

動物の群れと動的相互作用としてのコミュニケーション — マガンの群れのサイズ調整 —

東北大学・教育情報基盤センター 早川美徳
Yoshinori Hayakawa

Center for Information Technology in Education, Tohoku University

1 はじめに

ここ数年間、筆者はステレオカメラによる三次元軌跡の計測などを通じて、主として力学や統計物理的な視点から、鳥の群れの動態を調べている。コミュニケーションという観点で群れを考えるとすれば、誰しも、個と個の相互作用、個と集団の相互作用、そして、それらが群れ運動（行動）に及ぼす影響に注目するだろう。群れの中で動物たちが何を伝え合っているのかを直接的に知ることは難しいとしても（ほとんどの場合がそうだと思うのだが）、結果として生じる配置や運動の変化（密度や速度・加速度）といった物理的な計測結果から「有効相互作用」を推定することは可能なはずで、事実、近年この線に沿った興味深い研究が行われるようになってきた [1]。

そもそも、どうして多くの動物は群れを形成するのだろうか。鳥類に限っても、ねぐらの共有による餌場の状況などの情報の伝達（information center 仮説）、捕食者への警戒活動の分散化、それぞれの個体が発見・捕食される可能性の希釈化、集団によるナビゲーション精度の向上、エサの発見・収集効率の向上、等の解釈が与えられている。当然ながら、これらはいずれも群れの形成が生存にとって有利な戦略と見なすことができるためである。その一方で、群れのサイズが巨大化すると、種々の要因から群れの効用は低減してしまうだろうから、現実には、状況に応じて最適な群れのサイズが選択されている、と考えるのが自然であろう。加えて、長時間的には、過密な群れの中での感染症の伝搬や、環境条件の変化（悪化）等によって、結果として、群れの規模に抑制が加わる効果も予想される。

「動物の群れの（平均）サイズは自律的に調整されている」という描像に基づいて群れサイズの分布を議論した例として、Niwa [2] は、ある個体が属している群れに注目し、その群れのサイズ $S(t)$ の時間変化を、確率微分方程式

$$dS(t) = -\frac{p}{2}(S(t) - S_A)dt + \sigma(S)dB(t) \quad (1)$$

によって表現するモデルを提案している。ここで p はパラメータ（定数）、 N_A は群れの平均サイズ、 $\sigma(S)$ は群れサイズに依存した揺らぎの大きさ、 dB はウィーナー過程である。このモデルで、 $\sigma(S)$ が S に対して指数関数的に増大する場合、定常的なサイズ分布関数は、群れの平均サイズ S_A のみをパラメータとして

$$f(s) \sim s^{-1} \left(1 - \frac{1}{S_A}\right)^s \quad (2)$$

となり、魚群などのサイズ分布がこの分布形（対数分布）で良く説明できると報告されている。

また、別のグループによる最近の研究では、スズメの群れの平均的なサイズが、集団が置かれた状況（ねぐらに入っているのか、採餌中なのか、等）によって変わり、平均サイズをパラメータとして、それぞれの状況下での群れのサイズが上記の対数分布で良く説明できると報告されている [3]。つまり、スズメはコンテキストに応じて群れサイズを「切り換えて」いることになり、それがどのような相互作用に基づいているのかは興味深い。

本稿では、一時間に満たないような個体のライフサイクルに較べると十分短い時間スケールの間に、群れの構成員が動的に入れ替わるような状況下で、群れのサイズがどのような「有効相互作用」の下に調整されているのか（いないのか）について、飛行中のマガンの群れを対象として最近筆者が行った研究 [4] を紹介したい。

2 マガンの群れ行動

マガンは大型のカモ類の一種で、世界的に広く分布しており、そのV字型の飛翔隊形で良く知られている。宮城県北部には冬期になると越冬のために数万を大きく超える多数のマガンが集積し、その数において世界的に見ても珍しい観察地と言って良いだろう。

彼らは沼湖をめぐらし、日の出と共に近隣の田畑に移動し、日中はときどき場所を変えながら採餌を行い、日没頃になると一斉に飛び立ち、再びめぐらへと戻る。マガンは家族の絆が非常に強いと言われており、家族（平均的な個体数3～4程度）を最小単位として移動や採餌を行うと言われていたが、採餌の際には、数十羽の個体が比較的密に寄り添うように行動している。その中の数個体は必ず「見張り」をしており、時間とともに見張り役は交代する。首を上げた状態で捕食者を警戒している個体は餌を得ることができない一方で、見張り役以外は採餌に専念できるため、群れ全体としては、効率的な採餌が可能となり、これは「群れる」ことの効用のひとつと解釈できる。本稿の主題ではないものの、そうした役割の分担と交代のプロセスが、そのような個体間のコミュニケーションに基づいているのかは興味深い。

