

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

1m×1m超音速風洞の改修と風洞性能

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

2006年3月

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

宇宙航空研究開発機構研究開発報告
JAXA Research and Development Report

1m×1m超音速風洞の改修と風洞性能
The Performance and Control System of JAXA
1mX1m Supersonic Wind Tunnel After Some Improvements

渡辺 光則^{*1}、楯 篤志^{*2}、浜本 滋^{*1}、酒井 謙二^{*1}、
外立 政隆^{*1}、野田 順一^{*1}、近藤 洋史^{*1}、原 亘利^{*1}

Mitsunori WATANABE , Atsushi TATE , Shigeru HAMAMOTO , Kenji SAKAI ,
Masataka HASHIDATE , Junichi NODA , Youji KONDOU , Watari HARA

*1 : 総合技術研究本部 風洞技術開発センター

Wind Tunnel Technology Center
Institute of Aerospace Technology

*2 : 航空プログラムグループ 無人機・未来型航空機チーム

Unmanned and Innovative Aircraft Team
Aviation Program Group

2006年3月

March 2006

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

目 次

1. はじめに	1
2. 機械系の改修	2
2. 1 高圧導管部の改修	3
2. 2 集合胴部の改修	3
2. 2. 1 流入胴・拡散胴部の改修	3
2. 2. 2 整流部の改修	3
2. 2. 3 縮流部の改修	4
2. 3 可変ノズル部の改修	4
2. 4 測定部の改修	5
3. 制御系の改修	6
3. 1 風洞運転制御系の改修	6
3. 2 集合胴圧力制御の改修	7
4. 運転方式	8
4. 1 通風運転の種類	8
4. 2 運転手順及び通風回数	9
5. 可変ノズル形状とノズル内マッハ数分布	10
5. 1 可変ノズル形状設定と精度の検討	10
5. 2 ノズル内マッハ数分布の計測結果	10
6. 測定部の気流一様性	11
6. 1 気流一様性の確認方法	11
6. 2 横方向流れ特性	12
6. 3 気流方向流れ特性	12
6. 4 気流偏角特性	20
7. 風洞騒音	21
7. 1 測定条件	21
7. 2 測定方法	21
7. 3 騒音測定結果	22
8. まとめ	23
9. 謝辞	23
参考文献	23
付録：風洞運転フローの各項目の要点	24

1 m × 1 m 超音速風洞の改修と風洞性能

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

The performance and control system of JAXA 1m×1m supersonic wind tunnel after some improvements.

Mitsunori WATANABE, Atsushi TATE, Shigeru HAMAMOTO, Kenji SAKAI
Masataka HASHIDATE, Junichi NODA, Youji KONDOU And Nobutoshi HARA

ABSTRACT

The supersonic wind tunnel at JAXA has been improved in FY1999 by replacing the nozzle section, extending the settling chamber and renewing the control unit. Through the improvement, total pressure is stabilized within 5 seconds and thereafter kept $\pm 0.1\%$ around the target pressure from $M_\infty=1.4$ to 4.0. The flow in the test section is highly two-dimensional both horizontally and vertically. Total pressure distribution in the test section settles within 2% of the each average values at $M_\infty=1.4$ to 4.0. Furthermore, one-man-operation had been made possible by this upgrade.

Key words: supersonic wind tunnel, nozzle section, total pressure distribution, one-man-operation

概 要

宇宙航空研究開発機構 1 m × 1 m 超音速風洞の老朽化対策と測定部気流特性の改善を目的として、測定部より上流側の高圧導管部、集合胴部、可変ノズル・測定部及び風洞運転制御システムの改修を、平成 11 年度から 12 年度にかけて実施した。その結果、測定部の目標気流特性を満たし、風洞運転制御のワンマンコントロール化（1 人運転）を達成できた。改善された測定部気流特性においては、マッハ数 (M_∞) の設定精度を $\pm 1\%$ 以内に収めることができた。また、気流の一様性については、すべての主要マッハ数で総圧 (P_{o2}) 分布の一様性を改修目標値内に収めることができた。本報告では、改修概要と改修後の風洞性能について報告する。

1. はじめに

国内最大級の 1 m × 1 m の測定部を持つ JAXA 超音速風洞¹⁾ は 1961 年に建設されて以来、平成 11 年の風洞改修前までに約 19,500 回の通風を数えるに至った。この間、次世代超音速機 (SST)、H-II ロケット、宇宙往還機 (HOPE) 等の数多くの航空・宇宙機の研究開発に大きく寄与した。しかし、建設後約 40 年が経過し、老朽化が進んだことにより、近年の航空・宇宙機の開発で要求される高精度な測定部気流特性を満たすことが難しくなってきた。そのため、平成 11 年度から平成 12 年度にかけて、測定部気流特性の改善を主目的として、老朽化した風洞主要各部と風洞運転制御システムの改修を実施した。風洞主要部の改修箇所は、測定部から上流側の高圧導管部、集合胴部、可変ノズル・測定部である。

改修作業は平成 11 年 6 月より現地工事に着手し、平成 12 年 6 月中旬までに機械及び制御装置の据付・調整を終了させた。引き続き気流の調整作業を行い、平成 12 年 11 月

末までに改修を完了させた。気流の調整作業では、最初に集合胴圧力制御を調整するための通風調整試験を実施した。通風調整試験では、マッハ数 $M_\infty=1.4, 2.0, 3.0$ 及び 4.0 のマッハ数について通風が確立すること、及び集合胴設定圧力までの到達時間（整定時間）短縮の調整を行った。次に主要マッハ数 $M_\infty=1.4, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5$ 及び 4.0 において、測定部総圧 (P_{o2}) 分布の一様性（バラツキ）を改修目標値内に収める気流調整試験を実施した。気流調整試験において、マッハ数 $M_\infty=1.4$ 及び 2.0 では、ノズル形状を設計形状（ノズル基本形状）に設定することで、総圧分布の一様性の改修目標値を満足することができた。但し、マッハ数 $M_\infty=2.5$ 以上では、ノズル基本形状に設定することで総圧分布の一様性の改修目標値を満足しなかったため、ノズル基本形状を修正して改修目標値内に収めた。

改修後は平成 12 年 12 月よりユーザ試験を受入れながら、種々の気流特性を詳細に調べた。

気流偏角は、AGARD-B 標準模型を用いて縦 3 分力試験

をベースに検討した。

本報告では、改修概要と改修期間内に実施した気流調整作業の結果、及び改修直後に調べた気流偏角特性について報告する。

2. 機械系の改修

図1及び図2に改修後の風洞全体図と風洞本体図を示す。また、表1に改修後の風洞基本性能を示す。風洞基本性能は改修前とほぼ同じである。改修範囲は、超音速風洞専用仕切弁下流から測定部まで（高圧導管部、集合胴部及び可変ノズル・測定部）である。

以下に各部改修の詳細を示す。

表1 風洞基本性能

風洞型式	吹出式風洞
測定部寸法	1 m × 1 m
マッハ数(M_{∞})	1.4 ~ 4.0
レイノルズ数(R_{∞})	2 ~ 6×10^7 (1/m)
流量	280 (kg/s)
通風時間	最大40 (秒)
完成年度	1961年度
改修年度	2000年度

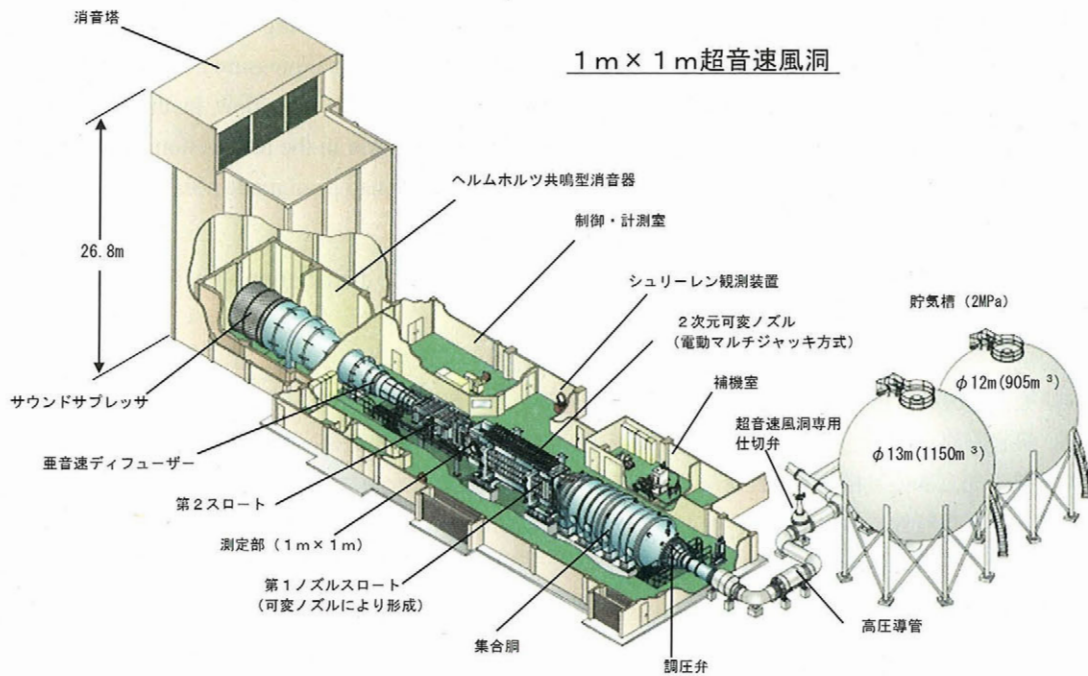


図1 風洞全体図

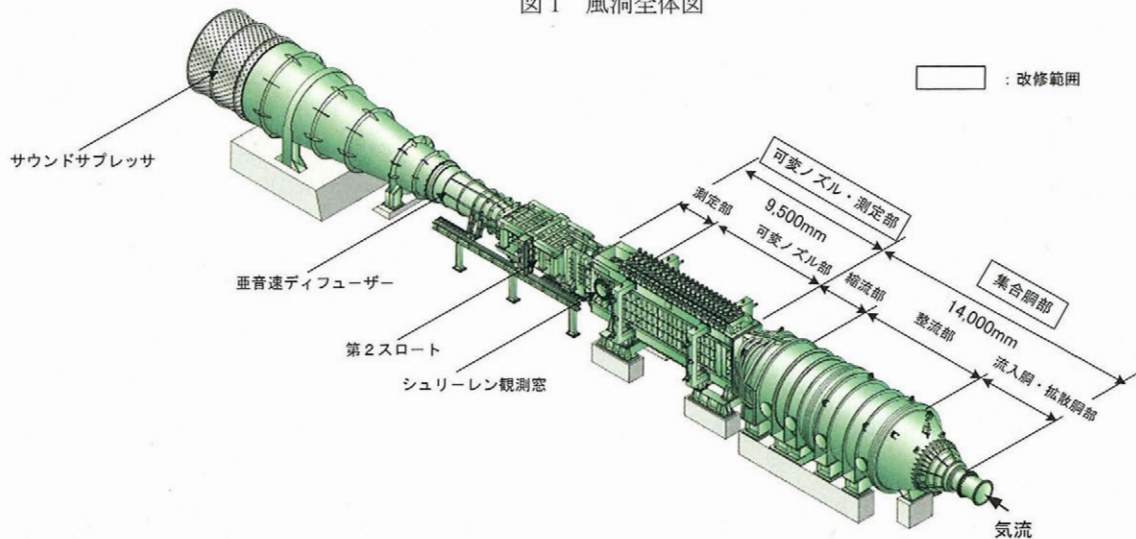


図2 風洞本体図

2. 1 高圧導管部の改修

集合胴部の長さが改修前に比べて約5m長くなったため、高圧導管部の改修が必要となった。

高圧導管とは、図1に示す超音速風洞専用仕切弁下流から集合胴入口までの流路を指す。改修に際して、流路内の2個の伸縮管は、既設のものを再使用した。従来の仕切弁下流から集合胴までの経路はL字を描いていたが、5mの延長を吸収するため、コの字を描く経路となった。その際、調圧弁圧力制御性能を確保するために、調圧弁入口直前の直管の長さは改修前と同じとした。

2. 2 集合胴部の改修

集合胴部の側面図と平面図を図3に示す。集合胴部は、図2及び図3に示すように調圧弁のある流入胴・拡散胴部、整流部及び縮流部で構成されている。各部の改修前後の寸法比較を表2に示す。

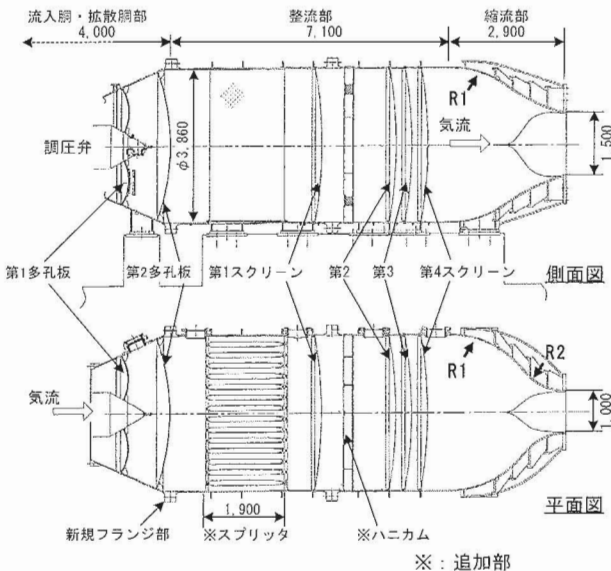


図3 集合胴部の側面図/平面図 (単位: mm)

表2 改修前後の寸法比較

	改修前(m)	改修後(m)
整流部内径	φ 4.00	φ 3.86
集合胴全長	9.39	14.00
1) 流入胴・拡散胴部	(3.99)	(4.00)
2) 整流部	(3.30)	(7.10)
3) 縮流部	(2.40)	(2.90)
縮流部	改修前(m)	改修後(m)
1) 入口径	φ 4.00	φ 3.86
2) 出口寸法	幅1×高さ2.2	幅1×高さ1.5
3) 縮流比 (出口面積/入口面積)	1/5.7	1/7.8

2. 2. 1 流入胴・拡散胴部の改修

更新前の調圧弁駆動用油圧シリンダーは、同シリンダー内のクッションリングが脱落していたため、閉速度が本来の性能より著しく劣っていた。

本改修では、調圧弁の駆動用油圧シリンダー、開度検出器及びロック装置（電磁石）等を更新した。

また、流入・拡散胴部を新設の整流部に結合させるために、同部下流側に新規のフランジを設けた（図3参照）。このフランジの取付けにあたって、障害となる第2多孔板を上流側へ90mm移動させた。

更新後の調圧弁駆動用油圧シリンダーの基本仕様は改修前と同様であるが、万が一調圧弁が暴走し高速で全開した場合に衝撃を緩和する目的で、閉方向だけにあったクッション機構を開方向にも設けた。

更新後は、本来の油圧シリンダー速度性能が回復し、調圧弁の圧力制御性能も向上した。参考として、マッハ数 $M_{\infty}=2.0$ の通風における油圧シリンダー速度の比較を表3に示す。速度の単位は、毎秒当たりの動きの量を使用最大ストロークに対する百分率で表したものである。

表3 調圧弁駆動用油圧シリンダー速度 ($M_{\infty}=2.0$)

	改修前(%/sec)	改修後(%/sec)
開方向	16.3	18.6
閉方向	1.2	17.3

2. 2. 2 整流部の改修

流れの整流と低騒音化を目的に、整流部の改修を実施した（図3参照）。

改修前には流入・拡散胴部に拡散用方向板、第1多孔板及び第2多孔板が、整流部には4枚のスクリーン（金網：SUS製14メッシュ）が装備されていたが、本改修では以下の装置を追加した。

