

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-697

内挿式六分力天秤の較正について  
第三報．複合荷重式自動天秤較正装置による  
初期較正試験結果

河本 巖 ・ 鈴木 弘一  
中村 正剛 ・ 小國 保男 ・ 飯島 由美

1996年7月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

## 目 次

1. はじめに	2
2. 複合荷重式自動天秤較正装置	2
2.1 供試天秤	2
2.2 較正装置の力の向きの定義及び天秤の出力正負の定義	2
2.3 天秤較正係数の定義	3
2.4 負荷形態	4
3. LMC6522-50/Z1000S 天秤の較正係数	4
3.1 主要項係数の再現性	4
3.2 主要項係数への負荷形態の影響	5
3.3 干渉項係数等の再現性	6
3.4 干渉項係数等への負荷形態の影響と実荷重簡易複合荷重試験結果との比較	6
3.5 偏差値	8
4. B660H 天秤の較正係数	10
4.1 主要項係数の再現性	11
4.2 主要項係数への負荷形態の影響	11
4.3 干渉項係数等の再現性	11
4.4 偏差値	13
4.5 干渉項係数等の各種比較について	13
4.6 風洞試験結果の比較	16
5. まとめ	18
[付録]	
A ボーイングのオリジナル干渉補正係数 $B_i$ から天秤較正係数 $C_i$ への換算	19
A.1 ボーイング天秤の干渉補正式	19
A.2 電気量から物理量への変換	20
A.3 干渉補正係数 $B_i$ ( $i=1\sim 162$ ) に対応する天秤較正係数 $C_i$ ( $i=1\sim 168$ ) の計算	21
A.4 座標系の変換	22
A.5 $B_i$ によるボーイング方式のデータ処理と $C_i$ による航技研方式のデータ処理の等価性	22

内挿式六分力天秤の較正について  
第三報。複合荷重式自動天秤較正装置による  
初期較正試験結果\*

河本 巖\*<sup>1</sup> 鈴木 弘一\*<sup>1</sup>  
中村 正剛\*<sup>1</sup> 小國 保男\*<sup>1</sup> 飯島 由美\*<sup>1</sup>

**On the Calibration of Six-Component Internal Balances  
Part 3, Initial Balance Calibration Results with the Automatic Balance  
Calibration System Using Combination Loading**

Iwao KAWAMOTO\*<sup>1</sup>, Kouichi SUZUKI\*<sup>1</sup>  
Seigo NAKAMURA\*<sup>1</sup>, Yasuo OGUNI\*<sup>1</sup>, Yoshimi IIJIMA\*<sup>1</sup>

**ABSTRACT**

The shakedown operation of the new automatic balance calibration system has been conducted since 1993 with two typical internal balances for the NAL-TWT. The calibration system including hardware and software has already been described in detail<sup>1)</sup>. In this paper, the balance calibration results during shakedown operation are analyzed for evaluation of the new system. Emphasis is placed on the following items.

- Comparison of the calibration results between the component loading method and the combination loading method in balance calibration.
- Repeatability of the coefficient matrices of two balances in the operation.
- Comparison of the calibration results obtained with several balance calibration systems.
- Effects of combination loading profiles on the coefficient matrices of balances.
- Findings of the problems concerning the system operation.

It is concluded that repeatability of the coefficient matrices of the balances is excellent and that they are applicable to data treatment of transonic wind tunnel tests. However, further efforts are necessary to improve the  $M_x$  component of the new calibration system.

**Keywords:** automatic balance calibration system, shakedown operation, calibration result, repeatability, loading profile

**概 要**

航技研遷音速風洞では平成5年度に複合荷重式自動天秤較正装置を導入し調整運転を行ってきた。同装置のシステムの詳細(構造や機能)は文献1に述べた。本報告は複合荷重式自動天秤較正装置の評価を行う目的で、調整運転中に収集した2体の一体加工式内挿天秤の較正試験結果を解析評価したものである。供試天秤は国産天秤1体と外国天秤1体でいずれも航技研遷音速風洞の標準天秤である。本研究の目的は

\* 平成8年7月10日受付 (received 10 July 1996)

\*<sup>1</sup> 空力性能部 (Aircraft Aerodynamics Division)

- 従来の成分荷重方式による天秤校正係数決定と複合荷重による係数決定との精度の比較
- 繰返して試験を行った場合の天秤校正係数の再現性検討
- 異なった校正装置で決定した天秤校正係数の比較検討
- 複合負荷形態の天秤校正係数への影響
- 複合荷重式自動天秤校正装置の運転計測上の問題点の洗いだし

等である。

一連の調整運転で得た試験データを解析した結果、求まる天秤校正係数の再現性は比較的優れており、またそれら係数マトリックスも実際の風洞試験に適用できるものと判断している。しかし  $M_x$  成分の精度向上等改善すべき事項も残されており引続きシステムの精度向上を図る努力も必要である。

## 主な記号

$B_i (i=1, n)$	: ボーイングのオリジナル干渉補正係数
$C_{AF}$	: 前面軸力係数
$C_i (i=1, n)$	: 天秤校正係数
$C_l$	: 横揺れモーメント係数, 右翼下げ正
$C_m$	: 縦揺れモーメント係数, 頭上げ正
$C_N$	: 垂直力係数, 上方正
$C_n$	: 偏揺れモーメント係数, 頭右振り正
$C_Y$	: 横力係数, 右翼正
$F_A$	: 軸力, 後方正
$F_N$	: 垂直力, 上方正
$F_X, F_Y, F_Z$	: $X, Y, Z$ 方向の力 (N), 図1 参照
$F_{XV}, F_{YV}, F_{ZV}$	: $X, Y, Z$ 要素の出力 ( $mV/V$ ), 図2, 図3 参照
$H_{FX}, H_{FY}, H_{FZ}$	: 電流量から力への換算係数(表14参照)
$H_{MX}, H_{MY}, H_{MZ}$	: 電流量からモーメントへの換算係数 (表14参照)
$M_X, M_Y, M_Z$	: $X, Y, Z$ 軸周りのモーメント ( $N \times m$ ), 図1 参照
$M_{XV}, M_{YV}, M_{ZV}$	: $M_X, M_Y, M_Z$ 要素の出力 ( $mV/V$ ), 図2, 図3 参照
$M_\infty$	: マッハ数
$Re_{Cr}$	: 中心コード基準レイノルズ数
$X_1 \sim X_4$	: $F_X$ を発生する負荷アクチュエータ番号, 図1 参照
$Y_1 \sim Y_4$	: $F_Y, M_Z$ を発生させる負荷アクチュエータ番号, 図1 参照
$Z_1 \sim Z_4$	: $F_Z, M_Y$ を発生させる負荷アクチュエータ番号, 図1 参照
$Z_5 \sim Z_8$	: $M_X$ を発生させる負荷アクチュエータ番号, 図1 参照
$\alpha$	: 迎角 (deg)
$\beta$	: 横滑り角 (deg)
$\sigma_{FX}, \sigma_{FY}, \sigma_{FZ}$	: $F_X, F_Y, F_Z$ 要素の最大許容荷重に対する標準偏差 (%)
$\sigma_{MX}, \sigma_{MY}, \sigma_{MZ}$	: $M_X, M_Y, M_Z$ 要素の最大許容荷重に対する標準偏差 (%)

添え字

F.S. 又は FS	: フルスケール
$f$	: 干渉を除去した6分力出力

## 1. はじめに

航技研遷音速風洞に新しく導入した複合荷重式天秤校正装置<sup>1)</sup>の評価の一環として遷音速風洞用の標準的な天秤2体、国産天秤(天秤名 LMC6522-50/Z1000S)と外国製天秤(ボーイング B660H)を取り上げ、校正装置の調整運転も兼ねて校正データの収集を行った。本稿ではこの2体の天秤の校正係数の評価を行う。国産天秤については11回の校正試験を、外国製天秤については16回の校正試験を行った。これら校正データをもとに、(1)成分負荷方式による試験結果と複合荷重方式による試験結果の比較、(2)試験結果である天秤校正係数マトリックスの再現性確認、(3)異なった校正装置で得た係数マトリックスの比較、(4)複合負荷形態の係数マトリックスへの影響、(5)その他運転中の問題点の洗いだし等について解析、検討を行った結果について述べる。

## 2. 複合荷重式自動天秤校正装置

本校正装置に関する構造と機能については文献1)に詳細に記した。以下に本稿に必要な箇所を再録しておく。

### 2.1 供試天秤

校正試験に使った天秤2体の6分力容量を校正装置の負荷能力とともに表1に示した。

### 2.2 校正装置の力の向きと天秤の出力正負の定義

本装置は自動運転方式を採用しており、計算機制御される力とモーメントの向きの定義は図1の通りである。天秤出力の正負の方向は必ずしも全ての天秤で統一されているわけではない。本校正試験時の供試天秤の出力の正負の定義を LMC6522-50/Z1000S 天秤に関しては図2に、B660H 天秤については図3に示しておく。本校正データから求まる天秤特性は、ここに定義した方向に従った負荷と出力の関係を与えるものである。従って風洞試験データにこの天

表1 供試天秤の容量

天秤名等	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
LMC6522-50/Z1000S (N,Nm)	1,000	5,000	10,000	200	800	400
B660H (N,Nm)	700	4,000	8,000	250	600	250
校正装置負荷容量 (N,Nm)	2,000	20,000	20,000	400	4,000	4,000

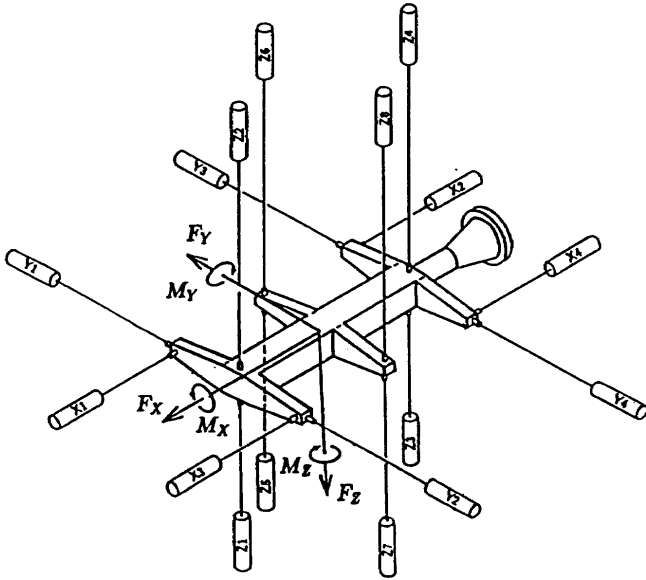


図1 航技研天秤校正装置の負荷方向の定義

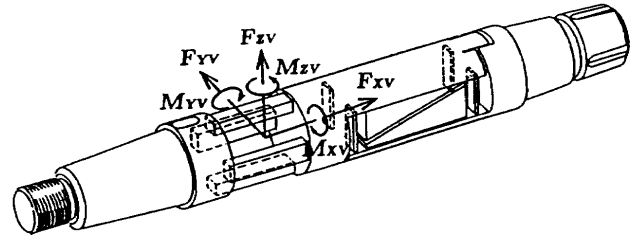


図2 LMC6522-50/Z1000S 天秤の出力正負の定義

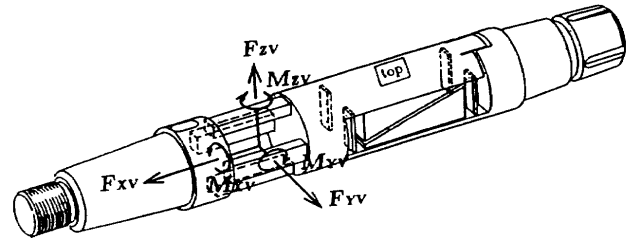


図3 B660H 天秤の出力正負の定義

秤特性式を適用する場合には、風洞試験時の力の向き、天秤出力の正負に従って必要に応じて座標変換を行う必要がある。

### 2.3 天秤校正係数の定義

天秤の6分力出力  $F_{Xv}$ ,  $F_{Yv}$ ,  $F_{Zv}$ ,  $M_{Xv}$ ,  $M_{Yv}$ ,  $M_{Zv}$  については単位励起電圧当りの出力 ( $mV/V$ ) 値を用い、その時の天秤への負荷  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  についてはその単位を  $N$  または  $Nm$  を用いる事とする。天秤特性式はこれら両者の関係を多項式で記述したもので、未定係数  $C_i$  ( $i=1\sim n$ ) は最小二乗法で決定する。

#### • 線形多項式による天秤特性表示

一体加工式内挿天秤のような剛性の低いエレメントでは、負荷と天秤出力の間に非線形性が目立ち線形多項式表現では天秤精度は劣る<sup>2)</sup>。しかし本稿では精度比較の対象として成分荷重のみによる校正係数も含めるので、線形多項式表示の場合の係数マトリックス  $C_i$  ( $i=1\sim 42$ ) を以下に定義しておく。

$$F_x = C_1 + C_2 F_{Xv} + C_3 F_{Yv} + C_4 F_{Zv} + C_5 M_{Xv} + C_6 M_{Yv} + C_7 M_{Zv} \quad (1)$$

$$F_y = C_8 + C_9 F_{Xv} + C_{10} F_{Yv} + C_{11} F_{Zv} + C_{12} M_{Xv} + C_{13} M_{Yv} + C_{14} M_{Zv} \quad (2)$$

$$F_z = C_{15} + C_{16} F_{Xv} + C_{17} F_{Yv} + C_{18} F_{Zv} + C_{19} M_{Xv} + C_{20} M_{Yv} + C_{21} M_{Zv} \quad (3)$$

$$M_x = C_{22} + C_{23} F_{Xv} + C_{24} F_{Yv} + C_{25} F_{Zv} + C_{26} M_{Xv} + C_{27} M_{Yv} + C_{28} M_{Zv} \quad (4)$$

$$M_y = C_{29} + C_{30} F_{Xv} + C_{31} F_{Yv} + C_{32} F_{Zv} + C_{33} M_{Xv} + C_{34} M_{Yv} + C_{35} M_{Zv} \quad (5)$$

$$M_z = C_{36} + C_{37} F_{Xv} + C_{38} F_{Yv} + C_{39} F_{Zv} + C_{40} M_{Xv} + C_{41} M_{Yv} + C_{42} M_{Zv} \quad (6)$$

#### • 非線形多項式による天秤特性表示

複合荷重形態での天秤校正データを処理するには通常2次の多項式を用いる。この場合の係数マトリックス  $C_i$  ( $i=1\sim 168$ ) の定義は以下の記述に従うものとする。

$$F_x = C_1 + C_2 F_{Xv} + C_3 F_{Yv} + C_4 F_{Zv} + C_5 M_{Xv} + C_6 M_{Yv} + C_7 M_{Zv} + C_8 F_{Xv}^2 + C_9 F_{Yv}^2 + C_{10} F_{Zv}^2 + C_{11} M_{Xv}^2 + C_{12} M_{Yv}^2 + C_{13} M_{Zv}^2 + F_{Xv} (C_{14} F_{Yv} + C_{15} F_{Zv} + C_{16} M_{Xv} + C_{17} M_{Yv} + C_{18} M_{Zv}) + F_{Yv} (C_{19} F_{Zv} + C_{20} M_{Xv} + C_{21} M_{Yv} + C_{22} M_{Zv}) + F_{Zv} (C_{23} M_{Xv} + C_{24} M_{Yv} + C_{25} M_{Zv}) + M_{Xv} (C_{26} M_{Yv} + C_{27} M_{Zv}) + C_{28} M_{Yv} M_{Zv} \quad (7)$$

