

JAXAにおけるEFD/CFD融合に向けた試み

～ 数値流体シミュレーション連携による風洞の情報化～

EFD: Experimental Fluid Dynamics (実験流体力学; 風洞試験)

CFD: Computational Fluid Dynamics (数値流体力学)

宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

総合技術研究本部

風洞技術開発センター、計算科学研究グループ

渡辺重哉、加藤裕之、口石茂、青山剛史
村上桂一、橋本敦、藤田直行、岩宮敏幸

EFD/CFD融合研究会 @ JAXA ARC

Feb. 26, 2008



0

発表内容

- 背景、動機
- 「デジタル/アナログ・ハイブリッド風洞」(風洞情報化システム)構想
 - 目的、コンセプト
 - 段階的技術開発目標
 - 要求機能・仕様
 - システム構成
 - 運用シーケンス
- ハイブリッド風洞の主要研究開発要素
 - デジタル風洞
 - 流体画像計測の高速データ処理技術
 - EFD/CFD融合技術
- 全体開発スケジュール
- 開発体制
- まとめ



1

空力予測ツールとしてのEFD、CFDの課題

■EFD side:

- ✓**実飛行条件との差異**: レイノルズ数、一様流乱れ/非一様性、風洞壁/模型支持の存在、模型変形等
⇒ 部分的に補正を実施しているが、精度面で不十分。
- ✓**計測量の制約**: 通常、力/圧力のみ。付加的に流れの可視化、詳細表面圧、速度場、遷移位置等の計測を実施
⇒ 流れ場の理解、問題発生時の原因究明が困難
- ✓**実験全体のリードタイムが長い**(模型製作等)

■CFD side:

- ✓**信頼性に不安**(特に乱流、遷移、剥離、反応性流等)
⇒ 常に実験による検証が必要
- ✓高忠実度解析では**計算時間が長い**(データ生産性が低い)
- ✓(改善されつつあるが)**計算格子生成に熟練が必要**、かつ長期間を要する

両者の課題を相補的に解決するための統一的平台はできないか？

EFD/CFD比較検証の課題 (1/2)

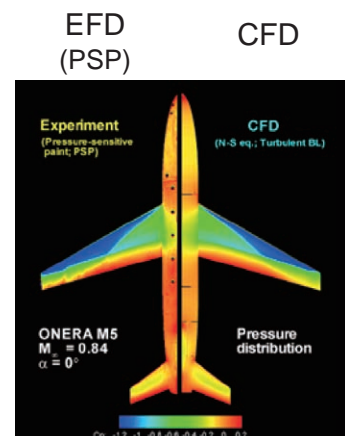
Ex) 悪い比較の例 (数値は架空)

風洞設定精度によるズレ

	EFD	CFD (事前)
マッハ数	0.904	0.9
レイノルズ数	2.1×10^6	2.0×10^6
迎角	2.6° (天秤、スティングたわみ含む)	2.0° (設定迎角)
模型形状	模型設計形状 + 空力荷重による変形	模型設計形状
境界条件	風洞壁、模型支持あり	一様流中に模型だけ存在
境界層遷移点位置	自然遷移 or 遷移点固定	全面層/乱流 or 遷移点固定 or 遷移点予測
データの不確かさ	CD: ± 0.0005	???

計測していない
と位置不明

評価方法
未確立



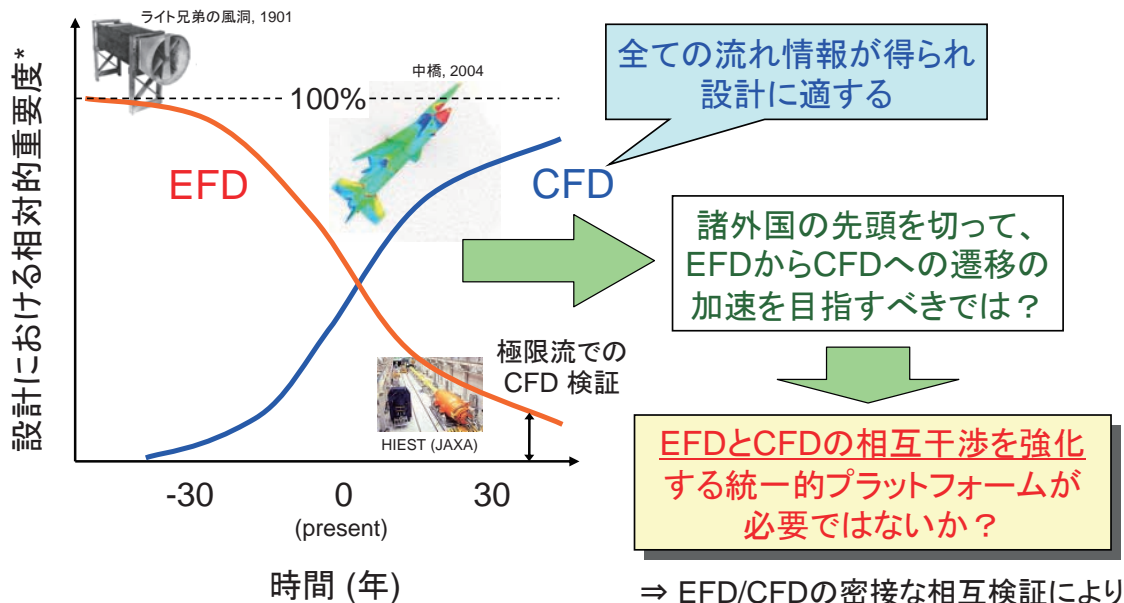
- | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> •天秤/スティングたわみあり •模型変形あり •壁/支持あり •自然遷移 | <ul style="list-style-type: none"> •天秤/スティングたわみなし •模型変形なし •支持のみあり •全面乱流 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

