

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

JAXA Research and Development Memorandum

JAXA吹出式 1 m × 1 m 超音速風洞変動圧計測結果

渡辺 光則, 鈴木 教雄, 永井 伸治,
外立 政隆, 西島 寛典

2007 年 3 月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目 次

1. 記号.....	1
2. はじめに.....	2
3. 気流の乱れ低減対策.....	2
3. 1 集合胴内への追加機能設置.....	2
3. 2 縮流部の流路形状改善.....	3
4. 変動圧計測の概要.....	3
5. 総圧 (P_{02}) 変動計測.....	4
5. 1 模型.....	4
5. 2 計測位置.....	5
5. 3 計測装置.....	5
5. 4 計測条件.....	7
5. 5 計測結果.....	7
5. 5. 1 測定部中心部の結果.....	7
5. 5. 2 計測方法の違いによるデータへの影響.....	7
5. 5. 3 貯気槽流路の違いによる影響.....	10
5. 5. 4 測定部中心部断面の分布.....	12
6. 静圧 (P_w) 変動計測.....	14
6. 1 計測位置.....	14
6. 2 計測装置.....	14
6. 3 計測結果.....	16
7. まとめ.....	17
8. 謝辞.....	17
参考文献.....	17

JAXA 吹出式 1 m × 1 m 超音速風洞変動圧計測結果

渡辺光則*¹、鈴木教雄*²、永井伸治*¹

外立政隆*³、西島寛典*⁴

Pressure Fluctuations in the JAXA Blow-Down 1m×1m Supersonic Wind Tunnel

Mitsunori WATANABE*¹, Norio SUZUKI*², Shinji NAGAI*¹
Masataka HASHIDATE*³ and Hironori NISHIJIMA*⁴

Abstract

After the upstream part of the JAXA blow-down 1m×1m supersonic wind tunnel was modified to improve its flow qualities, the pressure fluctuations were measured in the test section at Mach numbers from 1.4 to 4.0.

The rms values of the total(pitot) pressure fluctuations measured at the center of a cross section were reduced significantly, to about 1/2-1/6 of their former level. The ratio of the rms values of the static pressure fluctuations measured at the test section wall to dynamic pressure values decreased from about 0.5% to 0.1% with increasing tunnel Mach number. However, the level of the static pressure fluctuations at Mach 2.0 was one order of magnitude larger than that of a high-speed in-draft wind tunnel, which is reputed to be a quiet tunnel.

Keywords: supersonic wind tunnel, pressure fluctuations, test section

概 要

老朽化対策と気流特性の改善を目的として、JAXA吹出式 1 m × 1 m 超音速風洞の改修を実施した。改修後の気流変動を確認するため、主要マッハ数 $M_{\infty}=1.4$ から 4.0 について、測定部の中心部及び壁面でそれぞれ総圧(ピトー圧: P_{02})変動と静圧(P_w)変動について調べた。その結果、総圧変動については、改修前に比べて約 1/2 から 1/6 に減少したことが分かった。静圧変動($C_{p_rms}:\Delta P_{rms}/q_{\infty}$)については、 $0.1\% < C_{p_rms} < 0.5\%$ で、マッハ数が小さい方が大きいことが分かった。また、マッハ数 $M_{\infty}=2.0$ の静圧変動を、乱れが小さい真空吸込型高速風洞と比較した結果、 C_{p_rms} は一桁近く大きいことが分かった。

1. 記号

C_{p_rms}	静圧変動の係数(= $\Delta P_{rms}/q_{\infty}$)	PSD	パワースペクトル密度
M_{∞}	一様流マッハ数	P_w	静圧(測定部壁圧)
P_{02}	総圧(ピトー圧)	q_{∞}	一様流動圧
ΔP_{rms}	変動圧の実効値		

* 平成 19 年 3 月 5 日受付(Received 5 March, 2007)

*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 総合技術研究本部 飛行システム技術開発センター(Flight Systems Technology Center Institute of Aerospace Technology)

*3 元宇宙航空研究開発機構(Japan Aerospace Exploration Agency)

*4 (株) IHI エアロスペースエンジニアリング(IHI Aerospace Engineering Co., LTD.)

2. はじめに

JAXA の吹出式 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 超音速風洞¹⁾は、マッハ数 (M_∞) を 1.4 から 4.0 の範囲内で試験が可能な風洞である。ユーザより最近寄せられる本超音速風洞への要望は、気流の一様性向上だけでなく、乱れ低減に対しても要望が多い。これは、超音速境界層遷移の研究において、実験的検証を風洞に期待するところが大きいと考える^{2),3)}。

本超音速風洞においては、平成 11 年から平成 12 年にかけて、建設以来約 40 年ぶりの大改修を実施した。改修の目的は、老朽化した機械装置の更新、近年の航空・宇宙機の研究開発の要求水準を満たせなくなった気流特性の改善等である。改修では、測定部より上流の高圧導管部、集合胴部、可変ノズル・測定部及び風洞運転制御システム全体等を更新した。

この改修後の気流変動を確認するため、継続的に測定部で変動圧計測を実施した。変動圧計測では、主要マッハ数 ($M_\infty=1.4, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5$ 及び 4.0) について試験を実施し、測定部の中心部及び下壁面でそれぞれ総圧(ピトー圧: P_0) 変動と静圧(P_w) 変動を調べた。なお、総圧変動の計測においては、計測方法を変えた場合、及び貯気槽と調圧弁間の流路が異なった場合の影響についても調べた。更に、測定部中心部断面における分布も調べた。

総圧及び静圧変動のデータ取得は、圧力センサーを用いて行い、それらの周波数特性及び実効値を求めた。総圧変動の周波数特性及び実効値については、改修前のデータ

と比較し、改修の効果を確認した。また、静圧変動の実効値については、気流の乱れが小さい真空吸込型高速風洞⁴⁾との比較をした。

風洞改修後の気流の一様性については、大幅に改善できたことを、すでに報告⁵⁾した。本報告では、変動圧計測の結果について、気流の乱れ低減対策概要と合わせて報告する。

3. 気流の乱れ低減対策

図 1 に $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 超音速風洞の全体図と改修範囲を、図 2 に可変ノズル・測定部を示す。改修では、乱れ低減対策として、集合胴内への追加機能設置及び縮流部の流路形状改善等を実施した。

3. 1 集合胴内への追加機能設置

図 3 に風洞改修後における集合胴内部の構成を示す。集合胴内へは、従来より装備の 4 枚のスクリーン (SUS製金網) に加え、低騒音化を目的としてグラスウール製変形スプリッタ形消音器を、また整流能力向上を目的としてアルミ製ハニカムを追加設置した。

上述の追加装置のために、集合胴の長さを改修前よりも約 5m 延長した。なお、縮流比(集合胴整流部断面/測定部出口断面)は、集合胴の整流部内径を少し小さくしたため改修前の 12.6 に対し、改修後は若干小さい 11.7 である。

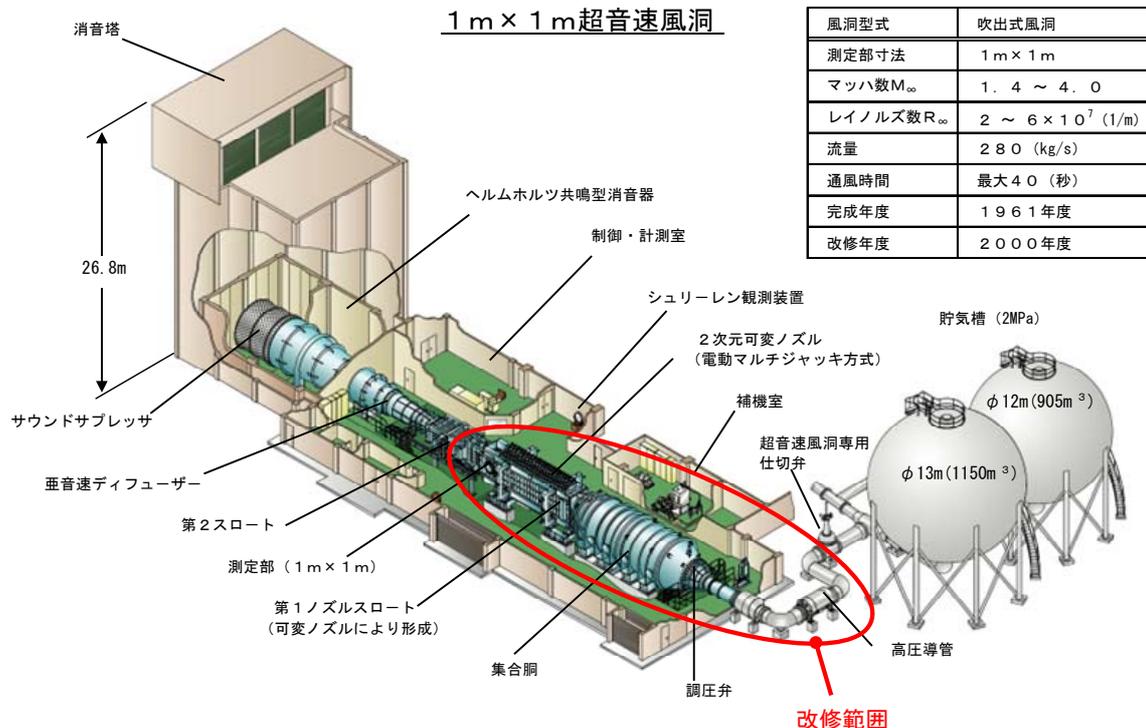


図 1 風洞全体と改修範囲

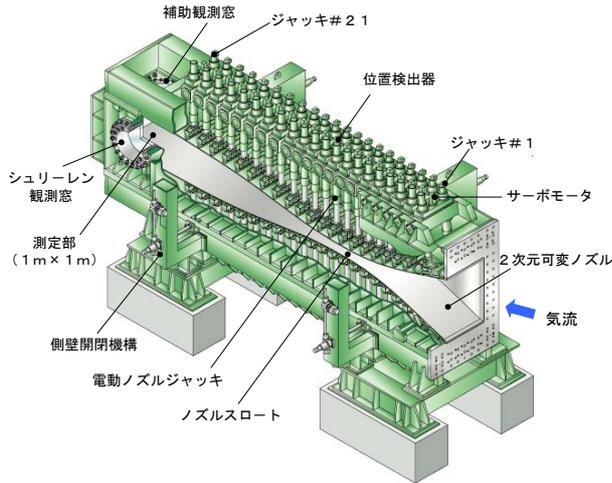


図2 2次元可変ノズル・測定部

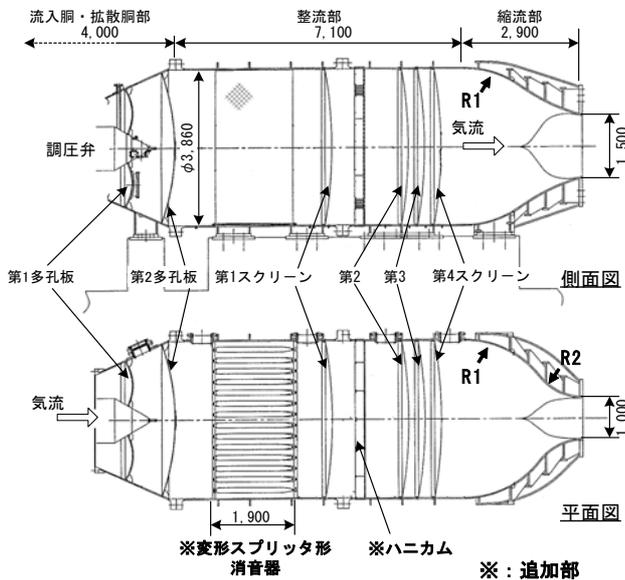


図3 集合胴内部の構成(単位: mm)

