

高忠実な大規模非線形複雑流体データをどう活かすか

河合 宗司 東北大学 大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻

1 はじめに

「高忠実な流体シミュレーションをすると何が分かるので すか?」と聞かれたことはないでしょうか.(正確には,「LES (large-eddy simulation)をすると何が分かるのですか?」と聞か れたと記憶しています).

航空宇宙分野が扱う流れは、レイノルズ数が高く、かつ衝撃 波も伴う圧縮性流体を取り扱う必要性から、特に工学的応用問 題や産業界では、時間平均化操作を施した渦粘性近似に基づ くRANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes)解析の利用が 多いのが現状です.著者は、そのような中で冒頭の質問を受け ました.工学的応用の見地から、RANS解析で得られる時間平 均諸量からの性能予測や現象理解を大きく上回るものが得ら れるのかと聞かれていると感じ、はっとしたのを良く覚えてい ます.もちろんRANSが複雑な乱流現象に対してその予測精度 が十分でないことはしばしば事実ですし、高忠実な流体シミュ レーションデータからは、乱流構造や乱流のダイナミクス、乱 流統計量など、流体現象の詳細の理解が深まりますなどと言え ることはありますが、何かそれは本質では無いと強く感じたの を覚えています.

一方で, (これまでの) 高忠実な流体シミュレーションを推進 するモチベーションの一つは、少なくとも航空宇宙分野では、 RANS解析で予測することが困難な工学的に重要な流れを高 忠実に予測したいという点にあったように思います. 言い換える と、これはRANSが複雑な乱流現象に対してその予測精度が十 分でないことへの代替とも言えます. 例えばその典型的な例は, 航空機の最大揚力予測です.最大揚力予測ができるようになれ ば, 航空機開発にイノベーションを起こすだろうとも言われてい ます. 実際, NASAのCFD Vision 2023では2030年までに達成す べき目標の一つとして、これまで困難であった実飛行・高レイノ ルズ数条件における最大揚力付近の航空機全機周り剥離流れ の予測があげられています.またアメリカ航空宇宙学会(AIAA) でもHigh-Lift Prediction Workshop (HLPW)で、最大揚力の 予測精度についての議論が現在も行われています(現在は HLPW-5が開催中であり、一つ前のHLPW-4のsummary paper を参照のためあげておく[2]).

ここで初めの質問「高忠実な流体シミュレーションをすると 何が分かるのですか?」に戻ると、この質問は、これまで予測困 難だった現象が予測できるようになったら、予測の向上以上に (RANS解析でも得られる)時間平均諸量からの性能予測や現 象理解を超える何か大きなゲインがあるのですか?という本質 的な問いだと考えることもできます.私たちは、高忠実な流体シ ミュレーションで得られる時間・空間方向に高忠実に解像され た莫大な流体データを十分に活用できているでしょうか.そこで はデータ科学との関わりがこれまで以上に重要になってくると 実感しています.本ニュースレター執筆の機会をいただき、ここ では私たちが抱えている課題を通して、高忠実な流体シミュレー ションとデータ科学との関わりやその重要性を簡単にではあり ますが記したいと思います.

2 高忠実な流体シミュレーションの現状

LESのような高忠実な流体シミュレーションは、今や学術研究 の多くで利用されています.一方,実際の工学的応用問題や産 業界で積極的に利用されているかというと、そうとも言えないの が現状だと思います.その原因として、大きな計算資源が必要と いう側面があげられることが多いと思いますが、その他にも根本 的な課題がいくつかあると私は考えています.まずそもそも産業 界が扱うような複雑な形状に対して、LESで必要となる数十~ 数百億点規模の格子が作成できない,もしくは,作成できるとし ても計算時間よりも長い時間がかかるという課題があったりし ます.これはいくら早いコンピュータが開発されても解決する課 題ではありません.また高忠実なLESを阻害する数値散逸を多 用しないと、特に複雑形状解析では計算が安定に進まないなど の課題もあります.このような中, 高忠実な流体シミュレーション による航空機離着陸時の複雑な形状と高い迎角による剥離を 伴う空力予測(航空機の最大揚力予測)は、航空機開発におけ る次世代のイノベーションに繋がりうる技術として, CFD Vision 2023やAIAA HLPWでも取り上げられるなど大きく期待されて います.ここではまず高忠実な流体シミュレーションの現状とし て,航空機の最大揚力予測を紹介します.

