

# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## JAXA Research and Development Memorandum

---

### JAXA 2m×2m 遷音速風洞における風試不確かさ解析

Uncertainty Analysis of Wind Tunnel Test in  
the JAXA 2m × 2m Transonic Wind Tunnel

越智 康浩 , 口石 茂, 永井 伸治  
Yasuhiro Ochi, Shigeru Kuchi-Ishi, Shinji Nagai

2016年10月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# JAXA 2m×2m 遷音速風洞における風試不確かさ解析

越智 康浩<sup>\*1</sup>, 口石 茂<sup>\*1</sup>, 永井 伸治<sup>\*1</sup>

## Uncertainty Analysis of Wind Tunnel Test in the JAXA 2m × 2m Transonic Wind Tunnel

Yasuhiro Ochi<sup>\*1</sup>, Shigeru Kuchi-Ishi<sup>\*1</sup>, Shinji Nagai<sup>\*1</sup>

### Abstract

To estimate uncertainties in the JAXA 2m × 2m transonic wind Tunnel test data, we developed a new uncertainty estimation program and applied it for a wind tunnel test using the AGARD-B calibration model. This program computes uncertainties in aerodynamic coefficients by accumulating uncertainties in measurement data. Computing sensitivity coefficients, which indicate the impact of the uncertainties in the measurement data on the aerodynamic coefficients, is very complicated. This program automatically computes these sensitivity coefficients and evaluates the aerodynamic coefficient uncertainties. This program is implemented in the Digital/Analog Hybrid Wind Tunnel (DAHWIN) developed by JAXA and has been applied for wind tunnel tests since FY2013.

Keyword: *Transonic Wind Tunnel, Uncertainty Analysis, AGARD-B*

### 概要

JAXA 2m×2m遷音速風洞における風試不確かさ解析用の処理プログラムを開発し、その適用事例としてAGARD-B標準模型を用いた風洞試験に適用した結果について報告する。本プログラムは空力係数の不確かさを各測定量の不確かさから計算する。各測定量の不確かさが空力係数に及ぼす影響度である感度係数の算出は煩雑であるが、本プログラムにより各測定量の不確かさと天秤計測値を入力条件として与えるだけで自動的に感度係数を計算し、空力係数の不確かさを算出できるようになった。なお、本プログラムはJAXAが開発し、平成25年度より運用を開始している「デジタル/アナログ・ハイブリッド風洞 (DAHWIN)」の一機能である風試不確かさ解析機能として実装されており、実際の風洞試験に適用されている。

---

\* 平成 28 年 8 月 10 日受付 (Received August 10, 2016)

<sup>\*1</sup> 航空技術部門空力技術研究ユニット (Aerodynamics Research Unit, Aeronautical Technology Directorate)

## 記号

$B$	正確度
$B'$	相関正確度
$CA$	機体軸系軸力係数
$CAF$	機体軸系フォアボディ軸力係数
$CC$	風軸系横力係数
$CCF$	風軸系フォアボディ横力係数
$CD_{cb}$	キャビティ/ベース圧抗力係数
$CD_s$	安定軸系軸力係数
$CD_w$	風軸系軸力係数
$CDF_s$	安定軸系フォアボディ軸力係数
$CDF_w$	風軸系フォアボディ軸力係数
$CL_s$	安定軸系揚力係数
$CL_w$	風軸系揚力係数
$CLF$	安定軸/風軸系フォアボディ揚力係数
$Cl_B$	機体軸系ローリングモーメント係数
$Cl_s$	安定軸系ローリングモーメント係数
$Cl_w$	風軸系ローリングモーメント係数
$Cm_B$	機体軸系ピッチングモーメント係数
$Cm_s$	安定軸系ピッチングモーメント係数
$Cm_w$	風軸系ピッチングモーメント係数
$CN$	機体軸系垂直力係数
$Cn_B$	機体軸系ヨーイングモーメント係数
$Cn_s$	安定軸系ヨーイングモーメント係数
$Cn_w$	風軸系ヨーイングモーメント係数
$Cp_{bi}$	計測点 <i>i</i> におけるベース圧力係数
$Cp_{ci}$	計測点 <i>i</i> におけるキャビティ圧力係数
$CY$	機体軸/安定軸系横力係数
$DM$	補正マッハ数
$FA$	機体軸座標系 <i>x</i> 方向荷重 [kgf]
$FN$	機体軸座標系 <i>z</i> 方向荷重 [kgf]
$Fx2$	物理量変換後天秤出力(天秤基準座標系 <i>x</i> 方向荷重) [kgf]
$Fx3$	たわみ角・ねじり角算出用空気力( <i>x</i> 方向荷重) [kgf]
$Fx4$	自重補正後の天秤基準座標系 <i>x</i> 方向荷重 [kgf]
$FY$	機体軸座標系 <i>y</i> 方向荷重 [kgf]
$Fy2$	物理量変換後天秤出力(天秤基準座標系 <i>y</i> 方向荷重) [kgf]
$Fy3$	たわみ角・ねじり角算出用空気力( <i>y</i> 方向荷重) [kgf]
$Fy4$	自重補正後の天秤基準座標系 <i>y</i> 方向荷重 [kgf]
$Fz2$	物理量変換後天秤出力(天秤基準座標系 <i>z</i> 方向荷重) [kgf]
$Fz3$	たわみ角・ねじり角算出用空気力( <i>z</i> 方向荷重) [kgf]
$Fz4$	自重補正後の天秤基準座標系 <i>z</i> 方向荷重 [kgf]
$g_0$	重力加速度(定数)[m/s <sup>2</sup> ], $g_0 = 9.80665$
$K_{\psi F_y}$	天秤たわみ係数 [deg/kgf]
$K_{\theta F_z}$	天秤たわみ係数 [deg/kgf]
$K_{\phi M_x}$	天秤たわみ係数 [deg/kgf-m]
$K_{\theta M_y}$	天秤たわみ係数 [deg/kgf-m]
$K_{\psi M_z}$	天秤たわみ係数 [deg/kgf-m]
$l_R$	ロール基準長(定数) [m]
$l_P$	縦基準長(定数) [m]

$l_y$	横基準長(定数) [m]
$m$	キャビティ圧測定点数(定数)
$M$	気流マッハ数
$Mx_2$	物理量変換後天秤出力(天秤基準座標系 $x$ 軸回りモーメント) [kgf-m]
$Mx_3$	たわみ角・ねじり角算出用空気力( $x$ 軸回りモーメント) [kgf-m]
$Mx_4$	自重補正後の天秤基準座標系 $x$ 軸回りモーメント [kgf-m]
$MX_B$	機体軸座標系 $x$ 軸回りモーメント [kgf-m]
$My_2$	物理量変換後天秤出力(天秤基準座標系 $y$ 軸回りモーメント) [kgf-m]
$My_3$	たわみ角・ねじり角算出用空気力( $y$ 軸回りモーメント) [kgf-m]
$My_4$	自重補正後の天秤基準座標系 $y$ 軸回りモーメント [kgf-m]
$MY_B$	機体軸座標系 $y$ 軸回りモーメント [kgf-m]
$Mz_2$	物理量変換後天秤出力(天秤基準座標系 $z$ 軸回りモーメント) [kgf-m]
$Mz_3$	たわみ角・ねじり角算出用空気力( $z$ 軸回りモーメント) [kgf-m]
$Mz_4$	自重補正後の天秤基準座標系 $z$ 軸回りモーメント [kgf-m]
$MZ_B$	機体軸座標系 $z$ 軸回りモーメント [kgf-m]
$np$	原始変数総数
$P$	偶然誤差限界
$P_c$	プレナム静圧 [Pa]
$P_s$	一様流静圧 [Pa]
$P_0$	集合胴総圧 [Pa]
$P_{cbi}$	測定点 $i$ におけるキャビティ/ベース圧 [Pa]
$P'_{cbi}$	測定点 $i$ におけるキャビティ/ベース圧(ESP/マンメータ計測値) [Pa]
$Q$	気流動圧 [Pa]
$R_1$	$x$ 軸回り回転行列
$R_2$	$y$ 軸回り回転行列
$R_3$	$z$ 軸回り回転行列
$S$	基準面積(定数) [m <sup>2</sup> ]
$S_{cbi}$	測定点 $i$ におけるキャビティ/ベース面積 [m <sup>2</sup> ]
$T$	気流静温度 [K]
$T_0$	集合胴温度 [K]
$U$	不確かさ幅
$W_x$	自重補正係数(天秤基準座標系 $x$ 方向荷重) [kgf]
$W_y$	自重補正係数(天秤基準座標系 $y$ 方向荷重) [kgf]
$W_z$	自重補正係数(天秤基準座標系 $z$ 方向荷重) [kgf]
$W\Delta x$	自重補正係数(天秤基準座標系 $x$ 軸回りモーメント) [kgf-m]
$W\Delta y$	自重補正係数(天秤基準座標系 $y$ 軸回りモーメント) [kgf-m]
$W\Delta z$	自重補正係数(天秤基準座標系 $z$ 軸回りモーメント) [kgf-m]
$Xl$	天秤中心からモーメント基準点までの $x$ 方向距離(前方が正) [m]
$Yl$	天秤中心からモーメント基準点までの $y$ 方向距離(右方が正) [m]
$Zl$	天秤中心からモーメント基準点までの $z$ 方向距離(上方が正) [m]
$\alpha$	迎角 [rad]
$\beta$	横滑り角 [rad]
$d\phi$	ロール方向たわみ補正量 [rad]
$d\psi$	ヨー方向たわみ補正量 [rad]
$d\theta$	ピッチ方向たわみ補正量 [rad]
$\Delta CA_{\text{support}}$	軸力係数に対する支持干渉補正項
$\Delta Fx$	自重補正量(天秤基準座標系 $x$ 方向荷重) [kgf]
$\Delta Fy$	自重補正量(天秤基準座標系 $y$ 方向荷重) [kgf]
$\Delta Fz$	自重補正量(天秤基準座標系 $z$ 方向荷重) [kgf]
$\Delta M_{\text{wall}}$	マッハ数に対する風洞壁干渉補正項

$\Delta M_x$	自重補正量(天秤基準座標系 $x$ 軸回りモーメント) [kgf-m]
$\Delta M_y$	自重補正量(天秤基準座標系 $y$ 軸回りモーメント) [kgf-m]
$\Delta M_z$	自重補正量(天秤基準座標系 $z$ 軸回りモーメント) [kgf-m]
$\Delta\alpha_{\text{wall}}$	迎角に対する風洞壁干渉補正項 [rad]
$\Delta\beta_{\text{wall}}$	横滑り角に対する風洞壁干渉補正項 [rad]
$\gamma$	比熱比(定数), $\gamma = 1.4$
$\theta_s$	設定ピッチ角(模型を水平にした時の模型ピッチ角を基準とした設定角) [rad]
$\phi_s$	設定ロール角(模型を水平にした時の模型ロール角を基準とした設定角) [rad]
$\theta_B$	曲がりスティングのオフセット角 [rad]

# 1 緒言

風洞試験の結果得られる空力係数等のデータについて、そのデータの信頼性を確保するためには、測定における精度管理が重要となる。測定における精度管理の指標の一つとして不確かさ (uncertainty) が用いられる。「計測における不確かさの表現ガイド」(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)<sup>1)</sup>)によると、不確かさを、「計測によって得られる値に対する私たちの知識の曖昧さを表すもの」としている。また、国際計量用語集であるVIM3<sup>2)</sup>によると、測定の不確かさ (measurement uncertainty) を、「使用した情報に基づく、測定対象に帰属する量のばらつきを特徴づける非負のパラメータ」と定義している。

不確かさの定量的評価の手順は前述のGUMにて説明されている。GUMでは様々な分野における様々なレベルに適用可能な不確かさ評価のための一般的なルールを確立することを目指している。これに対して機械分野では米国機械学会 (American Society of Mechanical Engineers, ASME) が統計学を工学的に適用した国家規格<sup>3)</sup> (以下、ASMEガイド) を発行している。また、米航空宇宙学会 (American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA) は風洞試験データの不確かさの定量化と報告のための合理的かつ実践的な作業の枠組みを示すことを目的とした不確かさ解析の指針<sup>4)</sup> (以下、AIAAガイド) を発行している。

風洞試験において不確かさ解析を行った場合、以下のような知見を得ることができる<sup>5)</sup>。

- ・ 異なる風洞で取得された風試データやCFD解析結果と比較する際の基準となる
- ・ 風試データに対する各種誤差要因の寄与の大きさがわかる
- ・ 風試データにおける異常値の発生を判定できる

AIAAガイドでは結果の不確かさを各測定量の不確かさから計算するとしている。各測定量は基本的には独立した誤差を持つ独立変数であるが、測定量の誤差が空力係数等の誤差に及ぼす影響度である感度係数の算出は煩雑かつ複雑なものとなる。AIAAガイドに従って実施された不確かさ解析として、例えば、AGARD-B標準模型を用いたJAXA 1m×1m 超音速風洞試験に対する不確かさ解析<sup>6)</sup>が挙げられるが、複雑な計算を効率的に実施する手段が存在しないことから、専用の処理プログラムが求められていた。そこで、測定量の不確かさから空力係数等の不確かさを効率的に算出するためのプログラムを開発した。

本稿では、まず気流条件や迎角・横滑り角、各軸における空力係数等の算出式を示す(第2章)。次に、風試不確かさ解析の全体的な手順を示す(第3章)。そして、不確かさ解析プログラムの処理フローを示す(第4章)。さらに、JAXAが開発した「デジタル/アナログ・ハイブリッド風洞 (DAHWIN)」に実装された本プログラムの操作の様子について示す(第5章)。最後に、不確かさ解析事例としてAGARD-B模型を用いたJAXA 2m×2m遷音速風洞試験に対する解析結果を示す(第6章)。

## 2 データ処理概要

本章では気流条件や迎角・横滑り角、各軸における空力係数等の算出式を示す。なお、不確かさ解析の対象範囲は、天秤出力に対して天秤干渉補正を行った以降のデータ処理プロセスとする。

### 2.1 気流条件の算出

測定量である $P_0$ と $P_c$ および補正項から完全気体の等エントロピー流れの式を用いて、自由流のマッハ数 $M$ 、静圧 $P_s$ および動圧 $Q$ を計算する。

$$M = \left[ \frac{2}{\gamma - 1} \left\{ \left( \frac{P_0}{P_c} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right\} \right]^{\frac{1}{2}} + DM + \Delta M_{\text{wall}} \quad (1)$$

$$P_s = P_0 \left[ 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right]^{-\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (2)$$

$$Q = \frac{\gamma}{2} P_s M^2 = \frac{\gamma}{2} P_0 \left[ 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right]^{-\frac{\gamma}{\gamma - 1}} M^2 \quad (3)$$

ここで、 $DM$ 、 $\Delta M_{\text{wall}}$ はそれぞれマッハ数の空間分布/風洞壁干渉に関する補正項である。

### 2.2 自重補正

まず、干渉補正後の天秤荷重出力 $Fx2$ 、 $Fy2$ 、 $Fz2$ 、 $Mx2$ 、 $My2$ 、 $Mz2$ に対する自重補正量 $\Delta Fx$ 、 $\Delta Fy$ 、 $\Delta Fz$ 、 $\Delta Mx$ 、 $\Delta My$ 、 $\Delta Mz$ を求める。

$$\begin{bmatrix} \Delta Fx \\ \Delta Fy \\ \Delta Fz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_x & 0 & 0 \\ 0 & W_y & 0 \\ 0 & 0 & W_z \end{bmatrix} \left[ R_2(\theta_B) \cdot R_1(\phi_s) \cdot R_2(\theta_s) \cdot R_2(-\theta_B) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right] \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Mx \\ \Delta My \\ \Delta Mz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -W\Delta z & W\Delta y \\ W\Delta z & 0 & -W\Delta x \\ -W\Delta y & W\Delta x & 0 \end{bmatrix} \left[ R_2(\theta_B) \cdot R_1(\phi_s) \cdot R_2(\theta_s) \cdot R_2(-\theta_B) \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right] \quad (5)$$

ここで、 $W_x$ 、 $W_y$ 、 $W_z$ 、 $W\Delta x$ 、 $W\Delta y$ 、 $W\Delta z$ は自重補正係数（無風データより算出または外部入力される定数）である。また、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ はそれぞれ $x$ 、 $y$ 、 $z$ 軸回りの回転行列である。

$$R_1(\phi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$R_2(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix},$$

$$R_3(\psi) = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

これより

$$\begin{bmatrix} Fx3 \\ Fy3 \\ Fz3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Fx2 \\ Fy2 \\ Fz2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta Fx \\ \Delta Fy \\ \Delta Fz \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} Mx3 \\ My3 \\ Mz3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Mx2 \\ My2 \\ Mz2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta Mx \\ \Delta My \\ \Delta Mz \end{bmatrix} \quad (8)$$

これらから荷重に伴うたわみ補正量 $d\phi$ ,  $d\psi$ ,  $d\theta$ を以下のように求める。

$$\begin{bmatrix} d\phi \\ d\psi \\ d\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & K_{\phi M_x} & 0 & 0 \\ K_{\psi F_y} & 0 & 0 & 0 & K_{\psi M_z} \\ 0 & K_{\theta F_z} & 0 & K_{\theta M_y} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Fy3 \\ Fz3 \\ Mx3 \\ My3 \\ Mz3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

ここで、 $K_{ij}$ は $j$ 方向の荷重に対して $i$ 方向にたわむ角度の係数（[deg/kgf]または[deg/kgf-m]）である。また、ここで計算された $d\phi$ ,  $d\psi$ ,  $d\theta$ の単位は[deg]であり、以降の計算では[rad]に変換する必要があることに注意。

次に、たわみ補正量を用いて自重補正量を再評価する。

$$\begin{bmatrix} \Delta Fx \\ \Delta Fy \\ \Delta Fz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_x & 0 & 0 \\ 0 & W_y & 0 \\ 0 & 0 & W_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1(d\phi) \cdot R_2(d\theta) \cdot R_3(d\psi) \\ R_2(\theta_B) \cdot R_1(\phi_s) \cdot R_2(\theta_s) \cdot R_2(-\theta_B) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta Mx \\ \Delta My \\ \Delta Mz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -W\Delta z & W\Delta y \\ W\Delta z & 0 & -W\Delta x \\ -W\Delta y & W\Delta x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1(d\phi) \cdot R_2(d\theta) \cdot R_3(d\psi) \\ R_2(\theta_B) \cdot R_1(\phi_s) \cdot R_2(\theta_s) \cdot R_2(-\theta_B) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

以上から自重補正を行った天秤荷重出力は以下のように求められる。

$$\begin{bmatrix} Fx4 \\ Fy4 \\ Fz4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Fx2 \\ Fy2 \\ Fz2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta Fx \\ \Delta Fy \\ \Delta Fz \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} Mx4 \\ My4 \\ Mz4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Mx2 \\ My2 \\ Mz2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta Mx \\ \Delta My \\ \Delta Mz \end{bmatrix} \quad (13)$$



## 2.3 天秤基準座標系から機体軸座標系への変換

$$\begin{bmatrix} FA \\ FY \\ FN \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Fx4 \\ Fy4 \\ -Fz4 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} MX_B \\ MY_B \\ MZ_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Mx4 \\ My4 \\ Mz4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & Zl & -Yl \\ Zl & 0 & Xl \\ Yl & Xl & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} FA \\ FY \\ FN \end{bmatrix} \quad (15)$$

ここで、 $Xl$ ,  $Yl$ ,  $Zl$ は天秤中心-モーメント基準点間の距離（それぞれ、前方、右方、上方が正）である。

## 2.4 迎角・横滑り角の算出

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = R_1(d\phi) \cdot R_2(d\theta) \cdot R_3(d\psi) \cdot R_2(\theta_B) \cdot R_1(\phi_s) \cdot R_2(\theta_s) \cdot R_2(-\theta_B) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{w}{u}\right) + \Delta\alpha_{\text{wall}} \quad (17)$$

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2 + w^2}}\right) + \Delta\beta_{\text{wall}} \quad (18)$$

ここで $\Delta\alpha_{\text{wall}}$ ,  $\Delta\beta_{\text{wall}}$ はそれぞれ風洞壁干渉に関する補正量。また、 $d\phi$ ,  $d\theta$ ,  $d\psi$ は(9)式で与えられる。

## 2.5 機体軸空力係数

$$\begin{bmatrix} CA \\ CY \\ CN \end{bmatrix} = \frac{g_0}{QS} \begin{bmatrix} FA \\ FY \\ FN \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta CA_{\text{support}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} Cl_B \\ Cm_B \\ Cn_B \end{bmatrix} = \frac{g_0}{QS} \begin{bmatrix} MX_B/l_R \\ MY_B/l_P \\ MZ_B/l_Y \end{bmatrix} \quad (20)$$

ここで $g_0 = 9.80665$  [m/s<sup>2</sup>]は重力加速度であり、これにより荷重およびモーメントの単位を、[kgf]/[kgf-m]から[N]/[N-m]に変換する。また、 $\Delta CA_{\text{support}}$ は軸力係数に対する支持干渉補正項、 $l_R$ ,  $l_P$ ,  $l_Y$ はそれぞれロール、縦、横方向の基準長である。

## 2.6 安定軸空力係数

$$\begin{bmatrix} FD_s \\ FY \\ FL_s \end{bmatrix} = R_2(-\alpha) \begin{bmatrix} FA \\ FY \\ FN \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} CD_s \\ CY \\ CL_s \end{bmatrix} &= \frac{g_0}{QS} \begin{bmatrix} FD_s \\ FY \\ FL_s \end{bmatrix} + R_2(-\alpha) \begin{bmatrix} \Delta CA_{\text{support}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \frac{g_0}{QS} \begin{bmatrix} \cos \alpha (FA) + \sin \alpha (FN) \\ FY \\ -\sin \alpha (FA) + \cos \alpha (FN) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \alpha (\Delta CA_{\text{support}}) \\ 0 \\ -\sin \alpha (\Delta CA_{\text{support}}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} MX_s \\ MY_s \\ MZ_s \end{bmatrix} = R_2(-\alpha) \begin{bmatrix} MX_B \\ MY_B \\ MZ_B \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} Cl_s \\ Cm_s \\ Cn_s \end{bmatrix} &= \frac{g_0}{QS} \begin{bmatrix} MX_s/l_R \\ MY_s/l_P \\ MZ_s/l_Y \end{bmatrix} \\ &= \frac{g_0}{QS} \begin{bmatrix} \cos \alpha (MX_B)/l_R + \sin \alpha (MZ_B)/l_R \\ MY_B/l_P \\ -\sin \alpha (MX_B)/l_Y + \cos \alpha (MZ_B)/l_Y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (24)$$

