

# 航技研 1 m × 1 m 超音速風洞の気流特性

○浜本滋、楯篤志、渡辺光則、酒井謙二（航技研）

## Flow Quality of the NAL 1m x 1m Supersonic Wind Tunnel

Shigeru HAMAMOTO, Atsushi TATE,  
Mitsunori WATANABE, Kenji SAKAI (NAL)

*Key Words: Wind tunnel, Flow quality*

### Abstract

The major refurbishment of the NAL 1m x 1m supersonic wind tunnel was carried out in FY1999. This refurbishment included replacement of the variable nozzle section and extension of the settling chamber, both of which have a large influence on flow quality in the test section. This paper describes the result of the flow quality inspection carried out in the first half of FY2000.

### 概要

航技研の1 m × 1 m 超音速風洞は平成 11 年度に上流部の改修を実施した。この改修は測定部及びその上流の可変ノズルの更新、集合胴の伸長を含んでおり、気流特性の大きな改善を実現した。本報告では改修に引き続き平成 12 年度前半に実施された気流特性確認試験の結果を述べる。

#### 1. はじめに

航技研の1 m × 1 m 超音速風洞は、平成 11 年度に老朽化対策と気流特性向上のための改修工事を実施した。この改修工事においては、気流特性を決定づける可変ノズル部を更新するとともに、集合胴の伸長、調圧弁のオーバーホール、制御装置のデジタル化等を行った。続く平成 12 年度前半には通風制御調整試験と気流性能確認試験を実施し、平成 12 年度後半より、1 年半ぶりにユーザー試験を再開した。

本改修による風洞性能の向上と運転方式の改善については既報のとおりである<sup>1)</sup>。本報告では気流性能確認試験の結果を報告する。同試験においては、櫛形総圧管プローブによる測定部のマッハ数分布測定を実施するとともに、ノズル形状を

司る電動マルチジャッキの微調整によるノズル形状の最適化を実施した。また、AGARD-B 標準模型による力試験を実施し、気流偏向角の推定を行った。

#### 2. 風洞及び改修の概要

1 m × 1 m 超音速風洞の概要を図 1 に示す。風洞は間欠吹き出し式で、本体は上流の貯気槽（最大圧力 2MPa、容量約 2,000m<sup>3</sup> = 2 球合計）と、下流の消音塔の間に位置している。風洞本体は上流から調圧弁、集合胴、可変ノズル部（第 1 スロート及び測定部を含む）、第 2 スロート、亜音速ディフューザーの各部位で構成されている。大気に放出する吹き出し式風洞は、高いレイノルズ数が得られる反面、通風時に大量の空気が流れる

(約 280kg/s 以上) ため、騒音が大きな問題となってきた。この問題に対応するため、本風洞では、巨大な消音塔に加え、サウンドサプレッサ等の騒音低減のための工夫が施されている。

今回の改修では、風洞本体のうち、測定部より上流部分を更新した。具体的には集合胴及び可変ノズル部を新規に製作し、調圧弁についてはオーバーホール及び機構改善を行った。可変ノズル部の更新に伴い、ノズル制御システムの更新を行うとともに、調圧および模型制御を含む運転制御システムも更新した。制御系システムには、従来のアナログ方式に代わり、シーケンサ制御に基づくデジタル方式を採用した。この結果、操作性が向上し、風洞運転のワンマンオペレーションを実現した。集合胴に関しては、流れ方向の長さを従来の約 1.5 倍に伸長し、乱れ低減のためのデバイスとして、これまでの 4 枚のスクリーンに加え、低周波の擾乱を軽減する効果のあるスプリッタを追加した。

図 2 には今回の改修で更新した可変ノズル部の詳細を示す。可変ノズルは上下壁を構成する可撓(かとう)板を、上下それぞれ 21 対の電動マルチジャッキにより変形させて、適切なノズル形状を作り出している。可撓板は下流側の測定部に固定されており、上流部の集合胴出口では滑り継ぎ手により流れ方向の変位を吸収する構造となっている。超音速の流れを作り出すための第 1 スロットは可変ノズルにより形成され、設定するマッハ数によって位置が前後することになる。

### 3. 気流特性試験

#### (1) 改修工事における要求仕様

今回の改修に際して、測定部の気流特性(気流の質)に関する要求仕様として次の 2 つの点を掲げた。

- 測定部の規定領域内でのマッハ数分布の幅が、平均値に対して  $\pm 0.5\%$  以内に収まること。
- 測定部における気流偏角が  $0.1^\circ$  以下であること。

ここで規定領域とは、測定部中心(流れ方向位置はシュリーレン観測窓中心)から上流側に 425mm、下流側に 275mm、上下方向にそれぞれ 300mm である。これらの領域は、水平方向の二次元性が確保されていることを前提に、図 5 に示す気流検定用の櫛形総圧管プローブの測定可能範囲に基づいて定めている。

#### (2) 気流特性試験の概要

改修後の気流特性を検討するための気流特性試験として、以下の 4 つの試験を実施(及び計画)した。

- 1) マッハ数分布測定試験
- 2) AGARD-B 標準模型試験
- 3) 壁面静圧測定試験
- 4) 総圧変動測定試験

1)および 2)は気流特性に関する要求性能を確認するための試験、3)はノズル形状の設計に用いた CFD の検証を主眼としている。4)については年度内に実施できなかったため、今後の課題としたい。1)~3)について、試験結果を以下に紹介する。

#### 4. 測定部におけるマッハ数分布

##### (1) 水平方向の二次元性の確認

マッハ数分布の測定では、まずはじめに図 3 に示す櫛形総圧管プローブを用いて、水平方向の二次元性を確認した。試験では図に示すように各総圧管が水平に並ぶようにプローブをセットし、通風時に上下方向にプローブをヒープさせて測定を行った。図 4 に  $M=3.0$  (風洞設定値) の場合のピトー圧  $P_{02}$  の計測結果を、改修前後の比較で示す。図 4 (a)は各総圧管の計測値の上下方向の分布をプロットしたものである。改修後(ノズルは設計形状)は上下にほぼ対称の分布が得られている。図 4 (b)では、横方向の分布をわかりやすくするため、各総圧管の偏差をプロットした。改修前には横方向に偏差が大きく、特に中心付近では散らばりが顕著であったのに対し、改修後には全体的にひじょうに小さな偏差となっているのが

分かる。同じ傾向が他のマッハ数でもみられ、この結果から水平方向には十分な二次元性が確保されていると判断した。

## (2) 設計形状におけるマッハ数分布

次に図5に示す改良型の櫛形総圧管プローブを用いて測定部規定領域のマッハ数分布を測定した。図3のプローブからの改良点は、プローブを支えるスティングが伸縮し、流れ方向の分布の測定にも対応した点である。プローブの幅については、高マッハ数での起動荷重に十分耐えるように設計したため、11列20cmと小型化した。マッハ数分布については、水平方向の二次元性を前提に、流れ方向及び上下方向の分布を測定した。

