

## H S C T 模型の数値解析 (その3)

若井 洋\*

## Numerical Analysis on HSCT model

by

Hiroshi WAKAI

Fuji Heavy Industries Ltd.

## Abstract

Numerical Flow Analysis around the HSCT model was carried out using Multi-Grid Euler Code. The results are evaluated by comparing with results of Supersonic Wind Tunnel Test that was conducted by NAL. The numerical results were well agreed with wind tunnel test results in pressure integrated value (CL,CM). As for the drag coefficient, the boundary layer correction was performed to results of Euler code and it made CD closer to wind tunnel results than original Euler results. All these analysis took 4hours/case on EWS and it seems reasonable time and quality level for preliminary aerodynamics examination phase.

## 1. はじめに

NAL が主体となって開発が進められている、小型超音速実験機は、その飛行実験の主たる目的の一つに、CFD による空力設計の検証・評価がある。実験機の開発に協力するメーカー各社も、各社の主たる CFD コードの特徴を明確にし、SST 形状解析への適用性を探ることが求められている。

NAL では CFD との比較検討に供することを目的とした HSCT 模型 (F1、P1 模型) の風洞試験を実施しており、この HSCT 模型に対し、富士重工業で主に全機形状の解析に使用している CFD コードで数値解析を実施した。本報告では、解析に用いた CFD コードの概要と幾つかの解析例を紹介し、また HSCT 模型の解析結果と風洞試験結果との比較により、解析の妥当性、解析に要する時間も含めた解析コードの特徴を述べる。

## 2. CFD コードの概要

HSCT 模型形状の解析には、富士重工業が現在、全機形態の解析に主に使用している 3 次元の Euler コードを用いた。全機形状の概念検討の段階では、より多くの形状の解析を短期間でサイクリックに実施することで形状の絞り込みを行う必要があり、その観点で Euler コードは計算機の処理速度の進歩と相まって、パネル法等に代わり近年十分実用に足るツールとなってきている。本 Euler コードの特徴を以下に列挙する。

## ・計算格子

空間格子は Cartesian 座標格子、物体表面は形状適合格子の Multi-Grid の Euler コード。翼、胴体、ナセル等の物体表面格子の各要素同士、及び空間格子と物体表面格子は互いに Overset するため、格子の生成が容易である。また物体形状を多少変更した場合でも空間格子や他の物体要素格子を生成し直す必要がないため、形状のバ

\* 富士重工業株式会社

ラメトリックスタディーが容易である。更に Multi-Grid の各格子毎の Local Time Step で加速収束することで、計算の効率化を図っている。

・離散化及び積分法

離散化は対流項は有限体積法を用いており、4-STAGE の Runge-Kutta Scheme により、定常解を求めている。

・物体表面の境界条件

物体表面の境界条件は、物体内に有限体積のセルを1段想定して、物体表面で Flux の流出入をキャンセルする状態量を与える手法をとっている。

・境界層補正

全機の摩擦抵抗を算出するために、Euler 解析後に物体表面で境界層方程式を別途計算。境界層計算は、層流、乱流、遷移に対応した3種類の手法で計算する。

層流：Cohen and Reshotko Method

乱流：Green's Lag-Entrainment Method

遷移：Granville Method

で遷移位置の指定と自動判定が可能。

本 Euler コードは EWS 上で 50 万点規模の計算で約 4 時間程度で収束し、また境界層計算も約 4 時間程度で可能であり実用的な解析が可能となっている。

解析例として図 1-1 ~ 1-2 に風洞支持スティング付 RAE 101 模型周りの計算格子（ブロック）と表面 Cp 分布 (M0.9,  $\alpha=1.0^\circ$ 、Re 数 1mil) を示す。また図 2 にナセル付 SST 形状の Cp 分布 (M2.0,  $\alpha=3.0^\circ$ ) を示す。

### 3. H S C T model の数値解析

第 2 項で紹介した Euler コードを用いて H S C T model 周りの流れ場の数値解析を実施した。H S C T model 形状は NAL から提供していただき、表面格子及び空間格子は富士重工で作成した。図 3 に H S C T model 表面格子を、図 4 に空間格子（サブブロック配置）を示す。

