

JAXA 2m × 2m 遷音速風洞における測定部マッハ数検定試験

香西 政孝、上野 真、塩原 辰郎、小松 行夫、唐澤 敏夫、小池 陽、須谷 記和（宇宙航空研究開発機構）
我那覇 義人、今 直樹（コスモテック株式会社）
原口 智裕（IHI エアロスペースエンジニアリング株式会社）
中村 晃祥（財団法人航空宇宙技術振興財団）

Calibration of the test section Mach number in the JAXA 2m x 2m Transonic Wind Tunnel

Masataka Kohzai, Makoto Ueno, Tatsurou Shiohara, Yukio Komatsu, Toshio Karasawa, Akira Koike, Norikazu Sudani (JAXA)
Yoshito Ganaha, Naoki Kon (COSMOTEC)
Tomohiro Haraguchi (IHIAE)
Akiyoshi Nakamura (JAST)
Key Words: Transonic Wind Tunnel, Flow calibration, Static pressure

Abstract

In the JAXA 2m x 2m Transonic Wind Tunnel, there have been more needs of wind tunnel users for high measurement accuracy to develop aircraft and launch vehicles with high performance. To achieve higher accuracy, more elaborate calibration tests to calculate freestream flow conditions have been conducted in this wind tunnel. To obtain test section Mach numbers exactly, test section static pressures must be measured precisely. However, the measurement of test section static pressure is difficult for transonic flows, especially high subsonic flows because of probe nose effects, blockage effects, support interference, and so on. A series of calibration tests is conducted to optimize the static pressure probe for transonic flows and to determine the test section Mach number in the model location from the plenum chamber Mach number.

はじめに

JAXA 2m x 2m 遷音速風洞 (JTWT) は国内で最も大きな測定部断面積をもつ遷音速風洞の一つであり、唯一の連続式遷音速風洞である。本風洞は飛行機やロケットの開発、空力的な基礎研究に多く使用されている。近年、風洞ユーザから高度な研究開発を行う為に高精度な計測データが要求されている。

高精度な計測データを取得する為には気流の状態を正確に把握する必要がある。最も重要な気流状態の一つは測定部マッハ数であり、測定部内のマッハ数を正確に把握するには測定部内の静圧を正確に測定出来なければならない。JTWTでは、プレナムチャンバーの静圧（プレナム静圧）と集合胴総圧から算出されたプレナムマッハ数により測定部マッハ数を制御している。過去に図1に示すような長さ9000mm、直径100mmの中心プローブを用いて測定部中心線上のマッハ数分布測定を行った。3種類の集合胴総圧についてプレナムマッハ数に対する測定部マッハ数とプレナムマッハ数の差を図2に示す。ここで用いた測定部マッハ数は集合胴総圧と測定部静圧を

用いて算出した。これらのデータは約1分間スキャンバンプ (SV) によってスキャンした圧力を測定したデータであり、気流の時間変動の影響を受けている為、これらのデータはバラツキが大きい。また、マッハ数0.8~0.9においては測定部マッハ数とプレナムマッハ数との差が約0.002存在する。当時、この違いは重要視されなかった為、測定部マッハ数の補正は行われていない。この差は当風洞所有の標準模型の抵抗係数に換算すると約5カウント (0.0005) に相当する。従って、計測精度を向上させ、正確に測定部マッハ数の測定をすることが必要である。

過去の気流検定試験で使用した中心プローブは全長9[m]であり、設置に非常に時間がかかる為、過密な風洞試験スケジュールの中でこのプローブを用いて頻繁に試験を行うことは難しい。本風洞試験設備における測定部マッハ数検定試験を定期的に行う為には、測定部内に設置出来る長さの静圧プローブによるマッハ数測定が必要であり、基準となる静圧プローブを所有する必要がある。しかし、現状では、様々な静圧プローブの形状についての情報はあがるが、それらの測定誤差の大きさや風洞測定部への設置方法等に関する詳細な情報がない為、基準と

なる静圧プローブを所有しておらず、測定部静圧の測定方法が定まっていない。また、遷音速領域、特に高亜音速領域において、静圧プローブによる測定部静圧測定は静圧プローブの頭部、ブロッケージの影響および支持干渉等の影響の為に正確に測定することが非常に難しい^{1,2)}。よって、遷音速領域における最適な静圧プローブ形状を決定し、正確に測定部静圧を測定することが必要である。

本報告の目的は、まず測定部静圧測定の計測精度を向上させ、静圧プローブ形状の最適化を行う。さらに改善した静圧測定方法により、プレナムマッハ数に対する測定部マッハ数を明らかにし、マッハ数補正を行うことである。

