

IB-LBM を用いた羽ばたき飛翔におけるレイノルズ数の影響の検討

Study of the effect of Reynolds number on the flapping flight by using the immersed boundary-lattice Boltzmann method

- 広橋謙介, 京大院, 京都市西京区京都大学桂 C3 棟, E-mail: hirohashi.kensuke.42v@st.kyoto-u.ac.jp
 川勝翔太郎, 京大院, 京都市西京区京都大学桂 C3 棟, E-mail: kawakatsu.shotaro.35n@st.kyoto-u.ac.jp
 稲室隆二, 京大院, 京都市西京区京都大学桂 C3 棟, E-mail: inamuro@kuaero.kyoto-u.ac.jp
 Kensuke Hirohashi, Dept. Aeronautics and Astronautics, Kyoto University, Kyoto 615-8530, Japan
 Shotaro Kawakatsu, Dept. Aeronautics and Astronautics, Kyoto University, Kyoto 615-8530, Japan
 Takaji Inamuro, Dept. Aeronautics and Astronautics, Kyoto University, Kyoto 615-8530, Japan

The flapping flight of insects such as butterflies and dragonflies is of fundamental interest not only in biology itself but also in its practical use for the development of micro air vehicles (MAVs). In this study we investigate the effect of Reynolds number on the flapping flight of a simple butterfly-like wing-body model and a dragonfly-like wing-body model by using the immersed boundary-lattice Boltzmann method (IB-LBM). For the simple butterfly-like wing-body model, we studied the effect of Reynolds number on the control of roll rotation by asymmetric flapping. Meanwhile, for the simple dragonfly-like wing-body model, we studied the effect of Reynolds number on the free flight. Consequently, we find that effects of Reynolds number on both the simulations are practically small.

1. 緒言

トンボやチョウに代表される昆虫の羽ばたき飛翔は、生物学的分野においてだけでなく、航空工学などの工学的分野への応用の観点からも興味深い問題として注目を集めている。これらの昆虫の羽ばたき飛翔は、その低いレイノルズ数や高い機動性から、超小型飛行体 (Micro Air Vehicle : MAV) の推進飛行機構への応用が期待されている。最近、ハーバード大学の研究グループがハエの羽ばたき運動を参考に作成した MAV が自由飛行に成功する例などが報告されており⁽¹⁾ こうした工学的応用への期待が大きな研究の動機付けの一つとなっている。昆虫の羽ばたき飛翔に関して、これまで多くの研究者により理論、実験、数値計算の面から研究がなされてきた。これらの研究では、羽ばたき飛翔において揚力や推力を発生・あるいは増大させる重要な要素として、翼の羽ばたき方、柔軟性、形状の 3 つに注目している。^(2,3) 多くの研究では、昆虫のホバリング時、あるいは一定速度で運動している状況における流れ場や、先に述べたそれぞれの要因が揚力や推力に与える影響を調べている。⁽⁴⁻⁹⁾

それに対し、Suzuki らは先に述べた 3 つの羽ばたき飛翔の重要な要素のうち、翼の羽ばたき方に注目し、チョウの羽ばたき方を模した単純な羽ばたき翼-胴体モデルを用いて数値計算を行った。⁽¹⁰⁾ その結果、実際のチョウのパラメータ (Janatella leucodesma, $Re = 1190$) において、静止状態から加速し、前進、上昇飛行することが可能であることを示した。また、前進上昇飛行の数値計算において、 $Re > 200$ の領域では Re 数増加により翼が受ける無次元流体力に大きな変化が見られないことを $Re < 1000$ の領域まで確認している。さらに、仲谷、川勝らは実在するハエ (fruit fly, $Re = 620$) を参考としたパラメータ (ただし、計算負荷削減のため $Re = 300$ としている) での計算において、Suzuki らの羽ばたき翼-胴体モデルの姿勢制御を行い、旋回飛行させることに成功している。⁽¹¹⁻¹³⁾ しかし、姿勢制御や旋回飛行のような繊細な運動に対するレイノルズ数の影響については明らかにされていない。そこで本研究では、Suzuki らの羽ばたき翼-胴体モデルを旋回飛行させる方法⁽¹³⁾ の中で重要な要素である、左右非対称羽ばたきによる姿勢変化および制御に対し、レイノルズ数が及ぼす影響について調べる。

一方、Minami らは実在するトンボ (アキアカネ) のパラメー

タを参考に、トンボの羽ばたき方を模した単純な羽ばたき翼-胴体モデルを作成し自由飛行の計算を行った。⁽¹⁴⁾ その結果、重力下において前進上昇飛行が可能であることを確認した。ただし、計算負荷の低減のため、 $Re = 200$ の条件で計算を行っている。本研究ではより高いレイノルズ数における数値計算を行い、トンボを模した羽ばたき翼-胴体モデルの飛行に対するレイノルズ数の影響を調べる。

