

# EFD/CFD 融合可視化における速度場表現の一手法

八反田香莉 (指導教員：伊藤貴之)

## 1. 概要

航空機の機体周りの流速や、機体にかかる圧力・抵抗の計測は、航空機開発において非常に重要である。特に機体の後方に生じる流れの渦は、機体の損傷や燃費の悪化を招く可能性があるため、重要な観察点となっている。

流体现象の理解や分析のために、Experimental Fluid Dynamics (EFD) と Computational Fluid Dynamics (CFD) の2種類の手法が研究されている。EFD 技術は風洞などの実験環境を用いて模型周りの流速を計測するものである。EFD を適用することで、計測精度や風洞壁干渉などの誤差要因はあるものの、ある程度の信頼性を持った計測値が得られる。しかし、EFD ではコストや使用可能日程の制限などから、重要性の高い模型形状や気流パラメータだけを適用して実験回数を限定することも多い。一方で、航空宇宙機開発をはじめとする多くの分野において、CFD に基づく計算機シミュレーション技術が広く用いられている。CFD を適用することで、複雑な流体现象をより容易に再現することが可能になる。ただし一般的に CFD では、実際の流体现象の再現に対する妥当性の検証が重要となる。

これらの両者の問題点を考慮し、EFD における実験結果と CFD におけるシミュレーション結果を比較し、それらの差分をわかりやすく可視化することは、シミュレーション技術の改良において重要性が高いと言える[1]。そこで本報告では、航空機の機体後方における流速 EFD と CFD の両者を比較する可視化技術を提案する。この技術により、ベクタ場における EFD/CFD の双方の誤差検証の課題の明確化とその解決に役立つだけでなく、EFD/CFD の圧力可視化[2]と組み合わせることによって、圧力・流速の相関関係の考察に役立つと考えられる。

## 2. 関連研究

EF/CFD融合技術の例として文献[1]では、航空機の設計開発の効率性・予測精度の向上のため、EFD/CFDの技術的な連携に関する技術を提案している。機体設計で定義された形状から、事前にCFD解析を行う。続いて風洞試験において、EFDデータと事前CFDデータとの統合可視化・比較処理を適用することで、準リアルタイムな評価を可能とする。本報告は、このようなEFD/CFD融合技術での両データ間の比較・評価を効率化するために、統合可視化手法を提案するものである。文献[2]では、EFD/CFD融合可視化を行っている。航空機機体にかかる圧力について、EFD/CFD両結果の分布可視化、差分表示、急勾配線の検出を実装しているが、流速に関しては分布可視化のみとなっている。そこで本研究では、流速に関して差分表示・渦の検出を実装する。これと圧力の差分表示・急勾配線を同時に可視化することにより、航空機周りの流体现象の解明に役立てたい。

文献[3]は、複雑なベクタ場を少数の流線で効果的に可視化する手法を提案している。この手法では、速度場でのベクト

ルが0である特異点を自動抽出し、その近傍を通過する流線を優先的に生成する。本手法の渦中心検出では、この手法を用いて、特異点が渦中心であるかを判定する。

## 3. 提案手法

本手法の流れは、データ統合・差分算出と渦中心検出の2つに大きく分けられる。これらの処理の後、可視化ソフト Tecplot を用いて結果を表示する。圧力・流速の分布可視化例を図1に示す。航空機の機体に圧力分布、機体後部に流速分布が表示されている。機体中央部より左半分が CFD データ、右半分が EFD データである。本手法では後部の流速データについて扱う。

