

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

1.27m極超音速風洞 マッハ数校正試験

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

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 1.27m 極超音速風洞.....	2
2.2 ピトーレークとトラパース装置.....	7
2.3 計測装置.....	7
3 試験方法.....	12
3.1 試験手順.....	12
3.2 試験条件.....	12
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 高温側校正領域.....	16
5.2 低温側校正領域.....	21
6 誤差解析結果.....	27
6.1 ピトー圧系統.....	27
6.2 よどみ点圧力系統.....	27
6.3 よどみ点温度系統.....	27
6.4 マッハ数空間分布.....	28
6.5 誤差総括.....	28
7 まとめ.....	30
参考文献.....	31

1.27 m 極超音速風洞 マッハ数校正試験

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

Mach Number Calibration on 1.27 m Hypersonic Wind Tunnel

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

ABSTRACT

Mach number calibration tests were conducted in the 1.27 m Hypersonic Wind Tunnel. 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 91 ports, a remotely controlled traverse system, and ESP (Electronically Scanned Pressure) system. From the Mach number distribution, the uniform core was defined as 0.60 m in diameter and 0.80 m in length. Average Mach numbers for $P_0=1, 2.5, 4,$ and 6 MPa were 9.45~9.68. Estimated uncertainties in the Mach numbers of the uniform core region were ± 0.03 .

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

1995年3月に完成した1.27m極超音速風洞は、竣工後の気流校正試験によりピトー圧力の変動やマッハ数分布のバラツキがあることがわかった。風洞の気流品質の向上を図るため加熱器の改修、ノズルの再加工等を行った後に改めて気流校正試験を行った。1999年実施の高温側校正領域（よどみ点温度1100K付近）試験ではよどみ点圧力2.5MPa、4MPa、6MPaの3条件で、2000年実施の低温側校正領域（よどみ点温度900K~1000K付近）試験では上記よどみ点圧力条件に1MPaを追加して試験を実施した。測定部での詳細なマッハ数分布を測定するため、0.01m間隔で91本配列した高密度のピトーレーク、電子的に圧力をスキャンして計測するESP装置、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、よどみ点圧力、及びよどみ点温度の測定値から、実在気体の式に基づいてマッハ数空間分布を算出し、近年要求されている不確かさ解析を実施した。その結果、低温側校正領域の場合を例にとると、一様流コアとして直径0.60m、長さ0.80mの領域を定めた。そこでの平均マッハ数は設定よどみ点圧力の関数として表されて、1MPaで 9.45 ± 0.03 、2.5MPaで 9.58 ± 0.03 、4MPaで 9.64 ± 0.03 、6MPaで 9.68 ± 0.03 と気流マッハ数の不確かさが0.3%前後と世界最高の高品質気流が得られていることを確認した。

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	総括正確度
B_i	測定誤差それぞれに対する偏り誤差 (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	総括精密度
S_i	測定誤差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、原点はノズル出口中心、 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 いて右方を正
Z	Z 軸座標、気流に直角な鉛直方向位置、上方を正
γ	比熱比
θ	感度係数
v	総括自由度
v_i	測定誤差それぞれに対する自由度 (標本の多寡)
ϕ	ピトーレークの設定角度、ピトー管鉛直を 0° 上 流を向いて右回りを正

1 はじめに

1.27m 極超音速風洞¹⁾は 1994 年度(1995 年 3 月竣工)に、既設の 0.5m 極超音速風洞²⁾と一部設備を共用する形で併設された。ノズル交換式の 0.5m 極超音速風洞と異なり、1.27m 極超音速風洞はマッハ数 10 のノズル固定式である。ノズル出口直径 1.27m (50inch) は米国 AEDC の VKF-C 風洞と並び世界最大の大きさを誇っている。

1.27m 極超音速風洞建設後の気流検定試験の流れを表 1.1 に示す。竣工直後 1995 年に行われた気流検定試験については速報として風洞研究会議で報告されている。³⁾ 1996 年度の加熱器更新をはさんで 1995 年から 1997 年 6 月にかけて行った気流検定試験ではピトー圧に顕著な変動現象が観察された。この変動現象の原因が、加熱器内に結露した燃焼ガスの水分によるものであることが分かったため、1997 年夏から秋にかけ加熱器真空排気システムの追加、配管温度調整、高圧空気源脱湿装置の代替等の結露対策を実施した。

改修後の 1997 年秋から翌 1998 年春にかけ、2 度目の気流検定試験を行った。この試験ではピトー圧変動問題が解決したことが確認できたと同時に、測定部に強い圧

力波があり、マッハ数のバラツキが平均マッハ数に対し 3%程度と大きいことが明らかになった。⁴⁾ 気流品質の向上を図るためノズルの再加工が 1998 年冬に行なわれた。1999 年春に行われたノズル改修後の気流検定試験では、レイノルズ数効果を見るためよどみ点圧力については 2.5MPa、4MPa、6MPa と 3 段階に変え、よどみ点温度については作動空気液化に余裕のある 1100K 前後に設定して実施した(高温側校正領域)。ノズル改修経緯と改修後に行われた気流検定試験の結果については内外学会報告^{5,6,7,8)}にまとめられている。

前記試験の風洞運転条件では空気液化に対し十分余裕のあることが分かった。高温運転による風洞疲労をできるだけ抑えるため、もう少し低温で通風する可能性を探る気流検定試験(低温側校正領域)を 2000 年 6 月に実施した。^{9,10)} この試験ではよどみ点温度を(よどみ点圧力に応じて)900K から 1000K に設定し、よどみ点圧力は 1MPa、2.5MPa、4MPa、6MPa と 4 段階に変えて実施した。液化に対するマージンを確認するため、それから更に約 200K 低い条件の通風も行って液化境界を確認した。

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た。米国では国家規格¹¹⁾が発行され、米機械学会及び米航空宇宙学会では実験結果論文の場合、この不確かさの表記は必須であり、日本機械学会でも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及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。1.27m 極超音速風洞では先駆的に不確かさ評価を始めている。^{9,10)}

本報告書の目的は、現在の(ノズル改修後の)1.27m 極超音速風洞のマッハ数気流特性を、気流の不確かさを含めて総合的に示すことである。今後、気流品質に関し検討を加える場合を想定して必要な深度までトレースできるように可能な限りデータ出处情報を記述するよう配慮した。

2 装置

2.1 1.27m 極超音速風洞

極超音速風洞全体の配置を図 2.1 に、1.27m 極超音速風洞の写真を図 2.2 に、主要性能要目を表 2.1 に示す。極超音速気流を実現するためには、500 倍以上の非常に高い圧力比が必要で、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自由噴流式をとっている。常温のまま通風を行うと加速膨張に伴う温度低下で空気が液化してしまうため、加熱器を備えて作動空気を加熱している。極超音速風洞の主要な構成は以下の通りである。

表 1.1 1.27m 極超音速風洞の気流検定試験

年度	試験/EVENT	試験期間	Run No.	Run 数	P ₀ (MPa)	試験模型
1994	通風確認試験	1994/12~1995/3				
	1.27m 極超音速風洞竣工	1995/3/31				
1995	気流検定試験	1995/5/8~6/12	37~50	14	1, 2, 4	総温度プローブ付き (旧)ピトーレーク
		1995/8/28~8/30	67~72	6	1, 3, 6, 8	
		1996/1/22~2/28	77~110	34	1, 2.5, 3, 6, 8	
1996	偏流測定及び閉塞比測定試験	1996/7/9~7/19	217~242	26	3	AGARD-J 圧力+スカート
	加熱器更新工事	1996/12/1~ 1997/3/26				
1997	気流検定試験	1997/4/8~6/27	401~500	100	2.5, 4, 6, 8.5, 9.8	総温度プローブ付き (旧)ピトーレーク
	加熱器真空排気、 配管温度調整工事 高圧空気源脱湿装置代替	1997/7/1~11/5				
	気流検定試験	1997/11/17~ 1998/1/9	510~574	65	2.5, 4, 6	総温度プローブ付き (旧)ピトーレーク
	ノズル修正気流検定試験	1998/3/24~4/6	667~686	20	6	総温度プローブ付き (旧)ピトーレーク
1998	ノズル再加工修正工事	1998/12/10~ 1999/3/26				
	ノズル修正完了通風確認	1999/3/29~3/31	749~752	4	2.5, 4	高分解能ピトーレーク
1999	高温側校正領域気流検定試験	1999/4/1~4/22	753~794	42	2.5, 4, 6, 8.5	高分解能ピトーレーク
	ノズル修正後気流傾角検定試験	1999/6/2~11	818~838	21	2.5, 4, 6	コーンレーク模型
	ノズル修正後気流傾角検定試験	1999/9/14~11/9	881~950	70	2.5, 4, 6	コーンレーク模型
2000	低温側校正領域気流検定試験	2000/6/12~30	1112~1166	55	1, 2.5, 4, 6	高分解能ピトーレーク
	気流傾角検定試験	2000/7/5~7/12	1167~1184	18	2.5, 4, 6	コーンレーク模型
	気流傾角検定試験	2000/9/14~20	1191~1201	10	1, 4	コーンレーク模型

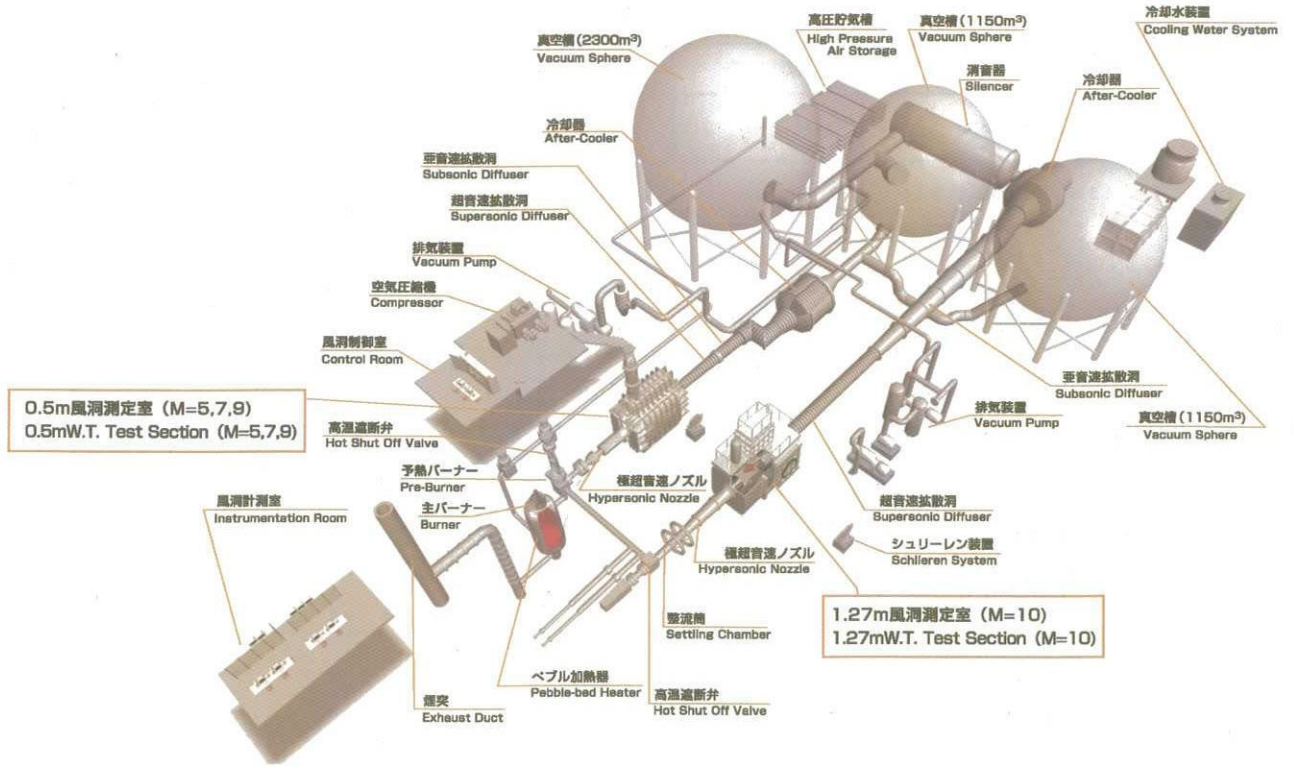


図 2.1 極超音速風洞全体配置図

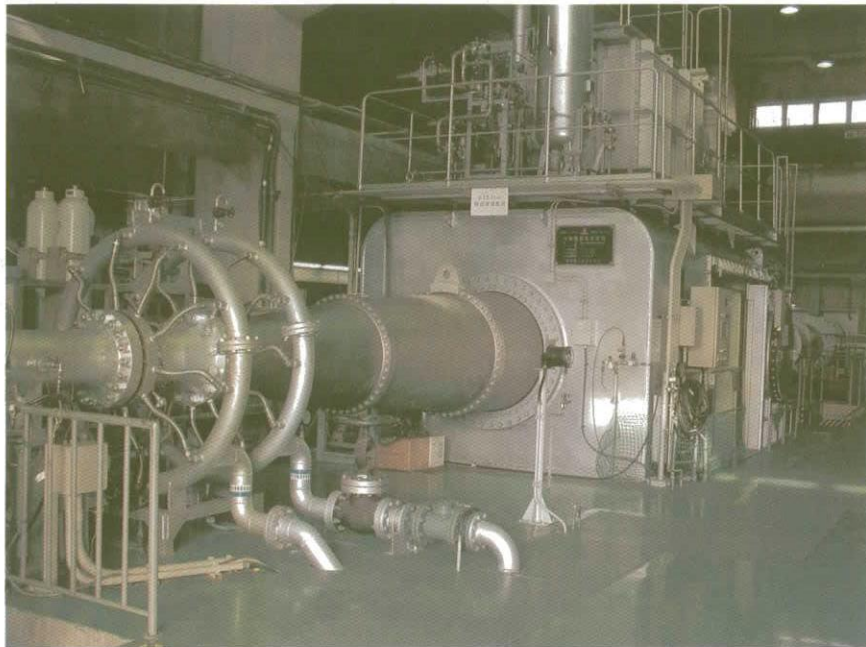


図 2.2 1.27m 極超音速風洞 外観

表 2.1 1.27m 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	10
測定部	自由噴流式
ノズル出口直径	1.27m
激み点圧力	1 - 9.9 MPa
激み点温度	850 - 1200 K
最大持続時間	30 秒 (2300m ³ 真空槽 又は 1150m ³ 真空槽 2 個使用) 60 秒 (3 真空槽 全部使用)
高压空気貯気槽	18 m ³ × 2
真空槽	2300 m ³ × 1 1150 m ³ × 2
主模型支持装置変角	ピッチ -12 - 47 deg ロール ±90 deg
高速模型投入装置	気流中心まで 0.2sec

(1) 高压空気源

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 36m³ で 18m³ 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、高压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。加熱用燃料には都市ガス(LNG)を採用している。

(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スロート口径約 100mm、水平置きのアングルプラグ型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(Settling chamber)

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 2 枚の整流多孔板と 2 枚の整流金網を有し、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。

(6) ノズル

マッハ数 10 のノズルを図 2.3 に示す。全長約 7.4m、入口内径 117mm で整流筒と滑らかに接続し、出口は内径 1.27m で測定室に自由噴流を作る。スロートの内径は 48mm で、この部分は強制的に水冷される。

(7) 測定部

図 2.4 に 1.27m 極超音速風洞の測定部を示す。上部、中間部、下部の 3 個のケーシング構造となっている。上部及び下部ケーシングにはそれぞれ高速模型投入装置及び主模型支持装置駆動部が格納され、中間部にはノズルと吸込筒が設置されている。吸込筒は、模型取付や配管・配線等の測定部作業がやりやすくするために、スライド式になっており、必要に応じて位置を変更できる。床面は作業しやすいようにデッキプレート製となっている。測定部の左右両面に電動スライド式扉を設置し、外部から容易に模型へのアクセスが出来る。これらの扉には直径 1m のシュリーレン撮影用光学ガラス窓が、測定部天井には直径 0.5m の光学観測窓がそれぞれ設置されている。空力加熱試験時に赤外線カメラを取付けるために、測定室上部の両側に円筒形のレールとブラケットが用意されている。測定部の側壁面の要所には試験に必要な配管、導線を貫通させるための真空気密を有する孔や準備作業を容易にするための各種扉が設けてある。