(1) 第2多孔板の後に、中高音領域で効果が大きいグラスワール製消音スプリッタ²⁾を設置

(2) 第1スクリーンと第2スクリーン間にアルミ製ハニカム（セルサイズ9.52mm×長さ185mm）を追加

これらの増設により整流部は、9.39mから14mと従来に比べて約4.6m長くなった。なお、改修後の第1スクリーンは#10メッシュサイズを、第2、第3及び第4スクリーンは#20メッシュサイズを採用している。

本改修による騒音特性への影響については、7章に示す。

なお、気流乱れ特性については、現段階では確認試験を行っていないが、上記(1)の消音スプリッタの設置により、気流乱れの大幅な低減が推定される。

2. 2. 3 縮流部の改修³⁾

縮流部入口から可変ノズル入口まで流れの剥離を防ぐために、図3に示す円形縮流部上流側の曲率半径(R1)と、可変ノズル部固定側壁との接合部の曲率半径(R2)を大きくした。この結果、縮流部の長さは0.5m伸長し、2.4mから2.9mになった。また、計算流体力学(CFD)解析を用いて、流路内のマッハ数分布及び静圧分布を検討し、縮流部入口から可変ノズル部入口まで流れの剥離がないことを確認した。

2. 3 可変ノズル部の改修

可変ノズルの形状設定精度の向上を図るために、従来の油圧制御から電動ジャッキを使用した電動制御に切替えた。電動ジャッキの数量は上下各21対である。また、ジャッキ軸には精密ローラーネジを採用した。

図4に可変ノズル・測定部の全体図を示す。また、図5.1及び図5.2には、各々可変ノズルの側面図と主要マッハ数 $M_{\infty}=1.4, 2.0, 3.0$ 及び 4.0 のノズル形状を示す(ちなみに、マッハ数 $M_{\infty}=4.0$ のスロート幅は約80mmである)。

なお、改修は下記の条件で実施した。

- (1)ノズルスロートより下流域でのノズルの設計形状は、改修前と同じとする(マッハ数 $M_{\infty}=1.4$ から 4.0)。

- (2)可変ノズルの全長及び測定部との結合部断面形状は改修前と同じとする。

また、電動ジャッキ制御に加えて、下記の改修を実施した。

- (1)集合胴からノズルへのつながりを改善するために、可変ノズル入口の高さを2.2mから1.5mにした。
 (2)ノズルシールの修理及び交換を容易にするため、左右の側壁が電動で開閉できる構造を採用した。
 可変ノズルの形状設定を電動ジャッキ制御に替えたことにより、以下の改善が得られた。

- (1)ノズル形状の微調整が可能となった。
 なお、ジャッキのストローク調整可能範囲は、平均で $\pm 10\text{mm}$ である。
 (2)ノズル形状変更中における故障がなくなった。
 マッハ数 $M_{\infty}=1.4$ から 4.0 までのノズル形状の変更に要する時間は約10分である。

参考までに、可変ノズルの上下可撓板は、材質がステンレス(13Cr-5Ni-1Mo)で板厚18mm、側壁はステンレスクラッド鋼(SUS304と鋼の合板)で板厚30mmである。また、内壁(気流面)は、全域が鏡面仕上げ(パフ仕上げ)である。

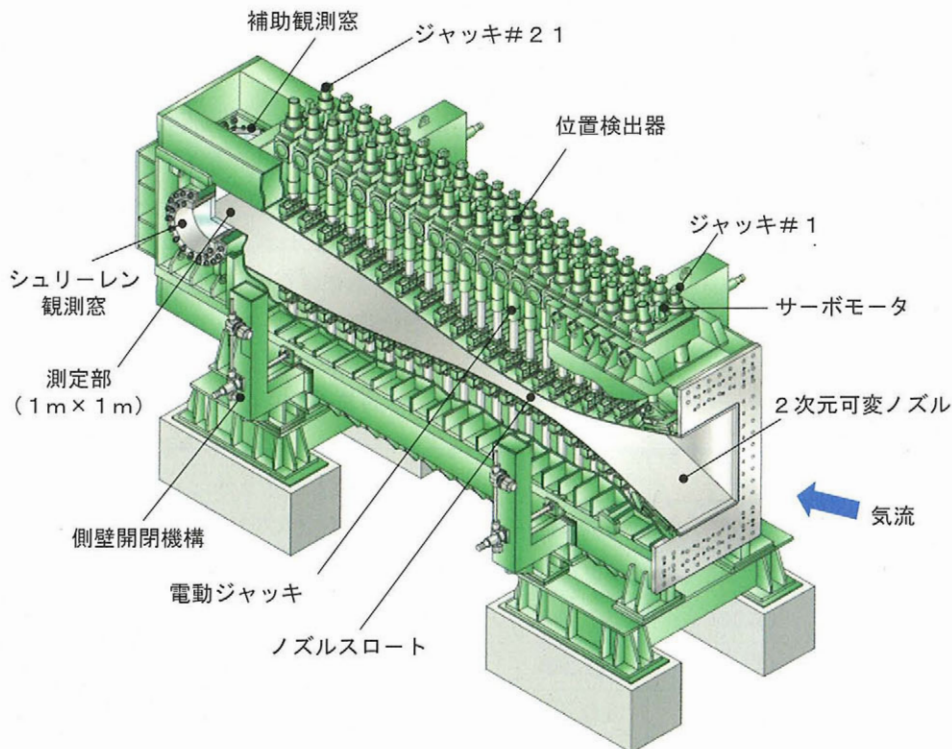


図4 可変ノズル・測定部の全体図

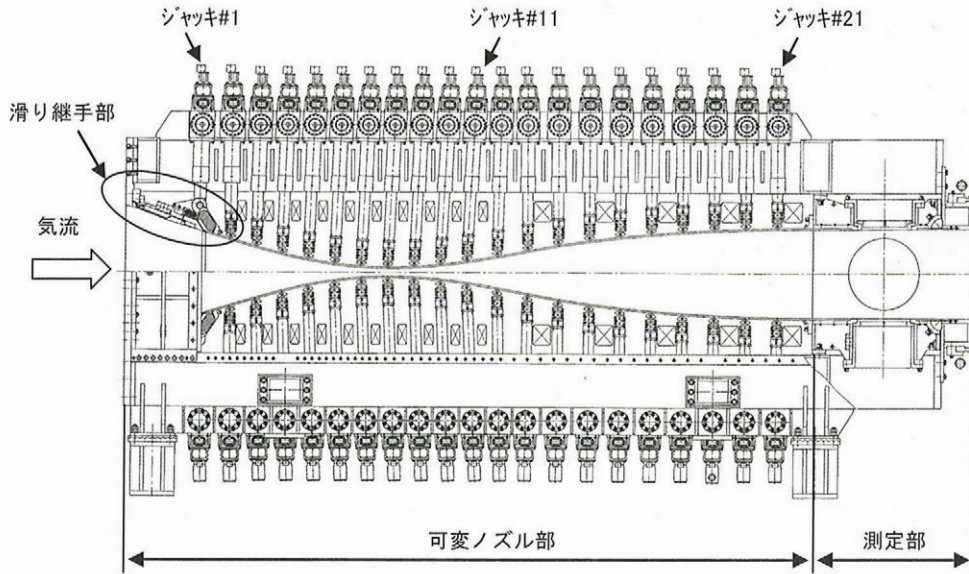


図 5.1 可変ノズル側面図 ($M_{\infty}=4.0$ 形状)

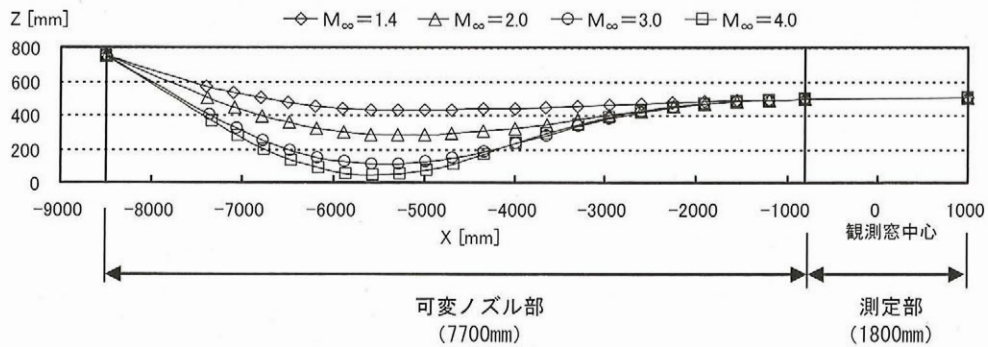


図 5.2 ノズル形状 ($M_{\infty}=1.4, 2.0, 3.0, 4.0$)

2. 4 測定部の改修

測定部には従来のシュリーレン観測窓に加えて、風洞試験の多様化を目的に、測定部上下壁が取外しできる構造とした（有効径600mm；フランジ式閉止蓋）。

本機能の追加により、上下壁へ模型を取付けた風洞試験が可能となった。下壁閉止蓋を活用した例を図6に示す。

また、上部からの試験状況の観察を可能とするため、上壁の閉止蓋内は有効径450mmの補助観測窓が取付く構造とした。補助観測窓外観写真を図7に示す。

測定部の寸法は改修前と同じく、測定部出口断面が1m×1m及び流れ方向の長さが1.8mである。上下壁の境界層排除勾配については、CFD解析による検討結果より6/1000から5/1000に変更した³⁾。

改修前においては、可変ノズル上下可撓板の形状変化に伴う同板の流れ方向位置の変位は、可撓板自体が測定部内（上下壁）をスライドすることにより吸収されていた。本改修では、測定部の流れへの影響を小さくするため、可変ノズル最上流部のジャッキに接合されている滑り継手部で、変位を吸収するように機構を変更した（図5.1参照）。

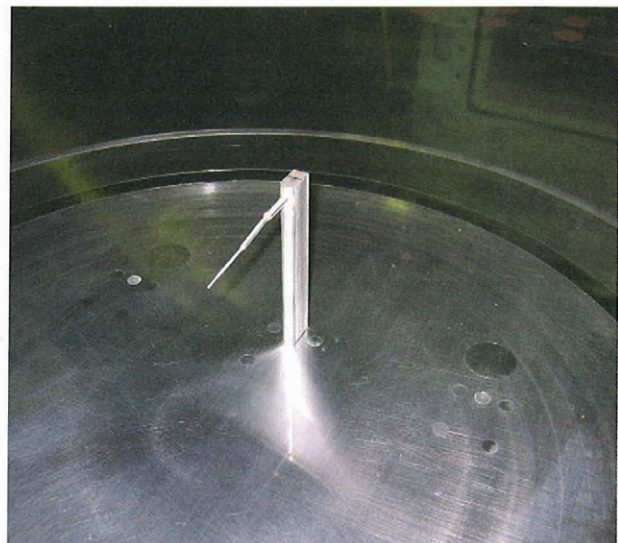


図 6 測定部下部閉止蓋の使用例
（トラバースタイプ総圧管プローブ模型）

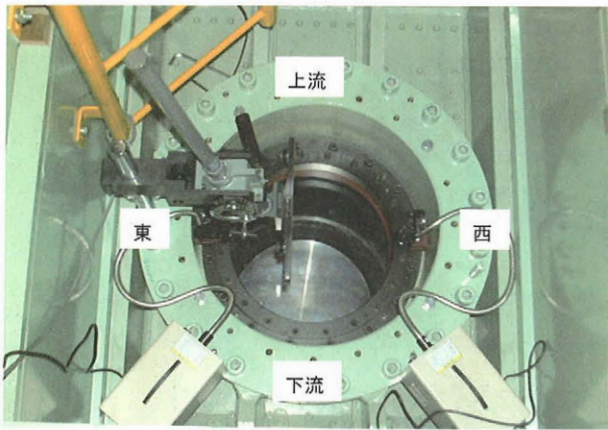


図7 補助観測窓外観写真

3. 制御系の改修

通風準備、通風及び通風停止までの一連の制御を、風洞操作卓上で1人のオペレータで実行できるようにするため、風洞運転制御システムの全体について改修を行った。

図8に風洞制御室を示す。同室内には、風洞操作卓、風洞運転制御コンピュータ、風洞監視盤及び模型制御盤を置いている。

主な改修内容は以下の通り。

(1) 新規に製作したもの

- ① 風洞操作卓
- ② 風洞運転制御コンピュータ
- ③ 風洞監視盤
- ④ 圧力制御盤
- ⑤ 可変ノズル制御盤
- ⑥ 模型制御盤

(2) 既設品を改造したもの

- ① 補機制御盤
- ② 油圧源空気源操作盤
- ③ 第2スロート機側盤

次章で風洞運転制御システムの改修と、制御装置の中で特に重要な集合胴圧力制御部の改修について述べる。

3. 1 風洞運転制御系の改修

風洞運転制御システムの改修では、産業用パソコンとPLC (Programmable Logic Controller : プログラマブルロジックコントローラ) を導入し、旧式なアナログ方式に変えて同システムのデジタル化を行った。風洞運転制御システム構成図を図9に示す。

風洞運転制御システムは、①風洞運転制御コンピュータ、②風洞操作卓、③風洞監視盤、④圧力制御盤、⑤可変ノズル制御盤、⑥模型制御盤及び⑦補機制御盤の以上7個の主要装置から構成される。

①の風洞運転制御コンピュータには、東芝製F3100A-model6000 (CPU233MHz) を使用した。また、②から⑦の制御装置は、PLC (横河電機製FA-M3シリーズ) を内蔵している。①から⑦の各装置間の信号伝送は、基本的に光ケーブルを使用した多重伝送方式である。制御の方法は、原則的に機能上類似性のある機器をまとめて、一つの制御盤で制御及び監視を行う方式を取っている。風洞運転 (制御) のためのパラメータ設定は、オペレータが風洞操作卓のPLC (タッチパネル入力) と同操作卓内に置かれた風洞運転制御コンピュータ (キー入力) により行う。制御室 (中央) から各機器への制御指令は、風洞操作卓より風洞監視盤を経由して各制御盤に伝送される。最終的に機器への制御指令は制御盤より発せられる。反対に機器の監視情報は、各制御盤を経由して風洞監視盤に集約され、風洞操作卓のPLC (タッチパネル) 及び風洞運転制御コンピュータ (モニター) に伝送される。

以上のように新しい風洞運転制御システムを構築したことにより、通風準備、通風及び通風停止までの一連の制御を、風洞操作卓上で1人のオペレータで実行できるようになった。

