

# 航技研二次元風洞の気流特性

## — 風軸方向マッハ数分布について —

神田 宏、佐藤 衛、須谷 記和、戸田 亘洋（航技研）

### Flow Characteristics of the NAL Two-dimensional Transonic Wind Tunnel

#### - Mach Number Distributions along the Wind axis in the Refurbished Test Section -

Hiroshi KANDA, Mamoru SATO, Norikazu SUDANI, Nobuhiro TODA (NAL)

#### 概要

改修後の二次元風洞の気流特性を評価するため、中心パイプおよび測定部上下壁に取付けられた静圧レールによって、風軸方向のマッハ数分布を調べながら壁傾角等の調整を行った。新たに設置された全機模型支持装置のステイングポッド、および抽気フラップ全閉時のシール性能が高マッハ数域において測定部下流のマッハ数分布に大きく影響することが判った。これらを対策した結果、上下壁傾角 $+0.5^\circ$ において最もフラットな分布となり、改修前に比較して良好なマッハ数一様性が得られた。

#### 1. はじめに

航技研二次元風洞は、よどみ点圧力( $P_0$ )が最大約 12 気圧までの高レイノルズ数試験が可能な加圧型吹出し式遷音速風洞設備である。本風洞は老朽化対策をきっかけに、試験可能範囲の拡張、気流の二次元性向上および三次元模型への対応を狙って測定部断面寸法の変更を伴う改修が行われた。二次元風洞改修作業の概要については第 58~60 回風洞研究会議で報告されている。<sup>1) 2) 3)</sup>

改修後の測定部における気流特性を把握するため風軸中心パイプおよび、風洞壁干渉量評価用に測定部上下の多溝壁中央に設置された静圧レールを用いて、気流方向のマッハ数(M)分布を調べる気流検定試験を行ってきた。計測されたM分布をもとに、上下の多溝壁傾角( $\theta_w$ )などを最適化した結果、改修前と比較して良好なマッハ数一様性が得られたので報告する。

#### 2. 測定部まわりの改修の概要

風洞改修作業で変更となった測定部まわりにおける改修の概要を以下に示す。

##### (1)測定部断面サイズの変更

側壁境界層への対策と三次元模型試験への対応および模型整備時における作業性向上を目的に、測定部断面寸法を幅 0.3m × 高さ 1.0m から幅 0.45m × 高さ 0.8m に変更した。これにともない多溝壁のスロット間隔が広がるため、壁開口比( $\tau$ )を見

直した。改修前は測定部のほぼ全域(長さ約 3m)で  $\tau=3\%$ 一定としていたスリットを、改修後は測定部長さ約 2.4mのうち下流側約半分を  $\tau=6\%$ 固定とし、これより上流側 1.2 m(1.5H)はスタビライザとして測定部入り口からテーパ状に開口比を 0→6%へ連続変化させている。

##### (2)可変ノズルの導入

電動プリセット式二次元可変ノズルを導入し、運転可能マッハ数範囲を 1.17 から 1.4 へ引き上げた。

##### (3)抽気フラップ

プリナム圧力が大気圧近傍となる低 $P_0$  高マッハ数条件では抽気弁によるM数制御が難しくなる。このため起動時の測定部壁差圧緩和用フラップを機能向上させ、プリナム抽気性能の向上のためM数フィードバック制御が可能な抽気フラップとした。

##### (4)側壁境界層吸取装置

従来は二次元模型支持装置に装着されるシュリーレン窓と交換したレジメッシュによって模型周辺で吸取りを行っていた。吸取り位置を測定部上流側2箇所へ変更することで側壁境界層吸取りとシュリーレン観測が同時に可能となり、模型近傍の気流の一様性も改善が期待できる。

##### (5)ストラット-ステイング式模型支持装置

試験要求の多様化に対応するため、三次元模型支持装置としてストラット-ステイング式模型支持装置を新たに設置した。高レイノルズ数条件における動圧の高い試験を考慮してステイングを取付けるポッ

