

# Unsteady Vortex Lattice Method を用いた編隊飛行における非定常流の解析

Analysis of unsteady flow in formation flight using Unsteady Vortex Lattice Method

- 村上遼, 京大院理, 京都市左京区北白川追分町, E-mail: ryo@kyoryu.scphys.kyoto-u.ac.jp  
 松本剛, 京大院理, 京都市左京区北白川追分町, E-mail: takeshi@kyoryu.scphys.kyoto-u.ac.jp  
 藤定義, 京大院理, 京都市左京区北白川追分町, E-mail: toh@kyoryu.scphys.kyoto-u.ac.jp

Ryo Murakami, Dept. of Phys., Kyoto Univ., Kitashirakawa-Oiwakecho, Sakyo-ku, Kyoto

Takeshi Matsumoto, Dept. of Phys., Kyoto Univ., Kitashirakawa-Oiwakecho, Sakyo-ku, Kyoto

Sadayoshi Toh, Dept. of Phys., Kyoto Univ., Kitashirakawa-Oiwakecho, Sakyo-ku, Kyoto

Many species of large bird fly in V-shaped formation. So far, it has been widely believed that following birds can save energy using upwash generated by leading birds and some observations support this idea. In this study, we focus on unsteady interactions among flapping wings and their wakes. The flow around multiple flapping wings is obtained using an incompressible potential flow solver, unsteady vortex lattice method. We discuss how to quantify beneficial flight of following wings and evaluate it for different relative positions and phase differences of the wings.

## 1. 序論

大型の鳥の中に集団で移動する際に V 字の編隊飛行を行うものがある。これは、前を飛ぶ鳥の羽ばたきによって生じた流れの上昇成分を後ろの鳥が利用することでエネルギー消費を抑えることができるからだとされている。実際、モモイロペリカンに心拍計を用いた測定により、V 字編隊飛行を行うことでエネルギー消費が低減されることが確認されている<sup>(1)</sup>。V 字の空間的な配置に注目すると、ホオアカトキに GPS を取り付けた観測では、後ろの鳥は前の鳥から斜め 45° 後ろの位置を好んでおり、斜め後ろに配置する際には翼端の軌跡が重なり、真後ろに配置する際には反位相の軌跡になると報告されている<sup>(2)</sup>。一方、ステレオカメラを用いてユリカモメの 3 次元の位置を取得し、相対的な位置の分布を調べた結果、地面からの高さはほとんど変わらない、2 次元的な配置をしていることがわかった<sup>(3)</sup>。また、翼方向に関しては翼長程度離れている場合が多く、進行方向に関しては集団によって分布が異なることが報告されている。マガンの群れに対しても同様な報告がされている<sup>(4)</sup>。

これら観測事実から鳥が自ら好んで V 字の編隊飛行を行っているように思われるが、個体間の相対的な位置や羽ばたきの位相は何が決めているのだろうか。流体力学の範疇に於いては複数の固定翼間の定常的な相互作用を考慮することで、翼端の軌跡が少し重なる程度の配置が最適であることが示されている<sup>(5)</sup>。しかし、実際の鳥の飛行を考えると、彼らは羽ばたき飛行をしているため、流れは本質的に非定常なものである。さらに、力学的な損得とは別に、彼らにとっての生存戦略の 1 つとして敢えてあのような編隊飛行をしている可能性もある<sup>(6)</sup>。したがって、この現象を理解するためには、純粋な流体力学の問題として、非定常流を介した物体間の相互作用を考慮することが不可欠と考える。もし物理的な側面から説明できない部分があれば、それは生物学的な側面からの寄与であると言うことができるはずである。

ここでは数値計算によるアプローチを考える。大型の鳥の飛行の場合、Reynolds 数は  $10^5$  程度と、決して小さくはない値になる。加えて、羽ばたきのような複雑な境界条件の変形を伴うため、3 次元のシミュレーションには多くの工夫と計算資源が必要となる。Ghommam et al. は離散要素法の一つである Unsteady vortex lattice method (UVLM) を用いて複数の羽ばたき翼のまわりの流れを計算し、適切な配置をすること及び群れの個体数を大きくすることで揚力・推力・効率が大きく改善されることを示した<sup>(7)</sup>。UVLM は 3 次元ポテンシャル流のソ

