

ISSN 0452-2982
UDC 53.08
533.6.013
533.6.07
65.012.1

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-590

矢羽根を用いた冗長型気流方向測定装置 の風洞試験に関する報告

木村武雄・滝沢実・内田忠夫
藤枝郭俊・岩崎昭人・藤田敏美
染谷昭夫

1988年7月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

1. まえがき	1
2. 冗長型気流方向測定装置（三軸 α/β センサ・システム）の試作	2
3. 装置の検査・試験および調整等	3
4. ポテンショメータの特性試験	5
5. 三軸 α/β センサ・システムの観測方程式	9
6. 風洞試験の実験計画	9
7. 風洞による当システムの較正	11
8. 三軸 α/β センサ・システムの風洞試験	15
9. 考 察	37
10. 結 論	39
11. あとがき	40
参考文献	40
付録A	41
付録B	41

矢羽根を用いた冗長型気流方向測定装置 の風洞試験に関する報告*

木村武雄** 滝沢 実** 内田忠夫***
藤枝郭俊**** 岩崎昭人**** 藤田敏美****
染谷昭夫*****

1. ま え が き

航空機用飛行制御システムを高信頼度化する研究は、システムを構成する要素の高信頼度化の研究と同時に、システムの多重化または冗長化の研究に方向づけられている。航空機の α （迎え角）/ β （横滑り角）センサ・システムについても高信頼度化が要求され、当所で研究開発を進めているファンジェットSTOL実験機では、三重系のデジタルSCAS（安定制御増大システム）に対応して、一つのベーンに対して三つの回転角検出器が取り付けられた α/β センサが開発され、実際に使用されている。しかし、この α/β センサでは対気流に関し、ベーンが α および β について各々一つであるため冗長系とはいえ、信頼性の点では問題を残している。 α/β センサの多重システムを従来から用いられている直交系の配置で行うと、センサを多く使用する割には信頼性を高められない問題がある¹⁾。そこで、筆者らは、これまでに、飛行制御システムの高信頼度化の研究の一環として、従来、研究されていなかった冗長型気流方向測定装置（三軸 α/β センサ・システム）の理論的考察を行い、また、誤差解析を主な目的とした数値シミュレーションも行った¹⁾。その結果この装置に、基本的には、問題点の無いことが明らかとなった。そこで上記の研究成果に基づいて、基礎実験用三軸 α/β センサ装置を試作（図-1参照）し、風洞内にて、その測定原理を確かめ

ること、および、センサに故障の無い場合と、有る場合の測定精度を明らかにすることを主な目的とする風洞試験（写真）を行い、概ね良好な結果が得られたので、報告する。

なお、本報告では、風洞試験に先立って行われ

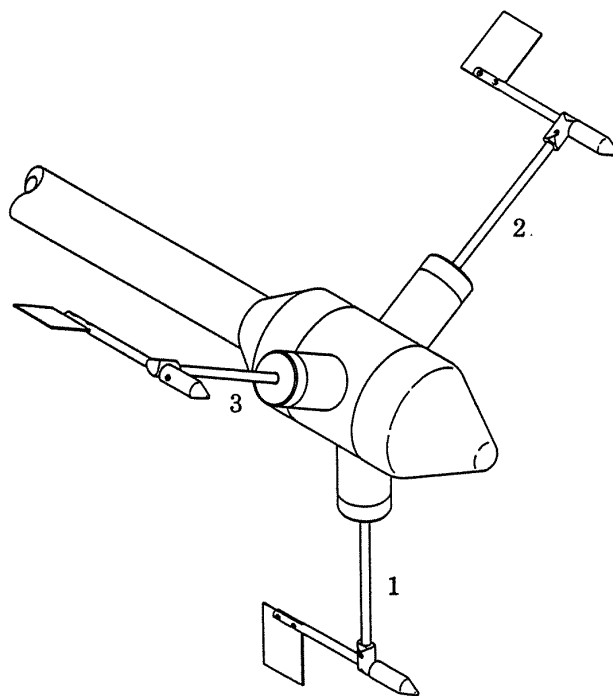


図-1 三軸 α/β センサ



写真 風洞試験風景

* 昭和63年5月18日受付

** 制御部

*** 飛行実験部

**** 新型航空機研究グループ

***** 元管理部工作課

た上記装置の予備的試験すなわち装置の調整および製品の精度の試験等についても、前半に、補足的に記述する。

2. 冗長型気流方向測定装置 (三軸 α/β センサ・システム) の試作

冗長型気流方向測定装置の理論的側面および三軸 α/β センサ・システムの数値解析については既に航技研資料TM-571で報告した(1987年4月)。本章では、それらの結果に基づき、一つの最適な三軸 α/β センサ・システム(図-1参照)の設計(図-2参照)に関することを述べる。尚、矢羽根の具体的形状等については航技研資料TM-119「ベーン型気流方向検出器の特性」²⁾を参考にし定めた。

2.1 強度

図-2を見ると、強度上の問題点は部品番号⑦支柱の高速気流中での強度だけで、他の部分は殆んど問題にならない程、強度的に十分剛であることが見て取れる。ここでは一番弱いと思われる支柱⑦の部分の強度計算結果を示す。計算の詳細については付録Aを参照されたい。

付録Aに示すように、風速 $v=50$ (m/s) として、

空気力による支柱最下部に生ずる最大曲げ応力 σ_b は

$$\sigma_b < 1.14 \text{ kg/mm}^2 \quad (2-1)$$

と計算され、支柱の材質(SUS304: 18_{Cr}-8_{Ni}ステンレス鋼)の許容曲げ応力は

$$\sigma_{ba} = 8 \text{ kg/mm}^2 \quad (2-2)$$

であるから強度上十分であることが分かる。

2.2 重りの計算

部品番号⑧は重り(材質は真鍮)であるが、この重りの大きさは矢羽根(ベーン)を形づくる全体(部品番号⑧, ⑨, ⑩)の重心が支柱⑦の中心軸に来るように設計されなければならない。ただし、この計算は概算でよい。というのは、止めネジ⑩および部品番号⑩に付いている止めネジ(部品番号⑲)によって、重りの位置をある程度自由に動かせるからである。計算方法は、部品番号⑧, ⑨, ⑩の力のモーメントの総和がゼロになるようにして求めた。計算の詳細は付録Bを参照されたい。

便宜上、部品番号⑧, ⑨, ⑩の部分を図-3のごとく簡単化し、更に、部品番号⑧の部分を円筒部分と円錐部分とに分けて考える。そして、円筒部分の長さを未知所求量とし、これを x で表す。

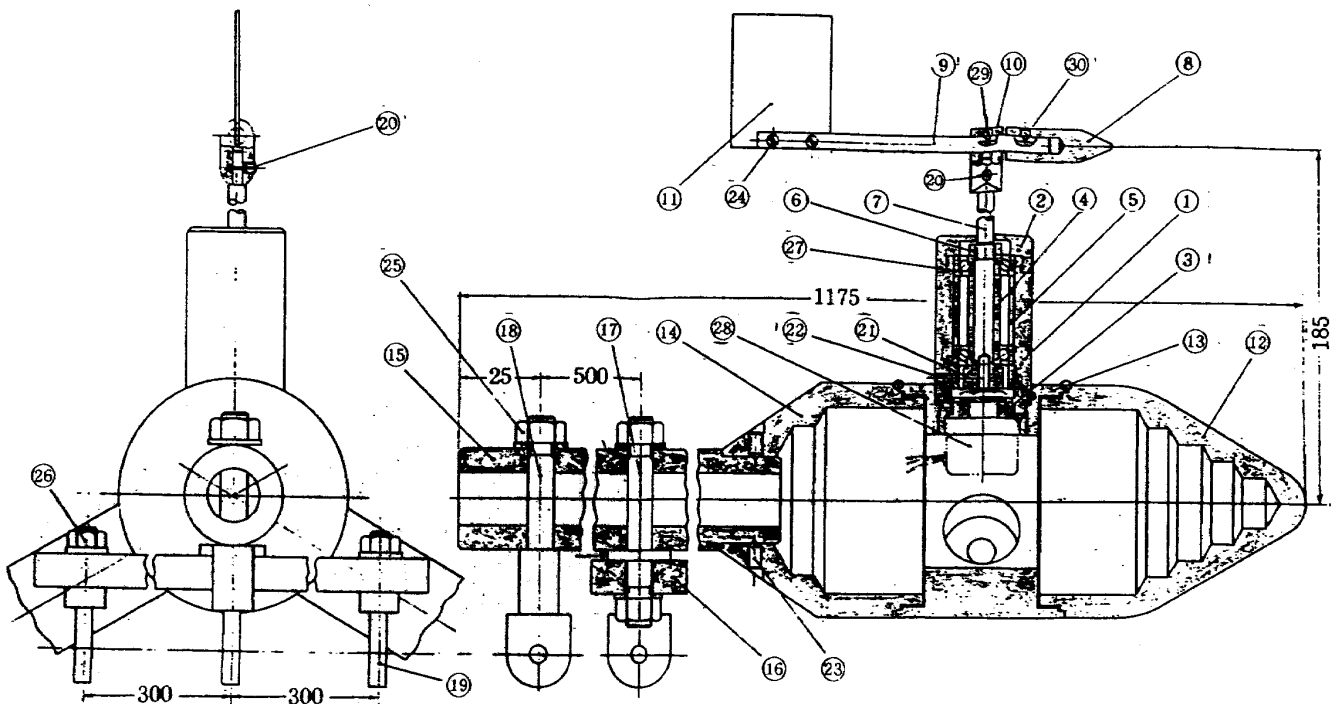
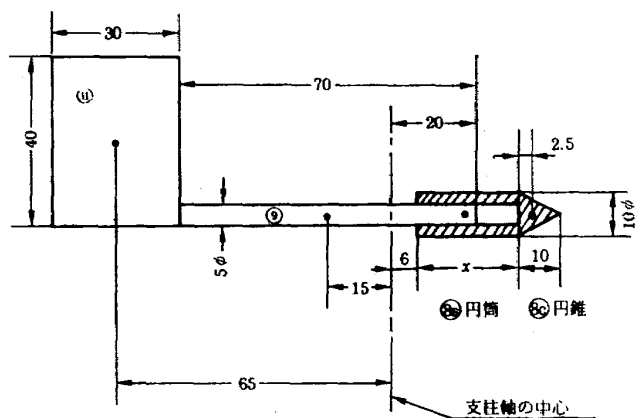


図-2 α/β センサ組立図



・：各部品番号の重心
部品番号：①、②、③、④

図-3 重りの計算

そうすると付録Bにより

$$x \approx 23 \text{ mm} \quad (2-3)$$

が得られる。

2.3 設計上の特徴および留意点

構造上、結合部分相互の部品の軸心を正確に合せなければならない箇所が多くある。この部分はネジ結合となるのであるが、ネジ面の嵌め合いのみでは、相互の部品の中心軸を正確に合わせることは望めない。このような場合、正確に軸心を合わせるには、円筒面の嵌め込み部分（インロー）を作って結合させると良く軸心が合う。本装置の重要な結合部（図-2において、部品番号①と部品番号②、部品番号①と部品番号③、部品番号③と部品番号④および部品番号③と部品番号④の結合部分）には全てこのインロー結合方式を用いた。なお、部品番号⑤の α/β センサ支持棒と部品番号④の α/β センサ支持金具(c)との結合は本来ならば、強度上、ネジ結合とすべきところであるが、部品番号⑦の支持ボルトの軸心と支柱（センサ1）の軸心を平行にした状態で固定しなければならないという使用上の制約があるため止めネジ結合にならざるを得なかった。しかし、強度的にはこれでも十分剛である。また、部品番号⑦の支持ボルトにおいて矢印（図-2）のフランジ（鏝：つば）の部分は部品番号⑥（風洞に取り付けるための支持金具）と部品番号⑦の支持ボルトとを正確に垂直にする役目を持つ。これは、風洞内において、

センサ1の回転軸（この軸は部品番号⑦の支持ボルトと平行に取り付けられている）を正確に床下方向に持って行くためである。

3. 装置の検査・試験および調整

この装置の製作は業者に依頼したが、ある程度厳しい精度を課せられているので、装置がうまく作動するかどうか、検査しなければならない。また、微妙な調整も必要である。以下に、これらの事柄について記述する。

3.1 センサ回転軸の配置角度の検査

センサ1, 2, 3の回転軸は、ある一つの平面上に乗るように設置される（この平面性の度合については、部品番号③の軸心を法線とする垂直面に対して、各センサの支柱がどの程度傾いているかをダイヤルゲージを用いて測定した結果、最大0.1度ほどであった）が、センサ相互は、ほぼ、120度間隔に配置されることが望ましい。しかし、工作精度上の制限があるので、出来上がった製品について、どの程度正確に設定されているか、この間隔を精密に測定しておく必要がある。測定は支柱受筒（部品番号④）と支柱（部品番号⑦）について行った。測定結果を次に示す。ただし、測定精度は±10秒（0.0028）である。

(a) 支柱受筒について

$$\angle \text{センサ } 1, 2 = 120 \text{度 } 15 \text{分} \quad (120.250 \text{度}) \quad (3-1)$$

$$\angle \text{センサ } 2, 3 = 119 \text{度 } 53 \text{分} \quad (119.883 \text{度}) \quad (3-2)$$

$$\angle \text{センサ } 3, 1 = 119 \text{度 } 52 \text{分} \quad (119.867 \text{度}) \quad (3-3)$$

(b) 支柱について

$$\angle \text{センサ } 1, 2 = 120 \text{度 } 16 \text{分} \quad (120.267 \text{度}) \quad (3-4)$$

$$\angle \text{センサ } 2, 3 = 119 \text{度 } 51 \text{分} \quad (119.850 \text{度}) \quad (3-5)$$

$$\angle \text{センサ } 3, 1 = 119 \text{度 } 52 \text{分} \quad (119.867 \text{度}) \quad (3-6)$$

3.2 矢羽根の尾翼 (部品番号⑩) の曲り (ねじれ)

尾翼の曲がり、センサ3が一番大きく、ベーン軸方向におよそ0.7~1.0度、それと垂直方向(回転軸方向)におよそ2.4~2.7度傾いている。センサ2が次に大きく、ベーン軸方向におよそ0.7~1.0度、それと垂直方向(回転軸方向)におよそ1.1~0.9度傾いている。この傾斜はセンサ1が一番小さく、ベーン軸方向におよそ0.02~0.3度、それと垂直方向(回転軸方向)におよそ0.2~0.4度傾いている。この傾斜による影響については、第9章で考察する。

3.3 センサ1の鉛直度設定

センサ1, 2, 3の回転軸は相互に120度ほどの間隔に配置されているが、この内センサ1の回転軸は、図-1(この図は装置を風洞に設置した場合の定常の位置、すなわち、 $\alpha = \beta = 0$ の位置である)において、正確に鉛直真下を向いていることが望ましい。この設定方法は、部品番号⑩支持ボルトの軸心とセンサ1の回転軸の軸心とが精密に平行になるようにすること、すなわち、部品番号⑩ α/β センサ支持棒の支持ボルト穴に精密嵌合の丸棒を挿入した状態で、定盤上に定置した1組の精密Vブロック上に部品番号⑩ α/β センサ支持棒を固定すると共に、挿入した丸棒の軸心を定盤面に平行になるように精密にセットする。次に、センサ1の回転軸の軸心が定盤面に平行になるように、微調回転を行った後、止めネジ(部品番号⑭)を絞め付け、固定する。なお、以上のような精密平行セッティングはレバー形ダイヤルゲージ(一目もり10マイクロン)を用いることにより、容易に行うことができる。

さて、以上の設定により、センサ1, 2, 3の絶対位置は、(3-1), (3-2), (3-3)式を考慮して、次の通りとなる。ただし、真下をゼロとし、風上から見て反時計周りをプラスとする。

$$\text{センサ1: } 0\text{度}00\text{分} (0.00\text{度}) \quad (3-7)$$

$$\text{センサ2: } 120\text{度}15\text{分} (120.25\text{度}) \quad (3-8)$$

$$\text{センサ3: } 240\text{度}08\text{分} (240.13\text{度}) \quad (3-9)$$

3.4 ポテンショメータのゼロ点の設定

風が真正面から吹いて来るときの3個のセンサの出力をそれぞれゼロ点としなければならない(図-2参照)。そこでまず、定盤上に定置した1組の精密Vブロック上に部品番号⑩ α/β センサ支持棒を固定する。次に、部品番号⑩のベーン軸心を定盤面に平行にセットし、止めネジ(部品番号⑭)を緩め、ポテンショメータに直結している支柱⑦をその軸心に沿って静かに回転させ、ポテンショメータの出力が2.5Volt程度(ポテンショメータへの入力)は5Voltなので、その1/2がゼロ点)で、ポテンショメータをプラス側に回転させたとき、出力がプラスになる所を捜し、できるだけ2.5Voltに近い所で止めネジ(部品番号⑭)を締める。これを、センサ1, 2, 3について行った。このときの精度は、いづれも、 $\pm 0.02\text{Volt}$ (≈ 1.2 度)以内であった。

尚、このゼロ点および上記のセンサ1, 2, 3の位置については、風洞内にて、あらためて校正する。この校正については、第7章で記述する。

3.5 センサの回転摩擦トルクの試験

図-4に示すごとく、センサを水平面上に置き、天秤用の分銅を尾翼の上に載せて、センサが回転する最小の重りを捜す。そして、回転軸の中心から、重りを載せた位置までの距離を測り、その距離と先の重りの重さを掛ける。結果は次の通りで

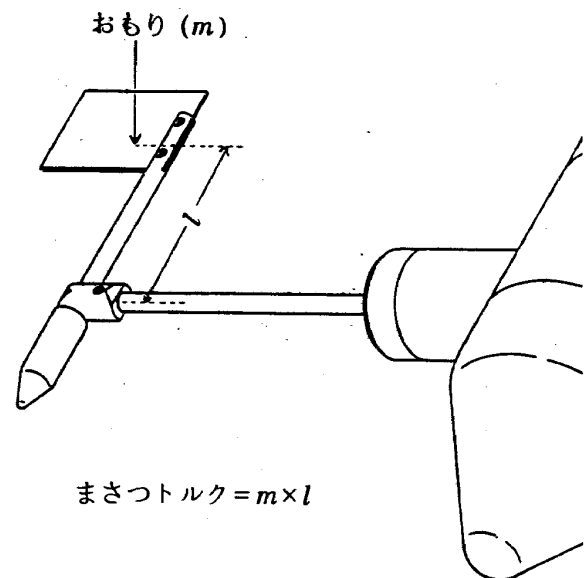


図-4 摩擦トルクの計算

ある。

センサ 1

+回転側 : 0.6g cm (3-10)

-回転側 : 0.6g cm (3-11)

センサ 2

+回転側 : 3.0g cm (3-12)

-回転側 : 1.2g cm (3-13)

センサ 3

+回転側 : 1.2g cm (3-14)

-回転側 : 1.2g cm (3-15)

3.6 上記摩擦トルクによる不感帯

摩擦トルクを M とし、不感帯を $\pm\theta$ とすると

$$M = \rho v^2 A C_L \ell / 2 \quad (3-16)$$

と表わされる。ただし

$\rho = 0.13 \text{ kgs}^2/\text{m}^4$: 空気密度

$v = 10 \text{ m/s}$: 風速

$A = 12 \text{ cm}^2$: 平板の面積

$C_L = 2\pi\theta$: 平板の揚力係数³⁾

$\ell = 5.75 \text{ cm}$: 回転軸心より風圧中心までの距離

である。

便宜上、摩擦トルクを 3.0 g cm とし、不感帯 θ を求める。(3-16)式より、

$$\theta = M / \rho v^2 A \pi \ell$$

$$= 3 \text{ g cm} / \{ (0.13 \text{ kgs}^2/\text{m}^4) (10 \text{ m/s})^2$$

$$\times 12 \text{ cm}^2 \times 3.14 \times 5.75 \text{ cm} \} = 0.01065 \text{ rad}$$

$$\approx 0.61 \text{ 度}$$

となる。また仮に、風速 v を 10 m/s の 2 倍の 20 m/s とすれば、不感帯 θ は 0.61 度 の $1/4$ の約 0.15 度 となる。

4. ポテンショメータの特性試験

ポテンショメータの特性試験は上記の装置の検査・試験および調整に先立って 2 回行われた。

4.1 試験方法

(a) 試験装置 (図-5 参照)