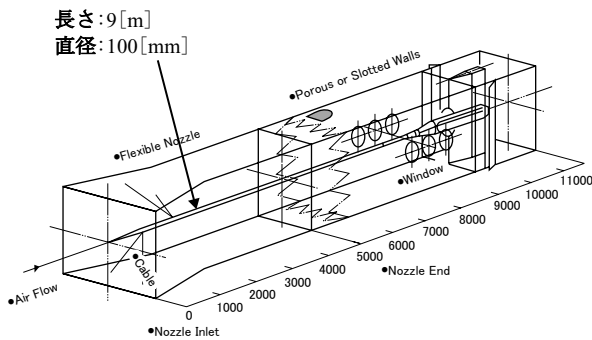


図 1: 中心プローブ概要図

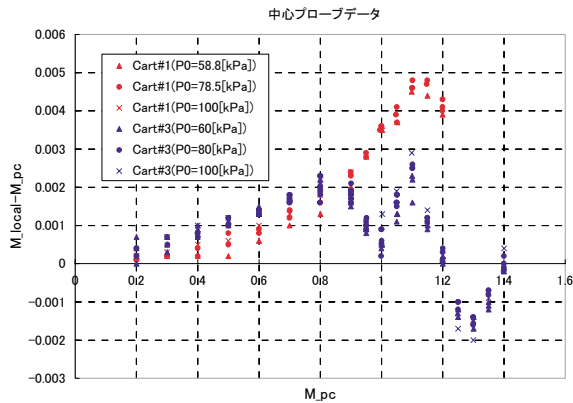


図 2: 測定部マッハ数とプレナムマッハ数の差

風洞試験設備概要

当風洞試験設備は2m×2mの測定部断面をもち、マッハ数0.1～1.4の範囲の試験が可能な連続循環式遷音速風洞である(図3)。通常、亜音速領域では主送風機を使用してマッハ数コントロールを行い、高亜音速以上の領域は模型周辺でのチョークを避けるために補助送風機を併用して抽気によりマッハ数のコントロールを行う。また集合胴総圧は50kPa～140kPaで制御が可能であり、集合胴総温度は35℃～65℃の範囲について±1℃で制御が可能である。単位レイノルズ数の最大値は20×10⁶/mである(表1)。

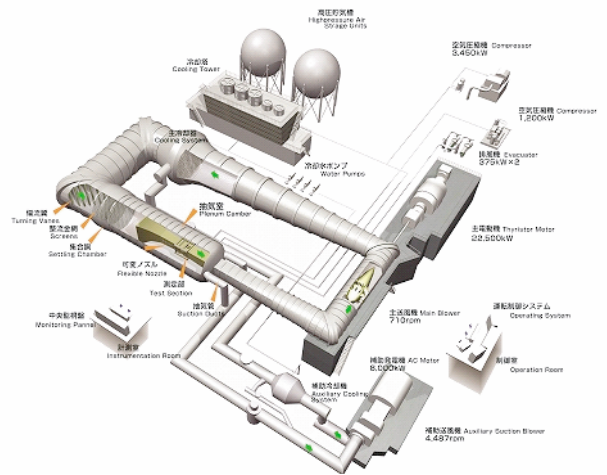


図 3: JAXA 2mx2m 遷音速風洞概要図

表 1: 風洞性能

Mach Number	0.1 to 1.4
Max. Reynolds Number	20 × 10 ⁶ [1/m]
Stagnation Pressure	50 to 140 [kPa]
Stagnation Temperature	308 to 338 [K]
Test Section Size	2 × 2 × 4.13 [m]
Construction	1960

測定部静圧測定方法の改善

測定部静圧の測定を行う為に使用した静圧プローブの設置状況を図4に、詳細を図5に示す。直径(d)が5mm、先端は長さ6dのOgive形状である。静圧孔は先端と円柱の接合部からaだけ後方の位置の周方向に4点設けられ、スティングによって支持されている。使用したスティングは平行部直径50.8mm、長さ850mmである。

まず、静圧測定精度を向上させる為に静圧プローブ(a=15d, b=15d)を用いて、スキャニバルブ(SV)によって測定した圧力データとデジタルクォーツマノメータによって測定した圧力データに関してバラツキの比較を行う。次に、プローブ形状の最適化を行う為に、a, bの長さの異なるプローブを用いて風洞試験を行ったデータの比較を行う。

1. 測定部静圧の計測精度向上

図6は測定部静圧をSVで測定した時の集合胴総圧の時間変化の影響を表したものである。通常、集合胴総圧、プレナム静圧はデジタルクォーツマノメータで測定されている。圧力制御方法の影響により集合胴総圧は約2分間周期で変動し、変化量は約±0.2[kPa]である。それに伴って測定部静圧、プレナム静圧も変化する。また、時間

変化の影響を調べる為に、SVを10スキャンさせて測定し、約2分間分の静圧データがプロットされている。図7は測定部マッハ数とプレナムマッハ数との差の時間変化を表したものである。SVで測定した場合には圧力センサの精度が良くないことと、応答遅れの為に誤差が生じている。

測定圧力をSVにて測定する場合の応答性の影響を表した結果を図8に示す。通常、集合胴総圧は集合胴に設置されたピトー管の圧力配管、プレナム静圧はプレナム室内のプレナム静圧検出部からの圧力配管を使用して風洞外に設置されたそれぞれのマノメータで計測され、これらの圧力からプレナムマッハ数の算出を行う。プレナム静圧測定用の圧力配管が長いことと、この圧力配管を途中で分岐して圧力センサのリファレンス圧力として使用している為、SVで切替えて測定された測定圧力とプレナム静圧の差圧 (P_{local}) とプレナム静圧 (P_{pc}) の同期が取れていない。

そこで、図9のように測定圧力をプレナム静圧と同様にマノメータにて測定を行うことにより圧力計測精度の改善を行った。マノメータにて圧力測定を行う場合には、マノメータが風洞外に設置されている為、配管長が約20mとなり、数秒程度の応答遅れが生じてしまう³。応答遅れを解消する為に、もう一台マノメータを使用して別にプレナム静圧 (P_{pc2}) の測定を行った。測定用圧力 (P_{local}) とプレナム静圧 (P_{pc2}) の同期を取る為に、両者の圧力配管の内径および配管長を同様にした。このように測定した静圧を使用して、測定部マッハ数とプレナムマッハ数の差 ($M_{local}-M_{pc}$) を算出した。SVを使用して静圧を測定した場合 (図7) のバラツキ誤差が0.0008であったのが、マノメータを使用した場合 (図10) のバラツキ誤差が0.0002と約4分の1になった。つまり、プローブ静圧測定用圧力配管とプレナム静圧測定用の圧力