これらの個体は、日没から薄暮にかけての短い時間帯に一斉に餌場を飛び立ち、数キロメートル程度先のめぐら（湖沼）へと、大小さまざまな編隊を組んで飛行する。その途上では、空がマガンの群れで覆い尽くされて見えるくらいに、ほぼ同方向に向かう多数の個体が観察できる（図1(a)を参照）。

それらの群れは基本的にはいわゆるV字型飛翔隊形を呈している。この隊形は、ガン・カモ類をはじめ、ツル類やウ類などの大型の鳥類でしばしば見られるもので、V字型が良く知られているが、実際には、鉤型や折れ曲がりの無い線状のものなど、その形態は多様である。このような隊形が現れるのは、流体力学的な効果による飛行コストの低減にあると考えられている。前方に位置する個体の翼の両端から生じた渦が、その個体の真後ろでは下向き速度成分を、進行方向に翼長程度の距離を置いた斜め後方では上向き速度成分を生じるため、斜め後方に位置する個体はその上昇成分（upwash）に由来する「追加の」揚力を得ることができ、その結果として、飛行に必要なエネルギーを節約できる、という。

事実、飛行中のマガンを観察していると、前方の斜め後方に位置取りを行おうと積極的に労力をかけてように見える。そうすると、空中の個体全てがひと連なりの隊形を組むのが、全体として、最も効率の高い配置となるべきであるが、現実には、大小様々な群れが観察され、編隊に属せずに単独で飛行している個体さえもしばしば目に入る。そして、飛行の最中、互いに鳴き合いながら何らかのコミュニケーションを取り合っているため、それぞれの編隊の構成員とその数がある種の自律的なメカニズムによって調整されている可能性もある。特に、編隊の大きさには、マガンの家族の個体数が反映されていると見るのが自然であろう。¹

そこで、空中の編隊のそれぞれを「群れ」と考え、群れのサイズ分布に、個体間、あるいは個と全体との相互作用がどのように反映されているのかに注目して、データ解析を行った。

¹マガンの個体識別は容易ではないが、胴体の縞模様の有無から、目視によって成鳥か幼鳥かを見分けることができる。マガンの生態に関する記述を調べていると、そうした観察を通じて、群れの先頭は成鳥がつとめる傾向がある、といった報告も見られるため、編隊の大きさだけでなく、その中の配列にも、個体の関係性が反映されている可能性がある。

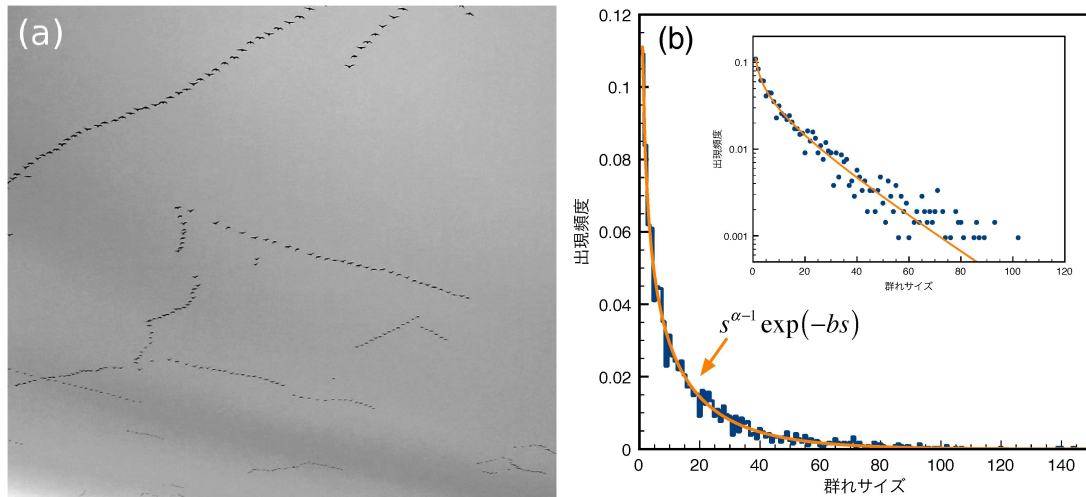


図 1: (a) 複数のマガンの群れがねぐらに向かって飛行する様子。宮城県大崎市で撮影。(b) 飛行中のマガンの群れのサイズ分布。挿入図は縦軸を対数スケールでプロットしたもの。実線は式 3 によるフィッティングの結果。

