

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

1m×1m 超音速風洞測定部の境界層計測

渡辺 光則, 飯島 秀俊, 佐藤 衛,
永井 伸治, 野村 陵

2009 年 2 月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

目 次

1. 記号.....	2
2. はじめに.....	2
3. ピトー圧(P_{02})分布計測.....	2
3. 1 計測位置.....	2
3. 2 模型.....	3
3. 3 計測装置.....	6
4. 計測結果.....	9
4. 1 ピトー圧(P_{02})分布	9
4. 1. 1 主要マッハ数における各計測位置の結果.....	9
4. 1. 2 楕形プローブ模型による干渉.....	9
4. 1. 3 ノズル形状変更による影響.....	9
4. 1. 4 CFD解析データとの比較.....	9
4. 1. 5 東西方向における2次元性.....	13
4. 2 境界層内部の速度分布.....	13
4. 2. 1 乱流境界層の速度分布特性との比較.....	13
4. 2. 2 境界層厚さ.....	14
4. 2. 3 主流範囲.....	14
5. まとめ.....	18
6. 謝辞.....	18
参考文献.....	18

1 m × 1 m 超音速風洞測定部の境界層計測*

渡辺光則*¹、飯島秀俊*¹、佐藤衛*¹、永井伸治*¹、野村陵*²

Measurement of the Boundary Layer Profiles in the Test Section of the 1m×1m Supersonic Wind Tunnel*

Mitsunori WATANABE*¹, Hidetoshi IJIMA*¹, Mamoru SATO*¹, Shinji NAGAI*¹
and Ryo NOMURA*²

Abstract

The uniform core flow of the JAXA 1 m x 1 m supersonic wind tunnel was defined as the region of 0.6 m x 0.6 m x 1.0 m. In this uniform core flow region, superior Mach number uniformities were achieved with the 2-Dimensional flexible nozzle at Mach numbers from 1.4 to 4.0. Although it is recommended to use in this region, some tunnel users want to do tests out of this region. In order to meet such requirement, the main flow region was determined by the pitot pressure distribution measurement within the boundary-layer of the tunnel walls. Since the flow in the test section was known to be vertically symmetric and two-dimensional, the measurement was taken place in the vertical direction only from the floor and the horizontal direction from the one side wall at four Mach numbers of 1.4, 2.0, 3.0 and 4.0. From the measurement results, it was determined that the boundary layer thicknesses were from 40 mm to 70 mm. In addition, the velocity distributions of the boundary layer both on the floor and the side wall showed good agreements with the turbulent boundary layer profiles estimated by the 1/7 power law.

Keywords: supersonic flow, wind tunnel, boundary layer thickness, velocity distribution

概 要

2次元可変ノズルを有するJAXA 1 m × 1 m 超音速風洞においては、測定部中心部の上下(鉛直)/東西(水平)方向:各600 mm及び気流方向:1,000 mmの領域を気流の一樣流範囲として、ユーザ試験に提供している。しかし、この範囲を超えた主流域での試験の要望も多い。このようなユーザ要望に対応するために、測定部中心の上下/東西方向における境界層厚さを計測して、主流範囲を確定することとした。境界層厚さは、ピトー圧(P₀₂)分布計測試験を実施して求めた。ピトー圧(P₀₂)の計測箇所は、測定部における気流の対称性(上下方向)及び2次元性(東西方向)が良好であるので、下壁/西壁の片側とした。本試験結果より、主要マッハ数M_∞=1.4、2.0、3.0及び4.0における測定部中心の境界層厚さ(δ)は、40 mm < δ < 70 mmであることが分かった。また、下壁側及び西壁側の境界層速度分布がいずれも平板乱流境界層の1/7乗則速度分布にほぼ一致することから、境界層の形態は完全な乱流境界層であることが分かった。

* 平成20年12月26日受付(Received 26 December, 2008)

*¹ 研究開発本部 風洞技術開発センター(Wind Tunnel Technology Center, Aerospace Research and Development Directorate)

*² 川崎重工工業株式会社(Kawasaki Heavy Industries, LTD.)

1. 記号

O	測定部内座標系の原点 (X=Y=Z=0、測定部出口より上流へ1,000mmの位置)
M	マッハ数
M_h	測定部中心(原点:O)より西壁方向の主流範囲
M_v	測定部中心(原点:O)より下壁方向の主流範囲
M_∞	一様流マッハ数
P_{02}	ピトー圧
$P_{02, e}$	P_{02} の無次元化に使用した基準値
P_∞	一様流静圧
Re_∞	一流レイノルズ数
u	流速
u_e	境界層外縁の流速
X, Y, Z	測定部座標系(右手系、+X: 気流進行方向、+Y: 西壁方向、+Z: 上壁方向)
y	測定部西壁面よりの距離
z	測定部下壁面よりの距離
γ	空気の比熱比(1.4)
δ	境界層厚さ
δ_y	測定部西壁の境界層厚さ
δ_z	測定部下壁の境界層厚さ

2. はじめに

JAXA 1 m × 1 m 超音速風洞¹⁾は、マッハ数 $M_\infty=1.4\sim 4.0$ 、レイノルズ数 $Re_\infty=2.3\sim 6.1\times 10^7$ [1/m] の吹出し風洞である。マッハ数 (M_∞) の設定は、上下に可撓壁を持つ2次元可変ノズルにより行われる。また、これに続く測定部は、寸法が縦1,000mm×横1,000mm×長さ1,800mmで、上下壁に5/1,000の境界層排除勾配を持つ。以上のような特徴を持つ本超音速風洞においては、測定部における気流の一様性が良好な範囲を、「一様流範囲」としてユーザ試験に提供している。その範囲は、測定部中心(測定部出口より1,000mm上流)より上下/東西方向に±300mm、気流方向±500mmである。ここでは、マッハ数(M_∞)の一様性について、「平均マッハ数の±0.5%以内」を概ね保証している。

しかし、ユーザ試験においては、この一様流範囲外すなわち境界層を除く主流域での試験の要望も多い。実際、過去に大型細長模型による空力特性(6分力計測)試験が行われた際、大迎角を取った模型が一様流範囲外にはみ出す事態が生じた。この時の6分力データにおいては、模型が一様流範囲内にある場合と比べて特異な傾向が示された。この原因は、境界層外縁で反射した衝撃波、または模型の境界層内への侵入による影響ではないかと疑われた。しかし、明確な境界層厚さのデータがなかったため、大迎角による

特異な空力特性なのか、または先に述べた影響によるものなのか結論に至らなかった。

上述のようなユーザ試験に対応するため、測定部中心の上下/東西方向における境界層厚さを計測して、主流範囲を確定することとした。境界層厚さは、ピトー圧(P_{02})分布計測試験を実施して求めた。ピトー圧の計測箇所は、測定部における気流の対称性(上下方向)及び2次元性(東西方向)が良好²⁾であるので、下壁/西壁の片側とした。また、下壁側については、測定部の入口及び中心の東西方向でも計測を実施した。

試験で取得したピトー圧分布については、CFD解析結果と比較した。また、ピトー圧データより速度分布を求め、境界層厚さを確定した。更に、速度分布を平板乱流境界層の1/7乗則速度分布と比較した。本報告では、これらの結果について報告する。

3. ピトー圧 (P_{02}) 分布計測

3.1 計測位置

図1に、1 m × 1 m 超音速風洞の2次元可変ノズル・測定部を示す。また、図2に、測定部内におけるピトー圧 (P_{02}) 分布計測の位置・範囲及び壁圧の計測位置を示す。測定部内座標系の原点(O)は、測定部出口より1,000mm上流の測定部中心である。なお、シュリーレン窓は、測定部中心の東西壁に設置されている。

図2に示すようにピトー圧分布計測の位置は、測定部中心の下壁付近(A1~A3)、西壁付近(B)及び測定部入口の下壁付近(C)である。それらの計測位置における計測範囲は、基本的に壁面より鉛直または水平方向へ120mmまでの区間である。但し、計測位置A1のみが壁面より150mmまでの区間である。

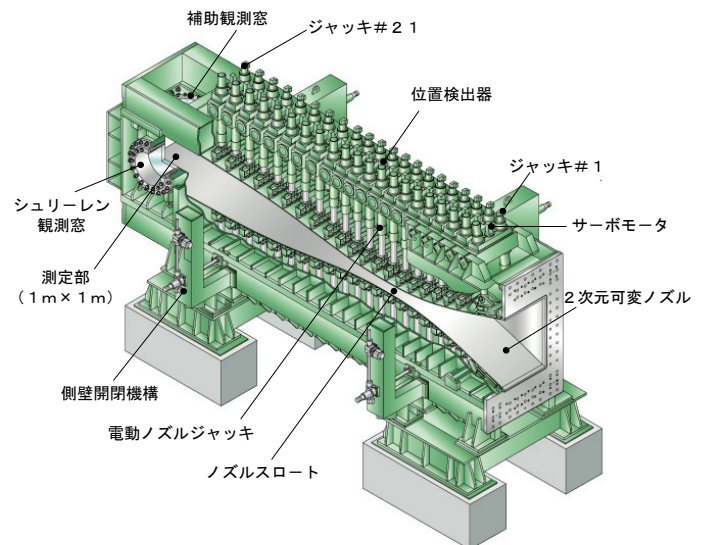


図1 2次元可変ノズル・測定部

φ0.5mmの壁圧孔 a1～a3及び b1～b3で取得した壁圧(静圧: P_{∞})は、ピトー圧分布計測位置A2及びBにおける境界層のマッハ数を計算する際に用いた。なお、ピトー圧と壁圧の同時計測においては、壁圧孔a2及びb2の壁圧にピトー圧分布計測用模型による影響が生じる。そのため、境界層のマッハ数計算に、それらの壁圧は使用していない。

西壁シュリーレン窓の中心より上流へ640mmの位置にある壁圧孔 s1～s3(φ0.5mm)は、風洞代表マッハ数(M_{∞})計算用の静圧を取得するための常設孔である。東壁の同位置にも同様な配置で3個の壁圧孔があり、合計6個の壁圧の平均値によりマッハ数計算がされている。

3.2 模型

ピトー圧(P_{02})分布計測には、図3.1から図3.3及び図4.1から図4.3に示すように移動式ピトープローブ模型を一式、及び楕形ピトープローブ模型を二式製作した。以下においては、これらの模型を「移動式プローブ模型」及び「楕形プローブ模型」の略称で記す。

(1) 移動式プローブ模型

図3.1及び図3.2に、それぞれ移動式プローブ模型全体と同模型の取付け状況を示す。

図3.1に示す移動式プローブ模型の主な構成部品は、①ピトープローブ・アーム部、②トラバース装置及び③チャンバである。

①ピトープローブ・アーム部

ピトープローブ・アーム部の製作にあたっては、JAXA第2遷音速風洞(2次元風洞)で使用されたピトープローブ模型と文献³⁾を参考とした。本プローブは、径の異なるSUS製パイプをロウ付けにより継ぎ合わせたもので、長さが80mmである。プローブの先端は、φ0.8mmのパイプを成形し、幅1.2mm×厚さ0.5mmの平たい形状とした。また、プローブのストロークは、測定部下壁面から150mmである。

アームの長さは全長350mmである。また、その断面は前縁が5mmの半円で、幅20mm×厚さ10mmである。アーム通過用穴とアーム間には、アームの動作性を高めるための約0.5mmの隙間がある。

