

数理科学的視点による魚の遊泳行動メカニズムの理解

計算流体力学により魚の間欠式遊泳運動のエネルギー最適化原理を解明

概要 多くの魚類は尾びれを連続して波打たせる「連続モード」と間欠的に波打たせる「間欠モード」を状況に応じて使い分けて遊泳する。特に間欠モードのモデル化は連続モードよりも困難であるが、間欠モード遊泳の詳細なシミュレーションに成功し、魚が間欠モードを選択するメリットを解明した。また、この成果は魚を模倣するロボット開発のための知見のひとつとなる。

科学的意義 生物学としては、魚の行動学における重要な現象の理解を深めた。物理学としては、波打ちフォイルの特徴的な流体力学的性質を検証すると共に、高性能遊泳の流体力学メカニズムを発見した。

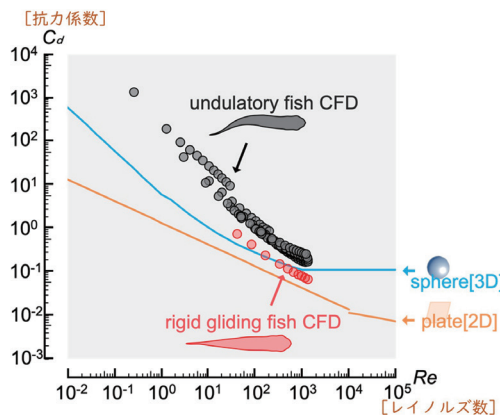
付加価値情報創生システムへの貢献 「流体-構造-自由運動の相互作用」変形体遊泳ソルバーや最適化手法として、数値解析リポジトリに貢献する。幅広い分野での活用が期待される。水中生命の行動とエネルギーを定量的に分析し、水中生命と海洋環境のデジタルツインの構成、四次元仮想地球への生命情報搭載の一步となる。

論文 Gen Li et al., Intermittent versus continuous swimming: An optimization tale, Physical Review Fluids 8, 013101 (2023)

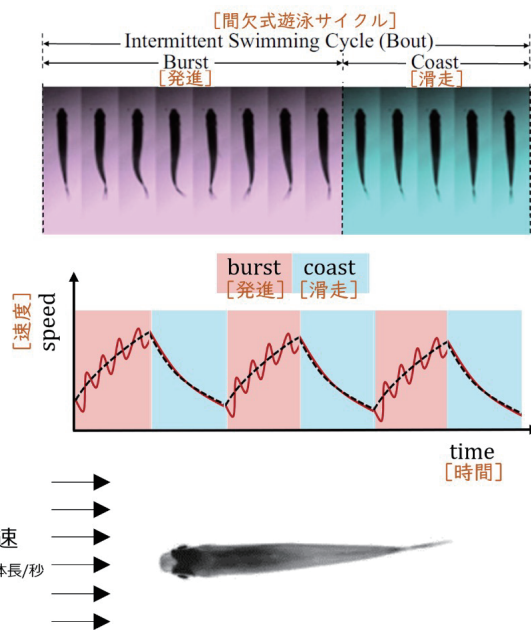
*科学誌「Physical Review Fluids」の「Editors' Suggestion」に選ばれました。

*アメリカ物理学会の会誌「Physics」で「Featured in Physics」に採択されました。

背景 左下グラフに示す通り、魚は体の波打ちを利用して推力を発生させるが、体の波打ちが体表面の流体境界層を乱すため、同時に抗力が2～5倍に増加する。



これを避けるため、魚は連続モードと間欠モードを使い分ける。右図に示す通り、間欠モードでは、小刻みな加速と慣性による滑走を繰り返す。滑走中の推進力の不足は、流線型の姿勢を保つことによって抗力を減少させて相殺する。



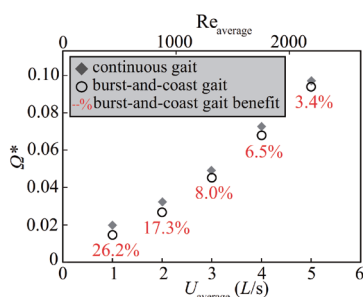
間欠式遊泳がより効率的であるということは、根拠がなくなんとなく受け入れられてきた通説ではあるが、それを証拠づける詳細なシミュレーションは、流れの非定常性のために困難であった。今回、実験と数値方法に基づいて独自に開発した非定常「流体-構造-自由運動の相互作用」モデルを用いて、間欠式遊泳の物理過程を先例のないレベルまで詳細に解析した。

方法 ①大量のシミュレーションでパラメータ空間やデータベースを構築した。このデータベースは、膨大な計算リソースを必要とせずに、周波数や振幅などのパラメータの最適値を提示することが可能である。

②間欠式遊泳と連続式遊泳の効率の詳細比較も実施した。特に、これまでに先例のない速度が同じ条件下での「最適化した間欠式遊泳 vs 最適化した連続式遊泳」の比較を実現した。

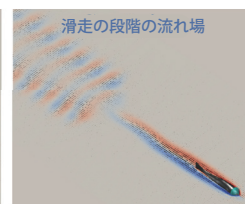
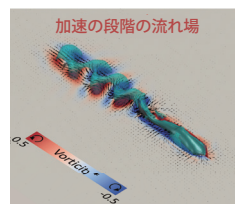
結果 ①本研究では、「適切にコントロールされた間欠式遊泳」は連続式遊泳よりエネルギー消費が少ないことを発見した。

②「やみくもな間欠式遊泳」例えば「間欠サイクルが長すぎる間欠式遊泳」は効率が大きく低下する可能性があることも発見した。

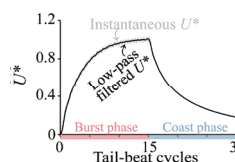


左図は「最適化した間欠式遊泳 vs 最適化した連続式遊泳」であり、赤色の数字は節約されたエネルギーの割合を示す。この節約の割合は、速度が上がるにつれて減少する。

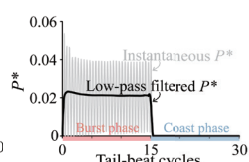
結論 本物の魚の間欠式遊泳の最適戦略は、おそらく何百万年にも渡る世代をまたぐ改善の結果として獲得されたものであるが、本研究により、魚ロボットの製作にあたってエネルギー消費を最小限に抑えるための間欠式遊泳のパラメータ決定の指針が示された。



間欠式遊泳サイクルの速度グラフ



間欠式遊泳サイクルのパワーのグラフ



音声ガイド



右の二次元コードより音声ガイドを聞くことができます。



李根 (Gen Li)

付加価値情報創生部門
数理科学・先端技術研究開発センター