

2026 年 7 月 16 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

昆虫の「鼻」を乾燥から守る保水ゲル電極を開発 ～触角センサを 7 時間安定記録、匂い追跡ドローンのセンサ長寿命化に前進～

ポイント

- 昆虫の触角を用いたバイオハイブリッド型匂いセンサの弱点であった、乾燥や接触ずれによる信号劣化を抑える保水ゲル電極を開発。
- カイコガ触角を用いた EAG センサで、切り出しから 7 時間後も初期値の 92%以上を維持。従来の金属電極では 4 時間以降に初期値の 50%を下回ったのに対し、長時間安定した信号記録を実現。
- 電気化学インピーダンス測定により、ハイドロゲルによる保水構造が、電極と導電性ゲル間の初期電氣的結合を保ち、時間経過に伴うインピーダンス変動を抑えることを示した。
- 小型ドローンに搭載した状態でも匂いに対する EAG 信号を取得し、EAG 信号をトリガーとしてドローンが前進する簡易的な閉ループ動作を実証。
- 匂い追跡ドローンのセンサ長寿命化に向けた基盤技術として、災害現場での要救助者探索、ガス漏れ検知、環境モニタリングへの応用に期待。

概要

信州大学学術研究院繊維学系の照月大悟准教授(繊維学部機械・ロボット学科/生命駆動型共創ロボティクス研究拠点^(注1)、信州大学 Rising Star 教員^(注2))、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、昆虫の触角を匂いセンサとして長時間安定に利用するため、触角と電極の接触部の乾燥や接触ずれを抑えるハイドロゲル電極(以下、保水ゲル電極)を開発しました。研究の全体像を図 1 に示します。本研究は、信州大学大学院総合理工学研究科生命医工学専攻の大森玲奈さん、同大学繊維学部機械・ロボット学科の近藤希栄さんらが中心となり、同大学工学部の影島洋介准教授(信州大学 Rising Star 教員)と共同で実施したものです。

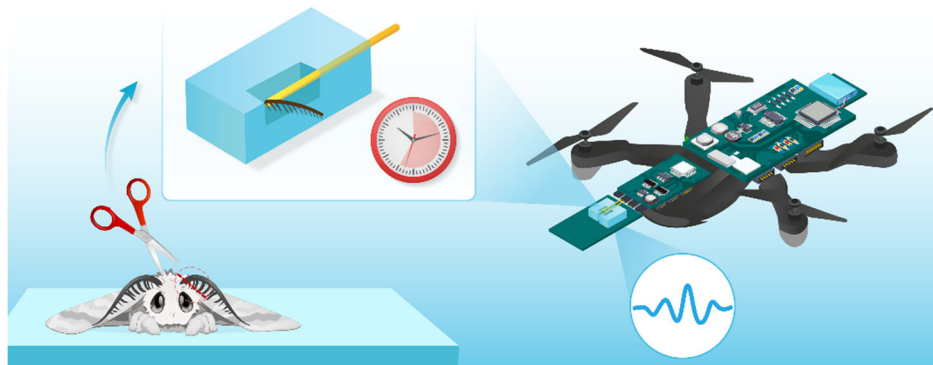


図 1 本研究の概要図:カイコガの触角を切り出して保水ゲル電極に接続することで、切り出しから 7 時間後も EAG 応答振幅を初期値の 92%以上に維持した。さらに、小型ドローンに搭載した状態でも匂いに対する EAG 信号を取得し、EAG 信号に基づく前進動作を実証した。

昆虫の触角は、匂い物質に対して高感度かつ高速に応答する優れたバイオセンサです。しかし、切り出した触角をドローンなどの移動ロボットに搭載して用いる場合、時間とともに触角端部や導電性ゲルが乾燥し、電氣的な接触が不安定になることが課題でした。

今回開発した保水ゲル電極は、食品用ゲル化剤から作製した保水ゲル(ハイドロゲル^(注 3))、導電性ゲル、金めっき電極、3D プリントフレームから構成されます。電氣的接続は導電性ゲルと金めっき電極が担い、保水ゲルは触角端部と導電性ゲルの接触部を湿潤状態に保つ支持構造として働きます。この構造により、乾燥や接触ずれによる信号劣化が抑えられ、カイコガ触角を用いた EAG センサ^(注 4)の信号は、室内・室温条件下で切り出しから 7 時間後も初期値の 92%以上を維持しました。

