

日本におけるEFD/CFD融合 – JAXAからの提言 –
Integration of EFD and CFD in Japan
– A Proposal from JAXA –

口石 茂、渡辺重哉、相曾秀昭、松尾裕一 (JAXA)

第4回EFD/CFD融合ワークショップ

2011年1月25日

秋葉原コンベンションホール

内容

- EFD/CFD融合とは
 - 特に航空機設計開発の観点から
 - 国内外における取組例
- 過去のワークショップを振り返って
 - 寄せられた主な意見
- 現状認識／あるべき姿
- 融合の形態と考え方
- 日本における進め方 – JAXAからの提言 –
- おわりに

- 本資料は、著者4人で作成した原案を基に、ワークショップ実行委員から寄せられた意見を反映させて、完成したものです。
- 今回の発表の内容は、航空宇宙分野を主な対象としています。

EFD/CFD融合とは

- EFD: Experimental Fluid Dynamics (実験流体力学)
- CFD: Computational Fluid Dynamics (数値流体力学)
- 両者それぞれの強み・弱みがある
- 両者を積極的に組み合わせることにより、
 - ー 研究開発の効率化・高精度化が実現できないか？
 - ー これまでできなかったことが、できるようにならないか？
 - ー これまで分からなかったことが、分かるようにならないか？
 - ー バーチャルな世界から、**より現実的な世界**に近づけないか？

特に航空機設計開発の観点から

- 昨今になって、日本の航空機産業が真っ向から国際的な競争の下で飛行機作りをしていこうとしている。
- 今後この流れを維持するには、基盤技術の国際的な競争力を伸ばしていかなければならない。
- 空力設計に関しては、EFD/CFDの両アプローチがあり、それぞれについて技術開発や設備整備を進めていく必要がある。
- 一方、EFD/CFDそれぞれの技術レベルは、各国でほぼ同程度であるのが実状。

※日本は部分的に欧米から出遅れている？ (36ページ参照)

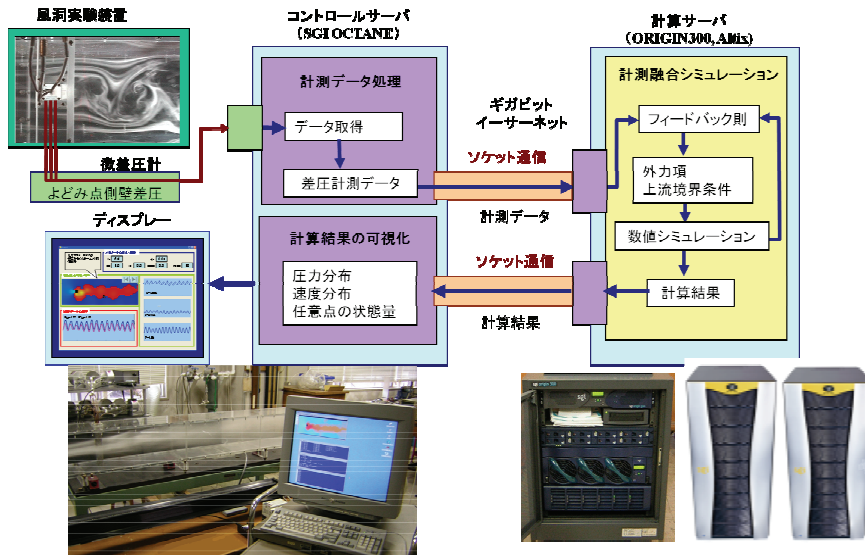
JAXAからの提言1

日本としてEFD/CFD融合技術を全面的に押し出すことにより、国際的優位性を確立することができないか？

国内外における取組例

■東北大学ハイブリッド風洞

ー計測融合による、実現象(カルマン渦)のリアルタイムシミュレーション

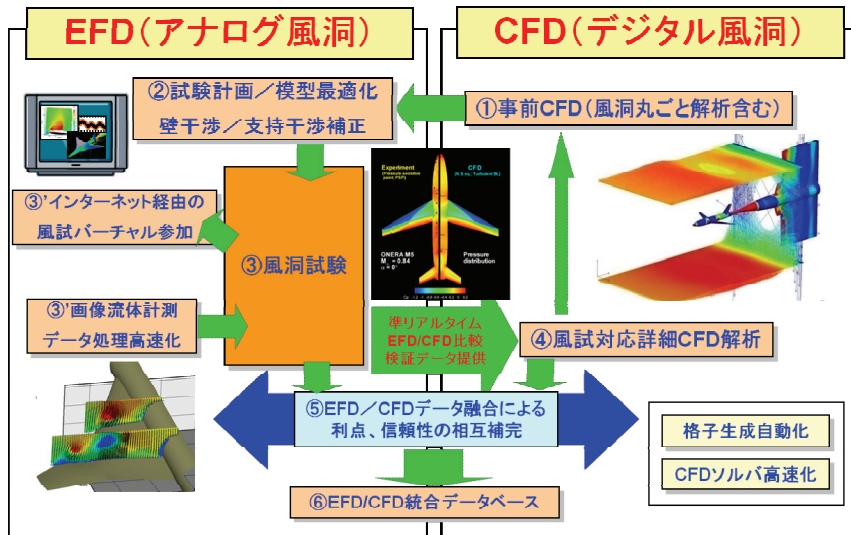


早瀬, 第1回EFD/CFD融合ワークショップ, JAXA-SP-09-002

国内外における取組例

■JAXAデジタル／アナログ・ハイブリッド風洞システム

ー風洞試験(アナログ風洞)にCFD(デジタル風洞)を強く連携させた、コンカレントなEFD/CFD融合システム



口石他, 第42回流体力学講演会, JSASS-2009-0137

国内外における取組例

■ 4次元変分法による後方乱気流の計測融合シミュレーション

— 後方乱気流計測データを用い、気象におけるデータ同化手法の導入によりシミュレーションの初期値を決定

計測と計算の差: 目的関数 → 最小化 (アジョイント法)