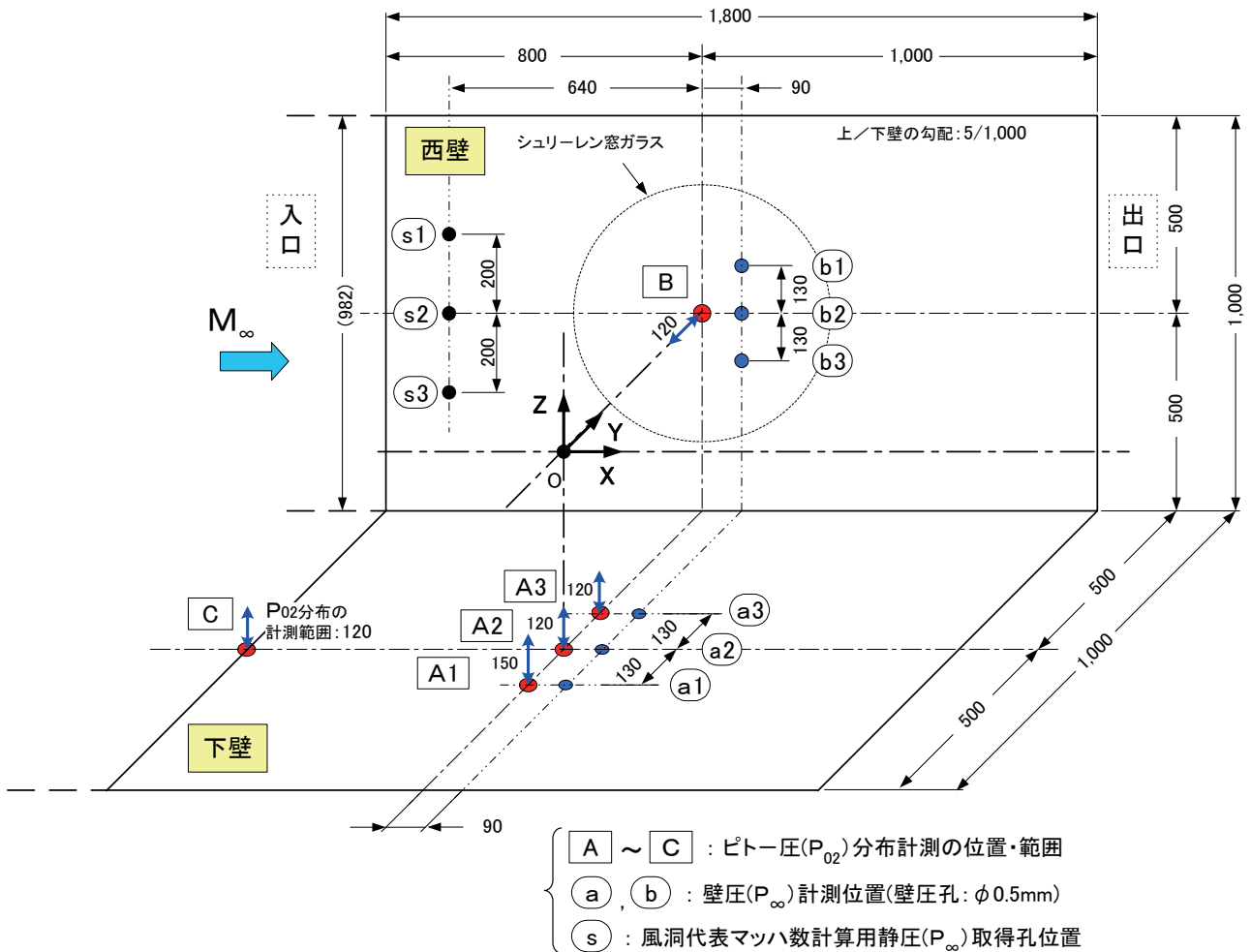


図2 測定部内におけるピトー圧(P_{02})分布及び壁圧(P_{∞})の計測位置(単位: mm)

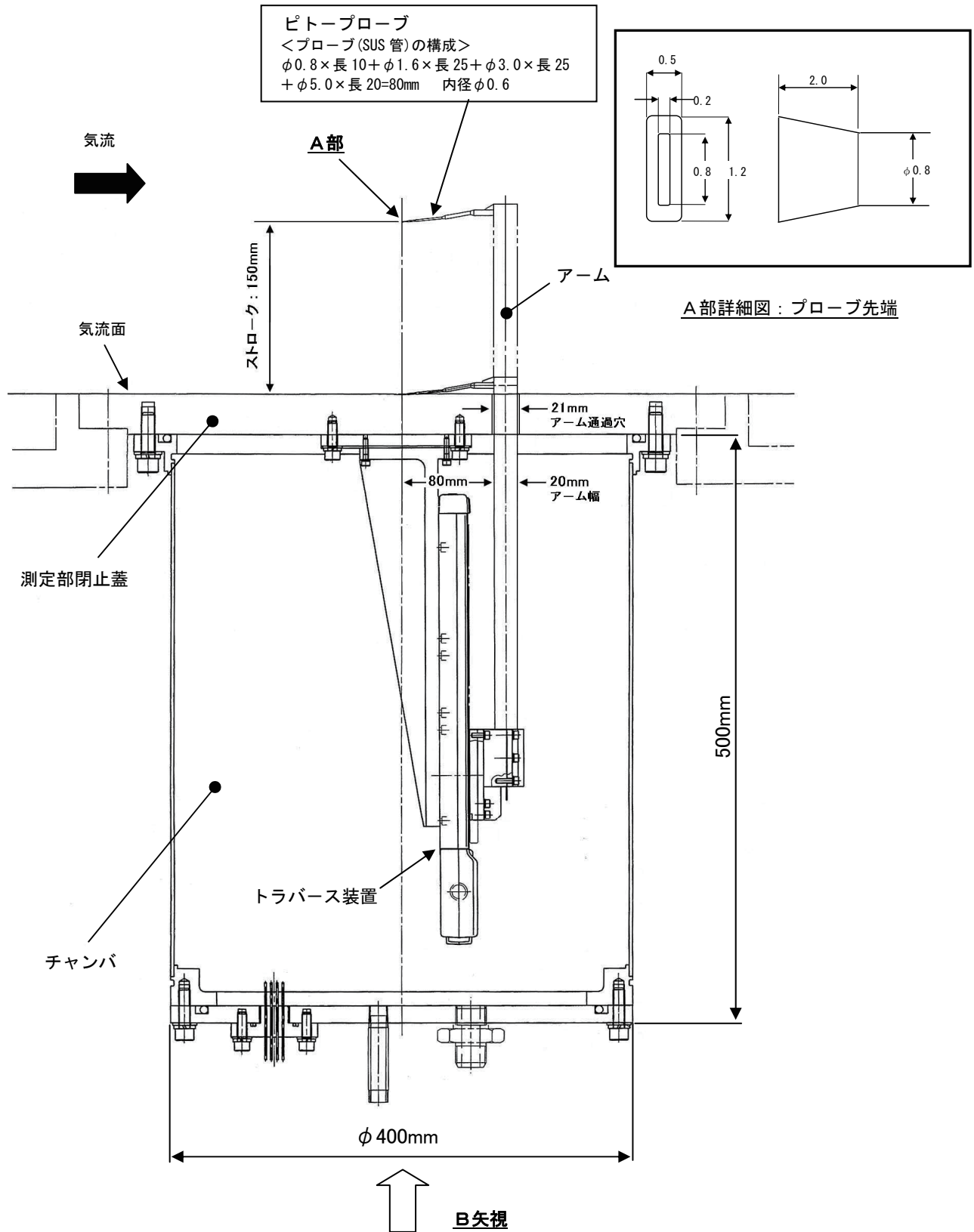


図 3.1 移動式プローブ模型全体(単位: mm)

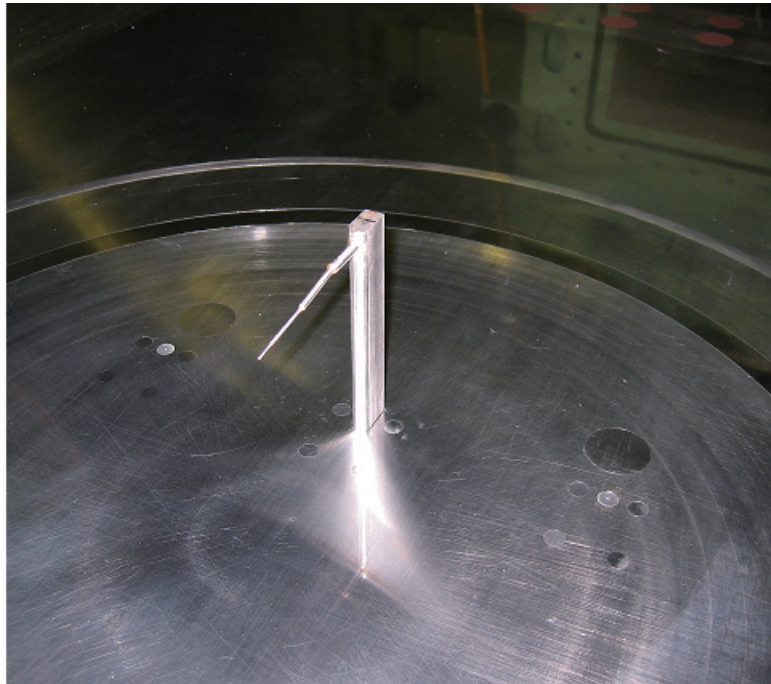


図 3.2 移動式プローブ模型取付け状況
(測定部中心部下壁：計測位置 A2)

②トラバース装置

トラバース装置には、ステッピングモータを駆動源とするシグマ光機製の「高剛性・精密型(X)軸ステージ(型式：SGSP26-200X)」を使用した。動作の制御は、専用コントローラ(型式：Mark-102)を介して市販のパソコン(PC)により行った。表1にトラバース装置の仕様を示す。

③チャンバ

図3.3に、測定部シュリーレン窓部に取付けたチャンバ外観写真を示す。上記①で述べたようにアーム通過用穴とアーム間には隙間があるので、測定部の気密を保つために外径400mm×長さ500mmのチャンバを設けた。通風中はチャンバ内の圧力がアーム通過用穴付近の壁圧(P_w)と同

程度になるように、以下の操作を行った。

- 1) 通風直前に真空ポンプでチャンバの排気を行い、チャンバ圧を通風時の壁圧程度まで下げる。
- 2) 通風開始後は真空ポンプを停止し、シュリーレン窓中心より下流へ720mmの位置における側壁の壁圧を、ホースを用いてチャンバ内に供給する。

移動式プローブ模型によるピトー圧分布計測は、図2に示す測定部中心の下壁付近(計測位置A2)及び西壁付近(計測位置B)で実施した。また、各主要マッハ数($M_\infty=1.4, 2.0, 3.0$ 及び 4.0)における境界層全域のピトー圧分布データ取得には、平均で4回の通風(ブロー)を要した。

表1 トラバース装置の仕様

型式/メーカー	SGSP26-200(X)/シグマ光機製
移動量	200 [mm]
モータ	5相ステッピングモータ
テーブルサイズ	80×80 [mm]
精密ボールネジ径/リード	φ8 [mm]、2 [mm] リード
位置決め精度	約0.02 [mm] 以下
最大移動量	200 [mm]
耐荷重	12 [kg]
質量	2.5 [kg]

