



## 航空機設計における風洞試験と CFD解析の活用について

川崎重工業(株) 航空宇宙カンパニー  
技術本部 研究部 空力技術課  
越智章生

EFD/CFD融合研究会@JAXA 26th Feb. 2008

### 内容

- 風洞試験とCFD解析の役割(メーカーの視点で)
- 風洞試験とCFDの違い
- 風洞試験側からCFDに期待すること
- CFD側から風洞試験に期待すること
- 空力データの検証
- まとめ



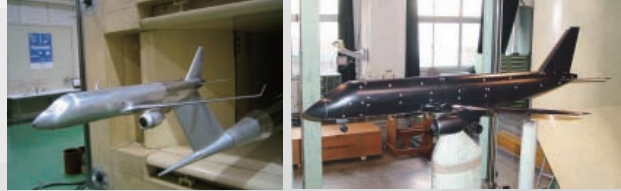
EFD/CFD融合研究会@JAXA 26th Feb. 2008

#2

## 航空機開発における、風洞試験とCFD解析の役割

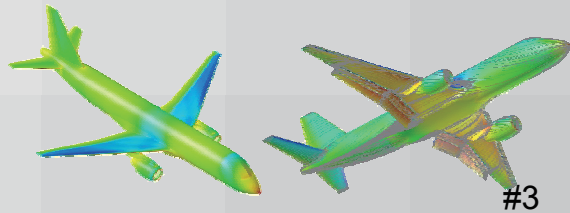
### ● 風洞試験(絶対評価)