$$F_y = C_{29} + C_{30} F_{Xv} + C_{31} F_{Yv} + C_{32} F_{Zv} + C_{33} M_{Xv} + C_{34} M_{Yv} + C_{35} M_{Zv} + C_{36} F_{Xv}^2 + C_{37} F_{Yv}^2 + C_{38} F_{Zv}^2 + C_{39} M_{Xv}^2 + C_{40} M_{Yv}^2 + C_{41} M_{Zv}^2 + F_{Xv} (C_{42} F_{Yv} + C_{43} F_{Zv} + C_{44} M_{Xv} + C_{45} M_{Yv} + C_{46} M_{Zv}) + F_{Yv} (C_{47} F_{Zv} + C_{48} M_{Xv} + C_{49} M_{Yv} + C_{50} M_{Zv}) + F_{Zv} (C_{51} M_{Xv} + C_{52} M_{Yv} + C_{53} M_{Zv}) + M_{Xv} (C_{54} M_{Yv} + C_{55} M_{Zv}) + C_{56} M_{Yv} M_{Zv} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
F_Z = & C_{57} + C_{58}F_{XV} + C_{59}F_{YV} + C_{60}F_{ZV} + C_{61}M_{XV} \\
& + C_{62}M_{YV} + C_{63}M_{ZV} + C_{64}F_{XV}^2 + C_{65}F_{YV}^2 + C_{66}F_{ZV}^2 \\
& + C_{67}M_{XV}^2 + C_{68}M_{YV}^2 + C_{69}M_{ZV}^2 + F_{XV}(C_{70}F_{YV} \\
& + C_{71}F_{ZV} + C_{72}M_{XV} + C_{73}M_{YV} + C_{74}M_{ZV}) \\
& + F_{YV}(C_{75}F_{ZV} + C_{76}M_{XV} + C_{77}M_{YV} + C_{78}M_{ZV}) \\
& + F_{ZV}(C_{79}M_{XV} + C_{80}M_{YV} + C_{81}M_{ZV}) \\
& + M_{XV}(C_{82}M_{YV} + C_{83}M_{ZV}) + C_{84}M_{YV}M_{ZV} \quad (9)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_X = & C_{85} + C_{86}F_{XV} + C_{87}F_{YV} + C_{88}F_{ZV} + C_{89}M_{XV} \\
& + C_{90}M_{YV} + C_{91}M_{ZV} + C_{92}F_{XV}^2 + C_{93}F_{YV}^2 \\
& + C_{94}F_{ZV}^2 + C_{95}M_{XV}^2 + C_{96}M_{YV}^2 + C_{97}M_{ZV}^2 \\
& + F_{XV}(C_{98}F_{YV} + C_{99}F_{ZV} + C_{100}M_{XV} + C_{101}M_{YV} \\
& + C_{102}M_{ZV}) + F_{YV}(C_{103}F_{ZV} + C_{104}M_{XV} + C_{105}M_{YV} \\
& + C_{106}M_{ZV}) + F_{ZV}(C_{107}M_{XV} + C_{108}M_{YV} \\
& + C_{109}M_{ZV}) + M_{XV}(C_{110}M_{YV} + C_{111}M_{ZV}) \\
& + C_{112}M_{YV}M_{ZV} \quad (10)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_Y = & C_{113} + C_{114}F_{XV} + C_{115}F_{YV} + C_{116}F_{ZV} + C_{117}M_{XV} \\
& + C_{118}M_{YV} + C_{119}M_{ZV} + C_{120}F_{XV}^2 + C_{121}F_{YV}^2 \\
& + C_{122}F_{ZV}^2 + C_{123}M_{XV}^2 + C_{124}M_{YV}^2 + C_{125}M_{ZV}^2 \\
& + F_{XV}(C_{126}F_{YV} + C_{127}F_{ZV} + C_{128}M_{XV} + C_{129}M_{YV} \\
& + C_{130}M_{ZV}) + F_{YV}(C_{131}F_{ZV} + C_{132}M_{XV} + C_{133}M_{YV} \\
& + C_{134}M_{ZV}) + F_{ZV}(C_{135}M_{XV} + C_{136}M_{YV} \\
& + C_{137}M_{ZV}) + M_{XV}(C_{138}M_{YV} + C_{139}M_{ZV}) \\
& + C_{140}M_{YV}M_{ZV} \quad (11)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
M_Z = & C_{141} + C_{142}F_{XV} + C_{143}F_{YV} + C_{144}F_{ZV} + C_{145}M_{XV} \\
& + C_{146}M_{YV} + C_{147}M_{ZV} + C_{148}F_{XV}^2 + C_{149}F_{YV}^2 \\
& + C_{150}F_{ZV}^2 + C_{151}M_{XV}^2 + C_{152}M_{YV}^2 + C_{153}M_{ZV}^2 \\
& + F_{XV}(C_{154}F_{YV} + C_{155}F_{ZV} + C_{156}M_{XV} + C_{157}M_{YV} \\
& + C_{158}M_{ZV}) + F_{YV}(C_{159}F_{ZV} + C_{160}M_{XV} + C_{161}M_{YV} \\
& + C_{162}M_{ZV}) + F_{ZV}(C_{163}M_{XV} + C_{164}M_{YV} \\
& + C_{165}M_{ZV}) + M_{XV}(C_{166}M_{YV} + C_{167}M_{ZV}) \\
& + C_{168}M_{YV}M_{ZV} \quad (12)
\end{aligned}$$

## 2.4 負荷形態

天秤較正試験における複合負荷点を設定する場合、天秤6成分の組合せ数が極めて多くなるので極力それを抑える必要がある。今回の較正試験では以下の考え方で合計434点の負荷群を基本負荷形態としている<sup>1)</sup>。

- 成分負荷形態として天秤の各成分容量の正、負域を各5等分した。この結果ゼロも含めて一成分当り14点となり合計84点の荷重点群を作成。

- 二成分複合負荷形態として天秤の各成分容量±40%値と±80%値を代表点に取り、15組の二成分組合せについて複合荷重を作成した。この結果 $F_X \times F_Y$ ではゼロも含めて18点となり15組の複合荷重について270点の荷重点群を作成。
- 天秤特性を記述する関数モデルから分るとおり、2次の非線形項を評価するには2成分の複合荷重で十分であるが、実際の風洞試験では6分力が同時に作用するので6成分複合荷重も含めた。各成分の容量の±50%を代表値として $F_X \times F_Y \times F_Z \times M_X \times M_Y \times M_Z$ の組合せを作成した。この場合ゼロを含めて80点の負荷群となる。

基本負荷形態の具体例についてはLMC6522天秤について文献1)の付録に示してある。B660H天秤についても基本的な考え方は同様であり、これら基本負荷形態で調整運転を行った。収集した天秤較正データから較正係数 $C_i$ を決定する際に、負荷形態の影響を調べる目的で表2に示す4負荷形態に較正試験データを再構築し、それぞれの負荷形態に対応した較正係数を算出し比較を行った。

## 3. LMC6522-50/Z1000S天秤の較正係数

本較正装置は負荷を加える場合張力のみを用い圧縮は利用しない。また系の剛性を高め機械の動きの再現性を確保する目的で常時一定の張力を加え、ゼロ負荷でも一対の張力を釣り合わせた状態とし、ワイヤーの張力をゼロにする事は無い。調整運転中は剛性を高める初期張力の大きさを各種変えて、11回の較正試験を行った。試験時の室温や湿度とともに試験時に設定した初期張力の大きさを表3に示す。

### 3.1 主要項係数の再現性

複合荷重による較正試験データの処理には式(7)～式(12)を用いる。この場合軸力 $F_X$ に対する多項式では $C_2F_{XV}$ が一次の比例項であり全ての項の中で最も卓越した項である。従って主要項係数 $C_2$ は他の係数に比べて大きな値をとる。同様に他の5成分についてはそれぞれ $C_{31}$ 、 $C_{60}$ 、 $C_{89}$ 、 $C_{118}$ 、 $C_{147}$ が主要項の係数となる。はじめにこれら最重要項係数の評価を行っておく。表4に11回の較正試験結果から計算した負荷形態1(基本負荷形態)の場合の主要項係数の一覧を示す。全体としての再現性は軸力成分の $C_2$ 、垂直力成分の $C_{60}$ 、縦揺れモーメントの $C_{118}$ は平均値に対する偏

表2 データ処理のための4負荷形態

負荷形態	荷重構成	負荷点数	適用関数
1	成分負荷+二成分複合+六成分複合	434	二次多項式
2	成分負荷のみ	84	一次多項式
3	成分負荷+二成分複合	354	二次多項式
4	成分負荷+六成分複合	164	二次多項式

表3 LMC6522-50/Z1000S 天秤の較正時の初期張力、環境条件

試験番号	試験日	$X_1 \sim X_4$	$Y_1 \sim Y_4$	$Z_1 \sim Z_4$	$Z_5 \sim Z_8$	室温	湿度
1	H70406	50	600	600	100	20	40
2	H70411	25	400	500	50	20	40
3	H70418	25	250	250	25	20	40
4	H70421	12	125	125	12	20	40
5	H70427	75	600	600	150	20	40
6	H70501	10	50	70	10	20	60
7	H70509	25	250	250	200	20	60
8	H70512	25	500	500	25	20	60
9	H70515	25	500	500	75	20	60
10	H70517	10	50	70	10	20	60
11	H70520	10	50	70	10	20	60

初期張力:(N)、室温:(°C)、湿度:(%RH)

表4 LMC6522-50/Z1000S 天秤の主要項係数の再現性(負荷形態1)

試験番号	試験日	$C_2$	$C_{31}$	$C_{60}$	$C_{89}$	$C_{118}$	$C_{147}$
1	H70406	-1543.2	6525.3	-24271.7	-190.2	813.5	-540.6
2	H70411	-1543.5	6522.4	-24269.8	-188.7	813.7	-540.3
3	H70418	-1544.1	6523.7	-24275.5	-187.8	813.6	-540.4
4	H70421	-1543.7	6524.1	-24265.0	-188.1	813.4	-540.0
5	H70427	-1543.5	6524.1	-24280.6	-190.9	814.2	-540.8
6	H70501	-1543.4	6507.7	-24266.4	-189.5	813.3	-538.1
7	H70509	-1544.0	6526.1	-24279.9	-188.6	814.3	-540.4
8	H70512	-1543.9	6522.6	-24270.3	-189.7	814.0	-540.8
9	H70515	-1544.2	6523.5	-24271.1	-189.9	814.3	-540.3
10	H70517	-1543.4	6507.2	-24258.0	-189.5	813.0	-536.9
11	H70520	-1543.7	6503.3	-24252.4	-189.5	812.5	-537.4
	平均値	-1543.7	6519.1	-24269.1	-189.3	813.6	-539.7
	偏差(%)	0.02	0.12	0.03	0.47	0.07	0.25

表5 LMC6522-50/Z1000S 天秤の主要項係数に対する負荷形態の影響

主要項係数の平均値 (偏差)	$C_2$ (%)	$C_{31}(C_{10})$ (%)	$C_{60}(C_{18})$ (%)	$C_{89}(C_{26})$ (%)	$C_{118}(C_{34})$ (%)	$C_{147}(C_{42})$ (%)
負荷形態1	-1543.7 (0.02)	6519.1 (0.12)	-24269.1 (0.03)	-189.3 (0.5)	813.6 (0.07)	-539.7 (0.3)
負荷形態2	-1543.4 (0.04)	6520.4 (0.09)	-24125.5 (0.62)	-190.9 (0.63)	812.0 (0.18)	-539.3 (0.25)
負荷形態3	-1544.6 (0.03)	6519.3 (0.12)	-24264.0 (0.04)	-188.3 (0.7)	813.2 (0.08)	-539.4 (0.28)
負荷形態4	-1542.5 (0.02)	6518.8 (0.13)	-24247.1 (0.03)	-191.5 (0.44)	814.1 (0.06)	-540.0 (0.23)

差が0.1%以下であり極めて良好である。ローリングモーメントの  $C_{89}$  が0.5%弱と最も大きく今後改善を必要とする。

### 3.2 主要項係数への負荷形態の影響

負荷形態を変えた場合の LMC6522-50/Z1000S 天秤の主要項係数の比較を表5に示した。負荷形態1, 3, 4は複合負

荷形態であり天秤6成分の主要項係数は式(7)～式(12)の  $C_2, C_{31}, C_{60}, C_{89}, C_{118}, C_{147}$  である。また負荷形態2は成分負荷形態であり一次多項式を用いるので主要項係数は式(1)～式(6)の  $C_2, C_{10}, C_{18}, C_{26}, C_{34}, C_{42}$  となる。従って表5では  $C_2, C_{31} \dots C_{147}$  は負荷形態1, 3, 4に対応し、括弧内の  $C_2, C_{10}, \dots C_{42}$  は負荷形態2に対応することになる。

係数値は11回の校正試験で得られた値の平均値であり、偏差はそれぞれの平均値に対する11回の試験結果の散らばりを標準偏差値で示したものである。負荷形態2の場合の $C_{60}$  ( $C_{18}$ )値が幾分小さめであるが、複合負荷形態の場合は6成分の主要項係数への負荷形態の違いは小さい。

3.3 干渉項係数等の再現性

次に主要項係数以外の非線形項の係数や干渉項の係数を直接比較してみる。比較のための作図は主要項係数の絶対値を単位大きさに取った場合の各係数の相対的な大きさを縦軸に取り、横軸は式(7)~式(12)で定義した係数 $C_i$ を順番に並べて整理した。ここでは代表例として負荷形態1の場合の校正係数を示す。図4の $F_x$ に係わる係数についてみると11回の校正試験から得られた $C_2-C_{28}$ の再現性は極めて良い。またこの天秤に関して分る事は最も干渉の大きい係数は $C_{10}$  ( $F_{2V}^2$ の係数)で主要項係数の15%弱程度である。次いで $C_4$  ( $F_{2V}$ の係数),  $C_{24}$  ( $F_{2V} \times M_{YV}$ の係数),  $C_{22}$  ( $F_{YV} \times M_{2V}$ の係数)等が目立つ。従ってこの天秤の場合には主に垂直方向の力 $F_2$ に大きい負荷が加わった場合に軸力 $F_x$ に大きい干渉を及ぼす事が分る。当然の事ではあるが本来干渉の小さい天秤が望ましいが、一体化天秤のような干渉を避け切れないものはその評価を含めた正しい天

秤校正を行う事が重要となる。本校正結果からも分るとおり、一体化天秤では非線形干渉項も無視できず、特にクロス項の係数も有意な値を有するために複合荷重による天秤校正が重要となる。本稿では試験結果の詳細を提示しないが、負荷形態2(成分負荷のみ)で天秤特性を一次式で記述した場合は例えば図4で $C_8-C_{28}$ の非線形項の係数を全て0と近似した事に相当し、精度が低下する事も明確である。この他の $F_y$ から $M_2$ に関する係数を図5-図9に示した。試験結果の再現性と言う観点からは $M_x$ 成分の $C_{94}$ に幾分散らばりが見えるが全体としては再現性は優れている。さらに特徴的な事項はクロス項の係数は $F_x$ 成分では無視できないと述べたが他の5分力では殆ど0に近い。他の負荷形態2, 負荷形態3, 負荷形態4それぞれの11回の干渉項係数の再現性については試験データの提示は省略するが負荷形態1の場合と同じ程度であることを確認している。

3.4 干渉項係数等への負荷形態の影響と実荷重簡易複合荷重試験結果との比較

各負荷形態に対する11回の校正係数の再現性は確認されたので、ここでは負荷形態を変えた場合の干渉項係数の値を比較してみる。代表値として第1回目の校正試験データ

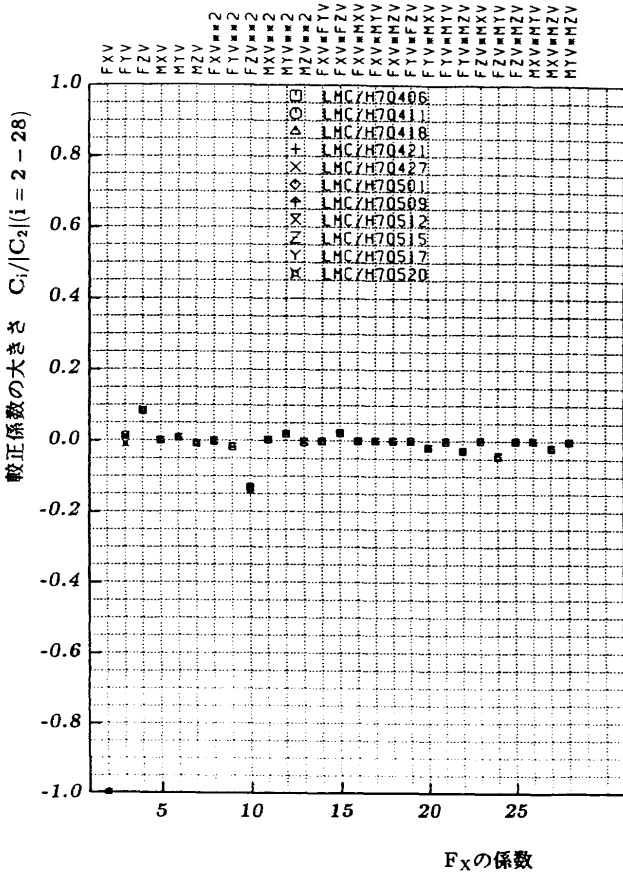


図4 LMC6522-50/Z1000S天秤の $F_x$ の係数 $C_2-C_{28}$ の再現性(負荷形態1)

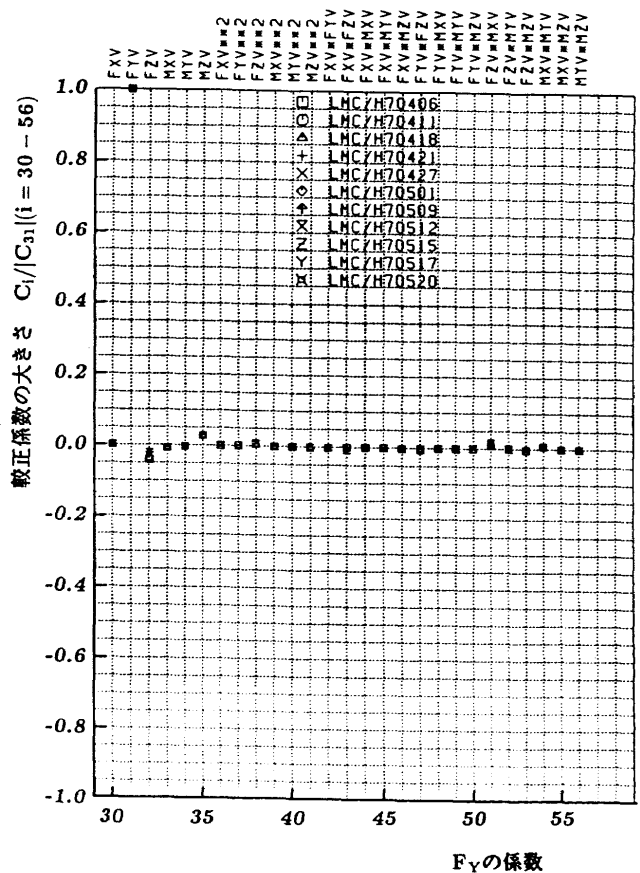


図5 LMC6522-50/Z1000S天秤の $F_y$ の係数 $C_{30}-C_{56}$ の再現性(負荷形態1)



