

昆虫搭載型バイオ燃料電池を用いた 自律分散型環境モニタリングロボットの開発

Autonomous Distributed Environmental Monitoring Robot Using Insect-mountable Biofuel Cell

○正 庄司 観 (阪大) 正 秋山 佳文 (信州大)
鈴木 将登 (農工大) 中村 暢文 (農工大)
大野 弘幸 (農工大) 正 森島 圭祐 (阪大)

Kan SHOJI, Osaka University, shoji@live.mech.eng.osaka-u.ac.jp
Yoshitake AKIYAMA, Shinshu University
Masato SUZUKI, Tokyo University of Agriculture and Technology
Nobuhumi NAKAMURA, Tokyo University of Agriculture and Technology
Hiroyuki OHNO, Tokyo University of Agriculture and Technology
Keisuke MORISHIMA, Osaka University, morishima@mech.eng.osaka-u.ac.jp

This paper reports the first demonstration of a self-powered environmental monitoring robot which backpacked a biofuel cell (BFC) and a micro wireless sensor on insect. Electric power was generated from blood sugar in its hemolymph by the BFC and environmental information around it was monitored by the wireless sensor. First, the BFC which can be backpacked cockroaches was fabricated with a 3D printer. Then, the performance of the BFC was evaluated and a maximum power output of 333 μ W (at 0.5 V) was obtained. Furthermore, a wireless temperature and humidity sensor was successfully driven by the BFC. Finally, the BFC and the micro wireless sensor were mounted on the insect and environmental monitoring was done by the insect. These results indicate that the insect which backpacked the self-powered battery and micro wireless sensors has sufficient potential as microrobots for environmental monitoring and searching in disasters.

Key Words: Biohybrid robot, Living battery, Environmental monitoring, Wireless sensing

1. 緒言

生物の機能や構造、動きを模倣し産業的に応用するバイオミメティクスや Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)技術の発展、カーボンナノチューブなどのナノ材料の開発に伴い、近年、高性能なマイクロ・ナノスケールのロボットが多く開発されている[1]。一部の機能や性能に関しては生物を超えているロボットも開発されているが、生物のように多くの機能を持ち複雑に構成されたロボットは未だに存在しない。そこで近年、生物と機械を融合したバイオハイブリッドロボットが開発されつつある[2]。例えば、生物の筋組織や筋細胞をアクチュエータとして使用するバイオアクチュエータ[3]や、生きた昆虫の筋肉や神経に電気刺激を与えることで行動を制御しロボットとして利用する昆虫サイボーグ[4]など、生物と機械を融合することで従来の機械システムに生物の特徴を付加したロボットが多数報告されている。しかしながら、生物と機械には“エネルギーの違い”という大きな隔りがあるため、生物もしくは機械どちらかの機能に偏ったバイオハイブリッドロボットしか開発されていない。生物が化学エネルギーを用いて駆動するのに対し、機械は電気エネルギーを用いて駆動するため、外部電源が必要になる。しかしながら従来の電池では、サイズが小さくなることにより電気容量が小さくなるため、バイオアクチュエータや昆虫サイボーグのような小さいバイオハイブリッドロボットに対して応用することが難しい。もし、機械が生物と同じエネルギーを用いることが出来れば、より複雑で高度な生物と機械の融合を実現することができる。そこで、我々のグループでは、生物が持つ化学エネルギーを電気エネルギーに変換する Living battery を提案し、昆虫体液中に含まれる糖を燃料とした Living battery を開発した[5, 6]。

本研究では、昆虫体液中に含まれる血糖を酵素により酸化することで発電する昆虫搭載型バイオ燃料電池(imBFC) (図 1)

