生物の機械化によるバイオセンサネットワークの創製

代表研究者　　庄　司　観　　長岡技術科学大学　技学研究院　機械系　准教授

1 研究概要

本研究では、生物体液中に含まれる糖を燃料として発電するバイオ燃料電池および本バイオ燃料電池によって駆動可能な小型の無線センサ・行動制御システムを開発し、生物に搭載することで自己発電型無線センサシステムを開発した。生きた昆虫の行動を制御しロボットとして利用する昆虫サイボーグは、従来のロボットシステムと比べ、高い運動性能、ロバスト性、低消費電力性を有しており、災害現場での探査ロボットや環境モニタリングロボットとしての応用が期待されている。しかしながら、昆虫のような小型の生物では搭載可能なサイズや質量に制限があるため、大容量のバッテリーを搭載することが難しく、駆動時間が 1 時間程度であることが課題であった。そこで本研究では、生物体液中に含まれる糖を燃料としたバイオ燃料電池によって駆動可能な、無線センサや昆虫行動制御システムを開発することで、自己発電型昆虫サイボーグの開発を目指した。

2 研究背景・目的

生きた昆虫の筋肉や神経に電気刺激を与えることで飛行や歩行行動を制御する昆虫サイボーグが報告されつつある[1, 2]。昆虫サイボーグは、従来のロボットと比較し、高い運動性能、ロバスト性、低消費電力性を有しているため、災害現場の捜索ロボットや環境モニタリングロボットへの応用が期待されている[3]。しかしながら、昆虫に搭載可能な質量に制限があるため、大容量の電源を搭載することが困難であり、駆動時間が約 1 時間程度と短いことが、昆虫サイボーグの実用化に向けた課題となっている。そこで我々の研究グループでは、昆虫体液中に含まれる糖を燃料としたバイオ燃料電池を開発することで電池寿命の問題解決を目指している[4, 5]。従来研究において、昆虫体液中に含まれる糖濃度は約 100 mM と他の生物に対し豊富に存在していることが確認されており[4]、さらに、糖濃度は生命活動によって維持されているため、原理的には昆虫が生きている間は半永久的に発電可能なシステムの構築が可能である。一方、バイオ燃料電池の発電量はマイクロワットレベル、さらに出力電圧は 0.5 V 程度とマイコンや無線回路などの昆虫サイボーグを駆動させるために必要な IC を駆動させることは困難であった。

そこで本研究では、バイオ燃料電池の出力向上およびバイオ燃料電池で駆動可能な無線センサシステムや昆虫行動制御システムを開発することで、自己発電型昆虫サイボーグを開発し、昆虫サイボーグによる無線センサネットワーク構築の可能性を検討した(図 1)。

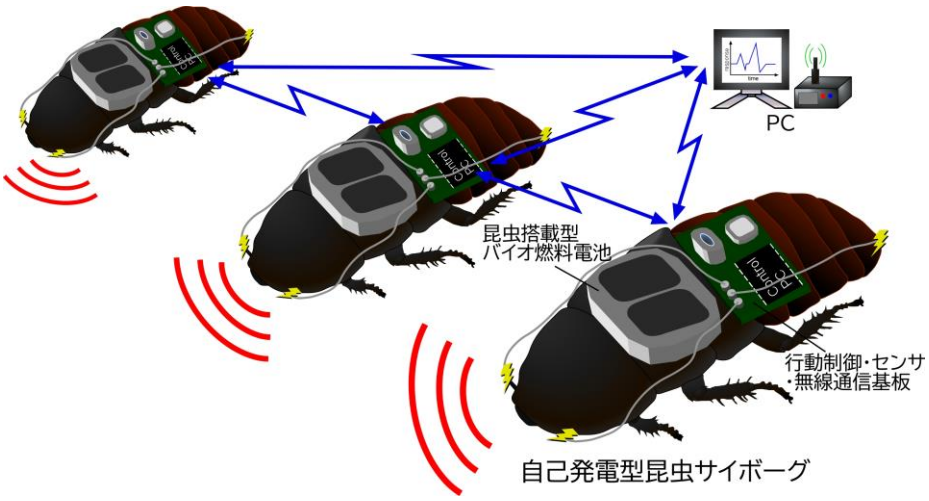

図 1 自己発電型昆虫サイボーグによる無線センサネットワークの概略図

公益財団法人電気通信普及財団
研究調査助成報告書　第37号　2022年度

3 研究内容

3-1 生体発電システムの開発

（１）生物体液を用いたバイオ燃料電池

昆虫体液を用いたバイオ燃料電池の出力向上を目指し、カーボンナノチューブ不織布であるバッキーペーパーを用いたバイオ燃料電池の開発を実施した。バイオ燃料電池の出力向上では、電極への酵素修飾量を増加させることが最も重要である。従来研究においては、カーボンマイクロ繊維で織られたカーボンクロスにカーボンナノ粒子であるケッチェンブラックを塗布した電極を使用していたが、バッキーペーパーを用いることで、更なる表面積増加が期待できる。

