

## No.8

## NAL突風風洞における曲がりスティングによる高迎角風洞試験

藤枝 郭俊 藤田 敏美 岩崎 昭人 高橋 侔 奥山 政広  
伊藤 婦美子 岩崎 和夫 鈴木 誠三(航空宇宙技術研究所)

A Try of High Angle of Attack Test by Model Mounting from a crooked Tail Sting in NAL Gust Wind Tunnel

Hirotoishi FUJIEDA, Toshimi FUJITA, Akihito IWASAKI, Hitoshi TAKAHASHI, Masahiro OKUYAMA,  
Fumiko ITOH, Kazuo IWASAKI, Seizo SUZUKI (National Aerospace Laboratory)

## 概 要

航技研突風風洞において、VTOL機や失速迎角の大きい試験模型など、高迎角までの空力特性を把握するための試験を行なう簡便な方法として、曲がりスティングと6自由度を有するロボットを利用した模型支持法の採用を試みた。今回は本方式による最初の試験として、ALFLEX16%模型を用いて設定迎角の可能な範囲や模型支持装置としての強度、剛性など安全上の確認とともに、本支持装置の試験模型の空力特性への影響を把握するために縦3分力測定とベース圧測定試験を行なった。空力特性への影響の程度を知る目安として、本試験で得られた結果を、別途実施された一般的な試験迎角範囲で使用される真っ直ぐなスティングによる同一模型の試験結果と比較検討した。ここでは、その概要について報告する。

## 2. 試験

〔使用風洞〕航技研の突風風洞と称する風洞<sup>1)</sup>で、測定部に固定壁カート(測定断面: 2 x 2 mの正方形、長さ: 4 m)を用い、一般的な閉鎖型の低速風洞として使用した。

〔模型及び模型支持装置〕図1に試験に用いたALFLEX16%模型の3面図を示す。図では脚及びボディフラップを装着した状態を示しているが、今回は脚、ボディフラップとも取り外した状態で試験を行なった。

本試験、即ち高迎角用のために製作した曲がりスティングの概要を図2に示す。このスティングは、スティングの中間よりやや後方で折り曲げられる様になっており、この曲がり角度を幾つか選択することが出来る。今回の試験では、このスティングの曲がり角を45度に設定し(以下、曲がりスティングと称す)、産業用ロボットと組み合わせ模型支持装置とした。本模型支持装置により風洞内に設定された模型の設定状態を写真1に示す。曲がりスティングで模型を支持した状態を図3(a)に、比較のため一般的に用いる真っ直ぐなスティング(以下、一般用スティングと称す)で同じ模型を支持した状態を同図(b)に示した。なお、産業用ロボット及び同ロボットを用いた風洞模型支持システムの詳細は文献2を参照されたい。

〔試験内容〕試験は風速  $V = 40 \text{ m/s}$  ( $Re = 13.8 \times 10^5$ : 平均空力翼弦基準)と  $V = 50 \text{ m/s}$  ( $Re = 17.3 \times 10^5$ : 平均空力翼弦基準)で実施し、測定は内挿天秤による縦の3分力測定と模型胴体後部のベース圧と、参考のためにラダー後縁部の圧力測定を行なった(図4参照)。

模型迎角  $\alpha$  の設定範囲は、 $V = 40 \text{ m/s}$  の場合(最大試験迎角:  $\alpha_{\max} \approx 84^\circ$ )に比較し、 $V = 50 \text{ m/s}$  の場合( $\alpha_{\max} \approx 50^\circ$ )が小さくなっている(図5参照)。これは目視観察による模型の振動等から安全上迎角の小さいところで試験を中止したためである。

