

## JAXAにおけるEFD/CFD融合に向けた試み ～ デジタル/アナログ・ハイブリッド風洞構想 ～

渡辺 重哉, 口石 茂, 加藤 裕之, 青山 剛史, 村上 桂一, 橋本 敦,  
藤田 直行, 岩宮 敏幸, 松尾 裕一 (宇宙航空研究開発機構)

### A Trial towards EFD/CFD Integration - JAXA Digital/Analog Hybrid Wind Tunnel -

by

Shigeya Watanabe, Shigeru Kuchi-ishi, Hiroyuki Kato, Takeshi Aoyama, Keiichi Murakami, Atsushi Hashimoto,  
Naoyuki Fujita, Toshiyuki Iwamiya, and Yuichi Matsuo (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)

#### ABSTRACT

A trial towards integration of EFD (Experimental Fluid Dynamics) and CFD, development of a system called Digital/Analog Hybrid Wind Tunnel, is introduced. The aim of the system is to improve efficiency, accuracy, and reliability of aerodynamic characteristics evaluation in aerospace vehicle developments through mutual support between EFD and CFD. The function of the system consists of optimization of test planning utilizing pretest-CFD calculations, an accurate correction of the wind tunnel wall and support interaction effects through CFD, CFD data refinement based on EFD data, the most probable aerodynamic characteristics estimation based on both EFD and CFD data, database including EFD and CFD data for an identical condition, and so forth. Key technical challenges in the system development are addressed. The detailed system design will be conducted, further identifying the needs and available techniques suitable to the system.

#### 1. はじめに

航空機、宇宙機の空力特性の予測には、従来、解析的な手法や風洞を用いた空力実験(EFD: Experimental Fluid Dynamics)が主に用いられてきたが、1970年代以降の数値流体シミュレーション(CFD: Computational Fluid Dynamics)技術及び計算機能力の飛躍的發展に伴い、CFDの重要性が急速に高まってきている。現在、空力設計におけるEFDとCFDの相対的な重要度はほぼ拮抗していると言っても過言ではない。そのような状況の中で、EFDの補助的な役割でCFDを用いるだけでなく、両者の技術的な連携、融合による新たな高精度かつ高効率の空力特性予測技術の創出の重要性が高まってきている。

一方、単なる比較検証を超えた本当の意味でのEFDとCFDの融合に関する研究は世界的に見てもまだ成熟しているとは言えず、個別の研究者、技術者が単発的に試行錯誤を行っているのが現状である。特に航空機・宇宙機開発の現場で、EFD/CFD融合技術を部分的でもシステムの的に導入している例は、NASA Langley研究所の3次元仮想実験診断システム(ViDI: Virtual Diagnostics Interface System)<sup>1)</sup>がほぼ唯一であろう。このシステムは、風洞での光学計測の事前検討に3次元CADを活用してリスクを減らすとともに、事前に実施したCFD解析結果と風洞試験結果を実験中にほぼリアルタイムで厳密に比較、可視

化する機能を持つ(Live View 3D)。ただし、実験支援システムとしての位置づけが強く、CFDとの連携はリアルタイム比較表示という点に留まる。

宇宙航空研究開発機構(JAXA)では、これまで大型風洞での空力実験(EFD)技術(粒子画像流速測定法[PIV], 感圧塗料法[PSP]等)とCFD技術を空力研究ツールの両輪として技術研究開発を行ってきたが、このような状況を踏まえ、現状の風洞(実流れを対象とした「アナログ風洞」)に対してCFD(数値シミュレーションという意味での「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(通称、デジタル/アナログ・ハイブリッド風洞[略して、ハイブリッド風洞])の構築に向けた検討を開始した。本システムでは、CFD活用による風洞試験の効率化、精度・信頼性向上を目指した複数の機能を統合させ、ViDIシステムよりも一歩進んだEFD/CFD融合システムの構築を目指している。本講演では、その全体構想に関する予備的な検討結果について報告する。システム構成の詳細、EFDとCFDのデータフォーマットの統一化検討などについては文献2)を参照いただきたい。

