

称号及び氏名 博士（工学） 右衛門佐 誠

学位授与の日付 平成 27 年 3 月 31 日

論 文 名 「実測データに基づく鳥の集団運動の研究」

論文審査委員 主査 大同 寛明

副査 岩住 俊明

副査 魚住 孝幸

副査 水口 毅

## 論文要旨

これまで駆動能力を持つ素子の集団運動に関する研究の多くは、数理モデルを用いた数値計算であった。これまでの研究で、各素子が能動的に運動する系において素子が系全体と結合することなく、自身の近傍の素子との結合のみであっても系全体として統率のとれた挙動を示すことが可能であることが明らかにされた。これをきっかけとして、群れというパターンを形成し、移動する生物集団に関する物理的な関心が高まってきている。

さらに、近年の実測機器の性能の向上や小型化により、実際に空を飛行する鳥から位置や加速度などの飛翔に関する物理量が測定可能となった。実測データに基づく研究も徐々に増えつつある。そこで得られた知見はこれまでの数理モデルを中心に行われてきた集団運動の研究とはそぐわないものもあり、現実の自然現象に則した集団運動の数理モデルを再検討する時期を迎えつつある。

このような背景の中で、本研究では鳥の集団運動に関する新たな動力的な知見を得るために、ユリカモメの群れの軌道データの取得・解析と、鳩のGPS軌道データの動力的な側面からの再解析を行った。解析の結果、群れの中での追尾関係と相対位置の間の関

係を，実測データから定量的に記述することに成功した．具体的には，方向選択に関して時間的に先行している個体が，空間的にも先行していることを明らかにした．さらに，編隊飛行に果たすこの関係性の役割を動力的な側面から明らかにした．また，異なる個体や飛行様式の鳩の飛行軌道データに共通する性質として，加速度の分布関数がある1つの関数形で記述できることが明らかになった．このことは，鳩の飛翔運動を数理モデルで再現するには重要な性質であると考えられる．本論文では，以上の研究から得られた成果をまとめたものである．

本論文は4つの章から構成されており，以下にその概要を示す．

第1章では，数理物理の分野におけるこれまでの集団運動に関する研究を，数理モデルを用いた数値計算の研究および実測データに基づく鳥の集団運動の研究に関して概説し，先行研究の中での本論文の意義を述べた．

第2章では，ステレオカメラシステムを用いたユリカモメの群れ運動の実測とその解析結果に関して記述した．ステレオカメラは東北大学の早川美徳教授が開発したものを使用した．撮影した左右の動画から3次元軌道を再構築する際には，画像上から個体を同定する必要がある．本研究では位相限定相関法を左右のスナップショット間の個体同定と連続するフレーム間の個体同定の両方に使用することで，画像解析の多くの部分を自動化することに成功した．

ユリカモメは帯のように長く連なった群れの形状を示すこともあれば，渡り鳥が一般的に示すV字の形状で飛行するときもある．彼らがどのような状況で群れの形状を使い分けしているのかということも生物学的には興味深い問題ではあるが，本研究では最近接個体の相対位置の分布関数を調べることによって，群れの形状によらない共通点と群れの形状による相違点を明らかにした．共通点としては次の2点が挙げられる．1点目は鉛直方向の相対位置の広がりがあるが他の2方向に比べて小さいことである．この傾向はムクドリやマガンなどの他の種の鳥でも共通する性質であり，鳥の群れに関しては一般的な性質なのかもしれない．また，共通点の2点目は，横方向の相対位置が開翼長程度の位置を中心に分布していることである．後方個体が開翼長程度離れた場所に位置することで，前方個体の作る翼端渦を効率的に利用することができることが理論的に明らかにされている．この性質は他の種の渡り鳥でも報告されているが，群れ全体の空間構造がV字でない集団で，この性質が見られたのは本研究がはじめてである．

最近接個体の相対位置の分布関数の相違点としては，進行方向の相対位置の分布関数の形状が挙げられる．V字編隊の群れでは分布関数が双峰性を示すのに対して，帯状の群れでは0を中心とした単峰性の分布関数を示す．つまり，帯状の群れでは最近接個体と横並びで飛行する個体が多いことを示している．これに対応して，帯状の群れでは鉛直方向の分布関数の分散がV字の群れに比べて大きくなっている．これは，水平面内での個体間距離

が小さくなるにしたがって、群れの3次元性が高くなっていくためであると思われる。

次に、本研究ではステレオカメラを用いた研究では初めて羽ばたき運動を数値化することに成功した。これは、本研究で用いたステレオカメラの精度が高いことに加えて、ユリカモメの群れを近距離で撮影することが可能であったためである。1羽の運動に関して解析したところ、画像上の羽ばたきによる形状変化と速度の鉛直方向成分の振動が対応していることを確認した。羽を打ち下ろすときに上向きの加速度を獲得し、打ち上げる時には下降することが実測からも明らかとなった。また、打ち下ろし時には翼を最大限に広げ、打ち上げ時には折りたたむようにして翼を上げていることも明らかとなった。このことによつて羽ばたき運動で生み出す揚力を大きくしていると考えられる。これらのことは鳥の飛翔の観測にもとづいて、古くから言われていたことである。しかし、本研究で形状とその位置座標を測定することで、数値的にそのことを明らかにすることができた。

V字編隊で飛行する群れの中の各個体の羽ばたき周期は個体ごとに異なり、群れ全体として位相が揃っているという同期現象は観測されなかった。また、群れの中の平均的な相対位置と羽ばたき周期との間の相関もなかった。これは、野生の群れを観測しているために、群れの中の年齢構成が異なっていることが1つの原因であると考えている。

