



デジタル/アナログ・ハイブリッド風洞の活用で見た EFD/CFD融合の課題

Future Works of EFD/CFD Integration Observed from the
JAXA Digital/Analog Hybrid Wind Tunnel

口石 茂、村上桂一、渡辺重哉 (JAXA)

第5回EFD/CFD融合ワークショップ

2012年1月23日

秋葉原コンベンションホール

内容

- JAXA デジタル/アナログ・ハイブリッド風洞
 - ー 概要
 - ー 活用事例
- EFD/CFD 融合の課題
 - ー 経済性・効率性の観点から
 - ー 精度・信頼性の観点から
- デジタル風洞の課題
- ハイブリッド風洞の将来構想
 - ー フライトデータとの統合
- まとめ

JAXA デジタル/アナログ・ハイブリッド風洞

EFD: Experimental Fluid Dynamics
(実験流体力学)

アナログ、リアル

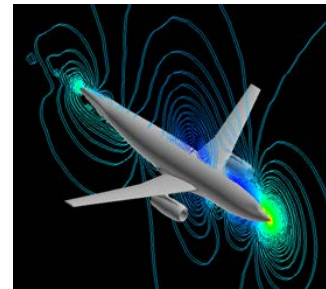
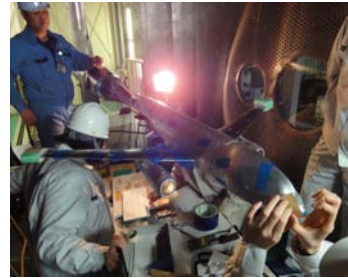
CFD: Computational Fluid Dynamics
(数値流体力学)

デジタル、ヴァーチャル

空力特性予測手法の両輪

EFD/CFD融合:

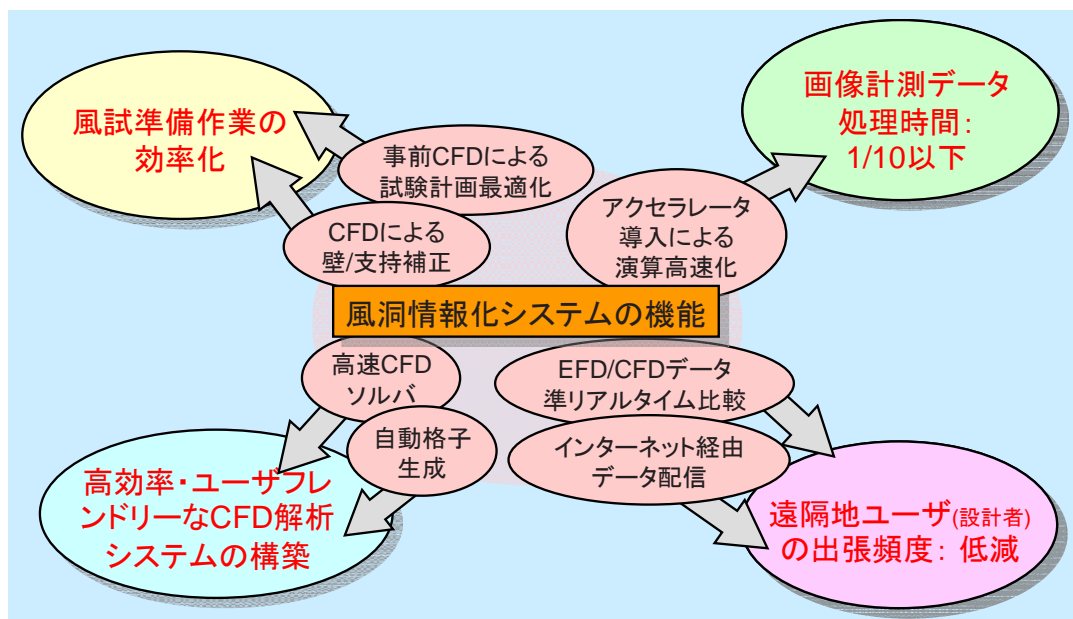
- ⇒ 単なる連携を越えるもの(1+1>2となる世界)
- ⇒ 融合により、データ生産性および精度の向上を図る。
- ⇒ JAXA実用風洞(2m×2m遷音速風洞)に対するEFD/CFD融合システム:
デジタル/アナログ・ハイブリッド風洞



