

マガンの群れの集団動力学

早川 美徳 (東北大学教育情報基盤センター)

1. はじめに

煮物にガンモドキは付きものであるし、ガンヅキやラクガンは定番の和菓子である。切手の意匠としても良く知られた歌川広重の「月に雁」に限らず、浮世絵や日本画にはガンをモチーフにしたものも多い。このように、雁(ガン、カリ)は生活の中でもしばしば耳にする鳥名であるが、現在の我が国で、実際に大空を飛ぶ様子を見る機会は限られているかもしれない。

筆者は宮城県に暮らしているが、同県の北部では、今でもガン類を当たり前のように目にする事ができる。というのは、この地域に点在する湖沼を安全なねぐらとして、また、その周囲に広がる広大な田畑は格好の採餌場所として、ガンを含む多くの渡り鳥がこの地で越冬するからだ。コンビニで買い物をして、駐車場でふと空を見上げると、賑やかに鳴き合いながら、ガンの群れが当たり前のように頭上を通り過ぎていく。ひとつの沼に(近隣の人口を遥かに超える)数万以上の個体が集まる時期もあるようだ。その中でも突出して数が多いのがマガンで、体重が2 kg程度、翼長(翼の端から端までの長さ)1.5 m程度と、飛行動物としてはかなり大型の部類に属する。額のあたりが白いことから、英語ではwhite-fronted gooseと呼ばれ、亜種も含め、北半球に広く生息しているようである。そして、彼らが群れて飛行する様子を、二、三の物理的な視点から捉えてみようというのが、この小文の主題である。

2. V字型の飛翔隊形

ガンやハクチョウなどの渡り鳥の飛行と言えば、まず頭に浮かぶのが、そのV字型の飛翔隊形であろう。前方の個体の斜め後方に位置しながら飛行すると、前方の翼端から生じている渦の上昇成分から追加の揚力が得られるため、その結果、「楽に」飛ぶことができるはずである。こうした飛行コストの節約効果がV字型の隊形の理由であろうと考えられている。^{1,2)} 隊列を組むことで、飛行に必要なエネルギーを10%程度以上減らせる、という見積もりもある。実際にマガンの群れの様子を観察していると、綺麗なV字ばかりとは限らず、鉤形や紐状など、その形にはバリエーションがあるものの、確かに、前方の斜め後方に位置しようと「努力」しているように感じられる。

それでは、彼らはどれくらい正確に互いの位置を調整しているのだろう。自作のステレオカメラを野外に持ち出し、V字で飛行している群れをビデオ撮影して、三角測量の原理で軌跡を調べてみた。そのデータをもとに、飛んでいる

マガンの視点になって、自分の位置を原点として、ひとつ前方の個体が相対的にどの位置を飛んでいたのかを数秒間プロットしてみた例が図1である。群れを構成する個体毎に、進行(速度)方向、進行方向に直交し水平面に平行な方向、そして上下方向に座標を設定し、前方の最近接個体の相対位置を重ね書きしてある。図で点の密な領域が、マガンが「好む」配置ということになる。

こうした計測を通じて、隊列を成す個体はほぼ同じ(平均的には、後方の個体のほうがやや高い)高度で、後方の個体は前方に対して、進行横方向にかなり正確に1 m程度の間隔をおいて飛行していることが分かる。一方、進行方向については、着目するペアによって数十 cmから数メートル程度と、間隔にかなり大きなばらつきがある。翼端から生じた渦糸はほぼ真後ろに伸びているはずなので、横方向の1 m強という間隔は、渦場の上昇成分の恩恵を最も受けやすい位置が選択された結果と解釈できる。さらに、横から風を受けているような状況では、相対位置が風向きに応じてずれることも確認できるので、群れの位置決めが気流の影響を受けていることは間違いなさだろう。

飛行機が当たり前のように空を行き交っている現代でも、(生きている)鳥が集団で飛行する状況を周囲の流体場まで考慮して精密に計算するのは未だに難しいようである。高レイノルズ数の状況(10^6 以上)で、複雑に運動し変形する体と羽。例えば、生きた状態と死んで冷凍状態の鳥を風洞に入れて比較すると、境界層の剥離の状況は大きく異なるという。¹⁾ けれども、ここではそうした詳細には立ち入らないで、「マガンは隊列を組みたがる」という性質から生じる集団的な振る舞いにフォーカスすることにしよう。

