

# 2019 年度 若手・女性研究者奨励金 レポート

研究課題	攪拌性能の観点から見た生物羽ばたき飛翔
キーワード	①攪拌翼、②羽ばたき翼、③生物飛翔

## 研究者の所属・氏名等

フリガナ 氏名	ノダ リュウスケ 野田 龍介	所属等	京都大学 大学院工学研究科 助教
プロフィール	長崎県長崎市出身。2015年に千葉大学で博士後期課程修了（博士（工学））後、香港科技大、関東学院大学、京都大学で数値流体解析を用いた生物の飛行メカニズムの研究や、ドローンなどの流体機械の性能向上に寄与する生物規範構造の研究に従事。		

## 1. 研究の概要

本研究課題では、生物の羽ばたき飛翔における飛翔体周りの特徴的な流動が攪拌性能へ及ぼす影響を定量的に評価することを目的とする。このため、水を作動流体とした攪拌槽内で生物の羽ばたき翼運動・翼形状を再現するための実験装置を構築した。本実験では、羽ばたき翼運動の複雑な翼根本周りの3次元回転運動から2次元回転運動へと低次元化したモデルを用いることで実験装置の簡易化を図った。また、これらの羽ばたき翼運動の各パラメータは、従来型の回転式攪拌翼と流体特性を一致させるように決定し、トレーサを用いた槽内の流れ場の可視化結果と画像解析に基づく乱流拡散係数等の算出により性能比較を行った。

## 2. 研究の動機、目的

本研究課題では、これまでにない新たな羽ばたき翼を有する生物規範型攪拌装置（図1）の創製を最終目的として、生物羽ばたき飛翔における飛翔体周りの流動を攪拌性能の観点から評価することを目的とする。生物羽ばたき飛翔における従来研究では、1) 非定常剥離渦が飛翔体の揚力・抗力といった空気力発生メカニズム、または安定飛行メカニズムに及ぼす影響、また、2) 翼の微細構造が境界層制御や抗力低減に及ぼす影響を評価するものが多く、羽ばたき飛翔時における飛翔体周りの流動そのものを導入して工業機械等における性能向上を図る研究は極めて少ない。また、攪拌操作の分野においても、近年では攪拌翼を持たずに遠心力を利用したものや超音波による攪拌など、様々な形態で攪拌プロセスを行う装置が開発されているが、依然として従来の1自由度の回転運動による機械式の攪拌翼を有する攪拌装置が主である。本研究では、攪拌槽内の基本流動である旋回流・上下循環流・放射流などの流れが、閉空間内の生物羽ばたき飛翔時に生じる吹き下ろし（ダウンウォッシュ）、地面効果、壁効果などの流れと類似している点に着目し、生物が本来飛翔するための様々な非定常空力メカニズムとそれに伴い生じる剥離渦が、「混合」「分散」といった攪拌における単位操作のプロセスに効果的ではないかとの考えから本研究課題の着想に至った。

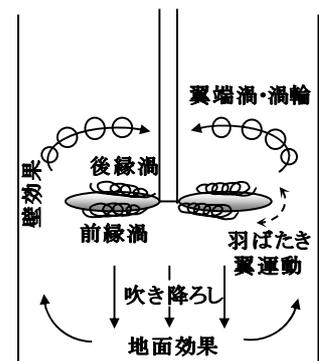


図1 生物規範型攪拌装置のイメージ図

本研究課題では上述の目的に沿って、比較対象とする低粘度領域の混合に用いられる代表的な攪拌プロペラ翼の翼長・消費パワーを考慮して、羽ばたき式攪拌翼の翼サイズ・羽ばたき

周波数を決定することで、従来型の攪拌翼と生物規範型攪拌翼の性能比較を包括的に行うことを可能とする。本研究課題内では作動流体を水として、主に「混合」・「分散」を目的とした攪拌プロセスにおける定量的評価と運動・形状の最適化を行うが、攪拌装置に求められる攪拌目的は、固体破碎・沈降防止、伝熱といったように多岐に渡っている。このため、それぞれの攪拌目的に合わせて、攪拌仕様を左右する吐出能力・剪断能力の分配割合を決定する必要がある。本研究課題で提案する生物規範型攪拌装置においては、この2つの能力の分配割合は、1) 羽ばたき運動の変化や2) 羽ばたき周期毎の運動モードの組み合わせ、また、3) 複数の羽ばたき翼の流体相互作用を考慮して導入することで、一定動力内で実現できる可能性があり、攪拌装置における十分な発展的研究が多く考えられる。

