

EFD/CFD 融合可視化の一手法

笠松沙紀（指導教員：伊藤貴之）

1 概要

流体力学はあらゆる流体現象の研究や、工学製品の開発にも応用される非常に重要な研究分野である。その中で、実際の流体現象を再現する主な手法としてEFD（Experimental Fluid Dynamics；実験流体力学）とCFD（Computational Fluid Dynamics；数値流体力学）がある。これら二つの手法の特徴について考える。

EFDでは、計測精度や風洞壁干渉などの誤差要因はあるが、比較的信頼性を持った計測結果が得られると考えられている。しかし、実験のコストや施設使用日程の問題があり、またデータの計測技術にも限界がある。一方CFDでは、複雑な流体現象をより効率的に再現・可視化することが可能である。しかし、計算結果が実際の流体現象を再現できていることの妥当性の検証が不可欠である。

これらの両者の特徴から、EFDとCFDを連携・融合し、両者の欠点を相互に補完することで、より高精度かつ効率的なシミュレーションの実現が可能と考えられている。EFD/CFD融合システム [1] [2] において、EFDによる実験結果とCFDにおけるシミュレーション結果を比較することは、誤差の発見・解析につながるため非常に重要となる。そのため、この比較・解析の課程をより効率化すべく、両データの可視化の重要性が高まっている。

そこで本論文では、EFD/CFD融合のためのEFD/CFDデータ及び差分データの可視化手法を提案する。本研究では二種類のデータを適用しており、機体表面にかかる圧力データと機体後方の流速データを扱っている。本手法では圧力データに対して、両データを統合した後、EFD/CFDの各データ及び両者の差分データを分布可視化する。また、圧力値が急激に変化する箇所を検出し急勾配線を表示する。流速データに対しては、EFD/CFDの各データの分布可視化に加え、ベクトルの間引きを行うことでより直感的な風の流れの把握を促す。

2 提案内容

2.1 圧力データ

EFDの圧力データは、圧力が低いときに発光する感圧塗料PSP[3]を用いて風洞実験で計測されたものである。実験では機体の曲面上に点を多数作り、その点における塗料の色を圧力に置き換える。このとき曲面上の点を結んで三角形メッシュを構成する。

CFDの圧力データは、自動格子生成プログラム及び高速ソルバーを用いて生成される。このとき、三角形と四角

形が混合した格子が生成されており、その各頂点に圧力値が割り当てられている。

2.1.1 データの統合

本手法では圧力データに対して、EFD/CFDデータの差分データを生成するが、その際に両データの構造を統一し、同一の座標値におけるEFD/CFDの圧力値を比較する必要がある。そのため、まずEFD/CFDデータの格子構造を統合する。本手法ではEFDデータの全頂点をCFDデータに投影し、対応する座標値でのCFDデータの圧力値を補間することでデータを統合する。以下が処理手順である（図1参照）

1. 任意の平面上にEFD/CFDデータの頂点を投影する。
2. EFDデータ上の頂点 V_e に対応するCFD上の座標値 $V_{e'}$ を求める。
3. $V_{e'}$ を囲む四角形もしくは三角形 C_c を求める。
4. C_c を構成する四つもしくは三つの頂点の圧力値から $V_{e'}$ における圧力値を補間する。
5. 2~4をEFDデータの全頂点に対して繰り返す。

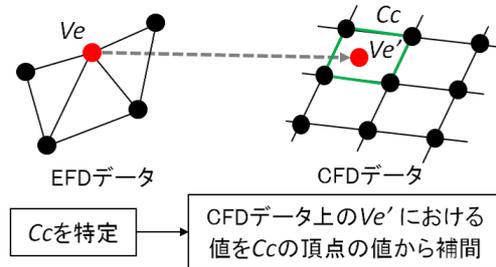


図 1: データの統合

2.1.2 分布可視化

本システムは、各頂点における圧力値を色に変換し、圧力値の分布を可視化する。 P を任意の頂点の圧力値、 P_{\min} と P_{\max} をそれぞれ最小・最大圧力値としたとき、求める頂点の色合い H を以下の式により算出する。

$$H = \frac{P - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} \quad (1)$$

$H=0$ は青、 $H=1/3$ が緑、 $H=2/3$ は黄、 $H=1$ が赤を示す。各頂点の色を計算した後、本システムは各格子を描画する。このとき、格子の頂点の色から格子の内側の色が補間される。図2、図3はそれぞれEFD及びCFDデータの可視化結果である。さらに、本手法はEFD/CFDデータ間の差分可視化にも重点を置いている。本システムでは2.1.1節に示した統合処理の後に、両データの各頂点における差分を求め、その差分値を色に変換することで、差分

