

JAXA 風洞技術開発センター傾斜計校正装置と内装式傾斜計の応用

青木 良尚、細江 信幸、星野 秀雄、伊藤 健 (JAXA)

The Introduction to the JAXA Wind Tunnel Technology Center Inclinometer Calibration Facility and Application of the Servo Inclinometer to Wind Tunnel Testing

Aoki yoshihisa, Hosoe nobuyuki, Hoshino hideo, Ito takeshi (JAXA)

Abstract

The Sensorex and Q-Flex type inclinometer calibration facility in JAXA Wintec was developed in August, 2003. The Inclinometer Calibration Facility is introduced and 2-axis servo inclinometer calibration formula based on servo inclinometer model is derived in this paper. With an example for a wind tunnel testing using the Sensorex41400 servo inclinometer conducted in JAXA 6.5- by 5.5- m Low Speed Wind Tunnel, we show the application of the inclinometer to the wind tunnel testing.

1. はじめに

風洞試験における重要な計測項目の一つに、模型の姿勢角がある。模型の姿勢角は一般的に重力を基準とした角度と一様流の偏流角から求められる。サーボ内装式傾斜計は、重力を利用して傾斜角を計測するセンサであり多くの産業分野で使用されているが、風洞試験における重力を基準としたピッチ角とロール角の計測にも使用されているセンサである[1]。JAXA6.5m × 5.5m 低速風洞でもサーボ内装式傾斜計 Sensorex41400 を購入し、風洞試験に使用してきた。2003年8月に完成したJAXA風洞技術開発センター傾斜計校正装置の概要と共に、課題であったサーボ内装式傾斜計のロール角を含めた2軸校正法とサーボ内装式傾斜計の設置誤差の補正法について、標準模型試験におけるサーボ内装式傾斜計の応用例と合わせて報告する。

2. JAXA 風洞技術開発センター傾斜計校正装置[2]

JAXA 風洞技術開発センター傾斜計校正装置は、風洞試験における模型姿勢角計測精度向上を目的として導入されたサーボ内装式傾斜計を正確に校正するために製作が進められ、2003年8月に完成した。装置の概観を図1に、主な仕様を表1に示す。この装置はピッチ角とロー

ル角の2自由度変角機能を備え、装置の角度検出器と被校正傾斜計の出力を比較する事による静止状態における角度校正を行うことが可能である。恒温槽も備えており、温度ドリフト確認機能を持つと共に、データの取得は全自動で行うことが可能である。被校正傾斜計は Sensorex タイプと Q-Flex タイプを想定しているが、傾斜計取り付け台座を介して取り付ける為、この台座を製作すればどのタイプの傾斜計でも校正することが出来る。また、ISOに対応するために、全ての計測機器のトレーサビリティは確保されている。

実際の校正手順は以下の通りとなる。

1. 準備操作
 - ・ 校正装置と傾斜計設置面を水平に調整
 - ・ 傾斜計を設置し、計測系の配線を接続
2. 信号設定
 - ・ 取得するデータの収集条件を設定
3. 試験条件設定
 - ・ 校正を行うピッチ角、ロール角を設定
4. 試験
 - ・ 設定した条件で校正試験を実行
5. 校正記録
 - ・ 取得したデータを保存

取得したデータをオフラインで処理して傾斜計校正係数を算出することにより、傾斜計の校正が完了する。

表 1 JAXA 風洞技術開発センター傾斜計校正装置の主な仕様

測定項目	項目	精度
ピッチ角	測定範囲	± 40°
	設定精度	0.005° 以下
	検出精度	0.002° 以下
ロール角	測定範囲	± 180°
	設定精度	0.005° 以下
	検出精度	0.002° 以下
高温槽	温度設定範囲	5 ~ 85 °C
	温度制御精度	± 0.3 °C 以内
校正条件	自動校正点数	最大 500 点