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

2

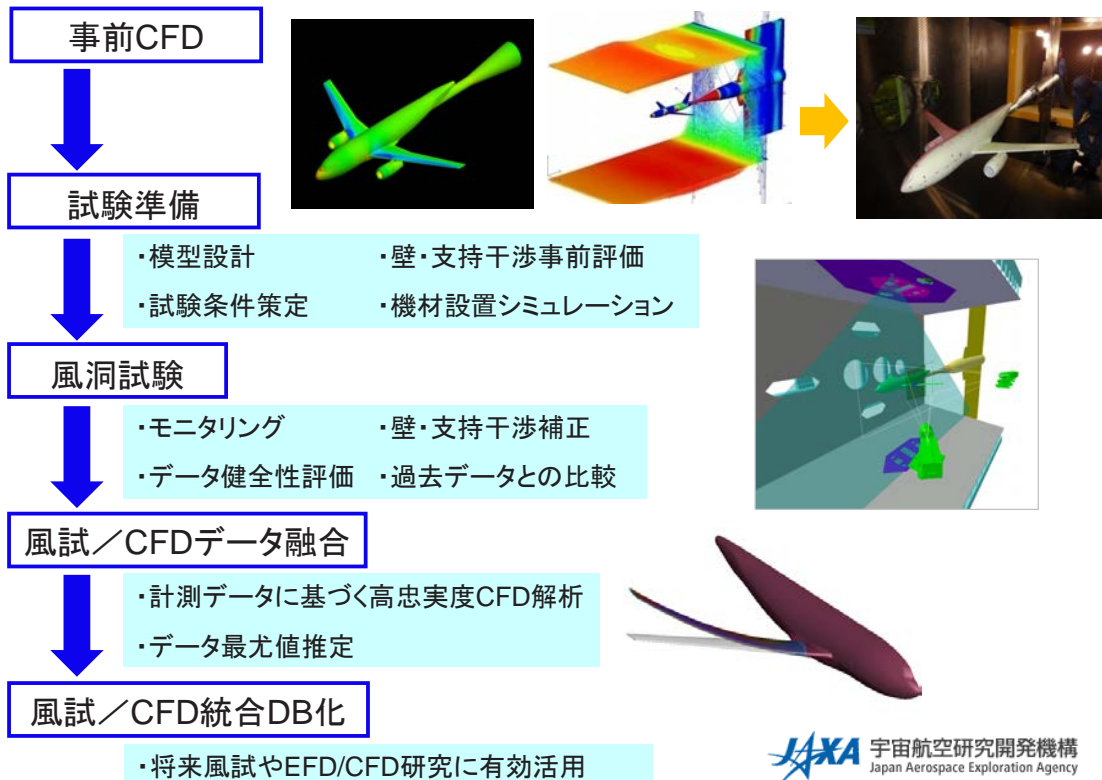
ハイブリッド風洞の目標



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

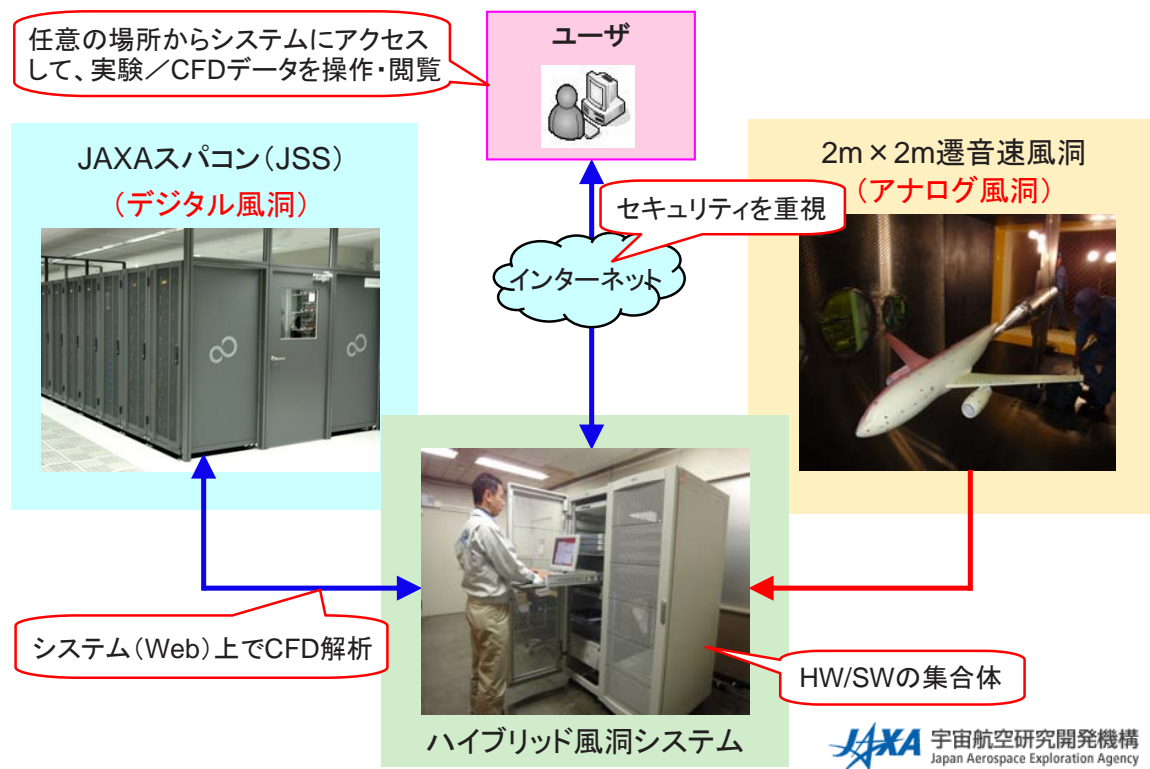
3

ハイブリッド風洞利用フロー



4

システム構成



5

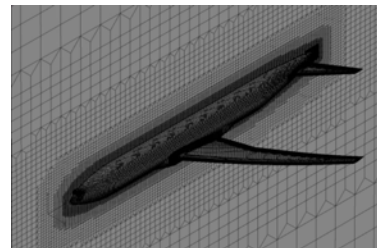
デジタル風洞

ハイブリッド風洞システムで、
高速に空力データベースを構築するために...

自動格子生成ソフト: **HexaGrid**

- ・ CAD形状データから、自動的に格子を作成
- ・ 少ないパラメータで生成可能
- ・ 複雑な形状に対応

手動で作成すると1カ月→HexaGridで1~2時間



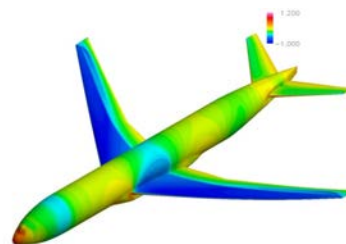
HexaGridの格子

高速流体解析ソフト: **FaSTAR**

- ・ 短時間で解析可能(世界最速レベル)
- ・ Euler, RANSIによる解析が可能
- ・ 目標は1時間/ケース、100コア、1000万格子

現状1.8時間/ケースで、商用ソフトの10倍の速さ

⇒ マルチグリッド法の導入で、目標達成見込み



FaSTARの計算結果

事前CFD(パラメトリックCFD)

- ✓マッハ数
- ✓模型姿勢角
- ✓風洞総圧
(レイノルズ数)

