

安定性と非散逸性を両立する圧縮性流体計算スキームと航空機全機LES解析

河合 宗司

1 はじめに

圧縮性流体と聞くと何を思い浮かべるでしょうか。高速な流れや衝撃波、もしくは流体の全エネルギーを構成する運動エネルギーと内部エネルギーの間のエネルギー交換が活発な流れなどを思い浮かべるかもしれません。航空宇宙分野で扱う流体現象の多くはこの圧縮性流体に基づいており、航空機周りの流れ（もしくは空力）も圧縮性流体現象となります。また同時に航空機周りの流れは高レイノルズ数条件となり、流れは乱流となります。航空機は空気（流体）の力を使って飛ぶことから、航空機開発において、航空機周りの圧縮性流体（乱流）現象やそれに基づく空力性能の予測・評価は、航空機開発の一丁目一番地とも言われる重要な要素となっています。このことから航空機開発において、数値流体解析、特に乱流現象を高忠実に解析可能とする large-eddy simulation (LES) による圧縮性流体現象の予測・評価が大きく期待されています。

本特集記事では、まず圧縮性流体（乱流）現象のLES解析についてや、既存の計算スキームからの根本的な大きな転換が求められている現状、さらには私たちの近年の研究成果である、これまで困難であった一見して相反する計算の「安定性」と「非散逸性」を同時に満たす物理現象により忠実な計算スキーム (kinetic energy and entropy preserving (KEEP) スキーム) について紹介します。また本計算スキームを含めた3つのキー学術成果（自動格子生成を可能とする階層型等間隔直交格子法、高レイノルズ数流れのLESを可能とする壁面モデルLES、高忠実な圧縮性流体解析を可能とする安定かつ非散逸なKEEPスキーム）を実装した安定性と高忠実性を両立する圧縮性流体解析基盤ソルバーFFVHC-ACE、およびFFVHC-ACEを用いた航空機全機周りの最新のLES解析結果についても紹介したいと思います。

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。専門は流体力学、数値流体力学、航空宇宙工学。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)、日本流体力学会論文賞(2022)。

2 安定性と非散逸性を同時に満たす物理現象により忠実な圧縮性流体計算スキーム

乱流のエネルギー保有渦を計算格子と計算スキームで解像することが求められるLESでは、正確に乱流現象を計算できる計算スキームがまず第一に必須となります。乱流現象の重要な特性としては(基本的には非粘性の)エネルギーカスケードがあり、さらにそれに関わる非粘性の運動エネルギー保存(厳密には非圧縮性条件での運動エネルギー保存)があります。すなわちLESで用いる対流項(非粘性項)の計算スキームとしては、数値散逸(散逸誤差)で非物理的に運動エネルギーが散逸され、物理的なエネルギーカスケードが乱されてはいけませんので、数値散逸が少ない、理想的にはゼロとなる非散逸な対流項の計算スキームが常に重要となります。また圧縮性流体現象では、運動エネルギー保存に加えて、重要な特性として非粘性流れ(もしくは非粘性項)のエントロピー保存が挙げられます。したがって、圧縮性流体の対流項の計算スキームでは数値的な非散逸性に加えて、エントロピー保存性も(非常に)重要となります。また本章で示すように、圧縮性流体解析では、計算の安定性とエントロピー保存性が密接に関わっています。

上記の理論的バックグラウンドは比較的よく知られていることで、では非散逸な数値散逸がゼロの中心系の計算スキームを用いればよいのではと考えますが、特に圧縮性流体解析では物事はそう簡単ではない現状があります。現状の圧縮性流体解析では、著者の知る限り(ほぼ)全ての数値計算で、計算の安定化のために数値散逸が必要であり、導入されています。例えば、構造格子が利用可能な比較的単純な形状を扱う主に学術研究コードでは、保存型の支配方程式をコンパクト差分法に代表されるような高次精度中心系スキームで離散化する手法が広く用いられますが、それだけでは瞬時に計算が不安定になるため、高次の数値散逸(多くの場合はローパスフィルタ)が導入されます。航空機のような複雑形状解析では、学術研究コードから応用、実用、商用コードを含め、従来からの風上スキームが広く用いられており、大きな数値散逸を導入しているのが現状です。すなわち現状の圧縮性流体解析は、学術研究や応用・実用を問わず、数値散逸に依存している現状があります。特に複雑形状解析で広く用いられる大きな数値散逸を伴う風上スキームの利用は、高忠実なLESを妨げるものであり、航空機全機周りのLES解析を考えると既存の計算スキームからの大きな転換が不可避でした。

