

学 位 論 文 の 要 旨

論文題目 Characterizing fluid dynamics of the structure of dragonfly wing in life environments
(生命環境に基づいたトンボ翼構造の流体力学的特徴づけ)

広島大学大学院統合生命科学研究科

数理生命科学プログラム

学生番号 D 2 1 6 9 9 4

氏 名 藤田 雄介

1 はじめに

生物は流体を巧みに操作することで優れた飛翔・遊泳能力を発揮する。これは自然淘汰による生物の形態・運動における最適化の結果と考えられる。この洗練された能力を解明し応用することで、高い移動能力を有するロボットの開発などが期待できる。

本研究ではトンボの飛翔、特に翅の形状に注目する。トンボの翅は凹凸構造をもつ(コルゲート翼)。昆虫飛翔に対応する低レイノルズ数領域 ($Re \cong O(10^3)$) において、コルゲート翼は平板翼よりも翼性能を向上させる可能性が報告されている。そのため、コルゲート翼の特性の解明により、例えば小型・低速領域で有用な飛行ロボットの開発への貢献が期待される。

コルゲート翼の空力性能を評価する先行研究の多くは、静的特性を評価するものである。つまり、固定された翼に一樣な流れを長時間当て続け、時間平均された諸量を評価する研究である。この解析手法は滑空特性を評価する研究であるといえる。この場合、コルゲート翼の凹部に渦構造を形成することが揚力生成に関係しているという報告がある。

トンボは滑空のほかに羽ばたき運動により飛翔を実現させる。このとき、翅は非定常運動を行うため、コルゲート翼の動的特性を評価する研究も重要である。一般に、昆虫は羽ばたき運動の際、前縁渦と呼ばれる渦が生成されており、揚力生成において重要であるとされている。しかし、多くの先行研究は翅の凹凸構造を考慮していない。コルゲート翼の場合、凹凸構造が誘起する渦運動が影響する可能性が考えられる。そのため、コルゲート翼の凹凸構造が前縁渦の運動へ及ぼす影響を調べることは、昆虫飛翔の理解を深める上で非常に重要である。しかしながら、羽ばたき運動は複雑な運動であり、コルゲート翼の形状も複雑であるゆえ、揚力生成機構は非常に複雑であると予想される。そのため、解析には問題の単純化が必要となる。

そこで本研究では初めに、コルゲート翼構造の一部分のモデルとして、三角形モデルを2次元空間の底面に設置し、静止した三角形モデル周辺における流れの特徴を調べる(第2章)。次に動的なコルゲート翼モデルの解析を行う(第3章、第4章)。その際、羽ばたき運動の一部として、静止状態から急激に並進運動を開始する2次元翼に注目し、比較的短い時間帯で解析を行うことで、コルゲート翼の動的特性を評価する。解析はスペクトル要素法による高精度計算ソルバを使用して、数値解析により翼性能を評価した。このモデルにおいて、平板翼では翼上に前縁渦と逆符号をもつ渦が生成される。この渦はラムダ渦と呼ばれる。一方でコルゲート翼の場合、ラムダ渦が崩壊して翼の凹部にはまり込むと、平板翼と比較して高い揚力係数が記録される(翼性能が向上される)ことがわかった。

2 三角形模型周辺における流れのレイノルズ数依存性と形状依存性^[1]

第2章では、三角形模型周辺における流れの特徴を調べた。

底面に設置された三角形模型1つに対する数値解析を行った。ここではレイノルズ数の変化 ($600 \leq Re \leq 12000$) に対する流れ構造の遷移の様子について注目した。図1は上から $Re = 600, 3000, 6000, 12000$ における計算結果のスナップショットである。流体は画面左から右へと流れていて、渦度場を描画している。曲線は流線である。 $Re < 1800$ では、渦構造の放出はなく、定常流に収束する(図1(a))。しかし、 $1800 \leq Re < 3900$ では、一時的に渦を放出する時間(図1(b))を経て定常流(図1(c))に収束する。 $3900 \leq Re < 10200$ では、渦を周期的に放出する流れに収束した(図1(d))。 $10200 \leq Re$ では、流れは非周期的である(図1(e))。つまり、三角形模型周辺の流れの特徴は $Re = O(10^3)$ で遷移しており、一時的あるいは継続する非定常な流れ構造が観察される。

