成されており、ジンバルで供試模型にピッチ角を与えると測定部中心から外れるため、ストラットを上下して中心に戻す機構である。これらの動きを協調させて模型を中心に保持する制御はハードウェアを含めて非常に難しく、同時性を保てないことから、これまでHWT1における力試験はピッチ&ポーズ（制御モード；フリー2）にて行われてきた経緯がある。然し、運転制御装置がコンピュータ化されたこと及び試験の高効率化の要求が高まっていることから、今回もうひとつの制御モード（ステップモード）による擬似スイープ動作での力試験を行い、双方のデータを比較して適用の可能性の有無、問題点の抽出を試みた。現状のステップモードはプログラム制約上、ピッチ角指令値の始点、終点の間を最大20ステップに等分割して制御するモードで、見た目上も円滑性に欠ける動作であることは否めない。

試験データ例として図7-1～6にCase9、Run 4091、 $P_o=1\text{MPa}$ 、 $\alpha = 20^\circ \sim -20^\circ$ のピッチ&ポーズの場合を、図8-1～4にCase23、Run 4101、 $P_o=1\text{MPa}$ 、 $\alpha = 20^\circ \sim 20^\circ$ の擬似スイープの場合をそれぞれ示す。図7-1は澱み点圧力 P_o 及び澱み点温度 T_o を示しているが、通風開始から10秒経過後には双方とも安定することから、この後模型を変角してデータを取得している。図7-2は内挿天秤各部6点の温度履歴を示しているが、天秤出力データ取得中の温度上昇は 3°C 以内に収まっており、温度ドリフトの影響は無視できるものと考えられる。ピッチ角、ベース圧及び天秤出力電圧データの図から双方の動作の違いが見て取れる。

天秤出力電圧を一次処理して得た縦三分力、即ち自重補正、ベース圧補正を行う前のピッチ&ポーズと擬似スイープとの比較を図9に示す。

Po=1MPaの4つのケースを重ねてプロットしたもので、動作の違いの割には非常に良い一致を示していて再現性試験によるデータのばらつきと同程度に収まっている。

自重補正をして得られた縦三分力の空力係数について、Po=1.0MPaのケースを図10に、Po=1.5MPaのケースを図11にそれぞれ示す。何れもピッチ&ポーズ及び擬似スイープを含んだ全試験ケースをプロットしている。CNは垂直力係数、CMBはピッチングモーメント係数、CAは全軸力係数、CAFはベース圧補正をした軸力係数である。ベース圧補正量(4点の平均値)は約0.1でAEDCのM5の結果⁴⁾と一致している。各係数の分布はスムーズで迎角に対する対称性も良く、模型の精度を含めて本試験での計測が妥当であったと判断できる。ピッチ&ポーズと比較した擬似スイープの空力係数データを見る限り、現状の制御モードでも力試験に適用できるものとする。

4. 3 他風洞との比較

今回の試験結果のうち無揚力時の軸力係数CAFについて、他風洞におけるHB-2試験結果^{4), 5)}と比較したものを図12に示す。横軸は粘性干渉パラメータ ($M / Re^{1/2}$) で、概ね妥当な結果が得られたものと判断できる。

4. 4 シュリーレン映像

本試験に先立ち、老朽化したHWT1光学観測装置受光部の改修を行った。風洞ユーザの予てからの要望であったデジタル化及び映像の鮮明化を図ったもので、今回の試験では改修した受光部の機能確認も併せて実施した。デジタルカメラにて取得したシュリーレン画像の一例を図13に示す。ピッチ角 12° (中央写真)あたりから、頭部からの衝撃波とフレア付け根部からの衝撃波の干渉が始まり、更にピッチ角が増加するに従って強くなっていく様子(右写真)が見て取れる。これは図10及び図11のピッチングモーメント係数CMB、垂直力係数CNの分布の中で変化量が増大していくのと対応している。

5. まとめ

M5ノズルを使用したHWT1において、HB-2標準模型の力試験を実施した。縦三分力、ベース圧等について、概ね妥当な結果を取得することができた。

HWT1模型制御モードのピッチ&ポーズと擬似スイープの試験データを比較した結果、良好な一致であったことから、今後の力試験において擬似スイープモードを適用することによりデータ生産性の向上、試験の高効率化を図ることができる。

HWT1光学観測装置受光部改修の機能確認の結果、映像のデジタル化、鮮明化及びデジタルカメラ、CCDカメラの同時撮影ならびに光学系調整作業の簡易化、精細化を実現できた。

今後の課題として、

- (1) 本試験結果のデータ不確かさ解析評価の実施
- (2) HWT1 M7 ノズルでのHB-2標準模型力試験の計画、実施
- (3) HWT1模型制御擬似スイープモードのプログラム改修によるステップ細分化(即ち動作円滑化)及び制御パラメータ条件設定の柔軟対応化
- (4) HWT1光学観測装置の老朽化した光源部の更新による画像の安定化、鮮明化を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 極超音速風洞建設グループ; 50cm極超音速風洞の計画と構造, NAL TR-116 (1966)
- 2) 空気力学部; 大型極超音速風洞の計画と構造, NAL TR-1261 (1995)
- 3) 関根, 平林, 永井; 航技研極超音速風洞システムの運転制御系と操作法(その1), NAL TM-718 (1997)
- 4) J. Don Gray; Summary Report on Aerodynamic Characteristics of Standard Models HB-1 and HB-2, AEDC - TDR-64-137 (1964)
- 5) Shigeru Kuchi-Ishi et al; 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 (2005)