- ✓ 空力性能の確認(高速、低速、HLD、舵効き)
- ✓ CFDの検証



### ● CFD(相対評価)

- ✓ 設計ツール(最適化設計)、形状のパラメトリックな検討
- ✓ 空力現象の確認
- ✓ 不具合対応

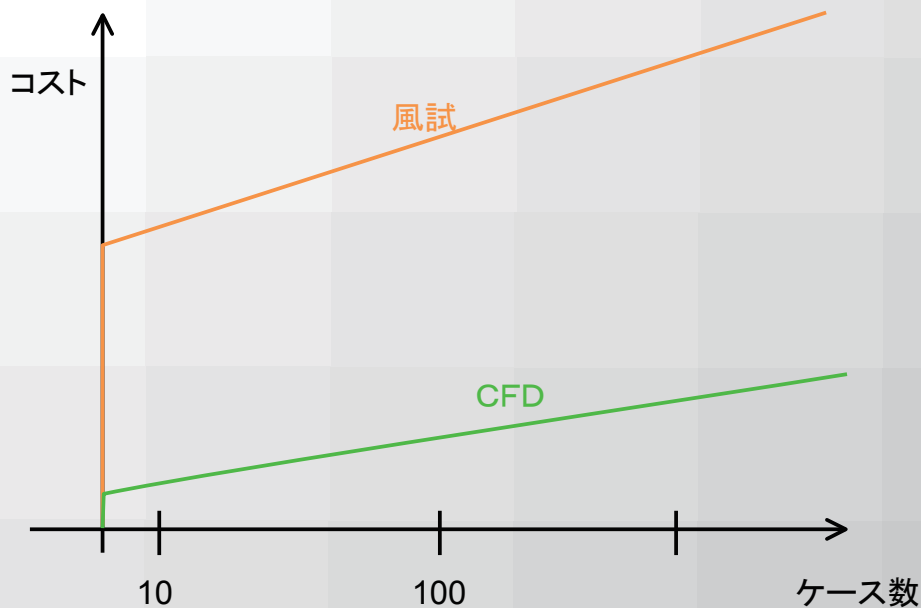


#3

EFD/CFD融合研究会@JAXA 26th Feb. 2008

## 風洞試験とCFD解析の対比 (コストについて)

CFDは初期コストも安く、1ケースあたりのコストも安い

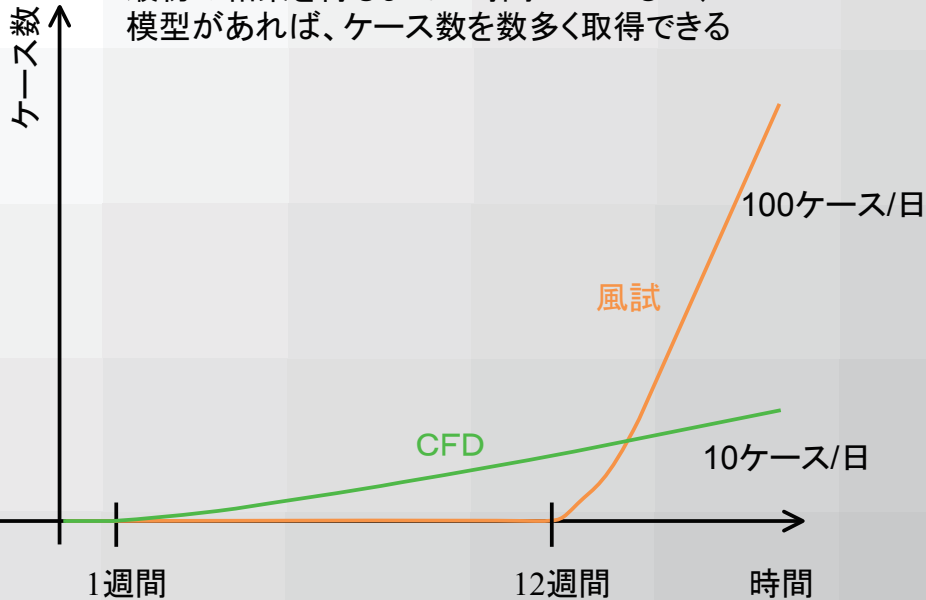


#4

EFD/CFD融合研究会@JAXA 26th Feb. 2008

## 風洞試験とCFD解析の対比（時間について）

風洞試験は、模型の設計と製作に時間がかかり、最初の結果を得るまでに時間がかかるが、模型があれば、ケース数を数多く取得できる



EFD/CFD融合研究会@JAXA 26th Feb. 2008

#5

## 風洞試験とCFD解析の対比（誤差要因）

### 風洞試験

- ✓ センサ精度
  - 天秤、圧力センサ
- ✓ 干渉
  - 支持干渉、壁干渉、ベース圧 (キャビティ圧)、浮力補正
- ✓ 模型
  - 変形、製作精度
- ✓ レイノルズ数
  - レイノルズ数補正
  - 乱流遷移(摩擦抗力補正)
- ✓ 風洞制御
  - マッハ数、温度、動圧

• 誤差要因の数が多く、補正量が大きい → データ整理が複雑

### CFD解析

- ✓ 格子依存性
  - 数値粘性による擬似抗力
  - 解像度不足 (shock、渦、後流)
  - 異なる格子間での評価が困難
- ✓ 数値スキーム
  - 乱流モデル
  - 遷移、剥離
  - ソルバー依存(バージョン管理)
  - 時間積分法(非定常解析)

• 誤差要因の数は少ないが補正が難しい



EFD/CFD融合研究会@JAXA 26th Feb. 2008

#6

## 風洞試験とCFD解析の対比（主要誤差要因）

### 風洞試験

- ✓ センサ精度
  - 天秤、圧力センサ
- ✓ 干渉
  - 支持干渉、壁干渉、ベース圧（キャビティ圧）、浮力補正
- ✓ 模型
  - 変形、製作精度
- ✓ レイノルズ数
  - レイノルズ数補正
  - 乱流遷移(摩擦抗力補正)
- ✓ 風洞制御
  - マッハ数、温度、動圧

### CFD解析

- ✓ 格子依存性
  - 数値粘性による擬似抗力
  - 解像度不足(shock、渦、後流)
  - 異なる格子間での評価が困難
- ✓ 数値スキーム
  - 乱流モデル
  - 遷移、剥離
  - ソルバー依存(バージョン管理)
  - 時間積分法(非定常解析)