設計変数: 初期条件

$$J(\mathbf{Q}_0) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^N (\mathbf{H}_i(\mathbf{Q}_i) - \mathbf{Y}_i)^T \mathbf{R}_i^{-1} (\mathbf{H}_i(\mathbf{Q}_i) - \mathbf{Y}_i)$$

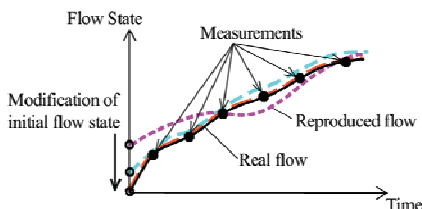
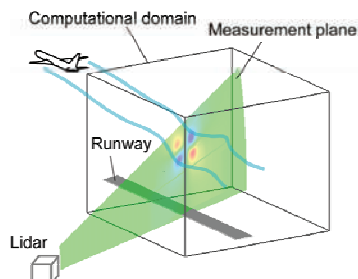
N : 時間ステップ

\mathbf{Q}_i : 計算変数

\mathbf{Y}_i : 計測変数

\mathbf{H}_i : 変換行列

\mathbf{R}_i : 計測誤差共分散行列

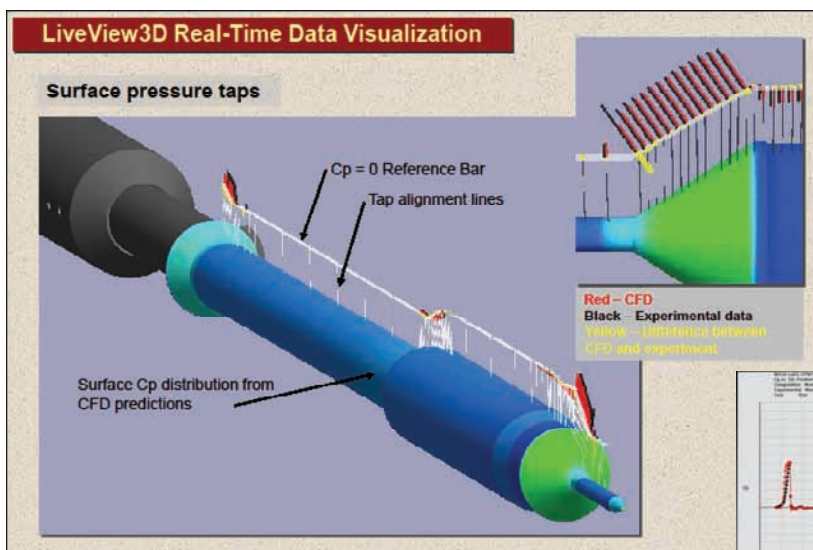


大林, 第1回EFD/CFD融合ワークショップ, JAXA-SP-09-002

国内外における取組例

■ Unified Data Visualization Using the Virtual Diagnostics Interface (ViDI)

— 可視化技術を駆使することにより、風洞試験の効率や利便性を向上

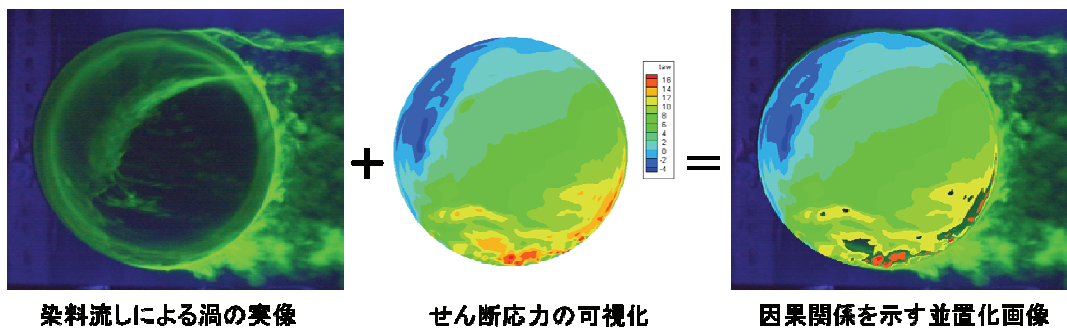


Schwartz, 第3回EFD/CFD融合ワークショップ, JAXA-SP-10-002

国内外における取組例

- VIDELICET (Visualization Design and Life Cycle Management) システム
 – EFD/CFD 並置化 (juxtaposition) による認知地図の劇的改良

Superimpose "shear stress" (CFD) on "vortices" (EFD)



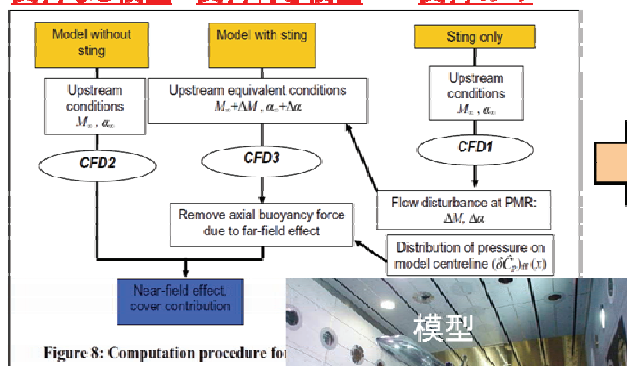
フリスビーの周りにできる渦構造(実写)と
せん断応力(シミュレーション)の因果関係

