

EFD/CFD 融合可視化に関する基礎検討

伊藤貴之[†], 笠松沙紀[†], 八反田香莉[†], 渡辺重哉[‡], 口石茂[‡], 保江かな子[‡]
[†]お茶の水女子大学 [‡]宇宙航空研究開発機構

Fundamental Study on EFD/CFD Integrated Visualization

Takayuki Itoh, Saki Kasamatsu, Kaori Hattanda (Ochanomizu University)
Shigeya Watanabe, Shigeru Kuchiishi, Kanako Yasue (Japan Aerospace Exploration Agency)

ABSTRACT

Integration of EFD and CFD is important to supplement their respective drawbacks, and enhance efficiency and reliability of aerodynamic simulations. To achieve this, visualization is an important component to help users compare EFD/CFD data. This poster proposes a unified approach on visualization for EFD/CFD integration. Two major components of our system are difference visualization, and gradient edge detection. These components make users easier to understand difference between EFD/CFD data, and also displacements of specific characteristic points between each data.

1. 概要

流体力学はあらゆる流体现象の研究や、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、実際の流体现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。特に航空・宇宙機開発においては、空力特性の予測には長年の間、風洞実験などを代表とする EFD が主に用いられてきた。しかし、近年の計算機能力や数値シミュレーション技術の飛躍的な発展に伴い、CFD の重要性が高まっている。以下、これら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ものの、長い歴史によって培われた信頼性のある計測結果が得られると考えられている。しかし、実験のためのランニングコストや施設の使用可能日程の問題がある。さらに、データの計測技術にも限界がある。

一方で CFD は、複雑な流体现象をより効率的に再現・可視化することが可能なため、機械や建築物の設計など広い分野で用いられている。しかし、CFD の信頼度には必ずしも十分とは言えない場合がある。そこで、シミュレーション結果が実際の流体现象を再現できているかどうか、という妥当性を検証することが不可欠である。

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。特に、EFD データを用いた CFD 検証や、CFD データを用いた EFD 検証を行い、両データを比較することで双方の誤差を素早く発見・修正することができる。このため、EFD/CFD 融合において、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非常に重要な過程であり、この比較・解析の過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。

本報告では、EFD/CFD 融合技術の一環として我々が取り組んでいる、EFD/CFD 融合可視化技術の基礎検討について報告する。我々はこの基礎検討の中で、EFD データと CFD データの比較を主たる目的とした可視化システムを開発中である。本報告では、航空機の機体表面の圧力、および機体周りの流速を題材として、本可視化システムの全体像を紹介する。また本報告では、本可視化システムにて実装中の格子統合と圧力分布表示の各機能について詳細を述べ、可視化例を示す。

2. 関連研究

2.1 EFD/CFD 融合システム

単なる EFD/CFD データの比較検証を超えた意味での、EFD/CFD 技術の融合に関する研究は世界的にもまだ数少ない。その中で、航空・宇宙機開発の現場で部分的でも EFD/CFD 融合技術を導入している希少な例として、NASA Langley 研究所による 3 次元仮想実験診断システム (ViDI: Virtual Diagnostics Interface System) [1] 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。

一方で、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) は、データフォーマットの統一や CFD による事前解析の常時実施など、ViDI の課題を克服したデジタル/アナログ・ハイブリッド風洞[2]の開発に取り組んでいる。さらにハイブリッド風洞は、風洞に対して 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、EFD/CFD の技術連携がリアルタイム比較表示に留まる ViDI よりも一歩進んだ、高精度・高信頼度なシステムを目指している。

これらの EFD/CFD 融合システムでは当然、EFD/CFD データの比較が重要な目的の一つとされる。両者を比較し誤差の検証をすることにより、実験や計算の修正・改善をし、より信頼度の高いデータを得ることができるからである。例えば、EFD データを用いた CFD 検証では、最適な乱流モデルの選択やパラメータの調整が可能である。反対に、CFD データを用いた EFD 検証によって、実験における誤差要因 (風洞壁・支持柱の計測結果への干渉) の補正や、実験の事前検討ができる。このような重要性を持つ EFD/CFD データの比較を効率化するため、両データのより直感的かつ解析的な可視化手法の創出が重要となっている。前述のハイブリッド風洞では、EFD データと CFD データを統合可視化してリアルタイム比較を行っている。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ズレといった定性的な解析は難しいという課題が残る。また、圧力や速度など、データの種類によって適した可視化手法により、データ比較を効率化できると考えられる。

