

航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム (ANSS) 「JAXA ソフトウェアユーザー懇談会」概要報告

相曾 秀昭, 高橋 孝 (宇宙航空研究開発機構 航空技術部門 数値解析技術研究ユニット)

A Brief Report on the Organized Session “JAXA Software Users’ Meeting”

AISO Hideaki and TAKAHASHI Takashi (Aeronautical Technology Directorate, JAXA)

ABSTRACT

The article gives a report on the organized session “JAXA Software Users’ Meeting”. This session is specialized in provision and exchange of information on JAXA software developed for numerical simulation, mainly CFD (Computational Fluid Dynamics).

The session consists of two parts. In the former part four lectures are delivered by people from JAXA. The first lecture introduces software development activity in JAXA, the following two provide information on individual simulation codes, and the last proposes how to provide CFD beginners with basic concept or knowledge for troubleshooting that is almost inevitable when they solve their own problems by CFD. The latter part includes five lectures by users of JAXA software. They also show interesting topics, i.e. examples of software’s usage or numerical behavior issues.

The presentation slides used in the former part are attached for the readers’ reference as well.

1. はじめに

JAXAでは業務に必要なCFD等の数値計算ソフトウェアが開発され、それらはJAXA内で利用される他、研究開発成果の社会還元活動の一つとしてJAXA外部での利用にも提供されている。提供先は私企業、公的機関の他、大学や高等専門学校等の教育機関であり、特に教育機関向けには教育支援活動の一環として提供され、20を超える大学・高専等で利用されている。

本企画は、JAXAソフトウェアについてソフトウェア提供者であるJAXAの側からソフトウェアの新機能や開発状況についてお知らせすると共に、ユーザー側からも興味深い計算例や技術的課題を提供していただき、会場全体で議論することで情報の普及・共有を図ることを目的としている。

2. プログラム概要

JAXA航空技術部門数値解析技術研究ユニット長の青山剛史による開会挨拶の後、以下の様に進められた。

前半：【JAXAソフトウェアの現況紹介】

- ・ FaSTAR-Move等JAXAソフトウェアの開発状況や新機能の紹介

高橋 孝、石田 崇

- ・ 粒子法による流体解析ソフトP-Flowの紹介

窪田 健一

- ・ rFlow3Dの紹介

田辺 安忠

- ・ 流体計算初心者向けFaSTARの計算障害トラブルシューティング手順の提案

相曾 秀昭

(以上の発表者は全てJAXA航空技術部門所属)

後半：【ユーザーからのミニプレゼンとディスカッション】

- ・ 小規模クラスタでのFaSTARベンチマーク
松野 隆

(鳥取大学工学研究科)

- ・ プルームを考慮したTSTOの数値計算
金崎 雅博

(首都大学東京システムデザイン学部)

- ・ 重合格子による多体問題解決

同上

- ・ FaSTAR移動格子機能 (GridMoving) を用いた2次元回転円柱流れの再現

高木 雄哉

(横浜国立大学理工学府 北村研)

- ・ 物体から離れた空間における数値解の挙動

高橋 良尚

(富山大学理工学研究部 松島研)

3. 【JAXA ソフトウェアの現況紹介】

ソフトウェアの提供を行う側から開発状況やソフトウェアに関する情報を提供するとともに提案を行わせていただいた。

最初の講演では、まず高橋が現状で提供されているソフトウェア (ツール) の全体の概要やそれらをJAXA外部で利用する際の実務の流れを説明した。その後、移動・変形物体まわりの流体解析を可能にするツールであるFaSTAR-MoveとJAXAソフトウェアとして今後の格子生成の標準ツールの位置付けであるBOXFUNの開発について担当の石田が説明した。

P-FlowはJAXAが外部に提供する初の粒子法解析ツールで滑走路の水撥ねのシミュレーションのために窪田らにより開発された。界面の大変形に対応できる有

利さから汎用的な利用も期待される。計算法、並列化でのロードバランシング、実験結果との比較等について概説されたが、これらは今回のANSSの他の講演でも発表されているので参照されたい。

rFlow3Dは回転翼の解析ツールとして開発され、既に外部利用も含め相当の実績を有しユーザー交流会も定期的に開催されている。現在はJAXAソフトウェアの外部利用の制度の下での利用がより容易になっている。今回、他のツールのユーザーに周知を図ることもあり、開発活動を率いる田辺がソフトウェア概要や各機能、計算例、実験や他の計算ツールとの比較等について解説した。

近年、FaSTARではCFDそのものを研究対象とはせず、に道具として利用するユーザーも増加し、計算法の詳細知識を前提としないユーザー向けの計算障害対応マニュアルも求められている。相曽の提案はこの要請に応えようとするもので、そうしたユーザー向けのCFDの初期講習も兼ねている。そのような新しいタイプのユーザーに合わせたショートカット的なCFD入門コースやそれに沿うマニュアルや集中講義プランの案を提示した。

なお、上記4講演の発表スライドを参考資料として掲載している。

4. 【ユーザーからのミニプレゼンとディスカッション】

大学の研究室でJAXAソフトウェアを利用いただいているユーザーの方々から、興味深い利用例の紹介や問題提起をいただき、質疑応答やそこから提起される課題についての討論を行った。

時間的な制約はありながらも4人のユーザーから5件の話題提供をいただくことができた。

研究室所有の計算機リソースでFaSTARを実行した場合の所要時間や並列化の効果に関する松野氏の報告、および金崎氏による実機の問題を対象にした計算例の紹介では、必要な計算機リソースや実際の問題の解析をどのように行うかというような事について、具体的な情報を提供していただき、ユーザーやこれからの利用を考慮中の参加者に有意義なものであった。

高木氏、高橋氏の話では、計算対象の問題は基本的または典型的とあってよいものであるが、それらの計算での数値的な挙動についての気付きや問題点の報告であった。こうした観点での議論も格子等も含む計算法の評価や改良の観点からは興味深く、またCFDの信頼性の向上に貢献することが期待される。

質疑応答・討論においても、格子生成コードBOXFUNで扱えるデータのサイズの最大限度、現時点で利用可能と考えられる計算資源（大学等のスパコンなどの利用の実際）といった話題もあり、また金崎氏の計算例紹介の中では具体的な問題の観点からFaSTAR-Moveへの期待も語られるなどユーザー会ならではの議論ができたのではないかとと思われる。

5. おわりに

ユーザー会においてはソフトウェアについての開発者側からの情報の提供だけでなく、実際に問題を解いた経験そしてそれらの経験から得られる問題の規模感や所要リソースといったものに関する大まかな感覚の共有、計算破綻の際のトラブルシューティングや計算破綻には至るほどではないが信頼性に影響する数値的不都合への対処のノウハウの共有、といった事の意義も大きい。今後もこうした形での情報共有の機会を定期的に設ける所存である。

報告を終えるにあたり、ユーザーとして情報提供をいただいた発表者諸氏や議論に参加いただいた皆様方への謝意を表するものである。

（次頁以降に 3. 【JAXAソフトウェアの現況紹介】での4講演のスライドを掲載）






FaSTAR-Move等JAXAソフトウェア の開発状況や新機能の紹介

宇宙航空研究開発機構
航空技術部門
数値解析技術研究ユニット
高橋 孝
石田 崇

内容



- 提供ソフトのリスト
- 高速流体ソルバFaSTAR 
- FaSTAR-Moveの開発 
- 自動格子生成ツールBOXFUN 

提供ソフトのリスト



提供窓口
contact-
IssacPlatz@
chofu.jaxa.jp

<http://www.aero.jaxa.jp/facilities/software/>

試験データ処理ソフト

PSPデータ処理

基幹PSPデータ処理ソフト

感圧材料 (PSP) を搭載した模型からのPSP発光をカメラで計測することで、計測範囲内の圧力分布を知ることが出来るPSP計測用のデータ処理ソフトウェア。定常圧力分布計測を対象とし、実用性を考慮して模型表面に合った非構造的格子を用いて圧力分布を算出します。生産性を高めるため、100ケース以上の処理ケースを事前にデータベース登録することで連続自動処理する機能を備えます。