藤代, 第1回EFD/CFD融合ワークショップ, JAXA-SP-09-002

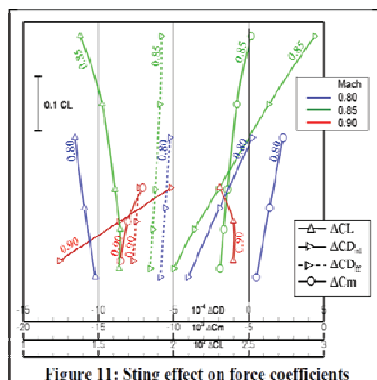
国内外における取組例

- CFDを活用した風洞模型支持装置干渉補正
 – 支持装置あり/なしCFD解析の差分から、風試支持干渉効果を補正

支持なし模型 支持付き模型 支持のみ



支持干渉補正手順

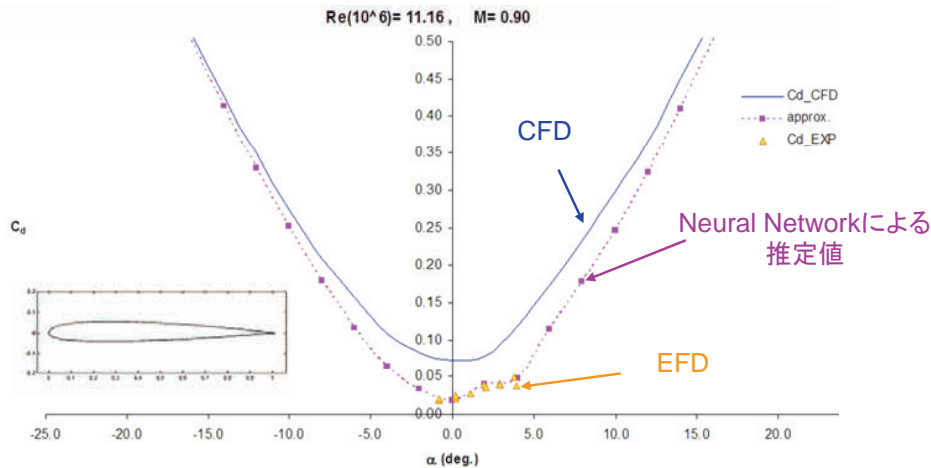


支持干渉推定量
(風洞データへの補正量)

国内外における取組例

■Neural Networkによる翼型の抗力係数推定

—データ融合手法(ニューラルネットワーク)を用いて、EFDデータの欠損部分をCFDデータで補間



Meade, International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration (AFI/TFI), 2004

過去のワークショップを振り返って

- 第1回：2008年2月26日@JAXA調布航空宇宙センター
参加者：59名
内容：国内招待講演10件、全体ディスカッション
- 第2回：2009年2月23, 24日@JAXA調布航空宇宙センター
参加者：80名
内容：海外招待講演2件、国内招待講演6件、一般講演4件、パネルディスカッション
- 第3回：2010年1月25日@秋葉原コンベンションホール
参加者：78名
内容：海外招待講演1件、国内招待講演4件、パネルディスカッション

寄せられた主な意見

■ EFD/CFD融合のあり方について

- ✓ 1+1 > 2となるのが理想だが、まずはEFDでもCFDでも難しい問題を0.3+0.3程度で融合させていくことが重要では。
- ✓ 将来的にはCFDの精度を上げる活動としてのEFDという位置づけになるのでは。
- ✓ EFDはそれなりに信頼性があるが、測れないところが出てくる。そこをCFDを使って補間することはできないか。

⇒ EFD/CFDの役割分担が重要

寄せられた主な意見

■ EFD/CFD融合の実問題への適用について

- ✓ 流体現象としての不確かさが設計開発においていかに重要なかが問題。
- ✓ EFDに一番期待されているのは実験の流体力学をいかに解釈するのかにも関わらず、そこが欠如している。

⇒ まずは流体力学現象の理解が重要

寄せられた主な意見

■EFD/CFD融合の実問題への適用について(続き)

- ✓ EFDとCFDを一致させることは困難。それよりもなぜ異なるのかを調べ、それらをどう設計に反映させるかを考えるべき。
- ✓ EFD/CFDともに目的は設計上の判断を可能たらしめること。ここでEFD/CFDを一緒にすることで迅速な判断を可能とするデータ融合という考えが出てくる。
- ✓ 航空機開発には知見の集積が大きな比重を占めている。そこでEFD/CFDで知見を向上させることを目指している。

- ⇒ 実機空力特性の真値を予測するのは困難
- ⇒ 融合により、EFD/CFD両者の不確かさを許容しつつ、如何に設計開発に資する判断材料を与えるか
- ⇒ 融合による課題・知見の抽出という観点も重要

