

JAXA2m × 2m 遷音速風洞壁境界修正用境界条件の設定

日高亜希子、口石 茂、小池 陽、香西政孝（宇宙航空研究開発機構）

Establishment of the Boundary Condition for the Wall Interference Correction in JAXA 2m × 2m Transonic Wind Tunnel

Akiko HIDAKA, Shigeru KUCHI-ISHI, Akira KOIKE and Masataka KOUZAI (JAXA)

概 要

現在JAXAで開発中のパネル法風洞壁境界修正プログラムを、JAXA2m × 2m 遷音速風洞試験に適用する為には、風洞壁面での境界条件を決定するレストリクションパラメータ R を求める必要がある。そこで、JAXA2m × 2m 遷音速風洞 No.1 カートにおいて ONERA-M5 標準模型風洞試験を実施しパラメータ R を求め、さらにその R を使用して風洞壁干渉量を推算した。

1. はじめに

現在、JAXA では、低速及び遷音速風洞に共用可能な風洞壁境界修正法を開発し実用化することを目的として、新しい風洞壁境界修正プログラムを作成中である。このプログラムを遷音速風洞試験に適用する為には、風洞壁面での境界条件を決定するレストリクションパラメータ R を求める必要がある。そこで今回、JAXA2m × 2m 遷音速風洞 No.1 カートにおいて ONERA-M5 標準模型風洞試験を実施し、レストリクションパラメータ R を求め、この R を用いて風洞壁干渉量を試算したので、これらの結果について報告する。

2. パネル法遷音速風洞壁境界修正の概要

2.1 風洞及び模型の数学モデル

(1) 風洞の数学モデル

風洞壁面パネルの例を図1に示す。

風洞壁面パネルは、Source 又は Sink で模擬する。計算領域は、風洞断面 2m × 2m、長さ 12m である。

また、壁面パネル枚数は、流れ方向に 40 枚、周方向に 80 枚であり、図1のように風洞中心が密になるように設定している。

また、風洞中心は座標系の原点であり、かつ模型の空力中心位置（つまり天秤中心位置）である。

(2) 模型の数学モデル

ONERA-M5 標準模型の計算モデルを図2に示す。

模型の揚力は Line Doublet、模型のプロジェージ及び後流は Point Doublet でそれぞれ模擬する。また、模型のピッチ角とロール角の変化に応じて、それぞれのダブレット位置を変化させる。

2.2 境界条件と風洞壁干渉修正計算の流れ

(1) 境界条件式

今回計算対象とした遷音速風洞 No.1 カートは多孔壁であり、境界条件式は以下ようになる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0$$

ここで、 ϕ は擾乱速度ポテンシャルであり、 $\frac{\partial \phi}{\partial x}$ は主流方

向の擾乱速度、 $\frac{\partial \phi}{\partial n}$ は風洞壁面に垂直方向の擾乱速度であ

る。また、R はレストリクションパラメータとよばれ、上式のように主流方向の擾乱速度と壁を横切る擾乱速度との関係を規定するパラメータである。

(2) 風洞壁干渉修正計算の流れ

最初に壁面パネルを設定し、次に模型の特異点を設定する。まず模型の揚力については、楕円揚力分布を仮定し 1/4 コード上に Line Doublet を配置する。このとき、

Doubletの強さは天秤で計測した揚力係数CLより算出する。次に、模型及びスティングについては、中心線上にPoint Doubletを配置する。このとき、Doubletの強さは模型及びスティングの幾何形状より算出する。また、後流については、後縁下流位置よりPoint Doubletを配置する。このとき、Doubletの強さは天秤で計測した揚力係数CL及び抵抗係数CDより算出する。

以上のように各特異点を設定し、境界条件式を満たすように壁面パネルのSource及びSinkの強さを決定する。

そして、風洞壁上の各Source及びSinkにより風洞中心(空力中心)に誘起される擾乱速度(u,v,w)を計算し風洞壁干渉量を求める。

3. レストリクションパラメータRの算出

レストリクションパラメータRの計算手法は、まず風洞試験において風洞壁面上の速度分布を取得し、取得データと計算結果とが一致するようにRを決定するというものである。以下に詳細を示す。

- ①まず、ある迎角 α のときの風洞壁面上静圧分布を計測し、これを速度分布に変換する。
- ②次に、Rをある値R1と仮定して壁面境界条件を設定し、壁面上の速度分布を計算する。
- ③①の壁面上速度分布計測データと②の計算結果とを比較して(図3参照)、下式により標準偏差Sを計算する。

$$S(R) = \sqrt{\frac{\sum_{\delta=1}^m [\Delta u'(\delta, R)]^2}{m-1}}$$

但し、 $\Delta u'$: 計測データと計算結果の差

m : 静圧孔の数

- ④R=R1~R2の範囲でいくつかのRを仮定して、②及び③の計算を行い、最小2乗FittingによりS-Rグラフの多項近似式を求め、標準偏差Sが最小となるRをその迎角におけるRとして採用する。(図4参照)
- ⑤各迎角に対して①~④の過程を行い、迎角ごとのRを決定し、それらの平均値を風洞固有のRと設定する。

4. 風洞壁面静圧計測試験

4.1 試験概要

JAXA2m×2m遷音速風洞No.1カートのレストリクションパラメータRを設定する為に、風洞壁面静圧計測試験を実施した。このカートは開孔率20%の多孔壁カートである。また、模型は、翼幅0.983m、平均空力翼弦長0.137mのONERA-M5標準模型を使用し、後方スティン

グ支持により試験を行った。試験の概要を図5に示す。

また、試験では、全機6分力と風洞壁面上静圧分布を計測した。風洞壁面上静圧分布については、上下左右それぞれの壁面センター上に、直径38mm、長さ約4.3mの静圧計測バー(図6参照)を設置し計測を行った。

次に、実施した試験ケースを表1に示す。今回の試験では、模型を取り付けた状態と取り外した状態で壁圧の計測を行い、その差分を取ることで模型の影響のみを取り出した。また、総圧の影響を見る為に、総圧60kPaと100kPaで試験を実施した。

4.2 試験結果

まず、風洞上面の静圧分布計測結果例を図7-1及び図7-2に示す。図7-1は風洞内に模型を入れた状態の静圧分布であり、図7-2は模型を取り外した状態の静圧分布である。この2つの図に共通するデータのばらつきの原因としては、静圧孔の製作誤差やパイプの影響等が考えられる。よって、このばらつきを取り除く為に図7-1と図7-2の差を取ったものが図7-3である。これらの図を比較すると、差を取ることでデータのばらつきが軽減されることが確認できる。また、図7-3より、静圧の差分 ΔC_p が上流側でゼロにならないという結果となったので、上側に移動して補正したデータ(図7-4)を計算に使用した。

次に、風洞の上下左右壁面の静圧差分 ΔC_p 分布を図8-1~図8-4に示す。図8-3及び図8-4より、左右の壁面静圧は、ばらつきはあるものの概ね同じ分布になっており、取得データの妥当性を示していると考えられる。

4.3 計算結果との比較

風洞上下左右壁面の擾乱速度分布について、計測データと計算結果との比較例を図9-1~図9-4に示す。上下壁面については両者はよく一致しており、左右壁面についても概ね一致していると言えるが、計測データのばらつきが大きい部分もある。

