

生体適合性高分子ゲルを用いて生体内の糖で発電～体内電源の実用化を目指す～

1. 発表者：

黄 依璇（東京大学大学院工学系研究科バイオエンジニアリング専攻 博士学生）

増田 造（東京大学大学院工学系研究科バイオエンジニアリング専攻 助教）

高井 まどか（東京大学大学院工学系研究科バイオエンジニアリング専攻 教授）

2. 発表のポイント：

- ◆ 埋め込み型の応用に向けて、生体適合性高分子を利用して、エネルギー変換部位を持つ多機能型高分子ゲル材料を創製した。
- ◆ 開発した材料を用いることで、バイオ電池の寿命が延び、複雑な生体内環境でも長期安定な発電が可能となる。
- ◆ 体内で利用できる次世代電源として、医療、情報、通信、環境といった分野への波及効果があり、社会の発展に貢献できると考えられる。

3. 発表概要：

バイオ燃料電池は、糖を二酸化炭素に分解する反応を発電に利用する発電デバイスである。体内のグルコースを燃料に用いて発電できるため、外部からの充電や燃料補給なしに体内埋込型医療機器・電子デバイスを動かし続けることが可能になると期待されている。しかし生体適合性・寿命に課題があり、生体埋め込み型の電池は未だ実用化されていません。こうした課題は酵素の失活及び生体適合性の低さに由来すると考えられる。東京大学工学系研究科の高井まどか教授らは、埋め込み型の応用に向けて、生体適合性高分子を利用して、エネルギー変換部位を持つ高分子ゲル材料を創製した。このゲル材料を利用し、1. 酵素活性を維持 2. 優れた生体適合性・血液適合性を持つバイオ燃料電池の開発を目指している。開発した材料を用いることで、優れた長期安定性が得られた。実際に3ヶ月にわたる長期発電にも成功しており、長寿命な生体内埋め込み型バイオ燃料電池への応用が期待される。次世代電源として、医療、情報、通信、環境といった分野への波及効果があり、社会の発展に貢献できると考えられる。

4. 発表内容：

研究の背景・先行研究における問題点

バイオ燃料電池は、糖を二酸化炭素に分解する解糖系の反応の一部を発電に利用し、化学エネルギーを電気エネルギーに変換する発電デバイスである。例えば、血中に含まれるグルコースを生体触媒（酵素）で分解し電気エネルギーに変換することができる。体内のグルコースを燃料に用いて発電できるため、外部からの充電や燃料補給なしに体内埋込型医療機器を動かし続けることが可能になると期待されている。しかしながら、バイオ燃料電池の生体埋め込み型のプロトタイプは未だ実現していない。生体内環境は、燃料となる糖の他にも様々な細胞やタンパク質が存在しており、これらの物質吸着により体内における発電性能（出力・寿命）は理想的な環境に比べて極端に低下してしまう。さらに、バイオ燃料電池の出力・寿命は酵素活性に依存しているため、酵素の変性・失活を抑制する設計が重要であると考えられる。

そこで我々は、タンパク質の非特異的な吸着を高度に抑制し、優れた生体適合性・血液適合性を持つ双性イオン高分子（注1）に注目した。本研究では、エネルギー変換部位（酵素・電子

伝達体)を内包した新規な多機能型双性イオン高分子ゲル(注2)材料を作製することで、酵素の寿命が延び、長期安定な発電が可能となった。複雑な生体内環境でも長期安定性を有すると予想され、体内埋め込み電子デバイスの電源として期待される。

① 研究内容

本研究では、生体内埋め込み型バイオ燃料電池の実用化を目指して、生体適合性を有しエネルギー変換部位(酵素・電子伝達体)を内包したゲル材料を設計する。埋め込み型バイオ燃料電池の長期安定性及び生体適合性を確保するため、生体親和性に優れる、2-メタクリロイルオキシエチルホスホリルコリン(MPC)ユニットを一成分、電子移動を介するメディエータ(フェロセン, Fc)を一成分とする、双性イオンポリマーを作製する。ポリマー組成を調整し、側鎖間の水素結合や疎水性相互作用によりゲル化させる。このゲルの三次元構造を利用して酵素の固定化量を増加させる。さらに酵素内包レドックスポリマーゲルを電極表面に被覆して酵素燃料電池のバイオ負極を作製する。そのバイオ負極と白金正極と組み立てバイオ燃料電池を作製した。本研究では、このような多機能型高分子ゲル材料の設計、合成、物性評価を行った。さらに実際に電極を作製し、バイオ燃料電池の長期安定駆動に対して、電気化学的な評価を行い、出力と寿命を評価した。