次に底面に設置された三角形模型2つに対する数値解析を行った。ここではレイノルズ数を $Re = 6000$ で固定し、模型間の距離 D に依存した流れ構造の遷移の様子について注目した。図2は上から $D = 12, 7, 6$ における計算結果のスナップショットである。 $9 \leq D$ では、2つの模型は独立に周期的に渦を放出している(図2(a))。 $7.8 < D < 9$ では、一時的に渦を放出する時間を経て定常流に収束する(図2(b))。 $6.8 \leq D \leq 7.8$ では、2つの模型から周期的に渦を放出し続け、再び非定常流れになる(図2(c))。つまり、レイノルズ数が同じでも、形状の詳細によって、流れの特徴は変化する。

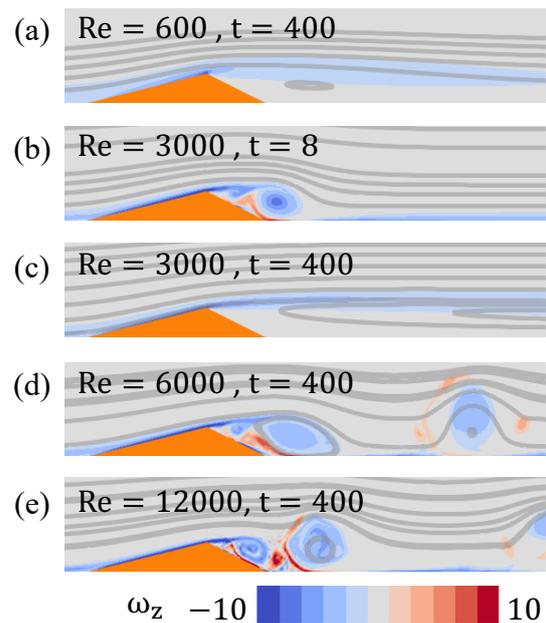


図1 1つの三角形模型周辺の渦度場のスナップショット。文献1から再構成した。

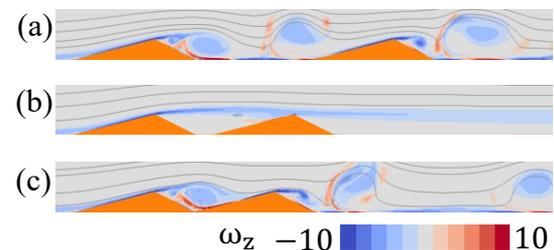


図2 2つの三角形模型周辺の渦度場のスナップショット。(a) $D = 12$ 。(b) $D = 7$ 。(c) $D = 6$ 。 $Re = 6000$ 。文献1から再構成した。

3 2次元コルゲート翼模型周りの流れ解析と揚力増大機構^[2]

第3章では、コルゲート翼模型周りの流れ解析を行い、翼性能を平板翼と比較した。

コルゲート翼模型は先行研究 (Kesel, 2000) を参考に作成した。作成したコルゲート翼模型を図3(b)に示す(実線は翼弦長 $d = 2$)。 α を模型の形状パラメータとし、 $\alpha = 0$ で平板翼(図3(a))を、 $\alpha = 1$ でコルゲート翼(図3(b))を構成する。主流方向に対して模型の傾き度合いを表す角度である迎角 ϕ を変えて解析する。流入条件は速度 $\mathbf{U} = (1,0)$ とした。短時間での流れに注目するため、計算は計算時間 t を無次元化した時間 $t^* = |\mathbf{U}|t/d$ について、 $0 \leq t^* \leq 4$ の範囲で行った。この時間はトンボの羽ばたき運動1周期に対し、およそ10%から20%の時間に相当する。コルゲート翼周りでの流れ構造につ