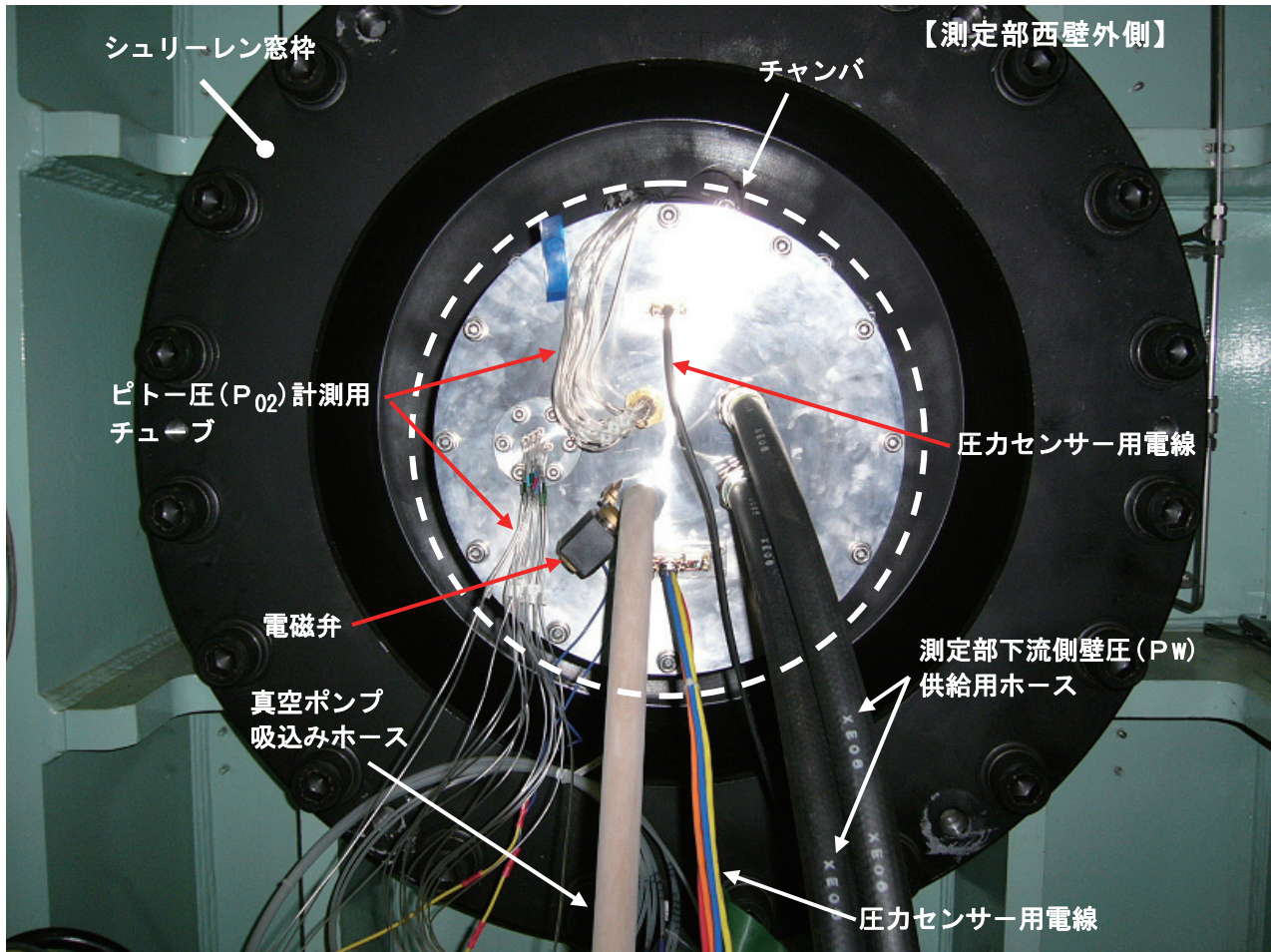


図 3.3 チャンバ外観写真(図 3.1 の B 矢視写真)

(2) 楕円プローブ模型

図 4.1 及び図 4.2 に、15 列の H120 及び H150 楕円プローブ模型の外観及び寸法を示す。また、図 4.3 には、H120 楕円プローブ模型の測定部下壁入口(計測位置 C)における取付け状況を示す。

H120 及び H150 楕円プローブ模型の違いは、図に示すように測定部下壁面よりの計測範囲(120mm/150mm)と、プローブの配置(間隔)が異なることである。プローブの寸法は、外径 1.0mm × 内径 0.5mm × 長さ 10mm、また、その材質は SUS 製である。プローブの間隔は一定でなく、3, 5, 10 及び 15mm の組み合わせで、測定部下壁面側が狭い。なお、楕円プローブ模型の取付け面には、プローブが測定部気流方向(X 軸)と平行になるように、測定部下壁の境界層補正勾配とは反対の 5/1, 000 の逆勾配を付けた。

3.3 計測装置

計測系統図と圧力センサーの性能表を、図 5 及び表 2 に示す。

移動式プローブ模型によるピトー圧(P_{02})計測、図 2 の a 1 ~ a 3 及び b 1 ~ b 3 の壁圧計測、及び図 3.1 のチャンバ内圧力の計測は、風洞計測システム⁴⁾を使用した。これらの計測における圧力センサーには、スキャニバルブ社製 PDCR23D(差圧型)を使用した。圧力レンジについては、図 5 及び表 2 に示すように 15psi 及び 50psi を使用した。なお、計測位置 s1 ~ s3 の風洞代表マッハ数計算用壁圧(P_w)の取得は、風洞常設の MKS 製バラトロン(絶対圧タイプ、圧力レンジ; 133kPa)で行われている。

楕円プローブ模型によるピトー圧計測は、スキャニバルブ社製の ZOC HyScan 2000 システム⁵⁾を用いて実施した。圧力センサーには、ZOC33 EPS モジュール(圧力レンジ; 50psi、ポート数; 64個)を用いた。

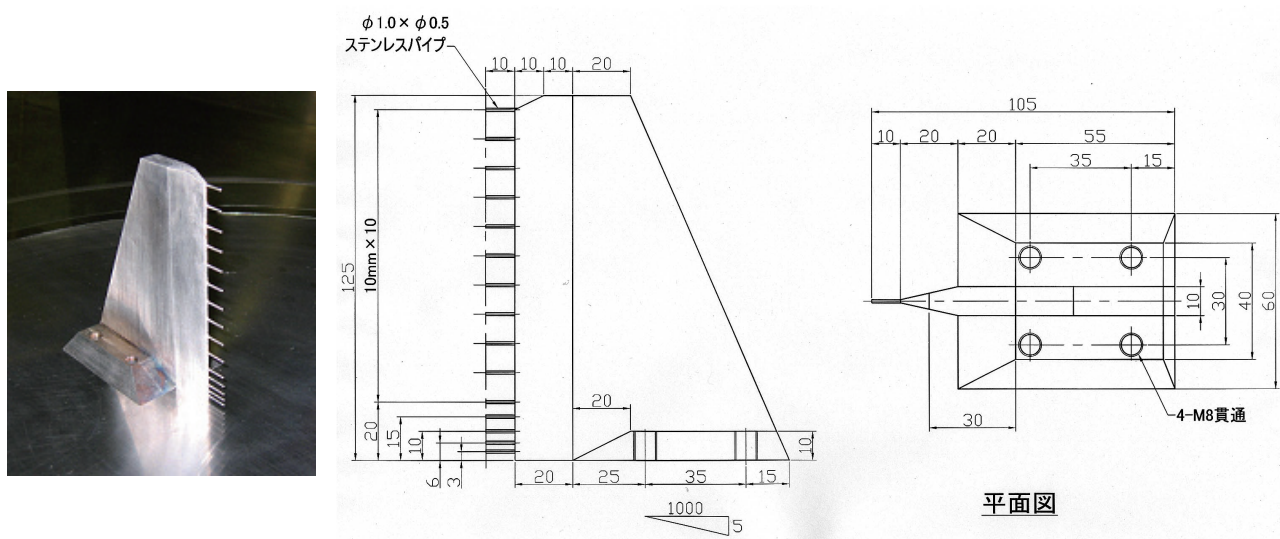


図 4.1 15 列-H120 楕形プローブ模型の寸法及び外観

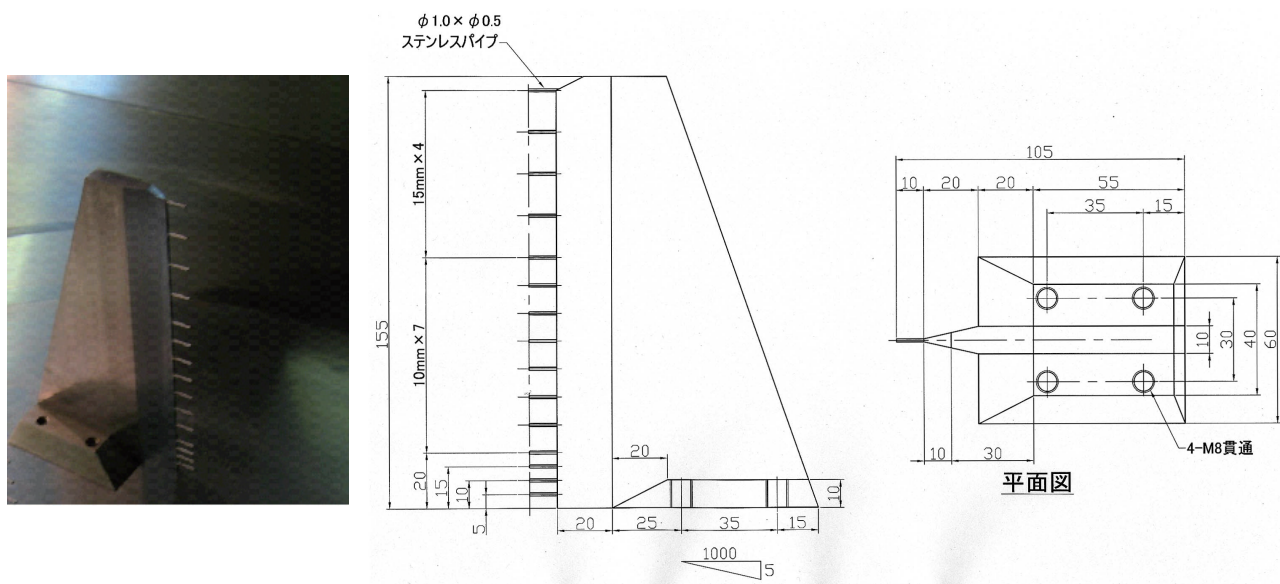


図 4.2 15 列-H150 楕形プローブ模型の寸法及び外観

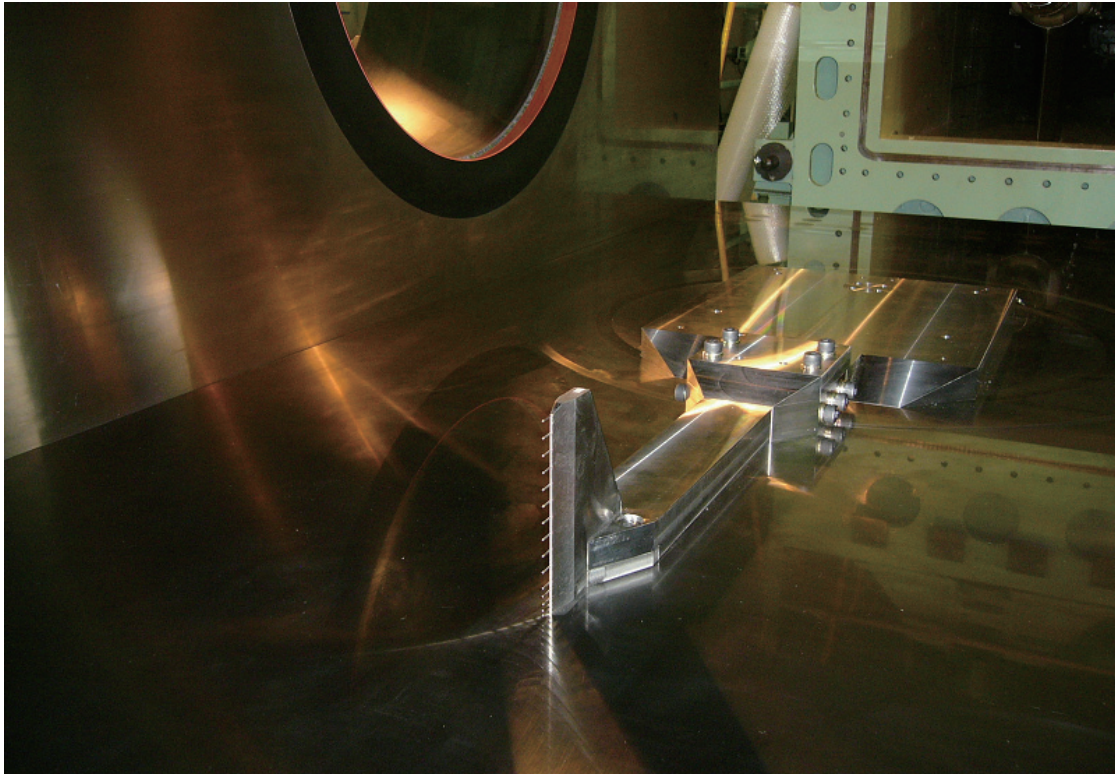


図 4.3 15 列-H120 楯形プローブ模型取付け状況
(測定部入口下壁：計測位置 C)