### 3. 研究の結果

本実験では、ステッピングモータ2台と制御器を用いて羽ばたき式攪拌装置の製作を行った。また、翼形状は1/4楕円翼としABS樹脂を用いて製作した。2台の同期された高速度カメラを槽側面と槽底面側に設置し、トレーサを用いて回転・羽ばたき式攪拌翼における流れ場を可視化した。両翼における回転速度は翼先端の周期平均速度を代表速度として、流体特性を表すレイノルズ数を一致させるように決定した。なお、回転翼での迎え角は $45^\circ$ とし、羽ばたき翼では受動的な回転運動により最大迎え角が $45^\circ$ となる機構を製作した。図2に実験装置の全体図と翼モデルを示す。

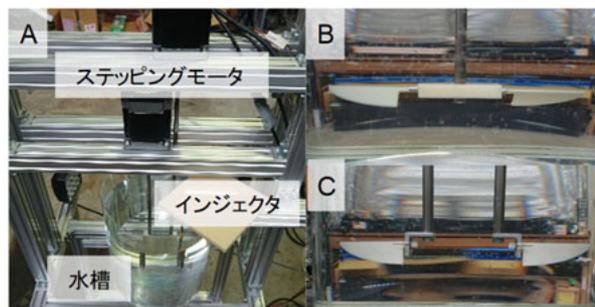


図2 (A) 実験装置の全体図  
(B) 回転式攪拌翼 (C) 羽ばたき式攪拌翼

トレーサ注入直後からの回転・羽ばたき式攪拌翼を用いて可視化を行った結果を、図3、図4に示す。回転式攪拌翼では、槽全体で作動流体が一様に回転している様子が確認でき、槽底面からの可視化では0.6秒後に回転方向へ約 $180^\circ$ の拡散が確認できる。また、縦方向においては、翼上2.5 [cm]に設置したインジェクタから翼の表面付近まで拡散している様子が確認で

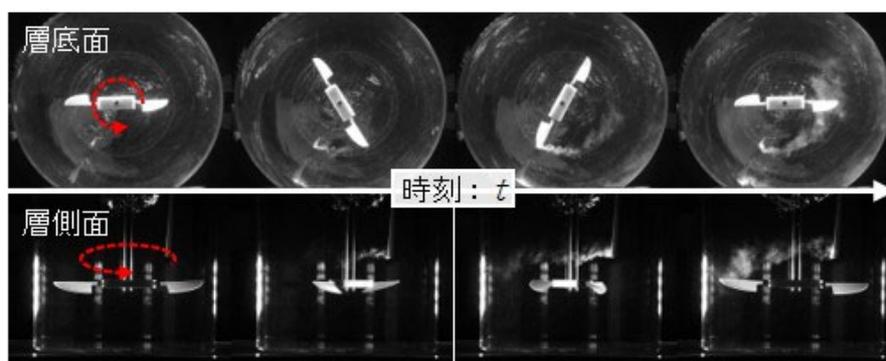


図3 回転式攪拌翼 ( $t = 0 \sim 0.6$  [sec])

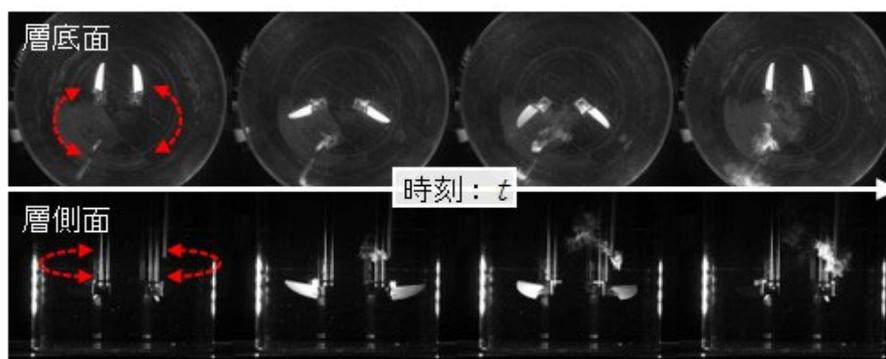


図4 羽ばたき式攪拌翼 ( $t = 0 \sim 0.6$  [sec]) [sec]