糖を酸化するアノード電極は、親水処理したバッキーペーパー上に電子伝達物質としてビタミン K3、β-nicotinamide adenine dinucleotide, reduced dipotassium salt を酵素としてグルコース脱水素酵素、ジアホラーゼを塗布した。さらに、ポリ-L-リジン(PLL)およびポリスルホン酸ナトリウム(PSS)を塗布することで電極上に酵素及び電子伝達物質を固定化した。一方、酸素を還元するカソード電極は、酵素としてビリルビンオキシダーゼを、電子伝達物質として，2,2'-azinobis (3-ethylbenzothiazoline -6- sulfonic acid ammonium salt)を塗布し、アノードと同様に PLL および PSS によって固定化した。

上記の電極を用いて、サイクリックボルタンメトリー測定を実施することで酵素電極の性能評価を実施した。さらに、昆虫から直接発電可能な昆虫搭載型バイオ燃料電池システム[5]を構築し、昆虫体液を用いた発電実験を実施した。

（２）昆虫の歩行による発電システムの検討

上記のバイオ燃料電池を用いた発電システムにおいては、出力電圧が約 0.5 V と低く、マイコンなどの IC 駆動が間欠的となるという問題がある。多くの IC は起動時に多くの電気エネルギを消費するため、ON-OFF を繰り返す間欠動作は消費電力を増加させる。そこで本研究では、IC の待機電力を補填することが可能な生体発電方法について検討した。具体的には、圧電素子を用いた昆虫の歩行発電システムに関して検討した。

3-2 バイオ燃料電池で駆動可能な小型無線センサの開発

本研究では、バイオ燃料電池の出力を昇圧する電源マネジメント IC、一時的に電気を充電するキャパシタ、キャパシタに充電された電気の放電をコントロールするレギュレーター、無線通信を行う Bluetooth Low Energy (BLE)モジュール、温湿度センサから構築される(図 2)。特に本無線差の低消費電力化を目指し、充電用キャパシタ、無線通信モジュール、レギュレーターの選定を実施した。

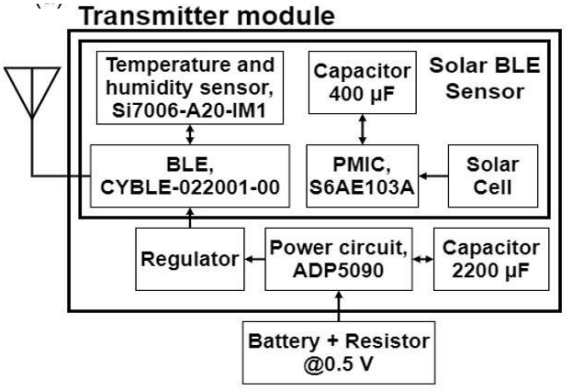

図 2 無線センサのブロック図

・充電用キャパシタの選定

先行研究[5]で使用されている無線センサのキャパシタを付け替え、キャパシタの充電特性を観察することでキャパシタの違いによる消費電力の違いを評価した。キャパシタの容量は従来研究と同様に 2200 μF 程度とし、電解コンデンサ、タンタルコンデンサ(220 μF × 10 個)、タンタルコンデンサ(1000 μF × 2 個)、積層セラミックコンデンサ(1000 μF × 2 個)を比較した。電源として抵抗を直列に接続した乾電池を用い、発電性能 300 μW (0.5 V, 600 μA)のバイオ燃料電池を再現した。

・無線通信モジュールの変更

従来の無線センサ[5]においては、ディスクリートで作製した無線送信機を使用していが、無線通信距離が

短いこと、マイコンによる制御が必要であるため消費電力が高いことが問題となっていた。そこで本研究では、BLE モジュールを用いることで無線センサの低消費電力化を試みた。BLE モジュールとして、低消費電力であることや開発キットが販売されていることなどから Cypress 社の BLE モジュール（CYBLE-022001-00）を選定し、受信間隔を計測することで無線センサの評価を行っ た.