各格子数は、

表面格子：2 3 4 4 0 点

主翼コード方向 1 6 0 点×スパン方向 6 5 点

胴体機軸方向 1 2 1 点×周方向 7 2 点

空間格子：約 4 5 0 0 0 0 点

となっている。

解析条件は NAL から提示していただいた。下表に解析条件一覧を示す。

H S C T model 解析条件

Case No.	Mach数	$\alpha$ (deg)	Re数 ( $\times 10^7$ 1/m)
1	1.4	3.0	2.4
2	1.6	3.0	2.5
3	1.8	3.0	2.6
4	2.0	-2.1	2.8
5	2.0	0.0	2.8
6	2.0	1.4	2.8
7	2.0	3.0	2.8
8	2.0	4.5	2.8

本解析では横滑角  $\beta=0$  のみとした。また Euler 解析後にすべてのケースで境界層計算を実施し、その際遷移位置の自動判定は行わず全域乱流とした。

### 4. 解析結果

代表的な解析結果として、M1.6/ $\alpha=3.0^\circ$  及び M2.0/ $\alpha=3.0^\circ$  の表面 Cp 分布を示す（図 5、6 参照）。いずれの Mach 数でも、主翼 Kink 位置後縁付近の下面に静圧の上昇が見られる。

図 7 に M 2.0 での迎角による揚力 (CL) 特性を示す。H S C T model の NAL B 風洞における風試データ（実線）と本解析結果（■）は良く一致しているといえる。

図 8 に M 2.0 での迎角による抗力 (CD) 特性を示す。風試データ（実線）と Euler 解析結果（■）、Euler 解析結果に境界層補正を行った結果（▲）を比べると、Euler は風試に対し 50 count 程度抵抗が少なく、この差分には摩擦抵抗分が含まれていると考えられる。逆に境界層補正後の解析結果は、風試よりも 20 count 程度増加しており、全域乱流と設定したことと相まって、本補正は摩擦抵抗を大きく見積もる傾向にあることが分かる。迎角による摩擦抵抗の変化はほとんど見られない。

図 9~13 に主翼断面の Cp 分布を示す。数値解析結果は、風試結果と比べて外舷側前縁付近での、上面負圧の立ち上がり及びピークを捉えていないが、それ以外の部分では、良く一致している。

## 5. まとめ

H S C T model 周りの流れ場の Euler 解析を実施し、超音速風洞試験結果と比較した。圧力分布の細部で風試と解析は若干の差が生じるが、圧力積分による全機特性を評価する上では比較的良好な一致を示していると考えられる。機体形状の概念設計や空力設計の初期段階においては、短時間で数多くの形状に対してパラメトリックな解析を行う必要があり、その点では短いターンアラウンドタイムで済む Euler 解析は有効なツールといえる。また摩擦抵抗補正は、迎角による変化が少ない事から、初期検討ではすべてのケースで境界層計算を実施する必要性は低いと考える。今後摩擦抵抗や前縁負圧ピークの差異に関して詳細に検討、改善していく予定である。

