

鳥の群れの集団ダイナミクスとその計測

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

動物の「群れ」の例は枚挙にいとまがない [1]。中でも、ハクチョウやガンなどの大型の渡り鳥が呈する V 字型の飛翔隊形は、よく知られ少なからず研究もされているにもかかわらず、不明な点が依然として多い。V 字型の隊形は、ガン・カモ類だけでなく、ツル類やウ類などの大型の鳥類で観察され、後方を飛行する個体が前方個体のやや側方に位置し、それが連なることによって、全体としては紐状の隊形を形成する。先頭から二股に分岐する場合は V 字型や鉤型となるが、折れ曲がりの無い線状のものもしばしば観察される。

このような隊形が現れるのは、流体力学的な効果によって飛行コストが減じられるかである、という説が有力である。鳥に限らず、有限翼の後方には翼端渦が生じるが、前方個体から生じた後方気流は、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の速度成分を持つ。そのため、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、という考えである。

その一方で、鳥の目が頭の左右に位置し、視野が交叉する範囲が小さいことを考慮すると、視覚的に近接個体とより多くの情報をやりとりするために、互いに斜め向きの位置関係を維持している、という説などもある。

いわゆる V 字型の「群れ」に関係した疑問を、素朴なものも含め、フィールドで実際の群れを計測している立場から筆者なりの視点で幾つか挙げてみる：

- 後方気流の三次元的な構造が後方の個体の位置を決める主要な要因であるなら、例えば、一様流中を飛行する隊形は、その速度と方向によって、群れ中での相対位置が変わるはずである。現実の群れにおいて、隊形に風の影響は現れているのか。
- 鳥の大きさや翼の形状や飛行速度等によって、後方気流の状態は強く影響されるはずである。また、一般に、大型の鳥ほど、後方の渦の影響を強く受けるであろうと想像できる。飛行隊形の形状や安定性と、鳥の種類や大きさ等との間に、物理的な条件や制約によって課せられる関係性を見出すことは出来ないか。
- V 字型の群れを呈する鳥は、滑空することは稀で、ほぼ定常的に羽ばたきを続けながら飛行している。そのような場合、当然、後方気流は定常的ではなく、羽ばたきの振動数に対応した時間振動が、後方の個体にも影響しているとするのが自然であろう。こうした気流の時間・空間構造は、例えば、羽ばたきのタイミングに影響を与えている可能性は無いか。
- 特に大規模な群れの場合、紐状の群れの構造はおおきく揺らいでおり、その中で各個体は、前方の個体との相対位置の調整に少なからぬコストをかけているように思われる。その際、各個体はどの程度先の個体まで認知しながら軌道の修正を行っているのか (群れの相互作用レンジはどの程度か)。また、調整のために要する特徴的な時間スケールはどの程度か。

これらに明快に解答することは現状ではなかなか難しいが、その手がかりとなりそうなデータは、最近の研究から得られ始めている。本稿では、今後のコンピュータ・シミュレーションや理論的な展開に期待しつつ、上記の問題意識に沿って筆者がマガンの群れの計測によって得たデータのいくつかを紹介したい。

2 飛行軌跡の解析

2.1 ステレオカメラによる計測

屋外での気流の可視化や速度場の計測は非常に困難と言わざるを得ないが、鳥の飛行軌跡の計測であれば、現時点で利用可能な機材や技術で、かなりの程度、行うことができるようになった。そのひとつは、GPSや加速度センサーを搭載した小型ロガーを個体に装着し、計測後に回収する方法で、飼育されたハトの群れ（10羽程度）の解析が行われ、群れ内部の情報伝達フローの推定などに利用されている。ただし、多数の野生の鳥に対して、ロガーの装着と回収を実施するのは困難であるため、多くの場合、ステレオカメラによる動画撮影が現実的な手法となる。

筆者は、ステレオカメラによる飛行軌跡の三次元計測システムを開発し、渡り鳥の越冬地が点在する宮城県内を中心に、V字型の隊形がよく知られるマガンの群れの動態を調べている [2, 3]。ステレオカメラの基線長（左右カメラの距離）は1~2mで、典型的なフレームレートは60fps、各カメラの画素数は2048×2048である。これを用いると、50m先の対象物に対して±4cm程度以下の感度で距離を検出することが可能である。マガンの翼端長は1.4m程度と言われているので、これは個体の位置を同定するには十分と言える。また、典型的なマガンの飛行速度は15m/s程度であるので、動画の1フレームあたりの空間移動量は0.25m程度と個体サイズよりも小さく、かなりの確度で動画像からの自動的な個体の追跡が可能である。