(1) グラスウール製変形スプリッタ形消音器

変形スプリッタ形消音器の吸音板は、グラスウールを芯材として、その表面全体がガラスクロス、金網及びパンチングメタルの順で覆われた構造である。グラスウールは密度 64kg/m³ (JIS A6306) で、10%圧縮され封入されている。また、吸音板の枚数は 14 枚で、全吸音板の整流部内径に対する断面積比(開口比)は、約 50%である。

本変形スプリッタ形消音器は、JAXA 第2遷音速風洞⁶⁾で使用されているものと類似タイプで、騒音に対しては 2kHz 付近の周波数領域で最も減衰効果⁷⁾がある。なお、グラスウール製のスプリッタ形消音器の風洞騒音に対する有効性については、文献⁸⁾でも示されている。本文献では、「風洞集合胴にグラスウール製のスプリッタ形消音器を設置した結果、マッハ数 M_∞=1.6 及び 2.0 における測定

部の静圧変動(頂角 10° の円錐模型上で計測)が、各々約 1/5 及び 1/2 以下に減少した」と報告している。

(2) アルミ製ハニカム

ハニカムは、セルサイズ 9.52mm×長さ 185mm である。設置位置は第1スクリーンと第2スクリーン間である。

(3) SUS 製スクリーン

スクリーンの枚数は風洞改修前と同数の 4 枚であるが、メッシュサイズ及び配置(改修前は 4 枚を連続に設置)を変更した。各スクリーン(金網)の主な仕様は、表 1 に示す通りである。

表 1 SUS 製スクリーン(金網)の主な仕様

	第1スクリーン	第2～第4スクリーン
メッシュサイズ [†]	#10	#20
線径	φ 0.6mm	φ 0.3mm
開口面積比	0.5834	0.5834

3. 2 縮流部の流路形状改善⁹⁾

集合胴円形形状と可変ノズル矩形形状をつなぐ縮流部を、滑らかで剥離のない流れを 2 次元可変ノズルに導くために、新しい形状に変更した。形状の設計には、計算流体力学(CFD)解析を用いた。主な変更点は、下記の(1)から(3)の通りである。

- (1) 縮流部全長に対する異形縮流部の長さ比を大きくした。
- (2) 円形縮流部上流側の曲率半径(R1)及び可変ノズル側壁との接合部曲率半径(R2)を、可能な範囲で大きくした。
- (3) 縮流部と可変ノズル上下可撓壁との接続角度を 15° とした。

以上のような変更をした結果、縮流部の長さは約 0.5m 伸長し、2.4m から 2.9m となった。

4. 変動圧計測の概要

表 2 に、変動圧計測の経緯を示す。本報告は、平成 11 年から平成 17 年までに実施した総圧(ピトー圧: P₀₂)変動計測、及び平成 18 年に実施した静圧(P_w)変動計測の結果についてまとめたものである。変動圧計測試験は、M_∞=1.4 から 4.0 における主要マッハ数で実施した。

総圧変動の計測では、ピトー圧計測模型を用いて、測定部中心部について調べた。また、同中心部において、計測方法が異なった場合の総圧変動データへの影響、及び貯気槽と集合胴間の流路(配管ルート)が異なった場合の影響についても調べた。更に、測定部中心部断面での総圧変動の分布も調べた。

静圧変動については、測定部下壁の表面に圧力センサーを取付け(フラッシュマウント)、計測を実施した。

5. 総圧(P₀₂)変動計測

5.1 模型

図4.1に、風洞改修後の総圧(P₀₂)変動の計測で使用した2種類の模型、タイプA模型及びタイプB模型を示す。

試験(通風)でのデータ取得は、基本的に外径φ24mmのタイプA模型を使用して行った。本模型には、ネジ込み固定方式の差圧型圧力センサー(Kulite製:XT-140-25D)を取付けた。なお、改修前の総圧変動の計測で使用した模型の先端外径寸法は、タイプA模型と同じである。

先端径φ10mmのタイプB型模型は、模型先端径の違いによる影響を調べるためのものである。先端径が細い本模

型には、ネジ込み固定方式ではなく、接着剤使用による埋め込み固定方式の差圧型圧力センサー(Kulite製:XCQ-093-25D)を取付けた。その他タイプA模型と異なる点としては、長さが2倍近く長い。そのため気流方向の測定位置は、タイプA模型に比べて上流側へ約22mm前である。

図4.2に示す基準圧取得模型は、通風中に総圧変動計測用圧力センサーの基準圧(背圧)を取得するための模型である。基準圧(ピトー圧)取得は、模型先端部の圧力孔で行われる。なお、この圧力孔の隣に、本模型での総圧変動圧計測もできるように、差圧型圧力センサー(Kulite製:XT-140-50D)を取付けた。

表2 変動圧計測の経緯

年度(平成)	試験内容	マッハ数(M _∞)	変動計測位置(単位:mm)		備考
			測定部中心部	測定部西壁側	
H11.2	改修前の総圧(P ₀₂)変動計測	1.5~4.0 (0.5間隔)	計測点:1箇所 (X=64, Y=0, Z=0)		<測定部座標系> ・気流の進行方向:+X(右手系) ・原点:測定部中心(図5.1、図5.2を参照)
H11~H12					改修工事 ・工事範囲:仕切弁下流から測定部までを更新
H13	予備試験	1.4~3.0		計測点:1箇所 (X=620, Y=380, Z=0)	計測方法の確認のために実施
H14.3	改修後の総圧(P ₀₂)変動計測	1.4, 2.0~4.0 (2.0以上では0.5間隔) 1.4, 2.0 (上下方向での計測) 2.0 { ・感度係数大/小での比較 ・センサー型式/模型先端 径の違いによる比較 }	中心部計測点:1箇所 (X=-12.5, Y=0, Z=0) 上下方向計測点:4箇所 (X=-12.5, Y=0, Z=±150, ±300)	計測点:1箇所 (X=620, Y=380, Z=0)	・感度係数の違いを比較:1.6kPa/Vまたは 25.5kPa/V ・模型先端径の違い:φ10mmまたはφ24mm ・センサー型式の違いを比較(Kulite製): XT-140-25DまたはXCQ-093-25
H14.4					シュリーレン観測窓ガラス段差を修理
H16.5	測定部中心部断面での総圧(P ₀₂)変動計測	1.4, 2.0	計測点:12箇所 (X=-12.5, Y=±150, ±300, Z=0, ±300)	計測点:1箇所 (X=620, Y=380, Z=0)	
	3種類のアンプによる総圧(P ₀₂)変動計測	1.4, 2.0, 3.0	計測点:1箇所 (X=-12.5, Y=0, Z=0)		
H17.1	貯気槽と集合胴間の流路が違った場合の総圧(P ₀₂)変動計測	1.4, 2.0, (4.0)	計測点:1箇所 (X=-12.5, Y=0, Z=0)	計測点:1箇所 (X=620, Y=380, Z=0)	3球及び4球の貯気槽のどちらか1個を使用した場合、または3球/4球の貯気槽を2個同時に使用した場合について、総圧(P ₀₂)変動を計測し比較
H18.9	測定部の下壁面での静圧(P _w)変動計測	1.4, 2.0~4.0 (2.0以上では0.5間隔)	計測点:1箇所 (下壁面:X=-125, Y=125)		

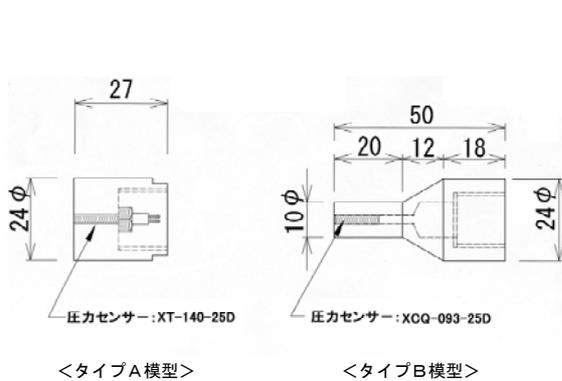


図4.1 総圧変動計測模型(単位:mm)

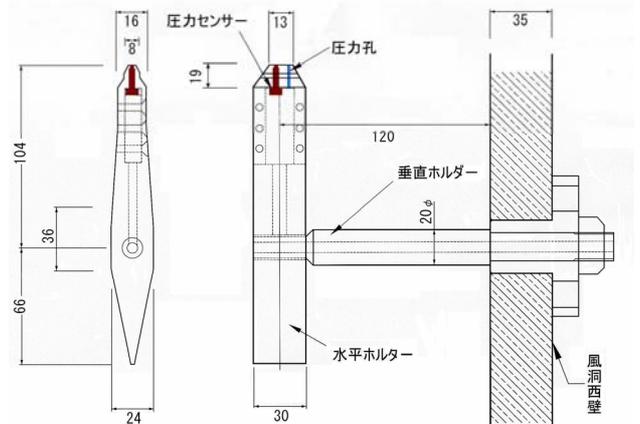


図4.2 基準圧取得模型(単位:mm)

5. 2 計測位置

図 5.1 及び図 5.2 に、総圧(P02)変動の計測位置と差圧型圧力センサーの基準圧取得位置を示す。また、図 5.3 及び図 5.4 に、タイプ A 模型の取付け状況写真と試験(通風)時における同模型のシュリーレン写真を示す。測定部における座標系は、測定部中心を原点(X=Y=Z=0mm)として、右手系、気流(X)方向が正(+)である。

図 5.1 に示すように総圧変動の計測位置は、風洞改修前では測定部中心(シュリーレン窓の中心)より後方へ X=64mm、改修後では測定部中心より前方へ X=-12.5mm である。また、基準圧取得位置は、図 5.2 に示すように測定部西側壁の中心(Z=0mm)に取付けた。同模型先端は測定部中心より下流へ X=620mm の位置である。

5. 3 計測装置

総圧(P02)変動計測用圧力センサー等の計測機器の性能を、表 3.1 及び表 3.2 に示す。また、風洞改修後に実施した総圧変動計測の系統図と、同図に示す計測機器の設定値/圧力変換係数を、各々図 6 及び表 4 に示す。