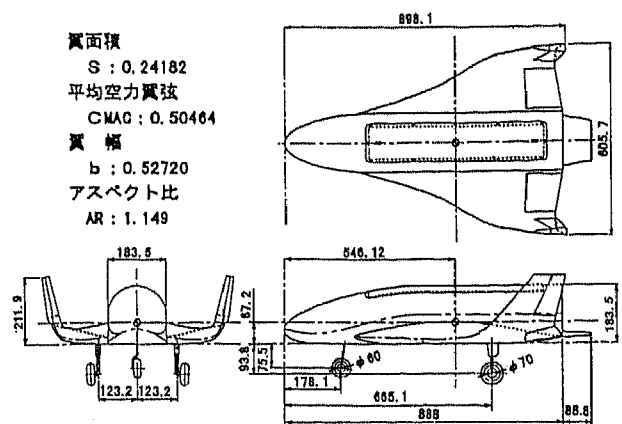


図1 ALFLEX16%模型概要

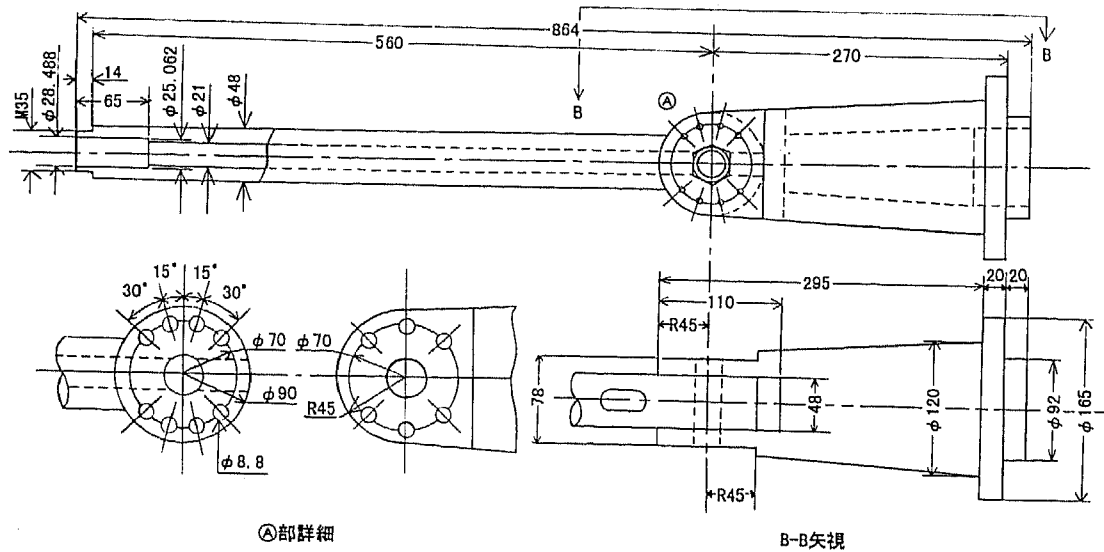
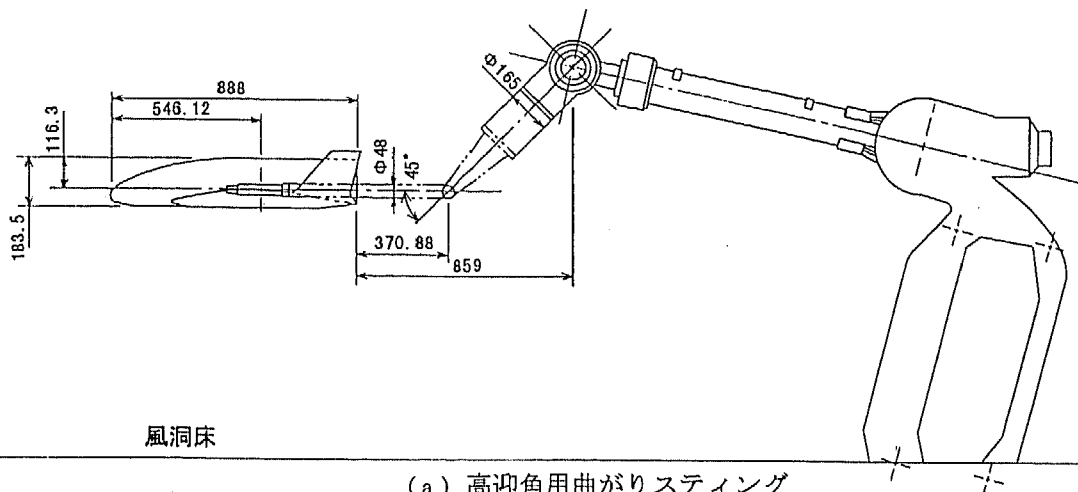


図2 高迎角用曲がりスティング

風洞天井



風洞天井

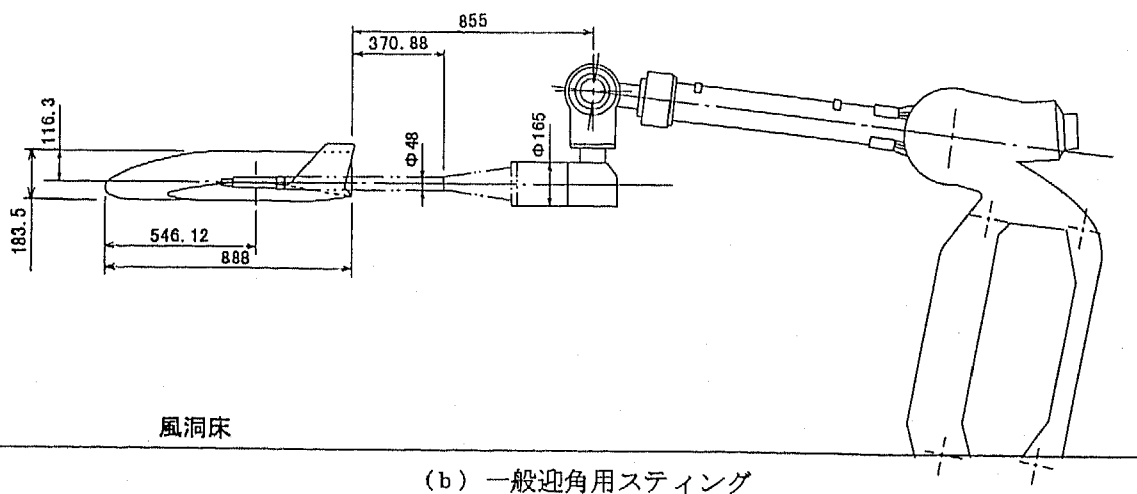


図3 模型の支持装置への取付状況概要

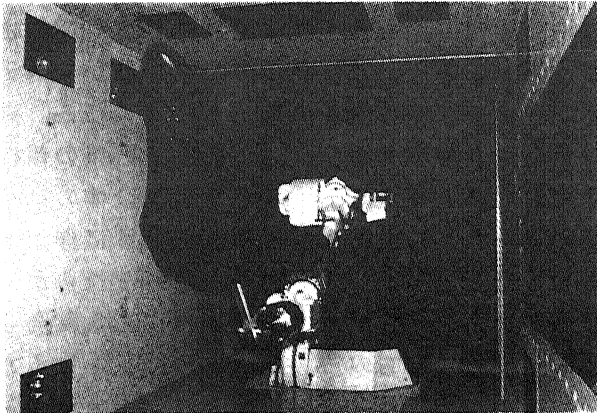


写真1 風洞内にセットされた模型の状況  
(曲がりスティングの場合)

