

圧縮性流体解析ソルバー Advance/FaSTAR の概要

中森 一郎*

Overview of Advance/FaSTAR

Ichiro Nakamori*

圧縮性流体解析ソルバーFaSTAR は国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)様により開発された世界トップレベルの高速性を持つ流体解析ツールである。非構造格子に対応した圧縮性流体解析ソルバーで、特に遷音速や超音速の流れなどの解析に適している。当社では、JAXA 様より権利の許諾をいただき、Advance/FaSTAR として事業展開する。

Key word: スーパーコンピュータ、シミュレーション、ソフトウェア、大規模解析、高速演算性能、高速流体、圧縮性流れ

1. はじめに

圧縮性流体解析ソルバーFaSTAR は、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)様により開発された世界トップレベルの高速性を持つ流体解析ツールである。非構造格子（任意形状のメッシュ）に対応した圧縮性流体解析ソルバーで、特に航空機や宇宙機などの空力解析に適している。効率的なデータ構造と計算アルゴリズムで世界最高レベルの高速化を成功している。当社では、JAXA 様より権利の許諾をいただき、Advance/FaSTAR として事業展開している。また、FaSTAR を利用した流体解析サービスやお客さまニーズに合わせた改良を行う。

JAXA が開発した高効率流体解析ツール（FaSTAR）は、世界にも類を見ない自動化・高速化が支持され、さまざまな分野で幅広く活用されてきている。このツールはデジタル/アナログハイブリッド風洞（DAHWIN）にも組み込まれており、風洞試験の効率化に役立てられている[1]。

2. FaSTAR について

以下に FaSTAR の内容紹介を目的として機能の概要を述べる。

*アドバンスソフト株式会社 第2事業部
2nd Computational Science and Engineering Group,
AdvanceSoft Corporation

3. FaSTAR について

以下に FaSTAR の内容紹介を目的として機能の概要を述べる。

3.1. 概要

本ソフトウェアは前処理、流体解析ソルバー、ならびに後処理から構成される。前処理では計算格子の体積や面情報、セル境界面を挟んだコンネクティビティ情報の取得や、並列計算のための領域分割と並び変えといった処理が行われる。前処理に先だつて、流体解析のための計算格子の作成ソフトウェアは、Gridgen、TasMesh などに対応している。

後処理では、可視化データの生成が行われ、これらのデータから Tecplot、Fieldview および ParaView[3]により流れの可視化作業が可能である。

3.2. 計算性能

ソルバー部分については、粘性のない流れを扱う場合には支配方程式として Euler 方程式を選択し、粘性を考慮する場合には Navier-Stokes 方程式を選択することになる。後者は、Euler 方程式に粘性項を付加した形式で扱われている。いずれの場合も流れの圧縮性を考慮した数値解法を用いている。このため、ソルバーはポアソン方程式を伴

う圧力ベース解法ではなくいわゆる密度ベース解法に立脚しており、時間進行で1ステップ進めるための計算時間が短く、従って高速に演算がなされる。図1は国際学会のワークショップにおいて著名なCFDコードで定常解を得る計算時間の比較である。格子1000万点と100CPUという同条件下において2015年当時で最速の結果が報告されている[4]。

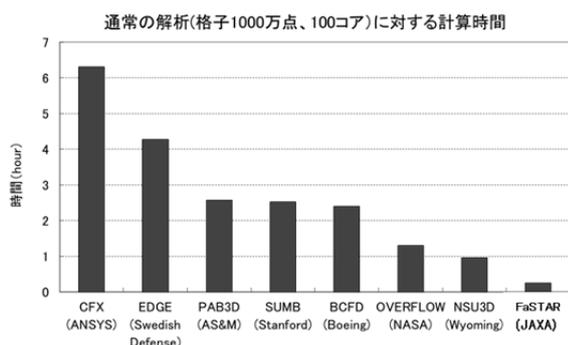


図1 著名なCFDコードの収束時間の比較

3.3. 対流項の評価方法

マッハ数の高い遷音速流や超音速流を扱う際には、対流項の流束評価法として HLLE/HLLEW スキームや Roe スキーム、または AUSM±UP スキームや SLAU スキームを選択することができる。また、マッハ数 M が $M < 0.1$ の低速流れを扱う際には、SLAU スキームで対応することができる。これらのスキームと併せて対流項の高精度化には勾配評価法と勾配制限関数を使用する。

3.4. 物理勾配の評価方法

勾配評価法は計算セル内の速度や圧力、温度の1階微分値の推定に関連し、粘性流束項の評価の際に現れる速度と温度の1階微分値の計算にも用いられる。歪みの少ない計算格子が準備できる場合は重み付グリーン-ガウス法(Weighted Green-Gauss, WGG)を使用し、計算格子の歪みや間隔の差異が大きい場合には最小自乗法を勾配評価法として用いることができる。対流項の流束計算の際には、WGG または最小自乗法で求められた勾配で2次精度化すると物理量の空間勾配が急峻な場所で計算が破綻することがある。これを回避す

