

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：32638

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20656

研究課題名（和文）膜か毛か：翼の微細構造への流体力学的アプローチ

研究課題名（英文）Membranous or hairly: fluid dynamics approach to the wing microstructures

研究代表者

前田 将輝（Maeda, Masateru）

拓殖大学・工学部・准教授

研究者番号：80795774

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：鳥の飛翔の進化において羽根の進化が果たした役割の解明を意図して、羽根の微細構造を考慮した空気力学的研究を行った。平板状の羽根モデルと、その羽弁に隙間（切れ込み）を入れたモデル群を作成し、一連のシミュレーションを行った。風速が小さく流れに乱れがなく（層流）、羽根にあたる気流の角度が小さい（低迎え角）の状況では、隙間の幅と数を増やすと、飛翔効率の指標である揚抗比（揚力を抗力で割った値）は低下する傾向にあった。流れの可視化により、羽根下面の高圧気流の一部が隙間を通して上面側へと流れ込み、上面表面の低圧領域を中和して、揚力の低下をもたらすことが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鳥の羽ばたき飛行の進化は樹上説・地上説・WAIR（坂の駆け上がり）等が議論されている一方、羽根の進化については「羽根の微細構造（羽枝・小羽枝）が密に結合しており風を通さないほどよい」とか「羽弁（板部分）が羽軸を挟んで前縁側（外弁）と後縁側（内弁）で非対称であることが必要」などとされるが、裏付けに乏しい。本研究はこの点を実証する第一歩として、微細構造を考慮した羽根の空気力学に取り組み、メカニズムの解明に近づけた。今後は引き続き羽根の空気力学を進めるとともに、毛でできた翼で飛翔する昆虫や植物との比較を行い、類似性の有無や、どのような条件のもとで収斂が起きているのかを明らかにしていきたい。

研究成果の概要（英文）：We conducted an aerodynamics study on a feather considering the microstructure to elucidate the role of feather evolution in the evolution of powered flight in birds. We created a simple feather model possessing a shaft (rachis) and planar plate (vane). We then compared it with models with various gaps (slits) on its vane. We then conducted a series of steady laminar flow simulations on the feather models. The results showed that the lift-to-drag ratio, an index for flight efficiency, decreases with increasing the total gap area. Flow visualisation revealed that the high-pressure air on the ventral side of the feather vane flowed into the upper surface through the gaps. This flow neutralises the low surface pressure on the upper surface, the main contributor to the lift.

研究分野：生物流体力学

キーワード：動物飛行 空気力学 羽根 羽毛 羽枝 小羽枝 微細構造 鳥

### 1. 研究開始当初の背景

現生鳥類の大きな特徴の一つは羽毛でできた翼をもち羽ばたき飛翔(飛行)することである。羽ばたき飛翔はこれまで地球で昆虫・翼竜・鳥・コウモリにおいて進化したとされる。このうち後者 3 グループは脊椎動物であり前腕の相同性という意味では似ているが、翼構造と機能に着目すると、鳥を除く 3 者はいずれも膜状の翼であるのに対して、鳥は羽毛とくに風切羽という個別の要素の集合体である点が特異である。現生の昆虫は翅内部に体液と神経およびメカノセンサが張り巡らされているし (e.g., Fabian et al., 2022; Salcedo & Socha, 2020)、コウモリに至っては飛膜内に各種弾性線維や筋肉までが走っており飛行を制御している (e.g., Cheney et al., 2022)。一方、鳥の羽毛は体液の循環・供給がなく乾燥した「死んだ」組織である。しかしながらその微細構造は複雑であり、軽量化に貢献していると考えられる。具体的には風切羽(手や腕の骨につく飛翔用の羽根)は、中央に羽軸がありその左右に羽弁という薄い板がつく。羽弁は羽軸から分岐した羽枝、羽枝からさらに分岐した小羽枝(羽小枝とも)からなる、ある意味で布に似た多孔質構造である。ただし布とは異なり繊維が織られているのではなく、隣の羽枝から伸びてきた小羽枝同士が、面ファスナ(ベルクロ、マジックテープ)のように微細なフックで引っかかる構造となっている。一般に羽弁は隙間のない面を指向しており、初期の鳥類や恐竜における羽毛は適切な面を構成できておらず、飛翔能力がなかったことの根拠の一つとされている。しかしながら、実際には現生鳥類の風切羽においても、羽弁は多少の空気透過性をもっている (Müller & Patone, 1998)。さらに、羽根の隙間をゲルで塞いだ風洞実験により、空気力学的な利点があることが示唆された (Edar et al., 2010)。一方、昆虫飛翔の分野では、毛でできた翅の空気力学的な飛行メカニズムが徐々に明らかになってきている (e.g., Farisenkov et al., 2022; Jiang et al., 2022) し、植物においてもタンポポの綿毛の研究が盛んになっている (e.g., Cummins et al., 2018)。鳥の羽毛に関してはこのように直接的なモデルを用いた空気力学メカニズムの探索はいまだなされていない (Sullivan et al., 2017 の「風洞実験」では迎え角つまり風と羽根面のなす角という空気力学の基本的な情報すら欠けている)。したがって、進化の途上で隙間の大きな羽根が本当に飛行の役に立たなかったのかどうかは、憶測の域を出ていないと言える。