3 サイズ分布の解析

夕刻にマガンが一斉に餌場からねぐらに帰る途上（ねぐらの湖沼から数キロメートル離れた場所）にカメラを設置し、静止画と動画を撮影する。その映像から、それぞれの編隊に属する個体数を数え、群れサイズとする。

こうした方法では、いくつかの点で、どうしても曖昧さが生じてしまう。編隊同士が非常に接近する場合もあるため、それらを一つの群れとカウントするか、区別するかについては、ある程度、主観の入り込む余地がある。それでも、ステレオカメラを用いた三次元的な計測から、V字編隊を組んで飛行する場合の個体間距離は 2m 程度であることが分かっているの、マガンの体長（翼長）と比較することで、ある程度の判別は可能である。また、複数の編隊が空中で立体交差する場合は、画像が重なってしまい、個体数が正確に数えられない場合もあるし、カメラの画角に収まらない程に巨大な群れもときに出現するため、非常に大きなサイズの群れ（数 100 個体以上）に対しては、系統的な数え落としが生じてしまう。しかしながら、多数回の観察を実施し、できるだけ多くの群れの画像を解析することによって、このような曖昧さは問題とならないレベルまで低減できると期待できる。

こうして得られた飛行中のマガン群れのサイズ分布を図 1 (b) に示す。3 シーズンに渡って撮影した映像から、34,140 個体をカウントし、見出された群れ（編隊）の数は 2,097 であった。群れの平均サイズは 16.3、標準偏差 19.2 である。平均と標準偏差が異なることから単純な指数分布ではないことは直ちに分かるが、事実、小さな群れサイズの頻度が指数分布と比較して有意に高い（図 1 (b) の挿入図を参照）。

いくつかの関数形を試行した結果、構成する個体数が s であるような編隊の出現頻度 $f(s)$ は、 α と b を定数、 A を規格化定数として、

$$f(s) = As^{\alpha-1} \exp(-bs) \quad (3)$$

で、分布全体にわたって、よく表現できることが分かった。ここで、フィッティングの結果、 $\alpha = 0.58 \pm 0.02$ 、 $b = 0.041 \pm 0.003$ を得た。

この分布形で意外なのは、群れとしては 1 羽のものが最も多く、マガンの家族数に対応するサイズに、顕著なピーク等は現れず、サイズと共に、群れの出現頻度は単調に減少しているように見える点である。このことは、群れのサイズを決めている要因は、高次の情報処理を伴うような個体間の関係性とは別のところに求められる可能性を示唆しているように思われる。

4 群れの形成過程とそのモデル

田畑などでマガンは数十羽程度の規模で見張り番を交代しながら集団行動しており、1羽で採餌を行っている様子を見かけることは（少なくとも著者の経験では）全くないことから、飛行中の群れのサイズは、地上でのそれとは異なると考えられる。

実際、ねぐらに向かう途上で、編隊同士が合体したり、あるいは大きな群れが二つ以上の群れに分裂する事象が頻繁に生じており、こうした過程が繰り返されることによって、採餌時の群れサイズの情報が失われ、ある定常的な分布形（式3）が現れたのではないかと予想できる。

図1(b)に示したサイズ分布のデータは、異なる年の複数回の観察結果から得たもので、観測日・場所ごとに、群れのサイズ分布は少なからず変わるものの（サンプル数が少ないために、当然ばらつきも大きい）、それらを合算すると一定の分布形に収斂するよう見えることから、合体と分裂のプロセスには、時期や条件に依らない共通性があるのではないかと推察される。