お互いに誤差を含んでいるデータを比較するのは、一筋縄ではいかない



## 風洞試験とCFD解析の対比

### ● 風洞試験

#### 長所

- 流れ場は物理的に正しい
- マッハ数や迎角のデータ点数を多く取れる
- 模型が出来れば短時間で形態変更を行える

#### 短所

- 高コスト、リードタイムが長い(模型の設計製造)
- 補正の項目が多い
- 得られる流れ場の情報量が少ない

### ● CFD解析

#### 長所

- 低コスト、短納期
- すべて流れ場の情報が得られる(可視化、後処理が容易)

#### 短所

- 流れ場の物理の問題(後述)
- 格子生成に時間がかかる
- マッハ数や迎角等の点数を多く取れない



## 風洞試験側からCFD解析に期待すること

- 風試データの補正、試験方法の検討
  - ✓ 支持方法や壁干渉の影響等の風試条件と飛行状態の差分
  - ✓ 試験結果の大まかな確認
  - ✓ レイノルズ数補正
  - ✓ 流れ場の情報(表面流線やベース部の圧力)

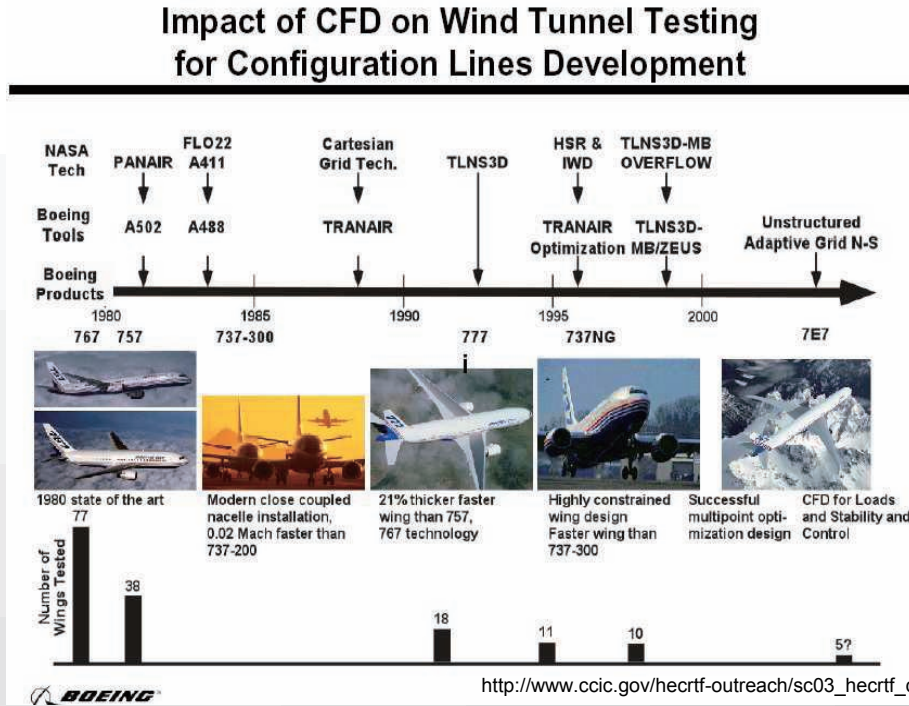


## CFD解析側から風洞試験に期待すること

- 精度保証のされた品質の高い検証データ
  - ✓ 航空機は実証主義であり、CFDの精度は風洞試験より高くなることは無い
  - ✓ 時間がかかり、地道に面倒な補正を施した質の高いデータ
- 流れ場の詳細な情報(力、圧力、流線、速度場、空力音)
  - ✓ 空気力(CL,CD,CM)の検証は出来て来た
  - ✓ 後流(PIV)や空力音(音源探査)のデータ