さらに、ユリカモメの群れの個体間の追尾関係に関して、個体間の空間構造と追尾関係、移動速度の関係性を実測データから明らかにした。鳩の群れに関する先行研究の中で、群れの中で他の個体を先導する役割を担う個体が、群れの前方に位置する傾向があるということが言われていた。本研究で得られた結果は、このことをより定量的に記述したものである。後述する第3章で、同様の関係性が鳩の群れに関しても成立することに加えて、動力学的な側面からのこの関係性の解釈を与えた。

第3章では、Eötvös大学のNagy博士から提供された鳩のGPS軌道データの再解析の結果に関して記述した。はじめに、ユリカモメの群れの解析で得られた個体間の空間構造と追尾関係の関係性が、鳩の群れでも成立することを明らかにした。また、相対位置の時間変化に着目することで、この関係性に動力学的な側面からの解釈を与えるとともに、鳩の群れの平均的な振る舞いを明らかにした。

さらに、先導者と追尾者の関係性について詳細に解析を行った。解析の結果、速度の分布関数に彼らの違いが見られることが明らかとなった。先導者は追尾者と比較した時に、帰巢時には速く飛行し、ねぐらの周りでの自由飛行時には遅く飛行することを明らかにした。このことは、先導者が速度の変化領域が大きく、飛行能力に優れていると解釈することができる。群れが編隊を維持したまま旋回する場合には、この速度の大小関係が相対位置の内外の関係と直結する。そのため、自由飛行時に先導者は追尾者に比べて、前方・内側を低速で飛行する傾向があることを明らかにした。

鳩の飛行様式には上で述べたねぐらの周りでの自由飛行の他に、遠く離れた場所からねぐらへと帰る帰巢飛行がある。これらの飛行様式には、飛行速度や軌道の直進性などの違

いが見られることが知られていた。本研究では、鳥の飛翔時に必要な仕事率に関する先行研究を拡張することで、これらの飛行様式が違うモードであることを明らかにした。

また、このような飛行様式や個体の訓練の経験などが異なる軌道データ間に共通する性質を、接線方向の加速度や鉛直軸周りの角加速度の分布関数を調べることで明らかにした。これらの分布関数はデータセットによってその形状が大きく異なる。しかし、分布関数の標準偏差を用いてそれらの分布を規格化することによって、異なる形状を示していたそれぞれの分布関数が1つの同じ関数形になる。さらに、接線方向の加速度と鉛直軸周りの角加速度という異なる物理量の分布がこの同じ関数形で表されることが明らかとなった。このとき、それぞれの標準偏差の比はデータセット間で概ね同じ値を示す。つまり、鳩の飛行軌道は個体や飛行状況によって異なるが、その運動はある1つの関数と、例えば標準偏差という1パラメータで表現することができるということを示唆している。なぜ個体や飛行様式が異なるデータセットの分布関数が同じ関数形で記述することができるのかということや、なぜ異なる物理量の分布関数が同じ関数形を示すのかということなど、この解析結果は今後多くの課題を残している。

上で述べた結果を集団運動の観点からも考察するために、加速度の分布関数と最近接個体間距離との関係性について解析した。その結果、加速度の標準偏差と再近接個体間距離の間には正の相関が見られた。このことは、急な加速・減速、急旋回をする個体の周りには他の個体があまり見られないことを示している。これは、衝突回避の観点からも妥当な結果であると考えられる。

第4章では、本研究で得られた結果を総括し、今後の発展の方向性について述べた。

## 審査結果の要旨

本論文は、実測データに基づいて生物の集団運動を定量化し、そのダイナミクスを数理的な観点から解析することを主眼としている。具体的には鳥の群れ運動を対象として、ステレオカメラを用いたユリカモメの群れ運動の実測・解析と、鳩のGPS軌道データの解析に関する研究成果をまとめたものであり、以下のような成果を得ている。

(1) 群れで飛行するユリカモメの個体間に、運動方向の選択に関する時間遅れと空間的な相対位置、移動速度との間の定量的な関係性を見い出した。さらに、同様の関係性は鳩の群れでも成り立っていることを明らかにした。その上で、相対位置の時間変化に着目することで、この関係性が飛行時の横方向の相対位置を維持するためのものであるという解釈を与えた。

(2) ユリカモメの群れの3次元的な空間構造を明らかにするために、最近接個体間の相対位置分布を複数の群れに関して調べ、横方向の相対位置が群れによらず開翼長程度離れた場所を中心に分布していることを明らかにした。また、前後方向の分布関数は、双峰性を示すものと0を中心とした単峰性を示すものの2つの種類があり、単峰性を示す群れは鉛直方向の分布関数の分散が双峰性のものに比べて大きいことを示した。

(3) これまでのステレオカメラを用いた研究では、時間的もしくは空間的な解像度の限界から測定することが困難であった羽ばたき運動を、ユリカモメの群れにおいて数値化することに成功した。群れの中で平均的な羽ばたき周期が個体ごとに異なっているものの、前方最近接個体との間に、羽ばたきの位相差と相対距離との間に相関があることを明らかにした。

(4) 飛行様式が異なっていたり、実測した個体が異なっていたりする複数の鳩のGPS軌道データの加速度の接線方向成分や角加速度の鉛直軸成分の分布関数が、それぞれの標準偏差でスケールすることで1つの分布関数に重なることを明らかにした。

以上の研究成果は、実測データを用いて鳥の集団運動に潜む重要な性質を明らかにしたものであり、これまでの数理モデルをより現実的なものへと改良する上で大きな貢献をなす。また、申請者が自立して研究活動を行うに必要な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに学力確認試験の結果から、博士(工学)の学位を授与することを適当と認める。