さらに、この EAG センサを小型ドローンに搭載し、ホバリング中にも匂いに対する EAG 信号を取得できること、また EAG 信号をトリガーとして前進動作を行えることを実証しました。研究グループはこれまで、昆虫触角を用いた匂い追跡ドローン^(注 5)の探索性能向上に取り組んできました。前回の研究が匂い追跡ドローンの「探索性能」を高めた成果であるのに対し、今回の成果は、その実用化を支える触角センサの「安定利用時間」を延ばす基盤技術です。将来的には、災害現場での要救助者探索、ガス漏れ検知、環境モニタリングなどへの応用が期待されます。

本研究成果は、化学・ガスセンサ分野の主要国際学術誌 *Sensors and Actuators B: Chemical* に、令和 8 年 7 月 2 日に公開されました。

背景

ドローンは、災害現場、インフラ点検、環境計測などで活用が進んでいます。しかし、倒壊建物内部、煙や粉塵が多い環境、暗所では、カメラや熱画像などの画像ベースのセンサだけでは十分に機能しない場合があります。

そこで研究グループは、匂いを利用して周囲を認識する「匂い追跡ドローン」の開発を進めてきました^(文献 1)。2025 年の研究では、昆虫触角を用いた匂いセンサの周囲構造や探索アルゴリズムを改良し、小型ドローンによる 5 m の匂い源探索に成功しました^(文献 2)。

一方で、こうしたバイオハイブリッド型匂いセンサ^(注 6)を実用化するには、センサそのものを長時間安定して使う技術が不可欠です。切り出した昆虫触角を用いる EAG センサでは、触角の切断端や導電性ゲルが空気中で乾燥し、電氣的な接触状態が時間とともに変化することが大きな課題でした。本研究ではこの課題に対し、触角と電極の接触部の乾燥や接触ずれを抑える保水ゲル電極を開発しました。

研究成果

【1. 保水ゲルで触角と電極の接触部を安定化】

これまでの EAG センサの電極は、2021 年の金属棒型電極、2025 年の溝付き金めっき電極へと改良され、触角センサの利用時間を延ばしてきました。今回開発した保水ゲル電極では、従来の電極形状による保持に加え、ハイドロゲルによる保水構造を導入しました(図 2)。本電極は、保水ゲル、導電性ゲル、金めっき電極、3D プリントフレームから構成されます。電氣的接続は導電性ゲルと金めっき電極が

担い、保水ゲルは主な導電経路ではなく、触角端部と導電性ゲルとの接触部を湿潤状態に保つ支持構造として働きます。カイコガ触角を保水ゲル電極に接続し、EAG センサとして小型ドローンに搭載することで、飛行中の匂い応答計測に利用できる構成としました(図 3)。