0.5m/1.27m 極超音速風洞 概略図

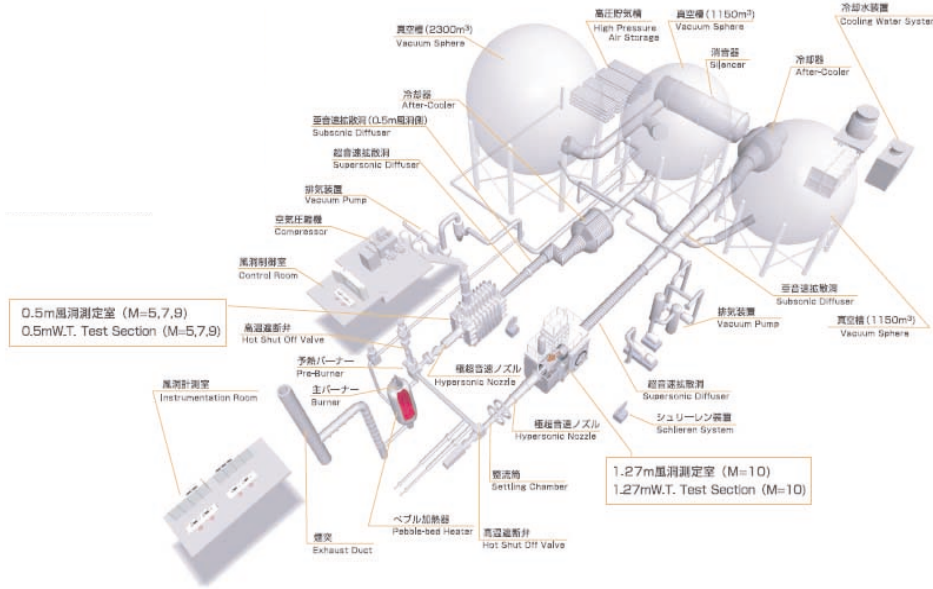
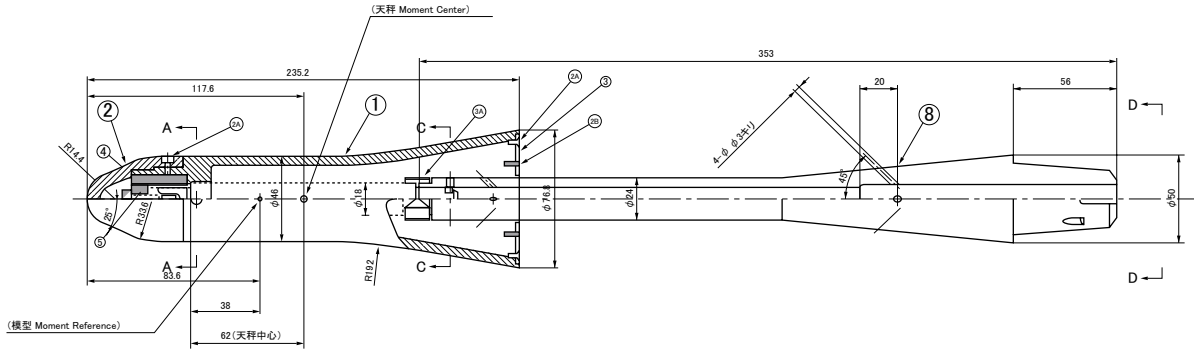


図1 0.5m / 1.27m 極超音速風洞概略図



HWT1用HB-2模型

- 基準胴体直径 : $d = \phi 48\text{mm}$
- 全長 : $L = 235.2\text{mm}$ (4.9 d)
- 底面直径 = $\phi 76.8\text{mm}$ (1.6 d)
- ベース圧測定孔 = $\phi 1.0\text{mm}$ (上下左右4点 : PCD= $\phi 40\text{mm}$)
- 天秤取付用コレット : ジルコニア断熱材使用

スティング

- HB-2 模型用スティング (模型と同時製作)
- 直径 = $\phi 24\text{mm}$ ($0.5 d > 0.3 d$)、全長 = 383mm

図2 試験模型 (HB - 2 標準模型)



