

# 宇宙航空研究開発機構研究開発報告

## JAXA Research and Development Report

---

0.5m極超音速風洞 マッハ数5及び7ノズル校正試験

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

2006年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# 目次

概要.....	1
1 はじめに.....	2
2 装置.....	2
2.1 0.5m 極超音速風洞.....	2
2.2 ピトーレークとトラバース装置.....	6
2.3 計測装置.....	6
3 試験方法.....	10
3.1 試験手順.....	10
3.2 試験条件.....	10
4 データ処理.....	15
4.1 マッハ数の算出.....	15
4.2 マッハ数算出時の誤差.....	15
5 試験結果.....	16
5.1 予備試験.....	16
5.2 マッハ数5ノズル.....	17
5.3 マッハ数7ノズル.....	17
6 誤差解析結果.....	26
6.1 ピトー圧系統.....	26
6.2 よどみ点圧力系統.....	26
6.3 よどみ点温度系統.....	26
6.4 マッハ数空間分布.....	26
6.5 誤差総括.....	27
7 まとめ.....	27
参考文献.....	31



# 0.5 m 極超音速風洞 マッハ数 5 及び 7 ノズル校正試験

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

## Mach Number Calibration on Mach 5 and 7 Nozzles of 0.5 m Hypersonic Wind Tunnel

Hideo SEKINE, Noriaki HIRABAYASHI, Tadao KOYAMA, Shoichi TSUDA,  
Shinji NAGAI, Koichi HOZUMI, and Minoru WATARI

### ABSTRACT

Mach number calibration tests were conducted in the 0.5 m Hypersonic Wind Tunnel, using Mach 5 and 7 nozzles. Mach number distributions were deduced from the measurements of Pitot pressures, the stagnation pressure  $P_0$ , and the stagnation temperature. Pitot pressures were measured by a Pitot rake equipped with 43 ports, a remotely controlled traverse system, and ESP (Electronically Scanned Pressure) system. From the Mach number distribution, the uniform core was defined as 0.28 m in diameter and 0.5 m in length. For the Mach 5 nozzle, average Mach numbers for  $P_0=1$  and 1.5 MPa were determined: 5.10~5.11. For the Mach 7 nozzle, average Mach numbers for  $P_0=1, 2, 2.5, 4, 6,$  and 8.5 MPa were 7.02~7.19. Estimated uncertainties in the Mach numbers of the uniform core region were  $\pm 0.05$  for both Mach 5 and 7 nozzles

**Keywords :** *Hypersonic wind 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

風洞試験データの品質保証の一環として 0.5m 極超音速風洞のマッハ数分布測定をマッハ数 5 及び 7 ノズルについて行った。試験を効率的に進めるために 43 箇配列のピトーレーク及びプログラムとリモート操作機能を有する 2 軸トラバース装置を整備し、ピトー圧力を電子走査式圧力測定(ESP)システムで測定した。試験は予備試験と本試験と都合 4 回に分けて実施した。予備試験ではマッハ数 7 ノズルを用いて通風し、構成機器の作動、試験手順、取得データの不確か解析の適否、マッハ数分布測定システムの成立性等を検討した。予備試験の結果を踏まえて、ピトーレークの改修と ESP システムの高度化を行った。ピトーレークは支持部の耐熱性向上、測定領域を下流方向と下方に拡張する改修をした。ESP システムは温度補償機能の高度化、測定回数の倍増、ESP センサー組み合わせの自由化等を図った。本試験では、マッハ数 5 ノズルではよどみ点圧力 2 点： $P_0=1, 1.5\text{MPa}$ 、マッハ数 7 ノズルではよどみ点圧力 6 点：1、2、2.5、4、6、8.5MPa について測定した。0.42m 幅のピトーレークを鉛直に、又は水平にして気流方向 0.5m の間を移動させ、分布を測定した。又、ピトーレークを水平にして上下に移動させ、気流軸に直角な断面分布を取得した。風洞中心軸まわり直径 0.28m、長さ 0.5m の範囲を一様流コア領域として定めた。コア領域の平均マッハ数はよどみ点圧力により変化し、マッハ数 5 ノズルでは 5.10~5.11、マッハ数 7 ノズルでは 7.02~7.19 で、そのマッハ数の不確かさはともに $\pm 0.05$ 程度であった。

キーワード：極超音速風洞、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

2005 年 12 月 8 日 受付 (Received 8 December, 2005)

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	偏り誤差(正確度)
M	マッハ数
$P_0$	よどみ点圧力
$P_{02}$	ピトー圧力
P	95%偶然誤差限界
S	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、下流方向を正。原点はノズル中心軸上、光学観測窓中心より 0.25m 上流の点とする。
Y	Y 軸座標、気流に直角な水平方向位置、上流を向いて右方を正
Z	Z 軸座標、気流に直角な鉛直方向位置、上方を正
$\gamma$	比熱比
$\theta$	感度係数
$\nu$	自由度 (標本数の多寡)
$\phi$	ピトーレークの設定角度、ピトー管鉛直を $0^\circ$ 上流を見て右回りを正

## 1 はじめに

極超音速風洞は1966年3月に0.5m風洞<sup>1)</sup>が建設され、1995年3月に大型化整備により1.27m風洞<sup>2)</sup>が追加された。1.27m風洞はマッハ数10のノズル固定であるが、0.5m風洞はノズル交換式でマッハ数5、7、9の試験が可能であり、1.27m風洞が追加設置された後も0.5m風洞の試験需要は減ることなく、最近では、エンジンインテーク特性試験、極超音速機の空力特性試験等、むしろ使用頻度は増加傾向にある。

0.5m風洞の気流については、建設直後、マッハ数5、7及び9について気流校正試験<sup>3)</sup>が行われ、マッハ数7<sup>4)</sup>及びマッハ数9<sup>5)</sup>については校正レポートが発行されたが、マッハ数5についてはより詳細な気流校正を要するため、校正レポートは発行されなかった。

1997年の極超音速風洞大型化整備で作動空気の乾燥度を上げるため加熱器に真空排気機能が追加され、システムに大きな問題はなくなったため、新たにマッハ数5及びマッハ数7ノズルについて気流校正試験を実施した。2001年5月にマッハ数7ノズルを用いた予備試験<sup>6)</sup>を、2002年に2月、10月、12月と3回に分けてマッハ数7ノズル、マッハ数5ノズルの本試験<sup>7)</sup>を実施した。

近年、風洞試験結果に不確かさ表示が推奨<sup>8,9,10)</sup>され

るようになった。これに対応して気流品質にどの程度不確かさを持つものか、定量的に示すことが要請されている。これらの試験では、ピトー圧測定に、高精度で、統計処理に必要な多量の圧力計測を可能にするESP (Electronically Scanned Pressure)システム<sup>11)</sup>を採用した。

本報告書の目的はマッハ数5及びマッハ数7ノズルの気流特性について、測定部マッハ数分布、測定部一様流範囲の設定、及びよどみ点圧力と一様流マッハ数の関係を明らかにすることである。

1.27m風洞ではノズル改修により大幅に気流品質が向上した<sup>12)</sup>。0.5m風洞のノズルも、より詳細な気流特性を明確にして気流品質改良の検討資料を得ることも目的である。

## 2 装置

## 2.1 0.5m 極超音速風洞

極超音速風洞全体の配置を図2.1に、0.5m極超音速風洞の写真を図2.2に、主要性能要目を表2.1に、それぞれ示す。極超音速気流を実現するためには、高い圧力比(例えば、マッハ数7のためには圧力比130)が必要で、本風洞ではそのために上流側に高圧空気源、下流側に真空槽を備えており、高圧の空気を真空の中に吹き込む形式(吹出し真空吸込み式)をとっている。常温のまま通風を行うと断熱膨張のために空気が凝縮してしまうため、加熱器を備えて高圧空気をその中を通過させることで加熱している。極超音速風洞の主要な構成は以下の通りである。

## (1)高圧空気源

圧縮機は吐出圧19.7MPaの空気を貯気槽に蓄圧する能力を持っている。貯気槽ポンベの合計容積は36m<sup>3</sup>で18m<sup>3</sup>ずつ2分割して充填し交互に使用することで稼働率を上げている。

## (2)調圧弁

よどみ点圧力を一定の設定値に調節するため、高圧空気を加熱器に導く直前に、電気油圧式制御装置を有し1MPaから9.9MPaの範囲で調圧可能な調圧弁を備えている。

## (3)加熱器

耐圧容器の内側を耐火材(純アルミナ質耐火煉瓦)と断熱材(純アルミナ質耐火断熱煉瓦、粘土質断熱煉瓦)で保護し、蓄熱体として球状アルミナペブルを8.5トン充填している。加熱用燃料としては都市ガス(LNG)を採用している。

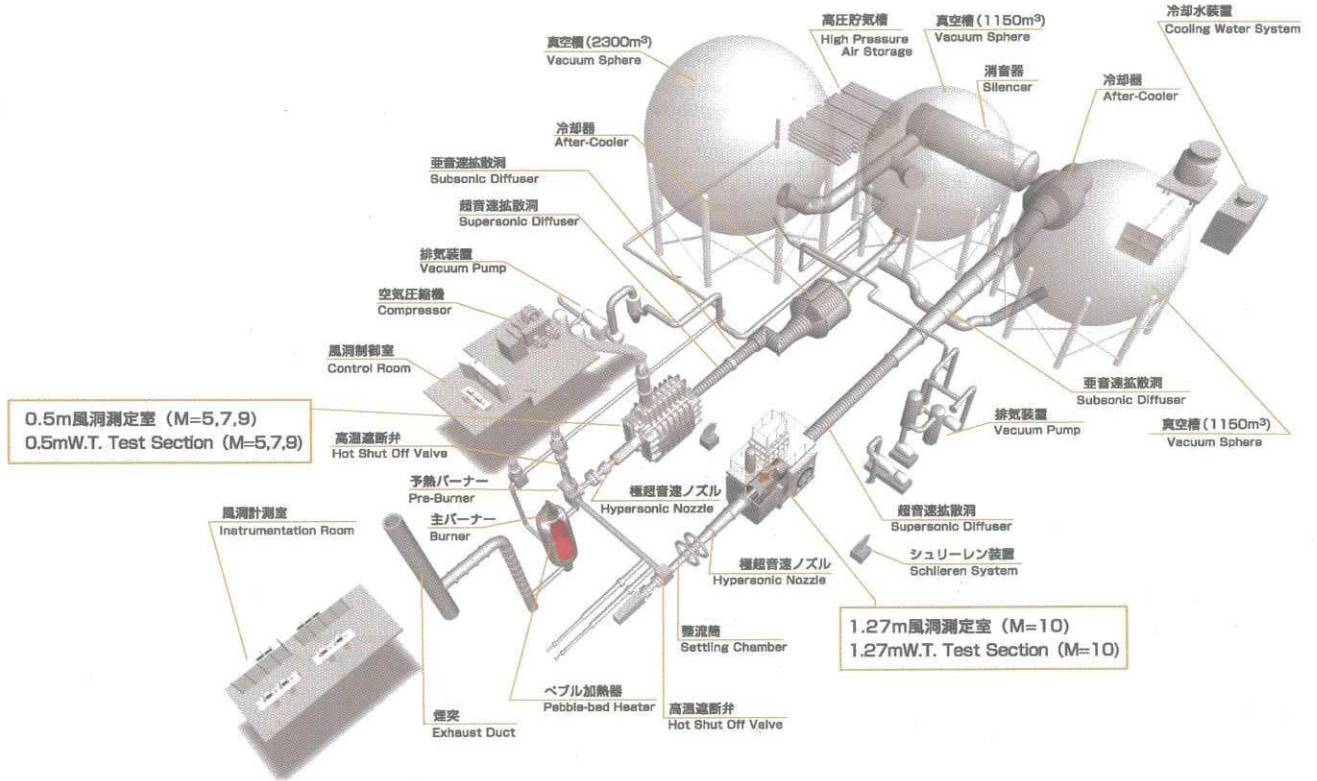
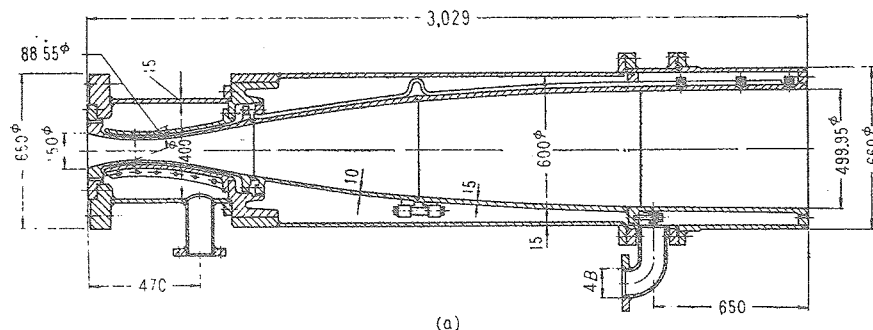


図 2.1 極超音速風洞全体配置図

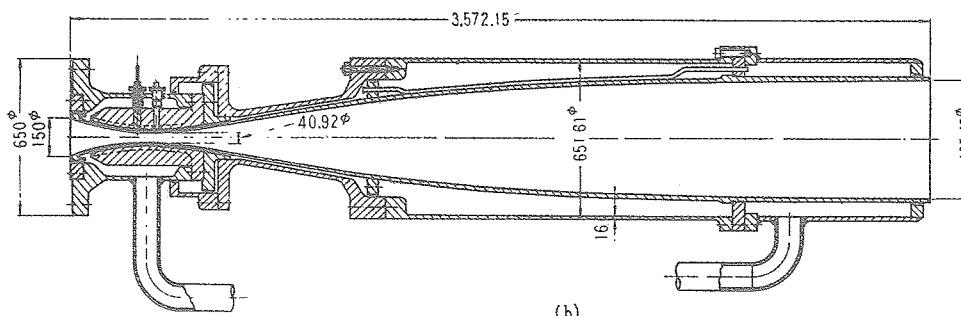


図 2.2 0.5m 極超音速風洞



(a)

(a) マッハ数5ノズル



(b)

(b) マッハ数7ノズル

図 2.3 マッハ数5、マッハ数7ノズル

表 2.1 0.5m 極超音速風洞 主要性能

形式	吹出し真空吸込み式
ノミナルマッハ数	5、7、9
測定部	自由噴流式
ノズル出口直径	0.5m
激み点圧力	1 - 9.9 MPa
激み点温度	600 - 1200 K
最大持続時間	60 秒 (1 真空槽使用)
	120 秒 (2 真空槽使用)
高圧空気貯気槽	18 m <sup>3</sup> × 2
真空槽	1150 m <sup>3</sup> × 2
模型支持装置変角範囲	ピッチ角 ±22 度

## (4) 高温遮断弁

加熱器と整流筒の間には通風の開閉を行う口径 200mm、プラグ型の高温遮断弁が設けられている。油圧で駆動される。

## (5) 整流筒

気流の均一化を図るためノズルの直前に整流筒を設けている。鋼管製で内部に整流多孔板と整流金網を有し、風洞基準量測定用のよどみ点温度プローブ、よどみ点圧力プローブが設置されている。マッハ数5ノズル用は全長 2.1m、マッハ数7ノズル用は全長 1.6m である。

## (6) ノズル

異なるマッハ数を実現するためには異なるノズルを用いる。今回校正したマッハ数5、7のノズルを図 2.3 に示す。

## (7) 測定部

図 2.4 に 0.5m 極超音速風洞の測定部を示す。上部測定室および下部測定室とから成り、上部測定室には模型支持機構等、下部測定室には模型支持機構の駆動部分が収納されている。測定部側面には気流観測用の直径 0.5m の光学ガラス窓と 6 分力、圧力、温度計測用の信号線、配管等の取出し口及び制御用配線端子などが設けられている。

## (8) 模型支持装置

0.5m 極超音速風洞の模型支持装置はピッチ角 1 軸のみの制御である。ジンバル部とストラット部で構成され、油圧で駆動される。ジンバルの回転で模型姿勢角を定め、ストラットの上下運動で模型がほぼ風洞中心に位置するように制御される。模型姿勢角の変化範囲は±22°で、変化方式は段階モード(ステップ的にピッチ角を変え、一定時間静止する)及びフリーモード(あらかじめ設定したピッチ角で静止する)の二つのモードがある。



