

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-641

ケーブル支持動的風洞試験模型の慣性特性推定

柳 原 正 明 ・ 永 安 正 彦
佐 々 修 一 ・ 下 村 卓

1991年10月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

ケーブル支持動的風洞試験模型の慣性特性推定*

柳 原 正 明^{*1} 永 安 正 彦^{*1}
佐 々 修 一^{*1} 下 村 卓^{*1}

Estimation of Cable-Mounted Model Inertia Characteristics for Dynamic Wind-Tunnel Test*

Masaaki YANAGIHARA^{*1}, Masahiko NAGAYASU^{*1}
Shuichi SASA^{*1}, Takashi SHIMOMURA^{*1}

ABSTRACT

The inertia characteristics of a National Aerospace Laboratory (NAL) Spaceplane cable-mounted model (1:20) used for dynamic wind tunnel tests were experimentally estimated. The estimated parameters consisted of the vertical position of the model's center of gravity, the inertia moments I_x , I_y and I_z , and the product of inertia I_{xz} . The method was based on a bifilar pendulum system and estimation errors were evaluated. As a result, the moment of inertia I_y and I_z were estimated within an about $\pm 1\%$ error, although I_x and the product of inertia I_{xz} had larger errors. An analysis of the estimation error confirmed that the errors for I_x and I_{xz} can be improved by using a smaller suspension rig.

Keyword : moment of inertia, cable-mounted model, bifilar pendulum

概 要

ケーブル支持方式動的風洞試験用 5%スペースプレーン模型の慣性特性推定実験を行った。推定対象は上下重心位置と 3 軸回りの慣性モーメント I_x , I_y , I_z 及び慣性乗積 I_{xz} とし、計測方法は 2 本吊り自由振動法を用いた。また、それらの持つ誤差についても最大推定値の計算を行った。その結果、 I_y , I_z 及び重心位置に関しては良好な誤差範囲内で推定が行われたが、 I_x 及び I_{xz} については比較的大きな誤差を持つ可能性が生じた。これらの結果については測定に使用する吊り下げ治具として小型軽量のものを用いれば改善されることが確認された。

* 平成 3 年 9 月 2 日受付 (Received 2 september 1991)

*1 制御部 (Control Systems Division)

目 次

1. まえがき	3
記 号	3
2. ケーブル支持方式動的風洞試験と模型慣性特性	4
3. 実験方法及び装置	5
4. 誤差解析	14
5. 結果及び考察	27
6. あとがき	37
参考文献	37
付録A：スペースプレーン模型	37
付録B：2本吊り自由振動法	39

1. ま え が き

航空機の動的運動が空気力に及ぼす影響を実機飛行に先だって実験的に推定するためには動的風洞試験技術及びパラメータ推定技術の確立が要求される。航空宇宙技術研究所ではこの目的のため、ケーブル支持方式による動的風洞試験を実施している。¹⁾ 動的風洞試験では模型に作用する外力を直接計測することが不可能であるため、計測された運動データと模型慣性量を運動方程式に代入することにより推定する方法が取られる。この際に模型慣性量（質量、慣性モーメント、慣性乗積、重心位置）を正確に知ることが必要不可欠であり、またその推定精度は実験結果に大きな影響を及ぼす。このため今回風洞試験の対象であるスペースプレーン5号模型（付録A）の慣性特性の推定実験を行い、その結果の持ち得る最大誤差の推定も同時に行った。本資料ではその実験方法と結果について述べる。

記 号

A_x, A_y, A_z	: x, y, z 方向の加速度
a_1, a_2	: 2本のワイヤーから重心までの距離
d	: 治具の2個のワイヤー取付点間の距離
e	: 最大計測誤差, あるいは最大推定誤差
g	: 重力加速度
I_x, I_y, I_z	: x, y, z 軸まわりの慣性モーメント
I_{yz}, I_{xz}, I_{xy}	: yz, xz, xy 平面内の慣性乗積
$I_{z'}$: z' 軸まわりの慣性モーメント
l	: ワイヤーの長さ
$L, M, N,$: x, y, z 軸まわりの外力のモーメント
m	: 質量
m_1, m_2	: 2台の台秤の指示値
p, q, r	: 機体軸 x, y, z まわりの角速度
t	: 時間
T_D	: 自由周期
X, Y, Z	: x, y, z 軸方向の外力
Δ_{CG}	: 重心位置の基準点からの変位
δ	: 対数減衰率
ϵ	: 計測誤差, あるいは推定誤差
θ	: 縦揺れ姿勢角
ζ	: 空力ダンピング係数

添字

A	: 模型単体
B	: 治具単体
C	: 治具模型合成物体

肩字

+	: 頭上げ
-	: 頭下げ

2. ケーブル支持方式動的風洞試験と模型慣性特性

従来から行われている静的風洞試験では模型は風洞に対して支柱等により固定されており、計測された空気力には機体の回転運動等による動的影響が含まれていない。そのためこの動的影響項は理論的に推定する方法がとられているが、この動的影響項を実験的に求めようとするのがケーブル支持方式風洞試験^{1, 2)}である。図2-1に同方式動的風洞試験の概念図を示す。模型は前後2本のケーブルにより各

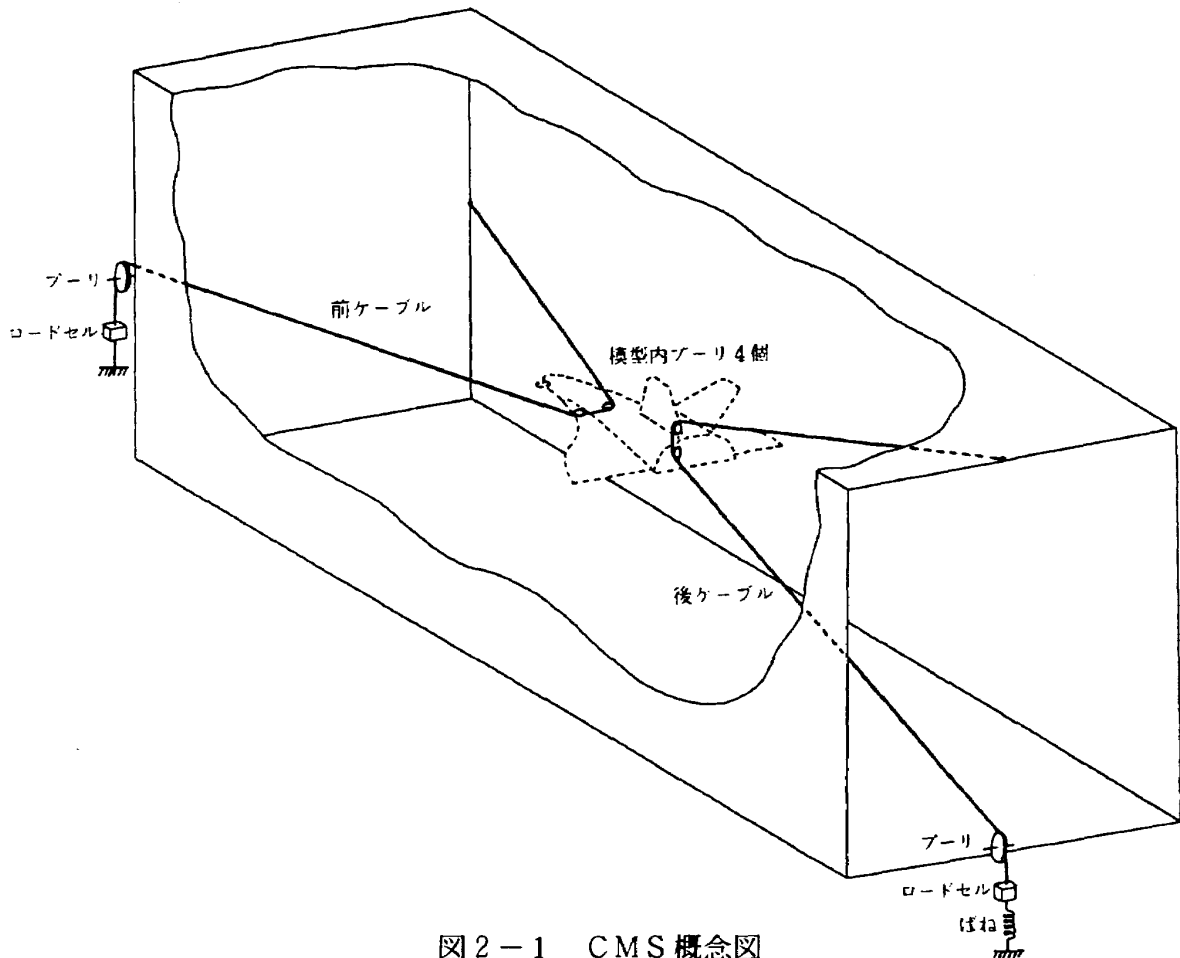


図2-1 CMS概念図

各2個のプーリを介して支持されている。後方ケーブルにはばねが含まれているため、模型は運動の自由度を持つことになる。通風状態の風洞の中で釣合状態の模型に対し適当な操舵入力を行えば運動が励起され、その際に計測されたデータを用いて自由飛行の場合と同様の空力モデル（線形もしくは非線形）同定法³⁾を行えば空力モデルが得られる。しかし静的風洞試験では模型に作用する外力は6分力天秤により直接計測されるが、動的風洞試験では直接計測することが不可能であるため、以下の運動方程式⁴⁾を用いてこれを推定する必要がある。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = m \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_x & 0 & -I_{xz} \\ 0 & I_y & 0 \\ -I_{xz} & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_x & 0 & -I_{xz} \\ 0 & I_y & 0 \\ -I_{xz} & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

ここで X, Y, Z と L, M, N は模型に作用する外力及び外力モーメントの機体軸 x, y, z 成分, A_x, A_y, A_z は 3 軸方向の直線加速度, $\dot{p}, \dot{q}, \dot{r}$ と p, q, r は各々 3 軸回りの角加速度及び角速度, m, I_x, I_y, I_z と I_{xz} は模型の慣性特性であり, 各々質量, 3 軸回り慣性モーメント, xz 平面慣性乗積である。なお模型の対称性より慣性乗積 I_{xy} と I_{yz} は 0 としている。模型の加速度, 角速度は模型の 3 軸方向に装備された加速度計, 角速度計により計測され, 角加速度は角加速度計により直接計測されるか, あるいは角速度データを数値微分することにより得られる。したがって模型の慣性特性がわかれば模型に作用する外力およびモーメントを上式に従い計算することができる。本実験の目的はケーブル支持方式動的風試を進めるために必要不可欠となる機体軸基準の慣性モーメント I_x, I_y, I_z , 慣性乗積 I_{xz} の値と運動方程式を記述する際の基準となる模型重心位置を正確に推定することである。

3. 実験方法及び装置

慣性モーメントの計測法としては付加質量自由振動法等種々の方法があるが,⁵⁾パラメータ同定技術と組み合わせることにより実機の慣性モーメント推定にも発展させることのできる 2 本吊り自由振動法を採用することとした。⁶⁾ 2 本吊り自由振動法は付録 B の図 B-1 に示した様に測定対象物体を 2 本のワイヤーで吊り, 重心を通る鉛直軸回りに重力による自由回転振動させることにより慣性モーメントを求める方法である。この方法によると物体の重心を通る鉛直軸まわりの慣性モーメント I は次式により求められる。

$$I = \frac{a_1 \cdot a_2 \cdot m \cdot g}{(4\pi^2 + \delta^2)l} T_D^2 \quad (3.1)$$

ただし m は物体の質量, a_1, a_2 は 2 本のワイヤーから重心までの水平距離, l はワイヤーの長さ, g は重力加速度, T_D と δ は回転振動の自由周期と対数減衰率である。2 本吊り自由振動法と (3.1) 式の導出については付録 B に示す。

今回の推定対象であるスペースプレーン模型に 2 本吊り自由振動法を適用するにあたり, 模型自体にワイヤーを取り付けることが困難であること, 3 軸回りの計測が容易に行えること等の理由により図 3-1 に示す吊り下げ治具を用いることとした。模型は 2 本の支柱により治具内に固定される。当初はこの固定状態において模型と治具の重心位置を一致させる予定であったため, 治具は前後, 上下及び左右対称となる様に設計を行ったが, 後述する様に模型内に搭載した各種計測機器の影響により両者の重心は一致させることができず補正が必要となった。治具はアルミニウム・ハニカムを FRP により挟んだサンドウィッチ構造となっており, 軽量でかつ十分な強度を保っている。その模型機首側前面及び左翼側の側面上と上面左右の合計 6 ケ所にワイヤーの取り付け金具がついており, 図 3-1 (a), (b),

(c) に示す様に容易に 3 軸回りの計測が可能である。2 本のケーブルの両端 4 ケ所には摩擦軽減のため図 3-2 に示すナイフ・エッジ軸受けが取り付けられている。この軸受けは直交する 2 個のナイフエッジ軸受けにより構成され, 2 自由度の回転が可能となっている。実験では鉛直軸回りの回転角速度をデータとして計測した。データ計測系を図 3-3 に示す。角速度は治具に固定されたガスレートセンサにより計測され, その出力信号はローパスフィルタ, AD 変換器を経てパーソナルコンピュータに取り込まれ, 記録される。フィルタのカットオフ周波数は 1 Hz, AD 変換器からデータのサンプリング周波数は 10 Hz に設定した。こうして記録された角速度 r は付録 B の (B.15) 式によると次式の対数減衰正弦波となる。

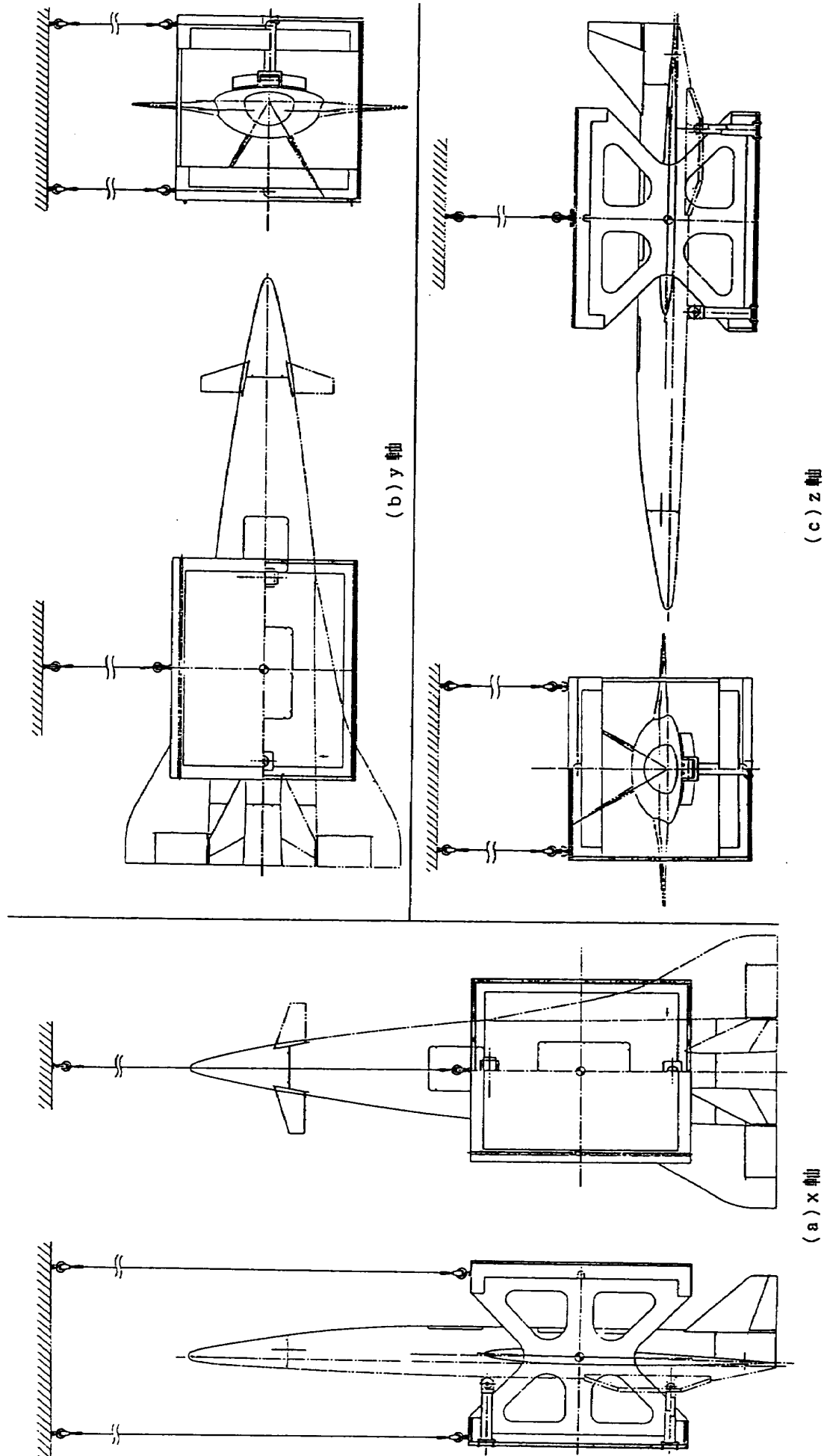


図 3-1 吊り下げ治具

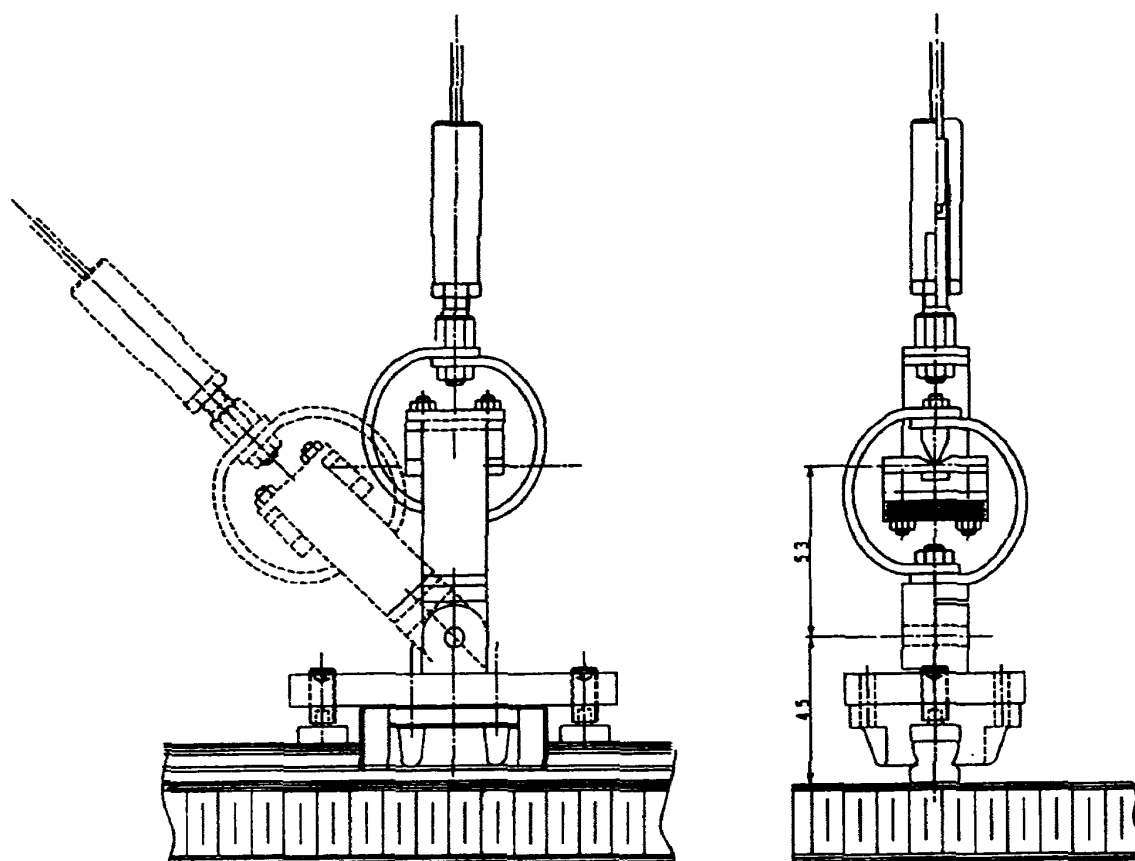


図 3 - 2 ナイフ・エッジ軸受け

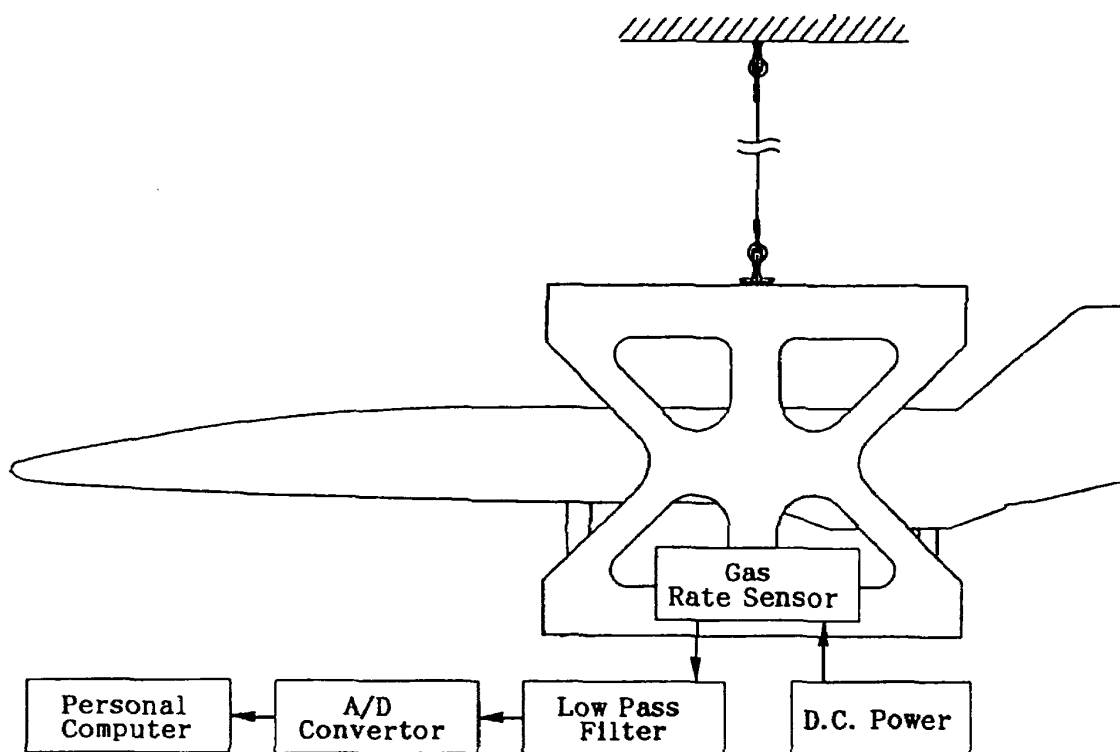


図 3 - 3 データ計測系

$$r = r_0 \cdot \exp\left(-\delta \frac{t-t_0}{T_D}\right) \cdot \sin\left(2\pi \frac{t-t_0}{T_D}\right) \quad (3.2)$$