図 3-1 模型装着状況

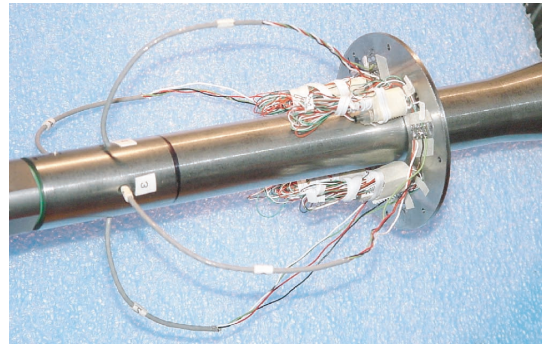


図 3-2 ベース圧測定センサ取付状況

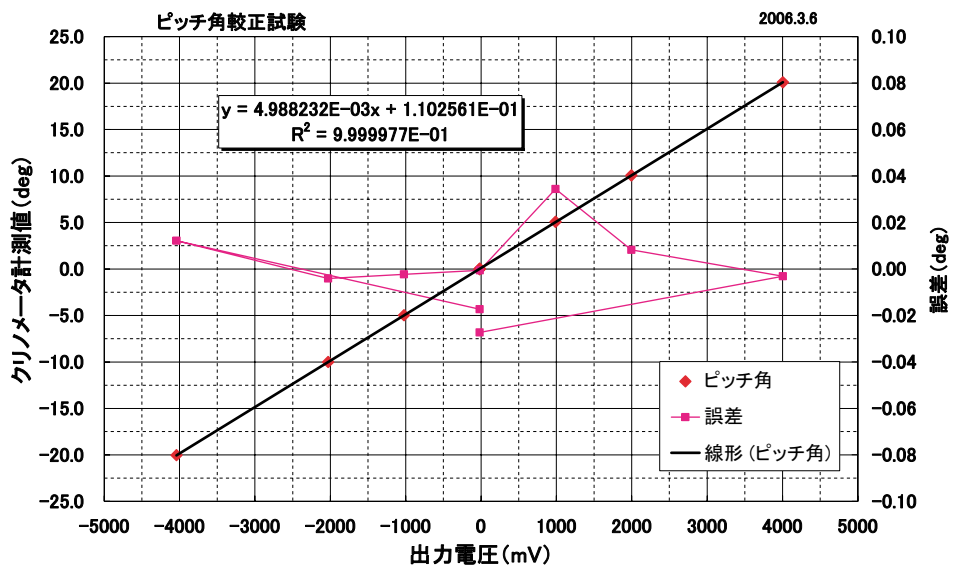


図 4 ピッチ角校正結果

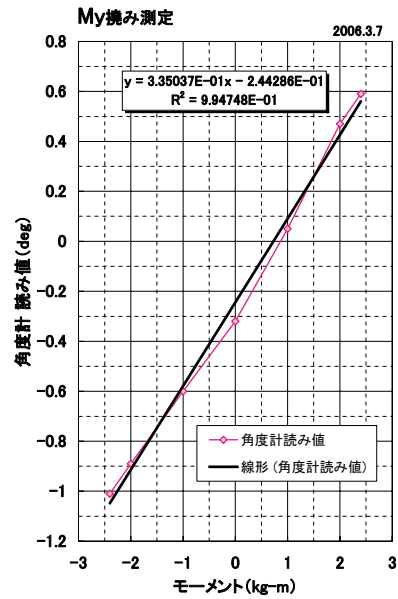
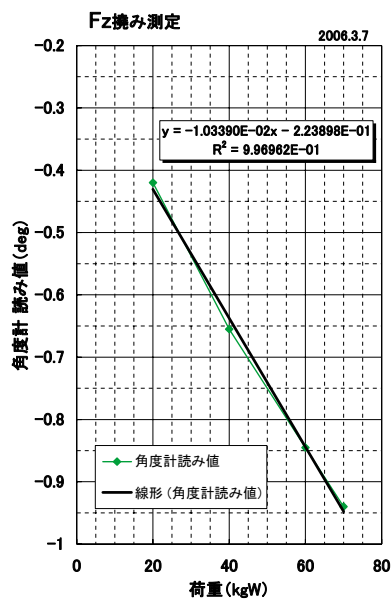