ルバーで、離散化した渦輪要素の循環と位置の時間発展を追う。特徴は、mesh-free であるため計算コストが低いことと、流れの非定常な特徴を捉えることができること、翼の変形を容易に与えることができることである。したがって、前述の計算する上での困難を回避することができる。羽ばたきの制御や最適化といった、計算を繰り返す必要がある場面においての有用性が示されている<sup>(8)(9)(10)</sup>。

本研究の目的は、複数の羽ばたき翼のまわりの非定常流を UVLM を使った数値計算によって求め、どのような相対的な位置及び位相差であれば、後ろの翼は「得」をするのか、定量的に評価することである。そのためには何を以って「得」をしているのか定義する必要がある。従来の研究では揚力  $L$ 、推力  $T$  に加え、次式で定義される効率が評価基準として使われている<sup>(7)(8)(9)</sup>。

$$\eta = \frac{\bar{T}U}{\bar{P}_{in}} \quad (1)$$

ここで、バーは時間平均、 $T$  は推力、 $U$  は飛行速度、 $\bar{P}_{in}$  は power input で、翼の表面での積分で定義される。

$$P_{in} = \int_{wing} p \mathbf{V}_b \cdot \mathbf{n} dS \quad (2)$$

ここで、 $p$  は圧力、 $\mathbf{V}_b$  は翼の運動の速度である。本研究では、これらの評価基準やその定式化の妥当性についても議論する。

## 2. 数値計算

### 2.1 Unsteady vortex lattice method

Unsteady Vortex Lattice Method (UVLM) は非圧縮ポテンシャル流の解法の 1 つである<sup>(11)</sup>。いま、翼の表面の厚みのない境界層と翼の後縁から延びる後流以外は渦なしであると仮定する。厚みのない翼の表面を格子状に区切り、パネルに分割する。パネルの各辺が同じ循環を持った渦線を表しており、1 つのループ、すなわち渦輪になっている。渦は Biot-Savart の法則に従って速度を誘起する。

$$d\mathbf{u} = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\mathbf{r} \times d\mathbf{l}}{r^3} \quad (3)$$

流れ場自体は束縛渦及び自由渦が誘起する速度と一様流を重ね合わせて求めることができる。

$$\mathbf{u} = \nabla\Phi_b + \nabla\Phi_w + \mathbf{U}_\infty \quad (4)$$

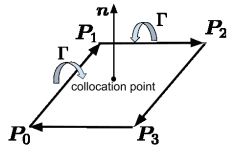


Fig. 1: A vortex element is characterized by circulation and position of corners. The center of a panel is called collocation point.

UVLM は端的に言うと、翼の表面の渦輪（束縛渦）と後流の渦輪（自由渦）の循環と四隅の位置の時間発展を記述する手法である。それぞれの更新の仕方は次の通りである。

まず、束縛渦の更新の仕方について説明する。束縛渦の位置は翼の表面に束縛されているため、こちらから与えた変形に従って変えていく。循環の値は、束縛渦の各パネルの collocation point にて境界条件 (no-penetration) を課すことで得られる連立方程式を解くことで陰的に求まる。

次に、自由渦の更新の仕方について説明する。自由渦は毎時間ステップごとに後縁の束縛渦を放出することで生じる。いま非粘性流体について考えているため、一旦放出された渦の循環は変わることはない。位置は渦輪の四隅をその点での流れに従って 1 次オイラー積分することで更新する。

力の計算には Katz and Plotkin の方法<sup>(11)</sup> や, Joukowski の定理を使う方法<sup>(12)</sup> がある。

