

魚の集団運動の包括的なモデル研究

理学研究科 物理学専攻 伊藤将

集団運動は様々な生物に普遍的に見られる行動様式である。特に魚は水中という三次元の空間で、群れ全体が向きを揃えて一つの方向に進行するパターンや、球状、トーラス状、リング状、円柱状といった多様な形状の回転パターンを示す。これらの魚群のサイズは、個体数にして数万匹以上、大きさにして体長の数十倍以上に及ぶことがある。そのため、個々の魚は群れ全体の動きは知り得ず、近傍の相手の行動から自身の運動を決定している。そこで、本研究では、どのような相互作用が働けば自発的な魚群形成を再現することができるのか、理論とシミュレーションの観点から研究した [1]。

これまで再現されていなかった巨大回転魚群の形成機構を解明するため、現象論的な相互作用に基づいたモデルを構築した [2]。先行モデルでは遠く離れた個体の間に一律に引力が働くと仮定していたため、個体数が大きいほど群れが凝縮して小さくなっていった。そこで、実験事実に基づき、群れの中では引力が働かず、近傍の個体と衝突回避行動のみを行うという行動の選択様式を導入した。これにより、球状、トーラス状、リング状の巨大な回転魚群を、その大きさと個体数の関係も含め再現することに成功した。さらに、重力感知による鉛直方向の運動の異方性を導入することにより、円柱状の回転魚群の再現にも初めて成功した [3]。

また、魚は周囲の水の流れを介して互いの運動に影響を与える。魚は遊泳時に尾から渦列を放出することが知られており、渦を介した流体相互作用が何らかの利点をもたらしていると考えられてきた。そこで、渦場が群れの形成に与える影響について研究した。尾の運動を、運動神経回路を介して自律的に振動する平板翼とみなした自己推進モデルを構築し、2匹の魚の渦を介した流体相互作用を数値的に解析した [4]。その結果、前にいる魚と後ろの魚の尾の振動が、距離に線形に依存した位相差を持って同期することが分かった。さらに、後ろの魚は前の魚に引き寄せられ、エネルギー散逸率が単独遊泳時よりも低くなることを明らかにした。加えて、近距離でのエネルギー散逸率は低下するものの最適化されているわけではなく、より効率のよい遊泳方法があることが示唆され、金魚とロボットを用いた先行研究での予想を初めて明確にした。

魚は高性能のカメラ眼も備えているが、網膜や視覚神経を介して相手の位置や速度をいかに読み取り、自身の運動に反映するかという根本的な問いへの解答は未だ十分になされていない。最近の実験によれば、視認可能な範囲に複数の他の魚が存在したとしてもその中の1匹を選択し、自身の運動を決定している場合があることがわかってきた。そこで、網膜に映る像からの視覚刺激に誘導される視線の移動を導入した集団運動モデルを構築した [5]。本モデルにより、渦パターン、向きの揃った群れのパターンが自発的に生じることが示された。また、複数の相手が同時に視認される場合でも、いずれかの相手を追跡する傾向があり、近距離では後ろの魚の位置分布が分岐するという観測事実を再現することができた。これにより、少数個体の選択的な意思決定と多数個体の集団運動を統一的に再現するモデルを構築することに初めて成功した。

以上のように、魚の集団運動について現象論、流体、視覚の観点から包括的なモデル研究を進めた。これまでの理論では十分に考慮されていなかった実験結果や魚の神経機構の特徴を多く取り入れ、さまざまな集団運動の様式を再現するとともにその仕組みを明らかにした。

【参考文献】

- [1] 伊藤将, 内田就也, 日本物理学会誌 **78**, 198 (2023).
- [2] S. Ito and N. Uchida, *J. Phys. Soc. Jpn.* **91**, 064806 (2022).
- [3] S. Ito and N. Uchida, *EPL* **138**, 17001 (2022).
- [4] S. Ito and N. Uchida, *Phys. Fluids* **35**, 111902 (2023).
- [5] S. Ito and N. Uchida, *PNAS Nexus* **3**, pgae264 (2024).