

内挿式六分力天秤の較正について

第四報 . 天秤特性と剛性の関係についての考察*

河本 巖^{*1} 鈴木 弘一^{*1} 小国 保男^{*1} 中村 正剛^{*1}
室田 勝一^{*1} 野中 修^{*1} 飯島 由美^{*1}

Calibration of Six-Component Internal Balances.

Part 4. The relation between balance characteristics and stiffness*

I. Kawamoto^{*1}, K. Suzuki^{*1}, Y. Oguni^{*1}, S. Nakamura^{*1},
K. Murota^{*1}, O. Nonaka^{*1} and Y. Iijima^{*1}

ABSTRACT

The relation between balance characteristics and its stiffness is discussed, emphasizing the evaluation of first and second order interference terms of the balance.

Three kinds of internal balances are used for this purpose. Balance characteristics are determined with the automatic balance calibration system of the NAL-TWT. During balance calibration, the strokes of 6 electric actuators for repositioning are stored as a data file. The balance deflections like ΔX , ΔY , ΔZ , $\Delta\phi$, $\Delta\theta$ and $\Delta\psi$ at full loading are calculated with this data file. They are called 'balance stiffness' in this paper. The relation between balance characteristics and the stiffness is discussed. In case of high stiffness (small deflection), the interference terms in the balance characteristics are small in comparison with the low stiffness balances.

Keywords: aerodynamics, internal-balance, balance characteristics, balance stiffness.

概 要

航技研遷音速風洞の複合荷重式自動天秤較正装置を用いて内挿式6分力天秤の剛性の決定を試みた。供試天秤として、 $\phi 50\text{mm}$ $\phi 60\text{mm}$ クラスの、製作会社の異なる3体の一体化天秤を選び、剛性の大きさを比較した。またその違いと別途求まる天秤の干渉特性との関係について考察した。

この結果天秤感度低下が実用上問題にならない範囲で天秤剛性を高めることで干渉量をかなり小さく押さえられることが判明し、干渉の小さい天秤を設計できる可能性を示した。

一方天秤エレメントの剛性が低い場合には干渉量が大きくこの場合にはその量を正しく評価し天秤精度を確保する事が最も重要となる。通常干渉特性は非線型性を有し従って天秤特性も非線型多項式で表現しなくてはならず、複合荷重による天秤較正が必要であることも示した。

* 平成9年10月2日受付 (received 2 October 1997)

* 1 空力性能部 (Aircraft Aerodynamics Division)

主な記号

A	스팅中中空円筒部断面積
C_i	天秤特性の多項式係数
D_i	たわみ特性の多項式係数
d_1, d_2	스팅円柱部の内径と外径
E	스팅の縦弾性係数
$F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$	天秤負荷。定格負荷の場合は $F_{X(max)}$ 等。力の向きは図 2 参照
G	스팅の横弾性係数
I	断面二次モーメント
I_p	断面極二次モーメント
l	스팅平行部付根から天秤中心までの長さ、 $l = l_1 + l_2$
l_1	天秤中心から스팅先端までの長さ
l_2	스팅平行部長さ
l_{motor}	姿勢復帰モータの固定端と可動端の距離
$l_{0,motor}$	姿勢復帰モータの固定端と可動端の無負荷時の距離
$X_a, Y_a, Y_b, Z_a, Z_b, Z_c$	姿勢復帰モータ番号、またはモータ変位出力
X, Y, Z	天秤中心を原点とした直角座標系
X_0, Y_0, Z_0	姿勢復帰モータの可動端初期座標
X_F, Y_F, Z_F	姿勢復帰モータの固定端座標
$\Delta X_a, \Delta Y_a, \Delta Y_b$	姿勢復帰モータの X_a, Y_a, Y_b 変位 (mm)、伸びを正
$\Delta Z_a, \Delta Z_b, \Delta Z_c$	姿勢復帰モータ Z_a, Z_b, Z_c の変位 (mm)、縮みを正
$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$	負荷による X, Y, Z 方向の変位
$\Delta \phi, \Delta \theta, \Delta \psi$	負荷による ϕ, θ, ψ 方向の変位角
$\Delta X_{bal+sti}$ 等	天秤と스팅結合状態の X 方向変位 (mm)。 $\Delta Y, \Delta Z, \Delta \phi, \Delta \theta, \Delta \psi$ についても同様。正負は図 3 の座標系参照。
$\Delta X_{bal, FX}$ 等	F_x 負荷による天秤単体の天秤中心位置の X 方向変位 (mm)。定格負荷を与えたときは添字 $FX(max)$ 。 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta \phi, \Delta \theta, \Delta \psi$ についても同様。
$\Delta X_{bal+sti, FX}$ 等	F_x 負荷による天秤と스팅結合状態での天秤中心位置の X 方向変位 (mm)。定格負荷を与えたときは添字 $FX(max)$ 。 $\Delta Y, \Delta Z, \Delta \phi, \Delta \theta, \Delta \psi$ についても同様。
$\Delta X_{sti, FX}$ 等	F_x 負荷による스팅先端位置の

X 方向変位 (mm)。定格負荷を与えたときは添字 $FX(max)$ 。 $\Delta Y, \Delta Z, \Delta \phi, \Delta \theta, \Delta \psi$ についても同様。

1. はじめに

航技研遷音速風洞の複合荷重式自動天秤較正装置では Repositioning System を採用している。即ち負荷により弾性変形した天秤を高剛性フレームの位置を制御することで元の位置に復帰させる。この時天秤に加わる負荷が変化しないように荷重制御も同時に行っている。従って天秤較正時に高剛性フレームに取り付けられた 6 台の姿勢復帰用電動モータの動作量をデータファイル化しておけば、これらデータをもとに高剛性フレームの移動量を計算出来る。高剛性フレームの移動量は天秤中心位置での 6 成分の弾性変位 ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, \Delta \phi, \Delta \theta, \Delta \psi$) を打消す量であるので、これにより負荷と天秤変位の関係を決定できる。本稿では遷音速風洞用内挿式 6 分力天秤 2 体 (国産、外国製)、大型低速風洞用内挿式 6 分力天秤 1 体 (国産) を例に天秤剛性 (balance stiffness) を実験的に決定した例について報告する。この結果をもとに 3 体の天秤の干渉特性の相違について考察を試みた。なお本稿では天秤剛性の定義として天秤に定格負荷が加わった時の変位と定義している。

2. 複合荷重式自動天秤較正装置

2.1 作動原理

本較正装置の詳細は文献 1 に記してある。このうち本稿の議論に必要な個所を以下に整理しておく。図 1 は較正装置の全体図で、図 2 にこの中から負荷機構を抜き出した略図を、図 3 に姿勢復帰機構の略図を示す。図 2 に示すような 16 個 ($X1-X4, Y1-Y4, Z1-Z8$) の電動モータで任意の 6 成分負荷を加える。この時キャリポディ内に収まった内挿天秤および스팅は弾性変形する。この時図 3 に示す高剛性フレームを支える 6 台の電動モータ ($X_a, Y_a, Y_b, Z_a, Z_b, Z_c$) で制御し、この弾性変形を打ち消しキャリポディを元の位置に復帰させる。負荷を所定の値に保った状態で姿勢復帰が完了したあと天秤負荷および天秤出力データを取り込み天秤特性を決定することになる。このとき天秤変位に対応した 6 台の姿勢復帰用モータの動きもデータとして取り込んでおき、これをもとに天秤変位を計算する。

2.2 天秤変位と姿勢復帰モータ変位との関係

図 3 に示すように初期設定した天秤に負荷を加え始めると天秤と스팅は負荷に応じて弾性変形を始める。この変位は天秤を内蔵するキャリポディ上に取り付けた 6 台のマグネスケールで読み取り、この変位が常にゼロと

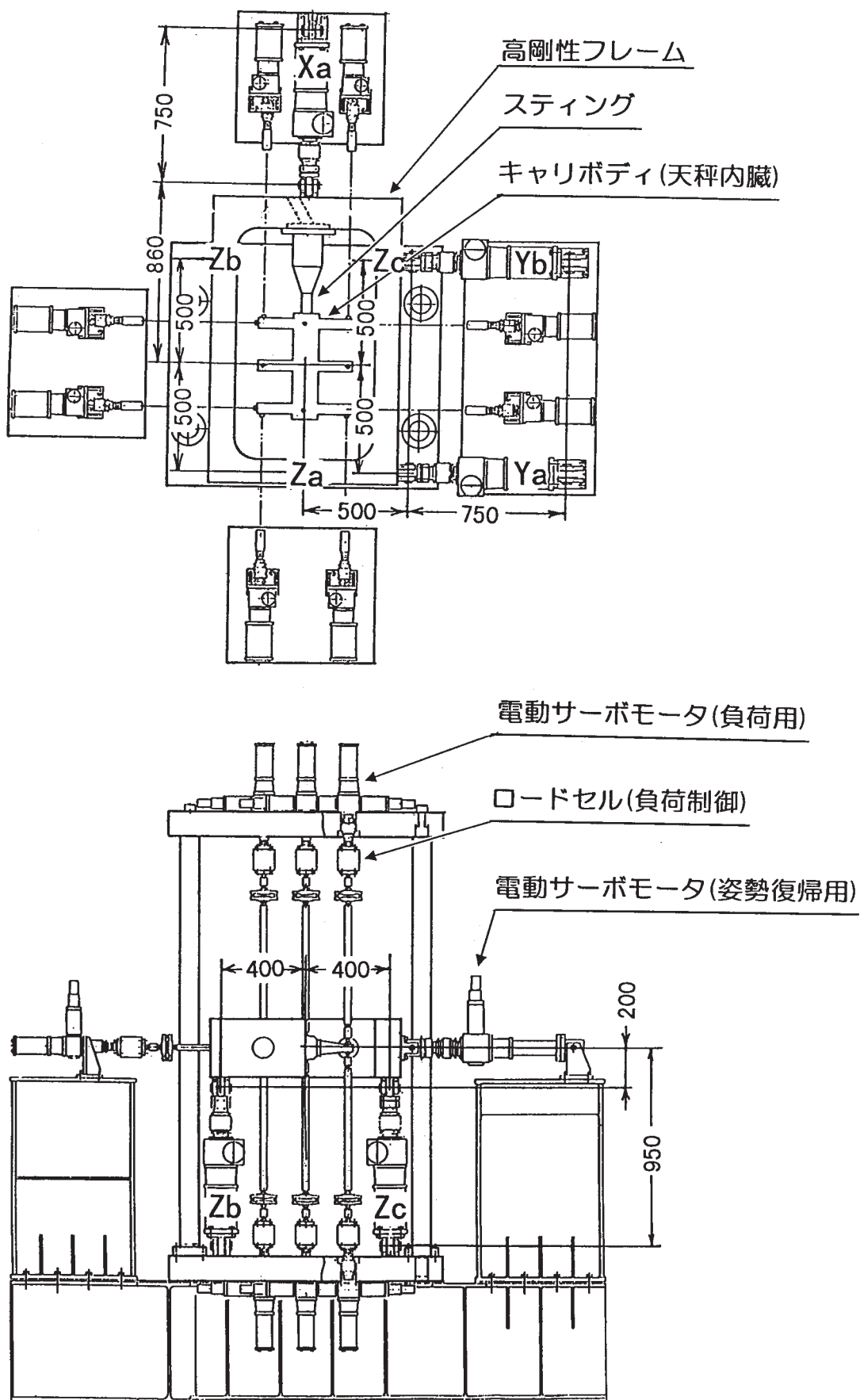


図1 天秤較正装置の全体図と姿勢復帰モータ取付け位置

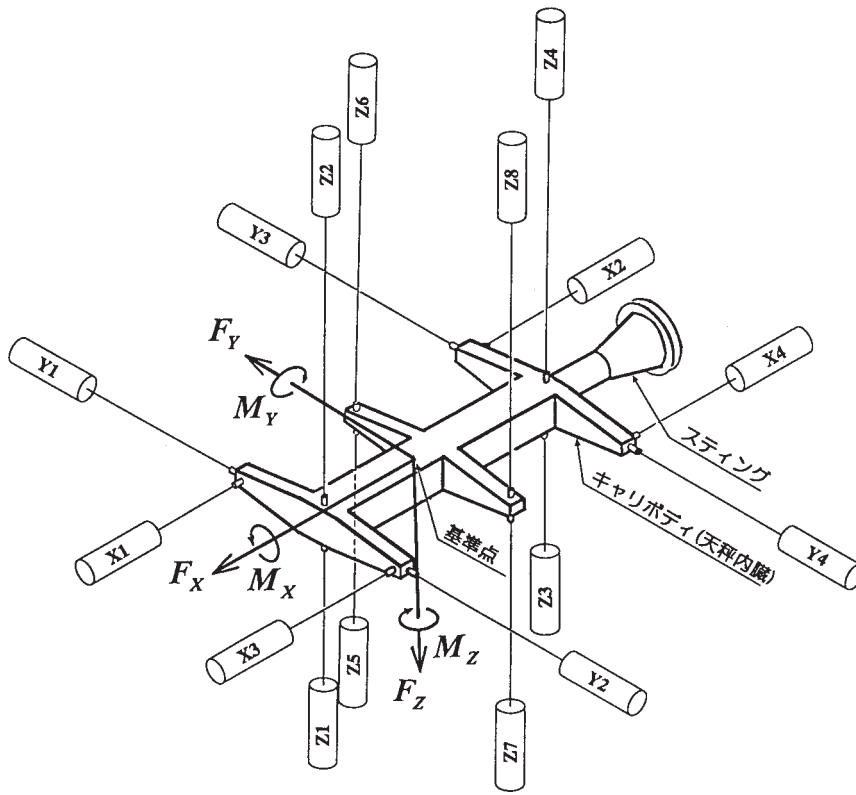


図2 キャリボディと負荷機構

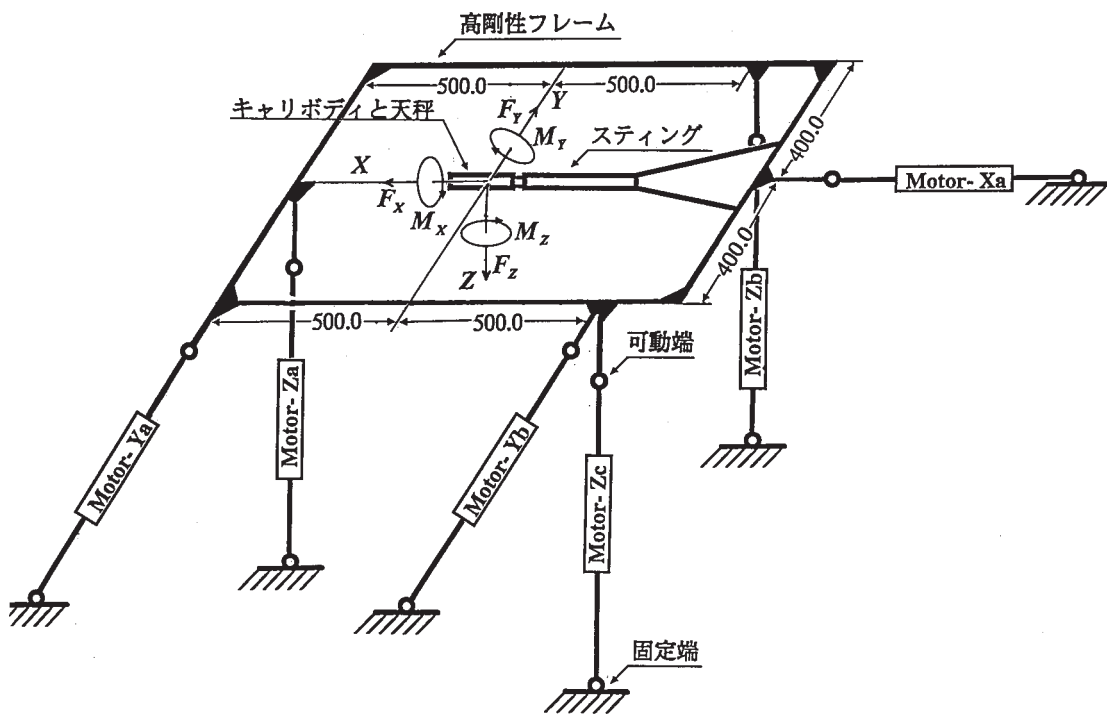


図3 高剛性フレームと姿勢復帰モータ

なるように6台の姿勢復帰用モータで高剛性フレームを制御する。従って所定の負荷に相当する天秤変位を ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 、 $\Delta\phi$ 、 $\Delta\theta$ 、 $\Delta\psi$ とすると、高剛性フレームの変位は $-\Delta X$ 、 $-\Delta Y$ 、 $-\Delta Z$ 、 $-\Delta\phi$ 、 $-\Delta\theta$ 、 $-\Delta\psi$ となる。姿勢復帰用モータの変位(伸び)を記述するにはモータの両端(例えば図3のモータの固定端、可動端)の座標を計算すればよい。姿勢復帰用モータの固定端の座標を (X_F, Y_F, Z_F) とし可動端の初期座標を (X_0, Y_0, Z_0) とすると弾性変位後の可動端の座標は次のように記述できる。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Delta\theta \cos\Delta\psi & \sin\Delta\phi \sin\Delta\theta \cos\Delta\psi \\ & +\sin\Delta\psi \cos\Delta\phi \\ -\cos\Delta\theta \sin\Delta\psi & -\sin\Delta\psi \sin\Delta\theta \sin\Delta\phi \\ & +\cos\Delta\psi \cos\Delta\phi \\ \sin\Delta\theta & -\sin\Delta\phi \cos\Delta\theta \\ & -\cos\Delta\psi \cos\Delta\phi \sin\Delta\theta \\ & +\sin\Delta\psi \sin\Delta\phi \\ & \sin\Delta\psi \cos\Delta\phi \sin\Delta\theta \\ & +\cos\Delta\psi \sin\Delta\phi \\ & \cos\Delta\phi \cos\Delta\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\Delta X \\ -\Delta Y \\ -\Delta Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

角度変化は小さいので次の様に展開出来る。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta\psi & -\Delta\theta \\ -\Delta\psi & 1 & \Delta\phi \\ \Delta\theta & -\Delta\phi & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

書き下すと

$$X = X_0 + \Delta\psi Y_0 - \Delta\theta Z_0 - \Delta X \quad (3)$$

$$Y = -\Delta\psi X_0 + Y_0 + \Delta\phi Z_0 - \Delta Y \quad (4)$$

$$Z = \Delta\theta X_0 - \Delta\phi Y_0 + Z_0 - \Delta Z \quad (5)$$

電動モータの動き(伸び)を計算する。一つのモータに着目し、その固定端と可動端の長さは

$$l_{motor} = \sqrt{(X - X_F)^2 + (Y - Y_F)^2 + (Z - Z_F)^2} \quad (6)$$

であるから、式(3)・(5)を代入し展開し、二次の微小量を無視すると

$$\frac{l_{motor}}{l_{0,motor}} = 1 + \frac{(X_0 - X_F)(\Delta\psi Y_0 - \Delta\theta Z_0 - \Delta X)}{l_{0,motor}^2} + \frac{(Y_0 - Y_F)(-\Delta\psi X_0 + \Delta\phi Z_0 - \Delta Y)}{l_{0,motor}^2} + \frac{(Z_0 - Z_F)(\Delta\theta X_0 - \Delta\phi Y_0 - \Delta Z)}{l_{0,motor}^2} \quad (7)$$

ここで $l_{0,motor}$ は弾性変位の無い初期状態のモータ固定端と可動端の長さである。

$$l_{0,motor} = \sqrt{(X_0 - X_F)^2 + (Y_0 - Y_F)^2 + (Z_0 - Z_F)^2} \quad (8)$$

X_a 、 Y_a 、 Y_b の制御モータについては図3に示す座標系に従って伸びの方向を正としてデータを取り込んでいるので $l_{motor} - l_{0,motor} = \Delta l_{motor}$ となり次の式を得る。

$$\Delta l_{motor} = \frac{X_F - X_0}{l_{0,motor}} \Delta X + \frac{Y_F - Y_0}{l_{0,motor}} \Delta Y + \frac{Z_F - Z_0}{l_{0,motor}} \Delta Z + \frac{Y_0 Z_F - Y_F Z_0}{l_{0,motor}} \Delta\phi + \frac{Z_0 X_F - Z_F X_0}{l_{0,motor}} \Delta\theta + \frac{X_0 Y_F - X_F Y_0}{l_{0,motor}} \Delta\psi \quad (9)$$

Z_a 、 Z_b 、 Z_c の制御モータについても図3の座標系に従い縮む方向が正となるので、その定義に従い $l_{0,motor} - l_{motor} = \Delta l_{motor}$ となる。従ってこのモータについては式(9)に代わって以下の記述となる。

$$\Delta l_{motor} = \frac{X_0 - X_F}{l_{0,motor}} \Delta X + \frac{Y_0 - Y_F}{l_{0,motor}} \Delta Y + \frac{Z_0 - Z_F}{l_{0,motor}} \Delta Z + \frac{Y_F Z_0 - Y_0 Z_F}{l_{0,motor}} \Delta\phi + \frac{Z_F X_0 - Z_0 X_F}{l_{0,motor}} \Delta\theta + \frac{X_F Y_0 - X_0 Y_F}{l_{0,motor}} \Delta\psi \quad (10)$$

X_a - Z_c 迄の6個の電動モータについて具体的に書き下す。図1に示した制御用モータの可動端と固定端の位置寸法を図3の座標系定義に従い単位をmmで読み取ると、モータ X_a については $X_0 = -860$ 、 $X_F = -(860 + l_{0,motor})$ 、 $Y_0 = Y_F = 0$ 、 $Z_0 = Z_F = 0$ 、モータ Y_a については $X_0 = X_F = 500$ 、 $Y_0 = -500$ 、 $Y_F = -(500 + l_{0,motor})$ 、 $Z_0 = Z_F = 0$ 、モータ Y_b については $X_0 = X_F = -500$ 、 $Y_0 = -500$ 、 $Y_F = -(500 + l_{0,motor})$ 、 $Z_0 = Z_F = 0$ 、モータ Z_a については $X_0 = X_F = 500$ 、 $Y_0 = Y_F = 0$ 、 $Z_0 = 200$ 、 $Z_F = 200 + l_{0,motor}$ 、モータ Z_b については $X_0 = X_F = -500$ 、 $Y_0 = Y_F = 400$ 、 $Z_0 = 200$ 、 $Z_F = 200 + l_{0,motor}$ 、モータ Z_c については $X_0 = X_F = -500$ 、 $Y_0 = Y_F = -400$ 、 $Z_0 = 200$ 、 $Z_F = 200 + l_{0,motor}$ となるので式(9)と式(10)から以下の式が得られる。

$$\Delta l_{Xa} = -\Delta X \quad (11)$$

$$\Delta l_{Ya} = -\Delta Y - 500\Delta\psi \quad (12)$$

$$\Delta l_{Yb} = -\Delta Y + 500\Delta\psi \quad (13)$$

$$\Delta l_{Za} = -\Delta Z + 500\Delta\theta \quad (14)$$

$$\Delta l_{Zb} = -\Delta Z - 400\Delta\phi - 500\Delta\theta \quad (15)$$

$$\Delta l_{Zc} = -\Delta Z + 400\Delta\phi - 500\Delta\theta \quad (16)$$

ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 、 $\Delta\phi$ 、 $\Delta\theta$ 、 $\Delta\psi$ について解くと以下の解が得られる。

$$\Delta X = -\Delta l_{Xa} \quad (17)$$

$$\Delta Y = -\frac{\Delta l_{Ya} + \Delta l_{Yb}}{2} \quad (18)$$

$$\Delta Z = -\frac{2\Delta l_{Za} + (\Delta l_{Zb} + \Delta l_{Zc})}{4} \quad (19)$$

$$\Delta\phi = -\frac{\Delta I_{Zb} - \Delta I_{Zc}}{800} \quad (20)$$

$$\Delta\theta = \frac{2\Delta I_{Za} - (\Delta I_{Zb} + \Delta I_{Zc})}{2000} \quad (21)$$

$$\Delta\psi = -\frac{\Delta I_{Ya} - \Delta I_{Yb}}{1000} \quad (22)$$

かくして姿勢復帰用モータの変位から天秤変位が計算できる。

3 . 供試天秤と試験データの例

較正試験に用いた天秤は直径は50mmから60mm程度で天秤容量も比較的類似した3体で、天秤エレメントは全て一体式で加工されたものである。天秤一覧を表1に示す。この3体は製作会社がそれぞれ異なり天秤エレメントの設計思想も幾分かちがっているものと思われる。天秤中心位置もそれぞれメーカーにより異なる。天秤較正試験では天秤中心位置を天秤較正装置の中心(負荷点)にあわせる必要があるため、天秤を支持するスティング長さで位置の調整を行っている。図4、図5、図6に較正試験時のそれぞれの天秤とスティングの結合状態を示す。較正試験の過程で作られるデータファイルについては文献1)で述べたように6分力負荷データファイル名はXXXXXX.ORM(前半6文字は利用者命名)と定義してあ

り、その構造は負荷ステップ順に $N, F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ とならべてあり単位はN, Nmである。また6台の姿勢復帰用モータの変位出力はXXXXXX. ORC(前半6文字は利用者命名)と定義したファイルに記録しており、ファイル構造は負荷ステップ順にN, Xa, Ya, Yb, Za, Zb, Zcと並べてあり単位はmmである。試験ファイルデータの一例として天秤3(60MT6-Z700-81)について表2に6分力負荷例の一部を示した。このファイルデータから負荷データを作図したものを図7と図8に示した。6成分の力の方向の定義は図3に示した座標系による。負荷制御はほぼ適正に行われていることが分かる。次に表3に試験時のモータの変位出力に関するファイルデータの一部を示した。このデータをもとに先に求めた式(17)式(22)に従って天秤中心位置での6成分変位を作図した結果を図9 図14に示した。天秤較正試験では天秤変位とスティング変位とが加算された形で現れるので変数に添字 bal+sti を加えておく。負荷による天秤変位 $\Delta X_{bal+sti}$ 、 $\Delta Y_{bal+sti}$ 、 $\Delta Z_{bal+sti}$ 、 $\Delta\phi_{bal+sti}$ 、 $\Delta\theta_{bal+sti}$ 、 $\Delta\psi_{bal+sti}$ についても変位の正負は図3の座標系に従う。図中のシンボルは試験データからの計算値で実線は後述する天秤たわみ式を一次の多項式で記述するとした場合の最小二乗法による当て嵌め曲線である。

表1 供試天秤3体と定格荷重

供試体	名称 (所有者)	直径 (mm)	軸力 (N)	横力 (N)	垂直力 (N)	横揺 (Nm)	縦揺 (Nm)	偏揺 (Nm)
天秤1	LMC6522-50/Z1000S (遷音速風洞所有)	50.0	1,000	5,000	10,000	200	800	400
天秤2	B660H (遷音速風洞所有)	52.6	700	4,000	8,000	250	600	250
天秤3	60MT6-700-81 (大型低速風洞所有)	60.0	3,000	1,000	7,000	400	1,000	400

