



ISSN 1349-1121  
JAXA-RM-09-007

# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## JAXA Research and Development Memorandum

---

### 遷音速フラッタ試験設備気流確認試験

玉山 雅人, 齊藤 健一, 有蘭 仁  
吉本 周生, 菊池 孝男

2010年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# 遷音速フラッタ試験設備気流確認試験\*

玉山 雅人<sup>\*1</sup> 齊藤 健一<sup>\*1</sup> 有菌 仁<sup>\*1</sup>  
吉本 周生<sup>\*1</sup> 菊池 孝男<sup>\*2, \*3</sup>

## Evaluation Tests for Flutter Wind Tunnel Flow Accuracy\*

Masato TAMAYAMA<sup>\*1</sup>, Kenichi SAITOH<sup>\*1</sup>, Hitoshi ARIZONO<sup>\*1</sup>  
Norio YOSHIMOTO<sup>\*1</sup> and Takao KIKUCHI<sup>\*2, \*3</sup>

### ABSTRACT

The JAXA's Flutter Wind Tunnel was built in 1959. The flow evaluation tests were conducted at that time. After then, this facility was applied with a major repair including refurbishment of pressure control system from 1993 through 1996. At this time, the flow evaluation tests were conducted shortly to check the repair specifications. On the other hand, the activity to globally acquire the wind tunnel characteristics has not been conducted after this latest repair. In order to conduct this activity, the flow evaluation tests were conducted in 2008. The results of tests are presented here.

### 概要

遷音速フラッタ試験設備は昭和 34 年の設備完成当時に気流の確認試験を行った。その後、平成 5～8 年に実施した圧力制御系の改修に伴ってその改修仕様確認の試験を簡単に実施したが、包括的な気流確認試験は行っていない。このため、風洞気流特性を調べるために気流確認試験を平成 20 年に実施した。本稿ではこの試験結果を報告する。

### 記号

$A_{Set}$	集合胴断面積	$M_{Quasi}$	$P_{Set}$ と $P_{P_{PA}}$ より求めたマッハ数
$A_{TS}$	測定部断面積	$M_{Set\_C}$	集合胴気流設定マッハ数
$A^*$	臨界断面積	$M_{TS}$	$P_{OTS}$ と $P_{TS}$ より求めた測定部マッハ数
$C_p$	圧力係数	$M_{TS\_C}$	測定部気流設定マッハ数
$M$	$P_{Set}$ と $P_p$ より求めたマッハ数	$M_{Unst}$	$P_{Pt}$ と $P_{P_{XCQ}}$ より求めたマッハ数
$M'$	$P_0$ と $P_p$ より求めたマッハ数	$P_0$	気流全圧
$M_p$	$P_{0P}$ と $P_p$ より求めた測定部マッハ数	$P_{0\_C}$	気流設定全圧
		$P_{0P}$	$P_{Set}$ と $P_p$ より求めた気流全圧

\* 平成 22 年 1 月 14 日受付 (Received 14 January 2010)

\*1 研究開発本部 機体構造グループ (Airframes and Structures Group, Aerospace Research and Development Directorate)

\*2 元 研究開発本部 構造・機構グループ (Structures and Mechanisms Group, Aerospace Research and Development Directorate)

\*3 現 株式会社スペースサービス (Space Service Co.Ltd.)

$P_{OTS}$	$P_{Set}$ と $P_{TS}$ より求めた気流全圧
$P_{cntrl}$	スウィープ制御圧力目標値
$P_{end}$	スウィープ終点での圧力目標値
$P_{meas}$	スウィープ時計測圧力
$\overline{P}_{meas}$	スウィープ時計測圧力の直線近似値
$P_p$	プレナム室圧力
$P_{p,PA}$	導管を介して計測したプレナム室圧力
$P_{Pt}$	全圧ピトー管計測圧力
$P_{p,XCQ}$	圧力センサー直付けにより計測したプレナム室圧力
$P_{Set}$	集合胴壁面圧力
$P_{start}$	スウィープ始点での圧力目標値
$P_{TS}$	測定部側壁静圧
$q$	気流動圧
$T_{sweep}$	スウィープ時間長さ
$\Delta P_{end}$	スウィープ時計測圧力のスウィープ終点での圧力目標値からの偏差
$\Delta P_{meas}$	スウィープ時計測圧力の $\overline{P}_{meas}$ からの変動量
$\Delta P_{start}$	スウィープ時計測圧力のスウィープ始点での圧力目標値からの偏差

## 1 序論

一般的に、航空機のフラッタ発生速度をマッハ数に対して図示すると図1のようになるが、流体の非線形性を考慮しないダブレット・ラティス法などの線形解析で推定した結果に比べ、遷音速域ではフラッタ速度が低下する”遷音速ディップ”と呼ばれる形状が現われる。遷音速域では機体上に衝撃波が発生して機体の姿勢と空気が非線形の関係を持ち、リミット・サイクル振動と呼ばれる”一定振幅の振動が持続する現象”を生じることがあると共に遷音速ディップに影響している<sup>1)</sup>。この様に、遷音速域ではフラッタの特性が他の速度域と比べて変化し、フラッタ現象を特に詳細に把握しておかなければならない領域と言える。

以上の背景のもと、旧航空技術研究所時代（旧航空宇宙技術研究所の前身）に遷音速フラッタ試験設備（transonic Flutter Wind Tunnel, 略してFWT）が整備され、JAXAとなった現在も活発に利用されている<sup>2~4)</sup>。フラッタ試験を専らの対象とする遷音速風洞としては日本唯一の設備であり、空力弾性分野では世界的に著名な風洞の一つに挙げられている<sup>5)</sup>。

FWTは昭和34年の完成当時に気流の確認試験を行っ

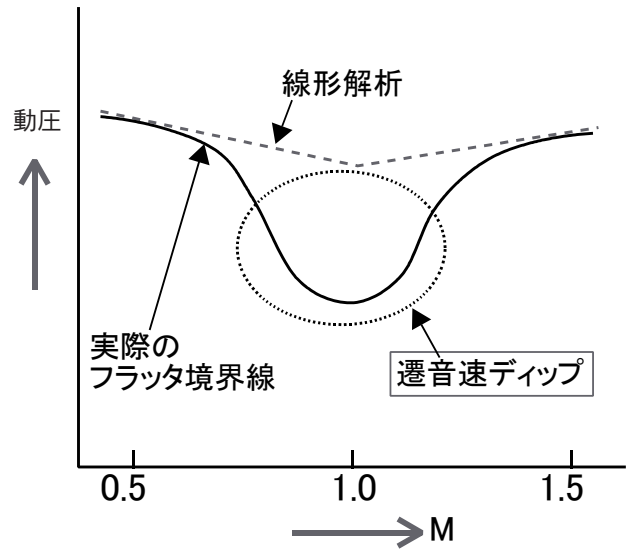


図1 遷音速領域でのフラッタ境界線図

た。この結果、測定部の静圧 ( $P_{TS}$ ) から求めたマッハ数 ( $M_{TS}$ ) とプレナム室内の圧力 ( $P_p$ ) を気流の静圧として求めたマッハ数 ( $M_p$ ) との一致は良好で、 $P_p$  を以て  $P_{TS}$  に代えることとした<sup>6)</sup>。その後、平成5～8年に実施した圧力制御系の改修に伴い、気流が低乱化されて気流制御もデジタル化されるなどの変化が加えられたが、改修仕様確認の試験を実施したのみで包括的な気流確認試験は行って来なかった。この度、試験精度保証に向けた気流確認試験を実施して現状のFWTが持つ気流特性を明らかにしたので、この結果を報告する。

## 2 遷音速フラッタ試験設備の概要

FWTは、昭和32～34年にかけて建設された。その後、ノズル交換を可能とするために昭和37年に集合胴及び測定部、昭和53年に消音棟、昭和63年にマッハ数制御装置に対して部分的な改修が行われた。しかし、30年以上の間、風洞の心臓部とも言うべき圧力制御系に関しては手が着けられずに建設当時のものが使用されて来た。この結果、風洞設備の老朽化が進行したため、平成5～8年にかけて大規模な改修が施された。この改修では、制御機器のデジタル化を含む老朽化対策や、調圧弁の変更並びに気流の低乱化、仕切り弁の新設などが実施された。平成5～8年の改修により完成した現在の風洞の鳥瞰図を図2に、風洞諸元を表1に夫々示す。

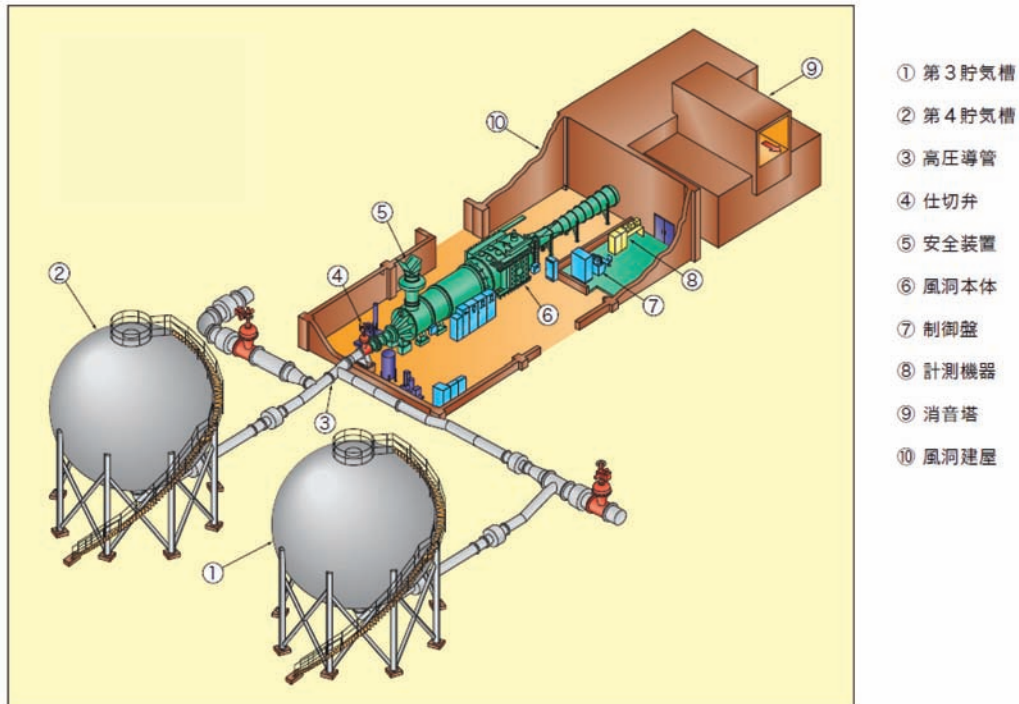


図2 遷音速フラッタ風洞の鳥瞰図

表1 遷音速フラッタ試験設備通風諸元

項目	諸元
測定部寸法	0.6m × 0.6m
貯気槽圧力	2.0 MPa
レイノルズ数	~ $6 \times 10^7$ /m
通風時間	120 sec (最大) ※
マッハ数制御範囲	0.50 ~ 1.20
全圧制御範囲	147 ~ 392 kPa abs
全圧スweep速度	0.882 ~ 29.4 kPa/sec

※持続時間は貯気槽圧力が 2MPa ⇒ 1MPa へと減る際の凡その時間で、気流条件により異なる。

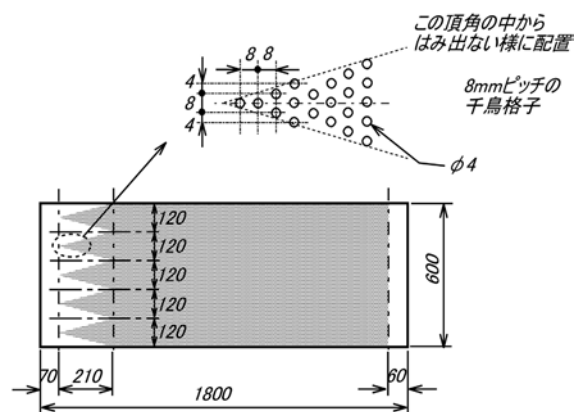


図3 測定部上下多孔壁 (単位: mm、開口比 23.2%)

フラッタ試験が行われる高速風洞は通常”吹き出し式”か”循環式”の何れかで、FWTは前者である。吹き出し式は循環式に比べて以下の通り幾つかの利点を持つ。

- ◆建設期間が短く、建設費及び維持費が安い
- ◆模型が破壊飛散しても風洞への被害が少ない
- ◆測定部における空気密度を広範囲かつ容易に変化させることができる

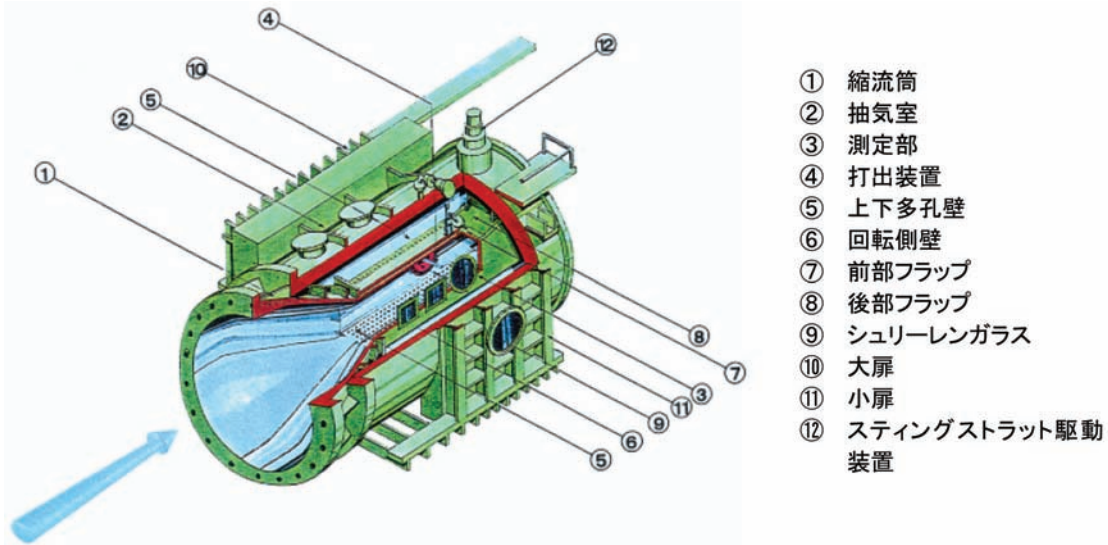


図4 測定部概要図

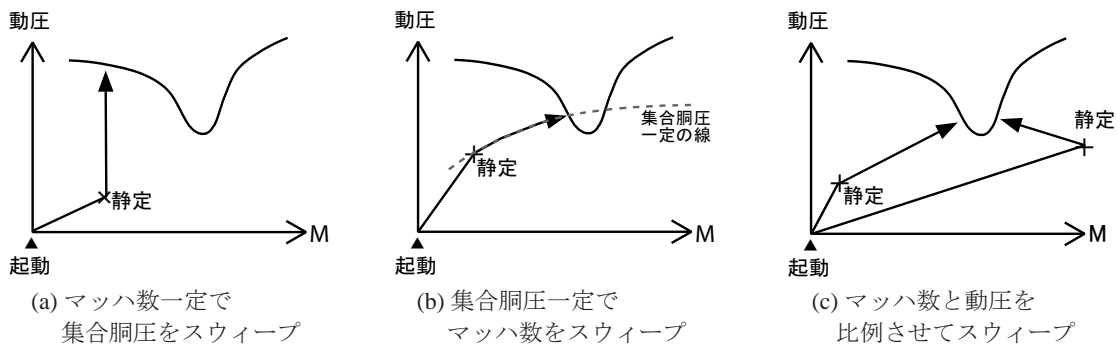


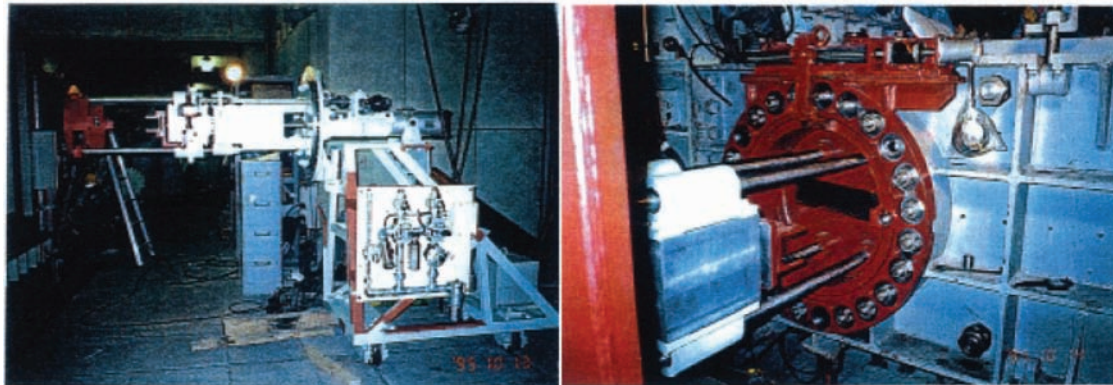
図5 風洞気流制御の方法

FWTの構造は一般的な吹き出し式遷音速風洞と同様で、図2に示す通りである。即ち、貯気槽、高圧導管、仕切弁、調圧弁、集合胴、測定部、拡散胴および消音塔から構成される。貯気槽～高圧導管部は、「JAXA 1m×1m 超音速風洞」並びに「JAXA 0.8m×0.45m 高レイノルズ数遷音速風洞」と共用している。貯気槽に貯められた約2MPaの乾燥空気を調圧弁において全圧制御し、集合胴にて気流を整流する。その後、先細ノズルにより流れを加速させ、プレナム室（抽気室とも呼ぶ）に囲われた0.6m×0.6mの断面を持つ測定部にて所定の気流を得る。測定部の上下壁には壁面に垂直に直径φ4mmの貫通孔が8mmピッチで千鳥格子に配列しており（開口比23.2%、図3）、プレナム室と測定部との空気の入出を可能にしている。図4には測定部の図を示す。マッハ数制御は測定部の下流側にある縮流胴の断面を変化させることで行う。この縮流胴と測定部間の気流通路の上下壁にはフラップが配置されている部分があり、その角度を変化させることでプレナム室と気流通路との間の開口具合を調節する。その後、気流は拡散胴にて減速され、

消音塔を通して大気へと放出される。

FWTは一般的な風洞とは異なり、「動的風洞」と称される分類に入り、一回の運転において気流の条件を変化させることが可能である。通風の仕方は図5に示す3通りを行える。即ち、起動後にある気流条件で整定させ、その後、①マッハ数一定で集合胴圧力をスweepさせる、②集合胴圧力一定でマッハ数をスweepさせる、もしくは、③マッハ数と動圧を比例させてスweepさせる、といった方法である。フラッタ境界線に対して直角になるように気流条件をスweepさせると、フラッタ発生をより明確に捉える事が出来る。

また、FWTのもう一つの特徴は模型打ち出し装置を備えている点である。模型打ち出し装置の写真を図6に示す。当該装置は約700kPaの空気圧により駆動され、模型を測定部から高速に出し入りさせることができる。模型打ち出し装置に取り付けられた模型は、風洞起動前はプレナム室に退避させられており、気流が整定した後に測定部に打ち出される。その後、気流条件をスweepし、フラッタが発生した場合には模型を測定部からプ



(a) 風洞から取り外した状態

(b) 風洞側壁に取り付けた状態

図6 模型打ち出し装置 外観写真

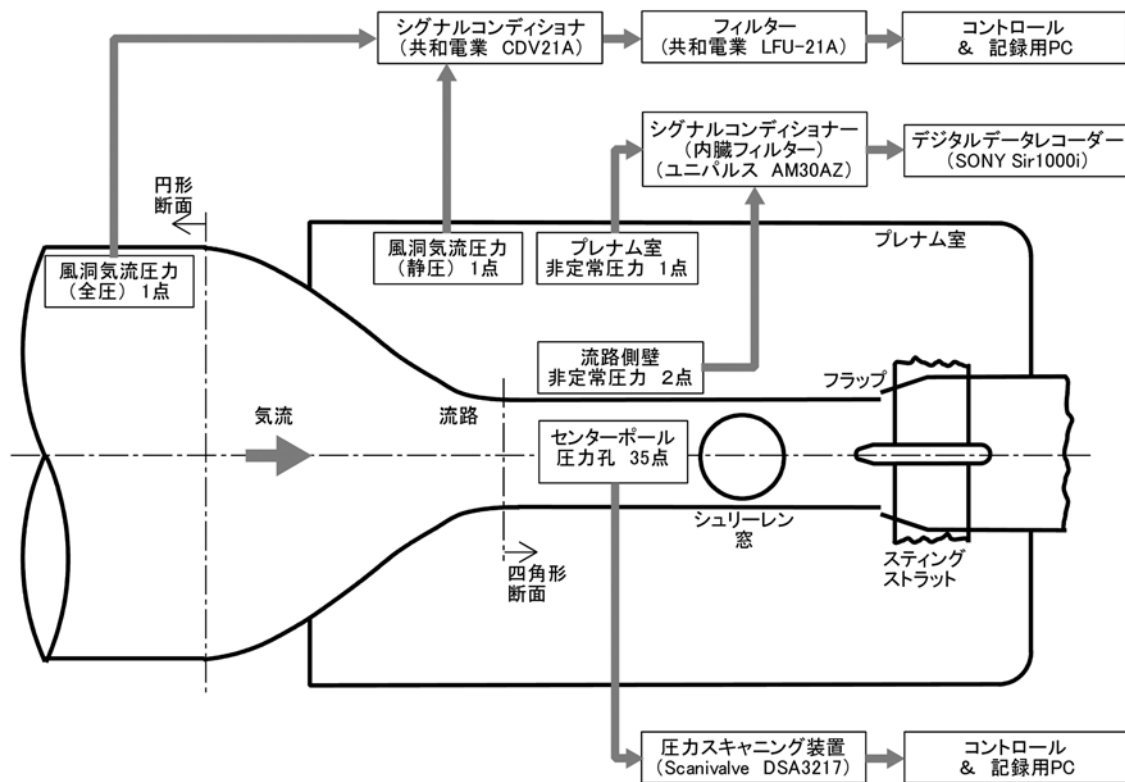


図7 計測系統図

プレナム室内へと引き抜いて風洞を停止させる。風洞模型は一般に高価なため、この打ち出し装置を用いて模型の破損を防ぐ。なお、打ち出し部断面は70 mm×430 mmの長方形で、この寸法の中に収まり、かつ、振動した際の振幅も考慮し、模型打ち出し装置使用の可否を決める。

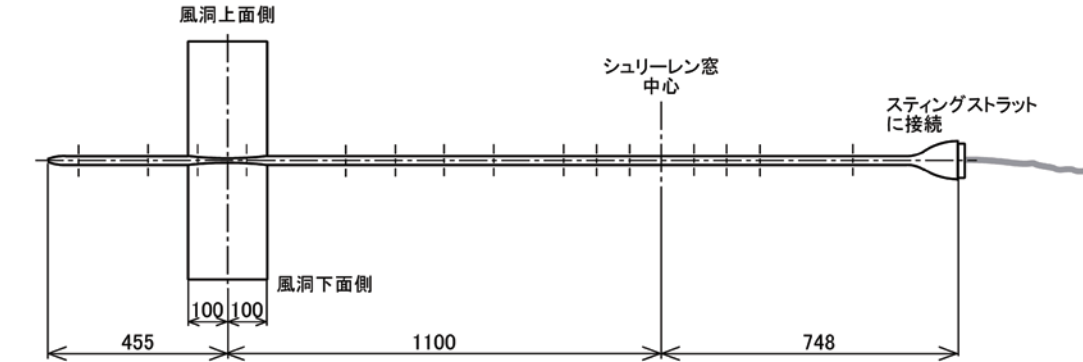
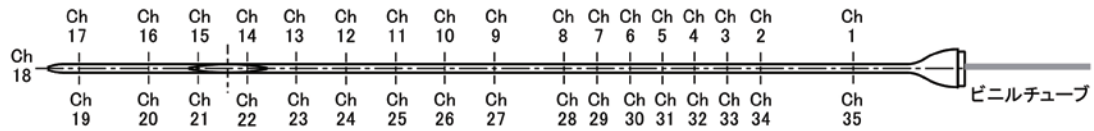
### 3 気流確認試験方法