改修後の測定部中心部での総圧変動計測は、圧力レンジ

が 25psi の Kulite 製差圧型圧力センサー XT-140-25D(タイプ A 模型)に取付け)を使用した。また、上記の圧力センサーの対比用として、型式の異なる差圧型圧力センサー XCQ-093-25D(25psi、タイプ B 模型)に取付け)も使用した。圧力センサー出力の増幅は、TEAC 製シグナルコンディショナ SA-57(アンプ)をゲイン 1000 倍に設定して行った。アンプよりの出力は RION 製 SA-74 の FFT アナライザーと、2 系統のレコーダ、NEC 三栄製オムニユース II RA-1200 及び SONY 製 PC-216A で取得した。FFT アナライザーによる FFT 解析は、測定(周波数)レンジ 0~50kHz、周波数分解能 62.5Hz に設定して、オンラインで実施した。

なお、アンプ出力のデータ保存のために使用した TEAC 製及び SONY 製データレコーダの周波数レンジは、表 3.2 に示すように 20kHz である。

図 6 に示す総圧変動計測用圧力センサー(差圧型)の基準圧には、感度を高める目的で、大気圧ではなく基準圧取得位置で取得したピトー圧を使用した。このピトー圧は、通風開始後気流が静定した後、直ちに電磁弁を閉じて封入したものである。

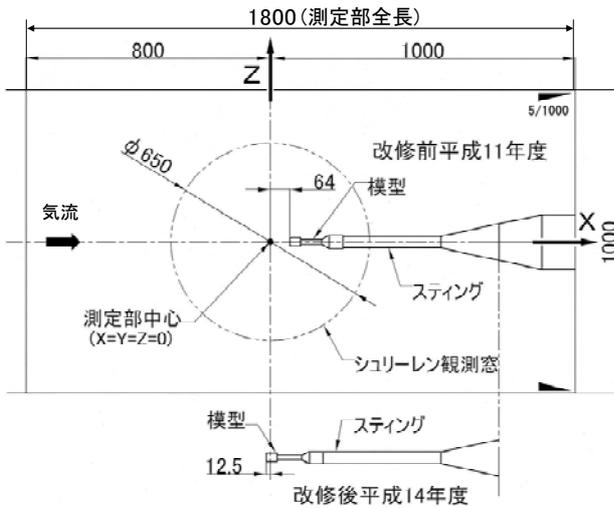


図 5.1 総圧変動計測位置(側面図、単位: mm)

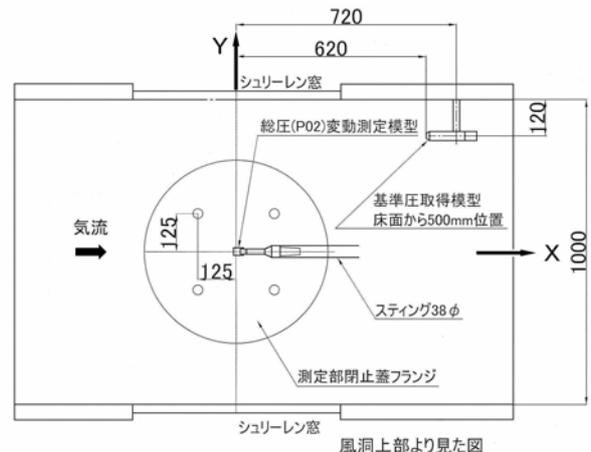


図 5.2 基準圧取得位置(平面図、単位: mm)



図 5.3 タイプ A 模型写真

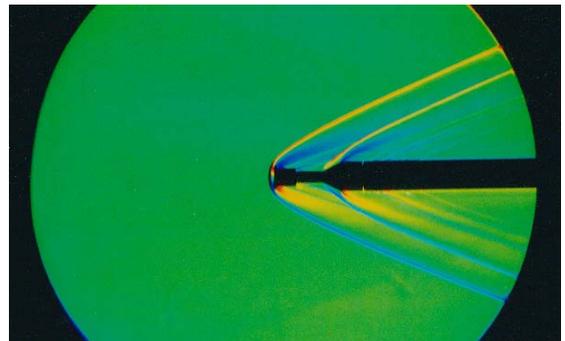


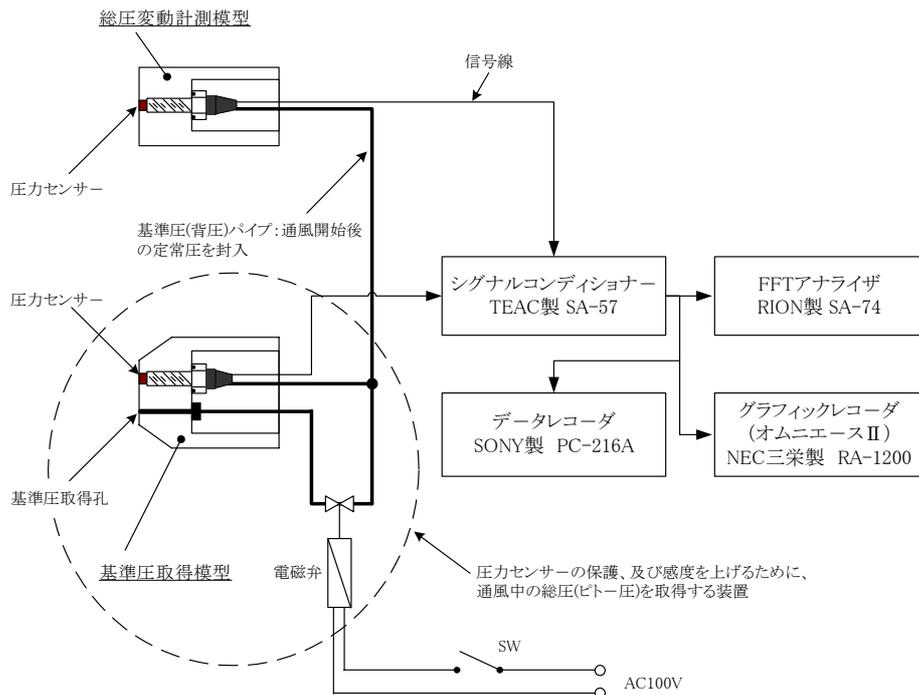
図 5.4 タイプ A 模型シュリーレン写真
(改修後、 $M_\infty=2.0$)

表 3.1 圧力センサーの性能

センサー名・型式	入力レンジ	測定モード	共振周波数	ブリッジ電圧	非直線性及びヒステリシス	繰返し精度	固定方式
Kulite 製 XT-140-25D/50D	25/50psi (172.4/344.8kPa)	差圧	300/400kHz	10VDC	±0.1%FS	±0.1%FS	ネジ 6-32NC-2A
Kulite 製 XCQ-093-25D	25psi (172.4kPa)	差圧	300kHz	10VDC	±0.1%FS	±0.1%FS	接着剤

表 3.2 計測機器の性能

<改修前に使用した計器類>			<改修後に使用した計器類>		
機材名	型名	主な性能	機材名	型名	主な性能
センサー	KULITE XT-140-50D	入力レンジ 50psi 共振周波数 400kHz 非直線性 ±0.1%/FS 繰返し精度 ±0.1%/FS	センサー	KULITE XT-140-25D XT-140-50D XCQ-093-25D	入力レンジ 25psi, 50psi 共振周波数 400, 300kHz 非直線性 ±0.1%/FS 繰返し精度 ±0.1%/FS
シグナル コンディショナ (アンプ)	NEC三栄 AH11-10	励起電圧 2.5, 5, 10, 15, 20V 周波数特性 DC~200kHz ゲイン 0.5k, 1.0k, 2.5k 非直線性 ±0.05%	シグナル コンディショナ (アンプ)	TEAC SA-57	励起電圧 2.5, 5, 10, 15, 20V 周波数特性 DC~100kHz ゲイン 0.25k, 0.5k, 1.0k, 2.5k, 5.0k 非直線性 ±0.05%
FFTアナライザー	RION SA-74	入力数 2ch 周波数レンジ 1~100kHz サンプル点数 1024, 2048 A/D分解能 16bit ゲインミックス -85dB	FFTアナライザー	RION SA-74 ADVANTEST -R9211A/E	入力数 2ch 周波数レンジ 1~100kHz サンプル点数 1024, 2048 A/D分解能 16bit ゲインミックス -85dB
デジタルデータ レコーダ	TEAC RD-135T	周波数レンジ DC~20kHz (2倍速) 歪み率 0.02% DC直線性 ±0.1% A/D分解能 16bit ゲインミックス -80dB以上	デジタル グラフィック レコーダ	NEC三栄 オムニエスII RA-1200	測定レンジ ±1, 2, 5, 10, 20, 50V等 入力数 16ch 周波数レンジ DC~50kHz 直線性 ±0.1%FS A/D分解能 16bit
			デジタルデータ レコーダ	SONY PC-216A	周波数レンジ DC~20kHz (2倍速) 歪み率 0.02% DC直線性 ±0.1% A/D分解能 16bit ゲインミックス -80dB以上



荷圧±5kPaに対してアンプ出力±5V、すなわち1kPa/Vを目標値とした。しかし、実際にはアンプ性能の制限により、完全に目標値に一致させることはできないが、ほぼ最適な約1.6kPa/V(最適感度係数)を設定できた。

これに対して、感度係数を1桁下げて(約25kPa/Vにして)総圧変動の計測を試みた。図8に、マッハ数 $M_\infty=2.0$ の計測結果をパワースペクトル密度(PSD)で示す。最適感

度係数よりも1桁下げた場合(感度小)は、最適感度係数の場合(感度大)と比較して周波数域1kHz以下及び40kHz以上で多少一致しないが、全体的にはほぼ一致している。