非定常PSPデータ処理ソフトウェア

14bit以上の高精度16bit色を持つ高速対応PSP計測材料を用い、そこからPSP発光を高速カメラで捉えることで非定常圧力変動にも対応できる非定常PSP計測用のデータ処理ソフトウェアです。実用性を考慮して模型表面に合った非構造的格子を用いて圧力分布を算出します。時系列圧力計測機能や時系列動画作成機能、高速フーリエ変換 (FFT) による周波数解析機能も備えます。

目録保存

自律探索解析ツール

アレイ状に配置した多数のマイクロホン (マイクロホンアレイ) を使用して計測した騒音データから自己分布を算出する自律探索解析ツール。騒音位置とその騒音レベルから各音源の周波数特性とその寄与度を把握することが出来ます。

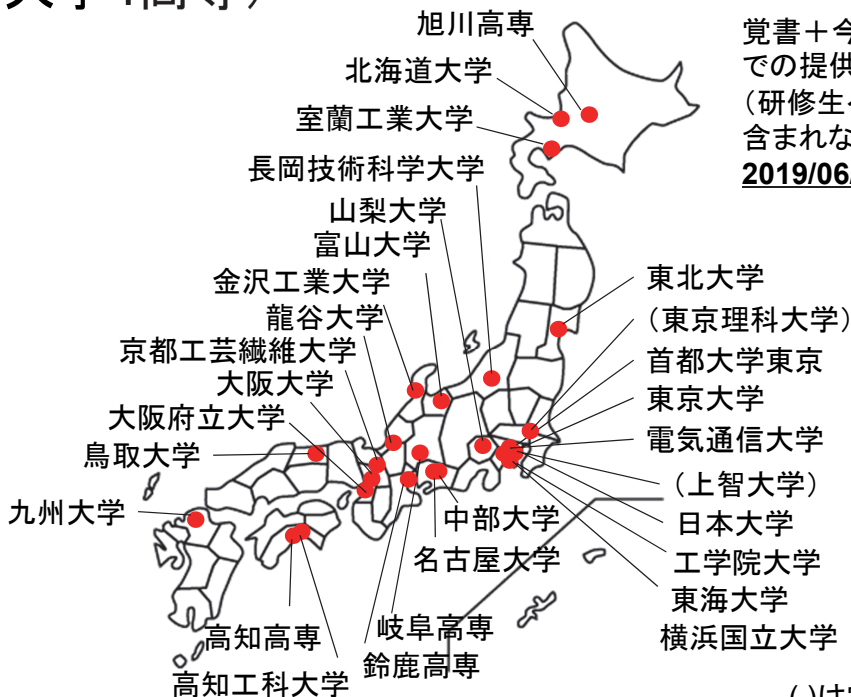
2019年6月28日更新

[このページを共有] [LINE](#) [Facebook](#) [Twitter](#)

2019/7/1現在

その他の提供ソフトについては、
当日配布資料に記載されています

JAXA解析ツール全体の提供状況 (25大学4高専)



覚書+今年度申請書
での提供によるもの
(研修生への提供は
含まれない)
2019/06/28現在

()は覚書締結中

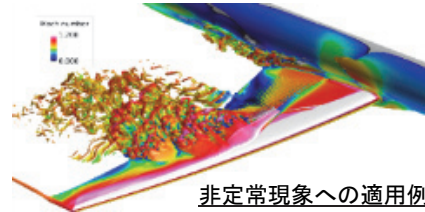
高速流体ソルバFaSTAR



FaSTAR：非構造格子ベース3次元圧縮性流体解析ソフト

解析ツール概要

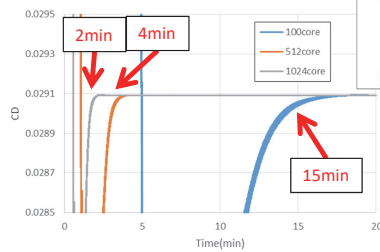
- 非粘性 (Euler), 層流 (NS), 乱流 (RANS)
- 陰解法 (LU-SGS) と収束加速 (Multigrid) を組み合わせた高速ソルバ (定常/非定常)
- 低～高マッハ数に対応したスキーム
- RANS、DES、LESなど各種乱流モデル
- 乱流遷移 (強制/自然)
- 各種前/後処理ソフトに対応
- 流体構造連成解析 (Nastranを使用)
- 移動格子 (回転/並行)



最大の特徴：高速性

シンプルなデータ構造、徹底的な性能チューニング、収束加速法の適用等により、1000コア@JSS2で航空機空力解析を2分で実行可能

FaSTAR計算時間



JSS2 (Fujitsu FX100)の100, 512, 1024コアを用いた航空機周りの解析 (10.9Mセル, Multigrid使用)

5

高速流体ソルバFaSTAR



ver.6の新機能：並列前処理・後処理, 非定常出力機能の拡張

既存の機能

Input

✓ 入力値
 XYZの最小値($X_{s_{min}}, Y_{s_{min}}, Z_{s_{min}}$)
 XYZの最大値($X_{s_{max}}, Y_{s_{max}}, Z_{s_{max}}$)
 各方向の分割数(n_x, n_y, n_z)

Output
 FV-UNSフォーマット

新しい機能

Input

✓ 入力値
 FaSTAR格子(.fsgrid)

Output
 FaSTARフォーマット(.rslt)

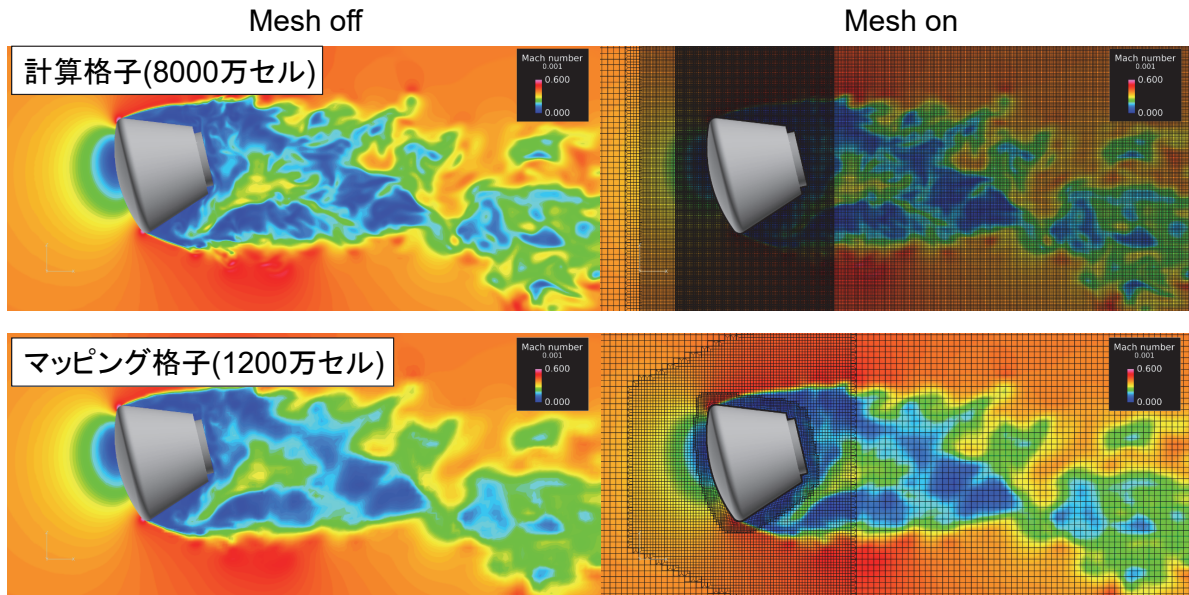
既存の機能を利用して、FaSTAR格子(.fsgrid)を入力値、結果ファイル(.rslt)を出力値にすることで、異なる格子にマッピングさせたデータを取得

