

ステレオカメラを用いた鳥の羽ばたき運動の解析

右衛門佐 誠¹, 水口 毅¹, 早川 美德²

¹大阪府立大学大学院 工学研究科

²東北大学 教育情報基盤センター

1 鳥の群れ運動

自然界では、多くの動物が群れを作り、集団的に行動する。その中でも、鳥の集団運動は種類や環境などによって多彩な振る舞いを示す。彼らはなぜ群れをつくり、集団的に行動するのだろうか。一般には次のような理由が挙げられる。

- 情報センター仮説
- 対捕食者戦略
- ナビゲーション能力の向上
- 空力学的なエネルギー効率の向上

情報センター仮説とは、それぞれ異なった場所で採餌を行った鳥がねぐらへと帰ってきて、翌日飛び立つときに餌が十分に採れた鳥は再びその餌場へと飛び立って行き、餌の採れなかった鳥は威勢よく飛び立っていく鳥に追従することで餌場の情報を共有することができるという仮説である。生物が群れを作る理由についてはこのような情報交換や社会性などの理由が考えられる。しかし、我々は集団運動に焦点を当てているため、このことは今回の議論からは少し逸脱している。

次に、対捕食者戦略であるがこのような理由から生物が群れを形成することは鳥だけでなく、魚群などでも観察することができる。小さい個体が集団となることでより大きな生物のように見せたり、集団の中でいることで捕食される確率を下げる目的があると言われている。

ナビゲーション能力の向上は、主に伝書鳩に関して言われていることである。彼らはそれぞれにねぐらへと帰巣する能力を有している。しかし、群れとなって飛行することで、効率よく最短経路での帰巣が可能であると言われている。

空力学的な観点からは、渡り鳥などのVやUの字の編隊飛行は群れ全体としてエネルギーを削減するような構造であることが古くから言われている。つまり、前方の個体を作る翼端渦を上手く利用し、後方の個体が飛行のためのエネルギーを削減しているという話である。

このような話は、これまであくまで仮説であった。しかし、近年の実測機器の性能の向上により、実際に飛行する鳥から位置や加速度といった情報が取得可能になったことによって、これらの仮説が検証されつつある。近年では、V字飛行するペリカンの群れの各個体に加速度計と心電図を装着することで、先頭個体に比べて後方個体の羽ばたき振動数が低く、また、心拍数が10%以上も小さいことが報告されている [1]。これは、編隊飛行によりエネルギーコストが削減されていると解釈できる。また、翼端渦を効率よく利用するためには、左右に開翼長程度離れることが理論的にも明らかにされている [2, 3]。比較的体長の大きな渡り鳥に関しては、

最近接個体の翼長方向の距離が開翼長程度であり、進行方向に比べて翼長方向の位置の揺らぎが小さいことが複数の種の実測研究で報告されている [4, 5, 6]。したがって、V字編隊を組む渡り鳥にとって、翼端渦を介した相互作用が集団運動に大きな影響をもたらしていると考えられる。

最近では、相対位置などの群れの空間構造だけでなく、鳥の羽ばたき運動にも注目されている。渡り鳥が前方個体の作る翼端渦を効率よく利用しているのであれば、前方個体の羽ばたきと後方個体の羽ばたきの間には何かしらの相関があるはずである。Portugalらは、動物園でひなから飼育した14羽のホオアカトキを、軽量飛行機の後についてV字編隊を組み、飛行するように訓練した。そして、全ての個体にGPS装置と加速度計を装着することで、群れの中の相対位置と羽ばたきの位相や振幅を実測し、前後方向の距離に応じて後方個体が羽ばたきのリズムを調節していることを報告している。そのようにすることで、後続個体の羽ばたきが先行する個体を作り出す空気の流れのパターンをほぼ正確に追従することが可能であると主張している [6]。