配管の長さと同径を合わせて同期を取るによりバラツキ誤差が大きく減少した。また、マノメータを使用することにより静圧測定精度が向上した。

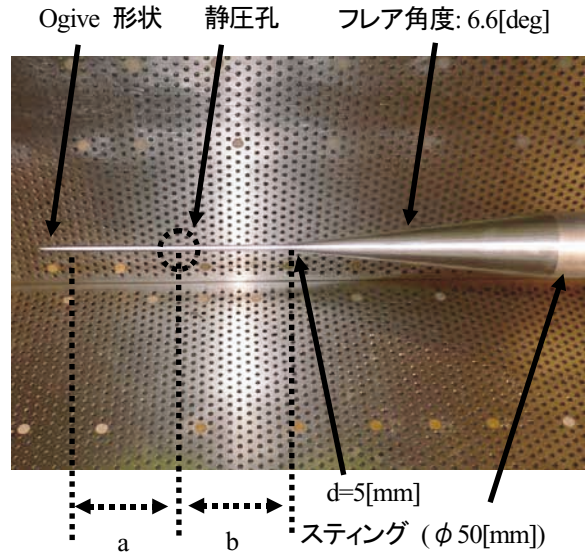


図5: 静圧プローブ詳細

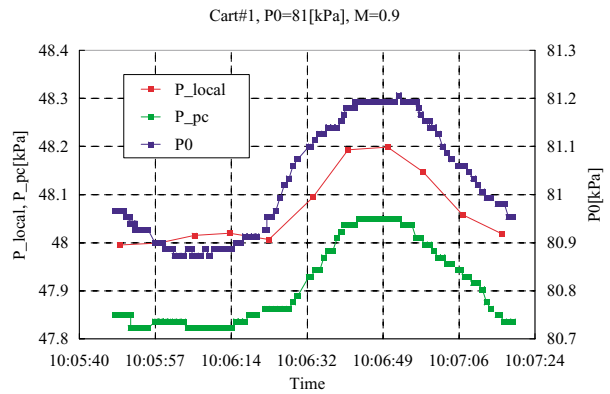


図6: 気流の時間変動の影響

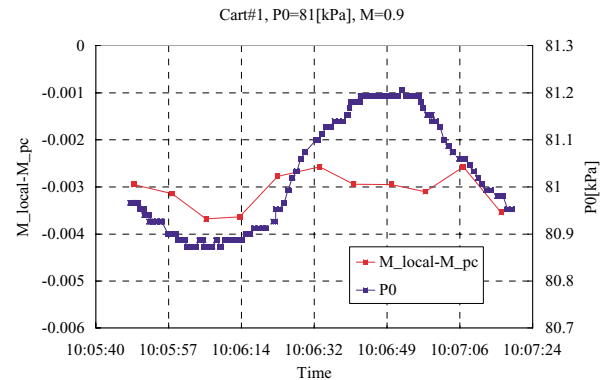


図7: 気流の時間変動によるバラツキ誤差



図4: 静圧プローブ設置状況

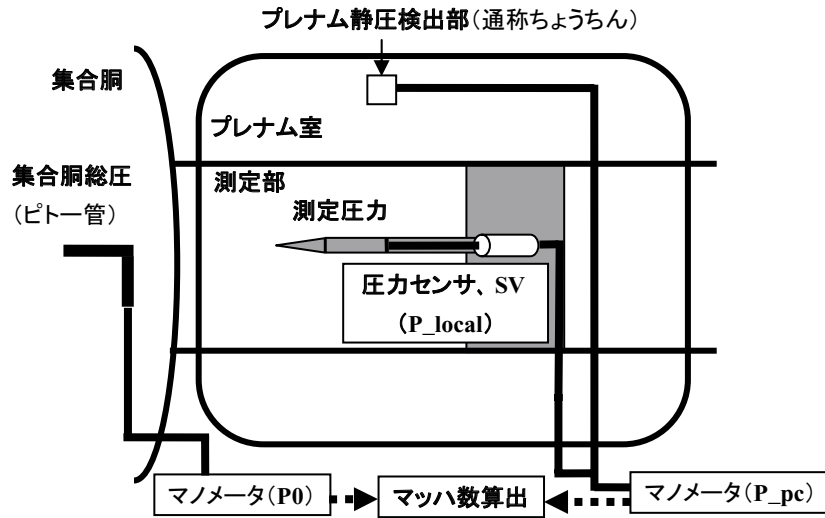


図 8: 配管長による応答遅れの影響

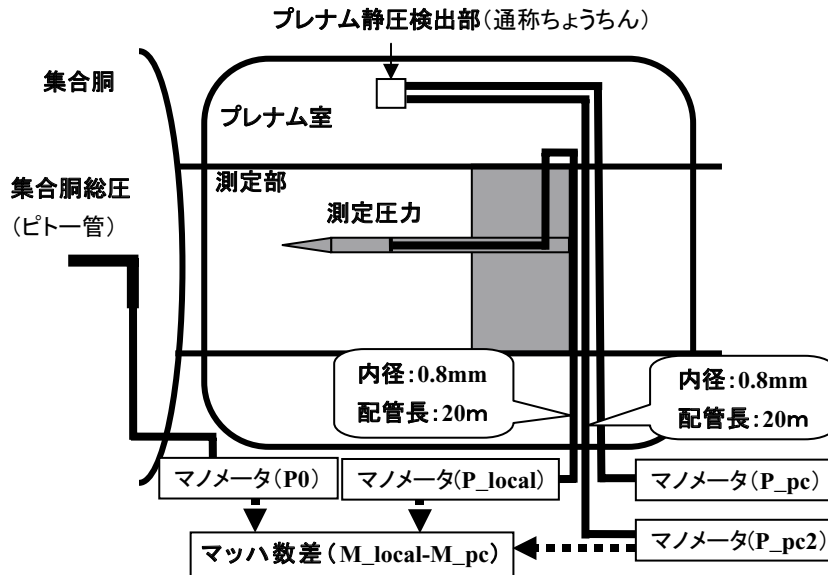


図 9: マンメータ使用による応答遅れの改善

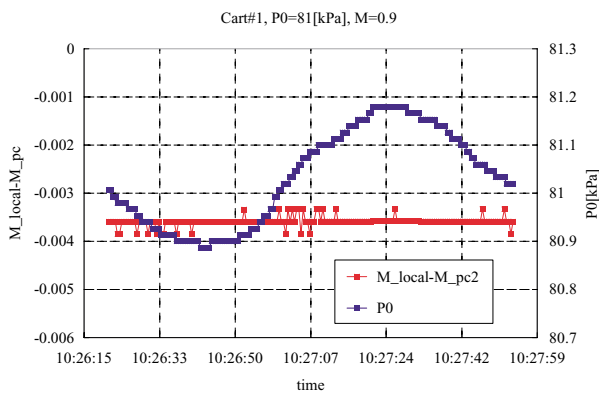


図 10: 改善した測定方法におけるバラツキ誤差

2. 静圧プローブ形状の最適化

静圧プローブ形状の最適化を行う為に、異なる静圧プローブ形状で測定したデータの比較を行った。まず、図 5 における b の長さが 15d 一定で、a の長さが 5d、10d、15d および 20d と異なる長さの静圧プローブを用いて測定部静圧を測定し、マンハ数差に変換したデータで比較を行った結果を図 11 に示す。一般に、a の長さが 10d、15d 以上であれば先端の影響が無視できることが知られている為、10d 以降で一定になると予想される。しかし、a の長さが 20d のところでマンハ数差がマイナス側へシフトする傾向が見られた。この原因は遷移の影響であると考えられるが、詳細については後述する。

次に、aの長さが10d一定で、bの長さが5d、10d、15dおよび20dと異なる長さのプロープを用いて、先ほどと同様に測定されたマッハ数差のデータで比較を行った結果を図12に示す。bは約15dで十分だと予想されたが、この長さでもまだ支持部の影響が見られる。このことからさらに長いプロープを用いて静圧の測定試験をする必要がある。