#### 2. EFD、CFDの技術課題と融合の必要性

##### 2.1 個別技術課題

EFD側の課題としては、実飛行条件との差異（レイノルズ数、風洞壁/模型支持の存在、模型変形等）、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、速度場等の詳細計測を実施）、実験全体のリードタイムが長いこと（模型製作等）などがあげられる。一方、CFD側には、信頼性に関する不安（特に乱流、遷移、剥離、反応性流等の場合）があり常に実験による検証を必要とすること、高忠実度解析では計算時間が長い（データ生産性が低い）こと、（改善されつつあるが）計算格子生成に熟練と時間を要することなどの課題がある。これらの課題を個別に解決するには限度があり、EFD/CFD融合により相補的に解決する統一的なプラットフォームの整備が必要とされていると考えられる。

## 2.2 EFD/CFD比較検証の課題

CFD技術の進歩は、常にEFD結果との比較による適用範囲の確認、精度の検証を通じてなされてきた。しかし、比較検証は両サイドの密接な協力の元を実施されているとは限らず、気流条件の不一致（設定値と実際値の差）、天秤やスティングのたわみ補正の精度不足による模型姿勢角（迎角、横滑り角）の不整合、模型変形を考慮していないことによる模型形状の差異、風洞壁や模型支持系がCFDで考慮されていない、遷移点位置の設定の不一致などが原因で条件を完全に揃えた対等な比較がなされていない場合が大半である。その結果、CFDの問題点の把握が確実になされず、CFDの発展を阻害している状況がある。この状況の解決のため、常に対等な条件での両者の比較を保証する統一的なプラットフォームの整備がCFD技術の更なる向上のために必要である。

## 2.3 タイムスパンの違いに関する課題

一般に、風洞試験(EFD)は模型設計・製作などの準備期間が長く、実際にデータを取る試験期間は短い。一方、CFDはその逆で、格子作成などの準備作業は模型製作に比べれば短期間である(ただし十分短いとは言えない)が、高忠実度の解析の場合は1計算条件当たり要する計算時間は、風洞試験でのデータ取得時間に比べるとはるかに長くなっている。また、風洞試験サイドでも、近年急速に適用が広がっている光学的な先進流体画像計測ではそのデータ処理に長時間を要するという問題もある。EFD、CFD両者のタイムスパンの差は、コンカレントな形で両者を融合させて行く際の障害となる。よって、模型の設計・製作の短期間化、光学画像計測データ処理の高速化、CFD格子生成およびCFD計算時間の短縮が望まれる。

## 3. デジタル/アナログ・ハイブリッド風洞構想

### 3.1 目的

2章で述べた課題を総合的に解決することにより風洞、

CFD両者の有用性を向上させ、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/信頼性の改善を行うことが、デジタル/アナログ・ハイブリッド風洞の目的である。具体的には、国産旅客機や超音速機の研究開発等のJAXAおよび航空宇宙産業界のプロジェクトに対し貢献することを目指す。また、このシステムの活用によりCFD技術の向上を強力に推進し、主要設計ツールとしてのEFDの地位のCFDへの移行を諸外国の先頭を切って加速することにより、国際競争力の獲得が可能となるものと期待される。さらには、ハイブリッド風洞を実験/シミュレーションの融合の成功例として、同様の手法を空力、流体以外の他分野へ広く展開することも視野に入れている。

### 3.2 ユーザ及び機能要求の設定

ハイブリッド風洞の主要ユーザとしては、JAXAや航空宇宙機メーカーの空力設計者、風洞試験担当者を考えている。メーカーの技術者は、風洞試験時に実際の風洞（アナログ風洞）の近くに配置される試験担当者や遠隔地のメーカーに残る空力設計者に分かれるため、両者への準リアルタイムなデータ配信が必要となる。当初の適用先となるアナログ風洞としては、航空機開発の主力風洞の一つであるJAXA 2m×2m遷音速風洞(TWT1)を予定しているが、将来的には他の大型風洞へも順次適用を広げていく計画である。

