

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 (第2報) —

口石 茂, 渡辺 重哉, 加藤 裕之, 青山 剛史, 村上 桂一, 橋本 敦, 藤田 直行, 松尾 裕一 (JAXA)
船江幸弘, 荻野純 (株式会社菱友システムズ)

A Trial towards EFD/CFD Integration

- JAXA Digital/Analog Hybrid Wind Tunnel (Second Report) -

by

Shigeru Kuchi-Ishi, Shigeya Watanabe, Hiroyuki Kato, Takeshi Aoyama, Keiichi Murakami, Atsushi Hashimoto,
Naoyuki Fujita, and Yuichi Matsuo (JAXA)
Yukihiko Funae and Jun Ogino (Ryoyu Systems Co., Ltd.)

ABSTRACT

As a trial of the integration of Experimental Fluid Dynamics (EFD) 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 the aerodynamic characteristics evaluation in aerospace vehicle developments through the complementary use of EFD and CFD. In the present article, key functions of the system determined as a series of preliminary design are described in detail and technical issues in the system development are addressed from the viewpoint of the EFD/CFD integration.

1. はじめに

航空宇宙機の空力特性の予測は、風洞等を用いた実験流体力学 (Experimental Fluid Dynamics, EFD) 的アプローチと数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 的アプローチが両輪である。設計開発における効率性および予測精度に対する要求は厳しさを増す一方で、EFD/CFD単独による予測は精度/信頼性において自ずから限界が生じる。そのため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な空力特性予測技術の創出が、航空宇宙機の国際競争力の獲得のためには重要な課題である。

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) ではこのような状況を踏まえ、情報化技術の導入により現状の風洞 (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融合システムである、デジタル/アナログ・ハイブリッド風洞 (以下、「ハイブリッド風洞」という) の構築を現在進めている。

本稿では、文献1)において第1報として報告した概念検討に引き続き、予備設計作業として実施されたハイブリッド風洞のシステム仕様策定結果に基づき、システム概要、デジタル/アナログ風洞の高度化に関する検討状況、機能要素の検討結果の詳細、およびEFD/CFD融合技術に係る研究開発要素について報告する。

2. ハイブリッド風洞概要

2.1 背景及び目的

ハイブリッド風洞構築の背景となるEFD/CFDの個別技術課題や融合の必要性については文献1)に詳しいので、ここでは割愛する。ハイブリッド風洞ではEFD/CFD両者に固有な弱点・技術課題を相補的に解決するとともに、EFD/CFD両データを統一的に生産、管理して対等な比較検証が可能なプラットフォームを整備することにより、EFD (風洞) /CFD両者の有用性を向上させ、航空・宇宙機的设计時間/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を目指す。

2.2 基本コンセプト

図1にハイブリッド風洞の基本コンセプトを示す。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試験実施に先立った事前CFD解析を行う。事前CFDには模型と風洞壁/模型支持装置を含めた解析 (風洞丸ごと解析) を含み、結果はアナログ風洞側に送られて試験計画や模型設計 (支持装置形状、圧力孔位置等) の最適化、壁/支持干渉の高精度補正の基本データとして使われる。風洞試験においては、計測データの事前CFDデータとの統合可視化・比較処理による風試結果の準リアルタイムな健全性評価を可能とする。また、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

形させた詳細なCFD解析の再実施、乱流モデルの選択や計算格子改良等、風試データを有効に利用した高精度CFD解析等がなされ、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ーに提供されると同時にデータベース化され、以降の風洞試験やCFD解析、設計開発に活用される。