・レギュレーターの選定

従来研究においてレギュレーターの消費電流が 50 μA と大きく、無線センサの消費電力の増加を引き起こしていた．そこで、消費電流が 0.6 μA であるレギュレーター(XC6327, トレックス・セミコンダクター)へ変更し、キャパシタの充電特性を観察することで消費電力を評価した。

3-3 バイオ燃料電池で駆動可能な小型電気刺激システムの開発

本研究では、昆虫としてマダガスカルゴキブリ(体長：約 70 mm、体重：約 6 g)を使用した。マダガスカルゴキブリは、触角を用いて前方の障害物を検知して旋回行動を起こし、また、腹部後端にある尾葉と呼ばれる感覚器官を用いて後方からの外敵の接近を気流で検知して前方へ回避するといった習性がある。本習性を利用し、上記感覚器官に人為的に電気刺激を与えることで行動を誘発することで行動制御を行う昆虫サイボーグが数多く報告されており[6]、本研究においても従来研究を参考に上記の手法により行動制御を試みた。

感覚器官に与える電気刺激にはマイコンで発生させたパルス幅変調(PWM)信号を用いた。従来の昆虫サイボーグに関する研究例においては、高電圧の PWM 信号を印加するために動作電圧が 2.0～3.0 V のマイコンがよく使用されているが、本研究では昇圧時におけるエネルギロスを低減するために、1.1 V から動作可能であり低電流で動作可能なマイコン(ML610Q482, LAPIS Technology Co., Ltd.)を選定した。より低電圧・低消費電力のマイコンを使用することにより、低消費電力な電気刺激装置の開発が期待できる。また、開回路電圧が約 0.5 V の昆虫搭載型バイオ燃料電池によるマイコンの動作を実現するために、上記の無線センサシステムと同様に昇圧機能を有する電源マネジメント IC (ADP5090, Analog Devices Inc.)を用いて昆虫搭載型バイオ燃料電池の出力電圧を昇圧した(図 3)。本回路では、電源マネジメント IC により充電用コンデンサに充電され、コンデンサの電圧が規定値に達すると放電されるように ON/OFF 機能付きのレギュレーターによって制御される。放電後、マイコンが起動し、PWM 信号がマダガスカルゴキブリに接続された電極に印加される。

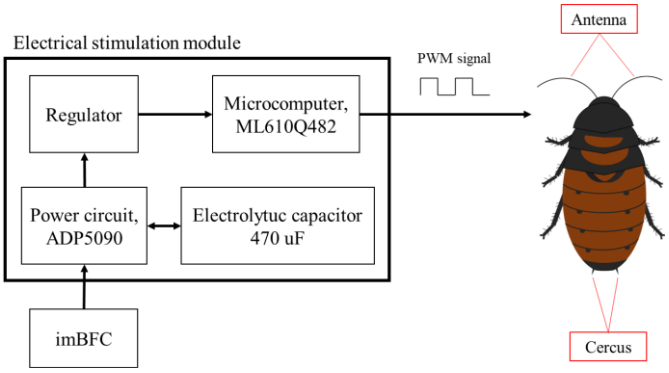

図 3 昆虫搭載型バイオ燃料電池で動作する電気刺激システムの概要

3-4 電気刺激システムによる行動制御実験

マダガスカルゴキブリの触角と尾葉に直径 0.2 mm のエナメル銅線を挿し込み、電気刺激用の電極として用いた。まず、触角および尾葉の先端を切取り、先端を火で炙ることで被覆を剥がしたエナメル銅線を内部の空洞に差し込んだ。その後、瞬間接着剤を用いて固定した。また、グランド用の電極として、背中にも同様に電極を取付けた。

取付けた各電極へ電気刺激を与え、マダガスカルゴキブリの刺激に対する応答を評価した。実験セットアップを図 4 に示す。上記の無線センサの評価と同様に、抵抗を繋いだ乾電池で発電性能 300 μW(0.5 V, 600 μA)の昆虫搭載型バイオ燃料電池を再現し、実験を行った(図 4a)。また、電気刺激装置とマダガスカルゴキブリに取付けた電気刺激用の電極をケーブルで接続し、自作のコントローラによって任意のタイミングで刺激を行った(図 4b)。刺激に用いた PWM 信号は電圧 1.8 V、周波数 20 Hz、duty 比 10%に設定した。また、マ

