

微細ガラスフィルターを用いた圧力駆動型環境発電機

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（研究当時所属）
日本サムスン(株)（執筆時所属）

田中 陽

A pressure driven energy harvesting generator using a porous glass filter

Yo Tanaka

Laboratory for Integrated Biodevice, Center for Biosystems Dynamics Research (BDR), RIKEN (Research conducted address)
Samsung Japan Corporation (Present address)

1. はじめに

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る。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る。振動から電気を得るための方法としては、電磁誘導や圧電素子を用いたものが良く知られているが、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る。そこで筆者らは水とガラス流路壁の電気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られる。ガラスは筆者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った¹⁾のでその結果について解説する。

2. 原理

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ある。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る。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^- は入りにくいことによりイオンの分離が生じる。

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、入口では酸素が生じ、電流が流れる (図 1a)。このとき生じる水素ガス (H_2) 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

〒230-0027
神奈川県横浜市鶴見区菅沢町 2-7
TEL 045-510-3340
E-mail : yotanaka1980@gmail.com

ば繰り返しの発電が可能である。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る。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た (図 1b)。

3. 発電機の作製

集積流路を作製するには、半導体微細加工技

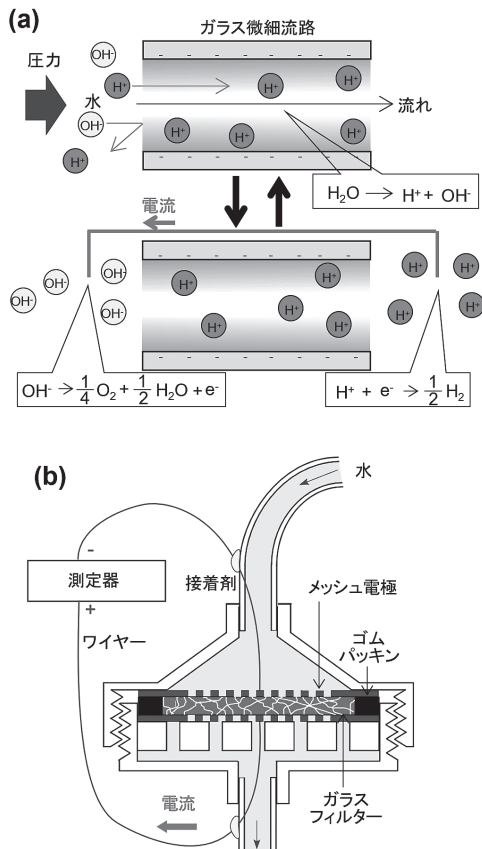


図 1 微細ガラスフィルターを用いた発電機の原理とデザイン

- (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。上下の図の現象や化学反応は、圧力印加状態では同時かつ連続的に発生。
- (b) 微細ガラスフィルターを用いた発電機のデザイン。

術の一種であるフォトリソグラフィ法を用いるのが一般的である。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ふ。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 (粒径 16 ~ 40 μm) を用いて、条件によってはガラスをさらに砕き、カーボン製鑄型に詰めて重りを乗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た (図 2a-e)。

フィルター焼成の条件としては、680 °C から 720 °C まで 10 °C ずつ焼成温度を変え、それぞれ

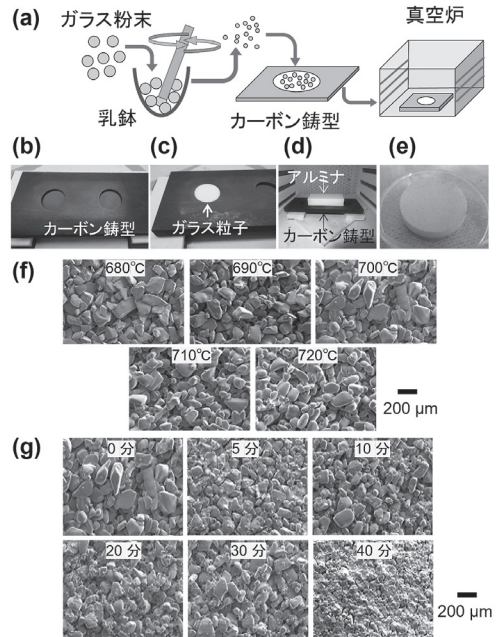


図 2 ガラスフィルターの作製と構造解析

- (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おもりを乗せて圧力をかけながら真空炉で焼成。
- (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 2 cm、深さは 3 mm。
- (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鑄型の上にアルミナのおもりを置き、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 °C で焼成したガラスフィルター表面の電子線顕微鏡写真。
- (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線顕微鏡写真 (焼成温度はいずれも 700 °C)

