

## No. 3

## 航技研超音速風洞測定部のマッハ数分布測定

楯 篤志，浜本 滋，野田順一，渡辺光則（航技研）  
原 亘利（元航技研）

Mach Number Distribution of NAL Supersonic Wind Tunnel

Atsushi TATE, Shigeru HAMAMOTO, Junichi NODA  
Mitsunori WATANABE (NAL), Nobutoshi HARA

## 概 要

航技研超音速風洞の測定部断面（1 m×1 m）の圧力を15本のピトー管（総圧管）からなる櫛型プローブ，および高速多点圧力計測装置（ZOCシステム）を用いて計測し，測定部断面のマッハ数分布を測定した．この手法により，シュリーレン窓中心位置における風洞測定部断面の左右±14 cm，上下±30 cmの範囲を2 cm間隔で左右15点，上下31点のメッシュ状に圧力データを計測し，マッハ数分布を求めた．この結果，マッハ数の低い範囲では，マッハ数の非一様性は1%未満であるが，マッハ数が高くなるに従って一様性が悪くなることが分かった．また，シュリーレン観測窓中心から15 cm上流断面，12 cm下流断面についてのマッハ数分布を測定し，気流の傾きを推定した．

1. はじめに

航技研超音速風洞は間欠式風洞 1、2) のため，1回の通風時間は30～40秒と制限されている．このため，従来のスキャニバルブを用いた圧力計測の手法によると，1回の通風中で異なる迎角，あるいは異なる断面の計測回数は2～3回が限度であった．航技研超音速風洞では平成7年度末に高速多点圧力計測装置（米国スキャニバルブ社製 ZOC HyScan 2000 システム）を導入し，平成9年度から本格的な運用を開始した 3)．このZOCシステムの導入により圧力計測のデータ生産性が格段に向上し，今回のような測定が可能になった．航技研超音速風洞では，風洞気流の一層の改善を目的とし

て，ノズル部を中心とした風洞上流部の改修工事が平成11年7月から開始する．それに先立ち，ノズル形状設定に向けてのCFD検証のための基礎データの取得，およびノズル改修後の気流との比較となるデータ取得を目的として，櫛型プローブおよびZOCシステムを用いて風洞測定部のマッハ数分布測定を行うことになった．

2. 実験方法と手順

圧力計測に用いた櫛形プローブは図1に示すように，外径3 mm，内径1 mmの総圧管を20 mm間隔に15本取り付けただけのものである．それぞれの総圧管からは外径1

mm, 内径 0.5 mm の圧力導管が接続され, さらにビニールチューブを経てストラット内で ZOC モジュールに接続されている. プローブ先端から圧力変換器までの全長は約 1.5 m である. このプローブは, 気流前後方向の任意の位置に強固に固定することが出来, しかもマッハ 4 における風洞起動時の衝撃 (スターティングロード) にも十分耐え得る構造になっている. 今回の実験ではシュリーレン観測窓中心断面, 中心より 15 cm 上流側断面, および 12 cm 下流側断面における圧力計測を行った. この櫛型プローブを上下に移動することにより, 風洞中心から左右 (東西方向) にそれぞれ 14 cm の幅で, ストラット機構の移動可能範囲 (風洞中心より上下  $\pm 30$  cm) の圧力分布を計測することができた. プローブの上下方向への移動は, 総圧管の左右間隔に合わせて 2 cm 間隔で行った. この結果, 圧力データは横 15 点  $\times$  縦 31 点のメッシュ状に取得することができた.

実験は, 風洞が起動し気流が確立し安定した後, プローブを 2.5 秒間隔で設定された位置に移動する. プローブが移動した後 1.5 秒後に圧力の計測を行う. 圧力計測に要する時間は約 0.5 秒である. この方法により, 1 回の通風中に 11 走査を行うことが可能となり, 3 回の通風で一つの気流条件 (マッハ数) についてのデータを取得することができた. 図 2 に超音速風洞でのスキヤニバルブ, ZOC を用いての圧力分布測定試験の計測タイムチャートを簡略化して示す. 風洞起動ボタンの押下の後基準データ取得等の猶予時間を 5 秒とってから調圧弁が開き通風を開始する. 気流整

定には 3 ~ 5 秒 (マッハ数が高くなるほど時間も増大する) を要する.

今回の実験では, ZOC モジュールにより得られたデータの信頼性を吟味するために 3 つの圧力ポート (プローブの左右および中心) については配管を分岐し, 従来の圧力変換器 (PDCR 22) と併用して計測を行い, 両者の計測結果が良好に一致していることを確認しながら計測を進めた. また, ZOC モジュール内の各ポートの圧力変換器精度の確認のために, プローブからの圧力を 2 つのポートに分岐して測定を行った. ZOC モジュール内の圧力変換機相互間の誤差は 0.08 % 未満であり, カタログ値の精度を十分に満足していた.

### 3. 実験結果

実験ケースの一覧を表 1 に示す. 今後の実験で必要と思われるマッハ 2 付近については特に狭い間隔で測定を行った.

図 3 は, マッハ 3.5 における圧力変換器 (PDCR 22) を用いて計測した圧力の時間履歴を示す. 横軸は通風開始からの時間である. -14 はプローブ左端 (東側), 0 はプローブの中心, +14 はプローブ右端 (西側) の圧力を示す. プローブが 2.5 秒間一定の位置に保持されている間, 圧力は安定している様子が分かる. また, 同図に  $\nabla$  で示す値は, 同時刻に ZOC にて計測した圧力値を示す. 両者の値は良好に一致している (最大誤差 0.2 %). これらの違いは, 高速多点圧力計測装置と風洞計測設備とで使用している圧力変換器が異なることによるものである.