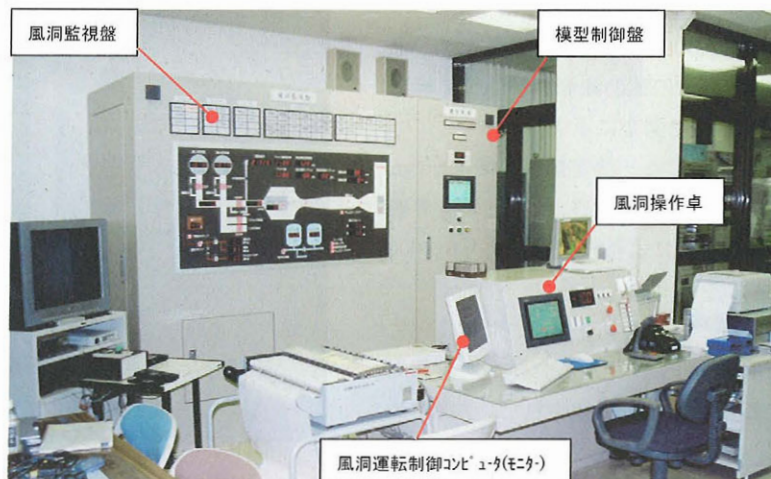


図8 風洞制御室

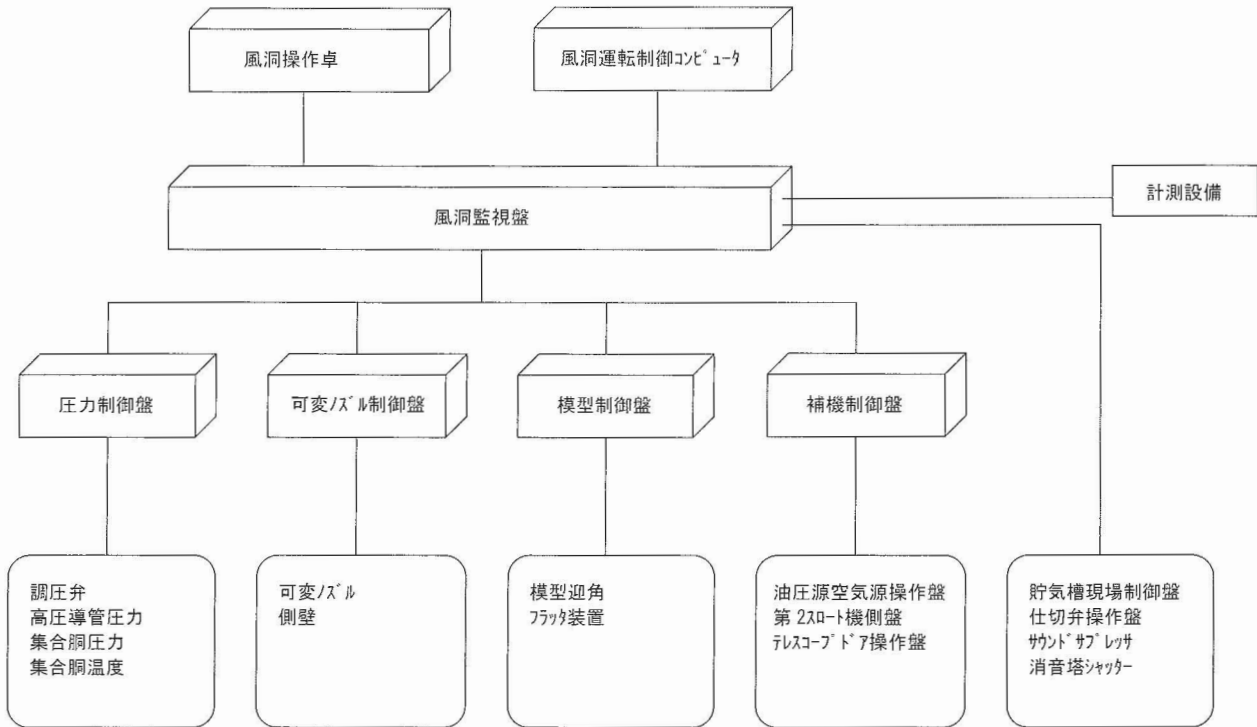


図9 風洞運転制御システム構成図

3. 2 集合胴圧力制御の改修

本改修前の集合胴圧力制御⁴⁾は、調圧弁駆動用油圧シリンダーの動作制御を行うサーボバルブが最新式のものであったにも拘わらず、同油圧シリンダーの劣化及び圧力制御装置の能力限界から、集合胴圧力制御能力は、満足できるものではなかった。そのため、本改修では、調圧弁駆動用油圧シリンダー及び圧力制御装置を更新した。同油圧シリンダーの更新については、上記で述べた通りである。

集合胴圧力制御装置の主な仕様を表4に示す。

表4 集合胴圧力制御装置の主な仕様

圧力設定範囲	150～1,650 kPa
圧力設定精度	集合胴設定圧力の±1.0%
圧力安定度	平均集合胴圧力の±0.1%
圧力スweep	1.0～30.0 kPa/sec
制御方式	デジタル制御 FF+PI 制御

圧力制御装置の更新概要は、以下の通りである。

- (1) 風洞起動時（調圧弁の開き始め）の過渡圧力制御時にはフィードフォワード(FF)方式を、その後の定常圧力制御には比例・積分(PI)方式を採用した。
- (2) 集合胴の圧力制御は、一般に風洞起動時には最短時間で設定圧力に近づけ、設定値と現在値の圧力偏差がある値以下になった以降は、定常偏差を可能な限り小さくするように制御することが望ましい。このため

フィードフォワード制御では、マッハ数(M_∞)、集合胴設定圧力(P_o)、高圧導管圧(P_d)、貯気槽容量及び過渡圧力時の調圧弁オーバーシュート量の条件をパラメータとして、調圧弁の最適な動作を予測制御するものとした。

- (3) 比例・積分制御では、貯気槽圧力補償ゲインを含めた制御とした。
- (4) 圧力制御装置にPLC（プログラマブルロジックコントローラ）を導入したことにより、マッハ数(M_∞)及び通風中の時々刻々に対応した最適な制御パラメータをより精度良く設定できるようになった。

気流の調整作業においては、通風調整試験（圧力制御調整試験）を実施し、より短時間で安定した設定圧力(P_o)になるように圧力制御装置のパラメータ調整を行った。

図10.1から図10.4に改修前後の集合胴圧力変化の対比を示す。当初、集合胴設定圧力までの到達時間（整定時間）は、改修により集合胴部の容積が約2倍なったことで、長くなると懸念された。しかし本圧力制御の改修により、改修前より短縮することができた。特に、マッハ数 $M_\infty=4.0$ （図10.4）においては、整定時間を（改修前の9秒から5秒になり）約4秒短縮できた。これは、調圧弁駆動用油圧シリンダーを更新したことと、フィードフォワード制御の採用に負う所が大きい。

圧力設定精度については、設定マッハ数 $M_\infty=1.4, 2.0, 3.0$ 及び 4.0 で、改修の目標である「圧力設定精度±1.0%以内」を満足した。また、圧力安定度とその保持時間につ

いては、 $M_\infty=2.0, 3.0$ 及び 4.0 で、目標とした「平均圧力の $\pm 0.1\%$ 以内で 30 秒間以上保持」を通風開始後 5 秒から 35 秒の間で達成した。

マッハ数 $M_\infty=1.4$ については、通風開始後 5 秒から 35 秒の間で、圧力安定度が部分的に目標値を超えた(最大で $\pm 0.17\%$)。なお、下記の 6 章で述べる測定部の気流特性においては、本目標未達成による顕著な影響は特に確認されていない。

4. 運転方式

4. 1 通風運転の種類

通風運転の種類としては、マッハ数 (M_∞) 固定による定常圧力運転と圧カスweep運転の 2 種類である。

定常圧力/圧カスweep運転における集合胴圧力設定値(淀み圧: P_o)の範囲は、改修前とほぼ同じである。しかしマッハ数 $M_\infty=2.25$ 及び 2.5 の場合については、通風時のスタートを良くするために、改修前より P_o のデフォルト値を 10% アップした。

図 11 に改修後の集合胴圧力設定値 (P_o) を示す。なお、定常圧力運転における P_o のデフォルト値は、通風のスタートが可能な P_o の最下限値としている。また、 P_o の上限値は、マッハ数 $M_\infty=1.4\sim 4.0$ において、いずれもデフォルト値の 1.2 倍である。

圧カスweep運転での集合胴圧力設定値 (P_o) の上限値については、マッハ数 (M_∞) に応じて定常圧力運転 (P_o : デフォルト値) の 1.3 倍 ~ 3.0 倍まで設定可能とした。

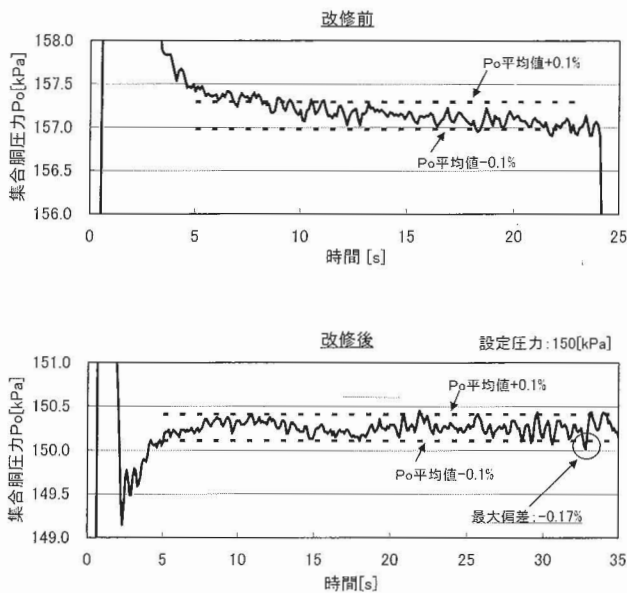


図 10.1 集合胴圧力変化 ($M_\infty=1.4$)

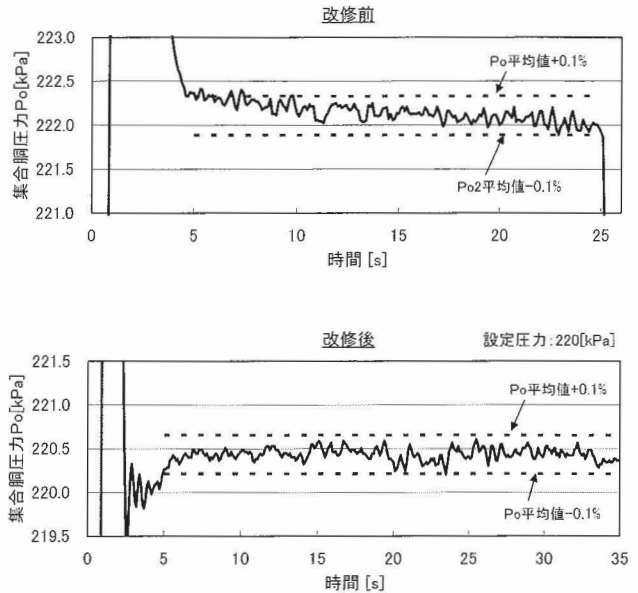


図 10.2 集合胴圧力変化 ($M_\infty=2.0$)

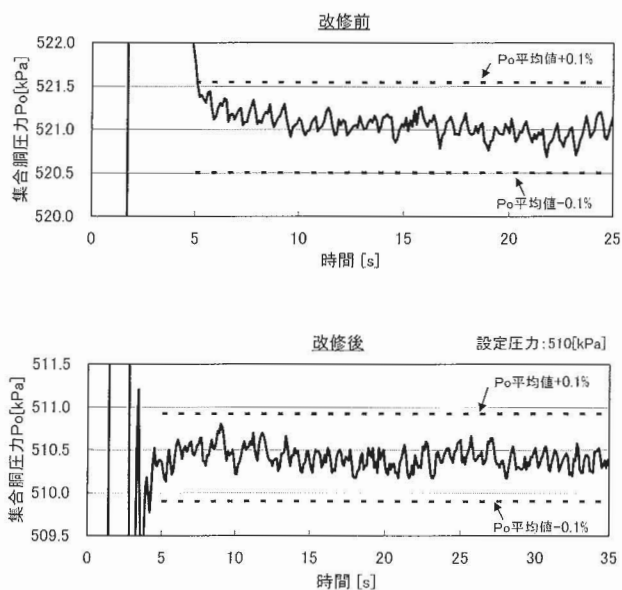


図 10.3 集合胴圧力変化 ($M_\infty=3.0$)

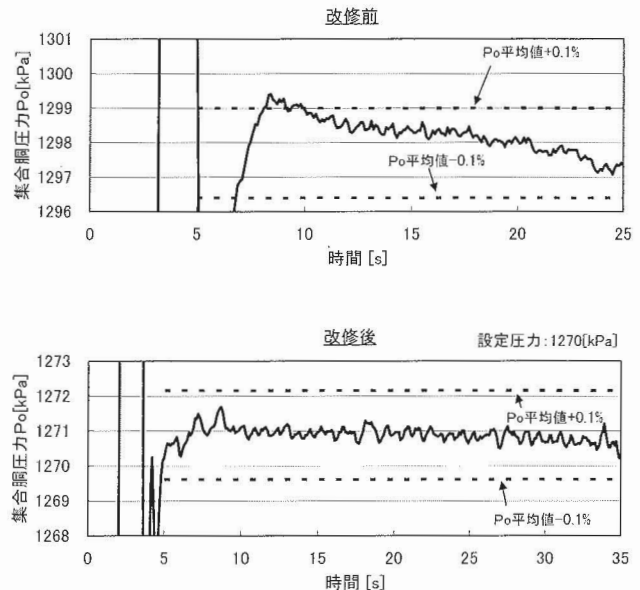


図 10.4 集合胴圧力変化 ($M_\infty=4.0$)

図 12 に、定常圧力運転でのレイノルズ数(R_{∞})を他の風洞と比較して示す。レイノルズ数を求めるにあたっては、集合胴圧力設定値(P_o)のデフォルト値及びその 1.2 倍を使用した。また、集合胴淀み温度(T_o)については、15°C (288K) とした。

4. 2 運転手順及び通風回数

新しい風洞運転制御システム下での風洞運転フローを図 13 に示す。風洞運転フローの各項目については、付録に要点をまとめた。通風については、通風間隔が約 20～30 分、1日の通風回数が 8～12 回である。

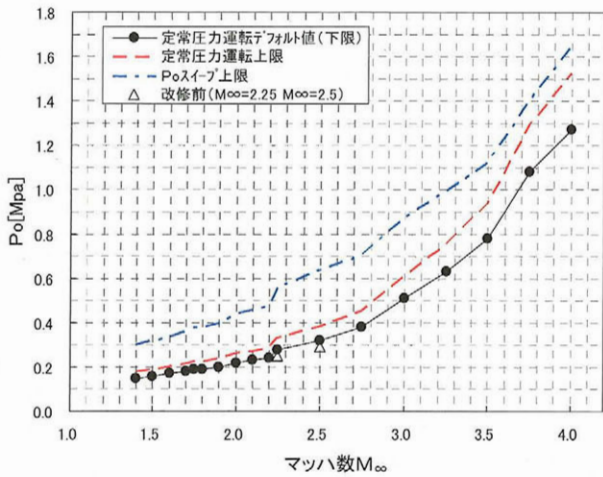


図 11 集合胴圧力設定値 (P_o)

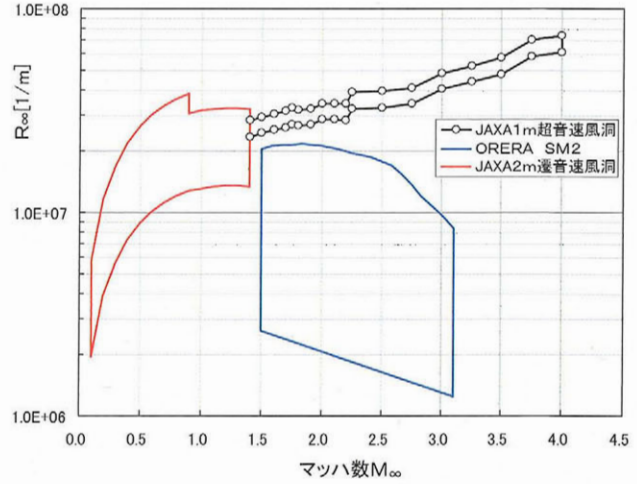


図 12 レイノルズ数 (R_{∞})