本解析は、NAL 主導のもと、H S C T model の風試との対応計算の一環として実施された。ここに記して関係各位に感謝する。

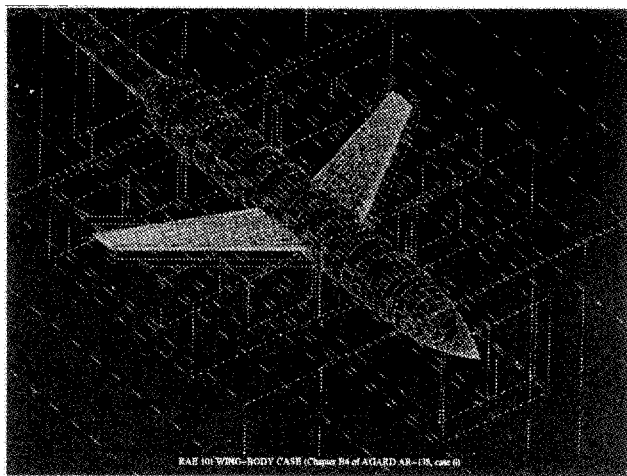


図 1 - 1 . スティック付 RAE101 模型 計算格子

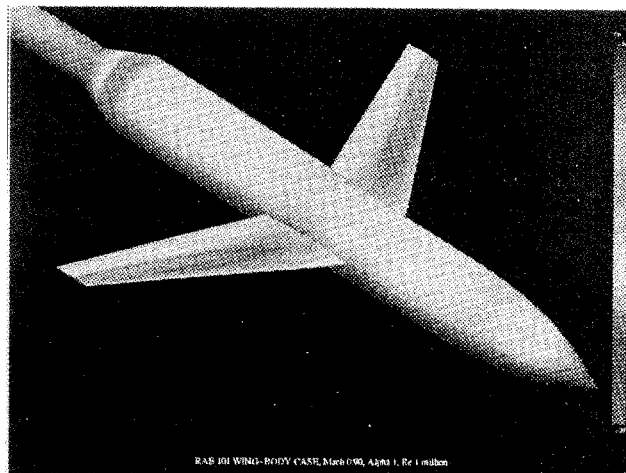


図 1 - 2 . スティック付 RAE101 模型解析結果  
( $M0.9$ 、 $\alpha = 1.0^\circ$ 、表面  $C_p$  分布)

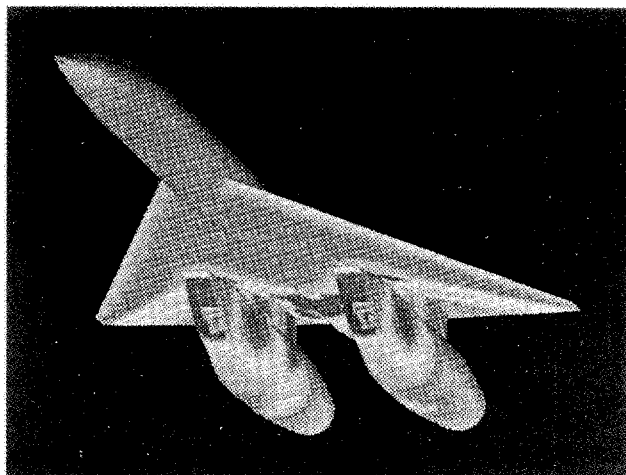


図 2 . ナセル付 SST 形状解析結果  
( $M2.0$ 、 $\alpha = 3.0^\circ$ 、表面  $C_p$  分布)

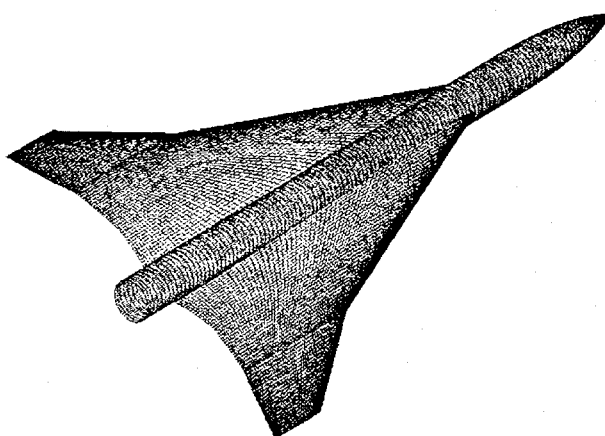


図 3 . H S C T model 表面格子

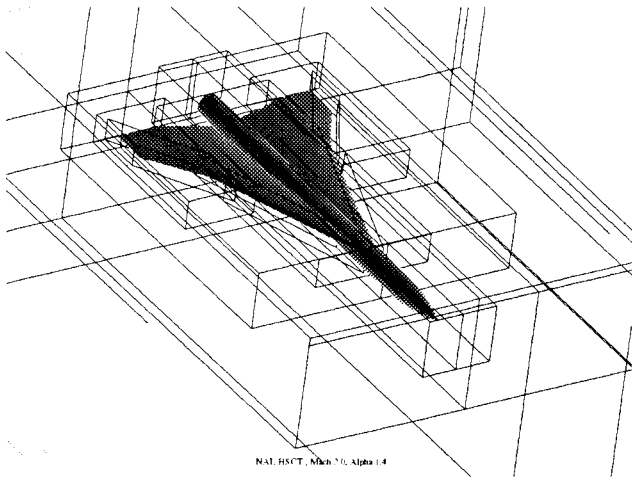


図4. H S C T model空間格子  
(サブブロック配置)

