

2023年6月15日  
プレスリリース



東北大学  
TOHOKU UNIVERSITY



公立大学法人  
前橋工科大学  
Maebashi Institute of Technology

国立大学法人信州大学  
国立大学法人東北大学  
国立大学法人九州大学  
公立大学法人前橋工科大学  
米国アラバマ大学ハンツビル校



## 標高 9000m 相当の低大気密度を模擬した環境下で 羽ばたき翼型飛行ロボット(ロボハチドリ信州)のリフトオフに成功！

昆虫・鳥・コウモリなどの飛翔生物は、巧みな翼の羽ばたき運動と時には胴体や尾翼の動きを利用し優れた飛行を行います。なかでも、翼面上に形成される前縁渦が地上の飛翔生物の自重を支える空気力発生メカニズムの共通メカニズムとして理解されています。地上より空気密度の低くなる高度数千メートル以上の標高の高い場所に生息する飛翔生物は、飛行の際、自重を支えるために地上より大きな空気力が必要になると言えます。しかし、この揚力の補償メカニズムを含む高高度での生物飛翔のメカニズムの詳細は現在も明らかになっていません。

さらに、これまで生物を規範とした様々なタイプの羽ばたき翼型飛行ロボットが開発されてきました。しかし、地上での飛行に注力されており、空気密度の低下に伴う揚力低下が起こる過酷な環境下の高高度での羽ばたき翼型飛行ロボットの開発は行われていませんでした。空气中(海面)や水中と比べて流体の密度が低い状態での実験は難しく、高高度飛行を理解するために不可欠な密度の低い中で飛行する生物とロボットの動きを精度良く観察することができませんでした。

そこで、信州大学繊維学部の青野光 准教授、東北大学大学院工学研究科の浅井圭介 名誉教授、野々村拓 准教授、小澤雄太 特任助教(現 青山学院大学理工学部 機械創造工学科 助教)、九州大学大学院総合理工学研究院の安養寺正之 准教授(現 株式会社 DigitalBlast 所属)、前橋工科大学工学部の安藤規泰 准教授、米国アラバマ大学ハンツビル校の Kang 准教授らの研究グループは、東北大学流体科学研究所所有の火星大気風洞の減圧チャンバーを用いて高高度飛行を模擬した低密度環境を構築し、その環境下においてハチドリ規範型羽ばたき翼型飛行ロボット(ロボハチドリ信州)の翼が発生する空気力と翼面形状の同時計測を行いました。

本計測により、飛行ロボットの翼の面積を地上のモデルに比べて大きくしゆっくり羽ばたくことにより、大きな羽ばたき振幅と飛翔生物の翼の回転角変化に近い受動的な回転角変化を得られることを示しました。この結果、大気密度が地上と比べて約 3 分の 1 の低大気密度環境下においても地上での空気力発生機構による大きな揚力の発生を実現させ、羽ばたき翼型飛行ロボットの世界初のリフトオフ実験に成功しました。本結果は、羽ばたき翼特有の空気力学的メカニズムの活用による低密度・高高度環境下での飛行の実現可能性を示すものとなり、生物の高高度飛行メカニズムの理解と更に低密度となる火星大気環境などでの羽ばたき翼型飛行ロボットの飛行実現に繋がる重要な研究成果と言えます。

なお、本成果は 6 月 2 日付(イギリス現地時間)で Scientific Reports 電子版に掲載されました。

## 【ポイント】

- これまでにマルハナバチやオオカバマダラの高高度での飛行が確認されており、マルハナバチは翼を大きな振幅で羽ばたきながら飛翔し、オオカバマダラは体の姿勢と飛行速度を調整して飛んでいることが観察されていましたが、羽ばたき翼型飛行ロボットでの飛行は実現されていませんでした。
- 飛翔体まわりの流れ場の特性は、レイノルズ数<sup>\*1</sup>によって特徴付けられます。もし、翼の大きさと運動速度が一定の場合、大気密度が減少するとレイノルズ数も減少します。このレイノルズ数が低い飛行環境下では、固定翼や回転翼によって生成される空気力は流れの剥離と渦の放出により低下する可能性が高くなります。しかしながら、昆虫や鳥は通常その低レイノルズ数領域( $O(10^2)$ - $O(10^4)$ )で飛行しており、この低レイノルズ数の流れ特有の空気力学的メカニズムを効果的に利用し、大きな空気力を生成していることが分かっていました。
- 本研究の実験の結果から羽ばたき翼型飛行ロボットが同じ大きさの飛翔生物と比べて重量が大きいながらも、機体と翼の重量比、翼のアスペクト比<sup>\*2</sup>、レイノルズ数、無次元周波数<sup>\*3</sup>などの無次元数と翼の羽ばたき運動を類似させることで、地上でも高高度でも生物羽ばたき飛行メカニズムを利用して大きな空気力を得ることができ、大気密度が地上と比較して約 3 分の 1 と低くなってもリフトオフが可能であることを示しました。