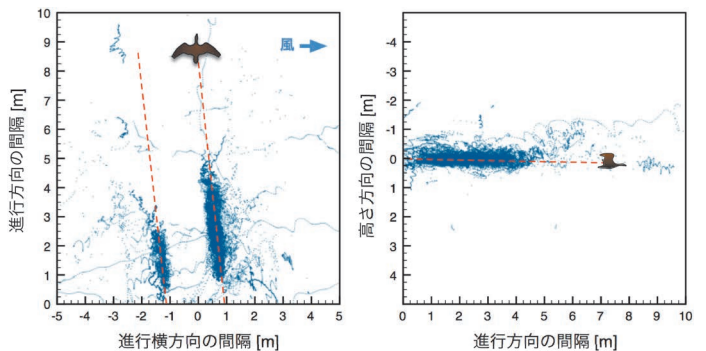


図1 前方の最近接個体との相対的な位置関係。大きな群れが数秒間飛行する間の変化を各個体について重ね書きしたもの。位置関係によっては、隊列中のひとつ前の個体を表していない点も含まれることに注意。軸の定義は本文を参照のこと。観測中、図中の矢印の向きに弱風が吹いていた。

3. 群れのサイズ分布

日中、あちこちの田んぼなどに分散して餌（イネの落ち穂や根）を食べていたマガンは、日没から薄暮にかけての短い時間帯にほぼ一斉に飛び立ち、ねぐらとなる湖沼へと戻る。そんな時間帯に、餌場とねぐらの中間的な場所に立って空を見上げると、空いっぱいには大小様々の群れが同じ方向を目指して飛行している。身を寄せながら厳しい冬を耐え、命をつないでいるその様子は感動的でさえある。

それを写真やビデオに撮って、それぞれの群れを構成している個体数（群れのサイズ）を数取り器を片手に手動で数え、ヒストグラムにまとめたのが図2(a)である。複数のシーズンに亘る多数のスナップショットからのデータを集めた結果、サイズ s の群れを見出す頻度分布 $f(s)$ はべき乗に指数関数的なカットオフを加えた形

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

(ここで、 $a=0.58$, $b=0.041$, A は規格化定数) でよく表すことができることが分かった。群れの大小は、鳥の社会的な行動様式といった極めて複雑な情報処理過程を経て、鳥自身が決めているような気もする一方で、沢山のサンプルを集めると、分布関数にはある種の決まった傾向が現れるようである。

そこで、大小の群れが形成される過程を単純化して、次のように考えてみることにする。まず、サイズ i と j の群れは、時間あたり $K(i, j)$ の頻度で合体して、 $i+j$ のより大きな群れを形成すると仮定する。事実、空中に漂う隊列を眺めていると、群れの後方に別の群れの先頭が結合する様子をしばしば目撃することができる。他方で、群れの途中がちぎれて、2つ（ときにはそれ以上）の小さな群れに分裂する事象も同じように生じている（図2(b)-(d)）。そこで、サイズ $i+j$ の群れが i と j に分裂するレートを $F(i, j)$ で表すことにしよう。こうした過程がランダムかつ空間的に一様に生じていると考えると、サイズを s 、時刻 t として、群れの数密度 $f(s, t)$ の時間発展は、平均場モデル

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

によって記述できる。例えば、右辺のひとつ目の総和記号の中の第一項は、2つの群れが合体してサイズ s の群れが新たに生じる過程を、第二項はサイズ s の群れが分裂する過程を表している。これはエアロゾル粒子の粒径などを議論する際に、古くから研究されてきたスモルコフスキー方程式（に分裂の効果を付加したモデル）に他ならない。

ここで意外にも、マガンの群れのほうが、複雑な形状の粒子の凝集を論ずる場合よりも、状況はむしろ単純と言えるかもしれない。というのは、マガンの群れは基本的に一次元

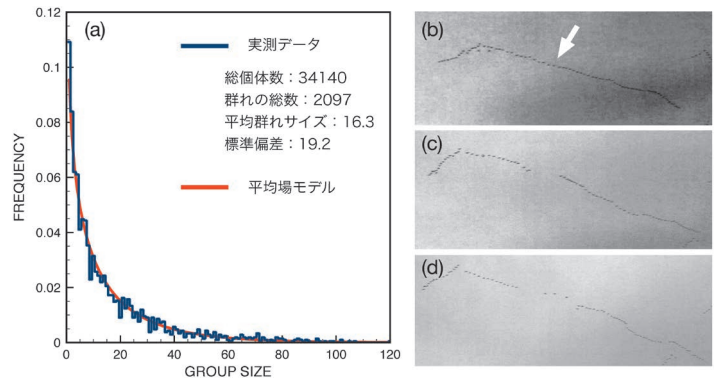


図2 マガンの群れのサイズ分布。(a) 群れサイズの頻度分布。赤線は平均場モデルで $a=0.58$ とおいた場合の定常解。(b)-(d) 分裂する群れの例。3秒おきに撮影。