ただし r_0 および t_0 は定数である。このモデル式を記録された角速度データにあてはめることにより自由周期 T_D と対数減衰率 δ が得られ、それらを (3.1) 式に代入することにより重心を通る鉛直軸回りの慣性モーメントが得られる。ただしこうして得られた慣性モーメントは治具と模型合成物体の慣性モーメントであり、模型単体の慣性モーメントを求める方法は後に述べる。

こうして図 3-1 (a), (b), (c) の装置設定により慣性モーメント I_x , I_y , I_z は得られるが、慣性乗積 I_{xz} は慣性モーメントの様に直接計測する方法はなく、以下の方法により間接的に求めた。治具上面左右のワイヤー取り付け金具は前後に移動可能であり、図 3-4 に示す様に頭上げあるいは頭下げ状態での自由振動が行える。このときの縦揺れ姿勢角を θ とし、座標軸 x , y , z を y 軸回りに角度 $-\theta$ だけ回転させた新しい座標系 x' , y , z' を考える。これらの両座標系の関係は次の様になる。

$$x' = \cos \theta \cdot x + \sin \theta \cdot z \quad (3.3)$$

$$z' = -\sin \theta \cdot x + \cos \theta \cdot z \quad (3.4)$$

一方慣性モーメント I_x , I_z と慣性乗積 I_{xz} は次式で定義される。

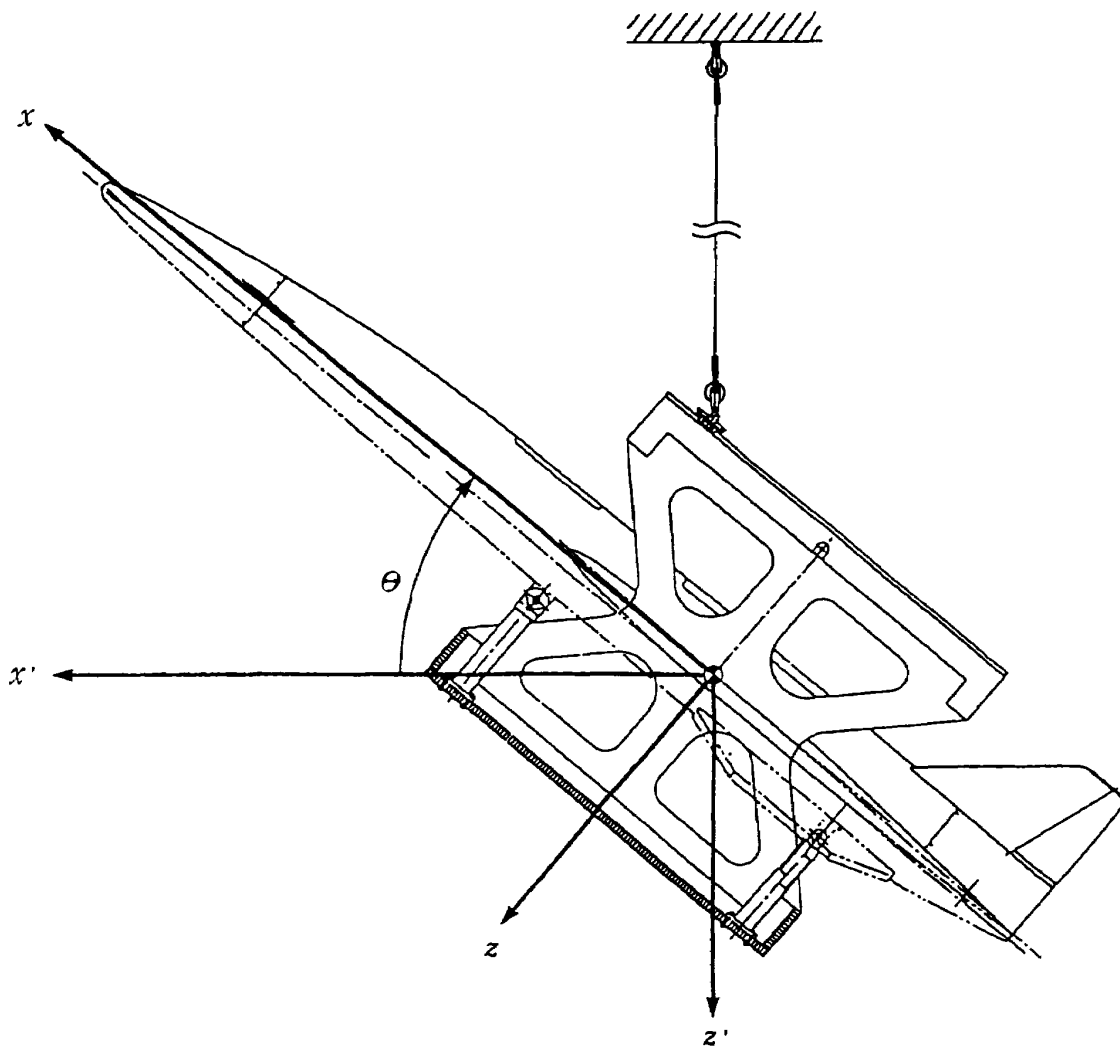


図 3-4 慣性乗積の推定

$$I_x = \int (y^2 + z^2) dm \quad (3.5)$$

$$I_z = \int (x^2 + y^2) dm \quad (3.6)$$

$$I_{xz} = \int xz dm \quad (3.7)$$

ここで dm は対象物体上の微小部分の質量, x, y, z はその微小部分の 3 軸座標であり, 積分は物体全体上で行う。図 3-4 の装置設定により求められる慣性モーメントは z' 軸回りのものであり, これを $I_{z'}$ と書けばこれは次の様に表される。

$$I_{z'} = \int (x'^2 + y^2) dm \quad (3.8)$$

(3.3) 式を代入して整理すると

$$\begin{aligned} I_{z'} &= \int \{ (\cos \theta \cdot x + \sin \theta \cdot z)^2 + y^2 \} dm \\ &= \int (\cos^2 \theta \cdot x^2 + 2 \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot xz + \sin^2 \theta \cdot z^2 + y^2) dm \\ &= \int \{ \cos^2 \theta (x^2 + y^2) + 2 \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot xz + \sin^2 \theta (z^2 + y^2) \} dm \\ &= \cos^2 \theta \cdot \int (x^2 + y^2) dm + 2 \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot \int xz dm + \sin^2 \theta \cdot \int (z^2 + y^2) dm \\ &= \cos^2 \theta \cdot I_x + \sin 2\theta \cdot I_{xz} + \sin^2 \theta \cdot I_z \end{aligned} \quad (3.9)$$

この式より I_{xz} を解くと

$$I_{xz} = \frac{-\sin^2 \theta \cdot I_x - \cos^2 \theta \cdot I_z + I_{z'}}{\sin 2\theta} \quad (3.10)$$

これより $I_{z'}$, θ と既に得られている I_x, I_z を用いれば慣性乗積 I_{xz} を計算することができる。なお, 慣性乗積は頭上げ及び頭下げの両試験より各々 (3.10) 式により計算し, その平均をとることとした。すなわち頭上げ状態の試験より推定された I_{xz} を I_{xz}^+ , 同じく頭下げ状態によるものを I_{xz}^- とすれば

$$I_{xz} = \frac{I_{xz}^+ + I_{xz}^-}{2} \quad (3.11)$$

以上により模型と治具の合成物体の慣性モーメント, 慣性乗積が得られた。模型と治具の重心位置が一致している場合には治具単体により全く同様の試験を行い, 合成物体の試験結果から治具単体の結果を差し引くことにより簡単に模型単体の慣性モーメント, 慣性乗積が得られる。治具の重心は模型の設計重心と一致する様に製作されたが, 2 本の支柱の影響により対称中心より上下方向に変位を持った。また模型の重心も搭載計測機器のために設計重心から変位を持つこととなった。この模型重心の変位は y 軸 (左右軸) 及び x 軸 (前後軸) 方向には模型内の機器の水平位置を調整することにより 0 とすることができたが, z 軸 (上下軸) 方向は調整方法がないため, 結果として治具と模型の重心は z 軸方向に偏差をもったために補正が必要となった。図 3-5 において CG_A を模型, CG_B を治具, CG_C を治具と模型の合成物体各々の重心位置とし, 各々の重心を原点とする座標系 (x_A, y_A, z_A) , (x_B, y_B, z_B) , (x_C, y_C, z_C) を設定する。各座標系は z 軸方向に平行移動した関係となっている。また各重心の上下位置を設計基準点 (治具の 3 つの対称面の交点, 設計では CG_A, CG_B, CG_C はすべてこの一点に一致) から上方を正として $d_{CGA}, d_{CGB}, d_{CGC}$, 各物体の質量を m_A, m_B, m_C とし, 模型の y_A 軸回

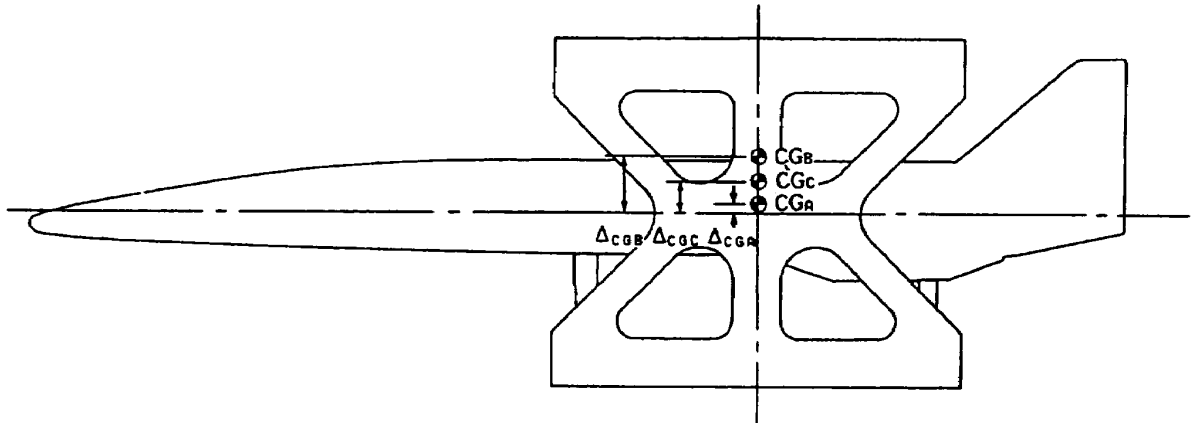


図 3-5 重心位置の補正

りの慣性モーメント及び $x_A z_A$ 平面慣性乗積を I_{yA} , I_{xzA} , 治具の y_B 軸回りの慣性モーメント及び $x_B y_B$ 平面慣性乗積を I_{yB} , I_{xzB} , 合成物体の y_C 軸回りの慣性モーメント及び $x_C z_C$ 平面慣性乗積を I_{yC} , I_{xzC} とする。この時, 次の関係式がある。

$$m_C = m_A + m_B \quad (3.12)$$

$$m_C \cdot \Delta_{CGC} = m_A \cdot \Delta_{CGA} + m_B \cdot \Delta_{CGB} \quad (3.13)$$

これらの式より模型の質量及び重心位置は次の様に表すことができる。

$$m_A = m_C - m_B \quad (3.14)$$

$$\Delta_{CGA} = \frac{m_C \cdot \Delta_{CGC} - m_B \cdot \Delta_{CGB}}{m_A} \quad (3.15)$$

この時, 模型及び治具の y_C 軸まわりの慣性モーメント及び $x_C z_C$ 平面慣性乗積を各々 I_{yA}' , I_{yB}' , I_{xzA}' , I_{xzB}' とすると, 慣性モーメント, 慣性乗積の定義式及び CG_A , CG_B が各々模型及び治具の重心であることよりこれらは

$$I_{yA}' = I_{yA} + m_A (\Delta_{CGA} - \Delta_{CGC})^2 \quad (3.16)$$

$$I_{yB}' = I_{yB} + m_B (\Delta_{CGB} - \Delta_{CGC})^2 \quad (3.17)$$

$$I_{xzA}' = I_{xzA} \quad (3.18)$$

$$I_{xzB}' = I_{xzB} \quad (3.19)$$

と表せる。 I_{yC} は I_{yA}' と I_{yB}' の和, I_{xzC} は I_{xzA}' と I_{xzB}' の和であるから, これらの式より,

$$\begin{aligned} I_{yC} &= I_{yA}' + I_{yB}' \\ &= I_{yA} + I_{yB} + m_A (\Delta_{CGA} - \Delta_{CGC})^2 + m_B (\Delta_{CGB} - \Delta_{CGC})^2 \\ &= I_{yA} + I_{yB} + \frac{m_B \cdot m_C}{m_A} (\Delta_{CGC} - \Delta_{CGB})^2 \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$I_{xzC} = I_{xzA}' + I_{xzB}' = I_{xzA} + I_{xzB} \quad (3.21)$$

ただし (3.14), (3.15) 式の関係を用いている。これより

$$I_{yA} = I_{yC} - I_{yB} - \frac{m_B \cdot m_C}{m_A} (\Delta_{CGC} - \Delta_{CGB})^2 \quad (3.22)$$

$$I_{xzA} = I_{xzC} - I_{xzB} \quad (3.23)$$

x 軸回り慣性モーメントについても同様の式が導かれる。

$$I_{xA} = I_{xC} - I_{xB} - \frac{m_B \cdot m_C}{m_A} (\Delta_{CGC} - \Delta_{CGB})^2 \quad (3.24)$$

z 軸回りの慣性モーメントについてはこの重心位置の変位の影響は受けない。

$$I_{zA} = I_{zC} - I_{zB} \quad (3.25)$$

(3.14), (3.15) 式と (3.22) ~ (3.25) 式により模型単体の慣性量が治具単体及び治具模型合成物体の慣性量により表された。治具及び合成物体の各々の重心を原点とした座標系基準の慣性モーメント, 慣性乗積は実験により得られており, また両者の上下重心位置 Δ_{CGB} , Δ_{CGC} は次式により求める。

$$\Delta_{CGB} = \left[\frac{m_{2B}}{m_B} - \frac{1}{2} \right] d \quad (3.26)$$

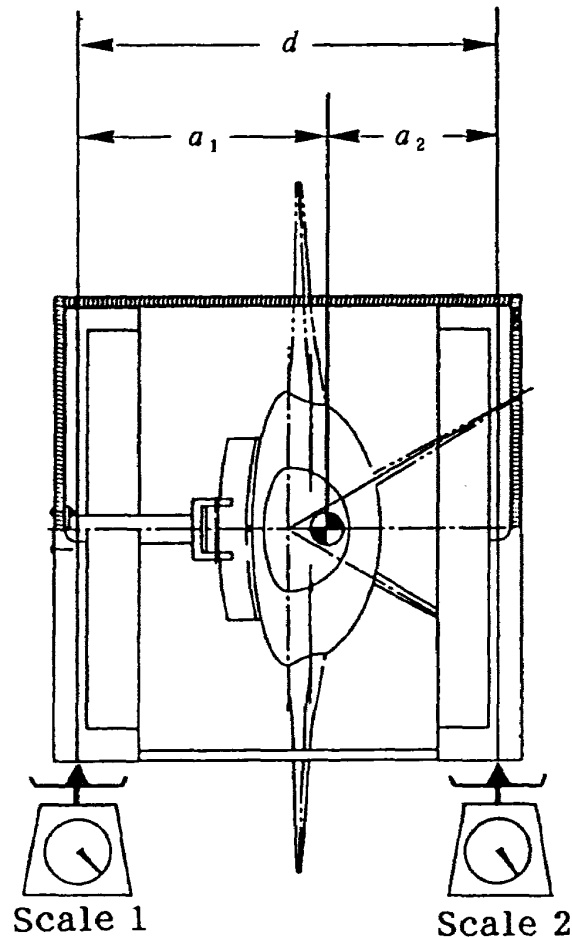


図3-6 上下重心位置の推定

$$\Delta_{CGC} = \left[\frac{m_{2C}}{m_C} - \frac{1}{2} \right] d \quad (3.27)$$

ただし m_{2C} は図 3-6 の様に治具側面の 2 本のワイヤーの取り付け点を支点として配置された 2 個の台秤の内、Scale 2 と示された秤の指示値、 d は両支点間の距離、すなわち 2 本のワイヤー間の距離であり、 m_{2B} は同様に治具単体での秤の指示値である。また質量 m_A 、 m_B 、 m_C は各々 1 台の台秤を用いて直接計測することができるが、推定に使用する計測量の数を減らした方が結果の持つ誤差が小さくなることが誤差解析の結果判明し、これらは図 3-6 により計測された値を用いて下式に従い計算することとした。

$$m_B = m_{1B} + m_{2B} \quad (3.28)$$

$$m_C = m_{1C} + m_{2C} \quad (3.29)$$

$$m_A = m_C - m_B = m_{1C} + m_{2C} - m_{1B} - m_{2B} \quad (3.30)$$

ただし m_{1C} 及び m_{1B} は図 3-6 の Scale 1 の指示値である。また治具単体あるいは合成物体の慣性モーメント I_x 、 I_y を (3.1) 式により求める際の a_1 、 a_2 は下式により求めることができる。

$$a_{1B} = \frac{1}{2} d + \Delta_{CGB} = \frac{m_{2B}}{m_B} d \quad (3.31)$$

$$a_{1C} = \frac{1}{2} d + \Delta_{CGC} = \frac{m_{2C}}{m_C} d \quad (3.32)$$

$$a_{2B} = \frac{1}{2} d - \Delta_{CGB} = \frac{m_{1B}}{m_B} d \quad (3.33)$$

$$a_{2C} = \frac{1}{2} d - \Delta_{CGC} = \frac{m_{1C}}{m_C} d \quad (3.34)$$

I_z あるいは I_z' を求める際の a_1 と a_2 は $d/2$ に等しい。

以上により模型単体の慣性量を求めるための式が導かれた。これらの作業を実験における手順に従い、流れ図として示したものが図 3-7 である。治具単体、模型単体及び治具模型合成物体に対する作業を各々破線により囲んでいるが、治具単体に対する作業は治具模型合成物体に対する作業と同一であるので図では省略している。なお重心位置計算 (3.27)、(3.32) 及び (3.34) 式において必要な治具側面のワイヤー取り付け点間の距離 d の設計値は 0.9 m である。また頭上げ及び頭下げ状態での 2 本吊り自由振動実験の際には縦揺れ姿勢角 θ^+ 、 θ^- を傾斜角計を用いて計測した。続いて (3.1) 式により I_z 、 I_z^+ 、 I_z^- を計算する際の a_1 、 a_2 は左右対称性より $d/2$ である。実験に使用した吊り下げワイヤーはステンレス製で自然長 4.0 m、ばね定数は 72.1 N/mm であり、(3.1) 式において必要なワイヤー長さ l はこれらの値に従い吊り下げ物の質量に対応して計算した。重力加速度 g は海面上における標準値 9.80665 m/s² とした。