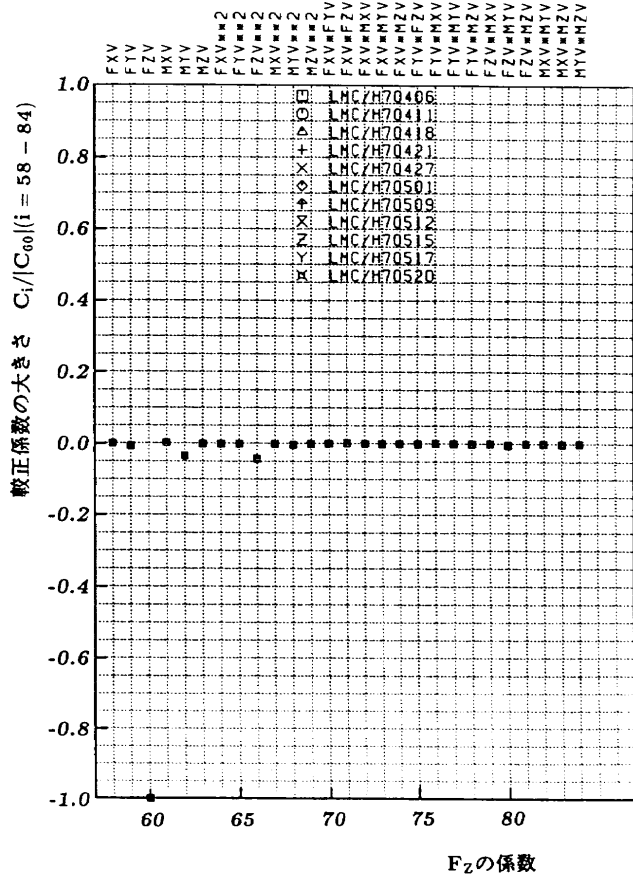


図6 LMC6522-50/Z1000S天秤の  $F_z$  の係数  $C_{58}-C_{84}$  の再現性 ( 負荷形態 1 )

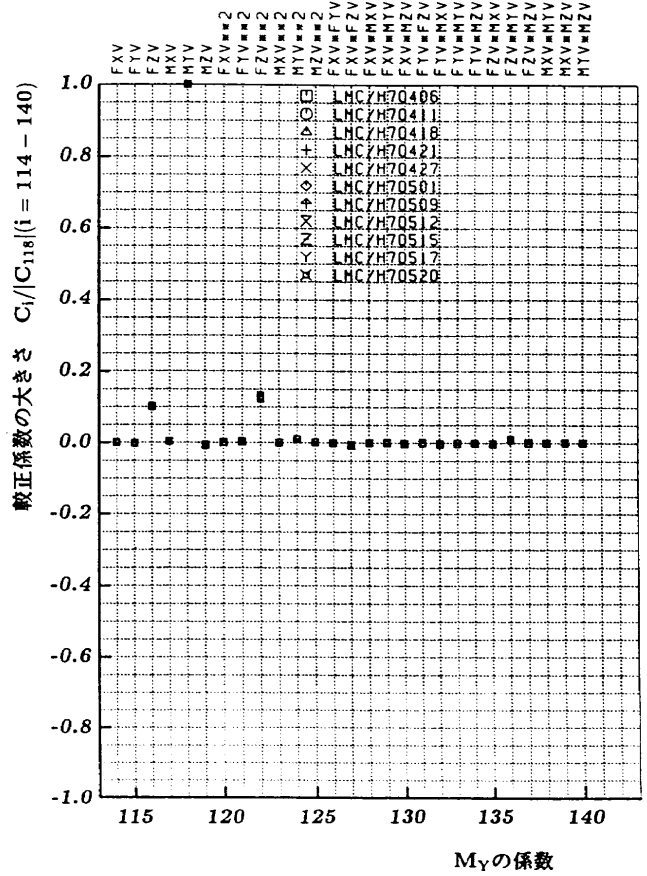


図8 LMC6522-50/Z1000S天秤の  $M_y$  の係数  $C_{114}-C_{140}$  の再現性 ( 負荷形態 1 )

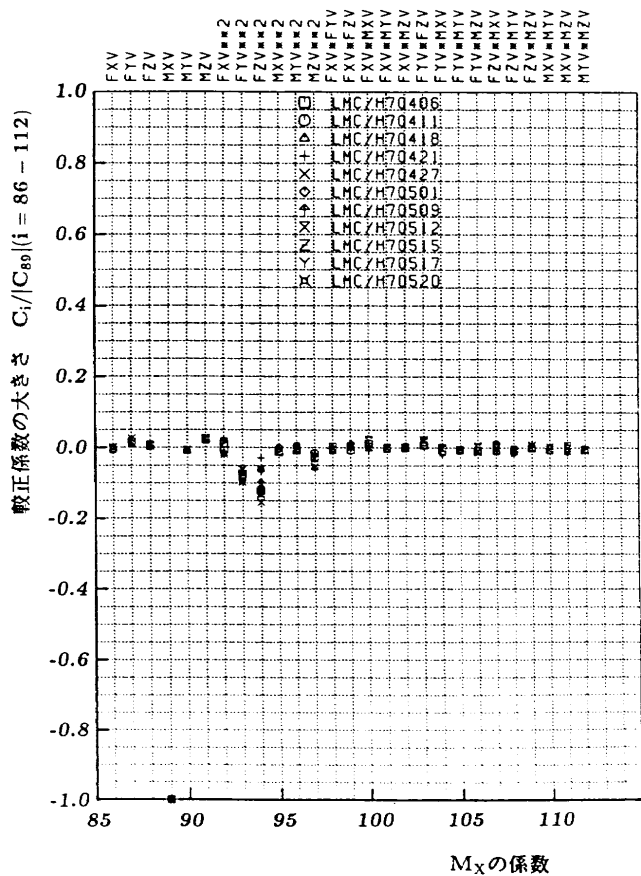


図7 LMC6522-50/Z1000S天秤の  $M_x$  の係数  $C_{86}-C_{112}$  の再現性 ( 負荷形態 1 )

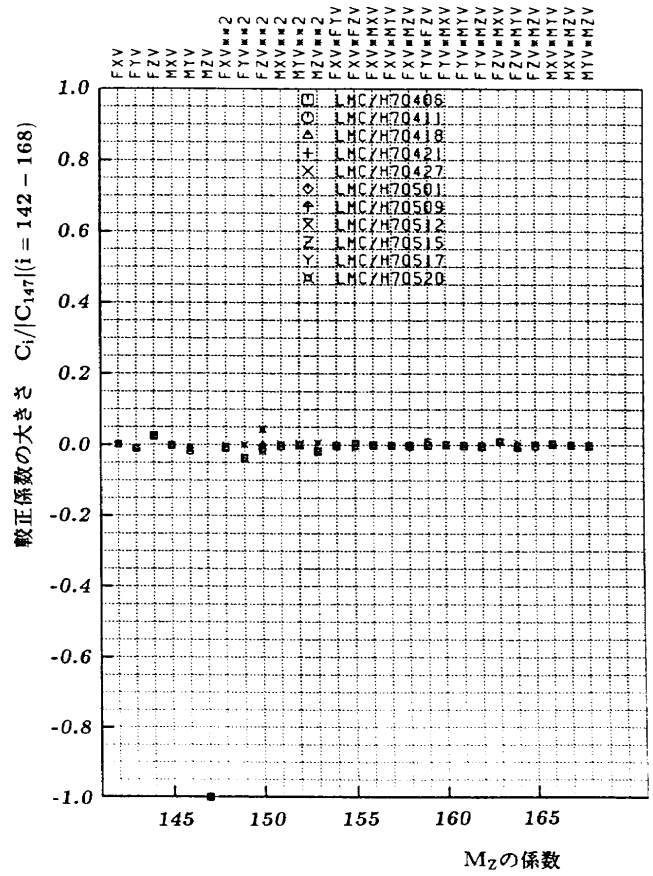


図9 LMC6522-50/Z1000S天秤の  $M_z$  の係数  $C_{142}-C_{168}$  の再現性 ( 負荷形態 1 )

であるH70406と称するものを引用してみる。図10-図15でLMC/H70406/1は天秤名/データファイル名/負荷形態1を略記したもので、複合負荷形態である負荷形態1、負荷形態3、負荷形態4の重ねがきを行った。また比較のために本校正装置を製作する以前に用いていた分銅による簡易複合荷重校正試験結果(LMC/WEIGHTS)も比較の対象とした。図10-図15から分る事は今回試験した複合負荷形態では干渉係数等の値は殆ど変化していない。従って今後の校正試験で天秤校正時間の短縮化を考える場合、負荷形態4でも実用上大きな問題は生じないであろう。但しこの場合注意しなくてはならないことは文献1)の「8.天秤校正データ処理」の章で述べたように、何等かの理由で多くの収集データ点にノイズが含まれる場合これらはデータ処理プログラムの中で自動的に間引かれるので有効データ点数が少なくなることに留意しておくべきである。今回の11回の試験では僅かな荷重点を除外しただけなのでこの点は問題にはならなかった。分銅による簡易複合荷重試験結果との比較では全体的には良い一致が認められるものの、いくつかの干渉項係数の値が大きく離れている。この理由は分銅による簡易的に複合荷重を作成する段階で、係数決定に必要なあらゆる複合荷重の組合せを作る事が出来ず、可能な範囲で複合荷重を作成したためと考えている。例えば図10に見られる  $C_{25}$  ( $F_{ZV} \times M_{ZV}$ の係数)、 $C_{21}$  ( $F_{YV} \times M_{YV}$ の係数)

には大きな誤差が含まれる可能性がある。即ち通常の6分力試験では考えにくい大きな垂直力と大きな偏揺れモーメントが同時に作用する場合、または大きな横力と大きな縦揺れモーメントが同時に作用する場合に  $F_x$  に誤差が含まれることになる。今回開発した本天秤校正装置では任意の複合荷重が作れるので理論的には全ての非線形項係数が決定できこの様な不具合は解消できている。

3.5 偏差値

天秤校正係数  $C_i$  を決定する場合には天秤負荷と天秤出力に関する校正試験データを用いて、式(7)-式(12)または式(1)-式(6)の係数を最小二乗法で決定する<sup>2)</sup>。この場合の解である天秤特性曲線に対する校正データの散らばりを標準偏差の形で調べておく。表6に負荷形態1の場合の11回の校正試験結果で得た偏差の一覧を示した。横揺れモーメントで1%近い偏差が見られ、先に図7で  $M_x$  に係わる校正係数の再現性を比較した場合と同様に散らばりが目立つ。 $M_x$  の精度については表3の  $Z_5 - Z_8$  に示すワイヤーの初期張力の大きさ、即ち系の剛性との相関は特に見られず、今後の精度向上に向けた研究課題の一つとして残る。11回の偏差の平均値を代表値として負荷形態の違いによる偏差の比較を表7に示す。当然の結果ではあるが負荷形態2は最も精度が劣る。特に風洞試験で最も高い精度を要求される抵

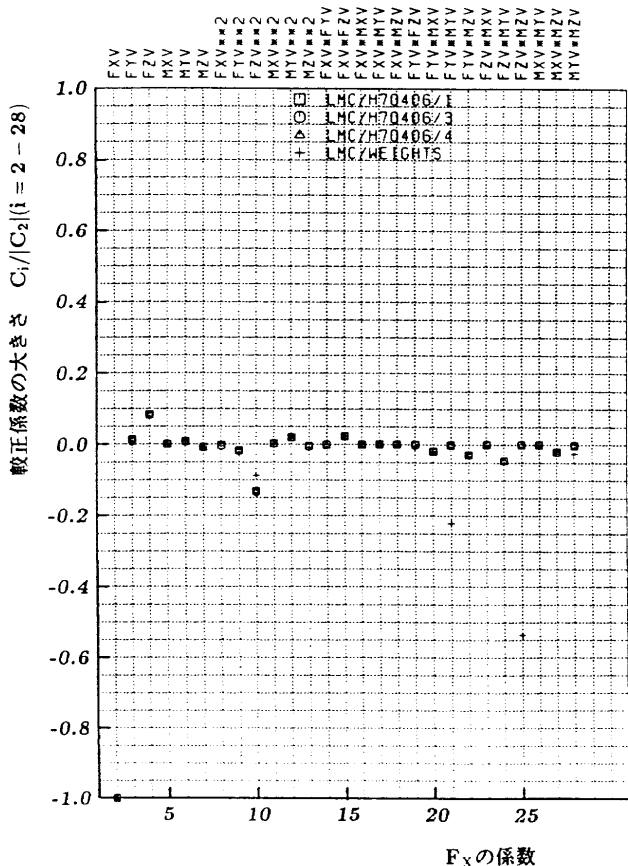


図10  $F_x$  の係数  $C_2 - C_{28}$  への負荷形態の影響と実荷重簡易複合試験結果の比較 ( LMC6522-50/Z1000S 天秤 )

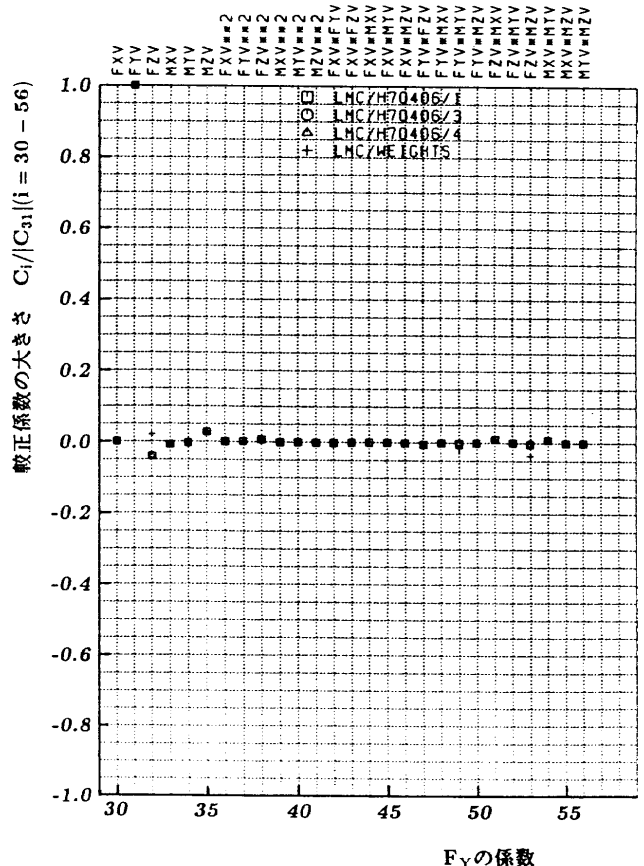


図11  $F_y$  の係数  $C_{30} - C_{56}$  への負荷形態の影響と実荷重簡易複合試験結果の比較 ( LMC6522-50/Z1000S 天秤 )

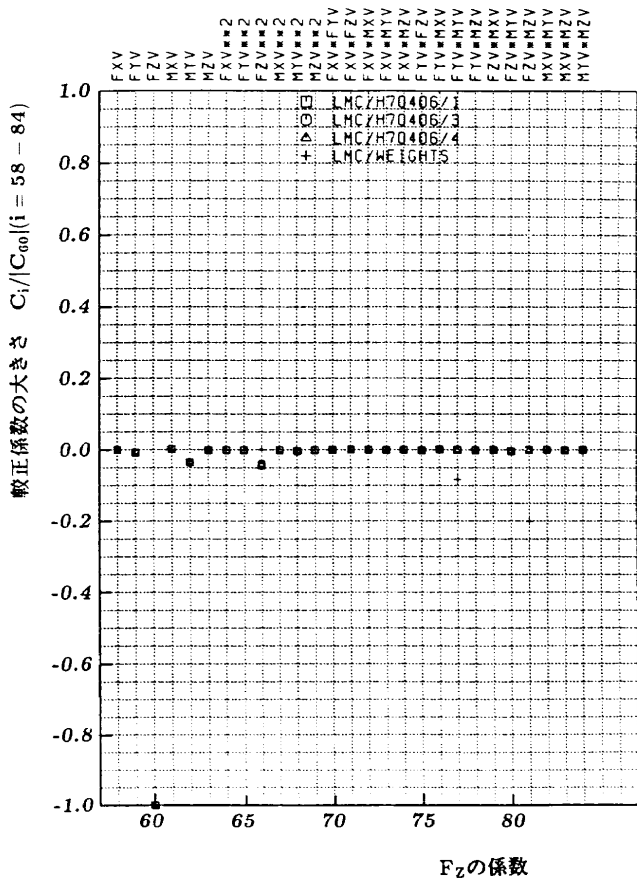


図12  $F_z$  の係数  $C_{58} - C_{84}$  への負荷形態の影響と実荷重簡易複合試験結果の比較 ( LMC6522-50/Z1000S 天秤 )

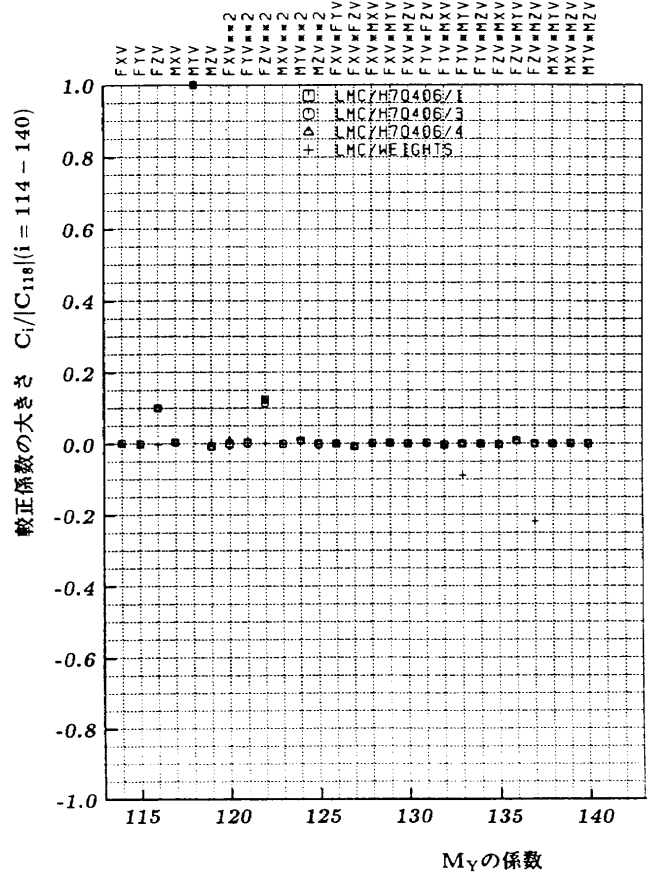


図14  $M_y$  の係数  $C_{114} - C_{140}$  への負荷形態の影響と実荷重簡易複合試験結果の比較 ( LMC6522-50/Z1000S 天秤 )