2.2 特徴に基づいた可視化

本研究において開発する可視化システムは、複数のデータに記録されたスカラ場（例えば圧力）やベクタ場（例えば流速）を比較することを目的の一つとしている。その際に有効な手段として、スカラ場やベクタ場の特徴点・特徴線に基づいた可視化手法の適用が考えられる。例えばスカラ場であれば極点などの特徴点、数値が不連続に近い状態となる急勾配線などの特徴線、などを可視化し、その位置や分布を比較することが有効であると考えられる。ベクタ場においても同様に、渦中心などの特徴点を可視化し、その位置や分布を比較することが有効であると考えられる。

圧力のスカラ場が急勾配を形成する代表的な現象に衝撃波がある。衝撃波を検出する手法の例として Liou の手法 [3] があげられる。また衝撃波に限定せずに急勾配部分を強調する可視化手法として、ボリュームレンダリングにおけるスカラ値から光学特性への伝達関数の導出に勾配を用いた Durkin らの手法 [4] があげられる。また流速などのベクタ場から渦中心を同定する手法も多く発表されている [5,6]。これらの特徴点・特徴線検出に基づく手法は我々の EFD/CFD 融合可視化において非常に有効なものであり、これらの手法の採用が今後の課題にあげられる。

3. EFD/CFD 融合可視化システム

図 1 に、我々が現在開発中の EFD/CFD 融合可視化システムの例を示す。この可視化システムでは、以下の 4 種類のデータが入力されていることを仮定する。

- ・物体表面上の圧力に関する EFD/CFD データ。
- ・物体周りの流速に関する EFD/CFD データ。

また、この可視化システムでは EFD データと CFD データに対して、3 次元空間中の一平面を軸として、互いに面/線対称な形状と位置関係を有することを仮定する。図 1 に示したデータでは、画面の上半分が圧力および流速の EFD データの表示結果、下半分が CFD データの表示結果であり、互いに面/線対称な形状と位置関係を有している。

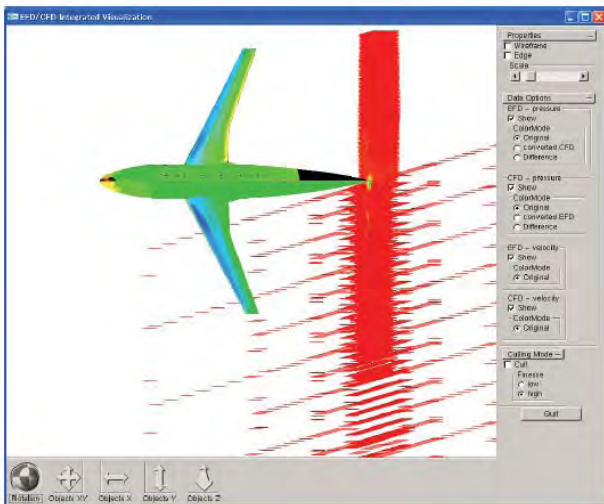


図 1 物体周りの圧力と流速を題材にした EFD/CFD 融合可視化システムによる表示例

しかしこの表示結果からは、2 章でも述べたとおり、両データの一致度の定量的な解析や、EFD/CFD 間の特徴的な箇所ズレなどを視認するのは必ずしも易しくない。そこで我々は、EFD/CFD 両データを重ねて表示することで、両者の比較を容易にする機能を開発した。本報告ではその中から、物体表面における格子統合機能と、物体表面における圧力分布表示機能を紹介する。特に後述する機体 3 次元

表面上の急勾配線の表示機能は、我々の知る限り市販の可視化ソフトには見られない機能であると考えられる。

4. 格子統合と圧力分布表示

4.1 格子統合

我々は EFD データと CFD データの圧力分布を比較するため、圧力分布を表すスカラ場から、両データの差分と、各データにおける急勾配線を求めることにした。ここで差分を求めるにあたり、EFD データと CFD データとの間で格子構造が異なることを考慮しないといけない。そこで我々は、両データの格子構造を統合する機能を開発した。

