T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	やわらかさが生み出す飛翔と遊泳の運動
Title(English)	
著者(和文)	田中博人
Authors(English)	Hiroto Tanaka
出典(和文)	日本機械学会誌, Vol. 122, No. 1205, pp. 18-20
Citation(English)	Journal of the Society of Mechanical Engineers, Vol. 122, No. 1205, pp. 18-20
発行日 / Pub. date	2019, 4

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

やわらかさが生み出す飛翔と遊泳の運動

田中 博人（東京工業大学）

飛翔と遊泳における身体のやわらかさ

やわらかい身体の変形と流体力の相互作用

移動は、ロボットにおいても生物においても、身体に求められる主要な機能の一つである。その中で飛翔と遊泳という移動方法では、身体が空気または水という流体の中を、地面などの他の固体と接触することなく、身体に働く流体力のみを利用して進む。飛翔と遊泳が、歩行や走行のような身体と地面との固体間接触力を利用する移動方法と大きく異なる点は、この流体力の向きと大きさが身体の外形に強く依存するという点である。

例えば一般的な固定翼飛行機では、主翼は流線型の断面形状によって大きな揚力を発生し、不要な抗力を抑制する。主翼を上から見た平面形も、揚力と抗力の特性に影響する。プロペラ機の場合では、プロペラの回転翼も流線型の翼断面を持ち、翼の揚力の進行方向成分を推進力として利用する。ジェット機の場合もエンジンの内部では、多数の翼で構成される回転翼が、空気の吸入や圧縮および後方への噴出といった仕事を行っている。このように、翼の形状は流体力の発生に決定的に重要であるため、翼構造は形状を保持できるように基本的には固い。逆に、固く変形しない翼ならば、定常流を仮定した一般的な空気力学で流体力を推定でき、翼や全体の設計も可能となる。

それでは、身体がやわらかく外形が連続的に変形しうるソフトロボットが飛翔や遊泳を行うと、何が起こるだろうか。流体中を身体が移動すると、身体の外形と相対流速に応じて、身体表面の各部で流体圧力と流体摩擦力が働く。それらの流体力に応じて、やわらかい身体は変形する。外形が変われば、流体力が変化する。こうして身体（変形する構造）と流体（空気や水）が相互作用（連成）する。身体の大変形を伴う流体構造連成は、流体力学分野においても今なお多くの研究が行われている最先端の課題の一つである。

科研費新学術「ソフトロボット学」領域（以後、「本領域」と呼ぶ）の A01 班「しなやかな体」の計画研究課題の一つである「微細構造を活用した生物のやわらかい飛翔と遊泳の原理解明と実装」（以後、「本課題」と呼ぶ）は、ソフトロボットの飛翔と遊泳において、流体と相互作用するやわらかい身体をどのように設計すればよいのか、そしてやわらかい身体による飛翔と遊泳は、従来の固い身体による飛翔と遊泳に対して、どのような特徴を持ちうるのか、という問いに答えることを目的としている。ここで課題名に「微細構造」と「生物」というキーワードが入っていることに注意されたい。すでに自然界の生物はやわらかい身体による飛翔と遊泳を実現しており、その身体はマクロからミクロに至るマルチスケールな構造で成り立っている。そこで本課題では、いわゆるバイオミメティクス（生物模倣）の発想に則り、生物におけるやわらかい身体の飛翔と遊泳の原理を解明し、ソフトロボットの身体設計の理論と実装方法を構築していくというアプローチを採ることにした。次章では、規範とする生物のやわらかい身体を具体的に見ていく。

鳥類に見られるやわらかさと微細構造

外部翼構造と内部筋骨格構造の弾性

本課題では、飛翔と遊泳の両方を行う生物である鳥類を規範とする。鳥の遊泳とは、例えばウミスズメ科の鳥（*Alcidae*）は、羽ばたき翼で飛翔するだけでなく、海中でも羽ばたき翼で潜水遊泳して魚などを捕食する。ペンギン科の鳥（*Sphenisciдae*）は、羽ばたき翼による潜水遊泳に特化して進化しており、空中飛翔は不可能である。さらに、ウ科（*Phalacrocoracidae*）のように、翼ではなく脚の水かきで潜水遊泳する鳥もいる。本課題では、翼の羽ばたきで飛翔および潜水遊泳する鳥に注目する。