気流確認試験では、風洞測定部中心軸に沿って設置したセンターポールにより測定部の静圧分布を計測した。併せて、測定部側壁の静圧、プレナム室の圧力を非正常

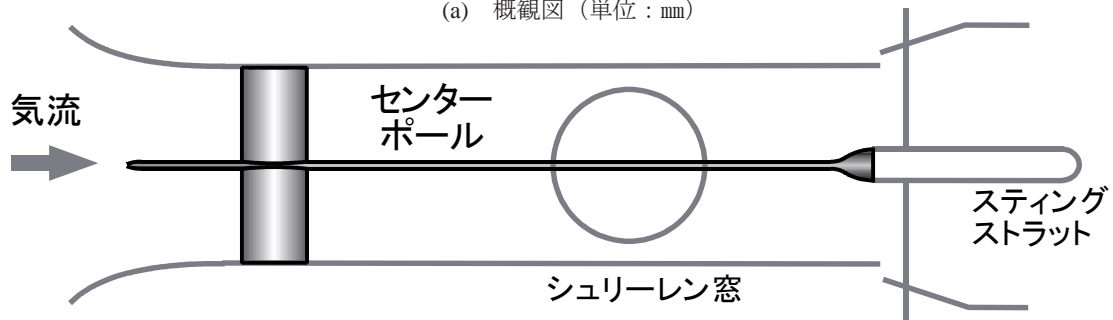
圧力センサーで計測した。また、通常の風洞試験でも計測する集合胴壁面圧力、プレナム室上壁面圧力、並びに集合胴温度も計測した。図7に計測系統図を示すと共に、これらの詳細を以下に示す。

#### 3.1 センターポール圧力計測

図8にセンターポールの概観図並びに風洞測定部に設置した状態の図を示す。センターポールの一端は集合胴に向け、もう一端は風洞測定部後方にあるスティング支持装置に固定する。また、センターポールの途中で円弧翼型断面（翼コード長200 mm、翼厚13%コード）の支



(a) 概観図 (単位: mm)



(b) 風洞に設置した状態

図8 センターポール

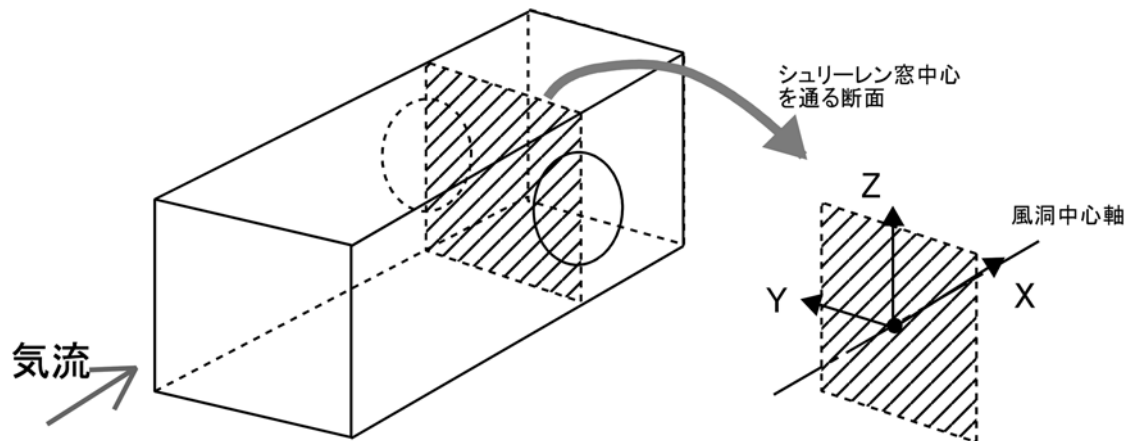


図9 座標系

柱により通路上下壁へと固定する。図9に示すカーテシアン座標系を用いると、センターポールに設けられた圧力孔座標は表2の通りで、合計35点である。これらの圧力孔はステンレスパイプ並びにビニルチューブによりスティンGSTラットの中を通過してプレナム室内に引き出される。これらを Scanivalve 社製 DSA3217(圧力レンジ 50PSI, 16Ch/台)3台に接続する。DSA3217

は LAN により接続したコンピュータにより計測制御し、計測データは当該計測制御コンピュータに保存する。DSA3217 のスキャンスピードはチャンネル間を  $400 \mu \text{sec}$  で、5回のスキャンの値を平均してコンピュータに書き出す。従って、コンピュータに書き出されるデータのサンプリング速度は  $\ll 400 \mu \text{sec} \times 16\text{Ch} \times 5\text{回} = 32\text{msec} \gg$  となる。DSA3217 の参照圧力は大気圧とし、3.3節で

表 2 センターポール圧力孔位置座標

Ch	X[mm]	Y[mm]	Ch	X[mm]	Y[mm]	Ch	X[mm]	Y[mm]
1	482.5	15.0	13	-925.0	15.0	25	-675.0	-15.0
2	247.5	15.0	14	-1050.0	15.0	26	-550.0	-15.0
3	165.0	15.0	15	-1175.0	15.0	27	-425.0	-15.0
4	82.5	15.0	16	-1300.0	15.0	28	-247.5	-15.0
5	0.0	15.0	17	-1475.0	15.0	29	-165.0	-15.0
6	-82.5	15.0	18	-1555.0	0.0	30	-82.5	-15.0
7	-165.0	15.0	19	-1475.0	-15.0	31	0.0	-15.0
8	-247.5	15.0	20	-1300.0	-15.0	32	82.5	-15.0
9	-425.0	15.0	21	-1175.0	-15.0	33	165.0	-15.0
10	-550.0	15.0	22	-1050.0	-15.0	34	247.5	-15.0
11	-675.0	15.0	23	-925.0	-15.0	35	482.5	-15.0
12	-800.0	15.0	24	-800.0	-15.0	何れも Z=0.0[mm] 平面		

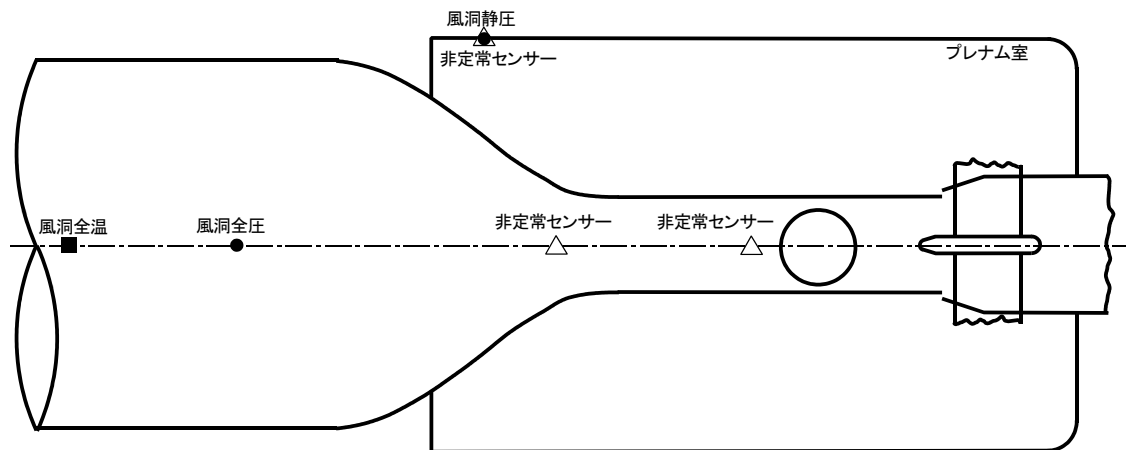


図 10 風洞の圧力計測点

(△：測定部側壁及びプレナム室内非常圧力計測，●/■：風洞気流計測点)

表 3 風洞気流・プレナム室・測定部側壁の圧力・温度計測位置座標

計測種類	X[mm]	Y[mm]	Z[mm]
測定部側壁非常圧力	-1650.0	300.0	0.0
測定部側壁非常圧力	-425.0	300.0	0.0
プレナム室非常圧力	-2100.0	300.0	1300.0
集合胴圧力 (風洞全圧)	-3650.0	-1150.0	0.0
プレナム室圧力 (風洞静圧)	-2100.0	300.0	1300.0
集合胴温度 (風洞全温)	-4715.0	-1150.0	0.0

示す風洞気流計測データの通風前のデータを平均した値を用いた。

### 3.2 測定部側壁並びにプレナム室内圧力計測

図 10 に測定部側壁の圧力計測位置，及びプレナム室内圧力計測位置を示す。表 3 には，図 9 に示す座標系を用いた計測点座標を示す。表に示す通り，測定部側壁の 2ヶ所とプレナム室壁面の 1ヶ所に圧力センサーを設置し，非常圧力計測を実施した。計測は，Kulite 社製 XCQ062 圧力センサー（圧力レンジは，測定部側壁は 100PSI（差圧型），プレナム室壁面は 50PSI（ゲージ圧型））をユニパルス株式会社製 AM30AZ のシグナルコンディショナに接続し，励起電圧 5V で計測した。また，ローパスフ

ルターは AM30AZ 内蔵機能を利用し，1kHz に設定した。シグナルコンディショナの出力は，ソニーマニファクチュアリングシステムズ株式会社製 SiR1000i に 12kHz でデジタルデータ収録した。

### 3.3 風洞気流条件計測

図 10 並びに表 3 に示す位置に圧力並びに温度計測位置を設けている。通常風洞試験では，これらの圧力・温度を標準計測項目として必ず計測する。圧力孔は夫々導管に接続し，プレナム室外に設置された株式会社共和電業製圧力センサー PA-5KB（圧力レンジ 490kPa）に接続する。これらの圧力センサーを株式会社共和電業製シグナルコンディショナ CDV21A に接続し，励起電圧は 2V に設定す



表 4 試験条件

試験 番号	設定 マツハ数	設定全圧(ステップ変化) [kPa]			各ステップ スweep 速度 [kPa/s]
		1st	2nd	3rd	
08300	0.70	150.0	175.0	200.0	5.0
08301	0.70	200.0	225.0	250.0	5.0
08302	0.70	250.0	275.0	300.0	5.0
08303	0.75	150.0	175.0	200.0	5.0
08304	0.75	225.0	250.0	275.0	5.0
08305	0.80	150.0	175.0	200.0	5.0
08306	0.75	200.0	300.0		10.0
08307	0.80	225.0	250.0	275.0	5.0
08308	0.80	200.0	300.0		10.0
08309	0.85	150.0	175.0	200.0	5.0
08310	0.85	225.0	250.0	275.0	5.0
08311	0.85	200.0	300.0		10.0
08312	0.90	150.0	175.0	200.0	5.0
08313	0.90	225.0	250.0	275.0	5.0
08314	0.90	225.0	300.0		5.0
08315	0.95	150.0	175.0	200.0	5.0
08316	0.95	225.0	250.0	275.0	5.0
08317	0.95	225.0	300.0		5.0
08318	0.98	150.0	175.0	200.0	5.0
08319	0.98	225.0	250.0	275.0	5.0
08320	0.98	225.0	300.0		5.0
08321	1.05	150.0	175.0	200.0	5.0
08322	1.05	225.0	250.0	275.0	5.0
08323	1.05	225.0	300.0		5.0
08324	0.82	150.0	175.0	200.0	5.0
08325	0.84	150.0	175.0	200.0	5.0
08326	0.86	150.0	175.0	200.0	5.0
08327	0.88	150.0	175.0	200.0	5.0
08328	0.92	150.0	175.0	200.0	5.0
08329	0.94	150.0	175.0	200.0	5.0
08330	0.96	150.0	175.0	200.0	5.0
08331	1.00	150.0	175.0	200.0	5.0
08332	1.02	150.0	175.0	200.0	5.0
08333	1.04	150.0	175.0	200.0	5.0
08334	1.10	150.0	175.0	200.0	5.0
08335	1.15	150.0	175.0	200.0	5.0
08336	1.20	150.0	175.0	200.0	5.0
08337	0.82	225.0	250.0	275.0	5.0
08338	1.20	225.0	250.0	275.0	5.0
08339	1.20	225.0	300.0		5.0
08340	1.15	225.0	250.0	275.0	5.0
08341	1.15	225.0	300.0		5.0
08342	1.10	225.0	250.0	275.0	5.0
08343	1.10	250.0	300.0		5.0
08344	1.00	225.0	250.0	275.0	5.0
08345	1.00	250.0	300.0		5.0
08346	0.94	225.0	250.0	275.0	5.0
08347	0.94	250.0	300.0		5.0
08348	0.96	225.0	250.0	275.0	5.0
08349	0.96	250.0	300.0		5.0
08350	0.92	275.0	300.0		5.0
08351	0.92	225.0	250.0		5.0

各試験でのステップ整定時保持時間は10.0[s]

る。シグナルコンディショナの後段に(株)共和電業製ローパスフィルター LFU-21A を設置し、10Hz のローパスフィルターを通す。この後、3.2 節で示した非定常圧力計測と同じくソニーマニュファクチャリングシステムズ(株)製 SiR1000i にて 12kHz でデジタルデータ収録する。なお、集合胴内の圧力は気流制御用の圧力センサーと圧力孔を共有しており、導管を分岐させている。プレナム室内圧力については、気流制御用圧力センサーに利用する圧力計測位置はプレナム室の側壁部に設けているが、風洞制御システムの外への信号出力は行われていないため、本報告では取り扱わない。

温度計測は、(株)共和電業製測温抵抗体 DAPS-7036 を渡辺電気工業(株)製抵抗温度変換器 WVP-PB-15S-1 に接続し、上記 SiR1000i にて同時に計測した。

#### 4 計測条件

計測を行った気流条件を表 4 に示す。FWT の通風可能域の中から、通風の頻度が高い領域をカバーするように条件を選んだ。気流確認試験で実施した気流制御は、測定部マッハ数を一定に保って集合胴圧力を変化させる手法をとり、マッハ数と集合胴圧力をパラメータとした表 5 の様な設定値の組み合わせで気流を計測した。なお、集合胴圧力を変える際は、表 4 に示す通りのスイープ速度にて変化させた。一例として、ケース #08312 の、

通風経過時間に対する集合胴圧力  $P_{Set}$  とプレナム室圧力  $P_p$ 、及び、 $P_{Set}$  と  $P_p$  を夫々気流全圧、静圧と仮定して等エントロピー流れの仮定で求めた気流マッハ数  $M$

$$M = \sqrt{\frac{2}{\kappa - 1} \left\{ \left( \frac{P_{Set}}{P_p} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right\}} \quad (4.1)$$

を図 11 に示す。ここで  $\kappa$  は空気の比熱比である。起動直後及びスイープ後、気流が所定の  $P_{Set}$  に整定してから 10 秒間一定の気流条件を保ち、次のスイープもしくは通風停止動作に入る。各ステップでの計測値は DSA3217 による計測では 16Hz、SONY SiR1000i では 250Hz へとダウンサンプリングし、次のスイープもしくは通風停止動作に入る直前 2 秒間の平均値を各ステップの定常値として処理した。

表 5 試験条件パラメータ組み合わせ (○: 計測実施)

		設定全圧 [kPa]						
		150.0	175.0	200.0	225.0	250.0	275.0	300.0
設定 マッハ数	0.70	○	○	○	○	○	○	○
	0.75	○	○	○	○	○	○	○
	0.80	○	○	○	○	○	○	○
	0.82	○	○	○	○	○	○	
	0.84	○	○	○				
	0.85	○	○	○	○	○	○	○
	0.86	○	○	○				
	0.88	○	○	○				
	0.90	○	○	○	○	○	○	○
	0.92	○	○	○	○	○	○	○
	0.94	○	○	○	○	○	○	○
	0.95	○	○	○	○	○	○	○
	0.96	○	○	○	○	○	○	○
	0.98	○	○	○	○	○	○	○
	1.00	○	○	○	○	○	○	○
	1.02	○	○	○				
	1.04	○	○	○				
	1.05	○	○	○	○	○	○	○
	1.10	○	○	○	○	○	○	○
1.15	○	○	○	○	○	○	○	
1.20	○	○	○	○	○	○	○	

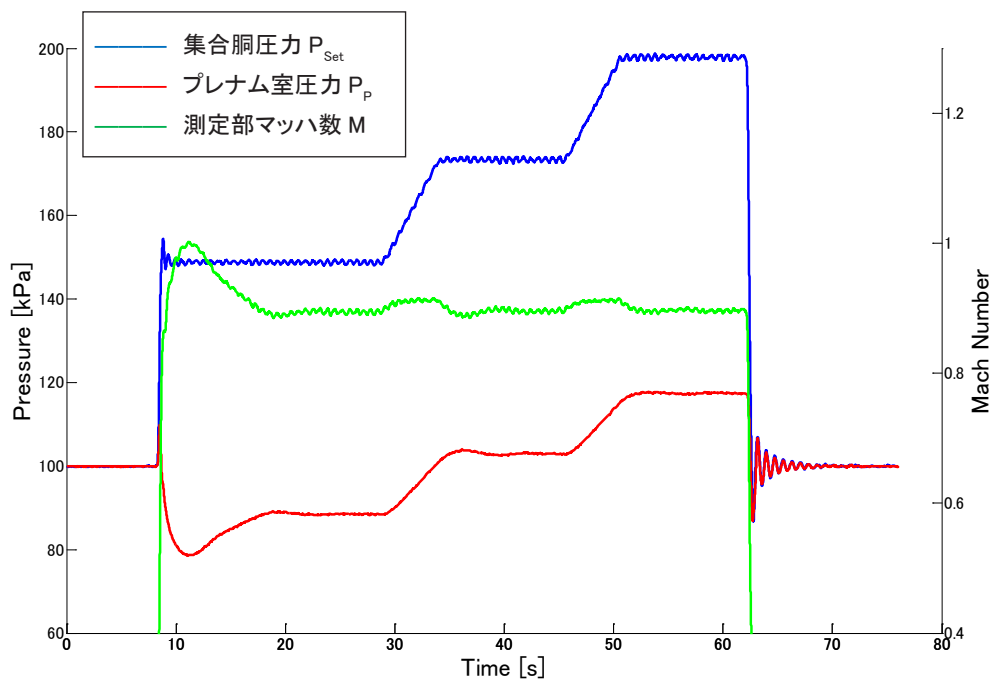


図 11 試験ケース # 08312 (マッハ数 0.90) の気流状態時間履歴

表 6 風洞改修における風洞精度要求

制御種類	精度仕様
定値制御	目標値の 1% 以内, 標準偏差 : 0.3% FS 以内
スweep制御	標準偏差 : 目標値の 5% 以内
風洞制御に用いる圧力センサー : Rosemount Model 1332 A18 圧力レンジ 75PSI (絶対圧型)	

## 5 計測結果並びに考察

### 5.1 気流計測値の風洞制御仕様からの評価

文献 7 より, 平成 5 ~ 8 年に実施した風洞改修における風洞精度要求は表 6 に示す通りである. 風洞制御の保安上, 風洞制御に用いる圧力センサーのシステム外に接続することは避け, 3.3 節の通りに別途圧力センサー (株共和電業製圧力センサー PA-5KB (圧力レンジ 490kPa, 精度  $\pm 0.49$ kPa)) を設けて計測している. これらの計測値に表 6 の基準を適用し, 各試験ケースの計測結果を評価したのが表 7 である. 表中, 灰色で塗りつぶされているセルが目標に達していない.

プレナム室内圧力については, 上記圧力センサー PA-5KB の精度は圧力目標値に対して  $\pm 0.2 \sim 0.8\%$  の誤差範囲に対応し, これを考慮すれば今回計測した全てのケースで要求精度範囲を満足し得ることが分かる. 集合胴圧力に関しては, 目標値を気流全圧としていることによる《気流全圧—集合胴壁面圧力》の誤差が含まれ

る. この誤差を見積もったのが表 8 である. ここで, 集合胴 (断面積  $A_{Set}$  2.77 m<sup>2</sup>) ~ 測定部 (断面積  $A_{TS}$  0.360 m<sup>2</sup>) の風洞通路内では, 目標気流全圧の下で 1 次元等エントロピー流れに従って状態量に変化し, 測定部で目標マッハ数になるものとした. 気流設定マッハ数  $M_{TS-C}$  と測定部断面積  $A_{TS}$  より, 等エントロピー流れのマッハ数と断面積の関係を表す以下の式を用いて臨界断面積  $A^*$  が求まる.

$$\frac{A_{TS}}{A^*} = \frac{1}{M_{TS-C}} \left\{ \frac{2}{\kappa+1} \left( 1 + \frac{\kappa-1}{2} M_{TS-C}^2 \right) \right\}^{(\kappa+1)/2(\kappa-1)} \quad (5.1)$$

この  $A^*$  と  $A_{Set}$  より, 式 (5.1) と同様な式を構成し, 集合胴気流設定マッハ数  $M_{Set-C}$  を繰り返し計算により求める.

$$\frac{A_{Set}}{A^*} = \frac{1}{M_{Set-C}} \left\{ \frac{2}{\kappa+1} \left( 1 + \frac{\kappa-1}{2} M_{Set-C}^2 \right) \right\}^{(\kappa+1)/2(\kappa-1)} \quad (5.2)$$

表7 風洞精度要求に対する達成度(定値制御) (続く)