以上の結果より、最適感度係数より1桁下げて周波数特性への影響は小さく、周波数特性全体の概要把握が可能であることが分かった。

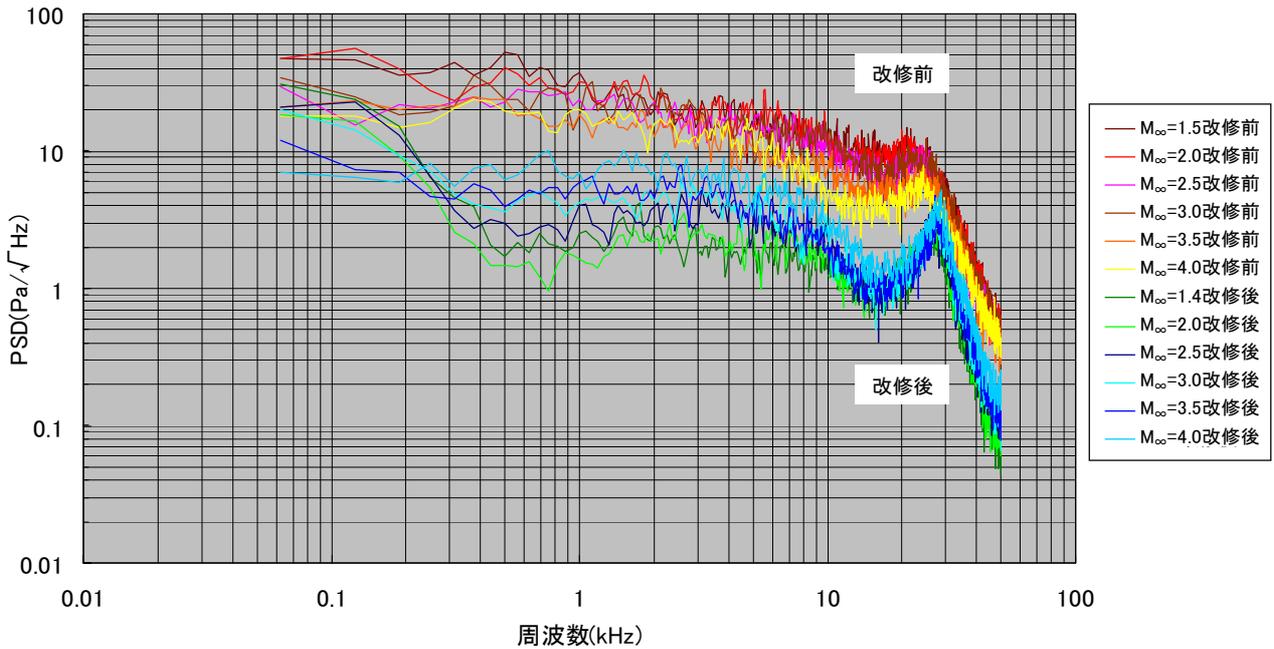


図 7.1 改修前後の総圧変動パワースペクトル密度分布

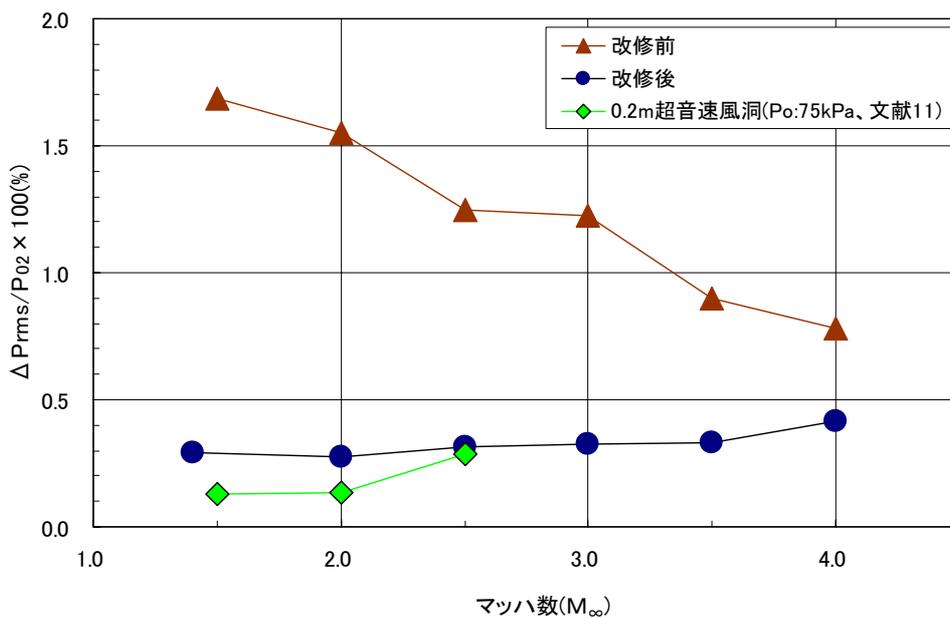


図 7.2 改修前後の総圧(P02)変動

表6 計測レンジ設定表

	感度大(最適感度係数)	感度小
Kuliteセンサー型式	XT-140-25D	XT-140-25D
シグナルコンディショナ TEAC-57 (アンプ)	Gain=1000 励起電圧=10[V] 感度係数=1.568[kPa/V]	Gain=250 励起電圧=2.5[V] 感度係数=25.45[kPa/V]
FFTアナライザ条件	周波数分解:62.5[Hz] 平均回数:10回	周波数分解:62.5[Hz] 平均回数:10回
感度比	1	1/16.2

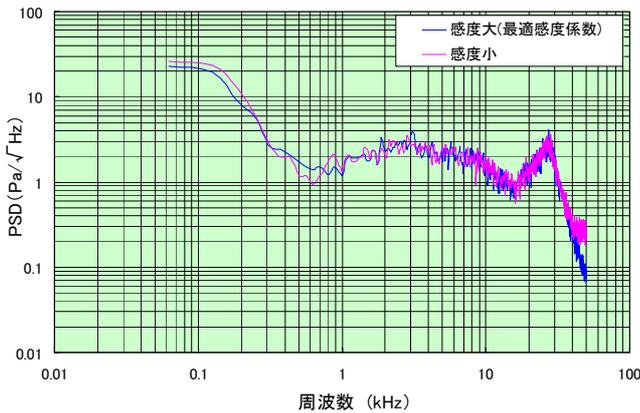


図8 感度係数の違いによるデータへの影響 (M_∞=2.0)

(2) 模型先端径、センサー型式の違いによるデータへの影響

タイプB模型を使用して、測定部中心部での総圧(P₀₂)変動データを取得し、タイプA模型で取得したデータとの比較を行った。

図9に、マッハ数M_∞=2.0における総圧変動の周波数特性を、パワースペクトル密度(PSD)で示す。周波数5kHz以上で、タイプA及びB模型のPSD分布に多少のずれが生じているが、全体的には概ね一致している。

上記の結果より、模型先端径、センサー型式(センサー固定方式)の相違による総圧変動の周波数特性への影響は、小さいことが分かった。

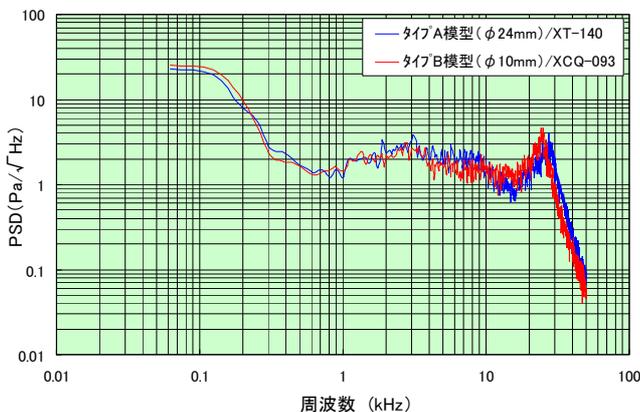


図9 模型先端径、圧力センサー型式の違いによるデータへの影響 (M_∞=2.0)

(3) 計測アンプ機種によるデータへの影響

風洞改修前も含むこれまでの総圧(P₀₂)変動の計測結果では、マッハ数M_∞=1.4から4.0のいずれでも30kHz手前の急激な減衰直前で、「ピーク」のある周波数特性となった(図7.1)。同様の「ピーク」の発生は、JAXAの0.2m×0.2m超音速風洞¹¹⁾及び第2遷音速風洞¹²⁾でも報告されている。第2遷音速風洞における総圧変動の計測では、本報告の上記図6に示す計測装置と同じものが使用された。図10に、本超音速風洞と第2遷音速風洞の周波数特性の比較を示す。

上述のように、本超音速風洞も含む3つの風洞に共通した「ピーク」なので、気流特性ではなく計測系の原因が疑われた。文献11)及び12)より、3つの風洞で使用された計測機器の内、圧力センサー及びアンプについては、同一メーカー(Kulite製/TEAC製)の製品である。また、FFTアナライザについては、本超音速風洞と第2遷音速風洞は同一メーカー(RION製)で、0.2m×0.2m超音速風洞は異なる(小野測器製)。

以上の計測機器の比較より、「ピーク」の発生原因はアンプ機種によるのではないかと推定し、それを確認することとした。アンプ機種による影響の有無確認は、TEAC製以外のメーカーのアンプでも総圧変動の計測を行い、データを比較することにより行った。表7に、3つのメーカーのアンプの型式/性能及び計測時の感度係数(圧力変換係数)を示す。

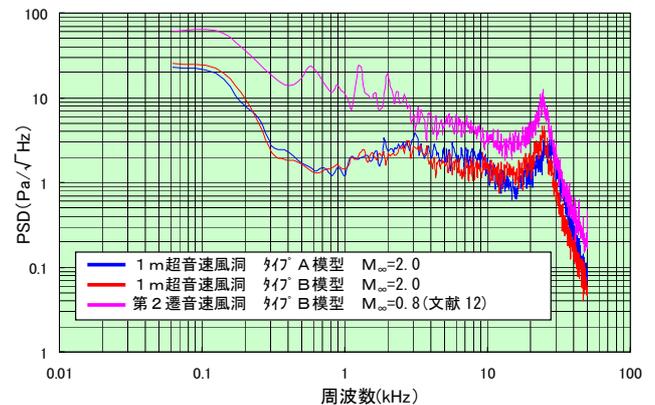


図10 第2遷音速風洞(文献12)との比較

表7 アンプ性能の比較

メーカー名	TEAC	ユニパルス	NEC三栄
型式	SA-57	AM30	AH11-110SP
周波数特性	DC~100kHz	DC~100kHz	DC~200kHz
励起電圧	10V	10V	10V
ゲイン	1000	1000	1000
非直線性	±0.05%	±0.01%	±0.01%
感度係数 [kPa/V]	1.563	1.559	1.574

アンプの比較における計測系を図 11 に示す。データの取得方法は、3つのアンプで一つの通風を同時計測するのではなく、個々のアンプでそれぞれ通風条件を同じにして通風を行い、データを取得した。

図 12.1 から図 12.3 に、マッハ数 $M_{\infty}=1.4, 2.0$ 及び 3.0 の周波数特性をパワースペクトル密度 (PSD) で示す。なお、図 12.3 のマッハ数 $M_{\infty}=3.0$ については、2つのメーカーのアンプでの比較である。各アンプで取得した PSD 分布は、マッハ数 $M_{\infty}=1.4$ 及び 2.0 のそれぞれにおいて、殆ど同様で「ピーク」も良く一致している。また、マッハ数 $M_{\infty}=3.0$ では、 $0.1\sim 0.7\text{kHz}$ で若干の相違が見られるが、その他の部分は「ピーク」も含めほぼ一致している。