そこで私たちが考えたのが運動エネルギー・エント

ロピー保存スキーム、KEEPスキーム^[1]です。KEEPスキームは、これまでの数値散逸を導入して計算の安定化を図るのではなく、支配方程式から導かれる2次的な物理量(運動エネルギーおよびエントロピー)も物理的に正しく時間発展できるように支配方程式の離散化を工夫することで、(数値散逸の導入なしに)自然と計算が安定になることを目指した計算スキームとなります。

圧縮性流体の支配方程式は一般的に、質量保存、運動量保存、エネルギー保存の3つの保存則から構成されます。解析的には積の微分法則を用いて、質量保存式および運動量保存式から2次的物理量である運動エネルギーが物理的に満たす方程式(非粘性・非圧縮条件では運動エネルギー保存を示す式になる)が導かれ、さらにはギブスの式よりエントロピーが満たす保存式(非粘性の場合)が導かれます。すなわち圧縮性流体现象では、運動エネルギーやエントロピーもそれらの2次的に導かれる方程式に従って時間発展します。

既存の計算スキームの問題点は、直接解いている3つの保存則(質量保存、運動量保存、エネルギー保存)は離散的にも満たすのですが、解析的には成立する積の微分法則を離散的に満たさないため、2次的な物理量である運動エネルギーやエントロピーの時間発展を正しく追えないことにあります。これが原因で圧縮性流体解析では、計算の安定化のために長年、数値散逸に依存しなければならないのが現状でした。そこで私たちは近年、従来の3つの保存則(質量保存、運動量保存、エネルギー保存)を直接解きながら、2次的物理量の方程式の導出に使う積の微分法則を離散的にも満たすことで、運動エネルギーやエントロピーの時間発展も正しく追える計算スキーム、KEEPスキーム^[1]を提案しています。KEEPスキームは数値流束の形を工夫していますが、中心的な離散化だけでシンプルに構築されているため既存のプログラムへの実装が容易なことも利点となります(詳細は参考文献[1-3]を参照)。

図1は非粘性・圧縮性Taylor-Green渦問題におけるエントロピー保存エラーを示した図です。非粘性条件ですのでエントロピーは保存するのが正しい解析解となります。また本問題は初期の大きな渦構造が時間発展

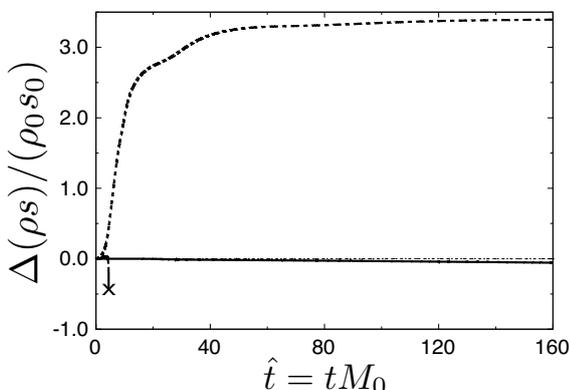


図1 非粘性・圧縮性Taylor-Green渦問題におけるエントロピー保存エラーの時間履歴。実線、KEEPスキーム^[1]; 一点鎖線、既存の風上スキーム; 破線、通常の中系スキーム。

とともに小スケール渦に遷移していく問題で、数値散逸の導入なしに安定に計算するのが非常に困難な問題として知られています。提案しているKEEPスキームは、その設計通りエントロピーを非常によく保存し、数値散逸の導入なしに長時間安定に計算ができています。著者の知る限り、ここまでの長時間、数値散逸の導入なしに安定に計算が可能な計算スキームはこれまでにありません。また圧縮性流体解析では、対流項などの非粘性項の離散化で離散的にも解析的なエントロピー保存を満たすことが、計算の安定化に非常に重要となることが明らかになっています。これに対し、通常の中系スキームでは非物理的にエントロピーが負となり、すぐに計算が破綻します。また圧縮性流体解析で広く用いられる風上スキームは数値散逸の導入により渦が拡散し(最終的には消失する)、非物理的にエントロピーが増加してしまいます。結果として、計算は安定にできますが、高忠実な計算を大きく妨げることとなります。