## 【研究の背景と内容】

飛行中に発生する揚力や抗力などの空気力は、大気密度、基準速度の二乗、翼面積、およびそれぞれの空力係数に比例します。したがって、大気密度が減少するにつれて、揚力が乗り物の重量を相殺して浮いた状態を維持するためには、残りの項の積が相応に増加しなければなりません。大気密度は、飛翔体の飛行高度によって変化する温度と圧力の関数であるために重要な考慮事項と言えます。さらに、流れの特性はレイノルズ数によって特徴付けられ、レイノルズ数は翼の大きさと運動速度が一定の場合、大気密度が減少すると低下します。

この低レイノルズ数環境下では、固定翼と回転翼によって生成される空気力は、流れの剥離と渦の放出によって低下する可能性が高くなります。一方、昆虫や鳥は通常低レイノルズ数領域( $O(10^2)$ - $O(10^4)$ )で飛行しており、このレイノルズ数領域で普及している非定常空気力学的メカニズムを効果的に利用することにより、大きな空気力を生成できます。これまでにマルハナバチやオオカバマダラの高高度での飛行は確認されていますが、そのメカニズム理解までは辿り着いていません。

一方で、過去 10 年間で飛翔生物の優れた飛行性能を模倣した様々なタイプの羽ばたき翼型飛行ロボットが開発されてきましたが、地球上の高高度のような低大気密度環境下で羽ばたき翼型飛行ロボットの実験を行った研究は殆どありません。また、低大気密度環境下では羽ばたき翼の変形が地上付近とは本質的に異なり、周囲の空気力学、翼の構造力学、動力学の動的バランスによって生じている翼の動きの事前の予測が困難なため、目標の機体重量を維持する揚力を生成する翼の大きさや動作を設計し開発することが不可能でした。さらに、低大気密度環境下では空気中(海面)や水中と比べて実験が難しく、飛行する動物の動きを観察することが困難であったため、動物の形態や動きを単純に模倣することはできませんでした。

そこで、研究グループはハチドリを規範とした無尾翼羽ばたき翼型飛行ロボットを開発し、空気密度  $0.360 \text{ kg/m}^3$  (9000 m) から  $1.184 \text{ kg/m}^3$  (海面) の範囲で翼の動きと空気力の同時計測と生物飛行のスケール関係との比較を行いました。

一連の解析結果から、単純に翼を早く動かすのではなく、翼のサイズと羽ばたき周波数を上手く調整することにより、ロボットの翼が十分に大きな羽ばたき振幅と飛翔生物の翼の回転角変化に近い受動的な回転角変化を実現することができました。その結果、低大気密度環境下でも地上での空気力発生機構を活用した揚力発生が働き、羽ばたき翼型飛行ロボットのリフトオフに成功しました。

本研究は文部科学省科学研究費基盤研究(A) (JP19H00800)と基盤研究(B) (JP22H01397)の支援を受けて行われました。

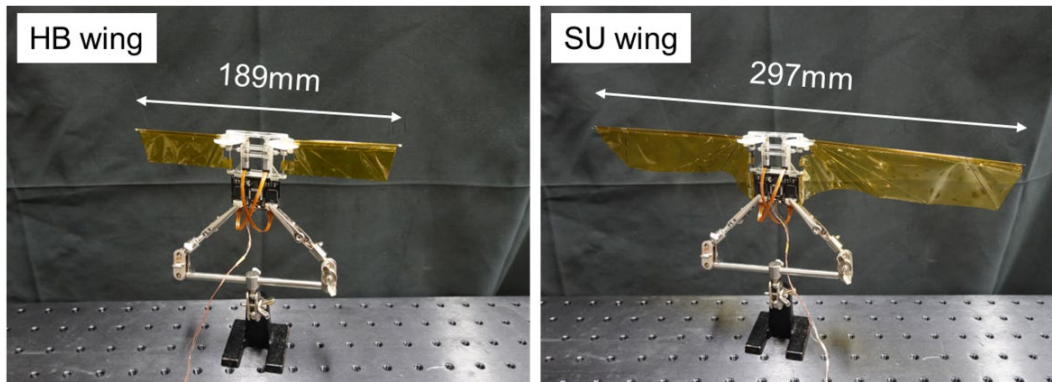


図 1 ロボハチドリ信州の写真：地上モデル（左）、高高度モデル（右）。ロボハチドリ信州はハチドリの肩の飛翔筋からインスピレーションを受け、左右の翼は個別のモーターによって駆動される。機体重量は地上モデルが 12.39 g、高高度モデルが 12.95 g である。バッテリー未搭載モデルであり、電力は外部電源より供給される。