図 1 JAXA 風洞技術開発センター傾斜計校正装置概観

3. サーボ傾斜計の 2 軸校正

3. 1 多項式フィッティングによる校正式と課題

ピッチ角のみを計測可能な 1 軸サーボ内装式傾斜計の校正式は、ピッチ角を θ 、ピッチ角出力電圧を S_θ 、校正係数を A, B とすると、

$$S_\theta = A \sin \theta + B \quad \dots(1)$$

となる。この式から 2 軸サーボ内装式傾斜計の出力もピッチ角とロール角の三角関数の線形和と仮定し、それぞれの角度の範囲を ± 90° と仮定して 3 次多項式近似を行うと、2 軸校正式は、ロール角を ϕ 、ロール角電圧出力を S_ϕ 、校正係数を a_i, b_i とすると、

$$\begin{cases} S_\theta = \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^3 a_{4m+n} \theta^m \phi^n \\ S_\phi = \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^3 b_{4m+n} \theta^m \phi^n \end{cases} \quad \dots(2)$$

となる。

この校正式を検証する為に、JAXA 風洞技術開発センター傾斜計校正装置でサーボ傾斜計 Sensorex41400 の校正データを取得した。校正データは図 2 に示すような 2 種類を取得して結果を比較した。校正データ 1 は図 2 の黒丸で示されるピッチ角 0° 上の点とロール角 0° 上の点、ピッチ角とロール角の絶対値が等しくなる点から 25 点抜粋した点であり、校正データ 2 は図 2 の × で示されるピッチ角・ロール角共に 5° 間隔で取得した 225 点である。それぞれの校正データから校正係数を算出し、他の校正データを使用して角度を算出することによる検証結果を表 2 に示す。

表 2 より、校正点が細かく校正範囲全体に分布している場合には、校正点以外の角度計測精度は十分確保されるが、校正点が荒い場合には校正点以外の計測精度が落ちることが判る。また、式(2)で示される校正式の校正項はピッチ角・ロール角合わせて 32 項あり、複雑である。したがって、式(2)の校正式には、計測精度を高める為には多数の校正点が必要、校正項の数が 32 項となり、1 軸校正式と比較して非常に複雑であるという課題があることが判明した。

表 2 多項式フィッティング 2 軸校正式検証結果

校正データ	確認データ	θ [deg]		ϕ [deg]	
		誤差平均	誤差標準偏差	誤差平均	誤差標準偏差
1	2	-0.0008	0.3717	0.0038	0.1031
2	1	0.0000	0.0019	0.0009	0.0103

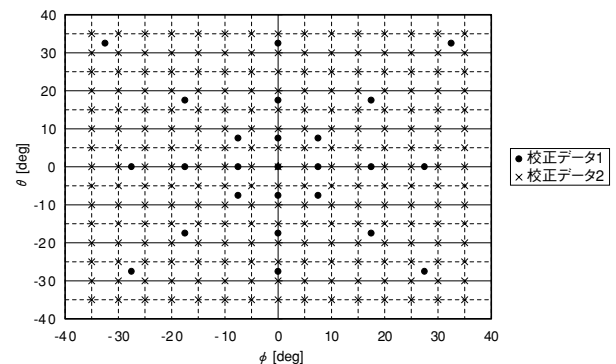


図 2 多項式フィッティング 2 軸校正式検証データ

3.2 サーボ傾斜計のモデル化と校正式の導出

前節の多項式フィッティングによる校正式の課題を解決する為に、サーボ傾斜計のモデルに基づいて校正式を導出する。

図3に示す1軸サーボ傾斜計モデルでは、傾斜計が傾いても傾斜計に固定された座標系における重りの位置が変わらないように重りに力を加える動作を行い、この重りに加える力に比例した信号が出力される。従って、サーボ傾斜計モデルに基づく2軸校正式を導出するためには、2軸を変角した時に重力に反して傾斜計内部の一定の位置に重りを固定する為に必要な力を求めればよい。

