

## No.12

## 07HOPE 遷音速対応風洞試験

青木竹夫、鈴木弘一、中村正剛（航空宇宙技術研究所）  
若松逸雄、中野英一郎（宇宙開発事業団）

The Second Estimations of Wind Tunnel Uncertainties for HOPE

Takeo AOKI, Koichi SUZUKI, Seigou NAKAMURA (NAL)  
Itsuo WAKAMATSU, Eiichiro NAKANO (NASDA)

## 概 要

宇宙往還技術試験機の空力係数誤差を設定する作業の一環として06HOPE模型による対応風洞試験に続き、07HOPE模型を使用して同じ方法で対応風洞試験を行った。06及び07の対応風洞試験結果は $C_n \beta$ の差のピークでは3倍異なったが、この他の差は、ほぼ同じレベル・同じ傾向を示した。また、今回は新たな別の試験結果も加えて、試験結果間の差の縮小の可能性についても議論する。

## 1. はじめに

宇宙往還技術試験機（HOPE-X）の設計用空力係数誤差（スペースシャトルの設計ではトレランスと呼ばれた。）を設定する作業の一環として、第55回風洞研究会議で06HOPE模型を用いた対応風洞試験の結果を報告した。今回もこれと同じ作業の流れであるが、異なる点は同一模型、天秤、スティングを使用する対応風洞試験結果に対して、模型縮尺比、天秤、模型支持方法が異なる3番目の風洞試験結果が加えられる点である。

本報告ではまず風洞試験について述べ、06HOPE試験結果間の差との比較を行う。次に3番目の風洞試験結果を加えたときの結果間の差を示し、トレランスとの比較をする。最後に試験結果間の差の縮小の可能性について議論する。

## 2. 風洞試験

表1に07HOPE模型（図1）で行った風洞試験の条件の比較を示す。三つの試験に記号をつけ、それぞれKHI, NAL1, NAL2ま

たは $k, n_1, n_2$ とする。KHIとNAL2が縮尺比2.25%の同一模型、同一天秤及びスティングを使用した試験である。これらの試験のスティングはオフセット角10度をもった曲がりスティングになっている（図2）。ここまでは前回と全く同じである。ただし模型の形状と縮尺比は異なる。表2に今回の模型のデータ処理基準値を示す。一方、NAL1では縮尺比5.5%の別個の模型が使われ、天秤及びスティングがKHI並びにNAL2と異なっている。NAL1ではスティングは直スティングである。各試験のマッハ数と縦基準長を用いたレイノルズ数の関係を図3に示す。各試験はレイノルズ数の大きい方からNAL1, KHI, NAL2の順に並び、KHIとNAL2のレイノルズ数の違いが大きくなっている。尚、NAL1の試験では高マッハ数、高迎角側で風洞運転が苦しくなるため、マッハ数上限を1.2までとしている。ちなみにこの試験の模型阻塞比は表1に示すように約1.2%である。

三つの試験結果の一例を図4に示す。い

ずれのデータもスティングのたわみ補正を行い、壁干渉補正は無しである。横・方向特性は、機体軸系の空力係数について横滑り角5度と0度の差分をとり、横滑り角で割って微係数のかたちで示してある。KHI データを中心にシャトルの設計に使われたトレランスの幅も記入してある。各試験データ間の違いが迎角によってトレランスの幅を越える様子がわかるが、更に見通しを良くするために、前回と同じ方法で風洞試験結果間の違いを定量化し、マッハ数に対する傾向を調べる。定量化は図5に示すノミナル迎角をはさむ±5度の迎角範囲に入る試験結果間の差に対して rms (自乗平均平方根) を求める方法である。

### 3. 06HOPE 試験結果間の差との比較

最初に KHI と NAL2 の試験に対して、定量化を行った結果を図6に示す。07HOPE 試験結果間の差の他に、前回の対応風洞試験の結果である 06HOPE (06DA) 試験結果間の差<sup>1)</sup>も示す。07HOPE の差を 06DA の差と比較すると、 $C_{n_{\beta}}$  の差ではピークの大きさが約3倍大きくなっているものの、この他の差は、ほぼ同じレベル・同じ傾向を示していると言える。両者では模型形状が異なるにもかかわらず、特に  $C_L$  の差は良く似ている。また、図6に添字 err で 07HOPE の空力係数の形に換算した天秤誤差を書き入れた。(  $C_D$  の天秤誤差は測定を行った最大迎角 25度で評価した。) 前回の 06DA 模型は縮尺比 2.5% であり、今回の 07 模型はこれよりも1割小さいため実空気力も2割小さくなる。従って、天秤精度が相対的に2割下がったことになるが、図からわかるようにマッハ数1前後に天秤誤差より大きな差が残る。

### 4. 三つの試験間の違い

表1に示した NAL1 の試験データを加えて更に検討をすすめる。図7は NAL1 と

NAL2 の差を調べたもので、KHI と NAL2 の差、シャトルのトレランス (3 $\sigma$ として扱われている。) の3分の1 (1 $\sigma$ ) も描いてある。NAL1 と NAL2 では風洞だけが同じで、他の要素 (模型、天秤、スティング) がいずれも異なっており、反対に、KHI と NAL2 では風洞以外の要素は同一であるため、図7においては風洞とその他の要素を対比させている。両者を比較すると、前者 (実線、n1-n2) は  $C_L, C_D, C_{Y_{\beta}}$  の差において明らかに後者 (破線、n2-k) を上回っているのがわかる。これは風洞を同一とするよりも、他の要素を同一にする方が、風洞試験結果間の差は小さくなることを示している。シャトルのトレランスとの大小関係は n1-n2 がトレランスより全体的に大きく、n2-k が同程度かピーク部分でトレランスを越えている。

### 5. 試験結果間の差の縮小の可能性

図7に示された差はより小さい方が望ましいため、差の縮小の可能性について考える。図8は図7における  $C_D$  の差を前方部抗力係数  $C_{Df}$  の差と底面抗力係数  $C_{Dbase}$  の差に分解して比較したものである。n1-n2 と n2-k は  $C_{Df}$  の差ではほぼ同じであるが、 $C_{Dbase}$  の差の方は違いが大きい。NAL1 と NAL2 において異なる要素 (模型、天秤、スティング) のうち、スティングの違い---すなわち支持干渉の違いが大きく影響していることが考えられる。これの傍証として図9に1989年に川崎重工業 (株) 遷音速風洞で行われた 63HOPE 支持干渉試験<sup>2)</sup>の例をあげる。この試験のレイノルズ数は  $3.2 \sim 6.0 \times 10^6$  であり、模型は FY63 形状で縮尺比は 4% である。図に示した曲がりスティングは、本試験で用いたスティング (図2) と形状が異なっているが、曲がり/直スティングの違いによる影響を調べてみる。図10は前述の方法で定量化した曲

がり/直スティングの違いによる縦3分力の差である。添字“be”は“曲がりスティング”、“st”は“直スティング”を表す。この図からやはりマッハ数1前後で差が大きくなる傾向がうかがえるほか、各最大値は  $C_L, C_D, C_m$  の順に 0.0341, 0.0454, 0.0208 であり、図7における n1-n2 の最大値は 0.0287, 0.0201, 0.0108 が対応し、図10におけるいずれの最大値も図7の最大値を越えている。従って、本試験でも支持干渉の違いが影響している可能性がある。このため、次の風洞試験フェーズでは支持干渉の違いを調べる試験を考えている。その際、前に示したように模型、天秤、スティングを同一とした場合でも風洞が異なると差が生じるため、支持干渉の違いを正確に調べるためには風洞ごとに行う必要がある。

6. まとめ

(1) 07HOPE2.25%模型と 06HOPE2.5%模型を用いて航技研遷音速風洞と川崎重工業(株)遷音速風洞で対応風洞試験が行われた。これらの試験では同一模型、同一天秤、同一スティングが使用された。両対応風洞試験データ間の差を定量化して比較した。両者は  $C_n \beta$  の差ではピークの大きさが3倍異なったが、この他の差では、ほぼ