我々は以前から大阪の大和川において、可動式ステレオカメラを用いたユリカモメの群れの実測を行ってきた。これまでの研究でも、実測データからユリカモメの羽ばたき運動が検出されていた。しかし、カメラの時間解像度が低く、得られたデータは詳細な羽ばたき運動の解析ができるほどではなかった。今回は、羽ばたき運動の解析を焦点に当て、高速度カメラを用いた解析を行ったので、その解析結果を報告する。

2 データの取得

我々は可動式ステレオカメラを用いて、大阪の大和川を行き来するユリカモメの群れの各個体の軌道データの取得・解析を行った。ユリカモメは大阪に越冬を目的に飛来する。そのため、観測期間は2013年12月から2014年3月までの間である。ステレオカメラは市販の三脚の上に剛性の強い金属棒を設置し、その左右に2台の高速度カメラ(Lt225M (Lumenera), VS-1614H1N (Omuron))を設置したものである。本システムは、 2048×1088 の画像サイズで、最大、160 fpsでの撮影が可能である。実際には、観測時間の確保などの運用上の理由からシャッタースピードは90または120 fpsで撮影を行った。ユリカモメの羽ばたき振動数は平均3~4 Hzなので、羽ばたき運動の解析には十分な時間分解能であると考えられる。

撮影により得られた左右の画像上の各個体の位置のずれから、カメラから個体までの距離を計算することができる。画像上の個体識別は、はじめに左側の画像上の個体を手動で選択すると、右側の画像上から類似度の高い同一点を自動的に検出する。さらに、次のフレームに対しても選択されている画像と類似度の一番高い点を選択することで、連続的に個体を追尾することが可能である。類似度の計算には位相限定相関法を用いた。ただし、この方法では2羽の個体が画像上で交差する場合などはうまく2羽を追尾することはできない。再構築された軌道の連続する2点間の距離を計算し、あまりにも離れている場合には画像追尾が失敗したと判断し、その点から再び手動で解析をする。このようにして、半自動的に群れの各個体の3次元軌道を再構築することができる。

3 データ解析

3.1 羽ばたき運動

ユリカモメは状況に応じて、数10羽程度のV字編隊を形成することもあれば、何百という個体数でつらつらと紐のような群れで飛行することもある。我々は前方個体の作る翼端渦を後方個体が利用することによる相互作用の解析を念頭に置き、得られたデータの中からV字編隊を形成し、飛行しているデータを解析した。

図1は11羽で編隊飛行する群れの各個体の軌道を再構築したものである。図1(a)は各個体の3次元軌道で、(b)、(c)は軌道をそれぞれ水平方向と鉛直方向に射影したものである。X, Yは水平面内で、Xが2台のカメラの光軸に垂直な方向を、YはXに対して垂直な方向を表している。Zは鉛直方向を表している。図1から水平面内の運動が大部分であり、群れの運動はほぼ2次元的事であることがわかる。

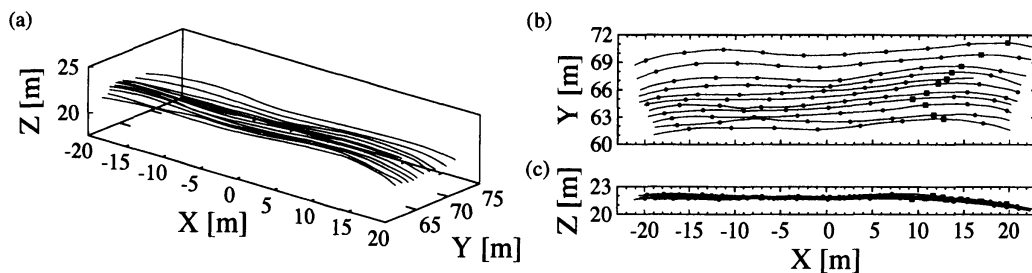


図1: 群れの軌道。(a)群れの3次元軌道。群れはXが正の方向から負の方向へと飛行している。(b)水平面内の軌道。(c)鉛直平面内の軌道。シンボルは0.5秒ごとにプロットしたもので、四角は同時刻の点を示している。また、全ての軌道は平滑化したものである。