図 4 は,  $M=1.4$  における観測窓中心

断面の圧力分布を、3回の通風より得られたデータを結合して描いたものである。横軸はZ軸（上下方向cm）、縦軸は測定圧 $P_{o2}$ （kPa）、パラメータはプローブの各点（左右方向）を示す。左右のデータのばらつきは少なく（1%未満）、横方向については気流の一様性は良好である。また、上下方向の気流の一様性も保たれている。図5、図6には、それぞれ $M=3$ 、 $M=4$ における観測窓中心断面の圧力分布を示す。マッハ3（図5）、マッハ4（図6）とマッハ数が高くなるにしたがい、横方向の圧力分布の非一様性は大きくなる。マッハ3の圧力分布では、測定部中央付近で約3%の圧力の急激な変化が観測される。

櫛型プローブにより計測された測定部圧力（ $P_{o2}$ ）と、風洞測定部静圧（ $P_s$ ）からマッハ数を求めた。マッハ数は2cm間隔のメッシュ状に求められているので、これらの値から等高線を描いたものを図7～図9に示す。外枠が風洞測定部全体（1m×1m）の大きさを示す。 $M=1.4$ では測定部断面のマッハ数はほぼ一様である（ $\pm 0.35\%$ ）。 $M=2.0$ ではマッハ数の非一様性はわずかながら大きくなり、上下 $\pm 1.0$ cm以内の風洞中央部ではマッハ数は高く、その外側では逆にマッハ数は低い。 $M=3.0$ ではマッハ数の非一様性は $\pm 1\%$ であり、上下にマッハ数の高い層、低い層が交互に現われている。

図10は、各断面のマッハ数の非一様性『（最大のマッハ数－最小のマッハ数）／平均マッハ数』を示す。横軸は設定マッハ数である。シンボルの違いは観測窓中心断面（○）、中心より1.5cm上流断面（△

）、および1.2cm下流断面（▽）での値を示す。マッハ数が低い範囲では1%未満であるが、マッハ数が高くなるに従い、非一様性は大きくなっているのが分かる。しかし、これらの値が他の風洞結果と比較して妥当なものであるのかについての議論は比較する文献等が少ないため困難である。

図11は、風洞測定部側壁の静圧 $P_s$ から算出したマッハ数と、櫛形プローブにより測定した $P_{o2}$ から算出したマッハ数との差を示したものである。測定部静圧から測定したマッハ数は、櫛形プローブから測定したマッハ数と比較すると0.9%程度いずれも高めにれている。これは、静圧測定とピトー圧測定とで使用している圧力変換器が異なるためと考えられる。この図からもマッハ数が高くなるにつれて非一様性が大きくなっていることが分かる。

図12は、 $M=3.0$ における気流方向位置の異なる断面でのマッハ数分布を示す。観測窓中心から1.5cm上流断面のマッハ数分布は、 $-1.0\text{cm} < Z < +1.0\text{cm}$ の範囲でマッハ数は低く、観測窓中心断面ではZ方向のマッハ数分布はほぼ一定である。さらに観測窓中心から1.2cm下流断面のマッハ数分布は、 $-1.0\text{cm} < Z < +1.0\text{cm}$ の範囲で、マッハ数は高い分布を示している。図13のシュリーレン写真から、観測窓中心付近で交差する弱い衝撃波が確認できる。この衝撃波が交差する前後で圧力の勾配があることが推測される。しかし、この衝撃波の発生源と考えられる上流部のノズル壁面を詳しく観察したが、急激な曲率変化等は見られなかった。四角錐台形5孔プローブ（ADSプローブ）を用いた気

流測定の結果 4) にも、マッハ 3 における気流の傾きが報告されており、その結果を裏付けるものである。

#### 4. まとめ

1. 15 列櫛型プローブおよび ZOC システムを用いて超音速風洞測定部のマッハ数分布を測定した。測定を行った範囲は、風洞測定部の中心から上下  $\pm 30\text{ cm}$ 、左右  $\pm 14\text{ cm}$  で、計測データは各  $2\text{ cm}$  間隔のメッシュ状に取得した。
2. マッハ数の非一様性は、 $M=1.5$  以下では  $\pm 0.5\%$  未満であるがマッハ数が高くなるにしたがって、その値は増加する。
3. 観測窓中心から気流方向に  $15\text{ cm}$  上流断面、および  $12\text{ cm}$  下流断面のマッハ数分布およびシュリーレン写真から、気流の傾きについて推定を行うことが出来た。
4. 今後風洞の改修を行い、マッハ数分布の一様性、および、気流の傾き角の改善を計る必要がある。

#### 文献

- 1) 「 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  吹出式超音速風洞の計画と構造」, 空気力学第二部, NAL TR-29, 1962 年 10 月.
- 2) 「吹出式超音速風洞のノズルの予備実験」, 川崎俊夫, 岡部祐二郎, 尾形吉和, 安藤尚, NAL TR-26, 1962 年 3 月.
- 3) 「航技研  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  超音速風洞における高速多点圧力計測装置の導入」, 浜本滋, 栢篤志, 渡辺光則, 原亘利, 石田洋治, NAL SP-38, 1998 年 1 月.
- 4) 「航技研  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  超音速風洞のノズル修理後の気流特性」, 関根英夫, 野田順一, 渡辺光則, NAL TM-694, 1996 年 7 月.