6

高速流体ソルバFaSTAR



ver.6の新機能：並列前処理・後処理，非定常出力機能の拡張



7

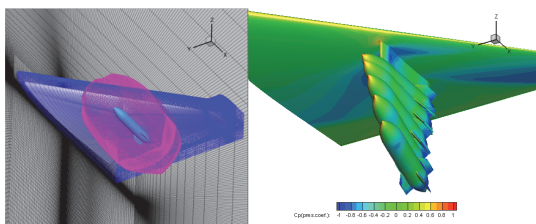
FaSTAR-Moveの開発



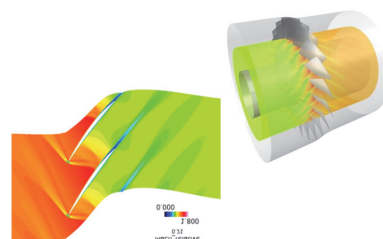
FaSTAR-Move：非構造移動重合格子流体解析コード

解析ツール概要

- 移動・重合格子解析モジュール（FaSTAR-Move ver.1）
 - ・ 移動重合格子機能を組み込み、流体と物体の運動連成解析が可能
- エンジン解析モジュール（FaSTAR-Move ver.2、2019年度中完成予定）
 - ・ スライディング格子に対応し、ファン・圧縮機・タービンなどのエンジン回転翼列解析が可能



外部搭載物分離解析



タービン翼列(単列)解析

8

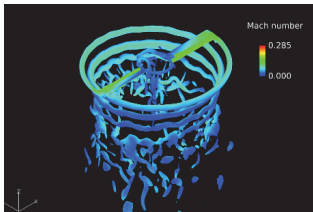
FaSTAR-Moveの開発



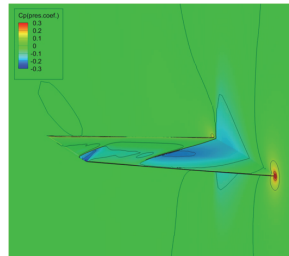
FaSTAR-Move：非構造移動重合格子流体解析コード

解析ツール概要（続き）

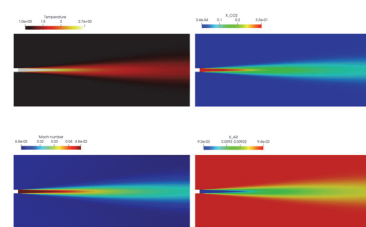
- 回転翼解析モジュール（FaSTAR-Move ver.2, 2019年度中完成予定）
 - ピッチ角制御・トリム等の機能を実装し、ブレードの回転運動解析が可能
- 構造解析モジュール（FaSTAR-Move ver.2）
 - 構造解析と流体解析を弱連成することにより、フラッタ解析などが可能
- 燃焼解析モジュール（FaSTAR-Move ver.2予定）
 - 多成分気体を扱えるよう機能拡張し、高温のエンジン排気などを取り扱うことが可能



ブレードの回転運動解析



AGARD445.6のフラッタ解析



多成分気体解析

9

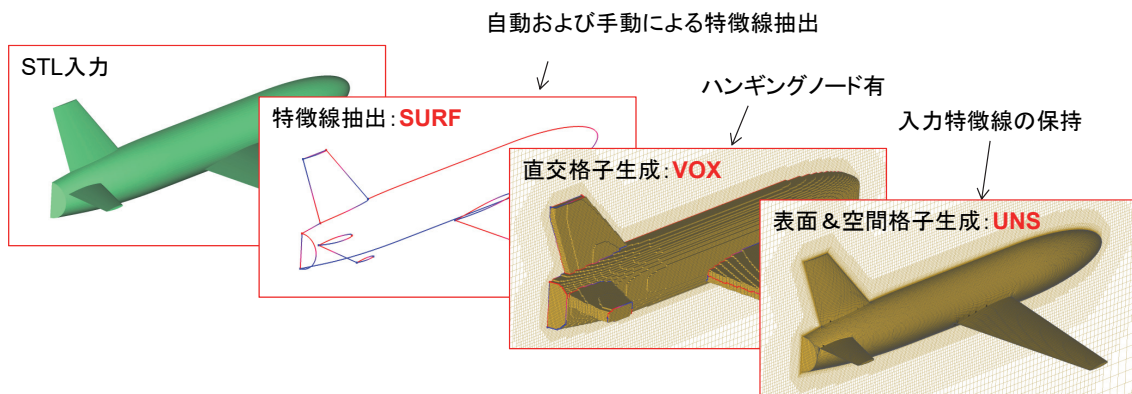
自動格子生成ツールBOXFUN



BOXFUN：

ツール概要

- HexaGridの課題を解決するべく、新たに開発をスタートした格子生成コード
- マニュアル操作機能による特徴線捕獲
- Building-Cube法のフレームワークを活用した大規模格子生成



10

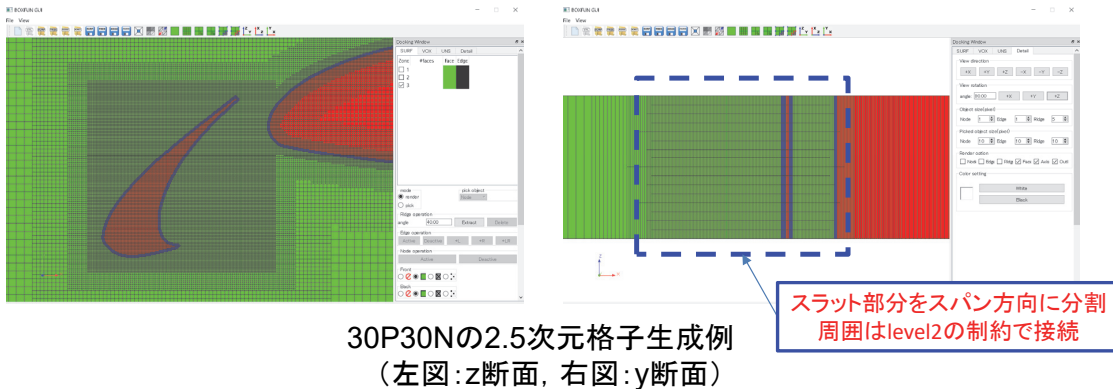
自動格子生成ツールBOXFUN



BOXFUN :

新規機能：2.5次元格子生成機能の強化

- 従来の2.5次元格子生成では、2次元格子をスパン方向に等分割して作成していたため、不必要な箇所にも格子が増えてしまう問題があった。
- 2.5次元格子生成で必要な箇所のみ3次的に分割し、それ以外の箇所をスムーズに接続する分割が出来るよう、改修実施。





粒子法による流体解析ソフトP-Flowの紹介

宇宙航空研究開発機構 航空技術部門
数値解析技術研究ユニット
窪田 健一

第51回流体力学講演会/第37回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
早稲田大学 国際会議場
2019年7月1日