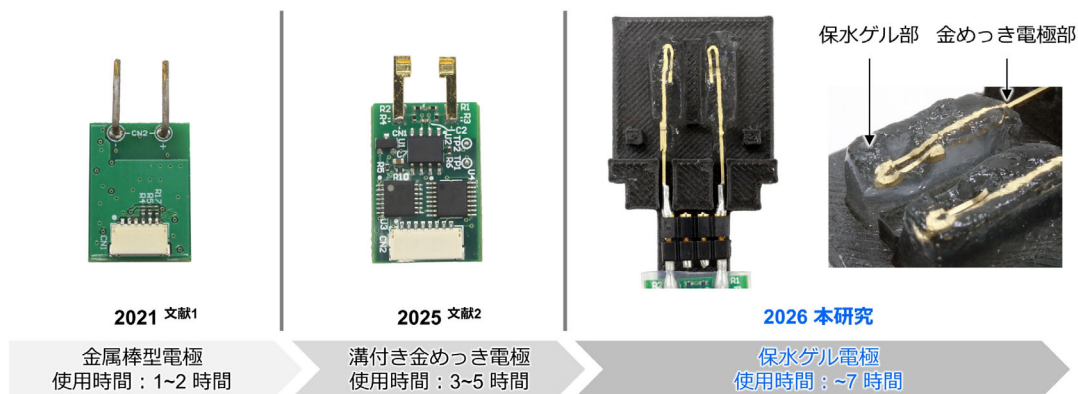


図 2 EAG センサ用電極の改良の流れ:2021 年の金属棒型電極、2025 年の溝付き金めっき電極に続き、本研究ではハイドロゲルによる保水構造を導入した。触角端部と導電性ゲルの接触部を安定化し、切り出しから 7 時間後も EAG 応答振幅を初期値の 92%以上に維持した。

