

圧力駆動型ガラス発電機

—微細ガラスフィルターを用いた小型環境発電機の開発—

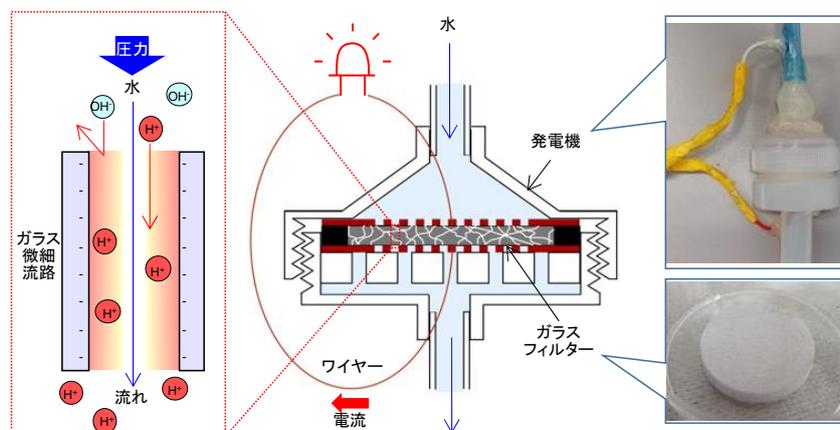
理化学研究所（理研）生命機能科学研究センター集積バイオデバイス研究チームの田中陽子チームリーダー（研究当時）、ヤリクン・ヤシャイラ客員研究員（奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科物質創成科学領域生体プロセス工学研究室准教授）、東京電機大学未来科学部ロボット・メカトロニクス学科の釜道紀浩教授らの共同研究グループは、ガラスと水の電気的相互作用を利用し、圧力で水を流すことで電力発生可能な圧力駆動型の小型発電機を開発しました。

本研究成果は、人間の歩行などのゆっくりした動きを用いた環境発電に利用でき、身の回りの電子機器の電源として役立つと期待できます。

IoT¹⁾の普及に伴う膨大な数の情報端末やセンサーへの給電手段として、熱や光、圧力などから電力を得る環境発電²⁾技術が注目されています。中でも、圧力は比較的大きな電力を生み出せますが、歩行のようなゆっくりした繰り返し圧力（振動）に対しては発電効率がやや悪いという課題があります。

今回、共同研究グループが開発した発電デバイスは、負に帯電したガラス表面に水を流してイオンを分離させることで、遅い動きでも水が流れ続ける限り発電が持続します。さらに、多数の流路が集積する微細ガラスフィルターを作製することで、圧力をかけても壊れにくく、かつ大きな電力を得られるようにし、実際にLED点灯やファンの回転、通信などに使えることが実証されました。

本研究は、科学雑誌『*Scientific Reports*』オンライン版（10月20日付：日本時間10月20日）に掲載されます。なお、理研は「発電デバイスおよび発電方法」として特許を出願しています。



微細ガラスフィルターを用いた振動環境発電機のコセプト

背景

身の回りのあらゆるモノがインターネットにつながる IoT (Internet of Things) の普及に伴い、無数のセンサー類を動かすための電源として、熱や光、圧力を利用した環境発電技術が注目されています。中でも、身近で大きなエネルギーが得られるものとして、歩行の際などに発生する圧力（振動）を利用した振動発電が挙げられます。振動から電気を得るための方法としては、電磁誘導^[3]や圧電素子^[4]を用いたものが良く知られていますが、電磁誘導は小型化が難しく、圧電素子は歩行のような遅い動きでは効率が落ちるといった課題があります。

そこで、本研究では水とガラス流路壁の電氣的相互作用を利用し、流路に圧力をかけて水を流し、イオンを分離することで電力発生を利用することを着想しました。水がある限り発電が持続するため、歩行のような遅い動きでも十分に電力を発生させることが可能です。ガラスは田中陽チームリーダーらがこれまでに得意としてきた材料であり、その知見に基づき、作製条件の最適化の検討と圧力駆動型ガラス発電機への利用に向けた実証実験を行いました。