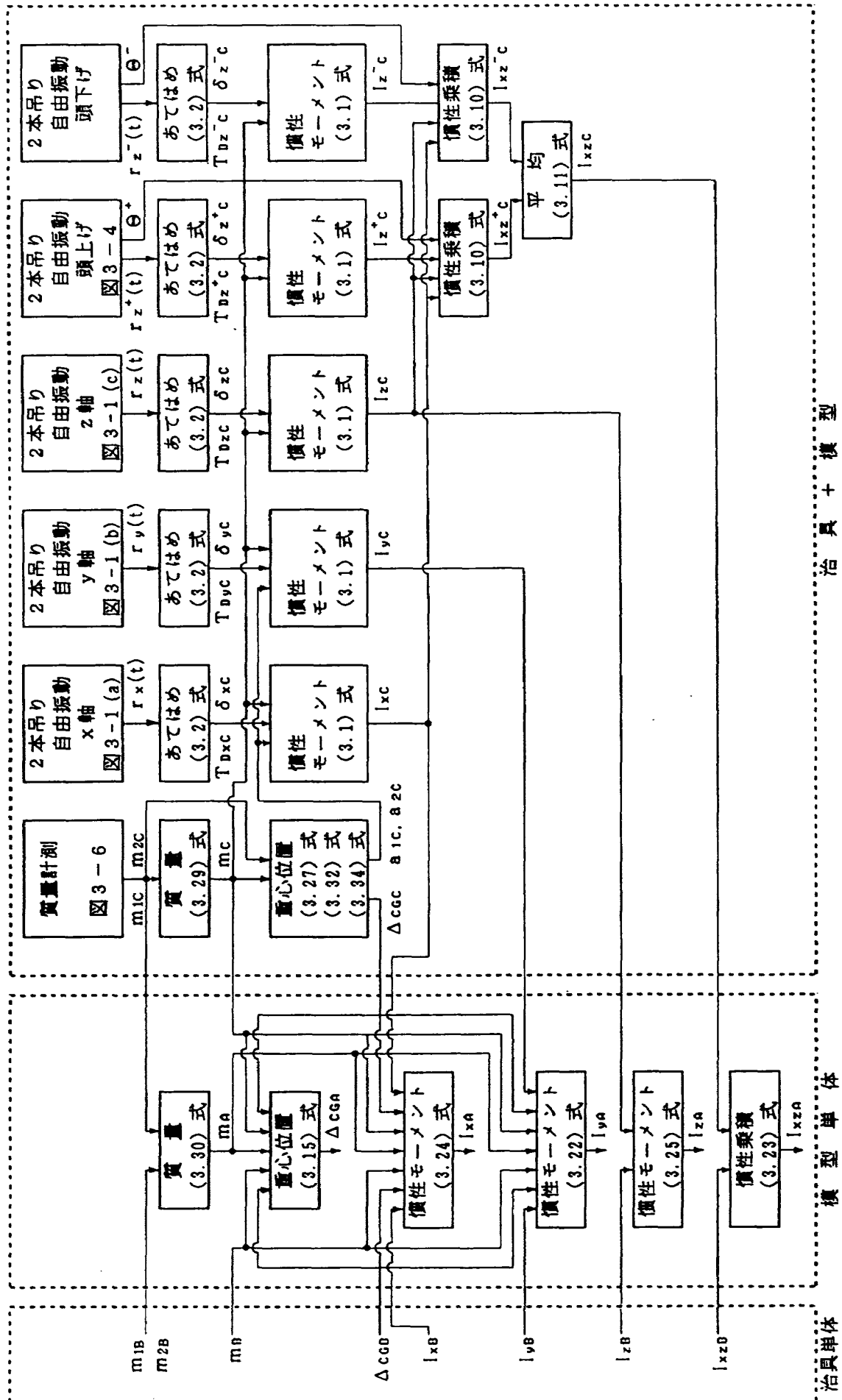


図 3-7 作業の流れ

4. 誤差解析

前章において導かれた式により模型単体の慣性量の推定が行われるが、これらの推定値は種々の測定値に基づき計算されるため、各測定値が誤差を持った場合推定結果はその影響を受けることになる。本章では推定結果の持ち得る最大誤差を各測定値の持つ測定誤差の関数として表すことを考える。この関数形が導かれれば各測定値の持ち得る最大誤差を用いて推定結果の持つ誤差の最大値を推定することができる。簡単化のためここでは個々の測定値の持つ誤差は微小であるとし、その2次以上の項は無視できると仮定することにすれば最終推定結果の持つ誤差は各測定誤差の線形結合として表される。以下の1)から6)においてまず治具単体あるいは模型治具合成物体の慣性量推定値の誤差式を求め、それを用いて7)から11)において模型単体慣性量の推定誤差を各測定値の誤差の線形結合の形として表現する。なお、1)から6)までは治具単体の場合と治具模型合成物体の場合の計算は同じであるため両者を同時に考えることとして各々を表す添え字 B, C は省略しており、それらの結果を7)以下で使用する場合には添え字 B, C を付けることとする。また特に断わらない限り ϵ で表される誤差は真値から増加する方向を正とする。

1) 治具単体あるいは治具模型合成物体の質量 m

m は (3.28) あるいは (3.29) 式より求める。これらの計算値の持つ誤差を ϵ_m と書けば (3.28) あるいは (3.29) 式より

$$\epsilon_m \doteq \frac{\partial m}{\partial m_1} \epsilon_{m1} + \frac{\partial m}{\partial m_2} \epsilon_{m2} = \epsilon_{m1} + \epsilon_{m2} \quad (4.1)$$

ただし $\epsilon_{m1}, \epsilon_{m2}$ は各々 m_1, m_2 の測定値の持つ誤差であり、その最大絶対値は秤の精度である。これを e_m とおくと

$$\max |\epsilon_m| = \max |\epsilon_{m1}| + \max |\epsilon_{m2}| = 2e_m \quad (4.2)$$

ここで (3.28) あるいは (3.29) を用いて計算される質量は他の慣性量を求める際に使用するものであり、質量を単独で用いる際には各々を直接台秤により計測することによりその誤差は秤の精度とすることができる。

$$\max |\epsilon_m| = e_m \quad (4.3)$$

2) 治具単体あるいは治具模型合成物体の上下重心位置 d_{cg}

これらは (3.26) あるいは (3.27) 式より計算される。これらの持つ誤差を ϵ_{cg} と書けばこれは第1項 $(m_2/m)d$ の誤差と第2項 $-(1/2)d$ の誤差の和となる。ただし第1項の d は図3-6の2台の台秤の支点1, 2の間の距離であり、また第2項の $(1/2)d$ は設計基準点から支点1までの距離である。台秤の支点1, 2はワイヤー取り付け点と一致する様に置かれたが、実際には誤差を持つ。この1, 2両支点の設置誤差を各々外側に向かって $\epsilon_{p1}, \epsilon_{p2}$ とする。また、2個のワイヤー取り付け点自体も設計点に対して変位を持つ。これを各々外側に向けて $\epsilon_{d1}, \epsilon_{d2}$ とすると第1項の d の誤差は $\epsilon_{d1} + \epsilon_{d2} + \epsilon_{p1} + \epsilon_{p2}$ 、第2項の $(1/2)d$ の誤差は $\epsilon_{d1} + \epsilon_{p1}$ と表すことができる。したがって

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{CG} &= \frac{\partial \Delta_{CG}}{\partial m} \varepsilon_m + \frac{\partial \Delta_{CG}}{\partial m_2} \varepsilon_{m2} + \frac{m_2}{m} (\varepsilon_{d1} + \varepsilon_{d2} + \varepsilon_{p1} + \varepsilon_{p2}) - (\varepsilon_{d1} + \varepsilon_{p1}) \\
 &= -\frac{m_2 \cdot d}{m^2} (\varepsilon_{m1} + \varepsilon_{m2}) + \frac{d}{m} \varepsilon_{m2} + \frac{m_2 - m}{m} (\varepsilon_{d1} + \varepsilon_{p1}) + \frac{m_2}{m} (\varepsilon_{d2} + \varepsilon_{p2}) \\
 &= -\frac{m_2 \cdot d}{m^2} \varepsilon_{m1} + \frac{m_1 \cdot d}{m^2} \varepsilon_{m2} - \frac{m_1}{m} \varepsilon_{d1} + \frac{m_2}{m} \varepsilon_{d2} - \frac{m_1}{m} \varepsilon_{p1} + \frac{m_2}{m} \varepsilon_{p2} \\
 &= -\frac{a_1}{m} \varepsilon_{m1} + \frac{a_2}{m} \varepsilon_{m2} - \frac{m_1}{m} \varepsilon_{d1} + \frac{m_2}{m} \varepsilon_{d2} - \frac{m_1}{m} \varepsilon_{p1} + \frac{m_2}{m} \varepsilon_{p2} \quad (4.4)
 \end{aligned}$$

この最大絶対値は

$$\begin{aligned}
 \max |\varepsilon_{CG}| &= \frac{m_2 \cdot d}{m^2} \max |\varepsilon_{m1}| + \frac{m_1 \cdot d}{m^2} \max |\varepsilon_{m2}| \\
 &\quad + \frac{m_1}{m} \max |\varepsilon_{d1}| + \frac{m_2}{m} \max |\varepsilon_{d2}| + \frac{m_1}{m} \max |\varepsilon_{p1}| + \frac{m_2}{m} \max |\varepsilon_{p2}| \\
 &= \frac{d}{m} e_m + e_d + e_p \quad (4.5)
 \end{aligned}$$

ただし $\max |\varepsilon_{d1}| = \max |\varepsilon_{d2}|$, $\max |\varepsilon_{p1}| = \max |\varepsilon_{p2}|$ と考えて良く, これらを e_d , e_p と置いている。

3) 治具単体あるいは治具模型合成物体の重心から2本のワイヤーまでの距離 a_1 , a_2

これらは I_x あるいは I_y 計測の際には (3.31) ~ (3.34) 式により計算される。ここで (3.31), (3.32) 式の $(1/2)d$ は治具の前面 (I_x 計測時) あるいは側面 (I_y 計測時) 下方のワイヤー取り付け点と設計基準点との距離であり, 一方 (3.33), (3.34) 式の $(1/2)d$ は同じく上方ワイヤー取り付け点と設計基準点との距離である。これらの持つ誤差は ε_{d1} , ε_{d2} である。したがって a_1 , a_2 の持つ誤差を各々 ε_{a1} , ε_{a2} とすれば

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{a1} &= \varepsilon_{d1} + \varepsilon_{CG} \\
 &= \varepsilon_{d1} - \frac{m_2 \cdot d}{m^2} \varepsilon_{m1} + \frac{m_1 \cdot d}{m^2} \varepsilon_{m2} - \frac{m_1}{m} \varepsilon_{d1} + \frac{m_2}{m} \varepsilon_{d2} - \frac{m_1}{m} \varepsilon_{p1} + \frac{m_2}{m} \varepsilon_{p2} \\
 &= -\frac{m_2 \cdot d}{m^2} \varepsilon_{m1} + \frac{m_1 \cdot d}{m^2} \varepsilon_{m2} + \frac{m_2}{m} \varepsilon_{d1} + \frac{m_2}{m} \varepsilon_{d2} - \frac{m_1}{m} \varepsilon_{d1} + \frac{m_2}{m} \varepsilon_{p2} \quad (4.6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{a2} &= \varepsilon_{d2} - \varepsilon_{CG} \\
 &= \varepsilon_{d2} + \frac{m_2 \cdot d}{m^2} \varepsilon_{m1} - \frac{m_1 \cdot d}{m^2} \varepsilon_{m2} + \frac{m_1}{m} \varepsilon_{d1} - \frac{m_2}{m} \varepsilon_{d2} + \frac{m_1}{m} \varepsilon_{p1} - \frac{m_2}{m} \varepsilon_{p2} \\
 &= \frac{m_2 \cdot d}{m^2} \varepsilon_{m1} - \frac{m_1 \cdot d}{m^2} \varepsilon_{m2} + \frac{m_1}{m} \varepsilon_{d1} + \frac{m_1}{m} \varepsilon_{d2} + \frac{m_1}{m} \varepsilon_{p1} - \frac{m_2}{m} \varepsilon_{p2} \quad (4.7)
 \end{aligned}$$

これらの最大絶対値は

$$\max |\varepsilon_{a1}| = \frac{d}{m} e_m + 2 \frac{m_2}{m} e_d + e_p \quad (4.8)$$

$$\max |\varepsilon_{a2}| = \frac{d}{m} e_m + 2 \frac{m_1}{m} e_d + e_p \quad (4.9)$$

次に I_z あるいは I_z' 計測の際には a_1, a_2 は $d/2$ と設定される。 y 軸方向の重心位置は対称性により xz 平面上にあるものとすれば誤差要因は実際の治具上面ワイヤー取り付け点の設計点からの変位である。左右両取り付け点が設計点から各々外に向けて $\varepsilon_{d1z}, \varepsilon_{d2z}$ 変位を持っているとすると a_1, a_2 の誤差 $\varepsilon_{a1}, \varepsilon_{a2}$ は

$$\varepsilon_{a1} = \varepsilon_{d1z} \quad (4.10)$$

$$\varepsilon_{a2} = \varepsilon_{d2z} \quad (4.11)$$

この $\varepsilon_{d1z}, \varepsilon_{d2z}$ の最大値は治具前面あるいは側面のワイヤー取り付け点の場合と同じと考えて良いから $\varepsilon_{a1}, \varepsilon_{a2}$ の最大絶対値は

$$\max |\varepsilon_{a1}| = \max |\varepsilon_{a2}| = e_d \quad (4.12)$$

4) 治具単体あるいは合成物体の x 軸, y 軸まわり慣性モーメント I_x, I_y

これらは (3.1) 式により計算される。ここでは I_x, I_y を総称して I と書くことにし, それらの持つ誤差を ε_I と書けば (3.1) 式より

$$\begin{aligned} \varepsilon_I &= \frac{\partial I}{\partial a_1} \varepsilon_{a1} + \frac{\partial I}{\partial a_2} \varepsilon_{a2} + \frac{\partial I}{\partial m} \varepsilon_m + \frac{\partial I}{\partial l} \varepsilon_l + \frac{\partial I}{\partial \delta} \varepsilon_\delta + \frac{\partial I}{\partial T_D} \varepsilon_{TD} \\ &= I \left[\frac{1}{a_1} \varepsilon_{a1} + \frac{1}{a_2} \varepsilon_{a2} + \frac{1}{m} \varepsilon_m - \frac{1}{l} \varepsilon_l - \frac{2\delta}{4\pi^2 + \delta^2} \varepsilon_\delta + \frac{2}{T_D} \varepsilon_{TD} \right] \end{aligned} \quad (4.13)$$

$\varepsilon_m, \varepsilon_{a1}, \varepsilon_{a2}$ に (4.1), (4.6), (4.7) を, a_1, a_2 に (3.31), (3.33) もしくは (3.32), (3.34) 式を代入して

$$\begin{aligned} \varepsilon_I &= I \left[-\frac{1}{m} \varepsilon_{m1} + \frac{m_1}{m \cdot m_2} \varepsilon_{m2} + \frac{1}{d} \varepsilon_{d1} + \frac{1}{d} \varepsilon_{d2} - \frac{m_1}{m_2 \cdot d} \varepsilon_{p1} + \frac{1}{d} \varepsilon_{p2} \right. \\ &\quad + \frac{m_2}{m \cdot m_1} \varepsilon_{m1} - \frac{1}{m} \varepsilon_{m2} + \frac{1}{d} \varepsilon_{d1} + \frac{1}{d} \varepsilon_{d2} + \frac{1}{d} \varepsilon_{p1} - \frac{m_2}{m_1 \cdot d} \varepsilon_{p2} \\ &\quad \left. + \frac{1}{m} \varepsilon_{m1} + \frac{1}{m} \varepsilon_{m2} - \frac{1}{l} \varepsilon_l - \frac{2\delta}{4\pi^2 + \delta^2} \varepsilon_\delta + \frac{2}{T_D} \varepsilon_{TD} \right] \\ &= I \left[+\frac{m_2}{m \cdot m_1} \varepsilon_{m1} + \frac{m_1}{m \cdot m_2} \varepsilon_{m2} + \frac{2}{d} \varepsilon_{d1} + \frac{2}{d} \varepsilon_{d2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{m_1 - m_2}{d \cdot m_2} \varepsilon_{p1} + \frac{m_1 - m_2}{d \cdot m_1} \varepsilon_{p2} - \frac{1}{l} \varepsilon_l - \frac{2\delta}{4\pi^2 + \delta^2} \varepsilon_\delta + \frac{2}{T_D} \varepsilon_{TD} \right] \end{aligned} \quad (4.14)$$

ただし $\varepsilon_l, \varepsilon_\delta, \varepsilon_{TD}$ は計算に使用した l, δ, T_D が真値に対して持つ誤差である。(4.14) 式の

最大絶対値は

$$\max |\varepsilon_I| = I \left[\frac{m_1^2 + m_2^2}{m \cdot m_1 \cdot m_2} e_m + \frac{4}{d} e_d + \frac{|m_1^2 - m_2^2|}{m_1 \cdot m_2 \cdot d} e_p + \frac{1}{l} e_l + \frac{2\delta}{4\pi^2 + \delta^2} e_\delta + \frac{2}{T_D} e_{TD} \right] \quad (4.15)$$

ただし

$$e_l = \max |\varepsilon_l| \quad (4.16)$$

$$e_\delta = \max |\varepsilon_\delta| \quad (4.17)$$

$$e_{TD} = \max |\varepsilon_{TD}| \quad (4.18)$$

と置いている。

5) 治具単体あるいは合成物体の z 軸, z' 軸まわり慣性モーメント $I_z, I_{z'}$

これらも(3.1)式により計算され, これらの持つ誤差を総称して ε_I と書けば x 軸, y 軸の場合と同様にこの誤差は(4.13)式で表される。しかしこの場合の $\varepsilon_m, \varepsilon_{a1}, \varepsilon_{a2}$ には(4.1), (4.10), (4.11)式を, a_1, a_2 には $d/2$ を代入する。

$$\varepsilon_I = I \left[\frac{1}{m} \varepsilon_{m1} + \frac{1}{m} \varepsilon_{m2} + \frac{2}{d} \varepsilon_{d1z} + \frac{2}{d} \varepsilon_{d2z} - \frac{1}{l} \varepsilon_l - \frac{2\delta_z}{4\pi^2 + \delta_z^2} \varepsilon_{\delta z} + \frac{2}{T_{Dz}} \varepsilon_{TDz} \right] \quad (4.19)$$

(4.19)式の最大絶対値は

$$\max |\varepsilon_I| = I \left[\frac{2}{m} e_m + \frac{4}{d} e_d + \frac{1}{l} e_l + \frac{2\delta_z}{4\pi^2 + \delta_z^2} e_{\delta z} + \frac{2}{T_{Dz}} e_{TDz} \right] \quad (4.20)$$

