

MHI60cm 高速風洞 光学計測カートの気流検定

木村一雄, 宇高康員, 石黒満津夫(三菱重工業)

Calibration Test of Optical Flow Measurement Cart in MHI High Speed Wind Tunnel

Kazuo Kimura, Yasukazu Utaka, Mitsuo Ishiguro (MHI)

概要

当社は平成14年度に, MHI60cm 高速風洞へ光学計測カートを導入した。本カートの気流検定を実施した結果, 計測部のマッハ数分布は十分一様で, 標準模型 (AGARD-B) の力試験結果は, 他風洞データとの比較の結果, 良い一致を示し, 本カート設計の妥当性が確認された。本報告では, 光学計測カート建設の概要と, 気流検定結果について報告する。

1. 背景・目的

風洞試験は新しい航空機の開発, CFDコードの検証及び流体力学の研究に幅広く用いられている。最近では, いくつかの先進計測技術が提案され, 実用化されてきている。特に光学計測は, 流れの現象理解という点で, 重要性が高まってきている。例えば, 感圧塗料による表面圧力分布の計測^{1)~3)}やPIVによる速度場の計測^{4)~5)}が汎用化され, その試験データが航空機の開発, CFDコードの検証に有益に用いられている。

一方, MHI 60cm 高速風洞は, これまで光学計測に対応した設備ではなかったため, 光学計測にはその準備に膨大な時間を要した。それ故, 高速風洞の能力向上と高まる光学計測のニーズに応える必要から, 今般光学計測カートを導入することにし, 本カートの基本特性確認のため, 気流検定を実施した。本報告では, 光学計測カート建設の概要と, 気流検定結果について報告する。

2. 光学計測カート

2.1 MHI高速風洞の概要

MHI高速風洞は計測部 60cm×60cm のブローダウ

ン式の風洞で, 試験マッハ数は, 0.4~4.0 である。遷音速試験時は, 多孔壁の遷音速カートを用いる。レイノルズ数は, $Re=13 \times 10^6/m$ ($M = 0.4$) ~ $Re=48 \times 10^6/m$ ($M = 1.4$) である。

2.2 光学計測カートの建設

図1に光学計測カートの写真を示す。設計コンセプトを以下に示す。

(1) スロット壁(多溝壁)

ポーラス壁(多孔壁)に光学計測窓を設置すると, 開口率の不連続により流れが乱される。そのため, 光学計測カートにはスロット壁(多溝壁)を採用した。一般には, スロット本数が多いほど流れの乱れは小さいが, 光学計測窓はスロットとスロットの間に設置するため, 本数が多くなると, 光学計測窓の設置スペースが小さくなる。そこで設置しうる最大本数を検討した。図2にスロットの本数と間隔の関係を示す。光学計測に用いる光源の直径が最低8cmは必要という条件から, 壁面当りの本数を4本, 間隔を150mmとした。

(2) 開口率

開口率の最大値は20%で, 交換可能なスロットピースにより調整が可能である。

(3) スロット形状

スロット形状はCFDを用いて選定された⁶⁾。幾通りかの候補形状を設定し、風洞内に風洞壁及びスティングも設置された状態での標準模型(AGARD-B)周りの流れ場を解析した。自由流中の標準模型表面圧力分布との差異が最も小さい形状を決定した。開口率同様、スロット形状も交換可能なスロットピースにより形状変更が可能である。

(4) 作業スペース

図3に本カートの作業スペースを示す。幾つかの光学計測機器が設置されている。また、作業効率と安全性の向上ため、出入口の扉とプレナム室の作業スペースが大きく確保されている。

(5) 光学計測窓

光学計測窓は気流に影響を与えないようスロットとスロットの間に設置されている。材質は光学計測に最適な石英ガラスを採用した。また、観測範囲の調整・変更が可能のように、窓位置を変更できる構造となっている。

3. 気流検定

光学計測カートを用いた気流検定を実施した。試験項目は以下の通りである。

(1) 中心軸上マッハ数分布

(2) 計測部断面マッハ数分布

(3) 標準模型(AGARD-B)6分力試験

試験条件は、

・マッハ数: $M=0.6, 0.9, 0.95, 1.2$

・レイノルズ数: $Re=16.5 \times 10^6$ to 22.1×10^6 [1/m]