私たちの研究グループでは、上記の課題を克服し、高忠実な 流体シミュレーション(LES)の抜本的な展開を目指して、圧縮 性流体解析基盤ソルバー FFVHC-ACEを開発しています[3]. FFVHC-ACEは3つのキー学術成果は、(1)完全自動格子生成 を可能とする階層型等間隔直交格子法、(2)高忠実な圧縮性 流体解析を可能とする数値散逸なしに安定なKEEPスキーム、 (3)高レイノルズ数流れのLESを可能とする壁面モデルLES、で 構成されています.図1および2は、三菱重工グループの方々が FFVHC-ACEを用いて、三菱スペースジェット実機フライト試験 のLESに成功した例となります.著者の知る限り、産業界による 初の民間旅客機全機LESです.

高忠実な流体シミュレーションにより、今まで困難であった 航空機の最大揚力予測が達成されている点に加えて、ここで特 筆すべきは、3つのキー学術成果により、ユーザーは形状データ (STLデータ)を入力するだけで、高忠実なLESが完全自動で 可能となっている点です.すなわち、ユーザーを問わない高品 質・高忠実な完全自動LESが可能となっていることが実証され



図1 三菱スペースジェット実機フライト試験の壁面モデルLES. Q 値等値面による乱流渦(三菱重工グループ提供)[3].



図2 三菱スペースジェット実機フライト試験の最大揚力予測 (三菱重工グループ提供)[3].

ています.これは,これまで困難であった,誰が実施しても高忠実 な流体データを取得することが可能な時代が始まっているとも 言えます.格子は自動で生成されますので,今までのような格子 生成の手間はありません(さらに言うと,ウォータータイトなSTL データである必要もありません).また完全自動で格子生成から 安定・高速なLESまでシームレスに実現できることから,計算自 体で流体計算の専門性が問われることもありません.計算に要 する時間も,一様流が主翼の空力平均翼弦長を流れる時間の計 算に,30億点のGrid1の計算で「富岳」全系の約0.5%(768ノー ド)を使って約2時間,186億点のGrid2では全系の約2%(3456 ノード)を使って約7時間となります.格子生成についても,640 億点の格子であっても約20分程度で自動的に生成可能です.い よいよIndustrial LESが現実味を帯びてきたと言っても過言では ない時代になりつつあるのではないでしょうか.

ただ真の意味でLESが役立つのに計算ができるだけで十分 でしょうか.またここで初めの質問に戻りますが,LESで得られる 高忠実な大規模非線形複雑流体データをどう扱い,どうフル活 用するかの方が重要ではないでしょうか.次の章では,私たちが 抱えている課題を通してその辺りを議論できればと思います.

3 高忠実な流体シミュレーションの課題とデータ科学

例えば,前章で紹介した数百億点レベルの計算で得られる高 忠実な流体現象のスナップショットデータは約500GB程度にな ります.流体現象の時間スケールは,乱流境界層スケールの現 象から,翼弦長スケールの現象,さらには低周波現象が加わると 翼弦長の10倍程度の現象までもが共存することになります.仮 にそれぞれ10倍程度のスケール差があるとすると、これらマルチ スケールな現象を時間方向に解像するデータとして最低限1000 スナップショットは必要となり, データ量としては約0.5PBとなり ます. 学術界のみならず産業界にとっても高忠実な流体シミュ レーションが可能となりつつある現在,得られるこの高忠実な大 規模非線形複雑流体データを、どのようにして十分に活用する かが大きな課題となっていると実感しています.実際この規模の データを扱うと,活用する以前に,そもそも可視化することさえ困 難な現状に直面します.また主に学術研究で扱うような比較的 単純な形状や重要と思われる現象が事前にある程度分かって いれば, 従来からの統計量や流れ場を解析する手法が使えるで しょう.しかし一方で、図1に示すように複雑形状かつ様々な複雑 流体現象が干渉し合う流れ場では、重要な現象が高次元データ の森の中に埋もれ、例えば、揚力に効いている重要な現象を抽 出することさえ困難な状況になります.実際に私たちも旧態依然 とした時間平均統計量から揚力や抗力,平均圧力分布や表面流 線などから議論は進めるものの、高忠実かつリッチな大規模流 体データを十分に活用できているとは言えない状況です.

今まで困難であった,完全自動でユーザーを問わない高品 質・高忠実な流体シミュレーションが可能となりつつある今、こ れまで扱ったことがないような大規模複雑流体データをどう解 析し、そのポテンシャルを十分に活かすかの重要性は以前にも 増して高まっています.この課題に対し、データ科学との関わりが これまで以上に重要になってくることは事実でしょう.また私たち は, データ科学の活用によって, 高忠実な大規模非線形複雑流 体データである高次元データの中から重要なダイナミクスを抽 出し, その後の解析やモデリング, 制御などの指針を示せるよう なことを期待して、高忠実な流体シミュレーションとデータ科学 に関する研究を進めています.本章では,データ科学による大規 模非線形複雑流体データの解析事例として, 2つ, (1) 大規模時 系列データのモード解析,および(2)非線形流体現象の入出力 関係解析,について私たちがどのようにデータ科学を利用し,大 規模流体データの活用につなげようとしているかについて、まだ まだ目的の達成には不十分な状況ですが紹介します.