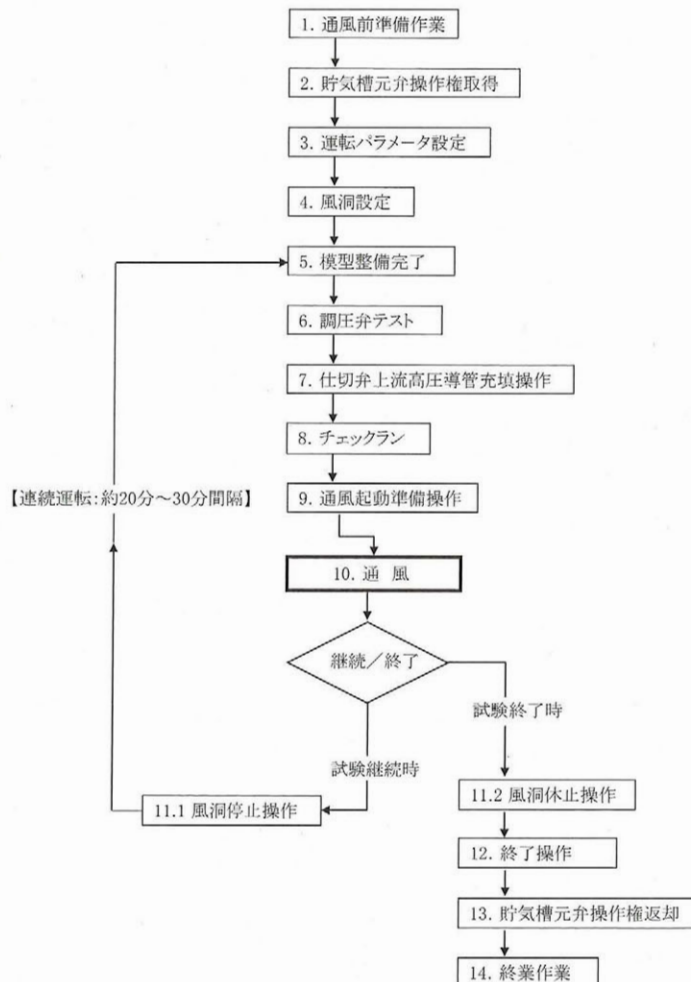


図 13 風洞運転フロー (手順)

5. 可変ノズル形状とノズル内マッハ数分布

5.1 可変ノズル形状設定と精度の検討

気流調整試験に先立ち、可変ノズルの形状設定とその形状精度を検討した。

ノズル形状設定は、マッハ数 $M_{\infty}=1.4$ の場合、形状ゲージ(板ゲージ;ノズル曲線)を使って実施した(形状ゲージは、厚さが2mmで2次元ノズルの片側曲線のみを有する)。具体的には、形状ゲージを上部及び下部の東西ノズル側壁に取付け、ノズルジャッキストロークを調整してノズル(可撓板)を同ゲージに沿わせることにより行った。但し、形状ゲージを可撓板に直接接触させるのではなく、形状ゲージと可撓板間に一定の隙間(法線方向のオフセット量)を作ることにより行った(オフセット量の設定には、市販の隙間ゲージ(NSK製;MAX-G5)を使用した)。なお、形状ゲージは、加工精度 $\pm 0.05\text{mm}$ のNCフライス盤で製作したものである。

マッハ数 $M_{\infty}=1.4$ 以外のノズル形状設定は、 $M_{\infty}=1.4$ のノズル形状をベースに、マッハ数(M_{∞})に対してテーブル化したジャッキストロークの値をセットすることにより行った。

この方法により設定したノズル形状の検証を、代表としてマッハ数 $M_{\infty}=4.0$ で実施した。検証は $M_{\infty}=1.4$ の場合と

同様な $M_{\infty}=4.0$ 用の形状ゲージを製作し、それを用いて行った。

図14.1及び図14.2に、上部及び下部の東西ノズル側壁で調べた形状ゲージに対するノズル形状設定偏差を示す。マッハ数 $M_{\infty}=1.4$ では $-0.01\sim 0.02\text{mm}$ 、 $M_{\infty}=4.0$ では $-0.1\sim 0.15\text{mm}$ である。

ノズル形状設定偏差データより、ノズルの東西方向の2次元性と上下方向の対称性について推定した。2次元性については、マッハ数 $M_{\infty}=1.4$ 及び4.0とも、概ね $\pm 0.02\text{mm}$ 以内であるので良好である。実際に東西方向の水平度を水準器で計測したが、傾きは殆どゼロであった。また、対称性についても、マッハ数 $M_{\infty}=1.4$ 及び4.0とも、上部及び下部のノズル形状設定偏差は同程度であるので、上部及び下部の可撓板曲面の対称性は良好である。

5.2 ノズル内マッハ数分布の計測結果

全圧(P_o)とノズル側面の静圧(P_{∞})の計測結果からノズル内基準マッハ数を求めた。

求めたマッハ数分布とCFD予測結果の比較を図15.1から図15.3に示す。両者は良好な一致を示し、ノズル形状が設計形状(基本形状)として妥当であることを確認した。

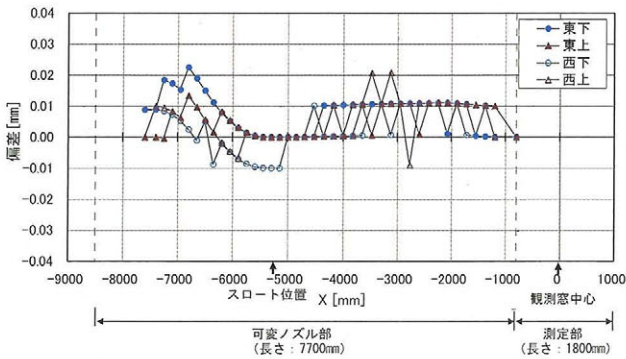


図 14.1 ノズル形状設定偏差 ($M_{\infty}=1.4$)

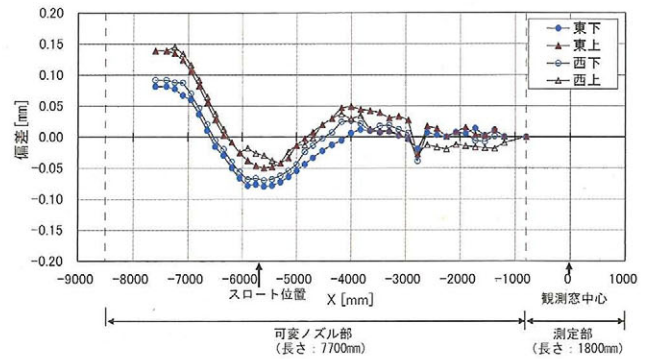


図 14.2 ノズル形状設定偏差 ($M_{\infty}=4.0$)

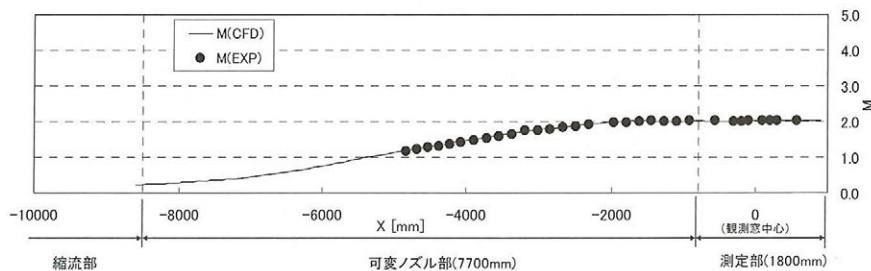


図 15.1 ノズル側壁中心のマッハ数 ($M_{\infty}=2.0$)

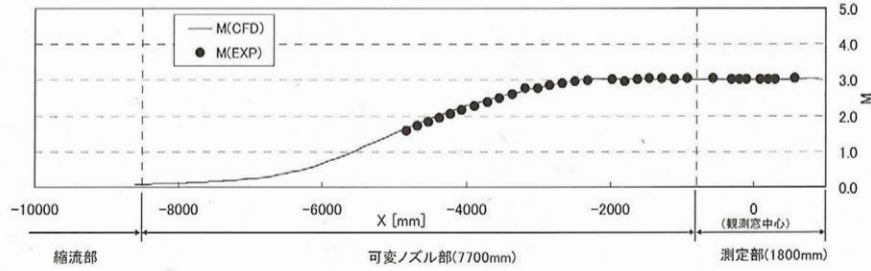


図 15.2 ノズル側壁中心のマッハ数 ($M_\infty=3.0$)

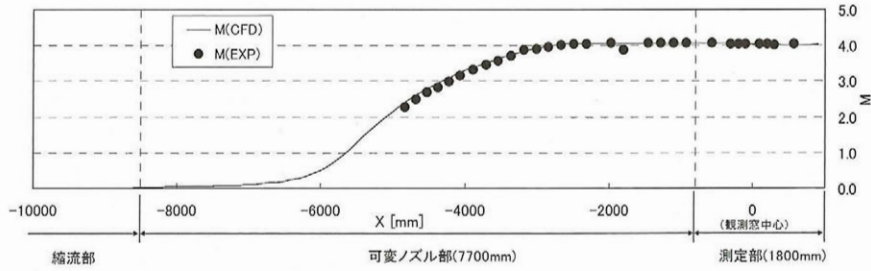


図 15.3 ノズル側壁中心のマッハ数 ($M_\infty=4.0$)

6. 測定部の気流一様性

圧力制御の調整に引き続き、測定部における気流特性（気流一様性と気流偏角）を調べた。

通常、模型は風洞中心付近に置かれるため、風洞中心付近の流れの気流特性が重要である。そのため、改修の目標を定めた気流特性の上下方向の範囲は、改修前と同じく測定部中心（シュリーレン観測窓中心）から上下±300mmとした。

6. 1 気流一様性の確認方法

測定部の気流一様性は、総圧管で計測した衝撃波後の総圧 (P_{o2}) を調べることにより確認した。

測定部の総圧分布計測には、楕形総圧管プローブを使用した。従来から使用してきた15列プローブに加え、新たに気流方向の計測範囲を広げた11列プローブを製作した。図16に各プローブの概略寸法と、測定部内での計測範囲及

びその座標系（右手系、気流の進行方向：+X）を示す。なお、座標系の原点は測定部中心と定めた。また、図17に11列プローブの写真を示す。11列プローブには、外径3mm、内径1mmの総圧管が11本、20mm間隔で幅200mmに一列に配置されている。また、15列プローブは幅280mmで、総圧管の内外径及び配列間隔は11列プローブと同様である。各プローブの気流方向の計測範囲は、11列プローブは700mm、15列プローブは300mmである。

横方向の総圧分布計測は15列プローブを使用して、また、測定部中心断面の同計測は11列プローブを使用して行った。通風では、所定の気流方向位置に固定したプローブを、上下方向に平行移動して計測を行った。図18に、11列プローブの計測時のシュリーレン写真を示す。この写真から、プローブ先端の圧力計測部には他からの衝撃波が当たることなく、総圧分布計測に問題がないことを確認した。

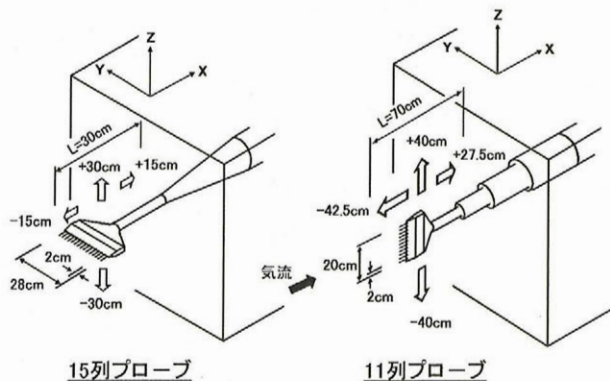


図 16 楕形総圧管プローブ概略寸法と測定範囲

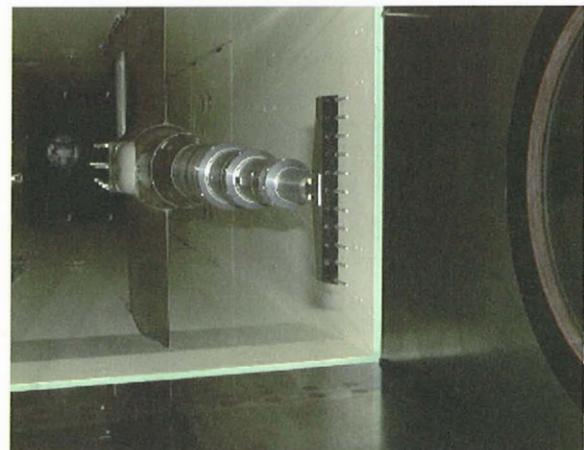


図 17 11列楕形総圧管プローブ

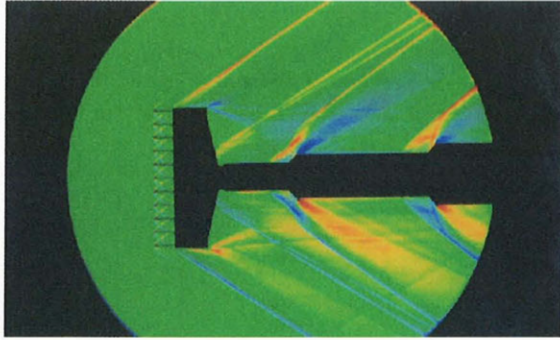


図 18.1 シュリーレン写真(M_∞=2.0、X=-190mm)

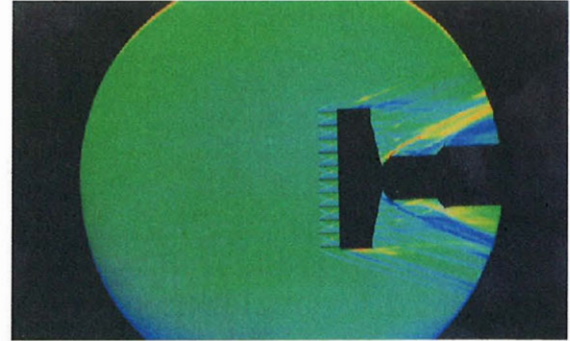


図 18.2 シュリーレン写真(M_∞=3.5、X=40mm)

6. 2 横方向流れ特性

まず、横方向の流れ特性を調べた。

15列プローブを水平にセットし、主要マッハ数M_∞=1.4、2.0、2.5、3.0、3.5及び4.0について、測定部中心位置の総圧(Po2)を計測した。プローブの上下平行移動の間隔は20mm、また、その範囲は±100mmである。代表的な例として、図19及び図20にマッハ数M_∞=2.0及び4.0について改修前と対比して示す。改修前に比べて横方向の一様性が著しく向上していることが分かる。この傾向は、他のマッハ数についても同様であった。主要マッハ数における一様性のバラツキは、最大でも±0.5%以下の結果を得た。

6. 3 気流方向流れ特性

改修前との比較のため、マッハ数M_∞=3.0の改修前に計測した気流方向X=-150、0及び120mmの3位置での、測

定部中心断面(Y=0mm)における総圧(Po2)分布を図21に示す。なお、図に示すデータは、15列プローブを水平にセットして計測したデータの内、同プローブ中心(Y=0mm)のデータを抜き出したものである。

図中の「max」/「min」及び「ave」の線は、各気流方向位置(X)における計測データのそれぞれ最大値/最小値及び平均値を示す。各気流方向位置での計測点及び計測範囲は、横方向(Y)：20mm間隔でY=±140mm、及び縦方向(Z)：20mm間隔でZ=±300mmである。また、偏差(δ)は、以下の式に示す通りで、バラツキの最大値を示す。

$$\delta [\%] = \left(\frac{Po2_max - Po2_min}{Po2_ave} \right) \times 100$$

図22に、改修前の主要マッハ数(M_∞)における各位置(X=-150、0及び120mm)での一様性(バラツキ)のまとめを示す。

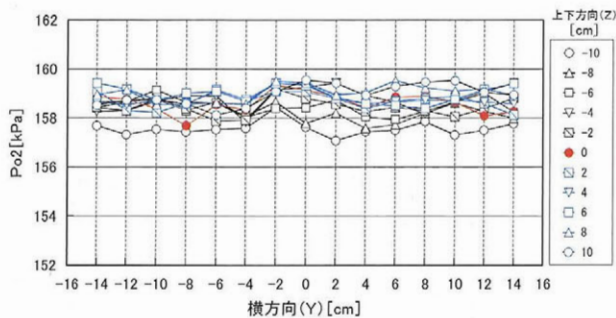


図 19.1 改修前の横(Y)方向総圧(Po2)分布 (M_∞=2.0, X=0cm)

