

[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

Development of glass nanofilter based power generator using energy from human behavior

2211020



研究代表者

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

田 中

陽

[研究の目的]

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う課題がある。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。ガラスは代表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。

[研究の内容, 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)。

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ー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

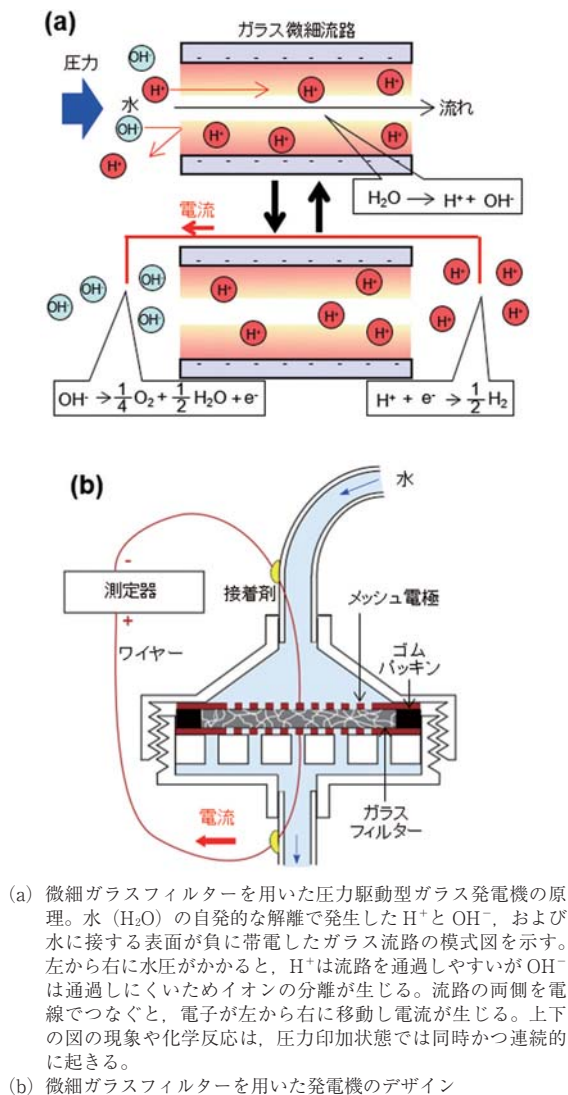
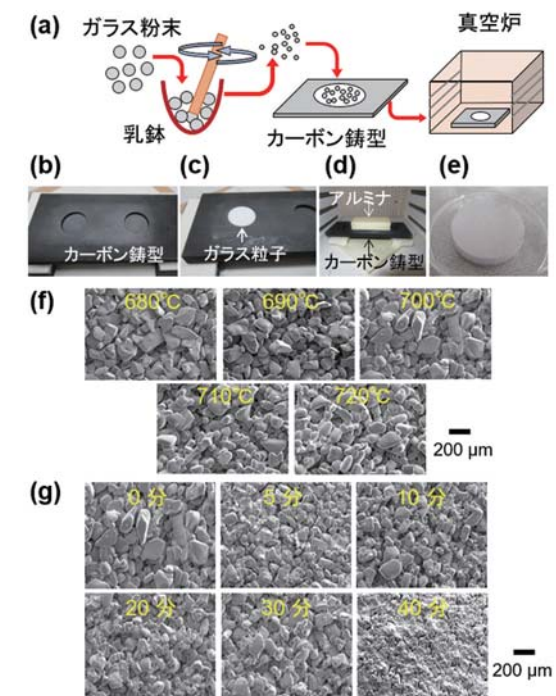


図1 微細ガラスフィルターを用いた発電機の原理とデザイン

う。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 $16\sim 40\ \mu\text{m}$ ）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、 $680\ ^\circ\text{C}$ から $720\ ^\circ\text{C}$ まで $10\ ^\circ\text{C}$ ずつ焼成温度を変え、それぞれの焼成時間は 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 、 $690\ ^\circ\text{C}$ 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 、 $720\ ^\circ\text{C}$ ではやや粉末が溶



- (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乗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 2 cm、深さは 3 mm
- (c) 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（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) $680\sim 720\ ^\circ\text{C}$ 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 $700\ ^\circ\text{C}$ ）

図2 ガラスフィルターの作製と構造解析

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銀量から細孔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、平均細孔系は約 $20\ \mu\text{m}$ 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、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 $700\ ^\circ\text{C}$ の温度条件でフィルター焼成し、表面の電子顕微鏡観察をしたところ、すりつぶし時間が長くなるほど粒子が細くなるが、焼成後も形状は保てていることが分かった（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 分に対して平均径 20、12、8、5、 $1\ \mu\text{m}$ となり、40 分ではピークはほとんど確認