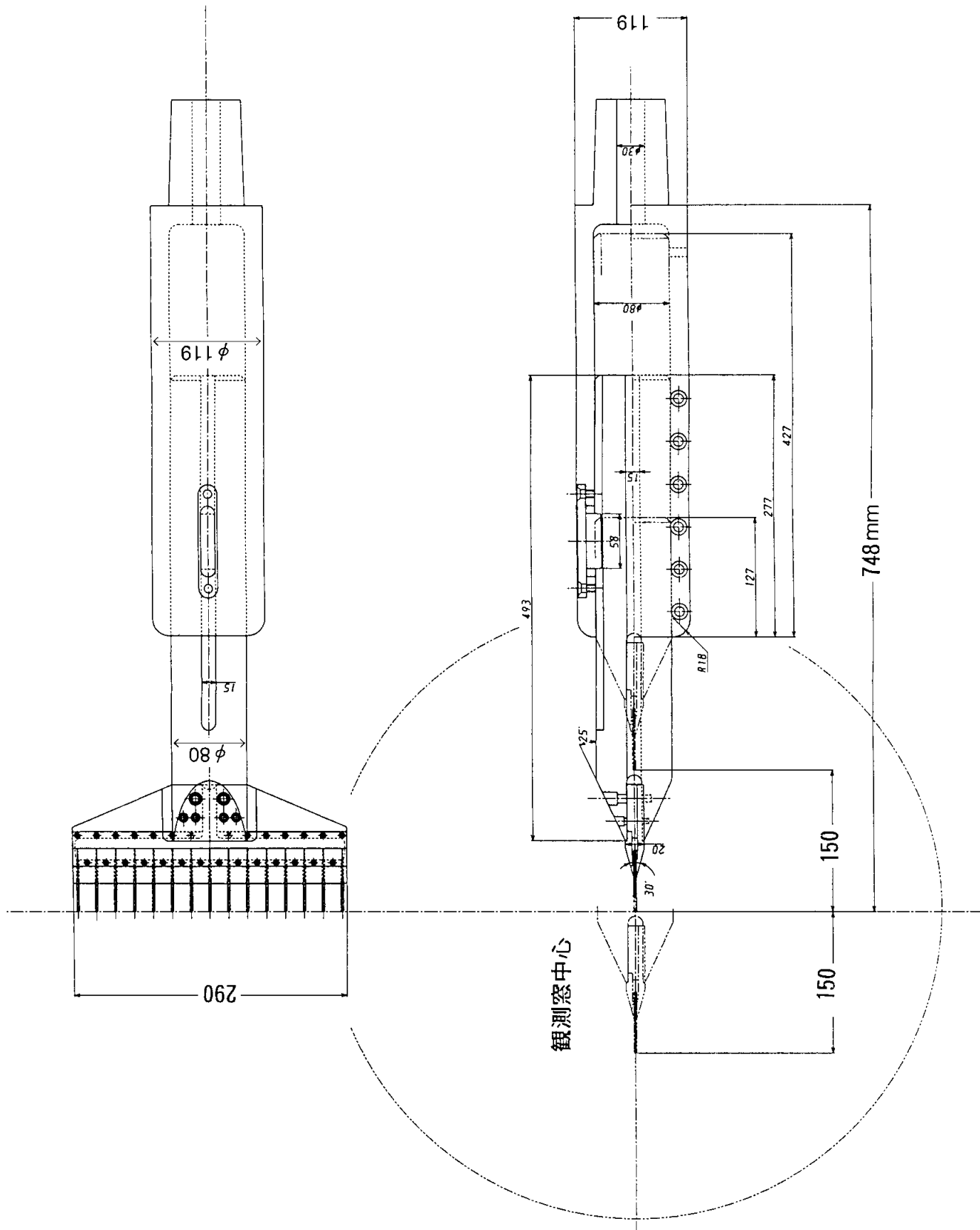


図 1 1 5 列楕円形プローブ



気流特性試験ケース一覧

	観測窓後方				中央	観測窓前方			
マッハ数	-20cm	-12cm	-10cm	-5cm	0	5cm	10cm	15cm	20cm
1.40		○			○			○	
1.50		○			○			○	
1.60					○			○	
1.80					○			○	
2.00		○			○			○	
2.20					○			○	
2.50					○			○	
2.75					○				
3.00		○			○			○	
3.25					○				
3.50					○			○	
4.00		○			○			○	

