

実飛行レイノルズ数・航空機全機LES解析に向けて

河合 宗司

1 はじめに

航空機の空力設計において、重要となる流体现象には2つの大きな特徴がある。一つは圧縮性流れであること、またもう一つは主翼コード長ベースのレイノルズ数が $Re_c \sim 10^7$ レベルにもおよぶ高レイノルズ数流れであることである。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」課題で開発している基盤アプリケーションFFVHC-ACEでは、これらの特徴的な流れを高忠実に扱う必要があるため、これまでの既存の圧縮性流体シミュレーション技術からの大きな転換が求められている。

航空機空力設計は、航空機の空力性能や安定性、操縦性に大きく関わり、高精度な空力予測、さらには空力を司る流れ場の予測が設計上、必要不可欠となる。現状の航空機空力設計を鑑みると、computational fluid dynamics (CFD) は既に欠かすことのできない技術となっており、時間平均流れを対象とするRANS解析による空力予測は、巡航時(ある程度準定常的な流れ場)であれば既に設計に耐えうる十分な精度を持っていると聞くことも多い。しかし一方で、これらの既存のRANS解析では、流れの非定常現象が支配的となる設計上の重要課題、最大揚力やバフエット境界の予測評価、またそれらに伴う主翼空力弾性などの予測精度が大きく悪化することが知られている。したがって現状、これらの重要課題は図1に示すように、開発下流段階の実機フライト試験など試験機製造後でないと評価できず、重大な手戻りによる開発期間の大幅な長期化や開発リスクとなっている。(なおここでは風洞試験について言及しなかったが、実飛行レイノルズ数 $Re_c \sim 10^7$ レベルの風洞試験が実施可能な設備は世界でも限られた数カ所であり、風洞試験・CFDともに上記設計上の重要課題を設計初期段階で精度良く予測評価できていないのが現状である)。

このような中、本課題では航空機実機複雑形状・実飛行レイノルズ数流れに適用可能な圧縮性LES手法を

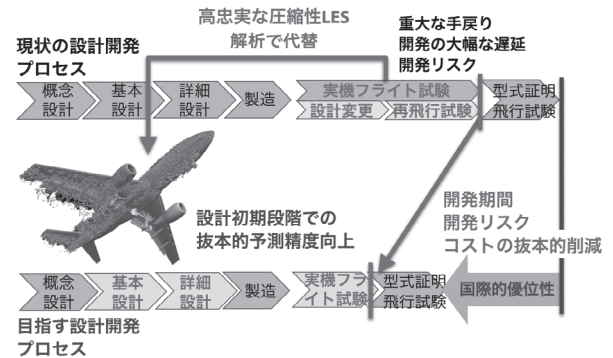


図1 高忠実な圧縮性LES解析で航空機フライト試験を代替する次世代の設計開発プロセス。

確立することを目指している。また「富岳」を利用することで、本LES手法が、ものができる前の設計初期段階で設計上の重要課題に対する予測評価精度を抜本的に向上させることを実証していく。本特集記事では、特に基盤アプリFFVHC-ACEの中で、実機複雑形状・実飛行レイノルズ数の圧縮性LESを可能とする独自のキー技術である、安定かつ高忠実な圧縮性流体計算スキーム、およびLESが可能なレイノルズ数を飛躍的に上げる壁面近傍内層乱流をモデル化するLES手法、この2つのキー技術に着目し、「富岳」を用いた最新の大規模LES解析結果と合わせて紹介させていただく。

2 「富岳」成果創出加速プログラム課題の概要

現状の航空機開発では、設計上の重要課題(最大揚力・バフエット境界予測など)の予測評価が困難であることなどから、図1に示すように試験機製造後に実施する実機フライト試験により空力設計の妥当性などを確認する設計プロセスを取らざるを得ず、航空機設計後に設計変更が生じるリスクが常に存在している。本課題ではこの現状を抜本的に解決するため、設計上の重要課題における高精度な空力予測評価を可能とする圧縮性LES手法を確立・実証し、本LES手法を次世代の航空機空力設計ツールとすべく研究開発を進めている。

