

2024年8月5日

配信先；文部科学記者会、科学記者会、千葉県政記者クラブ、  
長野市政記者クラブ、松本市政記者クラブ、地方新聞記者会

国立大学法人信州大学

国立大学法人千葉大学

## 飛べないカイコガの羽ばたきはフェロモン分子を美しく導く ～カイコガの羽ばたきと匂い追尾の関係を3次元シミュレーションによって解析～

### ポイント

- カイコガ（蚕）は、繭から糸を取って絹として利用できるため古くから家畜として用いられてきましたが、嗅覚（匂い）研究にとっても重要なモデル昆虫です。
- カイコガは家畜化して体が大きくなり、さらに翅（はね）も退化したため飛ぶことができません。しかし、メスと交尾するために、翅を羽ばたかせながらメスが出す空気中のフェロモンを頼りにメスを追跡します。
- 羽ばたきは、周囲に気流を引き起こします。これまで、飛べないカイコガの羽ばたきが周囲の気流をどのように乱し、この気流の乱れがフェロモンの検出にどのような影響があるかには、不明な点が残されていました。
- 本研究では、数値流体力学（CFD）解析<sup>（注1）</sup>により、カイコガの羽ばたきがカイコガ前方の気流を特定の範囲から選択的に触角へ誘導することを示しました。
- 本研究の成果は、昆虫の匂い源探索行動に新たな知見をもたらし、匂い源探索ロボットの設計指針を提供します。

### 概要

信州大学繊維学部 機械・ロボット学科の照月大悟准教授と千葉大学大学院工学研究院の中田敏是准教授らの研究グループは、昆虫の触角をドローンと組み合わせた嗅覚飛行ロボット<sup>（注2）</sup>を開発して、匂いの発生源を探索する研究を進めています。本研究では、優れた匂い（フェロモン）検出能力を持つカイコガ（蚕）を対象に、数値流体力学（CFD）解析を行うことで、翅の羽ばたきによる気流誘導メカニズムの詳細を明らかにすることに成功しました。

オスのカイコガは、メスの性フェロモンを高感度・高選択的に検出し、特徴的な匂い源探索行動をとることから、嗅覚研究のモデル昆虫としても長く利用されています。しかし、触角の形態や神経生理学的側面、そして匂い源探索アルゴリズムの研究は行われてきた一方で、カイコガの翅の羽ばたきが周囲の気流をどのように乱し、その気流の乱れが匂い源探索にどのような影響を与えるかについては、ほとんど検討されていませんでした。

そこで研究グループでは、高速度カメラを用いてカイコガの体と羽ばたき運動を測定し、PC内で羽ばたくカイコガを再構築してCFD解析を行い、羽ばたき運動によって生じる気流と、匂い分子の分布の関係を可視化しました。その結果、カイコガの翅の羽ばたきはカイコガ前方の気流を特定の範囲（水平方向から60°以内）から選択的に触角へ誘導することがわかりました。こ

の気流操作が高感度なフェロモン検出と効率的な匂い源探索に有効であることが示唆されました。

環境中の匂いを追跡して迅速に発生源を探索することは、災害下での要救助者探査などに有効です。本研究の成果は、嗅覚飛行ロボットのセンサ配置や匂い誘導構造の開発に有用な知見をもたらし、迅速な匂い源探索を行うロボットの実現につながります。

なお、本研究成果は、国際科学雑誌 *Scientific Reports* に令和 6 年 8 月 2 日に公開されました。

## <背景>

昆虫はエサや交尾相手を探す際に、空気中に漂う匂いをシグナルとして利用します。匂い（またはフェロモン）は気流に乗って拡散し、その濃度は時間や空間によって時々刻々と変化します。このような複雑な条件においても、昆虫は触角で匂いを検出し、瞬間的な匂い情報に基づいて匂いの発生源を探ることができます。触角による匂い検出とそれに基づく匂い源探索は、多様な応用先が想定されるため、近年注目を集める研究領域です。

