

# 宇宙航空研究開発機構研究開発報告

## JAXA Research and Development Report

---

0.44m極超音速衝撃風洞  
ターンテーブル型模型支持装置環境下でのマッハ数校正試験

山崎喬，中北和之，関根英夫，渡利實

2006年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

## 0.44 m 極超音速衝撃風洞

### ターンテーブル型模型支持装置環境下でのマッハ数校正試験

山崎喬、中北和之、関根英夫、渡利實

#### Mach Number Calibration of 0.44 m Hypersonic Shock Tunnel with a Turntable Model Support System

Takashi YAMAZAKI, Kazuyuki NAKAKITA, Hideo SEKINE, and Minoru WATARI

#### ABSTRACT

Mach number calibration tests were conducted at the JAXA 0.44 m Hypersonic Shock Tunnel. Mach number distributions were deduced from the measurements of Pitot pressures and the stagnation pressure, and the estimated stagnation temperature. Pitot pressures were measured by a Pitot rake equipped with 23 ports. From the Pitot pressure distribution, the uniform core was defined as 0.21 m in diameter and 0.30 m in length. Average Mach numbers were 9.79~10.43 depending on the initial pressures of the high pressure tube and the low pressure tube. Estimated uncertainties in the Mach numbers of the uniform core region were  $\pm 0.17$ .

**Keywords:** Hypersonic shock tunnel, Mach number calibration, uncertainty analysis, Pitot pressure, stagnation pressure, stagnation temperature, Pitot rake, precision error, bias error, uniform core region, average Mach number

#### 概 要

1994年、現在の場所に移設改修したJAXA 0.44 m 極超音速衝撃風洞(HST)は、安定した一様流の持続時間数十ミリ秒、通風間隔10~15分間に1ショット、という衝撃風洞として比類のない高生産性を誇っている。近年、試験結果に不確かさ評価を加えて示すことが求められるようになってきたのに対応して2005年10月に統計的評価に耐え得る、より細かい間隔でのピトー圧力測定試験を実施し、マッハ数の校正を行った。本書ではこの試験結果を中心に、前回(1996年11月)の試験結果も含めて報告する。風洞環境としては、マッハ数10ノズルを用いたターンテーブル型模型支持装置環境下である。ピトーレークは23本のピトー管を持つものを用いた。これらのピトー圧力分布および、よどみ点圧力の測定値とよどみ点温度推定値を用いて、Thermally Perfect 気体の式に基づいてマッハ数空間分布を算出した。測定値、推定値に対し誤差解析を行って当該風洞の気流品質を同定した。一様流コアおよびそこでの平均マッハ数は高圧管、低圧管の初期設定圧力の関数で、一様流コアは直径0.21m、長さ0.30m、平均マッハ数は9.79~10.43、マッハ数の不確かさは $\pm 0.17$ 前後であった。

**キーワード:** 極超音速衝撃風洞、気流校正試験、マッハ数分布、不確かさ解析、ピトー圧力、よどみ点圧力、よどみ点温度、ピトーレーク、偶然誤差、偏り誤差、一様流コア、平均マッハ数

---

2006年1月6日 受付 (Received 6 January, 2006)

総合技術研究本部 風洞技術開発センター 極超音速風洞セクション

(Hypersonic Wind Tunnel Section, Wind Tunnel Technology Center, Institute of Space Technology and Aeronautics)

## 記号

$B_i$	測定要素それぞれに対する偏り誤差 (正確度)
$B$	偏り誤差総括値
$M$	マッハ数
$P_4$	高压管初期設定圧力
$P_1$	低压管初期設定圧力
$P_0$	よどみ点圧力
$P_{02}$	ピトー圧力
$P$	95%偶然誤差限界
$S_i$	測定要素それぞれに対する偶然誤差 (精密度)
$T_0$	よどみ点温度
$t$	student $t$ 値
$U_{RSS}$	95%包括度不確かさ
$X$	$X$ 軸座標、気流方向位置、原点はノズル出口、下流方向を正
$Y$	$Y$ 軸座標、気流に直角な水平方向位置、上流を向いて右方向を正
$Z$	$Z$ 軸座標、気流に直角な鉛直方向位置、上方向を正
$\gamma$	比熱比
$\theta_i$	感度係数
$v_i$	偶然誤差要素それぞれに対する自由度 (標本の多寡)

## 1 はじめに

0.44 m 極超音速衝撃風洞 (HST) は 1967 年に建設したガン・タンネル<sup>1)</sup>を 1994 年に現在の場所に移設し、高压管、圧縮管、低压管を長大化する等の改修を行ったものである。これにより安定した一様流の持続時間を最大 50 ミリ秒程度まで延長すると共に、10~15 分間に 1 ショットという通風間隔の短縮化を実現した。<sup>2,3)</sup>

移設改修後の 1995 年 10 月末から 1998 年 1 月にかけて気流確認のため、一連の通風試験を行った。これらの試験結果については、速報として日本航空宇宙学会の年会等で報告している。<sup>4,5)</sup>

一方、近年、試験結果に不確かさ評価を加えて示すことが求められるようになってきた。不確かさの工学的適用に関して米国では国家規格が発行され、米機械学会および米航空宇宙学会では論文掲載の条件としてこの不確かさの表記を求めている。日本機械学会でも上記規格の訳本<sup>6)</sup>が出版され、表記が推奨されている。風洞試験結果の不確かさ評価をするためには、当該風洞の気流品質および計測諸量の不確かさが明確にされていなければならない。そのため 0.5m/1.27m 極超音速風洞については不

確かさを表記することを始めている。<sup>7)</sup>

HST でもこれに対応するため今回 (2005 年 10 月)、統計的評価に耐え得る、より細かい間隔でのピトー圧力測定試験を実施し、マッハ数の空間分布を求めた。本書ではこの試験結果を中心に、前回 (1996 年 11 月) の試験結果も含めて報告する。

## 2 0.44 m 極超音速衝撃風洞

風洞全体の概略を図 2.1 に、外観写真を図 2.2 に示す。本風洞は一段圧縮式の「長持続時間運転モード」と二段圧縮式の「高エンタルピー運転モード」の運転が可能である。管は高压管、圧縮管、低压管に区分され、スペース制約のため圧縮管部を U 字形状に曲げている。高压管は圧縮管の上流側 5 m の部分を包み込むように取付けられている。ピストン方式の第一急速開閉弁を開けると高压管の駆動気体は第一急速開閉弁の位置で 180 度向きを変えて内筒である圧縮管に流入する。圧縮管と低压管の間には隔膜部があり、高エンタルピー運転モードの際には、隔膜部にアルミ隔膜を入れ、低压管と極超音速ノズルの間にはフィルムを用いて二段階の圧縮を行う。気流持続時間は短い、高温度 (高エンタルピー) の極超音速流を得ることが可能である。

本書で扱う長持続時間運転モードの際には隔膜部には何も入れず、圧縮管、低压管は一体となって約 28 m の低压管として動作する。第一急速開閉弁を開けると高压管の駆動空気は低压管の空気をまず衝撃波で加圧し、更に圧縮波で等エントロピー的に加圧する。低压管端に十分圧縮された高压高温のよどみ点状態が形成された時点で、低压管端とノズルを分けているラック・ピニオン付金属製ボールバルブ弁形式の第二急速開閉弁が開けられて空気はノズルに流入し、極超音速流となる。

一般の衝撃風洞では、管の仕切りに金属や樹脂の隔膜を用いており、通風毎に隔膜交換と破膜片の清掃が必要であったが、機械式急速開閉弁の採用はこれらの作業を不要とし、試験間隔の短縮化に貢献している。極超音速ノズルはマッハ数 10 および 12 のものが用意されており、出口径はいずれも 0.44 m である。今回の校正試験はマッハ数 10 ノズルについて行った。

測定部は軸方向が流れと直角な直径 1.5 m の円筒形状で両側の扉には観測窓が用意されている。測定部の下流側は内容積 18 m<sup>3</sup> の真空槽につながっている。排気装置はメカニカルブースターポンプ、油回転ポンプから構成されており、30 分程度で大気圧から風洞試験を行う 1 Pa 程度まで減圧する事ができる。高压空気源は、空気圧縮機、除湿機および蓄圧 4.5 MPa の貯気槽 2 基から構成されている。空気圧縮機は 1 回の通風に使用する高压空気を 10 分程度で補充する事が出来る。

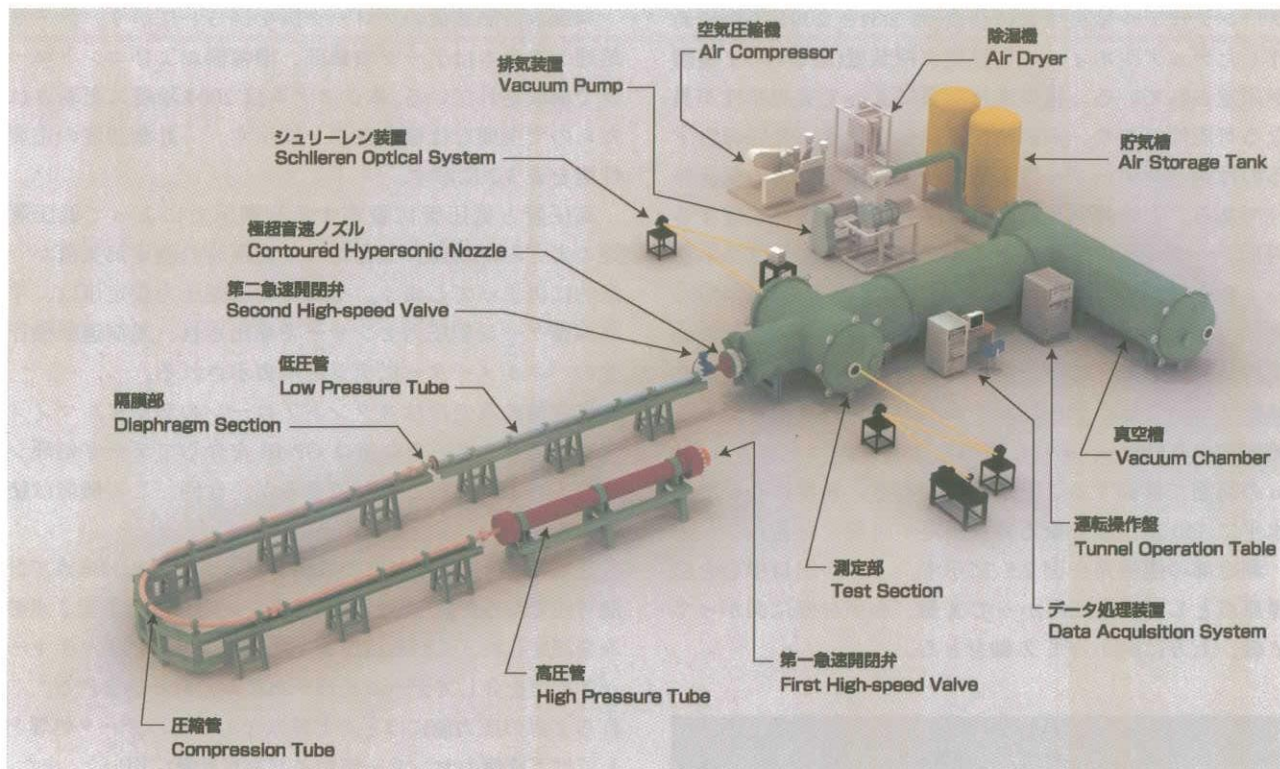


図 2.1 0.44m 極超音速衝撃風洞全体図



図 2.2 0.44m 極超音速衝撃風洞外観

模型支持装置としては当風洞設置時から用いているターンテーブル型模型支持装置(図 2.3)と 2001 年度に新制作したデュアルホイール型模型支持装置(図 2.4)の 2 種類が用意されている。模型支持装置によって気流特性が異なる可能性があり、別個に校正試験を行う。今回報告するのはターンテーブル型模型支持装置環境下での気流特性である。この模型支持装置はノズル出口端に設置する円形テーブル状のもので、そのテーブル上に鉛直ストラットを立て、それにスティングを介して模型を取付ける。ステッピングモーターを用いたパソコン制御により模型支持装置の移動と模型姿勢の変角を行うことができる。移動については、テーブルそのものをノズル出口から下流方向へ 0.800 m、それに直角な水平方向に左右各 0.300 m の範囲で移動することが可能である。角度については水平に 360 度、頭を振る角度設定が可能である。