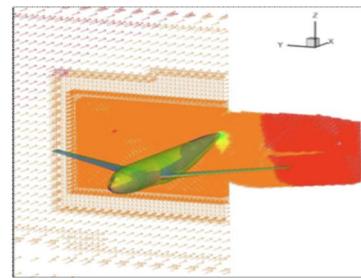


図1：圧力・流速分布可視化例

まずデータ統合・差分表示について述べる。本手法で用いるベクタ場のデータは、速度ベクトルを持つ多数の頂点によって格子を構成している。現在扱っているデータはEFDが四角形格子、CFDが三角形・四角形混合格子によってメッシュが構成されている。差分の算出には、同じ座標での値を比較しなくてはならないので、EFD/CFDの格子構造を統合する必要がある。本研究ではEFDの値を基準としてCFDの値を比較するという立場から、EFDの各格子点におけるCFDのベクタ値を補間により求めることで、データを統合する。データ統合の手順は以下のとおりである。

1. EFD上の頂点  $Ve$  に対応するCFD上の座標値  $Ve'$  を求める。
2.  $Ve'$  を囲む四角形  $Cc$  を求める。
3.  $Cc$  の4頂点の値から  $Ve'$  における値を補間する。
4. EFDの全ての頂点に対して、1~3を繰り返す。

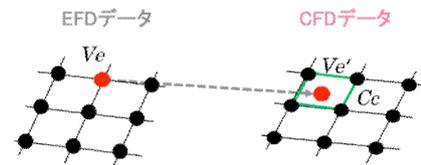


図2：データ統合

以上の手順でEFD/CFDデータを統合した後、EFD/CFDの各計測点でベクトルの長さの差分を算出し、差分の値に応じて色で表す。現在、データ統合・差分算出は実装しているものの色表示については未実装となっているので、今後の課題である。

続いて渦中心の検出手法について述べる。渦は機体の破損や燃費の悪化など飛行に悪影響を及ぼす可能性があることから、非常に重要な観察点となっている。機体後部の渦中心

や EFD/CFD 間の渦のズレを可視化することは、機体にかかる抵抗の直感的な理解を可能にする。

渦中心は速度が 0 である点の一種である。よって、速度場において速度が 0 となっている頂点を算出し、渦中心がそれ以外の点かの判定を行うことで、渦中心を検出する。渦中心検出の手段として、文献[3]の手法を用いる。渦中心検出の手順は以下のとおりである。

1. 四角形  $C_c$  の中にベクトルが 0 となる点を探す。
2. ベクトルが 0 となる点があった場合、 $V_e$  の座標を補間算出する。
3. 算出された点が渦中心であるか判定する。
4. EFD/CFD データの全ての要素に対して、1~3 の処理を繰り返す。

#### 4. 実行結果

前節までで算出した速度場の渦中心検出・比較の可視化結果を示す。この結果では模型形状 DLR-F6, マッハ数 0.75, 迎角 0.19 度のデータを用いている。横軸が  $y$ , 縦軸が  $z$  である。

図 3 に渦中心検出結果を示す。EFD の渦中心は図中央部より左半分の青い四角, CFD の渦中心は右半分の緑の四角である。この結果から、大きな渦はエンジン後部と翼端後部の 2 カ所に見られる。

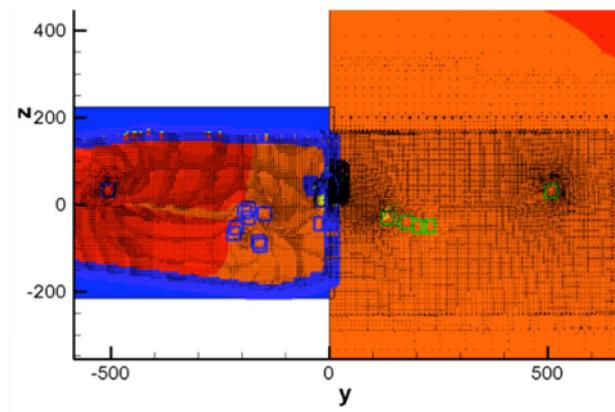


図 3: 渦中心検出結果

次に EFD/CFD の渦中心の比較結果を図 4, 図 5 に示す。両図とも、左下が EFD データに両渦中心を投影したもの, 右下が CFD データに両渦中心を投影したものとなる。この結果を見ると、図 4 の渦中心の位置は EFD/CFD 間でズレがあることが伺える。その要因として、エンジン後部の風の流は様々な要因が絡みあうことで乱流が起きているためだと考えられる。