表 1

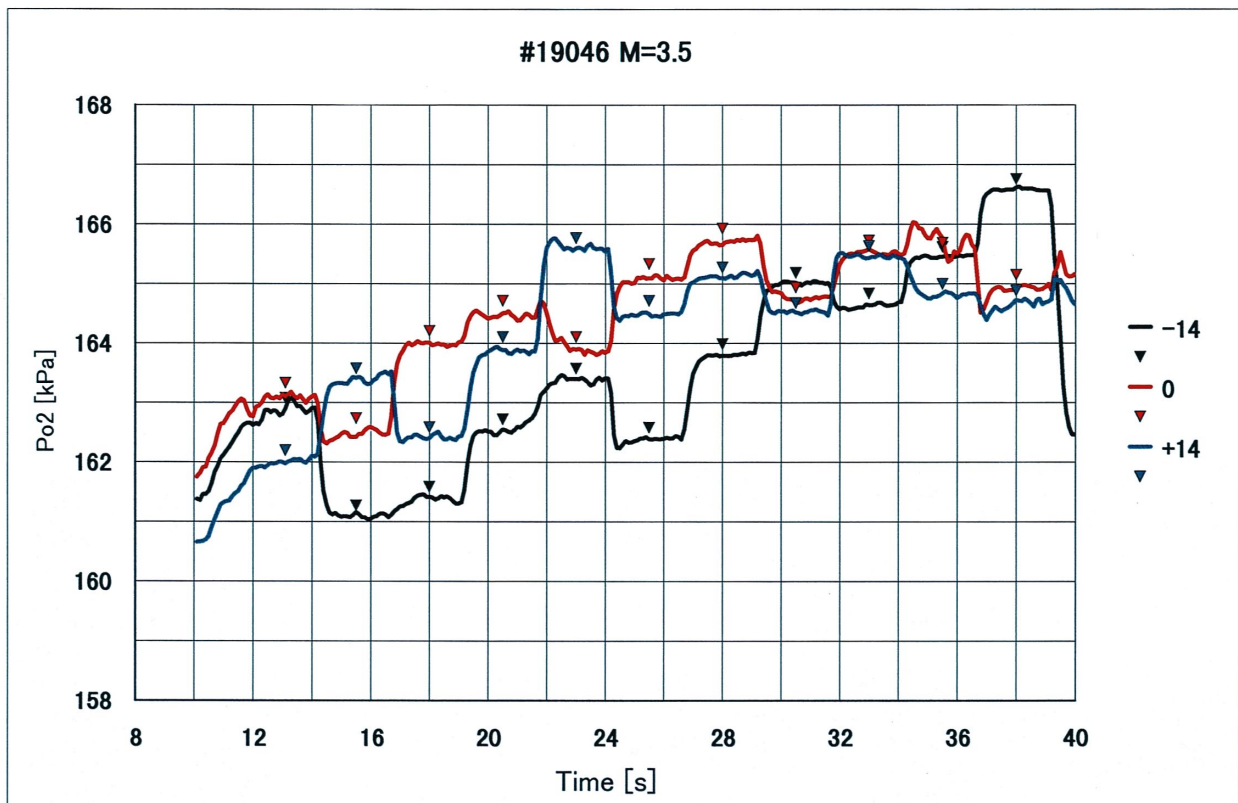
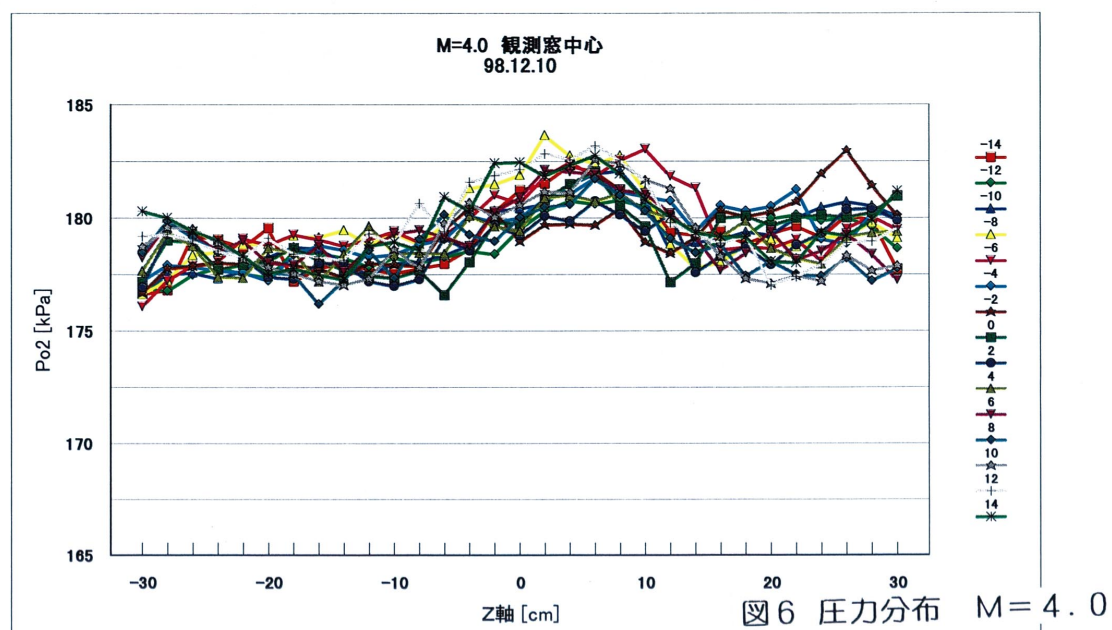