空中での群れ形成の素過程は、大まかに以下のように大別することができる（図2参照）：

1. 群れの最後尾に別の群れの先頭が合体し、より大きな群れとなる過程。
2. V字や鉤型などの群れの途中がちぎれ、二つ（以上）の群れに分裂する過程。

さらに、紐状の群れの途中に、単独で飛行していた個体が割り込んで、その群れの一部となる過程もしばしば目撃される。

このような分裂と合体は、相補的なプロセスと見なすことができる。すなわち、編隊が分裂した後に、分裂した「破片」は別の群れの最後尾に再び融合しようとするし、V字編隊の先頭部分が別の群れの最後尾と結合した場合、生じた横枝はじきに本隊から離脱してしまう。すなわち、合体と分裂が時間あたりに生じる頻度は、（オーダーとしては）等しいと見てよい。

以上を踏まえ、個体数を保存しながら、合体と分裂をランダムに繰り返す過程をモデル化し、その結果として、どのようなサイズ分布が得られるかを、以下に考察してみる。

鳥は三次元空間を（ほぼ）自由に運動できることから、平均場的な描像がよい近似を与えるであろう。そこで、空中のエアロゾルの凝集過程などを記述する方程式として長い研究の歴史がある Smolchowski 方程式に分裂の効果を取り入れた微分方程式モデルによって、分布関数の時間発展を記述してみる。

時刻 t でのサイズ s の群れの数密度を $f(s, t)$ として、数密度の時間発展を

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(s, t)}{\partial t} = & \frac{1}{2} \sum_{i+j=s} [K(i, j)f(i, t)f(j, t) - F(i, j)f(i + j, t)] \\ & - \sum_{j=1}^{\infty} [K(s, j)f(s, t)f(j, t) - F(s, j)f(j + s, t)], \end{aligned} \quad (4)$$

と表現する。ここで $K(i, j)$ はサイズ i と j の群れが時間あたりに合体するレート、 $F(i, j)$ はサイズ $i + j$ の群れが i と j の群れに分裂するレートである。これら二つのカーネルに適切な形を仮定することで、群れの定常的なサイズ分布が決まるプロセスが記述できるところでは期待する。

まず、合体レート $K(i, j)$ について考えてみよう。飛行するマガンの群れは、基本的に一次元（紐）状の構造物と見なすことができ、合体は、その端点（先頭と最後尾）のみで生じる。単独の個体が群れの途中に割り込むイベントも観察されることがあるが、ここではそれを無視する。もし空中で偶然ふたつの端点が出会った場合に、ある確率でそれらが結合すると考えると、反応に寄与する「表面積」は群れの大きさには依らず、一定であるべきである。すなわち、合体レートは一定値

$$K(i, j) = \beta \quad (5)$$

と考えるのが（第0近似の意味で）自然である。これは、マガンの隊形の特殊性を反映した仮定（あるいは設定）である。

他方、分裂レート $F(i, j)$ に関しては、様々な要因が関係する可能性がある。群れが分裂する様子を観察していると、「紐の切断」は群れ内部の位置（先頭、後方）に依らず、各所で起こっている。また、大型の群れになると、紐は大きく揺らぎ、いかにも構造的に不安定に見える [5]。そこで、分裂レートが群れのサイズ（より正確には、切断可能な「リンク」の数）にべき乗的に依存すると仮定し、

$$F(i, j) = \kappa (i + j - 1)^{\alpha - 1} \quad (6)$$

と置く。ここで κ は2羽からなる群れが分裂するレートに対応する定数で、 α はサイズ依存性の程度を表す定数である（以降の議論で、この α が、サイズ分布関数 $f(s)$ の指数部の α に対応することを示すが、この段階で両者は別物である）。

なお、以下の解析では、上記のべき乗的な依存性を、ガンマ関数を使って、

$$F(i, j) = \kappa \frac{\Gamma(i + j - 1 + \alpha)}{(i + j - 1)\Gamma(i + j - 1)} \quad (7)$$

と近似した場合について議論する（ $i + j \gg 1$ では両者に実質的な違いは無い）。

分裂カーネルにいずれの関数形を仮定した場合でも、 $\alpha = 0, 1$ では両者は完全に一致し、 $\alpha = 0$ は「全ての群れはサイズに依らず等しい分裂レートを持つ」場合、 $\alpha = 1$ は「群れの内部の全てのボンドが等しい分裂レートを持つ」場合、にそれぞれ対応する。

これらのカーネルの形の妥当性については、合体と分裂のイベントの系列を動画等から解析して検証されねばならないが、定量的な検討は今後の課題である。以上のカーネルを仮定した上で、Smolchowski 方程式を具体的に書き直すと、