本課題では、現状、実機フライト試験でしか高精度に評価できていない離着陸性能を決める重要な空力特性である最大揚力の予測評価をターゲットとし、開発している圧縮性LES手法の有効性を実証していく。具体的には、図2に示す(1)階層型等間隔直交格子ベースの基盤アプリFFVHC-ACEによる航空機実機複雑形状の壁面モデルLES(壁面近傍内層乱流をモデル化したLES)による最大揚力予測評価の実証研究、および(2)主翼基本形状を対象とした高次精度構造格子法(6次精度コンパクト差分法)による壁面まで準直接的に解像す

筆者紹介



かわい そうし

東北大学大学院工学研究科教授。2005年東京大学大学院工学系研究科修士(工学)。スタンフォード大学博士研究員、JAXA国際トップヤングフェローを経て、2019年より現職。専門は航空宇宙工学、流体力学、数値流体力学。文部科学大臣表彰若手科学者賞(2016)、日本流体力学会竜門賞(2016)、東北大学ディステイングイッシュトリチャー(2020)。

空力課題の予測評価

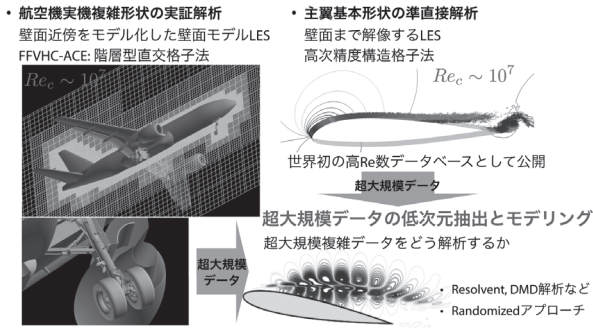


図2 「富岳」成果創出加速プログラム・航空機空力課題の実施概要。

る大規模LES研究を実施する。どちらの解析も実飛行レイノルズ数 $Re_c \sim 10^7$ レベルの高レイノルズ数流れを対象としており、独自の学術成果と「富岳」を利用することで初めて可能となる解析であり、成功すれば世界初の研究成果となる。また本課題の大きな目的は、高忠実な圧縮性LES解析により、ものができる前の設計初期段階で重要設計課題の推算精度を抜本的に向上させることで、高忠実なLES手法による運用全体を俯瞰した実機フライト試験を代替する新たな設計プロセス技術への可能性を先導的に示すことにある。

また本課題で実施する解析は数百から数千億点規模の大規模非定常解析となり、生成される次世代の大規模複雑流体現象データをどのように解析するか、さらにはキーとなる本質的な流体挙動をどのように低次元抽出し、低計算コストでの空力予測評価につなげていくか、についてもある一定の方向性を示したいと考え、研究開発を進めている。なお本課題の実施機関は代表機関の東北大学および協力機関のJAXAで構成し、航空機開発に携わる国内連携機関の三菱重工グループ、および海外連携機関のUCLAおよびImperial College Londonと連携体制を組み研究開発を進めている。

3 基盤アプリケーションFFVHC-ACEのキー技術

本課題で開発している基盤アプリケーションFFVHC-ACEでは、実機複雑形状の解析を実現するため、階層型等間隔直交格子法と埋め込み境界法による複雑形状への自動格子生成技術を用いている。本章では実飛行レイノルズ数の圧縮性LES解析を実現するためにFFVHC-ACEに実装している独自のキー技術である、LESを根底から支える安定かつ高忠実な非散逸圧縮性計算スキーム、および実飛行・高レイノルズ数流れのLESを可能とする壁面極近傍の内層乱流をモデル化したLES手法(壁面モデルLES)について紹介する。

3.1 安定・高忠実な非散逸圧縮性計算スキーム

LESは支配的な乱流スケールを格子と数値計算スキームで準第一原理的に直接解像し、保有エネルギーが小さく普遍的な小スケールの乱流のみをモデル化する手法である。したがって、乱流に対して移流方程式ベースで物理的な観点の誤差である散逸誤差や分散誤

