

昆虫規範型微小羽ばたき翼の流体構造連成設計

石原 大輔

1 緒言

本稿では、昆虫規範型FWPAV (Flapping Wing Pico Air Vehicle) 開発^[1]の一環として取り組んでいる昆虫規範型微小羽ばたき翼の流体構造連成設計について述べる。その大筋は文献[2]に基づく。

1.1 昆虫規範型FWPAV

昆虫は飛行の利点により地球全体に生息域を拡大させた。その飛行能力は自然淘汰によって、数億年という長い時をかけて洗練されてきた。そのメカニズムを理解し、模倣することによって、高性能な飛行体の開発が期待される^[3]。本稿では昆虫規範型FWPAVを対象とする。FWPAVは翼、アクチュエータ、トランスミッション、支持フレームなどから構成され、その大きさは5cm以下である^[4]。FWNAVにおける関心の1つは微小化にある^[5]。その潜在的な最小寸法は非常に小さな昆虫の寸法であり、進化の帰結からは1mm程度以下となる。

1.2 昆虫飛行における流体構造連成

昆虫の飛行能力はピッチング、キャンバリング、翼先端軌跡(8の字など)といった羽ばたき翼の特徴的運動^[6]による。特に、ピッチング運動は昆虫飛行の非定常流体力学^[7]の運動学的基礎をなす。昆虫翼とその基部は柔軟である^[8]。ゆえに大きなストローク角を伴う羽ばたき運動は周囲の空気流からの流体力による翼の変形を引き起こし、更にそれが周囲の空気流の変化を引き起こす(流体構造連成)。このトピックの最近の進歩に対して、計算力学的方法、特に数値流体構造連成解析方法^[9, 10]の寄与は顕著である。

1.3 流体構造連成設計

著者らは上述の特徴的な運動が流体構造連成によって受動的に生じ得ることを示してきた^[9, 11-16]。この力学的な翼運動の自動化は昆虫の微小化に寄与していると考えられ、昆虫規範型FWPAVにおいても利用されている^[4]。これを一般化して、人工物の機能を生み出すために積極的に流体構造連成を利用する設計(流体構造連成設計)が考えられる。この設計方法では、流体構造連成現象の複雑さのため、数値流体構造連成解析を中心とする計算力学的方法が有効である。ここでは著者らの流体構造連成設計に対する計算力学的方法(翼モデル、直接数値モデリング、動力学的相似

則、デザインウィンドウ探索)を示し、それを昆虫規範型羽ばたき翼に適用することで、FWPAVの小型化の可能性を示す。

2 流体構造連成設計に対する計算力学のアプローチ

2.1 昆虫翼の形状簡易化モデル

昆虫翼は多数の複合的な構造要素から構成される^[17]。翼膜を支持する翅脈は、飛行中の荷重に対して十分な強さを保ちつつ、ひねりやキャンバリングといった特徴的な変形を許容して、空力性能を改善する^[18]。その基部は多数の骨片、筋肉、腱から構成されており、それらが一体となって働くことで、飛翔筋による駆動力を伝達して翼を羽ばたかせるとともに、翼の運動を巧みに制御するトランスミッションとして働く^[19]。これらの構造を全てモデル化することは困難であるため、目的に応じて適切に簡易化が行われる^[10, 17]。ここでは、計算コストの低減および模倣の目的のために、図1に示す集中化柔軟性^[2, 9, 14]と翅脈-膜相互作用^[15]による形状簡易化モデルを用いる。それは複雑な構造の詳細をバネ、梁、シェルとして隠匿し、弾性変形メカニズムを大局的構成関係により記述する。ねじりバネはピッチング運動を生むねじり柔軟性に対応し^[9]、昇降バネは翼先端軌跡を生む昇降柔軟性に対応し^[14]、羽ばたきバネはトランスミッションが有する羽ばたきに関する柔軟性に対応する^[2]。さらに、翅脈はキャンバー形成の役割に対応する3つの梁によって表される^[15]。このモデル翼は昆虫翼の特徴的運動を模擬することができる。昆虫翼の複雑な構造がバ