(8) 模型支持装置

主模型支持装置と高速模型投入装置の二つの模型支持装置が装備されており、試験の目的に合わせて選択することができる。

主模型支持装置はセクタ型で、ピッチ角制御機構、ロール角制御機構、模型投入機構で構成されている。通常の試験では、通風前には支持装置全体を測定室床下に退避しておき、気流が確立した後、気流内に投入し、計測終了後は再び気流外に模型を退避させる。角度制御機構は電気油圧式アクチュエータで自動制御されており、ピッチ角とロール角を同時に制御することにより、横滑り角と迎角を独立にスイープする試験を行うことができる。

高速模型投入装置は模型支持部、空気アクチュエータ式高速駆動機構、油圧式ショックアブソーバ、模型前後移動機構から構成されている。模型を上部格納位置から風洞中心まで 0.2 秒以内で投入する能力を持っている。

(9) 真空系

真空槽 1, 2 (13m 球形槽 2 基、合計容積 2300m³) と真空槽 3 (16.4m 球形槽、容積 2300m³) から構成され、これらは仕切り弁によって交互に切替えて、また併用して使用できる。2 基の排気装置を有し、2 基同時運転により

5.78kg/sec の排気能力を持っている。

(10)風洞の作動範囲とレイノルズ数

1.27m 極超音速風洞の作動範囲を図 2.5 に示す。図は一樣流マッハ数が 9.6 として計算した。よどみ点圧力 P_0 とよどみ点温度 T_0 の組合せを変えることでレイノルズ数 R_e を変えることができる。図中には代表長を 1m とした時の値を示す。

温度の制限：加熱器の温度上限値は 1300K であるが、

流路配管での熱損失を考慮すると整流筒よどみ点温度の上限は約 1200K になる。長期的に見た損傷を少なくするために高い温度設定を避け、可能な限り、後述の低温側校正領域でのよどみ点温度(約 1000K 以下)で運用している。一方、気流液化に対する条件が整流筒よどみ点温度設定の下限値になる。

圧力の制限：調圧弁の調圧能力は 1MPa から 9.9MPa 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、よどみ点圧力 6MPa 以下で運用している。

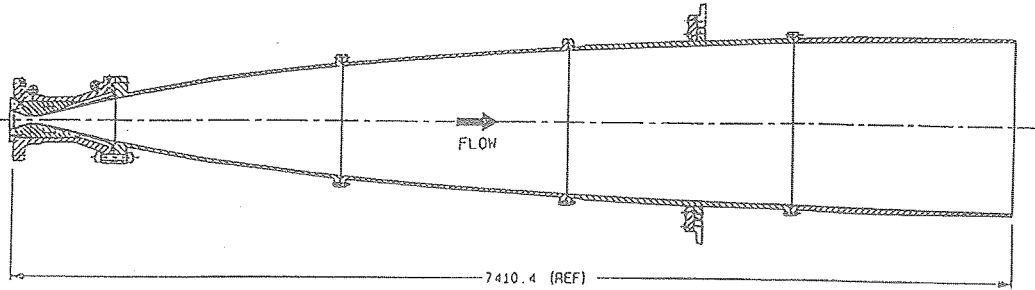


図 2.3 マッハ数 10 ノズル

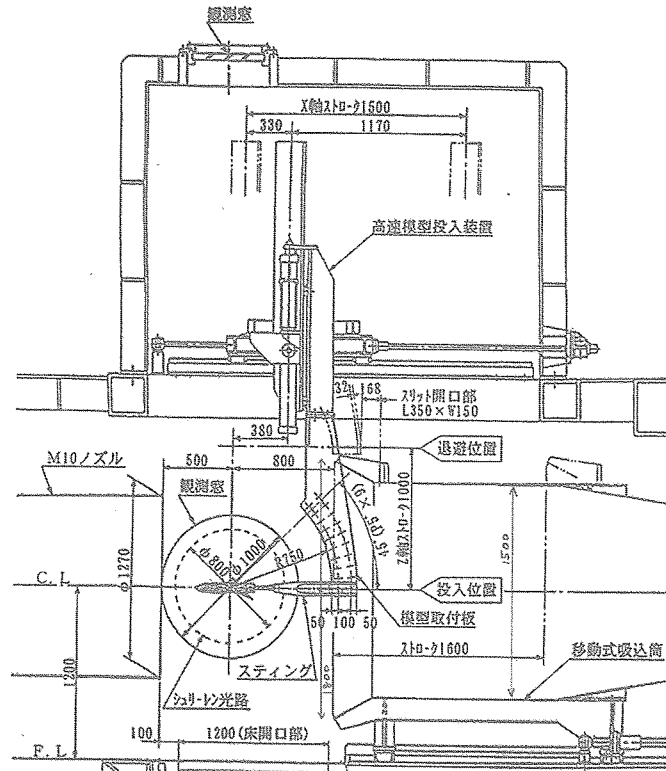


図 2.4 1.27m 極超音速風洞測定部

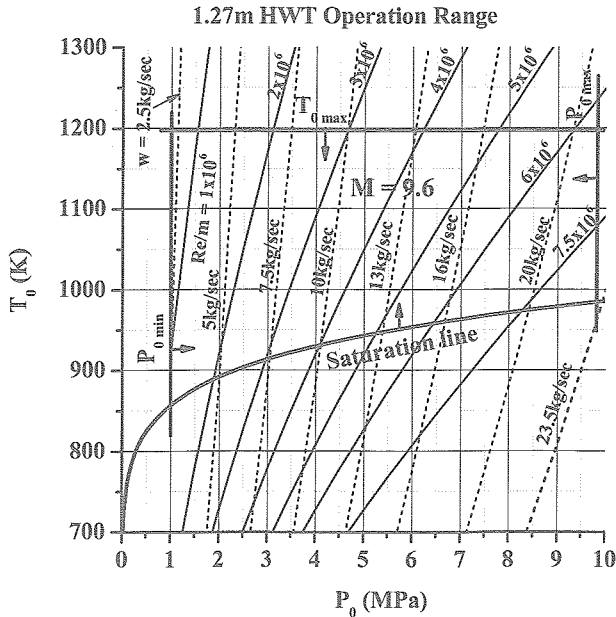


図 2.5 1.27m 極超音速風洞 作動範囲

2.2 ピトーレークとトラバース装置

(1) ピトーレーク

ピトーレークの平面図を図 2.6 に示す。ピトーレークは全幅が 0.90m で、外径 3mm、内径 1mm、長さ 50mm のピトー管 91 本を 0.01m 間隔で配している。ピトー圧力は電子走査式圧力計測 (ESP: Electronically Scanned Pressure) システムを用いて測定する。ピトーレークの圧力孔位置と ESP ポート番号の対応を表 2.2 に示す。

(2) トラバース装置

ピトーレークは高速模型投入装置に装着した。高速模型投入装置に、上下前後にトラバース作動する機能を追加した。トラバーススケジュール (位置、時間) は通風前に予め、測定室横に設置されたコントロールボックスよりプログラムしておき、スタートトリガーは風洞運転制御装置より与えた。ピトーレークは風洞軸まわりに角度 ϕ を $-90 \sim +90$ 度と任意に設定でき、回転させることで鉛直面および水平面の測定を切替える。水平に設定した場合 ($\phi = 90$ 度) と鉛直に設定した場合 ($\phi = 0$ 度) の様子を図 2.7 に示す。

ピトーレークを下流方向にトラバースさせると、その支持部が吸込筒にあたる場合が出てくる。その場合は吸込筒を標準位置より後方に下げた。吸込筒移動による気流特性変化の有無については後述するように検討し、有意な差が生じないことを確認した。

2.3 計測装置

(1) ピトー圧力測定

ピトー圧力測定に用いた ESP システム¹²⁾ の主要仕様を表 2.3 に、システム系統図を図 2.8 に示す。ESP センサーユニットの外観を図 2.9 に、スティングポッドに ESP センサーを収めた状況を図 2.10 に示す。ピトー管から ESP センサー近くまでは内径 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内径 0.8mm ポリウレタンチューブで接続した。

(2) よどみ点圧力及びよどみ点温度の測定

風洞基準量のよどみ点圧力及びよどみ点温度は図 2.11 に示すように整流筒において測定する。整流筒上部 V 字型に出ているのがよどみ点温度センサーで、手前が制御用、向こう側が計測用である。整流筒真横に出ているのがよどみ点圧力取り出し用配管で、手前が制御用、裏側 (見えていないが、丁度対称位置にある) が計測用よどみ点圧力取り出し用配管である。よどみ点圧力センサーは静電容量型で、主要仕様を表 2.4 に示す。よどみ点温度はプローブ熱電対で測定される。主要仕様を表 2.5 に示す。

(3) データ処理システム

データ処理システム¹³⁾ (HP 社製 VXI システム) のブロック図を図 2.12 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。1kHz 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する。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。よどみ点圧力およびよどみ点温度は風洞データ処理システムで、ESP システムで測定したピトー圧データと時間的対応をとって統合データとして生成される。

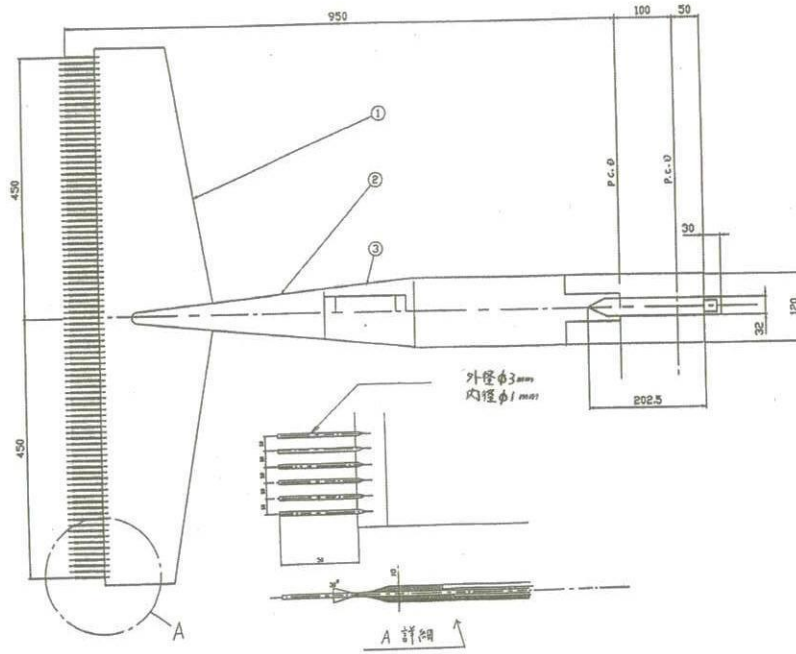


図 2.6 ピトーレークの平面図

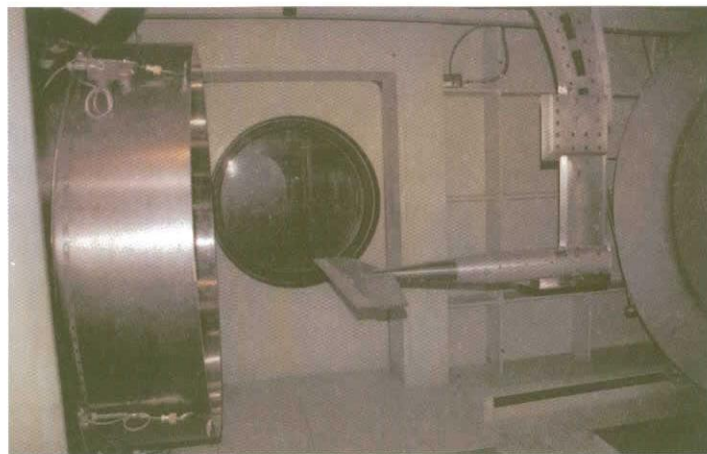
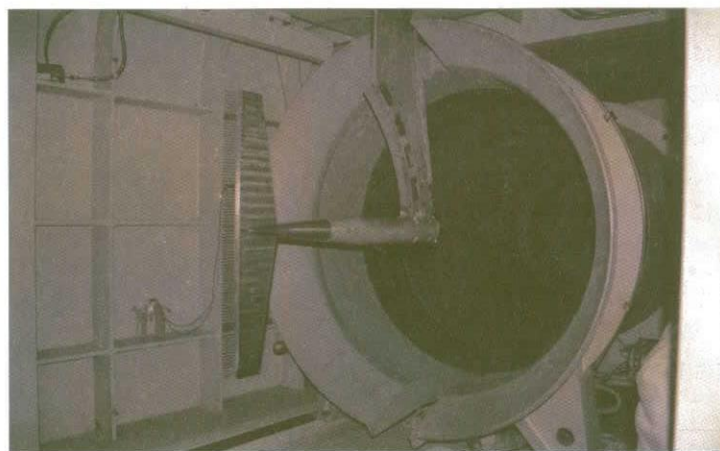
a 水平に設定した場合 ($\phi=90$ 度)b 鉛直に設定した場合 ($\phi=0$ 度)

図 2.7 ピトーレーク装着状況

表 2.2 ピトーレーク圧力孔と ESP ポート番号対応

高温側校正領域試験				低温側校正領域試験			
ピトー孔位置 (m)	ESP ポート 番号 (変更)	ピトー孔位置 (m)	ESP ポート 番号 (変更)	ピトー孔位置 (m)	ESP ポート 番号 (変更)	ピトー孔位置 (m)	ESP ポート 番号 (変更)
		0.45	P91			0.45	P94
		0.44	P90 (P92)			0.44	P93
		0.43	P89			0.43	P92
		0.42	P88			0.42	P91
		0.41	P87			0.41	P90
		0.40	P86			0.40	P89
-0.01	P45	0.39	P85 (P93)	-0.01	P02	0.39	P88
-0.02	P44	0.38	P84	-0.02	P03	0.38	P87
-0.03	P43	0.37	P83	-0.03	P04	0.37	P86
-0.04	P42	0.36	P82	-0.04	P05	0.36	P85
-0.05	P41	0.35	P81	-0.05	P06	0.35	P84
-0.06	P40	0.34	P80	-0.06	P07	0.34	P83
-0.07	P39	0.33	P79	-0.07	P08	0.33	P82
-0.08	P38	0.32	P78	-0.08	P09	0.32	P81
-0.09	P37	0.31	P77 (P94)	-0.09	P10	0.31	P80
-0.10	P36	0.30	P76	-0.10	P11	0.30	P79
-0.11	P35	0.29	P75	-0.11	P12	0.29	P78
-0.12	P34	0.28	P74	-0.12	P13	0.28	P77
-0.13	P33	0.27	P73	-0.13	P14	0.27	P76
-0.14	P32	0.26	P72	-0.14	P15	0.26	P75
-0.15	P31	0.25	P71	-0.15	P16	0.25	P74
-0.16	P30	0.24	P70	-0.16	P17	0.24	P73
-0.17	P29	0.23	P69	-0.17	P18	0.23	P72
-0.18	P28	0.22	P68	-0.18	P19	0.22	P71
-0.19	P27	0.21	P67	-0.19	P20	0.21	P70
-0.20	P26	0.20	P66	-0.20	P21	0.20	P69
-0.21	P25	0.19	P65	-0.21	P22	0.19	P68
-0.22	P24	0.18	P64	-0.22	P23	0.18	P67
-0.23	P23	0.17	P63	-0.23	P24	0.17	P66
-0.24	P22	0.16	P62	-0.24	P25	0.16	P65
-0.25	P21	0.15	P61	-0.25	P26	0.15	P64
-0.26	P20	0.14	P60	-0.26	P27	0.14	P63
-0.27	P19	0.13	P59	-0.27	P28	0.13	P62
-0.28	P18	0.12	P58	-0.28	P29 (P48)	0.12	P61
-0.29	P17	0.11	P57	-0.29	P30	0.11	P60
-0.30	P16	0.10	P56	-0.30	P31	0.10	P59
-0.31	P15	0.09	P55	-0.31	P32	0.09	P58
-0.32	P14	0.08	P54	-0.32	P33	0.08	P57
-0.33	P13	0.07	P53	-0.33	P34	0.07	P56
-0.34	P12	0.06	P52	-0.34	P35	0.06	P55
-0.35	P11	0.05	P51	-0.35	P36	0.05	P54
-0.36	P10	0.04	P50	-0.36	P37 (P47)	0.04	P53
-0.37	P09	0.03	P49	-0.37	P38	0.03	P52
-0.38	P08	0.02	P48	-0.38	P39	0.02	P51
-0.39	P07	0.01	P47	-0.39	P40	0.01	P50
-0.40	P06	0.00	P46	-0.40	P41	0.00	P01
-0.41	P05			-0.41	P42		
-0.42	P04			-0.42	P43		
-0.43	P03			-0.43	P44		
-0.44	P02			-0.44	P45		
-0.45	P01			-0.45	P46		