図1に示した軌道は羽ばたきによる影響を取り除き平滑化したものであり、実際には再構築した軌道はそのままでは振動している。この振動は鳥が羽ばたいていることが原因であると考えられる。図2(d)は個体の形状変化を数値化したもので、左側のスナップショットに映る鳥の画像を楕円でフィットし、その長軸と短軸の比(アスペクト比)を示したものである。このアスペクト比と速度に含まれる振動成分(図2(a))が対応しているために、位置や速度の振動は羽ばたき運動に由来するものであると考えられる(ζ 軸の正確な定義は次節に記述するが、ユリカモメがほぼ水平に運動することから、鉛直下方とほぼ同等である)。したがって、本システムでは鳥の羽ばたき運動を画像の形状変化と再構築した軌道の振動という2つの異なる方法で数値化することができる。しかし、アスペクト比は遠方では測定できない場合や、また、撮影方向にその大きさが依存するという問題もある。そのため、鳥の羽ばたき運動を数値化するには、画像の形状変化よりも再構築した軌道に含まれる振動成分の方が適切であると考えられる。

図2(a)の実線は速度の ζ 方向成分を示している。サイン関数のような振動に加えて、振動の時間スケールよりはゆっくりとした時間スケールでの変化も観測される。我々は位置 \mathbf{r} や速度 \mathbf{v} を振動成分 $\delta\mathbf{r}$, $\delta\mathbf{v}$ とトレンド成分 $\bar{\mathbf{r}}$, $\bar{\mathbf{v}}$ に分割して解析している。

はばたき位相は δv_{ζ} の極大値から次の極大値までを0から 2π とし、その間を時間で分割している。 δv_{ζ} の極小値は鳥が羽を上に向けている状態に対応し、この位相の定義は生物学的に考