図6に設計形状のマッハ数分布の一例として、 $M=2.0$ （風洞設定値）の測定結果を示す。流れ方向には4断面を計測し、上下方向は2cmごとに41点を計測した（規定領域外を含む）。測定部規定領域内の平均マッハ数は2.0007で、分布幅は最大値が0.3%、最小値が0.45%である。この結果、設計形状で要求仕様を満たしていることが確かめられた。

図7(a)には $M=2.5$ の、図8(a)には $M=4.0$ のそれぞれの風洞設定値に対する測定結果を示す。 $M=2.5$ については分布幅が1.11%、 $M=4.0$ については2.34%と、ともに要求仕様を満たしていないことがわかる。マッハ数分布の測定は $M=1.4, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0$ （それぞれ風洞設定値）について実施したが、 $M=2.5$ 以上ではマッハ数に比例して分布幅が大きくなる傾向があり、ノズル形状の調整によるマッハ数分布の改善が必要となった。

## (3) ノズル形状の修正による分布の改善

図2に示した電動マルチジャッキによる可変ノズルの特長は、個々のジャッキの位置を微少なながら独立に調整することが出来る点で、この結果、ノズル形状の微修正が可能となった。

測定部におけるマッハ数分布が要求仕様を満たさないマッハ数については、ノズル形状の修正により分布を改善する必要が生じた。ノズル形状

の修正は、

- ・ 測定部と可変ノズルの可撓板の接合部の不連続の修正
- ・ 可変ノズルの変曲点の2階微分の不連続の修正

を行うことをとして実施した。実際の作業では、まず個々のジャッキを単独で調整し、その修正量に対する分布の変化量からジャッキ修正の感度を求め、次にマッハ数分布を最適化する複数のジャッキの修正量を線形重ね合わせに基づいて決定することとした。ただし、これらの作業を実地の試験のみで行うためには膨大な時間が必要となるため、あらかじめCFDを用いて各ジャッキの修正の感度を推測し、実地の試験での作業時間を極力抑える工夫をした。

図7(b)に $M=2.5$ の場合の修正結果を示す。 $M=2.5$ の場合は、最も下流側のジャッキ(#21)の微調整（上下とも0.3mm押し下げ）のみで要求仕様を満たす結果が得られた。図9にはこの修正による等マッハ線図の変化を示す。#21の修正では、測定部と可変ノズル部の不連続の修正が大きな要素となり、つなぎ目から発生していると推定される擾乱（等マッハ線によって確認されるもの）が弱められていることが分かる。図8(b)には $M=4.0$ の場合の修正結果を示した。 $M=4.0$ では設計形状における分布が大きかったため、複数回の修正の結果、#14および#17～#21のジャッキ位置を調整して修正形状を得た結果、要求仕様を満たす分布を得た。#14のジャッキ位置の修正が、可変ノズルの変曲点の2階微分の調整に関与したものであると思われる。図10にこの修正による等マッハ線図を示す。図10から、分布の原因となっていた擾乱が大幅に軽減されたことがわかる。

図11には各マッハ数に対する、マッハ数分布の幅を示す。図11には改修前に測定した分布も同時にプロットしている。改修前の測定では、流れ方向の各断面毎に平均マッハ数に対する分布を求めているため、測定部全体ではグラフに表される以上に大きな分布が存在している。図11からわかるように、今回の改修により、測定部のマ

マッハ数分布の一様性は大きく改善された。

## 5. AGARD-B 標準模型試験

AGARD-B 標準模型を用いた試験の主目的は、対称模型を用いた力計測に基づく気流偏角の推定である。図 1 2 に今回用いた AGARD-B 標準模型の平面図を示す。試験は、模型を通常にセットした場合（正転： $\phi=0$ ）と、一部のマッハ数（ $M=1.4, 2.0, 2.5$ ）については上下を反転させてセットした場合（ $\phi=180^\circ$ ：天秤も反転）について実施した。

図 1 3 に、マッハ数に対する揚力傾斜の変化を示す。正転と反転ではデータはほぼ一致しており、マッハ数が大きくなるに従い、揚力傾斜が減少していく傾向が正しく得られている。揚力傾斜のデータについては、改修前あるいは他風洞ともほぼ一致した結果となっているが、詳しい解析および比較は後日行う予定である。

図 1 4 に、揚力データに基づく気流偏角の推定値を示す。気流偏角は、揚力傾斜が直線とみなされる $\pm 5^\circ$ の範囲のデータを直線回帰し、 $C_L=0$ となる迎角を調べたものである。従って $\alpha$ が正の場合、気流は下向きの偏角を持つことになる。また、この方法による偏角の推定には、模型支持系の偏角も含むことになる。図 1 4 より、 $M=1.4\sim 3.0$ の範囲では気流偏角は  $0.1^\circ$ より小さいことがわかり、要求仕様を満たしていると判断できる。 $M=1.4$  および  $M=2.2$  で  $0.07^\circ$ 以上の比較的大きな値を示している点が留意すべき点であるが、これらの原因等の検討も今後の課題としたい。

## 6. 壁面静圧の測定

### (1) 可変ノズルに沿ったマッハ数プロファイル

測定部及び可変ノズル部の側壁には、気流特性の検討を目的に、多数の静圧孔が設けられている。可変ノズル部の静圧孔の圧力計測を行い、流れ方向のマッハ数プロファイルを測定した結果を図 1 5 に示す。図では、ノズル形状の設計に使用した CFD の解析結果と、試験による測定結果を  $M=2.0, 3.0, 4.0$  について比較している。また、

参考のために各マッハ数でのノズル形状を図中に示している。CFD の結果と測定結果は良い一致を示しており、設計に用いた CFD の妥当性を確認した。

### (2) 測定部の代表静圧

本風洞では気流マッハ数の測定に集合胴の総圧および総温、測定部の静圧を用いている。測定部の静圧は、測定部中心より上流に 640mm の場所で、両側壁に上下方向の中心位置、及びその上下 20mm の位置の 3 カ所に静圧孔を設け、計 6 点の圧力を配管により結合して計測している。この方法による静圧の計測の妥当性を確認するために、測定部の壁圧測定を実施した。測定部の壁圧は図 1 6 (a) に示す点について実施した。図 1 6 (b) に  $M=2.0$  における試験結果を一例として示す。壁圧の測定試験は AGARD-B 標準模型の試験と同時にを行ったため、風洞中心よりも下流の点では、通風中の模型の迎角変化の影響を受けてデータが変化していたため、参考データとした。代表静圧の測定点近傍では、静圧は分布無くほぼ一定の値であることが読みとれるが、多少のばらつきもみられるため、今後はより詳細な検討が必要と思われる。