測定部の座標系を図 2.5 に示す。ノズル出口中心を座標原点とし、下流に向かって X 軸、水平左側に向かって Y 軸、上方に向かって Z 軸をとる。



図 2.3 ターンテーブル型模型支持装置

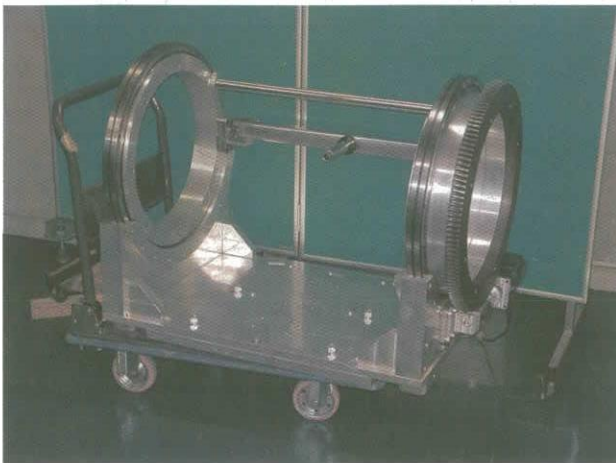


図 2.4 デュアルホイール型模型支持装置

### 3 計測装置

本風洞計測装置のブロック図を図 3.1 に示す。データ処理システムはデータ収録部、増幅器およびコントローラで構成されている。本システムは 2004 年度に更新されたもので主要な仕様を表 3.1 に示す。計測装置の主要性能を表 3.2 に示す。

高圧管と低圧管に設定する初期圧力によって低圧管端のよどみ点状態、したがって通風時の測定部気流が一次的に決まってしまう。それらの初期圧力設定値は、半導体歪ゲージ型圧力センサーで検出され、風洞運転操作盤のパネルメーターにデジタル表示される。

真空槽の真空度はスタンドアローンのデジタルマノメータで確認する。その値は GP-IB を介してデータ処理システムへ取り込むことができるが、今回、この機能は使用しなかった。

通風時の低圧管端部での風洞よどみ点圧力  $P_0$  は 4 点で計測可能であるが、今回は中間 2 点を省略、最上流 2 点のみを測定した。これらは圧電型圧力センサーによりチャージアンプを介してデータ処理システムに取り込まれる。これら 2 点の圧力値にほとんど差はなかった。データ処理としては下流側のセンサー値をよどみ点計算に用いた。また、この信号は後述するプレトリガー信号として用いた。

ピトーレークの写真を図 3.2 に、寸度を図 3.3 にそれぞれ示す。ピトー圧力は、ピトー管 23 本を有するピトーレークに半導体歪ゲージ型圧力センサーを直接に取付け、導管による圧力応答遅れを極力少なくするよう考慮した。シグナルコンディショナーは 1 ユニットに 6CH が組み込まれているものを都合 4 台用いた。シグナルコンディショナーでは圧力センサーへ励起電源の供給、圧力信号の増幅、零調および高周波数雑音の低減を行う。励起電圧はセンサー部の発熱による影響を少なくするために、最小電圧 (2V または 3V) に、増幅度は 2000 倍、ローパスフィルタの遮断周波数は、風洞気流の有用時間が数十ミリ秒程度であることを考慮して 1 kHz に、それぞれ設定した。

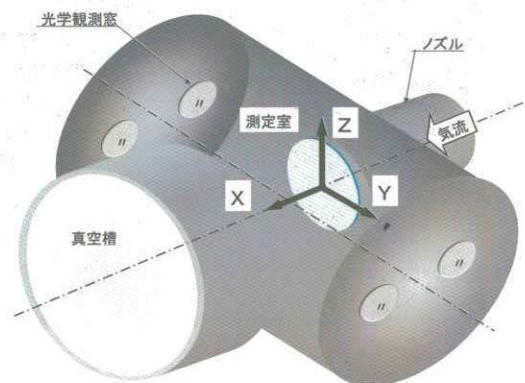


図 2.5 座標系

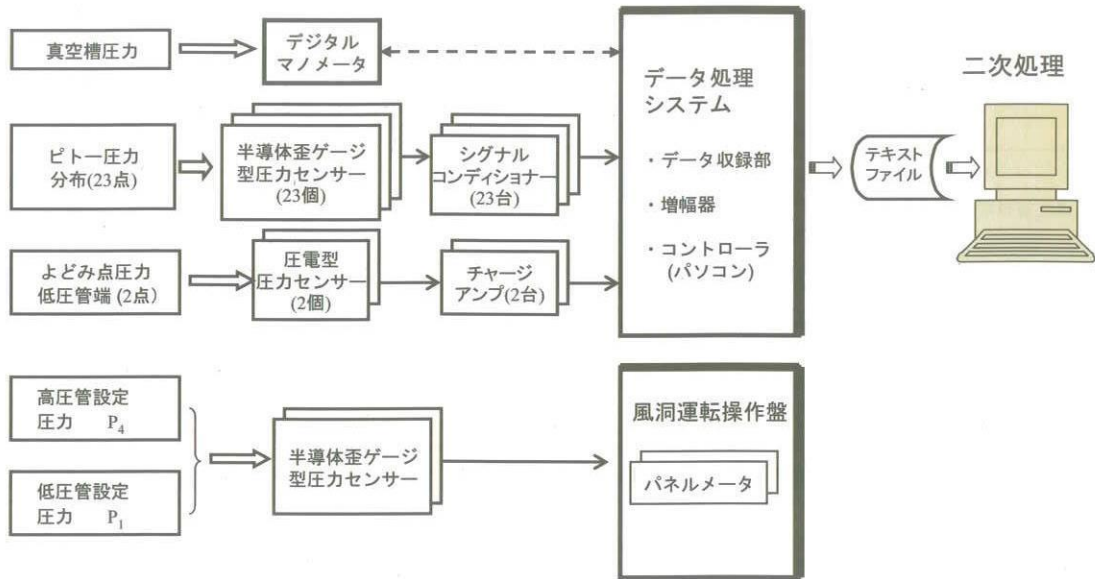


図 3.1 計測とデータ処理のブロック図

表 3.1 データ処理システム主要性能

主要パーツ	メーカー 型番	主要性能
データ収録部	横河電機 WE-900	AD 変換器 : WE-7272 有効桁 16bit 4ch × 8unit=32ch
増幅器	NF 回路設計 P-61	差動型アンプ : 10ch
コントローラ	DELL Dimension-4600C	OS : Windows XP アプリケーションソフト: WE7000 データ収集機能 データ表示機能 ファイル変換機能等



図 3.2 ピトーレーク

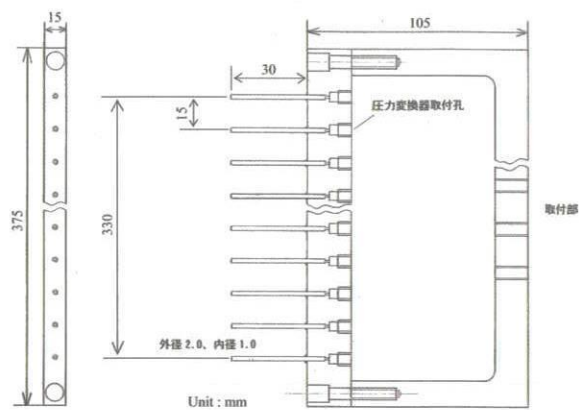


図 3.3 ピトーレークの主要寸度

表 3.2 計測装置の主要性能

計測	センサー／アンプ／表示器	メーカー 型番	主要性能
高圧管設定圧力	半導体歪ゲージ型圧力センサー	MINEBEA NS100-5MPA-1133	計測レンジ：0 - 5MPa 精度：定格(5MPa)の 0.2%
	パネルメータ	鶴賀電機 3127-19	
低圧管設定圧力	半導体歪ゲージ型圧力センサー	MINEBEA NS100-0.5MPA-1133	計測レンジ：0 - 0.5MPa 精度：定格(0.5MPa)の 0.2%
	パネルメータ	鶴賀電機 3127-19	
よどみ点圧力 (低圧管端)	圧電型圧力センサー	KISTLER 601A	最大レンジ：0 - 25MPa 選択レンジ：0-0.5/ 0-1/ 0-2/ 0-5MPa 直線性：選択レンジの 0.5%
	チャージアンプ (2 台)	KISTLER 5011A	最大入力電荷範囲：10～9999000 pC 精度：入力 FullScale 100pC 以上を選択 の場合 入力 FullScale の 1% 100pC 以下の場合 3%
真空槽圧力	デジタルmanoメータ	横河電機 MT-110	計測レンジ：0 - 130kPa 測定精度：読値の 0.03% + 6Pa
ピトー圧力分布	半導体歪ゲージ型圧力センサー	豊田工機 PMS5-1H	計測レンジ：0 - 200kPa 直線性：定格(200kPa)の 0.5%FS
	シグナルコンディショナ(6CH)	豊田工機 AA-6200	利得：20, 100, 200, 500, 1000, 2000 ゲージ印加電圧：2, 6, 9, 10V 直線性：0.01%
	シグナルコンディショナ(17CH)	北斗理研 PA-123	利得：40, 100, 200, 400, 1000, 2000 ゲージ印加電圧：3, 6, 9V 可変 直線性：0.05%

#### 4 試験手順

##### 4.1 ピトーレークの設置

鉛直分布を測定する場合のピトーレークの設置状況を 図 4.1 に示す。水平分布を測定する場合はスティングに取付けるネジ穴を変更、90 度回転させることで行った。鉛直、水平いずれの場合もレーク中心のピトー管（ポート 12）はノズル出口断面の中心に一致している。ピトーレークは模型支持装置に固定で、ピトーレークの X 軸移動は模型支持装置自体の移動で行った。

ピトーレークの位置は駆動用ステッピングモーターを制御するパソコン画面上のパルスカウンターで確認する。事前の確認ではピトーレークの位置設定精度は誤差 1mm 以内である。

##### 4.2 圧力センサー校正

ピトー圧力測定に用いるセンサーの校正を、試験期間中、複数回に渡って行った。ピトーレークを真空槽内に設置したまま真空槽の圧力を変化させて、真空槽付設のデジタルmanoメータの指示値を基準にセンサーの出力電圧を測定した。その校正曲線例を図 4.2 に示す。センサ