鳥の翼には、2種類のやわらかさ（弾性）が備わっていると言える。一つは、前章で述べたように流体と相互作用する翼自体の弾性であり、もう一つは、翼を羽ばたかせる胸部の筋骨格の弾性である。前者は身体から外部の流体中に突き出た外部構造の弾性であり、後者は身体内部の駆動系の弾性である。

飛翔する鳥の翼面は、上腕、下腕、手からなる筋骨格と、手の掌骨と第2指骨に接合する初列風切羽、下腕の尺骨に接合する次列風切羽、および両風切羽の根元付近を隙間なく覆う雨覆いという3種類の羽で構成される[1]。翼面の大部分は風切羽で占められており、各風切羽は羽軸と呼ばれる1本の桁構造で支持されており、羽軸は片持ち梁のように弾性的に曲げ変形可能である[2]。風切羽の薄板状の翼面である羽弁は、羽軸から枝分かれする羽枝と小羽枝で形成される（図1 a）[3]。羽枝と小羽枝の曲げ変形によって、羽弁も3次元的に弾性変形可能である。鳥の翼における、骨格、羽軸、羽枝、小羽枝という階層的な構造は、生物におけるマルチスケールな形態の分かりやすい例であろう。

翼のマクロな形状は、筋肉で制御される肩、肘、手首の

各関節の角度で決まり、翼骨格から先の翼面の形状は、各風切羽の受動的な曲げ変形に依存する。翼の揚力と抗力は、迎え角（翼弦と流入風速のなす角度）と翼型（翼断面の形状）に強く依存する。したがって、風切羽の受動的曲げ変形による翼面のねじれ変形や断面形状の変化は、あらゆる飛行状態において適切に生じなければならない。特に羽ばたき翼の場合は固定翼とは異なり、翼には空気力だけでなく羽ばたきによる慣性力も作用する。したがって、鳥の羽ばたき翼の構造は、適切な翼面形状を実現する適度な剛性と、慣性力を抑制する軽量性という要求に応える必要がある。

潜水遊泳に特化したペンギンの翼の構造は、飛翔する鳥とは大きく異なる。翼断面は骨と肉によって厚く流線形に形成され、風切羽は無く、小さな羽が表面を隙間なく覆っている。翼内部には扁平な上腕骨と手骨が広がる[4]。したがって、飛翔する鳥に比べて翼ははるかに固い。これは水が空気よりも密度が800倍以上大きく、翼に働く流体力も桁違いに大きくなることに対抗するためだと考えられる。それでも、肘や手首の関節は主に翼面内方向に可動である。またキングペンギン（*Aptenodytes patagonicus*）やエンペラーペンギン（*Aptenodytes forsteri*）などの大型の種では、羽ばたき遊泳中に翼の曲げ変形が目視される[5]。

一方、翼を羽ばたかせる胸部の筋骨格構造に目を向けると、上腕骨と胸骨をつなぐ胸筋が収縮すると肩まわりに打ち下ろしが生じ、烏口（うこう）上筋腱を介して上腕骨と胸骨をつなぐ烏口上筋が収縮すると肩まわりの打ち上げが生じる（図 1 b）[1]。肩は、上腕骨が烏口骨と接続する関節であり、烏口骨は胸骨と接する。さらに両肩は、V字状の叉骨（さこつ）で接続される。この構造では、腱と骨が弾性を有する可能性がある。特に叉骨は、いかにもバネのような形状をしており、弾性エネルギーの回収と放出を行っているのではないかと想像できる。実際、飛翔中のホシムクドリ（*Sturnus vulgaris*）において、X線写真撮影によって叉骨上端間が羽ばたきに応じて伸長と収縮を繰り返していることが示されている[6]。