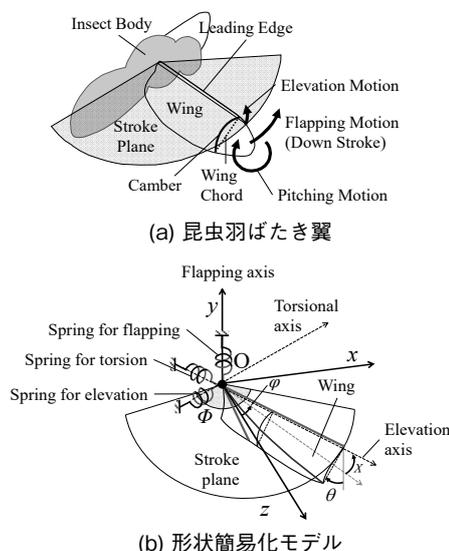


図1 昆虫羽ばたき翼の形状簡易化モデル

筆者紹介

いしはら だいすけ(著者紹介はP.2)

ネ、梁、シェルで表されているので、それらの実装により、昆虫翼の工学解^[20]を導くことができる。

2.2 直接的数値モデリングによる流体構造連成解析

本流体構造連成設計は、薄く柔軟な羽ばたき翼の動的大変形と周囲の流動の連成問題を正確かつ安定に解くことを前提とする。この連成問題の支配方程式は

$$\rho^s \frac{dv_i^s}{dt} = \frac{\partial \sigma_{ji}^s}{\partial x_j} \tag{1}$$

$$\rho^f \frac{\partial v_i^f}{\partial t} + \rho^f (v_j^f - v_j^m) \frac{\partial v_i^f}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ji}^f}{\partial x_j}, \quad \frac{\partial v_i^f}{\partial x_i} = 0 \tag{2a, b}$$

$$\sigma_{ij}^f n_j^f + \sigma_{ij}^s n_j^s = 0, \quad v_i^f = v_i^s \tag{3a, b}$$

である。ここで式(1)、(2)はそれぞれ弾性体と非圧縮性粘性流体の支配方程式、式(3)は流体構造境界面に課される連成条件である。翼に作用する重力は、その他の項に比べて十分小さいので考えない。これらの有限要素離散式から得られる一体型方程式を、系全体の運動方程式と流体圧力ポアソン方程式に分割して解くプロジェクトン解法^[21, 22]を用いる。流体圧力ポアソン方程式は、流体の非圧縮性拘束と等価である。ここではSchur補行列を回避するため、反復法に基づく分割^[22]を用いる。流体構造境界面はALE法により直接的に記述され、連成条件は一体型定式化により直接的に解かれる。構造大変形はTotal Lagrange法により定式化される。分割後の方程式は良条件化されているため、メッシュ分割による対角スケール前処理付き並列CG法を用いる。以上の詳細は文献^[16]に譲る。

2.3 流体構造連成の動学的相似則

支配方程式(1)~(3)の次元解析から求まる流体構造連成系の動学的相似則は、局所加速度と移流による慣性力の比 α 、移流による慣性力と粘性力の比であるReynolds数 Re 、流体動圧と構造弾性力の比であるCauchy数 Ca 、構造と流体の質量比 M_R から構成される：

$$\alpha = L/(TV), Re = \rho^f LV/\mu^f, Ca = \rho^f V^2 L^3 C, M_R = m_w/(\rho^f L^3) \tag{4a, b, c, d}$$

ここで L 、 T 、 V はそれぞれ寸法、時間、速度の代表量、 μ^f 、 C 、 m_w はそれぞれ流体粘性係数、構造コンプライアンス、構造質量を表す。図2に示すように、これらの4つの無次元数は、支配方程式(1)~(3)中の全ての力学項を相互に関連付けるので、幾何学的相似の下で、異なる流体構造連成系を互いに力学的相似にできる。最初に、昆虫データを図1の計算モデルに正確に導入するために用いられ^[9]、次に、スケール拡大モデル実験に用いられた^[11, 12]。本流体構造連成解析手法とその実装プログラムが支配方程式(1)~(3)と整合していることの検証にも用いられた^[2, 16]。

