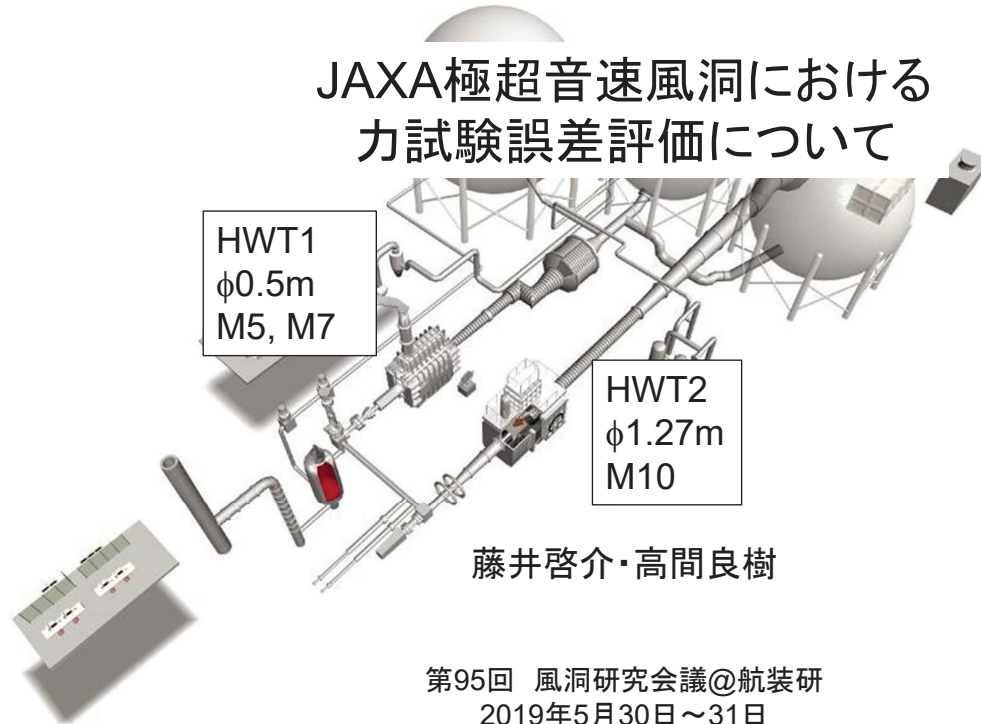




JAXA極超音速風洞における 力試験誤差評価について



1



経緯



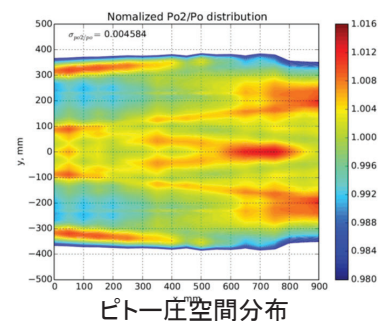
これまでの空力係数 C_X に関する誤差評価:

$$\delta C_X = \underbrace{\frac{\partial C_X}{\partial F_X} \delta F_X + \frac{\partial C_X}{\partial p_o} \delta p_o + \frac{\partial C_X}{\partial T_o} \delta T_o \left(+ \frac{\partial C_X}{\partial p_b} \delta p_b \right)}_{\text{センサ等の計測系誤差(精度)}} + \underbrace{\frac{\partial C_X}{\partial M_\infty} \delta M_\infty}_{\text{動圧推定誤差}}$$

**気流特性の誤差
(空間分布と計測誤差)**

- 標準模型での繰り返し試験において、
想定以上の空力係数のバラつきを確認。
風洞気流の再現性に関して調査した結果、
一定値を仮定していた一様流Mach数が
都度変化していることを確認。

気流較正試験結果から



2



経緯



$$C_x = \frac{F, M}{qS(L)}$$



$F, M=0$ の状況では、 q が変化しても影響ない...