EFD/CFD融合の現状認識

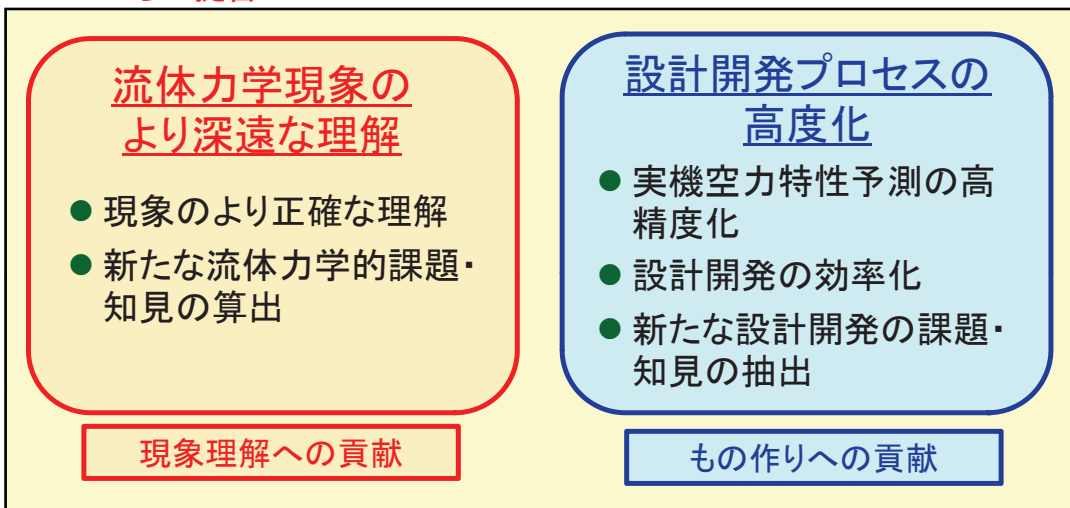
- 流体力学の研究者にはなじみの薄い専門知識が必要な場合があるため、取りかかりが悪い(敷居が高い)。
- また、具体的な課題(ニーズ)もアウトプットもイメージしづらい。
- そもそもEFD/CFD融合とは何なのか、融合して何のメリットがあるのかですら分りづらい。
 - 単なる比較・検討と融合とは異なる！
- よって研究者間でビジョンが共有できない。
- 以上により、大方は各機関で孤軍奮闘している状態。

- ⇒ EFD/CFD融合に係るコンセプト(あるべき姿)の共有が急務！

EFD/CFD融合のコンセプト(あるべき姿)