的な構造であることから、「反応」ゾーンはその両端（先頭と後端）に局在しており、しかも群れの「移動度」は群れの大きさに依らないので、合体レートは、合体前の群れのサイズ i, j には依存しないだろうと考えられるからである。すなわち、 $K(i, j) = (\text{定数})$ と見なし構わないはずだ。

分裂については、紐が2つに分断されるレート $F(i, j)$ をどのように置くべきか、不明な点が多いが、ここでは、群れのサイズ（「ボンド」の数）にべき乗的に依存する、すなわち、 $F(i, j) = 2\kappa(i+j-1)^{\alpha-1}$ を仮定してみる。 $\alpha=0$ はサイズに依らず全ての群れが等しいレートで、 $\alpha=1$ は全てのボンドが等しいレートで分裂する場合に、それぞれ対応する。

さて、多数の群れが餌場からねぐらに向かう間には、空中で何度も合体と分裂を繰り返すはずで、そのサイズは次第に定常的な分布に近づいていこうと想像できる。そこで、上記のような反応レートを仮定した上で、スモルコフスキー方程式の定常解を調べると（紙数の都合でその詳細は省略するが）、まさに式(1)の分布型が得られ、分裂カーネル $F(i, j)$ 中の指数 α が分布関数のべき指数を決める ($a=\alpha$ である) ことが分かった。³⁾ すると、観察から得られた $a=0.58$ は、「大きな群れほど分裂しやすい」（ただし、ボンドあたりで考えると、分裂レートは減少する）傾向を示唆していると解釈できる。

このモデルで個体の総数 $M = \sum_s s f(s)$ はもちろん保存するが、分布関数中のもうひとつのパラメータ b は、この M を通じて決まる。そこで、観察から得られる b を再現するような M を数値的に求めたところ、 $M \approx 130$ が得られた。この数は、マガンが群れを構成する際にどの程度の数の個体と相互作用しているのかを表す指標と解釈できる。

このように、沢山の群れが同時的に空中にある場合、そのサイズに関する限り、マガンの群れは「合体と分裂を繰り返す紐状の凝集体」と考えて差し支えなさそうである。

4. 群れを伝搬する波動

前節で述べたように、頻度としては相対的に小さな群れ



図3 基線長約2mでステレオ撮影したマガンの群れ。両眼視すると、群れが空中に浮んでいる様子が分かる。手前の群れはカメラから約45mの高度を水平に飛行している。

が多いものの、長く観察を繰り返していると、ときには図3に示すように数十を超えるような大きな(長い)群れが出現することがある。筆者が撮影した動画が、動物行動の映像データベース (<http://www.momo-p.com/index.php?movieid=momo131007un01b>) に登録されているので、この記事と合わせてご覧いただきたい。こうした大きな群れも、いずれは分裂や組み替りが生じるものの、数十秒から分程度の時間スケールでは、一本の運動する「紐」と見なせる場合がある。その動きをよく観ると、鞭がしなるように揺らぎながら、波が群れの前方から後方に向かって伝搬し、しかも、波の振幅は群れの後方に向かうほど増大しているように見える。

そうした揺らぎの性質を調べるため、時刻 t ごとにV字の片側に直線を当てはめ、群れの先頭から n 番目の個体の直線からのずれを $w(n, t)$ とし、その時間・空間的な変化を濃淡で表した例を図4(a)に示す。こうした解析を通じて、波は分散的で先頭から後方のみ伝搬しており、長波長の位相速度は約7個体/s、等の知見が得られている。⁴⁾

このような波動はどのように生じるのだろうか。上空の気流の乱れが群れの隊列を乱している可能性もあるが、揺らぎが増幅されながら後方に伝搬する直接の説明にはならない。むしろ経験的には、強風時よりも風が凪いだ条件下でのほうが、巨大な群れが出現し、こうした波動がより顕著に見られるようである。

