

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20012

研究課題名（和文）摩擦帯電を用いた貼付型環境発電デバイスの開発

研究課題名（英文）Development of triboelectric based energy harvester for wearable applications

研究代表者

松永 正広（Matsunaga, Masahiro）

名古屋大学・未来材料・システム研究所・助教

研究者番号：10850125

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：カーボンナノチューブを用いた透明で柔軟な摩擦帯電型エネルギーハーベスターに関する研究を遂行した。まず必要となる出力特性評価システムを構築した。その後、ウェアラブルデバイスへの応用に向け、デバイスの厚さを維持しつつ水平方向への振動に対し有効なデバイス構造の提案とその出力改善方法について検討し、従来手法より水平方向の振動に対し高出力を得た。また、簡便な間欠動作回路の検討も行い、腕時計の駆動を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

IoT社会の発展に伴い増加する各種センサ需要に対し、その駆動電源が重要な課題となっている。課題解決の一つとしてエネルギーハーベ스팅が期待されている。本研究は、エネルギーハーベ스팅の一つである摩擦帯電型の振動発電技術に着目し、その構造や出力改善を目指したものであり、将来的なIoT社会、省エネルギー社会への貢献につながるものである。

研究成果の概要（英文）：Transparent and flexible triboelectric energy harvesters using carbon nanotubes were studied. First, we established a measurement system to evaluate the output characteristics of the device. Then, toward the application to wearable devices, we proposed a device structure that is effective in horizontal vibration while maintaining the thickness of the device and investigated methods to improve the output power, and obtained higher output power for horizontal vibration than conventional structure. We also studied a simple intermittent operation circuit and demonstrated driving a wristwatch.

研究分野：ナノカーボン

キーワード：環境発電 カarbonナノチューブ

1. 研究開始当初の背景

IoT（モノのインターネット）社会の発展にしたいが、身の回りの至る所にセンサシステムが設置されつつあり、その数は年々増加の一途を辿る。センサシステムの需要増により、重要な課題となるのが、それらを駆動するための電源である。エネルギーハーベスティングは、それらの電源代替あるいは長寿命化の技術として期待されている。本研究で対象とした摩擦帯電型ナノ発電機(TENG)は、接触帯電と静電誘導により機械的振動を電気エネルギーに変換する振動発電の一種である。人体動作のようなランダムで低周波の振動に対して発電可能であり、柔軟な材料を用いた TENG は将来的なウェアラブルデバイスへの電源技術としての応用が期待されている。ウェアラブルデバイスへの応用では薄型化が一つのキーワードとなる。薄型化に適した構造であると知られている Single-electrode 構造がよく研究されているが、デバイス表面に対し垂直方向の振動には高い出力が得られる一方、水平方向への振動に対する効率は低い。

2. 研究の目的

本研究では、水平方向に対する出力向上を目指したデバイス構造の提案とその出力改善を目的に研究を進める。まずは、エレクトロメータ等を用いた出力特性評価手法を構築する。その後、水平方向への振動に有効と思われるデバイス構造を作製、評価を行い、有効な表面改質手法の検討を行う。

3. 研究の方法

(1) 出力特性評価システムの構築

TENG の出力特性評価には、規則的な振動印加と TENG の有する高い内部インピーダンスに適応する計測系の構築が必須である。TENG は、数十 Mohm といった高い内部インピーダンスを有するため、オシロスコープやマルチメータでの測定は難しい。そこでエレクトロメータや電流アンプを導入した測定系を構築する。

(2) 水平方向への振動に有効なデバイス構造の検討

摩擦帯電型ナノ発電機のウェアラブルデバイス応用では、薄型化に適していると知られる Single-electrode 構造を用いたデバイスがよく研究されているが、水平方向への振動に対する発電効率は低い。そこで、面内に電極を配置した構造を提案することで水平方向への振動に対する出力を改善する構造を提案する。

(3) 出力改善に向けた表面修飾手法の検討

摩擦帯電型ナノ発電機では、接触帯電により生じる電荷量はその出力に大きく寄与する。そこで表面修飾に着目し、デバイス表面を正または負に帯電する傾向を高めることで接触帯電により生じる電荷量を増加させ、出力改善を目指す。