図 2 に、三角形格子の EFD データと四角形格子の CFD データを統合する例を示す。我々の実装では、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 の圧力値を求めることでデータを統合する。処理手順は以下の通りである。

1. 任意の平面上に EFD/CFD データの全頂点を投影する。
2. EFD データ上の頂点 Ve に対応する CFD データ上の座標値 Ve' を求める。
3. 点 Ve' を囲む要素 Cc を求める。
4. 要素 Cc を構成する頂点の圧力値から、点 Ve' 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。

以上の処理によって本システムでは、EFD データを構成する全頂点に対して、CFD データ上の対応する位置における圧力値を求め、さらに EFD データと CFD データの圧力値の差分を求める。つまり本システムでは、EFD データを構成する各頂点は、

- 1) EFD データの圧力値
 - 2) CFD データの圧力値
 - 3) 両圧力値の差分値
- の 3 値を有することになる。

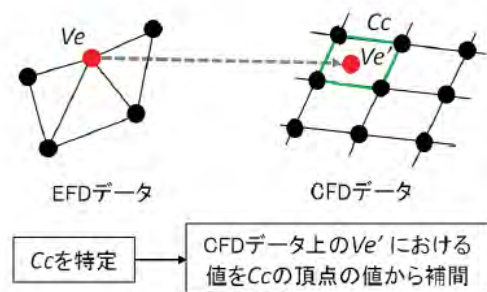


図 2 EFD/CFD データの格子統合

4.2 圧力分布表示

続いて本システムでは、圧力値（およびその差分値）を色に変換することで、圧力分布を表現する。圧力値を表示する際には、図 3（上）に示すカラーマップを用いる。差分値を表示する際には、図 3（下）に示すカラーマップを用いる。

さらに本システムでは、EFD/CFD の各圧力データから急勾配線を検出する。急勾配線とは前述の通り、値が急激に変化する箇所を意味しており、例えば衝撃波の周囲に見られることが多い。現時点での我々の実装では、急勾配線の検出に画像上のエッジ検出手法を適用している。この実装では、3 次元 CG ライブラリの OpenGL が確保するフレームバッファ上に機体モデルを描画した後、空間フィルタを用いて画素値が急激に変化する箇所を検出し、その集合を急勾配線として表示する。以下が処理手順である。

1. 機体モデルを描画後、画素値をフレームバッファに保持する。

2. フレームバッファから画素値を読み込み，ラプラシアンフィルタリングを適用。
3. 格子を構成する各頂点を画面上の画素に投影し，ラプラシアンフィルタリング適用後の画素値を各頂点に割り当てる。
4. フィルタリング適用後の画素値が閾値よりも高い頂点をハイライトして表示。
5. 1.~4.の処理をEFD/CFDの両データに適用する。

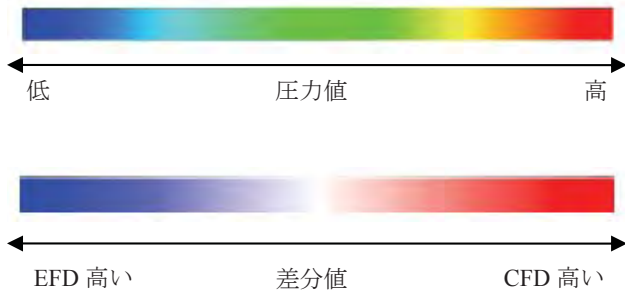


図3 (上) 圧力値のカラーマップ
(下) 差分値のカラーマップ

5. 本研究で用いるEFD/CFDデータ

本章では，我々が現時点で本研究に用いているEFD/CFDデータについて紹介する．我々は航空機の機体を題材として，以下の合計4データの融合可視化を試みている．

- 機体表面の圧力（スカラ場）のEFD/CFDデータ
 - 機体周りの流速（ベクタ場）のEFD/CFDデータ
- なお機体形状として，機体表面の圧力データにはナセルなしのDLR-F6形状，機体周りの流速データにはナセル付きのDLR-F6形状におけるデータを採用している．
- また，圧力および流速の主流条件は以下のとおりである．
- 圧力（スカラ場）：マッハ数 0.75，迎角 1.0，レイノルズ数 1.5×10^6
 - 流速（ベクタ場）：マッハ数 0.75，迎角 0.2，レイノルズ数 1.25×10^6
- また，各データの格子構造は表1に示すとおりである．