現在、本KEEPスキームは、一般座標系での高次精度スキームへの拡張^[2]や移動変形格子への拡張^[5]、次章の航空機全機LES解析で用いているハンギングノードを有する階層型直交格子法への拡張^[4]、さらには空間方向だけでなく時間方向の離散化でも運動エネルギーおよびエントロピーの保存性を大幅に向上させるスキームへの拡張^[6]など展開されています。またこれは余談ですが、Euler方程式をKEEPスキームで解くことで、これまで困難であったエントロピーを保存する本当の意味での(数値散逸ゼロの)非粘性衝撃波の計算にも成功しています^[6]。

3 安定性と高忠実性を両立する圧縮性流体解析基盤ソルバーFFVHC-ACEと航空機全機LES解析

前章では、圧縮性流体の基本的な支配方程式である3つの保存則(質量保存、運動量保存、エネルギー保存)から2次的に導かれる運動エネルギーやエントロピーの方程式も正しく時間発展できるように支配方程式の離散化を工夫することで、一見して相反する計算の「安定性」と「非散逸性」を両立する計算スキーム、KEEPスキームが構築できることを紹介しました。本章ではまず、本KEEPスキームを実装した学術研究から産業応用・実用までの使用に耐える安定性と高忠実性を両立する圧縮性流体解析基盤ソルバーFFVHC-ACEを簡単に紹介します。その後、著者の知る限り初となる実際の航空機(三菱スペースジェット)実機フライト試験のLES解析とフライト試験データとの比較を含め、FFVHC-ACEを用いた航空機全機周りの最新のLES解析結果について紹介します。

3.1 圧縮性流体解析基盤ソルバーFFVHC-ACE

私たちの研究グループで開発している圧縮性流体解析基盤ソルバーFFVHC-ACEは、航空機のような複雑形状かつ高レイノルズ数流れに対し、学術研究から応

用・実用までの使用に耐える安定性と高忠実性を両立するソルバーを目指しているものです。このような圧縮性流体解析ソルバーは、世界的に見てもほとんど存在しないのが現状であり、FFVHC-ACEが学术界から産業界までの圧縮性流体が関わる幅広い分野に貢献できればと考えています。なおFFVHC-ACEの初期バージョンは、本年7月頃より、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る予定です。

FFVHC-ACEの詳細については参考文献[7]を参照していただくこととし、ここではその概要を紹介します。FFVHC-ACEはKEEPスキームを含め3つのキーとなる学術成果によって構成されています。その1つ目は、複雑形状に対しても形状データ(STLデータ)を入力するだけで自動格子生成を可能とする階層型等間隔直交格子法です。複雑形状周りに格子を作成することは実際の計算時間よりも時間を要することがしばしばある現状や、状況によっては格子生成自体が実質不可能となる場合もあることを考えると、自動格子生成は必須の技術であり、(学术界も含め)特に産業界での高忠実な流体解析の普及を妨げている格子作成問題を解決する技術になると考えています。2つ目は、前章で紹介した高忠実な圧縮性流体解析を可能とする階層型直交格子法に展開した安定かつ非散逸なKEEPスキーム^[4]です。私たちはこれまでいくつかの異なる航空機複雑形状周りの流れを様々な格子解像度を用いてFFVHC-ACEで解析してきましたが、(著者自身が驚いていることでもあります)計算が落ちるということをほとんど経験していません。これは正に安定かつ高忠実なKEEPスキームの恩恵でもあります。最後の3つ目のキー技術は、高レイノルズ数流れのLESを可能とする壁面モデルLES^[8]です。FFVHC-ACEでは物体非適合直交格子に拡張した壁面モデル^[9]を実装しています。高レイノルズ数流れでは、おおよそ境界層厚さの壁面近傍10%以下における内層乱流の空間スケールおよび時間スケールが非常に小さくなり、通常の壁面まで解像するLESを実施することは「富岳」を用いても困難となります。壁面モデルLESはこの内層乱流をモデル化し、境界層の約90%の外層乱流は通常のLESとして解くことで、壁面近傍の格子点数の削減と時間刻み幅の増大の両側面から計算コストを大幅に削減する計算手法となります。特に航空機のような10の7乗オーダーにもなる高レイノルズ数流れでは、通常のLESと比べ約10,000倍以上の高速化を実現し、高レイノルズ数流れのLESを実現する必須の技術となります。また非等方な内層乱流を意図的に解像せず、比較的等方的な外層乱流をLESとして解像する壁面モデルLESは、等間隔直交格子法との相性も抜群です。