以上が、鳥類の羽ばたき翼の外部翼構造と内部筋骨格構造の概要である。これまでの生物学では、形態や動きの観察から、羽ばたき運動において構造の弾性変形が利用されているのではないかと想像はされてきた。しかし、力学的な計測や計算による定量的な検証は、実は手付かずであることが多い。その理由は、語弊があるかもしれないが、力学的な研究は工学的知識と実験方法が必要なことから生物学分野においては稀少だからであろう。逆に工学者は、生物の行動や形態に機械的な面白さが存在することをよく知らない。ここに、工学と生物学の連携による力学的な研究の革新の可能性がある。次章で、本課題の連携体制と具体的な取り組みを紹介する。

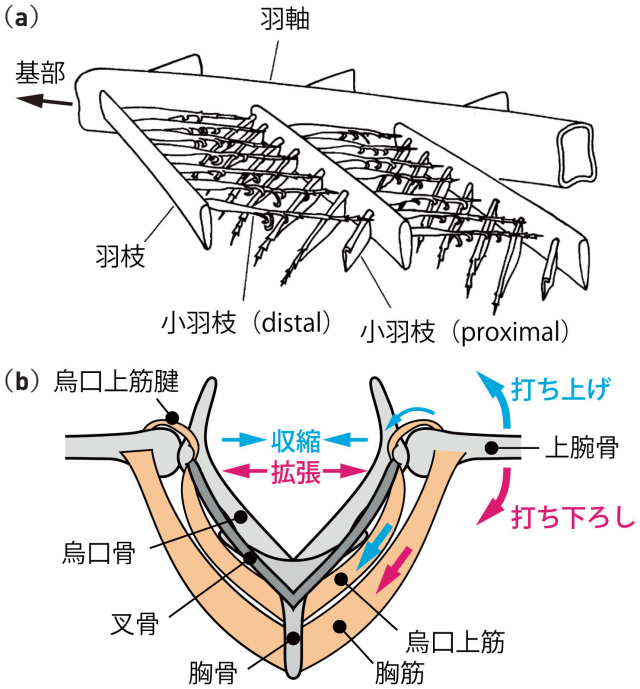

図 1　(a) 飛翔する鳥類の風切羽のマルチスケール構造の模式図（図は文献 (3) に基づく。）
(b) 鳥類の胸部の内部筋骨格の横断面模式図

研究体制と具体的な取り組み

生物を規範とした E-kagen な飛行と遊泳の実装に向けて

本課題の研究体制は、生物の飛行と遊泳の力学に造詣の深い工学者2名〔田中博人（東京工業大学）、中田敏是（千葉大学）〕と、鳥類形態学を専門とする生物学者1名〔山崎剛史（山階鳥類研究所）〕で構成した。まずは鳥類の羽ばたき飛行と遊泳に研究の焦点を絞り、実利的で密接な連携ができる体制とした。もちろん、羽ばたき翼は飛行と遊泳における一つの運動様式に過ぎず、今後の領域内外の研究の拡充に応じて、対象とする運動様式や形態も広がることを期待している。

現在の具体的な取り組みの例を紹介する。飛翔生物の規範として、持続的なホバリングが可能な唯一の鳥類として知られるハチドリに注目し、外部翼構造の弾性について研究を進めている。これまでに山階鳥研のチャムネエメラルドハチドリ（*Amazilia amazilia*）の剥製の風切羽の羽軸の静的曲げ試験を行い、曲げ剛性の翼面内分布を明らかにした。その結果に基づき、CFRP（炭素繊維強化プラスチック）製の羽軸とポリイミドフィルムの翼面で単純化したモデルを製作し、実際のハチドリと同じ周波数と振幅で羽ばたかせて、曲げ剛性分布と変形および性能（平均揚力や消費電力など）の関係を調べている（図 2）[7]。この CFRP 羽軸は、約 200 μm 厚の CFRP 板をスポット径約 20 μm の紫外線ナノ秒レーザ加工機で切り出して製作しており、さまざまな形状を高速で試作できる。電動羽ばたき機構の歯車部品は、PEEK（ポリエーテルケトン）樹脂板から最小直径 0.2 mm のエンドミルを用いて NC 切削で加工している。実際のハチドリの翼変形の様子は、すでに定量的に計測されており、本課題中で比較可能である[8]。