4. 研究成果

(1) 摩擦帯電型ナノ発電機の出力特性評価システムの構築

振動印加には TENG の出力特性評価として一般的となりつつある計測系を構築した。リニアモーターにより規則的な振動を印加し、その際の印加圧力をフォースゲージにより計測するものである。これによりニトリル手袋を装着した手を用いて振動を印加していた従来方法に比べ、より正確な振動印加が可能となった。また、出力電圧の測定系においては、TENG の内部インピーダンスが数十 Mohm と高く、マルチメータ等では測定が難しいため、エレクトロメータや電流アンプを導入し、測定系を構築した。

(2) 面内 contact-separation 構造デバイスの提案

Single-electrode 構造の場合、垂直方向の振動には高い出力が得られる一方、水平方向の振動に対する効率は落ちる。Lateral-sliding 構造では、水平方向の振動により発電可能であるが、上下電極が必要であり、厚さが大きく皮膚貼付型には向かない。そこで、Contact-separation 構造を改良し、薄型で水平方向の振動で発電可能な面内 Contact-separation 構造を提案した。同一面内に2つの電極を配置し、電極直上の誘電体層表面に異なる表面修飾を施すことで、誘電体層表面に帯電傾向の異なる領域を形成した。これにより、垂直方向の振動のみならず、Lateral-sliding 構造のように、水平方向の振動によっても発電できることを確認した。本構造では、一方の領域をフッ素プラズマ処理を行い、もう一方の領域は気相蒸着法により APTES (3-Aminopropyl triethoxysilane) を成膜した。APTES は末端にアミノ基をもつ有機材料であり、正に帯電する傾向をもつ。作製した面内 Contact-separation 構造は Single-electrode 構造と同

様に薄型で透明性と柔軟性をもつ。水平方向の振動に対しても発電可能であり、さらに Single-electrode 構造より高い出力を得ることを確認した。

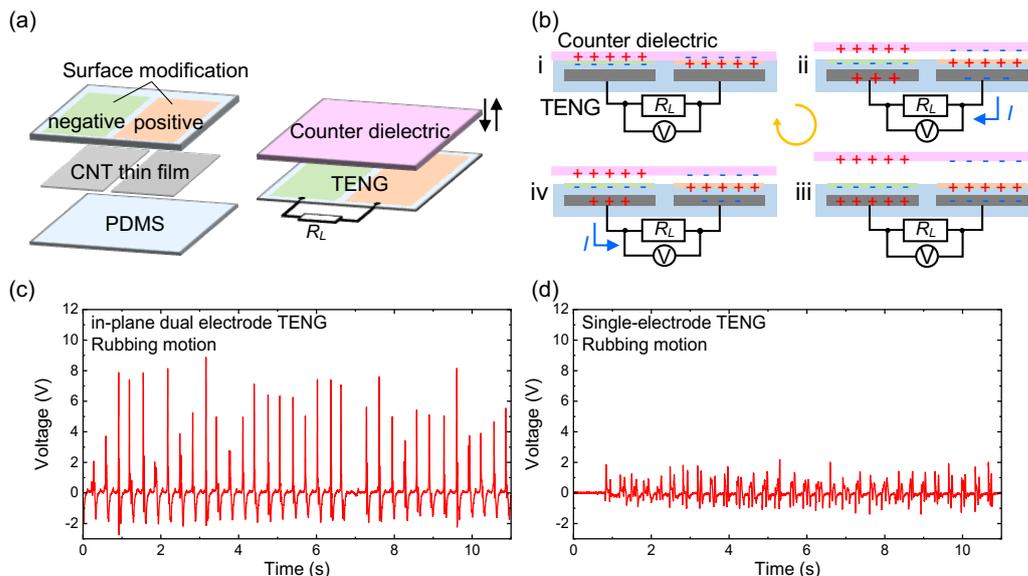


図1 面内 Contact-separation 構造 (a) デバイス構造の概要と (b) 動作 (c), (d) 面内 Contact-separation 構造と Single-electrode 構造における水平方向への振動印加に対する出力電圧の様子。