## 2.2 計算条件

翼はアスペクト比 6 で、断面に NACA83XX (mean camber を用いるため下二桁は不要) とした。注意として、翼の質量は考えない。翼は  $N$  列の V 字編隊をしており、合計で  $2N - 1$  個存在する。以下、先頭の翼 ( $n = 1$ ) は 1 つで、後ろの翼 ( $n \geq 2$ ) は 2 つずつ存在することに注意。位置は 1 つ前の翼と  $(x_{rel}, \pm y_{rel})$  だけずれているとした。つまり、先頭の翼に対し、 $n$  列目の翼の位置は

$$((n-1)x_{rel}, (n-1)y_{rel}), ((n-1)x_{rel}, -(n-1)y_{rel}) \quad (5)$$

となる。変形は振れ角  $\phi_0 = \pi/4$  の羽ばたきのみで、1 つ前の翼と位相差  $\Delta\phi$  あるものとする。したがって、 $n$  列目の翼の位相は

$$\phi_n(t) = \phi_0 \cos(\omega t + (n-1)\Delta t) \quad (6)$$

各翼は  $-x$  方向に一定速度  $U_\infty$  で移動する。Reduced frequency は大型の鳥に相当する値

$$k = \frac{\omega c}{2U_\infty} = 0.1 \quad (7)$$

とした。ここで、 $c$  は翼弦長 (翼の前縁と後縁の距離) である。

まず、単体の翼 ( $N = 1$ ) に対して計算を行った。次に、3 体の翼 ( $N = 2$ ) に対し、相対位置と位相差を変えた計算を行った。

## 3. 結果と考察

ここでは、単体の翼の飛行について述べる。後流の流れ場を見ると、翼端から後流に向かって渦が繋がっているという古典的な描像が数値計算を通じて確認できた (Fig. 3.)。渦の中心からの距離と誘起速度の関係を見ると、中心から近い領域に於いては  $1/r$  の減衰でよく近似出来ることがわかった。これは、後流を時空間的に変化させる渦線によって近似的に表現できることを示唆している。

さて、複数の翼の飛行が「得」であるかどうかは、ある基準を元に、単体での飛行と比較して判断することと

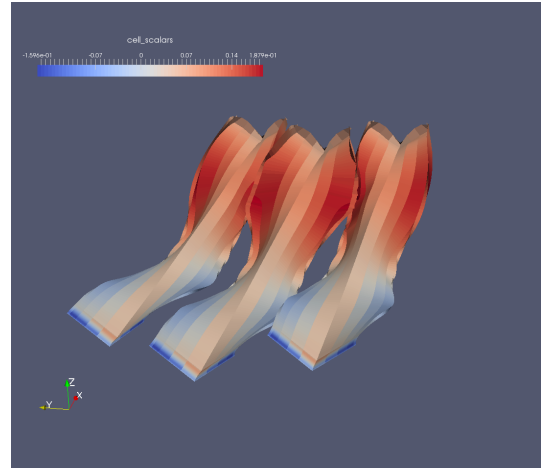


Fig. 2: Formation flight

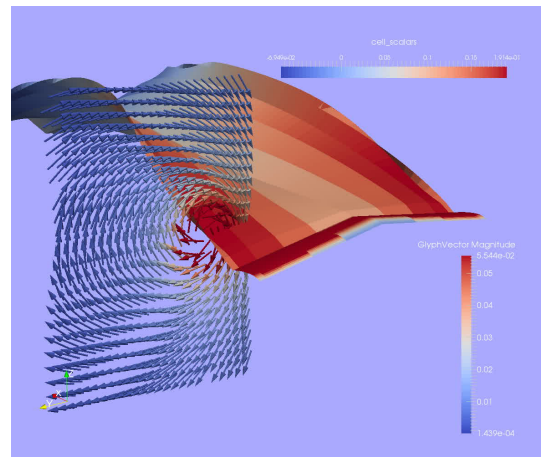


Fig. 3: Velocity field of the wake just behind the wing

なる。その基準としては序論で述べた推力・揚力・効率などが挙げられる。もし推力・揚力が編隊飛行によって向上しているならば、後ろの鳥は振れ角を小さくしたり、または羽ばたきの振動数を小さくすることで楽をしつつ、一定速度・一定高度の飛行に必要な推力・揚力を生み出すことができる。そうすると、「得」をするかどうかは、単体の飛行の時とは羽ばたき方を変えた結果として、同じ推力・揚力を生み出せるのか、そして効率がどうなっているのか、という問であるように思える。講演では、「得」することの定義を議論し、それに基づく結果を報告する予定である。

