

とんぼ翼の凹凸構造を舞台とした渦のワルツ

藤田 雄介^{1,2}, 飯間 信¹

¹広島大学大学院統合生命科学研究科, ²日本学術振興会 (DC)

流体力学の研究をしています。自然界では、ながれと関係して、様々なかたちの形成や維持が観察されています。例えば、とんぼの翼は飛行機翼とは異なり、流線型でない凹凸（でこぼこ）したかたちを形成します。
“凹凸したかたち”は“ながれ”とどのような関係があるのでしょうか？

カワセミのくちばし



David Markによる Pixabayからの画像

Teefarmによる Pixabayからの画像

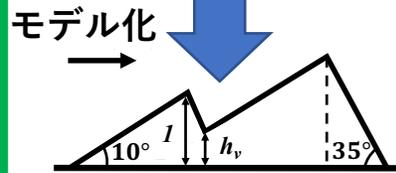


流線型

砂丘



<http://geografia liceum.republika.pl/wiatr.htm>



Y. Fujita et al., J. Phys. Soc. Jpn. 89, 063901 (2020)

渦の形成

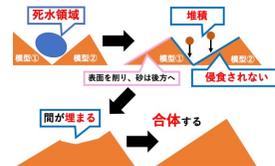


死水の形成



Y. Fujita et al., J. Phys. Soc. Jpn. 89, 063901 (2020)

砂丘運動を理解



とんぼ翼



モデル化



Antonia B. Kesel, J. Exp. Bio. 203, 3125-3135 (2000)

流線型ではない 凹凸の流体力学的意義とは？

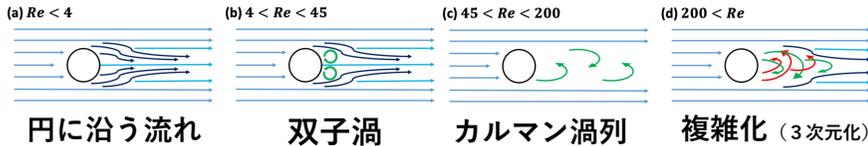
昆虫飛翔のせかい

レイノルズ数は流れの特徴を表す無次元量

$$Re = \frac{Ud}{\nu} = \frac{\text{(慣性力)}}{\text{(粘性力)}}$$

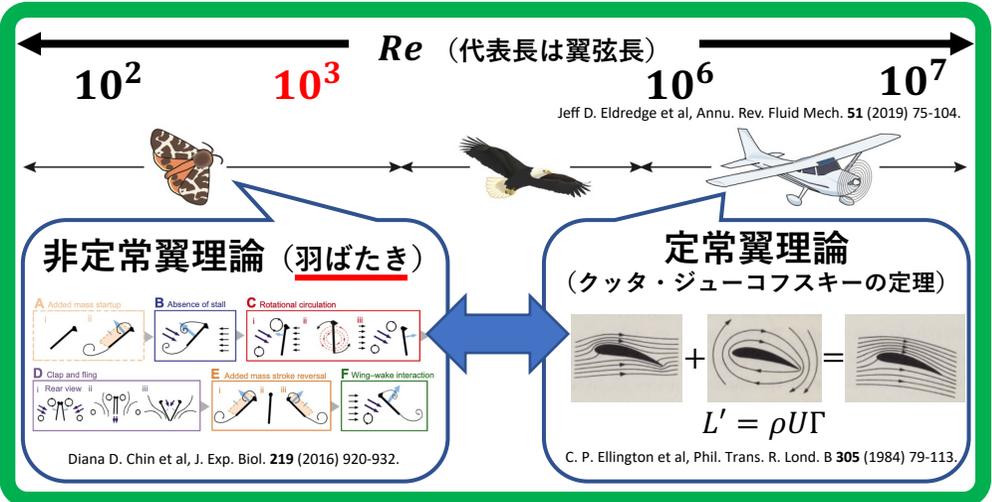
U : 流速, d : 代表長さ, ν : 動粘性係数

例: 円柱の場合 (代表長さ d は円の直径)