図 5 スティング・天秤撓み測定結果

表1 試験ケース

HWT1 M5 HB-2 標準模型試験ケース表 (結果) Rev.03

2006/05/31 平林

Case No.	日付 (mm/dd)	Run No.	Po (MPa)	To (°C)	Mach No.	Re ($\times 10^6/m$)	変角モード	変角 パターン	ピッチ角 (°)	備考
1	3/13	4086	1.0	450	5.10	7	フリー2 (P&P)	# 1	0°→+8°→(2°)→-8°→0°	基本
2	3/13	4087						# 2	0°→+6°→(2°)→+20°→0°	↑
3	3/13	4088						# 3	0°→-6°→(2°)→-20°→0°	↑
4	3/14	4090					ステップ		0°→+9°→-9°→0°	P&P との比較
5	3/14	4089					フリー2 (P&P)		0°一定	温度ドリフト
6	3/17	4098					フリー2 (P&P)	# 1	0°→+8°→(2°)→-8°→0°	再現性; 底面板90°回転
7	3/17	4099						# 2	0°→+6°→(2°)→+20°→0°	↑
8	3/17	4100						# 3	0°→-6°→(2°)→-20°→0°	↑
9	3/14	4091					フリー2 (P&P)	# 4	0°,20°,16°,12°,6°,0°,-6°,-12°,-16°,-20°,0°	繰り返し
10	3/20	4104						# 4	0°,20°,16°,12°,6°,0°,-6°,-12°,-16°,-20°,0°	繰り返し; 底面板90°回転
11	3/20	4105						# 4'	0°,-20°,-16°,-12°,-6°,0°,6°,12°,16°,20°,0°	繰り返し; 底面板90°回転; ピッチ角逆振り
12	3/15	4092	1.5	450	5.11	10.8	フリー2 (P&P)	# 1	0°→+8°→(2°)→-8°→0°	基本; Po 低 (1.5MPa 設定); 天秤温度ノイズ
12R	3/16	4095						# 1	0°→+8°→(2°)→-8°→0°	基本
13	3/15	4093						# 2	0°→+6°→(2°)→+20°→0°	基本; Po 低 (1.5MPa 設定)
13R	3/16	4096						# 2	0°→+6°→(2°)→+20°→0°	基本
14	3/15	4094						# 3	0°→-6°→(2°)→-20°→0°	基本; 天秤温度スパイクノイズ
15	/						ステップ		0°→-21°→+21°→0°	P&P との比較
16	3/22	4106					フリー2 (P&P)	# 1	0°→+8°→(2°)→-8°→0°	再現性; 底面板90°回転
17	3/22	4107						# 2	0°→+6°→(2°)→+20°→0°	↑
18	3/22	4108						# 3	0°→-6°→(2°)→-20°→0°	↑
19	3/16	4097					フリー2 (P&P)	# 4'	0°,-20°,-16°,-12°,-6°,0°,6°,12°,16°,20°,0°	繰り返し; ピッチ角逆振り; 天秤温度ノイズ
20	3/20	4102						# 4	0°,20°,16°,12°,6°,0°,-6°,-12°,-16°,-20°,0°	繰り返し; 底面板90°回転
21	3/20	4103						# 4	0°,20°,16°,12°,6°,0°,-6°,-12°,-16°,-20°,0°	↑
22	3/10	4085	1.0	450	5.10	7	フリー2 (P&P)	# 4	0°,20°,16°,12°,6°,0°,-6°,-12°,-16°,-20°,0°	通風確認
23	3/17	4101					ステップ		0°→-21°→+21°→0°	P&P との比較; ピッチ角逆振り; 底面板90°回転

- ※ 模型制御設定: 模型投入6秒、変化開始1.3秒、各ステップ保持時間はケース毎に設定、変化終了(最長5.7)秒、模型退避(最長6.0)秒
- ※ Po 設定値について: 運転制御装置のPo 設定値を各々1.1MPa、1.6MPaに設定して、実行値各々1.01MPa、1.47MPaを得る。(気流校正試験時と同様)
ただし、Case12、13は、Po 設定値を1.5MPa(実行値1.37MPa)で実施したため特別採用とし、Case12R、13Rとして再実施した。
- ※ ステップモードとピッチ&ポーズとの比較ケースをPo = 1.0MPaのみで実施したため、Case23(ピッチ角逆振り)を追加、Case15は未実施。
- ※ ベース圧測定センサ(上下左右4点)の各センサ出力値の比較のため、Run#4098以降、センサを取り付けた底面板を+90°回転させて試験実施。
- ※ 3/15、16の試験で、天秤温度出力値にスパイクノイズが乗っていたが、原因不明。

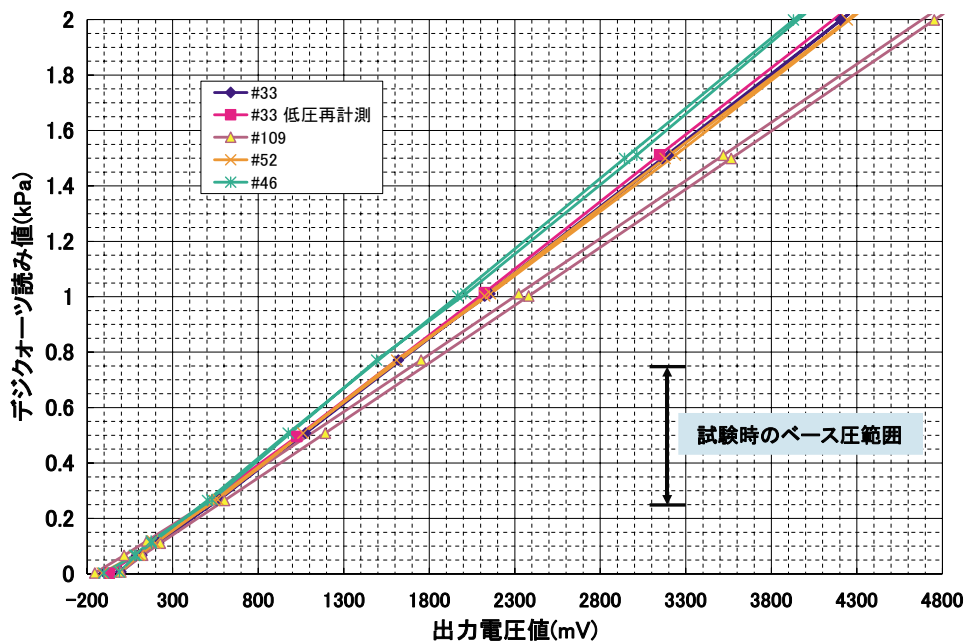


図6 ベース圧センサ校正結果

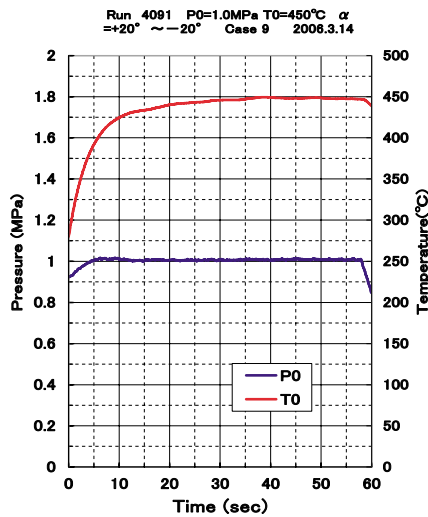


図7-1 P&P試験データ (Po, To)