一般には、光学計測カートは $M < 1$ の条件で使用するが、 $M=1.2$ のケースでも検定を実施した。

3.1 中心軸上マッハ数分布

図4に中心軸上マッハ数分布試験の試験状態写真を示す。計測範囲は $STA=-500\text{mm}$ から $STA=350\text{mm}$ で、シュリーレン窓中心を $STA=0\text{mm}$ とし、下流方向を正方向とする(図4)。中心軸上マッハ数分布は、39点の軸上静圧管を用いて計測した静圧と風洞総圧を用いて、

式①により算出する。

ここで、 P_s は軸上静圧管で計測した静圧、 P_0 は風洞総圧、 γ は比熱比である。

$$M = \sqrt{\frac{2}{\gamma-1} \left\{ \left(\frac{P_s}{P_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right\}} \quad \cdots \textcircled{1}$$

3.2 計測部断面マッハ数分布

図5に計測部断面マッハ数分布試験の試験状態写真を示す。計測範囲は左右方向 $\pm 210\text{mm}$ 、上下方向 $\pm 180\text{mm}$ である(図5)。計測に使用したピトーレークは左右方向に 30mm 間隔で15本の総圧管が並んでおり、上下方向には 90mm 間隔で $\pm 180\text{mm}$ トラバースして計測した。計測断面の気流方向位置は、 $STA=-150\text{mm}$ 、 0mm 、 $+150\text{mm}$ である。本カートのシュリーレン窓直径は 300mm であるから、シュリーレン窓の上流側及び下流側の先端と窓中心に計測断面を取ったことになる。

計測部断面マッハ数分布は、 $M < 1$ の場合、ピトーレークを用いて計測した総圧と風洞静圧(プレナム室静圧)を用いて、式①により算出する。ここで、 P_s は風洞静圧、 P_0 はピトーレークを用いて計測した総圧、 γ は比熱比である。

$M > 1$ の場合、レイリーのピトー管公式を用いて式②により算出する。ここで、 P_{01} は風洞総圧、 P_{02} はピトーレークを用いて計測した総圧、 γ は比熱比である。

$$\frac{P_{02}}{P_{01}} = \left[\frac{(\gamma+1)M^2}{(\gamma-1)M^2 + 2} \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left[\frac{\gamma+1}{2\gamma M^2 - (\gamma-1)} \right]^{\frac{1}{\gamma-1}} \cdots \textcircled{2}$$

3.3 標準模型力試験

図6に標準模型力試験の試験状態写真を示す。標準模型はAGARD-Bモデルで、スパン長 180mm 、胴体径 45mm である。計測項目は、標準模型の6分力、ベース圧及びキャビティ圧である。迎角は $-5^\circ \sim +10^\circ$ である。

4. 試験結果

4.1 中心軸上マッハ数分布

図7に中心軸上マッハ数分布計測結果を示す。気流方向の各計測点における一様流マッハ数からのずれ ΔM は、以下のように定義する。

$$\Delta M = M - M_{ave} \quad \cdots \textcircled{3}$$

ここで、 M は各位置の計測されたマッハ数、 M_{ave} は計測範囲(STA=-500mmからSTA=350mm)の平均マッハ数とする。中心軸上マッハ数の分布は、 $M=1.2$ の一部の点を除き、 $\Delta M=\pm 0.005$ の範囲内であり、中心軸上マッハ数分布の均一性が確認された。

4.2 計測部断面マッハ数分布

図8にシュリーレン窓中心位置における計測部断面マッハ数分布計測結果を示す。計測部断面マッハ数の分布は、 $M=1.2$ の一部の点を除き、 $\Delta M=\pm 0.005$ の範囲内で、これは中心軸上マッハ数分布の ΔM と同レベルであり、計測部断面マッハ数分布の均一性が確認された。

4.3 標準模型力試験結果(AGARD-B)

図9に標準モデル力試験結果の他風洞結果⁷⁾との比較を示す。CDFはforebodyの抵抗係数を示す。縦3分力の結果は、CDFがやや小さいものの、他風洞の結果(Reference Curve)と良く一致していることが分かる。