EFD/CFD比較検証の課題 (2/2)

- **環境条件**の不一致(気流条件、姿勢角、境界条件[風洞壁、模型支持、模型形状等]、データ点、遷移点位置)
- データの**不確かさ**情報の欠如: 計測精度、格子依存性、乱流モデルの影響等
- **可視化環境**の差: 異なった可視化ソフト、表示環境(カラーバー等)の差
- **CFD検証用実験データ**の不足: 全ての環境条件、計測精度情報が揃い、かつ精度、計測の種類が十分な実験データは限られる。
- **タイムスパン**の違い: 一般にEFD(風洞試験)は準備期間が長く、実験時間は短い。CFDは逆。
- 両者の**意思疎通**の不足: 双方の状況、課題が理解されていない。

EFD/CFD両データが管理された状態で生産され、対等に比較検証可能なプラットフォームの整備が必要ではないか？

EFD vs CFD: 空力設計における重要性

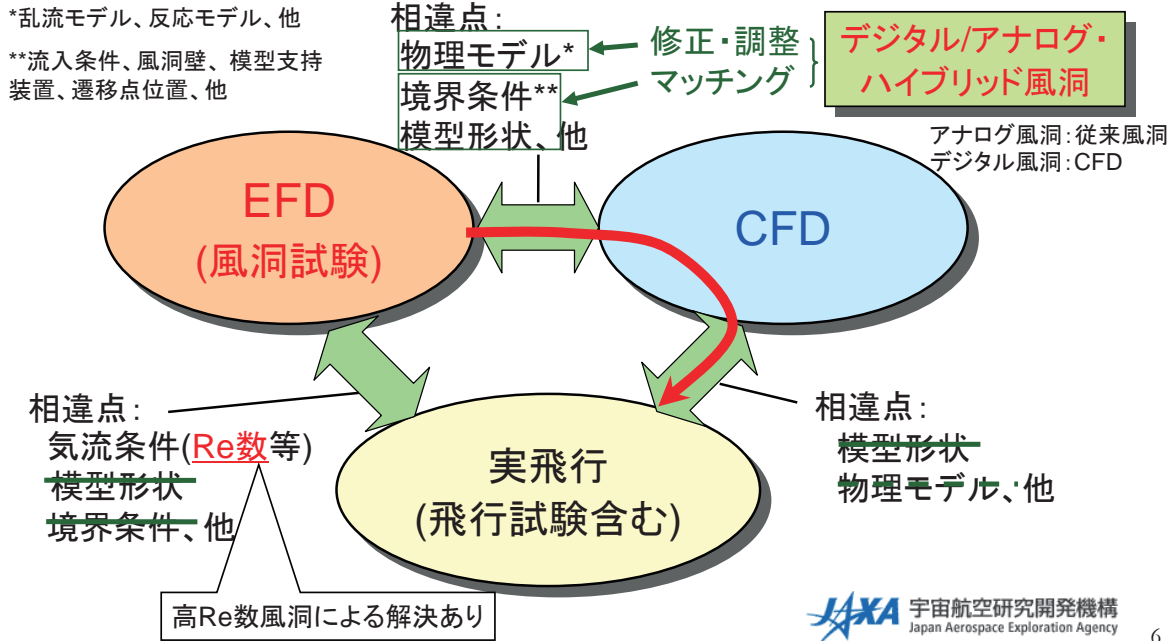


* 実機開発用空力設計データの取得割合が設計における相対重要性を決めるというイメージ

⇒ EFD/CFDの密接な相互検証により精度、効率両面でEFDを凌駕するCFDの実現に貢献

実飛行条件における空力特性予測

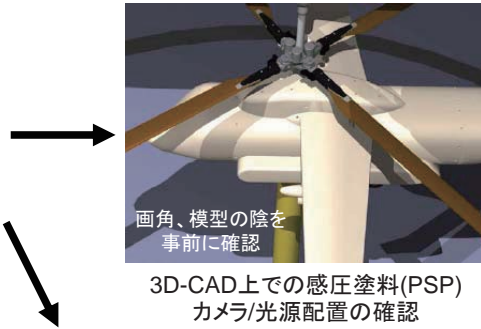
空力設計での空力特性予測におけるEFD/CFDの役割(あるべき姿):
実飛行条件における特性を正確かつ効率的に予測



