

# 正弦関数的に振動する平板周りの流れ

田中 智絵 (指導教員: 河村 哲也)

## 1 はじめに

航空力学の分野では、一般に前縁が曲線的で後縁が鋭くとがった翼型を用いる研究が数多くなされている。しかし、昆虫の翅は翼型断面でない形状だがその羽ばたきにより揚力を得る。羽ばたく物体の流れ場の中での振舞いを調べることは、昆虫の飛行メカニズムの解明や小型無人航空機開発などの目的で求められている。そこで本研究では、平板にモデル化した翼に振動を与えることにより羽ばたきを表現し、平板に働く力や平板の周りの流れ場を数値シミュレーションにより解析する。さらに揚力への効果を調査し、より効果的な羽ばたきを考察することとする。

## 2 計算方法

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、運動方程式として非圧縮性 Navier-Stokes 方程式 (2) を利用する。

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (1)$$

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

$\mathbf{V}$ : 速度  $t$ : 時間  $p$ : 圧力  $Re$ : レイノルズ数

これらの方程式を時間変化する一般座標系で表現し、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を用い、式 (3) により平板が受ける力を求める。

$$\mathbf{F} = \oint_{\text{平板全体}} P n dS \simeq \sum_i (P_{L_i} - P_{U_i}) \mathbf{n} \Delta S_i \quad (3)$$

$\mathbf{F}$ : 平板が受ける力  $i$ : 平板上の格子番号  
 $P_L$ : 平板の下面の圧力  $P_U$ : 平板の上面の圧力  
 $\mathbf{n}$ : 平板の法線単位ベクトル  $\Delta S$ : 平板上の格子の面積

さらに平板に作用する力  $\mathbf{F}$  の鉛直方向成分を揚力、水平方向成分を抗力とし、式 (4), (5) にそれぞれ代入し揚力係数、抗力係数を求める。

$$C_L = \frac{L}{0.5\rho U^2 S} \quad (4)$$

$$C_D = \frac{D}{0.5\rho U^2 S} \quad (5)$$

$C_L$ : 揚力係数  $C_D$ : 抗力係数  $L$ : 揚力  $D$ : 抗力  
 $\rho$ : 密度  $U$ : 一様流の速度  $S$ : 平板の面積

## 3 1枚の平板周りの流れ

### 3.1 モデル化・格子生成

縦横比 1:5 の平板を水平に配置し、短辺を軸とした回転運動を与える。回転角  $\theta$  を  $-45^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$  の

範囲で正弦関数的に変化させ羽ばたきを表現する (図 3.1)。使用する計算領域を図 3.2 に示す。平板の長辺方向を  $x$  方向、回転軸の方向を  $y$  方向、鉛直方向を  $z$  方向とした 3次元直方体型の計算領域を用い、平板の回転軸を  $x=0$  平面に置く。平板の  $x$  方向の長さを 1 とすると、領域の  $x$  方向の長さ、 $y$  方向の長さ、 $z$  方向の長さの比は 15:18:15 である。平板の周りが細かい不等間隔格子を用いる。平板の位置が時間ごとに移動するので計算格子も平板に沿って移動させる。したがって領域の形も直方体型から時間経過とともに変形する (図 3.2 右)。初期条件として回転軸方向の一様流を迎え角  $20^\circ$  で与え、斜め下から風を受けて進む場合を想定する。

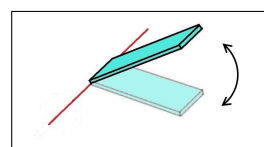


図 3.1: 平板の振動

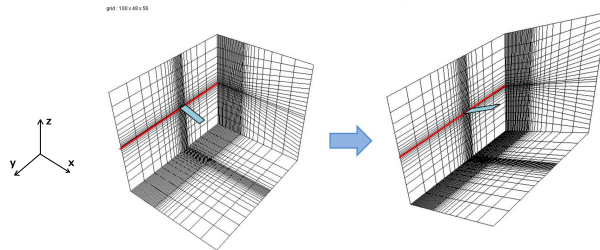


図 3.2: 計算領域

### 3.2 境界条件

平板の軸がある  $x=0$  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  $y=0$  平面では迎え角  $20^\circ$  の速度場を与える。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。

### 3.3 計算結果 一様流の速度による影響

図 3.3 で上のグラフは平板の回転角を、下のグラフは揚力係数の変化を示している。平板が振り下ろされる時に揚力係数が大きくなり、周期的に変化している。流れ場の速度  $U=0$ 、すなわち一様流を与えない場合、揚力の時間平均が 0 になる結果となった。また、一様流の速度が大きいほど揚力係数も大きくなった。

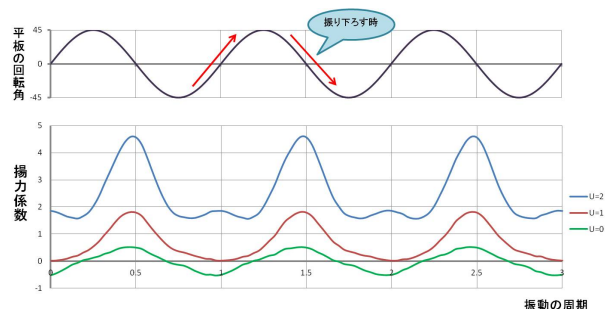


図 3.3: 一様流の速さの比較

### 3.4 計算結果 回転にひねりを加えた場合

平板の短辺を軸とした回転に加え、長辺を軸とした回転も与え、ひねりながら羽ばたく運動を平板に与える。

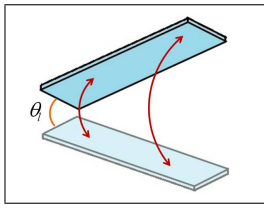


図 3.4: 平板の振動

長辺を軸とした回転運動の回転角  $\theta_1$  に対して、以下の4つの場合における結果を示す。すべて  $U = 1$  として計算し、3周期の振動の時間平均を求めた。