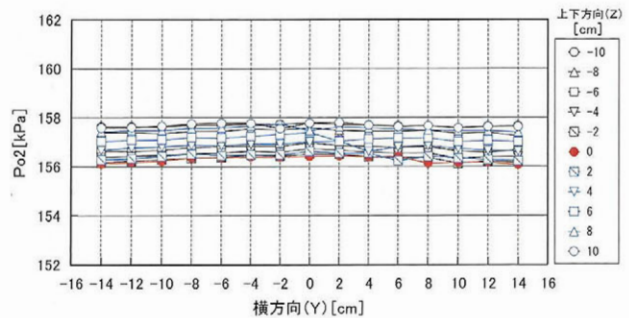


図 19.2 改修後の横(Y)方向総圧(Po2)分布 (M_∞=2.0, X=0cm)

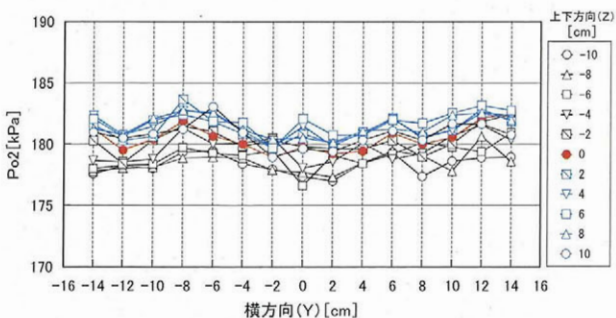


図 20.1 改修前の横(Y)方向総圧(Po2)分布 (M_∞=4.0, X=0cm)

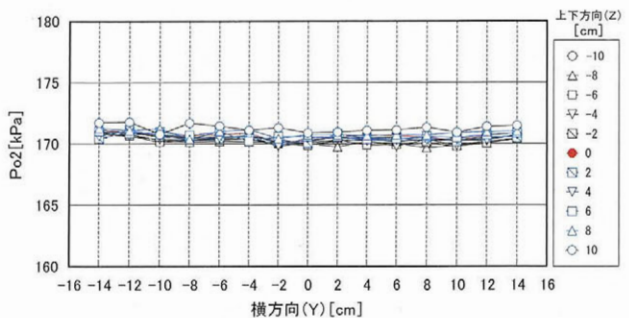


図 20.2 改修後の横(Y)方向総圧(Po2)分布 (M_∞=4.0, X=0cm)

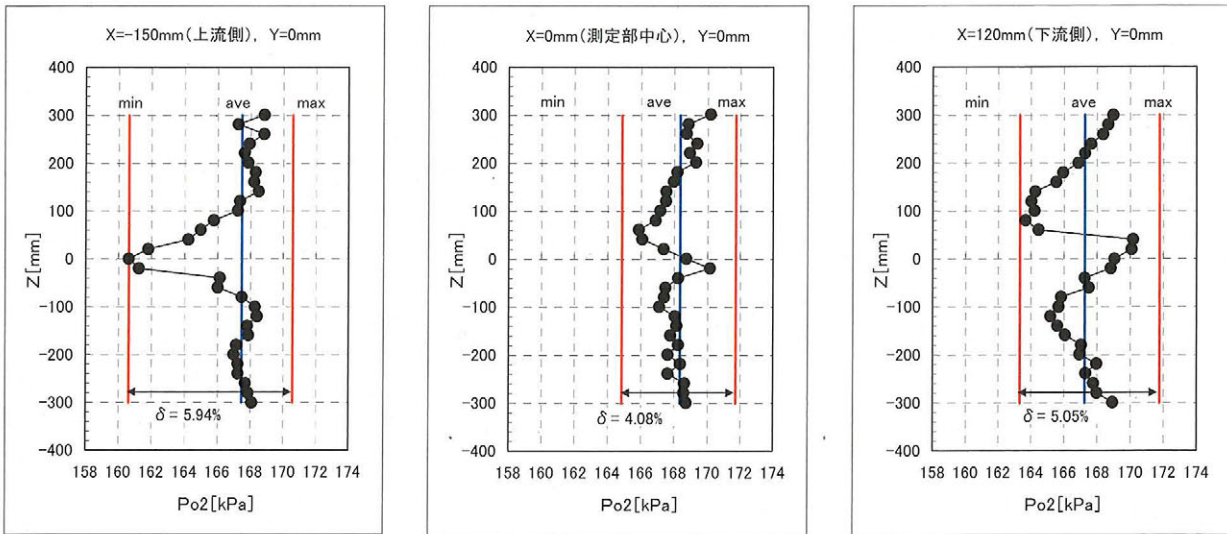


図 21 改修前の気流(X)方向総圧(Po2)分布
($M_\infty=3.0$, $X=-150, 0, 120\text{mm}$, $Y=0\text{mm}$)

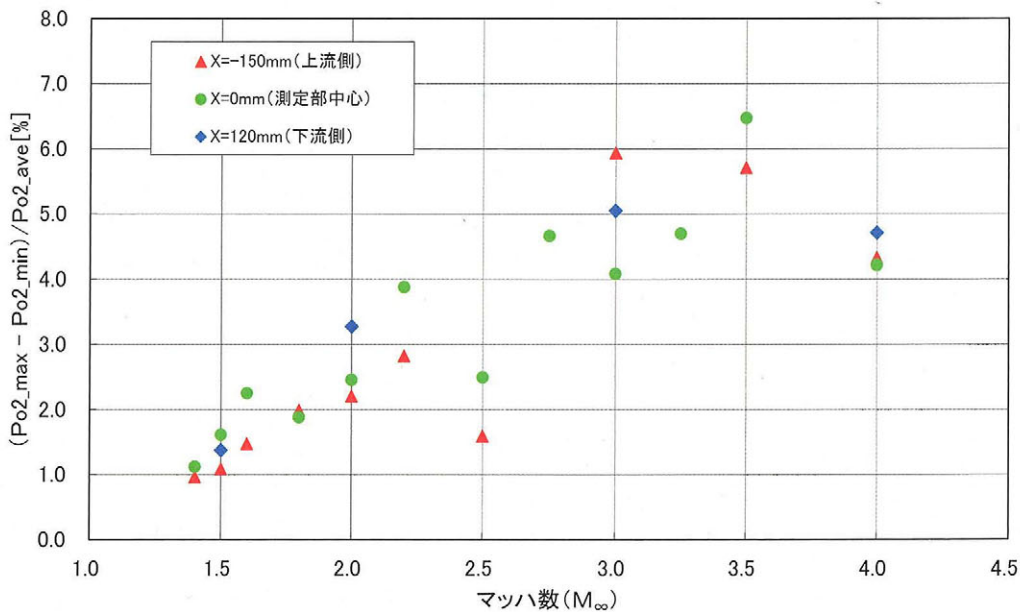


図 22 改修前の測定部総圧(Po2)分布一様性 (バラツキ)

今回新たに総圧(P_{o2})と静圧(P_s : 測定部壁圧、本 P_s は風洞代表マッハ数(M_∞)を求める際に使用している)を使ってレーレイ⁵⁾の式から求めた「評価マッハ数」を設定し、その一様性のバラツキが平均マッハ数の $\pm 0.5\%$ 以内に入る総圧値を改修の目標値とした。表 5 に、総圧の目標値を偏差(δ_m)の形式で示す。なお、「評価マッハ数」は実際のマッハ数と異なる。

前節により改修後の横方向の総圧分布は良好な 2 次元性が得られたので、測定部内の総圧分布を調べる際には、11列プローブを用いて測定部中心断面のみの特性を調べることとした。計測は11列プローブを鉛直方向にセット

(図 17 参照)して行った。気流方向の計測位置は、測定部中心($X=0\text{mm}$)から前後の位置で、 $X=-425, -190, 40, 275\text{mm}$ の4断面である。また、それらの位置(X)での上下(Z)方向の計測範囲は、 $Z=\pm 400\text{mm}$ である。

図 23 と図 24 に、予め解析で設計したノズル形状(ノズル基本形状)でのマッハ数 $M_\infty=1.4$ 及び 2.0 の総圧分布を示す。両者とも、一様性のバラツキ(δ)は、改修の目標値(δ_m)内に入った($\delta < \delta_m$)。

但し、マッハ数 $M_\infty=2.5$ 以上は、設計したノズル形状のままでは、改修の目標値(δ_m)を満たさなかったため、可変ノズルの調整(ノズル修正形状)を行った。

可変ノズル調整時間短縮のため、あらかじめ、個々のジャッキの微小変位が測定部の気流に及ぼす影響をCFDで計算しておく、

- ①ジャッキの変位が微小であれば、測定部の気流への影響は、ジャッキの変位に比例する。
- ②複数ジャッキの変位が測定部の気流へ及ぼす影響は、単独ジャッキの変位が測定部の気流へ及ぼす影響の重ねあわせで求まる。

という線形重ね合わせの仮定のもとにジャッキの変位量を求めた(文献6)参照)。

その結果、この仮定に大きな誤りが無く、可変ノズルの調整は測定部に近い方から最大で5個のジャッキで、主要

マッハ数 $M_{\infty}=2.5, 3.0, 3.5$ 及び 4.0 の調整を行うことができた。ジャッキ修正量一覧を表6に示す。

図25から図28に、主要マッハ数 $M_{\infty}=2.5, 3.0, 3.5$ 及び 4.0 の可変ノズル調整前後の総圧分布を示す。本調整により、一様性のバラツキ(δ)は、上記の全主要マッハ数域で改修の目標値(δ_m)を満足することができた($\delta \leq \delta_m$)。

図29に、改修前後の測定部総圧分布一様性(バラツキ)のまとめを示す。

なお、今後必要ならば、今回総圧分布計測を実施した主要マッハ数($M_{\infty}=1.4, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5$ 及び 4.0)以外のマッハ数についても総圧分布計測を行い、可変ノズルの調整作業を実施する予定である。

表5 総圧(Po2)一様性の目標値(δ_m)

マッハ数 (M_{∞})	δ_m [%]**
1.4	1.60以下
2.0	1.81 "
2.5	1.88 "
3.0	1.92 "
3.5	1.94 "
4.0	1.96 "

$$** \delta_m [\%] = \frac{(Po2_{M+0.5\%} - Po2_{M-0.5\%})}{Po2} \times 100$$

上記の式における総圧(Po2)及び評価マッハ(M)は、平均値である。

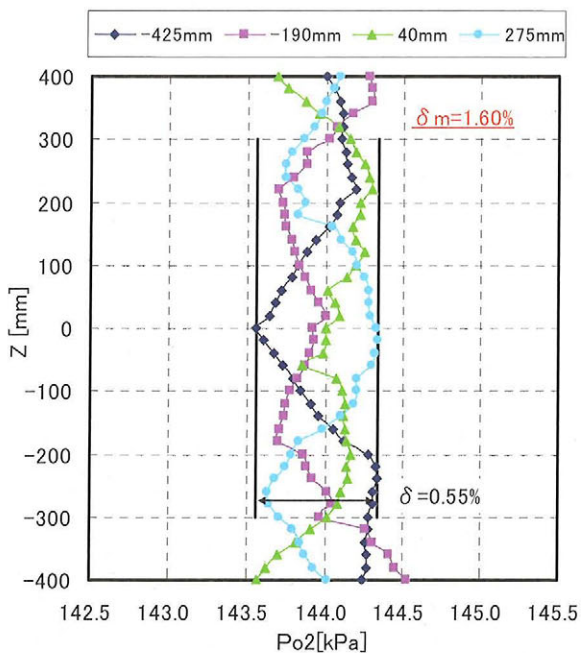


図 23.1 断面総圧(Po2)分布 ($M_{\infty}=1.4$)
(ノズル基本形状: $\delta < \delta_m$)

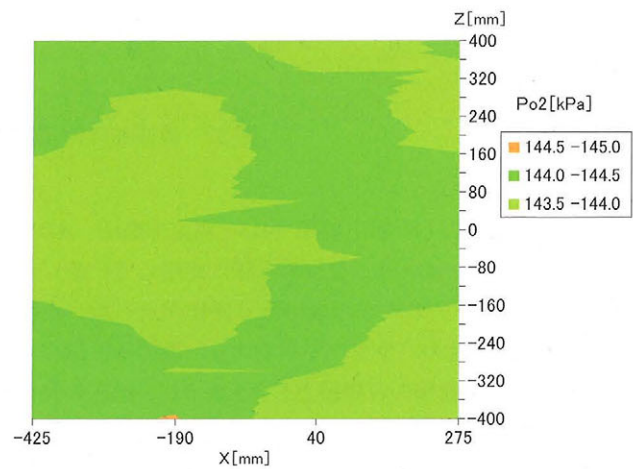


図 23.2 断面等総圧(Po2)線図 ($M_{\infty}=1.4$)
(ノズル基本形状)

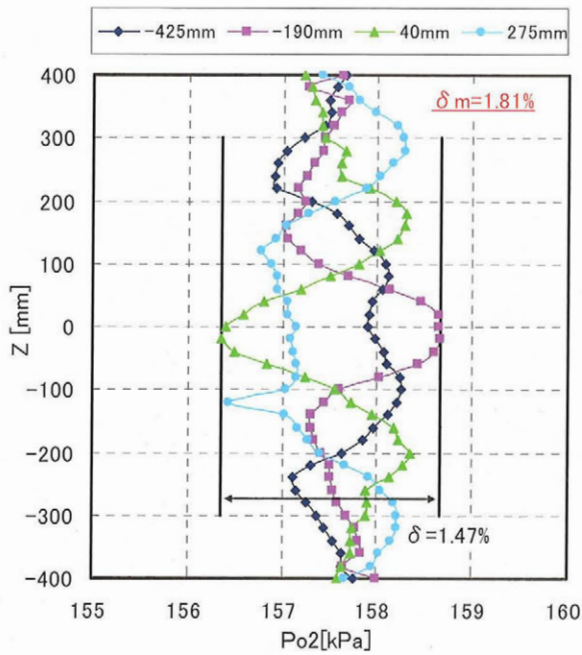


図 24.1 断面総圧 (Po2) 分布 ($M_\infty=2.0$)
(ノズル基本形状: $\delta < \delta_m$)

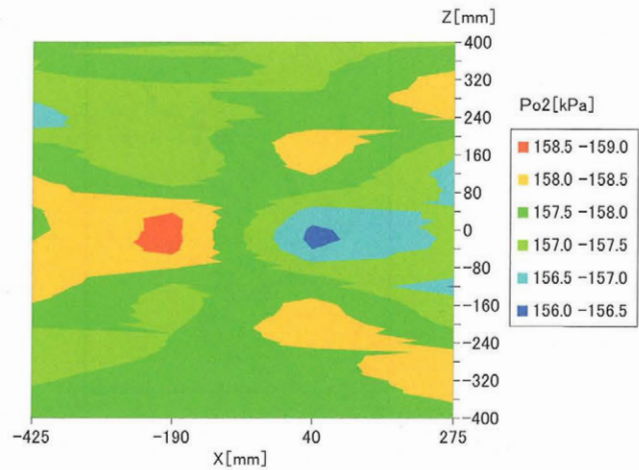


図 24.2 断面等総圧 (Po2) 線図 ($M_\infty=2.0$)
(ノズル基本形状)