の分布を可視化する．これにより，ユーザが EFD/CFD データの結果の差をより直感的に理解することができる．



図 2: EFD データの可視化結果 図 3: CFD データの可視化結果

2.1.3 急勾配線の検出

さらに，本手法は圧力データの急勾配線を検出する．ここで急勾配線とは，値が急激に変化する場所を表している．この急勾配線の近辺には，渦や衝撃波を意味する特異点が見つかることが多く，これらの特異点は流体力学の分野で非常に重要な観察点となる．そこで，EFD/CFD の両データから急勾配線を検出し，それら二つの急勾配線を同時に表示することで，特定の特異点の EFD/CFD 間での変位を知ることに役立つと考えられる．処理手順は以下のとおりである．

1. 機体モデルを描画後，画素値情報をフレームバッフに保持する．
2. フレームバッファから画素値を読み込み，ラプラスアンフィルタリングを適用する．
3. 画面上での頂点位置を取得し，フィルタリング適用後の画素値とマップする．本システムは gluProject 関数呼びウィンドウ座標値を取得している．
4. 画素値が閾値よりも高い頂点をハイライト表示する．

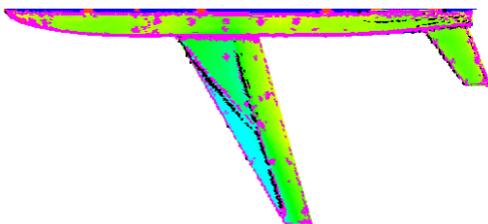


図 4: 急勾配線の可視化結果

図 4 は急勾配線の可視化結果であり，EFD データの急勾配線はピンク，CFD データの急勾配線は黒で表わされている．この結果から，両データ間で急勾配線が異なる箇所検出されていることが分かる．これらの違いが，EFD もしくは CFD の誤差を示唆する可能性があることから，ユーザはこの結果を注意深く検討する必要がある．

2.2 流速データ

流速データは空気の流れの速度分布を計測したものである．データは多数のベクトルで構成され，各ベクトルに流速の大きさと流れの向きが与えられている．しかし，ベクトルの数が膨大なため，それらの特徴を把握しにくいという問題点がある．そこで本手法は，ベクトルの長さ（流速の大きさ）に対しては色を用いてその分布を可視化する．(2.2.1 節参照) また，ベクトルの向き（空気の流れ）に対しては，ベクトルの間引き (2.2.2 節参照) を適用することで，より直感的な可視化を目指す．

2.2.1 分布可視化

L を任意のベクトルの長さ， L_{\min} と L_{\max} をそれぞれ最小・最大値したとき，本システムは各々のベクトルの色合い H を以下の式により算出する．

$$H = \frac{L - L_{\min}}{L_{\max} - L_{\min}} \quad (2)$$

図 5 は圧力データと流速データを同時に可視化した実行結果である．機体中央部から上側の圧力及び流速データが EFD，機体中央部から下側が CFD データである．このように圧力データと流速データを同時に可視化することで，圧力と流速の相互作用が見つかる利点がある．

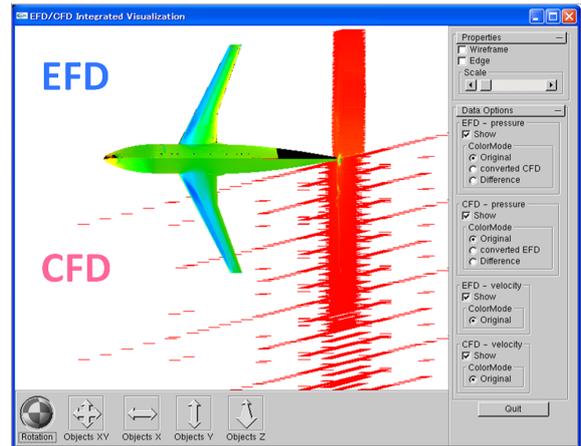


図 5: 圧力及び流速データの統合可視化結果

2.2.2 ベクトルの間引き

流速データの全ベクトルの始点は，同一 yz 平面上にある．この平面の y 幅と z 幅を s 分割すると，平面上に $(s + 1)^2$ 個の点ができる．これらの点から最短距離に始点があるベクトルをそれぞれ求めて表示することで，ベクトルを間引きする．

3 まとめ

本論文では，EFD/CFD 融合のための可視化手法を提案した．EFD/CFD 間での結果の差や誤差の発見をより効率化するために，両データの差分を分布可視化し，さらに値が急激に変化する急勾配線を検出した．

謝辞

貴重なデータと数多くのご助言を賜りました宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 渡辺重哉様，口石茂様，保江かな子様に感謝いたします．

参考文献

- [1] R. J. Schwartzs, G. A. Fleming, Virtual Diagnostics Interface: Real Time Comparison of Experimental Data and CFD Predictions for a NASA Ares I-Like Vehicle, *ICIASF 2007*, pp. 1-12, June 2007.
- [2] S. Watanabe, S. Kuchi-ishi, T. Aoyama, "A Prototype System Towards EFD/CFD Integration: Digital/Analog-Hybrid Wind Tunnel", *Proceedings of 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, 2010.
- [3] 中北，満尾，栗田，渡辺，山本，向井，感圧塗料計測データを用いた CFD コード検証について，*JAXA-SP-04-012*, 2004.