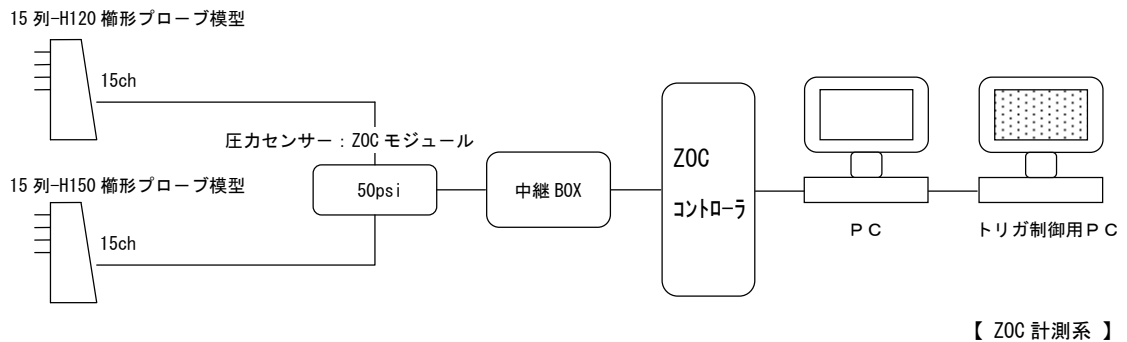
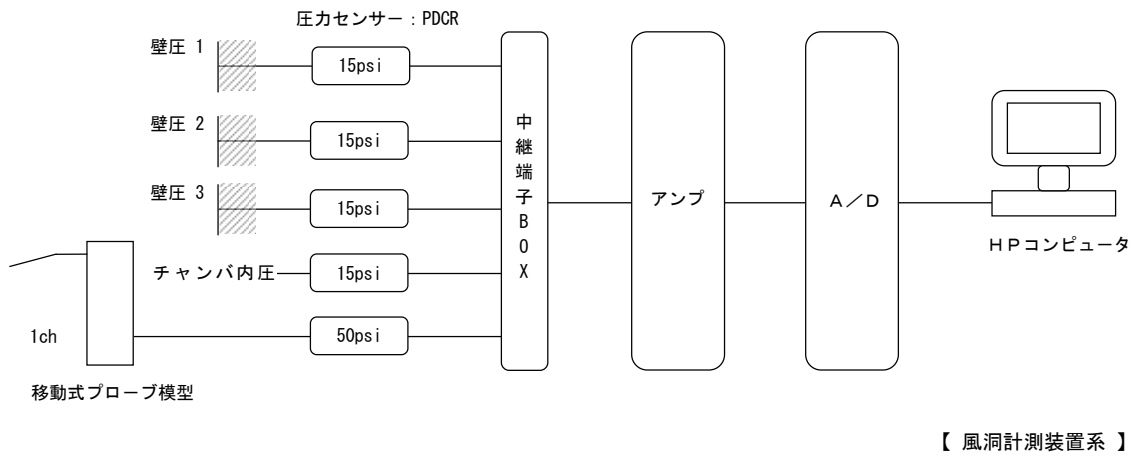


図 5 計測系統図

表2 圧力センサー性能表

型式	メーカー	レンジ[psi]	精度	基準圧
PDCR23D	スキャニバルブ社製	±15, ±50	±0.06% B. S. L.	大気圧
ZOC33 EPSモジュール	〃	±50	±0.08% F. S.	〃

4. 計測結果

4.1 ピトー圧(P_{02})分布

4.1.1 主要マッハ数における各計測位置の結果

図6から図8には、主要マッハ数 $M_{\infty}=1.4, 2.0, 3.0$ 及び 4.0 において、測定部中心下壁側の計測位置A2、測定部入口下壁側の計測位置C及び測定部中心西壁側の計測位置Bで取得したピトー圧(P_{02})分布を示す。また、図中にはCFDによるピトー圧分布の解析結果も示す。

測定部入口下壁側の計測位置Cには、移動式プローブ模型の取付けが困難であったため、H120楕形プローブ模型を用いた。

移動式プローブ模型によるピトー圧分布の計測点(y, z : 壁面よりの距離)は、H120楕形プローブ模型の計測点(y, z : 各プローブの壁面よりの距離)に一致させた。また、境界層外縁付近については、細かな間隔とした。

全体的に試験で取得したピトー圧分布は、 $M_{\infty}=1.4$ では弓状であるが、マッハ数が増加すると徐々に直線的となり、 $M_{\infty}=4.0$ ではほぼ直線または西壁側の場合のように反弓状となる。 $M_{\infty}=3.0$ 及び 4.0 のピトー圧分布は、圧縮性の影響を強く受けていると考える。

4.1.2 楕形プローブ模型による干渉

図7.1の測定部入口下壁側の計測位置Cにおける $M_{\infty}=1.4$ のピトー圧(P_{02})分布には、下壁面より $z=60\text{mm}$ の境界層外縁付近に膨らみがある。これと類似した膨らみは、図6.1の測定部中心下壁側の計測位置A2において、H120楕形プローブ模型を用いて計測したデータにも見られる。しかし、同計測位置で移動式プローブ模型を用いて計測した際には、この現象が見られないので、H120楕形プローブ模型自身の影響(模型による干渉)と考える。

図7.1に示す干渉領域の拡大図には、移動式プローブ模型で取得したデータとの比較を示す。この図より、H120楕形プローブ模型で取得したデータが干渉を受けている領域は、境界層外縁の内側付近である。

4.1.3 ノズル形状変更による影響

平成17年に、マッハ数 $M_{\infty}=1.4$ 及び 2.0 のノズル形状をわずかに変更した。図6.1から6.4に示すH120楕形プローブ

模型のピトー圧(P_{02})データは、このノズル形状変更後の平成18年に取得したものである。 $M_{\infty}=1.4, 2.0, 3.0$ 及び 4.0 の各マッハ数において、移動式プローブ模型と楕形プローブ模型で取得したピトー圧分布は、全体的にほぼ一致している。この結果より、ノズル形状変更による境界層への影響は殆どないと考える。

4.1.4 CFD解析データとの比較

図6から図8に示すCFD解析データは、3次元圧縮性NS解析コードで求めた結果を、近似曲線で補間したものである。

CFD解析は、全長9.5mの本超音速風洞ノズル・測定部内(可変ノズル部の長さ:7.7m、測定部の長さ:1.8m)主流域の解析^{6), 7)}を目的としたものである。使用した乱流モデルは、 $q-\omega$ 二方程式モデルである。 q 及び ω の定義は、以下の通りである。

- ・ q : 乱れ速度 (乱流エネルギー k に対して $q=k^{1/2}$)
- ・ ω : 単位エネルギー当たりの散逸率 (散逸率 ε に対して $\omega=\varepsilon/k$)

なお、主流域(非粘性域)の解析結果が試験結果と良く一致していることは、すでに報告^{8), 9)}されている。

図6.1から図6.4の測定部中心の下壁側において、CFD解析データと試験データを比較した場合、 $M_{\infty}=1.4$ では壁近傍より30mm位までは違いが見られるが、それ以降の40mmより120mmの区間では良く一致する。しかし、マッハ数が増加するに伴い壁近傍の不一致領域は上方に広がり、 $M_{\infty}=4.0$ では殆ど一致を見ない。また、図7.1から図7.4の測定部入口の下壁側について比較した場合にも、同部中心の下壁側と同様な傾向を示した。 $M_{\infty}=1.4$ の模型による干渉領域を除けば、 $M_{\infty}=1.4$ 及び 2.0 では、壁面側で多少異なる程度である。しかし、 $M_{\infty}=3.0$ 及び 4.0 では、境界層より外側の領域のみ一致している。一方、図8.1から図8.4の測定部中心の西壁側における比較では、上記の下壁側の傾向と同様に、マッハ数の小さい場合は比較的一致しているが、マッハ数の大きい場合は一致しなくなる。

このように主流領域の高精度解析を目的としたCFD解析では、境界層内部のピトー圧(P_{02})分布を十分に模擬していないことが分かった。この原因は、使用した乱流モデルの境界層プロファイル予測精度によるものと考えられる。

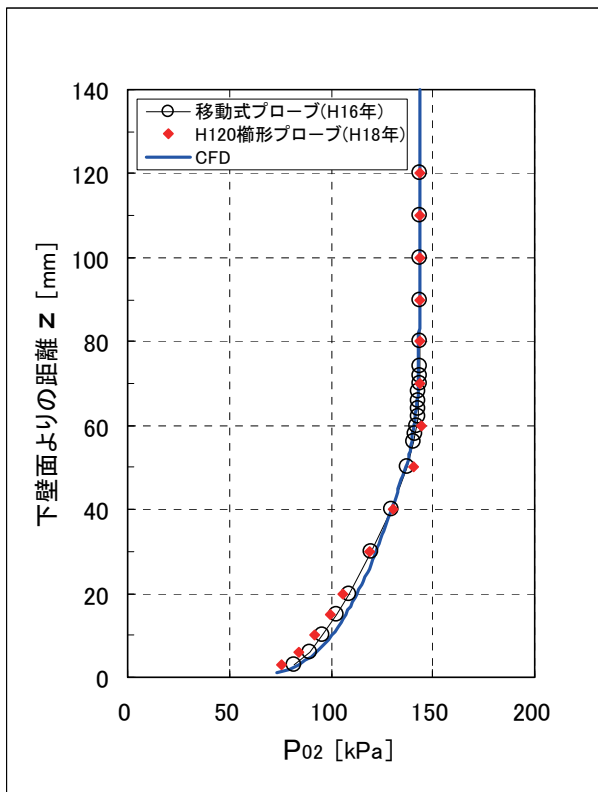


図 6.1 測定部中心下壁側のピトー圧 (P_{02}) 分布
($M_{\infty}=1.4$ 、計測位置:A2)

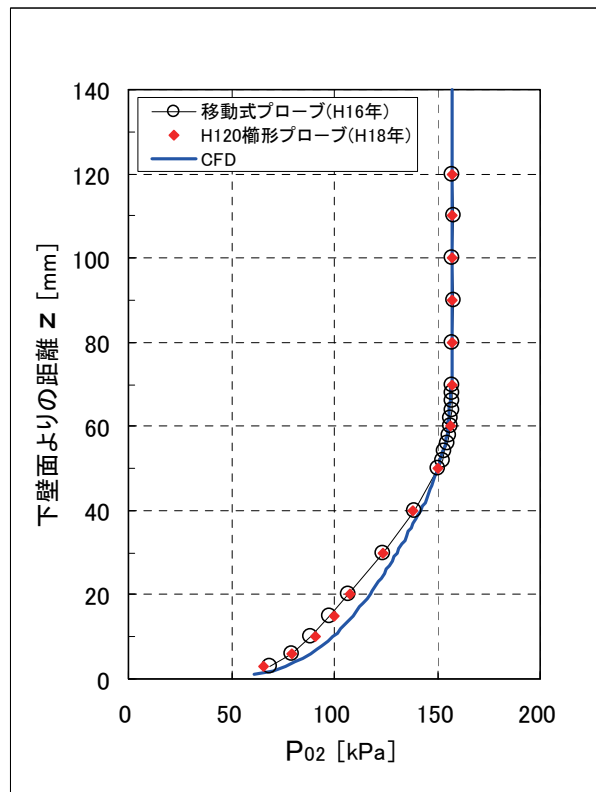


図 6.2 測定部中心下壁側のピトー圧 (P_{02}) 分布
($M_{\infty}=2.0$ 、計測位置:A2)