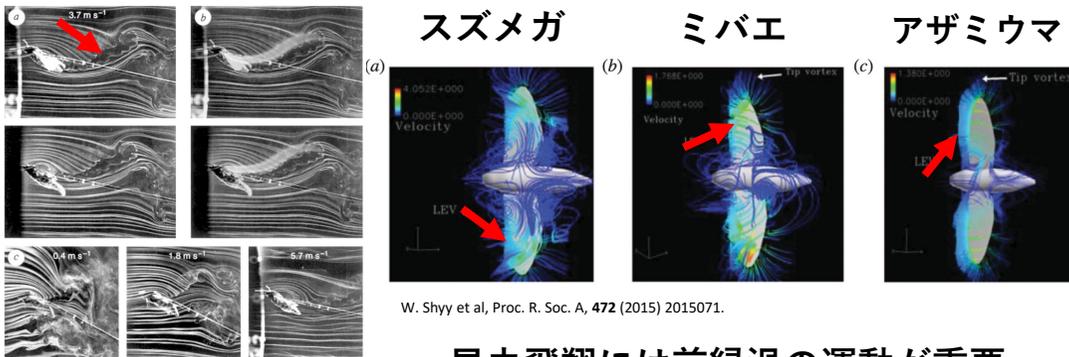
レイノルズ数によって流れの定性的な特徴が変わる

昆虫と飛行機の違い



昆虫飛翔と渦

昆虫は羽ばたき運動により前縁剥離渦 (LEV) を生成・放出する



昆虫飛翔には前縁渦の運動が重要

C. P. Ellington et al, Nature, 384 (1996) 19-26.

なぜ渦が重要か?

例: 鳴門の渦潮 渦は負圧を作る ⇒ 揚力生成

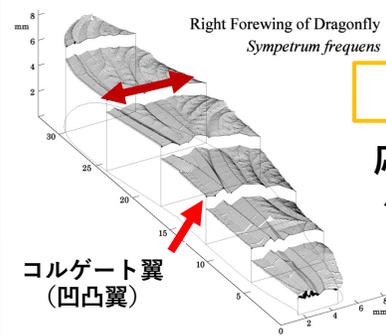


渦の運動に注目すれば翼性能を評価できる 🤔

とんぼのせかい

とんぼの翅は凸凹している

とんぼの翅の断面



須藤, 露木, ながれ, 21, 142-152 (2002)

他の昆虫の例: セミ・ハチ...

低レイノルズ数領域で

翼性能を向上させる?

($Re = O(10^3)$, 代表長は翼弦長)

応用例:
小型飛行ロボットの翼の設計

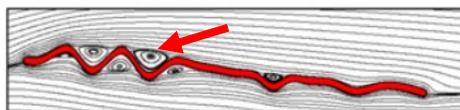


A. Obata et al, Robotics, 3 (2014) 163-180.

静的な翼性能評価 (研究例は多い)

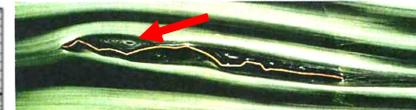
方法: 翼を固定・長時間流れを当てる・平均場で評価

数値計算 ($Re > 5000$)



A Vargas et al, Bioinsp. Biomim. 3 (2008) 026004

実験 ($Re \approx 7000$)



A. Obata et al, AIAA j. 47 (2009) 12



平板より高い翼性能を記録・凹部に渦

滑空する飛行特性を評価している 🤔

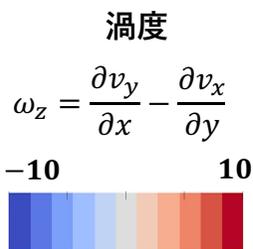
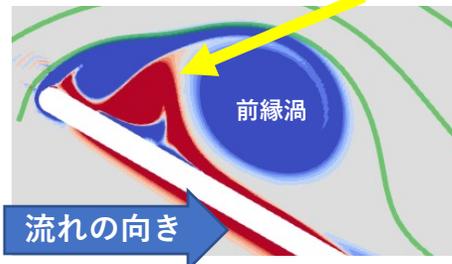
動的な翼性能評価 (研究例は少ない)

方法: 羽ばたき (動的な) 運動は複雑 + コルゲート翼構造は複雑

➡ 単純化 ⇒ 短い時間での流れ解析, モデルは2次元

研究例 (平板翼): ラムダ渦が噴出する

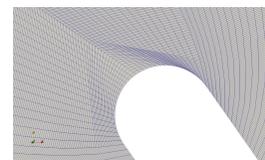
Jeff D. Eldredge et al, Annu. Rev. Fluid Mech. 51 (2019) 75-104.
Widmann A et al, Interface Focus. 7 (2016) 20160079.



