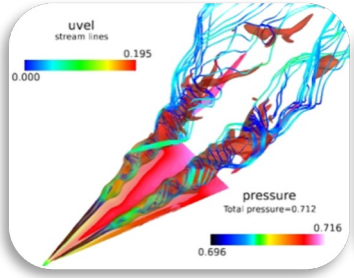
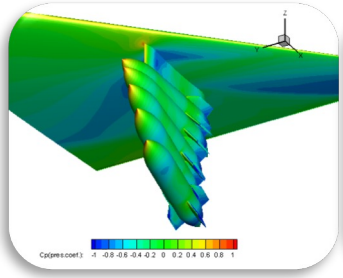
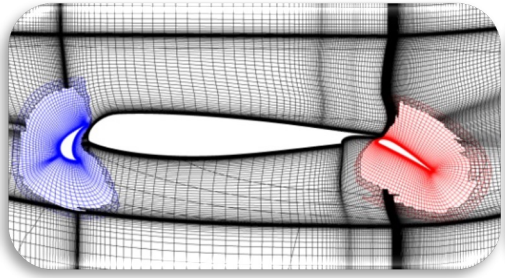
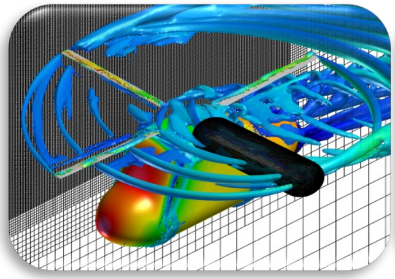
移動物体対応流体解析ソルバ FaSTAR-Moveの回転翼解析事例および最新機能紹介

保江 かな子, 南部 太介
宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 航空技術部門
航空機ライフサイクルイノベーションハブ



2022年度将来回転翼機研究会／回転翼解析技術交流会, 2023/3/24

航空機設計開発におけるCFD活用

- CFD (Computational Fluid Dynamics) の発展に伴い, 航空機設計開発段階においてCFDが多用されるようになっている
- 近年では, より**複雑な形状の解析**や**物体の運動を伴う解析**等への適用に対する需要が高まっている
  - ✓ファン, タービン, 圧縮機等の航空エンジンのターボ機械要素
  - ✓ヘリコプタやeVTOL等の回転翼機

航空機におけるCFDの活用

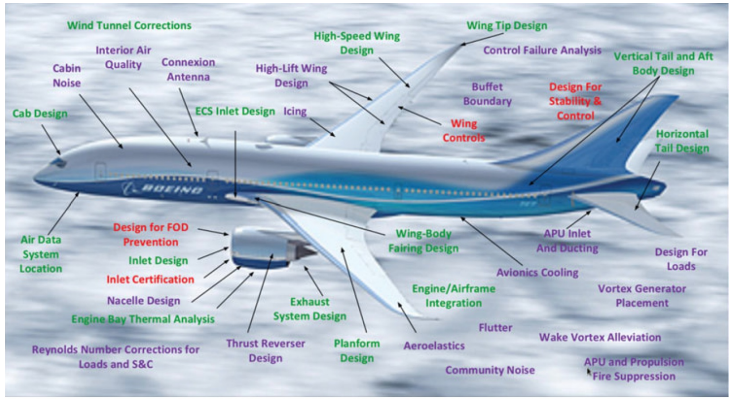
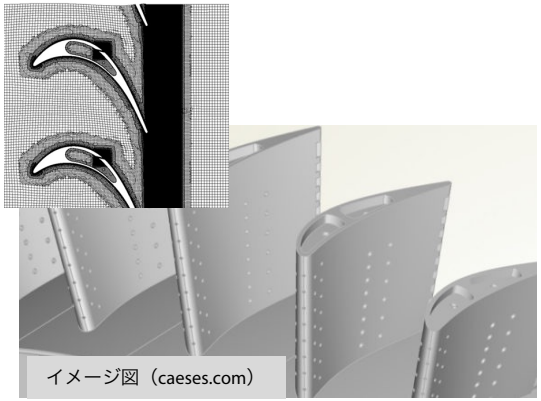


Figure 1. Impact of CFD at Boeing. Green areas have strong CFD penetration; blue areas have some penetration; red areas present future opportunities.

