正弦関数的に振動する凹凸のある平板周りの流れ

理学専攻・情報科学コース　　稲森千明

1　はじめに

昆虫の飛行メカニズムの解明, 小型無人航空機などの目的で羽ばたき飛行の研究が求められている. 中でもトンボは急加速, 急減速, 急旋回, 後退, ホバリングなど巧みな飛行を行うために理想飛行体として流体力学的な観点から様々な特性が調べられてきた. トンボは飛行するとき, フラッピング角やフェザリング角, 位相角, 羽ばたき周波数などを同時に変えている. そのため, トンボ観察による研究では一つ一つの動きの効果を抽出することは難しい. また, 小型無人航空機の設計においても, どのように羽ばたけばどのような流れが生成されるか, あるいはその生成メカニズムはどのようになっているのかを事前に知っておくことが必要である. そこで本研究では数値シミュレーションにより翅の周りの流れ場を解析し, 揚力への効果を調査することで, 効果的な羽ばたき方を考察することを目的とする. 本研究の先行研究 [1] では翅を平板にモデル化し一様流の大きさ, 羽ばたく速さ, ひねる角度, 二枚の翅の間の位相差を変え, 各々が揚力にもたらす影響を調べた. しかし, トンボの翅の断面は凹凸であることが知られている. そこで本研究では凹凸のある断面やしなる動きを加え, その翅の性質が与える影響を調査した. また, 同条件でフラッピング角やフェザリング角に変化を与えシミュレーションした結果について述べる.

2　計算方法

2.1　基礎方程式

昆虫の飛行速度は遅いので流れは非圧縮性流体とみなせる. そこで連続の式 (1) と非圧縮性 Navier-Stokes 方程式 (2) を利用する.

$$\nabla \cdot V = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla) = -\nabla p + \frac{1}{Re}\Delta V \tag{2}$$

ここで V は速度ベクトル,t は時間 p は圧力 Re はレイノルズ数である. これらの方程式を一度座標変換した上でフラクショナルステップ法を用いて解いた. 解く過程で求められる圧力 p を用い, 式 (3) により平板が受ける力 F を求める.

$$F = \oint_{平板全体} PndS \simeq \sum_i (P_{Li} - P_{Ui}) n \Delta S_i \tag{3}$$

ここで i は平板上の格子番号,P_L は平板下面の圧力 P_U は平板上面の圧力,n は平板の法線ベクトル,ΔS は平板の格子上の面積である. さらに平板に作用する力 F の鉛直方向成分 L を揚力, 水平方向成分 D を抗力とし, 揚力係数 C_L, 抗力係数 C_D を求める.

$$C_L = \frac{L}{0.5\rho U^2 S} \qquad C_D = \frac{D}{0.5\rho U^2 S} \tag{4}$$

ここで ρ を密度,U は一様流の速度,S は平板の面積である.

2.2　モデル化

先行研究では翅を 1 : 5 の平板でモデル化を行った. 本研究ではそこに図 1[2] のトンボの翅の断面図を採用し凹凸のある翅を生成する. トンボの翅は横方向からみて折れ曲がった構造をしており, その凹凸により渦が発生する. 今回は凹凸による前縁から後縁方向の流れを調査するため, 図 2 のように翅の短辺部分の断面形状は同じであるとした.