2章で述べた技術課題の分析より、ハイブリッド風洞の主要な機能要求として現段階では以下のようなものを想定している。風洞試験の効率化及びリスク低減の観点からは、事前CFD解析による模型製作を含む試験計画の最適化機能などが必要となる。風洞試験データの高精度化と信頼性向上のためには、CFD解析を用いた風洞壁干渉/模型支持干渉の高精度な補正機能、EFD/CFD両者のデータの不確かさや得失を考慮した最も確からしい空力特性推定機能などが必要となる。また、風洞試験中の計測データのタイムリーな妥当性評価のためには、EFD/CFD両データの準リアルタイムでの比較・可視化機能、遠隔地にいるユーザへのInternet経由でのリアルタイムデータ配信（ヴァーチャル風試参加）機能、流体画像計測データの高速処理機能などが要求される。一方、CFD技術の向上という観点では、風試データに基づく乱流モデル等のCFDパラメータ調整や格子の最適配置機能、対等な条件でのEFD/CFDの両データをセットとしたデータベース機能などが必要となる。これらの機能を実現するためにデジタル風洞側に共通的に要求されるのは、計算格子生成の自動化とCFDソルバの高速化である。

### 3.3 コンセプトと運用シーケンス

これらの機能を盛り込んだシステムのコンセプトを図1に示す。機体設計において風洞試験模型形状が定義

されたのち、デジタル風洞側では模型と風洞壁/支持を含めた事前CFD解析を行う。その結果はアナログ風洞側に送られ、試験計画や模型設計の最適化、壁/支持干渉の高精度補正に使われる。風洞試験においては、画像計測データが高速に処理されると共に、データは遠隔地のユーザにもほぼリアルタイムで送られる。風洞試験で計測された模型の変形量を含む、主要な風試データは随時デジタル風洞側に戻され、模型変形に合わせて格子を変形させたCFD解析の再実施、各種CFDパラメータの見直しがなされ、風洞試験全体が終了した時点では、完全に対等な条件でのEFD/CFDデータおよび両者を融合させた最も確からしい空力特性データがユーザに提供されると同時に、データベース化される。

ハイブリッド風洞の運用シーケンスの概要を図2に示す。風洞試験開始の3ヶ月前に事前CFD解析を開始し、風洞試験終了1ヶ月後には最終データをユーザ(空力設計者等)に渡すことを目標とする。

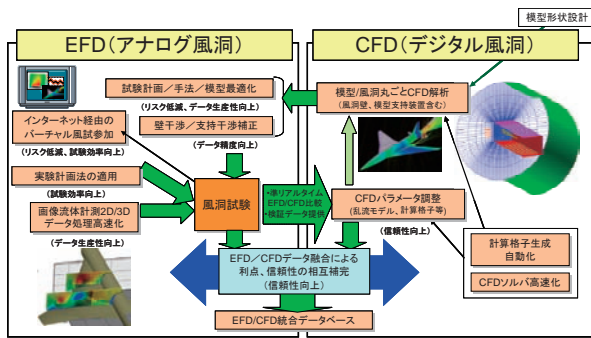


図1 デジタル/アナログ・ハイブリッド風洞のコンセプト

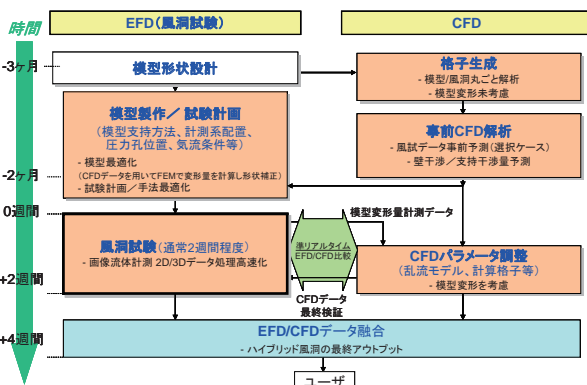


図2 ハイブリッド風洞の運用シーケンス

3.4 システム構成例

図3にハイブリッド風洞システムの構成の一例を示す<sup>2)</sup>。CFD解析には既存のJAXAスーパーコンピュータを、風洞試験には既存のJAXA風洞および個別の流体計測システムを使用する。CFDおよびEFDデータは機能毎のい