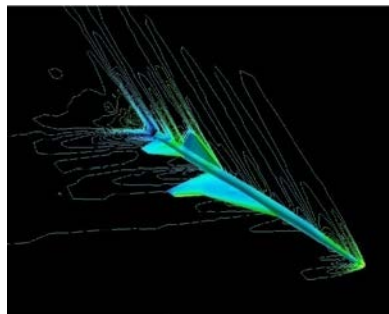
模型形状データ(STL
形式)を事前登録

CFD解析
自動実施

パラメータ範囲と
刻み幅を入力

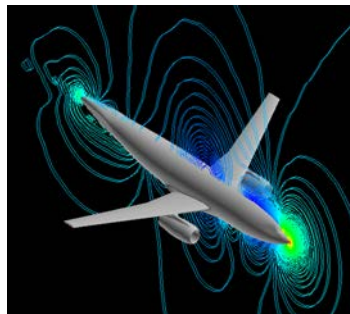
JSSジョブパラメータ
を入力

事前CFD(パラメトリックCFD)



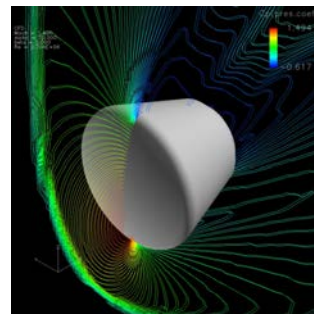
低ブーム概念実証機
(D-SEND#2)試験

- 全28ケース
- 格子点数12~15M



DLR-F6標準模型試験

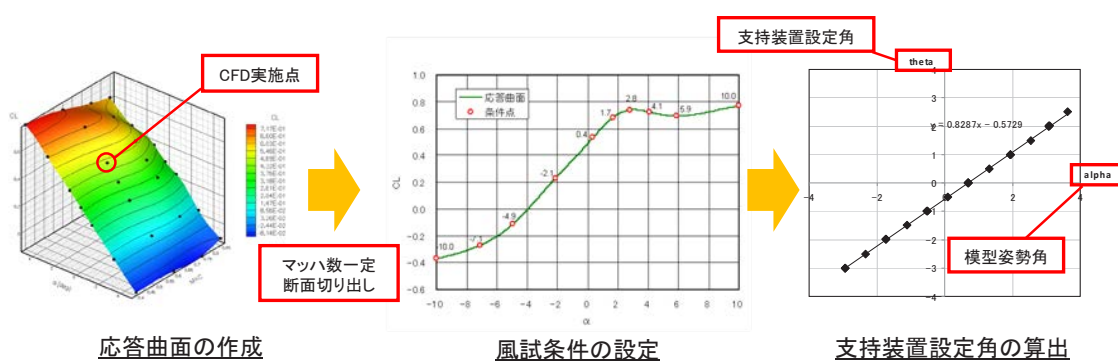
- 全42ケース
- 格子点数15~24M



HTV-R回収カプセル試験

- 全174ケース
- 格子点数3.5~9M

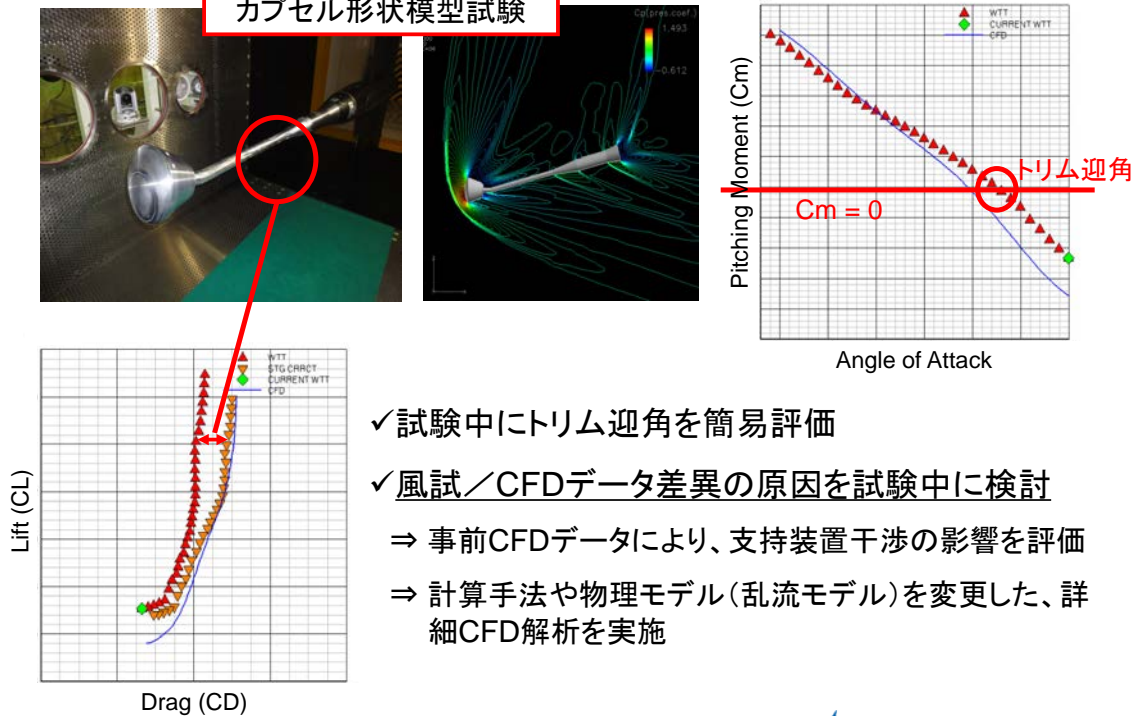
事前CFDデータを用いた試験計画の策定



- 計測ポイント数を入力し、曲率の大小に応じて計測ポイントを分布
- 事前CFDで得られた空気力と風洞の天秤/スティングたわみ係数値より、所定の模型姿勢角(ターゲット α)を実現する支持装置設定角(θ)を算出

