

09HOPE 風洞試験の胴上支持における ダミースティング効果について

青木竹夫（航空宇宙技術研究所）、辻本健士（宇宙開発事業団）

Dummy Sting Effects on HOPE-X Model Supported by the Dorsal Sting

Takeo AOKI(NAL), Takeshi TSUJIMOTO(NASDA)

概要

09HOPE 形状の遷/超音速風洞試験では、模型を胴体の上で支持する方法（Dorsal Sting）によりダミースティングが及ぼす影響（効果）についてデータ取得が行われた。本報告では、最初に、遷音速風洞試験についてダミースティング“あり/なし”のケースで取得された、縦3分力の差を天秤誤差と比較した。縦3分力に関する胴上支持のダミースティング効果は天秤誤差と同程度であり、ピッチングモーメントに対してやや大きいことがわかった。次に、ピッチングモーメントの差に着目し、舵面（ボディフラップ/エレボン）に作用する垂直力及びヒンジモーメントの各々の差との相関について論じた。

1. はじめに

風洞試験において支持干渉の補正を行って、模型支持系の影響をまったく受けない結果を得ようとすることは、支持干渉量の評価を模型形状ごとに（あるいは風洞及び模型形状ごとに）行う必要があるという意味で、古くて新しい技術課題である。近年、航技研においては低速風洞グループを中心に、支持干渉評価に関する努力が行われており¹⁻⁵⁾、更なる発展が望まれるところである。

支持干渉量を評価するには、模型を別の支持系により上面又は下面で支持した状態で、実際に使用する支持系（ここではスティンガーストラット）の代わりに、ダミー系による“あり/なし”のケースを行い、それらの結果の差から求める従来の方法がある⁶⁻⁷⁾。これらの実験的方法では、模型を支持するのに別の支持系を風洞内に持ち込むため、その影響が懸念されることやダミー系の効果が実際の支持系のものと異

なる可能性がある等の問題があるが、ここでは検討しない。

宇宙往還技術試験機の研究開発過程における09HOPE 形状の遷/超音速風洞試験では、模型を上面（胴体の上=胴上支持）で支持する方法（Dorsal Sting）によりデータが取得された。

本報告では、最初に、遷音速風洞試験についてダミースティング“あり/なし”のケースで取得された、縦3分力の差を天秤誤差と比較する。次に、両風洞試験のピッチングモーメントの差に着目し、ボディフラップやエレボンに作用する舵面垂直力及びヒンジモーメントの各々の差との相関について論じる。

2. 風洞試験

09HOPE 形状を図1に、風洞試験の項目を表1に示す。遷音速及び超音速の風洞試験では、同一の模型、天秤、スティンガが使用された。両試験における模型支持は、図2に示すように、

三つの支持形態（直スティング、胴上支持、胴上支持+ダミースティング）で行われた。計測項目としては、通常の6分力や各断面圧力分布の他に、各舵面に作用する舵面垂直力及びヒン

ジモーメントが計測された。表2にデータ処理基準値を示す。

表1 風洞試験項目

	遷音速風洞試験	超音速風洞試験
風洞	川崎重工業(株)遷音速風洞	米国 Boeing 社超音速風洞
測定部	1m×1m	1.22m×1.22m(4ft×4ft)
模型	09HOPE 形状	
縮尺	2.25%	
試験マッハ数範囲	0.4~1.4	1.4~3.5
レイノルズ数範囲	2.9~5.0×10 ⁶	4.7~5.0×10 ⁶

3. ダミースティング効果

図2に示された二つの支持形態〔胴上支持+ダミースティング(dr+ds)、胴上支持(dr)]で計測された縦3分力を図3~5に示す。代表例としてマッハ数はそれぞれ0.8,0.9,1.1であり、支持干渉の試験は0.4~1.2のマッハ数範囲で行われている。図3~5の上図はCL,CD,CMSを直接比較したものである。これらの図のスケールではダミースティングが及ぼす影響(効果)は、ほとんどわからない。下図はCL,CD,CMSを同じ迎角で線形補間し、両者の差(dr+ds-dr)をプロットしたものである。また、成果報告書⁸⁾に記載されている天秤誤差係数(CL,CDについては迎角α=9.95及び25degにおける最大値)をシンボル付きの横線で+/-の誤差幅(err)として示した。図3~5に示されたCL,CD,CMSの差と誤差幅との関係を表3にまとめる。

表3 ダミースティング効果と天秤誤差幅の関係

	0.4	0.8	0.9	1.1	1.2
CLの差	×	×	○	○	○
CDの差	×	×	×	×	×
CMSの差	○	○	○	○	○

○：天秤誤差幅を超える。

×：天秤誤差幅を超えない。

CDの差は、本試験マッハ数においては、天秤誤差幅を超えない。CLの差は、マッハ数0.9で高迎角の一部、1.1,1.2においては、低迎角側で1.6倍程度超える。CMSの差は全マッハ数で天秤誤差を超えるが、高いところでも2.6倍程度である。

以上のことから、縦3分力に関する胴上支持のダミースティング効果は、天秤誤差と同程度であり、ピッチングモーメントに対してやや大きいことがわかった。

4. ピッチングモーメント及び舵面(ボディフラップ/エレボン)に対する各ダミースティング効果間の相関

ピッチングモーメントに対する効果についてやや詳しく考えてみる。ここではダミースティング“あり/なし”によるボディフラップ舵面垂直力CzBF(風試データファイルではNBF)の差とピッチングモーメントの差に着目する。

舵面垂直力の差ΔCzBFによるピッチングモーメントの差ΔCmBFは、次式(1)で関係づけることができる。

$$\Delta C_{mBF} = \Delta C_{zBF} \times S_{bf} / (S_{ref} \times c_{ref}) \times (L + L_{bf}) + C_{zBF} \times S_{bf} / (S_{ref} \times c_{ref}) \times \Delta L_{bf}$$

(1)

また、ボディフラップ・ヒンジラインから舵面垂直力の着点までの距離は

$$L_{bf} = C_{hBF} / C_{zBF} \times c_{bf} \quad (2)$$

によって与えられる。ここで、 C_{hBF} はボディフラップのヒンジモーメントを表す。 $C_{hBF}, C_{zBF} \sim \alpha$, $\Delta C_{zBF} \sim \alpha$ 及び $C_{hBF} / C_{zBF} \sim \alpha$ の関係を図 6~8 に示す。

左上図はダミースティング“あり/なし”におけるボディフラップ・ヒンジモーメント C_{hBF} 及び舵面垂直力 C_{zBF} を比較したものである。ダミースティング“あり/なし”の差を目視で調べれば、 ΔC_{zBF} ($\equiv NBF_{dr} + ds - dr$) 及び ΔC_{hBF} ($\equiv HBF_{dr} + ds - dr$) の符号は、マッハ数 0.9 以下では負であり、1.1 以上では正になっているのがわかる。ボディフラップ・ヒンジモーメント C_{hBF} 及びボディフラップ舵面垂直力 C_{zBF} の符号の定義は、ボディフラップ舵面の後縁を下げる方向が“正”である。

左下図はダミースティング“あり/なし”におけるボディフラップ舵面垂直力の差を示す。CMS の差を 10 倍 (5 倍) した値も示す。すぐに気付くことは、NBF と CMS の差が同じように変化することであり、特にマッハ数 1.1 と 1.2 においてこの傾向が明確である。この傾向は、ボディフラップ舵面垂直力の差とピッチングモーメントの差との間に相関があることを示唆している。この相関について考える。

右下図は横軸に舵面垂直力の差、縦軸に CMS の差をプロットした図である。同様にマッハ数 1.1 (と 1.2) においてある迎角範囲のデータが

直線的関係を示している。

式(1)に戻り、この式に現れる 09HOPE2.25% 模型の各基準値は

$$S_{ref} = 0.032906 \text{ m}^2 = 32906 \text{ mm}^2$$

$$c_{ref} = 0.17478 \text{ m} = 174.78 \text{ mm}$$

$$S_{bf} = 0.0026290 \text{ m}^2 = 2629 \text{ mm}^2$$

$$L = 360 - 228.6 = 131.4 \text{ mm}$$

であり、

$$S_{bf} / (S_{ref} \times c_{ref}) = 4.5711 \times 10^{-4} \text{ 1/mm}$$

となる。これらの値を代入して

$$\begin{aligned} \Delta C_{mBF} = & 4.5711 \times 10^{-4} \times [\Delta C_{zBF} \times (131.4 \\ & + L_{bf}) + C_{zBF} \times \Delta L_{bf}] \end{aligned} \quad (3)$$

となり、さらに式(2)から

$$\begin{aligned} \Delta L_{bf} = & c_{bf} \times [\Delta C_{hBF} \times C_{zBF} \\ & - C_{hBF} \times \Delta C_{zBF}] / C_{zBF}^2 \\ C_{zBF} \times \Delta L_{bf} = & c_{bf} \times [\Delta C_{hBF} \\ & - C_{hBF} \times \Delta C_{zBF} / C_{zBF}] \\ C_{zBF} \times \Delta L_{bf} = & c_{bf} \Delta C_{hBF} - L_{bf} \times \Delta C_{zBF} \end{aligned} \quad (4)$$

が成立する。式(4)を式(3)に代入すると、

$L_{bf} \times \Delta C_{zBF}$ の項が打ち消されて、結局、式(1)は

$$\begin{aligned} \Delta C_{mBF} = & 4.5711 \times 10^{-4} \times [131.4 \times \Delta C_{zBF} \\ & + c_{bf} \times \Delta C_{hBF}] \end{aligned}$$