本結果より、アンプ機種による周波数特性への影響は、殆どないことが分かった。

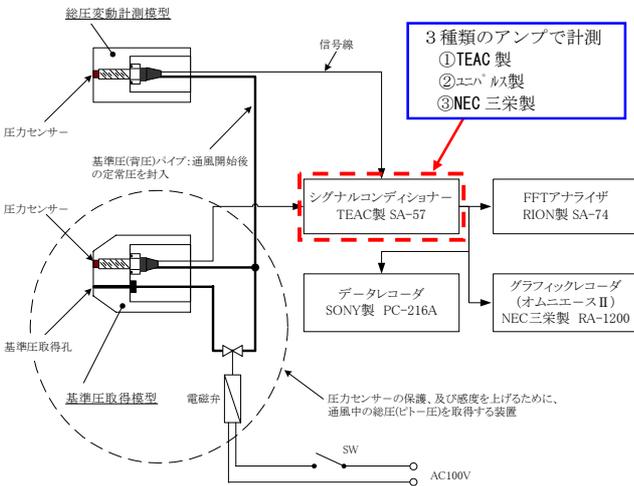


図 11 3種類のアンプの計測系

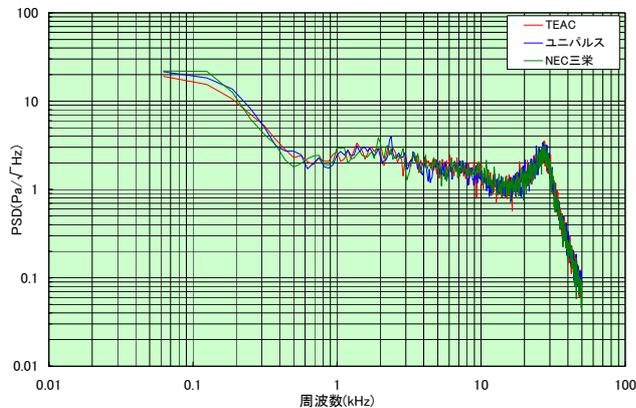


図 12.1 アンプ機種によるデータへの影響 ($M_{\infty}=1.4$)

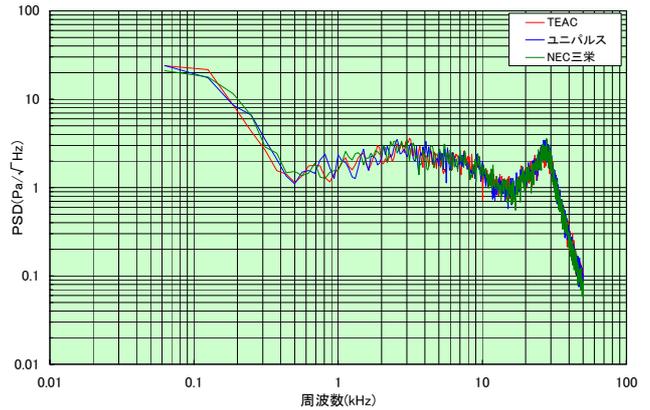


図 12.2 アンプ機種によるデータへの影響 ($M_{\infty}=2.0$)

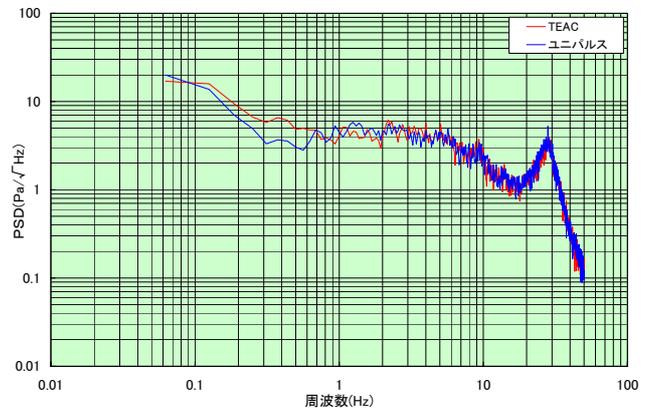


図 12.3 アンプ機種によるデータへの影響 ($M_{\infty}=3.0$)

5. 5. 3 貯気槽流路の違いによる影響

図 13 に示すように本超音速風洞における通常の通風では、空気源として2基の貯気槽¹³⁾ (2基の貯気槽名称: 3球及び4球) を使用している。しかし、貯気槽の保守・点検等の都合により、1基の貯気槽のみを使用して通風を行う場合がある。1基の貯気槽、すなわち3球または4球のどちらか一方の貯気槽をのみを使用した場合には、2基の貯気槽を使用した場合と比べて、調圧弁までの流路が異なる。この流路の違いが、総圧(P_{02})変動へ影響を及ぼすかどうかについて調べた。

平成 17 年に、貯気槽 1 基または 2 基を使用して、総圧変動の計測をマッハ数 $M_{\infty}=1.4, 2.0$ 及び 4.0 について実施した(なお、マッハ数 $M_{\infty}=4.0$ の貯気槽 1 基の通風は、貯気槽の安全装置が働くため不可能である)。本計測で取得したデータに、すでに平成 14 年に取得している貯気槽 2 基使用のデータを加え、貯気槽を 1 基使用した場合と 2 基使用した場合の比較を行った。その結果を、下記の(1)及び(2)に示す。

(1) 周波数特性

図 14.1 から図 14.3 に、総圧変動の周波数特性をパワー スペクトル密度 (PSD) で示す。

計測の再現性については、図 14.1 に示すように貯気槽を 2 基使用した場合のマッハ数 $M_{\infty}=4.0$ において、平成 14 年と平成 17 年のデータはほぼ一致しているのが良好である。

図 14.2 及び図 14.3 のマッハ数 $M_{\infty}=1.4$ 及び 2.0 においては、貯気槽を 1 基使用した場合、及び 2 基使用した場合の PSD 分布は殆ど一致している。

(2) 変動量

図 14.4 に、総圧変動 ($\Delta P_{rms} / P_{02}$) の比較を示す。マッハ数 $M_{\infty}=1.4$ 及び 2.0 における貯気槽 1 基同士の比較、及び貯気槽 1 基と 2 基の比較では、総圧変動に大きな違いはない。最大差異は、 $M_{\infty}=1.4$ における貯気槽を 1 基 (4 球) 使用した場合と 2 基 (3 球 + 4 球) 使用した場合の差異で、約 0.03% である。

以上より、貯気槽と調圧弁間の流路が異なっても、総圧変動に著しい差異 (影響) が生じないことが分かった。

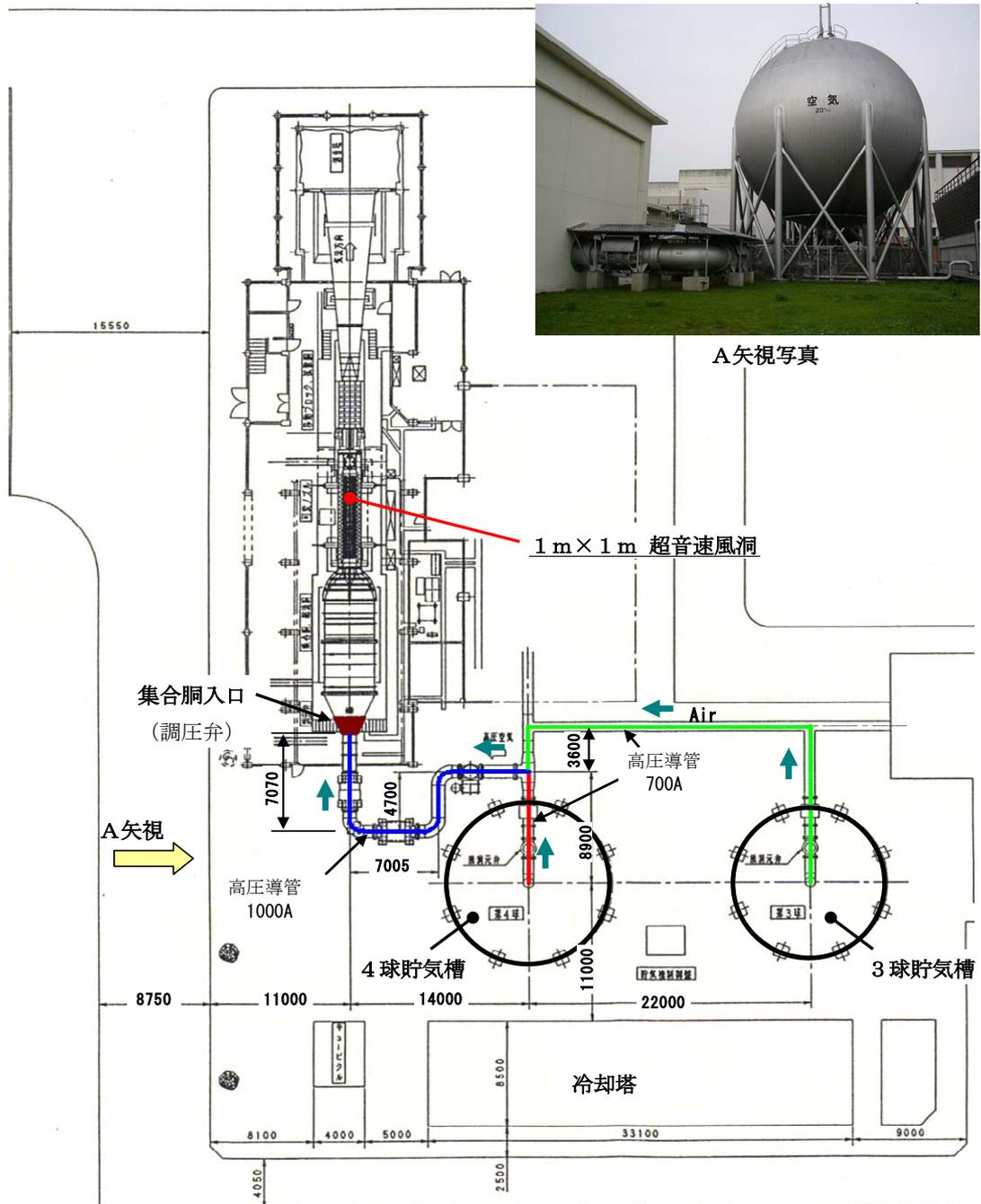
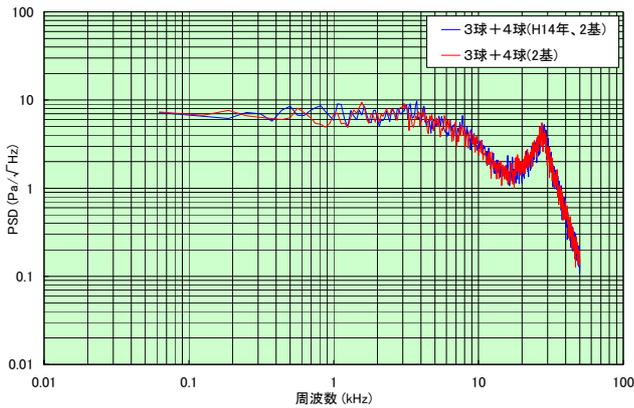
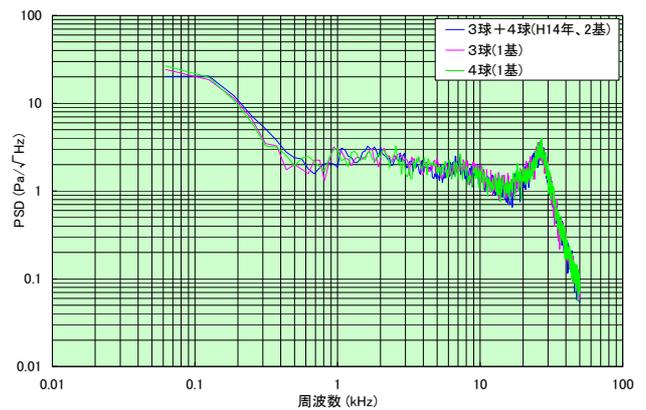
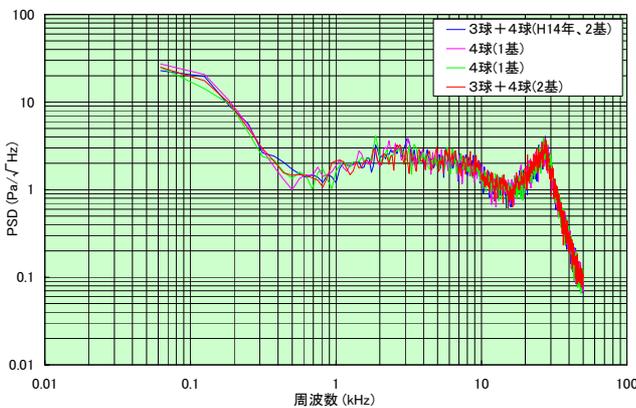
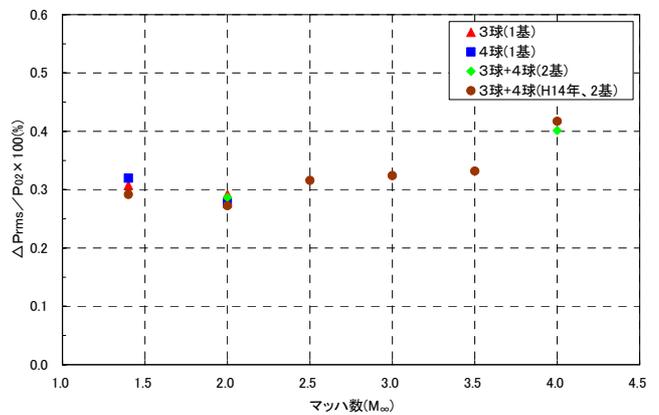