研究手法と成果

今回考案した発電機の原理は、水 (H_2O) が自発的に水素イオン (H^+) と水酸化物イオン (OH^-) に解離していることを利用したものです。またガラスは、水中で表面の H^+ が解離し、負に帯電する性質があります。そこで、ガラスで微細流路を作製し、ここに圧力で水を流せば H^+ は流路に入りやすいが OH^- は入りにくいため、イオンの分離が生じます。ここで流路の入口と出口をワイヤーで接続すると、出口では水素ガス (H_2)、入口では酸素ガス (O_2) が生じ、電流が流れます (図 1a)。このとき生じる水素ガスはごくわずかで、残った水は再び一定割合でイオンの電離が生じるため、水を流路に戻せば繰り返し発電が可能です。

電圧は圧力に、電流は流路数に比例するため、その積である電力を高めるには耐圧性の高い多数の流路を集積する必要があります。これを実現するための発電機デザインとして、円形状の微細ガラスフィルターを作製し、これにゴムパッキンを装着し、耐圧性能の高いホルダーに組み込むことを検討しました。フィルターの上下にはメッシュ状の電極を取り付け、外部の測定機にワイヤーで接続し、広い面積から電流を回収できる構造にしました (図 1b)。

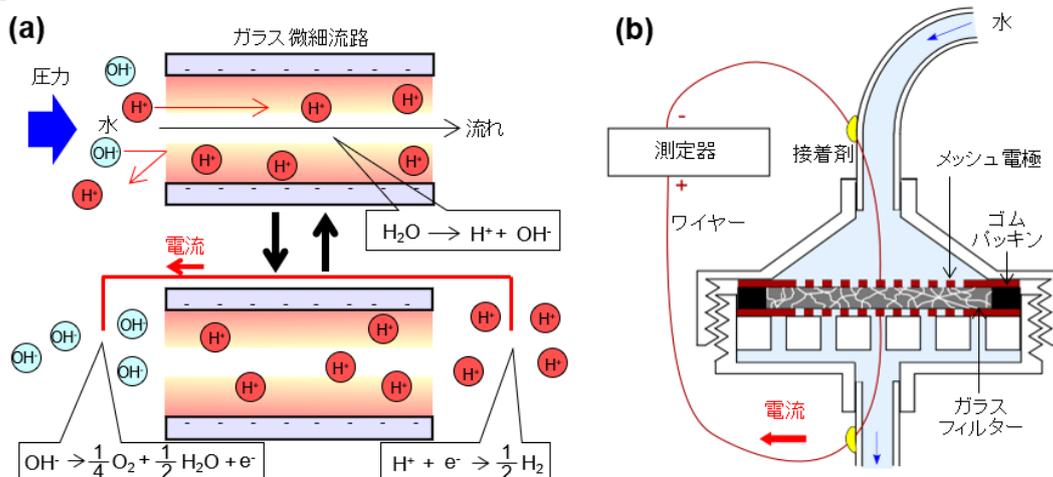


図 1 微細ガラスフィルターを用いた発電機の原理とデザイン

- (a) 微細ガラスフィルターを用いた圧力駆動型ガラス発電機の原理。水 (H₂O) の自発的な解離で発生した水素イオン (H⁺) と水酸化物イオン (OH⁻)、および水に接する表面が負に帯電したガラス流路の模式図を示す。左から右に水圧がかかると、H⁺は流路を通過しやすいが OH⁻は通過しにくいイオンの分離が生じる。ここで流路の両側を電線でつなぐと、電子が左から右に移動して電流が生じる。上下の図の現象や化学反応は、圧力が印加されている状態では同時かつ連続的に起きる。
- (b) デバイスのデザイン (断面図)。多数の流路が集積する円形状ガラスフィルターの周縁部をゴムパッキンでシールし、ホルダー内に組み込み、メッシュ電極で挟み込んだ構造。

集積流路を作製するには、半導体微細加工技術の一種であるフォトリソグラフィ法¹⁹⁾を用いるのが一般的です。しかし、2次元的な流路作製法では流路数に限界があり、効率化は難しく、また3次元的に流路を多数作製するのは技術的に難しい上、圧力耐性も小さくなってしまいます。そこで、作製が容易で圧力耐性も高い粉末状のホウケイ酸ガラス¹⁹⁾ (粒径 16~40 マイクロメートル (μm, 1μm は 100 万分の 1 メートル)) を用いて、条件によってはガラスをさらに砕き、カーボン製鋳型に詰めて重りを載せて圧力をかけながら焼成し、ガラスフィルターとして作製する方法を考案しました (図 2a-e)。