まず、図4に示すように傾斜計に固定された座標系を取る。ここで、x軸はロール回転軸、y軸はピッチ回転軸と一致する方向とする。また、z軸正方向を重力加速度方向と一致する位置をピッチ角・ロール角0°とし、これらの角度に関する回転行列 R_θ 、 R_ϕ を、重りの固定位置のピッチ角・ロール角オフセット値をそれぞれ α_i 、 β_i ($i = \theta, \phi$) として下記の通りに定義する。

$$R_\theta = \begin{pmatrix} \cos(\theta + \alpha_i) & 0 & -\sin(\theta + \alpha_i) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta + \alpha_i) & 0 & \cos(\theta + \alpha_i) \end{pmatrix} \quad \dots(3)$$

$$R_\phi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi + \beta_i) & \sin(\phi + \beta_i) \\ 0 & -\sin(\phi + \beta_i) & \cos(\phi + \beta_i) \end{pmatrix} \quad \dots(4)$$

ピッチ角・ロール角方向のサーボ入力軸を $(\varepsilon_{\theta x}, \varepsilon_{\theta y}, \varepsilon_{\theta z})$ 、 $(\varepsilon_{\phi x}, \varepsilon_{\phi y}, \varepsilon_{\phi z})$ 、重力によって重りに加わる荷重を f_g 、オフセット電圧を Δ_θ 、 Δ_ϕ 、サーボ入力を電圧に変換する比例定数を k_θ 、 k_ϕ とすると、2軸変角による2軸信号出力 S_θ 、 S_ϕ は下式となる。

$$\begin{cases} S_\theta = k_\theta (\varepsilon_{\theta x} & \varepsilon_{\theta y} & \varepsilon_{\theta z}) R_\theta R_\phi \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f_g \end{pmatrix} + \Delta_\theta \\ S_\phi = k_\phi (\varepsilon_{\phi x} & \varepsilon_{\phi y} & \varepsilon_{\phi z}) R_\theta R_\phi \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ f_g \end{pmatrix} + \Delta_\phi \end{cases} \quad \dots(5)$$

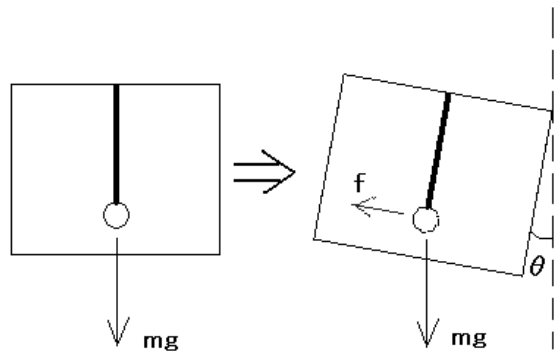
式(5)は、

$$\begin{pmatrix} 1, \sin \theta, \cos \theta, \sin \theta \sin \phi, \sin \theta \cos \phi \\ \cos \theta \sin \phi, \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix}$$

という一次独立な7個の基底関数の線形結合である為、サーボ傾斜計モデルに基づく2軸校正式はこれらの基底関数から下式となる。

$$\begin{aligned} S_\theta &= a_0 + a_1 \sin \theta + a_2 \cos \theta + a_3 \sin \theta \sin \phi \\ &\quad + a_4 \sin \theta \cos \phi + a_5 \cos \theta \sin \phi + a_6 \cos \theta \cos \phi \\ S_\phi &= b_0 + b_1 \sin \theta + b_2 \cos \theta + b_3 \sin \theta \sin \phi \\ &\quad + b_4 \sin \theta \cos \phi + b_5 \cos \theta \sin \phi + b_6 \cos \theta \cos \phi \end{aligned} \quad \dots(6)$$

以上より、サーボ傾斜計モデルに基づく2軸校正式(式(6))が導かれた。傾斜計校正データから最小二乗法によって式(6)の14項の校正係数を求める事が出来る。ピッチ角・ロール角は、求めた校正係数と信号出力から、Newton-Raphson法のような一般的な非線形方程式解法を用いて式(6)を解く事で計測することが可能となる。



m:質量
g:重力加速度
 θ :傾斜角
f:サーボ入力 ($mg \sin \theta$)

