



巨大翼竜はほとんど飛ばなかった ～絶滅巨大飛行生物と現生鳥類のソーリング能力の比較～

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院環境学研究科の後藤 佑介 研究員、依田 憲 教授らの研究グループは、東京大学大気海洋研究所の佐藤 克文 教授、フランスのシゼ生物学研究センター（CEBC）との共同研究で、航空力学に基づいて、絶滅した巨大飛行生物と現代の鳥類の、風や気流を利用した滑空^{注1)} 飛行（ソーリング^{注2)} における能力を計算、比較しました。その結果、プテラノドン^{注3)}（翼開長^{注4)} 約 5～6m）が現代のグンカンドリのように、海上の上昇気流を使ったソーリング飛行を得意としたことが分かりました。さらに、史上最大級の翼竜^{注5)}、ケツアルコアトルス^{注6)}（翼開長約 10m）が、ソーリング飛行に不向きであったことを発見しました。この結果から、ケツアルコアトルス及び同サイズの超大型翼竜は、ほとんど飛ばずに陸上生活をしていた可能性が高いと考えられます。

本研究成果により、絶滅した巨大鳥類や翼竜に関する図鑑での説明や、映画での描写が大きく変わることが期待されます。

本研究成果は、2022 年 5 月 5 日に米学術誌「PNAS Nexus」創刊号に掲載されました。

本研究は、2021 年度から始まった文部科学省「学術変革領域（A）階層的生物ナビ学」などの科学研究費助成事業の支援のもとで行われたものです。

【ポイント】

- ・ 現生の大型鳥類は風を使った滑空飛行（ソアリング）を行う。ソアリングには上昇気流を利用したサーマルソアリング^{注7)}と、海上の風速勾配を利用したダイナミックソアリング^{注8)}の2種類がある。
- ・ 力学モデルを使って4種の絶滅巨大飛行生物のサーマルソアリングとダイナミックソアリングの性能を計算し、現生鳥類の性能と比較した。
- ・ 史上最大級の飛行生物とされる巨大翼竜、ケツアルコアトルスが、現代の鳥類に比べて、ダイナミックソアリングもサーマルソアリングも下手であることが分かった。この結果から本種はほとんど飛ばずに陸上生活をしていた可能性が高いと考えられる。

【研究背景と内容】

【研究背景】

古生物図鑑を開くと、翼を広げたときの端から端までの長さ（翼開長）が、6～10mにも達する巨大な翼竜や鳥が数多く登場します。この夏公開予定の映画『ジュラシック・ワールド』最新作の予告映像にも、史上最大級の翼竜、ケツアルコアトルスらしき生物が登場しています。これらの絶滅した巨大生物はどのように飛んでいたのでしょうか？

現代の大型鳥類の多くは、羽ばたき飛行ではなく、より省エネな飛行方法である、風や気流を使った滑空飛行（ソアリング）を主な移動手段にします（例えば、現生鳥類最大級の種であるコンドルは、飛行時間のうち1%の時間しか羽ばたいていないことが近年の研究で報告されています）。現生鳥類のソアリング飛行は大きく分けて2種類あり、コンドルやワシ、ガンカンドリのように上昇気流を使って上昇と滑空を繰り返すサーマルソアリングと、アホウドリやミズナギドリのように海上の風速勾配を使ったダイナミックソアリングがあります。

絶滅した巨大鳥類や翼竜種も、現代の大型鳥類と同様に、ソアリング飛行を主な移動手段に用いたと考えられてきました。しかし、彼らのソアリング能力を実際に計算し、性能を評価した研究はほとんどありませんでした。

【内容】

滑空する鳥の飛行は、グライダー同様に、ニュートンの運動方程式^{注9)}でよく記述できることが知られています。そこで運動方程式を使って、2種の絶滅巨大鳥類（アルゲンタヴィス^{注10)}、ペラゴルニス・サンデルシ^{注11)} [翼開長6～7m]）と2種の翼竜（プテラノドン [翼開長5～6m]、ケツアルコアトルス [翼開長10m]）、そしてソアリングをする現生種を対象に、彼らのダイナミックソアリングと、サーマルソアリングの能力、持続的なソアリングに必要な風速を、計算、比較しました。（図2）