トリム角などの誤差は天秤計測誤差のみが反映
(現実には気流分布の影響が大きいケースもある)



空間分布の空力特性への影響を
適切に評価する必要性。

- 標準模型での繰り返し試験において、
想定以上の空力係数のバラつきを確認。

風洞気流の再現性に関して調査した結果、
一定値を仮定していた一様流Mach数が
都度変化していることを確認。

ピトー圧の変動
- 気流関連誤差は、動圧誤差のため、
0近傍の誤差の評価につながらない。

空間分布の空力特性への影響を
適切に評価する必要性。

2023/4/17

3



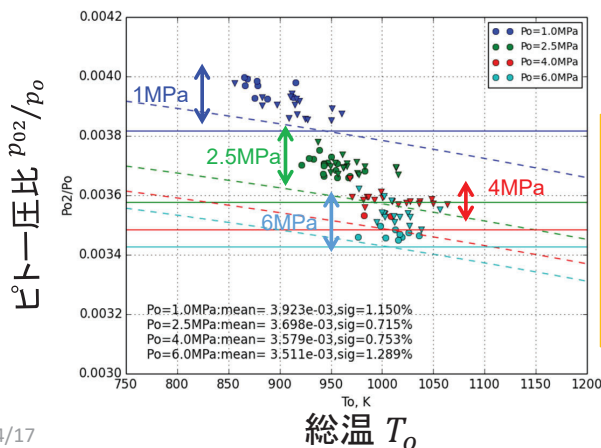
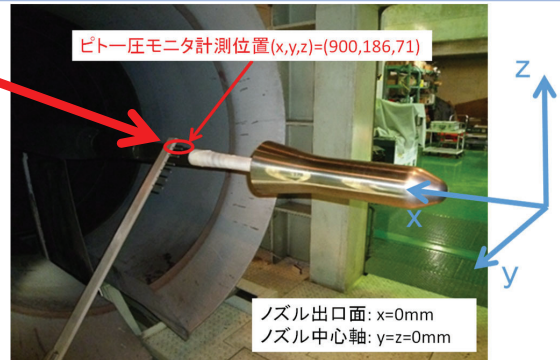
ピトー圧変動誤差について



気流健全性確認の目的で、
ピトー圧のモニタ計測を実施(模型投入前)。

得られたピトー圧比は、

- 較正試験結果より高い値
- バラつきは $1\sigma = 1\%$ 程度
- 試験キャンペーン毎に偏る



- ピトー圧比変動による
空力係数誤差を見積もること。
- モニター計測している
ピトー圧を用いて誤差低減すること。

2023/4/17

4



ピトー圧変動誤差の評価



計測量 (F_X, p_o など) と仮定量 (p_{02}/p_o) で、空力係数誤差 (δC_X) を表すために

$M_\infty \left(\frac{p_{02}}{p_o} \right), q \left(\frac{p_{02}}{p_o}, p_o \right), p_\infty \left(\frac{p_{02}}{p_o}, p_o \right)$ を ‘定義’ し、

p_{02}/p_o の誤差を、**仮定に伴う誤差**と、**計測誤差**とに分離する:

$$\begin{aligned} \text{誤差} \quad \delta \frac{p_{02}}{p_o} &= \left(\frac{p_{02}}{p_o} \right)_A - \left(\frac{p_{02}}{p_o} \right)_0 \\ &= \left\{ \left(\frac{p_{02}}{p_o} \right)_A - \frac{p_{02}}{p_o} \right\} + \left\{ \frac{1}{p_o} \delta p_{02} - \frac{p_{02}}{p_o^2} \delta p_o \right\} \\ &\quad \text{仮定値} \quad \text{計測値} \qquad \qquad \qquad \text{計測誤差} \end{aligned}$$

仮定に伴う誤差 $\equiv \delta^* \frac{p_{02}}{p_o}$

2023/4/17

5



前面軸力係数におけるバラツキの予測



$$\begin{aligned} \sigma_{C_{AF}}^2 &= \frac{\partial C_{AF}^2}{\partial F_A} \sigma_{\delta F_A}^2 + \frac{\partial C_{AF}^2}{\partial p_b} \sigma_{\delta p_b}^2 + \frac{\partial C_{AF}^2}{\partial (p_{02}/p_o)} \sigma_{\delta^* \frac{p_{02}}{p_o}}^2 + \frac{\partial C_{AF}^2}{\partial \alpha_p} \sigma_{\alpha_p}^2 \\ &\quad \text{空力係数のバラツキ} \quad \text{天秤精度} \quad \text{ベース圧計測精度} \quad \text{ピトー圧比のバラツキ} \quad \text{比のバラツキ} \\ &\quad + \left(\frac{\partial C_{AF}}{\partial p_o} - \frac{p_{02}}{p_o^2} \frac{\partial C_{AF}}{\partial (p_{02}/p_o)} \right)^2 \sigma_{\delta p_o}^2 + \left(\frac{1}{p_o} \frac{\partial C_{AF}}{\partial (p_{02}/p_o)} \right)^2 \sigma_{\delta p_{02}}^2 \\ &\qquad \qquad \qquad \text{p}_o \text{計測精度} \qquad \qquad \qquad \text{p}_{02} \text{計測精度} \end{aligned}$$