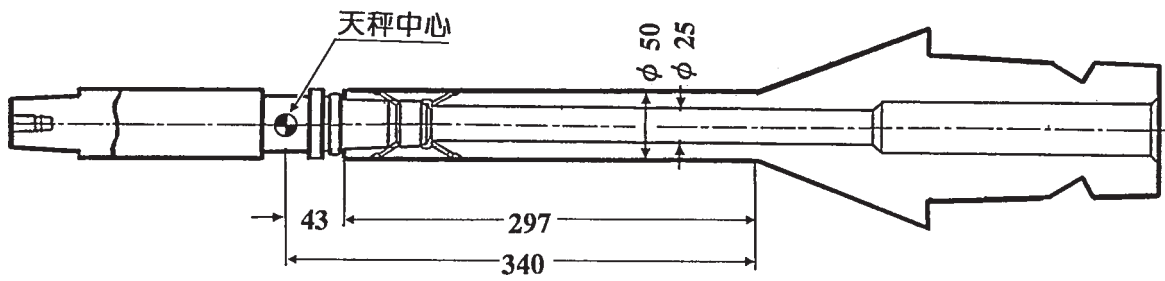


図4 天秤1 (LMC6522-50/Z1000S) と較正試験用スティング

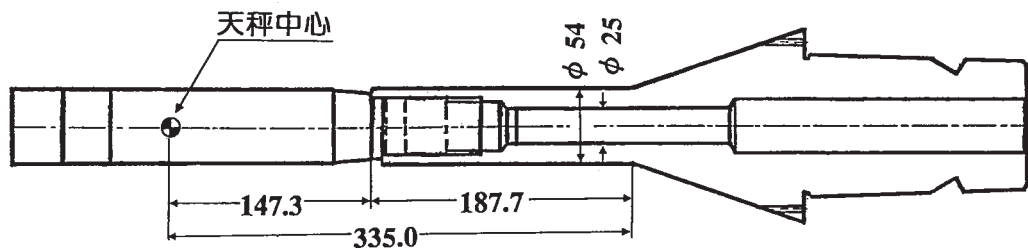


図5 天秤2 (B660H) と較正試験用スティング

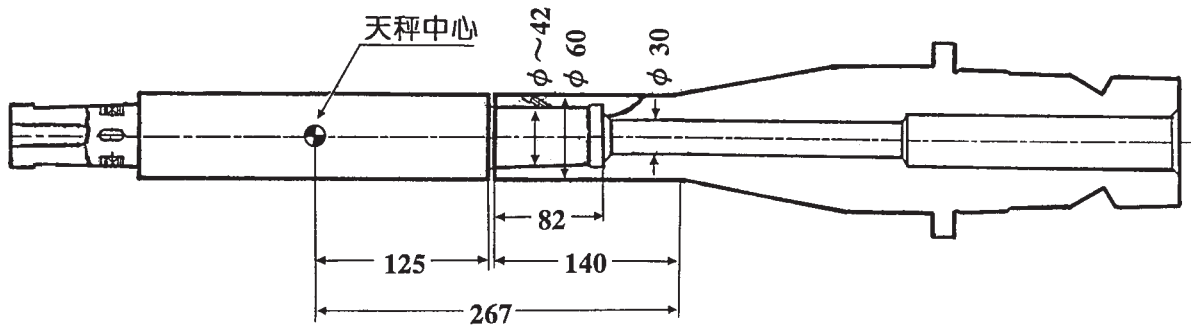


図6 天秤3 (60MT6-700-81) と較正試験用スティング

表2 天秤3(60MT6-Z700-81)の負荷データファイルの例(H80722.ORM)

H80722(T=25C RH=XX%)

H80722.ORM

60MT6-700-81 (MHI)

442

	2000.0	1000.0	7000.0	400.0	1000.0	400.0
1	0.0100	0.5100	-0.8210	-0.0620	-0.3570	-1.3970
2	409.0791	2.3910	-1.0410	-0.0520	-0.3720	-1.1000
3	818.1431	0.8820	-1.7800	-0.0500	-0.3020	-1.3410
4	1227.1780	1.5290	-1.2010	-0.0070	-0.4590	-0.9310
5	1636.2629	-0.5100	-0.4330	-0.0040	-0.5490	-0.9510
6	1942.7009	0.9600	-1.2310	-0.1100	-0.2510	-1.2120
7	0.0060	1.6270	-1.9310	0.1290	-0.4510	-1.0110
8	0.0880	0.9410	-2.1560	-0.0910	-0.2740	-0.9680
9	-408.7781	1.3330	0.0730	0.1380	-0.6390	-0.9560
10	-818.2219	0.3720	-0.6920	0.0760	-0.7020	-1.3200
11	-1226.8701	1.2540	1.4230	0.0340	-0.3650	-1.2990
12	-1636.0300	0.2740	0.3060	0.0740	-0.2270	-1.2050
13	-1942.4399	1.1370	-0.1330	-0.1860	-0.2200	-1.1950
14	0.0100	1.3130	-1.8520	0.0500	-0.4430	-1.1350
15	0.1200	2.1170	-2.4810	-0.2180	-0.4590	-1.0340
16	0.0390	205.2710	-1.2050	-0.1050	-0.2510	-1.4360
17	0.2530	414.4619	-2.0270	0.1170	-0.5210	-0.2500
18	0.1920	617.7329	-0.8860	0.0700	-0.3680	-0.6580
19	-0.0080	821.2991	-0.4250	0.0500	-0.2980	-1.2160
20	-0.3940	995.7981	-0.5230	-0.1170	-0.3920	-2.6710
21	0.1220	2.8030	-0.9840	-0.2230	-0.4160	-1.0570
22	0.1080	1.7640	-1.2270	0.0820	-0.4040	-1.0420
23	0.0490	-203.7220	-3.0050	-0.0670	-0.2160	-0.8480
24	0.1450	-410.0520	-3.0200	-0.0490	-0.2590	-0.8530
25	0.1530	-609.1089	-1.8170	0.0070	-0.2670	-1.4460
26	0.0310	-818.8491	-1.4290	-0.1250	-0.3610	-1.2670
27	0.1840	-998.8750	-1.1640	0.0840	-0.5640	-1.0590
28	0.1920	2.4300	-1.2720	-0.0620	-0.2590	-0.9960
29	0.4900	-0.7840	-1.4410	-0.0620	-0.3020	-1.3630
30	0.3140	3.4690	511.3010	0.0510	-0.2350	-2.0150
31	0.1590	0.8040	1021.8230	-0.0720	-0.7330	-1.1550
32	0.1690	-0.6270	1538.6470	-0.0670	-0.8110	-0.9310
33	0.1080	0.3720	2043.7939	-0.0550	-0.2940	-1.2150
34	0.2200	0.9600	2556.5161	-0.0410	-0.5060	-0.9280
35	0.1060	1.0390	3062.8899	-0.0320	-0.6150	-1.0760
36	0.0960	2.0970	3577.1250	-0.0490	-0.1840	-1.0840
37	0.3510	-5.2530	4085.6379	-0.0540	-0.2860	-1.6070
38	0.0900	0.1570	4601.8789	-0.0860	-0.0780	-0.9280
39	0.1900	1.3520	-0.3430	0.0360	-0.0390	-1.0680
40	0.1630	0.0590	-1.7500	0.1800	-0.2630	-1.2090
41	-0.1550	4.6450	-513.2910	-0.0230	-0.8390	-2.1630
42	0.1270	1.6070	-1022.2600	-0.0270	-0.5170	-0.9800
43	0.3470	1.7640	-1537.2700	-0.0870	-1.3210	-0.9430
44	-0.0390	-0.1760	-2046.4800	-0.0680	-0.5840	-1.4160
45	-0.1780	0.8230	-2556.1299	-0.0560	-0.6120	-1.1910
46	0.2140	2.9010	-3068.6101	-0.0970	-0.2000	-1.1150
47	0.1200	1.1960	-3580.7500	-0.2270	-0.4120	-1.0790
48	0.3590	-0.4310	-4090.2400	-0.0180	-0.4510	-0.8610
49	0.0760	1.5290	-4604.7617	-0.1060	-0.4900	-0.9750
50	0.1140	0.0390	-1.2030	-0.0540	-0.4820	-1.1390
51	-0.3490	-3.3320	0.5610	-0.0490	-0.7720	-1.2140
52	0.0270	2.1950	-2.0110	81.7270	-0.5290	-0.8190
53	-0.4120	-1.9010	-1.9760	163.5380	-0.1610	-1.3790
54	0.1650	2.3320	-1.1520	245.5250	-0.2120	-0.7150
55	0.0080	2.3520	-1.1940	327.0410	-0.5210	-1.4430
56	0.0940	0.8430	-2.6070	388.3511	-0.1060	-1.0470

表2 (続) 天秤3 (60MT6-Z700-81) の負荷データファイルの例 (H80722.ORM)

57	0.2290	1.8030	-0.9370	0.1280	-0.2550	-1.1720
58	0.1020	0.9600	-1.3370	-0.0590	-0.3610	-1.0190
59	0.1310	-0.0200	-2.2030	-81.8990	-0.2270	-1.1220
60	0.1410	-0.0590	-1.1250	-163.5960	-0.2590	-0.8690
61	0.1670	1.0390	-0.9290	-245.5860	-0.6510	-1.1600
62	0.2960	-0.2740	-2.1700	-327.2041	-0.1250	-1.3130
63	0.1530	0.2550	0.2780	-388.5190	-0.6590	-0.6640
64	0.2200	1.2740	-2.3460	-0.0170	-0.3610	-1.2900
65	0.1490	1.6460	-1.4660	-0.0670	-0.2200	-0.9790
66	0.1220	1.3920	-1.2430	-0.0380	203.6360	-1.2980
67	-0.3450	6.3500	-2.9120	-0.0040	408.3311	-1.6970
68	0.2450	1.3920	-1.8970	0.1160	612.8650	-1.1310
69	0.0880	0.6080	-3.3540	0.1340	816.9009	-0.7110
70	0.2590	1.9990	-1.8250	0.0410	1001.2971	-0.9100
71	0.1290	5.9580	-0.6270	0.0140	-0.4040	-2.2990
72	0.1330	4.5080	-0.3820	-0.2250	-0.3490	-1.3660
73	-0.0060	1.0190	-2.4740	-0.1070	-204.4480	-1.9320
74	0.0670	-0.2350	-2.3950	-0.0610	-409.1421	-1.2940
75	0.0390	2.6260	-0.8170	-0.0480	-613.2571	-1.0940
76	-0.0310	1.2740	1.8420	-0.0660	-818.0649	-1.2810
77	0.2470	0.1760	0.4960	0.0820	-1002.0400	-1.3120
78	0.2700	1.2540	-2.7500	-0.0560	-0.0590	-1.0050
79	0.1760	1.2540	-0.5700	-0.0350	-0.4120	-0.9310
80	0.1720	3.7830	-2.1520	-0.0480	-0.3840	82.2550
81	0.1200	1.7840	-0.6780	-0.0180	-0.5920	162.4710
82	0.6760	-1.2940	-2.7440	-0.0140	-0.1410	244.1670
83	0.1410	1.6860	-2.1070	0.1020	-0.1880	326.8611
84	-0.0200	-5.4490	-2.6950	0.0740	-0.1760	390.0830
85	0.1370	0.6270	-0.4700	0.1220	-0.6000	-1.2870
86	0.0430	1.7840	-1.2580	0.1060	-0.5020	-1.0920
87	0.1350	3.8020	-1.5680	0.0550	-0.1370	-83.4560
88	0.2100	-0.2940	-1.6760	-0.1380	-0.2470	-165.2680
89	0.2200	4.9780	-1.9290	0.1220	-0.1180	-247.3560
90	0.0860	1.0980	-2.3750	-0.0300	-0.2160	-328.9370
91	-0.0670	-0.7450	-1.6720	-0.0650	-0.5140	-390.2571
92	0.0780	1.2940	-2.2010	-0.2220	0.0510	-0.8690
93	0.2410	1.6660	-3.2950	-0.1940	0.0590	-1.1310
94	1022.5950	416.6370	-0.6590	-0.0430	-0.4700	0.0220
95	1022.4990	820.1030	-0.5940	-0.0490	-0.6900	-0.7840
96	1942.8621	421.9680	-0.1100	0.0310	-0.6980	-0.6150
97	1942.8049	818.5549	-2.0380	-0.0190	-0.0980	-1.6510
98	1022.8201	-407.8169	-0.3100	-0.1310	-0.5450	-0.7630
99	1022.8630	-820.6130	-2.0230	0.0760	-0.4700	-0.9870
100	1943.4260	-409.8159	-0.7960	0.1310	-0.4120	-0.7140
101	1943.0581	-820.1819	0.2000	0.1510	-0.5840	-1.3520
102	-1021.9399	421.0081	-0.2350	-0.0550	-0.5760	-0.9930
103	-1022.6001	818.4180	-2.1870	-0.0650	-0.2390	-2.2210
104	-1942.3799	418.8320	0.0800	-0.0610	-0.5800	-0.9810
105	-1942.3000	816.7520	-2.4030	-0.0350	-0.2040	-1.8350
106	-1022.5200	-404.4260	-3.0730	0.1260	-0.0980	-1.4940
107	-1022.6699	-821.3579	-1.1580	-0.1370	-0.6190	-1.2890
108	-1942.3899	-410.2080	-1.7070	0.0900	-0.0470	-1.4910
109	-1942.1499	-822.8860	-0.4190	-0.0140	-0.5720	-1.1410
110	0.2980	0.7640	-1.1470	-0.0220	-0.6390	-1.0730
111	0.1490	1.0980	-0.8700	-0.0440	-0.7020	-0.8310
112	1022.8730	-0.3720	1836.6431	-0.0610	-0.2270	-1.2530
113	1022.9121	2.4300	3679.9060	-0.0140	-0.1610	-0.9960
114	1942.9280	2.8620	1839.7971	0.0990	-0.5720	-1.6270
115	1942.9480	-0.8040	3682.5381	0.0850	-0.4190	-1.4900
116	1023.3259	0.3920	-1814.7500	-0.0360	4.5590	-1.0960
117	1023.2920	1.1560	-3620.3501	-0.0490	12.5240	-1.0370
118	1942.8459	-0.9800	-1840.4700	-0.0290	-0.3960	-1.5000

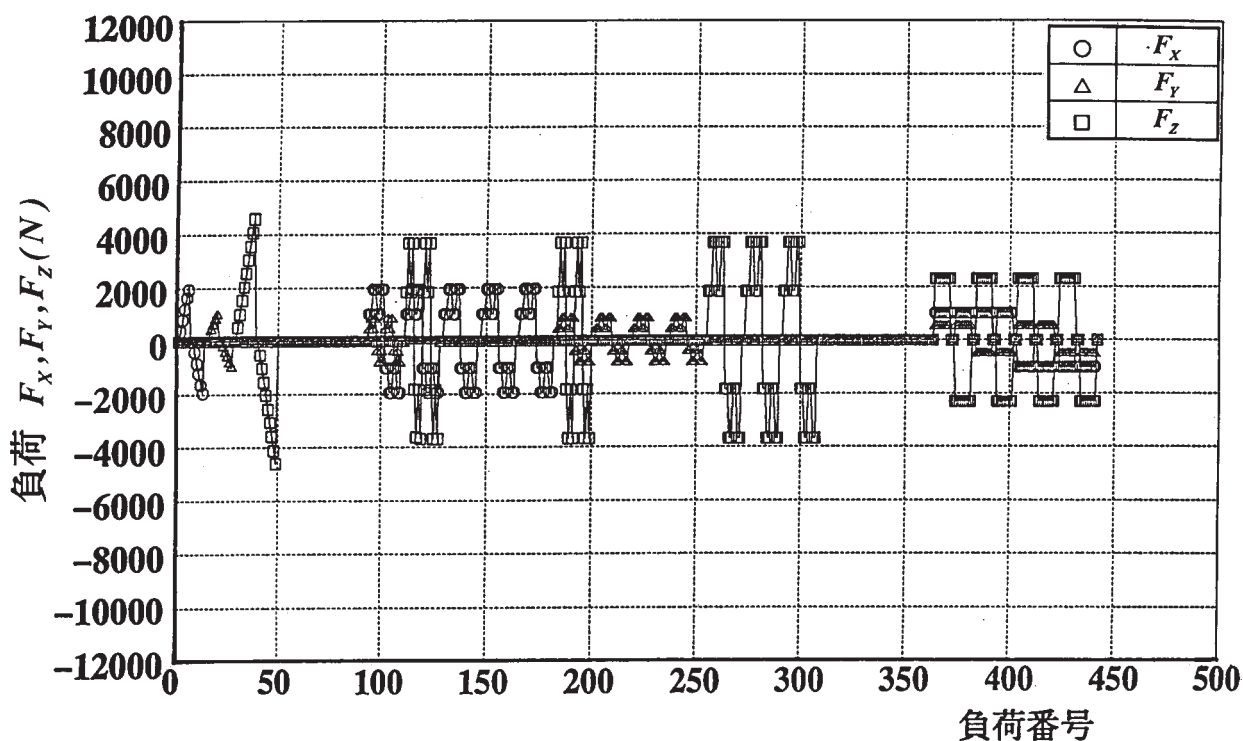


図7 較正試験時の負荷 F_x, F_y, F_z の例 (天秤3、較正試験日：H80722)

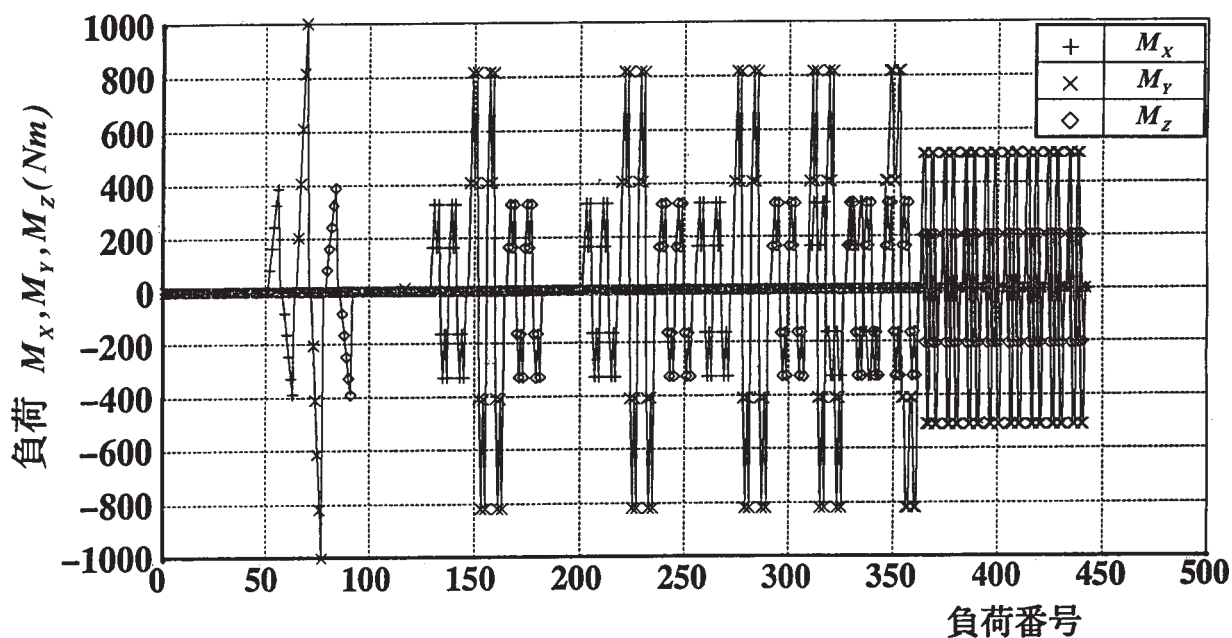


図8 較正試験時の負荷 M_x, M_y, M_z の例 (天秤3、較正試験日：H80722)

表3 姿勢復帰モータ変位データファイル (H80722.ORB) の例、天秤3 (60MT6-Z700-81)

H80722 (T=25C RH=XX%)
H80722.ORB
60MT6-700-81 (MHI)
442

	2000.0	1000.0	7000.0	400.0	1000.0	400.0
1	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	-0.0256	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	-0.0512	0.0000	0.0000	0.0000	0.0035	0.0000
5	-0.0768	0.0000	0.0000	0.0000	0.0035	0.0000
6	-0.0768	0.0000	0.0000	0.0000	0.0035	0.0000
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0035	0.0000
8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0035	0.0000
9	0.0123	0.0000	0.0000	0.0000	0.0035	0.0000
10	0.0259	0.0000	0.0000	0.0000	0.0035	0.0000
11	0.0355	0.0000	0.0000	0.0000	0.0035	0.0000
12	0.0511	0.0000	0.0000	0.0000	0.0035	0.0000
13	0.0611	0.0000	0.0000	0.0000	0.0035	0.0000
14	0.0091	0.0000	0.0000	0.0000	0.0035	0.0000
15	0.0091	0.0000	0.0000	0.0000	0.0035	0.0000
16	0.0091	-0.1024	-0.0768	0.0000	0.0035	0.0000
17	0.0091	-0.2560	-0.1280	0.0039	0.0035	0.0000
18	0.0091	-0.3840	-0.1792	0.0039	0.0035	0.0000
19	0.0091	-0.5376	-0.2560	0.0039	0.0035	0.0000
20	0.0091	-0.6400	-0.3072	0.0055	0.0035	0.0000
21	0.0052	-0.0768	-0.0256	0.0055	0.0035	0.0000
22	0.0052	-0.0768	-0.0256	0.0055	0.0035	0.0000
23	0.0052	0.0605	-0.0256	0.0055	0.0035	0.0000
24	0.0052	0.1518	0.0584	0.0055	0.0035	0.0000
25	0.0052	0.2485	0.1411	0.0055	0.0035	0.0000
26	0.0052	0.3924	0.1708	0.0055	0.0035	0.0000
27	0.0052	0.4782	0.2199	0.0055	0.0035	0.0000
28	0.0052	0.0032	0.0247	0.0055	0.0035	0.0000
29	0.0052	-0.0512	0.0248	0.0055	0.0035	0.0000
30	0.0000	-0.0512	0.0248	-0.2048	-0.0256	-0.1280
31	0.0000	-0.0512	0.0248	-0.4352	-0.0512	-0.1536
32	0.0000	-0.0512	0.0248	-0.6656	-0.0768	-0.1792
33	0.0000	-0.0512	0.0248	-0.8960	-0.1024	-0.2048
34	0.0000	-0.0512	0.0248	-1.1520	-0.1280	-0.2304
35	0.0000	-0.0512	0.0248	-1.4080	-0.1536	-0.2560
36	0.0000	-0.0512	0.0248	-1.6640	-0.1792	-0.2816
37	0.0000	-0.0512	0.0243	-1.9456	-0.1792	-0.3072
38	0.0000	-0.0512	0.0243	-2.2016	-0.1792	-0.3072
39	0.0161	-0.0512	0.0259	-0.0768	0.0324	-0.0512
40	0.0161	-0.0512	0.0259	-0.0768	0.0323	-0.0512
41	0.0127	-0.0512	0.0259	0.1596	0.0883	0.0054
42	0.0127	-0.0768	0.0259	0.4213	0.0903	0.0150
43	0.0127	-0.0768	0.0259	0.6633	0.1308	0.0576
44	0.0127	-0.1024	0.0259	0.9230	0.1214	0.0660
45	0.0084	-0.1024	0.0259	1.1953	0.1320	0.0791
46	0.0084	-0.1024	0.0259	1.4542	0.1927	0.1437
47	0.0042	-0.1024	0.0259	1.7142	0.2087	0.1665
48	0.0042	-0.1024	0.0036	2.0474	0.2379	0.2046
49	0.0004	-0.1024	0.0000	2.3092	0.2612	0.2344
50	-0.0256	-0.0768	0.0306	0.1803	-0.0256	-0.1280
51	0.0000	-0.0768	0.0306	0.1803	-0.0256	-0.1280
52	0.0000	-0.0256	-0.0256	0.1803	-0.4608	0.3337
53	0.0000	0.0097	-0.0768	0.1803	-1.0240	0.8894
54	0.0000	0.0679	-0.1536	0.1803	-1.6128	1.4702
55	0.0000	0.1215	-0.2048	0.1706	-2.2272	2.0768
56	0.0000	0.1666	-0.2560	0.1610	-2.6880	2.5480

表3(続) 姿勢復帰モータ変位データファイル(H80722.ORB)の例、天秤3(60MT6-Z700-81)

57	0.0000	-0.0768	0.0441	0.1459	-0.2304	0.0929
58	0.0000	-0.0768	0.0441	0.1459	-0.2304	0.0929
59	0.0000	-0.1280	0.1106	0.1459	0.3476	-0.4864
60	0.0000	-0.1792	0.1238	0.1459	0.9385	-1.0752
61	0.0000	-0.2304	0.1948	0.1459	1.5269	-1.6896
62	0.0000	-0.2816	0.3205	0.1459	2.1333	-2.3296
63	0.0000	-0.3072	0.3189	0.1459	2.5890	-2.7904
64	0.0000	-0.0768	0.0036	0.1337	0.1685	-0.3072
65	0.0000	-0.0768	0.0037	0.1337	0.1683	-0.3072
66	0.0167	-0.0512	0.0037	1.2452	-0.8448	-1.1520
67	0.0275	-0.0512	0.0037	2.4593	-1.8944	-2.1504
68	0.0427	-0.0512	0.0037	3.6857	-2.9696	-3.1744
69	0.0677	-0.0512	0.0037	4.9588	-4.0448	-4.2240
70	0.0973	-0.0512	0.0037	6.1091	-4.9920	-5.1712
71	-0.0256	-0.0768	0.0341	0.2274	-0.1280	-0.2560
72	0.0000	-0.0768	0.0341	0.2274	-0.1280	-0.2560
73	0.0000	-0.0768	0.0341	-1.0496	0.9263	0.8051
74	0.0019	-0.0512	-0.0256	-2.3296	1.9676	1.8796
75	0.0261	-0.0256	-0.0256	-3.6352	3.0261	2.9706
76	0.0560	0.0000	-0.0256	-4.9408	4.0773	4.0586
77	0.0964	0.0049	-0.0256	-6.1184	5.0339	5.0360
78	0.0167	-0.0512	-0.0256	-0.1280	0.1423	0.0501
79	0.0129	-0.0512	-0.0256	-0.1280	0.1422	0.0501
80	0.0091	-0.8704	0.7895	-0.1024	0.1422	0.0273
81	0.0091	-1.6896	1.5244	-0.0768	0.1422	-0.0256
82	0.0091	-2.5088	2.2709	-0.0512	0.1422	-0.0768
83	0.0218	-3.3280	2.9935	-0.0512	0.1738	-0.1024
84	0.0345	-3.9680	3.5568	-0.0512	0.1931	-0.1536
85	0.0065	-0.2048	0.0351	-0.0256	0.1364	-0.0768
86	0.0065	-0.2048	0.0352	-0.0256	0.1364	-0.0768
87	0.0065	0.6147	-0.7168	-0.0256	0.0776	-0.0512
88	0.0065	1.4594	-1.4848	-0.0256	0.0145	-0.0256
89	0.0203	2.3108	-2.2528	-0.0256	-0.0256	0.0241
90	0.0358	3.1693	-2.9952	0.0000	-0.1024	0.0690
91	0.0524	3.8107	-3.5584	0.0000	-0.1536	0.0947
92	0.0028	0.0267	0.0160	0.0090	-0.0256	0.0082
93	0.0028	0.0266	0.0160	0.0090	-0.0256	0.0083
94	-0.0512	-0.2304	-0.1536	0.0090	0.0000	0.0033
95	-0.0512	-0.5120	-0.2560	0.0090	0.0000	0.0033
96	-0.0768	-0.3328	-0.0768	0.0090	0.0000	0.0033
97	-0.0768	-0.5376	-0.2560	0.0090	0.0000	0.0033
98	-0.0512	0.1246	0.1694	0.0090	0.0000	0.0000
99	-0.0512	0.3477	0.2369	0.0090	0.0000	0.0000
100	-0.0768	0.1888	0.0883	0.0090	0.0000	0.0000
101	-0.0768	0.3698	0.2183	0.0090	0.0000	0.0000
102	0.0295	-0.2304	-0.1024	0.0090	0.0000	0.0000
103	0.0295	-0.5120	-0.2304	0.0090	0.0000	0.0000
104	0.0595	-0.3072	-0.0768	0.0090	0.0000	0.0000
105	0.0595	-0.5120	-0.2560	0.0090	0.0000	0.0000
106	0.0393	0.1498	0.1294	0.0090	0.0000	0.0000
107	0.0393	0.3586	0.2257	0.0090	0.0000	0.0000
108	0.0582	0.1961	0.0803	0.0090	0.0000	0.0000
109	0.0582	0.3782	0.2097	0.0090	0.0000	-0.0256
110	0.0041	-0.0256	0.0366	0.0090	0.0000	-0.0256
111	0.0041	-0.0256	0.0366	0.0090	0.0000	-0.0256
112	-0.0768	-0.0512	0.0366	-0.7936	-0.1024	-0.2048
113	-0.0768	-0.0512	0.0366	-1.7152	-0.1792	-0.2816
114	-0.0768	-0.0512	0.0366	-0.9728	-0.0256	-0.1280
115	-0.1024	-0.0512	0.0366	-1.7152	-0.1792	-0.2816
116	-0.0512	-0.1024	0.0249	0.8557	0.1112	0.0541
117	-0.0512	-0.1024	0.0249	1.8223	0.1927	0.1559
118	-0.1280	-0.1024	0.0249	1.0270	0.0583	-0.0256