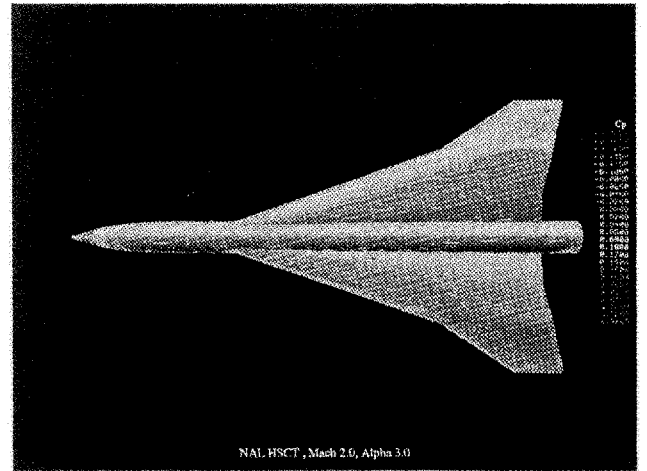


図6-1. M2.0 /  $\alpha = 3.0^\circ$  上面  $C_p$  分布

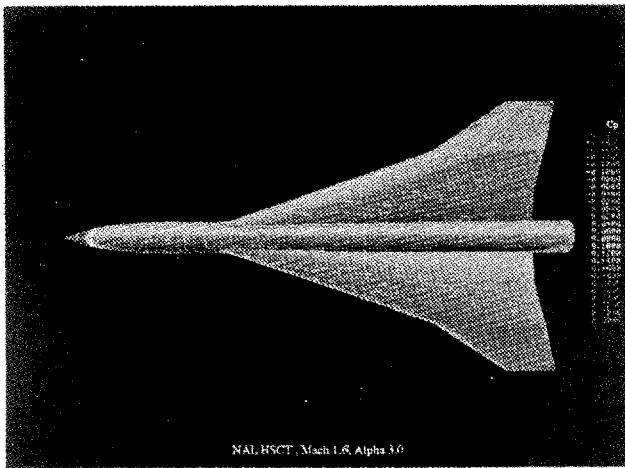


図5-1. M1.6 /  $\alpha = 3.0^\circ$  上面  $C_p$  分布

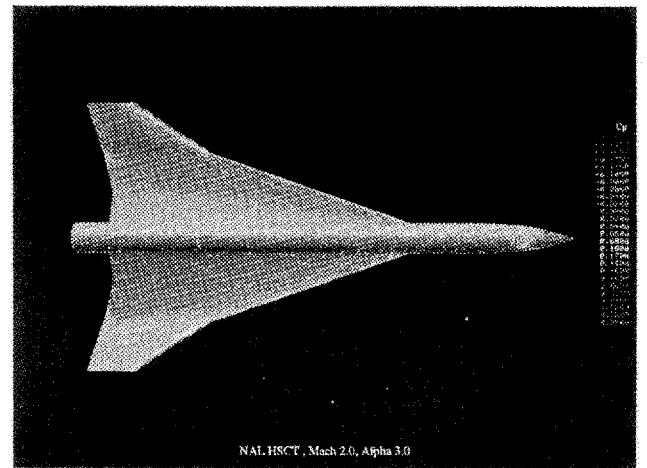


図6-2. M2.0 /  $\alpha = 3.0^\circ$  下面  $C_p$  分布