## (9)真空系

真空槽1, 2 (2基、各容積  $1150\text{m}^3$ ) と真空槽3 (容積  $2300\text{m}^3$ ) から構成される。1.27m 極超音速風洞には真空槽1, 2, 3を、0.5m 極超音速風洞には真空槽1, 2をそれぞれ仕切り弁によって交互に切替えて、また併用して使用する。2基の排気装置で排気を行う。

## (10)風洞の作動範囲とレイノルズ数範囲

0.5m 極超音速風洞の作動範囲を図2.5に示す。図は一樣流コアのマッハ数をそれぞれ、5.1、7.1として計算した。温度の制限：加熱器の温度上限値は  $1300\text{K}$  であるが、流路配管での熱損失を考慮するとよどみ点温度の上限は約  $1200\text{K}$  になる。長期的に見た風洞損傷を少なくするために高い温度設定を可能な限り避けて  $1000\text{K}$  以下を目標に

運用している。一方、気流液化に対する条件がよどみ点温度選定の下限值になる。

圧力の制限：調圧弁の調圧能力は  $1\text{MPa}$  から  $9.9\text{MPa}$  である。長期的に見た風洞の損傷を少なくするため、現在は、可能な限りよどみ点圧力  $6\text{MPa}$  以下で運用している。通風流量の大きなマッハ数5ノズルでは、加熱器ペプルの浮き上がり流量に対する流量制限から運用圧力の上限値を  $1.5\text{MPa}$  としている。

よどみ点圧力とよどみ点温度の組合せを変えることでレイノルズ数を変えることができる。図中には代表長を  $1\text{m}$  とした時の値を示す。

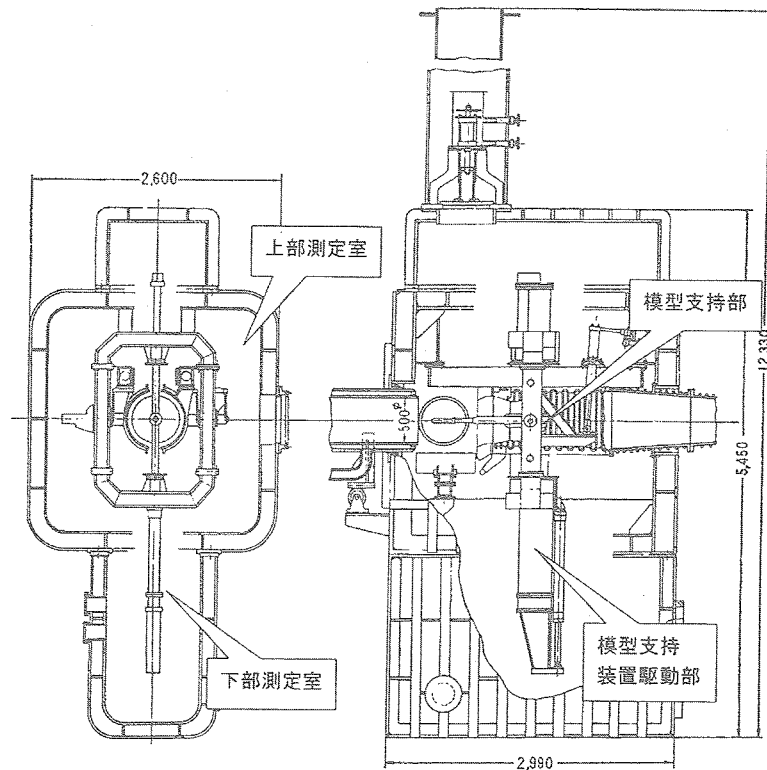


図 2.4 極超音速風洞測定部



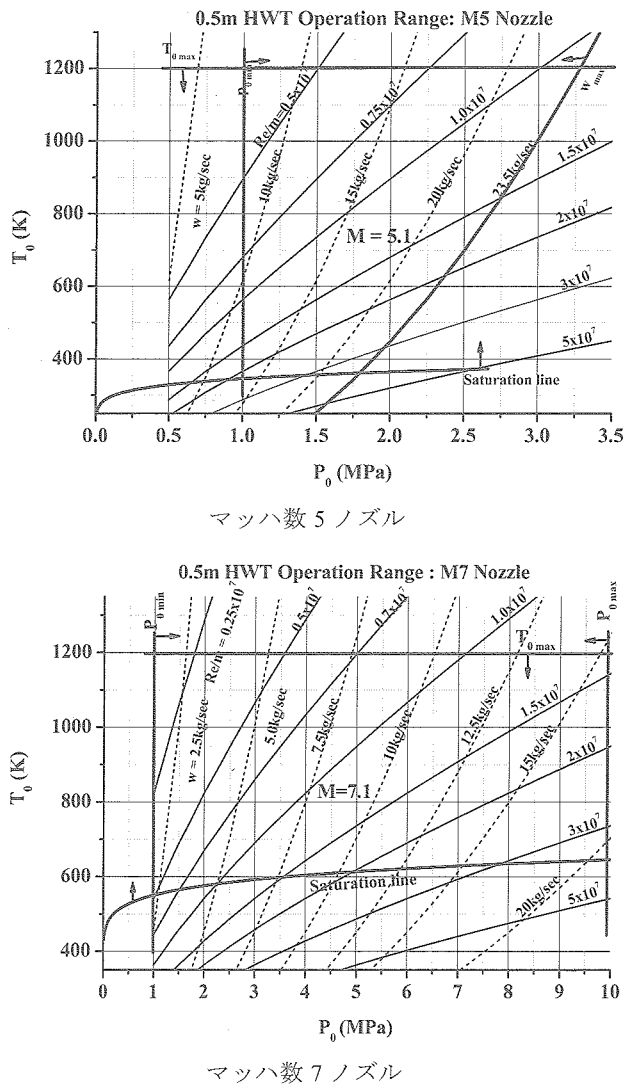


図 2.5 0.5m 極超音速風洞作動範囲

## 2.2 ピトーレークとトラバース装置

ピトーレークを図 2.6 に、トラバース装置を図 2.7 に、それぞれ示す。ピトーレークとトラバース装置を風洞測定部にセットした状態の写真を図 2.8 に示す。図 2.8 は予備試験時のもの、図 2.6 は本試験時のものでトラバース装置上のストラットの形状が改修されている。

### (1)ピトーレーク

外径 2.5mm、内径 1.0mm、長さ 40mm のピトー管 43 本を 10mm 間隔で配し、0.42m 幅の測定ができる。風洞軸まわりに±90°回転できる。ピトーレークをトラバース装置に装着するストラットはスペーサの着脱で長さを変えられ、上下方向の測定範囲を拡張できる。ピトーレークの圧力ポート位置と ESP ポート番号の対応を表 2.2 に示す。

### (2)トラバース装置

本試験のために今回整備したトラバース装置は自由噴流の下部に設置し、気流方向に最大速度 0.1m/s で 0.50m、上下方向に最大速度 0.2m/s で 0.32m 移動できる。人力で容易に運搬できるようにブロック化した構造とした。位置決めにはノックピンを用い無調整で同位置に設置できる。

## 2.3 計測装置

本校正試験の計測の流れを図 2.9 に示す。

### (1)センサー

よどみ点圧力  $P_0$ 、よどみ点温度  $T_0$ 、各部温度はセンサー出力として数 mV または数 V オーダーのアナログ信号として計測前置装置に入力される。ここで絶縁型直流増幅器によって数 V オーダーに増幅し振幅および帯域調整と信号源との絶縁を図り、計測信号としてデータ処理システムの AD 変換器に入力され、物理量に変換して風試データとして出力される。熱電対による温度計測では電子式基準接点補償器によって 0°C 基準の測定をしている。

ピトー圧分布はピトーレークを搭載したトラバース装置で、通風中に最大 20 回測定位置を変え ESP システムで [kPa] 単位のデータを得る。ESP システムは、自身の収集データと風洞データ処理システム収集データとの時間的対応をとる指標として「ESP 収集中」信号（収集中=5V、休止中=0V）を出力する。トラバース装置は X 軸および Z 軸それぞれの現在位置に対応した -5V~5V の [測定位置]信号を出力する。これらは計測前置装置に入力された以降は、よどみ点圧力等と同様な処理が取られる。

### (2)圧力分布測定システム

圧力分布測定システム (ESP システム、PSI 社 8400) ESP ユニットの外観を図 2.10 に、ESP システム系統図を図 2.11 に示す。ESP センサー圧力ポート(SUS 管)は直径約 1mm、長さ 15mm である。ピトー管から ESP センサー近くまでは外径 1.2mm、内径 0.8mm の SUS 管で配管し、ESP センサーとの間は可とう性のある外径 1.6mm 内径 0.8mm のポリウレタンチューブで接続した。ポリウレタンチューブの ESP センサー圧力ポート挿入部には抜け止めにスプリング状クランプをかぶせた。

既存の ESP システム (圧力レンジ: 30kPa、96 チャンネル) に対し次のような高度化を図った。まず、圧力レンジの異なる ESP 組み合わせ使用を可能とし、最大 4 台の ESP で 256 チャンネルまで 20 回分のデータ収集する能力を持たせた。精度向上のため、チャンネルごとの圧力センサー温度を測定して温度補償を行う DTC (Digital

Temperature Compensation) 機能を有する ESP を適用し、あわせて AD 変換部の設置場所を測定室にできるだけ近い位置に移動してアナログ信号経路を短縮し、デジタル信号経路には光ファイバーケーブルを適用して S/N 比向上を図った。圧力レンジは従来の範囲をカバーし、マッハ数分布測定試験に適用できる±30kPa と±100kPa の ESP ユニットの整備した。

新システムの温度特性を恒温チャンバにて確認した結果を図 2.12 に示す。当該 ESP を室温で校正した後、周囲温度を 30~50℃ 変化させたとしても測定誤差はほとんど変化せず、±0.08%FS (FS=30kPa) の精度をキープした。

ESP データ収録方法としては次の 3 種類のモードがある。

- (a) その都度ディスプレイ画面をクリックする「手動」モード
- (b) 予めデータ収録のタイミングを設定しておく「自動」モード
- (c) 他の機器の作動と同期を取ってデータ収録する「同期」モード

本試験では、この「同期モード」とトラバース装置の「歩進モード」を組み合わせることで通風中にトラバースさせ、測定位置を最大 20 回変えデータ収録できるようにした。

(3) データ処理システム

風洞データ処理システム<sup>13)</sup> (HP 社製 VXI システム) のブロック図を図 2.13 に示す。風洞基準量等のアナログ電圧出力はアンプ等を介して風洞データ処理システム高速 A/D 変換器に入力され、デジタル化される。この高速 A/D 変換器は最大 128 チャンネルの入力が可能である。1 kHz のサンプリングでデータを取得し、生データ(電圧値:mV)を 100 個ずつ単純平均したものに変換係数を掛け

物理量に変換し、0.1 秒毎のデータとして表示される。一次処理としては、時間履歴がチャンネル毎に出力される。

よどみ点圧力  $P_0$  及びよどみ点温度  $T_0$  は整流筒で測定される。それらは風洞基準量として風洞データ処理システムで圧力分布データと時間的対応をとられて統合データとして出力される。0.5m 極超音速風洞のよどみ点圧力の測定には、Setra 社製圧力変換器 204 型(レンジ: 500psi (3.45MPa) と 3000psi (20.7MPa))を使用し、よどみ点温度の測定には、シース型の R 型熱電対を使用している。

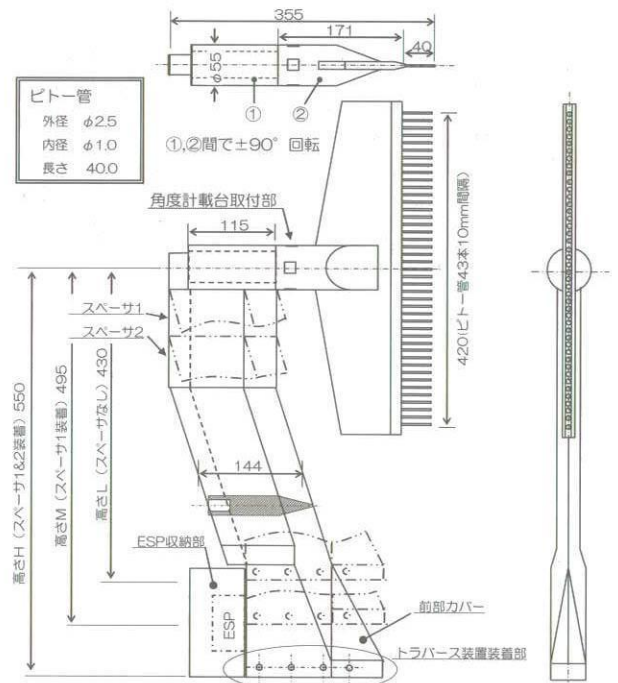


図 2.6 ピトーレーク

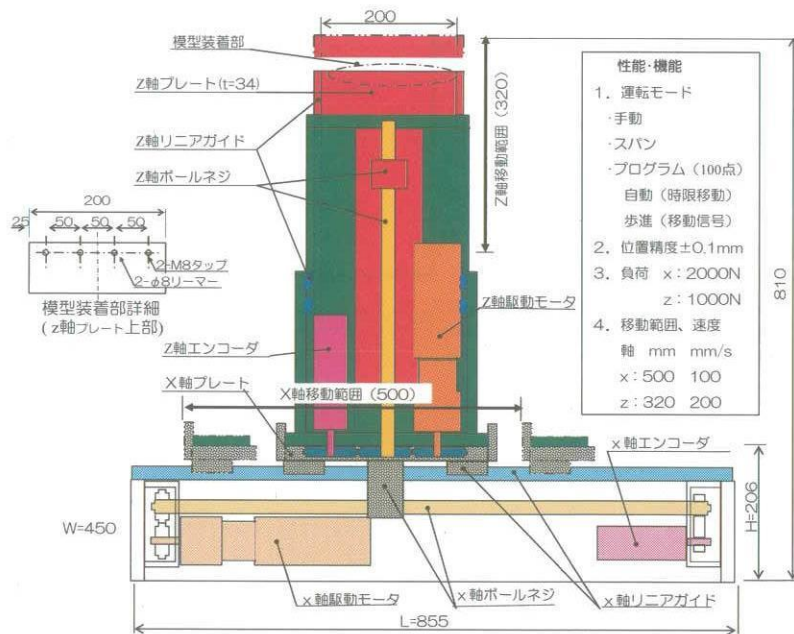
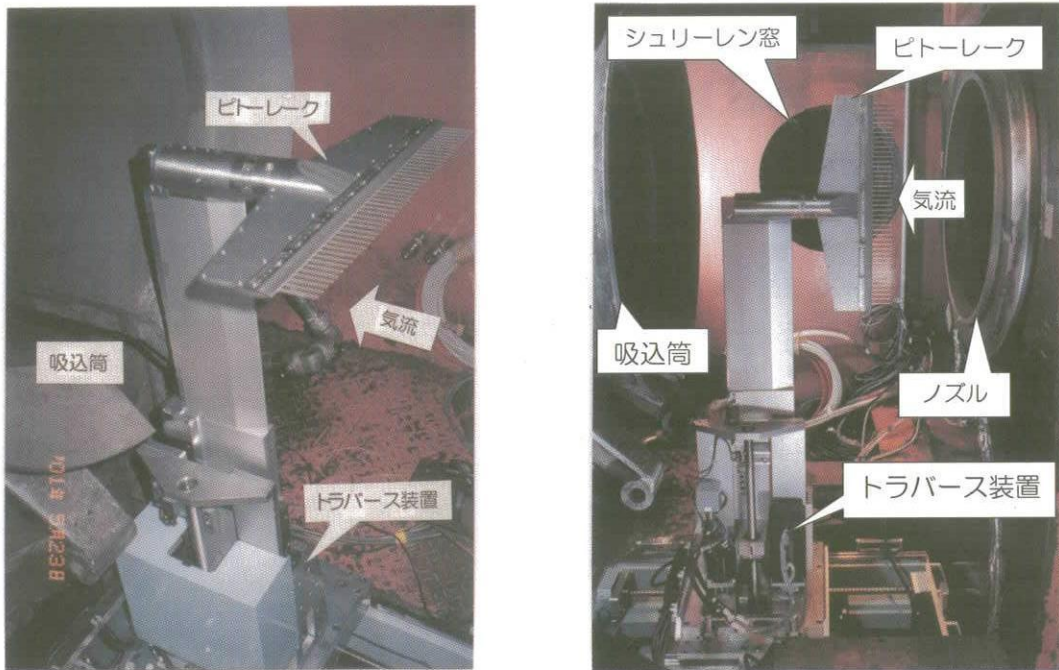