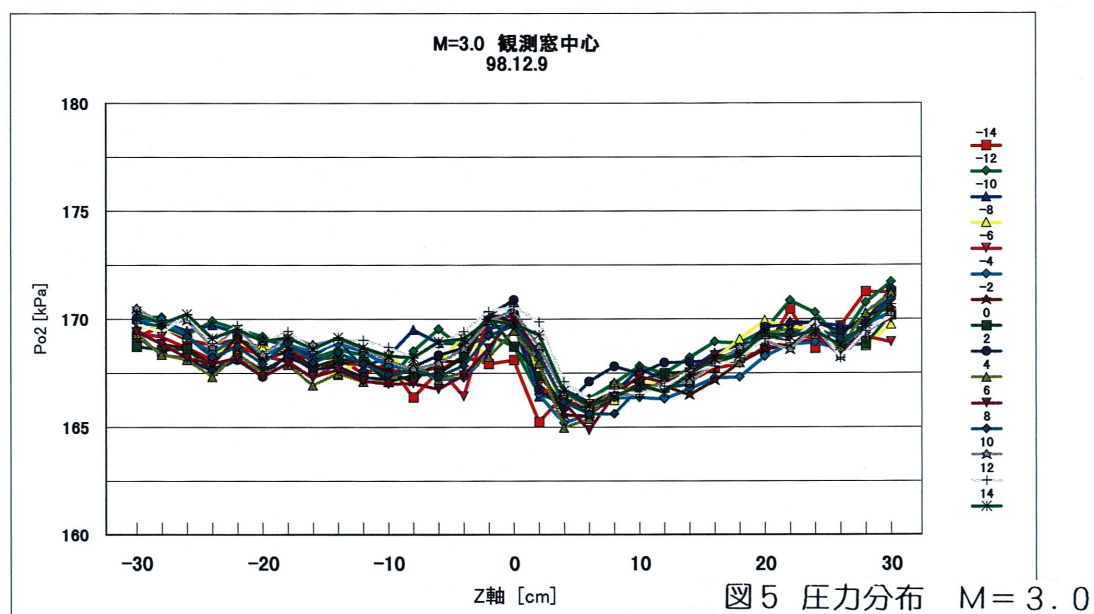
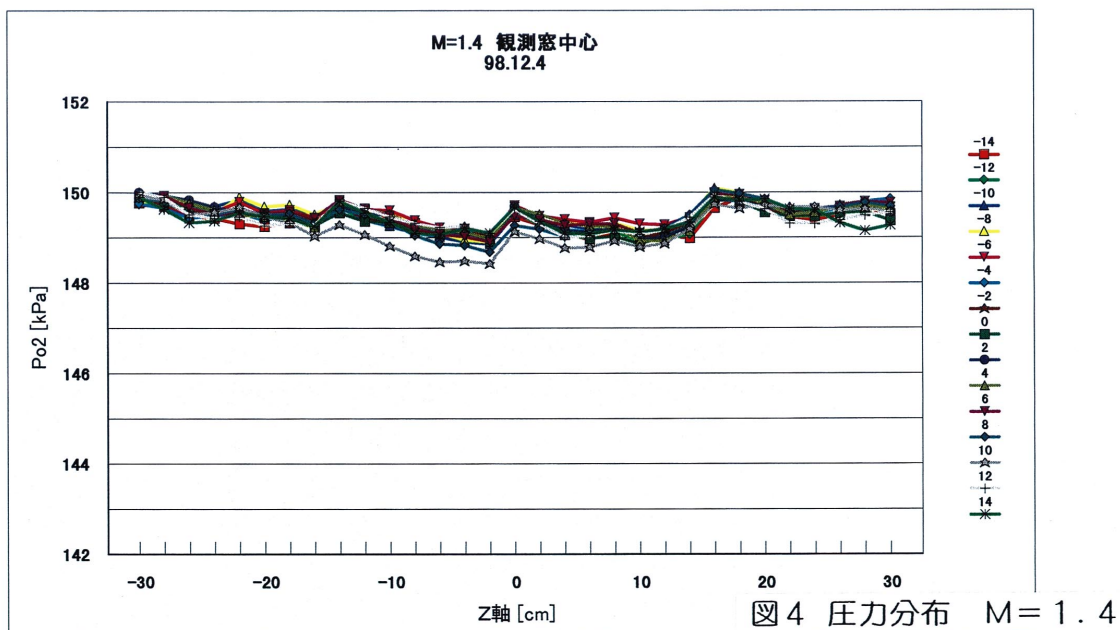
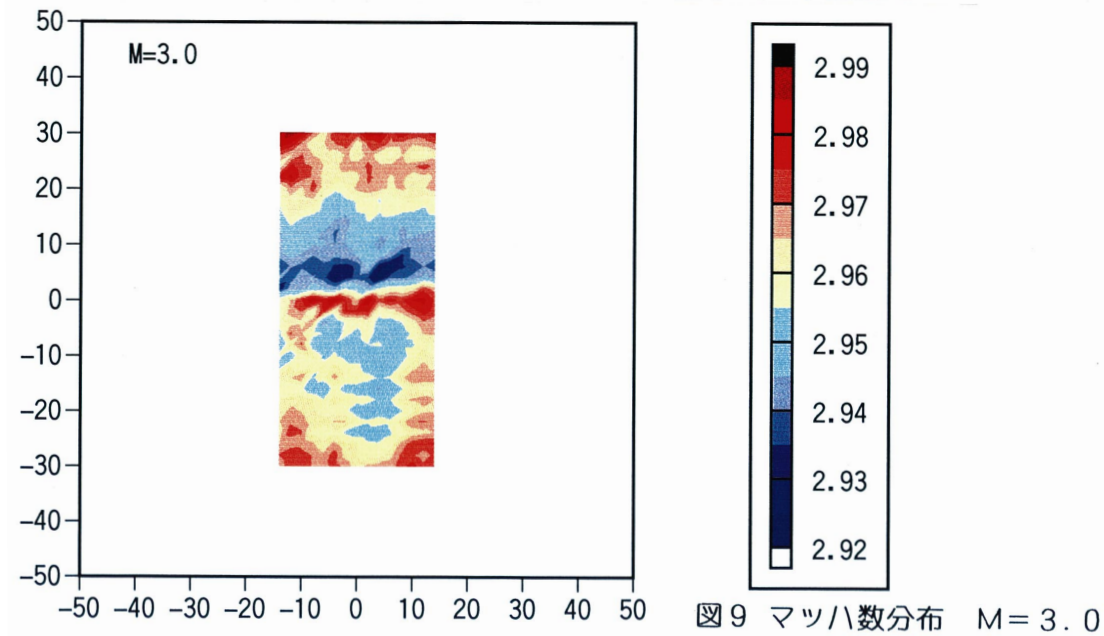