3.1 大規模時系列データのモード解析例

高次元データの低次元化やキーダイナミクスの抽出手法とし て固有直交分解 (Proper Orthogonal Decomposition: POD) や 動的モード分解 (Dynamic Mode Decomposition: DMD) などの モード解析手法があげられます.

ー般的にこれらの手法は、スナップショットデータを縦に、 その時系列データを横に並べた行列 X を取り扱います. 行列 X のサイズは、高忠実な大規模流体データを取り扱う場合、縦 の長さが格子点数×物理量から成り、数百億から数千億規模 の超縦長行列になります. この超大規模行列を扱うことの難し さは想像に難くないでしょう. すなわち、高次元データの低次 元化やキーダイナミクスの抽出として一般的に使われるような モード解析手法であっても、高忠実な大規模流体データを対 象にした途端に困難さを伴います.

詳細は参照文献[4]を参照してもらえればと思いますが、私たちは超大規模データの厳密なPOD/DMDを可能とする近似を用いない並列化アルゴリズムを提案することで、高忠実な大規

模流体データのモード解析を可能にしています. さらにDMDで は、用いる r 個のPOD基底を十分に多く取らないと高精度な DMDが困難であることが分かっています.これに対して、ハンケ ル行列を用いてDMDを行うことで、比較的少ないPOD基底で 正確なDMDが可能となることを示しています. ここでハンケル 行列とは、複数のスナップショットデータを縦に並べた数千億規 模の超縦長行列ですが, 上記の並列化アルゴリズムを用いるこ とで、厳密なDMDが可能となっています.図3は、航空機遷音速 バフェット現象の高忠実な大規模LESデータ(圧力)[5]に対し て、並列化ハンケルDMDでモード解析を実施した例です. 遷音 速バフェット現象とは、 高速で飛行する航空機の主翼上で衝撃 波が非定常に振動する現象であり、航空機の飛行安全性に関わ る重要な現象となります.後退翼では衝撃波の大規模な前後方 向の振動に加えて、衝撃波のスパン方向の振動が翼端に向けて 移流する特徴的なバフェットセル構造を持つことが知られてい ます. 図3は、複雑な大規模流体データから、特徴的な衝撃波の バフェットセル構造 (衝撃波のスパン方向の振動構造)の抽出 に成功している例です.

これまでにない大規模データのモード解析を可能としている 点は確実に一歩前進なのですが、一方で、バフェットセル現象の 周波数が事前にある程度分かっていたので抽出できたという側 面は否めず、データ科学による大規模非線形複雑流体データの フル活用という観点では、まだまだ課題が多いのも事実です.



図3 航空機遷音速バフェット現象LES データのハンケルDMD 解析[4]. 色は表面圧力変動分布.

3.2 非線形流体現象の入出力関係解析

前節では,複雑流体現象の理解の一助となりうる,高忠実な 大規模非線形複雑流体データのモード解析例を示しました.本 節では制御の指針にもなりうる,どのような流れ現象が入力と なって,出力としてどのような現象が誘起されるか,非線形流体 現象の入出力関係を探る解析例について紹介します.

図4上は、衝撃波の大規模な前後方向の振動を伴う主翼断面 形状翼型の遷音速バフェット現象のLESデータ[6]です、衝撃波 と乱流境界層との干渉により境界層剥離が発生し、衝撃波が低 周波で前後に自励振動する興味深い現象です.比較的単純な現 象だと思われるかもしれませんが,長年に渡ってその自励振動メ カニズムは理解されていないのが現状です.自励振動メカニズ ムやその入出力関係が理解できれば、自励振動周波数が事前 に特定でき、さらには入力となる現象を断ち、衝撃波振動を抑制 するような制御方法の確立にも繋がります.ただ非線形性が強 い流体現象において、何が入力で何がその結果となる出力なの か、そのメカニズムも含め、発生する力学現象の入出力関係の 理解は非常に困難になることが多いのが現状だと思います.当



図4 主翼遷音速バフェット現象LES データのresolvent 解析
[7]. 下左図: f(入力モード); 下右図: q(出力モード).
色は圧力変動分布.

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」 が, 直ちに「現象が理解できる. 設計や制御に生かせる」に結び つかないことを痛感する毎日です. その意味でも, 高忠実な流体 シミュレーションが実施可能となるのはゴールではなく, スター トだと実感します.