ー出力は長時間経つとドリフトするため図に示すように生データにはバラツキが生ずる。最小二乗法を適用してドリフト成分を消去してやると 1 本の校正曲線を得ることができる。

### 4.3 通風

高压管と低压管に設定する初期圧力は風洞運転操作盤のパネルメーターに表示される値を見ながら、高压空気源の乾燥空気を充填したり、抜いたりしながら所要値に調節した。真空槽は原則としてデジタルマノメータで“ゼロ Pa”表示を示すまで真空引きした。

通風は第一急速開閉弁を開く事により開始される。第二急速開閉弁の開閉トリガー信号用の圧力ポートは第一急速開閉弁の下流 5.5 m の位置にあり、この位置を圧力波が通過してから標準的には 120 ミリ秒 (A timer) 後に第二急速開閉弁「開」信号、更に 30 ミリ秒 (B timer) 後に「閉」信号が送られる。なお、第二急速開閉弁を閉じる動作には構造上、時間を要するため実際の開口時間は 70~80 ミリ秒である。

### 4.4 データ取得

データはサンプリング間隔 0.1 ミリ秒で 4000 点収録した。データ処理システムのプレトリガー機能を利用して、始めの 1000 点は無風状態を、それ以後の 3000 点は通風状態のデータを収録した。

通風終了後、低压管のよどみ点圧力 2 点とピトーレークによる圧力生データ (電圧データ) 23 点はデータ処理システムにより計算機内の所定ディレクトリに保存される。それをアプリケーションソフトで、二次処理プログラム (FORTRAN) 用にテキスト形式のファイルに変換した。

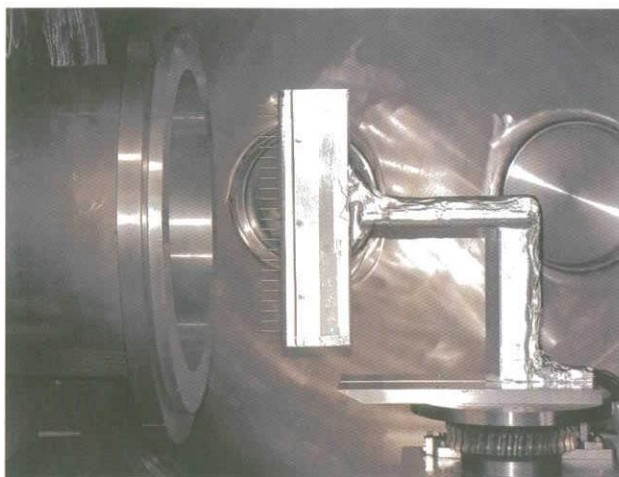
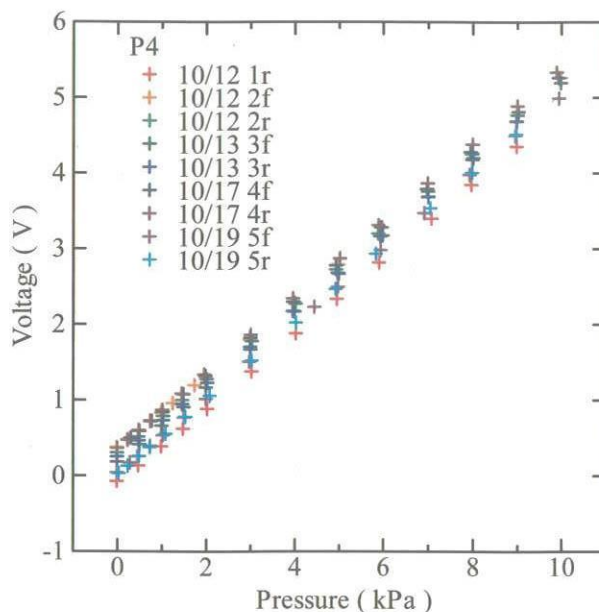
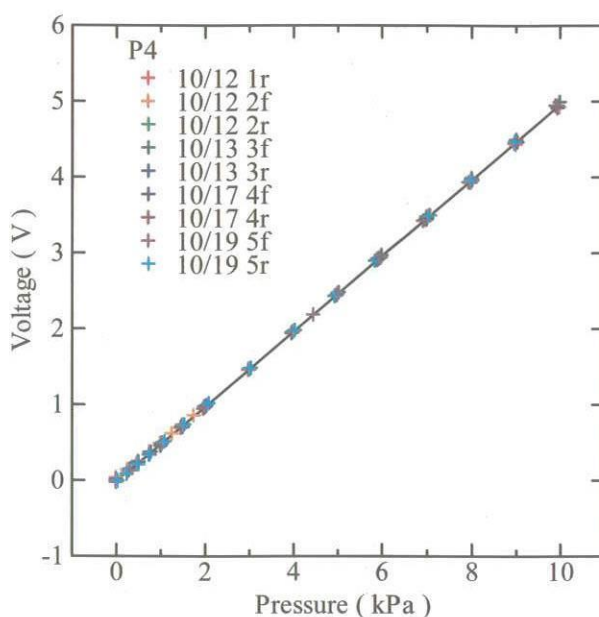


図 4.1 ピトーレーク設置状況 鉛直分布測定の場合



a 校正生データ



b ドリフトを消去した校正曲線

図 4.2 圧力センサー校正曲線例 ポート 4 センサー出力は長時間経つとドリフトするため生データにはバラツキが生ずる。最小二乗誤差を適用してドリフト成分を消去してやると 1 本の校正曲線を得る。



### 5 試験ケース

1996年校正の試験ケースを表 5.1 に、今回の試験ケースを表 5.2 に、それぞれ示す。現在、HST で標準的に用いられる高压管、低压管の初期圧力設定比は  $P_4/P_1 = 200$  である。前回 1996 年の校正試験では他の組合せでも行っているが、表にはこの組合せについてのみ示した。今回の試験ではこの組合せについて各ケース 2 ショット実施した。

1996年校正の計測点を図 5.1 に、今回の校正の計測点を図 5.2 に示す。1996年校正では  $X=0.100, 0.200, 0.300$  m 位置の水平分布のみであったが、今回は  $X=0$  m から  $0.350$  m まで  $0.050$  m 間隔で水平、鉛直分布を計測した。

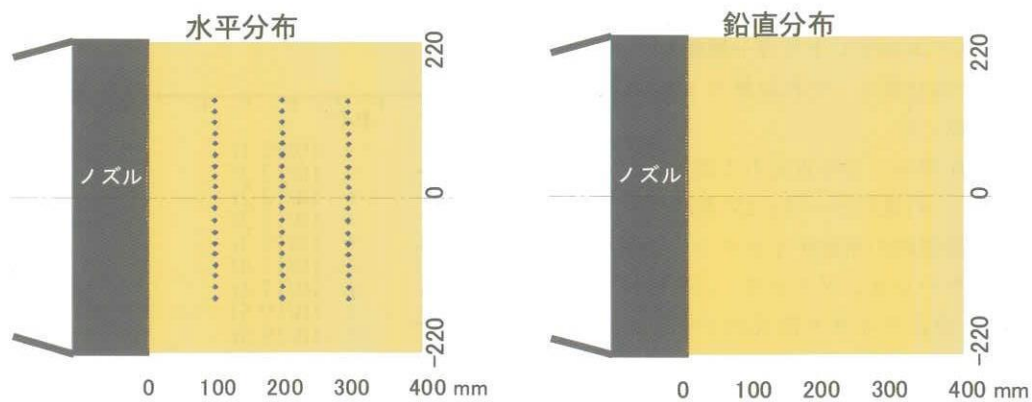


図 5.1 前回(1996年)校正試験の計測点

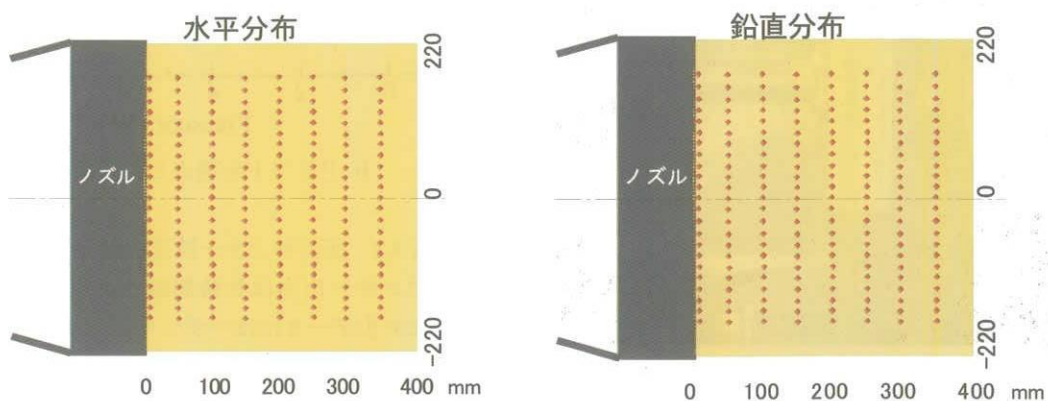


図 5.2 今回(2005年)校正試験の計測点

表 5.1 試験ケース (1996 年)

年月日	初期設定圧力		ピトーレーク位置		ファイル名		
	P <sub>4</sub> (MPa)	P <sub>1</sub> (MPa)	X (mm)	Y (mm)			
1996/11/20	4	0.02	100	0	nmac32 nmac33		
1996/11/21			200	0	nmac52 nmac53		
1996/11/22			300	0	nmac75 nmac76		
			300	30	nmac85 nmac86		
			300	-30	nmac87 nmac88		
			300	-30	nmac89 nmac90		
			200	-30	nmac91 nmac92		
			200	-30	nmac93 nmac94		
			200	30	nmac95 nmac96		
			200	30	nmac97 nmac98		
			100	0	nmac99 nma100		
			100	0	nma120 nma121		
1996/11/29			2	0.01	100	0	nmac36 nmac37
1996/11/21					200	0	nmac59 nmac60
1996/11/22	300	0			nmac71 nmac72		
1996/11/29	100	0			nma109 nma110		
	100	30			nma111 nma112		
	100	-30			nma113 nma118		
	100	-30			nma119 nma122		
100	0	nma123					
1996/11/20	1	0.005	100	0	nmac40 nmac41		
1996/11/21			200	0	nmac63 nmac64		
1996/11/22			300	0	nmac79 nmac80		
1996/11/29			100	0	nma107 nma108		
			100	30	nma114 nma115		
			100	-30	nma116 nma117		
			100	0	nma124 nma125		
1996/11/20			0.5	0.0025	100	0	nmac44 nmac45
1996/11/21	200	0			nmac67 nmac68		
1996/11/22	300	0			nmac83 nmac84		
1996/11/25	100	0			nma101 nma102		
	100	30			nma103 nma104		
	100	-30			nma105		
	100	0			nma106		

表 5.2 試験ケース (2005 年)