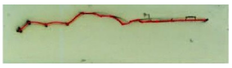


図 1: トンボの翅の断面

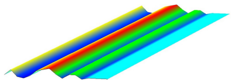


図 2: 翅のモデル

平板の短辺を軸に正弦関数的な振動を与えることで羽ばたきを表現する. また, このとき平板と x 軸がなす角度をフラッピング角 θ_f とする. また打ち上げるときは翅の中心部分が下に凸, 打ち下ろすときには翅の中心部分が上に凸となるように二次関数を用いて時間に伴い翅が変形することでしなりを表現した. 使用する計算領域を図 3 に示す. 平板の長辺方向を x, 短辺方向を z, 鉛直方向を y とした 3 次元直方体型の計算領域を用いる. 精密かつ効率的な計算を行うため平板がある部分は細かい等間隔格子を用い, その他の部分は不等間隔格子を用いる. 平板の位置は時間ごとに移動するので計算格子も平板に沿って変化させる. 前翅がある領域を A, 後翅がある領域を B とし, 各々に動く二つの領域をつなぎ合わせることで独立に動く二枚の翅を生成する. また, 二つの領域が重なる面では計算する点の近傍に位置する他方の領域の 4 つの点を探索し,4 点の値を補間することで二つの領域の各変数を相互作用させる. その他の面の境界条件は, 平板の軸がある

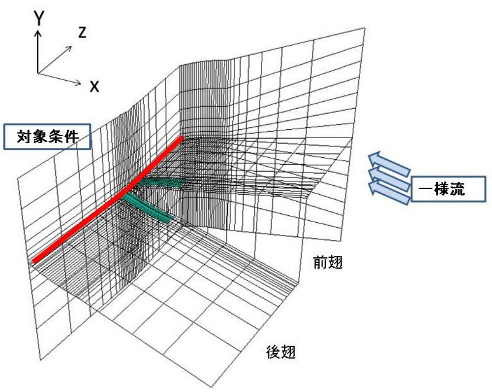


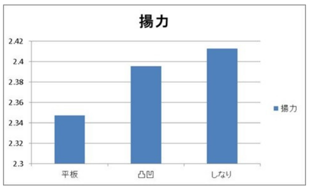
図 3: 計算領域

$x = 0$ の $y - z$ 平面では,1 対の平板が羽ばたく状況を想定し対称条件とする. 一様流の上流となる $z = z_{max}$ の $x - y$ 平面では迎え角 20°の速度場を与える　(z_{max} : z 方向の最大座標値). その他の面は自由流出とする. また, 平板上の格子点では平板の動く速度を境界条件として与える.

3 計算結果

3.1 凹凸のある翅

図 4 と図 5 はこれまでの研究で使用していた平板と断面に凹凸をつけた場合, さらにそこにしなる動きを加えた場合の揚力と抗力を比較した結果である．単なる平板よりも凹凸があり, さらにしなる平板の方が揚力, 抗力共に大きな値を得た. しかし, 揚抗比を計算してみると, 凹凸のあるなしでは大きな差はなかった. また, しなる場合は他 2 つの場合に比べ揚抗比は小さくなった. 実際にはトンボの翅のやわらかい材質により風の影響を受けしなるものと考えるが, 今回は強制的にしなりを与えてしまったため, このような結果になったといえる. しかしこの結果により翅の形状が揚力に影響するということが分かった.



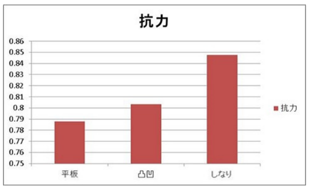


図 4: 揚力係数の比較　図 5: 抗力係数の比較

図 6 は凹凸のある平板を横からみた図である．図の右側から一様流が流れ, 二枚の平板を通過する様子を表している. ここで色は圧力, 矢印は速度ベクトルである．平板の下では凹凹によって凸凹がない場合よりも流れが乱れた．次に平板にかかる圧力を調べてみたところ, 根元よりもふり幅が大きくなる翅の先端部分で圧力差が大きくなった．さらに翅をしならせたことにより全体的に圧力差が大きくなり図 4,5 のような結果になったと考えられる.