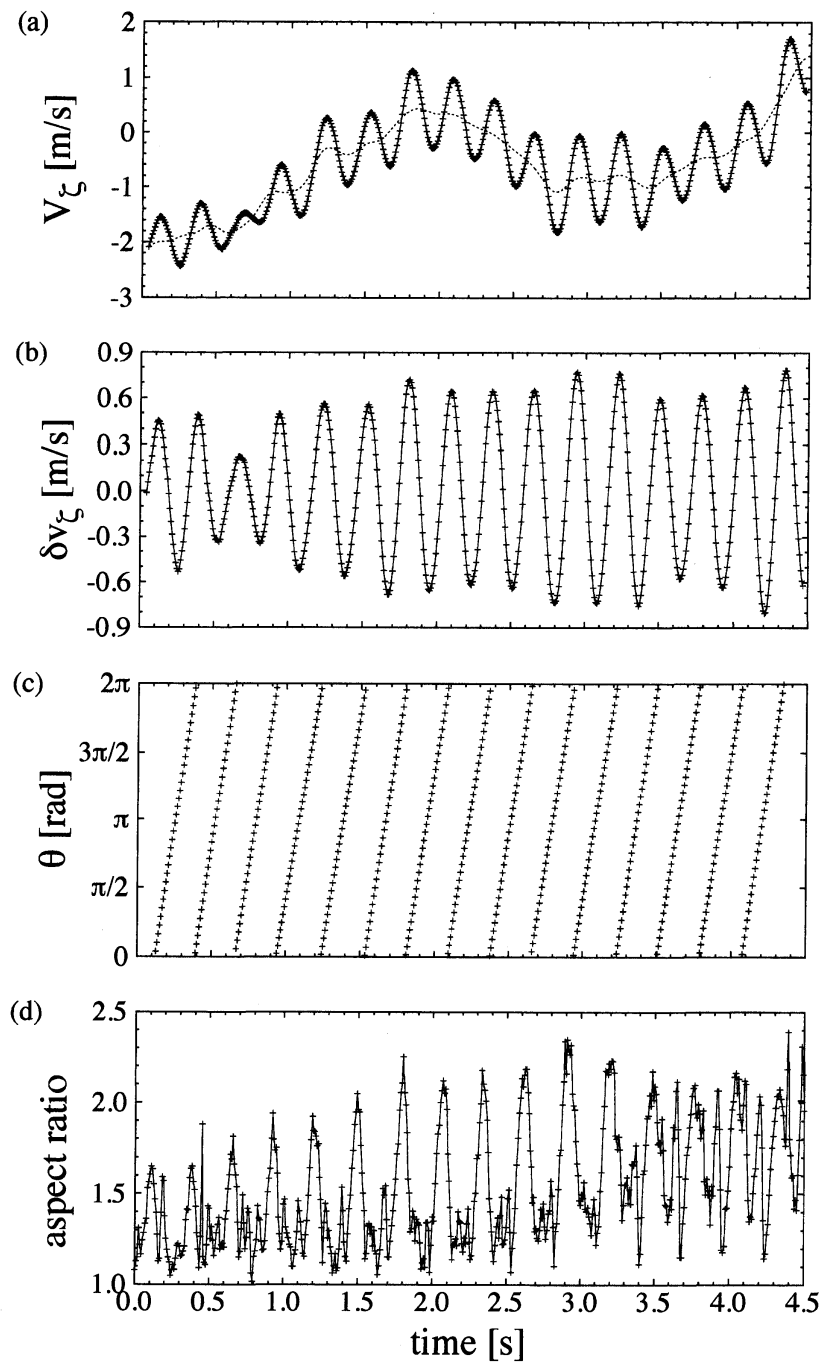


図 2: 振動成分の時系列. (a) 速度の ζ 方向成分. 実線はそのままの時系列 v_ζ で, 点線は平滑化したあとのトレンド速度の ζ 方向成分 \bar{v}_ζ . (b) 速度の振動成分の ζ 方向成分 $\delta v_\zeta \equiv v_\zeta - \bar{v}_\zeta$. (c) 羽ばたき位相 θ の時系列. (d) 左側の画像から計算した鳥の個体画像のアスペクト比.

えられている鳥の羽ばたき運動と対応している。

3.2 群れの中の羽ばたき位相

まず、各個体の運動方向を基準とした次のような座標系を設定する。

$$\begin{aligned}\hat{e}_i^\xi &= \frac{\bar{\mathbf{v}}_i}{|\bar{\mathbf{v}}_i|}, \\ \hat{e}_i^\eta &= -\frac{\bar{\mathbf{v}}_i \times \mathbf{g}}{|\bar{\mathbf{v}}_i \times \mathbf{g}|}, \\ \hat{e}_i^\zeta &= \hat{e}_i^\xi \times \hat{e}_i^\eta,\end{aligned}$$

ただし、 \mathbf{g} は重力加速度で、向きは鉛直下向きである。 \hat{e}_i^ξ は運動方向を、 \hat{e}_i^η は水平面内で \hat{e}_i^ξ に垂直な方向を、 \hat{e}_i^ζ は \hat{e}_i^ξ と \hat{e}_i^η に垂直な方向をそれぞれ表している。

この座標系をもとに個体 i からみた個体 j の相対位置を次のように定義する。

$$\begin{aligned}\xi_{ij} &= (\bar{\mathbf{r}}_j - \bar{\mathbf{r}}_i) \cdot \hat{e}_i^\xi, \\ \eta_{ij} &= (\bar{\mathbf{r}}_j - \bar{\mathbf{r}}_i) \cdot \hat{e}_i^\eta, \\ \zeta_{ij} &= (\bar{\mathbf{r}}_j - \bar{\mathbf{r}}_i) \cdot \hat{e}_i^\zeta.\end{aligned}$$