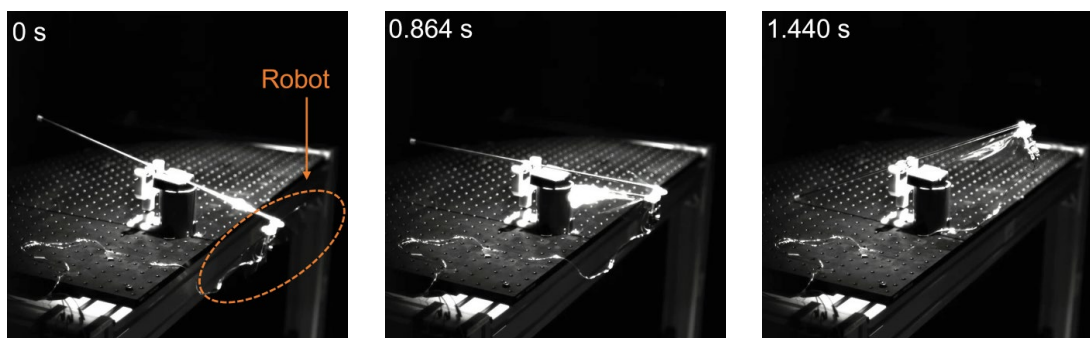


図 2 ロボハチドリ信州の高高度飛行環境模擬下のリフトオフ実験の高速度カメラ撮影画像。東北大学流体科学研究所所有の火星大気風洞の減圧チャンバーを利用した。チャンバー内の大気密度は飛行高度 9000 m に相当する  $0.360 \text{ kg/m}^3$  である。ロボットの羽ばたき周波数は 10.9 Hz、カメラのサンプリング周波数は 2000 fps である。ロボットは羽ばたき開始後 0.864 秒後にはリフトオフし、1.440 秒後には初期位置から約 167.4 mm 上昇した。地上モデルは羽ばたき周波数 22.7 Hz でリフトオフすることが可能である。

### 【論文題目】

題目: First lift-off and flight performance of a tailless flapping-wing aerial robot in high-altitude environments

著者: Shu Tsuchiya, Hikaru Aono, Keisuke Asai, Taku Nonomura, Yuta Ozawa, Masayuki Anyoji, Noriyasu Ando, Chang-kwon Kang, and Jeremy Pohly

雑誌: Scientific Reports

DOI: 10.1038/s41598-023-36174-5

掲載日: 2023 年 6 月 2 日付 (イギリス現地時間)

### 【発表者】

土屋脩 (信州大学 大学院総合理工学研究科)

青野光 (信州大学 繊維学部)

浅井圭介 (東北大学 大学院工学研究科、流体科学研究所)

野々村拓 (東北大学 大学院工学研究科、流体科学研究所)

小澤雄太 (東北大学 大学院工学研究科)

安養寺正之 (九州大学 大学院総合理工学研究院、現株式会社 DigitalBlast 所属)

安藤規泰 (前橋工科大学 工学部 生命工学領域)

Chang-kwon Kang (アラバマ大学ハンツビル校)

Jeremy Pohly (アラバマ大学ハンツビル校)

## 【用語説明】

1. レイノルズ数  
流体の慣性力と粘性力の比を示す流体力学的な無次元数
2. アスペクト比  
翼の縦横比
3. 無次元周波数  
翼の角速度と翼の代表翼弦度の積と翼の先端速度もしくは前進速度の比を示す無次元数

## 【お問合せ先】

(研究に関すること)

信州大学 繊維学部 機械・ロボット学科 バイオエンジニアリングコース

担当 青野 光(あおの ひかる)

TEL:0268-21-5617 e-mail:aono@shinshu-u.ac.jp

(報道に関すること)

信州大学 総務部総務課広報室

TEL:0263-37-3056 e-mail:kouhoushitsu@gm.shinshu-u.ac.jp

東北大学 工学研究科情報広報室

TEL:022-795-5898 e-mail:eng-pr@grp.tohoku.ac.jp

九州大学 広報課

TEL:092-802-2130 e-mail:koho@jimu.kyushu-u.ac.jp

前橋工科大学 学務課 地域貢献・研究支援係

TEL:027-265-7361 e-mail:chiiki@maebashi-it.ac.jp