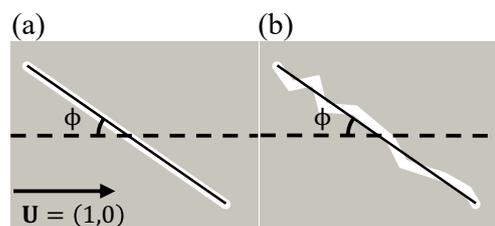


図3 翼模型。(a) 平板翼 ($\alpha = 0$)。 (b) コルゲート翼 ($\alpha = 1$)。 (c) コルゲート翼周りのスペクトル要素の例 ($\alpha = 1$, $\phi = 35^\circ$)。文献2, 3から再構成した。

いて、平板翼と比較する。流れ構造は、渦度と圧力で可視化する。抗力係数については大きな差が確認されなかったため、主に揚力係数に注目し、翼性能を評価する。

図4に $\phi = 35^\circ$, $Re = 4000$ の場合における、平板翼とコルゲート翼周りの流れ場を示す。この条件において、解析時間内に記録する揚力係数の最大値と平均値は、コルゲート翼が平板翼よりも高い値を記録した。つまり、コルゲート翼は平板翼よりも高い翼性能を発揮する。

ここでは、揚力係数の最大値と流れ構造を対応づける。揚力係数が最大値を記録した時刻(平板翼では

$t^* = 1.89$, コルゲート翼では $t^* = 2.21$)における圧力場を図4(a-1), (b-1)に示す。翼表面に注目すると、コルゲート翼上では低圧域(濃い青色)が平板翼よりも広く、翼表面に分布している。

次に、揚力係数の最大値を記録する時刻における渦構造がどのように形成されたのかを図4(a-2, a-3, b-2, b-3)により解析する。平板翼では、 $t^* = 1.00$ (図4(a-2))で観測された渦は自己相似的に大きくなり続けた。また、負の符号(青)をもった前縁渦の間に正の符号(赤)をもった2次渦の生成が観測された(図4(a-3)、矢印部分)。この2次渦がラムダ渦である。

一方でコルゲート翼では、翼の背後で形成された渦が複数に分裂し、異なる渦運動が観測された。特に $t^* = 1.70$ において、正の符号を持つラムダ渦が複数に分裂し、コルゲート翼の凹部にはまり込んでいた(図4(b-2); 矢印部分)。また、この時刻では前縁渦(青)も複数に分裂している。これらの渦同士は相互作用をおこして運動する。その結果、図4(b-2), (b-3)で「1」とラベルがついた渦は $t^* = 2.21$ (図4(b-3))において、翼の近くに位置に移動し、平板翼よりもより広い負圧領域を形成させる。つまり、コルゲート翼はラムダ渦を崩壊させることが鍵となり、翼性能を向上させている。

4 ラムダ渦の崩壊による揚力増大機構のレイノルズ数依存性と構造依存性^[3]

第4章では、コルゲート翼の揚力増大機構とラムダ渦の崩壊の関係について、レイノルズ数 ($Re = 1500, 4000$) とコルゲート翼の形状 ($\alpha = \pm 1$) を変更した場合について、解析を行った。なお、 $\alpha = -1$ のコルゲート翼模型は $\alpha = 1$ の翼形状を、翼弦長に対して反転した構造を意味する。

Flat wing

(a-1)



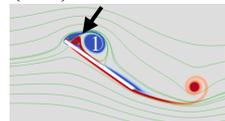
Corrugated wing

(b-1)

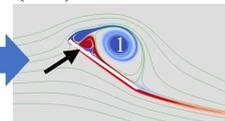


C_p -8 8

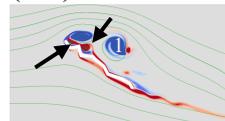
(a-2)



(a-3)



(b-2)



(b-3)



ω_z^* -20 20

図4 翼模型周りの流れ場のスナップショット。 $Re = 4000$ 。文献2から再構成した。

図5(a), (b)に $\phi = 25^\circ$, $Re = 4000$ における、凹凸構造が異なる2つのコルゲート翼 ($\alpha = \pm 1$) 周りの渦度場を示す。 $\alpha = -1$ のコルゲート翼 (図5(a)) では、ラムダ渦 (赤) が凹部にはまり込むようにして、複数に分裂することがわかった。そのとき、前縁渦 (青) が翼の上で複数形成された。つまり、定性的には図4(b-2)と同じ渦構造である。第3章の議論と同様に考えると、コルゲート翼 ($\alpha = -1$) の翼性能が向上すると予想されるが、実際に揚力係数は平板翼よりも大きい。