群れの中で、後方の個体は前方の斜め後ろに位置するよう調整されているのはすでに述べたとおりであるが、その調整時間のスケールを、前後の加速度相関から調べてみると、進行方向に対して水平横方向の位置合わせが最も「遅い」傾向にある。翼端渦の恩恵に与ろうとすれば、その影響が最大化されるような位置(前方の翼端付近から後方に長く伸びた領域)を注意深く探らなければならないはずである。計測結果からは、前後の間隔と高低差についての相関時間は短く(1回の羽ばたき程度)、おそらく視覚情報に

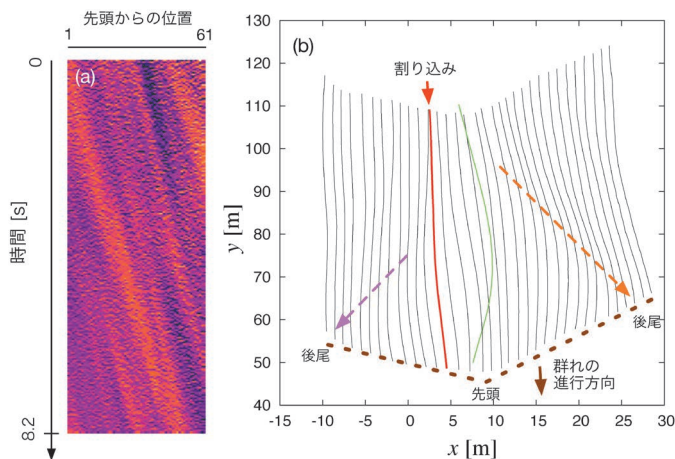


図4 マガンの群れを伝搬する波動。(a) 61羽が連なった群れが約8秒飛行する間、群れの中での平均的な位置からの変位を色の濃淡で表現し、時間・空間プロットした例。(b) V字型の群れ(茶色の破線はその概形)の一部にマガンが割り込む様子。黒線は隊形を成して飛行している各個体の3.5秒間の軌跡を水平面に投影したもので、赤で示した個体が矢印の位置から割り込みをかけている。割り込み位置よりも後尾の個体が進路を調整し「隙間」を作っており、その付近からマゼンタ色の破線に沿って、軌道の変形(湾曲)が後尾に伝搬している。また、先頭をはさんで、割り込みとは反対側の「枝」でも、先頭付近で生じた軌道の揺らぎが伝搬の様子が確認できる(オレンジ色の破線)。緑色の実線は、V字編隊のすぐ下を飛行しながら割り込みを試みたものの失敗した個体の軌跡。横方向のスケールを拡大していることに注意。

頼って短時間に調整されているのではないかと想像される。それに対して、横方向の最適位置は横風の影響も受ける上に「見えない」ため、その調整には、羽ばたきにして数回程度以上の、さらなる遅れを伴うようなのである。

一方、前方の個体は、後方をどれくらい「気にして」飛んでいるのだろうか。頻度は低いものの、群れの途中で別の個体が割り込みをかけたり、群れから1羽が離脱したりする事象が偶然撮影されることがある(図4(b))。その際の軌跡を調べてみると、割り込みや離脱が起こった位置よりも後方の個体は航路を再調整するが、先頭寄りの個体が進路を変える様子は見られない。すなわち、相互作用は非対称で、後方側は前方に影響を及ぼさない。

これらの知見をもとに、状況をうんと単純化して、マガンの一次元的な群れを(特殊な)バネ・質点系と見なしてみよう。先頭から n 番目の個体の群れの進行方向に対して水平横方向の最適位置からのずれを x_n とすれば、その現象論的な運動方程式は

$$m\ddot{x}_n = F(x_{n-1} - x_n) - \gamma\dot{x}_n \quad (3)$$

と書ける。ここで、 m は鳥の質量、右辺第一項は非対称な相互作用で、この項が通常のバネ・質点系との大きな違いをもたらす。また、第二項は流体からの抵抗よりもむしろ能動的な速度調整からの寄与が大きく、その意味で、 γ は「速度フィードバック係数」と解釈するのが適当である。この式は、一次元交通流を抽象化したモデルとして良く知られている最適速度(OV)モデルに他ならない。⁵⁾ OVモデルでは、車両の密度に応じて系の動作点が変わり、渋滞領域が疎密波として伝搬する解を持つことが知られている。