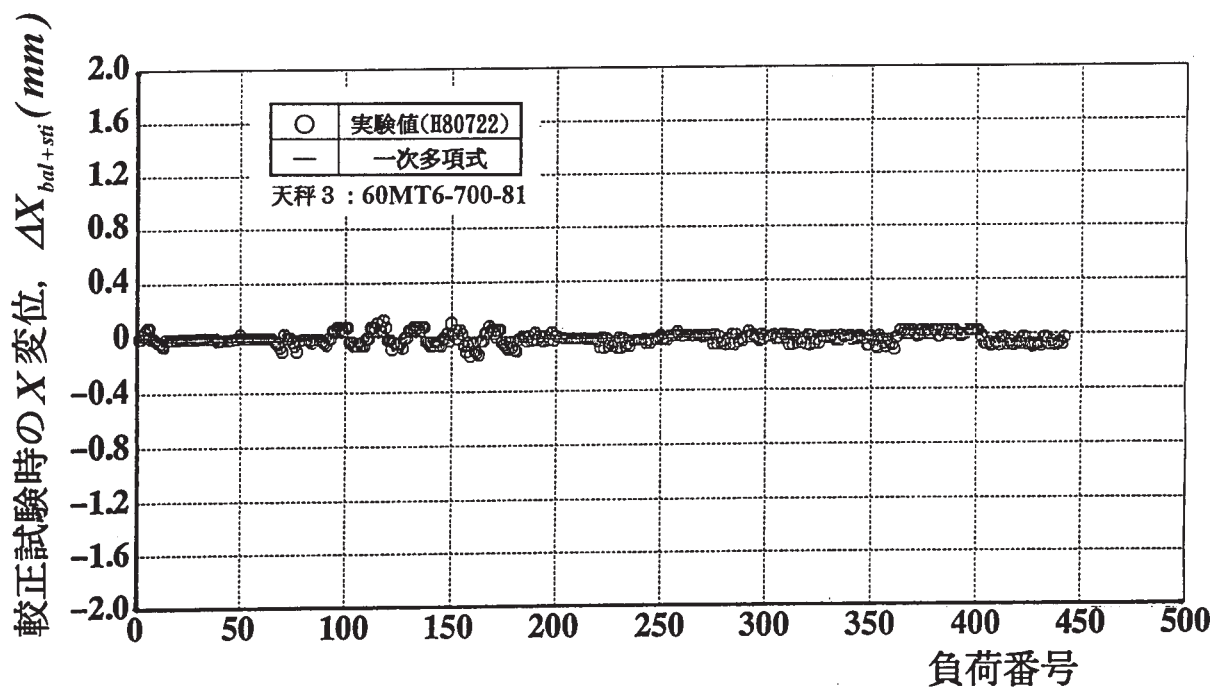


図9 天秤中心位置の X 変位の例 (天秤3、較正試験日: H80722)

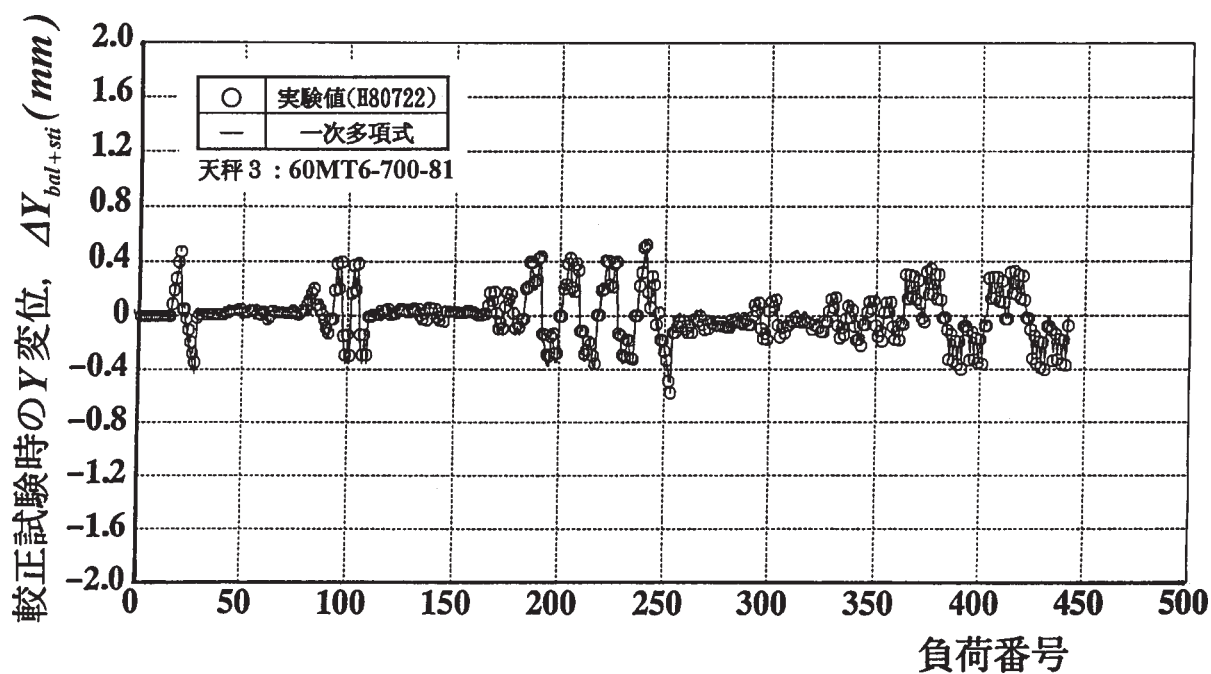


図10 天秤中心位置の Y 変位の例 (天秤3、較正試験日: H80722)

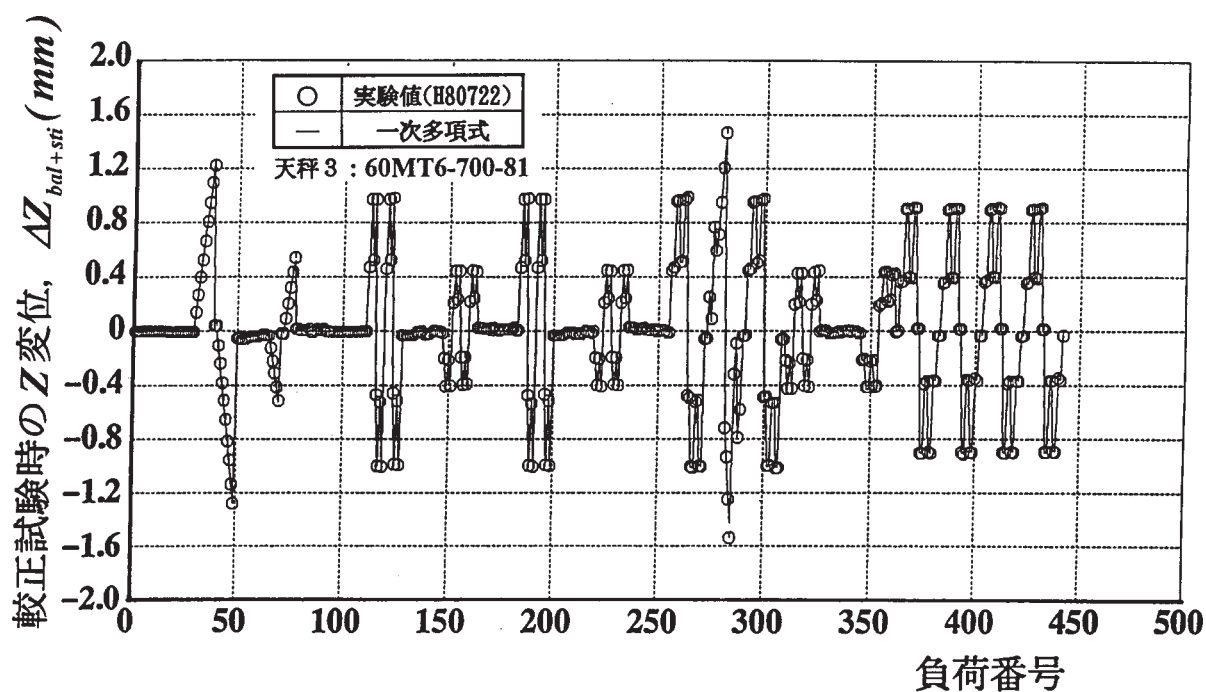


図 11 天秤中心位置の Z 変位の例 (天秤 3、較正試験日 : H80722)

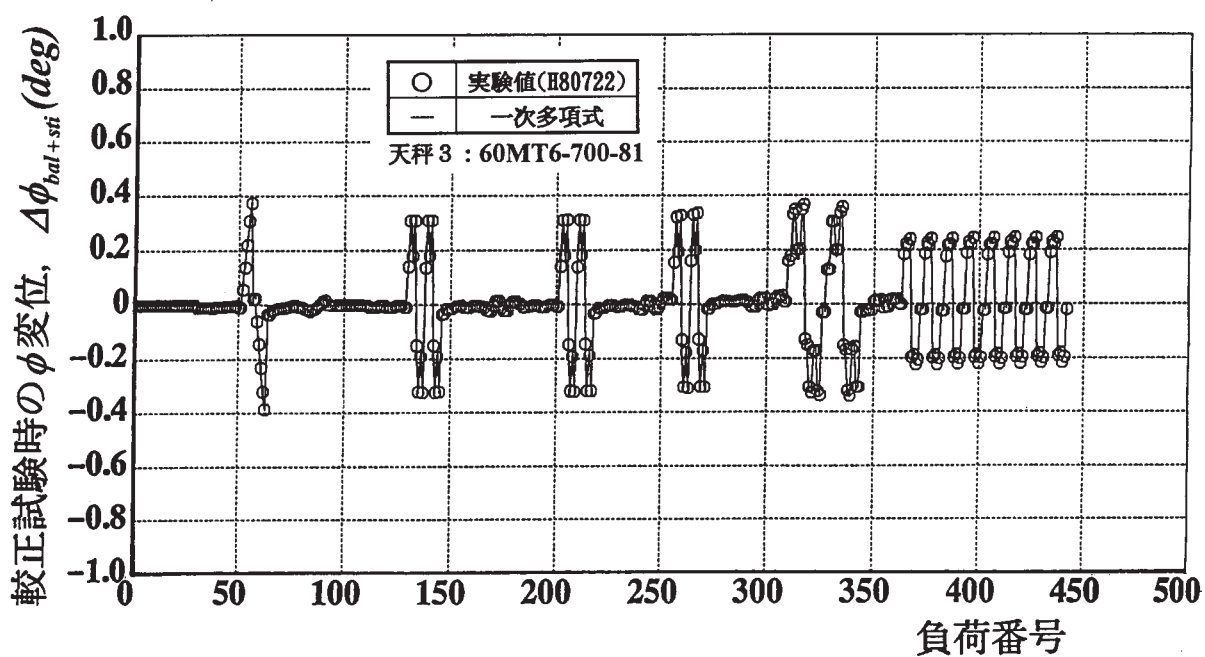


図 12 天秤中心位置の ϕ 変位の例 (天秤 3、較正試験日 : H80722)

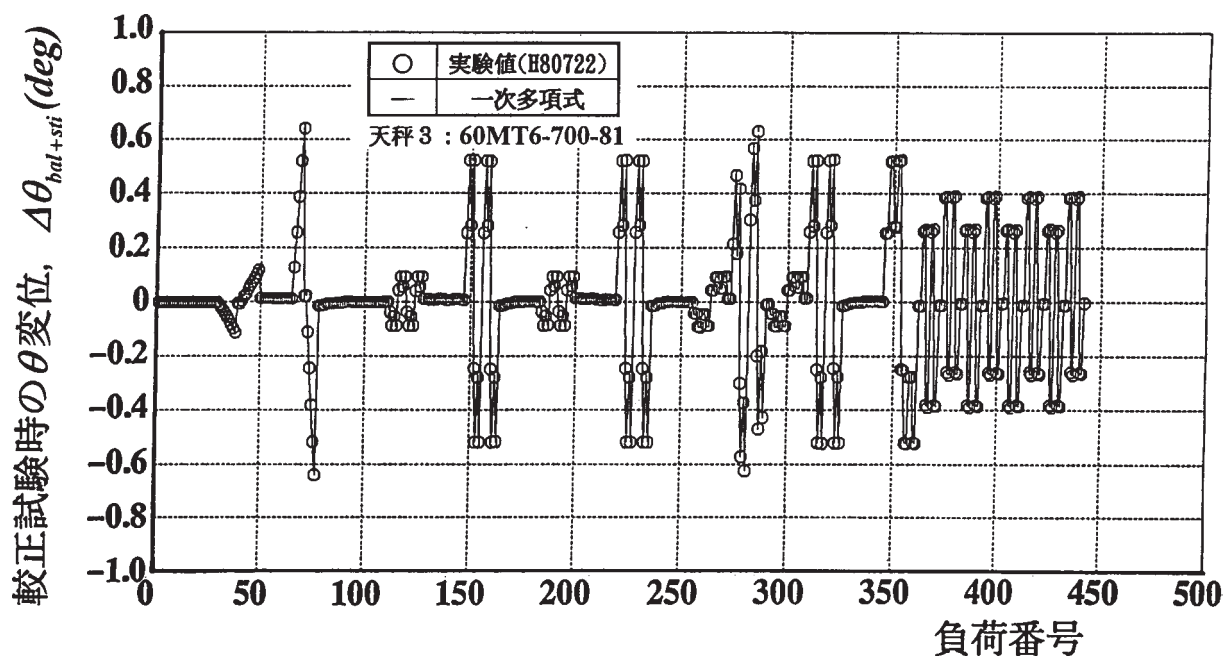


図13 天秤中心位置の θ 変位の例(天秤3、較正試験日:H80722)

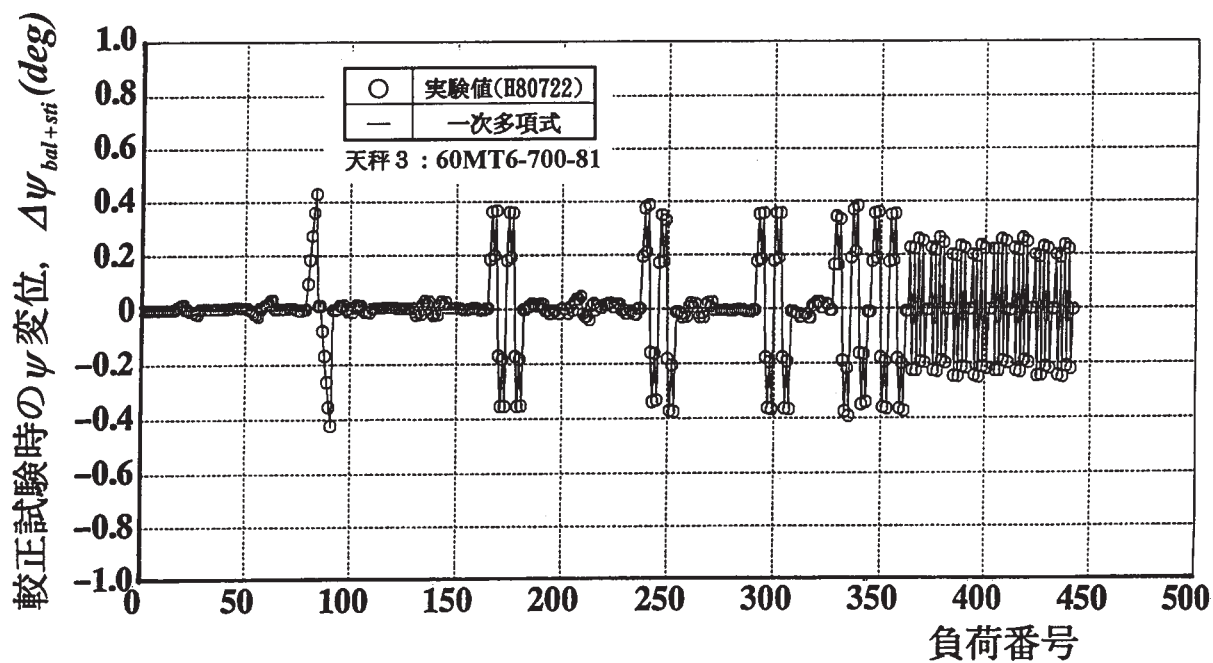


図14 天秤中心位置の ψ 変位の例(天秤3、較正試験日:H80722)

4 . 天秤たわみ式

4.1 線形定式化

負荷とたわみの関係を線形方程式で表示する場合は以下の通りである。天秤たわみ式の右辺の負荷の単位はN、Nmで左辺の弾性変位量の単位はmm及びdegとする。係数 D_i ($i=1-42$) は最小自乗法で決定する。

$$\Delta X_{bal+sti} = D_1 + D_2 F_X + D_3 F_Y + D_4 F_Z + D_5 M_X + D_6 M_Y + D_7 M_Z \quad (23)$$

$$\Delta Y_{bal+sti} = D_8 + D_9 F_X + D_{10} F_Y + D_{11} F_Z + D_{12} M_X + D_{13} M_Y + D_{14} M_Z \quad (24)$$

$$\Delta Z_{bal+sti} = D_{15} + D_{16} F_X + D_{17} F_Y + D_{18} F_Z + D_{19} M_X + D_{20} M_Y + D_{21} M_Z \quad (25)$$

$$\Delta \phi_{bal+sti} = D_{22} + D_{23} F_X + D_{24} F_Y + D_{25} F_Z + D_{26} M_X + D_{27} M_Y + D_{28} M_Z \quad (26)$$

$$\Delta \theta_{bal+sti} = D_{29} + D_{30} F_X + D_{31} F_Y + D_{32} F_Z + D_{33} M_X + D_{34} M_Y + D_{35} M_Z \quad (27)$$

$$\Delta \psi_{bal+sti} = D_{36} + D_{37} F_X + D_{38} F_Y + D_{39} F_Z + D_{40} M_X + D_{41} M_Y + D_{42} M_Z \quad (28)$$

4.2 非線形定式化

一次多項式表示の場合と比較する目的で二次多項式で記述する場合も取り上げておく。この場合の定式化は以下の通りである。

$$\begin{aligned} \Delta X_{bal+sti} = & D_1 + D_2 F_X + D_3 F_Y + D_4 F_Z + D_5 M_X + D_6 M_Y + D_7 M_Z \\ & + D_8 F_X^2 + D_9 F_Y^2 + D_{10} F_Z^2 + D_{11} M_X^2 + D_{12} M_Y^2 + D_{13} M_Z^2 \\ & + F_X(D_{14} F_Y + D_{15} F_Z + D_{16} M_X + D_{17} M_Y + D_{18} M_Z) \\ & + F_Y(D_{19} F_Z + D_{20} M_X + D_{21} M_Y + D_{22} M_Z) \\ & + F_Z(D_{23} M_X + D_{24} M_Y + D_{25} M_Z) \\ & + M_X(D_{26} M_Y + D_{27} M_Z) \\ & + D_{28} M_Y M_Z \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \Delta Y_{bal+sti} = & D_{29} + D_{30} F_X + D_{31} F_Y + D_{32} F_Z + D_{33} M_X + D_{34} M_Y + D_{35} M_Z \\ & + D_{36} F_X^2 + D_{37} F_Y^2 + D_{38} F_Z^2 + D_{39} M_X^2 + D_{40} M_Y^2 + D_{41} M_Z^2 \\ & + F_X(D_{42} F_Y + D_{43} F_Z + D_{44} M_X + D_{45} M_Y + D_{46} M_Z) \\ & + F_Y(D_{47} F_Z + D_{48} M_X + D_{49} M_Y + D_{50} M_Z) \\ & + F_Z(D_{51} M_X + D_{52} M_Y + D_{53} M_Z) \\ & + M_X(D_{54} M_Y + D_{55} M_Z) \\ & + D_{56} M_Y M_Z \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \Delta Z_{bal+sti} = & D_{57} + D_{58} F_X + D_{59} F_Y + D_{60} F_Z + D_{61} M_X + D_{62} M_Y + D_{63} M_Z \\ & + D_{64} F_X^2 + D_{65} F_Y^2 + D_{66} F_Z^2 + D_{67} M_X^2 + D_{68} M_Y^2 + D_{69} M_Z^2 \\ & + F_X(D_{70} F_Y + D_{71} F_Z + D_{72} M_X + D_{73} M_Y + D_{74} M_Z) \\ & + F_Y(D_{75} F_Z + D_{76} M_X + D_{77} M_Y + D_{78} M_Z) \\ & + F_Z(D_{79} M_X + D_{80} M_Y + D_{81} M_Z) \\ & + M_X(D_{82} M_Y + D_{83} M_Z) \\ & + D_{84} M_Y M_Z \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \Delta \phi_{bal+sti} = & D_{85} + D_{86} F_X + D_{87} F_Y + D_{88} F_Z + D_{89} M_X + D_{90} M_Y + D_{91} M_Z \\ & + D_{92} F_X^2 + D_{93} F_Y^2 + D_{94} F_Z^2 + D_{95} M_X^2 + D_{96} M_Y^2 + D_{97} M_Z^2 \\ & + F_X(D_{98} F_Y + D_{99} F_Z + D_{100} M_X + D_{101} M_Y + D_{102} M_Z) \\ & + F_Y(D_{103} F_Z + D_{104} M_X + D_{105} M_Y + D_{106} M_Z) \\ & + F_Z(D_{107} M_X + D_{108} M_Y + D_{109} M_Z) \\ & + M_X(D_{110} M_Y + D_{111} M_Z) \\ & + D_{112} M_Y M_Z \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \Delta \theta_{bal+sti} = & D_{113} + D_{114} F_X + D_{115} F_Y + D_{116} F_Z + D_{117} M_X + D_{118} M_Y + D_{119} M_Z \\ & + D_{120} F_X^2 + D_{121} F_Y^2 + D_{122} F_Z^2 + D_{123} M_X^2 + D_{124} M_Y^2 + D_{125} M_Z^2 \\ & + F_X(D_{126} F_Y + D_{127} F_Z + D_{128} M_X + D_{129} M_Y + D_{130} M_Z) \\ & + F_Y(D_{131} F_Z + D_{132} M_X + D_{133} M_Y + D_{134} M_Z) \\ & + F_Z(D_{135} M_X + D_{136} M_Y + D_{137} M_Z) \\ & + M_X(D_{138} M_Y + D_{139} M_Z) \\ & + D_{140} M_Y M_Z \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \Delta \psi_{bal+sti} = & D_{141} + D_{142} F_X + D_{143} F_Y + D_{144} F_Z + D_{145} M_X + D_{146} M_Y + D_{147} M_Z \\ & + D_{148} F_X^2 + D_{149} F_Y^2 + D_{150} F_Z^2 + D_{151} M_X^2 + D_{152} M_Y^2 + D_{153} M_Z^2 \\ & + F_X(D_{154} F_Y + D_{155} F_Z + D_{156} M_X + D_{157} M_Y + D_{158} M_Z) \\ & + F_Y(D_{159} F_Z + D_{160} M_X + D_{161} M_Y + D_{162} M_Z) \\ & + F_Z(D_{163} M_X + D_{164} M_Y + D_{165} M_Z) \\ & + M_X(D_{166} M_Y + D_{167} M_Z) \\ & + D_{168} M_Y M_Z \end{aligned} \quad (34)$$

4.3 線形表示と非線形表示の比較

天秤較正試験で得られた天秤とスティングの結合状態での変位データをもとにたわみ特性を調べてみる。先に述べた手続きで負荷と変位に関するデータ群が得られるので、このデータをもとに両者の関係を線形多項式で表現した場合と二次の多項式で表現した場合との比較を示す。例として天秤3 (60MT6-Z700-81) について示す。本天秤については成分負荷のみによる較正試験を2回、複合荷重による較正試験を2回行っている。従って1次の天秤たわみ特性式には4ケースのファイルデータが利用できるが、2次のたわみ特性式に対しては複合荷重による2ケースのファイルデータだけを利用した。始めに1次のたわみ式(23) - (28)を当てはめた場合の係数 D_i ($i=1-42$) について6成分変位に対して図15 - 図20に示した。横軸に係数を、縦軸にその大きさを記してある。図中4ケースの試験データは再現性を確認する目的で重ねがきで記してある。この結果から以下の点が明らかになった。

軸方向変位 $\Delta X_{bal+sti}$ に係わる係数 D_i はいずれも極めて小さいがあえて探し出すとすれば D_2 (F_X の係数) が興味の対象となる。横方向変位 $\Delta Y_{bal+sti}$ に係わる係数では D_{10} (F_Y の係数) と D_{14} (M_Z の係数) が卓越している。同様に垂直方向変位 $\Delta Z_{bal+sti}$ に係わる係数としては D_{18} (F_Z の係数) と D_{20} (M_Y の係数) が、横揺れ方向変位 $\Delta \phi_{bal+sti}$ では D_{26} (M_X の係数) が、縦揺れ方向変位 $\Delta \theta_{bal+sti}$ については D_{34} (M_Y の係数) が、偏揺れ方向変位 $\Delta \psi_{bal+sti}$ では D_{42} (M_Z の係数) が目立つ。ここでは天秤3の具体例について述べたが一般にはこの他に、縦揺れ方向変位 $\Delta \theta_{bal+sti}$ については D_{32} (F_Z の係数) も、偏揺れ方向変位 $\Delta \psi_{bal+sti}$ については D_{38} (F_Y の係数) も卓越する。次に式(29) - 式(34)で示した2次多項式の係数 D_i ($i=1-168$) を決定した結果を図21 - 図26に示した。この場合は2回の複合荷重による試験データの重ねがきで示してある。解析結果では天秤特性を非線型多項式で表示しても二次項の係数 D_i は6成分変位ともすべて極めて小さな量であることがわかる。また線形、非線型双方の数式モデルにおける一次の項の対応係数を比較してもほぼ同じ値が得られている。実際の弾性変位はこの係数に荷重を掛けたものであるので、以下に具体的な変位を比較しておく。各天秤の荷重 $F_X, F_Y, F_Z, M_X, M_Y, M_Z$ に対する定格値は表2に示した通りであり、以下では各成分に定格荷重を加えたときの変位の比較を行う。始めに軸方向変位について、1次多項式の各項の大きさの比較を図27に示した。横軸に各項を並べ、縦軸は各項の変位の大きさである。同様に他の5成分の変位については図28 - 図32に示した。非線型項の影響を見る

目的でたわみを二次多項式で表現した場合を図33 - 図38に示した。係数 D_i について両関数モデルの場合の比較を先に行ったが、負荷そのものについても非線型項の影響は極めて小さいと結論できる。従って天秤の変位を表現するには一次の多項式で実用上充分である。

この傾向は天秤1 (LMC6522-50/Z1000S)、天秤2 (B660H) についても同様であり、天秤1 (LMC6522-50/Z1000S) について1次多項式で表現したときの各項の変位の比較を図39 - 図44に、天秤2 (B660H) については図45 - 図50に示した。ここで天秤3体の定格荷重時の変位(剛性)の大きさを相互比較する場合に、全ての1次項を取り上げる必要はなく以下の10項が卓越しておりそれらの比較で充分であることが分かる。

$F_{X(max)}$ を加えたときの変位: $D_2 F_{X(max)}$

$F_{Y(max)}$ を加えたときの変位: $D_{10} F_{Y(max)}$

$M_{Z(max)}$ を加えたときの変位: $D_{14} M_{Z(max)}$

$F_{Z(max)}$ を加えたときの変位: $D_{18} F_{Z(max)}$

$M_{Y(max)}$ を加えたときの変位: $D_{20} M_{Y(max)}$

$M_{X(max)}$ を加えたときの変位: $D_{26} M_{X(max)}$

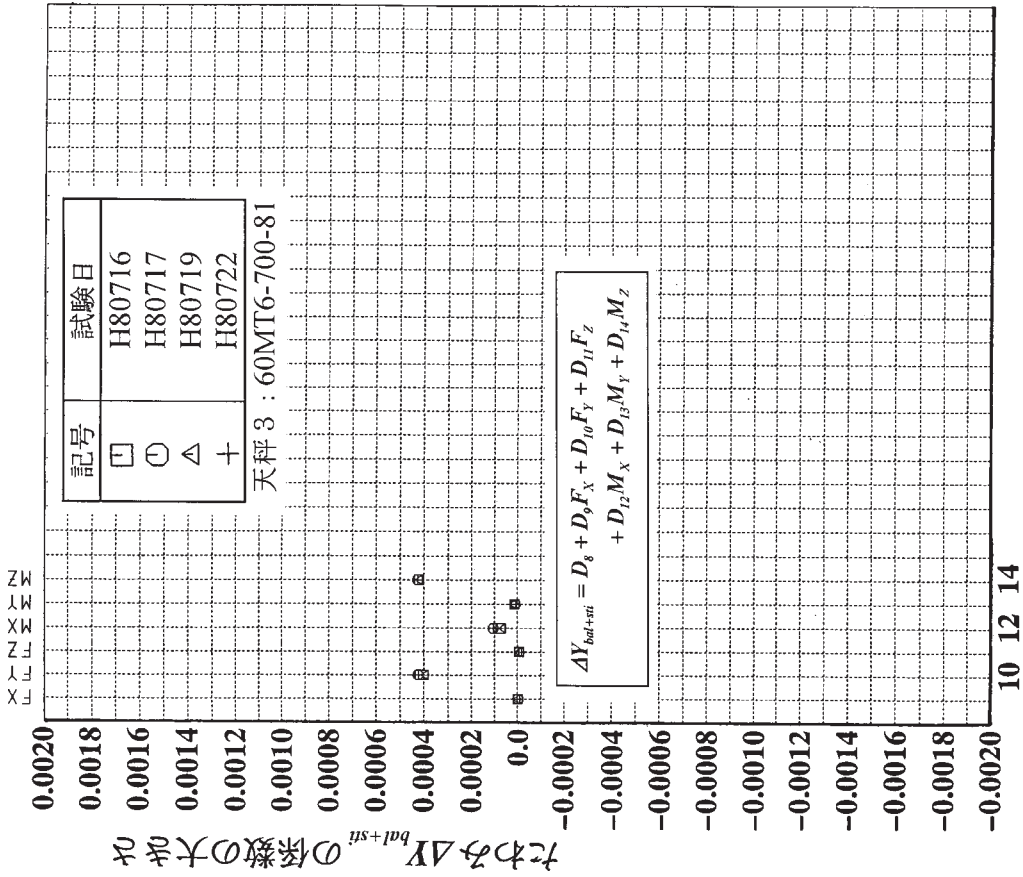
$F_{Z(max)}$ を加えたときの変位: $D_{32} F_{Z(max)}$

