

jh250067

狭隙や薄い物体を含む流体場の大規模数値解析と工学応用

川本裕樹（東海大学）

直交格子法に基づく解析手法と高性能計算機の計算資源を効率的に活用するアルゴリズムを構築し、狭隙や薄物体を含む工学問題に対する大規模流体シミュレーションへ適用した。継続課題の本年度は、前年度までに構築した埋め込み境界法を用いた解析基盤に対し適合格子細分化法と動的負荷分散を融合し、東北大学サイバーサイエンスセンターの AOBA-S/AOBA-A システムにより機械要素と航空宇宙分野に関する解析を実施した。機械要素に関してはジャーナル軸受隙間内のマイクロバブル周辺の解析と、トラクションドライブのローラ全体を対象とした気液二相流および熱伝達解析に取り組んだ。航空宇宙分野では柔軟膜翼の流体構造連成解析と突起付き平板まわりの三次元非定常解析を実施した。得られた知見はカーボンニュートラル実現に向けた自動車部品の高効率化から、惑星探査用翼型の空力設計といった社会的課題への貢献が期待される。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

東北大学 サイバーサイエンスセンター

(2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

(3) 参加研究者一覧と役割分担

代表者：

川本裕樹（東海大）

→ 解析法考案・プログラム開発・応用

副代表者：

佐々木大輔（大阪公立大）、

滝沢寛之（東北大 サイバーサイエンスセンター）、

落合成行（東海大）

→ 解析法考案・プログラム開発・応用・高速化

共同研究者：

大崎歩乃花（大阪公立大）、船田光星（大阪公立大）、

木村泰士（大阪公立大）、田嶋駿一（東海大）、

吉村友輝（東海大）、権田晃生（東海大）

2. 研究の目的と意義

広い空間に狭い流路や薄い物体が混在する流体場では、極端なスケール差が格子解像度、時間刻み幅などに制約を与える。また物体形状が幾何学的に不規則である場合や、気液の自由表面を含む場合など、複雑境界を伴う流れの把握は機械工学における様々な機器の性能評価において重要性を増している。数値流体力学（CFD）において解析を行う際、直交格子法は他の手法に比べて格子生成が容易であるが、セルの定義点と物体境界が一致しない場合の取り扱いが課題である。境界の定義に関しては、固定格子上でセルから境界までの距離関数を用いるレベルセット法や、周囲のセルから境界条件を定義する埋め込み境界法が注目されている。参加研究者らはこれまで、これらの手法を用い任意形状や自由表面を考慮した固気液混相流解析コードの開発を進めてきた。さらに本研究では、解像度が必要な領域のみ格子を階層的に細分化する適合格子細分化（Adaptive Mesh Refinement: AMR）法を導入し、これらの手法と融合させることで効率的な解析の実現を目指している。

本研究計画全体の目的は、直交格子法に基づく解析手法と高性能計算機の計算資源を効率的に活用するアルゴリズム構築に加え、狭隙や薄物体を含む工学的な問題に対する大規模数値シミュレーションへ適用することである。主な対象は、薄い油膜を含む軸受などの機械要素および航空宇宙分野に関する流体现象である。継続課題の本年度は、前年度までに構築した解析基盤に対し AMR 法を導入し、機械要素（ジャーナル軸受・トラクションドライブ）と航空宇宙応用（柔軟膜翼・突起付き平板）の 4 テーマにわたる解析を実施した。本研究は、従来の計算資源では困難であった複雑な境界を取り扱う気液二相流や薄い物体まわりの詳細な解析を可能とする学術的意義を有するとともに、カーボンニュートラル実現に向けた摩擦損失低減や電気自動車用動力伝達機構の高効率化、惑星探査用翼型の空力設計といった社会的課題に対する大規模流体解析の導入促進に寄与することも期待される。

3. 当拠点の公募型共同研究として実施した意義

本研究で対象とする問題は気液界面や物体近傍の境界層など境界近傍の現象が重要であり、高解像度かつ長時間の計算が必須となる。加えて AMR によるブロック間のデータ交換や、気液界面や物体近傍における処理など、単純な等間隔格子の解析とは異なる不規則なデータアクセスや条件分岐を含むことから、高性能かつ多並列な計算機環境との適合が重要である。研究拠点である東北大学サイバーサイエンスセンターの AOBA-S/AOBA-A システムは、ベクトルアーキテクチャに基づく高性能な計算環境を提供しており、本研究との親和性が高い。本年度導入した AMR 法についても、MPI 並列処理と空間充填曲線によるブロック配置の負荷分散を同システムに適合させる形で実装した。

本課題の中心は機械要素や航空宇宙応用といった個別の応用解析にあるが、これに加えて東北大学サイバーサイエンスセンターの研究者の協力のもとで構造解析部分の高速化を進め、多粒子系モ

デルによる膜の変形を含む大規模解析を実用的な計算時間で実行可能とした。このように機械工学の応用課題に対して計算科学の専門家と連携することで、個別の応用解析に必要な高速化や計算手法の改善を進める。これは機械工学分野への高性能計算の導入を促進する取り組みとしても意義を有する。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

これまでも東北大学サイバーサイエンスセンターの大規模計算システムを用い、機械要素および航空宇宙分野を対象とした数値解析を実施している。ジャーナル軸受について、カーボンニュートラル実現に向けた摩擦損失低減を目的として、マイクロバブル混入時の給油溝周辺の気液二相流解析を行い、回転数の増加に伴う気泡流入量の増加、渦の中心位置の移動、気泡の合一に関する傾向などを確認した。また、自励振動ヒートパイプを対象に相変化を伴う気液二相流と熱輸送の基礎検証を行い、二次元の気泡成長および三次元の上昇気泡挙動が理論解や先行研究と良好に一致することを示した。さらに、低レイノルズ数環境を想定した柔軟膜翼および突起付き平板翼の解析では、膜の変形や突起配置が剥離挙動を変化させ、揚力や揚抗比の向上に寄与することを明らかにした。これらの結果から、複雑な境界を伴う気液界面および薄い構造物周りの流れに対して構築した解析手法の有効性が確認された。

5. 今年度の研究成果の詳細

本年度は計算資源の効率的な活用を目的として AMR 法を独自に実装し、大規模並列計算への適合を考慮したデータ構造と演算を採用している。本手法では、計算領域を複数のブロックに分割し、必要に応じてブロック単位で格子を細分化・粗大化するブロックベース AMR を採用している。各ブロックは同一数の格子点からなる直交格子で構成される。物体境界と気液界面は符号付き距離であるレベルセット関数から定義し、この値に基づき高解像度を要する領域を判定してブロックの細

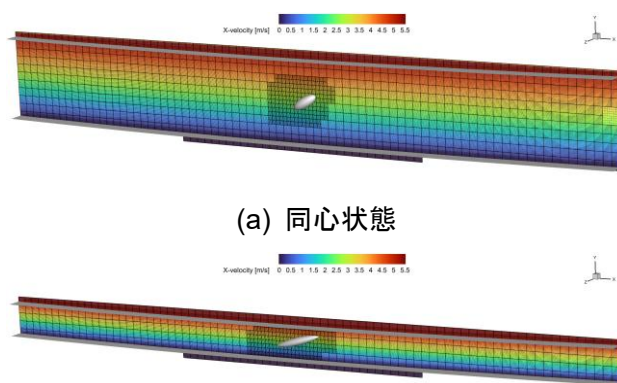
分化・粗大化を行う。また隣接ブロック間のレベル差を最大 1 に制限することで、ブロック境界における値の交換および補間による整合を確保している。並列計算における負荷分散には Z 曲線に基づくブロックの並べ替えを用い、定期的に各プロセスへ再分配を行うことで各ランクの負荷を動的に均等化する。本年度は初期検討として、AMR を 4 テーマのうち機械要素 2 テーマに適用した。以下に各テーマの検討内容を示す。

機械要素に関する検討として、カーボンニュートラル実現のための自動車エンジンの摩擦損失低減に向け、ジャーナル軸受隙間内のマイクロバブルによる摩擦低減メカニズムの解明を目的とした解析を実施した。前年度に給油溝周辺の現象を把握したことを受け、本年度は軸受隙間内のマイクロバブルの挙動に着目した解析を実施した。ジャーナル軸受を対象とした場合、軸の偏心による隙間の空間変化を考慮し、適切な計算領域の設定が必要となる。従来の解析では平行平板間流れを仮定し、計算領域が気泡に追従する ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 法が用いられていたが、本研究では固定座標系で定義された解析領域の端部に初期状態として気泡を配置した。

解析条件として、軸半径 50 mm、クリアランス 0.25 mm、軸回転数 1000 rpm、気泡直径 0.05 mm とした。流体の物性として、液相は ISO VG32 相当の潤滑油、気相は空気とした。計算領域は 2.0 mm × 0.3 mm × 0.1 mm とし、軸および軸受表面を埋め込み境界法で表現することで軸受隙間の一部の領域を模擬した。気泡の近傍では AMR により格子を細分化し、最小格子幅は約 1.56 μm 、総格子点数は約 240 万とした。本解析は軸受全体ではなく気泡周辺の局所領域を対象とするため、偏心に伴い生じる圧力勾配を考慮した外部境界条件を適切に設定する必要がある。本研究では Dubois & Ocvirk の理論に基づき解析領域端部の圧力を Dirichlet 条件として与えた。

図 1 に計算格子、速度分布および気泡挙動を示し、図 1(a)に軸と軸受が同心の状態、図 1(b)に偏心の状態（偏心率 $\varepsilon = 0.6$ ）の結果を示す。いずれ

の配置においても、気泡周辺で格子が細分化される様子が確認でき、AMR による適応的な格子細分化が機能していることがわかる。いずれの条件においても、計算領域端部に配置した円形状の気泡が軸の回転に起因するせん断流れにより延伸し移動する挙動が確認された。特に偏心配置では最小隙間が小さくなることに伴い、気泡が最小隙間を通過する際により顕著に変形する様子が観察され、隙間の変化がマイクロバブル挙動に与える影響が示された。



(b) 偏心状態（偏心率 $\varepsilon = 0.6$ ）

図 1 軸受隙間内の気泡挙動と格子の分布

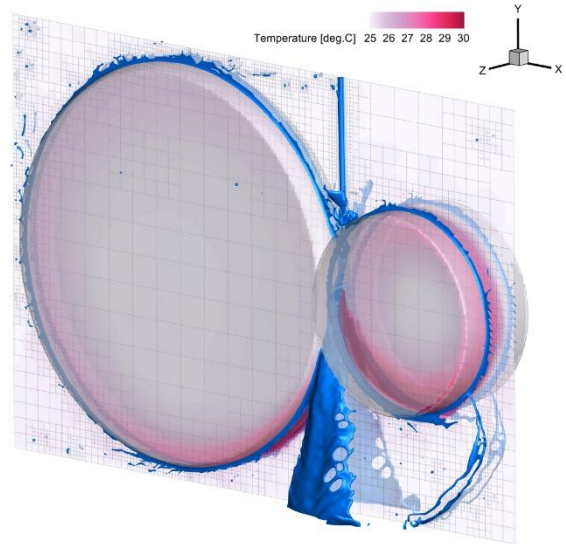
次に、電気自動車の動力伝達機構への応用について述べる。近年の電気自動車の航続距離の延伸に対してモータの高速化による小型化が求められている。その減速機として、歯車に比べ静粛性に優れたトラクションドライブが注目されている。これは二つの転動体を高荷重で押し付け、接触部に形成される弾性流体潤滑作用により動力を伝達する機構であるが、せん断発熱が生じるため冷却が重要となる。先行研究における二相流解析は接触部近傍のみに着目しており、計算負荷の観点からローラ全体を対象とした冷却現象の評価は困難であった。本研究では AMR 法を適用することで、ローラ全体を対象とした気液二相流解析と、流体領域と物体内部の双方での熱伝達解析を組み合わせ、ローラまわりの潤滑油挙動と冷却特性の評価を行った。解析では対称境界条件を適用して軸方向にローラの 1/2 の領域を定義し、計算領域は 210

mm×140 mm×20 mm とした。ローラの材質は SCM 材，潤滑油はトラクションドライブ用の KTF-1 を想定した。初期温度を 25 °C とし，接触部には 125 °C の温度条件を与え，従動ローラの回転数を複数条件設定して駆動ローラが 1 周するまでの計算を実施した。気液界面周辺では AMR により格子を細分化し，総格子点数は最大約一千万点とした。AMR によりローラ全体を対象としつつ接触部近傍の液膜や飛散する液滴の挙動を詳細に捉えることを可能としている。本検討では，給油ノズルの位置および給油方向を一定とし，ローラの回転方向および回転数を変更した場合のローラ温度を評価した。また，供給された潤滑油の進行方向と接触部におけるローラ表面速度の向きが同方向となる条件を「かみ合い給油」，逆方向となる条件を「かみ外れ給油」と定義した。

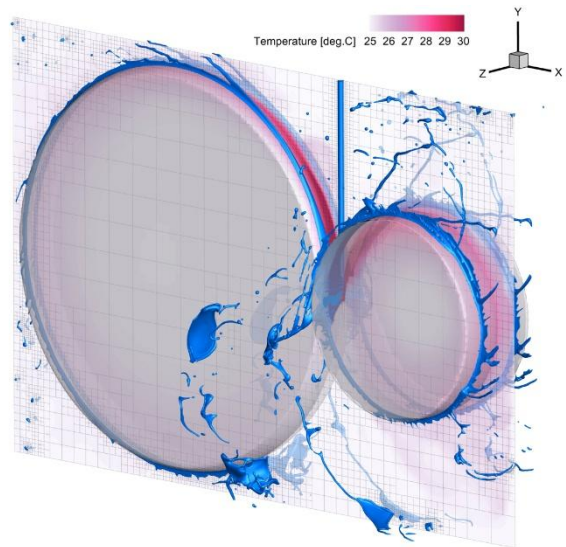
図 2 に代表条件として回転数 2×10^3 rpm における気液界面とローラ表面温度分布を示す。かみ合い給油では，供給された潤滑油が接触部下部で液膜化し，ローラ表面に付着した潤滑油の一部が液滴として飛散する様子が確認された。一方，かみ外れ給油では接触部に到達した潤滑油が軸方向に飛散しながらローラ表面に付着する様子が見られた。

図 3 にローラの平均温度の推移を示す。回転数を変更した比較では，かみ外れ給油において回転数依存がより明確に現れ，低回転ではローラ温度が上昇し，高回転では冷却効果が確認された。低回転時の温度上昇は，接触部で加熱された潤滑油がローラ表面に付着して高温の液膜を形成することが要因と考えられる。一方，高回転時の冷却効果は，接触部周辺の流れによる潤滑油への伝熱促進と，飛散に伴う熱放出が要因として挙げられる。

このように給油方向により接触部周辺の流れとローラ表面への付着・飛散挙動が異なり，温度分布にも給油方向依存の差が生じることが確認された。



(a) かみ合い給油



(b) かみ外れ給油

図 2 気液界面とローラ表面の温度分布の可視化

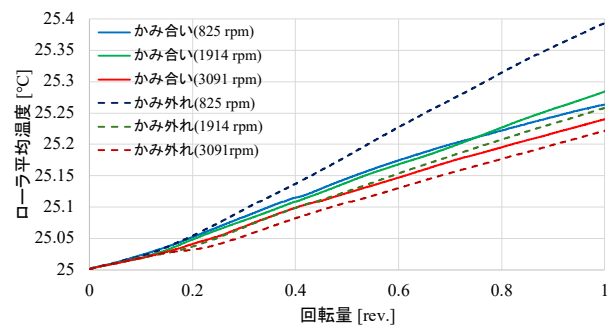


図 3 ローラ平均温度の推移

さらに埋め込み境界法の利点を活かし、薄翼周りの解析を実施した。火星探査を想定した航空機では柔軟膜翼の有用性が指摘される一方、希薄な大気と小型化の要請により低レイノルズ数での揚力の確保が課題である。また膜の大変形には構造内部の曲げ応力が強く寄与すると考えられる。本研究の目的は、格子幅よりも薄い物体を対象にでき、流体と構造の計算を連成して膜の大変形を捉えられる解析手法を構築することである。また構築した手法により実在のエラストマー素材を用いた柔軟膜翼の性能を評価する。

本解析では構造内部に働く弾性力として伸縮力と曲げ応力を考慮し、厚みゼロ相当の物体に対応した埋め込み境界法と組み合わせた。解析条件は先行研究の風洞試験で使用されたエラストマー翼を参考に決定し、翼弦長 $c = 0.05$ m、翼の弾性係数 7.4 MPa、ポアソン比 0.35 とした。計算領域は 0.4 m \times 0.2 m の二次元領域とし、格子幅 0.125×10^{-3} m の等間隔格子を用いて総格子点数を約 500 万点とした。レイノルズ数は 3.0×10^4 、迎角 3° 、 4.5° 、 6° の 3 ケースで解析を実施した。

図 4 に示すとおり、迎角の増加に伴い剥離位置が変化する様子が確認された。低迎角では翼変形によって前縁剥離が抑制される一方、高迎角では前縁剥離が十分に抑制されずに剥離泡が生成された。また曲げ応力の有無で定常状態の翼形状を比較すると、曲げ応力を追加することで翼形状に明確な違いが生じ、剥離泡が形成する圧力差による変形が構造解析モデルの改善により明確に反映された結果と考えられる。迎角 3° では後縁に剥離領域が広がることで前縁近くの変形が抑制され、翼の前半と後半で変形量の差が小さく比較的対称な形状となる。前縁剥離により剥離泡が発生する迎角 4.5° では、後縁の変形が抑制されることで前縁側での変形が顕著に表れる。さらに迎角が増加して剥離泡が後縁側に伸展する迎角 6° では、最大変形位置がわずかに後縁側へ移動する。一方で、風洞試験で得られた揚力係数と比較すると連成解析結果は過大評価する傾向が見られ、翼固定具の影響が要因として考えられる。

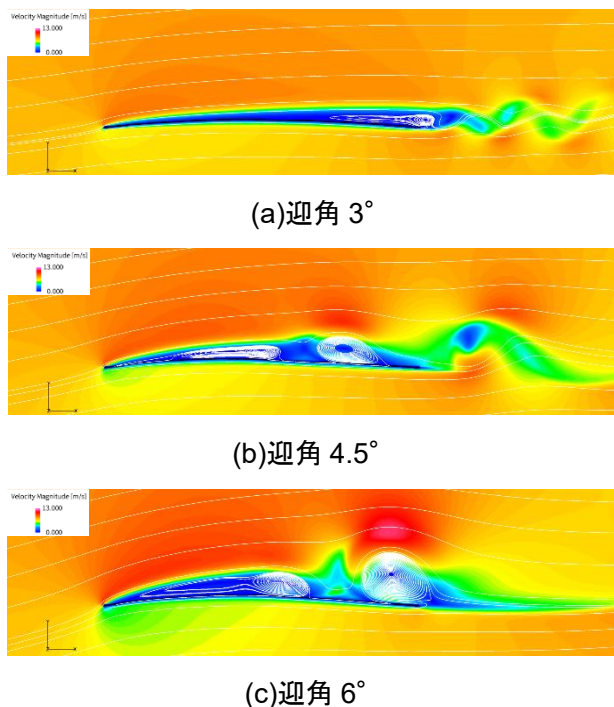


図 4 柔軟膜翼周辺の瞬時流速分布

柔軟膜翼と同様に低レイノルズ数域の流れ場においては新たな翼断面形状の探索が求められており、本研究ではドローンの主翼を模した平板にボルテックスジェネレータを模した半球状の突起を設置することで、流れ場および空力性能に生じる変化を調査した。ボルテックスジェネレータは様々な形状について研究されてきており、低レイノルズ数流れにおいても物体に突起を設置することで境界層内の運動量を増加させ、流れを附着させることで空力特性を改善する可能性がある。参加者が前年度に実施した二次元解析では、平板上面に半円状の突起を設置することで剥離泡に似た挙動を示す剥離渦が生じ、上面の負圧が増加することで下面との圧力差が拡大し揚力が増加すること、また迎角に応じて最大揚力を得られる突起の設置位置および設置数が異なることが明らかとなった。しかし同解析は二次元領域に限られていたことから、本年度は三次元的な突起形状と平板翼型の空力性能との関係を調査した。

計算条件としてはレイノルズ数 $Re = 1.0 \times 10^4$ 、迎角 $0^\circ \sim 6^\circ$ の条件下で、翼弦長 $c = 0.1$ m、厚み $1.2\% c$ の平板薄翼を基準とし、半径 $r = 2.5\% c$ の

半球突起について設置位置と配置数を比較した。格子幅は 5.0×10^{-4} m, 境界層内の格子点数はブラジウス解に基づき 9 点とし, 総格子点数は約 1 億点である。

図 5 に上面の平均圧力係数分布を示した。三次元解析においても二次元解析と同様に, 突起の設置による剥離渦の生成と上下面の圧力差の拡大による揚力上昇効果が確認された。一方で, 三次元では剥離渦により抗力の増加も生じることが確認された。また, 低迎角と高迎角で突起周りの流れ場が異なることも確認された。低迎角では流れが突起の周辺で直接干渉するが, 高迎角では前縁から発達する剥離泡の中に突起が埋もれ, 流れ場と空力性能への影響が小さいことがわかった。特に, 4.5° 以上の高迎角では平板の中央付近の左右両側に強い負圧領域が存在し, その前方かつ付近に突起を設置することでその負圧領域が弱まり, 揚力が減少すると判明した。また, スパン方向の突起の設置数による差は顕著に見られず, それよりも剥離渦をより後方まで伸ばすため, 翼弦方向の突起の設置数が重要であるとわかった。

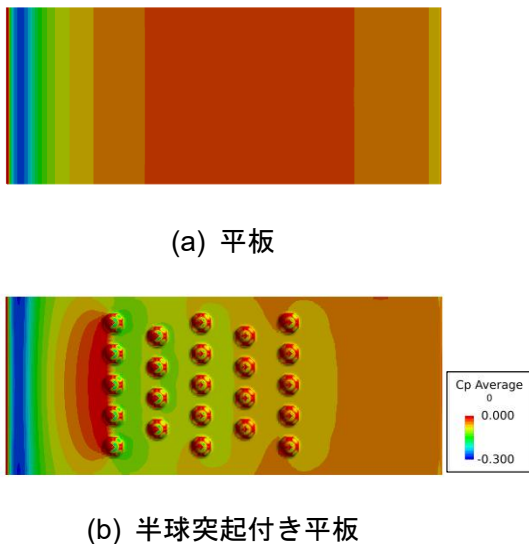


図 5 迎角 0° における上面の平均圧力係数分布

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

申請時に設定した計画に対する進捗状況は良好であり, 計画していた 4 件の応用解析 (ジャーナル軸受, トラクションドライブ, 柔軟膜翼, 突起付き平板) をすべて実施した。計算資源について

は, AOBA-S/AOBA-A システムに割り当てられた本年度分を 100%消費した。手法についても計画していた AMR 法の導入と既存の埋め込み境界法との融合を実現し, ジャーナル軸受およびトラクションドライブの 2 テーマに適用して大規模解析を実施することができた。また柔軟膜翼については流体構造連成解析手法を構築してエラストマ一翼の性能予測を行い, 突起付き平板では三次元非定常解析により突起の空力効果を明らかにした。

2026 年度は AMR 法に対する高速化技術および非定常流体解析手法の両面から取り組みを進める。AMR 法に対する高速化技術に関しては, 基礎的な気泡挙動問題による妥当性検証に加え, 大規模解析における高速化と並列化性能の評価を行う。またブロック型 AMR ソルバの GPU 向け実装に向けた基礎検討として, 等間隔直交格子ソルバの実装を先行してその解析速度と実装法を明らかにし, AMR ソルバへの展開方針を検討する。

工学問題に対する非定常流体解析手法に関しては, 柔軟膜翼について流体構造連成解析手法の妥当性の検証を進め, 実験では取得困難な抗力係数や物体近傍の流れ場を明らかにして学会発表および論文の投稿を行うとともに, AMR 法を薄い物体に対応できるよう拡張して火星環境を模した条件での境界層を解像できる解析の実現を目指す。また突起付き翼については, レベルセット関数で表現される突起を翼型形状に設置して三次元翼における空力効果を明らかにし, 迎角や突起形状の変化による性能向上策を検討する。

本研究を通して, 狭隙や薄物体を含む複雑境界流れに対する解析基盤の高度化と工学応用を引き続き進め, 機械設計に資する知見の創出と大規模計算科学の機械工学分野への展開に貢献していく。