図 2.7 トラバース装置 単位: mm



a ピトーレークを水平にセットした場合      b ピトーレークを鉛直にセットした場合  
 図 2.8 ピトーレークとトラバース装置をセットした状態

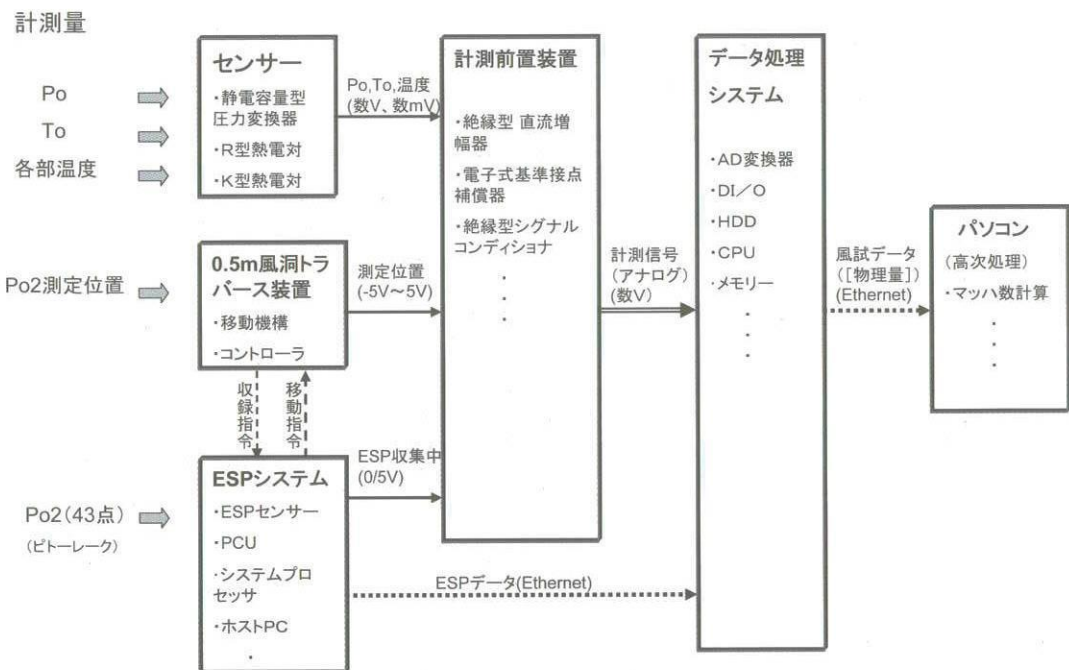


図 2.9 計測系統図



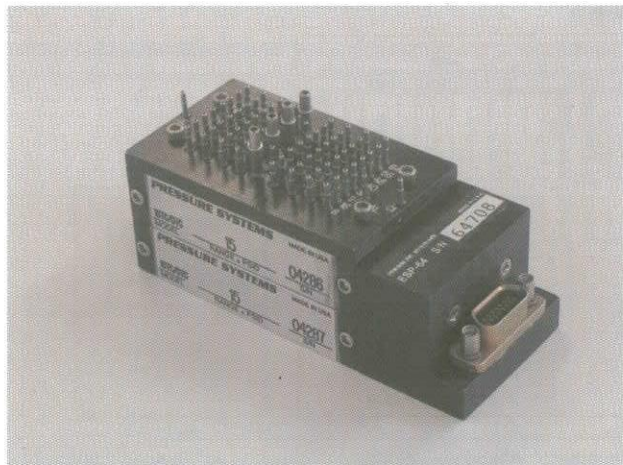


図 2.10 ESP ユニット外観

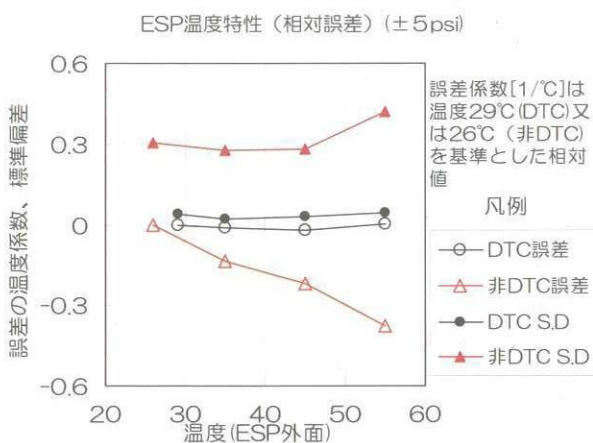


図 2.12 ESP 温度特性

表 2.2 ピトーレーク ESP ポート割当て表

番号	ピトー管			ESPセンサー Port番号	記事
	位置[mm] (中心=0)	鉛直 (φ=0°)	水平 (φ=+90°)		
42	210	上21	右21	42	
40	200	上20	右20	40	
38	190	上19	右19	38	
36	180	上18	右18	36	
34	170	上17	右17	34	
32	160	上16	右16	32	
30	150	上15	右15	30	
28	140	上14	右14	28	
26	130	上13	右13	26	
24	120	上12	右12	24	
22	110	上11	右11	22	
20	100	上10	右10	20	
18	90	上9	右9	18	
16	80	上8	右8	16	
14	70	上7	右7	14	
12	60	上6	右6	12	
10	50	上5	右5	10	
8	40	上4	右4	8	
6	30	上3	右3	6	
4	20	上2	右2	4	
2	10	上1	右1	2	
1	0	中央	中央	1	Port44での測定あり
3	-10	下1	左1	3	
5	-20	下2	左2	5	
7	-30	下3	左3	7	
9	-40	下4	左4	9	
11	-50	下5	左5	11	
13	-60	下6	左6	13	
15	-70	下7	左7	15	
17	-80	下8	左8	17	
19	-90	下9	左9	19	
21	-100	下10	左10	21	
23	-110	下11	左11	23	
25	-120	下12	左12	25	
27	-130	下13	左13	27	
29	-140	下14	左14	29	
31	-150	下15	左15	31	
33	-160	下16	左16	33	
35	-170	下17	左17	35	
37	-180	下18	左18	37	
39	-190	下19	左19	39	
41	-200	下20	左20	41	
43	-210	下21	左21	43	

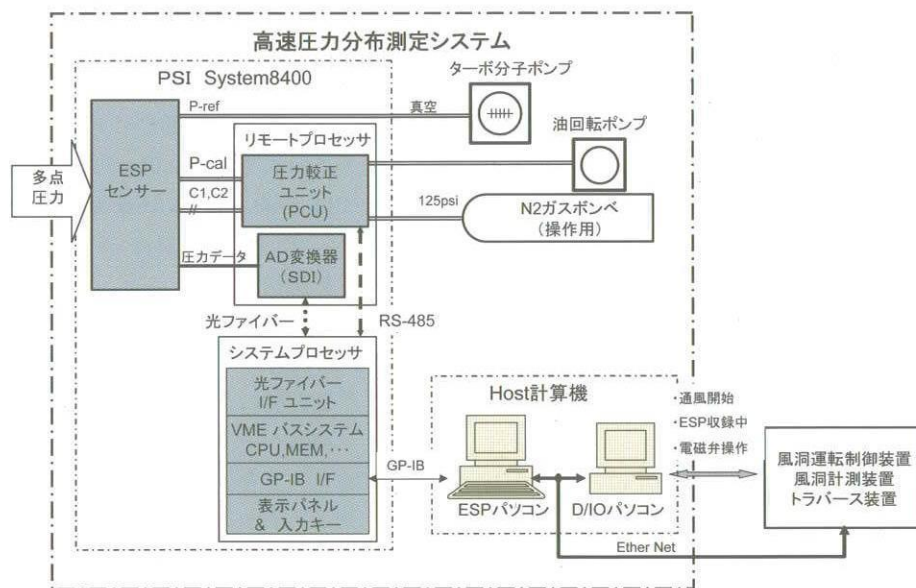


図 2.11 ESP システム系統図

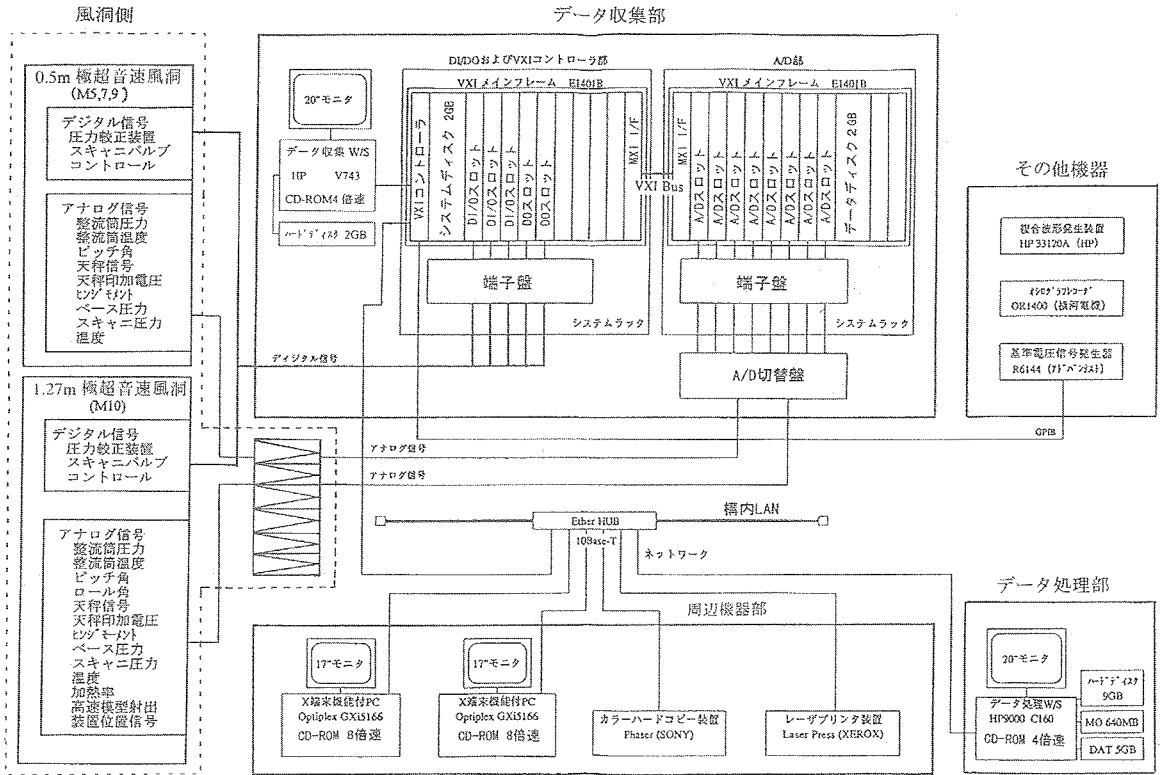


図 2.13 データ処理システム系統図

3 試験方法

3.1 試験手順

1回の通風時間は60秒を基本にした。よどみ点圧力は調圧弁で設定値に能動的に調圧されるが、よどみ点温度には制御機能はなく、目標とするよどみ点温度が得られるよう、風洞オペレータが加熱器の加熱温度、加熱時間を経験的に決めている。ピトー圧測定はよどみ点温度の変化率が小さくなった時点から開始するようにした。

タイムチャートを図 3.1 に示す。風洞気流が安定してから、測定位置に移動し、圧力応答を待って、ESP で圧力測定し、次の測定位置への移動を指示する、というように、予め測定位置をトラバース装置にプログラムしておいた。

座標系を図 3.2 に示す。光学観測窓中心から 0.25m 上流 (ノズル出口端から約 0.01m 離れた位置) のノズル中心軸上の点を原点とする。気流後方に X 軸、上流に向かって右方に Y 軸、上方に Z 軸を採る。

予備試験では、マッハ数 7 ノズルを用いて主に計測特性と誤差の把握を行った。通風開始後 8 秒後から計測を始めた。

鉛直面分布測定及び水平面分布測定は、ピトーレークを X=-0.01m から 0.385m までの 10 箇所にトラバースさせ、1 回の通風で測定した。

断面分布測定では、風洞中心 X= 0.25m 位置でピトーレークを水平にセットし、上方 Z=0.21m から下方

Z=-0.10m までの範囲を 0.01m 刻みで 1 回の通風あたり 10 箇所移動測定、4 回を要して一断面を完結させた。このように複数回数にわたった測定でひとつの分布を求める場合には通風間で重複した位置での測定を必ず入れ、測定の実現性を確認した。

本試験では通風開始後 15 秒後から計測を始めた。本試験時の測定範囲を図 3.3 に示す。

鉛直面及び水平面の分布測定では、気流方向 X=0m ~ 0.5m の範囲を 4 秒毎に 0.05m 刻みで 11 箇所を移動してデータを取得した。

断面分布測定では、ノズル出口近傍 X=0m 及び 風洞中心 X= 0.25m 位置でピトーレークを水平にセットし、上下方向に 2 秒毎 0.01m 刻みで移動し、マッハ数 7 ノズルでは Z=-0.16m ~ 0.16m 範囲を 2 回の通風で、マッハ数 5 ノズルでは Z=-0.21m ~ 0.21m 範囲を 3 回の通風で、それぞれ測定した。

3.2 試験条件

予備試験のケースを表 3.1 に、本試験 マッハ数 5 ノズルの試験ケースを表 3.2 に、本試験 マッハ数 7 ノズルの試験ケースを表 3.3 に、それぞれ示す。

マッハ数 5 ノズルは空気流量が大量で、よどみ点圧力  $P_0$  は空気加熱器の流量の制約と調圧弁の制御能力の制約に縛られる。1MPa と 1.5MPa とした。