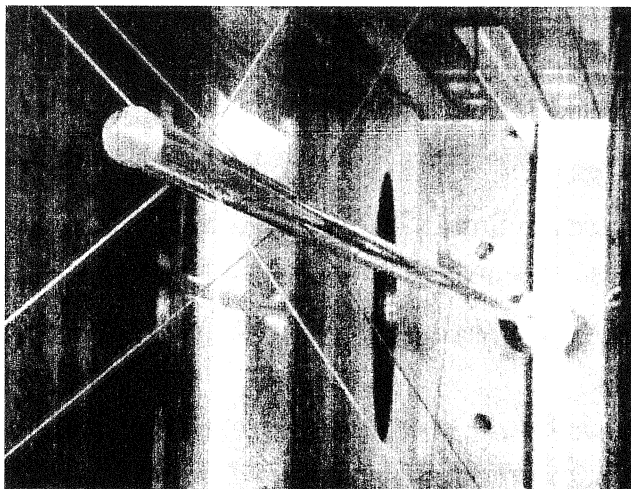


図 1. 静圧プローブ取付け状況

ド先端部分が測定部側に張り出した構造となった。

#### (6) テレスコープ式拡散胴移動ブロック

模型へのアクセス向上および、測定部全体を引出し交換が可能な構造とするため、前記の抽気フラップと三次元模型支持装置から下流の第2スロート弁までを、拡散胴をテレスコープ式にする事によって移動可能なブロック構造とした。

### 3. 静圧プローブ

気流方向のM分布計測に用いた静圧プローブには、下流端をスティングポッドに接続したφ34mmのステンレスパイプを縮流胴上流からワイヤで引張り固定した風軸中心パイプと、上下壁干渉修正量を評価するため上下の多溝壁中央に設置している高さ70mmの静圧レールを用いた。(図1)

中心パイプには90°毎4方向に開けられた静圧孔が可変ノズル入り口から模型取付け位置下流にかけて74点配置されている。静圧レールには壁面から60mmの高さに測定部上流から下流出口付近まで上下各46点の静圧孔があり、さら模型取付け位置上方にある観測窓を使用する際に、この部分のレールが切離せる構造となっている。(図2)

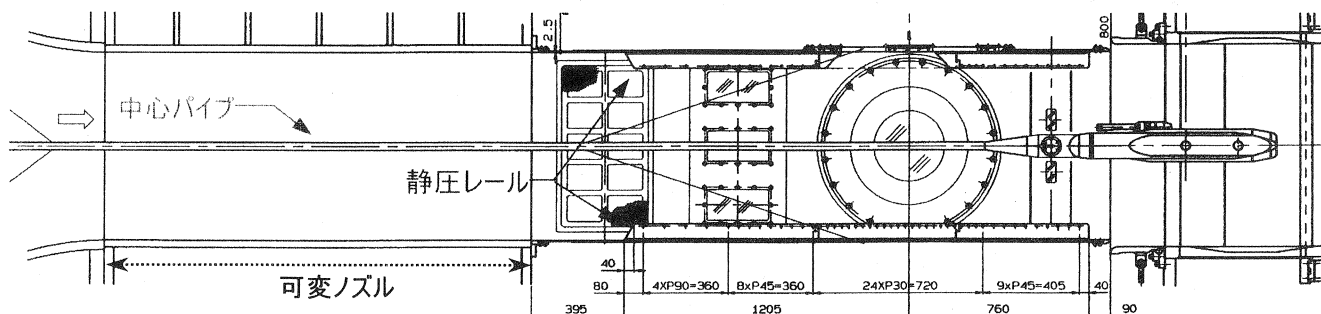


図 2. 中心パイプと静圧レールの位置関係

### 4. 調整ポイントと測定結果

#### (1) 初期設定状態

まず $\theta_w = +0.2^\circ$ に設定して中心パイプおよび静圧レールの両方を取付けた場合のM分布を計測した。なお通風条件は、空気使用量と試験効率を考慮して $P_0 = 392 \text{ kPa}$ を基本とし、必要に応じて $P_0$ を変えてレイノルズ効果を見ている。