カイコガ（蚕）（学名：*Bombyx mori*）は、繭から糸を取って絹として利用できるため古くから家畜として用いられてきました（**図 1a**）。信州大学繊維学部では、繊維その他複数の研究に活用するため、毎年数万頭規模でカイコガが飼育されています。

カイコガは繊維に関する研究のみならず、嗅覚研究のモデル生物としても重要な役割を果たしています。オスのカイコガは、メスの性フェロモン（ボンビコール）を触角で高感度かつ選択的に検出し、特徴的な匂い源探索行動（ジグザグ—直進—ターン）を繰り返してメスを探します。カイコガは家畜化された昆虫で、体が大きくなり、さらに翅も小さくなったため、飛ぶことができません。しかし、オスは羽ばたき続けながらメスを探します。

昆虫の翅の羽ばたきは、周囲の気流を操作して匂い分子を触角に誘導します。飛べないカイコガにとっても、羽ばたきが匂い源探索行動に有用であると想定されます。カイコガはフェロモン探索中に頻繁に進行方向を変えるため、気流が触角に向かう 3 次元的な方向と距離は、探索行動を理解する上で極めて重要です。しかし、オスが羽ばたきによってサンプリングする 3 次元的な空気の運動は測定されておらず、どのような方向から選択的に気流を誘導しているかについても、定量的な研究は行われていませんでした。

## <研究成果>

照月准教授と中田准教授の研究グループは、昆虫触角と小型ドローンを融合した嗅覚飛行ロボット（バイオハイブリッドドローン）を開発し、災害下での要救助者探査に応用することを目指しています（例：福島国際研究教育機構（F-REI）委託事業、嗅覚ロボットコンソーシアム<sup>(注 3)</sup>）。嗅覚飛行ロボットの開発には、効率的な匂い検出メカニズムの開発が重要な要素となるため、優れた匂い検出・探索能力を持つカイコガを調査することで、そのヒントを探りました。本研究では、カイコガの羽ばたきが操作する気流の方向や、匂いを含む周囲の空間との関係を可視化することに成功しました。

まず、小型ファンによってボンビコールを放出し、それを検出して羽ばたくカイコガを同期した2台の高速カメラによって撮影 (2,000 fps, シャッター速度 5,000 s<sup>-1</sup>) しました (図 1b)。カイコガの頭部、腹部、触角、翅の付け根と翼端などを特徴点とし、画像座標を組み合わせると PC 上にカイコガの運動モデルを再構築しました。解析の結果、カイコガは飛べないにもかかわらず、他の飛翔する昆虫と同様に前縁渦 (注 4) を発生させ (図 2a)、これを利用して体重に匹敵する大きな空気力 (240 mg 程度) を発生させることがわかりました。

次に、羽ばたきが誘導する流れとサンプリング量を理解するため、カイコガの触角の付け根から先端までを結ぶ線を仮想的な触角とみなして CFD 解析を行いました。その結果、羽ばたきによって触角に気流が流速約 0.3 m s<sup>-1</sup> 程度で引き込まれていました。フェロモンが触角に到達する距離は、10 回羽ばたくとカイコガの前方から 20~30 mm の距離、20 回羽ばたくと 40~50 mm の距離になることがわかりました (図 2b)。また、羽ばたきはカイコガ周囲の広い範囲から扇状に粒子を誘導しますが、ほとんどの粒子は、片方の翅では水平方向で 30° (0~30°) 以内、左右の翅では 60° 以内の限られた範囲から触角付近に到達しました (図 2c)。