マッハ数 7 ノズルでは空気流量の制約にはかからず調

圧弁の制約だけである。1.27m 極超音速風洞校正試験に倣って1MPa、2MPa、2.5MPa、4MPa、6MPa、8.5MPaの6ケースとした。

よどみ点温度  $T_0$  については、設定温度を変えた通風を行い、通風時間中の一様流ピトー圧が安定する値を選定した。

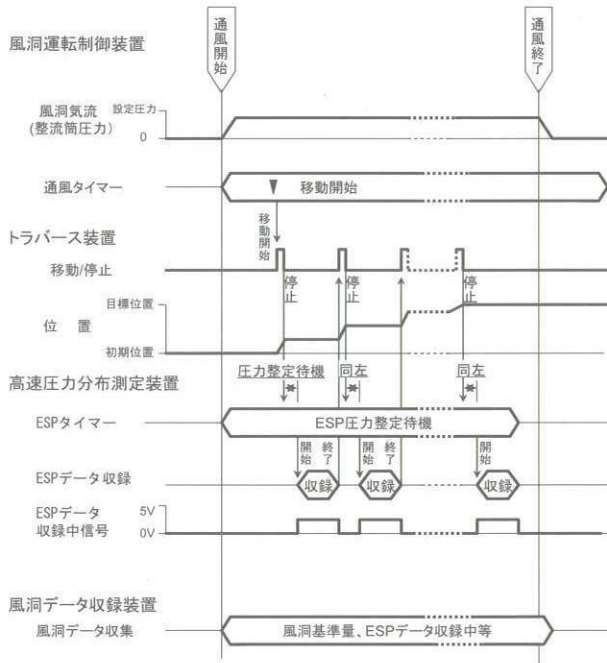


図 3.1 タイムチャート

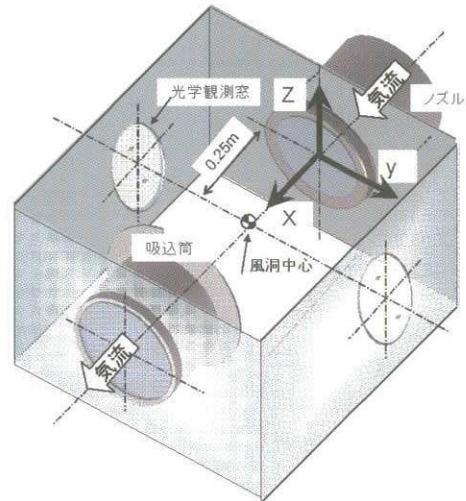


図 3.2 座標系

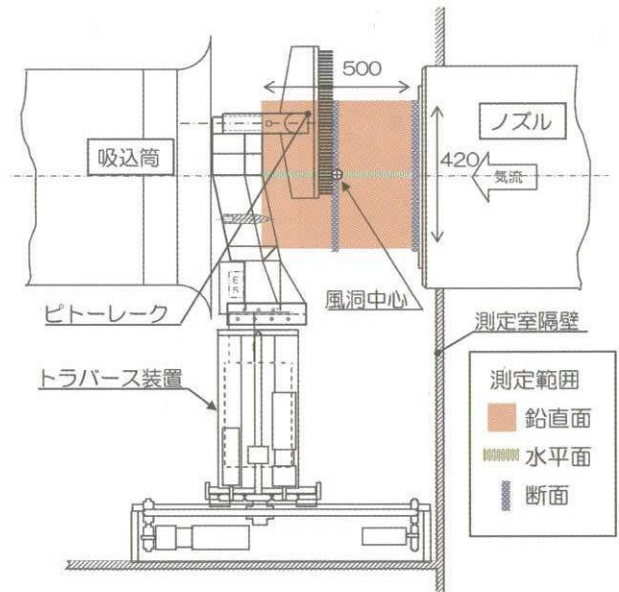


図 3.3 ピトー圧力の測定範囲 単位 mm

表 3.1 予備試験 試験ケース

NO.	測定項目	RUN NO.	目標値		実現値		ビトーレーク位置		
			P <sub>0</sub> [MPa]	T <sub>0</sub> [K]	P <sub>0</sub> [MPa]	T <sub>0</sub> [K]	φ [°]	X 軸[m]	Z 軸[m]
1	ESP 温度環境	3720	1	703	1.02	637	0	0.250	0.000
2		3724	2	703	2.04	693	0	0.250	0.000
3		3725	2	703	2.04	645	0	0.250	0.000
4	澱み点温度 の影響	3722	1	603	1.02	604	0	0.250	0.000
5		3723	1	803	1.03	688	0	0.250	0.000
6		3728	1	803	1.03	787	0	0.250	0.000
7		3729	1	903	1.03	821	0	0.250	0.000
8		3726	2	803	2.04	771	0	0.250	0.000
9		3727	2	903	2.04	869	0	0.250	0.000
10	試験の再現性	3730	1	803	1.02	822	-90	0.250	0.000
11		3733	1	803	1.02	813	90	-0.010~0.385	0.000
12		3743	1	803	1.02	793	0	0.385~-0.010	0.000
13	鉛直面分布	3734	1	803	1.02	808	0	-0.010~0.385	0.000
14		3735	2	803	2.04	833	0	-0.010~0.385	0.000
15	水平面分布	3731	1	803	1.02	833	90	-0.010~0.385	0.000
16		3732	2	803	2.04	858	90	-0.010~0.385	0.000
17	細密間隔 (0.002m 毎)	3736	1	803	1.03	804	0	0.250	-0.010~0.008
18		3737	1	803	1.03	814	0	0.150	-0.010~0.008
19		3738	1	803	1.02	817	0	0.050	-0.010~0.008
20	断面分布	3739	1	803	1.02	814	90	0.250	0.210~0.120
21		3740	1	803	1.02	815	90	0.250	0.130~0.040
22		3741	1	803	1.02	825	90	0.250	0.050~-0.040
23		3742	1	803	1.02	823	90	0.250	-0.010~-0.100
24	水分量の影響	3744	1	803	1.02	838	0	0.250	0.000
25	(加熱後真空 排気なし)	3745	2	803	2.04	853	0	0.250	0.000



表 3.2 本試験 マッハ数5ノズル試験ケース

NO.	測定項目	RUN NO.	目標値		実現値		ピトーレーク位置		
			P <sub>0</sub> [MPa]	T <sub>0</sub> [K]	P <sub>0</sub> [MPa]	T <sub>0</sub> [K]	φ [°]	X 軸[m]	Z 軸[m]
1	激み点温度 の影響	3781	1	573	0.91	574	0	0.250	0.000
2		3790	1	623	1.01	676	0	0.250	0.000
3		3782	1	673	1.01	648	0	0.250	0.000
4		3783	1	673	1.00	715	0	0.250	0.000
5		3784	1	773	1.01	748	0	0.250	0.000
6		3785	1.5	573	1.46	639	0	0.250	0.000
7		3786	1.5	673	1.47	692	0	0.250	0.000
8		3787	1.5	673	1.47	717	0	0.250	0.000
9		3788	1.5	773	1.47	763	0	0.250	0.000
10	鉛直面分布	3791	1	673	1.01	742	0	0~0.500	0.000
11		3792	1.5	673	1.47	725	0	0~0.500	0.000
12	水平面分布	3793	1	673	1.01	733	90	0~0.500	0.000
13		3797	1.5	673	1.47	705	90	0~0.500	0.000
14	断面分布(x=0)	3803	1	673	1.00	715	90	0.000	0.210~-0.070
15		3802	1	673	1.01	750	90	0.000	0.070~-0.070
16		3801	1	673	1.01	707	90	0.000	-0.070~-0.210
17	断面分布(x=0.25)	3804	1	673	1.00	718	90	0.250	0.210~-0.070
18		3795	1	673	1.01	716	90	0.250	0.070~-0.070
19		3794	1	673	1.01	718	90	0.250	-0.070~-0.210
20		3806	1.5	673	1.47	701	90	0.250	0.210~-0.070
21		3800	1.5	673	1.47	698	90	0.250	0.070~-0.070
22		3798	1.5	673	1.47	702	90	0.250	-0.070~-0.210
23	Pref=大気圧	3789	1	673	1.01	721	0	0.250	0.000
24	非 DTC	3796	1.5	673	1.47	727	0	0.250	0.000
25	斜め面分布	3807	1	673	1.01	713	45	0~0.500	0.000
26		3808	1	673	1.01	726	-45	0~0.500	0.000

表 3.3 本試験 マッハ数7ノズル試験ケース

NO.	測定項目	RUN NO.	目標値		実現値		ピトーレーク位置		
			P <sub>0</sub> [MPa]	T <sub>0</sub> [K]	P <sub>0</sub> [MPa]	T <sub>0</sub> [K]	φ [°]	X軸[m]	Z軸[m]
1	澱み点温度 の影響	3746	1	803	1.03	756	0	0.250	0.000
2		3747	1	803	1.03	807	0	0.250	0.000
3		3749	2	853	2.04	822	0	0.250	0.000
4		3761	2.5	703	2.56	837	0	0.250	0.000
5		3764	2.5	703	2.55	813	0	0.250	0.000
6		3753	2.5	803	2.55	831	0	0.250	0.000
7		3766	2.5	833	2.55	773	0	0.250	0.000
8		3767	2.5	893	2.56	905	0	0.250	0.000
9		3754	2.5	903	2.55	875	0	0.250	0.000
10		3756	4	703	4.08	802	0	0.250	0.000
11		3755	4	803	4.08	886	0	0.250	0.000
12		3765	4	833	4.08	888	0	0.250	0.000
13		3768	4	833	4.08	811	0	0.250	0.000
14		3769	4	843	4.08	837	0	0.250	0.000
15		3770	4	863	4.08	857	0	0.250	0.000
16		3757	4	903	4.09	880	0	0.250	0.000
17		3762	4	973	4.08	940	0	0.250	0.000
18		3846	6	723	6.13	771	0	0.250	0.000
19		3828	6	773	6.15	679	0	0.250	0.000
20		3831	6	773	6.15	844	0	0.250	0.000
21		3841	6	773	6.15	780	0	0.250	0.000
22		3760	6	803	6.12	832	0	0.250	0.000
23		3829	6	873	6.15	887	0	0.250	0.000
24		3830	6	873	6.15	983	0	0.250	0.000
25		3832	6	873	6.14	989	0	0.250	0.000
26		3833	6	873	6.15	936	0	0.250	0.000
27		3834	6	873	6.15	890	0	0.250	0.000
28		3842	8.5	673	8.68	742	0	0.250	0.000
29		3843	8.5	773	8.68	772	0	0.250	0.000
30		鉛直面分布	3748	1	803	1.03	841	0	0~0.500
31	3750		2	853	2.04	867	0	0~0.500	0.000
32	3771		2.5	853	2.55	881	0	0~0.500	0.000
33	3777		4	873	4.08	881	0	0~0.500	0.000
34	3835		6	923	6.14	930	0	0~0.500	0.000
35	3844		8.5	773	8.68	791	0	0~0.500	0.000
36	水平面分布	3752	1	803	1.03	797	90	0~0.500	0.000
37		3751	2	853	2.04	884	90	0~0.500	0.000
38		3772	2.5	853	2.55	877	90	0~0.500	0.000
39		3776	4	873	4.08	890	90	0~0.500	0.000
40		3836	6	923	6.13	935	90	0~0.500	0.000
41		3845	8.5	773	8.68	788	90	0~0.500	0.000
42	断面分布(x=0)	3839	6	923	6.14	930	90	0.000	0.160~0
43		3840	6	923	6.14	938	90	0.000	-0.160~0
44	断面分布(x=0.25)	3773	2.5	853	2.56	869	90	0.250	0.150~0.050
45		3774	2.5	853	2.56	887	90	0.250	0.050~-0.050
46		3775	2.5	853	2.56	875	90	0.250	-0.050~-0.150
47		3778	4	873	4.08	894	90	0.250	0.150~0
48		3779	4	873	4.08	895	90	0.250	-0.150~0
49		3837	6	923	6.13	943	90	0.250	0.160~0
50		3838	6	923	6.14	945	90	0.250	-0.160~0

## 4 データ処理

## 4.1 マッハ数の算出

マッハ数は気体の不完全性（文献<sup>14</sup>のいわゆる Thermally perfect gas）を考慮してピトー圧力とよどみ点圧力、及びよどみ点温度から以下の手順で算出した。

ピトー圧力  $P_{02}$  とよどみ点圧力  $P_0$  の比は完全気体の場合、マッハ数  $M$  から次式で表される。

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

ここで、比熱比  $\gamma = 1.4$  である。上式の逆関数を次の多項式で近似した。式(1)に対し誤差は無視できる量(0.01%以内)である。

マッハ数5ノズルに対して

$$M = -2.65091 \times 10^3 \left(\frac{P_{02}}{P_0}\right)^3 + 6.93118 \times 10^2 \left(\frac{P_{02}}{P_0}\right)^2 - 7.61837 \times 10 \left(\frac{P_{02}}{P_0}\right) + 7.68455 \quad (2a)$$

マッハ数7ノズルに対して

$$M = -2.16969 \times 10^5 \left(\frac{P_{02}}{P_0}\right)^3 + 1.40964 \times 10^4 \left(\frac{P_{02}}{P_0}\right)^2 - 3.83662 \times 10^2 \left(\frac{P_{02}}{P_0}\right) + 10.35247 \quad (2b)$$

不完全気体と完全気体の比を以下のようによどみ点温度  $T_0$  の多項式で近似した。この近似誤差はやはり無視できる量である。

マッハ数5ノズルに対して

$$\frac{\left(\frac{P_{02}}{P_0}\right)_{therm.perf}}{\left(\frac{P_{02}}{P_0}\right)_{perfect}} = 0.97340 + 9.94425 \times 10^{-5} T_0 - 5.98988 \times 10^{-8} T_0^2 - 1.06903 \times 10^{-10} T_0^3 + 4.83639 \times 10^{-14} T_0^4 \quad (3a)$$

マッハ数7ノズルに対して

$$\frac{\left(\frac{P_{02}}{P_0}\right)_{therm.perf}}{\left(\frac{P_{02}}{P_0}\right)_{perfect}} = 0.96672 + 1.35868 \times 10^{-4} T_0 - 1.313 \times 10^{-7} T_0^2 - 4.74662 \times 10^{-11} T_0^3 + 3.02264 \times 10^{-14} T_0^4 \quad (3b)$$

ピトー圧力/よどみ点圧力の測定値から補正式(3)に基づき完全気体相当の圧力比に換算、完全気体のマッハ数算出近似式(2)にかけ、マッハ数を算出した。

ただし、一様流を外れる周辺領域に対しては、一様流領域境界での静圧を求め、レーレーのピトー公式を適用して推算した。

## 4.2 マッハ数算出時の誤差

マッハ数算出が前提としている一次元等エントロピー変化式は誤差なく成立しているものと仮定する。又、前述の多項式近似式の計算誤差は無視する。マッハ数の空間分布を求める時の測定センサーの関係を図4.1に示す。

まず、通風直前に  $n (=43)$  点のピトー孔に対応する ESP の全要素センサーを専用圧力校正ユニット(PCU)で校正する。通風中、このピトーレークをトラバース装置により、例えば  $m$  回位置を変えて測定すると  $N=m \times n$  点のピトー圧力を求めることができる。鉛直面分布測定及び水平面分布測定では  $m=11$  である。各トラバース停止位置では ESP は8サンプル平均値(Frame=8)を0.1秒毎10回出力する。

よどみ点圧力及びよどみ点温度は1kHzでサンプリングされ0.1秒刻みで100サンプル平均値が出力される。各トラバース停止位置でピトー圧が測定されるタイミングに対応して10データ採取される。

誤差には、「偶然誤差」と「偏り誤差」の2種類がある。偶然誤差は測定のパラツキで、測定を繰返して平均値をとればパ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)の一般的指標は標本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。

ピトー圧系統の測定誤差  $\Delta P_{02}$ 、よどみ点圧力系統の測定誤差  $\Delta P_0$ 、及びよどみ点温度系統の測定誤差  $\Delta T_0$  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。

ピトー圧系統の測定誤差  $\frac{\Delta P_{02}}{P_{02}^*}$

よどみ点圧力系統の測定誤差  $\frac{\Delta P_0}{P_0^*}$

よどみ点温度系統の測定誤差  $\frac{\Delta T_0}{T_0^*}$

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

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、それぞれの総括値は次式に示すように RSS ( Root Sum Square )により見積もられる。

$$B = \sqrt{\sum (\theta_i B_i)^2} \tag{4}$$

$$S = \sqrt{\sum (\theta_i S_i)^2} \tag{5}$$

$$v = \left[ \sum (\theta_i S_i)^2 \right] / \sum [(\theta_i S_i)^4 / v_i] \tag{6}$$

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  $f_M(P_{02}, P_0, T_0)$  は式(2)、(3)で合成されるマッハ数算出関数である。

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

$$\theta_{T_0} = \left( \frac{T_0^*}{M^*} \frac{\partial f_M}{\partial T_0} \right), \quad \theta_{M_S} = 1 \tag{7}$$

総括自由度  $v$  から 95% の偶然誤差をカバーする student  $t$  値を求めて偶然誤差限界  $P = tS$  を計算し、それに総括正確度と合わせて、一様流コア領域のマッハ数の 95% 包括度の不確かさ  $U_{RSS}$  を計算する。なお、自由度が十分大きい ( $\geq 20$ ) 場合、student  $t$  値は 2 である。

$$U_{RSS} = \sqrt{B^2 + P^2} \tag{8}$$

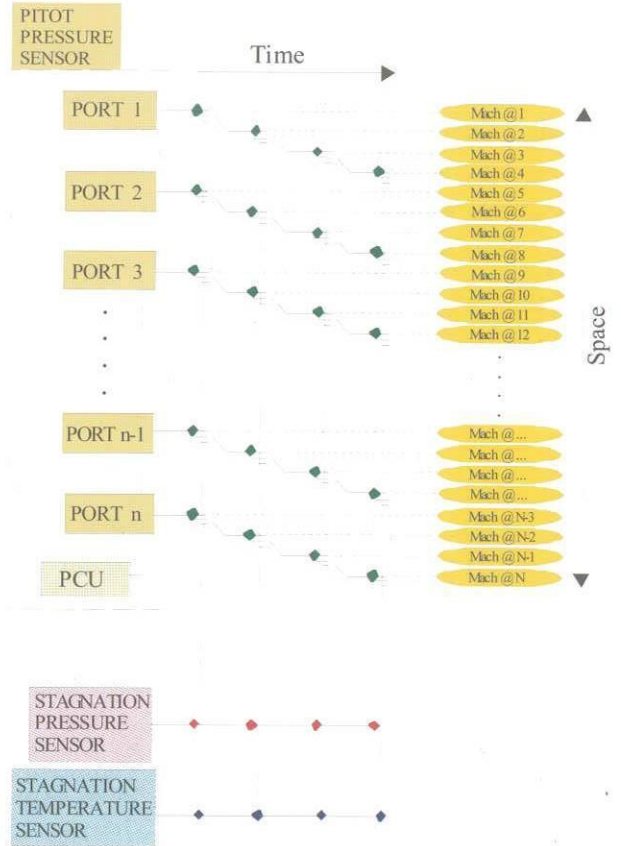


図 4.1 マッハ数空間分布を求める測定センサー

## 5 試験結果

### 5.1 予備試験

予備試験では、本試験に備えてマッハ数7ノズルを用いて主に計測特性の把握、試験条件の設定妥当性の検討を行った。

#### (1) ESP 計測に対する温度環境

ESP は半導体圧力センサーを使用しているため温度環境に対しては十分な注意が必要である。また、取扱い易いが使用限界温度の低い可撓性樹脂製チューブを圧力導管としてどの箇所まで使用できるか、決定するためには関連箇所の温度の把握が必要である。通風条件下で温度環境を調べた。結果を図 5.1 に示す。ここで温度計測位置は次の通りである。

