

# 生物流体力学における位相ダイナミクスの解析へ向けて

飯間 信<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 広島大学大学院 統合生命科学研究科 〒 739-8521 東広島市鏡山(総科棟) 1-7-1

**あらまし** 生物流体の主要な問題の一つである飛翔や遊泳はリミットサイクルと見なせるので、位相ダイナミクスによる解析が有効と考えられる。本講演では流体系を考慮した飛翔・遊泳の解析についてこれまでの試みを紹介する。

**キーワード** 生物流体力学、遊泳、引き込み

## Phase dynamics analysis in biofluid problems

Makoto IIMA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Graduate School of Integrated Sciences for Life, Hiroshima University, 1-7-1, Kagamiyama Higashihiroshima, Hiroshima, 739-8521 Japan

**Abstract** Flapping flight and swimming constitutes a limit cycle, implying that they can be regarded as oscillators for which phase dynamics is useful. In this talk, I review recent researches to analyze flight and swimming including fluid dynamics from the viewpoint of phase dynamics.

**Key words** biofluid mechanics, swimming, entrainment

### 1. はじめに

生物の飛翔や遊泳は流れのレイノルズ数により流体力学的な背景が異なる [1, 2]。レイノルズ数が数十以上の場合、渦が剥離し、翼やヒレの周期運動により逆カルマン渦列などの渦構造が生成され、これが揚力や推力の源となる。遊泳の場合、遊泳器官の運動は多様で、振動 (oscillatory swimming)、くねり (undulatory swimming)、ジェット、抗力などに大別される。特に尾びれが大きい魚は振動タイプで、ほぼ尾びれの振動により推力を生み出している。後2者はそれぞれクラゲや、カモが足を搔いて泳いでいる状態が対応する [3]。生物と流体との結合系は全体としてリミットサイクルを形成し、その状態は位相 (周期運動中の位置)  $\phi$  で記述できる。生物における位相調整は、トンボの前後翼の位相差が揚力に影響を与える、魚の群れでは位相差と相対位置によりエネルギー効率が向上する、渦列中の魚は位相調整でエネルギー消費を低減する、など多くの生物行動

に見られ、翼振動モデルでも位相依存の翼運動変化により渦構造の反転が起こる [4] など、興味深い現象が知られている。このように位相調整という視点は、生物流体力学における適応的運動を理解する鍵である。

本講演では、生物流体力学の問題を位相ダイナミクスで記述する試みについて紹介する。特に位相縮約理論を用いて必要な位相調整を定量的に算出することにより、調整機構の本質を明らかにすることを目指す。これは、生物の運動解析やロボット設計に加え、流体振動を利用した発電デバイスなど、次世代の位相調整システム設計の基盤となる可能性がある。

### 2. 流体系における位相ダイナミクスと位相縮約

位相力学において、摂動外力による位相のずれは、位相感受関数  $Z(\phi)$  で表現される、換言すれば、系の特性はこの関数に押し込められていると言える。

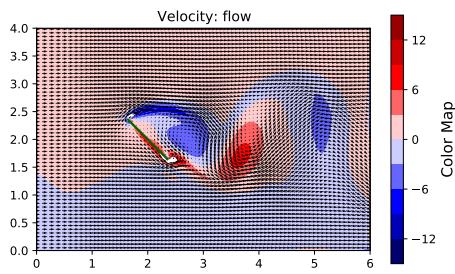


図 1: 固定平板翼周りの流れ (迎角 45 度) [8]。翼弦長  $c$  は 1, レイノルズ数は 200.

従ってこの関数を求めることが位相縮約理論を適用する際に重要となる [5]。位相感受関数は、力学系の随伴方程式を用いて計算する (随伴法) と効率が良い。しかし、非圧縮流体系では随伴方程式を求めるのが難しい場合が多く、工夫が必要とされる。特に生物流体の問題で位相の影響を議論する場合、翼やヒレの駆動力学と周囲の流れが強結合した連成系を取り扱うことになるが、こういった場合随伴法をもちいることは難しい。従って位相感受関数の計算手法自体を開発する必要がある。著者はこの問題に取り組み、“Jacobian-free algorithm” [6], “Projection method” [7] といういくつかの技法を提案した。例えば、円柱後ろに出来る Kármán 湧列や、固定平板翼周りの流れにおいて位相感受関数を計算出来ることを示し、最適外力の問題などに応用してきた [6–9]。

### 3. 振動する翼のモデル

翼運動と流体運動の結合系を考える場合、どちらの要素がどのように影響を及ぼしているのかを解析するには、計算が重い直接数値計算を実行する前に流体モデルによる解析が有効である。ここでは 2 次元空間におかれた平板翼を考え、前縁を軸とした振動運動するモデルを考える。この運動は、尾びれが振動することにより推進する魚のヒレ運動を考えることも出来る。翼の運動は以下のようにモデル化する。 $x$ -軸と板のなす角度を  $\theta$  とし、翼の駆動は van der Pol 方程式で記述されると仮定する:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega, \quad \frac{d\omega}{dt} = \Omega\mu \left[ 1 - \left( \frac{2\theta}{A} \right)^2 \right] - \Omega^2\theta + \frac{T_f}{I}, \quad (1)$$

ここで  $\omega$  は角速度であり、 $\Omega, A, I$  は定数で、それぞれ自然角振動数、振動振幅、慣性モーメントを表す。 $\mu$  はリミットサイクルの形を定めるパラメータである。翼駆動部分は慣性モーメントの影響を受けないと仮定している。

$T_f$  は流体が翼に与えるトルクである。この項のモデル化としては、(a) 定常翼近似モデル、(b) 緩和トルクモデル、(c) 湧層モデル、(d) 直接数値計算モデルなどが考えられる。それぞれに特徴があり、講演ではこれらのモデルを比較することで、流体と駆動機構の関係を議論したいと考えている。

本研究の一部は科研費 (25K01160, 24H00723, 21H05311, 19K03671)、およびマツダ財団、セコム財団の助成を受けた。

### 参考文献

- [1] 飯間 信. 昆虫の飛翔と流体力学. *科学*, 94:977–981, 2024.
- [2] 藤田雄介, 山下博士, 飯間 信. 生物流体と渦. ながれ, 44:57–62, 2025.
- [3] Alexander J. Smits. Undulatory and oscillatory swimming. *Journal of Fluid Mechanics*, 874:P1, 2019.
- [4] Makoto Iima, Naoto Yokoyama, and Kei Senda. Active lift inversion process of heaving wing in uniform flow by temporal change of wing kinematics. *Physical Review E*, 99:043110, 2019.
- [5] Yoshiki Kuramoto. *Chemical Oscillations, Waves, and Turbulence*. Dover Publications, 1984.
- [6] Makoto Iima. Jacobian-free algorithm to calculate the phase sensitivity function in the phase reduction theory and its applications to Kármán's vortex street. *Physical Review E*, 99:062203, 2019.
- [7] Makoto Iima. Phase reduction technique on a target region. *Physical Review E*, 103:053303, 2021.
- [8] Makoto Iima. Optimal external forces of the lock-in phenomena for flow past an inclined plate in uniform flow. *Physical Review E*, 109:045102, 2024.
- [9] Makoto Iima. Phase responses and flow characteristics of a family of Kármán's vortex streets. In *Proceedings of NOLTA 2019*, 2019.