$M_{Y(max)}$ を加えたときの変位: $D_{34} M_{Y(max)}$

$F_{Y(max)}$ を加えたときの変位: $D_{38} F_{Y(max)}$

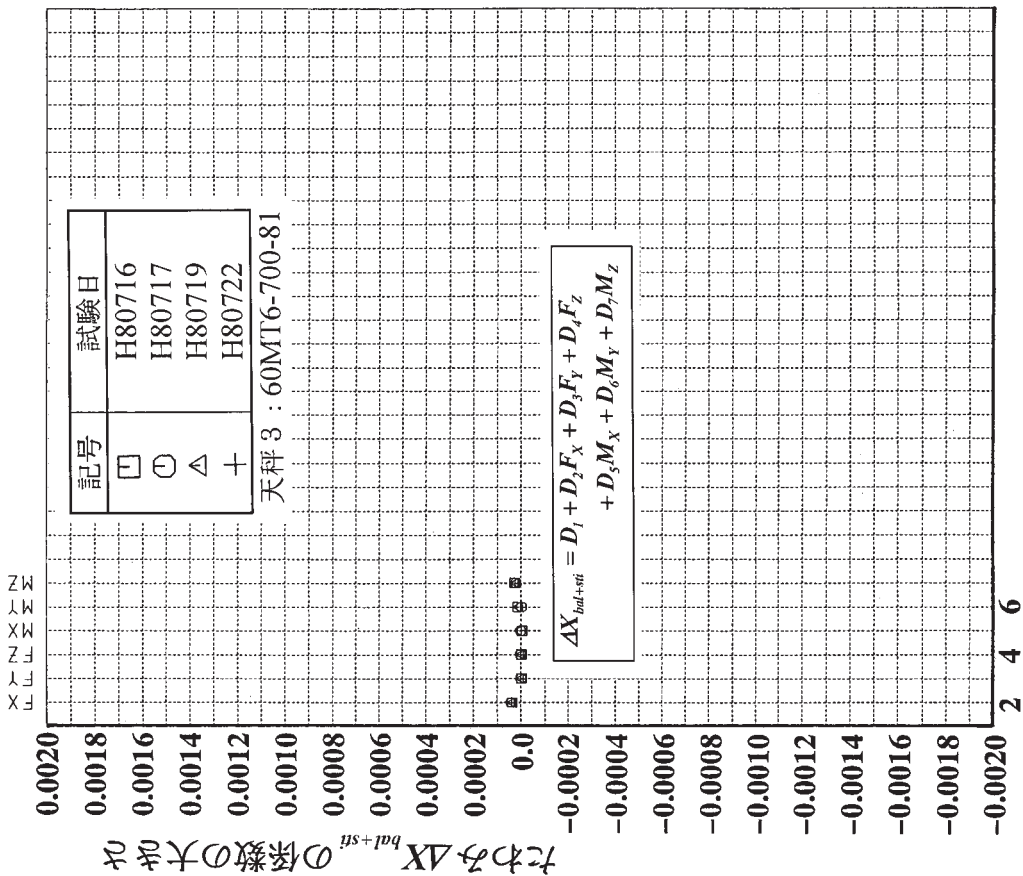
$M_{Z(max)}$ を加えたときの変位: $D_{42} M_{Z(max)}$

また天秤とスティングの結合状態での試験結果からデータの再現性もよく、天秤較正試験時の姿勢復帰モータの動きから天秤剛性を決定出来ることが分かる。



D_2, \dots, D_7 の各係数

図 15 天秤 3 に対して X 変位を一次多項式で表示した時の
たわみ係数の大きさ ($D_2 - D_7$)



D_9, \dots, D_{14} の各係数

図 16 天秤 3 に対して Y 変位を一次多項式で表示した時の
たわみ係数の大きさ ($D_9 - D_{14}$)

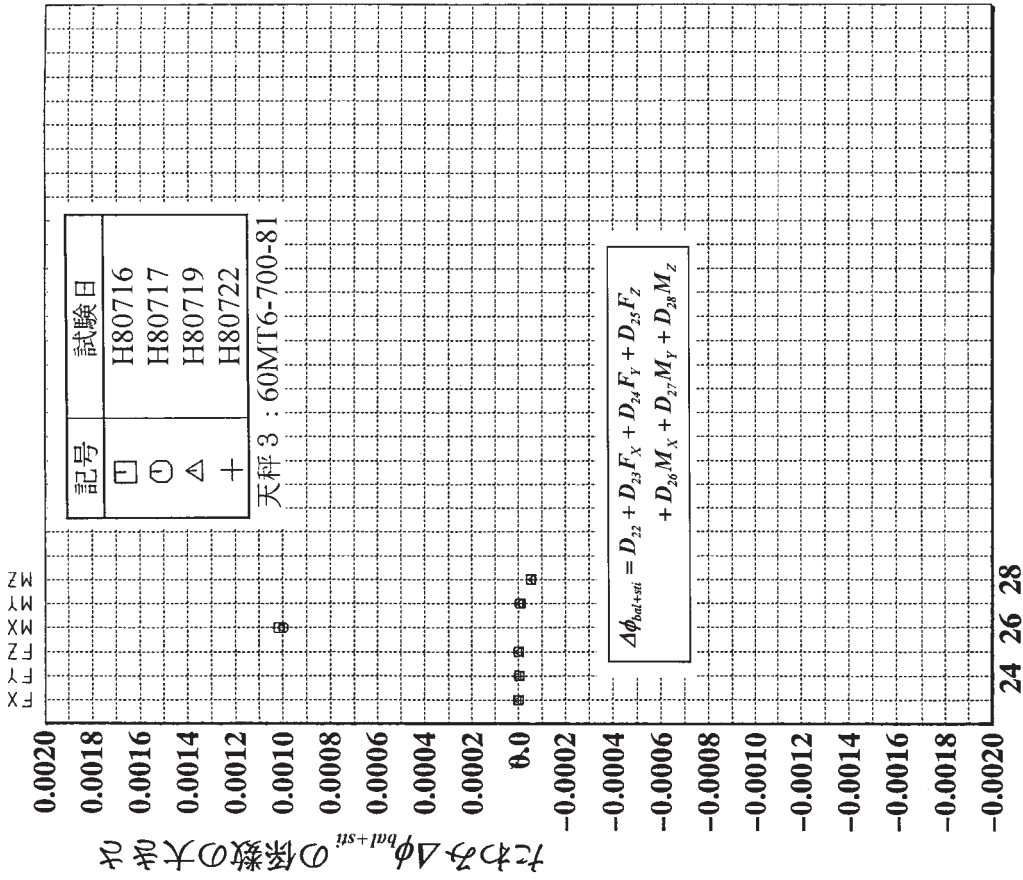


図 17 天秤 3 に対して Z 変位を一次多項式で表示した時の
たわみ係数の大きさ ($D_{16} - D_{21}$)

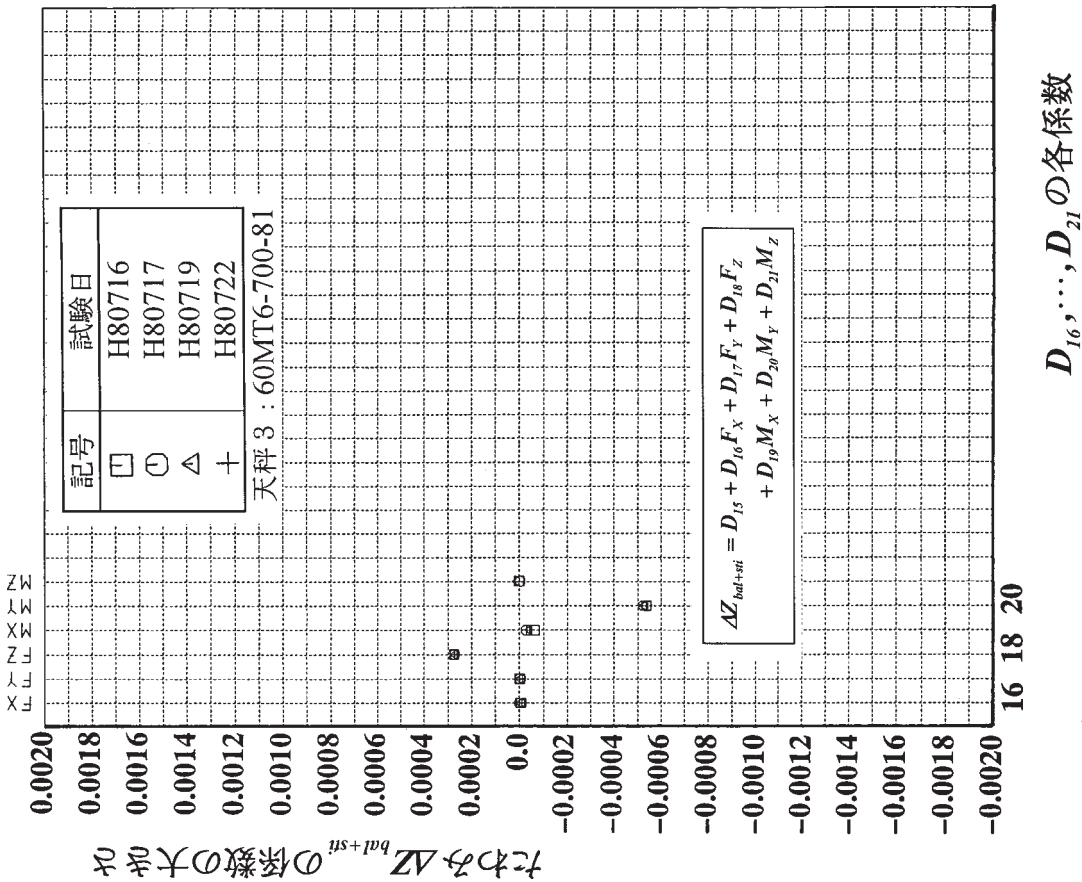
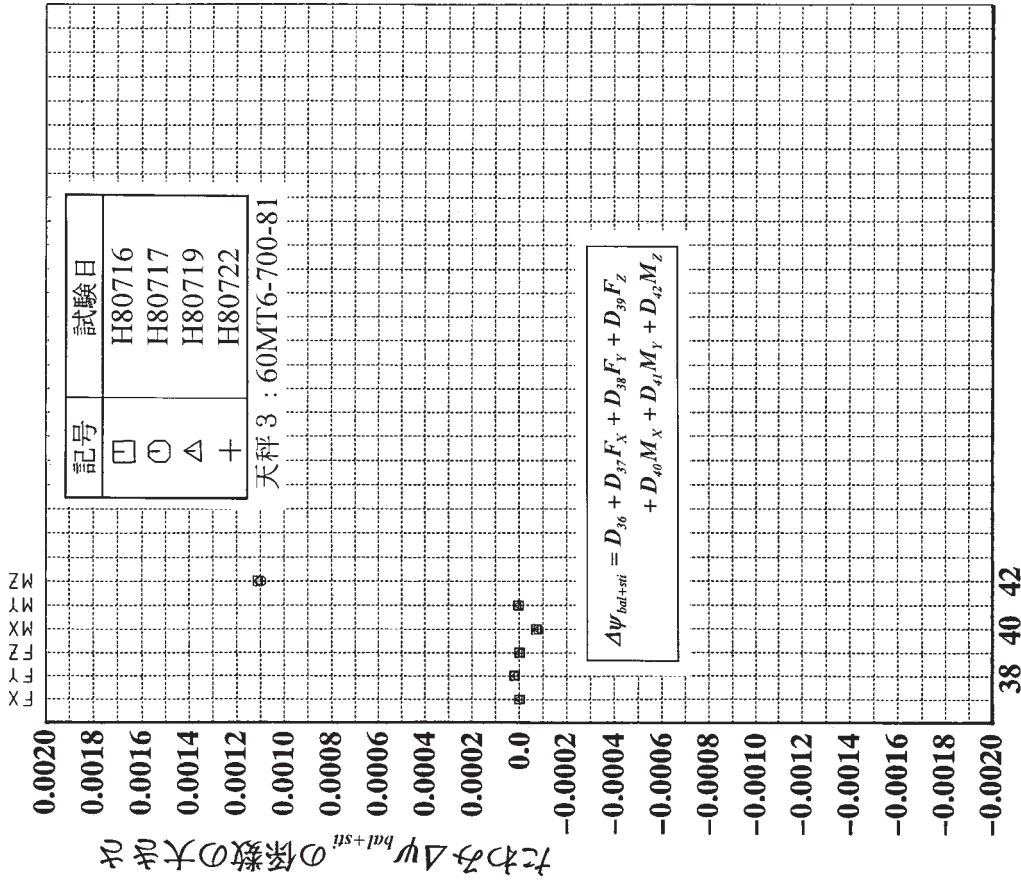
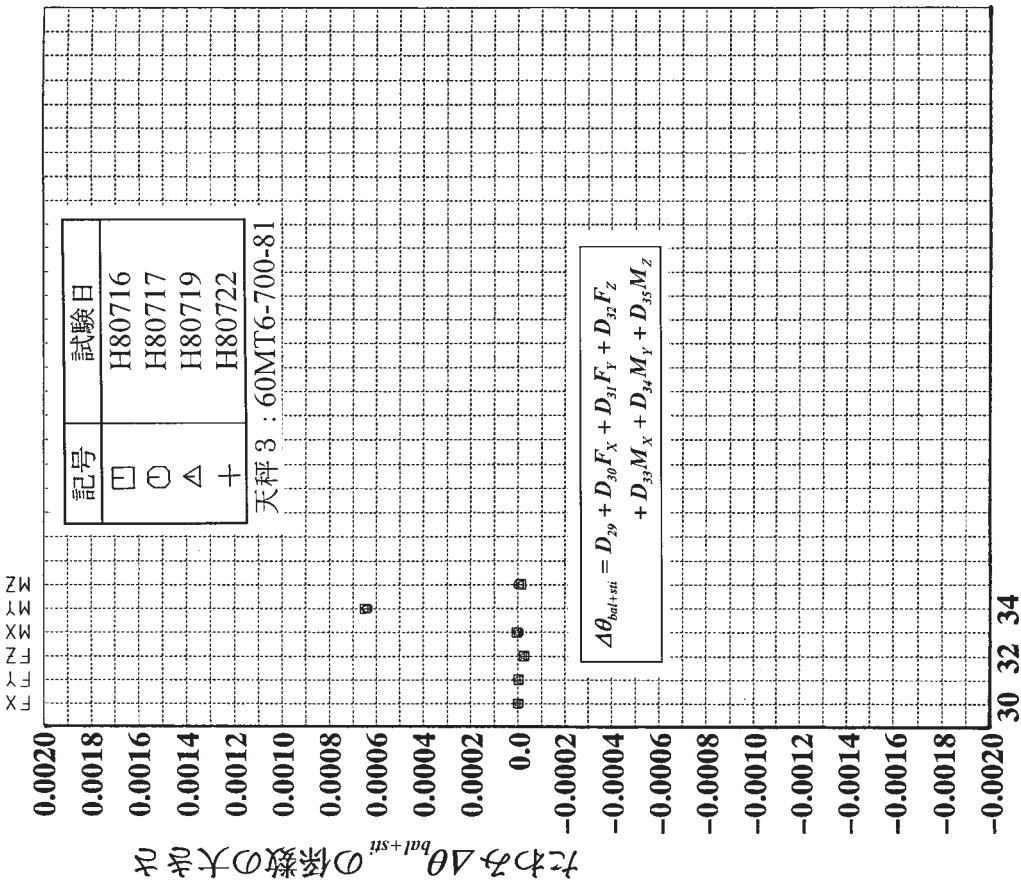


図 18 天秤 3 に対して ϕ 変位を一次多項式で表示した時の
たわみ係数の大きさ ($D_{23} - D_{28}$)



D_{37}, \dots, D_{42} の各係数

図 20 天秤 3 に対して ψ 変位を一次多項式で表示した時の
たわみ係数の大きさ ($D_{37} - D_{42}$)



D_{30}, \dots, D_{35} の各係数

図 19 天秤 3 に対して θ 変位を一次多項式で表示した時の
たわみ係数の大きさ ($D_{30} - D_{36}$)

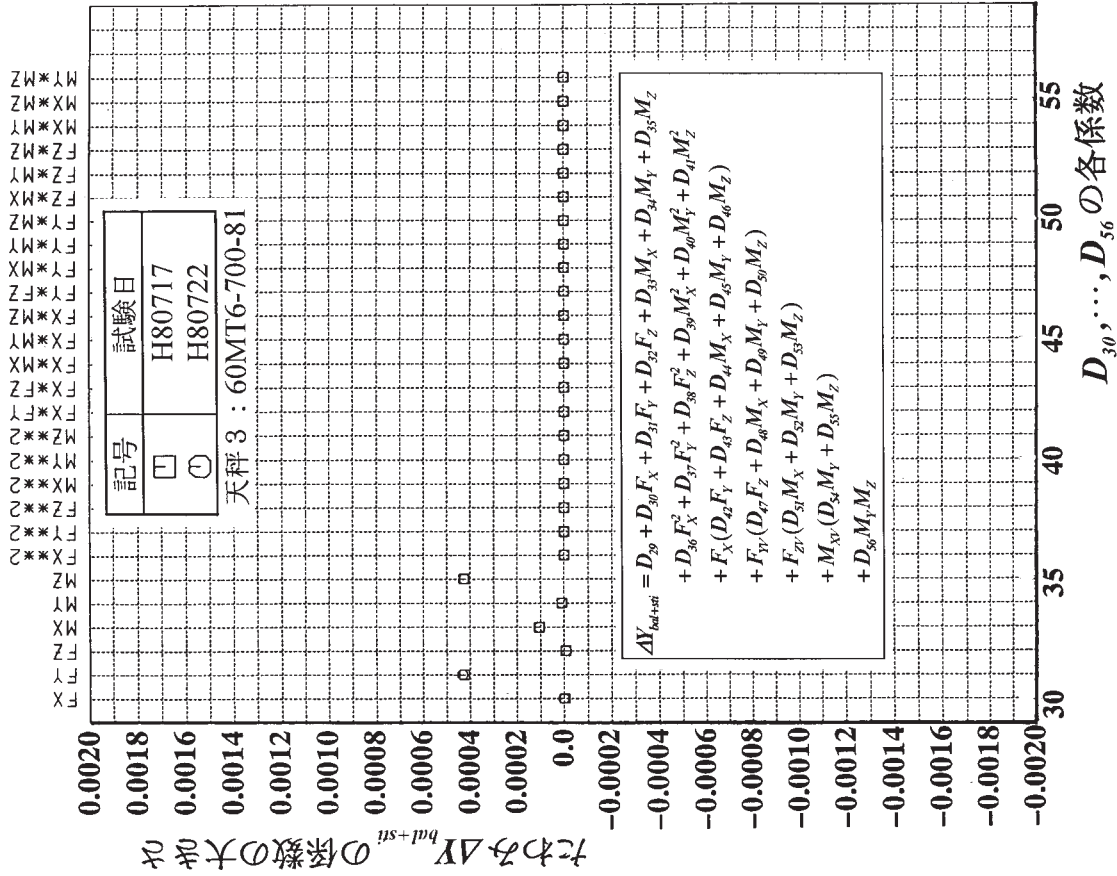


図 22 天秤 3 に対して Y 変位を二次多項式で表示した時の
たわみ係数の大きさ ($D_{30} - D_{56}$)

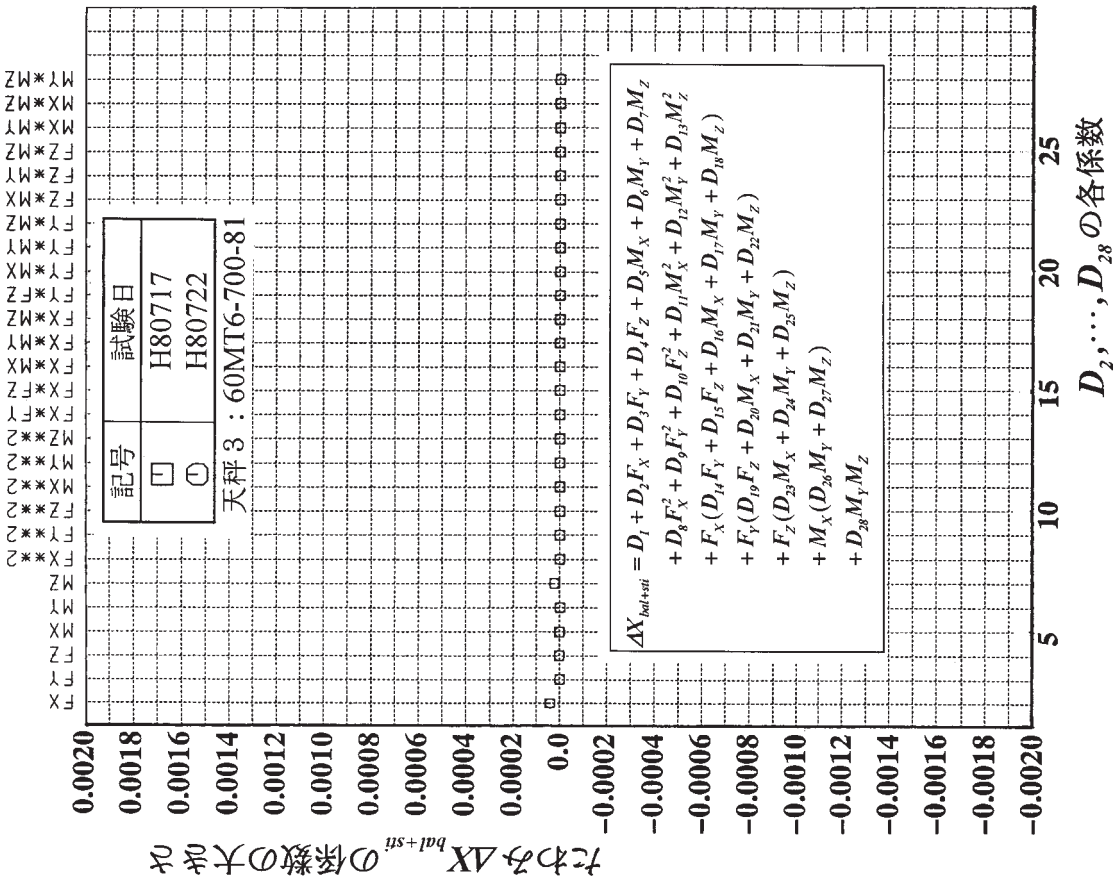


図 21 天秤 3 に対して X 変位を二次多項式で表示した時の
たわみ係数の大きさ ($D_2 - D_{28}$)

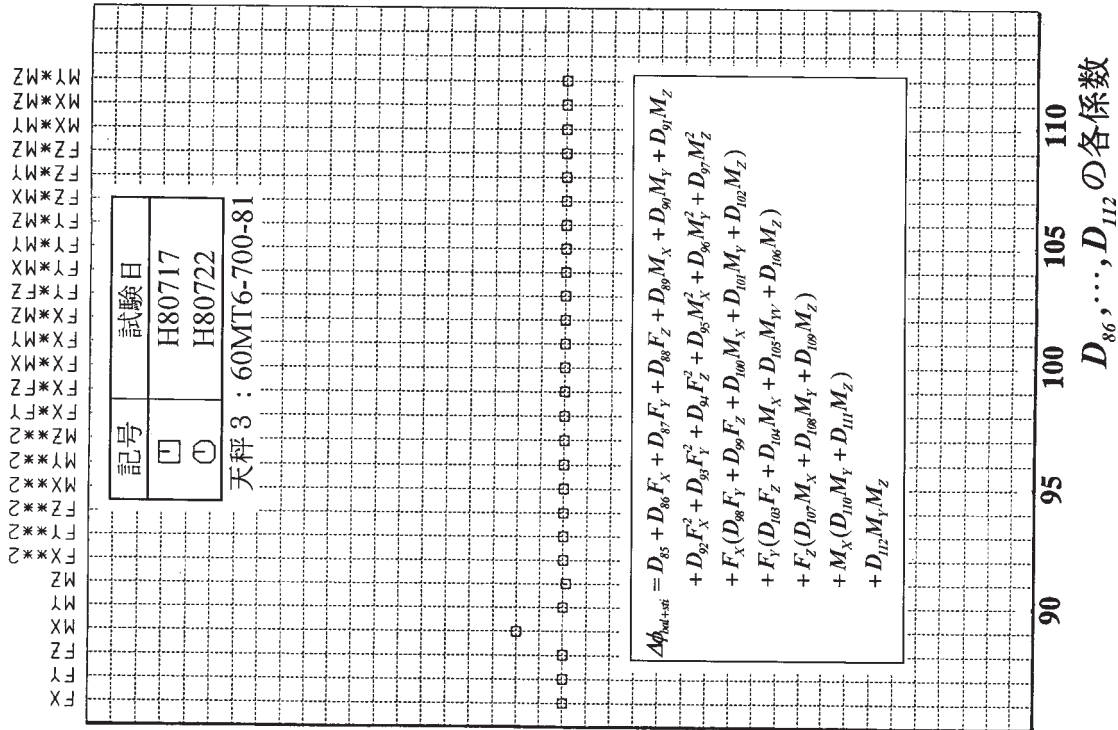


図 24 天秤 3 に対して φ 変位を二次多項式で表示した時の
たわみ係数の大きさ (D₈₆ - D₁₁₂)

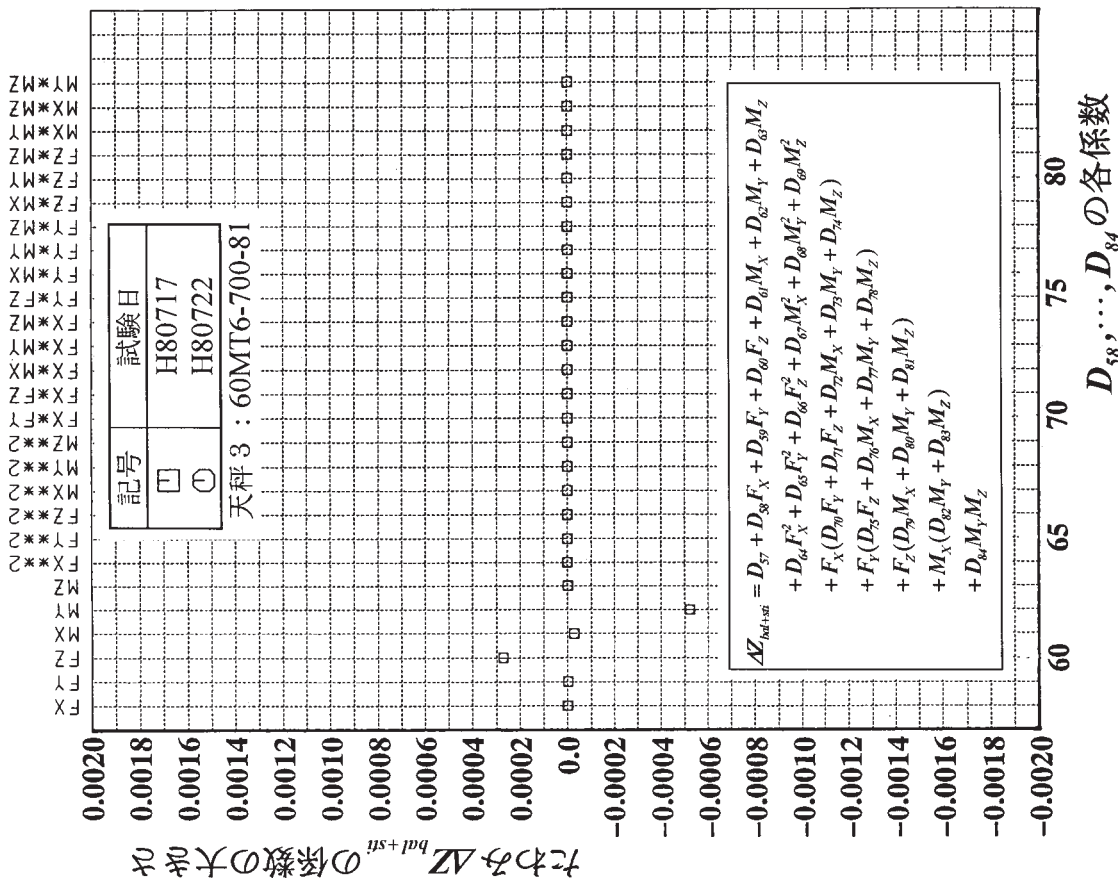


図 23 天秤 3 に対して Z 変位を二次多項式で表示した時の
たわみ係数の大きさ (D₅₈ - D₈₄)