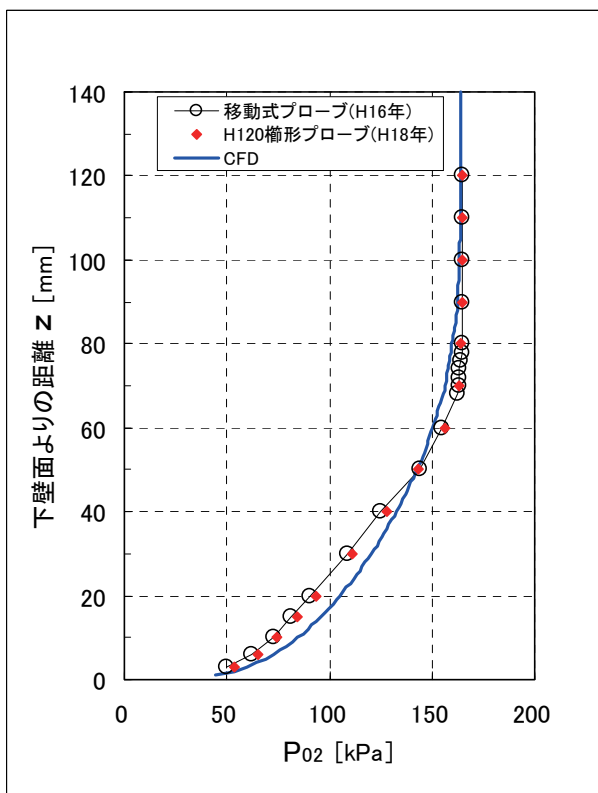


図 6.3 測定部中心下壁側のピトー圧 (P_{02}) 分布
($M_{\infty}=3.0$ 、計測位置:A2)

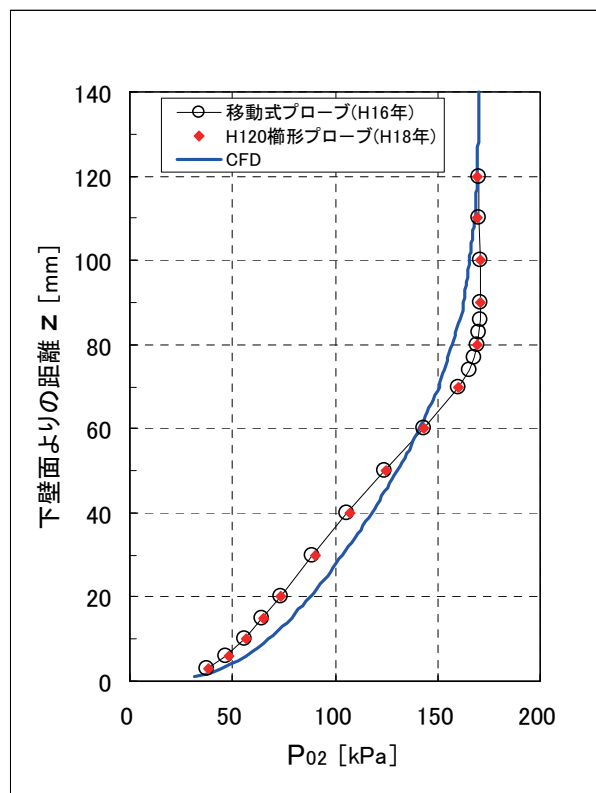


図 6.4 測定部中心下壁側のピトー圧 (P_{02}) 分布
($M_{\infty}=4.0$ 、計測位置:A2)

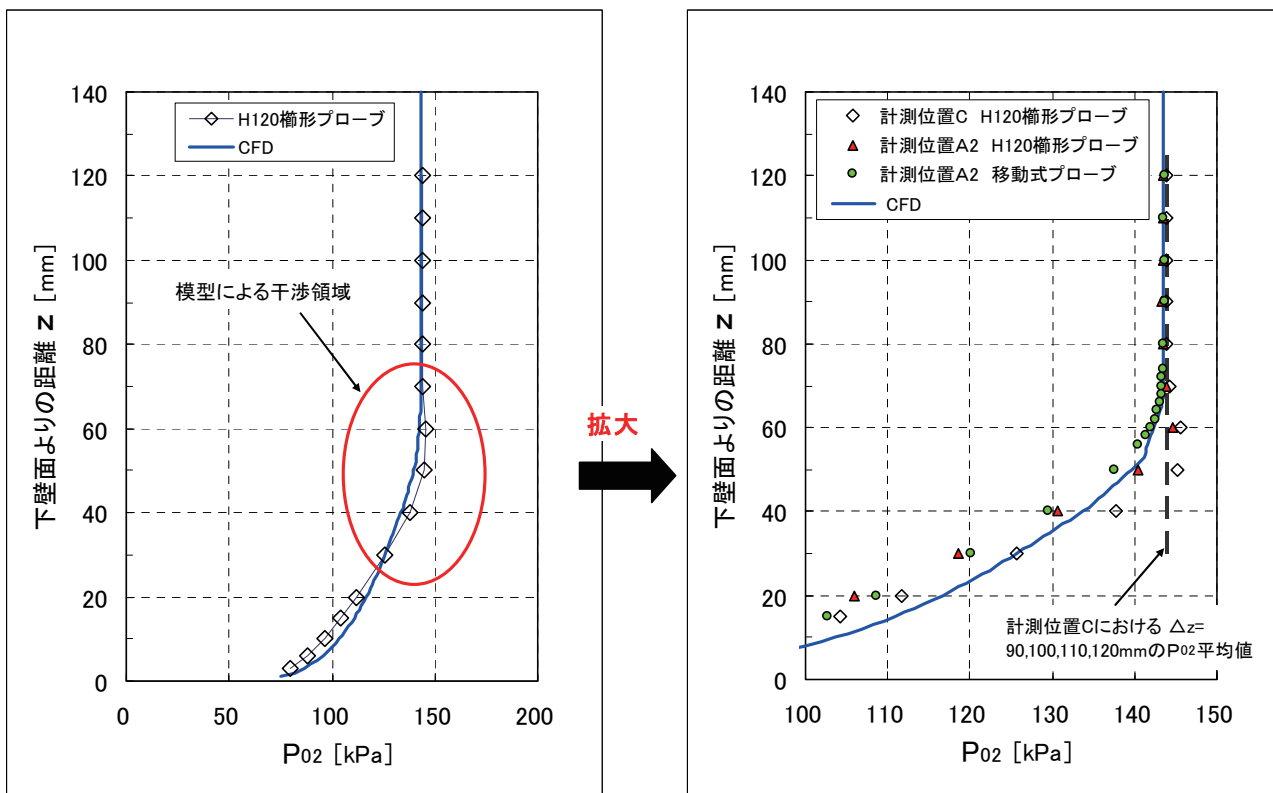


図 7.1 測定部入口下壁側のピトー圧(P_{02})分布
($M_{\infty}=1.4$ 、計測位置:C)

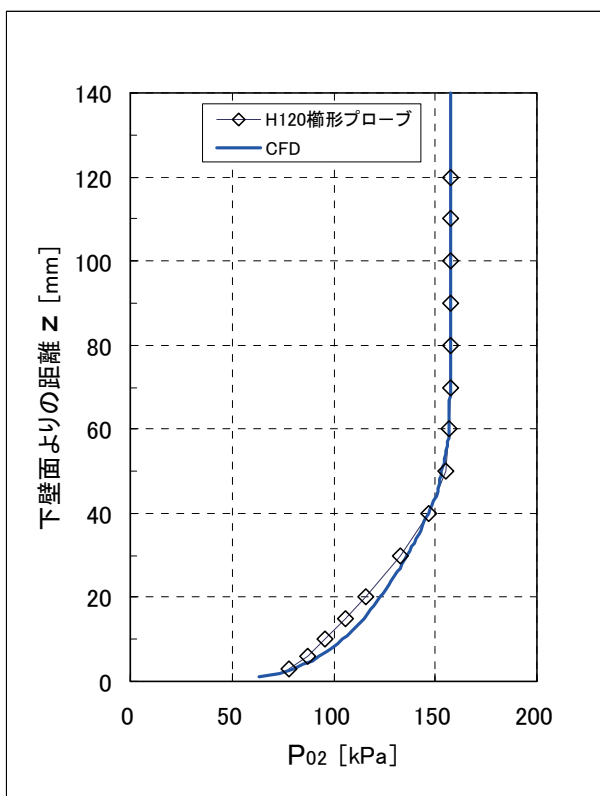


図 7.2 測定部入口下壁側のピトー圧(P_{02})分布
($M_{\infty}=2.0$ 、計測位置:C)

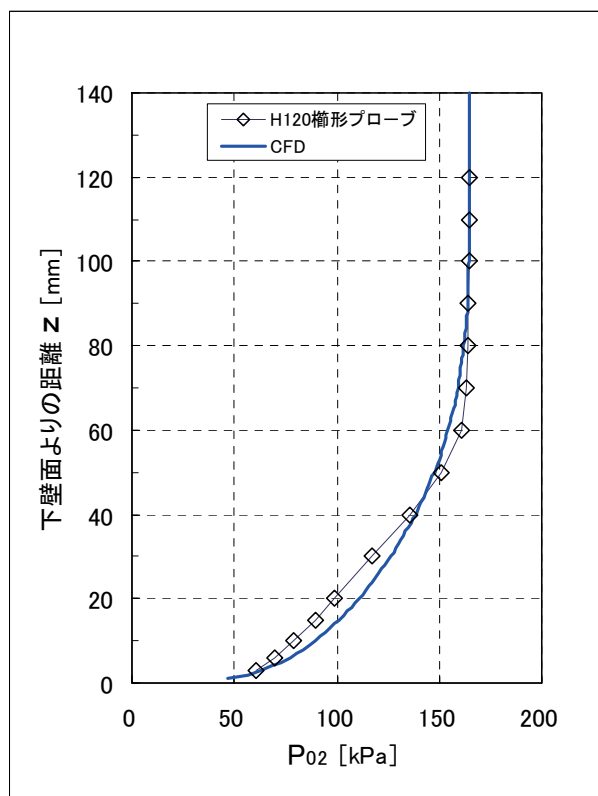


図 7.3 測定部入口下壁側のピトー圧(P_{02})分布
($M_{\infty}=3.0$ 、計測位置:C)

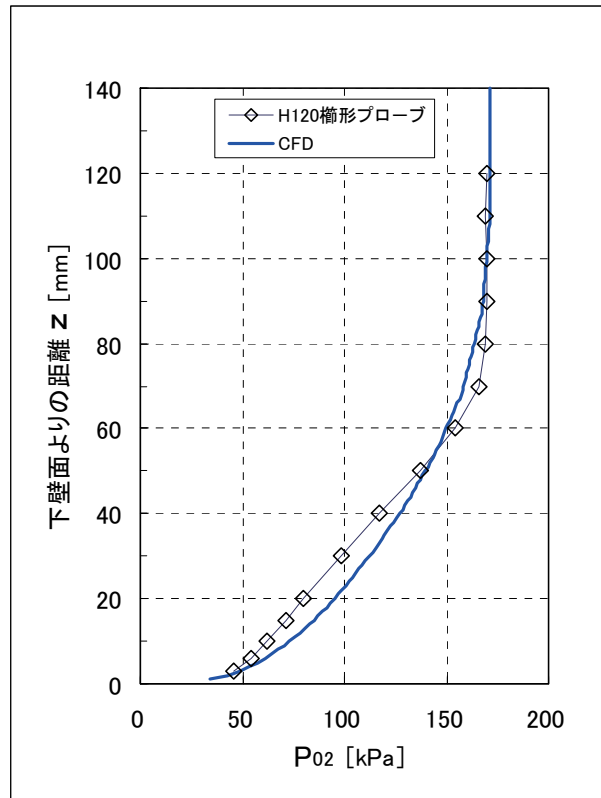


図 7.4 測定部入口下壁側のピトー圧(P_{02})分布
($M_{\infty}=4.0$ 、計測位置:C)

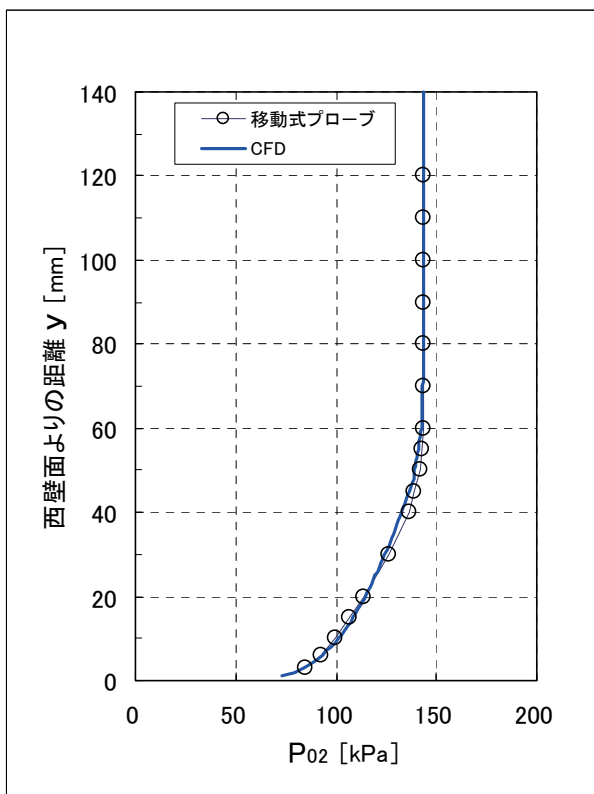


図 8.1 測定部中心西壁側のピトー圧(P_{02})分布
($M_{\infty}=1.4$ 、計測位置:B)

