

1C07 空飛ぶクルマ・eVTOL のフリーフライト・シミュレーション

○青木尊之（東京科学大学），渡辺勢也（九州大学），インイクイ（東京科学大学）

Free-flight Simulation of Air Taxi・eVTOL

Takayuki Aoki (Science Tokyo), Seiya Watanabe (Kyushu University), Yuwei Yin (Science Tokyo)

Key Words : Actuator Line model, Cumulant LBM, AMR

Abstract

A free-flight simulator for air taxi (eVTOL) has been developed by applying the actuator-line model for rotors to avoid assigning high-resolution mesh to the rotors with high-speed rotation. The code is based on the cumulant Lattice Boltzmann Method with implicit LES eddy viscosity. We successfully stabilize the flight with the PID feedback control and make it possible to simulate stable flights such as take-off, hovering, horizontal flight and safe landing. We also study several scenarios of abnormal flights for sudden rotor stops, strong downburst, too near approach of two air taxis and so on.

1. はじめに

次世代のモビリティとして期待されている「空飛ぶクルマ」と称されるマルチコプターは、2025年の大阪万博で定期運航が見送られるなど、安全性が疑問視されていることは明かである。大型のドローンのような航空機であるが、無人の場合とは全く異なり、けた違いの航行安全性が求められる。複数の「空飛ぶクルマ」が（特に上下に）接近・衝突してしまったとき、ローターの一つが停止するなどの異常な回転をしたとき、予期せぬ突風にあおられたときなど、どうやって姿勢を立て直し安全な航行を維持するかなどの制御法の確立や、より安全な「空飛ぶクルマ」の設計・開発など、実機による実験は余りにコストと



図1 「空飛ぶクルマ」の将来イメージ

時間が掛かり過ぎる。そこで、コンピュータの仮想空間の中に「空飛ぶクルマ」を設置し、さまざまな状況下でローター・ブレードに（時間的に変化する）回転数だけを与え、仮想の「空飛ぶクルマ」がどのように航行するのかを予測する（実験に置き換わる）フリー

フライト・シミュレーションを実現することが本研究の目的である。

これまでもヘリコプターやドローンのシミュレーションは数多く行われているが、その全てがローター・ブレードのシミュレーションであり、機体の航行までをNavier-Stokes方程式を解いてシミュレーションするものは（課題代表者が調べた限り）存在しない。ブレードが高速で回転するためにレイノルズ数が高く、ブレードにかかる力を計算するには非常に薄い境界層を解像する高解像度格子をy+に配置する必要があり、この計算コストが膨大であるためにブレードが30回転する程度までの時間しか計算できない。しかし、機体の航行をシミュレーションするにはブレードが1000回転する程度の時間を計算する必要がある。そこで本研究は翼素運動量理論に基づいたアクチュエータライン・モデル（ALM: Actuator Line Model）をブレードに適用することで画期的な計算時間の短縮を実現し、長時間シミュレーションを行うことにより飛行安全性を評価することを目的とする。

2. 計算手法

2. 1. 空力計算

高レイノルズ数の乱流に対し、高性能な陰的LES渦粘性により高精度かつ安定な空力解析を行うことができる Cumulant型格子ボルツマン法（LBM）を用いる。境界層の剥離や再付着を精度よく計算できるため、ドラッグ・クライシスも精度よく再現することができている。

「空飛ぶクルマ」同士の（上下）接近や衝突、建

物への接近、離陸・着陸などのさまざまな飛行のシミュレーションに対し、移動格子や重合格子は制限が多過ぎるため、適用できない。数100メートル・サイズの静止した計算空間を用意し、その中で図2のように8分木データ構造に基づいたAMR (Adaptive Mesh Refinement) 法により「空飛ぶクルマ」の近傍に高解像度格子を動的に割当て、細分化と粗大化を「空飛ぶクルマ」とともに移動させる。