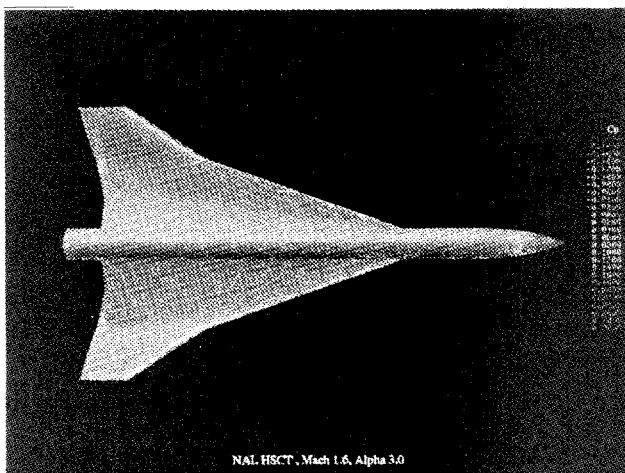


図5-2. M1.6 /  $\alpha = 3.0^\circ$  下面  $C_p$  分布

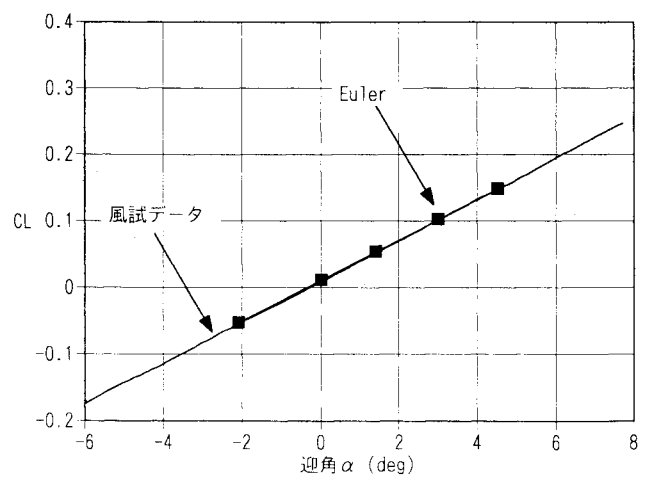


図7. 揚力-迎角特性 (M2.0)

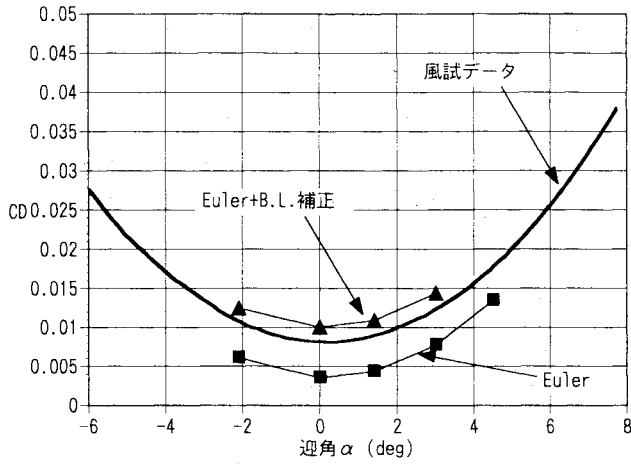
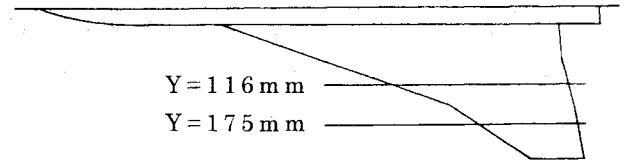


図 8 . 抗力 - 迎角特性 (M2.0)