越冬地でのマガンは、夜間に湖沼をねぐらとし、昼間に近隣の田畑で集団で採餌を行い、日没近くになるとほぼ一斉にねぐらへと戻る。その際に、ねぐらへと向かう途上の大小多数の群れを観察することが可能である。そうした群れのそれぞれはV字型や線状の隊形を呈しており、それらが頭上を通過するような場所を選んで、ステレオカメラで撮影を実施した。

2.2 個体の相互位置

群れの中のある個体の着目し、その位置を原点として、速度方向に ξ 軸を取る。さらに、それと直交し水平面に並行な軸を η 、加えて、これら2つの軸に直交する方向に ζ を取る（鉛直上方向を正とする）。このように定義した局所的な座標を用いて、斜め前方の最近接個体の位置をプロットしたのが図1である。（ここで、処理の自動化のため、前方の個体の中で距離の最も短いものの位置をプロットしているため、個体の配置によっては、必ずしも紐状の構造の「ひとつ前」に位置していない個体が含まれている可能性がある）。

図からは、前方の個体はほとんど同じ、あるいはやや低い高度で飛行していることがわかる。このことは、フィールドで観察していると、大型のV字型隊形では、先頭よりも後尾の高度が高く見えることも符合する。

一方、進行方向に対して横(η)方向には、翼長(wing span)よりやや短い距離(約1m)が維持されている様子が明らかである。それに対して、進行(ξ)方向の個体間隔は、数メートルの範囲で、大きな自由度が許されているようである。このことは、翼端渦が後方に伸びる状況を良く反映していると解釈できる。すなわち、upwash領域は、前方個体の翼端後方の「外側」に生じているので、 η 方向には翼長

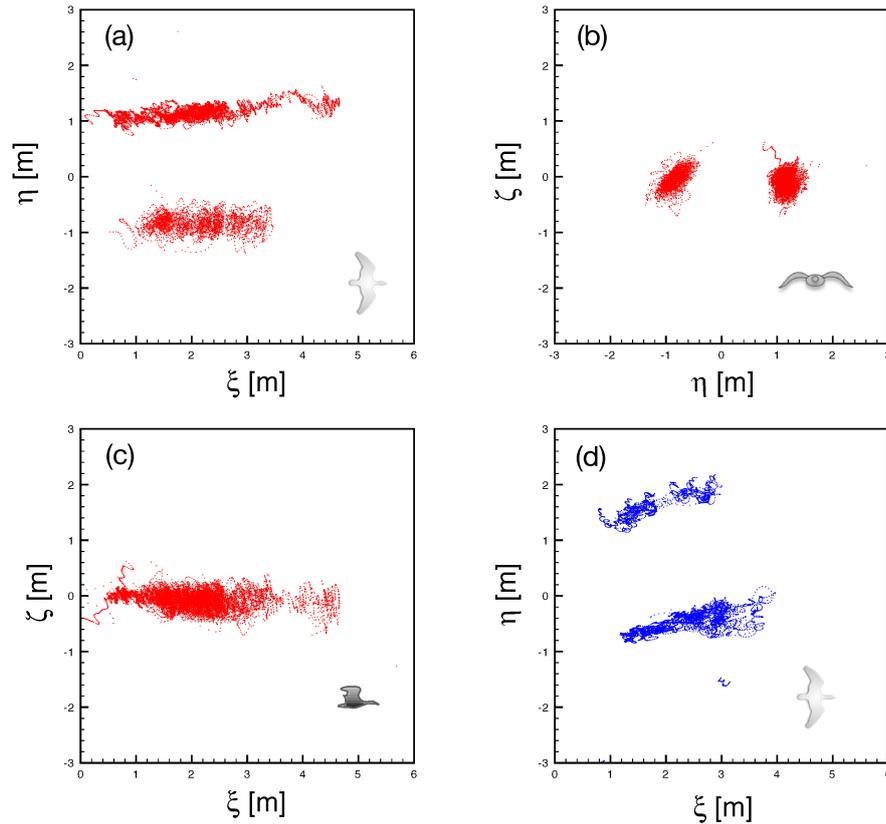


図 1: 群れの中の個体の相対位置の分布。約 7.5 秒間のステレオ動画から推定。(a) 前方個体の位置を、進行方向 (ξ) と水平横方向 (η) に射影。(b) 進行方向と縦方向 (ζ) への射影。(c) 横方向と縦方向への射影。(d) 異なる日に計測した別の群れの $\xi - \eta$ 面での位置分布。気象データの記録によると、この日は (a)–(c) のデータを計測した日に比べ、2 m/s 程度以上強い風が吹いていた。