- 従来处理 (M 一定仮定) では、 $\sigma_{\delta^* \frac{p_{02}}{p_o}}$ を過去試験結果から求め、誤差評価。
- 低減処理 (p_{02}/p_o で修正) では、1通風中の $\sigma_{\delta^* \frac{p_{02}}{p_o}}$ 変動として、誤差評価。

C_{AF} を例とし、これまで実施されてきたHB2標準模型試験結果による検証をする。

2023/4/17

6



バラつきによる誤差評価法有効性確認



$\sigma_{C_{AF}}$ 評価に用いたHB2標準模型試験と、条件別通風数

| 試験 | Po=1MPa | Po=2.5MPa | Po=4MPa | Po=6MPa |
|----------|---------|-----------|---------|---------|
| HWT18-51 | 7 | 7 | 0 | 8 |
| HWT17-53 | 2 | 2 | 5 | 1 |
| HWT17-52 | 12 | 2 | 0 | 4 |
| HWT16-04 | 6 | 0 | 0 | 4 |
| HWT16-03 | 9 | 2 | 0 | 6 |
| HWT15-53 | 7 | 8 | 15 | 6 |

迎角 $\alpha=0\text{deg}$ での前面軸力係数 C_{AF} における「データばらつき」で
実験結果と、積み上げによる予測とを比較する...

2023/4/17

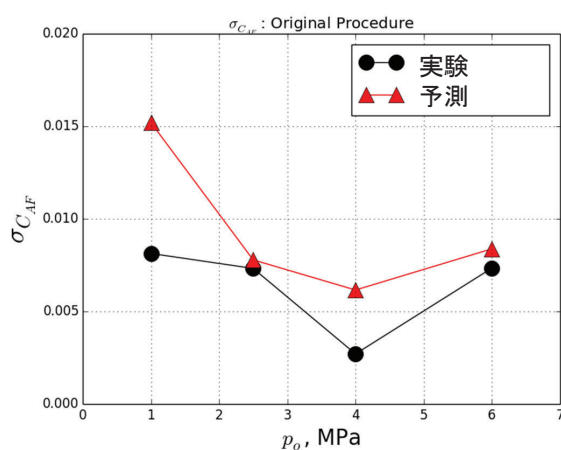
7



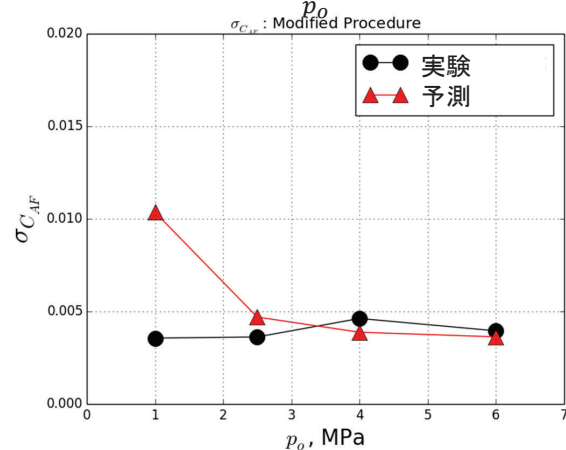
$C_{AF}:\alpha=0\text{deg}$ バラつきによる誤差評価法有効性確認



従来手法: M 一定を仮定



低減手法: $\frac{p_{02}}{p_o}$ で M を修正



- $\sigma_{C_{AF}}$ 実験結果と、積み上げによる予測とは概ね一致、
評価法の有効性を確認できた。
- $\frac{p_{02}}{p_o}$ による誤差低減手法の有効性を確認できる。
- $p_o=1\text{MPa}$ における実験と予測との不一致は天秤精度の過大評価の可能性
- $p_o=4\text{MPa}$ における低い実験値は単一キャンペーンに集中したことが原因か...