5. まとめ

MHI高速風洞の能力向上と高まる光学計測のニーズに応えるため、光学計測カートを導入した。本カートの基本特性確認のため、気流検定を実施した。気流検定の結果は以下の通りである。

- (1) 中心軸上マッハ数分布の均一性が確認された。
- (2) 計測部断面マッハ数分布の均一性が確認された。
- (3) 標準模型力試験結果(AGARD-B)の他風洞との良好な対応を確認した。

以上の結果から、光学計測カートの設計の妥当性が確認された。本カートを用いた先進光学計測はすでに実運用を開始しており、今後はスロット形状を変更した気流検定も行う予定である。

6. 参考文献

- 1) 真保, 高倉, 牧野, 野口 第67回風洞研究会議論文集
- 2) 神下, 真保, 酒井, 重見, 吉田 第69回風洞研究会議論文集
- 3) 中北, 栗田, 満尾, 神田, 渡辺, 浅井 第69回風洞研究会議論文集
- 4) 小池, 重見, 平野 第64回風洞研究会議論文集
- 5) 平野, 石黒 第31回流体力学講演会講演集(1999), pp.177-180.
- 6) 木村, 前田 第39回中部・関西支部合同秋期大会講演集
- 7) H.Valk, NATIONAAL LUCHTVAARTLABORATORIUM Report MP.197