同じレベル・同じ傾向を示した。

(2) 07HOPE 対応風洞試験結果に対して別の07HOPE5.5%模型による試験結果を加え、風洞要素と他の要素(模型、天秤、スティング)にわけて議論した。今回の試験に関する限り、風洞を同一にするよりも他の要素を同一にする方が風洞試験結果間の差が小さくなることが示された。

(3) 他の要素が異なっている試験間の差については、支持干渉の違いが影響している可能性があり、63HOPE の試験結果がそれを裏付けている。

63HOPE 試験データの処理に関しては航空宇宙技術研究所 数理解析部 石塚只夫主任研究官の援助を受けた。

文献

- 1) 青木竹夫, 鈴木弘一, 細江信幸, 中村正剛, 松田昌三, 高野 純; HOPE 風試誤差の初期評価, 航空宇宙技術研究所資料 TM-704 (1996/11)
- 2) 伊藤 忠, 穂積弘一, 吉沢 昭, 河本 巖, 石塚只夫; HOPE 風洞試験データベースについて(その2), 航空宇宙技術研究所資料 TM-689 (1995/11)

記号	風洞	測定部断面	測定部壁	模型	阻塞比	天秤	模型支持方法
KHI 又は k	川崎重工業 (株) 遷音速風洞 (KHI TWT)	1m×1m	60度 斜孔壁	FY07形状 2.25%	約0.8%	KHI天秤	KHI10度アダプタ/ スティング (オフセット角10度の スティング)
NAL1 又は n1	航技研 遷音速風洞 (NAL TWT)	2m×2m	垂直 多孔壁	FY07形状 5.5%	約1.2%	NAL天秤	NAL 直スティング
NAL2 又は n2	航技研 遷音速風洞 (NAL TWT)	2m×2m	垂直 多孔壁	KHIと 同一模型	約0.2%	KHIと 同一天秤	KHIと同一 スティング

表1 07HOPE 遷音速風洞試験条件の比較

		実機	2.25%模型	5.5%模型
風洞試験			KHI,NAL2	NAL1
縮尺比 (%)			2.25	5.5
基準面積	$S_{ref} (m^2)$	65	0.032906	0.19663
縦基準長	c (m)	7.768	0.17478	0.42724
横基準長	b (m)	9.094	0.20462	0.50017
モーメント基準位置	X (m, 63.5% $L_b$ )	10.16	0.22860	0.55880
	Y (m)	0	0	0
	Z (m)	1.6	0.036000	0.088000
底面積 (ボディフラップ取付部を除く。)	$S_{base} (m^2)$	7.835	0.0039665	0.023701