表 6 ジャッキ修正量一覧

ジャッキ No. マッハ数 (M_∞)	# 1 7	# 1 8	# 1 9	# 2 0	# 2 1
2.5	0	0	0	0	-0.30
3.0	0	0	0	-1.31	-0.40
3.5	0	-0.50	-1.27	-1.64	-0.96
4.0	-0.25	-1.20	-1.33	-1.48	-1.36

注) ①ジャッキ # 2 1 が測定部に一番近い (図 5 参照)

②ジャッキストローク調整の方向性 (単位: mm)

+: ジャッキ押上げ

-: ジャッキ押下げ

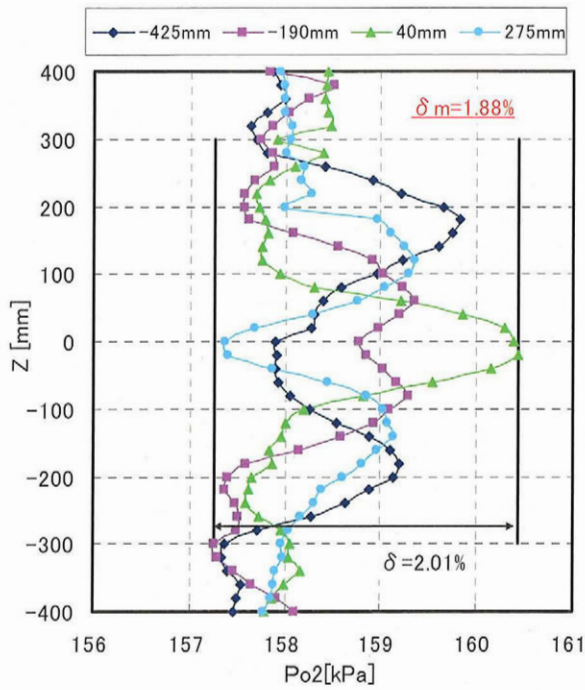


図 25. 1. 1 断面総圧 (Po2) 分布 ($M_\infty=2.5$)
(ノズル基本形状: $\delta > \delta_m$)

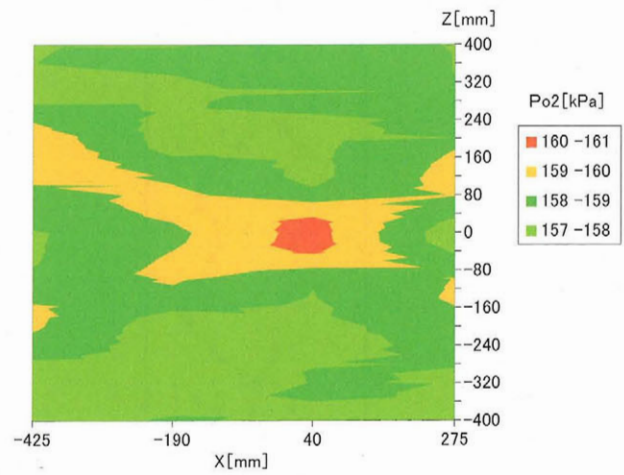


図 25. 1. 2 断面等総圧 (Po2) 線図 ($M_\infty=2.5$)
(ノズル基本形状)

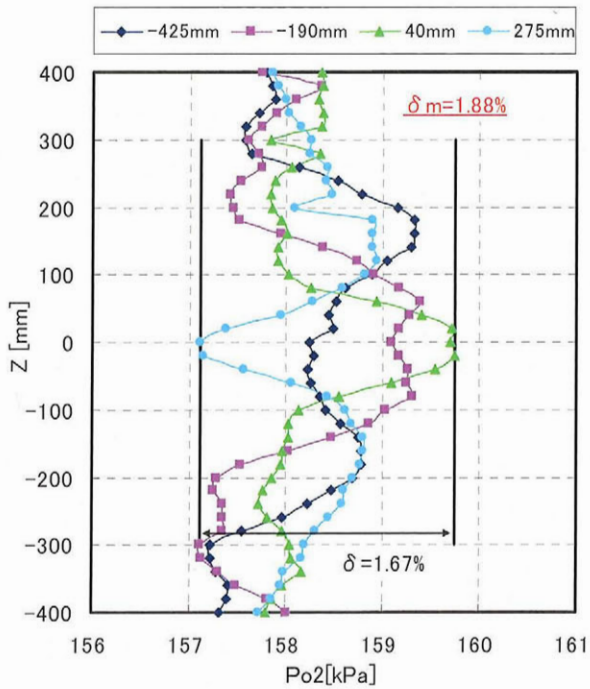


図 25. 2. 1 断面総圧 (Po2) 分布 ($M_\infty=2.5$)
(ノズル修正形状: $\delta < \delta_m$)
(#21 ジャッキ 0.3mm 押下げ)

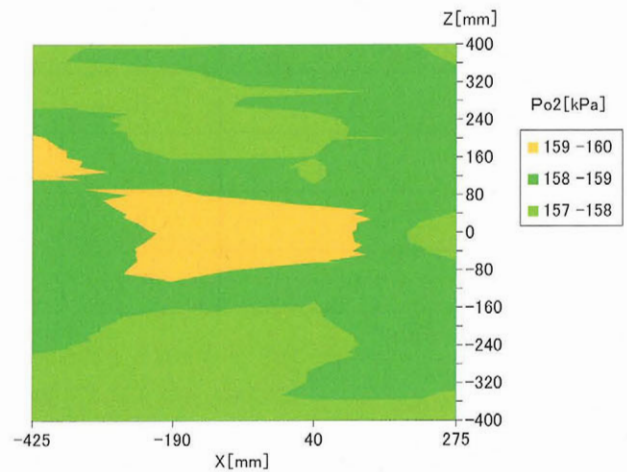


図 25. 2. 2 断面等総圧 (Po2) 線図 ($M_\infty=2.5$)
(ノズル修正形状)
(#21 ジャッキ 0.3mm 押下げ)

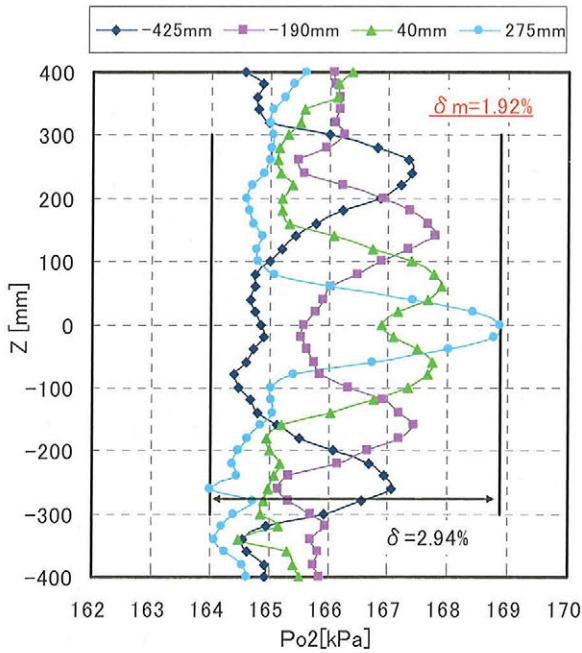


図 26. 1. 1 断面総圧 (Po2) 分布 ($M_\infty=3.0$)
(ノズル基本形状: $\delta > \delta_m$)

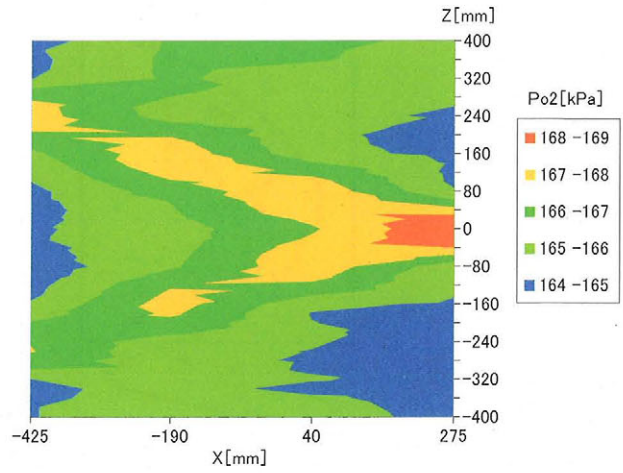


図 26. 1. 2 断面等総圧 (Po2) 線図 ($M_\infty=3.0$)
(ノズル基本形状)

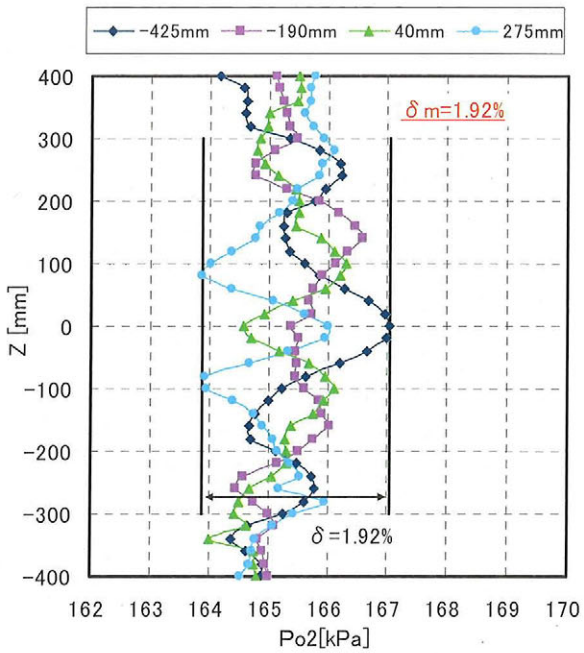


図 26. 2. 1 断面総圧 (Po2) 分布 ($M_\infty=3.0$)
(ノズル修正形状: $\delta = \delta_m$)
(#20 ジャッキ 1.31mm 押下げ)
(#21 ジャッキ 0.40mm 押下げ)

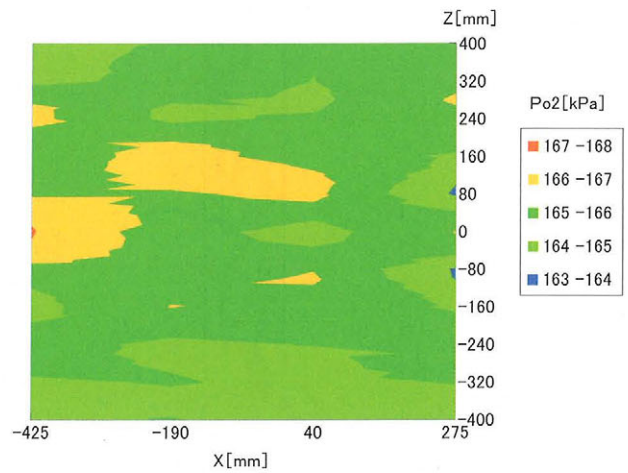


図 26. 2. 2 断面等総圧 (Po2) 線図 ($M_\infty=3.0$)
(ノズル修正形状)
(#20 ジャッキ 1.31mm 押下げ)
(#21 ジャッキ 0.40mm 押下げ)

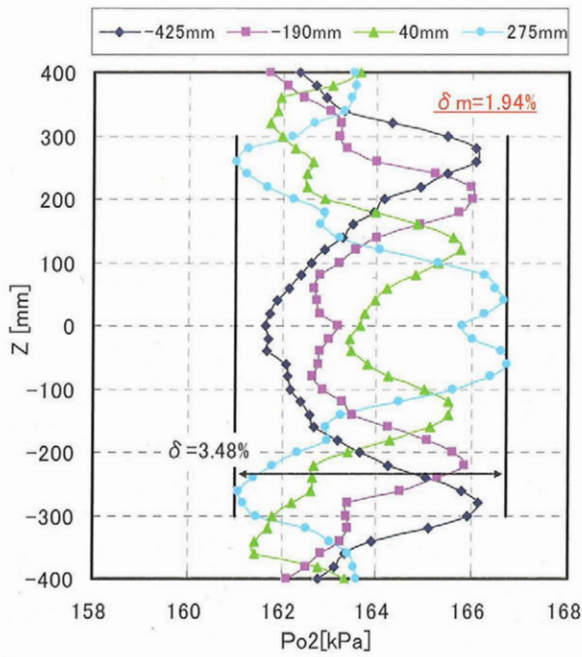


図 27. 1. 1 断面総圧 (Po2) 分布 ($M_\infty=3.5$)
(ノズル基本形状: $\delta > \delta_m$)

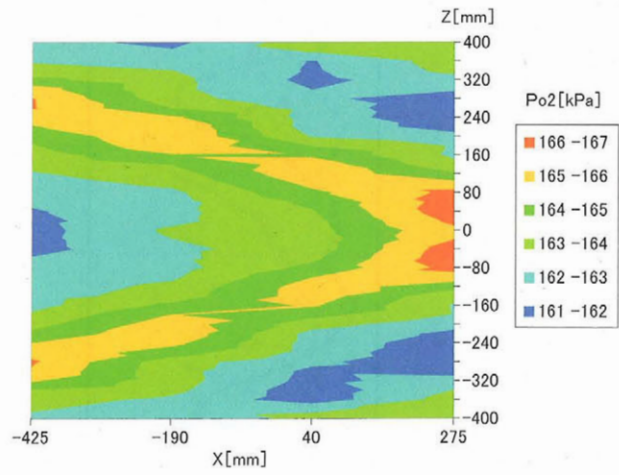


図 27. 1. 2 断面等総圧 (Po2) 線図 ($M_\infty=3.5$)
(ノズル基本形状)

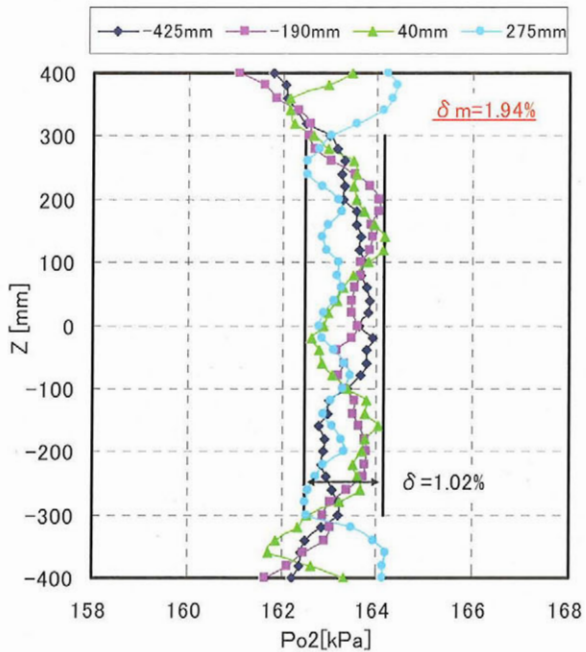


図 27. 2. 1 断面総圧 (Po2) 分布 ($M_\infty=3.5$)
(ノズル修正形状: $\delta < \delta_m$)

- (#18 ジャッキ 0.50mm 押下げ)
- (#19 ジャッキ 1.27mm 押下げ)
- (#20 ジャッキ 1.64mm 押下げ)
- (#21 ジャッキ 0.96mm 押下げ)

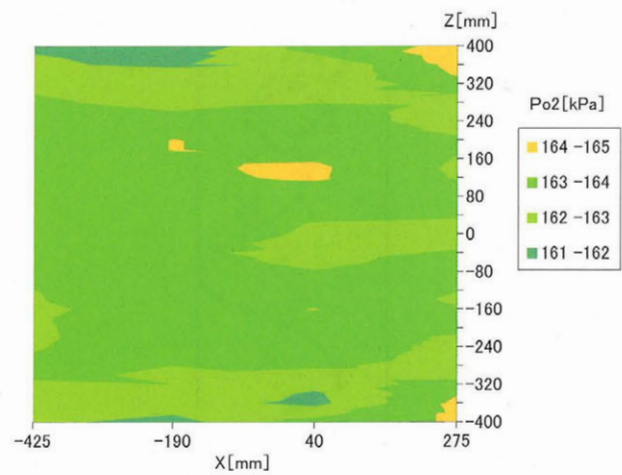


図 27. 2. 2 断面等総圧 (Po2) 線図 ($M_\infty=3.5$)
(ノズル修正形状)