その結果、アルゲンタヴィスは、従来の説通りサーマルソアリングに適していたこと、ペラゴルニスは、ダイナミックソアリングをしていたと考えられていましたが、サーマルソアリングに向いていたことが分かりました。またプテラノドンは、ダイナミックソアリングに適していたとする研究と、サーマルソアリングに適していたとする研

究がありましたが、我々の結果は後者を支持しました。最後に、史上最大級の飛行生物とされるケツアルコアトルスは、ダイナミックソアリングとサーマルソアリングいずれの能力も現生種に比べて低く、ソアリング飛行に不向きであったことが分かりました（なお、大気密度を変えてもケツアルコアトルスのソアリング能力は低いままでした。詳細は用語解説欄の“過去の大気密度”^{注12)}をご覧ください）。



過去と現代の、ソアリング飛行をする生物達としない生物達（イラスト：きのした ちひろ）

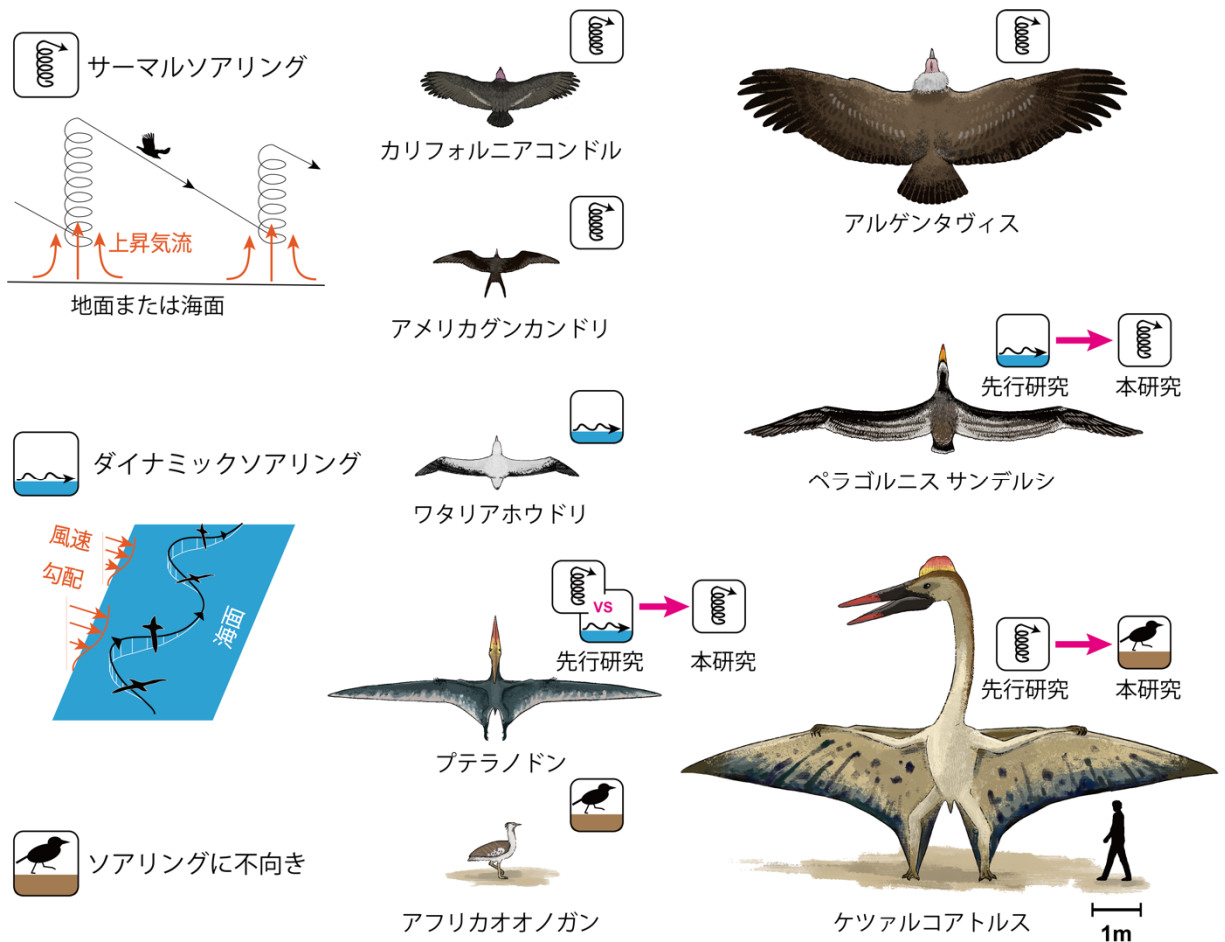


図 1：(左) サーマルソアリングとダイナミックソアリングの模式図。(右) 現生と絶滅した大型鳥類、翼竜のソアリング方法。ピンクの矢印は、左側が従来考えられていたソアリング方法、右側が本研究の結果から考えられるソアリング方法。(イラスト：きのした ちひろ)