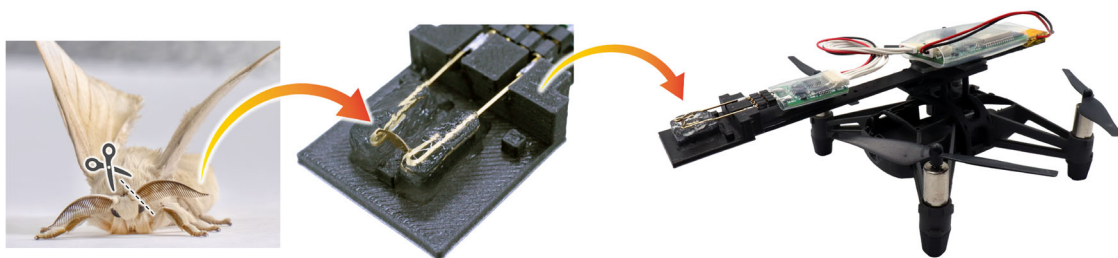


図 3 カイコガ触角を切り出し、保水ゲル電極に接続して小型ドローンに搭載するまでの流れ。

【2. EAG 応答振幅は 7 時間後も初期値の 92%以上を維持】

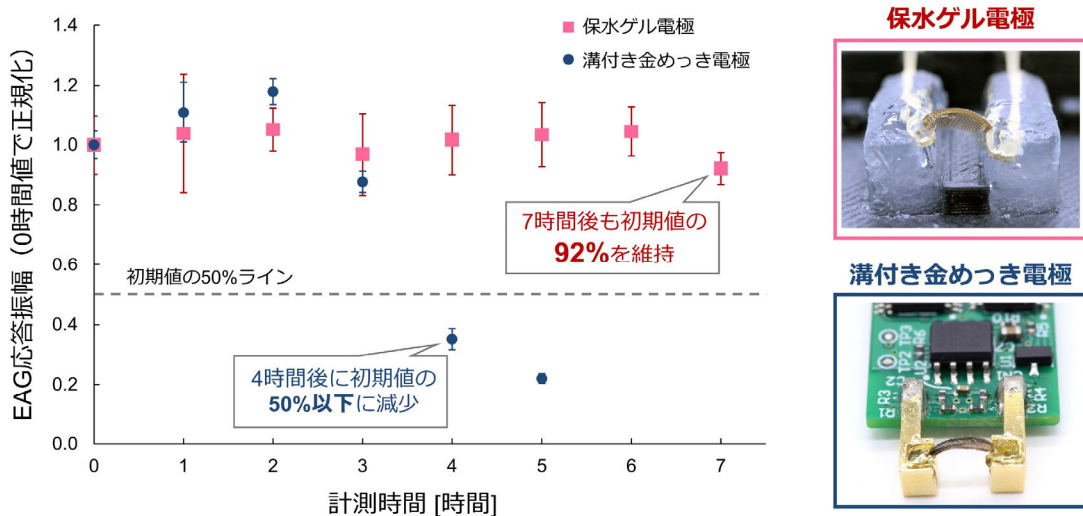


図 4 保水ゲル電極と溝付き金めっき電極における EAG 応答振幅の経時変化の比較。

開発した電極にカイコガ触角を取り付け、メスカイコガの性フェロモン成分であるボンビコールに対する EAG 応答を測定しました。その結果、室内・室温条件下で、切り出しから 7 時間後も初期値の 92%以上を維持しました(図 4)。比較対象とした溝付き金めっき電極では、同条件下で時間経過に伴う信号低下が見られ、本研究で実用上の目安とした初期値 50%を 4 時間以降に下回りました。さらに、電気化学インピーダンス測定^(注 7)により、ハイドロゲルによる保水構造が、電極と導電性ゲル間の初期電氣的結合を保ち、時間経過に伴うインピーダンス変動を抑えることが示されました。湿度・温度の変動やドローン旋回を想定した回転条件でも、試験範囲内では EAG 応答の大きな崩れは確認されませんでした。

【3. 小型ドローン搭載時にも EAG 信号を取得】

開発した保水ゲル電極を用いた EAG センサを小型ドローンに搭載し、ホバリング中の匂いに対する EAG 信号を評価しました。その結果、匂い源からの距離に応じた EAG 信号の変化を飛行中にも取得できることを確認しました。さらに、EAG 信号が事前に設定した閾値を超えた際にドローンが前進する簡易的な閉ループ飛行実験を行い、EAG 信号をドローン動作のトリガーとして利用できることを実証しました(図 5)。

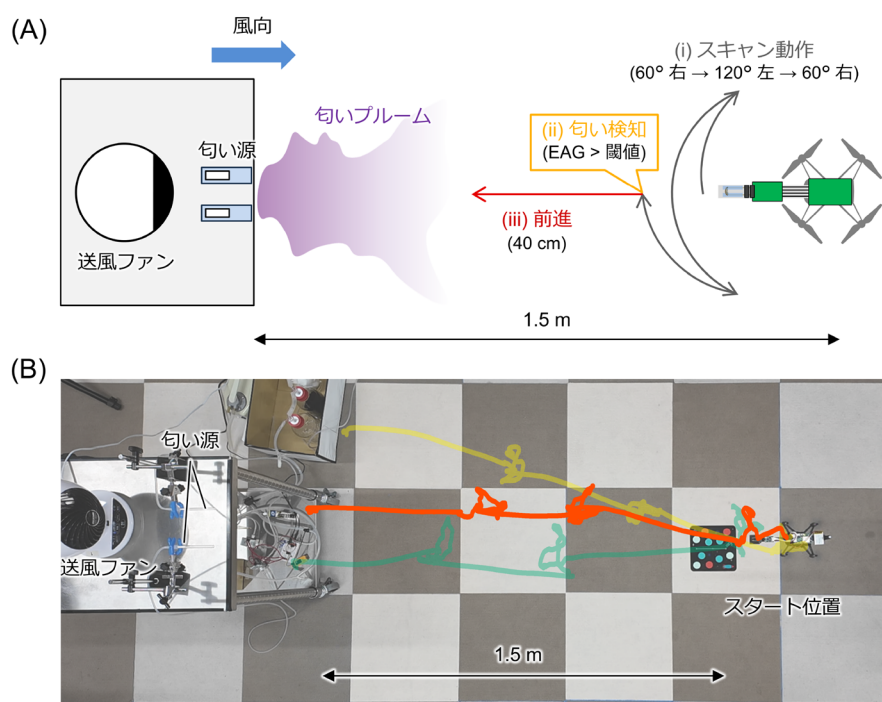


図 5 ドローン搭載実証: (A) 保水ゲル電極を搭載した小型ドローンにおける、EAG 信号をトリガーとした前進動作の模式図。(B) 実際の飛行軌跡(3 試行分)。

今後への期待

本研究で開発した保水ゲル電極は、昆虫触角を用いるバイオハイブリッド型匂いセンサを、実験室内の短時間利用から、より実用的な移動ロボット搭載へ近づける基盤技術です。これにより、匂い追跡ドローンや移動ロボットにおいて、センサ部をより安定に利用できるようになることが期待されます。将