表1 本研究で用いるEFD/CFDデータの格子構造

	EFDデータ	CFDデータ
圧力データ	三角メッシュ 要素数 142,704	三角・四角混合メッシュ 要素数 124,956
流速データ	四角形格子 要素数 8,880	四角形格子 要素数 19,252

以下に，各データの生成手段について論じる．

圧力のEFDデータ

本研究が適用したEFDの圧力データは，PSP (Pressure-Sensitive Paint)[7]を用いて風洞実験にて計測されたものである．PSPは，周囲の圧力に応じて発光強度が変化する感圧塗料である．PSPを塗装した航空機の模型をCCDカメラで画像計測し，発光強度を圧力値に置き換えることで，圧力が計測される．これにより，従来の圧力計測手法よりも遥かに連続的かつ詳細な計測が可能のため，PSPを用いたEFDデータはCFDデータとの比較検証[8]に適している．

データ処理においては機体表面の格子データを作り，格子点における圧力値を画像データからマッピングする．今回のデータは三角形格子で構成され，その各頂点に圧力が割り当てられている．

圧力のCFDデータ

本研究が適用したCFD圧力データは，自動格子生成ツールHexaGrid及び高速ソルバーFaSTAR[9]を用いて生成された．この場合，三角形と四角形が混合した格子の各頂点に圧力値が割り当てられる，という形でCFDデータが形成される．

流速のEFDデータ

本研究が適用したEFDの流速データは，PIV (Particle Image Velocity)[10]を用いて風洞実験にて計測されたものである．PIVは粒子画像流速測定法と呼ばれ，流体に追従する微小な粒子の動きを画像計測し，その移動量から空気の流れの空間速度分布を測定する手法である．PIVを適用することで，ある平面上の瞬時の速度分布を計測することが可能であり，CFD流速データとの比較検証[11]に多く用いられる．

また，PIVを適用した実験では，四角形構造格子上にデータが生成される．

流速のCFDデータ

我々が適用したCFD流速データは，EFDデータと同一の気流パラメータを用いて計算された．

CFD流速データでは，EFDデータと異なり計算点の間隔が不均一であり，特に重要な箇所（例えば，渦の発生が予測される機体翼面に近い箇所など）においては計算点が細かいことが多い．我々が適用するCFDデータでは，これらの計算点が四角形格子上に配置されている．

また，実験では空間内のある切り取られた平面状の流速のみ計測できるのに対し，CFDでは解析範囲に物理的な制限がないため，空間内の広範囲での解析が可能である．よって適用するCFDデータは，EFDデータの平面と該当する空間を切り出したものであるが，CFDデータの平面の大きさはEFDデータよりも大きくなっている．

6. 可視化例

本章では，我々の可視化システムによる可視化の例を示す．

6.1 圧力分布表示

図4は両データの圧力値を色表示した例である．この例では，機体中央より上側半分がEFDデータを，下側半分がCFDデータを表している．ここで，図中のEFDデータ中で，機体の尾尻部分などに見られる黒い部分は，PSP塗料が塗られず圧力が計測されなかった部分である．このように計測が行われなかった部分にはデータとして特定の値が割り当てられているので，我々の実装ではそのような部分を黒で表した．両データの可視化結果を見比べると，特に機体の胴体中心と翼の端の部分にEFDデータのみを確認できる数個の斑点があることがわかる．これらの斑点は，風洞実験において機体表面上の位置と，計測したデータの位置を照らし合わせる，位置合わせに使われるマーカー点であるため，EFD独特のものでありCFDデータには見られない．さらに可視化結果から，特に翼面における両データの差が見られた．CFDデータでは，翼の前半分において青色である低い圧力値が広範囲で見られるのに対し，EFDデータでは，翼の前半分における圧力値はCFDに比べて高く，最小値に近い青色が見られる部分が少ないことが分かる．さらに，水色から青色までの低い値が見られるx軸方向の範囲も，EFDデータの方がより狭いことが発見できた．