研究目的・方法

コルゲート翼は動的な運動で翼性能を向上させるのか?

- ⇒ 2次元翼モデル周りで流れ解析
- ⇒ 翼の構造と渦運動の関係を解明
- ⇒ コルゲート翼の翼性能を評価



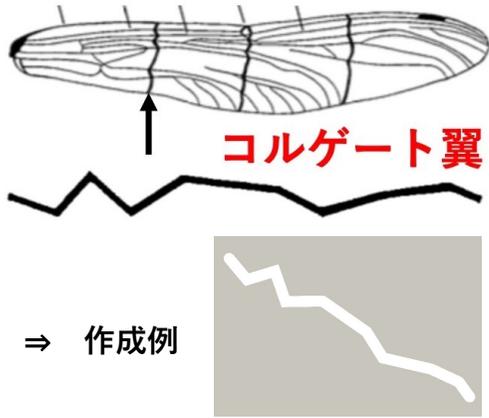
計算手法: スペクトル要素法

A. T. Patera et al, J. Comput. Phys., 54 (1984) 468-488.
H. M. Blackburn et al, Comput. Phys. Commun., 245 (2019), 106804.

← モデル周りのメッシュ

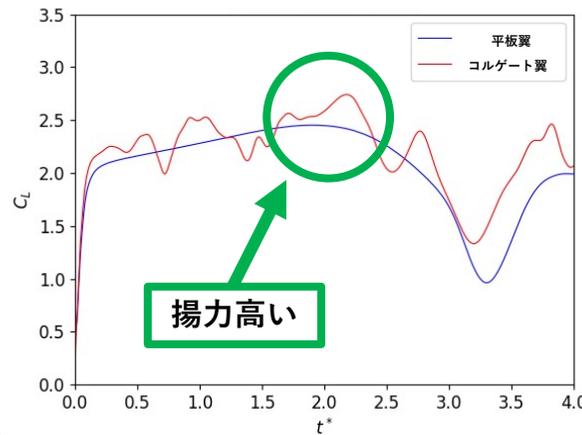
コルゲート翼モデル

Antonia B. Kesel, J. Exp. Bio. 203, 3125-3135 (2000) を参考に作成



計算結果：コルゲート翼と平板翼の比較

揚力係数の時系列グラフ



レイノルズ数 迎角
 $Re = 4000$ $\phi = 35^\circ$

揚力係数

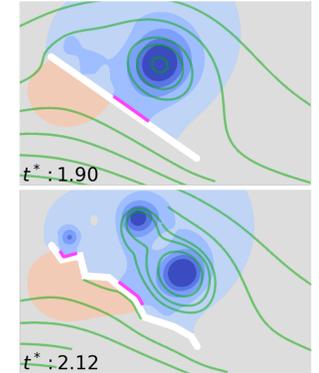
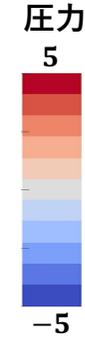
$$C_L = \frac{L}{(1/2)\rho d U^2}$$