1.1 チョウの翼-胴体モデル

1.1.1 モデルの構成

チョウの翼-胴体モデルを Fig.1 に示す。チョウの翼-胴体モデルは Suzuki ら⁽¹⁰⁾ と同様、2 枚の厚みのない平板の翼と、非常に細い棒状の胴体から構成する (Fig.1)。翼は 1 辺が L_w の正方形をしており、柔軟性は持たないものとする。胴体と左右の翼は、翼の一辺の midpoint と胴体の midpoint で結合している。また、実際のチョウの翅は全体の質量に対して十分に小さいことから、このモデルでは翼の質量は無視する。

1.1.2 羽ばたき方

翼の羽ばたき方は、実際のチョウを参考に下向きに振り下げ後ろ向きに振り上げる羽ばたき方とし、2 枚の翼の羽ばたき運動と迎角の変化の組み合わせによって翼の運動を実現する。本研究では Suzuki ら⁽¹⁰⁾ と同様、羽ばたき運動は翼の上下運動によって、迎角の変化は胴体に対する翼のねじり運動によって行う。羽ばたき角は水平を中心に上下に $\pm 45^\circ$ 変化させ、迎角は 45° を中心に 0° から 90° まで変化させる。翼の運動に関する運動方程式については文献 (11) を参照されたい。なお、実際のチョウでは胴体に対して迎角はほぼ変えず、胴体ごと翼を傾けることで迎角を変化させている点で本モデルと異なることに注意が必要である。

1.2 トンボの翼-胴体モデル

1.2.1 モデルの構成

トンボの翼-胴体モデルを Fig.2 に示す。このモデルは、フラッピング運動、フェザリング運動、リード・ラグ運動を行うことができ、胴体と 4 枚の翅から構成される。実際のトンボの翅の質量は、胴体に比べて無視できるほど小さいことから、このモデルでは翅の質量は無視する。したがって、モデルの重心は胴体の重心と一致し、その質量を M とする。4 枚の翅は変形のしな

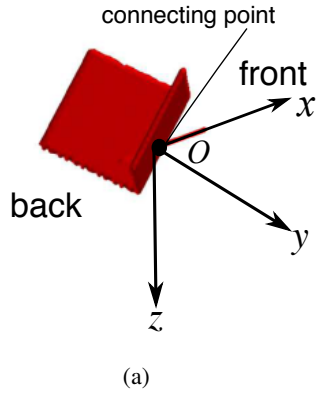


Fig. 1 A butterfly-like flapping wing-body model and the set of axes fixed to the body ($o-xyz$).

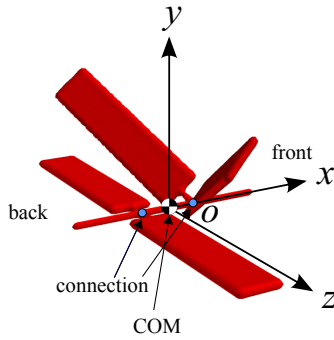


Fig. 2 A dragonfly-like flapping wing-body model and the set of axes fixed to the body ($o-xyz$).

い同形状の翅で、厚みなしの短辺 c 、長辺 $L = 4.5c$ の長方形の形状とする。胴体は長さ $L_b = 5c$ の厚みなしの等密度の棒とする。翅と胴体は $0.5c$ の厚みなしの棒で接続する。実際のトンボは、前翅と後翅の接続部の midpoint 付近に重心があるとされているため⁽¹⁵⁾、本モデルでは、前翅と後翅は重心（胴体の midpoint）から前後に等距離 $0.75c$ 離して接続する。

1.2.2 羽ばたき方

翼の羽ばたき方は、実際のトンボを参考に下向きに振り下げ後ろ向きに振り上げる羽ばたき方とし、4 枚の翼の羽ばたき運動と迎角の変化、リード・ラグ角の変化の組み合わせによって翼の運動を実現する。羽ばたき角は水平を中心に上下に $\pm 34.5^\circ$ 変化させ、迎角は 45° を中心に 0° から 90° まで変化させる。リード・ラグ角は Minami らの手法⁽¹⁵⁾ に基づいて、ピッチ角に応じて動的に変える。翼の運動に関する運動方程式については文献⁽¹⁵⁾ を参照されたい。