フィルター焼成の条件としては、680℃から 720℃まで 10℃ずつ焼成温度を変え、それぞれの焼成時間は 2 時間としました。これらの条件ではいずれもフィルターが作製できましたが、680、690℃で作製したものはやや壊れやすくなりました。また、焼成後のガラスフィルター表面の電子顕微鏡写真から、710、720℃ではやや粉末が溶けていることが観察されました (図 2f)。水銀ポロシメトリ法²⁰⁾で細孔径分布を調べたところ、焼成温度にかかわらず、平均細孔径は約 20μm で一定でしたが、高温ほど流路が一部溶けてつぶれていることが分かりました。

さらに、この粉末を乳鉢ですりつぶし、そのすりつぶし時間を 0、5、10、20、30、40 分として、頑強で、かつ流路がそれほどつぶれない 700℃の温度条件でフィルター焼成し、表面を電子顕微鏡で観察したところ、すりつぶし時間が長くなるほど粒子が細かくなりますが、焼成後も形状は保っていることが分かりました (図 2g)。細孔径分布を調べたところ、すりつぶし時間 0、5、10、20、30

報道解禁：日本時間 2022 年 10 月 20 日午後 6 時・21 日付朝刊

分に対して平均細孔径 20、12、8、5、1 μm となり、40 分ではピークはほとんど確認できず、粒子が細くなるほど細孔はつぶれることが確認できました。

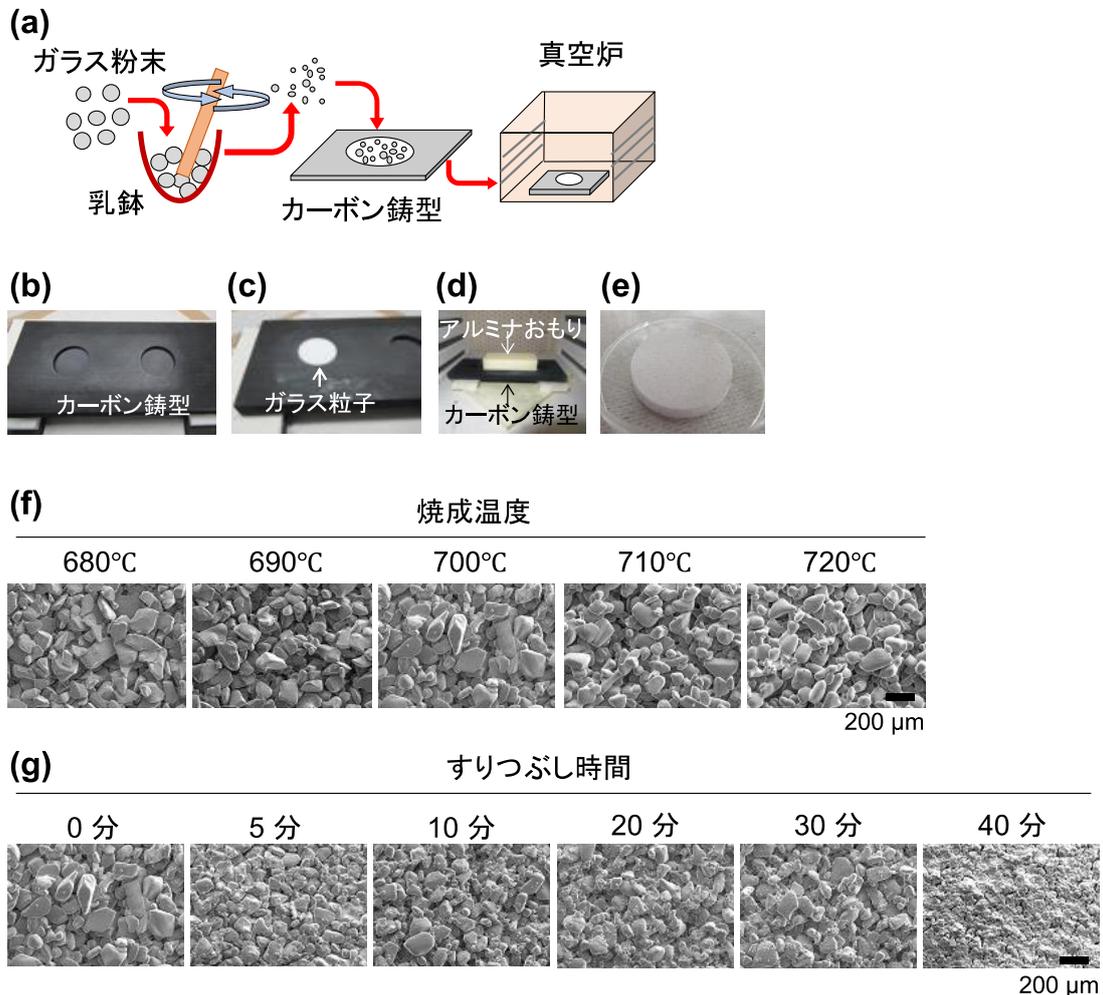


図 2 ガラスフィルターの作製と構造解析

- (a) 微細ガラスフィルターの作製方法。粉末状のホウケイ酸ガラスをそのまま、あるいは乳鉢で砕いたものを、カーボン製鑄型に詰めて重りを載せて圧力をかけながら真空炉で焼成する。
- (b) ガラスフィルター焼成成型用のカーボン製鑄型。穴の直径は 2cm、深さは 3mm。
- (c) (b)にガラス粉末を詰めた状態。
- (d) ガラス粉末を詰めたカーボン製鑄型の上にアルミナ（酸化アルミニウム）の重りを置き、炉に入れた状態。
- (e) 炉で焼成後、鑄型から外したガラスフィルター。
- (f) 680～720 $^{\circ}\text{C}$ で焼成したガラスフィルター表面の電子顕微鏡写真。