マツハ数	集合胴圧力						プレナム室圧力						通風番号		
	目標 [kPa]	実際 [kPa]	目標到達率	センサー誤差率	標準偏差 [kPa]	標準偏差対精度要求値 (±1.55kPa)	目標 [kPa]	実際 [kPa]	目標到達率	センサー誤差率	標準偏差 [kPa]	標準偏差対精度要求値 (±1.55kPa)			
0.70	150.0	149.0	99.3%	0.3%	0.154	9.9%	108.1	107.7	99.6%	0.5%	0.072	4.6%	08300		
	175.0	173.4	99.1%	0.3%	0.292	18.8%	126.2	125.2	99.2%	0.4%	0.097	6.2%			
	200.0	198.1	99.1%	0.2%	0.341	21.9%	144.2	142.9	99.1%	0.3%	0.184	11.8%			
	200.0	197.9	98.9%	0.2%	0.222	14.3%	144.2	143.1	99.2%	0.3%	0.094	6.1%			
	225.0	222.4	98.8%	0.2%	0.290	18.7%	162.2	160.6	99.0%	0.3%	0.121	7.8%			
	250.0	247.0	98.8%	0.2%	0.492	31.7%	180.2	178.4	99.0%	0.3%	0.162	10.4%			
	250.0	247.4	99.0%	0.2%	0.211	13.6%	180.2	179.7	99.1%	0.3%	0.086	5.5%			
	275.0	272.1	98.9%	0.2%	0.468	30.2%	198.3	196.5	99.1%	0.2%	0.171	11.0%			
300.0	296.4	98.8%	0.2%	0.372	24.0%	216.3	214.2	99.0%	0.2%	0.123	7.9%				
0.75	150.0	149.0	99.3%	0.3%	0.282	18.2%	103.3	103.1	99.8%	0.5%	0.089	5.7%	08303		
	175.0	173.5	99.1%	0.3%	0.187	12.0%	120.5	120.0	99.6%	0.4%	0.143	9.2%			
	200.0	198.2	99.1%	0.2%	0.443	28.5%	137.7	136.9	99.4%	0.4%	0.180	11.6%			
	225.0	222.2	98.8%	0.2%	0.188	12.1%	154.9	153.5	99.1%	0.3%	0.062	4.0%			
	250.0	246.6	98.7%	0.2%	0.464	29.9%	172.1	170.4	99.0%	0.3%	0.196	12.6%			
	275.0	271.0	98.5%	0.2%	0.461	29.7%	189.4	187.3	98.9%	0.3%	0.096	6.2%			
	200.0	197.6	98.8%	0.2%	0.208	13.4%	137.7	136.4	99.1%	0.4%	0.162	10.5%			
	300.0	295.5	98.5%	0.2%	0.518	33.4%	206.6	204.1	98.8%	0.2%	0.109	7.0%			
0.80	150.0	148.7	99.1%	0.3%	0.316	20.3%	98.4	98.1	99.7%	0.5%	0.102	6.6%	08305		
	175.0	173.1	98.9%	0.3%	0.325	21.0%	114.8	114.1	99.4%	0.4%	0.150	9.6%			
	200.0	197.7	98.9%	0.2%	0.340	21.9%	131.2	130.2	99.3%	0.4%	0.078	5.0%			
	225.0	221.9	98.6%	0.2%	0.227	14.6%	147.6	146.3	99.1%	0.3%	0.102	6.6%			
	250.0	246.7	98.7%	0.2%	0.533	34.3%	164.0	162.2	98.9%	0.3%	0.125	8.0%			
	275.0	270.8	98.5%	0.2%	0.471	30.4%	180.4	178.5	98.9%	0.3%	0.126	8.1%			
	200.0	197.3	98.7%	0.2%	0.441	28.4%	131.2	130.2	99.2%	0.4%	0.070	4.5%			
	300.0	295.3	98.4%	0.2%	0.603	38.9%	196.8	194.4	98.8%	0.2%	0.118	7.6%			
0.82	150.0	149.1	99.4%	0.3%	0.358	23.1%	96.5	96.2	99.8%	0.5%	0.076	4.9%	08324		
	175.0	173.5	99.2%	0.3%	0.425	27.4%	112.5	112.1	99.6%	0.4%	0.074	4.8%			
	200.0	198.2	99.1%	0.2%	0.308	19.9%	128.6	128.0	99.5%	0.4%	0.063	4.1%			
	225.0	222.2	98.8%	0.2%	0.335	21.6%	144.7	143.5	99.2%	0.3%	0.094	6.0%			
	250.0	246.7	98.7%	0.2%	0.431	27.8%	160.8	159.2	99.1%	0.3%	0.048	3.1%			
	275.0	271.4	98.7%	0.2%	0.365	23.5%	176.8	175.1	99.0%	0.3%	0.135	8.7%			
	200.0	197.8	98.9%	0.2%	0.294	18.9%	126.0	125.0	99.2%	0.4%	0.110	7.1%			
	300.0	295.8	98.6%	0.2%	0.572	36.9%	187.1	185.0	98.9%	0.3%	0.116	7.5%			
0.84	150.0	148.8	99.2%	0.3%	0.390	25.2%	94.5	94.1	99.5%	0.5%	0.068	4.4%	08325		
	175.0	173.3	99.0%	0.3%	0.382	24.6%	110.2	109.5	99.3%	0.4%	0.074	4.8%			
	200.0	197.8	98.9%	0.2%	0.294	18.9%	126.0	125.0	99.2%	0.4%	0.110	7.1%			
	150.0	148.7	99.1%	0.3%	0.304	19.6%	93.5	93.5	100.0%	0.5%	0.113	7.3%		08309	
	175.0	173.2	99.0%	0.3%	0.379	24.4%	109.1	108.6	99.5%	0.4%	0.054	3.5%			
	200.0	197.6	98.8%	0.2%	0.312	20.1%	124.7	123.8	99.3%	0.4%	0.108	7.0%			
	225.0	222.0	98.7%	0.2%	0.433	27.9%	140.3	139.1	99.2%	0.3%	0.089	5.8%			
	250.0	246.5	98.6%	0.2%	0.500	32.3%	155.9	154.5	99.1%	0.3%	0.093	6.0%			
275.0	271.2	98.6%	0.2%	0.493	31.8%	171.5	169.7	99.0%	0.3%	0.108	7.0%				
200.0	197.7	98.8%	0.2%	0.403	26.0%	124.7	123.9	99.3%	0.4%	0.078	5.0%				
300.0	295.8	98.6%	0.2%	0.572	36.9%	187.1	185.0	98.9%	0.3%	0.116	7.5%				
0.86	150.0	148.6	99.0%	0.3%	0.424	27.3%	92.6	92.2	99.6%	0.5%	0.063	4.1%	08326		
	175.0	173.3	99.0%	0.3%	0.311	20.0%	108.0	107.3	99.4%	0.5%	0.098	6.3%			
	200.0	197.9	99.0%	0.2%	0.462	29.8%	123.4	122.4	99.2%	0.4%	0.118	7.6%			
	150.0	148.6	99.1%	0.3%	0.386	24.9%	90.6	90.3	99.7%	0.5%	0.042	2.7%		08327	
	175.0	173.3	99.0%	0.3%	0.398	25.6%	105.7	105.1	99.4%	0.5%	0.085	5.5%			
	200.0	198.0	99.0%	0.2%	0.330	21.3%	120.8	120.1	99.4%	0.4%	0.080	5.1%			
	150.0	148.7	99.1%	0.3%	0.479	30.9%	88.7	88.5	99.7%	0.6%	0.094	6.0%			08312
	175.0	173.3	99.0%	0.3%	0.411	26.5%	103.5	102.9	99.5%	0.5%	0.100	6.5%			
200.0	198.0	99.0%	0.2%	0.408	26.3%	118.3	117.4	99.3%	0.4%	0.084	5.4%				
225.0	222.3	98.8%	0.2%	0.334	21.5%	133.0	132.0	99.3%	0.4%	0.057	3.7%				
250.0	247.1	98.8%	0.2%	0.676	43.5%	147.8	146.7	99.2%	0.3%	0.077	5.0%				
275.0	271.3	98.7%	0.2%	0.362	23.4%	162.6	161.1	99.1%	0.3%	0.105	6.8%				
225.0	222.5	98.9%	0.2%	0.417	26.9%	133.0	132.0	99.2%	0.4%	0.102	6.6%				
300.0	296.2	98.7%	0.2%	0.449	28.9%	177.4	175.6	99.0%	0.3%	0.098	6.3%				
0.92	150.0	148.5	99.0%	0.3%	0.275	17.7%	86.8	86.5	99.7%	0.6%	0.078	5.0%	08328		
	175.0	173.2	98.9%	0.3%	0.493	31.8%	101.2	100.7	99.5%	0.5%	0.105	6.7%			
	200.0	197.8	98.9%	0.2%	0.384	24.8%	115.7	114.7	99.1%	0.4%	0.098	6.3%			
	225.0	222.9	99.3%	0.2%	0.390	25.1%	130.2	129.3	99.1%	0.4%	0.193	12.4%			
	250.0	247.4	99.3%	0.2%	0.599	38.6%	144.6	143.6	99.0%	0.3%	0.150	9.7%			
	275.0	272.0	98.9%	0.2%	0.167	10.7%	159.1	157.6	99.1%	0.3%	0.087	5.6%			
	300.0	296.4	98.8%	0.2%	0.555	35.8%	173.5	171.7	98.9%	0.3%	0.158	10.2%			
	300.0	296.4	98.8%	0.2%	0.555	35.8%	173.5	171.7	98.9%	0.3%	0.158	10.2%			
0.94	150.0	148.7	99.2%	0.3%	0.326	21.0%	84.9	84.7	99.8%	0.6%	0.108	7.0%	08329		
	175.0	173.2	99.0%	0.3%	0.373	24.1%	99.0	98.5	99.4%	0.5%	0.051	3.3%			
	200.0	197.9	99.0%	0.2%	0.416	26.8%	113.2	112.1	99.1%	0.4%	0.108	7.0%			
	225.0	222.7	99.0%	0.2%	0.405	26.1%	127.3	126.3	99.2%	0.4%	0.134	8.6%			
	250.0	247.1	98.8%	0.2%	0.564	36.3%	141.4	140.4	99.3%	0.3%	0.200	12.9%			
	275.0	271.6	98.8%	0.2%	0.627	40.4%	155.6	154.1	99.1%	0.3%	0.152	9.8%			
	250.0	247.4	99.0%	0.2%	0.569	36.7%	141.4	140.4	99.2%	0.3%	0.149	9.6%			
	300.0	296.3	98.8%	0.2%	0.455	29.3%	169.7	168.3	99.2%	0.3%	0.083	5.4%			
0.95	150.0	149.0	99.3%	0.3%	0.418	26.9%	83.9	84.3	100.4%	0.6%	0.121	7.8%	08315		
	175.0	173.7	99.2%	0.3%	0.392	25.3%	97.9	97.9	99.9%	0.5%	0.139	9.0%			
	200.0	198.2	99.1%	0.2%	0.439	28.3%	111.9	111.2	99.4%	0.4%	0.094	6.0%			
	225.0	222.2	98.7%	0.2%	0.289	18.6%	125.9	124.8	99.1%	0.4%	0.053	3.4%			
	250.0	246.7	98.7%	0.2%	0.208	13.4%	139.9	138.7	99.2%	0.4%	0.059	3.8%			
	275.0	271.1	98.6%	0.2%	0.437	28.2%	153.9	152.1	98.9%	0.3%	0.196	12.6%			
	225.0	222.6	98.9%	0.2%	0.311	20.0%	125.9	124.8	99.2%	0.4%	0.074	4.8%			
	300.0	296.1	98.7%	0.2%	0.535	34.5%	167.8	165.8	98.8%	0.3%	0.096	6.2%			

表7 風洞精度要求に対する達成度 (定値制御) (続き終わり)

マッハ数	集合胴圧力						プレナム室圧力						通風番号
	目標 [kPa]	実際 [kPa]	目標到達率	センサー誤差率	標準偏差 [kPa]	標準偏差対精度要求値 (±1.55kPa)	目標 [kPa]	実際 [kPa]	目標到達率	センサー誤差率	標準偏差 [kPa]	標準偏差対精度要求値 (±1.55kPa)	
0.96	150.0	148.7	99.1%	0.3%	0.541	34.9%	83.0	82.7	99.7%	0.6%	0.086	5.5%	08330
	175.0	173.0	98.9%	0.3%	0.276	17.8%	96.8	96.1	99.2%	0.5%	0.052	3.4%	
	200.0	197.6	98.8%	0.2%	0.414	26.7%	110.6	109.5	99.0%	0.4%	0.154	9.9%	
	225.0	222.7	99.0%	0.2%	0.373	24.1%	124.5	123.6	99.3%	0.4%	0.166	10.7%	
	250.0	247.2	98.9%	0.2%	0.552	35.6%	138.3	137.2	99.2%	0.4%	0.161	10.4%	
	275.0	271.7	98.8%	0.2%	0.490	31.6%	152.1	150.9	99.2%	0.3%	0.132	8.5%	
	300.0	296.6	98.9%	0.2%	0.725	46.7%	166.0	164.2	98.9%	0.3%	0.142	9.2%	
0.98	150.0	149.2	99.5%	0.3%	0.473	30.5%	81.1	81.5	100.5%	0.6%	0.094	6.1%	08318
	175.0	173.4	99.1%	0.3%	0.459	29.6%	94.6	94.5	99.8%	0.5%	0.125	8.0%	
	200.0	198.2	99.1%	0.2%	0.478	30.8%	108.1	107.7	99.6%	0.5%	0.100	6.5%	
	225.0	222.8	99.0%	0.2%	0.324	20.9%	121.7	120.8	99.3%	0.4%	0.056	3.6%	
	250.0	247.1	98.8%	0.2%	0.535	34.5%	135.2	134.1	99.2%	0.4%	0.107	6.9%	
	275.0	271.7	98.8%	0.2%	0.443	28.5%	148.7	147.3	99.1%	0.3%	0.117	7.5%	
	300.0	296.2	98.8%	0.2%	0.457	29.5%	161.7	160.8	99.3%	0.4%	0.095	6.1%	
1.00	150.0	148.5	99.0%	0.3%	0.441	28.4%	79.2	79.1	99.8%	0.6%	0.090	5.8%	08331
	175.0	172.9	98.8%	0.3%	0.334	21.5%	92.4	91.9	99.4%	0.5%	0.079	5.1%	
	200.0	197.6	98.8%	0.2%	0.492	31.7%	105.7	104.9	99.2%	0.5%	0.134	8.6%	
	225.0	222.7	99.0%	0.2%	0.469	30.3%	118.9	117.9	99.2%	0.4%	0.160	10.3%	
	250.0	247.4	98.9%	0.2%	0.553	35.7%	132.1	131.3	99.4%	0.4%	0.112	7.2%	
	275.0	271.8	98.9%	0.2%	0.658	42.4%	145.3	144.0	99.1%	0.3%	0.300	19.3%	
	300.0	296.4	98.8%	0.2%	0.439	28.3%	132.1	130.6	98.9%	0.4%	0.065	4.2%	
1.02	150.0	148.7	99.1%	0.3%	0.377	24.3%	77.4	77.5	100.1%	0.6%	0.086	5.6%	08332
	175.0	173.2	99.0%	0.3%	0.426	27.4%	90.3	90.0	99.6%	0.5%	0.132	8.5%	
	200.0	197.6	98.8%	0.2%	0.346	22.3%	103.2	102.6	99.4%	0.5%	0.079	5.1%	
	150.0	148.7	99.1%	0.3%	0.601	38.7%	75.6	75.7	100.1%	0.6%	0.093	6.0%	
	175.0	173.2	99.0%	0.3%	0.421	27.1%	88.2	88.0	99.8%	0.6%	0.108	6.9%	
	200.0	197.6	98.8%	0.2%	0.486	31.3%	100.8	100.3	99.6%	0.5%	0.072	4.7%	
	150.0	149.1	99.4%	0.3%	0.469	30.2%	74.7	75.4	101.0%	0.7%	0.142	9.1%	
1.05	175.0	173.6	99.2%	0.3%	0.408	26.3%	87.1	87.4	100.3%	0.6%	0.102	6.6%	
	200.0	198.1	99.1%	0.2%	0.370	23.8%	99.6	99.5	100.0%	0.5%	0.062	4.0%	
	225.0	222.7	99.0%	0.2%	0.355	22.9%	112.0	111.6	99.6%	0.4%	0.107	6.9%	
	250.0	247.1	98.8%	0.2%	0.621	40.0%	124.5	123.9	99.6%	0.4%	0.139	9.0%	
	275.0	271.5	98.7%	0.2%	0.635	40.9%	136.9	136.2	99.5%	0.4%	0.121	7.8%	
	225.0	222.4	98.9%	0.2%	0.331	21.4%	112.0	111.5	99.5%	0.4%	0.129	8.3%	
	300.0	296.1	98.7%	0.2%	0.456	29.4%	149.4	148.2	99.2%	0.3%	0.114	7.3%	
1.10	150.0	148.7	99.2%	0.3%	0.492	31.7%	70.3	70.5	100.3%	0.7%	0.098	6.3%	
	175.0	173.2	98.9%	0.3%	0.449	29.0%	82.0	81.9	99.9%	0.6%	0.114	7.3%	
	200.0	197.6	98.8%	0.2%	0.488	31.4%	93.7	93.5	99.8%	0.5%	0.081	5.2%	
	225.0	222.8	99.0%	0.2%	0.206	13.3%	105.4	105.3	99.9%	0.5%	0.060	3.9%	
	250.0	247.4	99.0%	0.2%	0.671	43.2%	117.1	116.8	99.7%	0.4%	0.103	6.6%	
	275.0	271.7	98.8%	0.2%	0.604	38.9%	128.8	128.1	99.5%	0.4%	0.076	4.9%	
	300.0	296.5	98.8%	0.2%	0.464	29.9%	140.5	139.6	99.3%	0.3%	0.123	8.0%	
1.15	150.0	148.5	99.0%	0.3%	0.486	31.3%	66.0	66.3	100.4%	0.7%	0.074	4.8%	
	175.0	173.0	98.9%	0.3%	0.363	23.4%	77.0	77.1	100.2%	0.6%	0.058	3.7%	
	200.0	197.7	98.9%	0.2%	0.495	31.9%	88.0	87.9	100.0%	0.6%	0.049	3.2%	
	225.0	222.9	99.1%	0.2%	0.457	29.5%	99.0	98.8	99.9%	0.5%	0.152	9.8%	
	250.0	247.5	99.0%	0.2%	0.578	37.2%	110.0	109.8	99.8%	0.4%	0.094	6.1%	
	275.0	272.1	98.9%	0.2%	0.293	19.9%	121.0	120.6	99.7%	0.4%	0.027	1.7%	
	225.0	222.6	99.0%	0.2%	0.462	29.7%	99.0	98.6	99.6%	0.5%	0.064	4.1%	
300.0	296.5	98.8%	0.2%	0.736	47.4%	131.9	130.9	99.2%	0.4%	0.074	4.8%		
1.20	150.0	148.6	99.1%	0.3%	0.461	29.7%	61.9	62.3	100.7%	0.8%	0.061	4.0%	
	175.0	173.1	98.9%	0.3%	0.281	18.1%	72.2	72.5	100.4%	0.7%	0.108	7.0%	
	200.0	197.8	98.9%	0.2%	0.369	23.8%	82.5	82.6	100.2%	0.6%	0.078	5.0%	
	225.0	222.2	98.8%	0.2%	0.361	23.3%	92.8	92.8	100.0%	0.5%	0.092	5.9%	
	250.0	246.6	98.6%	0.2%	0.526	33.9%	103.1	102.6	99.6%	0.5%	0.095	6.1%	
	275.0	271.0	98.5%	0.2%	0.566	36.5%	113.4	112.9	99.5%	0.4%	0.078	5.0%	
	225.0	222.8	99.0%	0.2%	0.448	28.9%	92.8	93.0	100.2%	0.5%	0.090	5.8%	
300.0	296.4	98.8%	0.2%	0.725	46.8%	123.7	123.2	99.6%	0.4%	0.033	2.1%		

求めた  $M_{Set-C}$  と気流設定全圧  $P_{o-C}$  から、等エントロピーの関係式を用いて以下の通り集合胴目標圧力  $P_{Set-C}$  を求める。

$$P_{Set-C} = \frac{P_{o-C}}{\left(1 + \frac{\kappa-1}{2} M_{Set-C}^2\right)^{\kappa/(\kappa-1)}} \quad (5.3)$$

これにより、精度要求達成度が改善されていることが分

かる。精度要求を未だ満たしていない気流ケースも、上記の(株)共和電業製圧力センサー PA-5KB のセンサー精度 (対風洞全圧で ± 0.15 ~ 0.3% に対応) を考慮すれば、要求精度範囲を満足し得る。定値制御の標準偏差に関しては、表7より、何れのケースも精度要求 (± 1.55kPa 以内) を達成していることが分かる。

表 8 全圧精度要求に対する補正と達成度 (続く)

測定部 マツハ数 (設定値)	全圧[kPa] (設定値)	集合胴 マツハ数	設定値から 求めた 集合胴圧力 [kPa]	計測した 集合胴圧力 [kPa]	目標達成率 [%]	通風 番号	
0.70	150.0	0.0716	149.5	149.0	99.7%	08300	
	175.0		174.4	173.4	99.4%		
	200.0		199.3	198.1	99.4%		
	200.0			199.3	197.9	99.3%	08301
	225.0		224.2	222.4	99.2%		
	250.0		249.1	247.0	99.1%		
	250.0			249.1	247.4	99.3%	08302
	275.0		274.0	272.1	99.3%		
	300.0		298.9	296.4	99.2%		
0.75	150.0	0.0738	149.4	149.0	99.7%	08303	
	175.0		174.3	173.5	99.5%		
	200.0		199.2	198.2	99.5%		
	225.0		224.1	222.2	99.1%	08304	
	250.0		249.0	246.6	99.0%		
	275.0		274.0	271.0	98.9%		
	200.0			199.2	197.6	99.2%	08306
	300.0		298.9	295.5	98.9%		
	0.80		150.0	0.0756	149.4	148.7	
175.0		174.3	173.1		99.3%		
200.0		199.2	197.7		99.3%		
225.0		224.1	221.9		99.0%	08307	
250.0		249.0	246.7		99.1%		
275.0		273.9	270.8		98.9%		
200.0			199.2		197.3	99.1%	08308
300.0		298.8	295.3		98.8%		
0.82		150.0	0.0762		149.4	149.1	
	175.0	174.3		173.5	99.6%		
	200.0	199.2		198.2	99.5%		
	225.0	224.1		222.2	99.2%	08337	
	250.0	249.0		246.7	99.1%		
	275.0	273.9		271.4	99.1%		
0.84	150.0	0.0767	149.4	148.8	99.6%	08325	
	175.0		174.3	173.3	99.5%		
	200.0		199.2	197.8	99.3%		
0.85	150.0	0.0770	149.4	148.7	99.5%	08309	
	175.0		174.3	173.2	99.4%		
	200.0		199.2	197.6	99.2%		
	225.0		224.1	222.0	99.1%	08310	
	250.0		249.0	246.5	99.0%		
	275.0		273.9	271.2	99.0%		
	200.0			199.2	197.7	99.2%	08311
	300.0		298.8	295.8	99.0%		
	0.86		150.0	0.0772	149.4	148.6	
175.0		174.3	173.3		99.5%		
200.0		199.2	197.9		99.4%		
0.88	150.0	0.0776	149.4	148.6	99.5%	08327	
	175.0		174.3	173.3	99.4%		
	200.0		199.2	198.0	99.4%		
0.90	150.0	0.0779	149.4	148.7	99.5%	08312	
	175.0		174.3	173.3	99.4%		
	200.0		199.2	198.0	99.4%		
	225.0		224.0	222.3	99.2%	08313	
	250.0		248.9	247.1	99.3%		
	275.0		273.8	271.3	99.1%		
	225.0			224.0	222.5	99.3%	08314
	300.0		298.7	296.2	99.1%		
	0.92		150.0	0.0782	149.4	148.5	
175.0		174.3	173.2		99.4%		
200.0		199.1	197.8		99.3%		
225.0		224.0	222.9		99.5%	08351	
250.0		248.9	247.4		99.4%		
275.0		273.8	272.0		99.3%		
300.0		298.7	296.4		99.2%	08350	
0.94	150.0	0.0784	149.4	148.7	99.6%	08329	
	175.0		174.2	173.2	99.4%		
	200.0		199.1	197.9	99.4%		
	225.0		224.0	222.7	99.4%	08346	
	250.0		248.9	247.1	99.3%		
	275.0		273.8	271.6	99.2%		
	250.0			248.9	247.4	99.4%	08347
	300.0		298.7	296.3	99.2%		
	0.95		150.0	0.0785	149.4	149.0	
175.0		174.2	173.7		99.7%		
200.0		199.1	198.2		99.5%		
225.0		224.0	222.2		99.2%	08316	
250.0		248.9	246.7		99.1%		
275.0		273.8	271.1		99.0%		
225.0			224.0		222.6	99.3%	08317
300.0		298.7	296.1		99.1%		

表 8 全圧精度要求に対する補正と達成度 (続き終わり)

測定部 マツハ数 (設定値)	全圧[kPa] (設定値)	集合胴 マツハ数	設定値から 求めた 集合胴圧力 [kPa]	計測した 集合胴圧力 [kPa]	目標達成率 [%]	通風 番号
0.96	150.0	0.0785	149.4	148.7	99.5%	08330
	175.0		174.2	173.0	99.3%	
	200.0		199.1	197.6	99.2%	
	225.0		224.0	222.7	99.4%	08348
	250.0		248.9	247.2	99.3%	
	275.0		273.8	271.7	99.2%	
	300.0		248.9	247.6	99.5%	08349
298.7	296.6	99.3%				
0.98	150.0	0.0786	149.4	149.2	99.9%	08318
	175.0		174.2	173.4	99.5%	
	200.0		199.1	198.2	99.5%	
	225.0		224.0	222.8	99.4%	08319
	250.0		248.9	247.1	99.3%	
	275.0		273.8	271.7	99.2%	
	300.0		224.0	222.4	99.3%	08320
296.7	296.2	99.1%				
1.00	150.0	0.0786	149.4	148.5	99.4%	08331
	175.0		174.2	172.9	99.2%	
	200.0		199.1	197.6	99.2%	
	225.0		224.0	222.7	99.4%	08344
	250.0		248.9	247.4	99.4%	
	275.0		273.8	271.8	99.3%	
	300.0		248.9	247.2	99.3%	08345
296.7	296.4	99.2%				
1.02	150.0	0.0786	149.4	148.7	99.5%	08332
	175.0		174.2	173.2	99.4%	
	200.0		199.1	197.6	99.2%	
1.04	150.0	0.0785	149.4	148.7	99.6%	08333
	175.0		174.2	173.2	99.4%	
	200.0		199.1	197.6	99.2%	
1.05	150.0	0.0785	149.4	149.1	99.8%	08321
	175.0		174.2	173.6	99.7%	
	200.0		199.1	198.1	99.5%	
	225.0		224.0	222.7	99.4%	08322
	250.0		248.9	247.1	99.3%	
	275.0		273.8	271.5	99.2%	
	300.0		224.0	222.4	99.3%	08323
296.7	296.1	99.1%				
1.10	150.0	0.0780	149.4	148.7	99.6%	08334
	175.0		174.3	173.2	99.4%	
	200.0		199.2	197.6	99.2%	
	225.0		224.0	222.8	99.5%	08342
	250.0		248.9	247.4	99.4%	
	275.0		273.8	271.7	99.2%	
	300.0		248.9	247.5	99.4%	08343
296.7	296.5	99.3%				
1.15	150.0	0.0772	149.4	148.5	99.4%	08335
	175.0		174.3	173.0	99.3%	
	200.0		199.2	197.7	99.3%	
	225.0		224.1	222.9	99.5%	08340
	250.0		249.0	247.5	99.4%	
	275.0		273.9	272.1	99.4%	
	300.0		224.1	222.6	99.4%	08341
296.8	296.5	99.2%				
1.20	150.0	0.0762	149.4	148.6	99.5%	08336
	175.0		174.3	173.1	99.3%	
	200.0		199.2	197.8	99.3%	
	225.0		224.1	222.2	99.2%	08338
	250.0		249.0	246.6	99.0%	
	275.0		273.9	271.0	98.9%	
	300.0		224.1	222.8	99.4%	08339
296.8	296.4	99.2%				