以上のように圧縮性流体解析基盤ソルバーFFVHC-ACEは、私たちオリジナルの近年の学術成果で構築されており、これら3つのキー学術成果が、どれ一つ欠け

ても次で紹介する航空機全機周りのLES解析は実現できませんでした。

3.2 航空機全機周りのLES解析

それでは最後にFFVHC-ACEを用いた航空機全機周りの最新の壁面モデルLES解析結果について紹介します。ここでは、これまで予測評価が困難であった航空機開発における最大の空力課題とも言える離着陸性能や失速などの安全性に関わる最大揚力の予測評価についてのLES解析結果を紹介します。解析対象は、航空機模型の風洞試験および三菱スペースジェット実機フライト試験であり、計算には「富岳」を用いています。

図2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時の複雑形状に対するFFVHC-ACEを用いた壁面モデルLES解析結果です。レイノルズ数は大型旅客機相当の $Re_c \approx 4 \times 10^7$ 、マッハ数は $M_\infty \approx 0.2$ です。形状データ(STLデータ)を入力するだけで、特にランディングギアはケーブルなどを含め非常に細かい構造となっていますが、完全自動で格子生成から安定・高速なLES解析までシームレスに実現しています。これまでの解析で用いた最大の格子点数は約640億点ですが、「富岳」を用いて約20分で自動的に格子生成が完了します。またウォータータイトな形状データでなくても、自動格子生成が可能なのもFFVHC-ACEの特徴です。

図3は、アメリカ航空宇宙学会(AIAA)のHigh Lift



図2 航空機離着陸時複雑形状周りのLES解析。Q値の等値面により乱流渦を可視化。

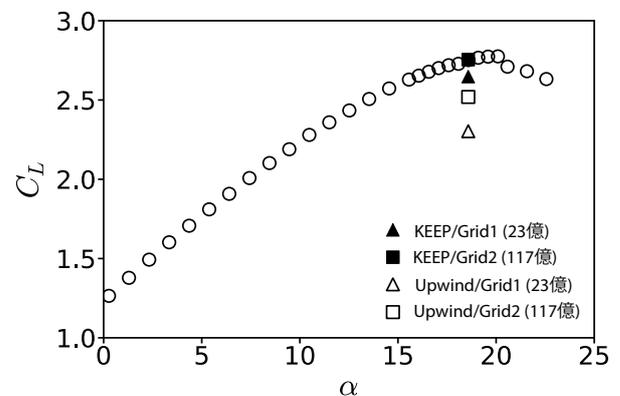


図3 航空機全機LES解析による最大揚力予測評価(風洞試験結果との比較)^[7]。

Prediction Workshopのテストケースとなった航空機離着陸時の複雑形状を模擬したJAXA Standard Model (JSM)の風洞試験^[10]に対する最大揚力の予測評価結果です。風洞試験に対する解析ですので、レイノルズ数は10の6乗オーダーとなり $Re_c \approx 2 \times 10^6$ です。ここでは全く同じ格子を用いて、対流項の離散化に2次精度KEEPスキームを使った結果と、従来の3次精度風上スキーム(リミッタなし)を使った結果を載せています。また図4にはそれぞれのLES解析で得られた時間平均表面流線および瞬間の断面速度分布を示しています。ここでは示しませんが風洞試験結果では、主翼の内舷側には剥離が生じず、外舷側の一部に剥離が生じる結果が得られており、KEEPスキームはGrid1(平均空力翼弦長 c におおよそ1000点)という比較的粗い格子でその剥離形態を非常によく予測しています。一方で同じ格子を用いた3次精度風上スキームの結果は、リミッタを導入しない比較的よい計算をしているにも関わらず、スラットからの剥離せん断層から生じる渦が数値散逸で拡散し、非物理的に大きな渦構造となり流れが過剰に剥離し、失速状態に入っています。図3に示す通り、その結果、揚力が大幅に低く予測されています。もちろん格子解像度を各方向倍にしたGrid2(c におおよそ2000点)を用いることで結果は改善されますが、依然として内舷側に剥離領域が残っており、揚力予測もGrid1を用いたKEEPスキームより劣ります。本結果からも高忠実なLESの実現に対する対流項の離散化スキームの重要性を改めて認識させられます。なお本LES解析では時間平均統計量を取得するのに、一様流が空力平均翼弦の5倍($5c$)流れる時間の計算が必要となりますが、その計算に要する時間は、Grid1の解析で「富岳」全系の約0.5%(768ノード)を使って約10時間、Grid2では全系の約2%(3456ノード)を使って約35時間となります。だいぶ身近に感じるのではないのでしょうか。