となり、舵面垂直力の差及びヒンジモーメントの差との関係式が導かれる。

以上のような議論はエレボン舵面についても行うことができる。ボディフラップとエレボンの結果を表 4 にまとめる。

表4 ボディフラップとエレボンの関係式

ボディフラップ	エレボン
$CmBF = Sbf / (Sref \times cref) \times CzBF \times (L + Lbf)$	$CmEV = Sev / (Sref \times cref) \times 2 \times CzEV \times (L' + Lev)$
$Lbf = ChBF / CzBF \times cbf$	$Lev = ChEV / CzEV \times cev$
$\Delta CmBF = Sbf / (Sref \times cref) \times [L \times \Delta CzBF + cbf \times \Delta ChBF]$	$\Delta CmEV = 2 \times Sev / (Sref \times cref) \times [L' \times \Delta CzEV + cev \times \Delta ChEV]$
$Sref = 0.032906 \text{ m}^2$	
$cref = 0.17478 \text{ m}$	
$Sbf = 0.0026290 \text{ m}^2$	$Sev = 0.001983 \text{ m}^2$
$cbf = 0.0477675 \text{ m}$	$cev = 0.037980 \text{ m}$
$L = 0.1314 \text{ m}$	$L' = 0.088020 \text{ m}$
$\Delta CmBF = 0.060064 \times \Delta CzBF + 0.021835 \times \Delta ChBF$ (5)	$\Delta CmEV = 0.060697 \times \Delta CzEV + 0.02619 \times \Delta ChEV$ (6)

表中の式(5)は、全ピッチングモーメントに対するボディフラップの寄与分を表すもので、 $\Delta CzBF$ と $\Delta ChBF$ がいずれも正のときは $\Delta CmBF$ が正となる。同様に、式(6)は、エレボンの寄与分を表す。式(5),(6)からボディフラップとエレボンにおける舵面垂直力の差とヒンジモーメントの差がわかれば、それぞれの寄与分を計算し、合計したものを求めることができる。残念ながら、遷音速風洞試験では、エレボンの舵面垂直力とヒンジモーメントについては計測が行われてないため、エレボンの寄与分は明らかでなく、式(5)だけが計算できる。マッハ数 1.1, 1.2 について式(5)から求めた実線を追加して描き直したものを図9に示す。但し比較に際しては、実線の開始点が、CMSの差に意図的に一致するように定数項を加え、縦軸は10倍拡大してある。式(5)から求めた実線について、その変化傾向はCMSの差の変化傾向と似ているが、マッハ数 1.1, 1.2 においては、縦軸に関して各々0.004611, 0.003226 偏りがある。この原因としては、底面圧力分布の差による寄与分が不明であることや、ダミースティンクの存在が流れ場の循環分布を変える可能性等が明らかでないことが考えられるが、偏りは、

表4の関係式では説明できず、一つの問題点として残る。

超音速風洞試験においては、ボディフラップの他、エレボンについても計測データがあるため、エレボンの寄与分を含めて計算ができる(図10~12)。式(6)エレボンの寄与分 $\Delta CmEV$ は、マッハ数 1.5, 2.0, 3.0 においていずれも負となり(右下図△印)、ボディフラップ寄与分(□印)にエレボンの寄与分(△印)を加えると(◆印)、CMSの差(■印)に近づくが、依然として偏りは、なくなる。両舵面の寄与分の合計値(◆印)を、図9と同様に意図的に一致させた、実線が示す変化傾向は、良く一致している。また、ピッチングモーメントの符号は“頭上げ”を“正”としているので、図9~12に示されるようにマッハ数 1.1 以上では、ダミースティンク“あり”のケースが“なし”のケースより“頭下げ”である。

5. まとめ

09HOPE 形状模型で行われた遷/超音速風洞試験データについて以下のことが明らかになった。

- (1) 遷音速風洞試験において縦3分力に関

する胴上支持のダミーステイング効果は、天秤誤差と同程度であり、ピッチングモーメントに対しては、やや大きかった。

- (2) ピッチングモーメントに対するダミーステイング効果は、ボディフラップ及びエレボン舵面に対するダミーステイング効果と良い相関をしめす場合があった。
- (3) ボディフラップとエレボンの関係式は、ピッチングモーメントに対するダミーステイング効果の変化傾向と良く一致したが、偏りが存在した。

謝 辞

本データ解析にあたり、三菱重工業株式会社 若松逸雄 氏、川崎重工業株式会社 花光 明 氏には、お忙しい中、貴重なコメントをいただきました。厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) 重見 仁；航技研突風風洞の壁干渉・支持干渉のパネル法による推定，第36回飛行機シンポジウム講演集(1998)。
- 2) 重見 仁；航技研突風風洞の壁干渉・支持干渉のパネル法による推定（その2），第36回飛行機シンポジウム講演集(1999)pp293-296。
- 3) 藤枝郭俊，岩崎昭人，藤田敏美；NAL突風風洞におけるストラット支持の場合の支持干渉について，航空宇宙技術研究所特別資料 SP-45(2000/7)pp.7-28。
- 4) 野中 修，近藤洋史，星野秀雄；宇宙往還機模型のストラット支持干渉測定試験結果について，航空宇宙技術研究所特別資料 SP-45(2000/7)pp.79-104。
- 5) 原田賢哉，澤田秀夫，高橋 侔；飛行船風洞試験における支柱干渉の影響，日本航空宇宙学会第32期年会講演会講演集(2001/4)pp.211-214。
- 6) D.L.Loving & A.A.Luoma；STING-SUPPORT INTERFERENCE ON LONGITUDINAL AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF CARGO-TYPE AIRPLANE MODELS AT MACH 0.70 TO 0.84,NASA TN D-4021(1967/7)。
- 7) 安部 正，谷岡忠幸；高速風洞試験における模型支持法，三菱重工技報 Vol.11 No.3(1974/5)。
- 8) 平成7年度宇宙開発事業団委託業務成果報告書，宇宙往還技術試験機 基本風洞試験（そのイ）成果報告書（その4）1/3(1998/6)。

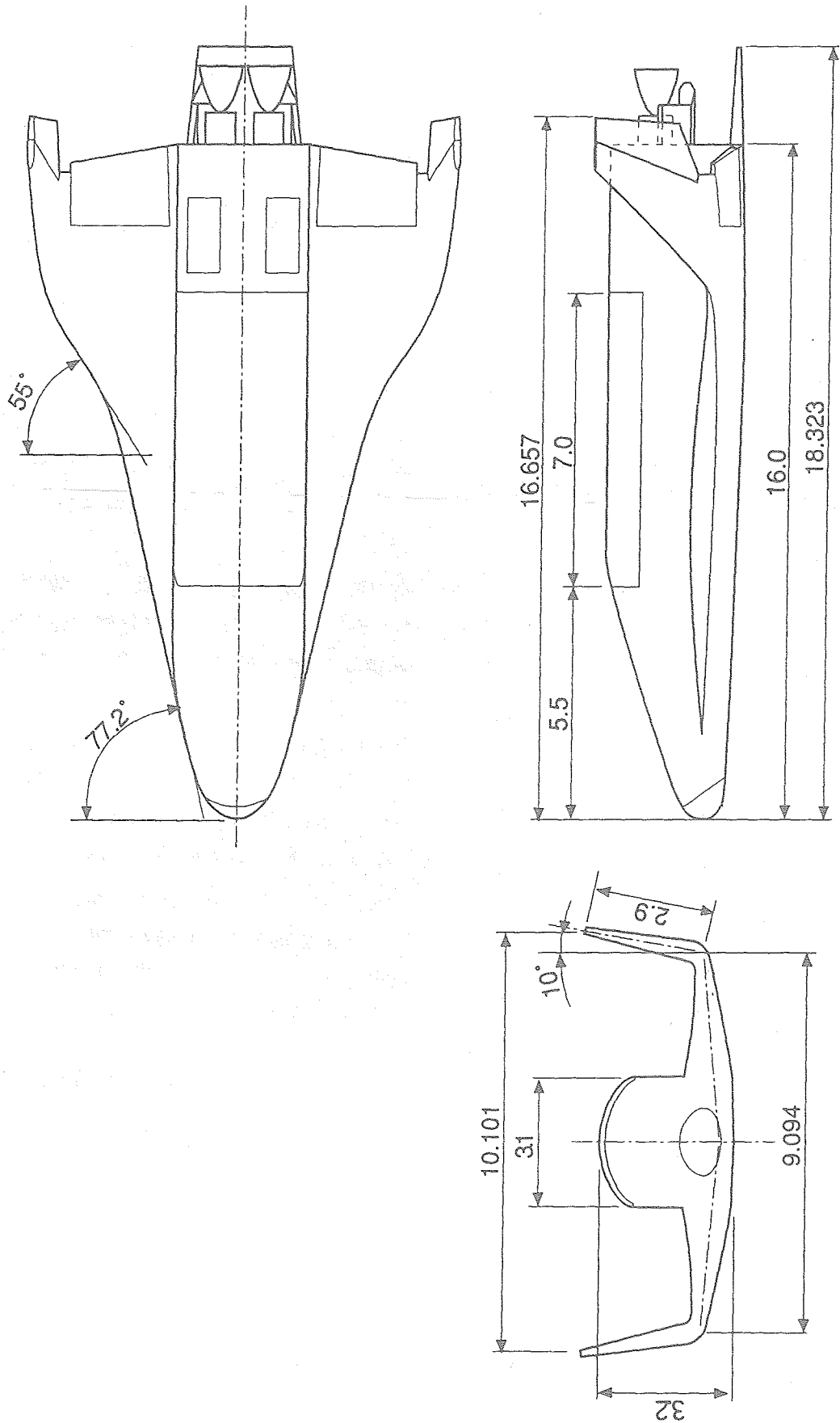
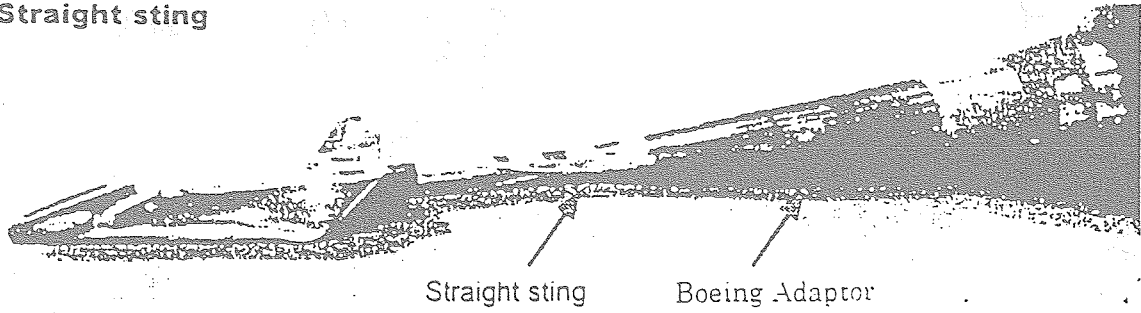