図 13 貯気槽 / 高压導管の配置 (単位 : mm)

図 14.1 試験の再現性 ($M_{\infty}=4.0$)図 14.2 周波数特性への影響 ($M_{\infty}=1.4$)図 14.3 周波数特性への影響 ($M_{\infty}=2.0$)図 14.4 総圧 (P_{02}) 変動への影響

5. 5. 4 測定部中心部断面の分布

図 15 に示すように、測定部中心部断面の総圧 (P_{02}) 変動の分布を調べた。図に示す 17 箇所の計測点の内、測定部中心縦方向 ($Y=0\text{mm}$) の 5 箇所 (A, 0~E, 0) については、図 5.1 (改修後 H14 年度以降) 及び図 5.3 に示したタイプ A 模型を縦方向に平行移動して計測を実施した。

その他の点については、図 16.1 に示すようにスティングのアームに取付けた 2 個のタイプ A 模型を水平にセットし、計測を実施した。縦方向の計測は、模型を上下に平行移動することにより行った。また、横方向 (東西方向) の計測は、スティングの中心を回転中心として東西を反転させて行った。

圧力センサーは、基本的に Kulite 製 XT-140-25D を使用した。但し、スティングのアームに 2 個のタイプ A 模型を取付けた場合には、図 16.1 に示すように Kulite 製 XCQ-093-25D の圧力センサーも使用した。また、計測系は基本的に図 6 に示す方法と同じであるが、模型を 2 個 (2ch) 使用した場合には、同時計測を実施した。なお、図 15 に示

す計測点 (A, 0)、(B, 0)、(D, 0) 及び (E, 0) についての FFT 解析には、ADVANTEST 製-R9211A/E の FFT アナライザーを使用した。

図 16.2 に模型写真を、また、図 16.3 にシュリーレン写真を示す。

図 17.1 及び図 17.2 に、各々マッハ数 $M_{\infty}=1.4$ 及び 2.0 における総圧変動の周波数特性 (パワースペクトル密度: PSD) を示す。マッハ数 $M_{\infty}=1.4$ 及び 2.0 ともそれぞれのマッハ数において、各計測点の全体的な PSD 分布の形態は概ね同じである。PSD のバラツキについては、マッハ数 $M_{\infty}=1.4$ に比べて $M_{\infty}=2.0$ の方が大きい。特に、 $0.3\sim 2\text{kHz}$ で顕著である。

図 17.3 に示すマッハ数 $M_{\infty}=1.4$ 及び 2.0 の総圧変動 ($\Delta P_{\text{rms}}/P_{02}$) については、平均値とバラツキを求めた。平均値については、どちらも 0.3% 程度で概ね同じである。また、バラツキ (最大値-最小値) については、マッハ数 $M_{\infty}=1.4$ 及び 2.0 のそれぞれで、約 0.09% 及び 0.11% である。従って、 $M_{\infty}=1.4$ の方が少し小さい。

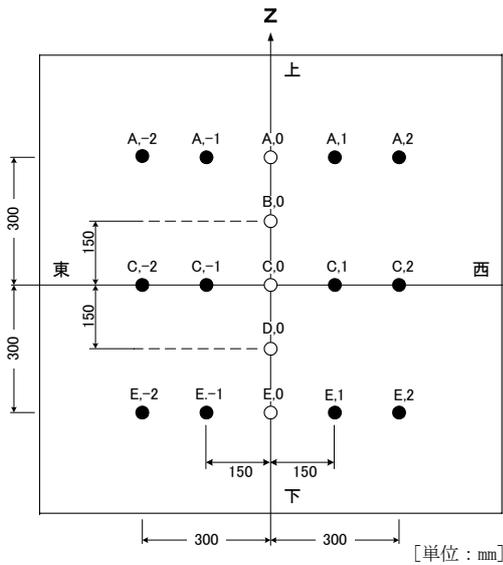


図 15 計測点 (測定部中心部断面: 17 点)

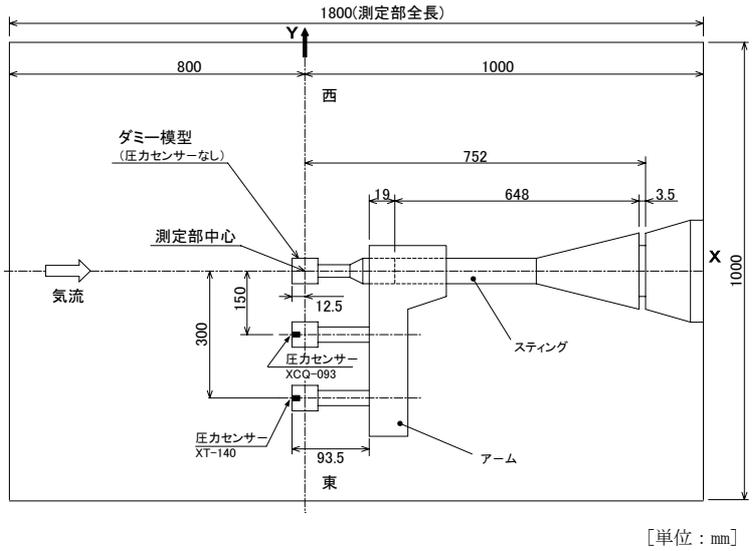


図 16.1 模型配置 (測定部平面図)



図 16.2 模型写真

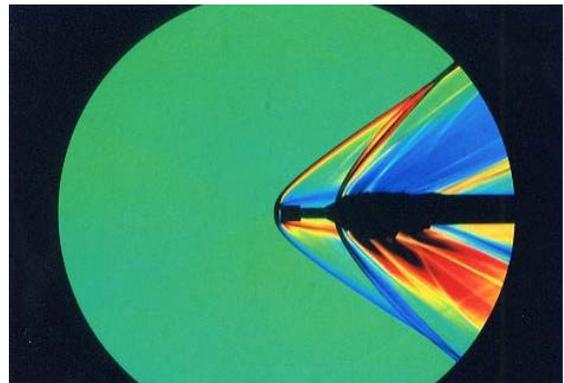


図 16.3 シュリーレン写真 ($M_\infty=2.0$)

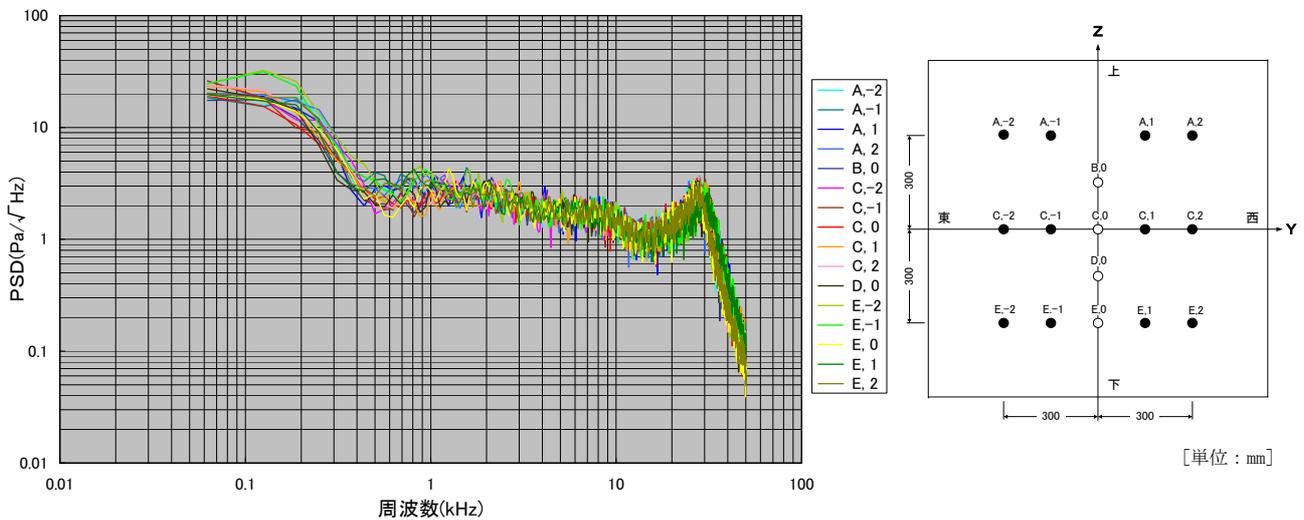


図 17.1 測定部中心部断面の周波数特性 ($M_\infty=1.4$)

