京都工芸繊維大学

氏　　名	たきい　あやと **滝井　郁人**
学位(専攻分野)	博　士（工学）
学位記番号	博甲第 1048 号
学位授与の日付	令和 4 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科　設計工学専攻
学位論文題目	**圧縮性および非圧縮性流れに対するダイナミクスシミュレーションに関する研究**
審査委員	(主査)教授　山川勝史 教授　森西晃嗣 教授　西田秀利

論文内容の要旨

本論文は，流体工学の分野において非常に重要となる移動/変形する物体周りの流れ場の評価つまり移動境界問題に対し，低速流（非圧縮性流れ）から高速流（圧縮性流れ）まで幅広い流れ場における高精度計算手法の構築を目的としている．具体的には形状再現性の高い非構造格子と物理保存および幾何保存を完全に満足させた移動格子法を組み合わせた計算手法が，流れの支配方程式の異なる圧縮性および非圧縮性流れの両者ともに適用可能であることを示し，生じる流体運動とその作用を受ける物体の挙動予測に成功している．圧縮性流れについては複数の回転軸を持ち航空機の中では最も複雑な動きをするティルトローター機を対象としている．一方非圧縮性流れについては現在最も深刻な問題である新型コロナ感染を取り上げている．

第 1 章緒言で研究の位置づけを明らかにした後，第 2 章では流れの支配方程式について記述し，移動格子有限体積法による離散化，移動計算領域法による移動境界問題の取り扱いについて述べている．また第 3 章では，数値計算の取扱いについて述べている．非構造格子における勾配計算法，圧縮性流体における流束評価および高次精度化，非圧縮流体における数値解法，時間進行のための線型方程式の解法について具体的に記述し，任意曲面に適用可能なスライディングメッシュ法を提案するとともに，その妥当性を検証している．

第 4 章では，安全な機体挙動の予測が望まれる一方でその複雑なダイナミクスのため完全な形状による自由な飛行計算はされていないティルトローター機 V-22 オスプレイに対し，圧縮性流れを適用した 6 自由度飛行シミュレーションについて述べている．ローター，エンジンナセル等機体の主要な構成要素全ての計算格子を表現した上で，機体と流体との相互作用を考慮した連成計算により 4 ケースの再現飛行を実施している．初めに，ヘリコプターモードでの離陸とホバリング，そしてヨー旋回による連成計算の実証である．次に，ティルトローター機特有の機能を再現するため，飛行モード変換を含む離陸からの直進飛行の連続計算を示している．続いて，航空機に不可欠な運動への適用として旋回飛行を再現し，流体との相互作用の下，フラッペロン，ラダー，エレベータからなる動翼を操作することで機体姿勢が制御された飛行結果を示している．最後に，実験では再現が困難な事例への適用として推奨降下率を超えた急降下を行い，機体が不安定状態

に陥る流体現象が示されている．これにより飛行時の動翼の操作量，姿勢，発生揚力などの数値データは任意に取得することができ，再現実験としてのデジタルフライトの可能性を示している．第５章では，パンデミックの間でも頻繁に利用される大きな高低差を有する地下鉄のエスカレータ利用を想定し，複数人が乗り合わせた場合の気流およびウイルスを含む咳飛沫の挙動の解析，および感染リスクの定量的評価について述べている．計算格子には，ステップ，手すりを有する詳細なエスカレータモデルを用い，非圧縮性流れの移動境界問題として流れ場を計算すると同時にウイルスを含む咳飛沫の運動方程式を解くことで飛沫の挙動を予測している．計算対象は，乗車人数が 10 人及び 5 人，移動方向はそれぞれ上昇及び下降の合計 4 ケースであり，上昇・下降の移動方向および搭乗間隔の違いにより流れ場が変化し，飛沫挙動が大きく異なることを明らかにしている．具体的には下りの方が安全であり，乗客間の距離を広くとることでより感染リスクを低下できる等，シミュレーションにより新たに得られた多くの知見が示されている．そして第６章結言では結果を総括している．

論文審査の結果の要旨

本論文は支配方程式の異なる２つの流れ場（非圧縮性流れと圧縮性流れ）における複雑な移動境界問題に対し，高精度計算手法の提案と構築を行っている．具体的には形状再現性の高い非構造格子と物理保存および幾何保存を完全に満足させた移動格子法を組み合わせた計算手法であり，実社会の様々な事例への適用により本手法の有用性を示している．圧縮性流れについては複数の回転軸を持ち航空機の中では最も複雑な動きをするティルトローター機を対象としている．この計算技術は今後数十年において 160 兆円もの市場規模が予測されている「空飛ぶクルマ」の機体設計にそのまま転用可能であり，大きな将来性を持っている．一方，非圧縮性流れについては現在最も深刻な問題である新型コロナ感染を取り上げており，スパコン富岳をはじめ世界中で実施されている静的シミュレーション（止まった物体周りの流れ計算）に対し，より現実的な動的シミュレーション（動く人間/物体周りの流れ計算）を実施しており，社会的インパクトが非常に大きなものとなっている．

本論文の基礎となっている学術論文は学術雑誌に掲載された４編であり，全て申請者が筆頭著者である．

1. Ayato Takii, Masashi Yamakawa, Shinichi Asao and Kyohei Tajiri, Six Degrees of Freedom Numerical Simulation of Tilt-Rotor Plane, Lecture Notes in Computer Science, LNCS 11536, pp.506-519 (2019).
2. Ayato Takii, Masashi Yamakawa and Shinichi Asao, Descending Flight Simulation of Tiltrotor Aircraft at Different Descent Rates, Lecture Notes in Computer Science, LNCS 12143, pp.178-190 (2020).
3. Ayato Takii, Masashi Yamakawa, Shinichi Asao and Kyohei Tajiri, Six degrees of freedom flight simulation of tilt-rotor aircraft with nacelle conversion, Journal of Computational

Science 44, 101164 (2020).
4. Ayato Takii, Masashi Yamakawa, Shinichi Asao and Kyohei Tajiri, Turning flight simulation of tilt-rotor plane with fluid-rigid body interaction, Journal of Thermal Science and Technology, Vol. 15, No.2, pp.1-12 (2020).