差の少ない計算スキームがまず第一に絶対的に重要となる。しかし圧縮性流体解析では、汎用商用コードを含め実際の複雑形状解析で用いられる非構造格子法や階層型直交格子法の(著者の知る限り)全てで、散逸誤差(数値散逸)の大きな既存の風上法が用いられているのが現状である。数値散逸の大きな風上法を用いている理由は、圧縮性流体解析では一次的な保存量(密度、運動量、全エネルギー)の保存性を確保するため、通常、保存形(発散型)の支配方程式を離散化するが、このような場合、数値散逸の無い中心的な離散化で計算を行うと、エイリアシングエラーの蓄積などから計算はたちまち不安定となり発散してしまうからである。風上法では強い散逸誤差から乱流が非物理的に散逸されてしまうため、高忠実なLESを実現するのは困難である。したがって高忠実な圧縮性LESを実現するためには、広く使われている既存の風上法ベースの計算スキームからの抜本的な転換が必要不可欠となる。

この課題に対し本研究では、移流項の離散化を工夫することで非散逸(散逸誤差が無い)な中心的な離散化を採用しつつ、計算の安定化を図るアプローチを新たに開発し、FFVHC-ACEに実装している。詳しい計算スキームのアイデアや導出は参考文献[1]を参照いただきたいが、本研究では、移流項の計算に一般的に用いられる発散型ではなく擬混合型を用い、通常の圧縮性計算手法と同様に一次的な保存量の保存を満足しつつ、さらに解析的に成立する二次的な運動エネルギーおよびエントロピー保存を離散的にも満足するよう工夫した計算手法KEEPスキーム(kinetic energy and entropy preserving (KEEP) scheme)を開発し、実装している。図3は、初期マッハ数

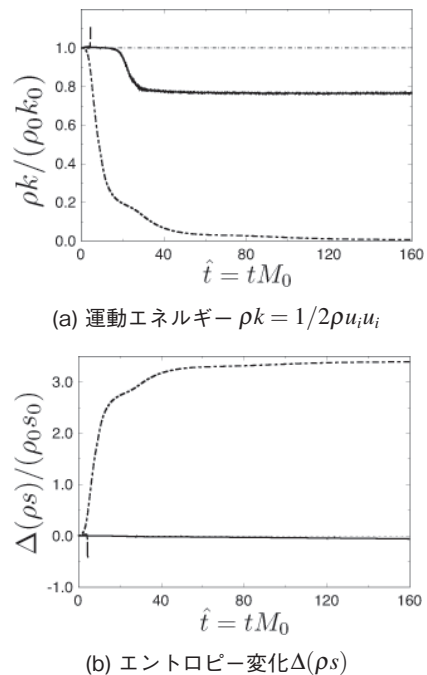


図3 非粘性圧縮性Taylor-Green渦問題における運動エネルギーおよびエントロピーの時間変化。初期マッハ数 $M_0 = 0.4$ 、 64^3 格子。実線、KEEPスキーム^[1]；点線、既存の風上法；破線、通常を中心差分。

$M_0 = 0.4$ の非粘性圧縮性 Taylor-Green 渦問題における運動エネルギーおよびエントロピーの時間変化を示したものである。Taylor-Green 渦問題は、大きな渦構造が時間が経つにつれて小スケール渦に遷移していく問題で、非粘性条件はレイノルズ数が無限大の極限条件であり、数値散逸無しに長時間安定に計算を行うことが非常に困難なテストケースとして知られている。KEEP スキームは、解析的に成立する運動エネルギーおよびエントロピーの保存が高忠実に再現され、中心的な離散化であるため散逸誤差は厳密に0 (数値散逸無し) であるが長時間安定に計算が可能となっている。これだけの長時間、数値散逸無しに安定に計算が可能となったのは、KEEP スキームが世界で初めてである^[1]。一方で、汎用コードなどの圧縮性流体解析で広く用いられる既存の風上法では、強い数値散逸によりほぼ全ての乱流エネルギーが散逸され、エントロピーが上昇してしまっている (非粘性流体ではエントロピーが保存するのが解析解である)。また既存の中心差分法ではエントロピーが非物理的に減少し、あつという間に計算が破綻する。

加えて本研究では FFVHC-ACE で KEEP スキームを用いるため、図2に示す階層型等間隔直交格子の階層部分ハンギングノードを含む全てのセルの離散化において、一次的な保存に加え、二次的な運動エネルギーおよびエントロピーの保存を満足する KEEP スキームの開発にも成功している^[2]。図4は、FFVHC-ACE に本