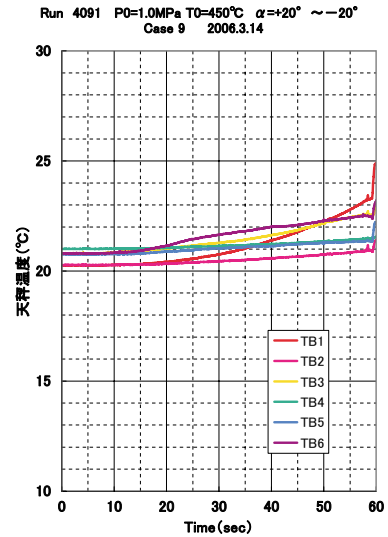


図7-2 P&P試験データ (天秤温度)

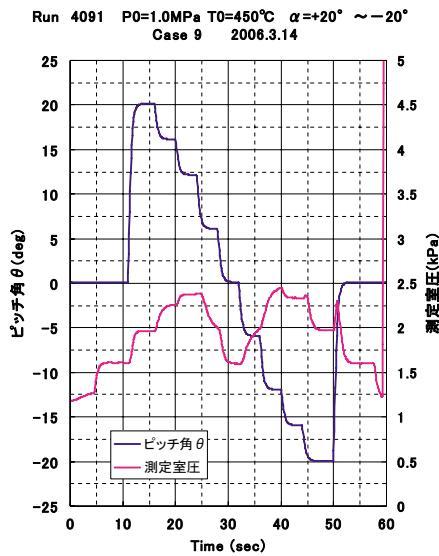


図7-3 P&P試験データ (ピッチ角, 測定室圧)

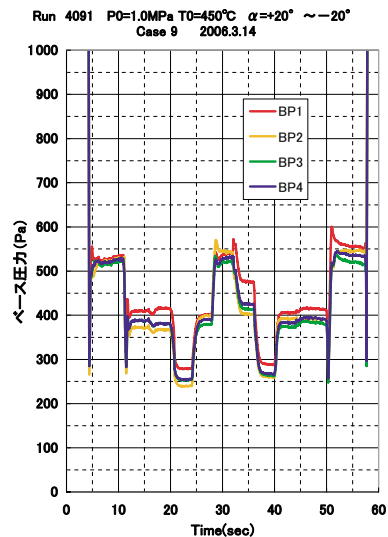


図7-4 P&P試験データ (ベース圧力)

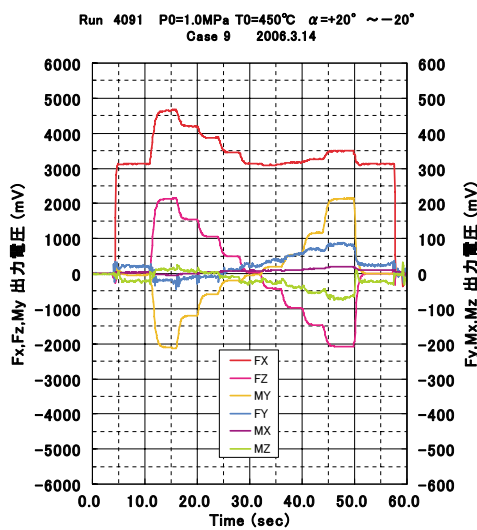


図7-5 P&P試験データ (天秤出力電圧)

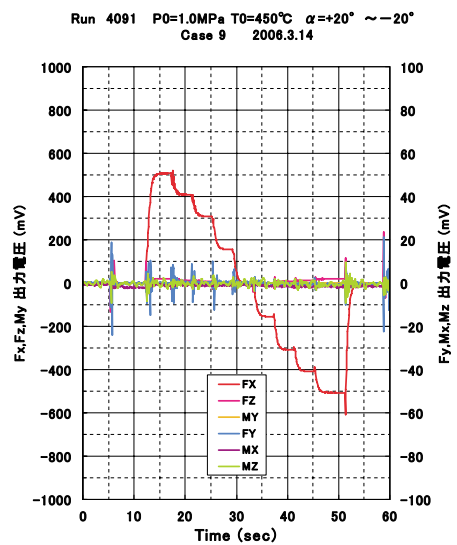


図7-6 P&P無風時データ (天秤出力電圧)