1

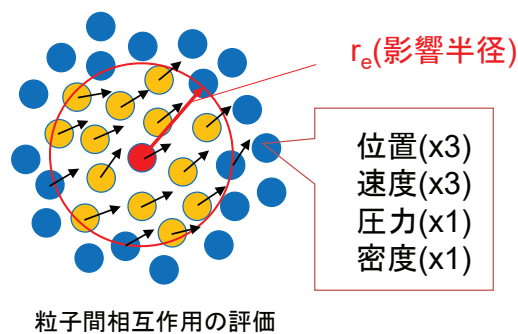
粒子法



- 流体を粒子の集まりで近似し、個々の粒子を流体の支配方程式に従ってLagrange的に運動させることで流れ場を解く手法。

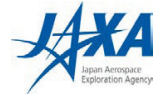
$$\frac{D\mathbf{u}_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p_i + \nu\nabla^2\mathbf{u}_i + \mathbf{f}_i$$

$$\langle\nabla p\rangle_i = \frac{d}{n_0}\sum_{j\neq i}\frac{p_j - p_i}{r_{ij}}\frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}}w(r_{ij})$$



- 一般的なCFDで必要とされる格子を生成する必要がなく、準備に要するコストが少ない。
- 安定性や高精度化に課題があり、研究が進められている。
- 界面の大規模変形を伴う液体解析を得意とする。様々な混相流解析の事例も多数報告されている。

2



開発の背景

- 滞水した滑走路での離発着の際、水が機体周りに跳ね上げられる(Water Spray)。
 - 抵抗の増加
 - 離陸に必要な距離が増加
 - エンジンへの水の流入
 - エンジン停止のリスク
- 型式証明の取得の際、これらの影響評価が必要だが、事前予測が困難。
- 見積りのための経験式はあるが、精度は低いとされる。精度が高い評価は実機試験に依存しており、手戻りリスクが大きい。

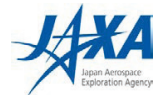


Water Spray test of A350. (K. Zhao et al. J. Aircraft, 2017.)

7/2 (火)
OS 航空機開発のための多分野統合シミュレーション(2)

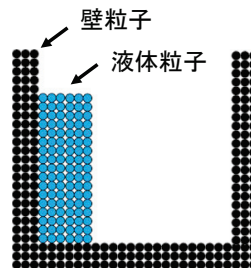
1A17 航空機タイヤからの水跳ね予測技術に関する研究

→粒子法による予測技術の確立を目指す

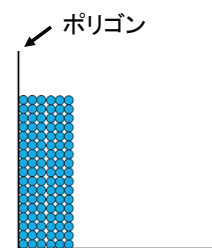


粒子法解析ツール(P-Flow)

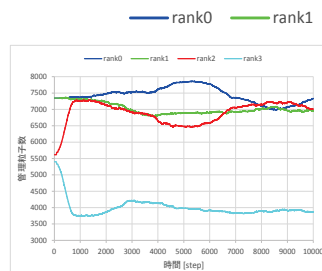
- P-Flow概要
 - MPS陽解法
 - ポリゴン壁モデル
 - 壁面データはSTL形式
 - 移動壁に対応
 - 動的領域分割に基づくMPI並列化
 - 領域分割にはParMETISを利用
 - GPU対応(実装中)
 - OpenACC
 - 適用先候補
 - 航空機タイヤの水跳ね
 - 燃料タンク内のスロッシング
 - 液体燃料の微粒化
 - 着水(ディッチング、帰還カプセル)



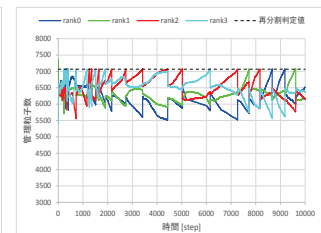
粒子壁モデル



ポリゴン壁モデル



動的領域分割なしの場合

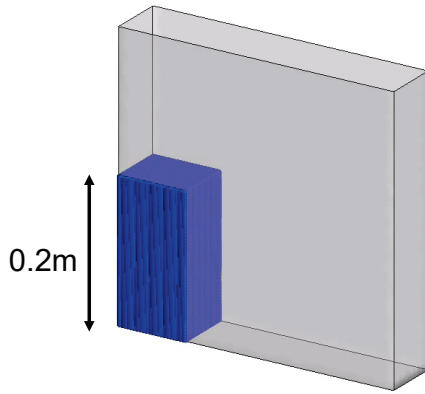


動的領域分割ありの場合

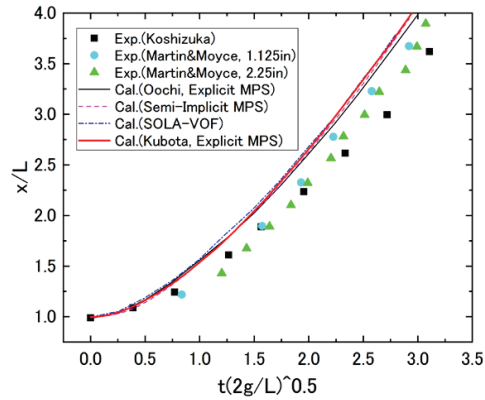


水柱崩壊問題

■ 水柱崩壊問題により妥当性を検証



解析結果(密度)



先端位置の時間変化

(大地ら, Transaction of JSCEs, Paper No. 20100013.)

- 先端位置の時間変化を先行研究と比較し、ほぼ一致する結果が得られることを確認。

5



スロッシング問題

- 移動壁、タンク静止系それぞれで解析可能だが、後者の方が効率的

$$\frac{D\mathbf{u}_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p_i + \nu\nabla^2\mathbf{u}_i + \mathbf{f}_i - \frac{d^2\mathbf{r}_0}{dt^2}$$

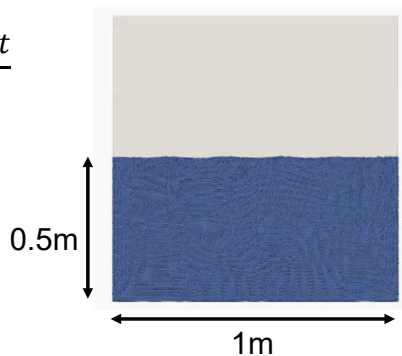
慣性項

テスト解析

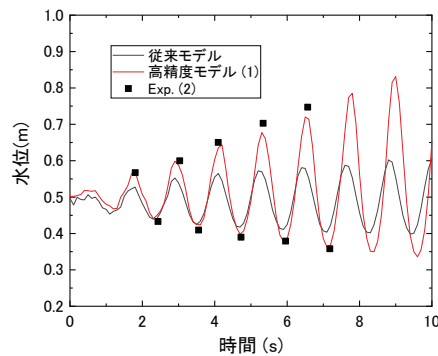
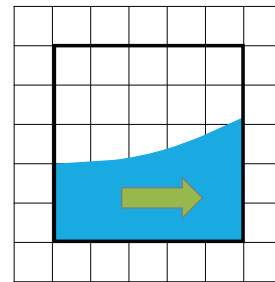
$$r_0 = A \sin \frac{2\pi t}{T}$$

$$A=9.3E-3 \text{ m}$$

$$T=1.183 \text{ s}$$



解析結果(∇p高精度モデル)



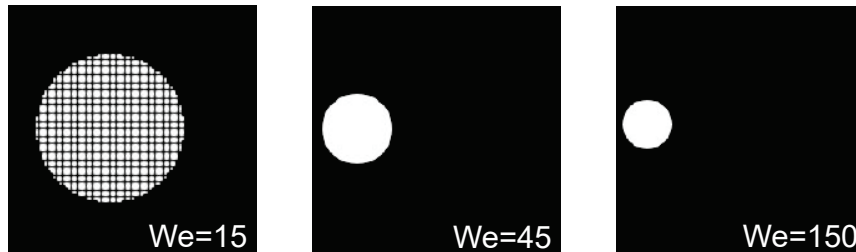
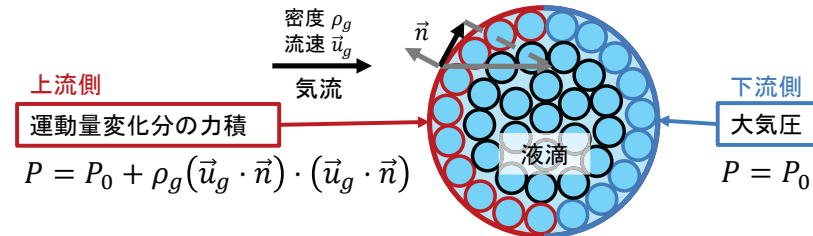
右側壁での水位時間変化

(1) 與儀ら, 土木学会論文集B1, Vol.67, No.4, 2011
 (2) Okamoto et al., Proc. JSCE, 441, 1992.