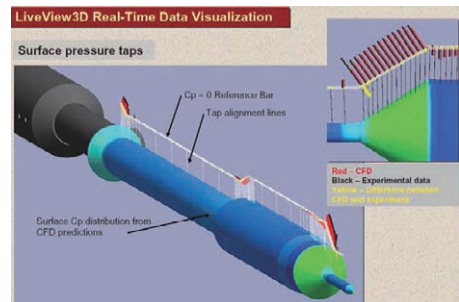
NASA Langley: Virtual Diagnostics Interface (ViDI) System

R. Schwartz, G. Fleming 2008

- 特徴、機能:
 - 3D-CADベースの仮想実験診断システム
 - ✓ 仮想モックアップによる風洞試験・計測計画の最適化・効率化
 - ✓ CFDと風試結果のリアルタイム比較/可視化(LiveView3D)
 - 世界の有用風洞では同レベルの有用なシステムは見当たらない。



- 課題: **JAXAハイブリッド風洞の優位点**
 - 風試とCFDデータフォーマットの不統一、内挿機能の脆弱さ等によりデータ比較が煩雑
 ⇒ **風試/CFDデータフォーマット統一等**
 - CFDは二義的(いつもCFD結果があるわけではない) ⇒ **事前CFDの常時実施**
 - CFDと実験データの融合機能を持たない(単なる比較止まり) ⇒ **EFD/CFD融合技術の開発**



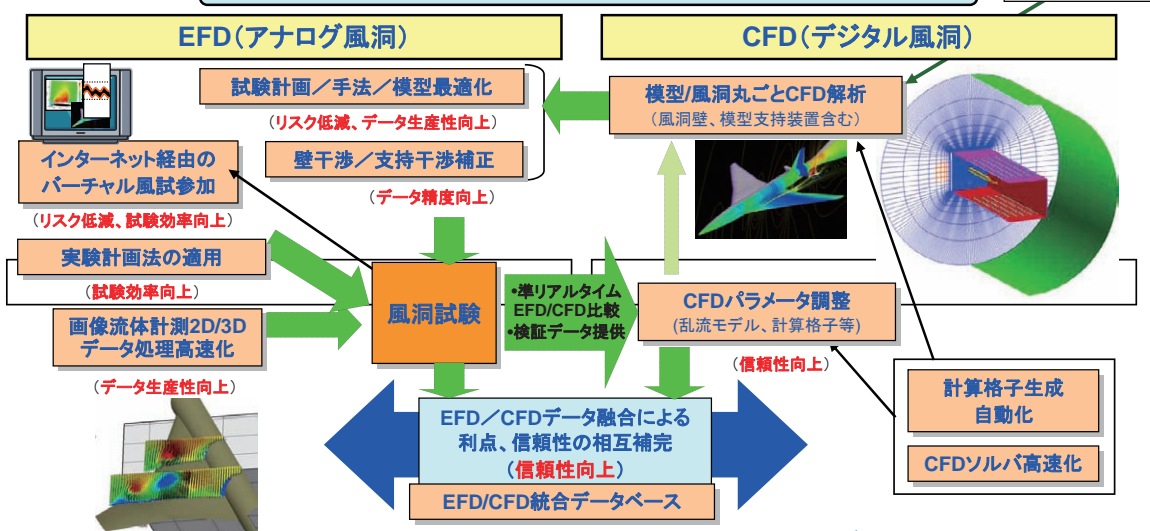
表面圧力分布のEFD/CFDリアルタイム比較

デジタル／アナログハイブリッド風洞： 目的とコンセプト

目的

- EFD/CFDデータ融合による風洞、CFD両者の有用性の向上
EFD: Experimental Fluid Dynamics(実験流体力学)、CFD: Computational Fluid Dynamics(計算流体力学)
- 航空・宇宙機の設計時間/コスト/リスクの低減、設計データ精度/信頼性の改善
⇒ 国産旅客機研究開発等のJAXAプロジェクト、産業界への貢献の増進

デジタル/アナログ・ハイブリッド風洞のコンセプト



実験/シミュレーション融合の成功例を作り、他分野へ展開

航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

8

段階的技術開発目標

時期	マイルストーン	EFD		CFD			cf. 計算機処理速度(現状比)
		風洞試験時間(現状比)	2次元/3次元計測データ処理時間(PIVの場合)	CFD計算時間(NS)(模型+風洞一体計算@TWT1)	自動格子生成	風試対応CFD(対全風試ケース)	
5年後	ハイブリッド風洞の完成(TWT1主対象) CFD設計重要度=約50%	- 10% (事前CFDによる実験計画最適化、圧力孔数半減、HM*計測削減等)	10分/ケース (GPU等の利用により現状の処理速度10~100倍)	1時間/ケース* (or 10時間/10ケース)	単純全機+風洞への適用	20% (事前) *目標設定根拠は参考参照	14倍 (次期スパコン、135TFLOPS; H20年度から段階的に稼働) *現状は9.5TFLOPS
10年後	ハイブリッド風洞適用領域拡大(LWT1等の低速風洞へ) CFD設計重要度=約60%	- 20% (CFDによる風試の代替進展)	1分/ケース (準リアルタイム処理=カ/圧力計測とほぼ同レベル)	10分/ケース	複雑全機(高揚力装置等)+風洞への適用	100% (事前)	100(~1000)倍
20年後	ハイブリッド風洞リアルタイム化(風試時間=CFD計算時間@TWT1) CFD設計重要度=約80%	- 50% (CFDによる風試の代替加速)	10秒/ケース (リアルタイム処理)	10秒/ケース (リアルタイム計算)	同上	100% (事前 and リアルタイム)	10000(~100000)倍