## 2.7 風軸空力係数

$$\begin{bmatrix} FD_w \\ FC_w \\ FL_w \end{bmatrix} = R_3(-\beta)R_2(-\alpha) \begin{bmatrix} FA \\ FY \\ FN \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} CD_w \\ CC \\ CL_w \end{bmatrix} &= \frac{g_0}{QS} \begin{bmatrix} FD_w \\ FC_w \\ FL_w \end{bmatrix} + R_3(-\beta)R_2(-\alpha) \begin{bmatrix} \Delta CA_{\text{support}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \frac{g_0}{QS} \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta (FA) - \sin \beta (FY) + \sin \alpha \cos \beta (FN) \\ \cos \alpha \sin \beta (FA) + \cos \beta (FY) + \sin \alpha \sin \beta (FN) \\ -\sin \alpha (FA) + \cos \alpha (FN) \end{bmatrix} \\ &\quad + \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta (\Delta CA_{\text{support}}) \\ \cos \alpha \sin \beta (\Delta CA_{\text{support}}) \\ -\sin \alpha (\Delta CA_{\text{support}}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} MX_w \\ MY_w \\ MZ_w \end{bmatrix} = R_3(-\beta)R_2(-\alpha) \begin{bmatrix} MX_B \\ MY_B \\ MZ_B \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} Cl_w \\ Cm_w \\ Cn_w \end{bmatrix} &= \frac{g_0}{QS} \begin{bmatrix} MX_w/l_R \\ MY_w/l_P \\ MZ_w/l_Y \end{bmatrix} \\ &= \frac{g_0}{QS} \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta (MX_B)/l_R - \sin \beta (MY_B)/l_R + \sin \alpha \cos \beta (MZ_B)/l_R \\ \cos \alpha \sin \beta (MX_B)/l_P + \cos \beta (MY_B)/l_P + \sin \alpha \sin \beta (MZ_B)/l_P \\ -\sin \alpha (MX_B)/l_Y + \cos \alpha (MZ_B)/l_Y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (28)$$

## 2.8 キャビティ/ベース圧補正

本補正は、機体軸系軸力係数 $CA$ に対して行われる。

$$CAF = CA + CD_{cb} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} CD_{cb} &= \sum_{i=1}^m C p_{cbi} \cdot \frac{S_{cbi}}{S} \\ &= \sum_{i=1}^m \frac{P_{cbi} - P_s}{Q} \cdot \frac{S_{cbi}}{S} \\ &= \frac{1}{QS} \sum_{i=1}^m (P_{cbi} - P_s) S_{cbi} \end{aligned} \quad (30)$$

$$P_{cbi} = \begin{cases} P'_{cbi} + P_c & (\text{ESP計測の場合}) \\ P'_{cbi} & (\text{マノメータ計測の場合}) \end{cases} \quad (31)$$

ここで $m$ はキャビティ/ベース圧測定点数、 $Cp_{cbi}$ は測定点 $i$ におけるキャビティ/ベース圧力係数、 $S_{cb}$ はキャビティ/ベース面積を表す。また圧力計測にはESPを用いる場合とマノメータを用いる場合の2種類が存在するが、ESPはプレナム静圧との差圧計測、マノメータは絶対圧計測という違いがあるので、不確かさ解析においても区別して考える必要がある。

本補正を反映させた風洞安定軸/風軸における空力係数は以下で与えられる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} CDF_s \\ CY \\ CLF \end{bmatrix} &= R_2(-\alpha) \begin{bmatrix} CAF \\ CY \\ CN \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \alpha (CAF) + \sin \alpha (CN) \\ CY \\ -\sin \alpha (CAF) + \cos \alpha (CN) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} CDF_w \\ CCF \\ CLF \end{bmatrix} &= R_3(-\beta) R_2(-\alpha) \begin{bmatrix} CAF \\ CY \\ CN \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta (CAF) - \sin \beta (CY) + \sin \alpha \cos \beta (CN) \\ \cos \alpha \sin \beta (CAF) + \cos \beta (CY) + \sin \alpha \sin \beta (CN) \\ -\sin \alpha (CAF) + \cos \alpha (CN) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (33)$$

フォアボディ揚力係数 $CLF$ は安定軸系と風軸系とで同じ値となる。

### 3 不確かさ解析手順

本章では、まず本稿における不確かさ解析の概要について述べる(3.1節)。次に、風試不確かさ解析の全体的な流れを示す(3.2節)。そして、解析の前提条件を確認(3.3節)した上で変数を分類し(3.4節)、第2章で示した各変数について、その従属関係を整理する(3.5節)。最後に、安定軸系フォアボディ軸力係数( $CDF_s$ )を例として、偶然誤差限界/正確度の算出手順を示す(3.6節)。

#### 3.1 不確かさ解析の概要

本稿では、誤差をかたより誤差と偶然誤差に分類する。この分類はASMEガイド<sup>3)</sup>やAIAAガイド<sup>4)</sup>に準拠しており、以降、本規格に沿って議論を進める。

- ・ かたより誤差  
系統誤差、規則性があり、測定値に偏りを与える。
- ・ 偶然誤差

環境条件などの変動により偶発的に生じる誤差、測定値のばらつきとなって現れる。

95%包括度(95%の確率で真の値を含むと期待される範囲)の偏り誤差の推定値を正確度  $B$  と呼ぶ。また、95%包括度の偶然誤差の推定値を偶然誤差限界  $P$  と呼ぶ。偶然誤差限界  $P$  は標本標準偏差(精密度)  $S$  と自由度  $\nu$  (データの個数を  $N$  個とした場合、 $\nu=N-1$ ) に応じた95%信頼度の Student  $t$  値の積 ( $P=t \cdot S$ ) で表される。

空力係数を算出するためには、天秤校正、風洞測定、データ処理などが行われるが、これらの処理手順を階層化することにより、誤差の推定が可能となる。最終的な空力係数の誤差へ反映するため、測定量の空力係数に対する感度係数(偏導関数)を導入する。感度係数は第2章で示したデータ処理ステップを連鎖律を使って偏微分することにより求める。

得られた感度係数を各測定量の正確度や偶然誤差限界に乘じ、二乗和平方根(Root Sum Square, RSS)を計算することにより、最終的な空力係数の正確度や偶然誤差限界が求まる。

$$B = \pm \left( \sum (\theta_i B_i)^2 + 2 \sum (\theta_i B'_i \cdot \theta_j B_j)^2 \right)^{1/2} \quad (34)$$

$$P = \pm \left( \sum (\theta_i P_i)^2 \right)^{1/2} \quad (35)$$

$\theta_i$ : 感度係数,  $i$ : 測定量インデックス

ここで、式(34)の右辺第二項は測定量  $i, j$  間の相関に起因する正確度である。

空力係数の不確かさ幅(95%包括度)  $U$  はこの正確度と偶然誤差限界の二乗和平方根として表される。

$$U = \pm (B^2 + P^2)^{1/2} \quad (36)$$

#### 3.2 解析の流れ

1. 第2章の各処理ステップにおいて入力値として与える変数(以下、「子変数」と呼ぶ)と求められる変数(以下、「親変数」と呼ぶ)との関係を整理する(3.5節)。本稿では正確度および偶然誤差限界を入力値として与える変数を「原始変数」、原始変数以外の子変数を「従属変数」と呼ぶ。
2. 親変数について、感度係数(親変数の子変数に関する偏微分値)および子変数の正確度/偶然誤差限界を用いて、正確度/偶然誤差限界の評価式を求める。

3. 子変数が従属変数の場合は、その子変数を求める処理ステップから、さらなる子変数の偶然誤差限界/正確度および感度係数を用いて、従属変数に関する正確度/偶然誤差限界の評価式を求める。
4. 以降、同様の手順で全ての正確度/偶然誤差限界が原始変数に帰着されるまで、子変数の展開を繰り返す。
5. 親変数に関する原始変数の感度係数を、各処理ステップにおける親変数/子変数間の感度係数を用いて連鎖律により評価する。
6. 上記の感度係数および原始変数の正確度/偶然誤差限界を用いて、親変数に関する正確度/偶然誤差限界の評価式を求めるとともに、最終的な不確かさ幅を求める。

### 3.3 前提条件

- ・ 力計測が行われて天秤データファイル（以下、「BALデータ」と呼ぶ）が出力されていることを前提とする。自重補正については、(12), (13)の補正量 $\Delta F_x$ ,  $\Delta F_y$ ,  $\Delta F_z$ ,  $\Delta M_x$ ,  $\Delta M_y$ ,  $\Delta M_z$ を原始変数と考える。すなわち、(4)~(11)式までの処理は不確かさ解析の対象外とする。
- ・ 迎角・横滑り角の算出については、(16)式において $d\phi$ ,  $d\theta$ ,  $d\psi$ を原始変数と考える。すなわち、(9)式は用いない。
- ・ 正確度算出時の関連項については、キャビティ圧力( $P_{ci}$ )間およびベース圧力( $P_{bi}$ )間の関連のみ考慮する。
- ・ 場合によっては親変数を原始変数として指定することもある（例：動圧 $Q$ の正確度/偶然誤差限界を別途直接評価して入力、以下、「ユーザ指定原始変数」と呼ぶ）。

### 3.4 変数の分類

本節では2章で示した各変数を、親変数/子変数（従属変数）/原始変数に関して分類する。大きく、以下の3種類に分けることができる。

- (1) 原始変数にしかなり得ない変数（「デフォルト原始変数」）
- (2) 親変数/子変数/原始変数のいずれにもなり得る変数
- (3) 親変数にしかなり得ない変数

ここで、(1)は原始変数に指定されない場合でも必ず入力する変数とする。(2)は設定に応じて原始変数として入力する場合も不確かさ解析の対象として出力される場合もあり得る。(3)は原始変数として入力することはできず、不確かさの出力対象にのみなり得る。

表1 変数の分類

変数名	親変数	子変数(従属変数)	原始変数	分類
$P_0$	×	×	○	(1)
$P_c$	×	×	○	(1)
$Fx2, Fy2, Fz2$	×	×	○	(1)
$Mx2, My2, Mz2$	×	×	○	(1)
$\Delta Fx, \Delta Fy, \Delta Fz$	×	×	○	(1)
$\Delta Mx, \Delta My, \Delta Mz$	×	×	○	(1)
$Xl, Yl, Zl$	×	×	○	(1)
$d\phi, d\psi, d\theta$	×	×	○	(1)
$\theta_s, \phi_s, \theta_B$	×	×	○	(1)
$P'_{cbi}$	×	×	○	(1)
$S_{cbi}$	×	×	○	(1)
$DM$	×	×	○	(1)
$\Delta M_{wall}$	×	×	○	(1)
$\Delta\alpha_{wall}, \Delta\beta_{wall}$	×	×	○	(1)
$\Delta CA_{support}$	×	×	○	(1)
$M$	○	○	○	(2)
$P_s$	○	○	○	(2)
$Q$	○	○	○	(2)
$Fx4, Fy4, Fz4$	○	○	○	(2)
$Mx4, My4, Mz4$	○	○	○	(2)
$FA, FY, FN$	○	○	○	(2)
$MX_B, MY_B, MZ_B$	○	○	○	(2)
$\alpha, \beta$	○	○	○	(2)
$CA, CY, CN$	○	○	○	(2)
$P_{cbi}$	○	○	○	(2)
$CD_{cb}, CAF$	○	○	○	(2)
$Cl_B, Cm_B, Cn_B$	○	×	×	(3)
$CD_s, CL_s$	○	×	×	(3)
$Cl_s, Cm_s, Cn_s$	○	×	×	(3)
$CD_w, CC, CL_w$	○	×	×	(3)
$Cl_w, Cm_w, Cn_w$	○	×	×	(3)
$CDF_s, CLF$	○	×	×	(3)
$CDF_w, CCF$	○	×	×	(3)

### 3.5 親変数/子変数の整理

本節では2章で示した各変数について、その従属関係を整理する。

#### 3.5.1 気流条件の算出

(1)～(3)式より

$$M = M(P_c, P_0, DM, \Delta M_{\text{wall}}) \quad (37)$$

$$P_s = P_s(P_0, M) \quad (38)$$

$$Q = Q(P_0, M) \quad (39)$$

#### 3.5.2 自重補正

(12)および(13)式より

$$F_{x4} = F_{x4}(F_{x2}, \Delta F_x) \quad (40)$$

$$F_{y4} = F_{y4}(F_{y2}, \Delta F_y) \quad (41)$$

$$F_{z4} = F_{z4}(F_{z2}, \Delta F_z) \quad (42)$$

$$M_{x4} = M_{x4}(M_{x2}, \Delta M_x) \quad (43)$$

$$M_{y4} = M_{y4}(M_{y2}, \Delta M_y) \quad (44)$$

$$M_{z4} = M_{z4}(M_{z2}, \Delta M_z) \quad (45)$$

#### 3.5.3 天秤基準座標系から機体軸座標系への変換

(14)および(15)式より

$$FA = FA(F_{x4}) \quad (46)$$

$$FY = FY(F_{y4}) \quad (47)$$

$$FN = FN(F_{z4}) \quad (48)$$

$$MX_B = MX_B(M_{x4}, FY, FN, Yl, Zl) = MX_B(M_{x4}, F_{y4}, F_{z4}, Yl, Zl) \quad (49)$$

$$MY_B = MY_B(M_{y4}, FA, FN, Xl, Zl) = MY_B(M_{y4}, F_{x4}, F_{z4}, Xl, Zl) \quad (50)$$

$$MZ_B = MZ_B(M_{z4}, FA, FY, Xl, Yl) = MZ_B(M_{z4}, F_{x4}, F_{y4}, Xl, Yl) \quad (51)$$

#### 3.5.4 迎角・横滑り角の算出

(16)～(18)式より

$$\alpha = \alpha(d\phi, d\psi, d\theta, \theta_s, \phi_s, \theta_B, \Delta\alpha_{\text{wall}}) \quad (52)$$

$$\beta = \beta(d\phi, d\psi, d\theta, \theta_s, \phi_s, \theta_B, \Delta\beta_{\text{wall}}) \quad (53)$$

### 3.5.5 機体軸空力係数

(19)および(20)式より

$$CA = CA(FA, Q, \Delta CA_{\text{support}}) \quad (54)$$

$$CY = CY(FY, Q) \quad (55)$$

$$CN = CN(FN, Q) \quad (56)$$

$$Cl_B = Cl_B(MX_B, Q) \quad (57)$$

$$Cm_B = Cm_B(MY_B, Q) \quad (58)$$

$$Cn_B = Cn_B(MZ_B, Q) \quad (59)$$

### 3.5.6 安定軸空力係数

(21)～(24)式より

$$CD_s = CD_s(FA, FN, Q, \alpha, \Delta CA_{\text{support}}) \quad (60)$$

$$CY = CY(FY, Q) \quad (61)$$

$$CL = CL(FA, FN, Q, \alpha, \Delta CA_{\text{support}}) \quad (62)$$

$$Cl_s = Cl_s(MX_B, MZ_B, Q, \alpha) \quad (63)$$

$$Cm_s = Cm_s(MY_B, Q) \quad (64)$$

$$Cn_s = Cn_s(MX_B, MZ_B, Q, \alpha) \quad (65)$$

### 3.5.7 風軸空力係数

(25)～(28)式より

$$CD_w = CD_w(FA, FY, FN, Q, \alpha, \beta, \Delta CA_{\text{support}}) \quad (66)$$

$$CC = CC(FA, FY, FN, Q, \alpha, \beta, \Delta CA_{\text{support}}) \quad (67)$$

$$CL_w = CL_w(FA, FN, Q, \alpha, \Delta CA_{\text{support}}) \quad (68)$$

$$Cl_w = Cl_w(MX_B, MY_B, MZ_B, Q, \alpha, \beta) \quad (69)$$

$$Cm_w = Cm_w(MX_B, MY_B, MZ_B, Q, \alpha, \beta) \quad (70)$$

$$Cn_w = Cn_w(MX_B, MZ_B, Q, \alpha) \quad (71)$$

### 3.5.8 キャビティ/ベース圧補正

(29)～(33)式より

$$CAF = CAF(CA, CD_{cb}) \quad (72)$$

$$CD_{cb} = CD_{cb}(P_{cbi}, S_{cbi}, P_s, Q) \quad (73)$$

$$P_{cbi} = P_{cbi}(P'_{cbi}, P_c) \quad (74)$$

$$CDF_s = CDF_s(CAF, CN, \alpha) \quad (75)$$



$$CLF = CLF(CAF, CN, \alpha) \quad (76)$$

$$CDF_w = CDF_w(CAF, CY, CN, \alpha, \beta) \quad (77)$$

$$CCF = CCF(CAF, CY, CN, \alpha, \beta) \quad (78)$$

### 3.6 偶然誤差限界/正確度の算出例

本節では安定軸系フォアボディ軸力係数( $CDF_s$ )を例として、偶然誤差限界/正確度の算出手順を示す。対象となる原始変数は全てデフォルト原始変数とする。

#### Step 1.1(キャビティ/ベース圧補正)

(75)式より

$$CDF_s = CDF_s(CAF, CN, \alpha)$$

$CAF$ : 従属変数 → Step 1.2

$CN$ : 従属変数 → Step 2.2

$\alpha$ : 従属変数 → Step 3.1

#### Step 1.2(キャビティ/ベース圧補正)

(72)式より

$$CAF = CAF(CA, CD_{cb})$$

$CA$ : 従属変数 → Step 2.1

$CD_{cb}$ : 従属変数 → Step 1.3

#### Step 1.3(キャビティ/ベース圧補正)

(73)式より

$$CD_{cb} = CD_{cb}(P_{cbi}, S_{ci}, P_s, Q)$$

$P_{cbi}$ : 従属変数 → Step 1.4

$S_{cbi}$ : 原始変数 → 展開終了

$P_s$ : 従属変数 → Step 6.2

$Q$ : 従属変数 → Step 6.1

#### Step 1.4(キャビティ/ベース圧補正)

(74)式より

$$P_{cbi} = P_{cbi}(P'_{cbi}, P_c)$$

$P'_{cbi}$ : 原始変数 → 展開終了

$P_c$ : 原始変数 → 展開終了

#### Step 2.1(機体軸空力係数)

(54)式より

$$CA = CA(FA, Q, \Delta CA_{\text{support}})$$

$FA$ : 従属変数 → Step 4.1

$Q$ : 従属変数 → Step 6.1

$\Delta CA_{\text{support}}$ : 原始変数 → 展開終了

Step 2.2(機体軸空力係数)

(56)式より

$$CN = CN(FN, Q)$$

FN: 従属変数 → Step 4.2

Q: 従属変数 → Step 6.1

Step 3.1(迎角・横滑り角の算出)

(52)式より

$$\alpha = \alpha(d\phi, d\psi, d\theta, \theta_s, \phi_s, \theta_B, \Delta\alpha_{wall})$$

 $d\phi$ : 原始変数 → 展開終了 $d\psi$ : 原始変数 → 展開終了 $d\theta$ : 原始変数 → 展開終了 $\theta_s$ : 原始変数 → 展開終了 $\phi_s$ : 原始変数 → 展開終了 $\theta_B$ : 原始変数 → 展開終了 $\Delta\alpha_{wall}$ : 原始変数 → 展開終了Step 4.1(天秤基準座標系から機体軸座標系への変換)

(46)式より

$$FA = FA(Fx4)$$

Fx4: 従属変数 → Step 5.1

Step 4.2(天秤基準座標系から機体軸座標系への変換)

(48)式より

$$FN = FN(Fz4)$$

Fz4: 従属変数 → Step 5.2

Step 5.1(自重補正)

(40)式より

$$Fx4 = Fx4(Fx2, \Delta Fx)$$

Fx2: 原始変数 → 展開終了

 $\Delta Fx$ : 原始変数 → 展開終了Step 5.2(自重補正)

(42)式より

$$Fz4 = Fz4(Fz2, \Delta Fz)$$

Fz2: 原始変数 → 展開終了

 $\Delta Fz$ : 原始変数 → 展開終了

Step 6.1(気流条件の算出)

(39)式より

$$Q = Q(P_s, M)$$

 $P_s$ : 従属変数 → Step 6.2 $M$ : 従属変数 → Step 6.3Step 6.2(気流条件の算出)

(2)式より

$$P_s = P_s(P_0, M)$$

 $P_0$ : 原始変数 → 展開終了 $M$ : 従属変数 → Step 6.3Step 6.3(気流条件の算出)

(37)式より

$$M = M(P_c, P_0, DM, \Delta M_{\text{wall}})$$

 $P_c$ : 原始変数 → 展開終了 $P_0$ : 原始変数 → 展開終了 $DM$ : 原始変数 → 展開終了 $\Delta M_{\text{wall}}$ : 原始変数 → 展開終了