2023/4/17

8

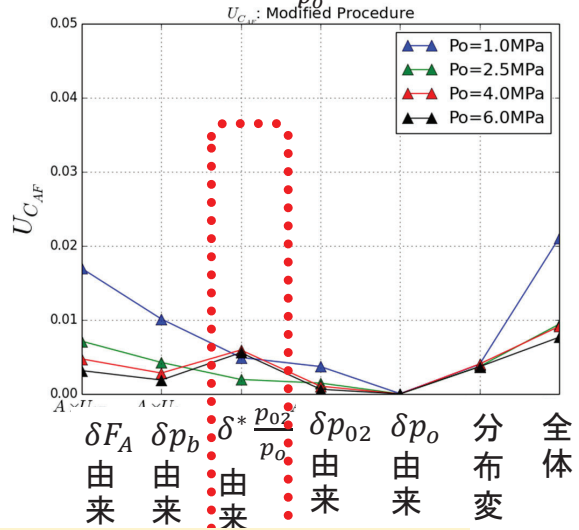
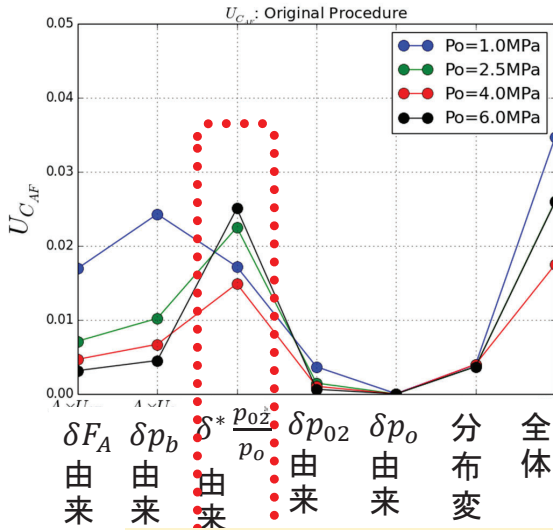


不確かさ予測



従来手法: M 一定を仮定

低減手法: $\frac{p_{02}}{p_0}$ で M を修正



- これまでは $\frac{p_{02}}{p_0}$ 変動に起因する不確かさが支配的であった。
- 低減手法により=1MPaでは天秤精度・計測精度が支配的、
 - 他条件では天秤精度、 $\frac{p_{02}}{p_0}$ 変動に依存

2023/4/17

9



経緯(再び...)



これまでの空力係数 C_X に関する誤差評価:

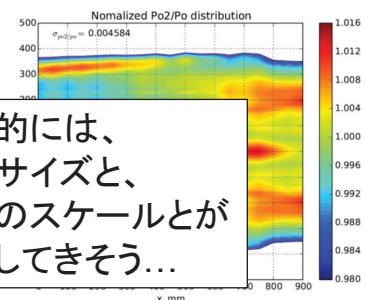
$$\delta C_X = \underbrace{\frac{\partial C_X}{\partial F_X} \delta F_X + \frac{\partial C_X}{\partial p_0} \delta p_0 + \frac{\partial C_X}{\partial T_0} \delta T_0 \left(+ \frac{\partial C_X}{\partial p_b} \delta p_b \right)}_{\text{センサ等の計測系誤差(精度)}} + \underbrace{\frac{\partial C_X}{\partial M_\infty} \delta M_\infty}_{\text{動圧推定誤差}}$$

気流特性の誤差 (空間分布と計測誤差)

- 標準モデルでの繰り返し試験において、想定以上の空力係数のバラつきを確認。風洞気流の再現性に関して調査した結果、一定値を仮定していた一様流Mach数が都度変化していることを確認。

- 気流関連誤差は、動圧誤差のため、0近傍の誤差の評価につながらない。
空間分布の空力特性への影響を適切に評価する必要性。

気流較正試験結果から



直感的には、
 模型サイズと、
 分布のスケールとが
 関係してきそう...

2023/4/17

10



気流非一様性効果の直感的予想...



| | | |
|------------------------------------|--|--------------------------------|
| 波数が小さい $\alpha L \ll 2\pi$ | | 空気力 : おそらく最大 空力モーメント : 0に収束 |
| 波数がほどほど $\alpha L \approx 2\pi$ | | 空気力 : 小 空力モーメント : おそらく最大 |
| 波数が大きい $\alpha L \gg 2\pi$ | | 空気力 : 0に収束 空力モーメント : 0に収束 |

模型サイズ(形状)と、気流分布の波数に依存

2023/4/17

11



気流非一様性効果の予測(1)



空力モデル: 局所動圧と、圧力係数の積が局所圧力となると仮定。

$$f(x_o) = \int_S q_f(x + x_o) C_p(x) ds$$

x : 模型座標
 x_o : 模型位置(風洞座標)