全圧スイープ制御時の風洞圧力の計測例は図 12 のようになる。ここで、圧力値が低周波数(約 1 Hz)で波打っているのは、風洞制御の結果による。全圧スイープ制御の目標値との比較において、スイープ制御の目標値データを時系列で計測できるシステムにはなっておらず、図 12 に示す結果に対応するスイープ目標値を明確に特定することは不可能である。一方、スイープ制御の始点及び終点の目標値は、スイープ前後の定値部での目標値に等しく、スイープ時はスイープ速度一定で気流条件が変化するとする。これらの仮定を与え

ると、スイープ制御目標値の不明な情報はスイープの始点及び終点のタイミングだけである。これらのタイミングはケース毎に結果を眺めて決定した。これらの値を基にし、図 12 に対して目標値を描画したものが図 13 になる。標準偏差の大部分は目標値からの計測値の偏差分になっていることが分かり、スイープの前後で急激に誤差が拡大するという傾向は見られず、スイープタイミングを目の目で決定したことによる影響は小さいと考える。

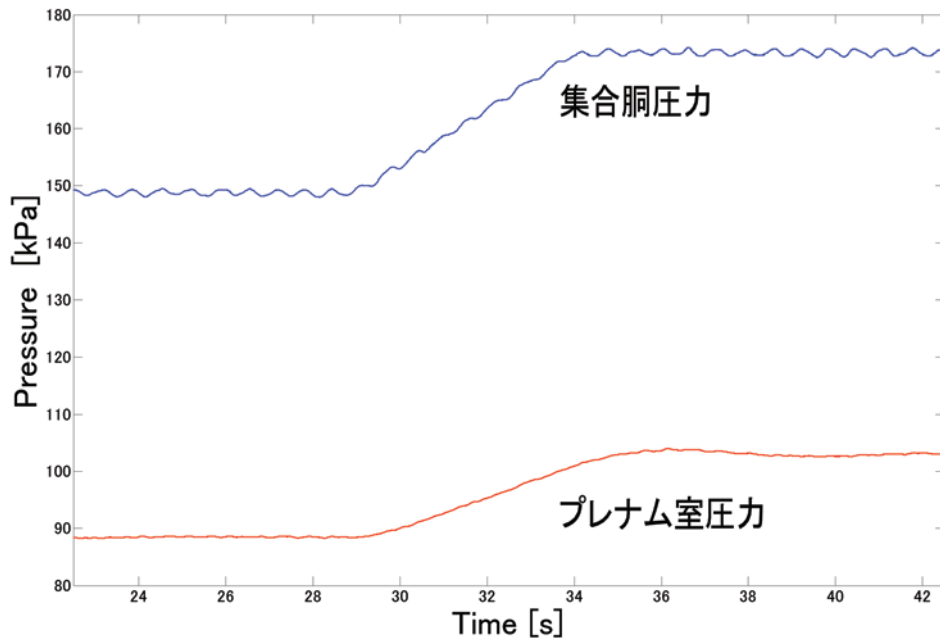


図 12 気流スweep時の時間履歴

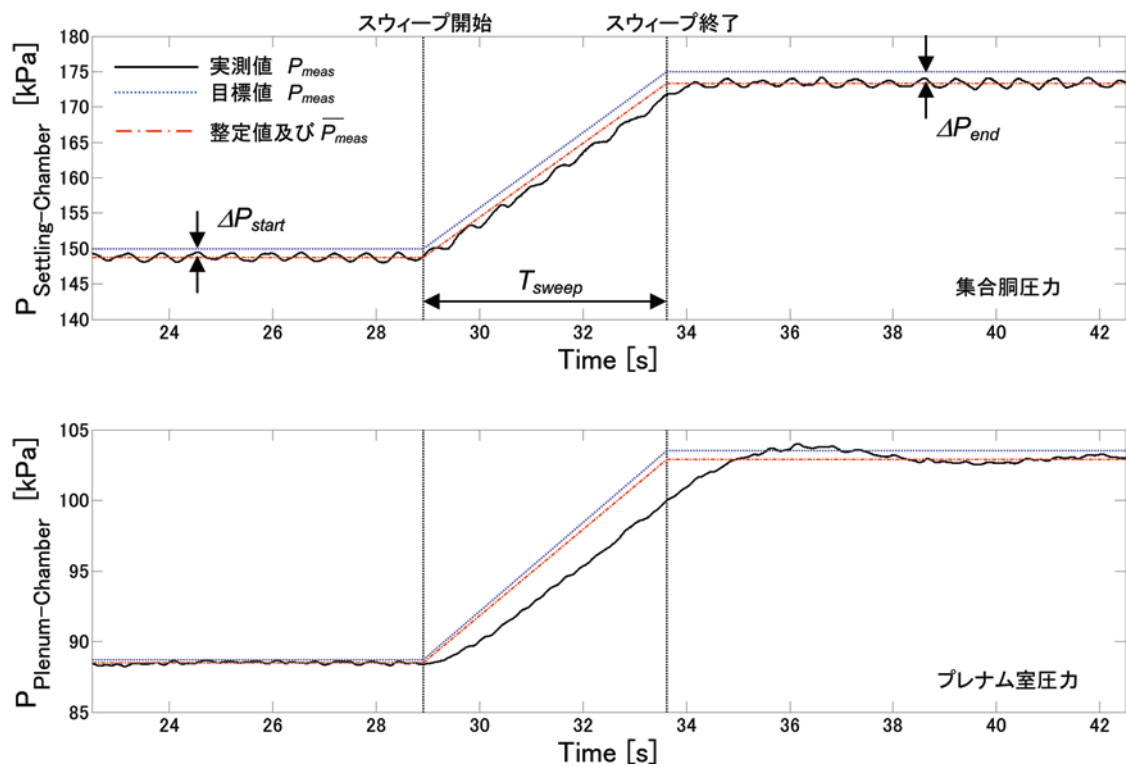


図 13 気流スweep時の標準偏差計算 説明図

スweep時の標準偏差の計算では、以下の通り、標準偏差の上限を計算することで処理を簡略化した。スweep制御の目標値  $P_{ctrl}$  は時間  $t$  の関数として以下の様になる。

$$P_{ctrl} = a \cdot t + b \quad (a, b \text{ は定数}) \quad (5.4)$$

一方、計測値の直線近似圧力  $\bar{P}_{meas}$  は以下の通りである。ここで、 $\Delta P_{start}$  と  $\Delta P_{end}$  は以下の式 (5.5) で示される直線の、スweep始点及び終点における式 (5.4) からの偏差であり、図で表示した際に式 (5.5) が式 (5.4) の下側にある場合を正の量とする。また、 $T_{sweep}$  はスweep時間長さを示す。



$$\bar{P}_{meas} = \left( a - \frac{\Delta P_{end} - \Delta P_{start}}{T_{sweep}} \right) \cdot t + b - \Delta P_{start} \quad (5.5)$$

計測値は式(5.5)の $\bar{P}_{meas}$ 周りに圧力が変動した様になる。変動量を $\Delta P_{meas}$ とすると、計測値 $P_{meas}$ は以下の様に表わされる。

$$P_{meas} = \bar{P}_{meas} + \Delta P_{meas} \quad (5.6)$$

各時間での計測値の目標値からの差は、

$$\begin{aligned} P_{meas} - P_{cntrl} &= \bar{P}_{meas} + \Delta P_{meas} - P_{cntrl} \\ &= \left( a - \frac{\Delta P_{end} - \Delta P_{start}}{T_{sweep}} \right) \cdot t + b - \Delta P_{start} + \Delta P_{meas} - (a \cdot t + b) \\ &= \Delta P_{meas} - \left( \frac{\Delta P_{end} - \Delta P_{start}}{T_{sweep}} \cdot t + \Delta P_{start} \right) \end{aligned} \quad (5.7)$$

となる。ここで、記述の簡略化のため、

$$D = \frac{\Delta P_{end} - \Delta P_{start}}{T_{sweep}} \cdot t + \Delta P_{start} \quad (5.8)$$

とする。スイープ始点での時刻を $t = 0$ とすると、連続時間領域での計測値の分散は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_{sweep}} \int_0^{T_{sweep}} (P_{meas} - P_{cntrl})^2 dt &= \\ &= \frac{1}{T_{sweep}} \left[ \int_0^{T_{sweep}} \Delta P_{meas}^2 dt - 2 \int_0^{T_{sweep}} \Delta P_{meas} \cdot D dt + \int_0^{T_{sweep}} D^2 dt \right] \end{aligned} \quad (5.9)$$

Cauchy-Schwarzの不等式より、変数 $x$ に関して $[c,d]$ で積分可能な任意の関数 $f(x), g(x)$ に対して

$$\left( \int_c^d f(x) \cdot g(x) dx \right)^2 \leq \int_c^d f(x)^2 dx \cdot \int_c^d g(x)^2 dx \quad (5.10)$$

であるから、

$$\sqrt{\left( \int_c^d f(x) \cdot g(x) dx \right)^2} \leq \sqrt{\int_c^d f(x)^2 dx \cdot \int_c^d g(x)^2 dx} \quad (5.11)$$

$f(x), g(x)$ 共に実数であれば、

$$\left| \int_c^d f(x) \cdot g(x) dx \right| \leq \sqrt{\int_c^d f(x)^2 dx \cdot \int_c^d g(x)^2 dx} \quad (5.12)$$

となる。一方、式(5.9)は、

$$\begin{aligned} &\frac{1}{T_{sweep}} \left[ \int_0^{T_{sweep}} \Delta P_{meas}^2 dt - 2 \int_0^{T_{sweep}} \Delta P_{meas} \cdot D dt + \int_0^{T_{sweep}} D^2 dt \right] \\ &\leq \frac{1}{T_{sweep}} \left[ \int_0^{T_{sweep}} \Delta P_{meas}^2 dt + 2 \left| \int_0^{T_{sweep}} \Delta P_{meas} \cdot D dt \right| + \int_0^{T_{sweep}} D^2 dt \right] \end{aligned} \quad (5.13)$$

と書け、式(5.12)を適用すると、

$$\begin{aligned} &\frac{1}{T_{sweep}} \left[ \int_0^{T_{sweep}} \Delta P_{meas}^2 dt + 2 \left| \int_0^{T_{sweep}} \Delta P_{meas} \cdot D dt \right| + \int_0^{T_{sweep}} D^2 dt \right] \\ &\leq \frac{1}{T_{sweep}} \left[ \int_0^{T_{sweep}} \Delta P_{meas}^2 dt + 2 \sqrt{\int_0^{T_{sweep}} \Delta P_{meas}^2 dt \cdot \int_0^{T_{sweep}} D^2 dt} + \int_0^{T_{sweep}} D^2 dt \right] \\ &= \left( \sqrt{\frac{1}{T_{sweep}} \int_0^{T_{sweep}} \Delta P_{meas}^2 dt} + \sqrt{\frac{1}{T_{sweep}} \int_0^{T_{sweep}} D^2 dt} \right)^2 \end{aligned} \quad (5.14)$$

式(5.14)の最右辺カッコ内の第1項は式(5.5)周りの計測値の標準偏差であり、第2項の平方根記号の中の値は以下の通り求まる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_{sweep}} \int_0^{T_{sweep}} D^2 dt &= \frac{1}{T_{sweep}} \int_0^{T_{sweep}} \left( \frac{\Delta P_{end} - \Delta P_{start}}{T_{sweep}} \cdot t + \Delta P_{start} \right)^2 dt \\ &= \frac{1}{T_{sweep}} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{T_{sweep}}{\Delta P_{end} - \Delta P_{start}} \left[ \left( \frac{\Delta P_{end} - \Delta P_{start}}{T_{sweep}} \cdot t + \Delta P_{start} \right)^3 \right]_0^{T_{sweep}} \\ &= \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{\Delta P_{end} - \Delta P_{start}} (\Delta P_{end}^3 - \Delta P_{start}^3) \\ &= \frac{1}{3} (\Delta P_{end}^2 + \Delta P_{end} \cdot \Delta P_{start} + \Delta P_{start}^2) \end{aligned} \quad (5.15)$$

以上の通り、スイープ目標値に対する計測値のスイープ総時間に対する標準偏差は、式(5.14)で上限値が求まる。一方、表6で規定されるスイープ制御の精度要求は風洞全圧によって変化するが、スイープ総時間に対する平均処理で評価ができる。すなわち、スイープ目標値のスイープ時の時間平均値は、スイープ目標値が線形で変化すれば、スイープ始点及び終点の目標値(夫々、 $P_{start}$ 及び $P_{end}$ とする)の平均値に等しく、従って、表6に示す精度要求(目標値の5%以内)は以下の通りとなる。

$$(\text{目標値}) = 0.05 \times \frac{P_{start} + P_{end}}{2} \quad (5.16)$$

以上の条件の下、各試験ケースの結果を評価したのが表9である。何れのケースでも要求精度を満たしていることが分かる。ここで、既述の通り、標準偏差の大部分は目標値からの計測値の偏差分が占めている。特に、全圧の高い条件でのスイープ時にこの偏差分が大きくなっていく。なお、集合胴圧力の評価に用いた制御圧力は、表8で示した理論的な集合胴壁面圧力目標値である。

表9 風洞精度要求に対する達成度（スウィープ制御）（続く）

マツハ数	全圧 スウィープ [kPa]	集合胴圧力				プレナム室圧力				通風番号
		標準偏差 目標値 [kPa]	式(5.5)に 対する 標準偏差 [kPa]	スウィープ 目標値に 対する 標準偏差 [kPa]	標準偏差 対精度 要求 [%]	標準偏差 目標値 [kPa]	式(5.5)に 対する 標準偏差 [kPa]	スウィープ 目標値に 対する 標準偏差 [kPa]	標準偏差 対精度 要求 [%]	
0.70	150.0 ⇒ 175.0	8.1	0.181	0.911	11.3%	5.9	0.144	0.873	14.9%	08300
	175.0 ⇒ 200.0	9.3	0.163	1.214	13.0%	6.8	0.125	1.253	18.5%	
	200.0 ⇒ 225.0	10.6	0.180	1.794	16.9%	7.7	0.146	1.520	19.8%	08301
	225.0 ⇒ 250.0	11.8	0.258	2.237	18.9%	8.6	0.178	1.884	22.0%	
	250.0 ⇒ 275.0	13.1	0.258	2.076	15.9%	9.5	0.164	1.845	19.5%	08302
275.0 ⇒ 300.0	14.3	0.423	2.665	18.6%	10.4	0.175	2.136	20.6%		
0.75	150.0 ⇒ 175.0	8.1	0.240	0.882	10.9%	5.6	0.344	0.675	12.1%	08303
	175.0 ⇒ 200.0	9.3	0.245	1.163	12.5%	6.5	0.252	0.897	13.9%	
	225.0 ⇒ 250.0	11.8	0.292	2.464	20.8%	8.2	0.245	1.802	22.0%	08304
	250.0 ⇒ 275.0	13.1	0.280	2.971	22.7%	9.0	0.214	2.106	23.3%	
	200.0 ⇒ 300.0	12.5	0.248	2.812	22.6%	8.6	0.296	2.211	25.7%	08306
0.80	150.0 ⇒ 175.0	8.1	0.312	1.293	16.0%	5.3	0.261	0.754	14.1%	08305
	175.0 ⇒ 200.0	9.3	0.245	1.591	17.0%	6.2	0.231	1.059	17.2%	
	225.0 ⇒ 250.0	11.8	0.311	2.582	21.8%	7.8	0.305	1.871	24.0%	08307
	250.0 ⇒ 275.0	13.1	0.416	3.144	24.1%	8.6	0.245	2.105	24.5%	
	200.0 ⇒ 300.0	12.5	0.269	2.965	23.8%	8.2	0.398	2.184	26.6%	08308
0.82	150.0 ⇒ 175.0	8.1	0.311	0.858	10.6%	5.2	0.253	0.590	11.3%	08324
	175.0 ⇒ 200.0	9.3	0.274	1.176	12.6%	6.0	0.284	0.819	13.6%	
	225.0 ⇒ 250.0	11.8	0.274	2.353	19.9%	7.6	0.290	1.654	21.7%	08337
	250.0 ⇒ 275.0	13.1	0.293	2.699	20.6%	8.4	0.187	1.826	21.6%	
	0.84	150.0 ⇒ 175.0	8.1	0.302	1.074	13.3%	5.1	0.322	0.913	17.8%
175.0 ⇒ 200.0	9.3	0.300	1.453	15.6%	5.9	0.254	1.140	19.3%		
0.85	150.0 ⇒ 175.0	8.1	0.422	1.316	16.3%	5.1	0.230	0.563	11.1%	08309
	175.0 ⇒ 200.0	9.3	0.243	1.598	17.1%	5.8	0.241	0.966	16.5%	
	225.0 ⇒ 250.0	11.8	0.351	2.649	22.4%	7.4	0.255	1.559	21.1%	08310
	250.0 ⇒ 275.0	13.1	0.461	3.060	23.4%	8.2	0.256	1.824	22.3%	
	200.0 ⇒ 300.0	12.4	0.457	2.730	21.9%	7.8	0.434	1.934	24.8%	08311
0.86	150.0 ⇒ 175.0	8.1	0.407	1.286	15.9%	5.0	0.221	0.741	14.8%	08326
	175.0 ⇒ 200.0	9.3	0.441	1.529	16.4%	5.8	0.255	1.116	19.3%	
0.88	150.0 ⇒ 175.0	8.1	0.361	1.243	15.4%	4.9	0.299	0.796	16.2%	08327
	175.0 ⇒ 200.0	9.3	0.382	1.474	15.8%	5.7	0.213	0.929	16.4%	
0.90	150.0 ⇒ 175.0	8.1	0.375	1.220	15.1%	4.8	0.259	0.662	13.8%	08312
	175.0 ⇒ 200.0	9.3	0.300	1.382	14.8%	5.5	0.263	0.969	17.5%	
	225.0 ⇒ 250.0	11.8	0.260	2.040	17.3%	7.0	0.252	1.323	18.8%	08313
	250.0 ⇒ 275.0	13.1	0.467	2.658	20.3%	7.8	0.275	1.615	20.8%	
	225.0 ⇒ 300.0	13.1	0.482	2.576	19.7%	7.8	0.192	1.637	21.1%	08314
0.92	150.0 ⇒ 175.0	8.1	0.344	1.303	16.1%	4.7	0.305	0.728	15.5%	08328
	175.0 ⇒ 200.0	9.3	0.285	1.531	16.4%	5.4	0.195	0.991	18.3%	
	225.0 ⇒ 250.0	11.8	0.444	1.798	15.2%	6.9	0.247	1.178	17.1%	08351
	275.0 ⇒ 300.0	14.3	0.414	2.465	17.2%	8.3	0.238	1.920	23.1%	
	0.92	150.0 ⇒ 175.0	8.1	0.462	1.314	16.2%	4.6	0.295	0.683	14.8%
175.0 ⇒ 200.0	9.3	0.434	1.587	17.0%	5.3	0.237	1.054	19.9%		
0.94	225.0 ⇒ 250.0	11.8	0.316	1.942	16.4%	6.7	0.260	1.293	19.2%	08346
	250.0 ⇒ 275.0	13.1	0.546	2.569	19.7%	7.4	0.251	1.507	20.3%	
	250.0 ⇒ 300.0	13.7	0.410	2.357	17.2%	7.8	0.361	1.617	20.8%	08347
	150.0 ⇒ 175.0	8.1	0.319	0.810	10.0%	4.5	0.345	0.543	11.9%	
	175.0 ⇒ 200.0	9.3	0.186	0.965	10.3%	5.2	0.147	0.544	10.4%	08315
0.95	225.0 ⇒ 250.0	11.8	0.479	2.521	21.3%	6.6	0.233	1.347	20.3%	08316
	250.0 ⇒ 275.0	13.1	0.463	2.952	22.6%	7.3	0.205	1.649	22.5%	
	225.0 ⇒ 300.0	13.1	0.512	2.574	19.7%	7.3	0.128	1.693	23.1%	08317

表9 風洞精度要求に対する達成度 (スweep制御) (続き終わり)

マッハ数	全圧 スweep [kPa]	集合胴圧力				プレナム室圧力				通風番号
		標準偏差 目標値 [kPa]	式(5.5)に 対する 標準偏差 [kPa]	スweep 目標値に 対する 標準偏差 [kPa]	標準偏差 対精度 要求 [%]	標準偏差 目標値 [kPa]	式(5.5)に 対する 標準偏差 [kPa]	スweep 目標値に 対する 標準偏差 [kPa]	標準偏差 対精度 要求 [%]	
0.96	150.0 ⇒ 175.0	8.1	0.426	1.387	17.1%	4.5	0.277	0.794	17.7%	08330
	175.0 ⇒ 200.0	9.3	0.186	1.558	16.7%	5.2	0.234	1.149	22.2%	
	225.0 ⇒ 250.0	11.8	0.389	1.897	16.0%	6.6	0.276	1.232	18.8%	08348
	250.0 ⇒ 275.0	13.1	0.509	2.410	18.4%	7.3	0.427	1.572	21.7%	
0.98	250.0 ⇒ 300.0	13.7	0.609	2.362	17.3%	7.6	0.318	1.746	23.0%	08349
	150.0 ⇒ 175.0	8.1	0.363	0.887	11.0%	4.4	0.232	0.448	10.2%	08318
	175.0 ⇒ 200.0	9.3	0.325	1.209	12.9%	5.1	0.184	0.490	9.7%	
	225.0 ⇒ 250.0	11.8	0.442	1.977	16.7%	6.4	0.261	1.229	19.1%	08319
	250.0 ⇒ 275.0	13.1	0.537	2.516	19.3%	7.1	0.203	1.409	19.8%	
1.00	225.0 ⇒ 300.0	13.1	0.556	2.661	20.4%	7.1	0.249	1.574	22.2%	08320
	150.0 ⇒ 175.0	8.1	0.399	1.497	18.5%	4.3	0.298	0.690	16.1%	08331
	175.0 ⇒ 200.0	9.3	0.357	1.805	19.3%	5.0	0.191	0.892	18.0%	
	225.0 ⇒ 250.0	11.8	0.424	1.889	16.0%	6.3	0.272	1.138	18.1%	08344
	250.0 ⇒ 275.0	13.1	0.473	2.249	17.2%	6.9	0.317	1.353	19.5%	
1.02	250.0 ⇒ 300.0	13.7	0.462	2.465	18.0%	7.3	0.224	1.794	24.7%	08345
	150.0 ⇒ 175.0	8.1	0.396	1.262	15.6%	4.2	0.267	0.438	10.4%	08332
	175.0 ⇒ 200.0	9.3	0.412	1.713	18.4%	4.8	0.239	0.701	14.5%	
1.04	150.0 ⇒ 175.0	8.1	0.346	1.218	15.1%	4.1	0.171	0.251	6.1%	08333
	175.0 ⇒ 200.0	9.3	0.463	1.771	19.0%	4.7	0.247	0.555	11.8%	
1.05	150.0 ⇒ 175.0	8.1	0.455	0.896	11.1%	4.0	0.240	0.748	18.5%	08321
	175.0 ⇒ 200.0	9.3	0.425	1.245	13.3%	4.7	0.224	0.354	7.6%	
	225.0 ⇒ 250.0	11.8	0.266	1.862	15.7%	5.9	0.219	0.685	11.6%	08322
	250.0 ⇒ 275.0	13.1	0.723	2.789	21.3%	6.5	0.222	0.851	13.0%	
	225.0 ⇒ 300.0	13.1	0.539	2.669	20.4%	6.5	0.227	1.076	16.5%	08323
1.10	150.0 ⇒ 175.0	8.1	0.458	1.340	16.6%	3.8	0.246	0.367	9.6%	08334
	175.0 ⇒ 200.0	9.3	0.295	1.644	17.6%	4.4	0.233	0.354	8.1%	
	225.0 ⇒ 250.0	11.8	0.470	1.840	15.6%	5.6	0.189	0.416	7.5%	08342
	250.0 ⇒ 275.0	13.1	0.567	2.386	18.3%	6.1	0.165	0.678	11.0%	
	250.0 ⇒ 300.0	13.7	0.624	2.451	17.9%	6.4	0.240	0.917	14.2%	08343
1.15	150.0 ⇒ 175.0	8.1	0.315	1.376	17.0%	3.6	0.224	0.443	12.4%	08335
	175.0 ⇒ 200.0	9.3	0.414	1.765	18.9%	4.1	0.256	0.333	8.1%	
	225.0 ⇒ 250.0	11.8	0.422	1.772	15.0%	5.2	0.210	0.372	7.1%	08340
	250.0 ⇒ 275.0	13.1	0.474	2.113	16.2%	5.8	0.244	0.524	9.1%	
	225.0 ⇒ 300.0	13.1	0.554	2.410	18.4%	5.8	0.314	1.026	17.8%	08341
1.20	150.0 ⇒ 175.0	8.1	0.250	1.237	15.3%	3.4	0.252	0.629	18.8%	08336
	175.0 ⇒ 200.0	9.3	0.519	1.815	19.4%	3.9	0.257	0.483	12.5%	
	225.0 ⇒ 250.0	11.8	0.544	2.690	22.7%	4.9	0.305	0.576	11.8%	08338
	250.0 ⇒ 275.0	13.1	0.594	3.262	25.0%	5.4	0.197	0.693	12.8%	
	225.0 ⇒ 300.0	13.1	0.503	2.337	17.9%	5.4	0.330	0.593	11.0%	08339