5. レストリクションパラメータR推算結果

前節の風洞試験をもとに計算した、レストリクションパラメータRの推算結果について以下に示す。

まず、マッハ数0.6、0.74及び0.9について、迎角毎のRを計算した結果を図10に示す。各迎角におけるRの計算値にはばらつきがあるが、平均値を取りマッハ数ごとのRとして決定した。

次に、それぞれのマッハ数におけるRの平均値計算結果を図11に示す。これより、Rはマッハ数に対して右下がりという結果が得られた。

6. 風洞壁境界修正量計算結果

6.1 迎角及びマッハ数修正結果

迎角の修正量 $\Delta\alpha$ を図12に、マッハ数の修正量 ΔM を図13にそれぞれ示す。ここで、 $\Delta\alpha$ 及び ΔM はそれぞれ、

$$\Delta\alpha = \alpha_c - \alpha$$

$$\Delta M = M_c - M$$

である。

迎角修正量 $\Delta\alpha$ は、迎角 2° のとき約 0.067° であり、R計算値のばらつきによる誤差範囲は約 0.006° である。また、マッハ数修正量 ΔM については、修正量は小さいと言える。

6.2 縦3分力修正結果

縦3分力の壁干渉修正計算結果を図14～図16にそれぞれ示す。これらの図では計測結果と計算結果の差は小さく見えるが、修正量の値を具体的に記すと、迎角 2° のとき、揚力係数がおおよそ0.005、抵抗係数がおおよそ0.0006（6カウント）であり、迎角 5° のとき、揚力係数がおおよそ0.002、抵抗係数がおおよそ0.0008（8カウント）である。

7. まとめ

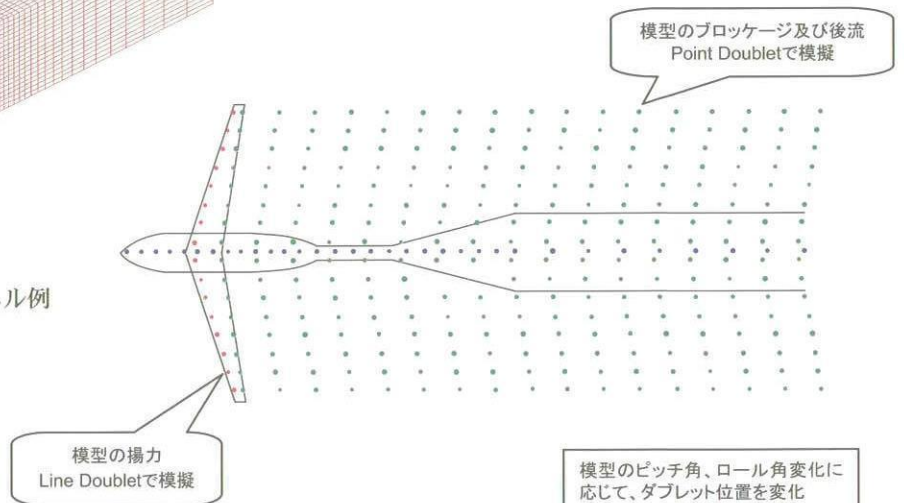
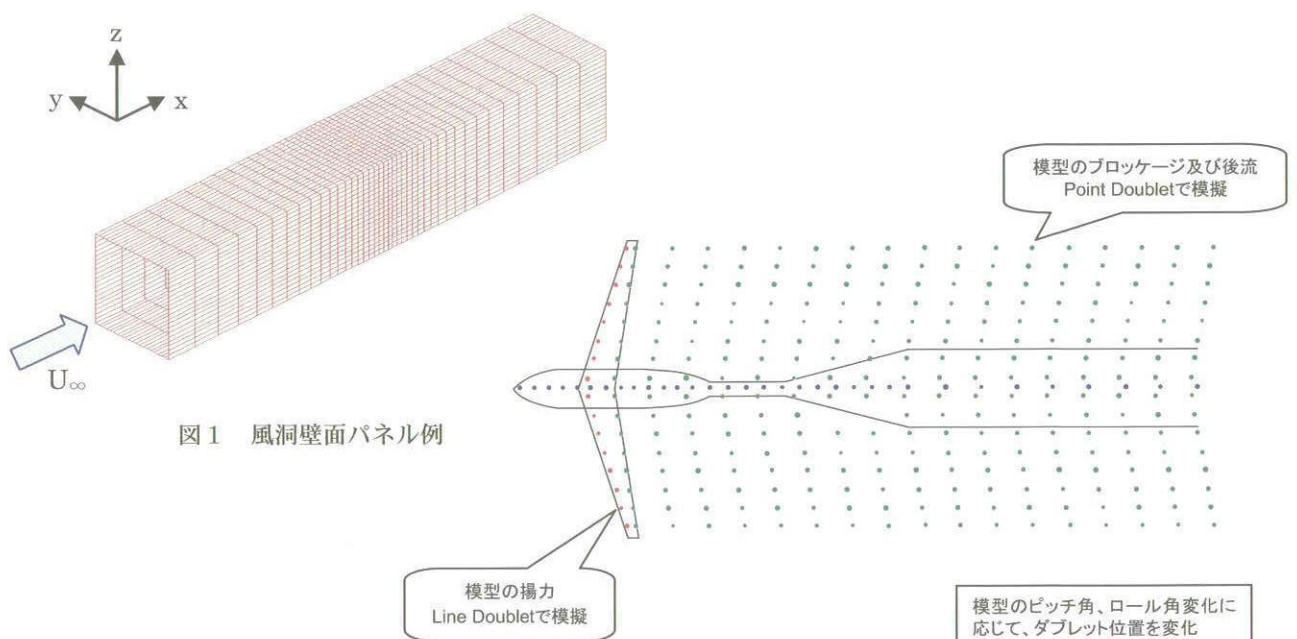
今回、ONERA-M5標準模型を用いて風洞壁静圧分布計測試験を実施し、これをもとにJAXA2m×2m遷音速風洞No.1カートのレストリクションパラメータRを求め、R=2.0～2.4という結果を得た。さらに、求めたRを用いてONERA-M5標準模型の風洞壁空力干渉量を計算し、ま

た、Rの推算誤差が壁干渉量に与える影響は少ないという結果を得た。

今後、本修正法の信頼性を確認する為に、さらに検証を行う予定である。

8. 参考文献

- 1) James D. Keller and Ray H. Wright , A Numerical Method of Calculating the Boundary-Induced Interference in Slotted or Perforated Wind Tunnels of Rectangular Cross Section , NASA TR R-379 , November 1971
- 2) James D. Keller , Numerical Calculation of Boundary Induced Interference in Slotted or Perforated Wind Tunnels Including Viscous Effects in Slots , NASA TN D-6871 , August 1972
- 3) Norbert Ulbrich , Description of Panel Method Code ANTARES , NASA/CR-2000-209592 , May 2000
- 4) N. Ulbrich and A. R. Boone , Determination of the Wall Boundary Condition of the NASA Ames 11ft Transonic Wind Tunnel , AIAA-2001-1112 , January 2001
- 5) N. Ulbrich , The Application of Panel Method Code ANTARES to Wind Tunnel Wall Interference Problems , AIAA-2002-0307 , January 2002
- 6) N. Ulbrich and A. R. Boone , Direct Validation of the Wall Interference Correction System of the Ames 11-Foot Transonic Wind Tunnel , NASA/TM-2003 - 212268