知りたい量は、...模型位置 x_o が変化したときの空気力 $f(x_o)$ の標準偏差

$$\sigma_f^2 = \frac{1}{V_o} \int_{V_o} \begin{pmatrix} (f_x(x_o) - \bar{f}_x)^2 \\ (f_y(x_o) - \bar{f}_y)^2 \\ (f_z(x_o) - \bar{f}_z)^2 \end{pmatrix} dv_{x_o} \approx \sum_{k,l,m} \begin{pmatrix} \left| \frac{F_x \ k,l,m}{N_1 N_2 N_3} \right|^2 \\ \left| \frac{F_y \ k,l,m}{N_1 N_2 N_3} \right|^2 \\ \left| \frac{F_z \ k,l,m}{N_1 N_2 N_3} \right|^2 \end{pmatrix}$$

$$\approx \sum_{k,l,m} \left| \frac{Q_{k,l,m}}{N_1 N_2 N_3} \right|^2 \begin{pmatrix} |f_{C,x}|^2 \\ |f_{C,y}|^2 \\ |f_{C,z}|^2 \end{pmatrix}$$

気流分布psd

$$f_C = \sum_{i_o} C_{p,i_o} e^{-i(\alpha_{k,l,m} x_{i_o})} \Delta S_{i_o}$$

模型情報: STLなどで?

2023/4/17

12



気流非一様性効果の予測(2)



WINTEC

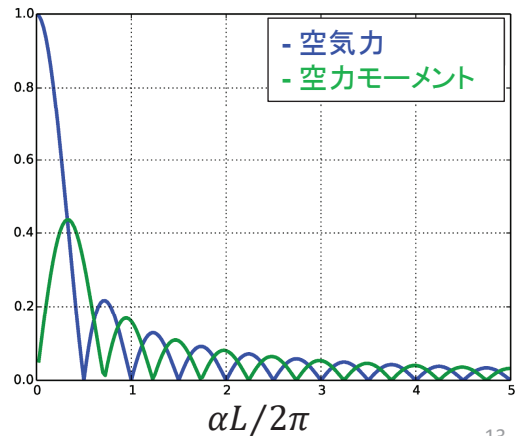
同様に空力モーメントに関しても、

$$\sigma_m^2 \approx \sum_{k,l,m} \begin{pmatrix} \left| \frac{M_x k,l,m}{N_1 N_2 N_3} \right|^2 \\ \left| \frac{M_y k,l,m}{N_1 N_2 N_3} \right|^2 \\ \left| \frac{M_z k,l,m}{N_1 N_2 N_3} \right|^2 \end{pmatrix} \approx \sum_{k,l,m} \left(\frac{Q_{k,l,m}}{N_1 N_2 N_3} \right)^2 \begin{pmatrix} |m_{c,x}|^2 \\ |m_{c,y}|^2 \\ |m_{c,z}|^2 \end{pmatrix},$$

気流分布psd

$$m_c = \sum_{i_0} C_{p,i_0} e^{-i(\alpha_{k,l,m} x_{i_0})} (x_{i_0} - x_{CM}) \times \Delta S_{i_0}$$

模型情報: STLなどで?



仮に、直方体形状、Cp=1の場合、
解析的に求めることができ、
空気力、空力モーメントは波数に依存

2023/4/17

13



気流非一様性効果予測の検証



WINTEC

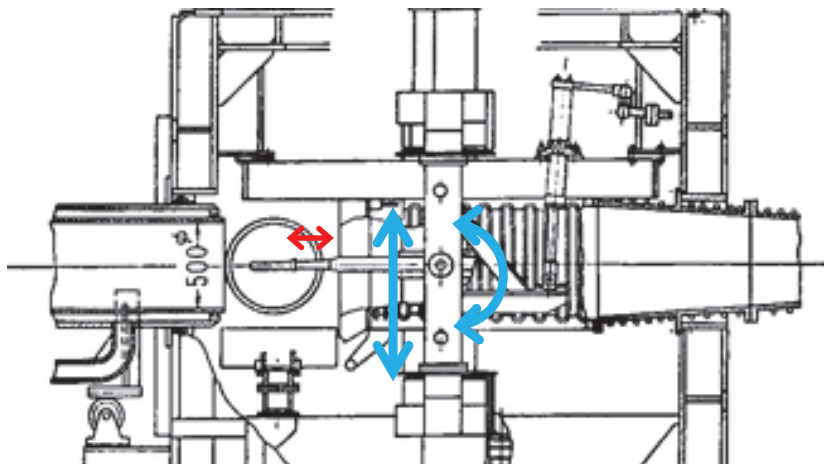
試験設備 : 0.5m極超音速風洞、M5ノズル

模型・形態 : HB-2 (D=48mm)