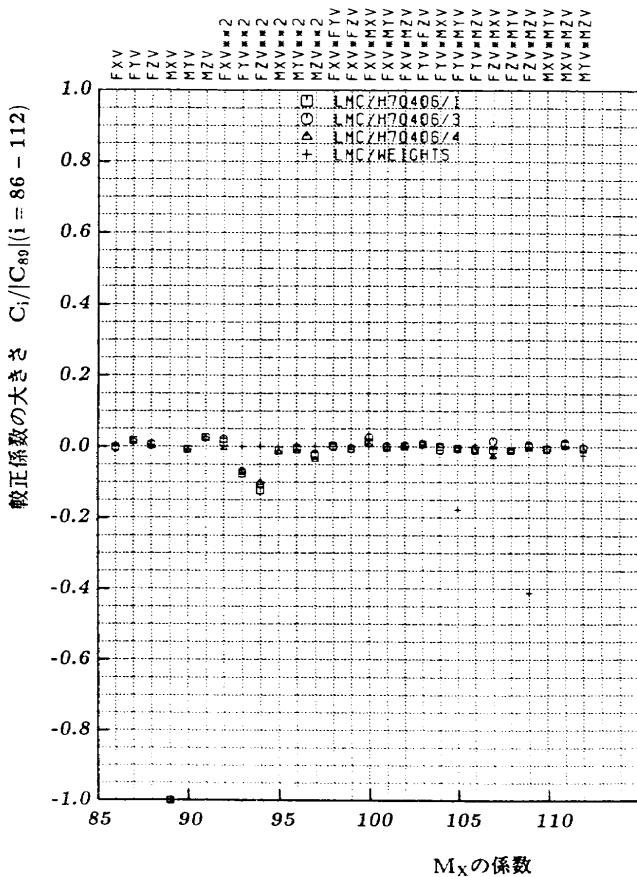


図13  $M_x$  の係数  $C_{86} - C_{112}$  への負荷形態の影響と実荷重簡易複合試験結果の比較 ( LMC6522-50/Z1000S 天秤 )

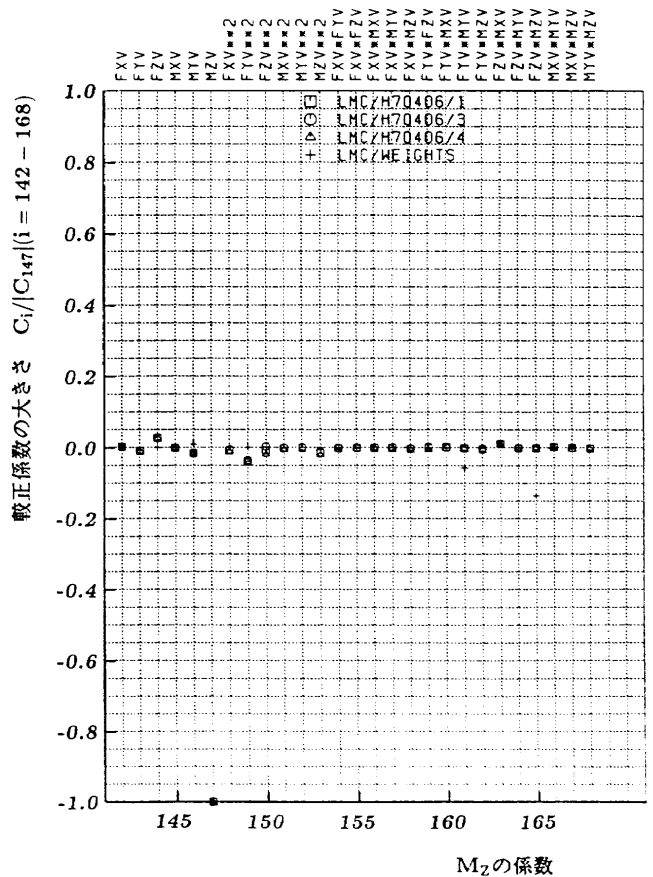


図15  $M_z$  の係数  $C_{142} - C_{168}$  への負荷形態の影響と実荷重簡易複合試験結果の比較 ( LMC6522-50/Z1000S 天秤 )

表6 LMC6522-50/Z1000S 天秤の偏差 (負荷形態1)

試験番号	試験日	$\sigma_{F_x}$ (%FS)	$\sigma_{F_y}$ (%FS)	$\sigma_{F_z}$ (%FS)	$\sigma_{M_x}$ (%FS)	$\sigma_{M_y}$ (%FS)	$\sigma_{M_z}$ (%FS)
1	H70406	0.13	0.10	0.14	0.91	0.20	0.29
2	H70411	0.15	0.10	0.15	1.17	0.18	0.30
3	H70418	0.15	0.10	0.15	1.17	0.19	0.32
4	H70421	0.16	0.17	0.14	0.91	0.20	0.35
5	H70427	0.14	0.18	0.15	1.03	0.19	0.35
6	H70501	0.17	0.18	0.15	0.74	0.25	0.41
7	H70509	0.17	0.11	0.14	1.04	0.18	0.30
8	H70512	0.13	0.17	0.14	1.49	0.18	0.37
9	H70515	0.13	0.17	0.14	1.50	0.18	0.39
10	H70517	0.37	0.20	0.15	0.82	0.22	0.48
11	H70520	0.17	0.19	0.14	0.81	0.21	0.36
	平均値	0.17	0.15	0.14	1.05	0.20	0.36

表7 LMC6522-50/Z1000S 天秤の偏差 (負荷形態の影響)

負荷形態	$\sigma_{F_x}$ (%FS)	$\sigma_{F_y}$ (%FS)	$\sigma_{F_z}$ (%FS)	$\sigma_{M_x}$ (%FS)	$\sigma_{M_y}$ (%FS)	$\sigma_{M_z}$ (%FS)
負荷形態 1	0.17	0.15	0.14	1.05	0.20	0.36
負荷形態 2	1.01	0.14	0.97	0.82	0.51	0.79
負荷形態 3	0.17	0.15	0.11	0.94	0.17	0.31
負荷形態 4	0.15	0.12	0.11	0.50	0.16	0.28

抗測定に直接係わる  $F_x$  において、複合荷重による偏差値に比べ 1 オード偏差値が大きい。負荷形態 2 では 11 回の試験結果は  $\sigma_{F_x}$  は何れも 1% 前後の偏差値を示しており、非線形性の強い軸力に係わる天秤負荷と出力の関係を線形方程式で近似する事が適切でない事を示している。

#### 4. B660H 天秤の較正係数

航技研遷音速風洞では力計測精度の一層の向上を目指して組立式内挿天秤から一体式内挿天秤に切替える事を計画し 1980 年にボーイング社から我が国で初めて一体化天秤

表8 B660H 天秤の主要項係数の再現性 (負荷形態 1)

試験番号	試験日	$C_2$	$C_{31}$	$C_{60}$	$C_{89}$	$C_{118}$	$C_{147}$
1	H70905	825.6	-4370.6	-5014.1	181.6	549.9	577.4
2	H70908	825.3	-4370.4	-5015.0	180.9	550.9	578.5
3	H70912	824.9	-4370.7	-5014.7	180.8	550.8	578.2
4	H70918	824.9	-4369.6	-5014.6	180.7	550.5	579.1
5	H70920	825.2	-4368.8	-5012.7	181.4	550.3	577.8
6	H70922	825.1	-4369.1	-5012.9	181.1	550.7	578.2
7	H70927	825.1	-4369.8	-5014.1	180.7	550.7	579.3
8	H70929	825.1	-4368.8	-5013.7	180.7	550.9	578.9
9	H71004	825.3	-4369.8	-5013.5	180.6	550.6	578.4
10	H71006	825.2	-4369.8	-5011.0	180.8	549.7	578.6
11	H71009	825.0	-4366.8	-5012.2	181.2	550.2	578.0
12	H71012	825.1	-4368.0	-5012.2	181.1	549.8	578.0
13	H71016	825.2	-4367.9	-5011.5	180.9	550.7	578.0
14	H71018	824.9	-4366.7	-5011.8	181.1	550.4	578.2
15	H71023	824.8	-4366.2	-5011.2	181.5	550.2	578.2
16	H71025	824.7	-4361.1	-5011.6	181.7	550.0	577.3
	平均値	825.1	-4368.4	-5012.9	181.0	550.4	578.3
	偏差 (%)	0.03	0.05	0.03	0.19	0.07	0.09

B660Hを購入した。以来同天秤は遷音速風洞での力計測試験の主要な試験機材として使われてきている。本章ではこの天秤を16回較正試験を行った結果について述べる。

4.1 主要項係数の再現性

負荷形態1を代表例に二次多項式表示での最重要項係数  $C_2, C_{31}, C_{60}, C_{89}, C_{118}, C_{147}$  の一覧を表8に示す。いずれの成分とも優れた再現性を有する。

4.2 主要項係数への負荷形態の影響

表9に16回の較正試験で得た係数の平均値に対する負荷

形態の影響を偏差と共に記した。負荷形態1, 3, 4では  $C_2, C_{31}, C_{60}, C_{89}, C_{118}, C_{147}$  が、負荷形態2では  $C_2, C_{10}, C_{18}, C_{26}, C_{34}, C_{42}$  が比較の対象となる。偏差は平均値に対する16回の試験値の標準偏差値と定義している。この天秤についても負荷形態2の場合の  $C_{18}$  の値が他と比べ幾分小さめであるが、複合負荷形態の場合は6成分とも負荷形態の顕著な影響は見られない。

4.3 干渉項係数等の再現性

16回の較正試験結果から計算した全ての係数値に対して、負荷形態1の場合について各主要項係数との比の形で図16

表9 B660H天秤の主要項係数に対する負荷形態の影響

主要項係数の平均値 (偏差)	$C_2$ (%)	$C_{31}(C_{10})$ (%)	$C_{60}(C_{18})$ (%)	$C_{89}(C_{26})$ (%)	$C_{118}(C_{34})$ (%)	$C_{147}(C_{42})$ (%)
負荷形態1	825.1 (0.03)	-4368.4 (0.05)	-5012.9 (0.03)	181.0 (0.19)	550.4 (0.07)	578.3 (0.10)
負荷形態2	824.8 (0.14)	-4360.7 (0.20)	-4990.2 (0.13)	181.7 (0.60)	549.3 (0.11)	576.2 (0.81)
負荷形態3	825.4 (0.03)	-4367.2 (0.05)	-5011.7 (0.03)	180.2 (0.35)	550.0 (0.07)	578.0 (0.11)
負荷形態4	824.7 (0.06)	-4370.3 (0.06)	-5013.2 (0.06)	182.7 (0.30)	550.9 (0.08)	578.7 (0.09)

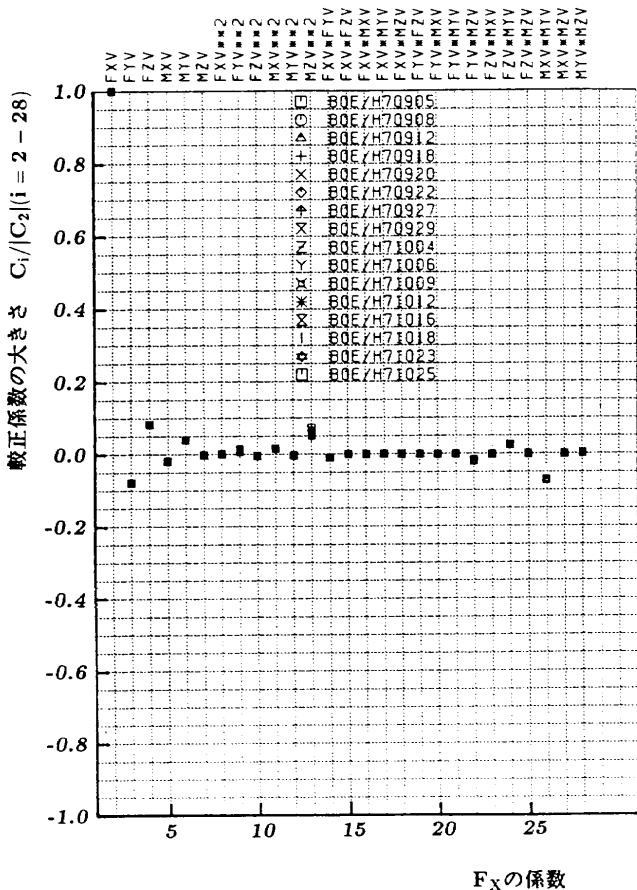


図16 B660H天秤の  $F_x$  の係数  $C_2 - C_{28}$  の再現性 (負荷形態1)

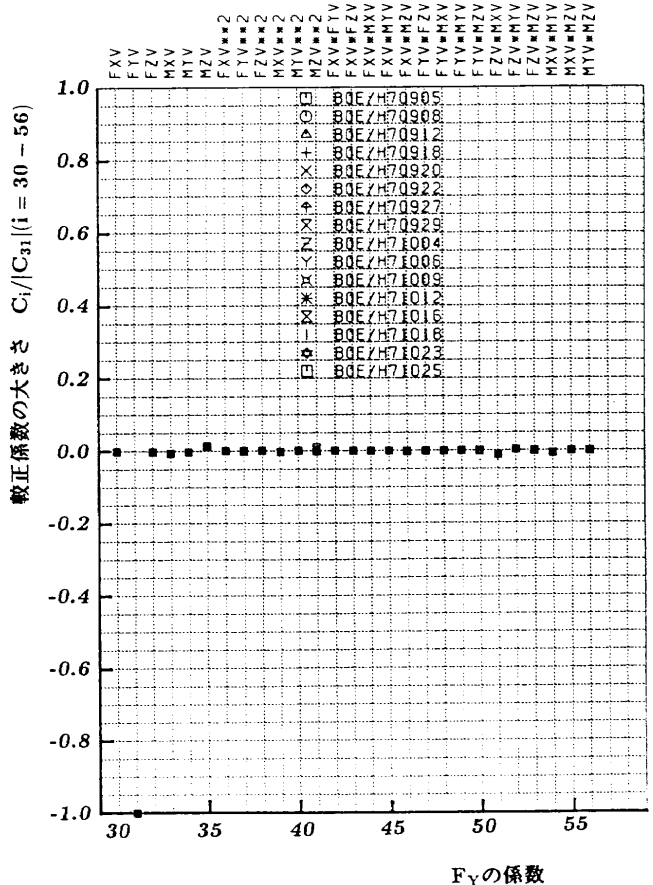


図17 B660H天秤の  $F_y$  の係数  $C_{30} - C_{56}$  の再現性 (負荷形態1)

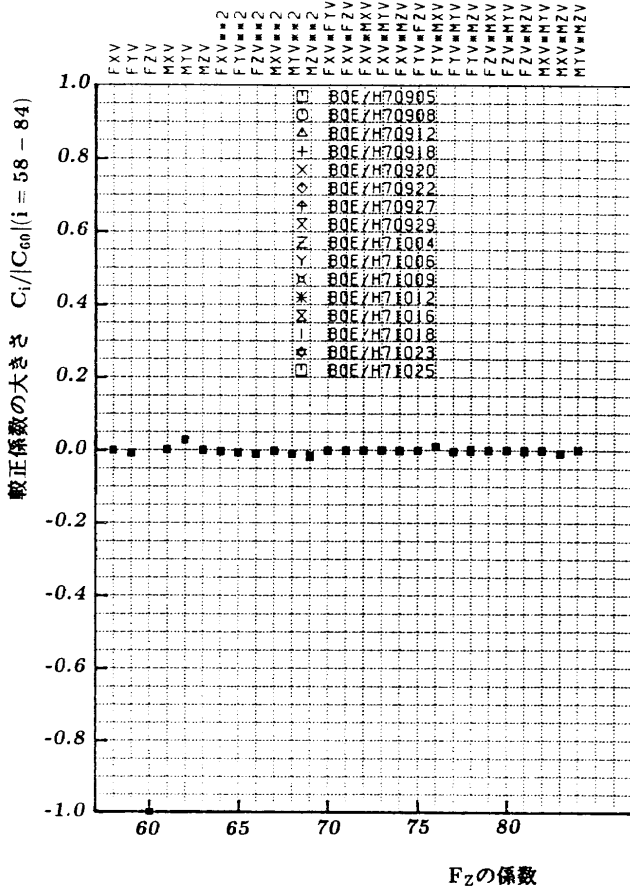


図18 B660H天秤の  $F_z$  の係数  $C_{58} - C_{84}$  の再現性 (負荷形態1)

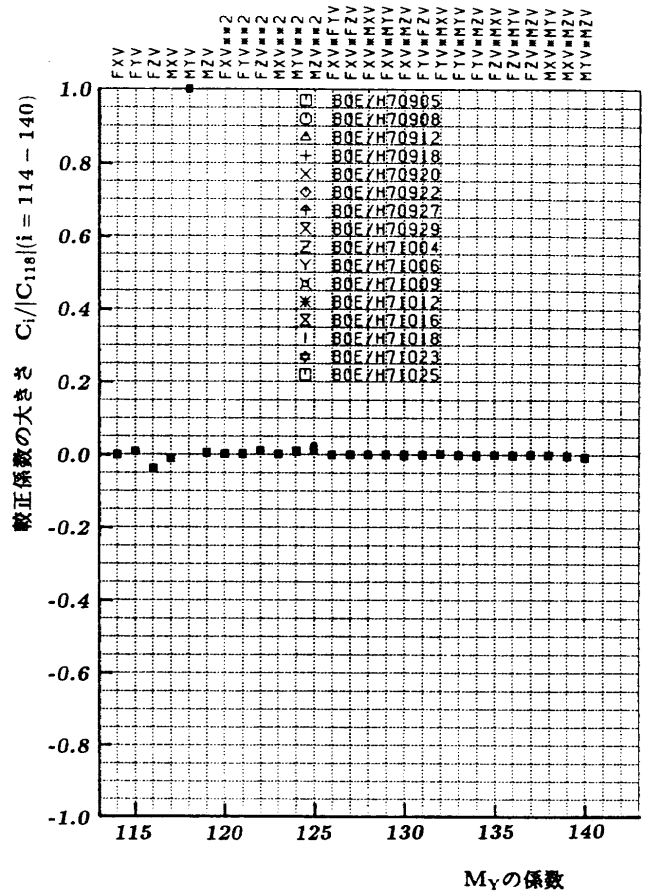


図20 B660H天秤の  $M_y$  の係数  $C_{114} - C_{140}$  の再現性 (負荷形態1)