の焼成時間は2時間とした。これらの条件ではいずれもフィルターが作製できたが、680、690℃で作製したものはやや壊れやすくなった。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た(図2f)。圧力をかけたときに細孔に入る水流量から平均流路半径を測る水銀ポロシメトリー法で細孔径分布を調べたところ、焼成温度にかかわらず、平均半径は約20 μmで一定であったが、高温ほど流路が一部溶けてつぶれていることが分かった。さらに、この粉末を乳鉢ですりつぶし、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℃でフィルター焼

成し、表面の電子顕微鏡観察したところ、すりつぶし時間が長くなるほど粒子が細くなるが、焼成後も形状は保っていることが分かった(図2g)。すりつぶし時間0、5、10、20、30分に対して平均径20、12、8、5、1 μmとなり、40分ではピークは確認できず、粒子が細くなるほど細孔はつぶれることが確認できた。

4. 発電機の原理検証と最適化

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

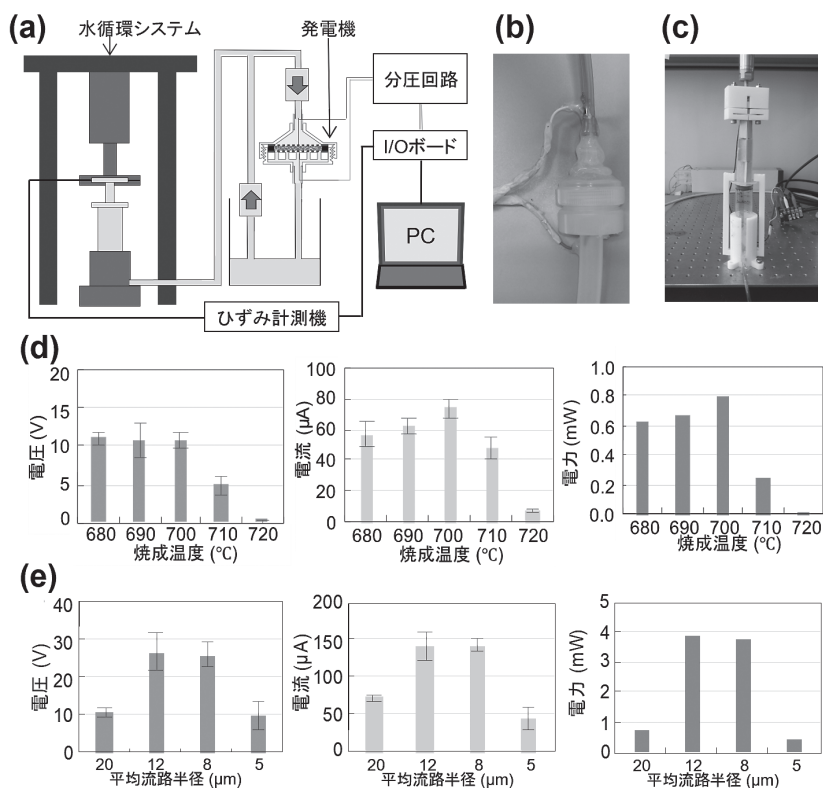


図3 発電の実証実験とガラスフィルターの評価実験

- (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。ピストンにかかる負荷は歪み測定器で計測。
- (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) 各焼成温度条件で50 mm/sで水を流したときの電圧・電流・電力測定結果まとめ。
- (e) 各平均流路半径条件で50 mm/sで水を流したときの電圧・電流・電力測定結果まとめ。

セットした (図 3b, c)。これを用いて、発電機に流速 20 mm/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た。繰り返すと少し電圧が下がってくることも分かったが、これ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るが、大きな変化はなく、フィルターが壊れることもなかった。このシステムで各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った。温度別では、焼成温度 680 ~ 700 °C ではほとんど電圧に変化がなかったが、710 ~ 720 °C では電圧は小さくなった (図 3d)。これは前項実験でもみられたように、高温で流路が一部溶けて塞がっているためと考えられる。一方電流は、外部コンデンサへの蓄電速度から逆算して測定したところ 700 °C がピークになり、電圧と電流の積である電力も同様の傾向となった。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と考えられる。

すりつぶし時間 (平均流路半径) 別でみると、電圧・電流・電力とも半径 12 μm がピークとなった (図 3e)。これについても、すりつぶし時間 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る。

以上より定速 (50 mm/s) で水を流した場合、最も発電性能が良くなるのは焼成温度 700 °C、すりつぶし時間 5 分 (平均流路半径 12 μm) のフィルター (電圧 27 V, 電流 0.14 mA, 電力 0.8 mW) で発電効率は 0.021 % となった。

5. 人の動作による発電実証とアプリケーション

図 3a のようなアプリケーション実証を目的として、足踏みによって発電機に水を流すため、3D プリンターを用いて簡易的なプレスユニットを作製した (図 4b, c)。足踏みによる力を確実かつ効率的にシリンジと流体に伝えるための