表2 模型データ処理基準値

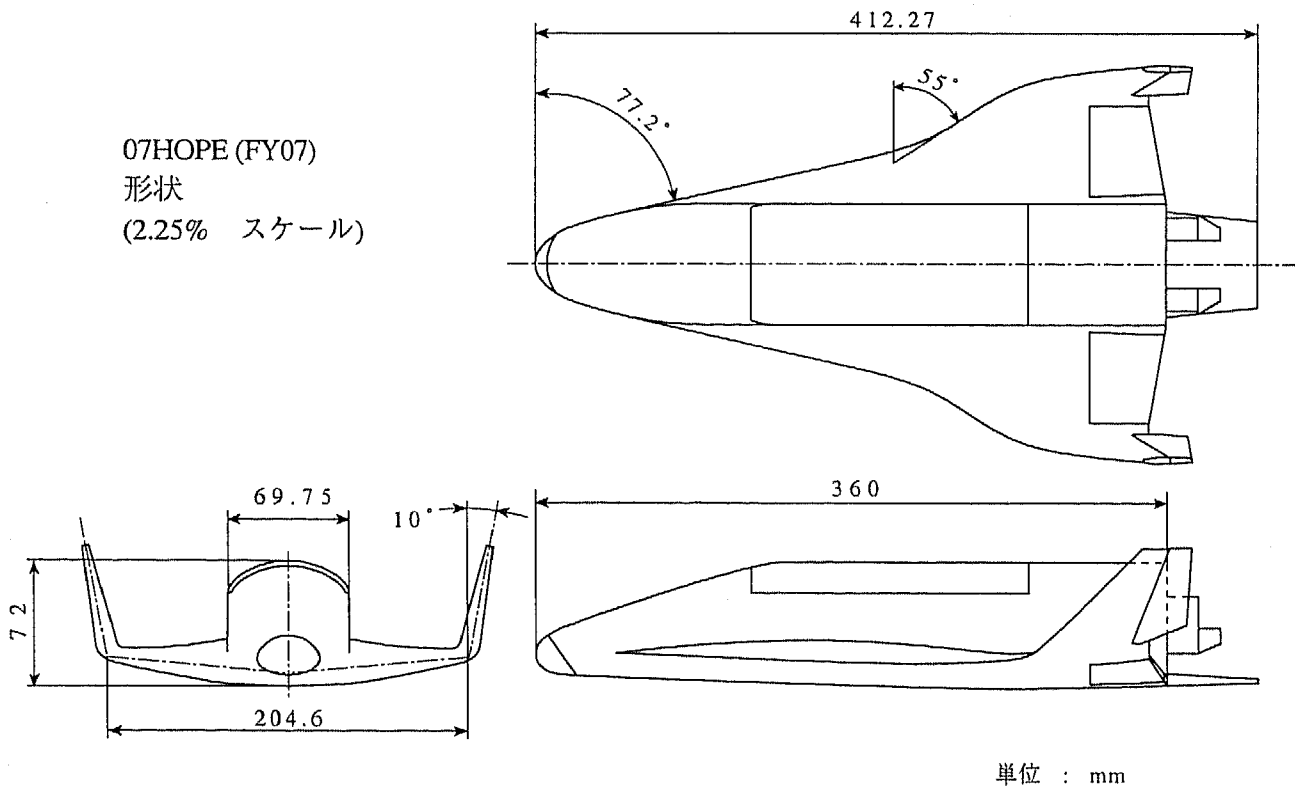


図1 07HOPE模型

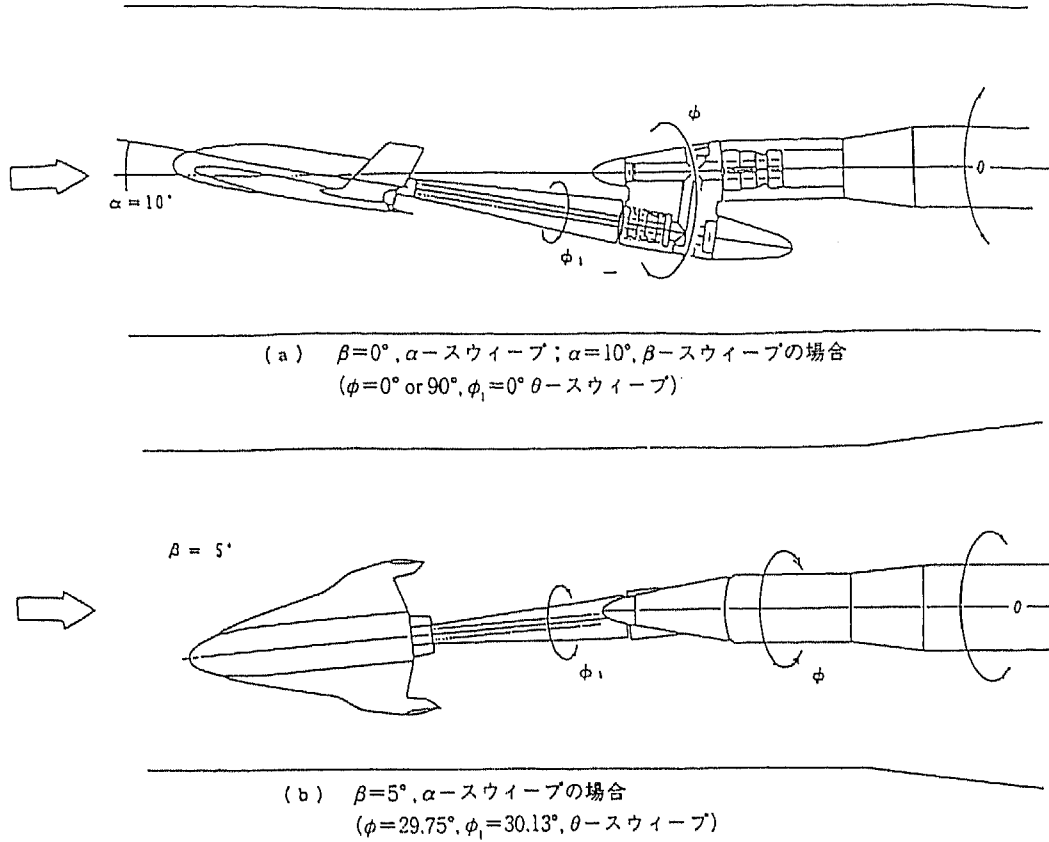


図2 スティング

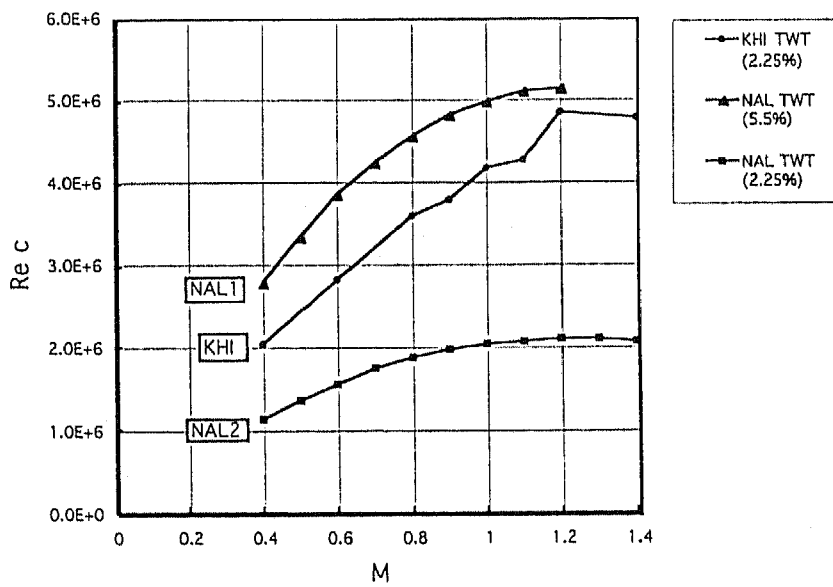


図3 風洞試験レイノルズ数の比較

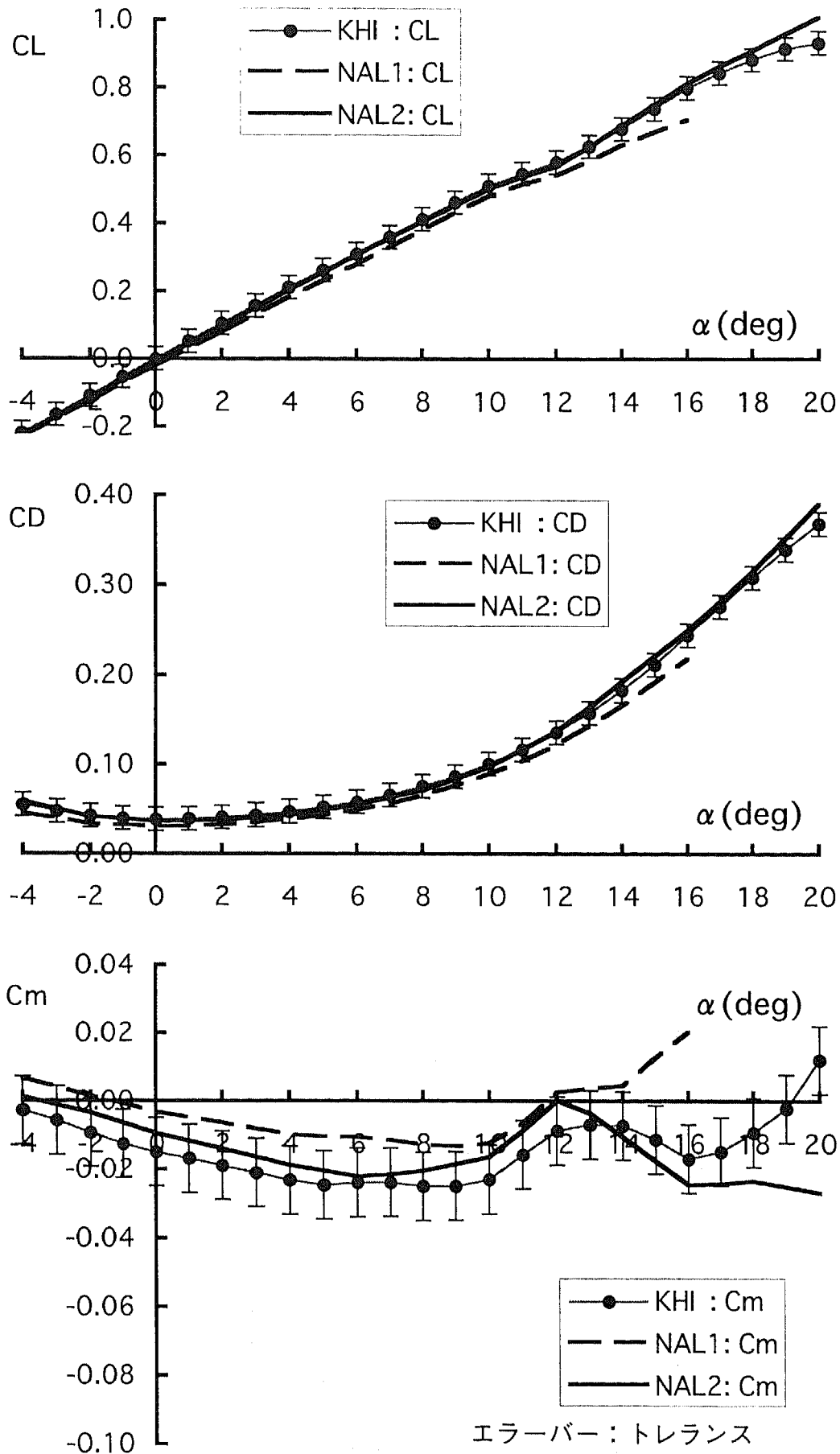


図4(a) 縦特性の比較(M=0.9)