また、過去の中心プロープで測定されたデータとの比較を図13に示す。中心プロープで測定されたマッハ数差と静圧プロープで測定されたマッハ数差では最大約0.01の差が存在する。この差の原因としては、プロープのブロッケージの影響と支持部分の影響が考えられる。中心プロープのブロッケージは0.2%であり、静圧プロープのブロッケージ0.0005%よりかなり大きい。静圧測定に中心プロープを用いた場合には先端がノズル上流にあるが、測定部内の気流はブロッケージの影響を受けている。静圧測定に静圧プロープを用いた場合には、スティンクおよびスティンクと接合されているフレア部分は静圧孔位置の気流に影響を与える。その為、これらの影響について調べる必要がある。

そこで、二次元軸対称のオイラー方程式に基づくCFD⁴を用いて今回使用した静圧プロープ上のマッハ数分布の計算結果を図14に示す。静圧プロープ上マッハ数は静圧プロープの下流に行くに従って徐々に低くなっている。特にマッハ数0.95ではプロープ上のマッハ数が一様流マッハ数に比べて約0.005低い。これらのことから今回使用した静圧プロープで測定した静圧は支持部分の影響を受けていることが分かる。高亜音速における静圧測定においては、使用する静圧プロープの静圧孔下流、特に支持部分の影響を受けやすいことを考慮する必要がある。

適切な静圧プロープの支持部分の形状を決定する為には静圧プロープとスティンクの位置関係が重要である(図15)。静圧孔と支持部分の距離を支持部直径の15倍(15D)距離をとることにより、静圧孔で測定される静圧は支持部の影響を受けない⁵。支持部のフレア角度は以下の式から求められる。

$$\theta \leq \tan^{-1} \frac{D/2}{15D} = 1.909$$

ここで θ は支持部のフレア角度であり、 D は支持部(スティンク)の直径である。ここで測定される静圧は、静圧プロープとフレア部の接合部が自動的に静圧孔から15倍下流(15d)に位置するため、この接合部の影響も受けない。

支持部のフレア角度を1度としたときの静圧プロープ上のマッハ数をCFDにより再計算した結果を図16に示す。静圧孔位置における一様流マッハ数と静圧プロープ上マッハ数との差は0.0002以下になった。この形状の静圧プロープを使用することによって測定部内静圧が正確に測定できる。