年月日	鉛直 水平	初期設定圧力		ピトーレーク位置 X (mm)	ファイル名
		P <sub>4</sub> (MPa)	P <sub>1</sub> (MPa)		
2005/10/7 2005/10/12	水平	4	0.02	0	calb_40h_000_1.2
				50	calb_40h_050_1.2
				100	calb_40h_100_1.2
				150	calb_40h_150_1.2
				200	calb_40h_200_1.2
				250	calb_40h_250_1.2
				300	calb_40h_300_1.2
				350	calb_40h_350_1.2
2005/10/7 2005/10/13	水平	2	0.01	0	calb_20h_000_1.2
				50	calb_20h_050_1.2
				100	calb_20h_100_1.2
				150	calb_20h_150_1.2
				200	calb_20h_200_1.2
				250	calb_20h_250_1.2
				300	calb_20h_300_1.2
				350	calb_20h_350_1.2
2005/10/13  2005/10/14	水平	1	0.005	0	calb_10h_000_1.2
				50	calb_10h_050_1.2
				100	calb_10h_100_1.2
				150	calb_10h_150_1.2
				200	calb_10h_200_1.2
				250	calb_10h_250_1.2
				300	calb_10h_300_1.2
				350	calb_10h_350_1.2
2005/10/14	水平	0.5	0.0025	0	calb_05h_000_1.2
				50	calb_05h_050_1.2
				100	calb_05h_100_1.2
				150	calb_05h_150_1.2
				200	calb_05h_200_1.2
				250	calb_05h_250_1.2
				300	calb_05h_300_1.2
				350	calb_05h_350_1.2
2005/10/14 2005/10/17	鉛直	4	0.02	0	calb_40v_000_1.2
				50	calb_40v_050_1.2
				100	calb_40v_100_1.2
				150	calb_40v_150_1.2
				200	calb_40v_200_1.2
				250	calb_40v_250_1.2
				300	calb_40v_300_1.2
				350	calb_40v_350_1.2
2005/10/17	鉛直	2	0.01	0	calb_20v_000_1.2
				50	calb_20v_050_1.2
				100	calb_20v_100_1.2
				150	calb_20v_150_1.2
				200	calb_20v_200_1.2
				250	calb_20v_250_1.2
				300	calb_20v_300_1.2
				350	calb_20v_350_1.2
2005/10/17	鉛直	1	0.005	0	calb_10v_000_1.2
				50	calb_10v_050_1.2
				100	calb_10v_100_1.2
				150	calb_10v_150_1.2
				200	calb_10v_200_1.2
				250	calb_10v_250_1.2
				300	calb_10v_300_1.2
				350	calb_10v_350_1.2
2005/10/17	鉛直	0.5	0.0025	0	calb_05v_000_1.2
				50	calb_05v_050_1.2
				100	calb_05v_100_1.2
				150	calb_05v_150_1.2
				200	calb_05v_200_1.2
				250	calb_05v_250_1.2
				300	calb_05v_300_1.2
				350	calb_05v_350_1.2

## 6 データ処理

代表的な通風時圧力時歴波形を図 6.1 に示す。ピトー管圧力は代表的にポート番号 1、5、12 の圧力波形を示す。この例では、データ処理に用いるのはよどみ点圧力とピトー圧力が安定している間、約 40 ミリ秒の区間である。しかし、ポート番号 1 のように一様流領域から外れた点の圧力は通風中、上がり続ける場合も見られる。ここはノズル壁面に沿って発達中の境界層流れ状態で、このように非定常な圧力波形になると考えられる。

以下、マッハ数を算出するための主要なデータ処理について述べる。

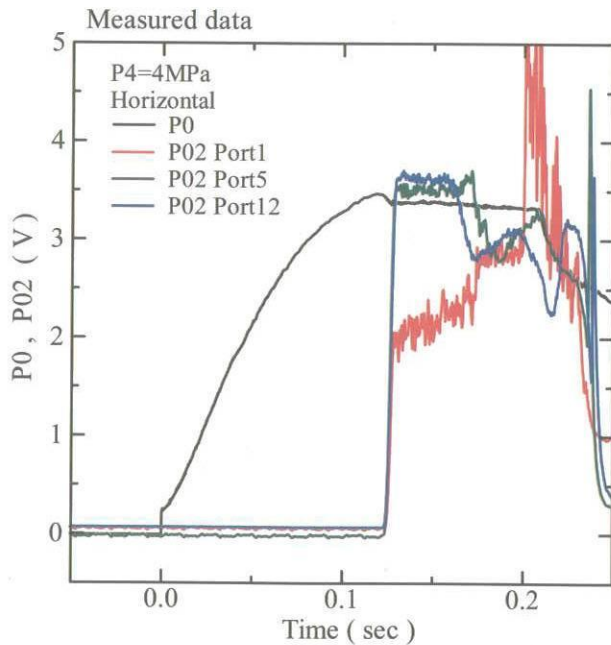


図 6.1 代表的な通風データ

ポート番号 1 のように一様流領域から外れた点の圧力は通風中、上がり続ける場合も見られる。ここはノズル壁面に沿って発達中の境界層流れ状態で、このように非定常な圧力波形になると考えられる。

### 6.1 よどみ点圧力

低压管の圧力は低压管端に埋め込まれている 2 種類のセンサー：半導体歪ゲージ型センサーと圧電型センサーで計測される。圧電型センサーは、圧力変化に対する応答性は良いがドリフト性があるため高周波変化分に対してのみ有効である。したがって、よどみ点圧力の時歴は半導体歪ゲージ型センサーによる低压管の初期設定圧力値に、圧電型センサー測定値の初期状態からの増分を加算して求めた。

### 6.2 よどみ点温度

HST のよどみ点温度、即ち、低压管端での温度については直接計測の試みはされたが<sup>8)</sup>、簡便で信頼性ある方法はなかなか見つからないのが現状である。

改修工事にかかる前、従来の衝撃風洞装置を使って行った、長持続時間運転モードを想定した圧縮過程の予備試験結果<sup>2)</sup>によれば、高压管、低压管の初期圧力設定比  $P_4/P_1$  が余り大きくない場合、圧縮波による等エントロピー的圧縮が主体になることが分かった。衝撃波圧縮による効果もあるが、その寄与分は小さく、高压/低压空気接触面でのミキシングや熱伝導等の損失で相殺されてしまうため、等エントロピー温度程度に落ち着くと考えている。Thermally perfect 気体（後述）の等エントロピー圧縮を想定し、以下のようによどみ点温度を推定する。

低压管の空気 ( $P_1, T_1$ ) が等エントロピー圧縮されて ( $P_0, T_0$ ) になった場合、圧力と温度の関係は次式で与えられる。ここで、 $E(T)$  は原子振動に係るエントロピー寄与分、 $\theta$  は振動の特性温度で空気の場合、3055.56 K である。

$$\frac{P_0}{P_1} = \left( \frac{T_0}{T_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \frac{E(T_0)}{E(T_1)} \quad (1)$$

$$E(T) = \frac{\exp\left[\frac{\theta/T}{\exp(\theta/T)-1}\right]}{1-\exp(-\theta/T)} \quad (2)$$

よどみ点圧力は 6.1 節で述べられたように、通風試験時には測定されている量で十分なデータがあり、 $P_4/P_1 = 200$  の場合、 $P_0/P_1$  は約 170 である。 $T_1$  を衝撃風洞室の年平均温度 295 K として、(1)、(2)式からよどみ点温度を逆算すれば  $T_0$  は 1180 K となる。

### 6.3 マッハ数分布の算出

測定部のマッハ数を求める方法としては、流れに楔を置いて衝撃波の角度から決める方法、ピトー圧力と静圧の比から求める方法等もあるが、極超音速流れでは衝撃波がかなり鋭角になるため、又、静圧は非常に小さな値になるため、それらの精度はあまり良くない。一次元等エントロピー流れと垂直衝撃波関係式を介したピトー圧力とよどみ点圧力の比から求める方法を採用する。1.27 m 極超音速風洞のノズル改修時に実施した試験で、この方法で測定した一様流域のマッハ数と CFD で算出したマッハ数がよく一致している<sup>9)</sup>ことから、境界層を除けば問題なく成立していると考える。当所の 0.5 m/1.27 m 極超音速風洞<sup>10,11)</sup>でも、国外の極超音速風洞<sup>12)</sup>でも同じ方法が採用されている。

1000 K 程度の高温になると気体分子を構成する原子間の振動自由度も無視できなくなり、完全気体からは、

ずれてくるので NACA Report-1135<sup>13)</sup> の補正式 (いわゆる Thermally perfect 気体) を適用する。まず、完全気体のピトー圧力/よどみ点圧力比とマッハ数の関係式は以下の通りである。ここで、比熱比は  $\gamma=1.4$  である。

$$\left(\frac{P_{02}}{P_0}\right)_{perfect} = \left(\frac{2\gamma}{\gamma+1} M^2 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \left(\frac{\frac{\gamma+1}{2} M^2}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (3)$$

これに Thermally perfect 気体の補正式を適用する。NACA Report-1135 には完全気体との比がチャート化されている。この近似多項式を作れば以下の通りである。

$$\frac{\left(\frac{P_{02}}{P_0}\right)_{thermpref}}{\left(\frac{P_{02}}{P_0}\right)_{perfect}} = 1.011 + 1.62 \times 10^{-5} \times T_0 - 7.452 \times 10^{-8} \times T_0^2 \quad (4)$$

従って、ピトー圧力/よどみ点圧力の測定値  $(P_{02}/P_0)_{measure}$  から次式に基づいて完全気体相当の圧力比を求め、

$$\left(\frac{P_{02}}{P_0}\right)_{perfect} = \frac{\left[\frac{\left(\frac{P_{02}}{P_0}\right)_{therm.perf}}{\left(\frac{P_{02}}{P_0}\right)_{perfect}}\right]^{-1}}{\left(\frac{P_{02}}{P_0}\right)_{measure}} \quad (5)$$

次いで、ここで求めた  $(P_{02}/P_0)_{perfect}$  の値を (3) 式の逆関数に入れてマッハ数を求める。

等エントロピーの仮定も作動空気が液化を起こすようであれば成立しない。しかし、水分と空気液化の関係を検討した研究<sup>14)</sup> によれば充分乾燥した作動空気をを用い、初期圧力比  $P_4/P_1$  として極端に小さな設定をしない限り、液化しない流れを保証することができる。

#### 6.4 マッハ数算出時の誤差

一様流コア領域のマッハ数算出時の誤差要素としては以下の変数の測定又は推定の誤差、およびマッハ数の空間的バラツキを考える。各誤差要素に対する誤差見積もり方針を表 6.1 に示す。

ピトー圧力測定誤差

よどみ点圧力測定誤差

よどみ点温度推定誤差

マッハ数の空間的バラツキ誤差

誤差には、「偶然誤差」と「偏り誤差」の 2 種類があ

る。偶然誤差は測定のバラツキで、測定を繰り返して平均値をとればバラツキは小さくなる。偏り誤差はバイアスエラーとも呼ばれ、測定を繰り返しても改善されない。誤差に対する視点を逆転させると、偶然誤差の小ささを「精密度」、偏り誤差の小ささを「正確度」と言う。偶然誤差 (精密度) の一般的指標は推定標準誤差とその標本数の多寡を示す自由度である。偏り誤差 (正確度) の推定値としては「これよりズレることはない」という上限見積り値を提示する。