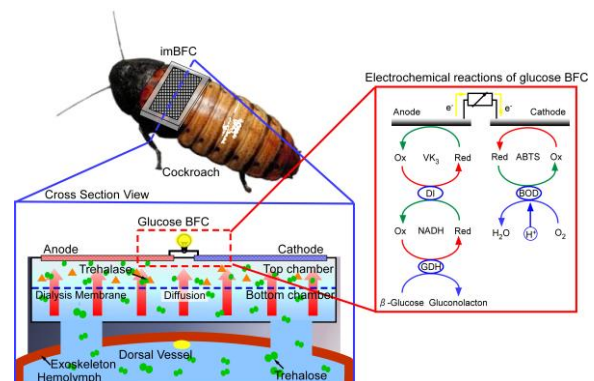


Fig. 1 Schematic illustration of the imBFC. Trehalose in insect hemolymph diffuses from the insect body to the chamber. Then, the trehalose is decomposed to glucose enzymatically. Finally, electric power is generated by the glucose BFC. The inset shows the electrochemical reaction of the glucose BFC consisting of the VK3/DI/NADH/GDH anode and the ABTS/BOD cathode.

を作製し、バイオハイブリッドロボットへの応用を試みる。具体的にはまず、imBFCにおける電極の電気化学反応をサイクリックボルタムメトリ(CV)測定により評価する。次に、3Dプリンタを用いてimBFCを作製し、発電量を測定する。その後、imBFCを用いて無線センサの駆動実験を試みる。最後に、小型無線センサとimBFCを昆虫上に搭載し、環境モニタリングを行い、バイオハイブリッドロボット実現の可能性を示す。

2. 実験

2.1 imBFCの作製

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。imBFCは、昆虫搭載型チャンバ、透析膜(分画分子数:500-1000)、グルコース BFC から構成

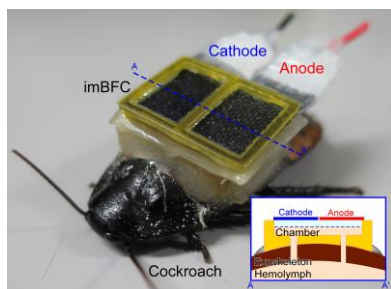


Fig. 2 Photograph of a cockroach backpacking the imBFC. The inset shows a schematic cross-sectional view on the line A-A' in the photograph.

される。昆虫に搭載するチャンバは3Dプリンタ(RVS-S1, Real Vision Systems Inc.)を用いて作製し、昆虫への毒性を緩和させるためにパレレンを厚さ1 μm で蒸着した。また、体液中に含まれる成分の電極への付着を防ぐために、透析膜によりチャンバを分離した。チャンバのサイズはそれぞれ、上部；長さ18 mm, 幅13 mm, 深さ0.5 mm, 下部；長さ18 mm, 幅13 mm, 深さ2 mmとした。グルコース BFC, グルコースを酸化するアノードと酸素を還元するカソードから構成される。アノードは、カーボンクロス電極にグルコース脱水素酵素とメディエータを固定化することで作製した。カソードは、カーボンクロス電極上に酸素還元酵素とメディエータを固定化することで作製した。電極面積は117 mm²とした。

まず、ゴキブリに下部チャンバをエポキシ系接着剤(Araldite, Huntsman)で固定した。接着剤乾燥後、ドリルを用いて外骨格に直径5 mmの穴を二つ開け、穴から漏れ出した昆虫体液で下部チャンバを満たす。その後、透析膜を付けた上部チャンバを接着剤で固定し、ゴキブリ用生理食塩水で満たした。最後に、トレハラーゼ27 μL とムタロターゼ20 μL を上部チャンバに加え12時間室温で静置後、グルコース BFCを取り付けた(図2)。

2.2 酵素電極の電気化学測定

CV測定により酵素電極の電気化学評価を行った。imBFC, 100 mM グルコース溶液(0.1 M リン酸カリウム緩衝液(PPB), pH 6.5), トレハラーゼとムタロターゼを加えた100 mM トレハロース溶液(0.1 M PPB, pH 6.5)中におけるアノードの電気化学測定, 0.1 M PPB (pH 6.5)中におけるカソードの電気化学測定を行い、電極の性能を評価した。CV測定には、電気化学測定装置(SI 1280b, Solartron社)を用いた。トレハロース溶液は、100 mM トレハロース溶液(0.1 M PPB, pH 6.5)にトレハラーゼを27 μL , ムタロターゼを20 μL を加え、5分室温で静置し作製した。Ag|AgCl電極(3 M NaCl) (+205 mV vs. 標準水素電極)を参照極として白金電極を対極として用いた。測定はすべて室温で行った。また作用電極の表面積は25 mm²とした。