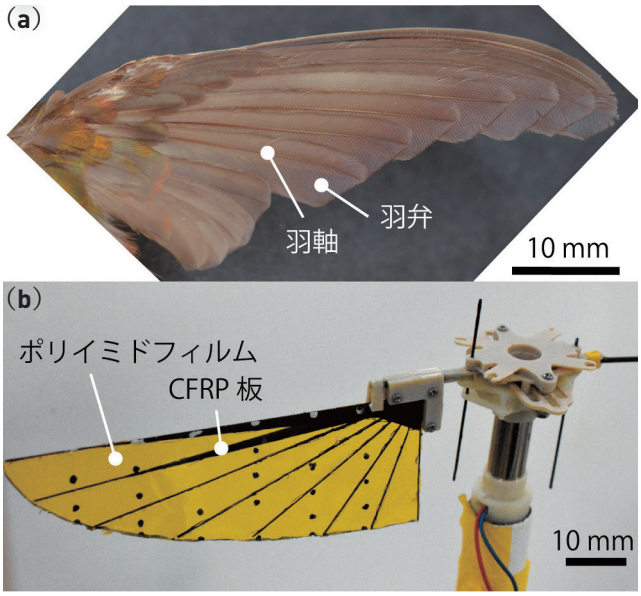

図 2　ハチドリを規範とした羽ばたき翼
(a) チャムネエメラルドハチドリの剥製の右翼の背面（山階鳥類研究所所蔵。標本番号 YIO-62540）
(b) 電動羽ばたき機構に取り付けた模倣翼の例

水中遊泳についてはペンギンに着目し、長崎ペンギン水族館の協力のもとで、遊泳運動の水中撮影と 3 次元運動解析を行っている（図 3 a）[9]。また、実際の翼運動を模倣可能な電動羽ばたき機構を開発中である（図 3 b）[10]。

内部筋骨格の弾性については、羽ばたきをてこ運動に単純化し、高精度な準静的流体計算と組合せた動力学モデルを作成して、胸部の粘弾性による効率向上効果や流れの外乱に対するロバスト性を調べている（図 4）[11] [12]。このモデルを用いて、ハチドリとペンギンを規範にしながら、空気と水という密度と粘度が大きく異なる二つの流体に対して、内部筋骨格の弾性の最適設計方法を確立することを目指している。

本課題の研究アプローチは、これまで述べてきた通りバイオミメティクス的である。「ソフトロボット」の概念が、人を含む生物に備わるやわらかさに着想を得ているのだから、それは自然なことである。生物を規範とすることの工学的な意義は、従来の学術体系からは発想し難い研究出発点を得ることであり、しかもそれが多様であることである。その利点を活用するには、規範元の生物の具体的な形態と運動の理解が欠かせない。

一方、本課題が「ソフトロボット学」たる所以は、最終的にソフトロボットとして実装するための理論と製作方法を確立することにある。本領域のソフトロボットは、ソフトな体と知能が、E-kagen（良いかげん）[13]に変形し、E-kagenに機能する。本課題の飛行と遊泳におけるソフトな身体は、乱れの無い理想的な環境下での効率的な運動を実現できるだけでなく、流体外乱、衝突、損傷などの予期しないさまざまな乱れに対しても E-kagen に機能して生存できるものになる。それは、さまざまな環境と状況に対応して生き延びる生物を想起させるもので、やはり本課題は工学と生物学の連携によって互いに新領域を開拓できる良き場になるだろう。