■寄せられた意見や現状認識を踏まえ、航空宇宙分野における融合のコンセプト(あるべき姿)を以下のように考えた。

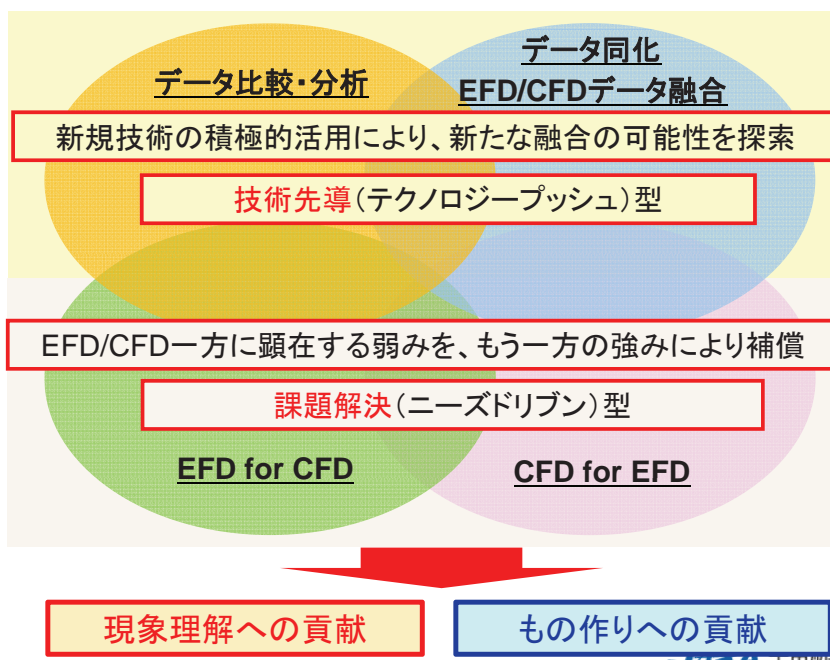
JAXAからの提言2



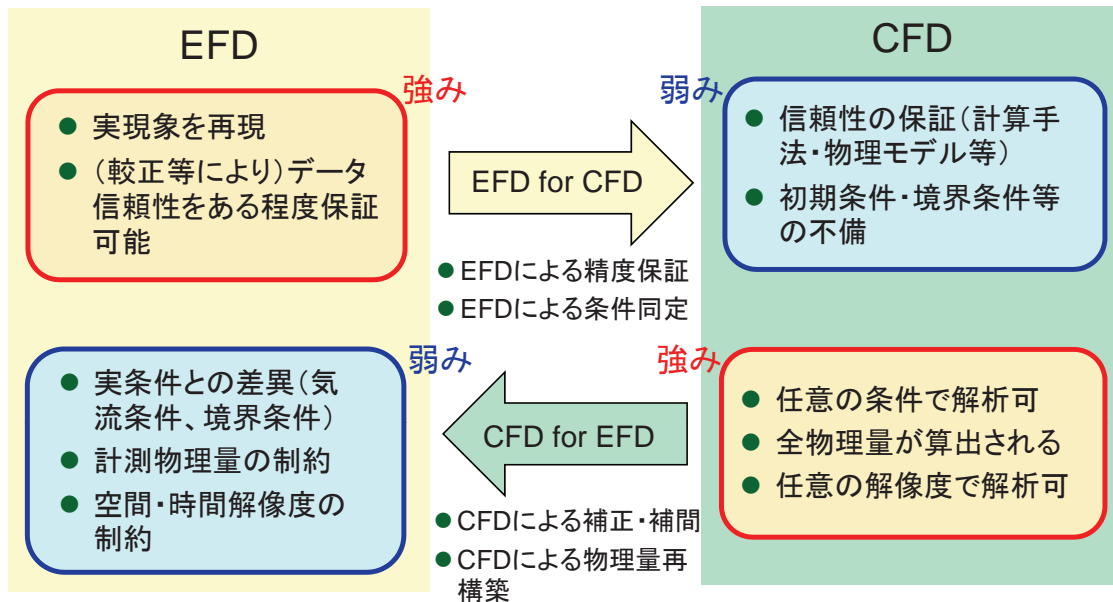
⇒ これで十分か？ 他にもあるか？

融合の形態と考え方

■過去の取り組み例を参考に、融合の形態を以下の4つに分類



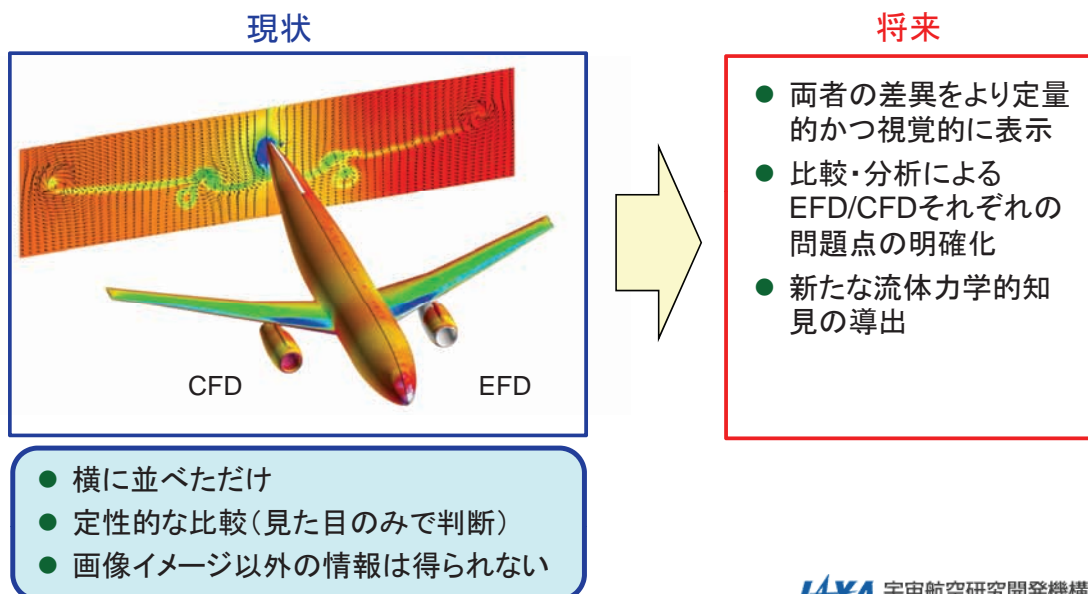
EFD for CFD / CFD for EFD



いずれもEFD/CFD一方を真値と仮定することが前提
⇒ EFD/CFD双方の不確かさを許容した融合は可能か？

データ比較・分析

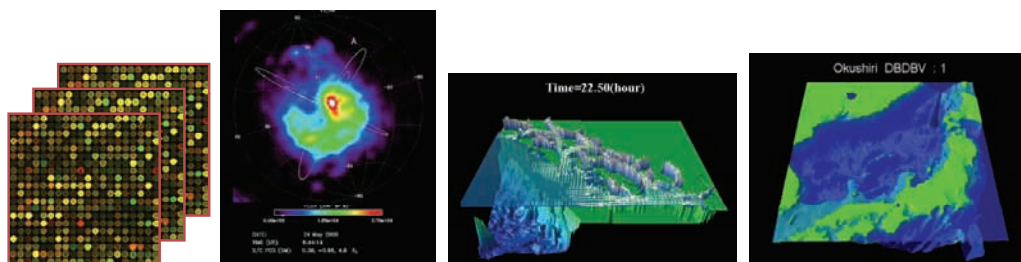
■ 可視化情報技術、データ解析技術等の活用により、**単純比較**では得られない知見が得られないか？



データ同化 (Data Assimilation)

- 気象学・海洋学の分野で発達
- 数値シミュレーションモデルと観測を統合する手法
 - ー シミュレーションのみでは適切に物理現象を再現できない
 - ー 観測データは得られる情報に限界がある