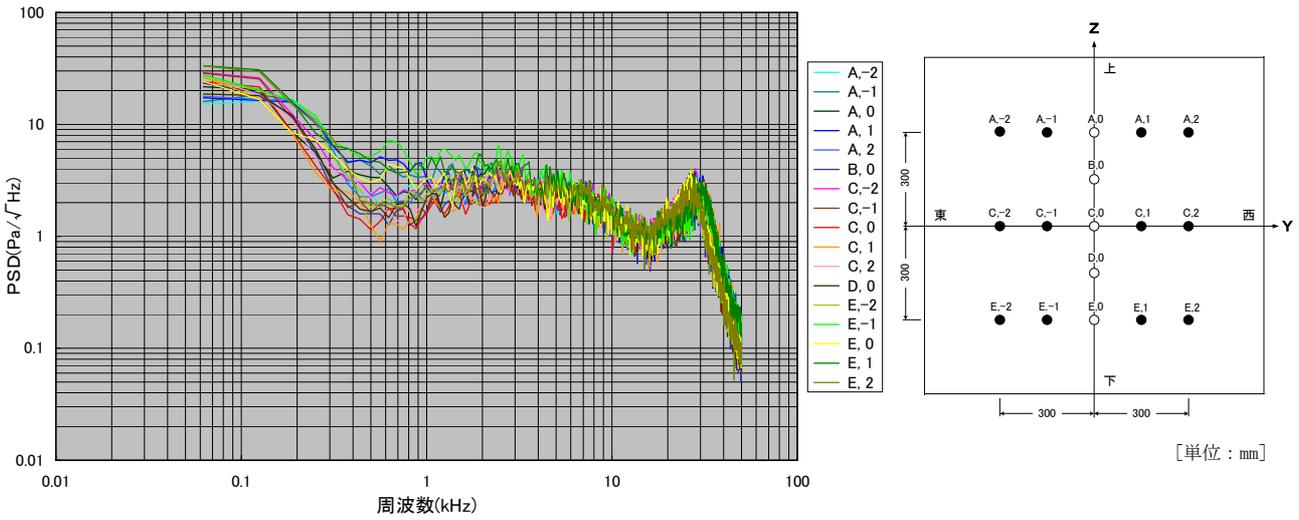


図 17.2 測定部中心部断面の周波数特性 ($M_\infty=2.0$)

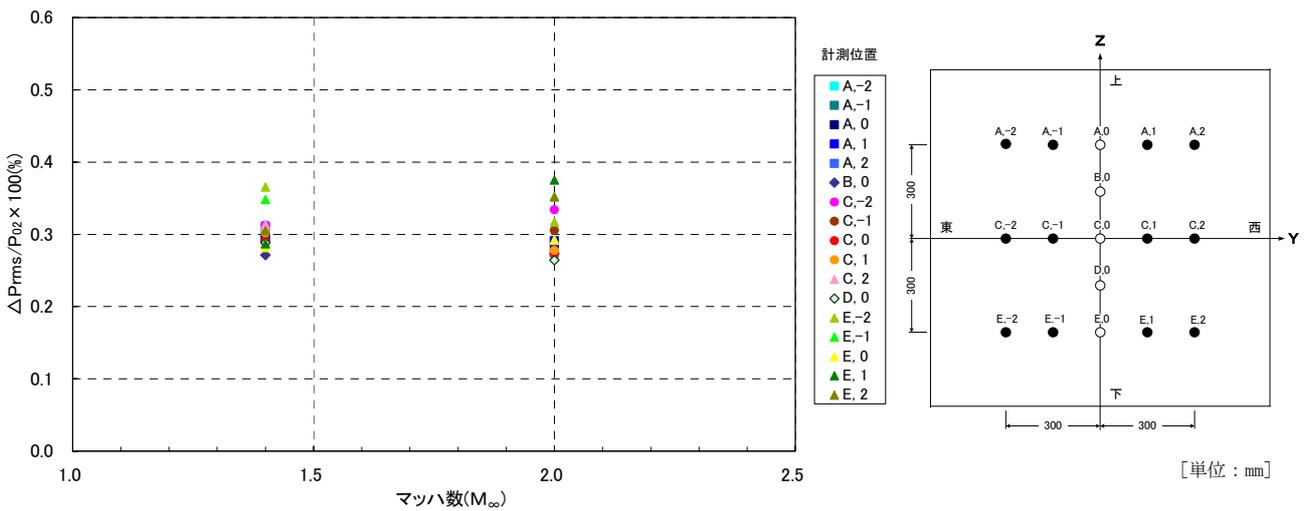


図 17.3 測定部中心部断面の総圧 (P_{02}) 変動 ($M_\infty=1.4, 2.0$)

6. 静圧 (P_w) 変動計測

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、静圧 (P_w) 変動を測定部下壁面で調べた。静圧変動の計測は、閉止蓋の取付・取外用作業穴に圧力センサーを取付けて行った。

6. 1 計測位置

図 18.1 及び図 18.2 に示すように、計測位置は測定部下壁の中心より上流へ 125mm 、西側へ 125mm の位置である。

6. 2 計測装置

静圧 (P_w) 変動の計測には、表 3.1 に示す Kulite 製の差

圧型圧力センサー XT-140-25D を使用した。図 19 に圧力センサーの取付部詳細を示す。

図 20 に計測系統図を示す。圧力センサーの基準圧には、計測感度を上げる目的で、測定部西壁圧を使用した。圧力センサーへの基準圧供給は、図 20 に示す基準圧取得装置において、通風後気流が静定した後に壁圧を封入することにより行った。

表 8 に圧力センサーを除く計測機器の性能、及びその設定値を示す。計測データ解析には、小野測器製 FFT アナライザ (型式: CF5220、レンタル品) を使用した。また、計測データの処理については、総圧 (P_{02}) 変動の場合と同様である。

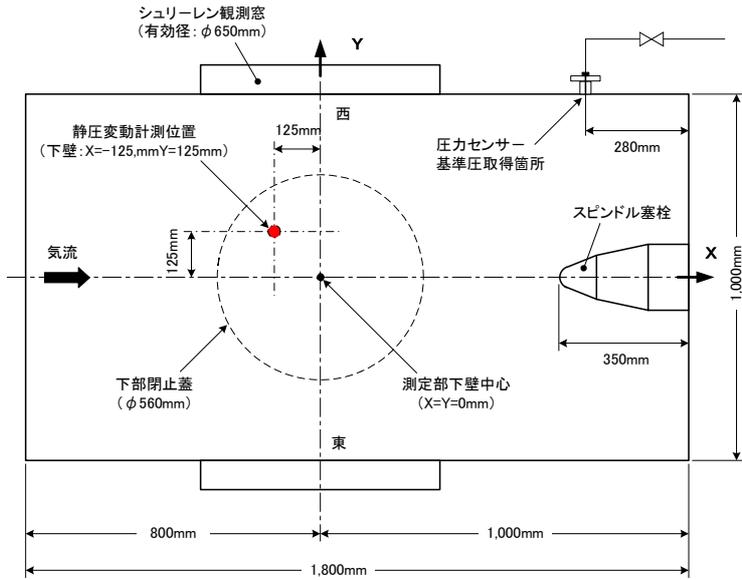


図 18.1 静圧変動の計測位置 (測定部平面図)

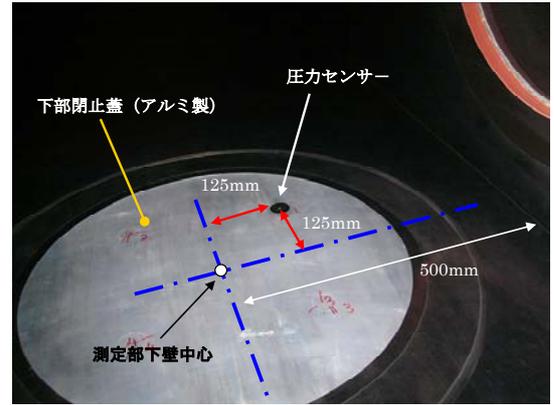


図 18.2 圧力センサー取付け状況 (測定部内写真)

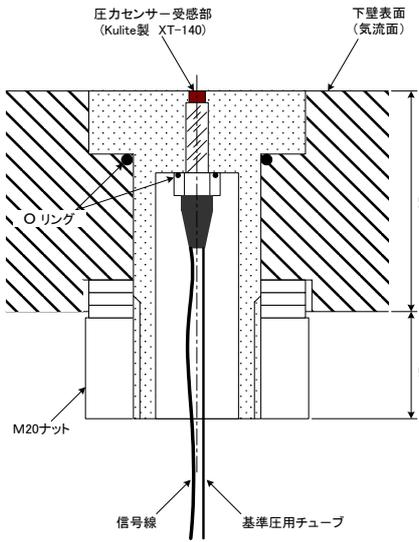


図 19 圧力センサー取付け部詳細図

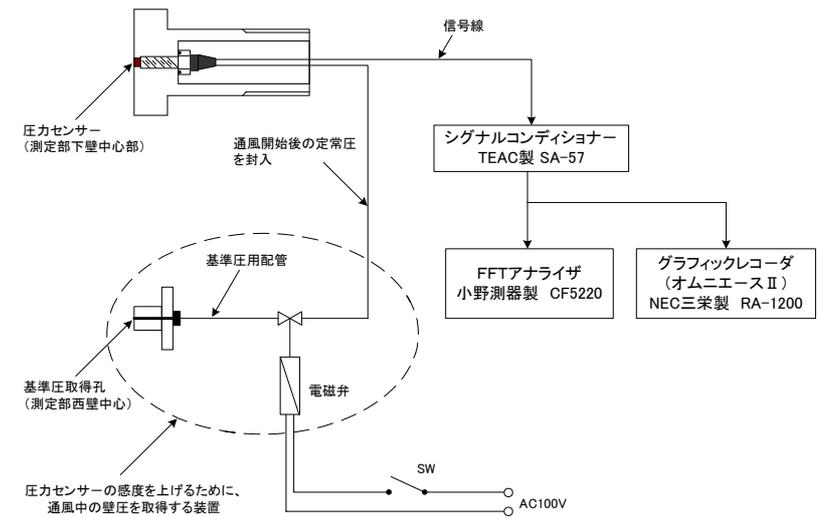


図 20 静圧変動計測系統図

表 8 静圧 (Pw) 変動計測の機器性能/設定値

測定機器名	型式	主要性能	主な設定値/圧力変換係数
シグナル コンディショナ (アンプ)	TEAC 製 SA-57	励起電圧 2.5, 5, 10, 15, 20V 周波数特性 DC~100kHz ゲイン 0.25, 0.5, 1, 2.5, 5k 非直線性 ±0.01%/FS 以内	励起電圧 10V ゲイン 1000倍 圧力変換係数 3.724kPa/V
FFT アナライザ	小野測器製 CF5220	入力数 2ch 周波数レンジ 1~100kHz サンプリング点数 64, 128, 512 1024, 2048 4096, 8192 A/D変換器分解能 16bit ダイナミックレンジ 90dB 以上	周波数分解能 (バンド幅) 62.5Hz 周波数レンジ DC~50kHz 測定値の平均回数 10回 窓関数 HANNING AC/DC AC結合
デジタル グラフィック レコーダ	NEC 三栄製 オムニエース II RA-1200	測定レンジ ±1, 2, 5, 10, 20, 50V 等 入力数 16ch 周波数レンジ DC~50kHz 直線性 ±0.1% FS 以内 A/D変換器分解能 16bit	測定レンジ ±20V ローパスフィルター なし 入力結合 (AC/DC) : DC 結合