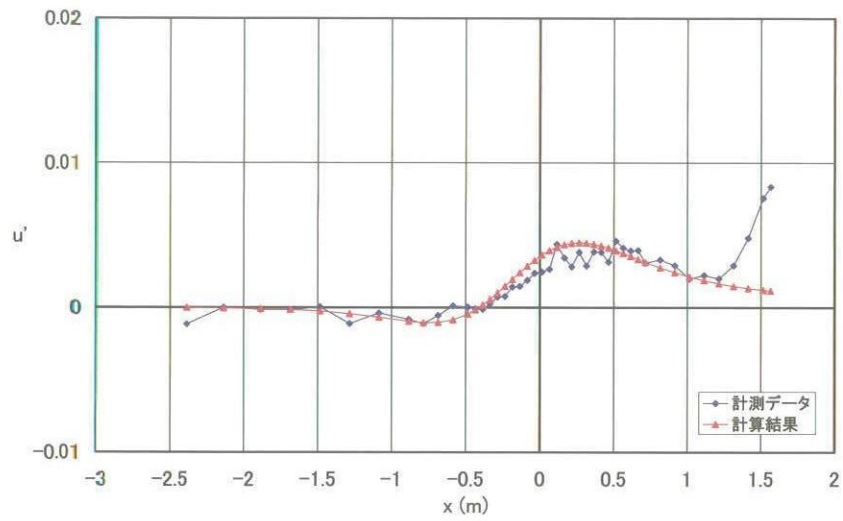


図3 風洞上面擾乱速度分布比較 (M=0.74、 $\alpha = 0^\circ$)

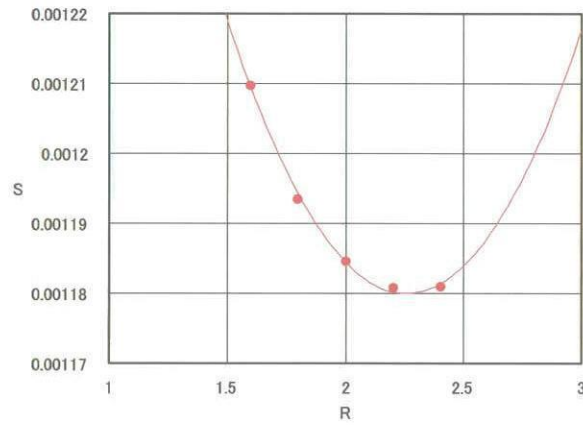


図4 各Rに対する標準偏差計算結果例 (M=0.74、 $\alpha = 0^\circ$)

表1 試験ケース表

模型	P_0 (kPa)	M	α	β
有/無	60 / 100	0.6 / 0.65 / 0.7	-5° ~ 5° 0.5° ピッチ	$\alpha = 2^\circ$ で $\pm 5^\circ, \pm 10^\circ$
		0.74	-5° ~ 5° 0.5° ピッチ	0°
		0.8 / 0.84	-5° ~ 2° 0.5° ピッチ	0°
		0.9	-2° ~ 2° 0.5° ピッチ	0°