- (g) 0～40 分のガラス粉末すりつぶし条件で作製した、ガラスフィルター表面の電子顕微鏡写真（焼成温度はいずれも 700 $^{\circ}\text{C}$ ）。

次に、各種条件で作製したガラスフィルターに実際に水を流し、電力を測定しました。PC 制御で荷重を制御し、ピストンを往復させることで水を循環させるシステムを構築し（図 3a）、作製したガラスフィルターを組み込んだ発電機をセットしました（図 3b、c）。これを用いて、発電機に流速 20mm/s で水を流した

ところ、水が流れている間発電が持続し、これを何度も繰り返すことができました（図 3d）。繰り返すと少し電圧が下がっているのは、同じ水を繰り返し使ったことによる汚れのためと考えられますが、大きな変化はなく、フィルターが壊れることもありませんでした。

このシステムで各温度、すりつぶし時間条件で作製したフィルターを用いて水を流したところ、流速に比例して電圧も大きくなることが分かりました（図 3e、g）。温度別でみると、焼成温度 680~700°C ではほとんど電圧に変化がありませんでしたが、710~720°C では電圧はかなり小さくなりました。これは前項での実験でも見られたように、高温で流路が一部溶けてふさがっているためと考えられます（図 3f）。一方電流は、外部のコンデンサに電荷がたまる速度から逆算して測定したところ 700°C がピークになり、電圧と電流の積で表される電力も同様の傾向となりました。これは 680~700°C では流路がつぶれない範囲で小さくなり、発電効率が上がっているためだと考えられます。すりつぶし時間別でみると、電圧・電流・電力ともにすりつぶし時間 5 分がピークとなりました（図 3g）。これも 5 分までは流路が小さくなり効率が上がるものの、それ以上すりつぶすと流路がつぶれてしまうためと考えられます。

以上より、定速（50mm/s）で水を流した場合、最も電力が大きくなるのは焼成温度 700°C、すりつぶし時間 5 分（平均細孔径 12 μ m）のフィルター（電圧 27V、電流 0.14mA、電力 0.8mW）で、発電効率は 0.021% となりました。