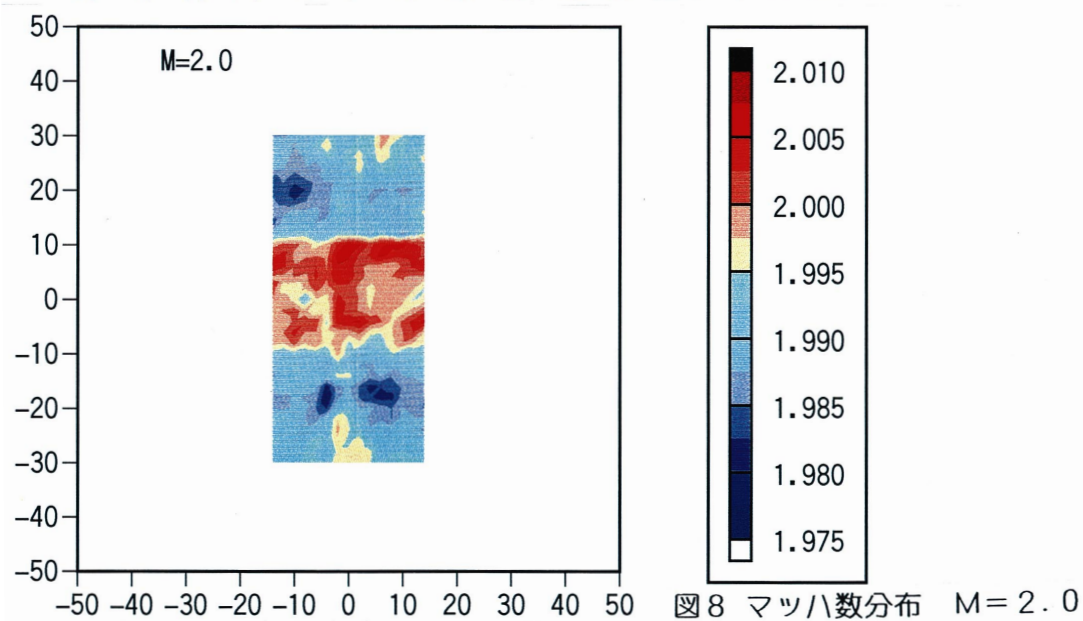
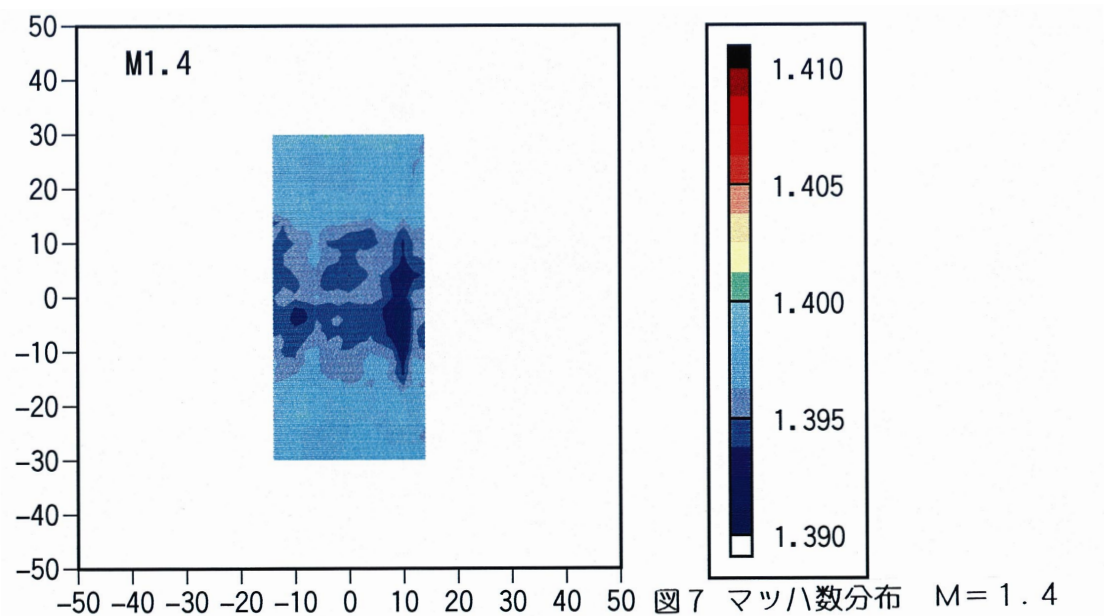