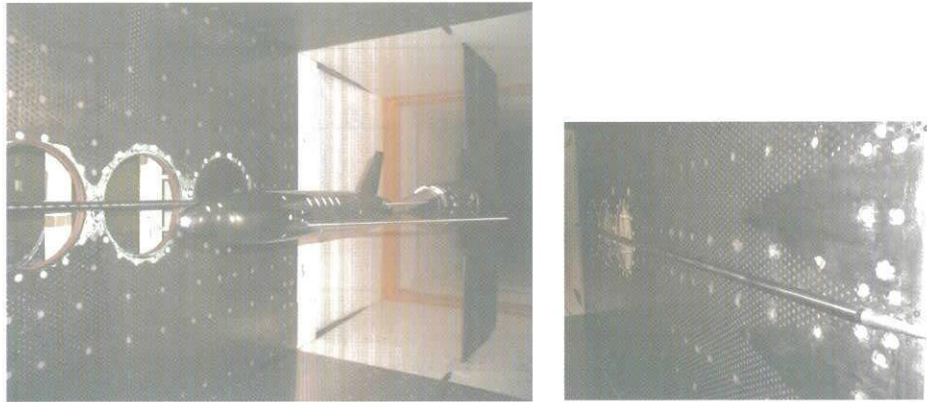


図5 風洞試験概要

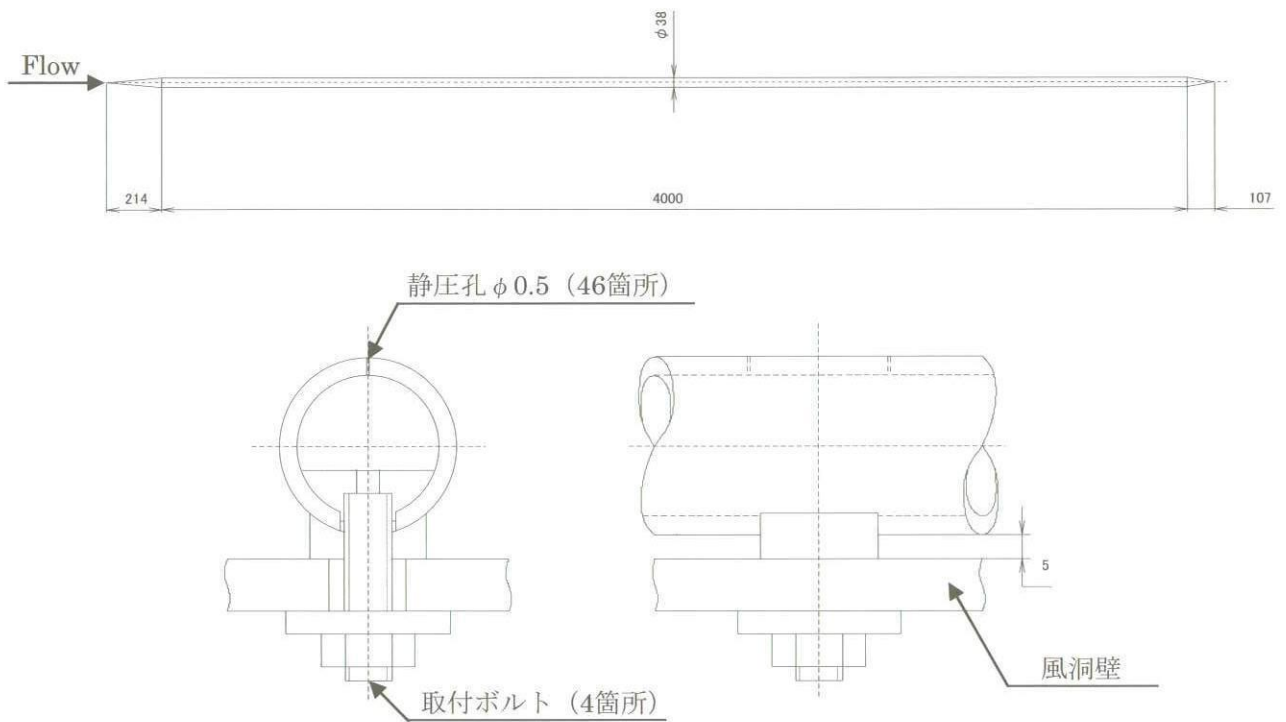


図6 静圧分布計測バー

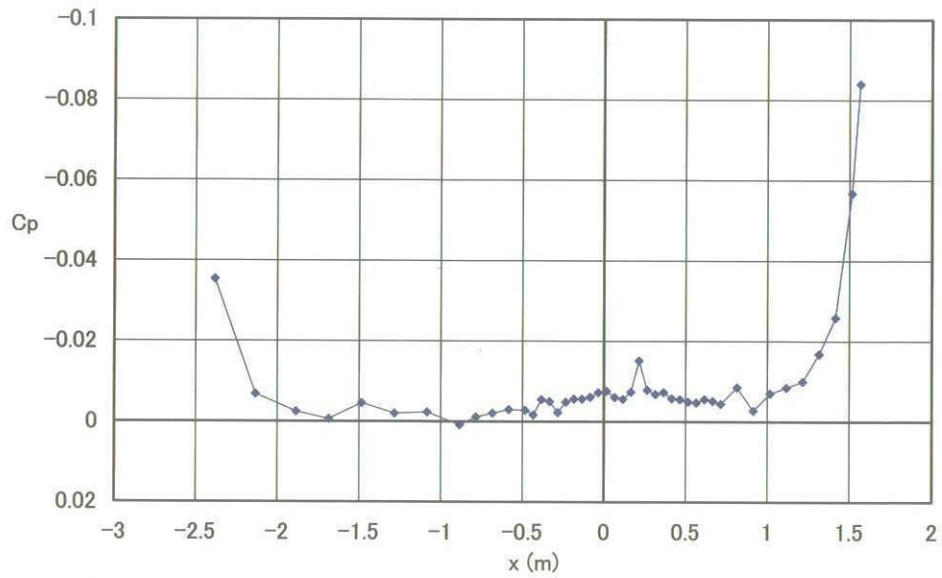


図 7-1 風洞上面静圧分布計測結果 (模型有り、 $M=0.74$ 、 $\alpha = 0^\circ$)

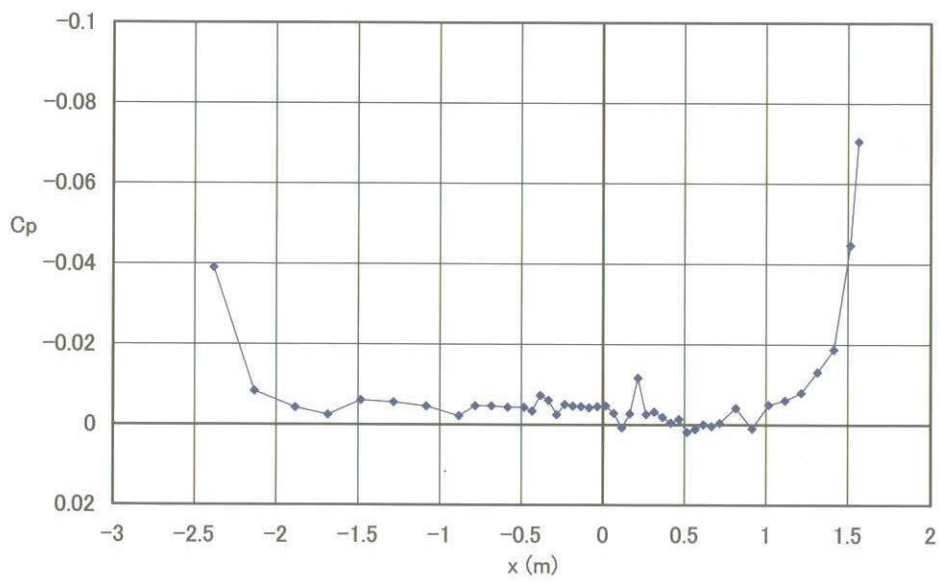


図 7-2 風洞上面静圧分布計測結果 (模型無し、 $M=0.74$ 、 $\alpha = 0^\circ$)

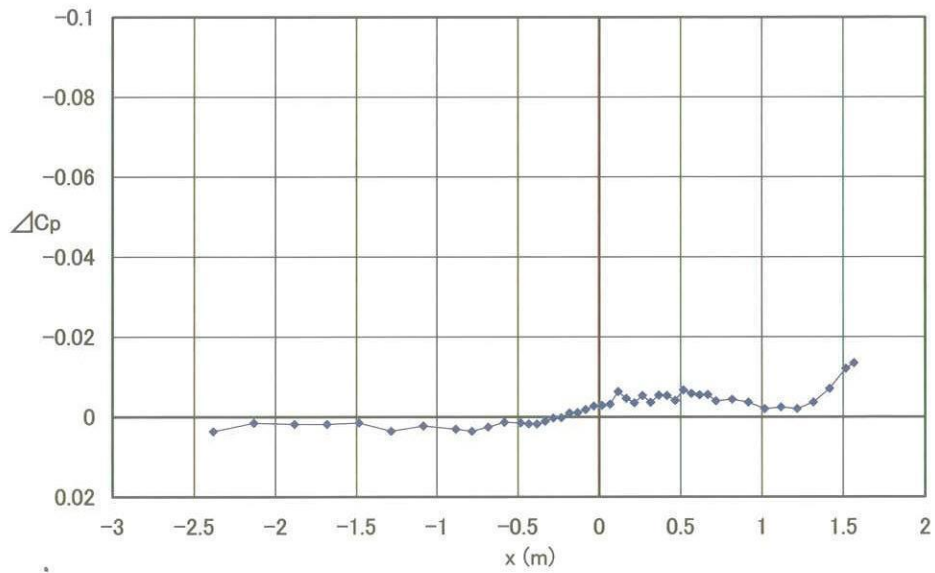


図7-3 静圧差分 ΔC_p (図7-1から図7-2を引いた結果)