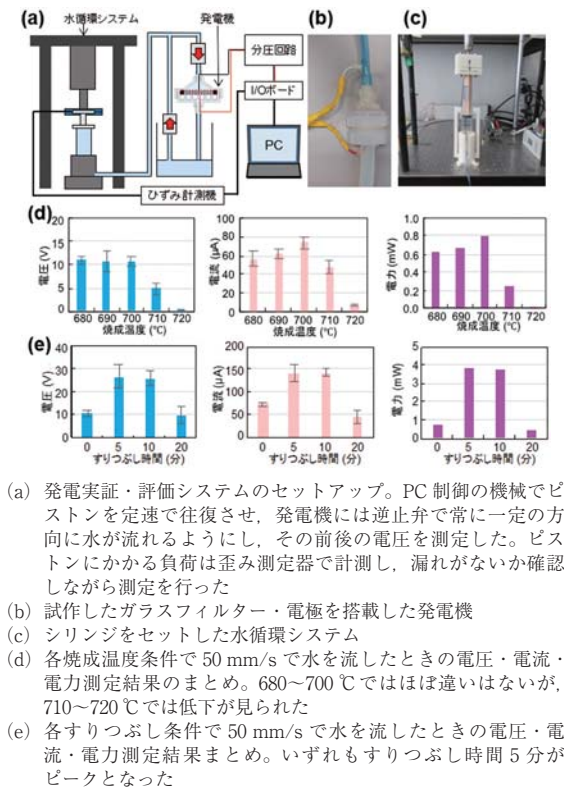


図3 発電の実証実験とガラスフィルターの評価実験

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。

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った。温度別でみると、焼成温度680～700℃ではほとんど電圧に変化がなかったが、710～720℃では電圧はかなり小さくなった

（図3d）。これは前項での実験でもみられたように、高温で流路が一部溶けてふさがっているためと考えらる。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℃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った。これは680～700℃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。

すりつぶし時間別でみると、電圧・電流・電力ともすりつぶし時間5分がピークとなった（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℃、すりつぶし時間5分（平均細孔径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。

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った（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に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℃、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、電力ではすりつぶし時間5分と10分のものとで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

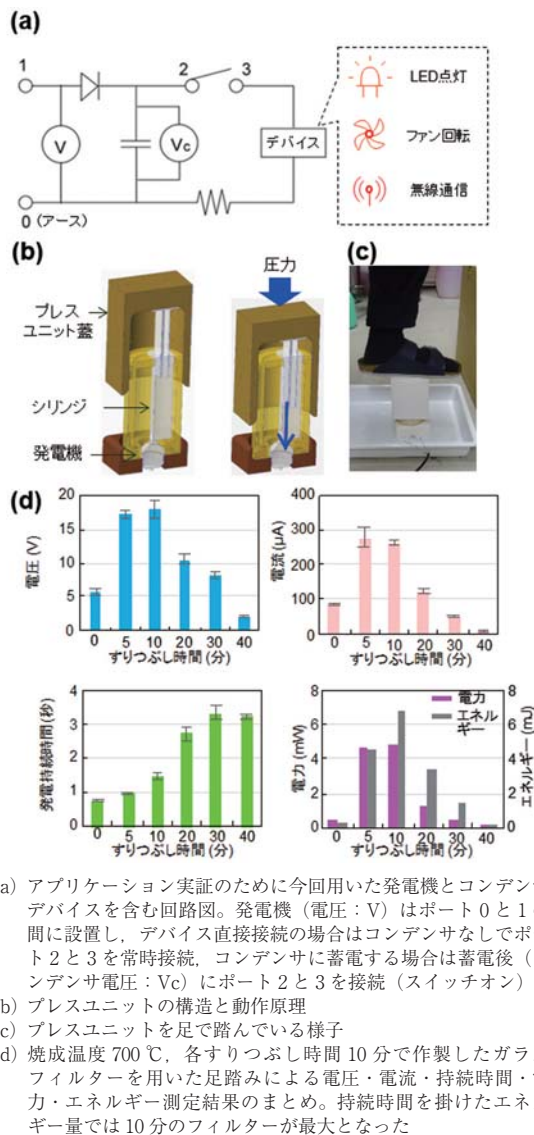


図4 プレスユニットを用いた足踏み発電とアプリケーション実証

して比較してみると、すりつぶし時間 10 分（平均細孔径 $8\mu\text{m}$ ）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。

[今後の研究の方向、課題]

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、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製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ないが、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、人は自然な動作で機械を使えて機械は電源を安定確

保できメンテナンス不要、という人と機械が完全融和した社会を実現できる可能性を示したものである。

[成果の発表, 論文等]

- ・ Yo Tanaka, Satoshi Amaya, Shun-ichi Funano, Hisashi Sugawa, Wataru Nagafuchi, Yuri Ito, Yusufu Aishan, Xun Liu, Norihiro Kamamichi, Yaxiaer Yalikun, "A pressure driven electric energy generator exploiting a micro- to nano-scale glass porous filter with ion flow originating from water", Scientific Reports, 12, 16827 (2022)