

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[†] 伊藤 貴之[†] 渡辺 重哉[‡] 口石 茂[‡] 保江 かな子[‡]

[†]お茶の水女子大学 〒112-8610 東京都文京区大塚 2-1-1

[‡]宇宙航空研究開発機構 〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

E-mail: [†] {kaori_h, itot}@itolab.is.ocha.ac.jp

[‡] {shigeyaw, shigeruk}@chofu.jaxa.jp, yasue.kanako@jaxa.jp

あらまし EFD(実験流体力学)と CFD(数値流体力学)は流体现象を再現する手法である。EFD は風洞実験などによる計測技術であり、CFD はコンピュータで流体现象をシミュレートする技術であり、どちらも様々な条件を想定して反復した結果がデータベースなどに蓄積されている。我々は航空機周りの圧力と機体後部の流速を題材として、EFD/CFD 両者の問題点を補うことを目標とした EFD/CFD 融合可視化に取り組んでいる。既に発表している EFD/CFD の圧力可視化に加えて、本報告では EFD/CFD の流速可視化の一手法を提案する。本手法では、分布表示と差分表示に加えて、速度場において特徴となる部分である渦の検出を適用する。EFD/CFD の圧力可視化と流速可視化が揃うことで、圧力と流速の相関関係の考察が容易になると考えられる。

キーワード EFD/CFD, EFD/CFD 融合可視化, 圧力/流速可視化, 渦の検出/比較

Fundamental Study on EFD/CFD Integrated Visualization For Vector Fields

Kaori HATTANDA[†] Takayuki ITOH[†]

Shigeya WATANABE[‡] Shigeru KUCHIISHI[‡] and Kanako YASUE[‡]

[†] Department of Information Sciences, Ochanomizu University 2-1-1 Otsuka, Bunkyo-ku, Tokyo, 112-8610 Japan

[‡] Japan Aerospace Exploration Agency 7-44-1, Jindaijihigashimachi, Chofu, Tokyo, 182-8522 Japan

E-mail: [†] {kaori_h, itot}@itolab.is.ocha.ac.jp

[‡] {shigeyaw, shigeruk}@chofu.jaxa.jp, yasue.kanako@jaxa.jp

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り、CFD よりも長い歴史を有する。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 ではランニング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・可視化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。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 の両者のベクタデータ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[3]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

2.1 EFD/CFD 融合システム ViDI

航空・宇宙機開発の現場で EFD/CFD 融合技術を導入している例として、文献[1]の NASA Langly 研究所による 3 次元仮想実験診断システム (ViDI: Virtual Diagnostics Interface System) が挙げられる。ViDI は、風洞実験の実施のための事前検討で、3 次元 CAD を用いることで実験の最適化及び効率化を図るシステムである。また、事前実施した CFD の計算結果と風洞試験結果を実験中にリアルタイムで厳密に比較・可視化することができる。ただし、EFD/CFD のデータフォーマットの不統一などにより、データ比較に煩雑さが残る。

2.2 EFD/CFD 融合技術

文献[2]のデジタル・アナログハイブリッド風洞は、風洞と CFD を強く連携させたコンカレントな EFD/CFD 融合システムであり、一歩進んだ高精度・高信頼度なシステムを目指している。

EFD/CFD 融合技術の基本方針は以下のとおりである。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。その後、主要な EFD データを随時 CFD へ戻し、EFD の条件を基に詳細な CFD 解析を再実施する。その結果、EFD/CFD データおよび両者を融合させた最も確からしいデータがユーザへ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。

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。この統合可視化では、横に隣接する EFD/CFD データを交互に見ることで比較はできるが、両データの一致度を測る定量的な解析や、EFD/CFD 間での特徴的な箇所のズレといった定性的な解析は難しいといった課題が残っている。

2.3 EFD/CFD 融合可視化

文献[3]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、急勾配線の検出を行っている。急勾配線とは圧力が急激に変化している部分であり、このような箇所付近には渦や衝撃波などの特異点が見つかることが多いとされている。一方、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・渦の検出を行う。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 EFD/CFD の特徴や急勾配線と渦の関係性など流体现象の解明に役立てたい。

2.4 渦中心検出手法

文献[4]は、複雑なベクトル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(渦中心、鞍点など)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、この手法を用いて全ての特異点を抽出した後、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と渦度算出の3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。図中の左半分が 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。