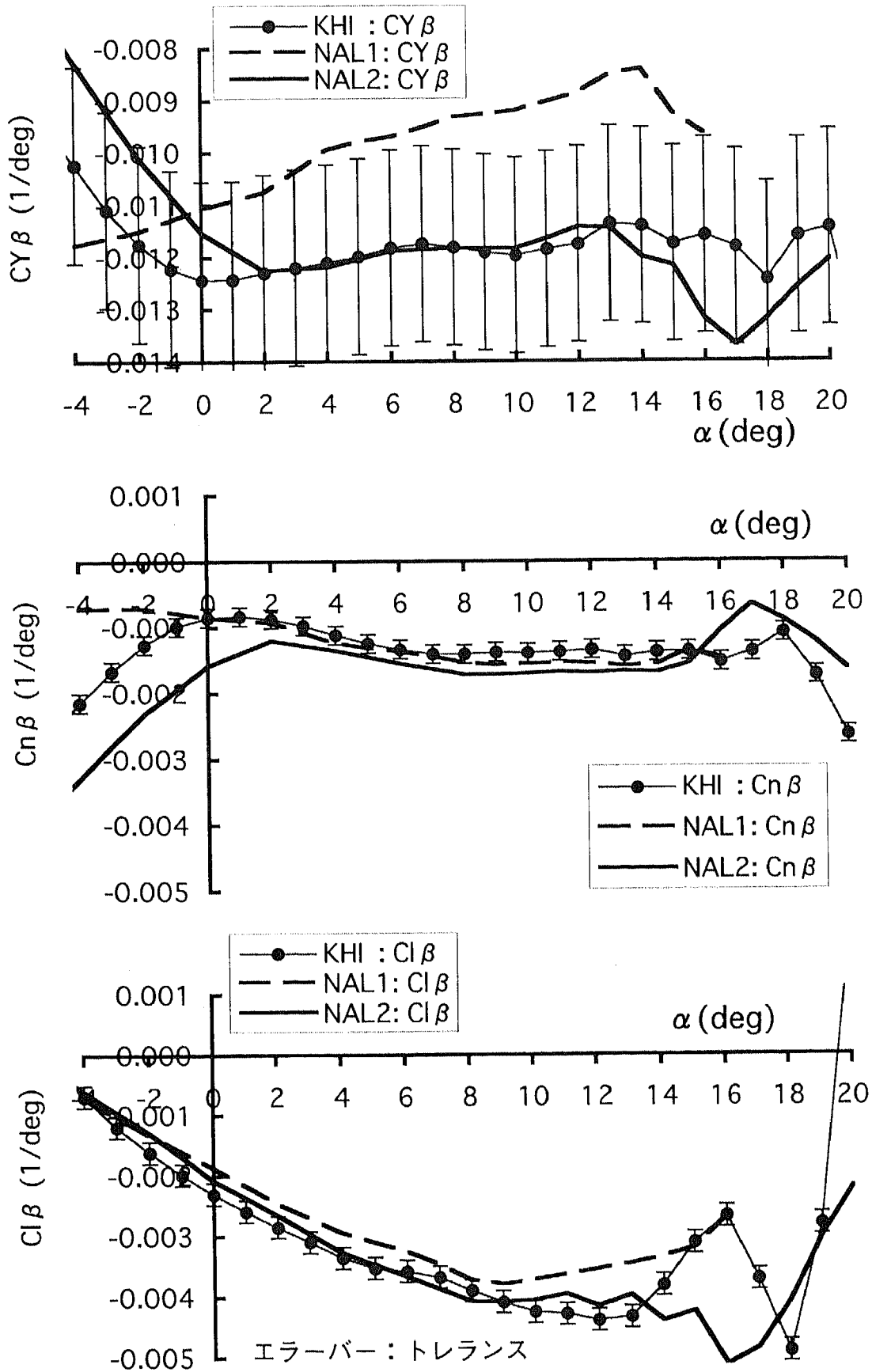


図4(b) 横方向特性の比較(M=0.9)