くつかのモジュールからなるハイブリッド風洞の中核部に送られ、フォーマット変換、比較・可視化等の処理がされるとともに、データベース化される。ユーザは、Webモジュールを介してシステムにアクセスすることになる。

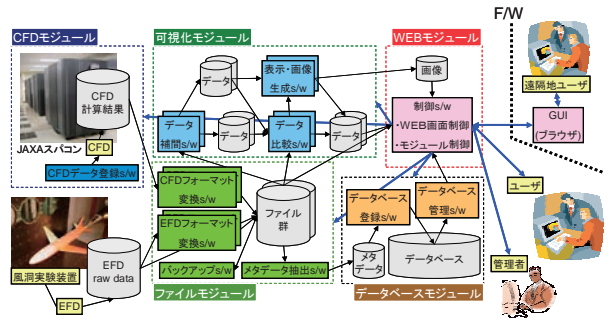


図3 ハイブリッド風洞のシステム構成例

4. ハイブリッド風洞の主要研究開発要素

4.1 デジタル風洞用自動格子生成法、ソルバの開発

デジタル風洞には、CFD解析の高速性と高精度性の両者が要求される。前者の目的には直交格子法を用いた自動格子生成<sup>3)</sup>と新規開発の高速ソルバで対応し、後者の目的には東北大学の開発した非構造Navier-Stokes解析コードTAS<sup>4)</sup>を改良して用いる。

直交格子を用いた自動格子生成の実現性の初期検討では、図4に示すように、PCを用いて約10分で航空機周りに1000万点の格子を自動的に生成できること、必要な場所(翼面上及び後縁等)に格子を集められること、TASコード用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ことを確認した。また、3次元翼模型に対し境界層に細かい格子を使用した場合、実験とよく一致する圧力分布が得られた。

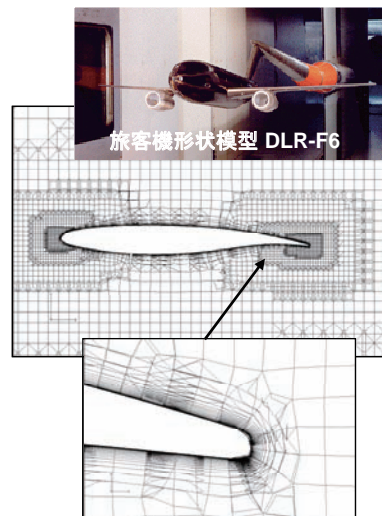


図4 旅客機全機模型周りの自動直交格子生成例

#### 4.2 アナログ風洞の画像計測データ処理高速化

現在、流体画像計測技術で最もデータ処理に時間を要しているのはPIVであるため、PIVデータ処理の高速化に絞った検討を実施している。図5に示すように、現在結果出力までに数時間要しているものを100倍程度の高速化により、数分で完了させることを当面の目標としている。高速化の手法としてはいくつか考えられるが、高速性、コスト、実現可能性、将来性等の観点で、CellまたはGPGPUを用いる方法とクラスタPCを用いる方法の2つの方法について検討を行っている。

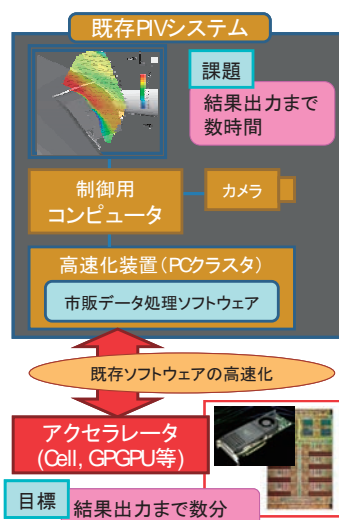


図5 PIVデータ処理の高速化

#### 4.3 EFD/CFD融合技術

ハイブリッド風洞の付加価値を決定するのがEFD/CFD融合技術である。技術としては多岐に及ぶが、1)データ比較技術、2)データ融合技術、3)EFDによるCFD支援技術、4)CFDによるEFD支援技術がハイブリッド風洞では柱となる。