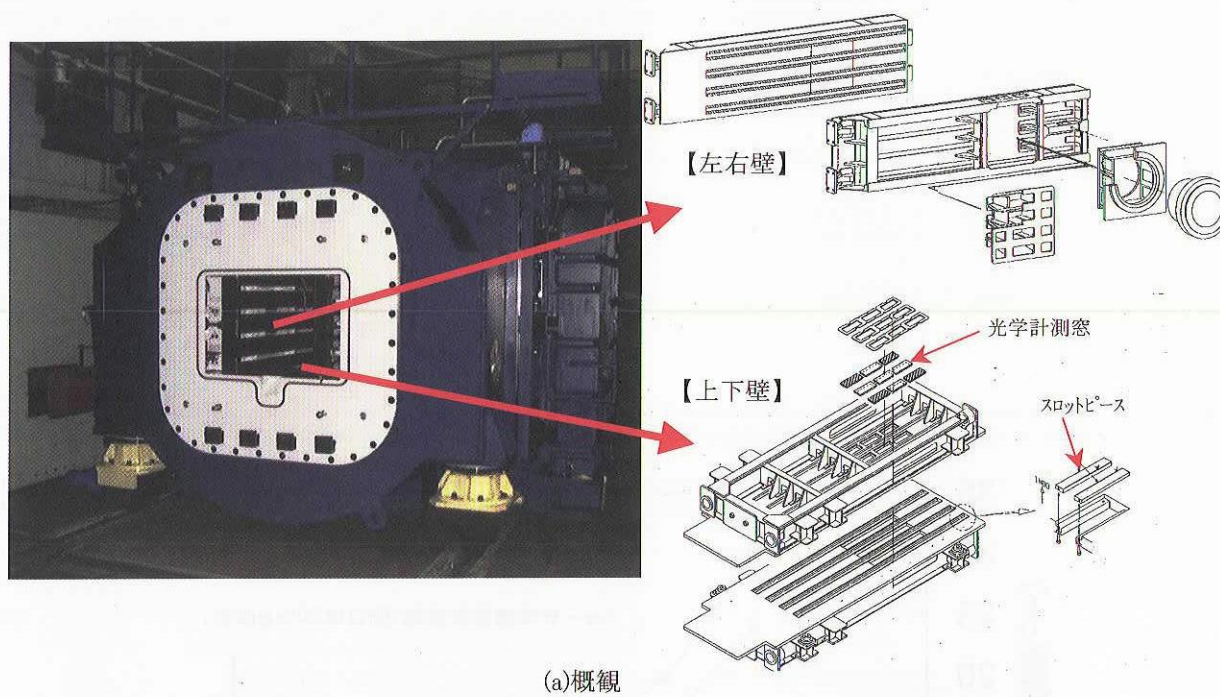


図1 光学計測カートの写真

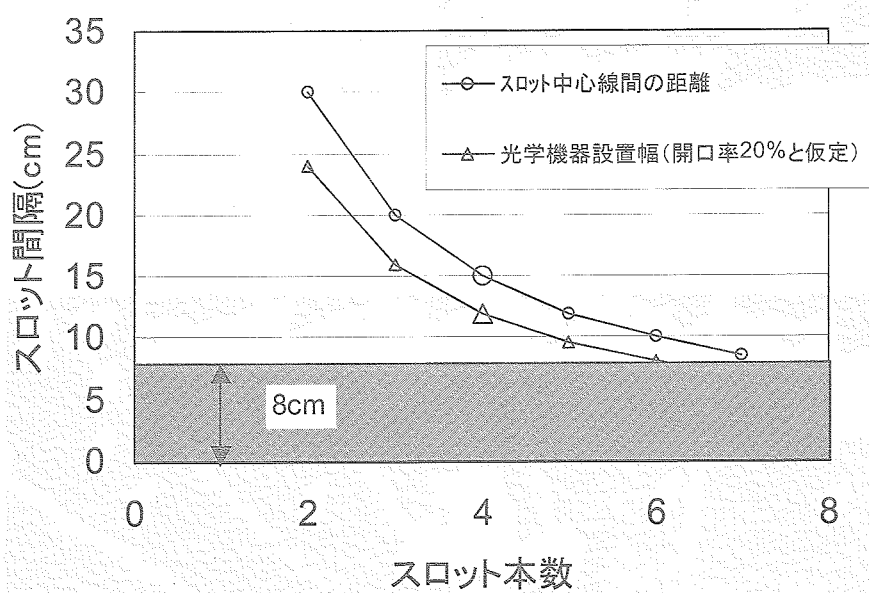