Spalart et al., The Aeronautical Journal, vol.120, No. 1223, pp. 209 – 232, 2016

冷却孔付き翼列



eVTOL

本研究の目的・手段

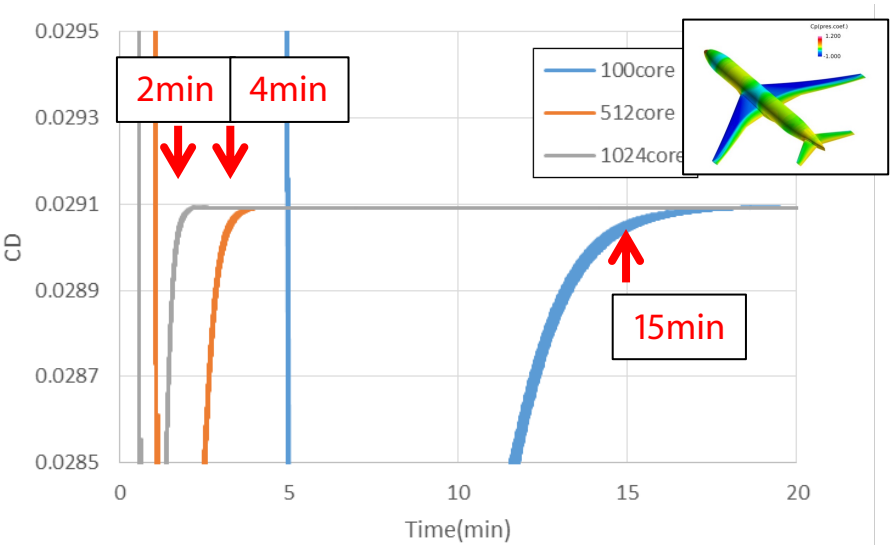
目的

- 運動や回転, 変形を伴う複雑形状の物体周りの流体解析を可能とする, 非常に高速な流体解析ソルバを構築する

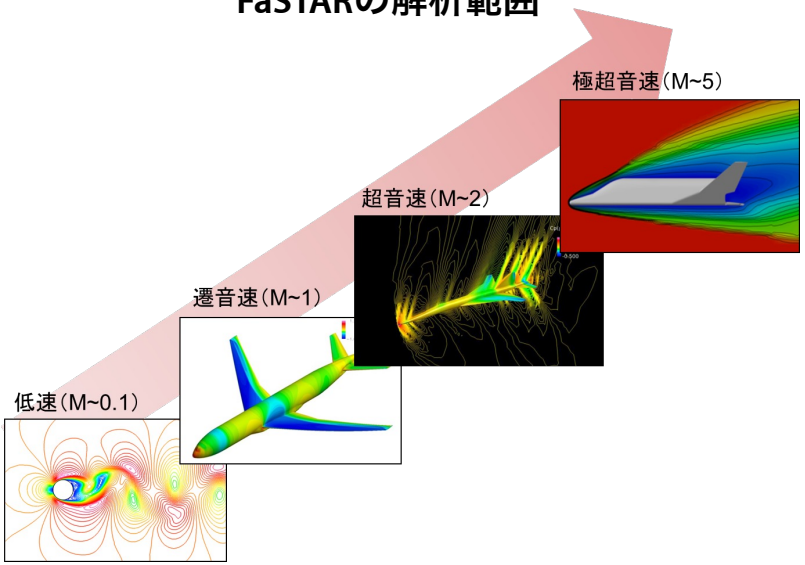
手段

- JAXAで開発してきた世界最高速レベルのCFDソルバ『FaSTAR※』に, 移動重合格子機能, 変形格子機能, スライディング格子機能等を追加することで, 複雑形状かつ動きを伴う解析を可能とする

FaSTARの高速性



FaSTARの解析範囲



※FaSTAR: FaST Aerodynamic Routineの略。 1000コア@JAXA Supercomputer System generation 2 (JSS2)で、航空機空力解析を2分で実行可能

FaSTAR-Moveの研究開発

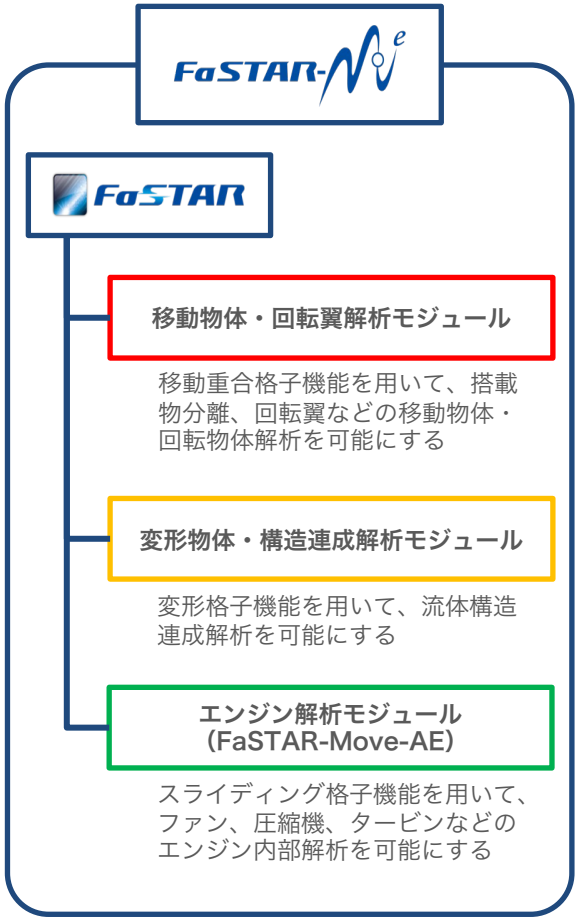
解析対象

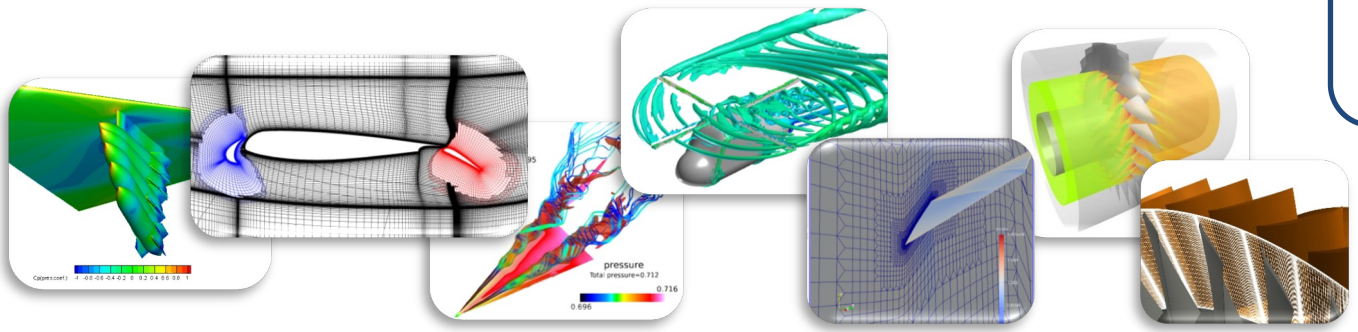
- 高揚力装置周りの解析や, 運動連成解析
- ヘリやeVTOL等の回転翼機周りの流体解析
- フラッタ等, 構造振動を伴う流体解析（流体構造連成）
- ファン, 圧縮機, タービン等エンジン内部解析