報道解禁：日本時間 2022 年 10 月 20 日午後 6 時・21 日付朝刊

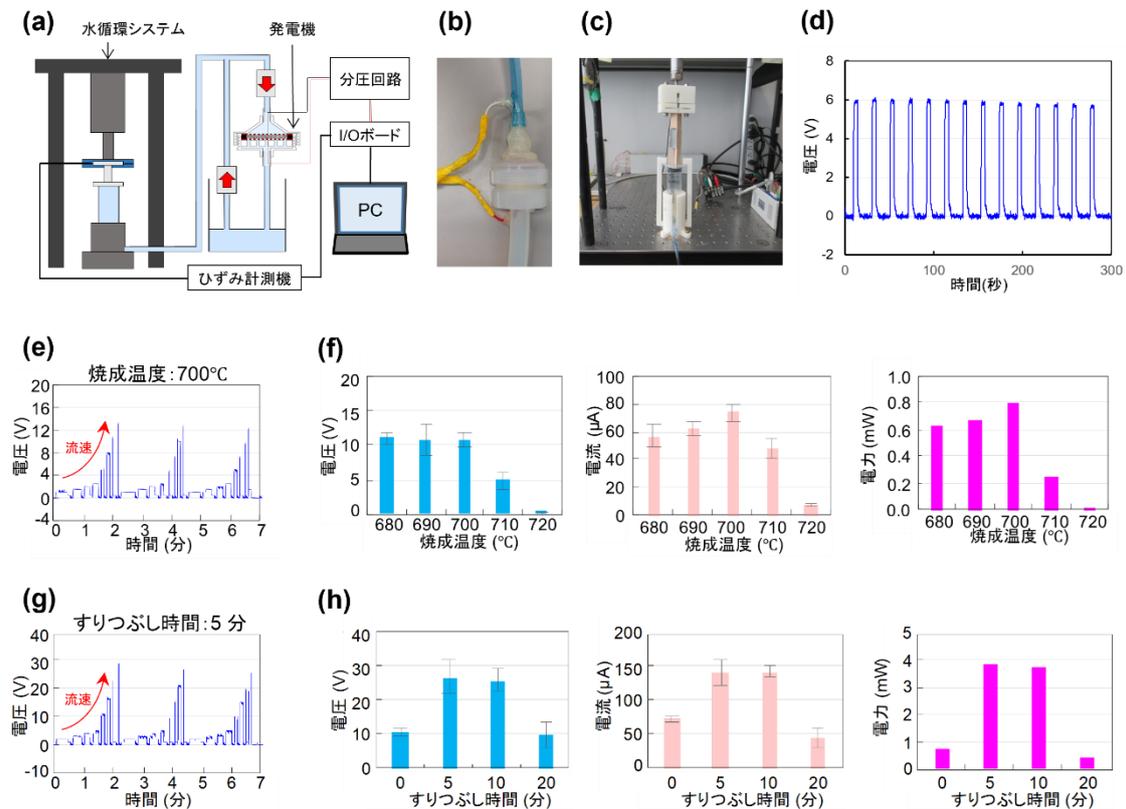


図3 発電の実証実験とガラスフィルターの評価

- (a) 発電実証・評価システムのセットアップ。PC 制御の機械でピストンを定速で往復させ、発電機には逆止弁で常に一定の方向に水が流れるようにし、その前後の電圧を測定した。ピストンにかかる負荷は歪み測定器で計測し、漏れがないか確認しながら測定を行った。
- (b) 試作したガラスフィルター・電極を搭載した発電機。
- (c) シリンジをセットした水循環システム。
- (d) 700°C 焼成、5 分すりつぶし条件で作製したガラスフィルターを用いて、20mm/s で水を繰り返し流した際の電圧測定結果。繰り返しによりわずかに電圧の低下が見られた。
- (e) 700°C の焼成温度条件で作製したガラスフィルターを用いて、流速 4、6、8、10、20、30、40、50mm/s で順次水を流し、これを 3 回繰り返した際の電圧測定結果。
- (f) 各焼成温度条件での電圧・電流・電力測定結果のまとめ。680~700°C ではほぼ違いはないが、710~720°C では低下が見られた。
- (g) すりつぶし時間 5 分で作製したガラスフィルターを用いて、流速 4、6、8、10、20、30、40、50mm/s で順次水を流し、これを 3 回繰り返した際の電圧測定結果。
- (h) 各すりつぶし条件での電圧・電流・電力測定結果のまとめ。いずれもすりつぶし時間 5 分がピークとなった。

以上の基礎的検証結果に基づき、環境発電の実証を兼ねて、コンデンサを用いた蓄電回路を構築し、足踏みによるエネルギーで発電させ、各種電子デバイスを駆動させる実証実験を行いました(図 4a)。足踏みによって発電機に水を流すため、3D プリンターでプレスユニットを作製しました(図 4b、c)。これを用いて、700°C、各すりつぶし時間で作製したガラスフィルターに 60kg の体重荷重による 0.8 メガパスカル (MPa、1MPa は 100 万パスカル) の定圧で 50mL の水を流したところ、電圧は前項の実験(図 3h 左)に近い発生傾向となりましたが(図