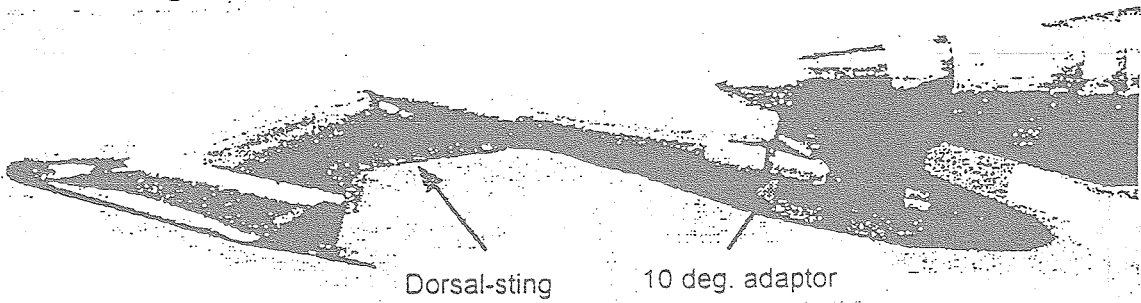
図1 O9HOPE形状

Straight sting



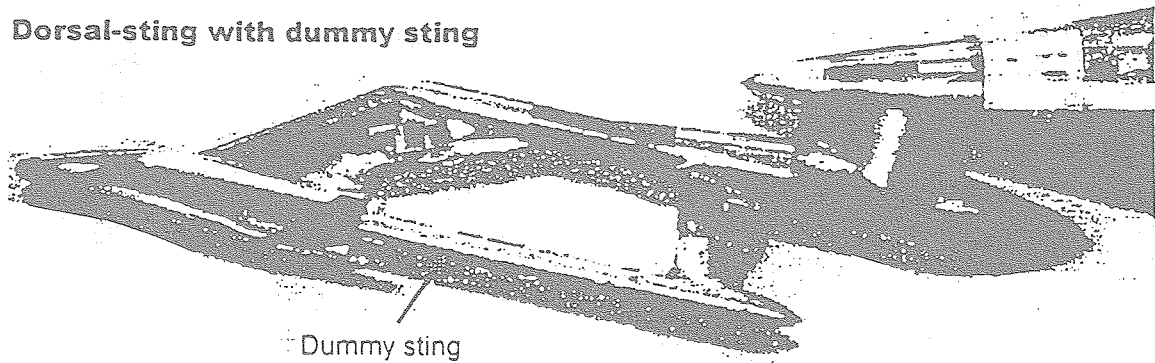
a. Straight sting(直スティング)

Dorsal-sting



b. Dorsal-sting(胴上支持スティング)

Dorsal-sting with dummy sting



c. Dorsal-sting with dummy sting(胴上支持スティング ダミースティング有り)

図2 模型支持状況

表2 データ処理基準値

6分力 処理基準値			
	単位	模型スケール(2.25%)	実機スケール
基準面積	m ²	0.032906	65.000
縦基準長	m	0.17478	7.768
横基準長	m	0.20462	9.094
胴体ベース面積 (ボディフラップ取付部を含まない)	m ²	0.0041254	8.149
天秤 中心 位置	x(ノーズより後方)	m	0.2250
	y	m	0
	z(胴体最下点より上方)	m	0.03645
処理 基準 位置	X(ノーズより後方) (注: 63.5%胴体長)	m	0.22860
	Y	m	0
	Z(胴体最下点より上方) (注: 胴体中心軸と一致)	m	0.036000
ヒンジモーメント係数処理基準値			
エレボン面積(片舷)	m ²	0.0019830	3.917
エレボン翼弦長	m	0.037980	1.688
ラダー面積(片舷)	m ²	0.0011127	2.198
ラダー翼弦長	m	0.023985	1.066
ボディフラップ面積	m ²	0.0026290	5.193
ボディフラップ翼弦長	m	0.0477675	2.123
胴上スピードブレーキ面積(片舷)	m ²	0.0010712	2.116
胴上スピードブレーキ翼弦長	m	0.033525	1.490