FaSTAR-Moveの特徴

- 複雑形状周りの解析が可能
- 物体の移動・変形・回転等の動きを模擬可能
- 世界最先端レベルの精度
- 世界最高レベルの高速性

FaSTAR-Moveの構成

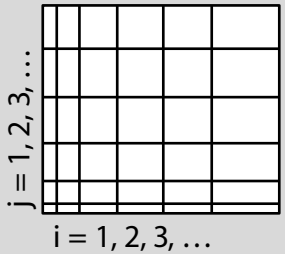




複雑な形状を解析する方法

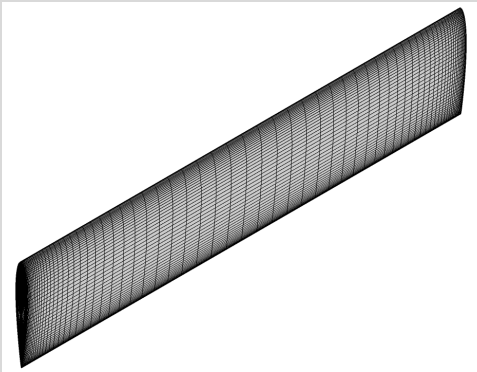
構造格子
【UPACS/rFlow3D】

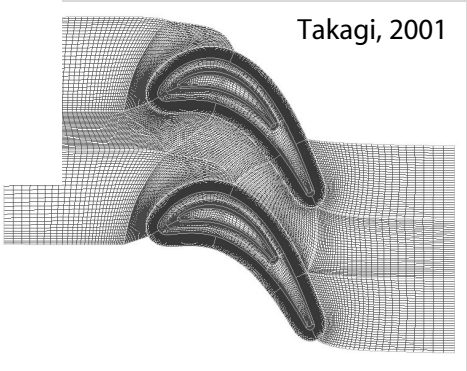
特徴
- 六面体の計算セルで構成
- 計算セルが規則的に並んでいる格子



メリット
- 計算セルが規則的に並んでいるため, コード実装が容易

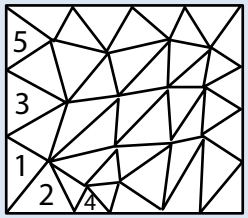
デメリット
- 複雑な形状に対しては, 計算格子の生成の難易度高





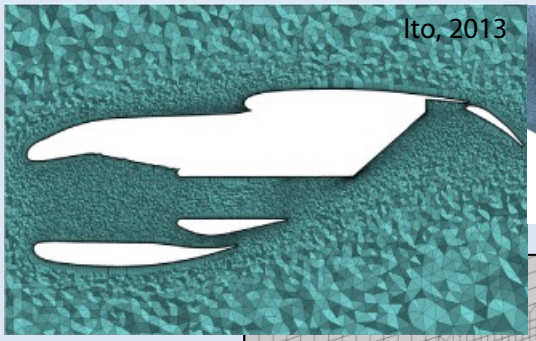
非構造格子
【FaSTAR/FaSTAR-Move/TAS】

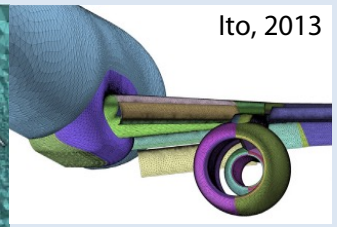
特徴
- 多面体（六面体, 四面体, プリズム, ピラミッドなど）の計算セルで構成
- 計算セルが不規則に並んでいる格子