断面 Cp 切り出し位置

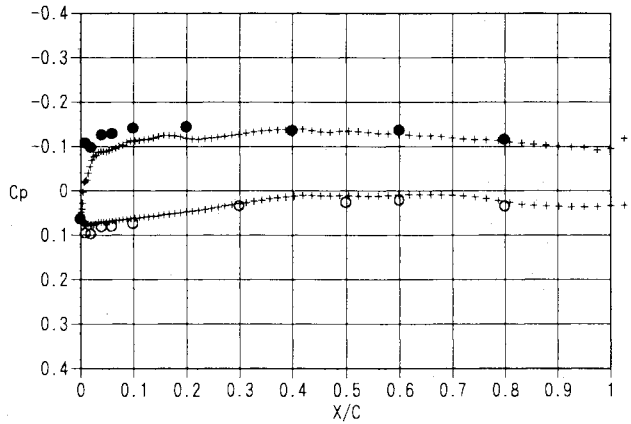


図 9-1. M=1.6  $\alpha=3.0$  Y=0.116m

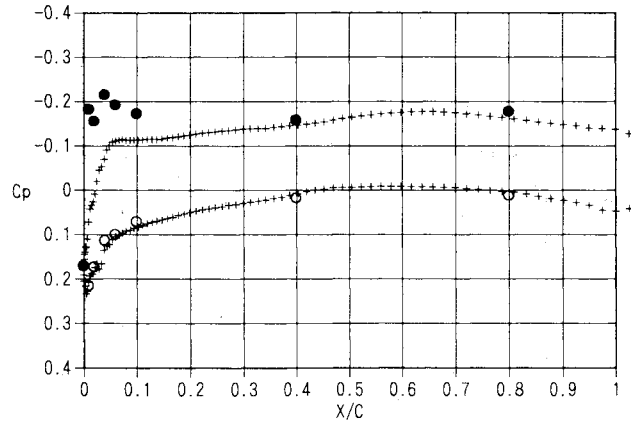


図 9-2. M=1.6  $\alpha=3.0$  Y=0.175m

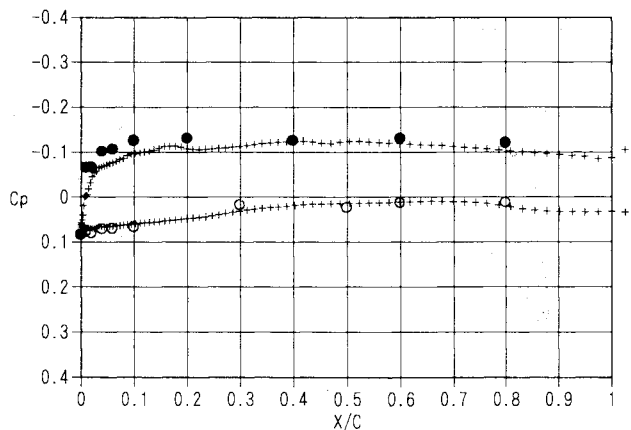


図 10-1. M=1.8  $\alpha=3.0$  Y=0.116m

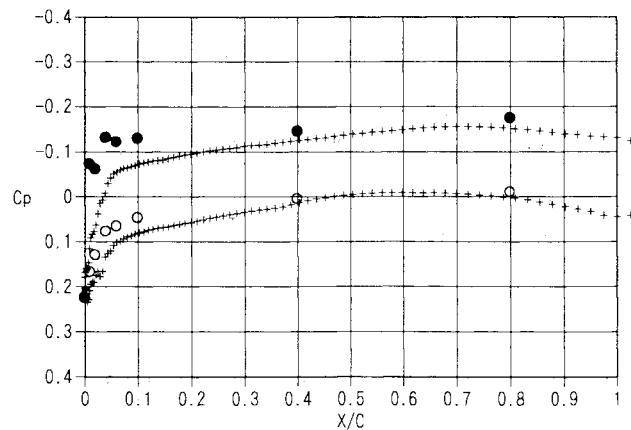


図 10-2. M=1.8  $\alpha=3.0$  Y=0.175m

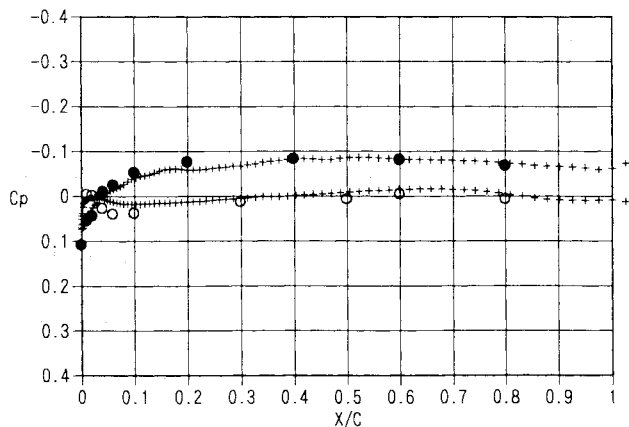


図 11-1.  $M=2.0$   $\alpha=1.44$   $Y=0.116m$