改善した静圧プロープを用いて測定部マッハ数の測定を行った結果を図17に示す。用いた静圧プロープは、支持部のフレア角度を1度に変更した以外は前回の静圧プロープと形状が全く同じである。静圧プロープで測定した静圧、プレナム静圧についても先述と同様の測定方法で試験を行った。図18にプレナムマッハ数に対する測定部マッハ数とプレナムマッハ数の差を示す。改善した静圧プロープで測定したマッハ数差のデータは、先述の静圧プロープデータに比べて、中心プロープデータ側へシフトした。この変化量はCFDの計算結果とほぼ一致した為、プロープ形状の改善によりスティンク支持の影響を取り除くことが出来た。しかし、中心プロープデータと改善した静圧プロープデータの違いが約0.002存在する。このことから両者のデータの差はさらに下流に位置するスティンクポッドから受ける影響の違いであると考えられる。

スティンクポッドの静圧測定値に対する影響を把握する為には、中心プロープと改善した静圧プロープについての比較を図19に示す。まず、静圧測定位置(模型中心位置)とスティンクポッドの距離がスティンクポッドの直径の約6倍(6D^{*})である為、どちらのプロープを使用しても静圧孔の位置ではスティンクポッドの影響を受ける。その為、スティンクポッドの影響は、プロープとスティンクポッド接合部の直径によって影響の度合いが異なる。静圧プロープの断面積の方がスティンクに近い為、模型を入れた風洞試験に近い状態、つまりスティンクポッドの影響込みのマッハ数測定が可能である。

また、静圧プロープの気流軸に対する傾きの影響を調べる為には、マッハ数0.8、集合胴総圧80kPaの場合とマッハ数0.9集合胴総圧100kPaの場合について静圧プロープのピッチ角を-0.5~0.5[deg]に変化させた時のマッハ数差データを図20に示す。どちらの場合についてもマッハ数差の変化は±0.0005以下であり、気流軸からの傾きに対する影響はほとんどないことが分かる。また、過去の試験結果より気流偏角が0.1[deg]以下であることから、静圧プロープの取り付け誤差、静圧プロープのたわみ、気流偏角の影響は無視できる。

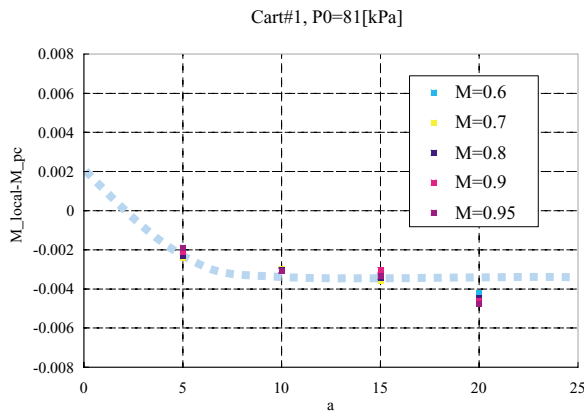


図 11: a の長さの異なるプローブ比較 (b=15d)

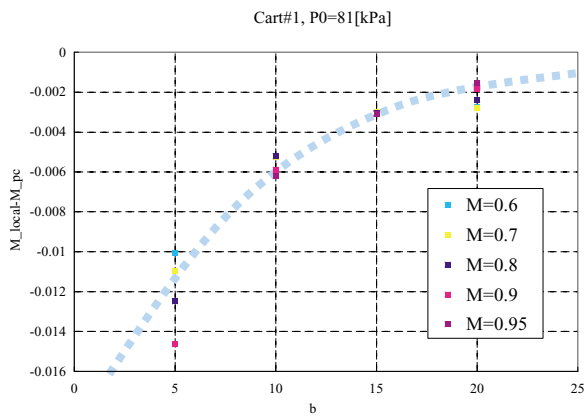


図 12: b の長さの異なるプローブの比較 (a=10d)