2. 支配方程式

2.1 流体の運動

流体運動の支配方程式は、非圧縮性流体の連続の式および Navier-Stokes 方程式である。

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

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho_f} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{u}, \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{u} は流速、 ρ_f は空気の密度、 p は圧力、 ν は空気の動粘性係数であり、本研究では 20°C の地球大気における値である $\rho_f = 1.205 [\text{kg}/\text{m}^3]$ 、 $\nu = 1.512 \times 10^{-5} [\text{m}^2/\text{s}]$ を用いる。この方程式系での支配パラメータは、チョウの羽ばたき翼-胴体モデルの場合、レイノルズ数 Re を平均翼端速度 $u_{\text{tip}} = 4\pi\beta_m L_w/T$ を代表速度として

$$Re = \frac{u_{\text{tip}} L_w}{\nu}, \quad (3)$$

と定義する。一方、トンボの羽ばたき翼-胴体モデルの場合、代表長をコード長 c 、代表速度を翼の付け根から $2/3$ の位置における最大羽ばたき速度 $u_{\text{max}} = 20\pi c\phi_0/(3T)$ として、レイノルズ数を

$$Re = \frac{u_{\text{max}} c}{\nu}, \quad (4)$$

と定義する。

2.2 チョウおよびトンボの羽ばたき翼-胴体モデルの運動

チョウおよびトンボの羽ばたき翼-胴体モデルの運動は、胴体と翼が受ける流体力を \mathbf{F}_{aero} 、モデルの重心 \mathbf{X}_b 周りの流体トルクを \mathbf{T}_{aero} とすると、胴体の運動は以下の Newton-Euler の運動方程式で記述される。

$$M_b \frac{d\mathbf{U}_b}{dt} = \mathbf{F}_{\text{aero}} + M_b \mathbf{G}, \quad (5)$$

$$\mathbf{I} \frac{d\boldsymbol{\Omega}}{dt} + \boldsymbol{\Omega}_b \times (\mathbf{I}\boldsymbol{\Omega}_b) = \mathbf{S}(\mathbf{Q})^T \mathbf{T}_{\text{aero}}, \quad (6)$$

ここで、 \mathbf{I} は胴体の慣性テンソルであり、チョウの場合、Fig.1 に示した胴体固定座標 Σ_{bB} から観測した場合の成分は、胴体の x 軸周りの慣性モーメント I_{rB} と y 、 z 軸周りの慣性モーメント I_B を用いて以下のように与えられる。

$$\mathbf{I}_B = \begin{bmatrix} I_{rB} & 0 & 0 \\ 0 & I_B & 0 \\ 0 & 0 & I_B \end{bmatrix}, \quad (7)$$

本研究のチョウの翼-胴体モデルでは胴体が厚みのない棒であり、棒と平行方向の x 軸周りの慣性モーメントが定義できない。そのため、チョウの翼-胴体モデルでは x 軸周りの回転を解くために、実際の小型のチョウである *Janatella leucodesma*⁽¹⁾ を参考として、胴体直径が胴体長さの 0.16 倍であると仮定し、胴体長 $L_b = L_w$ として仮想的な x 軸周りの慣性モーメントを算出して用いた。 I_{rB} および I_B は以下の式で表される。

$$I_B = \frac{1}{12} M_b L_b^2, \quad I_{rB} = \frac{1}{8} M_b (0.16L_b)^2, \quad (8)$$

トンボの場合、胴体の慣性テンソル \mathbf{I} を、Fig.2 に示した胴体固定座標 Σ_{bD} から観測した場合の成分は、 y 、 z 軸周りの慣性モーメント I_D を用いて以下のように与えられる。

$$I_D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_D & 0 \\ 0 & 0 & I_D \end{bmatrix}, \quad (9)$$

ここで、チョウの胴体固定座標 Σ_{bB} とトンボの胴体固定座標 Σ_{bD} では、初期の取り方が x 軸周りに 90° 異なることに注意されたい。また、 $I_D = M_b L_b^2 / 12$ である。 x 軸方向の主慣性モーメントが 0 であるのは、胴体が厚みのない棒であるためで、トンボの翼-胴体モデルを用いた本研究ではロール回転 (x 軸周りの回転)、ヨー回転 (y 軸周りの回転) を無視し、ピッチ回転 (z 軸周りの回転) のみを考慮する。なお、左翅の運動は右翅の運動と xy 平面に関して鏡面対称とし、 $Z = 0$ の面で鏡面反射条件を用いて半分の領域のみで計算することで計算負荷を下げた。

また、この方程式系の支配パラメータは無次元質量 N_M と Froude 数 Fr であり、チョウの翼-胴体モデルの場合、胴体長さは $L_b = L_w$ とするため、以下のように定義する。

$$N_M = \frac{M_b}{\rho_f L_w^3}, \quad (10)$$

$$Fr = \frac{u_{tip}}{\sqrt{L_w G}}, \quad (11)$$

トンボの翼-胴体モデルの場合、この方程式系の支配パラメータは S を面積として、無次元質量 N_M と Froude 数 Fr は以下のように定義する。

$$N_M = \frac{M}{\rho_f c 4S}, \quad (12)$$

$$Fr = \frac{u_{max}}{\sqrt{Gc}}. \quad (13)$$

2.2.1 チョウの胴体-翼モデルの左右非対称羽ばたき

本研究では左右の翼の羽ばたき周期を変更することにより左右の翼を非対称に羽ばたかせる。その結果ロール回転方向の姿勢が変化し、また制御を行うことができる。本研究では、制御則として PI 制御を用い、制御定数を K_{rp} 、 K_{ri} とした。詳細は文献 (13) を参照されたい。