6

空気力モデル

- 気流解析(格子法)との連成を視野に入れた空気力モデルを構築中
 - 孤立粒子に対しては球の抗力を与える
 - 複数の粒子で構成される液滴に対しては風上粒子に対しモデルを適用する



空気力モデルによる液滴変形解析 (辻村, 窪田, 佐藤, ながれ, 38, 2019.)

7

まとめ

- MPS法を用いた大規模並列解析を見据え、粒子法解析ツール P-Flowを開発している。
- 航空機タイヤの水跳ね解析を皮切りに、燃料微粒化やスロッシングなどへの適用を検討中。
- 現在、気流との連成などの課題に取り組んでいる。その他、各種モデルの高精度化などが粒子法の共通の課題となっている。

8



JAXAソフトウェアユーザー会
2019年7月1日
早稲田大学国際会議場

回転翼用流体・構造・音響統合解析ツールチェーン rFlow3Dの紹介

田辺 安忠

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
航空技術部門 航空システム研究ユニット



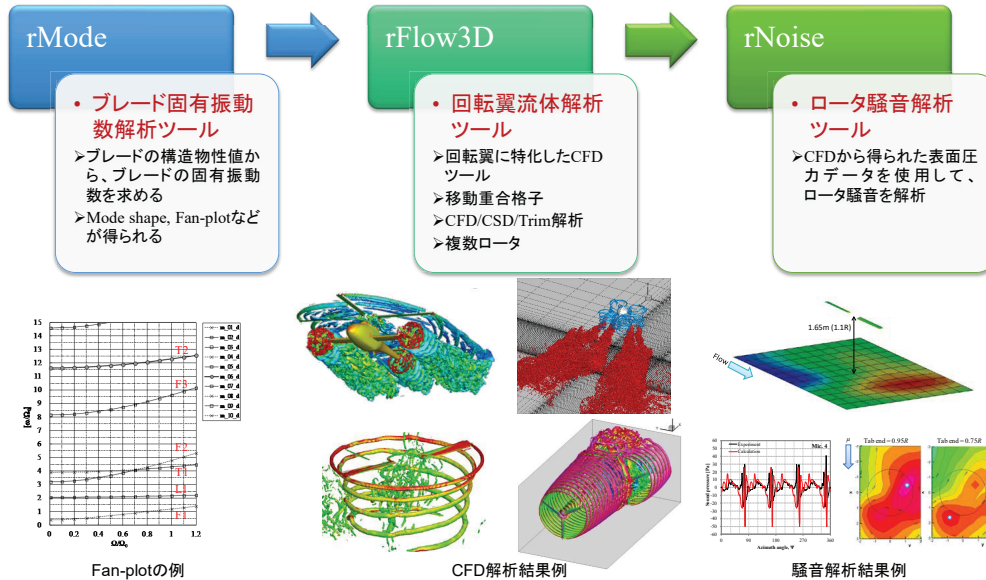
Rotorcraft CFD Code Requirements

- Rotorcraft Flow Field Characteristics
 - Unsteady (motions and deformations)
 - Complex geometry
 - Wide flow speed range
 - Mach 0 ~ 0.9 for rotor blades
 - Mach 0 ~ 0.4 for fuselage
 - Wake interactions
- Requirements for Rotorcraft CFD Code
 - Time accurate unsteady analysis
 - Moving overlapping deforming grids
 - All speed scheme
 - High resolution for efficient capturing of rotor wakes





回転翼用数値解析Tool Chain



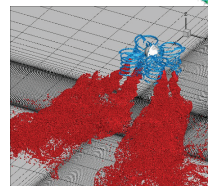
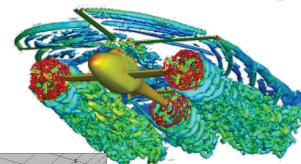
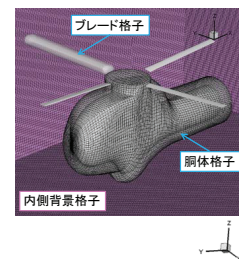
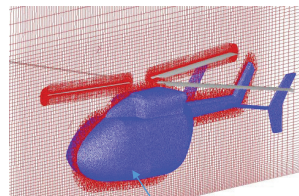
rFlow3Dの紹介、JAXAソフトウェアユーザー会、2019年7月1日

2



rFlow3D/JANUSの主な特徴

- JAXAで開発している回転翼CFDツール
- 構造格子ベースの圧縮性ソルバー
 - 胴体の複雑形状には**非構造格子 (FaSTAR/TAS)**と重合 (**JANUS**)
- 移動重合格子法
 - 外側背景格子
 - 内側背景格子
 - ブレード格子
 - 胴体**構造**格子
 - 胴体**非構造**格子
- トリム解析
 - 二重反転ロータも可能
- CFD/CSD解析 (ブレード弾性変形考慮)
- 粒子による流れ場の可視化
 - 流体に沿って粒子が輸送される
 - 粒子の空気抵抗を考慮した粒子の運動連成解析
 - ノズル噴射模擬



rFlow3Dの紹介、JAXAソフトウェアユーザー会、2019年7月1日

3



rFlow3Dの計算手法

	背景直交格子	背景円筒格子	物体構造格子	TAS	FaSTAR
支配方程式	3次元圧縮性Navier-Stokes方程式				
空間離散化	Cell-vertex	Cell-center	Cell-center	Cell-vertex	Cell-center
数値流束関数	mSLAU(2)			SLAU(2)	HLEW, Roe, HLL, SLAU(2), AUSM+-up
空間高次精度化	MUSCL/FCMT			MUSCL	U-MUSCL
勾配計算法	-			Volume Average法	LS, WLS, GG, WGG, GLSQ
勾配制限関数	minmod			Venkatakrishnan	Venkatakrishnan, Barth-Jespersen, Hishida
粘性流束	2次精度 中心差分			2次精度 中心差分	2次精度 中心差分
時間積分法	m-stage R-K	m-stage R-K DTS/LU-SGS	m-stage R-K DTS/LU-SGS	DTS/LU-SGS	R-K DTS/LU-SGS
乱流モデル	Spalart-Allmaras Menter k- ω SST Wilcox k- ω DES γ -Re $_{\text{tr}}$ transition			Spalart-Allmaras	Spalart-Allmaras Menter k- ω SST DES γ -Re $_{\text{tr}}$ transition

rFlow3Dの紹介、JAXAソフトウェアユーザー会、2019年7月1日

4



国際研究機関の類似CFDツールと比較検証

- ONERA(仏) : elsA (Multi-block structured grid)
- DLR(独) : Flower (Overset structured grid); Tau (Unstructured grid)
- NASA(米) : Overflow II (Multi-block structured grid); FUN3D (Unstructured grid); Helios (Overset multi-layer mixed grid)
- Kunkuk Univ(韓) ; kFlow (Overset structured grid)
- Glasgow Univ(英) : HMB (Hybrid Multi-Blocks)
- Internal CSD routineはrFlow3Dだけ。