6) 治具単体あるいは合成物体の xz 平面慣性乗積 I_{xz}

これらは(3.10)式により計算される。この値の持つ誤差を $\varepsilon_{I_{xz}}$ と書けば

$$\begin{aligned} \varepsilon_{I_{xz}} &= \frac{\partial I_{xz}}{\partial I_x} \varepsilon_{I_x} + \frac{\partial I_{xz}}{\partial I_z} \varepsilon_{I_z} + \frac{\partial I_{xz}}{\partial I_{z'}} \varepsilon_{I_{z'}} + \frac{\partial I_{xz}}{\partial \theta} \varepsilon_\theta \\ &= \frac{-\sin^2 \theta \cdot \varepsilon_{I_x} - \cos^2 \theta \cdot \varepsilon_{I_z} + \varepsilon_{I_{z'}}}{\sin 2\theta} - \frac{\tan \theta \cdot I_x - \cot \theta \cdot I_z + 2 \cot 2\theta \cdot I_{z'}}{\sin 2\theta} \varepsilon_\theta \end{aligned} \quad (4.21)$$

ここで ε_θ は θ の計測値の持つ誤差, また ε_{I_x} は(4.14)式, ε_{I_z} と $\varepsilon_{I_{z'}}$ は(4.19)式において各々添字 x, z あるいは z' を付けて表される。

$$\varepsilon_{I_x} = I_x \left[\frac{m_2}{m \cdot m_1} \varepsilon_{m1} + \frac{m_1}{m \cdot m_2} \varepsilon_{m2} + \frac{2}{d} \varepsilon_{d1x} + \frac{2}{d} \varepsilon_{d2x} \right]$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{m_1-m_2}{m_2 \cdot d} \varepsilon_{p1} + \frac{m_1-m_2}{d \cdot m_1} \varepsilon_{p2} - \frac{1}{l} \varepsilon_l - \frac{2 \delta_z}{4 \pi^2 + \delta_z^2} \varepsilon_{\delta z} + \frac{2}{T_{Dz}} \varepsilon_{TDz} \Big] \\
\varepsilon_{Iz} = I_z & \left[\frac{1}{m} \varepsilon_{m1} + \frac{1}{m} \varepsilon_{m2} + \frac{2}{d} \varepsilon_{d1z} + \frac{2}{d} \varepsilon_{d2z} - \frac{1}{l} \varepsilon_l - \frac{2 \delta_z}{4 \pi^2 + \delta_z^2} \varepsilon_{\delta z} + \frac{2}{T_{Dz}} \varepsilon_{TDz} \right] \\
& (4.23)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{Iz}' = I_z' & \left[\frac{1}{m} \varepsilon_{m1} + \frac{1}{m} \varepsilon_{m2} + \frac{2}{d} \varepsilon_{d1z} + \frac{2}{d} \varepsilon_{d2z} - \frac{1}{l} \varepsilon_l - \frac{2 \delta_z'}{4 \pi^2 + \delta_z'^2} \varepsilon_{\delta z'} + \frac{2}{T_{Dz'}} \varepsilon_{TDz'} \right] \\
& (4.24)
\end{aligned}$$

これらを (4.21) 式に代入すると

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{Ixz} = \frac{1}{m} & \left[I_{xz} + \frac{(m_1-m_2) \tan \theta}{2 m_1} I_x \right] \varepsilon_{m1} + \frac{1}{m} \left[I_{xz} - \frac{(m_1-m_2) \tan \theta}{2 m_2} I_x \right] \varepsilon_{m2} \\
& - \frac{\tan \theta \cdot I_x}{d} \varepsilon_{d1x} - \frac{\tan \theta \cdot I_x}{d} \varepsilon_{d2x} \\
& - \frac{\tan \theta \cdot I_x + 2 I_{xz}}{d} \varepsilon_{d1z} - \frac{\tan \theta \cdot I_x + 2 I_{xz}}{d} \varepsilon_{d2z} \\
& + \frac{\tan \theta (m_1-m_2) I_x}{2 d \cdot m_2} \varepsilon_{p1} - \frac{\tan \theta (m_1-m_2) I_x}{2 d \cdot m_1} \varepsilon_{p2} - \frac{I_{xz}}{l} \varepsilon_l \\
& + \frac{\tan \theta \cdot I_x \cdot \delta_z}{4 \pi^2 + \delta_z^2} \varepsilon_{\delta z} + \frac{\cot \theta \cdot I_x \cdot \delta_z}{4 \pi^2 + \delta_z^2} \varepsilon_{\delta z} - \frac{2 I_z' \cdot \delta_z'}{\sin 2 \theta (4 \pi^2 + \delta_z'^2)} \varepsilon_{\delta z'} \\
& - \frac{\tan \theta \cdot I_x}{T_{Dz}} \varepsilon_{TDz} - \frac{\cot \theta \cdot I_x}{T_{Dz}} \varepsilon_{TDz} + \frac{2 I_z'}{\sin 2 \theta \cdot T_{Dz'}} \varepsilon_{TDz'} \\
& - \frac{\tan \theta \cdot I_x - \cot \theta \cdot I_x + 2 \cot 2 \theta \cdot I_z'}{\sin 2 \theta} \varepsilon_{\theta} \\
& (4.25)
\end{aligned}$$

慣性乗積は頭上げ、頭下げの両試験結果の平均として (3.11) 式により求められる。この式より I_{xz} の誤差を I_{xz}^+ 及び I_{xz}^- の誤差で表し、それらに (4.25) 式に肩字+あるいは-をつけたものを代入すれば

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{Ixz} &= \frac{I_{xz}}{I_{xz}^+} \varepsilon_{Ixz}^+ + \frac{I_{xz}}{I_{xz}^-} \varepsilon_{Ixz}^- \\
&= \frac{\varepsilon_{Ixz}^+ + \varepsilon_{Ixz}^-}{2} \\
&= \frac{1}{m} \left[I_{xz} + \frac{(m_1-m_2) (\tan \theta^+ + \tan \theta^-)}{4 m_1} I_x \right] \varepsilon_{m1} \\
&+ \frac{1}{m} \left[I_{xz} - \frac{(m_1-m_2) (\tan \theta^+ + \tan \theta^-)}{4 m_2} I_x \right] \varepsilon_{m2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - \frac{(\tan \theta^+ + \tan \theta^-) I_x}{2d} \epsilon_{d1x} - \frac{(\tan \theta^+ + \tan \theta^-) I_x}{2d} \epsilon_{d2x} \\
 & - \frac{(\tan \theta^+ + \tan \theta^-) I_x + 4 I_{xz}}{2d} \epsilon_{d1x} \\
 & - \frac{(\tan \theta^+ + \tan \theta^-) I_x + 4 I_{xz}}{2d} \epsilon_{d2x} \\
 & + \frac{(\tan \theta^+ + \tan \theta^-) (m_1 - m_2) I_x}{4d \cdot m_2} \epsilon_{p1} - \frac{(\tan \theta^+ + \tan \theta^-) (m_1 - m_2) I_x}{4d \cdot m_1} \epsilon_{p2} \\
 & - \frac{I_{xz}}{l} \epsilon_l \\
 & + \frac{(\tan \theta^+ + \tan \theta^-) I_x \cdot \delta_x}{2(4\pi^2 + \delta_x^2)} \epsilon_{\delta x} + \frac{(\cot \theta^+ + \cot \theta^-) I_x \cdot \delta_x}{2(4\pi^2 + \delta_x^2)} \epsilon_{\delta x} \\
 & - \frac{I_x'^+ \cdot \delta_x'^+}{\sin 2\theta^+ (4\pi^2 + \delta_x'^2)} \epsilon_{\delta x}'^+ - \frac{I_x'^- \cdot \delta_x'^-}{\sin 2\theta^- (4\pi^2 + \delta_x'^2)} \epsilon_{\delta x}'^- \\
 & - \frac{(\tan \theta^+ + \tan \theta^-) I_x}{2T_{Dx}} \epsilon_{TDx} - \frac{(\cot \theta^+ + \cot \theta^-) I_x}{2T_{Dz}} \epsilon_{TDz} \\
 & + \frac{I_x'^+}{\sin 2\theta^+ \cdot T_{Dx}'^+} \epsilon_{TDx}'^+ + \frac{I_x'^-}{\sin 2\theta^- \cdot T_{Dz}'^-} \epsilon_{TDz}'^- \\
 & - \frac{\tan \theta^+ \cdot I_x - \cot \theta^+ \cdot I_x + 2 \cot 2\theta^+ \cdot I_x'^+}{2 \sin 2\theta^+} \epsilon_{\theta^+} \\
 & - \frac{\tan \theta^- \cdot I_x - \cot \theta^- \cdot I_x + 2 \cot 2\theta^- \cdot I_x'^-}{2 \sin 2\theta^-} \epsilon_{\theta^-} \tag{4.26}
 \end{aligned}$$

この最大絶対値は

$$\begin{aligned}
 \max |\epsilon_{I_{xz}}| &= \frac{1}{m} \left[\left| I_{xz} + \frac{(m_1 - m_2) (\tan \theta^+ + \tan \theta^-)}{4m_1} I_x \right| \right. \\
 & \quad \left. + \left| I_{xz} - \frac{(m_1 - m_2) (\tan \theta^+ + \tan \theta^-)}{4m_2} I_x \right| \right] e_m \\
 & + \frac{1}{d} \left[\left| (\tan \theta^+ + \tan \theta^-) I_x + (\tan \theta^+ + \tan \theta^-) I_x + 4 I_{xz} \right| \right] e_d \\
 & + \frac{|\tan \theta^+ + \tan \theta^-| |m_1^2 - m_2^2| I_x}{4d \cdot m_1 \cdot m_2} \epsilon_p + \frac{|I_{xz}|}{l} e_l \\
 & + \frac{|\tan \theta^+ + \tan \theta^-| I_x \cdot \delta_x}{2(4\pi^2 + \delta_x^2)} e_{\delta x} + \frac{|\cot \theta^+ + \cot \theta^-| I_x \cdot \delta_x}{2(4\pi^2 + \delta_x^2)} e_{\delta x} \\
 & + \frac{I_x'^+ \cdot \delta_x'^+}{\sin 2\theta^+ (4\pi^2 + \delta_x'^2)} e_{\delta x}'^+ - \frac{I_x'^- \cdot \delta_x'^-}{\sin 2\theta^- (4\pi^2 + \delta_x'^2)} e_{\delta x}'^- \\
 & + \frac{|\tan \theta^+ + \tan \theta^-| I_x}{2T_{Dx}} e_{TDx} + \frac{|\cot \theta^+ + \cot \theta^-| I_x}{2T_{Dz}} e_{TDz}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{I_z'^{+}}{\sin 2\theta^{+} \cdot T_{Dz}^{+}} e_{TDz}^{+} + \frac{I_z'^{-}}{\sin 2\theta^{-} \cdot T_{Dz}^{-}} e_{TDz}^{-} \\
& + \left[\left| \frac{\tan \theta^{+} \cdot I_x - \cot \theta^{+} \cdot I_z + 2 \cot 2\theta^{+} \cdot I_z'^{+}}{2 \sin 2\theta^{+}} \right| \right. \\
& \left. + \left| \frac{\tan \theta^{-} \cdot I_x - \cot \theta^{-} \cdot I_z + 2 \cot 2\theta^{-} \cdot I_z'^{-}}{2 \sin 2\theta^{-}} \right| \right] e_{\theta} \quad (4.27)
\end{aligned}$$

7) 模型単体質量 m_A

m_A は (3.30) 式より求める。この計算値の持つ誤差を ε_{mA} とすると

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{mA} &= \frac{\partial m_A}{\partial m_{B1}} \varepsilon_{mB1} + \frac{\partial m_A}{\partial m_{B2}} \varepsilon_{mB2} + \frac{\partial m_A}{\partial m_{C1}} \varepsilon_{mC1} + \frac{\partial m_A}{\partial m_{C2}} \varepsilon_{mC2} \\
&= +\varepsilon_{mC1} + \varepsilon_{mC2} - \varepsilon_{mB1} - \varepsilon_{mB2} \quad (4.28)
\end{aligned}$$

最大絶対値は

$$\max |\varepsilon_{mA}| = \max |\varepsilon_{mC1}| + \max |\varepsilon_{mC2}| + \max |\varepsilon_{mB1}| + \max |\varepsilon_{mB2}| = 4e_m \quad (4.29)$$

ここで1)の場合と同様に (3.30) 式を用いて計算される質量は他の慣性量を求める際に使用するものであり、質量を単独で用いる際には直接台秤により計測することによりその誤差は秤の精度とすることができる。

$$\max |\varepsilon_{mA}| = e_m \quad (4.30)$$

8) 模型単体上下重心位置 Δ_{CGA}

Δ_{CGA} は (3.15) 式より求める。 Δ_{CGA} の計算値の持つ誤差を ε_{CGA} とすると (3.15) 式より

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{CGA} &= \frac{\partial \Delta_{CGA}}{\partial m_A} \varepsilon_{mA} + \frac{\partial \Delta_{CGA}}{\partial m_B} \varepsilon_{mB} + \frac{\partial \Delta_{CGA}}{\partial m_C} \varepsilon_{mC} + \frac{\partial \Delta_{CGA}}{\partial \Delta_{CGB}} \varepsilon_{CGB} + \frac{\partial \Delta_{CGA}}{\partial \Delta_{CGC}} \varepsilon_{CGC} \\
&= \frac{1}{m_A} \left[-\Delta_{CGA} \cdot \varepsilon_{mA} - \Delta_{CGB} \cdot \varepsilon_{mB} + \Delta_{CGC} \cdot \varepsilon_{mC} - m_B \cdot \varepsilon_{CGB} + m_C \cdot \varepsilon_{CGC} \right] \quad (4.31)
\end{aligned}$$

(4.28), (4.1), (4.4) 式を代入して

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{CGA} &= \frac{1}{m_A} \left[-\Delta_{CGA} (\varepsilon_{m1C} + \varepsilon_{m2C} - \varepsilon_{m1B} - \varepsilon_{m2B}) \right. \\
&\quad - \Delta_{CGB} (\varepsilon_{m1B} + \varepsilon_{m2B}) + \Delta_{CGC} (\varepsilon_{m1C} + \varepsilon_{m2C}) \\
&\quad + a_{1B} \cdot \varepsilon_{m1B} - a_{2B} \cdot \varepsilon_{m2B} + m_{1B} \cdot \varepsilon_{d1} - m_{2B} \cdot \varepsilon_{d2} + m_{1B} \cdot \varepsilon_{p1B} - m_{2B} \cdot \varepsilon_{p2B} \\
&\quad \left. - a_{1C} \cdot \varepsilon_{m1C} + a_{2C} \cdot \varepsilon_{m2C} - m_{1C} \cdot \varepsilon_{d1} + m_{2C} \cdot \varepsilon_{d2} - m_{1C} \cdot \varepsilon_{p1C} + m_{2C} \cdot \varepsilon_{p2C} \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{m_A} \left[(\Delta_{CGA} - \Delta_{CGB} + a_{1B}) \varepsilon_{m1B} + (\Delta_{CGA} - \Delta_{CGB} - a_{2B}) \varepsilon_{m2B} \right. \\
 &\quad - (\Delta_{CGA} - \Delta_{CGB} + a_{1C}) \varepsilon_{m1C} - (\Delta_{CGA} - \Delta_{CGB} - a_{2C}) \varepsilon_{m2C} \\
 &\quad - (m_{1C} - m_{1B}) \varepsilon_{d1} + (m_{2C} - m_{2B}) \varepsilon_{d2} \\
 &\quad \left. + m_{1B} \cdot \varepsilon_{p1B} - m_{2B} \cdot \varepsilon_{p2B} - m_{1C} \cdot \varepsilon_{p1C} + m_{2C} \cdot \varepsilon_{p2C} \right] \\
 &= \frac{1}{m_A} \left[\left(\Delta_{CGA} + \frac{d}{2} \right) \varepsilon_{m1B} + \left(\Delta_{CGA} - \frac{d}{2} \right) \varepsilon_{m2B} \right. \\
 &\quad - \left(\Delta_{CGA} + \frac{d}{2} \right) \varepsilon_{m1C} - \left(\Delta_{CGA} - \frac{d}{2} \right) \varepsilon_{m2C} \\
 &\quad - (m_{1C} - m_{1B}) \varepsilon_{d1} + (m_{2C} - m_{2B}) \varepsilon_{d2} \\
 &\quad \left. + m_{1B} \cdot \varepsilon_{p1B} - m_{2B} \cdot \varepsilon_{p2B} - m_{1C} \cdot \varepsilon_{p1C} + m_{2C} \cdot \varepsilon_{p2C} \right] \quad (4.32)
 \end{aligned}$$

この最大絶対値は

$$\max |\varepsilon_{CGA}| = 2 \frac{d}{m_A} e_m + e_d + \frac{m_B + m_C}{m_A} e_p \quad (4.33)$$

9) 模型単体の x 軸, y 軸まわり慣性モーメント I_{xA} , I_{yA}

I_{xA} , I_{yA} は式 (3.24) 及び (3.22) により計算される。ここでは両者を同時に考えることとして I_A と表し, 添え字 x , y は省略する。 I_A の計算値の持つ誤差を ε_{IA} とすると (3.24) もしくは (3.22) 式より

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{IA} &= \frac{\partial I_A}{\partial I_B} \varepsilon_{IB} + \frac{\partial I_A}{\partial I_C} \varepsilon_{IC} + \frac{\partial I_A}{\partial m_A} \varepsilon_{mA} + \frac{\partial I_A}{\partial m_B} \varepsilon_{mB} + \frac{\partial I_A}{\partial m_C} \varepsilon_{mC} + \frac{\partial I_A}{\partial \Delta_{CGB}} \varepsilon_{CGB} + \frac{\partial I_A}{\partial \Delta_{CGC}} \varepsilon_{CGC} \\
 &= -\varepsilon_{IB} + \varepsilon_{IC} + \frac{(\Delta_{CGC} - \Delta_{CGB})^2}{m_A^2} \left[+m_B \cdot m_C \cdot \varepsilon_{mA} - m_A \cdot m_C \cdot \varepsilon_{mB} - m_A \cdot m_B \cdot \varepsilon_{mC} \right] \\
 &\quad + 2 \frac{m_B \cdot m_C (\Delta_{CGC} - \Delta_{CGB})}{m_A} \left[+\varepsilon_{CGB} - \varepsilon_{CGC} \right]
 \end{aligned}$$