*HM: ヒンジモーメント / LWT1: 6.5m x 5.5m低速風洞 / TWT1: 2m x 2m低速風洞

★ 20年後を見据えると他の方向性(動特性、全飛行経路解析等)とのバランスが必要

JAXA 宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

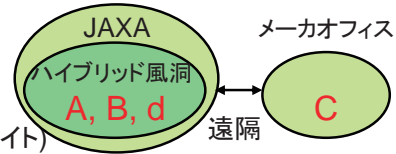
9

デジタル／アナログハイブリッド風洞: 要求機能・仕様 (1/2)

■前提条件:

- 対象ユーザ:

- (主要) A. JAXA国産機/静粛超音速機プロ担当者
- B. 航空宇宙機メーカ風洞試験担当者(オンサイト)
- C. 航空宇宙機メーカ空力設計者(オフサイト)
- (その他) d. JAXA研究者、その他メーカ技術者等の全風試ユーザ



- 対象風洞: JAXA 2m×2m遷音速風洞(ユーザニーズが最も高いため)を主対象

■ユーザ要求と機能・仕様との対比(1/2)

ユーザ要求	機能・仕様
風洞試験の効率化、リスク低減	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 事前CFD解析に基づく模型製作/実験計画の最適化 ✓ 実験計画法の活用による風試計画の効率化 ⇒ 自動格子生成かつ高速CFD(NS)解析能力 (1時間/ケース; 全風試ケースの1/5程度について事前解析実施)
風洞試験データの高精度化(不確かさ情報含む)信頼性向上	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 事前CFD解析に基づく高精度風洞壁干渉/支持干渉補正 ✓ 同一条件での風試/CFDデータに基づく最も確からしい空力特性推定(不確かさデータを含む) ⇒ 高精度CFD要求に対応するため、既存TAS*コードの組込みも実施

*TAS: Tohoku University Aerodynamics Simulation

デジタル／アナログハイブリッド風洞: 要求機能・仕様 (2/2)

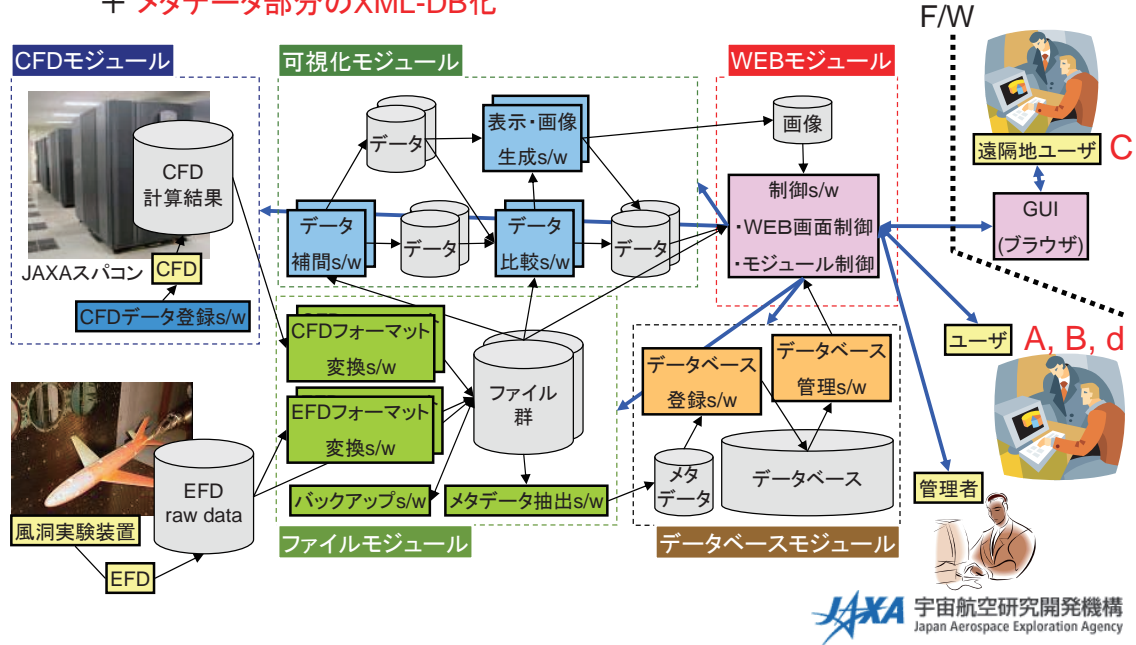
■ユーザ要求と機能・仕様との対比(2/2)