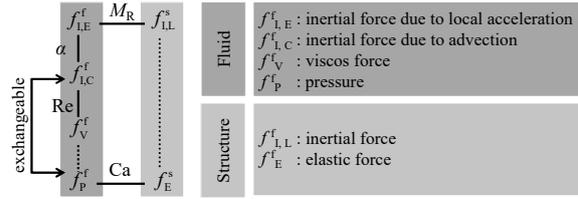


図2 流体構造連成の動学的相似則

2.4 デザインウィンドウ探索

MEMSの構造設計^[23]と同様に、FWNAVの構造設計では、作製可能性など定式化し難い設計制約を考慮して、設計問題を徐々に修正しながら、最終的な設計解に至るので、唯一の最適解を探索するよりも設計要求を満足する解の集合(デザインウィンドウ)を探索する方が有効な場合がある^[24, 25]。

3 動学的相似則に関する数値計算例

3.1 問題設定

図1の集中化ねじり柔軟性のみを考慮し、代表量 L 、 T 、 V 、 C をそれぞれ平均翼弦長 c_w 、平均羽ばたき速度 $V_m = 2r_2 \Phi L_w f_\phi$ 、羽ばたき周波数 f_ϕ の逆数、ねじり柔軟性 C_θ によって与える。ここで r_2 は翼面積の断面2次元モーメントの無次元半径、 Φ はストローク角、 L_w は翼長である。このとき、 $\alpha = 1/(r_2 r_A \Phi)$ となる。但し、 r_A は $2L_w/c_w$ で定義される翼アスペクト比である。集中化ねじり柔軟性を表すねじりバネを細長い板バネで与えた実装モデルを、図3に示す。簡単のため、翼形状を長方形とする。長方形の r_2 は $1/3^{0.5}$ であり、多くの双翅目の翼の r_2 はこの値に近い。周囲の流体領域は十分な大きさの直方体で与え、全ての壁面上に滑り無し条件を課す。翼前縁に課される強制変位は、正弦波状の時刻歴の羽ばたき角変位によって与える。ここでその1階微分の羽ばたき角速度は、実際の昆虫の観測に基づき、各半ストロークの中盤で一定となる台形波によって与える。振幅は1周期かけて正負のピーク間の大きさが Φ となるまで線形的に増加させる。翼にMITCシェル要素、流体にP1P1要素を用いて離散化する。

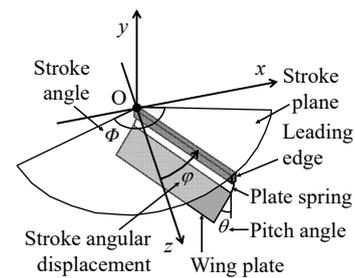


図3 集中化ねじり柔軟性翼モデルの実装

3.2 2つの異なる流体構造連成系の動学的相似

双翅目の昆虫とそのスケール拡大モデルを考える。前者に対して後者の翼長を約20倍、羽ばたき周波数を約1/200倍、流体を空気からシリコン油に変更する。幾何学的相似の無次元パラメータは $r_2 = 1/3^{0.5}$ 、 $r_A =$

7.267、 $\Phi = 107.5^\circ$ であり、動学的相似の無次元パラメータは $\alpha = 0.127$ 、 $Re = 824$ 、 $Ca = 0.244$ 、 $M_R = 0.111$ である。2つの異なる流体構造連成系でピッチ角と無次元化された揚力の時刻歴 (図4) は非常によく一致した。ゆえに数値流体構造連成解法とその実装プログラムは、支配方程式 (1)~(3) と整合している。