回転角の基準としてはロータリ・エンコーダ (日本光学社製 : RHA-43200) を用いた。この精度は最小読み 30 秒 (約 0.008 度) である。このエンコーダと、試験されるべきポテンショメータ (緑測器社製 : CP-2U) はカップリング (日本光学社製 : L-A2) で結合され芯合せを比較的容易にしている。とはいえ、ポテンショメータ回転角測定装置 (図-5) の設計においては、この芯合せを確実なものとするため、各関係部品 (部品番号 ①~⑦) の寸法許容誤差、各部平行度および直角度を厳しく決定した。この装置の製作も業者に依頼したが、出来上がった製品の精度は十分であった。

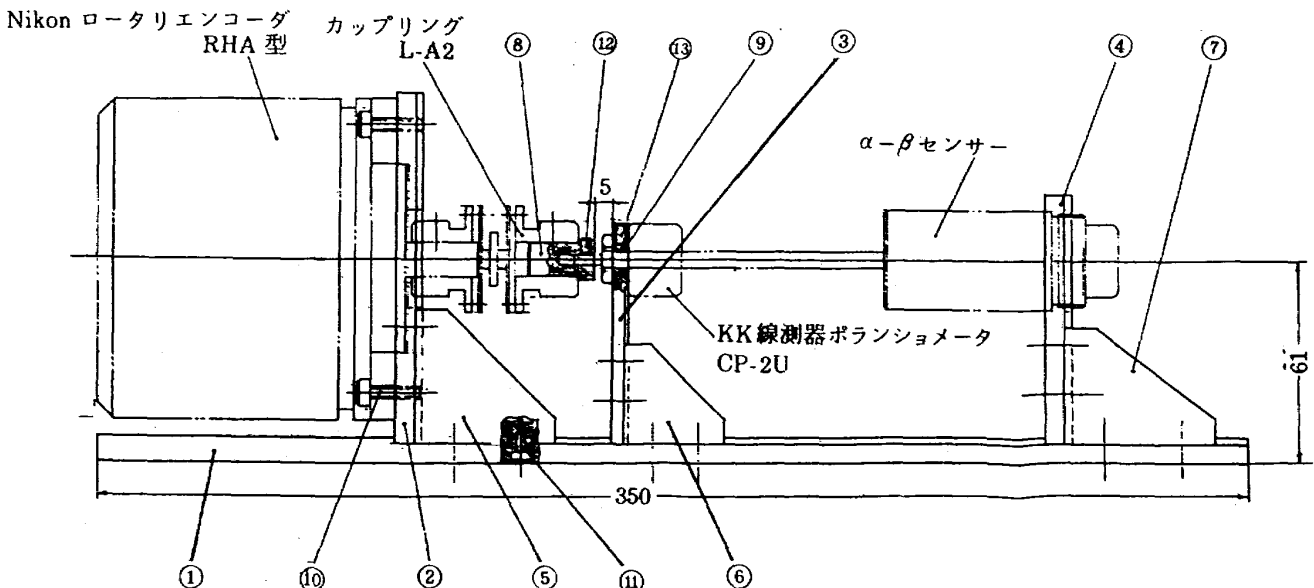


図-5 ポテンショメータ回転角測定装置

(b) 試験手順

ポテンショメータへの入力電圧を 5Volt とし、ポテンショメータを回転（ロータリ・エンコーダも同時に回転する）させて、出力電圧が入力電圧の約 1/2 の 2.5Volt 近辺となる場所を捜す。その位置は二つあるが、どちらか一方をゼロ点としなければならない。この決め方は、ポテンショメータをプラス側に回転させたとき、出力がプラスになる方をゼロ点とする。このときエンコーダの表示をゼロにリセットする。そして、エンコーダの表示を見ながら約 5 度ずつ回転させ、エンコー

ダの表示とポテンショメータの出力電圧双方を読み取る。

4.2 試験結果

図-6～図-11に結果を示す。各グラフの直下の A-1 とか B-2 とか A-3 とかに付いている数字 1, 2 および 3 はセンサの番号であり、A は一回目の試験、B は二回目の試験を意味する。図の下部に、試験した月日とそのときの気温が示されている。また、A-2(55) とかの (55) の意味は、およそ ±55 度以内のデータ 23 点を用いた場合のグラフで

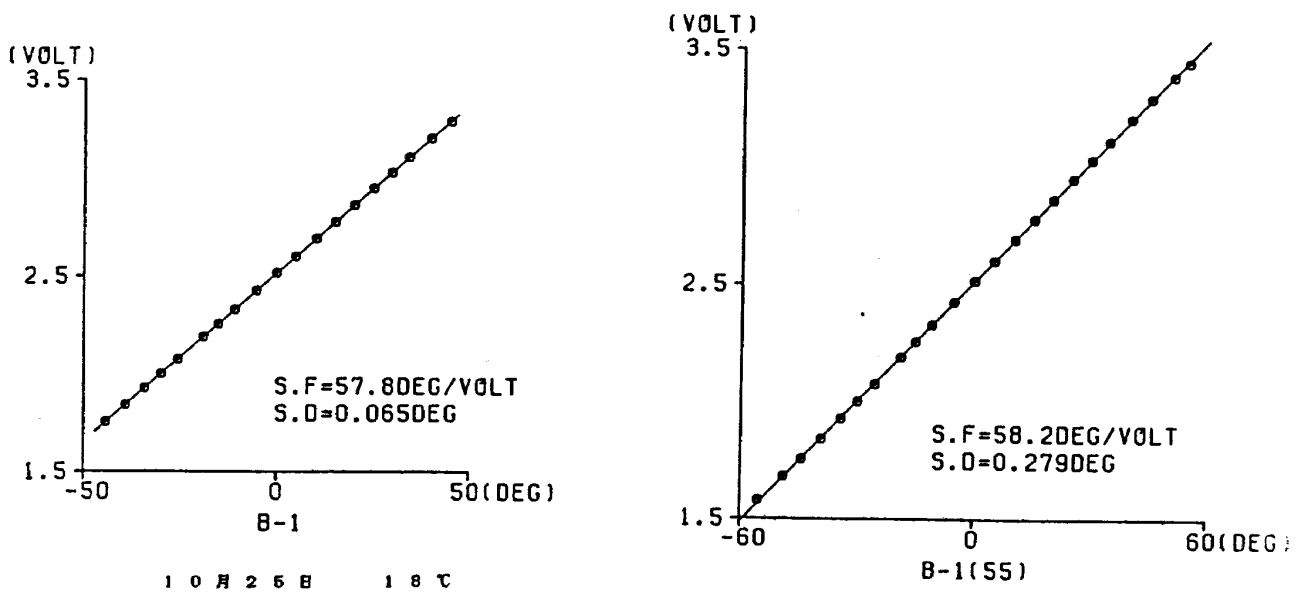


図-6 ポテンショメータ 1 の出力係数と直線性（8月測定）

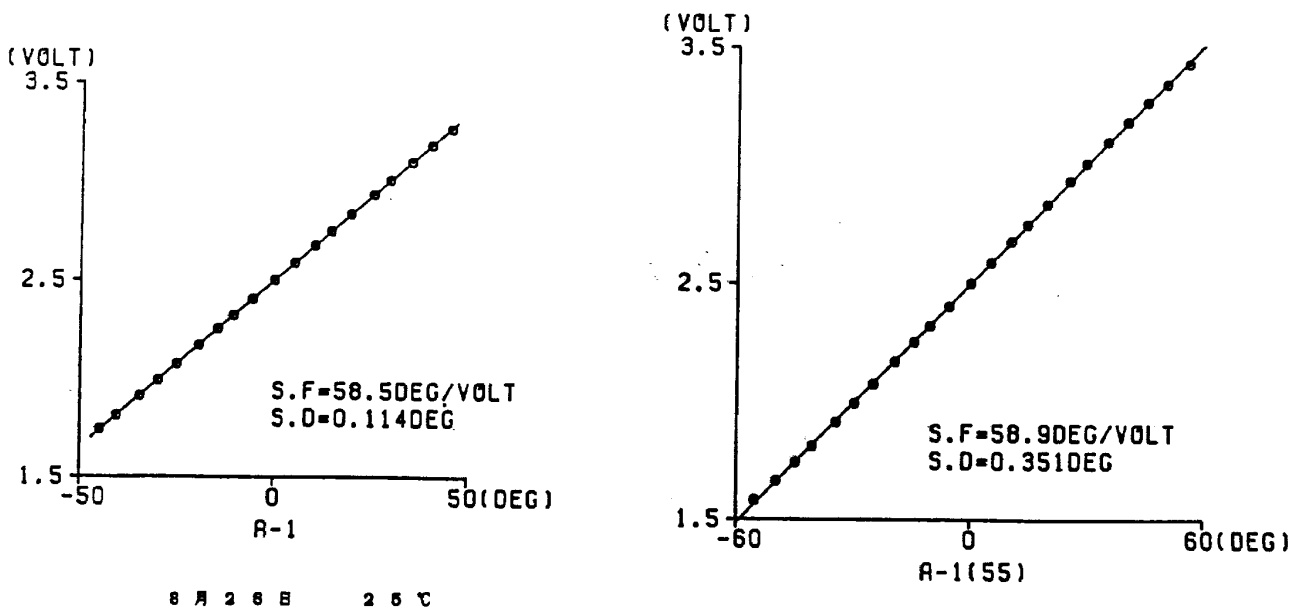
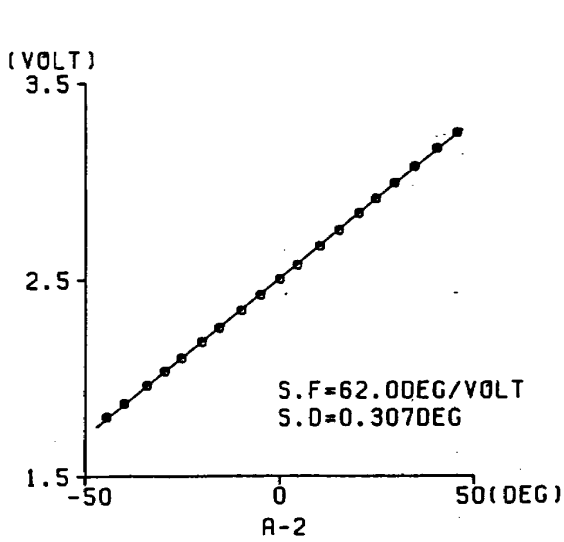
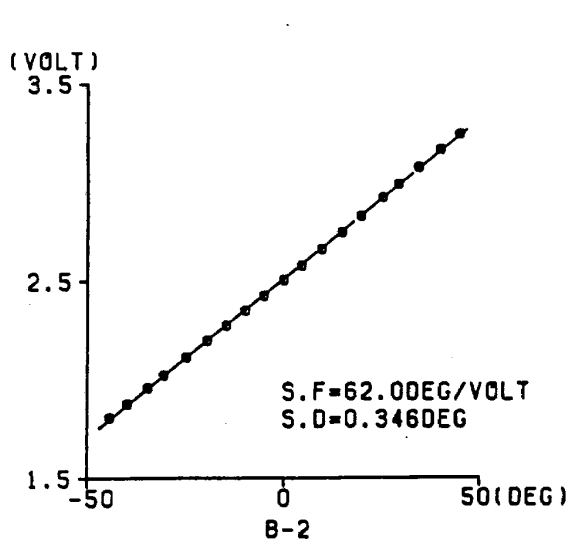
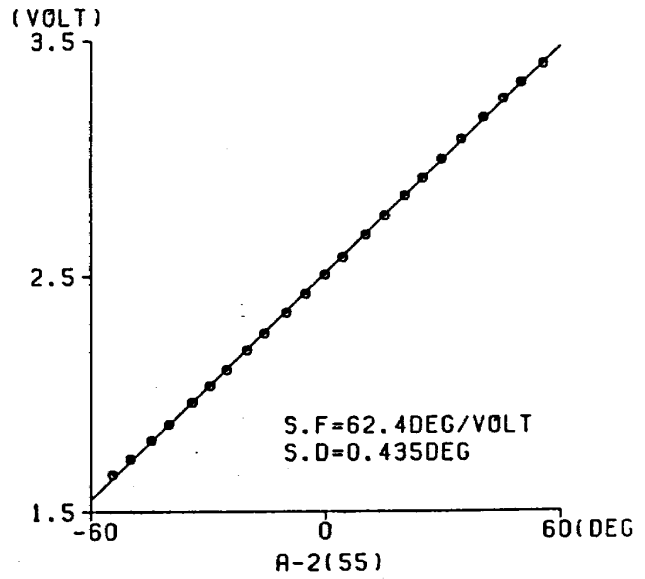


図-7 ポテンショメータ 1 の出力係数と直線性（10月測定）



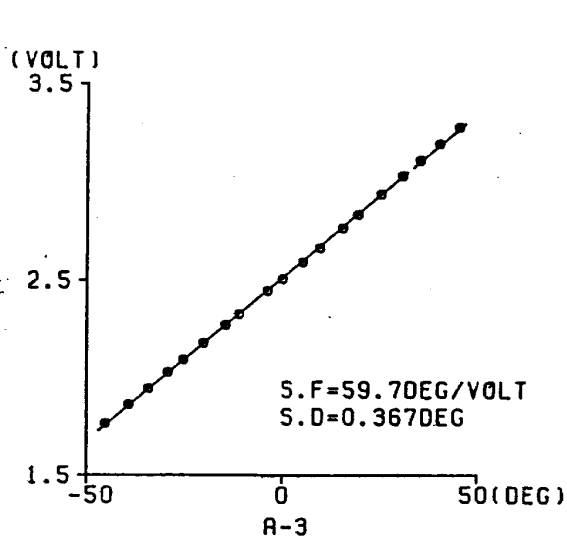
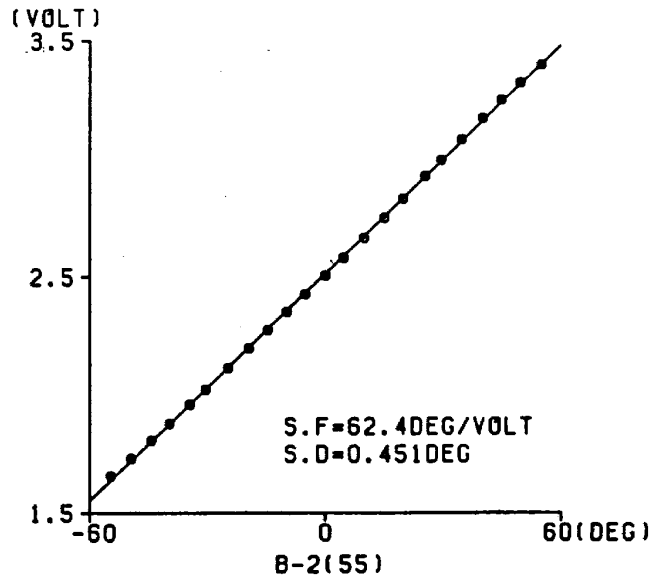
8月26日 23℃

☒-8 ポテンショメータ 2 の出力係数と直線性 (8月測定)



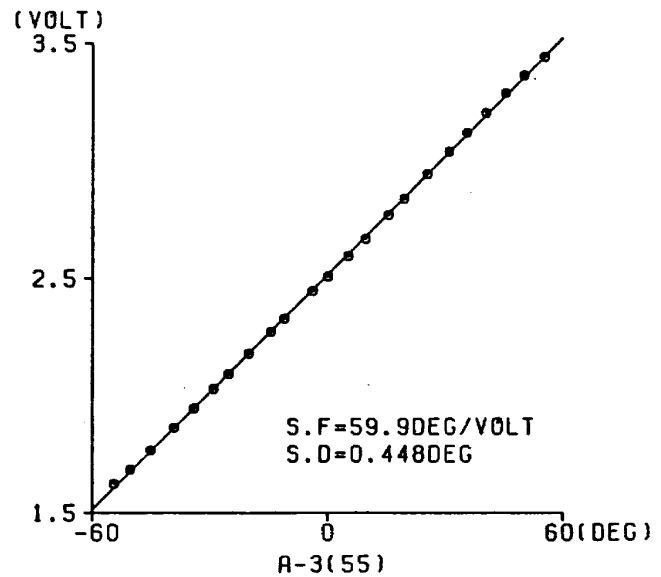
10月25日 19℃

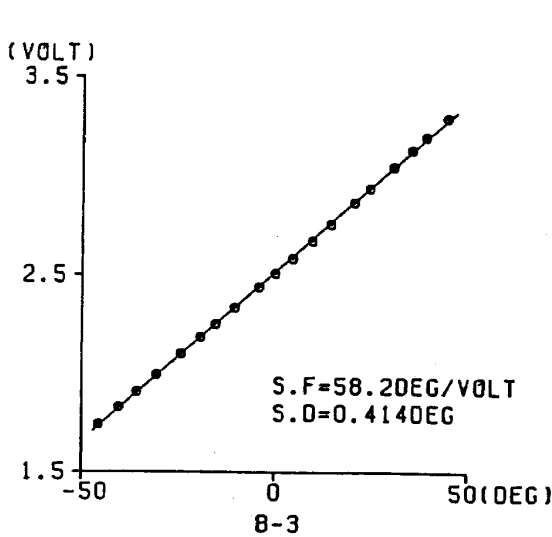
☒-9 ポテンショメータ 2 の出力係数と直線性 (10月測定)



8月26日 23℃

☒-10 ポテンショメータ 3 の出力係数と直線性 (8月測定)





10月26日 19.7

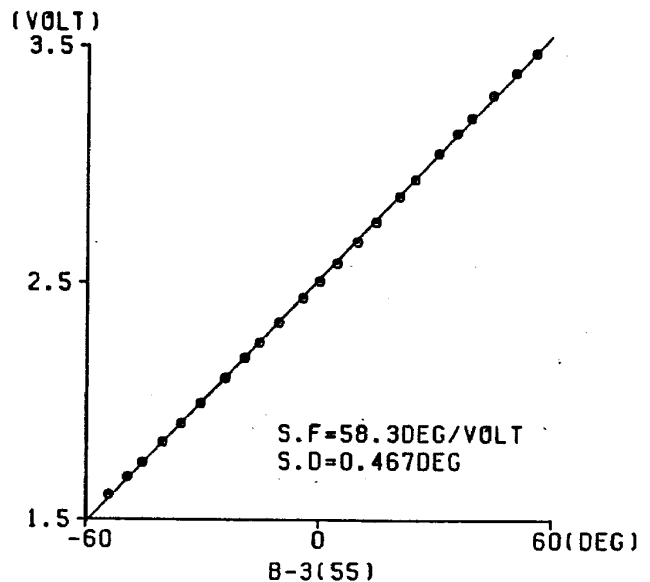


図-11 ポテンショメータ 3 の出力係数と直線性 (10月測定)

あり、(55)と書いてないグラフでは、本来(45)と書くべき処で、およそ±45度以内のデータ19点を用いた場合のグラフである。

図に示すように、エンコーダの表示すなわち回転角をX軸とし、ポテンショメータの出力電圧をY軸として、グラフを描かせた。このグラフを最小二乗法で直線近似する。すなわち

$$y_i = ax_i + b \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (4-1)$$

ここに

i : 測定番号

n : データ数 (本報告の場合、この数は19または23)

y_i : ポテンショメータの出力

x_i : エンコーダの出力

a : 直線の傾き (未知量)

b : バイアス (未知量)