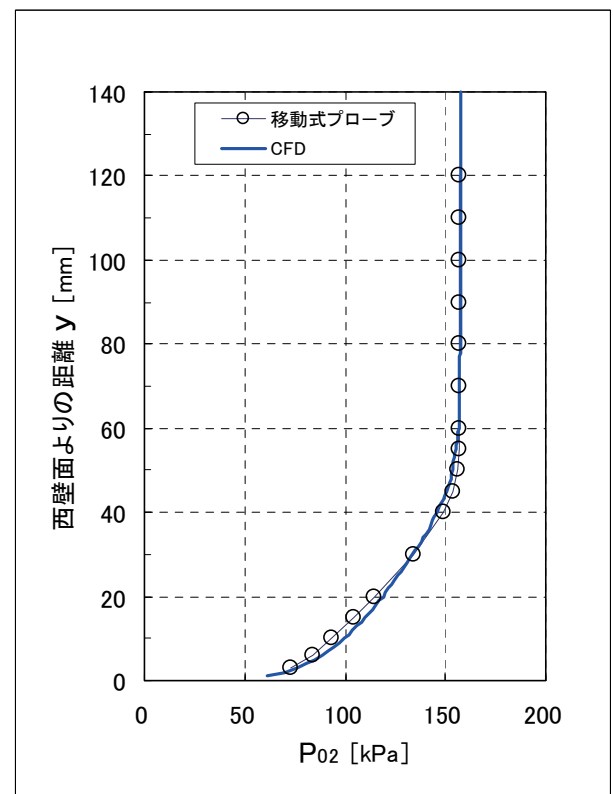


図 8.2 測定部中心西壁側のピトー圧(P_{02})分布
($M_{\infty}=2.0$ 、計測位置:B)

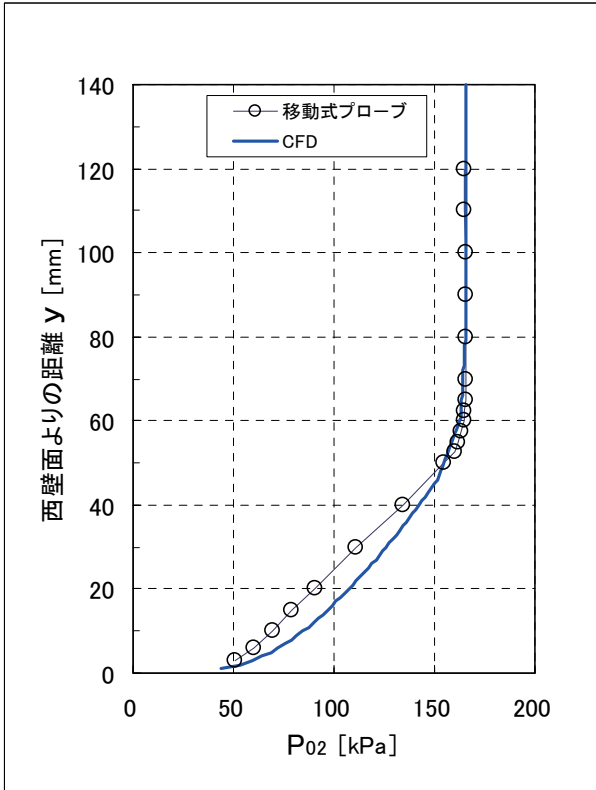


図 8.3 測定部中心西壁側のピトー圧(P02)分布 (M_∞=3.0、計測位置:B)

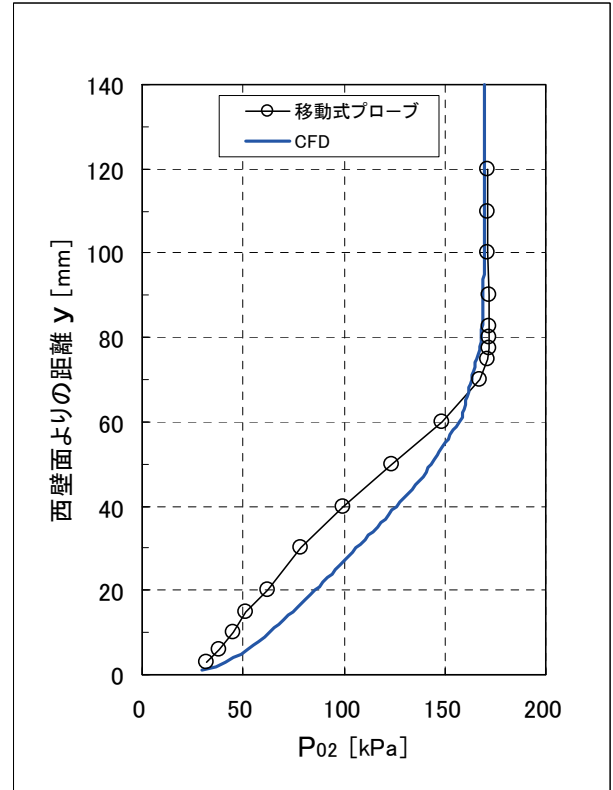


図 8.4 測定部中心西壁側のピトー圧(P02)分布 (M_∞=4.0、計測位置:B)

4.1.5 東西方向における2次元性

図9に示すように測定部中心下壁側、すなわち気流方向の中心X=0において、2個の楕円プローブ模型を用い東西方向におけるピトー圧(P02)分布の2次元性を調べた。2個の楕円プローブ模型の取付け位置は、東西方向の中心Y=0に対して、それぞれ東西へ130mmの位置(計測位置A1及びA3)である。各計測位置で使用した模型は、東側の計測位置A1:H150楕円プローブ模型、西側の計測位置A3:H120楕円プローブ模型である。

図10.1から図10.6に、東西方向におけるピトー圧分布の比較を示す。図に示すマッハ数M_∞=1.4、2.0、3.0及び4.0については、東西方向の中心(Y=0)の計測位置A2のデータも加えて比較した。また、M_∞=2.5及び3.5については、計測位置A1とA3のみの比較である。データの無次元化に使用した基準値「P02,e」は、計測位置3カ所(A1, A2, A3)の比較では、図中の計測位置A2のピトー圧データとした。また、計測位置2カ所(A1, A3)の比較では、図中の計測位置A1のピトー圧データとした。「P02,e」の下壁面よりの距離(z)は、M_∞=1.4より2.5ではz=80mm、M_∞=3.0より4.0ではz=90mmである。

図に示す計測位置2カ所及び3カ所の比較において、それぞれのピトー圧分布は良く一致している。従って、M_∞=1.4、2.0、2.5、3.0、3.5及び4.0のいずれのマッハ数においても、東西方向の2次元性は良好であると言える。

4.2 境界層内部の速度分布

4.2.1 乱流境界層の速度分布特性との比較

試験で取得したピトー圧(P02)データより、境界層速度分布を求め、乱流境界層の1/7乗則速度分布¹⁰⁾と比較した。

図11.1及び図11.2に、測定部中心の下壁付近(計測位置A2)及び西壁付近(計測位置B)の境界層速度分布を速度比(流速比)で示す。これらの図の中には、平板上における乱流境界層の1/7乗則速度分布を示した。

流速比は、以下の(1)及び(2)の手順で求めた¹¹⁾。

(1)移動式プローブ模型で取得したピトー圧(P02)と静圧(P_∞)として測定した壁圧より、下記の(1.1)及び(1.2)式を用いて境界層マッハ数分布を求める。

①M_∞ ≤ 1 の場合

$$\frac{P_{02}}{P_{\infty}} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \tag{1.1}$$

②M_∞ > 1 の場合

$$\frac{P_{02}}{P_{\infty}} = \left(\frac{\gamma + 1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \left(\frac{\gamma + 1}{2\gamma M^2 - \gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \tag{1.2}$$

(2)境界層内の温度が一定且つ境界層外縁の淀み点温度に一致するものと仮定して、下記の(1.3)式より流速比を求める。

$$\frac{u}{u_e} = \frac{M}{M_e} \sqrt{\frac{1 + \frac{\gamma-1}{2} M_e^2}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2}} \quad (1.3)$$

縦軸の正規化に用いた境界層厚さ^{12), 13)} (西壁側: δ_y 、下壁側: δ_z)は、壁面から主流域に向かって、流速(u)が境界層外縁の流速(u_e)の99%に達する位置までの距離(西壁側: y 、下壁側: z)とした。壁圧については、下壁側では計測位置 a1と a3の平均値を、西壁側では計測位置 b1と b3の平均値を使用した。

図11.1に示す気流方向に対して5/1,000の開き角を持つ下壁側においては、 $M_\infty=1.4, 2.0, 3.0,$ 及び4.0の主要マッハ数の各速度分布は、全体的にほぼ一致している。また、それらの速度分布を1/7乗則速度分布と比較すると、壁面からの距離(z)と境界層厚さ(δ_z)の比 $z/\delta_z=0.4$ 以下ではやや大きめであるが、その他の部分では良く一致している。

図11.2に示す気流方向に対して平行な(開き角を持たない)西壁側においては、 $M_\infty=1.4$ 及び2.0の速度分布は上記の下壁側の場合と殆ど同じように、ほぼ一致し且つ1/7乗則速度分布に対しても同様な傾向を示す。また、 $M_\infty=3.0$ 及び4.0の速度分布は、 $M_\infty=1.4$ 及び2.0に一致しないが、

1/7乗則速度分布に対しては、全体的にほぼ一致する。

以上より、境界層は十分に乱流に発達していることが分かった。

4.2.2 境界層厚さ

図12に、上記で求めた主要マッハ数 $M_\infty=1.4, 2.0, 3.0,$ 及び4.0の境界層厚さ(δ)を示す。測定部中心の下壁側及び西壁側における境界層厚さは、主要マッハ数 $M_\infty=1.4$ から4.0において $40\text{mm} < \delta < 70\text{mm}$ である。

下壁の境界層厚さは、マッハ数の増加と共にほぼ直線的に増加している。これに対して西壁側では、 $M_\infty=1.4$ 及び4.0において、下壁側の厚さとほぼ一致しているが、 $M_\infty=2.0$ 及び3.0では10mm程度薄い。

4.2.3 主流範囲

前項で求めた境界層厚さを用いて、測定部中心(原点: O)より下壁/西壁方向の主流範囲を確定した。それらの結果を表3に示す。主要マッハ数 $M_\infty=1.4, 2.0, 3.0,$ 及び4.0において、測定部中心より下壁(M_v)/西壁(M_w)方向における主流範囲は、各々 $425\text{mm} < M_v < 450\text{mm}$ 及び $435\text{mm} \leq M_w < 460\text{mm}$ である。なお、測定部中心より下壁面までの寸法は495mm、また、西壁面までの寸法は500mmである。

測定部中心(原点: O)より上壁/東壁方向の主流範囲は、気流の対称性(上下方向)及び2次元性(東西方向)が良好であることから、上記で確定した下壁側及び西壁方向の主流範囲に、各々ほぼ一致すると考える。