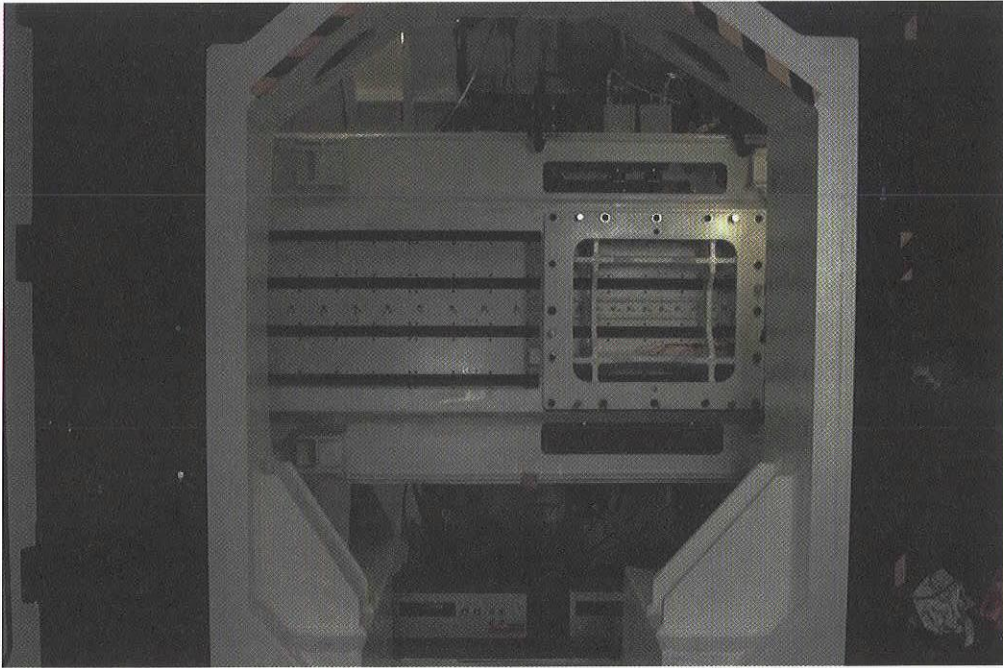
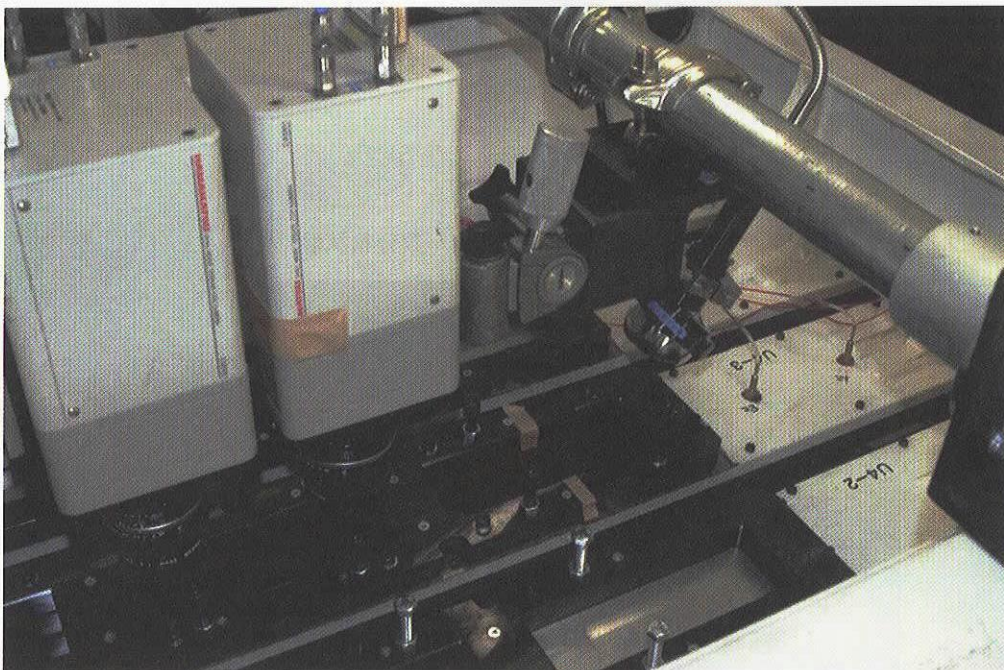