図5の上半分は，EFDデータとCFDデータの圧力値の差分を表示したものである．この結果，機体の上半分が全体

的に原色の青からも赤からも遠い色で表示され、CFD データと EFD データの差分が全体的に小さいことがわかる。しかし、翼面の圧力値には多少の誤差が見られている。具体的には、翼の前縁付近に CFD データのほうが高い圧力値を示している部位があり、中央付近に EFD データのほうが高い圧力値を示している部位があるのがわかる。

図 6 の上半分は急勾配線の可視化結果である。ピンク色の点群は EFD データの、深緑色の点群は CFD データの急勾配線である。この結果から、EFD データでは位置合わせのマーカー点を除いても、点状の急勾配線が多数検出されており、小範囲での微妙な値の変化が実験では多数計測されていることが分かる。ここで、圧力データでは衝撃波などの特異点を見つけるには、特にライン状の急勾配線に注目することが有効なので、点が連なり線状になっている急勾配線を観察する。翼面に注目すると、図中の翼部拡大図で(a)の黄色の枠に囲まれた箇所(圧力値が青から緑に変化している)に急勾配線が見られ、ここでは EFD/CFD データの急勾配線の位置がほぼ一致していると言える。次に、その少し右の黄色枠(b)の箇所では、閾値の設定によっては図 6 に示すように CFD データでのみ急勾配線が検出された。ここで図中の機体下側の CFD データで該当する箇所を確認してみると、圧力値が水色から緑色に変化している箇所と一致し、上側の EFD データとは異なる値の動きであることがわかる。

6.2 圧力と流速の同時表示

図 7 は EFD と CFD における流速を並べて可視化した例である。両データの格子点から短い線分が伸びており、線分の向きが流速の向きを、線分の色が流速の大きさをそれぞれ表している。

図 7 に示す可視化結果では、最大速度に近い赤色のベクタが多い中で、EFD/CFD 各データが隣接する中心に急激に速度が低くなる部分が見られる。また、この部分から、曲線状に上下に伸びた黄色の領域が見られる。この曲線を EFD/CFD 間で比較すると、形状は非常に類似しているが、CFD データの曲線の方が EFD データよりも黄色に近い色をしている。このように速度が急激に変化する場所には、渦などの特徴的な現象が見られやすい。これらの箇所における両データ間の差を発見することが、EFD/CFD 融合の過程において重要である。

続いて、圧力データと流速データの可視化を統合した結果を図 8 に示す。圧力データと流速データを同時に可視化してみると、流速データ中の流れの歪みや、速度の変化が見られた箇所の意味合いを理解しやすくなる。まず流速データ中心に円状に見られる速度が低い部分は、機体胴部の後方の流れであるため、風が機体胴部によってよけられ速度が急激に低くなったことがわかる。また、図 7 にも見られた、中心から曲線状に(図 8 では左右に)伸びていく黄色の値は、翼の後方の流れだと確認できる。ここで、圧力データを見てみると、翼面上で圧力値が低くなっていることが分かる。そして、その後方の流速データでは翼の形状と等しい曲線上に速度が低くなっており、さらにベクトルの向きに歪みが見られる。圧力が低くなると、逆に揚力が強まり、揚力が強まる場所では、今度は渦が強くなる。これを考慮すると、翼面にかかる圧力が低くなったことが原因で、その後方の流速では渦が生成されたという、圧力と流速の相互作用が確認できる。

7. まとめと今後の課題

本報告では、我々の EFD/CFD 融合可視化のためのシステムの概要を示し、航空機の機体表面の格子統合、および統合された格子上の圧力分布可視化に関する実装を紹介した。今後の課題として、以下の 3 点をあげたい。

[スカラ場の可視化における特徴抽出の改善] 現時点の我々の実装では、圧力分布(に限らずスカラ場)から画像上での空間フィルタを用いて急勾配線を抽出しているが、本来であれば 3 次元形状上で抽出するほうが望ましいため、そのように実装を差し替えたい。また急勾配線だけでなく、例えばスカラ場の極大・極小点なども抽出し、EFD/CFD 間の比較に用いたい。