()は係る ESP ポート不具合のため変更したもの

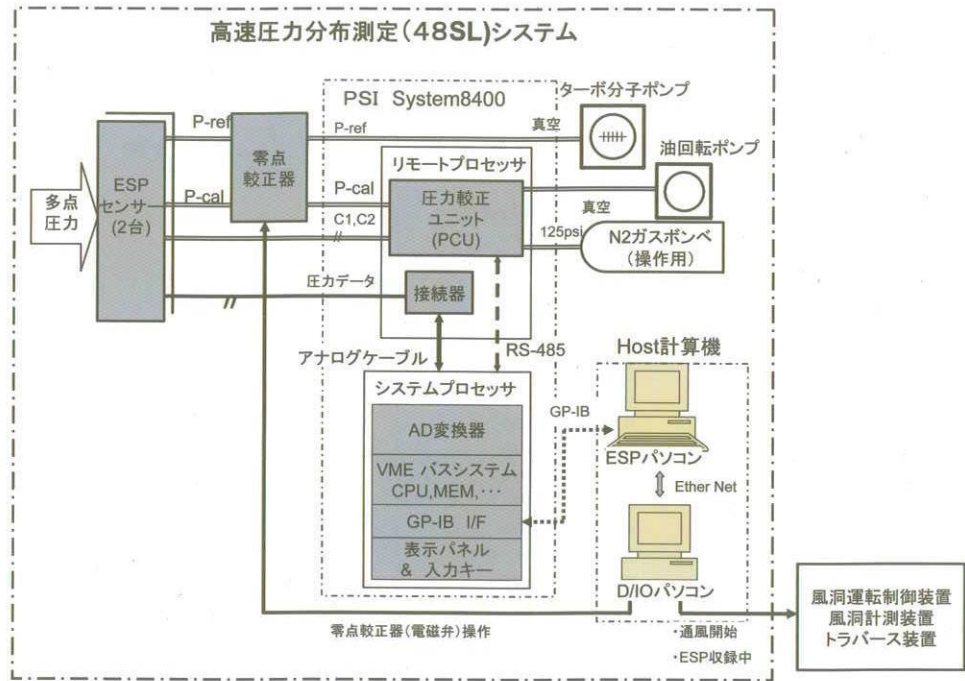


図 2.8 ESP システム系統図

表 2.3 ESP システム主要仕様

(1) システムプロセッサ (PSI 社製 型番 : 8400)	
1) VME バスシステム	
2) データ収録速度	20000 点/秒
3) 分解能	16bit
4) インターフェース	GP-IB
(2) 圧力校正ユニット (PSI 社製 型番 : 8435)	
1) 圧力範囲	35kPa(abs)
2) 精度	±0.02%FS
(3) ESP センサー (PSI 社製 型番 : ESP-48SL)	
1) 圧力範囲	±35kPa(dif.)
2) チャンネル数	48
3) 精度	±0.05%FS (4 次式近似)
4) 数量	2 台
(4) ホストコンピュータ	
1) ESP パソコン OS : Windows NT	システムプロセッサの操作
2) D/I-O パソコン OS : Windows NT	外部機器との信号授受

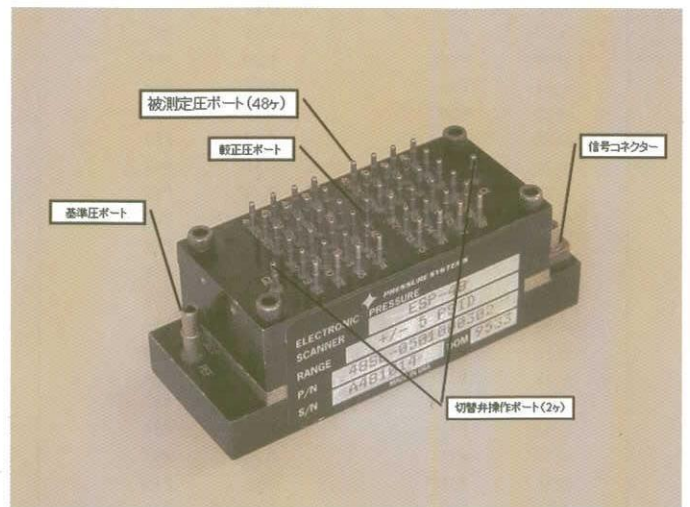


図 2.9 ESP センサーユニット

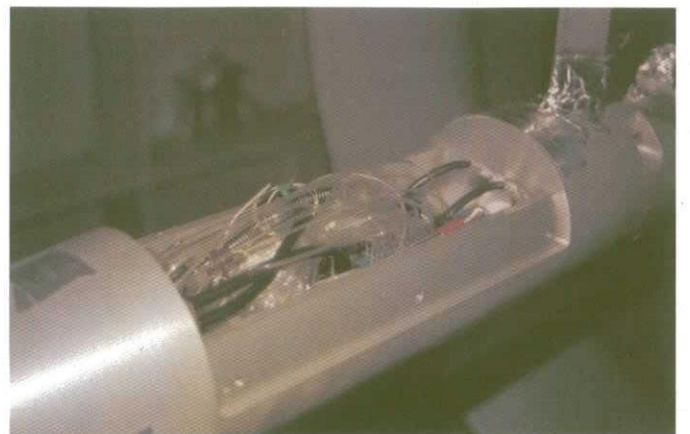


図 2.10 スティングポッドに ESP センサーを収めた状況

表 2.4 よどみ点圧力センサー主要仕様

(1) 形式	キャパシタンス型 (Setra 社製 型番: 205-2)	
(2) 測定範囲	各 1 台	
	1) 高レンジセンサー	0 ~ 10MPa
	2) 低レンジセンサー	0 ~ 5MPa
(3) 精度	±0.11%FS (総合)	
(4) 出力	0 ~ 5V	
(5) 外形寸法	φ 44mm×151mm(圧力ポートを除く)	

表 2.5 よどみ点温度センサー主要仕様

(1) 形式	R 型熱電対非接地型
(2) 応答時間	1.5 秒
(3) シース先端外径	3.18mm
(4) 構造	三重ラジエーションシールドつき
(5) 基準接点	電子式基準接点補償器 (チノー社製 型番: HT-30X-RX)

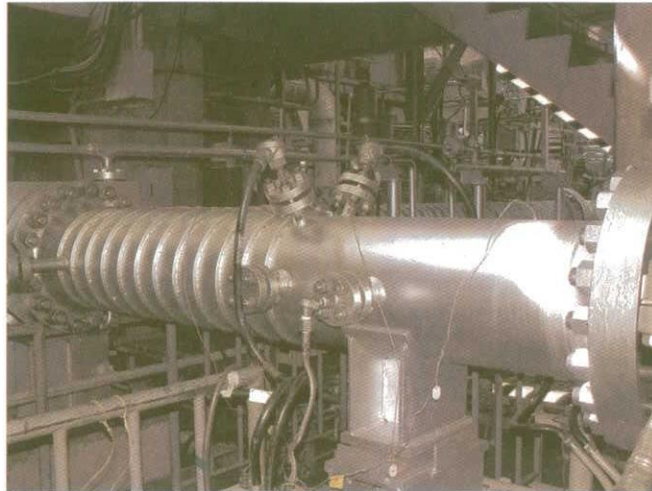


図 2.11 整流筒におけるよどみ点圧力、よどみ点温度の測定

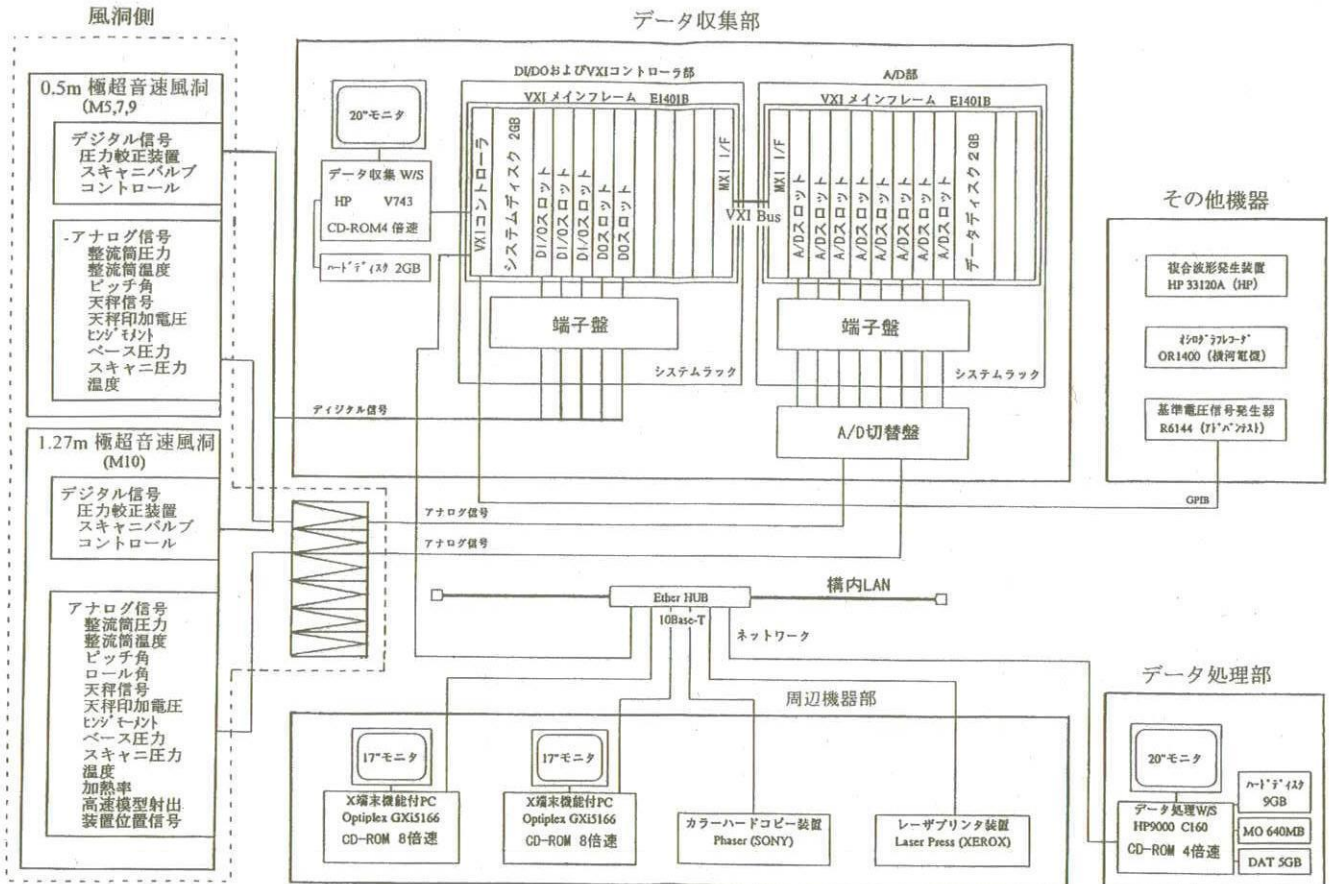


図 2.12 データ処理システム系統図

3 試験方法

3.1 試験手順

座標系を図 3.1 に示す。ノズル出口端の中心を原点とし、気流方向に X 軸、上流に向かって右方に Y 軸、上方に Z 軸を採る。

1 回の通風時間は 30 秒を基本とした。よどみ点圧力は調圧弁により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空気加熱器蓄熱体の加熱温度、加熱時間を風洞オペレータが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。図 3.2 に通風シーケンスのタイムチャートを示す。風洞気流が安定してから、トラバース装置を測定位置に移動し、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する、というようにシーケンスを設定した。

高温側校正領域の試験では気流方向 X=0m~0.75m の範囲を、低温側校正領域の試験では気流方向 X=0m~0.90m の範囲をそれぞれ測定した。鉛直面の分布測定で

は、ピトーレークを鉛直($\phi=0$ 度)に立て、気流方向に 0.1m 刻みで、水平面の分布測定では、ピトーレークを水平($\phi=90$ 度)に寝かせ、気流方向に 0.05m 刻みで測定した。断面分布測定では、風洞中心 X= 0.50m 位置でピトーレークを水平にセットし、上下方向に 0.01m 刻みで移動し、Z=-0.35~0.35m の範囲を測定した。

1 組の空間分布を得るには数回の通風に分けてデータを取得せざるを得ない。異なる通風間の再現性を確認するため、各通風の端面計測は重複するようにし、有意な差が生じていないことを確認した。

3.2 試験条件

高温側校正領域の試験ケースを表 3.1 に、低温側校正領域の試験ケースを表 3.2 に、それぞれ示す。高温側校正領域試験のよどみ点圧力条件は 2.5MPa、4.0MPa、6.0MPa が主眼であるが、一部(鉛直面分布)に 8.5MPa のケースが含まれている。