ユーザ要求	機能・仕様
<p>風試データ妥当性の準リアルタイム*確認(判断の迅速化による手戻り防止)</p> <p>⇒ 開発スケジュールがタイトな旅客機開発では必須</p> <p>*「データ取得後10分以内」と定義</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 風試/CFDデータの準リアルタイム可視化、比較機能: データ内挿、一致度の定量化、データマイニング等 ✓ Internet経由のヴァーチャル風試参加(リアルタイムデータ閲覧) ✓ 流体画像計測データ[空間速度場計測(PIV*)等]の処理時間短縮(PIVの場合、10分/ケースへ) <p style="text-align: right; font-size: small;">*Particle Image Velocimetry (粒子画像流速測定法)</p>
CFD技術の向上	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 風試データに基づくCFDパラメータ調整、格子の最適配置 ✓ 模型変形計測のCFD格子への反映 ✓ 風試/CFDの統合データベース化 ✓ レイノルズ数依存性風試/CFD解析の常時実施 (注: ハイブリッド風洞運用要領に反映) ⇒ 実機特性推定技術向上
データセキュリティの確保 データの保全	<ul style="list-style-type: none"> ✓ セキュリティ管理機能 ✓ 復旧支援機能、データバックアップ/リストア機能等

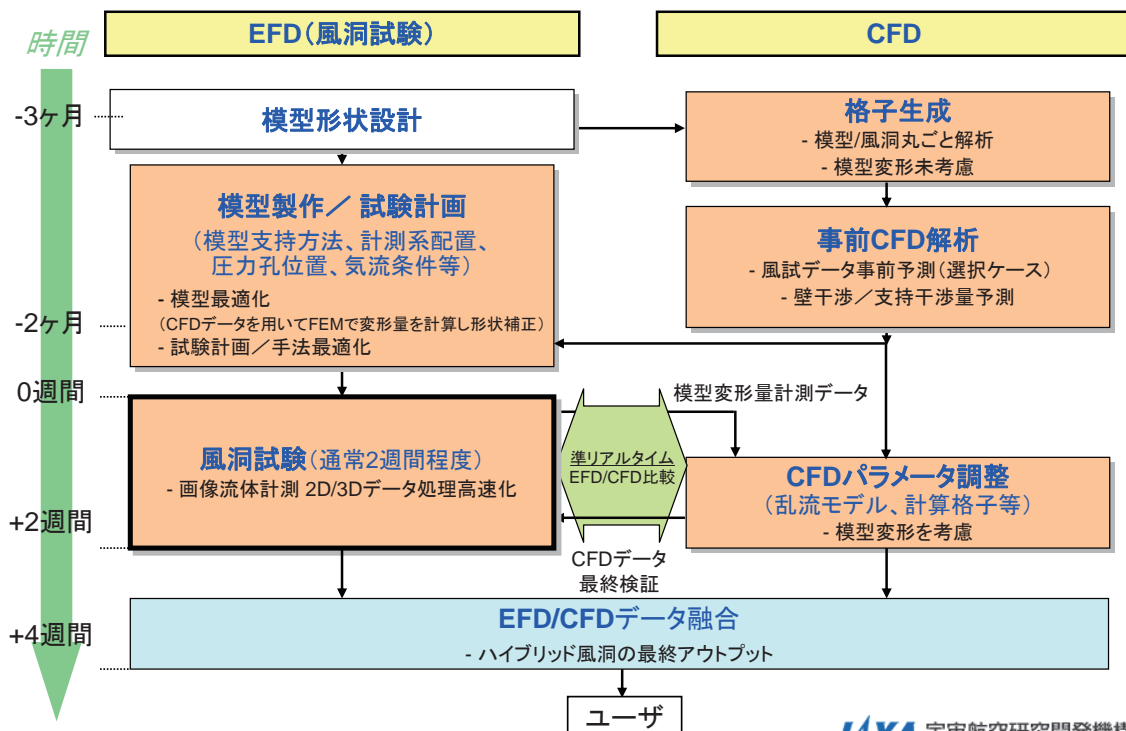
デジタル／アナログハイブリッド風洞：システム構成

■ソフトウェア構成(例)

- 機能別のモジュール構成。ユーザとはWebモジュールを介し接続。
- 自己記述型フォーマット(HDF5等)によるEFD/CFD実データのフォーマット統一化
+ メタデータ部分のXML-DB化