$\bar{\mathbf{r}}_i$ はステレオカメラを基準とした絶対座標である。

3.1 のようにして定義した位相を、編隊飛行する群れの全個体について計算した。図 3 は 2 つの群れに対して、各個体の平均的な位置と平均振動数を示している。 $\bar{\xi}$ は平均的な群れの進行方向を、 $\bar{\eta}$ は水平面内で $\bar{\xi}$ に対して垂直の方向を表している。各点の色が平均振動数を表している。平均振動数は群れの中の個体ごとに違っており、群れ全体として位相が同期しているという同期現象は観測されなかった。

群れの羽ばたきの同期現象に進行方向の距離 ξ_{ij} が関係していることが報告されている。また、再近接個体の η 方向の相対距離は開翼長程度であり、後方個体が前方個体の作る翼端渦を利用して飛行していることが示唆される (図 4)。

そこで、再近接個体のペアに限定し、前後方向の距離 ξ_{ij} と位相差 θ_{ij} の関係を調べた (図 5(a))。シンボルは以下のように定義される Kuramoto オーダーパラメータの位相 θ を表しており、エラーバーの長さは $2\pi(1-R)$ を描いている。そのため、位相差がそろっていれば長さは 0 となり、 $0 \sim 2\pi$ を一様に分布していると長さが 2π となるような量である。

$$Re^{i\theta} = \sum_j e^{i\theta_j}$$

赤と青の 2 つのグラフは一見するとずれており、共通点がないように見える。しかし、図 5(b) の分布関数と共に比較すると、両方のデータともに分布関数のピークの位置では $-\pi$ を中心に分布しており、また、ピークの位置より前方からピークの位置にかけて、位相差が小さくなっていく様子も共通している。分布関数のピークの位置がずれているということは群れの密度が異なるということを示している。

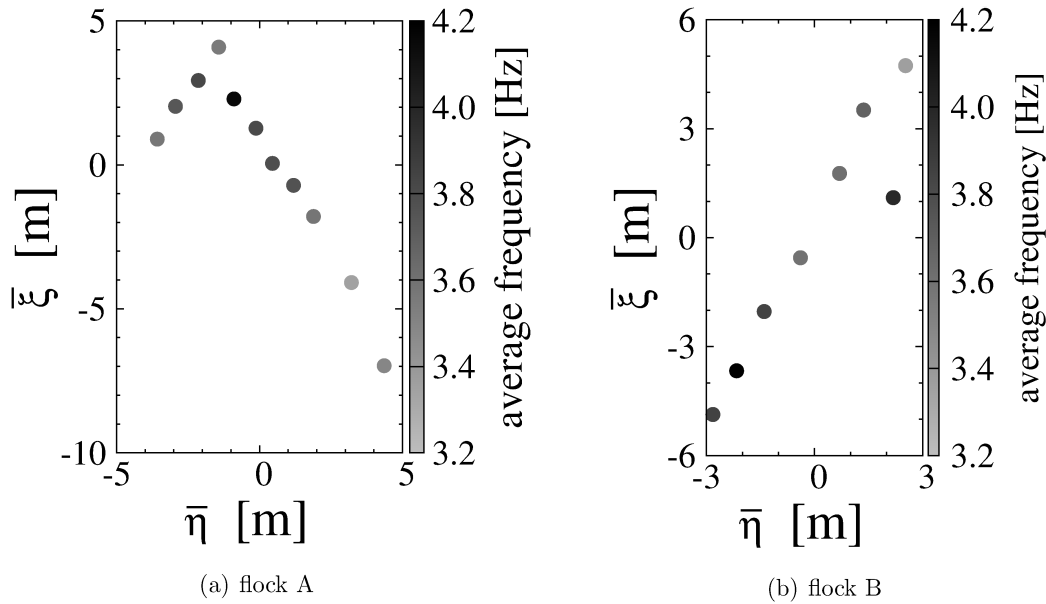


図 3: 各個体の群れの中での平均位置と平均振動数. (a), (b) は異なる群れである.