2.3 支配パラメータ

以上より、系の支配パラメータはレイノルズ数 Re 、無次元化質量 N_M 、フルード数 Fr の 3 つの無次元化パラメータと、チョウのロール回転制御法では制御に用いる K_{rp} 、 K_{ri} の 2 つの制御用パラメータ、トンボの自由飛翔ではリード・ラグ角を用いたピッチ回転制御に用いる制御パラメータ K である。これらの制御パラメータは、それぞれのケースで適切なものを検討し使用している。羽ばたき翼-胴体モデルの自由運動を計算するには上に示した 3 つの無次元化パラメータも指定しなくてはならない。しかし、 Re 数と Fr 数は以下の関係があり、独立に指定することはできない。

$$\frac{Fr}{Re} = \frac{\nu}{\sqrt{L^3 G}}, \quad (14)$$

この式において右辺のうち ν および G は物性値である。したがって、 Re 数と Fr 数の比は L を指定すれば一意に決まること

に注意されたい。

3. 数値計算法

本研究では、流体の運動方程式 Eq. (1)、Eq. (2) を数値計算するために、埋め込み境界-格子ボルツマン法⁽¹⁶⁾を用いた。埋め込み境界-格子ボルツマン法は、直交格子状で移動境界流れを計算でき、かつ圧力の Poisson 方程式を解く必要がない効率のよい手法である。

胴体の運動方程式 Eq. (5)、Eq. (6) の数値積分には 2 次精度の Adams-Bashforth 法を用いた。また、2 枚の翼と胴体が流体から受ける力 F_{aero} とトルク T_{aero} は、埋め込み境界法において境界近傍の格子点に加える体積力の総和の反力として求めた。⁽¹⁷⁾ この力やトルクの計算法は、境界上で応力テンソルを積分して求める一般的な方法に比べ、格段に容易に力やトルクを計算することができるため、埋め込み境界法を用いた研究のほとんどで用いられている。本研究で用いている羽ばたき翼-胴体モデルは体積を持たないため、内部質量の影響⁽¹⁶⁾は無視できることに注意する。

なお、流体運動計算と物体運動計算の連成には、交互に時間発展の計算を進める弱連成を採用した。

4. 計算条件

4.1 チョウの数値計算における計算条件

計算領域は、Fig. 3 に示すような 1 辺が $12L_w$ の立方体領域とする。本研究では翼長 L_w を、 $Re = 300, 620, 1000$ の場合に対してそれぞれ、 $L_w = 50\Delta x, 70\Delta x, 110\Delta x$ としている。立方体領域の境界は、 x 軸に垂直な面を周期境界とし、それ以外の面をすべてすべりなし条件の境界とした。この条件は x 軸方向の長さを十分に取ることで、長いダクトの中を翼モデルが羽ばたくような物理的状況を模擬したものとなっている。初期状態では羽ばたき翼-胴体モデルを領域の中央に置き、領域内の流体は静止状態とした。

本研究では、マルチブロック格子を用いることで計算負荷を軽減している。⁽¹⁸⁾ マルチブロック格子では、格子間隔が Δx である細い格子の領域と、格子間隔が $2\Delta x$ である粗い格子の領域が存在する。細かい格子で構成された領域は、羽ばたき翼-胴体モデルの胴体中心を中心とした一辺 $2.4L_w$ の立方体領域とし、残りの領域は粗い格子で計算を行った。

4.2 トンボの数値計算における計算条件

計算領域を Fig. 4 に示す。翅の運動は胴体の左右で対称であるので、 $Z = 0$ の面で鏡面反射条件を用い、半分の領域のみで

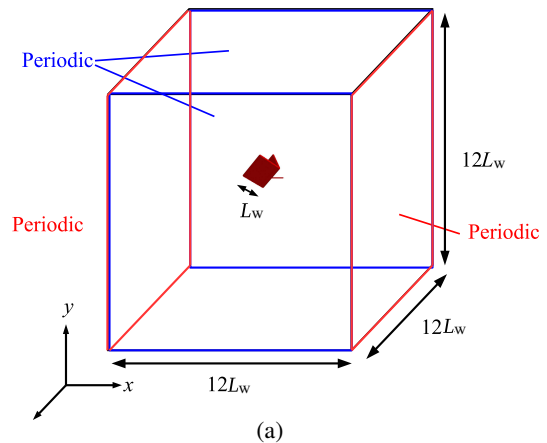


Fig. 3 The domain of computation and the initial position of a butterfly-like flapping wing-body model.