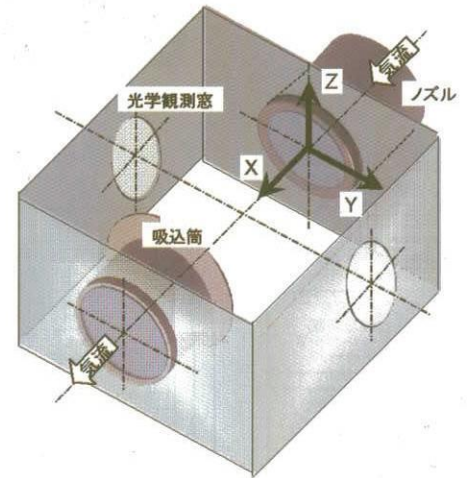


図 3.1 座標系

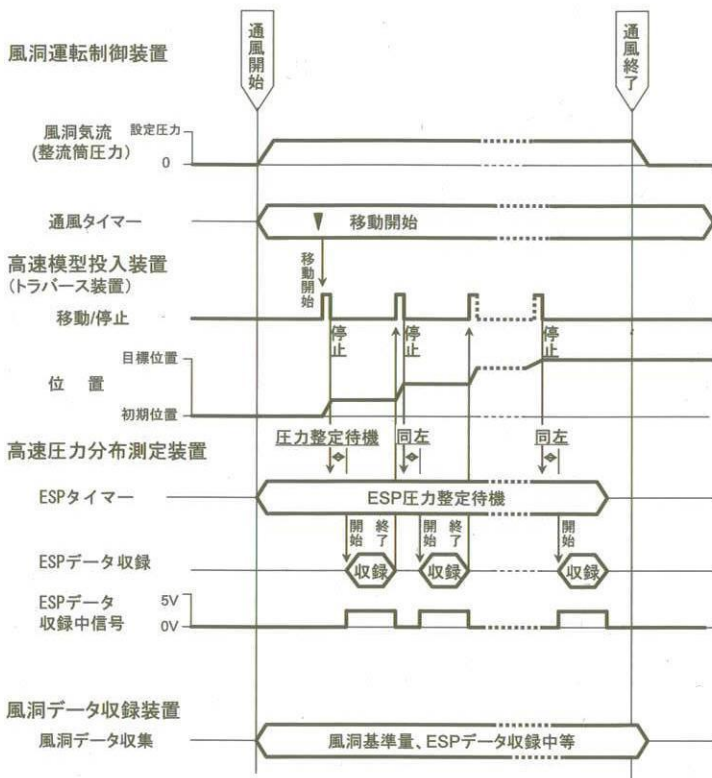


図 3.2 測定のタイムチャート

表 3.1 高温側校正領域 試験ケース

ケース	測定項目	RUN NO.	目標値	実現値		ピトーレーク X 軸[m]	吸込筒 [m]	備考
			P ₀ [MPa]	P ₀ [MPa]	T ₀ [K]			
1	水平面分布 (P ₀ =2.5MPa)	752	2.5	2.46	1022~1069	0.020~0.300	0.000	ピトーレーク Z 軸=0(m) 気流中心
2		754		2.45	1065~1092	0.500~0.750	0.250	
3		756		2.45	1054~1090	0.000~0.450	0.000	
4		760		2.45	1069~1083	0.050~0.350	0.015	
5		763		2.45	1085~1099	0.500~0.700	0.000	
6	水平面分布 (P ₀ =4MPa)	751	4.0	3.91	1075~1107	0.400~0.510	0.000	ピトーレーク Z 軸=0(m) 気流中心
7		753		3.90	1085~1102	0.020~0.200	0.000	
8		758		3.91	1056~1074	0.050~0.350	0.015	
9		759		3.90	1072~1103	0.000~0.450	0.015	
10		764		3.90	1102~1121	0.700~0.500	0.270	
11	766	3.89	1089~1110	0.750~0.550	0.270			
12	水平面分布 (P ₀ =6MPa)	755	6.0	5.88	1115~1134	0.020~0.300	0.000	ピトーレーク Z 軸=0(m) 気流中心
13		757		5.88	1111~1135	0.050~0.350	0.000	
14		761		5.87	1129~1142	0.550~0.750	0.270	
15		762		5.88	1104~1114	0.500~0.700	0.270	
16		765		5.87	1107~1120	0.400~0.500	0.015	
17	780	5.89	1086~1120	0.000~0.200	0.015	ストラット 0.6m		
18	吸込筒位置	767	4.0	3.91	1089~1117	0.000~0.500	0.520	ピトーレーク
19	効果(φ=90°)	768		3.90	1092~1107	0.750~1.000	0.520	Z 軸=0(m) 気流
20	鉛直面分布 (P ₀ =2.5MPa)	770	2.5	2.45	1079~1099	0.300~0.500	0.015	ピトーレーク
21		773		2.45	1083~1092	0.200~0.000	0.015	Z 軸=0(m) 気流
22		779		2.45	1061~1084	0.750~0.500	0.270	中心
23	鉛直面分布 (P ₀ =4MPa)	769	4.0	3.90	1090~1110	0.300~0.500	0.015	ピトーレーク
24		772		3.90	1093~1102	0.200~0.000	0.015	Z 軸=0(m) 気流
25		777		3.90	1082~1109	0.750~0.500	0.270	中心
26	鉛直面分布 (P ₀ =6MPa)	771	6.0	5.88	1113~1123	0.300~0.500	0.015	ピトーレーク
27		775		5.88	1081~1097	0.200~0.000	0.015	Z 軸=0(m) 気流
28		776		5.87	1083~1095	0.750~0.500	0.270	中心
29	鉛直面分布 (P ₀ =8.5MPa)	774	8.5	8.35	1068~1085	0.050~0.500	0.015	ピトーレーク
30		778		8.32	1106~1119	0.750~0.500	0.270	Z 軸=0(m) 気流
31	水平面分布 再現性	791	2.5	2.47	1049~1102	0.200~0.700	0.270	ピトーレーク
32		790	4.0	3.92	1060~1117	0.200~0.700	0.270	Z 軸=0(m) 気流
33		789	6.0	5.90	1095~1139	0.200~0.700	0.270	中心
34	鉛直面分布 再現性	794	2.5	2.47	1040~1107	0.200~0.700	0.270	ピトーレーク
35		793	4.0	3.91	1066~1115	0.200~0.700	0.270	Z 軸=0(m) 気流
36		792	6.0	5.91	1082~1129	0.200~0.700	0.270	中心
37	断面分布 (P ₀ =4MPa)	781	4.0	3.91	1065~1109	0.080~0.000	0.015	ピトーレーク X 軸=0.5(m) シュリーレン窓 中心 □注
38		782		3.90	1076~1112	-0.080~0.000		
39		783		3.91	1036~1071	0.090~0.170		
40		784		3.91	1073~1109	-0.090~-0.170		
41		785		3.91	1073~1110	0.260~0.180		
42		786		3.91	1073~1110	-0.260~-0.180		
43		787		3.90	1078~1124	0.270~0.350		
44		788		3.90	1077~1117	-0.270~-0.350		

□注 計測ミスにより P₀, T₀ データ取得失敗、ほぼ同様の P₀, T₀ プロファイルを持つ Run785 の P₀, T₀ で処理

表 3.2 低温側校正領域 試験ケース

ケース	測定項目	RUN NO.	目標値		実現値		ピトーレーク		吸込筒 [mm]
			P ₀ [MPa]	T ₀ [K]	P ₀ [MPa]	T ₀ [K]	φ [°]	X 軸	
1	前回の 高温側領域 再確認	1113	2.5	1073	2.45	1011~1056	90	0	0
2		1114	4		3.89	1012~1055			
3		1112	6		5.87	1060~1107			
4	液化限界領域 の確認	1117	1	973	0.96	901~934	90	0	0
5		1118	2.5		2.45	945~984			
6		1116	4		3.89	957~989			
7		1115	6		5.86	995~1017			
8		1120	1	873	0.96	729~776			
9		1121	2.5		2.44	835~867			
10		1119	6		5.86	871~894			
11		1122	1		673	0.96			
12		1123	2.5	753	2.45	745~773			
13		1124	4	823	3.88	804~825			
14		ESP 平均点数検証	1125	6	973	5.86			
15	水平面分布 (P ₀ =1MPa)	1128	1	920	0.96	896~951	90	0~300	0
16		1139			0.96	904~962	90	300~600	120
17		1144			0.96	887~960	90	600~900	420
18	水平面分布 (P ₀ =2.5MPa)	1127	2.5	970	2.45	958~985	90	0~150	0
19		1132			2.45	956~987	90	150~300	0
20		1137			2.45	946~982	90	300~450	0
21		1141			2.45	956~990	90	450~600	120
22		1143			2.45	985~1020	90	600~750	270
23		1147			2.45	982~1015	90	750~900	420
24	水平面分布 (P ₀ =4MPa)	1126	4	990	3.89	956~980	90	0~150	0
25		1131			3.89	976~1000	90	150~300	0
26		1135			3.89	978~1011	90	300~450	0
27		1138			3.89	999~1026	90	450~600	120
28		1142			3.89	994~1022	90	600~750	270
29		1146			3.90	990~1021	90	750~900	420
30	水平面分布 (P ₀ =6MPa)	1129	6	1035	5.88	937~948	90	0~150	0
31		1133			5.88	1010~1040	90	0~150	0
32		1134			5.87	1001~1025	90	150~300	0
33		1136			5.88	986~1011	90	300~450	0
34		1140			5.87	992~1014	90	450~600	120
35		1145			5.89	1012~1043	90	600~800	270
36	鉛直面分布 (P ₀ =1MPa)	1154	1	920	0.96	906~971	0	0~450	0
37		1159			0.96	870~951	0	400~900	420
38	鉛直面分布 (P ₀ =2.5MPa)	1158	2.5	970	2.46	984~1024	0	0~300	0
39		1157			2.45	986~1030	0	300~600	120
40		1162			2.45	978~1017	0	600~900	420
41	鉛直面分布 (P ₀ =4MPa)	1153	4	990	3.90	977~1009	0	0~300	0
42		1156			3.90	979~1021	0	300~600	120
43		1161			3.90	990~1026	0	600~900	420
44	鉛直面分布 (P ₀ =6MPa)	1152	6	1035	5.88	988~1006	0	0	0
45		1163			5.88	1007~1032	0	0~300	0
46		1155			5.88	1018~1053	0	300~600	120
47		1160			5.89	1030~1059	0	600~900	420
48	液化現象の把握 凝固衝撃波の確認	1148	4	823	3.89	786~801	90	540	0
49		1151			3.88	797~819	90	800	0
50		1149			3.88	801~821	90	100	0
51		1150		778	3.88	815~831	90	300	0
52		1164		848	3.87	858~885	0	0	0
53		1165		748	3.87	752~780	0	0	0
54		1166		650	3.87	637~660	0	0	0

4 データ処理

4.1 マッハ数の算出

マッハ数は実在気体効果を考慮して¹⁴⁾ ピトー圧力、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。ここで、比熱比 $\gamma=1.4$ を用いる。

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

実在気体と完全気体の比を以下のようによどみ点温度 T_0 とよどみ点圧力 P_0 の多項式で近似する。

$$\frac{\left(\frac{P_{02}}{P_0}\right)_{real}}{\left(\frac{P_{02}}{P_0}\right)_{perfect}} = 1.0419 + 5.5564 \times 10^{-9} P_0 \quad (2)$$

$$- (3542.0 + 2.0690 \times 10^{-4} P_0 + 5.4772 T_0) \times 10^{-8} \times T_0$$

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、

$$\left(\frac{P_{02}}{P_0}\right)_{perfect} = \left[\frac{\left(\frac{P_{02}}{P_0}\right)_{real}}{\left(\frac{P_{02}}{P_0}\right)_{perfect}} \right]^{-1} \left(\frac{P_{02}}{P_0}\right)_{measure} \quad (3)$$

完全気体のマッハ数と圧力比の関係式 (1) の逆関数からマッハ数を算出した。

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、逆関数計算の誤差は測定誤差に比べるとはるかに小さいので無視する。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 ($=91$) 点のピトー孔に対応する ESP の全要素センサーを専用の圧力校正ユニット(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。1 回の通風での変更位置は鉛直面分布測定、水平面分布測定では $m=3 \sim 7$ 、

断面分布測定では $m=9$ である。各トラバース停止位置では ESP は 16 サンプル平均値(Frame=16)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出力され、その平均値を用いてマッハ数算出の P_0, T_0 として用いられる。

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 ΔP_{02} 、よどみ点圧力系統の測定誤差 ΔP_0 、及びよどみ点温度系統の測定誤差 ΔT_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) ΔM_S を上乗せすれば、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。

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

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

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

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

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 ν_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。

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

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

$$\nu = \left[\sum (\theta_i S_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} / \sum [(\theta_i S_i)^4 / \nu_i] \quad (6)$$

ここで、感度係数 θ_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 (1)、(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 ν 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 (≥ 20) 場合、student t 値は 2 である。

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

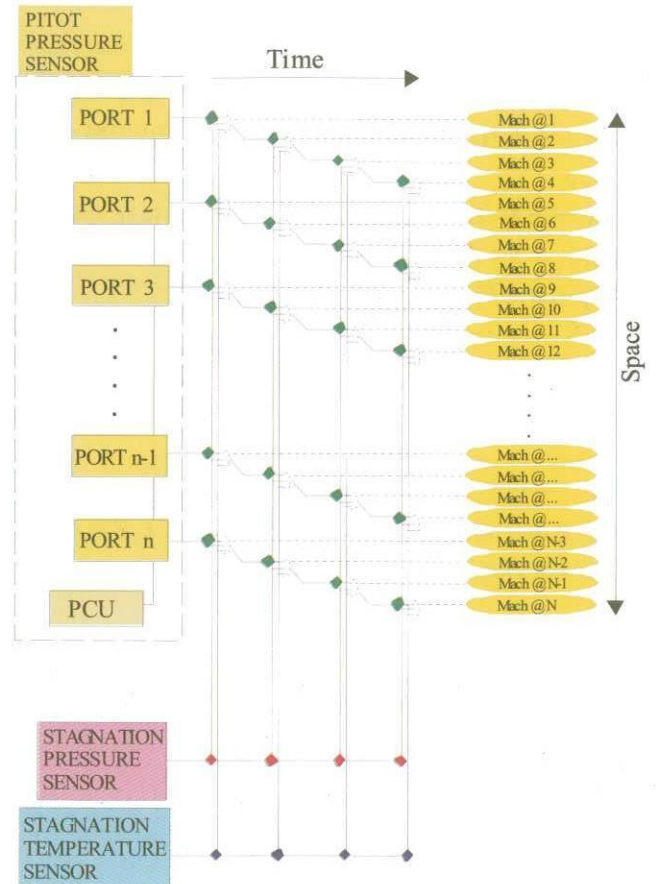


図 4.1 マッハ数空間分布を求める測定センサー

5 試験結果

5.1 高温側校正領域

(1) 一様流コア

ピトー圧力/よどみ点圧力の、ノズル改修前後の比較を図 5.1 に示す。original と記されているのが改修前、remachined と記されているのが改修後の分布である。改修前にあった中心付近の圧力波の影響による大きな圧力勾配が見事に解消され、均一な圧力分布を示していることがわかる。そして、改修前に比べて一様流領域がやや広まった。

図 5.2 によどみ点圧力 $P_0 = 2.5\text{MPa}, 4.0\text{MPa}, 6.0\text{MPa}$ について、 $X=0\text{m}$ から 0.75m まで 0.05m 刻みで変化させた時のピトー圧分布の変化の様子を示す。図では重なりを防ぐため X 位置に応じて $(X-0.3)/1000$ ずつ右にずらして表示している。低よどみ点圧力 ($P_0 = 2.5\text{MPa}$) では下流に行くにしたがって一様領域が狭まる傾向がある。一様流コア領域直径として 0.70m 以内に設定すれば一様性は十分確保される。

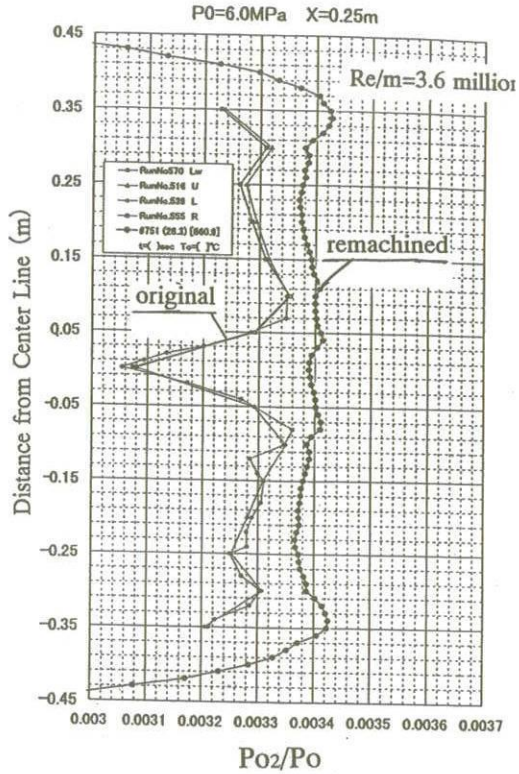


図 5.1 ノズル改修前後のピトー圧分布比較

(2) マッハ数の鉛直面、水平面分布

各よどみ点圧力について、気流方向 $X=0\sim 0.75\text{m}$ 、直径 0.70m 領域の (a) 鉛直面分布、(b) 水平面分布、(c) 鉛直面分布と水平面分布を併せたマッハ数ヒストグラム、及び (d) マッハ数の気流方向傾斜を以下の図に示す。