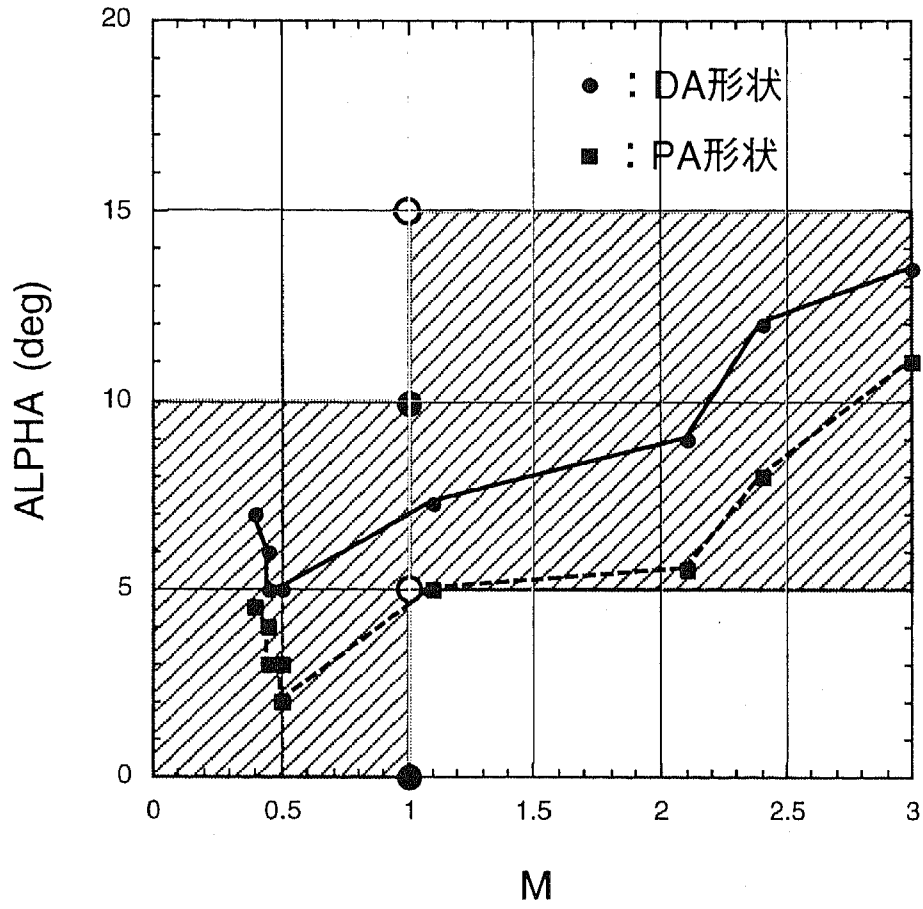


図5 試験機飛行時のノミナル迎角とrmsを計算するための迎角範囲



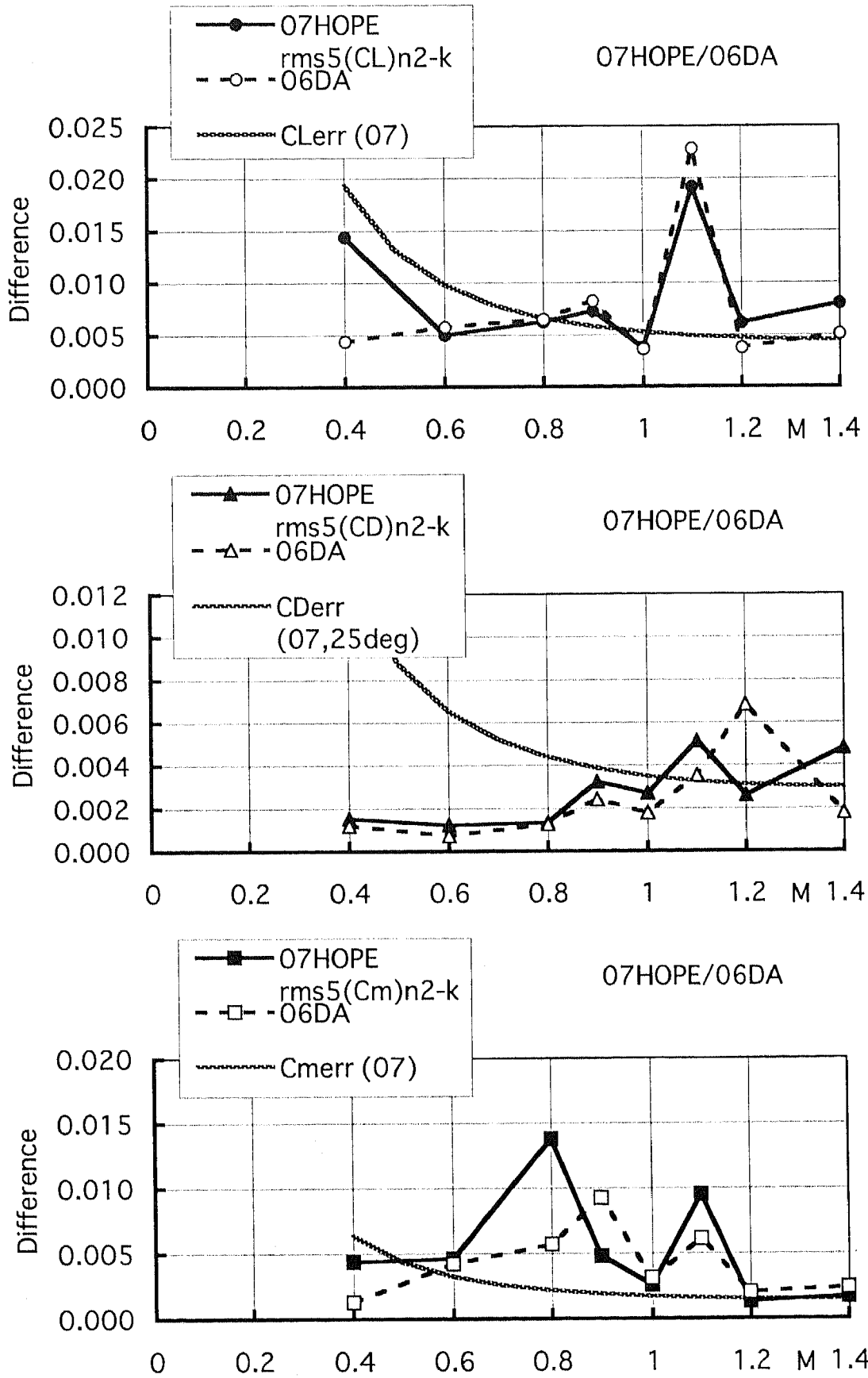


図6(a) 07/06縦特性試験結果間の差の比較

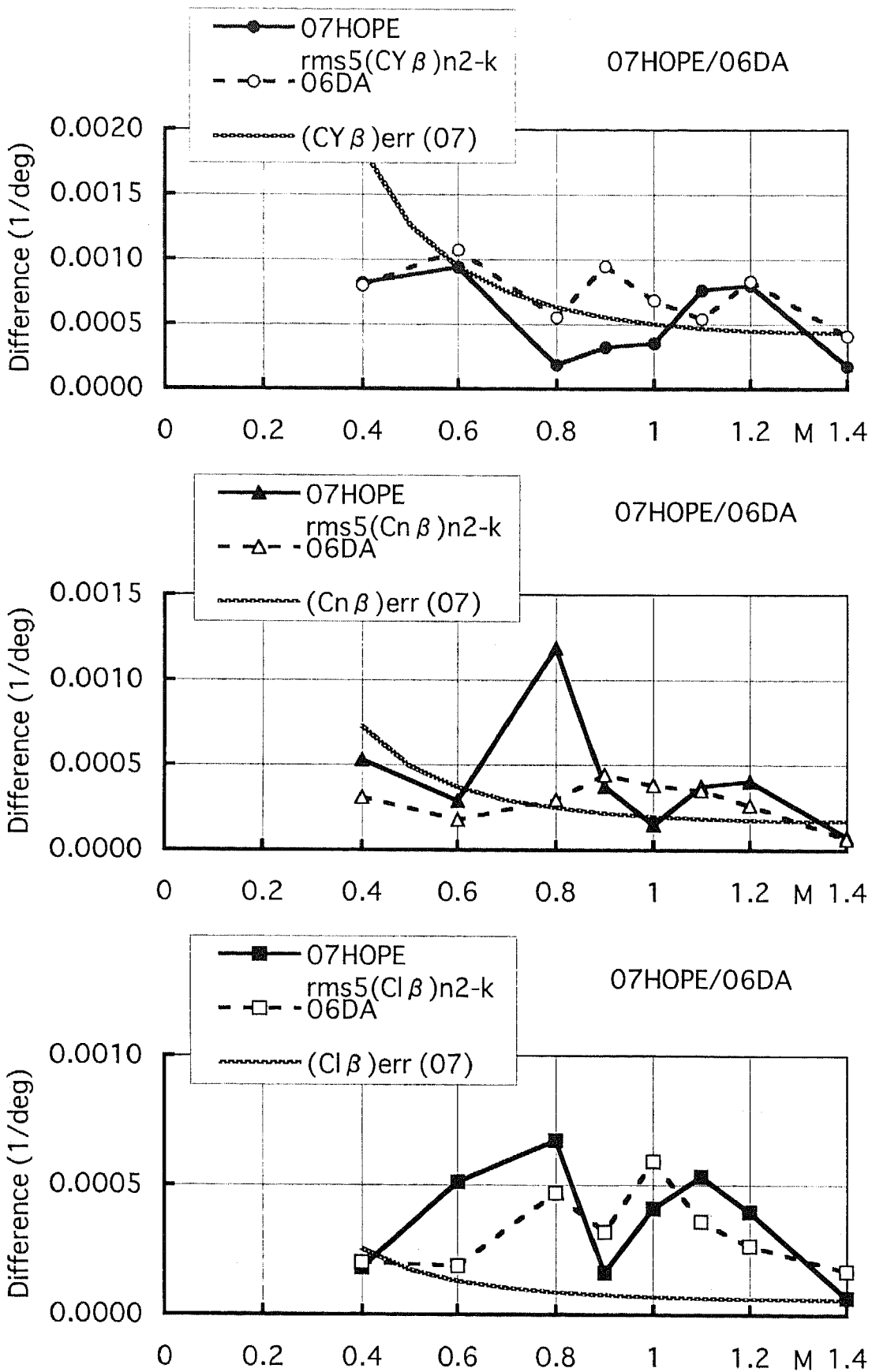
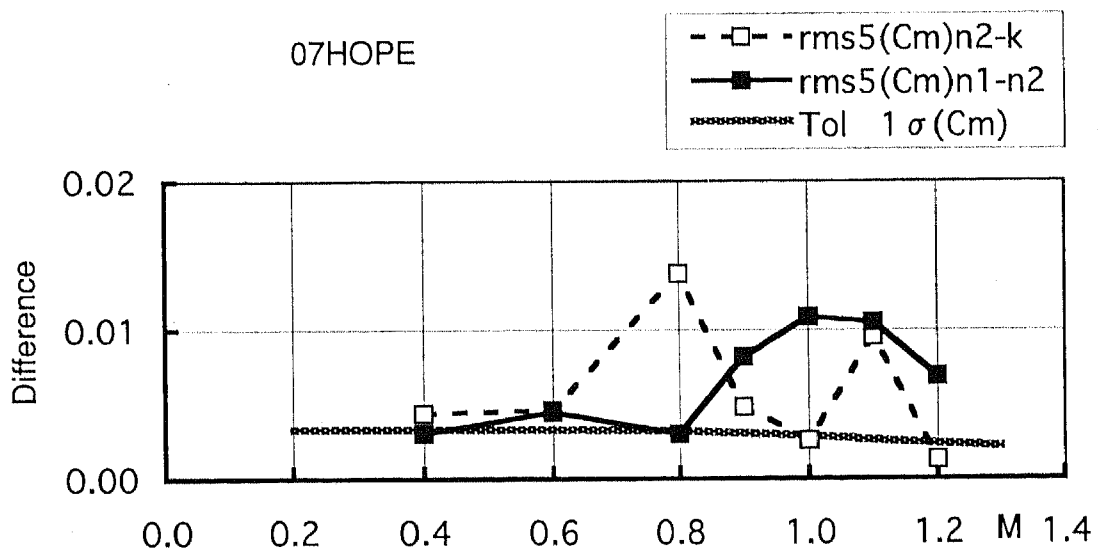