図3においてラインによるプロットは中心パイプ、シンボルは静圧レールでの計測結果を示す。可変ノズル内では、流速はスムーズに加速されている。静圧レール最上流端の測圧孔はレール先端からの距離が短いため中心パイプとは一致していない。模型位置下流( $x=1.0C$ )付近から中心パイプの分布が急激に減速しているのは、ポッド支持用のテーパ部の影響と考えられる。超音速域では測定部に入った途端に周期的な分布となるが、これは衝撃波が主に側壁に反射する影響が大きいと考えられる。

また、高マッハ数域で測定部入り口付近の中心パイプの分布に段差が顕著に表れてくるが、レールを取外した時の分布と比較してみると、静圧レールの影響であることが判明した(図4)。これらのデータより亜音速～遷音速域では測定部中心付近で中心パイプと静圧レールで計測したM分布は比較的良い一致を示している事がわかった。なお、これらの条件( $M < 1.0$ )ではプリナム抽気による一様性への悪影響を最小限に抑えるため、可能な限り第2スロート弁制御を行い、抽気弁は全閉状態にする運転方法を採用している。

#### (2) スティングポッドの影響

次に模型取付け部近傍の分布をもう少し詳しく見てみるため、中心パイプを取外して計測を行った。以後のデータでは、上下レールの分布が大きく相違しないことを確認した上で、同じx位置での上下レール

ルの平均値を風軸方向マッハ数計測値としている。

図5において青色で示したプロットでは、 $M > 0.8$ 程度から模型取付部下流付近より減速がみられる。これはスティングポッドの先端が約 170 mm程測定部内に突き出している影響だと考えられる。スティングポッドを取外し、三次元模型変角機構のカバーのみ取付けた状態(図6の下側の状態)で計測を行った結果を赤色プロットで示しているが、測定部下流での減速はほとんど見られなくなった。これより、三次元模型支持装置のスティングポッドは二次元模型試験の精度へ悪影響を及ぼすと考えられるため、以降はスティングポッドを取外し、ダミーのカバー取付状態を標準として計測した。

### (3) 抽気の効果

二次元風洞では抽気フラップより下流部分が移動ブロックとして、測定部下流端から分離開放できる構造になっている。当初、組立て精度によってフラップ当り面のシール性に問題があり、全閉時も若干の隙間ができていた。また、上下の多溝壁下流端と移動ブロックを接続する部分には  $\theta_w$  に応じて調整可能な固定フラップ機構があるが、この角度設定によっても測定部との隙間が変化する。これらがM分布へどのように影響するかを見るため、ゴムシートによって全閉時のシール性を確保しながら、遷音速域においてプリナム抽気有/無の両条件下で比較してみた。その結果を図7に示す。なお、これ以降のグラフでは縦軸のスケールを拡大するため、各計測点の局所マッハ数を、プリナム静圧で算出したマッハ数を基準とした偏差( $\Delta M$ )で表している。

プリナム抽気を行わない場合、測定部下流で加速する傾向にあるが、シール性を確保した場合は、シールがない場合に比べて下流での加速が少ない。一方、第2スロート弁の開度を抑えて抽気弁制御が可能となるように強制的にプリナム抽気を行った場合、M分布は下流に向かって減速されるが、シールがない場合はこれが緩やかになる。

抽気フラップ部分ではスティングポッドのブロックエッジを考慮して、流路幅が拡がり始めているため、スティングポッドを外した場合、気流は減速すると考えられる。これにより流路内の静圧がプリナム室よりも高くなり、フラップ隙間部分からプリナム室へ逆流

