

技術動向レポート

UPACS を活用したターボ機械分野向け 流体解析システム開発

情報通信研究部
シニアコンサルタント 松村 洋祐

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(以下、JAXA)が開発した流体解析ソフトウェア UPACS を基に、ターボ機械分野向け、特に遠心圧縮機を対象として、従来は解析が困難であった低流量域を含む広い作動範囲の性能を解析することを目的とした流体解析システムを、JAXA とみずほ情報総研が共同で開発した。

1. 背景

機械と流体の間でエネルギーを変換する流体機械のうち、回転する翼列などを用いて連続的にエネルギー変換を行うものをターボ機械という。主なものとして、ジェットエンジン、ガスタービン、蒸気タービン、ファン、ポンプ、水車、風車などが挙げられ、幅広く利用されている。ターボ機械の一種である遠心圧縮機⁽¹⁾は、コンパクトでありながら空気流量が大きく圧力比が高い。そのバランスの良さや作動範囲の広さから、石油精製プラント、化学プラント、天然ガスプラント、製鉄プラントなどの各種プラントや空気源、小型ガスタービン、ターボチャージャーなど、様々な機械の心臓部として利用されている。

ターボ機械メーカーは、遠心圧縮機の設計において流体解析ソフトウェアを用い、一般性能(作動条件に対する出力や効率等)や圧縮機内部の流動パターン等をシミュレーションにより評価している。遠心圧縮機の大流量域の解析に関しては、従来の流体解析方法を用いる市販の流体解析ソフトウェアにより、ある程度良好な解析結果を得られるものの、低流量域で発生する流

体振動現象(旋回失速⁽²⁾やサージ⁽³⁾)については、その流動現象の複雑さから設計に十分に資する精度の解析結果を得ることが困難である。低流量域の振動現象は遠心圧縮機本体や管路系の疲労や破壊につながるため、ターボ機械メーカーではシミュレーションによる十分な解析結果が得られない中、安全マージンを大きく取って頑丈な構造にする、作動範囲を狭める、などの対応を行っているのが現状である。この課題に対しては、複雑な流動現象を解析できる DES⁽⁴⁾などの最新の流体解析技術を活用することにより、遠心圧縮機性能のより正確な予測と低流量域における振動現象の解明に期待がかけられている。

また、一般的に市販の流体解析ソフトウェアについては、使用する計算機が企業内の小規模な PC クラスタに限定され、解析規模に応じて増大するライセンス費用の制約もあり、大規模解析や多ケース解析が困難である。また、ソフトウェア内部での処理の詳細が明らかではなくブラックボックス化する傾向があり、解析結果の解釈が難しいなどの問題点もある。

これらの課題解決に対する機械産業分野でのニーズを踏まえ、航空機、航空用ジェットエンジン、ロケットの研究開発用に JAXA が開発し

た流体解析ソフトウェア UPACS⁽⁵⁾を基に、ターボ機械分野向け、特に遠心圧縮機を対象とした流体解析システムを JAXA と共同で開発した。UPACS は、世界でも有数の研究機関である JAXA が最新・最先端の研究成果を取り込んで開発した、スーパーコンピュータでの大規模解析の実績を有する流体解析ソフトウェアである。

なお、本共同開発は、JAXA 産業振興に資する共同研究制度に基づき行った「流体解析ソフトウェア UPACS を活用したターボ機械分野向け流体解析システム開発」(実施年度：2017～2019年度)により、みずほ情報総研と JAXA が共同で実施したものである。

2. 開発項目

本開発では、市販流体解析ソフトウェアでは解析が困難な、遠心圧縮機の低流量域を含む広い作動範囲の性能を解析できる流体解析ソフトウェアを開発することを目的とした。

具体的には、UPACS の CFD ソルバーに関して、(1) 境界条件の改良や (2) 遠心圧縮機への適用に際する解析ノウハウの蓄積を行った。さらに、(3) UPACS に含まれる格子生成ツール MBGG⁽⁶⁾、modifyGrid⁽⁷⁾を活用した遠心圧縮機

用格子生成の技術課題の解決を行った。また、(4) チュートリアルデータの作成等のパッケージ整備を行った。

開発した流体解析システムを用い、(5) 遠心圧縮機の性能予測と (6) 並列効率の評価を行った。

3. 成果

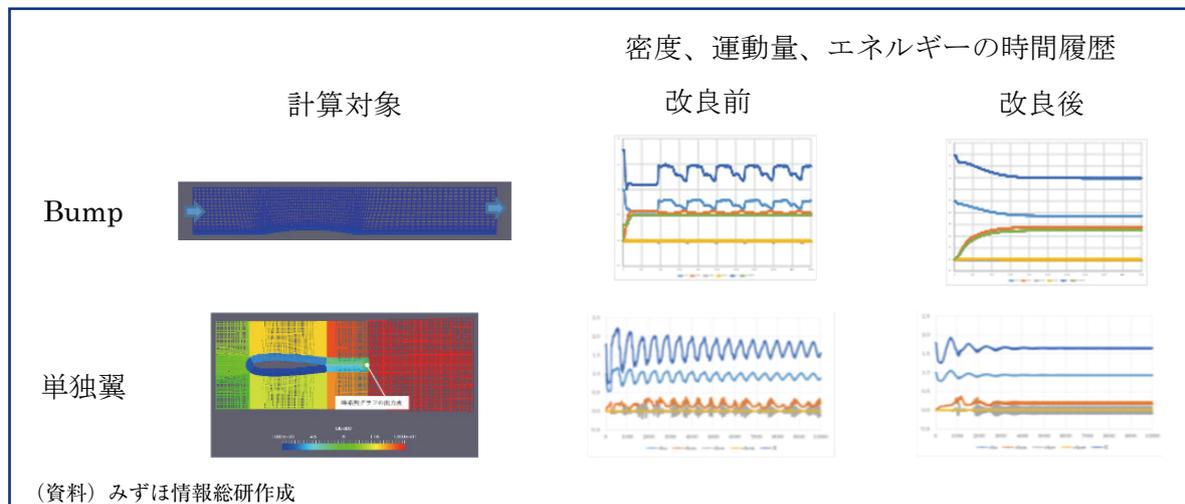
(1) CFD ソルバーの境界条件の改良

ターボ機械内部流れ解析で多用される流量指定境界条件を使用する際、数値的な振動が起きる場合があるため、対策を行った。

流量を物理的境界条件として与え、それと圧縮性流体力学の「特性の方法」を組み合わせ、流出境界面の物理量を求める。ただし、流出境界面では音波が完全に反射されるため、流れ場が振動しやすくなる。そこで、境界面上の流束を、境界面より内部領域の流束で緩和させることで振動を抑制した。

改良した境界条件計算法を単純形状(Bump、単独翼)に適用しその効果を確認した。また、後述するように、遠心圧縮機に対しても適用し、性能曲線の右上がり特性が再現できることを確認した。

図表1 流量指定境界条件の改良の効果



(2)遠心圧縮機への適用に際する解析ノウハウの蓄積

ターボ機械内部流れ解析において乱流渦による損失を正しく評価するためには、瞬時流れ場で乱流渦を解像できる必要がある。しかし、従来行われていた RANS 解析のみならず、Roe スキーム⁽⁸⁾による DES 解析でも、乱流渦を解像することができていなかった。

そこで、SLAU スキーム⁽⁹⁾について回転系への対応を行い、DES による遠心圧縮機の非定常乱流解析を実施した。これにより、瞬時流れ場での乱流渦を解像できることを確認した。

(3)遠心圧縮機用格子生成に際する技術課題の解決

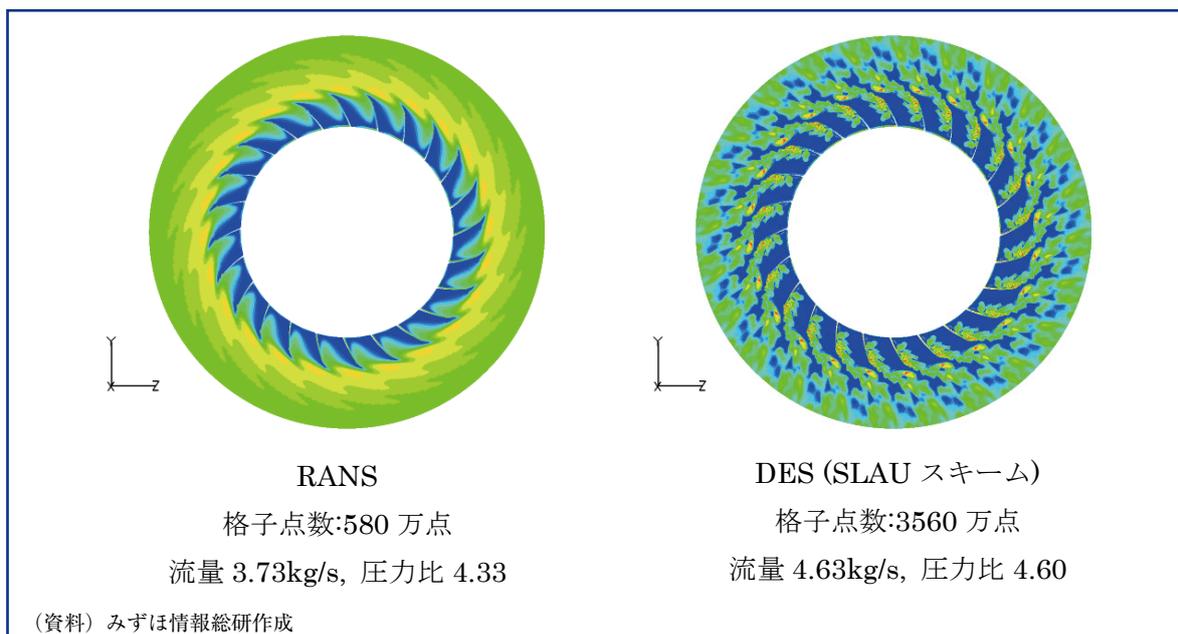
遠心圧縮機のような3次元的に捩れた複雑な形状に対する大規模格子を効率的に生成する手法は確立されておらず、格子生成に熟達していない技術者がそのような格子を現実的な時間内に作成することは困難である。この課題に対応した。

まず、JAXA の開発した軸流ターボ機械用格子生成ツール MBGG を遠心圧縮機に対応させた。具体的には、流路断面の与え方が軸方向座標の関数となっていたものを、入口と出口を結ぶ曲線の関数に変更した。これにより、格子生成に熟達していない技術者でも、現実的な時間内に複雑形状に対する高品質な3次元格子の作成が可能となった。

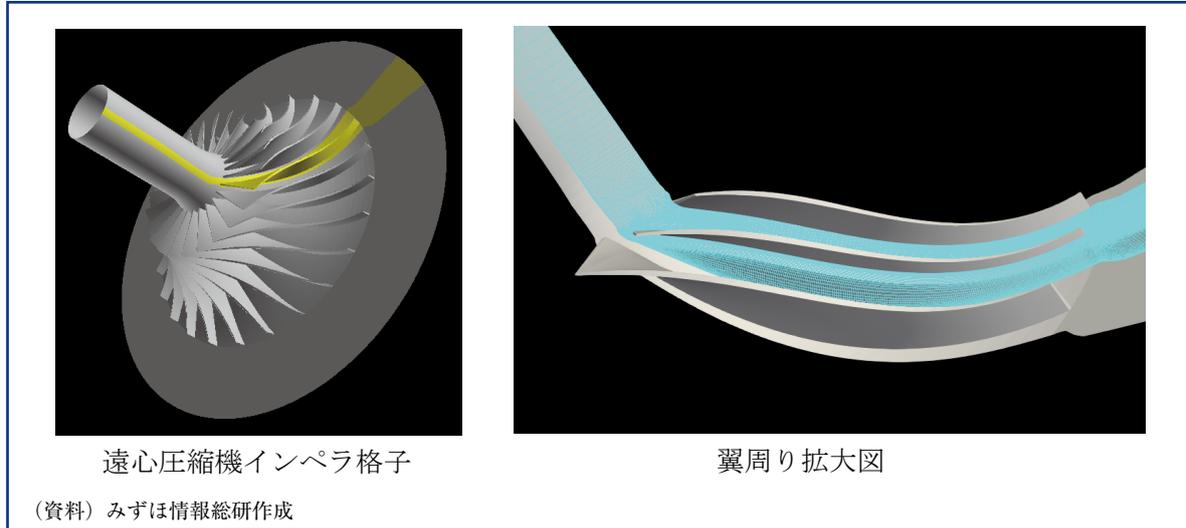
また、MBGG は微分方程式法に基づく格子生成ツールであるため、DES 解析等で必要とされる大規模な格子の作成には計算時間がかかる。そのため、JAXA の開発した代数的手法に基づく格子細分化ツール modifyGrid と連携させることとした。ただし、modifyGrid では格子ブロック境界への指定のみで格子密度の制御を行うため、拘束条件が多くなる O 型格子や周期境界では制御が困難であることが分かった。そこで、modifyGrid に新たな機能を拡充し、翼面に垂直な方向についてはすべての格子線の密度分布を直接制御できるように機能を追加した。

これにより、MBGG でつくられた高品質の格

図表2 解法によるエントロピー分布の解像度の違い



図表3 遠心圧縮機格子図(圧縮機形状は Krain ら⁽¹⁰⁾より引用)



子をベースとして、modifyGrid によってその格子密度分布を制御する、という両者のメリットを活かす考え方で、大規模な格子を作成する手法を確立した。

(4)チュートリアルデータの作成

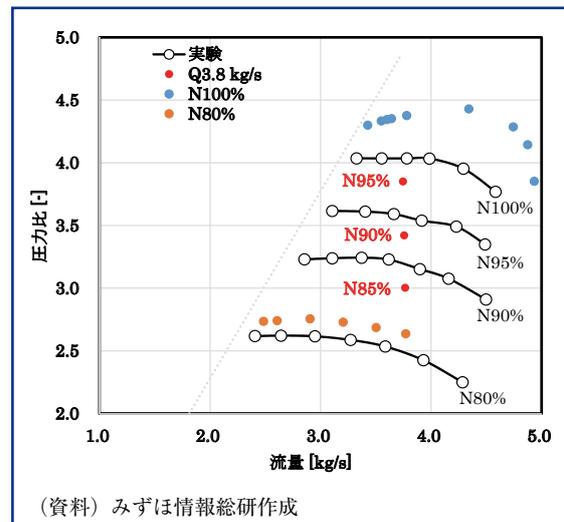
UPACS による遠心圧縮機内部流れ解析における、CFD ソルバーおよびその前後処理を含む一連の計算手続きをまとめたチュートリアルデータを作成した。これにより、これまでUPACS を利用したことのないユーザでも、UPACS による解析に必要な準備や操作を効率的に理解し、解析を容易に立ち上げることができる。また、チュートリアルデータに含まれる実行スクリプトを利用することにより、前処理から解析の実行、後処理までを一括で実行することも可能である。

(5)遠心圧縮機性能予測

改良した UPACS を使用して、遠心圧縮機の RANS 解析を行い、実験結果と比較した。

その結果、回転数100%では、性能曲線の右上がり特性が再現できているが、市販の流体解析ソフトウェアと同様に、実験結果より圧力損

図表4 遠心圧縮機の性能曲線(実験値は Krain ら⁽¹⁰⁾より引用)



失を過少に見積もる傾向があることがわかった。ただし、回転数80%では実験結果とより一致した。これらより、旋回方向の流れによって圧力損失を増やす要素が実験に含まれている可能性が示唆される。今後、より信頼性の高い実験データとの比較が必要と考える。

なお、SLAU スキームによる DES 解析でも、性能曲線上の動作点はほぼ変化しなかった。DES 解析を行わなくとも RANS 解析によって

性能特性の予測自体は可能であることがわかったが、低流量域での振動現象などの非定常現象を捉えてユーザのニーズに対応するためには、DESによる非定常解析が必須である。

(6)並列効率の評価

改良したUPACSのCFDソルバーについて、strong scaleのベンチマークテストを実施した。これにより、少なくとも1024コアという大規模まで実行性能がリニアに上がることを確認した。

DESによる非定常解析などの大規模な解析を行うためには、並列効率の高さが重要となる。UPACSはスーパーコンピュータでも高速に動作するように設計されていることから、市販の流体解析ソフトウェアより高い並列性能を持つということが実証できた。