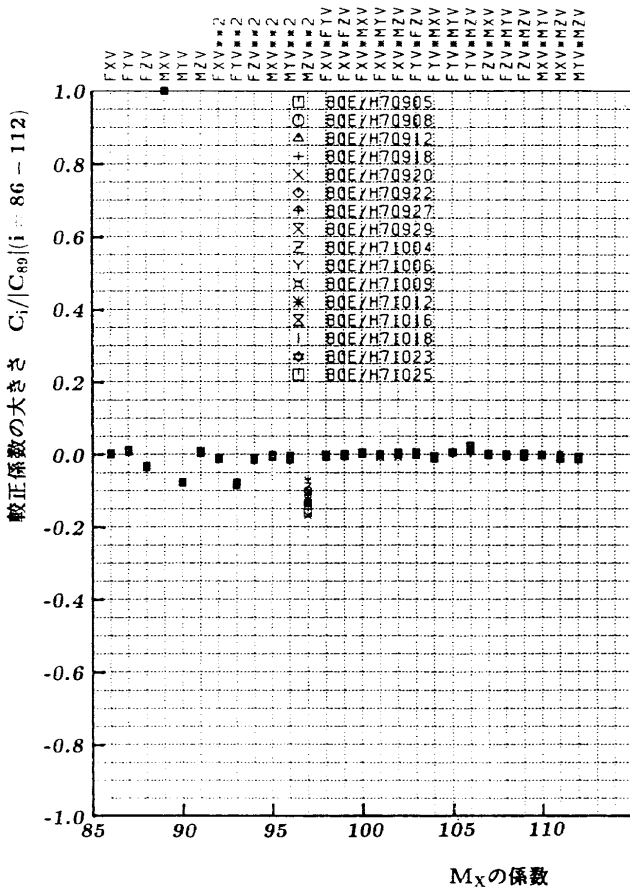


図19 B660H天秤の  $M_x$  の係数  $C_{86} - C_{112}$  の再現性 (負荷形態1)

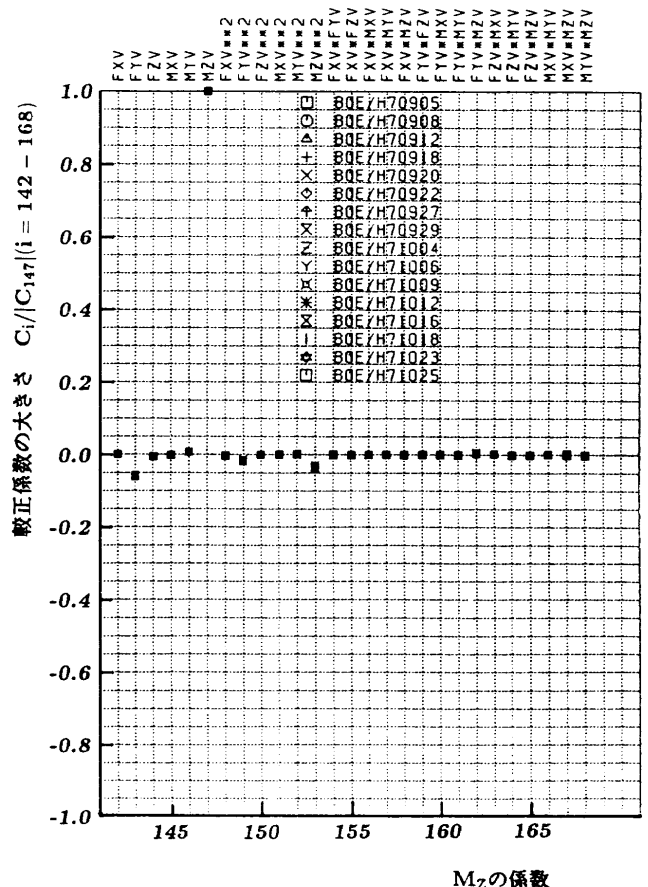


図21 B660H天秤の  $M_z$  の係数  $C_{142} - C_{168}$  の再現性 (負荷形態1)

図21に示した。試験結果の再現性については  $M_x$  成分の  $C_{97}$  ( $M_{zV}^2$  の係数) に幾分散らばりが見られるが、全体としては再現性は良い。このボーイング天秤の場合も例えば軸力成分  $F_x$  についてみれば干渉の大きい項として  $C_4$  ( $F_{zV}$  の係数),  $C_3$  ( $F_{yV}$  の係数),  $C_{26}$  ( $M_{xV} \times M_{yV}$  の係数),  $C_{13}$  ( $M_{zV}^2$  の係数) 等が目立つ。この場合も非線形項係数の影響、特にクロス項の影響は無視できず、複合荷重による天秤較正の必要性を示している。

4.4 偏差値

16回の較正試験データ処理時の天秤特性式に対する較正データの散らばりを標準偏差の形で調べた。表10に負荷形態1の場合の16回の較正試験で得た偏差の一覧を示した。再現性は良いが  $M_x$  成分の偏差が幾分大きい。表11に偏差値に対する各種負荷形態の影響を示した。この天秤の場合でも負荷形態2は特に軸力成分で偏差値が大きく、 $F_x$  エレメントについて負荷と出力の関係に非線形性が強く天秤特性を線形表示したのでは精度的に劣る事を示している。

4.5 干渉項係数等の各種比較について

B660H天秤の較正係数  $C_i$  の再現性はかなり良いことが分ったが、本節では他の較正装置で求めた天秤較正係数との比較を行っておく。本天秤については以下の3つの異なった較正装置で求めた天秤較正係数が直接比較できる。

- 航技研較正装置による負荷形態1, 負荷形態3, 負荷形態4に対する天秤較正係数:

航技研複合荷重式自動天秤較正装置による天秤較正係数としては16ケースの中からH70905(較正係数ファイル名と較正作業の日付は同一)を代表例として引用し比較を行う。既に16回の較正試験から求めた係数の比較に示した様に係数マトリックスは十分再現性が有りどの係数マトリックスを代表に選んでも大きな違いはない。

- ボーイングオリジナル干渉補正係数から計算した天秤較正係数:

ボーイングB660H天秤の特性に関しては、1980年2月にボーイング社で同社の較正装置で複合荷重試験が行われ、係数  $B_i$  ( $i=1\sim 162$ ) が提示されている。しかし提示された係

表10 B660H 天秤の偏差 (負荷形態1)

試験番号	試験日	$\sigma_{F_x}$ (%FS)	$\sigma_{F_y}$ (%FS)	$\sigma_{F_z}$ (%FS)	$\sigma_{M_x}$ (%FS)	$\sigma_{M_y}$ (%FS)	$\sigma_{M_z}$ (%FS)
1	H70905	0.28	0.16	0.14	0.67	0.24	0.41
2	H70908	0.25	0.15	0.14	0.89	0.24	0.38
3	H70912	0.23	0.16	0.15	0.72	0.24	0.40
4	H70918	0.22	0.15	0.14	0.99	0.23	0.39
5	H70920	0.29	0.15	0.14	0.72	0.23	0.39
6	H70922	0.32	0.14	0.14	0.73	0.23	0.45
7	H70927	0.23	0.14	0.14	0.79	0.23	0.41
8	H70929	0.22	0.15	0.13	0.94	0.22	0.38
9	H71004	0.20	0.14	0.14	1.02	0.22	0.39
10	H71006	0.22	0.14	0.15	1.06	0.23	0.34
11	H71009	0.31	0.15	0.14	0.68	0.22	0.35
12	H71012	0.27	0.13	0.14	0.74	0.22	0.36
13	H71016	0.26	0.15	0.14	0.75	0.24	0.39
14	H71018	0.26	0.16	0.14	0.70	0.22	0.40
15	H71023	0.30	0.15	0.14	0.68	0.23	0.40
16	H71025	0.31	0.18	0.14	0.68	0.22	0.38
	平均値	0.26	0.15	0.14	0.80	0.23	0.39

表11 B660H 天秤の偏差 (負荷形態の影響)

負荷形態	$\sigma_{F_x}$ (%FS)	$\sigma_{F_y}$ (%FS)	$\sigma_{F_z}$ (%FS)	$\sigma_{M_x}$ (%FS)	$\sigma_{M_y}$ (%FS)	$\sigma_{M_z}$ (%FS)
負荷形態1	0.26	0.15	0.14	0.80	0.23	0.39
負荷形態2	0.85	0.36	0.46	0.86	0.46	0.91
負荷形態3	0.20	0.14	0.11	0.60	0.20	0.32
負荷形態4	0.20	0.12	0.11	0.52	0.18	0.35

数を使って天秤出力電圧から力やモーメントに変換する手順は、式(7)~式(12)を用いる航技研の方法と少し異なる。従ってボーイング社提示の干渉補正係数  $B_i$  は比較のためにそのまま使う事は出来ない。ボーイング社提示の干渉補正係数  $B_i$  ( $i=1\sim 162$ )と等価な、式(7)~式(12)の天秤較正係数  $C_i$  ( $i=1\sim 168$ )を計算し、係数同志の比較を行う事とする。ボーイング社の指示する天秤データ処理は、干渉を含んだ天秤6分力出力値から干渉補正係数  $B_i$  を用いて干渉量を除去し、真値を計算した後に換算係数を掛けて力、モーメントを求めるようになっている<sup>3)</sup>。よって干渉量を含んだ仮想的な天秤出力データ群と干渉補正係数  $B_i$  を使って、これら仮想的な出力群に対応する天秤負荷群を計算し、これら

を天秤較正試験で得られたデータ群と考えれば、式(7)~式(12)の天秤較正係数  $C_i$  ( $i=1\sim 168$ )が決定できる。これをオリジナル干渉補正係数と等価な天秤較正係数と定義し、航技研天秤較正装置で求めた較正係数と直接比較ができる。 $B_i$  ( $i=1\sim 162$ )から、等価な  $C_i$  ( $i=1\sim 168$ )を計算した具体的な方法は付録にまとめておいた。

● 実荷重簡易複合負荷による天秤較正係数:

B660H天秤については国産天秤と同様に必要に応じて国内天秤メーカーに依頼し同社の実荷重による簡易複合荷重較正試験装置で較正試験を行う事としていた。最近では1993.3に較正試験を行っているので、この較正試験データで決定した係数値を比較の対象とする。

表12 各種較正装置から求めた B660H 天秤の主要項係数

	$C_2$	$C_{31}$	$C_{60}$	$C_{89}$	$C_{118}$	$C_{147}$	備考
(1) 負荷形態 1	825.6	-4370.6	-5014.1	181.6	549.9	577.4	1995.9
(2) 負荷形態 3	826.0	-4369.0	-5012.6	181.3	549.7	577.1	同
(3) 負荷形態 4	825.3	-4373.2	-5014.1	182.4	550.3	578.0	同
(4) オリジナル等価	817.7	-4322.6	-4939.5	182.6	538.4	572.6	1980.2
(5) 実荷重簡易複合	821.8	-4316.1	-4946.9	182.5	545.1	576.0	1993.3
平均値	823.3	-4350.3	-4985.4	182.1	546.7	576.2	装置による
偏差 (%)	0.39	0.58	0.69	0.29	0.83	0.33	散らばり
(1)/(4)	1.010	1.011	1.015	0.995	1.021	1.008	経年変化

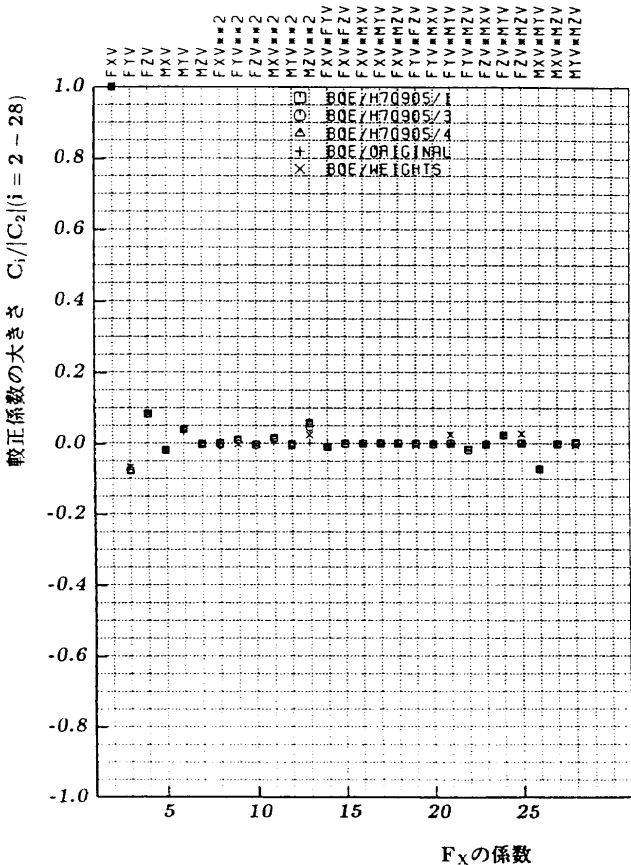


図22  $F_x$  の係数  $C_2 - C_{28}$  に対する各種係数の比較 (B660H 天秤)

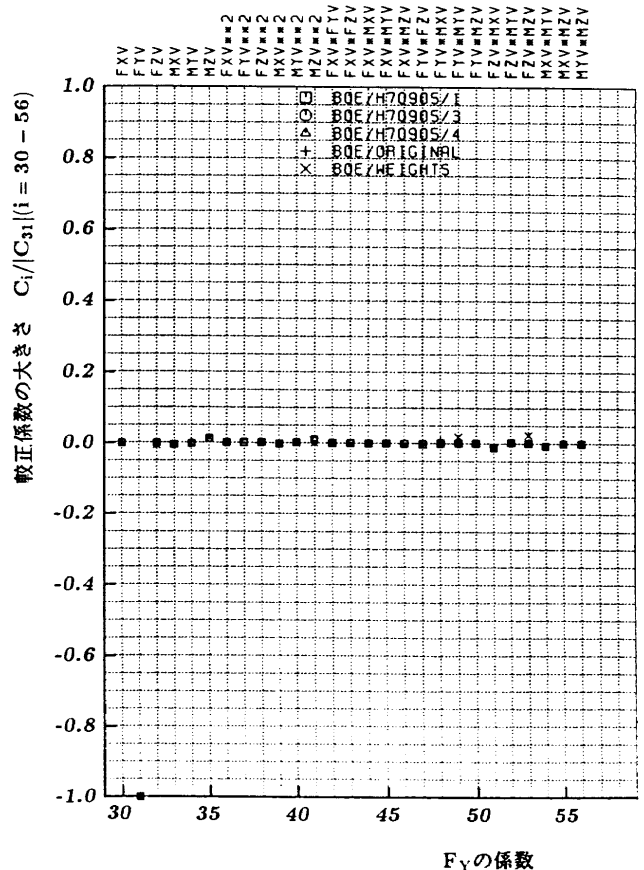


図23  $F_y$  の係数  $C_{30} - C_{56}$  に対する各種係数の比較 (B660H 天秤)



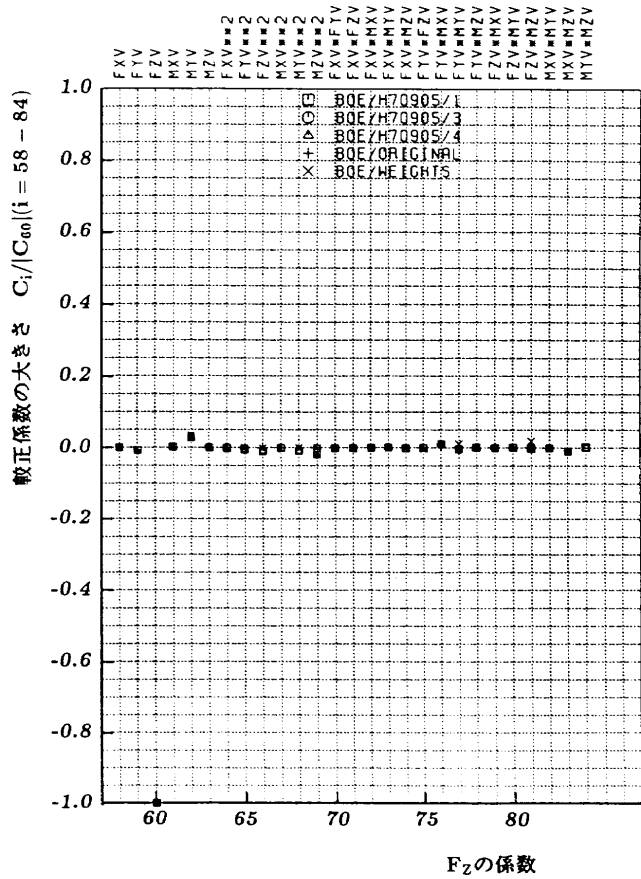


図24  $F_z$  の係数  $C_{58} - C_{84}$  に対する各種係数の比較 (B660H 天秤)