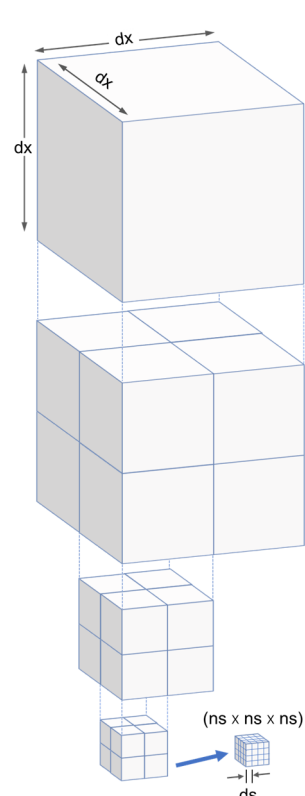


図2 Octree AMR法の実装

図3に「空飛ぶクルマ」のAirbusモデルの形状データ (CADデータ) を示す。STLデータからレベルセット関数を作成し、Interpolated Bounce Back法により移動する複雑形状の境界条件をLBMの流体計算に課す。一方、境界でBounce Backする速度分布関数を用いて「空飛ぶクルマ」にかかる力を求める。

GPUスパコンを用いるため、複数GPUを前提としたコードの実装を進めている。各GPUはシミュレーション内にメモリプールを持ち、AMR格子の細分化と粗大化に伴う頻繁なGPUメモリの確保と解放を避ける。また、空間充填曲線 (モートン曲線) を用いた動的負荷分散、GPU間の通信と計算のオーバーラップなどを実装している。

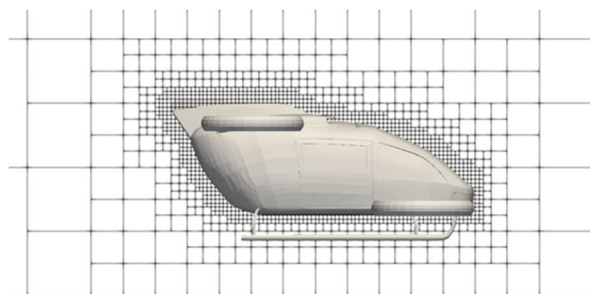


図3 「空飛ぶクルマ」のAirbusモデルとAMR格子

2. 2. アクチュエータライン・モデル (ALM)

ローターではブレードが高速回転するために流れ

のレイノルズ数が高く、従来の方法でブレードにかかる力を計算するには、非常に薄い境界層まで解像する格子を用いたLES計算、壁関数法、DES計算のどれかが必要となる。いずれにしてもブレード近傍では非常に高解像度の格子を用いた計算が必要となり、この計算負荷が膨大であるためにブレードが30回転する程度の時間までしか計算できない。そこで、「空飛ぶクルマ」のローター部に、翼素運動量理論に基づいたアクチュエータライン・モデルを用いる。

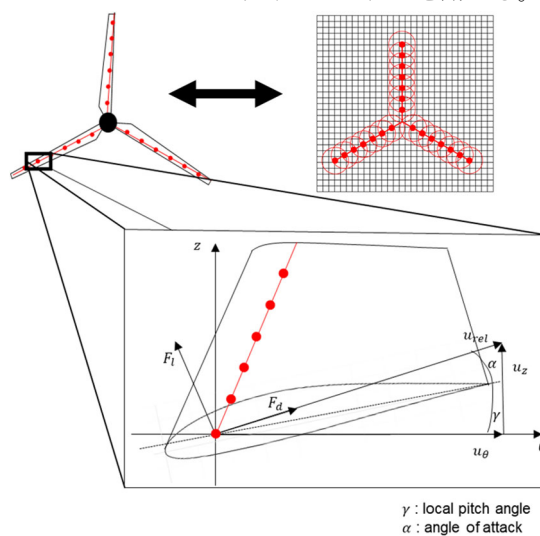


図4 アクチュエータライン・モデル

既にデータベース化されている翼断面に対する揚力・抗力の空力特性を用い、図4のようにブレードにマーカー点を設置し、その点に翼素理論に基づいて空気から受ける力をブレードに与える。一方でその反作用による力をガウシアン・フィルタにより分散して流体に与える。アクチュエータライン・モデルをローター・ブレードに適用し、実験と詳細なCFD (壁面からの無次元距離 y^+ に十分格子を集めた計算) との比較を行い、Single rotor だけでなく Co-axial rotor (図5および図6) についても実験および詳細なCFD と非常に良い一致が得られた。