図2 スロットの本数と間隔の関係



(a) プレナム室概観(左右壁を見る)



(b) 光学計測機器の設置状況

図3 光学計測カートの作業スペース

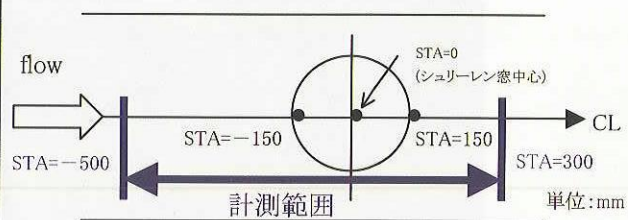
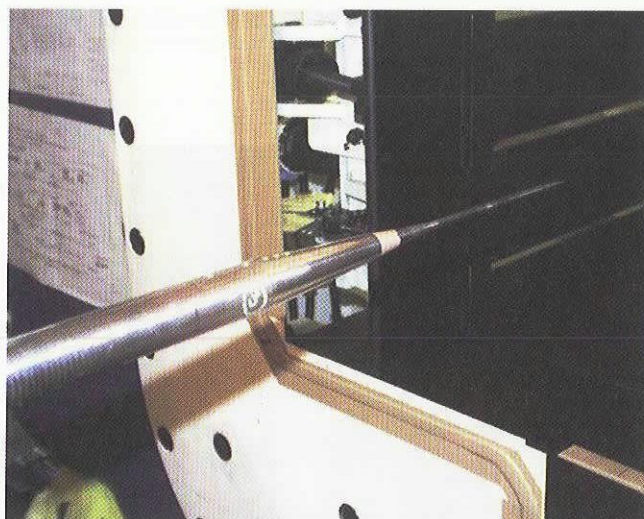


図4 試験状態写真(中心軸上マッハ数分布試験)

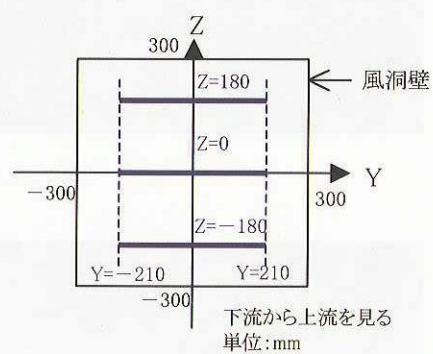


図5 試験状態写真(計測部断面マッハ数分布試験)