るために種々の勾配制限関数を併用することができる。

勾配制限関数は、隣のセルの物理量の勾配変化の情報から、セル内の勾配をなだらかにする役目を担い、種々の制限関数が用意されている。精度を維持するにはできるだけ勾配制限がかからない関数形が望ましく、また計算が安定でなければならない。これらの両方に対して機能するリミッターとして Hishida[5]リミッターがデフォルトとなっている。

3.5. 時間進行法

特にRANS方程式を扱う際に遭遇する境界層メッシュでは、格子サイズが極端に小さくなるために時間進行については陰解法を用いる必要がある。このような格子系において、定常解を安定に速く解くことを目的として、Euler 陰解法による離散化式を用い、Lower-Upper Symmetric Gauss-Seidel(LU-SGS)法と、さらなる高速化を目的として実装された Generalized Minimal Residual (GMRES)法[6]が使用できる。GMRES 法ではLU-SGS 法に比べて計算時間を2倍ほど短縮できることが報告されている[6]。

3.6. 乱流モデル

乱流解析を実施する際には、RANSモデルとして2種類の乱流モデルを選択することができる。1つは Spalart-Allmaras (SA) 1方程式モデルである。オリジナルのSAモデルは剥離渦における渦粘性の過大評価が難点であるが、これを抑止する修正が施されたモデルとなっている[7]。また、スレンダーボディのような形状周りの付着乱流境界層の解析にも向いている。選択することのできるもう1つのモデルは、 $k-\omega$ SST2 方程式モデルである。これは $k-\omega$ モデルと $k-\epsilon$ モデルをハイブリッド化したモデルである。付着乱流境界層と剥離渦の双方に対して精度が良いとされている。

いずれの乱流モデルも低レイノルズ数型のRANSモデルに分類されるが、粘性底層近傍までの格子解像度が不足する場合には、自動壁処理が使用できる。

3.7. 収束加速法

オイラー方程式やRANS方程式を支配方程式として定常解を求める際には、Agglomeration Multigrid 法[8]を使用することができる。この手法は行列空間で用いられる Algebraic Multigrid (AMG)法とは区別され、元は構造格子系でのCFDで用いられてきた手法を非構造格子系に拡張した手法である。粗い格子と細かい格子の間の相互の補間作業は物理空間で行われ、Full Approximation Storage (FAS)と呼ばれる[8]。また、この手法では粗い格子上での演算子を計算するために残差とともに保存変数も粗い格子へ補間される。マルチグリッド法を用いることにより、既存の汎用解析ソルバーよりも10分の1の計算時間で収束解が得られるという事例が報告されている。

表 1 FaSTAR ソルバー機能一覧

項目	内容
支配方程式	Euler 方程式、または Navier-Stokes 方程式
離散化	セル中心型有限体積法
コントロールボリューム形状	四面体、五面体、六面体から成るハイブリッド格子
乱流モデル (RANS モデル)	Spalart-Allmaras1 方程式モデル、k- ω -SST2 方程式モデル
時間積分法	LU-SGS、GMRES
勾配評価法	グリーン-ガウス法、最小自乗法
勾配制限関数	Venkatakrishnan リミッター、Barth-Jespersen リミッター、Hishida リミッター
対流項の流束評価法	HLLE、HLLEW、AUSM \pm UP Roe、SLAU
定常解への収束加速法	Agglomeration Multigrid
並列計算機能	MPI
領域分割機能	Metis 分割等

本ソフトウェアは領域分割による MPI 通信を

用いた並列計算に対応している。計算領域の分割法は Metis を用いるが、具体的にはサンディア国立研究所が開発したライブラリ Zoltan[9]を用いる。ここには Metis の並列化版である ParMETIS を始めとして種々の手法があり、Metis 分割で困難が生じたときには他の手法を選択できる。

4. まとめ

圧縮性流体解析ソルバーFaSTAR は、国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA)様により開発された世界トップレベルの高速性を持つ流体解析ツールである。非構造格子（任意形状のメッシュ）に対応した圧縮性流体解析ソルバーで、特に遷音速や超音速の流れなどの解析に適しており、効率的なデータ構造と計算アルゴリズムで世界最高レベルの高速化を成功している。当社では、JAXA 様から権利の許諾をいただき、Advance/FaSTAR として事業展開している。また、FaSTAR を利用した流体解析サービスやお客さまニーズに合わせた改良を行う。