空気力データのリアルタイム確認

カプセル形状模型試験



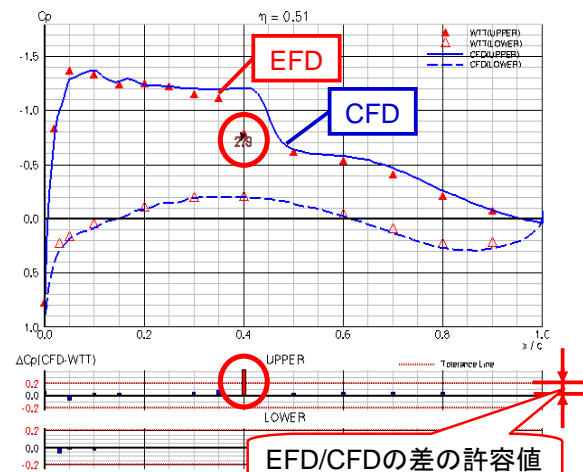
✓試験中にトリム迎角を簡易評価

✓風試／CFDデータ差異の原因を試験中に検討

⇒ 事前CFDデータにより、支持装置干渉の影響を評価

⇒ 計算手法や物理モデル(乱流モデル)を変更した、詳細CFD解析を実施

静圧孔データのリアルタイム確認



✓CFDとの差が大きな実験点について、差分と模型圧力孔番号をモニタリング画面で赤色表示

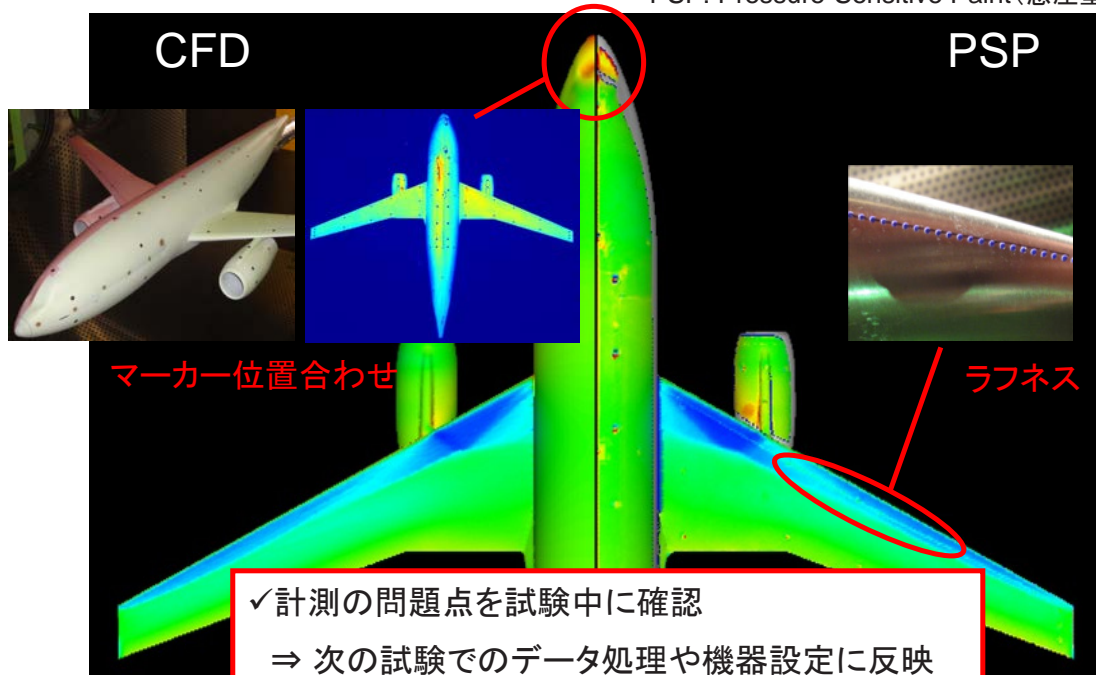
⇒ 異常値とみなされる場合は、試験終了後に圧力孔を確認、修復

⇒ 次の試験でのデータ改善

⇒ 風洞試験の手戻り削減、データ信頼性/生産性の向上

PSPデータの妥当性確認

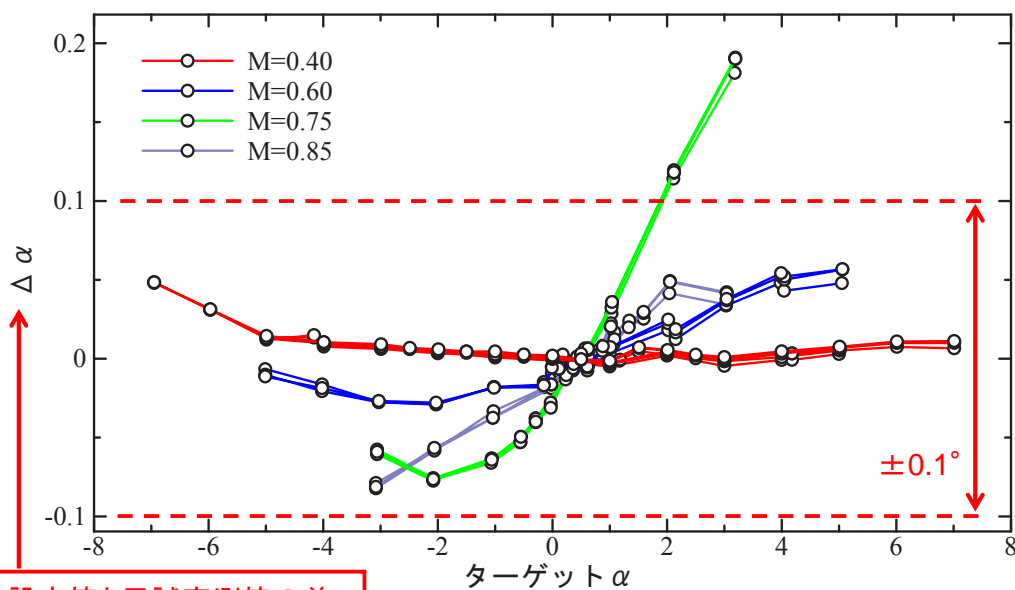
PSP: Pressure-Sensitive Paint (感圧塗料)