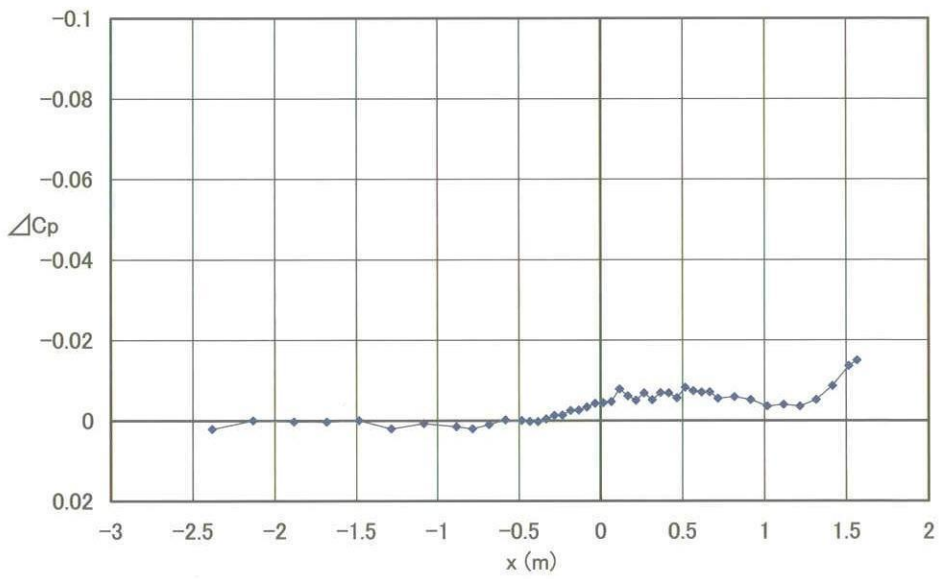


図7-4 補正後の ΔC_p 分布

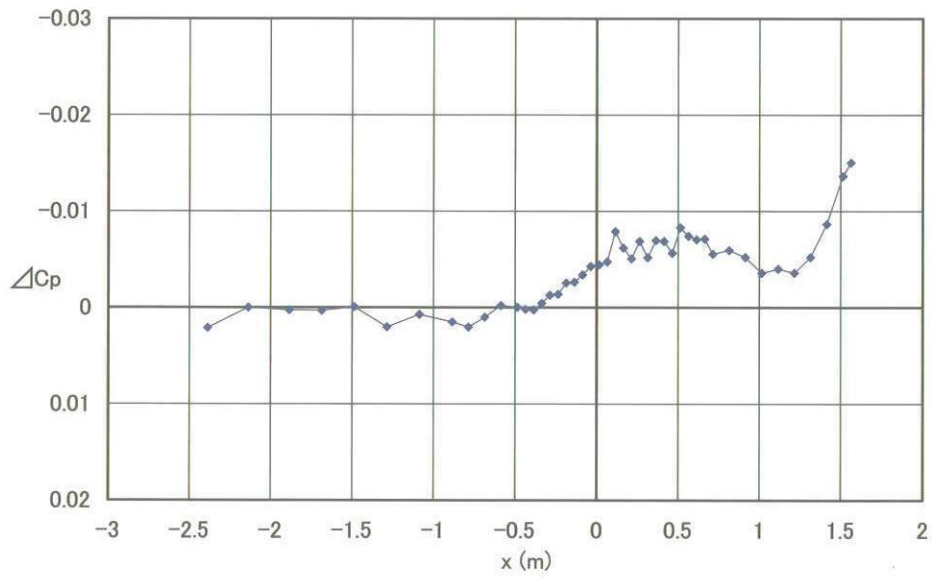


図8-1 風洞上面静圧差分 ΔC_p 分布 ($M=0.74$ 、 $\alpha=0^\circ$)

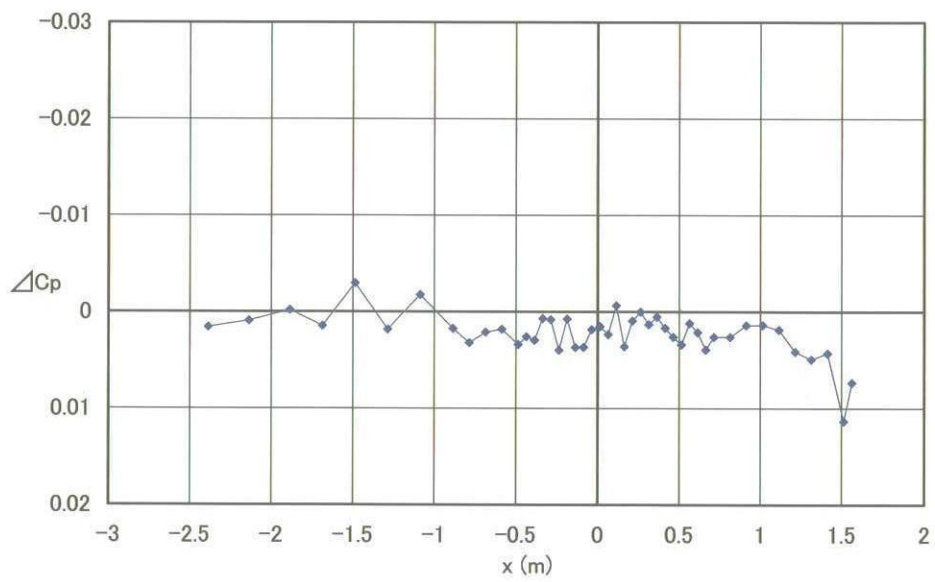


図8-2 風洞下面静圧差分 ΔC_p 分布 ($M=0.74$ 、 $\alpha=0^\circ$)

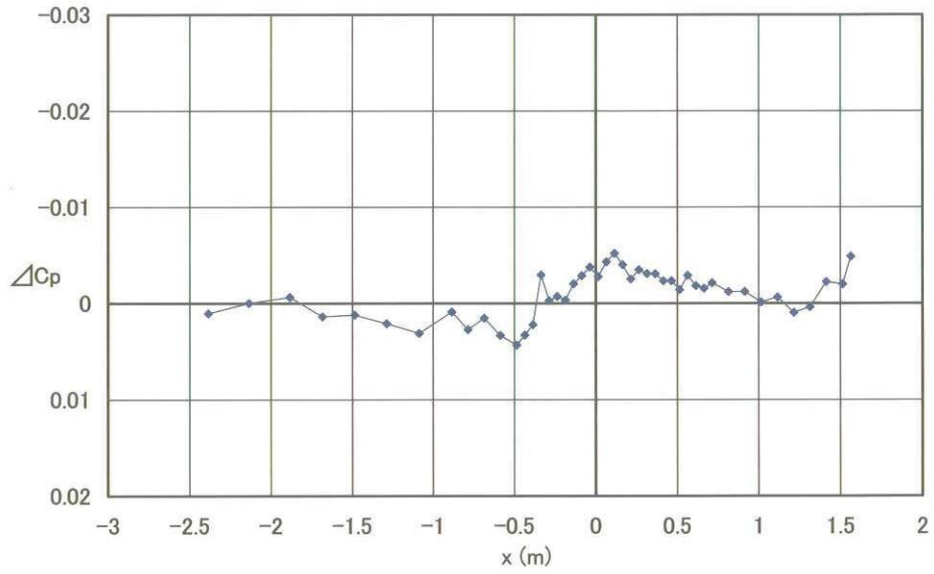


図 8-3 風洞左面静圧差分 ΔC_p 分布 ($M=0.74$ 、 $\alpha =0^\circ$)

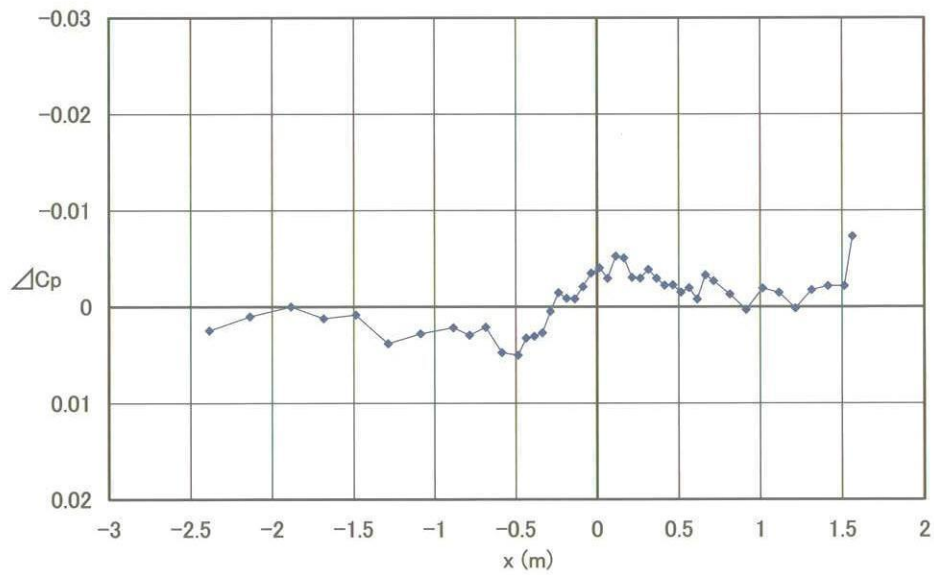


図 8-4 風洞右面静圧差分 ΔC_p 分布 ($M=0.74$ 、 $\alpha =0^\circ$)