目的のゲル材料の設計と評価を行い、長期安定性に優れた電気化学特性を得ることに成功している。MPCユニットと活性エステル基を持つ双性イオンコポリマーをラジカル重合により調製した。¹H NMR測定からコポリマーの合成・キャラクタリゼーション、及び動的粘弾性測定からゲル化のメカニズムまで確認した。また、電子伝達体としてアミノ基を有するフェロセンをコポリマーの側鎖に固定化することで、レドックス双性イオンポリマーゲルを作製した。続いて、架橋剤を利用して酵素を化学的にゲルに固定化させた。得られたゲル/酵素複合体を電極表面に被覆してバイオ燃料電池の負極を作製した。次に、バイオ負極と白金正極と組み立てバイオ燃料電池を作製し、長期安定駆動に対して電気化学評価を行い、出力と寿命を評価した。その結果、ゲル/酵素複合体は、バイオ燃料電池として優れた出力特性が得られることがわかった。さらに *in vitro* で酵素化学固定ゲルを電極表面に被覆して作製したバイオ負極と白金電極と組んだバイオ燃料電池が、優れた長寿命(三ヶ月以上)を得ることに成功した。また、*ex vivo* でバイオ燃料電池をぶどうに埋め込み、動作試験及び24時間連続放電実験を行った。ぶどうから発電できること、及び安定なセル電圧を確認できた。以上より、生体親和性を有し、新規な物性を有する高分子ハイドロゲル材料を用いて、実用化可能なバイオ燃料電池の作製に成功した。

② 社会的意義・今後の予定

バイオ燃料電池は、次世代電源として、医療、情報、通信、環境といった分野への波及効果があり、社会の発展に貢献できると考えられる。今後は、生体内埋め込み型エレクトロニクスデバイスのエネルギー源としてヒトに用いる研究に展開する。さらに、動植物の糖も利用できることから、温度や湿度、有害物質などを検知し管理するスマート農業分野で用いる複数のセンサーを集積化した無線システムの電力源として実用化することを目的とする。

5. 発表雑誌:

雑誌名: Polymer Preprints, Japan 2019, 68

論文タイトル: 生体内埋め込み型を目指した酵素燃料電池用双性イオンポリマーゲル材料の開発

著者: 黄 依璇、増田 造、高井 まどか*

URL : http://main.spsj.or.jp/koho/koho_top.php

6. 問い合わせ先

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

東京大学大学院工学系研究科

バイオエンジニアリング専攻

工学部 5号館 607室

高井 まどか (たかい まどか)

7. 用語解説 :

(注1) 双性イオン高分子 :

同一分子内に正電荷と負電荷の両方を持つ分子のことである。優れた含水能力を持つことから高い生体適合性を有する。

(注2) 高分子ゲル :

高分子の網目が溶媒を含んで膨潤した材料である。特に、水を含むハイドロゲルは、生体に類似した柔軟性や、物質透過性を持つことから医用材料としても注目されている。

8. 添付資料 :

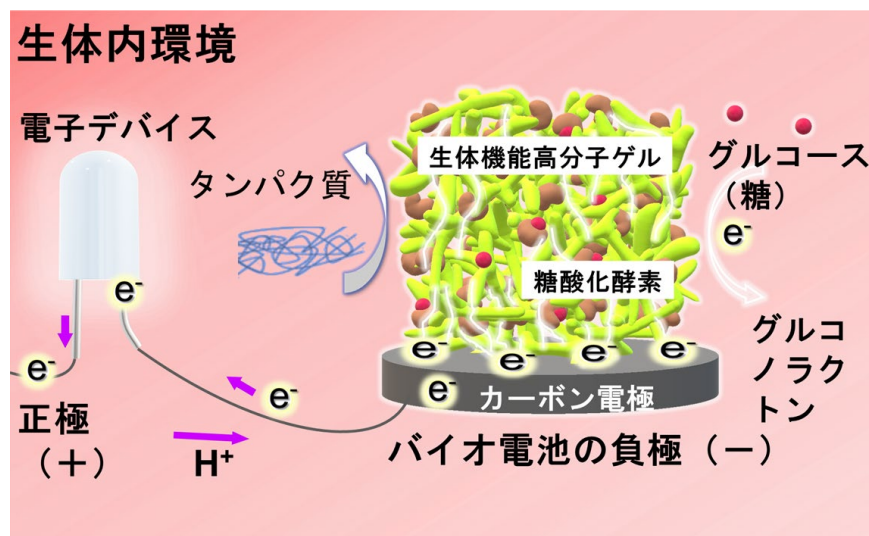


図1. 生体内の糖で発電する生体適合性高分子ゲル電池