### 2. 研究の目的

鳥の羽根の微細構造、とくに羽枝や小羽枝同士の隙間があることで、どのような流れ場を生み出し、空気力学的に望ましい(あるいは望ましくない)結果をもたらすのかを明らかにすることが目的である。合わせて、「スタート支援」の趣旨にかんがみて、持続的な研究環境の構築という点に重点を置いたことも付記したい。

### 3. 研究の方法

鳥の羽根(風切羽)を規範とした形状モデルを作成し、形態をパラメトリックに変更するという方針で行った。

#### (1) 形状モデリング

Rhinoceros 7 およびそのプラグインであるパラメトリックデザインツール Grasshopper を用いて、羽根の 3 次元モデルを作成した。パイロットスタディとしては隙間の全く無い板状の羽弁をもつ羽根と、羽軸から羽枝のみが 100 本生えた 2 種類のモデルを文献 (Bachmann et al., 2007) の形状を参考に製作した(図 1)。その後、より効率的な形態空間の探索のため、平面形はシンプルなものとし、隙間の入れ方を変更することに注力した。具体的には隙間の間隔が 100, 300  $\mu\text{m}$ ; 隙間角度が 30, 45 度; 隙間の本数が 0, 2, 4, 8, 20, 40 本。このとき拓殖大学が保有する電子顕微鏡が使用可能となったため、撮影を行い、

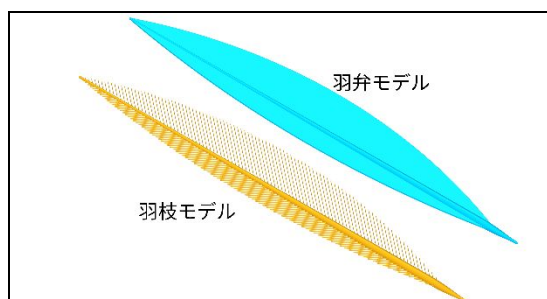


図 1. CAD で作製した 2 つの羽根モデル。上(水色)は板状の羽弁を持つモデル、下の黄色は羽軸に 100 本の羽枝が接続されたモデル。

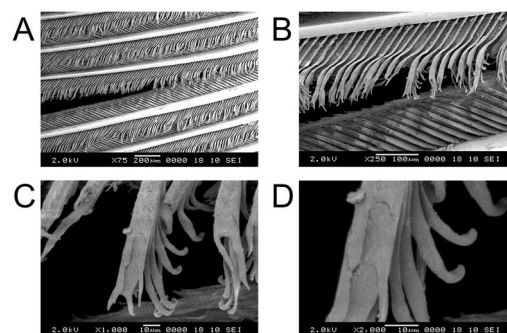


図 2. 走査型電子顕微鏡 (SEM) による羽根の撮影。(A) 75 倍 (B) 250 倍 (C) 1000 倍 (D) 2000 倍。A と B で横に走る白く見える筋が羽枝、縦に走るグレーのブラシ状の毛が小羽枝で、C と D は小羽枝の拡大。羽軸は写っていない。