ダガスカルゴキブリの刺激応答の様子はハンディーカム(HDR-CX670, Sony)を三脚に固定し真上から観察した(図 4c)。

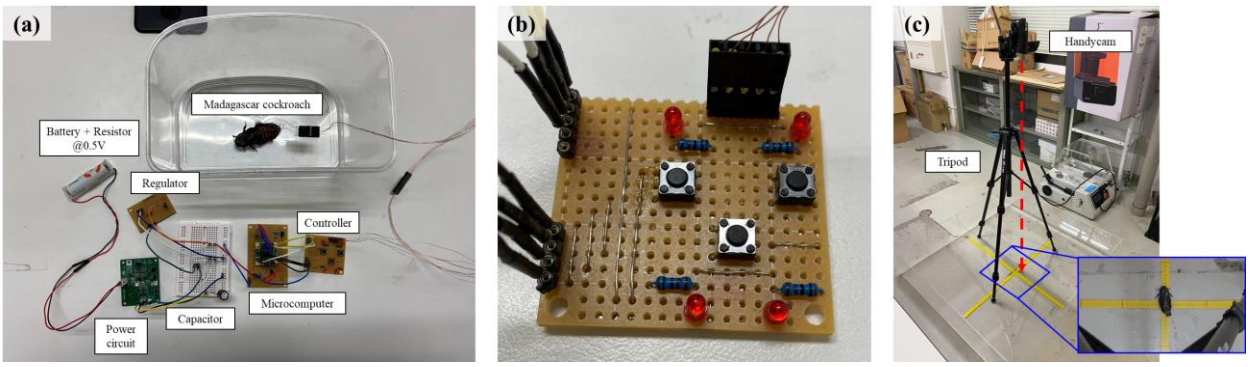

図 4 電気刺激実験のセットアップ

3-4 バイオ燃料電池によって動作する電気刺激システムによる行動制御実験

開発した電気刺激システムを昆虫搭載型バイオ燃料電池で駆動させ、マダガスカルゴキブリの行動制御実験を行った。まず、バイオ燃料電池を用いた際の本電気刺激システムの駆動時間を調査した。その後、実際に電気刺激システムを昆虫に搭載し、特定のライン上を動作するように電気刺激を加え行動制御を実施した。

4 研究結果

4-1 生体発電システム

（１）生物体液を用いたバイオ燃料電池

グルコース溶液中で作製した酵素電極の電気化学計測を行った結果、アノードおよびカソードの酸化還元電流が確認された。さらに、上記の電極を用いてトレハロース燃料電池を構築した結果、170 μW の発電量を獲得することに成功した(図 5a)。従来研究において使用していたカーボンクロス電極と比較し、バッキーペーパー電極の厚みは 1/10 程度であるが、ほぼ同等の発電量を得ることに成功し、カーボンナノチューブ不織布を用いることで、より高出力な生体バイオ燃料電池構築の可能性が示された。さらに、本トレハロースバイオ燃料電池を昆虫に搭載し発電実験を行った結果、昆虫一匹から 110 μW の発電量を得ることに成功した(図 5b)。今後はより厚みのあるバッキーペーパーやカーボンナノチューブによる三次元構造体を電極材料としたバイオ燃料電池を開発することで更なる発電量の増加を目指す。

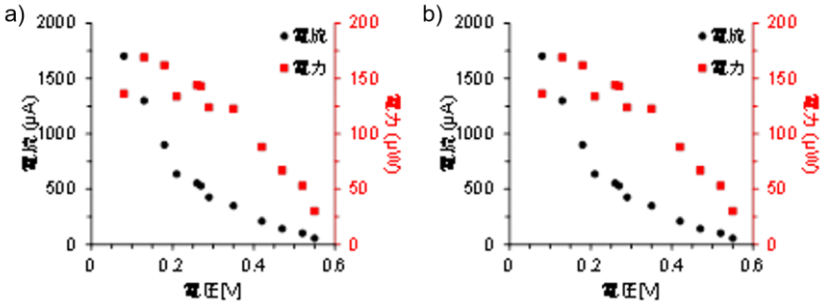

図 5 a)トレハロースバイオ燃料電池および b)昆虫搭載型バイオ燃料電池の発電結果

（２）昆虫の歩行による発電システム

3D プリンタを用いて、圧電フィルムを張り付ける土台を作製し、その土台に圧電フィルムを接着剤で固定することで小型圧電システムを作製した(図 6a)。ピンセットを用いて本圧電システムを変形させた際の開回路電圧を計測した結果、最大で約 17 V の出力が得られた(図 6b)。さらに、昆虫の足に固定可能な形状を有する土台を 3D プリンタを用いて作製した(図 6c)。現在、本システムを用いた発電実験では、100 mV 程度