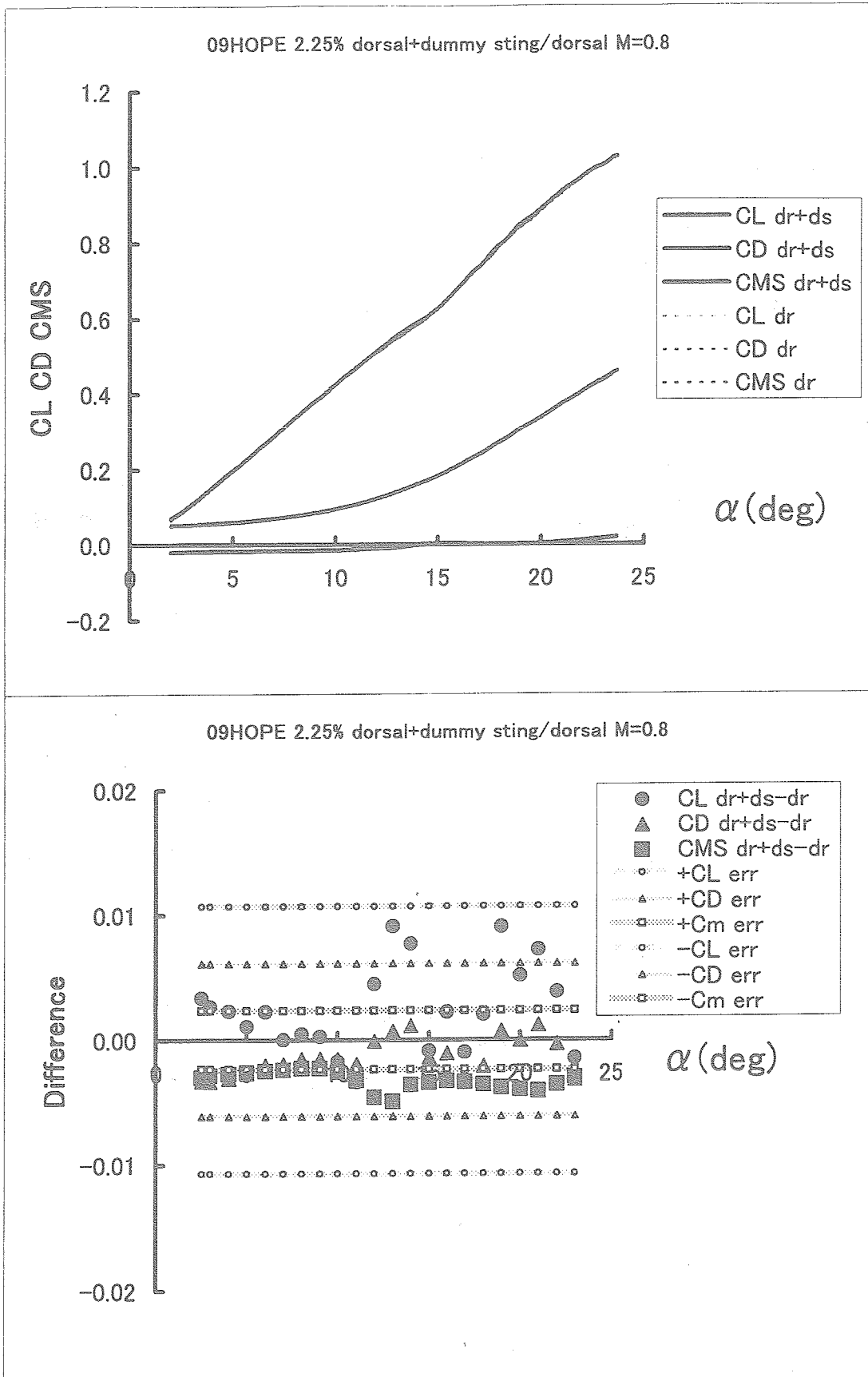


図3 ダミースティング+胴上支持と胴上支持の比較

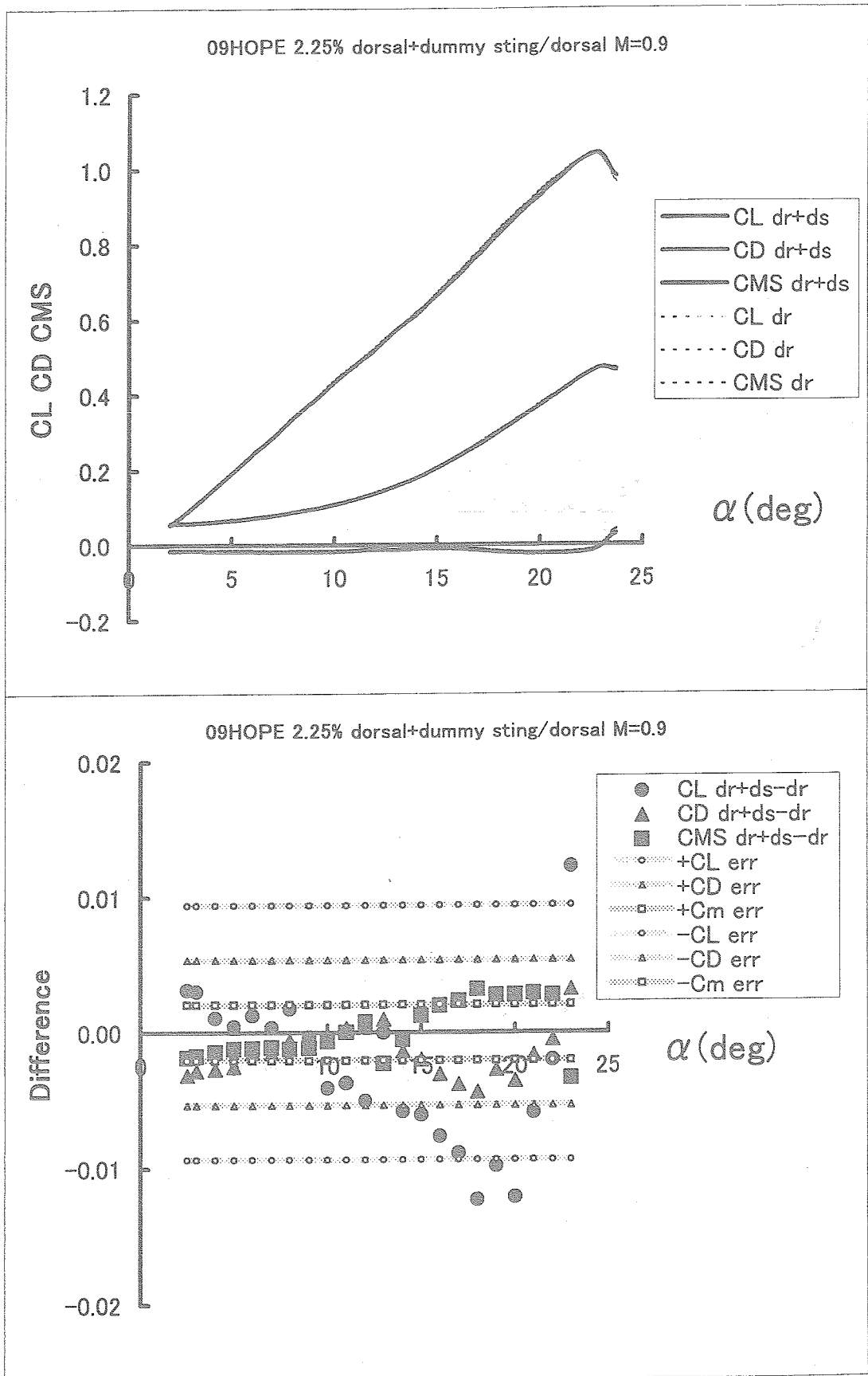


図4 ダミーステイング+胴上支持と胴上支持の比較

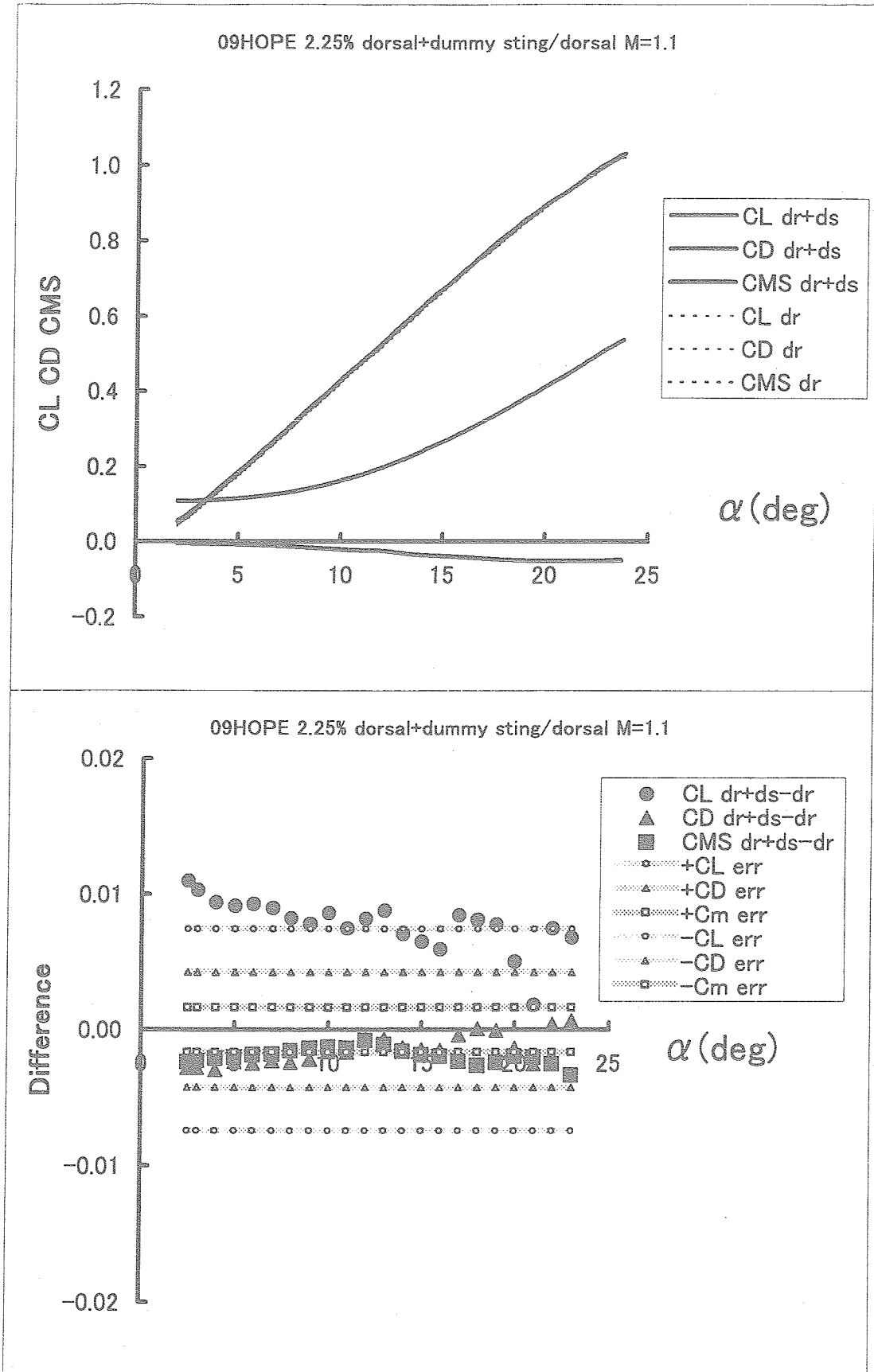


図5 ダミースティング+胴上支持と胴上支持の比較

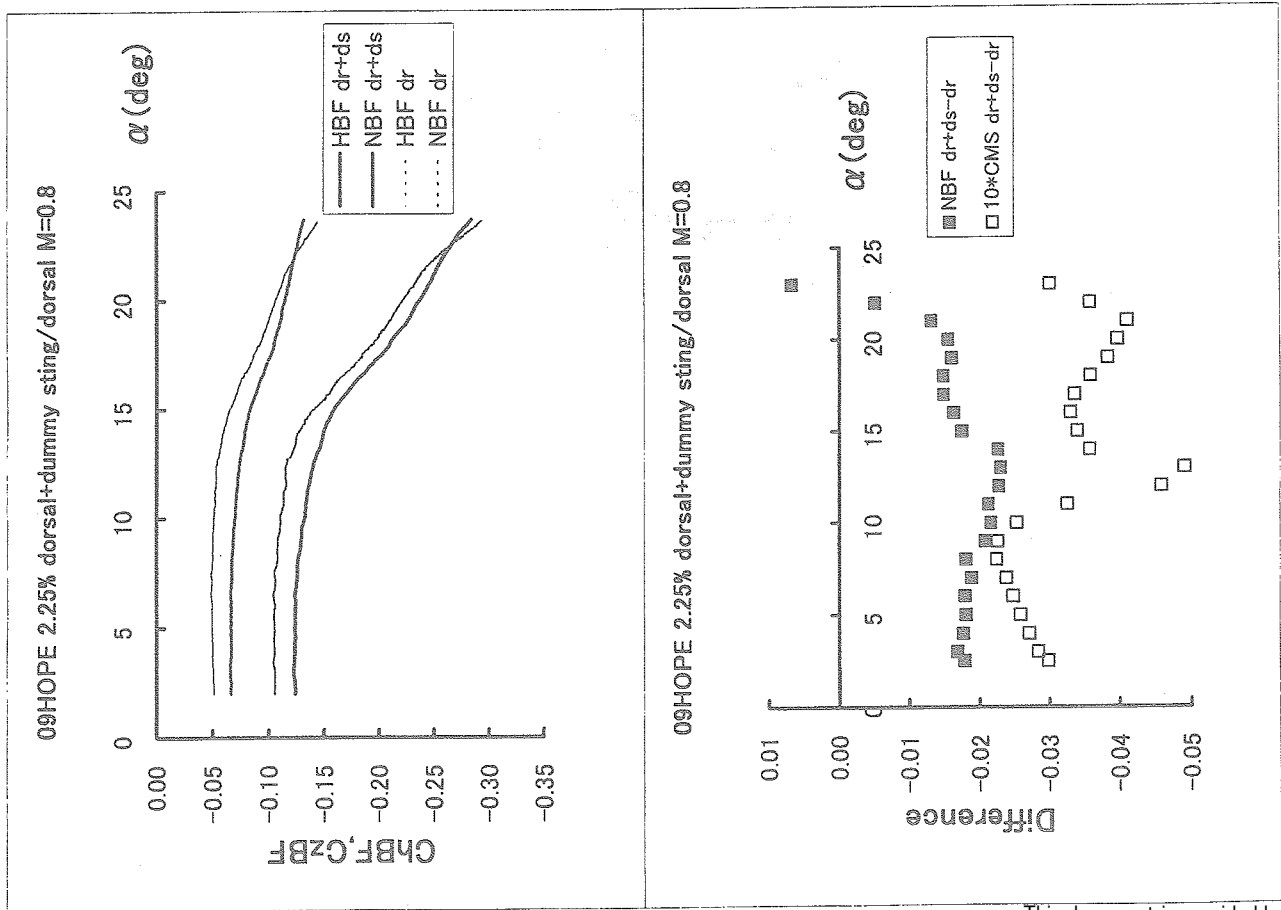