以上の親変数から子変数への展開をツリー構造で記述すると、図1ようになる。

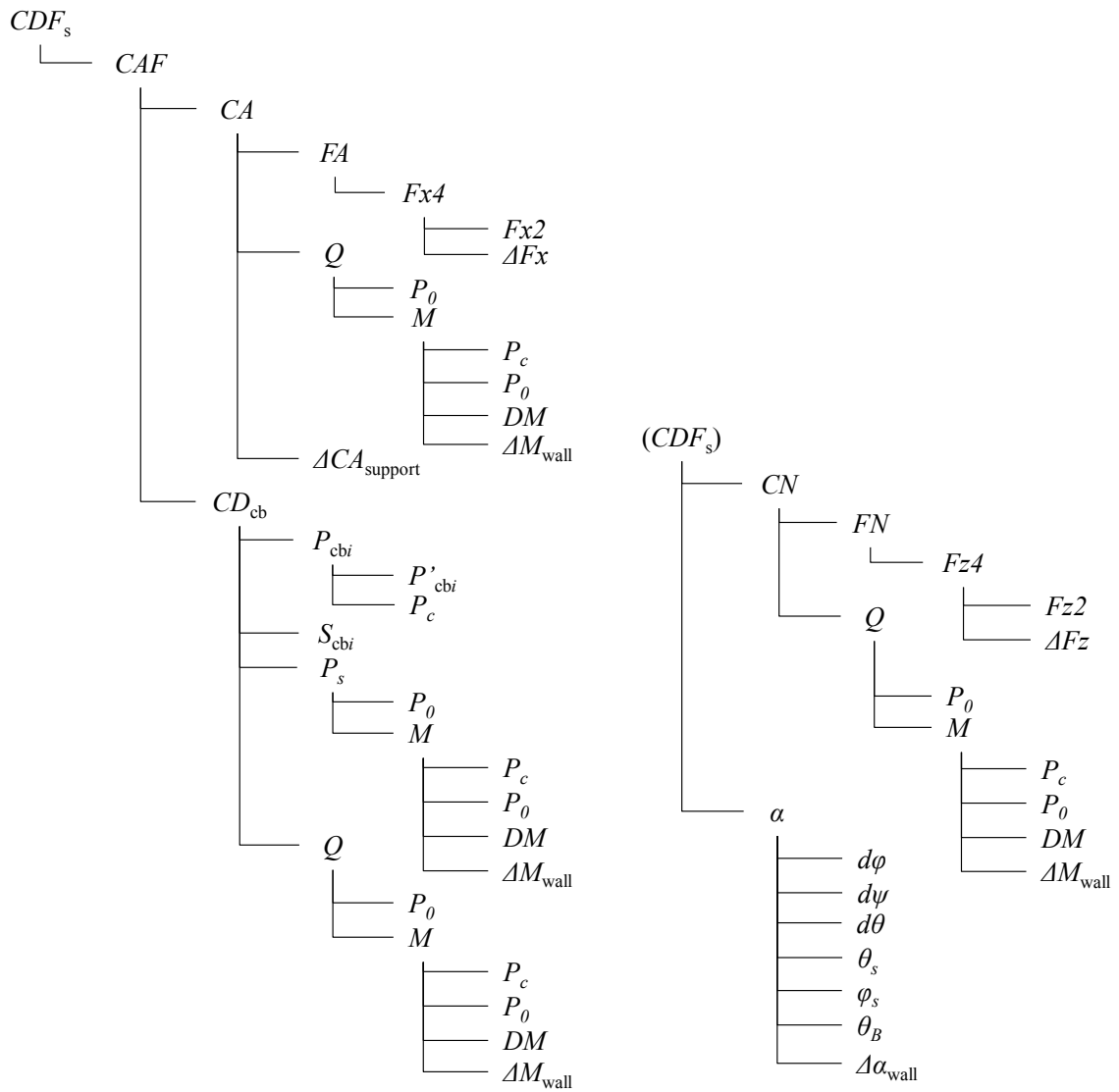


図1  $CDF_s$ における親変数→子変数展開構造

図1を参考に、各原始変数に関する $CDF_s$ の感度係数は以下のように記述される。

$$\frac{\partial(CDF_s)}{\partial(Fx2)} = \frac{\partial(Fx4)}{\partial(Fx2)} \cdot \frac{\partial(FA)}{\partial(Fx4)} \cdot \frac{\partial(CA)}{\partial(FA)} \cdot \frac{\partial(CAF)}{\partial(CA)} \cdot \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(CAF)} \quad (79)$$

$$\frac{\partial(CDF_s)}{\partial(Fz2)} = \frac{\partial(Fz4)}{\partial(Fz2)} \cdot \frac{\partial(FN)}{\partial(Fz4)} \cdot \frac{\partial(CN)}{\partial(FN)} \cdot \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(CN)} \quad (80)$$

$$\frac{\partial(CDF_s)}{\partial(\Delta Fx)} = \frac{\partial(Fx4)}{\partial(\Delta Fx)} \cdot \frac{\partial(FA)}{\partial(Fx4)} \cdot \frac{\partial(CA)}{\partial(FA)} \cdot \frac{\partial(CAF)}{\partial(CA)} \cdot \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(CAF)} \quad (81)$$

$$\frac{\partial(CDF_s)}{\partial(\Delta Fz)} = \frac{\partial(Fz4)}{\partial(\Delta Fz)} \cdot \frac{\partial(FN)}{\partial(Fz4)} \cdot \frac{\partial(CN)}{\partial(FN)} \cdot \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(CN)} \quad (82)$$

$$\frac{\partial(CDF_s)}{\partial(d\phi)} = \frac{\partial\alpha}{\partial(d\phi)} \cdot \frac{\partial(CDF_s)}{\partial\alpha} \quad (83)$$

$$\frac{\partial(CDF_s)}{\partial(d\psi)} = \frac{\partial\alpha}{\partial(d\psi)} \cdot \frac{\partial(CDF_s)}{\partial\alpha} \quad (84)$$

$$\frac{\partial(CDF_s)}{\partial(d\theta)} = \frac{\partial\alpha}{\partial(d\theta)} \cdot \frac{\partial(CDF_s)}{\partial\alpha} \quad (85)$$

$$\frac{\partial(CDF_s)}{\partial\theta_s} = \frac{\partial\alpha}{\partial\theta_s} \cdot \frac{\partial(CDF_s)}{\partial\alpha} \quad (86)$$

$$\frac{\partial(CDF_s)}{\partial\phi_s} = \frac{\partial\alpha}{\partial\phi_s} \cdot \frac{\partial(CDF_s)}{\partial\alpha} \quad (87)$$

$$\frac{\partial(CDF_s)}{\partial\theta_B} = \frac{\partial\alpha}{\partial\theta_B} \cdot \frac{\partial(CDF_s)}{\partial\alpha} \quad (88)$$

$$\frac{\partial(CDF_s)}{\partial(\Delta\alpha_{wall})} = \frac{\partial\alpha}{\partial(\Delta\alpha_{wall})} \cdot \frac{\partial(CDF_s)}{\partial\alpha} \quad (89)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(CDF_s)}{\partial P_c} &= \frac{\partial M}{\partial P_c} \cdot \frac{\partial Q}{\partial M} \cdot \frac{\partial(CA)}{\partial(Q)} \cdot \frac{\partial(CAF)}{\partial(CA)} \cdot \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(CAF)} \\ &+ \frac{\partial M}{\partial P_c} \cdot \frac{\partial P_s}{\partial M} \cdot \frac{\partial(CD_{cb})}{\partial(P_s)} \cdot \frac{\partial(CAF)}{\partial(CD_{cb})} \cdot \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(CAF)} \\ &+ \frac{\partial M}{\partial P_c} \cdot \frac{\partial Q}{\partial M} \cdot \frac{\partial(CD_{cb})}{\partial(Q)} \cdot \frac{\partial(CAF)}{\partial(CD_{cb})} \cdot \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(CAF)} \\ &+ \frac{\partial M}{\partial P_c} \cdot \frac{\partial Q}{\partial M} \cdot \frac{\partial(CN)}{\partial(Q)} \cdot \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(CN)} \end{aligned} \quad (90)$$



このように、親変数の原始変数に関する感度係数が、各処理ステップにおける親変数/子変数間の感度係数を用いて連鎖律により求められる。また、図1では原始変数が複数箇所に現れており、トータルの感度係数はそれぞれの寄与分の和として表される事に注意。以上から $CDF_s$ の偶然誤差限界は以下の手順で求められる。

$$\begin{aligned}
P_{CDF_s} = & \pm \left( \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(Fx2)} P_{Fx2} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(Fz2)} P_{Fz2} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(\Delta Fx)} P_{\Delta Fx} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(\Delta Fz)} P_{\Delta Fz} \right]^2 \right. \\
& + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(d\phi)} P_{d\phi} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(d\psi)} P_{d\psi} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(d\theta)} P_{d\theta} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial\theta_s} P_{\theta_s} \right]^2 \\
& + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial\phi_s} P_{\phi_s} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial\theta_B} P_{\theta_B} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(\Delta\alpha_{wall})} P_{\Delta\alpha_{wall}} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial P} P_P \right]^2 \\
& + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial P_0} P_{P_0} \right]^2 + \sum_{i=1}^m \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial P'_{cbi}} P_{P'_{cbi}} \right]^2 + \sum_{i=1}^m \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial S_{cbi}} P_{S_{cbi}} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(DM)} P_{DM} \right]^2 \\
& \left. + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(\Delta M_{wall})} P_{\Delta M_{wall}} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(\Delta\alpha_{wall})} P_{\Delta\alpha_{wall}} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(\Delta CA_{support})} P_{\Delta CA_{support}} \right]^2 \right)^{1/2} \quad (98)
\end{aligned}$$

正確度についても同様の手順で求められるが、正確度の場合は 相関関係がある原始変数の組み合わせについて、相関項が付加されることに注意。

$$\begin{aligned}
B_{CDF_s} = & \pm \left( \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(Fx2)} B_{Fx2} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(Fz2)} B_{Fz2} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(\Delta Fx)} B_{\Delta Fx} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(\Delta Fz)} B_{\Delta Fz} \right]^2 \right. \\
& + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(d\phi)} B_{d\phi} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(d\psi)} B_{d\psi} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(d\theta)} B_{d\theta} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial\theta_s} B_{\theta_s} \right]^2 \\
& + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial\phi_s} B_{\phi_s} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial\theta_B} B_{\theta_B} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(\Delta\alpha_{wall})} B_{\Delta\alpha_{wall}} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial P} B_P \right]^2 \\
& + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial P_0} B_{P_0} \right]^2 + \sum_{i=1}^m \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial P'_{cbi}} B_{P'_{cbi}} \right]^2 + \sum_{i=1}^m \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial S_{cbi}} B_{S_{cbi}} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(DM)} B_{DM} \right]^2 \\
& + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(\Delta M_{wall})} B_{\Delta M_{wall}} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(\Delta\alpha_{wall})} B_{\Delta\alpha_{wall}} \right]^2 + \left[ \frac{\partial(CDF_s)}{\partial(\Delta CA_{support})} B_{\Delta CA_{support}} \right]^2 \\
& \left. + 2 \sum_{i < j} \frac{\partial(CDF_s)}{\partial P'_{cbi}} \cdot \frac{\partial(CDF_s)}{\partial P'_{cbj}} B'_{P'_{cbi}} B'_{P'_{cbj}} \right)^{1/2} \quad (99)
\end{aligned}$$

最終的に $CDF_s$ の不確かさ $U_{CDF_s}$ は以下で与えられる。

$$U_{CDF_s} = \pm (B_{CDF_s}^2 + P_{CDF_s}^2)^{1/2} \quad (100)$$



## 4 プログラム実装について

本章では、まず、不確かさ解析の処理フローを示し（4.1節）、次に、各変数の原子変数に対する感度係数を計算するための計算式を示す（4.2節）。そして、親変数にしかかなり得ない変数（3.4節にて(3)に分類された変数）の子変数展開構造を示す（4.3節）。さらに、不確かさ解析における入力パラメータの一覧を示す（4.4節）。最後に、不確かさ解析における出力パラメータの一覧を示す（4.5節）。

### 4.1 処理フロー

1. 各変数について構造体を定義する。構造体要素は以下の通り
  - ・ 変数の分類項目（3.4節の(1), (2), (3)）
  - ・ 原始変数に関するboolean（(1)は全てtrue, (3)は全てfalse, (2)は入力により指定）
  - ・ 不確かさ評価に関するboolean（(1)は全てfalse, (3)は全てtrue, (2)はデフォルトでfalseとしておく）
  - ・ 子変数総数
  - ・ 子変数に対するポインタ配列（要素数 = 子変数総数、要素 = 子変数構造体を示すポインタまたはインデックス）
2. 全ての親変数/子変数の組み合わせについて、感度係数を計算する。
3. (3)の変数について子変数を参照し、子変数=原始変数（ユーザ指定原始変数を含む）であれば展開を終了、従属変数であればさらなる子変数への展開、感度係数の計算を原始変数に帰着されるまで繰り返す。この時、親変数 → 子変数 → 孫変数 → …の流れ（パス）を記憶しておくとともに、子変数が(2)に属する場合は不確かさ評価のbooleanをtrue（実施する）に変更する。また、デフォルト原始変数については、帰着された総数および変数のインデックスを記録しておく。
4. (2)の変数について不確かさ評価のbooleanを参照し、trueの場合は3と同様の手順で原始変数への展開を行う。
5. 全ての(2), (3)の変数について原始変数への展開が終了したら、入力として与えたユーザ指定原始変数の総数および3, 4で求めたデフォルト原始変数の総数より、（今回用いられた）原始変数の総数 $np$ を求める。
6. 不確かさ評価を行う変数について、パスから親変数/子変数の組み合わせに対応する感度係数を参照し、順次掛け合わせることで（連鎖律に相当）親変数の原始変数に関する感度係数を算出する。同じ原始変数に帰着される別のパスが存在する場合は、先に計算された感度係数に順次足し合わせることで、当該原始変数に関するトータルの感度係数を算出する。
7. 全ての原始変数に関する親変数の感度係数が求まったら、入力値として与えた原始変数の偶然誤差限界/正確度と合わせて最終的な正確度/偶然誤差限界およびトータルの不確かさ幅を計算する。
8. 原始変数の総数および各変数のインデックス、感度係数、正確度/偶然誤差限界/不確かさ幅をそれぞれ出力する。

## 4.2 感度係数計算式の導出

本節では各変数の原子変数に対する感度係数を計算するための計算式を示す。

### 4.2.1 気流条件の算出

(1)～(3)式より

$$\frac{\partial M}{\partial P_c} = -\frac{1}{\gamma P_c} \cdot \frac{\left(\frac{P_0}{P_c}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{M - DM - \Delta M_{wall}} \quad (101)$$

$$\frac{\partial M}{\partial P_0} = \frac{1}{\gamma P_c} \cdot \frac{\left(\frac{P_0}{P_c}\right)^{\frac{1}{\gamma}}}{M - DM - \Delta M_{wall}} \quad (102)$$

$$\frac{\partial M}{\partial(DM)} = 1 \quad (103)$$

$$\frac{\partial M}{\partial(\Delta M_{wall})} = 1 \quad (104)$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial P_0} = \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right]^{-\frac{\gamma}{\gamma-1}} + \frac{\partial P_s}{\partial M} \cdot \frac{\partial M}{\partial P_0} \quad (105)$$

$$\frac{\partial P_s}{\partial M} = \frac{-\gamma P_s M}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2} \quad (106)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial P_0} = \frac{\gamma}{2} M^2 \frac{\partial P_s}{\partial P_0} + \gamma P_s M \frac{\partial M}{\partial P_0} \quad (107)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial M} = \frac{\gamma}{2} M^2 \frac{\partial P_s}{\partial M} + \gamma P_s M \quad (108)$$

## 4.2.2 自重補正

(12)および(13)式より

$$\frac{\partial(Fx4)}{\partial(Fx2)} = 1 \quad (109)$$

$$\frac{\partial(Fx4)}{\partial(\Delta Fx)} = -1 \quad (110)$$

$$\frac{\partial(Fy4)}{\partial(Fy2)} = 1 \quad (111)$$

$$\frac{\partial(Fy4)}{\partial(\Delta Fy)} = -1 \quad (112)$$

$$\frac{\partial(Fz4)}{\partial(Fz2)} = 1 \quad (113)$$

$$\frac{\partial(Fz4)}{\partial(\Delta Fz)} = -1 \quad (114)$$

$$\frac{\partial(Mx4)}{\partial(Mx2)} = 1 \quad (115)$$

$$\frac{\partial(Mx4)}{\partial(\Delta Mx)} = -1 \quad (116)$$

$$\frac{\partial(My4)}{\partial(My2)} = 1 \quad (117)$$

$$\frac{\partial(My4)}{\partial(\Delta My)} = -1 \quad (118)$$

$$\frac{\partial(Mz4)}{\partial(Mz2)} = 1 \quad (119)$$

$$\frac{\partial(Mz4)}{\partial(\Delta Mz)} = -1 \quad (120)$$

### 4.2.3 天秤基準座標系から機体軸座標系への変換

(14)および(15)式より

$$\frac{\partial(FA)}{\partial(Fx4)} = -1 \quad (121)$$

$$\frac{\partial(FY)}{\partial(Fy4)} = 1 \quad (122)$$

$$\frac{\partial(FN)}{\partial(Fz4)} = -1 \quad (123)$$

$$\frac{\partial(MX_B)}{\partial(Mx4)} = 1 \quad (124)$$

$$\frac{\partial(MX_B)}{\partial(Fy4)} = -Zl \quad (125)$$

$$\frac{\partial(MX_B)}{\partial(Fz4)} = -Yl \quad (126)$$

$$\frac{\partial(MX_B)}{\partial(Yl)} = -Fz4 \quad (127)$$

$$\frac{\partial(MX_B)}{\partial(Zl)} = -Fy4 \quad (128)$$

$$\frac{\partial(MY_B)}{\partial(My4)} = 1 \quad (129)$$

$$\frac{\partial(MY_B)}{\partial(Fx4)} = Zl \quad (130)$$

$$\frac{\partial(MY_B)}{\partial(Fz4)} = Xl \quad (131)$$

$$\frac{\partial(MY_B)}{\partial(Xl)} = Fz4 \quad (132)$$

$$\frac{\partial(MY_B)}{\partial(Zl)} = Fx4 \quad (133)$$

$$\frac{\partial(MZ_B)}{\partial(Mz4)} = 1 \quad (134)$$

$$\frac{\partial(MZ_B)}{\partial(Fx4)} = Yl \quad (135)$$

$$\frac{\partial(MZ_B)}{\partial(Fy4)} = -Xl \quad (136)$$

$$\frac{\partial(MZ_B)}{\partial(Xl)} = -Fy4 \quad (137)$$

$$\frac{\partial(MZ_B)}{\partial(Yl)} = Fx4 \quad (138)$$

#### 4.2.4 迎角・横滑り角の算出

(17), (18)式より

$$\frac{\partial \alpha}{\partial x} = \frac{1}{u^2 + w^2} \left[ -w \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial w}{\partial x} \right] \quad (139)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial x} = \frac{1}{\sqrt{u^2 + w^2}} \cdot \frac{1}{u^2 + v^2 + w^2} \left[ -uv \frac{\partial u}{\partial x} + (u^2 + w^2) \frac{\partial v}{\partial x} - vw \frac{\partial w}{\partial x} \right] \quad (140)$$

ここで  $x = d\phi, d\theta, d\psi, \theta_s, \phi_s, \theta_B$  とする。  $u, v, w$  は(16)式より計算される。また、  $u, v, w$  の  $x$  に関する偏微分は、

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial(d\phi)} \\ \frac{\partial v}{\partial(d\phi)} \\ \frac{\partial w}{\partial(d\phi)} \end{bmatrix} = \frac{\partial R_1(d\phi)}{\partial(d\phi)} \cdot R_2(d\theta) \cdot R_3(d\psi) \cdot R_2(\theta_B) \cdot R_1(\phi_s) \cdot R_2(\theta_s) \cdot R_2(-\theta_B) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (141)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial(d\theta)} \\ \frac{\partial v}{\partial(d\theta)} \\ \frac{\partial w}{\partial(d\theta)} \end{bmatrix} = R_1(d\phi) \cdot \frac{\partial R_2(d\theta)}{\partial(d\theta)} \cdot R_3(d\psi) \cdot R_2(\theta_B) \cdot R_1(\phi_s) \cdot R_2(\theta_s) \cdot R_2(-\theta_B) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (142)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial(d\psi)} \\ \frac{\partial v}{\partial(d\psi)} \\ \frac{\partial w}{\partial(d\psi)} \end{bmatrix} = R_1(d\phi) \cdot R_2(d\theta) \cdot \frac{\partial R_3(d\psi)}{\partial(d\psi)} \cdot R_2(\theta_B) \cdot R_1(\phi_s) \cdot R_2(\theta_s) \cdot R_2(-\theta_B) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (143)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial\theta_s} \\ \frac{\partial v}{\partial\theta_s} \\ \frac{\partial w}{\partial\theta_s} \end{bmatrix} = R_1(d\phi) \cdot R_2(d\theta) \cdot R_3(d\psi) \cdot R_2(\theta_B) \cdot R_1(\phi_s) \cdot \frac{\partial R_2(\theta_s)}{\partial\theta_s} \cdot R_2(-\theta_B) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (144)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial\phi_s} \\ \frac{\partial v}{\partial\phi_s} \\ \frac{\partial w}{\partial\phi_s} \end{bmatrix} = R_1(d\phi) \cdot R_2(d\theta) \cdot R_3(d\psi) \cdot R_2(\theta_B) \cdot \frac{\partial R_1(\phi_s)}{\partial\phi_s} \cdot R_2(\theta_s) \cdot R_2(-\theta_B) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (145)$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \theta_B} \\ \frac{\partial v}{\partial \theta_B} \\ \frac{\partial w}{\partial \theta_B} \end{bmatrix} &= R_1(d\phi) \cdot R_2(d\theta) \cdot R_3(d\psi) \cdot \frac{\partial R_2(\theta_B)}{\partial \theta_B} \cdot R_1(\phi_s) \cdot R_2(\theta_s) \cdot R_2(-\theta_B) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
&+ R_1(d\phi) \cdot R_2(d\theta) \cdot R_3(d\psi) \cdot R_2(\theta_B) \cdot R_1(\phi_s) \cdot R_2(\theta_s) \cdot \frac{\partial R_2(-\theta_B)}{\partial \theta_B} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{146}$$

回転行列 $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ に関する偏微分は、(6)式より

$$\frac{\partial R_1(d\phi)}{\partial (d\phi)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin(d\phi) & \cos(d\phi) \\ 0 & -\cos(d\phi) & -\sin(d\phi) \end{pmatrix} \tag{147}$$

$$\frac{\partial R_2(d\theta)}{\partial (d\theta)} = \begin{pmatrix} -\sin(d\theta) & 0 & -\cos(d\theta) \\ 0 & 0 & 0 \\ \cos(d\theta) & 0 & -\sin(d\theta) \end{pmatrix} \tag{148}$$

$$\frac{\partial R_3(d\psi)}{\partial (d\psi)} = \begin{pmatrix} -\sin(d\psi) & \cos(d\psi) & 0 \\ -\cos(d\psi) & -\sin(d\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{149}$$

$$\frac{\partial R_2(\theta_s)}{\partial \theta_s} = \begin{pmatrix} -\sin \theta_s & 0 & -\cos \theta_s \\ 0 & 0 & 0 \\ \cos \theta_s & 0 & -\sin \theta_s \end{pmatrix} \tag{150}$$

$$\frac{\partial R_1(\phi_s)}{\partial \phi_s} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \phi_s & \cos \phi_s \\ 0 & -\cos \phi_s & -\sin \phi_s \end{pmatrix} \tag{151}$$

$$\frac{\partial R_2(\theta_B)}{\partial \theta_B} = \begin{pmatrix} -\sin \theta_B & 0 & -\cos \theta_B \\ 0 & 0 & 0 \\ \cos \theta_B & 0 & -\sin \theta_B \end{pmatrix} \tag{152}$$

$$\frac{\partial R_2(-\theta_B)}{\partial \theta_B} = \begin{pmatrix} -\sin \theta_B & 0 & \cos \theta_B \\ 0 & 0 & 0 \\ -\cos \theta_B & 0 & -\sin \theta_B \end{pmatrix} \tag{153}$$