4d 左)、定速でないため、発電持続時間には大きな違いがあり、目の細かいフィルターほど長くなりました(図 4d 右から 2 番目)。その結果、電力ではすりつぶし時間 5 分と 10 分のものでほとんど差がありませんでしたが、電力に発電持続時間をかけたエネルギー量では 10 分(平均細孔径 $8\mu\text{m}$)のものが最大となりました(図 4d 右)、発電性能は電圧 18V、電流 0.26mA、電力 4.8mW で持続時間 1.7 秒、エネルギーは 6.8mJ、発電効率は 0.017%となりました。

このフィルターを用いて、3 種類のアプリケーション実証実験を行いました。LED 点灯実験では、発電機に小型の LED (3mm、3.3V 以上で点灯)を直接つないだところ、プレス中は点灯していることが分かりました(図 4e)。小型のファンを回転させる実験では、50 回プレスを繰り返してコンデンサに 5.2V 蓄電し、スイッチを入れた瞬間 1 秒近く回転する様子が見られました(図 4f)。ワイヤレス通信実験は、コンデンサに 0.2V 以上の電圧がたまれば自動的にシグナルが送信機から 3m 離れた PC に送られるもので、2 回のプレス後に、モニター上で受信を確認できました(図 4g)。

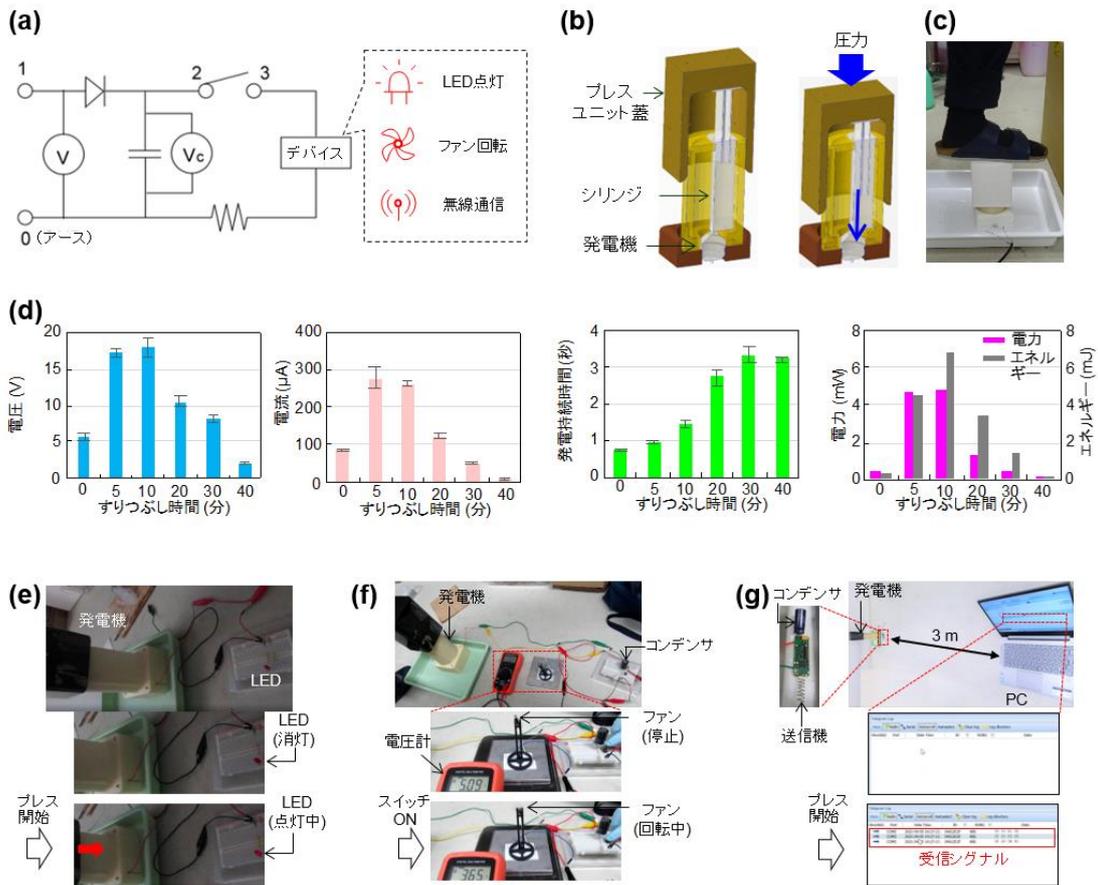


図4 プレスユニットを用いた足踏み発電とアプリケーション実証

- (a) アプリケーション実証のために今回用いた発電機とコンデンサ、デバイスを含む回路図。発電機（電圧：V）はポート0と1の間に設置し、デバイス直接接続の場合はコンデンサなしでポート2と3を常時接続、コンデンサに蓄電する場合は蓄電後（コンデンサ電圧：Vc）にポート2と3を接続（スイッチオン）。
- (b) プレスユニットの構造と動作原理。
- (c) プレスユニットを足で踏んでいる様子。
- (d) 各すりつぶし条件での電圧、電流、発電持続時間、電力・エネルギー測定結果のまとめ。電力に発電持続時間をかけたエネルギー量では10分のものが最大となった。
- (e) LEDの直接点灯実験。上段は全体図、中・下段はプレス開始前とプレス中の発電機とLEDの様子。
- (f) ファン回転実験。上段は全体図、中・下段はスイッチONの前と後の、コンデンサにたまった電圧（Vc）の電圧計の表示数値とファンの様子。
- (g) ワイヤレス通信実験。上段は全体図、中・下段はプレス開始の前と後の、ソフト上の受信シグナルの表示モニターの様子。

今後の期待

今回開発した足踏み型の発電機の性能を、同じ機械的振動を用いた小型の環境発電機として圧電素子を用いたものと比較すると、電力や発電効率は同程度ですが、圧電素子の持続時間が0.1秒以下であるのに対し、足踏み型の発電機は1秒以上と長くゆっくりとした振動で、持続的な発電が可能になるという特長があります。