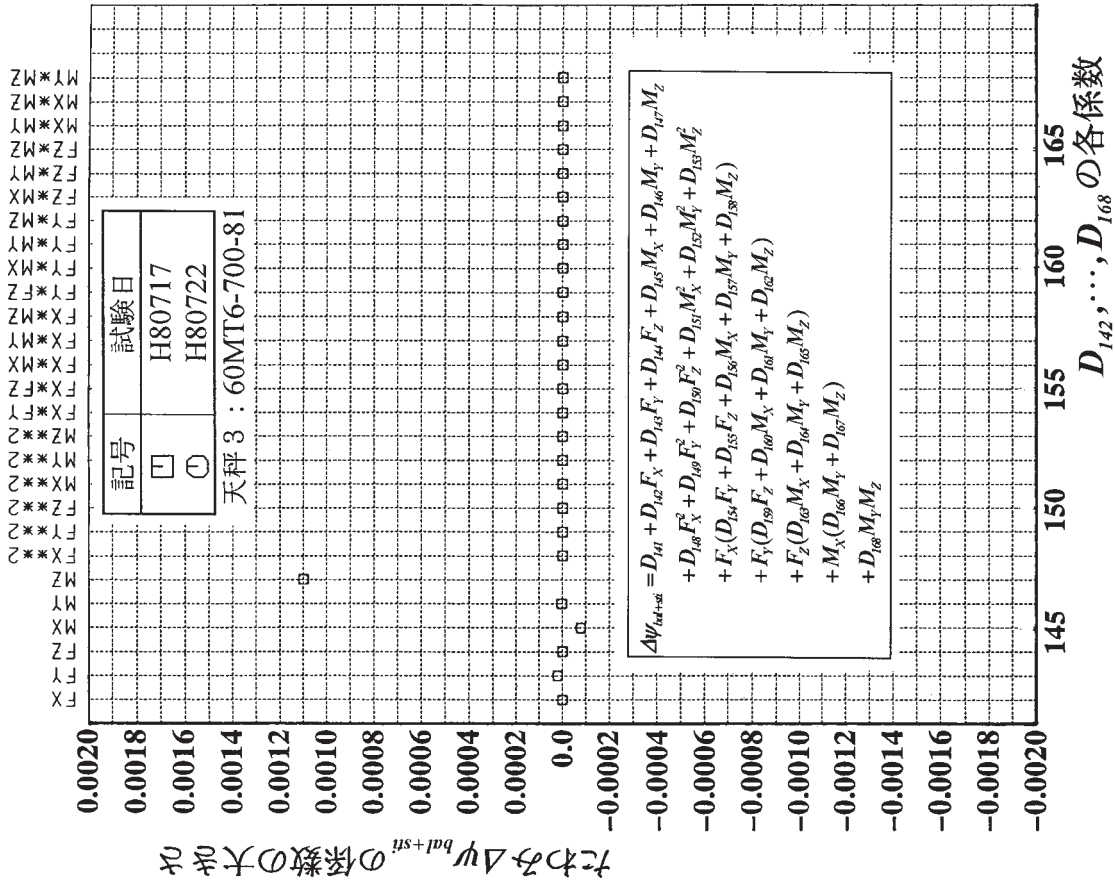


図 26 天秤 3 に対して ψ 変位を二次多項式で表示した時のたわみ係数の大きさ (D_{142}, \dots, D_{168} の各係数)

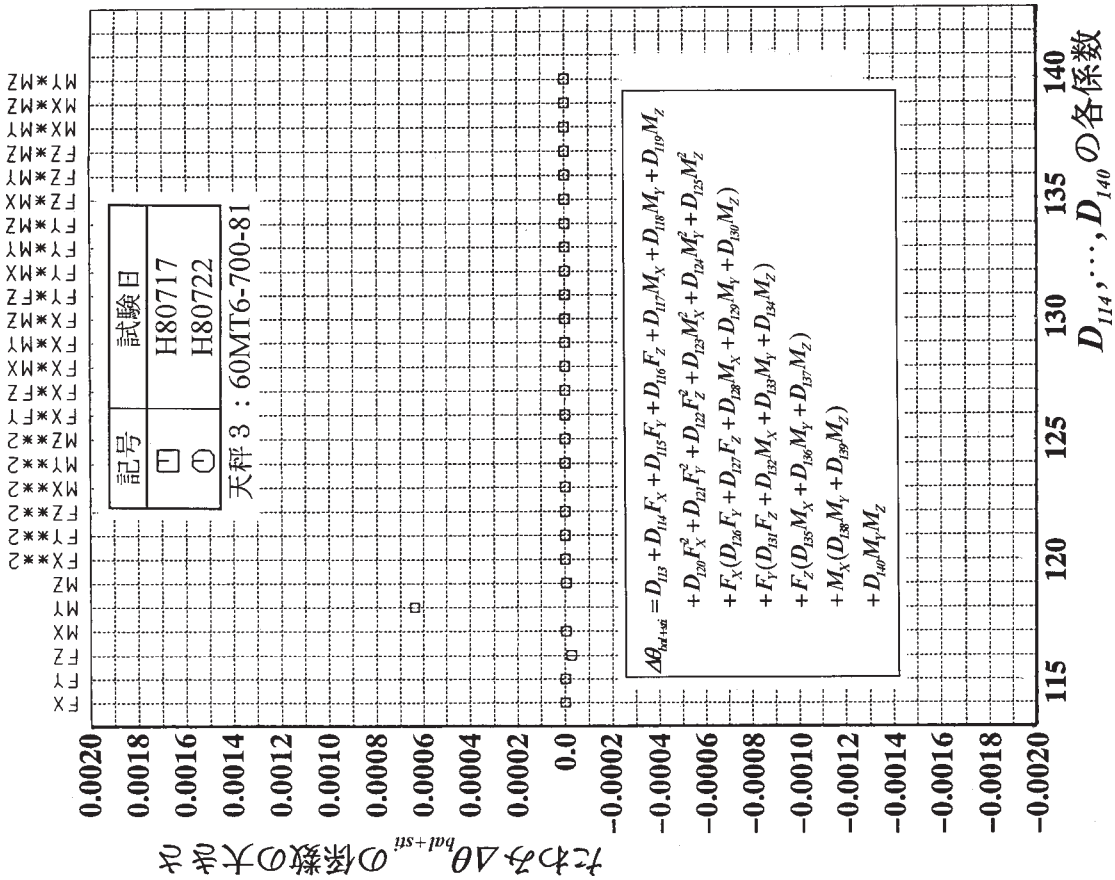


図 25 天秤 3 に対して θ 変位を二次多項式で表示した時のたわみ係数の大きさ (D_{114}, \dots, D_{140} の各係数)

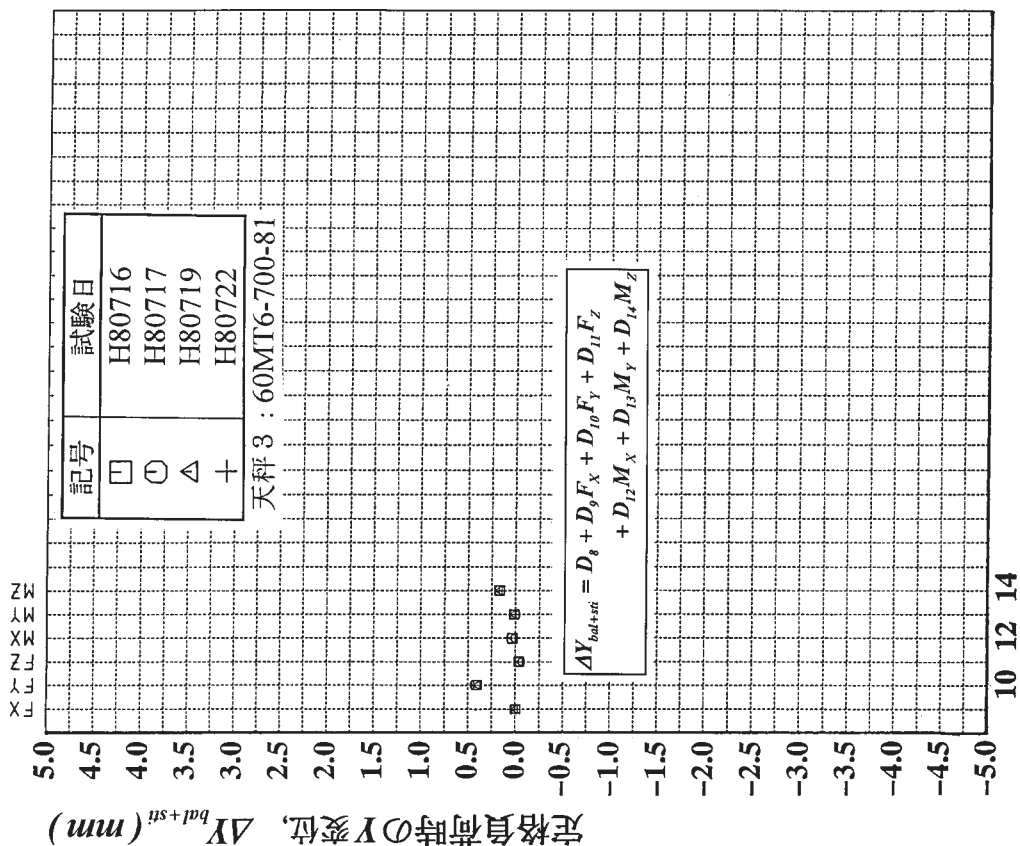


図 27 天秤 3 に対して X 変位を一次多項式で表示した時の
定格負荷時の各項の大きさ比較 ($D_2 F_{X(max)} - D_7 M_{Z(max)}$)

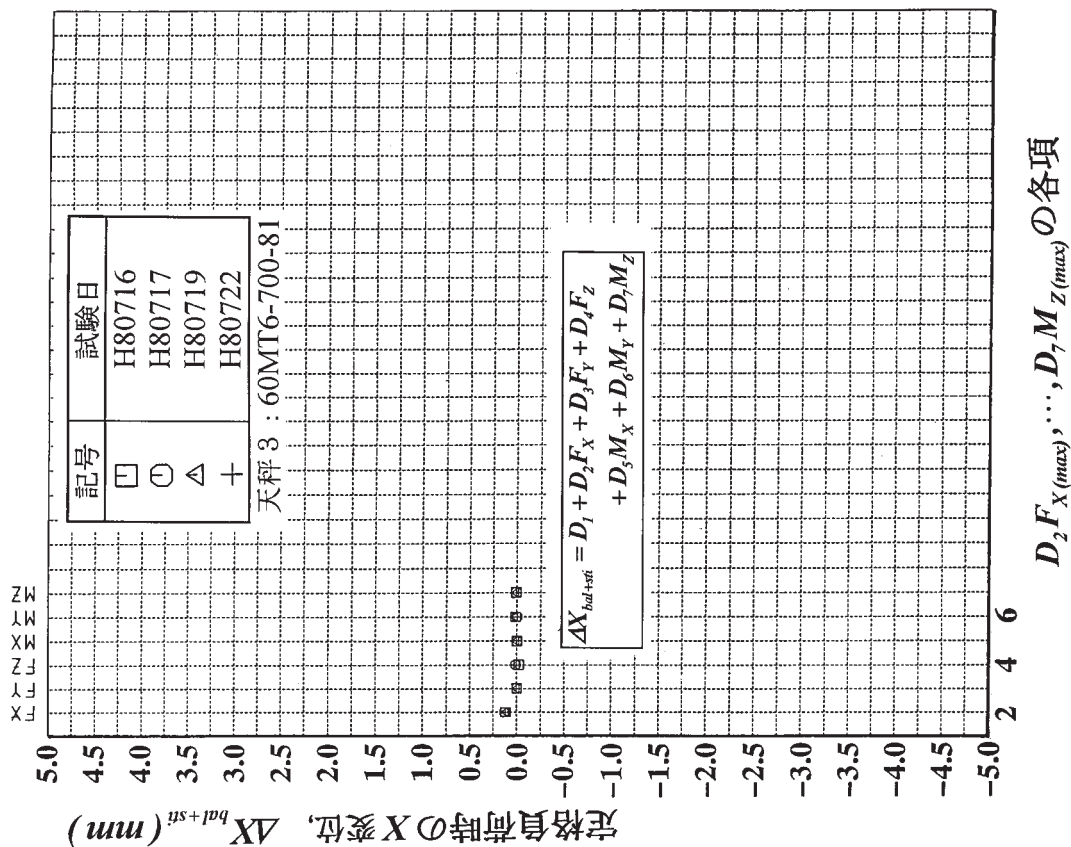
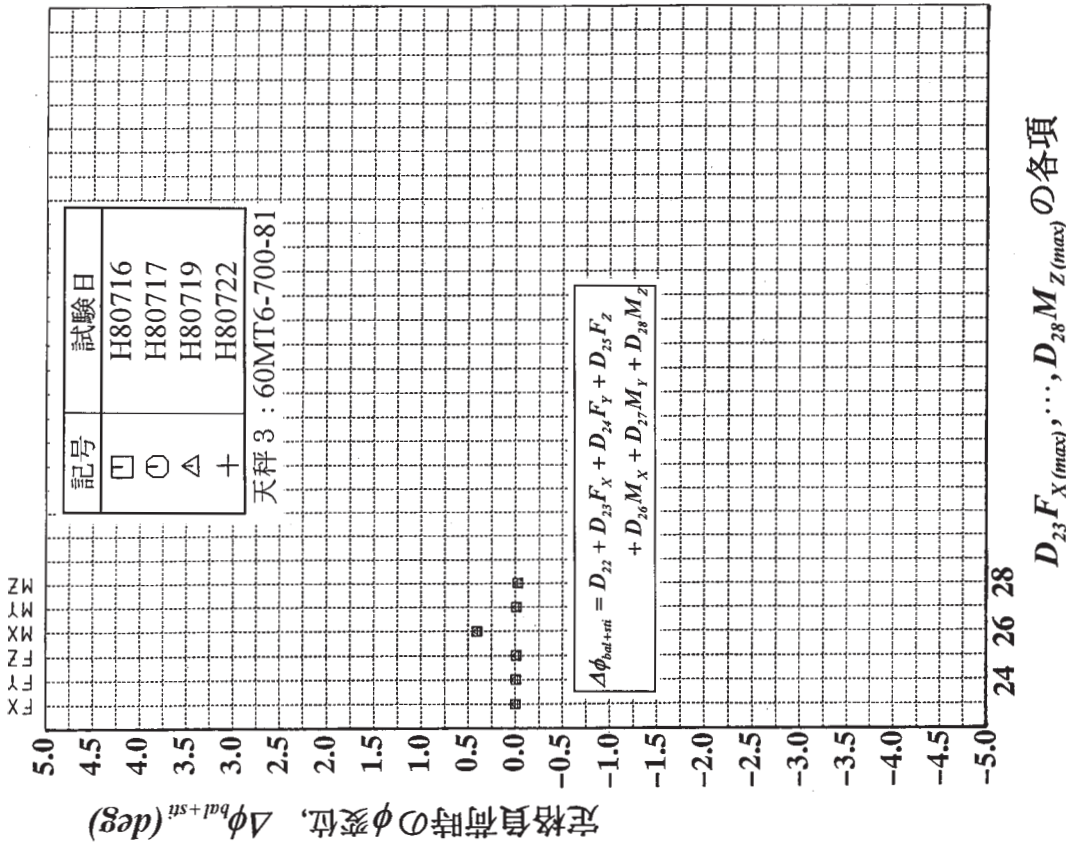
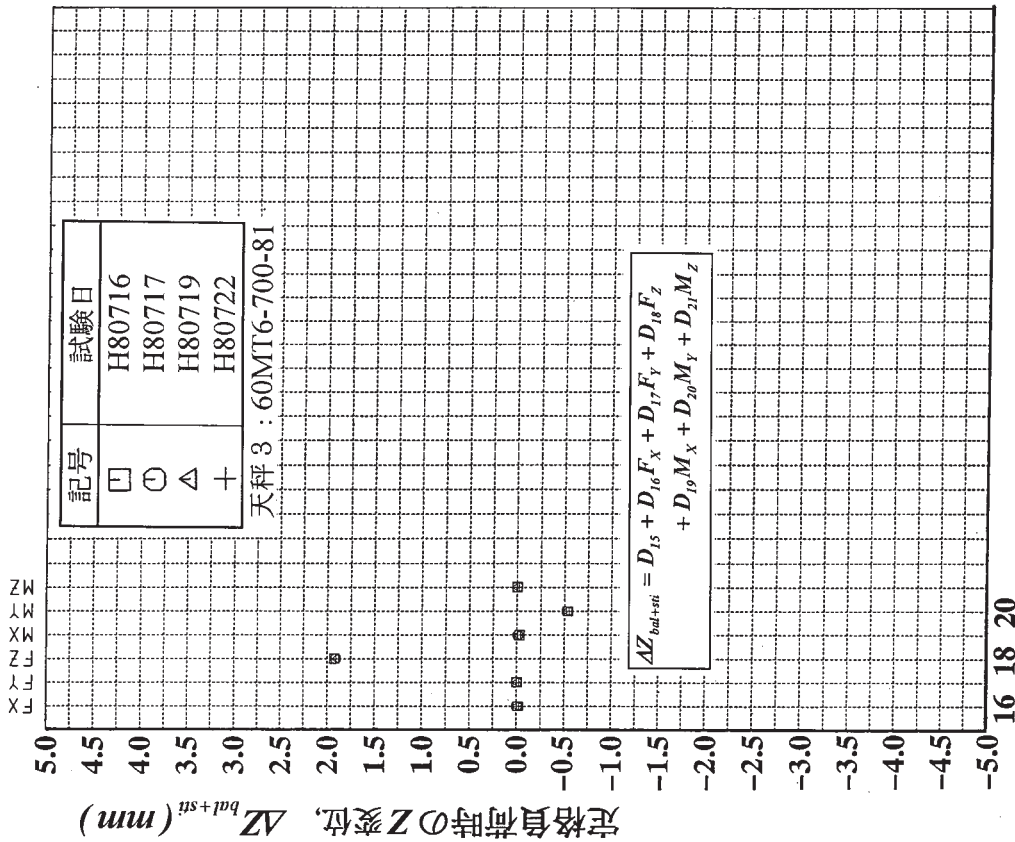


図 28 天秤 3 に対して Y 変位を一次多項式で表示した時の
定格負荷時の各項の大きさ比較 ($D_9 F_{X(max)} - D_{14} M_{Z(max)}$)



$D_{16}F_X(max), \dots, D_{21}M_Z(max)$ の各項

図 29 天秤 3 に対して Z 変位を一次多項式で表示した時の
定格負荷時の各項の大きさ比較 ($D_{16}F_X(max) - D_{21}M_Z(max)$)



$D_{23}F_X(max), \dots, D_{28}M_Z(max)$ の各項

図 30 天秤 3 に対して φ 変位を一次多項式で表示した時の
定格負荷時の各項の大きさ比較 ($D_{23}F_X(max) - D_{28}M_Z(max)$)

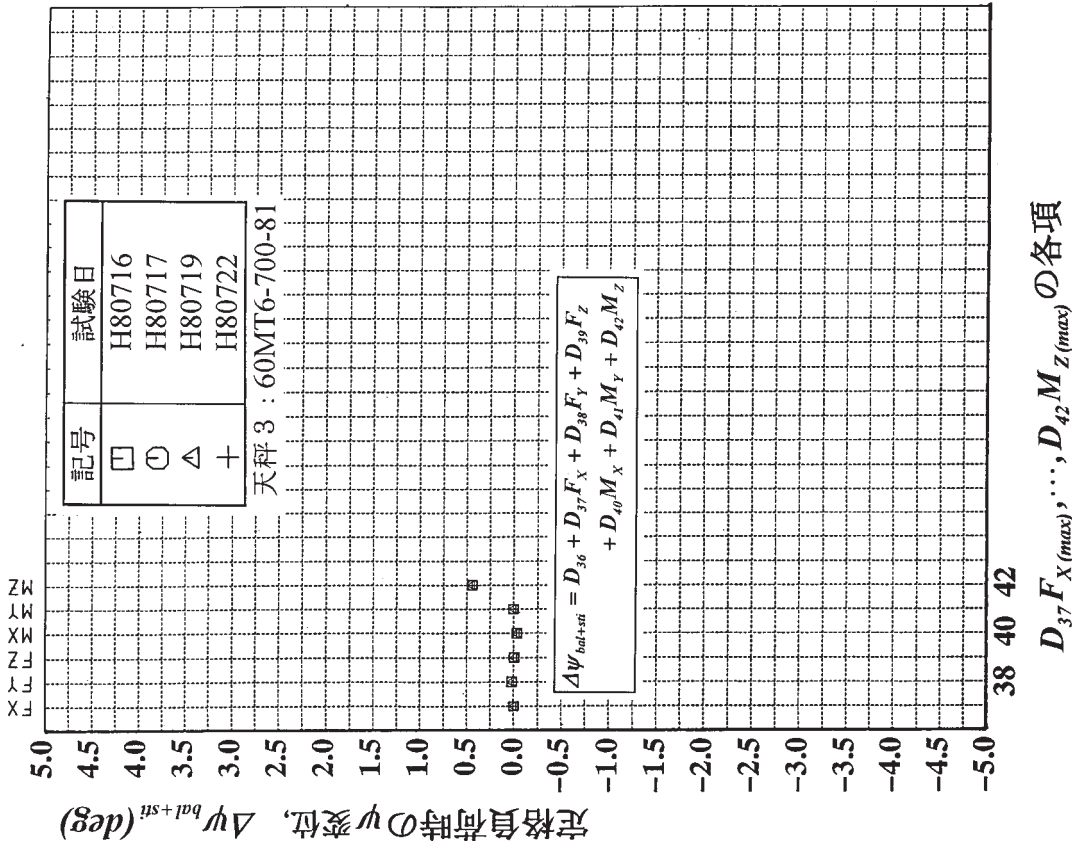


図 32 天秤 3 に対して ψ 変位を一次多項式で表示した時の定格負荷時の各項の大きさ比較 ($D_{37}F_{x(max)} - D_{42}M_{z(max)}$)

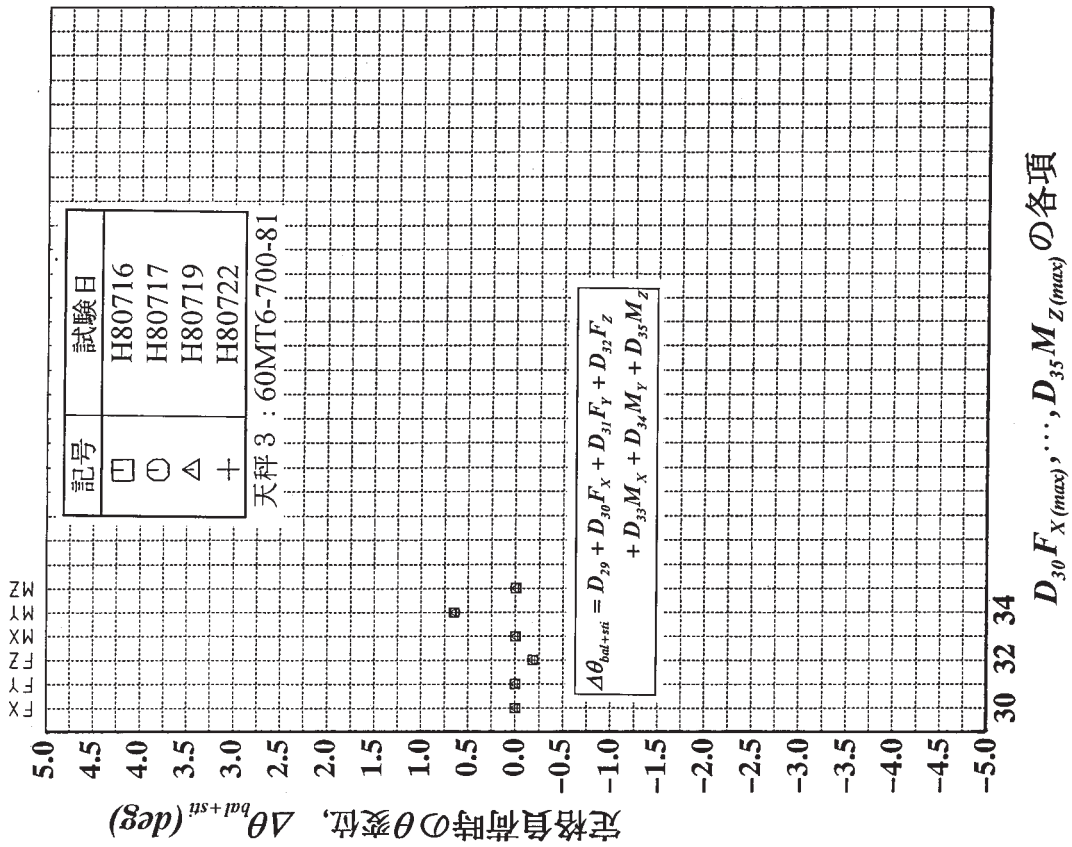


図 31 天秤 3 に対して θ 変位を一次多項式で表示した時の定格負荷時の各項の大きさ比較 ($D_{30}F_{x(max)} - D_{35}M_{z(max)}$)

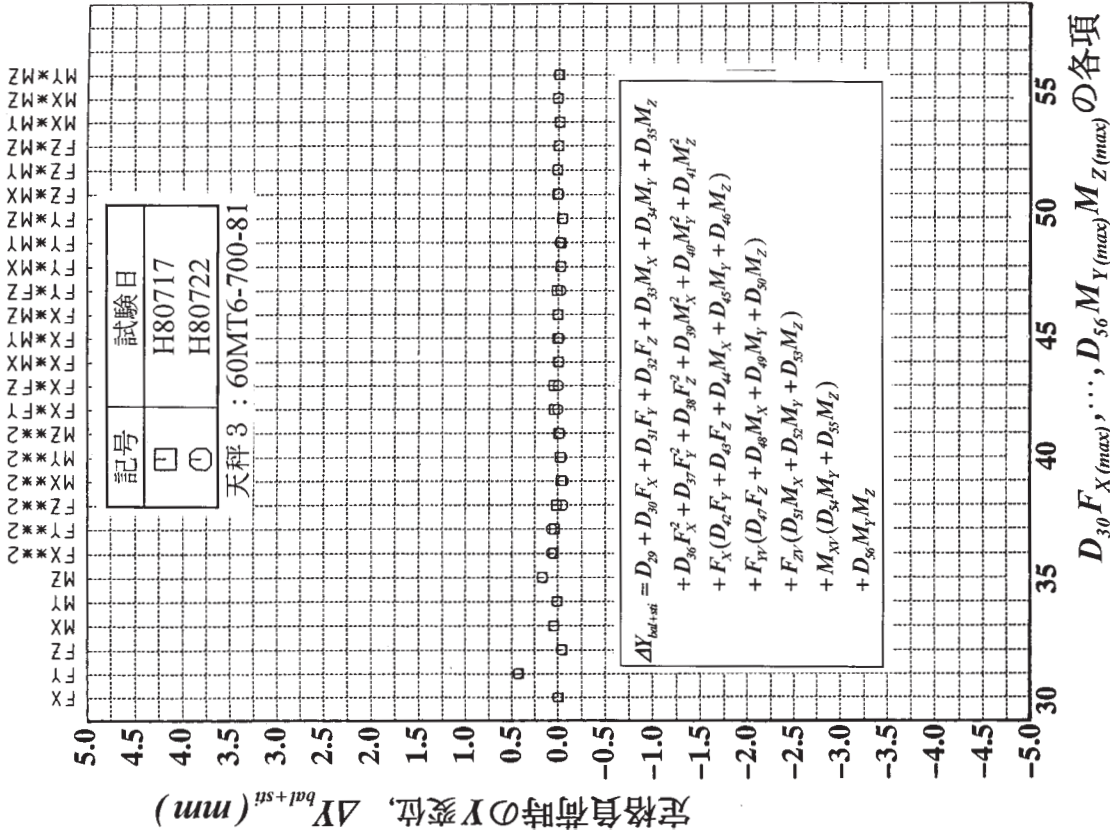


図34 天秤3に対してY変位を二次多項式で表示した時の

定格負荷時の各項の大きさ比較 ($D_{30} F_{X(max)} - D_{56} M_{Y(max)} M_{Z(max)}$)