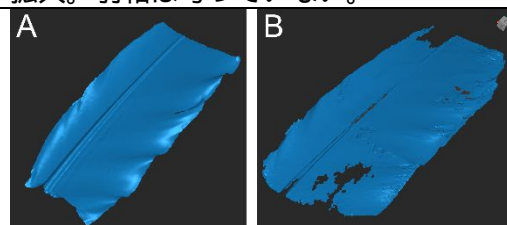


図 3. 3D スキャナによる同じ羽根のスキャン結果。(A) Revopoint POP 2 (B) Revopoint MINI.

参考とした(図2)。一方、3D スキャナ (Revopoint POP2 および同 MINI)を使用して羽毛の表面形状の取得も試みた(図3)。

### (2) 数値シミュレーション

3次元羽根モデルを使用して流れの数値シミュレーションを行った。まずパイロットスタディでは流れ場計算プログラムとしてOpenFOAMを利用した。その後はAnsys Academic Research Partner プログラムのもとで使用可能になった数値計算環境 Ansys 2023 R2 を用いた。手順としてはまず空気の領域から羽根の領域を取り除き (Ansys DesignModeler)、空気の領域を多数のセル(メッシュ)に分解し (Ansys Meshing)、流れ場を求め (Ansys Fluent)、最後に流れ場の可視化 (Ansys CFD-Post) および空気力の定量化 (Microsoft Excel) を行った。風速は 2 m/s 乱れのない層流と仮定した。迎え角は 5, 10 度。計算は時間発展させない定常とした。流れの様相を決定づける無次元数の一つである Reynolds 数は約 1300 だった。

### (3) 実験

3次元羽根モデルをベースとして3Dプリンタ (Ultimaker S5) により実験用モデルを製作し、簡易風洞により煙可視化実験を行った。簡易風洞は市販のサーキュレータを多数のストローで整流しただけのもので、吹出口付近に貼ったニクロム線に直流安定化電源から電流を流して加熱し、そこにオリーブオイルを垂らして煙を発生させた。原型は拓殖大学工学部香川研究室所属の修士課程大学院生(当時)朱 淵超により製作されたもので、これを前田研究室の修士課程大学院生カヴァディル ルイス耕史さんと共に拡張した。気流は高速度カメラ Chronos 2.1-HD (Kron Technologies) により約 1,000 fps (frames per second, 1秒間の撮影コマ数)で撮影した。

### 4. 研究成果

まず羽軸・羽枝・小羽枝に相当する部位の形態をパラメトリックに変更可能な羽根モデルの作成に成功した(図1)。ただし当該モデルは数値計算時の要素数の問題から羽枝レベルまでしか再現しておらず、小羽枝レベルをどのようにモデリングするかは今後の課題である。本モデルを用いたパイロットスタディにおいて、板状の(隙間のない)羽弁と羽枝からなる羽弁のモデルを気流シミュレーションで比較したところ、隙間の有無で明確に異なる流れ場が得られ(図4) 隙間のある方が揚抗比(揚力を抗力で割った値、高いほど効率がよい)は小さかった。これは主に隙間のある羽根では揚力(流れに垂直な力)が小さいことによったが、同時に、抗力(流れに平行な力、空気抵抗)は隙間のない羽根よりも大きかった。さらに投影面積で正規化した抗力係数をみると、隙間がある方がないものより4倍程度大きく、少ない材料で効果的に空気抵抗を増やせる可能性を示唆した。