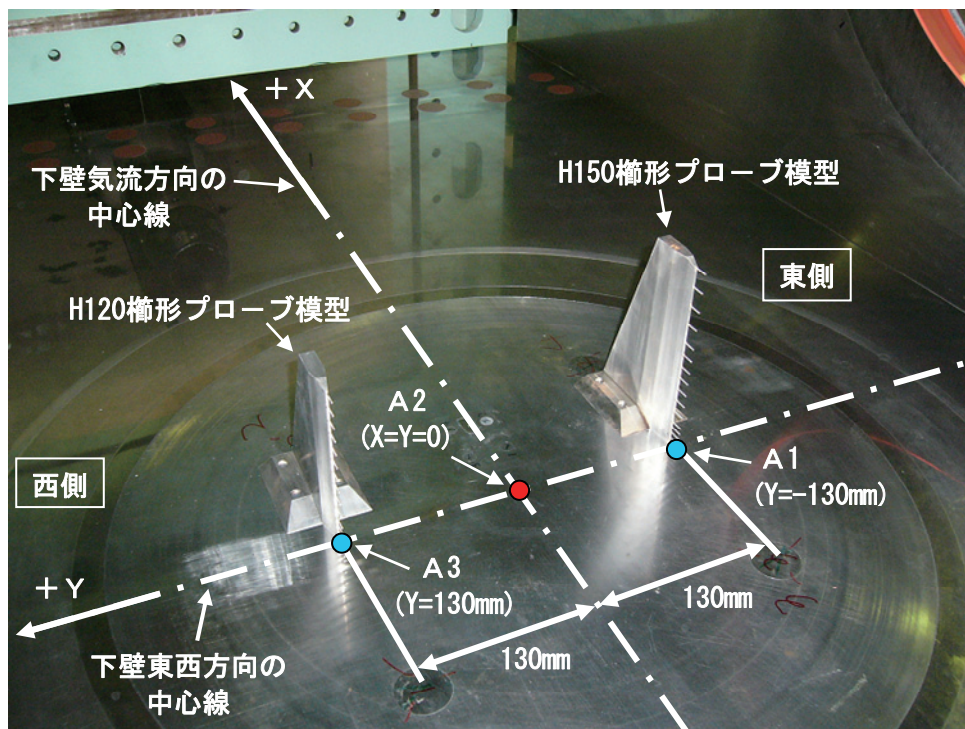


図9 H120及びH150楕形プローブ模型の取付け状況
(測定部下壁気流方向の中心: $X=0$)

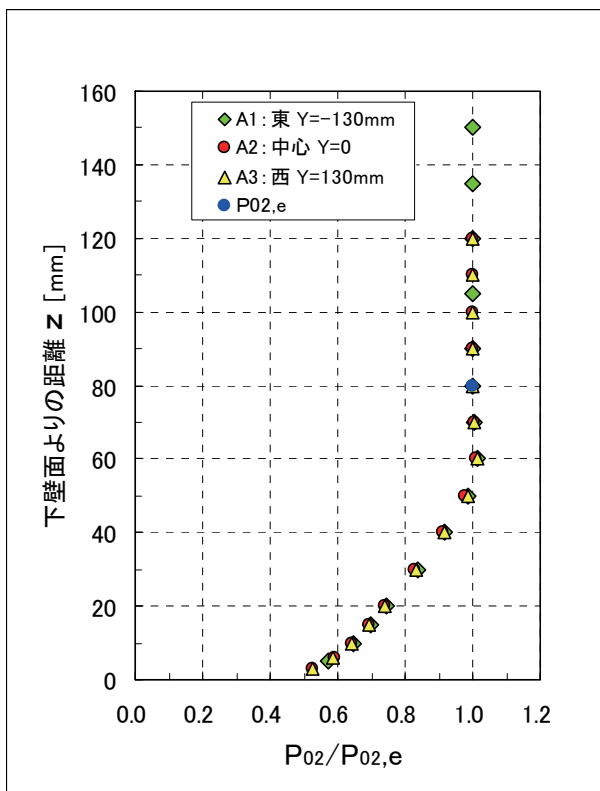


図 10.1 測定部中心下壁側の 2 次元性確認
($M_\infty=1.4$ 、計測位置：A1, A2, A3)

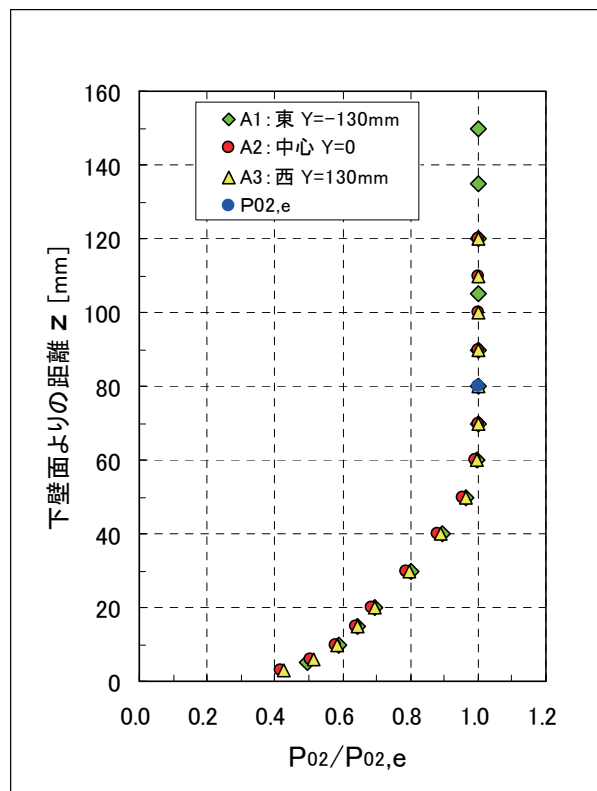


図 10.2 測定部中心下壁側の 2 次元性確認
($M_\infty=2.0$ 、計測位置：A1, A2, A3)

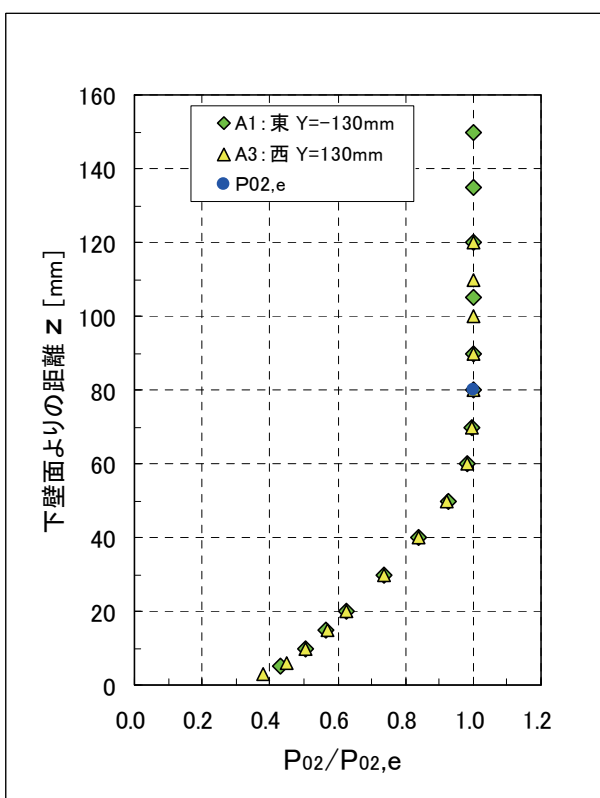


図 10.3 測定部中心下壁側の 2 次元性確認
($M_\infty=2.5$ 、計測位置：A1, A3)

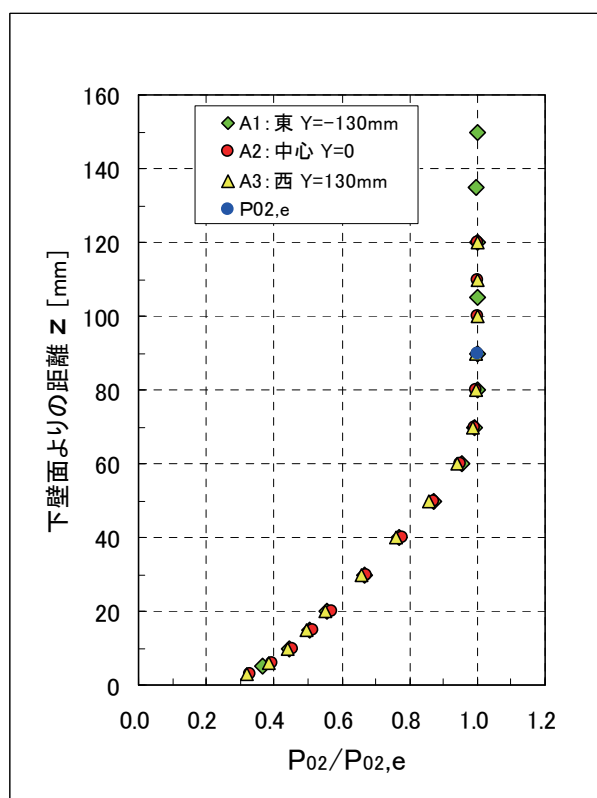


図 10.4 測定部中心下壁側の 2 次元性確認
($M_\infty=3.0$ 、計測位置：A1, A2, A3)

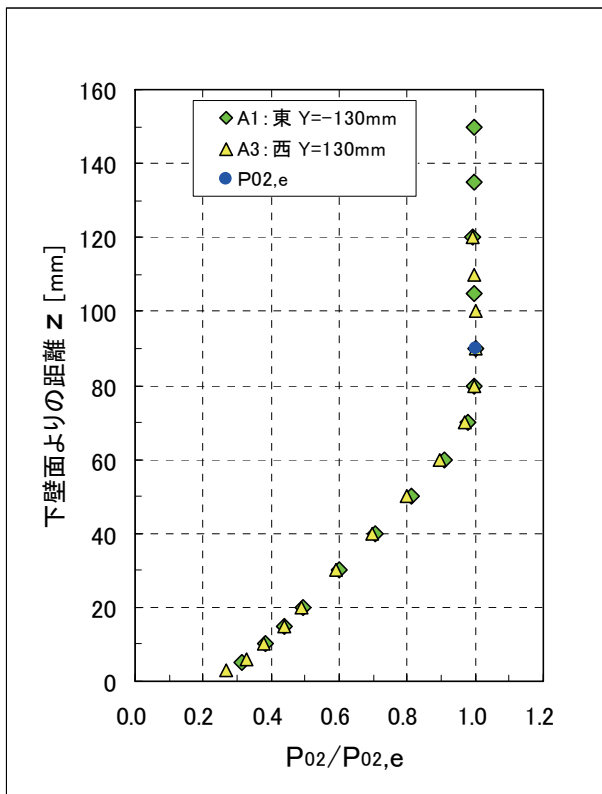


図 10.5 測定部中心下壁側の 2 次元性確認
($M_\infty=3.5$ 、計測位置：A1, A3)

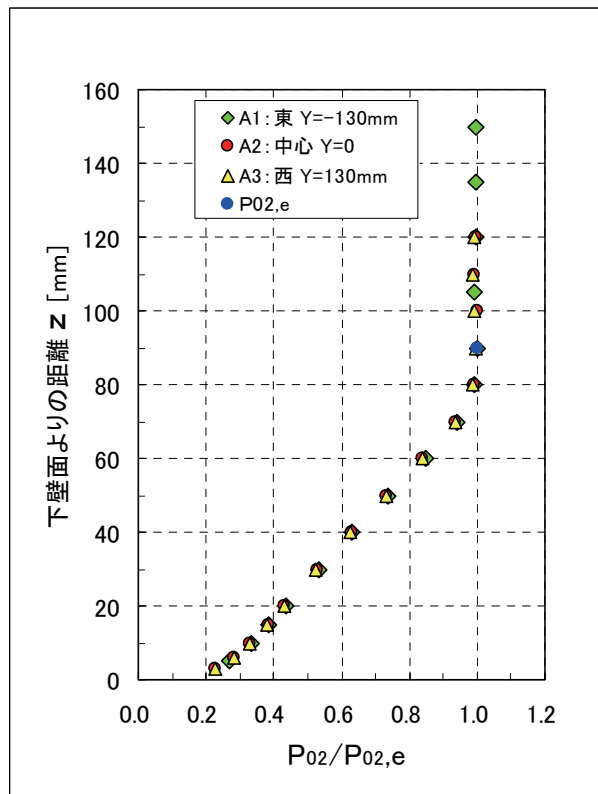


図 10.6 測定部中心下壁側の 2 次元性確認
($M_\infty=4.0$ 、計測位置：A1, A2, A3)

