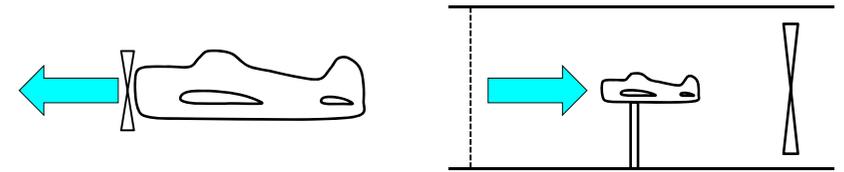


## 風洞とは

- 航空機が、飛行する状態を模擬する試験設備。
- 静止した大気中を飛行する代わりに、宙に支持した縮尺模型に、人工気流を当てて各種測定を行う。
- 模型忠実度、支持干渉、壁干渉、気流の質の問題。



## 風洞試験の不確かさに関する活動について

宇宙航空研究開発機構 (JAXA)  
研究開発本部 風洞技術開発センター  
永井伸治

2011年2月17日  
計測標準フォーラム不確かさクラブ

## 風洞試験の結果

- 風洞で測定できるのは、縮尺模型にかかる空気力。
- 予測したいのは、実際の機体にかかる空気力。
- 無次元空力係数を結果とし、換算。

$$\text{揚力係数の例: } C_L = \frac{F_L}{q \cdot A_w}$$

ここで、 $F_L$ は揚力、 $q$ は動圧(圧力)、 $A_w$ は翼面積

- BuckinghamのPi理論より、迎角 $\alpha$ 、マッハ数 $M$ 、レイノルズ数 $Re$ とすると、空力係数 =  $f(\alpha, M, Re)$

マッハ数 $M$ は、音速の何倍かを示すパラメータ。



## 大型化の必要

- 空力係数の支配パラメータは、実機と合わせる必要
  - 慣性と粘性の比である $Re$ 数は、大きさに依存。

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\mu}$$

ここで、 $\rho$ は密度、 $u$ は流速、 $L$ は代表長さ、 $\mu$ は粘性係数で温度の関数

- 小さな模型の欠点
  - 各部の詳細測定に困難。
    - 構造設計のための圧力分布
    - 舵面を動かす力
  - 忠実度、そして精度も悪化。





## 目標と相棒



- 米空軍AEDCのVKF風洞
  - 空力用としては世界最大(50 inch = 1.27 m)、M = 8, 10
  - アポロ、シャトルの主幹風洞と言う、輝かしい実績
- CFD(計算流体力学)
  - 風洞で模擬出来ない飛行条件も
  - 流れ場詳細判明/形状変更容易
  - 人に依存、絶対値の信頼性低い
  - 風洞試験での検証は不可欠
- 互角に対する精度(誤差)を、新風洞で如何に保証？



## 誤差を確認する従来の方法



- 共通模型を、多数の風洞で試験する対応風洞試験
- 実機開発やCFDの検証のため、無数の関心対象で
  - 米国遷音速風洞群 B737(1967年初飛行)で繰返し試験
  - 従来にない形状と飛行領域を持つ、有人スペースシャトル
    - 同条件の風洞試験を2~3基の風洞で、27,000時間も行う物量作戦
- やはり経験や実績に頼るしかないのか？



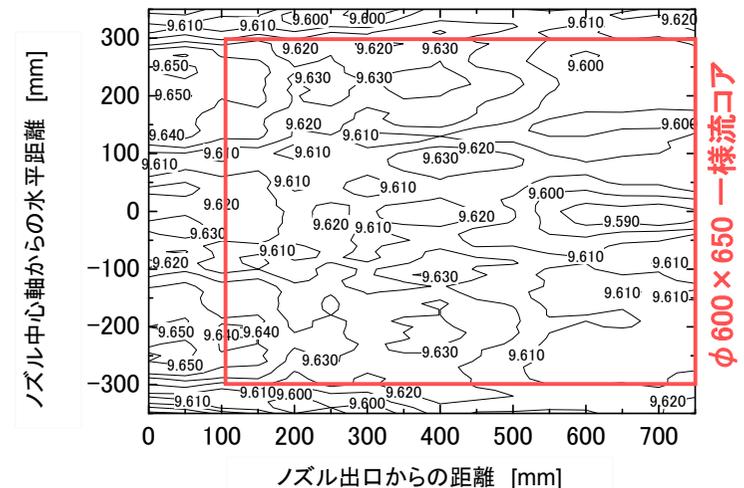
## 標準エラーバーとしての不確かさ



- 計測の不確かさ ANSI/ASME PTC19.1-1985  
米機械学会編、米国家規格、日本機械学会訳(丸善)
- Assessment of Experimental Uncertainty  
with Application of Wind Tunnel Testing  
米航空宇宙学会規格 AIAA-S071A-1999(1995初版)
- 共通手法として論文へ表示義務付け、または表示推奨
  - 比較時に一致の基準、異常値を排除、支配的な誤差要因が判明
- 各干渉補正法を含め、風洞試験には未だに研究要素残る。
  - 規格でも、「気流の質」の評価/反映手法は、各風洞に委ねる。

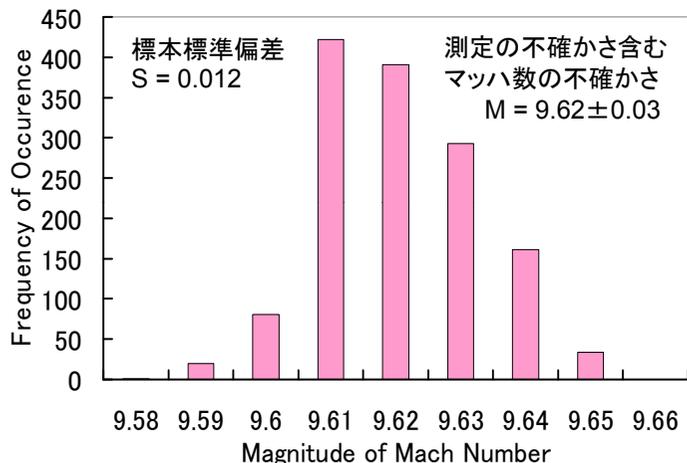


## 1.27m極超音速風洞の「気流の質」



飛行するときは一様なマッハ数だが...