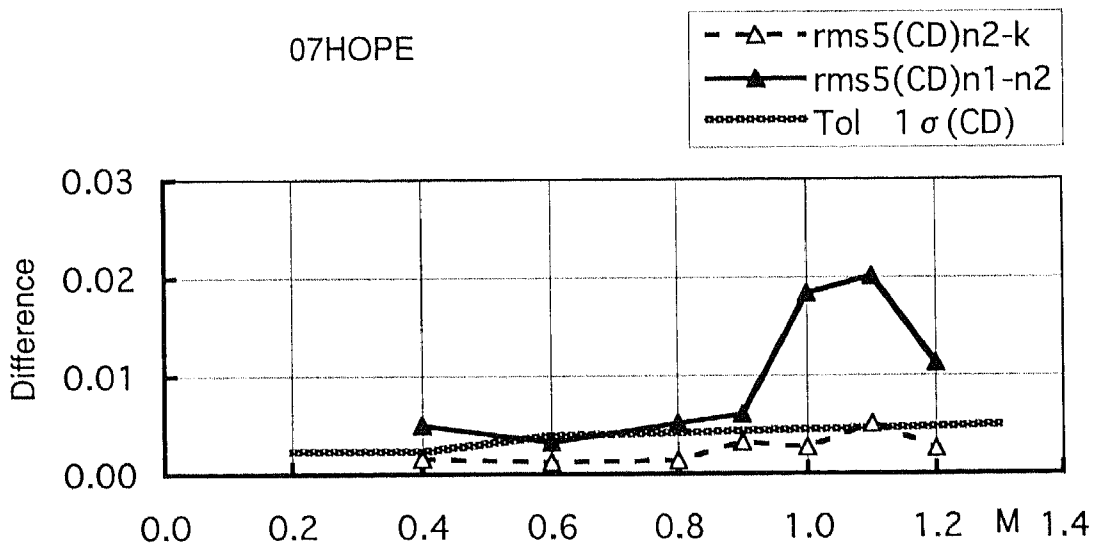
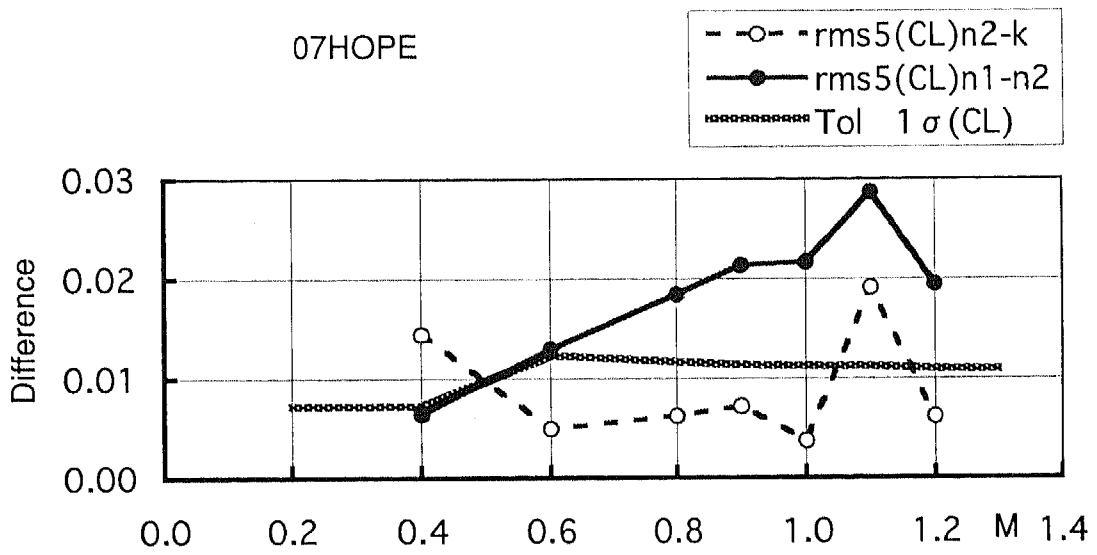
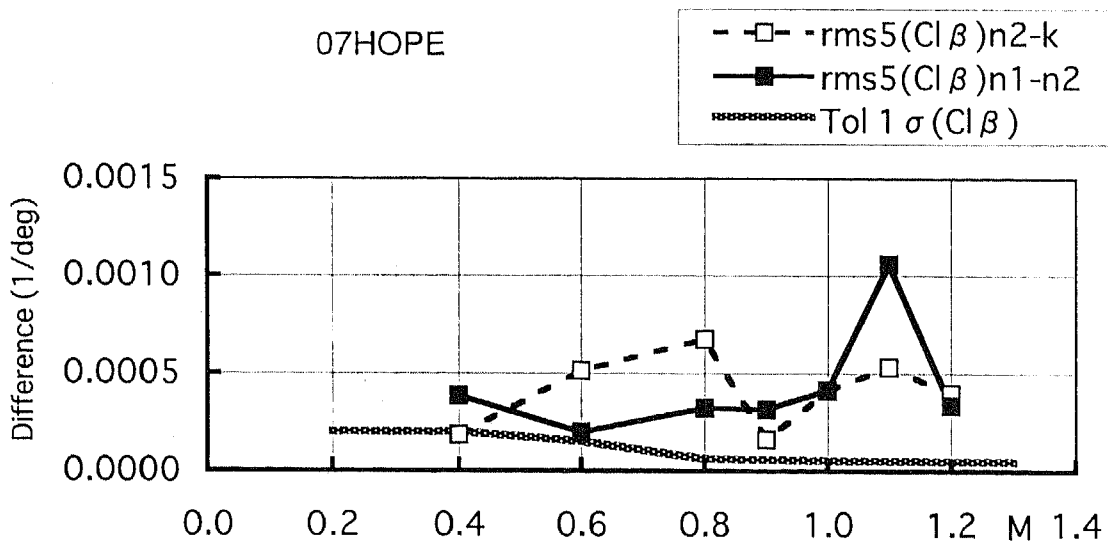
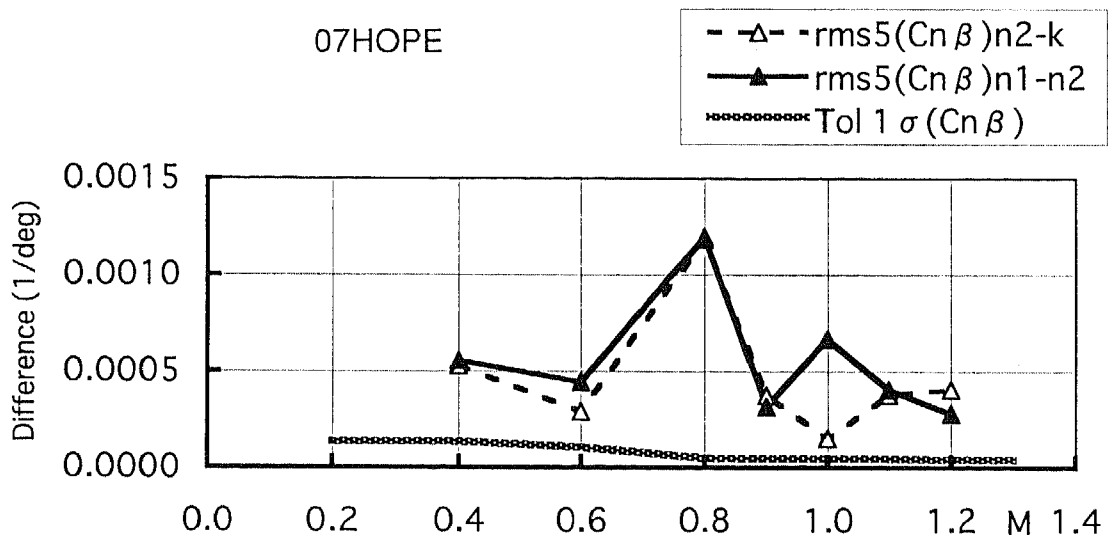
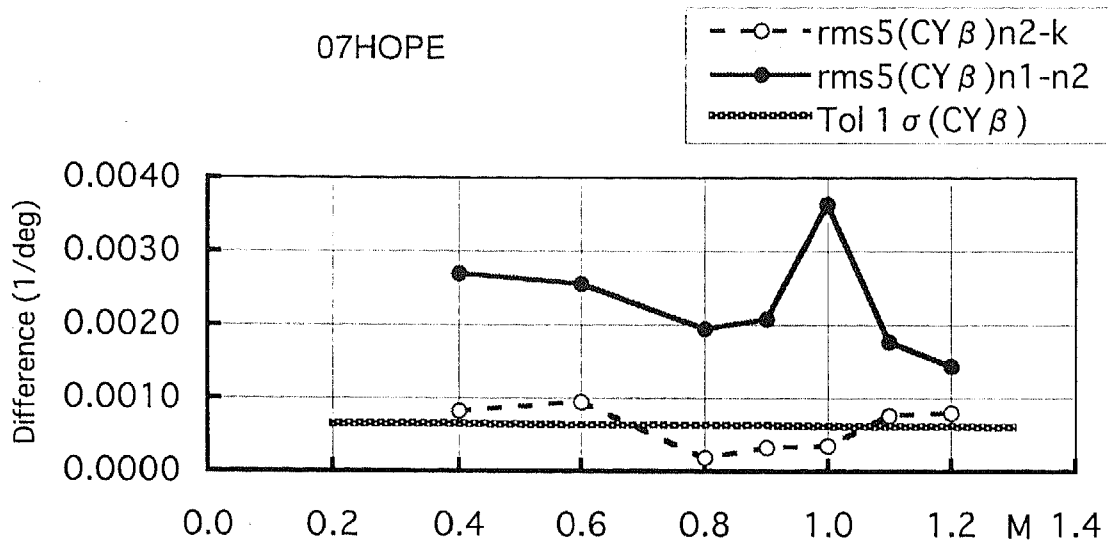