無次元時間

$$t^* = \frac{|U|t}{d}$$

L : 揚力, ρ : 流体密度,
 d : 翼弦長, $d = 2$,
 U : 流速, 流入条件: $U = (1, 0)$

C_L が最大値を記録する時刻における圧力場



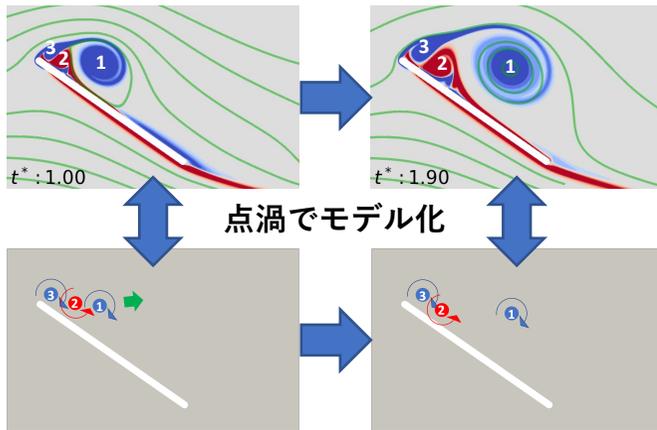
負圧と正圧がより広く分布

渦のワルツ：ラムダ渦と前縁剥離渦の相互作用

* 負圧を作るには前縁渦を翼の近くに配置する必要がある！

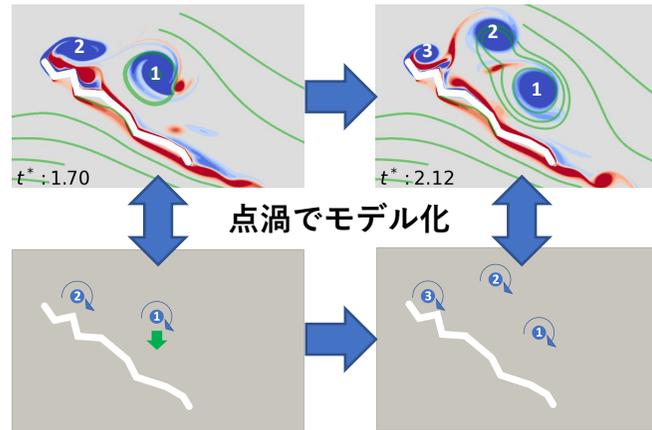
平板翼の場合：前縁渦が翼から離れていく

- 渦が自己相似的に成長
- ラムダ渦②が作る流れが渦①を翼から遠ざける



コルゲート翼の場合：前縁渦が翼に近づく

- ラムダ渦が崩壊して、凹部に詰まる
- 前縁渦②が作る流れが渦①を翼に近づける



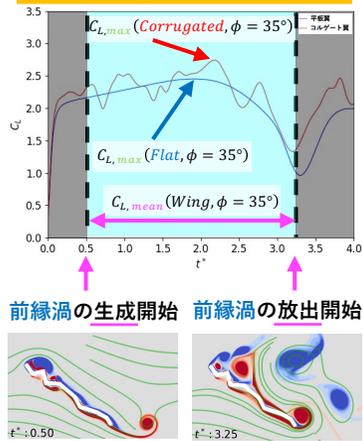
つまり...コルゲート翼は前縁渦の相互作用により翼性能を向上させる！

前縁渦同士のワルツが大切！

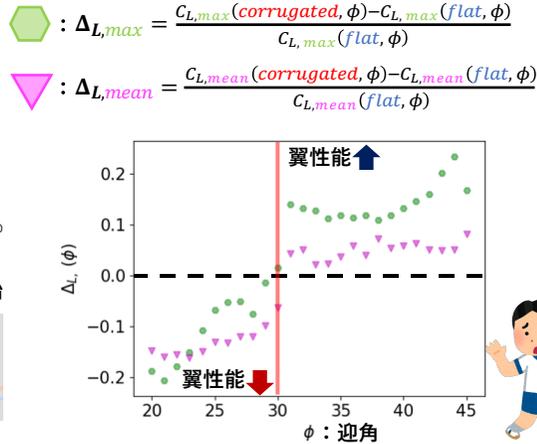


他の迎角ではどうか？

揚力係数の時系列グラフ



揚力係数の相対的な差



翼性能が落ちるとき (例: 迎角 $\phi = 20^\circ$)

- ラムダ渦が噴出
- 平板と同じ渦の配置

前縁渦たちは相互作用しない
翼性能は向上されない

つまり...
前縁渦の相互作用 (ワルツ) は
ラムダ渦の噴出の抑制に
よって実現される!

コルゲート翼の凹凸構造は
ラムダ渦を崩壊させて、
凹部にはめ込むように
設計すべき

翼性能が向上される例 →

まとめ

- 2次元コルゲート翼模型周りの流れ解析を行い、翼性能について考察した
- コルゲート翼は迎角 $\phi > 30^\circ$ で翼性能が向上される
 - コルゲート翼の翼性能が向上される場合
⇒ 翼上で負圧領域が広く分布する
 - 負圧を広く分布させるためには...
⇒ ラムダ渦が崩壊し、凹部にはまる
⇒ 前縁渦が相互作用し、翼の近くに移動
- 前縁渦たちのワルツが重要!**

今後の課題

- 渦の運動と翼性能向上機構の関係は普遍的か?
⇒ 他の条件 (モデル, レイノルズ数) で検討
- 前縁渦のワルツを実現させる翼の設計について
⇒ ラムダ渦の崩壊・はめ込むコツは?
⇒ 前縁の凹凸構造の特徴づけ
- 実験でも再現してみたい