していると考えられる。これは、タフトやオイルフローによっても観察された。この逆流による吹出しがプリナム室を経由し、多溝壁下流部の上下のスリットから主流に戻る流れが形成されていると考えられ、この流入により主流路が相対的に狭まり、測定部下流での加速が生じていると考えられる。また、上下固定フラップのみ最大開き角である $+0.8^\circ$ の場合が下流部分での跳ね上がりが少ない事がわかる。これは、固定フラップを上げた場合は、この隙間からの流入量が増えるため、相対的に測定部側のスリットを通しての流入は減少し、下流部分での加速が緩和されるものと考えられる。

以上のように、抽気フラップ全閉時のシール性能の低下がM分布へ影響するため、抽気フラップ全閉時のシール性能が確保できるように、フラップの当り面にゴムクッションを取り付けた。

### (4) 壁傾角の効果

模型取付部近傍でのM分布が最もフラットになる設定を探るため、 $\theta_w$ を $+0.2 \sim 0.6^\circ$ まで $+0.1^\circ$ ずつ変更しながらM分布の変化を見た。(図8)

$\theta_w$ が開くほど $x=1.6C$ 付近を回転軸にM分布の傾きが左上がりになる傾向がわかる。これは前述したように、多溝壁スロットの開口比分布が、下流側約半分のみ $\tau=6\%$ 固定とし、これより上流側ではテーパ状に変化させているため、プリナム室とバランスする領域が下流側へシフトしているためと考えられる。 $x=\pm 2C$ の範囲において $\theta_w=+0.5^\circ$ の場合が最もフラットになった。また、上下固定フラップ角度の違いは上流側にほとんど影響しないことがわかったため、下流付近の加速が最も少なくなる最大開き角に設定することとした。

### (5) マッハ数の効果

測定部  $\theta_w=+0.5$ 、固定フラップ角最大を標準設定として、マッハ数による変化を見た。図9のデータは、澤田の方法による二次元風洞壁干渉修正<sup>4)</sup>に使用する基準データとするため、二次元模型試験と同様に後流トラバース装置にピトーレークを取付けた状態で中央に固定し計測している。

$M=0.6 \sim 0.9$ では、下流端を除けば分布にほとんど差が見られない。 $M=1.0$ において $x=+3C$ 付近で急激な加速がみられるが、これはピトーレークから

発生した衝撃波が上下のレールに到達したためと考えられる。なお、 $-2\sim 0\text{C}$ にかけて分布に凹凸がみられるが、これは前述したように静圧レールがこの部分で分離できる構造となっており、継ぎ目のわずかなずれや固定用ボルトが影響しているものと考えられる。

#### (6)レイノルズ数効果

$M=0.80$  における $P_0$ による変化を図10に示す。傾向としては、レイノルズ数が大きくなるほどマッハ数が若干下がる傾向にあるが、傾きはそれほど変化していない。これは壁面境界層の厚みが、レイノルズ数が高いほど薄くなり、流路が相対的に広がってくるためと考えられる。傾きがあまり変化しないのは、境界層が測定部より上流で既に発達していて、側壁境界層の寄与も大きいと推察される。

### 5. 改修前との比較

シュリーレン窓を中心に $\pm 450\text{ mm}$ の範囲におけるマッハ数一様性を改修前の測定部と比較した。<sup>5)</sup> 図12では  $2\sigma_M$ を同様の式で計算しているが、改修前の計測値は中心パイプで測定したデータであり、その平均値を基準として偏差を計算している。今回計測した改修後の計測値は、静圧レールの各位置毎の上下の平均値であり、偏差の基準としてプリナム静圧から算出したマッハ数を基準としているところが異なっている。これらは偏差が大きくなる要因となる。しかしながら、改修前に比べ多少良くなっていることがわかる。レイノルズ数による影響を含めても、 $M=0.80$ の場合だけではあるが、その偏差は十分小さいと考えられる。