とし、残差 ρ_i ($i=1, 2, \dots, n$) すなわち

$$\rho_i = y_i - (ax_i + b) \quad (4-2)$$

の二乗和が最小となるように、 a, b を定める。

(a) 出力係数 (スケール・ファクター)

最小二乗法で求めた(4-1)式における a (単位は Volt/DEG) または、その逆数 $1/a$ (図には、この値が S.F=として書かれている。単位は DEG/Volt) が出力係数である。

(b) 直線性

上述の残差の最小二乗和を $(n-2)$ で割り、その

表-1 センサ 1, 2, 3 の出力係数と直線性 (±45度以内の場合)

	センサ 1		センサ 2		センサ 3	
	出力係数 (DEG/V)	直線性 (DEG)	出力係数 (DEG/V)	直線性 (DEG)	出力係数 (DEG/V)	直線性 (DEG)
8月	58.5	0.114	62.0	0.307	59.7	0.367
10月	57.8	0.065	62.0	0.346	58.2	0.414
平均	58.2	0.090	62.0	0.327	59.0	0.391

表-2 センサ 1, 2, 3 の出力係数と直線性 (±55度以内の場合)

	センサ 1		センサ 2		センサ 3	
	出力係数 (DEG/V)	直線性 (DEG)	出力係数 (DEG/V)	直線性 (DEG)	出力係数 (DEG/V)	直線性 (DEG)
8月	58.9	0.351	62.4	0.435	59.9	0.448
10月	58.2	0.279	62.4	0.451	58.3	0.467
平均	58.5	0.315	62.4	0.443	59.1	0.458

平方根をとれば、それが標準偏差である。そのときの単位は Volt である。また、その標準偏差に先の出力係数 $1/a$ を掛ければ、単位は度となり分

かりやすい(図には、この値がS・D=として書かれている)。いずれにしろ、そのような値が、ここで言う直線性の目安となる。なお、直線からの最大のズレは標準偏差S・Dの三倍程度である。以上の結果の数値を表-1, 2にまとめる。

以上の試験, 調整, 計算などによって, ほぼ, 所期の目的が達せられ, 三軸 α/β センサ・システムを風洞試験に持込める見通しを得た。

5. 冗長型気流方向測定装置の観測方程式

従来の, 矢羽根を用いた気流方向測定装置(α/β センサ・システム)は, センサの回転軸が水平か垂直のいずれかであった。ここでは, もっと一般的に, 斜めに回転軸を配置する(センサの回転軸は, 後に述べるyx平面上に限定して取り付けるものとする)場合も考慮して, 矢羽根を用いた気流方向測定装置(α/β センサ・システム)の測定原理を表わす基本的関係式を明らかにする。詳しくはTM-571を参照されたい。

まず, 次のような記号を導入する。

座標系: x (機首方向)
 y (右翼方向)
 z (床下方向)

風向ベクトル: v

風向ベクトル v の x 成分: v_x
 y 成分: v_y
 z 成分: v_z

迎え角: α , ただし $|\alpha| \ll 90$ 度とする。

'擬'横滑り角: b , ただし $|b| \ll 90$ 度とする。

横滑り角: β , ただし $|\beta| \ll 90$ 度とする。

そうすると

$$\tan \beta = \tan b \cos \alpha \quad (5-1)$$

もしくは, 逆に

$$\tan b = \tan \beta / \cos \alpha \quad (5-2)$$

と表わされる。

ここで

センサの配置角度: θ_i

センサ真値: δ_i

とすると, 次のような関係式がなりたつ。

α の定義より

$$\tan \alpha = v_z / v_x \quad (5-3)$$

b の定義より

$$\tan b = v_y / v_x \quad (5-4)$$

また

$$\begin{aligned} v'_x &= v_x \\ v'_y &= v_y \cos \theta_i + v_z \sin \theta_i \\ v'_z &= -v_y \sin \theta_i + v_z \cos \theta_i \end{aligned} \quad (5-5)$$

であるので, δ_i の定義より

$$\tan \delta_i = v'_y / v'_x \quad (5-6)$$

従って, (5-3), (5-4), (5-5), (5-6)式より

$$\tan \delta_i = \sin \theta_i \cdot \tan \alpha + \cos \theta_i \cdot \tan b \quad (5-7)$$

となる。上式(5-7)が, 迎え角(α), '擬'横滑り角(b)とセンサ真値(δ_i)を結ぶ基本的関係式であり, 観測軸が斜めの場合も含めた一般的測定原理を表わす。

6. 風洞試験の実験計画

この風洞試験の主な目的は, まえがきの所でも述べたように, 測定原理を実証すること, および, センサに故障が無い場合と有る場合の測定精度を明らかにすることであるので, その線に沿って, 実験計画を練った。次に述べる実験計画は何回かの改定を経て, 定められた。決められた内容は次の通りである。

日 時: 1985年12月2日(月)~12日(木)

予備日16日(月)

場 所: 突風風洞(新型航空機研究グループ)

実験者: 木村武雄, 滝沢 実, 内田忠夫, 藤枝 郭俊, 岩崎昭人, 藤田敏美, 穴戸 優

実験要領

- (1) 入力: 三つのセンサへ5Volt-DC (KIKUSUI Model 7326安定電源)を供給。
- (2) 出力: センサ1, センサ2およびセンサ3より, いずれも1.5Volt~3.5Voltの間の値のほぼ一定の定電圧

- (3) 出力係数(スケール・ファクタ), および, センサの位置等の校正(3×3=9ケース)

風速: 30m/sec

α : -30, 0, 30 DEG

β : -30, 0, 30 DEG

センサ1, 2, 3

サンプリング: 20msec

500point (10sec)

(4) 静特性 (4×8×9=288ケース)

風速 : 10, 20, 30, 40m/sec

 α : -30, -20, -10, 0, 10, 20, 30, 40 DEG β : -40, -30, -20, -10, 0, 10, 20, 30, 40

DEG

センサ 1, 2, 3

サンプリング : 20msec

500point (10sec)

同時性 9msec (出力電圧 1,

出力電圧 2, 出力電圧 3 の間

の同時性は 2msec)

(5) 動特性 (3×3×2=18ケース)

センサ : 1, 2, 3

風速 : 20, 30, 40m/sec

設定角 : -20, 20 DEG

サンプリング : 10msec

1000point (10sec)

但し、動特性については本報告のテーマとはしない。

(6) 計測および記録

実験値の計測には、突風風洞のデータ処理装置を使用した。測定量は、デジタル値に変換してMTに記録し、編集した後に通信回線で調布システム演算処理部に転送した。A/D変換器は分解能が10m Voltで、入力レンジが±10 Voltなので、出力電圧 1, 出力電圧 2, 出力電圧 3は、いずれも1.5~3.5 Voltの間の値であり、各出力電圧とも2.5 Volt キャンセルして、各出力電圧が±1.0 Volt 以内となるようにし、更に、それを10倍に増幅することにより、A/D変換器の入力レンジ・±10 Volt をマルに活用し、計測精度を向上させた。最終的な実験データは次のような順序でMT (標準ラベル, 1600 BPI, 2400 Feet, 3巻) に収録された。

- (0) 時刻, (1) 入力電圧, (2) 出力電圧 1,
(3) 出力電圧 2, (4) 出力電圧 3, (5) 温度,
(6) 圧力 1, (7) 圧力 2, (8) α , (9) β

(7) 実験順序

- ① 静特性試験を先にし、動特性試験を後にする。

② 先に β を固定し、 α をスイープする。たとえば、原則として、 $\beta=-40$ 度のとき、 α は-30→40度とスイープし、次に、 $\beta=-30$ 度としたとき、 α は40→-30度と逆にスイープする。これを繰り返す。

③ 実験の最初と最後に校正を行う。

(8) 備考 (風洞特性について)

この冗長型気流方向測定装置の風洞試験において、風洞気流特性として重要なのはその測定部断面内の風向が一様であることで、速度変動、風速分布、乱れ等は測定原理上その測定値には殆ど影響しない。風洞測定部断面内の風向分布測定は非常に難しいが、その風速分布が一様で乱れが小さければその風向分布も良好であることが推察できる。

この試験で使用した風洞は突風風洞と称し、その風洞測定部を突風用カートから固定壁カートへ交換することにより、突風風洞としてばかりでなく、一般的な低速風洞としても利用できるようになっている風洞である。本風洞の諸元及びその気流特性の詳細については文献5)に示されているが、その低速風洞としての諸元と気流特性の代表値について下記に示す。

低速風洞性能

型 式 : 循環式・閉鎖型

測定部断面寸法 : 2m×2m

測定部断面形状 : 正方形

測定部断面長さ : 4m

断面内風速分布 : 設定風速に対して±1%
以内

風の乱れ度 : 0.06%

 α , β 設定精度 : ±0.05度以内

上記中には風向分布が示されていないが、当風洞完成時の風洞性能試験では気流糸とカセットメータにより風洞の中心線上で測定されており、その結果ではほぼ0.3度 (風速50m/sec) 以内であり、風速分布や乱れ度などと併せ、装置の校正用風洞として十分な精度を有する気流特性である。

装置を風洞に取り付けるに当たっては、支柱及びその風防による気流の変化の影響を避けるため、装置を風洞中心上方約50mm, 支柱から約500mm

前方になるように取り付けた。

7. 風洞による三軸 α/β センサ・システムの校正

センサ 1, 2, 3 の各々の正確な位置、および、各センサについて 3 個のポテンショメータの正確な出力係数とゼロ点出力を求めることが、ここでいう校正である。これらの量は、装置を風洞に入れる前に予備実験で、既に、ある程度の精度で測られているが、実際に装置を風洞に設置し、風を吹かせた状態で、それらの値を新たに測っておくことが実験精度を高めるために必要である。

7.1 校正係数 (校正すべき量)

- センサの番号を i ($i=1, 2, 3$) として、
- 出力係数 = C_i ($i=1, 2, 3$): ポテンショメータのスケール・ファクタ
- バイアス = B_i ($i=1, 2, 3$): ゼロ点におけるポテンショメータの位置
- センサの配置角度 = θ_i ($i=1, 2, 3$): 図-3(a) に示す角度

7.2 校正点 (データを取得すべき α, β の位置)

- 上述の計画の通り
- α : -30, 0, 30 DEG.
- β : -30, 0, 30 DEG

の $3 \times 3 = 9$ ポイントでのデータを取得する。

7.3 校正点におけるデータ

$DATA_i(\alpha, \beta)$: (単位は Volt) と表わす。センサの番号 i は 1, 2, 3 であり、各校正点 9 ポイント毎に、三つのセンサからデータが得られるので、合計 27 個のデータが得られる。

7.4 校正方程式

- センサの番号 $i=1, 2, 3$
- センサからの出力 = $DATA_i(\alpha, \beta)$ (単位は Volt)
- 出力係数 = C_i (DEG/Volt) : ある一定の未知所求量
- バイアス = B_i (DEG) : ある一定の未知所求量
- センサの配置角度 = θ_i : ある一定の未知所求量

とするとき、センサの回転角度・ $\lambda_i(\alpha, \beta)$ は $\lambda_i(\alpha, \beta) = C_i \cdot DATA_i(\alpha, \beta) - B_i$ と計算され、従って、校正方程式は (5-7) 式を考慮して

$$\tan \lambda_i(\alpha, \beta) = \sin \theta_i \cdot x + \cos \theta_i \cdot y + \epsilon_i \tag{7-2}$$

と表わされる。ただし

$$x = \tan \alpha \tag{7-3}$$

$$y = \tan \beta = \tan \alpha / \cos \alpha \tag{7-4}$$

である。

表-3 各種校正係数

	C_1	C_2	C_3	B_1	B_2	B_3	θ_1	θ_2	θ_3
校正 1	56.98	61.03	57.62	0.7612	0.4866	1.1291	0.2416	119.655	237.636
校正 2	57.06	60.99	57.85	0.8463	0.3083	0.9423	0.2701	119.663	237.701
平均値	57.02	61.01	57.73	0.8038	0.3975	1.0357	0.2558	119.659	237.668
予備実験値	58.5	62.4	59.1	± 1.2	± 1.2	± 1.2	0.00	120.25	240.13

7.5 計算手順

上記の各式において、先ず、センサの番号 i を固定する。例えば、 $i=1$ とする。そうすると、未知所求量は C_1, B_1, θ_1 の3個であり、それに対し、較正方程式の数は、各 α, β の組み合わせで9個あり、最小二乗法によって、未知所求量を解くことができる。これを $i=2$ および $i=3$ についても、同じことを繰り返し、全ての未知所求量 C_i, B_i, θ_i ($i=1, 2, 3$) を求める。以上の結果を表-3に

示す。また、これより後のデータ処理においては、係数 C_i, B_i, θ_i ($i=1, 2, 3$) の値として、上記の2回の較正の平均値を用いる。平均値を用いた場合の較正精度を図-12, 13, および、その計算の元となったデータを表-4, 5に示す。

図-12, 13より、最大0.628度の誤差で α, β が求まっていることが分る。このことは、測定原理式(5-7)がほぼ正しいことを示している。

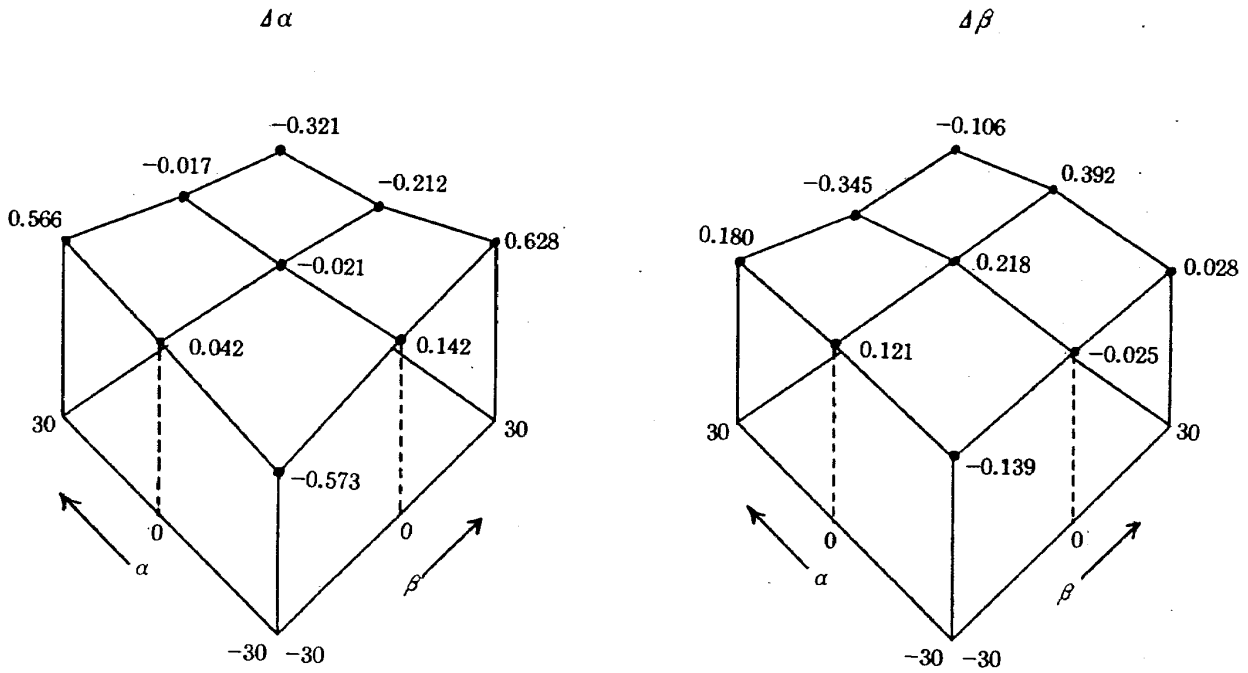


図-12 較正1の較正精度

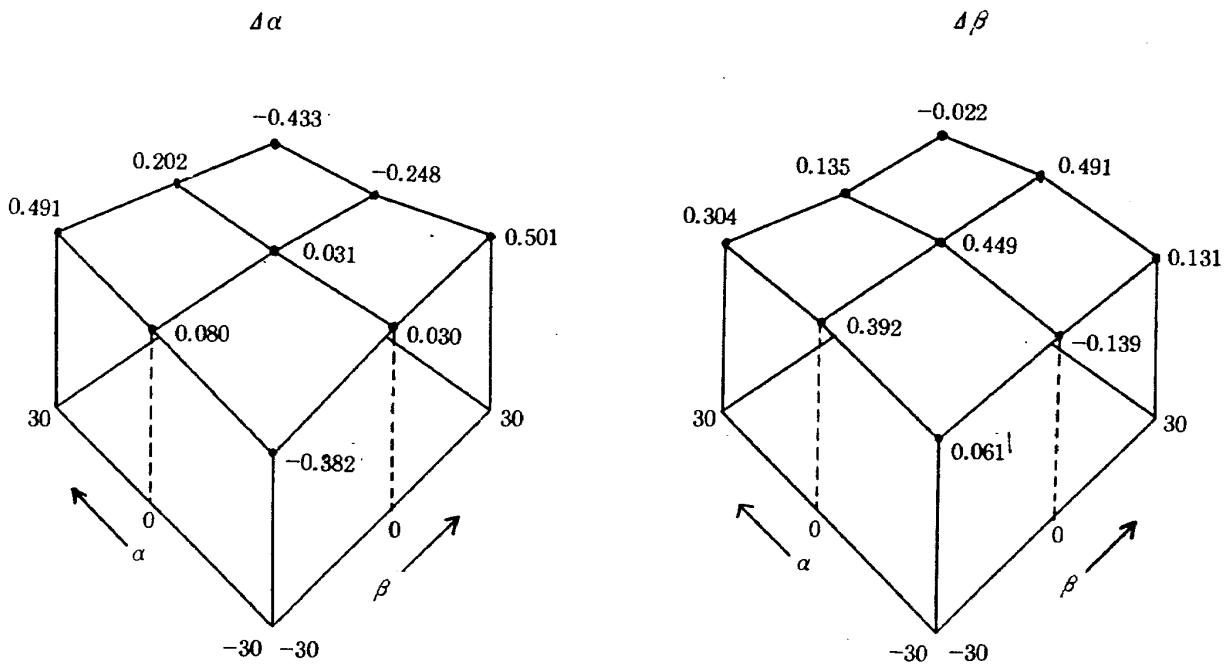


図-13 較正2の較正精度

表-4 校正1の測定値等(風速:30m/sec, 単位はすべて度)

α	β	-30度			0度			30度		
		センサ1	センサ2	センサ3	センサ1	センサ2	センサ3	センサ1	センサ2	センサ3
30度	風速: 30m/sec									
	真値	-33.586	39.744	-7.476	0.148	26.643	-26.005	33.792	9.749	-40.177
	平均測定値	-33.708	39.988	-8.365	-0.011	26.967	-25.625	33.791	9.791	-39.710
	標準偏差	(0.076)	(0.065)	(0.474)	(0.087)	(0.068)	(0.093)	(0.074)	(0.374)	(0.066)
	測定誤差	-0.120	0.241	-0.886	-0.158	0.324	0.380	0.001	0.041	0.467
0度	真値	-30.000	15.944	17.160	0.000	0.000	0.000	30.000	-15.944	-17.160
	平均測定値	-30.154	15.580	16.717	0.075	-0.262	-0.240	30.241	-16.531	-17.434
	標準偏差	(0.074)	(0.041)	(0.087)	(0.070)	(0.046)	(0.056)	(0.064)	(0.072)	(0.072)
	測定誤差	-0.154	-0.364	-0.442	0.075	-0.262	-0.240	0.242	-0.587	-0.274
-30度	真値	-33.792	-9.749	40.177	-0.148	-26.643	26.005	33.587	-39.747	7.480
	平均測定値	-33.777	-9.758	40.951	-0.054	-26.408	25.985	33.309	-39.378	6.687
	標準偏差	(0.131)	(0.056)	(0.077)	(0.129)	(0.037)	(0.054)	(0.127)	(0.063)	(0.072)
	測定誤差	0.015	-0.008	0.774	0.094	0.235	-0.020	-0.278	0.369	-0.793

