

## 論文の内容の要旨

論文題目 魚群の運動メカニズムの研究

氏 名 稲田 喜信

多数の要素が集合した群の運動は、自然界の様々な種類の生物や駅や地下街における人間の動き、渋滞時の自動車の動きなどにおいて日常的に観察されるものである。これらの群運動を実現する個体間の相互作用のメカニズムについては過去にいくつかの数理モデルが提案され、個体間の相互作用に仮想的な「力」を想定する「物理モデル」や、個体間の相互作用を個体の位置関係に基づく「行動ルール」で記述する「ルール規範型モデル」が用いられてきた。これらのモデルはコンピュータシミュレーションによって自然界の群に類似した群運動を再現しているが、モデルが用いる個体間の相互作用のメカニズムは解析の簡便さを目的として便宜的に提案されたものが多く、自然界の群運動との間で十分な対応が取られていなかった。そこで本研究では実際の魚群の運動を観察し、観察された運動と十分に対応のとれた数理モデルを作成することによって群運動における個体間の相互作用の詳細を分析し、さらに自然界に見られる大規模な群運動の解析を行うことを目的としている。以下に各章ごとの要旨を述べる。

### 1) 魚群の個体間の相互作用の分析

第2章では、ムギイワシとボラの2種類の魚の10個体の群の運動を観察し、接近行動と平行行動という群運動に不可欠な2つの行動に注目して、これらの行動を分析する新しい手法を提案した。この方法は、個体同士の位置関係や移動方向に見られる相関に

基づいて相互作用を分析する手法であり、従来の分析が個体対最近接個体間の一对一の相互作用を対象としたのに対し、個体対複数個体間の相互作用を対象とし、相互作用個体の位置や個体数、反応の時間遅れなどの多次元的なデータを取得できるものである。その結果、2種の魚の接近行動と平行行動との間に明らかな相違点と類似点が存在し、接近行動では相互作用個体が個体の正面に集中し、動きの時間遅れが小さかったのに対し、平行行動では相互作用個体が個体周辺に広く分布し、動きの時間遅れが接近行動より大きいことがわかった。一方で、相互作用個体の距離と個体数は双方の行動でほぼ一致し、個体から2BL~4BL（BLは平均体長）の位置に存在する2,3個体と主に相互作用していることがわかった。

## 2) 群運動の数理モデル

第3章では、第2章で行った2種の魚の群行動の観察結果に基づいて群運動の数理モデルを作成した。観察結果に基づいて個体周辺に相互作用領域を設け、領域内の周辺個体の位置と行動ルールから個体の運動を決定するという「ルール規範型モデル」を作成した。このモデルを用いて計算機シミュレーションを行った結果、観察実験と同じ10個体の群で実際の魚群行動と類似性の高い動きを実現することができた。さらに、モデルに含まれる相互作用パラメータ（個体間の接近性や平行性、反発性の強さ、相互作用個体数、個体の運動の乱雑さなど）を操作することによって、パラメータが群全体の運動に及ぼす影響を詳細に分析した。その結果、個体間の接近性を強く、反発性を弱くするように相互作用パラメータを設定した時、群は分裂しにくくかつ小さく固まって運動した。また、個体間の平行性を強め、運動の乱雑さを抑えた時は、向きのばらつきが小さく前後に細長い群ができた。これにより、群の形状や運動の秩序、持続性といった群全体の運動の性質が個体間の局所的な相互作用と密接に関わっていることを確認できた。また、10個体の群と同じモデル、同じパラメータ値のまま個体数を50個体に増やすと群が非常に分裂しやすくなり、個体数の増加によって群の運動が不安定になることがわかった。この原因は個体数が増加すると群全体に占める相互作用個体数の比率が低下し、個体が得る情報が局所的なものとなって群全体の動きの均一性が低下するためであった。

## 3) 群運動の秩序と柔軟性の分析

第4章では、自然界における大規模な群がいかにして長時間、長距離にわたって群を安定に維持し、かつ緊急時に必要な回避行動を実現しているかを分析した。このため、モデルの相互作用領域の配置を若干変更し、分裂しにくくしたモデルを用いて50個体の群でシミュレーションを行った。群運動の持続性には整列性や直進性といった運動の「秩序」が必要であり、回避行動には変形のしやすさである「柔軟性」が必要であるが、この2つの性質は互いに相反する関係にあるため、これらが同じ群の中に共存するメカ

ニズムを分析した。その結果、個体の運動の乱雑さと相互作用可能な周辺個体の個体数が、群運動の秩序に影響を与えるパラメータであり、乱雑さが小さく相互作用する個体数が多いほど運動の秩序が増加した。また、このパラメータは群運動の柔軟性にも影響し、乱雑さが小さく相互作用する個体数が2,3個体である時に回避行動が発生しやすく、柔軟性が増加した。さらに、群運動における秩序と柔軟性を両立させる条件を分析した結果、運動の乱雑さを抑え、相互作用個体数を2,3個体に保つことが2つの性質の両立に有効であることがわかった。最後に逃避行動における捕獲数を調べた結果、逃避行動の発生頻度が高いほど捕獲数が少ないことが確認され、群の柔軟性の高さが捕食者の攻撃に対する防衛効果を高めることがわかった。

以上により、本研究は、魚群行動における接近行動と平行行動の特性を明らかにすることによって実際の運動と対応のとれた群運動モデルを実現し、それを用いて個体間の局所的な相互作用と群全体の動きとの関係を明らかにした。さらに、大規模な群運動の秩序と柔軟性の形成のメカニズムとそれらを両立するために必要な条件を明らかにした。現段階では、群の規模が大きくなるほど運動の計測や解析は困難となり、自然界に見られる大規模な群運動を定量的に分析するための新たな手法が望まれている。本研究では、実際の魚群の動きに基づいた群運動モデルによる数値シミュレーションの手法により、大規模な群運動の定量的な分析を可能にし、その制御機構の解明に道を開くことができた。