

生物的手法によるクリーンかつ安全な革新的発電システムの創出

Clean and safety power generation system by biological methods

2151023



研究代表者

理化学研究所
生命システム研究センター

ユニットリーダー

田中 陽

[研究の目的]

火力や原子力など既存の発電方法に代わる、クリーンで安全な発電手法の開発は急務である。そこで、クリーン・安全な電力供給手段として生物機能利用型の発電方法が近年注目を集めており、微生物の酸化還元酵素を電極に組み込んだバイオ燃料電池や、微生物から直接電気を取り出す微生物燃料電池等があるが、出力性能は現状必ずしも十分でない。これに対し、シビレイに代表される強電気魚は電気器官で変換効率が100%に近い効率的な発電システムを体内で実現している(図1A)。シビレイには1対の電気器官が胸鰭の基部にあり、それらは腎臓型をしている。電気器官の中では発電細胞がたくさん積み重なり電気柱を形成している。通常時は、細胞膜に存在するイオンポンプがATPのエネルギーを使い、細胞内外で電位差を生じさせている。そこに神経線維の末端から放出された神経伝達物質のアセチルコリンが細胞膜に存在するイオンチャンネルを刺激すると、細胞外にあるナトリウムイオンが一気に細胞内に流入し、電流が発生する(図1B)。

電気器官においては、イオンポンプ・チャンネルが細胞膜に多数集積して電流密度が飛躍的に増加する。また、細胞直列積層により高出力発電する。このような大規模集積構造は天然にしか存在しない。

一方研究代表者らは、これまで培ってきた細胞・組織機能の微小流体デバイスへの実装技術を開発してきた。

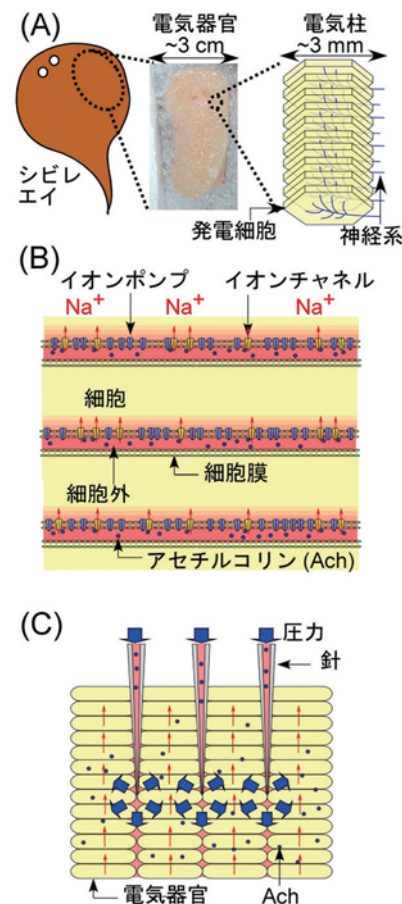


図1 シビレイの構造と発電原理、および発電機コンセプト。(A) 電気器官および電気柱の構造。(B) 神経系からのアセチルコリン刺激による発電原理を示した電気柱断面図。(C) 流体圧力を用いた代替神経系による発電コンセプト。アセチルコリンが、シリンジ針を通した圧力によって電気器官全体に広がる。

この技術の応用により発電器官をデバイス搭載し、神経代替制御系の人工的構築により高効率な ATP 発電システムが実現可能と着想した。シリンジ針を代替神経系に見立て、電気器官にシリンジ針を通し、圧力でアセチルコリンを器官全体に行き渡らせ刺激する方法を考えた (図 1C)。

以上の背景のもと、本研究では、(1)基礎的知見を得るため、生体シビレエイの物理刺激による電気応答測定、(2)シビレエイより摘出した発電器官の電気応答測定、ならびに(3)電気器官を搭載した発電デバイスの試作と実証、を行った。詳細を以下に記す。

[研究の内容, 成果]

生体シビレエイの物理刺激による電気応答測定

はじめに、実際にシビレエイがどれくらいの電気を発生しているのかを検証した。

シビレエイ生体 (個体) への物理的刺激による発電性能の測定実験を行った。捕獲後数日以内の新鮮なシビレエイを用い、電気器官周辺部に導電布を貼り、頭部を手で継続的に圧迫刺激して電氣的応答を測定した。

その結果、10 ミリ秒以下というきわめて短時間ながらパルス電流が測定され、ピーク電圧は 19 V、ピーク電流は 8 A であった。また、このパルス電流を利用して LED の点灯やコンデンサへの蓄電ができた。さらに蓄電エネルギーで LED を長時間点灯させることやミニカーを駆動させることができた。このように、シビレエイの電気で電気器具が機能することを示し、シビレエイが大きな電力を発生していることが確認できた。

シビレエイより摘出した発電器官の化学刺激による電気応答測定

続いて、シビレエイ個体から取り出した電気器官への化学的刺激による発電性能の測定実験を行った。取り出した電気器官は、人工脳髄液

(ACSF) 中で一時保存した後、導電布で挟み込み、上下それぞれに電極をつないだ。正極側からシリンジ針を 7 本刺し、シリンジ一本あたり 0.25 ml のアセチルコリン水溶液を手動で一気に入注して、電氣的な応答を測定した。このとき、アセチルコリン溶液の溶媒は ACSF を使用し、アセチルコリンの濃度は 1 mM であった。その結果、ピーク電圧は 91 mV、ピーク電流は 0.25 mA と低いものの、生体の場合より長い、1 分間以上もの長時間、電流が継続して流れた。