ピトー圧力の測定誤差  $\Delta P_{02}$ 、よどみ点圧力の測定誤差  $\Delta P_0$ 、およびよどみ点温度の推定誤差  $\Delta T_0$  を総括すると空間 1 点のマッハ数を算出する際の誤差が出てくる。これにマッハ数空間分布に係るバラツキ (偶然誤差)  $\Delta M_S$  を上乘せすれば、一様流コア領域マッハ数の不確かさの見積もり値となる。今後、特に断らない限り、誤差はそれぞれの代表値  $P_{02}^*$ 、 $P_0^*$ 、 $T_0^*$ 、 $M^*$  で割った相対誤差で扱う。

$$\text{ピトー圧力の測定誤差} \quad \frac{\Delta P_{02}}{P_{02}^*}$$

$$\text{よどみ点圧力の測定誤差} \quad \frac{\Delta P_0}{P_0^*}$$

$$\text{よどみ点温度の推定誤差} \quad \frac{\Delta T_0}{T_0^*}$$

$$\text{一様流コア領域マッハ数空間分布バラツキ (偶然誤差)} \quad \frac{\Delta M_S}{M^*}$$

それぞれの測定誤差にはさまざまな偏り誤差や偶然誤差が存在する。それらを偏り誤差 (正確度)  $B_i$ 、偶然誤差 (精密度)  $S_i$  およびその自由度  $v_i$  と代表的に記せば、自由度は全てが十分大きい ( $v_i \geq 20$ ) ため student  $t$  値は 2 になり、偏り誤差総括値  $B$ 、95% 偶然誤差限界  $P$ 、および一様流コア領域のマッハ数の 95% 包括度の不確かさ  $U_{RSS}$  は次式で見積もられる。

$$B = \sqrt{\sum (\theta_i B_i)^2} \quad (6)$$

$$P = \sqrt{\sum (\theta_i t S_i)^2} \quad (7)$$

$$U_{RSS} = \sqrt{B^2 + P^2} \quad (8)$$

ここで、感度係数  $\theta_i$  は次式で定義され、代表値  $P_{02}^*$ 、 $P_0^*$ 、 $T_0^*$ 、 $M^*$  の条件下で評価される。関数  $f_M(P_{02}, P_0, T_0)$  は (3)、(4)、(5) 式から合成されるマッハ数算出関数である。

$$\theta_{P02} = \left( \frac{P_{02}^*}{M^*} \frac{\partial f_M}{\partial P_{02}} \right), \quad \theta_{P0} = \left( \frac{P_0^*}{M^*} \frac{\partial f_M}{\partial P_0} \right),$$

$$\theta_{T0} = \left( \frac{T_0^*}{M^*} \frac{\partial f_M}{\partial T_0} \right), \quad \theta_{M_s} = 1 \quad (9)$$

表 6.1 マッハ数算出の誤差要素

測定要素	誤差要素	偶然誤差	
		偶り誤差 正確度 (B)	精密度 (S)
ピトー 圧力測定	圧力センサー校正誤差	N.A.	校正曲線は折点12からなる線形補間関数。9回の圧力校正試験（124点の計測）からバイアス電圧を調節することで最小二乗誤差フィットするように校正曲線を決定。標準偏差 40Pa以下に収まっている。
	応答性等センサ個体差	ピトーレークを180度回転させて同一計測を実施（個体差がなければ同じ点の圧力は同じ圧力を示すはず）。最大で $\Delta P_{02}/P_0 = 0.00006$ 程度の差異を生じている。	N.A.
	時間的バラツキ	N.A.	平均して20m秒間(200点)の測定データ平均値から圧力を導出。 標準偏差は $\sigma(P_{02}/P_0) = 0.00003$ 程度
よどみ点 圧力測定	低圧管圧力設定誤差	低圧管センサー（ミネベア製）校正精度 0.031%R.O.=155Pa 圧力設定精度:デジタル表示の最下位桁の"1"程度 0.0001MPa=100Pa。両者合成して 184Pa	N.A.
	低圧管圧力センサー誤差	低圧管センサー（Kistler製）校正精度 直線性：0.12%FSO以内 0.0012×5MPa=6kPa	N.A.
	時間的バラツキ	N.A.	平均して20m秒間(200点)の測定データ平均値から圧力を導出。 標準偏差は $\sigma P_0/P_0 = 0.0011$ 程度
よどみ点 温度推定	推定誤差	等エントロピー変化を仮定してよどみ点圧力から推算。 等エントロピー仮定そのものに5%程度の誤差を見込む。 $T_0/T_1 \sim (P_0/P_1)^{0.71} = (P_0/P_1)^{2.7}$ $\Delta T_0/T_0 = 0.05 + \Delta T_1/T_1 + 2/7 \times (\Delta P_0/P_0 + \Delta P_1/P_1)$ 初期温度誤差 $\Delta T_1 = 10K$ 、よどみ点圧力誤差 $\Delta P_0 = 6kPa$ 、 低圧管設定誤差 $\Delta P_1 = 184Pa$	N.A.
マッハ数 空間分布	空間的バラツキ	N.A.	一様流コアをカバーする鉛直面分布、水平面分布のマッハ数結果を使用して平均値を求める。標準偏差を算出。 表7.1を参照

## 7 試験結果

### 7.1 前回と今回の校正試験の比較

前回 1996 年の校正試験の結果と今回の試験結果の比較を、共通する計測点：水平分布  $X=0.100\text{ m}$  の  $P_4=4\text{MPa}$ ,  $2\text{MPa}$ ,  $1\text{MPa}$ ,  $0.5\text{MPa}$  について 図 7.1 に示す。バラツキの範囲内で一致しており、試験の妥当性を裏打ちしている。

### 7.2 ピトー圧力分布と一様流コア

ピトー圧力/よどみ点圧力の空間分布を水平、鉛直分布それぞれ、 $P_4=4\text{MPa}$ ,  $2\text{MPa}$ ,  $1\text{MPa}$ ,  $0.5\text{MPa}$  について 図 7.2 に示す。図では、 $X$  位置によって分布が変化する様子を示すために  $X$  が  $0.050\text{ m}$  増す毎に  $0.002$  ずつ上方にずらして示す。

$P_4$  が小さくなる（よどみ点圧力が小さくなる）につれ一様流の領域が狭まっていく様子が明瞭である。そして後流に行くにしたがって分布が丸みを帯びてくる（中心が圧力高く、端に行くに従い圧力が下がる）。一様流コア領域として、ピトー圧力分布の中央部分平均値から、その標準偏差値の 2 倍以上ずれない範囲として次の範囲を設定した。

流れ方向： $X=0.000\text{ m} \sim 0.300\text{ m}$  間

半径方向： $P_4=4, 2\text{MPa}$  に対して  $Y$  又は  $Z=\pm 0.105\text{ m}$  間

$P_4=1, 0.5\text{MPa}$  に対して  $Y$  又は  $Z=\pm 0.095\text{ m}$  間

### 7.3 マッハ数分布

マッハ数の空間分布をカラーで図示したものを 図 7.3 に示す。水平分布と鉛直分布の間に大きな差はない。即ち、断面分布が扁平になっていることはなく、軸対称的である。上に決めた一様流コア領域において平均マッハ数と標準偏差を求めてみると表 7.1 に示す通りである。

### 7.4 誤差解析

誤差解析の結果を表 7.2 に示す。誤差の最大寄与要素は  $0.5\text{m}/1.27\text{m}$  極超音速風洞<sup>12,13)</sup>と同様にマッハ数の空間的バラツキである。次いでピトー圧力センサーの誤差寄与分が大きく、ピトー圧力が一番小さくなる  $P_4/P_1=0.5\text{MPa}/0.0025\text{MPa}$  の場合にはマッハ数の空間的バラツキと同程度になる。ピトー圧力測定精度の重要性を再認識した。

一様流コアマッハ数の 95% 包括度不確かさがそれぞれ  $0.03\text{ Mach}$ 、 $0.05\text{ Mach}$  程度である  $1.27\text{m}$ 、 $0.5\text{m}$  の極超音速風洞の気流品質にはかなわないとはいえ、不確かさ  $0.17\text{ Mach}$  は衝撃風洞として高い気流品質である。