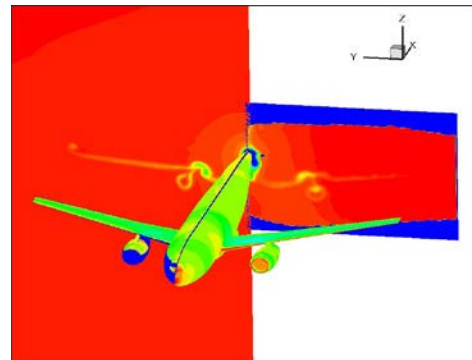


図 1: 圧力・流速分布可視化例

3.1 データ統合・差分算出

本手法で用いるベクトル場のデータは、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。速度ベクトルには座標値 (x, y, z) と流速に対して正規化を行ったベクトル成分 (u, v, w) とメッシュ構造の情報が与えられている。EFD/CFD はメッシュの構造や疎密が異なっている場合があり、現在扱っているデータは EFD が四角形格子、CFD が三角形・四角形混合格子の構造となっている。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ことから、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 のベクトル値を補間により求めることで、データを統合する。その後、EFD/CFD の各計測点の差分を算出する。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.

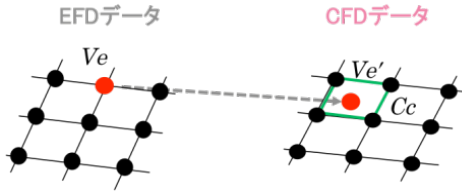


図2: データ統合

流速値の補間の手順は以下のとおりである.

- i. 頂点と2つの三角形の内外判定に置き換える.
- ii. 三角形を三分割し, 各要素中心におけるスカラー値を平均値とする.
- iii. 求める点のスカラー値を各要素中心値の面積重み付け平均として算出する. 図3では, S が面積, v が流速の v 成分を示している. u, w 成分のそれぞれに対しても同様に算出する.

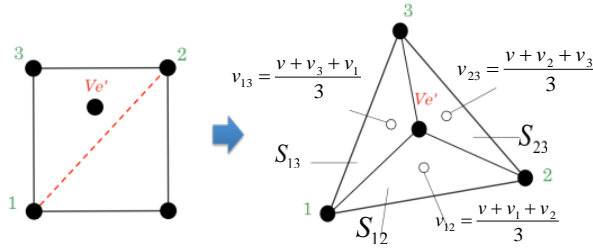


図3: データ補間

$$v = \frac{1}{S} \left(S_{12} \frac{v+v_1+v_2}{3} + S_{23} \frac{v+v_2+v_3}{3} + S_{31} \frac{v+v_3+v_1}{3} \right) \quad (1)$$

u, w についても同様.

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, 差分の値に応じて頂点にスカラー値を与え, そのスカラー値を色で表す.

3.2 渦中心検出

渦は流れが不安定な箇所であり, 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, 流体シミュレーションにおいて非常に重要な観察点となっている. 機体後部の速度場で, 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.

飛行機後部の速度場ではエンジン後部と翼端の後方に渦が発生している. 翼端の渦(翼端渦)は翼の上下の流速と圧力の差によって発生する渦であり, この渦の強さで機体にどれほどの抗力がかかっているかを確認することができる. 一方, エンジン後部の渦は様々な要因が絡み合い乱流が発生していることにより, 現在扱っている2次元平面のデータのみでは渦の発生要因やEFD/CFD間の渦の対応関係を観察することが難し

- い. よって, 本研究では翼端渦に注目し, 渦検出・比較を行っていく. 図4は, 翼端渦の例である.

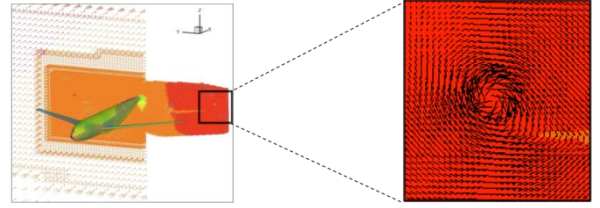


図4: 翼端渦

続いて渦中心の検出手法について述べる. 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, 渦中心かそれ以外の点(鞍点)かの判定を行うことで, 渦中心を検出する. 渦中心検出手法として, 文献[4]の手法を用いる. 渦中心検出手順は以下のとおりである. 本研究では, 扱っているデータが機体後部の平面データであるため, 现阶段ではその平面に生成される渦を対象としている. 飛行機の圧力と流速の三次元空間は, 機体前後方向が x 軸, 速度場は yz 平面で構成されている. なお, ここでは飛行機に対して垂直にできる渦のみを算出するため, yz 平面について処理を行っている.

1. 四角形 Cc 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, Ve 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.