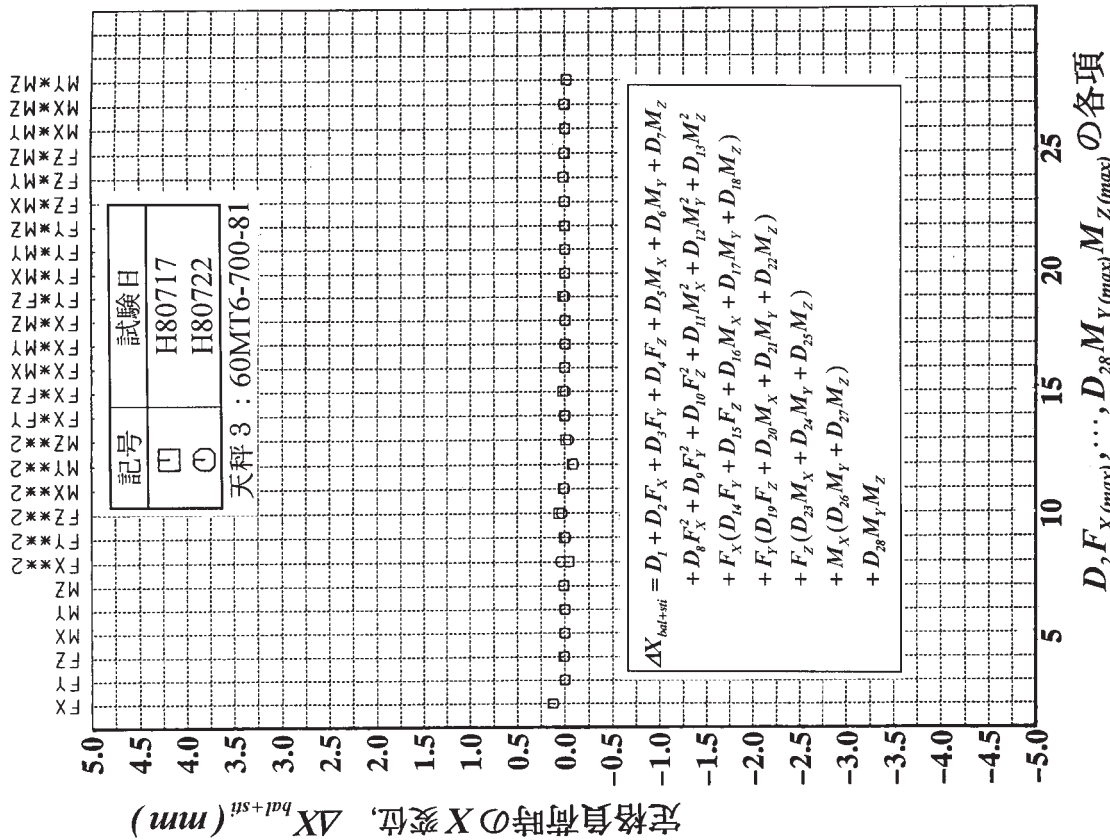


図33 天秤3に対してX変位を二次多項式で表示した時の

定格負荷時の各項の大きさ比較 ($D_2 F_{X(max)} - D_{28} M_{Y(max)} M_{Z(max)}$)

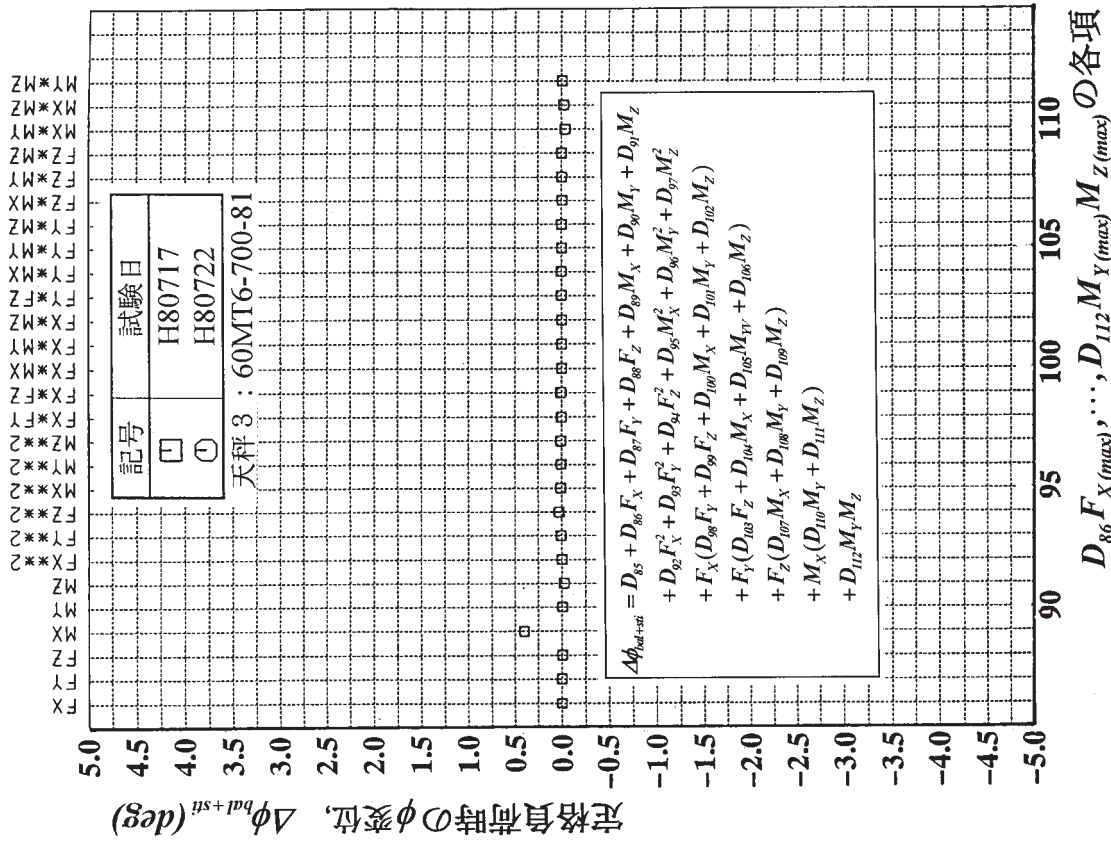


図 36 天秤 3 に対して φ 変位を二次多項式で表示した時の

定格負荷時の各項の大きさ比較 ($D_{86}F_x$, $D_{87}F_y$, $D_{88}F_z$, $D_{89}M_x$, $D_{90}M_y$, $D_{91}M_z$) の各項

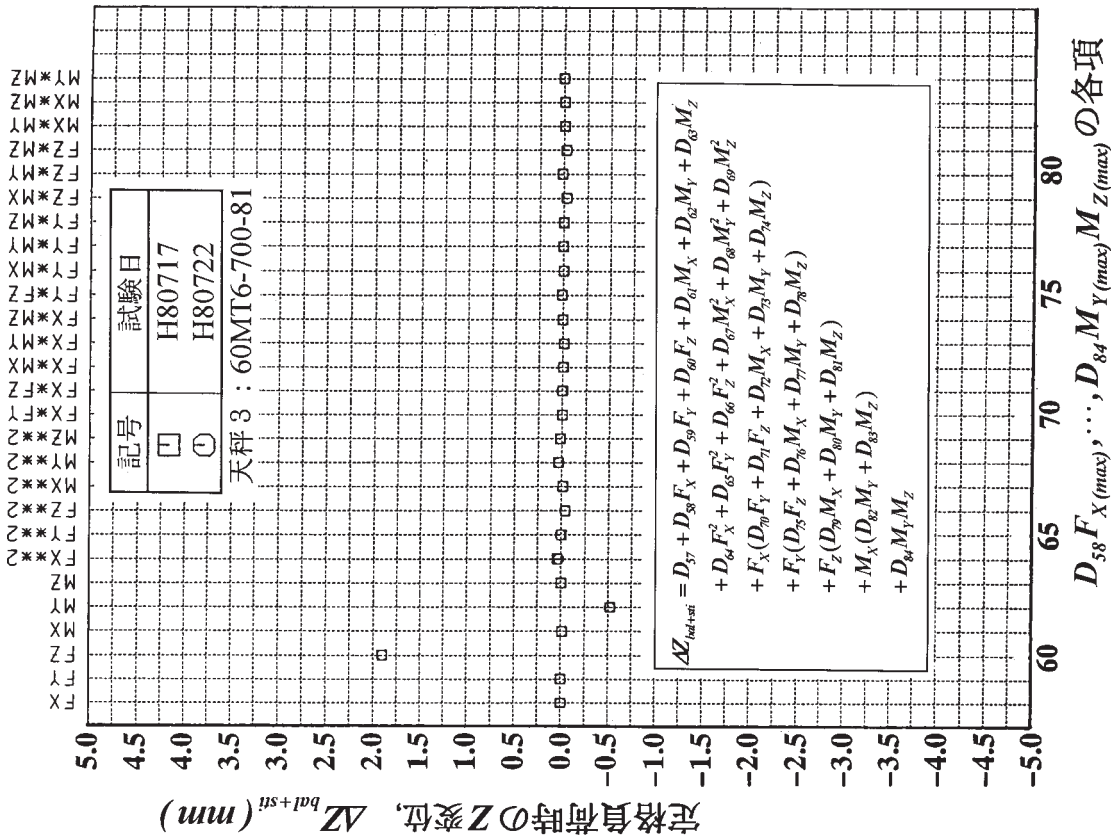


図 35 天秤 3 に対して Z 変位を二次多項式で表示した時の

定格負荷時の各項の大きさ比較 ($D_{58}F_x$, $D_{59}F_y$, $D_{60}F_z$, $D_{61}M_x$, $D_{62}M_y$, $D_{63}M_z$) の各項

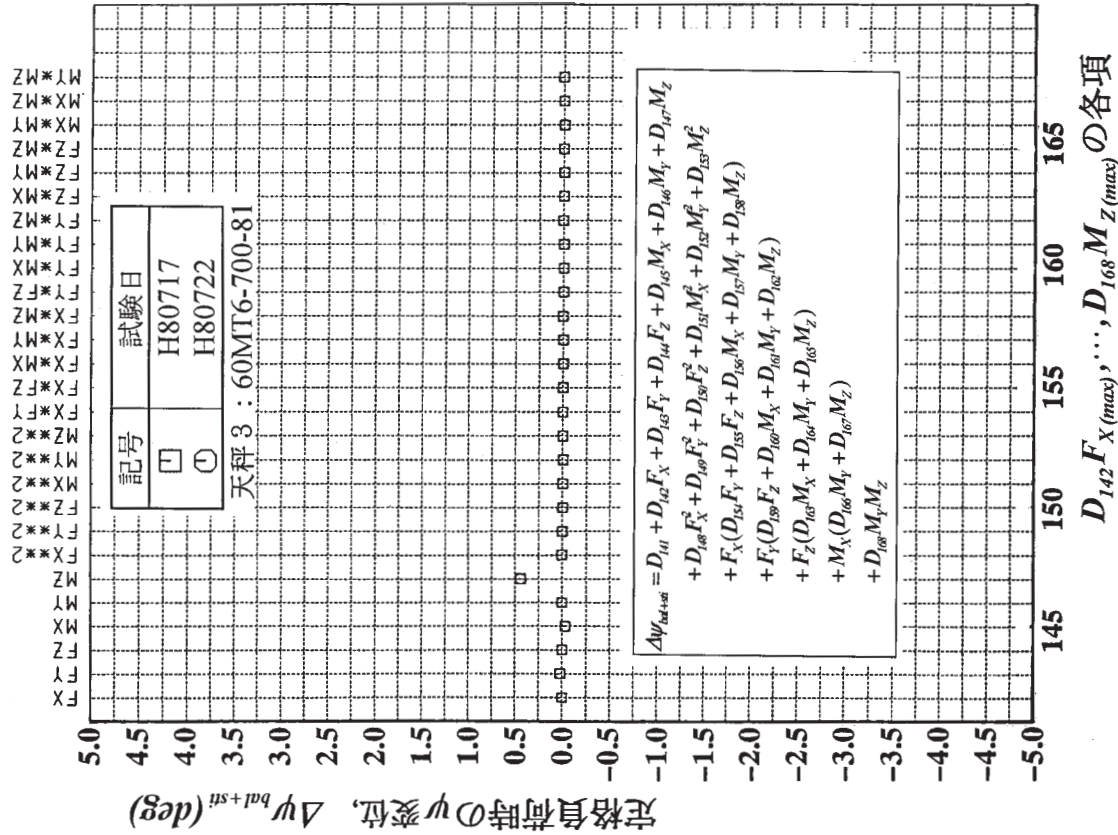


図 38 天秤 3 に対して ψ 変位を二次多項式で表示した時の
定格負荷時の各項の大きさ比較 ($D_{142}F_X(max), \dots, D_{168}M_Y(max)M_Z(max)$)

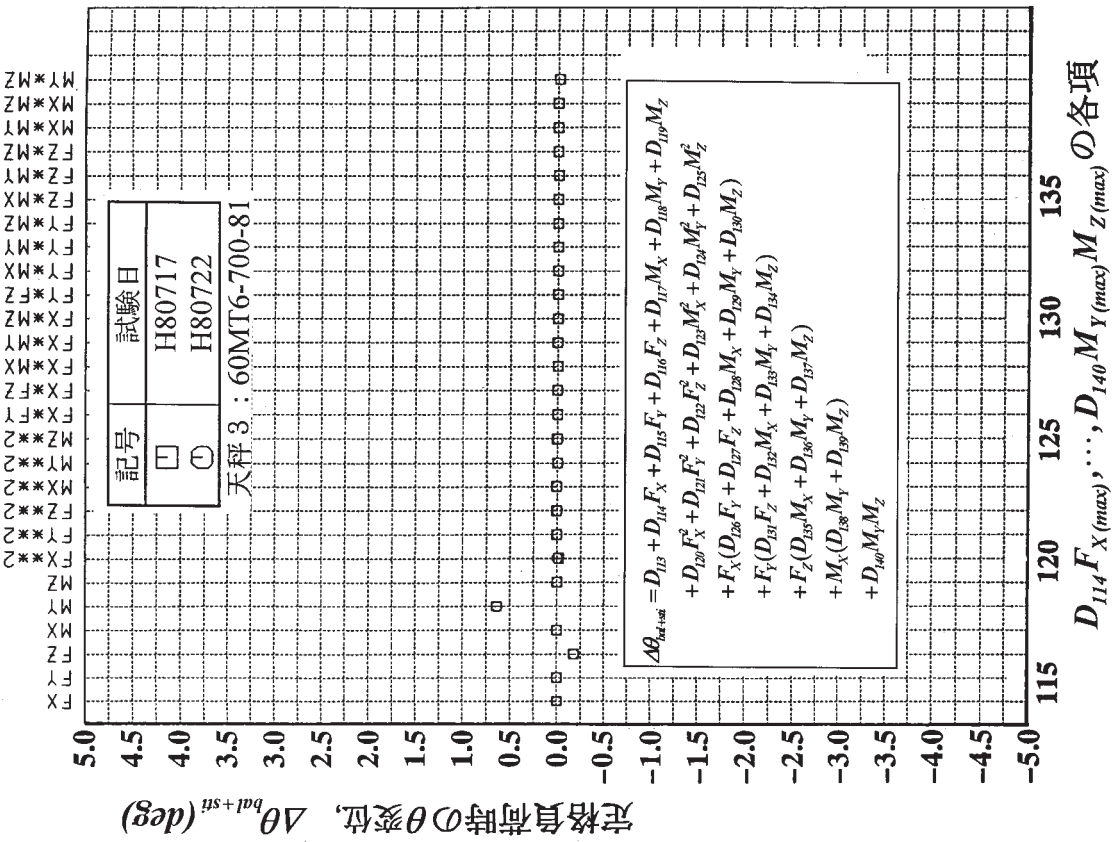


図 37 天秤 3 に対して θ 変位を二次多項式で表示した時の
定格負荷時の各項の大きさ比較 ($D_{114}F_X(max), \dots, D_{140}M_Y(max)M_Z(max)$)

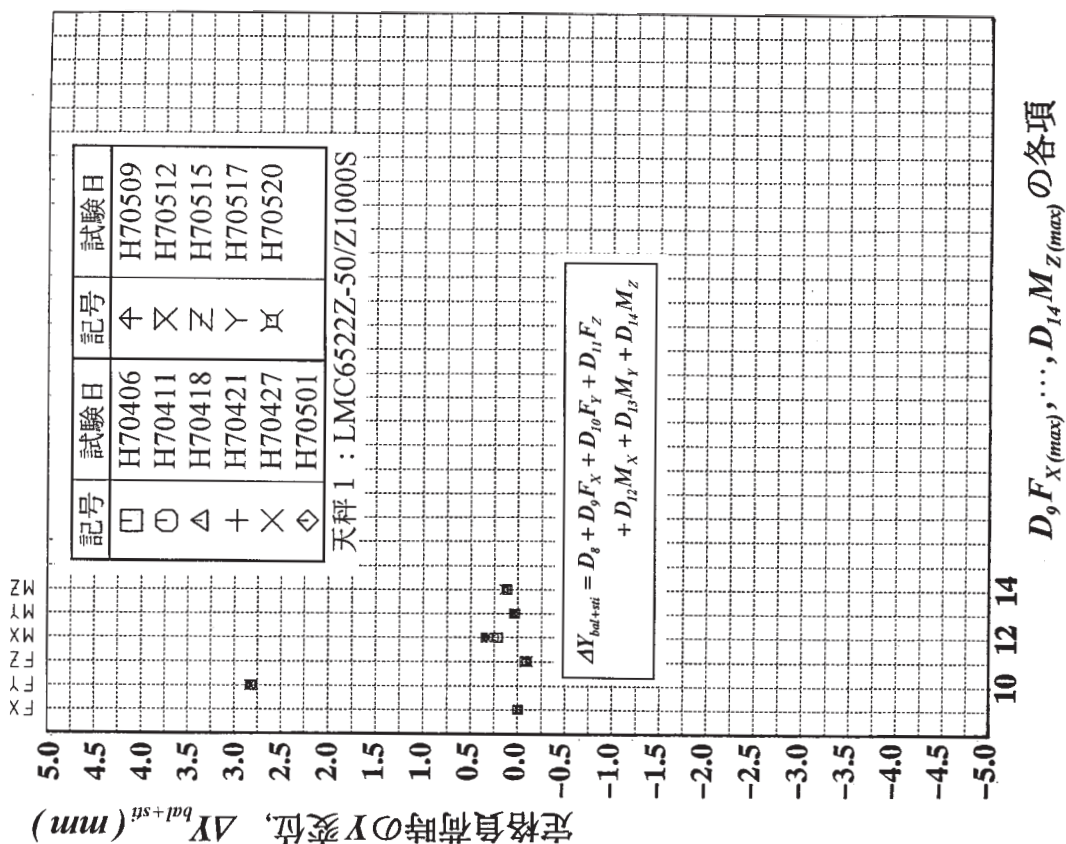


図 40 天秤 1 に対して Y 変位を一次多項式で表示した時の定格負荷時の各項の大きさ比較 ($D_9 F_x^{(max)} - D_{14} M_z^{(max)}$)

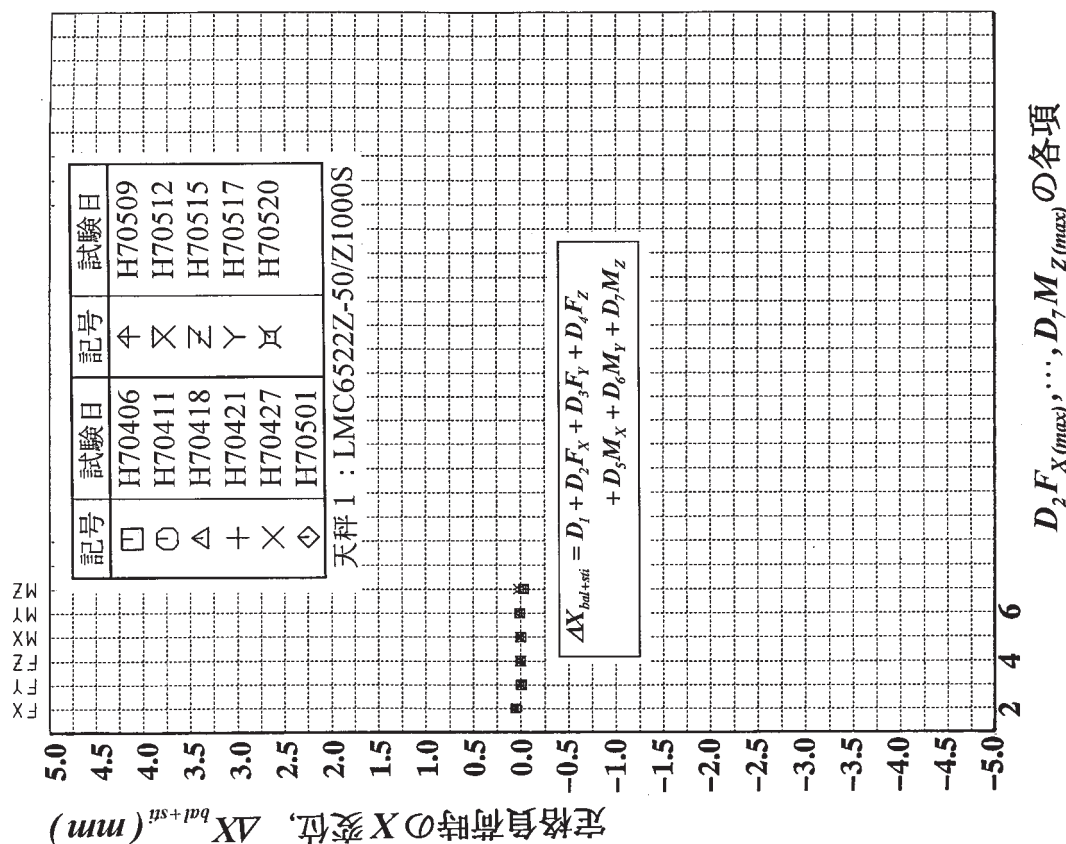


図 39 天秤 1 に対して X 変位を一次多項式で表示した時の定格負荷時の各項の大きさ比較 ($D_2 F_x^{(max)} - D_7 M_z^{(max)}$)

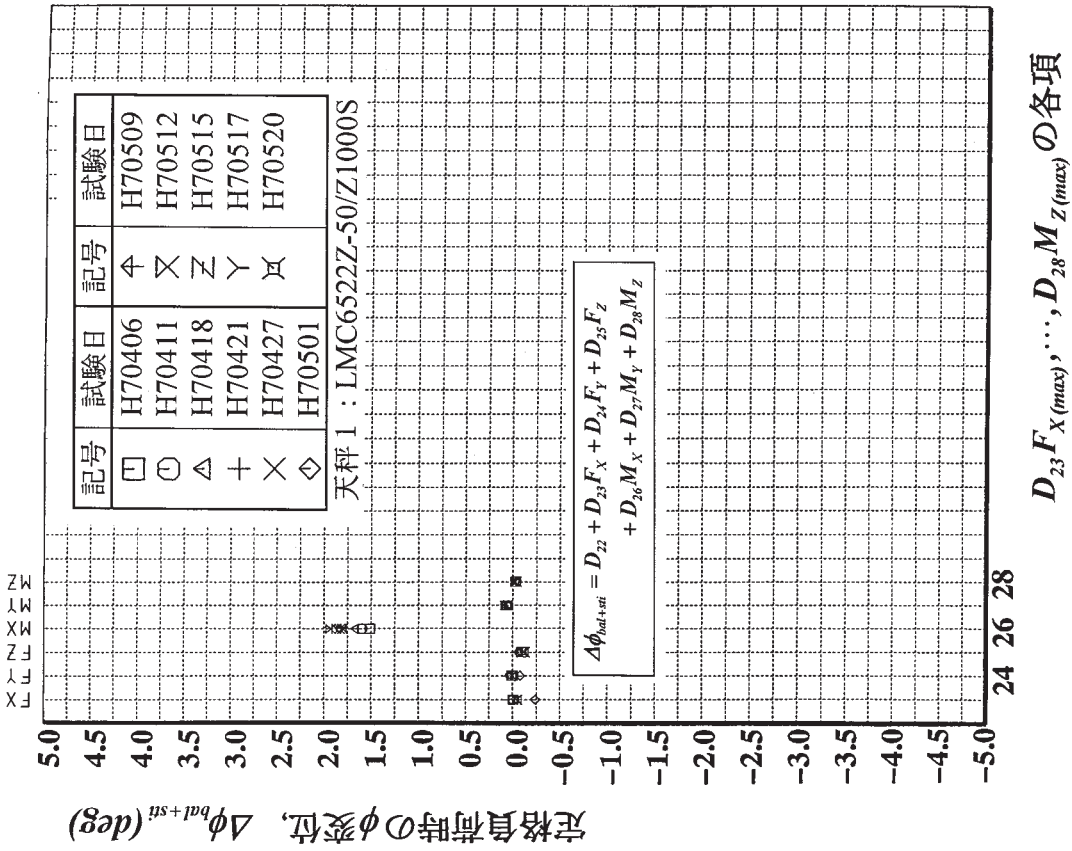


図41 天秤1に対してZ変位を一次多項式で表示した時の定格負荷時の各項の大きさ比較 ($D_{16}F_x(max) - D_{21}M_z(max)$)