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

12

事前CFDを用いた目標迎角への合わせ込み



設定値と風試実測値の差

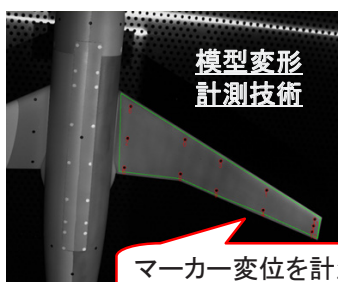
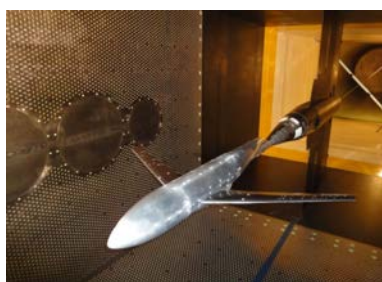
⇒ 大半は0.1度以内の誤差で設定できている。

⇒ EFD/事前CFDのデータ比較が有効に

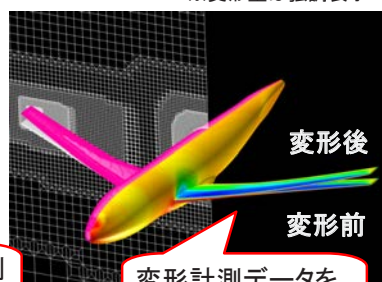
JAXA 宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

13

模型変形計測データを用いた高忠実CFD



マーカー変位を計測し、変形量を計算

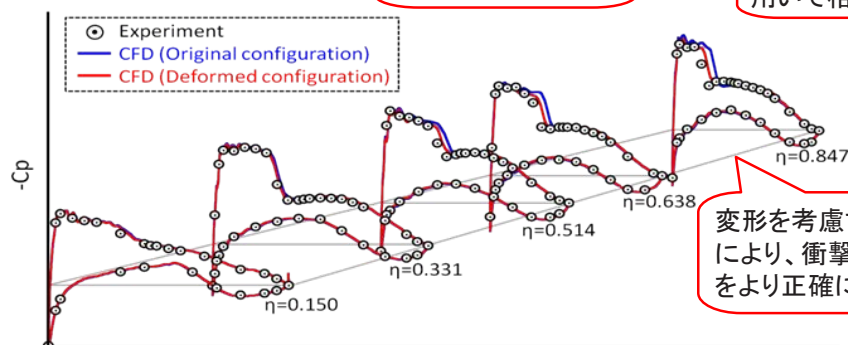


※変形量は強調表示

変形後

変形前

変形計測データを用いて格子を変形



変形を考慮することにより、衝撃波位置をより正確に再現

⇒ 厳密なEFD/CFD比較が可能に

EFD/CFD統合データベース

EFD(風試)データベース

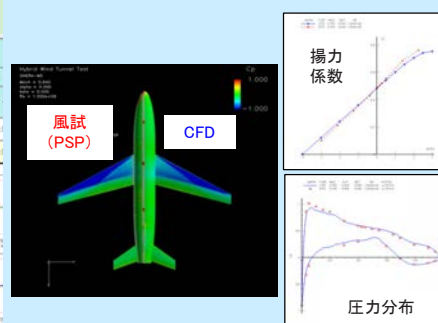
No.	有効性	区分	識別番号				気流条件				姿勢角		空力						
			試験種別	ラン番号	計測番号	実験日	実験時刻	M	Re [×10 ⁶]	P0 [kPa]	T0 [K]	α [deg]	β [deg]	GA	CY	CN	CI	Cm	Cn
□ 1	有効	リアルタイム	力	04039	023	2011-10-06	11:06:05	0.750	1.54	100.09	315.38	1.429	-0.0	0.02682	0.0	0.50546	0.0	-0.08599	-0.0
□ 2	有効	リアルタイム	力	04039	025	2011-10-06	11:08:54	0.750	1.53	99.92	317.47	-1.019	0.0	0.03306	0.0	0.21344	0.0	-0.11059	-0.0
□ 3	有効	リアルタイム	力	04039	026	2011-10-06	11:10:11	0.749	1.52	99.93	318.25	-0.008	0.0	0.03076	0.0	0.32668	0.0	-0.10083	-0.0
□ 4	有効	リアルタイム	力	04039	027	2011-10-06	11:16:41	0.750	1.53	100.10	318.11	1.019	0.0	0.02647	0.0	0.45345	0.0	-0.08996	-0.0
□ 5	有効	リアルタイム	力	04039	028	2011-10-06	11:18:21	0.749	1.52	100.06	318.23	1.226	0.0	0.02527	0.0	0.46097	0.0	-0.08775	-0.0
□ 6	有効	リアルタイム	力	04039	029	2011-10-06	11:20:06	0.750	1.52	99.91	318.21	1.433	0.0	0.02415	0.0	0.50968	0.0	-0.08669	-0.0

CFDデータベース

No.	CFD	有効性	種別	区分	気流条件						姿勢角				空力係数				空力係数								空力係数																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
					M	Re [$\times 10^5$]	P0 [kPa]	T0 [K]	α [deg]	β [deg]	3C(1) $\times 10^{-3}$		3C(2) $\times 10^{-3}$		Res($\times 10^{-3}$)	空力係数表示	空力係数																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
											CA	CY	CN	CI			Cm	Cn	CD	CY	CA	CY	CN	CI	Cm	Cn	CD	CY																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
1	事前CFD	支持なし	無効	0.800	1.31	100.00	321.00	-3.000	0.0	0.038123	0.020019	3.872544	0.0	0.03405	0.0	0.08036	0.0	-0.15000	0.0	0.03044	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0