## 風洞試験に対するCFDの影響(Boeing)

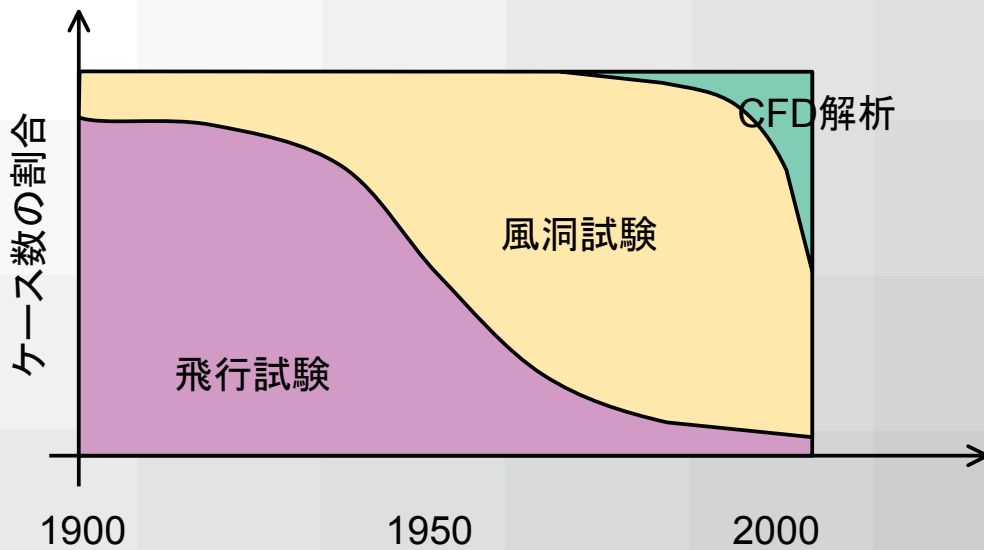


Kawasaki

EFD/CFD融合研究会@JAXA 26th Feb. 2008

#11

## 空力性能確認の方法の変遷



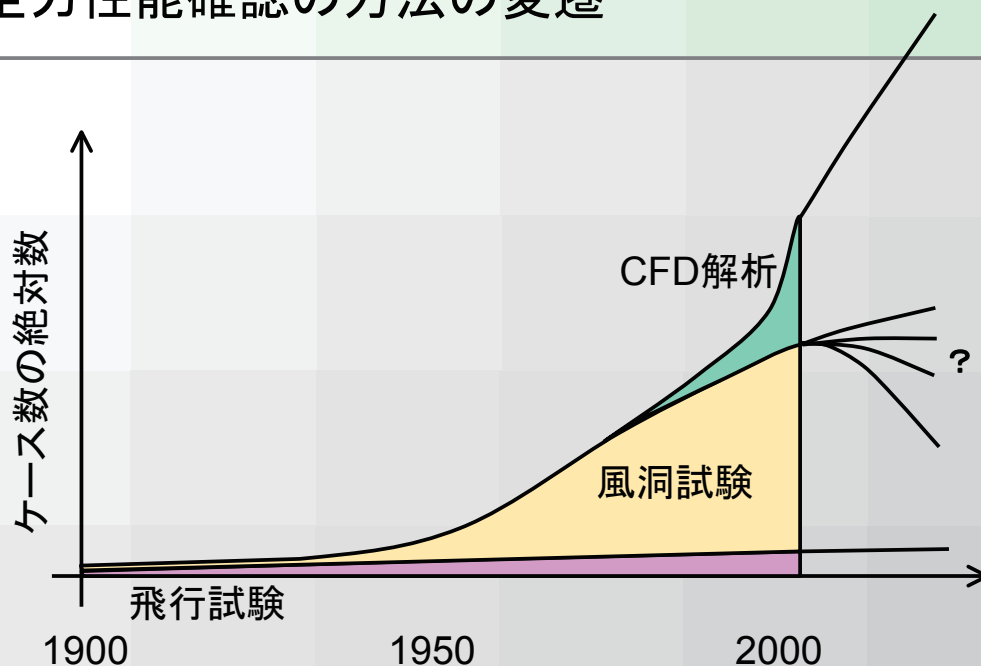
空力性能の確認手段は、飛行試験→風洞試験と変わり、CFD解析が台頭し始めている。