- (#18 ジャッキ 0.50mm 押下げ)
- (#19 ジャッキ 1.27mm 押下げ)
- (#20 ジャッキ 1.64mm 押下げ)
- (#21 ジャッキ 0.96mm 押下げ)

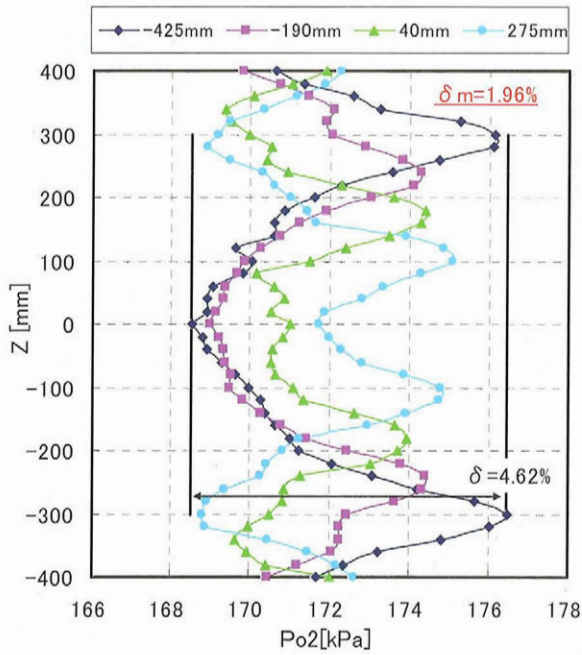


図 28. 1. 1 断面総圧 (Po2) 分布 ($M_\infty=4.0$)
(ノズル基本形状: $\delta > \delta_m$)

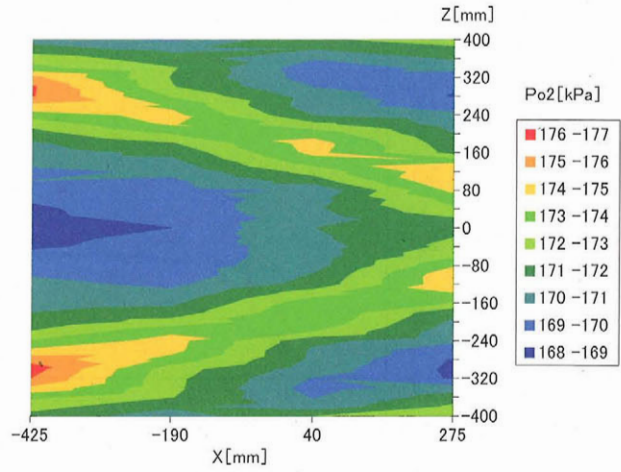


図 28. 1. 2 断面等総圧 (Po2) 線図 ($M_\infty=4.0$)
(ノズル基本形状)

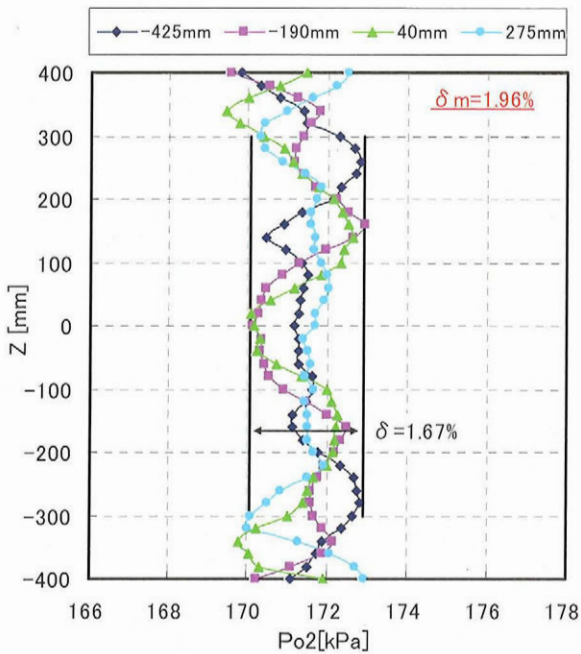


図 28. 2. 1 断面総圧 (Po2) 分布 ($M_\infty=4.0$)
(ノズル修正形状: $\delta < \delta_m$)

- (#17 ジャッキ 0.25mm 押下げ)
- (#18 ジャッキ 1.20mm 押下げ)
- (#19 ジャッキ 1.33mm 押下げ)
- (#20 ジャッキ 1.48mm 押下げ)
- (#21 ジャッキ 1.36mm 押下げ)

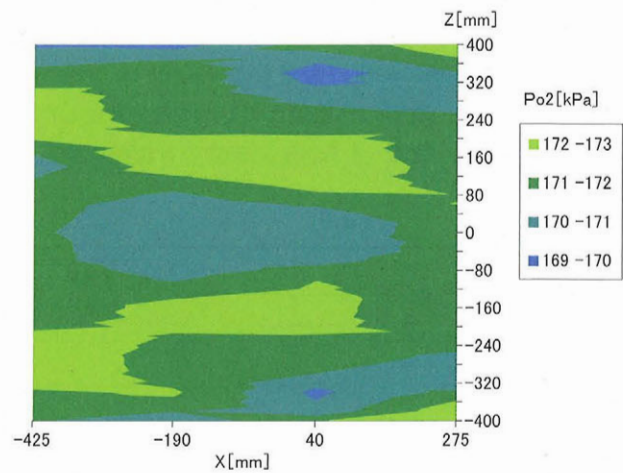


図 28. 2. 2 断面等総圧 (Po2) 線図 ($M_\infty=4.0$)
(ノズル修正形状)

- (#17 ジャッキ 0.25mm 押下げ)
- (#18 ジャッキ 1.20mm 押下げ)
- (#19 ジャッキ 1.33mm 押下げ)
- (#20 ジャッキ 1.48mm 押下げ)
- (#21 ジャッキ 1.36mm 押下げ)

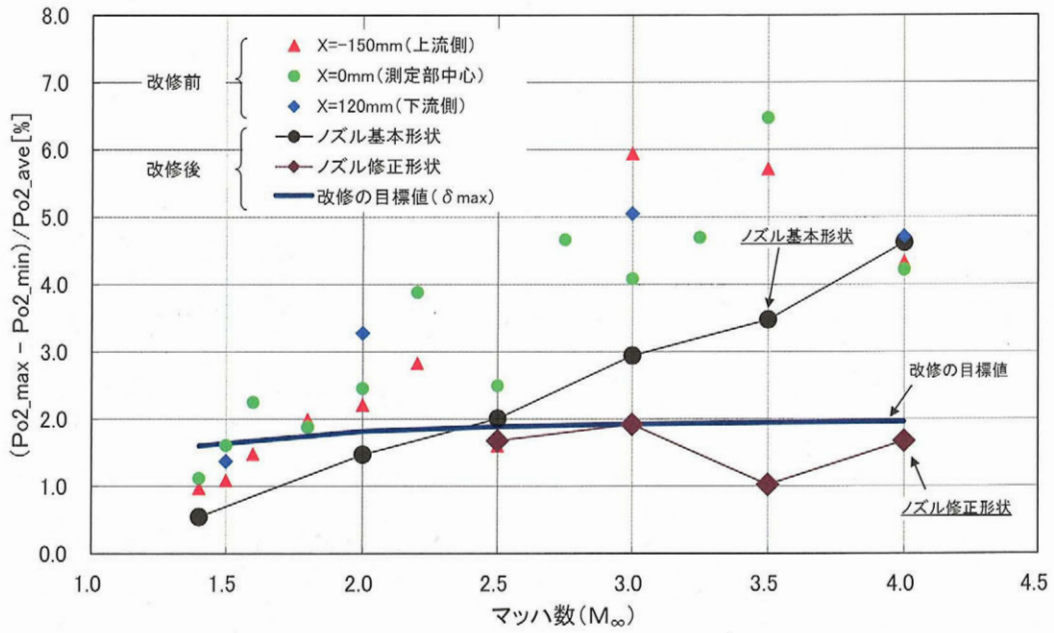


図 29 改修前後の測定部総圧(Po2)分布一様性 (バラツキ)

6. 4 気流偏角特性

マッハ数 $M_{\infty}=1.4\sim 3.0$ のマッハ数について、AGARD-B標準模型を用いて縦三分力試験を実施し、気流の上下及び左右方向の偏角を推定した。

模型の主要寸法は、全長637.5mm、胴体径75mm及び翼幅300mmである。また、気流方向に対する模型の位置関係については、模型モーメント基準点(模型後端より191.8mm)が測定部の中心(シュリーレン観測窓中心、模型支持系不動点位置:1300mm)付近の位置にある。

試験結果を図30に示す。上下方向の偏角は、マッハ数 $M_{\infty}=1.4\sim 3.0$ で、改修の目標値 $\pm 0.1^{\circ}$ 以内を満足した。改修前にはマッハ数 $M_{\infty}=1.5$ 前後で改修の目標値よりも

かなり外れていたが、本改修により約1/4まで改善された。改修後の傾向として、 $1.4 \leq M_{\infty} \leq 2.0$ では下方からの流れ、 $2.0 < M_{\infty} < 3.0$ では上方からの流れを示した。

左右方向の偏角についても、改修の目標値 $\pm 0.1^{\circ}$ 以内を満足した。流れの傾向としては、改修前同様に左方からの流れを示した。縦三分力試験後、模型支持系の寸法検査をした結果、同支持系が右方に 0.06° 程度傾いていることが判明した。模型支持系の傾きを考慮すると、気流の偏角は更に小さいと推測する。

マッハ数が $3.0 < M_{\infty} \leq 4.0$ については、後日追加検討とするが、マッハ数 $M_{\infty}=3.5$ 及び 4.0 については、図27と図28の気流特性から目標性能を満足していると考えられる。

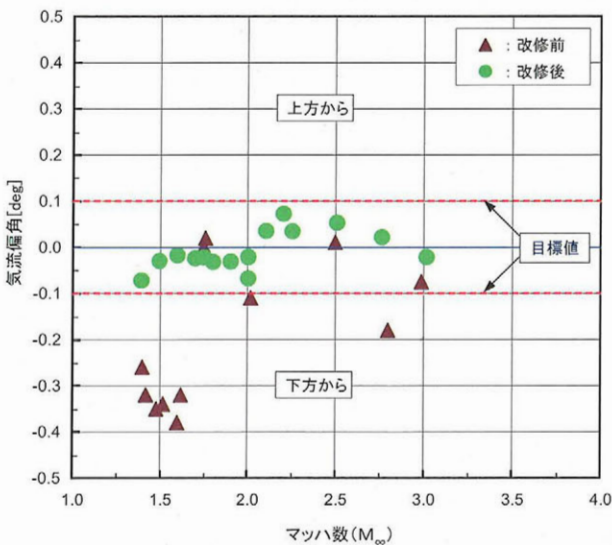


図 30.1 上下方向の気流偏角

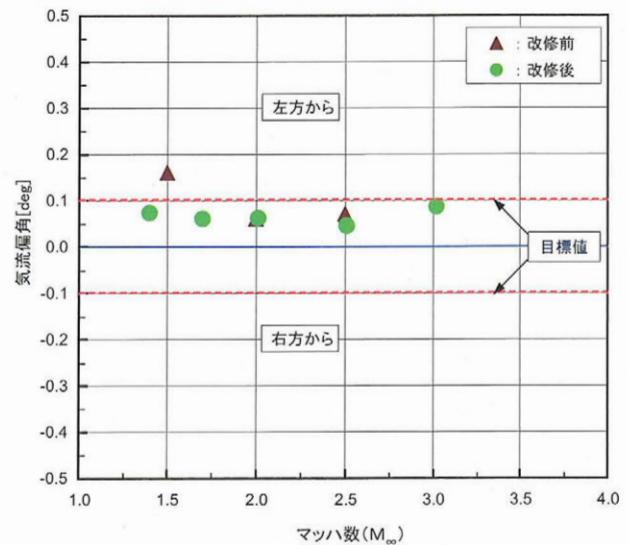


図 30.2 左右方向の気流偏角

7. 風洞騒音

本改修による風洞騒音への影響を調べるために、野外騒音測定 of 専門家 (小林理学研究所) に依頼して騒音測定を実施した。本超音速風洞においては、建設以来近隣住宅の増加と並行して、これまで幾度も騒音対策が行われてきた。

特に 20Hz 以下の超低周波の騒音対策については、困難を極めた。1992 年度から 1994 年度の騒音対策⁷⁾において、漸く超低周波の騒音低減に効果を取め、近隣住宅よりの苦情をなくした。以上のような経緯に鑑み、本騒音測定の周波数域は、20Hz 以下の超低周波音とした。本報告では、取得した騒音データのうち、代表的なマッハ数 $M_\infty=2.0, 3.0$ 及び 4.0 についてのデータを紹介する。

7. 1 測定条件

風洞騒音の測定条件を表 7 に、測定場所の概略地図を図 31 に示す。

図に示すように測定場所は、消音塔を原点として 3 点である。測定点①は、消音塔から 39m 離れた空力 3 号館建屋南屋上である。測定点②及び③は、各々消音塔から南側 100m 及び南側 200m の地上である。また、各測定点における騒音計の高さは、屋根面または地上から約 1.2m である。

測定点②及び③を選択した理由は、消音塔出口を点音源と仮定した場合、騒音 (音のエネギー) の伝搬は一様で且つ球心状に伝わるので、測定点②及び③での騒音測定を

行えば、消音塔から 100m 及び 200m 離れた近隣住宅地と同じ騒音を測定したことになるからである。また、もう一つの理由は、騒音の距離減衰を調べるためである。

7. 2 測定方法

騒音計には、リオン製の低周波音圧レベル計 (NA-17) を用いた。同レベル計の出力は、ソニー製の DAT レコーダ (PC-208) 用いて収録した。

周波数解析は、1/3 オクターブバンド分析で行った。1/3 オクターブバンド分析は、DAT レコーダに収録されたテープを 90Hz のローパスフィルター (リオン製: SA-34) を通し再生し、実時間分析器 (リオン製: SA-30) で行った。分析の周波数帯は、1~80Hz である。

表 7 風洞騒音測定条件

No.	風洞騒音測定条件	
1	マッハ数 (M_∞)	2.0, 3.0, 4.0
2	測定周波数域	20Hz 以下
3	測定場所 (3点)	空力 3 号館建屋南屋上 39m 消音塔南側 100m, 200m
4	測定日 (天候)	H12 年 7/27 (雲), 7/28 (曇) 8/9 (曇)
5	測定者	小林理学研究所



図 31 風洞騒音測定場所 (①~③)

7. 3 騒音測定結果

図32に、マッハ数 $M_{\infty}=2.0, 3.0$ 及び 4.0 における改修後の音圧レベル(1~80Hzのパワー平均値)を示す。また、点音源距離減衰率⁹⁾(傾斜)を、測定点②(消音塔から100mの位置)の改修後マッハ数 $M_{\infty}=4.0$ における音圧レベルを基準として示す。音圧レベルの大きさは、各測定点ともマッハ数が大きい方が大きい。距離減衰については、各マッハ数とも概ね点音源距離減衰に近い傾向を示した。