ベクトルが0となる座標の補間手法は以下のようになる.

- i. 四角形を2つの三角形に分割する.
- ii. 三角形の内部にベクトル0の点があるか判定する. 各頂点のベクトル (v_i, w_i) を用いて算出.

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_0 \\ w_0 \end{pmatrix} \times p + \begin{pmatrix} v_1 \\ w_1 \end{pmatrix} \times q + \begin{pmatrix} v_2 \\ w_2 \end{pmatrix} \times (1-p-q) \quad (2)$$

この式を p, q について解き,

$$0 \leq p, 0 \leq q, 0 \leq 1-p-q \quad (3)$$

(3)の条件を満たすとき, 3つのベクトルで作られる平面内に0の点が存在することになり, 三角形内部にベクトル0の点があると判定できる.

- iii. ベクトル0の点の座標を求める.
- ii で求めた p, q を用いて, 3つの頂点と特異点の位置関係から座標を算出する.

$$\begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \times p + \begin{pmatrix} y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} \times q + \begin{pmatrix} y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} \times (1-p-q) \quad (4)$$

iv. 渦中心の判定

渦中心の判定には、ヤコビアン固有値を用いる。ヤコビアンは以下のように定義される。

$$J_v = \begin{bmatrix} \frac{\partial V}{\partial y} & \frac{\partial V}{\partial z} \\ \frac{\partial W}{\partial y} & \frac{\partial W}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{\partial V}{\partial w} & \frac{\partial W}{\partial w} \\ \frac{\partial V}{\partial w} & \frac{\partial W}{\partial w} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$= \begin{bmatrix} y_0 - y_2 & y_1 - y_2 \\ z_0 - z_2 & z_1 - z_2 \end{bmatrix}^t \times \begin{bmatrix} V_0 - V_2 & V_1 - V_2 \\ Z_0 - Z_2 & Z_1 - Z_2 \end{bmatrix}^t$$

J_v の固有値が正の場合は特異点から外に離れる流れ、負の場合は特異点に対し内に吹き込む流れであることを示す。さらに、固有値が複素数であった場合、実部が0以外であれば特異点は渦中心で、実部に正負両方ある場合は鞍点である。

3.3 渦度算出

渦の強さによって機体にかかる抵抗を測ることができることから、渦度を算出する。渦度とは、速度ベクトルの回転のありさまを表す量であり、渦度の値の大小によって渦の回転方向と強さを示す。渦度が負であると右回りの渦、正であると左回りの渦を指し、絶対値の大きさにより渦の強さを表す。本研究では機体前後に対し鉛直方向にできる渦を観察するため、ベクトルのvw成分のみを用いている。

渦度の式は次のように定義される。

$$rotV = \nabla \times V = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \quad (6)$$

この式を各格子点それぞれについて解くことにより渦度を算出する。

4. 実行結果

前節までの処理で算出した速度場の、渦中心検出・比較、渦度、差分表示の可視化結果を示す。

図5は流速データの分布可視化結果である。この可視化結果では模型形状 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 であり、速度に応じて色を割り当てている。

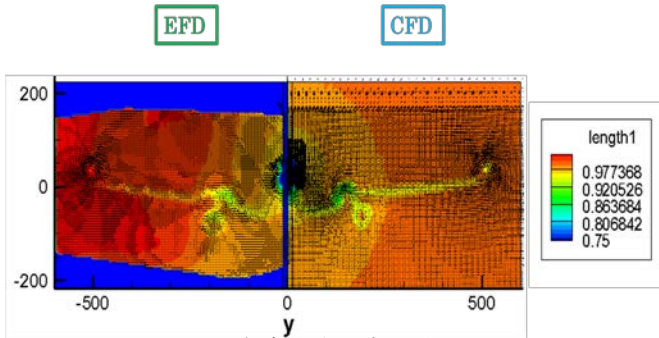


図5：流速分布可視化例

図5より CFD は EFD に比べ、翼端に行くにつれて流速が遅くなっている傾向にあることや翼・エンジン後部の流速が遅くなっていることが読み取れた。

4.1. 渦中心検出結果

続いて渦中心の検出・比較の結果について述べる。

図6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緑の四角、CFDの渦中心は右半分の青の四角で示されている。エンジン後部には乱流が起きていることから渦中心としていくつか検出されていると考えられる。そして翼端渦の中心が EFD/CFD 間でそれぞれ検出されている様子が確認できた。