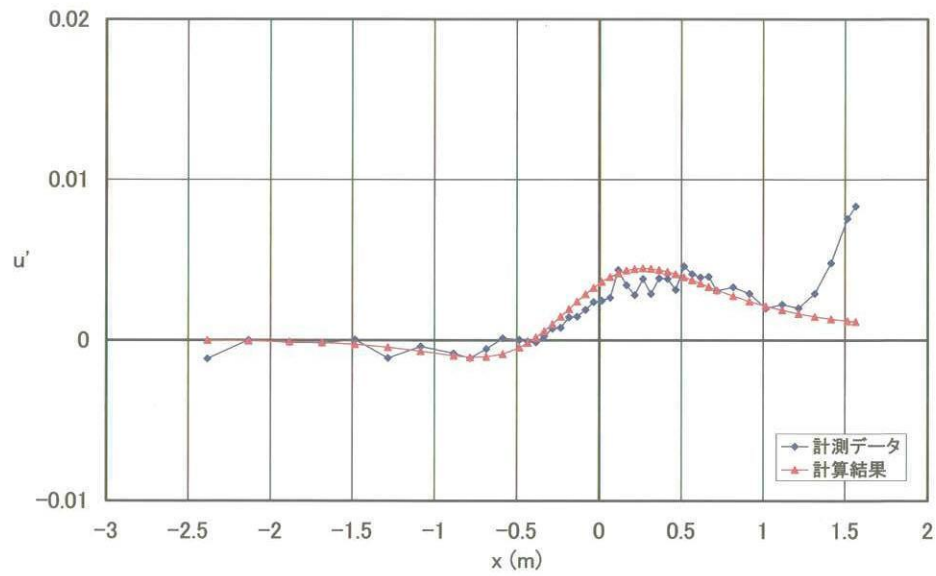


図 9-1 風洞上面擾乱速度分布比較 ($M=0.74$, $\alpha=0^\circ$)

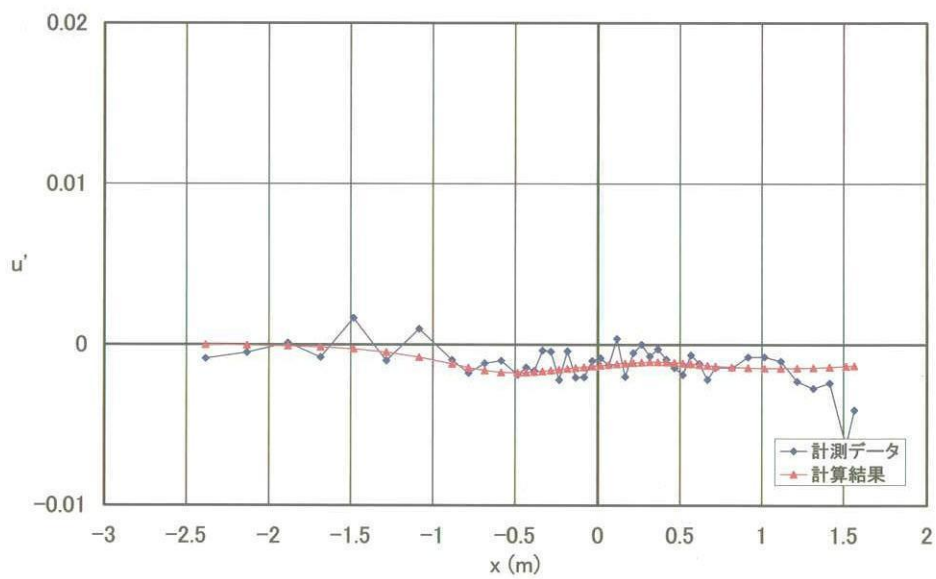


図 9-2 風洞下面擾乱速度分布比較 ($M=0.74$, $\alpha=0^\circ$)

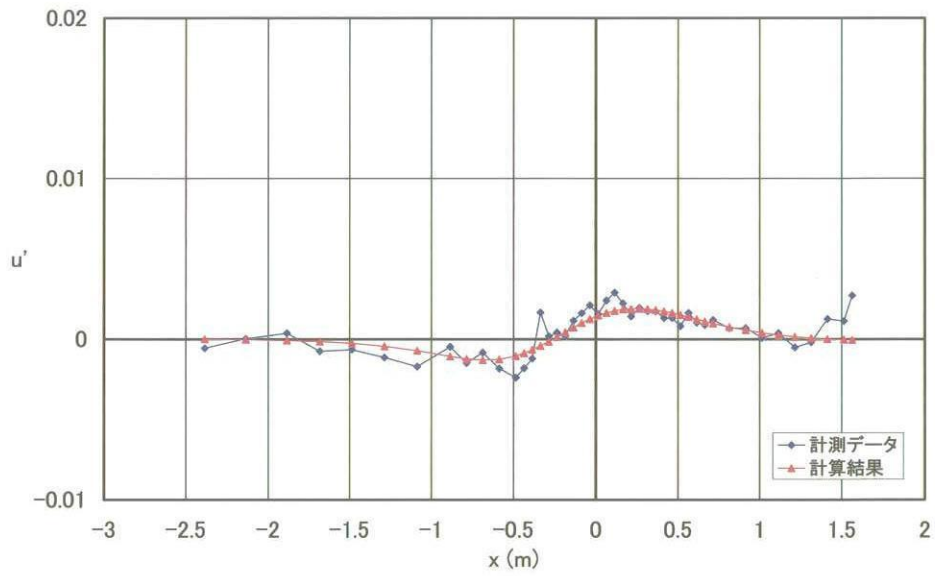


図9-3 風洞左面擾乱速度分布比較 ($M=0.74$ 、 $\alpha = 0^\circ$)