2.3 imBFCの性能評価

100 mM グルコース溶液(0.1 M PPB, pH 6.5), トレハラーゼとムタロターゼを加えた100 mM トレハロース溶液(0.1 M PPB, pH 6.5)中でのBFCの性能とimBFCの性能を評価した。開回路電圧を5分間測定後、測定した開回路電圧の値から0 Vまで電位を掃引し、その際に流れた電流を測定することにより電池性能を評価した。グルコース BFC, トレハロース BFCは、それぞれの溶液にimBFCと同様の酵素電極を挿入することで作製した。測定はすべて室温で行い、電極の表面積は117 mm²とした。

2.4 無線センサの駆動実験

本研究では、imBFCで駆動可能な無線センサを作製した。

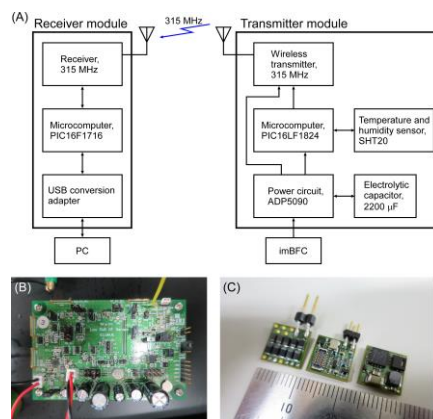


Fig. 3 (A) A block diagram of the wireless sensor device. The transmitter module consists of the power circuit, electrolytic capacitor, microcomputer, temperature and humidity sensor, and wireless transmitter. This module is connected to the imBFC. The receiver module consists of the receiver, microcomputer and USB conversion adapter. This module is connected to a PC on which the hygrothermal data are displayed. Photographs of transmitter modules (B) for evaluation and (C) of the micro wireless sensor.

開発した無線センサのブロック線図を図3(A)に示す。無線センサは、imBFCの出力電圧(約0.5 V)を約2.5 Vまで昇圧する電源回路(ADP5090, Analog Devices Inc.), 無線回路(搬送周波数; 315 MHz), 温湿度センサ(SHT20, Sensirion AG), マイクロコンピュータ(PIC16LF1824, Microchip Technology Inc.)から構成される。まず、電源回路によりimBFCの出力電圧が2.5 Vまで昇圧され2200 μF の電解コンデンサに、無線センサとマイコンの起動電圧に達するまで充電される。充電後、コンデンサから放電されマイコンとセンサが駆動し、温湿度情報が測定される。最後に、温湿度データが無線回路により送信される。

まず、無線センサの評価ボード(図3(B))を作製し、imBFCを電源とした場合の動作評価を行った。

2.5 環境モニタリング実験

最後に、昆虫上に搭載可能な小型無線センサ(図3(C))を作製し、昆虫上に搭載、imBFCを用いて駆動させることにより、環境モニタリング実験を行った。無線センサを両面印刷基板三枚に集積化した結果、サイズ10 \times 10 \times 8 mm, 質量1.3 gに小型化することに成功した。また、キャパシタとして容量220 μF のタンタルコンデンサを10個用いた。電解コンデンサに比べタンタルコンデンサの漏れ電流が大きいので、発電量を増加させるためにimBFCの電極サイズを234 mm²とした。