図6(b) 07/06横方向特性試験結果間の差の比較



(n2,k : 模型、天秤、スティングが同一、風洞は異なる。  
 n1,n2 : 風洞が同一、模型、天秤、支持方法は異なる。)

図7(a) 縦特性試験結果間の差の比較



(n2,k : 模型、天秤、ステーイングが同一、風洞は異なる。  
 n1,n2 : 風洞が同一、模型、天秤、支持方法は異なる。)

図7(b) 横方向特性試験結果間の差の比較

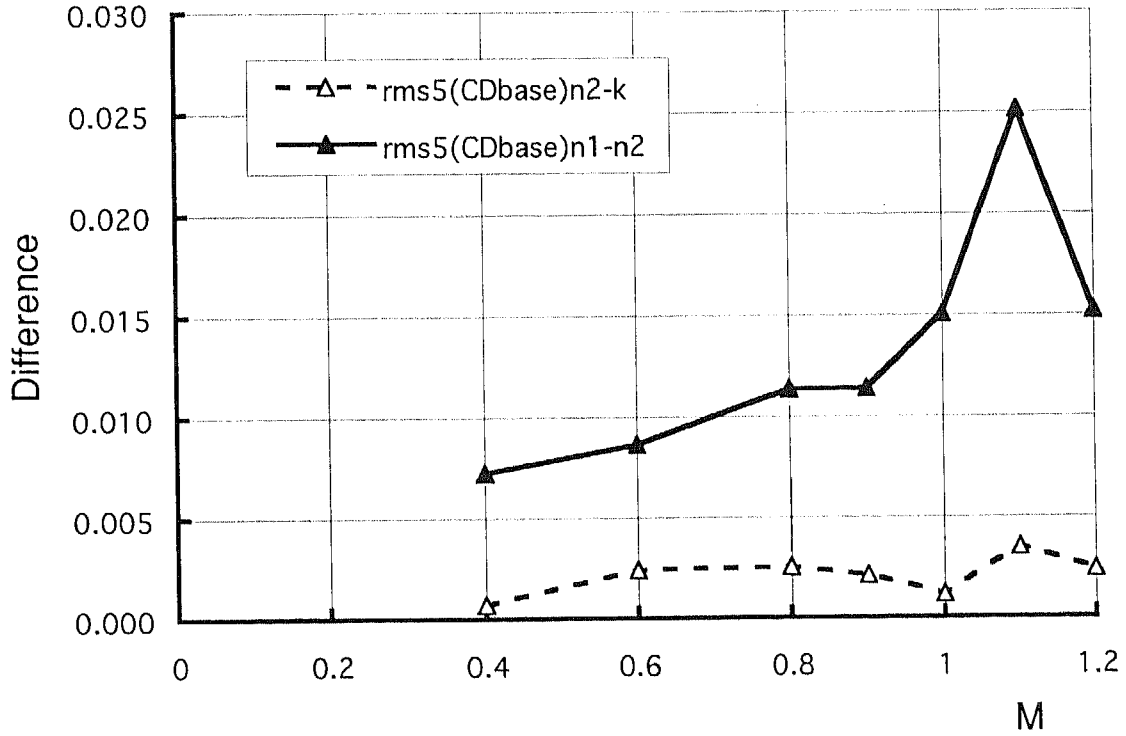


図8(b) 底面抗力係数の比較