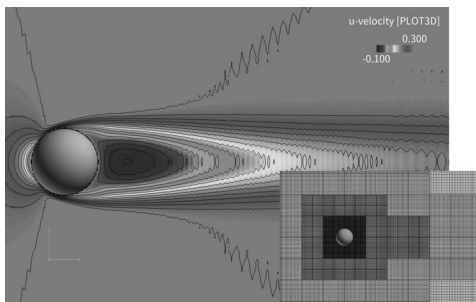


図4 KEEP スキームを実装した FFVHC-ACE での球周りの流れ解析例 ($Re_D = 200$, $M_\infty = 0.3$)。

KEEP スキーム^[1,2]を実装し、低レイノルズ数・亜音速条件 ($Re_D = 200$, $M_\infty = 0.3$) での球周りの流れを解析した例である。ハンギングノードを含む階層型直交格子を用いているが、安定化のための数値散逸を全く導入せずに (散逸誤差は厳密に0で)、安定かつ高忠実な計算が可能となっている。またここでは示さないが、非定常な乱流現象を伴う $Re_D = 1,000$ のケースでも数値散逸無しに安定に計算ができています。

以上のように、本課題のアプリケーション FFVHC-ACE では、複雑形状の圧縮性流体解析で世界的に広く用いられる既存の風上法から、高忠実な圧縮性 LES を実現可能とする計算スキーム (KEEP スキーム) へと抜本的な転換を行なっているのが一つの特徴である。

3.2 LESの内層乱流モデリング (壁面モデル LES)

航空機の空力特性はレイノルズ数依存性が強いことが知られており、実飛行・高レイノルズ数条件での空力の予測評価が極めて重要となる。一方で、航空機全機複雑形状の実飛行・高レイノルズ数 $Re_c \sim 10^7$ 流れに対し、壁面近傍の内層乱流まで LES として準直接的に解像し、航空機空力設計に活かすのは向こう数十年のスパコンの発達を考えると実現困難と言わざるを得ない。すなわち、KEEP スキームなどの高忠実な圧縮性計算スキームと「富岳」だけでは、実飛行レイノルズ数での航空機全機 LES 解析は実施不可能であり、何らかの工夫で LES が実施可能なレイノルズ数を飛躍的に上げる必要がある。本課題で開発している FFVHC-ACE のもう一つの大きな特徴は、この実飛行レイノルズ数 $Re_c \sim 10^7$ レベルの高レイノルズ数流れの LES を可能とするため、独自の研究成果^[3]に基づく壁面近傍 (境界層厚みの約10%程度 $y \leq 0.1\delta$) の内層乱流のモデル化 (壁面モデル LES) を取り入れている点にある。

LESの内層乱流モデリング (壁面モデル LES) の原理や詳細については、元論文である参考文献[3]およびレビュー論文[4]を参照いただくものとし、ここではその概要を紹介する。図5は、乱流境界層における乱流エネルギースペクトル密度^[5]が壁面から離れるにつれ、ど