Kawasaki

EFD/CFD融合研究会@JAXA 26th Feb. 2008

#12

## 空力性能確認の方法の変遷



安全性に対する要求、設計の信頼性に対する要求から、ケース数が増加  
CFDの発展があっても風洞試験の重要性は変わらない

EFD/CFD融合研究会@JAXA 26th Feb. 2008

#13

## これからの風洞試験に期待すること

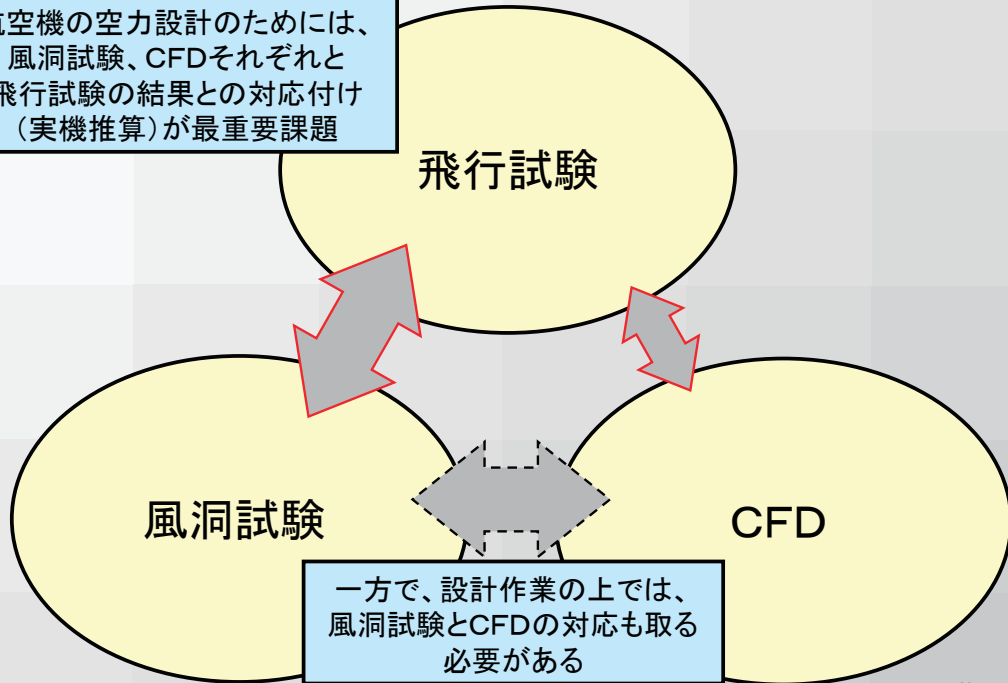
- データ生産性の向上
  - ✓ 単位時間・コスト当たりのケース数の増加
- 精度保証のされた品質の高い検証データ
  - ✓ 航空機は実証主義であり、CFDの精度は風洞試験より高くなることは無い
  - ✓ 時間がかかり、地道に面倒な補正を施した質の高いデータ
- 流れ場の詳細な情報(力、圧力、流線、速度場、空力音)
  - ✓ 空気力(CL, CD, CM)の検証は出来て来た
  - ✓ 空力音や後流についてはこれから