### 3. 結果の検討

#### 3. 1 曲がりスティンの場合の縦3分力特性

図5に風速  $V = 40\text{m/s}$  と  $V = 50\text{m/s}$  の場合の縦3分力特性を示す。図中の修正済みは閉塞効果修正(模型閉塞効果と伴流閉塞効果)と気流境界の修正を行なった値である。閉塞効果修正法は進藤により提案された単純化した方法<sup>3)</sup>、即ち誘導抗力係数を除く測定抗力係数が全閉塞効果(模型閉塞効果と伴流閉塞効果)の影響を表しているという仮定の基に得られた修正法を採用した。各修正式を以下に示す。

$$\varepsilon_T = (S/C) [C_D - C_L^2 \{ (1/\pi A) - \delta(S/C) \}]$$

$$\alpha_c = \alpha + \delta(S/C)C_L \quad \text{rad}$$

$$C_{Lc} = C_L / (1 + \varepsilon_T)^2$$

$$C_{Dc} = C_D / (1 + \varepsilon_T)^2 + \delta(S/C)C_L^2$$

$$C_{mc} = C_m / (1 + \varepsilon_T)^2$$

但し  $\varepsilon_T$ : 全閉塞効果修正係数

$\delta = 0.14$ : 気流境界による吹きろし  
修正係数

$S/C = 0.060455$ : 阻塞比

( $S$ : 翼面積、 $C$ : 測定部断面積)

$A$ : 翼のアスペクト比

$\alpha$ : 迎角、 $C_L$ : 揚力、 $C_D$ : 抗力

$C_m$ : 縦揺れモーメント

上記各値の添え字  $c$  無しは無修正測定値を、  
添え字  $c$  付は修正された値を表す。

図5からALFLEX模型の機体が完全に失速する迎角は  $\alpha \approx 50^\circ$  と非常に大きいことが分かる。また、上式から得られた  $\alpha$  に対する  $\varepsilon_T$  の変化(図6)を見ると、風速により若干ずれはあるが  $\varepsilon_T$  は  $\alpha \approx 22^\circ$  前後から急激に大きくなり、 $\alpha$

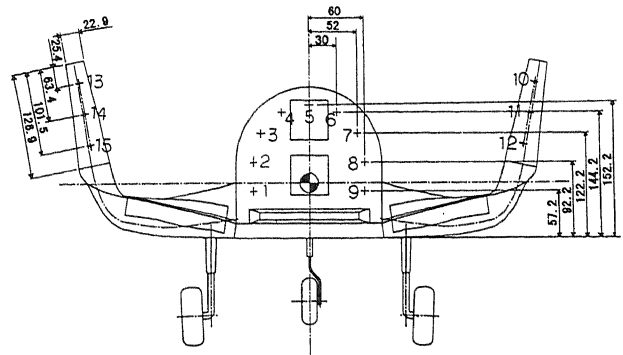


図4 圧力測定位置

に対し直線的に増加する。これは  $\alpha \approx 22^\circ$  以後において模型の剥離が始まり、伴流による閉塞効果が増大するためと考えられる。

#### 3. 2 曲がりスティングと一般用スティングの場合の空力特性の比較

以下では、曲がりスティングの場合と一般用スティングの場合の測定結果を区別するために、各値に各々添え字(曲)と(一)を付して呼ぶ。例えば揚力  $C_L$  のとき、曲がりスティングの場合の値は  $C_L(\text{曲})$ 、一般用スティングの場合の値は  $C_L(\text{一})$  と表す。

この曲がりスティングの結果を別途実施された一般用スティングによる結果と比較して表したのが図7である。いずれの結果も上述の修正を行なっている。また図7以下、両スティングの結果を比較する図では、一般用スティングの場合の試験迎角範囲が狭いため曲がりスティングの結果は比較する迎角に見合う範囲を適宜示している。以下、3分力について両スティングの場合を比較してみる。

$C_L$  は、その揚力傾斜  $C_{L\alpha} (-10^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ)$  間の直線近似による値)が一般用スティングの場合 ( $C_{L\alpha}(\text{一}) = 0.0392$ ) に比較し、曲がりスティングの場合 ( $C_{L\alpha}(\text{曲}) = 0.0398$ ) の方がやや大きい。この迎角間での両者の  $C_L$  値の差  $\Delta C_L (C_L(\text{一}) - C_L(\text{曲}))$  は約  $0.053 (\alpha = -10^\circ)$  から  $0.021 (\alpha = 10^\circ)$  と、 $\alpha$  の増大 ( $\alpha = -10^\circ \rightarrow \alpha = 10^\circ$ ) とともに減少し、 $\alpha \approx 20^\circ$  でその差はほぼ無くなる。しかし、 $\alpha > 20^\circ$  では  $V = 40\text{m/s}$  の場合は両者の特性が比較的良く一致しているが、 $V = 50\text{m/s}$  の場合は  $\alpha > 30^\circ$  で差が見られる。