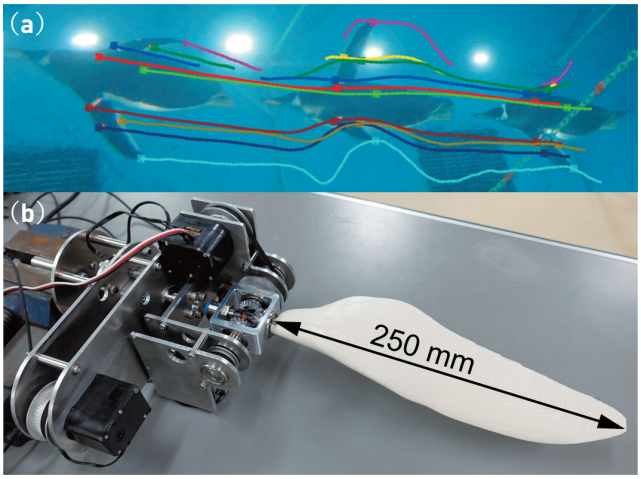

図 3　ペンギンを規範とした羽ばたき翼
(a) 遊泳するジェンツーペンギンの軌跡（三つの画像を合成）
(b) 三つの回転自由度をもつ電動羽ばたき機構

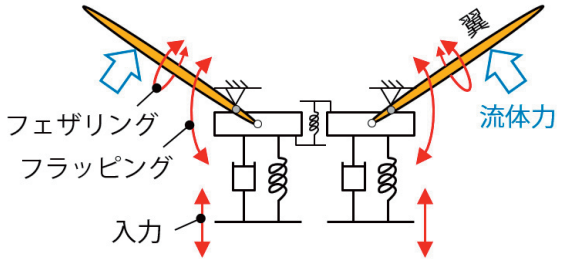

図 4　羽ばたき翼の胸部筋骨格の動力学モデル

参考文献
(1) フランク・B・ギル，山岸哲（日本版監修），山階鳥類研究所（訳），鳥類学［原書第 3 版］(2009), pp. 99- 105, 147-151.
(2) T. Bachmann, J. Emmerlich, W. Baumgartner, J. M. Schneider and H. Wagner, "Flexural stiffness of feather shafts: Geometry rules over material properties," Journal of Experimental Biology, Vol. 215 (2012), pp. 405-415.
(3) A. R. Ennos, J. R. E. Hickson and A. Roberts, "Functional morphology of the vanes of the flight feathers of the pigeon Columba livia," Journal of Experimental Biology, Vol. 198, (1995), pp. 1219-1228.
(4) D. B. Thomas and R. E. Fordyce, "The heterothermic loophole exploited by penguins," Australian Journal of Zoology, Vol. 55 (2007), pp. 317-321.
(5) B. D. Clark and W. Bemis, "Kinematicis of Swimming of Penguins at the Detroit Zoo," Journal of Zoology, Vol. 188 (1979), pp. 411-428.
(6) F. A. Jenkins, K. P. Dial and G. E. Goslow, "A cineradiographic analysis of bird flight - The wishbone in starlings is a spring," Science, Vol. 241 (1988), pp. 1495-1498.
(7) 相澤誠浩，田中博人，山崎剛史，"ハチドリを模倣した小型羽ばたき飛翔体における高性能弾性翼の研究，"第 29 回バイオフロンティア講演会（2018），2C24.
(8) M. Maeda, T. Nakata, I. Kitamura, H. Tanaka and H. Liu, "Quantifying the dynamic wing morphing of hovering hummingbird," Royal Society Open Science, Vol. 4 (2017), 170307.
(9) 大浦琢真，前田将輝，田中博人，"ペンギンの羽ばたき遊泳の 3 次元運動解析，"日本機械学会 2018 年度年次大会（2018），J1510104.
(10) 田中博人，栢菅宏規，"羽ばたき動作機構及び羽ばたき動作機構の使用方法、並びに、羽ばたき動作機構を用いた推進装置，"特願 2018-184512（出願人：東京工業大学）(2018).
(11) 中田敏是，上山浩平，劉浩，"筋骨格系を有する昆虫羽ばたき翼の流体構造連成モデル，"計算力学講演会講演論文集，Vol. 2017.30 (2017), 138.
(12) 上山浩平，小泉咲人，中田敏是，劉浩，"羽ばたき機構の柔軟性が羽ばたき翼のロバスト性に及ぼす影響，"バイオエンジニアリング講演会講演論文集，Vol. 2018.30 (2018), 1I09.
(13) K. Suzumori, "Plenary speakers: Soft robots as an E-kagen artifact," 2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft) (2018).

<正員>
田中 博人
◎東京工業大学　工学院機械系　准教授
◎専門：流体力学、微細加工、バイオメカニクス