3. 結果と考察

3.1 電気化学反応の比較

図4(A)に各溶液中におけるアノードのCV曲線を示す。曲線aは0.1 M PPB (pH 6.5)中、曲線bは100 mM グルコース溶液中、曲線cはトレハラーゼとムタロターゼを加えた100 mM トレハロース溶液中、曲線dはimBFC中のアノードの電気化学反応を示している。掃引範囲は、-0.6 V から 0.6 V (vs. Ag|AgCl)とし、掃引速度は10 mV/sとした。

緩衝液中(曲線a)では、グルコースが溶液中に存在しないため、メディエータであるビタミンK3の酸化還元ピークのみが確認された。グルコース溶液(曲線b), トレハラーゼとムタロターゼを加えたトレハロース溶液(曲線c), imBFC(曲線d)では、グルコースの酸化反応が-0.3 V (vs. Ag|AgCl)付近から確認でき、+0.6 V (vs. Ag|AgCl)でそれぞれ、2.03, 1.37, 1.18 mA/cm²の酸

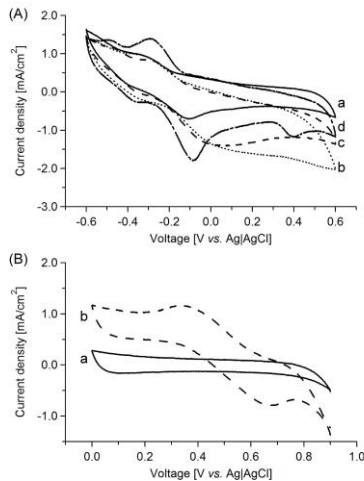


Fig. 4 (A) Cyclic voltammograms obtained for the anode: curve a, in 0.1 M PPB (pH 6.5); curve b, in 100 mM glucose solution (0.1 M PPB, pH 6.5); curve c, in 100 mM trehalose with added trehalase and mutarotase (0.1 M PPB, pH 6.5); and curve d, in the imBFC. (B) Cyclic voltammograms obtained for the cathode in 0.1 M PPB (pH 6.5): curve a, without immobilized ABTS and BOD; and curve b, with immobilized ABTS and BOD. The scan rate was 10 mV/s for all curves.

化電流が測定された。

imBFC の電流密度は、グルコース溶液及びトレハロース溶液と比べ低く、溶液中のグルコース濃度が低かったと考えられる。昆虫体液中のトレハロース濃度は約 100 mM であるが、imBFC 内では、トレハロースが拡散により上部チャンバに運ばれる際に、昆虫用生理食塩水で薄められているため低くなったと考えられる。また、 -1.0 V と $+0.4\text{ V}$ (vs. Ag/AgCl) 付近に電流のピークが確認された。imBFC では、電極の保護のために昆虫体液と生理食塩水が分画分子数 500-1000 の透析膜で隔てられている。透析膜により体液中に含まれる高分子は上部チャンバに運ばれないが、 Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- などのイオンや有機酸化物イオン、脂肪体、アミノ酸など低分子は透析膜を通過する。これらイオンなどの低分子の電気化学反応によりピークが発生することが知られており、imBFC においても酸化電流のピークが見られたと考えられる。

図 4 (B) に 0.1 M PPB (pH 6.5) におけるカソードの CV 曲線を示す。曲線 a は ABTS と BOD が固定されていないカーボン電極、曲線 b は ABTS と BOD が固定された電極の電気化学反応を示している。掃引範囲は、 $+0.9\text{ V}$ から 0 V (vs. Ag/AgCl) とし、掃引速度は 10 mV/s とした。曲線 a では、酵素とメディエータが固定されていないため、酸素の還元電流が観察されなかった。ABTS と BOD が固定された電極(曲線 b)では、 $+0.6\text{ V}$ 付近から酸素の還元反応が確認され、 0 V (vs. Ag/AgCl) で -1.17 mA/cm^2 の電流密度が得られた。従来の体内埋め込み型 BFC では、体液中に含まれる酸素濃度が空気中に含まれる酸素濃度と比べ低いため、カソードの電気化学反応が電池出力の律速となっていることがある。imBFC では、空気中の酸素を直接利用可能な空気拡散カソードを利用することで、従来の体内埋め込み型 BFC よりも高い還元電流が期待できる。