$C_D$  は、 $\alpha < 20^\circ$  で常に  $C_D(\text{曲}) < C_D(\text{一})$  で、その両者の差は、最小抵抗値を示す付近 ( $\alpha =$

4°前後)で最も大きい。

$C_m$ は、 $\alpha < 20^\circ$ では $V$ にかかわらず $C_m(\text{曲}) > C_m(\text{一})$ 、即ち、曲がりりスティングの方が一般用スティングの場合より頭上げ側に大きい。その両者の $C_m$ 値の差は $\alpha = -10^\circ$ 付近では小さいが、 $\alpha \approx 13^\circ$ 前後迄は $\alpha$ の増大( $-10^\circ \rightarrow \alpha = 13^\circ$ )とともに増大し、以後ほぼ一定である。 $\alpha > 20^\circ$ では、 $\alpha$ に対する $C_m$ の変化の全体的な傾向は一致しているが、両者の $C_m$ 値の差は $V$ により差が見られる。

両スティングの場合の $\varepsilon_T$ (全閉塞効果修正係数) $\sim \alpha$ を図8に示す。この結果をみると、両者とも $\varepsilon_T$ の $\alpha$ に対する変化の全体的な傾向は概ね似ているが、迎角範囲 $|\alpha| \leq 10^\circ$ で、 $\alpha$ が $10^\circ$ から $-10^\circ$ に向かう程両者に明確な差が見られる。この迎角範囲では、前述の如く両スティングの力測定結果にも明確な差が表れている。この迎角範囲では全閉塞効果(模型閉塞効果+伴流閉塞効果) $\varepsilon_T$ は小さく、中でもその伴流による閉塞効果成分は模型の剥離状況を考慮すれば極めて小さいと考えて良い。従って、両者の $\varepsilon_T$ の差は、模型閉塞効果成分に差が生じていると推察される。この原因としては、模型支持装置としてのスティングとロボット・アームの形状が両者の場合で異なることによる影響の相違が考えられる。一方、伴流閉塞効果の影響はスティングの相違より、むしろ風速 $V$ により差が生じている。 $\varepsilon_T$ が急増する迎角 $\alpha$ が $V = 40 \text{ m/s}$ より $V = 50 \text{ m/s}$ の方が約 $2 \sim 3^\circ$ 大きく、 $\alpha = 37^\circ$ 付近で両風速における $\varepsilon_T$ 値がほぼ一致する。これはレイノルズ効果により、剥離開始が $V = 50 \text{ m/s}$ の方が遅く始まることによるためと考える。

次に、両スティングのベース圧の測定結果について検討を試みる。ベース圧の測定結果を図9に示す。測定値 $C_p$ は下式により無次元化したもので、模型後部の測定点の平均値である。

$$C_p = (P_i - P_\infty) / q_\infty$$

但し、 $P_i$ : 測定点のベース圧

$P_\infty$ : 一様流の静圧

$q_\infty$ : 一様流の動圧

図9に見られるように、ベース圧は両スティングの場合とも測定範囲内で常に負圧( $C_p < 0$ )であるが、負圧の値は曲がりりスティングの場合の方が小さい( $|C_p(\text{曲})| < |C_p(\text{一})|$ )。このベ

ース圧による模型後部面に働く力の抵抗成分は、 $\alpha$ の正負にかかわらず機体全体の抵抗を増加させる方向に働く。故に負圧の小さい曲がりりスティングの方が機体全体の抵抗も小さくなる。両スティングの場合の $C_p$ 、 $C_D$ の測定結果の傾向は定性的に一致する。図10は、模型全体の抵抗値の差とベース圧により模型後部全体に作用する力の抵抗分(ベース抵抗)の差及びそれらが一般用スティングの場合の全抵抗に占める割合を比較して示したものである。この結果を見ると、迎角 $\alpha$ が $-10^\circ < \alpha < 10^\circ$ 間では、両スティングのベース抵抗の差は全抵抗値(一般用スティング)の約7%以下に対し、全抵抗値の両者の差は20%を超え、最小抵抗値付近( $\alpha \approx 5^\circ$ 弱)での全抵抗値の差は33%強となり、定量的には一致しない。一方、ベース圧による揚力成分は $C_p \sin \alpha$ に比例するので、 $\alpha < 0^\circ$ では上向きの力を、 $\alpha > 0^\circ$ では下向きの力を発生する。故に $C_p$ が大きいほど揚力傾斜 $C_{L\alpha}$ を小さくする方向に作用するが、迎角の小さい範囲での $C_p$ の差による揚力成分は非常に小さい値( $C_L < \text{約} 0.0005$ 、at  $|\alpha| \leq 10^\circ$ )となり、模型全体の揚力特性への影響は極めて小さい。しかるに同じ迎角範囲における模型全体の揚力係数 $C_L$ に関する両者の差 $\Delta C_L (C_L(\text{一}) - C_L(\text{曲}))$ は、 $\alpha$ の正負にかかわらず常に正( $\Delta C_L > 0$ )であり、またその値 $\Delta C_L$ も約 $0.053 \rightarrow 0.021 (\alpha = -10^\circ \rightarrow 10^\circ)$ と一致しない。