程度の「最適」な距離が存在する一方で、進行方向については急激な流れ場の変化は無いであろうから、前後間隔についての制約は比較的緩いのではないだろうか。

前後の個体の相対位置に関して、もうひとつ興味深いのは、観測する群れによって、相対位置の分布に違いが見られる点である。V 字型や鉤型の群れの三次元配置を調べると、進行方向に対して、左右のブランチの成す角度は必ずしも等しくない。すなわち、上述の η の分布は、群れの左右の「枝」で異なる場合があるし、また、群れによっても多少異なるようである。系統的な検証はまだその途上であるが、観察地の気象観測データと照合してみると、強い横風を受けながら群れが飛行していたと思われるような状況下では、 $\xi - \eta$ 平面での相対位置分布に傾きが生じることが強く示唆される (図 1(d))。このことは、個体の配置を決める主要因が前方個体の「航跡」である (視覚的コミュニケーションではない) ことの情況証拠とも言える。

2.3 相対的な加減速

軌跡の時系列データから、個体の速度および加速度を推定することができる。位置情報には当然誤差が含まれるため、その微分量である速度や加速度の瞬間的な値には相対的に大きな誤差が含まれるものの、ある種のローパスフィルターによって処理することで、それらのトレンドを得ることは可能である。

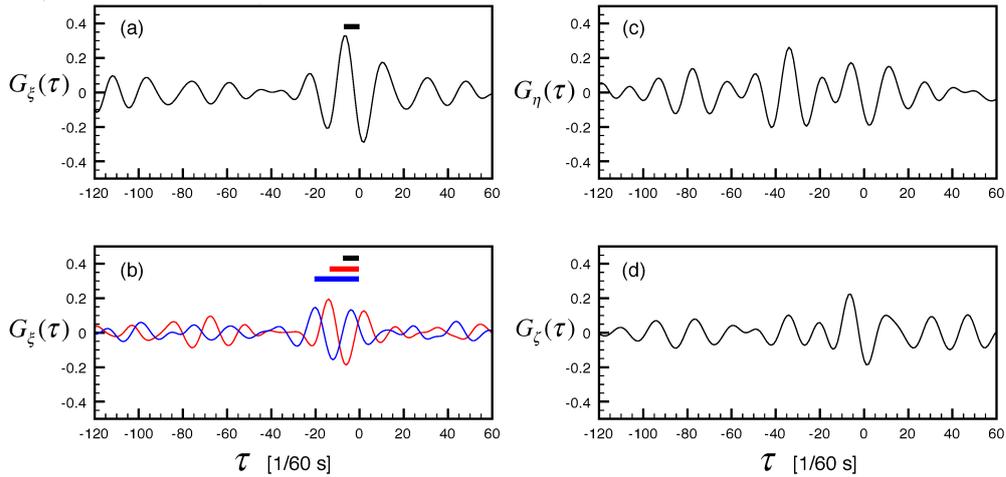


図 2: 隣接するマガンの加速度相関関数。横軸は動画フレーム時間 (1/60 秒) 単位。(a) 最近接間の進行 (ξ) 方向の加速度相関、(b) 第 2 近傍 (赤)、および第 3 近傍 (青) の個体との ξ 方向の加速度相関、(c) 最近接間の横 (η) 方向、および (d) 上下 (ζ) 方向の加速度相関。側方の相関のタイムスケールは他と較べ長い。

群れの中の i 番目の個体の速度ベクトルを \mathbf{v}_i 、 ξ 方向の単位ベクトルを \mathbf{e}_ξ として、 ξ 方向の加速度を

$$a_i^{(\xi)}(t) = \frac{1}{\Delta t} (\mathbf{v}_i(t + \Delta t) - \mathbf{v}_i(t)) \cdot \mathbf{e}_\xi$$