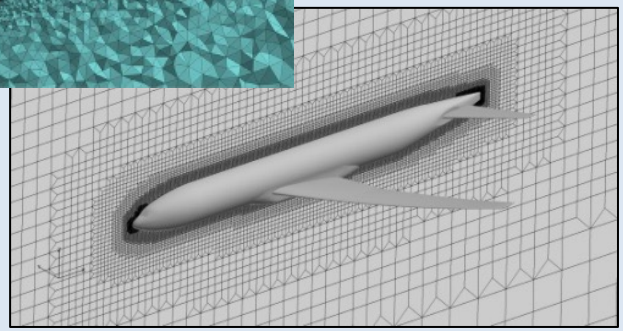


メリット
- 複雑な形状でも, 容易に計算格子を生成可能

デメリット
- 計算セルが不規則に並んでいるため, コード実装の難易度高





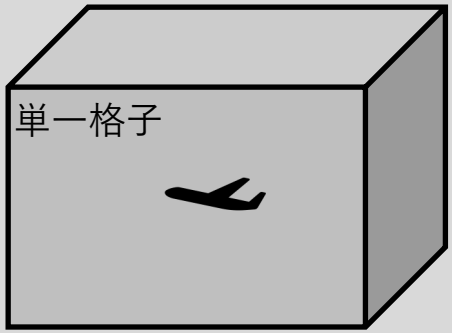


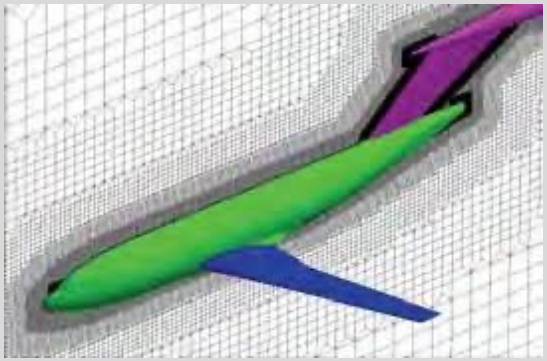
物体の運動を伴う解析の方法

単一格子
【FaSTAR】

固定翼機解析の方法

- 物体の周りを覆う単一の計算格子を用いて流体計算を実施





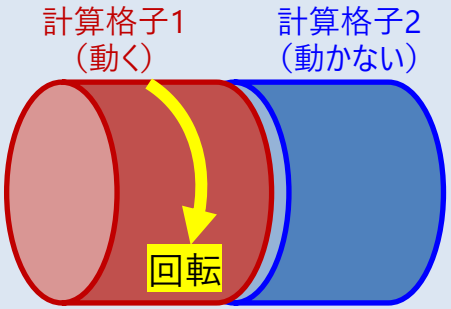
スライディング格子
【FaSTAR-Move エンジン】

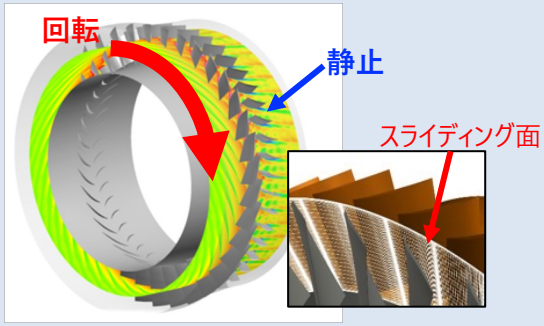
固定翼機解析との主な違い

- 計算格子を特定の界面に沿ってスライドさせることで物体移動を伴う解析を実施

課題

- 内部流解析で重要となる流量を100%保持したまま解析（保存則の保証）するには, 複雑な処理が必要





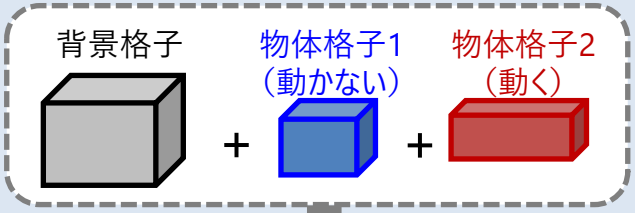
移動重合格子
【FaSTAR-Move 回転翼】

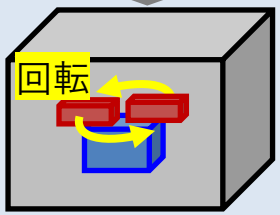
固定翼機解析との主な違い

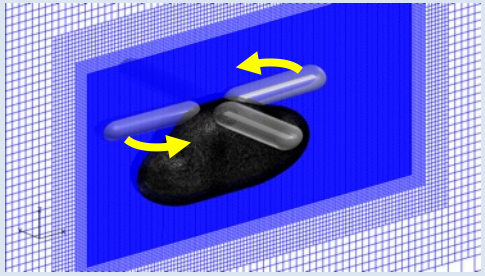
- 移動する物体, 固定物体, その周りを取り囲む領域に対して別々の計算格子を用意し, 重ねて解析

課題

- 複数格子間の情報授受のために必要な処理（ホールカット処理）が非常に高負荷







FaSTAR-Moveの研究開発

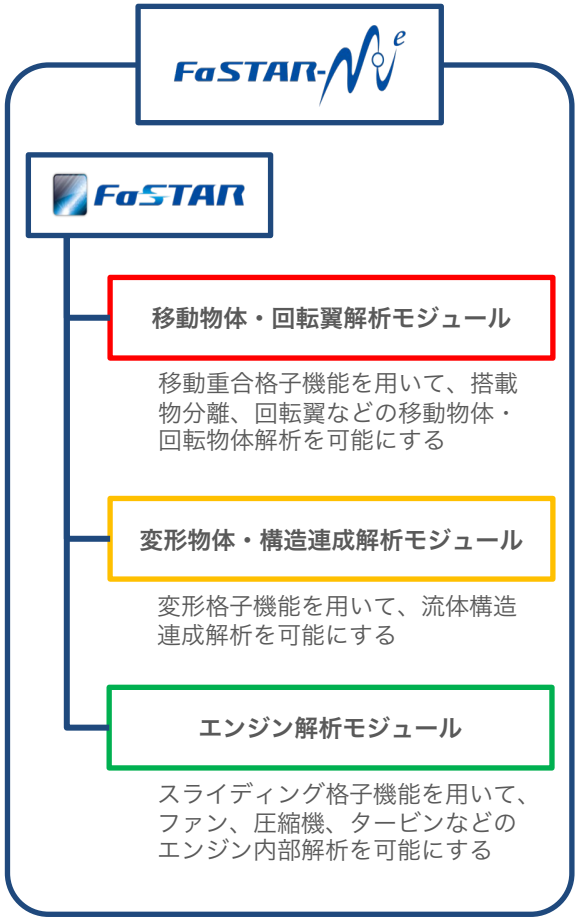
解析対象

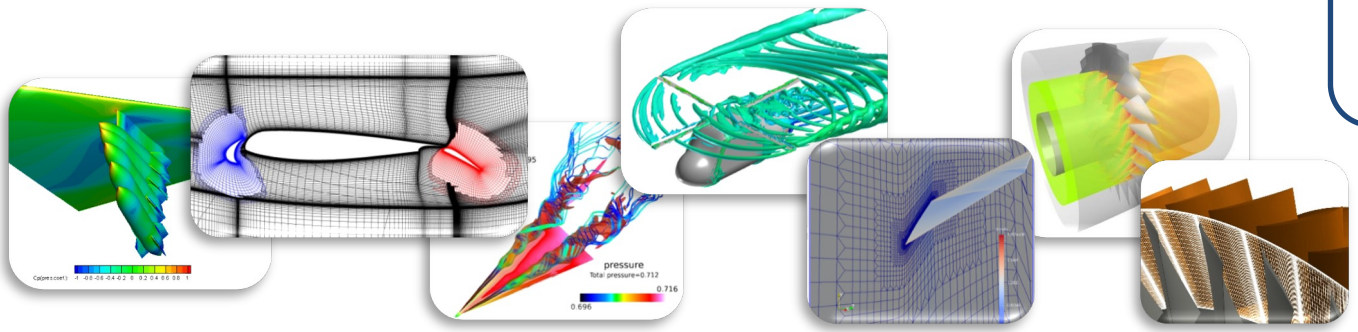
- 高揚力装置周りの解析や, 運動連成解析
- ヘリやeVTOL等の回転翼機周りの流体解析
- フラッタ等, 構造振動を伴う流体解析（流体構造連成）
- ファン, 圧縮機, タービン等エンジン内部解析