## 7. まとめ

1m×1m 超音速風洞（第 1 超音速風洞）の上流部の改修は平成 11 年度に終了し、引き続き平成 12 年度に通風制御調整試験および気流調整試験を実施し、一連の改修作業を完了した。測定部におけるマッハ数分布は、ノズル形状の微調整を行った結果、 $M=1.4, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0$  において平均マッハ数の $\pm 0.5\%$ 以内に抑えられた。また、AGARD-B 標準模型による力試験結果から推測される気流偏角は $\pm 0.1^\circ$ 以内であった。これらの結果により、今回の改修は要求仕様を満たしていることが確認された。さらに、壁面静圧の測定により、可変ノズル部のマッハ数プロファイルを確認するとともに、代表静圧測定位置近傍の静圧分布を測定し、測定部静圧の測定に関する検討を

行った。今後は測定部静圧についてさらに詳細な検討を行うとともに、気流特性試験として積み残している総圧変動測定試験、および $M=1.4$ 、 $2.0$ 、 $2.5$ 、 $3.0$ 、 $3.5$ 、 $4.0$  以外の常用マッハ数についてのマッハ数分布測定を順次行っていく予定である。

## 8. 謝辞

本風洞の改修においては川崎重工業（株）に工事を請け負っていただき、改修工事及び可変ノズル形状の修正によるマッハ数分布の改善において尽力いただいた。また、改修全般及び超音速風洞の運営に関して、航空宇宙振興財団の外立政隆氏には多大な協力をいただいた。超音速風洞の運転については、IHI エアロスペース（株）に業務を受託していただき、同社より派遣の伊藤正剛氏、西島寛典氏の両氏にも試験中、いろいろとお世話になった。以上に関し、関係各位を含め感謝の意を表したい。

## 参考文献

- 1) 渡辺光則, 楯篤志, 浜本滋, 酒井謙二, 外立政隆;  $1\text{m} \times 1\text{m}$  超音速風洞改修後の風洞性能と運転方式について, 第 65 回風洞研究会議, 神戸, 2000 年 11 月
- 2) S. Hamamoto, M. Watanabe, A. Tate, K. Sakai; "Improvement of the Nozzle of the Supersonic Wind Tunnel", 94<sup>th</sup> STAI, Stockholm, Sept. 2000