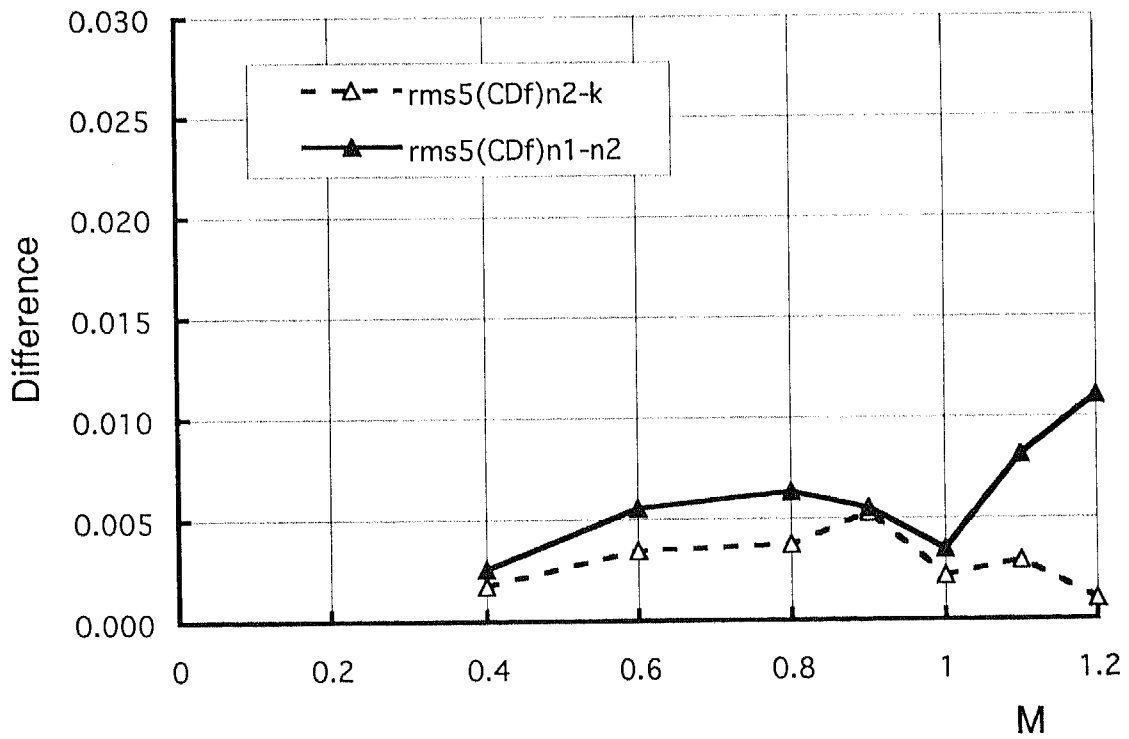


図8(a) 前方部抗力係数の比較

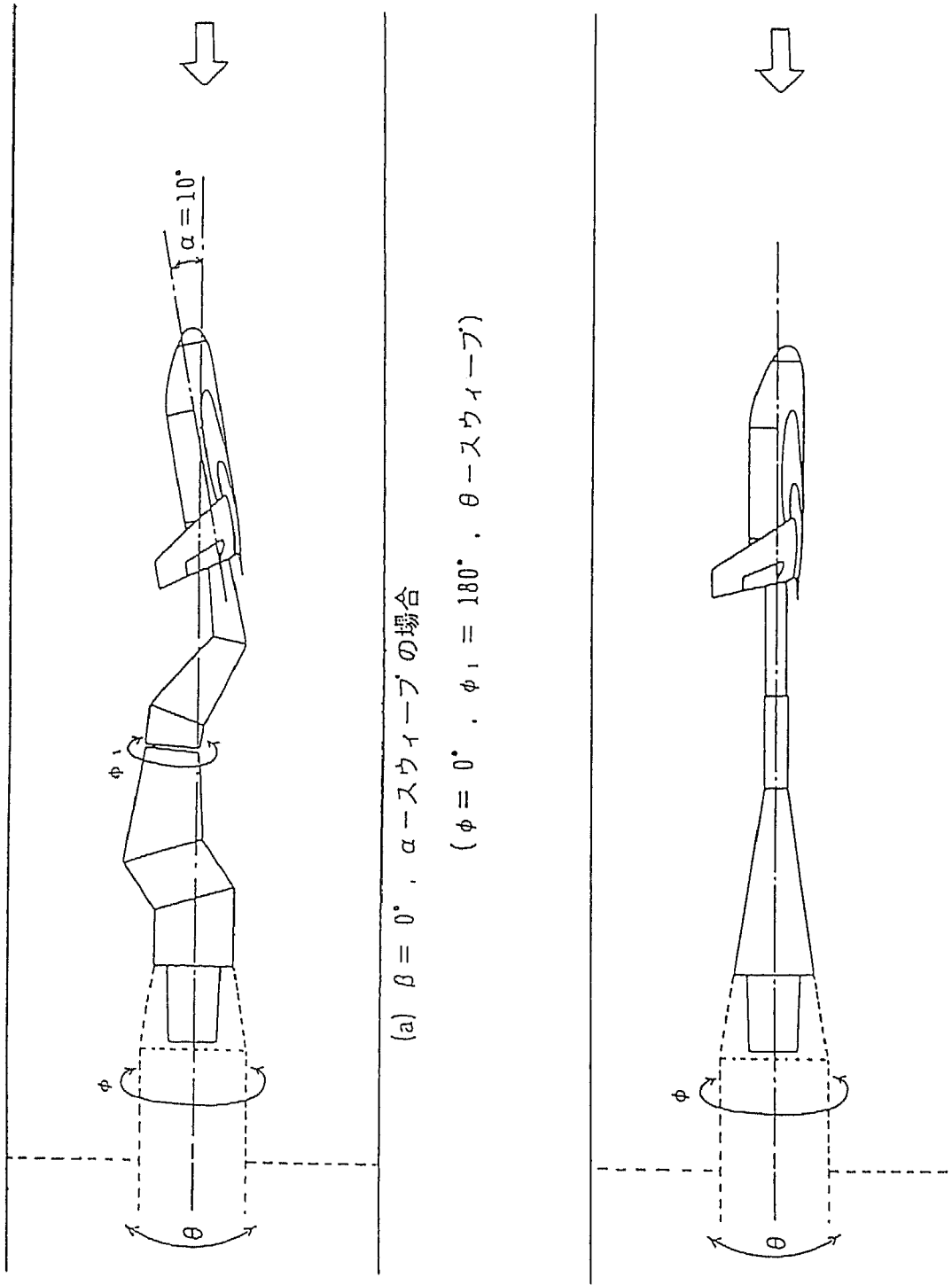


図9 63HOPE支持干渉試験

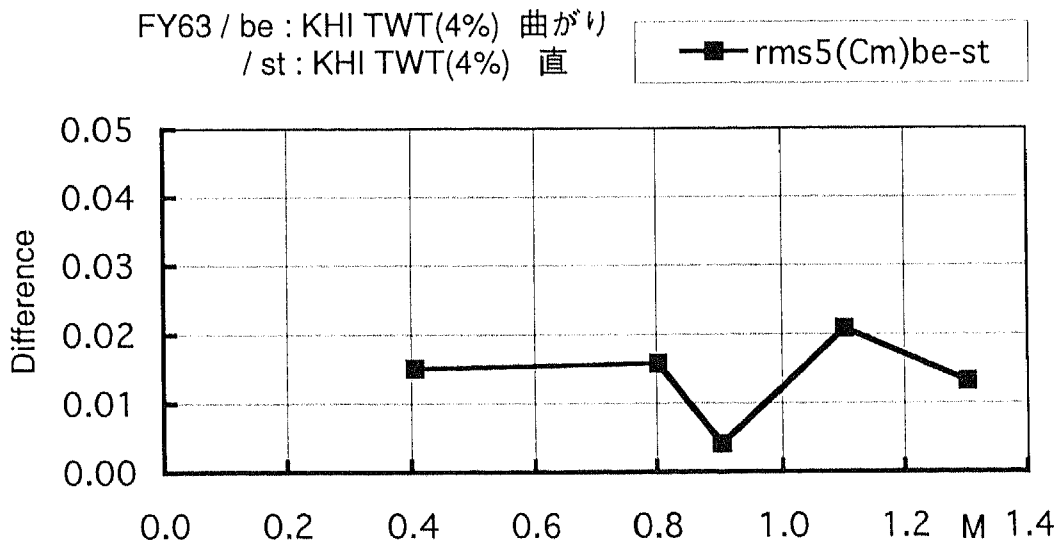
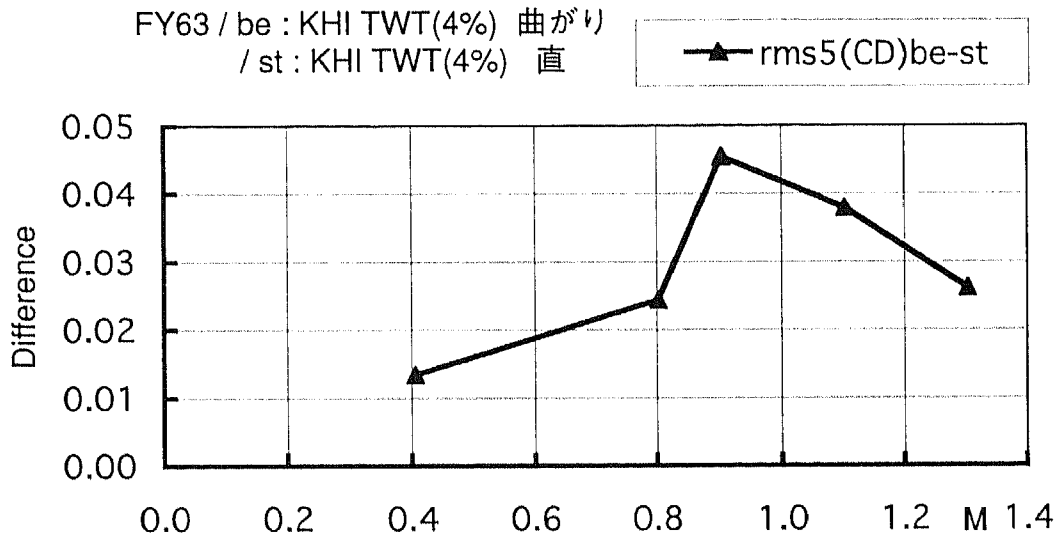
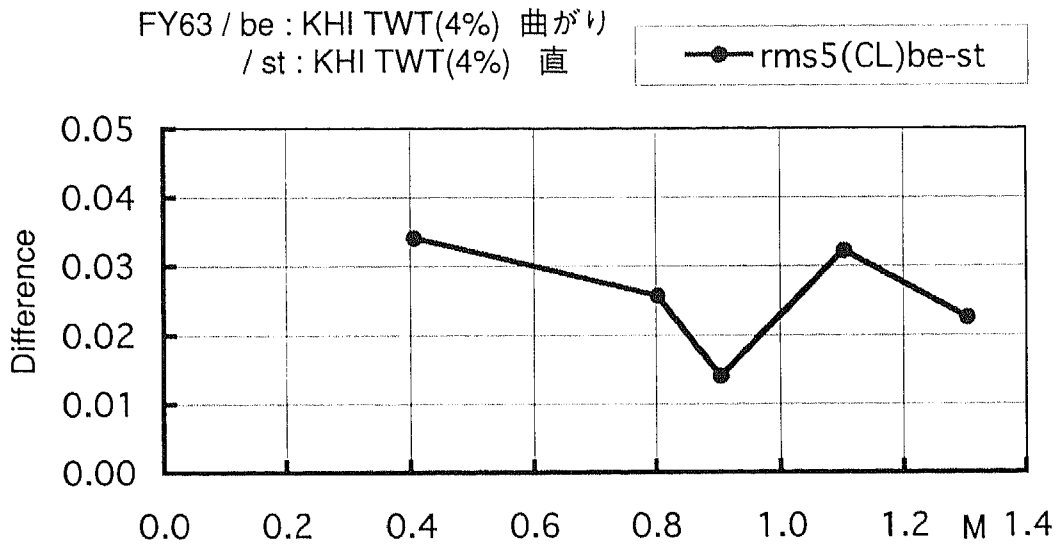


図10 63HOPE 支持方式の違いによる縦特性の差  
(曲がり/直スティング)