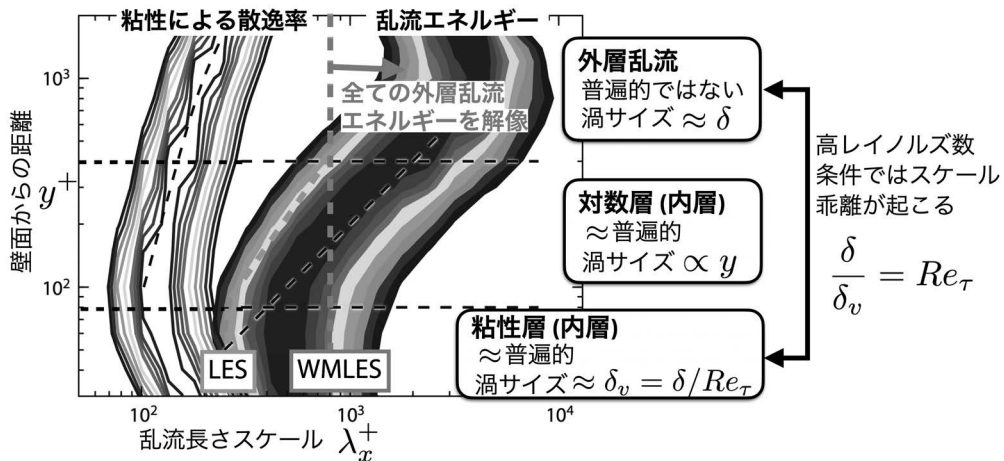


図5 乱流境界層における乱流エネルギースペクトル密度^[5]と壁面モデル LES (WMLES)。

のように変化するかを示した図である。壁面近傍 $y \leq 0.1\delta$ の内層乱流域、境界層の90%程度を占める外層乱流域を示している(なお縦軸と横軸は対数スケールになっている)。内層乱流と外層乱流の長さスケールの比はレイノルズ数 $\delta/\delta_\tau = Re_\tau$ で表され、高レイノルズ数乱流では内層と外層乱流の間にスケール乖離が起こる。これは乱流境界層現象はマルチスケール現象だからであり、乱流エネルギー保有スケールを壁面近傍から全て解像する通常のLESの高レイノルズ数流れへの適用を、「富岳」をもってしても困難にしている原因である。これに対してLESの内層乱流のモデル化(壁面モデルLES)は、流れ場依存があり普遍的ではない外層乱流($y \geq 0.1\delta$)を通常のLESと同様に解像し、レイノルズ数依存の強い普遍的な壁面近傍の内層乱流を意図的に解像しないことを選択し、非定常に変動する壁面摩擦応力としてモデル化することでLESが可能なレイノルズ数を大幅に引き上げることが可能とする手法である。

図6は、内層乱流モデル(壁面モデル)を用いたLES解析例であり、高レイノルズ数($Re_\theta \approx 50,000$)平板乱流境界層解析の平均速度分布^[3]、および「京」を用いた遷音速バフエット流れ解析^[6]を示したものである。 $Re_\theta \approx 50,000$ もの高レイノルズ数乱流境界層流れは、通常のLESで準直接的に解析すると、単純な平板乱流境界層であっても100億点規模の格子点数が必要になるケースである。このケースに対して、壁面モデルLES

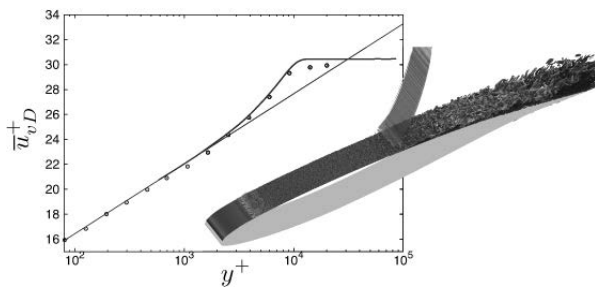


図6 壁面モデルLESによる高レイノルズ数($Re_\theta \approx 50,000$)平板乱流境界層解析の平均速度分布^[3](シンボル、実験; 黒線、提案手法)、および遷音速バフエット流れ解析^[6]。

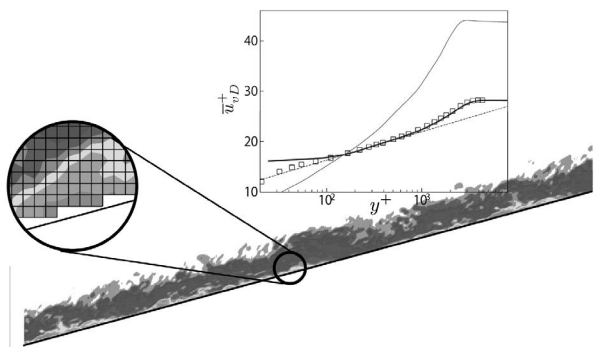


図7 壁面モデルLESによる高レイノルズ数・斜め平板乱流境界層解析の平均速度分布^[7](シンボル、実験; 黒線、提案手法; 灰色線、従来法)。

を用いることで約300万点規模($\Delta x^+ = \Delta z^+ \approx 440$ 、 $\Delta y_{wall}^+ \approx 110$)の非常に粗い格子で、精度良く平均速度の対数則を予測可能であることを示している。また時間スケールの小さな内層乱流を意図的に解像しないことで、通常のLESと比べ、壁面モデルLESでは時間刻み幅も大きく取ることができ(このレイノルズ数条件では約100倍)、計算格子の削減と時間刻み幅の増大の効果で、トータルとして少なく見積もっても約10,000倍以上のスปีトアップが実現される。またこのスปีトアップはレイノルズ数が大きくなるほど顕著となる。