### 6. まとめと今後の課題

風洞改修後の二次元風洞測定部の気流特性として、中心パイプと静圧レールにより、風軸方向のマッハ数分布を調べた結果をまとめると次のとおりである。

- 中心パイプと静圧レールでは、静圧レール先端および中心パイプ支持用テーパ部の影響を除けば、比較的良い一致がみられた。
- 亜音速～遷音速域では、可変ノズルから模型上流付近まで滑かな分布となっている。

- 超音速域では、周期的な分布がみられ、側壁での衝撃波反射が強いと考えられる。
- 遷音速域以上では、模型近傍から三次元模型支持装置用ポッドが大きく影響するため、二次元試験用にダミーのカバーに交換した結果、良好な特性となった。
- 抽気フラップ全閉時のシール性の良悪が、測定部下流のM分布に影響している。
- 上下スロット壁の開き角を変えながら系統的に分布を調べた結果、プリナム抽気無、側壁境界層取り無の場合、開き角 $+0.5^\circ$ で最もフラットなM分布となった。  
今後の課題として、
- 側壁境界層取り時におけるスロット壁開き角の妥当性を調べる必要がある。
- 風洞壁干渉修正に必要となる、試験可能全領域でのM分布データベースの作成。
- 三次元模型支持装置用ポッドを取付けた場合の風洞試験精度への影響評価  
などがあげられる。

### 参考文献

- 1) 重見 仁、神田 宏、佐藤 衛、須谷 記和「航技研二次元風洞の改修」：第58・59回風洞研究会議論文集 SP-38 P.57, P.209 (1998年1月)
- 2) 佐藤 衛、神田 宏、須谷 記和、重見 仁、戸田 亘洋「航技研二次元風洞の改修(制御関連について)」：第60・61回風洞研究会議論文集 SP-42 P.45(1999年5月)
- 3) 二次元風洞研究室「航技研二次元風洞の改修」：航空宇宙技術研究所資料 TM-744 (1999年11月)
- 4) 沢田秀夫、榊原盛三、佐藤 衛、神田 宏「航技研二次元風洞の壁干渉評価」：航空宇宙技術研究所報告 TR-829 (1984年8月)
- 5) 榊原盛三、高島一明、三輪 等、小國保雄、佐藤 衛、神田 宏「航技研二次元風洞の気流特性について (I)」：航空宇宙技術研究所報告 TR-693 (1982年1月)



