

氏 名	いそだ よしたか 磯田 佳孝
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	博 甲 第 1 1 1 7 号
学位授与の日付	令和 6 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	周期流中における 2 次元ピッチング翼の推進特性に関する研究
審 査 委 員	(主査)准教授 田中 洋介 教授 山川 勝史 教授 村田 滋

論文内容の要旨

港湾施設における水中構造物の点検を省人化・効率化するには、高い推進効率と機動力を備えた魚型ロボットの導入が有効である。しかし、導入に伴う問題として、港湾内周期流が魚型ロボットの制御を複雑化すること、そして周期流への適応を可能にする制御設計を支援するための理論が提案されていないことが挙げられる。このような状況を踏まえ、本研究は、魚型ロボットのピッチング翼が生み出す推進力を予測するための理論式を導出すること、この理論式の予測精度を悪化させて、適用範囲を制限している流れ構造を特定すること、そして、その流れ構造の発生を未然に防ぐために、前兆が生じるタイミングを明らかにすることを目的とする。本研究の貢献は、導出した理論式を用いて、港湾内周期流に適応するための制御設計を可能にすることにある。本論文は全 6 章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。1 章では、周期流に適応するための水中機動として、前後左右方向への並進移動を提唱し、これを実現するための研究目的を設定した。2 章では、ピッチング翼が周期流と同じ周波数で振動するという条件下で、推進力を予測するための理論式を導出した。この理論式を用いて、位相差とピッチング振幅を制御パラメータとすることで、左右方向に推進力を発生可能であることを予測した。実証実験の結果、予測した制御方法の適用範囲は、ピッチング振幅が 12° 以下であることを示した。この適用範囲の中では、位相差とピッチング振幅を制御することで、魚型ロボットが左右方向へ並進移動することが可能になると考える。3 章では、翼の前縁から剥離することで生じる前縁渦が理論式の適応限界の原因であると考え、これを実証するために前縁渦が翼表面の圧力に与える影響を調査した。まず、粒子画像流速測定法(Particle Image Velocimetry : PIV)を用いて流れ場を計測した。その結果、理論式の適用範囲外であるピッチング振幅 18° の条件において、前縁渦が発生することを明らかにした。つづいて、数値計算を用いて、この前縁渦が翼表面の圧力を低下させることを示した。この前縁渦の影響は理論式に考慮されていないため、前縁渦が理論式の適用範囲を狭める一因であると考え。4 章では、理論式の適用範囲を拡大するためには、前縁渦の発生を未然に防ぐことが重要だと考え、前縁渦の前兆である逆流が成長するタイミングを調査した。PIV 計測と数値計算を併用することで、周期流の減速時に逆流領域が拡大することを明らかにした。この逆流が前縁に到達することで、前縁渦が発生すると考える。このことから、魚型ロボットが周期流

の加減速をセンシングすることで、前縁渦の発生を事前に察知することが可能になる。そこから、流体制御を行い、前縁渦の発生を未然に防ぐことで、理論式の適用範囲が拡大すると考える。5章では、2章で導出した理論式を拡張し、ピッチング翼と周期流の周波数が異なる場合も含めて、推進力を予測することを可能にした。この拡張理論式を用いて、周波数比と位相差を制御パラメータとすることで、前後左右方向に推進力を発生可能であることを予測し、実験で実証した。このパラメータを用いることで、魚型ロボットが前後左右方向へ並進移動することが可能になると考える。6章では、以上の研究成果を総括し結論を述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、周期流中の魚型ロボットをモデル化した2次元翼が生み出す推進力を予測する理論式を導出することを主な目的として、加えて周期流を利用した新しい水中機動を提案している。また導出された理論式を用いることで、港湾内周期流に適応するための制御設計を可能にし、魚型ロボットの効率的な運用の実現に貢献する。これにより、港湾施設における水中構造物の点検作業を省人化・効率化することに繋がり工学的価値が非常に高い。

基本的な理論式の導出は、ピッチング翼が周期流と同じ周波数で振動するという条件下で行われている。推進力を予測するために、先行研究で示された定常流中の推進力を表すスケーリング則を時間変化する周期流へ拡張した点が学術的新規性を有する。この式の適用範囲は、詳細に回流水槽での実験結果により明らかにされている。得られた結果は、周期流中で進行方向に対して中立な位置を保ちつつ左右に移動可能であることを示している。このことは、新しい水中機動の提案に繋がり工学的価値が高いと言える。さらに、理論適用範囲外では、翼前縁部からの離れが翼表面の圧力に与える影響が明らかにされている。その詳細については、揚抗力を独自に開発した揚抗力計の実験結果と数値計算結果との一致を示し、さらに画像計測を用いた翼周囲の速度場との一致も示すことで、実験では得られない翼表面の圧力分布に関する数値計算結果を用いた考察を可能としている。このことは、流体実験と数値計算を相補的に用いて現象を把握する過程で、非常に高度な検証を行っている点が学術的に評価出来る。最後に、ピッチング翼と周期流の周波数比が1以上の場合について導出した理論式を拡張し、一般化しているため、本論文は学術的かつ工学的価値を有すると評価できる。

上記の論文は、査読制度の確立した学術雑誌に掲載された英文論文3編と1編の参考論文を基に執筆されており、いずれの学術論文においても申請者が筆頭著者になっている。

【学術論文】

1. Yoshitaka ISODA, Yohsuke TANAKA, Takuma SADANAGA and Shigeru MURATA, Experimental and numerical investigations of flow over a pitching airfoil in periodic flow, *Advanced Experimental Mechanics*, 6, (2021), 27–32. (https://doi.org/10.11395/aem.6.0_27)

2. Yoshitaka ISODA, Yohsuke TANAKA, Maoto KAWANO and Shigeru MURATA, Effect of phase difference between pitching foil and periodic flow on maneuverability in the lift direction, Advanced Experimental Mechanics, 7, (2022), 34–42. (https://doi.org/10.11395/aem.7.0_34)
3. Yoshitaka ISODA, Yohsuke TANAKA, Hiroki Tanaka, and Maoto KAWANO, Scaling and lateral maneuverability of pitching foil in periodic freestream, AIP Advances, 13-2, (2023), 025161. (<https://doi.org/10.1063/5.0137661>)

【参考論文】

Yoshitaka ISODA, Yohsuke TANAKA, Scaling laws for thrust and lift generated by pitching wing in periodic freestream. (has been submitted to AIAA Journal)