収束状況を確認

EFD/CFD統合可視化



EFD/CFD融合の課題

■これまでのハイブリッド風洞の活用により抽出されたEFD/CFD融合に関する課題について、

① 経済性・効率性

② 精度・信頼性

それぞれの側面から考える。

EFD/CFD融合の課題 —経済性・効率性の観点から

■ 事前CFDによる試験計画設定支援

⇒ ユーザは限られた試験期間に、「必要な」データを取りきりたい

⇒ 計測ポイントの最適配置を行うだけでは、不十分

⇒ 今後検討すべき課題

① 実験計画法の導入

② CFDによるEFDの補間

✓ 線形領域はCFDで補間し、非線形領域のデータ取得に集中

✓ 空間的に計測困難な箇所をCFDでカバー

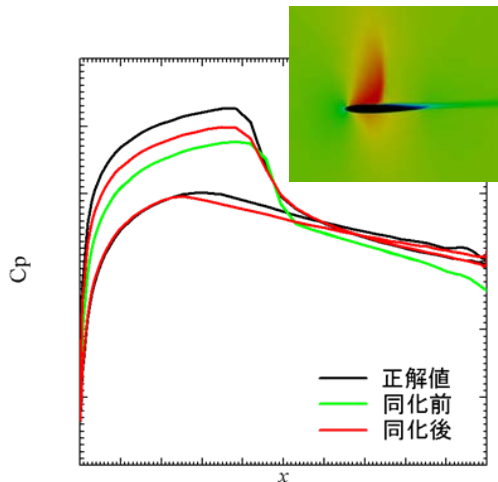
✓ 無駄な計測を無くすことにより、試験コストを削減

EFD/CFD融合の課題 —経済性・効率性の観点から

■ CFDによるEFDの補間(流れ場の再構築)

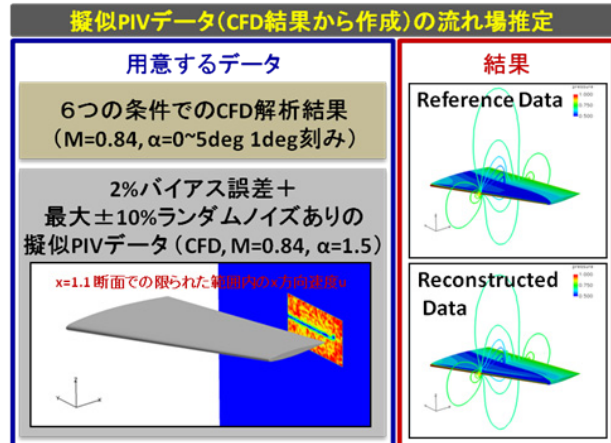
計測融合シミュレーション

- ・ NS方程式に補正項を付加し、CFDを計測値に近づけるように同化



固有直交分解(POD)

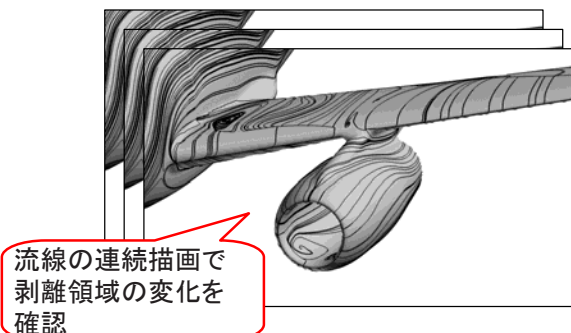
- ・ 複数CFDデータから共分散行列を構築し、固有値/固有ベクトルおよび計測データにより流れ場を再構築



EFD/CFD融合の課題 —経済性・効率性の観点から

■ EFD/CFDデータのリアルタイム確認

- ⇒ 空気力、圧力のみならず、より局所的かつ特定な情報のモニタリング
- ✓ ヒンジモーメント、コンポーネント荷重等
- ✓ 現象(圧力分布、剥離領域等)のパラメータ変化を、CFDで調査
- ⇒ CFDにおける情報抽出の効率化が課題
- ✓ 必要な位置において、必要な物理量を、任意の次元(点/線/面/空間)についてスピーディーに表示



EFD/CFD融合の課題 —経済性・効率性の観点から

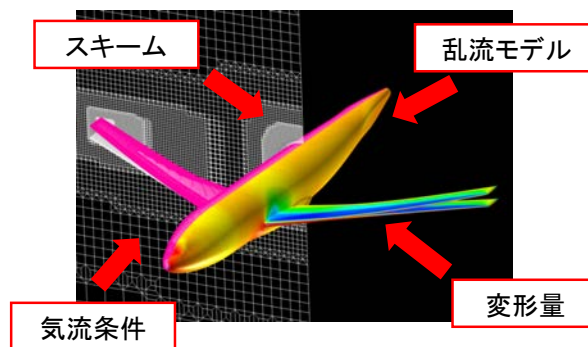
■ EFD/CFDデータのリアルタイム確認(続き)