の発電量しか得られておらず、今後は、構造シミュレーションを用いて、歩行による構造体の変形が最大になるような形状を設計することで、数ボルトレベルの発電量を目指す。

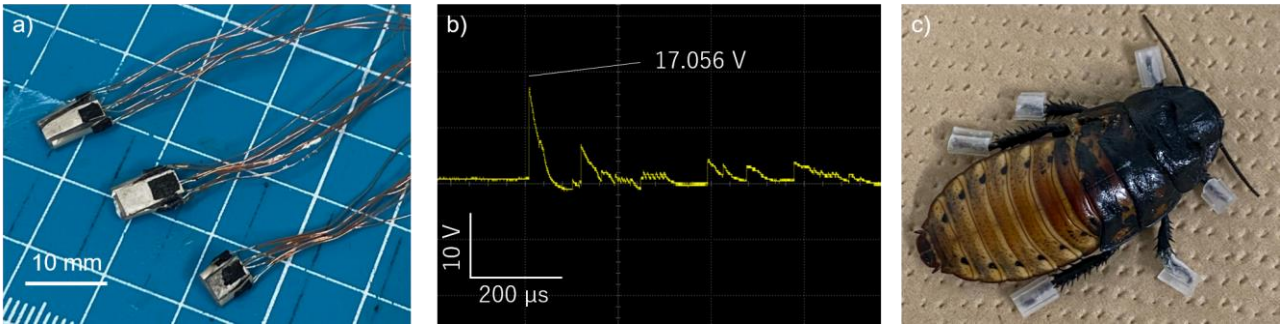

図 6 a)作製した小型圧電システム b)小型圧電システムによる電圧出力 c)小型圧電システムを装着したマダガスカルゴキブリ

4-2 無線センサのバイオ燃料電池による駆動結果

蓄電用コンデンサとして 1,000 μF のタンタルコンデンサを使用し、電源マネジメント回路のレギュレーターを低消費電力化させた無線センサを構築した(図 7a)。コンデンサの充放電を計測した結果、図 7b に示すように、コンデンサが最初に既定の電圧まで到達するまでの時間である初期充電時間および無線センサの間欠的な動作間隔の時間を表す再充電時間が、従来研究と比較し大幅に改善されていることが確認された。また、再充電時の充放電グラフから消費エネルギを計算した結果、消費エネルギは 215 μJ であり、従来研究の約 1/7 程度の低消費電力化に成功した(図 7b)。

次に、昆虫搭載型バイオ燃料電池による駆動実験を実施した(図 8a)。その結果、乾電池で駆動させた場合と比べ初期充電時間および再充電時間共に延びたが、通信間隔が 8.4 s、駆動時間が 68 min となり、従来研究と比較し通信間隔および駆動時間を 10 倍以上向上することに成功した(図 8)。さらに、上記システムを昆虫搭載可能サイズ(24 mm×22.6 mm)に集積化した小型無線センサを新たにデザインし作製した(図 9)。今後は、本小型無線センサを昆虫に搭載し、バイオ燃料電池によって動作させることで無線センサネットワークの構築を実証する。