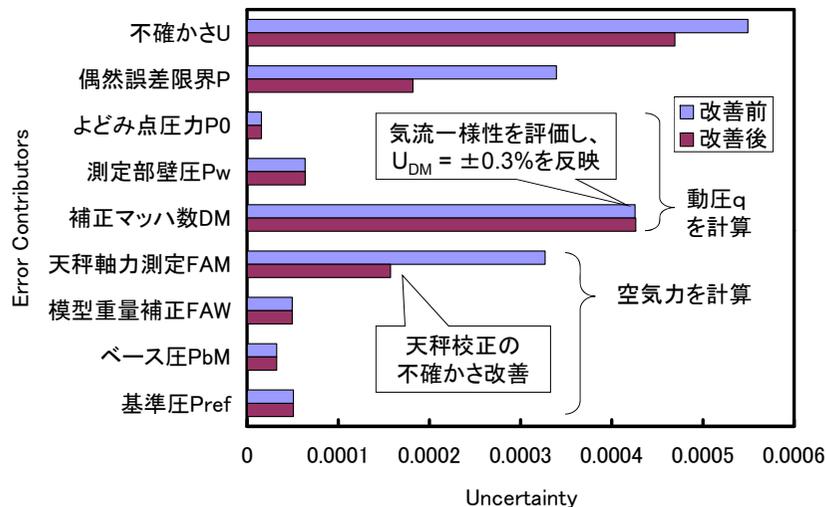
## φ 600 × 650内のマッハ数の統計的評価 10 × 50 ~ 100 mm間隔、十字面内1342点



米空軍風洞は、 $M = 9.94 \pm 0.07$

## 結果の不確かさ内訳

JAXA超音速風洞のAGARD-B模型,  $M = 2.0$ ,  $\alpha = 4^\circ$  のCAF



多くの測定量から計算される結果の、支配的な不確かさが判明

## AIAA-S071A-1999の和訳



- 2004年に教育も兼ね、大型風洞の若手4人に逐語和訳させ、添削者と共に内容を1年輪講。
- 和訳原稿を、原主著者D. Cahill氏を通しAIAAと刊行交渉。
- 翻訳者の著作権を放棄、ユーザへの配布資料(pdf含)として、2008年によく刊行許可。
- 企業、大学等ユーザに配布。依頼を受けて、3時間の講義も。



## AIAA規格の近日改訂について



- 米機械学会規格 ASME PTC 19.1-2005 準拠
- Systematic Standard Uncertainty (SSU),  $b_M$ 
  - 系統標準不確かさ ( $b_M = B/2$ ; '99規格の正確度B)
- Random Standard Uncertainty (RSU),  $p_M$ 
  - 偶然標準不確かさ ( $p_M = P/2$ ; '99規格の偶然誤差限界P)
- Combined Std. Uncertainty,  $u_M = (b_M^2 + p_M^2)^{0.5}$ 
  - 標準不確かさ
- Expanded Uncertainty,  $U_M = k u_M (= U; '99規格)$ 
  - 拡張不確かさ (95%包括度の包含係数  $k = 2$ )
  - 測定階層の多い風洞試験では、各階層10標本あれば  $k = 2$



風洞(測定器)の数が少ないので、系統(かたより)誤差で整理すると便利

## NASA ラングレー風洞群では



- 2000年代に風洞試験の目玉技術
- “Statistical data Quality Assurance” (SQA) by Dr. M. Hemsch
  - 試験開始直後から不確かさを予測管理。
- “Modern Design of Experiments” (MDOE) by Dr. D. Deloach
  - データではなく、知見を結果とする
  - 結果を多項式の応答曲面で表現
  - 結果に対する不確かさを管理
  - 試験ケースを半分以上削減
- 貴重な試験時間を最大限活用。

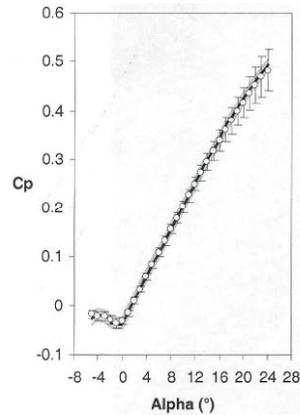


Figure 16. Tap C Cp versus alpha at beta=0°  
MDOE: — prediction — 95% prediction interval  
OFAT: o data point | 95% prediction interval



OFAT (One Factor at a Time)よりMDOEの方が、不確かさ小さい。

## まとめ



- 不確かさを、様々な局面での判断基準として活用。
  - センサ不良や失敗の迅速な判断から、世界との比較まで。
  - 多くの測定量のうち、支配的な不確かさを合理的に改善。
- 推定手法を研究し、超音速風洞ではユーザに提供。
  - 「気流の質」を始め、風洞試験の本質を考え直す機会に。
  - 不確かさを知らなければ、完全に知ったことにならない。\*
- 出来るところから、出来る範囲での活用のすすめ
  - 世界共通の考え方を、日本の航空宇宙産業界にも。



\* by Prof. Liu of Western Michigan Univ.