図33に騒音測定の結果を、1/3オクターブバンド中心の

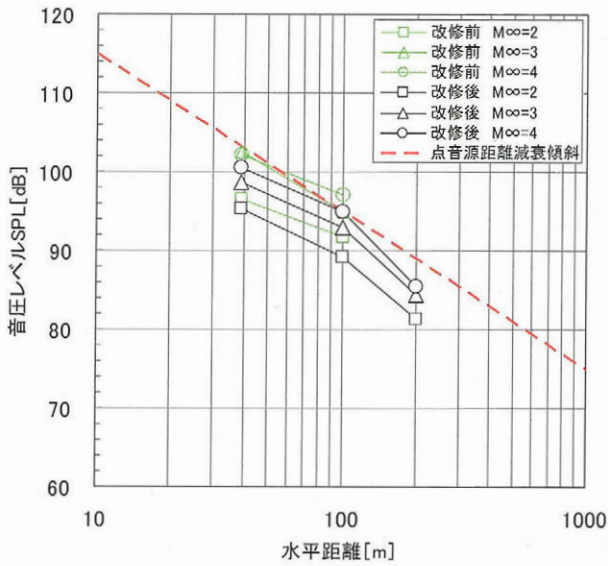


図32 低周波音の音圧レベル/距離減衰 (1~80Hzパワー平均)

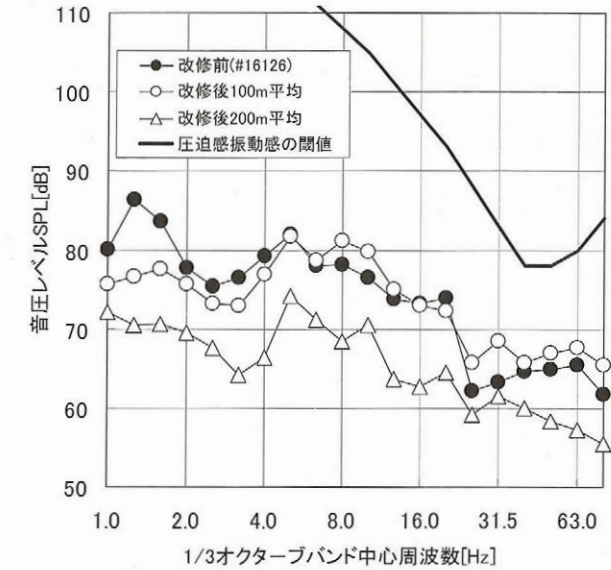


図33.1 低周波音の周波数特性 ($M_{\infty}=2.0$) (1/3オクターブバンド分析; 1~80Hz)

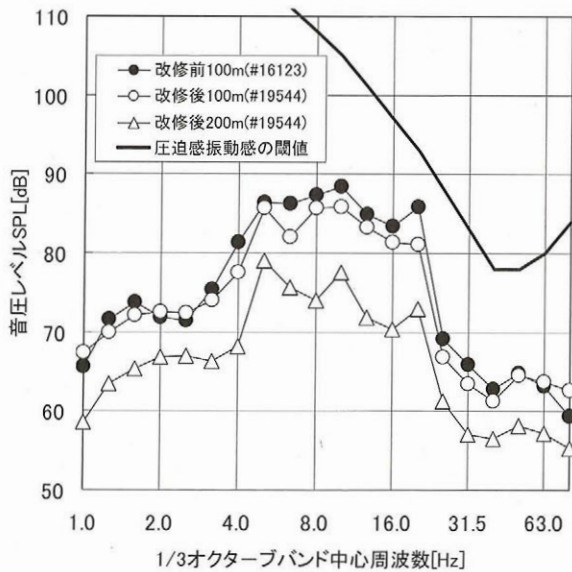


図33.2 低周波音の周波数特性 ($M_{\infty}=3.0$) (1/3オクターブバンド分析; 1~80Hz)

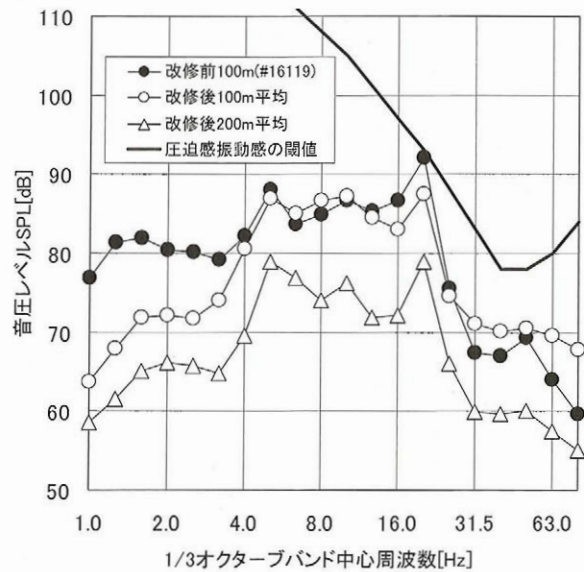


図33.3 低周波音の周波数特性 ($M_{\infty}=4.0$) (1/3オクターブバンド分析; 1~80Hz)

周波数特性で示す。近隣住宅地と接する騒音測定点100mの改修前後の比較においては、マッハ数 $M_{\infty}=2.0, 3.0$ 及び 4.0 のいずれも概ね一致している。但し、マッハ数 $M_{\infty}=4.0$ では、4Hz以下で改修後の方が明らかに小さい。

図中に示した人への「圧迫感・振動感」の閾値^{9, 10)}に対しては、マッハ数 $M_{\infty}=2.0, 3.0$ 及び 4.0 のいずれも閾値を下回っている。全体的な傾向としては、マッハ数の大きい方が20Hz付近で最も閾値に近づく。

8. まとめ

1 m × 1 m 超音速風洞の老朽化対策と測定部気流特性の改善を目的として、風洞の主要部である高圧導管部、集合胴部及び可変ノズル・測定部と風洞運転制御システムの改修(更新)を行った。改修の主な成果は、以下の通りである。また、それら一覧を表8に示す。

- (1) 可変ノズルの更新により、ノズル形状の微調整が可能となり、主要マッハ数 $M_{\infty}=1.4, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5$ 及び 4.0 で測定部の気流一様性に大きな改善、すなわち「総圧(P_{o2})分布で一様性のバラツキが目標値の2%以内」を得た。
- (2) 気流偏角をAGARD-B標準模型を用いて調べた。その結果、マッハ数 $M_{\infty}=1.4\sim 3.0$ では、目標とした「風洞軸に対し $\pm 0.1^{\circ}$ 以内」を満足した。
- (3) 気流特性に影響を及ぼす集合胴圧力設定精度については、主要マッハ数 $M_{\infty}=1.4, 2.0, 3.0$ 及び 4.0 で、「設定圧力の $\pm 1.0\%$ 以内」の目標を満足した。また、集合胴圧力の安定度とその保持時間については、マッハ数 $M_{\infty}=1.4$ を除くマッハ数 $M_{\infty}=2.0, 3.0$ 及び 4.0 で、「平均圧力の $\pm 0.1\%$ 以内で30秒間以上保持」の目標を満足した。なお、マッハ数 $M_{\infty}=1.4$ については、平均圧力が目標値を若干超えた(最大で $\pm 0.17\%$)。なお、これによる測定部気流特性への顕著な影響は特に確認されていない。
- (4) 風洞運転制御システムのデジタル化を図り、目標とした「ワンマンコントロール」を実現した。

9. 謝辞

本改修工事の遂行にあたっては、JAXA内の多くの方々から御協力を頂いた。特に、横幕良生、井上安敏、河本巖の各氏には全般的な御指導を頂いた。風洞技術開発センター長の重見仁氏と空気力学グループ先進空力実験セクションリーダーの澤田秀夫氏には、気流改善のための技術的な助言を頂いた。改修工事は、川崎重工業株式会社に担当して

頂いた。とりわけ、藤原精二氏には改修工事開始から完了まで、多大の尽力を頂いた。

本報告のまとめでは、風洞技術開発センター超音速風洞セクションリーダーの永井伸治氏に御指導を頂いた。また、データ整理においては、非常勤職員の巻島和好氏に御協力を得た。関係各位に深甚なる感謝の意を表する。

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) 佐藤衛、神田宏、須谷記和、重見仁、戸田宣洋：「航技研二次元風洞の改修(制御関連について)」、NAL SP-42, 1999, PP. 45-55
- 3) 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
- 4) 外立政隆、野田順一、清水福寿：「航技研1 m × 1 m 吹出式超音速風洞運転制御装置におけるデジタル技術の導入と若干の改良について」、NAL TM-404, 1980
- 5) リープマン・ロシュコ：「気体力学」、吉岡書店, 1960年, PP. 160-165
- 6) 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
- 7) 吉永崇、野田順一、永井伸治、藤井啓介、関根英夫、楯篤志、渡辺光則：「航技研超音速風洞の超低周波騒音の低減」、日本航空宇宙学会第27期年会講演会講演集、1996, PP. 88-89
- 8) 一宮亮一：「機械系の音響工学」、コロナ社, 1992, PP. 86-108
- 9) 町田信夫：「低周波音の影響・評価」、騒音制御、Vol. 23, No. 5, 1999, PP. 302-305
- 10) 落合博明：「低周波音の測定方法」、騒音制御、Vol. 23, No. 5, 1999, PP. 306-310

表8 改修の主な成果

改修における改善目標項目		目標	改修後の結果
測定部 気流特性	気流一様性	総圧(P_{o2})分布で一様性のバラツキが2%以内	目標達成 ($M_{\infty}=1.4, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0$)
	気流偏角	上下方向	$\pm 0.1^{\circ}$ 以内
		左右方向	$\pm 0.1^{\circ}$ 以内
集合胴 圧力制御性能	圧力設定精度	設定圧力の $\pm 1.0\%$ 以内	目標達成 ($M_{\infty}=1.4, 2.0, 3.0, 4.0$)
	圧力安定度及びその保持時間	平均圧力の $\pm 0.1\%$ 以内で30秒間以上保持	目標達成 ($M_{\infty}=2.0, 3.0, 4.0$) ※ $M_{\infty}=1.4$: 最大 $\pm 0.17\%$ /30秒間以上保持
通風時の風洞制御系運転要員		1人	目標達成

付録：風洞運転フローの各項目の要点（図 13 参照）

No.	項目	要点
1	通風前準備作業（始業点検） ①風洞設備の目視点検 ②低圧動力盤内の風洞制御電源投入確認 ③補機動作点検 ④風洞操作卓電源投入 ⑤補機運転 ⑥シュリーレン観測装置セットアップ	<ul style="list-style-type: none"> ・風洞本体及び補機まわりの異常の有無を確認する。 ・風洞設備元電源が投入されていること確認する。 ・補機（油ポンプ及び空気圧縮機）について、現場で機側運転を行い動作の点検を行う。 ・風洞制御電源（スイッチ：風洞操作卓上）を投入すると、風洞制御系システムの全てに電源が投入される。 ・風洞操作卓（タッチパネル）にて、補機運転（再起動）を行う。 ・シュリーレン観測装置の光源（キセノンランプ）を点灯させ、シュリーレン映像をモニターで観察できるようにする。また、静止画及び動画を、各々デジカメ及びビデオで収録できるようにする。 ・通風前準備作業の終了後は、風洞の故障・異常等がない限り、通風が全て終了するまで、オペレータは基本的に図 13 に示す運転フローに従った制御卓でのオペレーションとなる。
2	貯気槽元弁操作権取得	<ul style="list-style-type: none"> ・貯気槽元弁操作が超音速風洞側（風洞操作卓）で行えるように貯気槽管理者（遷音速風洞制御室）へ連絡して、貯気槽元弁操作権を取得する（複数の風洞で貯気槽を共有しているため）。
3	運転パラメータ設定	<ul style="list-style-type: none"> ・風洞運転制御コンピュータへ気流条件、模型姿勢角及び通風時間等の入力を行う。
4	風洞設定	<ul style="list-style-type: none"> ・所定のマッハ数(M_∞)に対して、風路各部の設定を行う。本設定の詳細は、以下の通りである。 <ol style="list-style-type: none"> 1) 2次元可変ノズル形状 2) 第2スロートの幅 3) サウンドサプレッサの開または閉の選択 4) 消音塔シャッターを全開
5	模型整備完了	<ul style="list-style-type: none"> ・模型整備は原則として試験実施者が行う。 ・試験実施者は、模型整備完了後テレスコープドア（カート）を閉じる。
6	調圧弁テスト	<ul style="list-style-type: none"> ・通風前に所定マッハ数(M_∞)での調圧弁動作シミュレーションを行い、動作が正常であることを確認する。風洞の連続運転の場合、調圧弁テストは通風日の最初の通風前に1回行うのを原則としている。

No.	項目	要点
7	仕切弁上流高圧導管充填操作	<ul style="list-style-type: none"> 貯気槽バイパス弁を開き、仕切弁上流側の高圧導管に高圧空気の充填を開始する。
8	チェックラン	<ul style="list-style-type: none"> 通風時のシーケンスを確認する。確認内容の詳細は、以下の通りである。 <ol style="list-style-type: none"> 時刻設定器動作確認 模型動作確認 模型オフセットデータ取得の確認（風洞計測装置）
9	通風起動準備操作	<ul style="list-style-type: none"> 貯気槽元弁及び仕切弁を開き、調圧弁上流側の高圧導管に高圧空気を充填し、貯気槽と高圧導管の圧力を均一にする。 貯気槽圧力が通風に必要な所定の圧力に達した時点で、起動準備が完了する。
10	通風	<ul style="list-style-type: none"> 通風操作において、オペレータは最初に風洞計測担当者に対し計測準備完了の確認を行う。次に貯気槽管理者へ通風開始の連絡を行い承諾を得た後、インターロックの完了及び風洞起動操作可を示すランプ（風洞操作卓上にある）の点灯を確認する。最後に通風開始のアナウンスを行い、風洞起動スイッチを入れる。 通風中においては、オペレータはシュリーレン映像モニターで通風状態を監視する。 通風がアンスタートの場合及び模型が吹き飛んだ場合等の異常が生じた場合には、直ちに通風を停止する。 通風終了後、ユーザに試験継続または試験終了の判断を問う。 実験簿（通風毎）の作成を風洞運転制御コンピュータで行う。
11.1	風洞停止操作	<ul style="list-style-type: none"> 試験継続の場合には、風洞停止操作を行う。本操作では、仕切弁と調圧弁間の高圧導管空気放出（大気開放）をする。 ユーザはテレスコープドアを開いて模型整備（上記5に戻る）を行い、次の通風に備える。
11.2	風洞休止操作	<ul style="list-style-type: none"> 昼の休憩時前及び試験が終了（通風が全て終了）した場合には、風洞休止操作を行う。本操作では、貯気槽元弁と調圧弁間の高圧導管空気放出（大気開放）をする。

No.	項目	要点
12	終了操作 ①風洞設定リセット ②補機停止 ③シュリーレン光源消灯	<ul style="list-style-type: none"> ・ 2次元可変ノズル形状及び第2スロートの幅をマッハ数$M_{\infty}=1.4$の基準位置に戻す。また、サウンドサプレッサ及び消音塔シャッターを閉じる。 ・ 補機（油圧ポンプ及び空気圧縮機）を停止する。 ・ シュリーレン観測装置の光源を消灯する。
13	貯気槽元弁操作権返却	<ul style="list-style-type: none"> ・ 貯気槽元弁操作権を貯気槽管理者へ返却する。
14	終業作業 ①電源断操作 ②風洞設備の目視点検	<ul style="list-style-type: none"> ・ 風洞制御電源及びシュリーレン観測装置電源を切る。 ・ 上記1の通風前準備作業の場合と同様に、風洞本体及び補機まわりの異常の有無を確認する。

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-05-024

発行 平成18年3月23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 (株)ビー・シー・シー・

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・電子媒体に加工することを禁じます。