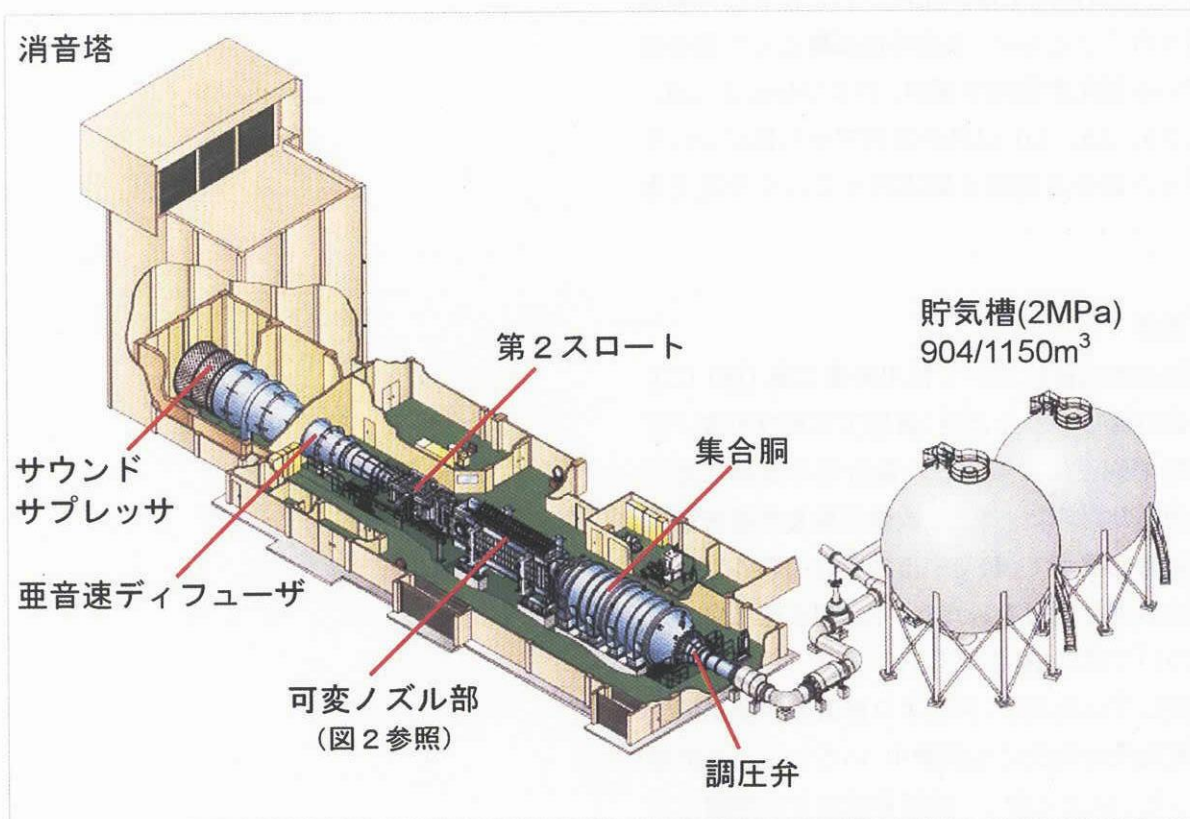


図1 航技研 1 m × 1 m 超音速風洞

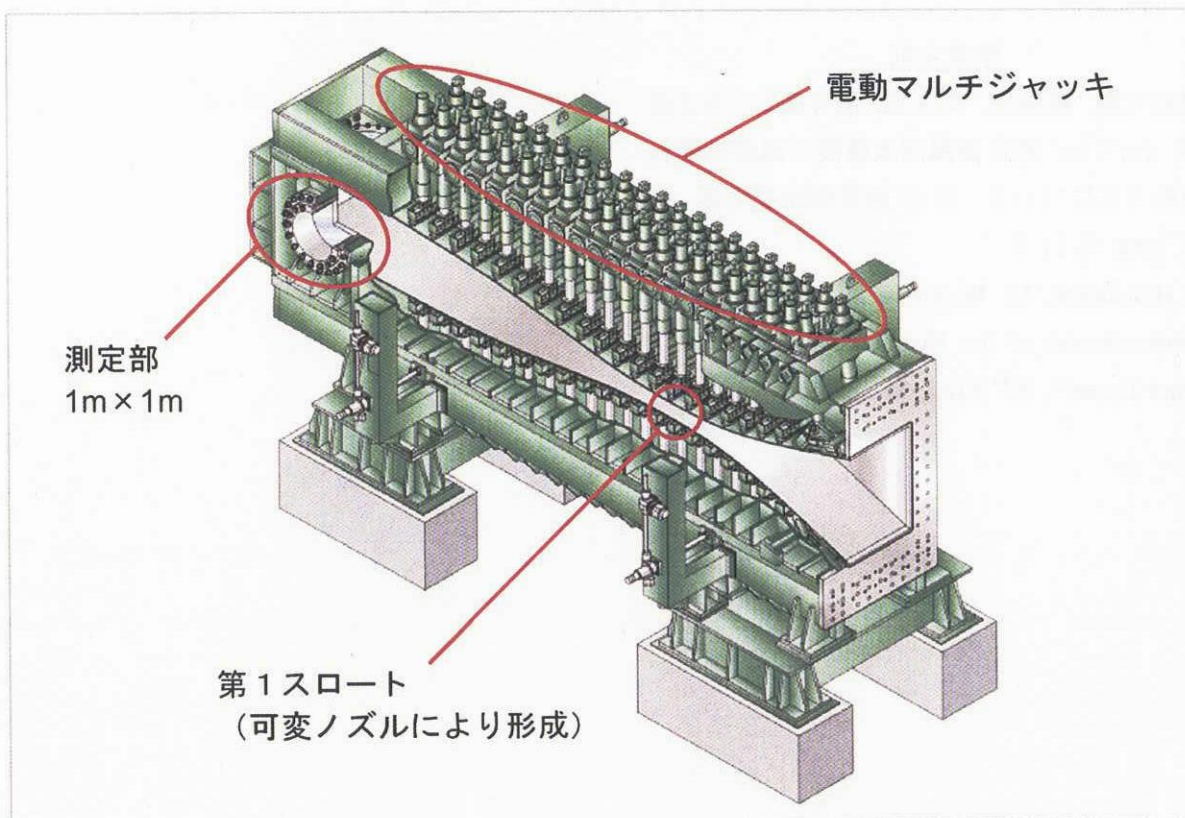


図2 可変ノズル部

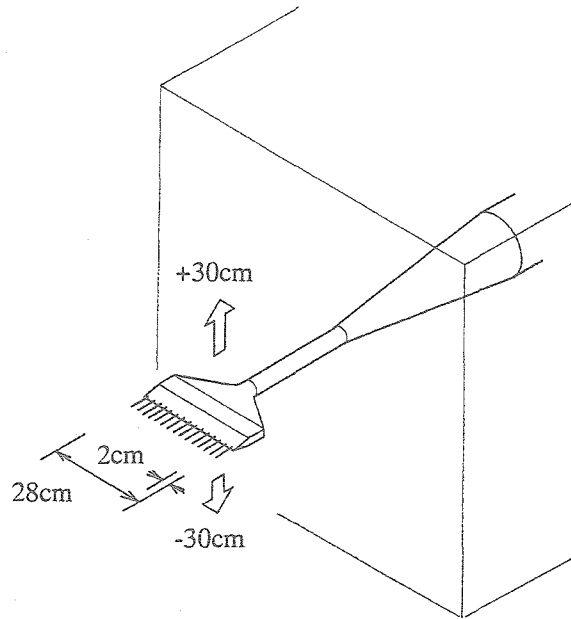
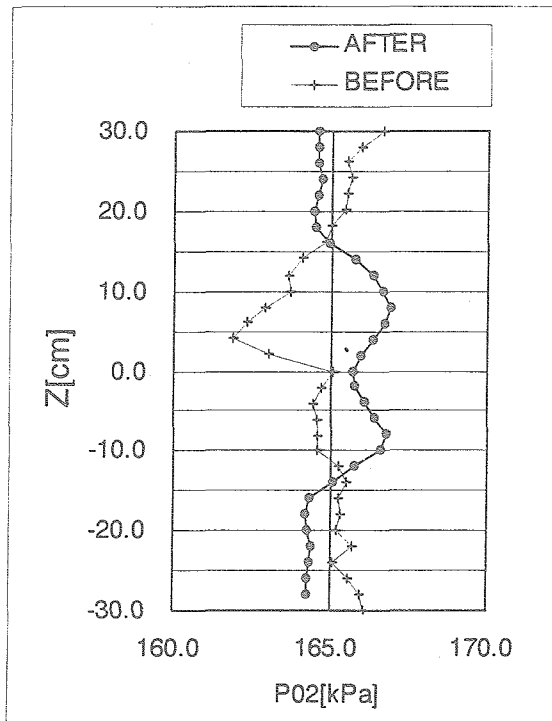
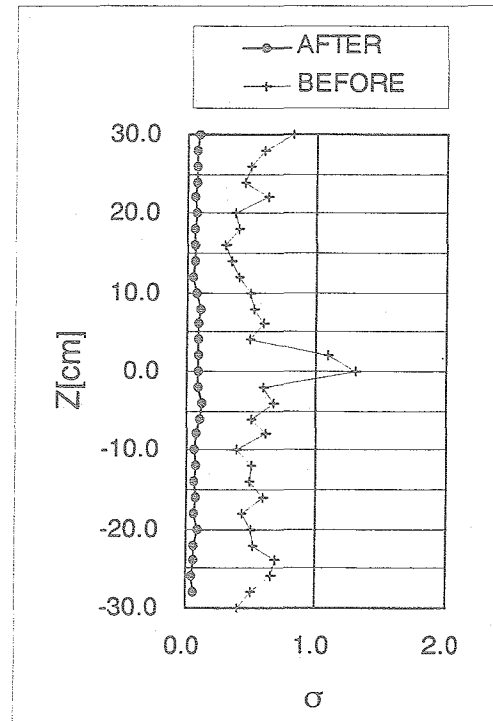


図3 櫛形総圧管プローブ No.1 (15列)



(a) 15列の総圧管の計測値の平均



(b) 横方向の分布の偏差

図4 横方向のマッハ数分布の検討

$M=3.0$ 、測定部中心での計測

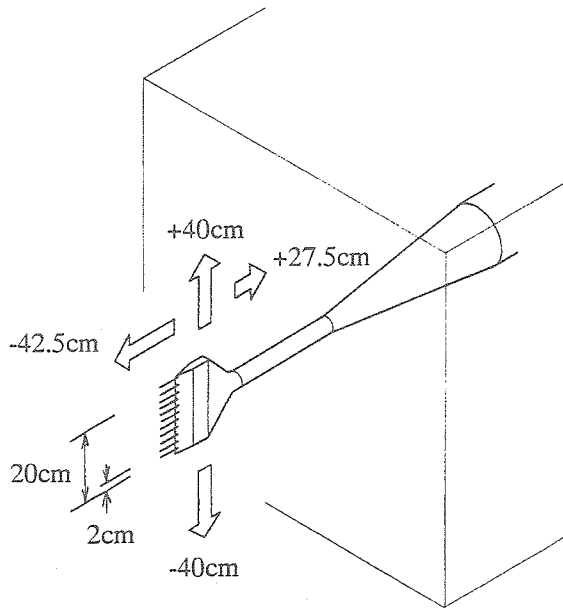


図5 櫛形総圧管プローブ No.2 (11列)