参考文献

- [1] Hashimoto, A., Ishida, T., Aoyama, T., Takekawa, K. and Hayashi, K.: Results of Three-dimensional Turbulent Flow with FaSTAR, AIAA Paper 2016-1358, (2016).
- [2] 橋本 敦、村上 桂一、菱田 学、ラフルールパウルス：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 論文集、JAXA-SP-11-015、(2011)、pp.159-164.
- [3] ParaView, <http://www.paraview.org/>
- [4] Hashimoto, A., Murakami, K., Aoyama, T., Ishiko, K., Hishida, M., Sakashita, M. and Lahur, P.R.: Toward the Fastest Unstructured CFD Code “FaSTAR,” AIAA Paper 2015-2075, (2015).
- [5] 菱田 学、橋本 敦、村上 桂一、青山 剛史、“非構造高速流体解析ソルバ FaSTAR における勾配制限関数,” 第 42 回流力/ANSS 講演集、IC10、2010

- [6] 坂下 雅秀, 松尾 裕一, 橋本 敦, 青山 剛史, “LU-SGS 右前処理付き GMRES 法の高速度流体ソルバ FaSTAR への適用,” 第 42 回流力/ANSS 講演集, 1C10, 2010
- [7] Knopp, T., Alrutz, T., Schwamborn, D., "A Grid and Flow Adaptive Wall-function Method for RANS Turbulence Modelling," Journal of Computational Physics, Vol.220, 2006, pp.19-40.
- [8] Mavriplis, D. J., " Multigrid Techniques for Unstructured Meshes," NASA CR 195070, ICASE Report No. 95-27, 1995.
- [9] http://www.cs.sandia.gov/zoltan/ug_html/ug.html
- [10] 橋本 敦, 村上 桂一, 青山 剛史, 菱田 学, 大野 真司, 坂下 雅秀, ラフル パウルス, 佐藤 幸男, “高速流体ソルバ FaSTAR の開発,” 第 42 回流力/ANSS 講演集, 1C10, 2010

補足

FaSTAR の利用においては六面体自動格子生成ツール「HexaGrid」も利用可能である。CFD により流体の現象を解析するためには、空間を格子状に分割するところから始める。HexaGrid は、六面体ベースの非構造格子を自動生成するツールで、手動で 1~2 カ月かかっていた図 2 のような旅客機形態の格子を 1~2 時間で生成することができる。また、その格子を用いた空力予測の精度についても、手動生成格子を用いた場合と同等の結果が得られることが実証されている[2]。非構造格子系のメッシュで境界適合格子を生成する場合には、物体境界を表現するのに四面体格子が向いているものの、境界層メッシュへ対応する際に要素数が膨大になりがちである。

また、流体計算における実質的な精度を保持する観点からも六面体格子の運用が望ましく、可能であれば等間隔格子が最も良いとされる。

HexaGrid では、ユーザーは格子体系全体を決めるサイズと物体表面近傍の最小・最大のセルサイズとともに、物体表面から第 1 層までの距離を指定する。まず解析領域全体をカバーする直交格子が生成され、次に物体近傍の直交格子が取り除かれた後に、代わりにレイヤー格子と呼ばれる物体

に沿った扁平な六面体が生成される。また、物体からある距離だけ離れると、全体の格子数を適度に削減することを目的として格子解像度レベルを段階的に下げる。その結果、解像度の異なる直交格子が接することになり、いわゆる hanging node が出現する。これを回避するために四面体もしくは五面体の計算セルを用いてこの間を接合している。

また、HexaGrid は複数の STL データを入力可能であるため、物体表面を幾つかのパーツに分けておき、物体形状の部分変更にも対応が可能である。

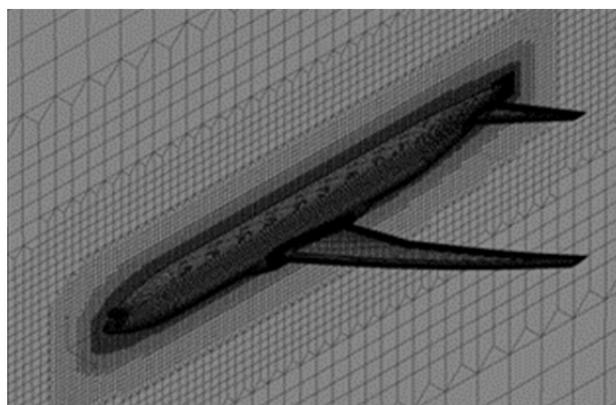


図 2 航空機胴翼周りの計算格子例

※ 技術情報誌アドバンスシミュレーションは、アドバンスソフト株式会社 ホームページのシミュレーション図書館から、PDF ファイルがダウンロードできます。(ダウンロードしていただくには、アドバンス/シミュレーションフォーラム会員登録が必要です。)