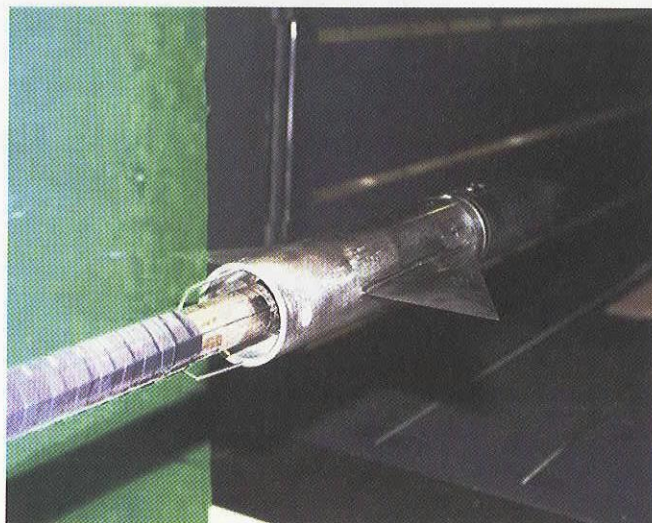


図6 試験状態写真(標準模型力試験)

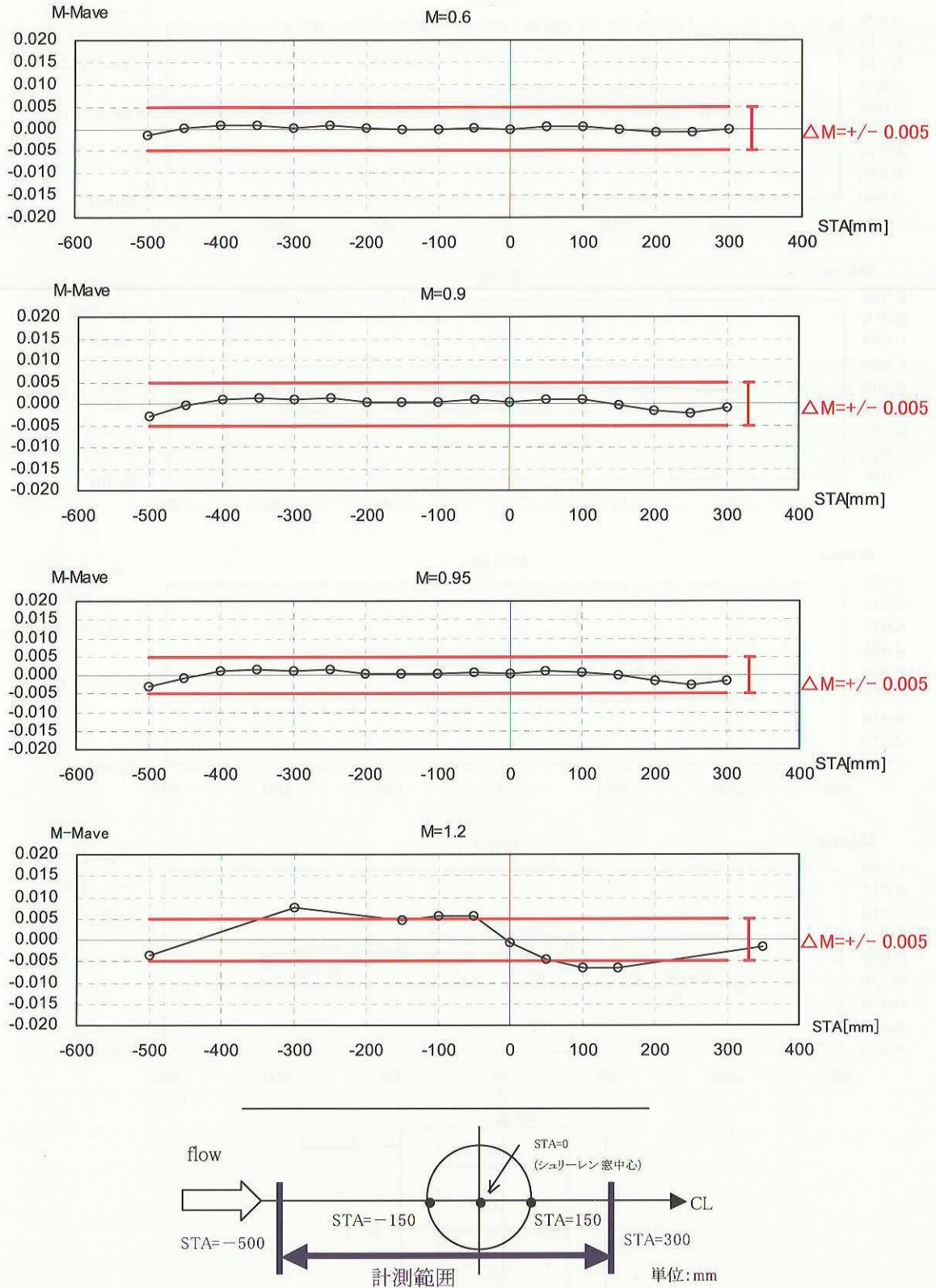


図7 中心軸上マッハ数分布計測結果

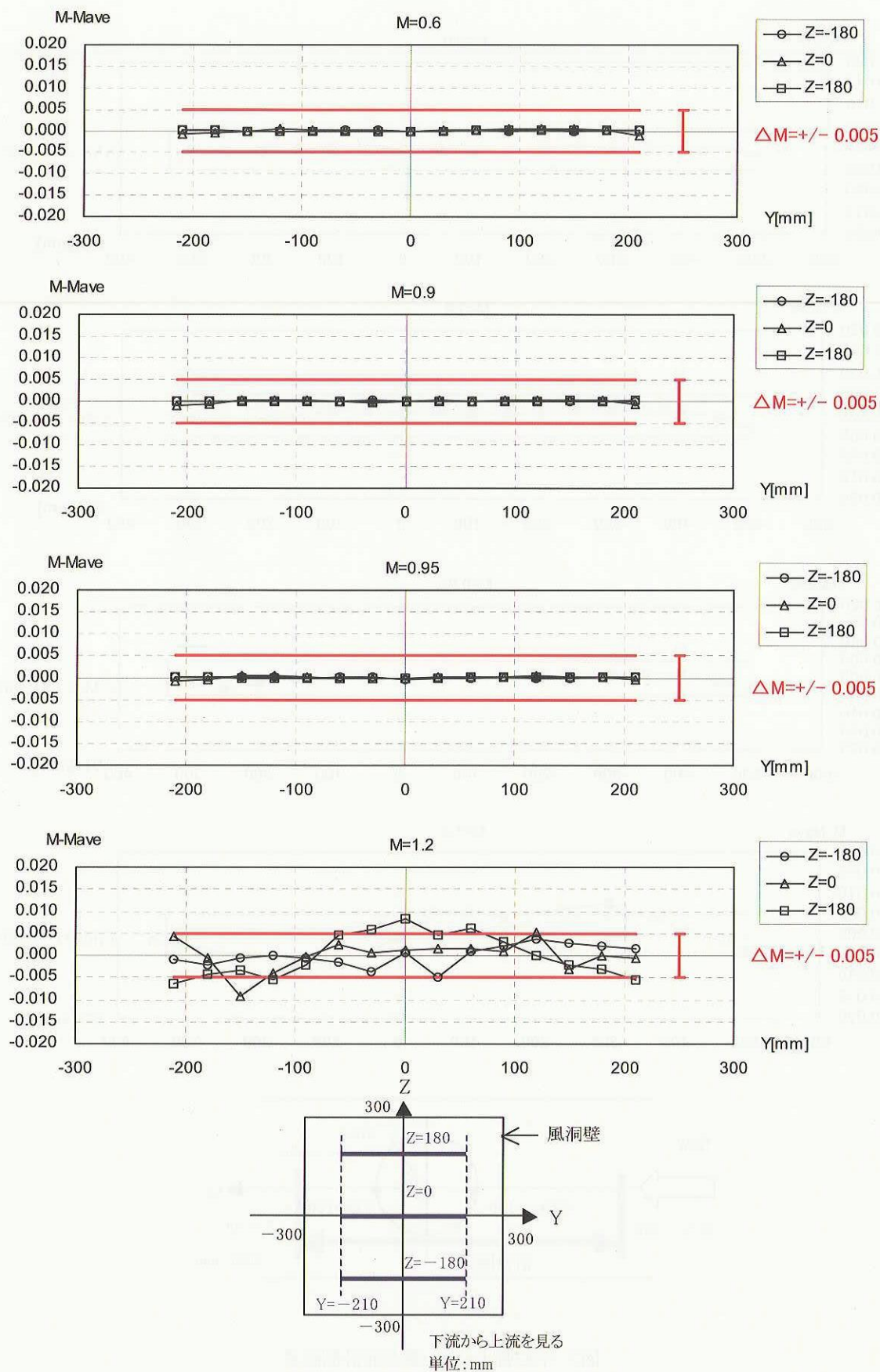