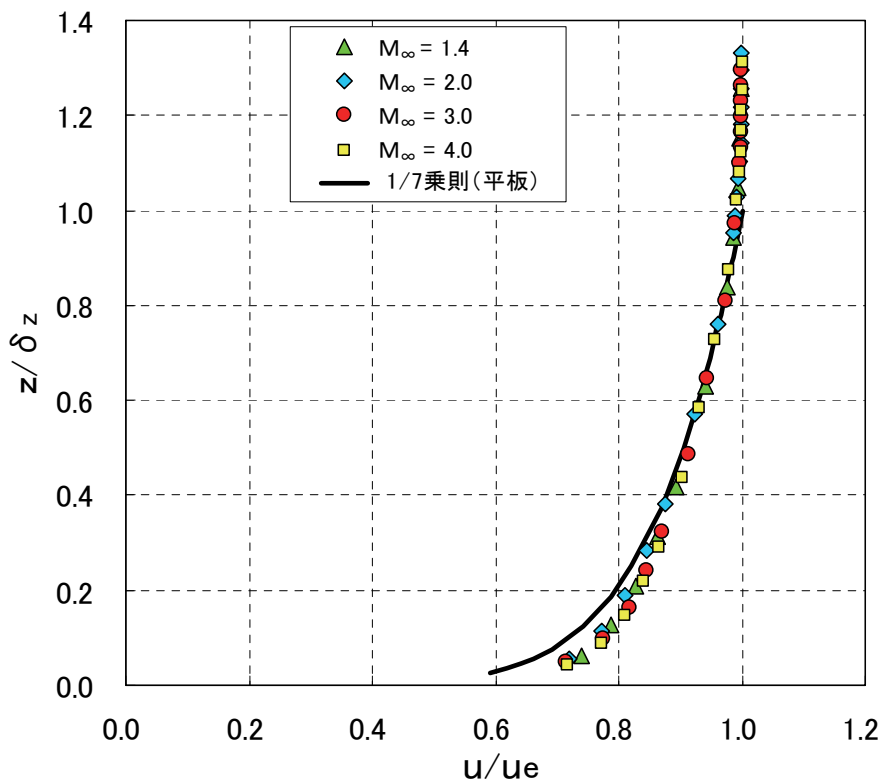


図 11.1 測定部中心下壁側の境界層速度分布
(計測位置：A2)

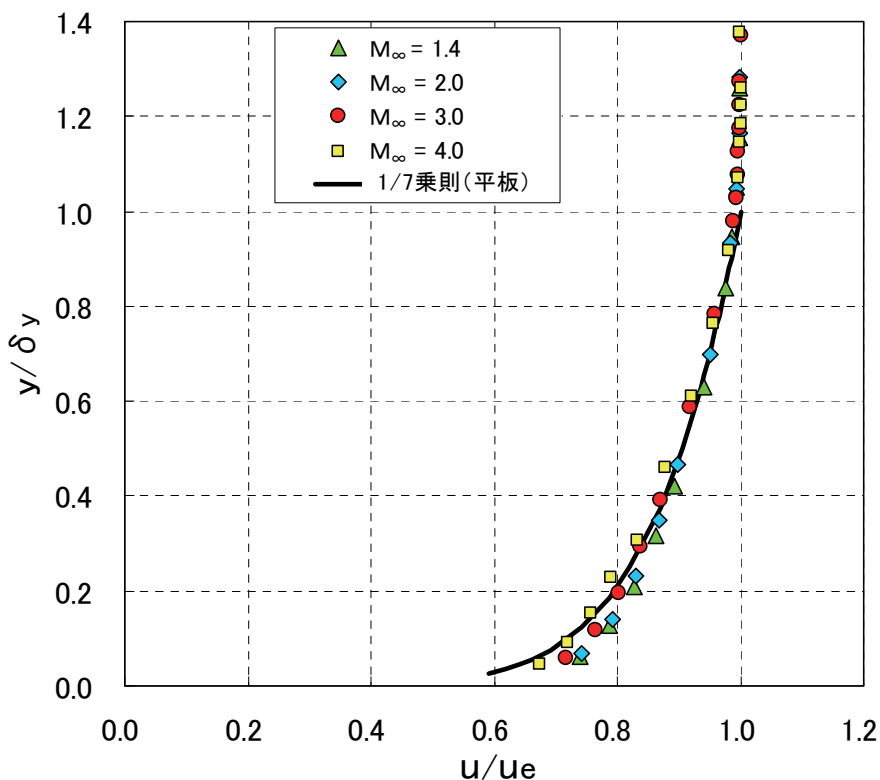


図 11.2 測定部中心西壁側の境界層速度分布
(計測位置：B)

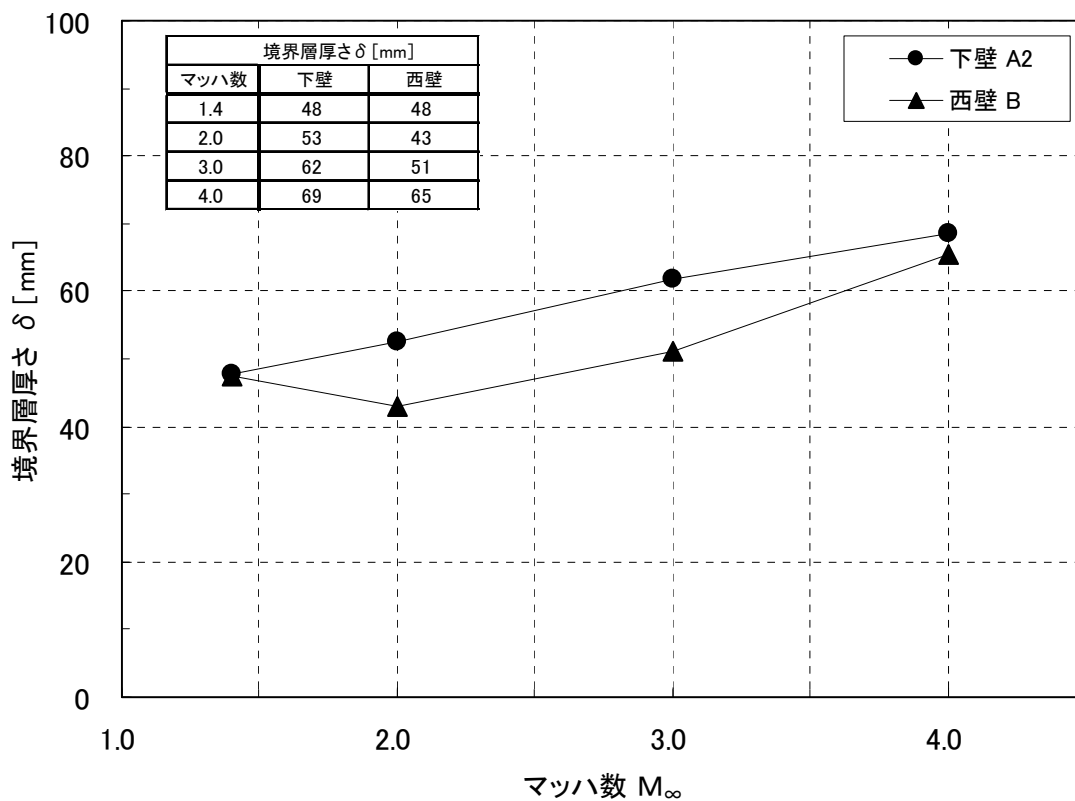


図 12 測定部中心の下壁側及び西壁側の境界層厚さ
(計測位置：A2、B)

表3 測定部中心(原点:O)より下壁方向及び西壁方向の主流範囲(単位: mm)

マッハ数 (M_∞)	下壁方向の主流範囲(M_v) $M_v=495-\delta_z$	西壁方向の主流範囲(M_h) $M_h=500-\delta_y$
1.4	447	452
2.0	442	457
3.0	433	449
4.0	426	435

※ δ_y , δ_z : 西壁側及び下壁側の境界層厚さ

5. まとめ

JAXA吹出式1 m×1 m超音速風洞の主要マッハ数 M_∞ =1.4、2.0、3.0及び4.0において、測定部中心(測定部出口より1,000mm上流)の上下(鉛直)／東西(水平)方向における主流範囲を確定するため、境界層厚さ計測を実施した。境界層厚さは、ピトー圧(P_{02})分布計測試験を行い求めた。ピトー圧の計測箇所は、測定部における気流の対称性(上下方向)及び2次元性(東西方向)が良好であるので、下壁／西壁の片側とした。

境界層厚さ計測の結果より、以下の結論を得た。

- (1)CFD解析において、境界層内部の模擬が満足できるものではなくとも、主流については十分な精度で模擬できることが分かった。
- (2)下壁の境界層内ピトー圧分布の2次元性は、良好である。
- (3)下壁側及び西壁側における境界層は、乱流境界層であることが分かった。
- (4)下壁側及び西壁側における境界層厚さ(δ)は、40mm< δ <70mmである。この結果より、測定部中心(原点:O)より下壁方向(M_v)及び西壁方向(M_h)の主流範囲は、各々425mm< M_v <450mm及び435mm $\leq M_h$ <460mmである。

6. 謝辞

本境界層計測の実施にあたって、多くの方々の御協力を得た。本境界層計測の計画段階では、飛行システム技術開発センター計画管理チーフマネージャの鈴木教雄氏より、たいへん有益な助言を頂いた。また、試験では、風洞技術開発センター超音速風洞セクション主任研究員の神田宏氏、研究員の赤塚純一氏、IHIエアロスペースエンジニアリングの西島寛典氏、木村毅氏、航空宇宙技術振興財団の板橋幸広氏の各位に御協力を頂いた。関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 空気力学第二部：「1 m×1 m吹出式超音速風洞の計画と構造」、NAL TR-29,1962
- 2) 渡辺光則、楯篤志、浜本滋、酒井謙二、外立政隆、野田順一、近藤洋史、原亘利：「1 m×1 m超音速風洞改修と風洞性能」、JAXA-RR-05-024,2006
- 3) Eart R. Keener and Edward J. Hopkins : Accuracy of Pitot-Pressure Rakes for Turbulent Boundary-Layer in Supersonic Flow. NASA TN D-6229, 1971.
- 4) 浜本滋、楯篤志、原亘利：「航技研1 m×1 m超音速風洞データ処理設備の更新」、NAL SP-38,1998,PP.25-48
- 5) 浜本滋、楯篤志、渡辺光則、野田順一、原亘利、石田洋治：「航技研1 m×1 m超音速風洞における高速多点圧力計測装置の導入」、NAL SP-38,1998,PP.195-208
- 6) 川崎重工業株式会社：「超音速風洞気流特性改善のための調査検討作業報告書」、1998年10月
- 7) 川崎重工業株式会社：「超音速風洞改修工事 第2回設計報告会資料」、1999年3月
- 8) 野村陵、川本英樹、吉田秀則、米田武史、青木茂：「超音速風洞ノズルの形状最適化(第1報、ノズル内の流れ特性に着目した最適化手法の開発)」、日本機械学会論文集(B編)、69巻680号,2003年4月, PP.854-860
- 9) 野村陵、川本英樹、米田武史、渡辺光則、楯篤志、浜本滋、酒井謙二：「超音速風洞ノズルの形状最適化(第2報、実機ノズル最適化への適用)」、日本機械学会論文集(B編)、69巻680号,2003年4月, PP.861-867
- 10) Schlichting, Hermann (J.Kestin,trans.) : "Boundary Layer Theory. McGraw-Hill Book Co., Inc., 1968.
- 11) Jerry M. Allen : Pitot-Probe Displacement in a Supersonic Turbulent Boundary Layer. NASA TN D-6759, 1972.
- 12) John B. Peterson, Jr. : Boundary-Layer Velocity Profiles Downstream of Three-Dimensional Transition Trips on a Flat Plate at Mach 3 and 4. NASA TN D-5523, 1969.
- 13) 遠藤浩：「風洞概論(続編)」、NAL N-34,1985