

トポロジカル相互作用による巨大な回転魚群の形成機構

伊藤 将 (東北大学大学院理学研究科 ito-susumu@cmpt.phys.tohoku.ac.jp)

内田 就也 (東北大学大学院理学研究科 uchida@cmpt.phys.tohoku.ac.jp)

魚や鳥の群れによる運動は、古来より人々を惹きつけ、情景の一部として詩歌の題材にもなってきた。環境に応じて変幻自在に形を変えるその動きに人々は魅せられてきたのである。それは科学者も例外ではなく、20世紀後半から様々な生物の集団運動に関する知見が得られてきた。

魚の群れの特徴は、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に加えて、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とである。回転する魚群のサイズは、個体数にして数万匹以上、直径にして体長の数十倍以上に及ぶことがある。ここでまず浮かぶ疑問は、群れの回転は何によって生じるのかということである。個々の魚は左回り、右回りなど特定の方向に旋回する性質を持たないにもかかわらず、群れとなったときには回転パターンを示すことが知られている。また、水面や岸といった境界から離れたところでも、回転する群れが生じることが知られている。すなわち、回転する魚群は、個体間の相互作用による自発的対称性の破れによって生じているということができる。

多様な魚の群れの形態を説明するため、個々の魚を自己駆動粒子とみなしたモデル化が試みられてきた。これらのモデルでは、各個体を自身が生み出す推進力によって運動する点状粒子とみなし、個体間の相互作用によって位置や速度が変化する。魚の相互作用については実験による定量的な測定が困難であるため、現象論的なアプローチが取られてきた。その一つは、ポテンシャルを用いて等方的な引力や斥力を記述するもの、もう一つは、距離と方向によってはたらく相互作用のタイプをゾーン分けするゾーン型モデルである。後者では、魚の視野が限られていることに着目して後方に死

角を設けたり、個体の運動の向きを揃える配向相互作用を取り入れることが多い。

これらのモデルによって、回転する群れのパターンが得られた一方、群れのサイズの再現性には大きな問題があった。まず、これらのモデルでは体長の数十倍以上に及ぶ巨大な群れを再現することができていなかった。むしろ、個体数を増やすほど長距離ではたらく引力が卓越して群れの直径が小さくなり、数千匹が同時に相互作用しながら剛体回転するような状況が見られた。一方、実際の群れの中では視野や流れは他の個体によって遮蔽され、密度が高いほど有効的な相互作用距離は短いと考えるのが自然であろう。つまり、相互作用距離は一定ではなく、周囲の個体の相対的な配置によって変化すると考えられる。そこでわれわれは、各個体の近傍にいる一定数以下の個体に作用するトポロジカル相互作用を採用した。トポロジカル相互作用は鳥(ムクドリ)の群れのモデルにおいて初めて導入された概念であり、個体間の距離ではなく相対的な配置(トポロジー)によって決まる相互作用である。今回のモデルでは最近の実験的知見に基づき、群れの内部では引力ははたらかないとする。一方、周囲の魚が少ないとき、すなわち群れの外側や境界付近にいる魚は、群れの内側に入ろうとする逃避行動を示すが、これを引力として導入した。

このモデルによって体長の数十倍の大きさの回転魚群を発生させることができ、ベイト・ボールとして知られる球状の群れや、重力の影響で鉛直方向に伸長した円柱状の回転パターンを初めて再現することができた。さらに群れのサイズについて定量的な解析を行い、トーラス状の群れの大きさ(射影面積)と個体数の間に成り立つべき乗則を再現することができた。

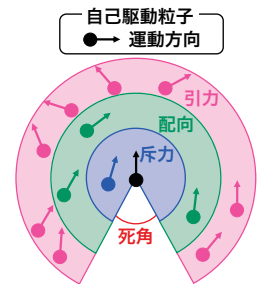
用語解説

自己駆動粒子:

化学的エネルギーなどの非力学的なエネルギーを運動エネルギーに変えて運動する粒子。バクテリアや、昆虫、鳥、魚といった生物の集団運動のモデルとして用いられるほか、コロイド粒子などを用いた実験系も作成されている。

ゾーン型モデル:

各個体に斥力、配向、引力の各相互作用がはたらく同心円状の領域が設けられたモデル。相互作用がはたらかない死角を設定することが多い。



トポロジカル相互作用:

個体間の相対的な配置(トポロジー)によって決まる相互作用。たとえば各個体が m 次近接個体とまで相互作用するものがある。下図に $m=3$ の場合を示す。対比的に、個体間の距離によって決まる相互作用をメトリック相互作用とよぶ。