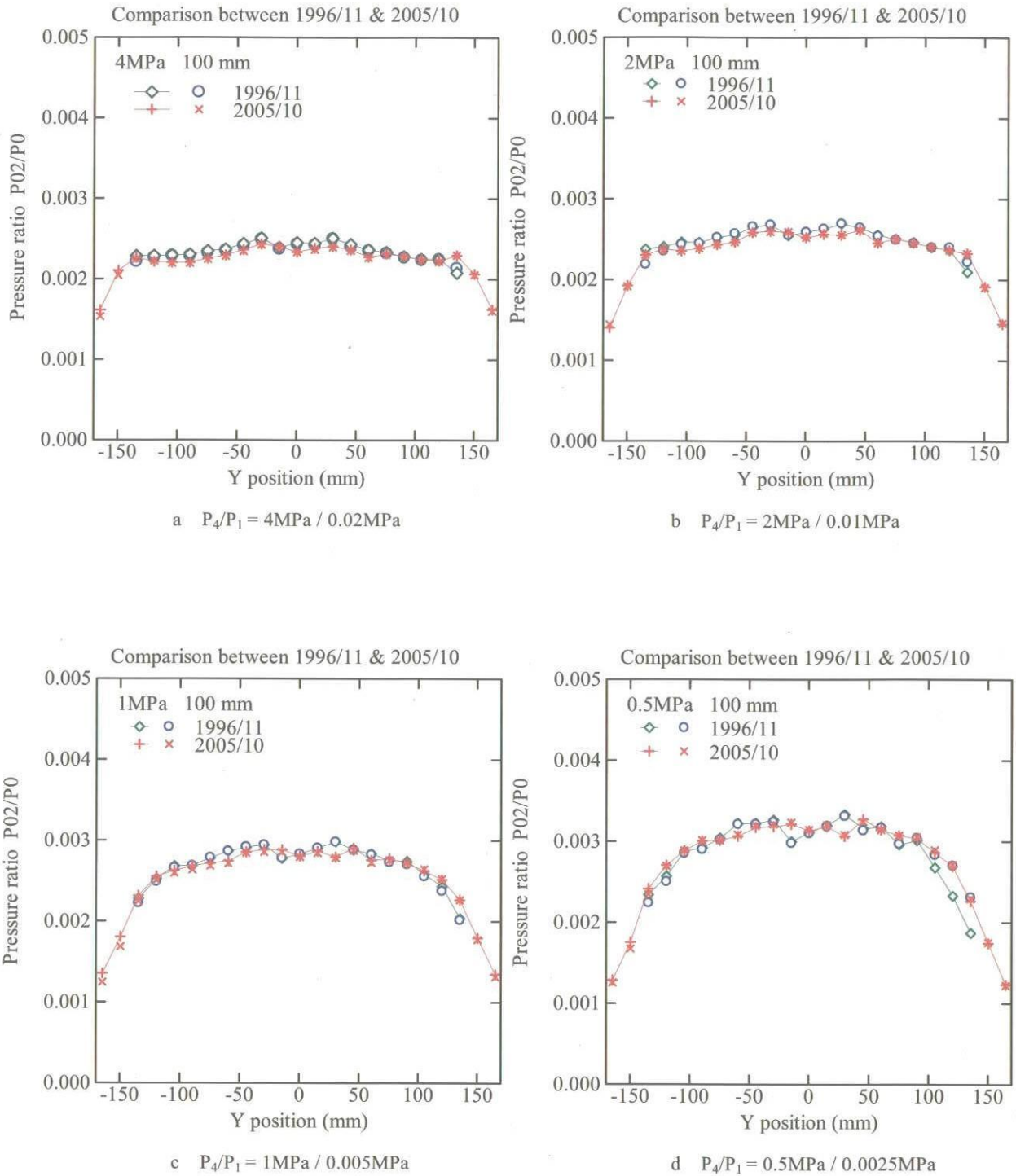


図 7.1 前回と今回の校正試験の比較



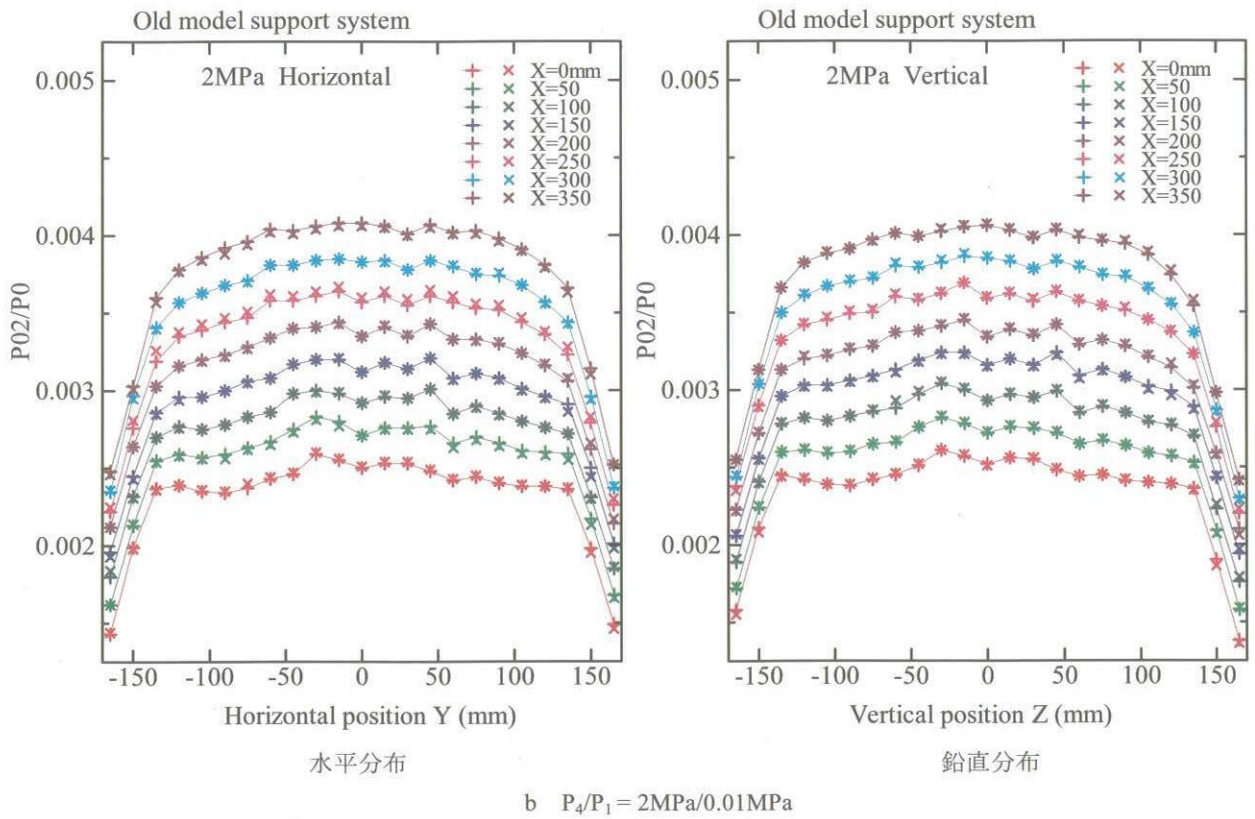
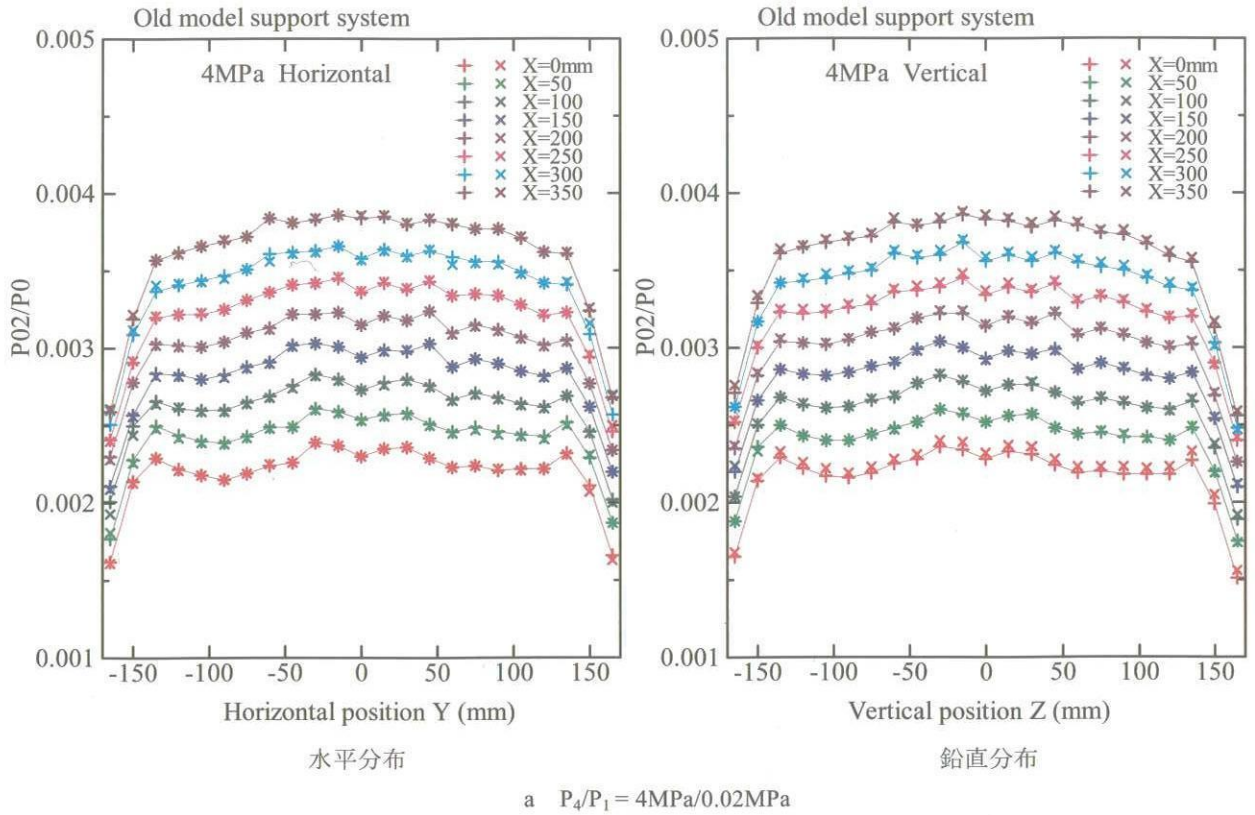
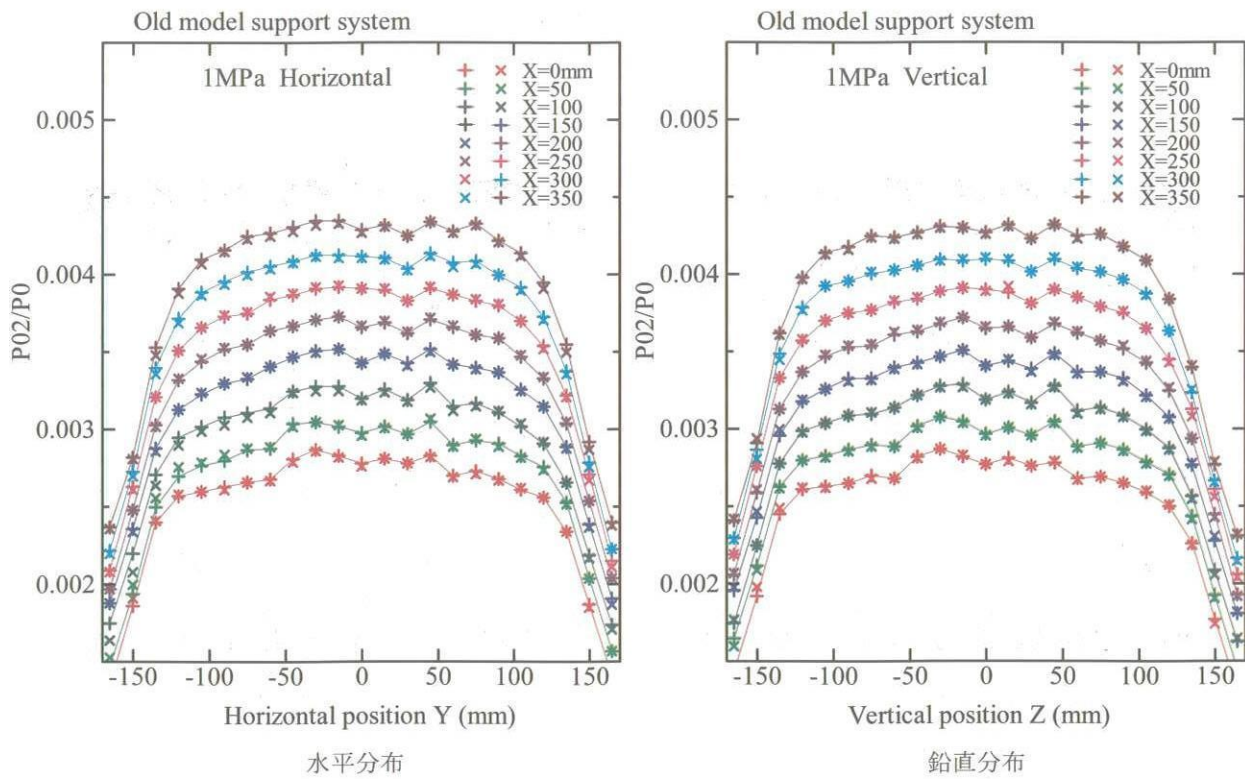
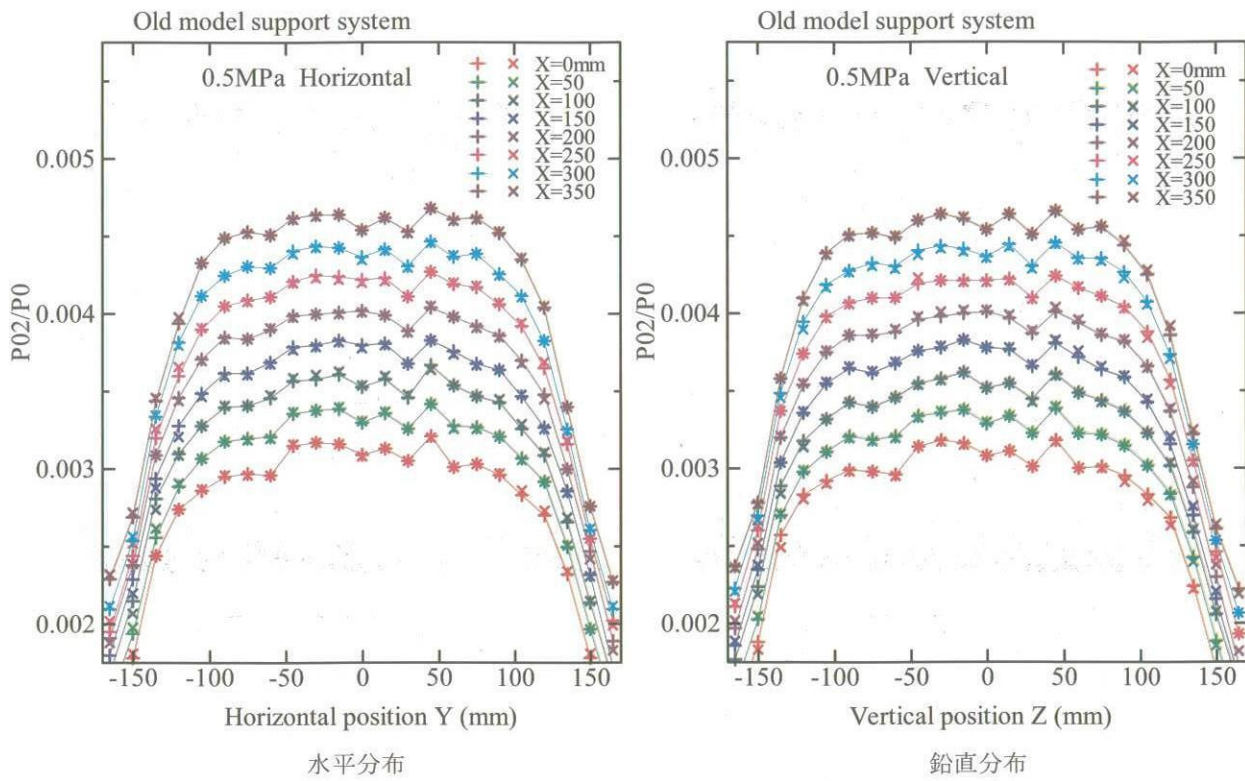