観測データで数値シミュレーション内の変数を修正 = データ同化



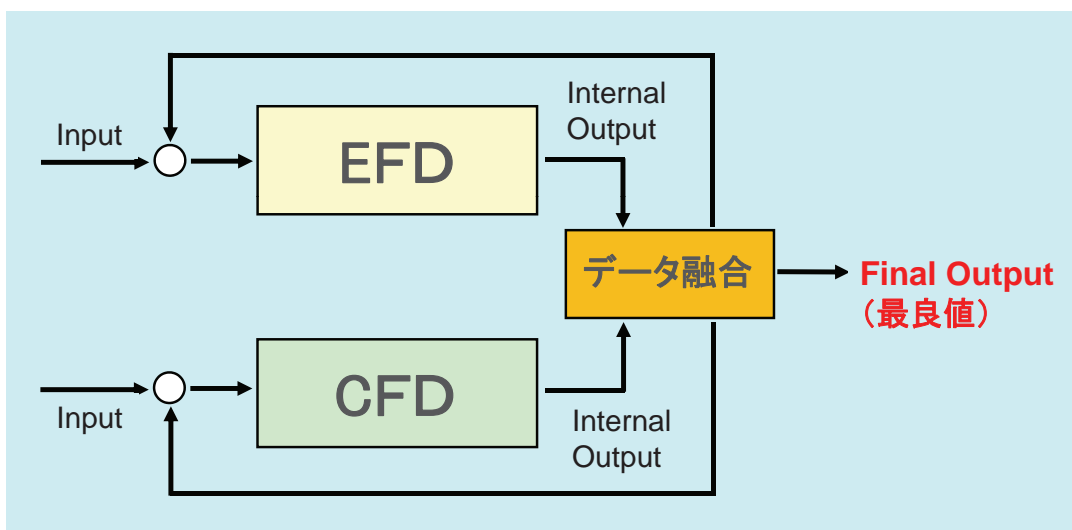
⇒ 航空宇宙分野に適用可能か？

データ同化研究開発センター
<http://daweb.ism.ac.jp/contents/>



EFD/CFDデータ融合

- EFD/CFDデータの**相補的活用**により、精度・信頼性を向上させたデータ(**最良値**)を導出できないか？

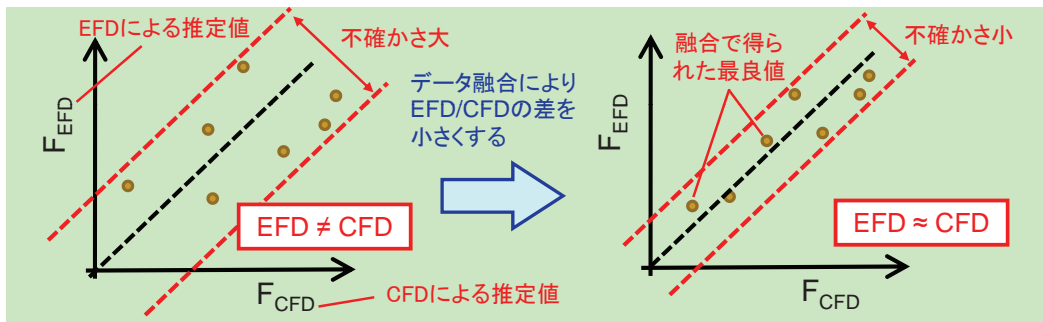


⇒ EFD/CFDそれぞれに課題の多い現状では困難？



EFD/CFDデータ融合による最良値推定

- 融合により、流体现象に係る**真値**を求めるのが究極の目標
- しかしながら単なる融合で真値を明かめるのは、おそらく不可能
- そこで、融合によりEFDとCFDを極力一致させた値を**最良値**と考え、加えて**不確かさ幅**を評価することを当面の目標としたい。
- その不確かさ幅を、EFD/CFD融合の高度化により、可能な限り小さくしたい。

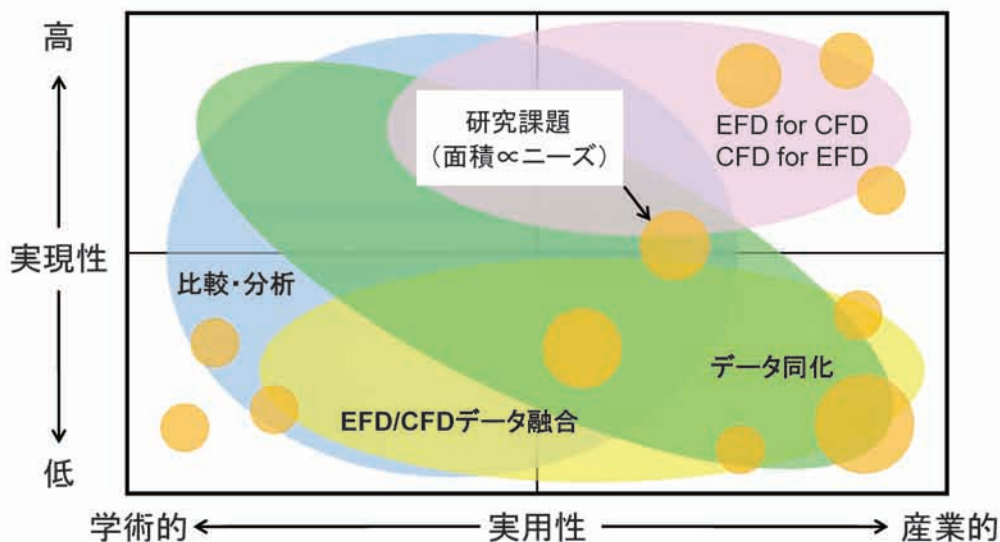


EFD/CFDデータ融合による最良値推定(イメージ)

融合研究課題(案)

	現象理解への貢献	もの作りへの貢献
比較・分析	<ul style="list-style-type: none"> ● 並置化による現象因果関係の抽出・新たな知見の導出 	<ul style="list-style-type: none"> ● 並置化によるEFD/CFD健全性評価・問題点抽出
CFD for EFD		<ul style="list-style-type: none"> ● CFDによるEFD感度解析 ● CFDによるEFDデータ補間 ● CFDによる風洞壁・支持干渉補正 ● 事前CFDによるEFD条件設定 ● パワー効果補正 ● フラッタ、パフェット等の事前予測
EFD for CFD	<ul style="list-style-type: none"> ● 物理モデル構築・高精度化 	<ul style="list-style-type: none"> ● EFDデータによる乱流モデルの選択 ● 高忠実CFD解析(模型変形、遷移) ● EFDデータによるCFD格子の再配置
データ同化	<ul style="list-style-type: none"> ● 計測融合シミュレーションによる現象再現 	<ul style="list-style-type: none"> ● データ同化によるCFD条件同定
EFD/CFDデータ融合	<ul style="list-style-type: none"> ● 微細・複雑現象(音響、燃焼等)の解明 ● 非定常現象の解明 	<ul style="list-style-type: none"> ● EFD/CFD最尤値推定 ● EFD/CFDデータから実機性能の直接推定

日本における進め方 –JAXAからの提言–



⇒ 融合研究課題をポートフォリオで整理の上、優先順位を設けて、日本として戦略的に実施できないか？

日本における進め方 –JAXAからの提言–

- 日本でEFD/CFD融合を推進するための基盤となる、フレームワークを構築したい。

JAXAからの提言3

「EFD/CFD融合ワーキンググループ」(仮称)の設立

- 航空宇宙に限らず、様々な専門分野から会員を募集
- メーリングリストで関連学会やセミナー等を周知
- EFD/CFDデータや参考資料を共有
- JAXA公募研究の実施
- 競争的資金(科研費等)の獲得も検討
- 将来的にはコンソーシアム的な発展を期待