FaSTAR-Moveの特徴

- 複雑形状周りの解析が可能
- 物体の移動・変形・回転等の動きを模擬可能
- 世界最先端レベルの精度
- 世界最高レベルの高速性

FaSTAR-Moveの構成





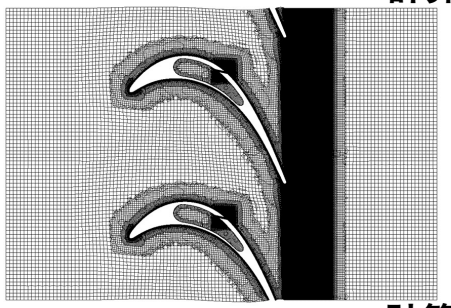
最先端レベルの計算精度実現に向けて (2/2)

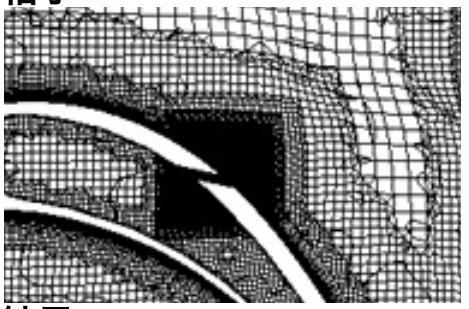
- さまざまな解析を実施し, 精度の良い妥当な解を得られることを確認
- 実績のあるコードや, 実験データ等との比較検証を実施中

冷却孔付き直線翼列解析

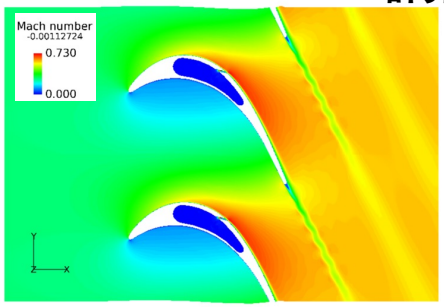
- ✓ 翼面に冷却孔を持つ直線翼列(T106A）の解析
- ✓ 微細な形状を含み, 低速部と高速部が共存する流れ場でも安定的に解析可能であることを確認
- ✓ 翼面のCp分布は実験と良好な一致

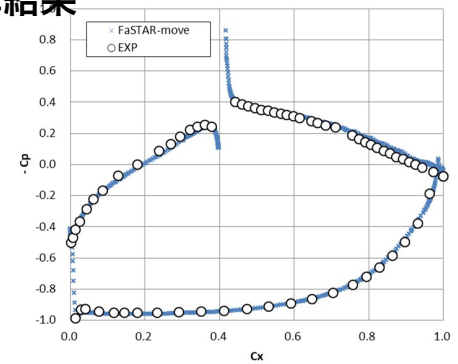
計算格子





計算結果

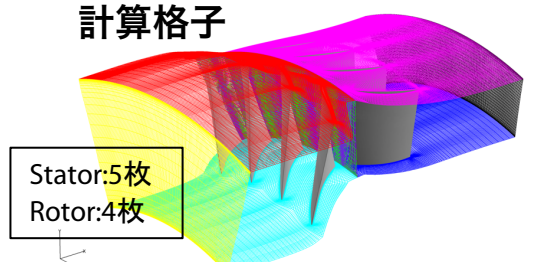


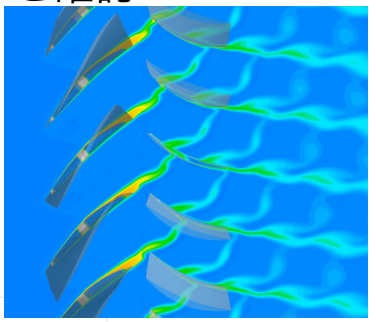


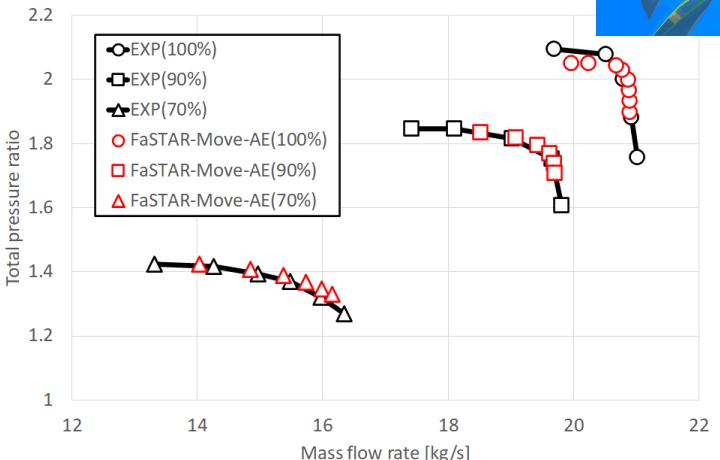
圧縮機動静翼列解析

- ✓ 動静翼列（stage37）の解析
- ✓ 周期境界角度40deg格子を用いて解析
- ✓ スライディング面での保存性を損なわず安定的に解析できることを確認

計算格子







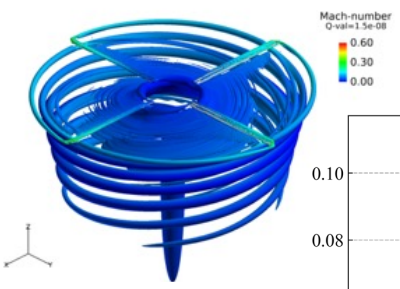
世界最高レベルの高速性 (2/2)