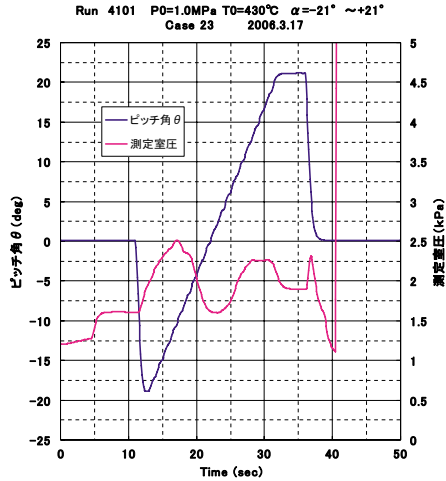


図8-1 擬似スweep試験データ (ピッチ角, 測定室圧)

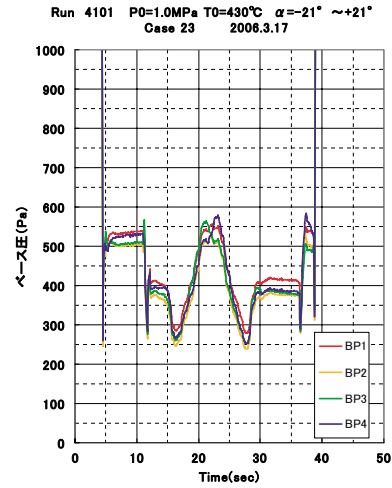


図8-2 擬似スweep試験データ (ベース圧)

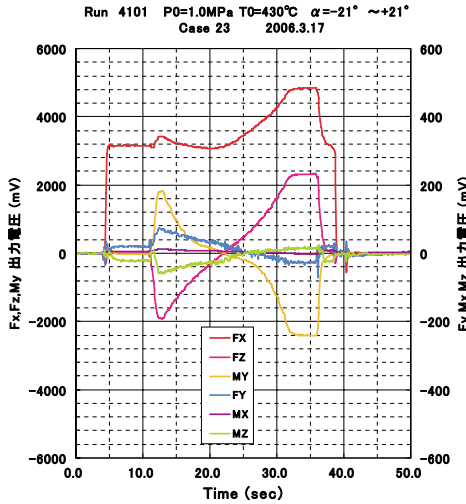


図8-3 擬似スweep試験データ (天秤出力電圧)

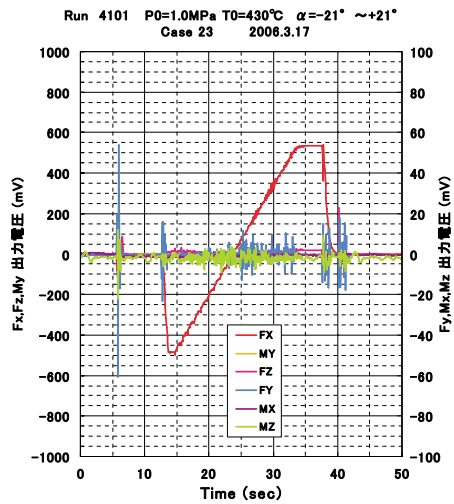


図8-4 擬似スweep無風時データ (天秤出力電圧)

Po=1.0MPa Run#4090: 擬似スweep: +9° ~ -9°
 Run#4091: P&P : +20° ~ -20°
 Run#4101: 擬似スweep: -20° ~ +20° (逆振り)
 Run#4105: P&P : -20° ~ +20° (逆振り)