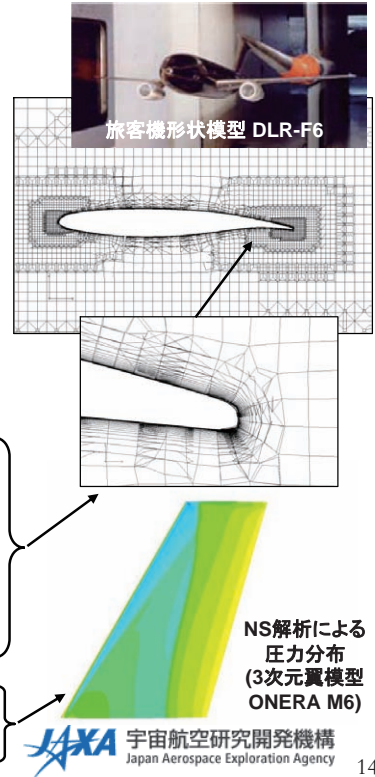


デジタル／アナログハイブリッド風洞：運用シーケンス



デジタル風洞の開発

■ デジタル風洞の要件



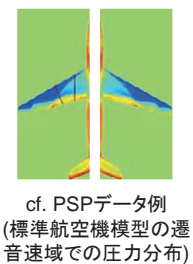
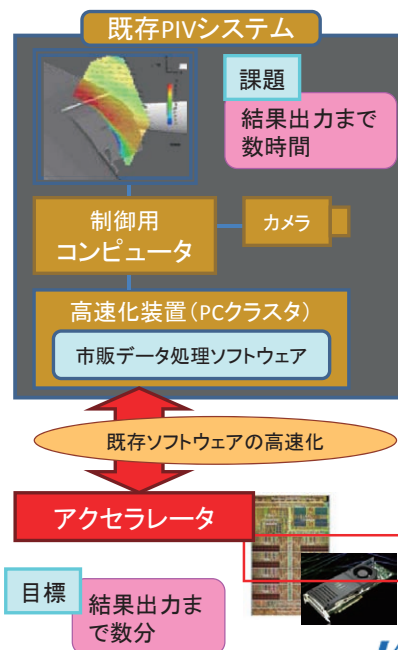
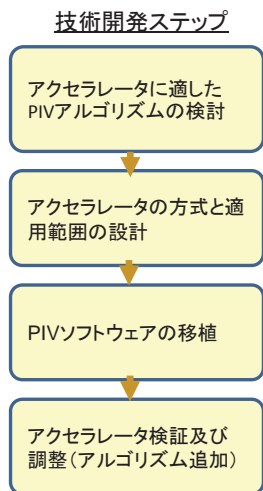
■ 直交格子を用いた自動格子生成の実現性

- ✓ 約10分でPCを用いて航空機周りに1000万点の格子を自動的に生成可能。
- ✓ 所望の場所(翼面上及び後縁付近等)に格子を集めることが可能。現在実機開発に使用されているTASコード用の非構造格子と同程度の格子品質を同等の格子点数で実現できる。
- ✓ 境界層に細かい格子を使用した場合、実験と良く一致する圧力分布が得られた。

流体画像計測の高速データ処理技術

空間速度場計測(PIV)、詳細表面圧力計測(PSP)等の画像計測データ処理を高速化することにより、アナログ風洞のトータルなデータ生産性を飛躍的に向上

Ex) PIVデータ処理の高速化

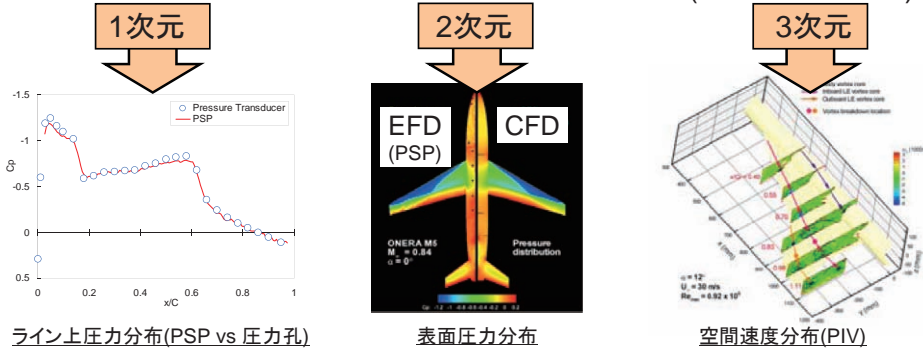


アクセラレータ:
GPGPU(汎用目的グラフィックプロセッサ)またはCell(IBM/東芝/Sonyが開発した高性能CPU)を候補として検討予定

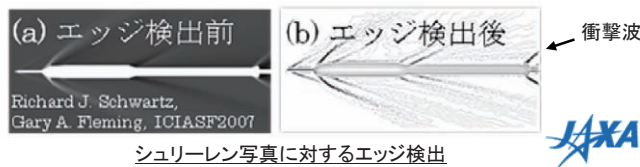
EFD/CFD融合技術 (1/2)

データ比較技術

- 目的:
 - ・風洞試験進行に合わせた即時の判断を助ける。
 - ・比較を通じてEFD/CFD双方の技術課題を明確化、解決する。
- 「定量的」比較: 1~3次元データの一貫性の定量化技術(内挿技術を含む)



- 「定性的」比較: 特徴点抽出、エッジ検出、テンプレートマッチング等の可視化技術による流れの特長(渦、剥離線、衝撃波等)の強調化

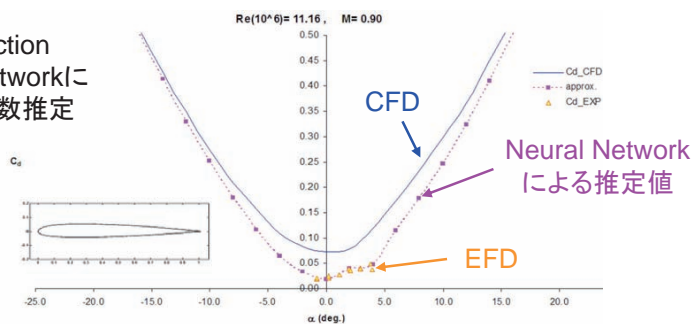


EFD/CFD融合技術 (2/2)