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(s, t)}{\partial t} = & -\kappa \frac{\Gamma(s-1+\alpha)}{\Gamma(s-1)} (1 - \delta_{1,s}) f(s, t) + 2\kappa \sum_{k=s+1}^{\infty} \frac{\Gamma(k-1)}{\Gamma(k-1+(1-\alpha))} f(s, t) \\ & + \frac{\beta}{2} \sum_{k+l=s} f(k, t) f(l, t) - \beta \sum_{k=1}^{\infty} f(k, t) f(s, t), \end{aligned} \quad (8)$$

となる。ここで、 $\delta_{i,j}$ は Kronecker のデルタである。

5 定常状態の分布関数

分裂レート κ がある臨界的な値よりも小さいと、方程式 8 は定常解を持たず、大きなサイズの群れが雪だるま式に生成され続ける。このとき、全個体数 $N = \sum_s s f(s)$ は保存されるので、数密度分布 $f(s, t)$ は裾を広げながら 0 に漸近することになる。一方、 κ が臨界値を超えると、分裂と合体との間に動的な釣り合いが達成されて、一定の時間が経過した後には定常状態が得られることが数値計算によって確かめられた。定常状態が達成される条件は吟味されなければならないが、ここでは簡単のため、定常状態の存在を仮定し（具体的には、式 8 の左辺を 0 と置いて）、分布関数の定常形のみを議論することしよう。

まず、定常分布関数 $f(n)$ の母関数を

$$G(x) = f(1) + \sum_{n=2}^{\infty} f(n) x^{n-1}$$

で定義する。定常状態でこの $G(x)$ が満たすべき表式を得るため、非整数階の微分演算子 D^λ と積分演算子微分演算子 J^λ を導入する。以下の議論では、これらの演算子がべき乗関数に作用した場合に

$$D^\lambda x^n = \frac{\Gamma(n+1)}{\Gamma(n+1-\lambda)} x^{n-\lambda},$$

および

$$J^\lambda x^n = \frac{\Gamma(n+1)}{\Gamma(n+1+\lambda)} x^{n+\lambda},$$

と変換される点のみが重要である。

さらに、母関数 $G(x)$ から生成される

$$H(x) = x^\alpha J^{1-\alpha} \left[\frac{G(y) - G(0)}{y} \right] (x)$$

を定義すると、 $0 < \alpha < 1$ について、式 8 が定常状態を満たす条件として

$$-\kappa x D^\alpha [x^{\alpha-1}(G(x) - G(0))] + 2\kappa \frac{H(x) - H(1)}{x-1} + \frac{\beta x}{2} G(x)^2 - \beta G(1)G(x) = 0 \quad (9)$$

が得られる。

上の $G(x)$ に関する非整数階の微積分方程式を解くことは一般に困難であるけれども、 $f(n)$ の漸近形は、以下のようにして推定することが可能である。分布関数 $f(n)$ が n と共に指数関数的に減衰する ($f(n) \sim e^{-cn}$) 場合、 $G(x)$ の項 $f(n)x^n$ は、 $\log x > c$ であるような x に対して、 $n \rightarrow \infty$ で発散する。すなわち、 $G(x)$ はある x の周りで特異的であると考えるのが自然であるので、ここでは、その特異点 ($x^* = 1/a$ とする) の周りで母関数が

$$G(x) \sim \sum_k b_k (1-ax)^{\xi_k}$$

のように、指数 $\{\xi_k\}$ と係数 $\{b_k\}$ の組 ($k = 0, 1, 2, \dots$) を使って展開できると仮定する (ここで、指数には $\xi_0 < \xi_1 < \dots$ となるよう添え字を付けておく。また、 $G(x)$ が特異的であるために、少なくとも指数の一つは負、すなわち、 $\xi_0 < 0$ である。)

釣り合いの式 9 が、 G の特異点の周りで恒等的に成り立つためには、式 9 の左辺に現れる展開の各項が互いに相殺されなければならない。すなわち、 ξ_k という指数を持つ項が左辺中に単独で現れてはならない。