一方で、 $\alpha = 1$ の場合 (図5(b)) には翼性能が向上されなかった。この場合、渦構造はコルゲート翼の凹凸構造により、ラムダ渦が一時的に崩壊するが、コルゲート翼の凹部に嵌り込まず、再び成長し、前縁渦の間に形成された (黒矢印)。つまり、模型の構造によらず、コルゲート翼の翼性能向上にはラムダ渦の崩壊が関係している。また、この関係は $Re = 1500$ の場合においても同様であった。

5 おわりに

本研究では、コルゲート翼に見られるような凹凸構造に注目し、直接数値計算による流れ解析を行った。はじめにコルゲート翼構造の最も簡単な例として、平面上の三角形模型周りの流れ解析を行った。その結果、 $Re = O(10^3)$ で渦構造が生成される遷移構造を観察した。また、2つの模型の距離を近づけることで、流れが遷移した^[1]。こうした特徴は、コルゲート翼周りの流れが非定常になること、翼構造の詳細に依存して、翼性能が変化することを示唆する。

次に、2次元コルゲート翼周りの流れ解析を行い、翼性能を評価した。本研究で作成したコルゲート翼は $\phi = 35^\circ$, $Re = 4000$ で平板翼よりも高い翼性能を発揮した。このとき、コルゲート翼上ではラムダ渦が崩壊し、分裂した前縁渦が相互作用した。この運動により、揚力が増加することがわかった^[2]。そしてこのラムダ渦の崩壊と揚力増大機構の関係は他のコルゲート翼模型でも観察された^[3]。また、このようなラムダ渦崩壊と揚力増大の関係は、定量的な指標でも裏付けられている^[2]。

コルゲート翼の翼性能向上には、このような凹部での特徴的な流れ構造が重要であると示唆された。自然界で観察される流線型でない凹凸形状をもった物体は渦の運動など、特徴的な流れ構造を活用し、形成、維持されていると考える。また、あえて複雑な流れ構造を活用することで、生物は多様な環境に適応している可能性がある。本研究で得られた知見は自然現象の理解だけでなく、将来的には凹凸形状を活かしたロボットや建築物の設計など工学的な応用への貢献も期待できるだろう。

【参考論文】

- [1] **Yusuke Fujita**, Hiraku Nishimori and Makoto Iima, “Dead-Water Region around Two-Dimensional Sand-Dune Models”, *Journal of the Physical Society of Japan*, **89**, 063901 (2020).
- [2] **Yusuke Fujita** and Makoto Iima, “Dynamic lift enhancement mechanism of dragonfly wing model by vortex-corrugation interaction”, *Physical Review Fluids*, **8**, 123101 (2023).
- [3] **Yusuke Fujita** and Makoto Iima, “Aerodynamic performance of dragonfly wing model that starts impulsively: how vortex motion works”, *Journal of Fluid Science and Technology*, **18**, 1, JFST0013 (2023).

(a: $\alpha = -1, t^* = 1.75$) (b: $\alpha = 1, t^* = 1.90$)

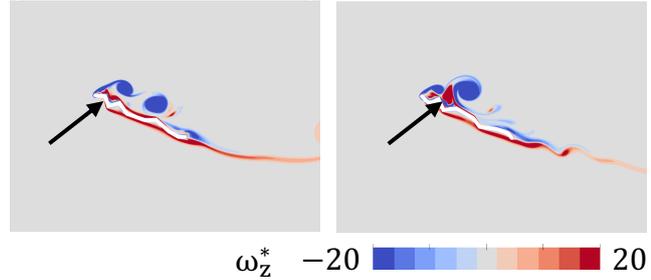


図5 翼模型周りの渦度場のスナップショット。(a) $\alpha = -1$ 。(b) $\alpha = 1$ 。 $Re = 4000$ 。文献3から再構成した。