図6(a) ダミレステイング+胴上支持と胴上支持における ボディフラップ ヒンジモーメント及び舵面垂直力の比較

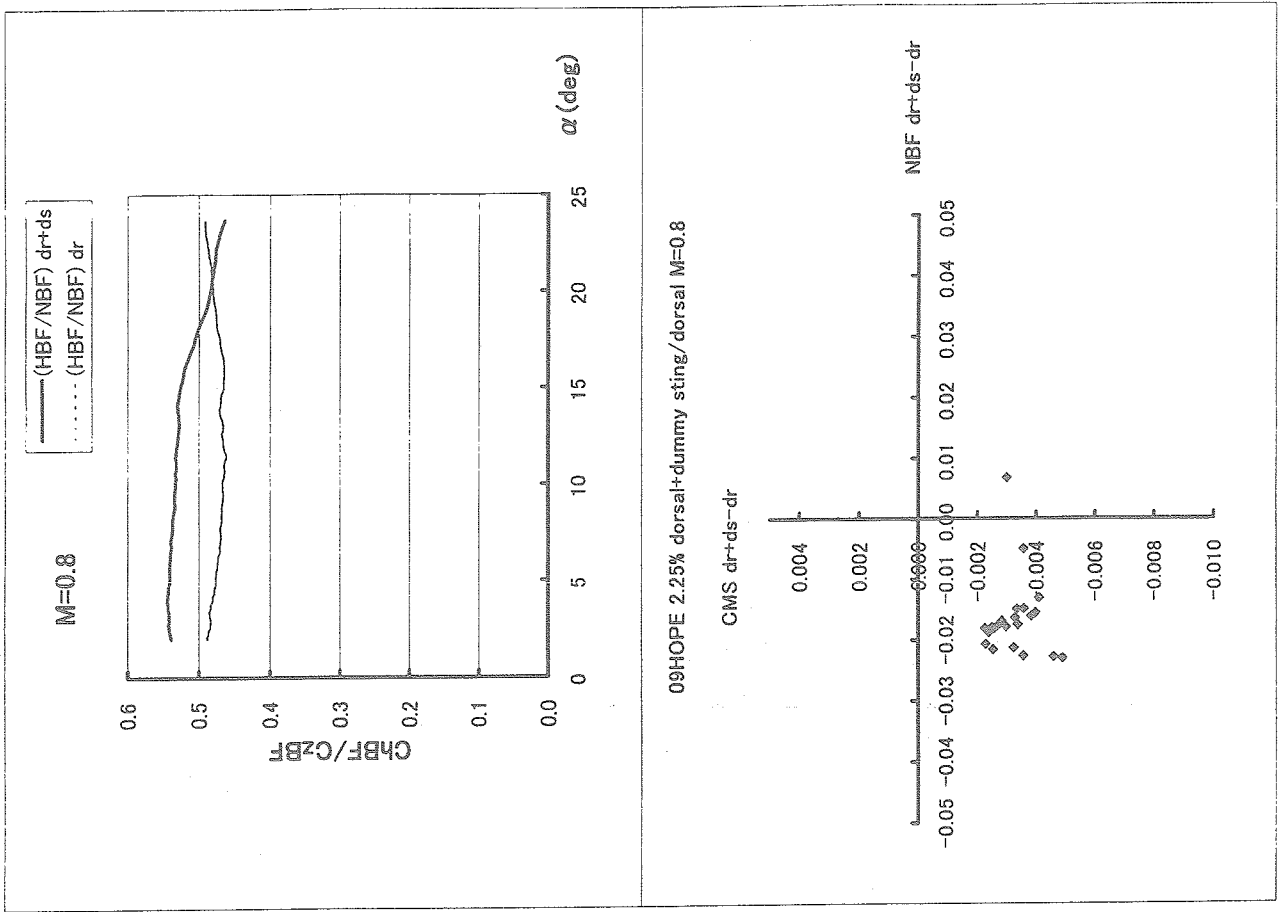


図6(b) ボディフラップ舵面垂直力の差とピッチング モーメントの差との相関

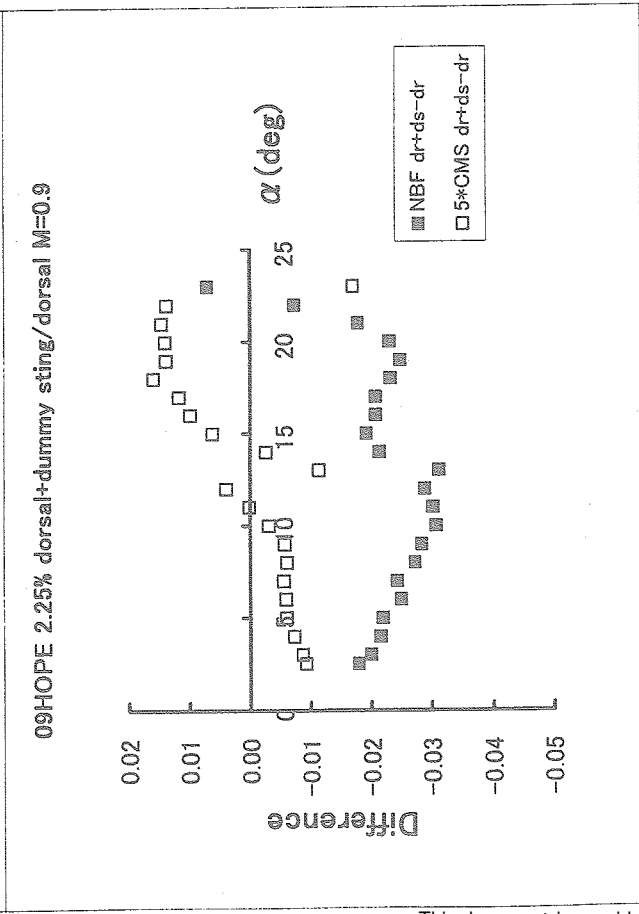
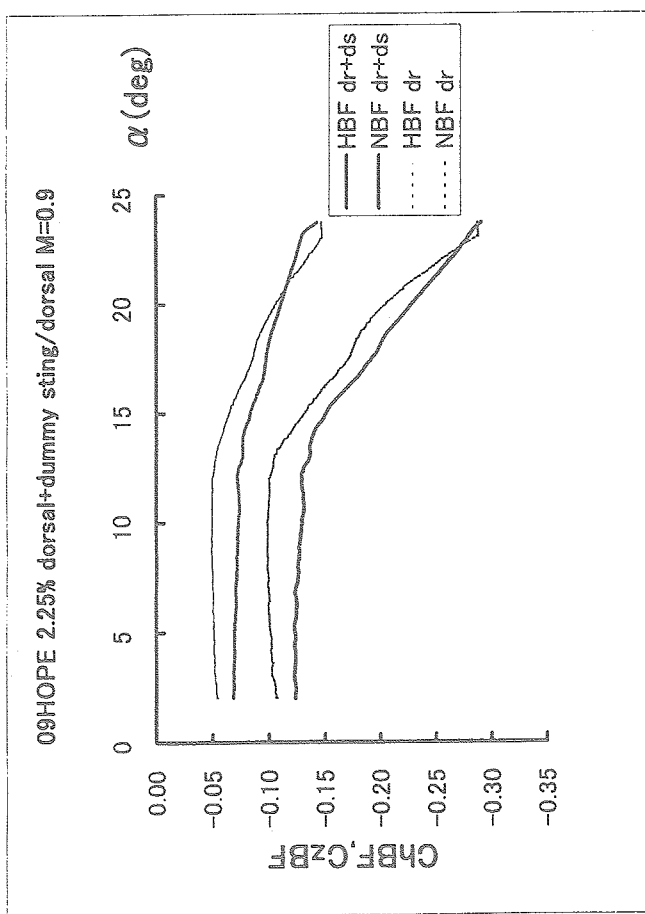