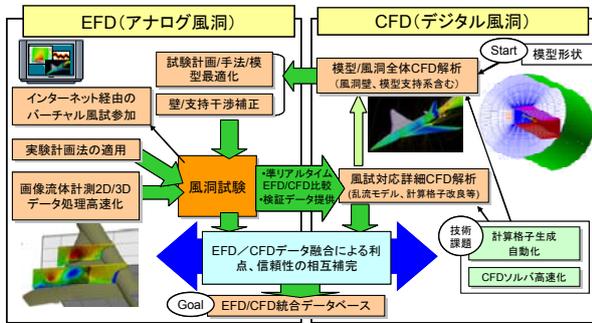


図1 ハイブリッド風洞基本コンセプト

ハイブリッド風洞の当面の適用先はJAXA風洞群で最も稼働率の高い2m×2m遷音速風洞であるが、将来的には他速度域の大型風洞へも適用を広げていく計画である。

2.3 システム構成

図2に予備設計において検討したハイブリッド風洞のシステム構成を示す。

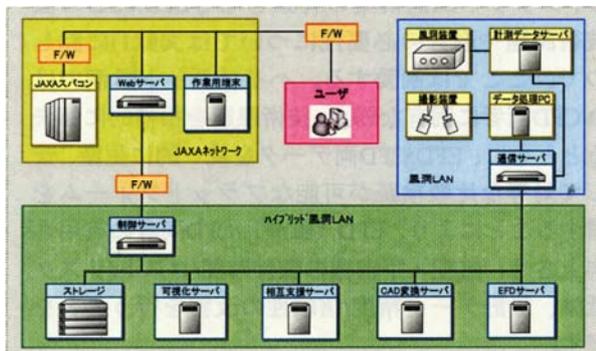


図2 ハイブリッド風洞システム構成

現在JAXA大型風洞群はセキュリティ確保のためJAXA内の共通ネットワークからは独立しており、データをネットワークから直接参照することはできない。今回は風洞計測システムに通信サーバを新設し、これをハイブリッド風洞LANと接続することによって、ユーザーはハイブリッド風洞を介してのみWeb上での風試データ取得が可能となるようにする。ハイブリッド風洞自体は図の「ハイブリッド風洞LAN」で示したハードウェアおよびソフトウェアの集合体である。CFD解析はJAXAスパコン（JSS）上で実行されることを基本とする。システム開発の母体となるフレームワークとしては、システムを構築するための基本的な機能（ユーザ管理、ジョブ管理、データベース連携など）をまとめた基盤ミドルウェアである、RCM System Software²⁾を導入する。

能（ユーザ管理、ジョブ管理、データベース連携など）をまとめた基盤ミドルウェアである、RCM System Software²⁾を導入する。

3. デジタル/アナログ風洞の高度化

先に示したハイブリッド風洞のコンセプトを実現するためには、デジタル風洞では計算格子生成の自動化とCFDソルバの高速化、アナログ風洞ではPIV等の光学計測において計算負荷のかかる、画像計測データの処理高速化が必須となる。ここではこれらの検討状況について簡単に述べる。

3.1 デジタル風洞用格子生成法、ソルバ開発

格子生成については、(株)計算力学研究センターとJAXAが共同開発した非構造格子生成ソフトHexaGrid³⁾を改良の上、適用する。直交格子を基本として物体表面近辺にはプリズム格子を配置することで、複雑形状への対応と高速自動生成を図っており、(STLデータ量にもよるが)航空機周りに1000万点の格子をPCを用いて10分程度で生成することが可能である。また、風洞丸ごと解析に必要な風洞壁と支持装置を含めた格子生成においても良好に機能することを確認している(図3)。

ソルバはハイブリッド風洞用にJAXAで開発中の非構造格子用CFDソルバFaSTAR⁴⁾(FaST Aerodynamic Routine)を標準装備する。コードのチューニングや収束加速法の適用により、市販ソルバと比較して1/10以下の解析時間で結果が得られる見込みである。また、共同開発管理ソフト(バージョン管理、課題管理等)やコーディングルールを採用することにより、コードのメンテナンスを容易にしている。

HexaGrid、FaSTAR共にハイブリッド風洞への適用に関してはユーザーフレンドリー性を重視し、CFDの専門家以外でも使用可能とする。また用途に応じてEulerとNSを使い分け、必要最小限の計算負荷となるようにする。