また、力の計算方法にも問題があるように思う。なぜなら、紹介した 2 種類の UVLM における力の計算方法のどちらも渦輪のダイナミクスから導出されたわけではないからである。実際、Katz and Plotkin の方法の導出過程の曖昧さは以前にも指摘されている<sup>(12)</sup>。講演ではこの問題についても触れたいと思う。

## 4. まとめ

UVLM を用いた数値計算により、羽ばたき翼の周りの流れを計算した。単体の翼の計算結果を見ると、後流の非定常な変化を捉えられており、さらに、後流は時空間的に変化する渦線がよい近似を与えることがわかった。複数の翼については相対的な位置及び位相差を変えたときに後ろの翼が「得」をするかどうか調べた。「得」をすることの定義及びその計算方法についての議論と結果は講演にて報告する予定である。

参考文献

- (1) H Weimerskirch, J Martin, Y Clerquin, P Alexandre, and S Jiraskova. Energy saving in flight formation. *Nature*, Vol. 413, No. 6857, pp. 697–698, 2001.
- (2) Steven J Portugal, Tatjana Y Hubel, Johannes Fritz, Stefanie Heese, Daniela Trobe, Bernhard Voelkl, Stephen Hailes, Alan M Wilson, and James R Usherwood. Upwash exploitation and downwash avoidance by flap phasing in ibis formation flight. *Nature*, Vol. 505, No. 7483, pp. 399–402, jan 2014.
- (3) Makoto Yomosa, Tsuyoshi Mizuguchi, and Yoshinori Hayakawa. Spatio-temporal structure of hooded gull flocks. *PloS one*, Vol. 8, No. 12, p. e81754, jan 2013.
- (4) Y. Hayakawa. Spatiotemporal dynamics of skeins of wild geese. *EPL (Europhysics Letters)*, Vol. 89, No. 4, p. 48004, 2010.
- (5) P B Lissaman and C A Shollenberger. Formation flight of birds. *Science (New York, N.Y.)*, Vol. 168, No. December 1969, pp. 1003–1005, 1970.
- (6) Frank H. Heppner, Jeffrey L. Convisar, Dennis E. Moonan, and John G.T. Anderson. Visual angle and formation flight in Canada geese (*Branta canadensis*). *The Auk*, No. January, pp. 195–198, 1985.
- (7) M Ghommem and V M Calo. Flapping wings in line formation flight: a computational analysis. *AERONAUTICAL JOURNAL*, Vol. 118, No. 1203, pp. 485–501, 2014.
- (8) Bret K. Stanford and Philip S. Beran. Analytical Sensitivity Analysis of an Unsteady Vortex-Lattice Method for Flapping-Wing Optimization. *Journal of Aircraft*, Vol. 47, No. 2, pp. 647–662, mar 2010.
- (9) Mehdi Ghommem, Muhammad R. Hajj, Dean T. Mook, Bret K. Stanford, Philip S. Beran, Richard D. Snyder, and Layne T. Watson. Global optimization of actively morphing flapping wings. *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 33, pp. 210–228, 2012.
- (10) Kei Senda, Takuya Obara, Masahiko Kitamura, Tomomi Nishikata, Norio Hirai, Makoto Iima, and Naoto Yokoyama. Modeling and emergence of flapping flight of butterfly based on experimental measurements. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 60, No. 5, pp. 670–678, 2012.
- (11) Joseph Katz and Allen Plotkin. *Low-speed aerodynamics*, Vol. 13. Cambridge University Press, 2001.
- (12) Robert J. S. Simpson, Rafael Palacios, and Joseba Murua. Induced-Drag Calculations in the Unsteady Vortex Lattice Method. *AIAA Journal*, Vol. 51, No. 7, pp. 1775–1779, 2013.