- T1 ピトーレーク支柱 圧力導管収納スペース内中間
- T2 ESP センサーユニット表面
- T3 ピトーレーク支柱 圧力導管収納スペース内上端
- T4 ピトー管 No. 1 圧力導管櫛型部

ピトー管 No. 1 圧力導管櫛型部で約 50°C、圧力導管収納スペース内上端部で微小の温度上昇が見られるが、それ以外ではほとんど変化しない。ESP 計測にとって温度

環境は問題ないと判断した。可撓性樹脂製チューブはピトーレーク支柱 圧力導管収納スペース内上端まで使用可能と判断した。

### (2)よどみ点温度の影響

よどみ点温度を変えて一連の通風を行った。773K (500°C) を下回るとピトー圧が通風中に変動する傾向が観察された。一様流の温度は十分飽和温度以上で、加熱器を真空排気して水分は可能な限り排除しているはず (40ppmV 以下) であるが、作動空気中に残存する水分の影響と推測している。以降、マッハ数 7 の校正試験では 773K 以上を基本とした。

### (3)真空排気ありなしによる影響

加熱器燃焼ガスの水分を除去するため、通常運転時には加熱終了後、通風前に加熱器の真空排気を実施している。この効果を見るため、故意に真空排気せずに通風する試験を実施した。真空排気あり/なしのマッハ数分布の比較を  $P_0=1\text{MPa}$  について図 5.2 に示す。ただし、本図で示すマッハ数は  $P_{02}/P_0$  から完全気体を仮定して式(2b)のみにより求めた。図で明らかのように、真空排気をしなかった場合、通風中ピトー圧が不安定に変動する現象が現れる。

## 5.2 マッハ数 5 ノズル

### (1)よどみ点温度の影響

マッハ数 7 ノズルの予備試験でよどみ点温度が低いと気流が安定せずピトー圧がフラフラするとの観察がなされたため、マッハ数 5 ノズルにおいてもよどみ点温度をいくつか変えて通風試験を行い、ピトー圧の落ち着き具合を見た。673K (400°C) 以上であればバラツキが小さいので 673K 以上を基本とした。

### (2)マッハ数 5 ノズルのマッハ数空間分布

各よどみ点に対する鉛直面分布、水平面分布、断面分布、ヒストグラムをそれぞれ、次の図に示す。

図 5.3 : よどみ点圧力  $P_0=1.0\text{MPa}$

図 5.4 : よどみ点圧力  $P_0=1.5\text{MPa}$

鉛直面分布、水平面分布が示すように、風洞中心点

$X=0.25\text{m}$  を過ぎたあたりから流れは軽微な converge の傾向を持つ。一様流コア領域の X 軸範囲として風洞中心前後  $0.25\text{m}$  ( $X=0\sim 0.5\text{m}$ ) を確保すると、終端部の  $X=0.5\text{m}$  位置では直径  $0.28\text{m}$  を超える周辺で流速は急激に減少しだす。したがって、一様流コア領域は図中、点線で示すように直径  $0.28\text{m} \times$  長さ  $0.5\text{m}$  とした。

一様流コア領域をそのように選べば、領域内測定点のマッハ数分布はヒストグラムが示すように、平均マッハ数を中心にほぼ対称に分布し、バラツキは小さい。鉛直面、水平面それぞれのヒストグラムが同様な分布を持つこと、及び断面分布から、断面内の方位対称性は良好と判断する。

鉛直面分布、水平面分布が示すように、ノズル内から発すると見られる弱い圧力波が 2 筋、一様流コア領域内を横断していることが観測され、これらが  $X=0.35\text{m}$  近傍で周囲よりマッハ数の低い領域を、その直後の  $X=0.5\text{m}$  近傍でマッハ数の高い領域を生じている。これらが是正されれば、気流分布は更に良好になると考える。

## 5.3 マッハ数 7 ノズル

マッハ数 7 ノズルの各よどみ点に対するマッハ数鉛直面分布、水平面分布、断面分布、ヒストグラムをそれぞれ、次の図に示す。

図 5.5 : よどみ点圧力  $P_0=1.0\text{MPa}$

図 5.6 : よどみ点圧力  $P_0=2.0\text{MPa}$

図 5.7 : よどみ点圧力  $P_0=2.5\text{MPa}$

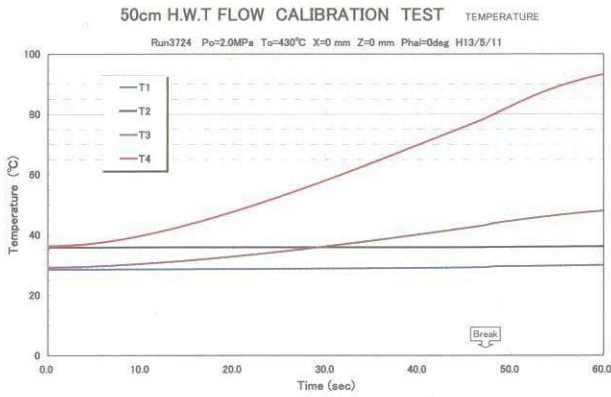
図 5.8 : よどみ点圧力  $P_0=4.0\text{MPa}$

図 5.9 : よどみ点圧力  $P_0=6.0\text{MPa}$

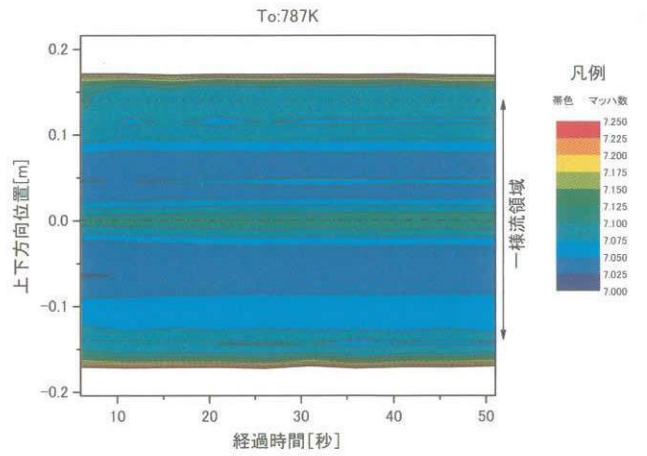
図 5.10 : よどみ点圧力  $P_0=8.5\text{MPa}$

converge の傾向はやはり見受けられるがマッハ数 5 ノズルほどではない。一様流領域はマッハ数 5 ノズルより広域で確保されているが、図中、点線で示すように直径  $0.28\text{m} \times$  長さ  $0.5\text{m}$  とした。一様流コア領域をこのように選べば、領域内測定点のマッハ数分布はヒストグラムが示すように、平均マッハ数を中心にほぼ対称、バラツキ小さく断面内方位による対称性は良い。

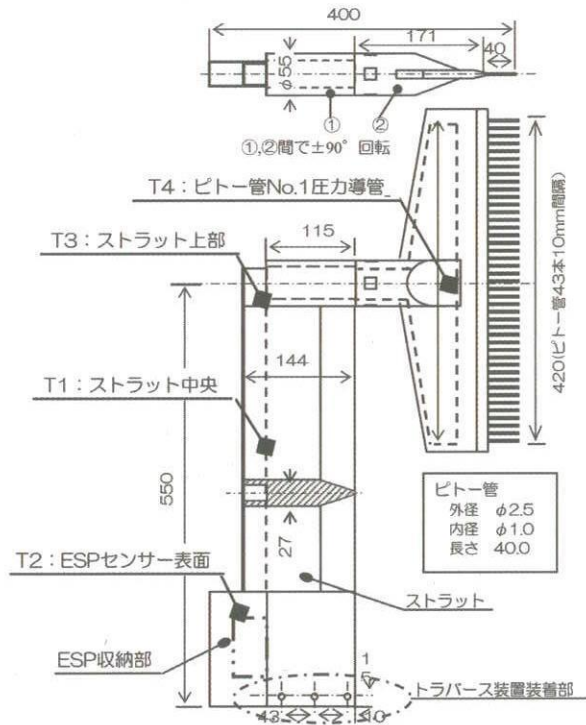
よどみ点圧力を上げていくと境界層厚は薄くなり、膨張加速が促進されることから平均マッハ数が増加する傾向が見られる。