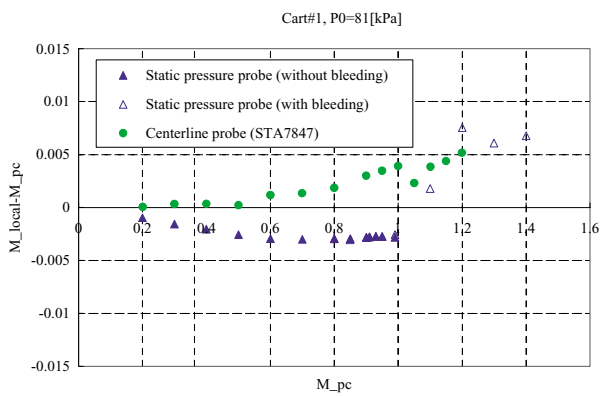


図 13: 中心プローブデータと静圧プローブデータの比較

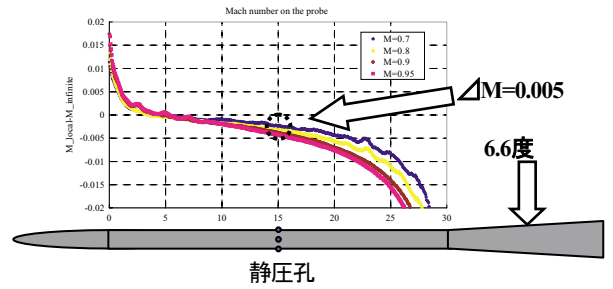


図 14: CFDによる静圧プローブ上のマッハ数分布計算結果

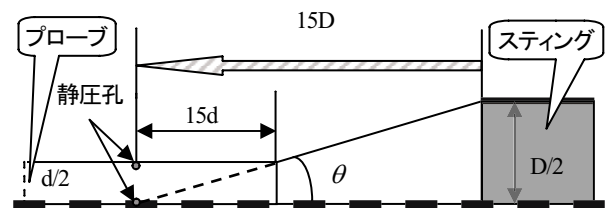


図 15: プローブ支持部の静圧測定データに対する影響

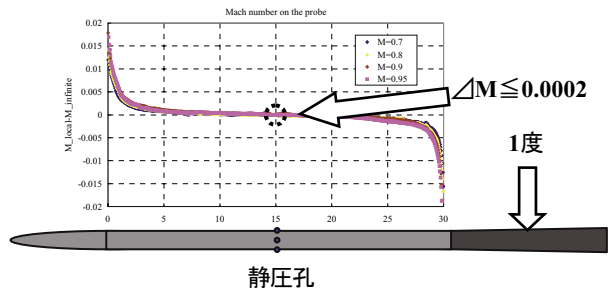


図 16: CFDによる改善した静圧プローブ上のマッハ数分布計算結果

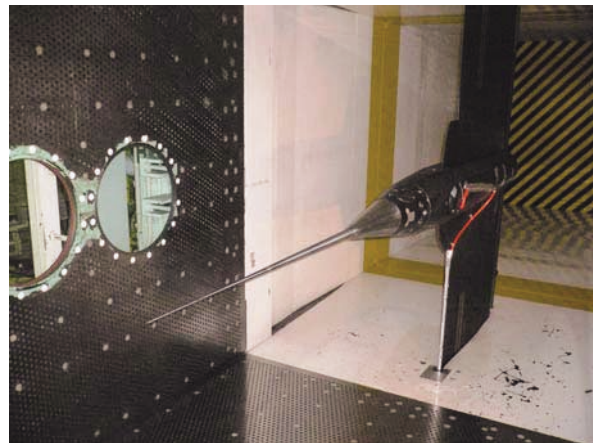


図 17: 改善した静圧プローブ設置状況

測定部マッハ数検定試験結果

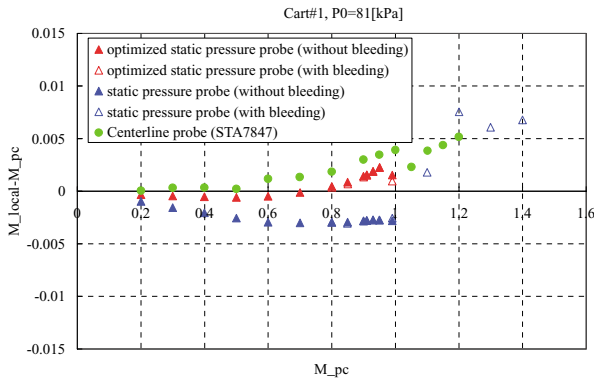


図 18: 改善した静圧プローブデータ、静圧プローブデータおよび中心プローブデータの比較

マッハ数を0.2~1.4、集合胴総圧を80kPa、100kPaそして120kPaと変化させたときのプレナムマッハ数に対するマッハ数差を図21に示す。亜音速域については、集合胴総圧を大きくするにつれてあるマッハ数から測定部マッハ数が下がる現象がみられる。また、超音速域についてマッハ数変化に対するマッハ数差の変化量が大きい。さらに、マッハ数0.8~0.99については抽気を行う場合と行わない場合のデータ比較を行った。両者のデータの差は0.001以下となり、抽気の影響はほとんどないことが確認された。

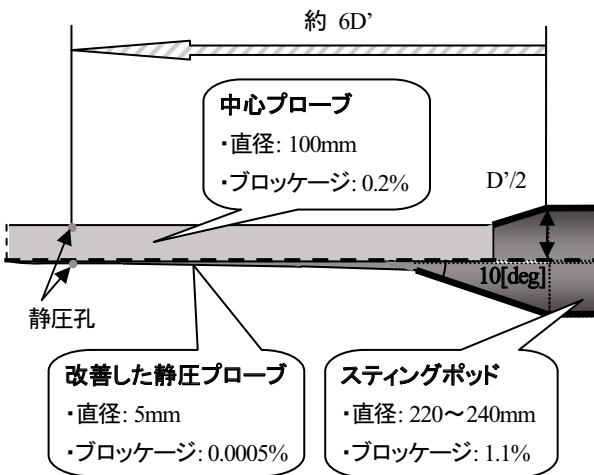


図 19: スティングポッドの静圧測定データに対する影響

亜音速域において集合胴総圧が大きくなるにつれてマッハ数差がシフトする原因を調べる為に、集合胴総圧を50kPaから140kPaに変化させたときのプレナムマッハ数に対するマッハ数差を図22に示す。集合胴総圧が大きくなるにつれて低いマッハ数でシフトすることが分かる。原因として、プローブ上で層流から乱流に移した影響が考えられる。遷移の影響を調べる為に、模型先端にラフネスとしてOリングを取り付けて静圧データを取得した結果を図23に示す。総圧が大きくなるにつれあるマッハ数でシフトする変化がなくなった。しかし、全ての値が減速側に0.002程度シフトした為、これらのデータを用いてキャリブレーションを行うことは出来ない。また、レイノルズ数効果を調べる為に遷移の起こらないデータ(P0=50[kPa])との差を取った結果を図24に示す。静圧孔位置のレイノルズ数が約1~2[million]の値で遷移していると思われる。このことから遷移前のデータを下にマッハ数校正テーブルを作成する必要がある。図25に示すように遷移前のデータのみを使用し、P0=50、80、100[kPa]について作成したマッハ数補正関数を表2に示す。P0=80kPaではM≥0.88で補正が必要であることが分かる。