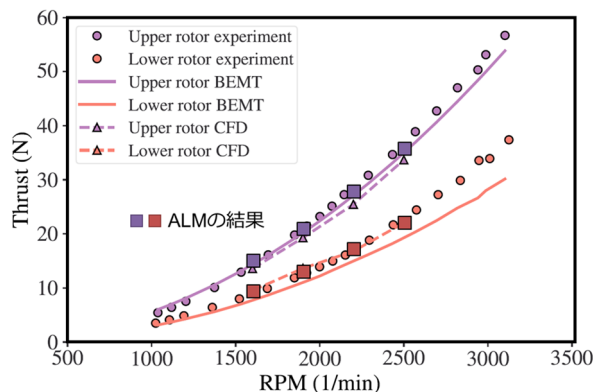


図5 アクチュエータライン・モデルによるCo-axial rotor の推力

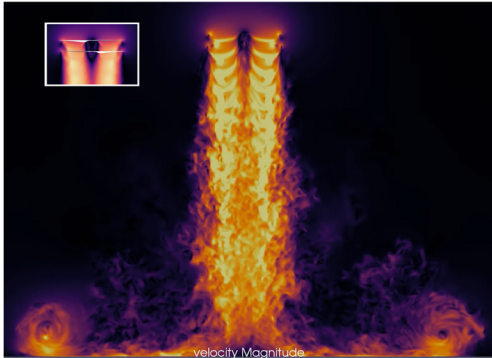


図6 2500 rpm のときのCoaxial Twin Rotorから放出される流れの断面

2. 3. AirbusモデルへのALMの適用

ローター部に推力と釣り合う／少し重い／少し軽い質量を設定し、ローター部だけの自由上昇および下降の検証を行い、問題ないことを確認した。その後、図-3に示すAirbusの「空飛ぶクルマ」の形状モデルのローター部にALMを取り付け、ローターが受ける推力、周囲の空気から受ける空力、重力に対して機体の運動方程式を解き、機体の運動とそれによる周囲の流れの相互作用を計算した。

機体に鉛直上下移動のみの自由度を与え、ローターの回転数を指定したときに「空飛ぶクルマ」の自由な上昇・ホバリング・下降ができることを確認した。また、鉛直方向、水平1軸方向とそれらに垂直な軸周りの自由度を与え、「空飛ぶクルマ」の前後のローターを逆回転させることによる360度のピッチ回転、左右のローターを逆回転させることによる360度のロール回転ができることを確認した。

2. 4. ローター回転数制御

マルチローターによる飛行は基本的に不安定であり、ローターに重力と釣り合う推力を発生する回転数だけを与え、6自由度のシミュレーションを実行すると、図7のようにホバリング中の「空飛ぶクルマ」が姿勢を崩し墜落してしまう。実際のドローンと同じように、図8に示すPIDフィードバック制御をシミュレータの中に組み込んで計算する。



図7 墜落

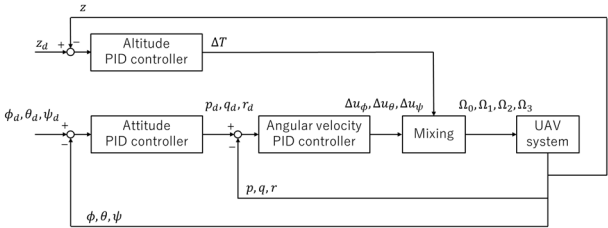


図8 PIDフィードバック制御

3. 空飛ぶクルマのフリーフライト・シミュレーション

Airbusモデルの「空飛ぶクルマ」に対し、4基のCoaxialローターの上下合わせて8個のローターに対し、回転数のPID制御だけで飛行するフリーフライトのシミュレーションを行った。図9は地面から離陸して