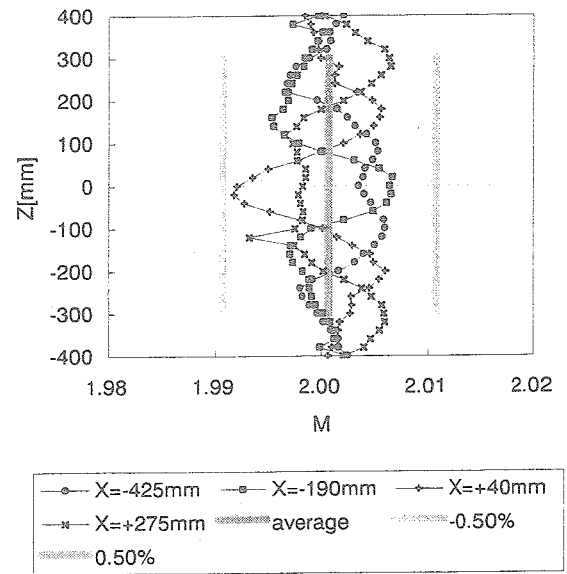
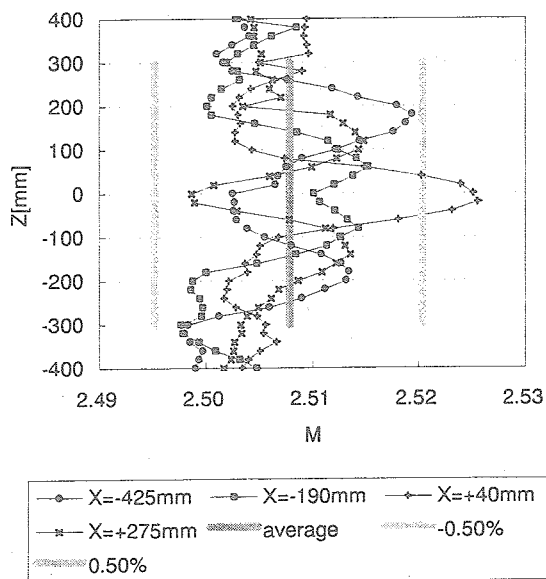
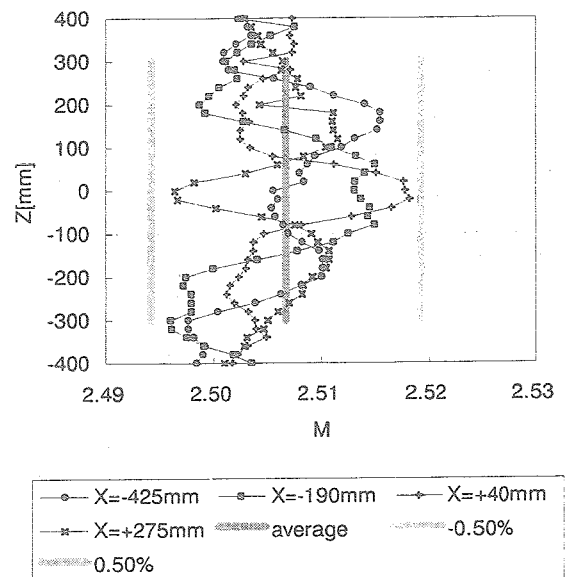


図6 測定部におけるマッハ数分布(M=2.0)



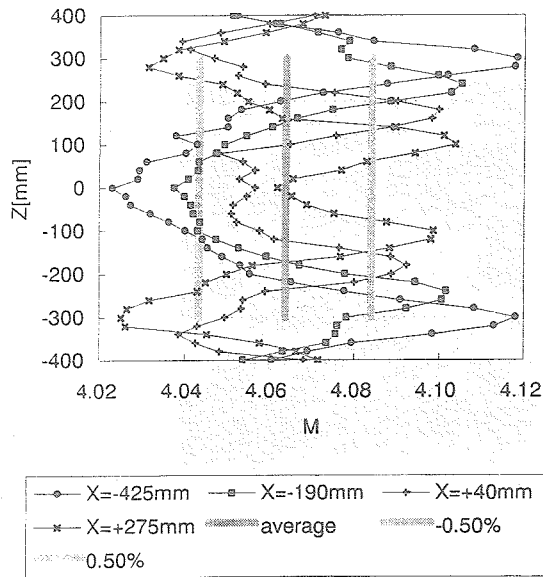
(a)設計形状に対するマッハ数分布



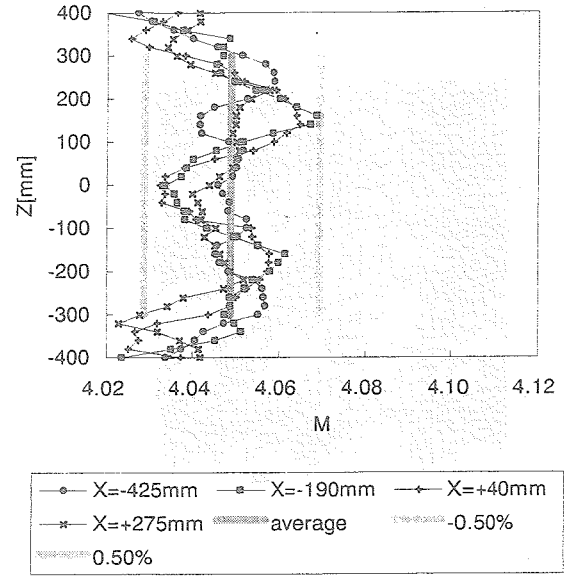
(b)修正形状に対するマッハ数分布

図7 ノズル形状の修正によるマッハ数分布の改善 (1/2)

M=2.5 : #21 ジャッキを 0.30mm 押し下げ



(a)設計形状に対するマッハ数分布



(b)修正形状に対するマッハ数分布

図8 ノズル形状の修正によるマッハ数分布の改善 (2 / 2)

M=4.0 : #14	0.50mm 押し下げ
#17	0.18mm 押し下げ
#18	1.25mm 押し下げ
#19	1.36mm 押し下げ
#20	1.56mm 押し下げ
#21	1.33mm 押し下げ