[ベクタ場における格子統合] 我々の実装による EFD/CFD 融合可視化システムは、スカラ場だけでなく、流速などのベクタ場も対象としている。しかしベクタ場における格子統合や特徴抽出は、まだ実装されていない。そこでベクタ場においても、格子統合機能を実装し、さらに渦中心などの特徴を抽出し、EFD データと CFD データの比較を実施したい。

[格子統合処理の高速化] 現段階の我々の実装による格子統合機能では、5 章で例示した 2 データの統合に数分間を要している。これでは実験や計算との並列処理によるリアルタイムな融合可視化を実現できない。本当の意味での EFD と CFD との融合を実現するためにも、格子統合処理の高速化は不可欠な課題であると考えられる。

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, 22nd International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities (ICIASF), pp. 1-12, 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) W. W. Liou, G. Huang, T. Shih, Turbulence Model Assessment for Shockwave/Turbulent Boundary-Layer Interaction in Transonic and Supersonic Flows, Computers & Fluids, Vol. 29, Issue 3, pp. 275-299, 2000.
- 4) J. W. Durkin, G. Kindlmann, Semi-Automatic Generation of Transfer Functions for Direct Volume Rendering, Proceedings of the 1998 IEEE Symposium on Volume Visualization, pp. 79-86, 1998.
- 5) K. Sawada, A Convenient Visualization Method for Identifying Vortex Centers, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 38, no. 120, pp. 102-116, 1995.
- 6) H. Miura, S. Kida, Identification of Tubular Vortices in Turbulence, Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 66, pp. 1331-1334, 1997.
- 7) J. H. Bell, E. T. Schairer, L. A. Hand, R. D. Mehta, Surface Pressure Measurements Using Luminescent Coatings, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 33, pp. 155-206, 2001.
- 8) 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, pp. 184-189, 2005.
- 9) 橋本, 村上, 菱田, ラフル, HexaGrid/FaSTAR を用いたデジタル風洞の開発, 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 2011, 2011.
- 10) R. J. Adrian, Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 23, pp. 261-304, 2001.
- 11) 渡辺, 加藤, 雷忠, 今村, 榎本, 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, pp. 178-183, 2005.