- case1 ひねらない場合 (3.3の  $U = 1$  の場合と同様)
- case2 上下対称にひねる場合 ( $-20^\circ \leq \theta_1 \leq 20^\circ$ )
- case3 上に大きくひねる場合 ( $-10^\circ \leq \theta_1 \leq 30^\circ$ )
- case4 下に大きくひねる場合 ( $-30^\circ \leq \theta_1 \leq 10^\circ$ )

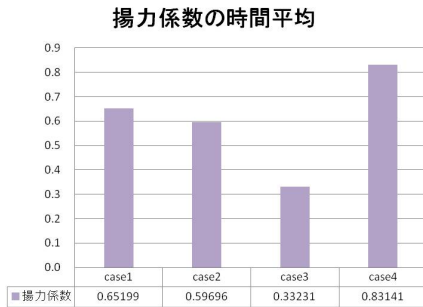


図 3.5: ひねりを加えた場合

## 4 2枚の平板周りの流れ

### 4.1 モデル化・格子生成

縦横比 1:5 の平板を 2 枚用い独立に振動させる。  $U = 1$  の一様流を与え、流れ場の上流側を前方翼、下流側を後方翼とした時、前方翼の回転と後方翼の回転の位相差を  $\theta_d$  で与える。2枚の平板間の距離は、平板の短辺の 1/2 とする。図 4.1 は使用する計算領域を示している。3次元直方体型の計算領域を 2 つ用い、独立に動く平板の動きに沿って変形する格子をそれぞれ作成する。領域の端の格子を重ね、2枚の平板周りの流れ場を同時に計算する。

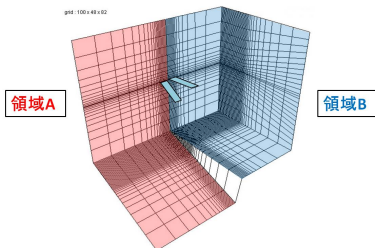


図 4.1: 計算領域

### 4.2 境界条件

図 4.1 の 2 つの領域の境界面では、格子の位置にずれが生じるため、速度場、圧力場の境界条件を互いの格子から補間する。その他の面は 3.2 の平板 1 枚の場合の境界条件と同様とする。

### 4.3 計算結果 揚力係数の比較

図 4.2 は、1枚の平板を振動させた場合と、2枚の平板を  $\theta_d = 0^\circ$  として振動させた場合の揚力係数である。3周期の振動の時間平均を示している。平板を 2枚振動させた場合、前方翼の揚力係数が後方翼よりも大きくなった。また、2枚の平均値は平板 1 枚の場合の揚力係数より高くなった。

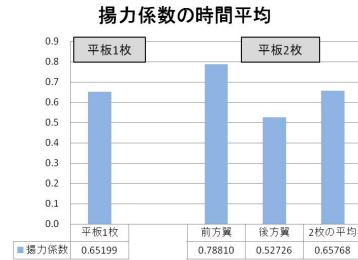


図 4.2: 平板 1 枚と 2 枚の比較

### 4.4 計算結果 平板周りの速度場

図 4.3, 4.4 に平板周りの速度場を示す。図 4.4 は  $\theta_d = 10^\circ$  とした場合である。振り下ろす速度が最も速くなる時刻の様子である。一様流に垂直な方向からの視点で、一様流は紙面右から左の方向である。  $x = 0$  平面からの距離が平板の長辺の 2/3 の位置における断面での速度場である。平板 2 枚の場合、羽ばたきの影響が平板の間の速度場にもみられる。

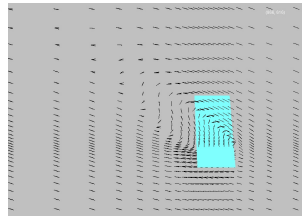


図 4.3: 平板 1 枚

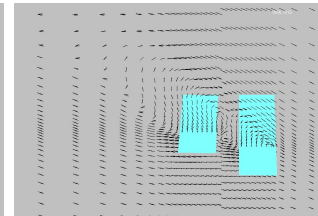


図 4.4: 平板 2 枚

## 5 まとめと今後の課題

振動する平板に与えられる一様流の大きさ、羽ばたき方、平板の数を換え、周りの流れ場や揚力に与える影響を比較し、効果的な羽ばたきに近付けることができた。今後は平板をしならせる、ギザギザにするなど、平板の形状を変えて揚力への効果を比較することが必要とされる。

### 参考文献

- [1] 安藤常世, "工学基礎 流体の力学", ISBN4-563-03411-8, 培風館, 1984.
- [2] 西山哲男, "翼型流れ学", ISBN4-526-04224-2, 日刊工業新聞社, 1998.