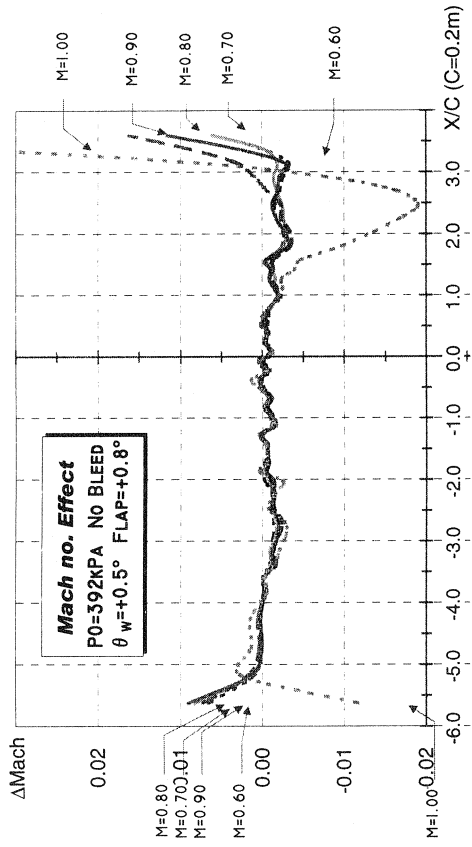


図 9. マツハ数の効果

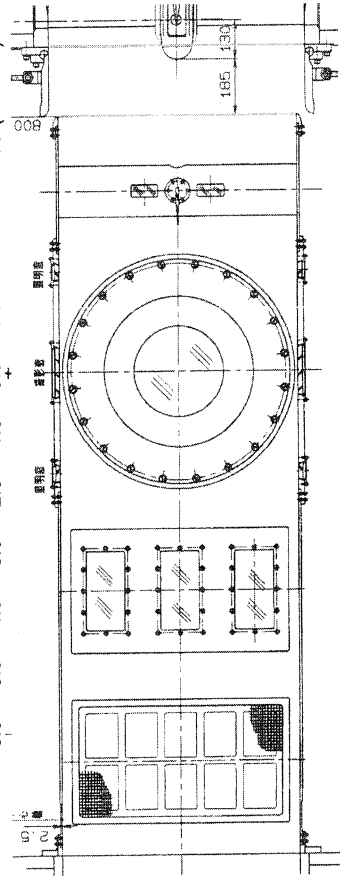
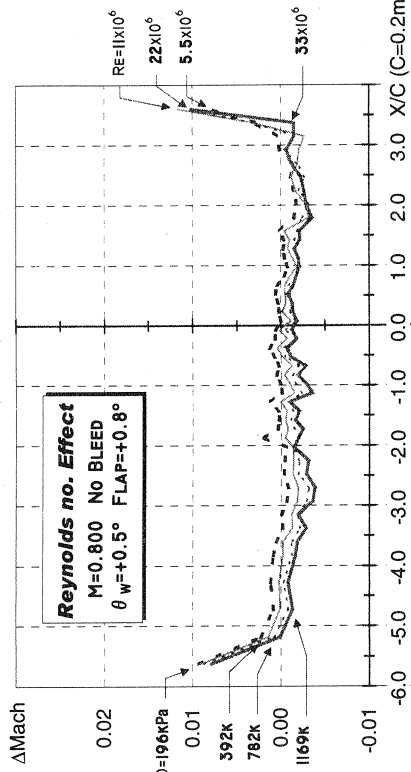