最後に $\Delta\alpha_{\text{wall}}$ ,  $\Delta\beta_{\text{wall}}$ に関する偏微分は(17), (18)式より

$$\frac{\partial \alpha}{\partial (\Delta\alpha_{\text{wall}})} = 1 \tag{154}$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial (\Delta\beta_{\text{wall}})} = 1 \tag{155}$$

## 4.2.5 機体軸空力係数

(19)および(20)式より

$$\frac{\partial(CA)}{\partial(FA)} = \frac{g_0}{QS} \quad (156)$$

$$\frac{\partial(CA)}{\partial Q} = -\frac{CA - \Delta CA_{support}}{Q} \quad (157)$$

$$\frac{\partial(CA)}{\partial(\Delta CA_{support})} = 1 \quad (158)$$

$$\frac{\partial(CY)}{\partial(FY)} = \frac{g_0}{QS} \quad (159)$$

$$\frac{\partial(CY)}{\partial Q} = -\frac{CY}{Q} \quad (160)$$

$$\frac{\partial(CN)}{\partial(FN)} = \frac{g_0}{QS} \quad (161)$$

$$\frac{\partial(CN)}{\partial Q} = -\frac{CN}{Q} \quad (162)$$

$$\frac{\partial(Cl_B)}{\partial(MX_B)} = \frac{g_0}{QS \cdot l_R} \quad (163)$$

$$\frac{\partial(Cl_B)}{\partial Q} = -\frac{Cl_B}{Q} \quad (164)$$

$$\frac{\partial(Cm_B)}{\partial(MY_B)} = \frac{g_0}{QS \cdot l_P} \quad (165)$$

$$\frac{\partial(Cm_B)}{\partial Q} = -\frac{Cm_B}{Q} \quad (166)$$

$$\frac{\partial(Cn_B)}{\partial(MZ_B)} = \frac{g_0}{QS \cdot l_Y} \quad (167)$$

$$\frac{\partial(Cn_B)}{\partial Q} = -\frac{Cn_B}{Q} \quad (168)$$

## 4.2.6 安定軸空力係数

(21)から(24)式より

$$\frac{\partial(CD_s)}{\partial(FA)} = g_0 \frac{\cos \alpha}{QS} \quad (169)$$

$$\frac{\partial(CD_s)}{\partial(FN)} = g_0 \frac{\sin \alpha}{QS} \quad (170)$$

$$\frac{\partial(CD_s)}{\partial Q} = -\frac{CD_s - \cos \alpha (\Delta CA_{support})}{Q} \quad (171)$$

$$\frac{\partial(CD_s)}{\partial \alpha} = g_0 \frac{-\sin \alpha (FA) + \cos \alpha (FN)}{QS} - \sin \alpha (\Delta CA_{support}) \quad (172)$$

$$\frac{\partial(CD_s)}{\partial(\Delta CA_{support})} = \cos \alpha \quad (173)$$

$$\frac{\partial(CY)}{\partial(FY)} = \frac{g_0}{QS} \quad (174)$$

$$\frac{\partial(CY)}{\partial Q} = -\frac{CY}{Q} \quad (175)$$

$$\frac{\partial(CL_s)}{\partial(FA)} = g_0 \frac{-\sin \alpha}{QS} \quad (176)$$

$$\frac{\partial(CL_s)}{\partial(FN)} = g_0 \frac{\cos \alpha}{QS} \quad (177)$$

$$\frac{\partial(CL_s)}{\partial Q} = -\frac{CL_s + \sin \alpha (\Delta CA_{support})}{Q} \quad (178)$$

$$\frac{\partial(CL_s)}{\partial \alpha} = g_0 \frac{-\cos \alpha (FA) - \sin \alpha (FN)}{QS} - \cos \alpha (\Delta CA_{support}) \quad (179)$$

$$\frac{\partial(CL_s)}{\partial(\Delta CA_{support})} = -\sin \alpha \quad (180)$$

$$\frac{\partial(Cl_s)}{\partial(MX_B)} = g_0 \frac{\cos \alpha}{QS \cdot l_R} \quad (181)$$

$$\frac{\partial(Cl_s)}{\partial(MZ_B)} = g_0 \frac{\sin \alpha}{QS \cdot l_R} \quad (182)$$

$$\frac{\partial(Cl_s)}{\partial Q} = -\frac{Cl_s}{Q} \quad (183)$$

$$\frac{\partial(Cl_s)}{\partial \alpha} = g_0 \frac{-\sin \alpha (MX_B) + \cos \alpha (MZ_B)}{QS \cdot l_R} \quad (184)$$

$$\frac{\partial(Cm_s)}{\partial(MY_B)} = \frac{g_0}{QS \cdot l_P} \quad (185)$$

$$\frac{\partial(Cm_s)}{\partial Q} = -\frac{Cm_s}{Q} \quad (186)$$

$$\frac{\partial(Cn_s)}{\partial(MX_B)} = g_0 \frac{-\sin \alpha}{QS \cdot l_Y} \quad (187)$$



$$\frac{\partial(Cn_s)}{\partial(MZ_B)} = g_0 \frac{\cos \alpha}{QS \cdot l_Y} \quad (188)$$

$$\frac{\partial(Cn_s)}{\partial Q} = -\frac{Cn_s}{Q} \quad (189)$$

$$\frac{\partial(Cn_s)}{\partial \alpha} = g_0 \frac{-\cos \alpha (MX_B) - \sin \alpha (MZ_B)}{QS \cdot l_Y} \quad (190)$$

## 4.2.7 風軸空力係数

(25)から(28)式より

$$\frac{\partial(CD_w)}{\partial(FA)} = g_0 \frac{\cos \alpha \cos \beta}{QS} \quad (191)$$

$$\frac{\partial(CD_w)}{\partial(FY)} = g_0 \frac{-\sin \beta}{QS} \quad (192)$$

$$\frac{\partial(CD_w)}{\partial(FN)} = g_0 \frac{\sin \alpha \cos \beta}{QS} \quad (193)$$

$$\frac{\partial(CD_w)}{\partial Q} = -\frac{CD_w - \cos \alpha \cos \beta (\Delta CA_{\text{support}})}{Q} \quad (194)$$

$$\frac{\partial(CD_w)}{\partial \alpha} = g_0 \frac{-\sin \alpha \cos \beta (FA) + \cos \alpha \cos \beta (FN)}{QS} - \sin \alpha \cos \beta (\Delta CA_{\text{support}}) \quad (195)$$

$$\frac{\partial(CD_w)}{\partial \beta} = g_0 \frac{-\cos \alpha \sin \beta (FA) - \cos \beta (FY) - \sin \alpha \sin \beta (FN)}{QS} - \cos \alpha \sin \beta (\Delta CA_{\text{support}}) \quad (196)$$

$$\frac{\partial(CD_w)}{\partial(\Delta CA_{\text{support}})} = \cos \alpha \cos \beta \quad (197)$$

$$\frac{\partial(CC)}{\partial(FA)} = g_0 \frac{\cos \alpha \sin \beta}{QS} \quad (198)$$

$$\frac{\partial(CC)}{\partial(FY)} = g_0 \frac{\cos \beta}{QS} \quad (199)$$

$$\frac{\partial(CC)}{\partial(FN)} = g_0 \frac{\sin \alpha \sin \beta}{QS} \quad (200)$$

$$\frac{\partial(CC)}{\partial Q} = -\frac{CC - \cos \alpha \sin \beta (\Delta CA_{\text{support}})}{Q} \quad (201)$$

$$\frac{\partial(CC)}{\partial \alpha} = g_0 \frac{-\sin \alpha \sin \beta (FA) + \cos \alpha \sin \beta (FN)}{QS} - \sin \alpha \sin \beta (\Delta CA_{\text{support}}) \quad (202)$$

$$\frac{\partial(CC)}{\partial \beta} = g_0 \frac{\cos \alpha \cos \beta (FA) - \sin \beta (FY) + \sin \alpha \cos \beta (FN)}{QS} + \cos \alpha \cos \beta (\Delta CA_{\text{support}}) \quad (203)$$

$$\frac{\partial(CC)}{\partial(\Delta CA_{\text{support}})} = \cos \alpha \sin \beta \quad (204)$$

$$\frac{\partial(CL_w)}{\partial(FA)} = g_0 \frac{-\sin \alpha}{QS} \quad (205)$$

$$\frac{\partial(CL_w)}{\partial(FN)} = g_0 \frac{\cos \alpha}{QS} \quad (206)$$

$$\frac{\partial(CL_w)}{\partial Q} = -\frac{CL_w + \sin \alpha (\Delta CA_{\text{support}})}{Q} \quad (207)$$

$$\frac{\partial(Cl_w)}{\partial\alpha} = g_0 \frac{-\cos\alpha(FA) - \sin\alpha(FN)}{QS} - \cos\alpha(\Delta CA_{\text{support}}) \quad (208)$$

$$\frac{\partial(Cl_w)}{\partial(\Delta CA_{\text{support}})} = -\sin\alpha \quad (209)$$

$$\frac{\partial(Cl_w)}{\partial(MX_B)} = g_0 \frac{\cos\alpha \cos\beta}{QS \cdot l_R} \quad (210)$$

$$\frac{\partial(Cl_w)}{\partial(MY_B)} = g_0 \frac{-\sin\beta}{QS \cdot l_R} \quad (211)$$

$$\frac{\partial(Cl_w)}{\partial(MZ_B)} = g_0 \frac{\sin\alpha \cos\beta}{QS \cdot l_R} \quad (212)$$

$$\frac{\partial(Cl_w)}{\partial Q} = -\frac{Cl_w}{Q} \quad (213)$$

$$\frac{\partial(Cl_w)}{\partial\alpha} = g_0 \frac{-\sin\alpha \cos\beta(MX_B) + \cos\alpha \cos\beta(MZ_B)}{QS \cdot l_R} \quad (214)$$

$$\frac{\partial(Cl_w)}{\partial\beta} = g_0 \frac{-\cos\alpha \sin\beta(MX_B) - \cos\beta(MY_B) - \sin\alpha \sin\beta(MZ_B)}{QS \cdot l_R} \quad (215)$$

$$\frac{\partial(Cm_w)}{\partial(MX_B)} = g_0 \frac{\cos\alpha \sin\beta}{QS \cdot l_P} \quad (216)$$

$$\frac{\partial(Cm_w)}{\partial(MY_B)} = g_0 \frac{\cos\beta}{QS \cdot l_P} \quad (217)$$

$$\frac{\partial(Cm_w)}{\partial(MZ_B)} = g_0 \frac{\sin\alpha \sin\beta}{QS \cdot l_P} \quad (218)$$

$$\frac{\partial(Cm_w)}{\partial Q} = -\frac{Cm_w}{Q} \quad (219)$$

$$\frac{\partial(Cm_w)}{\partial\alpha} = g_0 \frac{-\sin\alpha \sin\beta(MX_B) + \cos\alpha \sin\beta(MZ_B)}{QS \cdot l_P} \quad (220)$$

$$\frac{\partial(Cm_w)}{\partial\beta} = g_0 \frac{\cos\alpha \cos\beta(MX_B) - \sin\beta(MY_B) + \sin\alpha \cos\beta(MZ_B)}{QS \cdot l_P} \quad (221)$$

$$\frac{\partial(Cn_w)}{\partial(MX_B)} = g_0 \frac{-\sin\alpha}{QS \cdot l_Y} \quad (222)$$

$$\frac{\partial(Cn_w)}{\partial(MZ_B)} = g_0 \frac{\cos\alpha}{QS \cdot l_Y} \quad (223)$$

$$\frac{\partial(Cn_w)}{\partial Q} = -\frac{Cn_w}{Q} \quad (224)$$

$$\frac{\partial(Cn_w)}{\partial\alpha} = g_0 \frac{-\cos\alpha(MX_B) - \sin\alpha(MZ_B)}{QS \cdot l_Y} \quad (225)$$

## 4.2.8 キャビティ/ベース圧補正

(29)から(33)式より

$$\frac{\partial(CAF)}{\partial(CA)} = 1 \quad (226)$$

$$\frac{\partial(CAF)}{\partial(CD_{cb})} = 1 \quad (227)$$

$$\frac{\partial(CD_{cb})}{\partial(P_{cbi})} = \frac{S_{cbi}}{QS} \quad (228)$$

$$\frac{\partial(CD_{cb})}{\partial(S_{cbi})} = \frac{C p_{cbi}}{S} \quad (229)$$

$$\frac{\partial(CD_{cb})}{\partial P_s} = -\frac{1}{QS} \sum_{i=1}^m S_{cbi} \quad (230)$$

$$\frac{\partial(CD_{cb})}{\partial Q} = -\frac{1}{QS} \sum_{i=1}^m C p_{cbi} \cdot S_{cbi} \quad (231)$$

$$\frac{\partial P_{cbi}}{\partial P'_{cbi}} = 1 \quad (232)$$

$$\frac{\partial P_{cbi}}{\partial P_c} = \begin{cases} 1 & \text{(ESP計測の場合)} \\ 0 & \text{(マノメータ計測の場合)} \end{cases} \quad (233)$$

$$\frac{\partial(CDF_s)}{\partial(CAF)} = \cos \alpha \quad (234)$$

$$\frac{\partial(CDF_s)}{\partial(CN)} = \sin \alpha \quad (235)$$

$$\frac{\partial(CDF_s)}{\partial \alpha} = -\sin \alpha (CAF) + \cos \alpha (CN) \quad (236)$$

$$\frac{\partial(CLF)}{\partial(CAF)} = -\sin \alpha \quad (237)$$

$$\frac{\partial(CLF)}{\partial(CN)} = \cos \alpha \quad (238)$$

$$\frac{\partial(CLF)}{\partial \alpha} = -\cos \alpha (CAF) - \sin \alpha (CN) \quad (239)$$

$$\frac{\partial(CDF_w)}{\partial(CAF)} = \cos \alpha \cos \beta \quad (240)$$

$$\frac{\partial(CDF_w)}{\partial(CY)} = -\sin \beta \quad (241)$$

$$\frac{\partial(CDF_w)}{\partial(CN)} = \sin \alpha \cos \beta \quad (242)$$

$$\frac{\partial(CDF_w)}{\partial \alpha} = -\sin \alpha \cos \beta (CAF) + \cos \alpha \cos \beta (CN) \quad (243)$$

$$\frac{\partial(CDF_w)}{\partial\beta} = -\cos\alpha \sin\beta (CAF) - \cos\beta (CY) - \sin\alpha \sin\beta (CN) \quad (244)$$

$$\frac{\partial(CCF)}{\partial(CAF)} = \cos\alpha \sin\beta \quad (245)$$

$$\frac{\partial(CCF)}{\partial(CY)} = \cos\beta \quad (246)$$

$$\frac{\partial(CCF)}{\partial(CN)} = \sin\alpha \sin\beta \quad (247)$$

$$\frac{\partial(CCF)}{\partial\alpha} = -\sin\alpha \sin\beta (CAF) + \cos\alpha \sin\beta (CN) \quad (248)$$

$$\frac{\partial(CCF)}{\partial\beta} = \cos\alpha \cos\beta (CAF) - \sin\beta (CY) + \sin\alpha \cos\beta (CN) \quad (249)$$