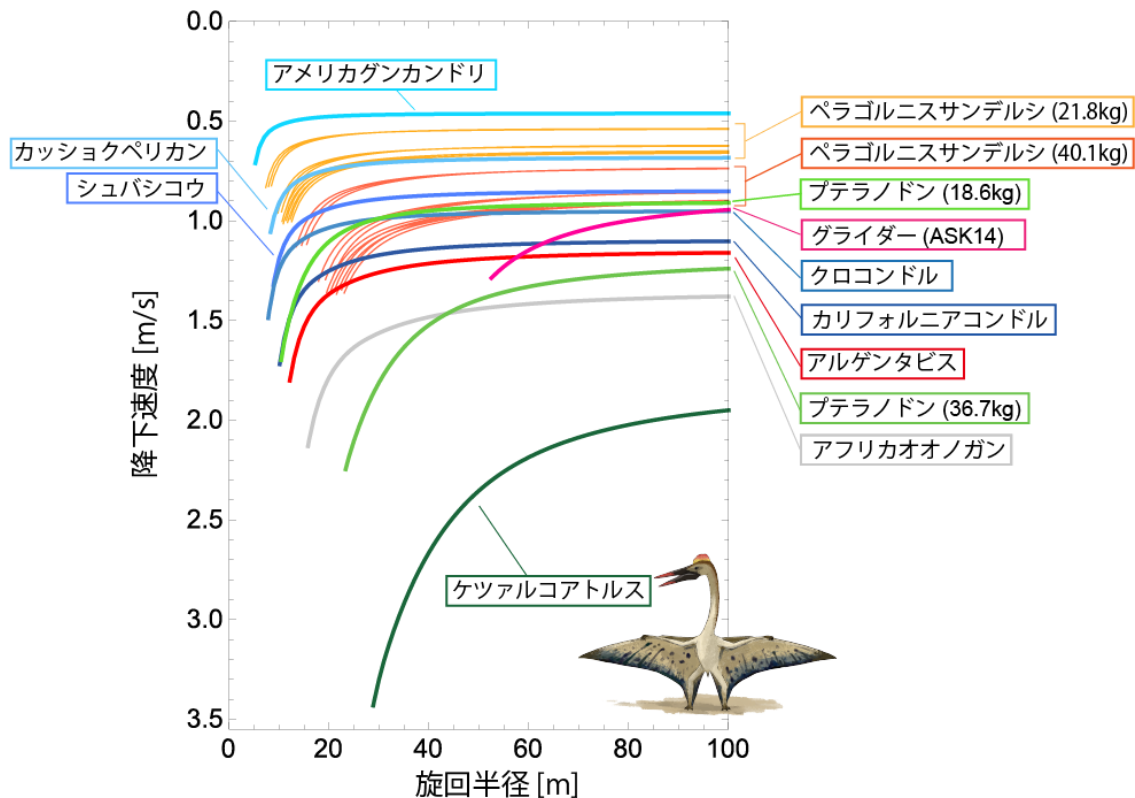


図 2：サーマルソアリング性能の種間比較

サーマルソアリングでは、鳥は上昇気流を受けながら、円軌道を滑空することで上昇する（身近な例ではトビ）。上昇気流の速度が、生物が滑空で降下する速度を上回れば生物は上昇できる。また、滑空する円の半径が小さいほど、上昇気流が強い範囲にとどまりやすくなり有利である。よって、できるだけ小さい半径を、小さな降下速度で滑空できるほど、サーマルソアリングの能力が高い。現生種と絶滅種について力学モデルから計算した、旋回半径（横軸）に対する降下速度（縦軸）を図示した。線が左上にあるほどその種のサーマルソアリングの性能が高いことを意味する。ケツアルコアトルスだけ極端にサーマルソアリングの性能が低いことが見てとれる。