図3 1軸サーボ傾斜計モデル

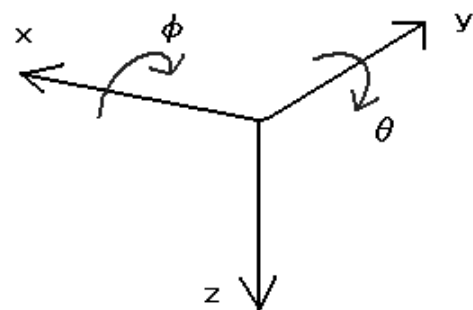


図4 傾斜計内部に固定された座標系の定義

3. 3 サーボ傾斜計 Sensorex41400 によるサーボ傾斜計モデルに基づく校正式の検証

前節で求めたサーボ傾斜計の 2 軸校正式の妥当性を検証する為に、多項式フィッティング校正式の検証に使用した校正データに加えて、傾斜計を再設置して計測した校正データ 1 と同様の 25 点校正データ 3、校正データ 1 ~ 校正データ 3 の 1 年前に計測したピッチ角が $-10^\circ, 0^\circ, 10^\circ$ におけるロール角 $-35^\circ \sim 35^\circ$ まで 5° 間隔、ロール角が $-10^\circ, 0^\circ, 10^\circ$ におけるピッチ角 $-35^\circ \sim 35^\circ$ まで 5° 間隔の 175 点の校正データ 4 を追加した。校正式の検証は 25 点の校正データ 1 から計算した校正係数を使用して、校正データ 1 ~ 校正データ 4 の計測値から角度を計算して角度設定値と計測値の差分を評価して行った。表 3 にサーボ傾斜計モデルに基づく 2 軸校正式の検証結果を、図 5 にピッチ角計測誤差のヒストグラムを、図 6 にロール角計測誤差のヒストグラムを示す。

校正データ 1、校正データ 2 の誤差は全て $\pm 0.1^\circ$ 以内となり、多項式フィッティングによる 2 軸校正式と比較して、少ない校正点数で校正点以外の計測点でも良い計測結果が得られた。再設置時データでは、ピッチ角・ロール角共に角度のオフセットが発生しているが、大きな計測誤差は発生していない。再設置時データのロール角誤差標準偏差は 0.02° 程度と他の誤差標準偏差と比較して大きくなる。この原因は不明であるが、センサの特性である可能性が考えられる。以上より、サーボ傾斜計モデルに基づく校正式 (式(6)) は妥当である事が確認できた。

表 3 サーボ傾斜計モデルに基づく 2 軸校正式検証結果

	θ [deg]		ϕ [deg]	
	誤差平均	誤差標準偏差	誤差平均	誤差標準偏差
校正データ1	0.0000	0.0014	0.0000	0.0019
校正データ2	0.0004	0.0022	- 0.0005	0.0024
校正データ3	0.0134	0.0044	0.0347	0.0234
校正データ4	0.0174	0.0030	- 0.0038	0.0192