マガンの飛行について、「社会的相互作用」 F の具体的な形はよく分からないものの、形式的に $F(\delta x) = a_1\delta x + a_3\delta x^3 + \dots$ と展開してみる。そして、系の線形安定性を調べてみると、無次元量 $\hat{a}_1 = ma_1/\gamma^2$ に応じて、 $\hat{a}_1 < 1/2$ では系は線形安定であるが、 $\hat{a}_1 > 1/2$ で不安定化し、前方で生じた擾乱が後方で拡大することが分かる。また線形波の(無次元)位相速度は \hat{a}_1 で与えられる。^{*1}

ここで、マガンの羽ばたき時間(約0.25秒)を系の特徴的な時間^{*2}と考えると、観測された位相速度(7個体/s)から、 $\hat{a}_1 \approx 1.7 > 1/2$ となるため、系は不安定領域にあること、仮想的な「バネ定数」は $a_1 \approx 50 \text{ N}/(\text{個体間隔})$ 程度であること等が、かなり荒い議論ではあるが、推定できる。

ここまでをまとめると、マガンの一次元的な隊列は、それが維持されている限りは、一次元交通流の別バージョンという枠組みで捉えることができ、波動は「空中で生じたある種の渋滞」と見なすことができそうである。

では、こうした波動の伝搬はマガンに限って見られるのだろうか。マガンよりさらに大型のハクチョウもV字飛行をするが、紐状の隊形はより安定しており、筆者が知る限りでは、揺らぎが拡大しながら伝搬する様子は見られない。一方、マガンよりも少し小型のカリガネなどのカモ類は、紐状の隊形は呈するものの、群れの構造は乱れやすく

乱雑である。ひとつの可能性として、上記のモデルのパラメータ領域が、ハクチョウは線形安定領域に、カリガネはより不安定な領域に位置していると考えerことで、群れの「乱雑さ」の起源を説明できるのではあるまいか。式(3)のモデルは、不安定点の近傍での遅いダイナミクスがソリトンのように振る舞うことが分かっているが、群れの中を波が時間・空間共にゆっくりと伝搬している様子から類推すると、マガンは(上記の推定よりもさらに)不安定点に近い臨界的なところに位置している可能性もある。

5. おわりに

東日本大震災のしばらく前から、休日になると観察に出かけ、屋外で何時間も空を眺めていることが多くなった。鳥がやって来はしないかと目を凝らしてうちに、思いのほか沢山の飛行機が頭上を行き交っていることに驚かされる。ジェット旅客機ともなれば、翼端渦の影響はマガンの比ではなくて、例えば、その影響を緩和するためにウィングレットを取り付けただけでも、十分な省エネ効果を発揮するようである。さらに進んで、旅客機をマガンのように編隊飛行させることで燃料を節約してはどうか、といった論文や記事を何度か目にしたこともある。また、最近ではドローンと呼ばれる小型の無人飛行機が生活の様々なシーンで実用化されようとしているので、そう遠くない未来、空のあちらこちらで人工的な飛行物体が「群れ」を成して行き交うような時代が到来するのかもしれない。ドローンとカモが仲良く編隊飛行していたところが、ドローンの運ぶ宅配便の中身はネギだった、というようなこともあながちあり得ないとは言えないだろう。

物体を「群れ」で飛行させるためには、当然、事故を起こしたり効率が悪くなったりしないよう、集団飛行のための特別な設計や配慮が必要ははずである。そんな際、マガンに限らず、鳥や昆虫の集団飛行をよく調べることで、新しい発想や手がかりが得られそうな気がする。

参考文献

- 1) C. J. Pennycuik: *Modeling the flying bird* (Academic Press, 2008).
- 2) A. Azuma: *The Biokinetics of Flying and Swimming*, 2nd ed. (Amer. Inst. of Aeronautics, 2006).
- 3) Y. Hayakawa and S. Furuhashi: *Phys. Rev. E* **86** (2012) 031924.
- 4) Y. Hayakawa: *Europhys. Lett.* **89** (2010) 48004.
- 5) M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata and Y. Sugiyama: *Phys. Rev. E* **51** (1995) 1035.

(2015年1月31日原稿受付)

*1) バネが強いと、非対称な相互作用によって前方の変位が下流側に伝搬する過程で、オーバーシュートの影響が拡大される。対称な相互作用では、このような挙動は生じない。

*2) 速度調整に要する時間 m/γ が羽ばたき1回程度分に対応すると仮定。