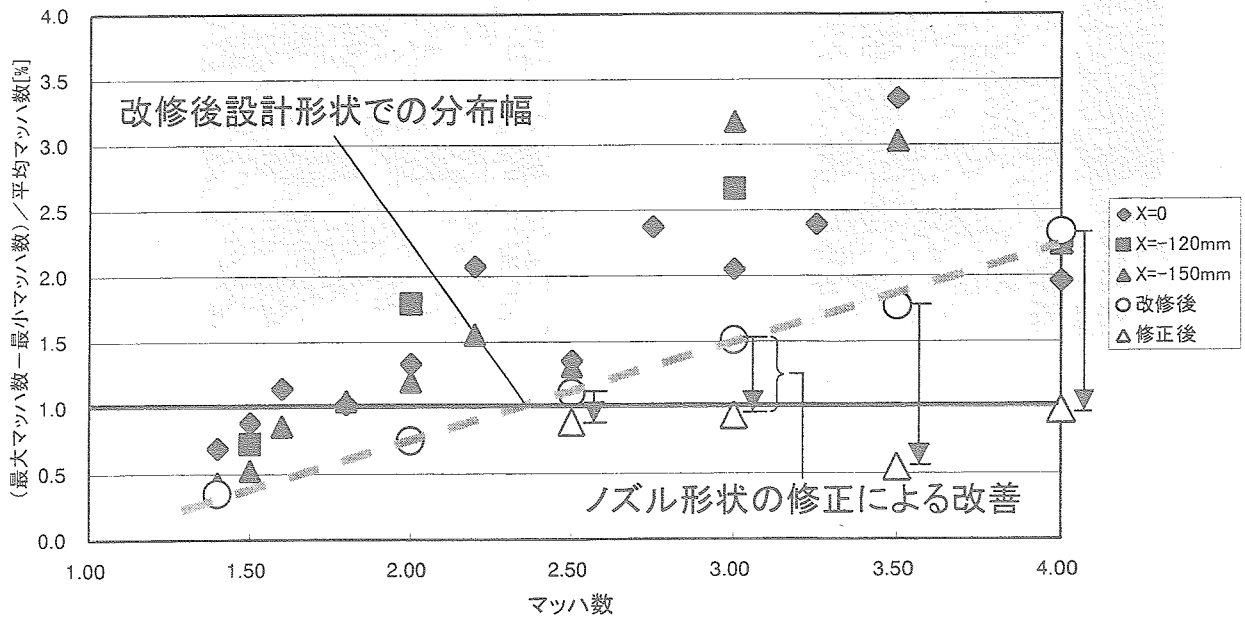
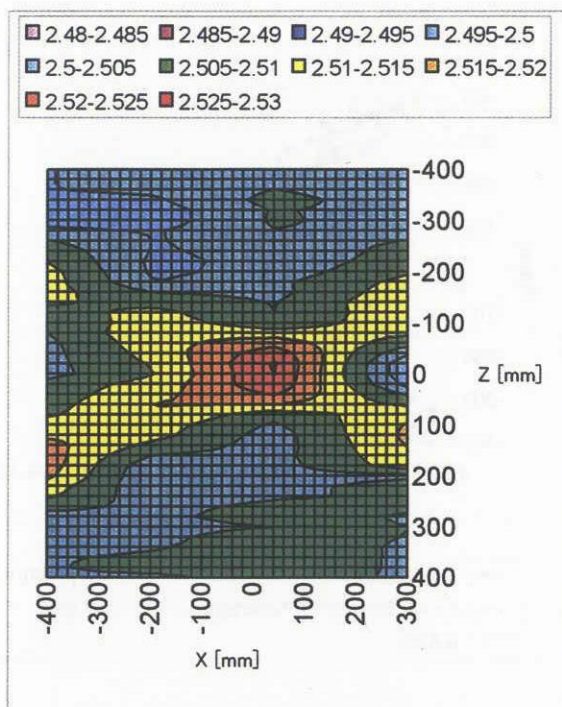
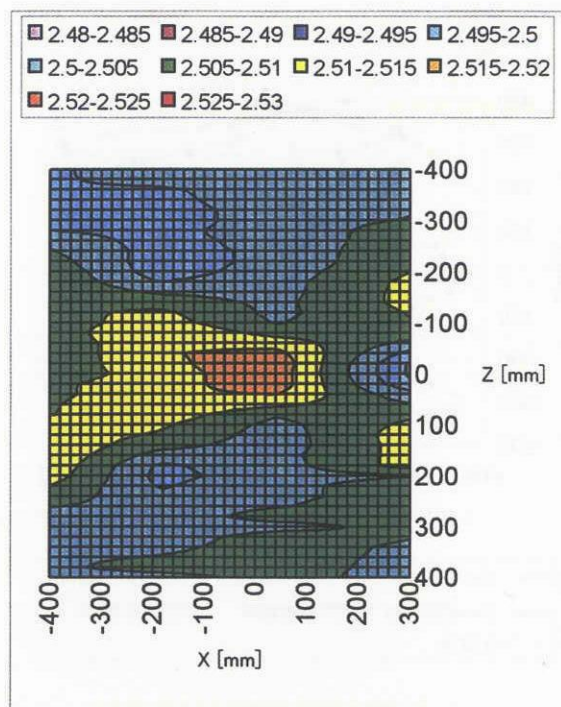