図 5.3 高温側校正領域 よどみ点圧力 $P_0=2.5\text{MPa}$

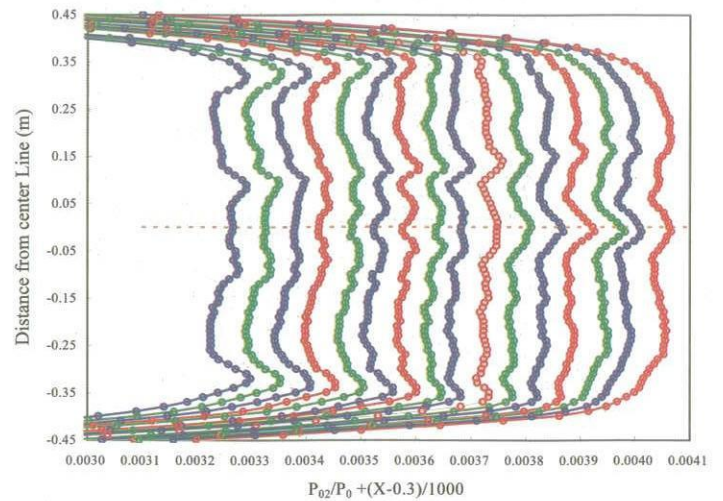
図 5.4 高温側校正領域 よどみ点圧力 $P_0=4.0\text{MPa}$

図 5.5 高温側校正領域 よどみ点圧力 $P_0=6.0\text{MPa}$

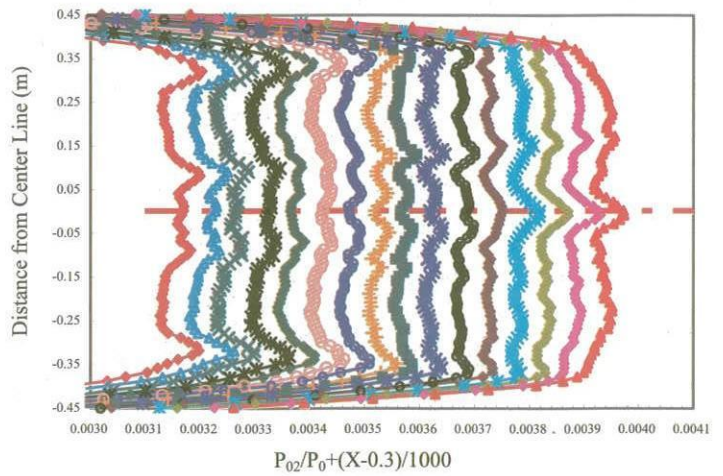
一様流中に大きな圧力勾配がなく、均一な気流が得られていることが分かる。ヒストグラムによればマッハ数で ± 0.03 以内に約 98% のポイントが入っている。

マッハ数平均値の気流方向傾斜については、最小二乗近似直線を計算することで求めた。気流方向傾斜は微弱な負値で、よどみ点圧力によってほとんど変わらない。この値は一様流コア始端 ($X=0\text{m}$) と終端 ($X=0.75\text{m}$) でマッハ数の差は最大で 0.04 を生じさせる程度である。

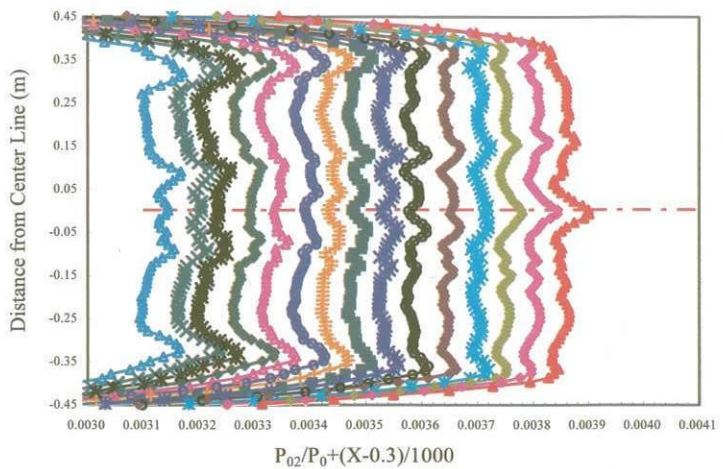
一様流コア領域直径として、最終的に低温側校正領域に合わせて直径 0.60m に設定した。気流方向については $X=0\sim 0.75\text{m}$ である。この領域の鉛直面マッハ数分布と水平面マッハ数分布を併せたデータから求めたマッハ数平均値を表 5.1 に示す。よどみ点圧力が (レイノルズ数が) 上がるにしたがって、ノズル内境界層の厚さは減じ、膨張加速がより促進されるために平均マッハ数は、 $P_0=2.5\text{MPa}$ のとき 9.55 、 $P_0=4.0\text{MPa}$ のとき 9.62 、 $P_0=6.0\text{MPa}$ のとき 9.68 、といったように漸増する傾向にある。



a $P_0=2.5\text{MPa}$

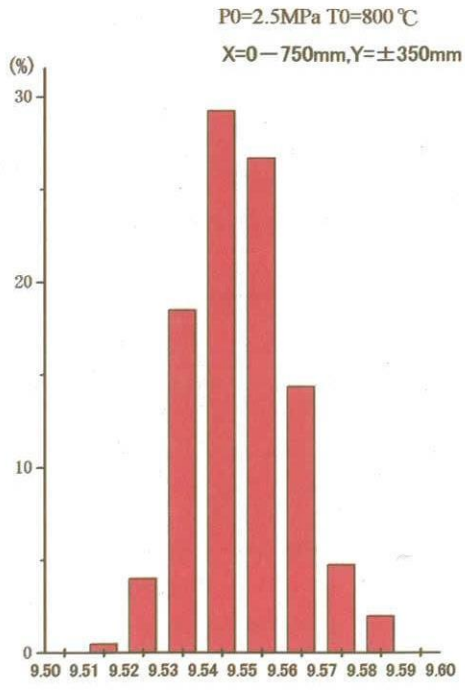
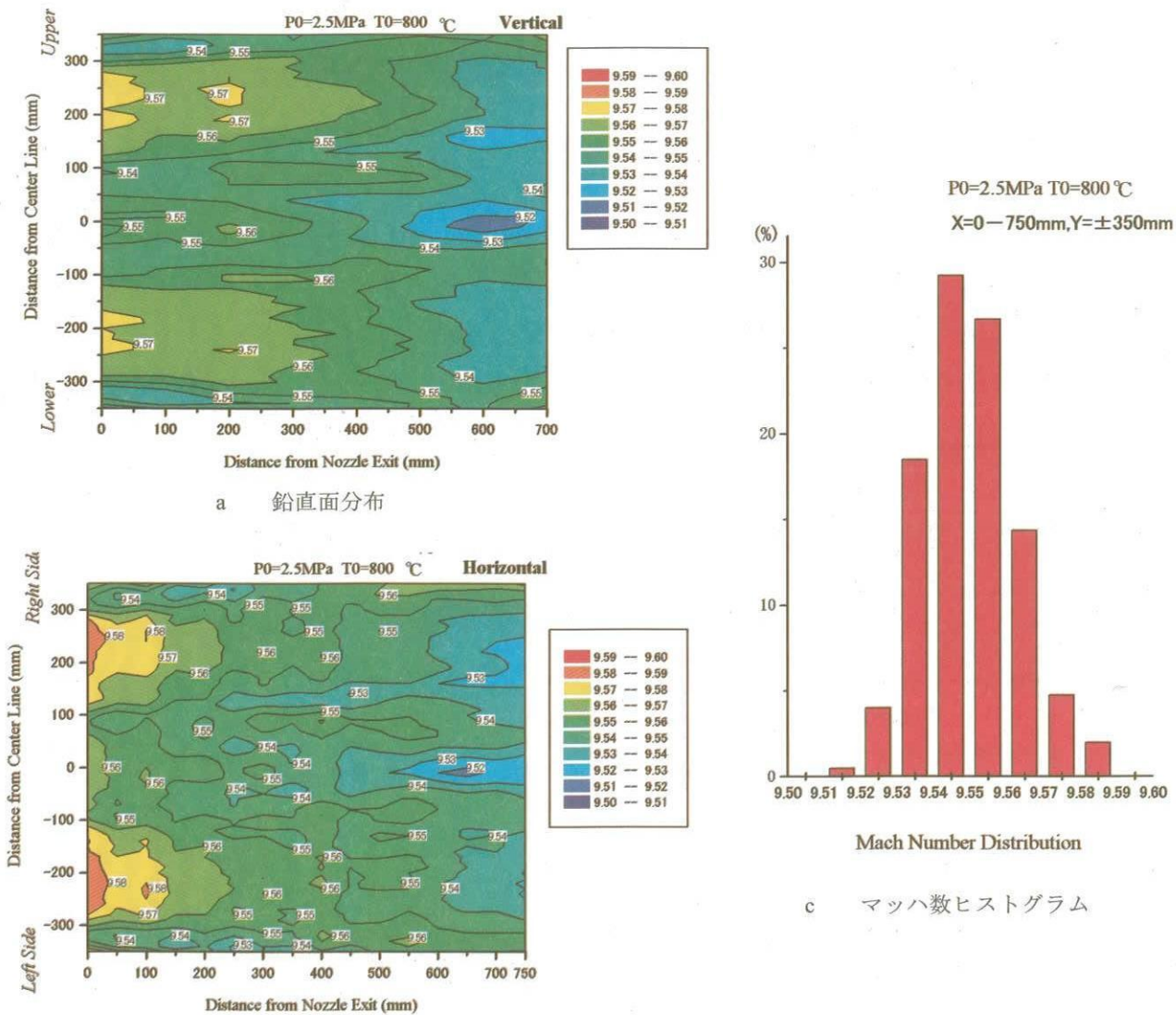