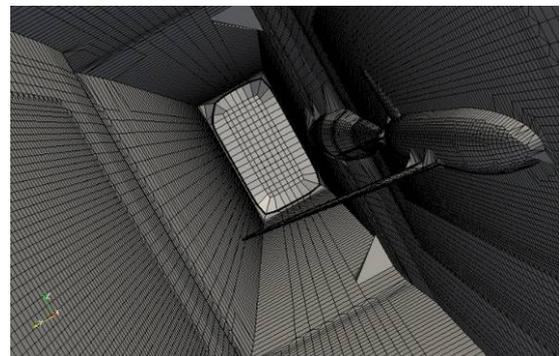


図3 HexaGridを用いた風洞/モデル格子生成

3.2 アナログ風洞画像計測データ処理高速化

PIVデータ処理に関しては、処理PCにアクセラレータを導入することにより、ハードウェア面からの高速化を図る。アクセラレータの候補としては、Cell、GPGPU、FPGA、PCクラスタなどがあげられるが、高速性、価格、安定供給等を総合的に評価した結果、Cellを導入する方向で作業を進めている。ベンチマーク試験により、Cellにより現状のCPUと比較して100倍以上の高速化が達成されることが確認された⁵⁾。これは実際の風試においてはデータ取得後約10分で結果の確認を可能とし、かつ試験50ケース程度までは試験当日中にデータ処理を終了させることが可能となる。

4. ハイブリッド風洞機能要素

予備設計においては、ハイブリッド風洞に要求されることが想定される機能要素についてそれらの必要性、技術的実現性をインハウスで検討し、さらにユーザ（主要航空宇宙機メーカー）ニーズ調査結果を反映して機能の追加、優先順位付けを行った。以下に主要な機能要素の検討結果を示す。

風試セッティングシミュレーション

CAD上に風洞設備、模型、支持装置、スティング、計測機材をセッティングすることにより、支持装置サイズの検討や光学計測におけるカメラ系機材配置の事前検討を効率化する。

事前CFD

風試前に全風洞試験ケースの1/5程度についてCFD解析を実施し、さらに模型変形解析や壁・支持装置を付けた解析を行って、風洞試験計画や模型/支持装置検討に供する。

FEM変形解析

風洞試験模型が試験状態で空力荷重によりどの程度変形するかを試験前に流体構造連成解析により推算し、模型設計に有益な情報を提供する。

模型圧力孔位置/試験条件設定支援

事前CFDで得られた解析結果から、各条件に対する圧力分布および空力係数の応答曲面を作成し、模型圧力孔位置および試験条件の設定支援情報を提供する。

風洞壁・支持干渉補正

事前CFDの結果を用いて、風洞壁・支持装置の存在が空力係数へ及ぼす影響を評価し、合わせて風洞試験の不具合確認で用いる空力係数の算出や模型サイズの検討を行う。さらに詳細CFD（後述）の結果を用いて、風洞壁・支持装置の存在が空力係数へ

及ぼす影響をより高精度に評価、補正する。

風試/CFD統合可視化および風試健全性評価

風試データとCFDデータを統合的に表示して準リアルタイムで比較し、風洞試験中に計測値異常がないかを随時自動確認する。さらにデータの一致度の分析や統計処理も可能とする。

風試モニタリング

風洞試験中の計測結果（CL- α 、CL-CD等）を遠隔地からインターネット経由でモニタリング可能にする。

詳細CFD

模型変形量を含む風試データを用いて解析モデルの改良（乱流モデル選択等）を行い、そのモデルを用いて風洞試験を補完する情報や風洞試験では得るのが困難な流れ場情報（物理量空間分布、壁面・支持装置の影響度など）を高精度に算出する。

風試/CFD不確かさ解析

風試/CFD両者について不確かさ解析を実施し、不確かさを考慮した上で両者を比較すると共に、ノミナル値とあわせてデータベース化する

空力特性データ最尤値推定

空力係数などの空力特性について風試データ、CFD両データを融合させることにより、最も確からしい値（最尤値）を算出する。

実際の開発においては、優先順位の高い機能からステップアップ的にシステムを構築するとともに、機能の見直しを随時実施する予定である。

5. EFD/CFD融合技術に係る研究開発要素

ここでは先にあげた機能要素の実現に必要なEFD/CFD融合技術を、1)データ比較、2)CFDによるEFD支援、3)EFDによるCFD支援、4)データ融合の4種類に大別し、詳細に説明する。

5.1 データ比較

「風試/CFD統合可視化」機能が相当する。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。EFD/CFDデータの単純重ね合わせのイメージであり、技術的実現は比較的容易と考えられるが、試験/解析条件の差異を埋めるための高速かつ高精度な内挿手法や可視化技術を駆使した流れ場情報の抽出・強調化等に関してチャレンジング