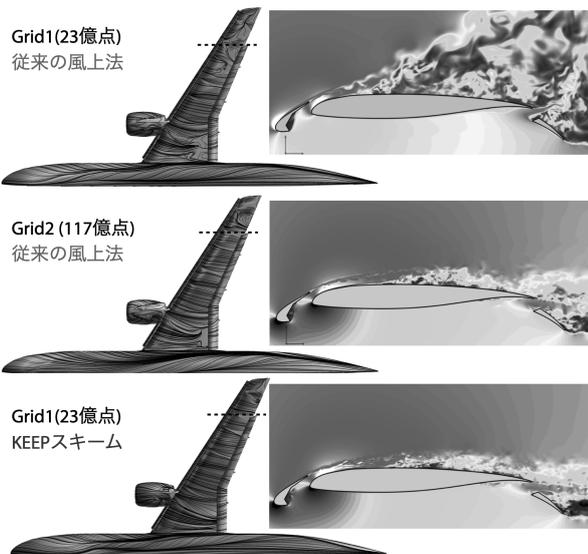


図4 航空機全機LES解析におけるKEEPスキームの重要性^[7]。時間平均表面流線および瞬間の断面速度分布。

最後に三菱スペースジェット実機フライト試験のLES解析結果を紹介します。実際の航空機フライト試験に対する解析ですので、レイノルズ数は10の7乗オーダー $Re_c \approx 10^7$ となり、著者の知る限り、航空機実機フライト試験のLES解析は世界初だと思います。なお本LES解析では、三菱重工グループの方々がFFVHC-ACEを用いて、形状データの入力のみで完全自動かつロバーストに三菱スペースジェット実機フライト試験のLES解析に成功しています。私たちはFFVHC-ACE利用のサポートをただけです。正に学術研究から応用・実用までの使用に耐える、ユーザーを問わない安定性と高忠実性を両立する完全自動LES解析が可能となっています。特に複雑形状解析ともなれば、計算が落ちるという経験を誰しもがすると思いますが、FFVHC-ACEでは計算が不安定になったという話をほとんど聞きません。図5および図6に最大揚力の予測結果および高迎角時における瞬間表面流線を示します。上記JSMのLES解析と同様に、Grid2(c におおよそ2000点)を用いることで、迎角1における最大揚力値やそれよりも高迎角側(迎角2)での揚力の低下(失速)をよく予測しています。図6の表面流線を見ると、本LES解析は迎角の上昇にともないエンジンナセル下流の内舷側で剥離が拡