## 5.2 気流方向圧力分布

図 14 に、センターポール圧力計測により計測した結果と、風洞測定部側壁圧力の計測結果を描画する。何れも、定値制御の整定部での圧力を平均化して示している。マッハ数をパラメータとして、横軸を  $x$  軸、縦軸を以下で示す圧力係数で処理している。

$$C_p = \frac{P - P_p}{q} \quad (5.17)$$

$$q = \frac{1}{2} \kappa P_p M^2 \quad (5.18)$$

ここで、 $q$  は気流の動圧であり、 $M$  はマッハ数である。 $P_p$  は式 (4.1) で既出のプレナム室圧力である。なお、プレナム室圧力は、プレナム室天井内壁に直接 Kulite XCQ-062 圧力センサーを貼り付けて（図 10 の“非常圧力センサー”位置）計測したデータと、通常の風洞気流計測として実施しているプレナム室天井外部に設置した（株）共和電業製 PA-5KB 圧力センサーを用いて（図 10 の“風洞静圧”位置）計測したデータとがあり、ここでは後者の圧力を利用している。ところで、式 (4.1) では集合胴圧力を気流全圧と仮定して  $M$  を求めているが、実際の  $M$  にできるだけ近い値を利用するために以下の通りマッハ数  $M'$  を導いて式 (5.18) の動圧を求めた。ここで使用する量は図 15 の通りである。また、流れは一次元の等エントロピー流れであると仮定し、気流の全圧を  $P_0$ 、臨界面積を  $A^*$  とする。

集合胴の断面積と壁面圧力との間には以下の関係がある。

$$\frac{A_{Set}}{A^*} = \frac{\sqrt{\frac{\kappa-1}{2}} \cdot \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{P_{Set}}{P_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot \left(\frac{P_{Set}}{P_0}\right)^{\frac{1}{\kappa}}}} \quad (5.19)$$

測定部も同様にして

$$\frac{A_{TS}}{A^*} = \frac{\sqrt{\frac{\kappa-1}{2}} \cdot \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa+1}{2(\kappa-1)}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{P_p}{P_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot \left(\frac{P_p}{P_0}\right)^{\frac{1}{\kappa}}}} \quad (5.20)$$

式 (5.19) と (5.20) の辺々を除算して、

$$\frac{A_{Set}}{A_{TS}} = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{P_p}{P_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot \left(\frac{P_p}{P_0}\right)^{\frac{1}{\kappa}}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{P_{Set}}{P_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot \left(\frac{P_{Set}}{P_0}\right)^{\frac{1}{\kappa}}}} \quad (5.21)$$

これを  $P_0$  について解くと、

$$P_0 = \left\{ \frac{\left(\frac{A_{Set}}{A_{TS}}\right)^2 P_{Set}^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} - P_p^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}}{\left(\frac{A_{Set}}{A_{TS}}\right)^2 P_{Set}^{\frac{2}{\kappa}} - P_p^{\frac{2}{\kappa}}} \right\}^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (5.22)$$

式 (4.1) の  $P_{Set}$  を式 (5.22) で求めた  $P_0$  に置き換えることで、マッハ数  $M'$  が求まる。

$$M' = \sqrt{\frac{2}{\kappa-1} \left\{ \left(\frac{P_0}{P_p}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right\}} \quad (5.23)$$

図 14 では、異なる全圧（設定値）の結果を同一の図中に表示している。また、 $X=-1200 \sim -1000$  mm に表示されている黄緑色で塗られた範囲にはセンターポールを支える円弧翼型の支柱が実際には存在している。 $C_p$  の導出より明らかな様に、 $C_p=0$  はプレナム室圧力  $P_p$  に等しい事を示している。各マッハ数で同様に、 $X=-500 \sim 0$  mm でセンターポールの圧力がほぼ  $P_p$  に等しいことがわかる。一方、 $X=0$  mm より下流での圧力はセンターポール後方のステイングストラットの影響もあり、 $P_p$  と比べると高めの圧力を示している。支柱部からその直後の辺りに配置される圧力孔 ( $X=-1000$  mm 付近) では全圧によるバラツキが見られるが、それ以外では全圧によるバラツキはほとんど見られない。マッハ数が 1.1 以上になると、気流方向の  $C_p$  分布にもバラツキが顕著に見られるようになる。センターポール圧力 (○印) と測定部側壁圧力 (□印) は、 $X=-425$  mm で良く一致している。図 14 より、風洞模型設置の場所として  $X=-500 \sim 0$  mm に設置することが推奨され、これにより、通常の測定部静圧計測 ( $P_p$  の計測) にて模型が受ける気流状態を的確に捉えることが可能になると言える。

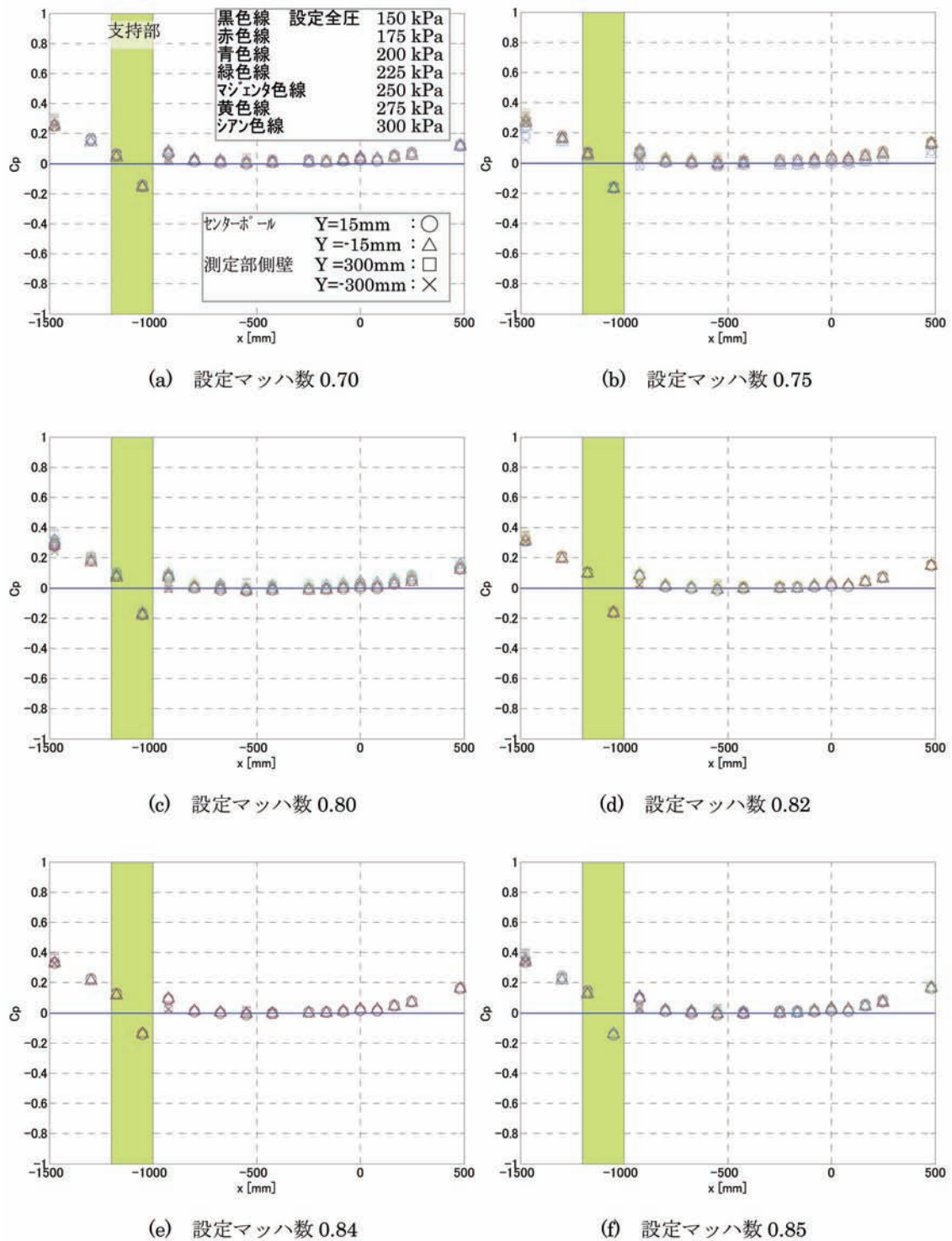


図 14 センターポール圧力分布と測定部側壁圧力との比較 (続く)

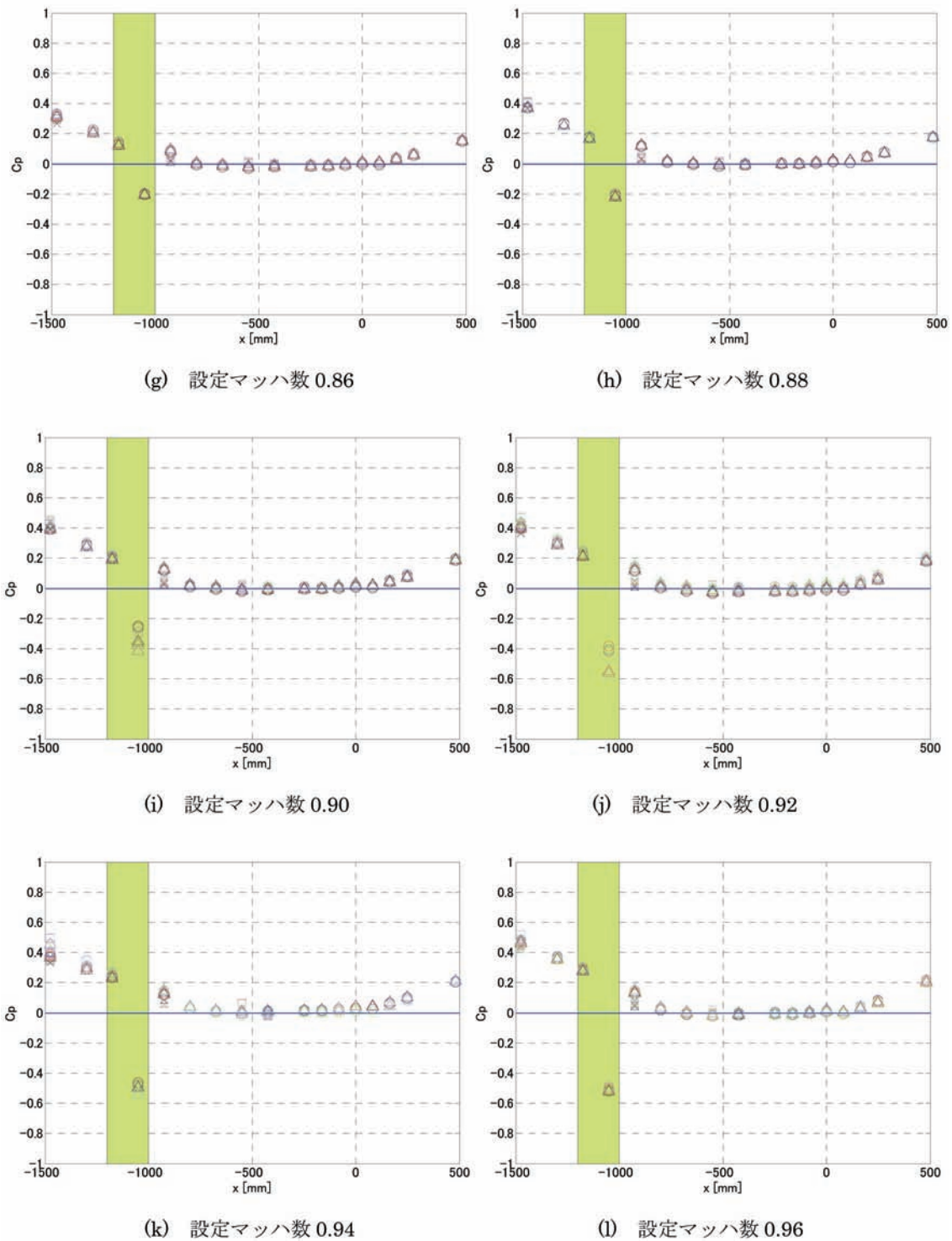


図 14 センターポール圧力分布と測定部側壁圧力との比較 (続く)

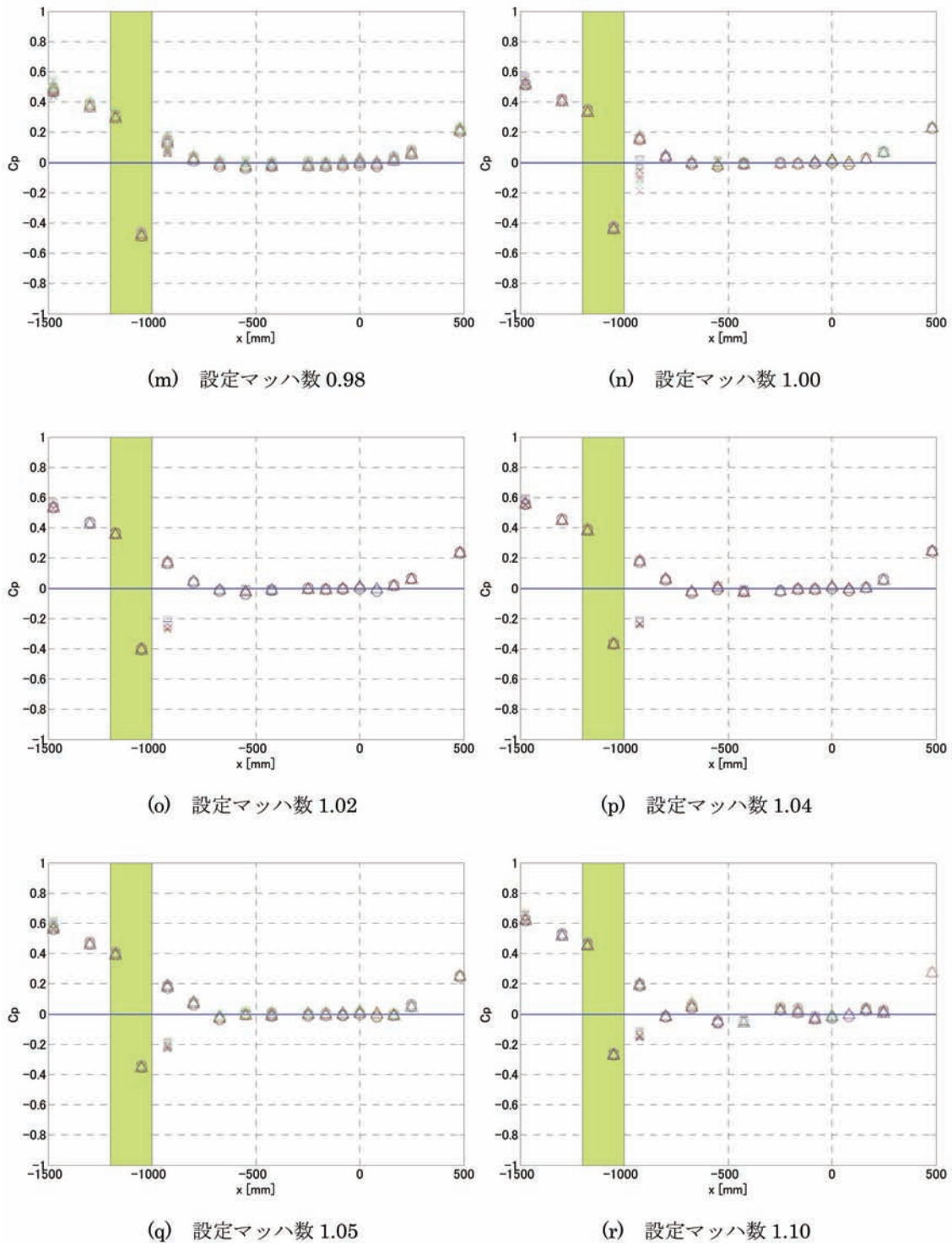


図 14 センターポール圧力分布と測定部側壁圧力との比較 (続く)

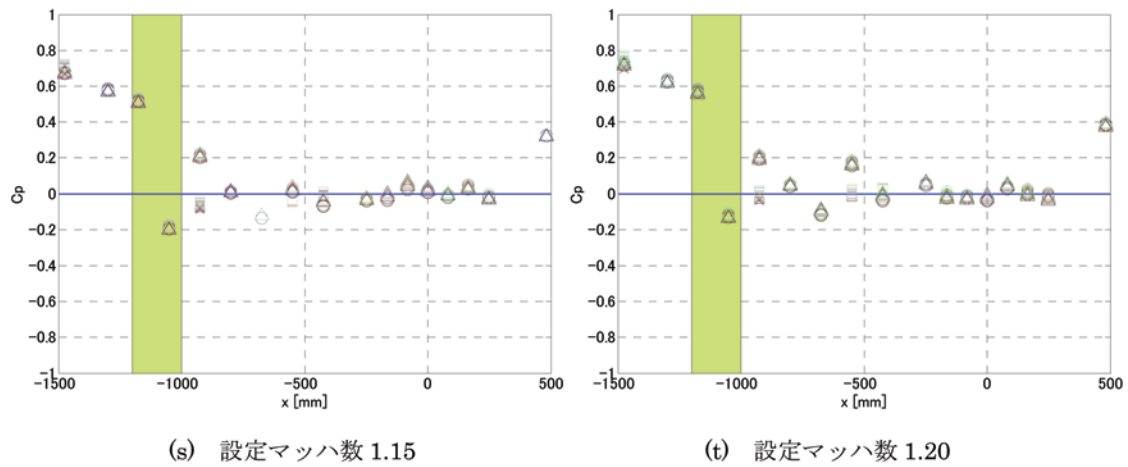


図 14 センターポール圧力分布と測定部側壁圧力との比較 (続き終わり)

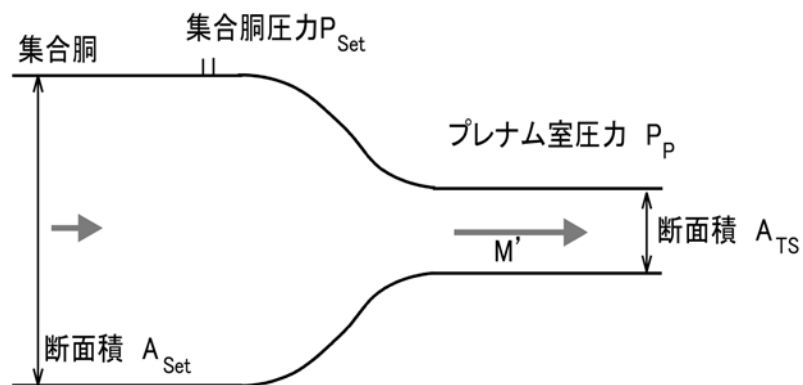


図 15 マッハ数を求めるのに必要な諸量

### 5.3 測定部圧力とプレナム室圧力

#### 5.3.1 一緻度

5.2 節において、センターポール圧力と測定部側壁圧力の比較を図 14 にて示し、両者は良く一致していると記した。一方、実際に風洞測定部気流の静圧計測に用いているのはプレナム室圧力  $P_p$  であり、これと測定部側壁圧力  $P_{TS}$  との比較を本節で示す。表 10 には  $P_p$  と  $P_{TS}$  との値の影響を示した。なお、ここで用いている  $P_p$  は通常の風洞気流計測として実施しているプレナム室天井外部に設置した(株)共和電業製 PA-5KB 圧力センサーを用いて(図 10 の“風洞静圧”位置)計測したデータである。図 16 に  $P_p$  と  $P_{TS}$  の比較を示す。これより、 $P_p$  と  $P_{TS}$  は

比例係数が凡そ 1 で線形近似できることが分かる。また、詳細に比較するために  $P_{TS}$  に対する  $P_{TS}-P_p$  の値を図 17 に示す。これより、 $P_{TS}$  が小さい値の際、即ち、マッハ数が大きい場合に両者の圧力差が突然大きくなるが、その他の部分では比較的線形関係がある。両者の計測系の違いや圧力センサー較正係数の精度の違いによりこれらの傾斜が現われてくると考えられる。



表 10 気流静圧計測位置の影響 (続く)