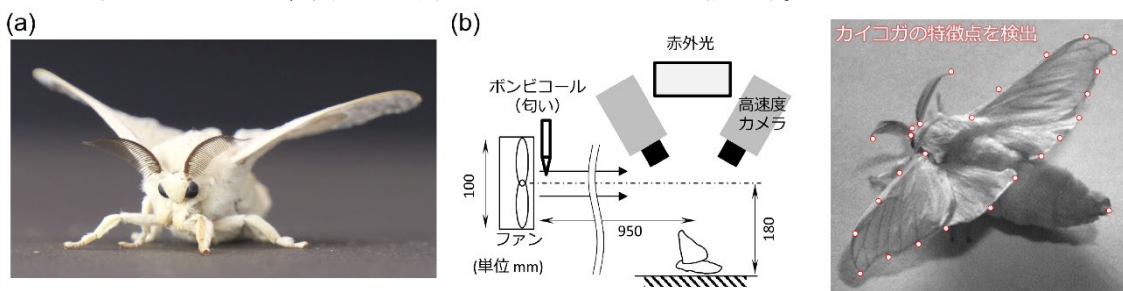


図 1 (a)オスのカイコガ写真。(b)カイコガの撮影セットアップと特徴点検出。

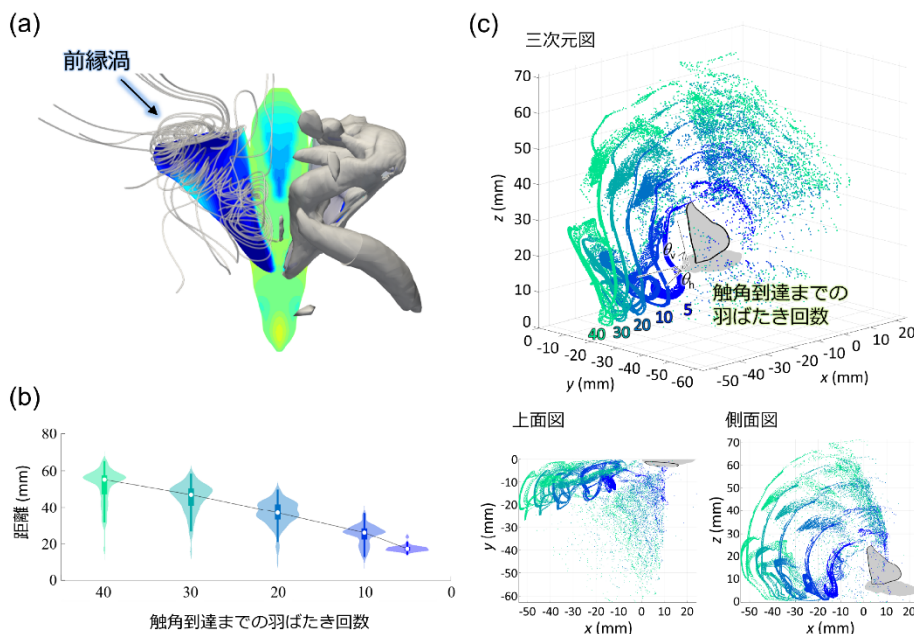


図 2 (a)カイコガ周囲の瞬間的な流れ場のシミュレーション結果。(b)羽ばたき回数と触角に到達する粒子の距離の関係。(c)羽ばたきが 5~40 回の後に触角に到達した粒子分布の三次元図、上面図、側面図。

これらの結果は、カイコガは羽ばたきによって闇雲に周囲の匂いを集めるのではなく、自身の前方の限られた範囲から、気流、さらには空気中の粒子を選択的に触角へ誘導していることを示しています。羽ばたきによる的確な気流操作が、カイコガの高度な匂い検出と匂い源探索行動を支えていると考えられます。

### <今後への期待>

本研究では、カイコガの翅の運動計測とCFD解析によって、カイコガの羽ばたきが起こす流れの解析、さらに羽ばたきによる周囲の気流の乱れと匂い検出への影響を詳細に調査しました。これらの結果は、飛べないカイコガが羽ばたきを駆使して行う効率的な匂い源探索行動に新たな知見をもたらします。また、研究グループが開発を進めている嗅覚飛行ロボットに対しても、新たな設計指針を提供します(図3)。今後の研究によって昆虫嗅覚への理解がさらに深まり、ロボット工学やセンサ技術のブレークスルーにもつながると期待されます。