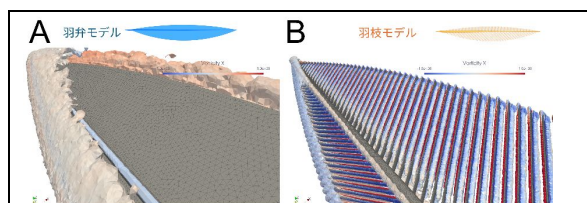


図4. 流速 1 m/s, 迎え角 5 度の際の、パイロットスタディにおける羽根まわりの流れの可視化。渦を表す Q の等値面に渦度の流れ方向成分で色をつけている。(A) 板状の羽弁を持つモデルでは前縁で流れが大きく剥がれている (B) 羽枝からなるモデルでは羽枝の間に細かい縦渦が生じている。

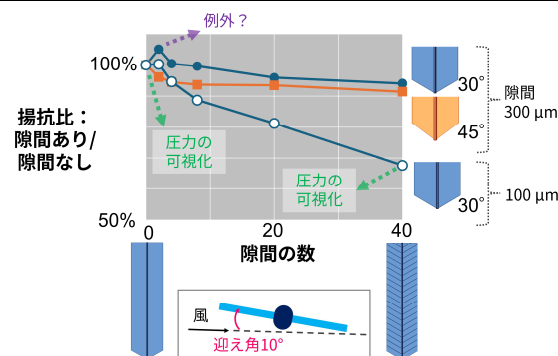


図5. 新たなモデルにおける計算結果。縦軸は各モデルの揚抗比を、隙間なしモデルの揚抗比を 100%として正規化した値。横軸は隙間の数。系列は、隙間の間隔が 300  $\mu\text{m}$  かつ隙間角度が 30 度 (filled blue); 隙間の間隔が 300  $\mu\text{m}$  かつ隙間角度が 45 度 (filled orange); 隙間の間隔が 100  $\mu\text{m}$  かつ隙間角度が 30 度 (open blue) の 3 通り。いずれも風速は 2 m/s, 迎え角は 10 度。

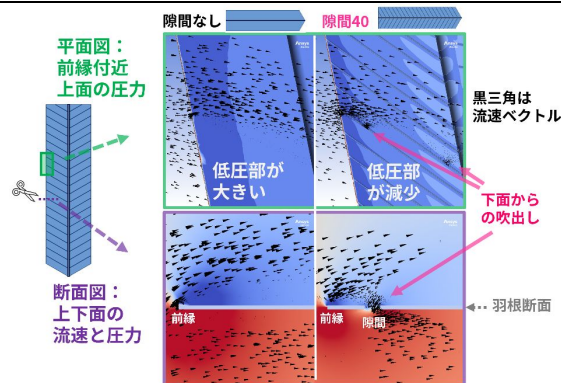


図6. 圧力と流速の可視化。

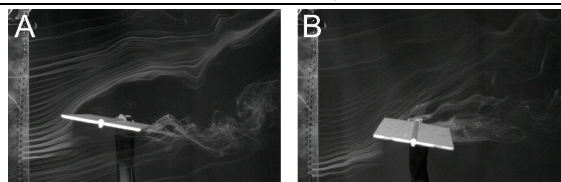


図7. 簡易風洞におかれた羽根周りの気流の煙可視化。(A) 隙間のない羽弁をもつモデルでは前縁で気流が剥離し、上面に煙が入り込んでいない。(B) スリットが 20 本入った羽弁をもつモデルでは煙が隙間を通り抜け羽根上面を通過している。

上記パイロットスタディは、羽枝を備えたモデルの要素数(空気の領域を数値計算のために小さく分割したセルの数)が1000万以上と大きく、計算量が膨大になることが問題だった。そこで、敢えてシンプルな板+隙間構造を採用し、隙間の幅・角度・数を色々と変えることとした。その途中経過として、興味深い結果が得られた(図5)ため、バードリサーチ鳥類学大会2023にてオンラインポスタ発表を行った(六倉・前田, 2023)。全体的には隙間を増やすほど・隙間の角度を増やすほど・隙間の数を増やすほど、揚抗比は低下する(非効率となる)傾向が見られた。これは隙間を通して下面の高圧空気が上面へ流れ込み、上面の低圧部(これが揚力を生む)を中和してしまうことが原因であった(図6)。このこと自体はある程度予期されていたが、一部例外的に隙間がある方がないよりも揚抗比が向上するケースも見られた。これがどのようなメカニズムによるのか、他にも同様のパラメタセットが存在するのか(それがEdar et al., 2010で見出されたケースに相当するの否か)、といった点については現在も検証中である。