図 10. レイノルズ数の効果

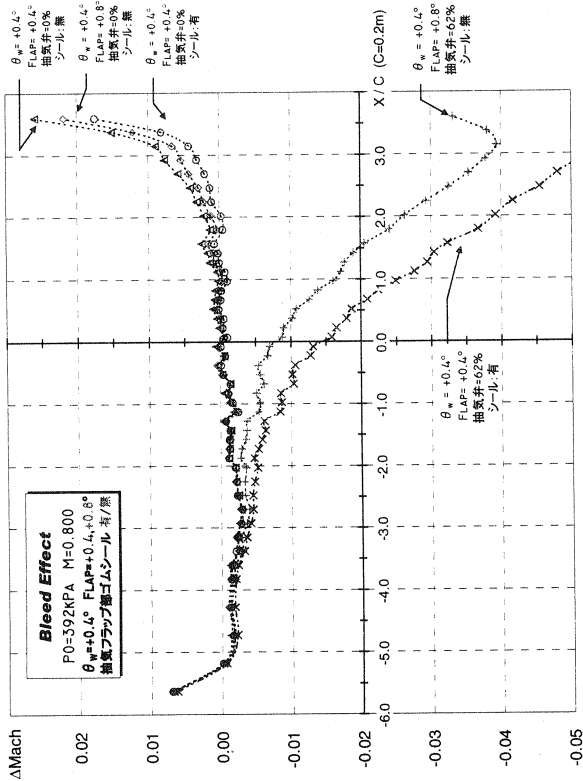


図 7. 抽気の効果

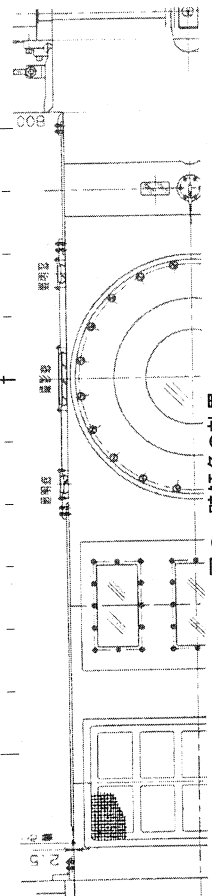
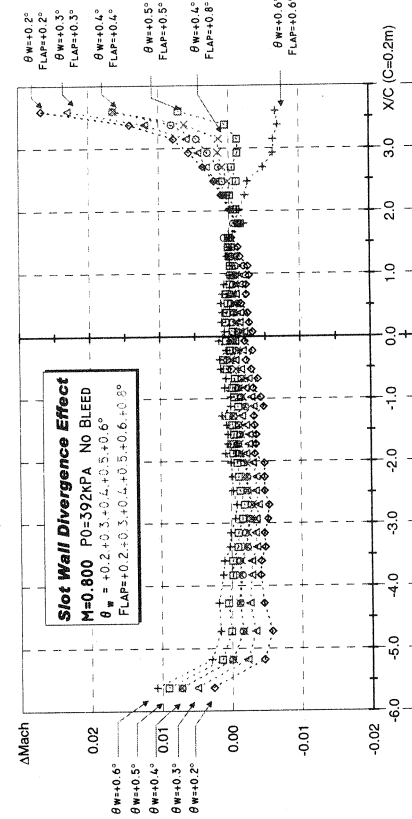