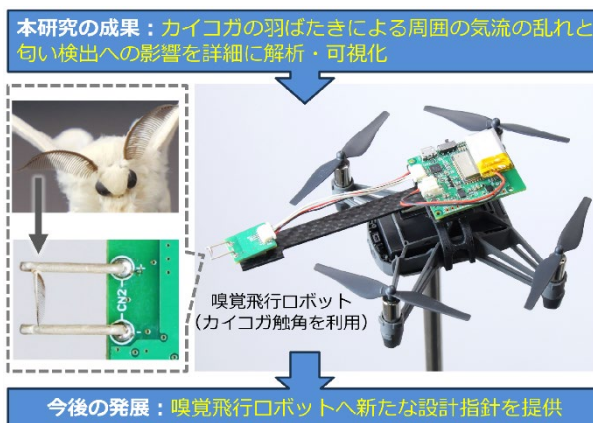


図3 本研究の成果と今後の発展のイメージ

### <謝辞>

本研究の一部は、福島国際研究教育機構 (F-REI) の委託研究費 (JPFR23010401)、国際科学技術財団 日本国際賞平成記念研究助成、JKA 研究補助 (2024M-419)、JSPS 科研費 (17K17638, 18H05468, 19H02060, 24K00829, 24K03014)、カシオ科学振興財団、大下財団、笹川科学研究助成、立石科学技術振興財団の助成を受けて行われました。

### <用語解説>

- 注1. 数値流体力学解析: Computational Fluid Dynamics (CFD)解析とも呼ぶ。流体の運動方程式と連続の式をコンピュータ上で解くことで、解析する対象周囲の流れ場をシミュレーションする技術。
- 注2. 嗅覚飛行ロボット: 昆虫触角 (例: カイコガ) と小型ドローンを融合した昆虫-機械ハイブリッド型ドローン。バイオハイブリッドドローンとも呼称する。2021年に照月准教授らが国際誌にて発表した。文献: D. Terutsuki et al., Real-time odor concentration and direction recognition for efficient odor source localization using a small bio-hybrid drone. *Sens. Actuators B Chem.* 339 (2021) 129770.
- 注3. 嗅覚ロボットコンソーシアム: 福島国際研究教育機構(F-REI)の令和5年度「防災・災害のためのドローンのセンサ技術研究開発事業」委託事業に採択に伴い、信州大学 (代表機関)、千葉大学、慶應義塾大学の3大学で設立したコンソーシアム。
- 注4. 前縁渦: 昆虫の翅の前側において、流れがはく離して形成される渦。前縁渦の発生に伴う大きな負圧

によって翅が吸い上げられ、大きな力が発生するため、昆虫は飛行することができる。

<論文情報>

【著者】

Toshiyuki Nakata\*, Daigo Terutsuki\*, Chihiro Fukui, Tomoya Uchida, Kohei Kanzaki, Taito Koeda, Sakito Koizumi, Yuta Murayama, Ryohei Kanzaki and Hao Liu

\* Double first and corresponding authors (共同筆頭著者&責任著者)

【論文タイトル】

Olfactory sampling volume for pheromone capture by wing fanning of silkworm moth: a simulation-based study

【掲載誌情報】 Scientific Reports (Springer Nature)

DOI: 10.1038/s41598-024-67966-y

Web サイト : <https://www.nature.com/articles/s41598-024-67966-y>

<本研究成果に関するお問い合わせ先>

照月 大悟 (てるつき だいご)

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

Tel : 0268-21-5618

E-mail : [terutsuki@shinshu-u.ac.jp](mailto:terutsuki@shinshu-u.ac.jp)

中田 敏是 (なかた としゆき)

千葉大学大学院工学研究院

Tel : 043-290-3233

E-mail : [tnakata@chiba-u.jp](mailto:tnakata@chiba-u.jp)

<報道に関する問い合わせ先>

国立大学法人 信州大学 総務部総務課広報室

E-mail: [shinhp@shinshu-u.ac.jp](mailto:shinhp@shinshu-u.ac.jp)

Tel : 0263-37-3056 Fax : 0263-37-2182

国立大学法人 千葉大学 広報室

E-mail : [koho-press@chiba-u.jp](mailto:koho-press@chiba-u.jp)

Tel : 043-290-2018