また、電池の開回路電圧は、アノードとカソードの酸化還元電圧の差で決まる。本結果より、imBFC の開回路電圧は約 900 mV と概算できる。

3.2 imBFC の発電量

図 5 にグルコース溶液(曲線 a)、トレハラーゼとムタローゼを加えたトレハロース溶液(曲線 b)中の BFC、および

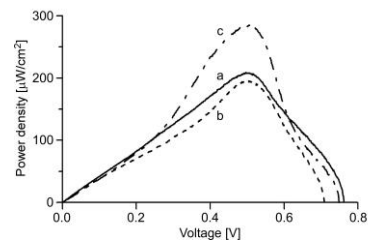


Fig. 5 Dependence of power density on voltage for BFCs. Curve a, in 100 mM glucose solution (0.1 M PPB, pH 6.5); curve b, in 100 mM trehalose solution with added trehalase and mutarotase (0.1 M PPB, pH 6.5); and curve c, in the imBFC.

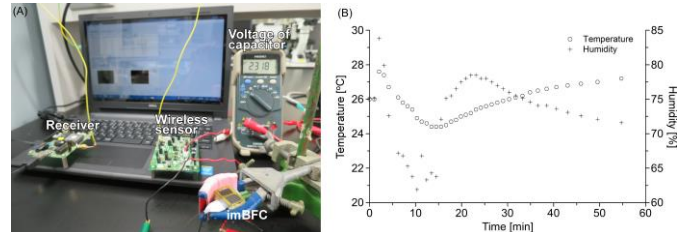


Fig. 6 (A) Experimental setup of driving the wireless sensor device powered by the imBFC. The imBFC was connected to the wireless sensor and the capacitor voltage was monitored with the circuit tester. (B) Hygrothermal data transmitted from the wireless sensor device when the capacitor voltage reached around 2.55 V. The wireless communication intervals gradually increased and the wireless sensor device stopped 54 min after the first wireless communication.

imBFC(曲線 c)の電圧-電流曲線、電圧-電力曲線を示す。それぞれ、 0.5 V において $243\text{ }\mu\text{W}$ ($208\text{ }\mu\text{W/cm}^2$), $229\text{ }\mu\text{W}$ ($196\text{ }\mu\text{W/cm}^2$), $333\text{ }\mu\text{W}$ ($285\text{ }\mu\text{W/cm}^2$)の最大電力が得られた。

imBFC の最大電力はグルコース溶液中における BFC の出力と比べ約 $100\text{ }\mu\text{W}$ 高くなった。imBFC におけるアノードの CV 曲線において、 -0.1 V (vs. Ag/AgCl) に酸化電流のピークが確認でき、また、 -0.3 V から $+0.05\text{ V}$ (vs. Ag/AgCl) の範囲で酸化電流がグルコース溶液中よりも大きくなった。その結果、imBFC では電流が大きくなり最大電力が増加した。

Rasmussen らのグループもまた体内に埋め込んだトレハロース BFC を用いて昆虫体液から発電に成功している[7]。しかしながら、昆虫に埋め込んだ電極のサイズが、直径 $0.04\text{--}0.05\text{ cm}$ と小さいため、電子機器を駆動させるための十分な電力が得られていない。本発表では、電極を昆虫の体内に埋め込むのではなく、搭載することで大きな電極を用いることが可能となり、 $333\text{ }\mu\text{W}$ の電力が得られた。さらに、imBFC の電力は、他の生物を用いた BFC の比べても最高出力となった。昆虫体液に含まれる糖濃度が約 100 mM と他の生物よりも高いため、高出力が得られたと考えられる。