また、針の本数を 20 本に増やすことで、ピーク電圧は変わらないものの、ピーク電流は 0.64 mA を達成した。これにより、針の本数を増やす、すなわち並列化することにより、電流値を増やすことができるということが実証された。

対照実験として、アセチルコリンを含まない ACSF を電気器官内に注入したところ、電流が発生しなかった。よって、この現象はアセチルコリンの組織内での拡散により起こるものと考えられる。また、電気器官を ACSF で洗浄することで、繰り返し同様の反応が得られた。さらに、電気器官を ACSF に浸しておくことで、1 日以上経過した後でも発電量は下がるものの、電流の発生が確認された。こうして、電気器官が摘出後もその電気発生機能を保ち、繰り返し使用可能であることが明らかになった。これにより、化学刺激コントロール型発電システムの基礎原理が実証された。

電気器官を搭載した発電デバイスの試作と実証

次に、電気器官をデバイスに組み込んだ発電機プロトタイプ作製に取り組みこんだ。

上記の発電方法では発電自体は可能であるが、電気器官のサイズが必ずしも一定ではなく、またシリンジ針を支持体なく電気器官に刺しているため、シリンジ針が動きやすい不安定な状態であった。そのため、電気器官の大きさに依存する電圧・電流が電気器官ごとに安定せず、またシリンジ針が動くことでノイズが発生した。

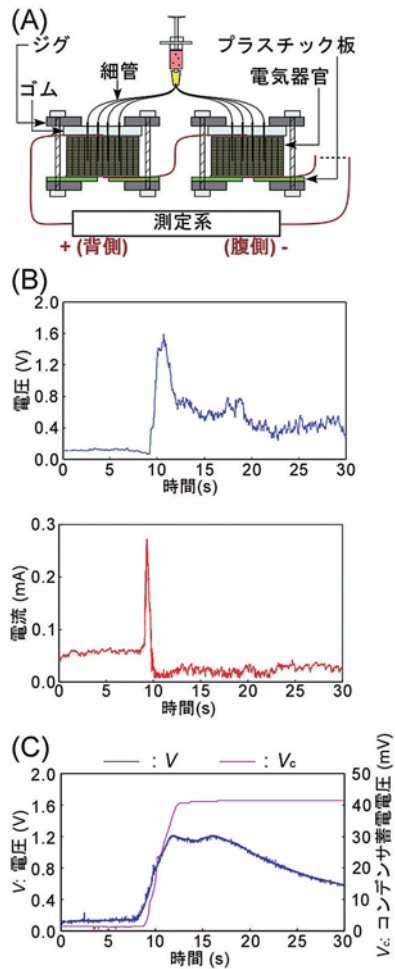


図2 電気器官直列発電ユニットを用いた発電デバイス。(A) 直列デバイスの原理図。3 cm 角にカットした電気器官に電極をつなぎデバイス化。このデバイスを直列に接続。(B) 電圧と電流の測定結果(注入は $t=10$ s)。ピーク電圧 1.5 V、ピーク電流 0.25 mA。(C) 発電電圧 (V , 青線) とコンデンサ蓄電電圧 (V_c , 紫線)

これらの問題を解決するには、一定サイズのデバイスに電気器官を組み込むことが必要であった。

そこで、電気器官を 3 cm 角にカットし、これをアルミやシリコンゴムで作製した容器に固定し、発生電力の安定化ならびに直列による電圧増強が可能かどうかについて調べた (図 2A)。

その結果、16 個のデバイスを直列につなぐことにより、ピーク電流は約 0.25 mA と単体の場合とほぼ変わらないものの、ピーク電圧は約 1.5 V と単体の場合のほぼ 16 倍を達成した (図 2B)。一般的に、電力で仕事をするために

は、常時一定の電力が供給されることが必要である。

しかし、このデバイスで発電した場合、発生電力はアセチルコリン注入後から徐々に低下する。そのため、このデバイスで発電した電力を使用するには蓄電が必要になる。

そこで、デバイスを含む電気回路を構成し、蓄電を試みた。その結果、発電後、コンデンサの電圧が上昇し、それが一定 (約 40 mV) に保たれたことから、電力を電池のように一定供給できる可能性が示された (図 2C)。

[今後の研究の方向, 課題]

本研究の成果は、人をはじめ生体を動かすものになっている化学エネルギーである ATP エネルギーのみで実現できる高効率発電機に向けた第一歩であると位置付けられる。

ただし、シビレエイは安定大量に入手できるものではない。よって、実用化に向けては、電気器官に相当するものを人工的に構築する必要がある。すなわち、細胞膜やタンパク質の再構成手法とマイクロ・ナノ流体技術を融合し、分子からボトムアップ的に細胞機構を開発し、発電細胞と同様の材料を創出することが考えられる。また、燃料となる ATP をいかに大量に供給するかという問題がある。これに対しては、例えば、セルロースを遺伝子組換えバクテリアに分解させ、ATP を合成させれば、一般の植物を原料にすることなどが考えられる。

ATP は生物には必ず含まれ、生物が関連するあらゆるところに存在することから、将来的には、このようなデバイスは、生体内はもちろん、食物や排水など、様々な環境下に存在する ATP やグルコースを利用した微小エネルギー駆動型の環境発電機やセンサーとしても、様々な応用が考えられる。

[成果の発表, 論文等]

Y. Tanaka, S. Funano, Y. Nishizawa, N. Kamamichi, M.
Nishinaka, T. Kitamori, “An electric generator

using living Torpedo electric organs controlled by
fluid pressure-based alternative nervous systems”,
Sci. Rep. 6, 25899 (2016)