表-5 校正2の測定値等(風速:30m/sec, 単位はすべて度)

α	β	-30度			0度			30度					
		センサ1	センサ2	センサ3	センサ1	センサ2	センサ3	センサ1	センサ2	センサ3			
30度	風速:30m/sec												
	真値	-33.586	39.744	-7.476	0.148	26.643	-26.005	33.792	9.749	-40.177			
	平均測定値	-33.623	39.811	-8.491	0.219	26.911	-25.778	33.802	9.558	-39.704			
	標準偏差	(0.072)	(0.085)	(0.468)	(0.072)	(0.078)	(0.084)	(0.067)	(0.353)	(0.053)			
	測定誤差	-0.038	0.067	-1.016	0.071	0.267	0.227	0.010	-0.191	0.473			
0度	真値	-30.000	15.944	17.160	0.000	0.000	0.000	30.000	-15.944	-17.160			
	平均測定値	-29.980	15.333	16.396	0.215	-0.418	-0.496	30.244	-16.733	-17.586			
	標準偏差	(0.070)	(0.048)	(0.098)	(0.069)	(0.045)	(0.055)	(0.065)	(0.079)	(0.074)			
	測定誤差	0.020	-0.611	-0.764	0.215	-0.418	-0.496	0.244	-0.789	-0.426			
-30度	真値	-33.792	-9.749	40.177	-0.148	-26.643	26.005	33.587	-39.747	7.480			
	平均測定値	-33.657	-9.921	40.589	-0.029	-26.548	25.723	33.356	-39.604	6.584			
	標準偏差	(0.120)	(0.050)	(0.076)	(0.129)	(0.048)	(0.069)	(0.122)	(0.063)	(0.064)			
	測定誤差	0.135	-0.172	0.412	0.119	0.095	-0.282	-0.232	0.143	-0.896			

8. 三軸 α/β センサ・システムの風洞試験

当試験の目的は、風洞側設定値 α_0, β_0 (真値とする) に対して、センサ 1, 2, 3 のデータから計算した場合どのような値が得られ、誤差はどの程度かを明らかにすること、および、センサ 2, 3 のデータから計算 (センサ 1 が故障) した場合、センサ 1, 3 のデータから計算 (センサ 2 が故障) した場合、および、センサ 1, 2 のデータから計算 (センサ 3 が故障) した場合、それぞれ、どの程度の精度が得られるかを調べることである。風速は実験計画にもある通り、10m/sec, 20m/sec, 30m/sec, 40m/sec の 4 ケースとした。

8.1 計算手順

計算方法は先に述べた較正法の逆である。逆というのは、データは別として、何が未知量で何が既知量かが逆になるという意味である。つまり、較正において未知所求量であったものが、ここでは既知量となり、既知量であったものが、ここでは未知所求量となる。ここで

センサの番号 $i=1, 2, 3$

風洞における風向設定値 = α_0, β_0

センサからの出力 = $DATA_i(\alpha_0, \beta_0)$

(単位は Volt)

出力係数 = C_i (DEG/Volt) : 先の較正の際には未知所求量であった。

バイアス = B_i (DEG) : 先の較正の際には未知所求量であった。

センサの配置角度 = θ_i : 先の較正の際には未知所求量であった。

データから求めるべき風向 = α, β : 未知所求量、先の較正の際には既知量であった。

とすると、センサの回転角度 λ_i は

$$\lambda_i = C_i \cdot DATA_i(\alpha_0, \beta_0) - B_i \quad (8-1)$$

と計算され、従って、観測方程式は

$$\tan \lambda_i = \sin \theta_i \cdot x + \cos \theta_i \cdot y + \epsilon_i \quad (8-2)$$

と表わされる。そこで、上式のセンサの番号 i について、1, 2, 3 と 3 個より成る連立方程式を立て、先ず、未知量 x, y を最小二乗法で計算し (センサ 1, 2, 3 の内のどれか一つ故障の場合は最小二乗法で計算する必要は無い)、次に

$$x = \tan \alpha \quad (8-3)$$

$$y = \tan \beta = \tan \alpha / \cos \alpha \quad (8-4)$$

なる関係より、最終の未知所求量 α, β を求める。

8.2 計算結果

上述の計算で得られた最終所求量 α, β の誤差 $\Delta\alpha = \alpha - \alpha_0, \Delta\beta = \beta - \beta_0$ の俯瞰図を図-14~図-29に示す。各図において、左側が誤差 $\Delta\alpha$,

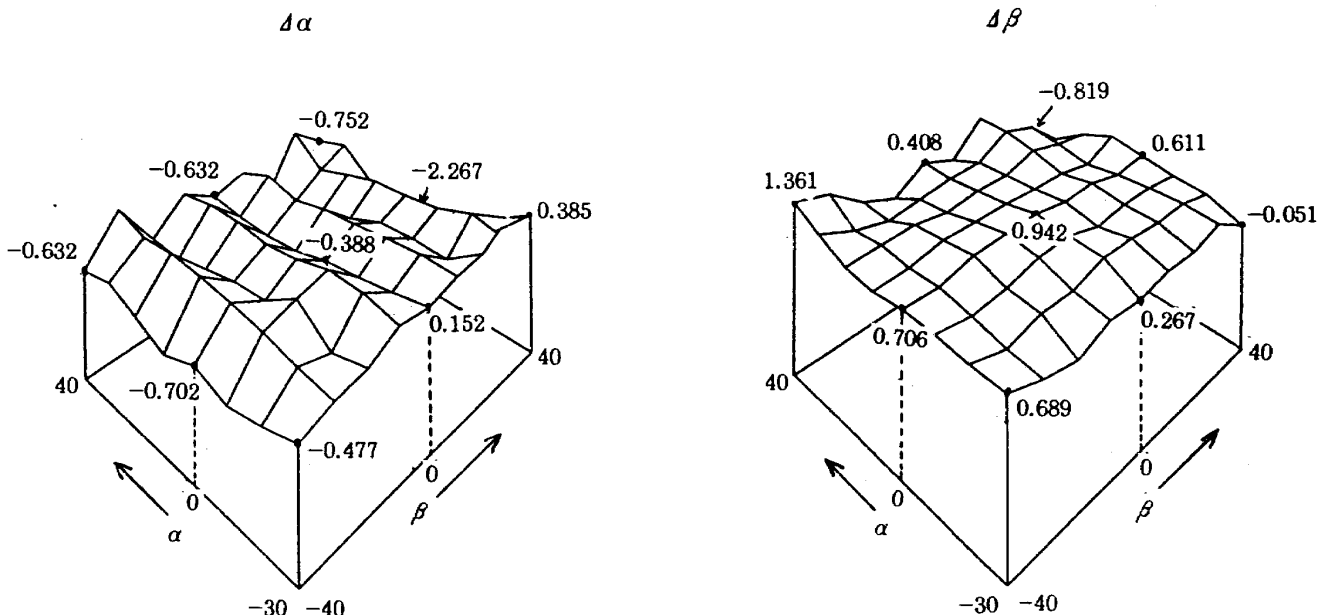


図-14 風速10m/sec, 無故障の場合

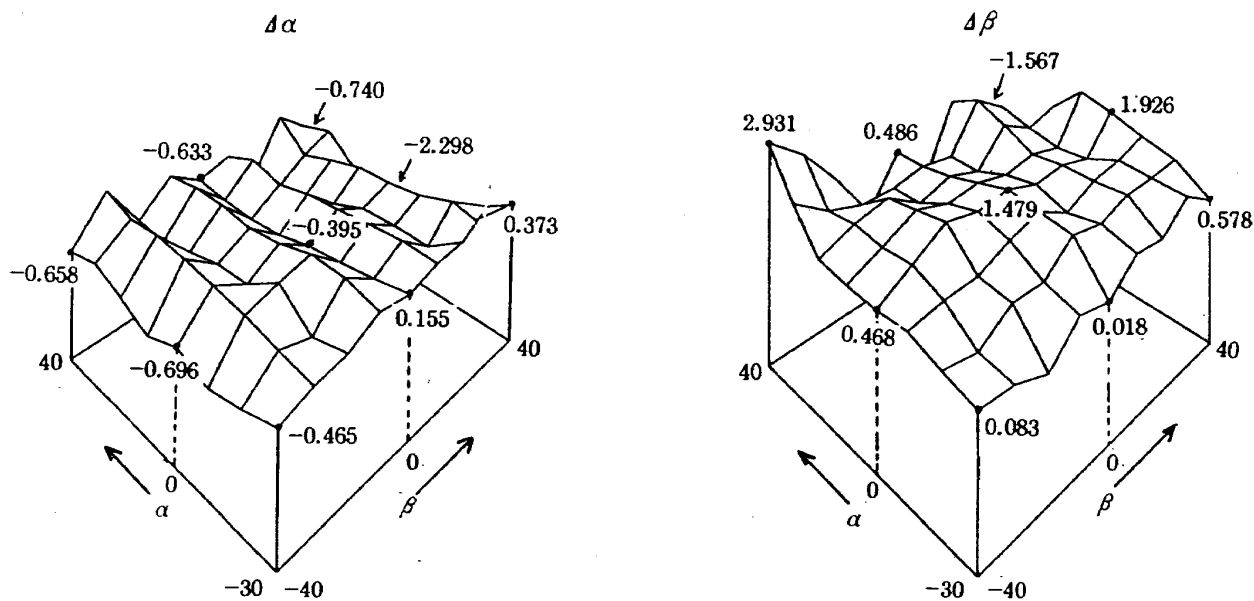


図-15 風速10m/sec, 故障1の場合

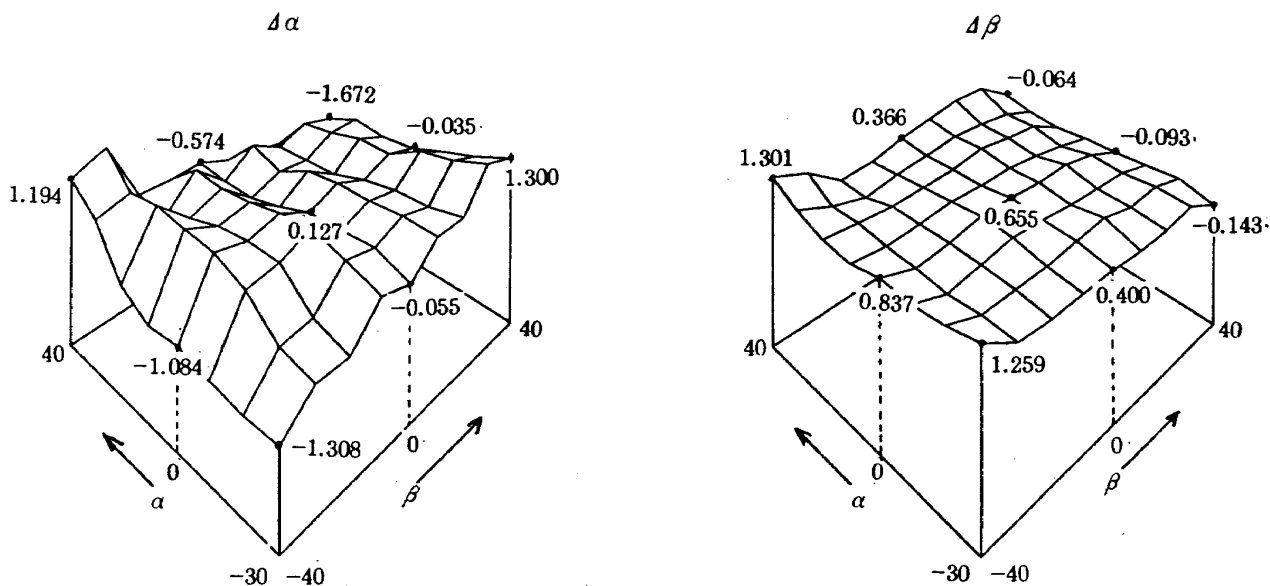


図-16 風速10m/sec, 故障2の場合

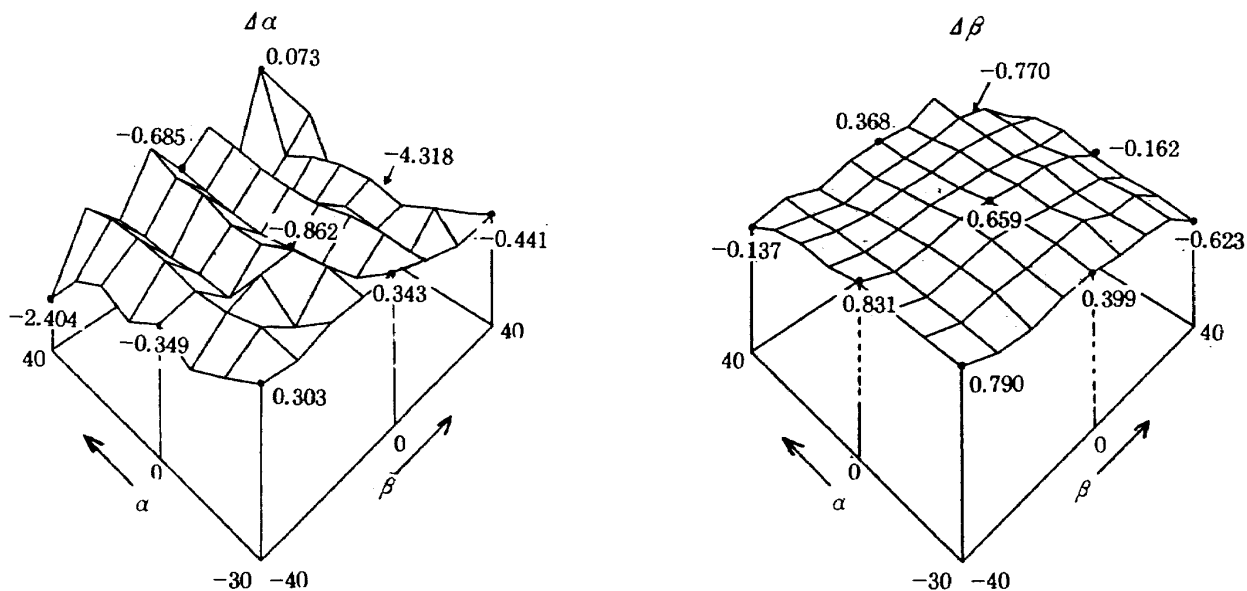


図-17 風速10m/sec, 故障3の場合

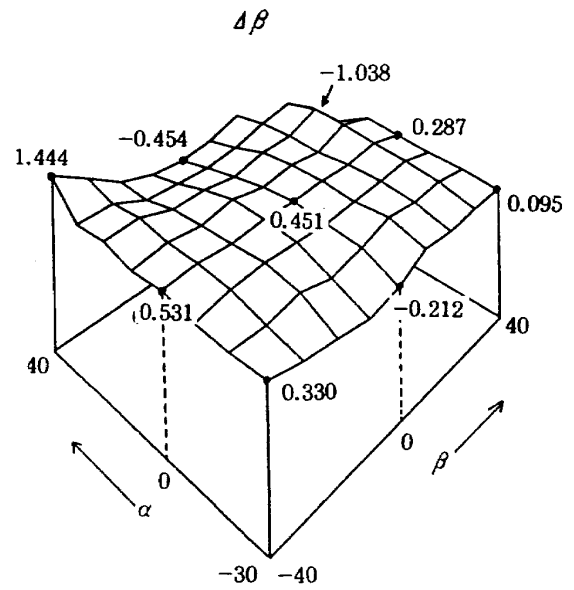
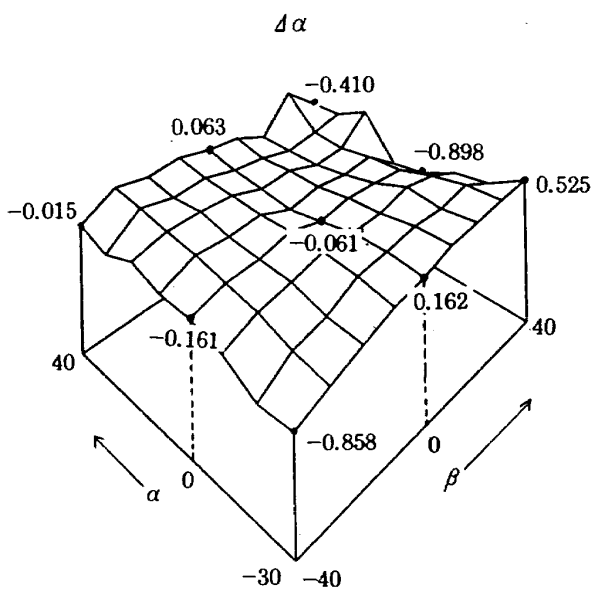


図-18 風速20m/sec, 無故障の場合

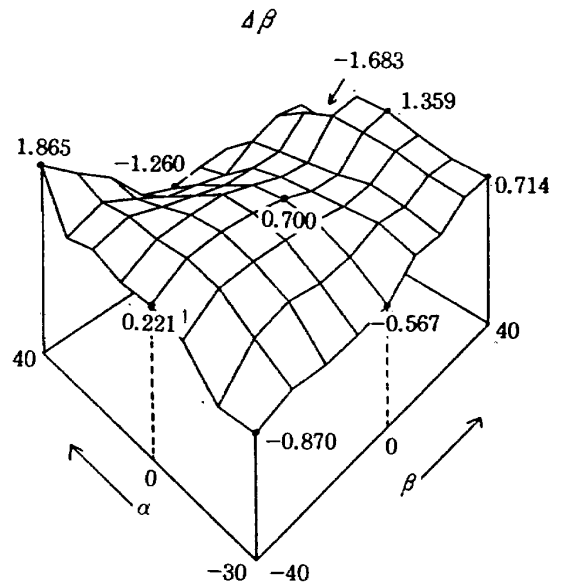
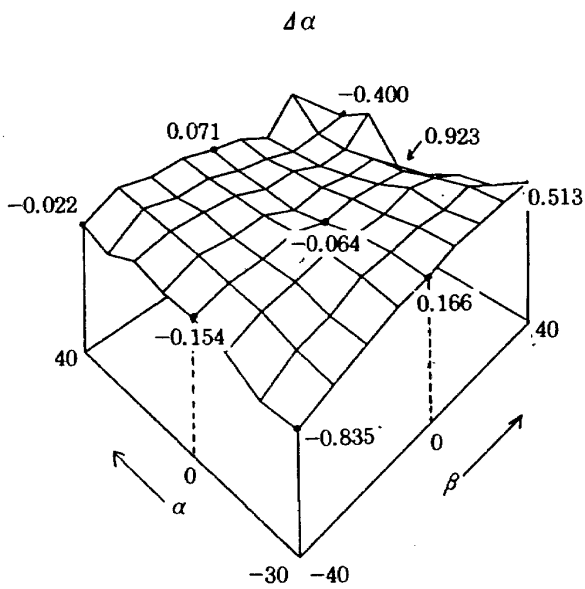


