



航空工学における高忠実・大規模 LES データの可視化*

河合 宗司¹

Visualization of Large-Scale High-Fidelity LES Data in Aeronautics

Soshi KAWAI

1. はじめに

航空機は空気（流体）の力を使って飛ぶことから、航空機設計では、空力性能、すなわち航空機周りに発生する流体力学現象の理解や予測が重要となります。また航空機は比較的大きく、かつ高速で飛行するため、流れは高レイノルズ数条件となり、複雑な乱流現象を伴います。私たちの研究グループでは、現在、スーパーコンピュータ「富岳」を用いた数百から一十億点規模の高忠実・大規模 LES (large-eddy simulation) 解析から、航空機周りの複雑な流体力学現象を理解・予測し、航空機の設計開発にイノベーションをもたらすよう、研究を進めています。本特集では、高忠実に複雑流体現象を再現した大規模時系列 LES データを用いて、どのように複雑流体現象を可視化し、理解につなげるか、2つの可視化を例に簡単にではありますが紹介します。

2. 高忠実・大規模 LES データの可視化事例

LES は、流体現象の支配方程式である Navier-Stokes 方程式を時間・空間方向に準直接的に解くことで、複雑な流体現象を高忠実に再現する手法です。すなわち、得られるデータは時間・空間の物理量データとなり、例えば私たちが扱っている大規模 LES データは、数百から一十億点規模の空間離散点、数百万ステップ規模の時系列点（時間離散点）、密度、速度3成分、圧力などの物理量データとなります。本章では、このような超大規模時系列データの可視化として、(1)航空機複雑形状周りの流れ現象の可視化、(2)流れ現象の因果関係の可視化、の2つについて、私たちがどのように可視化を利用し、流体現象理解につなげようとしているかを紹介します。

2.1 航空機複雑形状周りの流れ現象の可視化

航空機複雑形状周りの流体現象解析では、どこでどのような流体現象が起こっているのか、事前に分からないケースが多々あります。このようなケースでは、まずは全体の流れ場構造を可視化することである程度の状況を

把握し、その上でキーとなる流体現象にフォーカスして、乱流統計量や乱流構造などを調べることで複雑な流体現象を理解するというアプローチがしばしば取られます。しかし、数百から一十億点規模の複雑形状周りの大規模時系列 LES データとなると、全体の流れ場を可視化することにも困難が伴います。

Fig. 1 は、航空機複雑形状周りの 200 億点規模・大規模時系列 LES データの可視化例です。渦構造は、しばしば速度勾配テンソルの第 2 不変量 Q 値の等値面で可視化しますが、200 億点規模の大規模時系列データの場合、スナップショットデータで約 1 TB となり、通常の方法による可視化は困難となります。Fig. 1 左図では、マーチングキューブ法を用いて、LES 解析と並行して Q 値の等値面データをポリゴンデータとして抽出し、データサイズを大幅に削減すると共に、LES を実施した「富岳」の 384 ノードを用いた並列可視化により 200 枚の時系列可視化を 5 時間程度で実現しています。また右図の表面流線は、形状データ (STL データ) から壁面を構成する三角形要素を読み込み、そこに壁面近傍の速度成分を射影することでデータサイズを大幅に削減し、可視化しています。詳細はここでは割愛しますが、大規模時系列複雑流体データであっても、このような工夫により、航空機の空力性能に大きな影響を及ぼす翼端側や翼根付近での剥離現象といった、流れの全体像を把握することが可能となります。

2.2 流れ現象の因果関係の可視化

前節では、超大規模データから複雑流体現象理解の第一歩となる、全体の流れ場構造を如何にして把握するか可視化例を示しました。本節ではそこから一歩踏み込み、キーとなる本質的な流体現象の因果関係を特定・抽出する解析（可視化）例を紹介します。

非線形性が強い複雑な流体現象では、何が原因で何が結果なのか、すなわち発生する力学現象の因果関係の理解は非常に困難となります。特に LES のように、時間・空間に発達するブロードなスペクトルを持つ複雑な流体現象を高忠実に再現した大規模データであれば尚更で、当然のことではありますが「高忠実に複雑な流体現象を再現した」≠「現象が理解できた。設計に生かせる」であることを痛感します。そこでここでは、複雑な

* 原稿受付 2021年7月29日

¹ 東北大学大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻
(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01,
E-mail: kawai@tohoku.ac.jp)