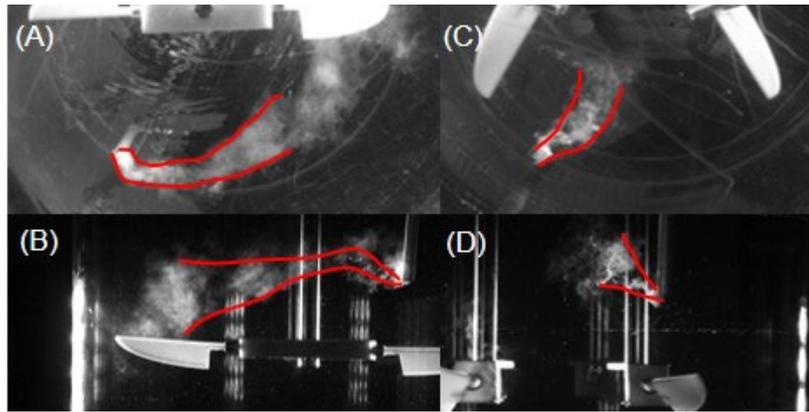


図5 (A-B) 回転式攪拌翼と (C-D) 羽ばたき式攪拌翼における槽側面・底面における拡散の様子

きる。この翼上部における下向きの流れは、一般的な回転式攪拌槽内で生じている旋回流と同等の流れである。一方、羽ばたき式攪拌翼を用いた結果では、周期的にそれぞれの翼が右・左回りの回転と切り替わり、槽全体の流動としては回転式攪拌翼と比較してなだらかな流動の様子が確認された。0.6秒後における拡散挙動においても、トレーサは注入部入口近辺で留まっており、領域全体への拡散の様子は見られない。縦方向においては、旋回流となる回転式とは異なる翼上部での上向きの流れが確認できる。図5 にそれぞれのトレーサの広がりの様子を示す。槽底面・側面からの解析した画像を用いてそれぞれ算出した乱流拡散係数は、回転式攪拌翼で底面： $236.0[\text{cm}^2/\text{s}]$ 、側面： $128.5[\text{cm}^2/\text{s}]$ 、羽ばたき式攪拌翼で底面： $90.1[\text{cm}^2/\text{s}]$ 、側面： $21.6[\text{cm}^2/\text{s}]$ となり、回転式攪拌翼で優れた値を示した。しかしながら、羽ばたき式攪拌翼では局所的な空間では強い渦構造が生じている様子が確認でき、包括的な定量的評価においては課題が残った。

#### 4. 研究者としてのこれからの展望

飛行生物が有する多様な優れた流体的特性を実験、数値解析手法を用いて明らかにしていきたい。また、得られた知見を基に流体機械等の機能向上へ寄与する生物規範構造を考案し、幅広い分野で応用可能な技術の体系化を目指したい。

#### 5. 社会に対するメッセージ

羽ばたき飛翔の研究分野において、近年では空気中にのみに留まらず、水中・空中両用の小型羽ばたきロボットの開発も進められている。このようなロバスト性の高い小型ロボットは、携帯性・操縦性、また、羽ばたき飛行の突風などの外乱に対して有する高い飛行安定性などから、自然災害現場等で人が立ち入ることが困難な環境下における迅速な要救助者の情報収集などでの活躍が見込まれている。本研究課題で行った攪拌槽内における空気と粘性の異なる作動流体下での生物を規範とした羽ばたき運動により生じる流れの理解は、発展的研究として考えられる上述の水空両用の統合型小型羽ばたきロボットの設計指針の導出に寄与する可能性も考えられる。本奨励金により行った研究で得られた知見を幅広く社会に還元できるよう、攪拌装置に留まらず更なる発展的研究を見込んだ研究を進めていきたい。