a 温度時歴

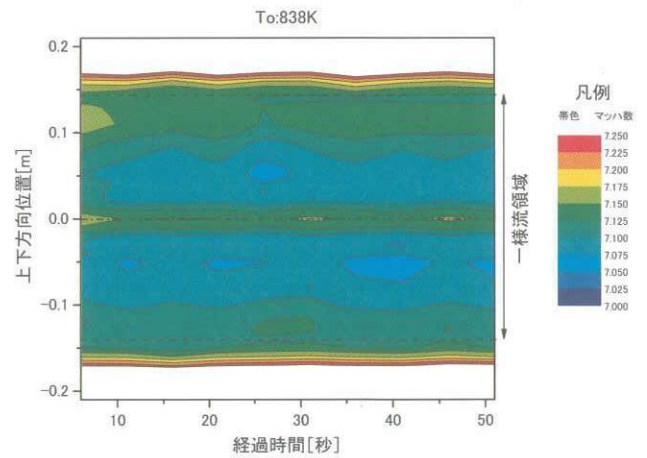


真空排気をした場合



b 温度計測点

図 5.1 ESP 計測 通風時の温度環境



真空排気をしない場合

図 5.2 真空排気をした場合としない場合の違い  
マッハ数7ノズル P<sub>0</sub>=1.0MPa



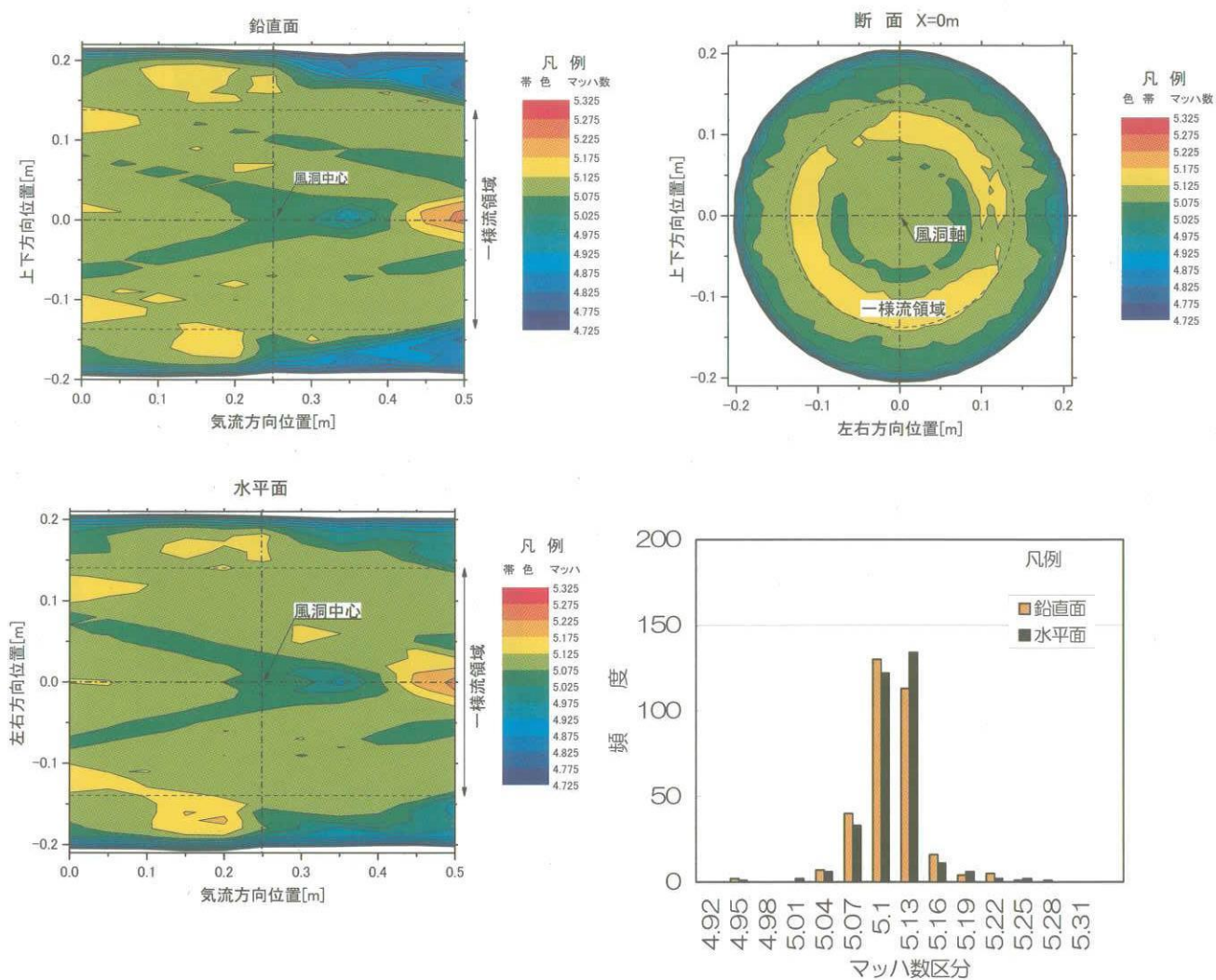


図 5.3 マッハ数 5 ノズル マッハ数空間分布  $P_0=1.0\text{MPa}$



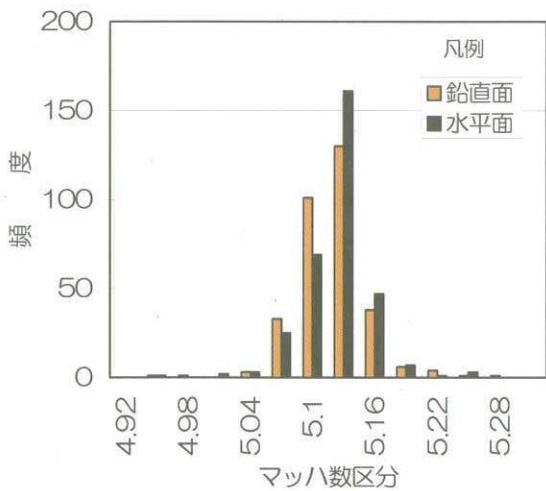
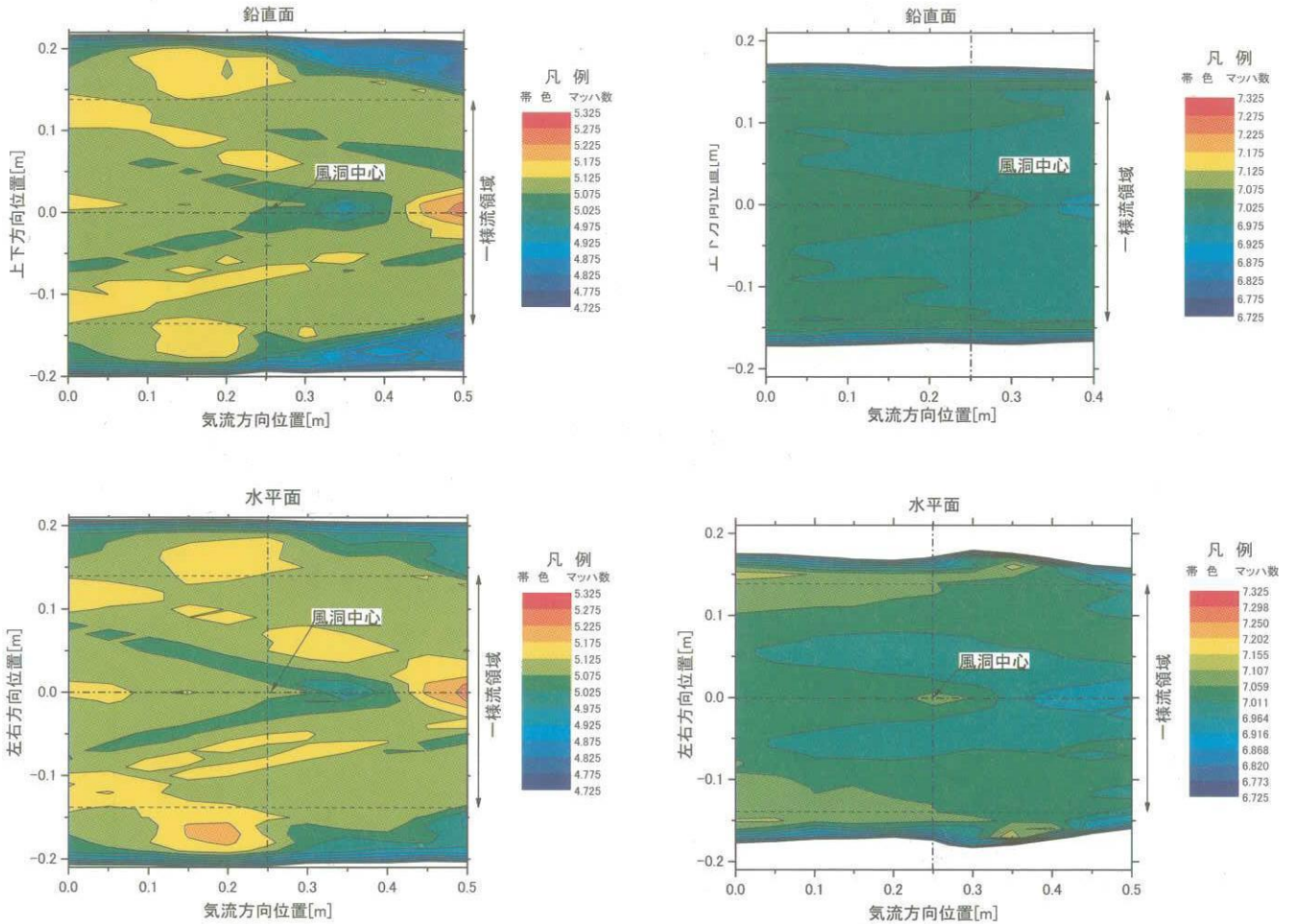