3.3 無線センサの駆動

imBFC に接続した無線センサの評価ボードを図 6 (A) に示す。imBFC の出力電圧が昇圧回路により昇圧され、電解コンデンサが約 2.55 V まで充電された。imBFC と無線センサを接続して 21 分後に最初の無線通信が行われた。その後、54 分で 38 回、温湿度データが送信された(図 6 (B))。最初は、約 60 秒間隔で無線通信が行われていたが、測定開始後 20 分辺りから通信間隔が徐々に増し 54 分後に無線センサが停止した。imBFC の発電量が徐々に低下し、無線センサの消費電力以下に発電量が低下したためであると考えられる。

駆動時間は 1 時間弱と短かったが、世界で初めて生物の持つ化学エネルギーを用いた無線センシングに成功した。従来の埋め込み型 BFC では、電力量が小さかったため駆動可能な電

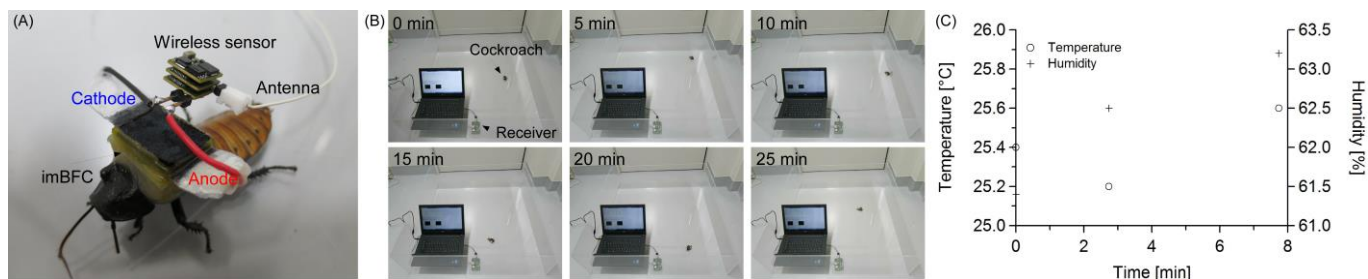


Fig. 7 Photographs of (A) the cockroach which backpacked the imBFC and the micro wireless sensor and (B) time course of the cockroach positions. The cockroach autonomously walked and sensed the environmental conditions by the self-powered wireless sensor. (C) Hygrothermal data transmitted from the environmental monitoring robot. The perpendicular axes on the left and the right show temperature and humidity, respectively.

子デバイスに制限があった。本研究では、マイコンを駆動させることに成功しており、無線センサだけではなく様々な電子機器を駆動可能であり、様々なアプリケーションを提示することが出来る。しかしながら、本電池の発電寿命は大きな問題であり、今後改善する必要がある。

3.4 昆虫による環境モニタリング

図 7 (A)に imBFC と小型無線センサを搭載したマダガスカルゴキブリを、図 7 (B)にマダガスカルゴキブリの移動経過を示す。本研究で開発した小型無線センサは、マダガスカルゴキブリに対して十分小さく、マダガスカルゴキブリの行動を妨げることはなかった。マダガスカルゴキブリは自律的に行動し、また、imBFCにより体液中の糖から発電された。imBFC と小型無線センサを接続してから約 26 分後に一回目の温湿度データが送信された。その後、8 分間で 3 回、温湿度データが送信された(図 7 (C))。本結果は、自身の体液中に含まれる化学エネルギーを用いて発電し、その電気により搭載された無線センサを駆動させる、自律分散・自己発電型環境モニタリングロボットの世界で最初のデモンストレーションであり、生物の化学エネルギーを用いた電池のバイオハイブリッドロボットへの応用の可能性を示すことが出来た。

しかしながら、本ロボットの实用化には多くの問題点が残されている。imBFC に関しては、さらなる小型・軽量化、フレキシブル化が必要である。本研究で開発した imBFC は昆虫が歩行可能なサイズまでは小型化しているが、実際にロボットの電源として利用する際は、近年開発が進んでいるウェアラブルエレクトロニクスの技術に応用し、より小型・軽量かつフレキシブルな電池の開発が必要になる。さらに、電池の高出力化、長寿命化も大きな課題である。電池の出力は電極面積により変わるため、電極性能を向上させることにより、出力を維持しながら小型化することが可能である。電池寿命に関しては、生物の体液と電池を分離する膜の設計が重要になってくる。無線センサに関しては、さらなる小型・軽量化、低消費電力化、多機能化が必要である。現在使用している電子部品はすべて既存の部品であるため、本利用目的に合わせた新たな規格の電子機器を開発する必要がある。