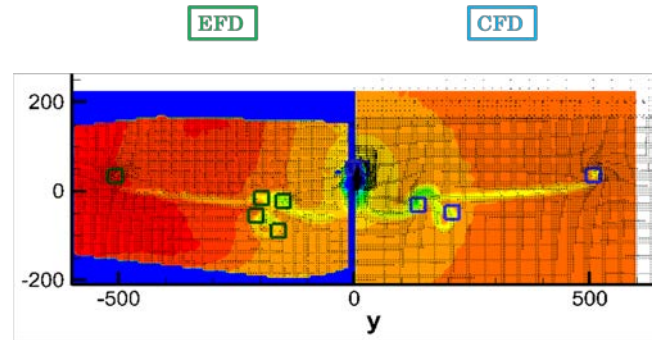


図6：渦中心検出結果

次に EFD/CFD の渦中心の比較結果を図7に示す。前章でも述べたように、エンジン後部の渦は様々な要因が絡み合い乱流が発生していることにより、現在扱っている2次元平面のデータのみでは渦の発生要因や EFD/CFD 間の渦の対応関係を観察することが難しい。よって図7では翼端渦のみ位置比較を行った。位置比較を分かりやすくするため、EFD/CFD の分布可視結果に EFD/CFD の両渦中心検出結果を投影すると、下図のようになった。

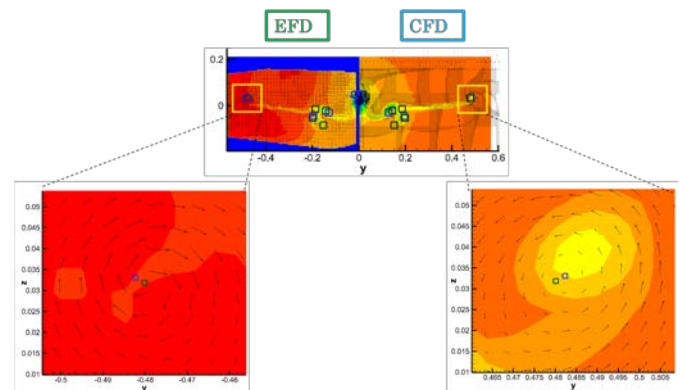


図7：翼端渦位置比較

ここでは渦中心の位置のズレが機体幅の割合のどれほどを占めるかを確認するため、機体幅を1として正規化した座標を用いている。EFD/CFD の翼端渦中心の座標を比較すると機体幅に対し、0.1~0.2%程度位置のズレがみられた。現状では EFD/CFD 間のデータに

は通常 10% 程度のズレがあるのが一般的であるとされている。よって、今回用いたデータはとても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。

4.2. 渦度検出結果

次に渦度の検出結果について述べる。

図 8 上図では渦度のみの表示，下図は渦度にベクトルと渦中心を重ねて表示した結果である。下図を見ると，渦度が発生している領域と渦中心の位置が一致している様子が読み取れる。青で示されている領域が負，つまり右回転の力が働いている領域，そして赤で示されている領域が正，つまり左回転の力が働いている領域を示している。

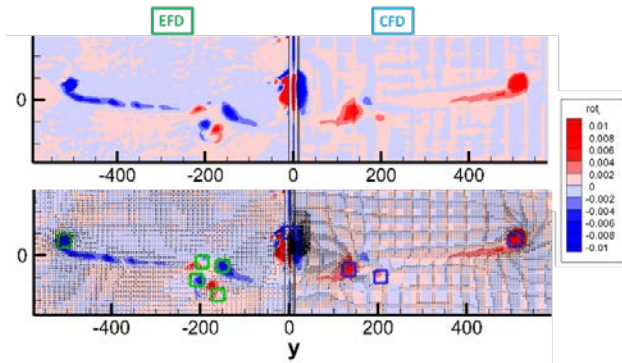


図 8：渦度表示

図 9 は翼端周辺の渦度分布を拡大したものである。この図では比較しやすくするために，カラースケールと CFD の座標を調整している。赤は渦度がほとんど発生していない領域を示し，青に近づくると右回りの渦の力が強いことを示している。

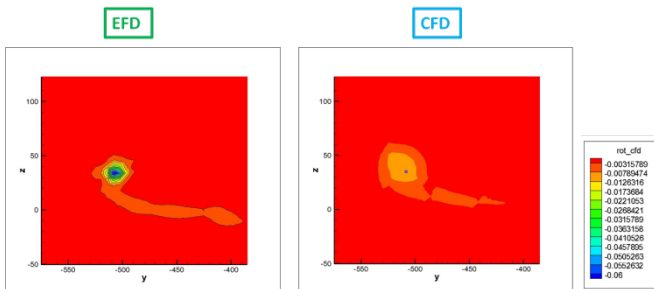


図 9：EFD/CFD 渦度表示(翼端)