データ比較は定量的、定性的両面での比較を想定しており、風洞試験進行に合わせた即時のユーザの判断を補助すること、比較を通じてEFD/CFD双方の技術課題を明確化し解決に役立てることを目的とする。定量的比較では、気流条件や計測点(格子点)位置に関するEFD/CFD両者の差異を埋めるための高速かつ高精度な内挿技術が一つのキーとなる。また、定性的比較では、特徴点抽出<sup>5)</sup>、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)の強調化等の技術が重要となる。

データ融合技術は、EFD/CFD両データに基づく最も確からしい空力特性の推定を目的とする。適用する技術としては、Neural Network<sup>6)</sup>やデータ同化(Data Assimilation)技術<sup>7)</sup>などが考えられる。

EFDによるCFD支援、CFDによるEFD支援技術としては、前者は乱流モデルの最適選択<sup>8)</sup>、各種CFDパラメー

タの調整、計算格子の最適化が、後者としては模型/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次元状態量を含む)、事前CFDによる最適かつ効率的な模型設計及び風洞試験・計測計画策定などが重要と考えている。

#### 5. まとめ

EFD/CFD融合技術を用いて風洞、CFD両者の有用性を向上させ、航空機・宇宙機の空力特性取得、空力設計技術を多面的に改善することを目的として開発を開始したデジタル/アナログ・ハイブリッド風洞について、その概要を報告した。まだ検討は緒についたばかりであり、今後機能要求、システム構成などの詳細検討を実施するとともに、このシステムをEFD/CFDを用いた実機空力特性推定という最終目標に向けてどのように生かすかについての検討も進めて行く予定である。実験/数値シミュレーション技術の融合の先導的な例として是非有効なシステムを開発したいと考えている。また、EFD/CFD融合技術は先に述べたように未開拓の分野であるため、「EFD/CFD融合研究会」などの場を利用して、産学官の研究者、技術者との連携を強化して関連研究を活性化し、先進的な技術を積極的にシステムに取り込んで行くことも重要と認識している。

#### 文献

- 1) Schwartz, R. J. and Fleming, G. A., "Virtual Diagnostics Interface: Real Time Comparison of Experimental Data and CFD Predictions for a NASA Ares I-Like Vehicle," Proc. ICIASF 07, R56, 2007.
- 2) 佐藤, 松原, 渡辺, "JAXAデジタル/アナログ・ハイブリッド風洞システムに関する予備技術検討," 第40回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム2008 講演集, 1C13, 2008.
- 3) Lahur, P. R., "Automatic Hexahedra Grid Generation Method for Component-based Surface Geometry," AIAA Paper 2005-5242, 2005.
- 4) Nakahashi, K., Ito, Y., and Togashi, F., "Some Challenges of Realistic Flow Simulations by Unstructured Grid CFD," Int. J. Numerical Methods in Fluids, Vol. 43, Issue 6-7, 2003.
- 5) Takeshima, Y., et al, "Adaptive Visualization of Measurement-Integrated Simulation of Karman Vortex Sheet Based on Topological Skeltonization," Proc. 5<sup>th</sup> Int. Sympo. on Advanced Fluid Information, 2005.
- 6) Navarrete, J. A. and Meade, A. J., "Fusion of Experimental Data and Mathematical Model in the Simulation of Aerodynamic Coefficients," AIAA Paper 2004-952, 2004.
- 7) 中村, 上野, 樋口, "データ同化: その概念と計算アルゴリズム," 統計数理, Vol. 53, No. 2, 2005.
- 8) 渡辺他, "PIV(粒子画像流速測定法)を用いたCFDコード検証について," JAXA-SP-04-012, 2005.