rFlow3Dの紹介、JAXAソフトウェアユーザー会、2019年7月1日

5



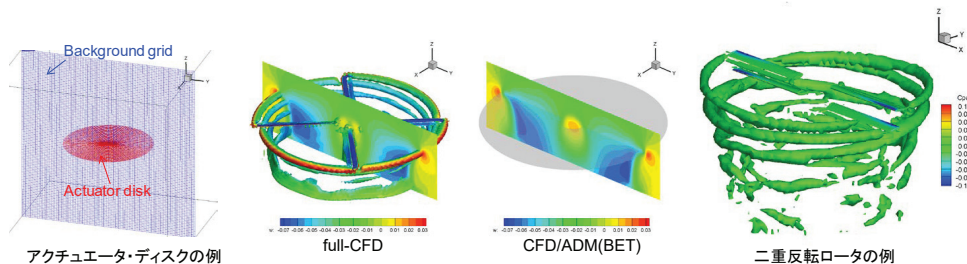
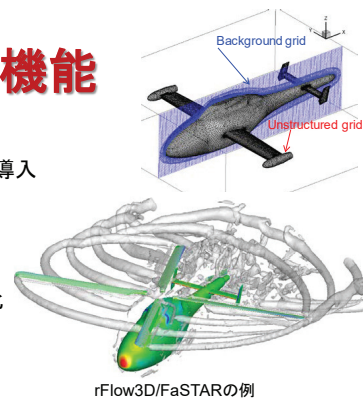
検証例

- Caradonna Rotor (NASA): surface pressure, tip vortex position
- HART-II database (DLR): Blade loading, elastic deformation, noise
- ドローン(Imp-3)用のプロペラ ($Re_{tip} \sim 2 \times 10^5$): performance, open/ducted rotor
- JMRTS database ($Re_{tip} \sim 6 \times 10^5$): performance, unsteady pressure
- Univ Texas Rotor ($Re_{tip} \sim 1 \times 10^6$): performance, coaxial rotor
- UH-60A (real-size rotor) ($Re_{tip} \sim 1 \times 10^7$): performance, high- μ conditions
- 火星ヘリ: ($Re_{tip} \sim 10^4$): performance
- Wind-turbines: MEXICO, NREL Phase VI, 三重大模型風車



rFlow3Dの最新機能

- 2019年度配布するバージョン : v6.4.3
- 非構造格子ソルバーとして、JAXAで開発しているFaSTARの導入
 - 非構造格子ソルバー部の計算を高速化
 - 計算手法(乱流モデル)の選択がrFlow3Dとほぼ同じ
- アクチュエータ・ディスクモデル(ADM)
 - ロータをモデル化することによって、流れ場解析を効率化
- 二重反転ロータ(Coaxial rotor)のトリム解析機能
 - トルク・バランスを考慮





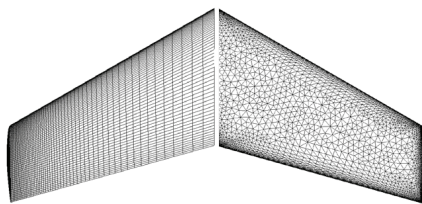
FaSTARの実装と動作確認

- ONERA M6 wingで検証
- rFlow3Dでは、半裁条件での計算に対応していないので、翼を対象に配置した形状で計算を実施

計算条件 (Case2308)	
一様流Mach数	0.8395
Re数 (MAC)	11.72x10 ⁶
迎角	3.06

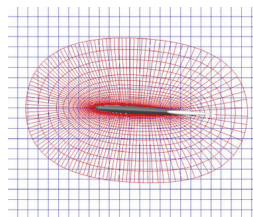


計算モデル

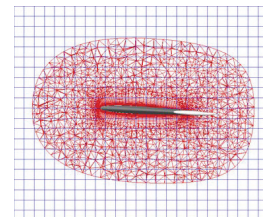


rFlow3D格子
総セル数: 1.55M

TAS/FaSTAR格子
総セル数: 2.49M
総セル数は1.6倍多い



物体構造格子+背景直交格子



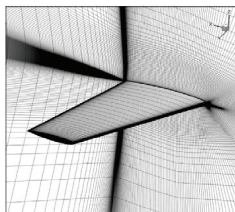
物体非構造格子+背景直交格子



検証結果

- 表面圧力分布の比較
- elsAの結果と比較している
- おおむね同様な結果が得られている

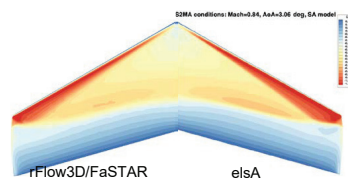
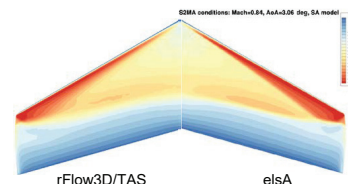
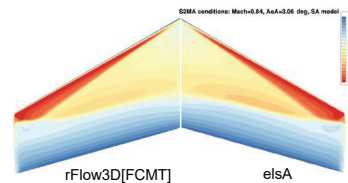
elsA計算手法



elsAの計算格子

支配方程式	3次元圧縮性Navier-Stokes方程式
数値流束関数	AUSM+(P)
空間高次精度化	MUSCL (3 rd order)
時間積分法	backward Euler scheme with implicit lower-upper symmetric successive overrelaxation
乱流モデル	SA

Ref: J. Mayeur, A. Dumont, D. Destarac, and V. Glicze, "Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulations on NACA0012 and ONERA-M6 Wing with the ONERA elsA Solver", AIAA JOURNAL, Vol. 54, No. 9, September 2016.



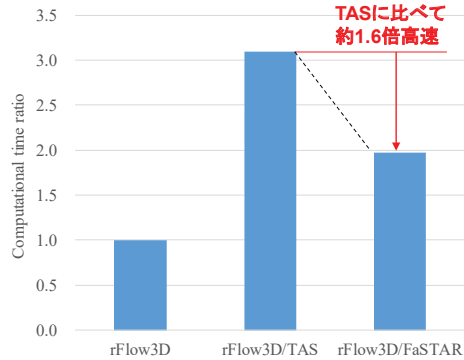


計算コスト比較

- ONERA M6 wing の計算条件で計算コストを比較
- 計算機はWorkstationを使用 (Windows)
- 10ステップ計算を行い、各処理時間を平均化して1ステップあたりの計算時間を算出

計算機	
PC	HP Z840
CPU	Intel Xeon® CPU E5-2687W v3 3.10 GHz 10core(20thread)
実装メモリ	64GB
OS	Windows 7

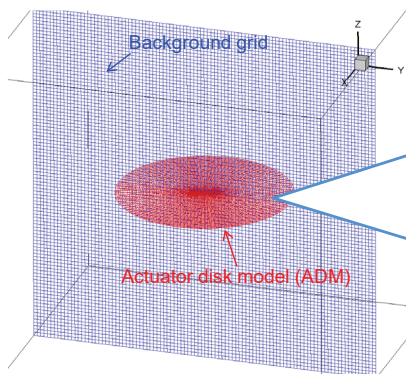
テスト条件	
計算条件	ONERA M6 Wing (Case2308)
スレッド数	8



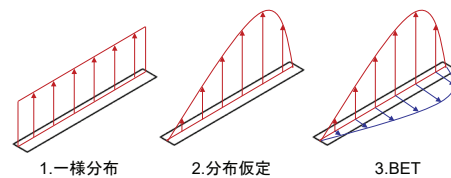
アクチュエータ・ディスク・モデル (ADM)

ADMの効果はソース項として与える

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{r(t)} \mathbf{U} dV + \oint_{s(t)} (\mathbf{F}^i - \mathbf{F}^o) \cdot \mathbf{n} dS = \int_{r(t)} \mathbf{Q}_s dV$$