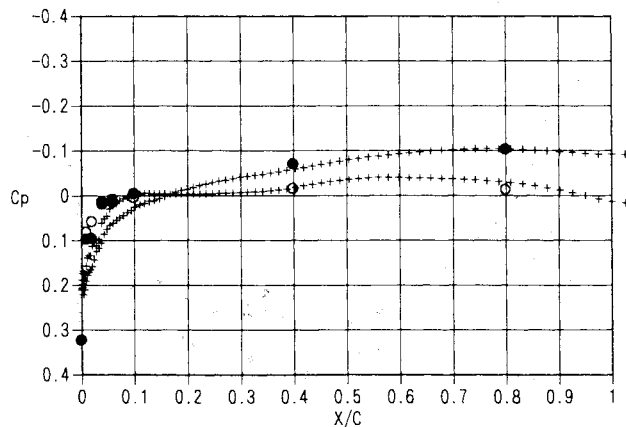


図 11-2.  $M=2.0$   $\alpha=1.44$   $Y=0.175m$

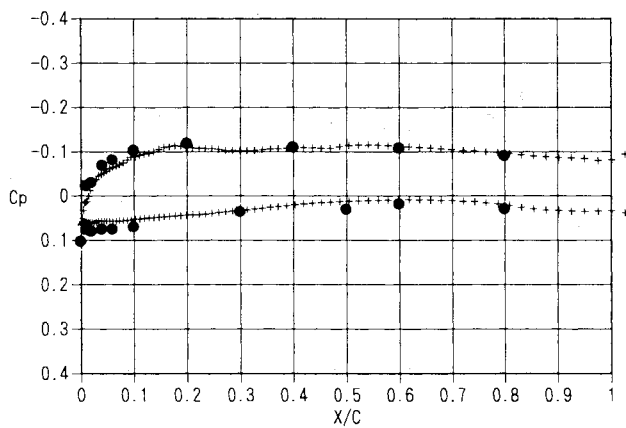


図 12-1.  $M=2.0$   $\alpha=3.0$   $Y=0.116m$

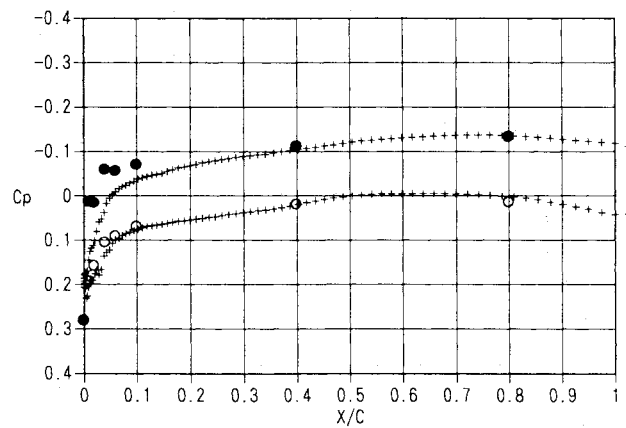


図 12-2.  $M=2.0$   $\alpha=3.0$   $Y=0.175m$

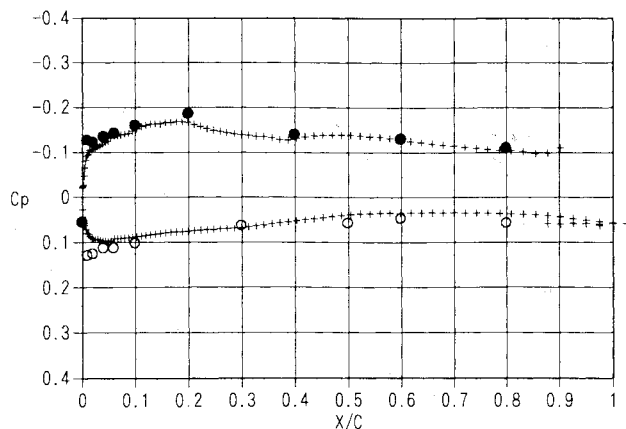


図 13-1.  $M=2.0$   $\alpha=4.5$   $Y=0.116m$

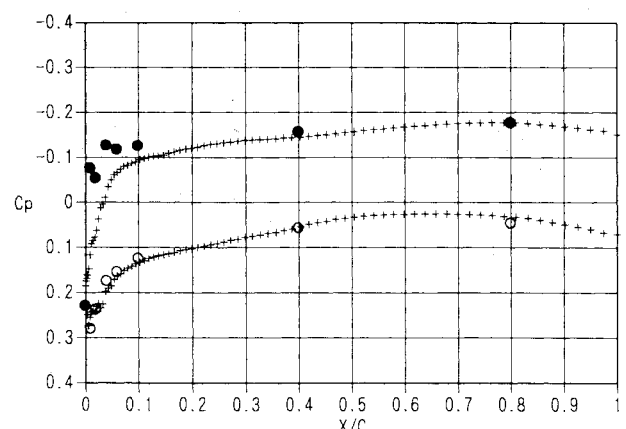


図 13-2.  $M=2.0$   $\alpha=4.5$   $Y=0.175m$