来的には、災害現場で要救助者の匂いを検出する探索ドローン、ガス漏れや化学物質漏洩を発見するインフラ点検ロボット、環境中の揮発性有機化合物を計測する移動型センサプラットフォームなどへの応用が考えられます。今後は、カイコガ以外の昆虫触角や多様な匂い物質への適用性を検証し、屋外や災害現場を模した複雑環境での実験、風向・風速情報との統合、適応的な閾値設定、より高度な匂い源探索アルゴリズムの開発を進めます。

用語解説

- 注1. **生命駆動型共創ロボティクス研究拠点**: 生物と機械の深い融合を基盤とする独創的な境界領域研究により、生命とともに創り出す新しいロボティクスの世界を開拓することを目指した研究拠点であり、照月准教授が拠点長を務めています。(HP: <https://www.shinshu-u.ac.jp/institution/bideros/>)
- 注2. **信州大学 Rising Star 教員**: 独創性と国際的な発信力を兼ね備えた次世代の研究リーダーを育成することを目的に創設された信州大学の独自制度。
- 注3. **ハイドロゲル**: 大量の水を含む柔らかい高分子材料です。本研究では、食品用ゲル化剤を用いて作製したハイドロゲルを、触角端部と導電性ゲルの接触部を湿潤状態に保ち、支持する材料として利用しました。
- 注4. **EAG センサ**: 昆虫の触角は、匂いを受容すると電気的な応答を示します。触角の両端に電極を接続し、この電圧変化を計測する手法を触角電図法(Electroantennogram; EAG)と呼びます。本研究では、EAG に基づいて匂いを検出するセンサをEAG センサと呼びます。
- 注5. **匂い追跡ドローン**: 照月准教授が開発を進めている、昆虫触角をセンサに利用した、空気中の匂い検出とその発生源を探索するためのドローン。
- 注6. **バイオハイブリッド型匂いセンサ**: 生物が持つ高感度な感覚器、細胞、組織などを人工デバイスと組み合わせたセンサ。本研究では、昆虫の触角を匂いセンサ素子として利用し、電子回路やドローンと組み合わせています。
- 注7. **電気化学インピーダンス測定**: インピーダンスとは、交流信号を加えたときの電流の流れにくさを表す量です。電気化学インピーダンス測定は、この値を測ることで、電極界面や導電経路の電気的な応答や接続状態を評価する手法です。本研究では、保水ゲル電極と導電性ゲルからなる接触部の見かけのインピーダンスを測定し、時間経過による電気的接触の変化を評価しました。

参考文献

- [1] 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.
2021年に照月准教授らが国際誌にて発表した、第一世代バイオハイブリッドドローン。
- [2] C. Fukui et al., Advanced bio-hybrid drone for superior odor-source localization: high-precision and extended-range detection capabilities. *npj Robot.* 3 (2025) 4.
2025年に照月准教授と中田准教授が中心となって国際誌にて発表した、次世代匂い追跡ドローン。

謝辞

本研究の一部は、J-PEAKS アクア研究創発プログラム、IJIE-GAP ファンドプログラム、NEDO 官民による若手研究者発掘支援事業(若サポ)マッチングフェーズ、JSPS 科研費(24K03014、24K00829)、(公財)JKA 補助事業(2024M-419)、(公財)大下財団、(公財)村田学術振興・教育財団、(公財)TAKEUCHI 育英奨学会の支援を受けて行われました。本研究で使用了カイコ系統は文部科学省主催のナショナルバイオリソースプロジェクト(カイコ)を活用して実施されました。

論文情報

【論文タイトル】

Engineering electroantennogram interfaces through agar-based hydrogels for multi-hour recording and drone-mounted biohybrid odor sensing

【著者】

Reina Omori [†], Kie Kondo [†], Kento Yamauchi [†], Shunsuke Momose, Takuma Terada, Chihiro Fukui, Yosuke Kageshima, Toshiyuki Nakata, Daigo Terutsuki ^{*}

[†] 共同筆頭著者

^{*} 責任著者

【掲載誌情報】

雑誌名: Sensors and Actuators B: Chemical

公開日: 2026 年 7 月 2 日

URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400526010245>

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2026.140445>

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

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

報道に関するお問い合わせ先

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

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

Tel: 043-290-2018