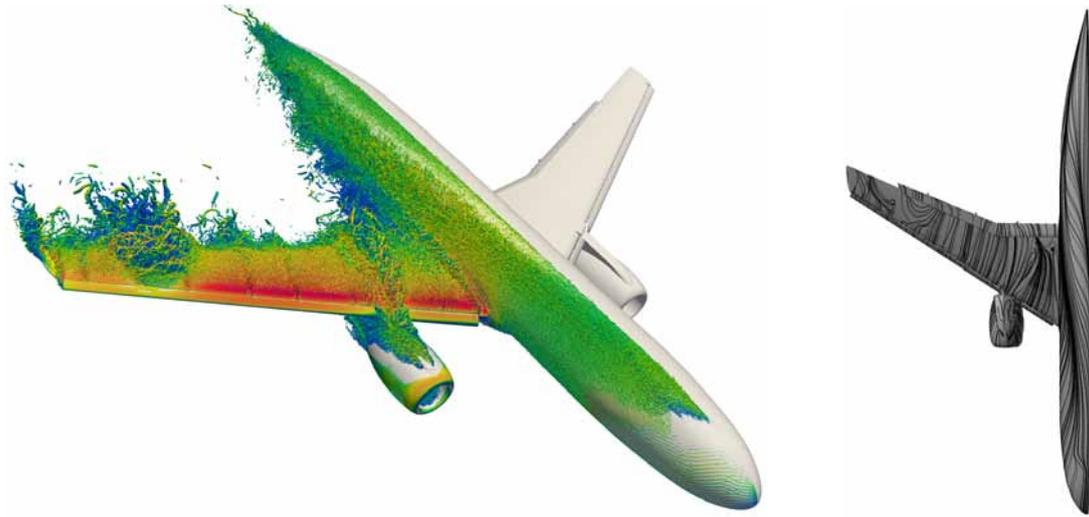


Fig. 1 離着陸時の航空機全機形状周りに発生する複雑流体现象を高忠実に再現した 200 億点規模・大規模 LES データの可視化例。左図：航空機周りの乱流渦；右図：物体表面流線。

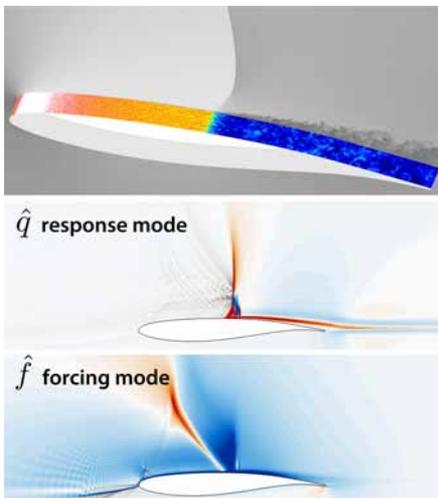


Fig. 2 翼型遷音速パフエット現象 LES データの Resolvent 解析結果の可視化例。上図：LES の流れ場；中図： \hat{q} (response mode)；下図： \hat{f} (forcing mode)。

流体现象における因果関係を応用数学的に解析（可視化）することで、高忠実・大規模 LES データからキーとなる流体现象を特定・抽出する例を紹介します。

Fig. 2 は、遷音速飛行時に翼面上で衝撃波が前後に振動するパフエット現象の LES データを用いた Resolvent 解析結果の可視化例です。Resolvent 解析では、Navier-Stokes 方程式から導かれる因果関係式 $\hat{q} = \mathcal{H}\hat{f}$ における、Resolvent 作用素 \mathcal{H} を特異値分解することで、因果関係のインプット（原因）に当たる \hat{f} (forcing mode) とアウトプット（その結果）に当たる \hat{q} (response mode) を抽出するデータ解析手法です。詳細は割愛しますが、非定常な衝撃波振動を引き起こす原因の一つは、衝撃波の上流に伝播する圧力波であることを示唆する結果が得られています。単に流体データを可視化するだけでなく、応用数学的なデータ解析手法を併用し可視化することで、複雑な流体现象のキーとなる

本質的な挙動を応用数学的な新たな側面から特定し、抽出できるのではと期待して研究を進めています。

3. おわりに

本特集記事では、可視化を専門としない著者の狭い見識に基づく話として、スーパーコンピュータ「富岳」を用いた数百から一千億点規模の LES から得られる高忠実・大規模時系列複雑流体データの可視化例について紹介しました。解析手法の高度化や計算機の性能が上がると、それらに応じて、扱う現象やデータの複雑化・大規模化が起こるのは一般的な事実とも言えるでしょう。また航空分野では、扱うレイノルズ数が高いこともあり、複雑流体现象を高忠実に再現するデータは必然的に超大規模となり、従来の可視化では対応が困難な状況が生じてきています。またこのような超大規模複雑流体データから、キーとなる本質的な流体挙動をどのように抽出し、理解につなげていくか、は今後の大きな課題だとも考えています。本特集記事が一つの話題提供となり、可視化を専門とする研究者との交流が増え、大規模データの可視化やキーとなる物理現象の抽出などの研究分野の更なる発展に少しでも貢献できれば幸いであり、またそれを期待したいと思います。

謝辞

本研究成果の一部は、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム「航空機フライト試験を代替する近未来型設計技術の先導的実証研究」の一環として行われたものであり、スーパーコンピュータ「富岳」の計算資源の提供を受け、実施しました (Project ID: hp200137, hp210168)。また本特集で紹介した研究成果は、JAXA の高木亮治准教授、UCLA の平邦彦教授、Chi-An Yeh 博士、東北大学の玉置義治助教、浅田啓幸助教、岩谷優汰さんとの共同研究成果となります。