⇒ ただ比較するだけでなく、試験キャンペーン中の一致度改善により、データの信頼性をリアルタイムに向上できないか？

- ✓ スキーム、乱流モデル等を変更してのCFD再実施
- ✓ 計測データを反映した、高忠実CFD
- ✓ 詳細CFDデータの試験へのフィードバック

詳細CFD

⇒ 究極的には、CFDを試験とパラで実行させたい。



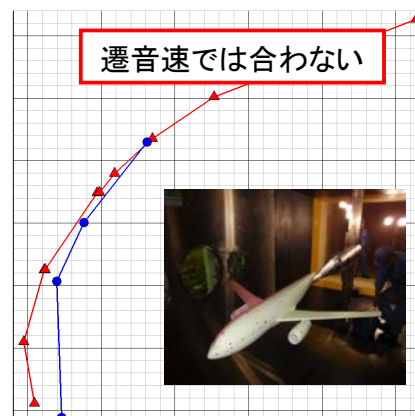
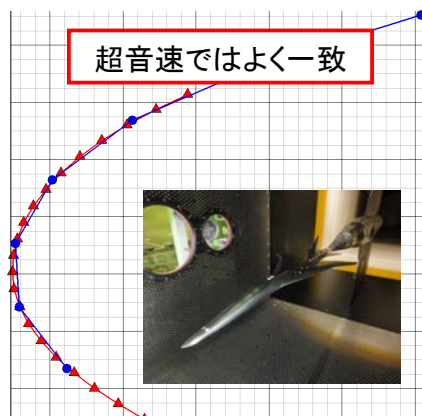
EFD/CFD融合の課題 —精度・信頼性の観点から

■ 何よりもCFDの精度向上・信頼性確保が至上命題

⇒ 現状のハイブリッド風洞では、「事前CFD＝真値」を陰に仮定している。

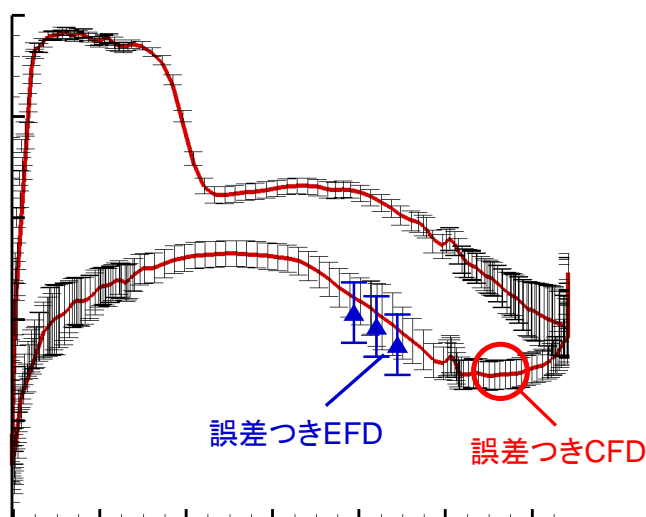
⇒ 遷音速域における複雑形状まわりのCFDは、物理的にも数値的にも課題が多い。

⇒ 計算機速度が上がれば、詳細CFDを事前CFDと逐次置き換えることによって、CFDの定量的有用性を向上させることも可能。



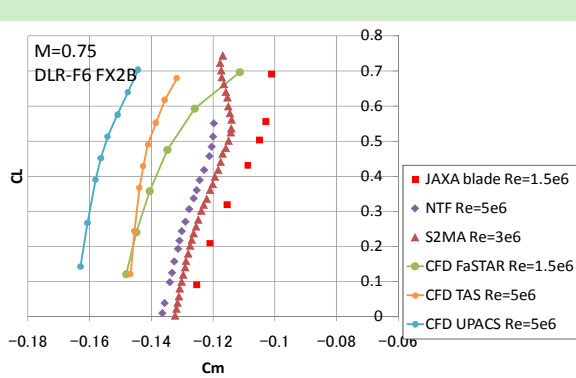
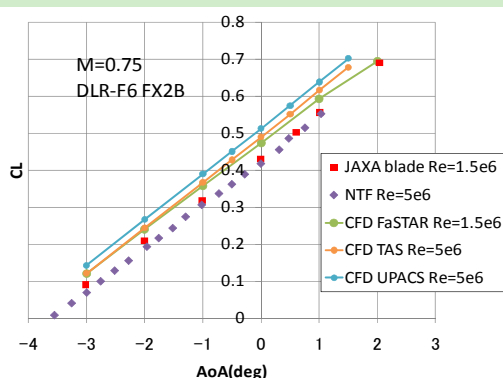
EFD/CFD融合の課題 ー精度・信頼性の観点から

- EFD/CFDともに、**不確かさ**(エラーバーなど)に関する明確な情報を
⇒ EFDについては標準的な不確かさ解析手法が存在
⇒ **CFD不確かさ評価手法の確立**が、当面の課題