### 4.3 親変数の子変数展開構造

ここでは3.4節の(3)に分類される変数について示す。(2)に属する変数は以下のツリー構造においてサブセットとなっている。

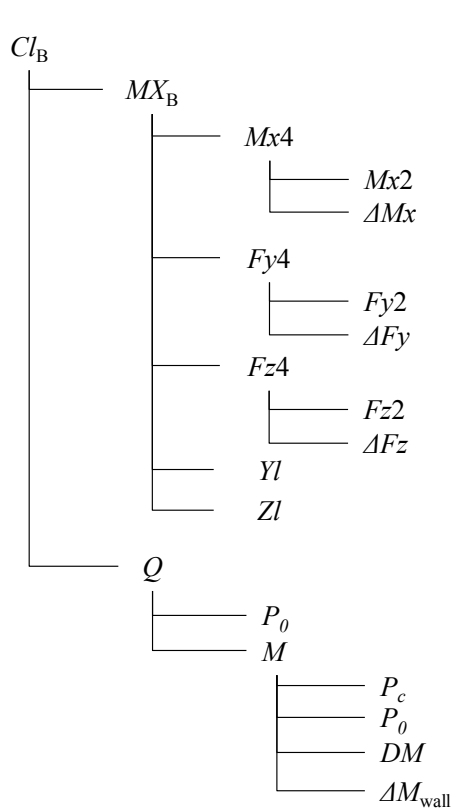


図2  $Cl_B$ における親変数→子変数展開構造

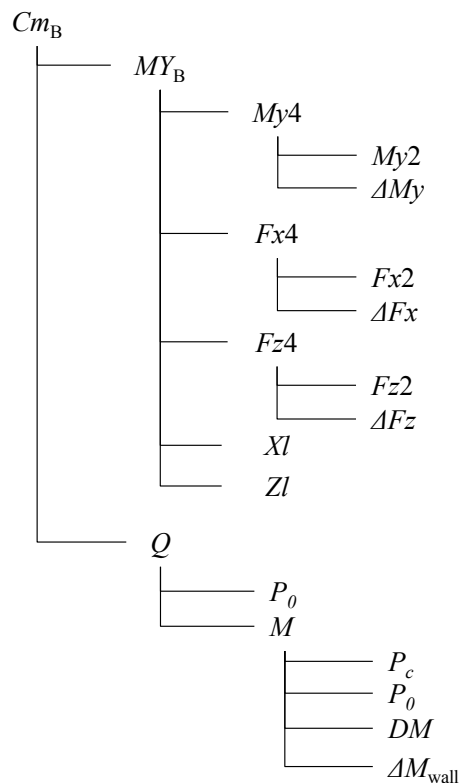


図3  $Cm_B$ における親変数→子変数展開構造

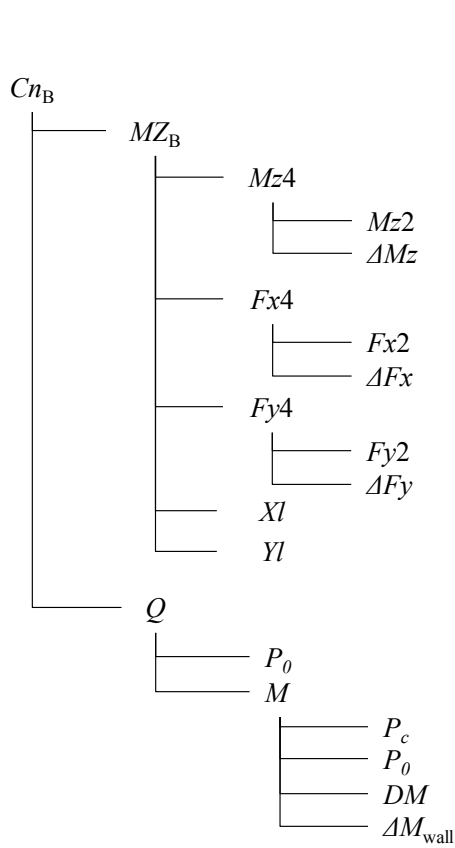


図4  $Cn_B$ における親変数→子変数展開構造

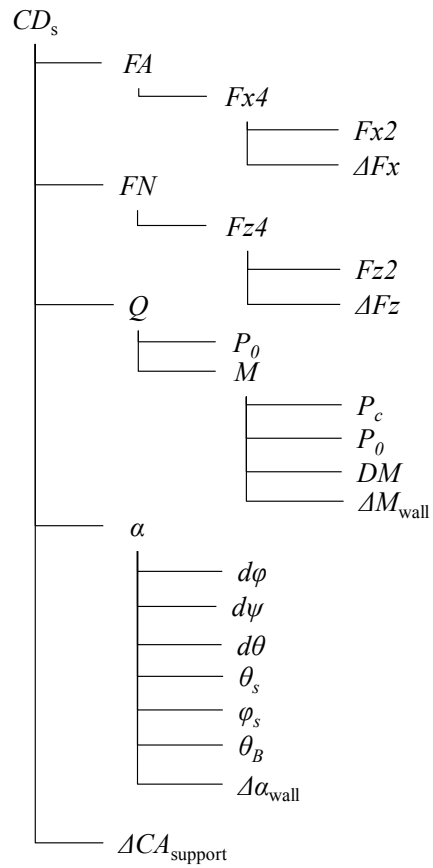


図5  $CD_s$ における親変数→子変数展開構造

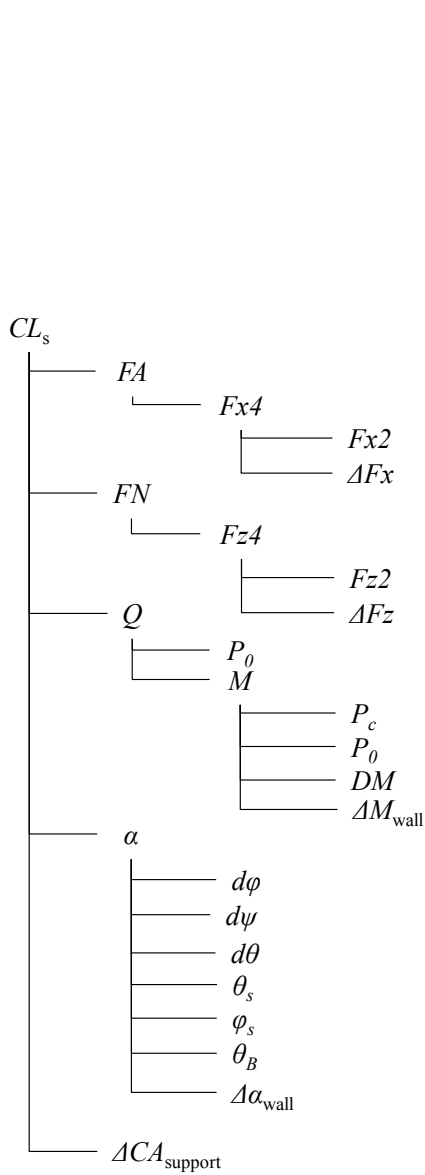


図6 CLsにおける親変数→子変数展開構造

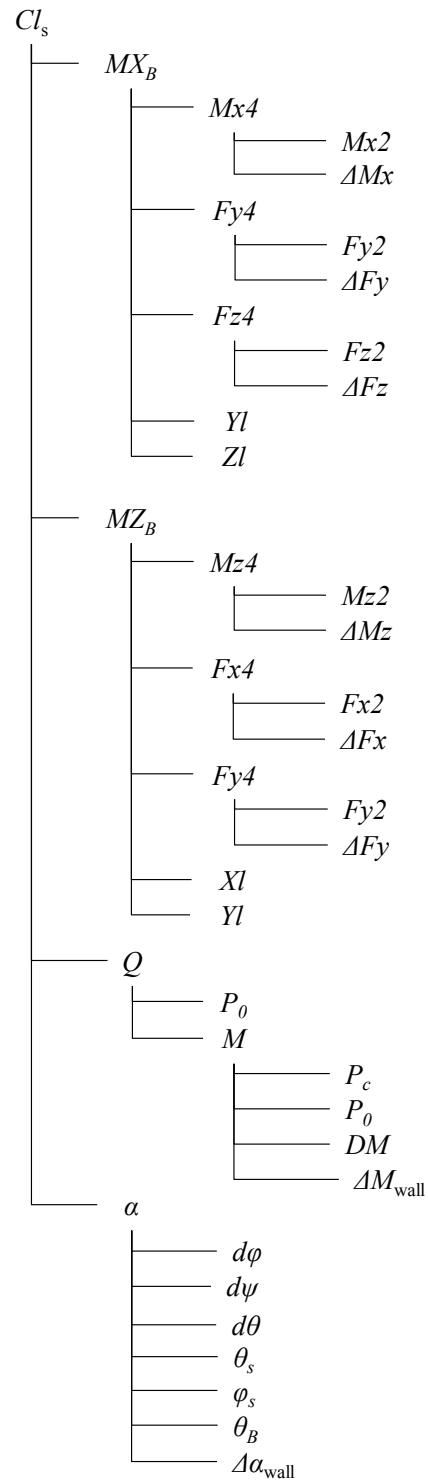


図7 Clsにおける親変数→子変数展開構造



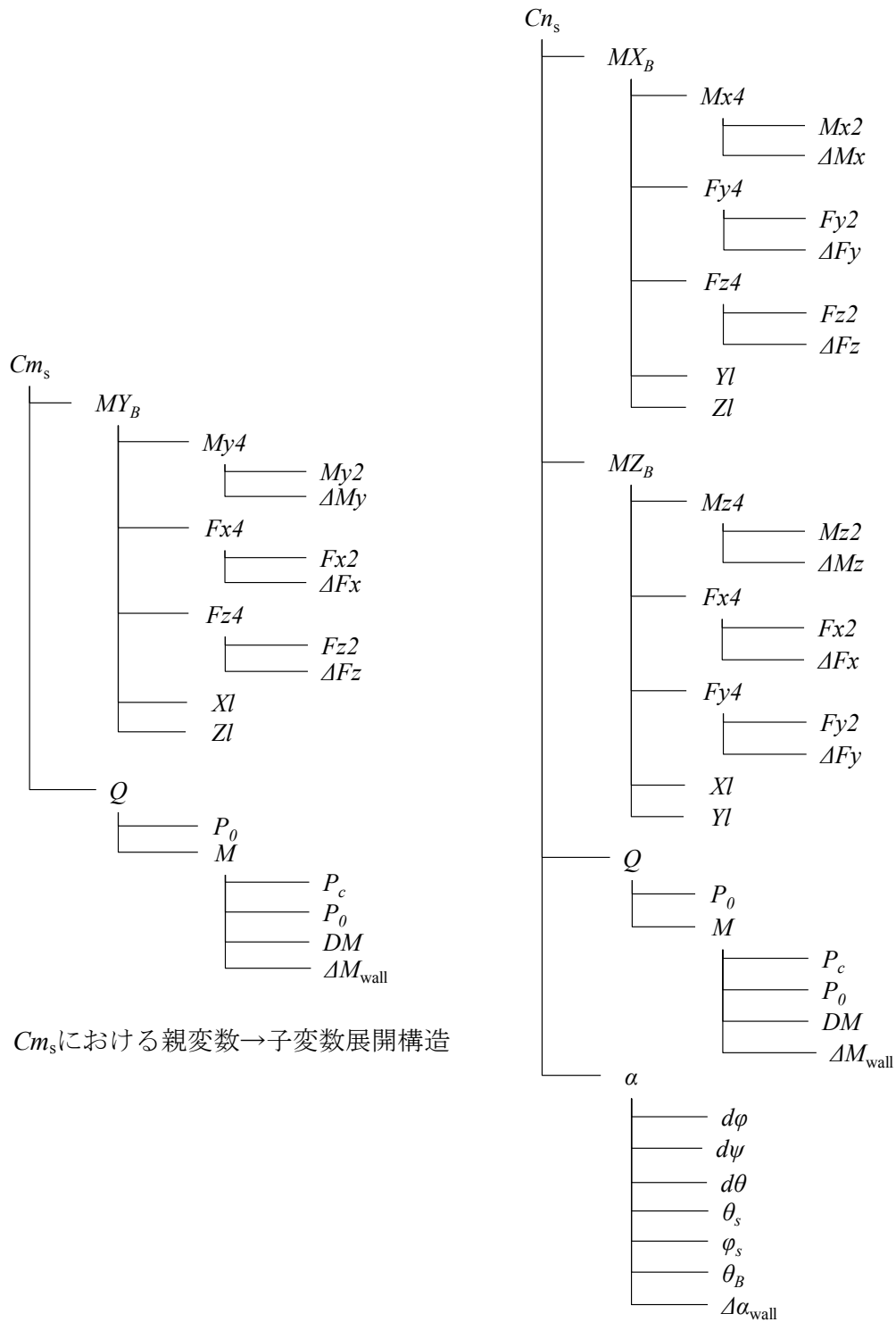


図8  $Cm_s$ における親変数→子変数展開構造

図9  $Cn_s$ における親変数→子変数展開構造

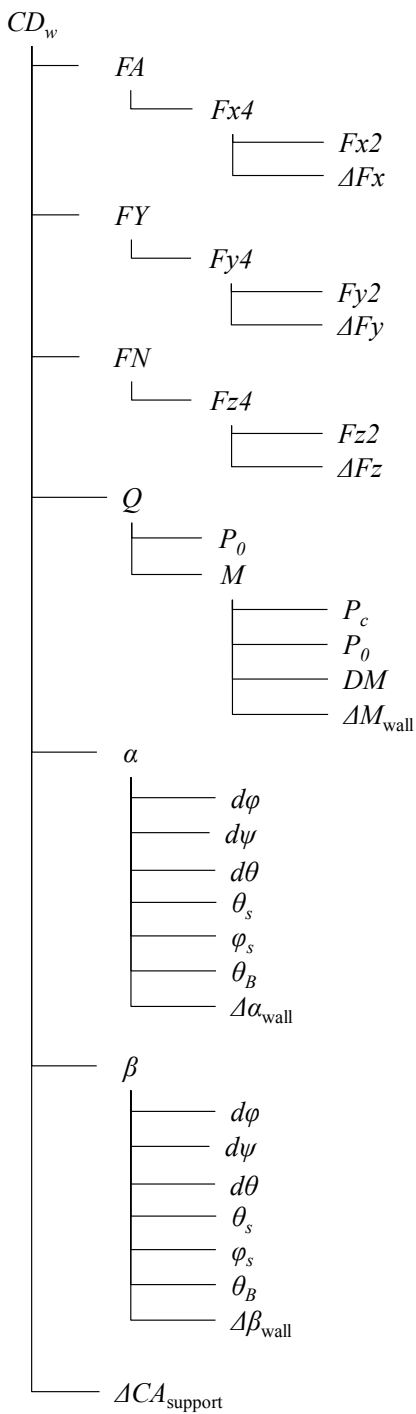


図10  $CD_w$ における親変数→子変数展開構造

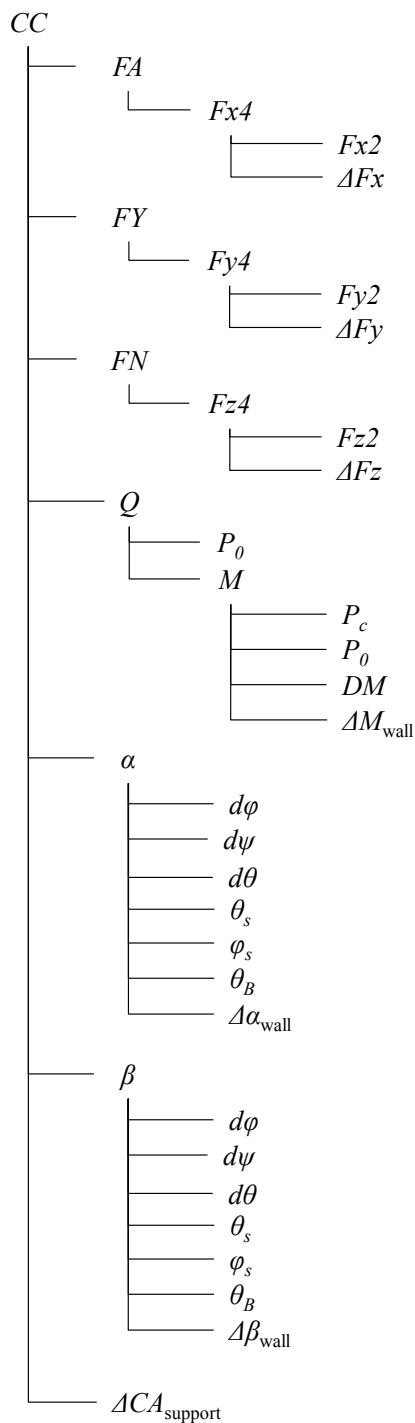


図11  $CC$ における親変数→子変数展開構造

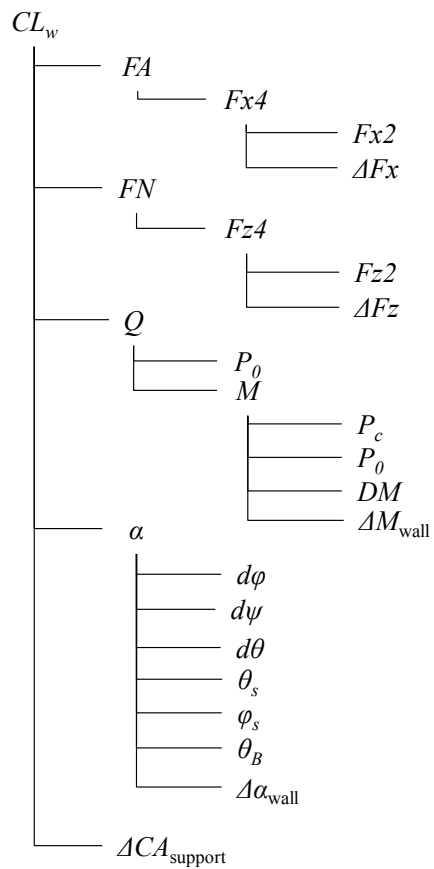


図12  $CL_w$ における親変数→子変数展開構造

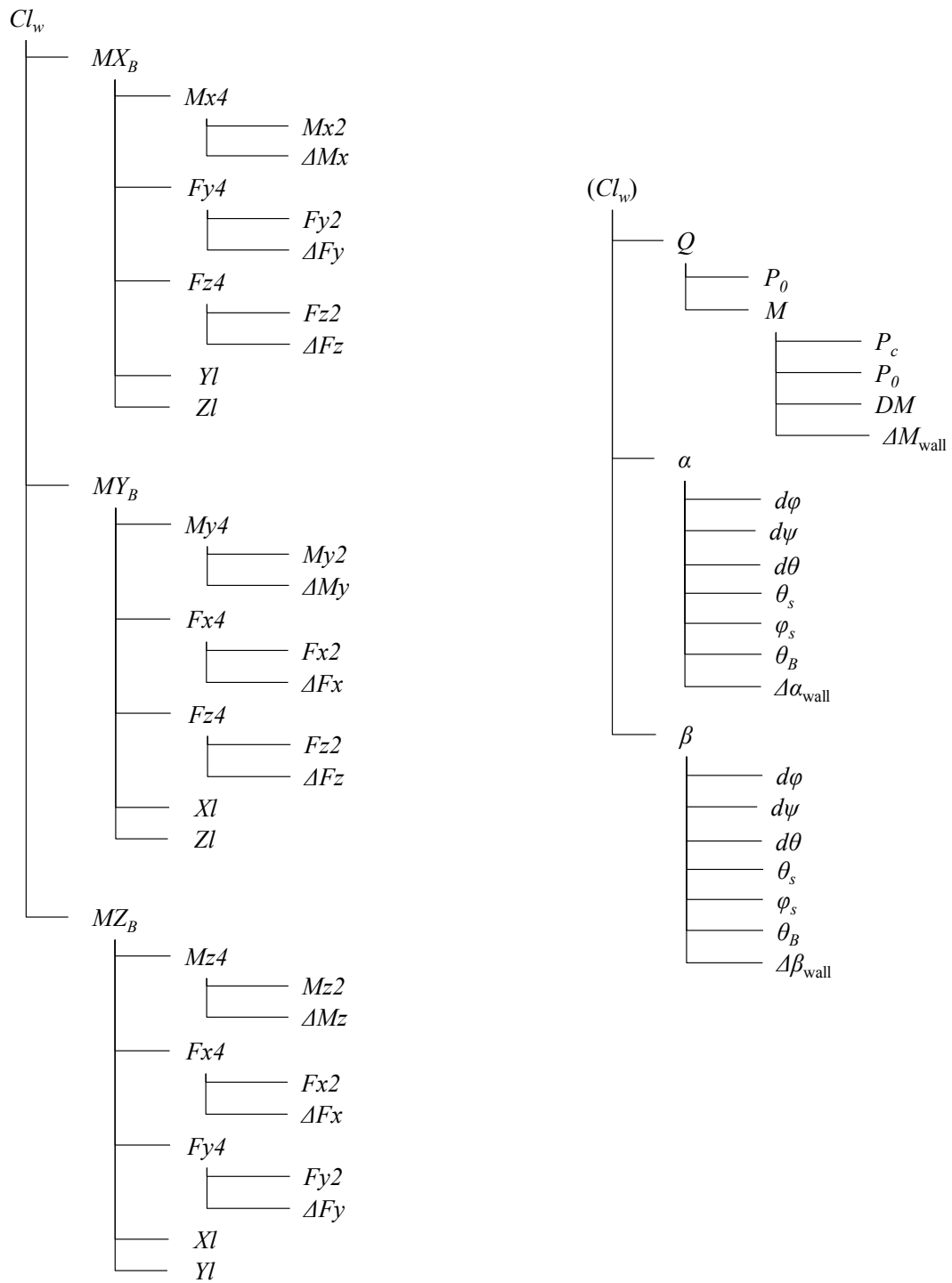


図13  $Cl_w$ における親変数→子変数展開構造

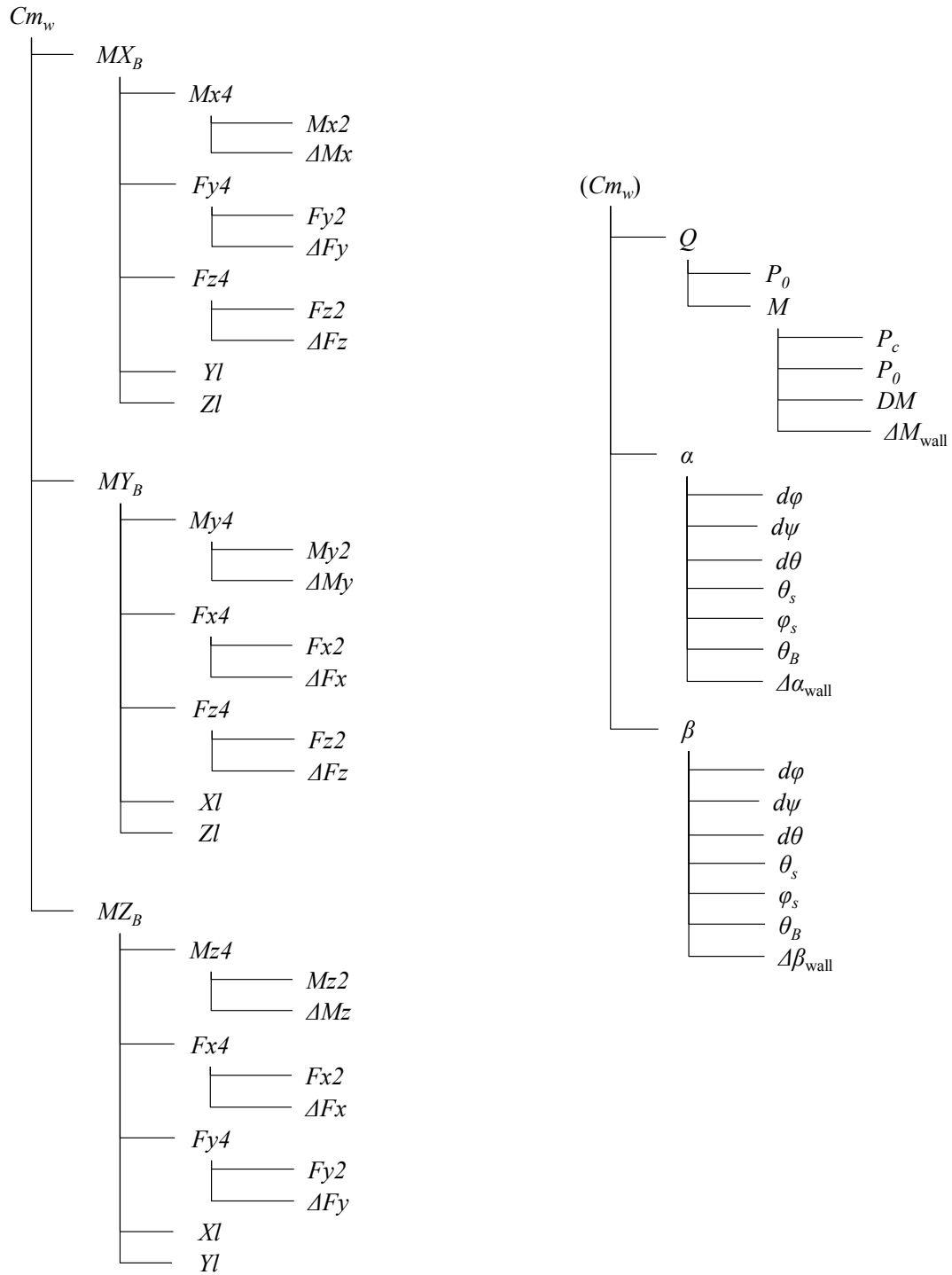


図14  $Cm_w$ における親変数→子変数展開構造

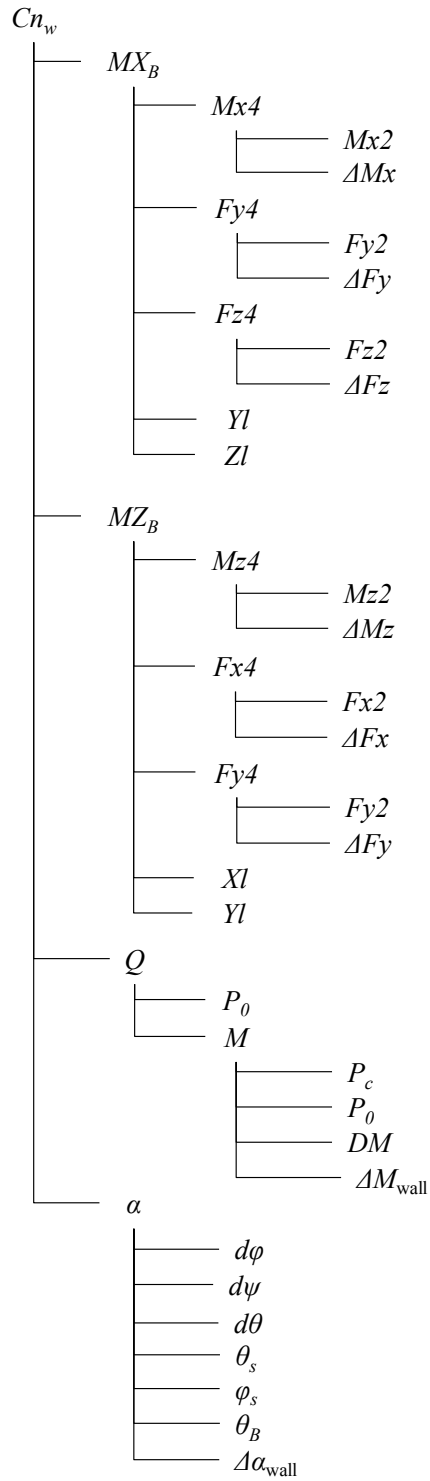


図15  $C_{nw}$ における親変数→子変数展開構造

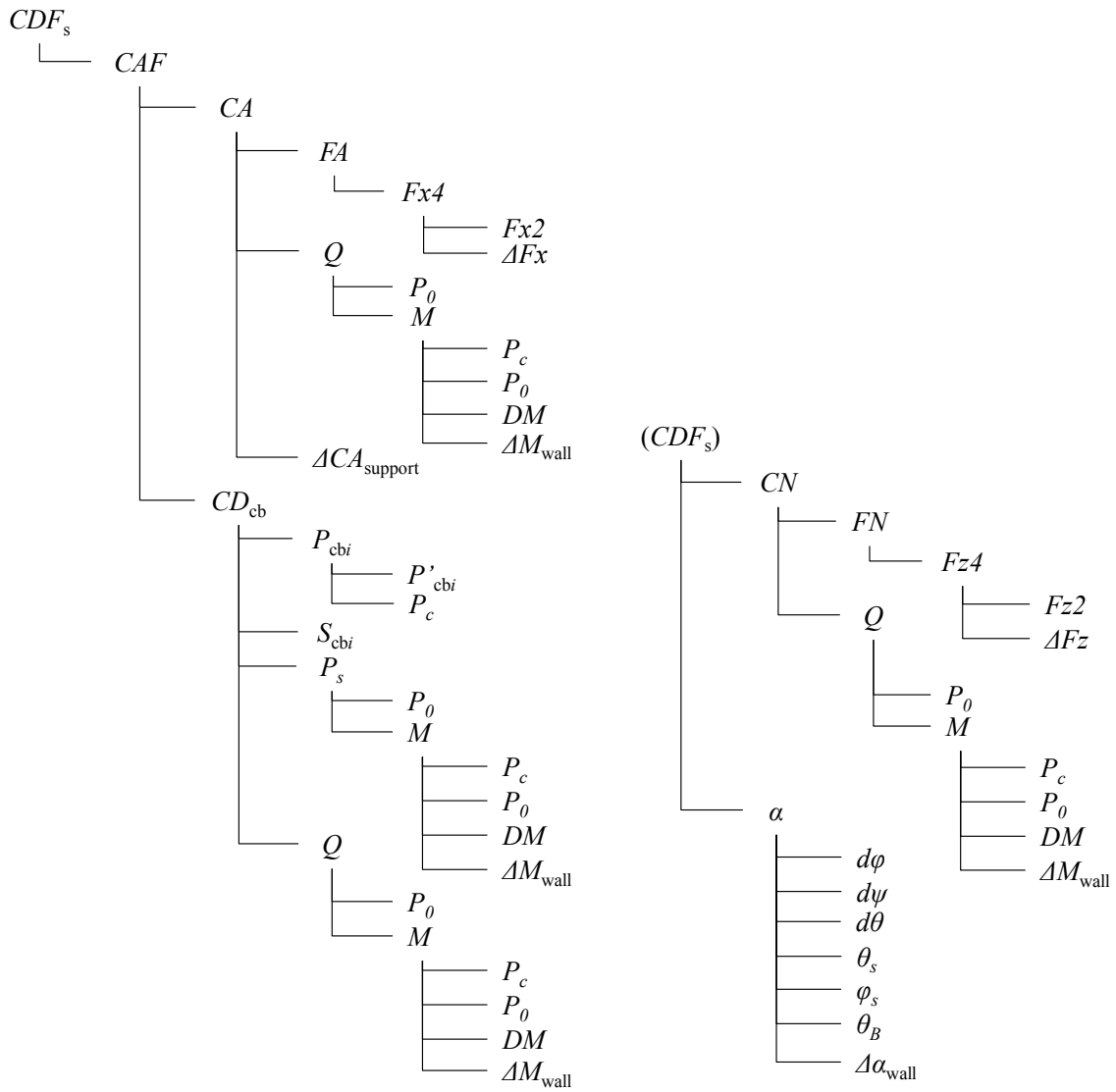


図16  $CDF_s$ における親変数→子変数展開構造 (図1を再掲)