図-19 風速20m/sec, 故障1の場合

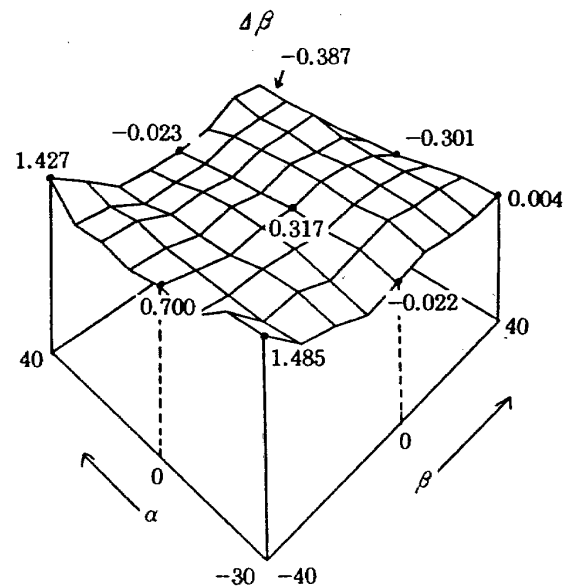
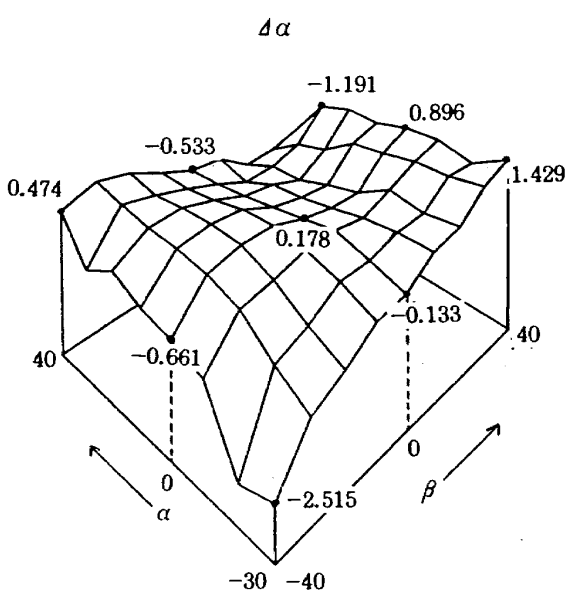