本課題で開発しているFFVHC-ACEは、複雑形状に対応するため階層型等間隔直交格子を用いており、本壁面モデルLESをベースとし、壁面が格子に沿わない場合にも適用可能となるようモデルを拡張し^[7](図7)、FFVHC-ACEに実装している。高忠実な圧縮性LESを実現可能とする世界トップレベルの計算スキーム(KEEPスキーム)と合わせ、LESの内層乱流モデリング(壁面モデルLES)がFFVHC-ACEのキー技術となっている。なお、格子が壁面に沿わない解析ケース(図7)においても、FFVHC-ACEはKEEPスキームを用いることで、数値散逸を全く導入せずに安定に計算が可能となっているのは特筆すべき点である。

4 「富岳」などを用いた最新の大規模LES解析例

最後に「富岳」などを用いた最新の大規模LES解析例について簡単に紹介させていただく。図8は、ランディングギアやフラップ・スラット、支持装置、ナセルなどを含めた航空機離着陸形態複雑形状におけるFFVHC-ACEを用いた空力予測評価の試計算結果である。FFVHC-ACEでは、670億点規模の航空機複雑形状周りの格子生成を5分程度で実施可能であり、対「京」性能向上比が21倍と高速な大規模LES解析を可能としている。今後、高忠実な圧縮性LESを実現可能とするKEEPスキームと壁面モデル、および「富岳」を用いた大規模LES解析を実施し、本LES手法が航空機実機複雑形状・実飛行レイノルズ数での空力予測評価を可能とすることを実証していく予定である。

図9は、最大揚力付近における主翼基本形状を対象とした実飛行レイノルズ数レベル $Re_c = 10^7$ の壁面まで準直接的に解像する「富岳」を用いた380億点規模の大規模LES解析結果である。本解析では、高次精度構造格子