図9 離陸とホバリングのシミュレーション

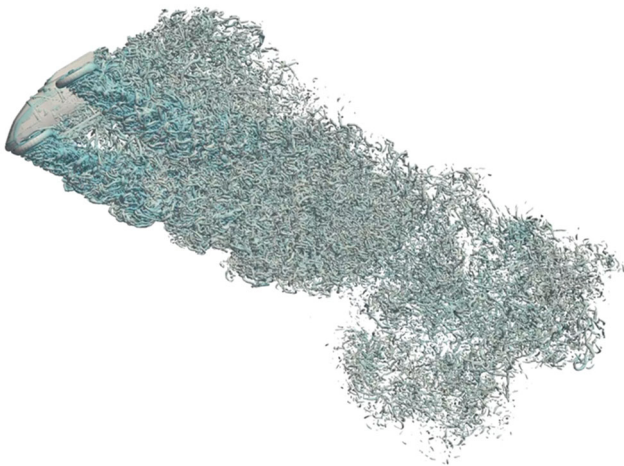


図10 水平飛行するシミュレーション

10mの高度でホバリングするシナリオのシミュレーションである。

「空飛ぶクルマ」の高度と水平速度を指定すると、図10のように自動的に機首を下げた水平飛行がシミュレーションの中で確認できた。

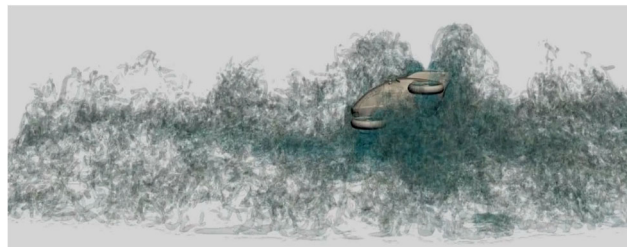


図11 安全に着陸するシミュレーション

急激に降下するとヘリコプターでも最も危険な制御不能状態と言われる「Vortex Ring State」の発生を回避しながら、対地速度、高度をセンサー情報として使い、速度を落としながら安全に着地するシミュレーションが図11のように可能になった。また、「空飛ぶクルマ」がパーティポートなどから離陸する際のダウンウォッシュを図12に示す。激しく乱れた流れが水平に広がるのが分かる。

4. 異常飛行シミュレーション

機体の故障や異常気象など、通常と異なる状況での飛行をシミュレーションにより調べる。

- 水平飛行している最中に、4基のCo-axialローターの合計8個のローターのうち、1基が突然停止したシナリオでシミュレーションを行った。停止した直後は僅かに姿勢を崩すが、残りの7基のローターに対する制御で水平飛行を維持することが分かった。
- 8基のローターのうち、同じ軸の2基が突然停止した場合は、バランスを崩し回転しながら落下する結果となった。故障の事象が発生してから、PID制御のパラメータを変更することにより落下を回避できるかもしれない。
- 8基のローターのうち、異なる軸の2基が突然停止した場合は、ほぼ高度を維持しながら想定とは異なる方向に水平にドリフトする結果が得られた。これも、PID制御のパラメータを変更することにより正常な航行を維持できる可能性がある。
- ダウンバーストなどの突風にあおられた際、気流変化の勾配に依存するが、急激な突風に対しては風に流され、通常飛行が不可能である結果となった。
- 2機の「空飛ぶクルマ」が上下ですれ違うシナリオでシミュレーションを行ったところ、下の「空飛

ぶクルマ」が大きな影響を受けると予想していたが、影響を受ける時間が短時間であるため、機体が大きくバランスを崩すようなことはなかった。

5. おわりに

「空飛ぶクルマ」の高速で回転するローター周りの空力を直接計算せず、アクチュエータライン・モデルを適用し、計算効率を革新的に向上させ、フリーフライト・シミュレーションを可能にした。ローター部以外の空力計算は、高性能な陰的 LES モデルを含んだキュムラント衝突項の格子ボルツマン法にAMR法を導入し、広大な計算空間の中を自由に飛行できるようにした。

単にローター部に推力を与え、6自由度の飛行シミュレーションを行うと、飛行が不安定であることが分かり、「空飛ぶクルマ」にもPID制御を導入する必要があることが明らかになった。それにより、離陸、ホバリング、水平飛行、安全な着陸のシナリオに対し、ローターの回転数を与えるだけで安定なフリーフライト・シミュレーションが可能であることを明らかにした。

一部のローターの異常な回転（停止）や突風などの想定外の事象に対してもフリーフライト・シミュレーションを行い、飛行を維持できる場合と墜落に至る場合があることが明らかになった。また、2機の「空飛ぶクルマ」の上下の異常な接近などのシミュレーションも行うことができることを示した。

今後は、「空飛ぶクルマ」が建物などの構造物に衝突した場合や、「空飛ぶクルマ」同士が接触した場合などのシナリオに対して、シミュレーションを行う。さらに、落下している最中に残存する飛行能力でどこまで復活することができるかなどを明らかにする。

謝 辞

本研究は学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点（JHPCN）共同研究課題jh240022「空飛ぶクルマのフリーフライト・シミュレーション」および革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ（HPCI）の一般課題 hp250130「空飛ぶクルマの革新的フリーフライト・シミュレーションー墜落シミュレーション」として進めてきた研究である。また、科学研究費補助金・基盤研究(A) 課題番号25H00714「フリーフライト・シミュレーションによる空飛ぶクルマの墜落阻止の研究」からも支援を頂いている。本研究の計算には、東京科学大学・情報基盤センターのスパコンTSUBAME4.0を利用させて頂いた。記して謝意を記す。