EFD/CFD融合研究会@JAXA 26th Feb. 2008

#14

## 空力データの検証(メーカー)

航空機の空力設計のためには、  
風洞試験、CFDそれぞれと  
飛行試験の結果との対応付け  
(実機推算)が最重要課題

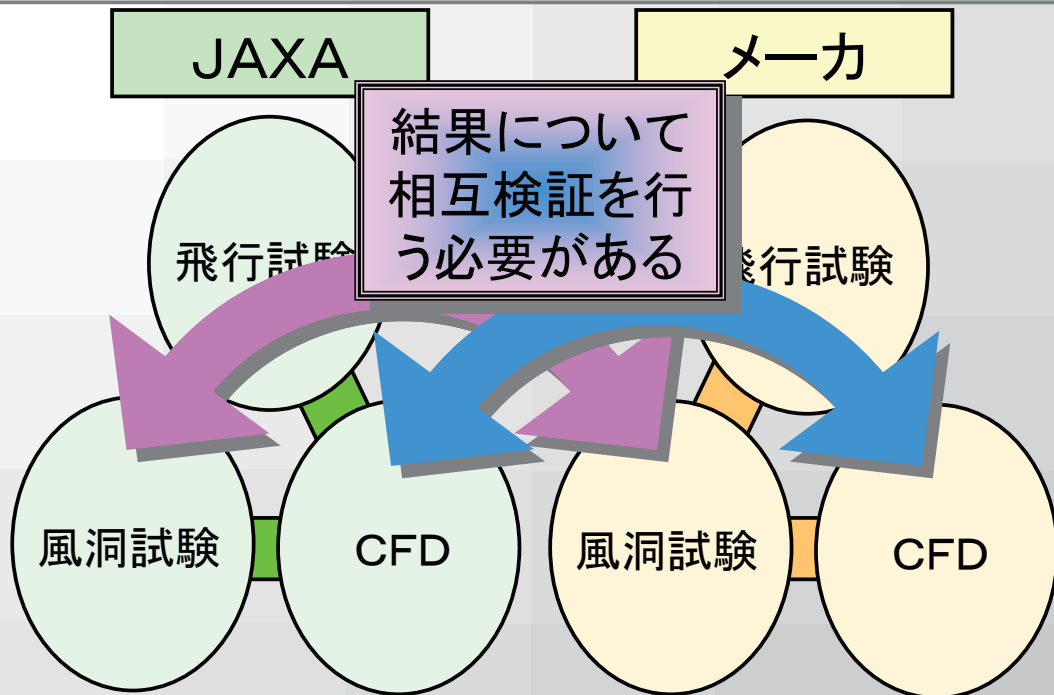


Kawasaki

EFD/CFD融合研究会@JAXA 26th Feb. 2008

#15

## 空力データの検証(JAXA+メーカー)



Kawasaki

EFD/CFD融合研究会@JAXA 26th Feb. 2008

#16



## 空力データの検証(まとめ)

- メーカーは自社の飛行試験、風試、CFDを比較検証
  - ✓ 実機推算の精度が、空力設計の要
- JAXAは、風試、CFDの対応付けに加えて、メーカーの風試、CFDとの検証についても考慮していただきたい
  - ✓ CFDでは、例えばJAXA-HLDワークショップ
- 海外のメーカーは、実機開発の数も多く、飛行試験との検証データが十分取れているが、国内は開発事例が少なく、ノウハウの蓄積が少ない
  - ✓ 実機推算精度の向上が必要



EFD/CFD融合研究会@JAXA 26th Feb. 2008

#17

## CFD技術の向上

- 計算機の能力向上により、CFDの解析時間、精度とも今後向上するであろう
- 将来的には、複雑な実機形状でもLES (Large Eddy Simulation) が可能となる。
- 10年後,20年後のCFDに対する、風洞試験のあり方とは？



全機着陸形態模擬の解析(RANS)

EFD/CFD融合研究会@JAXA 26th Feb. 2008

#18

## まとめ

- 風洞試験とCFD解析には、それぞれの役目があり、棲み分けがある
  - ✓ 風洞試験;確認、CFD;設計
- 風洞試験の精度を上げるには、数多くの補正が必要
  - ✓ 人・コスト・時間をかけて、地道に面倒な補正量を追求を行う
  - ✓ CFD解析結果との比較検証
- 風洞試験やCFDの結果から、実機推算をどこまで精度高く行えるかが、航空機の空力設計能力を決定付ける
- 精度の高いデータ、流れ場の詳細なデータを計測する必要がある
- 精度の向上と、生産性の向上の二つの方向がある
- 風洞試験とCFDの融合だけではなく、メーカー等の外部の結果との相互検証を進めて頂きたい
- CFDに対する風洞試験のあり方とは？
  - ✓ 10年後、20年後のCFDの向上に対し、風試のあり方は？

ご清聴、ありがとうございました

Any question and comment are welcomed