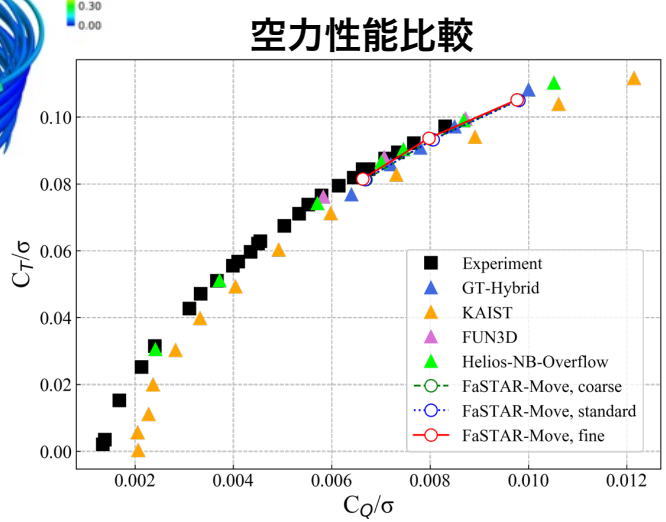
- 海外ソルバや商用ソルバとの比較検証を実施
- 計算時間に関する公開されている情報を見る限りでは, 世界最高速の計算速度を実現

S-76ロータによる妥当性検証および高速化効果確認

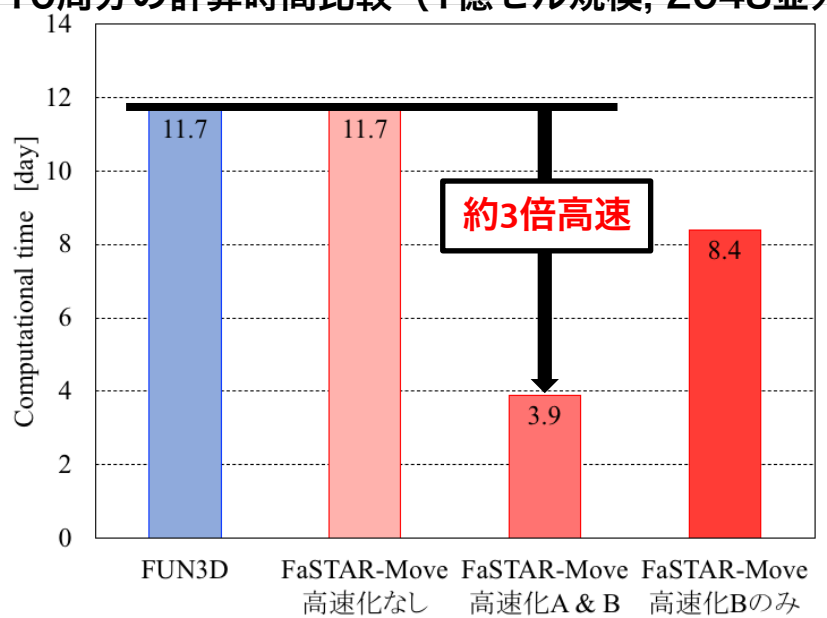
✓ Rotor Hover Prediction Workshop (AIAA) にて検証問題として取り上げられたロータ空力性能比較において, 実験値との良い一致を示すと共に, 海外ソルバと同等の計算精度で解が得られることを確認

✓ 高速化手法（前頁で紹介した方法以外の高速化も組み合わせている）を実装することにより, 非構造ベースの移動重合格子ソルバとして世界を牽引しているFUN3D（NASA）より約3倍高速





10周分の計算時間比較（1億セル規模, 2048並列）



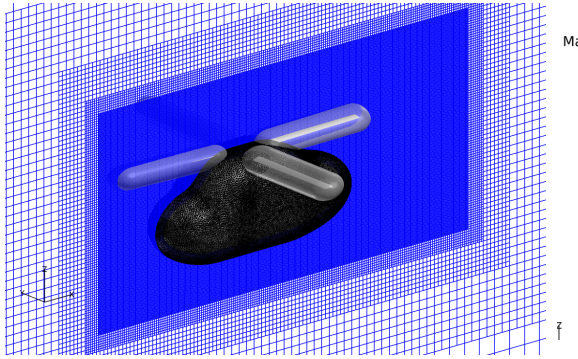
解析例：トリム解析②

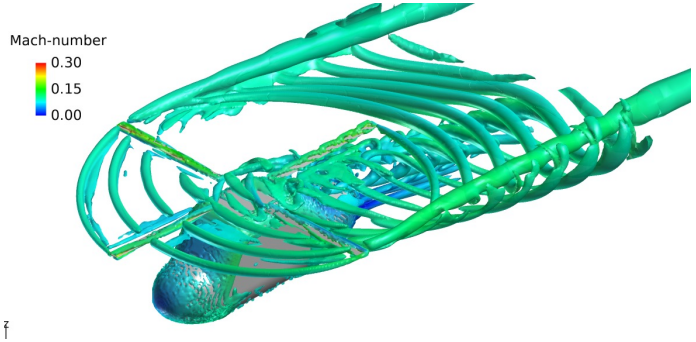
胴体／ロータ干渉（JMRTS）トリム解析

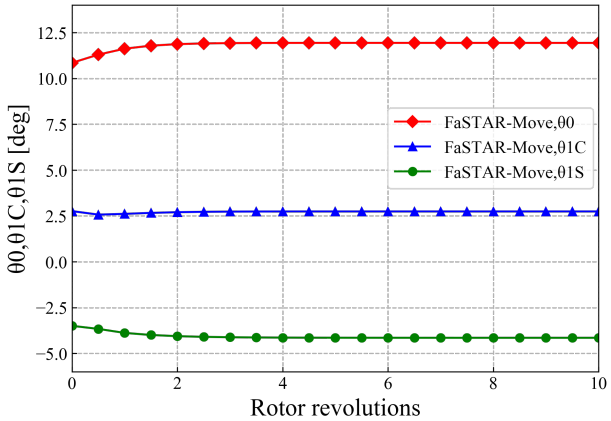
- 推力およびモーメントが平衡となるようなトリム解析を実施
- JAXA実施の風洞試験データと結果を比較し, 空力弾性の影響が大きいUH-60Aに比べて, 実験値と良い一致が得られることをを確認