計算することで計算負荷を下げた。X 軸方向には周期境界条件を用い、上方、下方および左方の境界は静止壁とした。計算領域の大きさは $25c \times 25c \times 10c$ である。高解像度格子の格子間隔を Δx とすると低解像度格子の格子間隔は $2\Delta x$ である。初期において、羽ばたき翼-胴体モデルの重心を $(0, 0, 0)$ に置いた。本研究ではコード長 c を、 $Re = 50, 100, 200, 400, 600$ の場合に対してそれぞれ、 $c = 80\Delta x, 100\Delta x, 120\Delta x, 160\Delta x, 240\Delta x$ としている。なお、初期状態において流体は静止しているとする。翅の急発進を避けるために、いずれの位相差の場合も前翅および後翅の初期位置は最も振り上げた位置とした。初期は後翅のみを運動させ、位相差 $\phi = \pi/2$ がついたところで前翅も運動させる。初期条件の影響を小さくするために、重心の運動方程式は $t = 3T$ から解く。

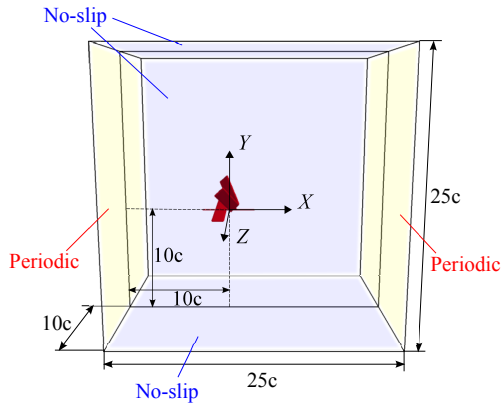


Fig. 4 The domain of computation and the initial position of a dragonfly-like flapping wing-body model.

5. 計算結果

5.1 チョウの胴体-翼モデルの左右非対称羽ばたきによるロール回転制御へレイノルズ数が及ぼす影響

本研究では右翼の周期 T_{right} 、左翼の周期を T_{left} 、左右の比を A または B として、以下の式で翼の羽ばたき周期を決定する。

$$T_{\text{right}} = AT_{\text{left}}, \quad (15)$$

または

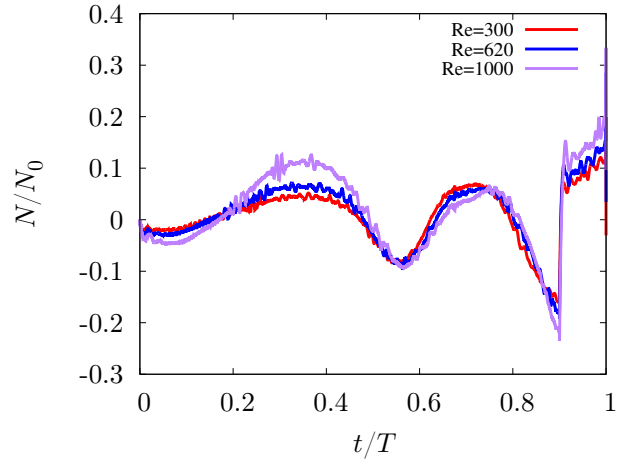
$$T_{\text{left}} = BT_{\text{right}}, \quad (16)$$

以上の式より、左右の翼の羽ばたき周期を変えることで、ロール回転を誘起する。

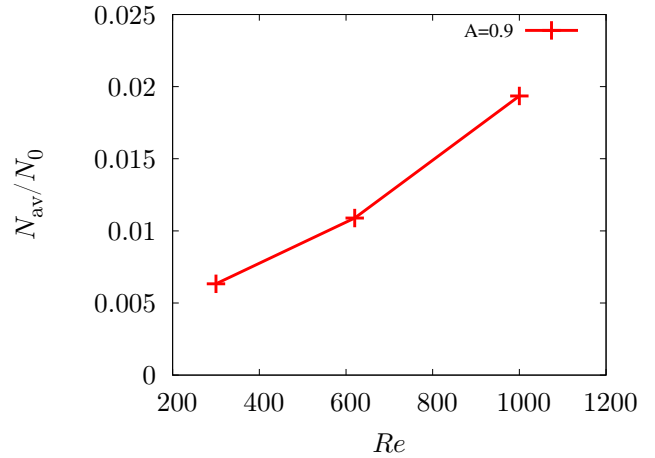
5.1.1 左右非対称羽ばたきによるロール回転変化

まず初めに、左右の翼の羽ばたき周期を変える左右非対称羽ばたきにより、どの程度ロール回転が発生するかを、 $Re = 300, 620, 1000$ の3つのレイノルズ数で検証する。またレイノルズ数の増加に伴い、チョウの羽ばたき翼-胴体モデルが支持可能な質量が増加するため⁽¹⁰⁾、本研究では3つのレイノルズ数に対して、無次元化質量 N_M を $N_M = 38, N_M = 61, N_M = 130$ と変えて計算を行っている。