図 7.2 (1/2) ピトー圧分布  
分布が変化する様子を示すために X が 0.050 m 増す毎に 0.002 ずつ上方にずらして示す。



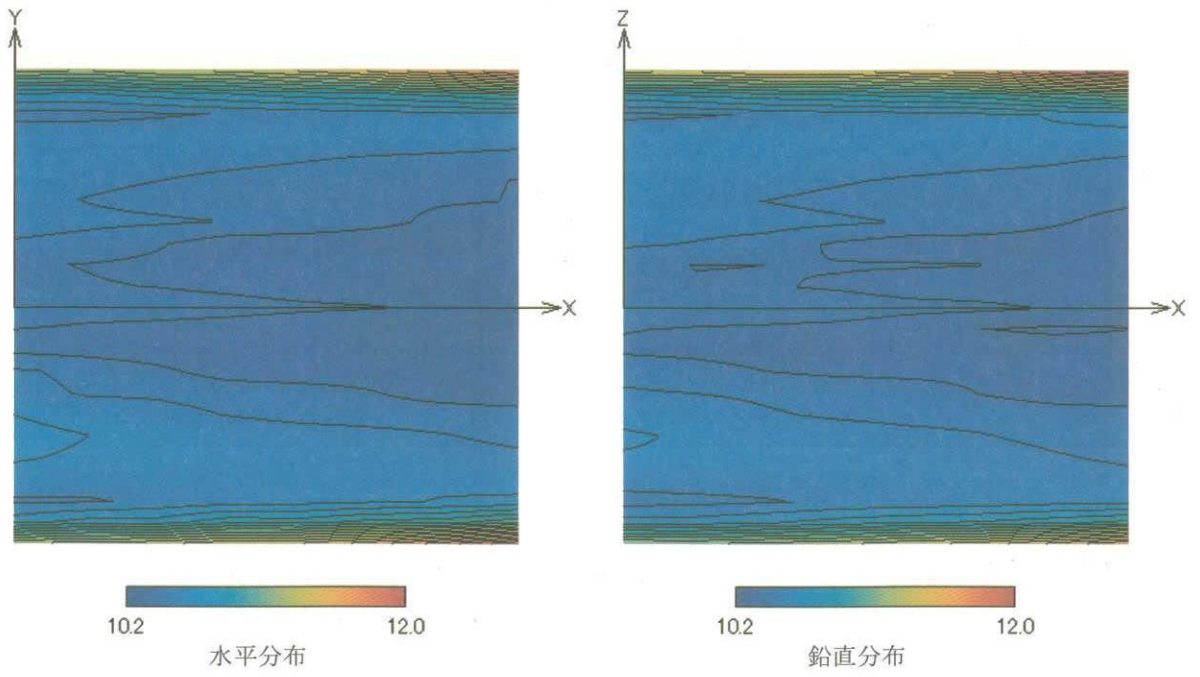
c  $P_4/P_1 = 1\text{MPa}/0.005\text{MPa}$



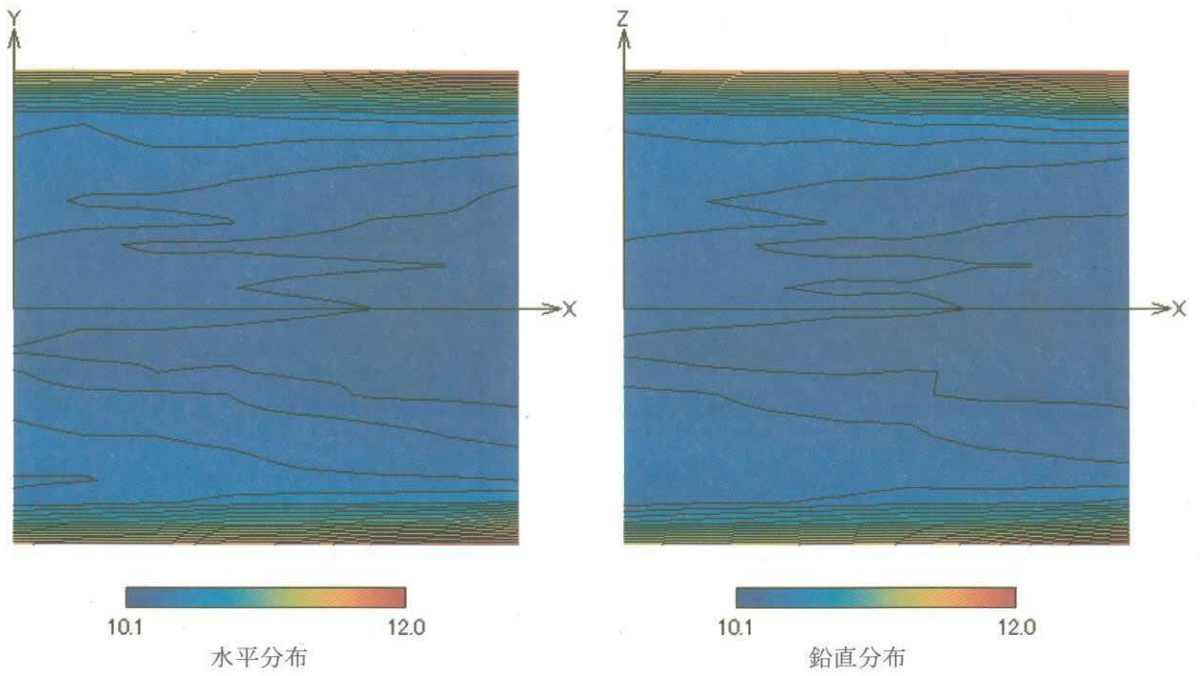
d  $P_4/P_1 = 0.5\text{MPa}/0.0025\text{MPa}$

図 7.2 (2/2) ピトー圧分布

分布が変化する様子を示すために X が 0.050 m 増す毎に 0.002 ずつ上方にずらして示す。



a  $P_4/P_1 = 4\text{MPa}/0.02\text{MPa}$



b  $P_4/P_1 = 2\text{MPa}/0.01\text{MPa}$

図 7.3 (1/2) マッハ数分布

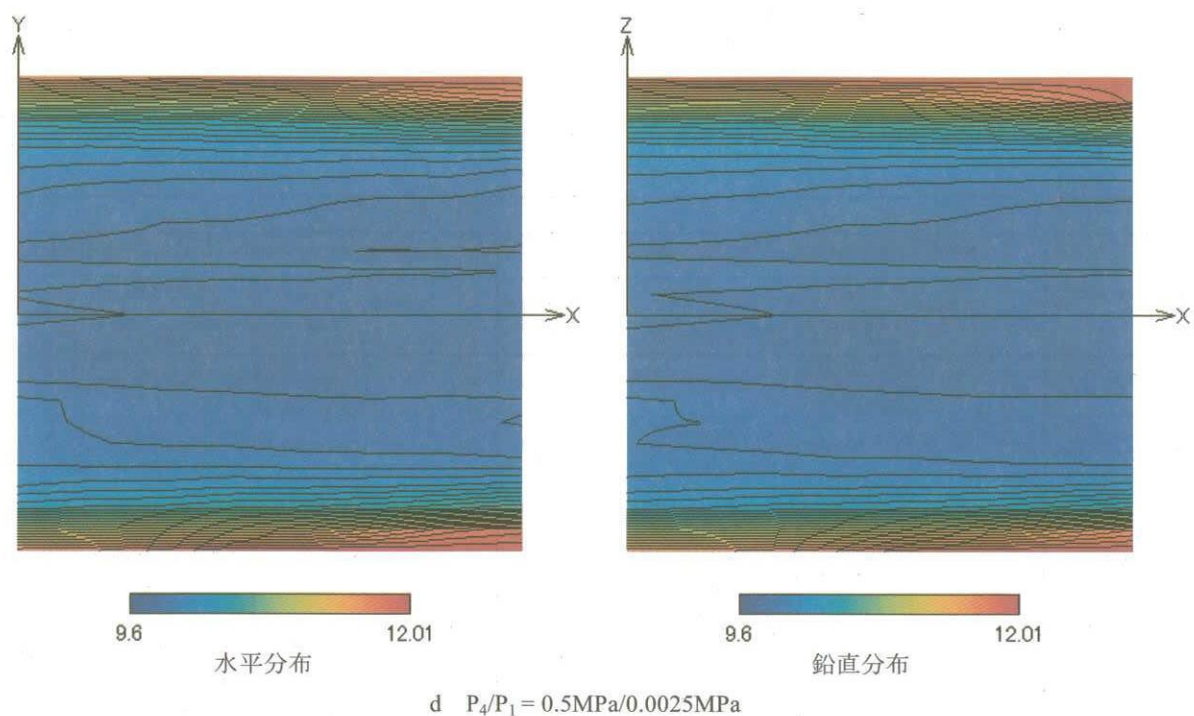
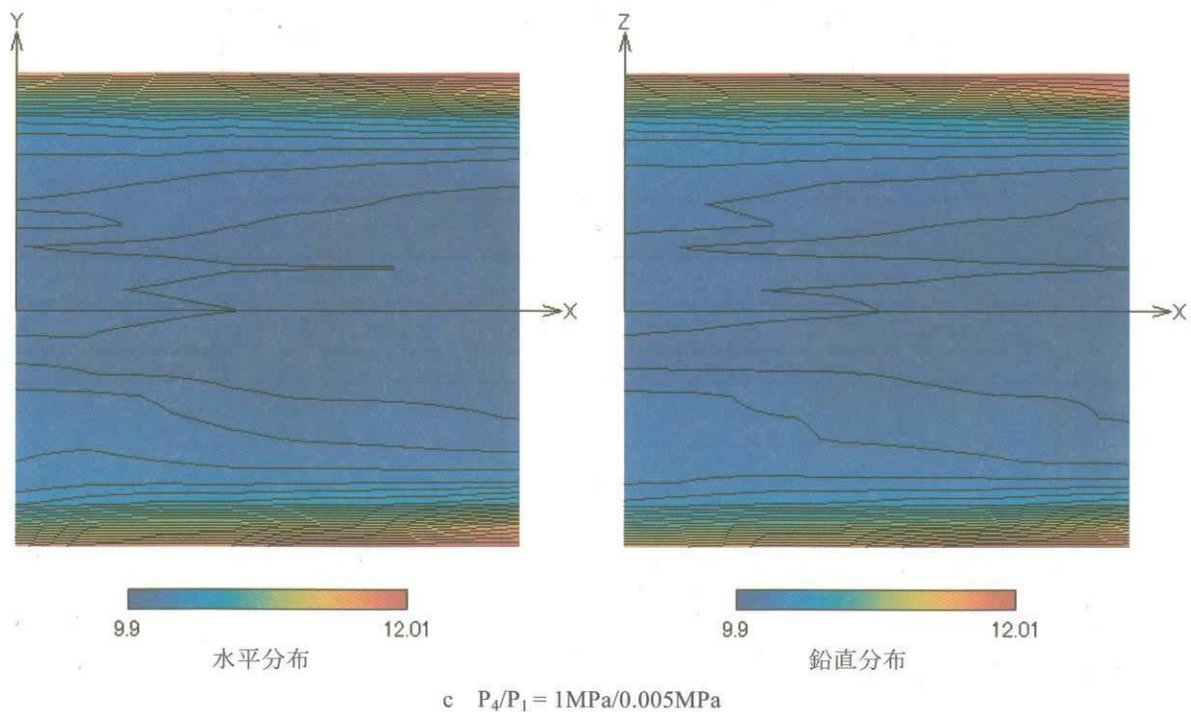