図11にラダー後縁部の圧力測定結果を示す。 $\alpha$ に対する $C_p$ の変化は全体的に比較的良く一致している。しかし、測定値にややバラツキが見られ、両スティングによる $C_p$ の差など、その特性の詳細については、今回の試験結果のみでは十分把握出来なかった。

以上の結果、曲がりりスティングと一般的なスティングの空力特性の間には、特に低迎角において大きな差が生じた。この特性の差は模型後部のベース圧に基づく力を考慮するだけでは定量的には一致せず、定性的にも十分説明し得ないことが分かった。また、全閉塞効果係数 $\varepsilon_T$ の特性から、低迎角での両者の模型閉塞効果成分に差が有ることも推定できた。これらのことから、スティングとロボット・アームを含めた模型支持装置の形状が、模型周りの流れの広い範囲に影響を及ぼしていることが示唆された。

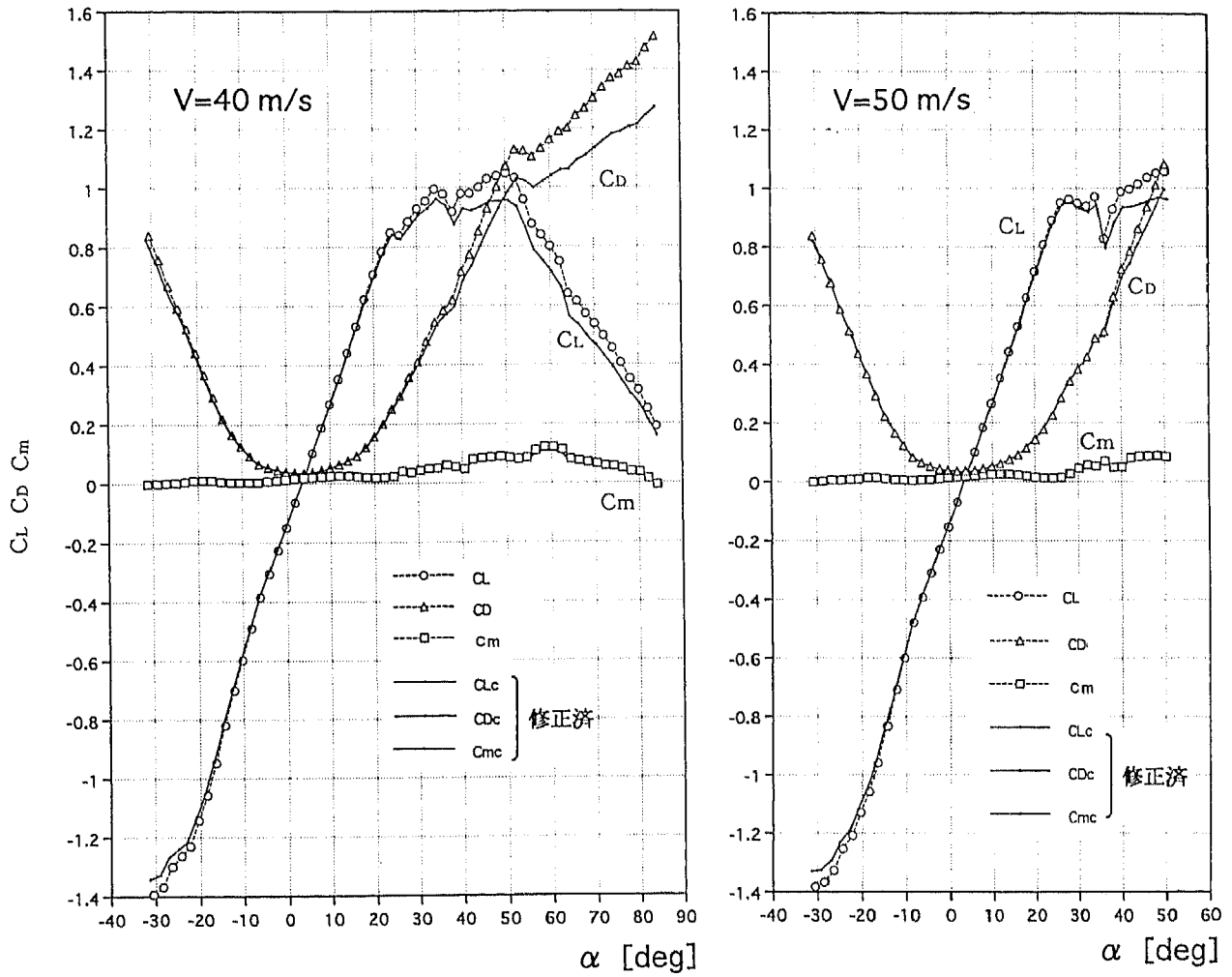


図5 曲がりスティングの場合の縦3分力

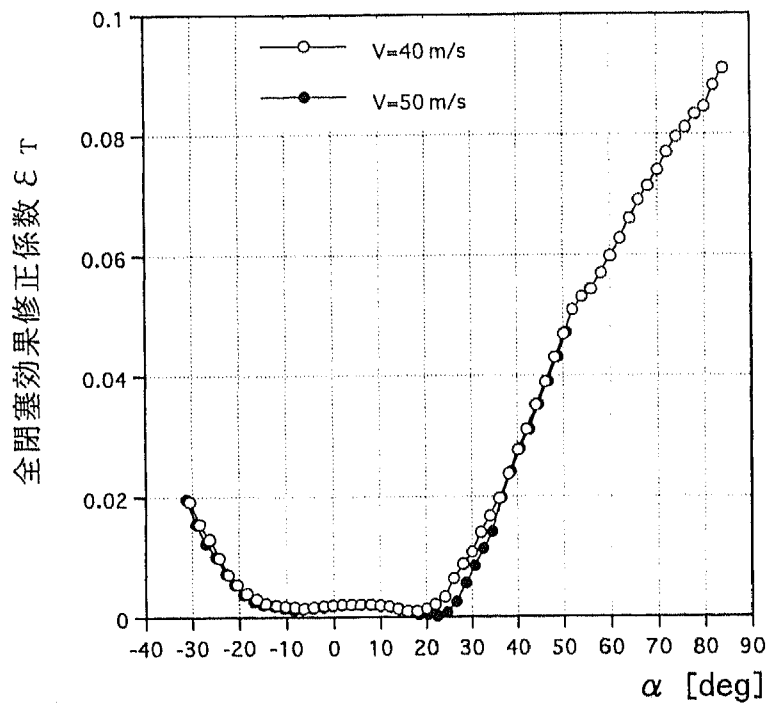


図6 曲がりスティングの場合の全閉塞効果

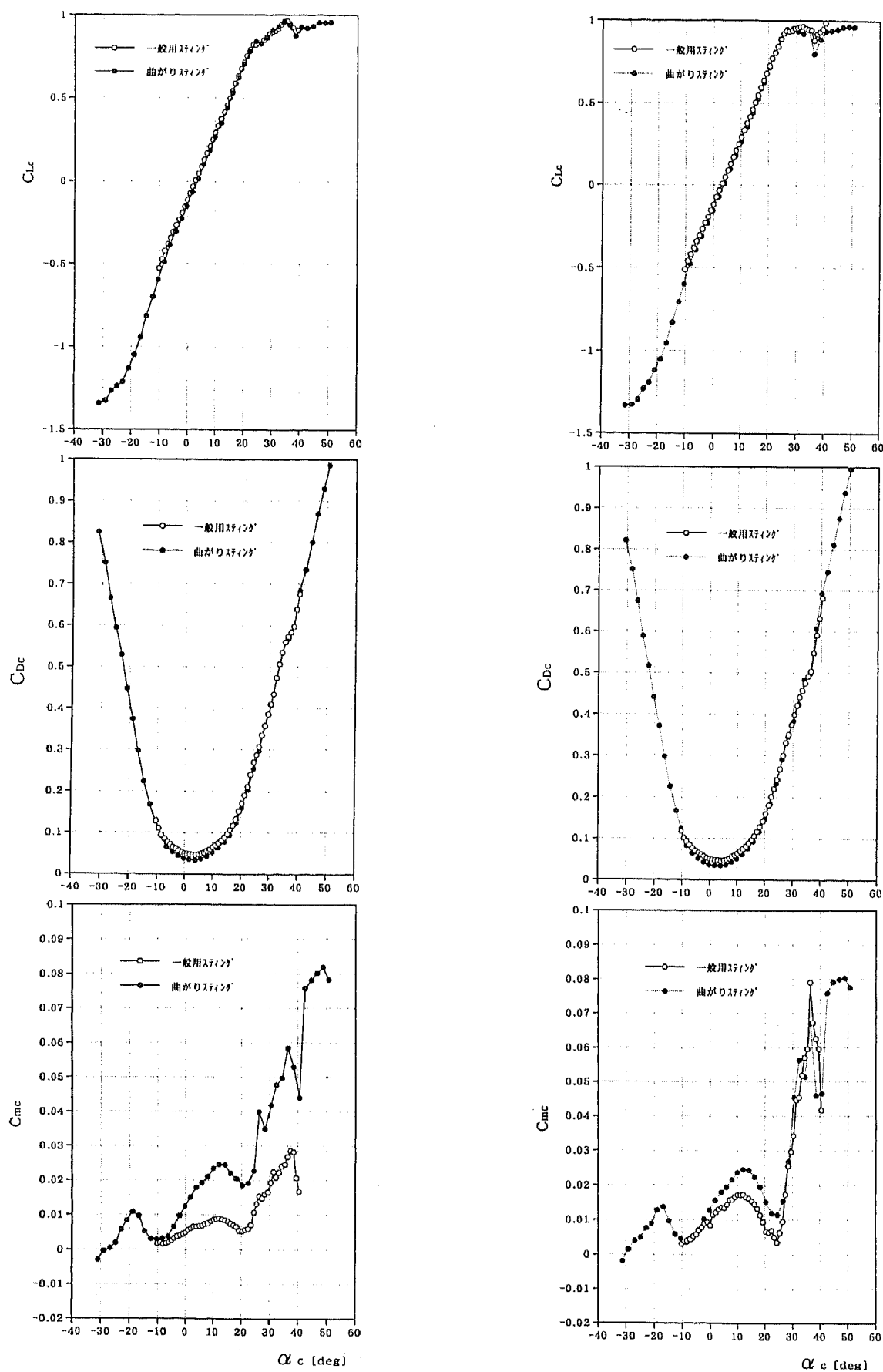
(a)  $V = 40 \text{ m/s}$ の場合(b)  $V = 50 \text{ m/s}$ の場合