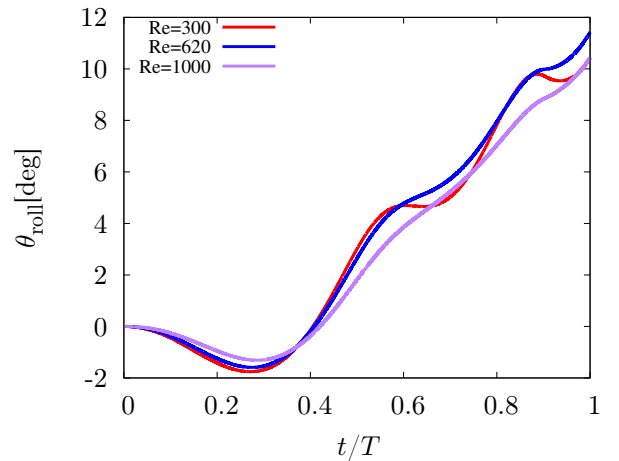
Fig. 5 に Eq. (15) において $A = 0.9$ としたときの、1 羽ばたき周期での x 軸周りの無次元化トルクの時間変化 (a) 及びレイノルズ数ごとの周期平均無次元トルク (b)、ロール回転の時間変化 (c) を示す。(a) を見るとレイノルズ数の増大に伴い、1 周期内の無次元化トルクの変化が大きくなっていることがわかる。また 1 周期を平均した周期平均無次元トルクについても、 $Re = 620$ の場合は $Re = 300$ の場合と比べて約 1.7 倍の時計回りのトルクが、 $Re = 1000$ の場合は $Re = 300$ の場合と比べて



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Calculated results with the asymmetric flapping of a butterfly-like wing. (a) Time variation of the torque in each Reynolds number, (b) The variation of the the period average torque by Reynolds number variation, (c) Time variation of the roll angle in each Reynolds number.

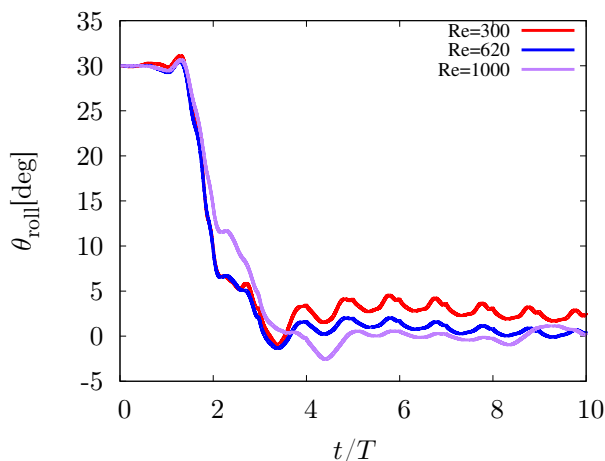


Fig. 6 Calculated results with the roll control method of a butterfly-like flapping wing-body model. Time variation of the roll angle for each Reynolds number.

約 3.1 倍の時計回りのトルクが発生していることがわかる。これらのことから、チョウの羽ばたき翼-胴体モデルが左右非対称羽ばたきにより発生する無次元トルクはレイノルズ数に依存しており、その影響は小さくないといえる。しかしながら、(c)を見ると、ロール角の変化の度合いは、それぞれのレイノルズ数を比較しても大きく変わらないことがわかる。これは、レイノルズ数増加に伴って支持可能質量が増加し、 x 軸周りの慣性モーメントが増加したためであると考えられる。

5.1.2 異なるレイノルズ数下でのロール回転制御

左右の羽ばたき周期を変えることによるロール回転制御法⁽¹³⁾を異なるレイノルズ数 ($Re = 300, 620, 1000$) について行った。無次元化質量については前節と同様にレイノルズ数に応じて変え、その値も前節と同じ値を設定している。本計算では、初期に羽ばたき翼-胴体モデルを 30° 傾け、目標角を 0° とすることで最終的に水平飛行に移行するという計算を行う。Fig. 6 にそれぞれのレイノルズ数においてロール回転制御を行った場合のロール角の時間変化を示す。なお、制御に用いた制御定数はどのレイノルズ数においても同じ値を使用している。Fig. 6 を見ると、 $Re = 300$ および $Re = 620$ はロール回転変化の傾向が似ており、どちらも最終的に 0° 付近で安定している。 $Re = 1000$ の場合、少しロール回転の復元が遅いものの、最終的に 0° 付近で安定することがわかった。これらのことから、 $300 \leq Re \leq 1000$ の範囲では異なるレイノルズ数においても、同じ制御定数を用いて姿勢を制御できることがわかった。

5.2 トンボの自由飛行にレイノルズ数が及ぼす影響

トンボを模した羽ばたき翼モデルの羽ばたき飛行に関しては、 $Re = 50, 100, 200, 400, 600$ における自由飛行の数値計算を行い、レイノルズ数が羽ばたき翼モデルの運動に与える影響について調べた。 $Re = 50, 100, 200, 400, 600$ におけるモデルの揚力係数の時間変化を Fig. 7 に、モデルの推力係数の時間変化を Fig. 8 に、モデル重心の軌跡を Fig. 9 に示す。Fig. 7 と Fig. 8 の結果より、 $Re = 50$ の場合は他のレイノルズ数に比べ、 C_L および C_T のピーク値が大きくなっていることが分かる。一方で、 $Re = 100, 200, 400, 600$ とレイノルズ数を大きくしても、 C_L および C_T は比較的良く似た時間発展をしていることが分かる。