／20deg曲リスティング・直スティング

気流条件 : M=5.1, p₀=1MPa, α=-20deg~40deg

スティングポッド位置: 25mm~225mm (4段階)

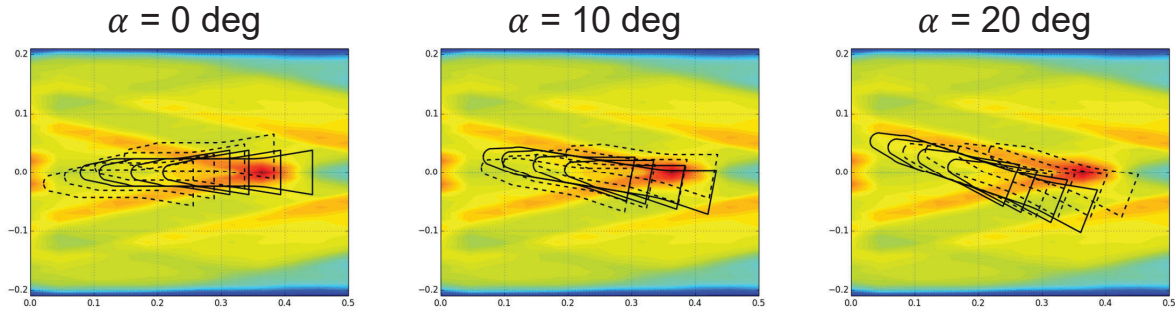


2023/4/17

14



気流非一様性効果予測の検証



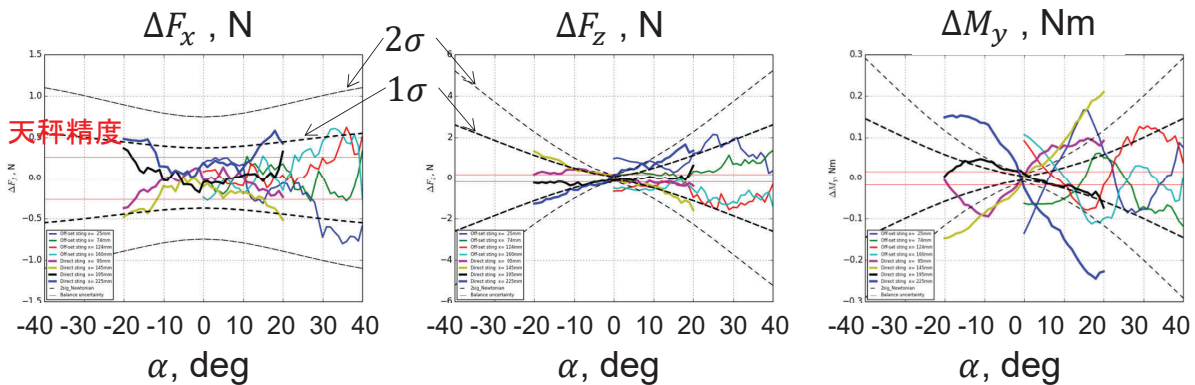
- 動圧分布の影響が現れると予想される領域をカバーしているよう...
- 各迎角における平均値からの差として空力偏差(有次元)を整理。

2023/4/17

15



気流非一様性効果予測の検証



- 各迎角における平均値からの差として空力偏差(有次元)を整理。
- 予測法Cpは、基本的にNewtonian分布(風下面は静圧)

- ΔF_x , ΔF_z とも予測の範囲内に含まれている。
- ΔM_y は一部逸脱あるものの、おおむね予測できていると考えられる。
- 気流分布の空力特性計測への影響予測の有効性を確認できた。

2023/4/17

16



まとめ



- 一様流Mach数の変動に伴う誤差評価法を整理し、
またピトー圧計測値を利用した誤差低減処理法を検討した。
- $\sigma_{C_{AF}}$ 実験結果と、積み上げによる予測とは概ね一致、
評価法の有効性を確認できた。
- $\frac{p_{02}}{p_o}$ による誤差低減手法の有効性を確認できた。

- 気流分布の空力特性計測への影響予測法として、
ピトー圧比分布のパワースペクトルと、
模型上圧力係数を用いる影響評価手法を整理した。
- M5試験結果を通じ、
気流分布効果予測法の有効性を確認できた。

- 以上により、風洞気流のキャンペーン毎・試験毎の変動、
及び気流分布の影響を取り込んだ誤差評価法を獲得した。