6.3 計測結果

(1) 周波数特性

図 21.1 に、マッハ数 $M_\infty=1.4$ から 4.0 の周波数特性をパワースペクトル密度 (PSD) で示す。全体として、PSD のレベルはマッハ数が小さい方が大きい。また、総圧変動のように、30kHz 手前での「ピーク」の発生はない。

それぞれのマッハ数の PSD 分布について、総圧変動の分布と比較した。 $M_\infty=1.4$ から 4.0 の重ね合わせ図を、図 21.2 に示す。 $M_\infty=1.4$ の場合、低周波域と総圧変動のピーク発生域を除き、概ね一致している。しかし、マッハ数が増加すると、PSD における静圧変動と総圧変動のレベルの違いが大きくなる。

(2) 変動量

静圧変動の実効値(オーバオール値： ΔP_{rms})を一様流動圧(q_∞)で無次元化した $C_{p_rms}(\Delta P_{rms}/q_\infty)$ を、図 21.3 に示す。

図に示すように本超音速風洞の C_{p_rms} は、約 0.12~0.45% で、マッハ数 (M_∞) が大きい方が小さい。また、 M_∞

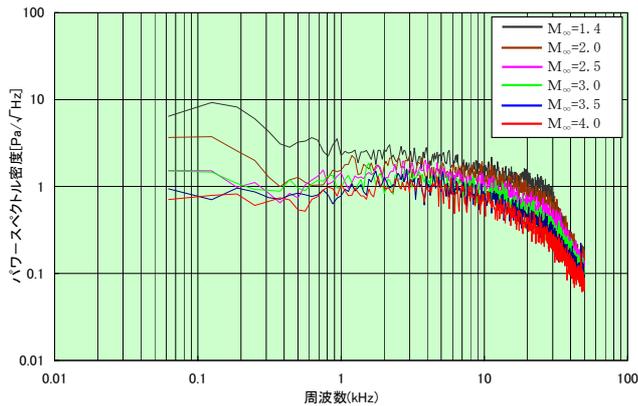


図 21.1 静圧 (Pw) 変動の周波数特性

=2.0 においては、気流の乱れが小さい真空吸込型高速風洞^{4),14)}のデータ¹⁵⁾に対して、1桁近く大きい。

図に示す文献⁸⁾及び¹⁶⁾のデータは、参考として示した。それらのデータはAEDC提唱による頂角 10° の円錐模型(10° コーン)を用いて計測されたものである。一般に、静圧変動における風洞間の比較及び飛行データとの比較は、 10° コーン上で計測されたデータで行われている。

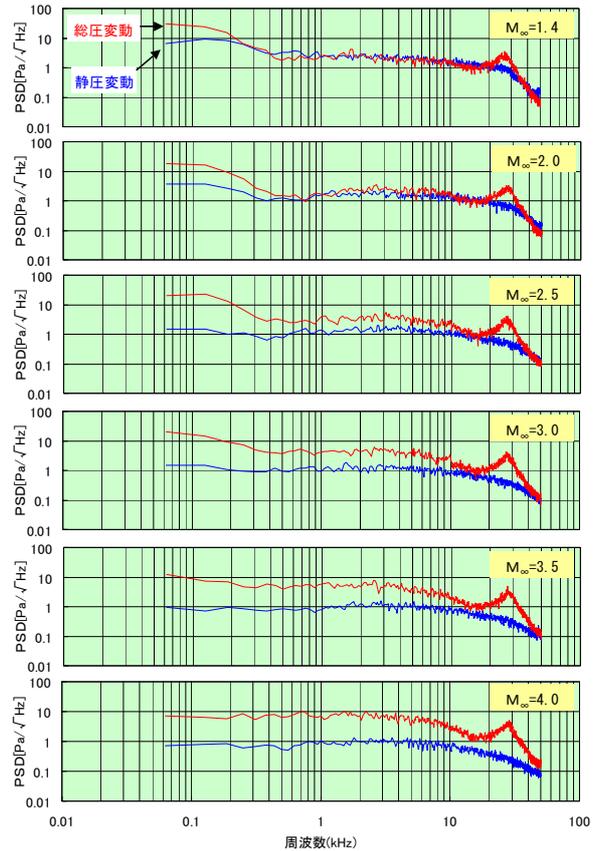


図 21.2 静圧変動と総圧変動の周波数特性比較

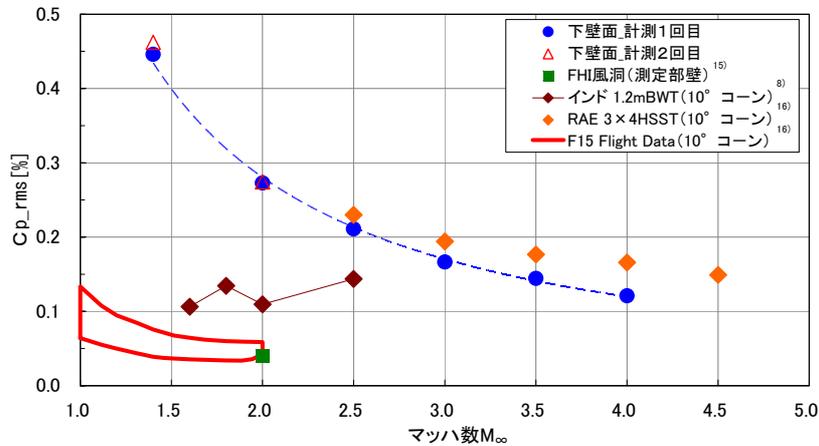


図 21.3 静圧 (Pw) 変動

7. まとめ

平成12年度のJAXA吹出式1m×1m超音速風洞改修後、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、測定部における変動圧計測を実施した。変動圧計測では、測定部の中心部及び下壁面でそれぞれ総圧(P_{02})変動と静圧(P_w)変動を調べた。その結果、以下のことが判明した。

- (1) 主要マッハ数における測定部中心部の総圧変動(ΔP_{rms})は、総圧(P_{02})の平均値に対して0.29%から0.42%で、改修前に比べて約1/2から1/6に減少した。マッハ数が小さいほど減少率は大きい。
- (2) 測定部中心部断面において、マッハ数 $M_\infty=1.4$ 及び2.0における総圧変動の分布を調べた。断面内の総圧変動(ΔP_{rms})の平均値は、総圧(P_{02})の平均値に対して、両マッハ数とも0.3%程度で概ね同じである。また、その断面内バラツキについては、 $M_\infty=1.4$ の方が小さい。
- (3) マッハ数 $M_\infty=1.4$ 及び2.0においては、貯気槽を1基使用した場合と2基使用した場合で、すなわち貯気槽と調圧弁間の流路が異なっても、測定部中心部の総圧(P_{02})変動に著しい差異はない。
- (4) 主要マッハ数における測定部下壁面の静圧変動($C_{p_rms}:\Delta P_{rms}/q_\infty$)は、 $0.1\% < C_{p_rms} < 0.5\%$ で、マッハ数が小さい方が大きい。
- (5) マッハ数 $M_\infty=2.0$ での測定部下壁面における静圧変動(C_{p_rms})は、気流の乱れが小さい真空吸込型高速風洞のデータに対して1桁近く大きい。

8. 謝辞

本変動圧計測の実施にあたって、多くの方々の御協力を得た。風洞技術開発センター超音速風洞セクションの佐藤衛氏からは、模型に関する資料を提供して頂いた。また、同センター標準化セクションの神田宏氏からは、アンプを貸与して頂いた。

試験(通風)では、模型のセットアップ及び風洞諸量計測等で超音速風洞セクションの飯島秀俊氏、赤塚純一氏、(株)IHIエアロスペースエンジニアリングの木村毅氏、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します。

参考文献

- 1) 空気力学第二部：「1m×1m吹出式超音速風洞の計画と構造」, NAL TR-29, 1962
- 2) 高木正平：「超音速風洞(流れを作る)」, ながれ 21, 2002, pp. 400-408
- 3) 徳川直子：「圧縮性境界層の遷移と気流変動」, JAXA-SP-05-012, 2006, pp27-28

- 4) 富士重工業株式会社：「航空宇宙技術本部の風洞設備の紹介」、スバル技報第17号別刷、平成2年7月
- 5) 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：「1m×1m超音速風洞改修と風洞性能」、JAXA-RR-05-024, 2006
- 6) 榊原盛三、三輪等、小国保男、佐藤衛、神田宏：「航技研二次元風洞の気流特性について(II)」, NAL TR-386, 1984
- 7) 「騒音・振動対策ハンドブック」、社団法人日本音響材料協会編、1982年1月
- 8) H.Sundara Murthy, R.S. Verma, S.P. Jagadeeswarachar, and Rajan Kumar：”Flow Quality Improvements in a Blowdown Wind Tunnel”, J.AIRCRAFT, VOL.38, NO.3: ENGINEERING NOTES, pp.577-580.
- 9) 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
- 10) 「FFT解析に関する基礎用語集」、株式会社小野測器、2002.12
- 11) 澤田秀夫、河野敬、国益徹也：「0.2m超音速風洞の圧力変動計測結果」、NAL TM-1355, 1998
- 12) 鈴木教雄、佐藤衛、神田宏、板橋幸広、西島寛典：「JAXA 0.8m×0.45m高Re数遷音速風洞の測定部二次元性、総圧変動特性について」、JAXA-SP-04-011, 2004, pp. 4-12
- 13) 馬場滋夫、末永尚史、鈴木正光、戸田宣洋：「航技研高圧貯気槽設備の更新について」、NAL TM-634, 1991
- 14) 杉浦裕樹、高木正平、徳川直子、西沢啓：「マッハ数2における小型超音速実験機の遷移特性」、NAL-SP-54, 2002, pp27-30
- 15) 鈴木教雄、塩沢信秋、志村譲二「富士重工高速風洞の超音速特性と模型試験について」、第36回風洞研究会議前刷
- 16) N.S. Dougherty, Jr., and D.F. Fisher: ”Boundary, Layer Transition on a 10-Degree Cone: Wind Tunnel/Flight Data Correlation”, AIAA Paper No. 80-0154, January, 1980.

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-06-013

発行 平成 19 年 3 月 30 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) 東京プレス

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

© 2007 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。



本書は再生紙を使用しております。

This document is provided by JAXA.