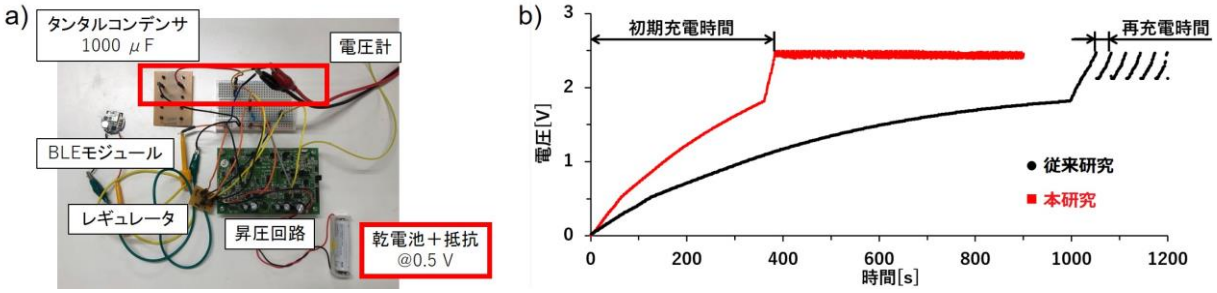

図 7 a)構築した無線センサ b)充電用キャパシタの充放電間隔の比較

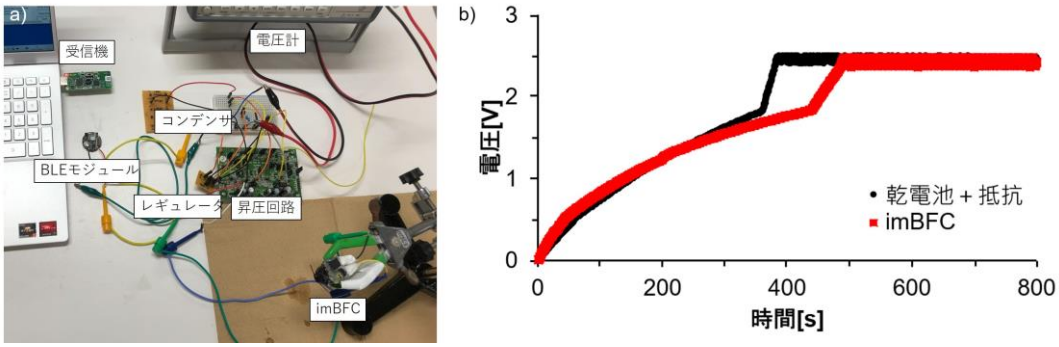

図 8 a)昆虫搭載型バイオ燃料電池による無線センサの駆動実験および b)充放電間隔

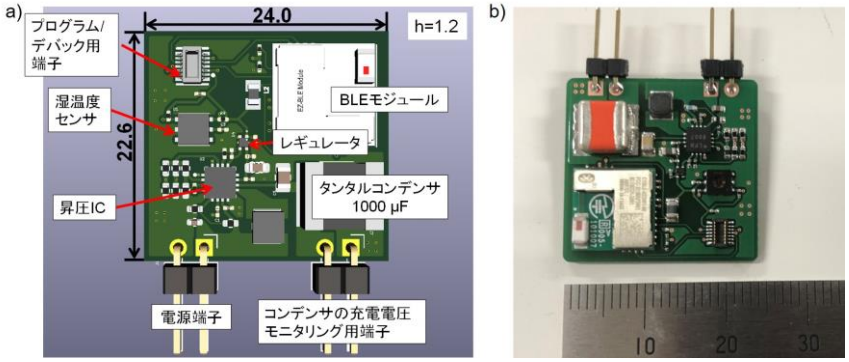

図 9 a) 小型無線センサのデザインおよび b) 実際に作製した無線センサ

4-3 電気刺激による昆虫の行動制御

開発した電気刺激システムを用いてマダガスカルゴキブリの触覚に PWM 信号を 1 秒間与えその応答を評価した。その結果、右の触角への刺激に対してはその場で左に方向転換したのち進行し、左の触角への刺激に対しては逆にその場で右に方向転換したのち進行する応答が見られた(図 10)。この行動は従来報告されているマダガスカルゴキブリの回避行動の習性と一致しており、開発した電気刺激装置によってマダガスカルゴキブリの旋回行動を制御可能であることが示唆された。また、同一個体に対し複数回刺激実験を行った結果、移動の軌跡にばらつきが確認された(図 10b, c)。本刺激実験においては、1 秒間という短い電圧印加であったため、回転運動を誘発した後はマダガスカルゴキブリの自律的な行動が観察されたと考えられる。今後は、ゴキブリの向きに応じて断続的に PWM 信号を与えることでより制御性を向上させる必要がある。

次に、尾葉に 1 秒間の PWM 信号を 1 秒間隔で与え、その応答を評価した。その結果、刺激を与えなかった場合と比較して前進速度が速くなる応答が見られた(図 11)。以上の結果より、尾葉への電気刺激によってマダガスカルゴキブリの前進・加速行動を誘発可能であることが示唆された。また、触角刺激と同様に同一個体に対し複数回刺激実験を行った結果、移動の軌跡にばらつきが確認された(図 11b)。本結果は、尾葉刺激は前進・加速行動に対して有効ではあるが、進行方向については制御性が低くなる可能性があることを示唆しており、進行方向の制御性を向上させるために触角刺激との併用が必要であると思われる。