ここで、 $(1-ax)^\xi$ という項に微分演算子 D^α が作用すると、その特異性は $(1-ax)^{\xi-\alpha}$ に、同様に、演算子 $J^{1-\alpha}$ は特異性 ξ を $\xi+1-\alpha$ に変換するという性質に注意すると、式 9 左辺の第 1 項、2 項、3 項、4 項は、それぞれ指数部の組 $\{\dots\}$ を

$$\begin{aligned} \{\xi_k\} &\rightarrow \{\xi_k, \xi_k - \alpha\}', \\ \{\xi_k\} &\rightarrow \{\xi_k + 1 - \alpha\}', \\ \{\xi_k, \xi_l\} &\rightarrow \{\xi_k + \xi_l\}', \\ \{\xi_k\} &\rightarrow \{\xi_k\}' \end{aligned}$$

のように変換することが分かる。ここで $\{\dots\}'$ は「変換後」の指数の組を表す。

例えば、「最低次」の指数 $\xi_0 (< 0)$ からは、指数 $\xi_0 - \alpha$ および $\xi_0 + \xi_0$ を持つ項が生成されるが、それらが相殺されるためには、 $\xi_0 = -\alpha$ が要請される。同様の考察から、上記の指数の変換の後に、ある指数を持つ項が単独では現れないような指数の組み合わせは

$$\{-\alpha, -\alpha + 1, -\alpha + 2, \dots, -\alpha + k, \dots\},$$

であることが分かる。

すなわち、ある点 ($x = 1/a$) に $G(x)$ が特異点を持つとすると、その特異性を特徴づける指数が満たすべき必要条件が上記のように得られたことになる。そこで、改めて

$$G(x) \sim b_0(1-ax)^{-\alpha} + b_1(1-ax)^{1-\alpha} + b_2(1-ax)^{2-\alpha} + \dots$$

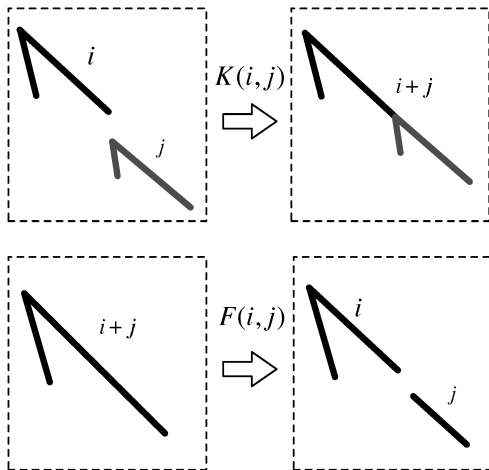


図 2: 飛行中のマガンの群れにおけるサイズ調整の素過程。サイズ i と j の群れの合体レートを $K(i, j)$ 、サイズ $i+j$ の群れが i と j に分裂するレートを $F(i, j)$ とする。

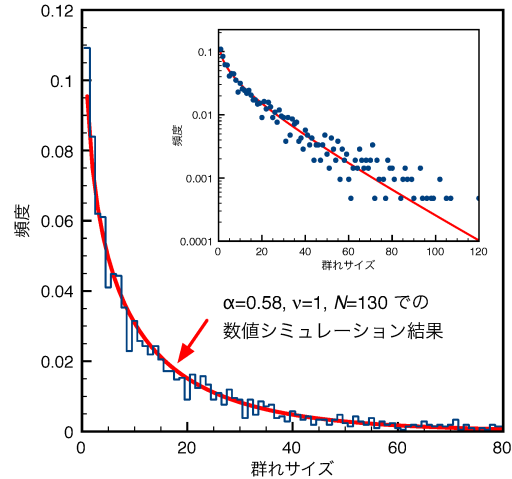


図 3: 平均場モデルの数値シミュレーションによって得られた定常サイズ分布 (実線) を実測サイズ分布と重ねたプロット。モデルパラメータの与え方については本文を参照。

と書いて、対応する分布関数の、 $n \gg 1$ における主要な項のみを取り出すと

$$f(n) = \frac{1}{n!} \frac{d^n}{dx^n} G(0) \sim \frac{\Gamma(n+\alpha)}{\Gamma(n+1)} a^n \sim n^{\alpha-1} e^{\log(a)n}$$

となる。母関数の特異点は $x > 1$ に現れるべきであるから、 a の範囲は $0 < a < 1$ で、上式の指数関数の肩の符号は負である。当初、分布関数のテールが指数関数的に減衰すると仮定して議論を出発したが、結果はそれに整合している。