図7(a) ダミーステーティング+胴上支持と胴上支持におけるポディアラップ ヒンジモーメント及び舵面垂直力の比較

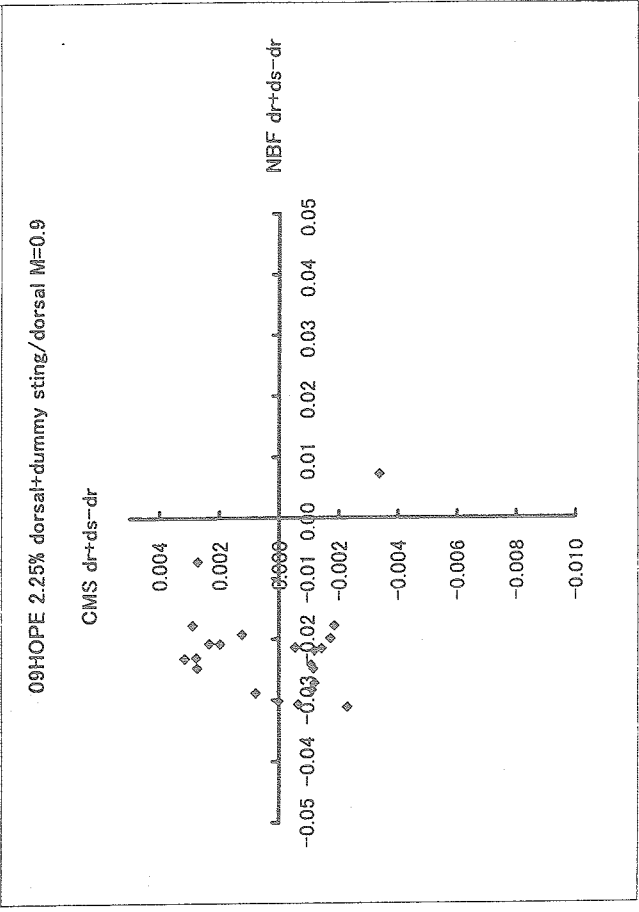
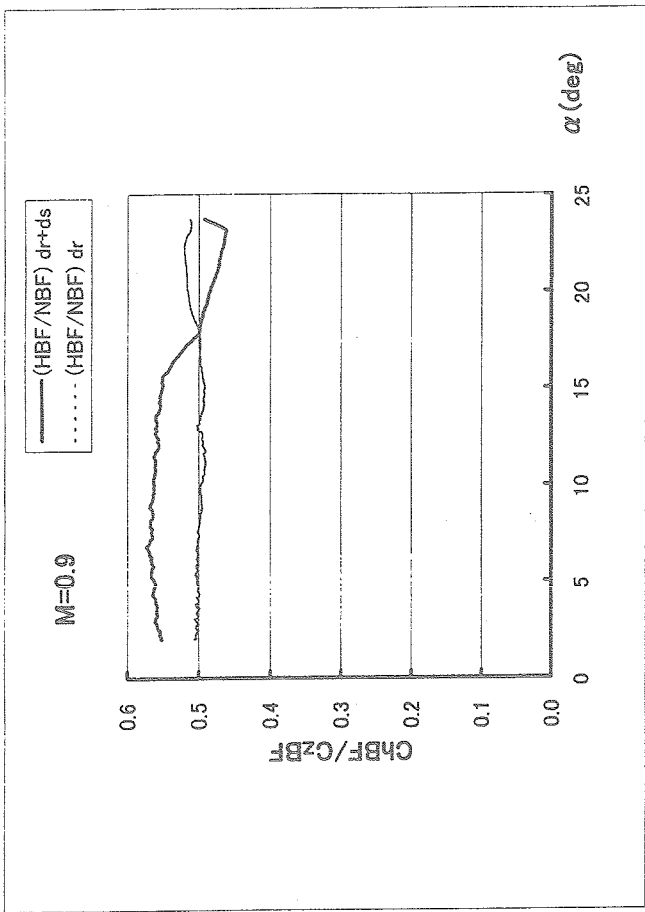