図 5.4 マッハ数5ノズル マッハ数空間分布  $P_0=1.5\text{MPa}$

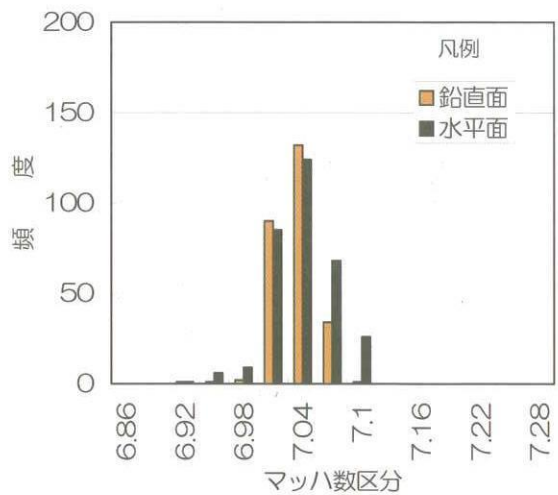


図 5.5 マッハ数7ノズル マッハ数空間分布  $P_0=1.0\text{MPa}$

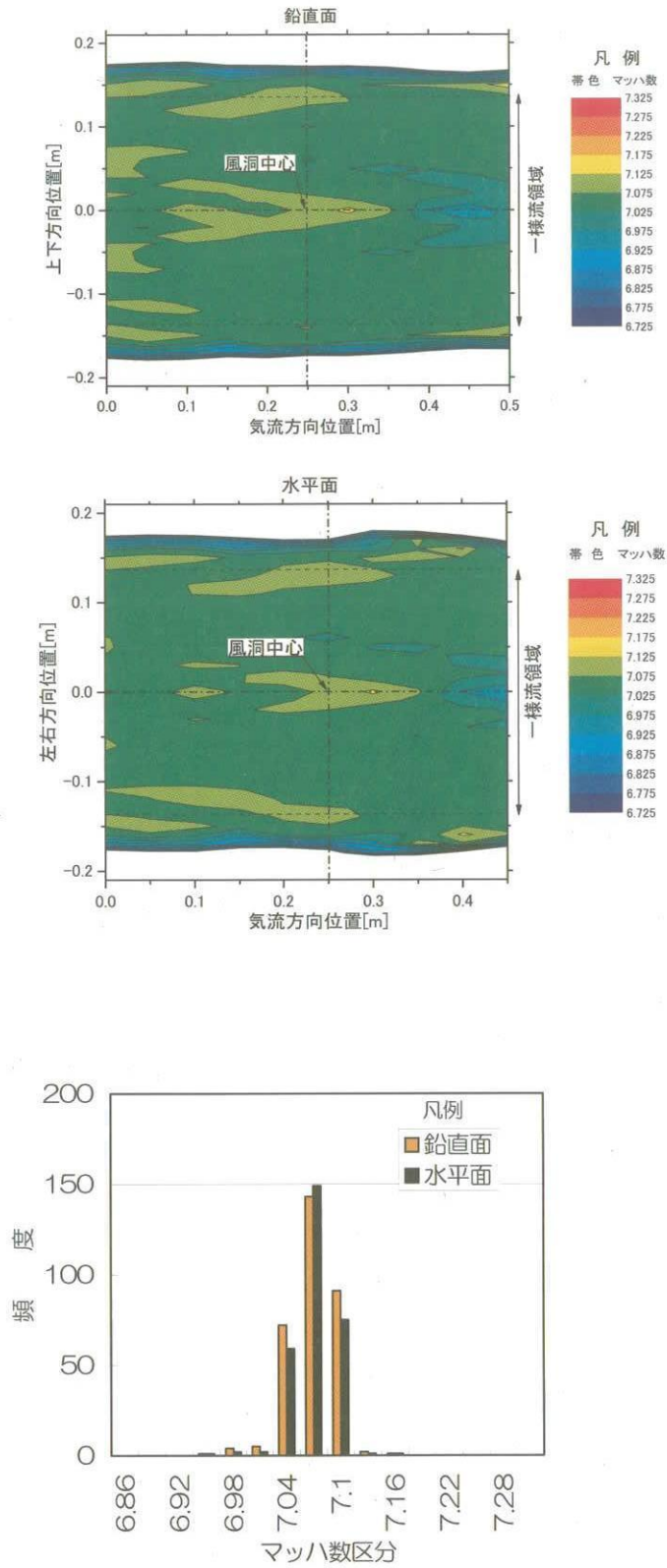


図 5.6 マッハ数7ノズル マッハ数空間分布  $P_0=2.0\text{MPa}$

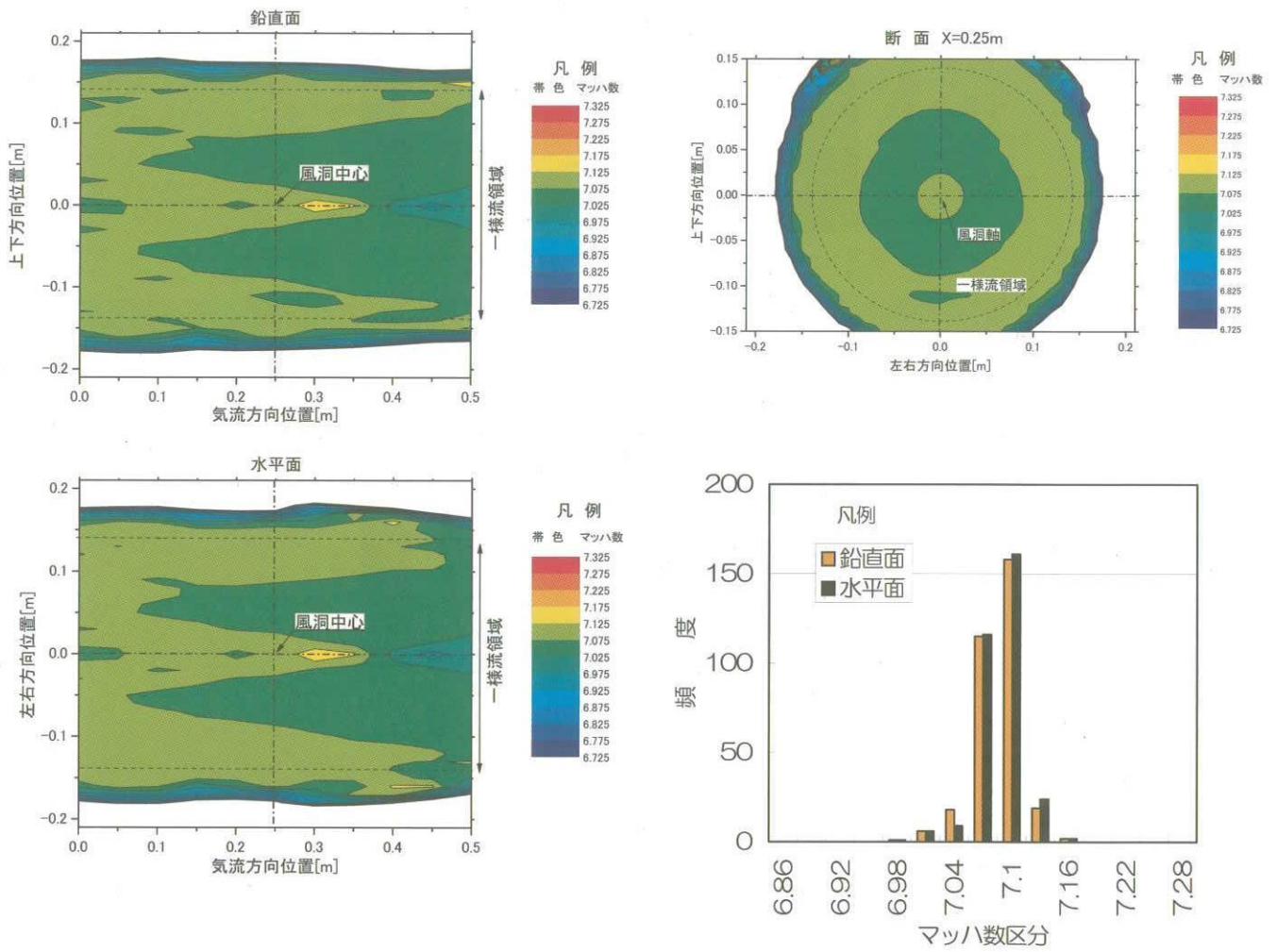


図 5.7 マッハ数7ノズル マッハ空間分布  $P_0=2.5\text{MPa}$



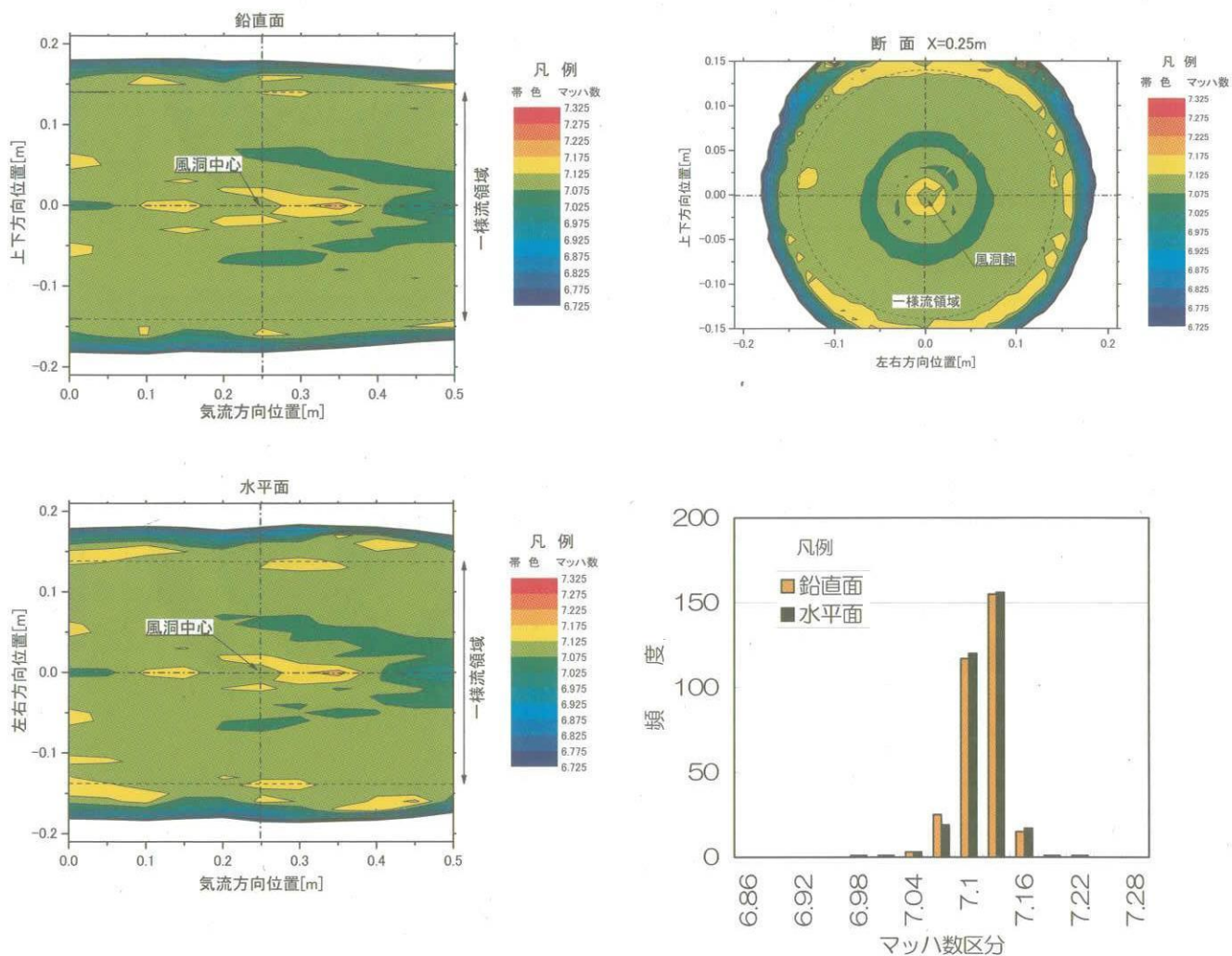


図 5.8 マッハ数7ノズル マッハ数空間分布  $P_0=4.0\text{MPa}$

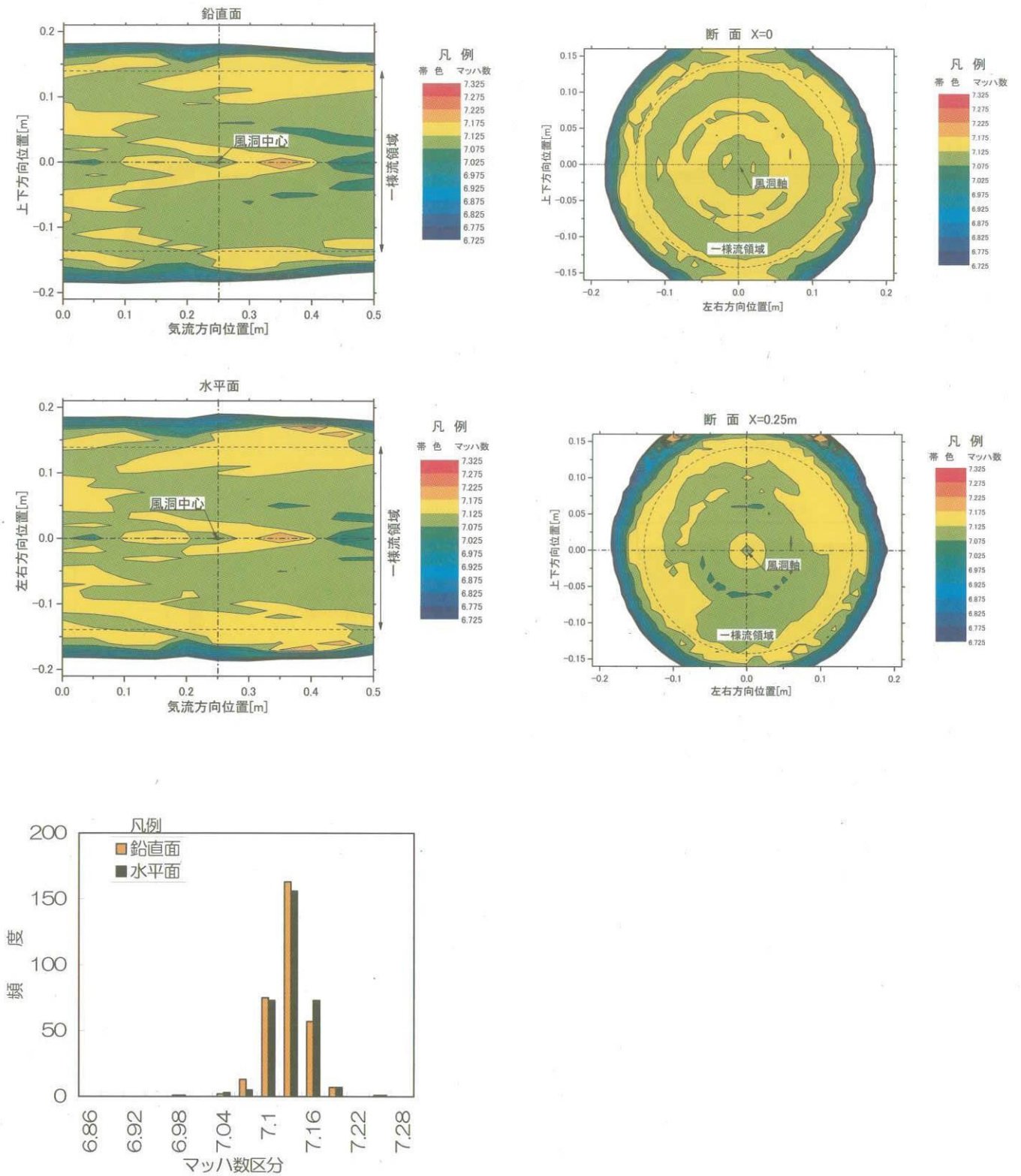
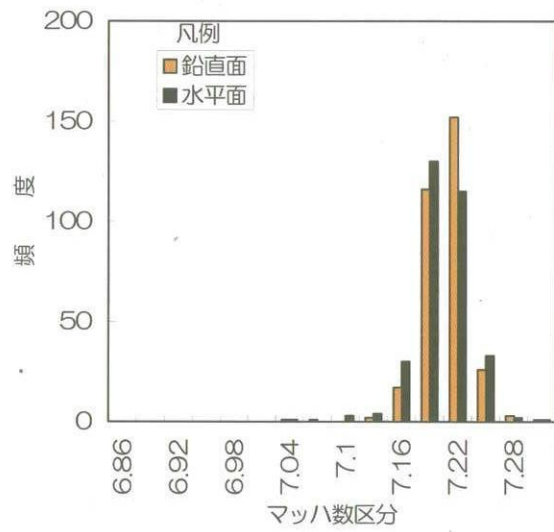
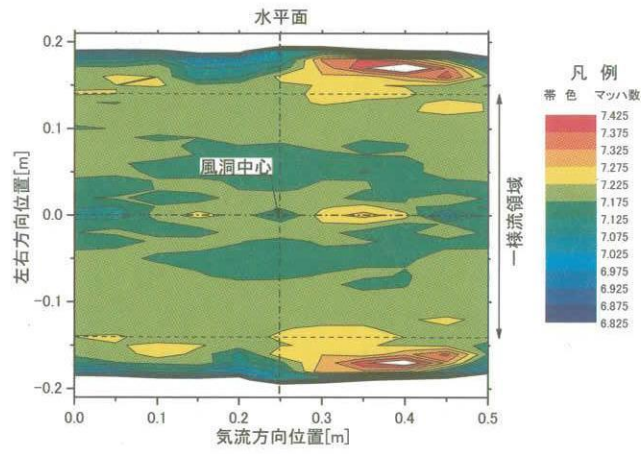
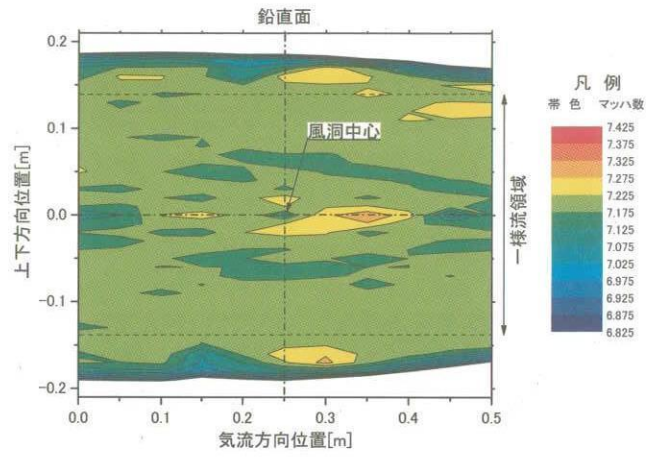


図 5.9 マッハ数7ノズル マッハ数空間分布  $P_0=6.0\text{MPa}$



0 マッハ数7ノズル マッハ数空間分布  $P_0=8.5\text{MPa}$

## 6 誤差解析結果

表 6.1 にピトー圧力、よどみ点圧力、よどみ点温度、マッハ数空間分布の測定に係る誤差要素の種類とその内容のまとめを示す。以下、表に沿ってこれら各測定誤差について論ずる。

### 6.1 ピトー圧系統

通風直前に ESP の全要素センサーは PCU を基準に校正される。したがって、PCU が抱える誤差はそのままピトー圧測定の誤差になる。PCU は定期的に校正する。下記の偏り誤差、偶然誤差が存在し、それらの量はカタログ、又は校正レポートにより得ることができる。

偏り誤差：PCU 自身が持つ不確かさ

偶然誤差：校正した測定データに校正式を当てはめた時に残る残差

偏り誤差についてはカタログより FS(5psi)の 0.02%、偶然誤差については校正レポートにより見積もった。

それ以外のピトー圧系統の誤差として 2 種類の偶然誤差を考慮する。まず、ESP 要素センサー個々のバラツキがある。ESP ユニット本体には 64 個の要素センサーが埋めこまれている。個体差があり、仮に同じ圧力をかけたとしても要素センサー間でバラツキを生ずる。これを測定するためには ESP ユニットの測定室に置き、測定室圧力を一定圧力に保って全ポートの圧力を測定してみればよい。2002 年 10 月 25 日に ESP センサーを測定室内に設置、測定室の雰囲気圧をデジクォーツでモニターしながら 5 段階：真空、20kPa、49kPa、78kPa、102kPa に設定して各ポートの指示値を測定する試験を実施した。もう一つの偶然誤差はピトー圧測定の時間的バラツキである。この要因としては風洞気流の時間的変動及び ESP 要素センサーのノイズ等が考えられる。代表的な通風試験を行って一様流コア領域内圧力センサー測定の時間的バラツキ(標準偏差値)を測定データから求めればよい。RUN3783(マッハ数 5 ノズル、 $P_0=1\text{MPa}$ )でトラバースせずに同一箇所でも 10 回の計測を 12 回実施、時間的なバラツキを算出した。

### 6.2 よどみ点圧力系統

よどみ点圧力センサーにはよどみ点圧 2.5MPa までの圧力範囲をカバーする 500psi(3.45MPa)タイプのもの、2.5MPa を超える範囲をカバーする 3000psi(20.7MPa)タイプのものがあり、試験によって使い分ける。いずれも PCU と同様に定期的に校正する。偏り誤差、偶然誤差が存在し、その情報は校正レポートにより得る。

偏り誤差：校正基準となる重錘式圧力発生器自身が持つ不確かさ

偶然誤差：校正測定データに校正式(1次式)を

当てはめた時に残る残差

センサーから計測装置の間にゲイン 1 のアンプ(A34: 500psi 用、A33: 3000psi 用)が介在する。正確な感度係数を定期的に校正する。校正直線からの残差を偶然誤差とした。

アンプのゼロ調整は毎日行うが完全に取りきれないし、時間とともに微妙に上下する。試験期間中 12 日間分のゼロ調記録から平均的なバイアス成分(偏り誤差)と変動成分(偶然誤差)を求めた。

通風試験時のよどみ点圧力はピトー圧力測定のタイミングに合わせて 0.1 秒刻みの測定値(1kHz の 100 サンプル平均)を 10 個取得する。それらは時間的に変動しており、平均してよどみ点圧力  $P_0$  としてマッハ数算出に用いる。前述の RUN3783(マッハ数 5 ノズル、 $P_0=1\text{MPa}$ )でのよどみ点圧力時歴を用いて標準偏差を算出した。

### 6.3 よどみ点温度系統

よどみ点温度センサーは基準接点温度補償器と測温センサー部からなる。両者は定期的に校正に出し、カタログ値もしくは JIS 規格の精度を保っているか検定する。したがって、センサー固有の誤差としては次の 2 つの偏り誤差を考慮した。

偏り誤差：基準接点温度補償器の精度定格(カタログ値)

偏り誤差：測温センサーの起電力許容差 JIS-C-1602 規定値

センサーから計測装置の間にゲイン 500 のアンプ(A35)が介在する。正確な感度係数を定期的に取得する。校正直線からの残差を偶然誤差とした。

アンプのゼロ調整は毎日行うが完全に取りきれないし、時間とともに微妙に上下する。ゼロ調の記録から平均的なバイアス成分(偏り誤差)と変動成分(偶然誤差)を求める。

よどみ点温度測定の不確かさを見積もる場合、考慮しなければならない問題として、温度測定センサーの応答遅れおよび温度センサー通過後の気流の熱ロスがある。これらはよどみ点温度の時間履歴等から見積もった。

通風試験時のよどみ点温度はピトー圧力測定のタイミングに合わせて 0.1 秒刻みの測定値(1kHz の 100 サンプル平均)を 10 個取得する。それらは時間的に変動しており、平均してよどみ点温度  $T_0$  としてマッハ数算出に用いる。前述の RUN3783(マッハ数 5 ノズル、 $P_0=1\text{MPa}$ )でのよどみ点温度時歴から標準偏差を算出した。

### 6.4 マッハ数空間分布

一様流コア領域のマッハ数として空間分布から平均値を算出する。平均値算出時の標準偏差は偶然誤差とし



て扱った。直径 0.28m、 $X=0.0\sim 0.5\text{m}$  の範囲を一様流コア領域として、これをカバーする鉛直面分布測定 (29 ポート×11 位置) 及び水平面分布測定 (29 ポート×11 位置) を併せた 638 点データに対し平均化処理を施した(但し、マッハ数7ノズルの  $P_0=1\text{MPa}$  のケースの鉛直面分布測定は9位置、580点)。その平均値、標準偏差、他統計諸量をまとめたものを表 6.2 に示す。

## 6.5 誤差総括

マッハ数5ノズル誤差解析結果を表 6.3 に、マッハ数7ノズル誤差解析結果を表 6.4 に、それぞれ示す。マッハ数の誤差は1%前後で、そのほとんどはマッハ数の空間分布に起因する。ノズル形状が重要である所以である。

## 7 まとめ

0.5m極超音速風洞のマッハ数5及び7ノズルの気流校正試験を行った。43本のピトー管を持つ高密度のピトーレーク、電子的に圧力をスキャンし、チャンネル毎に温度補償するESP装置、そして上下、前後にプログラム制御で移動させることのできるトラバース装置を用いて、細密で多数点のピトー圧空間分布を効率的に計測した。

これら多量のピトー圧分布、及びよどみ点圧力、よどみ点温度の測定値から、熱量的不完全気体の式に基づいて、マッハ数空間分布を算出した。近年要求されている不確かさ解析を実施、当該風洞の気流品質を同定した。結果は以下の通りである。

一様流コアは直径 0.28m、風洞中心(シュリーレン窓中心)前後 0.25m の長さ  $X=0\sim 0.50\text{m}$  の範囲で、そこでの平均マッハ数は設定よどみ点圧力  $P_0$  の関数として表 7.1 のように表される。気流マッハ数の不確かさは1%前後(マッハ数5、7ノズルとも $\pm 0.05\text{M}$ 程度)で、その大半はマッハ数の空間的バラツキに起因するものである。

表 6.1 誤差要素

測定要素	誤差要素	偶り誤差		偶然誤差	
		正確度 (B)		精密度 (S)	自由度 (ν)
P <sub>02</sub> 測定	圧力校正ユニット(PCU)	PCUの偶り誤差についてはカタログよりFS(5psi)の0.02%	7Pa	校正測定データ(11点)にPCU校正式(1次式の傾斜のみを当てはめた時の推定標準偏差(SEE), PCU校正レポート(2003/5/28)による。SEEはFS(5psi)の0.0037%: 1.3Pa	ν=11-1=10
	ESP個々のバラツキ	N.A.		2002/10/25, ESPセンサを測定室に設置。雰囲気圧を真空、20kPa, 48kPa, 78kPa, 102kPa, と段階に設定して63ポートの指示値を測定。各ポート間のバラツキを算出した。: 5Pa	ν=83-1=62
	時間的なバラツキ	N.A.		通風試験RUN3783 (M5, P <sub>0</sub> =1MPa)でピトー圧各43点で10Datasetの標準偏差: 100Pa	ν=10-1=9
P <sub>0</sub> 測定	P <sub>0</sub> センサ校正	校正基準器自身の不確かさ。校正レポート(2002/9/2) S/N298629 FS (500psi) の400ppm : 1.38kPa S/N55834 FS (3000psi) の100ppm : 2.07kPa		調整後の表示値と真値の関係を9点を直線回帰。 S/N298629 SEE=0.21 psi: 1.45kPa S/N55834 SEE=1.78 psi: 12.14kPa	ν=9-2=7
	P <sub>0</sub> アンプ校正	N.A.		2002/6月のA34アンプの内部校正。負電圧に対し強い非線形があるため使用範囲の正電圧4点で感度係数決定。SEE = 0.31 mV A34 (500psi用): 0.00069(MPa/mV)*0.31(mV)= 0.21kPa A33 (3000psi用): 0.0041(MPa/mV)*0.31(mV)= 1.27kPa	ν=4-2=2
	P <sub>0</sub> アンプゼロ調整	ゼロ調整記録(調整前の指示値及び調整後の指示値) 12日分 平均値≒ 0mV		ゼロ調整記録(調整後の指示値) 12日分。標準偏差≒ 0.3mV: A34 (500psi用): 0.00069(MPa/mV)*0.3(mV)= 0.21kPa A33 (3000psi用): 0.0041(MPa/mV)*0.3(mV)= 1.23kPa	ν=12-1=11
	時間的なバラツキ	N.A.		通風試験RUN3783 (M5, P <sub>0</sub> =1MPa)のピトー圧計測タイミングでのP <sub>0</sub> 測定値を処理。0.1秒キザミの測定値(1kHzの100sample平均値)の10個のDatasetから標準偏差を計算。 1.8kPa	ν=10-1=9
T <sub>0</sub> 測定	T <sub>0</sub> センサ校正	基準接点補償器の誤差(カタログ): ±0.5°C 測温接点センサ許容誤差(JIS-C1802) ±0.5°C (0°C~600°C), ±0.0025* $t$ [°C] (600°C~1800°C) 800°Cで見積もって±2°C。基準接点+測温接点合わせて 2.5K		N.A.	
	T <sub>0</sub> 用アンプ校正	N.A.		2002/9/4のA35アンプの内部校正。11点で感度係数決定。SEE = 0.5 mV (800-800)/(7.950-5.583)*0.5/500= 0.08K	ν=11-2=9
	T <sub>0</sub> 用アンプゼロ調整	ゼロ調整記録(調整前の指示値及び調整後の指示値) 12日分 平均値≒ 0mV		ゼロ調整記録(調整後の指示値) 12日分。標準偏差≒ 0.3mV: (800-800)/(7.950-5.583)*0.3/500= 0.05K	ν=12-1=11
	応答遅れ、熱ロス	センサーの応答遅れおよびセンサー通過後の気流の熱ロスから生ずる不確かさを、露み点温度の時間履歴等から見積もった。 20K		N.A.	
	時間的なバラツキ	N.A.		通風試験RUN3783 (M5, P <sub>0</sub> =1MPa)のピトー圧計測タイミングでのT <sub>0</sub> 測定値を処理。0.1秒キザミの測定値(1kHzの100sample平均値)の10個のデータから標準偏差を計算。 1K	ν=10-1=9
マッハ数空間分布	空間的なバラツキ	N.A.		コア(直径0.28m, x=0.000~0.500m)をカバーする鉛直面分布測定データ(29ポート×11位置)及び水平面分布測定データ(29ポート×11位置)を併せた638点データに対し平均値、標準偏差を算出。	ν=638-1=637