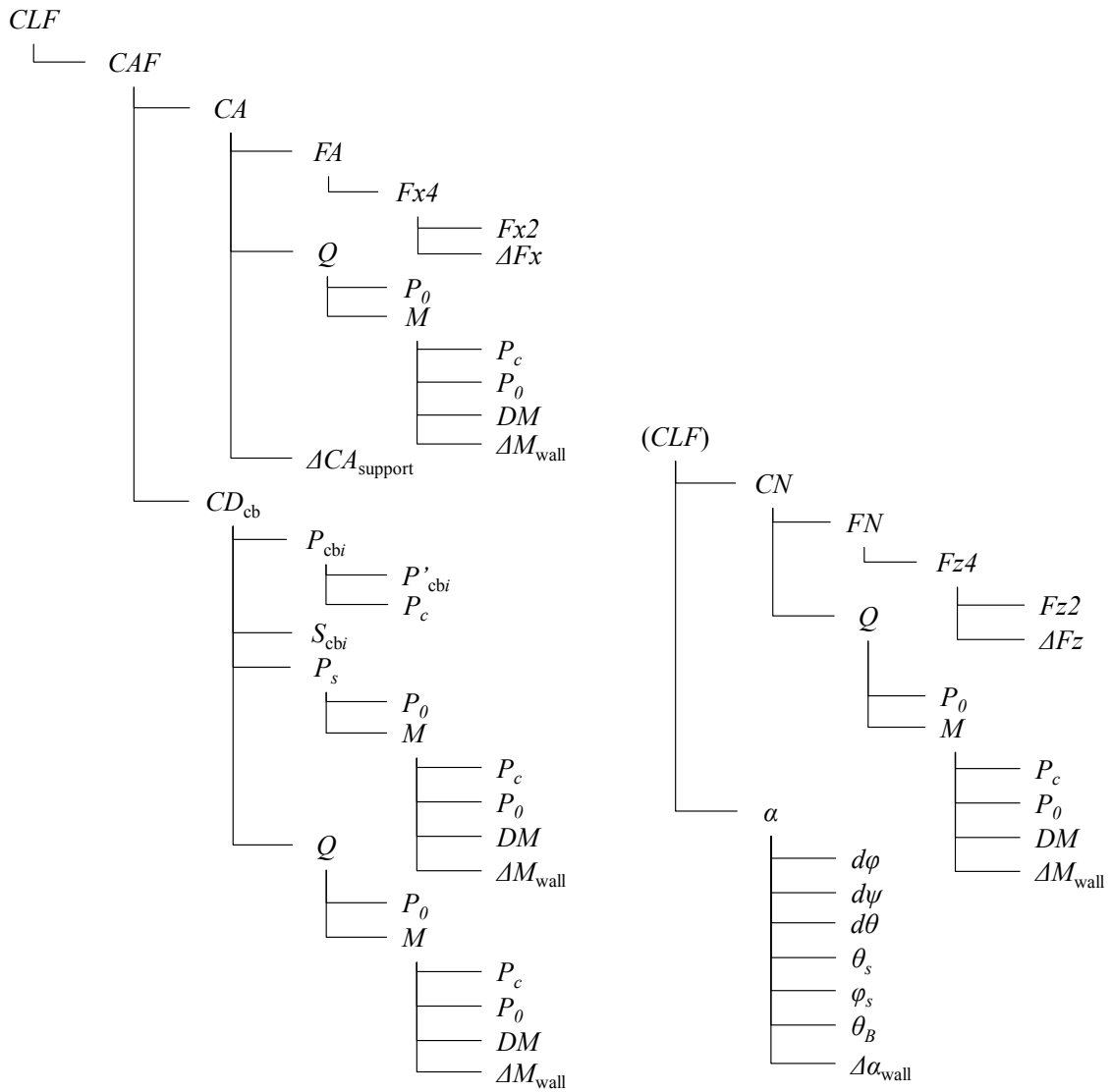


図17 CLFにおける親変数→子変数展開構造



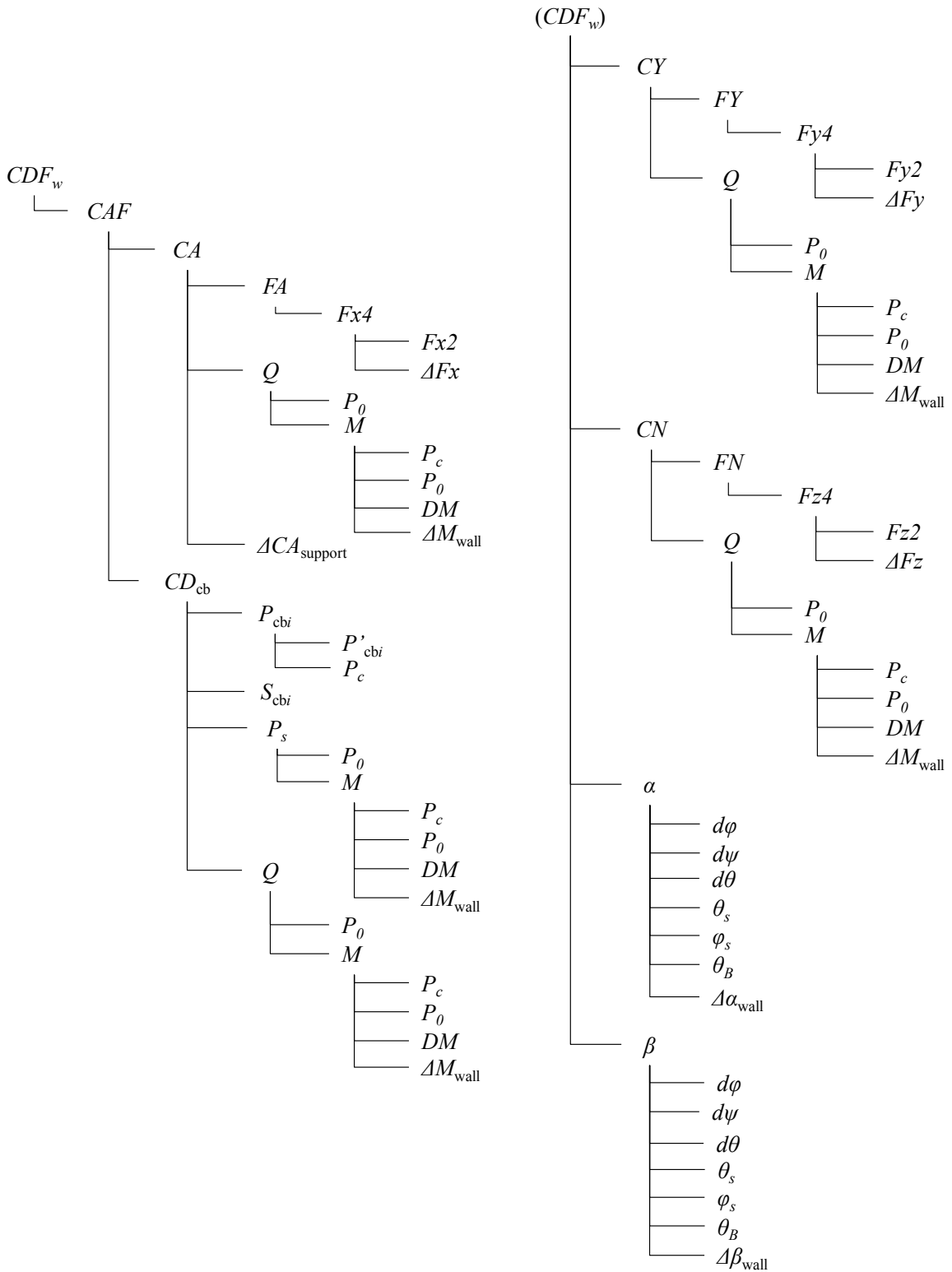


図18  $CDF_w$ における親変数→子変数展開構造

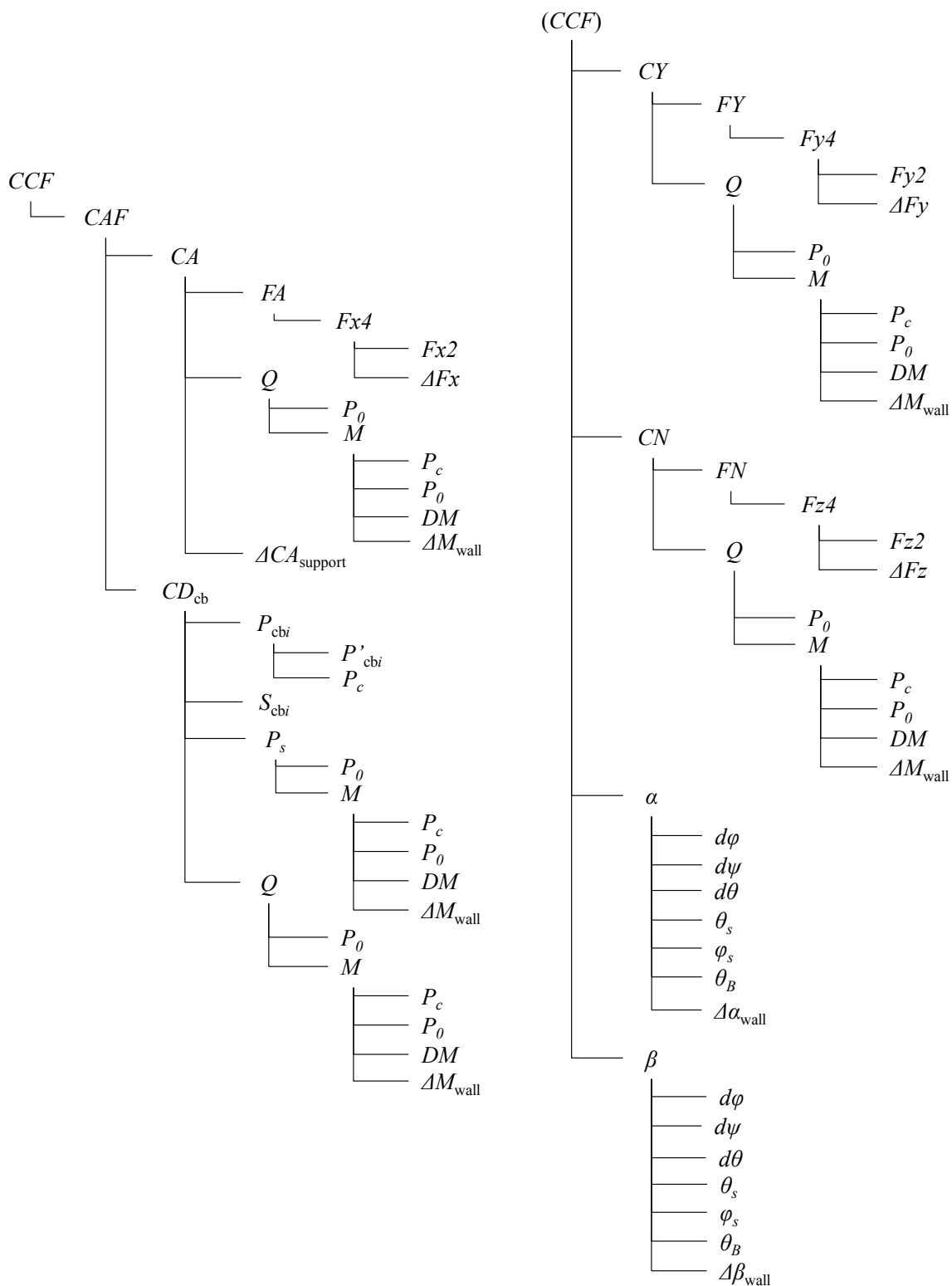


図19 CCFにおける親変数→子変数展開構造

## 4.4 入力パラメータ

本節では不確かさ解析における入力パラメータを示す。

### 4.4.1 制御パラメータ

表2 入力パラメータ (制御パラメータ)

No.	変数名	説明	備考
1	$np2$	ユーザ指定原始変数の総数	3.4節(2)の変数を原始変数にする場合
2	$index\_up[i]$	ユーザ指定原始変数のインデックス	$i=1, \dots, np2$
3	$m$	キャビティ/ベース圧測定点数	キャビティ/ベース圧補正を行わない場合は0とする
4	$eorm$	キャビティ/ベース圧測定におけるESP/マンメータ計測の識別	$eorm=0$ (ESP計測)/1 (マンメータ計測)等

### 4.4.2 模型・天秤諸元情報

表3 入力パラメータ (模型・天秤諸元情報)

No.	変数名	説明	備考
1	$S$	基準面積 [m <sup>2</sup> ]	-
2	$l_R$	ロール基準長 [m]	-
3	$l_P$	縦基準長 [m]	-
4	$l_Y$	横基準長 [m]	-
5	$Xl$	天秤中心からモーメント基準点までのx方向距離(前方が正) [m]	-
6	$Yl$	天秤中心からモーメント基準点までのy方向距離(右方が正) [m]	-
7	$Zl$	天秤中心からモーメント基準点までのz方向距離(上方が正) [m]	-
8	$S_{cbi}$	キャビティ/ベース面積 [m <sup>2</sup> ]	$i = 1 \sim m$ , キャビティ/ベース圧補正を行わない場合は0とする
9	$K_{\psi F_y}$	天秤たわみ係数 [deg/kgf]	$d\phi, d\theta, d\psi$ の算出に必要
10	$K_{\theta F_z}$	天秤たわみ係数 [deg/kgf]	$d\phi, d\theta, d\psi$ の算出に必要
11	$K_{\phi M_x}$	天秤たわみ係数 [deg/kgf-m]	$d\phi, d\theta, d\psi$ の算出に必要
12	$K_{\theta M_y}$	天秤たわみ係数 [deg/kgf-m]	$d\phi, d\theta, d\psi$ の算出に必要
13	$K_{\psi M_z}$	天秤たわみ係数 [deg/kgf-m]	$d\phi, d\theta, d\psi$ の算出に必要
14	$\theta_B$	曲がりスティングのオフセット角 [rad]	現状未使用のパラメータ(0とする)

## 4.4.3 風試データ

表4 入力パラメータ（風試データ）

No.	変数名	説明	備考
1	$M$	気流マッハ数	BALデータのMach
2	$Q$	気流動圧 [Pa]	BALデータのQ
3	$P_0$	集合胴総圧 [Pa]	BALデータのP0
4	$P_c$	プレナム静圧 [Pa]	BALデータのP
5	$\theta_s$	設定ピッチ角 [rad]	BALデータの $\theta_s$
6	$\phi_s$	設定ロール角 [rad]	BALデータの $\phi_s$
7	$\alpha$	迎角 [rad]	BALデータの $\alpha$
8	$\beta$	横滑り角 [rad]	BALデータの $\beta$
9	$CA$	機体軸系軸力係数	BALデータのCA
10	$CY$	機体軸/安定軸系横力係数	BALデータのCY
11	$CN$	機体軸系垂直力係数	BALデータのCN
12	$CAF$	機体軸系フォアボディ軸力係数	BALデータのCAF
13	$Cl_B$	機体軸系ローリングモーメント係数	BALデータのCIB
14	$Cm_B$	機体軸系ピッチングモーメント係数	BALデータのCmB
15	$Cn_B$	機体軸系ヨーイングモーメント係数	BALデータのCnB
16	$CD_s$	安定軸系軸力係数	BALデータのCDS
17	$CL_s$	安定軸系垂直力係数	BALデータのCL
18	$CDF_s$	安定軸系フォアボディ軸力係数	BALデータのCDFS
19	$Cl_s$	安定軸系ローリングモーメント係数	BALデータのCIS
20	$Cm_s$	安定軸系ピッチングモーメント係数	BALデータのCmS
21	$Cn_s$	安定軸系ヨーイングモーメント係数	BALデータのCnS
22	$CLF$	安定軸/風軸系フォアボディ揚力係数	BALデータのCLF
23	$CD_w$	風軸系軸力係数	BALデータのCDW
24	$CC$	風軸系横力係数	BALデータのCC
25	$CL_w$	風軸系垂直力係数	BALデータのCL
26	$CDF_w$	風軸系フォアボディ軸力係数	BALデータのCDFW
27	$Cl_w$	風軸系ローリングモーメント係数	BALデータのCIW
28	$Cm_w$	風軸系ピッチングモーメント係数	BALデータのCmW
29	$Cn_w$	風軸系ヨーイングモーメント係数	BALデータのCnW
30	$CCF$	風軸系フォアボディ横力係数	BALデータのCCF
31	$CD_{cb}$	キャビティ/ベース抗力係数	BALデータのCDcb
32	$Fx2$	物理量変換後天秤出力1 [kgf]	BALデータのFx2
33	$Fy2$	物理量変換後天秤出力2 [kgf]	BALデータのFy2
34	$Fz2$	物理量変換後天秤出力3 [kgf]	BALデータのFz2
35	$Mx2$	物理量変換後天秤出力4 [kgf-m]	BALデータのMx2
36	$My2$	物理量変換後天秤出力5 [kgf-m]	BALデータのMy2
37	$Mz2$	物理量変換後天秤出力6 [kgf-m]	BALデータのMz2
38	$Fx3$	空気力1(たわみ角・ねじり角算出用) [kgf]	BALデータのFx3
39	$Fy3$	空気力2(たわみ角・ねじり角算出用) [kgf]	BALデータのFy3
40	$Fz3$	空気力3(たわみ角・ねじり角算出用) [kgf]	BALデータのFz3

No.	変数名	説明	備考
41	$Mx3$	空気力4(たわみ角・ねじり角算出用) [kgf-m]	BALデータのMx3
42	$My3$	空気力5(たわみ角・ねじり角算出用) [kgf-m]	BALデータのMy3
43	$Mz3$	空気力6(たわみ角・ねじり角算出用) [kgf-m]	BALデータのMz3
44	$Fx4$	空気力1(天秤基準座標系) [kgf]	BALデータのFx4
45	$Fy4$	空気力2(天秤基準座標系) [kgf]	BALデータのFy4
46	$Fz4$	空気力3(天秤基準座標系) [kgf]	BALデータのFz4
47	$Mx4$	空気力4(天秤基準座標系) [kgf-m]	BALデータのMx4
48	$My4$	空気力5(天秤基準座標系) [kgf-m]	BALデータのMy4
49	$Mz4$	空気力6(天秤基準座標系) [kgf-m]	BALデータのMz4
50	$FA$	空気力1(機体軸系) [kgf]	BALデータのFA
51	$FY$	空気力2(機体軸系) [kgf]	BALデータのFY
52	$FN$	空気力3(機体軸系) [kgf]	BALデータのFZ
53	$MX_B$	空気力4(機体軸系) [kgf-m]	BALデータのMXB
54	$MY_B$	空気力5(機体軸系) [kgf-m]	BALデータのMYB
55	$MZ_B$	空気力6(機体軸系) [kgf-m]	BALデータのMZB
56	$Cp_{cbi}$	測定点 <i>i</i> におけるキャビティ/ベース圧力係数	$0 \leq i \leq m$
57	$DM$	補正マッハ数	現状未使用のパラメータ(0とする)
58	$\Delta M_{wall}$	マッハ数に対する風洞壁干渉補正項	現状未使用のパラメータ(0とする)
59	$\Delta \alpha_{wall}$	迎角に対する風洞壁干渉補正項	現状未使用のパラメータ(0とする)
60	$\Delta \beta_{wall}$	横滑り角に対する風洞壁干渉補正項	現状未使用のパラメータ(0とする)
61	$\Delta CA_{support}$	軸力係数に対する支持干渉補正項	現状未使用のパラメータ(0とする)