図-20 風速20m/sec, 故障2の場合

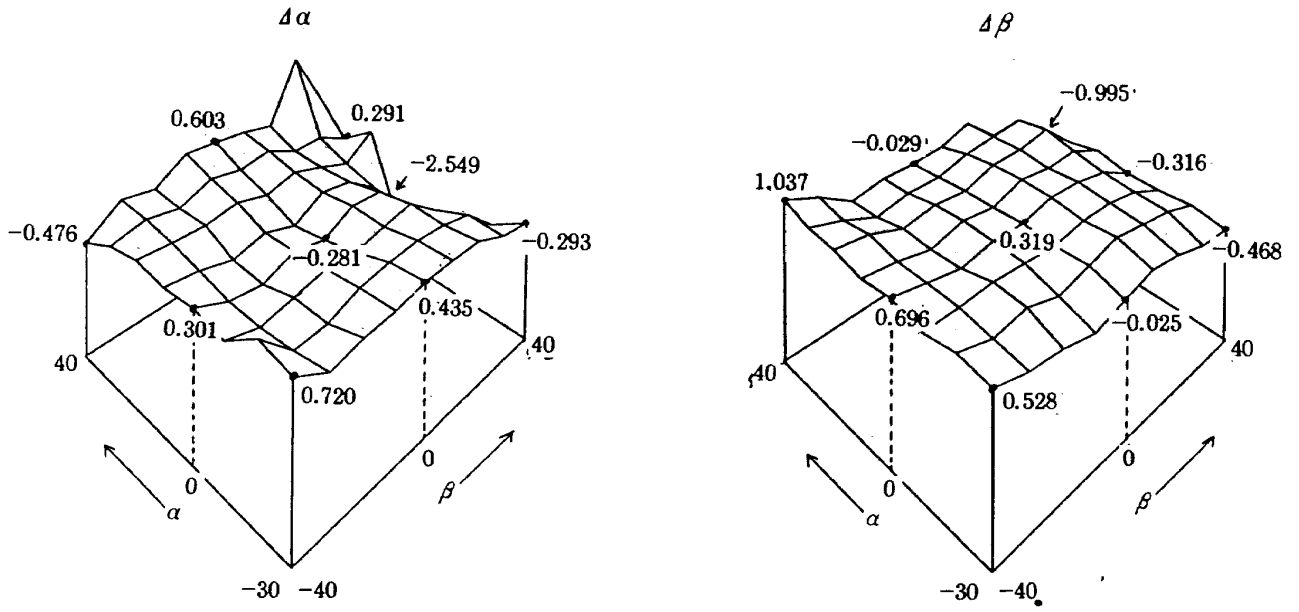


図-21 風速20m/sec, 故障3の場合

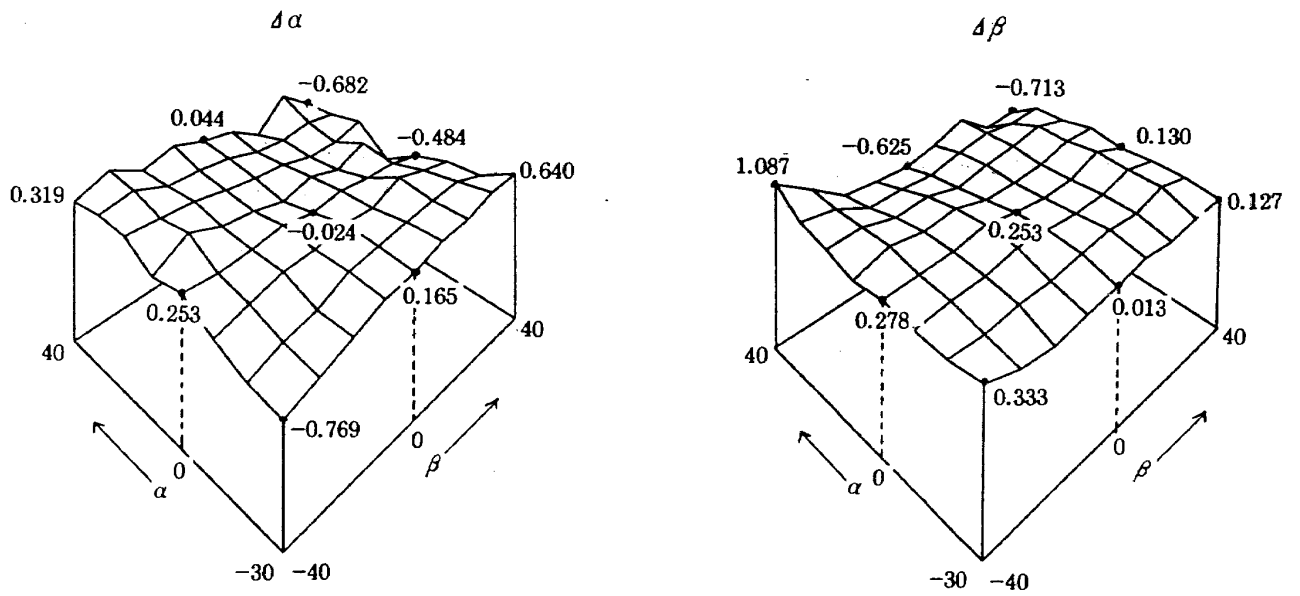


図-22 風速30m/sec, 無故障の場合

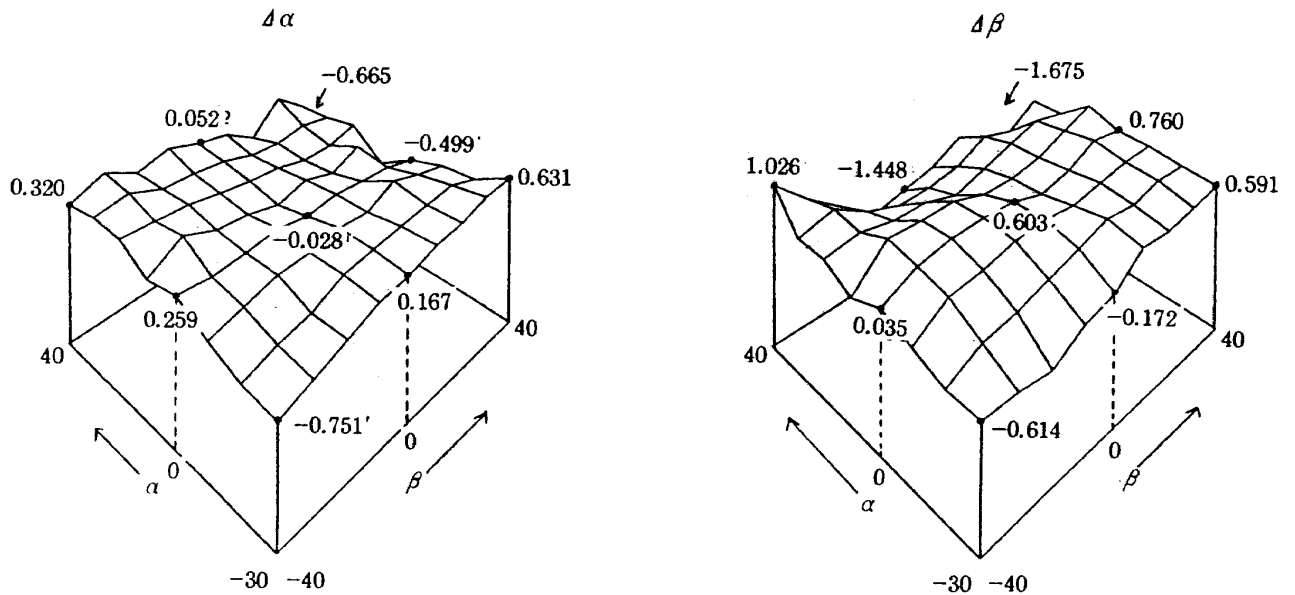


図-23 風速30m/sec, 故障1の場合

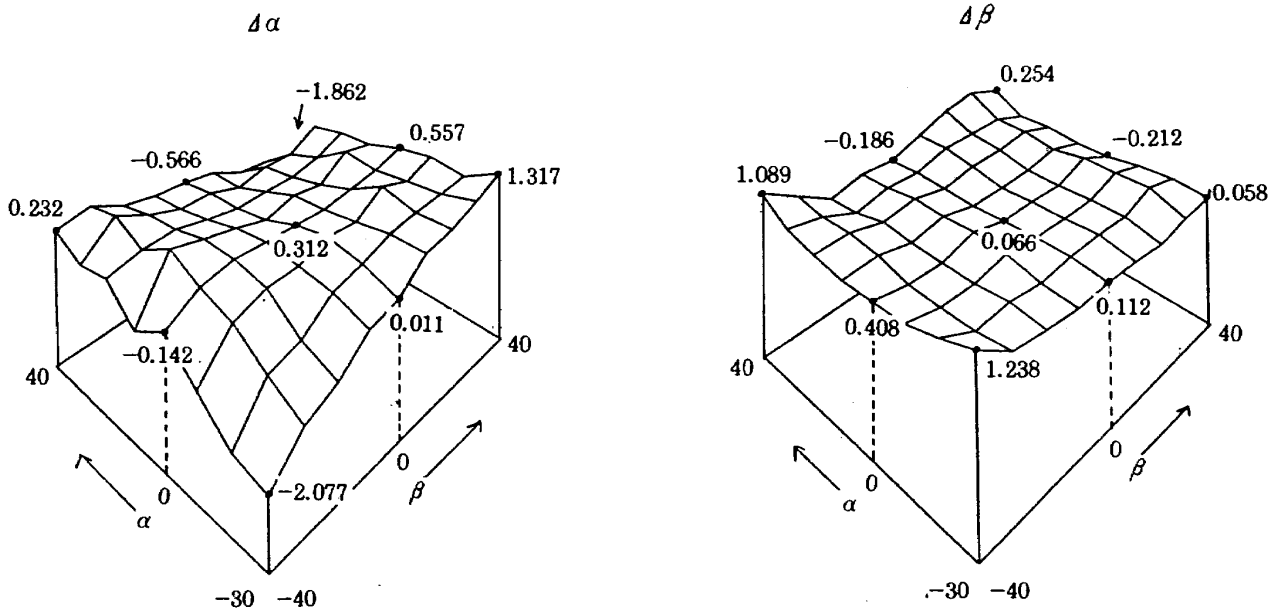


図-24 風速30m/sec, 故障2の場合

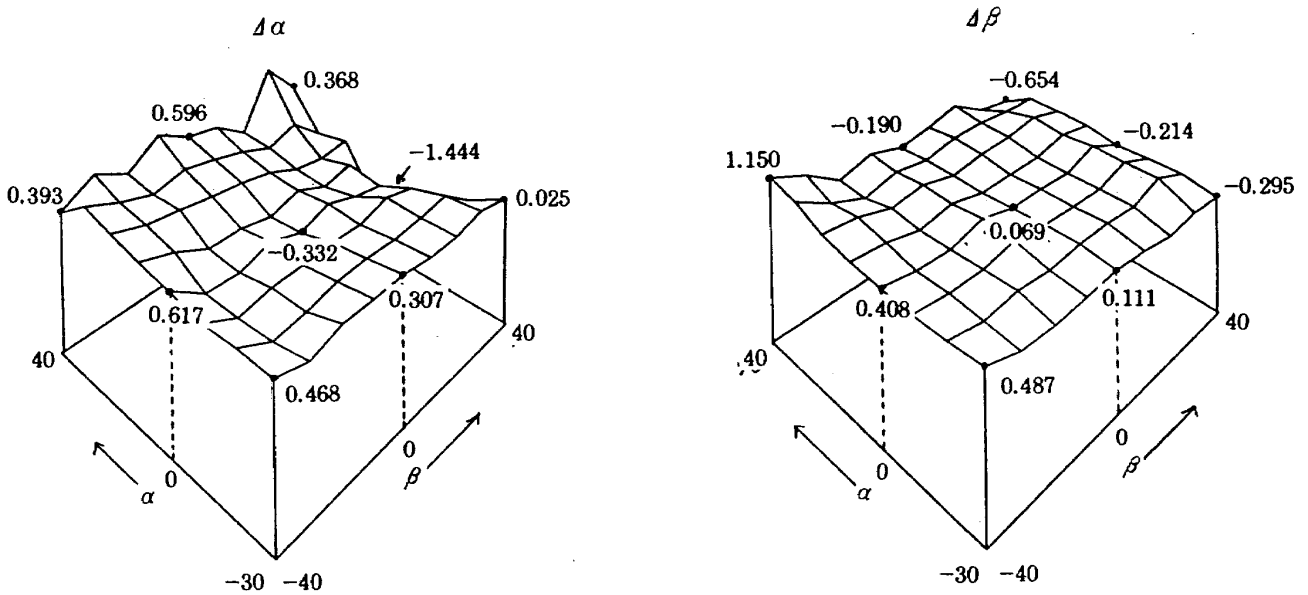


図-25 風速30m/sec, 故障3の場合

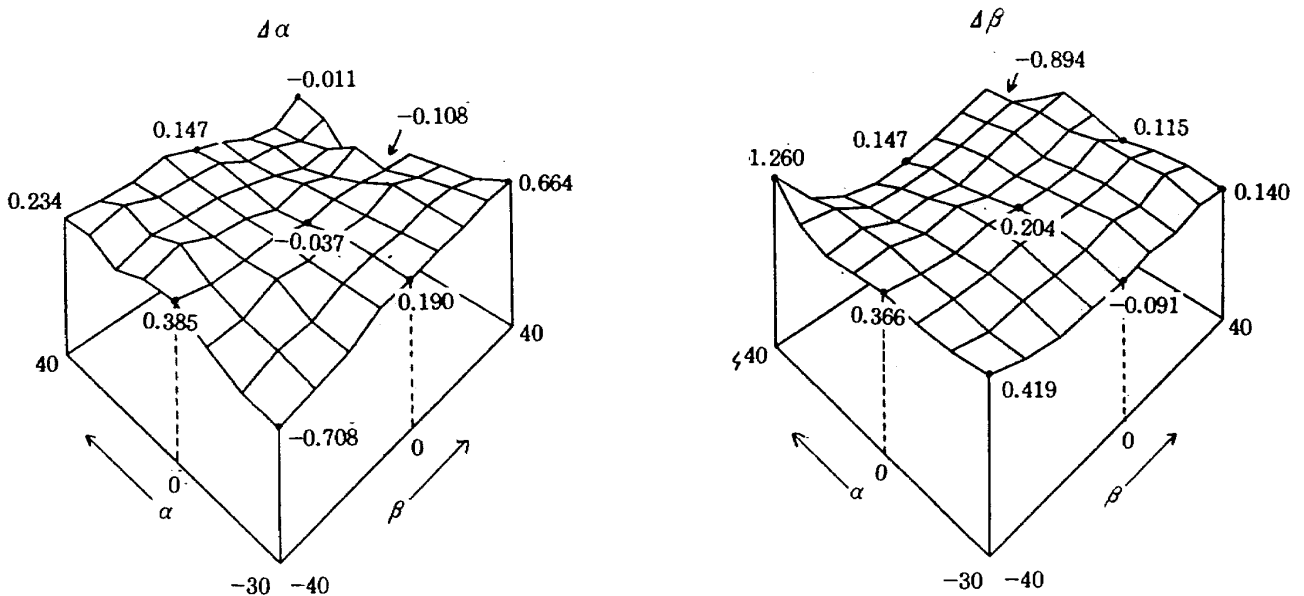


図-26 風速40m/sec, 無故障の場合

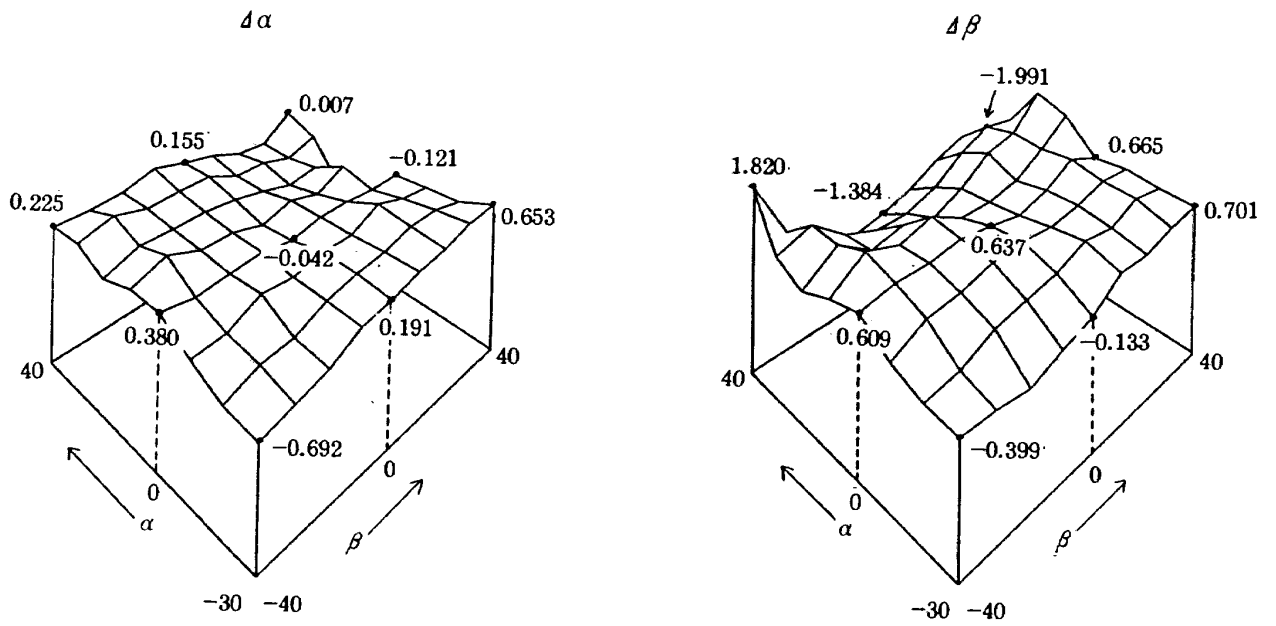


図-27 風速40m/sec, 故障1の場合

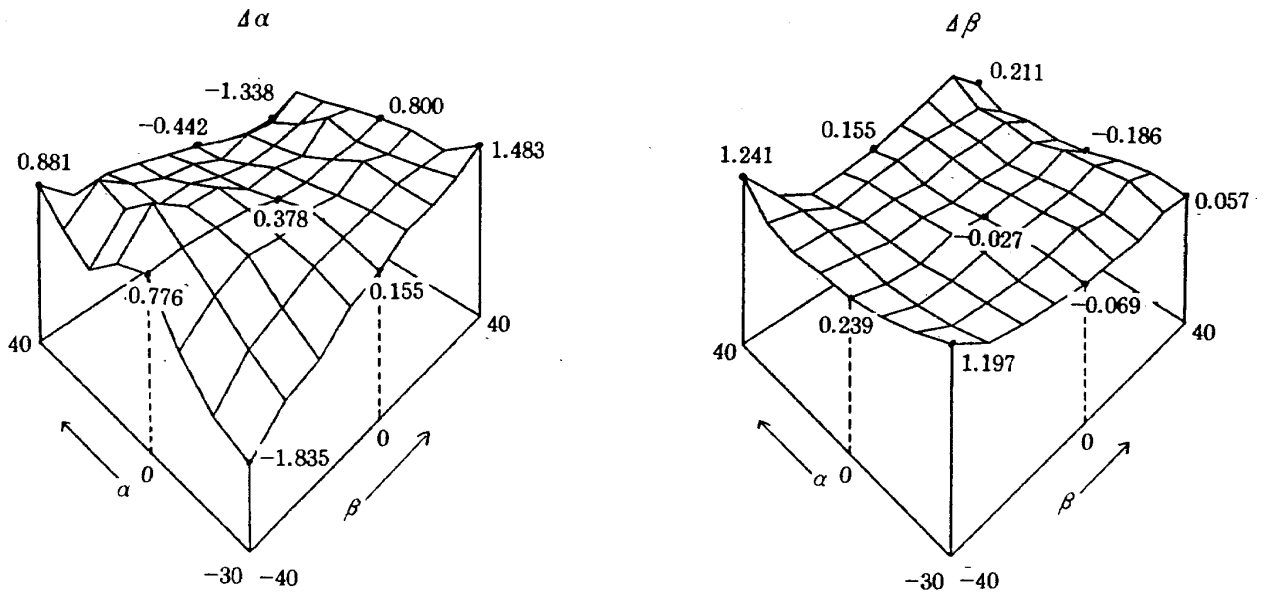


図-28 風速40m/sec, 故障2の場合

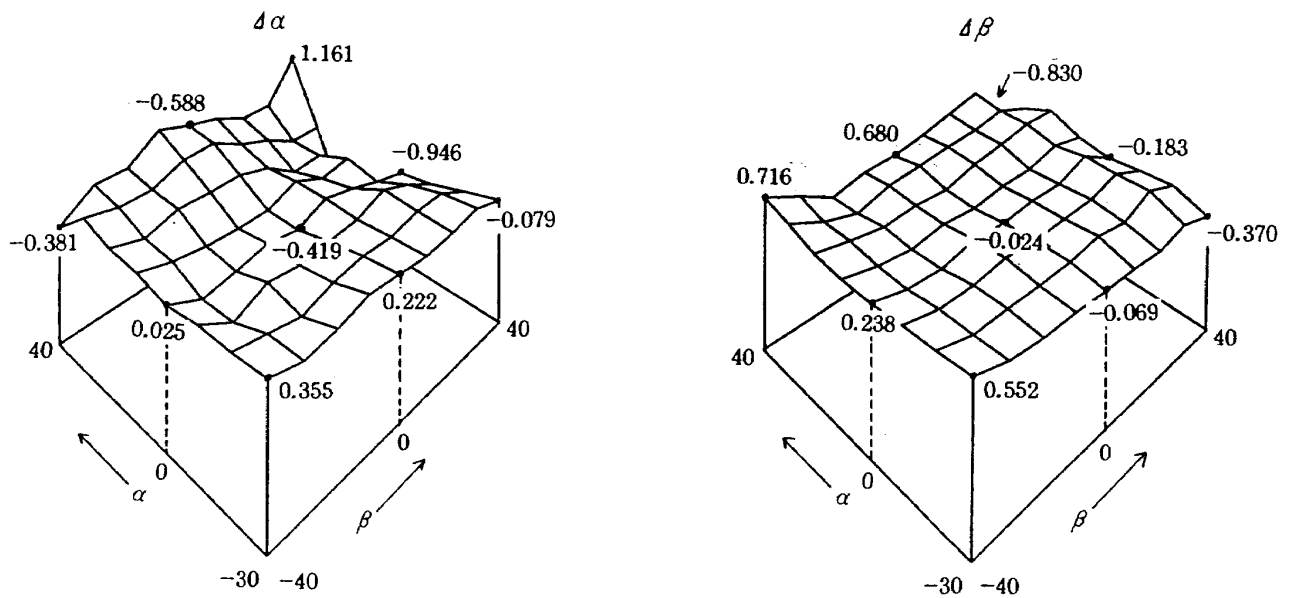


図-29 風速40m/sec, 故障3の場合

表-6 風速：10m/sec の場合の測定値等（単位はすべて度）

α	β	-40度			0度			40度					
		センサ1	センサ2	センサ3	センサ1	センサ2	センサ3	センサ1	センサ2	センサ3			
40度	風速：10m/sec												
	真値	-47.508	51.809	-7.022	0.215	36.098	-35.337	47.703	10.600	-52.321			
	平均測定値	-46.688	50.094	-9.658	0.685	35.281	-34.959	46.956	11.381	-51.088			
	標準偏差	(0.032)	(0.032)	(0.511)	(0.035)	(0.026)	(0.039)	(0.036)	(0.377)	(0.014)			
	測定誤差	0.820	-1.716	-2.636	0.470	-0.818	0.378	-0.747	0.881	1.233			
0度	真値	-40.000	22.549	24.169	0.000	0.000	0.000	40.000	-22.549	-24.169			
	平均測定値	-39.171	21.695	24.308	0.655	-1.075	-0.458	39.907	-25.624	-24.074			
	標準偏差	(0.024)	(0.020)	(0.016)	(0.030)	(0.021)	(0.012)	(0.029)	(0.053)	(0.016)			
	測定誤差	0.829	-0.854	0.139	0.655	-1.075	-0.458	-0.093	-3.075	0.095			
-30度	真値	-44.171	-1.275	45.172	-0.148	-26.643	26.005	44.024	-44.470	-1.722			
	平均測定値	-43.282	-1.766	45.459	0.314	-26.508	25.856	43.511	-44.472	-2.656			
	標準偏差	(0.072)	(0.032)	(0.044)	(0.033)	(0.010)	(0.023)	(0.063)	(0.033)	(0.018)			
	測定誤差	0.889	-0.491	0.287	0.461	0.135	-0.149	-0.508	0.017	-0.918			

表-7 風速：20m/sec の場合の測定値等（単位はすべて度）

α	β	-40度			0度			40度					
		センサ1	センサ2	センサ3	センサ1	センサ2	センサ3	センサ1	センサ2	センサ3			
40度	風速：20m/sec												
	真値	-47.508	51.809	-7.022	0.215	36.098	-35.337	47.703	10.600	-52.321			
	平均測定値	-46.254	51.019	-9.113	0.181	36.695	-34.816	46.822	11.933	-51.287			
	標準偏差	(0.049)	(0.036)	(1.230)	(0.067)	(0.048)	(0.063)	(0.061)	(0.931)	(0.042)			
	測定誤差	1.254	-0.790	-2.091	-0.034	0.597	0.521	-0.881	1.333	1.034			
0度	真値	-40.000	22.549	24.169	0.000	0.000	0.000	40.000	-22.549	-24.169			
	平均測定値	-39.303	22.276	24.110	0.318	-0.402	-0.320	39.705	-24.213	-24.574			
	標準偏差	(0.055)	(0.037)	(0.103)	(0.063)	(0.030)	(0.039)	(0.050)	(0.068)	(0.031)			
	測定誤差	0.696	-0.273	-0.059	0.318	-0.402	-0.320	-0.295	-1.664	-0.404			
-30度	真値	-44.171	-1.275	45.172	-0.148	-26.643	26.005	44.024	-44.470	-1.722			
	平均測定値	-43.429	-1.149	46.216	-0.174	-26.230	26.137	43.626	-44.439	-2.916			
	標準偏差	(0.109)	(0.037)	(0.068)	(0.078)	(0.031)	(0.038)	(0.105)	(0.051)	(0.059)			
	測定誤差	0.742	0.126	1.043	-0.026	0.413	0.132	-0.393	0.016	-1.177			

表-8 風速：30m/sec の場合の測定値等（単位はすべて度）

α	β	-40度			0度			40度					
		センサ1	センサ2	センサ3	センサ1	センサ2	センサ3	センサ1	センサ2	センサ3			
40度	風速：30m/sec												
	真値	-47.508	51.809	-7.022	0.215	36.098	-35.337	47.703	10.600	-52.321			
	平均測定値	-46.499	51.622	-8.501	-0.031	36.754	-34.708	47.202	11.658	-51.097			
	標準偏差	(0.079)	(0.075)	(1.213)	(0.074)	(0.091)	(0.099)	(0.077)	(1.085)	(0.061)			
	測定誤差	1.009	-0.187	-1.479	-0.246	0.656	0.628	-0.501	1.058	1.224			
0度	真値	-40.000	22.549	24.169	0.000	0.000	0.000	40.000	-22.549	-24.169			
	平均測定値	-39.592	22.716	23.961	0.067	-0.323	-0.299	39.791	-23.466	-24.402			
	標準偏差	(0.092)	(0.073)	(0.191)	(0.079)	(0.056)	(0.056)	(0.077)	(0.178)	(0.066)			
	測定誤差	0.407	0.167	-0.208	0.067	-0.323	-0.299	-0.209	-0.917	-0.233			
-30度	真値	-44.171	-1.275	45.172	-0.148	-26.643	26.005	44.024	-44.470	-1.722			
	平均測定値	-43.543	-1.332	46.023	-0.018	-26.410	25.939	43.712	-44.291	-2.881			
	標準偏差	(0.137)	(0.061)	(0.104)	(0.138)	(0.038)	(0.053)	(0.145)	(0.086)	(0.090)			
	測定誤差	0.628	-0.057	0.851	0.130	0.233	-0.066	-0.307	0.164	-1.142			

表-9 風速：40m/sec の場合の測定値等（単位はすべて度）

α	β	-40度			0度			40度					
		センサ1	センサ2	センサ3	センサ1	センサ2	センサ3	センサ1	センサ2	センサ3			
40度	風速：40m/sec												
	真値		51.809	-7.022	0.215	36.098	-35.337	47.703	10.600	-52.321			
	平均測定値	-47.508	51.225	-9.296	0.000	36.827	-34.838	47.367	12.643	-51.453			
	標準偏差	(0.109)	(0.091)	(1.507)	(0.092)	(0.115)	(0.117)	(0.101)	(1.301)	(0.081)			
	測定誤差	0.887	-0.584	-2.273	-0.214	0.729	0.499	-0.336	2.043	0.868			
0度	真値		22.549	24.169	0.000	0.000	0.000	40.000	-22.549	-24.169			
	平均測定値	-40.000	22.397	23.440	-0.026	-0.352	0.305	39.819	-23.119	-24.592			
	標準偏差	(0.074)	(0.133)	(0.210)	(0.088)	(0.064)	(0.066)	(0.096)	(0.170)	(0.070)			
	測定誤差	0.238	-0.152	-0.729	-0.026	-0.352	-0.305	-0.181	-0.570	-0.423			
-30度	真値		-1.275	45.172	-0.148	-26.643	26.005	44.024	-44.470	-1.722			
	平均測定値	-44.171	-1.494	45.870	-0.226	-26.406	25.898	43.671	-44.345	-2.999			
	標準偏差	(0.130)	(0.086)	(0.134)	(0.189)	(0.050)	(0.072)	(0.163)	(0.119)	(0.101)			
	測定誤差	0.662	-0.219	0.697	-0.078	0.237	-0.107	-0.354	0.125	-1.277			

表-10 センサ1の測定誤差（風速10m/secの場合）

α	β	-40度	-30度	-20度	-10度	0度	10度	20度	30度	40度
	10m/sec	センサ1	センサ1	センサ1	センサ1	センサ1	センサ1	センサ1	センサ1	センサ1
40度	測定誤差	0.820	0.281	0.223	0.214	0.470	0.484	0.430	0.127	-0.747
	標準偏差	0.032	0.028	0.034	0.016	0.035	0.031	0.029	0.027	0.036
30度	測定誤差	0.734	0.202	0.205	0.243	0.357	0.508	0.274	0.159	-0.395
	標準偏差	0.032	0.030	0.035	0.024	0.038	0.036	0.031	0.030	0.056
20度	測定誤差	0.756	0.351	0.413	0.406	0.435	0.583	0.348	0.283	-0.297
	標準偏差	0.031	0.028	0.030	0.032	0.033	0.027	0.031	0.048	0.030
10度	測定誤差	0.677	0.361	0.447	0.533	0.472	0.469	0.296	0.138	-0.154
	標準偏差	0.032	0.027	0.019	0.022	0.030	0.045	0.030	0.039	0.034
0度	測定誤差	0.829	0.439	0.521	0.707	0.655	0.568	0.577	0.346	-0.093
	標準偏差	0.024	0.035	0.034	0.021	0.030	0.028	0.034	0.049	0.029
-10度	測定誤差	0.700	0.434	0.576	0.718	0.605	0.433	0.362	0.238	-0.041
	標準偏差	0.030	0.056	0.052	0.030	0.038	0.017	0.044	0.034	0.047
-20度	測定誤差	0.726	0.494	0.514	0.577	0.625	0.659	0.343	0.260	-0.007
	標準偏差	0.042	0.035	0.068	0.074	0.066	0.079	0.066	0.052	0.054
-30度	測定誤差	0.889	0.440	0.351	0.504	0.461	0.258	0.183	0.004	-0.508
	標準偏差	0.072	0.046	0.041	0.050	0.033	0.040	0.050	0.043	0.063

表-11 センサ2の測定誤差(風速10m/secの場合)

α	β	-40度	-30度	-20度	-10度	0度	10度	20度	30度	40度
	10m/sec	センサ2	センサ2	センサ2	センサ2	センサ2	センサ2	センサ2	センサ2	センサ2
40度	測定誤差	-1.716	-0.241	-1.014	0.449	-0.818	0.099	-2.391	1.839	0.881
	標準偏差	0.032	0.030	0.031	0.028	0.026	0.025	0.059	0.095	0.377
30度	測定誤差	-1.072	-0.055	-0.953	0.063	-0.943	-0.095	-2.463	-1.595	0.065
	標準偏差	0.030	0.022	0.034	0.028	0.027	0.033	0.033	0.029	0.366
20度	測定誤差	-0.838	-0.104	-1.099	0.011	-1.084	-0.377	-1.884	-0.985	-2.049
	標準偏差	0.028	0.026	0.022	0.036	0.032	0.031	0.020	0.047	0.140
10度	測定誤差	-1.115	-0.158	-1.023	-0.383	-1.154	-0.374	-1.274	-0.554	-3.628
	標準偏差	0.027	0.027	0.028	0.031	0.032	0.019	0.032	0.030	0.038
0度	測定誤差	-0.854	-0.370	-1.143	-0.443	-1.075	-0.405	-0.964	-0.569	-3.075
	標準偏差	0.020	0.026	0.027	0.020	0.021	0.024	0.037	0.042	0.053
-10度	測定誤差	-1.274	-0.319	-0.040	-0.049	-0.913	-0.103	-0.904	-0.695	-2.132
	標準偏差	0.027	0.027	0.029	0.021	0.028	0.007	0.028	0.026	0.031
-20度	測定誤差	-0.922	-0.054	-0.725	0.234	-0.682	-0.114	-0.945	-0.301	-1.300
	標準偏差	0.028	0.021	0.028	0.028	0.031	0.019	0.033	0.037	0.041
-30度	測定誤差	-0.491	-0.141	0.236	0.147	0.135	0.016	0.101	0.134	-0.017
	標準偏差	0.032	0.033	0.027	0.030	0.010	0.032	0.033	0.042	0.033

表-12 センサ3の測定誤差（風速10m/secの場合）

α	β	-40度	-30度	-20度	-10度	0度	10度	20度	30度	40度
	10m/sec	センサ3	センサ3	センサ3	センサ3	センサ3	センサ3	センサ3	センサ3	センサ3
40度	測定誤差	-2.636	-2.366	0.471	0.523	0.378	0.701	0.786	0.908	1.234
	標準偏差	0.511	0.142	0.039	0.010	0.039	0.038	0.031	0.029	0.014
30度	測定誤差	-1.346	-0.997	0.584	-0.442	0.405	-0.253	0.289	0.076	0.523
	標準偏差	0.790	0.046	0.027	0.025	0.029	0.030	0.029	0.028	0.037
20度	測定誤差	0.013	-1.173	-0.218	-0.490	0.302	-0.032	0.178	-0.128	0.206
	標準偏差	0.049	0.029	0.022	0.042	0.022	0.008	0.027	0.029	0.020
10度	測定誤差	0.406	-0.992	-0.564	-0.695	-0.007	-0.482	0.138	-0.296	0.205
	標準偏差	0.128	0.034	0.032	0.022	0.032	0.029	0.028	0.028	0.029
0度	測定誤差	0.139	-0.936	-0.729	-0.993	-0.458	-0.717	-0.345	-0.472	0.095
	標準偏差	0.016	0.031	0.060	0.013	0.012	0.024	0.051	0.030	0.016
-10度	測定誤差	0.326	-0.584	-0.751	-1.105	-0.508	-0.681	-0.446	-0.981	-0.279
	標準偏差	0.028	0.036	0.039	0.027	0.015	0.039	0.019	0.016	0.030
-20度	測定誤差	0.383	-0.016	-0.031	-0.785	-0.598	-0.945	-0.507	-1.348	-0.716
	標準偏差	0.047	0.060	0.028	0.032	0.037	0.032	0.033	0.028	0.030
-30度	測定誤差	0.287	0.165	0.307	-0.453	-0.149	-0.765	-0.745	-1.823	-0.918
	標準偏差	0.044	0.028	0.028	0.036	0.023	0.030	0.041	0.040	0.018

表-13 センサ1の測定誤差(風速20m/secの場合)

α	β	-40度	-30度	-20度	-10度	0度	10度	20度	30度	40度
		センサ1	センサ1	センサ1	センサ1	センサ1	センサ1	センサ1	センサ1	センサ1
40度	測定誤差	1.254	0.472	-0.227	-0.113	-0.034	0.119	0.506	0.286	-0.881
	標準偏差	0.049	0.058	0.056	0.065	0.067	0.052	0.059	0.054	0.061
30度	測定誤差	0.771	0.342	-0.120	0.065	0.080	0.407	0.409	0.487	-0.514
	標準偏差	0.053	0.051	0.059	0.055	0.064	0.042	0.052	0.045	0.075
20度	測定誤差	0.694	0.566	0.149	0.311	0.189	0.525	0.474	0.595	-0.294
	標準偏差	0.052	0.058	0.061	0.046	0.053	0.061	0.052	0.077	0.062
10度	測定誤差	0.540	0.417	0.141	0.400	0.223	0.568	0.374	0.380	-0.284
	標準偏差	0.053	0.042	0.046	0.040	0.046	0.040	0.042	0.055	0.054
0度	測定誤差	0.696	0.445	0.202	0.378	0.318	0.570	0.491	0.250	-0.295
	標準偏差	0.055	0.059	0.048	0.051	0.063	0.037	0.035	0.046	0.050
-10度	測定誤差	0.485	0.425	0.469	0.372	0.245	0.409	0.377	0.207	-0.198
	標準偏差	0.063	0.064	0.068	0.061	0.052	0.049	0.065	0.050	0.054
-20度	測定誤差	0.830	0.302	0.449	0.095	0.335	0.529	0.299	0.114	-0.092
	標準偏差	0.071	0.076	0.110	0.100	0.094	0.087	0.096	0.075	0.073
-30度	測定誤差	0.742	0.234	0.105	-0.246	-0.026	0.175	-0.087	-0.352	-0.393
	標準偏差	0.109	0.091	0.088	0.123	0.078	0.099	0.097	0.090	0.105