図4下は、この力学現象の入力と出力の関係をresolvent解 析で示した例です[7]. Resolvent解析は、レイノルズ分解した Navier-Stokes方程式から導かれる入出力関係式 $\hat{q} = \mathcal{H}\hat{f}$ にお ける、resolvent作用素 \mathcal{H} を特異値分解することで、入出力関係 の入力モード \hat{f} と出力モード \hat{q} を抽出するデータ解析手法です. 議論の詳細は参考文献[7]を参照していただくとして、resolvent 解析結果は、衝撃波の上流に伝播する圧力波と翼後縁付近の 圧力変動が入力となり、出力として非定常な衝撃波自励振動が 起こっていることを示しています.新たな視点から複雑な流体現 象のキーとなる本質的な挙動を特定し、抽出できるのではと期 待して研究を進めていますが、数値振動のないresolventモード を安定に得ることの困難さや、得られたモードに対する物理的解 釈の困難さなど、こちらもまだまだ課題が多いのが現状です.

おわりに

本特集記事では著者の狭い見識に基づく話として、高忠実な 大規模非線形複雑流体データをどう活かすか, 高忠実な流体 シミュレーションの現状と課題、またデータ科学の重要性につ いて紹介しました. 航空宇宙分野を含め, 今や学術界だけでな く産業界でも高忠実な大規模流体シミュレーションを活用する Industrial LESの時代に入ってきたと言っても過言ではない時 代になってきています. 計算手法の高度化や自動格子生成など の基礎学術成果,さらには計算機の性能が上がり,これまでは予 測困難であった複雑な流体現象が、ユーザーを問わず高忠実 に予測することが可能になってきています. そこでは, 形状も現 象も複雑な系の数百億点規模の高忠実な大規模非線形複雑流 体データをどう十分に活用するかが大きな未知の課題となって おり、データ科学との関わりがこれまで以上に重要になっている と実感しています.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であり、今まさに私たちは、これまでにな

い規模の大規模データの解析の必要性に直面するという転換 点にきていると考えています.事実,従来の解析手段では対応が 困難な状況が生じています.

高忠実な大規模非線形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,少なくと も私たちにとって喫緊の大きな課題となっています.なにしろ,高忠 実に複雑な流体現象の再現には成功しているにも関わらず,その 貴重なデータを目の前にし,現象を理解し,設計や制御に十二分 に生かすことができていないのですから.本特集記事が一つの話 題提供となり,今まさに転換期を迎えている高忠実な大規模流体 データのデータ科学研究の発展に貢献したいと思いますし,また 本研究分野の発展に期待したいと思います.

なお本特集記事で紹介した圧縮性流体解析基盤ソルバー FFVHC-ACEは、スーパーコンピュータ「富岳」を初め、北海道 大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、大阪大学、最先端共同 HPC基盤施設(JCAHPC)所有のスパコンにインストールされ 無償で利用可能となっています. 産業界の方々も含め、ぜひご活 用頂けましたら幸いです.

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(JPMXP1020200312)」、および「航 空機デジタルフライトが拓く機体開発DXに向けた実証研究 (JPMXP1020230320)」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(hp200137, hp210168, hp220160, hp230197, hp240203).

引用文献

- Slotnick, J., Khodadoust, A., Alonso, J., Darmofal, D., Gropp, W., Lurie, E., & Mavriplis, D.: CFD vision 2030 study: A path to revolutionary computational aerosciences, NASA CR 2014–218178 (2014)
- [2] Kiris, C. C., Ghate, A. S., Browne, O. M. F., Slotnick, J., & Larsson, J.: HLPW-4: Wall-modeled largeeddy simulation and lattice-Boltzmann technology focus group workshop summary, J. Aircraft, 60 (2023) 1118–1140.
- [3] Asada, H., Tamaki, Y., Takaki, R., Yumitori, T., Tamura, S., Hatanaka, K., Imai, K., Maeyama, H., & Kawai, S.: FFVHC-ACE: fully automated Cartesiangrid- based solver for compressible large-eddy simulation, AIAA J., 61 (2023) 3466–3484.
- [4] Asada, H. & Kawai, S.: Parallelized dynamic mode decomposition for large-scale flow data with Hankel matrix, in preparation (to be submitted).
- [5] Tamaki, Y. & Kawai, S.: Wall-modeled LES of transonic buffet over NASA-CRM using FFVHC-ACE, AIAA J., Articles in Advance (2024).
- [6] Fukushima, Y. & Kawai, S.: Wall-modeled large-eddy simulation of transonic airfoil buffet at high Reynolds number, AIAA J., 56 (2018) 2372-2388.
- [7] Iwatani, Y., Asada, H., Yeh, C.-A., Taira, K., & Kawai, S.: Identifying the self-sustaining mechanisms of transonic airfoil buffet with resolvent analysis, AIAA J., 61 (2023) 2400–2411.