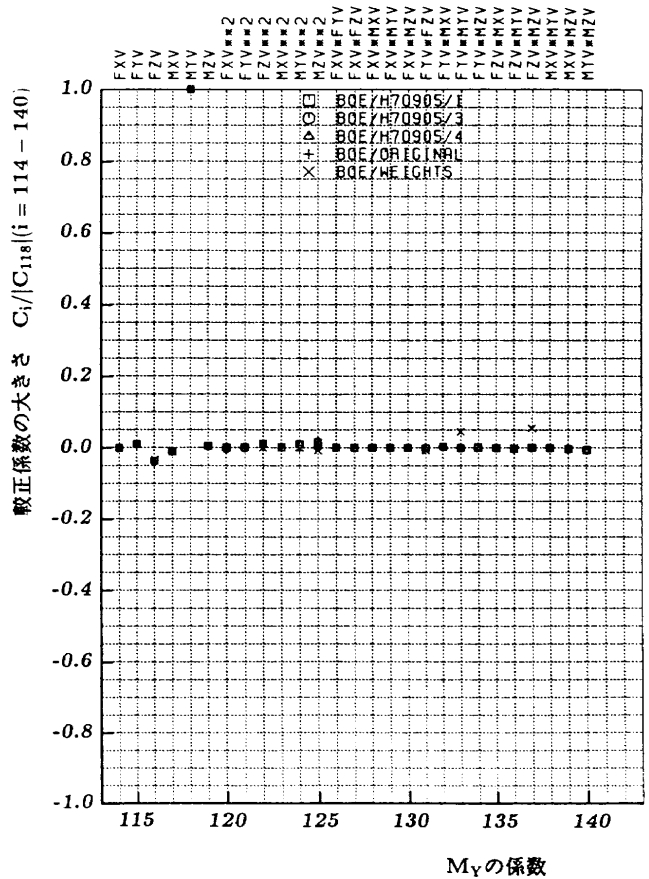


図26  $M_y$  の係数  $C_{114} - C_{140}$  に対する各種係数の比較 (B660H 天秤)

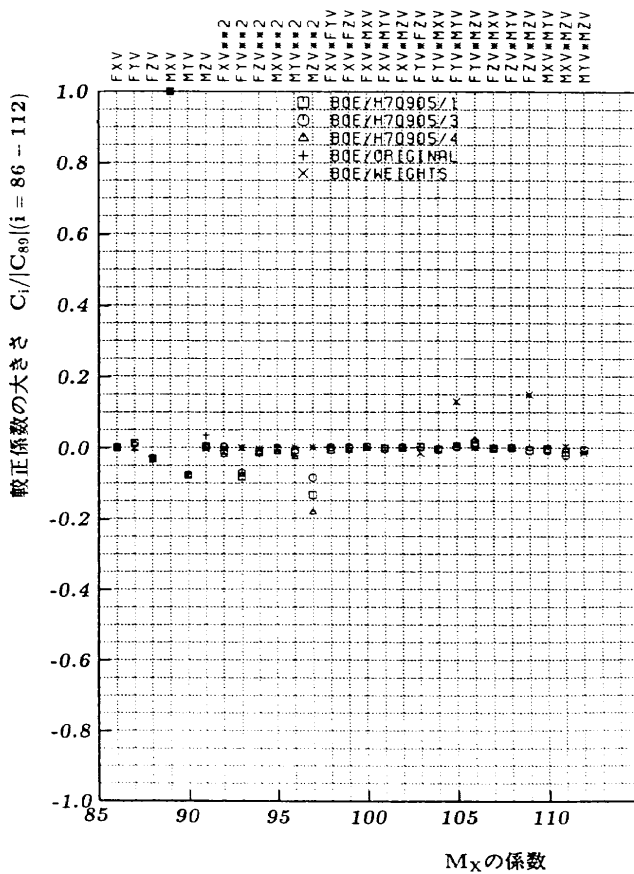


図25  $M_x$  の係数  $C_{86} - C_{112}$  に対する各種係数の比較 (B660H 天秤)

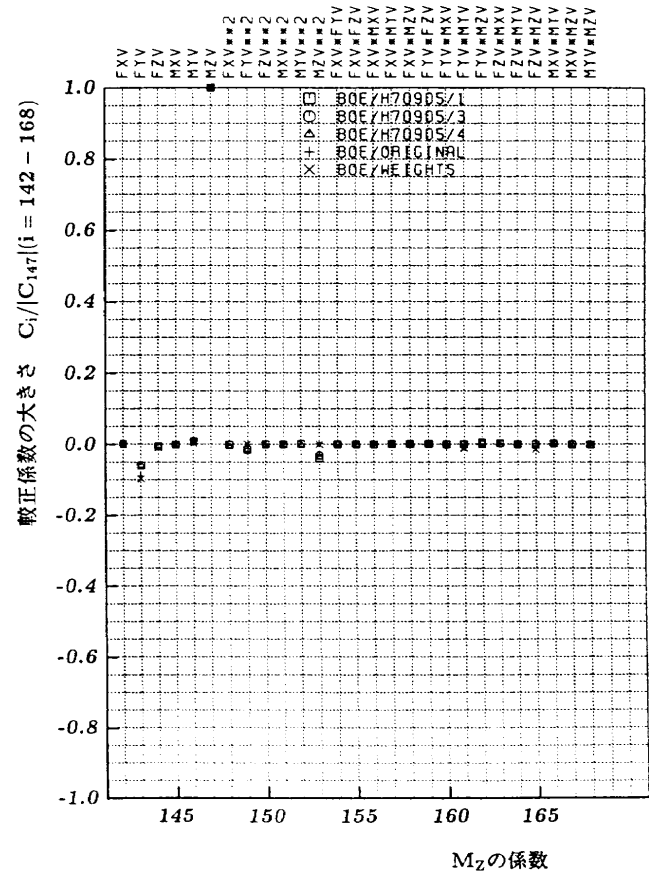


図27  $M_z$  の係数  $C_{142} - C_{168}$  に対する各種係数の比較 (B660H 天秤)

始めに表12に主要項係数の比較を示す。較正装置が異なれば、同一天秤でも係数値が微妙に異なる事は容易に想像できるが、ここで示した較正係数の散らばりを較正装置が異なるためと考えれば、5個の平均値周りに偏差値で0.5%前後散らばることがわかる。またこの結果を天秤の経年変化のためと考えれば「(1)負荷形態1」と「(4)オリジナル等価」との比較から15年間で1~2%程度特性が変化すると考えられる。現状では係数の散らばる原因を特定するのは困難で、15年程度の経年変化と較正装置が異なる事の影響の総和として、主要項係数に1~2%程度の違いがでると考えておくことにする。次に図22~図27に天秤6成分の各種較正係数の比較を示した。図中のBOE/H70905/1は天秤名/較正試験日/負荷形態1を示している。BOE/ORIGINALはボーイングオリジナル干渉補正係数と等価な天秤較正係数を意味し、BOE/WEIGHTSは実荷重簡易複合試験による較正係数を示している。はじめに軸力成分 $F_X$ に係わる係数 $C_2 \sim C_{28}$ についてみると、航技研の負荷形態1、負荷形態3、負荷形態4とボーイングオリジナル較正係数の一致は極めてよい。これに対して外注作業である実荷重簡易複合試験結果は $C_{13}$  ( $M_{ZV}^2$ の係数)、 $C_{21}$  ( $F_{YV} \times M_{YV}$ の係数)、 $C_{25}$  ( $F_{ZV} \times M_{ZV}$ の係数)に僅かな違いが見られる。全体的には良い対応を示しており、ここでは経年変化に関係する特徴は見出せない。これらの図で見られる係数値の散

らばりは較正装置そのものに起因すると考えた方がよい。最も散らばりの大きいものは $M_X$ に関する係数で $C_{93}$  ( $F_{YV}^2$ の係数)、 $C_{97}$  ( $M_{ZV}^2$ の係数)、 $C_{105}$  ( $F_{YV} \times M_{YV}$ の係数)、 $C_{109}$  ( $F_{ZV} \times M_{ZV}$ の係数)である。本較正装置に対して $M_X$ 成分の精度向上が必要な事が分る。これら散らばりのある特定の係数値が大きく関与するような模型迎角を設定する試験では注意を要する。

#### 4.6 風洞試験結果の比較

最後に3種類の係数マトリックスを航技研遷音速風洞試験データ処理に適用した例について述べる。式(7)~式(12)を風試データ処理に適用する場合定数項 $C_1, C_{29}, C_{57}, C_{85}, C_{113}, C_{141}$ はすべて0とした。試験内容は航技研複製オイラー模型<sup>1)</sup>による $M_\infty=0.85$ ,  $Re_{cr}=7.76 \times 10^5$ で $\alpha=-2^\circ \sim +20^\circ$ での $\alpha$ スイープ試験である。試験結果はB660H天秤の電圧出力をそのまま各係数マトリックスで力またはモーメントに変換し、それぞれの成分容量(表1のB660H天秤)で無次元化して重ね書で整理した。即ち縦軸最大値は天秤負荷限度を示す。BOE/H70905は航技研較正装置で得た天秤較正係数の代表例で、BOE/ORIGINALは先に述べたボーイングのオリジナル干渉補正係数と等価な天秤較正係数による処理結果である。なお付録に示したとおり「オリジナル干渉補正係数による天秤出力処理結果」と「等価な天