図11 ノズル形状の修正による測定部におけるマッハ数分布幅の改善

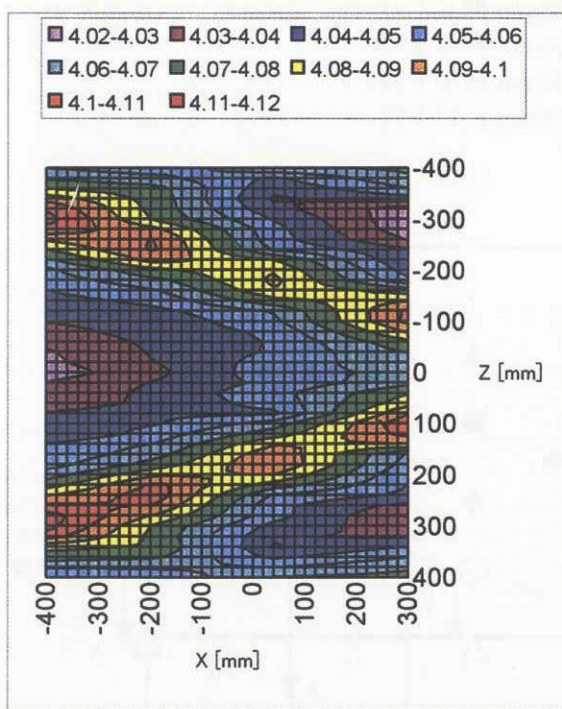


(a)M=2.5 設計形状

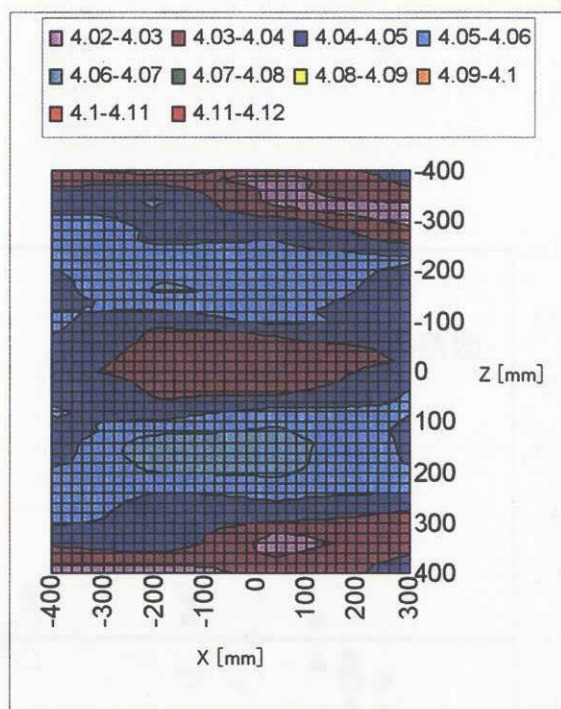


(b)M=2.5 修正形状

図9 ノズル形状の修正による等マッハ線図の変化 (1 / 2)



(a)M=4.0 設計形状



(b)M=4.0 修正形状

図10 ノズル形状の修正による等マッハ線図の変化 (2 / 2)