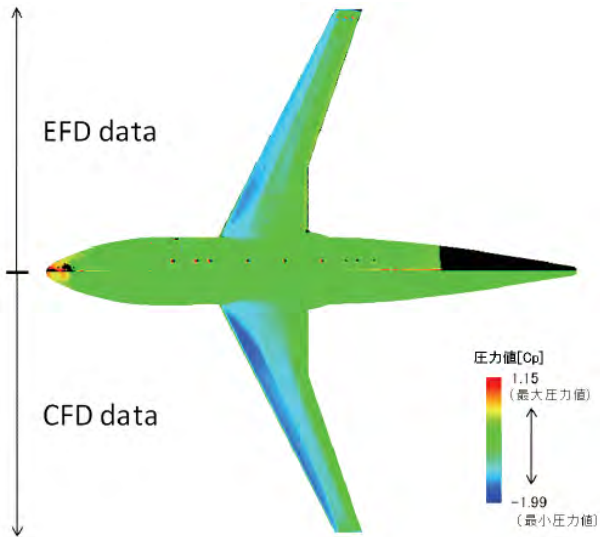


図4 EFD/CFDデータの圧力の比較表示

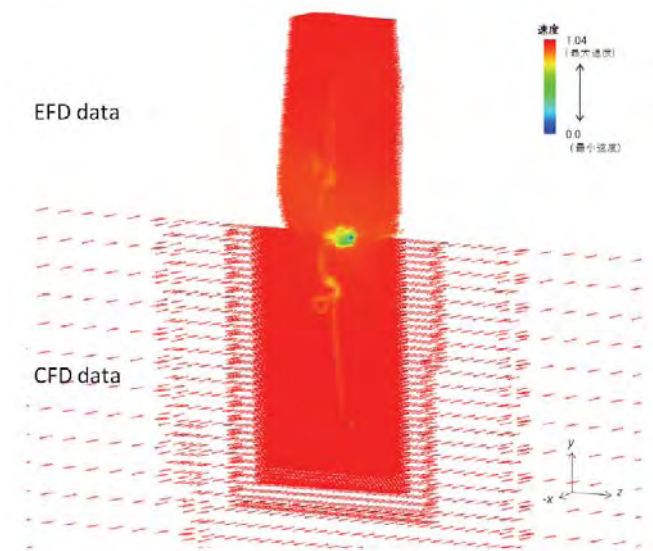


図7 流速分布の可視化

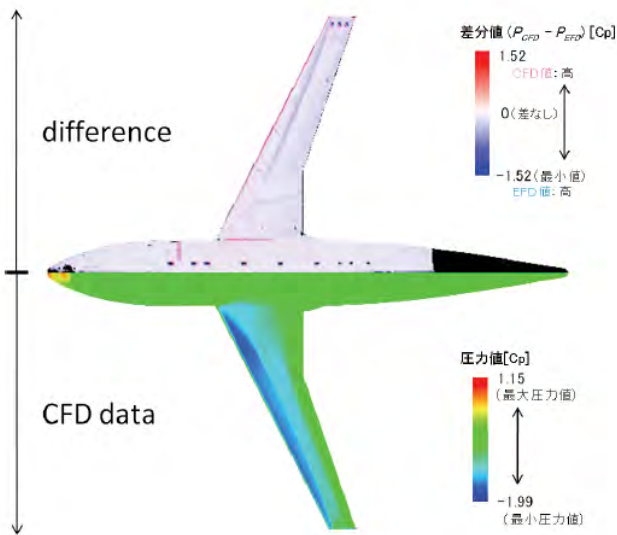


図5 EFD/CFDデータの圧力の差分表示

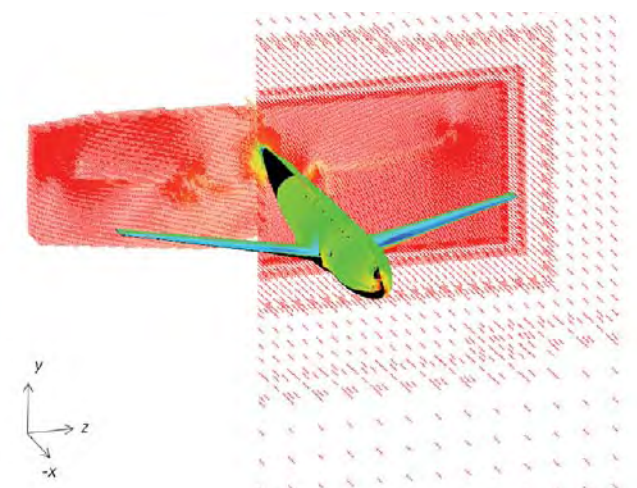


図8 圧力・流速データの統合可視化

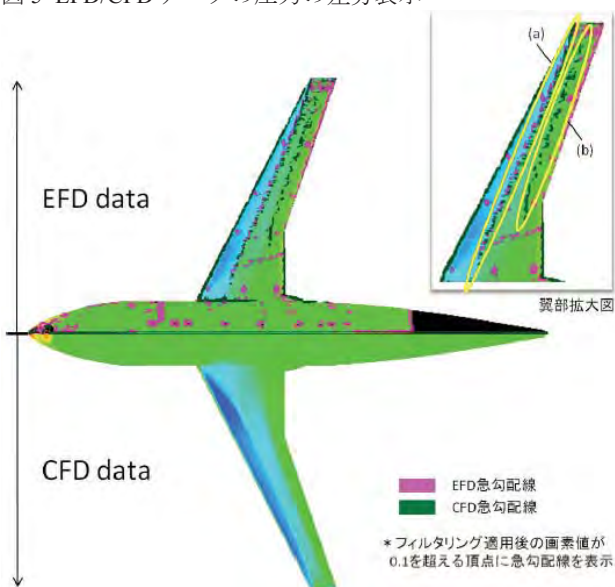


図6 EFD/CFDデータの圧力の急勾配線の表示