図 7.3 (2/2) マッハ数分布

表 7.1 一様流コア領域の平均マッハ数と標準偏差

$P_4$ [MPa]	$P_1$ [MPa]	一様流 コア	マッハ数 [-]	標準偏差 [-]
4.0	0.020	直径0.21m 長さX=0~0.30m	10.43	±0.073
2.0	0.010		10.24	±0.071
1.0	0.005	直径0.19m 長さX=0~0.30m	10.01	±0.060
0.5	0.0025		9.79	±0.056

表 7.2 マッハ数算出誤差解析結果

測定要素	誤差要素	高圧管、低圧管初期設定圧力比 $P_4/P_1 = 4\text{MPa}/0.02\text{MPa}$							高圧管、低圧管初期設定圧力比 $P_4/P_1 = 2\text{MPa}/0.01\text{MPa}$								
		代表値	感度係数 $\theta_i$	偏り誤差		偶然誤差			マッハ数誤差 $(\theta_i B_i \text{ or } \theta_i S_i)$	代表値	感度係数 $\theta_i$	偏り誤差		偶然誤差			マッハ数誤差 $(\theta_i B_i \text{ or } \theta_i S_i)$
				正確度 ( $B_i$ ) 絶対値 相対値	精密度 ( $S_i$ ) 絶対値 相対値	自由度 ( $\nu_i$ )	t値	正確度 ( $B_i$ ) 絶対値 相対値				精密度 ( $S_i$ ) 絶対値 相対値	自由度 ( $\nu_i$ )	t値			
ピトー 圧力測定	圧力センサー 校正誤差	7988	0.21265		40	5.008E-03	103	2.0	2.130E-03	4316	0.2130		40	9.268E-03	103	2.0	3.948E-03
	応答性等 センサー個体差			207	2.591E-02				5.511E-03			102.6	2.377E-02				5.063E-03
	時間的 バラツキ					103.5	1.296E-02	199	2.0			5.511E-03			51.3	1.189E-02	199
よどみ点 圧力測定	低圧管圧力 設定誤差	3450000	0.21281		184	5.333E-05			1.135E-05	1710000	0.21329		100	5.848E-05			1.247E-05
	低圧管圧力 センサー誤差			6000	1.739E-03				3.701E-04			6000	3.509E-03				7.484E-04
	時間的 バラツキ					3795	1.100E-03	199	2.0			4.682E-04			1881	1.100E-03	199
よどみ点 温度推定	推定誤差	1180	0.0435	102	8.644E-02			3.761E-03	1180	0.0436	106	8.983E-02				3.918E-03	
マッハ数 空間分布	空間的 バラツキ	10.43	1.000		0.073	6.999E-03	210	2.0	1.400E-02	10.24	1.000		0.071	6.934E-03	210	2.0	1.387E-02
総括					B = 6.682E-03	P = 1.520E-02		$U_{\text{RSS}} = 1.660E-02$ (0.17 Mach)				B = 6.446E-03	P = 1.529E-02		$U_{\text{RSS}} = 1.659E-02$ (0.17 Mach)		

測定要素	誤差要素	高圧管、低圧管初期設定圧力比 $P_4/P_1 = 1\text{MPa}/0.005\text{MPa}$							高圧管、低圧管初期設定圧力比 $P_4/P_1 = 0.5\text{MPa}/0.0025\text{MPa}$								
		代表値	感度係数 $\theta_i$	偏り誤差		偶然誤差			マッハ数誤差 $(\theta_i B_i \text{ or } \theta_i S_i)$	代表値	感度係数 $\theta_i$	偏り誤差		偶然誤差			マッハ数誤差 $(\theta_i B_i \text{ or } \theta_i S_i)$
				正確度 ( $B_i$ ) 絶対値 相対値	精密度 ( $S_i$ ) 絶対値 相対値	自由度 ( $\nu_i$ )	t値	正確度 ( $B_i$ ) 絶対値 相対値				精密度 ( $S_i$ ) 絶対値 相対値	自由度 ( $\nu_i$ )	t値			
ピトー 圧力測定	圧力センサー 校正誤差	2414	0.21341		40	1.657E-02	103	2.0	7.072E-03	1320	0.2136		40	3.030E-02	103	2.0	1.295E-02
	応答性等 センサー個体差			51.6	2.138E-02				4.562E-03			25.44	1.927E-02				4.117E-03
	時間的 バラツキ					25.8	1.069E-02	199	2.0			4.562E-03			12.72	9.636E-03	199
よどみ点 圧力測定	低圧管圧力 設定誤差	860000	0.21392		100	1.163E-04			2.487E-05	424000	0.21455		100	2.358E-04			5.060E-05
	低圧管圧力 センサー誤差			6000	6.977E-03				1.492E-03			6000	1.415E-02				3.036E-03
	時間的 バラツキ					946	1.100E-03	199	2.0			4.706E-04			466.4	1.100E-03	199
よどみ点 温度推定	推定誤差	1180	0.0437	114	9.661E-02			4.226E-03	1180	0.0439	128	1.085E-01				4.759E-03	
マッハ数 空間分布	空間的 バラツキ	10.01	1.000		0.060	5.994E-03	182	2.0	1.199E-02	9.79	1.000		0.056	5.720E-03	182	2.0	1.144E-02
総括					B = 6.395E-03	P = 1.465E-02		$U_{\text{RSS}} = 1.599E-02$ (0.16 Mach)				B = 6.987E-03	P = 1.777E-02		$U_{\text{RSS}} = 1.909E-02$ (0.18 Mach)		

## 8 まとめ

0.44m 極超音速衝撃風洞のマッハ数 10 ノズルをターンテーブル型模型支持装置環境下でマッハ数校正試験を行った。23 本のピトー管を持つピトーレークを用いて、細密で多数点のピトー圧力空間分布を効率的に計測した。これら多量のピトー圧力分布、およびよどみ点圧力の測定値、そしてよどみ点温度推定値を用いて、Thermally Perfect 気体の式に基づいてマッハ数空間分布を算出した。不確かさ解析を実施、当該風洞の気流品質を同定した。一様流コアを直径約 0.21m、長さ  $X=0\sim 0.30\text{m}$  と設定した。そこでの平均マッハ数およびその不確かさは高圧管、低圧管の初期設定圧力  $P_4$ 、 $P_1$  の関数として表 8.1 のように表される。

表 8.1 一様流コア領域のマッハ数と不確かさ

$P_4$ [ MPa ]	$P_1$ [ MPa ]	一様流 コア	マッハ数 [-]	マッハ数の 95%不確かさ [-]
4.0	0.020	直径0.21m 長さ $X=0\sim 0.30\text{m}$	10.43	$\pm 0.17$
2.0	0.010		10.24	$\pm 0.17$
1.0	0.005	直径0.19m 長さ $X=0\sim 0.30\text{m}$	10.01	$\pm 0.16$
0.5	0.0025		9.79	$\pm 0.18$

## 謝辞

試験準備の時に、又、試験中トラブルに遭遇した時に、津田尚一氏には一方ならず助けていただいた。厚くお礼を申し上げる。

## 参考文献

- 1) 和田勇、曾我國男、井上安敏；航技研ガン・タンネルの構造と特性およびその応用 NAL TR-556 (1978)
- 2) 曾我國男、井上安敏、山崎喬；大型衝撃風洞の新運転手法 NAL TR-765 (1983)
- 3) 曾我國男、白水正男、山崎喬；航空宇宙技術研究所衝撃風洞高エンタルピ化改修 日本航空宇宙学会誌 VOL.42 No.480 (1994)
- 4) 山崎喬、中北和之、井上安敏；NAL 中型衝撃風洞特性試験(第1報)第26期航宇学会年会 (1995)
- 5) 山崎喬、中北和之、井上安敏；NAL 中型衝撃風洞特性試験(その2)第27期航宇学会年会 (1996)
- 6) アメリカ機械学会編 日本機械学会訳：アメリカ国家規格 計測の不確かさ アメリカ機械学会性能試験規約 計測機器及び試験装置に関する補則 第1部 アメリカ規格協会 アメリカ機械学会性能試験規約 ANSI/ASME PTC19.1-1985,丸善 (1987)
- 7) 永井伸治, 津田尚一, 小山忠勇, 平林則明, 関根英夫, 穂積弘一：極超音速風洞での空力係数の不確かさ 航空宇宙学会論文集第51巻 第591号 (2003)
- 8) 中北和之、山崎喬、出口祥啓、穂積弘一；衝撃風洞澱点温度直接計測の試み平成10年度 宇宙航行の力学シンポジウム (1998)
- 9) J.Lacey, Y.Inoue, A. Higashida, M.Inoue, K.Ishizaka, and J.J.Korte; Mach 10 Hypersonic Nozzle: Improved Flow Quality J.of Spacecraft & Rockets, Vol.40, No.1 (2003)
- 10) 関根英夫、平林則明、小山忠勇、津田尚一、永井伸治、穂積弘一、渡利實；0.5 m 極超音速風洞マッハ数5および7ノズル校正試験 JAXA-RR-05-043 (2006)
- 11) 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；1.27 m 極超音速風洞マッハ数校正試験 JAXA-RR-05-041 (2006)
- 12) A.H.Boudreau; Performance and Operational Characteristics of AEDC/VKF Tunnels A, B, and C, AEDC-TR-80-48 (1981)
- 13) Ames Research Staff; Equations, Tables and Charts for Compressible Flow, NACA Rept.1135 (1953)
- 14) 山崎喬、中北和之、井上安敏、曾我國男；極超音速流の Air Condensation の診断 第59回風洞研究会議 NAL SP-38 (1997)

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-05-050

---

発行 平成 18 年 3 月 27 日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

URL : <http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 (有)ノースアイランド

---

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

TEL : 029-868-2079 FAX : 029-868-2956

---

© 2006 宇宙航空研究開発機構

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