図 3 測定圧力の時間変化







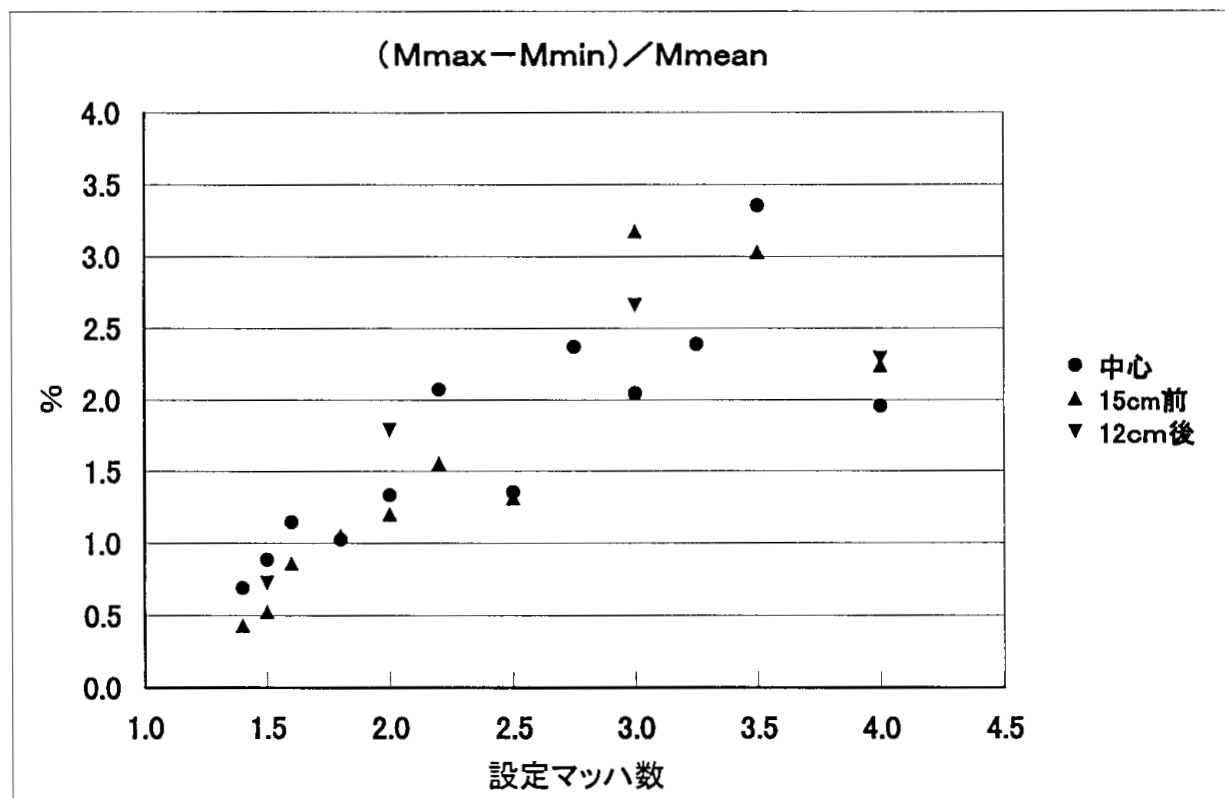


図10 マッハ数の一様性

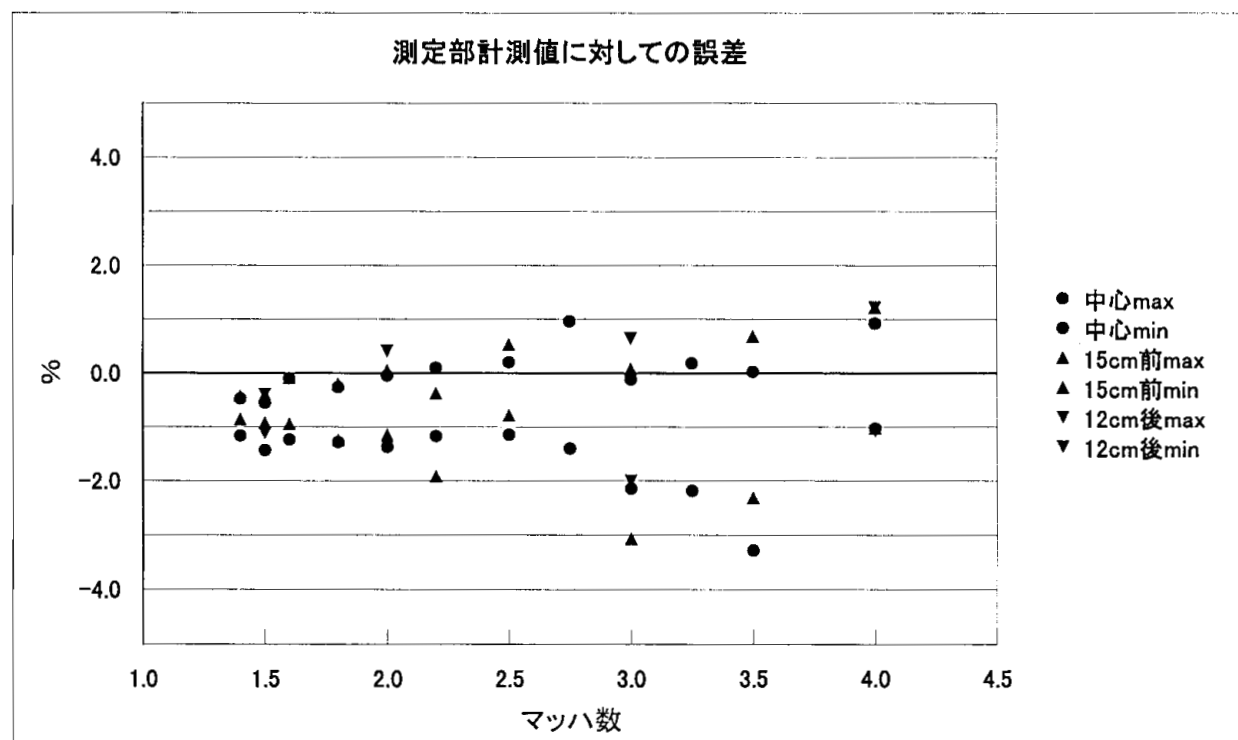


図11 マッハ数の一様性