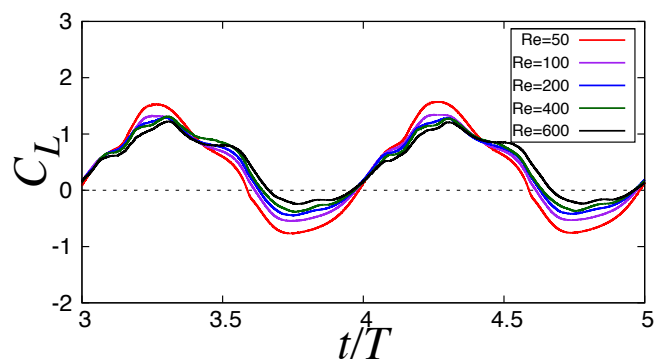


Fig. 7 Time variations of the lift coefficient C_L for $Re = 50, 100, 200, 400$ and 600 for the dragonfly-like flapping wings.

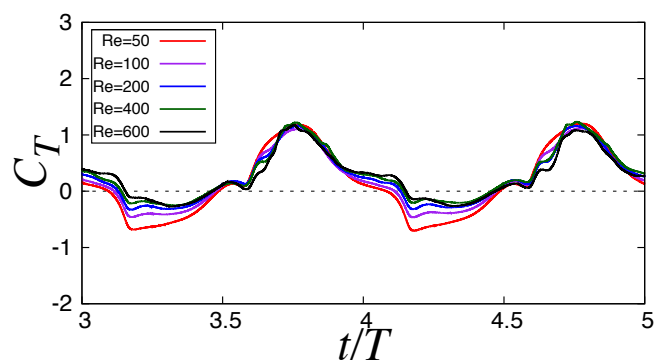


Fig. 8 Time variations of the thrust coefficient C_T for $Re = 50, 100, 200, 400$ and 600 for the dragonfly-like flapping wings.

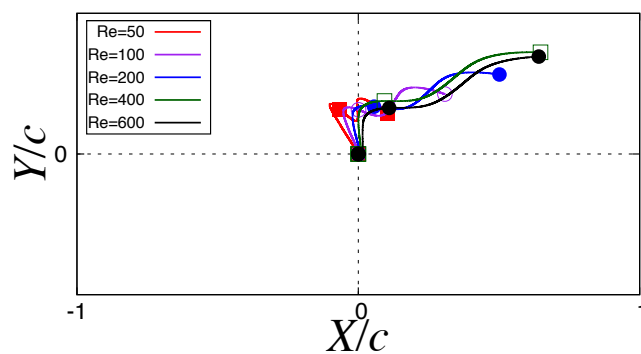


Fig. 9 The trajectories of the center of the mass (COM) for $0 \leq t \leq 5T$ of the dragonfly-like flapping wing-body model for $Re = 50, 100, 200, 400$ and 600 . The initial position of the COM is $(X/c, Y/c) = (0, 0)$, and the dots indicate the position of the COM when the hindwings are at top dead point.

また, Fig. 9 の結果を見れば, $Re = 50, 100, 200$ においては羽ばたき翼モデルの重心軌跡が異なっているが, $Re = 400, 600$ においてはほぼ同じような重心軌跡であることがわかる. これらの結果から, $Re = 200$ を超える高レイノルズ数になれば, レイノルズ数を大きくしても羽ばたき翼-胴体モデルの飛行には大きな影響を与えないことがわかり, 高レイノルズ数での数値計算を $Re = 200$ 程度の数値計算により概略推定できることが分かった.

6. 結言

埋め込み境界-格子ボルツマン法を用いて, チョウやトンボを模した羽ばたき翼-胴体モデルの飛行に対するレイノルズ数の影響を調べた.

チョウを模した羽ばたき翼-胴体モデルを用いた計算では, $Re = 300, 620, 1000$ の異なるレイノルズ数下で, 左右の翼の周期を変える非対称羽ばたきの計算を行い, ロール回転の変化, および制御レイノルズ数の変化が及ぼす影響について調べた. その結果, 非対称羽ばたきにより生じるロール軸周りの無次元トルクは, レイノルズ数への依存が少なくないことがわかった. しかしながら, レイノルズ数の増大による羽ばたき翼-胴体モデルの支持可能質量の増加により, ロール軸周りの慣性モーメントが増大するため, ロール回転変化の度合いはレイノルズ数の変化によっても大きく変わらないことがわかった. また, 本研究の 3 つのレイノルズ数のケースについて, 左右の羽ばたき周期を変えるロール回転制御法による計算を行った結果, 同じ制御パラメータを用いても十分ロール回転を制御できることがわかった. なお, このロール回転制御を用いた旋回飛行に対するレイノルズ数の影響については, 発表時に紹介する.