また、今回の発電方法はガラスの表面電位を利用してイオンをフィルタリングするものですが、同じ原理で違う材料を用いたもの（半導体や合金、木材など）と性能を比較すると、従来材料による数 mW 以下の起電力に対して、数 mW へと大きく向上しています。これはガラスを用いることで表面電位の高さや頑強性を兼ね備えているからだと考えられます。今回はプロトタイプとして比較的大型になっていますが、原理的にはさらに小さく、靴の中に仕込める程度のサイズにすることも可能です。

以上のことから、今回開発した発電機は、歩行中の電子デバイスの無電源駆動や椅子やベッドでの人の動きの検知などゆっくりした動きを効率的に用いた環境発電としての利用が効果的です。例えば、今回の実証実験でも示した、LED による暗い道での照明や、暑い場所でのファンを用いた空冷装置などが考えられます。そして IoT への応用では、歩行や椅子・ベッドでなどの人の動きを常にセンシング・通信してモニタリングするための健康管理デバイスなど、さまざまなシーンでの利用が期待できます。

論文情報

<タイトル>

A pressure driven electric energy generator exploiting a micro- to nano-scale glass porous filter with ion flow originating from water

<著者名>

Yo Tanaka, Satoshi Amaya, Shun-ichi Funano, Hisashi Sugawa, Wataru Nagafuchi, Yuri Ito, Yusufu Aishan, Xun Liu, Norihiro Kamamichi, Yaxiaer Yalikun

<雑誌>

Scientific Reports

<DOI>

10.1038/s41598-022-21069-8

補足説明

[1] IoT

モノがインターネット経由で通信することを意味する。今までインターネットにつながっていなかったモノをつなぐことで、計測データ、センサーデータ、制御データを交換し、見守りや介護、機械の故障や不具合に迅速に対応できるようになり、安全・安心な社会につながることを期待されている。IoT は Internet of Things の略。

[2] 環境発電

エネルギーハーベスティング (Energy Harvesting) ともいわれ、太陽光や室内光、振動、熱、電磁波などのエネルギーを電力に変換する発電方法。電池の交換が不要なので環境に優しく、一度設置すれば半永久的に使用できる。多数のセンサーの電源として期待されている。