で定義する。ここで Δt はビデオフレーム間隔程度に取る。

これを使って、 i 番目と j 番目の個体間の ξ 方向の規格化された加速度相関が

$$G_\xi(\tau) = \frac{\langle (a_j^{(\xi)}(t + \tau) - \langle a_j^{(\xi)}(t) \rangle) (a_i^{(\xi)}(t) - \langle a_i^{(\xi)}(t) \rangle) \rangle}{\left[\langle (a_j^{(\xi)}(t) - \langle a_j^{(\xi)}(t) \rangle)^2 \rangle \right]^{1/2} \left[\langle (a_i^{(\xi)}(t) - \langle a_i^{(\xi)}(t) \rangle)^2 \rangle \right]^{1/2}}$$

時間差 τ の関数として計算できる (ここで $\langle \dots \rangle$ はビデオフレームに渡る平均)。同様に、 η 、 ζ 各方向の加速度相関 $G_\eta(\tau)$ 、 $G_\zeta(\tau)$ も数値的に求められる。

マガンの群れの前後の個体 (先頭から k 番目と $k+1$ 番目) 間の加速度相関の例を図 2 に示す。なお、群れの全体的な挙動を特徴付けるため、図のデータは、加速度相関を群れの中で隣り合うペアにわたってさらに平均化してある。相関に 1/4 秒程度の周期で振動が見られるのは、マガンの羽ばたき周期が 1/4 秒程度であって、そのタイミングで加減速を繰り返している様子を反映していると解釈できる。もし、前後の個体の加減速が完全に同期していれば、その定義から、相関のピークは 1 に近い値を取るはずであるが、データではそのピーク値が概ね 0.15 ~ 0.3 程度に留まっており、さらに、相関は時間差 τ とともに減少していることから、羽ばたきには同期する傾向は見られるものの、それは非常に「緩い」、あるいは部分的であることが示唆される。また、相関関数のピーク位置は 0.1 秒程度マイナス側にシフトしており、このことは、後続の個体の羽ばたきが、典型的に 0.1 秒程度遅れていることを表している。

トキの群れの飛行をデータロガーを用いて解析した最近の研究では、その理由は明らかではないものの、前後個体の羽ばたきが同期する傾向があると報告されている [4]。これらから、マガンに限らず、編隊飛行する鳥は、羽ばたきに伴う流れ場の「変調」の影響を受けていることはほぼ確実と思われる。

加速度相関は、運動の方向ごとに、そのプロファイルが異なる。進行 (ξ) 方向と上下 (ζ) 方向は似た特徴を持つ一方で、側方 (η) の加速度は、羽ばたきによる振動も伴いつつ、より長い時間にわたって相関が維持されている。このことは、V 字隊形を維持する上での、個体間の位置調整の方略と直接的に関係

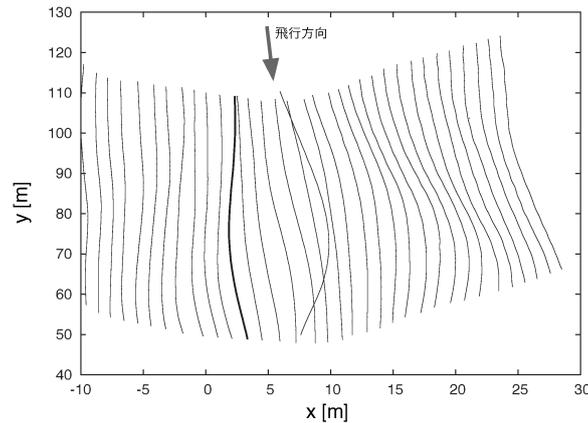


図 3: V 字型の隊形で飛行するマガンの軌跡。三次元的な軌跡を平面に射影した。図は飛行方向に対して横方向を相対的に拡大している。群れの途中に割り込みをかけている個体の軌跡を太線で示した。他の軌跡と交叉するように飛行しているように見える個体は、V 字型の隊形には加わっていない。

していると考えられる。というのは、前後の個体間隔は相対的に大きな自由度はあるものの、あるペアに注目すると、飛行の間にあまり大きく変動することは無く、一定の距離が保たれるように調整されている。前後の距離調整を万一怠ると、衝突に至る危険性も孕んでいるため、その意味でも、応答時間は短いはずである。また、上下については、前方とほぼ同じ高度が常に保たれている。すなわち、 ξ と ζ 方向の位置（あるいは相対速度）調整は、比較的短い時間スケールのうちに行われなければならない、これらは、言わば「速いモード」と言えるかもしれない。