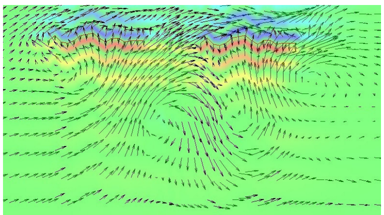
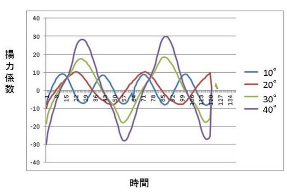


図 6: 凹凸のある断面の流れ

3.2 フラッピング角の影響



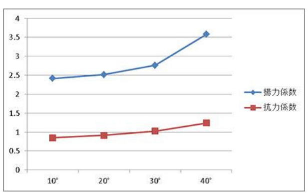


図 7: フラッピング角と揚力　図 8: 揚力と抗力の比較

トンボの羽ばたき周波数は約 40Hz といわれているが, フラッピング角 θ_f に応じて周波数も変え, 小さく速く羽ばたく場合と大きくゆっくり羽ばたく場合で比較した．図 7 はフラッピング角における `0.1[s]` 間の後翅の揚力の変位を表している. ここでフラッピング角 θ_f は $-\alpha$°〜 α°の範囲で振動させている．フラッピング角が大きいほど振幅が大きい. 図 8 は二枚の翅の揚抗比の時間平均を比較したものである．細かく速く羽ばたくよりもゆっくり大きく羽ばたく方が高い揚力を得られた．

3.3 位相差による影響

二枚間の位相差 θ_d による揚力を調査する．図 9 は位相差を変えたときの揚力係数を表している．位相差が正の場合は後翅の方が位相が進んでいるときであり, 位相差 90 °までは位相差が大きくなるにつれて揚力は減少している. しかし,90 °以降は位相差が大きくなるにつれて揚力も増加し, 位相差 180 °で再び大きな揚力が得られた．グラフ全体では前翅の位相を進ませた方がより高い揚力が得られており, 位相差-90 °で最大となった．図 10 は位相が 180 °で後翅が打ち下ろされるときの速度ベクトルを表している．これより前翅の振動により後翅により大きな風が吹きこむ為, 位相 180 °では揚力が大きくなったといえる．つまり後翅は前翅が作り出す流れを利用してより高い揚力を得ている．

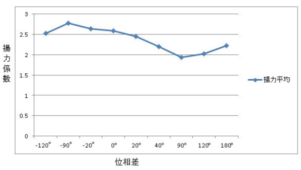


図 9: 位相差による揚力の変化

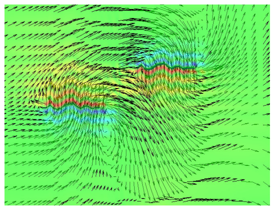


図 10: 位相差 180 °での流れ

3.4 フェザリング角の影響

$y = 0$ と $x - z$ 面がなす角をフェザリング角としフェザリング角の違いによる平板への影響を調べた．フェザリング角 10 °〜 40 °の範囲で比較すると , フェザリング角 20 °で揚力が最大となった．本研究では風上から迎角 20 °の一様流が流れている．そのためフェザリング角を 20 °にすると , 一様流を垂直に受け止めることになるため, より強い圧力がかかり大きな揚力を得たと考えた．しかし, 前翅と後翅それぞれの揚力係数の時間平均に分けると, 前翅の揚力係数はフェザリング角が大きくなるほど減少するが, 後翅はフェザリング角が大きくなるほど増加し,30 °のときに一番大きな値になる．翅の断面の流れを解析した結果,30 °のときにそれぞれの翅が互いに影響を一番受けている．このことから, フェザリング角は流れる一様流に対しての迎角だけでなく, 互いの翅の影響も踏まえる必要がある．

4 まとめ

トンボの翅の断面を参考に平板に凹凸をつけシミュレーションを行った．また, フラッピング角, フェザリング角, 平板間の位相角を変えて計算を行い, これらの要素が平板にもたらす影響を調べた.

参考文献

[1] 田中智絵,”正弦関数的に振動する平板周りの流れ”

[2] Azuma A.,Watanabe,”Flight Performance of a Dragonfly”