[3] 電磁誘導

磁束が変動する環境下に存在する導体に電位差が生じる現象であり、発電機、誘導電

動機、変圧器など多くの電気機器の動作原理となっている。この動作原理を利用した身近な例としては、自転車の車輪回転による発電とライト点灯が挙げられ、やや大掛かりだが人体に装着することで歩行から発電している例もある。

[4] 圧電素子

圧電体に加えられた力を電圧に変換する、あるいは電圧を力に変換する、圧電効果を利用した素子で piezo 素子ともいわれる。センサーのほか、スピーカー、イヤホン、着火装置などさまざまな所で用いられる。小型化も容易で、靴に仕込んで発電させている例もある。

[5] フォトリソグラフィ法

感光性の物質を塗布した物質の表面を、パターン状に露光することで、露光された部分と露光されていない部分からなるパターンを生成する技術。半導体加工の基盤となる技術で集積回路や微細流路の作製などに用いられる。

[6] ホウケイ酸ガラス

ホウ酸を混ぜて熔融し、軟化点や硬度を高めたガラス。耐熱性・耐薬品性に優れており、理化学用途では最も一般的に用いられているガラス。

[7] 水銀ポロシメトリー法

測定したい物体の細孔に水銀を浸入させるために圧力を加え、連続的に増加させながら、細孔への水銀侵入量を検出し、試料表面の細孔の大きさとその体積を測定して細孔分布を求める方法。細孔容積変化がピークとなる径が平均細孔径となる。数百 μm ~ 数 nm まで幅広い範囲の細孔径分布を測定可能。

共同研究グループ

理化学研究所

生命機能科学研究センター 集積バイオデバイス研究チーム

チームリーダー（研究当時） 田中 陽（タナカ・ヨウ）

客員研究員 ヤリクン・ヤシャイラ（Yalikus Yaxiaer）

（奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科物質創成科学領域 生体プロセス工学研究室 准教授）

技師（研究当時） 天谷 諭（アマヤ・サトシ）

大学院生リサーチ・アソシエイト（研究当時）

アイサン・ユスフ（Aishan Yusufu）

客員研究員 船野俊一（フナノ・シュンイチ）

研究パートタイマー 伊藤友理（イトウ・ユリ）

東京電機大学

未来科学部 ロボット・メカトロニクス学科

教授 釜道紀浩（カマミチ・ノリヒロ）

大学院生（研究当時） 須川 尚（スガワ・ヒサシ）

大学院生（研究当時） 永淵 亘（ナガフチ・ワタル）

奈良先端科学技術大学院大学

先端科学技術研究科物質創成科学領域 生体プロセス工学研究室

大学院生 リュウ・シュン（Liu Xun）

研究支援

本研究は、理化学研究所運営費交付金（生命機能科学研究）により実施し、日本学術振興会（JSPS）科学研究費助成事業新学術領域研究（研究領域提案型）「自励振動ゲルを用いたソフトマイクロポンプ（研究代表者：田中陽）」、東電記念財団研究助成（基礎研究）「極限集積ガラスナノ流路を用いた超高効率な圧力駆動型環境発電機」、立石科学技術振興財団研究助成（A）「ガラスナノフィルターを用いた人体動作融和型発電機の開発」などによる助成を受けて行われました。また、細孔径分布測定は大阪産業技術研究所森之宮センターにて行っていただきました。

発表者・機関窓口

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせください。

理化学研究所

生命機能科学研究センター 集積バイオデバイス研究チーム

チームリーダー（研究当時） 田中 陽（タナカ・ヨウ）

客員研究員 ヤリクン・ヤシャイラ（Yalikun Yaxiaer）

（奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科物質創成科学領域 生体プロセス工学研究室 准教授）

東京電機大学

未来科学部 ロボット・メカトロニクス学科

教授 釜道紀浩（カマミチ・ノリヒロ）

<生命機能科学研究センターに関する問い合わせ>

理化学研究所 生命機能科学研究センター センター長室 報道担当

山岸 敦 （ヤマギシ・アツシ）

<機関窓口>

理化学研究所 広報室 報道担当

Tel: 050-3495-0247

Email: ex-press [at] ml.riken.jp

東京電機大学 総務部 企画広報担当

Email: keiei [at] jim.dendai.ac.jp

奈良先端科学技術大学院大学 企画・教育部企画総務課 渉外企画係

Email: s-kikaku [at] ad.naist.jp

※上記の[at]は@に置き換えてください。