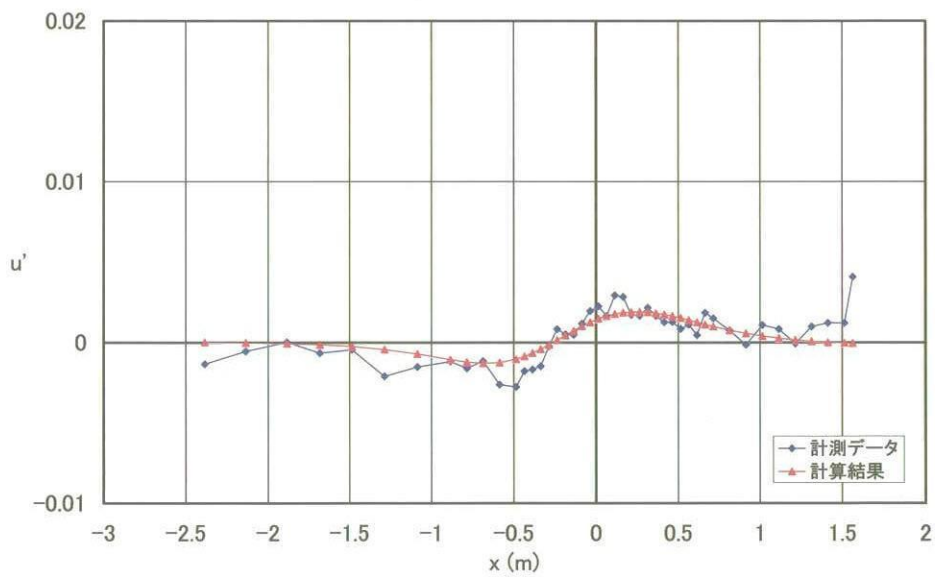


図9-4 風洞右面擾乱速度分布比較 ($M=0.74$ 、 $\alpha = 0^\circ$)