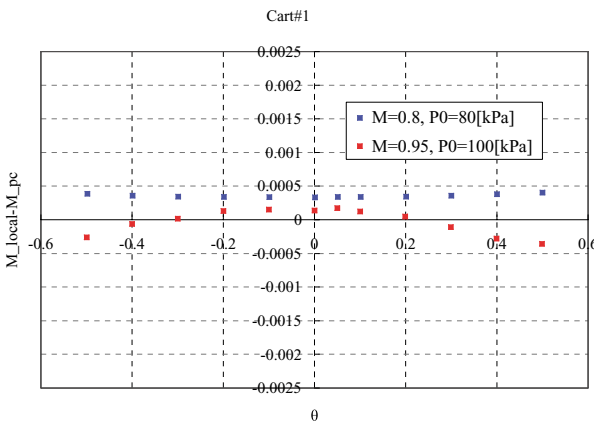


図 20: 静圧プローブの気流軸に対する傾きの影響

超音速域について、遷音速域について示したものと同様の結果を図26に示す。プレナムマッハ数に対するマッハ数差の変化が単調ではなく変化量も大きい。その傾向はP0を変化させても一致している。この変化の原因を調べる為に、ポーラス壁からの衝撃波の影響について調べた。マッハ数1.1~1.4について、静圧プローブを高さ方向にポーラス壁からの格子1格子分の範囲についてスweepさせたデータを取得した結果を図27に示す。これらのデータについては周期性が見られ、バラツキ(2σ)は約0.002以下である。図26におけるエラーバーはこのバラツキが表されている。ポーラス壁からの衝撃波が、プレナムマッハ数に対するマッハ数差の大きな変化をもたらす原因ではない。現時点では、この変化の原因は明らかには分かっていない。従って、これらのデータにより作成したマッハ数補正テーブルを表3に示す。

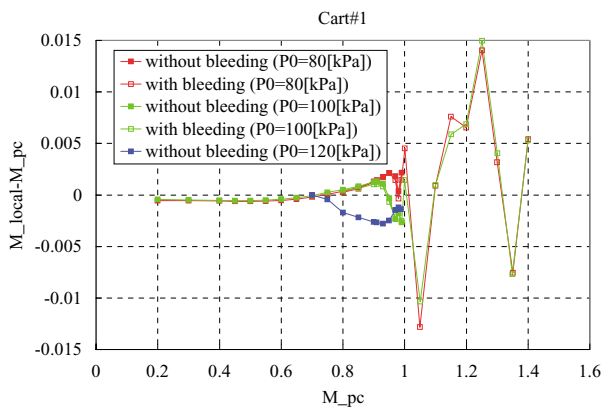


図 21: 改善した静圧測定方法による測定部マッハ数とプロナムマッハ数の差

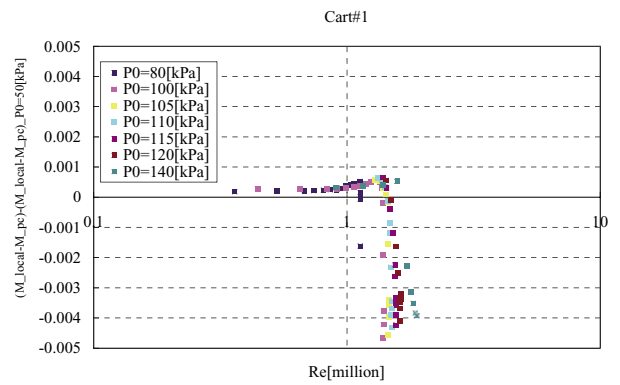


図 24: 遷移レイノルズ数の影響

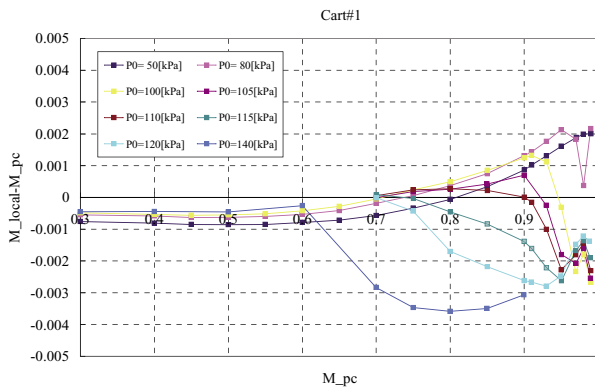


図 22: 集合胴総圧変化の影響 (M < 1)