(4.14), (4.28), (4.1), (4.4) 及び (3.26), (3.27) 式を代入して

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{IA} &= -I_B \left[+ \frac{m_{2B}}{m_B \cdot m_{1B}} \varepsilon_{m1B} + \frac{m_{1B}}{m_B \cdot m_{2B}} \varepsilon_{m2B} + \frac{2}{d} \varepsilon_{d1} + \frac{2}{d} \varepsilon_{d2} \right. \\
 &\quad - \frac{m_{1B} - m_{2B}}{d \cdot m_{2B}} \varepsilon_{p1B} + \frac{m_{1B} - m_{2B}}{d \cdot m_{1B}} \varepsilon_{p2B} \\
 &\quad \left. - \frac{1}{I_B} \varepsilon_I - \frac{2 \delta_B}{4 \pi^2 + \delta_B^2} \varepsilon_{\delta B} + \frac{2}{T_{DB}} \varepsilon_{TDB} \right] \\
 &\quad + I_C \left[+ \frac{m_{2C}}{m_C \cdot m_{1C}} \varepsilon_{m1C} + \frac{m_{1C}}{m_C \cdot m_{2C}} \varepsilon_{m2C} + \frac{2}{d} \varepsilon_{d1} + \frac{2}{d} \varepsilon_{d2} \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{m_{1C}-m_{2C}}{d \cdot m_{2C}} \epsilon_{p1C} + \frac{m_{1C}-m_{2C}}{d \cdot m_{1C}} \epsilon_{p2C} \\
& + \frac{1}{I_C} \epsilon_I - \frac{2 \delta_C}{4 \pi^2 + \delta_C^2} \epsilon_{\delta C} + \frac{2}{T_{DC}} \epsilon_{TDC} \Big] \\
& + \frac{(\Delta_{CGC} - \Delta_{CGB})^2}{m_A^2} \Big[m_B \cdot m_C (\epsilon_{m1C} + \epsilon_{m2C} - \epsilon_{m1B} - \epsilon_{m2B}) \\
& \quad - m_A \cdot m_C (\epsilon_{m1B} + \epsilon_{m2B}) - m_A \cdot m_B (\epsilon_{m1C} + \epsilon_{m2C}) \Big] \\
& + 2 \frac{\Delta_{CGC} - \Delta_{CGB}}{m_A} \Big[m_C (-a_{1B} \cdot \epsilon_{m1B} + a_{2B} \cdot \epsilon_{m2B}) \\
& \quad - m_{1B} \cdot \epsilon_{d1} + m_{2B} \cdot \epsilon_{d2} - m_{1B} \cdot \epsilon_{p1B} + m_{2B} \cdot \epsilon_{p2B}) \\
& \quad - m_B (-a_{1C} \cdot \epsilon_{m1C} + a_{2C} \cdot \epsilon_{m2C}) \\
& \quad - m_{1C} \cdot \epsilon_{d1} + m_{2C} \cdot \epsilon_{d2} - m_{1C} \cdot \epsilon_{p1C} + m_{2C} \cdot \epsilon_{p2C}) \Big] \\
& = \Big[-\frac{m_{2B} \cdot I_B}{m_B \cdot m_{1B}} - \frac{(\Delta_{CGC} - \Delta_{CGB}) (\Delta_{CGA} + \Delta_{CGB} + d) m_C}{m_A} \Big] \epsilon_{m1B} \\
& + \Big[-\frac{m_{1B} \cdot I_B}{m_B \cdot m_{2B}} - \frac{(\Delta_{CGC} - \Delta_{CGB}) (\Delta_{CGA} + \Delta_{CGB} - d) m_C}{m_A} \Big] \epsilon_{m2B} \\
& + \Big[\frac{m_{2C} \cdot I_C}{m_C \cdot m_{1C}} + \frac{(\Delta_{CGC} - \Delta_{CGB}) (\Delta_{CGA} + \Delta_{CGC} + d) m_B}{m_A} \Big] \epsilon_{m1C} \\
& + \Big[\frac{m_{1C} \cdot I_C}{m_C \cdot m_{2C}} + \frac{(\Delta_{CGC} - \Delta_{CGB}) (\Delta_{CGA} + \Delta_{CGC} - d) m_B}{m_A} \Big] \epsilon_{m2C} \\
& + 2 \Big[\frac{I_C - I_B}{d} - \frac{d (m_{1B} \cdot m_{2C} - m_{2B} \cdot m_{1C})^2}{m_A \cdot m_B \cdot m_C} \Big] \epsilon_{d1} \\
& + 2 \Big[\frac{I_C - I_B}{d} - \frac{d (m_{1B} \cdot m_{2C} - m_{2B} \cdot m_{1C})^2}{m_A \cdot m_B \cdot m_C} \Big] \epsilon_{d2} \\
& + \Big[\frac{(m_{1B} - m_{2B}) I_B}{d \cdot m_{2B}} - \frac{2 d \cdot m_{1B} (m_{1B} \cdot m_{2C} - m_{2B} \cdot m_{1C})}{m_A \cdot m_B} \Big] \epsilon_{p1B} \\
& + \Big[-\frac{(m_{1B} - m_{2C}) I_C}{d \cdot m_{1B}} + \frac{2 d \cdot m_{2B} (m_{1B} \cdot m_{2C} - m_{2B} \cdot m_{1C})}{m_A \cdot m_B} \Big] \epsilon_{p2B} \\
& + \Big[-\frac{(m_{1C} - m_{2C}) I_C}{d \cdot m_{2C}} + \frac{2 d \cdot m_{1C} (m_{1B} \cdot m_{2C} - m_{2B} \cdot m_{1C})}{m_A \cdot m_C} \Big] \epsilon_{p1C} \\
& + \Big[\frac{(m_{1C} - m_{2C}) I_C}{d \cdot m_{1C}} - \frac{2 d \cdot m_{2C} (m_{1B} \cdot m_{2C} - m_{2B} \cdot m_{1C})}{m_A \cdot m_C} \Big] \epsilon_{p2C} \\
& - \Big[\frac{I_C}{I_C} - \frac{I_B}{I_B} \Big] \epsilon_I \\
& + \frac{2 \delta_B \cdot I_B}{4 \pi^2 + \delta_B^2} \epsilon_{\delta B} - \frac{2 I_B}{T_{DB}} \epsilon_{TDB} - \frac{2 \delta_C \cdot I_C}{4 \pi^2 + \delta_C^2} \epsilon_{\delta C} + \frac{2 I_C}{T_{DC}} \epsilon_{TDC}
\end{aligned}$$

この最大絶対値は

$$\begin{aligned}
 \max |\varepsilon_{IA}| = & \left[\left| \frac{m_{2B} \cdot I_B}{m_{1B} \cdot m_B} + \frac{(\Delta_{CGC} - \Delta_{CGB})(\Delta_{CGA} + \Delta_{CGB} + d) m_C}{m_A} \right| \right. \\
 & + \left| \frac{m_{1B} \cdot I_B}{m_{2B} \cdot m_B} + \frac{(\Delta_{CGC} - \Delta_{CGB})(\Delta_{CGA} + \Delta_{CGB} - d) m_C}{m_A} \right| \\
 & + \left| \frac{m_{2C} \cdot I_C}{m_{1C} \cdot m_C} + \frac{(\Delta_{CGC} - \Delta_{CGB})(\Delta_{CGA} + \Delta_{CGC} + d) m_B}{m_A} \right| \\
 & \left. + \left| \frac{m_{1C} \cdot I_C}{m_{2C} \cdot m_C} + \frac{(\Delta_{CGC} - \Delta_{CGB})(\Delta_{CGA} + \Delta_{CGC} - d) m_B}{m_A} \right| \right] e_m \\
 & + 4 \left| \frac{I_C - I_B}{d} - \frac{d(m_{1B} \cdot m_{2C} - m_{2B} \cdot m_{1C})^2}{m_A \cdot m_B \cdot m_C} \right| e_d \\
 & + \left[\left| \frac{(m_{1B} - m_{2B}) I_B}{d \cdot m_{2B}} - \frac{2d \cdot m_{1B} (m_{1B} \cdot m_{2C} - m_{2B} \cdot m_{1C})}{m_A \cdot m_B} \right| \right. \\
 & + \left| \frac{(m_{1B} - m_{2B}) I_B}{d \cdot m_{1B}} - \frac{2d \cdot m_{2B} (m_{1B} \cdot m_{2C} - m_{2B} \cdot m_{1C})}{m_A \cdot m_B} \right| \\
 & + \left| \frac{(m_{1C} - m_{2C}) I_C}{d \cdot m_{2C}} - \frac{2d \cdot m_{1C} (m_{1B} \cdot m_{2C} - m_{2B} \cdot m_{1C})}{m_A \cdot m_C} \right| \\
 & \left. + \left| \frac{(m_{1C} - m_{2C}) I_C}{d \cdot m_{1C}} - \frac{2d \cdot m_{2C} (m_{1B} \cdot m_{2C} - m_{2B} \cdot m_{1C})}{m_A \cdot m_C} \right| \right] e_p \\
 & + \left[\frac{I_C}{I_C} - \frac{I_B}{I_B} \right] e_l \\
 & + \frac{2\delta_B \cdot I_B}{4\pi^2 + \delta_B^2} e_{\delta B} + \frac{2I_B}{T_{DB}} e_{TDB} + \frac{2\delta_C \cdot I_C}{4\pi^2 + \delta_C^2} e_{\delta C} + \frac{2I_C}{T_{DC}} e_{TDC} \quad (4.36)
 \end{aligned}$$

10) 模型単体の z 軸まわり慣性モーメント I_{zA}

I_{zA} は (3.25) 式により計算される。 I_{zA} の計算値の持つ誤差を ε_{IzA} と書けばこの式より

$$\varepsilon_{IzA} = \frac{\partial I_{zA}}{\partial I_{zC}} \varepsilon_{IzC} + \frac{\partial I_{zA}}{\partial I_{zB}} \varepsilon_{IzB} = \varepsilon_{IzC} - \varepsilon_{IzB} \quad (4.37)$$

(4.19) 式を代入して

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{IzA} = I_{zC} & \left[\frac{1}{m_C} \varepsilon_{m1C} + \frac{1}{m_C} \varepsilon_{m2C} + \frac{2}{d} \varepsilon_{d1z} + \frac{2}{d} \varepsilon_{d2z} - \frac{1}{I_C} \varepsilon_I \right. \\
 & \left. - \frac{2\delta_{zC}}{4\pi^2 + \delta_{zC}^2} \varepsilon_{\delta zC} + \frac{2}{T_{DzC}} \varepsilon_{T DzC} \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -I_{zB} \left[\frac{1}{m_B} \epsilon_{m1B} + \frac{1}{m_B} \epsilon_{m2B} + \frac{2}{d} \epsilon_{d1z} + \frac{2}{d} \epsilon_{d2z} - \frac{1}{l_B} \epsilon_l \right. \\
& \quad \left. - \frac{2\delta_{zB}}{4\pi^2 + \delta_{zB}^2} \epsilon_{\delta zB} + \frac{2}{T_{DzB}} \epsilon_{TDzB} \right] \\
& = -\frac{I_{zB}}{m_B} \epsilon_{m1B} - \frac{I_{zB}}{m_B} \epsilon_{m2B} + \frac{I_{zC}}{m_C} \epsilon_{m1C} + \frac{I_{zC}}{m_C} \epsilon_{m2C} \\
& \quad + \frac{2I_{zA}}{d} \epsilon_{d1z} + \frac{2I_{zA}}{d} \epsilon_{d2z} - \left[\frac{I_{zC}}{l_C} - \frac{I_{zB}}{l_B} \right] \epsilon_l \\
& \quad + \frac{2\delta_{zB} \cdot I_{zB}}{4\pi^2 + \delta_{zB}^2} \epsilon_{\delta zB} - \frac{2I_{zB}}{T_{DzB}} \epsilon_{TDzB} - \frac{2\delta_{zC} \cdot I_{zC}}{4\pi^2 + \delta_{zC}^2} \epsilon_{\delta zC} + \frac{2I_{zC}}{T_{DzC}} \epsilon_{TDzC} \quad (4.38)
\end{aligned}$$

この最大絶対値は

$$\begin{aligned}
\max |\epsilon_{IzA}| = & 2 \left[\frac{I_{zB}}{m_B} + \frac{I_{zC}}{m_C} \right] e_m + \frac{4I_{zA}}{d} e_d + \left[\frac{I_{zC}}{l_C} + \frac{I_{zB}}{l_B} \right] e_l \\
& + \frac{2\delta_{zB} \cdot I_{zB}}{4\pi^2 + \delta_{zB}^2} e_{\delta zB} + \frac{2I_{zB}}{T_{DzB}} e_{TDzB} + \frac{2\delta_{zC} \cdot I_{zC}}{4\pi^2 + \delta_{zC}^2} e_{\delta zC} + \frac{2I_{zC}}{T_{DzC}} e_{TDzC} \quad (4.39)
\end{aligned}$$

11) 模型単体の xz 平面慣性乗積 I_{xzA}

I_{xzA} は (3.23) 式により計算される。 I_{xzA} の計算値の持つ誤差を ϵ_{IxzA} と書けばこの式より

$$\epsilon_{IxzA} = \frac{\partial I_{xzA}}{\partial I_{xzC}} \epsilon_{IxzC} + \frac{\partial I_{xzA}}{\partial I_{xzB}} \epsilon_{IxzB} = \epsilon_{IxzC} - \epsilon_{IxzB} \quad (4.40)$$

(4.26) 式に添字 B あるいは C を付けて代入すると

$$\begin{aligned}
\epsilon_{IxzA} = & -\frac{1}{m_B} \left[I_{xzB} + \frac{(m_{1B} - m_{2B})(\tan\theta_B^+ + \tan\theta_B^-)}{4m_{1B}} I_{xB} \right] \epsilon_{m1B} \\
& - \frac{1}{m_B} \left[I_{xzB} + \frac{(m_{1B} - m_{2B})(\tan\theta_B^+ + \tan\theta_B^-)}{4m_{2B}} I_{xB} \right] \epsilon_{m2B} \\
& + \frac{1}{m_C} \left[I_{xzC} + \frac{(m_{1C} - m_{2C})(\tan\theta_C^+ + \tan\theta_C^-)}{4m_{1C}} I_{xC} \right] \epsilon_{m1C} \\
& + \frac{1}{m_C} \left[I_{xzC} + \frac{(m_{1C} - m_{2C})(\tan\theta_C^+ + \tan\theta_C^-)}{4m_{2C}} I_{xC} \right] \epsilon_{m2C} \\
& + \frac{1}{2d} \left[(\tan\theta_B^+ + \tan\theta_B^-) I_{xB} - (\tan\theta_C^+ + \tan\theta_C^-) I_{xC} \right] \epsilon_{d1x} \\
& + \frac{1}{2d} \left[(\tan\theta_B^+ + \tan\theta_B^-) I_{xB} - (\tan\theta_C^+ + \tan\theta_C^-) I_{xC} \right] \epsilon_{d2x}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{d} \left[\frac{(\tan \theta_B^+ + \tan \theta_B^-) I_{xB}}{2} + 2 I_{xxB} - \frac{(\tan \theta_C^+ + \tan \theta_C^-) I_{xC}}{2} - 2 I_{xxC} \right] \epsilon_{d1x} \\
 & + \frac{1}{d} \left[\frac{(\tan \theta_B^+ + \tan \theta_B^-) I_{xB}}{2} + 2 I_{xxB} - \frac{(\tan \theta_C^+ + \tan \theta_C^-) I_{xC}}{2} - 2 I_{xxC} \right] \epsilon_{d2x} \\
 & - \frac{(\tan \theta_B^+ + \tan \theta_B^-) (m_{1B} - m_{2B}) I_{xB}}{4 d \cdot m_{2B}} \epsilon_{p1B} \\
 & + \frac{(\tan \theta_B^+ + \tan \theta_B^-) (m_{1B} - m_{2B}) I_{xB}}{4 d \cdot m_{1B}} \epsilon_{p2B} \\
 & + \frac{(\tan \theta_C^+ + \tan \theta_C^-) (m_{1C} - m_{2C}) I_{xC}}{4 d \cdot m_{2C}} \epsilon_{p1C} \\
 & - \frac{(\tan \theta_C^+ + \tan \theta_C^-) (m_{1C} - m_{2C}) I_{xC}}{4 d \cdot m_{1C}} \epsilon_{p2C} \\
 & - \left[\frac{I_{xxC}}{I_C} - \frac{I_{xxB}}{I_B} \right] \epsilon_l \\
 & - \frac{(\tan \theta_B^+ + \tan \theta_B^-) I_{xB} \cdot \delta_{xB}}{2 (4 \pi^2 + \delta_{xB}^2)} \epsilon_{\delta_{xB}} - \frac{(\cot \theta_B^+ + \cot \theta_B^-) I_{xB} \cdot \delta_{xB}}{2 (4 \pi^2 + \delta_{xB}^2)} \epsilon_{\delta_{xB}} \\
 & + \frac{I_{x'}^{'+B} \cdot \delta_{x'}^{'+B}}{\sin 2 \theta_B^+ (4 \pi^2 + \delta_{xB}^2)} \epsilon_{\delta_{x'}^{'+B}} + \frac{I_{x'}^{-B} \cdot \delta_{x'}^{-B}}{\sin 2 \theta_B^- (4 \pi^2 + \delta_{xB}^2)} \epsilon_{\delta_{x'}^{-B}} \\
 & + \frac{(\tan \theta_C^+ + \tan \theta_C^-) I_{xC} \cdot \delta_{xC}}{2 (4 \pi^2 + \delta_{xC}^2)} \epsilon_{\delta_{xC}} + \frac{(\cot \theta_C^+ + \cot \theta_C^-) I_{xC} \cdot \delta_{xC}}{2 (4 \pi^2 + \delta_{xC}^2)} \epsilon_{\delta_{xC}} \\
 & - \frac{I_{x'}^{'+C} \cdot \delta_{x'}^{'+C}}{\sin 2 \theta_C^+ (4 \pi^2 + \delta_{xC}^2)} \epsilon_{\delta_{x'}^{'+C}} - \frac{I_{x'}^{-C} \cdot \delta_{x'}^{-C}}{\sin 2 \theta_C^- (4 \pi^2 + \delta_{xC}^2)} \epsilon_{\delta_{x'}^{-C}} \\
 & + \frac{(\tan \theta_B^+ + \tan \theta_B^-) I_{xB}}{2 T_{DxB}} \epsilon_{TDxB} + \frac{(\cot \theta_B^+ + \cot \theta_B^-) I_{xB}}{2 T_{DxB}} \epsilon_{TDxB} \\
 & - \frac{I_{x'}^{'+B}}{\sin 2 \theta_B^+ \cdot T_{Dx'}^{'+B}} \epsilon_{TDx'}^{'+B} - \frac{I_{x'}^{-B}}{\sin 2 \theta_B^- \cdot T_{Dx'}^{-B}} \epsilon_{TDx'}^{-B} \\
 & - \frac{(\tan \theta_C^+ + \tan \theta_C^-) I_{xC}}{2 T_{DxC}} \epsilon_{TDxC} - \frac{(\cot \theta_C^+ + \cot \theta_C^-) I_{xC}}{2 T_{DxC}} \epsilon_{TDxC} \\
 & + \frac{I_{x'}^{'+C}}{\sin 2 \theta_C^+ \cdot T_{Dx'}^{'+C}} \epsilon_{TDx'}^{'+C} + \frac{I_{x'}^{-C}}{\sin 2 \theta_C^- \cdot T_{Dx'}^{-C}} \epsilon_{TDx'}^{-C} \\
 & + \frac{\tan \theta_B^+ \cdot I_{xB} - \cot \theta_B^+ \cdot I_{xB} + 2 \cot 2 \theta_B^+ \cdot I_{x'}^{'+B}}{2 \sin 2 \theta_B^+} \epsilon_{\theta_B^+} \\
 & + \frac{\tan \theta_B^- \cdot I_{xB} - \cot \theta_B^- \cdot I_{xB} + 2 \cot 2 \theta_B^- \cdot I_{x'}^{-B}}{2 \sin 2 \theta_B^-} \epsilon_{\theta_B^-}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{\tan \theta_c^+ \cdot I_{xc} - \cot \theta_c^+ \cdot I_{zc} + 2 \cot 2\theta_c^+ \cdot I_{z'}^+}{2 \sin 2\theta_c^+} \epsilon_{\theta^+} \\
& - \frac{\tan \theta_c^- \cdot I_{xc} - \cot \theta_c^- \cdot I_{zc} + 2 \cot 2\theta_c^- \cdot I_{z'}^-}{2 \sin 2\theta_c^-} \epsilon_{\theta^-}
\end{aligned}$$