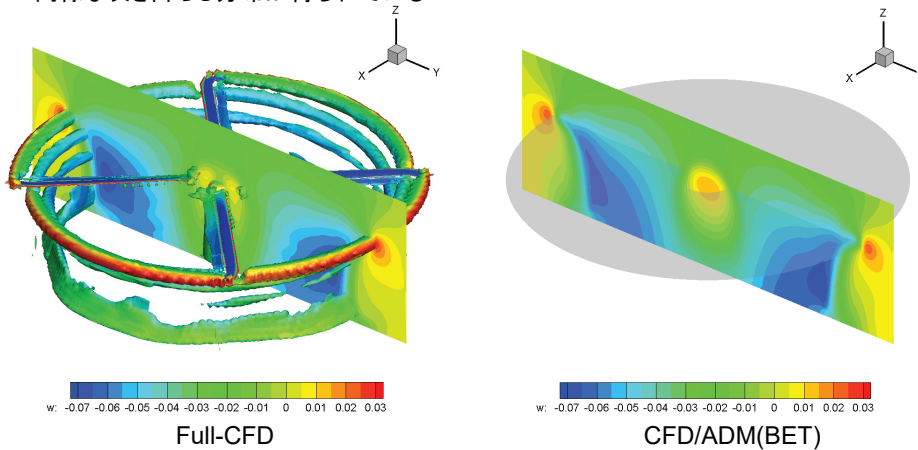
- アクチュエータ・ディスクの面内の力の分布は3つの機能を実装
 1. 一様分布 (C_T)
 2. 力の分布を仮定 (C_T, C_{MX}, C_{MY})
 3. Blade Element Theory (BET)





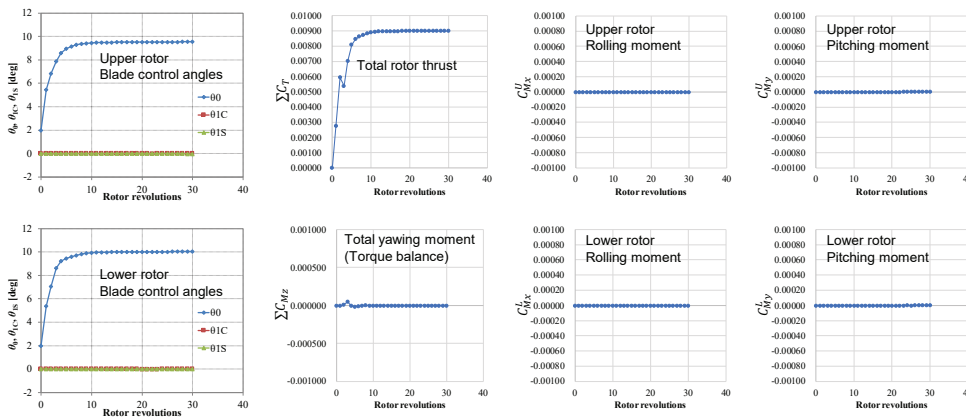
アクチュエータ・ディスクモデルを用いた 計算事例

- UH-60Aロータのホバリング条件
- 同様な吹き降ろし分布が得られている



二重反転ロータのトリム解析機能

- 目標のトリム条件となるように、ブレードの舵角を自動的に調節しながら解析を行う
- 入力: 目標となる力とモーメント(推力、ローリング/ピッチング・モーメント、トルクバランス)
- 出力: ブレードの舵角 (θ_0 : コレクティブ・ピッチ角, θ_{1c} , θ_{1s} : 横/縦サイクリック・ピッチ角)





rFlow3Dのサポート体制

- 高速回転翼機セクションが担当。研究プロジェクト推進の傍ら
- 初期ユーザーに対しては、講習会(1日コース)を実施。
- チュートリアル内容の充実。
- 便利ツールの配布。
- rFlow3Dユーザーズ交流会の開催(年に一回)
- SOH構造格子の生成相談
- 市販ソフト推奨: Tecplot (後処理); Gridgen/Pointwise (格子生成)
- メールによる相談(できるだけ迅速に対応)



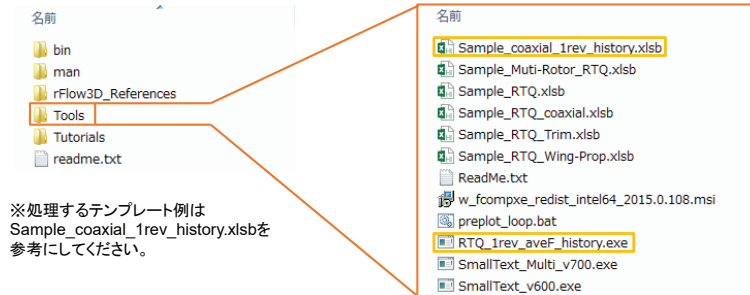
チュートリアル(License Package内)

チュートリアル番号	内容
1	ロータ単体のホバリング空力解析
2	マルチ・ロータ解析
3	ロータと胴体の空力解析
4	ロータ/胴体/Trim解析
5	二重反転ロータ(Coaxial rotor)
6	固定翼とプロペラの空力解析
7	FaSTARを用いた空力解析
8	Ducted rotorの空力解析

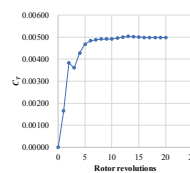
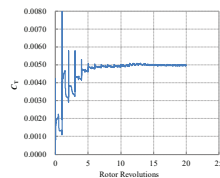


後処理ツールの追加

- Toolsフォルダの中に、新しい後処理ツールを追加: RTQ_1rev_aveF_history.exe



- 空力履歴ファイル(RTQ_IG***.his)を読み込んで、ロータ1回転での平均値履歴を作成



変動履歴に加えて、一回転の平均値
の収束履歴を確認することができる



rFlow3Dのライセンス

- 教育機関(無償)向け窓口: JAXA航空技術部門 数値解析技術研究ユニット(高橋孝)
- 企業(有償)向け窓口; JAXA 新事業促進部
– 無償トライアル制度もあるので、ご相談ください。



ご清聴ありがとうございました。

2019/7/1 JAXAソフトウェアユーザー会
ANSS/JSASS流体力学講演会@早稲田国際会議場

流体計算初心者向けFaSTARの計算障害トラブルシューティング手順の提案

相曾 秀紹
JAXA航空技術部門
数値解析技術研究ユニット

課題(本提案での問題意識):

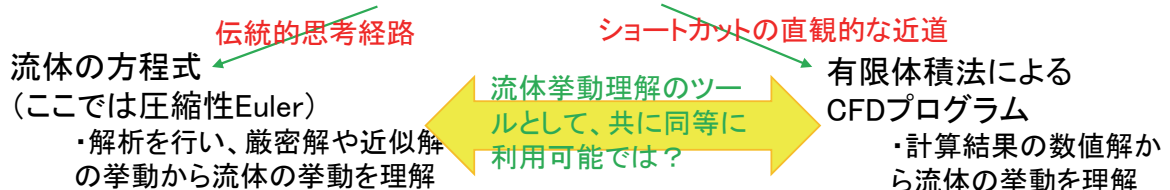
流体力学やCFD(特に圧縮性非粘性or高Reynolds数)を「道具」として使うユーザー(CFDの数値計算法などにあまり詳しくない、しかし大学教養程度の力学知識は仮定してよい)がCFD計算で不具合を起こしたときのトラブルシューティング
⇒ それなりに「分かって」対応できるようにならないか？

考察:

数理的に厳密な理解に目を瞑るというtrade offを容認すれば、伝統的なCFD計算法の理解の道筋はshortcutされた近道で代替可能かもしれない。

考察から得たアイデア:

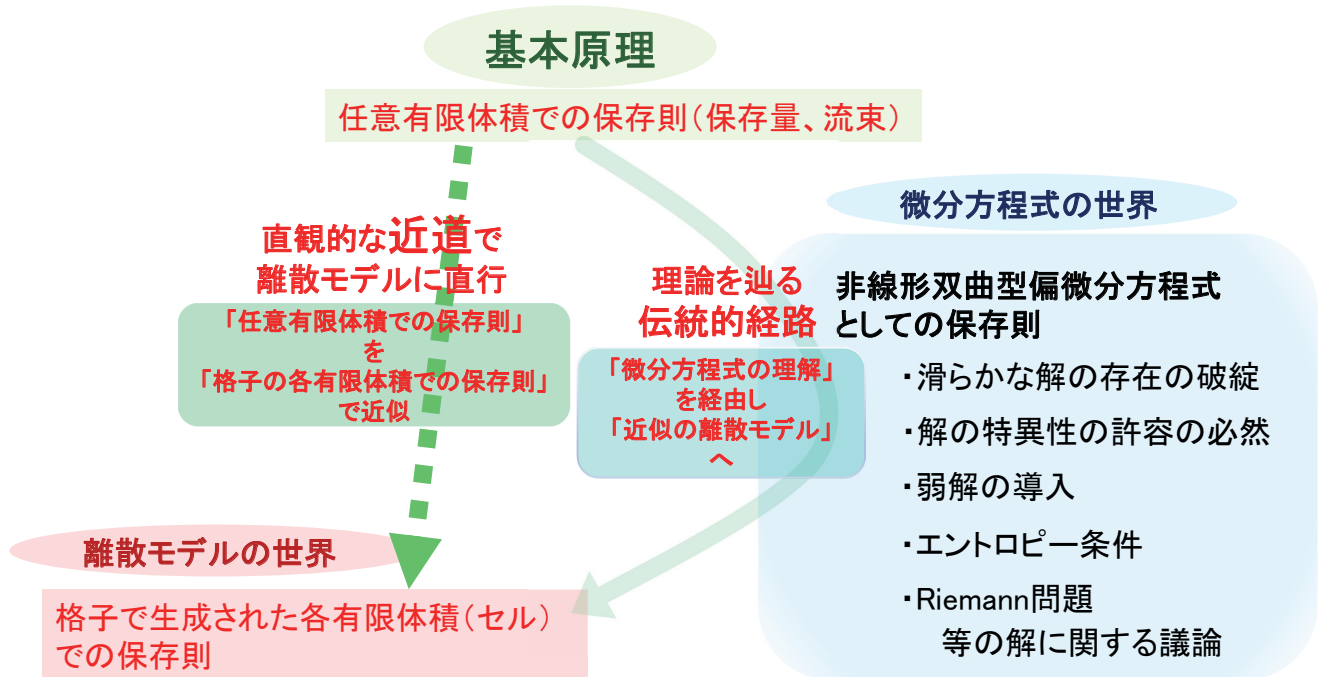
流体挙動の基本原則である保存則



皮算用:

- ・伝統的な計算法理解の過程をスルーしても、ある程度は「分かった」形でのトラブルシューティングができるようになるのでは？
⇒ トラブルシューティング対策付FaSTAR講習の試み(3~5コマを想定)
- ・流体力学(流体挙動)の理解に、流体方程式の代わりにCFDプログラムを用いることもできるのでは？(一挙両得 or 二兎を追う)

圧縮性Euler流体のCFD計算理解 — 伝統的経路 & ここで提案のshortcut —



伝統的経路の正当性の理由

- ・離散モデルよりも連続モデルの微分方程式の方が扱いやすい。つまり、数学としての道具(=概念や手法)が豊富。
- ・必要な概念が導出される必然性を説明するためには、偏微分方程式の形での議論が必要
- ・有限体積法での数値流束の理論的考察の為にはRiemann問題の概念が必須(セル境界面は保存量に不連続の生じている場所であるため)

上の理由は金科玉条か？

(現在でも？ or 全てのCFDerにとって？)

- ・計算法のコア(schemeの基本である近似Riemann解の技法)はかなり進歩。
- ・現状、計算法のコアに由来する本質的な計算不能は殆ど起こらない。(収束の様子や誤差等での問題点は依然として存在はするものの)
- ・殆どの計算破綻は物理現象(数学的厳密解)や近似解の極端な挙動に計算設定が対応できない(空間や時間での解像度不足等)場合に発生。これは計算法のコアの本質的問題ではなく、計算設定や格子の修正で対応可能。



計算法の進歩とユーザー層の広がりを考えると、近道(直観的理解)経由のCFDへの導入経路も用意できないか？

トラブルシューティング対策付FaSTAR講習 (案)

Step1. 保存則(基本原理)とその原理の計算ツール化

- ・質量、運動量、エネルギーの3つの保存量の流束の理解
- ・元々の保存則の「任意の有限体積での保存則の成立」を「格子により十分に細分した各有限体積での保存則の成立」で近似する事の説明
- ・「格子により十分に細分した各有限体積での保存則の成立」をプログラムにして数値計算するのがCFDである、という理解
- ・プログラムでは保存量が不連続な場所であるセル境界面での流束の計算が必要だが、それに関しては簡単に言及。(その事実の認識 & この事はRiemann問題として研究され厳密解や近似解、それらの計算法の研究成果の蓄積が相当にあることの理解)

Step2. 計算法の原理の体感

- ① セル境界面に於ける流束を計算するサブルーチンを実際に動かしてみる。
 - ・両側のセルでの物理量を指定しその場合にどのような流束が生じるかを観察し、物理に合っていそうだという事を実感的に理解
- ② ①で使ったサブルーチンを使った、1次元CFDプログラムで、基本的な流体现象が計算できる事を体験
 - ・音波の伝播(弱い音波、強い音波)
 - ・衝撃波管
 - ・衝撃波や音波の固定端や開放端での反射
 - ・いわゆるBlast Wave
 - etc.
- ③ 2次元や3次元への拡張について考察してみる
 - ・同様の原理で計算できそうな事を理解。
 - ・原理は同様でも拡張の際の困難さ(故に規制のソフトウェアの利用も意味がある事)を考察してみる。

Step3. 多次元計算実習

- ・ここでFaSTARを用いて2次元計算を実習(可能であれば3次元も)
- ・FaSTARに付属しているTutorialも流用可能
- ・しかし3次元計算を手軽にできる環境は一般的ではないので、FaSTARのWindowsPC版とも言えるCL-Packを利用した2次元計算が現実的か。(その場合の格子生成を手軽に行える方法について現在検討中)

Step4. 計算破綻の典型例の理解 & 破綻回避法の習得

- ・殆どの計算破綻の理由は、いくつかの典型に分類可能。これらの典型は1次元計算で実現でき、Step2で使った1次元プログラムで破綻の実例を観察
例えば、強い膨張、初期値に起因する極端な状況、etc.
- ・これらの計算破綻が格子や時間ステップの調整で回避できる事も観察=トラブルシューティングの基本的技法の習得

Step1→4 で CFD初級課程修了！
というイメージ

まとめ

- ・有限体積法を
「流体方程式(微分方程式)の近似」と捉えるのではなく、
「『任意有限体積での保存則の成立』を『格子細分でできた各有限体積での保存則の成立』で近似する」と捉えることで、数理的な厳密さを失うが、感覚的に理解し易い「理解の近道」をつくれるのではないか？
- ・上記の「理解の近道」を利用して、増加しつつある道具としてCFDを使うユーザーのCFD理解を促進でき、「トラブルシューティング力」の習得にも繋がられるのではないか？
- ・この方法は、初心者向けの「微分方程式を使わない流体力学入門」のようなものにも流用可能かもしれない。
- ・相当程度にこなれてきた流体のシミュレーション計算技術の新たな(?)利用法とも言える。