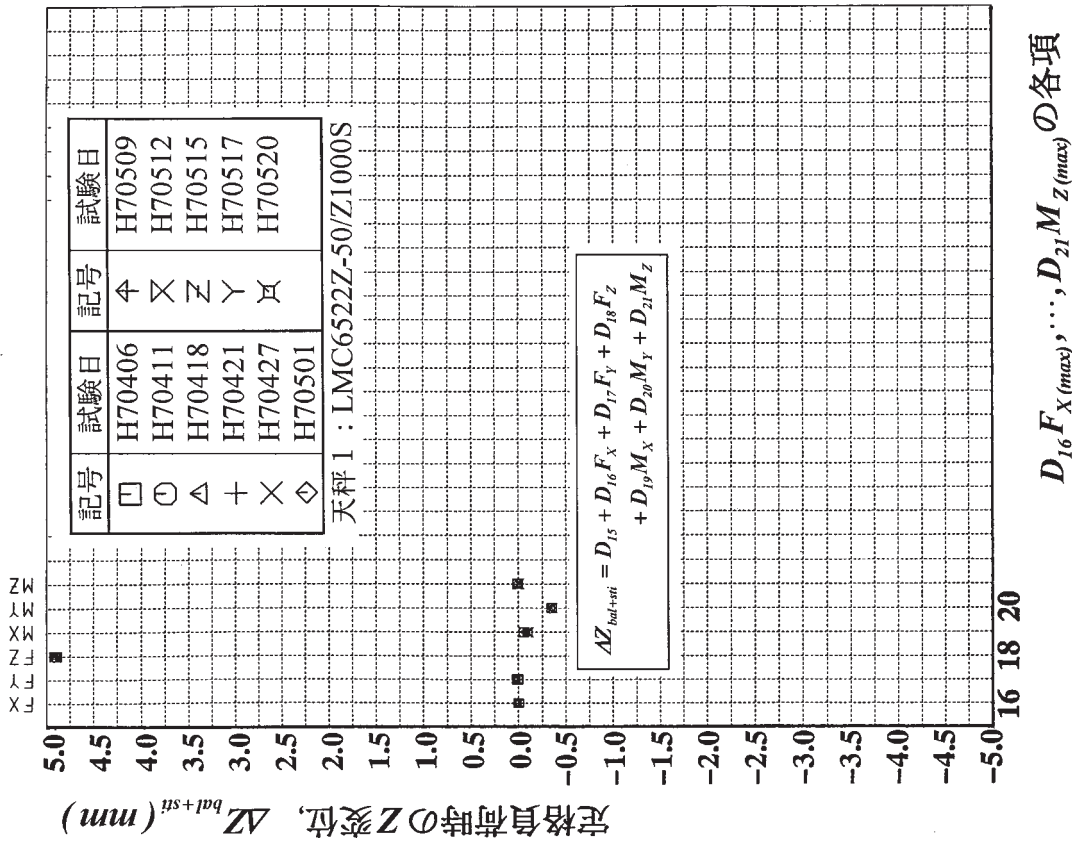
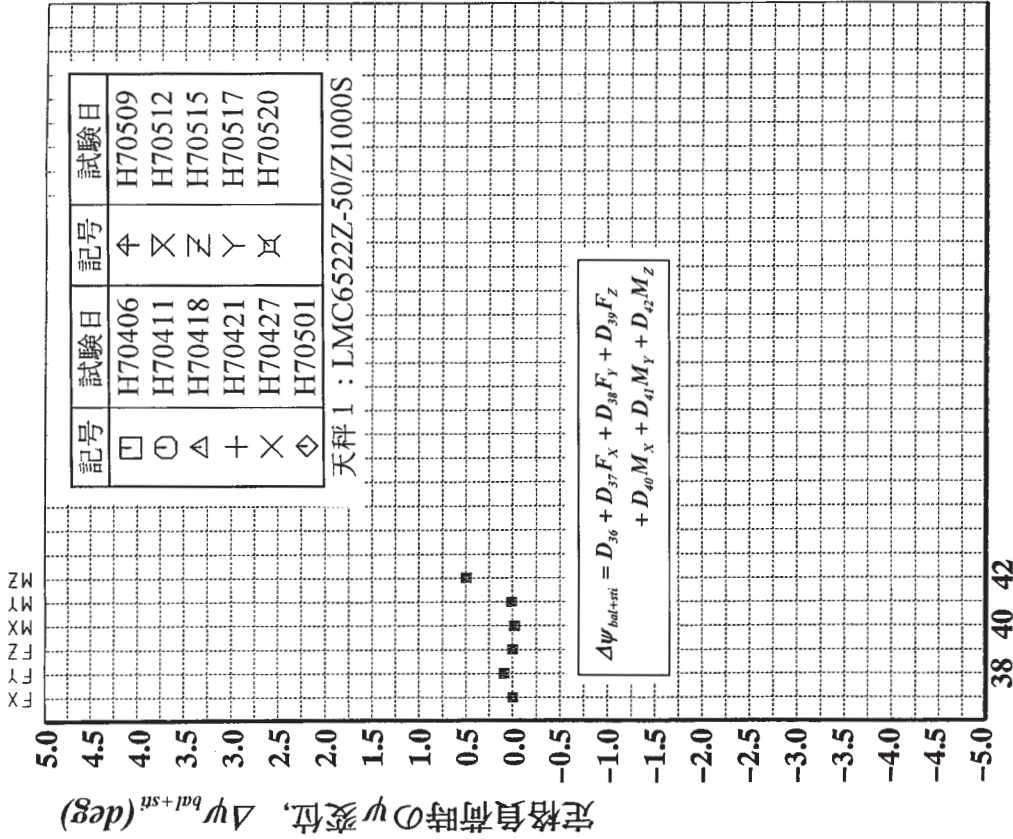


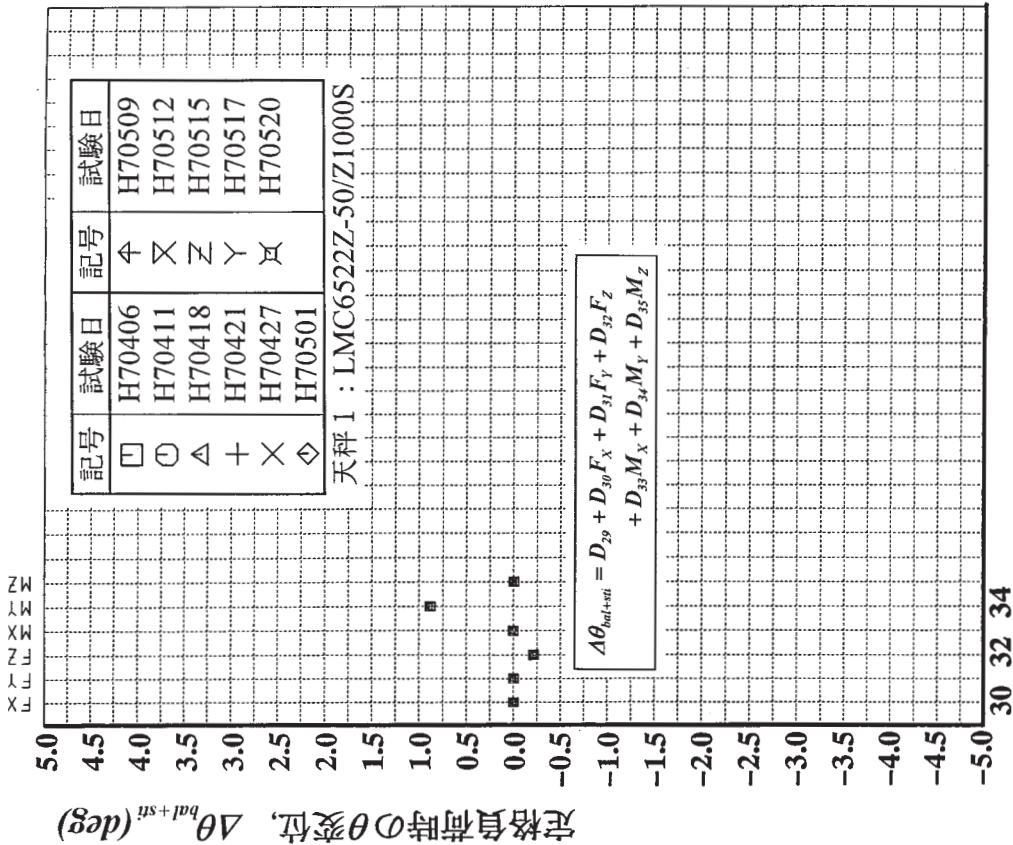
図42 天秤1に対してφ変位を一次多項式で表示した時の定格負荷時の各項の大きさ比較 ($D_{23}F_x(max) - D_{28}M_z(max)$)



$D_{30}F_x^{(max)}, \dots, D_{35}M_z^{(max)}$ の各項

図 43 天秤1 に対して θ 変位を一次多項式で表示した時の

定格負荷時の各項の大きさ比較 ($D_{30}F_x^{(max)} - D_{35}M_z^{(max)}$)



$D_{37}F_x^{(max)}, \dots, D_{42}M_z^{(max)}$ の各項

図 44 天秤1 に対して ψ 変位を一次多項式で表示した時の

定格負荷時の各項の大きさ比較 ($D_{37}F_x^{(max)} - D_{42}M_z^{(max)}$)

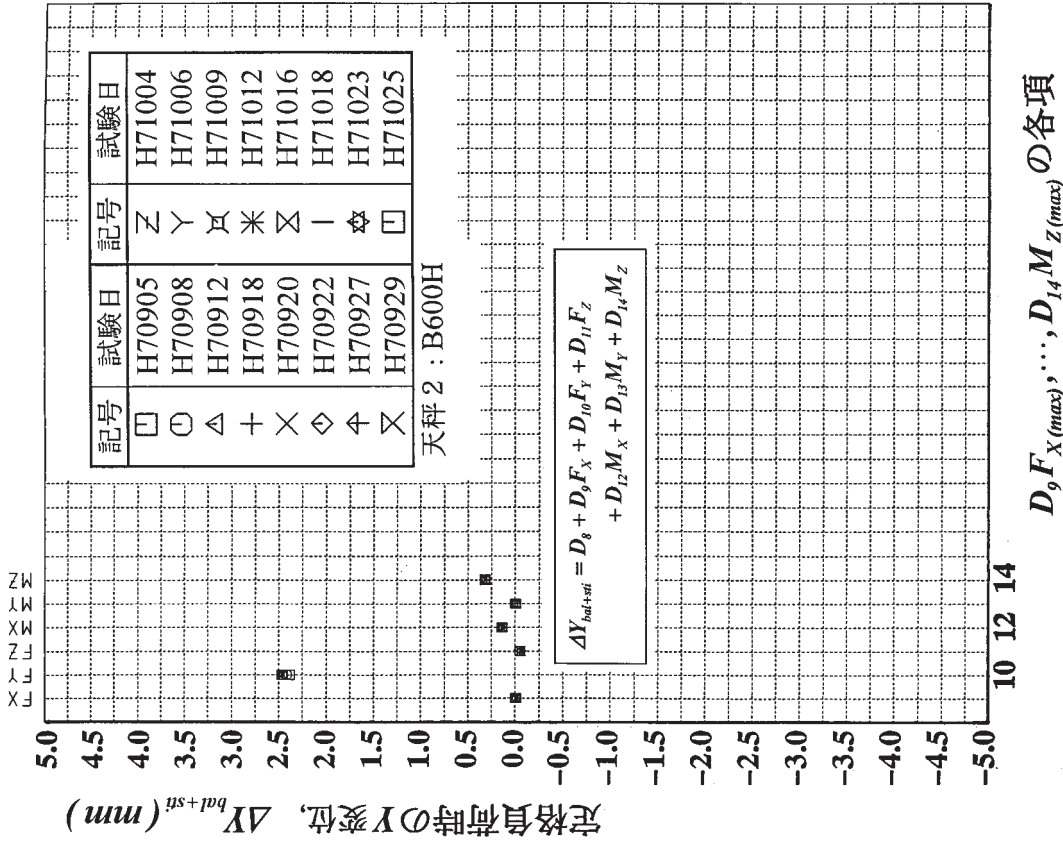


図 46 天秤 2 に対して Y 変位を一次多項式で表示した時の
定格負荷時の各項の大きさ比較 ($D_9 F_X^{(max)} - D_{14} M_Z^{(max)}$)

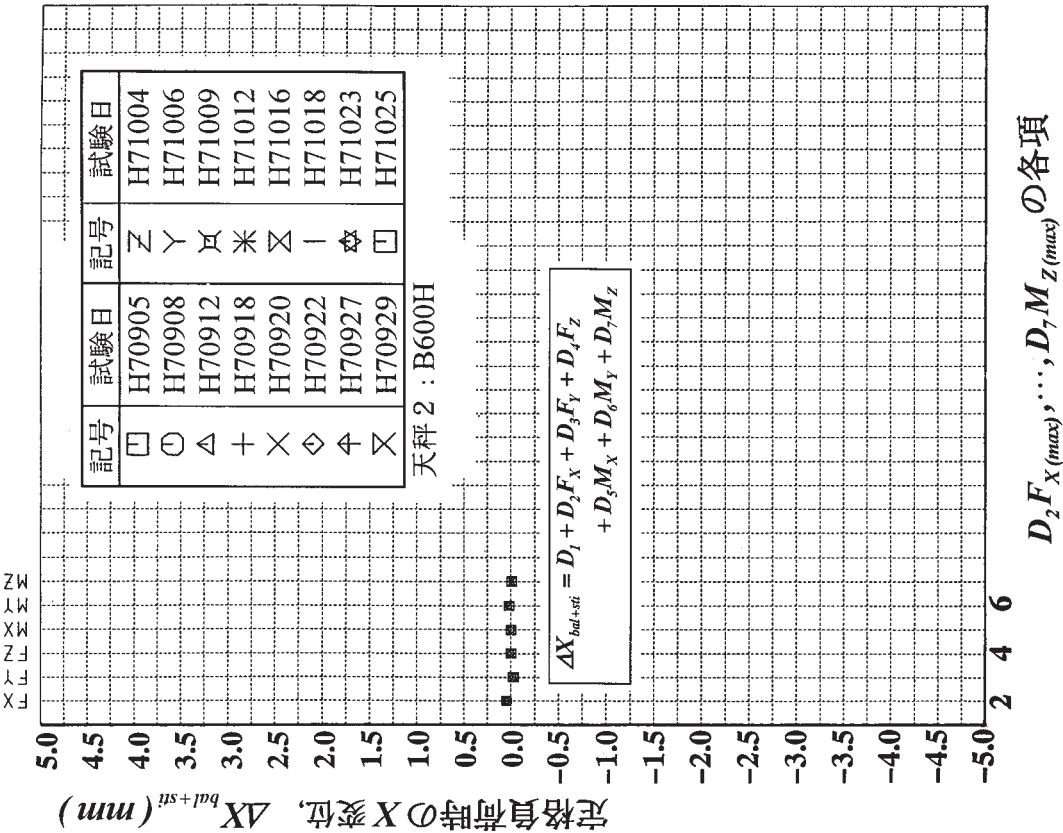
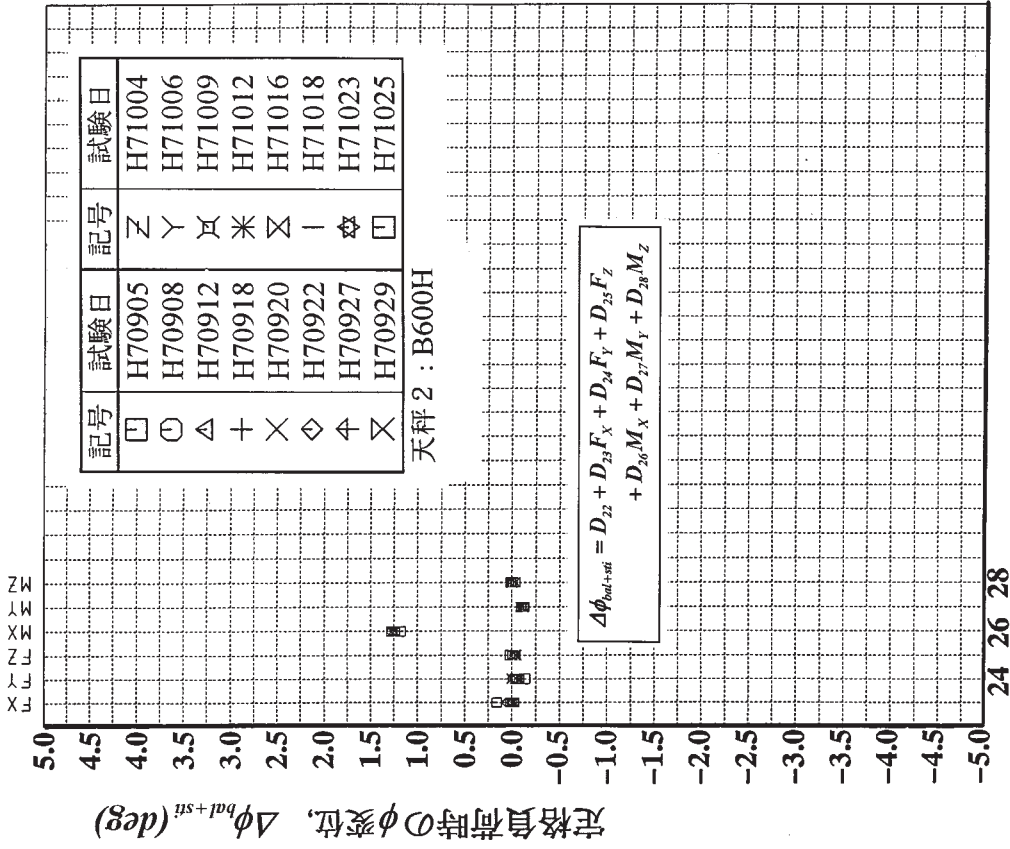
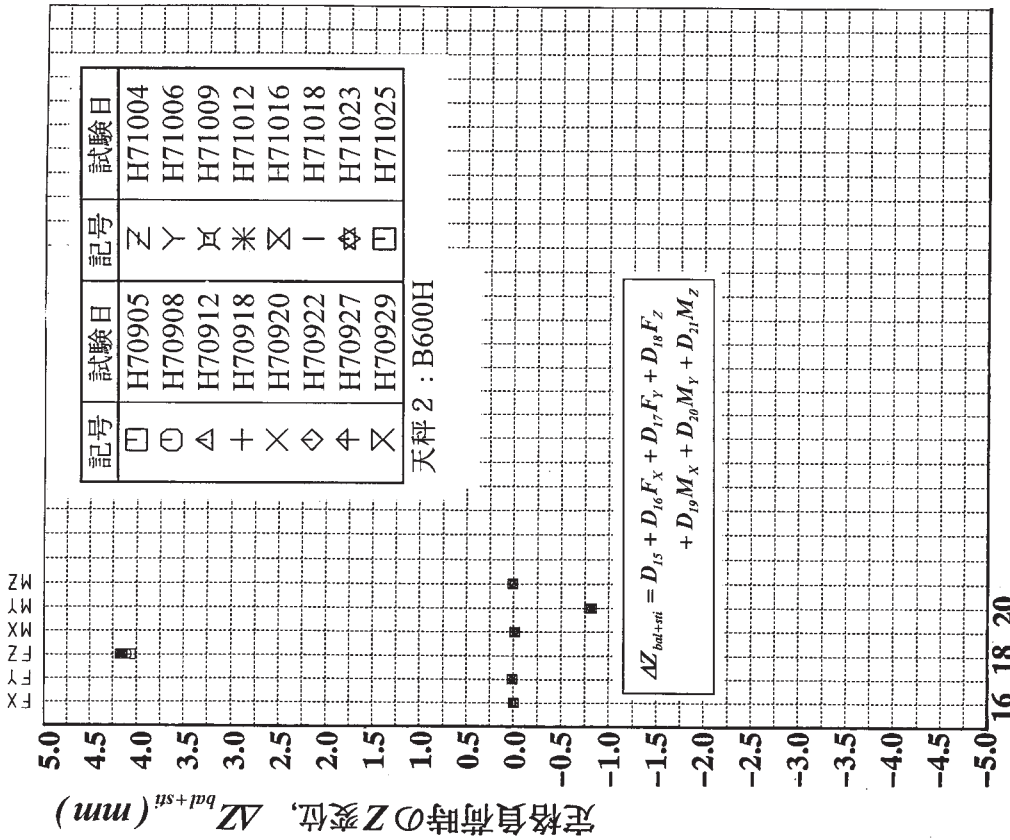


図 45 天秤 1 に対して X 変位を一次多項式で表示した時の
定格負荷時の各項の大きさ比較 ($D_2 F_X^{(max)} - D_7 M_Z^{(max)}$)



$D_{23}F_X(max), \dots, D_{28}M_Z(max)$ の各項

図 48 天秤 2 に対して ϕ 変位を一次多項式で表示した時の
定格負荷時の各項の大きさ比較 ($D_{23}F_X(max) - D_{28}M_Z(max)$)



$D_{16}F_X(max), \dots, D_{21}M_Z(max)$ の各項

図 47 天秤 2 に対して Z 変位を一次多項式で表示した時の
定格負荷時の各項の大きさ比較 ($D_{16}F_X(max) - D_{21}M_Z(max)$)

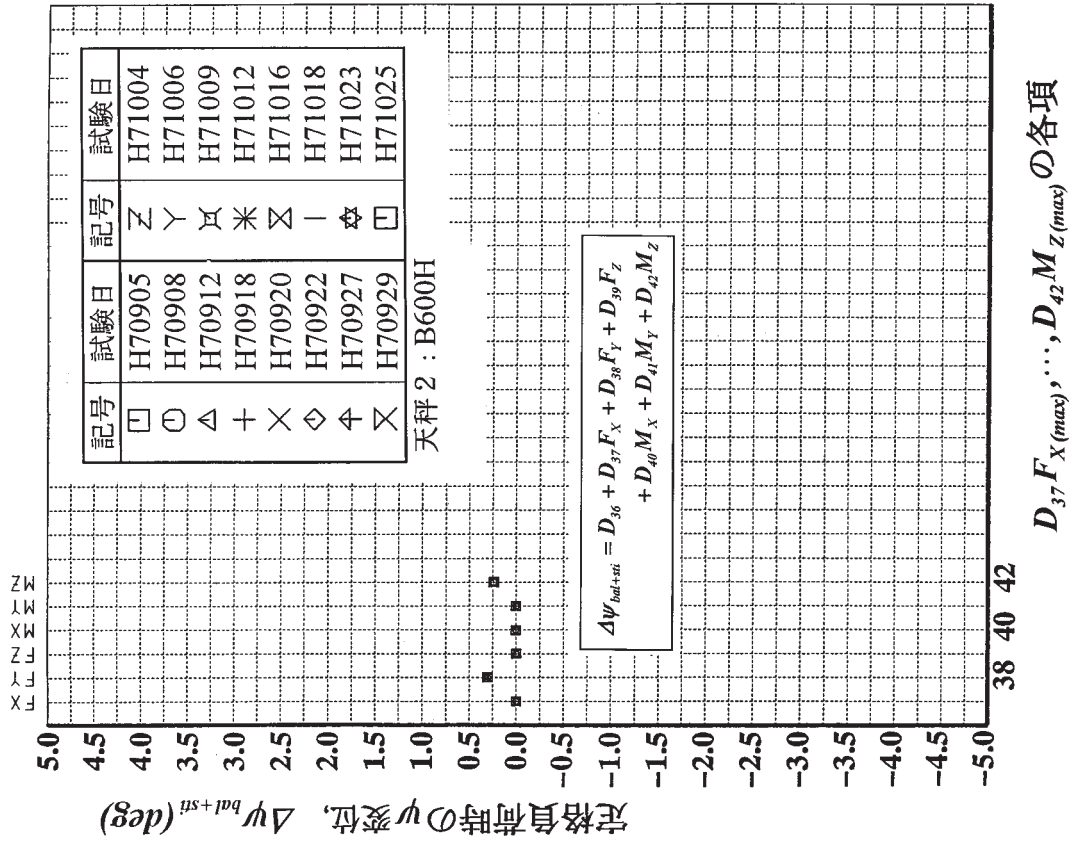


図 50 天秤 2 に対して ψ 変位を一次多項式で表示した時の定格負荷時の各項の大きさ比較 ($D_{37}F_{X(max)} - D_{42}M_{Z(max)}$)

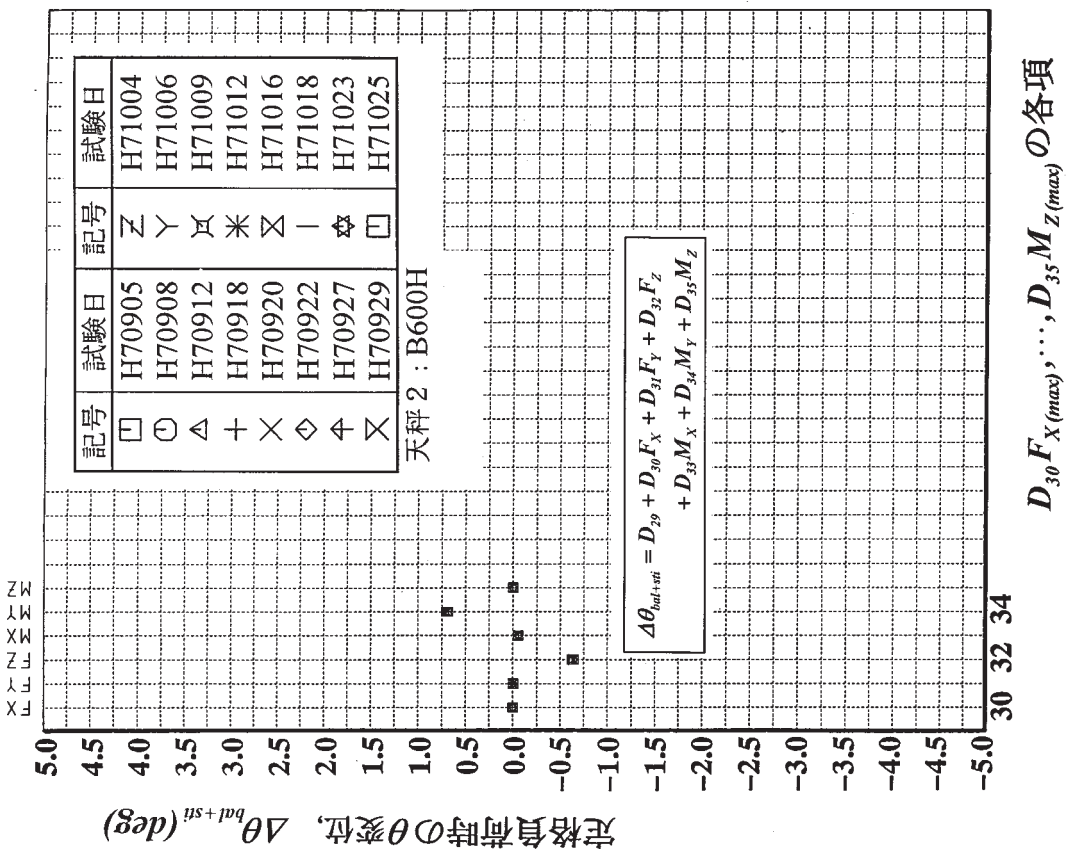


図 49 天秤 2 に対して θ 変位を一次多項式で表示した時の定格負荷時の各項の大きさ比較 ($D_{30}F_{X(max)} - D_{35}M_{Z(max)}$)

5. スティングの変位推算

天秤較正試験結果から求まる変位は天秤変位とスティング変位の加算されたものであるから、天秤単体の剛性を決定するにはスティングの変位を推算し取り除く必要がある。天秤 3 体の較正試験に用いたスティングを図 4 - 図 6 に示したが、スティングの変位は先端円柱部のみで生じると仮定して、天秤 1 (LMC6522-50/Z1000S) 用のスティングについては外形 50mm、内径 25mm、長さ 297mm、天秤 2 (B660H) 用については外形 54mm、内径 25mm、長さ 187.7mm、天秤 3 (60MT6-Z700-81) 用については外形 60mm、内径 42mm、長さ 140mm で近似した。これらを中空丸棒の片持ち梁と考えると天秤中心位置に負荷（引っ張り $F_{X(max)}$ 、曲げモーメント $M_{Y(max)}$ および $M_{Z(max)}$ 、捩りモーメント $M_{X(max)}$ 、剪断力 $F_{Y(max)}$ および $F_{Z(max)}$ ）を加えた時のスティング先端部の変位（撓みと撓み角）を計算すれば、天秤中心位置でのスティングの変位による影響が計算できる。スティング先端部の変位を計算するための式は通常材料力学の教科書に従った。以下に用いた式を整理しておく。荷重点（天秤中心）とスティング先端との距離を l_1 としスティング円柱部の長さを l_2 とすと荷重点（天秤中心）とスティング円柱部固定端との距離は $l = l_1 + l_2$ となる。

軸力による変位（伸び）

$$\Delta X_{sti,FX} = \frac{l_2}{EA} F_X \quad (35)$$

横力による変位（撓み、撓み角）

$$\Delta Y_{sti,FY} = -\frac{F_Y l_2^3}{3EI} \left(1 - \frac{3l_1}{2l} + \frac{l_1^3}{2l^3}\right) \quad (36)$$

$$\Delta \psi_{sti,FY} = \frac{F_Y l_2^2}{2EI} \left(1 - \frac{l_1^2}{l^2}\right) \quad (37)$$

垂直力による変位（撓み、撓み角）

$$\Delta Z_{sti,FZ} = -\frac{F_Z l_2^3}{3EI} \left(1 - \frac{3l_1}{2l} + \frac{l_1^3}{2l^3}\right) \quad (38)$$

$$\Delta \theta_{sti,FZ} = \frac{F_Z l_2^2}{2EI} \left(1 - \frac{l_1^2}{l^2}\right) \quad (39)$$

横揺れモーメントによる変位（捩り角）

$$\Delta \phi_{sti,MX} = \frac{l_2}{GI_p} M_X \quad (40)$$

縦揺れモーメントによる変位（撓み、撓み角）

$$\Delta Z_{sti,MY} = \frac{M_Y l_2^2}{2EI} \quad (41)$$

$$\Delta \theta_{sti,MZ} = \frac{M_Z l_2}{EI} \quad (42)$$

偏揺れモーメントによる変位（撓み、撓み角）

$$\Delta Y_{sti,MZ} = \frac{M_Z l_2^2}{2EI} \quad (43)$$

$$\Delta \psi_{sti,MZ} = \frac{M_Z l_2}{EI} \quad (44)$$

ここでは縦弾性係数で

$E = 0.2058 \times 10^6 \text{ N/mm}^2 (21,000 \text{ kgf/mm}^2)$ 、 A は断面積で $A = \frac{\pi(d_2^2 - d_1^2)}{4}$ 、 I は断面二次モーメントで $I = \frac{\pi(d_2^4 - d_1^4)}{64}$ 、 G は横弾性係数で $G = 0.07938 \times 10^6 \text{ N/mm}^2 (8,100 \text{ kgf/mm}^2)$ 、 I_p は断面極二次モーメントで $I_p = \frac{\pi(d_2^4 - d_1^4)}{32}$ である。