この最大絶対値は

$$\begin{aligned}
\max |\epsilon_{I_{zzA}}| = & \left[\frac{1}{m_B} \left| I_{zzB} + \frac{(m_{1B} - m_{2B})(\tan \theta_B^+ + \tan \theta_B^-)}{4m_{1B}} I_{xB} \right| \right. \\
& + \frac{1}{m_B} \left| I_{zzB} - \frac{(m_{1B} - m_{2B})(\tan \theta_B^+ + \tan \theta_B^-)}{4m_{2B}} I_{xB} \right| \\
& + \frac{1}{m_C} \left| I_{zzC} + \frac{(m_{1C} - m_{2C})(\tan \theta_c^+ + \tan \theta_c^-)}{4m_{1C}} I_{xC} \right| \\
& \left. + \frac{1}{m_C} \left| I_{zzC} - \frac{(m_{1C} - m_{2C})(\tan \theta_c^+ + \tan \theta_c^-)}{4m_{2C}} I_{xC} \right| \right] e_m \\
& + \frac{1}{d} \left[\left| (\tan \theta_B^+ + \tan \theta_B^-) I_{xB} - (\tan \theta_c^+ + \tan \theta_c^-) I_{xC} \right| \right. \\
& \quad + \left| (\tan \theta_B^+ + \tan \theta_B^-) I_{zB} + 4 I_{zzB} \right. \\
& \quad \quad \left. - (\tan \theta_c^+ + \tan \theta_c^-) I_{zC} - 4 I_{zzC} \right| \left. \right] e_d \\
& + \left[\frac{|(\tan \theta_B^+ + \tan \theta_B^-)(m_{1B}^2 - m_{2B}^2)| I_{xB}}{4d \cdot m_{1B} \cdot m_{2B}} \right. \\
& \quad \left. + \frac{|(\tan \theta_c^+ + \tan \theta_c^-)(m_{1C}^2 - m_{2C}^2)| I_{xC}}{4d \cdot m_{1C} \cdot m_{2C}} \right] e_p \\
& + \left| \frac{I_{zzC}}{l_C} - \frac{I_{zzB}}{l_B} \right| e_l \\
& + \frac{|\tan \theta_B^+ + \tan \theta_B^-| I_{xB} \cdot \delta_{zB}}{2(4\pi^2 + \delta_{zB}^2)} \epsilon_{\delta zB} + \frac{|\cot \theta_B^+ + \cot \theta_B^-| I_{zB} \cdot \delta_{zB}}{2(4\pi^2 + \delta_{zB}^2)} e_{\delta zB} \\
& + \frac{I_{z'}^+ \cdot \delta_{z'}^+}{\sin 2\theta_B^+ (4\pi^2 + \delta_{zB}^2)} e_{\delta z'^+} + \frac{I_{z'}^- \cdot \delta_{z'}^-}{\sin 2\theta_B^- (4\pi^2 + \delta_{zB}^2)} e_{\delta z'^-} \\
& + \frac{|\tan \theta_c^+ + \tan \theta_c^-| I_{xC} \cdot \delta_{zC}}{2(4\pi^2 + \delta_{zC}^2)} e_{\delta zC} + \frac{|\cot \theta_c^+ + \cot \theta_c^-| I_{zC} \cdot \delta_{zC}}{2(4\pi^2 + \delta_{zC}^2)} e_{\delta zC} \\
& + \frac{I_{z'}^+ \cdot \delta_{z'}^+}{\sin 2\theta_c^+ (4\pi^2 + \delta_{zC}^2)} e_{\delta z'^+} + \frac{I_{z'}^- \cdot \delta_{z'}^-}{\sin 2\theta_c^- (4\pi^2 + \delta_{zC}^2)} e_{\delta z'^-} \\
& + \frac{|\tan \theta_B^+ + \tan \theta_B^-| I_{xB}}{2T_{DzB}} e_{TDzB} + \frac{|\cot \theta_B^+ + \cot \theta_B^-| I_{zB}}{2T_{DzB}} e_{TDzB}
\end{aligned}$$

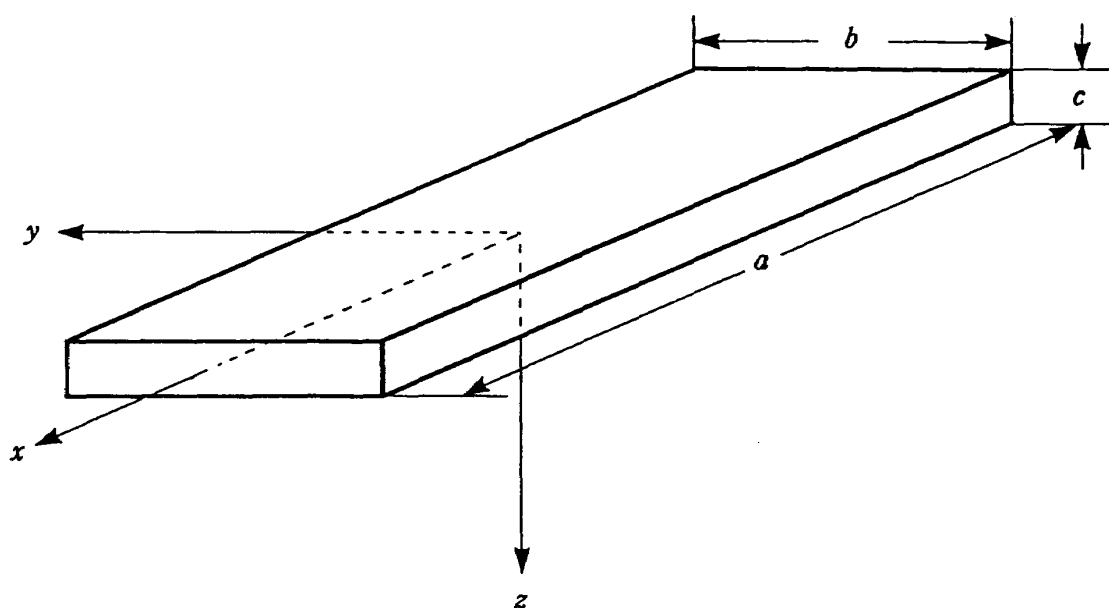
$$\begin{aligned}
 & + \frac{I_{z'}^{'+}{}_B}{\sin 2\theta^{+}_B \cdot T_{Dz'}^{'+}{}_B} e_{TDz'}^{'+}{}_B + \frac{I_{z'}^{-}{}_B}{\sin 2\theta^{-}_B \cdot T_{Dz'}^{-}{}_B} e_{TDz'}^{-}{}_B \\
 & + \frac{|\tan \theta^{+}_c + \tan \theta^{-}_c| I_{zc}}{2T_{Dzc}} e_{TDzc} + \frac{|\cot \theta^{+}_c + \cot \theta^{-}_c| I_{zc}}{2T_{Dzc}} e_{TDzc} \\
 & + \frac{I_{z'}^{'+}{}_c}{\sin 2\theta^{+}_c \cdot T_{Dz'}^{'+}{}_c} e_{TDz'}^{'+}{}_c + \frac{I_{z'}^{-}{}_c}{\sin 2\theta^{-}_c \cdot T_{Dz'}^{-}{}_c} e_{TDz'}^{-}{}_c \\
 & + \left[\left| \frac{\tan \theta^{+}_B \cdot I_{zB} - \cot \theta^{+}_B \cdot I_{zB} + 2 \cot 2\theta^{+}_B \cdot I_{z'}^{'+}{}_B}{2 \sin 2\theta^{+}_B} \right| \right. \\
 & \quad + \left| \frac{\tan \theta^{-}_B \cdot I_{zB} - \cot \theta^{-}_B \cdot I_{zB} + 2 \cot 2\theta^{-}_B \cdot I_{z'}^{-}{}_B}{2 \sin 2\theta^{-}_B} \right| \\
 & \quad + \left| \frac{\tan \theta^{+}_c \cdot I_{zc} - \cot \theta^{+}_c \cdot I_{zc} + 2 \cot 2\theta^{+}_c \cdot I_{z'}^{'+}{}_c}{2 \sin 2\theta^{+}_c} \right| \\
 & \quad \left. + \left| \frac{\tan \theta^{-}_c \cdot I_{zc} - \cot \theta^{-}_c \cdot I_{zc} + 2 \cot 2\theta^{-}_c \cdot I_{z'}^{-}{}_c}{2 \sin 2\theta^{-}_c} \right| \right] e_{\theta} \quad (4.42)
 \end{aligned}$$

以上の7) から 11) において与えられた最大絶対値 (4.30), (4.33), (4.36), (4.39), (4.42) 式が前章において導かれた模型慣性量の推定値の持ち得る最大誤差である。ただしこれらの最大誤差の計算において e で表される各計測値の誤差の係数部分の計算には真値を用いる必要があるが、本解析では最初に述べた様に誤差は微小でありその2次以上の項は無視できるという仮定に基づいていることから、計測値を用いて計算を行っても大きな誤差は生じないと考えて良く、次章の誤差推定では係数の計算に計測値をそのまま用いている。

5. 結果及び考察

試験を行うにあたり、本試験法の精度確認のため慣性特性が既知の物体を模型の代わりに治具に取り付け、同様の試験を行うこととした。試験により推定された慣性特性に対して真値が推定最大誤差の範囲内に入っていれば本試験法の信頼性が確認されることになる。今回は精度確認試験の対象物としてアルミニウム角材を使用することとした。密度の均一な矩形物体の慣性モーメント及び慣性乗積は図5-1に示す様にその寸法及び質量を用いて計算が可能である。表5-1は使用したアルミニウム角材の諸元と図5-1の公式により計算された慣性モーメント、慣性乗積である。寸法は設計値、質量は計測値であり、±により表したものは工作及び計測による誤差である。これらの誤差のために、慣性モーメント及び慣性乗積の計算値も誤差を持つことになり、同じく±により表している。以下ではこの計算値を予測値と呼ぶことにし、試験による推定値との比較を行う。角材の質量は実験装置の強度上の問題から模型の質量に比べて極端に大きくすることができなかつたため、慣性モーメントは模型の2割前後の小さな値となった。

実験は治具単体の計測、治具にアルミニウム角材を取り付けての計測、治具にスペースプレーン模型を取り付けての計測の順に行った。また実験中に治具が変形することが考えられたため、最後に再度治具単体の計測を行い、治具単体のデータとしては前後の平均値を取ることにした。各々に対して x 軸、 y 軸、 z 軸まわりのデータ、及び慣性乗積推定のための z^{+} 軸（頭上げ状態）、 z^{-} 軸（頭下げ状態）まわりのデータの計測を行った。一回の計測では100秒から150秒の間データ収録を行い、記録された角



$$I_x = \frac{m}{12} (a^2 + c^2) \qquad I_z = \frac{m}{12} (a^2 + b^2)$$

$$I_y = \frac{m}{12} (c^2 + a^2) \qquad I_{xz} = 0.0$$

図 5-1 角材の慣性モーメント，慣性乗積

表 5-1 アルミニウム角材諸元

寸法 (mm)	a (1,070±1) × b (270±1) × c (50±1)
質量 (kg)	38.400±0.025
I_x (kg·m ²)	0.241±0.002
I_y (kg·m ²)	3.672±0.010
I_z (kg·m ²)	3.897±0.011
I_{xz} (kg·m ²)	0.0

速度データに (3.2) 式をあてはめることにより自由周期 T_0 と対数減衰率 δ を求めた。一例として治具と模型合成物体の z 軸まわり試験の計測データとあてはめられたモデルを図 5-2 に示す。ガスレートセンサ出力はバイアス誤差を持っているため、このバイアス誤差も自由周期、対数減衰率と同時に推定している。計測データを実線、モデルを破線で表しているが両者は非常に良く一致しており、ほとんど差は見られない。他のデータについても同程度の一致をみている。なお、試験に冗長度を持たせるため各ケースとも 9～10 回の計測を連続して行い、各回ごとに得られた自由周期と対数減衰率の平均値及び標準偏差を計算した。結果を表 5-2 に示す。図 5-2 に示したものは表 5-2 (c) (iii) の 2 ケース目である。表 5-2 (a) に示した治具単体試験の内、No 1～10 までの試験はアルミニウム角材及び模型を用いた試験の以前、No 11～20 は以後に行ったものであるが前後でほとんど差は見られず、治具の大きな変形は生じていないことがわかる。実験では初期角度変位を与えた後、解放することにより自由振動を行わせているが、減衰があるために 9～10 回の計測の途中に数回初期変位を与えなおしている。こ

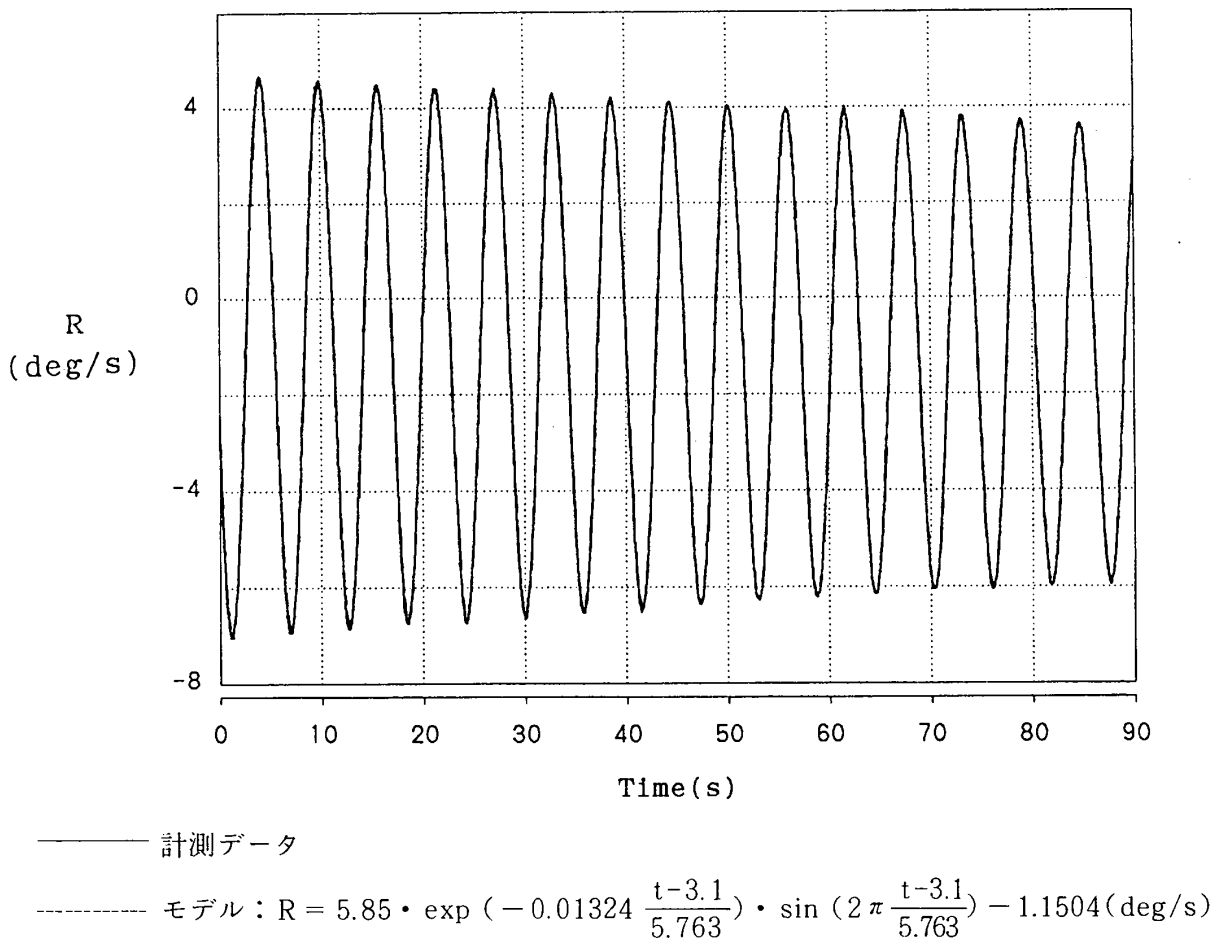


図 5-2 自由振動角速度

の初期変位が大きすぎる場合、3章において用いた種々の近似が成立しなくなり、信頼度の低い結果が得られる。特に治具模型合成物体のY軸まわりの計測では模型の主翼の影響による空力減衰が大きく、計測2回ごとにかなり大きな初期変位を与える必要があった。表5-2を見ると T_D にはこの影響はほとんど現れず、ばらつきの少ないデータが得られているが、 δ では影響が大きく、*印を付けたデータではこの理由により他のデータに比べて大きく異なった結果が得られている。そのためこれらのデータは平均及び標準偏差の計算には使用しなかったが、それにもかかわらず δ の平均値に対する標準偏差の割合は T_D に比べてかなり大きく、ばらつきの大きいデータとなっている。しかしこれは δ の値が非常に小さいためであり、今回の試験に関しては式(3.1)において減衰 δ を無視したモデルを用いても結果に大きな差はなかった。このため δ のばらつきも最終結果の推定最大誤差にはほとんど影響していないことが後の表-4において示される。したがって*印のデータを省いたことも結果には大きな影響はしていないと言えるが、他の試験対象について実験を行う際には減衰の大小により使用データの取捨選択が結果に大きな影響を与える可能性があるため、慎重に行う必要がある。

表5-3に3章の推定計算、4章の誤差推定に必要な計測値及び計測誤差を全て示す。 T_D 、 δ の計測値及び計測誤差には表5-2の平均値と標準偏差の3倍、 3σ を用いることとした。それ以外の計測値の誤差は各計測器の仕様に基づいている。

表5-4は3章及び4章の計算式に表5-3の計測結果を用いて求めた慣性量とその推定最大誤差である。推定最大誤差は各計測誤差の線形和として求められるが表5-4にはその各構成項の大きさも示してある。空白となっている欄は影響を持たない項である。また、影響を持つ項についても小数点以下

表 5-2 (a) 治具単体試験結果

(i) x 軸まわり			(ii) y 軸まわり			(iii) z 軸まわり			(iv) z ⁺ 軸 (θ=+45.0°) まわり			(v) z ⁻ 軸 (θ=-44.3°) まわり		
No.	T _D (s)	δ	No.	T _D (s)	δ	No.	T _D (s)	δ	No.	T _D (s)	δ	No.	T _D (s)	δ
1*	4.871	0.02335	1*	5.353	0.02825	1*	4.773	0.01200	1*	4.803	0.01101	1*	4.794	0.00993
2	4.861	0.01405	2*	5.338	0.02092	2	4.769	0.01091	2	4.801	0.00889	2	4.792	0.00871
3	4.859	0.01372	3	5.333	0.01591	3	4.769	0.00708	3	4.801	0.00651	3	4.791	0.00798
4	4.859	0.01281	4	5.332	0.01215	4	4.770	0.00977	4*	4.804	0.01159	4	4.792	0.00692
5*	4.862	0.01560	5	5.330	0.01098	5	4.768	0.00780	5	4.802	0.00990	5	4.790	0.00663
6	4.860	0.01176	6*	5.342	0.02242	6	4.767	0.00781	6	4.802	0.00911	6*	4.784	0.01051
7	4.858	0.01192	7	5.335	0.01701	7	4.771	0.01094	7*	4.805	0.01109	7	4.792	0.00876
8	4.858	0.01176	8	5.331	0.01429	8	4.768	0.00977	8	4.803	0.01098	8	4.791	0.00725
9	4.857	0.01220	9	5.329	0.01458	9	4.767	0.00731	9	4.802	0.00739	9	4.790	0.00709
10*	4.862	0.01704	10	5.328	0.00919	10	4.770	0.00863	10	4.815	0.01506	10	4.794	0.01368
11*	4.870	0.01874	11*	5.361	0.02152	11	4.770	0.00863	11*	4.815	0.01506	11*	4.794	0.01368
12	4.864	0.01356	12	5.348	0.01232	12	4.769	0.00905	12*	4.809	0.01287	12*	4.790	0.01229
13	4.862	0.01057	13	5.344	0.00736	13	4.768	0.00975	13	4.807	0.01008	13	4.789	0.01079
14	4.862	0.01073	14	5.345	0.00555	14	4.766	0.00880	14	4.805	0.00865	14	4.788	0.00976
15	4.860	0.00765	15	5.344	0.00356	15	4.769	0.00940	15	4.805	0.00909	15	4.787	0.00913
16	4.860	0.01027	16	5.350	0.01241	16*	4.771	0.01133	16	4.805	0.00590	16*	4.795	0.01282
17	4.858	0.00807	17	5.346	0.00963	17	4.770	0.01009	17	4.805	0.00858	17*	4.791	0.01249
18	4.865	0.01390	18	5.345	0.00820	18	4.769	0.00765	18	4.805	0.00828	18	4.790	0.01109
19	4.863	0.01147	19	5.346	0.00983	19	4.767	0.01070	19	4.805	0.00864	19	4.788	0.00897
20	4.863	0.00832	20	5.346	0.00650	20	4.768	0.00851	20	4.805	0.00553	20	4.787	0.01100
平均	4.860	0.01145	平均	5.340	0.01060	平均	4.769	0.00906	平均	4.804	0.00839	平均	4.790	0.00878
σ	0.002	0.00210	σ	0.008	0.00382	σ	0.001	0.00125	σ	0.002	0.00157	σ	0.002	0.00156

表 5-2 (b) アルミニウム角材と治具合成物体試験結果

(i) x 軸まわり			(ii) y 軸まわり			(iii) z 軸まわり			(iv) z ⁺ 軸 (θ=+43.5°) まわり			(v) z ⁻ 軸 (θ=-42.0°) まわり		
No.	T _D (s)	δ	No.	T _D (s)	δ	No.	T _D (s)	δ	No.	T _D (s)	δ	No.	T _D (s)	δ
1*	3.374	0.01224	1*	4.177	0.01243	1	3.887	0.00631	1*	3.669	0.09911	1*	3.664	0.00916
2	3.373	0.00892	2	4.174	0.01158	2	3.887	0.00562	2	3.667	0.00711	2	3.661	0.00766
3	3.372	0.00758	3	4.173	0.01003	3	3.887	0.00615	3	3.666	0.00637	3	3.660	0.00632
4	3.372	0.00592	4	4.172	0.00759	4	3.886	0.00565	4	3.666	0.00667	4	3.659	0.00550
5	3.372	0.00581	5	4.172	0.00530	5	3.885	0.00502	5	3.665	0.00534	5	3.659	0.00502
6*	3.373	0.01250	6*	4.177	0.01228	6	3.887	0.00621	6	3.666	0.00693	6	3.662	0.00867
7	3.373	0.00893	7	4.174	0.01201	7	3.886	0.00631	7	3.666	0.00533	7	3.660	0.00684
8	3.373	0.00689	8	4.173	0.00802	8	3.885	0.00425	8	3.665	0.00522	8	3.660	0.00576
9	3.372	0.00690	9	4.172	0.00580	9	3.885	0.00479	9	3.665	0.00479	9	3.659	0.00518
平均	3.372	0.00728	平均	4.173	0.00876	平均	3.886	0.00559	平均	3.666	0.00597	平均	3.660	0.00637
σ	0.001	0.00128	σ	0.001	0.00248	σ	0.001	0.00075	σ	0.001	0.00090	σ	0.001	0.00128