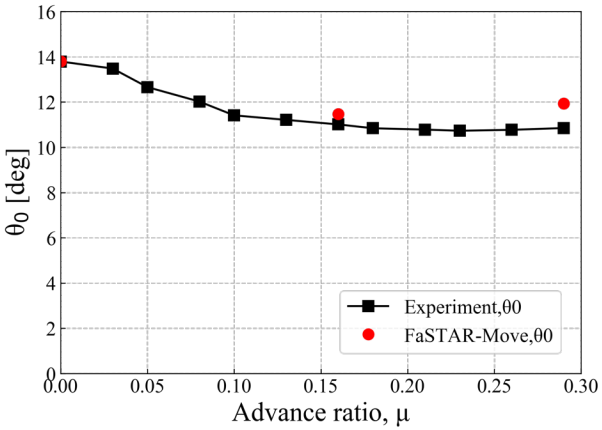
※rFlow3D：構造格子ベース回転翼解析ソルバ（JAXAインハウスコード）

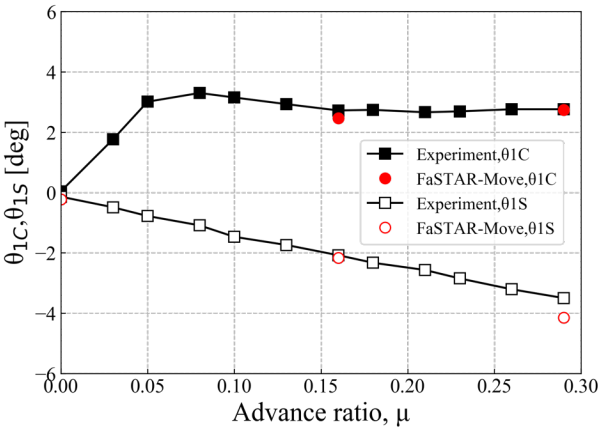
前進飛行時の解析結果（3500万セル規模、9.4日／10周@JSS2-2048コア）











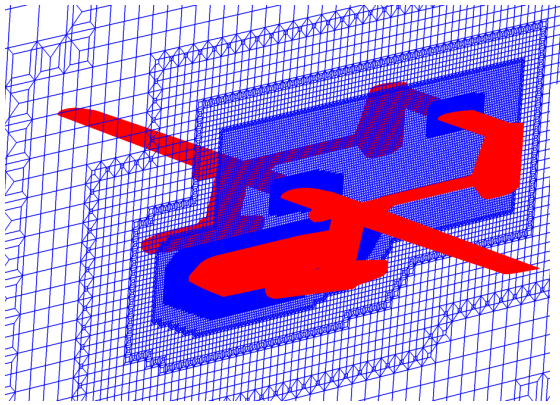
解析例：全機解析例①

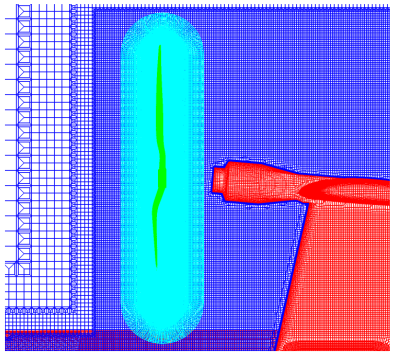
Special Thanks:
株式会社スペースエンターテインメントラボラトリー殿