## 4.4.4 正確度/偶然誤差限界

表5 入力パラメータ（正確度/偶然誤差限界）（1/2）

No.	変数名	分類*	備考
1	$B_{P_0}, P_{P_0}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力
2	$B_{P_c}, P_{P_c}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力
3	$B_{F_{x2}}, P_{F_{x2}}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力
4	$B_{F_{y2}}, P_{F_{y2}}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力
5	$B_{F_{z2}}, P_{F_{z2}}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力
6	$B_{M_{x2}}, P_{M_{x2}}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力
7	$B_{M_{y2}}, P_{M_{y2}}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力
8	$B_{M_{z2}}, P_{M_{z2}}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力
9	$B_{\Delta F_x}, P_{\Delta F_x}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力
10	$B_{\Delta F_y}, P_{\Delta F_y}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力
11	$B_{\Delta F_z}, P_{\Delta F_z}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力
12	$B_{\Delta M_x}, P_{\Delta M_x}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力
13	$B_{\Delta M_y}, P_{\Delta M_y}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力
14	$B_{\Delta M_z}, P_{\Delta M_z}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力
15	$B_{X_l}, P_{X_l}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力
16	$B_{Y_l}, P_{Y_l}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力
17	$B_{Z_l}, P_{Z_l}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力
18	$B_{d\phi}, P_{d\phi}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力
19	$B_{d\psi}, P_{d\psi}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力
20	$B_{d\theta}, P_{d\theta}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力
21	$B_{\theta_s}, P_{\theta_s}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力
22	$B_{\phi_s}, P_{\phi_s}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力
23	$B_{P'_{cbi}}, P_{P'_{cbi}}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力 ( $0 \leq i \leq m$ )
24	$B'_{P'_{cbi}}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力 ( $0 \leq i \leq m$ )
25	$B_{S_{cbi}}, P_{S_{cbi}}$	(1)	デフォルト原始変数として、常に入力 ( $0 \leq i \leq m$ )
26	$B_{DM}, P_{DM}$	(1)	現状未使用のパラメータ(0とする)
27	$B_{\Delta M_{wall}}, P_{\Delta M_{wall}}$	(1)	現状未使用のパラメータ(0とする)
28	$B_{\theta_B}, P_{\theta_B}$	(1)	現状未使用のパラメータ(0とする)
29	$B_{\Delta\alpha_{wall}}, P_{\Delta\alpha_{wall}}$	(1)	現状未使用のパラメータ(0とする)
30	$B_{\Delta\beta_{wall}}, P_{\Delta\beta_{wall}}$	(1)	現状未使用のパラメータ(0とする)
31	$B_{\Delta CA_{support}}, P_{\Delta CA_{support}}$	(1)	現状未使用のパラメータ(0とする)
32	$B_M, P_M$	(2)	通常は0とし、原始変数に指定した場合のみ入力
33	$B_{P_s}, P_{P_s}$	(2)	通常は0とし、原始変数に指定した場合のみ入力
34	$B_Q, P_Q$	(2)	通常は0とし、原始変数に指定した場合のみ入力
35	$B_{F_{x4}}, P_{F_{x4}}$	(2)	通常は0とし、原始変数に指定した場合のみ入力
36	$B_{F_{y4}}, P_{F_{y4}}$	(2)	通常は0とし、原始変数に指定した場合のみ入力
37	$B_{F_{z4}}, P_{F_{z4}}$	(2)	通常は0とし、原始変数に指定した場合のみ入力

表5 入力パラメータ（正確度/偶然誤差限界）（2/2）

No.	変数名	分類*	備考
38	$B_{Mx4}, P_{Mx4}$	(2)	通常は0とし、原始変数に指定した場合のみ入力
39	$B_{My4}, P_{My4}$	(2)	通常は0とし、原始変数に指定した場合のみ入力
40	$B_{Mz4}, P_{Mz4}$	(2)	通常は0とし、原始変数に指定した場合のみ入力
41	$B_{FA}, P_{FA}$	(2)	通常は0とし、原始変数に指定した場合のみ入力
42	$B_{FY}, P_{FY}$	(2)	通常は0とし、原始変数に指定した場合のみ入力
43	$B_{FN}, P_{FN}$	(2)	通常は0とし、原始変数に指定した場合のみ入力
44	$B_{MXB}, P_{MXB}$	(2)	通常は0とし、原始変数に指定した場合のみ入力
45	$B_{MYB}, P_{MYB}$	(2)	通常は0とし、原始変数に指定した場合のみ入力
46	$B_{MZB}, P_{MZB}$	(2)	通常は0とし、原始変数に指定した場合のみ入力
47	$B_{\alpha}, P_{\alpha}$	(2)	通常は0とし、原始変数に指定した場合のみ入力
48	$B_{\beta}, P_{\beta}$	(2)	通常は0とし、原始変数に指定した場合のみ入力
49	$B_{CA}, P_{CA}$	(2)	通常は0とし、原始変数に指定した場合のみ入力
50	$B_{CY}, P_{CY}$	(2)	通常は0とし、原始変数に指定した場合のみ入力
51	$B_{CN}, P_{CN}$	(2)	通常は0とし、原始変数に指定した場合のみ入力
52	$B_{P_{cbi}}, P_{P_{cbi}}$	(2)	通常は0とし、原始変数に指定した場合のみ入力 ( $0 \leq i \leq m$ )
53	$B_{CD_{cb}}, P_{CD_{cb}}$	(2)	通常は0とし、原始変数に指定した場合のみ入力
54	$B_{CAF}, P_{CAF}$	(2)	通常は0とし、原始変数に指定した場合のみ入力

\* 3.4節参照

## 4.5 出力パラメータ

本節では不確かさ解析における出力パラメータを示す。

### 4.5.1 制御変数

表6 出力パラメータ (制御変数)

No.	変数名	説明	備考
1	$np$	原始変数総数	デフォルト変数(の一部) + ユーザ指定変数
2	$index\_p[i]$	原始変数のインデックス	$i = 1, \dots, np$

### 4.5.2 感度係数

以下、 $x_k (k = 1, \dots, np)$ は原始変数を示す。

表7 出力パラメータ (感度係数) (1/2)

No.	変数名	分類*	備考
1	$\partial M / \partial x_k$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、 NANとする**
2	$\partial P_s / \partial x_k$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、 NANとする**
3	$\partial Q / \partial x_k$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、 NANとする**
4	$\partial(Fx4) / \partial x_k$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、 NANとする**
5	$\partial(Fy4) / \partial x_k$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、 NANとする**
6	$\partial(Fz4) / \partial x_k$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、 NANとする**
7	$\partial(Mx4) / \partial x_k$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、 NANとする**
8	$\partial(My4) / \partial x_k$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、 NANとする**
9	$\partial(Mz4) / \partial x_k$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、 NANとする**
10	$\partial(FA) / \partial x_k$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、 NANとする**
11	$\partial(FY) / \partial x_k$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、 NANとする**
12	$\partial(FN) / \partial x_k$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、 NANとする**



表7 出力パラメータ（感度係数）（2/2）

No.	変数名	分類*	備考
13	$\partial(MX_B)/\partial x_k$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする**
14	$\partial(MY_B)/\partial x_k$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする**
15	$\partial(MZ_B)/\partial x_k$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする**
16	$\partial\alpha/\partial x_k$	(2)	自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする***
17	$\partial\beta/\partial x_k$	(2)	自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする***
18	$\partial(CA)/\partial x_k$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする**
19	$\partial(CY)/\partial x_k$	(2)	自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする***
20	$\partial(CN)/\partial x_k$	(2)	自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする***
21	$\partial P_{cbi}/\partial x_k$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする**
22	$\partial(CD_{cb})/\partial x_k$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする**
23	$\partial(CAF)/\partial x_k$	(2)	自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする***
24	$\partial(Cl_B)/\partial x_k$	(3)	-
25	$\partial(Cm_B)/\partial x_k$	(3)	-
26	$\partial(Cn_B)/\partial x_k$	(3)	-
27	$\partial(CD_s)/\partial x_k$	(3)	-
28	$\partial(Cl_s)/\partial x_k$	(3)	-
29	$\partial(Cl_s)/\partial x_k$	(3)	-
30	$\partial(Cm_s)/\partial x_k$	(3)	-
31	$\partial(Cn_s)/\partial x_k$	(3)	-
32	$\partial(CD_w)/\partial x_k$	(3)	-
33	$\partial(CC)/\partial x_k$	(3)	-
34	$\partial(Cl_w)/\partial x_k$	(3)	-
35	$\partial(Cl_w)/\partial x_k$	(3)	-
36	$\partial(Cm_w)/\partial x_k$	(3)	-
37	$\partial(Cn_w)/\partial x_k$	(3)	-
38	$\partial(CDF_s)/\partial x_k$	(3)	-
39	$\partial(CLF)/\partial x_k$	(3)	-
40	$\partial(CDF_w)/\partial x_k$	(3)	-
41	$\partial(CCF)/\partial x_k$	(3)	-

\* 3.4節参照

\*\* 4.3節のツリー構造で第3階層以降に属する変数

\*\*\* 親変数が(3)のみに属する変数

## 4.5.3 正確度/偶然誤差限界/不確かさ幅

表8 出力パラメータ（正確度/偶然誤差限界/不確かさ幅）（1/2）

No.	変数名	分類*	備考
1	$B_M, P_M, U_M$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする**
2	$B_{P_s}, P_{P_s}, U_{P_s}$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする**
3	$B_Q, P_Q, U_Q$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする**
4	$B_{Fx4}, P_{Fx4}, U_{Fx4}$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする**
5	$B_{Fy4}, P_{Fy4}, U_{Fy4}$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする**
6	$B_{Fz4}, P_{Fz4}, U_{Fz4}$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする**
7	$B_{Mx4}, P_{Mx4}, U_{Mx4}$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする**
8	$B_{My4}, P_{My4}, U_{My4}$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする**
9	$B_{Mz4}, P_{Mz4}, U_{Mz4}$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする**
10	$B_{FA}, P_{FA}, U_{FA}$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする**
11	$B_{FY}, P_{FY}, U_{FY}$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする**
12	$B_{FN}, P_{FN}, U_{FN}$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする**
13	$B_{MX_B}, P_{MX_B}, U_{MX_B}$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする**
14	$B_{MY_B}, P_{MY_B}, U_{MY_B}$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする**
15	$B_{MZ_B}, P_{MZ_B}, U_{MZ_B}$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする**
16	$B_\alpha, P_\alpha, U_\alpha$	(2)	自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする***
17	$B_\beta, P_\beta, U_\beta$	(2)	自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする***
18	$B_{CA}, P_{CA}, U_{CA}$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする**
19	$B_{CY}, P_{CY}, U_{CY}$	(2)	自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする***
20	$B_{CN}, P_{CN}, U_{CN}$	(2)	自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする***
21	$B_{P_{cbi}}, P_{P_{cbi}}, U_{P_{cbi}}$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする**
22	$B_{CD_{cb}}, P_{CD_{cb}}, U_{CD_{cb}}$	(2)	親変数または自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする**
23	$B_{CAF}, P_{CAF}, U_{CAF}$	(2)	自変数が原始変数に指定された場合は、NANとする***

表8 出力パラメータ（正確度/偶然誤差限界/不確かさ幅）（2/2）

No.	変数名	分類*	備考
24	$B_{Cl_B}, P_{Cl_B}, U_{Cl_B}$	(3)	-
25	$B_{Cm_B}, P_{Cm_B}, U_{Cm_B}$	(3)	-
26	$B_{Cn_B}, P_{Cn_B}, U_{Cn_B}$	(3)	-
27	$B_{CD_s}, P_{CD_s}, U_{CD_s}$	(3)	-
28	$B_{CL_s}, P_{CL_s}, U_{CL_s}$	(3)	-
29	$B_{Cl_s}, P_{Cl_s}, U_{Cl_s}$	(3)	-
30	$B_{Cm_s}, P_{Cm_s}, U_{Cm_s}$	(3)	-
31	$B_{Cn_s}, P_{Cn_s}, U_{Cn_s}$	(3)	-
32	$B_{CD_w}, P_{CD_w}, U_{CD_w}$	(3)	-
33	$B_{CC}, P_{CC}, U_{CC}$	(3)	-
34	$B_{CL_w}, P_{CL_w}, U_{CL_w}$	(3)	-
35	$B_{Cl_w}, P_{Cl_w}, U_{Cl_w}$	(3)	-
36	$B_{Cm_w}, P_{Cm_w}, U_{Cm_w}$	(3)	-
37	$B_{Cn_w}, P_{Cn_w}, U_{Cn_w}$	(3)	-
38	$B_{CDF_s}, P_{CDF_s}, U_{CDF_s}$	(3)	-
39	$B_{CLF}, P_{CLF}, U_{CLF}$	(3)	-
40	$B_{CDF_w}, P_{CDF_w}, U_{CDF_w}$	(3)	-
41	$B_{CCF}, P_{CCF}, U_{CCF}$	(3)	-

\* 3.4節参照

\*\* 4.3節のツリー構造で第3階層以降に属する変数

\*\*\* 親変数が(3)のみに属する変数

## 5 DAHWINへの実装

前項までで示した風試不確かさ解析処理プログラムはJAXAが開発し、平成25年度より運用を開始している「デジタル/アナログ・ハイブリッド風洞 (DAHWIN)」の一機能である風試不確かさ解析機能として実装されている。本章では、DAHWINにおける風試不確かさ解析の操作概要を示す。

### 5.1 操作概要

DAHWINにおける風試不確かさ解析の操作概要を示す。図20の左側がDAHWINのメイン画面となっており、全ての操作はこの画面を基点に行う。風試不確かさ解析機能を選択し、実行ボタンをクリックすると解析対象を選択する画面 (右上) が起動する。本画面にて対象のランを選択し、実行ボタンをクリックすると入力ファイルを指定する画面 (右下) が起動する。この入力ファイルは3章で議論した測定の正確度・偶然誤差限界を記入したファイルである。ファイルを指定後、Submitボタンをクリックすると後は自動で処理が進む。処理が完了すると、各空力係数の不確かさ幅が出力された画面が表示される。1計測点当たりの処理時間は10秒弱である (この時間はシステムに処理要求を送信してから、結果の出力が完了するまでの時間なので、解析に要している時間はこれよりも短い)。従って、目安として計測点が100点あるランの場合、20分弱で解析が終了する。出力ファイルには感度係数や各空力係数の正確度、偶然誤差限界、不確かさ幅が記録されている。

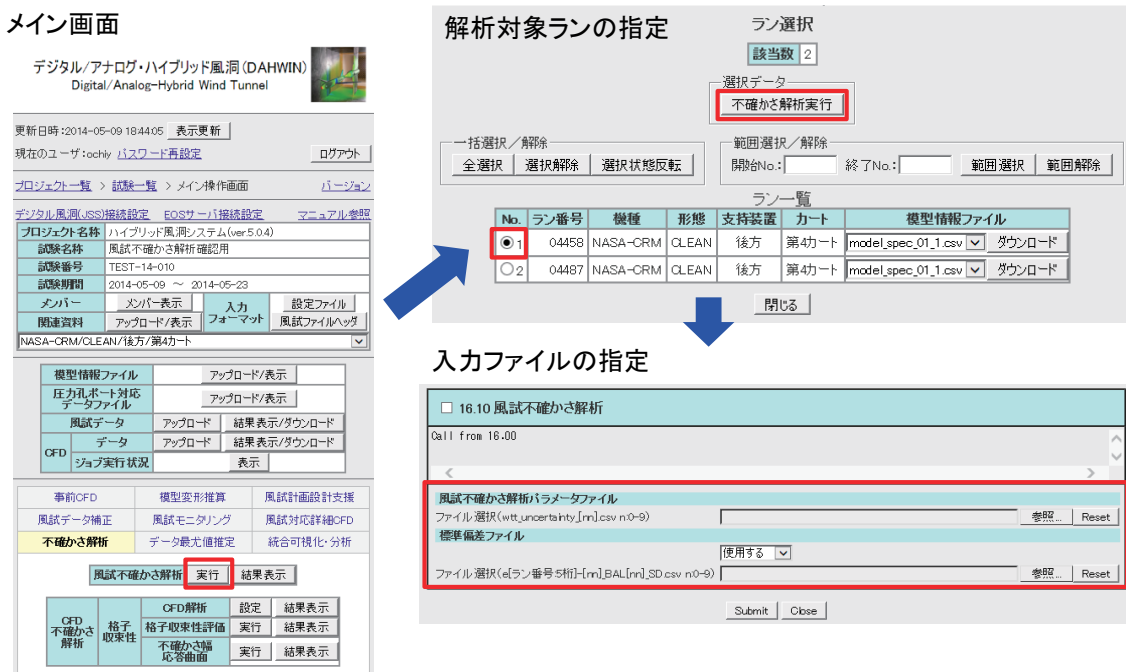


図20 DAHWINにおける風試不確かさ解析操作画面

得られた不確かさ幅は、エラーバーとしてDAHWINが表示する空力係数グラフ上に描画することができる (例えば、後述の図22や図23)。

## 6 不確かさ解析例

### 6.1 試験模型および試験条件

解析事例としてAGARD-B標準模型<sup>7)</sup>を用いたJAXA 2m×2m 遷音速風洞試験（以下、TWT1試験）に対する不確かさ解析結果を示す。比較対象として、同模型によるJAXA 1m×1m 超音速風洞試験（以下、SWT試験）に対する解析結果も示す。図21にAGARD-B模型の概要図を示す。この模型は、主翼が60度の後退角を持つデルタ翼、胴体は尖端部をもつ回転体を有する。全ての寸法が模型胴体直径（ $D$ ）との比で表される。今回、SWT試験では  $D = 75 \text{ mm}$  の胴体直径の模型（以下、D75 模型）を、TWT1試験で  $D = 100 \text{ mm}$  の胴体直径の模型（以下、D100 模型）を使用した。

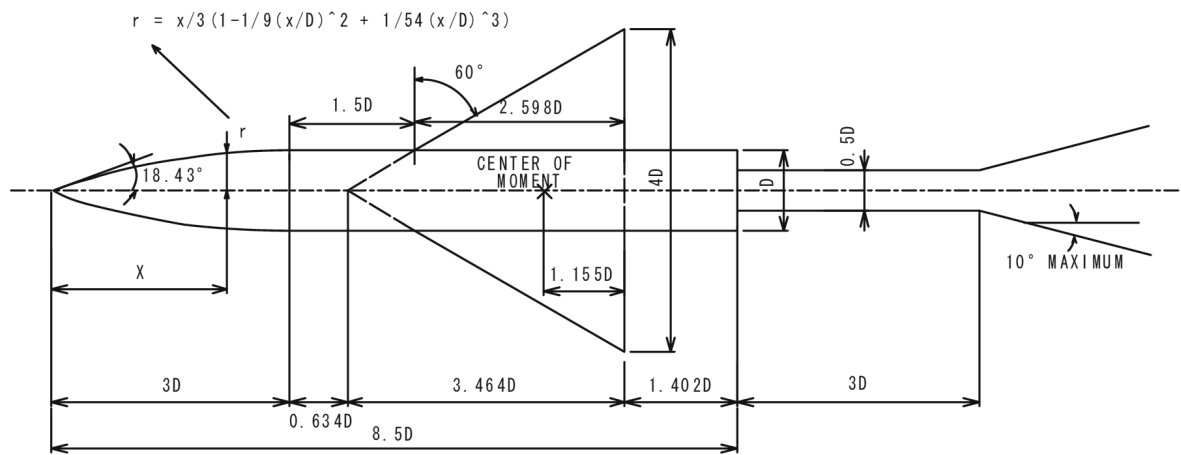


図21 AGARD-B 標準模型概要図<sup>8)</sup>

SWT試験条件は、マッハ数1.4、風洞総圧は150kPa、迎角0度から9.5度の範囲で5点計測を行った。TWT1試験条件は、マッハ数0.6から1.4、風洞総圧は80kPa、迎角 -8度から15度の範囲で35点計測を行い、カートは多孔壁カートを使用した。

### 6.2 不確かさ解析条件

不確かさ解析は前述の全計測点（SWT試験：5点、TWT1試験：35点）それぞれに対して実施した。原始変数として与えた入力パラメータおよびその正確度と偶然誤差限界の値を表9（SWT試験）および表10（TWT1試験）に示す。ただし、TWT1試験における天秤出力値（ $F_x2$ ,  $F_y2$ ,  $F_z2$ ,  $M_x2$ ,  $M_y2$ ,  $M_z2$ ）の偶然誤差限界については、計測点毎に標準偏差値を2倍した値に置き換えたものを使用した（表10の値は迎角2.018度の計測点における値を示す）。

補正マッハ数 $DM$ について、SWT試験では、ピトーレークを用いた気流検定試験により求めた。詳細な算出方法は参考文献5) 3.1節あるいは参考文献6) II.B.に記載されているが、気流マッハ数 $M_w$ 、ピトーレークの各点におけるマッハ数 $M$ 、マッハ数の空間分布による精密度 $S_{\text{space}}$ を基に $DM$ の正確度 $B_{DM}$ 及び偶然誤差限界 $P_{DM}$ を設定した（式(251), (252)）。ただし、本解析ではTWT1試験に対する解析結果と比較することを想定していたので、正確度 $B_{DM}$ における空間分布寄与（ $S_{\text{space}}$ ）は無視した。

$$B_{DM} = \left( B_{M_w}^2 + B_M^2 - 2 \cdot B'_{M_w} \cdot B'_M + (2 \cdot S_{\text{space}})^2 \right)^{1/2} \quad (250)$$

$$P_{DM} = (P_{M_w}^2 + P_M^2)^{1/2} \quad (251)$$

一方、TWT1試験については、対応したマッハ数の空間分布データが存在しないため、本解析ではTWT1試験におけるDMの正確度と偶然誤差限界は暫定的にゼロとした。SWT試験とTWT1試験の結果を適切に比較するためには、TWT1試験におけるDMも考慮する必要がある。しかしながら、DMの正確度と偶然誤差限界を算出するためには大規模な空間分布測定試験が必要となるが、本解析で対象としたマッハ数1.4以下ではピトーレークによる空間分布測定の精度が悪化するという問題もあり、測定が実施されていないのが現状である。

超音速領域では支持装置部の静圧勾配がほぼなく、支持干渉はほぼないと考えたので、軸力係数に対する支持干渉補正項  $\Delta CA_{\text{support}}$  はゼロとした。また、模型のプロジェクティビティ比が比較的小さいので、壁干渉の補正量も小さいと推測されることから、マッハ数に対する壁干渉補正項  $\Delta M_{\text{wall}}$  もゼロとした。

表9および表10の入力データを基にDAHWIN (5.1節) を使用して不確かさ解析を行った。解析結果として計測点単位の制御変数 (表6)、感度係数 (表7) および正確度/偶然誤差限界/不確かさ幅 (表8) を得た。