※コンソーシアム(Consortium): 提携、共同、団体

日本における進め方 –JAXAからの提言–

- 一方、EFD/CFD融合推進のための体制をJAXAで強化
 - ✓ EFD/CFD共通データベースの構築
 - ✓ CFD解析プラットフォームの整備
 - ✓ 検証用EFDデータの取得
- ニーズを重視しつつも、テクノロジープッシュ的な発想も常に念頭に置く
- 実飛行条件予測に関しては、フライトデータ整備も今後の課題
 - フライトデータの高精度化の観点から、将来的にはEFD/CFD for Flightという考え方も必要

(参考)JAXA CFDポータルシステム(NAGシステム)

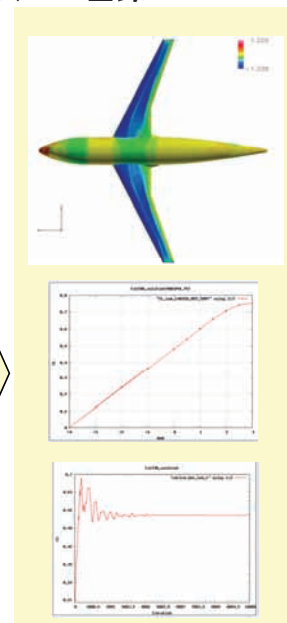
- 形状データ、解析条件ファイル等を用意してWeb(ポータルサイト)上で登録
 - ⇒ 格子生成、解析実施、データ整理までを自動実行
 - ⇒ CFDに不慣れなユーザでも手軽に解析が可能！



データ入力画面

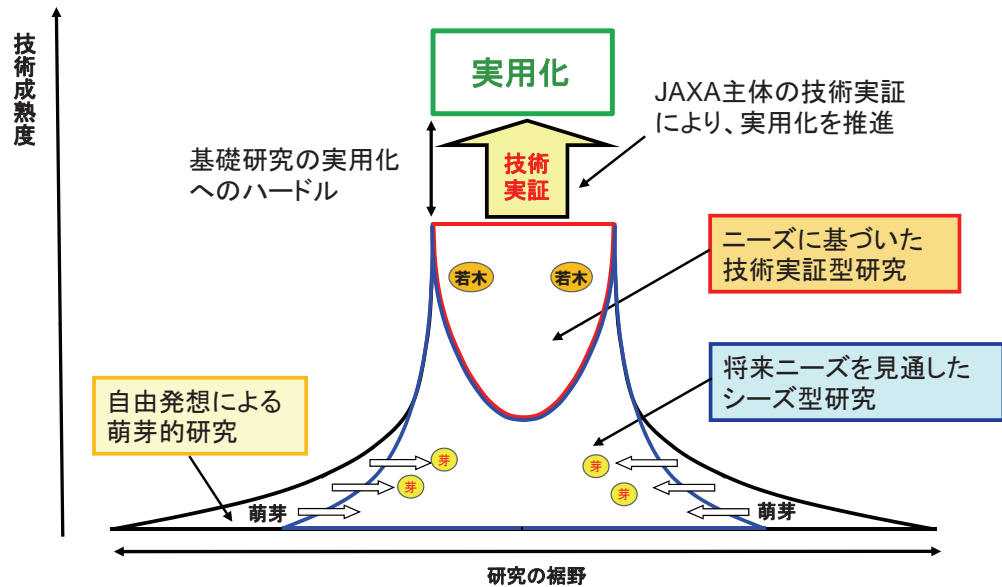


CFD解析結果DB



日本における進め方 –JAXAからの提言–

■ 研究課題の絞り込みと技術成熟・実用化まで(イメージ)



EFD/CFD融合推進のために

- EFD/CFD融合技術は新たな研究分野(研究要素の宝庫)
 - 研究者個々人の自由な発想からの発展を期待
 - 何に対してどう役に立つかを常に考えることが重要
- EFD/CFD融合に先立って、**流体力学と他分野との融合**が、技術のブレークスルーにおいて重要
 - 従来の流体力学的発想のみでは限界がある
- 実験とシミュレーションの融合は工学共通の課題なので、成果は流体分野以外にもスピノフ可能
- 産学官の密接な連携により、効果的かつ効率的に推進したい

おわりに(JAXAからの提言)

■JAXAからの提言1

日本としてEFD/CFD融合技術を全面的に押し出すことにより、国際的優位性を確立することができないか？

■JAXAからの提言2

航空宇宙分野におけるEFD/CFD融合の二枚看板

流体力学現象の
より深遠な理解

現象理解への貢献

設計開発プロセスの
高度化

もの作りへの貢献

■JAXAからの提言3

「EFD/CFD融合ワーキンググループ」(仮称)の設立

以下、参考資料

参考：過去のワークショップで寄せられた意見（詳細版）

- ✓ 航空機の実機空力特性について、EFD、CFDのどちらの方がポテンシャルが高いかを考えると、EFDでは不可能だがCFDの方がまだ可能性がある。
- ✓ EFDが何をしたいかによるのではないか。空力特性の把握だけか。フライトまで含んだシステムのモデル化か。まずは目標を考えるべき。
- ✓ 今後5年間でEFDが必要なくなるほどCFDが発達するとは思えない。EFDとCFDの使い分けが重要ということではないか。一方全てのケースについてEFDとCFDを付き合わせるのはやりすぎと考える。
- ✓ 両者を組み合わせて使うべきだと思うが、それが常時必要になるのか。
- ✓ それはEFDも同じことではないか。誰がどこでやるかで結果が異なってしまう。
- ✓ 確かにコンピュータの能力が向上してやれることが増えた一方で、EFDはそこまで技術が加速していないという側面はあるが、CFDだけで十分という前にvalidationをスムーズにできるシステムを構築することが大事なのではないか。
- ✓ 将来的にはCFDの精度を上げる活動としてのEFDという位置づけになるのでは。
- ✓ 1+1 > 2となるのが理想だが、まずはEFDでもCFDでも難しい問題を0.3+0.3程度で融合させていくことが重要では。
- ✓ 個別の問題についてはカルマンフィルタ等ツールや方法論ができつつある。それらを整理すると体系化できて他の分野にも使えるということがあるのではないか。そこが研究対象でもある。