不確かさ情報を付加
することにより、比較
の妥当性を向上

EFD/CFD融合の課題 ー精度・信頼性の観点から



- ✓EFDデータ同士は同じ傾向を示す。
- ✓CFDデータ同士も同じ傾向を示す。
- ✓しかし、EFD/CFD間で合わない。

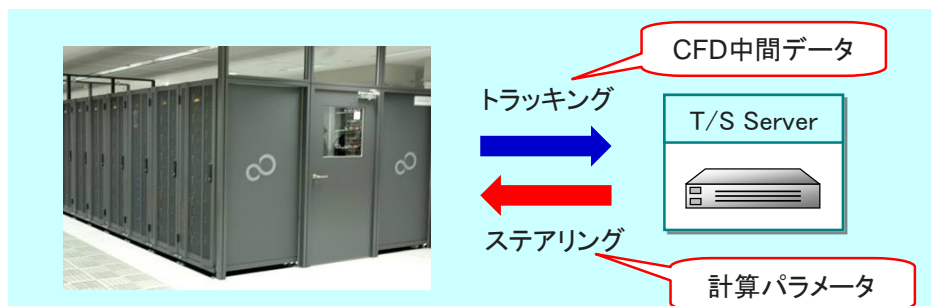
橋本他, 第49回飛行機シンポジウム, 2011

デジタル風洞の課題

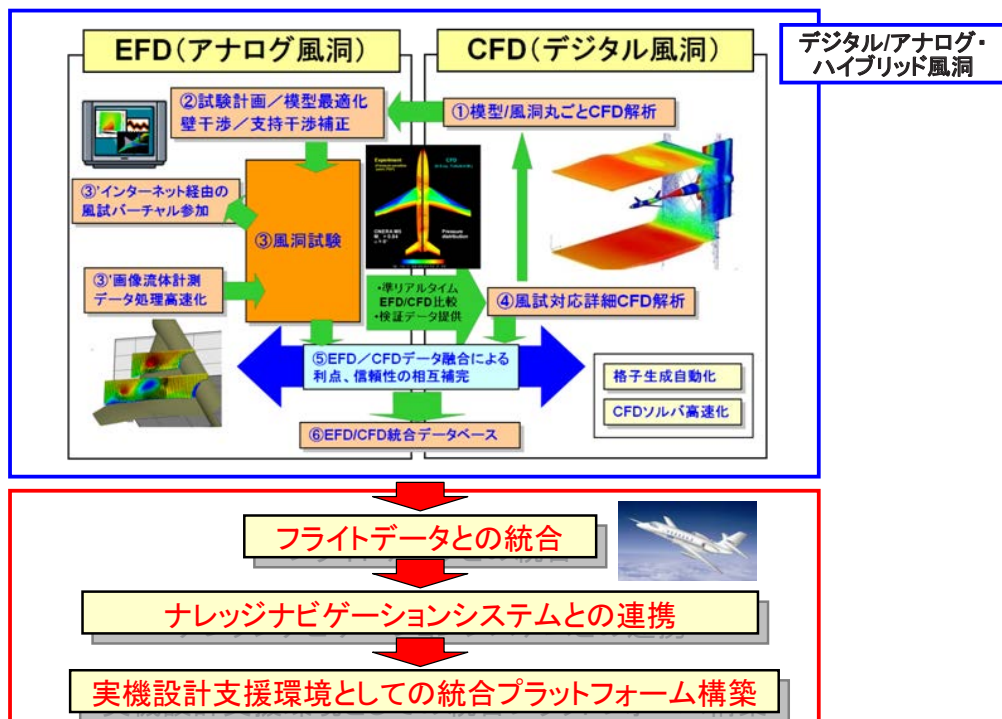
- CFD解析の効率化・簡略化（ユーザフレンドリー化）はある程度実現したが・・・
 - ⇒ 完全な自動化は未だ困難
 - ⇒ 自動的に出力されたデータの精度は？
- 格子生成は、熟練者のノウハウが依然として必要
 - ⇒ デフォルトの生成パラメータでうまくいかない場合
- CFD解析の効率化・ソルバーオプション（スキーム、乱流モデル、リミタ等）の選択
 - ⇒ 最適な組み合わせの選択には経験を要する。
- 計算不具合時（発散、収束性悪化）の対応
 - ⇒ リスタートが必要なので、どうしても手作業が入る。

デジタル風洞の課題

- 現状ではCFD熟練者のノウハウはどうしても必要
 - 将来的に改善する可能性の一候補として・・・
- トラッキング・ステアリングシステム
- 数値解析の進行をリアルタイムに確認（トラッキング）
 - パラメータを計算を中断することなく、適切な値に調整（ステアリング）



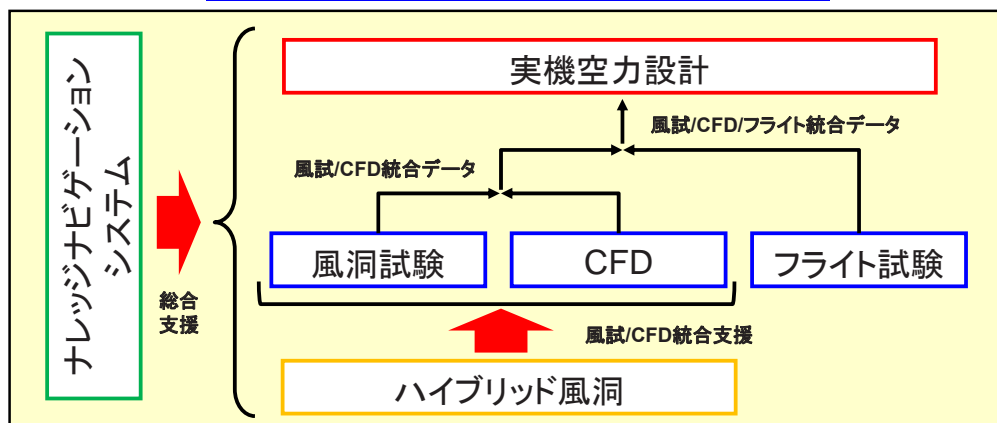
ハイブリッド風洞の将来構想 –フライトデータとの統合



ハイブリッド風洞の将来構想 –フライトデータとの統合

- 過去の航空機開発、風洞試験で培った技術・ノウハウ等の知識DB化
 - 実機空力設計ナレツジナビゲーションシステムの構築
 - ✓ 設計作業支援(概念設計・基本設計・詳細設計)
 - ✓ 実機空力設計を踏まえた、風洞試験/CFD/フライト試験の有機的な実施支援

実機空力設計支援統合プラットフォーム(概念図)



まとめ

- 風洞試験に対してCFDを有機的に連携させた、EFD/CFD融合システム「デジタル/アナログ・ハイブリッド風洞」を開発中。
- システムを実際の風洞試験に適用し、EFD/CFD融合の第一歩として着実な成果を収めている。
- 実用的な観点からは、CFDをEFDに同化させる手法の確立、CFDの精度向上・精度保証、および情報抽出の効率化が近々の課題。
- 将来的にはフライトデータとの統合も含めることにより、航空宇宙機の設計開発ツールとしての地位を確立するとともに、EFD/CFD融合技術を推進するためのプラットフォームとして、更なる活用を図りたい。

謝辞

ハイブリッド風洞の開発に関わってこられた以下の方々のご尽力に対し、ここに感謝の意を表します（順不同、敬称略）。

山下達也、保江かな子、今川健太郎、橋本敦、加藤裕之
(JAXA)

(株)菱友システムズ

(株)キャトルアイ・サイエンス