図7(b) ポディアラップ舵面垂直力の差とピッチング モーメントの差との相関

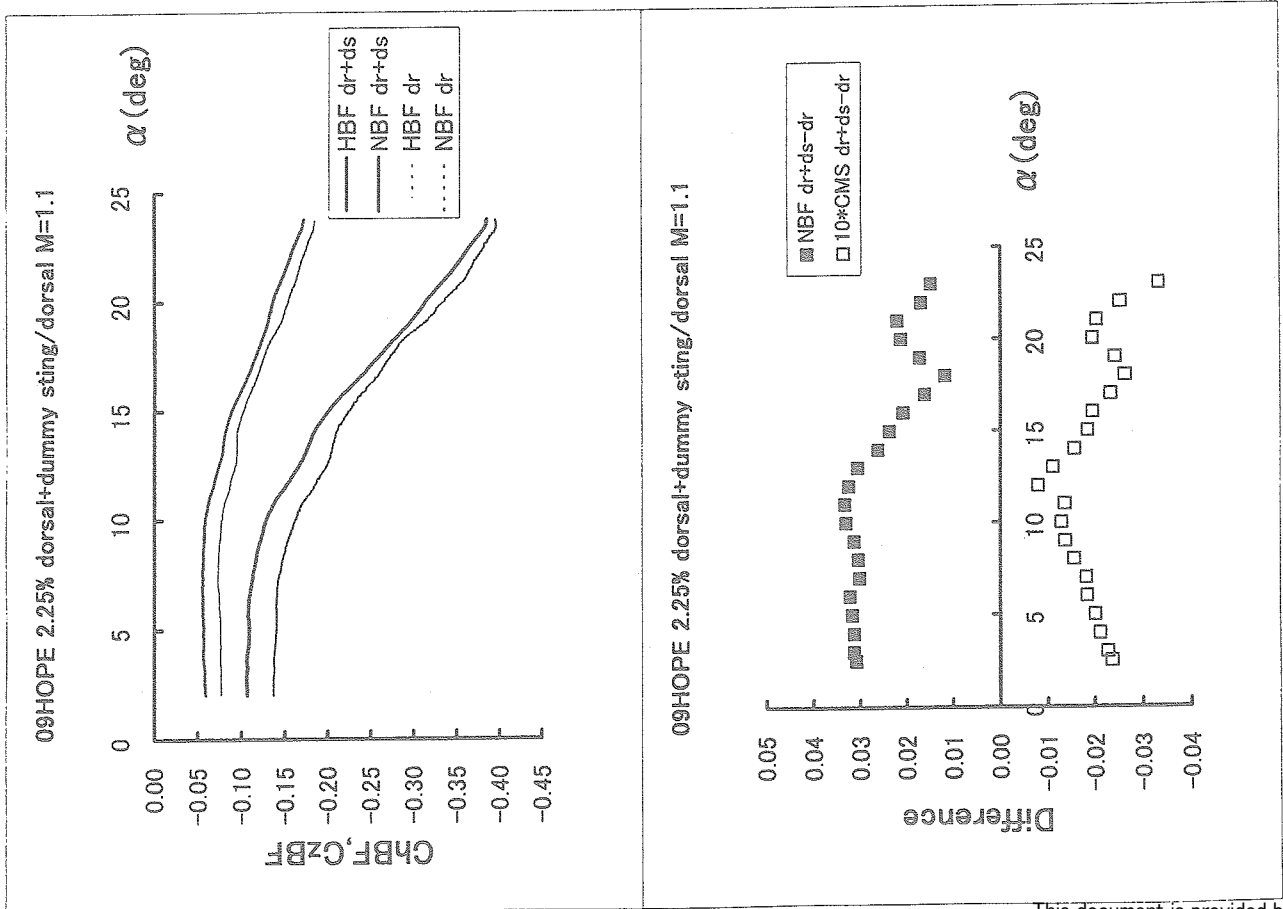


図8(a) ダミーステイング+胴上支持におけるポディフリップ ヒンジモーメント及び舵面垂直力の比較

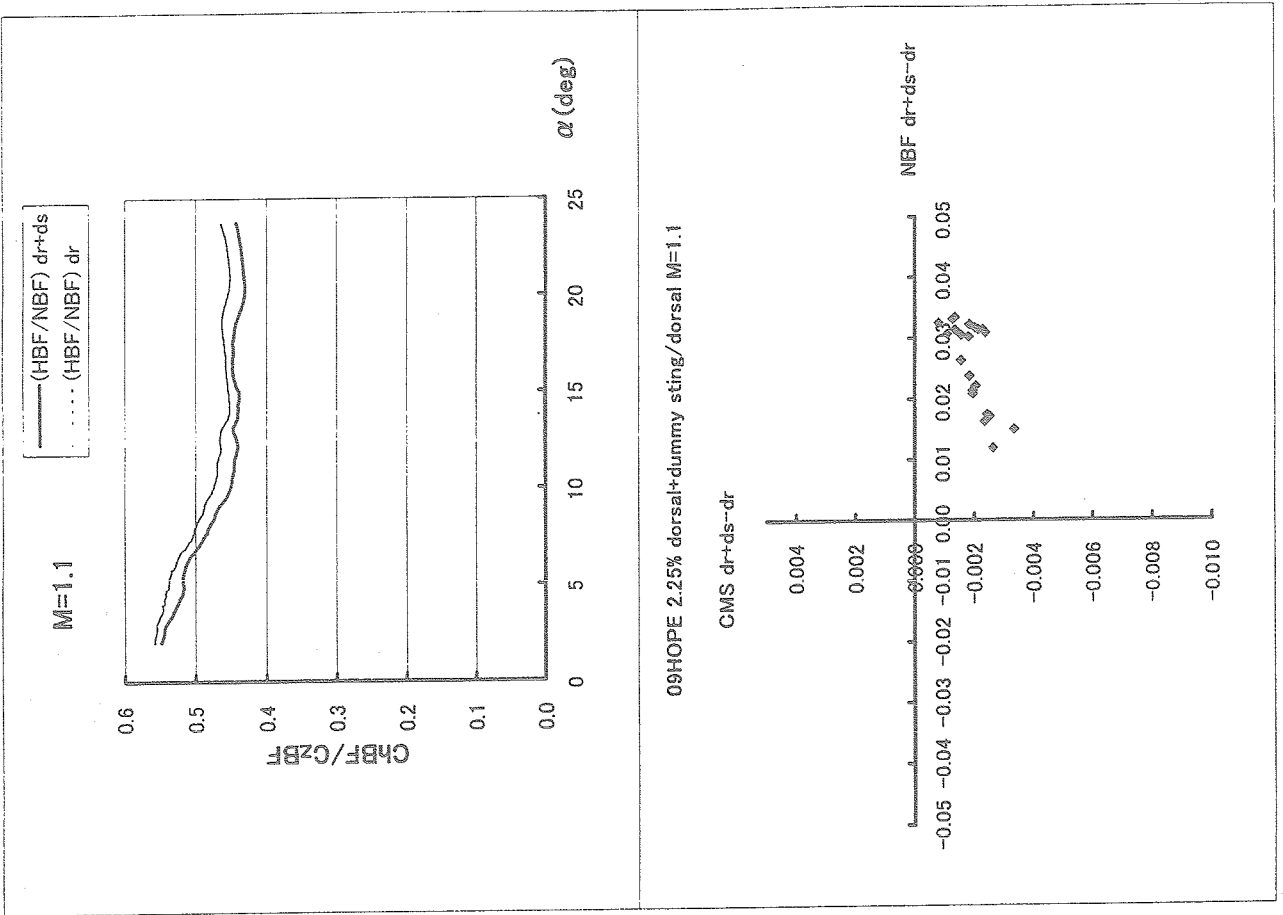


図8(b) ポディフリップ舵面垂直力の差とピッチング モーメントの差との相関

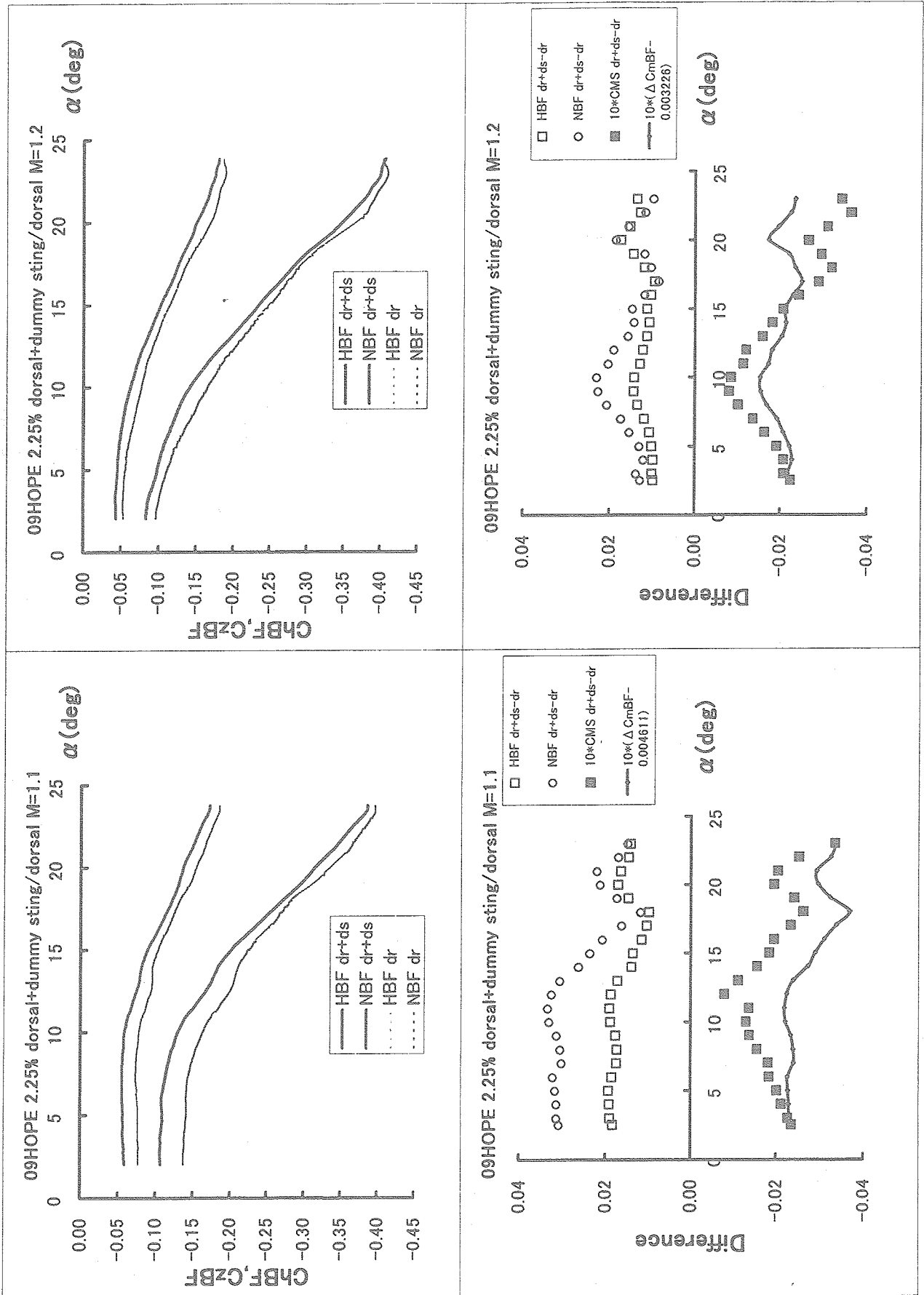