6. 天秤単体の剛性（Stiffness）

較正試験で求めた天秤とスティングの結合状態での定格負荷時の変位の内、主要 10 項を対象としてスティングの影響分を以下のように取り除いた。X 変位については較正試験時の変位から単にスティングの変位を差し引けばよい。Y 変位、Z 変位については、スティングの先端部の変位とスティング先端部の変位角による影響を考慮する必要がある。 ϕ 、 θ 、 ψ の角度変位については単に較正試験時の値からスティング先端部の傾斜角を差し引けば良い。即ち

軸方向変位

$$\Delta X_{bal,FX(max)} = \Delta X_{bal+sti,FX(max)} - \Delta X_{sti,FX(max)} \quad (45)$$

横方向変位

$$\Delta Y_{bal,FY(max)} = \Delta Y_{bal+sti,FY(max)} - \Delta Y_{sti,FY(max)} - l_1 \Delta \psi_{sti,FY(max)} \quad (46)$$

$$\Delta Y_{bal,MZ(max)} = \Delta Y_{bal+sti,MZ(max)} - \Delta Y_{sti,MZ(max)} - l_1 \Delta \psi_{sti,MZ(max)} \quad (47)$$

垂直方向変位

$$\Delta Z_{bal,FZ(max)} = \Delta Z_{bal+sti,FZ(max)} - \Delta Z_{sti,FZ(max)} + l_1 \Delta \theta_{sti,FZ(max)} \quad (48)$$

$$\Delta Z_{bal,MY(max)} = \Delta Z_{bal+sti,MY(max)} - \Delta Z_{sti,MY(max)} + l_1 \Delta \theta_{sti,MY(max)} \quad (49)$$

横揺れ方向変位角

$$\Delta \phi_{bal,MX(max)} = \Delta \phi_{bal+sti,MX(max)} - \Delta \phi_{sti,MX(max)} \quad (50)$$

縦揺れ方向変位角

$$\Delta\theta_{bal,FZ(max)} = \Delta\theta_{bal+sti,FZ(max)} - \Delta\theta_{sti,FZ(max)} \quad (51)$$

$$\Delta\theta_{bal,MY(max)} = \Delta\theta_{bal+sti,MY(max)} - \Delta\theta_{sti,MY(max)} \quad (52)$$

偏揺れ方向変位角

$$\Delta\psi_{bal,FY(max)} = \Delta\psi_{bal+sti,FY(max)} - \Delta\psi_{sti,FY(max)} \quad (53)$$

$$\Delta\psi_{bal,MZ(max)} = \Delta\psi_{bal+sti,MZ(max)} - \Delta\psi_{sti,MZ(max)} \quad (54)$$

となる。

供試天秤3体に対して、天秤較正試験時（天秤とスティングの結合状態）の変位、天秤先端部の変位（計算値）、天秤単体の剛性の一覧を表4、表5、表6に示した。また図51、図52、図53にそれぞれの比較を示した。天秤単体の剛性比較について、今回の供試天秤はいずれも一体加工式の内挿天秤であるが剛性は（定格負荷時の変位）大きく異なっている事が分かる。特徴的な結果は天秤3（60MT6-700-81）に比べて天秤1（LMC6522-50/Z1000S）、天秤2（B660H）の剛性が全体的にかなり低い点である。一般に一体加工式天秤は剛性を高く取れないために天秤負荷と出力の関係に非線形性が現れる事がよく知られて

いる。天秤1、天秤2については天秤較正試験結果から非線形性が無視出来ないことをすでに指摘した²⁾。しかし天秤3のように弾性変形が相対的に小さい場合には天秤6分力間の干渉特性が比較的小さく留まることが予想される。この点を確認するために天秤の負荷と出力の関係を示す特性式のうち、特に干渉成分の大きいX成分の特性の例を図54、図55、図56に示した。天秤1については再現性を確認する目的で9回の試験を行っており、天秤2については16回の試験を行っている。文献2で指摘したように両天秤については非線形型に係わる係数が明らかに有意な値を持ち非線形干渉項を無視できない。これに対して天秤3（60MT6-700-81）の干渉係数は際立って小さいことがわかる。とくに二次の干渉項係数がかなり小さく押さえられている。またここでは提示していないが天秤3の他の5成分 $F_Y - M_Z$ についても干渉係数は極めて小さい。これらの点を総合して考えると、一体式天秤の設計においても、天秤感度、温度特性等に十分な注意を払って、剛性を高く取る工夫をすれば干渉の少ない天秤を作ることが可能となる。

表4 天秤1（LMC6522-50/Z1000S）の剛性（H70406）：単位 mm,deg

変位	天秤/スティング 結合状態の変位	スティングの影響	天秤単体の変位
ΔX by $F_X(max)$	0.061	0.001	0.061
ΔY by $F_Y(max)$	2.805	0.898	1.701
ΔY by $M_Z(max)$	0.113	0.298	-0.272
ΔZ by $F_Z(max)$	4.890	1.796	2.681
ΔZ by $M_Y(max)$	-0.348	-0.596	0.421
$\Delta\phi$ by $M_X(max)$	1.517	0.075	1.442
$\Delta\theta$ by $F_Z(max)$	-0.212	-0.551	0.338
$\Delta\theta$ by $M_Y(max)$	0.881	0.230	0.651
$\Delta\psi$ by $F_Y(max)$	0.092	0.275	-0.184
$\Delta\psi$ by $M_Z(max)$	0.490	0.115	0.375

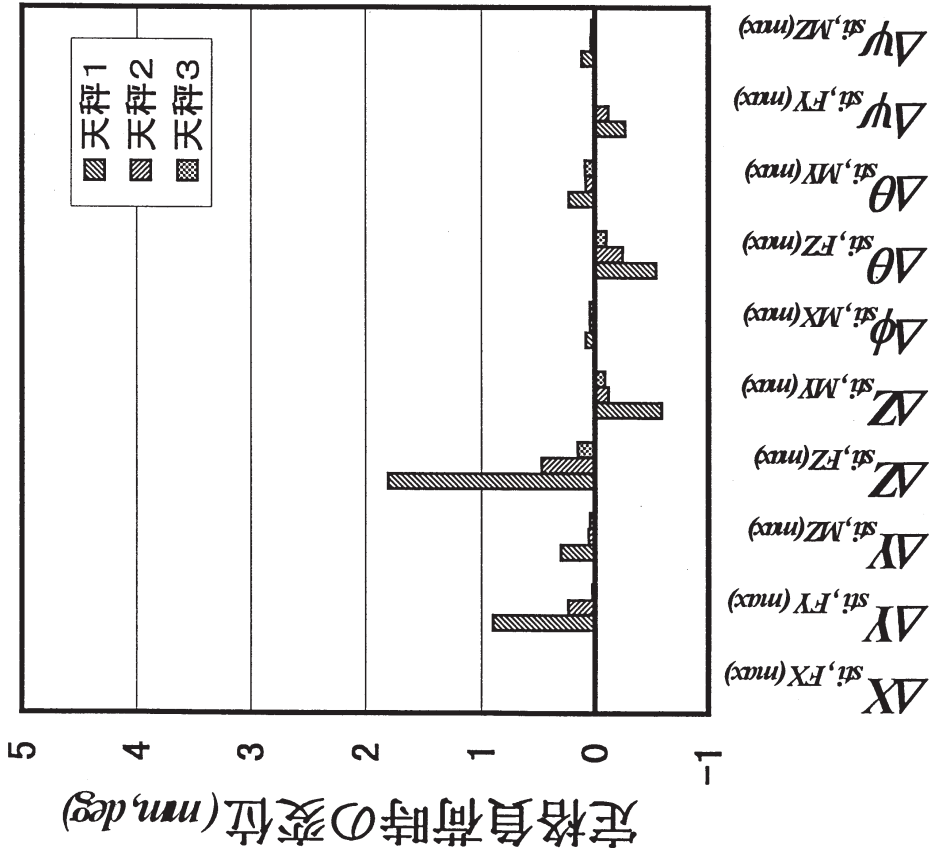
表5 天秤2 (B660H) の剛性 (H70908): 単位 mm,deg

変位	天秤/スティング 結合状態の変位	スティングの影響	天秤単体の変位
ΔX by $F_{X(max)}$	0.041	0.000	0.041
ΔY by $F_{Y(max)}$	2.418	0.234	1.859
ΔY by $M_{Z(max)}$	0.321	0.054	0.182
ΔZ by $F_{Z(max)}$	4.104	0.468	2.985
ΔZ by $M_{Y(max)}$	-0.798	-0.129	-0.467
$\Delta\phi$ by $M_{X(max)}$	1.238	0.043	1.196
$\Delta\theta$ by $F_{Z(max)}$	-0.626	-0.253	-0.373
$\Delta\theta$ by $M_{Y(max)}$	0.695	0.079	0.617
$\Delta\psi$ by $F_{Y(max)}$	0.300	0.127	0.174
$\Delta\psi$ by $M_{Z(max)}$	0.237	0.033	0.204

表6 天秤3 (60MT6-700-81) の剛性 (H80722): 単位 mm,deg

変位	天秤/スティング 結合状態の変位	スティングの影響	天秤単体の変位
ΔX by $F_{X(max)}$	0.121	0.001	0.120
ΔY by $F_{Y(max)}$	0.435	0.022	0.378
ΔY by $M_{Z(max)}$	0.171	0.039	0.060
ΔZ by $F_{Z(max)}$	1.901	0.152	1.503
ΔZ by $M_{Y(max)}$	-0.520	-0.099	-0.243
$\Delta\phi$ by $M_{X(max)}$	0.398	0.042	0.356
$\Delta\theta$ by $F_{Z(max)}$	-0.178	-0.111	-0.066
$\Delta\theta$ by $M_{Y(max)}$	0.637	0.081	0.557
$\Delta\psi$ by $F_{Y(max)}$	0.021	0.016	0.005
$\Delta\psi$ by $M_{Z(max)}$	0.439	0.032	0.407

ステイング先端



天秤ステイング結合状態

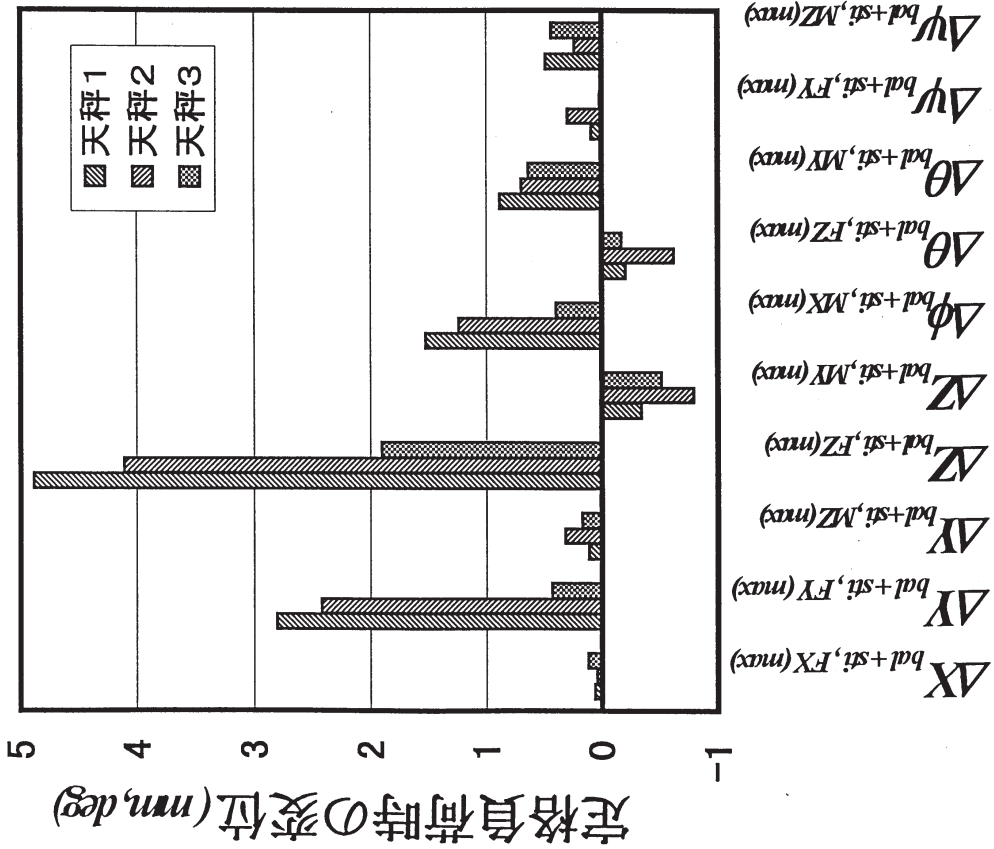


図52: 校正試験用ステイングの先端変位

図51: 天秤 / ステイング結合状態での剛性比較

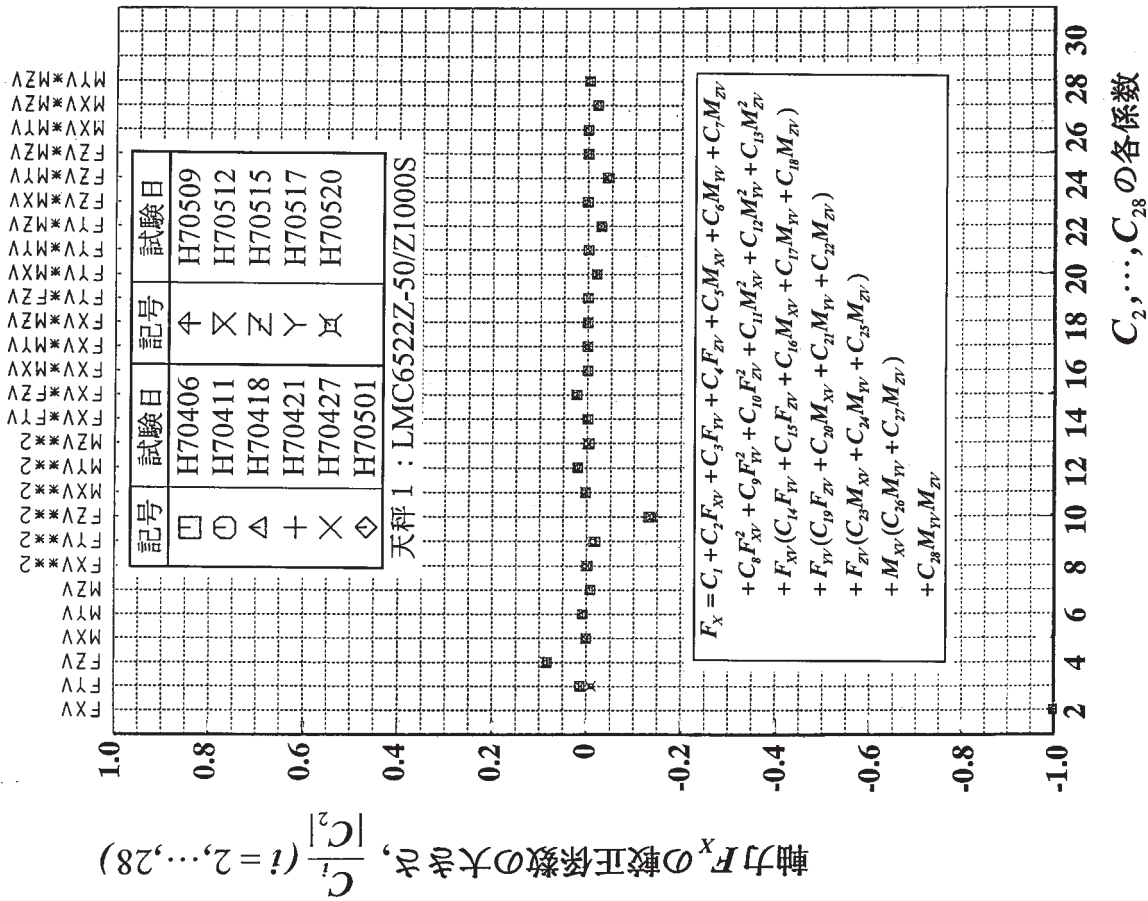


図 54 : 天秤 1 (LMC6522Z-50/Z1000S) の特性 (F_x の較正係数 $C_2 \sim C_{28}$)

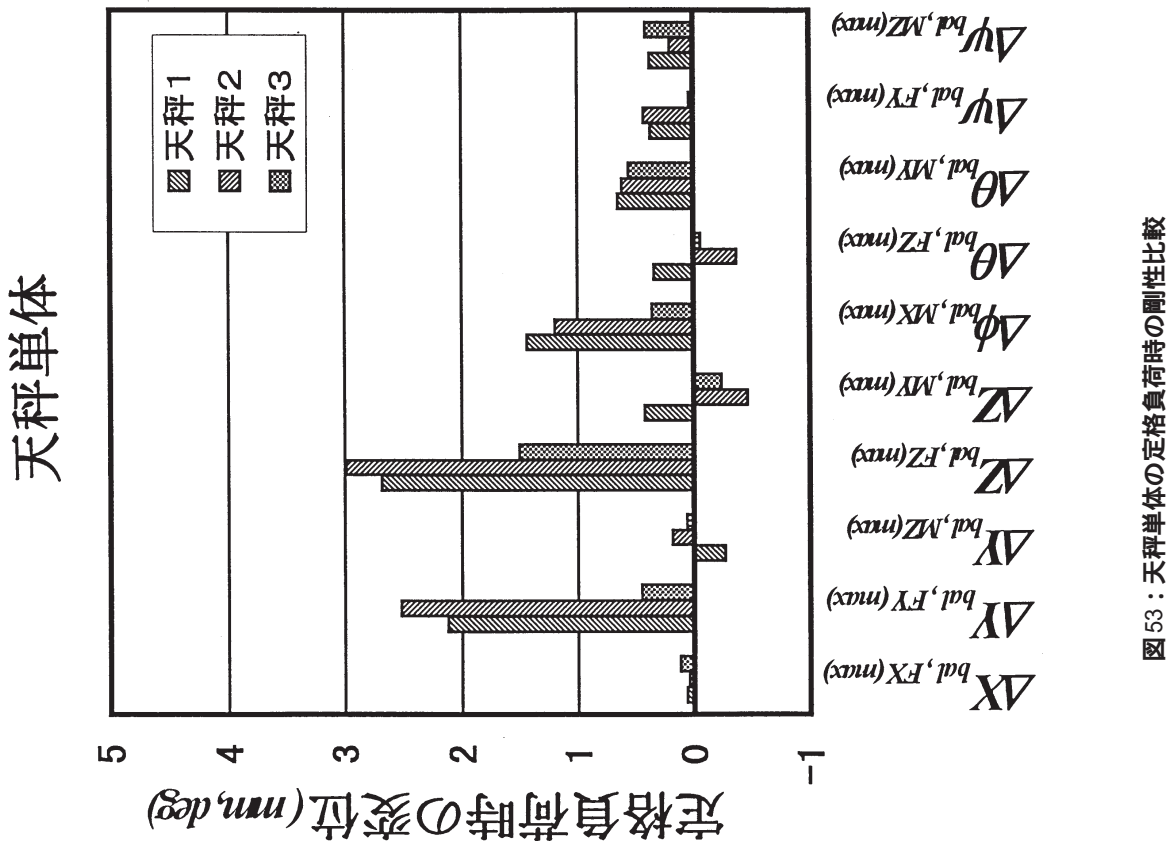


図 53 : 天秤単体の定格負荷時の剛性比較

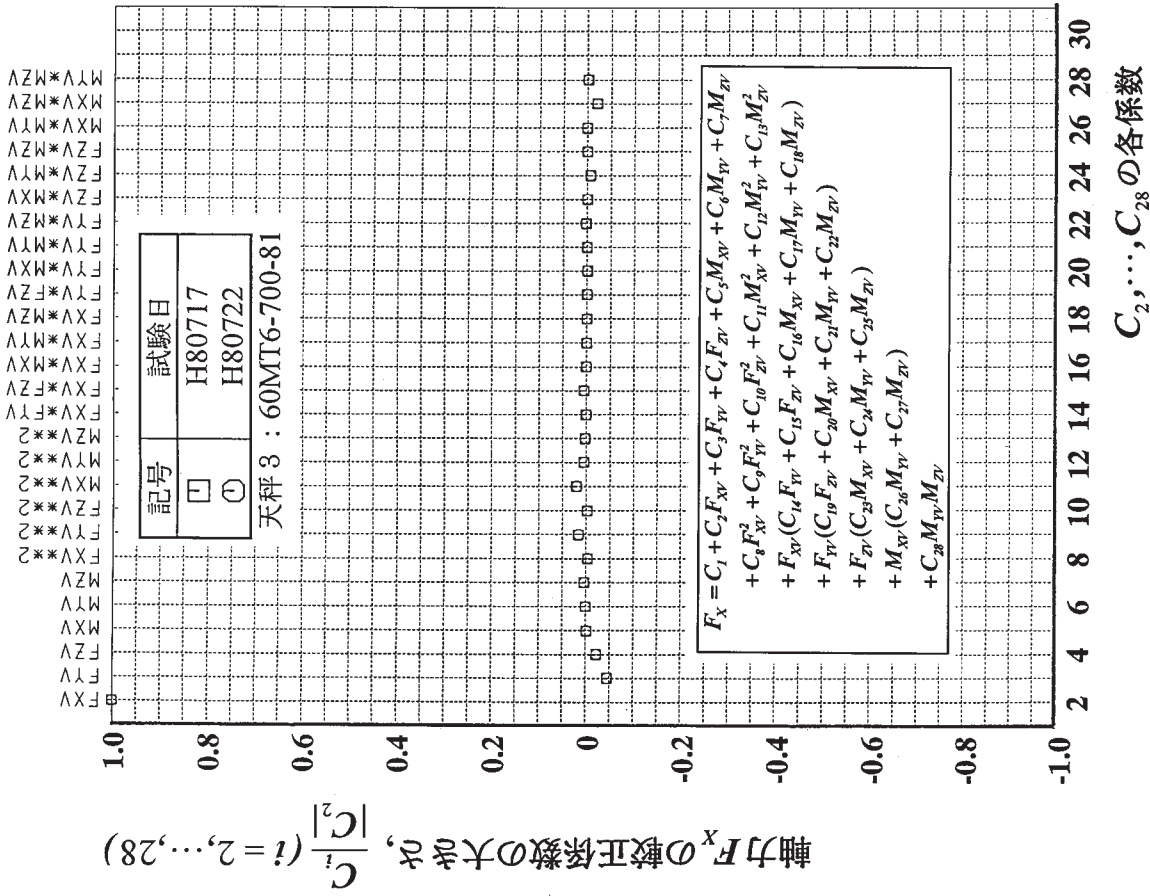


図 56 : 天秤 3 (60MT6-700-81) の特性 (F_x の較正係数 $C_2 - C_{28}$)

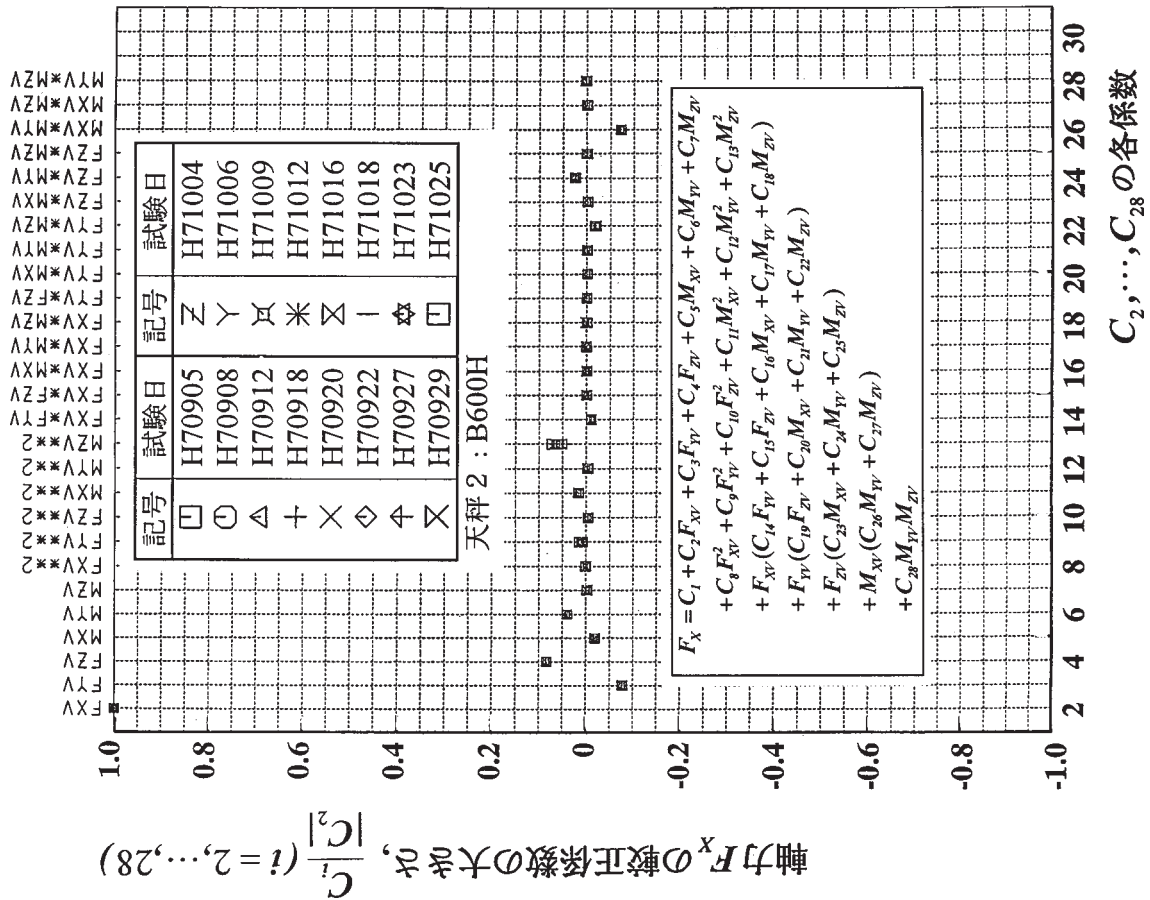


図 55 : 天秤 2 (B660H) の特性 (F_x の較正係数 $C_2 - C_{28}$)

7.まとめ

航技研の複合荷重式自動天秤較正装置を用いて3体の6分力天秤の剛性の決定を試みた。供試天秤はいずれも一体式の内挿天秤で製作会社はそれぞれ異なる。天秤を設計する場合、天秤剛性をどの程度に押さえるかは重要な問題であるが、設計者の考えにかなり違いが見られ、その結果比較的類似した大きさの天秤にもかかわらず剛性に大幅な違いが見られた。本試験を通して以下の知見が得られた。

- (1) 天秤の剛性を決定する手順を確立した。
- (2) $\phi 50 - \phi 60$ 程度の天秤でも、ゲージ貼付位置、天秤感度、温度特性等に十分注意を払った上で、剛性を高くとる工夫をすれば天秤の干渉をかなり小さく押さえることが出来る。
- (3) 剛性の小さい天秤では、二次干渉項を無視できず複合荷重による天秤較正が重要である。

参考文献

- 1) 河本 巖、鈴木弘一、中村正剛、小国保男、飯島由美；内挿式六分力天秤の較正について、第二報 .複合荷重式自動天秤較正装置の開発、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、小国保男、飯島由美；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、航空宇宙技術研究所資料 TM-697、1996年7月

航空宇宙技術研究所資料719号

平成9年12月発行

発行所 科学技術庁航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7-44-1
電話(0422)47-5911 〒182
印刷所 株式会社実業公報社
東京都千代田区九段北1-7-8

© 禁無断複写転載

本書(誌)からの複写、転載を希望される場合は、企画室
調査普及係にご連絡ください。

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-719

内挿式六分力天秤の較正について 第四報 . 天秤特性と剛性に関する考察

河本 巖 ・ 鈴木 弘一 ・ 小国 保男 ・ 中村 正剛
室田 勝一 ・ 野中 修 ・ 飯島 由美

1997年12月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY