

jh240076

直交格子法を用いた複雑な境界を含む大規模流体解析および工学応用

川本裕樹（東海大学）

本研究ではレベルセット法と埋め込み境界法を用いた直交格子法による固気液混相流解析手法の開発と工学応用を目指している。近年では物体形状や自由表面を持つ複雑な境界を含む流れの把握が重要性を増している。これに対し、共同研究拠点の大規模計算資源を活用した解析手法の構築と、機械要素や航空宇宙分野への応用に着目した解析を実施した。マイクロバブルの混入によるジャーナル軸受の摩擦低減に関しては給油溝内における多数の気泡の挙動について確認した。相変化を伴う解析では気泡成長や上昇の検証を実施し、理論解および先行研究との良好な一致を得た。また格子幅よりも薄い柔軟膜翼の定義手法と流体構造連成解析を開発し、変形による剥離領域の移動や揚力の向上を明らかにした。さらに平板上への半円状の突起の配置による空力性能向上効果も確認した。今後は適合格子細分化（AMR）法を導入し計算効率を向上させる予定である。

1. 共同研究に関する情報

船田光星（大阪公立大）

(1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

→ プログラム開発・応用

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（東北大学 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：

平井克樹（東海大）、

山崎佑人（東海大）、

大崎歩乃花（大阪公立大）、

2. 研究の目的と意義

加工技術の向上などにより従来は困難であった複雑形状を有する機械や部品の製造が可能となってきた。流体力学の観点からも、物体が幾何学的に不規則な形状を持つ場合や気体と液体などの自由表面を有する場合など、複雑な境界を含む流れの現象把握が機械性能評価において重要性を増している。これに対して数値流体力学（CFD）による解析が現象予測の有効な手段となるが、格子を用いた CFD では物体に沿って格子を配置する場合は形状を明確に表現できるものの、境界移動時に再生成が必要となる課題がある。これに対し直交格子法は空間の直交座標上に自動的に格子を定義するため生成が容易である一方、各セルの定義点と物体境界の位置が異なる場合が生じるため物体境界の取り扱いに課題を有する。

近年では固定した格子上において、各セルから

境界までの距離関数を用いるレベルセット法や、任意の境界条件を周囲のセルの情報などから定義する埋め込み境界法が注目されている。本研究の参加者らはこれらの手法を用いて、任意の物体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。

本課題では直交格子法に基づく解析手法と高性能計算機を最大限に活用するアルゴリズムを構築し、工学問題に対する大規模数値シミュレーションの応用に繋げることを目的とする。また主な応用例として、軸受などの機械要素や航空宇宙分野を想定している。機械要素については自動車などで用いられるジャーナル軸受の狭い隙間に存在する油膜の解析が挙げられる。現在、軸受隙間内のオイルに対してマイクロバブルを混入することで摩擦を低減する研究が進められており、本研究ではオイルを隙間内に供給するための溝形状に着目する。また相変化を考慮した自励振動ヒートパイプ内部の熱輸送の予測に向けたソルバの構築と検証を実施する。

上述した解析手法は移動物体や変形を伴う流れ場に有用であり、火星探査機や小型飛行機用の翼の性能予測にも着手している。火星での飛行に際しては柔軟な膜翼の有用性が示唆されているが、その影響因子はまだ明らかにされておらず、解析での予測が有効である。また平板翼の上面に突起を取り付け、その空力効果の検証を実施する。

本研究を通して複雑な境界を有する流体挙動を理解するための解析手法を工学の実問題に適用することで、上記の応用先をはじめとした機械設計に向けた研究開発に貢献することを目指す。解析ソルバはMPIによる並列処理を実装しており大規模なベクトル型計算機システムへの適用性も有している。研究拠点のシステムの性能を最大限に活用し非定常流体解析手法の確立することで、機械系の分野における大規模解析の導入の推進にも寄与することが期待される。

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。使用するソルバは物体境界と気液界面の両方にレベルセット法が適用され、移動や変形を伴う物体の定義を容易にする手法を構築している。気液界面には不連続な物理量を考慮するシャープ界面モデルを用い、微細な境界形状を含む流れの予測を可能としている。

またMPIによる並列処理により大規模なベクトル型計算機システムへの適用性も有している。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システムの性能を最大限に活用することで、一般的な計算機では実施困難な高解像度な解析が実施可能となる。同センターのシステムはベクトル処理に最適化されたアーキテクチャを備えており、本研究への高い適用性を有している。また以前より本課題参加研究者らは同センターとの共同研究も実施しており、同システムへの解析コードの最適化も進めてきた。

特に柔軟膜翼の研究においては、埋め込み境界法を応用し格子幅よりも薄い物体の定義を可能とした。また多粒子系モデルを導入して膜の変形を考慮した流体構造連成解析手法を開発した。この解析手法の開発過程では、東北大学サイバーサイエンスセンターの滝沢教授による専門的な支援を受け、構造解析部分の高速化を図っている。このような計算科学の専門家との連携は、機械工学分野の問題解決に計算科学の知見を活かす学際的アプローチとして重要な意義を有する。

以上より、大規模計算資源を活用した解析により詳細な現象把握が可能となり、得られた知見は学術的価値と産業界への応用の両面で意義が大きいと考える。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要
新規課題のため該当なし

5. 今年度の研究成果の詳細

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大規模計算システムを用いて、下記の機

械要素および航空宇宙分野への応用を想定した解析を実施した。

ジャーナル軸受の油膜挙動の検討に関しては、カーボンニュートラル実現に向けた自動車エンジンの摩擦損失の低減を目指している。自動車のエネルギー損失の約二割はエンジンでの摩擦損失が占めており、軸受の摩擦低減も重要な課題である。本研究の最終目的は、マイクロバブル（直径数 μm から $100\mu\text{m}$ 程度の気泡）をオイルに混入した場合のジャーナル軸受の摩擦低減率の向上およびそのメカニズム解明である。従来の研究では気泡周辺での周回的な速度分布と摩擦の減少効果が見られ、回転数やボイド率などの影響も確認されている。しかし、軸受隙間内への多数のマイクロバブルの混入に向けた給油溝形状の検討が必要である。

本研究ではレベルセット法を用いた気液二相流解析を実施により、給油溝に着目した解析を実施した。支配方程式として連続の式と非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を用い、気液界面の表面張力は Laplace 圧力の関係式を考慮したジャンプ条件として与えられる。空間の離散化は等間隔直交格子上でを行い、移流項には 5 次精度 WENO 法と TVD Runge-Kutta 法、粘性項には 2 次精度中心差分法と Crank-Nicolson 法を用いた。圧力の Poisson 方程式は BiCGStab 法に基づき計算した。

軸受の給油部に設けられた半円状の給油溝付近で生じる現象の把握を目標とし、回転数の影響を調査するために実施した 1000 rpm, 2000 rpm, 3000 rpm の 3 ケースで比較について述べる。図 1 のそれぞれの下部は円筒状のシャフトの上部の一部を模擬しており、シャフトは時計回りに回転している。解析では左側の微小な隙間から断続的に空気を流入させた場合において半円状の溝内の流れについて確認した。

結果として、回転数に関わらず給油溝内に気泡が流入する傾向が確認され、高回転の場合に溝内の気泡の割合が増加した（図 2）。軸付近ではせん断の影響が大きく気泡が延伸し高速に移動する傾向が見られた。また気泡の大きさや分布は回転数

により差異が見られた。回転数の増加に伴い給油溝に沿う流れの速度が増加し、渦の中心が移動する傾向となった。高回転の場合には低回転に比べ多数の気泡が発生する一方、それらが渦の中心で合する傾向が確認された。

東海大学での実験との比較では、溝内での渦の発生位置や、その渦に気泡が集まり合する傾向が定性的に一致している。しかし実際には奥行方向へオイルや気泡が排出されると考えられ、三次元的な形状の影響については引き続き検討が必要である。

今後は給油溝形状を変更した解析および定量的な比較を実施する予定である。隙間内への気泡の供給を促進させる形状を模索することで、摩擦損失低減への寄与を目指す。

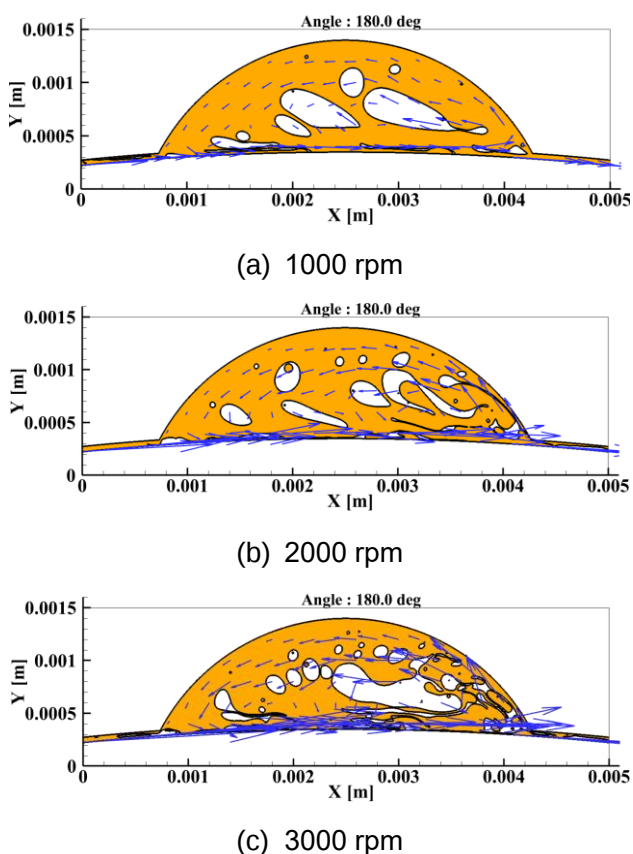


図 1 給油溝周辺における気液界面および速度ベクトルの可視化

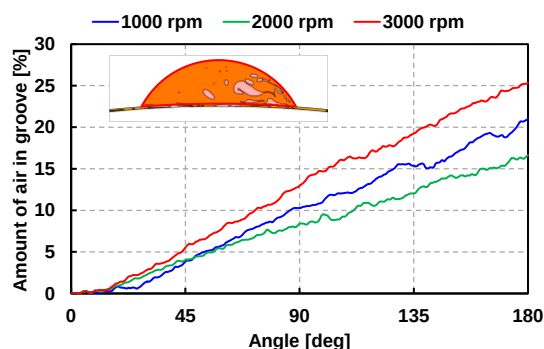


図 2 給油溝内の気泡の割合

次にヒートパイプ内部の流れへの応用に関して述べる。本研究では液相から相変化を経て気液二相流に至る過程とその後の流れと熱輸送メカニズムの挙動解明を目的としている。対象とする自励振動ヒートパイプは金属管の内部に作動流体を封入し、その作動流体の蒸発と凝縮による相変化を伴った流れを利用することで効率よく熱を輸送するデバイスである。内部流動の把握及び予測には CFD が有効であるが、相変化を伴う解析は容易ではなく、気液界面近傍で生じる現象のモデル化と検証が重要である。

本研究では上述した解析と同様に、等間隔直交格子とレベルセット法を用いた解析手法を採用した。流体の支配方程式は連続の式と非圧縮性 Navier-Stokes 方程式に基づき、気液界面はレベルセット法により定義した。表面張力には NS 方程式の体積力項として考慮する CSF モデルを適用した。温度場の計算にはエネルギー方程式を用い、気液界面を飽和温度とするため界面近傍のみ不等間隔差分法を用いた二次精度中心差分法で離散化を行っている。相変化量は界面を通過する質量流量束についてセル内の界面の面積を用いて計算している。

本研究では自励振動ヒートパイプの作動原理である相変化の基礎検証を実施した。まず二次元における気泡成長解析を行い、過熱状態にある静止液体中の気泡成長を調査した。結果として、表面張力モデルによる疑似速度の影響で過熱度分布が一部不均一に変形するものの、気泡半径の時間変化は理論解と良好な一致を示した。また、格子幅

を細かくすることで過熱度分布の変形が改善される傾向も確認された。気泡半径の時間変化も理論解と比較し、格子幅が Coarse, Medium, Fine でそれぞれ最大 8%, 5%, 3%の相対誤差となり、格子を細かくすることで解が収束傾向にあることが確認された。

三次元での重力下における過熱状態の液相流れ内の上昇気泡解析を実施した。気泡の上昇に伴い下部に伸びる過熱度分布が現れ、球形から楕円状に変化することが確認された（図 3）。格子解像度を細かくすることで先行研究と近い傾向を示し、気泡の上昇速度や正規化した気泡半径でも良好な一致が見られた（図 4）。粗い格子幅での乖離は、界面厚さによる界面近傍の物理量の勾配の違いが影響していると考えられる。

これらの解析結果から、相変化を伴う気液二相流の再現が確認され、今後はより実際のヒートパイプに近い条件での円管内の流れと熱輸送メカニズムの解明を進める予定である。これにより高効率な熱輸送を実現するヒートパイプの設計指針の確立を目指す。

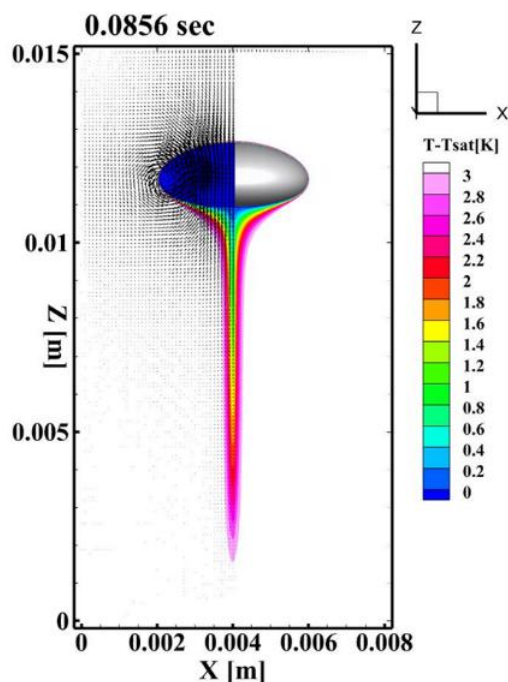


図 3 過熱度分布の可視化（Fine）

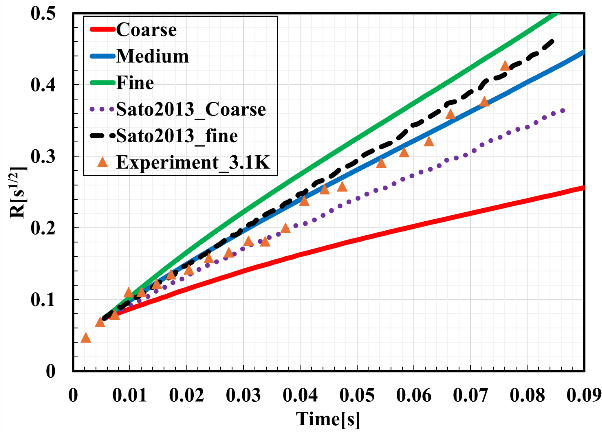


図 4 正規化された気泡半径の時間変化

さらに、埋め込み境界法の利点を活かし任意形状を有する厚みの小さな翼周りの解析を実施した。

火星探査を想定した航空機に対して柔軟膜翼の有用性が示唆されているが、火星の大気密度は地球の $1/100$ と希薄であるため揚力を生み出すことが困難である。また、探査機の火星への輸送のために翼の小型化も課題である。そこで本研究では、計算空間において厚みがないことに相当する物体を解析できる流体構造連成解析手法を構築し、低 Reynolds 数環境下における柔軟膜翼の性能予測を行った。

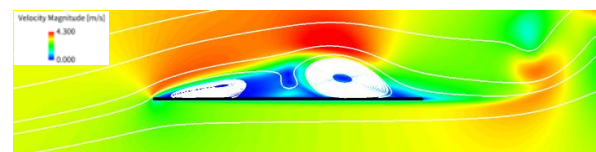
流体解析には埋め込み境界法を用いた等間隔直交格子を採用し、支配方程式である連続の式と二次元非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を完全等間隔直交格子上で離散化している。物体境界は物体壁面からの距離関数を用いた埋め込み境界法で定義しており、物体周りのセルを流体セル、ゴーストセル等に分類している。従来の埋め込み境界法では厚みのある物体を対象としていたが、本研究では非常に薄い膜翼を扱うため、物体の両側に流体が存在する状況に対応する必要がある。そこで、ゴーストセルを境界の外側近傍に配置し、境界から垂直に伸ばしたイメージポイントの値と境界条件から内挿して値を決定する手法を採用した。これにより格子幅よりも薄い物体でも正確に境界条件を適用が可能となり、極限的には厚みゼロの膜状物体の解析を可能にしている。

構造解析には多粒子系モデルを導入し、翼の両

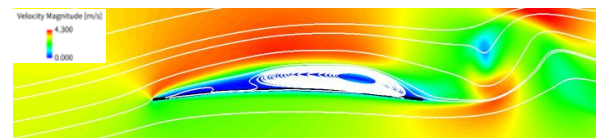
端に固定された粒子間に移動可能な粒子を配置して膜の変形を考慮している。また東北大学サイバーサイエンスセンターの滝沢教授の支援により構造解析部分の高速化を図った。

解析では、剛体平板翼 1 種類と弾性係数の異なる柔軟膜翼 2 種類を対象とし、Reynolds 数 1.0×10^4 、迎角 3° 、 4.5° 、 6° の条件で比較を行った。結果として、すべての迎角において最も柔らかい膜翼が最高の揚力係数を示した。流れ場の観察から、剛体翼と中間弾性の膜翼では前縁から中央にかけて剥離領域が広がり、剥離泡が生成されてスケールの大きな渦が放出される一方、柔軟性の高い膜翼では剥離領域が後縁に移動し、比較的小さな渦が放出されることが確認された（図 5）。

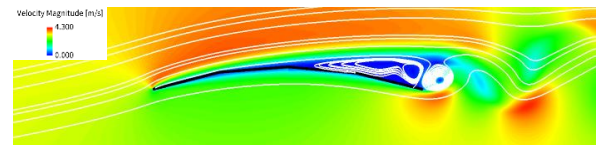
膜の変形については、まず前縁近くの部分が高い圧力により上部に変形することで前縁剥離を抑制し、続いて翼中央部が大きく上昇することでキャンバを増大させる挙動が観察された（図 6）。これにより、柔軟膜翼の変形により剥離領域が前縁から後縁に移動することが確認され、また膜翼の弾性係数が流れの再付着に影響を与えることが明らかとなった。以上の結果から、変形しやすい膜翼は前縁剥離の抑制と翼中央の変形によるキャンバの増大により、剛体平板翼に比べて空力性能が向上することが示された。



(a) 剛体平板翼



(b) 弾性係数 1.0MPa の柔軟膜翼



(c) 弾性係数 0.1MPa の柔軟膜翼

図 5 翼周辺の流速と流線の可視化

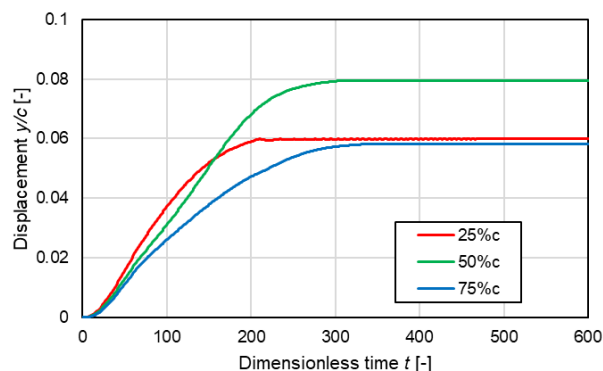


図 6 柔軟膜翼の変形量の時間変化

また平板翼の上面に半円形の突起を取り付け、その空力性能に対する効果を調査した。解析対象は翼弦長 $c=0.1\text{ m}$ で厚みが翼弦長の 1.2 % の平板とし、レベルセット関数を用いて二次元および三次元空間で定義した。突起は半径が翼弦長の 2.5 % または 1.75 % の半円形状とし、設置位置を前縁から 10 % c 、25 % c 、50 % c の 3 箇所に变化させた計 6 種類の単一突起平板を定義した。また 2 つの突起を追加した複数の突起を有する平板も解析対象とした。三次元モデルでは半円の突起がスパン方向に翼端まで伸びた半円柱状の突起を設定した。

解析には等間隔直交格子と埋め込み境界法を用いた非圧縮流体解析ソルバを使用し、Reynolds 数 1.0×10^4 の条件で角度 0° 、 3° 、 6° など複数の迎角での非定常解析を実施した。

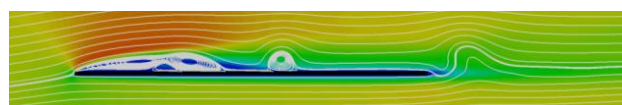
解析の結果、平板上面に突起を配置することで剥離渦が発生し、上下面の圧力差が増加して揚力が向上することが確認された。特に突起の位置による影響が顕著であり、迎角 3° では前縁から 25 % c 位置での突起配置が最も効果的であった。また既に存在する剥離泡内に突起を設置することで剥離泡の高さが低減し、抗力の減少も確認された。突起のサイズについては、半径が大きい場合に強い剥離渦を形成し、空力性能向上への寄与が大きいことが分かった。

複数の突起を配置した場合においては突起間に微細な剥離渦が生成され、上面の前縁から発達する剥離泡の再付着点がより後方に延長されることが明らかとなった（図 7）。この効果は、上面前縁

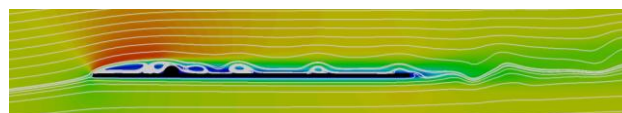
から剥離泡が形成される迎角 3° や 6° では特に有効であった（図 8）。

本研究により得られた知見は、火星のような低 Reynolds 数環境で運用される探査機の翼設計に有用である。特に、飛行条件に応じて最適な突起配置を選択することで、限られた大気密度の中でも効率的な揚力生成が可能となる。

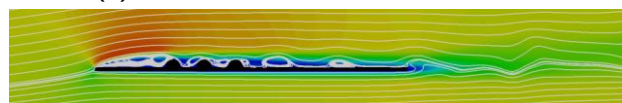
今後の研究では、特に大きな剥離が生じる高迎角の条件においてより高解像度な三次元解析を実施し、スパン方向の流れの影響も含めた総合的な評価を行う予定である。



(a) 元の平板 (Plane)



(b) 単一突起付き平板 (Case L25)



(c) 複数突起付き平板 (Case L25_3)

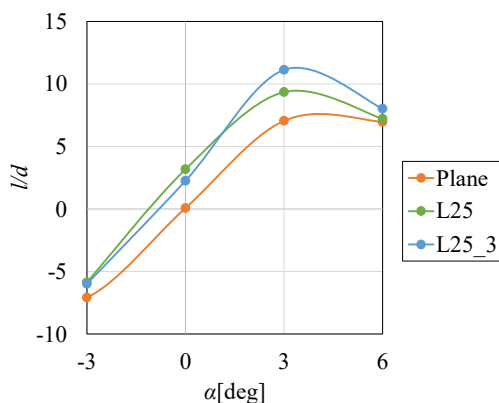
図 7 各形状の流線の可視化（迎角 3° ）

図 8 各形状の揚抗比

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る。マイクロバブルの混入による摩擦低減に関してはレベルセット法とゴーストフルード法、埋め込み境界法による気液二相流解析を実施し、

給油溝付近の現象把握を実施した。特に回転数による気泡の挙動変化や渦の形成について詳細な知見が得られている。また当初の研究計画には含まれていないが、上記の手法を更に高度化した相変化を伴う熱輸送に関するテーマを追加し、基礎的な検証を実施した。気泡の成長と上昇に関する解析で先行研究と近い傾向が確認され、今後の応用研究の基盤を構築した。柔軟膜翼の空力性能に関する検討では、埋め込み境界法を用いた薄い物体の定義手法と多粒子系モデルによる流体構造連成解析手法を開発し、変形による剥離現象の変化を明らかにした。また平板上の突起効果についても、剥離渦の作用による空力性能の向上を確認している。

これまで使用してきた解析ソルバは解像度が必要な領域の格子幅で領域全体を分割する必要があり、計算資源の効率的な活用には改善の余地があった。申請時に計画の一部として含めたピストン周辺の流体や軸受の表面テクスチャについては物体近傍や気液界面での高精度な解析が必要となったことから、本年度は新規の計算手法の構築に重点を置いた。具体的には、必要な箇所のみ格子を細分化する適合格子細分化（Adaptive Mesh Refinement: AMR）法の導入を本課題と並行して進めてきた。計算領域を階層的なブロックで分割し、並列計算時の負荷分散を考慮した実装を行った。埋め込み境界法、シャープ界面モデルと AMR 法の三者を組み合わせた例は少なく、これらを融合した手法の確立は効率的な解析ツールの実現に大きく貢献すると考えられる。

2025 年度は AMR を用いた解析手法に関して、主に本年度実施した応用先への適用を進める。また新規の応用先としてトラクションドライブの接触部周辺のオイル挙動の予測に取り組む。自動車の電動化に伴うモータの高速化に対応する減速機として注目されるトラクションドライブにおいて、高速条件下での油膜の挙動や冷却特性に関する検討を実施予定である。これらの応用先は全て物体近傍や気液界面での現象理解が重要となるため、AMR 法の導入により大幅な計算効率の向上が期

待できる。

以上の内容に基づき、引き続き複雑な境界を有する流体挙動を理解するための解析手法の工学応用を進め、機械設計に向けた研究開発への更なる貢献を目指す。