表-14 センサ2の測定誤差(風速20m/secの場合)

α	β	-40度	-30度	-20度	-10度	0度	10度	20度	30度	40度
	20m/sec	センサ2	センサ2	センサ2	センサ2	センサ2	センサ2	センサ2	センサ2	センサ2
40度	測定誤差	-0.790	0.044	0.132	0.663	0.597	0.427	-0.047	2.727	1.333
	標準偏差	0.036	0.043	0.036	0.041	0.048	0.039	0.074	0.351	0.931
30度	測定誤差	-0.332	0.059	0.084	0.353	0.149	0.145	-0.450	-0.611	-0.412
	標準偏差	0.041	0.059	0.033	0.034	0.045	0.041	0.056	0.149	0.533
20度	測定誤差	-0.195	-0.148	0.025	0.078	-0.154	-0.141	-0.499	-1.050	0.253
	標準偏差	0.038	0.036	0.050	0.035	0.040	0.055	0.046	0.071	0.209
10度	測定誤差	-0.224	-0.219	-0.314	-0.267	-0.516	-0.245	-0.364	-1.073	-1.993
	標準偏差	0.037	0.039	0.033	0.034	0.036	0.031	0.040	0.051	0.174
0度	測定誤差	-0.273	-0.426	-0.418	-0.217	-0.402	-0.125	-0.197	-0.881	-1.664
	標準偏差	0.037	0.035	0.043	0.031	0.030	0.037	0.047	0.046	0.068
-10度	測定誤差	-0.263	-0.450	-0.320	-0.095	-0.137	-0.074	0.038	-0.489	-0.933
	標準偏差	0.036	0.025	0.044	0.033	0.033	0.030	0.044	0.067	0.042
-20度	測定誤差	0.173	-0.304	-0.326	0.178	0.152	0.070	0.036	-0.084	-0.552
	標準偏差	0.038	0.029	0.068	0.022	0.036	0.021	0.033	0.063	0.054
-30度	測定誤差	0.126	-0.057	0.223	0.396	0.413	0.281	0.308	0.083	0.016
	標準偏差	0.037	0.037	0.059	0.030	0.031	0.026	0.034	0.047	0.051

表-15 センサ3の測定誤差(風速20m/secの場合)

α	β	-40度	-30度	-20度	-10度	0度	10度	20度	30度	40度
	20m/sec	センサ3	センサ3	センサ3	センサ3	センサ3	センサ3	センサ3	センサ3	センサ3
40度	測定誤差	-2.091	-1.417	-0.493	0.112	0.521	0.550	0.900	0.818	1.034
	標準偏差	1.230	0.551	0.087	0.045	0.063	0.045	0.046	0.052	0.042
30度	測定誤差	0.018	-0.982	-0.306	-0.015	0.372	0.612	0.549	0.253	0.166
	標準偏差	0.561	0.212	0.068	0.061	0.050	0.033	0.066	0.051	0.053
20度	測定誤差	-0.556	-0.943	-0.611	-0.339	0.145	0.137	0.446	-0.060	-0.147
	標準偏差	0.330	0.109	0.041	0.060	0.045	0.034	0.081	0.042	0.058
10度	測定誤差	-0.068	-0.759	-0.649	-0.643	-0.081	-0.017	0.186	-0.495	-0.168
	標準偏差	0.253	0.079	0.048	0.042	0.042	0.040	0.053	0.044	0.041
0度	測定誤差	-0.059	-0.640	-0.651	-0.709	-0.320	-0.244	-0.134	-0.599	-0.404
	標準偏差	0.103	0.068	0.056	0.018	0.039	0.043	0.056	0.049	0.031
-10度	測定誤差	0.287	-0.371	-0.484	-0.603	-0.499	-0.390	-0.650	-0.853	-0.630
	標準偏差	0.104	0.092	0.060	0.033	0.036	0.035	0.053	0.051	0.040
-20度	測定誤差	1.228	0.259	0.002	-0.241	-0.314	-0.619	-0.505	-0.956	-0.629
	標準偏差	0.074	0.080	0.049	0.034	0.036	0.049	0.066	0.041	0.035
-30度	測定誤差	1.043	0.677	0.519	0.270	0.132	-0.486	-0.507	-0.998	-1.177
	標準偏差	0.068	0.062	0.061	0.042	0.038	0.055	0.063	0.045	0.059

表-16 センサ1の測定誤差（風速30m/secの場合）

α	β	-40度	-30度	-20度	-10度	0度	10度	20度	30度	40度
	30m/sec	センサ1	センサ1	センサ1	センサ1	センサ1	センサ1	センサ1	センサ1	センサ1
40度	測定誤差	1.009	0.280	-0.312	-0.007	-0.246	0.039	0.164	0.130	-0.501
	標準偏差	0.079	0.093	0.102	0.076	0.074	0.060	0.076	0.113	0.077
30度	測定誤差	0.653	0.158	-0.222	0.060	-0.078	0.152	0.061	-0.014	-0.319
	標準偏差	0.069	0.073	0.081	0.082	0.082	0.078	0.075	0.070	0.074
20度	測定誤差	0.437	0.408	0.089	0.253	-0.031	0.093	0.061	0.190	-0.155
	標準偏差	0.075	0.070	0.069	0.071	0.073	0.083	0.076	0.077	0.075
10度	測定誤差	0.397	0.318	0.070	0.254	-0.039	-0.049	-0.072	0.140	-0.236
	標準偏差	0.079	0.071	0.077	0.067	0.066	0.056	0.070	0.070	0.082
0度	測定誤差	0.407	0.182	0.123	0.388	0.067	0.058	-0.024	0.322	-0.209
	標準偏差	0.092	0.081	0.081	0.065	0.079	0.072	0.066	0.062	0.077
-10度	測定誤差	0.404	0.214	0.189	0.354	0.181	0.086	0.032	0.329	-0.059
	標準偏差	0.079	0.071	0.073	0.077	0.070	0.087	0.073	0.063	0.088
-20度	測定誤差	0.486	0.161	0.278	0.152	0.234	0.190	0.049	0.345	0.008
	標準偏差	0.088	0.093	0.132	0.124	0.108	0.126	0.148	0.110	0.102
-30度	測定誤差	0.628	0.153	0.089	0.100	0.130	-0.034	-0.274	-0.234	-0.307
	標準偏差	0.137	0.130	0.108	0.197	0.138	0.157	0.125	0.117	0.145

表-17 センサ2の測定誤差(風速30m/secの場合)

α	β	-40度	-30度	-20度	-10度	0度	10度	20度	30度	40度
	30m/sec	センサ2	センサ2	センサ2	センサ2	センサ2	センサ2	センサ2	センサ2	センサ2
40度	測定誤差	-0.187	0.597	0.453	1.043	0.656	0.412	-0.478	1.921	1.058
	標準偏差	0.075	0.035	0.056	0.089	0.091	0.078	0.178	0.693	1.085
30度	測定誤差	0.390	0.409	0.351	0.469	0.337	-0.031	-0.437	-0.055	-0.769
	標準偏差	0.053	0.098	0.052	0.054	0.072	0.081	0.097	0.443	0.649
20度	測定誤差	0.363	0.229	0.291	0.100	0.096	-0.173	-0.616	-1.016	-0.538
	標準偏差	0.059	0.048	0.039	0.049	0.081	0.100	0.142	0.251	0.518
10度	測定誤差	0.268	0.122	-0.157	-0.268	-0.354	-0.145	-0.538	-0.516	-1.774
	標準偏差	0.052	0.060	0.056	0.066	0.047	0.067	0.079	0.133	0.278
0度	測定誤差	0.167	-0.234	-0.262	-0.164	-0.323	-0.066	-0.329	-0.722	-0.917
	標準偏差	0.073	0.043	0.089	0.043	0.056	0.089	0.085	0.076	0.178
-10度	測定誤差	0.046	-0.270	-0.113	-0.205	-0.106	-0.146	0.090	-0.313	-0.596
	標準偏差	0.064	0.041	0.079	0.036	0.047	0.048	0.095	0.097	0.116
-20度	測定誤差	0.059	-0.188	-0.162	0.057	0.017	-0.055	0.035	-0.071	-0.383
	標準偏差	0.052	0.082	0.075	0.039	0.040	0.055	0.064	0.098	0.097
-30度	測定誤差	-0.057	0.043	0.334	0.280	0.234	0.130	0.184	0.275	0.164
	標準偏差	0.061	0.049	0.046	0.046	0.038	0.052	0.049	0.059	0.086

表-18 センサ 3 の測定誤差 (風速30m/sec の場合)

α	β	-40度	-30度	-20度	-10度	0度	10度	20度	30度	40度
	30m/sec	センサ3	センサ3	センサ3	センサ3	センサ3	センサ3	センサ3	センサ3	センサ3
40度	測定誤差	-1.479	-0.735	0.388	0.483	0.628	0.658	0.950	0.917	1.224
	標準偏差	1.213	0.831	0.204	0.119	0.099	0.069	0.069	0.049	0.061
30度	測定誤差	-0.446	-0.867	0.032	0.284	0.379	0.566	0.414	0.461	0.272
	標準偏差	0.889	0.470	0.135	0.095	0.086	0.055	0.068	0.060	0.077
20度	測定誤差	-0.440	-0.528	-0.269	-0.057	0.294	0.237	0.284	0.139	0.044
	標準偏差	0.814	0.314	0.157	0.100	0.065	0.055	0.073	0.059	0.084
10度	測定誤差	0.307	-0.970	-0.509	-0.354	0.122	-0.052	0.137	-0.414	0.048
	標準偏差	0.381	0.242	0.091	0.084	0.048	0.058	0.049	0.085	0.065
0度	測定誤差	-0.208	-0.435	-0.522	-0.567	-0.299	-0.205	-0.207	-0.473	-0.233
	標準偏差	0.191	0.092	0.097	0.076	0.056	0.059	0.063	0.071	0.066
-10度	測定誤差	0.363	-0.187	-0.381	-0.456	-0.574	-0.388	-0.819	-0.671	-0.575
	標準偏差	0.158	0.120	0.085	0.061	0.054	0.061	0.086	0.049	0.060
-20度	測定誤差	0.796	0.331	0.174	-0.250	-0.446	-0.677	-0.665	-0.889	-0.626
	標準偏差	0.125	0.091	0.074	0.052	0.048	0.074	0.078	0.059	0.058
-30度	測定誤差	0.851	0.694	0.560	0.070	-0.066	-0.635	-0.624	-0.945	-1.142
	標準偏差	0.104	0.079	0.073	0.065	0.053	0.103	0.119	0.068	0.090

表-19 センサ1の測定誤差(風速40m/secの場合)

α	β	-40度	-30度	-20度	-10度	0度	10度	20度	30度	40度
	40m/sec	センサ1	センサ1	センサ1	センサ1	センサ1	センサ1	センサ1	センサ1	センサ1
40度	測定誤差	0.887	0.049	-0.635	-0.441	-0.214	0.116	0.317	0.585	-0.336
	標準偏差	0.109	0.106	0.209	0.093	0.092	0.089	0.084	0.109	0.101
30度	測定誤差	0.377	-0.097	-0.452	0.133	0.049	0.182	0.190	0.198	-0.265
	標準偏差	0.082	0.089	0.116	0.079	0.091	0.085	0.091	0.082	0.081
20度	測定誤差	0.235	0.039	-0.219	-0.112	-0.173	0.098	0.158	0.323	-0.108
	標準偏差	0.072	0.078	0.086	0.081	0.089	0.078	0.079	0.086	0.081
10度	測定誤差	0.194	-0.059	-0.212	-0.058	-0.177	-0.032	-0.069	0.197	-0.246
	標準偏差	0.079	0.064	0.058	0.055	0.072	0.059	0.058	0.076	0.080
0度	測定誤差	0.238	-0.069	-0.153	0.080	-0.026	0.086	0.053	0.416	-0.181
	標準偏差	0.074	0.082	0.077	0.078	0.088	0.083	0.081	0.079	0.096
-10度	測定誤差	0.375	0.055	0.061	0.190	0.079	0.125	0.132	0.413	0.010
	標準偏差	0.101	0.100	0.116	0.106	0.124	0.112	0.108	0.102	0.101
-20度	測定誤差	0.479	0.114	0.081	0.062	0.087	0.237	0.001	0.430	0.103
	標準偏差	0.155	0.154	0.144	0.142	0.133	0.138	0.155	0.150	0.156
-30度	測定誤差	0.662	0.220	0.087	0.085	-0.078	-0.134	-0.265	-0.103	-0.354
	標準偏差	0.130	0.149	0.134	0.163	0.189	0.162	0.131	0.128	0.163

表-20 センサ2の測定誤差(風速40m/secの場合)

α	β	-40度	-30度	-20度	-10度	0度	10度	20度	30度	40度
	40m/sec	センサ2	センサ2	センサ2	センサ2	センサ2	センサ2	センサ2	センサ2	センサ2
40度	測定誤差	-0.584	0.230	0.444	1.050	0.729	0.390	-0.271	-0.595	2.043
	標準偏差	0.091	0.079	0.072	0.090	0.115	0.128	0.296	1.143	1.301
30度	測定誤差	0.132	0.219	0.349	0.565	0.560	-0.047	-0.481	-1.164	-0.841
	標準偏差	0.060	0.093	0.058	0.057	0.135	0.109	0.124	0.529	0.796
20度	測定誤差	0.046	-0.067	0.267	0.169	0.184	-0.262	-0.977	-1.103	-3.031
	標準偏差	0.072	0.078	0.072	0.053	0.080	0.104	0.184	0.432	0.557
10度	測定誤差	0.036	-0.046	-0.131	-0.305	-0.294	-0.064	-0.472	-0.518	-2.348
	標準偏差	0.067	0.059	0.044	0.064	0.063	0.118	0.082	0.160	0.389
0度	測定誤差	-0.152	-0.358	-0.241	-0.234	-0.352	-0.087	-0.294	-0.785	-0.570
	標準偏差	0.133	0.056	0.053	0.077	0.084	0.121	0.129	0.131	0.170
-10度	測定誤差	-0.114	-0.411	-0.059	-0.276	-0.158	-0.144	0.130	-0.364	-0.519
	標準偏差	0.103	0.064	0.078	0.045	0.087	0.057	0.198	0.111	0.151
-20度	測定誤差	-0.181	-0.078	-0.311	-0.049	0.028	-0.110	0.124	-0.123	-0.308
	標準偏差	0.073	0.075	0.094	0.056	0.080	0.060	0.077	0.158	0.127
-30度	測定誤差	-0.219	-0.117	0.093	0.301	0.237	0.116	0.198	0.224	0.125
	標準偏差	0.086	0.074	0.149	0.062	0.050	0.101	0.061	0.086	0.119

表-21 センサ3の測定誤差(風速40m/secの場合)

α	β	-40度	-30度	-20度	-10度	0度	10度	20度	30度	40度
	40m/sec	センサ3	センサ3	センサ3	センサ3	センサ3	センサ3	センサ3	センサ3	センサ3
40度	測定誤差	-2.273	0.016	0.276	0.379	0.499	0.563	0.686	0.615	0.868
	標準偏差	1.507	0.913	0.314	0.134	0.117	0.108	0.100	0.062	0.081
30度	測定誤差	-0.516	-1.062	-0.059	0.146	0.161	0.439	0.143	0.162	0.005
	標準偏差	1.058	0.638	0.126	0.102	0.165	0.073	0.090	0.059	0.086
20度	測定誤差	0.187	-0.712	-0.099	-0.217	0.128	0.139	0.037	-0.213	-0.157
	標準偏差	0.663	0.422	0.318	0.118	0.109	0.074	0.064	0.056	0.099
10度	測定誤差	-0.490	-1.257	-0.564	-0.642	-0.004	-0.167	0.003	-0.701	0.235
	標準偏差	0.387	0.205	0.102	0.147	0.068	0.070	0.054	0.077	0.080
0度	測定誤差	-0.729	-0.609	-0.552	-0.619	-0.305	-0.322	-0.429	-0.685	-0.423
	標準偏差	0.210	0.124	0.116	0.090	0.066	0.074	0.084	0.079	0.070
-10度	測定誤差	0.119	-0.165	-0.506	-0.494	-0.617	-0.504	-0.936	-0.843	-0.729
	標準偏差	0.157	0.138	0.151	0.068	0.076	0.076	0.119	0.057	0.101
-20度	測定誤差	0.599	0.309	0.084	-0.263	-0.455	-0.701	-0.803	-1.100	-0.806
	標準偏差	0.122	0.143	0.089	0.072	0.063	0.079	0.094	0.072	0.080
-30度	測定誤差	0.697	0.620	0.577	0.067	-0.107	-0.599	-0.655	-1.067	-1.277
	標準偏差	0.134	0.111	0.090	0.075	0.072	0.117	0.115	0.077	0.101

右側が誤差 $\Delta\beta$ を表わす。また、その図を描く計算の基となった各センサ自身の測定値等の一部については表-6~9に示す。更に、各センサの全てのケースの測定誤差、および、その標準偏差については表-10~21に示す。

9. 考 察

9.1 本風洞実験結果について

① 各種係数の風洞による較正值と予備実験値について

表-3に示すように、実験の始めに行った較正1と実験の最後に行った較正2における値は、互いに良く似通っているので信頼できる値と考えられる。また、2回の較正の平均値と予備実験値とを較べると、出力係数 C_i ($i=1, 2, 3$) および、バイアス B_i ($i=1, 2, 3$) は共に、多少のズレは有るものの、比較的良く合っている。そして、センサの位置を示す θ_1 , θ_2 も同様に良く合っている。しかし、 θ_3 のズレが少し大きい。このズレの原因を調べるため、予備実験を再度やりなおし、この値を再計測したが、その値は240.125度であった。この値と前回の値との差は小さく、この点においては、前の予備実験に問題ないことが分った。そこで、次に矢羽根の尾翼の部分の曲りを測定した結果、かなり大きなネジレがあることが分かった。尾翼の曲がり、センサ3が一番大きく、ベーン軸方向におよそ0.7~1.0度、それと垂直方向(回転軸方向)におよそ2.4~2.7度傾いている。センサ2が次に大きく、ベーン軸方向におよそ0.7~1.0度、それと垂直方向(回転軸方向)におよそ0.9~1.1度傾いている。この傾斜はセンサ1が一番小さく、ベーン軸方向におよそ0.02~0.3度、それと垂直方向(回転軸方向)におよそ0.2~0.4度傾いている。これらの曲り(ねじれ)による影響が θ_3 のズレに関係していると思われる。また、センサ1, 2, 3の三つの回転軸の成す平面性も、0.1度以内と小さく、各回転軸のスリコギ運動も0.04度以内であり、装置としての器械的精度は尾翼のネジレの部分と別として十分であると考えられる。