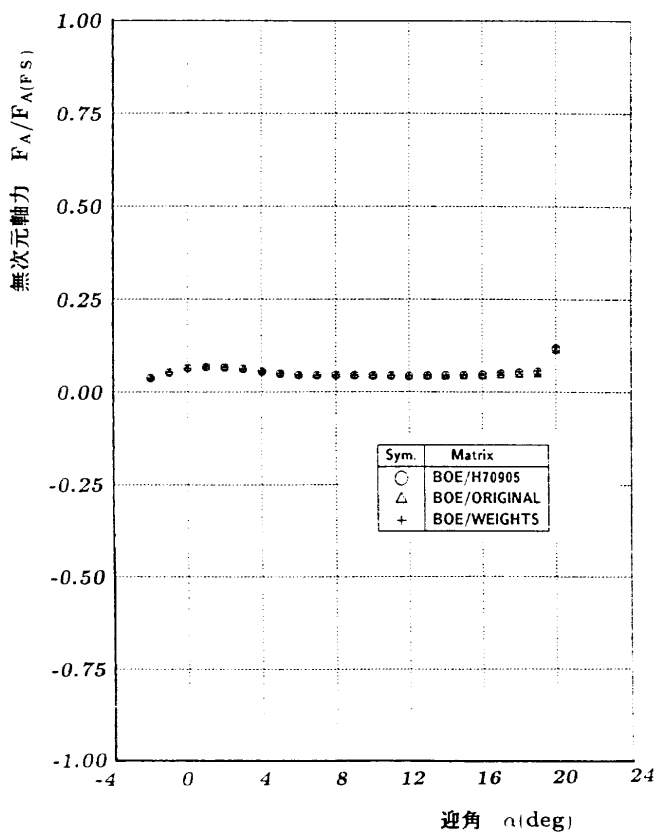


図28  $\alpha$ スイープ試験の軸力成分比較

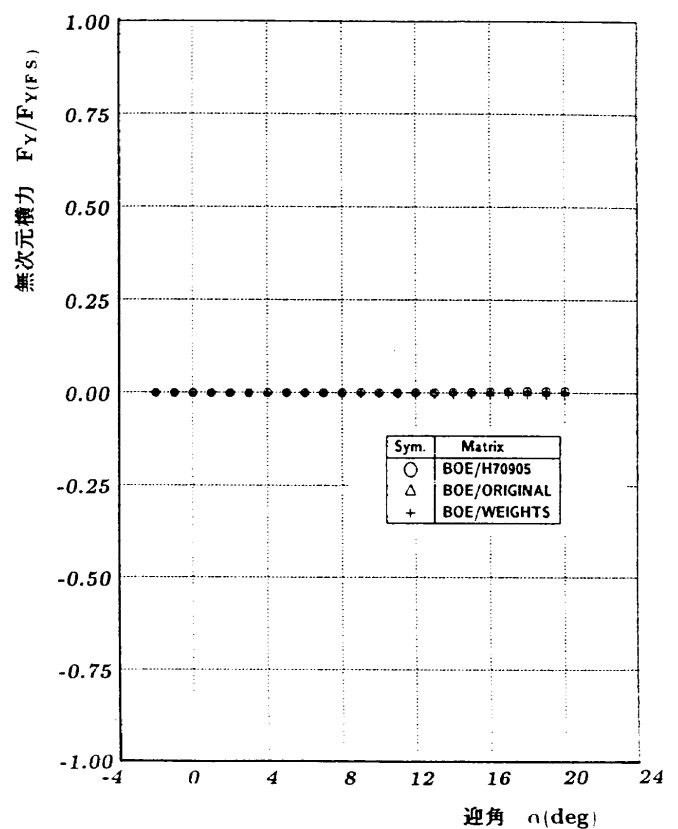


図29  $\alpha$ スイープ試験の横力成分比較

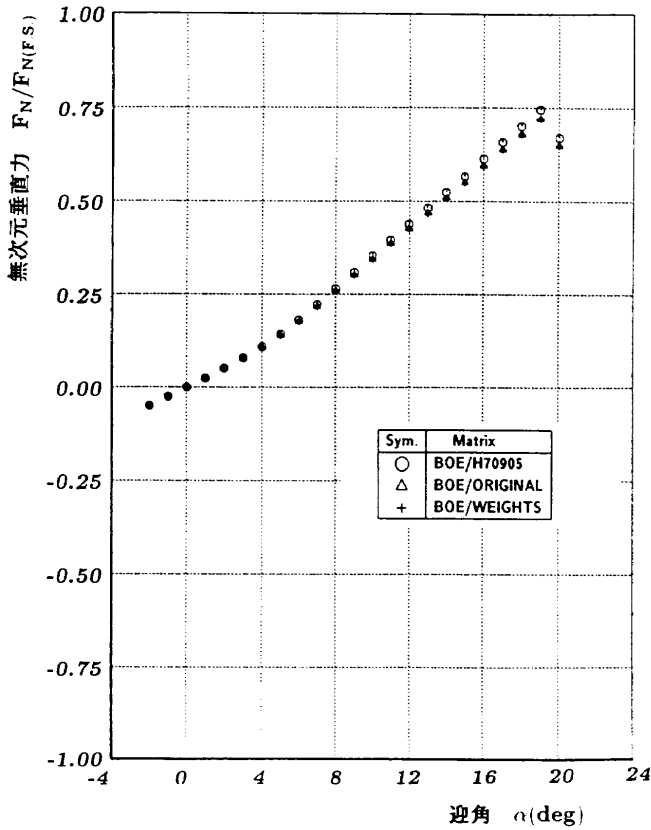


図30  $\alpha$ スweep試験の垂直力成分比較

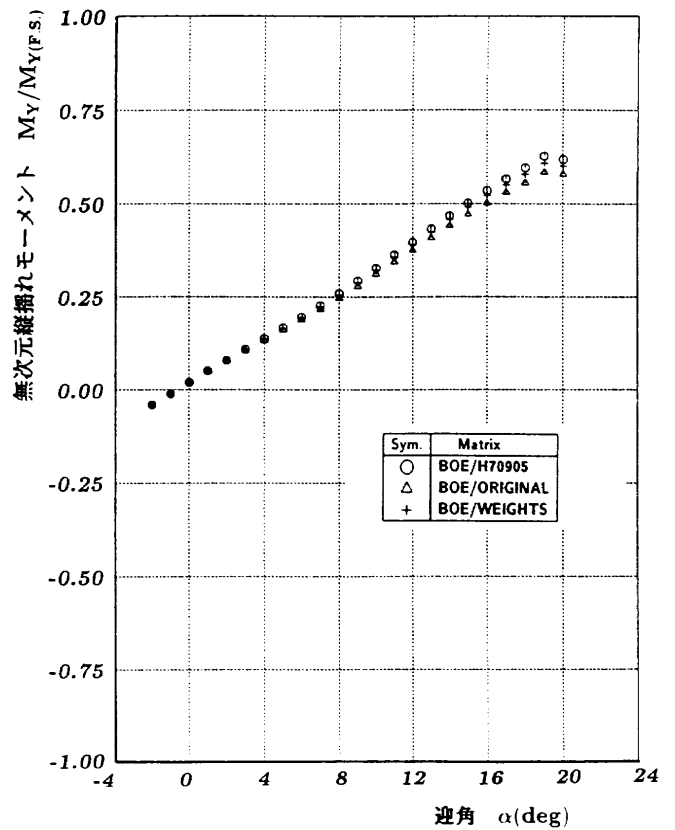


図32  $\alpha$ スweep試験の縦揺れモーメント成分比較

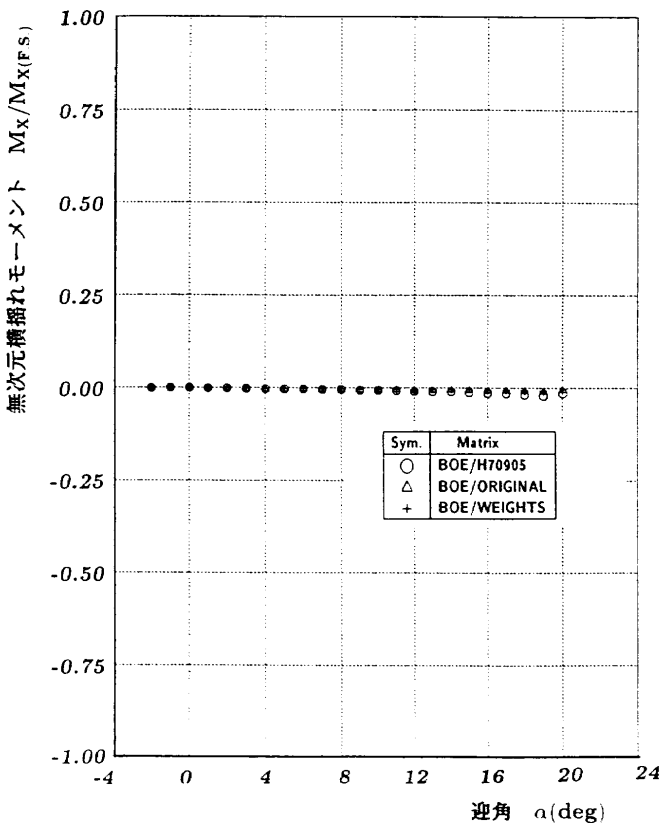


図31  $\alpha$ スweep試験の横揺れモーメント成分比較

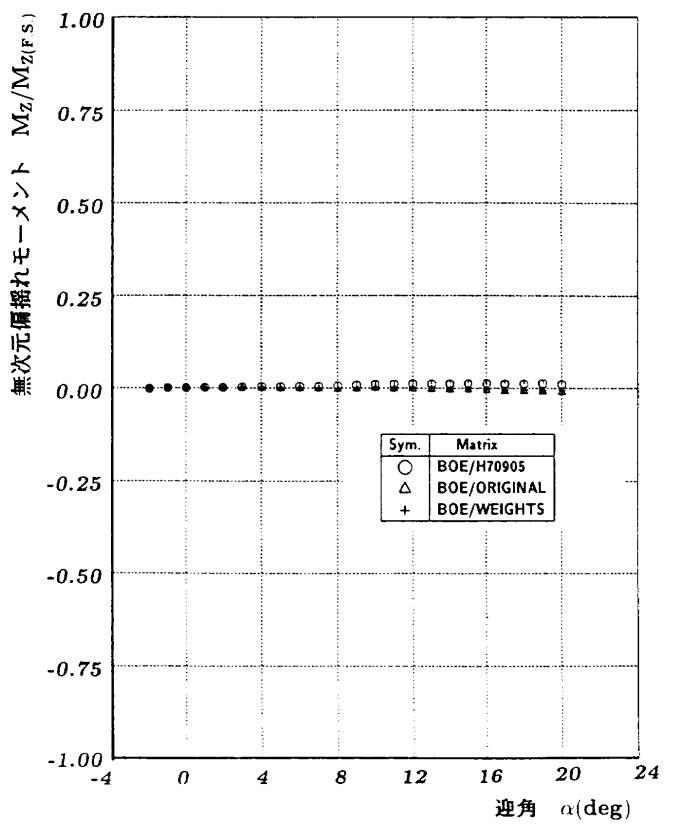


図33  $\alpha$ スweep試験の偏揺れモーメント成分比較

秤校正係数による処理結果」とは実用上完全に等価である。またBOE/WEIGHTSは実荷重による簡易複合校正試験結果による係数を使ったものである。軸力成分は迎角にあまり依存せず天秤容量の10%以下ではほぼ一定である。BOE/H70905とBOE/WEIGHTSは良い一致が読み取れるが、BOE/ORIGINALは幾分か小さめである。図30の垂直力については航技研の校正装置による処理結果が幾分か大きめにでている。この原因は表12で見たとおり垂直力に係わる主要項係数 $C_{60}$ の値についてBOE/H70905がBOE/ORIGINALに比べて1.5%大きめにしているためである。図32の縦揺れモーメント要素の出力についても類似した傾向が読み取れるが、この原因も表12で見たとおり主要項係数 $C_{118}$ の値が2.1%異なるためである。どちらが正しい校正試験結果であるのか結論できないが、先に述べたとおり天秤経年変化と天秤校正装置の違いによる総合誤差としてこの程度の違いは起こり得ると考えるべきであろう。

## 5. まとめ

航技研遷音速風洞用に新たに開発した複合荷重式自動天秤校正装置の調整運転の過程で収集した2体の一体式内挿天秤の校正試験データを解析し、試験装置評価の基礎資料を得た。現在までの成果を要約する。

1. 航技研の複合荷重式自動天秤校正はおおむね正常に動作し、風洞試験データ処理に適用できる校正係数を提供できる事を確認した。
2. 複合荷重式天秤校正は成分荷重方式に比べ軸力成分に高い精度を期待できる。
3. 複合荷重式自動天秤校正装置から求まる天秤校正係数の再現性は優れている。
4. 天秤校正装置が異なっている点、また15年程度の天秤経年変化がある点などを考慮した天秤校正係数の総合的な散らばりは係数値の1~2%程度である。
5. 3種類の複合負荷形態による天秤校正係数の違いは極めて小さい。
6. 航技研複合荷重式天秤校正装置のローリングモーメント成分の一部係数の再現性改善が今後必要である。

## 参考文献

- 1) 河本巖, 鈴木弘一, 中村正剛, 小國保男, 飯島由美 : 内挿式六分力天秤の校正について ; 第二報 複合荷重式自動天秤校正装置の開発, 航空宇宙技術研究所資料TM-690, 1996年3月
- 2) 河本巖, 鈴木弘一, 中村正剛, 小國保男 : 内挿式六分力天秤の校正について ; 第一報 遷音速風洞における実荷重校正の現状, 航空宇宙技術研究所資料TM-663, 1994年3月
- 3) 中村正剛, 鈴木弘一, 白井正孝, 小池陽, 藤田敏美 : 航技研2m×2m遷音速風洞のデータ処理, 航空宇宙技術研究所報告TR-811, 1984年5月

## [ 付 録 ]

A. ボーイングのオリジナル干渉補正係数  $B_i$  から天秤較正係数  $C_i$  への換算

1980年に購入したボーイング天秤では、干渉補正係数の形で天秤較正データが提供されている<sup>3)</sup>。オリジナルな干

渉補正係数  $B_i$  を用いた天秤データ処理法は次の通りである。

風洞試験で計測される干渉を含んだ天秤出力値を、 $F_{XV}$ 、 $F_{YV}$ 、 $F_{ZV}$ 、 $M_{XV}$ 、 $M_{YV}$ 、 $M_{ZV}$  として、干渉の無い出力値を  $F_{XVf}$ 、 $F_{YVf}$ 、 $F_{ZVf}$ 、 $M_{XVf}$ 、 $M_{YVf}$ 、 $M_{ZVf}$  とする。干渉補正係数  $B_i$  ( $i=1,162$ ) がボーイング社より提示されており(表13)、これを用いて次式により干渉補正を行い、干渉の無い6分力出力を計算する。

## A.1 ボーイング天秤の干渉補正式

$$\begin{aligned}
 F_{XVf} = & F_{XV} - (B_2 F_{YVf} + B_3 F_{ZVf} + B_4 M_{XVf} + B_5 M_{YVf} + B_6 M_{ZVf}) \\
 & - (B_7 F_{XVf}^2 + B_8 F_{YVf}^2 + B_9 F_{ZVf}^2 + B_{10} M_{XVf}^2 + B_{11} M_{YVf}^2 + B_{12} M_{ZVf}^2) \\
 & - F_{XVf} (B_{13} F_{YVf} + B_{14} F_{ZVf} + B_{15} M_{XVf} + B_{16} M_{YVf} + B_{17} M_{ZVf}) \\
 & - F_{YVf} (B_{18} F_{ZVf} + B_{19} M_{XVf} + B_{20} M_{YVf} + B_{21} M_{ZVf}) \\
 & - F_{ZVf} (B_{22} M_{XVf} + B_{23} M_{YVf} + B_{24} M_{ZVf}) \\
 & - M_{XVf} (B_{25} M_{YVf} + B_{26} M_{ZVf}) \\
 & - B_{27} M_{YVf} M_{ZVf}
 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
 F_{YVf} = & F_{YV} - (B_{28} F_{XVf} + B_{30} F_{ZVf} + B_{31} M_{XVf} + B_{32} M_{YVf} + B_{33} M_{ZVf}) \\
 & - (B_{34} F_{XVf}^2 + B_{35} F_{YVf}^2 + B_{36} F_{ZVf}^2 + B_{37} M_{XVf}^2 + B_{38} M_{YVf}^2 + B_{39} M_{ZVf}^2) \\
 & - F_{XVf} (B_{40} F_{YVf} + B_{41} F_{ZVf} + B_{42} M_{XVf} + B_{43} M_{YVf} + B_{44} M_{ZVf}) \\
 & - F_{YVf} (B_{45} F_{ZVf} + B_{46} M_{XVf} + B_{47} M_{YVf} + B_{48} M_{ZVf}) \\
 & - F_{ZVf} (B_{49} M_{XVf} + B_{50} M_{YVf} + B_{51} M_{ZVf}) \\
 & - M_{XVf} (B_{52} M_{YVf} + B_{53} M_{ZVf}) \\
 & - B_{54} M_{YVf} M_{ZVf}
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 F_{ZVf} = & F_{ZV} - (B_{55} F_{XVf} + B_{56} F_{YVf} + B_{58} M_{XVf} + B_{59} M_{YVf} + B_{60} M_{ZVf}) \\
 & - (B_{61} F_{XVf}^2 + B_{62} F_{YVf}^2 + B_{63} F_{ZVf}^2 + B_{64} M_{XVf}^2 + B_{65} M_{YVf}^2 + B_{66} M_{ZVf}^2) \\
 & - F_{XVf} (B_{67} F_{YVf} + B_{68} F_{ZVf} + B_{69} M_{XVf} + B_{70} M_{YVf} + B_{71} M_{ZVf}) \\
 & - F_{YVf} (B_{72} F_{ZVf} + B_{73} M_{XVf} + B_{74} M_{YVf} + B_{75} M_{ZVf}) \\
 & - F_{ZVf} (B_{76} M_{XVf} + B_{77} M_{YVf} + B_{78} M_{ZVf}) \\
 & - M_{XVf} (B_{79} M_{YVf} + B_{80} M_{ZVf}) \\
 & - B_{81} M_{YVf} M_{ZVf}
 \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
 M_{XVf} = & M_{XV} - (B_{82} F_{XVf} + B_{83} F_{YVf} + B_{84} F_{ZVf} + B_{86} M_{YVf} + B_{87} M_{ZVf}) \\
 & - (B_{88} F_{XVf}^2 + B_{89} F_{YVf}^2 + B_{90} F_{ZVf}^2 + B_{91} M_{XVf}^2 + B_{92} M_{YVf}^2 + B_{93} M_{ZVf}^2) \\
 & - F_{XVf} (B_{94} F_{YVf} + B_{95} F_{ZVf} + B_{96} M_{XVf} + B_{97} M_{YVf} + B_{98} M_{ZVf}) \\
 & - F_{YVf} (B_{99} F_{ZVf} + B_{100} M_{XVf} + B_{101} M_{YVf} + B_{102} M_{ZVf}) \\
 & - F_{ZVf} (B_{103} M_{XVf} + B_{104} M_{YVf} + B_{105} M_{ZVf}) \\
 & - M_{XVf} (B_{106} M_{YVf} + B_{107} M_{ZVf}) \\
 & - B_{108} M_{YVf} M_{ZVf}
 \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
 M_{YVf} = & M_{YV} - (B_{109} F_{XVf} + B_{110} F_{YVf} + B_{111} F_{ZVf} + B_{112} M_{XVf} + B_{114} M_{ZVf}) \\
 & - (B_{115} F_{XVf}^2 + B_{116} F_{YVf}^2 + B_{117} F_{ZVf}^2 + B_{118} M_{XVf}^2 + B_{119} M_{YVf}^2 + B_{120} M_{ZVf}^2) \\
 & - F_{XVf} (B_{121} F_{YVf} + B_{122} F_{ZVf} + B_{123} M_{XVf} + B_{124} M_{YVf} + B_{125} M_{ZVf}) \\
 & - F_{YVf} (B_{126} F_{ZVf} + B_{127} M_{XVf} + B_{128} M_{YVf} + B_{129} M_{ZVf}) \\
 & - F_{ZVf} (B_{130} M_{XVf} + B_{131} M_{YVf} + B_{132} M_{ZVf}) \\
 & - M_{XVf} (B_{133} M_{YVf} + B_{134} M_{ZVf}) \\
 & - B_{135} M_{YVf} M_{ZVf}
 \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
 M_{ZVf} = & M_{ZV} - (B_{136} F_{XVf} + B_{137} F_{YVf} + B_{138} F_{ZVf} + B_{139} M_{XVf} + B_{140} M_{YVf}) \\
 & - (B_{142} F_{XVf}^2 + B_{143} F_{YVf}^2 + B_{144} F_{ZVf}^2 + B_{145} M_{XVf}^2 + B_{146} M_{YVf}^2 + B_{147} M_{ZVf}^2) \\
 & - F_{XVf} (B_{148} F_{YVf} + B_{149} F_{ZVf} + B_{150} M_{XVf} + B_{151} M_{YVf} + B_{152} M_{ZVf})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -F_{YVf} (B_{153} F_{ZVf} + B_{154} M_{XVf} + B_{155} M_{YVf} + B_{156} M_{ZVf}) \\
 & -F_{ZVf} (B_{157} M_{XVf} + B_{158} M_{YVf} + B_{159} M_{ZVf}) \\
 & -M_{XVf} (B_{160} M_{YVf} + B_{161} M_{ZVf}) \\
 & -B_{162} M_{YVf} M_{ZVf}
 \end{aligned}$$

(18)

これら方程式から読み取れるように、干渉補正には繰返し演算が必要である。主要項係数以外の全ての係数 $B_i$ が1より十分小さいので容易に収斂する。天秤出力が6要素とも1mV/Vの場合と-1mV/Vの場合について計算した結果4, 5回の繰返し演算で収斂する事を確認している。

A.2 電気量から物理量への変換

干渉を取除いた天秤出力値  $F_{XVf}$ ,  $F_{YVf}$ ,  $F_{ZVf}$ ,  $M_{XVf}$ ,  $M_{YVf}$ ,  $M_{ZVf}$  にボーイング社から提示された変換係数 $H_{FX}$ 等を使い電圧変化量 (mV/V) から物理量 (N, Nm) に変換す

る。

$$F_X = H_{FX} F_{XVf} \tag{19}$$

$$F_Y = H_{FY} F_{YVf} \tag{20}$$

$$F_Z = H_{FZ} F_{ZVf} \tag{21}$$

$$M_X = H_{MX} M_{XVf} \tag{22}$$

$$M_Y = H_{MY} M_{YVf} \tag{23}$$

$$M_Z = H_{MZ} M_{ZVf} \tag{24}$$

ここで $H_{FX} \sim H_{FZ}$ は(N/mV/V)の次元を、 $H_{MX} \sim H_{MZ}$ は(Nm/mV/V)の次元を持つことになる。換算係数の値を表14に与えた。

表13 ボーイング B660H 天秤のオリジナル干渉補正係数

	$\Delta F_{XV}$	$\Delta F_{YV}$	$\Delta F_{ZV}$	$\Delta M_{XV}$	$\Delta M_{YV}$	$\Delta M_{ZV}$
$F_{XV}$	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
$F_{YV}$	0.063061	1.000000	0.008125	-0.004350	0.007847	-0.089344
$F_{ZV}$	0.088463	0.003828	1.000000	0.043393	0.045920	0.008817
$M_{XV}$	-0.013944	0.004134	0.002868	1.000000	0.012579	-0.003336
$M_{YV}$	0.034020	0.000000	0.031104	0.075795	1.000000	0.000000
$M_{ZV}$	0.000000	-0.017067	0.000000	-0.035679	-0.006147	1.000000
$F_{XV}^2$	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
$F_{YV}^2$	0.000128	-0.000287	0.000000	0.000000	0.000001	0.000939
$F_{ZV}^2$	0.000485	-0.000000	0.000992	0.000031	0.000094	-0.000003
$M_{XV}^2$	0.000002	0.000000	0.000000	-0.000812	-0.000010	-0.000000
$M_{YV}^2$	-0.000031	0.000000	-0.000031	-0.000223	0.006622	0.000000
$M_{ZV}^2$	0.000000	-0.000001	0.000000	-0.000001	0.000382	-0.002570
$F_{XV} \times F_{YV}$	0.000320	-0.001643	0.000699	0.000313	0.000192	0.000853
$F_{XV} \times F_{ZV}$	0.001873	0.000058	-0.000335	-0.000933	-0.000025	0.000122
$F_{XV} \times M_{XV}$	-0.001105	0.000844	0.000263	0.000093	0.000502	-0.000314
$F_{XV} \times M_{YV}$	0.000516	-0.000389	-0.001403	-0.000905	-0.001177	0.000698
$F_{XV} \times M_{ZV}$	0.001314	-0.001016	-0.000195	-0.001324	0.000112	-0.002013
$F_{YV} \times F_{ZV}$	0.000699	-0.001643	0.000057	0.000313	0.000320	0.000853
$F_{YV} \times M_{XV}$	-0.002240	0.011829	0.000040	-0.000119	0.000205	-0.004068
$F_{YV} \times M_{YV}$	0.000657	-0.001197	0.003505	0.004091	0.001770	0.000054
$F_{YV} \times M_{ZV}$	0.015770	0.001473	-0.000037	-0.000022	0.000029	-0.000887
$F_{ZV} \times M_{XV}$	-0.002240	0.011829	0.000040	-0.000119	0.000205	-0.004069
$F_{ZV} \times M_{YV}$	0.022368	-0.002429	-0.000070	-0.000265	-0.000551	0.000041
$F_{ZV} \times M_{ZV}$	-0.001274	-0.000542	0.000653	-0.001738	-0.000027	-0.000136
$M_{XV} \times M_{YV}$	-0.069072	0.006876	-0.000152	0.001016	0.000021	-0.002916
$M_{XV} \times M_{ZV}$	0.000347	-0.000292	-0.007332	-0.002153	0.002517	-0.000237
$M_{YV} \times M_{ZV}$	0.001314	0.000212	0.000275	0.008711	0.004492	-0.000615

表14 B660H 天秤の換算係数

	$H_{FX}$	$H_{FY}$	$H_{FZ}$	$H_{MX}$	$H_{MY}$	$H_{MZ}$
換算係数	83.3784	440.100	502.901	18.6033	54.7720	58.2934

単位 : (N/mV/V, Nm/mV/V)