表9 SWT試験における入力パラメータ

項目	記号	正確度	偶然誤差限界
集合胴総圧[Pa]	$P_0$	1.5000E+02	1.5800E+02
プレナム静圧[Pa]	$P_c$	3.5000E+01	8.8000E+00
物理量変換後天秤出力 (天秤基準座標系x方向荷重)[kgf]	$F_{x2}$	6.1651E-03	4.8951E-02
物理量変換後天秤出力 (天秤基準座標系y方向荷重)[kgf]	$F_{y2}$	3.0276E-02	1.1475E-01
物理量変換後天秤出力 (天秤基準座標系z方向荷重)[kgf]	$F_{z2}$	3.8835E-02	1.6716E-01
物理量変換後天秤出力 (天秤基準座標系x軸回りモーメント)[kgf-m]	$M_{x2}$	1.6127E-03	4.7121E-03
物理量変換後天秤出力 (天秤基準座標系y軸回りモーメント)[kgf-m]	$M_{y2}$	7.8415E-03	5.7436E-03
物理量変換後天秤出力 (天秤基準座標系z軸回りモーメント)[kgf-m]	$M_{z2}$	6.2774E-03	5.4607E-03
自重補正量 (天秤基準座標系x方向荷重)[kgf]	$\Delta F_x$	-4.7829E-03	2.3112E-03
自重補正量 (天秤基準座標系y方向荷重)[kgf]	$\Delta F_y$	-5.7130E-03	6.3240E-03
自重補正量 (天秤基準座標系z方向荷重)[kgf]	$\Delta F_z$	-7.3153E-04	6.1544E-03
自重補正量 (天秤基準座標系x軸回りモーメント)[kgf-m]	$\Delta M_x$	4.6800E-05	1.5425E-04
自重補正量 (天秤基準座標系y軸回りモーメント)[kgf-m]	$\Delta M_y$	-2.0992E-04	3.3898E-04
自重補正量 (天秤基準座標系z軸回りモーメント)[kgf-m]	$\Delta M_z$	-2.1533E-04	3.3316E-04
天秤中心からモーメント基準点までの x方向距離[mm]	$X_l$	6.0000E-02	6.8800E+00
天秤中心からモーメント基準点までの y方向距離[mm]	$Y_l$	5.0000E-02	1.0000E-01
天秤中心からモーメント基準点までの z方向距離[mm]	$Z_l$	5.0000E-02	1.0000E-01
ロール方向たわみ補正量[deg]	$d\Phi$	0.0000E+00	0.0000E+00
ヨー方向たわみ補正量[deg]	$d\phi$	0.0000E+00	0.0000E+00
ピッチ方向たわみ補正量[deg]	$d\theta$	1.0000E-02	2.0000E-02
設定ピッチ角[deg]	$\theta_s$	1.4142E-02	2.8284E-02
設定ロール角[deg]	$\Phi_s$	1.0000E-02	2.0000E-02
補正マッハ数[-]	$DM$	3.7483E-03	1.6280E-03
軸力係数に対する支持干渉補正項	$\Delta CA_{\text{support}}$	0.0000E+00	0.0000E+00
マッハ数に対する壁干渉補正項	$\Delta M_{\text{wall}}$	0.0000E+00	0.0000E+00
測定点iにおけるキャビティ/ベース圧 (ESP/マンメータ計測値)[Pa]	$P^{cbi}$	3.5228E+01	2.8000E+01
測定点iにおけるキャビティ/ベース圧 (ESP/マンメータ計測値)の相関正確度[Pa]	$P^{cbi'}$	3.5228E+01	-
キャビティ/ベース面積[mm <sup>2</sup> ]	$S_{cbi}$	0.0000E+00	0.0000E+00

表10 TWT1試験における入力パラメータ

項目	記号	正確度	偶然誤差限界
集合胴総圧[Pa]	$P_0$	3.2000E+00	2.2600E+00
プレナム静圧[Pa]	$P_c$	3.2000E+00	8.9700E-01
物理量変換後天秤出力 (天秤基準座標系x方向荷重)[kgf]	$F_{x2}$	3.9000E-02	7.1600E-03
物理量変換後天秤出力 (天秤基準座標系y方向荷重) [kgf]	$F_{y2}$	1.4400E-01	9.0400E-02
物理量変換後天秤出力 (天秤基準座標系z方向荷重) [kgf]	$F_{z2}$	1.9200E-01	4.3400E-02
物理量変換後天秤出力 (天秤基準座標系x軸回りモーメント) [kgf-m]	$M_{x2}$	1.0800E-02	4.8000E-04
物理量変換後天秤出力 (天秤基準座標系y軸回りモーメント) [kgf-m]	$M_{y2}$	1.9000E-02	5.7200E-03
物理量変換後天秤出力 (天秤基準座標系z軸回りモーメント) [kgf-m]	$M_{z2}$	6.4500E-03	1.4340E-02
自重補正量 (天秤基準座標系x方向荷重) [kgf]	$\Delta F_x$	7.5000E-03	2.2900E-02
自重補正量 (天秤基準座標系y方向荷重) [kgf]	$\Delta F_y$	-7.0100E-03	5.7800E-02
自重補正量 (天秤基準座標系z方向荷重) [kgf]	$\Delta F_z$	-1.0200E-02	1.0300E-01
自重補正量 (天秤基準座標系x軸回りモーメント) [kgf-m]	$\Delta M_x$	2.1400E-03	4.9800E-03
自重補正量 (天秤基準座標系y軸回りモーメント) [kgf-m]	$\Delta M_y$	-1.4700E-02	6.9700E-02
自重補正量 (天秤基準座標系z軸回りモーメント) [kgf-m]	$\Delta M_z$	2.7600E-04	4.0800E-02
天秤中心からモーメント基準点までの x方向距離[mm]	$X_l$	2.0000E-01	0.0000E+00
天秤中心からモーメント基準点までの y方向距離[mm]	$Y_l$	2.0000E-01	0.0000E+00
天秤中心からモーメント基準点までの z方向距離[mm]	$Z_l$	2.0000E-01	0.0000E+00
ロール方向たわみ補正量[deg]	$d\Phi$	0.0000E+00	0.0000E+00
ヨー方向たわみ補正量[deg]	$d\phi$	0.0000E+00	0.0000E+00
ピッチ方向たわみ補正量[deg]	$d\theta$	2.0000E-02	1.8300E-02
設定ピッチ角[deg]	$\theta_s$	1.0000E-02	4.8500E-03
設定ロール角[deg]	$\Phi_s$	1.0000E-02	3.3100E-02
補正マッハ数[-]	$DM$	0.0000E+00	0.0000E+00
軸力係数に対する支持干渉補正項	$\Delta CA_{\text{support}}$	0.0000E+00	0.0000E+00
マッハ数に対する壁干渉補正項	$\Delta M_{\text{wall}}$	0.0000E+00	0.0000E+00
測定点iにおけるキャビティ/ベース圧 (ESP/マンメータ計測値)[Pa]	$P'_{cbi}$	4.0965E+01	7.5522E+00
測定点iにおけるキャビティ/ベース圧 (ESP/マンメータ計測値)の相関正確度[Pa]	$P'_{cbi'}$	4.0965E+01	-
キャビティ/ベース面積[mm <sup>2</sup> ]	$Sc_{bi}$	0.0000E+00	0.0000E+00



### 6.3 不確かさ解析結果

図22はCDFs-CLFのグラフで、CLF=0近傍を拡大したのが図23である。不確かさ幅はエラーバーとして表示さる。なお、CLFについてもエラーバーは表示しているが、縦軸のスケールに対して小さいので画像上では見づらくなっている。CDFsの不確かさは迎角 $\alpha$ が2度付近にて、SWT試験の場合5.2カウント（1カウント=0.0001）、TWT1試験の場合2.4カウント程度である（詳細は表11を参照）。迎角 $\alpha$ の不確かさ幅は両試験とも0.03度程度であった。

SWT試験とTWT1試験のCDFsに差が生じるのはラフネス付加抵抗が主要な原因と考えられる。図22及び図23はラフネス付加抵抗に対して補正を行っていないが、このラフネス付加抵抗を簡便に補正する手法について参考文献9)にて提案されている。補正後の両風洞の結果は、不確かさの範囲内での一致が見られた。

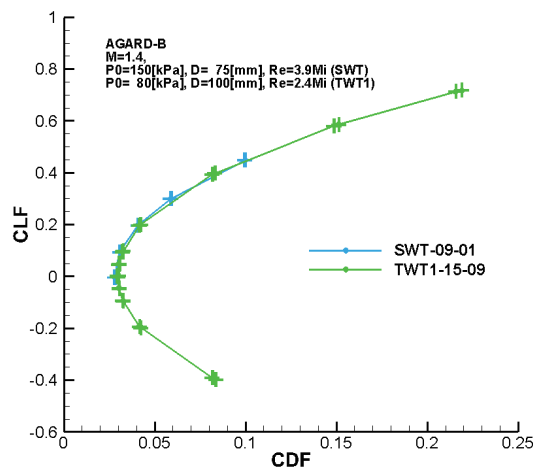


図22 安定軸系フォアボディ軸力係数 (CDFs) の不確かさ幅

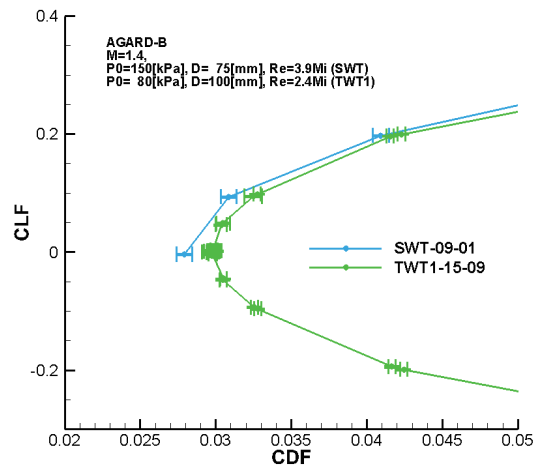


図23 安定軸系フォアボディ軸力係数 (CDFs) の不確かさ幅 (拡大図)

表11は両試験における安定軸系フォアボディ軸力係数 (CDFs) の正確度と偶然誤差限界を迎角 $\alpha \approx 2$ 度の場合について示したものである。

表11 安定軸系フォアボディ軸力係数 (CDFs) の正確度と偶然誤差限界

試験	$\alpha$ [deg]	CDFs	正確度	偶然誤差限界	不確かさ幅
SWT試験	2.055	3.0870E-02	4.4199E-04	2.7676E-04	5.2148E-04
TWT1試験	2.018	3.2748E-02	2.1665E-04	1.0596E-04	2.4117E-04

表11より、CDFsの不確かさ幅はSWT試験では約5.2カウントであるのに対し、TWT1試験では約2.4カウントとなり、SWT試験の方が約2.1倍大きい。正確度、偶然誤差限界に着目すると、SWT試験の方がそれぞれ2.0倍程度、2.6倍程度大きい。

そこで、正確度と偶然誤差限界に有意な差異が発生した原因を探るため、各測定量の正確度と偶然誤差限界が空力係数 (CDFs) の正確度と偶然誤差限界にどの程度寄与しているのかについて分析した。図24は、横軸に測定量、縦軸に感度と正確度の二乗平方根をとり、各測定量の正確度の寄与を示したグラフである。本グラフよりSWT試験では補正マッハ数  $DM$  の寄与が最も大きく、約4.3カウント分寄与しているのがわかる。次にプレナム静圧  $P_c$ 、総圧  $P_0$  がそれぞれ約0.6カウント、約0.3カウント寄与している。

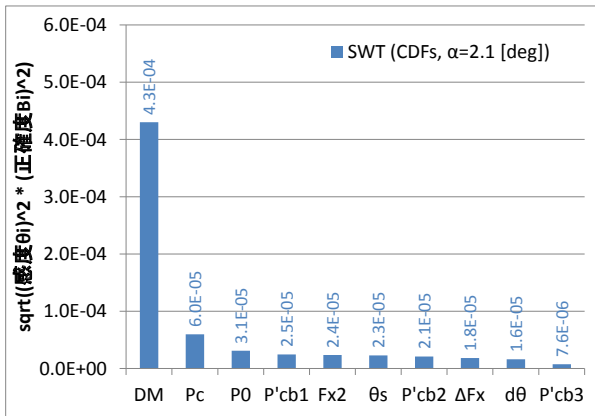


図24 安定軸系フォアボディ軸力係数 (CDFs) に対する測定量の寄与度 (SWT試験、正確度)

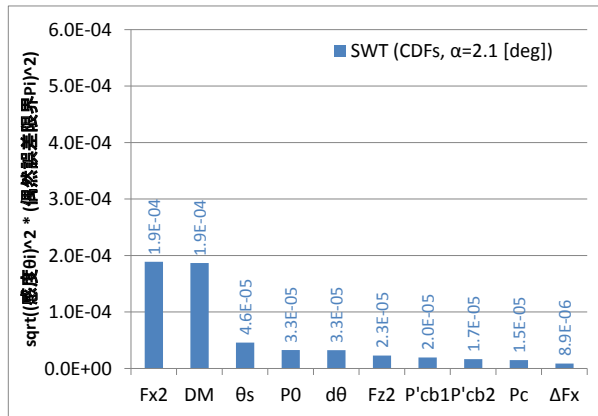


図25 安定軸系フォアボディ軸力係数 (CDFs) に対する測定量の寄与度 (SWT試験、偶然誤差限界)

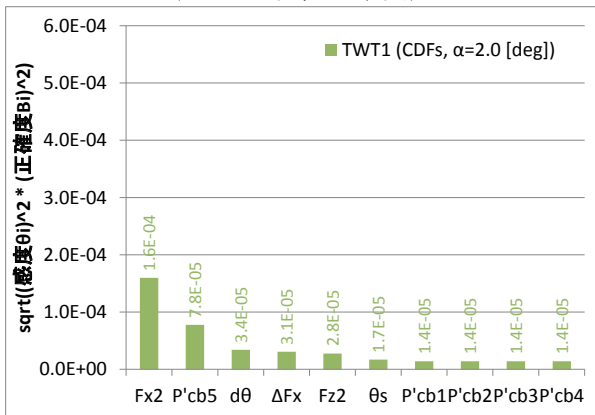


図26 安定軸系フォアボディ軸力係数 (CDFs) に対する測定量の寄与度 (TWT1試験、正確度)

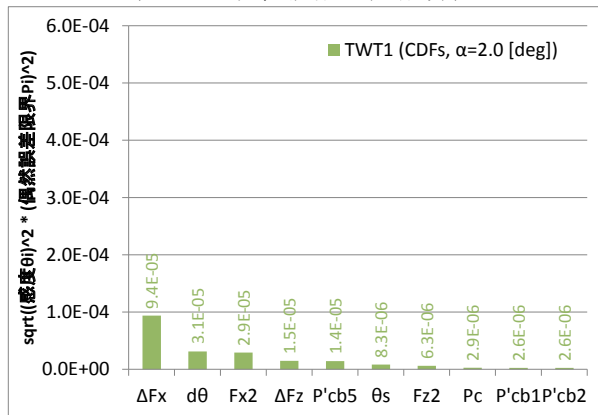


図27 安定軸系フォアボディ軸力係数 (CDFs) に対する測定量の寄与度 (TWT1試験、偶然誤差限界)

図25は、縦軸に感度と偶然誤差限界の二乗和平方根をとり、各測定量の偶然誤差限界の寄与を示したグラフである。本グラフよりSWT試験では天秤出力Fx2と補正マッハ数DMの寄与が最も大きく、共に約1.9カウント分寄与している。次に設定ピッチ角θs、総圧P0、ピッチ方向たわみ補正量dθがそれぞれ約0.5カウント、約0.3カウント、約0.3カウント分寄与している。

図26はTWT1試験における各正確度の寄与比較である。天秤出力Fx2の寄与が最も大きく、約1.6カウント分寄与しており、次にキャビティ/ベース圧計測値P'cb5、ピッチ方向たわみ補正量dθ、自重補正量ΔFxがそれぞれ約0.8カウント、0.3カウント、0.3カウント分寄与している。

図27はTWT1試験における各偶然誤差限界の寄与比較である。自重補正量ΔFxの寄与が最も大きく、約0.9カウント分寄与している。次にピッチ方向たわみ補正量dθ、天秤出力Fx2、がそれぞれ約0.3カウント分寄与している。

補正マッハ数DMについては、前項で述べた通り、本解析ではTWT1試験におけるDMの正確度と偶然誤差限界は暫定的にゼロとした。しかしながら、参考文献6)で指摘されているように、気流の非一様性が超音速風洞試験の支配的な不確かさである。従って、TWT1試験においても実際はDMの寄与が最も大きいと予想される。TWT1試験の不確かさは、気流一様性をDMの不確かさとして考慮していない分、不確かさ幅を過小評価している可能性が大きい。

一方、総圧P0の寄与について、原始変数として入力した正確度と偶然誤差限界はSWT試験の場合それぞれ150 Pa、158 Paであるのに対し、TWT1試験ではそれぞれ3.2 Pa、2.3 Paで

あり、正確度はSWT試験の方が約47倍、偶然誤差限界はSWT試験の方が約69倍大きい。このことがSWT試験において総圧 $P_0$ による空力係数への寄与が大きくなった原因と考えられる。そもそも、SWT試験にて使用している圧力センサ (GE Druck PMP4010) のレンジは、高マッハ数試験に対応した1400 kPaであるのに対し、TWT1試験の圧力センサ (Fluke RPM4) のレンジは160 kPaである。このようにレンジが1桁異なることが、原始変数として入力した総圧 $P_0$ の正確度と偶然誤差限界の差につながったと考えられる。

天秤出力 $F_{x2}$ の寄与について、原始変数として入力した正確度と偶然誤差限界はSWT試験の場合それぞれ0.0062 kgf、0.049 kgfであるのに対し、TWT1試験ではそれぞれ0.039 kgf、0.0072 kgfであり、正確度はTWT1試験の方が約6.3倍、偶然誤差限界はSWT試験の方が約6.8倍大きい。このため、 $F_{x2}$ による寄与の大きさについて試験間で顕著な差異が発生したと考えられる。

自重補正量 $\Delta F_x$ の寄与について、原始変数として入力した正確度と偶然誤差限界はSWT試験の場合それぞれ0.0048 kgf、0.0023 kgfであるのに対し、TWT1試験ではそれぞれ0.0075 kgf、0.023 kgfであり、正確度はTWT1試験の方が約1.6倍大きいだけだが、偶然誤差限界はTWT1試験の方が約9.9倍大きい。このため、 $\Delta F_x$ による寄与の大きさについて特に偶然誤差限界において試験間で顕著な差異が発生したと考えられる。

なお、SWT試験で使用している天秤(日章 LMC-6522 #13、直径 38.0 mm)の秤量は $F_x=800$  N であるが、400 N フルスケールで較正を行っている。TWT1試験で用いている天秤(MHI 温度センサ付き 6 分力天秤 52MT6、直径 52.0 mm)の秤量は $F_x=670$  N である。

## 7 結言

風洞試験における測定量の誤差（不確かさ）から空力係数等の誤差（不確かさ）を効率的に算出するための風試不確かさ解析プログラムを開発した。本プログラムにより、各測定量の不確かさと天秤計測値を入力条件として与えるだけで自動的に感度係数および空力係数の不確かさを算出できるようになった。

本プログラムが実装された「デジタル/アナログ・ハイブリッド風洞（DAHWIN）」を使用し、AGARD-B標準模型を用いたJAXA 2m×2m遷音速風洞（TWT1）試験に対する不確かさ解析を実施した。本解析により迎角 $\alpha \simeq 2$ 度の場合、安定軸系フォアボディ軸力係数（CDFs）の不確かさ幅はJAXA 1m×1m超音速風洞（SWT）試験では約5.2カウントであるのに対し、TWT1試験では約2.4カウントとなった。CDFsの正確度、偶然誤差限界はSWT試験の方がそれぞれ2.0倍程度、2.6倍程度大きい結果となり、その原因を分析したところ、入力値とした測定量（特に補正マッハ数 $DM$ 、総圧 $P0$ ）の正確度と偶然誤差限界の大きさの違いが寄与していることが明らかとなった。

このように一部入力データに不足があるものの、本プログラム自体は実際の風洞試験結果に対して不確かさ解析を効率的に実施可能であることが確かめられたことから、今後も本プログラムを様々な風洞試験に適用する予定である。

## 謝辞

AGARD-B模型によるJAXA 2m×2m遷音速風洞試験に対する不確かさ解析を実施するにあたり、JAXA 航空技術部門 空力技術研究ユニットの渡邊篤史氏、知念大実氏には、測定量の不確かさを取得するための計測を別途実施して頂きました。また、不確かさ解析プログラムの作成は三菱スペース・ソフトウェア株式会社、DAHWINへの実装は株式会社菱友システムズにそれぞれ担当頂きました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) JCGM: “Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement”, JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor corrections, 2008.
- 2) JCGM: “International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM 3rd edition)”, JCGM 200:2012, 2008 version with minor corrections, 2012.
- 3) アメリカ機械学会編, 日本機械学会訳: “アメリカ国家規格, 計測の不確かさ”, アメリカ機械学会性能試験規約, 計測機器および試験装置に関する補則, 第1部, アメリカ規格協会, アメリカ機械学会性能試験規約ANSI/ASME PTC19.1-1985, 丸善, 東京, 1987.
- 4) AIAA: “Assessment of Experimental Uncertainty with Application to Wind Tunnel Testing”, AIAA S071A-1999, 1999.
- 5) 永井伸治, 飯島秀俊, 神田宏, 渡辺光則, 佐藤衛: “超音速風洞での空力係数の不確かさ”, 日本航空宇宙学会論文集 Vol. 54, No. 634, pp.485-491, 2006.
- 6) S. Nagai, H. Iijima: “Uncertainty Identification of Supersonic Wind-Tunnel Testing”, Journal of Aircraft, Vol. 48, No. 2, pp. 567-577, 2011.
- 7) Hills, R. (ed.): “A Review of Measurement on AGARD Calibration Models,” AGARDograph 64, 1961, Part 3.
- 8) 飯島秀俊, 渡辺光則, 神田宏, 佐藤衛, 永井伸治, 鈴木教雄: “超音速風洞におけるAGARD-B標準模型3分力試験”, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, JAXA-RR-06-046, 2007.
- 9) 飯島秀俊, 野口正芳, 永井伸治, 西島寛典, 木村毅: “JAXA遷・超音速風洞におけるラフネス付加抵抗の補正法について”, 第49回飛行機シンポジウム講演集, JSASS-2011-5171, 2011.

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-16-001

JAXA Research and Development Memorandum

JAXA 2m×2m 遷音速風洞における風試不確かさ解析

Uncertainty Analysis of Wind Tunnel Test in the JAXA 2m × 2m Transonic Wind Tunnel

---

発行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL: <http://www.jaxa.jp/>

発行日 平成28年10月20日

電子出版制作 松枝印刷株式会社

©2016 JAXA

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。

Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

---