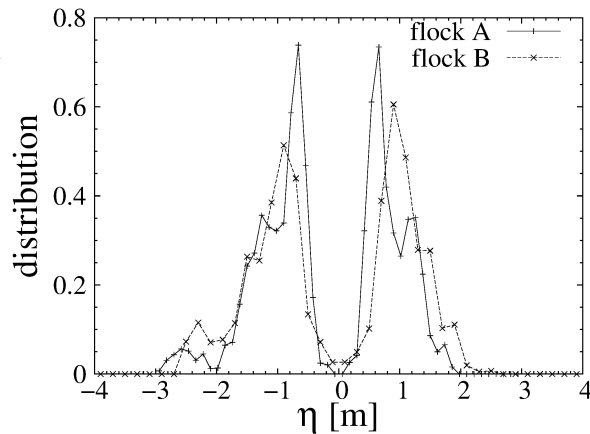


図 4: 再近接個体の η_{ij} の分布.

図 6 は図 5 の横軸を ξ_{ij} から ξ_{ij}/v_j に変更したものである. 図 5(b) ではずれていたピークの位置が, 図 6(b) では概ね重なっていることが確認できる. ξ_{ij}/v_j の分布関数が重なるということは何を意味するのだろうか. もし, ξ_{ij}/v_j が一定になるように各個体が何かしらの調整をしているなら, 速度が大きな場合には群れの密度が小さくなり, 速度が小さいと密度が大きくなることになる. これは, 衝突回避などの観点からもっともらしい仮説である.

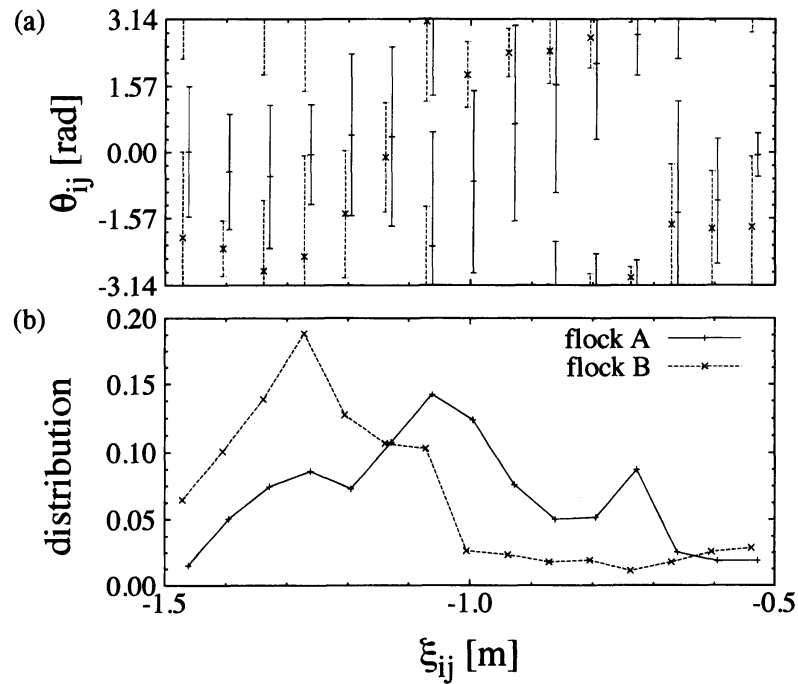


図 5: 再近接個体の前後方向の距離 ξ_{ij} と位相差 θ_{ij} の関係性. (a) は θ_{ij} と ξ_{ij} の関係性を示している. (b) は ξ_{ij} の分布関数を示している. それぞれの分布関数は重なりを避け, 結果を見やすくするために, flock A は右に 0.005, flock B は左に 0.005 移動させて表示している.