図7 スティングの相違による縦3分力の比較

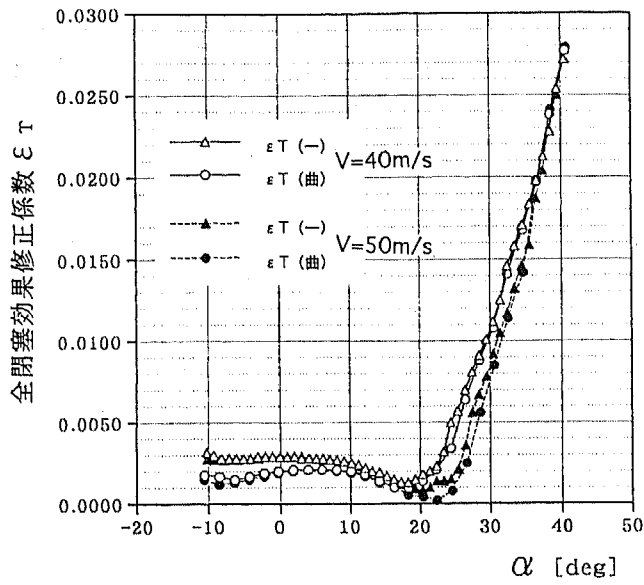
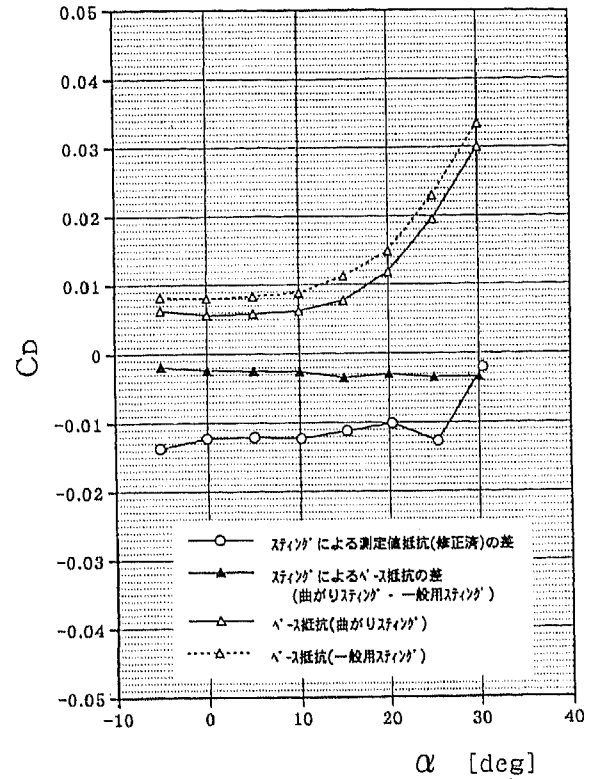


図8 全閉塞効果の比較



a) 全抵抗の差とベース抵抗の比較

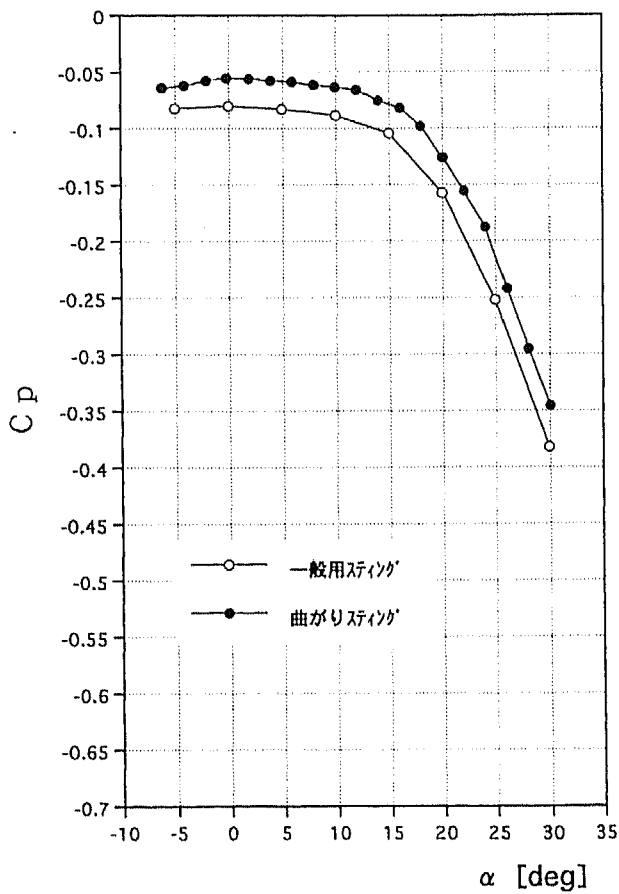
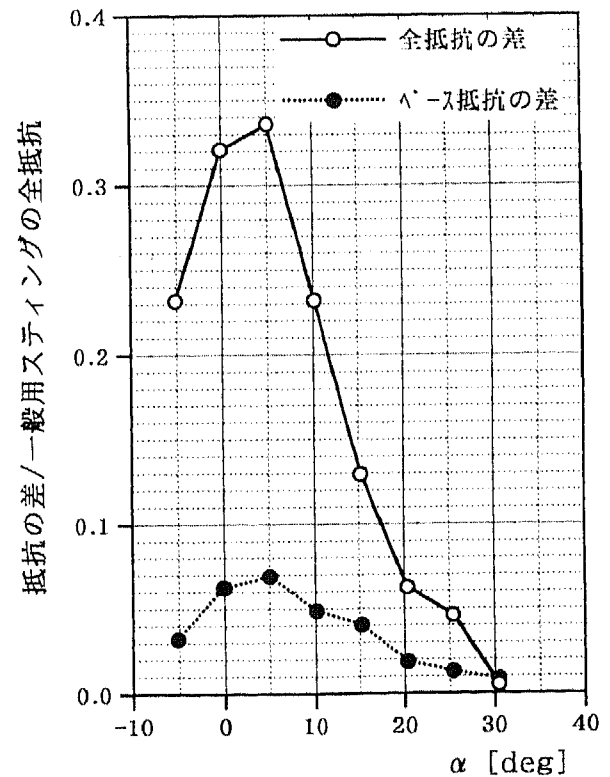