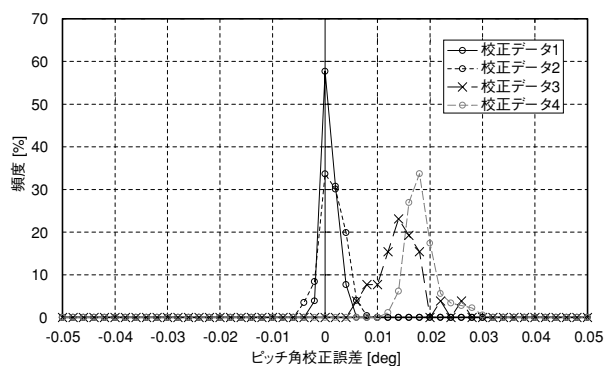


図 5 ピッチ角校正誤差ヒストグラム

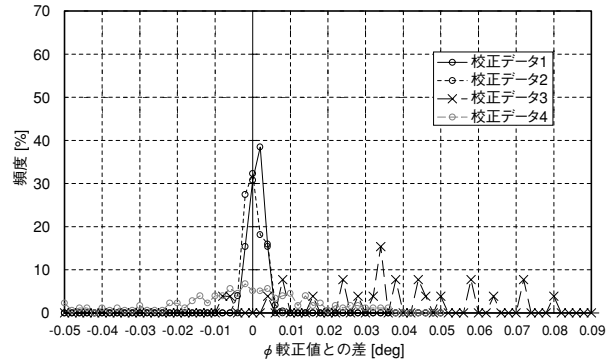


図 6 ロール角校正誤差ヒストグラム

4. 設置誤差補正法の検討

4. 1 傾斜計設置誤差

先に導出したサーボ傾斜計モデルに基づく傾斜計の 2 軸校正式は妥当であることを確認したが、表 3 より、傾斜計再設置後には校正データ 3 でピッチ角 0.013° 、ロール角で 0.035° 、校正データ 4 でピッチ角 0.017° の微小な計測誤差平均値のずれが発生している。これらの計測誤差平均値のずれは傾斜計の誤差範囲の可能性もあるが、傾斜計は傾斜計校正装置で校正された後に一旦取り外して模型内部に再設置されるので、微小な設置誤差が発生した場合に、設置誤差が傾斜計のピッチ角・ロール角計測値に与える影響を補正する必要がある。次節で、微小な設置誤差が傾斜計の計測値に与える影響の補正法を検討する。

4. 2 微小な傾斜計設置誤差補正法の検討

微小な設置角度のオフセットをオイラー角で定義し、微小な傾斜計設置誤差を持つ傾斜計が計測するピッチ角とロール角から、実際の設定ピッチ角とロール角を求める補正式を算出する。

微小な設置角度のオフセットのピッチ角 θ_e ・ロール角 ϕ_e ・ヨー角 ψ_e を定義する回転行列をそれぞれ R_{θ_e} 、 R_{ϕ_e} 、 R_{ψ_e} とすると、

$$R_{\theta_e} = \begin{pmatrix} \cos \theta_e & 0 & -\sin \theta_e \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_e & 0 & \cos \theta_e \end{pmatrix} \quad \dots(7)$$

$$R_{\phi_e} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi_e & \sin \phi_e \\ 0 & -\sin \phi_e & \cos \phi_e \end{pmatrix} \quad \dots(8)$$

$$R_{\psi_e} = \begin{pmatrix} \cos \psi_e & \sin \psi_e & 0 \\ -\sin \psi_e & \cos \psi_e & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \cdots(9)$$

となる。また、実際の設定ピッチ角 θ と設定ロール角 ϕ を表現する回転行列 R'_θ , R'_ϕ は、式(3)と式(4)におけるピッチ角・ロール角オフセットを 0° とすると、

$$R'_\theta = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \quad \cdots(10)$$

$$R'_\phi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \quad \cdots(11)$$

となる。式(7)～式(9)で表される設置誤差を含む傾斜計ピッチ角 $\hat{\theta}$ とロール角 $\hat{\phi}$ の回転行列 R''_θ , R''_ϕ は、

$$R''_\theta = \begin{pmatrix} \cos \hat{\theta} & 0 & -\sin \hat{\theta} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \hat{\theta} & 0 & \cos \hat{\theta} \end{pmatrix} \quad \cdots(12)$$

$$R''_\phi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \hat{\phi} & \sin \hat{\phi} \\ 0 & -\sin \hat{\phi} & \cos \hat{\phi} \end{pmatrix} \quad \cdots(13)$$

となる。以上の式(7)～式(13)より、傾斜計で計測されるピッチ角・ロール角と、実際に設定されたピッチ角・ロール角の関係は、以下の式で表される。

$$R''_\theta R''_\phi \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = R_{\phi_e} R_{\theta_e} R_{\psi_e} R'_\theta R'_\phi \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \cdots(14)$$

傾斜計で計測されたピッチ角・ロール角から実際に設定されたピッチ角・ロール角を算出する為に、右辺の設置角度のオフセット回転行列の逆行列を両辺に掛けて整理すると、ピッチ角が $\pm 90^\circ$ の範囲内では、以下の関係式が得られる。

$$\begin{aligned} \sin \theta &= \cos \theta_e \cos \psi_e \sin \hat{\theta} \\ &+ \left\{ \sin(\hat{\phi} - \phi_e) \sin \psi_e \right. \\ &\quad \left. - \sin \theta_e \cos(\hat{\phi} - \phi_e) \cos \psi_e \right\} \cos \hat{\theta} \\ \tan \phi &= \left\{ -\cos \theta_e \sin \psi_e \sin \hat{\theta} \right. \\ &\quad \left. + \left(\sin \theta_e \cos(\hat{\phi} - \phi_e) \sin \psi_e \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \sin(\hat{\phi} - \phi_e) \cos \psi_e \right) \cos \hat{\theta} \right\} / \\ &\quad \left\{ \sin \theta_e \sin \hat{\theta} + \cos \theta_e \cos(\hat{\phi} - \phi_e) \cos \hat{\theta} \right\} \end{aligned} \quad \cdots(15)$$