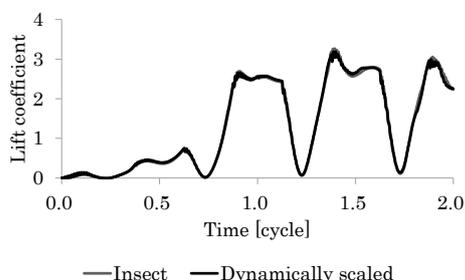


図4 揚力係数の時刻歴

3.3 受動的翼運動における羽ばたき周波数の効果

動学的相似則に基づき、羽ばたき翼の性能を系統的に評価する。ガガンボの無次元パラメータ $\alpha = 0.073$ 、 $Re = 254$ 、 $Ca = 0.19$ 、 $M_R = 16$ 、 $\Phi = 123^\circ$ 、 $r_A = 10.7$ に対して、 f_ϕ を変えることで、無次元周波数 $F_r = f_n/f_\phi$ (f_n は翼の固有周波数) を 3.32~5.80 と変えながら、 Φ を $80 \sim 140^\circ$ と調整することで、 Re 、 Ca 、 M_R を一定に保ちつつ、 α のみ 0.112~0.0637 と変わるようにした。この設定は、翼慣性力だけをその他の力学項に対して相対的に変化させるものである。この結果、図5に示すように、ピッチ角がストロークの切り返しの直後で顕著に変化する一方で、各半ストローク中盤ではあまり変化しないように調整された。図6にストロークの切り返

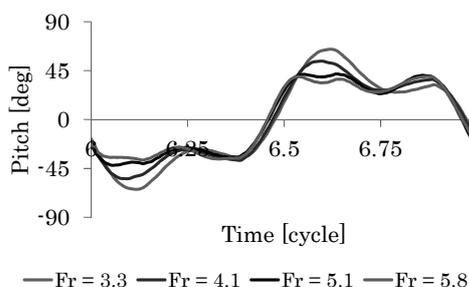
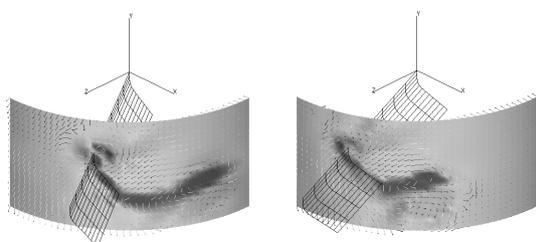


図5 ピッチ角の時刻歴



(a) $\Phi = 123^\circ$ 、 $F_r = 5.1$ 、 $\alpha = 0.073$ (crane-fly) (b) $\Phi = 80^\circ$ 、 $F_r = 3.3$ 、 $\alpha = 0.11$

図6 6.65 cycleにおける流れ場。コンターはz方向の渦度、ベクトルは流速を表す。

し直後にピッチ角がピークをとる時点付近での流れ場を示す。同図に示すように、いずれの場合にも昆虫羽ばたき飛行の非定常流体力学理論で重要な前縁渦が明確に捉えられている。また F_r が小さい方が下向きに強い流れが生じており、その時点のピッチ角と揚力がより大きいことと対応している。

4 2.5次元構造を有する微小羽ばたき翼の流体構造連成設計

図7に2.5次元構造を有する微小羽ばたき翼の流体構造連成設計の概念を示す。流体構造連成による受動的ピッチング運動に加えて、微小な基部励振が共振によって十分大きな羽ばたき角に増幅される。前章で示したように、羽ばたき周波数は受動的運動で重要なパラメータなので、それを設計パラメータとする。この翼の最も顕著な特徴は2.5次元構造であり、MEMSマイクロマシニングによって作製可能である [2,20]。