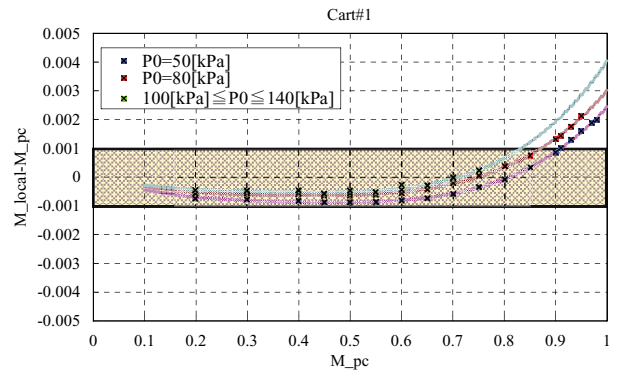


図 25: マッハ数補正用データ

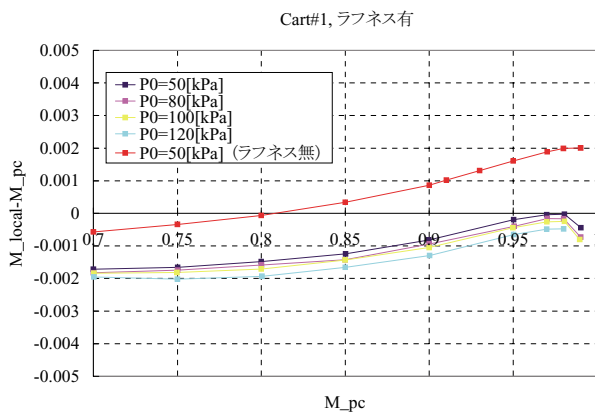


図 23: ラフネスの有無の影響

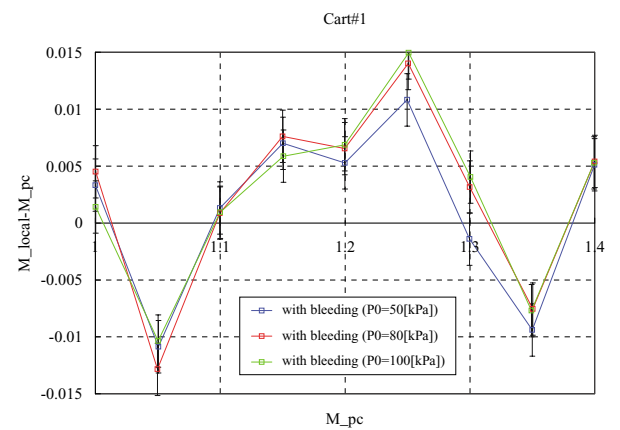


図 26: マッハ数差データ (M ≥ 1)

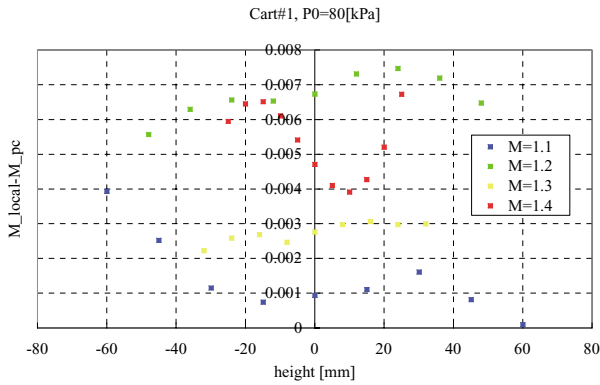


図 27: ポーラス壁からの衝撃波の影響

表 2: マッハ数補正関数 (Cart #1, M < 1)

M_local (P0=50[kPa])	$0.017750M_{pc}^4 - 0.026745M_{pc}^3 + 0.017343M_{pc}^2 + 0.994084M_{pc}$
M_local (P0=80[kPa])	$0.016240M_{pc}^4 - 0.022515M_{pc}^3 + 0.013784M_{pc}^2 + 0.995489M_{pc}$
M_local (P0 ≥ 100[kPa])	$0.019575M_{pc}^4 - 0.025175M_{pc}^3 + 0.013554M_{pc}^2 + 0.996071M_{pc}$

表 3: マッハ数補正テーブル (Cart #1, M ≥ 1)

M_pc	1	1.05	1.1	1.15	1.2	1.25	1.3	1.35	1.4
M_local (P0=50[kPa])	1.003	1.039	1.101	1.157	1.205	1.261	1.299	1.341	1.405
M_local (P0=80[kPa])	1.005	1.037	1.101	1.158	1.207	1.264	1.303	1.342	1.405
M_local (P0=100[kPa])	1.001	1.040	1.101	1.156	1.207	1.265	1.304	1.342	1.405

結論

測定部静圧とプレナム静圧の同期を取る為に、両者の圧力配管の長さと同径を揃えて2台のクォーツマノメータで測定を行うことにより静圧の測定精度が向上した。また、静圧プローブの形状を変化させた特性を把握し、静圧プローブの支持部の影響を考慮することにより、静圧プローブの最適化を行った。さらに第1カート（ポーラス壁）について、改善した静圧プローブを用い、改善した静圧測定方法で測定部静圧を測定することにより、プレナムマッハ数に対する測定部マッハ数のキャリブレーションを行った。このキャリブレーション結果を用いてマッハ数補正を行うことにより測定部マッハ数を正確に把握することが可能となった。

参考文献

1. T. D. Reed, T. C. Pope, and J. M. Cooksey: Calibration of Transonic and Supersonic Wind Tunnel, NASA Contractor Report 2920
2. D.W. Bryer and R.C. Pankhurst: Pressure-probe methods of determining wind speed and flow direction, National Physical Laboratory, Her Majesty's Stationery Office, London, 1971
3. 上野真, 須谷記和, 香西政孝, 我那覇義人, 今直樹: 風洞基準圧力計測配管の圧力応答シミュレーションによる最適化, JAXA RR-0537
4. James J. Quirk: AMRITA-A Computational Facility (for CFD Modelling), VKI LS 1998-03: 29th computational fluid dynamics
5. Chevalier, H.L.: Calibration of the PWT 16-Ft. Transonic Circuit with a Modified Model Support System and Test Section, AEDC TN-60-164