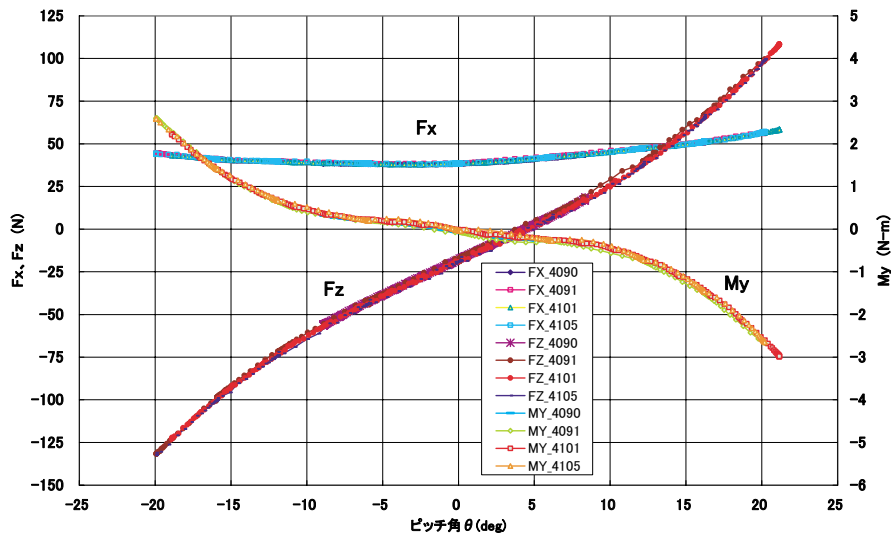


図9 ピッチ&ポーズと擬似スweepとのデータ比較

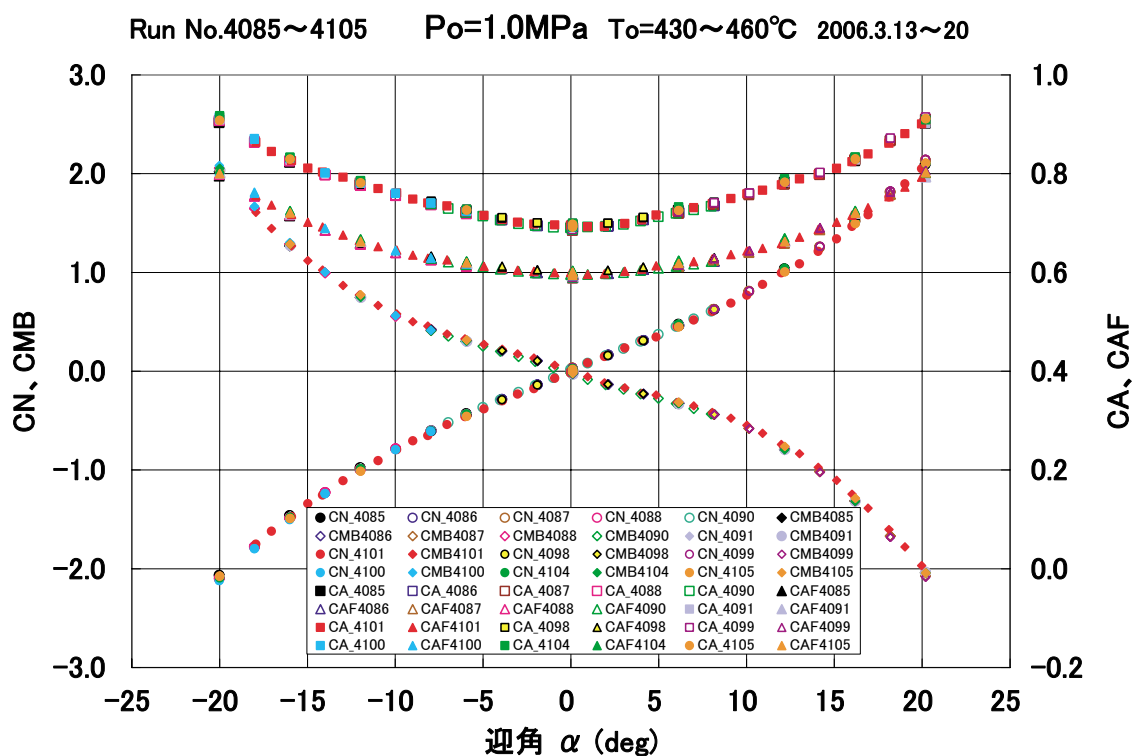


図10 空力係数 (縦三分力) $P_o=1.0\text{MPa}$ の場合

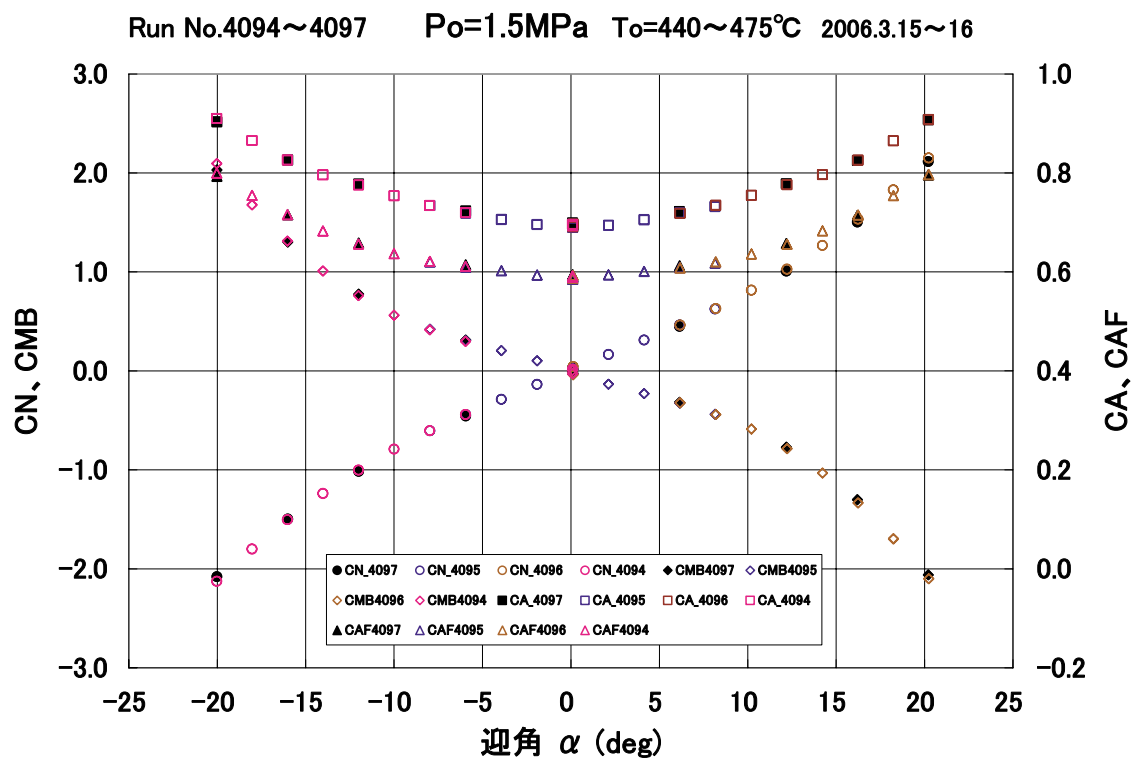