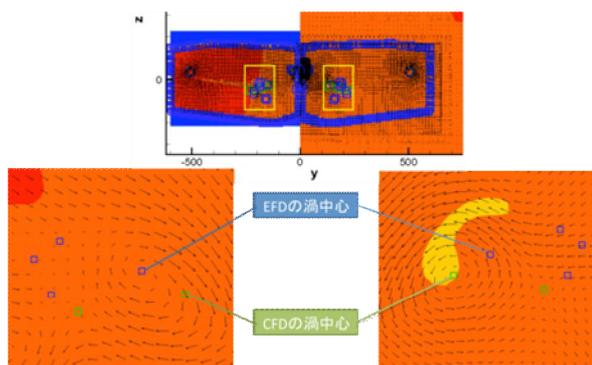


図 4: エンジン後部の渦中心比較結果

一方、図 5 の渦中心の位置は EFD/CFD 間でズレがほぼないと言える。翼端に出来る渦の大きさによって機体への抵抗を測れることから、この渦の位置情報は非常に重要である。よって、今回の実行結果で扱ったデータは正確なシミュレーション結果が得られていると推測できる。

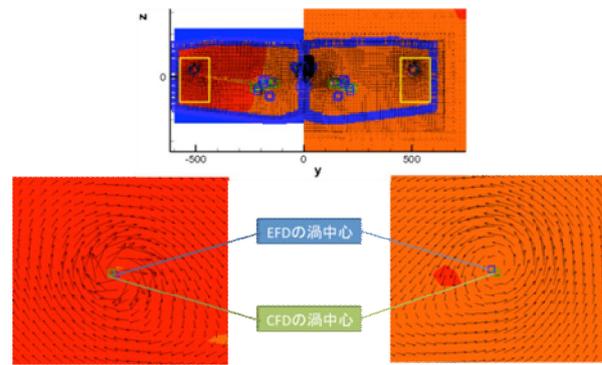


図 5: 翼端後部の渦中心比較結果

EFD/CFD の渦中心のズレを比較することは、EFD や CFD の誤差の原因の検証に有効である。この結果を参考に、EFD の風洞壁干渉を考慮することや CFD のパラメータを調整する等、両データの差を見ながらシミュレーションの改善が出来ると考えられる。

#### 5. まとめ

本報告では、EFD/CFD 融合可視化を用いた速度場の表現手法を提案した。本手法によって、EFD/CFD 双方の技術課題を明確化し、誤差の原因の解決に役立てることが可能になると考えられる。

今後は以下の課題に取り組んでいきたい。

- 様々な条件のデータに対して、本手法を適用し検証する。
- 渦度を利用した渦可視化手法の検討に取り組む。
- ベクトルの長さや方向を考慮した差分可視化手法の検討を行う。

これらの課題を解決することによって、速度場の特徴や EFD/CFD 間の差分についてより深く考察したい。また、機体の圧力データと統合した可視化により、本研究の最終目的である圧力と流速の相関関係の考察にも着手したい。

#### 謝辞

研究を進めるにあたって貴重なご助言を数多く賜りました Jaxa (宇宙航空研究開発機構) 渡辺重哉様、口石茂様、保江かな子様へ感謝いたします。

#### 参考文献

- [1] 口石, 渡辺, δJAXA における EFD/CFD 融合に向けた試み, 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論文集, pp.61-64, 2009.
- [2] 伊藤, 笠松, 八反田, 渡辺, 口石, 保江, δEFD/CFD 融合可視化に関する基礎検討, 第 43 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「EFD/CFD 融合技術」特別セッション, 2011.
- [3] Koji Koyamada, Takayuki Ito, δSeed Specification for Displaying a Streamline in an Irregular Volume, Engineering with Computers, pp.73-80, 1998.