図9 ベース圧の比較



抵抗の差 = (曲がりスティングの場合) - (一般用スティングの場合)

b) 抵抗の差が全抵抗に占める割合

図10 スティングの違いによる抵抗の比較  
( $V = 40\text{m/s}$ )

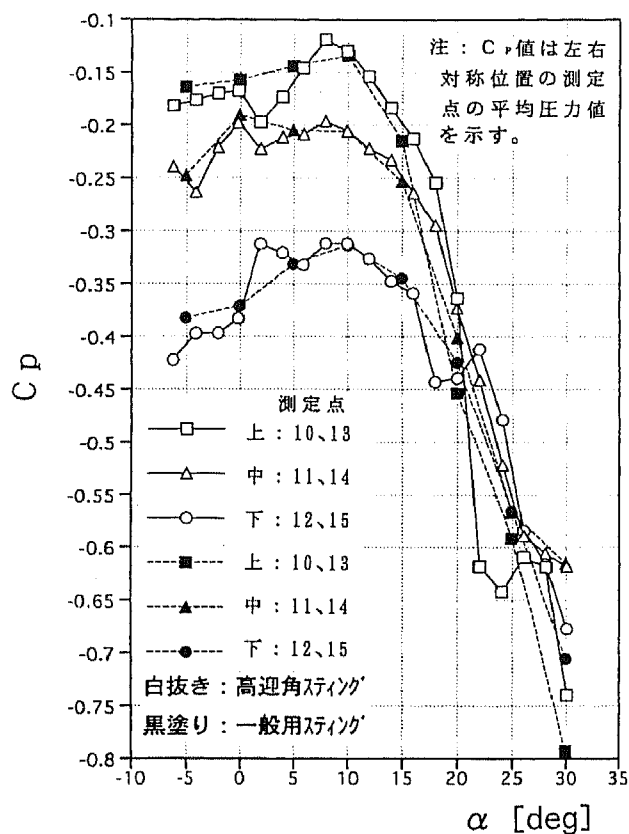


図11 ラダー後縁部圧力の比較( $V = 40\text{m/s}$ )

#### 4. まとめ

曲がりスティングとロボットを利用した模型支持装置による高迎角風洞試験は、模型位置を常に風洞中心に位置し、かつ広い迎角範囲の姿勢を簡単にとることができ、非常に有効な支持装置であることが確かめられた。しかし、今回

製作した曲がりスティングと一般的な真っ直ぐなスティングを使用した風洞試験結果の比較から、低迎角範囲で両者の空力特性に大きな差が見られ、スティングの影響が大きいことが確認された。この影響の原因には、スティングの太さ、長さ及びその形状などが考えられる。特に本支持装置の場合、スティングの曲がり角度と模型設定迎角との関係により、ロボット・アームのヒンジ、3ヶ所の角度が変化する。即ち、スティングの曲がり角によりロボット・アームを含む支持装置としての形状が変化し、そのことが模型周りの流れ場の広い範囲に影響を与え、空力特性に差を生じさせることが示唆された。従って、今後は本支持装置による風洞試験におけるスティングの影響の詳細と適切なスティング形状の把握に努めるとともに、本来の目的である高迎角での測定値の修正法について検討する予定である。

#### 5. 参考文献

- 1) 広末健一、他：航空宇宙技術研究所突風風洞の計画と整備試験、航空宇宙技術研究所報告、NAL TR-335、1973年9月
- 2) 藤田敏美、他：産業用ロボットを用いた風洞模型支持システム、航空宇宙技術研究所資料、NAL TM-666、1994年6月
- 3) 進藤章二朗：低速風洞実験法、コロナ社、1992、pp. 70-100及び正誤表