設定 マツハ数	静圧力[kPa]				全圧力[kPa]				マツハ数			試験 番号	
	設定値	P <sub>P</sub>	P <sub>TS</sub>	P <sub>TS</sub> -P <sub>P</sub>	設定値	P <sub>OP</sub>	P <sub>O<sub>TS</sub></sub>	P <sub>O<sub>TS</sub></sub> -P <sub>OP</sub>	M <sub>P</sub>	M <sub>TS</sub>	M <sub>TS</sub> -M <sub>P</sub>		
0.70	108.14	107.65	108.04	0.38	150.00	149.49	149.49	0.00	0.701	0.697	-0.004	08300	
	126.16	125.21	126.13	0.92	175.00	173.98	173.98	-0.01	0.702	0.694	-0.008		
	144.19	142.89	143.73	0.84	200.00	198.81	198.80	-0.01	0.703	0.697	-0.007		
	144.19	143.05	144.43	1.38	200.00	198.55	198.54	-0.01	0.701	0.690	-0.011		
	162.21	160.61	162.46	1.85	225.00	223.11	223.09	-0.01	0.702	0.689	-0.013		
	180.23	178.43	180.34	1.91	250.00	247.80	247.79	-0.01	0.701	0.689	-0.012		
0.70	180.23	178.66	180.73	2.07	250.00	248.25	248.23	-0.01	0.702	0.689	-0.013	08302	
	198.26	196.46	198.68	2.22	275.00	272.97	272.95	-0.02	0.702	0.689	-0.013		
	216.28	214.15	216.30	2.14	300.00	297.39	297.38	-0.01	0.701	0.690	-0.011		
0.75	103.29	103.11	103.22	0.10	150.00	149.52	149.52	0.00	0.748	0.747	-0.001	08303	
	120.50	120.03	120.53	0.50	175.00	174.11	174.11	0.00	0.749	0.744	-0.004		
	137.71	136.91	137.68	0.78	200.00	198.93	198.93	0.00	0.751	0.745	-0.006		
	154.93	153.52	154.80	1.28	225.00	223.01	223.00	-0.01	0.750	0.741	-0.009		
	172.14	170.44	171.86	1.42	250.00	247.50	247.49	-0.01	0.750	0.741	-0.009		
	189.36	187.28	189.18	1.90	275.00	271.95	271.94	-0.01	0.750	0.739	-0.011		
	137.71	136.45	137.57	1.12	200.00	198.27	198.26	-0.01	0.751	0.742	-0.009		08306
	206.57	204.07	206.85	2.78	300.00	296.53	296.52	-0.02	0.751	0.736	-0.014		
	98.40	98.12	97.96	-0.16	150.00	149.20	149.20	0.00	0.798	0.799	0.002		
114.80	114.13	114.41	0.28	175.00	173.74	173.74	0.00	0.799	0.796	-0.003			
131.20	130.23	129.97	-0.27	200.00	198.44	198.44	0.00	0.800	0.802	0.002			
0.80	147.60	146.27	147.31	1.04	225.00	222.72	222.71	0.00	0.799	0.792	-0.007	08307	
	164.01	162.22	163.78	1.56	250.00	247.57	247.56	-0.01	0.801	0.791	-0.010		
	180.41	178.47	180.30	1.83	275.00	271.80	271.80	-0.01	0.799	0.789	-0.010		
	131.20	130.16	130.87	0.71	200.00	198.07	198.07	0.00	0.798	0.793	-0.005		08308
	196.81	194.37	196.76	2.39	300.00	296.44	296.42	-0.01	0.801	0.788	-0.012		
	96.45	96.25	96.11	-0.13	150.00	149.66	149.66	0.00	0.820	0.821	0.001		
112.53	112.07	112.34	0.27	175.00	174.17	174.17	0.00	0.819	0.817	-0.002			
128.60	127.99	128.40	0.41	200.00	198.90	198.90	0.00	0.819	0.816	-0.003			
0.82	144.68	143.46	144.35	0.89	225.00	223.08	223.07	0.00	0.820	0.814	-0.006	08337	
	160.75	159.24	160.46	1.22	250.00	247.60	247.60	-0.01	0.820	0.812	-0.008		
	176.83	175.06	176.64	1.58	275.00	272.40	272.39	-0.01	0.821	0.812	-0.009		
	94.50	94.07	93.70	-0.38	150.00	149.37	149.37	0.00	0.840	0.844	0.004		08325
110.25	109.51	109.47	-0.04	175.00	173.99	173.99	0.00	0.841	0.841	0.000			
126.00	124.98	124.31	-0.67	200.00	198.58	198.58	0.00	0.841	0.846	0.005			
0.85	93.53	93.48	93.03	-0.45	150.00	149.27	149.27	0.00	0.846	0.850	0.005	08309	
	109.11	108.56	108.46	-0.10	175.00	173.84	173.84	0.00	0.848	0.849	0.001		
	124.70	123.82	123.99	0.17	200.00	198.32	198.32	0.00	0.849	0.847	-0.001		
	140.29	139.10	139.78	0.67	225.00	222.83	222.83	0.00	0.849	0.844	-0.005		
	155.88	154.46	155.42	0.96	250.00	247.40	247.40	0.00	0.849	0.843	-0.006		08310
	171.47	169.75	171.06	1.31	275.00	272.20	272.20	0.00	0.850	0.842	-0.007		
	124.70	123.85	124.10	0.24	200.00	198.41	198.41	0.00	0.849	0.847	-0.002		
	187.05	184.99	186.75	1.77	300.00	296.93	296.93	-0.01	0.851	0.842	-0.009		
0.86	92.56	92.22	91.70	-0.53	150.00	149.13	149.14	0.00	0.858	0.863	0.005	08326	
	107.98	107.29	107.20	-0.09	175.00	173.99	173.99	0.00	0.861	0.861	0.001		
	123.41	122.38	122.57	0.19	200.00	198.70	198.70	0.00	0.862	0.860	-0.001		
0.88	90.62	90.30	89.76	-0.54	150.00	149.19	149.19	0.00	0.878	0.884	0.006	08327	
	105.72	105.06	104.86	-0.21	175.00	173.93	173.94	0.00	0.880	0.882	0.002		
	120.82	120.05	120.11	0.06	200.00	198.74	198.74	0.00	0.880	0.880	0.000		
0.90	88.69	88.45	87.93	-0.53	150.00	149.24	149.24	0.00	0.898	0.903	0.006	08312	
	103.47	102.92	102.72	-0.20	175.00	173.96	173.96	0.00	0.899	0.901	0.002		
	118.25	117.40	117.47	0.07	200.00	198.74	198.74	0.00	0.901	0.900	-0.001		
	133.03	132.04	132.57	0.53	225.00	223.20	223.20	0.00	0.899	0.896	-0.004		08313
	147.82	146.67	147.45	0.79	250.00	248.06	248.06	0.00	0.900	0.895	-0.005		
	162.60	161.07	162.08	1.01	275.00	272.38	272.37	0.00	0.900	0.894	-0.006		
	133.03	131.96	132.41	0.45	225.00	223.34	223.34	0.00	0.901	0.898	-0.003		08314
177.38	175.59	177.12	1.53	300.00	297.32	297.31	0.00	0.901	0.893	-0.008			
0.92	86.77	86.48	85.71	-0.77	150.00	149.13	149.13	0.00	0.918	0.926	0.008	08328	
	101.23	100.69	100.15	-0.54	175.00	173.84	173.84	0.00	0.919	0.924	0.005		
	115.70	114.67	114.20	-0.47	200.00	198.53	198.54	0.00	0.921	0.925	0.004		
	130.16	129.28	129.49	0.21	225.00	223.76	223.76	0.00	0.921	0.920	-0.001		08351
	144.62	143.63	144.16	0.53	250.00	248.36	248.36	0.00	0.920	0.917	-0.003		
	159.08	157.61	158.61	1.00	275.00	273.07	273.07	0.00	0.922	0.916	-0.006		
173.54	171.66	173.04	1.38	300.00	297.61	297.61	0.00	0.923	0.915	-0.007			
0.94	84.87	84.68	83.80	-0.88	150.00	149.33	149.33	0.00	0.938	0.947	0.009	08329	
	99.01	98.45	97.89	-0.56	175.00	173.86	173.87	0.00	0.939	0.944	0.005		
	113.16	112.11	111.33	-0.78	200.00	198.69	198.69	0.00	0.942	0.949	0.006		
	127.30	126.29	126.49	0.20	225.00	223.54	223.54	0.00	0.941	0.940	-0.001		08346
	141.44	140.39	140.84	0.45	250.00	248.04	248.04	0.00	0.940	0.937	-0.003		
	155.59	154.14	154.85	0.71	275.00	272.71	272.71	0.00	0.941	0.937	-0.004		
	141.44	140.38	140.79	0.41	250.00	248.42	248.42	0.00	0.941	0.938	-0.003		08347
	169.73	168.29	169.29	1.00	300.00	297.51	297.51	0.00	0.940	0.935	-0.005		
0.95	83.92	84.28	83.80	-0.49	150.00	149.57	149.57	0.00	0.944	0.954	0.010	08315	
	97.91	97.85	97.89	0.03	175.00	174.34	174.34	0.00	0.947	0.952	0.005		
	111.89	111.23	111.33	0.10	200.00	198.98	198.98	0.00	0.951	0.953	0.003		
	125.88	124.78	126.49	1.71	225.00	223.05	223.05	0.00	0.950	0.948	-0.002		08316
	139.86	138.74	140.84	2.10	250.00	247.68	247.68	0.00	0.949	0.945	-0.004		
	153.85	152.11	154.85	2.74	275.00	272.14	272.14	0.00	0.951	0.946	-0.005		
	125.88	124.82	140.79	15.97	225.00	223.43	223.43	0.00	0.951	0.949	-0.002		08317
	167.84	165.82	169.29	3.47	300.00	297.29	297.29	0.00	0.953	0.947	-0.005		

表 10 気流静圧計測位置の影響 (続き終わり)

設定 マッハ数	静圧力[kPa]				全圧力[kPa]				マッハ数			試験 番号
	設定値	$P_P$	$P_{TS}$	$P_{TS}-P_P$	設定値	$P_{OP}$	$P_{OTS}$	$P_{OTS}-P_{OP}$	$M_P$	$M_{TS}$	$M_{TS}-M_P$	
0.96	82.98	82.70	81.84	-0.87	150.00	149.24	149.24	0.00	0.958	0.968	0.009	08330
	96.80	96.08	95.56	-0.52	175.00	173.73	173.73	0.00	0.960	0.965	0.005	
	110.63	109.54	109.10	-0.45	200.00	198.38	198.38	0.00	0.962	0.965	0.004	
	124.46	123.63	123.60	-0.02	225.00	223.62	223.62	0.00	0.961	0.961	0.000	08348
	138.29	137.22	137.52	0.30	250.00	248.19	248.19	0.00	0.960	0.959	-0.002	
	152.12	150.91	151.43	0.52	275.00	272.81	272.81	0.00	0.960	0.957	-0.003	
	138.29	137.25	137.64	0.39	250.00	248.55	248.55	0.00	0.962	0.959	-0.002	08349
165.95	164.17	165.17	1.00	300.00	297.76	297.76	0.00	0.963	0.958	-0.005		
0.98	81.10	81.53	80.44	-1.08	150.00	149.79	149.79	0.00	0.974	0.986	0.012	08318
	94.62	94.47	93.71	-0.75	175.00	174.11	174.11	0.00	0.977	0.984	0.007	
	108.13	107.69	107.17	-0.53	200.00	198.98	198.98	0.00	0.979	0.983	0.004	
	121.65	120.77	120.76	-0.01	225.00	223.67	223.67	0.00	0.981	0.981	0.000	08319
	135.17	134.11	134.31	0.20	250.00	248.09	248.09	0.00	0.980	0.979	-0.001	
	148.68	147.33	147.81	0.48	275.00	272.75	272.75	0.00	0.981	0.978	-0.003	
	121.65	120.83	120.87	0.04	225.00	223.28	223.28	0.00	0.979	0.979	0.000	08320
162.20	160.43	161.40	0.97	300.00	297.34	297.34	0.00	0.982	0.977	-0.005		
1.00	79.24	79.09	78.06	-1.03	150.00	149.11	149.11	0.00	0.996	1.008	0.011	08331
	92.45	91.86	91.06	-0.80	175.00	173.59	173.59	0.00	0.999	1.006	0.008	
	105.66	104.85	104.26	-0.59	200.00	198.37	198.37	0.00	1.000	1.004	0.005	
	118.86	117.87	117.78	-0.09	225.00	223.56	223.56	0.00	1.002	1.002	0.001	08344
	132.07	131.34	131.45	0.11	250.00	248.34	248.34	0.00	0.999	0.998	-0.001	
	145.28	143.96	144.33	0.37	275.00	272.92	272.92	0.00	1.001	0.999	-0.002	
	132.07	130.58	130.91	0.33	250.00	248.20	248.20	0.00	1.004	1.001	-0.002	08345
158.48	156.84	157.61	0.77	300.00	297.60	297.60	0.00	1.002	0.998	-0.004		
1.02	77.40	77.49	76.39	-1.10	150.00	149.27	149.27	0.00	1.015	1.027	0.012	08332
	90.30	89.97	89.01	-0.97	175.00	173.89	173.89	0.00	1.018	1.027	0.009	
	103.20	102.62	101.92	-0.71	200.00	198.38	198.38	0.00	1.018	1.024	0.006	
1.04	75.58	75.68	74.56	-1.13	150.00	149.28	149.27	0.00	1.035	1.047	0.012	08333
	88.18	88.02	87.21	-0.81	175.00	173.87	173.87	0.00	1.036	1.044	0.008	
	100.78	100.34	99.82	-0.52	200.00	198.38	198.38	0.00	1.037	1.041	0.004	
1.05	74.68	75.42	74.52	-0.90	150.00	149.69	149.69	0.00	1.040	1.050	0.010	08321
	87.13	87.37	87.17	-0.19	175.00	174.33	174.33	0.00	1.045	1.046	0.002	
	99.57	99.55	99.84	0.29	200.00	198.91	198.91	0.00	1.046	1.043	-0.002	
	112.02	111.62	112.45	0.84	225.00	223.58	223.58	0.00	1.048	1.042	-0.006	08322
	124.47	123.95	125.17	1.22	250.00	248.06	248.06	0.00	1.047	1.039	-0.008	
	136.91	136.18	137.66	1.48	275.00	272.61	272.61	0.00	1.047	1.038	-0.009	
	112.02	111.50	112.55	1.05	225.00	223.31	223.31	0.00	1.048	1.040	-0.008	08323
149.36	148.22	150.30	2.08	300.00	297.26	297.26	0.00	1.049	1.037	-0.012		
1.10	70.25	70.48	67.58	-2.90	150.00	149.31	149.30	-0.01	1.094	1.127	0.034	08334
	81.96	81.92	78.95	-2.97	175.00	173.83	173.82	-0.01	1.095	1.125	0.030	
	93.67	93.48	90.23	-3.25	200.00	198.34	198.34	-0.01	1.095	1.123	0.028	
	105.38	105.25	101.92	-3.33	225.00	223.72	223.71	-0.01	1.096	1.122	0.026	08342
	117.09	116.77	113.44	-3.33	250.00	248.37	248.36	-0.01	1.097	1.120	0.023	
	128.80	128.11	124.69	-3.42	275.00	272.81	272.80	-0.01	1.098	1.120	0.022	
	117.09	116.72	113.43	-3.29	250.00	248.48	248.48	-0.01	1.098	1.121	0.023	08343
140.51	139.56	136.38	-3.18	300.00	297.68	297.68	-0.01	1.099	1.118	0.018		
1.15	65.97	66.26	65.26	-0.99	150.00	149.08	149.08	0.00	1.142	1.154	0.012	08335
	76.97	77.12	76.26	-0.86	175.00	173.70	173.69	0.00	1.143	1.151	0.009	
	87.97	87.92	87.27	-0.66	200.00	198.47	198.47	0.00	1.144	1.150	0.006	
	98.96	98.82	99.54	0.72	225.00	223.72	223.72	0.00	1.147	1.141	-0.006	08340
	109.96	109.78	110.61	0.83	250.00	248.42	248.42	0.00	1.146	1.140	-0.006	
	120.95	120.58	121.76	1.18	275.00	273.12	273.13	0.00	1.147	1.139	-0.008	
	98.96	98.61	99.26	0.65	225.00	223.50	223.51	0.00	1.148	1.142	-0.005	08341
131.95	130.93	131.74	0.81	300.00	297.63	297.63	0.00	1.150	1.145	-0.005		
1.20	61.86	62.31	63.88	1.57	150.00	149.14	149.15	0.01	1.190	1.171	-0.019	08336
	72.17	72.46	74.15	1.69	175.00	173.79	173.79	0.01	1.192	1.174	-0.018	
	82.48	82.63	84.77	2.14	200.00	198.50	198.51	0.01	1.193	1.173	-0.020	
	92.78	92.75	95.74	2.99	225.00	223.08	223.09	0.01	1.194	1.169	-0.024	08338
	103.09	102.64	100.91	-1.73	250.00	247.48	247.47	-0.01	1.196	1.209	0.013	
	113.40	112.87	112.87	0.00	275.00	272.01	272.01	0.00	1.195	1.195	0.000	
	92.78	93.00	91.66	-1.33	225.00	223.66	223.66	-0.01	1.194	1.205	0.011	08339
123.71	123.19	121.67	-1.52	300.00	297.54	297.54	-0.01	1.197	1.206	0.010		

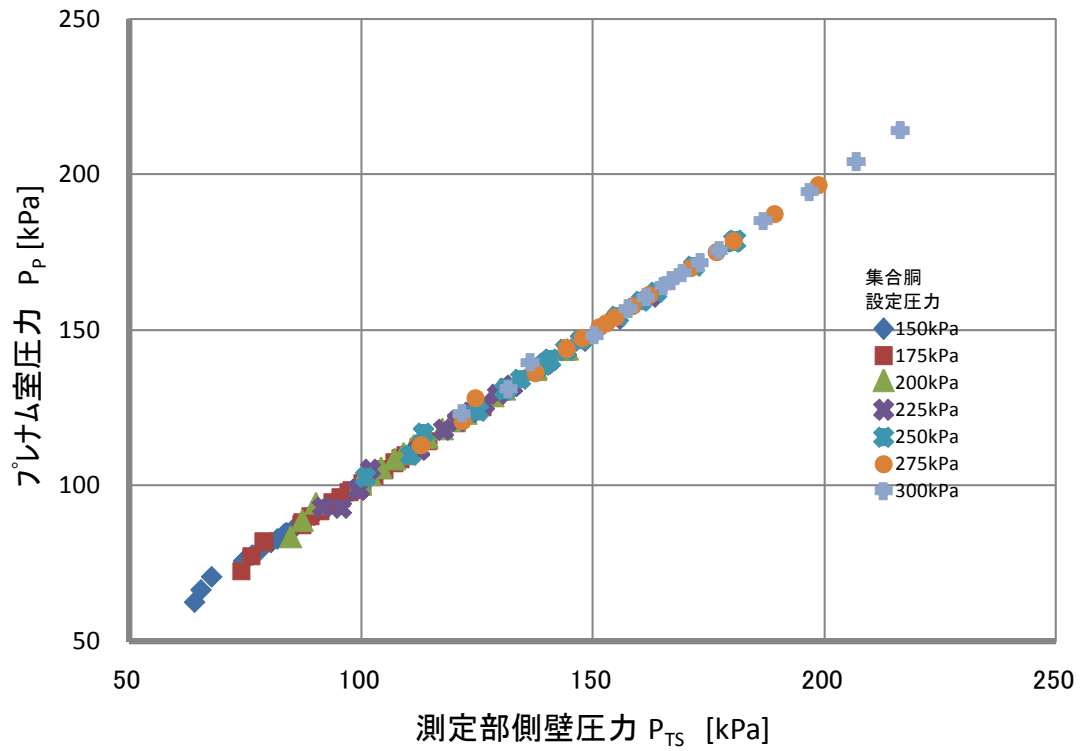


図 16 測定部側壁圧力  $P_{TS}$  とプレナム室圧力  $P_p$  の比較

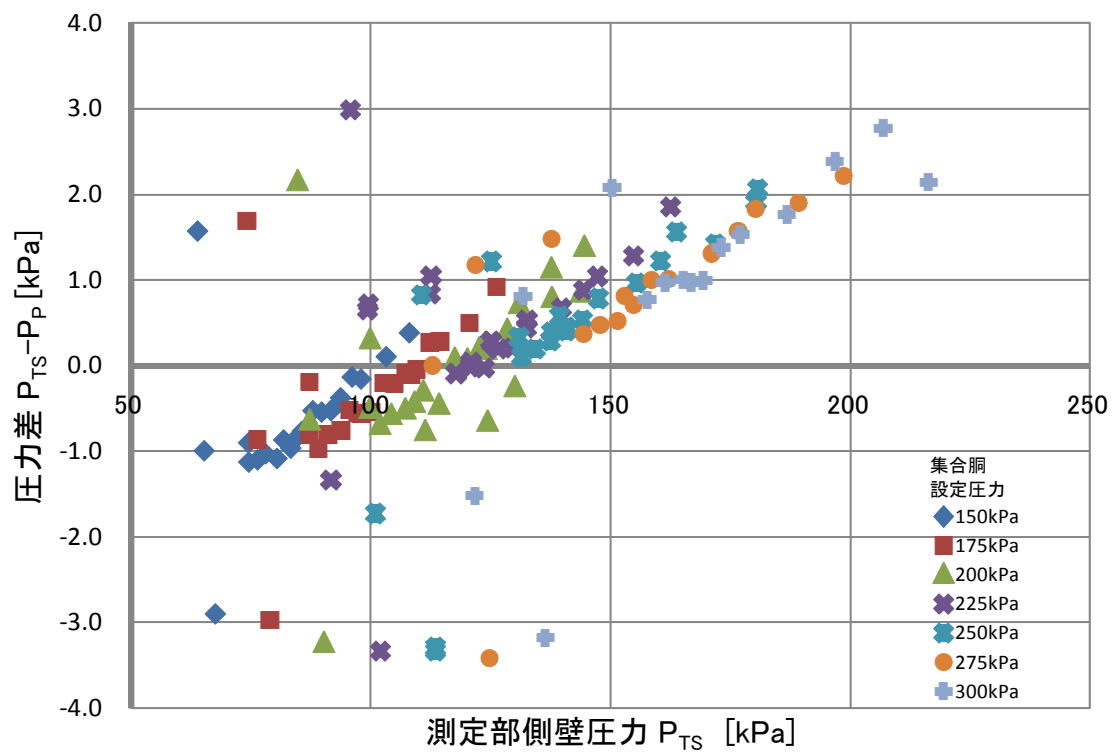
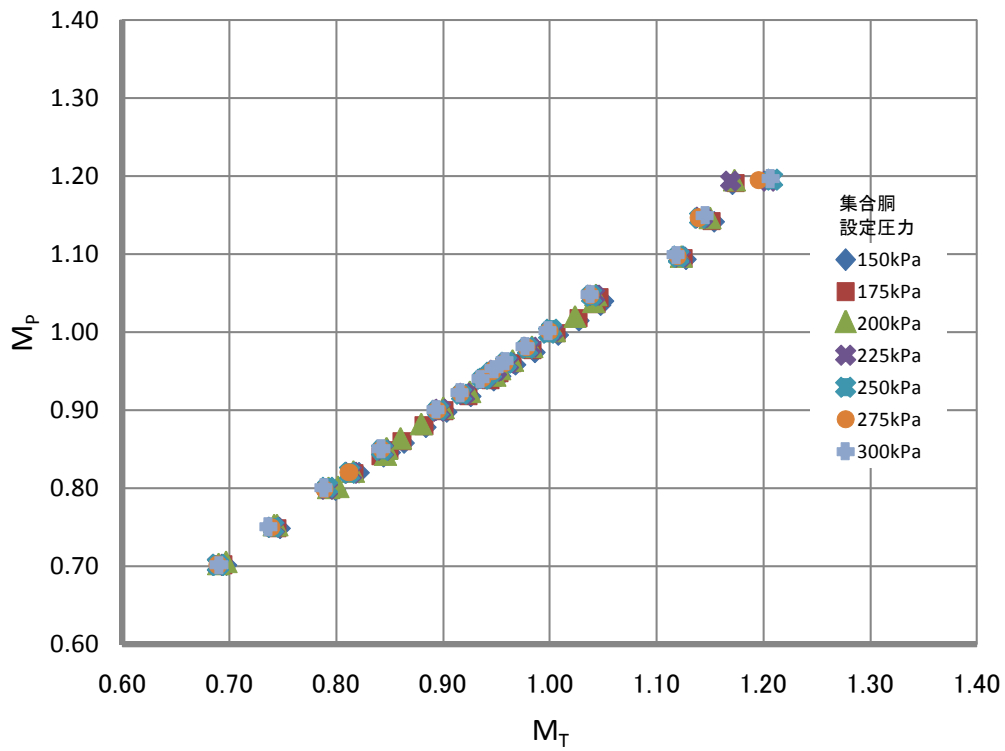
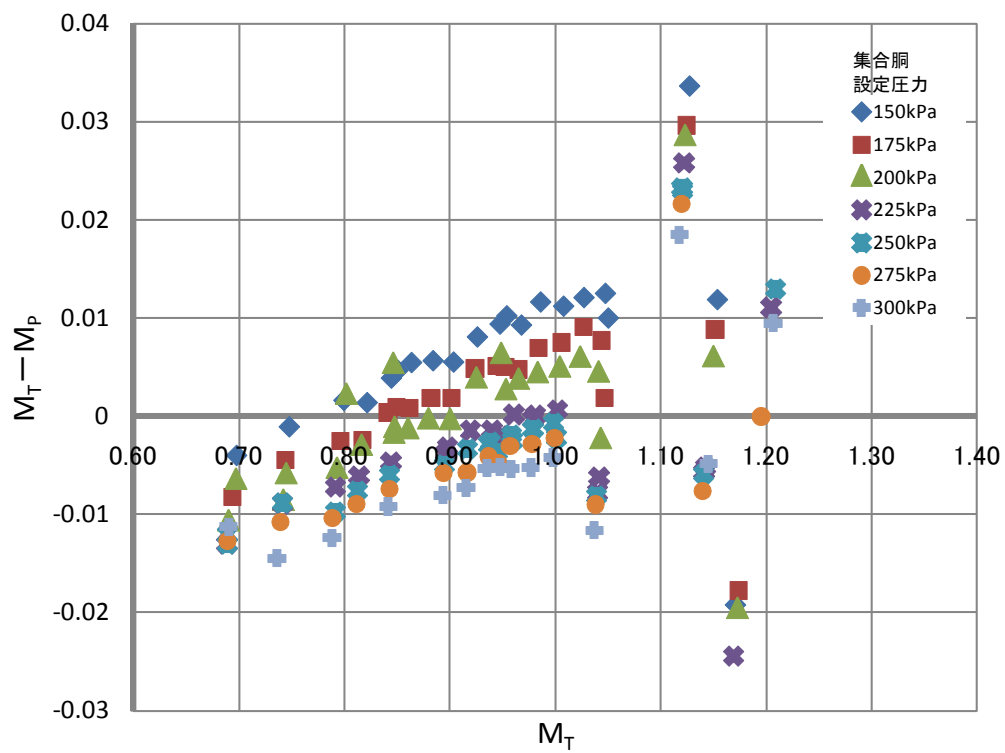