な課題が存在する。

5.2 CFDによるEFD支援

「模型圧力孔位置/試験条件最適化」、「風洞壁・支持干渉補正」、「風試健全性評価」の各機能が相当する。いずれもCFDの精度・信頼性保証が最大の課題であり、さらに多数のケースについてCFD解析を実施する必要があるため、ソルバの高速化が実用的観点からは重要になる。風洞丸ごと解析については内部流解析となるため収束性が悪化し、また流入/流出部や風洞壁（多孔壁/多溝壁等）での境界条件をいかに適切に設定するかが課題となる。CFDによる風洞壁・支持干渉補正は、パネル法等による既存手法と比較して、多大な計算労力に見合うだけの精度向上が見込める方法について今後詳細な検討が必要である。

5.3 EFDによるCFD支援

「詳細CFD」において、風試データを用いた乱流モデルの最適選択や計算格子の最適化等を検討している。いずれも最適化の一種と考えられ、既存の最適化手法をうまく導入することによって実現可能と考える。計測データを利用した数値シミュレーションの高精度化、信頼性向上という観点からは、気象や海洋の分野で実績のあるデータ同化（Data Assimilation）手法⁶⁾の適用可能性を検討中である。当然ながらCFD検証のための高精度な風試データ蓄積という観点も重要であり、ハイブリッド風洞はCFD検証用データベースという役割も併せ持たせて、将来的なCFDの高精度化に向けて有効活用する予定である。

5.4 データ融合

「空力特性データ最尤値推定」において、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。EFD/CFD共に不確実要素を含む中でいかに最も確からしい値を推定するかという意味で、研究要素としては統計手法等を用いた数理的な側面が強くなる。また、データ解析技術の一環としてノイズフィルタリングやカルマンフィルタ、ベイズ推定のような応用数理手法の中に有効な手段が存在するのではないかと考え、目下候補となる技術の調査を通じて課題を抽出している段階である。データ融合技術の実用化を念頭においた本格化な取り組みは、世界的に見ても今後の課題である。実機飛行性能の正確な予測は空力技術として最大の目標の一つであり、ハイブリッド風洞におけるデータ融合技術は、それを実現するための有効な手段と捉えている。

EFD/CFD融合技術は研究要素の強い課題である。システム開発においては、ハイブリッド風洞として最低限実現すべき機能をミニマムサクセスとして先行的

に実装し、難易度の高いEFD/CFD融合技術関連については並行して研究活動を進め、実用化の目処がついた時点で随時システムをアップデートするという段取りで作業を進めていく予定である。

6. まとめ

EFD/CFD融合技術および情報化技術を用いて風洞/CFD両者の有用性を向上させ、航空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、その概要および基本機能要素を報告した。今後作業は本格的なシステム設計/製作フェーズに移行するが、個々の機能要素についてはユーザヒアリングの継続的な実施や開発途中段階における試行的運用を通じて常に見直しを行い、途中段階の仕様変更にも柔軟に対応可能な開発体制を持って臨む予定である。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、ぜひ有効なシステムを開発し、将来的には他分野にも展開したいと考えている。

また、EFD/CFD融合技術は先進的でありかつ多くの技術分野を含むため、大学、研究機関を主とした産学官の研究者、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ような仕組みを構築していきたい。

参考文献

- 1) 渡辺他, “JAXAにおけるEFD/CFD融合に向けた試みーデジタル/アナログ・ハイブリッド風洞構想ー,” 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, 1C12, June 2008.
- 2) 上島, 西原, “XMLデータベースを用いた実験・シミュレーション統合Webシステム,” 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, 1C14, June 2008.
- 3) Hashimoto, et al., “Lift and Drag Prediction Using Automatic Hexahedra Grid Generation Method,” AIAA-2009-1365, Jan. 2009.
- 4) 橋本他, “JAXAデジタル/アナログ・ハイブリッド風洞: デジタル風洞の開発,” 第2回EFD/CFD融合ワークショップ, Feb. 2009 (JAXA-SP化予定)
- 5) 加藤他, “Cell及びGPGPUによるPIV処理高速化,” 第41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2009講演集, 1C9, June 2009.
- 6) 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.