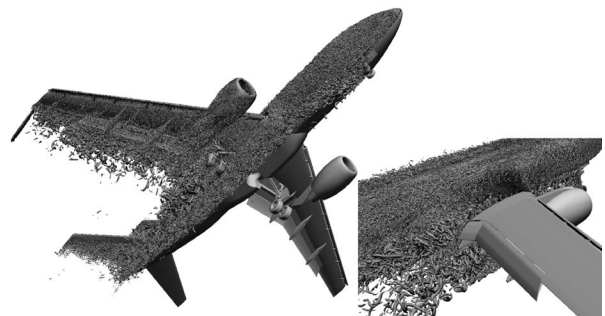


図8 FFVHC-ACEによる航空機全機離着陸形態複雑形状の解析例。

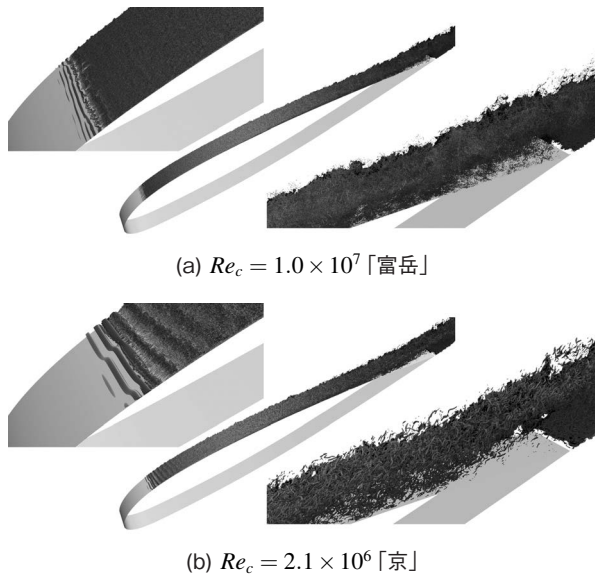


図9 「富岳」を用いた実飛行レイノルズ数レベルの主翼基本形状最大揚力付近の準直接大規模LES解析。

法(6次精度コンパクト差分法)を用いており、壁面まで解像するLESで要求される格子解像度(流れ方向 $\Delta x^+ \leq 25$ 、スパン方向 $\Delta z^+ \leq 13$)を満たす大規模LES解析が「富岳」により初めて実施可能となっている。なお $Re_c = 10^7$ の高レイノルズ数条件での翼型LES解析は世界初である。詳細な議論はここでは割愛するが、「京」で実施した $Re_c = 2.1 \times 10^6$ のLES解析結果と比べると、翼前縁での乱流遷移が早まり、後縁失速を引き起こす翼後縁での乱流剥離が抑えられる傾向にあることが分かり、改めて航空機空力特性のレイノルズ数依存性の強さが垣間見れる。本大規模LESから得られる高精度な高レイノルズ数乱流データベースは、今後のモデル開発などの恒久的な参照データとなるよう広く公開し、「富岳」の計算機リソースを使用した成果を学界・産業界が広く享受できるようにしていく予定である。

5 おわりに

本特集記事では、この4月から開始した「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」課題で開発している基盤アプリケーションFFVHC-ACEのキー技術を中心に、課題の概要や最新の大規模LES解析成果なども踏まえ紹介した。今年度前半は利用できる「富岳」の計算リソースも限られた状況であったが、後半からは比較的多くの計算リソースが使える状況になってきており、「富岳」で初めて可能となる高レイノルズ数条件($Re_c = 10^7$)での大規模LES解析も進められ、今後への期待も大きい。今後も国内航空機開発メーカーと連携し、航空機空力設計のゲームチェンジになり得る圧縮性LES解析による実機複雑形状・実飛行レイノルズ数

条件での空力予測評価の実証に向け研究開発を推進していきたい。

航空機実機複雑形状・実飛行レイノルズ数での高忠実な圧縮性LES解析が実施可能なアプリケーションは、日本国内はもとより世界的に見てもほぼ存在しないと言っても過言ではない。本課題で先導的に当該基盤アプリの開発・実証を行い、高レイノルズ数乱流データベースと合わせて基盤アプリケーションの公開も進め、航空宇宙分野のシミュレーション技術の発展にも寄与できればと考えており、ご支援いただけると幸いである。

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」、および文部科学省ポスト「京」重点課題「近未来型ものづくりを先導する革新的設計・製造プロセスの開発」、サブ課題D「航空機の設計・運用革新を実現するコア技術の研究開発」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」および「京」の計算資源の提供を受け、実施した(Project ID: hp150254, hp160205, hp170056, hp180185, hp190164, hp200137)。また本特集記事で紹介した研究成果は、共同で研究開発を進めているJAXA宇宙科学研究所の高木亮治准教授、東北大学の玉置義治助教、浅田啓幸博士、久谷雄一助教、福島裕馬博士(現JAXA)との共同研究成果であり、謝意を表したい。

参考文献

- [1] Kuya, Y., Totani, K. & Kawai, S.: Kinetic energy and entropy preserving schemes for compressible flows by split convective forms, *J. Comput. Phys.*, 375 (2018) 823-853.
- [2] Kuya, Y. & Kawai, S.: A stable and non-dissipative kinetic energy and entropy preserving (KEEP) scheme for non-conforming block boundaries on Cartesian grids, *Comput. Fluids*, 200 (2020) 104427.
- [3] Kawai, S. & Larsson, J.: Wall-modeling in large eddy simulation: Length scales, grid resolution, and accuracy, *Phys. Fluids*, 24 (2012) 015105.
- [4] Larsson, J., Kawai, S., Bodart, J. & Bermejo-Moreno, I.: Large eddy simulation with modeled wall-stress: recent progress and future directions, *Mech. Eng. Rev.*, 3 (2016) 15-00418.
- [5] Jimenez, J.: Cascades in wall-bounded turbulence, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 44 (2012) 27-45.
- [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] Tamaki Y. & Kawai, S.: Wall-modeling for large-eddy simulations on non-body-conforming Cartesian grids, to be submitted (2020).