（イラスト：きのした ちひろ）

【成果の意義】

絶滅飛行生物の中でも特にケツアルコアトルスは、その飛行能力について長年にわたり議論がされてきました（詳細は用語解説欄の“巨大翼竜は飛べた？”^{注 13)}をご覧ください）。先行研究では、本種はその巨体のために羽ばたき飛行を短時間しか続けられず、長距離移動をする際には、サーマルソアリングに頼っていたとされてきました。しかし、今回の我々の研究によって、ケツアルコアトルスのサーマルソアリング能力が低いことが新たに判明したため、本種及び同サイズの超大型翼竜は、稀に羽ばたき飛行をするのみで、ほとんど飛ばずに陸上生活をしていた可能性が高いと考えられます。

このように本研究の結果は、ケツアルコアトルスをはじめとする、絶滅した大型翼竜や鳥類達の当時の暮らしに関して、我々の従来の理解を更新し、今後、古生物図鑑の説明や映画の描写を塗り換えることが期待されます。

また本研究は、絶滅飛行生物のソアリング能力を、物理モデルに基づいて定量的に評価する枠組みを提示しています。そのため、古生物学、工学、動物行動学、古気候学な

どさまざまな分野の研究者が、各分野の知識（翼竜の新しい形態の推定値、当時の生息環境の推定など）を持ち寄り、協力しながら、絶滅飛翔生物の飛行性能を今後さらに解き明かしていくための、理論的土台となることが期待されます。

【用語説明】

注 1) 滑空 (gliding) :

生物が翼を羽ばたかせずに飛ぶ方法。

注 2) ソアリング (soaring) :

滑空の中でも風などの空気の流れを利用して飛ぶ飛行方法。

注 3) プテラノドン (*Pteranodon longiceps*) :

最も有名な翼竜の 1 種。白亜紀後期に生息。推定翼開長は 5~6m。化石が過去の海底から数多く見つかったことから、現代の海鳥のように海上を生活の舞台にしていたと考えられている。アホウドリのようにダイナミックソアリングをしていたとする研究 (Witton & Habib 2010) と、グンカンドリのように海上をサーマルソアリングしていたとする研究 (Palmer 2011) があった。本研究の結果から、本種はダイナミックソアリングが苦手、サーマルソアリングに適していたことが分かった。

注 4) 翼開長 :

翼竜や鳥が翼を広げたときの、翼の端から端までの長さ。

注 5) 翼竜 :

三畳紀後期から白亜紀末期まで生息した、飛行する爬虫類。皮膜状の翼を持つ。白亜紀後期にはケツァルコアトルスをはじめとした、翼開長が 10m 近くに達する超大型翼竜が複数種出現したと考えられている。

注 6) ケツァルコアトルス (*Quetzalcoatlus northropi* : 以下 *Q. northropi* と表記) :

史上最大級の翼竜のうちの 1 種。約 7000 万年前に生息。その体重は約 70kg と推定されてきたが、2010 年前後に複数の研究が 3 倍以上重い体重の推定値を報告した (Witton 2008, Sato et al. 2009, Henderson et al. 2010)。現在は、研究によりばらつきはあるものの、およそ、翼開長 9~11m、体重 250kg とされている。本種以外にも、同クラスのサイズであったと推定される翼竜の化石がこれまで複数報告されている。しかし、いずれの巨大翼竜も全身骨格化石は見つかっていない。*Q. northropi* の場合、上腕を含むごく一部の骨が見つかったのみである。*Q. northropi* の形態復元はその多くを、小型の近縁種 *Quetzalcoatlus lawsoni* (推定翼開長約 5.5m, 2021 年に正式に命名) の化石から得た知見に拠っている。

注 7) サーマルソアリング：

陸上や海上に生じた上昇気流内を旋回上昇し、その後滑空するプロセスを繰り返すことで移動するソアリング方法。現生の鳥類では、主に陸上性の鳥類が使い、ワシ類やコンドル類が日常的に使う。例外的に海上でのサーマルソアリングを日常的に行う種としてグンカンドリがいる。本研究ではサーマルソアリングの性能の指標として、鳥が円軌道を旋回しながら上昇するのに必要な上昇気流の速度と、直線経路を滑空して 1m の高度を降下した際に移動できる水平方向の移動距離、の 2 つを計算した。