式(15)を簡略化するために、設置角度のオフセット角 0° 周りでテーラー展開し、傾斜計で計測されたピッチ角・ロール角から実際に設定されたピッチ角・ロール角の一次近似式を求めると、下式となる。

$$\begin{cases} \theta = \hat{\theta} - \theta_e \cos \hat{\phi} + \psi_e \sin \hat{\phi} \\ \phi = \hat{\phi} - \theta_e \tan \hat{\theta} \sin \hat{\phi} - \psi_e \tan \hat{\theta} \cos \hat{\phi} \end{cases} \quad \cdots(16)$$

式(16)の補正式から、供試体の基準面上で計測した姿勢角 3 点以上から、設置角度のオフセット角を求める事が出来る。

式(16)の補正式を使ってオフセット補正をした補正後のピッチ角校正誤差を表 4 に、補正後のロール角校正誤差を表 5 に、補正後のピッチ角校正誤差ヒストグラムを図 7 に、補正後のロール角校正誤差ヒストグラムを図 8 に示す。

補正後のピッチ角では、誤差の平均値は 0° に近づき、誤差の標準偏差は校正データ 3 では半分程度に、校正データ 4 では 1.4 倍となった。校正データ 3 は校正に使用した校正データ 1 を取得直後に再設置して計測したデータなので、傾斜計自体の特性の変化の影響が小さいために設置角度補正の効果があったと考えられる。

補正後のロール角では、誤差の平均値は 0° に近づくが、誤差の標準偏差はほとんど変化がない。したがって、校正データ 3 と校正データ 4 で見られるロール角の誤差の標準偏差が他の誤差の標準偏差と比較して大きいのは、設置角度の影響ではなく、センサの特性などに原因があると考えられる。

以上より、導出した設置角度補正近似式(式(16))は誤差のオフセットを補正するのに妥当であることがわかった。

表 4 補正後ピッチ角校正誤差

	補正前 θ [deg]		補正後 θ [deg]		オフセット角[deg]		
	誤差平均	誤差標準偏差	誤差平均	誤差標準偏差	θe	ψe	ϕe
校正データ1	0.0000	0.0014	0.0000	0.0014	—		
校正データ2	0.0004	0.0022	0.0001	0.0022	0.0003	-0.0016	-0.0005
校正データ3	0.0134	0.0044	0.0001	0.0022	0.0138	-0.0125	0.0347
校正データ4	0.0174	0.0030	0.0000	0.0044	0.0179	0.0100	-0.0038

表 5 補正後ロール角校正誤差

	補正前 ϕ [deg]		補正後 ϕ [deg]		θe	ψe	ϕe
	誤差平均	誤差標準偏差	誤差平均	誤差標準偏差			
校正データ1	0.0000	0.0019	0.0000	0.0019	—		
校正データ2	-0.0005	0.0024	0.0000	0.0022	0.0003	-0.0016	-0.0005
校正データ3	0.0347	0.0234	0.0000	0.0232	0.0138	-0.0125	0.0347
校正データ4	-0.0038	0.0192	0.0000	0.0186	0.0179	0.0100	-0.0038