隙間の角度を変更していた際、羽枝長さに相当する斜め距離を一定に保っていたため、翼弦長(流れ方向の羽弁前縁から羽弁後縁までの距離)が変動していた。いずれにせよ正規化を施すためあまり気にしていなかったのだが、実はこれが流れ場を定性的にも変えてしまったことに気づいた。羽弁と羽軸の流れ(渦)の干渉が生じているようで、こちらについても系統的な検証を現在進行中である。同時に、時間発展を考慮しない(最終的に到達するである「おちついた」流れ場を求めようとする)定常計算では、渦の周期的な剥離と振動などの定性的な流れ場を正確に再現できていない危険性が危惧されたため、非定常計算を行うことにした。要求される計算リソースが大きくなるためその確保が今後の課題である。

実験に関しては本グラントにより3Dプリンタと高速度カメラを購入したものの、大学の大型回流式低速風洞・小型吹出式風洞がいずれも故障するというトラブルのため予定通りに進まず、数値シミュレーションを先行させる策を取った。その間、苦肉の策として手製の簡易風洞を用いて煙可視化のテストを行ったところ、風の乱れや煙の出し方などに課題は残るものの、定性的には隙間の有無で流れ(流脈線)の違いが明確に現れた(図7)。この実験を通して、3Dプリント・高速度カメラによる撮影(照明やレンズ等の購入・設置も含む)・および撮影したデータの転送や後処理といった各種基本ノウハウの取得に成功した。幸い、小型吹出式風洞は復旧したため、今後は当該風洞とロードセルを用いて数値計算結果の定量的な検証(validation)を進めていく。

羽根の外形を得るための3Dスキャン結果(図3)については、以前に使用したことのあるArtec SpaceSpiderに比べると価格が1/30程度と格安であるためか、トラッキングがすぐに外れることと、なによりも点群にレイヤの概念がなく一度トラッキングが外れると全てやり直しというソフトウェア上の問題が致命的で非常に使いづらかった。精度についてはPOP2(図3A)よりも高精度をうたうMINIを導入してみた(図3B)ものの、顕著な違いは感じられなかった。光学的な方式の違いによりトラッキングエラーは多少減ったかもしれないが、視野が狭くなったため動かす必要のある領域は増え、むしろ視野範囲を大きく超えるようなスキャン(多くの風切羽はそうなる)は難しくなってしまったかもしれない。今後は発展の著しいフォトグラメトリ(たとえばRealityCapture)を中心に使用し、3Dスキャンは補助的に用いることを考えている。

全体を通しての今後の展望としては、当初の目的であった鳥の羽毛の進化・飛翔の進化により明確に迫るため、化石鳥類等の羽毛形態を模擬したモデルに挑戦していきたい(Feo et al., 2014; Wang et al., 2020)を後に発見したことは痛恨であった。さらに長期的な展望としては、昆虫や植物等、毛を用いた他の「翼」も含めた比較を通して、グローバルなスケールリング則の有無やその意義(収斂・非収斂への影響)にも迫りたい。

#### <引用文献>

- Bachmann, T., Klän, S., Baumgartner, W., Klaas, M., Schröder, W., Wagner, H., 2007. Morphometric characterisation of wing feathers of the barn owl *Tyto alba pratincola* and the pigeon *Columba livia*. *Frontiers in Zoology* 4, 23–15. DOI: 10.1186/1742-9994-4-23
- Cheney, J.A., Rehm, J.C., Swartz, S.M., Breuer, K.S., 2022. Bats actively modulate membrane compliance to control camber and reduce drag. *Journal of Experimental Biology* 225, jeb243974. DOI: 10.1242/jeb.243974
- Cummins, C., Seale, M., Macente, A., Certini, D., Mastropaolo, E., Viola, I.M., Nakayama, N., 2018. A separated vortex ring underlies the flight of the dandelion. *Nature* 562, 414–418. DOI: 10.1038/s41586-018-0604-2