装置である。これを使用して、700 °C、各すりつぶし時間で作製したガラスフィルターに 60 kg の体重荷重による 0.8 MPa の定圧で 50 mL の水を流したところ、電圧は前項の実験 (図 3e 左) に近い発生傾向となったが定速ではないため、持続時間には大きな違いがあった。目の細かいフィルターほど抵抗が大きく、時間が長くなった (図 4d 左下)。その結果、電力では半径 12 μm と 8 μm のものとはほとんど差がなかったが、持続時間を掛けたエネルギー量として比較してみると、8 μm のものが最大値となった (図 4d 右下)。発電性能は電圧 18 V, 電流 0.26 mA, 電力 4.8 mW で持続時間 1.7 秒、エネルギーは 6.8 mJ, 発電効率は 0.017 % という結果になった。

このガラスフィルターを用いて、また環境発電の実証実験も兼ねて、3 種類 (LED 点灯, ファン回転, 無線通信) のアプリケーション実証実験を行った。LED 点灯実験では、発電機に小型の LED (3 mm, 3.3 V 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った。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 5.2 V 蓄電した後にスイッチを入れるとその瞬間 1 秒近く回転する様子が見られた。ワイヤレス通信実験は、コンデンサに 0.2 V 以上の電圧がたまれば自動的にシグナルが送信機から 3 m 離れた PC にシグナルが送られるもので、今回は 2 回のプレス後に、モニター上で 3 回の受信を確認できた。これらの結果から、足踏みによる発電で電子デバイスを駆動できることが実証できたといえる。

6. おわりに

今回開発した足踏み型の発電機の性能を、同じ機械的な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はあるが、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した振動で、

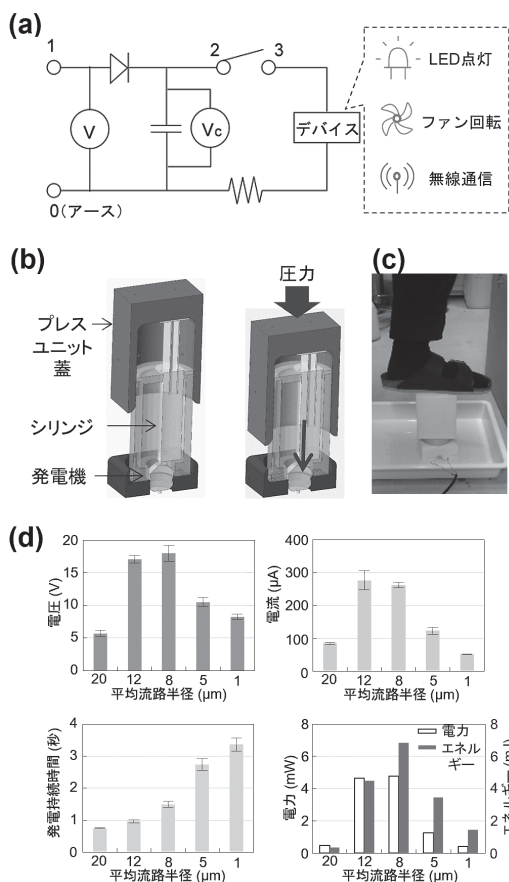


図4 プレスユニットを用いた足踏み発電とアプリケーション実証

- (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) 焼成温度700℃、各流路半径のガラスフィルターを用いた足踏みによる電圧・電流・持続時間・電力・エネルギー測定結果のまとめ。

持続的な発電が可能となるという特徴があるといえる。

また、今回の発電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というものであるが、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μW以下の起電力に対して、数mWへと大きく向上している。これはガラスを

用いることで表面電位の高さと頑強性を兼ね備えているからだと考えられる。今回はプロトタイプとして比較的大型なものにはなっているが、原理的にはさらに小さく、将来的に靴の中に仕込める程度のサイズにすることも可能である。

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あるといえる。例えば、今回の実証実験でも示したように、LEDによる暗い道での照明といった用途や、ファンを用いた暑い場所での空冷装置などが考えられるであろう。そしてIoTへの応用としては、歩行や椅子・ベッドでなどの人（とくに患者）の動きや姿勢などを常にセンシングおよび通信してモニタリングするための健康管理デバイスとしてなど、さまざまなシーンでの利用が期待できる。以上のように本研究では、水とガラス微細流路の電気相互作用を利用し、人の動きに適した新環境発電機を創成した。これにより、人の身近なところで安定な電源供給を可能とし、最近研究開発が進むウェアラブルデバイスやインプラントデバイスを有効に使うための重要な手段となることが期待される。

参考文献

1) Y. Tanaka, S. Amaya, S. Funano, H. Sugawa, W. Nagafuchi, Y. Ito, Y. Aishan, X. Liu, N. Kamamichi, Y. Yalikun, "A pressure driven electric energy generator exploiting a micro- to nano-scale glass porous filter with ion flow originating from water", *Sci. Rep.*, 12, 16827 (2022)