表 5-2 (c) SP 模型と治具合成物体試験結果

(i) x 軸まわり			(ii) y 軸まわり			(iii) z 軸まわり			(iv) z ⁺ 軸 (θ=+44.8°) まわり			(v) z ⁻ 軸 (θ=-32.0°) まわり		
No.	T _D (s)	δ	No.	T _D (s)	δ	No.	T _D (s)	δ	No.	T _D (s)	δ	No.	T _D (s)	δ
1	3.712	0.01434	1*	5.974	0.04651	1*	5.769	0.01709	1*	4.927	0.01790	1*	5.237	0.02016
2	3.713	0.01769	2	5.966	0.02449	2	5.763	0.01324	2	4.922	0.01419	2*	5.225	0.01411
3*	3.715	0.02033	3*	5.975	0.04498	3	5.763	0.01105	3	4.920	0.01358	3	5.221	0.01069
4	3.711	0.01268	4	5.965	0.02727	4	5.762	0.01105	4	4.920	0.01346	4	5.220	0.00935
5	3.711	0.01189	5*	5.972	0.03687	5*	5.771	0.01762	5*	4.925	0.01662	5*	5.225	0.01442
6	3.714	0.01788	6	5.967	0.02749	6	5.764	0.01379	6	4.921	0.01384	6	5.222	0.01077
7	3.711	0.01303	7*	5.970	0.03914	7	5.762	0.01216	7*	4.928	0.01864	7	5.220	0.00976
8	3.711	0.01204	8	5.966	0.02343	8	5.763	0.00909	8	4.922	0.01465	8*	5.225	0.01376
9*	3.716	0.02053	9*	5.974	0.03953	9	5.763	0.01298	9	4.920	0.01270	9	5.221	0.01085
10*	3.708	0.01079	10	5.967	0.02141	10	5.761	0.01087	10	4.920	0.01223	10	5.221	0.00844
平均	3.711	0.01422	平均	5.966	0.02482	平均	5.763	0.01178	平均	4.921	0.01352	平均	5.221	0.00998
σ	0.002	0.00257	σ	0.001	0.00259	σ	0.001	0.00155	σ	0.001	0.00084	σ	0.002	0.00097

表 5-3 計測結果

	治具単位	治具 + アルミ	治具 + SP
$T_{Dx} \pm e_{TDx}$ (s)	4.860 ± 0.006	3.372 ± 0.002	3.711 ± 0.005
$\delta_x \pm e_{\delta x}$ ($\times 10^{-2}$)	1.145 ± 0.631	0.728 ± 0.384	1.422 ± 0.769
$T_{Dy} \pm e_{TDy}$ (s)	5.340 ± 0.024	4.173 ± 0.003	5.966 ± 0.003
$\delta_y \pm e_{\delta y}$ ($\times 10^{-2}$)	1.060 ± 1.145	0.876 ± 0.744	2.482 ± 0.777
$T_{Dz} \pm e_{TDz}$ (s)	4.769 ± 0.004	3.886 ± 0.003	5.763 ± 0.003
$\delta_z \pm e_{\delta z}$ ($\times 10^{-2}$)	0.906 ± 0.375	0.559 ± 0.225	1.178 ± 0.466
$T_{Dz'}^+ \pm e_{TDz'}^+$ (s)	4.804 ± 0.005	3.666 ± 0.002	4.921 ± 0.003
$\delta_{z'}^+ \pm e_{\delta z'}^+$ ($\times 10^{-2}$)	0.839 ± 0.472	0.597 ± 0.269	1.352 ± 0.251
$T_{Dz'}^- \pm e_{TDz'}^-$ (s)	4.790 ± 0.005	3.660 ± 0.002	5.221 ± 0.005
$\delta_{z'}^- \pm e_{\delta z'}^-$ ($\times 10^{-2}$)	0.878 ± 0.469	0.637 ± 0.385	0.997 ± 0.291
$\Theta^+ \pm e_{\Theta^+}$ (deg)	45.00 ± 0.10	43.50 ± 0.10	44.80 ± 0.10
$\Theta^- \pm e_{\Theta^-}$ (deg)	-44.30 ± 0.10	-42.00 ± 0.10	-32.00 ± 0.10
$m_1 \pm e_{m1}$ (kg)	15.85 ± 0.025	36.65 ± 0.025	32.05 ± 0.025
$m_2 \pm e_{m2}$ (kg)	17.15 ± 0.025	34.75 ± 0.025	33.50 ± 0.025
$l \pm e_l$ (m)	4.002 ± 0.004	4.004 ± 0.004	4.004 ± 0.004
$d \pm 2e_d$ (m)		0.90 ± 0.001	
$\pm e_p$ (m)		± 0.0005	

表 5-4 推定結果及び推定誤差

(a) 治具単位

	Δc_g (m)	l_x (kg·m ²)	l_y (kg·m ²)	l_z (kg·m ²)	l_{zz} (kg·m ²)
推定値	0.0177	9.781	11.809	9.549	0.028
合計	0.0017	0.072	0.162	0.064	0.022
e_m	0.0007	0.015	0.018	0.014	0.000
e_d	0.0005	0.022	0.026	0.022	0.000
e_p	0.0005	0.001	0.001		0.000
e_l		0.010	0.012	0.010	0.000
e_{TDx0}		0.024			0.000
$e_{\delta x0}$		0.000			0.000
e_{TDy0}			0.105		
$e_{\delta y0}$			0.000		
e_{TDz0}				0.018	0.000
$e_{\delta z0}$				0.000	0.000
$e_{TDz'}^+$					0.011
$e_{\delta z'}^+$					0.000
$e_{TDz'}^-$					0.011
$e_{\delta z'}^-$					0.000
e_{TDxc}					
$e_{\delta xc}$					
e_{TDyc}					
$e_{\delta yc}$					
e_{TDzc}					
$e_{\delta zc}$					
$e_{TDz'}^+$					
$e_{\delta z'}^+$					
$e_{TDz'}^-$					
$e_{\delta z'}^-$					
e_{Θ}					0.000

表5-4 推定結果及び推定誤差 (続き)

(b) 治具+アルミニウム角材

推定値	Δc_g (m)	I_x (kg·m ²)	I_y (kg·m ²)	I_z (kg·m ²)	I_{xz} (kg·m ²)
合計	-0.0120	10.130	15.606	13.524	0.064
e_m	0.0003	0.007	0.011	0.009	0.000
e_d	0.0005	0.023	0.035	0.031	0.001
e_p	0.0005	0.001	0.001		0.000
e_l		0.010	0.016	0.014	0.000
e_{DxB}					
$e_{\theta xU}$					
e_{DyB}					
$e_{\theta yB}$					
e_{DzB}					
$e_{\theta zB}$					
$e_{Dz'B^+}$					
$e_{\theta z'B^+}$					
$e_{Dz'B^-}$					
$e_{\theta z'B^-}$					
e_{DxC}		0.010			0.000
$e_{\theta xC}$		0.000			0.000
e_{DyC}			0.020		
$e_{\theta yC}$			0.000		
e_{DzC}				0.020	0.000
$e_{\theta zC}$				0.000	0.000
$e_{Dz'C^+}$					0.007
$e_{\theta z'C^+}$					0.000
$e_{Dz'C^-}$					0.007
$e_{\theta z'C^-}$					0.000
e_θ					0.006

誤差推定値

(c) アルミニウム角材単体

推定値	Δc_g (m)	I_x (kg·m ²)	I_y (kg·m ²)	I_z (kg·m ²)	I_{xz} (kg·m ²)
合計	0.0031	0.294	3.743	3.975	0.036
e_m	0.0012	0.022	0.029	0.024	0.000
e_d	0.0005	0.001	0.008	0.009	0.000
e_p	0.0014	0.004	0.004		0.000
e_l		0.000	0.004	0.004	0.000
e_{DxB}		0.024			0.000
$e_{\theta xU}$		0.000			0.000
e_{DyB}			0.105		
$e_{\theta yB}$			0.000		
e_{DzB}				0.018	0.000
$e_{\theta zB}$				0.000	0.000
$e_{Dz'B^+}$					0.011
$e_{\theta z'B^+}$					0.000
$e_{Dz'B^-}$					0.011
$e_{\theta z'B^-}$					0.000
e_{DxC}		0.010			0.000
$e_{\theta xC}$		0.000			0.000
e_{DyC}			0.020		
$e_{\theta yC}$			0.000		
e_{DzC}				0.020	0.000
$e_{\theta zC}$				0.000	0.000
$e_{Dz'C^+}$					0.007
$e_{\theta z'C^+}$					0.000
$e_{Dz'C^-}$					0.007
$e_{\theta z'C^-}$					0.000
e_θ					0.006

誤差推定値

表 5-4 推定結果及び推定誤差 (続き)

(d) 治具+スペースプレーン模型

	ΔC_F (m)	I_x (kg·m ²)	I_y (kg·m ²)	I_z (kg·m ²)	I_{xz} (kg·m ²)
推 定 値	0.0100	11.334	29.293	27.647	0.504
合 計	0.0013	0.074	0.142	0.138	0.083
e_m	0.0003	0.009	0.022	0.021	0.000
e_d	0.0005	0.025	0.065	0.062	0.009
e_p	0.0005	0.001	0.001		0.000
e_l		0.011	0.029	0.028	0.001
e_{TDxB}					
$e_{\delta xB}$					
e_{TDyB}					
$e_{\delta yB}$					
e_{TDzB}					
$e_{\delta zB}$					
$e_{TDz'B^+}$					
$e_{\delta z'B^+}$					
$e_{TDz'B^-}$					
$e_{\delta z'B^-}$					
e_{TDxC}		0.028			0.003
$e_{\delta xC}$		0.000			0.000
e_{TDyC}			0.025		
$e_{\delta yC}$			0.000		
e_{TDzC}				0.027	0.004
$e_{\delta zC}$				0.000	0.000
$e_{TDz'C^+}$					0.012
$e_{\delta z'C^+}$					0.000
$e_{TDz'C^-}$					0.025
$e_{\delta z'C^-}$					0.000
e_θ					0.029

誤 差 推 定 値

(e) スペースプレーン模型単体

	ΔC_F (m)	I_x (kg·m ²)	I_y (kg·m ²)	I_z (kg·m ²)	I_{xz} (kg·m ²)
推 定 値	0.0021	1.549	17.480	18.097	0.476
合 計	0.0034	0.081	0.228	0.138	0.104
e_m	0.0014	0.023	0.040	0.035	0.000
e_d	0.0005	0.003	0.039	0.040	0.009
e_p	0.0015	0.001	0.002		0.000
e_l		0.002	0.017	0.018	0.000
e_{TDxB}		0.024			0.000
$e_{\delta xB}$		0.000			0.000
e_{TDyB}			0.105		
$e_{\delta yB}$			0.000		
e_{TDzB}				0.018	0.000
$e_{\delta zB}$				0.000	0.000
$e_{TDz'B^+}$					0.011
$e_{\delta z'B^+}$					0.000
$e_{TDz'B^-}$					0.011
$e_{\delta z'B^-}$					0.000
e_{TDxC}		0.028			0.003
$e_{\delta xC}$		0.000			0.000
e_{TDyC}			0.025		
$e_{\delta yC}$			0.000		
e_{TDzC}				0.027	0.004
$e_{\delta zC}$				0.000	0.000
$e_{TDz'C^+}$					0.012
$e_{\delta z'C^+}$					0.000
$e_{TDz'C^-}$					0.025
$e_{\delta z'C^-}$					0.000
e_θ					0.029

誤 差 推 定 値

表 5-5 推定結果

	治具単体	アルミニウム角材		S P 模 型
		推 定 値	予 測 値	
m (kg)	33.00 ± 0.025	38.40 ± 0.025	—	32.55 ± 0.025
上下重心位置 (mm) (基準点より上方正)	17.7 ± 1.7	2.500 ± 4.300	0.000	2.1 ± 3.4
I_x ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	9.781 ± 0.072	0.294 ± 0.061	0.241 ± 0.002	1.549 ± 0.081
I_y ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	11.809 ± 0.162	3.743 ± 0.170	3.672 ± 0.010	17.480 ± 0.228
I_z ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	9.549 ± 0.064	3.975 ± 0.075	3.897 ± 0.011	18.097 ± 0.138
I_{xz} ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	0.028 ± 0.022	0.036 ± 0.042	0.000	0.476 ± 0.104

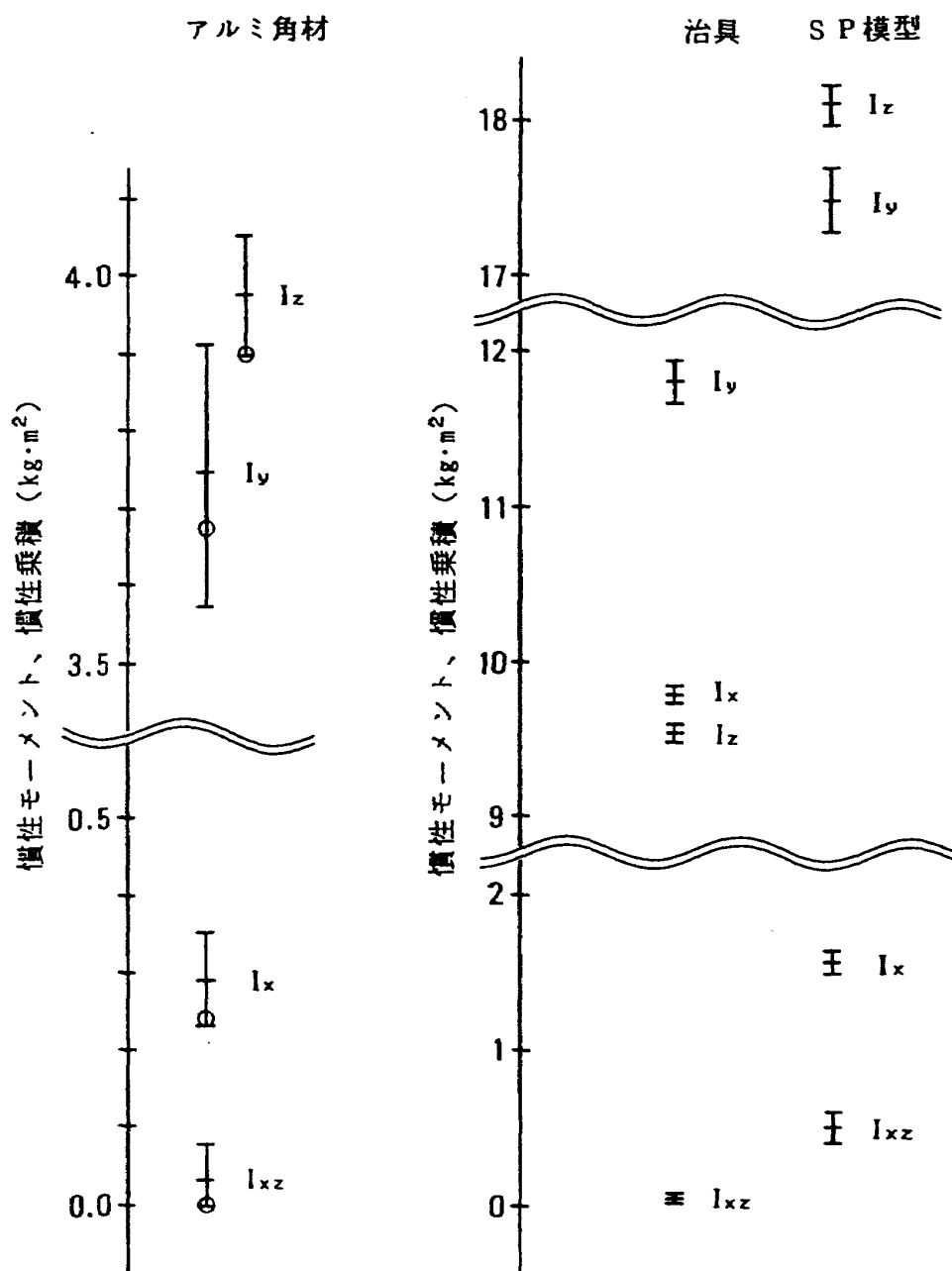


図 5-3 慣性モーメント、慣性乗積推定結果

四桁以降を四捨五入しているため、対数減衰率 δ の項等その影響の非常に小さい項については 0.000 と表示されている。表 5-5 はこれらの結果を整理し、アルミニウム角材については予測値も同時に示した結果である。また図 5-3 は表 5-5 の結果の内、慣性モーメント、慣性乗積の推定結果を図示したものである。アルミニウム角材の予測値は○印の中心により示しているが、その誤差は小さく図示しても見えないため、特に表示していない。これらによるとアルミニウム角材の慣性量の予測値はすべて推定値の最大誤差範囲に入っており、本推定法が正しく行われていることがわかる。したがってスペースプレーン模型の慣性量真値も推定値の最大誤差範囲内に入っていると考えて良い。

スペースプレーン模型の結果に注目すると各慣性モーメント及び慣性乗積の推定最大誤差はほぼ同程度の大きさとなっている。このためこれらの値を推定絶対値に対する割合表示すれば I_y , I_z については 1.3%, 0.8% と良好な値になっているが絶対値の小さい I_x については 5.3% と大きくなる。これは模型の I_x は I_y , I_z に比べて小さいが、治具の 3 軸まわりの慣性モーメントはほぼ同じ大きさであるため、 I_y , I_z については模型の値が治具の約 1.5 倍程度であるのに対し I_x については逆に約 1/6 となっていることが原因である。すなわち模型の I_x は (3.24) 式により求められるが、治具模型合成物体の I_x と治具単体の I_x の差が主要な部分となる。この両者の値がその差に比べて大きく、両者の誤差の影響を大きく受けているからである。表 5-4 (e) のスペースプレーン模型の I_x の誤差を見ると質量 m 、治具単体の x 軸まわり自由周期 T_{DxB} 、治具模型合成物体の x 軸まわり自由周期 T_{Dxc} の各計測誤差が全誤差の各々 1/3 程度ずつを占めているが、後の 2 者は表 5-4 (a), (d) すなわち治具単体および治具模型合成物体の計測誤差が直接現れたものであり、これらの誤差は (4.15) 式を見れば各々の I_x に比例するため、治具の I_x を I_y , I_z と同様模型の 1/1.5 程度まで小さくすることにより減少させることができる。治具の I_x がこの様に大きな値になったのは 3 章に述べた様に治具の重心と模型重心を一致させる目的で治具に対称性を持たせたためである。しかし結果的には両者の重心間には上下方向に変位を持ったため補正を行っており、その意味では治具は上下対称の必要はない。したがって I_x の小さな治具を設計使用することによりこの結果は改善される。

I_{xz} についても推定最大誤差は 21.8% となるが、表 5-4 (e) よりこの誤差の構成を見ると θ の計測誤差項が最も大きく全体の 1/3 弱を占めており、続いて治具単体および治具模型合成物体の頭上げあるいは頭下げ状態での自由周期の誤差が同程度の大きさとなっている。 θ の誤差については計測精度が 0.1° となっており、これは改善が可能と考えられる。自由周期の誤差については治具の慣性モーメントを小さくすることにより多少の改善が期待されるが大きなものではない。通常 I_{xz} の絶対値は小さく、今回の方法により (3.10) 式に従って I_{xz} を求める場合にはこの程度の誤差は避けられないと考えられる。なお、 I_{xz} の誤差の内、 T_{DxB} , T_{Dxc} 及び T_{DyB} , T_{Dyc} の誤差の寄与分は I_x あるいは I_z の誤差における寄与分比べて極端に小さくなっているが、これは (4.42) 式よりわかる様に頭上げ試験の結果と頭下げ試験の結果の平均をとったことによりこれらの誤差の係数が打ち消された結果である。頭上げ角度と頭下げ角度を等しく設定すればこれらの寄与項は 0 となり、平均をとることの効果が現れている。同様に模型単体の各慣性量推定最大誤差の内、 e_d , e_l の寄与項は治具単体と治具模型合成物体の差になっているがこれは治具を用いたことによる利点であり、測定対象物に直接ワイヤーを取り付けるより治具を用いた場合の方が各試験に共通の計測誤差についてはその影響が小さくなる。 e_m , e_p については各試験ごとに独立して現れる誤差であるため、治具を用いることによりその影響は大きくなっている。