データ融合技術

- EFD/CFDデータに基づく最も確からしい空力特性の推定

Ex: SFA (Sequential Function Approximation) Neural NetworkによるSC1085翼型の抗力係数推定 (Meade 2004)

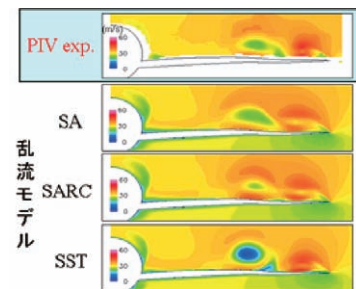


EFD⇒CFD

- 乱流モデルの最適選択、各種パラメータの調整
- 計算格子の最適化

CFD⇒EFD

- 模型/風洞統合CFD解析による高精度な風洞壁/支持干渉補正(2~3次元データを含む)
- CFD/PIVによる揚力、抗力成分分解(後流積分)
- 事前CFDによる最適かつ効率的な模型設計、風洞試験・計測計画策定

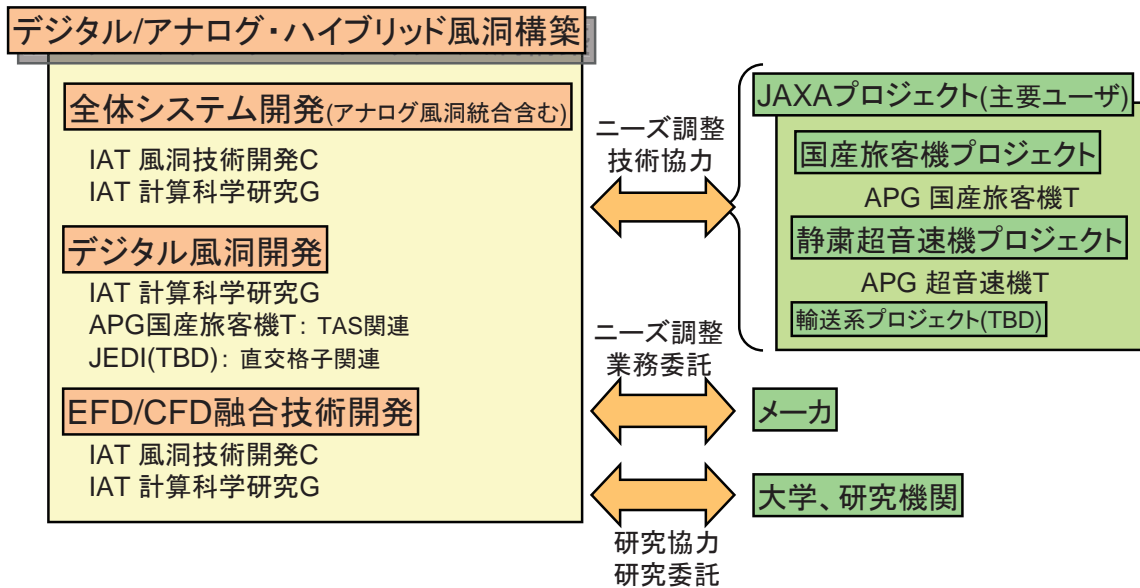


EFD(PIV)データによる乱流モデルの選択
(クラークアロー翼周りの速度分布)

全体開発スケジュール

作業項目	2008		2009		2010		2011		2012		作業内容
	FY20	FY21	FY21	FY22	FY22	FY23	FY23	FY24	FY24		
① 概念検討	←→										全体システム及びデジタル風洞ソフトウェアに関する概念検討を行う。
② 設計		←基本→	←詳細→								全体システム及びデジタル風洞等のサブシステムの基本設計、詳細設計を行う。
③ 製作			←→								デジタル風洞、EFD/CFD出力統合表示装置等を含む風洞情報化試行システム(ソフト+ハード)の製作を行う。
④ 検証							▼試行システム完成				試行システムに対して検証試験を行い、システムの機能・性能を確認する。
⑤ 試運用、評価							←→				試行システムの試運用を実施する中でシステムの評価を行い、改良点を洗い出す。
⑥ 高度化								←→	システム完成		システムの不具合の改修、改良(機能追加、高精度化等)を行い、システムを高度化する。

開発体制



*IAT: 総合技術研究本部
 APG: 航空プログラムグループ
 JEDI: 情報・計算工学センター

まとめ

- JAXAでは、EFD/CFD融合による風洞の情報化事業として、「デジタル/アナログ・ハイブリッド風洞」の開発に着手する。
- 主要研究開発項目：
 - ✓EFD/CFD融合技術(比較/可視化、壁/支持補正、風試最適化、データ融合等)
 - ✓デジタル風洞(自動格子生成+高速ソルバー)
 - ✓流体画像計測の高速データ処理(PIV等)
- EFD/CFD融合技術がハイブリッド風洞の付加価値を高めるキー。
- 産学官の密接な連携により、新しい分野であるEFD/CFD融合技術の効果的、効率的な発展を目指したい。