さらに、昆虫搭載型バイオ燃料電池を用いて行動制御システムを動作させ、昆虫の行動制御実験を実施した(図 12a)。その結果、昆虫搭載型バイオ燃料電池を用いてシステムの動作が可能であることが確認され、昆虫のライントレース実験に成功した。本結果より、自己発電型昆虫サイボーグ実現の可能性を示すことができた。

最後に、上記の電気刺激システムを小型基板に集積化した、昆虫搭載型の電気刺激システムを作製した(図 12b)。バイオ燃料電池を用いて本システムの動作実験を実施した結果、3.5 時間以上連続で動作可能であることが確認された。従来の外部電源を用いた昆虫サイボーグの電池寿命が約 1 時間程度であることから、本システムを用いることで、昆虫サイボーグの長時間駆動の可能性が示唆された。

今後は、小型システムを用いた行動実験や自律的に動作するためのセンサフィードバックシステム、無線通信回路との組み合わせにより、より高度な作業を実行可能な自己発電型昆虫サイボーグの開発を目指す。

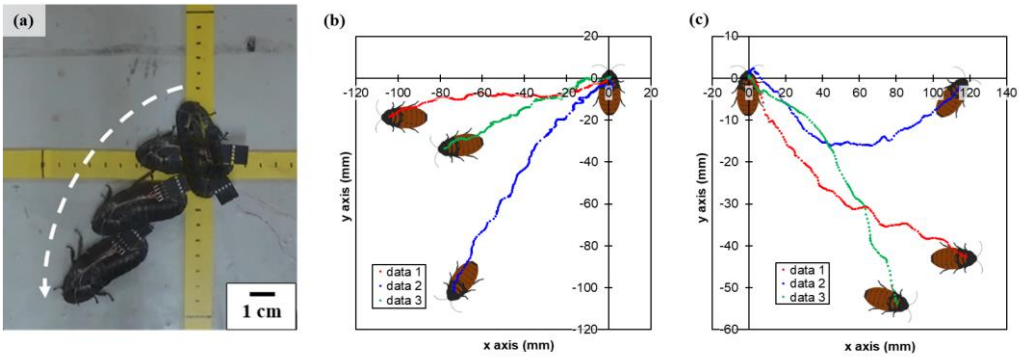

図 10 触覚への電気刺激実験 a) b) 右触覚刺激時の昆虫の行動軌跡 c) 左触覚刺激時の行動軌跡

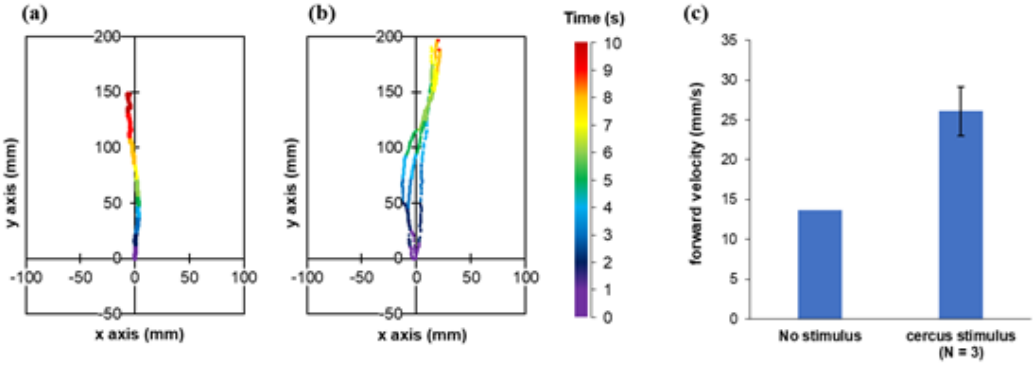

図 11 a）刺激無、b）刺激印加時の時間経過に対する昆虫の行動軌跡 c）刺激の有無による速度比較

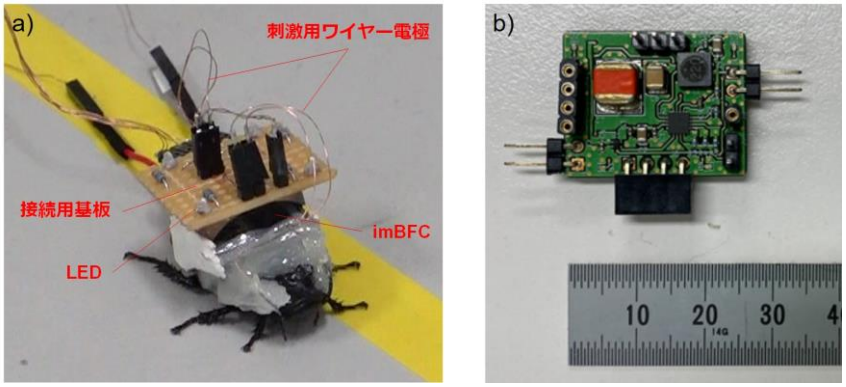

図 12 a）自己発電型昆虫サイボーグ b）小型行動制御システム

5 まとめ

本研究では､外部電源が不要な自己発電型昆虫サイボーグによる無線センサネットワークの構築を目指し、生体発電技術の確立および生体発電システムで駆動可能な無線センサ･行動制御システムの開発を実施した。まず、従来研究において我々の研究グループが報告してる体液バイオ燃料電池の発電量向上を目指し、カーボンナノチューブ不織布であるバッキーペーパーを用いた酵素電極を作製した。本電池を用いて昆虫搭載型バイオ燃料電池を構築し発電した結果、昆虫 1 匹あたり約 110 μW の発電量が得られた。さらなる発電量向上を目指し、昆虫の歩行動作による発電システムの開発を実施した。昆虫の足に装着可能な、圧電システムを作製した結果、最大で 17 V の出力が得られた。次に、上記の発電システムを用いて駆動可能な無線センサおよび行動制御システムの開発を目指した｡低出力電圧であるバイオ燃料電池による動作を実現するために、昇圧機能を有した電源マネジメント回路を有する無線センサおよび電気刺激システムを開発した。昆虫搭載型バイオ燃料電池を用いた回路の駆動実験を行った結果、無線センサでは 1 時間程度、電気刺激システムでは 3 時間程度の動作を確認した。さらに、電気刺激システムを用いて昆虫の行動制御実験を実施し、昆虫の旋回および加速を制御することに成功した。

以上の結果より、自己発電型昆虫サイボーグを用いたセンサネットワーク構築の可能性を示すことができた。今後は、センサフィードバックによる行動制御システムを構築することでより高度な作業を実施可能な自己発電型昆虫サイボーグを開発し､災害現場における探査･環境モニタリングロボットへの応用を目指す。