参考：過去のワークショップで寄せられた意見（詳細版）

- ✓ 現状では気象に特化したものが風洞にも適用できる等、裾野が広がっていく可能性があるのでは。
- ✓ 関係者を融合する困難さもある。研究者のモチベーションをどう高めていけばよいのか。いずれにしても閉じたコミュニティにならないように、オープンな体制で海外と競うような姿が欲しい。
- ✓ CFDは日本の売りなので、ペタコン等の技術動向と合わせて今後検討すべき。
- ✓ 融合の前に分解することが重要ではないか。個々人が持つ技術や手法をスクラップ&ビルドすることにより、何ができるか、何をすべきか、という共通項が見えてくる。
- ✓ 現場と研究者で課題を共有できることが大事。
- ✓ Ill-posedの問題をEFD/CFDで補完し合うことによりWell-posedに近づけていくのが大事。
- ✓ EFD/CFDお互いの基礎がしっかりして、かつ互いをよく知っていることが大事。
- ✓ CFDと風試の両方にかかる時間を減らすことにより、より早く製品化に到達することができたらよい。
- ✓ 流体现象としての不確かさが設計開発においていかに重要なのが問題。
- ✓ EFD/CFDともにその目的は設計上の判断を可能たらしめること。ここでEFD/CFDを一緒にすることで迅速な判断を可能とするデータ融合という考えが出てくる。

参考：過去のワークショップで寄せられた意見（詳細版）

- ✓ 融合の最終ゴールは真値に到達することかもしれないが、完全に一致するようなデータはまず得られない。時代に応じた精度目標値に向かって、いかに融合を進めていくかを考えることが大切。
- ✓ EFDとCFDには違いが多すぎるので、両者を一致させることは困難。それよりもなぜ異なるのかを調べ、それらをどう設計に反映させるかを考えるべき。
- ✓ 生産性や効率性という観点も重要
- ✓ EFDはそれなりに信頼性があるが、測れないところが出てくる。そこをCFDを使って補間することはできないか。
- ✓ 実現象には敏感な要素がかなりあるので、EFDとCFDだけで世の中閉じようとするのがおかしい。航空機開発においてはもっと飛行試験が必要。欲しい真値はEFD/CFDの真値ではなく実機の真値のはず。
- ✓ まずは風洞試験として正しい値を模索するのが第一段階では。さらにそこから実飛行条件を予測するという2ステップで。そこにEFD/CFD融合が入り込める余地があるのでは。
- ✓ 航空機開発には知見の集積が大きな比重を占めている。そこで風洞試験とCFDの2つを使って知見を向上させ、不確かさを減らしていくことを目指している。
- ✓ 感度解析として実飛行条件を予測することができないか。

参考：過去のワークショップで寄せられた意見（詳細版）

- ✓ NASAで融合を推進する力は、研究者からではなく、プログラムマネージャーからきている。プロジェクトではデータが正確ならEFDでもCFDでも構わない。
- ✓ 融合する前にEFD自身でやらなければならないことがまだ数多くあるはず。
- ✓ 共同してEFD/CFD融合を進めるためには、オープンにできるデータが必要。
- ✓ EFD/CFD担当者間の連携が、なかなか困難。文化の違いが大きい。
- ✓ 頭の中で融合することができる人間を育成することが最も大切。
- ✓ 理想的で簡単な実験を高精度に行う等で、基礎的な問題を地道に検証するような研究も重要。
- ✓ 異なる情報を結びつける融合においては学習することが必ずある。その学習プロセスを現実的な問題に応用できる状況を考えておく必要がある。
- ✓ 昔はEFDにCFDを合わせ込んでいたが、CFDの精度が上がった分、CFDサイドからもEFDに要求があるべき。
- ✓ EFDに一番期待されているのは実験の流体力学をいかに解釈するのかにも関わらず、そこが欠如している。
- ✓ 融合の前に、そもそもの流体力学の基本をきちんと押さえてデータを見られる人が重要。

特に航空機設計開発の観点から(委員のコメント)

- ✓ CFDの観点で、競争力と言うのなら現状の設計点付近しかできていないレベルを何とかできるのか、という方が重要。
- ✓ 設計者から見て現状のCFDのレベルが満足できる状態にあるとはとても思えない。Stability & Controlや飛行限界の予測や空力荷重予測の信頼性も出てこない、Navier-Stokesを用いた解析の価値が半減する。
- ✓ 技術的に言えば、高レイノルズ数の非定常乱流解析の技術と航空機設計への利用ではいまだに模索の段階。
- ✓ 定量性評価と実用化を次の旅客機開発までに間に合わせることは、今後の空力CFDの一つの目標。すでに欧米から出遅れてしまっている。
- ✓ 日本で嬉しいのはCFDの細かい事を分かっている人が多い。そのため、本気になりさえすれば優位性を確立することができると思う。精度の良い試験データを取得することも容易ではないので、EFD/CFD融合という見方で何かできる事があるかもしれない。
- ✓ 実飛行とは何か？フライトデータとはどんなものか？そもそも飛行試験は何のために行うのか？を良く考えて整理してほしい。空気力学を考える上では、飛行試験では非常に多くの制約があるので、わからないことが多い。だから空力設計ではEFDやCFDでデータを取っている。