上下重心位置については手法の簡便さから考えればかなり良い精度で求まっているといえる。

以上の検討より今回の試験によりスペースプレーン模型の重心位置、 I_y 及び I_z については良好な精

度で推定が行われたといえる。 I_x の推定値は比較的大きな誤差を持つ可能性が示されたが、これは小型軽量の治具を用いて試験を行えば結果が改善されることが確認された。 I_{xz} についても大きな割合の誤差が生じたが、その値自体は他の慣性モーメントの場合と同程度であり、本手法による限り避けられない誤差であると考えられる。今後の課題として実験装置に関しては治具の小型軽量化、データ解析に関しては軸受け部の摩擦力の検討、治具と共に回転する空気の見かけの質量の検討等があげられる。

6. あとがき

スペースプレーン模型の慣性モーメント推定にあたり推定方法として2本吊り自由振動法を用いた結果、 y 軸、 z 軸まわりの慣性モーメントに関しては推定最大誤差は1%前後と良好であったが、 x 軸に関しては5.3%となった。これは治具の x 軸まわり慣性モーメントがスペースプレーン模型と比較して約6倍と大き過ぎたためであり、各軸とも慣性モーメントが模型の1/1.5程度以下の小型軽量治具を使用することにより改善されることが誤差解析の結果確認された。また慣性乗積についても推定最大誤差は21.8%と大きくなった。この誤差の約1/3は角度計測の精度向上により減少が可能であるが、その他の部分は本手法による限り大きな改善は期待できないことがわかった。ただし慣性乗積はその値が非常に小さいため推定最大誤差の割合は相対的に大きくなっているが、その絶対値は他の慣性モーメントの場合と同程度である。今後の課題として、治具の小型軽量化による推定精度向上、軸受け部の摩擦及び空気の見かけの質量の検討が必要である。また今回は対象物を自由振動させる際、手で対象物に初期変位を与え、それを解放することにより振動を発生させたが、より正確な振動励起法の検討が必要である。さらに今回は推定対象物の上下重心位置のみに自由度を与えたが、前後あるいは左右重心位置が調整不可能であった場合の推定手法の検討等も必要である。

なお、本試験の実施にあたっては当所の研修生であった東海大学の阿藤賢一君、東京電気大学の深谷健君の御協力を得た。ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 永安正彦他：ケーブルマウントによるスペースプレーン模型の動的風洞試験，第28回飛行機シンポジウム，1990
- 2) 柳原正明：ケーブル支持動的風洞試験模型の数学モデルによる運動特性解析，航技研報告TR-1127，1991
- 3) 永安正彦他：航空機特性同定法の対話型評価システム（IPIS），航技研報告TR-1000，1988
- 4) 柳原正明：宇宙往還機飛行シミュレーションプログラム，航技研資料TM-594，1988
- 5) ACT研究会：片持矩形弾性翼の突風荷重軽減の風洞試験と解析，航技研報告TR-846，1984
- 6) R. C de Jong, J. A. Mulder “Estimation of Aircraft Inertia Characteristics from a Single Suspension Experiment”, Journal of Aircraft,

VOL.24, NO.6, June, 1987

- 7) M. Yanagihara et al. “Estimation of Spaceplane Model Inertia Characteristics”, Proceedings of the 28th Aircraft Symposium, 1990

付録A. スペースプレーン模型

図A-1に今回の試験対象としたスペースプレーン模型の3面図を示す。模型はNAL-SP-0次形状であり、想定実機の5%縮尺模型である。主翼は翼型NACA 0006，付角1°，上反角0°である。操舵面としてエレボン，ラダー，カナードを備えており，サーボモータにより各々独自に操舵可能である。軽量化のため主構造は強度部材を箱型に配したモノコック構造とし，主材料にはカーボン/アラミドファイバーを使用している。模型内部にはケーブル支持のためのプーリが前後各々2個装着されている。また運動データ収録用に加速度計，レート・ジャイロ，バーティカル・ジャ

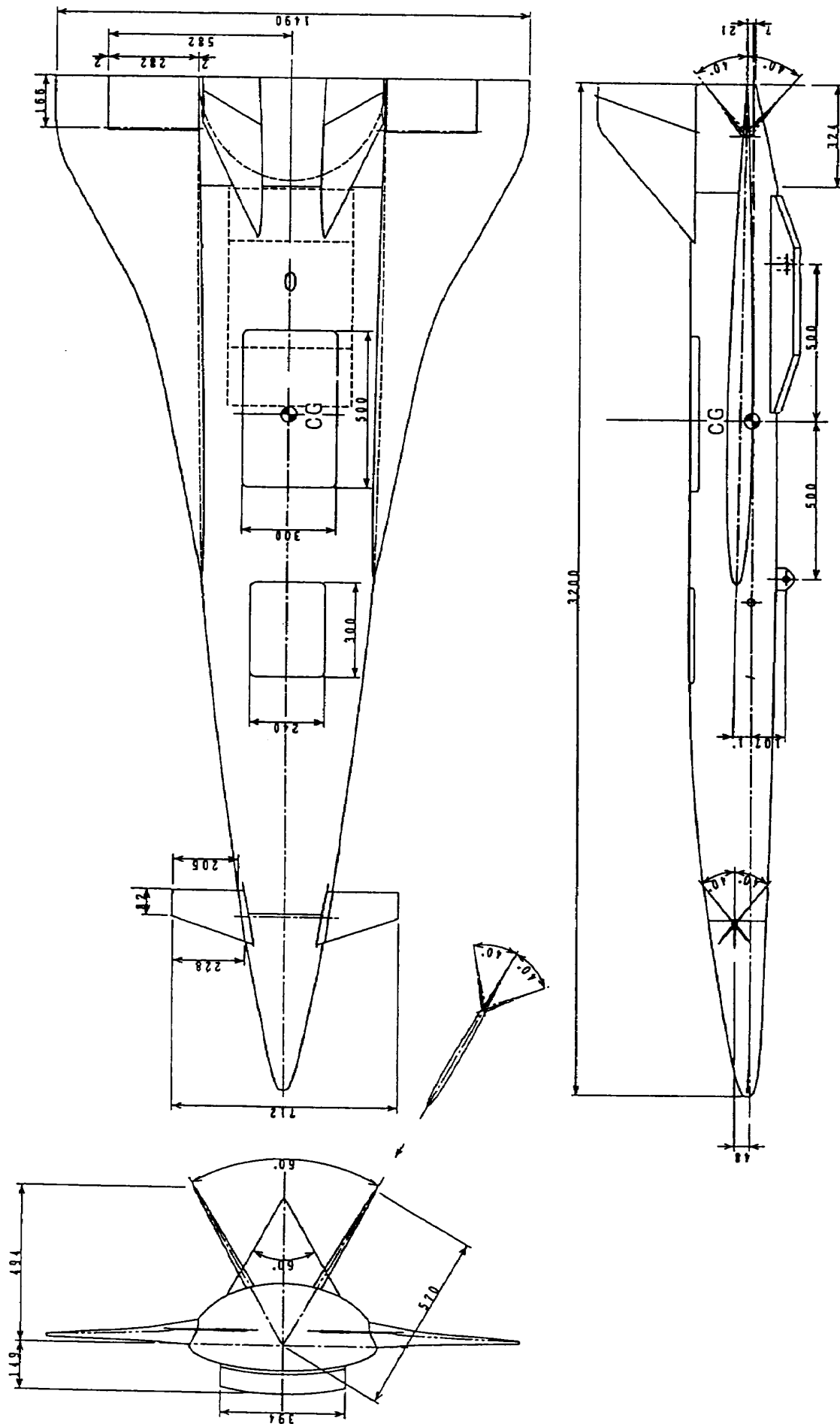
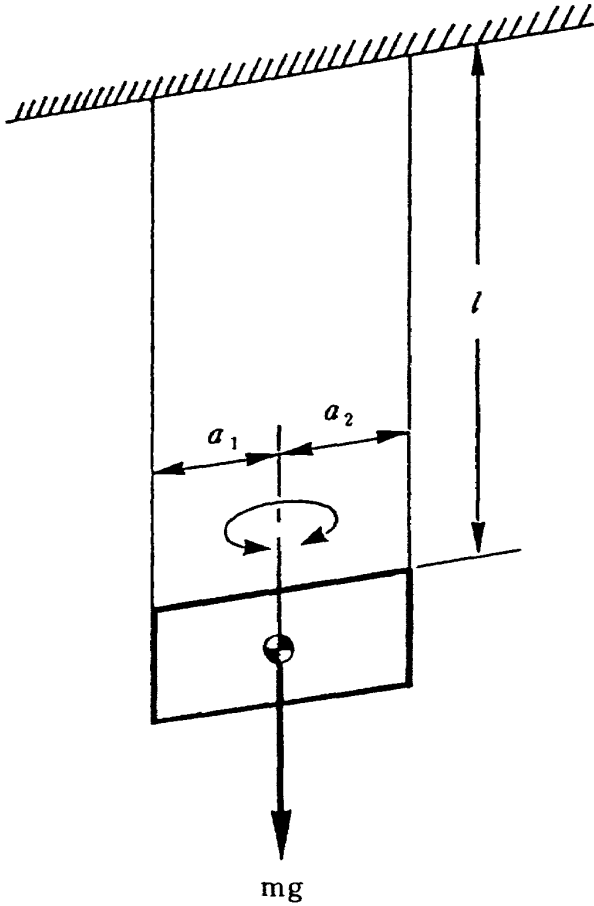


図 A-1 スペースプレーン模型

イロ、各舵面の舵角計測用にポテンショ・メータが装着されている。今回の実験において治具との固定のために用いた金具が図A-1の側面図の重心の前後500mmの位置に示されている。これらの金具は静的風洞試験の際の支柱との固定金具を兼用しており、動的風洞試験の際には取りはずされる。

付録B. 2本吊り自由振動法

2本吊り自由振動法は図B-1に示されるように測定対象物体を2本のワイヤーで吊り、重心を



図B-1 2本吊り自由振動法

通る鉛直軸回りに重力による自由回転振動させることにより慣性モーメントを求める方法である。この方法によると物体の重心を通る鉛直軸まわりの慣性モーメント I は次式により求められる。

$$I = \frac{a_1 \cdot a_2 \cdot m \cdot g}{(4\pi^2 + \delta^2) l} T_D^2 \quad (\text{B. 1})$$

ただし m は物体の質量、 a_1 、 a_2 は2本のワイヤ

ーから重心までの水平距離、 l はワイヤーの長さ、 g は重力加速度である。また T_D と δ は回転振動の自由周期と対数減衰率であり、ダンピング係数 ζ と固有角振動数 ω_n を用いて以下の様に表される。

$$T_D = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (\text{B. 2})$$

$$\delta = T_D \cdot \zeta \cdot \omega_n = \frac{2\pi \cdot \zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (\text{B. 3})$$

以下 (B. 1) 式の算出を行う。 T_{10} 、 T_{20} を図B-1の静止状態における2本のワイヤーの張力とすると、力及びモーメントの釣合い式は次の様に表される。

$$T_{10} + T_{20} = m \cdot g \quad (\text{B. 4})$$

$$T_{10} \cdot a_1 = T_{20} \cdot a_2 \quad (\text{B. 5})$$

この2式より T_{10} 、 T_{20} を解くと

$$T_{10} = \frac{a_2}{a_1 + a_2} m \cdot g \quad (\text{B. 6})$$

$$T_{20} = \frac{a_1}{a_1 + a_2} m \cdot g \quad (\text{B. 7})$$

図B-2に示す様に物体が静止状態から重心を通る鉛直軸回りに微小角度 ϕ 回転したときのワイヤー傾き角を ϕ_1 、 ϕ_2 とし、そのときの張力を T_1 、 T_2 とすると鉛直方向の力の釣合いより

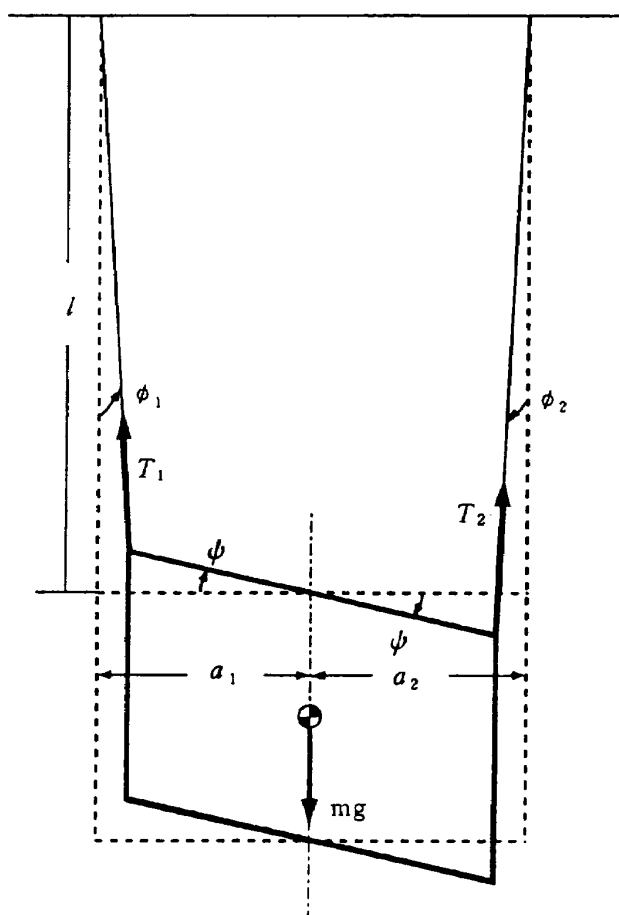
$$T_1 = \frac{T_{10}}{\cos \phi_1} \doteq T_{10} \quad (\text{B. 8})$$

$$T_2 = \frac{T_{20}}{\cos \phi_2} \doteq T_{20} \quad (\text{B. 9})$$

このときのワイヤーの張力の水平成分を H_1 、 H_2 とすると

$$H_1 = T_1 \cdot \sin \phi_1 \doteq T_{10} \cdot \phi_1 \quad (\text{B. 10})$$

$$H_2 = T_2 \cdot \sin \phi_2 \doteq T_{20} \cdot \phi_2 \quad (\text{B. 11})$$



図B-2 微小回転変位

この初期回転変位を持った静止状態から解放するとこのワイヤーの張力の水平成分は鉛直軸回りの回転復元モーメント N として働く。

$$\begin{aligned}
 N &= -(H_1 \cdot a_1 + H_2 \cdot a_2) \\
 &= -(T_{10} \cdot \phi_1 \cdot a_1 + T_{20} \cdot \phi_2 \cdot a_2) \\
 &= -\left\{ T_{10} \frac{a_1 \cdot \phi}{l} a_1 + T_{20} \frac{a_2 \cdot \phi}{l} a_2 \right\} \\
 &= -\frac{(T_{10} \cdot a_1^2 + T_{20} \cdot a_2^2) \phi}{l}
 \end{aligned} \quad (B.12)$$

(B.6), (B.7) 式を代入すると

$$N = -\frac{a_1 \cdot a_2 \cdot m \cdot g}{l} \phi \quad (B.13)$$

この角変位に比例する復元モーメントにより物体は回転振動を行うが、これに加えて空気力がダンピング・モーメントとして作用する場合を考える。

ダンピングが角速度に比例すると仮定すれば運動方程式は次式で表される。

$$I\ddot{\psi} = -k\dot{\psi} - \frac{a_1 \cdot a_2 \cdot m \cdot g}{l} \psi \quad (B.14)$$

k は空力ダンピングの比例係数であり右辺第1項が空力ダンピングモーメント、第2項が復元モーメントである。この式を書き換えると

$$\ddot{\psi} + 2\zeta \cdot \omega_n \cdot \dot{\psi} + \omega_n^2 \cdot \psi = 0 \quad (B.15)$$

ここで ζ と ω_n は自由振動のダンピング係数と固有角振動数であり、次式で表される。

$$\zeta \cdot \omega_n = \frac{k}{I} \quad (B.16)$$

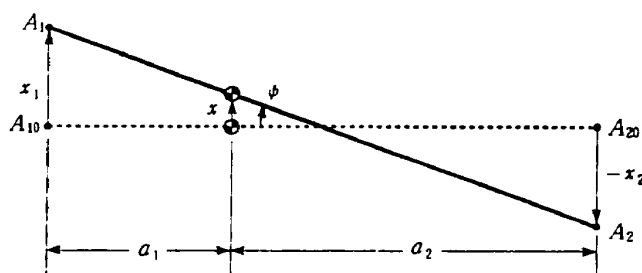
$$\omega_n^2 = \frac{a_1 \cdot a_2 \cdot m \cdot g}{I \cdot l} \quad (B.17)$$

(B.17) 式と (B.2), (B.3) 式より

$$I = \frac{a_1 \cdot a_2 \cdot m \cdot g}{\omega_n^2 \cdot l} = \frac{a_1 \cdot a_2 \cdot m \cdot g}{(4\pi^2 + \delta^2) l} T_D^2 \quad (B.18)$$

こうして (B.1) 式が導かれた。

2本吊り自由振動法では初期変位として物体の重心を通る鉛直軸回りの回転のみを与える必要があるが、実際には誤差により他の軸まわりの回転あるいは重心の並進変位が初期変位に加わることが考えられる。特に重心位置を示す a_1, a_2 が正確に知られていない場合には初期変位として重心が図B-3の様に並進変位を持つことが考えられ



図B-3 重心の並進変位

る。図B-3は図B-1を上方から見た図であり、点 A_1, A_2 は2本のワイヤーと物体との接点、 A_{10}, A_{20} はそれらの静止状態における位置、 x, x_1, x_2

は各々重心, A_1 , A_2 の並進変位量であり, ψ は物体の回転変位である。この時 x_1 , x_2 は次の様に近似表現することができる。

$$x_1 = x + a_1 \cdot \psi \quad (\text{B.19})$$

$$x_2 = x - a_2 \cdot \psi \quad (\text{B.20})$$

並進変位は微小であり, 2本のワイヤーの張力はその影響を受けないと考えればこれらは (B.8), (B.9) あるいは (B.6), (B.7) 式により表される。この張力により A_1 , A_2 点を受ける水平面内の復元力は

$$H_1 = T_1 \cdot \frac{x_1}{l} = \frac{a_2 (x + a_1 \cdot \psi)}{a_1 + a_2} \cdot \frac{m \cdot g}{l} \quad (\text{B.21})$$

$$H_2 = T_2 \cdot \frac{x_2}{l} = \frac{a_1 (x - a_2 \cdot \psi)}{a_1 + a_2} \cdot \frac{m \cdot g}{l} \quad (\text{B.22})$$

となり, 各々 $A_1 \rightarrow A_{10}$, $A_2 \rightarrow A_{20}$ の方向に作用する。この復元力は物体の重心の並進運動及び重心まわりの回転運動を生じさせ, その運動方程式は各々次の様に記述できる。

$$m \ddot{x} = -H_1 - H_2 = -\frac{m \cdot g}{l} x \quad (\text{B.23})$$

$$\begin{aligned} I \ddot{\psi} &= -H_1 \cdot a_1 + H_2 \cdot a_2 \\ &= -\frac{a_1 \cdot a_2 \cdot m \cdot g}{l} \psi \end{aligned} \quad (\text{B.24})$$

これより回転運動と並進運動は独立であり, 重心が初期並進変位を持っていないければその後の並進運動は生じないことがわかる。また (B.24) 式は (B.13) と同じであり, これは初期変位の誤差により重心が微小な並進運動を行っている場合にも (B.1) 式は成立することを示している。

航空宇宙技術研究所資料 641 号

平成 3 年 10 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 セイコー社
東京都調布市西つつじヶ丘 1 丁目 5 番地 15