**A.3 干渉補正係数  $B_i$  ( $i=1\sim 162$ ) に対応する天秤較正係数  $C_i$  ( $i=1\sim 168$ ) の計算**

上に述べたとおり干渉補正の手順がボーイングと航技研では異なるので係数  $B_i$  と  $C_i$  を直接比較できない。しかし天秤特性に関する基本的な考え方として、両者とも干渉補正において6分力に対して二次の多項式で補正している点と同じである。本節ではボーイングの係数  $B_i$  ( $i=1\sim 162$ ) を使って等価な  $C_i$  ( $i=1\sim 168$ ) を求めることにする。ボーイングの方法は干渉を含んだ天秤出力  $F_{XV}$  等から干渉の無い  $F_{XV}$  を計算し力  $F_X$  等を求めるので、予め  $F_{XV}$  等と  $F_X$  等のデータ群を作成し、これを仮想的な天秤較正データと考えて式(7)～(12)を使って最小二乗法を適用し  $B_i$  に対応する  $C_i$  ( $i=1\sim 168$ ) を求める事にする。仮想的なデータ群の作成に際して単成分データ点、2成分複合データ点、6成分複合データ点を最大天秤容量に対する天秤出力を考慮して偏りの無いように以下の通り作成した。即ち各々の仮想的な天秤出力点は以下のようなデータ点とした。

1. 成分荷重群

(a)  $F_{XV}$  に対して  $-1.00\sim +1.00$  (mV/V) を10等分した点を仮想的な天秤出力とし、各々に対応する荷重  $F_X$  (N) を計算。

(b)  $F_{YV}$  は  $-0.90\sim +0.90$  (mV/V) を10等分し対応する荷重を計算。

(c)  $F_{ZV}$  は  $-1.68\sim +1.68$  (mV/V) を10等分し対応する荷重を計算。

(d)  $M_{XV}$  は  $-1.46\sim +1.46$  (mV/V) を10等分し対応する荷重を計算。

(e)  $M_{YV}$  は  $-1.17\sim +1.17$  (mV/V) を10等分し対応する荷重を計算。

(f)  $M_{ZV}$  は  $-0.40\sim +0.40$  (mV/V) を10等分し対応する荷重を計算。

2. 2成分複合荷重群

各成分に対して負荷限度の40%値と80%値に相当する天秤出力と負荷を代表点として組合せデータ点を作成。

表15 オリジナル干渉補正係数から計算した天秤較正係数

	$F_X$	$F_Y$	$F_Z$	$M_X$	$M_Y$	$M_Z$
CONST	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$F_{XV}$	817.661	-0.002	-0.009	0.000	0.002	0.000
$F_{YV}$	-50.813	-4322.621	-39.123	-1.539	3.785	-51.203
$F_{ZV}$	71.421	-16.414	-4939.480	-7.364	-24.451	-5.323
$M_{XV}$	-12.071	-17.574	12.015	182.647	-6.669	1.710
$M_{YV}$	26.449	1.866	152.772	13.617	538.420	0.036
$M_{ZV}$	0.723	73.067	2.014	6.462	3.014	572.600
$F_{XV}^2$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
$F_{YV}^2$	1.223	-0.367	-0.382	0.004	0.007	-0.439
$F_{ZV}^2$	-0.648	1.509	4.993	-0.017	-0.044	-0.057
$M_{XV}^2$	0.702	0.633	-0.064	0.152	-0.009	-0.024
$M_{YV}^2$	3.451	1.688	-0.855	0.140	-3.616	-0.085
$M_{ZV}^2$	0.225	0.082	-1.351	0.027	-0.267	1.490
$F_{XV} \times F_{YV}$	0.370	7.431	3.477	-0.032	-0.106	-0.289
$F_{XV} \times F_{ZV}$	-1.546	0.278	1.393	-0.159	0.016	0.071
$F_{XV} \times M_{XV}$	0.986	3.658	-1.259	0.009	0.267	-0.148
$F_{XV} \times M_{YV}$	-0.588	-1.878	6.778	-0.131	-0.611	0.395
$F_{XV} \times M_{ZV}$	-1.098	-4.520	0.860	-0.256	0.079	-1.204
$F_{YV} \times F_{ZV}$	-0.229	-7.998	0.339	-0.001	0.114	0.428
$F_{YV} \times M_{XV}$	1.860	50.029	3.798	-0.081	0.164	-1.709
$F_{YV} \times M_{YV}$	0.094	-8.097	-17.724	0.851	1.026	0.001
$F_{YV} \times M_{ZV}$	-12.752	8.313	0.572	-0.005	0.048	-0.665
$F_{ZV} \times M_{XV}$	-0.009	-49.309	-0.038	0.029	-0.024	1.649
$F_{ZV} \times M_{YV}$	20.698	15.202	0.239	0.038	0.587	-0.041
$F_{ZV} \times M_{ZV}$	-1.174	0.422	4.804	0.357	0.198	0.009
$M_{XV} \times M_{YV}$	-56.972	-27.993	-1.197	-0.205	0.131	1.259
$M_{XV} \times M_{ZV}$	0.351	0.235	-36.708	0.409	-1.527	0.171
$M_{YV} \times M_{ZV}$	-1.014	-1.871	3.470	-1.594	-2.297	0.322

3. 6 成分複合荷重群

負荷限度の 50% 値に相当する天秤出力と負荷を代表点として組合せデータ点を作成。

A.4 座標系の変換

さらに図 1 と図 3 に示した航技研の天秤較正装置で試験した時の座標系の定義（負荷の向きと天秤出力の正負）とボーイング社が行った較正試験での座標系が異なるのでその変換を行う必要がある。ボーイングのオリジナルな干渉補正係数に対応する座標系は文献(3) に示してあり以下の変換が必要となる。

$$F_X = -F_X \quad (25)$$

$$F_{XV} = -F_{XV} \quad (26)$$

$$F_{YV} = -F_{YV} \quad (27)$$

$$F_Z = -F_Z \quad (28)$$

以上で航技研の較正試験の場合と同一座標系となり較正係数の大きさを直接比較できる。

以上の手順で式(7)～式(12)を適用して求めた等価な較正係数  $C_i$  を表 15 に示す。

A.5  $B_i$  によるボーイング方式のデータ処理と  $C_i$  による航技研方式のデータ処理の等価性

表 13 に示したボーイングのオリジナル干渉補正係数  $B_i$  と上に述べた手順で計算した表 15 の  $C_i$  が等価なものである事を確認する目的で、両方の係数マトリックスを遷音速風洞試験結果に適用し比較した結果を図 34 から図 39 に示しておいた。

当然の事であるが両者は計算誤差の範囲で完全に一致している。従って表 13 に代って表 15 をボーイングの天秤較正係数と考えて、航技研較正装置で求めた天秤較正係数と直接比較ができる。

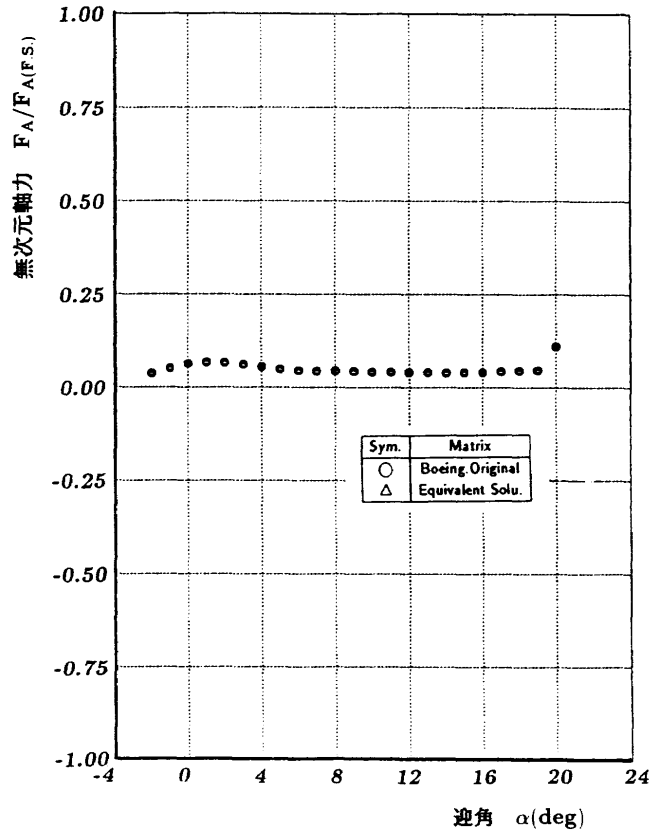


図34  $\alpha$  スイープ試験の軸力成分出力

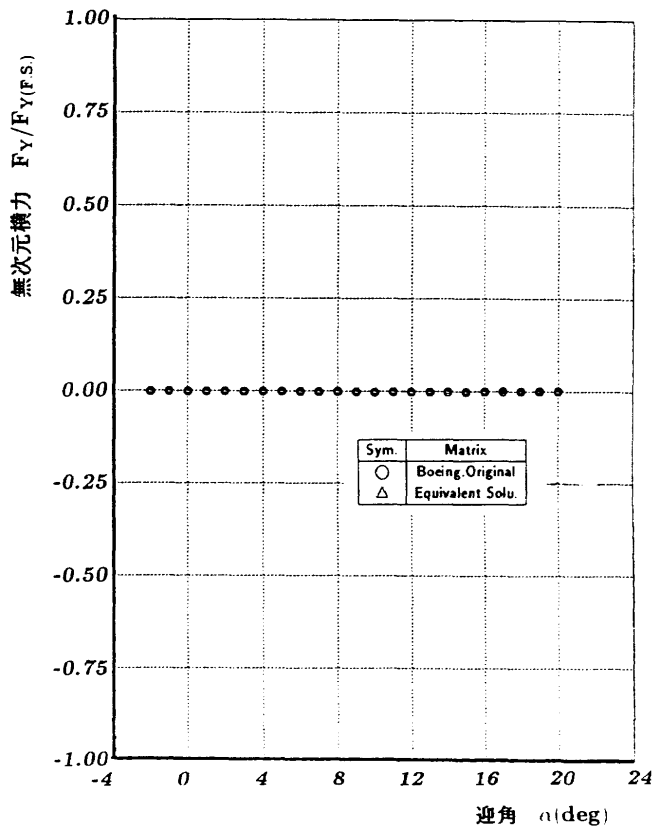


図35  $\alpha$  スイープ試験の横力成分出力



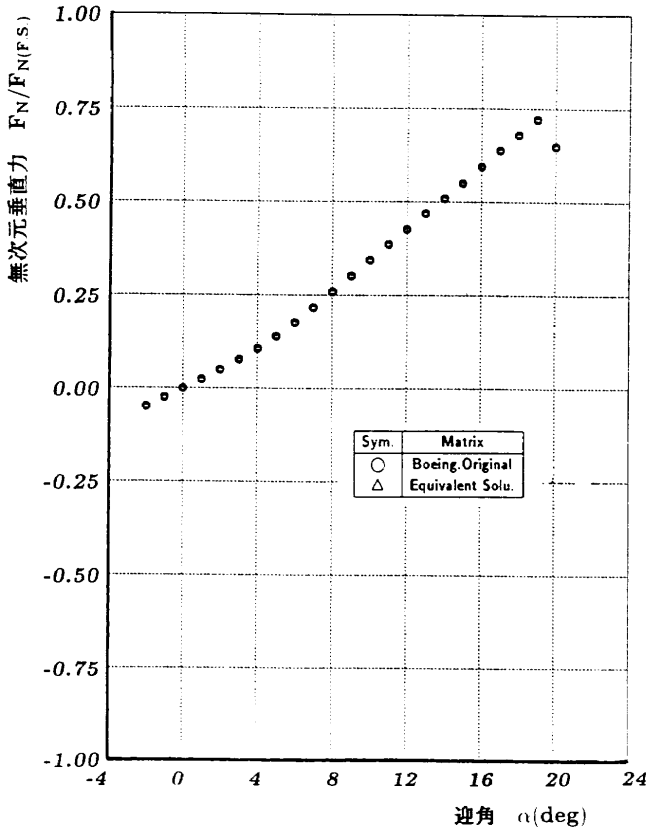


図36  $\alpha$ スweep試験の垂直力成分出力

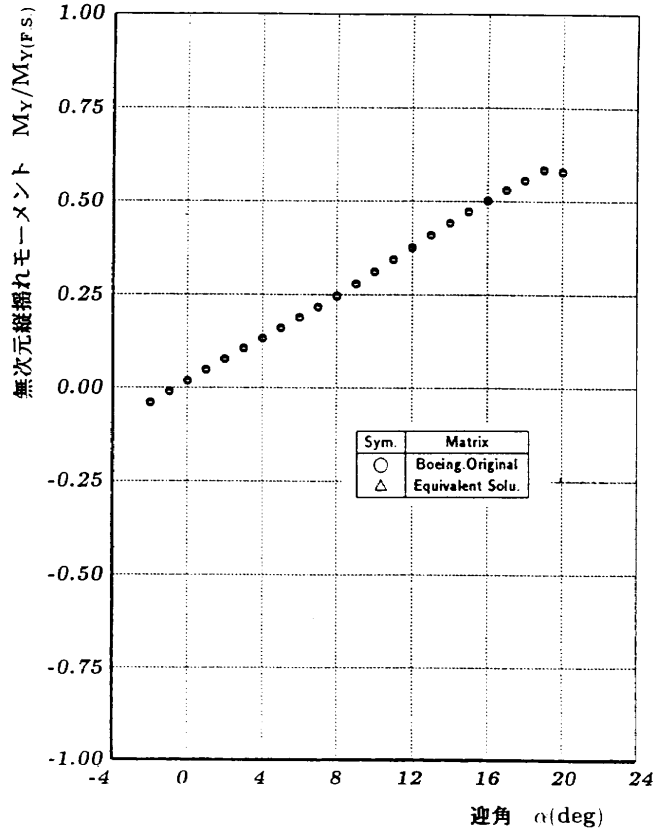


図38  $\alpha$ スweep試験の縦揺れモーメント成分出力

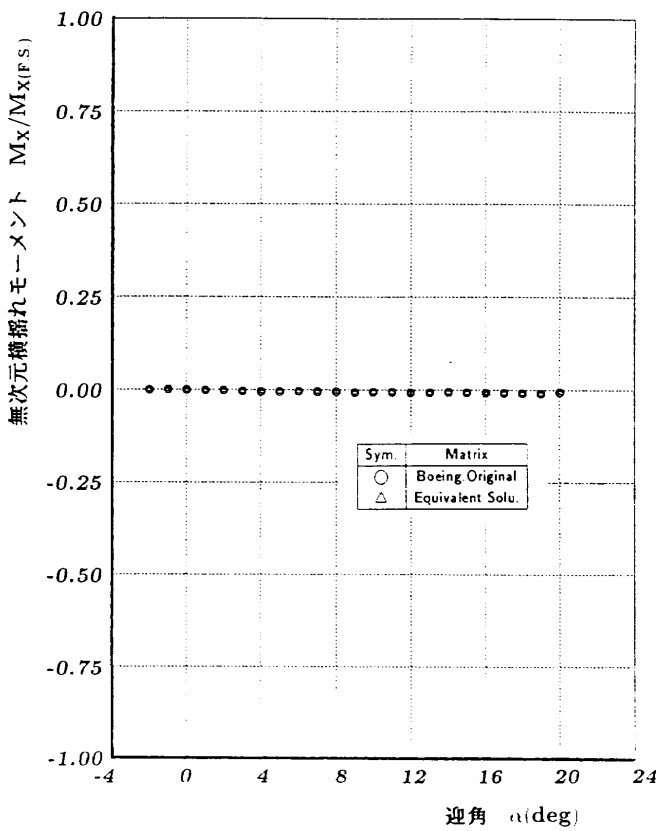


図37  $\alpha$ スweep試験の横揺れモーメント成分出力

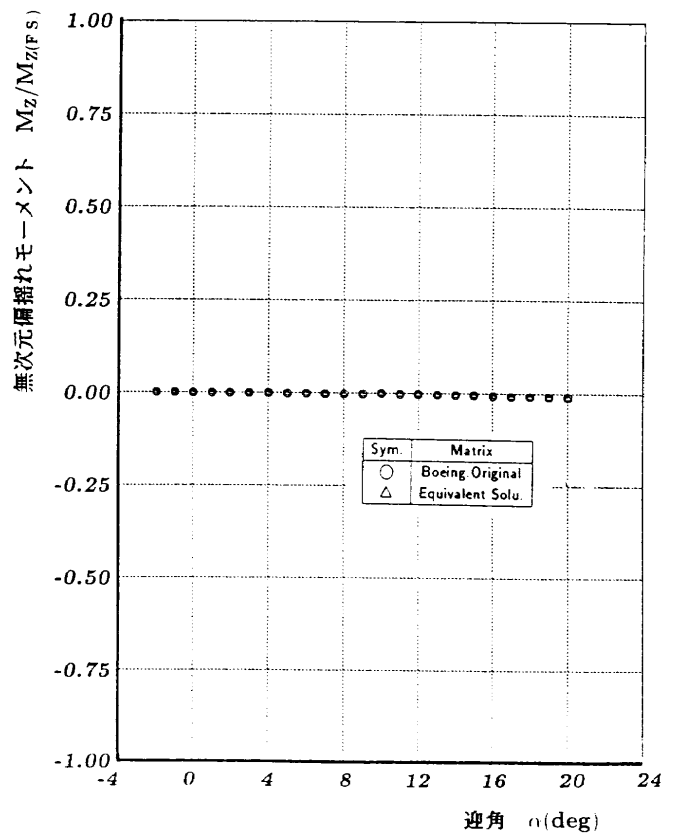


図39  $\alpha$ スweep試験の偏揺れモーメント成分出力

---

## 航空宇宙技術研究所資料 697号

平成 8 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 三興印刷  
東京都新宿区西早稲田 2-1-18

---