- Eder, H., Fiedler, W., Pascoe, X., 2010. Air-permeable hole-pattern and nose-droop control improve aerodynamic performance of primary feathers. *Journal of Comparative Physiology A* 197, 109–117. DOI: 10.1007/s00359-010-0592-7/
- Fabian, J., Siwanowicz, I., Uhrhan, M., Maeda, M., Bomphrey, R.J., Lin, H.-T., 2022. Systematic characterization of wing mechanosensors that monitor airflow and wing deformations. *iScience* 25, 104150. DOI: 10.1016/j.isci.2022.104150
- Farisenkov, S.E., Kolomenskiy, D., Petrov, P.N., Engels, T., Lapina, N.A., Lehmann, F.-O., Onishi, R., Liu, H., Polilov, A.A., 2022. Novel flight style and light wings boost flight performance of tiny beetles. *Nature* 602, 96–100. DOI: 10.1038/s41586-021-04303-7
- Feo, T.J., Field, D.J., Prum, R.O., 2015. Barb geometry of asymmetrical feathers reveals a transitional morphology in the evolution of avian flight. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 282, 20142864. DOI: 10.1098/rspb.2014.2864
- Jiang, Y., Zhao, P., Cai, X., Rong, J., Dong, Z., Chen, H., Wu, P., Hu, H., Jin, X., Zhang, D., Liu, H., 2022. Bristled-wing design of materials, microstructures, and aerodynamics enables flapping flight in tiny wasps. *iScience* 25, 103692. DOI: 10.1016/j.isci.2021.103692
- Ksepka, D.T., 2020. Feathered dinosaurs. *Current Biology* 30, R1347–R1353. DOI: 10.1016/j.cub.2020.10.007
- Müller, W., Patone, G., 1998. Air transmissivity of feathers. *Journal of Experimental Biology* 201, 2591–2599. DOI: 10.1242/jeb.201.18.2591
- 六倉大志, 前田将輝. 羽根の微細な隙間は飛翔に貢献するか: 空気力学的検討. *バードリサーチ鳥類学大会 2023*, 2023年12月. ポスタ発表
- Salcedo, M.K., Socha, J.J., 2020. Circulation in Insect Wings. *Integr Comp Biol*. DOI: 10.1093/icb/icaa124
- Sullivan, T.N., Chon, M., Ramachandramoorthy, R., Roenbeck, M.R., Hung, T.-T., Espinosa, H.D., Meyers, M.A., 2017. Reversible Attachment with Tailored Permeability: The Feather Vane and Bioinspired Designs. *Advanced Functional Materials* 27, 1702954. DOI: 10.1002/adfm.201702954
- Wang, S., Chang, W.-L., Zhang, Q., Ma, M., Yang, F., Zhuo, D., Hans, H.I.-C., Yang, R., Wu, P., Habib, M., Juan, W.-T., Chuong, C.-M., 2020. Variations of Mesozoic feathers: Insights from the morphogenesis of extant feather rachises. *Evolution* 74, 2121–2133. DOI: 10.1111/evo.14051

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>六倉大志、前田将輝                 |
| 2. 発表標題<br>羽根の微細な隙間は飛翔に貢献するか：空気力学的検討 |
| 3. 学会等名<br>バードリサーチ鳥類学大会 2023         |
| 4. 発表年<br>2023年                      |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>前田将輝                              |
| 2. 発表標題<br>生物学における高速度カメラの活用例：鳥と昆虫の羽ばたき飛翔を中心に |
| 3. 学会等名<br>第71回日本生態学会大会（招待講演）                |
| 4. 発表年<br>2024年                              |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|