図11 空力係数 (縦三分力) $P_o=1.5\text{MPa}$ の場合

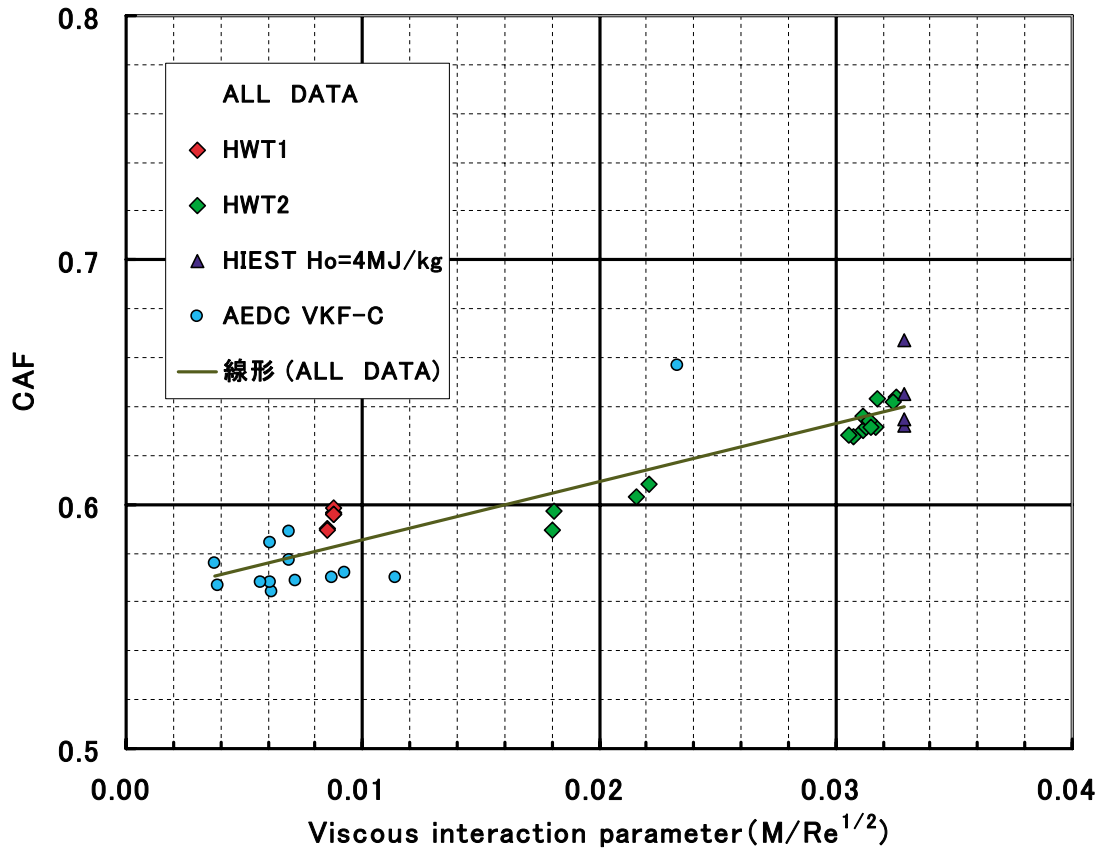


図12 他風洞との比較

$Po=1.0MPa$: P&P : Run#4091 Case 9

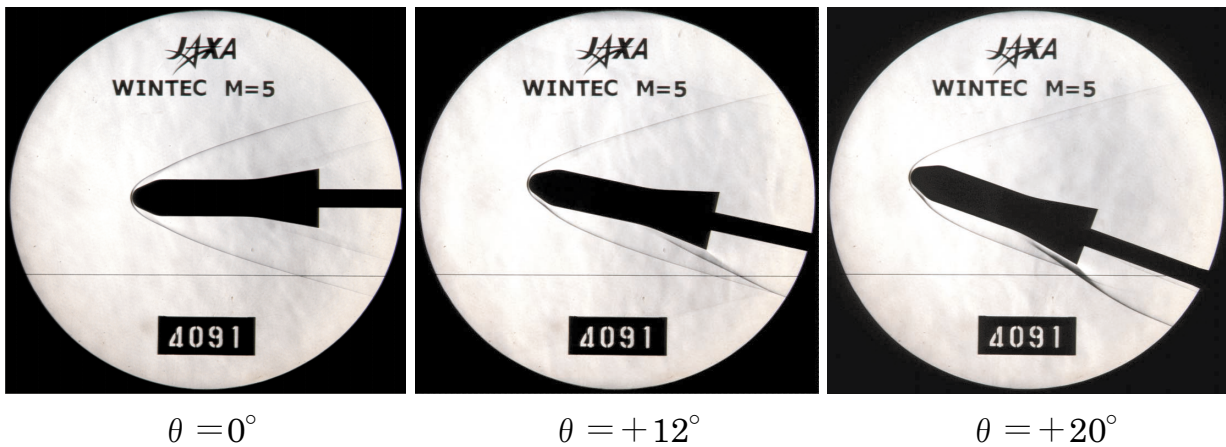


図13 シュリーレン画像