それに対して、側方の運動については、相対的にゆっくりと調整されている。前方の個体の進路が、飛行方向の積極的な変更、あるいは、気流等の影響によって変動した場合にでも、紐状の群れの構造を維持するためには、後続は、前方個体に合わせて次々と進路を調整する必要がある。 η 方向の加速度相関を見ると、秒程度の遅れ時間に渡って相関が高い領域が見られるので、これが、進路を調整する際の特徴的な時間スケールではないかと考えられる。

数十、ときには数百の個体が連なる大規模なマガンの群れが観察されることがあるが、その際に、紐状の構造は大きく波打ながら、波動が前方から後方への伝搬する様子が確認できる。当初、筆者は、こうした波動の起源として、個体の前後距離の調整に伴う遅れが（高速道路の渋滞と同様に理由で）次々と後続に伝搬するためではないか、と考えていた。しかしながら、加速度相関のデータからは、こうした「波打ち」に対して寄与の大きい変動成分は、前後の個体間隔ではなく、水平横方向の調整機構にあることが示唆される。（ただし、その場合でも変位の方向が異なるだけで、波動伝搬のマクロな描像そのものに変更はない）。

2.4 相互作用の範囲

飛行しているマガンの隊列に、その群れには属していなかった単独の個体が割り込みを行う様子が、まれに観察されることがある。そのような事象を撮影し、三次元的な軌跡を再構成すると、割り込みをかける側の個体は、まず割り込む位置の下方まで移動し、それから次第に高度を上げながら、群れの一部に加わっている。その際に、割り込む個体よりも相対的に後方の群れの個体が進路を横方向に修正し、それがさらに後方へと伝搬することで、1 個体分が入り込めるだけのスペースが確保される。逆に、割

り込み位置よりも前方の個体に、特に位置調整は行う様子は見られない(図3参照)。すなわち、マガンは前方の個体に合わせて自らの軌道を調整する一方で、後続の運動に対しては反応しない(相互作用は完全に非対称的である)ことが、この観察結果から推定できる。なお、マガンなどの鳥類の視野は非常に広いので、このような状況でも、斜め後方の個体の運動も十分知覚されているはずである。

前節で説明した加速度相関を、第二、第三近接の個体間で計算してみると、相関は単調に減少し、かつ、羽ばたきに起因すると見られる時間遅れも、最近接での遅れ時間の整数倍で増大している(図2(b))。これにより、離れた個体間で直接的な速度調整が行われている可能性は低い(相互作用レンジは最近接に局在している)ものと解釈できる。

3 終わりに

ステレオカメラを用いた現状のシステムでは、カメラからたかだか200m程度の範囲で起こる事象しか計測することができず、数十秒程度以上の長時間に渡る群れの挙動を定量的に調べるには、GPSロガーによるバイオロギング等の、別の手法とのハイブリッドなアプローチも今後必要になると考えている。特に、羽ばたきの同期など、時間空間的な挙動の細部に立ち入ろうとすると、十分に長い時系列データを取得しない限り、定量的な議論は難しい。

また、今後、流体力学的な議論(理論や数値シミュレーション)と、現実の系での計測結果とを比較・対照するには、実際に鳥が飛んでいる状況での風の状況等についても情報を得ることが望ましいが、例えば、ねぐらに帰る際のマガンの飛行高度(概ね地上50mから100m程度)での風速や風向を知ることすら容易でないのが現状で、計測自体に、まだ多くの課題がある。

本稿で述べた研究は、野生動物を対象にしていることもあって、「受動的な観察」の段階に留まっているという見方もできるだろう。さらに踏み込んで、例えば、外部刺激に対する応答を調べることによって、系の特性を知る手がかりが得られるであろうし、位置や加速度だけではなく、神経活動などのより詳細な内部自由度についての情報を併せて取得することで、新たな論点が設定できる可能性が高い。その意味で、物理的な計測のみならず、「群れ」研究のさらなる学際的な展開に期待したい。

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] Y. Hayakawa, *Europhys. Lett.* **89** (2010) 48004.
- [3] Y. Hayakawa and S. Furuhashi, *Phys. Rev. E* **86** (2012) 031924.
- [4] S. Portugal, T. Hubel, J. Fritz, S. Heese, D. Trobe, B. Voelkl, S. Hailes, A. Wilson, and J. Usherwood, *Nature* **505** (2014) 399-402.