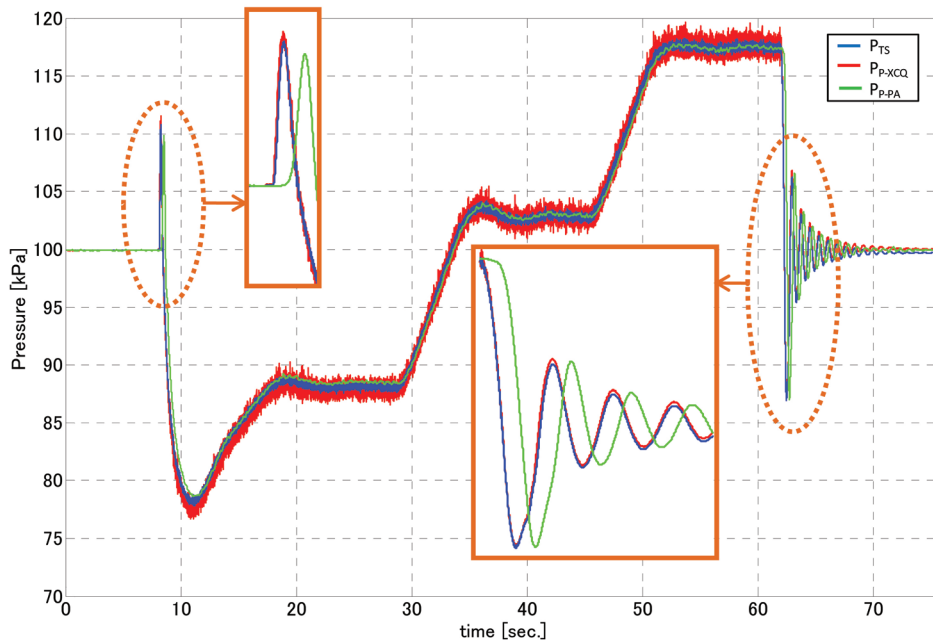
図 17 圧力  $P_{TS}$  と  $(P_{TS} - P_p)$  との比較

図 18 マッハ数  $M_{TS}$  と  $M_p$  の比較図 19 マッハ数  $M_{TS}$  と  $(M_{TS} - M_p)$  との比較

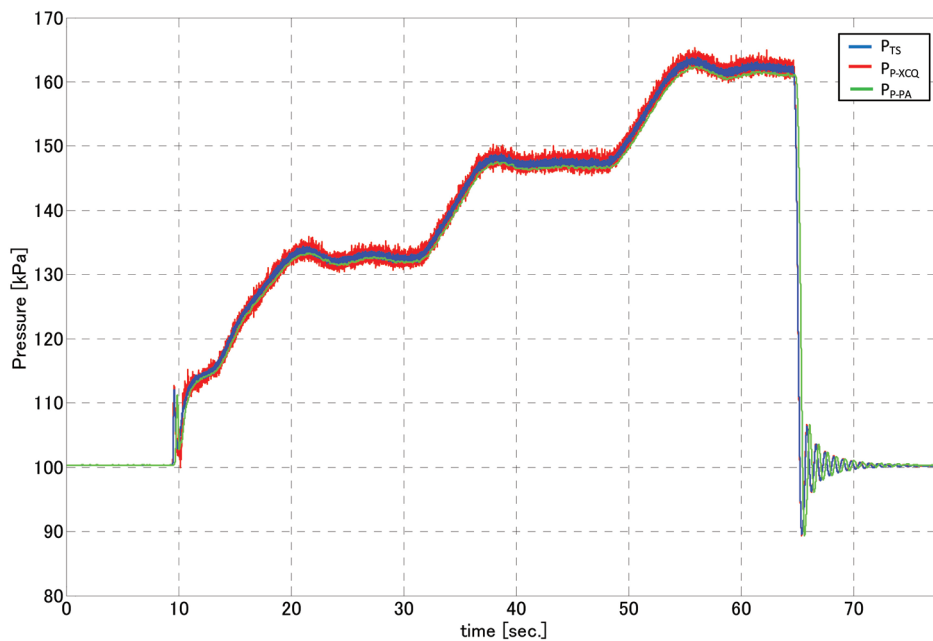
次に、 $P_p$  と  $P_{TS}$  のそれぞれを用いて式 (5.22) を用いて求めた全圧を  $P_{op}$  並びに  $P_{OTS}$  と表わすことにする。表 10 より、これら全圧の違いはほとんど見られない。次に、 $P_p$ 、 $P_{op}$  を用いて得たマッハ数を  $M_p$  とし、 $P_{TS}$ 、 $P_{OTS}$  から求めたマッハ数を  $M_{TS}$  と表わし、これらの関係を図 18 に示す。これらのマッハ数の間には、 $P_p$  と  $P_{TS}$  の関係と

同様に比例係数が凡そ 1 で線形近似できることが分かる。この誤差を詳細に観るため、 $M_{TS}$  に対して  $M_{TS} - M_p$  を描かせたのが図 19 である。これらのマッハ数の差は  $\pm 0.01$  程度の領域に分布するが、マッハ数が 1.1 以上になるとこの差が拡大することが分かる。

以上から、定値制御においては、測定部圧力・マッハ

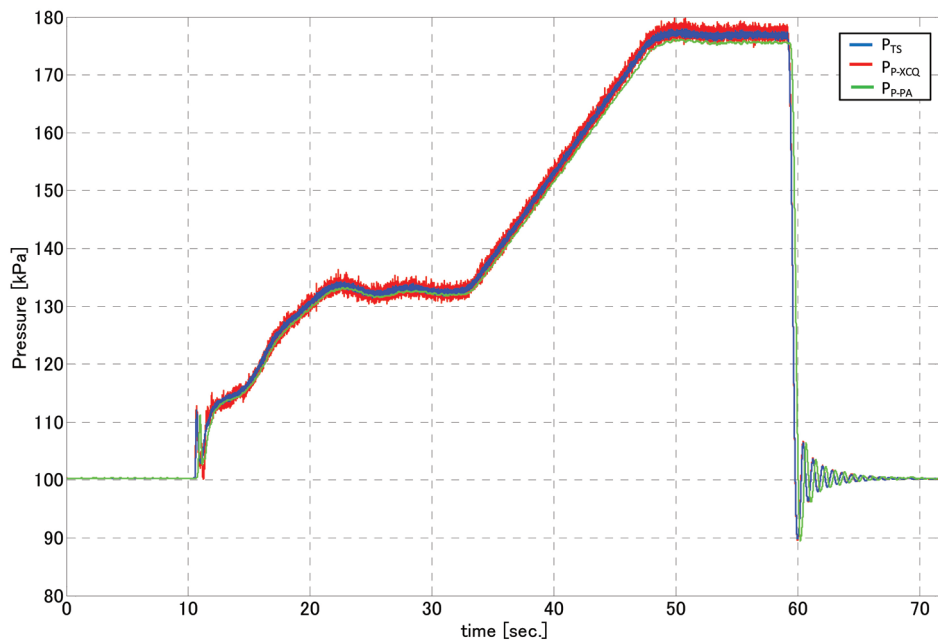


(a) 設定全圧 150⇒175⇒200 kPa



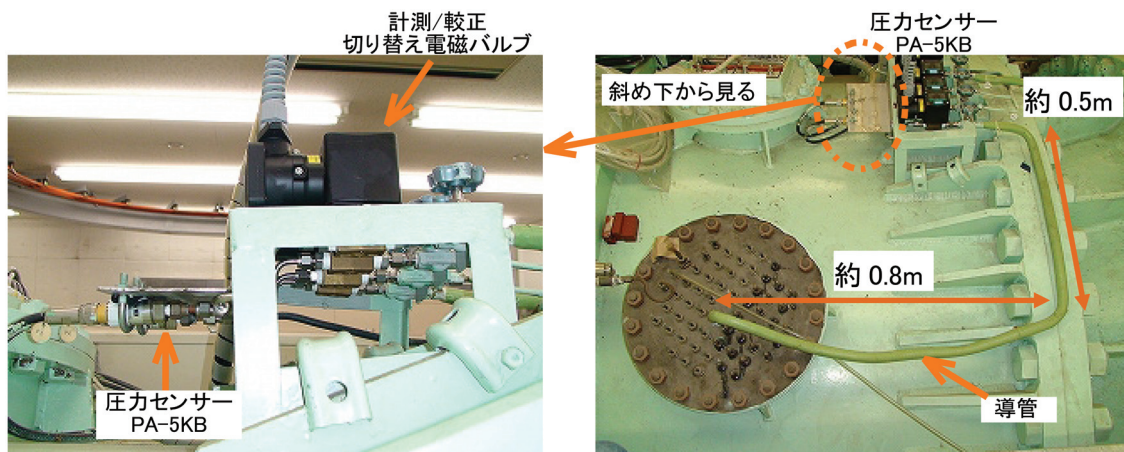
(b) 設定全圧 225⇒250⇒275 kPa

図 20 測定部側壁圧力とピレナム室圧力の比較 (設定マッハ数 0.90) (続く)



(c) 設定全圧 225⇒300 kPa

図 20 測定部側壁圧力とプレナム室圧力の比較（設定マッハ数 0.90）（続き終わり）

図 21 プレナム室圧力  $P_{p\_PA}$  の計測センサーと導管部の写真

数はプレナム室圧力とこれより求めたマッハ数と全般的には良く一致する。一方、より精度の高い気流状態量計測のためには、 $P_{TS}$ を直接計測する検討を今後進めるべきと考える。

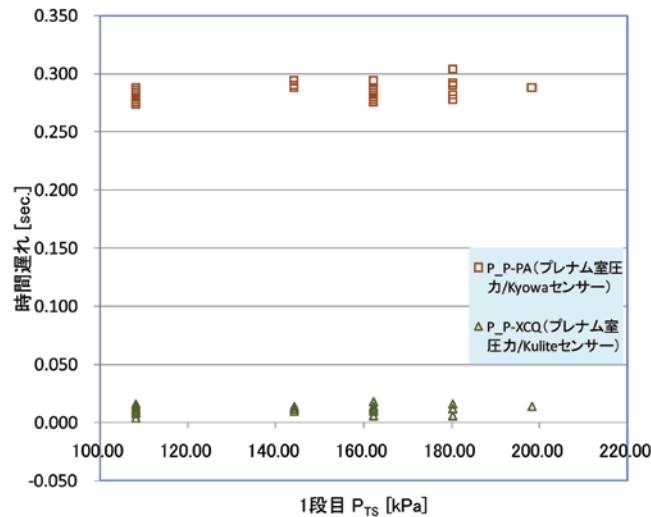
### 5.3.2 時間遅れ

既述の通り測定部上下壁は多孔板であり、風洞制御上ではプレナム室圧力  $P_p$  を測定部静圧として気流制御している。一方、測定部圧力変動がプレナム室圧力計測点まで伝播する際の時間遅れが懸念される。そこで、測定部側壁圧力  $P_{TS}$  と、プレナム室圧力  $P_p$  を比較してみる。

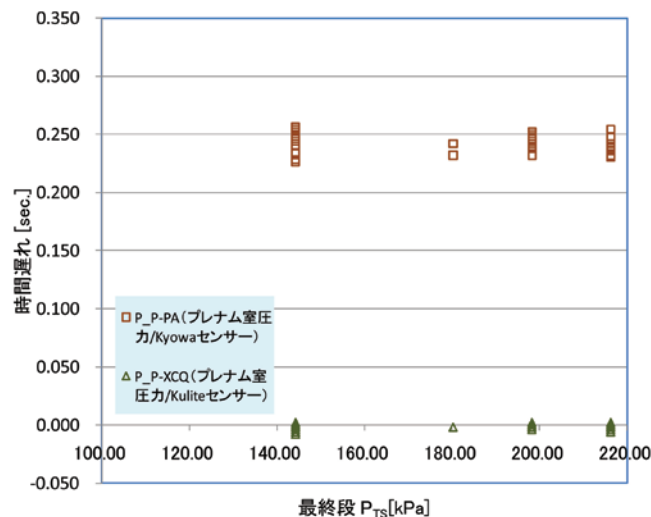
一例として、表 4 に示す試験番号 08312～08314 の  $M = 0.90$  で試験したケース夫々に対して、 $P_{TS}$  と  $P_p$  の両圧力を同一の図に示した（図 20 (a)～(c)）。なお、 $P_p$  としては、(株)共和電業製 PA-5KB 圧力センサーを用いて通常計測している系統に加え、この圧力計測孔位置に Kulite XCQ062 圧力センサーを直接設置（図 10 の“非常常圧力センサー”位置）して計測したデータの 2 種類（前者を  $P_{p\_PA}$ 、後者を  $P_{p\_XCQ}$  とする）を示す。プレナム室内では図 17 に示す程度の  $P_{TS}$  からの差があるために  $P_{TS}$  と  $P_{p\_PA}$  並びに  $P_{p\_XCQ}$  の時系列データは完全に一致はせず、定値制御とスイープ制御時の時間遅れを定量化す

表 11 測定部圧力からのプレナム室圧力の時間遅れ

試験 番号	設定 マッハ 数	1段目 設定 静圧	最終段 設定 静圧	立ち上がり時					通風停止時				
				圧力 [kPa]			時間遅れ[sec.]		圧力 [kPa]			時間遅れ[sec.]	
				P <sub>TS</sub>	P <sub>P-PA</sub>	P <sub>P-XCQ</sub>	P <sub>P-PA</sub>	P <sub>P-XCQ</sub>	P <sub>TS</sub>	P <sub>P-PA</sub>	P <sub>P-XCQ</sub>	P <sub>P-PA</sub>	P <sub>P-XCQ</sub>
08300	0.70	108.14	144.19	112.03	110.94	111.56	0.282	0.004	91.40	90.98	91.14	0.234	-0.002
08301	0.70	144.19	180.23	112.71	111.99	112.19	0.294	0.010	91.36	90.93	91.10	0.232	-0.002
08302	0.70	180.23	216.28	113.20	113.07	112.69	0.304	0.012	91.44	91.24	91.65	0.232	-0.004
08303	0.75	108.14	144.19	111.87	109.65	111.44	0.288	0.012	90.55	90.25	90.69	0.240	-0.008
08304	0.75	162.21	198.26	112.78	112.09	111.93	0.294	0.018	90.62	90.61	90.97	0.232	0.000
08305	0.80	108.14	144.19	111.71	110.40	111.27	0.284	0.014	89.31	89.19	89.42	0.244	-0.002
08306	0.75	144.19	216.28	112.54	111.56	112.00	0.290	0.010	90.74	90.46	90.82	0.230	-0.006
08307	0.80	162.21	198.26	112.70	111.67	112.10	0.288	0.012	90.15	90.17	90.38	0.240	0.000
08308	0.80	144.19	216.28	112.48	111.31	111.91	0.288	0.012	90.16	90.22	90.35	0.240	-0.002
08309	0.85	108.14	144.19	111.62	110.39	111.22	0.282	0.012	88.39	88.54	88.61	0.250	0.002
08310	0.85	162.21	198.26	112.67	111.47	112.09	0.288	0.014	89.67	89.66	89.93	0.242	-0.002
08311	0.85	144.19	216.28	112.48	111.16	111.93	0.288	0.014	89.92	89.89	90.11	0.236	-0.002
08312	0.90	108.14	144.19	111.15	109.84	110.70	0.280	0.010	87.13	86.98	87.03	0.252	0.000
08313	0.90	162.21	198.26	112.48	111.28	111.91	0.288	0.014	89.44	89.31	89.67	0.238	-0.004
08314	0.90	162.21	216.28	112.61	111.21	112.00	0.288	0.012	89.65	89.51	89.88	0.230	-0.004
08315	0.95	108.14	144.19	111.55	110.06	111.11	0.280	0.012	86.13	86.29	86.37	0.252	0.000
08316	0.95	162.21	198.26	112.14	110.72	111.56	0.282	0.012	89.15	89.17	89.32	0.240	-0.004
08317	0.95	162.21	216.28	112.37	110.92	111.78	0.284	0.010	89.36	89.25	89.58	0.240	0.002
08318	0.98	108.14	144.19	111.58	110.05	111.13	0.286	0.016	84.89	85.30	85.12	0.256	0.000
08319	0.98	162.21	198.26	112.22	110.74	111.65	0.284	0.012	88.63	88.65	88.84	0.248	0.002
08320	0.98	162.21	216.28	112.46	110.98	111.82	0.286	0.014	89.03	88.96	89.23	0.240	-0.002
08321	1.05	108.14	144.19	111.65	110.13	111.18	0.282	0.012	82.16	82.97	82.39	0.250	-0.002
08322	1.05	162.21	198.26	112.31	110.70	111.74	0.282	0.010	88.01	87.83	88.25	0.244	-0.004
08323	1.05	162.21	216.28	112.29	110.78	111.72	0.286	0.014	88.39	88.35	88.59	0.242	-0.002
08324	0.82	108.14	144.19	111.69	110.57	111.24	0.286	0.014	89.42	89.13	89.17	0.248	0.000
08325	0.84	108.14	144.19	111.69	110.46	111.27	0.286	0.014	88.53	88.44	88.65	0.244	-0.002
08326	0.86	108.14	144.19	111.70	110.50	111.28	0.284	0.012	88.19	88.13	88.35	0.248	-0.002
08327	0.88	108.14	144.19	111.69	110.36	111.26	0.284	0.012	87.63	87.64	87.83	0.250	0.000
08328	0.92	108.14	144.19	111.75	110.37	111.27	0.280	0.012	86.85	87.04	87.03	0.250	-0.002
08329	0.94	108.14	144.19	111.58	110.10	111.19	0.278	0.010	86.10	86.13	86.30	0.250	0.000
08330	0.96	108.14	144.19	111.60	110.24	111.13	0.274	0.004	85.52	85.73	85.63	0.254	-0.002
08331	1.00	108.14	144.19	111.51	110.25	111.08	0.280	0.012	84.05	84.47	84.25	0.256	0.002
08332	1.02	108.14	144.19	111.71	110.30	111.24	0.274	0.004	83.47	83.96	83.65	0.252	-0.004
08333	1.04	108.14	144.19	111.68	110.12	111.18	0.276	0.008	82.64	83.18	82.82	0.254	0.000
08334	1.10	108.14	144.19	111.69	110.24	111.24	0.278	0.010	95.06	95.20	95.11	0.228	-0.004
08335	1.15	108.14	144.19	111.56	109.99	111.09	0.282	0.014	94.88	95.02	94.95	0.228	-0.004
08336	1.20	108.14	144.19	111.50	110.03	111.10	0.276	0.008	94.83	95.09	94.92	0.226	-0.006
08337	0.82	162.21	198.26	112.71	111.47	112.12	0.286	0.010	90.20	89.96	90.29	0.244	0.000
08338	1.20	162.21	198.26	112.51	110.92	111.88	0.280	0.012	83.15	83.41	83.35	0.252	0.000
08339	1.20	162.21	216.28	113.43	111.79	112.85	0.282	0.012	85.73	85.75	85.66	0.248	-0.002
08340	1.15	162.21	198.26	113.38	111.81	112.76	0.284	0.012	85.75	86.14	86.02	0.250	-0.002
08341	1.15	162.21	216.28	113.12	111.60	112.54	0.284	0.014	86.96	87.22	87.21	0.254	0.002
08342	1.10	162.21	198.26	113.44	111.96	112.84	0.278	0.006	87.33	87.53	87.61	0.250	0.000
08343	1.10	180.23	216.28	113.25	111.75	112.65	0.282	0.012	88.47	88.65	88.70	0.248	0.000
08344	1.00	162.21	198.26	113.06	111.77	112.48	0.286	0.012	89.36	89.22	89.43	0.244	0.000
08345	1.00	180.23	216.28	113.26	111.85	112.63	0.278	0.006	89.63	89.58	89.77	0.238	0.000
08346	0.94	162.21	198.26	113.25	112.52	112.62	0.288	0.010	89.88	89.65	89.98	0.238	-0.004
08347	0.94	180.23	216.28	113.41	111.37	112.79	0.292	0.012	90.18	90.17	90.31	0.240	-0.002
08348	0.96	162.21	198.26	113.24	112.61	112.61	0.286	0.014	89.81	89.78	89.95	0.244	-0.004
08349	0.96	180.23	216.28	113.42	112.23	112.80	0.290	0.016	89.88	89.82	90.05	0.240	-0.002
08350	0.92	198.26	216.28	113.20	111.79	112.60	0.288	0.014	90.22	90.05	90.39	0.238	0.000
08351	0.92	162.21	180.23	112.99	111.67	112.38	0.276	0.006	89.77	89.58	89.95	0.242	-0.002



(a) 風洞起動時の圧カピークの位置より算出



(b) 通風停止時の圧カピークの位置より算出

図 22 測定部圧力からのプレナム室圧力の時間遅れ

るのは困難であるが、定性的には追随性は良好と言える。一方、大きな圧力変動が起きる起動直後と通風停止後は、 $P_{P-PA}$  では時間遅れが顕著に見られる。これは、 $P_{P-PA}$  の計測系ではプレナム室天井の圧力孔から圧力センサーまでの間に導管を繋げていることによることが主因と考えられる（導管の写真を図 21 に示す）。これらの通風時間ではピーク値が得られるため、それらのタイミングを特定でき、各計測系間の時間遅れを求めることが可能である。これらの結果を示したのが表 11 であり、立ち上がり直後の整定  $P_{TS}$  と通風停止直前の整定  $P_{TS}$  を横軸にして  $P_{P-PA}$  並びに  $P_{P-XCQ}$  夫々の時間遅れを示したのが図 22 である。これから、上述の通り  $P_{P-PA}$  の時間遅れが改めて明らかとなり、その量は  $P_{TS}$  の大きさに依らずにほぼ一定で、0.25 ～ 0.3 秒程度であることが分かる。また、

$P_{P-XCQ}$  の時間遅れは  $P_{P-PA}$  に比べると 1 オーダー短いことがわかる。なお、通風停止時に  $P_{P-XCQ}$  の時間進み（マイナスの時間遅れ量）が見られるが、これは  $P_{TS}$  が  $X=-425$  mm の一点のみの圧力を計測しているのに対して、プレナム室内の圧力は約 2m に及ぶ測定部通路領域の状態変化の影響を受けていることに因ると考えられる。

#### 5.4 風洞起動時のマッハ数オーバーシュート

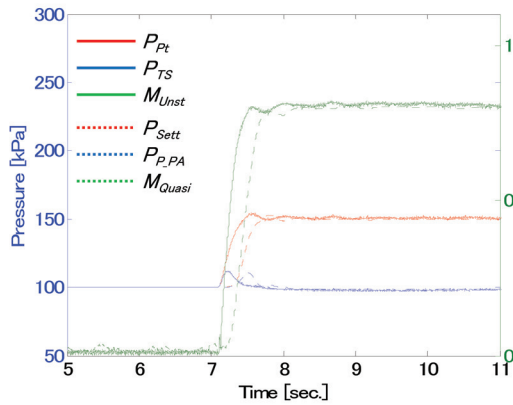
吹き出し式の高速度風洞では、通風前に流路を加圧充填するなどの対策を行わない限り、風洞起動時にマッハ数がオーバーシュートするのが一般的である。旧航空宇宙技術研究所にて整備されていた二次元風洞（平成 9 年に大規模改修が加えられて現在は JAXA 0.8m×0.45m 高レイノルズ数遷音速風洞と改名されている）の気流特性を



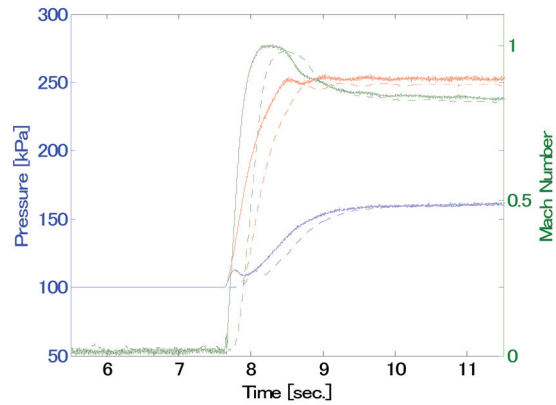
報告した文献 8 によると、集合胴内の圧力を最短時間で整定させる場合、集合胴体積とあまり変わらないプレナム室内圧力の整定遅れにより測定部マッハ数のオーバーシュートが発生する、と記述されている。本節では、この起動時のマッハ数オーバーシュートに関して検討をする。まず、風洞起動時の気流状態量の変化を見てみる。

FWT では、通常の風洞試験において集合胴圧力  $P_{Set}$

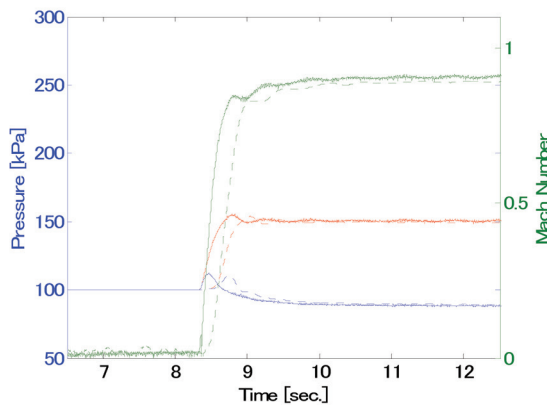
並びにプレナム室圧力  $P_{P,PA}$  を計測している。これらから求めたマッハ数  $M_{Quasi}$  とする。一方、風洞測定部  $X=-181.5\text{mm}$  位置での断面中心部全圧を、非定常圧力センサーを先端に搭載したピトー管により計測した結果が FWT にはある。この計測圧力を  $P_{pt}$  とし、測定部側壁圧力  $P_{TS}$  並びにこれらの圧力より求めたマッハ数を  $M_{Unst}$  とする。風洞起動前後数秒程度におけるこれらの状態量を