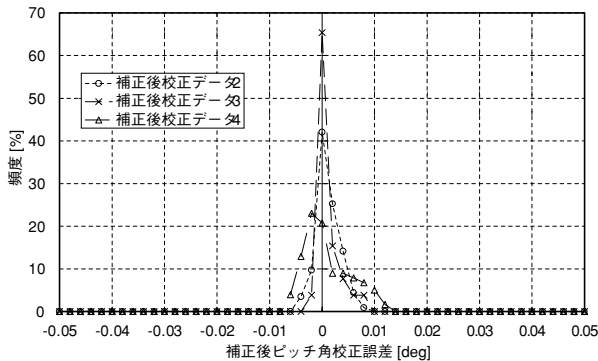


図 7 補正後ピッチ角校正誤差ヒストグラム

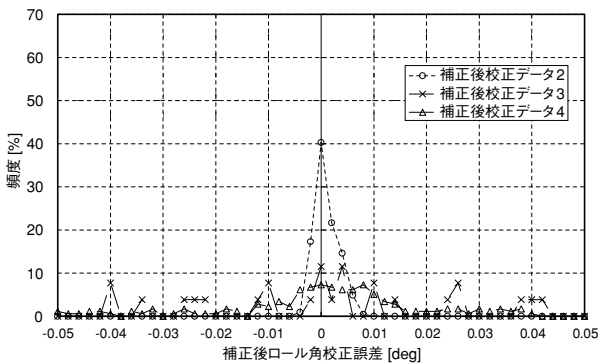


図 8 補正後ロール角校正誤差ヒストグラム

出力で使用するのはピッチ角のみとしている。供試体内部でピッチ角を計測するので、たわみを含めたピッチ角を計測することが出来る為、たわみ補正は行わない。

5. 2 ピッチ角の傾斜計出力とエンコーダ出力の比較

JAXA6.5m × 5.5m 低速風洞で行われた ONERA M5 2.5 倍相似模型による標準模型試験で取得したデータにより、ピッチ角の傾斜計出力とエンコーダ出力を比較した結果を図 9 に示す。たわみ補正を行っていないが、ピッチ角の傾斜計とエンコーダ出力はほぼ 0.05° 範囲で一致している。傾斜計はアナログ出力である為、エンコーダよりも高精度・高分解能でピッチ角を計測可能となる。

6. まとめ

- ・ JAXA 風洞技術開発センター傾斜計校正装置の概要を示した。
- ・ サーボ式傾斜計のモデルを作成し、校正データによってその妥当性を示した。
- ・ サーボ式傾斜計 Sensorex41400 の校正を行い、導出した校正式が妥当であることを確認した。
- ・ 校正条件とは異なった取り付け角を持った場合の補正方法を検討し、妥当性を確認した。
- ・ JAXA6.5m × 5.5m 低速風洞における内装式傾斜計の応用を紹介した。

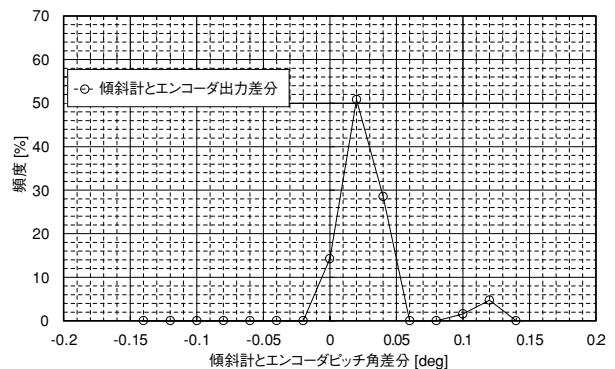


図 9 標準模型試験におけるピッチ角の傾斜計出力とエンコーダ出力比較結果

5. JAXA6.5m × 5.5m 低速風洞における内装式傾斜計の応用

5. 1 内装式傾斜計の使用法

JAXA6.5m × 5.5m 低速風洞では、サーボ傾斜計 Sensorex41400 を供試体の内部に設置面を製作して搭載し、ピッチ角の計測に使用している。この風洞の支持装置はピッチ&ヨー変角機構であるので、内装式傾斜計の

7. 謝辞

標準模型試験を行う為に、JAXA6.5m × 5.5m 低速風洞の皆様には大きな助力を頂きました。また、超音速風洞の永井伸治セクションリーダーには、適切な助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] T. Finley and P. Tchong, “Model Attitude Measurements at NASA Langley Research Center”, AIAA 92-0763
- [2] 川崎重工業株式会社, “模型姿勢角センサ・角度較正装置 完成図書”, 2003