b $P_0=4.0\text{MPa}$



c $P_0=6.0\text{MPa}$

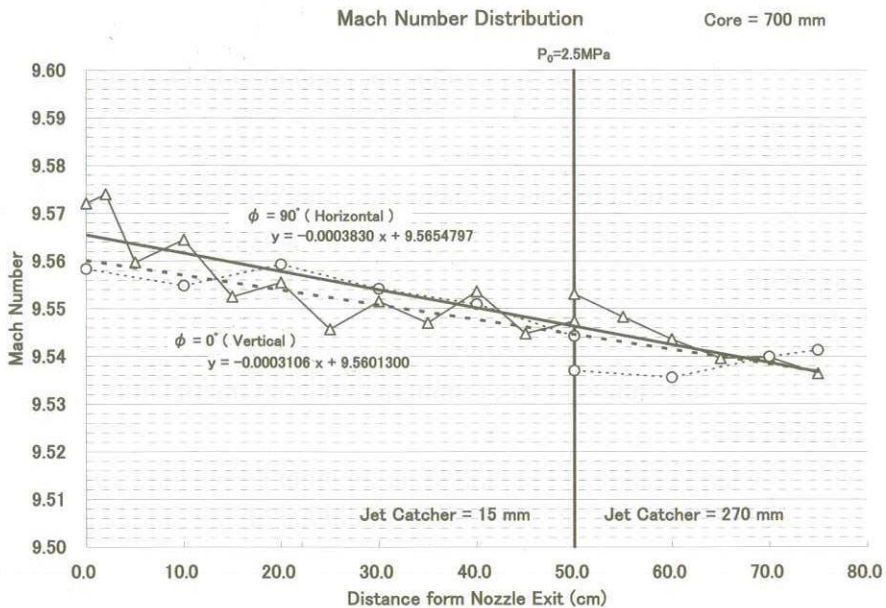
図 5.2 高温側校正領域 ピトー圧分布の X 位置による変化



a 鉛直面分布

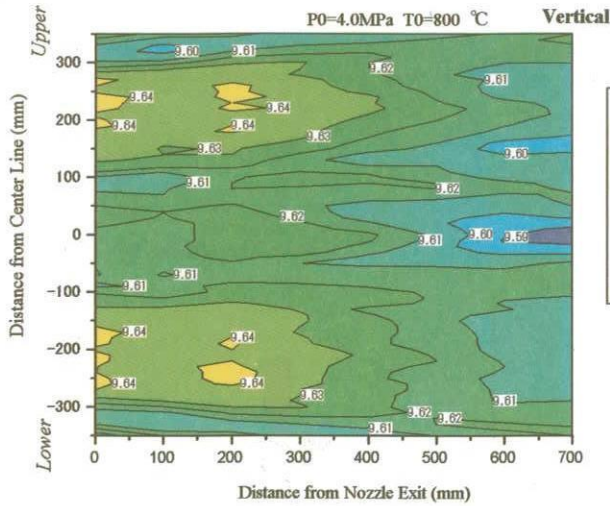
b 水平面分布

c マッハ数ヒストグラム

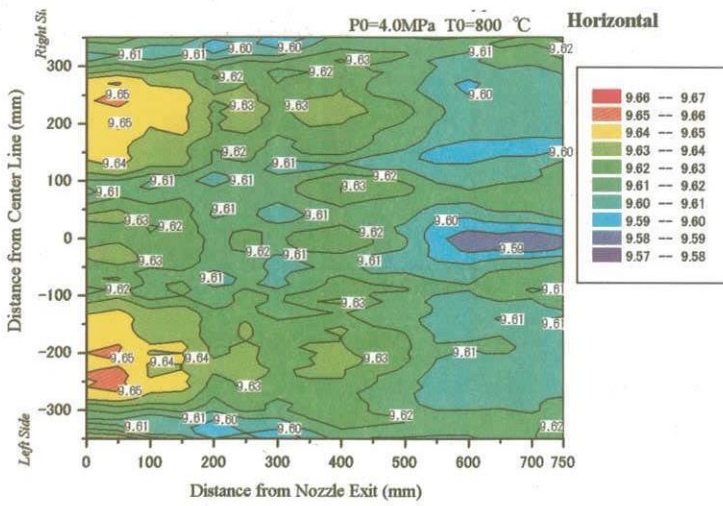


d マッハ数の気流方向傾斜

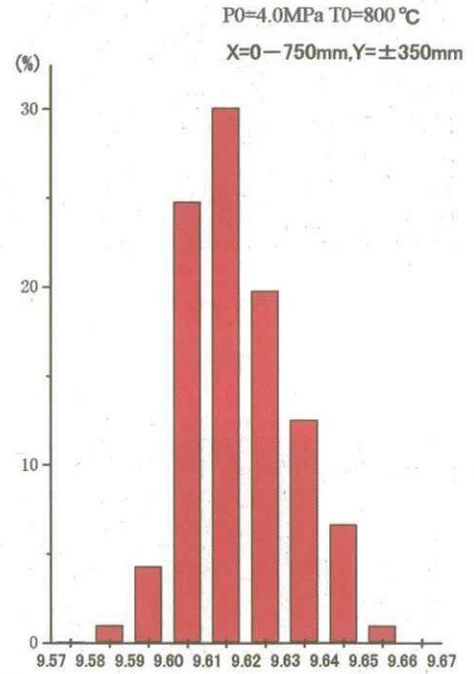
図 5.3 高温側校正領域 P₀=2.5MPa



a 鉛直面分布

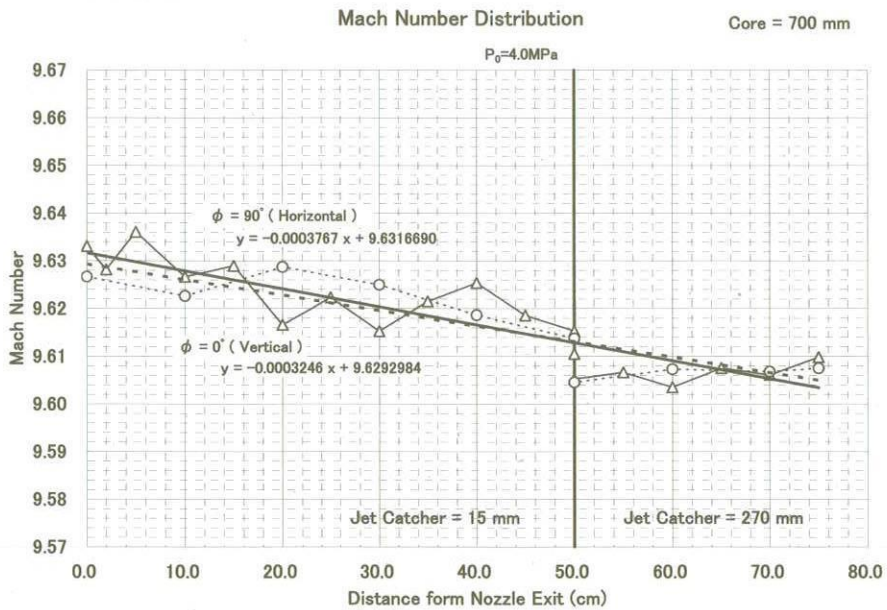


b 水平面分布



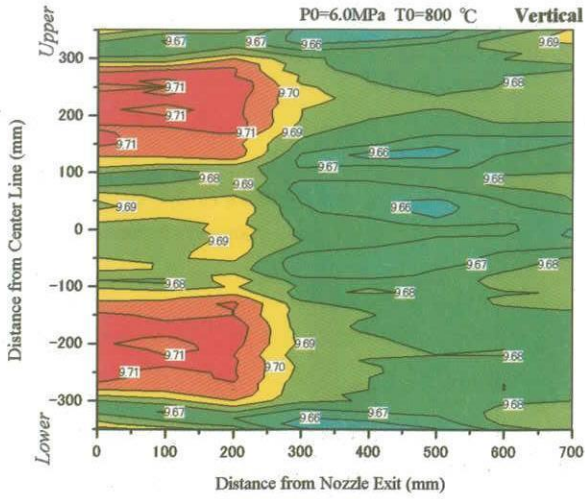
Mach Number Distribution

c マッハ数ヒストグラム

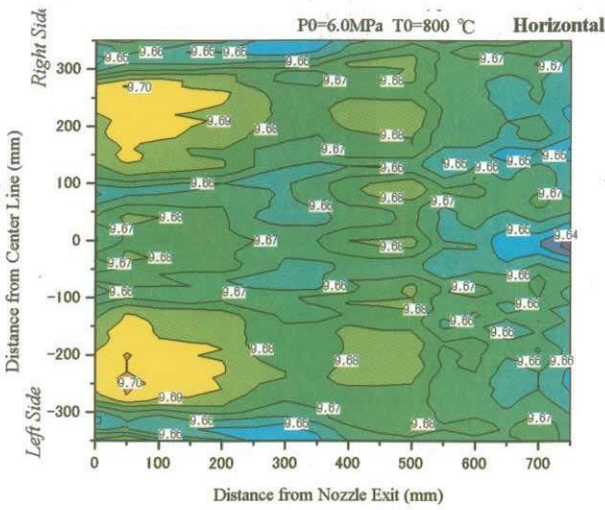


d マッハ数の気流方向傾斜

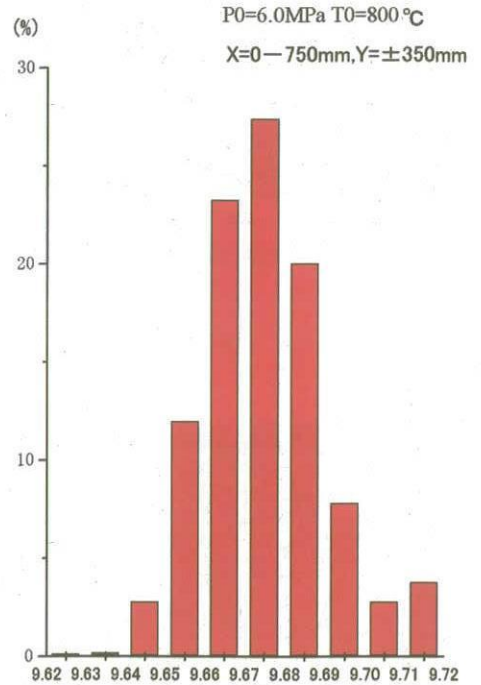
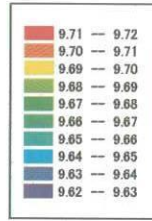
図 5.4 高温側校正領域 $P_0=4.0\text{MPa}$



a 鉛直面分布

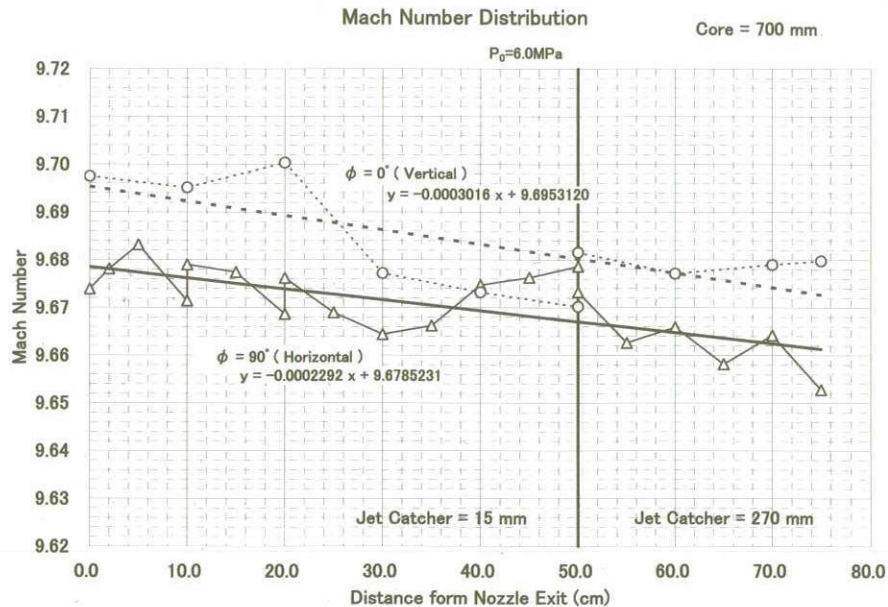


b 水平面分布



Mach Number Distribution

c マッハ数ヒストグラム



d マッハ数の気流方向傾斜

図 5.5 高温側校正領域 P0=6.0MPa

表 5.1 一様流コア領域のマッハ数空間分布

校正領域	一様流コア	P ₀ [MPa]	T ₀ [K]	Run No.		データ点数			マッハ数					
				鉛直面	水平面	鉛直面数	水平面数	空間点数	平均	最大	最小	幅	標準偏差	
											[Mach]	[%]		
高温側	直径 0.6m 気流方向 x=0~0.75m	2.5	1022 ~1099	773, 770, 779	756, 760, 752, 763, 754	9	17	1586	9.549	9.589	9.513	0.076	0.01291	0.135
		4.0	1075 ~1121	772, 769, 777	759, 758, 753, 751, 764, 766, 764	10	18	1708	9.617	9.655	9.580	0.075	0.01348	0.140
		6.0	1081 ~1135	775, 771, 776	780, 757, 755, 765, 762, 761	9	17	1586	9.676	9.718	9.625	0.093	0.01460	0.151
低温側	直径 0.6m 気流方向 x=0.1~0.9m	1.0	896 ~975	1154, 1159	1128, 1139, 1144	9	17	1586	9.449	9.484	9.404	0.080	0.01301	0.138
		2.5	947 ~1022	1158, 1157, 1162	1127, 1132, 1137, 1141, 1143, 1147	9	17	1586	9.577	9.609	9.535	0.074	0.01409	0.147
		4.0	891 ~1028	1153, 1156, 1161	1126, 1131, 1135, 1138, 1142, 1146	9	17	1586	9.637	9.671	9.602	0.069	0.01313	0.136
		6.0	935 ~1039	1163, 1155, 1160	1133, 1134, 1136 1140, 1145	9	15	1464	9.683	9.710	9.648	0.062	0.01096	0.113

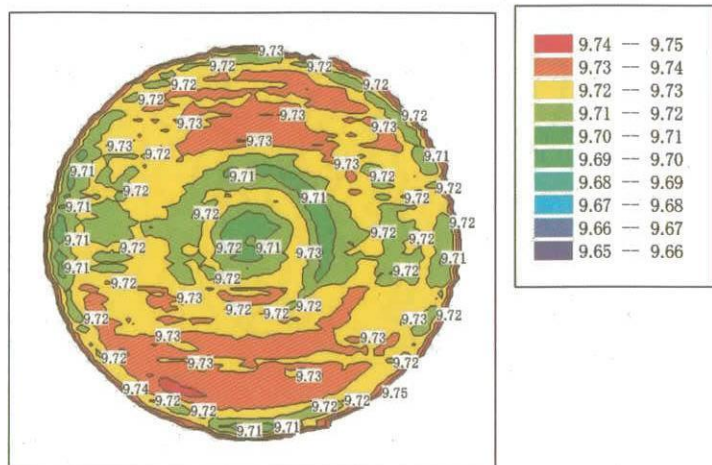


図 5.6 高温側校正領域 X=0.5m 位置での断面マッハ数分布 P₀=4.0MPa

(3)マッハ数の断面分布

X=0.5m 位置での断面マッハ数分布を、よどみ点圧力 P₀=4.0MPa について図 5.6 に示す。ただし、このマッハ数は完全気体に基づく計算値である。断面全体のマッハ数分布から測定部に強い圧力波が生じていないことが分かる。

(4)吸込筒位置変更の影響

ピトーレークと吸込筒が干渉するため、X=0.50m を境に、これより下流の測定では吸込筒の位置を後ろへ移動させた。吸込筒移動によるマッハ数への影響については、異なる RUN 間の重複測定結果の違いと比べて同程度であり、有意な差ではないと判定した。

5.2 低温側校正領域

(1)一様流コア

図 5.7 によどみ点圧力 P₀=1.0MPa、2.5MPa、4.0MPa、6.0MPa について、X=0mm から 750mm まで 50mm 刻みで変化させた時のピトー圧分布の変化の様子を示す。図では重なりを防ぐため X 位置に応じて (X-300)/1000000 ずつ右にずらして表示している。一様流領域は高温側校正領域より狭まる傾向があり、一様流コア領域として直径 0.60m を選択した。気流方向については模型を置く可能性が高い領域 X=0.10~0.90m の範囲をコア領域として設定した。

(2)マッハ数の空間分布

各よどみ点圧力について気流方向 X=0~0.90m 間の

(a) 鉛直面分布、(b) 水平面分布を以下の図に示す。

図 5.8 低温側校正領域 よどみ点圧力 P₀=1.0MPa

図 5.9 低温側校正領域 よどみ点圧力 P₀=2.5 MPa

図 5.10 低温側校正領域 よどみ点圧力 P₀=4.0 MPa

図 5.11 低温側校正領域 よどみ点圧力 P₀=6.0 MPa

鉛直面マッハ数分布と水平面マッハ数分布の、一様流コアとして定めた直径 0.60m、気流方向 X=0.10~0.90m の範囲のデータを用いてマッハ数平均値を求めた。結果を表 5.1 に示す。

(3)液化が起きた時の現象の確認

空気液化の影響を見るために、ピトーレーク先端をノズル出口端面で固定し、よどみ点温度を徐々に下げた通風をよどみ点圧力 P₀=4.0MPa で行ってピトー圧分布の変化を観察した。よどみ点圧力で無次元化したピトー圧

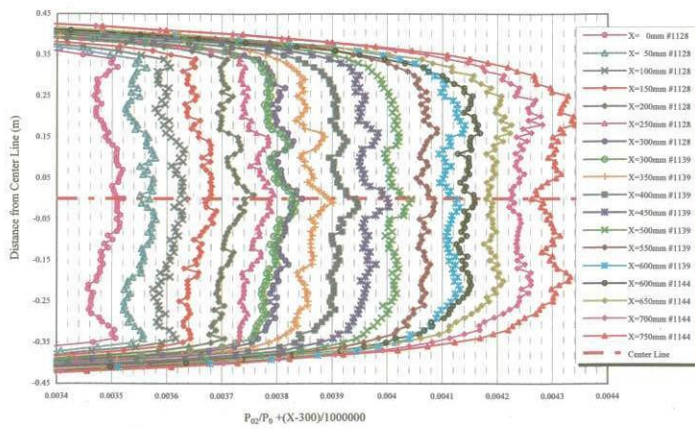
力分布を 図 5.12 に示す。よどみ点温度を 970K から下げていくと、中心軸上の測定点からピトー圧力が大きく減少すると共に減少領域が中心軸より外側へ広がっていく現象が見られた。これは凝固衝撃波が発生及び反射し、よどみ点温度の低下に従って発生位置や強度、流れに対する角度が変化していくためと考えられる。液化が生じた場合、等エントロピー流れの仮定が崩れるため、等エントロピー流れの式より求めたマッハ数は大幅に変化するので、これより液化を判断することができる。

(4) 液化限界

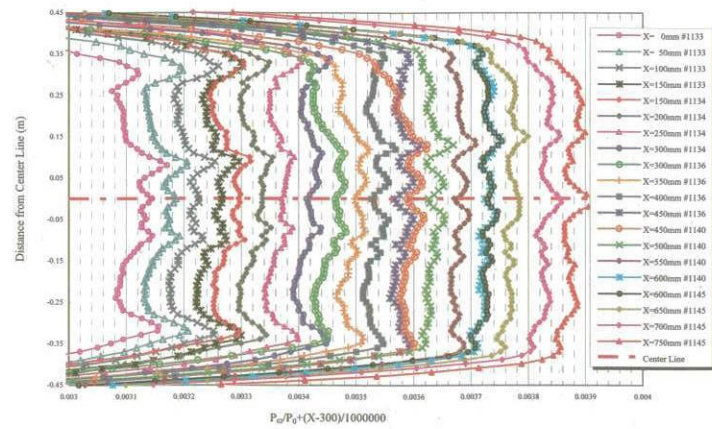
液化限界を探るため実施した試験ケースの液化/非液化の判定結果を図 5.13 に示す。液化したものを×印、液化しなかったものを○印で示す。図中には液化に対する飽和限界¹⁵⁾を実線で示す。急速に断熱膨張すると、飽和温度より低温になっても液化しない過飽和現象が生じ

る。過飽和状態のものを△印で示す。同図中には低温側校正領域の試験結果も併せて示す。低温側校正領域のよどみ点温度は飽和曲線より高く設定してある¹⁶⁾のでほとんど液化の問題はなかったが、 $P_0=6.0$ MPa のケースで一部、マッハ数の再現性が悪いものがあった。微量に残った残留水分が影響したと考えている。それも 1000K 以上に設定すればマッハ数再現性の問題は全く見られなかった。

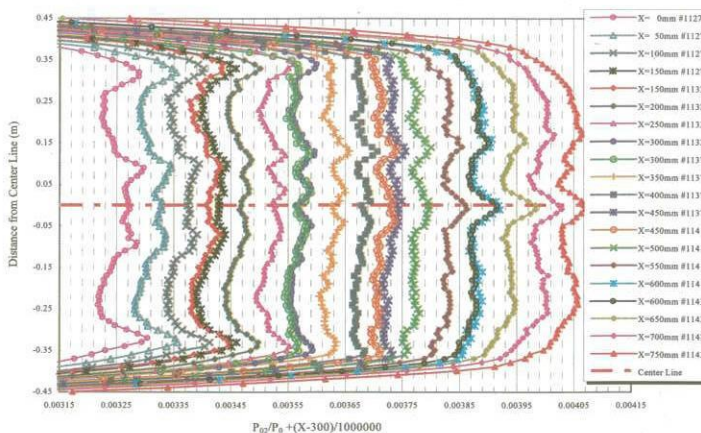
当極超音速風洞と同一直径で同等のノズル長さ、すなわち同等の過飽和条件を持つ AEDC 風洞で得られた液化開始曲線¹⁷⁾を破線で示す。この文献に示されている値は静温、静圧であるが、出口断面平均マッハ数よりよどみ点条件に逆算したものである。本試験で得られた液化境界は概ね AEDC の液化開始曲線と一致している。低温側校正領域でも運転は液化に対し余裕があると判断する。