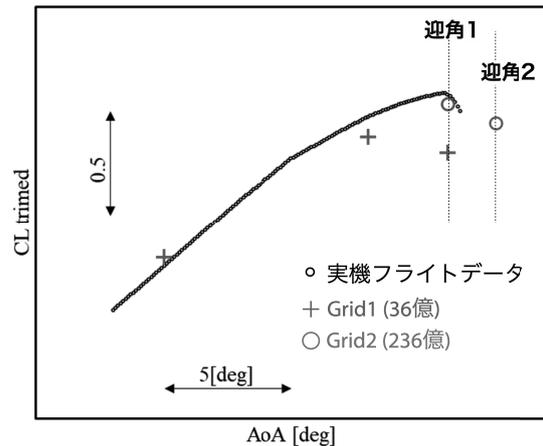


図5 三菱スペースジェット実機フライト試験の最大揚力予測評価(三菱重工グループ提供)^[7]。

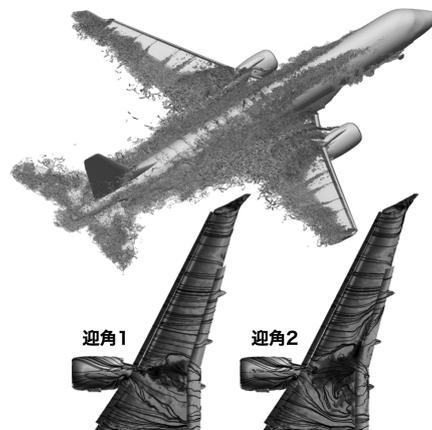


図6 三菱スペースジェット実機フライト試験の失速形態予測評価。Q値等値面による乱流渦と瞬間表面流線(三菱重工グループ提供)^[7]。

大し、失速に至る現象を予測しています。この内舷側の剥離が拡大し失速に至る現象は、実際の設計においてもそのように設計されており、航空機実機複雑形状周りの剥離現象をよく予測できていると考えられます。本結果は、実機航空機の最大揚力予測評価に成功していることを示しており、航空機開発における最大の空力課題の解決にある程度目処が立ってきたと言っても過言ではないと考えています。

4 おわりに

本特集記事では、高忠実な圧縮性流体解析のために第一に重要となる非散逸な計算スキームについて、近年の研究成果である運動エネルギー・エントロピー保存スキーム、KEEPスキーム (kinetic energy and entropy preserving scheme) を紹介しました。KEEPスキームは、支配方程式から導かれる計算では直接は解かない2次の物理量 (運動エネルギーおよびエントロピー) も物理的に正しく時間発展できるように支配方程式の離散化を工夫する計算スキームとなります。これにより、これまでの圧縮性流体解析では導入不可避であった非物理的な数値散逸を導入しなくても、著者自身が驚くほど安定で高忠実な計算が可能になることを実証してきました。KEEPスキームはシンプルな中心系の数値流束の形で記載でき、プログラムへの実装も容易である特徴があります。ぜひ試して頂けると幸いです。

本特集の後半では、KEEPスキームなどを実装した、学術研究から応用・実用までの使用に耐え、ユーザーを問わない安定性と高忠実性を両立する完全自動LES解析が可能な圧縮性流体解析基盤ソルバーFFVHC-ACE、およびFFVHC-ACEを用いた実用例を航空機全機周りのLES解析を中心に紹介しました。著者が2005年に博士号を取得した当時 (もうそれから18年も経っていることに驚きます)、次の大きな目標の一つとして航空機全機周りのLESを実現したいと考え、コツコツと地道に基礎研究を進めてきました。幸いにも多くの素晴らしい研究者の方々と一緒に研究ができ、その目標の一端を掴むところまでは来れたかと考えています。とは言うものの、まだまだ解決したいと考えている課題 (例えばFFVHC-ACEによる移動変形物体解析や流体構造連成解析など) は山のようにあり、今後もどこかでその進展をご紹介できればと考えています。

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 (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。また本特集記事で紹介した研究成果は、「富岳」成果創出加速プログラムと一緒に研究を進めている東北大学、JAXA、三菱重工グループの方々との共同研究成果であり、謝意を表したいと思います。

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.: High-order accurate kinetic-energy and entropy preserving (KEEP) schemes on curvilinear grids, *J. Comput. Phys.*, 442 (2021) 110482.
- [3] Tamaki, Y., Kuya, Y. & Kawai, S.: Comprehensive analysis of entropy conservation property of non-dissipative schemes for compressible flows: KEEP scheme redefined, *J. Comput. Phys.*, 468 (2022) 111494.
- [4] 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.
- [5] Sashida, H., Kuya, Y. & Kawai, S.: Kinetic-energy and entropy preserving (KEEP) schemes on moving and deforming meshes, in preparation.
- [6] Asada, H., Maruyama, K. & Kawai, S.: Temporal discretization for improving kinetic-energy and entropy preservation properties in KEEP schemes, in review (2023).
- [7] Asada, H., Tamaki, Y., Takaki, R., Yumitori, T., Tamura, S., Hatanaka, K., Imai, K., Maeyama, H. and Kawai, S.: FFVHC-ACE: fully automated Cartesian-grid-based solver for compressible large-eddy simulation, *AIAA J.*, Article in Advance, (2023).
- [8] 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.
- [9] Tamaki, Y. and Kawai, S.: Wall-modeling for large-eddy simulation on non-body-conforming Cartesian grids, *Phys. Rev. Fluids*, 6 (2021), 114603.
- [10] Yokokawa, Y., Murayama, M., Uchida, H., Tanaka, K., Ito, T. & Yamamoto, K.: Aerodynamic Influence of a Half-Span Model Installation for High-Lift Configuration Experiment, *AIAA Paper* 2010-684, (2010).