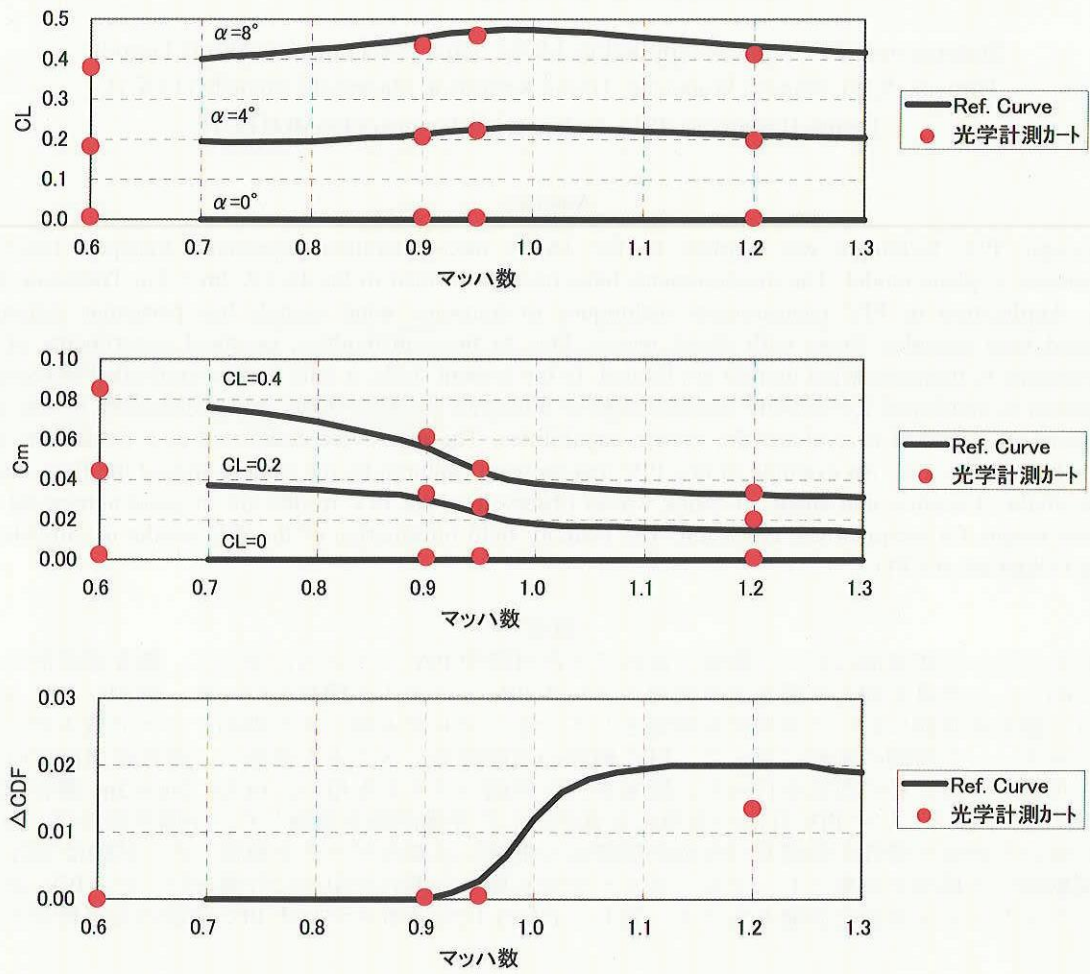


図8 計測部断面マッハ数分布計測結果(STA=0)



注1) $\Delta CDF = CDF - CDF(M=0.8)$

注2) Ref. Curve は参考文献7)より引用

図9 標準模型力試験結果の他風洞結果との比較