4.まとめ

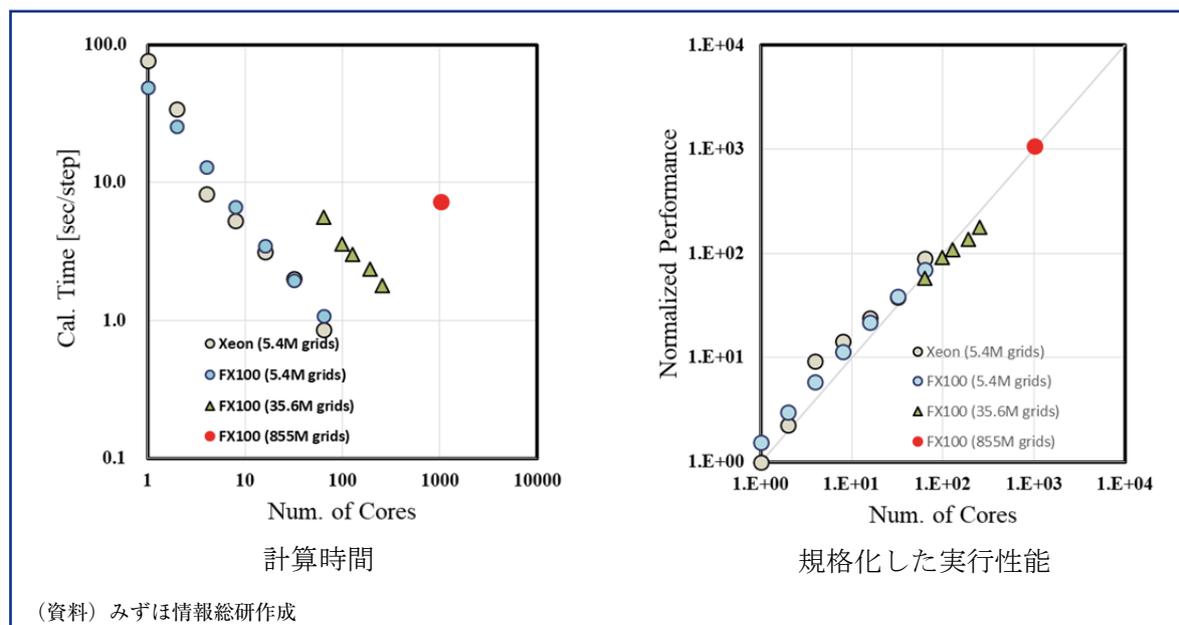
JAXAが開発した流体解析ソフトウェア

UPACSを基に、ターボ機械分野、特に遠心圧縮機向けの流体解析システムを開発した。

開発された流体解析システムのCFDソルバーは、市販の流体解析ソフトウェアと比較して高い並列性能を持ち、DESによる非定常解析などの大規模な解析も実行可能である。また、改良した格子生成ツールにより、格子生成に熟達していない技術者でも、遠心圧縮機のような3次元的に採れた複雑な形状に対する大規模格子を効率的に生成する手法を確立した。さらに、チュートリアルデータの作成等のパッケージ整備により、これまでUPACSを利用したことのないユーザでも、解析を容易に立ち上げることを可能とした。これらにより、UPACSをターボ機械分野、特に遠心圧縮機に適用する基盤を構築できた。

なお、この流体解析システムは、2020年度内に販売を開始する予定である。

図表5 ベンチマークテスト結果



注

- (1) 流体を軸方向から流入させ、インペラと呼ばれる羽根車で流体にエネルギーを与え、半径方向に流出させて高圧にする圧縮機。
- (2) ターボ機械の低流量域で起きる不安定現象の一つ。流量を低くしていくと、一部の翼列に失速が発生する。この失速が成長すると翼間の流路が閉塞される。この失速領域が翼列の回転方向に伝播していく現象。
- (3) ターボ機械の低流量域で起きる不安定現象の一つ。ターボ機械と配管等を含めた系全体が自励振動を起こし、逆流を含む周期的な変動となる現象。
- (4) DES (Detached Eddy Simulation) 壁面近傍など乱流スケールが小さい領域は RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes equation)、それ以外の領域は LES (Large Eddy Simulation) で計算する手法。非定常計算が可能であり、LES よりも格子点数を少なくできる。
RANS は時間的に平均化された基礎方程式を解く手法。格子サイズにかかわらずすべての乱れがモデル化されて計算される。非定常計算には向かない。LES は空間的なフィルターをかけた基礎方程式を解く手法。格子サイズより大きな渦は直接計算で、小さな渦はモデル化されて計算される。非定常計算が可能であるが、RANS よりも格子点数が大幅に増加する
- (5) 山本 一臣, 高木 亮治, 山根 敬, 榎本 俊治, 山崎裕之, 牧田 光正, 岩宮 敏幸「CFD 共通基盤プログラム UPACS の開発」第14回数値流体力学シンポジウム講演論文集 D02-1 (2000年)
- (6) Yamamoto, K. and Engel, K. 「Multi-block Grid Generation Using an Elliptic Differential Equation」 AIAA Paper 97-0201 (1997年)
- (7) Koizumi, H., Tsutsumi, S., Takaki, R., Yamamoto, K., Ito, H., Abe, M. and Matsumura, Y. 「Automated Massively Refinement Technique for Multi-block Structured Grids Based on NURBS Volume」 AIAA 2015-2295 (2015年)
- (8) 対流項の数値流束の算出方法の一つ。Riemann 流束の近似解として Roe 平均を使用する。
- (9) 対流項の数値流束の算出方法の一つ。流束を移流と圧力に分離して扱う。Roe スキームより数値粘性が小さい。
- (10) Krain, H., and Hoffman, W. 「Verification of an Impeller Design by Laser Measurements and 3D-Viscous Flow Calculations」 ASME Paper 89-GT-159 (1989年)