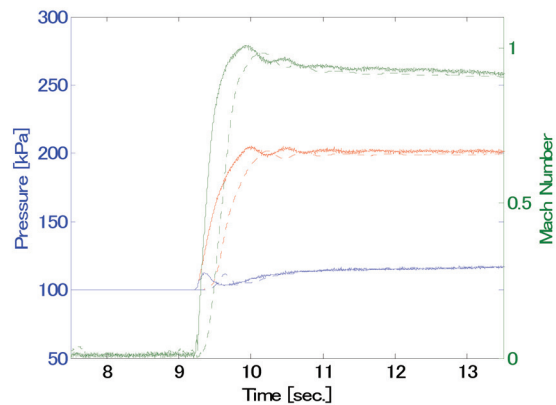
(a) Run#08269 設定(M,Po)=(0.80, 150kPa)



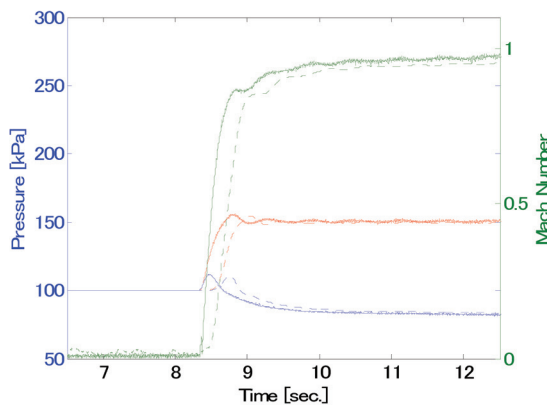
(b) Run#08270 設定(M,Po)=(0.80, 250kPa)



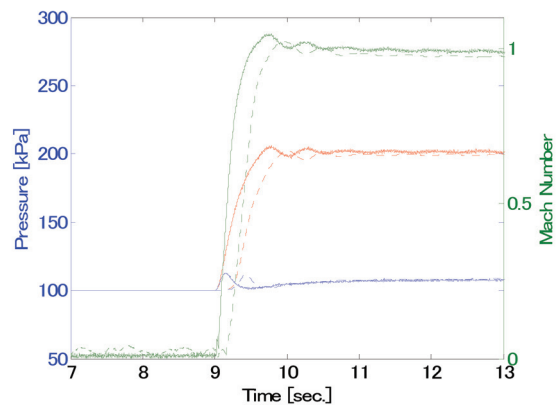
(c) Run#08271 設定(M,Po)=(0.90, 150kPa)



(d) Run#08272 設定(M,Po)=(0.90, 200kPa)



(e) Run#08273 設定(M,Po)=(0.98, 150kPa)



(f) Run#08274 設定(M,Po)=(0.98, 200kPa)

図 23 起動時圧力変動 (続く)

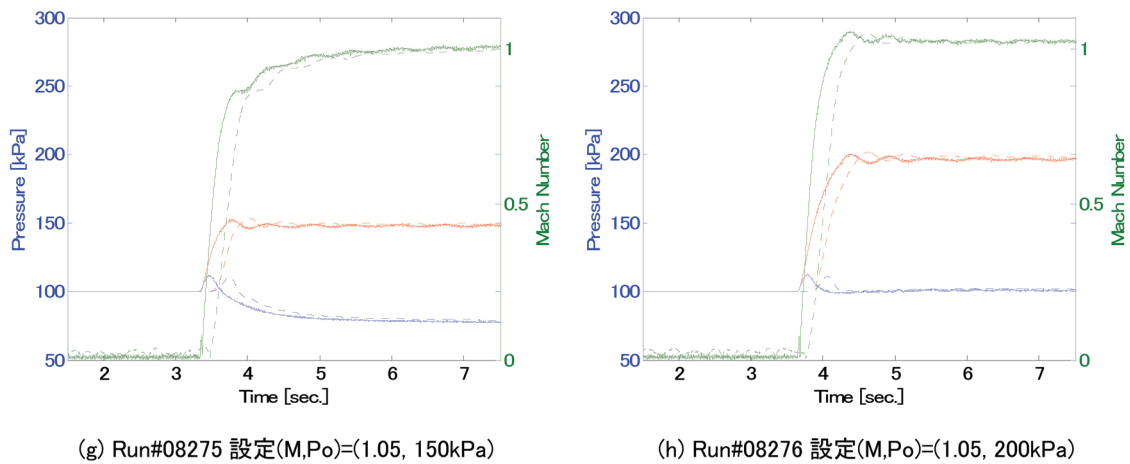


図 23 起動時圧力変動 (続き終わり)

表 12 気流設定条件と起動時過渡特性の関係

Run #	設定値		整定値				オーバーシュート量		時定数 [sec.]		
	全圧 [kPa]	マッハ数	$P_{Pt}$ [kPa]	$P_{TS}$ [kPa]	$M_{Unst}$	$P_{TS}$ (ゲージ圧) [kPaG]	$P_{Pt}$ [kPa]	$M_{Unst}$	$P_{Pt}$	$P_{TS}$	$M_{Unst}$
08269	150	0.80	150.77	97.95	0.8097	-2.31	4.17	0.0133	0.17	0.67	0.1640
08270	250	0.80	252.78	160.03	0.8352	59.72	3.44	0.1660	0.37	0.87	0.1480
08271	150	0.90	150.55	88.56	0.9047	-11.71	5.04	0.0104	0.16	0.73	0.1860
08272	200	0.90	201.53	115.71	0.9267	15.43	3.78	0.0819	0.28	0.08	0.1680
08273	150	0.98	150.65	82.84	0.9653	-17.43	5.46	0.0170	0.16	0.76	0.2040
08274	200	0.98	201.48	107.36	0.9926	7.07	4.50	0.0558	0.28	0.04	0.1820
08275	150	1.05	147.87	78.25	0.9985	-21.81	4.75	0.0137	0.16	0.78	0.2180
08276	200	1.05	196.35	100.90	1.0235	0.92	3.95	0.0336	0.27	0.00	0.1940

抜き出したのが図 23(a)～(h)である。なお、設定マッハ数が超音速のものもあるが、ほぼマッハ数 1 に近いことから、 $M_{Unst}$  算出においては衝撃波補正をせずに  $P_{Pt}$  と  $P_{TS}$  を式(4.1)の  $P_{Set}$  と  $P_p$  と入れ替えて求めた。また、計測系について述べると、 $P_{Set}$  及び  $P_{p,PA}$  は圧力配管を通して圧力センサーに接続されており、 $P_{Pt}$  及び  $P_{TS}$  は圧力配管を通さず直接圧力センサーにより計測している。従って、図 23 より、 $P_{Set}$  及び  $P_{p,PA}$  は  $P_{Pt}$  及び  $P_{TS}$  と比べて夫々時間遅れが見られる。ただ、 $P_{Set}$  及び  $P_{p,PA}$  の時間遅れが双方で同程度であることから、 $P_{Set}$  及び  $P_{p,PA}$  から得られた  $M_{Quasi}$  は、 $M_{Unst}$  と比較してオーバーシュート量としては大きな変化とはなっていない。また、既述の通り  $P_{Set}$  は厳密には全圧とは異なるため、これより求める  $M_{Quasi}$  は  $M_{Unst}$  と比べて小さい値を示す一因となっている。本節では起動時の非定常な現象を見て行くため、以下では  $P_{Pt}$ 、 $P_{TS}$  及び  $M_{Unst}$  に着目して議論を進める。

図 23 より、いずれのマッハ数でも、設定全圧が 150kPa の場合ではマッハ数のオーバーシュート(整定マッハ数に対して)は見られない。設定全圧が 200kPa 以上では、 $P_{TS}$  整定値が風洞起動前の圧力(大気圧)か

ら差が大きいほどマッハ数オーバーシュートは大きくなる。特に、設定全圧 250kPa の場合 (Run#08270)、 $P_{Pt}$  がほぼ整定全圧に達した後も  $P_{TS}$  は整定途上にある。このことは、前述の文献 8 の説明にある、プレナム室の整定遅れ(プレナム室と測定部を合わせた容積内での圧力整定遅れ)によりマッハ数オーバーシュートが表れてくるというメカニズムの可能性を強く示唆している。

表 12 に、気流設定条件により、どの程度のオーバーシュートが表れるかを数値として整理した。ここで、「設定値」は風洞気流条件設定値、「整定値」は図 23 の各図に現れるプロットの最後の 2 秒の平均値、「オーバーシュート量」は整定値からの最大値の差であり、「時定数」は起動直後から整定値の 62.3%の値に達するまでの時間である(図 24)。なお、圧力についてはゲージ圧力が 62.3%の値に達するまでの時間とした。この表から、 $P_{TS}$  (ゲージ圧) に対して  $P_{Pt}$ 、 $P_{TS}$  及び  $M_{Unst}$  の時定数と、 $M_{Unst}$  のオーバーシュート量とをそれぞれ描画したのが図 25(a),(b)である。

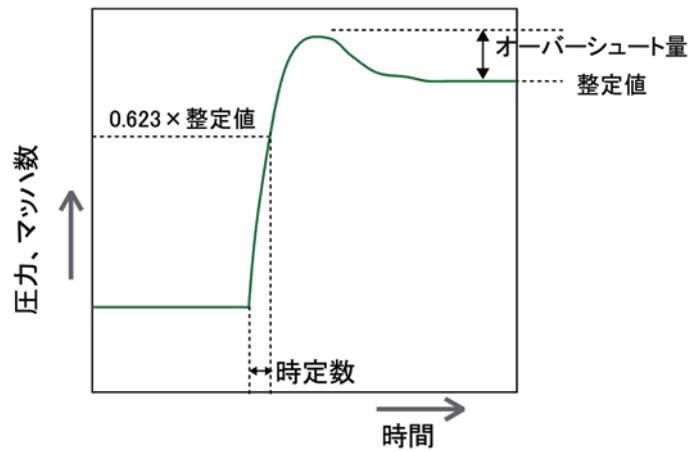


図 24 起動時オーバーシュート説明図

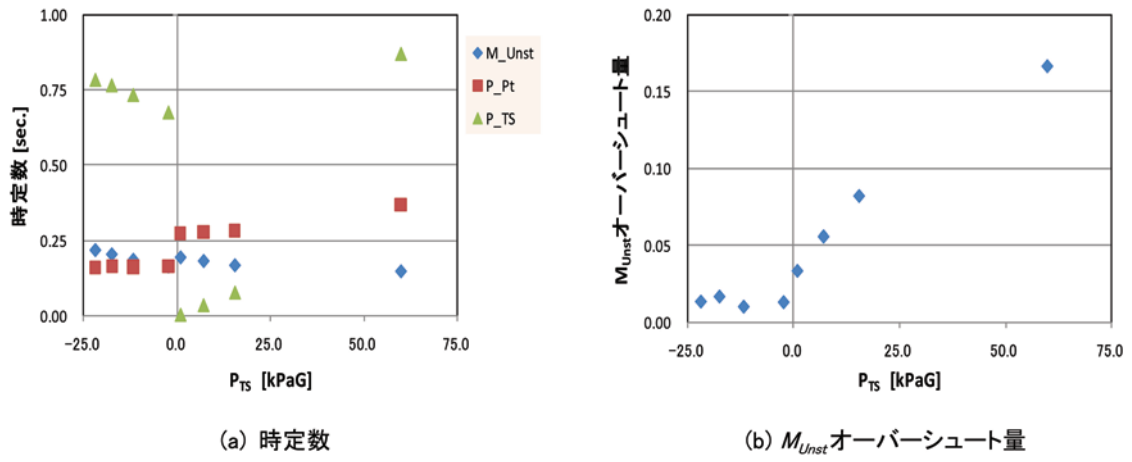


図 25 測定部静圧（ゲージ圧）に対する起動時過渡特性

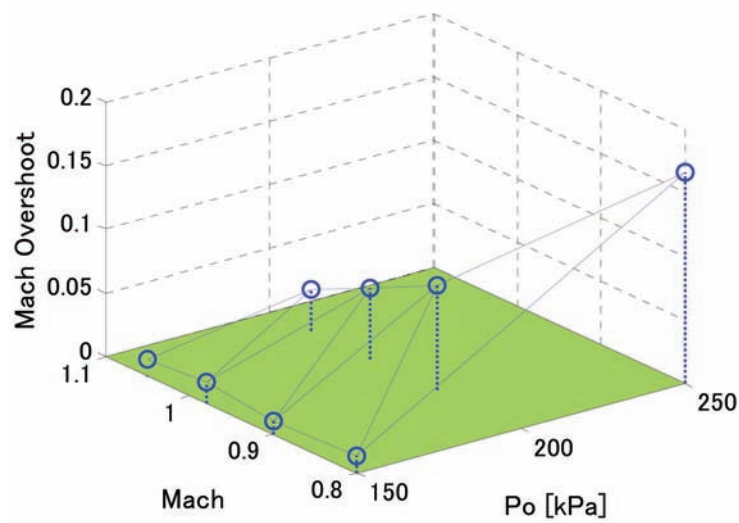


図 26 設定全圧・マッハ数に対する  $M_{Unst}$  オーバーシュート量

時定数の図では、図 23 で見たように  $P_{TS}$  整定値が大きい場合、 $P_{pt}$  よりも  $P_{TS}$  の整定に時間がかかるという現象が再確認される。この結果、所定の  $P_{TS}$  よりも低い圧力状態が続き、 $M_{Unst}$  にオーバーシュートが生じてくることがわかる。

ところで、実際に風洞試験をする際に必要な事は、設定条件に対してどの程度のマッハ数オーバーシュートが見込まれるかを事前に知り、風洞模型に対して起動時マッハ数オーバーシュートによるフラッタ発生を防ぐ様に気流条件を設定することである。現在得られているオーバーシュートのデータを設定全圧及びマッハ数に対してプロットしたのが図 26 であり、マッハ数オーバーシュート量は二変数関数の値として推定する必要がある。これらの得られているデータを用いて二次元内挿することは科学計算ソフトウェアの関数などにより行えるが、内挿ではなくて非線形な関数として近似することは難しい。これを簡単に可能とする一つの手法に、ニューラル・ネットワークがある。難しい設定を行う必要がなく、GUI によりニューラル・ネットワークを構築できるツールとして、NeuroDimension 社の NeuroSolutions ソフトウェアがあげられる。本報告では同ソフトウェアを利用して任意の設定条件に対するオーバーシュートを推定した。なお、同ソフトウェアにはネットワークを構築するためのメニューがいくつかあり、今回利用したのは NeuralExpert と呼ばれるメニューである。同ソフトウェアの詳細は文献 9 を参照されたい。まず、抱えている問題のタイプを設定する。タイプとしては

“*Classification* : Determine a class or group for each input pattern”

“*Function Approximation* : Determine a continuous value for each input pattern”

“*Prediction* : Determine a time-series value using information from the past”

“*Clustering* : Group or visualize data without knowledge of the desired groupings”

の 4 タイプがあり、我々の目的としては設定条件をインプットとしたマッハ数オーバーシュートの推定であるので、“*Function Approximation*” を選択する。ネットワークを構築するためには、トレーニング・データと呼ばれる、ネットワークの学習のためのデータを準備する必要がある。これらのデータは、入力値とそれに対して期待される出力値にて構成される。より優秀なネットワークを構築するためにはトレーニング・データに含まれるデータセットは多いことが望まれる。一方、今回得られているデータは 8 ケースのみである。そこで、設定全圧を  $\pm 0.5\text{kPa}$ 、設定マッハ数並びにマッハ数オーバーシュート量を  $\pm 0.005$  の範囲でランダムに変化させ、データセット量を 80 ケースに擬似的に増やした。NeuralExpert メニューの最後でニューラル・ネットワークの複雑さのレベルを設定する。低・中・高の 3 段階があり、ネットワークとしてはシンプルであることが重要であるため、“低レベル” でネットワークを構築した。構築したネットワークの概要図を図 27 に示す。入力は設定全圧とマッハ数の 2 要素、出力はマッハ数オーバーシュートの 1 要素、その間に隠れ層として 3 要素を配置した構成である。ネットワークのトレーニングは、*Backpropagation* という手法により各シナプスの重みを計算して行く。1000 サイクルのトレーニングの結果、期待値とシミュレーション値の二乗平均誤差は 0.000385 まで低下した。このネットワークを使い、設定全圧を 150 ~ 300kPa、設定マッハ数を 0.6 ~ 1.2 としてマッハ数オーバーシュートを推定した曲面を図 28 に示す。マッハ数が低くて全圧が高い条件にてマッハ数オーバーシュートが目立つ。これは既に述べた通り、 $P_{TS}$  の値が大きくなって起動時の  $P_{TS}$  整定に時間がかかるためである。トレーニング・データ付近では信頼性は高いと思われるが、一方、このネットワークを実際に使用するには、実際の試験データが存在しない設定全圧・マッハ数領域でのトレーニング・データを更に整備してトレーニングをする必要があり、今後の課題としたい。

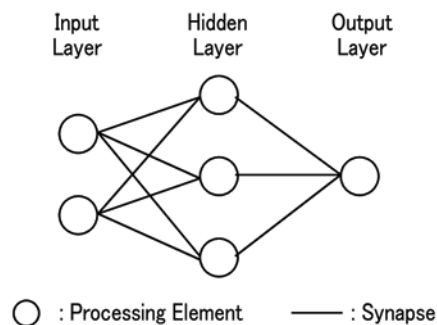


図 27 構築したニューラル・ネットワーク

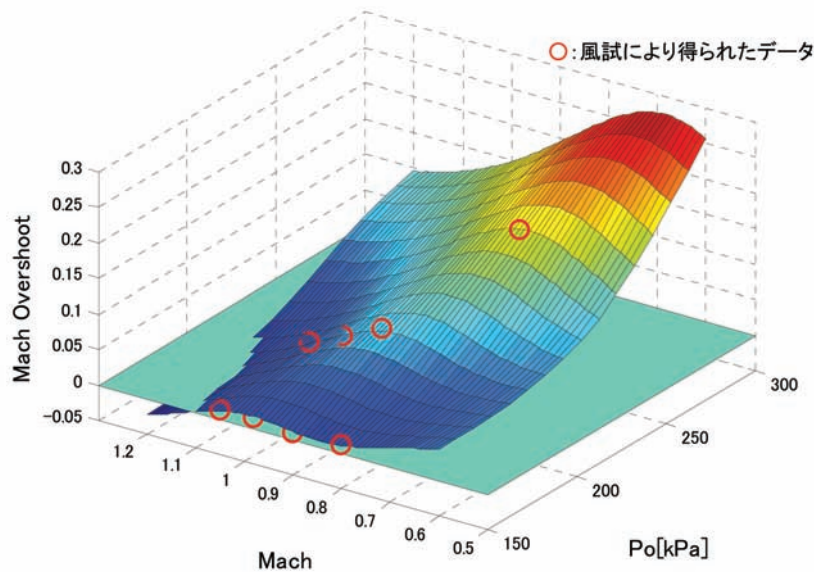


図 28 ニューラル・ネットワークにより推定したマッハ数オーバーシュート曲面

## 6 まとめ

昭和 34 年の設備完成当時直後に行った気流の確認試験以降、遷音速フラッタ風洞では包括的な気流確認試験は行って来なかったが、平成 20 年にこれを実施し、以下の結果を得た。

- ・ 風洞気流の定値制御では、設定全圧ではなくて集合胴圧力の目標値を気流制御設定値から求め、かつ、圧力センサーの精度を考慮することで、集合胴圧力並びにプレナム室圧力は何れも風洞仕様の要求精度を満足していることが示された。
- ・ 気流のスウィープ制御では、今回実施した何れのケースでも、風洞仕様の要求精度を満足していることが確認された。一方、実測値の目標値からの標準偏差の大部分は、実測値の偏差分が占めていることが確認された。
- ・ 測定部の中心軸にそってセンターポールを設置して静圧計測を行った。この結果、測定部シュリーレン窓中心とその上流側 500 mm 付近の間では、主流マッハ数に依らずにセンターポール圧力がプレナム室圧力とほぼ等しくなることが確認された。また、センターポール圧力と測定部側壁圧力（シュリーレン窓中心より上流に 425 mm で計測）が良く一致していることも分かった。以上より、シュリーレン窓中心からその上流側 500 mm 付近の間に風洞模型を設置することが推奨される。
- ・ 風洞では、風洞測定部静圧として通常プレナム室圧力を計測している。今回、この圧力と測定部側壁圧力とを比較した。定値制御においては、測定部圧力とこれより求めたマッハ数は、プレナム室圧力とこれより求めたマッハ数と比較して全般的には一致した傾向が見られた。一方、主流マッハ数が 1.10 を超える領域では両者の差が大きくなることが確認された。
- ・ 次に、プレナム室圧力計測の時間遅れを検討した。この結果、測定部側壁とプレナム室圧力との間の時間遅れは、圧力センサーを直付けした計測ではほとんど見られないが、導管を経由して計測したプレナム室圧力（通常の風洞試験の計測方法）では測定部側壁圧力よりも 0.25 ～ 0.30 秒程度遅れることが明らかとなった。
- ・ 風洞起動時のマッハ数オーバーシュートについて、測定部に設置した全圧ピトー管と測定部側壁（共に、圧力センサーを直付け）の圧力計測結果をもとに検討した。この結果、いずれの試験マッハ数でも、設定全圧が 150kPa と低い場合にはマッハ数のオーバーシュートは見られなかった。一方、設定全圧が 200kPa 以上では、測定部圧力の整定値が風洞起動前の圧力（大気圧）から差があるほどマッハ数オーバーシュートが大きくなることが確認された。これは、プレナム室と測定部を合わせた容積内での圧力整定遅れによりマッハ数オーバーシュートが現れてくるというメカニズムの可能性を強く示唆している。
- ・ 起動時マッハ数オーバーシュートを、既存の実験データを利用してニューラル・ネットワークにより推定したところ、主流マッハ数が低くて全圧が高い条件になるとマッハ数オーバーシュートが大きくなる傾向が見られた。この傾向は上述の説明と一致する。なお、こ

のニューラル・ネットワークの信頼性を高めて実用に供するためには、推定領域をカバーする実験データを今後揃えていく必要がある。

### 参考文献

- 1) Saitoh,K. and Tamayama,M., Two-dimensional flutter test of a supercritical wing in transonic regime, Proceedings of the International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics, 2009, Seattle, 2009.
- 2) Saitoh,K., Kikuchi,T. and Tamayama,M., Wind Tunnel Flutter Tests for NEXST-1, Proceedings of the International Forum on Aeroelasticity and Structural Dynamics 2003, Amsterdam, 2003.
- 3) Machida,S., Kikuchi,T., Arizono,H., Saitoh,K. and Nakamichi,J., Transonic Flutter Characteristics of an Arrow Wing Mounted with Engine, AIAA 2005- 0835, 2005.
- 4) 有菌仁, 中道二郎, 遷音速域における T 型尾翼のフラッタ特性, 第 49 回構造強度に関する講演会講演集, 2007, 225-227 頁.
- 5) Heeg,J., Chapter 4: Wind Tunnel Testing, Lecture Material of Aeroelasticity: State-of-the-Art Practices, AIAA Professional Development Course, 2008.
- 6) 中井暎一, 橋爪宏, 中村泰治, 航空技術研究所 (60cm × 60cm) 遷音速フラッタ試験設備の計画と整備試験, 航空技術研究所報告 NAL-TR-5, 1960.
- 7) 菊池孝男, 江尻宏, 玉山雅人, 森田甫之, 中道二郎, 航技研遷音速フラッタ試験設備の新システム設計第 I 部「機能編」, 航空宇宙技術研究所報告 NAL-TR-1401, 2000.
- 8) 三輪等, 佐藤衛, 小国保男, 神田宏, 『航技研二次元風洞の気流特性について (IV) - 二次元風洞気流制御 -』, 航空宇宙技術研究所報告 NAL-TR-862, 1985.
- 9) NeuroDimension, NeuroSolutions Help, [http://www.neurosolutions.com/downloads/ documentation.html](http://www.neurosolutions.com/downloads/documentation.html), 2006.