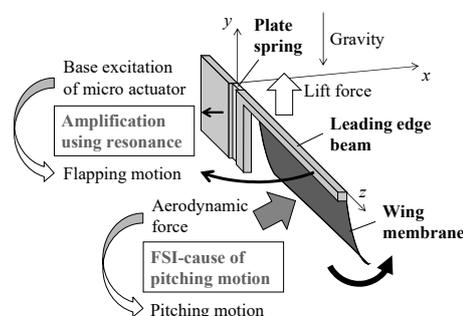


図7 2.5次元構造を有する微小羽ばたき翼の流体構造連成設計

翼膜の材質をポリイミド、翼長2.5mm、翼弦長0.8mm、膜厚 $t_w = 1.6\mu\text{m}$ とした。これらの寸法は小さなハエと同程度である。翼前縁の材質をシリコン単結晶、幅0.1mm、厚さ0.05mmとした。但し、このような複合材の微小翼の作製は困難であるため [26]、現在は全てポリイミドで作製している [5, 20, 27, 28]。板バネは翼膜と同じ層に形成されるとし、その長さを0.05mmとする。周囲の流体は空気とする。翼基部の励振は、利用可能な圧電アクチュエータから、面外方向振幅0.08mm、羽ばたき周波数 $f_\phi = 100 \sim 1000\text{Hz}$ と仮定する。揚力 F_L が小さなハエの自重と同程度以上である場合を満足解とする。図8に $f_\phi = 428\text{Hz}$ のときの翼基部と翼先端の面外方向変位の時刻歴を示す。共振によって後者は前者の19倍に増幅された。このとき、準定常状態において、ストローク角とピッチ角はそれぞれ実際の昆虫と同程度の 73° と 62° に達した。このとき両翼による揚力 (鉛直方向の流体力の総和) の平均は実際の昆虫の自重を超える。このときの翼運動と周囲の流れを図9に示す。同図に示すように、ピッチング運動が適切に生じていること、前縁渦が各半ストローク中盤で安定的に付着していることが確認できる。揚力の周波数応答関数から、デザインウィンドウは $f_\phi = 410 \sim 460\text{Hz}$ であり、満足解の存在が示された。

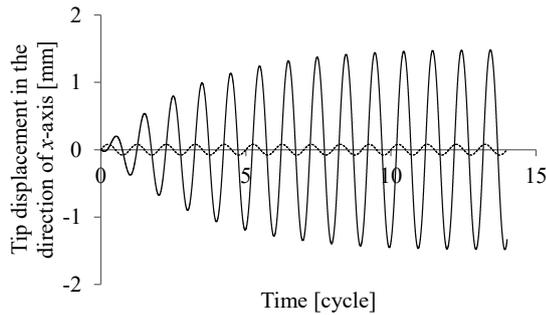


図8 翼基部と翼先端の面外変位の時刻歴

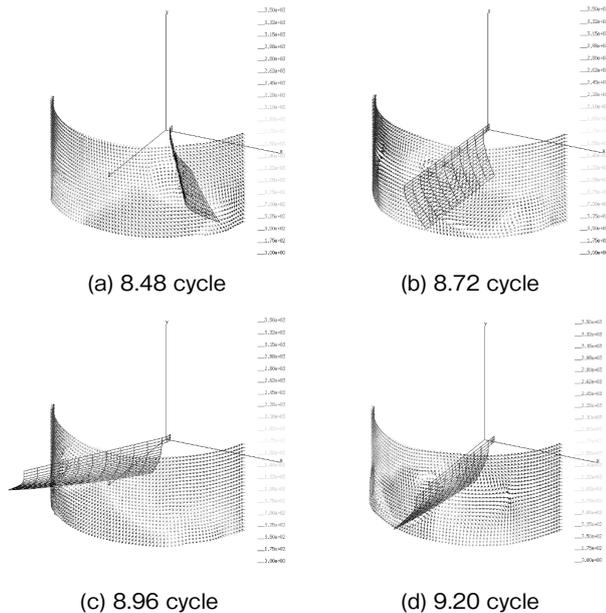


図9 共振駆動による翼運動と周囲の流れ

(<https://www.mdpi.com/2311-5521/7/1/26>の動画参照)

5 結言

流体構造連成による翼運動の自動化は、人工的な羽ばたき飛行体の電気機械的複雑さの低減に寄与する。この流体構造連成設計の複雑さを取り扱うために、本稿ではその計算力学的アプローチについて述べ、昆虫規範型微小羽ばたき翼への適用を通じて、FWNAVの小型化の可能性を示した。