6 モデルと測定結果の比較

フィールドでの観察から得た知見と、幾つかの (おそらくは尤もらしい) 仮定の下に、平均場モデルを構成し、(定常状態が達成されるような状況の下で) その定常サイズ分布が漸近的に式 3 と同じ形の関数形となる結果を得た。

また、パラメータを変えながら式 8 を数値的に解いて、得られた定常分布を調べてみると、サイズが大きい領域では、式 3 の分布形がよく再現できることも確認した。

サイズ分布を決めるパラメータのうち、 α は分裂カーネル $K(i, j)$ のサイズ依存性を決めるべき指数に対応しており、 b は、母関数 $G(x)$ の特異点と、 $b = -\log(a)$ で関係付けられる。モデル自体は、その他に、合体カーネルの係数 β と、分裂カーネルの係数 κ をパラメータとして含むが、式 9 から明らかなように、結果に影響するのはそれらの比率 $\nu = \beta/\kappa$ のみである。そして、分裂と合体が相補的に生じるという観察事実が示唆するのは、 $\nu \approx 1$ であった。

このモデルには、事実上、隠れたパラメータがさらにもうひとつ存在する。それは、系全体の個体数である。ここで用いた平均場モデルは、本来は、単位体積辺りの構成要素の数 (数密度) の時間発展を記述するものであるが、鳥の群れのような開放形においては、密度の定義が甚だ曖昧となってしまう。事実、多数の個体が飛行している状態でも、マガンが占めている空間はたかだか数百メートル程度の幅でしかないし、その領域も時々刻々と変化する。したがって、これまで数密度として扱ってきた $f(s)$ は、「分裂と合体という相互作用が可能な領域内に見いだされるサイズ s の群れの数」と解釈するほうが自然である。

すると、モデル方程式4の初期条件として与える分布関数 $f(s, 0)$ から決まる全個体数 $N = \sum_s s f(s, 0)$ (系の保存量) はもう一つの間接的パラメータと見なすことができる。

パラメータ ν と N を調整することによって、モデル方程式の定常分布を決める b が変化する。そこで、 $\nu = 1$ に固定し、初期条件を様々に変えた方程式8の数値シミュレーションから、観察結果の b の値 ($b = 0.041$) が最も良く再現されるような N を探した。その結果は $N = 130$ で、これが、マガンの有効相互作用個体数のひとつの見積もりを与えるものと考えられる。

こうして、図3に示すように、モデルの定常分布は、1個体程度のごく小さい群れを除いて、観測された分布を全体的に良く再現することができることが分かった。

7 まとめ

マガンは、基本的には家族を単位として行動するが、餌場やねぐらに移動する際には、多数の「家族」が集まって、巨大な紐状の隊列を形成しながら飛行する。そうした隊形については、飛行の際に生じる渦場を利用して、飛行コストを節約しているという解釈が一般的であるが、群れとして行動すること自体は、マガンが被食者であって、自衛のための戦略と見ることもできる。

編隊飛行を行う際に、盛んに鳴き合い、また、頭の方を変えながら周囲の様子を伺っている彼らの様子から、群れのサイズは何らかの自律的・能動的な調整機構によって決まっているのではないかと、研究の当初は予想していた。

ところが、サイズ分布に注目する限り、単純な平均場モデルが観察結果を良く再現するという意味では、群れのサイズ調整は、偶然性に支配された物理的なプロセスの結果であるように見える。あるいは、サイズは調整されていなかった、というべきかもしれない。

無論、このような結果は、平均化された集団を対象として問題を設定したために得られたもので、現実には、個体同士は活発にコミュニケーションを交わし、複雑に相互作用しながら行動していることは言うまでもない。マガンの飛行について、そうした相互作用が群れとしての振る舞いに反映される様子を見るためには、もう少し時間と空間の解像度を上げる必要があるのかもしれない。

参考文献

- [1] 例えば、次のレビューを参照：T. Vicsek and A. Zafeiris, *Physics Reports* **517** (2012) 71.
- [2] H.-S. Niwa, *J. Theor. Biol.* **224** (2003) 451.
- [3] M. Griesser, Q. Ma, S. Webber, M. Bowgen, and D. J. T. Sumpter, *PLoS One* **6** (2011) e23438.
- [4] Y. Hayakawa and S. Furuhashi, *Phys. Rev. E* **86** (2012) 031924.
- [5] Y. Hayakawa, *Europhys. Lett.* **89** (2010) 48004.