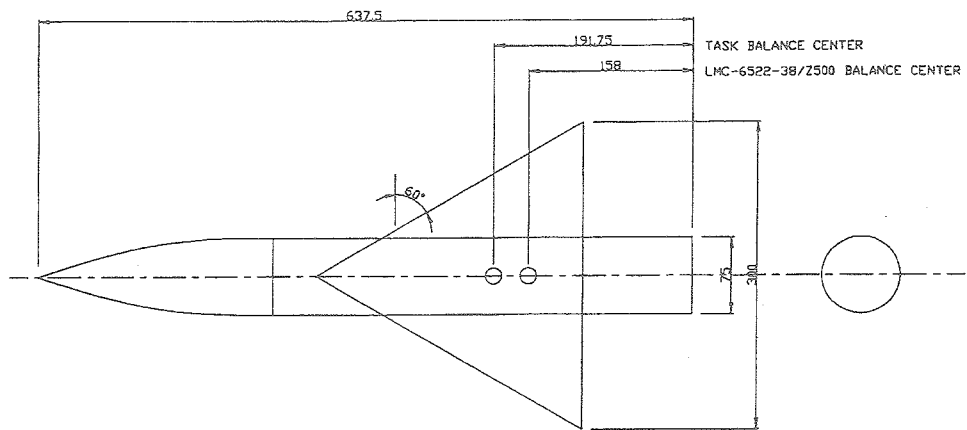


図 1 2 AGARD-B 標準模型の平面図

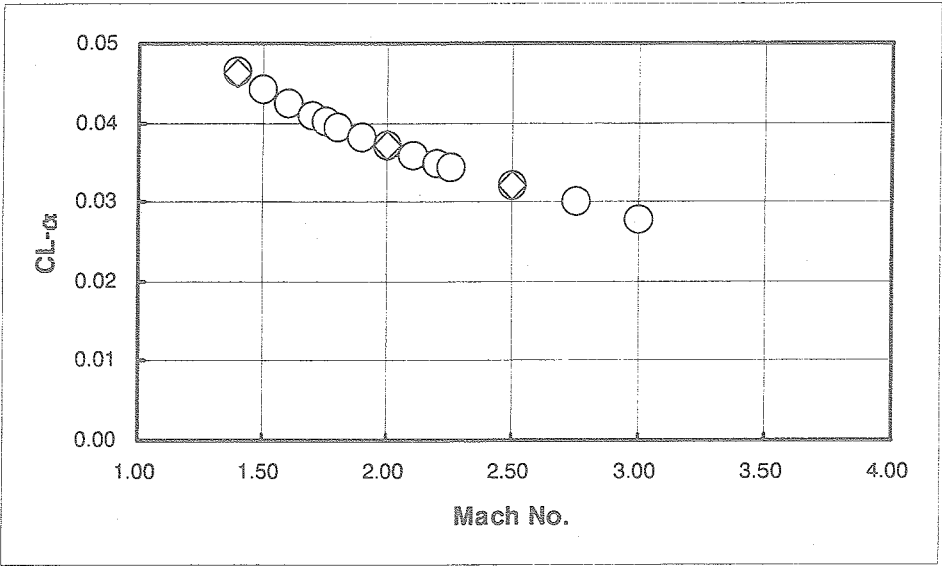


図 1 3 揚力傾斜

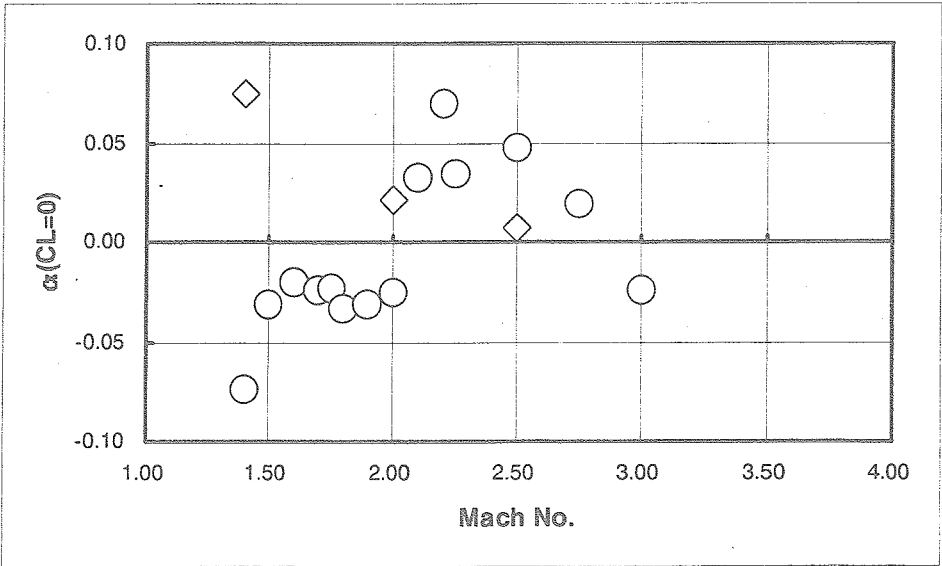


図 1 4 零揚力となる迎角より推算した測定部における気流偏角（正が吹き下ろし）

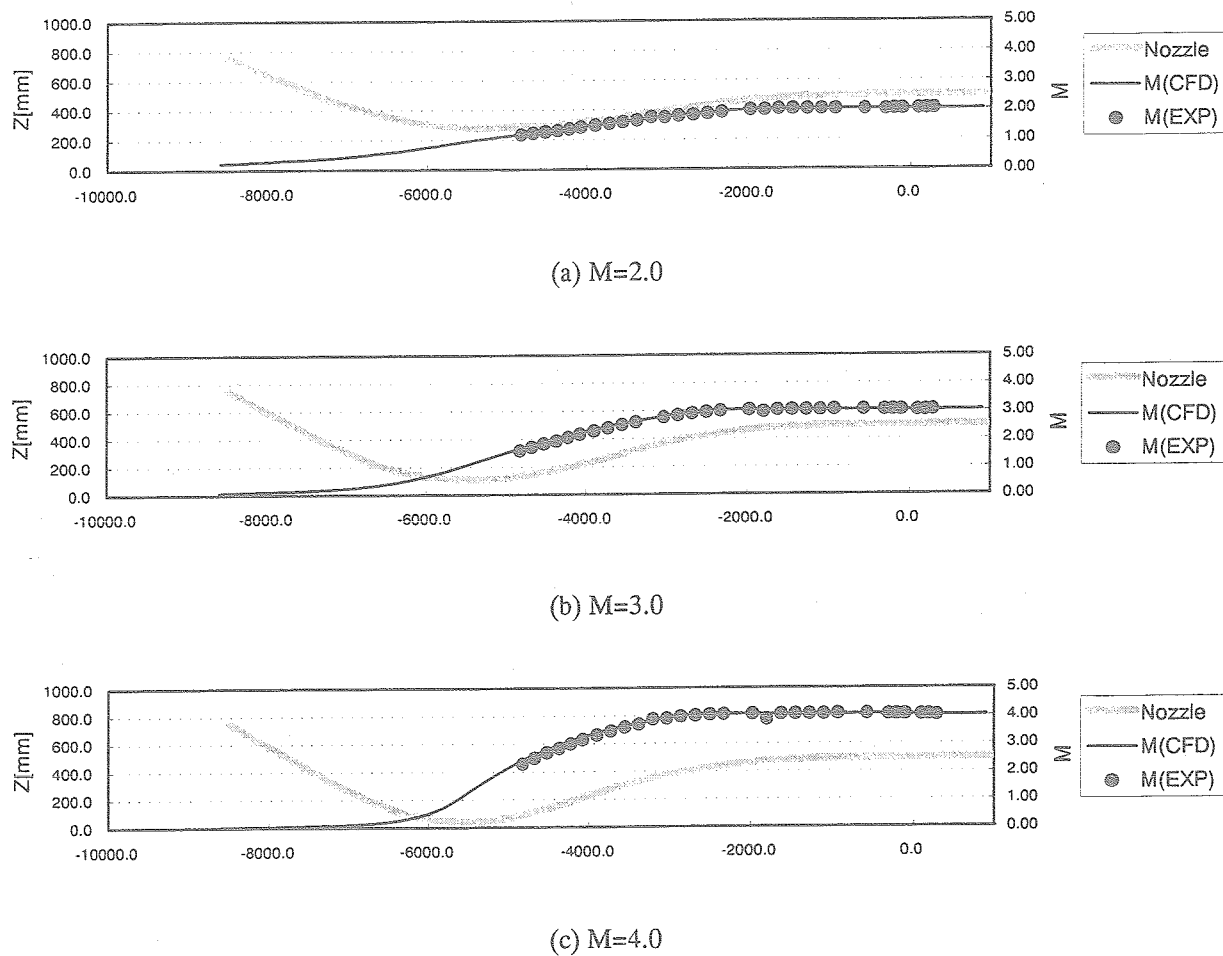


図 15 可変ノズル部側壁の静圧測定に基づく流れ方向のマッハ数プロファイル

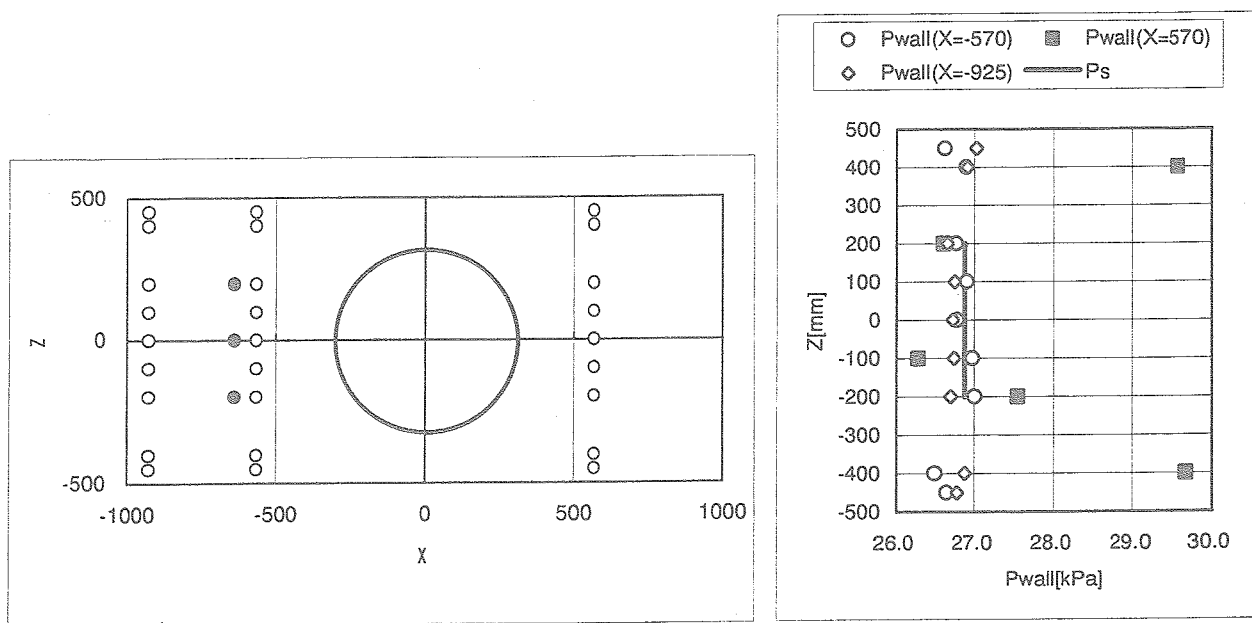


図 16 測定部静圧の測定位置の妥当性検討