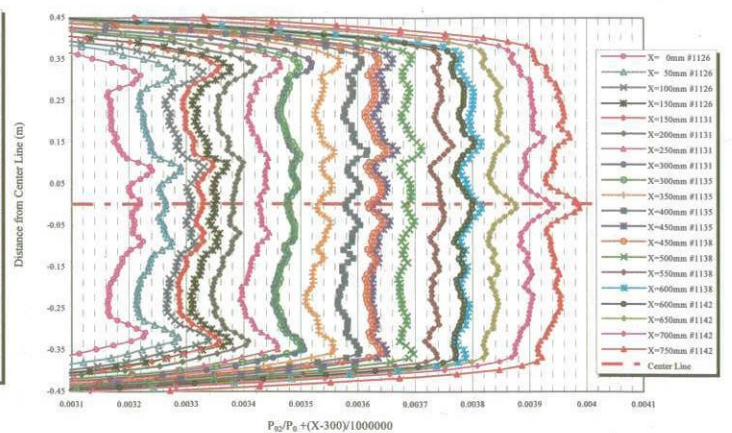
a $P_0=1.0$ MPa



c $P_0=4.0$ MPa

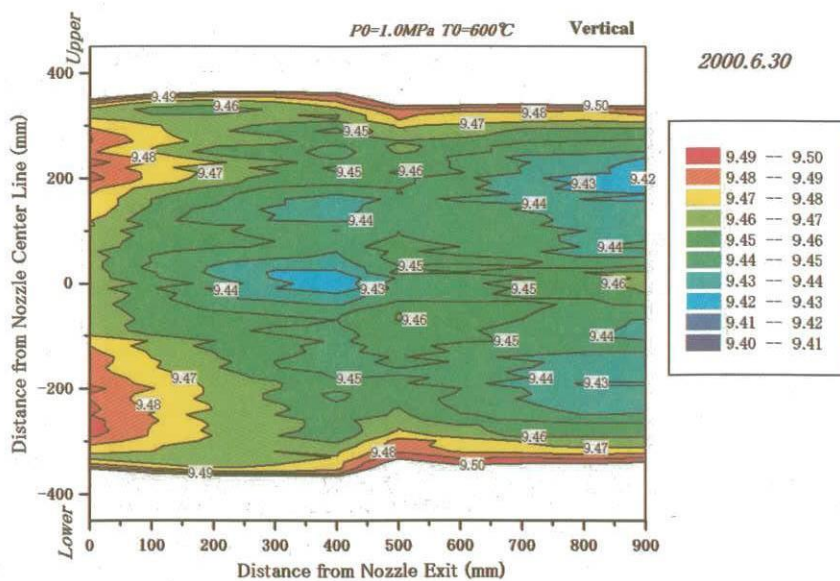


b $P_0=2.5$ MPa

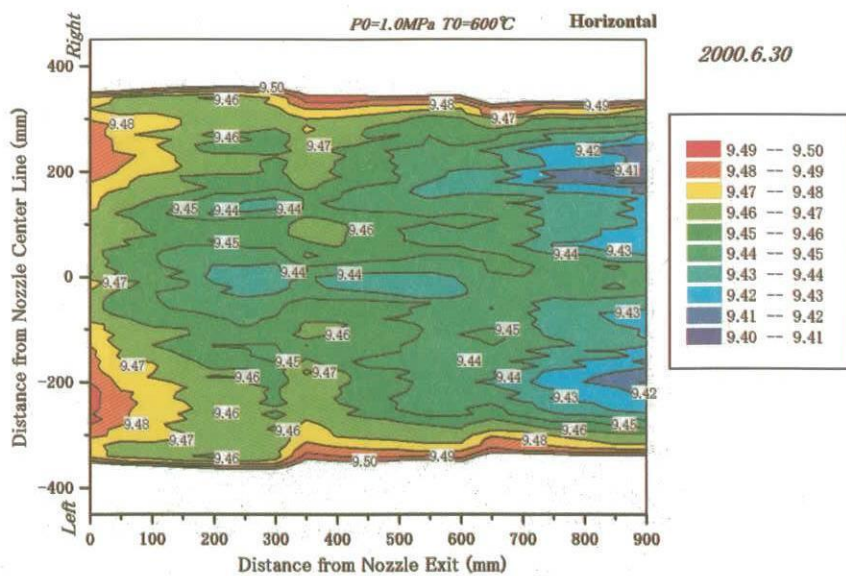


d $P_0=6.0$ MPa

図 5.7 低温側校正領域 ピトー圧分布の X 位置による変化

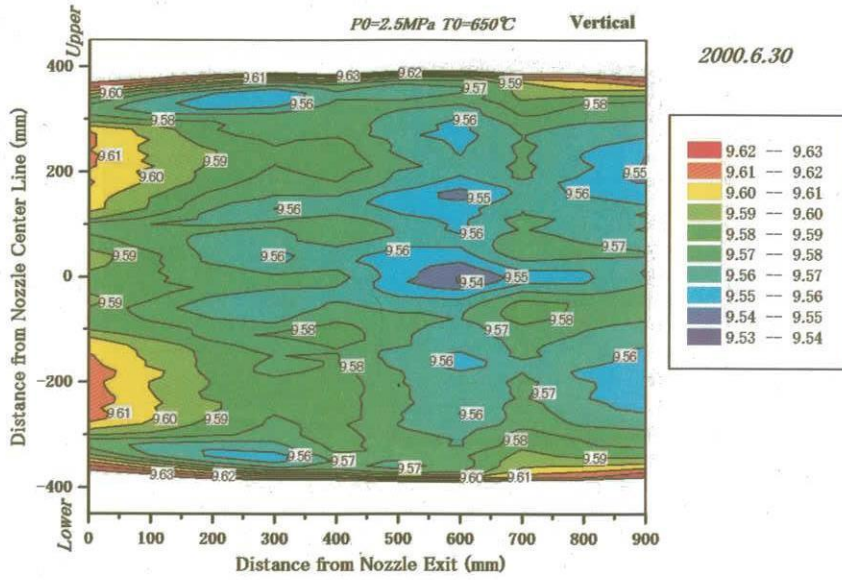


a 鉛直面分布

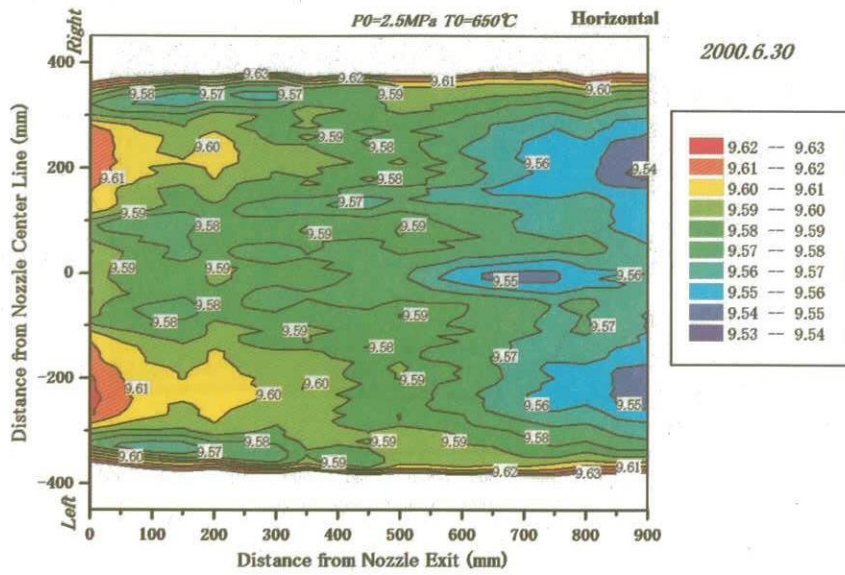


b 水平面分布

図 5.8 低温側校正領域 $P_0=1.0\text{MPa}$

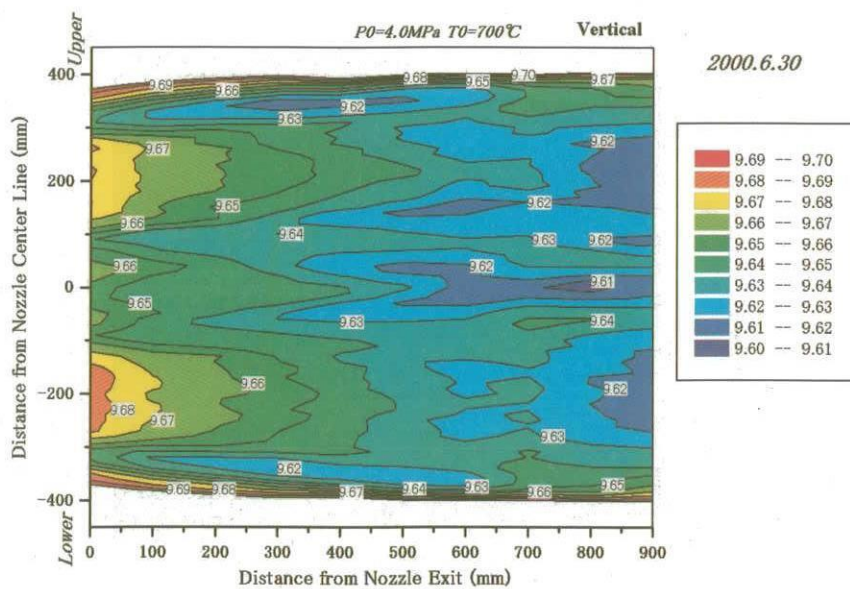


a 鉛直面分布

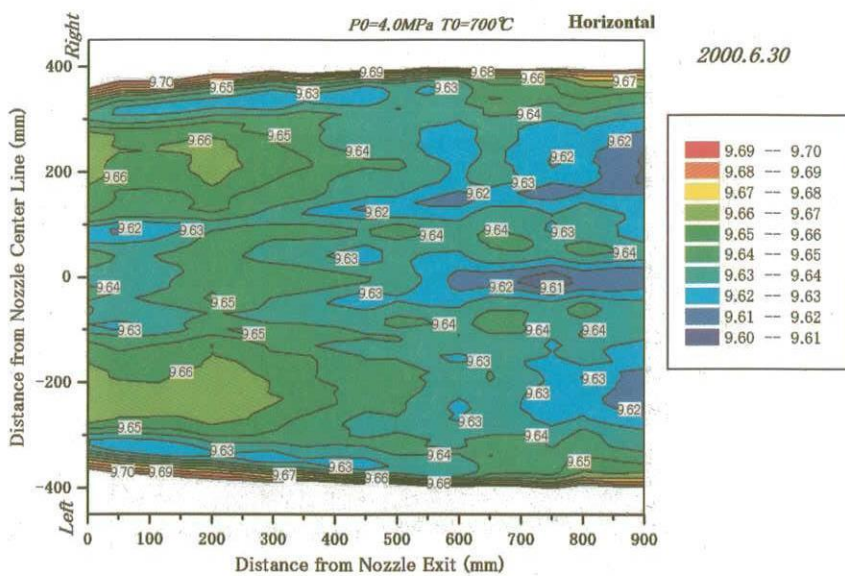


b 水平面分布

図 5.9 低温側校正領域 $P_0=2.5\text{MPa}$

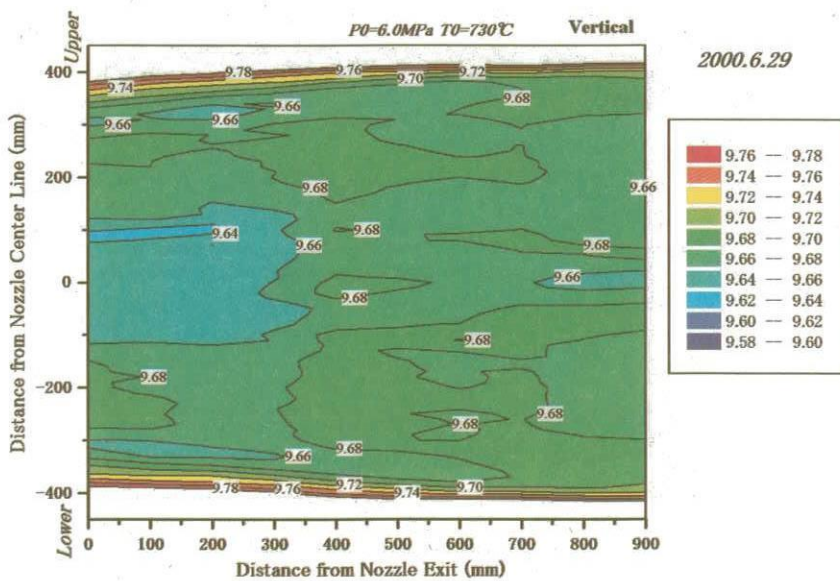


a 鉛直面分布

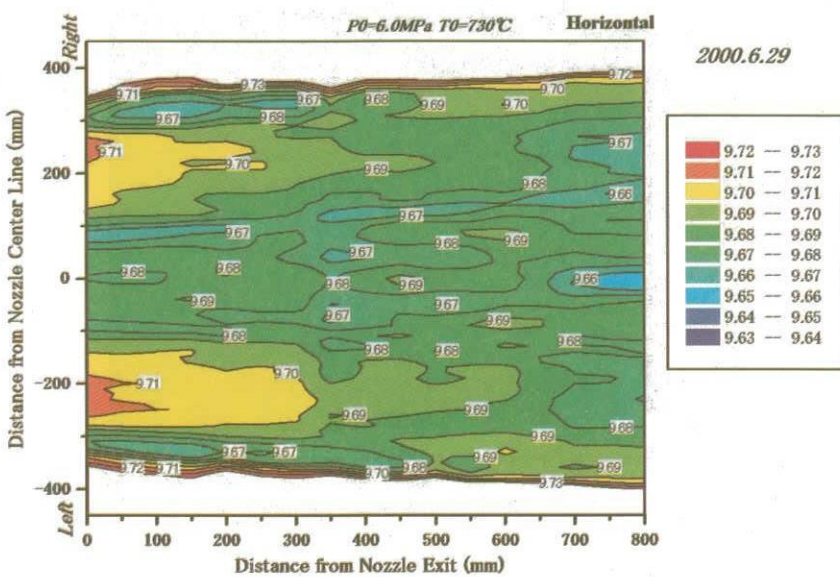


b 水平面分布

図 5.10 低温側校正領域 $P_0=4.0\text{MPa}$



a 鉛直面分布



b 水平面分布

図 5.11 低温側校正領域 $P_0=6.0\text{MPa}$

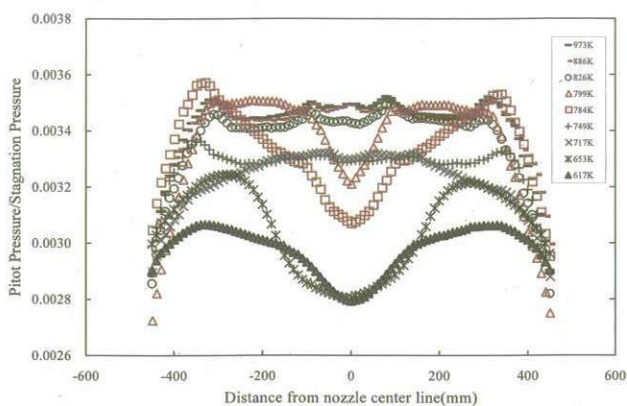


図 5.12 激み点温度を減少させた場合のピトー圧力の変化

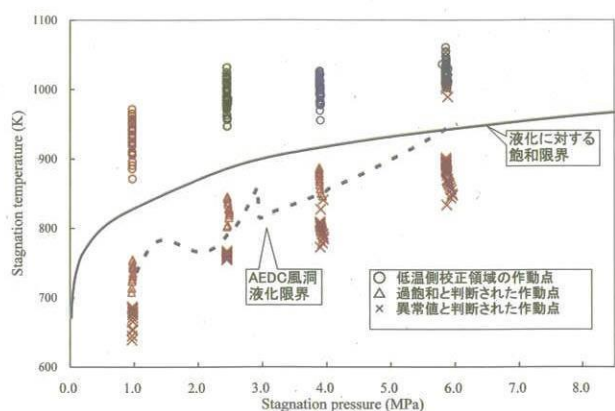


図 5.13 液化限界

6 誤差解析結果

表 6.1 にピトー圧力、よどみ点圧力、よどみ点温度の測定、及びマッハ数空間的分布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。偏り誤差は PCU 自身が持つ不確かさで、カタログによれば FS(5psi=34.5kPa) の 0.02% である。偶然誤差は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 (推定標準誤差: SEE) で 2000 年 5 月の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 96 個の要素センサーが埋