謝辞

東レ株式会社の支援およびJSPS科研費の助成に謝意を表す。

参考文献

- [1] 昆虫の自由飛行と知能を包括したマルチフィジクス連成解析による真の計算Bio-Mimetics、基盤研究(A)、課題番号23H00475.
- [2] Ishihara, D. *Fluids* 2022, 7, 26.
- [3] Liu, H.; Ravi, S.; Kolomenskiy, D.; Tanaka, H. *Philos. Trans. R. Soc.* 2016, B371, 20150390.
- [4] Wood, R.J.; Finio, B.; Karpelson, M.; Ma, K.; Pérez-Arancibia, N.O.; Sreetharan, P.S.; Tanaka, H.; Whitney, J.P. *Int. J. Robot. Res.* 2012, 31 (11), pp. 1292-1302.
- [5] Ishihara, D.; Murakami, S.; Ohira, N.; Ueo, J.; Takagi, M.; Urakawa, K.; Horie, T. *Proceedings of the 15th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems 2020*, pp. 27-30.
- [6] Ellington, C.P. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* 1984, B305, 41-78.
- [7] Dickinson, M.H.; Lehmann, F.-O.; Sane, P.S. *Science* 1999, 284, 1954-1960.
- [8] Ennos, A.R. *J. Exp. Biol.* 1988, 140, 137-160.
- [9] Ishihara, D.; Horie, T.; Denda, M. *J. Exp. Biol.* 2009, 212, 1-10.
- [10] Nakata, T.; Liu, H. *J. Comput. Phys.* 2012, 231, 1822-1847.
- [11] Ishihara, D.; Yamashita, Y.; Horie, T.; Yoshida, S.; Niho, T. *J. Exp. Biol.* 2009, 212, 3882-3891.
- [12] Ishihara, D.; Horie, T.; Niho, T. *Bioinspiration Biomim.* 2014, 9, 046009.
- [13] Ishihara, D.; Horie, T. *Bioinspiration Biomim.* 2017, 12, 016008.
- [14] Ishihara, D. *Phys. Rev. E* 2019, 98, 032411.
- [15] Ishihara, D.; Onishi, M.; Sugikawa, K. *Biomimetics* 2023, 8, 571.
- [16] Ishihara, D.; Onishi, M. *Int. J. Numer. Methods Fluids* 2024, 96 (4), 435-481.
- [17] Wootton, R.J.; Herbert, R.C.; Young, P.G.; Evans, K.E. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* 2003, B358, 1577-1587.
- [18] Du, G.; Sun, M.J. *J. Exp. Biol.* 2010, 213, 2273-2283.
- [19] Beatus, T.; Cohen, I. *Phys. Rev. E* 2015, 92, 022712.
- [20] Shankar, V.; Shirakawa, N.; Ishihara, D. *Biomimetics* 2024, 9, 133.
- [21] Ishihara, D.; Yoshimura, S. *Int. J. Numer. Methods Eng.* 2005, 64, 167-203.
- [22] Ishihara, D.; Horie, T. *Comput. Modeling Eng. Sci.* 2014, 101, 421-440.
- [23] Ishihara, D.; Jeong, M.J.; Yoshimura, S.; Yagawa, G. *Comput. Struct.* 2002, 80, 2469-2481.
- [24] Rashmikant, Ishihara, D. *Int. J. Mech. Mater. Des.* 2023, 19, 407-429.
- [25] Rashmikant; Onishi, M.; Sugikawa, K.; Ishihara, D. *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.* 2023, 17 (1), 2271053.
- [26] Murakami, S.; Ishihara, D.; Araki, M.; Ohira, N.; Ito, T.; Horie, T. *Micro Nano Lett.* 2017, 12 (11), 913-915.
- [27] Rashmikant; Ishihara, D.; Suetsugu, R.; Ramegowda, P. C. *Eng. Res. Express* 2021, 3, 045006.
- [28] Rashmikant; Suetsugu, R.; Onishi, M.; Ishihara, D. *Proceedings of 2023 IEEE 36th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems 2023*, 534-537.