注 8) ダイナミックソアリング：

海上付近の風は海面から高度が上がるほど風速が大きくなる（風速勾配）。この風速勾配を利用することで、羽ばたかずに飛ぶ方法がダイナミックソアリングである。現生の鳥類では、ミズナギドリ類やアホウドリ類が日常的にこの飛行方法を利用する。本研究ではダイナミックソアリングの性能の指標として、ダイナミックソアリングで実現できる最大移動速度、向かい風方向へ飛ぶ際に実現できる最大移動速度、持続的なダイナミックソアリングをするのに必要な最小風速を計算した。

注 9) ニュートンの運動方程式：

物体の運動を決める式で（運動量の時間変化）＝（物体に働く力）によって与えられる。この方程式を解くことで物体の運動（任意の時間の位置と速度）を計算することができる。どのような力が働くかによって物体の運動が決まる。滑空する生物（またはグライダー）には重力、揚力、抗力の 3 つの力が働く。これらの力の大きさは、生物の体重、翼面積、翼の長さ、抗力係数、飛行速度などによって決まる。

注 10) アルゲンタヴィス (*Argentavis magnificens*)：

史上最大級の鳥類。翼開長の推定値は約 7m。約 600 万年前の地層から見つかった。現代のコンドルに似た生態をしていたと考えられている。

注 11) ペラゴルニス・サンデルシ (*Pelagornis sandersi*)：

2014 年に報告された史上最大級の鳥類 (Ksepka 2014)。2800～2500 万年前の地層から見つかった。推定された翼開長は 6.06m～7.38m。細長い翼を持ち、アホウドリに似た形態からダイナミックソアリングをしたであろうと先行研究では報告されたが、本研究からサーマルソアリングに適していたことが分かった。

注 12)

過去の大気密度：

翼竜や巨大鳥類が生息した時代の大気組成や密度が現代と大きく異なっていたとする研究は著者達の知る限りない。また本研究では、現代の 1.2 倍の大気密度でもソアリング性能を計算したが、ケツアルコアトルスの飛行性能は依然低かった。よって本研究の結果は時代による大気密度の違いに大きな影響は受けないと考えられる。

注 13) 巨大翼竜は飛べた？：

翼開長が 10m に達する巨大翼竜は果たして飛べたのかという議論が、2010 年前後に起こった (Sato et al. 2009, Henderson et al. 2010, Witton & Habib 2010)。巨大翼竜は飛べたのか、という問いは、①翼竜が離陸できたのか、②翼竜は持続的に羽ばたき飛行ができたのか、③翼竜はソアリング飛行ができたのか、の 3 つに分けられる。①については、重すぎて離陸できなかったとする研究 (Henderson 2010) もあるが、多くの古生物学者は離陸できたと考えているようである。ただし、その方法については、4 本足を使ってコウモリのように離陸したとする説 (Habib 2008) や、後肢で高くジャンプし離陸したとする説 (Padian et al. 2021)、など議論が続いている。②に関しては、複数の研究が、巨大翼竜は羽ばたき飛行を長時間維持できなかったと結論づけた (Sato et al. 2009, Witton & Habib 2010)。しかし、この結論から導かれた主張は研究によって異なり、巨大翼竜は飛べなかったと主張した研究 (Sato et al. 2009) もあれば、サーマルソアリングを主な移動手段として広範囲を移動したと主張した研究 (Witton & Habib 2010) もある。最後に、③に関しては、翼竜の形態の最新の推定値を使ってこれを計算した研究はなかった。そこで本研究ではこの点に焦点を当てた結果、ケツアルコアトルスのサーマルソアリング能力が、現代の鳥に比べて低いことが分かった。よって、以上 3 点の疑問に関する知見を合わせると、巨大翼竜は仮に離陸できたとしても、短時間の羽ばたき飛行をするのみだったと考えられる。

【論文情報】

雑誌名 : *PNAS Nexus*

論文タイトル : "How did extinct giant birds and pterosaurs fly? A comprehensive modeling approach to evaluate soaring performance"

著者 : Yusuke Goto (名大, CEBC (研究当時)), Ken Yoda (名大), Henri Weimerskirch (CEBC), and Katsufumi Sato (東大)

DOI: 10.1093/pnasnexus/pgac023

URL: <https://academic.oup.com/pnasnexus/article/1/1/pgac023/6546201?login=true>