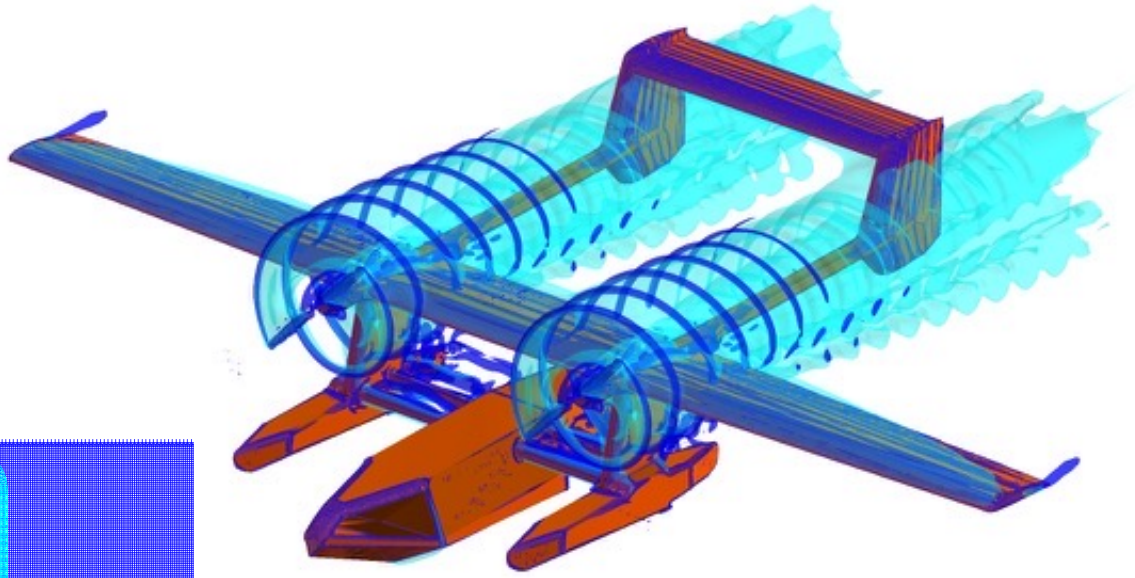
小型無人機全機解析

- プロペラを有する小型無人機（水上飛行艇）の全機解析を実施
- プロペラ後流が空力特性に与える影響を検討するとともに, 飛行試験との比較や分析も実施

解析格子および結果例





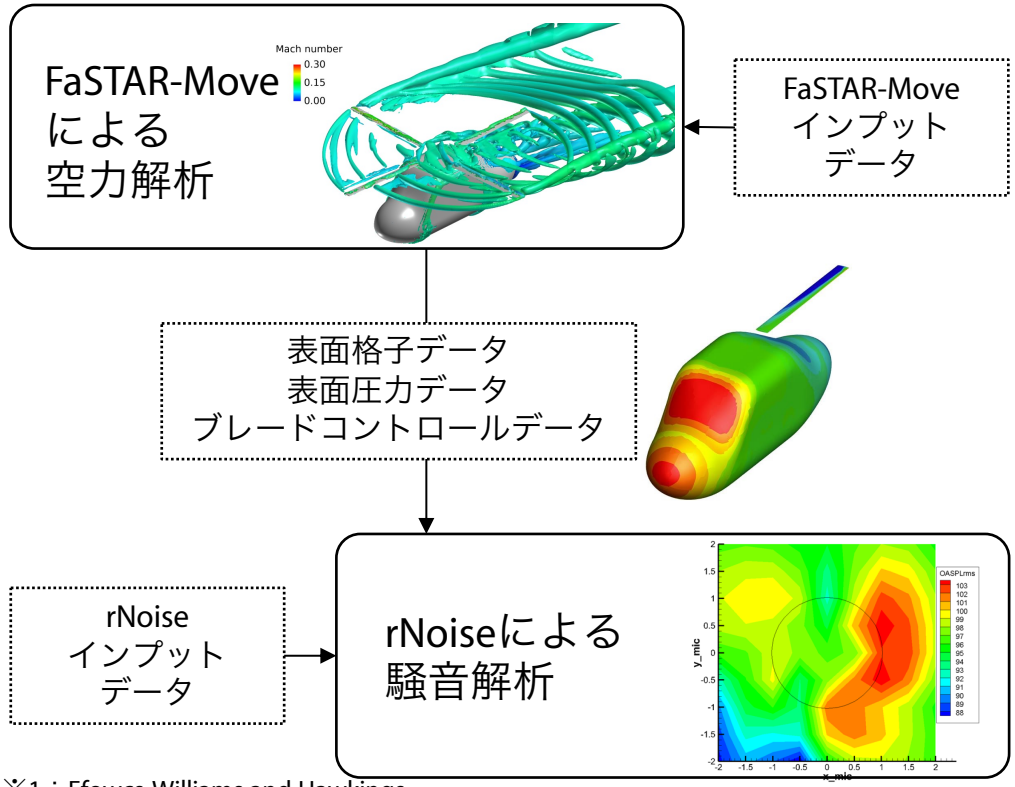


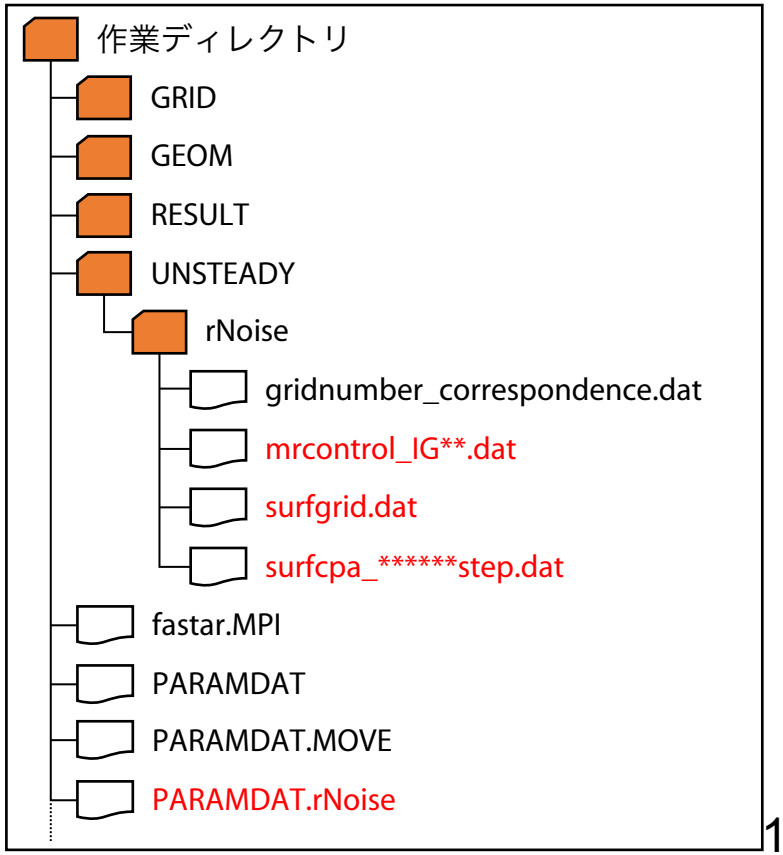
最新機能紹介

rNoiseとの連成による騒音解析機能

- FaSTAR-MoveとFW-H※1法ベースの騒音解析ツールrNoise※2との連成機能を追加
- ソルバ実行時に, PARAMDAT.rNoiseという入力ファイルを計算ディレクトリに置いておくことでrNoise用のインプットファイルを出力

解析の流れと出力ファイル





※1：Ffowcs-Williams and Hawkings
※2：田辺, “回転翼機の空力騒音予測ツールの構築について,”第 44 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 2012講演論文集, 2012

まとめ

- 高速な非構造格子流体解析ソルバFaSTARに移動物体の解析に必要となる機能を追加したFaSTAR-Moveの概要と最新の研究成果を紹介した

- 回転翼解析等に必要な各種機能の実装や妥当性検証解析を実施しており高精度な結果を高速に得られること確認している

- 今年度は, FW-H法ベースの騒音解析ツールrNoiseとの連成機能を実装し, 複雑形状に対する空力・騒音連成解析を可能とした

- 今後, さらなる機能拡張を進めていき, 非常に複雑な形状であっても高速に解析可能な移動物体対応流体解析ソルバを完成させる予定である

謝辞

FaSTAR-Moveの研究開発を進めるにあたり, 以下の方々に多大なるご協力を頂いております.

回転翼解析モジュール

- JAXA 環境適合ハブ　高速ヘリT　田辺 安忠氏・菅原 瑛明氏

また, 本研究では, JSS3（一部はJSS2）を用いて解析を実行しております.

この場をお借りして, 心より御礼申し上げます.