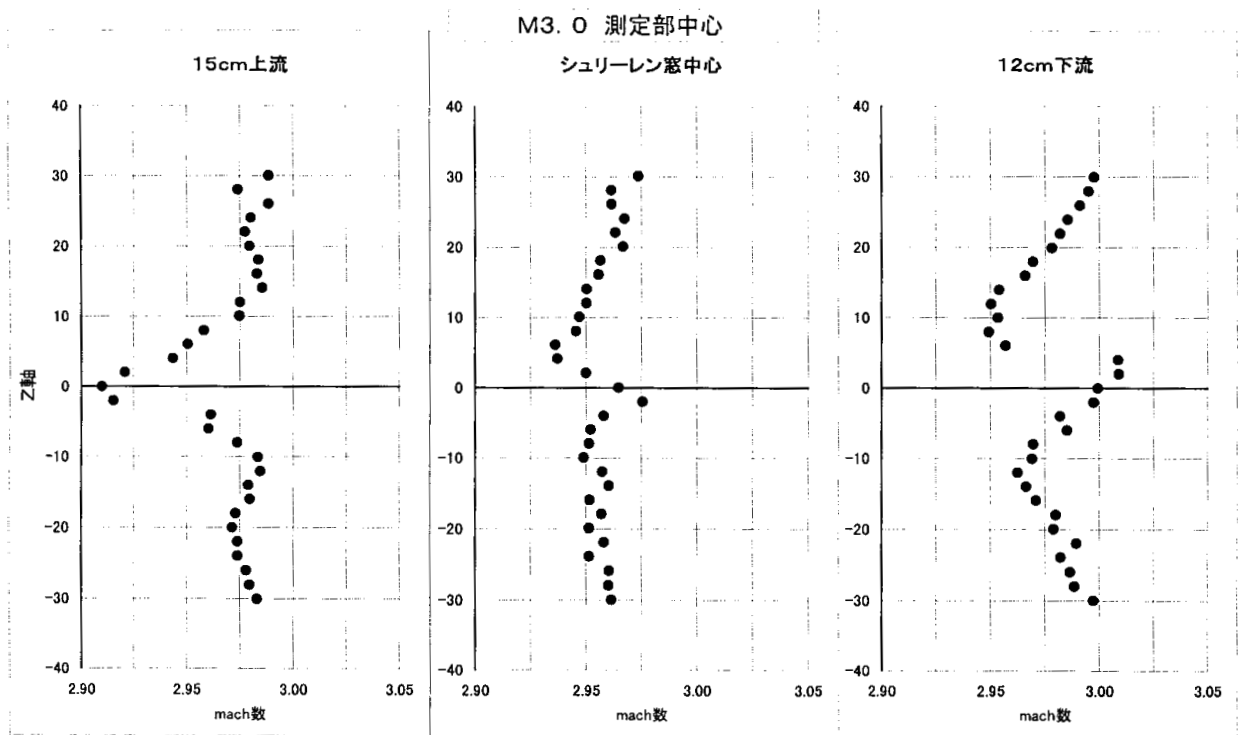


図 1 2 気流方向のマッハ数分布 ( $M=3.0$ )

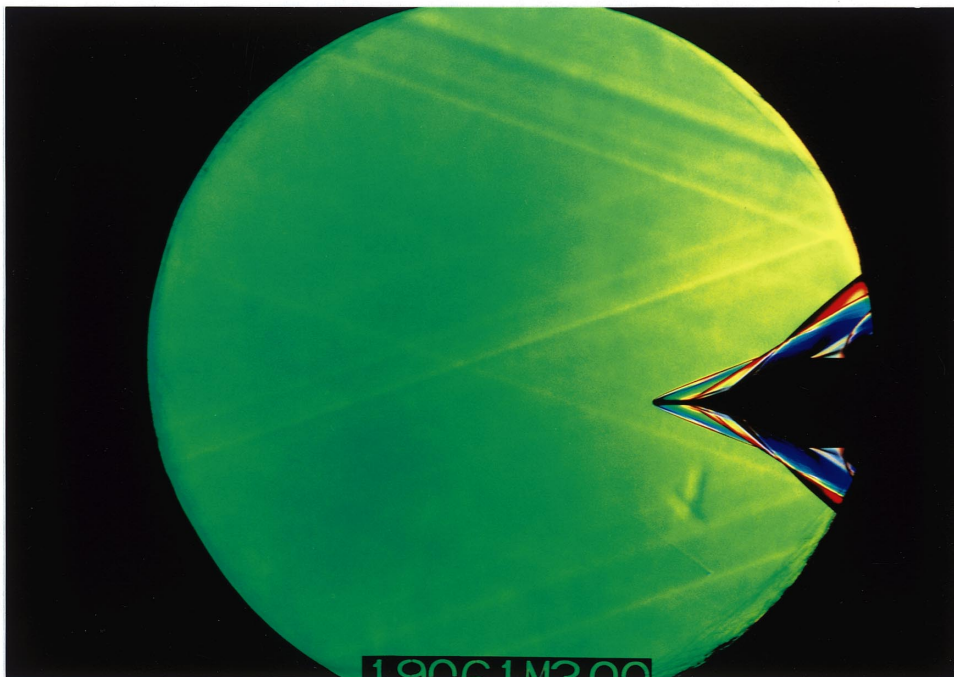


図 1 3  $M=3$  のシュリーレン写真