【参考文献】

[1] H. Sato et al., “Remote radio control of insect flight,” *Frontiers in Integrative Neuroscience*, vol. 3, 2009.

[2] H. D. Nguyen et al., “Cyborg beetle achieves efficient autonomous navigation using feedback control,” *arXive*, 2022.

[3] H. Sato et al., “Insect-computer hybrid system for autonomous search and rescue mission,” *Research square*, 2021.

[4] K. Shoji et al., “Insect biofuel cells using trehalose included in insect hemolymph leading to an insect-mountable biofuel cell,” *Biomedical Microdevices*, vol. 14, no. 6, pp. 1063–1068, 2012.

[5] K. Shoji, Y. Akiyama, M. Suzuki, N. Nakamura, H. Ohno, and K. Morishima, “Biofuel cell backpacked insect and its application to wireless sensing,” *Biosensors and Bioelectronics,* vol. 78, pp. 390–395, 2016.

[6] C. J. Sanchez et al., “Locomotion control of hybrid cockroach robots,” *Journal of The Royal Society Interface*, vol. 12, no. 105, p. 20141363, 2015.

〈発　表　資　料〉

題　　名	掲載誌・学会名等	発表年月
体液バイオ燃料電池により駆動する電気刺激システムを用いた昆虫の行動制御	2022 年電気化学会北陸支部春季大会	2022 年 5 月
自己発電型昆虫サイボーグの開発～昆虫バイオ燃料電池で動作する電気刺激システムの開発～	日本機械学会 北陸信越支部 2022 年合同講演会	2022 年 3 月
昆虫搭載型バイオ燃料電池で駆動可能な無線センサの開発	第 39 回日本ロボット学会学術講演会	2021 年 9 月
自己発電型昆虫サイボーグの行動制御	第 40 回日本ロボット学会学術講演会	2022 年 9 月(発表予定)
圧電フィルムを用いた昆虫歩行発電システムの開発	第 40 回日本ロボット学会学術講演会	2022 年 9 月(発表予定)