渦中心付近では，EFD の図 9(左)をみると CFD の図 9(右)に比べても低い値を示していることがわかる。翼端渦の渦度が高いほど，機体にかかっている抵抗が大きい。この図の結果からは，EFD データの方が CFD に比べ機体に強い抵抗がかかっているようなデータが得られていることが推測できる。

4.3. 差分表示結果

最後に差分表示結果について述べる。

図 10 は EFD から CFD の流速の差分をとった値を可視化した図で，図 11 はその翼端部の拡大図である。

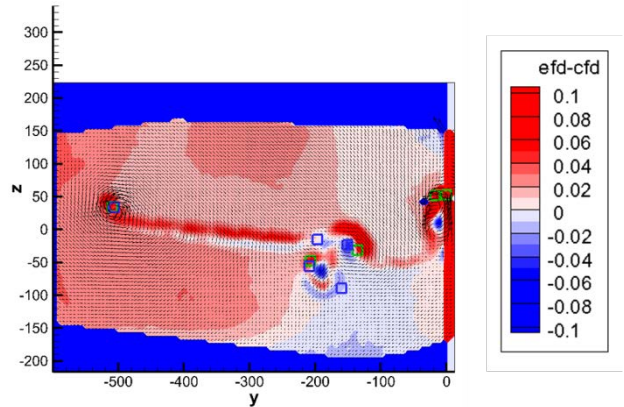


図 10：EFD/CFD 流速差分表示(全体)

翼端部を拡大すると図 11 のような結果が得られた。渦中心付近の差分が約 0.078 を示していることから，流速に対し約 7.8% のずれがあることがわかった。なお，ここでの流速は試験条件として設定された流速を 1 として正規化した値である。

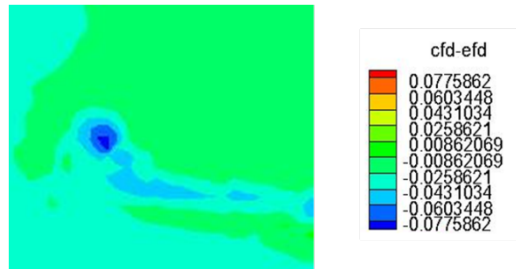


図 11：EFD/CFD 流速差分表示(翼端)

EFD/CFD のズレを比較・可視化することは，EFD や CFD の誤差の原因の検証に有効である。シミュレーションを実施する際に考える誤差要因は，EFD では模型の形状変化，作業者の技能，実験環境などの不確かさに関する要因があり，CFD ではモデルの定式化・簡略化，丸め誤差，時間・空間の離散化などの数多くの要因がある。差分可視化で得られた結果を参考に，これらの誤差要因を考慮に入れ，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，誤差の解決に役立てることが可能になると考えられる。今後の課題として以下の 3 点があげられる。

現段階では特徴点の位置を考慮せずに差分をとっている。それでは特徴となる部分の位置の違いにより発生している差分なのか，値の大小の違いにより発生している差分かという情報が欠落してしまうので，改良を行いたいと考えている。また，差分表示にはベクトルの長さは反映されているが，向きの違いは可視化できていないので今後検討を行う必要がある。

次の課題は EFD/CFD 間の誤差も含めた可視化方法の検討である。4.3 節で述べた通り、EFD にも CFD にも様々な誤差が発生しうる。その起こりうる誤差範囲の算出を各頂点に適用したデータを用い、EFD/CFD 間の最も確からしい値を算出し、その確からしさを可視化できるような手法を目指す。

最後の課題は多数の条件の流速データを対象として、本手法を適用して検証することである。そして、現在 2 次元平面の速度場で実装しているのを 3 次元に拡張し、機体周りの流体现象の可視化も実現したい。また、リアルタイムでの比較可視化も行い、空間・時間共に複合的で多様な切り口で比較・誤差検証が行えるようなシステムにしたいと考えている。

参 考 文 献

- [1] R.J.Schwartz, 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] 口石, 渡辺, “JAXA 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.
- [3] 伊藤, 笠松, 八反田, 渡辺, 口石, 保江, “EFD/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.
- [4] Koji Koyamada, Takayuki Ito, “Seed Specification for Displaying a Streamline in an Irregular Volume”, Engineering with Computers, pp. 73-80, 1998.