4. 結言

本研究では、昆虫上に小型無線センサと昆虫体液中に含まれる糖を燃料とする BFC を搭載した、自己発電・自律分散型無線センサロボットを提案した。imBFC の最大電力は、333 μ W (at 0.5 V) となり、従来の生物を用いた BFC と比べ最高の出力となった。さらに、マイクロ無線センサと BFC を搭載した昆虫を用いて環境モニタリングに成功した。

これらの結果により、自己発電型センサロボットを用いた

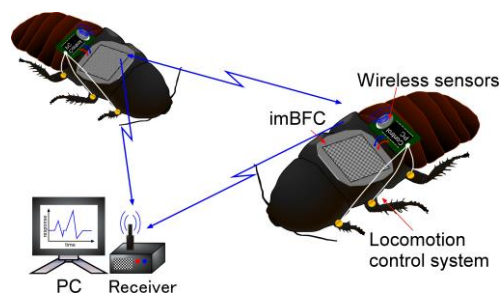


Fig. 8 Schematic illustration of the autonomous distributed sensor network powered by the imBFC. Living organisms which were mounted the imBFC, the micro wireless sensor and a locomotion control system monitor environmental conditions and wirelessly communicate with each other.

自律分散型センサネットワーク(図 8)構築の可能性が示された。さらに、imBFC の発電原理はすべての生物に応用することができ、将来、生体埋込型センサや医療機器さらには体内駆動型ロボットの電源としても応用可能である。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省の科学研究費補助金(Nos. 21676002, 23111705, 26249027), NEDO 産業技術研究助成, 東電記念財団, 総務省の戦略的情報通信研究開発推進事業(SCOPE)および日本学術振興会特別研究員奨励費の研究助成を受けて行われた。株式会社エルウェーブには無線センサに関して援助していただき感謝いたします。

参考文献

- [1] Ma, K.Y., Chirattananon, P., Fuller, S.B. and Wood, R.J., "Controlled Flight of a Biologically Inspired, Insect-Scale Robot," *Science*, vol. 340-6132, pp. 603-607, 2013.
- [2] Ricotti, L. and Menciassi, A., "Bio-hybrid muscle cell-based actuators," *Biomed. Microdevices*, vol. 14-6, pp. 987-998, 2012.
- [3] Chan, V., Asada, H.H. and Bashir, R., "Utilization and control of bioactuators across multiple length scales," *Lab Chip*, vol. 14-4, pp. 653-670, 2014.
- [4] Sato, H., Berry, C.W., Peeri, Y., Baghoomian, E., Casey, B.E., Lavella, G., VandenBrooks, J.M., Harrison, J.F. and Maharbiz, M.M., "Remote radio control of insect flight," *Front. Integr. Neurosci.*, vol. 3, p. 24, 2009.
- [5] Shoji, K., Akiyama, Y., Suzuki, M., Hoshino, T., Nakamura, N., Ohno, H. and Morishima, K., "Insect biofuel cells using trehalose included in insect hemolymph leading to an insect-mountable biofuel cell," *Biomed. Microdevices*, vol. 14-6, pp. 1063-1068, 2012.
- [6] Shoji, K., Akiyama, Y., Suzuki, M., Nakamura, N., Ohno, H. and Morishima, K., "Biofuel Cell Backpack Insect and Its Application to Wireless Sensing," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 78-15, pp. 390-395, 2016.
- [7] Rasmussen, M., Ritzmann, R.E., Lee, I., Pollack, A.J. and Scherson, D., "An Implantable Biofuel Cell for a Live Insect," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 134-3, pp. 1458-1460, 2012.