表 6.2 マッハ数空間分布

ノズル	P <sub>0</sub> [MPa]	T <sub>0</sub> [K]	Run No.		データ点数			マッハ数					
			鉛直面	水平面	鉛直面	水平面	計	平均	最大	最小	幅	標準偏差	
												[Mach]	[%]
5	1.0	720	3791	3793	11	11	638	5.098	5.253	4.939	0.313	0.032	0.629
	1.5	710	3792	3797	11	11	638	5.107	5.258	4.947	0.310	0.032	0.628
7	1.0	800	3748	3752	9	11	580	7.022	7.092	6.915	0.177	0.026	0.372
	2.0	860	3750	3751	11	11	638	7.055	7.140	6.948	0.192	0.023	0.322
	2.5	860	3771	3772	11	11	638	7.072	7.156	6.956	0.200	0.024	0.338
	4.0	880	3777	3776	11	11	638	7.099	7.201	6.967	0.234	0.024	0.335
	6.0	930	3835	3836	11	11	638	7.113	7.226	6.963	0.264	0.025	0.353
	8.5	790	3844	3845	11	11	638	7.190	7.308	7.012	0.295	0.027	0.377

表 6.3 マッハ数 5 ノズル誤差解析結果

測定要素	誤差要素	$P_0 = 1 \text{ MPa}$				$P_0 = 1.5 \text{ MPa}$			
		代表値	感度係数 $\theta_i$	偏り誤差 $B_i$ 偶然誤差 $\sigma_{Si}$	マッハ数誤差 $\theta_i B_i$ or $\theta_i \sigma_{Si}$	代表値	感度係数 $\theta_i$	偏り誤差 $B_i$ 偶然誤差 $\sigma_{Si}$	マッハ数誤差 $\theta_i B_i$ or $\theta_i \sigma_{Si}$
$P_0$ 測定	圧力校正ユニット 偏り誤差	56.41 kPa	0.257	1.240E-04	3.187E-05	84.04 kPa	0.257	8.330E-05	2.141E-05
	圧力校正ユニット 偶然誤差			5.082E-05	1.306E-05			3.403E-05	8.747E-06
	ESP箇々の バラツキ			1.772E-04	4.534E-05			1.190E-04	3.058E-05
	時間的な バラツキ			4.078E-03	1.048E-03			2.737E-03	7.034E-04
$P_0$ 測定	$P_0$ センサ校正 偏り誤差	1.0 MPa	0.257	1.380E-03	3.547E-04	1.5 MPa	0.257	9.200E-04	2.364E-04
	$P_0$ センサ校正 偶然誤差			3.480E-03	8.944E-04			2.320E-03	5.962E-04
	$P_0$ アンブゼロ 偶然誤差			9.030E-04	2.321E-04			6.020E-04	1.547E-04
	$P_0$ アンブゼロ調整 偶然誤差			4.620E-04	1.187E-04			3.080E-04	7.916E-05
	時間的な バラツキ			4.140E-03	1.064E-03			2.760E-03	7.093E-04
$T_0$ 測定	$T_0$ センサ校正 偏り誤差	720 K	0.015	3.470E-03	5.344E-05	710 K	0.015	3.521E-03	5.422E-05
	$T_0$ アンブゼロ 偶然誤差			2.553E-04	3.932E-06			2.592E-04	3.992E-06
	$T_0$ アンブゼロ調整 偶然誤差			1.527E-04	2.351E-06			1.549E-04	2.386E-06
	応答遅れ、熱ロス 偏り誤差			2.778E-02	4.278E-04			2.817E-02	4.338E-04
	時間的な バラツキ			3.194E-03	4.919E-05			3.239E-03	4.989E-05
マッハ数 空間分布	空間的な バラツキ	5.10 Mach	1.000	1.258E-02	1.258E-02	5.11 Mach	1.000	1.256E-02	1.256E-02
総括		B = 5.591E-04 P = 1.267E-02 $U_{RSS} = 1.268E-02$ (0.065 Mach)				B = 4.975E-04 P = 1.260E-02 $U_{RSS} = 1.261E-02$ (0.064 Mach)			

表 6.4 (1/2) マッハ数 7 ノズル 誤差解析結果

測定要素	誤差要素	$P_0 = 1 \text{ MPa}$				$P_0 = 2 \text{ MPa}$				$P_0 = 2.5 \text{ MPa}$			
		代表値	感度係数 $\theta_i$	偏り誤差 $B_i$ 偶然誤差 $\sigma_{Si}$	マッハ数誤差 $\theta_i B_i$ or $\theta_i \sigma_{Si}$	代表値	感度係数 $\theta_i$	偏り誤差 $B_i$ 偶然誤差 $\sigma_{Si}$	マッハ数誤差 $\theta_i B_i$ or $\theta_i \sigma_{Si}$	代表値	感度係数 $\theta_i$	偏り誤差 $B_i$ 偶然誤差 $\sigma_{Si}$	マッハ数誤差 $\theta_i B_i$ or $\theta_i \sigma_{Si}$
$P_0$ 測定	圧力校正ユニット 偏り誤差	14.85kPa	0.229	4.714E-04	1.079E-04	28.77kPa	0.228	2.433E-04	5.547E-05	35.75kPa	0.228	1.958E-04	4.464E-05
	圧力校正ユニット 偶然誤差			1.926E-04	4.410E-05			9.941E-05	2.267E-05			8.000E-05	1.824E-05
	ESP箇々の バラツキ			6.734E-04	1.542E-04			3.476E-04	7.925E-05			2.797E-04	6.378E-05
	時間的な バラツキ			1.550E-02	3.549E-03			7.994E-03	1.823E-03			6.434E-03	1.467E-03
$P_0$ 測定	$P_0$ センサ校正 偏り誤差	1.0MPa	0.229	1.380E-03	3.160E-04	2.0MPa	0.228	6.900E-04	1.573E-04	2.5MPa	0.228	5.520E-04	1.259E-04
	$P_0$ センサ校正 偶然誤差			3.480E-03	7.969E-04			1.740E-03	3.967E-04			1.392E-03	3.174E-04
	$P_0$ アンブゼロ 偶然誤差			9.030E-04	2.068E-04			4.515E-04	1.029E-04			3.612E-04	8.235E-05
	$P_0$ アンブゼロ調整 偶然誤差			4.620E-04	1.058E-04			2.310E-04	5.267E-05			1.848E-04	4.213E-05
	時間的な バラツキ			4.140E-03	9.481E-04			2.070E-03	4.720E-04			1.656E-03	3.776E-04
$T_0$ 測定	$T_0$ センサ校正 偏り誤差	800K	0.020	3.125E-03	6.250E-05	860K	0.024	2.907E-03	6.977E-05	860K	0.024	2.907E-03	6.977E-05
	$T_0$ アンブゼロ 偶然誤差			2.300E-04	4.600E-06			2.139E-04	5.135E-06			2.140E-04	5.135E-06
	$T_0$ アンブゼロ調整 偶然誤差			1.375E-04	2.750E-06			1.279E-04	3.070E-06			1.279E-04	3.070E-06
	応答遅れ、熱ロス 偏り誤差			2.590E-02	5.000E-04			2.326E-02	5.81E-04			2.326E-02	5.81E-04
	時間的な バラツキ			2.875E-03	5.750E-05			2.674E-03	6.419E-05			2.675E-03	6.420E-05
マッハ数 空間分布	空間的な バラツキ	7.02M	1.000	7.440E-03	7.440E-03	7.06M	1.000	6.440E-03	6.440E-03	7.07M	1.000	6.760E-03	6.760E-03
総括		B = 6.045E-04 P = 8.127E-03 $U_{RSS} = 8.149E-03$ (0.057 Mach)				B = 5.867E-04 P = 6.654E-03 $U_{RSS} = 6.680E-03$ (0.047 Mach)				B = 5.781E-04 P = 6.917E-03 $U_{RSS} = 6.941E-03$ (0.049 Mach)			

表 6.4 (2/2) マッハ数 7 ノズル 誤差解析結果

測定要素	誤差要素	P <sub>0</sub> = 4 MPa				P <sub>0</sub> = 6 MPa				P <sub>0</sub> = 8.5 MPa			
		代表値	感度係数 θ <sub>i</sub>	偏り誤差 B <sub>i</sub> 偶然誤差 σ <sub>i</sub>	マッハ数誤差 θ <sub>i</sub> B <sub>i</sub> or θ <sub>i</sub> σ <sub>i</sub>	代表値	感度係数 θ <sub>i</sub>	偏り誤差 B <sub>i</sub> 偶然誤差 σ <sub>i</sub>	マッハ数誤差 θ <sub>i</sub> B <sub>i</sub> or θ <sub>i</sub> σ <sub>i</sub>	代表値	感度係数 θ <sub>i</sub>	偏り誤差 B <sub>i</sub> 偶然誤差 σ <sub>i</sub>	マッハ数誤差 θ <sub>i</sub> B <sub>i</sub> or θ <sub>i</sub> σ <sub>i</sub>
P <sub>02</sub> 測定	圧力校正ユニット 偏り誤差	56.004 kPa	0.228	1.250E-04	2.850E-05	82.95 kPa	0.228	8.441E-05	1.925E-05	113.77 kPa	0.228	6.153E-05	1.403E-05
	圧力校正ユニット 偶然誤差			5.107E-05	1.164E-05			3.449E-05	7.863E-06			2.515E-05	5.733E-06
	ESP箇々の バラツキ			1.786E-04	4.071E-05			1.206E-04	2.749E-05			8.790E-05	2.004E-05
	時間的な バラツキ			4.107E-03	9.364E-04			2.773E-03	6.323E-04			2.022E-03	4.609E-04
P <sub>0</sub> 測定	P <sub>0</sub> センサ校正 偏り誤差	4.0 MPa	0.228	5.175E-04	1.180E-04	6.0 MPa	0.228	3.450E-04	7.866E-05	8.5 MPa	0.228	2.435E-04	5.52E-05
	P <sub>0</sub> センサ校正 偶然誤差			7.284E-03	1.661E-03			4.856E-03	1.107E-03			3.428E-03	7.815E-04
	P <sub>0</sub> アンプ校正 偶然誤差			1.365E-03	3.113E-04			9.102E-04	2.075E-04			6.424E-04	1.465E-04
	P <sub>0</sub> アンプゼロ調整 偶然誤差			6.765E-04	1.542E-04			4.510E-04	1.028E-04			3.183E-04	7.258E-05
	時間的な バラツキ			1.035E-03	2.360E-04			6.900E-04	1.573E-04			4.871E-04	1.110E-04
T <sub>0</sub> 測定	T <sub>0</sub> センサ校正 偏り誤差	880 K	0.026	2.841E-03	7.386E-05	930 K	0.030	2.688E-03	8.064E-05	790 K	0.019	3.165E-03	6.013E-05
	T <sub>0</sub> アンプ校正 偶然誤差			2.091E-04	5.436E-06			1.978E-04	5.935E-06			2.329E-04	4.425E-06
	T <sub>0</sub> アンプゼロ調整 偶然誤差			1.250E-04	3.250E-06			1.183E-04	3.548E-06			1.392E-04	2.646E-06
	応答遅れ、熱ロス 偏り誤差			2.273E-02	5.909E-04			2.151E-02	6.452E-04			2.532E-02	4.810E-04
	時間的な バラツキ			2.613E-03	6.793E-05			2.473E-03	7.419E-05			2.912E-03	5.532E-05
マッハ数 空間分布	空間的な バラツキ	7.10 Mach	1.000	6.700E-03	6.700E-03	7.11 Mach	1.000	7.060E-03	7.060E-03	7.19 Mach	1.000	7.540E-03	7.540E-03
総括		B = 6.078E-04	P = 6.923E-03	U <sub>RSS</sub> = 6.949E-03 (0.049 Mach)		B = 6.552E-04	P = 7.174E-03	U <sub>RSS</sub> = 7.204E-03 (0.051 Mach)		B = 4.881E-04	P = 7.596E-03	U <sub>RSS</sub> = 7.611E-03 (0.055 Mach)	

表 7.1 一様流コア領域のマッハ数と不確かさ

ノズル	P <sub>0</sub> [MPa]	T <sub>0</sub> [K]	マッハ数 [-]	マッハ数の 95%不確かさ [-]	Re数 [1/m]
5	1.0	690~740	5.10	±0.06	7.0 × 10 <sup>6</sup>
	1.5	680~730	5.11	±0.05	10.8 × 10 <sup>6</sup>
7	1.0	730~860	7.02	±0.06	3.1 × 10 <sup>6</sup>
	2.0	820~890	7.06	±0.05	4.7 × 10 <sup>6</sup>
	2.5	840~880	7.07	±0.05	5.7 × 10 <sup>6</sup>
	4.0	860~900	7.10	±0.03	9.1 × 10 <sup>6</sup>
	6.0	910~940	7.11	±0.03	11.4 × 10 <sup>6</sup>
	8.5	780~790	7.19	±0.05	21.0 × 10 <sup>6</sup>

## 参考文献

- 1) 極超音速風洞建設グループ; 50cm 極超音速風洞の計画と構造 NAL TR-115 (1966/9)
- 2) 空気力学部; 大型極超音速風洞の計画と構造-極超音速風洞システムの概要- NAL TR-1261 (1995/2)
- 3) 平木他; 航空宇宙技術研究所 50cm 極超音速風洞の特性について 日本航空宇宙学会誌 VOL.19 No.206 (1971/3)
- 4) 橋本、吉沢、穂積; 極超音速風洞マッハ数7ノズル校正試験 NAL TM-155 (1969/2)
- 5) 長洲、橋本、穂積、松崎; 極超音速風洞 M9 ノズル校正試験 NAL TM-192 (1970/2)
- 6) 関根、津田、他; 航技研 0.5m 極超音速風洞マッハ数分布測定試験、第45回宇宙科学技術連合講演会講演集 (2001/10)
- 7) 関根、津田、他; ESPシステム高度化による航技研 0.5m 極超音速風洞マッハ数分布測定試験、日本航空宇宙学会第34期年会講演会講演集 (2003/4)
- 8) AIAA/AGARD; Assessment of Wind Tunnel Data Uncertainty, AIAA-S-071-1995
- 9) 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足 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、(1987/11) 丸善
- 10) A. H. Boudreau; Performance and Operational Characteristics of AEDC/VKF Tunnels A, B and C, AEDC-TR-80-48 (1980/7)
- 11) 関根、津田他: 大型極超音速風洞における高速圧力分布測定システムについて、第31回流体力学講演会講演集 (1999/9)
- 12) J.Lacy, Y.Inoue, A. Higashida, M.Inoue, K.Ishizaka, and J.J.Korte; Improvement of flow Quality in NAL Chofu Mach 10 Nozzle, AIAA 2002-0440 (2002/1)
- 13) 津田、小山; 極超音速風洞データ処理装置の更新について NAL TM-737 (1999/3)
- 14) Ames Research Staff; Equations, Tables, and Charts for Compressible Flow, NACA Report 1135 (1948)



宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-05-043

---

発行 平成 18 年 3 月 31 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・電子媒体等加工することを禁じます。