め込まれている。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、測定室雰囲気圧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。測定室の雰囲気圧をデジコーツでモニターしながら 5 段階: よどみ点圧力 1.0MPa、2.5MPa、4.0MPa、6.0MPa で試験を行った場合のそれぞれのピトー圧に相当する圧力を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。この要因としてはピトー管の振動、ESP 要素センサーのノイズ等がある。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。RUN1125 ($P_0=6.0\text{MPa}$) でトラバースせず同一箇所でも 10 Dataset の計測を 5 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 4.0MPa までの圧力範囲をカバーする 600psi(4.137MPa) タイプのもの、4.0MPa 以上の圧力範囲をカバーする 1700psi(11.722MPa) タイプのものが、試験によって使い分ける。次の偏り誤差、偶然誤差が存在し、1997 年 2 月の校正レポートにより見積もった。

偏り誤差: 校正基準となる重錘式圧力発生器自信が持つ不確かさ

偶然誤差: 取得した測定データに校正式 (1 次式) を当てはめた時に残る残差

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。RUN1144 ($P_0=1.0\text{MPa}$)、RUN1143 ($P_0=2.5\text{MPa}$)、RUN1142 ($P_0=4.0\text{MPa}$)、RUN1140 ($P_0=6.0\text{MPa}$) 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

温度センサーそのものが整流筒位置で静的に正しい値を検出するとしても応答遅れおよび温度センサー通過後の気流の熱ロスのため、必ずしもノズル出口でのよどみ点温度を測定していないおそれがある。このよどみ点温度測定の不確かさをよどみ点温度の時間履歴等から算出した。

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。RUN1144 ($P_0=1.0\text{MPa}$)、RUN1143 ($P_0=2.5\text{MPa}$)、RUN1142 ($P_0=4.0\text{MPa}$)、RUN1140 ($P_0=6.0\text{MPa}$)でのよどみ点温度時歴を用いて標準偏差を算出した。

6.4 マッハ数空間分布

前節で一樣流コア領域のマッハ数空間分布から平均値を算出した。平均値算出時の標準偏差は偶然誤差として扱った。表 5.1 に標準偏差を示す。

6.5 誤差総括

高温側校正領域の誤差解析結果を表 6.2 に、低温側校正領域の誤差解析結果を表 6.3 に、それぞれ示す。マッハ数の95%不確かさは0.3%前後で、そのほとんどはマッハ数の空間分布に起因する。次いでよどみ点温度の測定点での不確かさが大きな寄与を持つ。他の誤差は非常に小さい。

表 6.1 誤差要素

測定要素	誤差要素	偶然誤差		
		偏り誤差 正確度 (B)	精密度 (S)	
P_{00} 測定	圧力校正ユニット(PCU)	PCUの偏り誤差についてはカタログよりFS(5psi)の0.02% 7Pa	校正は直線回帰。 直線回帰における推定標準誤差(SEE) FS(5psi)の0.0037% 1.3Pa	$\nu=11-2=9$
	ESP個々のバラツキ	N.A.	RUN1096(通風なし)測定室の雰囲気圧を $P_0=1, 2.5, 4, 6\text{MPa}$ に対応する代表ピトー圧に設定、ESP全ポート(96ポート;レークに接続されていないものも含む)のFrame=16の3Dataset, 6Dataset, 10Datasetの平均値を求める。96ポートの値のバラツキからSEEを算出。5Pa	$\nu=96-1=95$
	時間的なバラツキ	N.A.	RUN1125(6MPa)でESP平均化数を決める通風を実施。Frame=2で64DataSetを計測、平均化数とSEEの関係を検討。一樣流コア±0.30m 以内のピトー圧は SEE=30Pa 64個平均を使うから $30\text{Pa} / \sqrt{64} = 4\text{Pa}$	$\nu=64-1=63$
P_0 測定	P_0 センサ校正	校正基準としての重錘式圧力発生器の最大誤差 FS(600psi)用: S/N433865 FSの50ppm 207 Pa FS(1700psi)用: S/N43980 同上 586 Pa	直線回帰における推定標準誤差(SEE) FS(600psi)用: S/N433865 0.2043psi 1409 Pa FS(1700psi)用: S/N43980 0.8532psi 5883 Pa	$\nu=11-2=9$
	時間的なバラツキ	N.A.	代表的通風データから、ピトー圧力測定のタイミングに合わせて取得した0.1秒キザミの測定値10個の標準偏差。 設定済み点圧力の0.05%	$\nu=10-1=9$
T_0 測定	T_0 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-C1602) ±0.5°C (0°C~600°C) ±0.0025*[°C] (600°C~1600°C) 800°Cで見積もって±2°C。基準接点+測温接点合わせて3K	N.A.	
	応答遅れ、熱ロス	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。これらの見積もりをよどみ点温度の時間履歴等から算出した。30K	N.A.	
	時間的なバラツキ	N.A.	代表的通風データから、ピトー圧力測定のタイミングに合わせて取得した0.1秒キザミの測定値10個の標準偏差。5K	$\nu=10-1=9$
マッハ数空間分布	空間的なバラツキ	N.A.	一樣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。	1000以上

表 6.2 高温側校正領域 誤差解析結果

測定要素	誤差要素	P ₀ = 2.5 MPa				P ₀ = 4 MPa				P ₀ = 6 MPa			
		代表値	感度係数 θ _i	偏り誤差 B _i , 偶然誤差 tS _i	マツハ数誤差 θ, B _i , or θ, tS _i	代表値	感度係数 θ _i	偏り誤差 B _i , 偶然誤差 tS _i	マツハ数誤差 θ, B _i , or θ, tS _i	代表値	感度係数 θ _i	偏り誤差 B _i , 偶然誤差 tS _i	マツハ数誤差 θ, B _i , or θ, tS _i
P ₀₂ 測定	圧力校正ユニット 偏り誤差	8.988kPa	0.2152	7.788E-04	1.676E-04	13.857kPa	0.2150	5.052E-04	1.086E-04	20.332kPa	0.2149	3.443E-04	7.399E-05
	圧力校正ユニット 偶然誤差			3.272E-04	7.041E-05			2.122E-04	4.563E-05			1.446E-04	3.108E-05
	ESP個々のバラツキ			1.113E-03	2.394E-04			7.217E-04	1.552E-04			4.918E-04	1.057E-04
	時間的なバラツキ			8.901E-04	1.915E-04			5.773E-04	1.241E-04			3.935E-04	8.456E-05
P ₀₁ 測定	P ₀₁ センサ校正 偏り誤差	2.5MPa	0.2172	8.280E-05	1.798E-05	4.0MPa	0.2181	5.175E-05	1.129E-05	6.0MPa	0.2193	9.767E-05	2.142E-05
	P ₀₁ センサ校正 偶然誤差			1.275E-03	2.769E-04			7.968E-04	1.738E-04			2.218E-03	4.864E-04
	時間的なバラツキ			1.131E-03	2.457E-04			1.131E-03	2.467E-04			1.131E-03	2.480E-04
T ₀₁ 測定	T ₀₁ センサ校正 偏り誤差	1050K	0.0371	2.857E-03	1.060E-04	1100K	0.0411	2.727E-03	1.121E-04	1100K	0.0418	2.727E-03	1.140E-04
	応答遅れ 熱ロス (偏り誤差)			2.857E-02	1.060E-03			2.727E-02	1.121E-03			2.727E-02	1.140E-03
	時間的なバラツキ			1.077E-02	3.996E-04			1.028E-03	4.226E-05			1.028E-02	4.298E-04
マツハ数 空間分布	空間的なバラツキ	9.55M	1.000	2.700E-03	2.700E-03	9.62M	1.000	2.800E-03	2.800E-03	9.68M	1.000	3.020E-03	3.020E-03
総括		B=1.078E-03 P=2.760E-03 U _{RSS} =2.964E-03 (0.028M)				B=1.132E-03 P=2.845E-03 U _{RSS} =3.062E-03 (0.029M)				B=1.148E-03 P=3.085E-03 U _{RSS} =3.292E-03 (0.032M)			

表 6.3 低温側校正領域 誤差解析結果

測定要素	誤差要素	P ₀ = 1 MPa				P ₀ = 2.5 MPa				P ₀ = 4 MPa				P ₀ = 6 MPa			
		代表値	感度係数 θ _i	偏り誤差 B _i , 偶然誤差 tS _i	マツハ数誤差 θ, B _i , or θ, tS _i	代表値	感度係数 θ _i	偏り誤差 B _i , 偶然誤差 tS _i	マツハ数誤差 θ, B _i , or θ, tS _i	代表値	感度係数 θ _i	偏り誤差 B _i , 偶然誤差 tS _i	マツハ数誤差 θ, B _i , or θ, tS _i	代表値	感度係数 θ _i	偏り誤差 B _i , 偶然誤差 tS _i	マツハ数誤差 θ, B _i , or θ, tS _i
P ₀₂ 測定	圧力校正ユニット 偏り誤差	3.811kPa	0.2153	1.837E-03	3.955E-04	8.929kPa	0.2151	7.840E-04	1.686E-04	13.953kPa	0.2149	5.017E-04	1.078E-04	20.580kPa	0.2148	3.401E-04	7.306E-05
	圧力校正ユニット 偶然誤差			7.716E-04	1.661E-04			3.293E-04	7.084E-05			2.108E-04	4.529E-05			1.429E-04	3.669E-05
	ESP個々のバラツキ			2.624E-03	5.649E-04			1.120E-03	2.409E-04			7.167E-04	1.540E-04			4.859E-04	1.044E-04
	時間的なバラツキ			2.099E-03	4.520E-04			8.960E-04	1.927E-04			5.734E-04	1.232E-04			3.887E-04	8.350E-05
P ₀₁ 測定	P ₀₁ センサ校正 偏り誤差	1.0MPa	0.2164	2.070E-04	4.479E-05	2.5MPa	0.2172	8.280E-05	1.798E-05	4.0MPa	0.2181	5.175E-05	1.129E-05	6.0MPa	0.2195	9.767E-05	2.144E-05
	P ₀₁ センサ校正 偶然誤差			3.187E-03	6.897E-04			1.275E-03	2.769E-04			7.968E-04	1.738E-04			2.218E-03	4.868E-04
	時間的なバラツキ			1.131E-03	2.447E-04			1.131E-03	2.457E-04			1.131E-03	2.467E-04			1.131E-03	2.483E-04
T ₀₁ 測定	T ₀₁ センサ校正 偏り誤差	920K	0.0285	3.261E-03	9.293E-05	1000K	0.0338	3.000E-03	1.014E-04	1000K	0.0343	3.000E-03	1.029E-04	1600K	0.0349	3.000E-03	1.047E-04
	応答遅れ 熱ロス (偏り誤差)			3.261E-02	9.294E-04			3.000E-02	1.014E-03			3.000E-02	1.029E-03			3.000E-02	1.047E-03
	時間的なバラツキ			1.229E-02	3.504E-04			1.131E-02	3.823E-04			1.131E-02	3.879E-04			1.131E-02	3.947E-04
マツハ数 空間分布	空間的なバラツキ	9.45M	1.000	2.760E-03	2.760E-03	9.58M	1.000	2.940E-03	2.940E-03	9.64M	1.000	2.720E-03	2.720E-03	9.68M	1.000	2.260E-03	2.260E-03
総括		B=1.015E-03 P=2.946E-03 U _{RSS} =3.116E-03 (0.030M)				B=1.033E-03 P=2.994E-03 U _{RSS} =3.167E-03 (0.031M)				B=1.040E-03 P=2.762E-03 U _{RSS} =2.951E-03 (0.030M)				B=1.055E-03 P=2.341E-03 U _{RSS} =2.568E-03 (0.026M)			

7 まとめ

1.27m 極超音速風洞の気流校正試験を行った。91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、計測する 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、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。不確かさ解析を実施、当該風洞の気流品質を同定した。

一様流コアとして、高温校正領域では直径 0.6m、長さ $X=0\sim 0.75\text{m}$ 、低温校正領域として直径 0.6m、長さ $X=0.10\text{m}\sim 0.90\text{m}$ と設定した。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 0.3%前後 ($\pm 0.03M$) 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 7.1 一様流コア領域のマッハ数と不確かさ

校正領域	一様流 コア	P_0 [MPa]	T_0 [K]	マッハ数 [-]	マッハ数の 95%不確かさ [-]	Re数 [1/m]
高温側	直径 0.6m 気流方向 $X=0\sim 0.75\text{m}$	2.5	1020~1100	9.55	± 0.03	1.6×10^6
		4.0	1070~1120	9.62	± 0.03	2.5×10^6
		6.0	1070~1120	9.68	± 0.03	3.6×10^6
低温側	直径 0.6m 気流方向 $X=0.1\sim 0.9\text{m}$	1.0	900~980	9.45	± 0.03	1×10^6
		2.5	900~1020	9.58	± 0.03	2×10^6
		4.0	900~1020	9.64	± 0.03	3×10^6
		6.0	900~1020	9.68	± 0.03	4.3×10^6

参考文献

- 1) 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)
- 2) 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)
- 3) 平林、榊原、原、永井、吉沢、小山、津田;大型極超音速風洞検定試験第一報 第55 風研(1995/11)
- 4) 永井、津田、小山、平林、関根;1.27m 極超音速風洞における水分管理 NAL TR-1436 (2001/12)
- 5) 榊原、関根、平林、小山、津田、永井;1.27M マッハ10 極超音速風洞の気流評価試験第43 回宇科技連講演会 (1999 / 10)
- 6) Sakakibara, Y.Inoue, Higashida, M.Inoue, Ishizaka, Korte, Lacey ; Modification of the NAL Hypersonic Wind-Tunnel Mach 10 Nozzle 92nd Supersonic Tunnel Association International (1999/10)
- 7) Lacey, Y.Inoue, Higashida, M.Inoue, Ishizaka, Korte ; Improvement of Flow Quality in NAL Chofu Mach 10 Nozzle AIAA 2002-0440 (2002/1)
- 8) Lacey, Y.Inoue, Higashida, M.Inoue, Ishizaka, Korte ; Mach 10 Hypersonic Nozzle: Improved Flow Quality J. of Spacecraft and Rockets Vol.40 (2003/1)
- 9) 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 (2003/4)
- 10) 永井伸治, 津田尚一, 小山忠勇, 平林則明, 渡利實, 関根英夫: 極超音速風洞における不確かさの表示と応用 航空宇宙学会論文集第53 巻 第622 号 (2005/11)
- 11) 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 (1987/11)
- 12) 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)
- 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) Boudreau; Performance and Operational Characteristics of AEDC/VFK Tunnels A, B, and C AEDC-TR-80-48 (1981)
- 15) G.T. Furukawa, R.E. McCosky; The Condensation Line of Air and the Heats of Vaporization of Oxygen and Nitrogen, NACA TN 2969, (1953/ 6)
- 16) A.Pope, K.L.Goin; High Speed Wind Tunnel Testing, John Wiley & Sons, Inc. (1965)
- 17) F.L. Daum, G. Gyarmathy; Condensation of Air and Nitrogen in Hypersonic Wind Tunnels, AIAA J. 6, 458-463 (1968)

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-05-041

発行 平成 18 年 3 月 17 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。