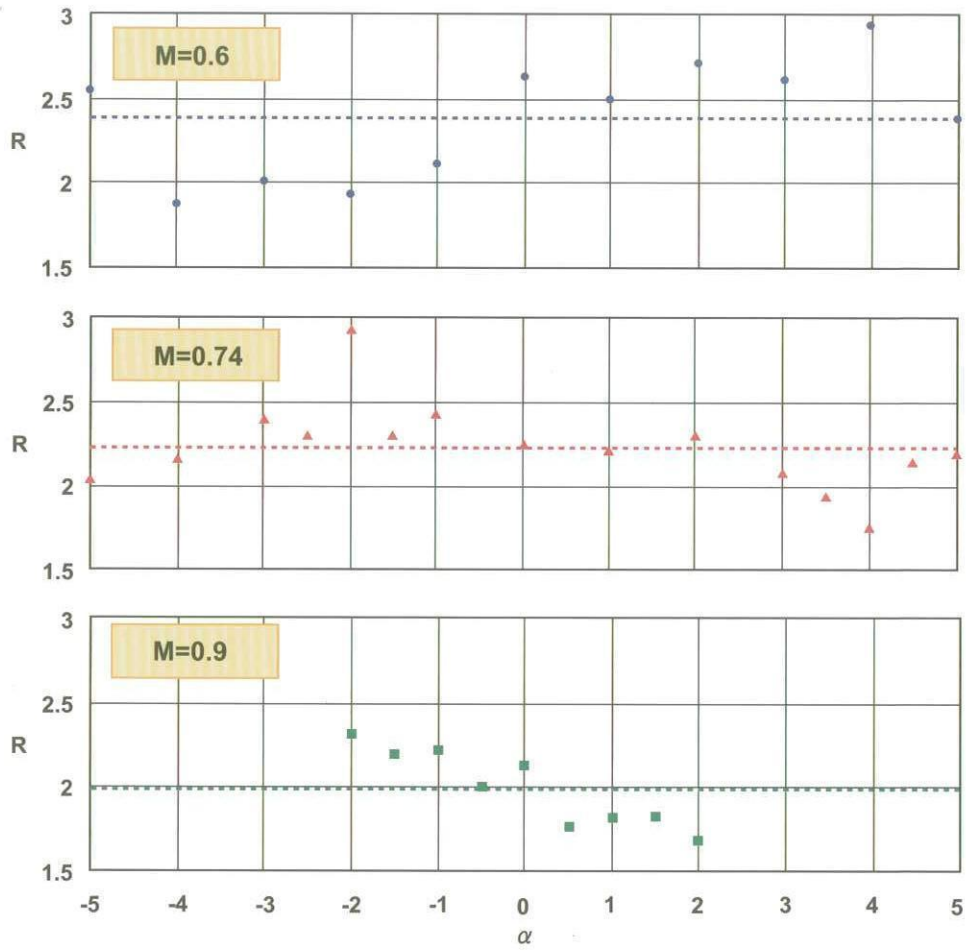


図10 各迎角におけるレストリクションパラメータ R 推算結果

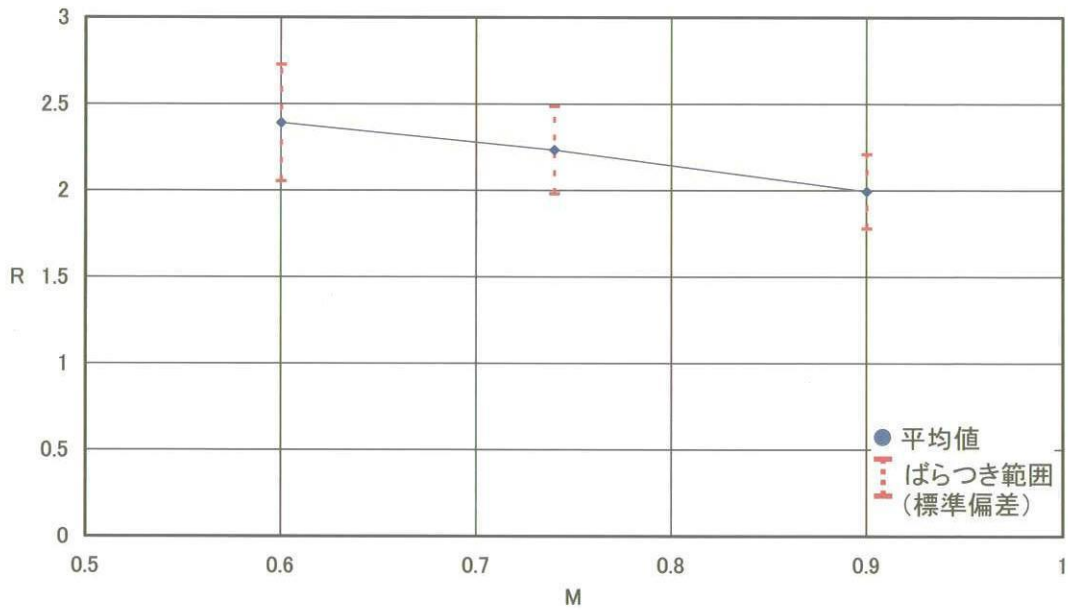


図11 各マッハ数におけるレストリクションパラメータ R 推算結果

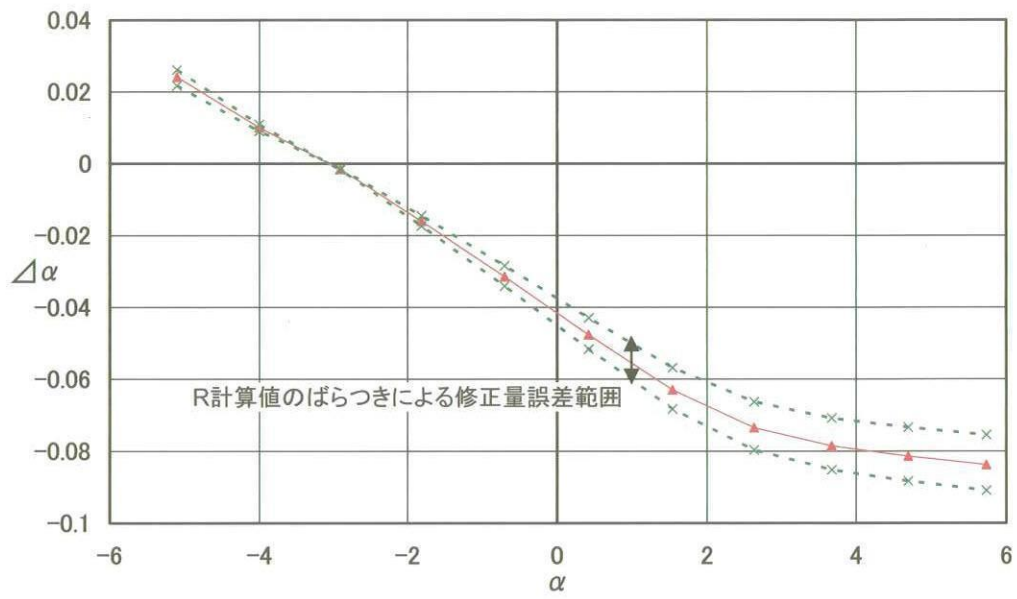


図12 迎角修正量計算結果

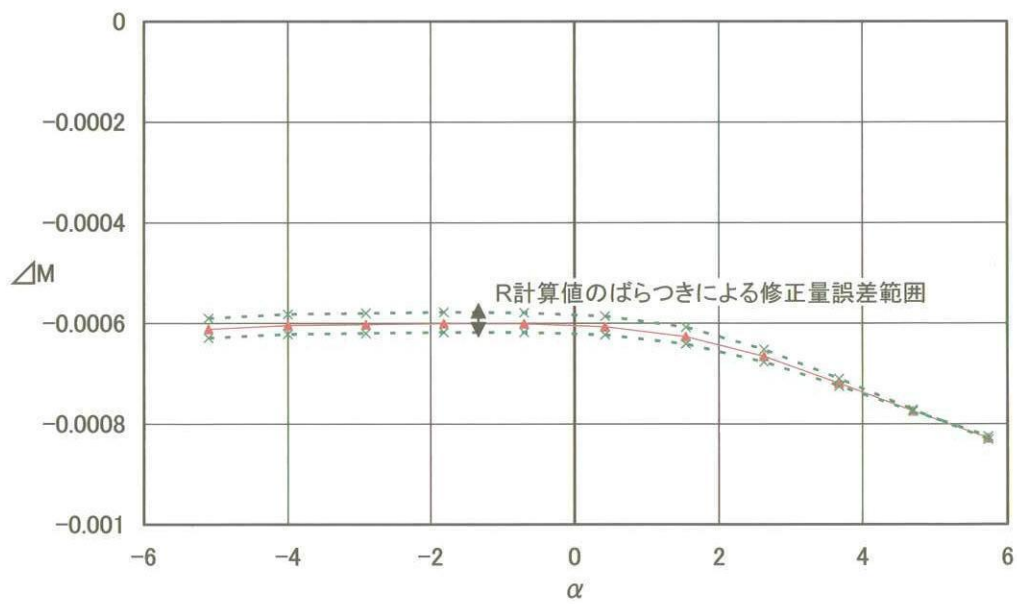


図13 マッハ数修正量計算結果

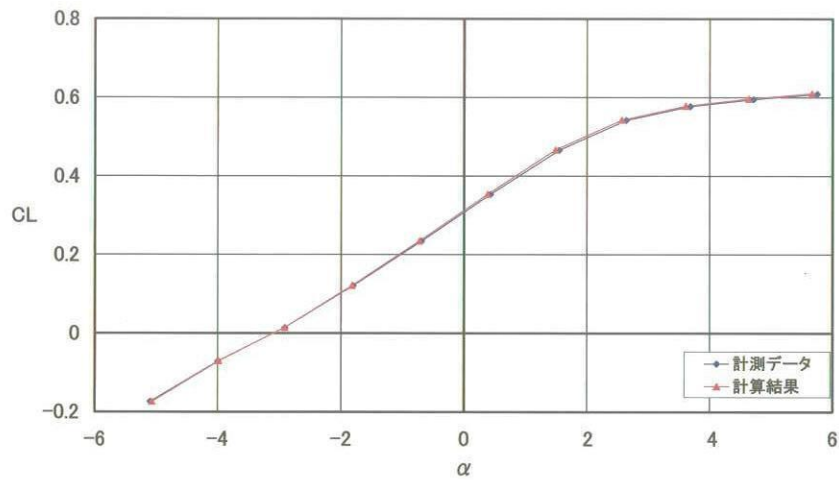


図14 揚力係数修正計算結果

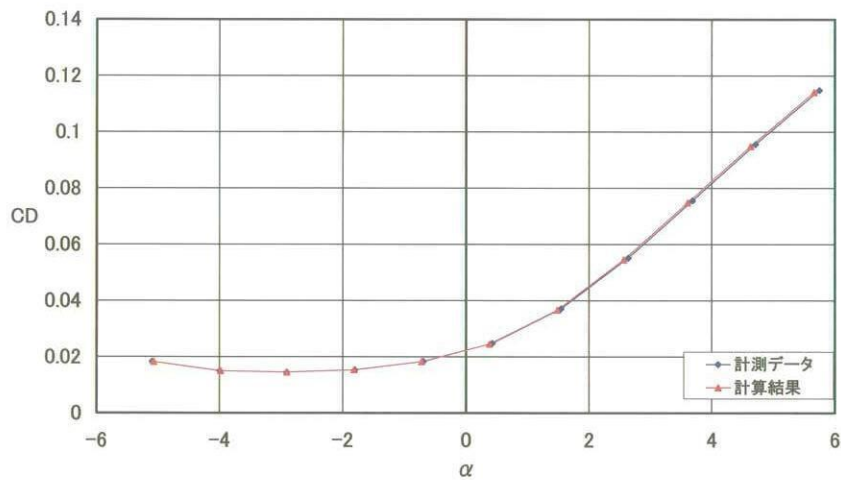


図15 抵抗係数修正計算結果

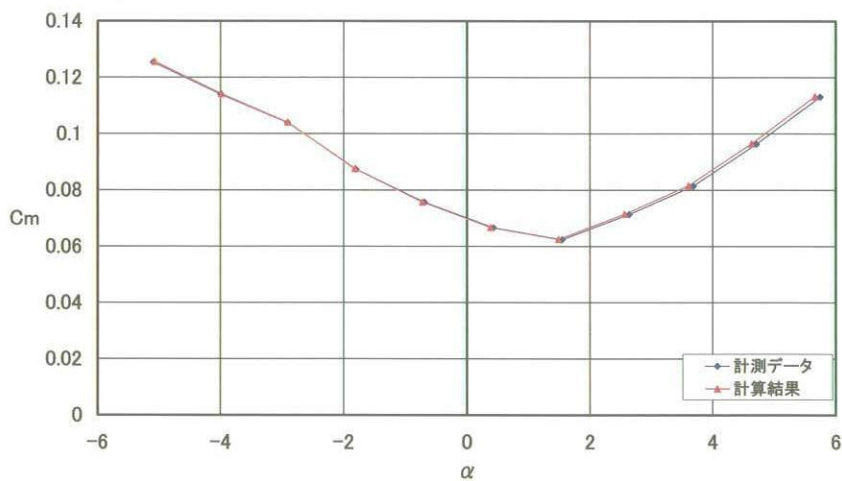


図16 ピッチングモーメント係数修正計算結果