図 8. 壁傾角の効果

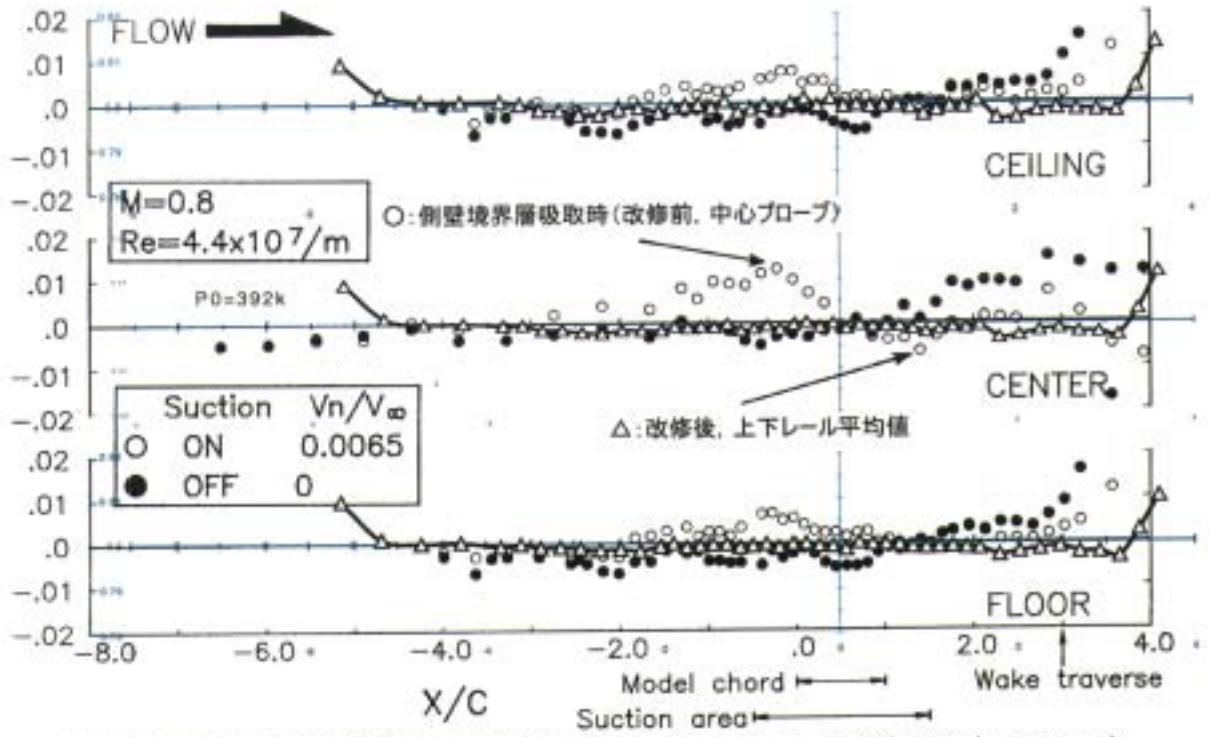


図 11 改修前との比較(側壁境界層吸取:有○/無●,  $C=0.25m$ ) △:改修後(吸取無,  $C=0.2m$ )

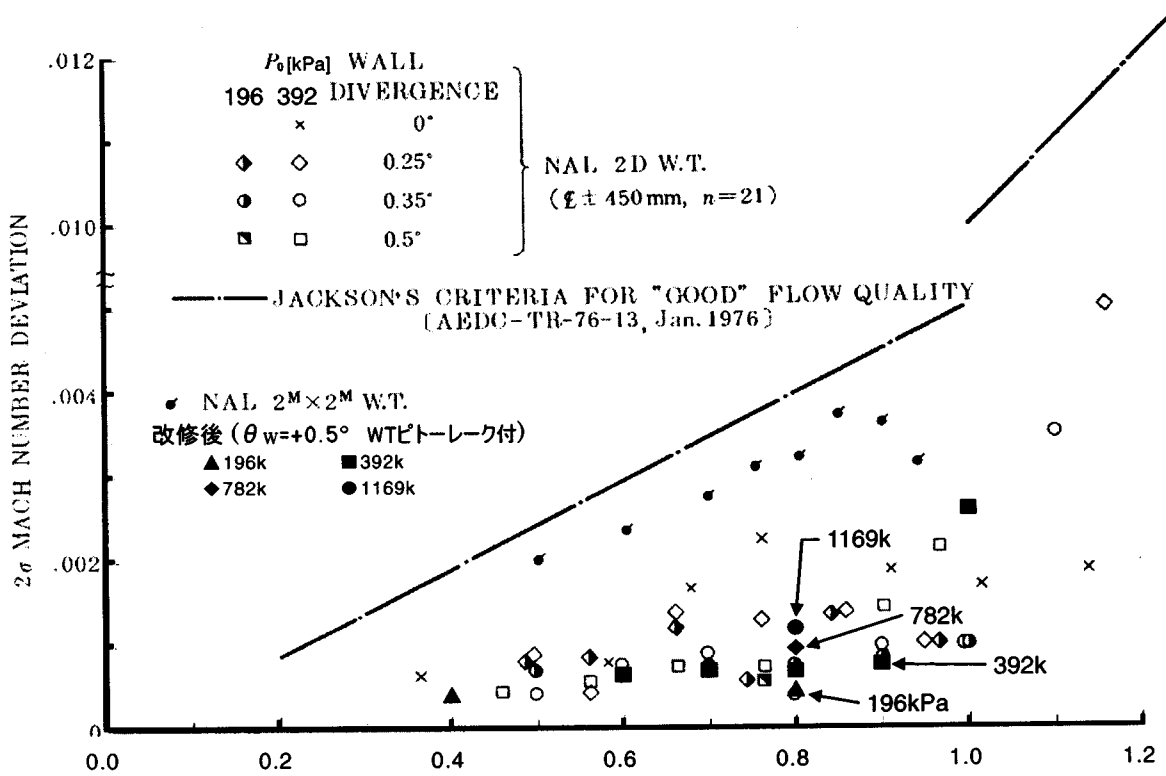


図 12. 改修前との比較 (マッハ数偏差)