参考：5年後のCFD所要時間目標の設定

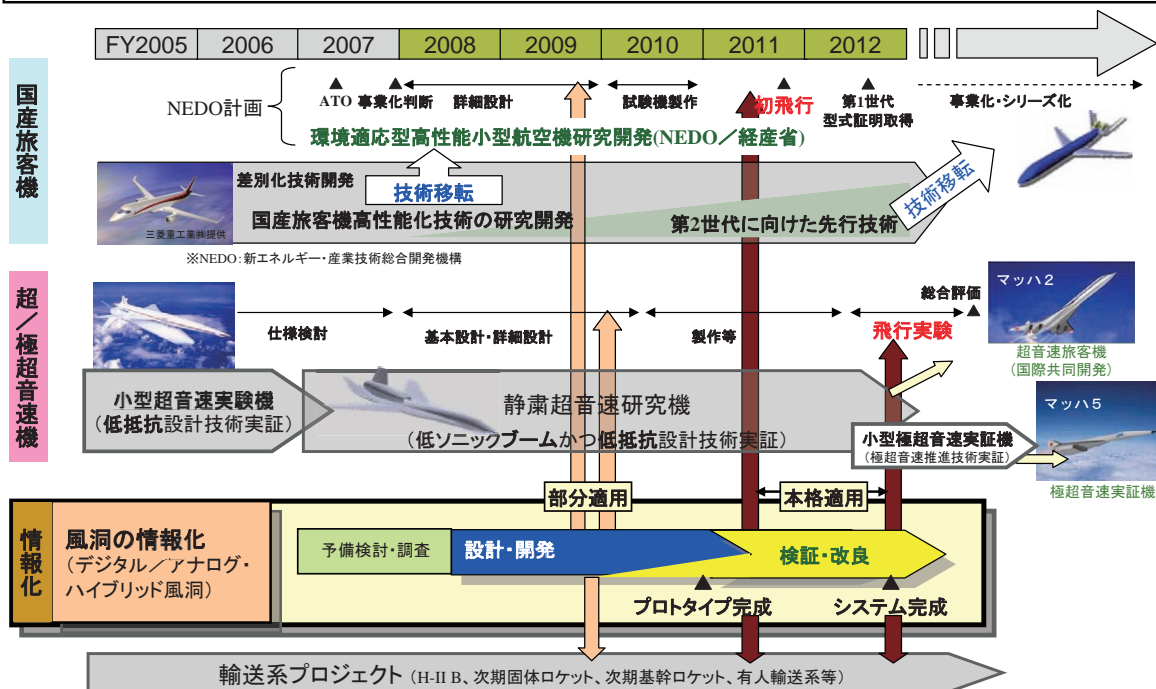
- 前提条件：
 - 事前CFD解析を形状決定後1ヶ月(実働20日)で終了
⇒結果を模型製造設計、風試計画に反映(2ヶ月間)
 - 全試験ケースのうち主要な1/5について事前CFD実施
 - 風試期間：2週間 @TWT1 (通風 8日間；200ケース/日)
- CFD所要時間目標値：
 - 事前解析ケース数 = 200ケース/日 x 8日 x 1/5 = 320ケース
 - 1ケース当たり所要時間 = 20日/320ケース = 1.5時間/ケース
⇒ 格子作成期間、verificationのための解析、データチェック等を考慮し、目標値として【1時間/ケース】を設定
(注: 10時間/ケースを10ケース並列で計算しても良い。ただし、将来的に風試と並行してリアルタイム計算する場合は、並列計算は不可)

参考：ハイブリッド風洞における模型変形考慮方法

ステップ	模型変形 ○：考慮 ×：考慮せず	模型変形の扱い
風試模型形状設計	×	場合によっては、実機飛行時変形を考慮して形状設計をする場合もあり ^{注)}
事前CFD	×	模型形状設計結果をそのまま使用
風試模型製造設計	○	事前CFDデータに基づき推算した風試時空力荷重を用いて模型構造FEM解析を行い、風試時模型変形を推算。その結果から、 風試時形状が模型形状設計時形状と一致するように形状設計。
風洞試験	○	変形量は 風試時に直接計測 (模型製造設計時の推算結果とは一般に若干異なる;また、風試条件により異なる)
風洞試験対応CFD (風試と並行して実施)	○	風試時に計測した変形を考慮した格子で解析 ⇒ 風試と同一形状での比較が可能

注) 模型形状設計時に実機飛行時変形が考慮されている場合には、模型製造設計時のFEM解析で風試時の形状が実機飛行時形状に一致するように設計することになる。

参考：航空分野の技術開発シナリオ



【緊急性】H23年度実施予定の国産旅客機の飛行試験で想定される空力関連のトラブルシュートを短期間で確実に、実機開発スケジュールをキープするためには、ハイブリッド風洞のプロトタイプをH22年度までに完成させ適用することが必要