トンボを模した羽ばたき翼-胴体モデルを用いた計算において, 前翅と後翅の位相差 $\phi = \pi/2$ およびストローク角 $\beta = \pi/3$ の条件の下で, $Re = 50, 100, 200, 400, 600$ における自由飛行の数値計算を行った結果, $Re = 200, 400, 600$ では, 羽ばたき翼モデルの飛行に対するレイノルズ数の影響が小さいことがわかり, 高レイノルズ数での数値計算を, 低レイノルズ数での数値計算により概略推定できることが分かった. なお, $Re = 1000$ を超える高レイノルズ数や, アキアカネの実際のレイノルズ数 $Re = 2300$ での数値計算に関しては, 発表時に紹介する.

謝辞

本研究の一部は, 平成 27 年度「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題 (ID: hp150087) により, 京都大学学術情報メディアセンターのスーパーコンピュータ CRAY XC30 を利用して実施した. また, 科研費・基盤研究 (C) 課題番号 26420108 の一部として実施した.

参考文献

- (1) K. Y. Ma, P. Chirarattananon, S. B. Fuller, and R. J. Wood, "Controlled flight of a biologically inspired, insect-scale robot," *Science* **340** (2013), pp. 603-606.
- (2) W. Shyy, Y. Lian, J. Tang, D. Vierter, and H. Liu, "Aerodynamics of low Reynolds number flyers," Cambridge University Press, New York (2008).
- (3) W. Shyy, H. Aono, S. K. Chimakurthi, P. Trizila, C. K. Kang, C. E. S. Cesnik, and H. Liu, "Recent progress in flapping wing aerodynamics and aeroelasticity," *Progress in Aerospace Sciences* **46** (2010), pp.284-327.
- (4) C.P.Ellington, C. van den Berg, A.P. Willmott, and A. L. R. Thomas, "Leading-edge vortices in insect flight," *Nature* **384** (1996), pp. 626-630.
- (5) H. Kiu, C. P. Ellington, K. Kawachi, C. van den Berg, and A. P. Willmott, "A computational fluid dynamics study of hawkmoth hovering," *J.Exp. Biol.* **201** (1998), pp. 461-477.
- (6) M. H. Dickinson, F. O. Lehman, and S. P. Sane, "Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight," *Science* **284** (1999), pp. 1954-1960.
- (7) J. M. Birch and M. H. Dickinson, "Spanwise flow and the attachment of the leading-edge vortex on insect wings," *Nature* **412** (2001), pp. 729-733.
- (8) T. Nakata and H. Liu. "A fluid-structure interaction model of insect flight with flexible wings," *J. Comput. Phys.* **231** (2012), pp. 1822-1847.
- (9) N. Yokoyama, K. Senda, K. Iima, and N. Hirai, "Aerodynamic forces and vortical structures in flapping butterfly's forward flight," *Physics of Fluids* **25** (2013), 021902.
- (10) K. Suzuki, K. Minami, and T. Inamuro, "Lift and thrust generation by a butterfly-like flapping wing-body model: immersed boundary-lattices Boltzmann simulations," *J. Fluid Mech.* **767**(2015), pp.659-695.
- (11) 仲谷雄一, 鈴木康祐, 稲室隆二, "蝶を模した 3 次元羽ばたき翼モデルの姿勢制御の数値計算," 日本流体力学学会年会 2014 (2014).
- (12) 仲谷雄一, 稲室隆二, "IB-LBM による羽ばたき翼モデルの姿勢制御の数値計算," 第 28 回数値流体力学シンポジウム D05-5 (2014).
- (13) 川勝翔太郎, 稲室隆二, "蝶を模した羽ばたき翼モデルの旋回飛行の数値計算," 日本流体力学学会年会 2015 (2015).
- (14) K. Minami, K. Suzuki and T. Inamuro, "Free flight simulations of a dragonfly-like flapping wing-body model using the immersed boundary-lattice Boltzmann method," *Fluid Dyn. Res.* **47** (2015), 015505.
- (15) A. Azuma and T. Watanabe, "Flight performance of a dragonfly," *J. Exp. Biol.* **137** (1988), 221-252.
- (16) K.Suzuki and T. Inamuro, "Effect of internal mass in the simulation of a moving body by the immersed boundary method," *Computers & Fluids* **49** (2011), pp. 173-187.
- (17) M. C. Lai and C. S. Peskin, "An immersed boundary method with formal second-order accuracy and reduced numerical velocity," *J. Comp. Phys.* **160** (2000), pp. 705-719.
- (18) T. Inamuro, "Lattice Boltzmann methods for moving boundary flows," *Fluid Dyn. Res.* **44** (2012), 024001.