参考文献

- [1] Takayuki Aoki: Innovative Simulation for Multiphase Flows and Fluid-structure Interactions, The 12th International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD 12), Kobe, 15 July 2024 (Plenary Talk)
- [2] 青木尊之：日本流体力学会・流体若手夏の学校 2024（特別講演），湯河原, 2024 年 8 月 21 日
- [3] 青木尊之, 渡辺勢也, インイクイ: 空飛ぶクルマのフリーフライト・シミュレーション, 2024 年日本流体力学会・年会, 仙台, 2024 年 9 月 25 日
- [4] 青木尊之, インイクイ, 渡辺勢也: 空飛ぶクルマのフリーフライト・シミュレータによる墜落シミュレーション, 日本流体力学会・第 38 回数値流体シンポジウム, 東大生研, 2024 年 12 月 13 日

特許 7475103号：シミュレータの開発方法、情報処理システム及びプログラム

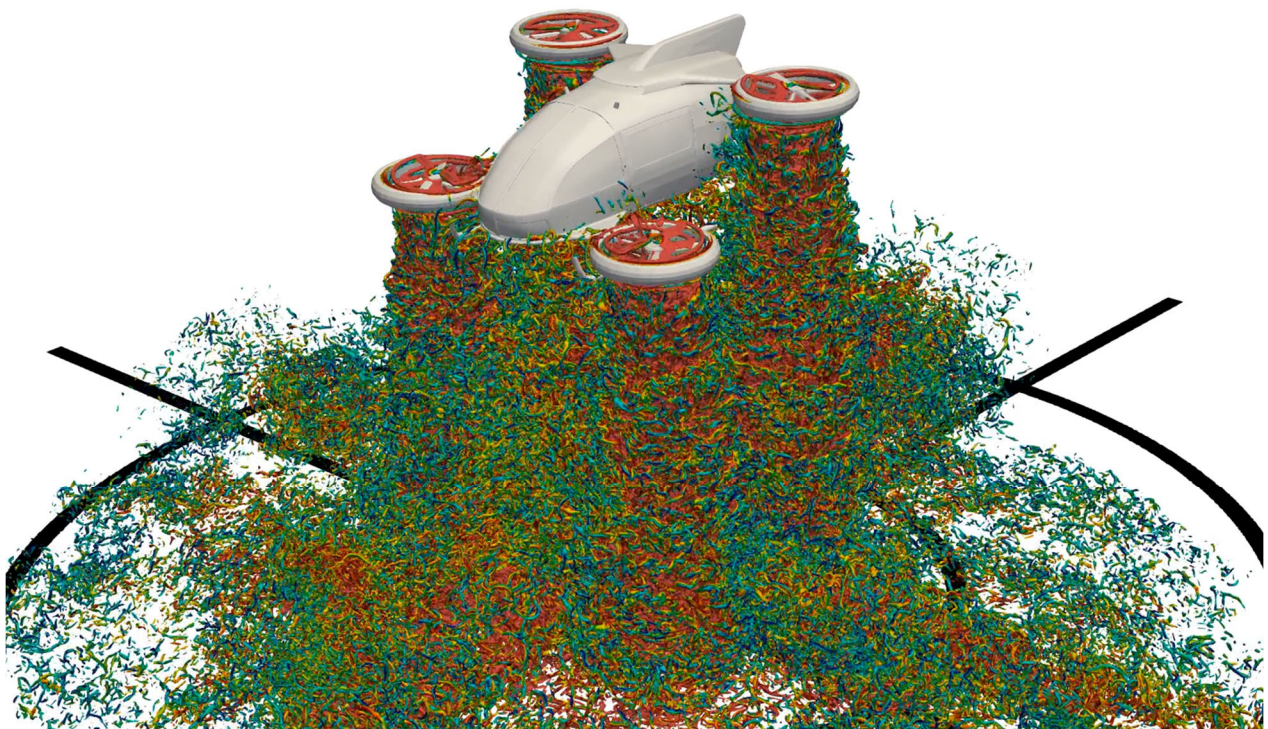


図12 離陸時のダウンウォッシュ