図9 ダミーステイニング+胴上支持と胴上支持におけるポディアラップ ヒンジモーメント及び純面垂直力の比較

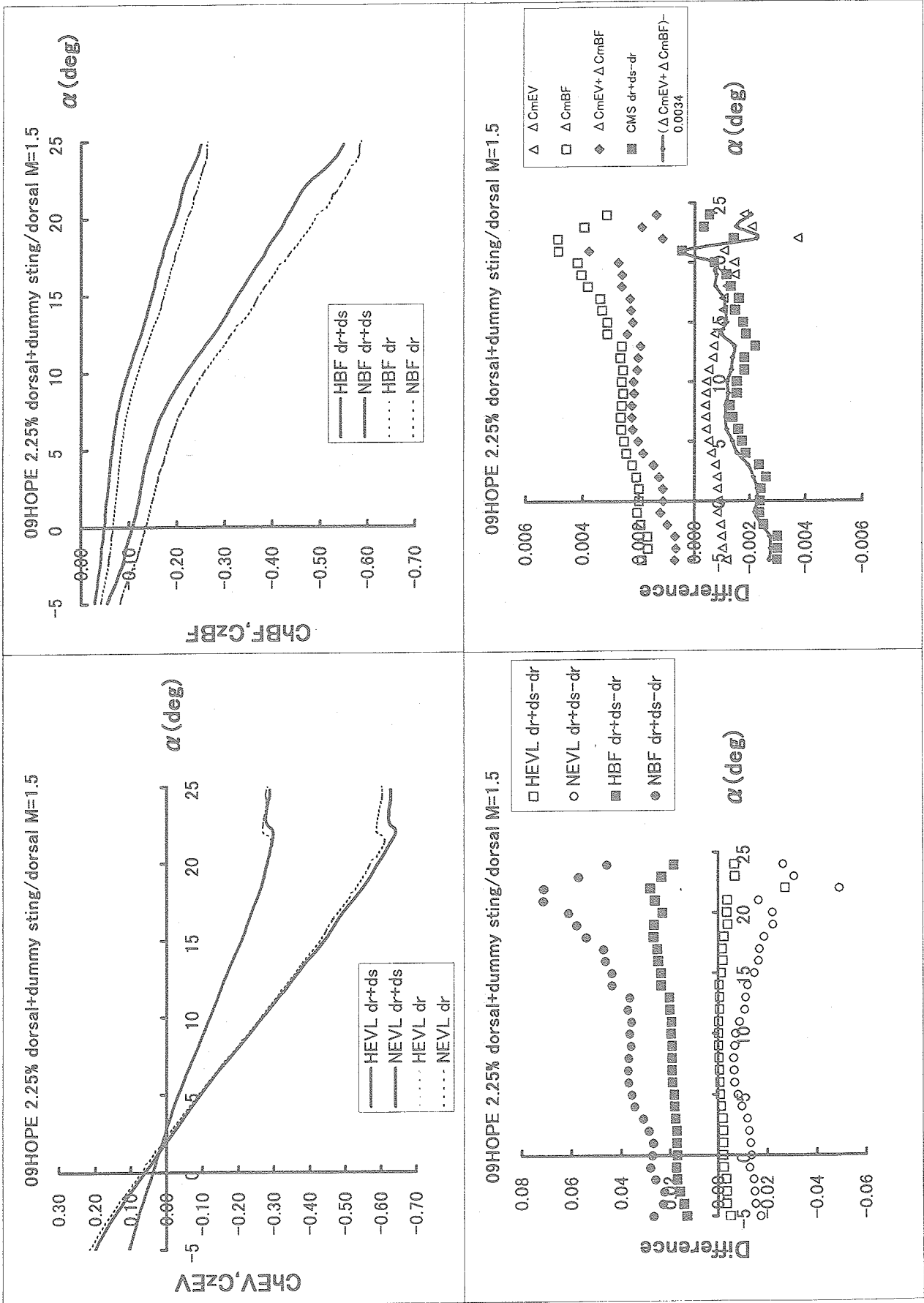


図10 エレボン及びひボディフラップにおけるヒンジモーメントと舵面垂直力の比較

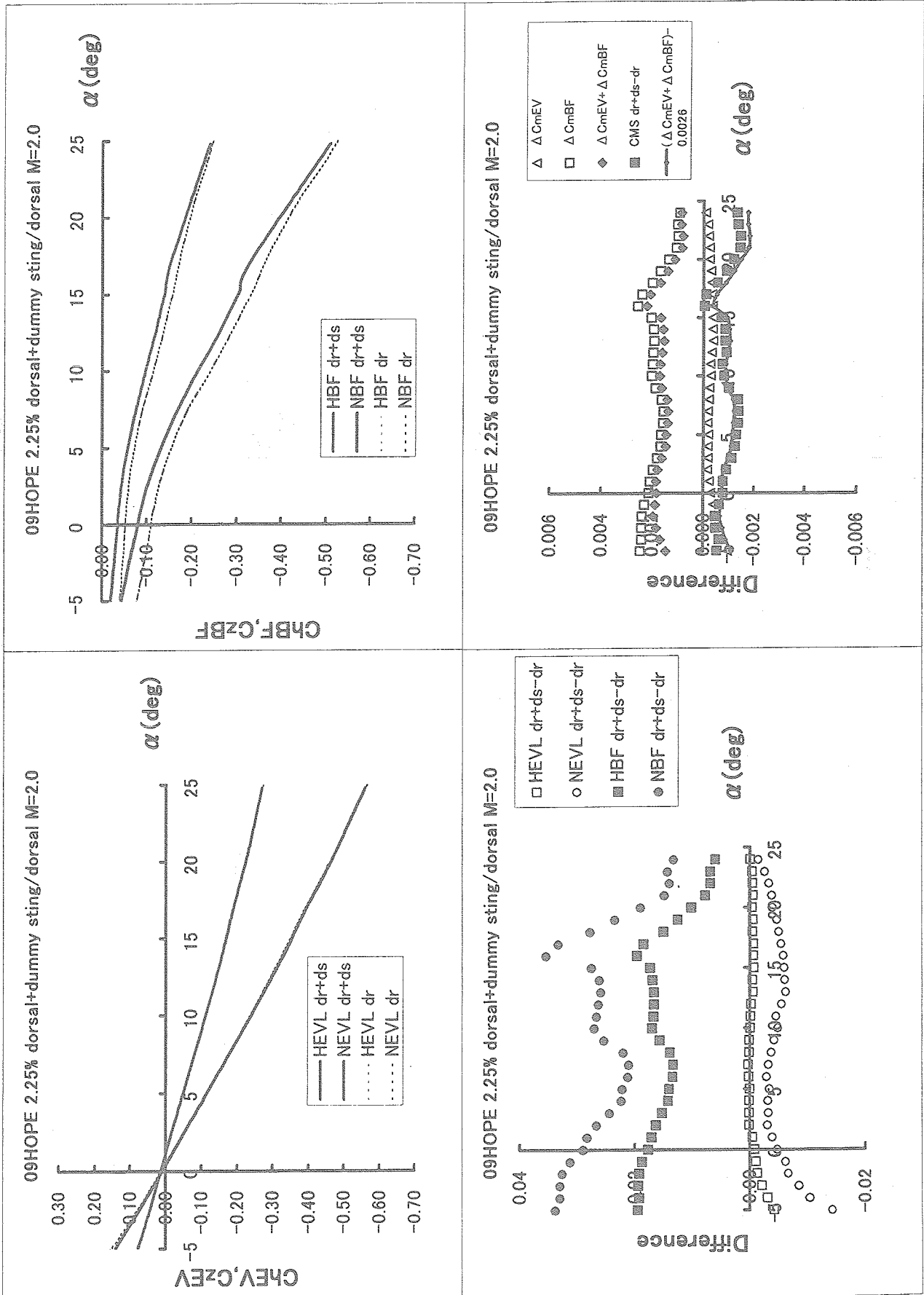


図11 エレポン及びボディアラップにおけるヒンジモーメントと舵面垂直力の比較

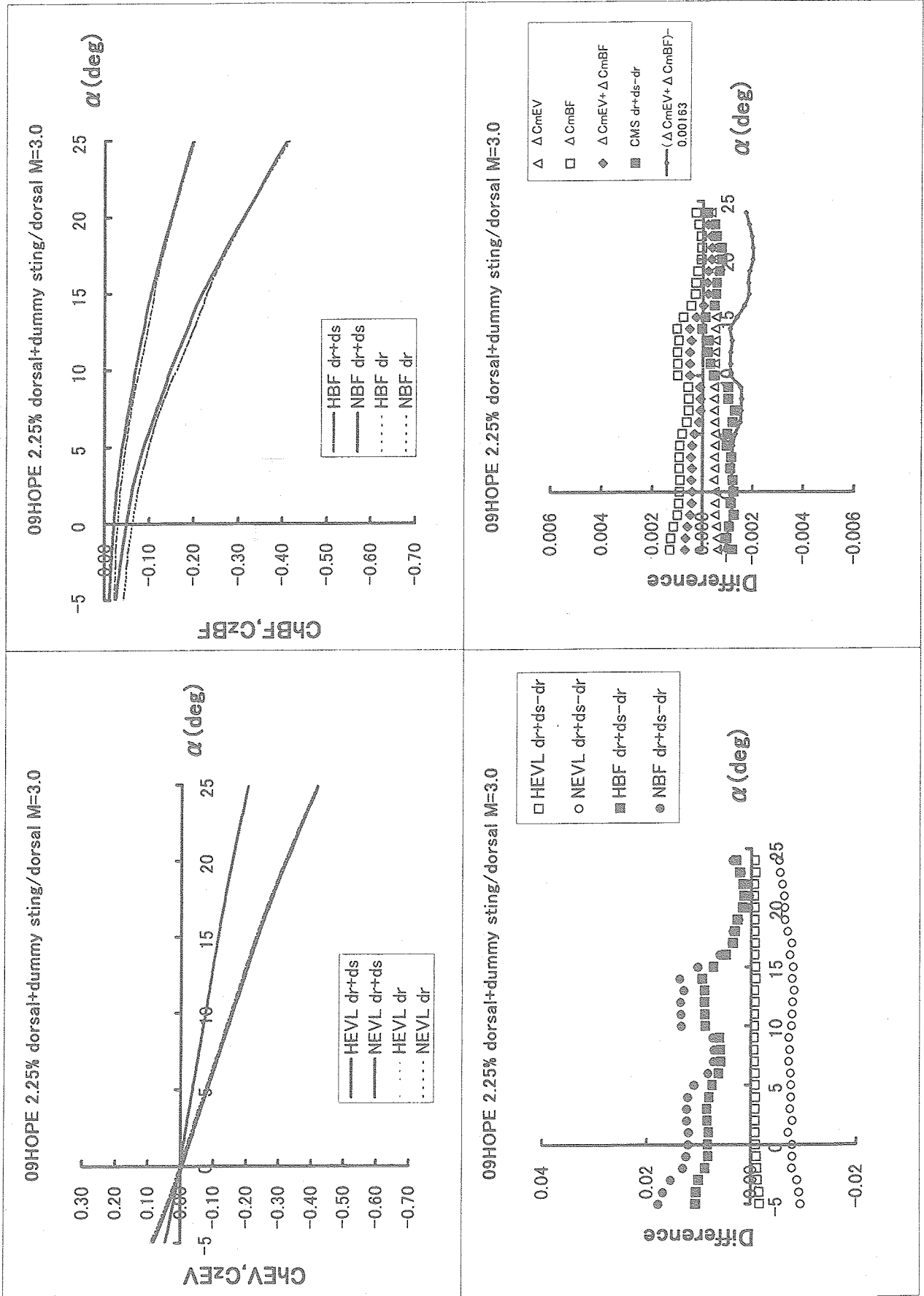


図12 エレボン及びボディアラップにおけるヒンジモーメントと舵面垂直力の比較