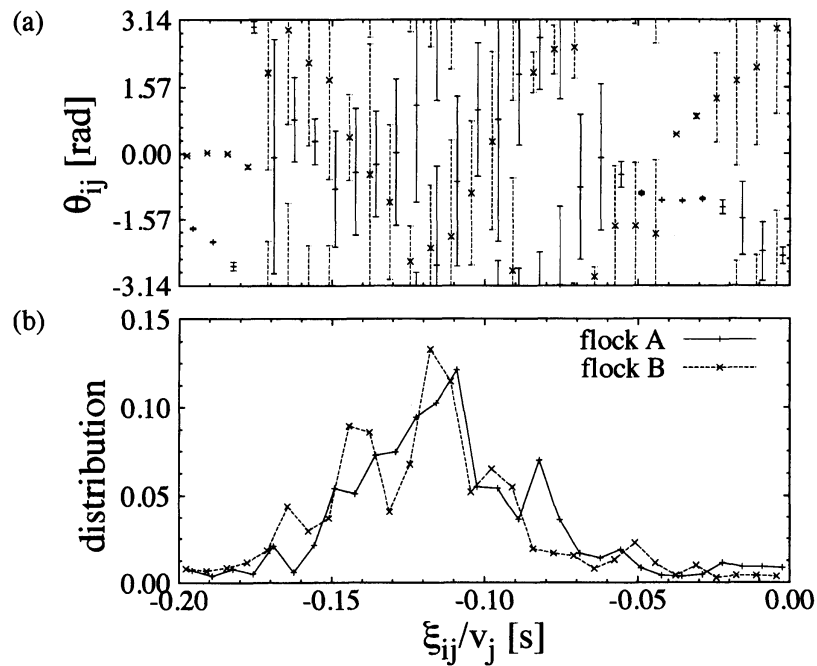


図 6: ξ_{ij}/v_j と θ_{ij} の関係性. それぞれの分布関数は重なりを避け, 結果を見やすくするために, flock A は右に 0.001, flock B は左に 0.001 移動させて表示している.

4 考察

高速度カメラを用いたステレオカメラによってユリカモメの群れ運動を解析した。V字編隊を組む群れの最近接個体の翼長方向の相対位置は、これまでの渡り鳥の先行研究と同様に開翼長程度離れていた。このことから、ユリカモメも他の渡り鳥と同様に翼端渦を利用した飛行を行っていると思われる。

羽ばたきについては、個体ごとの平均振動数が最大で20%程度は異なっており、群れの中での単純な位相同期は観測されなかった。また、空間構造との相関も見られなかった。このことは、野生の群れを観察しているために、群れの中の個体の年齢による差なども影響しているのかもしれない。ユリカモメは足の色や換羽の状態から年齢を推定することが可能である。今回のデータは画像が白黒であり、年齢を推定することができないが、年齢と平均振動数の関係は生物学的にも意義のある問題であり、今後の課題である。

最近接個体間の進行方向の距離分布は群れによってピークの位置が異なるが、速度でスケールすることで分布関数の構造が概ね一致することが明らかとなった。 ξ_{ij}/v_j が一定であるということは、衝突回避の観点から考えるととっても面白い話であるし、先行研究 [5] の遅延時間との関係を踏まえて考えると、ユリカモメの反応速度の最小時間なのかもしれない。

参考文献

- [1] H. Weimerskirch *et al.*, Energy saving in flight formation, *Nature* **413**, 697 (2001).
- [2] P. B. S. Lissaman and C. A. Shollenberger, Formation Flight of Birds, *Science* **168**, 1003 (1970).
- [3] I. L. Bajec and F. H. Heppner, Organized flight in birds, *Anim. Behav.* **78**, 777 (2009).
- [4] Y. Hayakawa, Spatiotemporal dynamics of skeins of wild geese, *Europhys. Lett.* **89**, 48004 (2010).
- [5] M. Yomosa, T. Mizuguchi and Y. Hayakawa, Spatio-temporal structure of hooded gull flocks, *PloS one* **8**, e81754 (2013).
- [6] S. J. Portugal *et al.*, Upwash exploitation and downwash avoidance by flap phasing in ibis formation flight, *Nature* **505**, 399 (2014).