② 風速をパラメータとしたときの誤差 $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ の値

風速10m/secのときの誤差 $\Delta\alpha$ の俯瞰図は起伏に富んでおり、他のケースと様相が異なる。これは、 α の値を決定するセンサ2, 3の回転摩擦トルクが比較的大きく、風速が低い場合、矢羽根が正しく追従しないからと考えられる。同じ風速10m/secのときでも誤差 $\Delta\beta$ の方は比較的精度が良いのは、 β の値を大方決定するセンサ1の回転摩擦トルクが小さく、微風にも十分追従するからではないかと考えられる。さらに、センサ2, 3が左右対称であることから、 β については、誤差が相殺されることも考えられる。風速10m/secのときの誤差 $\Delta\alpha$ を除き、各風速における誤差 $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ と、大局的には相関があるが、微視的には相関は、それ程強くはない。例えば、風速30m/secの場合でセンサ1が故障のときの誤差 $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ (図-23)と、風速40m/secの場合でセンサ1が故障のときの誤差 $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ (図-27)とを重ね合せて比較すると、上記のようなことが言える。

③ 故障の有る場合の誤差 $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ の値

迎え角 α はセンサ1に殆ど(センサ1は殆ど床下を向いている)無関係なので、センサ1が故障の場合は、故障の無い場合と、誤差 $\Delta\alpha$ に関する図は殆ど同一となる。また、誤差 $\Delta\beta$ については、センサ2が故障の場合とセンサ3が故障の場合、相関が比較的強い。これは、センサの配置が左右対称であるためと考えられる。

なお、図-30~図-33に、ローカル・フローの影響が無視し得る場合(つまり、 α , β が共に0に近い場合、すなわち、 $\alpha = \beta = 0$, あるいは、 $\alpha = \beta = 10$ 度の特定の場合)の、センサ故障の無いとき、および、センサ1, センサ2, センサ3にそれぞれ故障が有るときの誤差 $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ 及びその標準偏差の一例を図示する。この図に示されるように、無故障時、故障時とも、センサ出力から求めた誤差 $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ の値は、ほぼ1.0度以内であり、また、標準偏差も0.14度以内にあることが認められる。

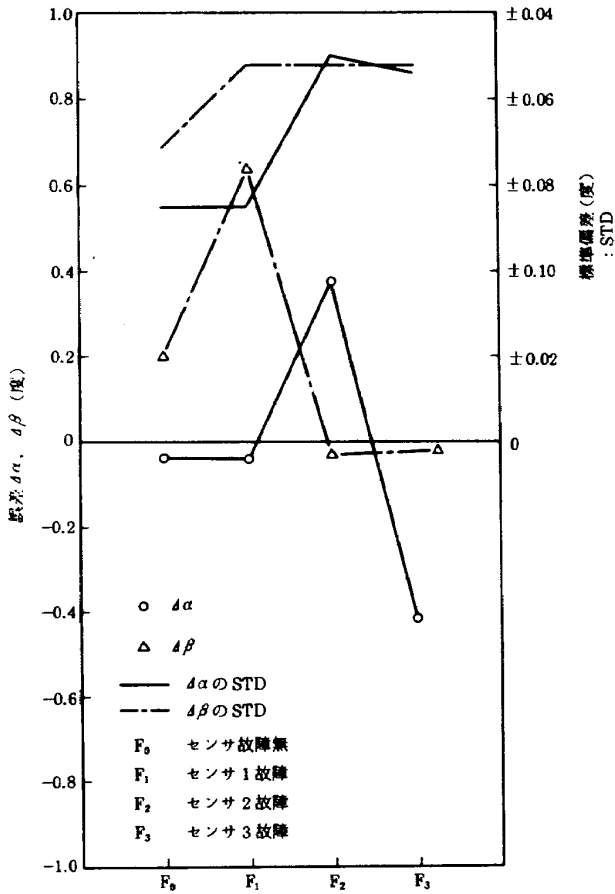


図-30 $W=40$ (m/s), $\alpha=0$, $\beta=0$ のときの $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ 及び標準偏差

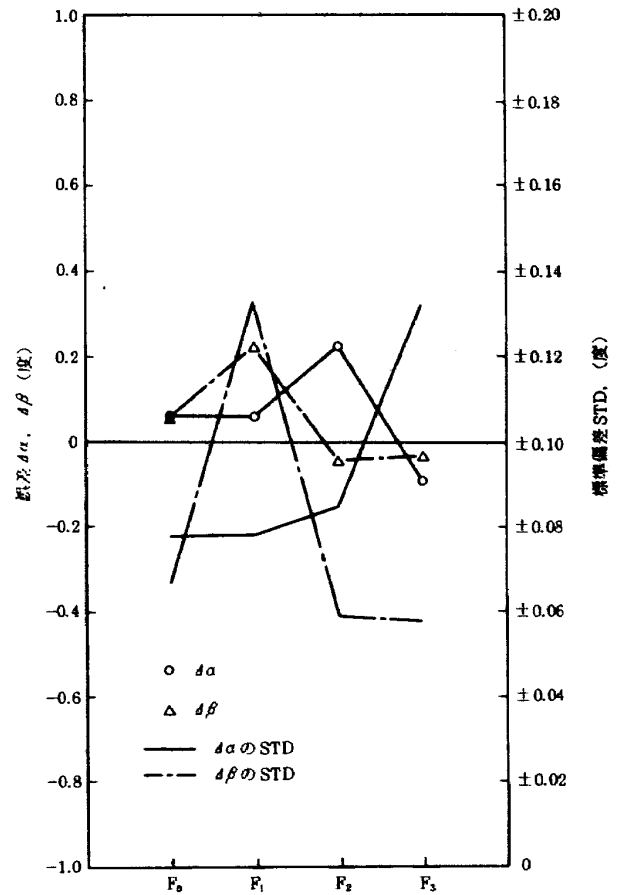


図-31 $W=40$ (m/s), $\alpha=10$, $\beta=10$ のときの $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ 及び STD

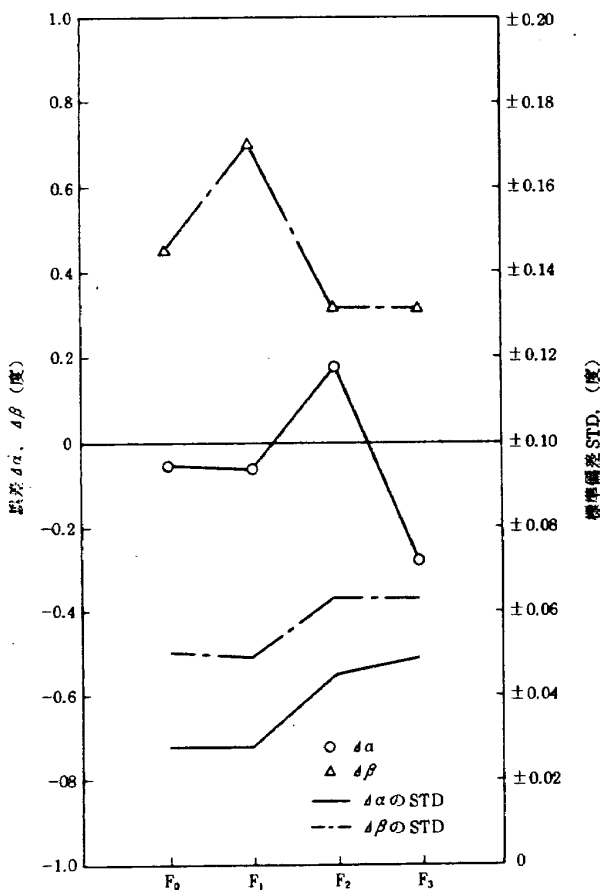


図-32 $W=20$ (m/s), $\alpha=0$, $\beta=0$ (度) のときの $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ 及び STD

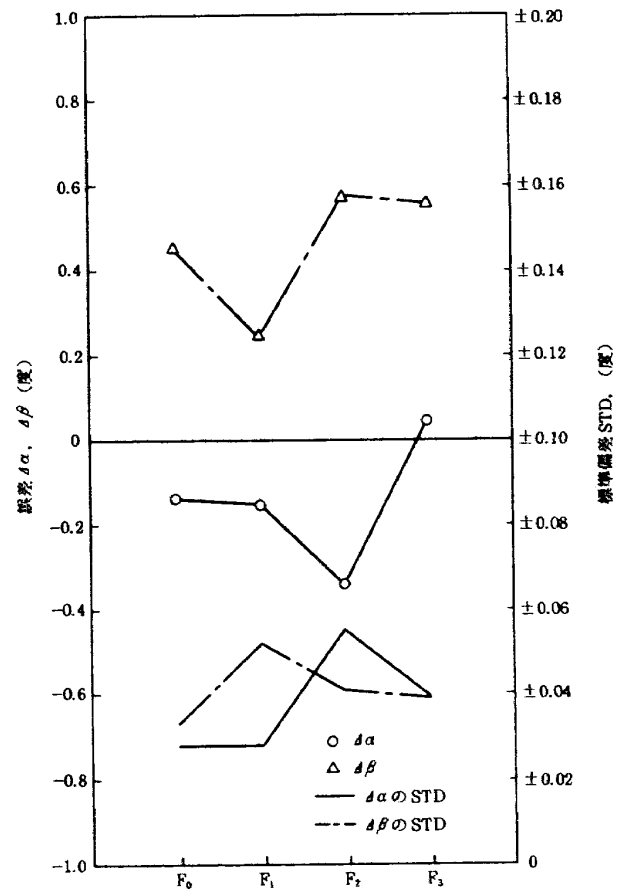


図-33 $W=20$ (m/s), $\alpha=10$, $\beta=10$ (度) のときの $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ 及び STD

9.2 本風洞実験結果と数値シミュレーション 結果との比較

本風洞実験に先立ち予備的資料を得るため数値シミュレーションを行ったことは既に「まえがき」の所で述べた。ここでは風洞実験と数値シミュレーション結果との比較検討を行う。

① 各種係数 C_i , B_i , θ_i ($i=1, 2, 3$) の理想値からのズレの影響

上述の数値シミュレーションにおいては

$$C_i = \text{Const} \quad (i=1, 2, 3) : \text{既知量}$$

$$B_i = 0 \quad (i=1, 2, 3)$$

$$\theta_1 = 0, \theta_2 = 120, \theta_3 = 240 \text{ DEG}$$

と想定した。これらの値は理想値である。しかし、実際の風洞実験のデータ処理においては、これらの値は実際の値とは異なるので、先の理想値をそのまま用いたら、誤差が大きくなってしまう。従って、実際のデータ処理においては、上記理想値の諸量の代わりに、風洞実験の2回の校正で求めた実際的な平均値(表-3)をもちいる必要がある。このような値を用いれば誤差はそれほど大きくなることはない。

② 故障の無い場合の誤差 $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ の値

数値シミュレーションによれば、故障の無い場合、3個センサのセンサ誤差が0.4度のとき、誤差 $\Delta\alpha$ および誤差 $\Delta\beta$ への影響は通常0.3~0.5度程度であり、当実験の実際のデータ処理によると、概ねその位の誤差となっている。しかし、 α , β が端の方になると、精度が落ちることは免れない。これは装置の構造上の問題であると考えられる。すなわち、大きな α および大きな β をとったとき、図-2における部品番号①および②の先から出るローカルフローがそのセンサの尾翼に当たり、風見安定を多少そこねるものと考えられる。

③ 故障の有る場合の誤差 $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ の値

数値シミュレーションによれば、故障の有る場合、1個のセンサのセンサ誤差が0.4度のとき、誤差 $\Delta\alpha$ および誤差 $\Delta\beta$ への影響は最大0.7度程度であり、当実験の実際のデータ処理によると、概ねその位の誤差となる。しかし、 α , β が端の方になると、精度が落ちる。このことは、上述した故障の無い場合と同様である。

10. 結 論

10.1 測定原理の実証

以上の実験および計算処理の結果、本センサ系、すなわち、二次元ベクトル量計測法⁴⁾に基づく冗長型気流方向測定装置(三軸 α/β センサ・システム)の測定原理が一定の精度で実証され、また、故障の有る場合も、多少精度は落ちるものの、一個故障のときにも十分作動することが分り、本システムが実用に供し得る範囲の計測精度を有していることを示している。

10.2 測定精度

ポテンショメータそのものの精度が0.3~0.5度であるので、その割りには、最終結果(α , β)は良く求まったといえる。ただし、風速の低い(10m/sec)ときは精度が悪い。これは既に述べたように、矢羽根の回転軸の摩擦トルクが少し大きいからと考えられる。

10.3 今後の課題

① α , β 演算のオンライン処理

当実験では、センサ1, 2, 3の生データを記録しているが、そのデータを用いて α , β をオンラインで計算処理している訳ではない。データは、一旦、MTに記録し、そのMTを当研究所の計算センターに掛けて α , β を求めた。今後、航空機搭載型とするためには、この計算処理をオンラインで行う必要がある。したがって、当センサシステムにマイコンを結合した形の実験が求められ、機会があれば、この実験を実施に移す予定である。

② 故障検出とその信号の排除

当実験では、任意の一個のセンサが故障しても α , β を求めることが出来ることが明らかにされたが、どのセンサが故障したかは、計算処理上で行ったに過ぎない。従って、故障検出およびその信号の排除が今後の課題として残る。

③ フライトモデルの試作

上述の①, ②が解決されれば、次の段階として、フライトモデルの試作が課題となって来る。これについても、様々な問題点が出て来ると考えられ

るが、順次行っていきたいと考える。

11. あとがき

以上の事柄により、ほぼ、所期の目的が達せられた。中でも、回転軸を斜に配した冗長型気流方向測定装置の測定原理が一定の精度で実証されたことは意味深いと考える。

尚、当装置の全般的設計について前計測部長幸尾治朗氏(現東海大学教授)より教示を得た。また、センサの軸受け部分の基本設計については宇宙研究グループ主任研究官関勝美氏より助言を得た。さらに、計測部総括室長堀川勇壮氏より、矢羽根の不感帯について記述する必要性を指摘され、また、矢羽根の揚力係数について空力性能部主任研究官外立政隆氏より教示を得た。併せて、感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 木村武雄, 滝沢 実, 内田忠夫; 矢羽根を用いた冗長型気流方向測定装置の最適化と設計のための数値解析について, 航技研資料TM-571 (1987)
- 2) 田畑浄治, 松島弘一, 成田健一, 塚本憲男; ベーン型気流方向検出器の特性, 航技研資料 TM-119 (1967)
- 3) 比良二郎, 滝沢英一; 流体力学の基礎と演習, 広川書店
- 4) 木村武雄; 二次元ベクトル量計測における最適観測軸配置について, 航技研資料 TM-547 (1985)
- 5) 廣末健一, 北村清美, 村上義隆, 進藤重美; 航空宇宙技術研究所突風風洞の計画と整備試験, 航技研報告 TR-335 (1973)

付録A. 強度計算

図-2において、支柱⑦に加わる空気力を F (kg)、支柱およびその上部に結合している部品（部品番号⑧, ⑨, ⑩, ⑪）の気流方向に直角な方向の投影断面積の総和を A (m²)、気流速度を v (m/s)、空気密度を ρ (kgf s²/m⁴) とすると、空気力 F の概算値は次式で与えられる。

$$F = \rho v^2 A C_D / 2 \quad (A-1)$$

1気圧、常温における空気密度 $\rho \approx 0.13$ (kgf s²/m⁴)、図面寸法より算出した投影断面積 $A \approx 0.7 \times 10^{-3}$ (m²)、風速 $v = 50$ (m/s) として、上式より支柱 ($C_D \approx 1.2$) に加わる空気力を計算すると

$$F \approx 0.14 \text{ (kg)} \quad (A-2)$$

となる。

一方、この空気力による支柱最下部に生ずる最大曲げ応力 σ_b は

$$\sigma_b = 32 M_b / (\pi d^3) \quad (A-3)$$

と表わされる。ただし

d : 支柱外径 (5mm)

M_b : 空気力によって生ずる曲げモーメント
($< 0.14 \text{ kg} \times 100 \text{ mm} = 14 \text{ kg mm}$)

である。よって、(A-3)式より、

$$\sigma_b < 1.14 \text{ kg/mm}^2 \quad (A-4)$$

と計算され、支柱の材質 (SUS304 : 18Cr-8Ni ステンレス鋼) の許容曲げ応力は

$$\sigma_{ba} = 8 \text{ kg/mm}^2 \quad (A-5)$$

であるから強度上十分であることが分かる。

付録B. 重りの計算

材質の比重について記すと、図-3について、部品番号⑨, ⑩の部分の材質はA7075 (アルミ合金) で比重は2.8であり、部品番号⑧の材質は真鍮で比重はおおよそ8.9である。また、各部分部分の、支柱軸を中心としたモーメントを、それぞれ、 M_{11} , M_g , M_{8s} , M_{8c} と表示する。そうすると

$$M_{11} = -30 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 65 \text{ mm} \\ \times 2.8 \text{ g/cm}^3 \approx -218 \times 10^3 \text{ mm}^4 \text{ g/cm}^3 \quad (B-1)$$

$$M_g = -\pi (5 \text{ mm}/2)^2 \times 70 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \\ \times 2.8 \text{ g/cm}^3 \approx -577 \times 10^2 \text{ mm}^4 \text{ g/cm}^3 \quad (B-2)$$

$$M_{8s} = \{ (10 \text{ mm}/2)^2 - (5 \text{ mm}/2)^2 \} \pi x \\ \times (6 \text{ mm} + x/2) \times 8.5 \text{ g/cm}^3 \\ \approx 300 \times 10 \text{ mm}^3 \text{ g/cm}^3 \\ + 250 x^2 \text{ mm}^2 \text{ g/cm}^3 \quad (B-3)$$

$$M_{8c} = (10 \text{ mm}/2)^2 \times (10 \text{ mm}/3) \times \{ (6 \text{ mm} \\ + x + (10 \text{ mm}/4)) \} \times 8.5 \text{ g/cm}^3 \\ \approx 189 \times 10^2 \text{ mm}^4 \text{ g/cm}^3 \\ + 222 \times 10 x \text{ mm}^3 \text{ g/cm}^3 \quad (B-4)$$

となり、それらの総和がゼロとなるように x を決める。すなわち

$$M_{11} + M_g + M_{8s} + M_{8c} = 0 \quad (B-5)$$

となるように x を決める。そうすると、概略計算として

$$250 x^2 + 5220 x - 253800 = 0 \quad (B-6)$$

$$x \approx 23 \text{ mm} \quad (B-7)$$

が得られる。

既 刊 資 料

TM-580	2m×2m 遷音速風洞主送風機用駆動設備の更新(計画と構成について)	1988年2月	鈴木 正光, 戸田 巨洋 小松 行夫, 唐沢 敏夫
TM-581	飛行シミュレーション試験設備視界模擬装置の構成および機能・性能	1988年2月	若色 薫, 川原 弘靖 渡辺 顯, 岡部 正典
TM-582	飛行運動再生アルゴリズムのヘリコプタ飛行データへの適用	1988年3月	佐々 修一
TM-583	並列計算機のアーキテクチャシミュレータ	1988年3月	原田 公一
TM-584	CFRP 面板/アルミハニカムサンドイッチ曲面板の軸圧縮座屈試験	1988年3月	遠藤 修司, 野口 義男 大竹 邦彦, 小野 幸一 福島 幸夫
TM-585	空冷タービンの空力特性に関する研究(I)タービン空力回転試験機と装置	1988年5月	井上 重雄, 臼井 弘 蓑田 光弘, 能瀬 弘幸
TM-586	並列計算機のアセンブラ	1988年6月	原田 公一
TM-587	空冷タービンの空力特性に関する研究(II)動翼シュラウドリングからの吹出しの影響	1988年6月	臼井 弘, 井上 重雄 蓑田 光弘, 能瀬 弘幸
TM-588	「飛鳥」7%半截模型の高速風洞試験に用いた配管干渉除去装置の特性について	1988年6月	細江 信幸, 唐沢 敏夫 浅井 圭介, 末永 尚史 小池 陽, 鈴木 弘 中村 正剛, 三堀 進
TM-589	2次元グラフィックディスプレイ装置用ソフトウェアパッケージ	1988年6月	末松 和代, 磯部 俊夫

航空宇宙技術研究所資料590号

昭和63年7月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1
電話三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川2-27-12