(3) 簡便な間欠動作回路の提案

TENG の出力はパルス的な交流電力であることに加え、低い周波数の振動により発電する場合は平均電力が小さい。センサデバイス等を駆動するためには、直流化することに加え、発電した電力を一定量まで蓄電し、間欠的にセンサデバイスに供給する間欠動作技術など、電源回路技術が必須である。研究当初の計画にはなかったが、TENG の動作実証のためには必須であるため、簡単に間欠動作を実現する手法として、プログラマブルユニジャンクショントランジスタ (PUT) を用いた回路を提案した。PUT は、三端子の半導体素子であり、ゲート電圧がしきい値を超えると、高抵抗状態から低抵抗状態にスイッチングし、その状態を保持する。TENG で発生したパルス電圧は、ブリッジダイオードにて整流され、コンデンサに充電される。抵抗 R_1 、 R_2 を通じて PUT にゲート電圧が印加されており、充電電圧がしきい値を超えると PUT は低抵抗状態に切り替わる。同時にコンデンサに蓄積された電荷が負荷へと供給される。コンデンサの電圧が低下すると、再び高抵抗状態に戻る。この繰り返しにより間欠動作を実現している。この間欠動作回路は半導体素子 1 個を用いた簡単な構成であり、コンデンサから負荷へのエネルギー伝達効率 は 89% と高いことがわかった。この間欠動作回路をフレキシブル PCB 上に構成し、腕時計のベルトに装着し、TENG による腕時計の駆動を実証した。拍手を 6 分ほど続けることで 100 μF のコンデンサを充電し、腕時計を 90 秒間駆動することが可能であった。

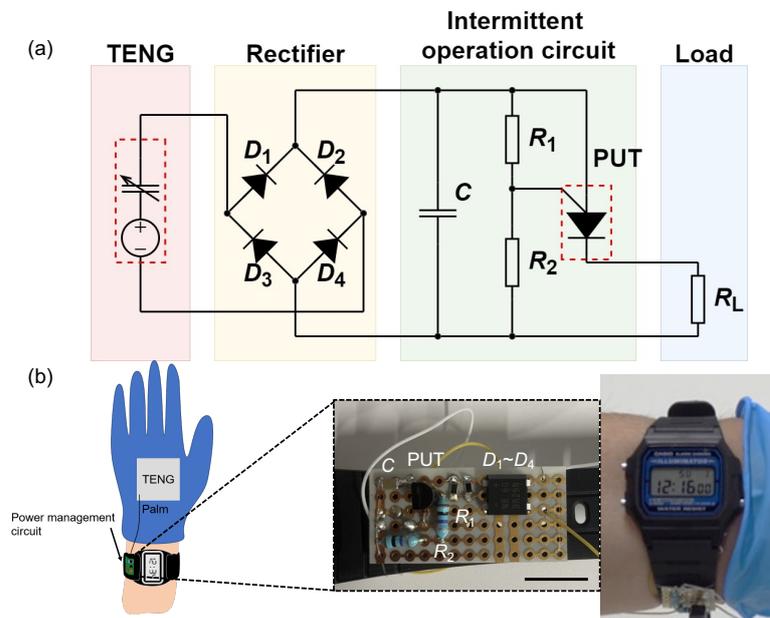


図2 間欠動作回路 (a) 間欠動作回路の概要と (b) 腕時計の駆動を実証した様子。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Matsunaga Masahiro, Hirotsu Jun, Ohno Yutaka	4. 巻 15
2. 論文標題 In-plane dual-electrode triboelectric nanogenerator based on differential surface functionalization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 27006
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/ac4d07	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 松永 正広、川口 敦司、大野 雄高	4. 巻 90
2. 論文標題 カーボンナノチューブを用いた柔軟性に富む摩擦帯電型エネルギーハーベスタ	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 応用物理	6. 最初と最後の頁 684 ~ 688
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11470/oubutsu.90.11_684	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chuang Chiashain, Matsunaga Masahiro, Wang Tian-Hsin, Roy Prathik, Ravindranath Rini, Ananthula Meenakshi, Aoki Nobuyuki	4. 巻 32
2. 論文標題 Investigation of plant leaf-derived graphene quantum dot clusters via magnetic force microscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 245704 ~ 245704
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6528/abeadb	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kawaguchi Atsushi, Uchiyama Haruki, Matsunaga Masahiro, Ohno Yutaka	4. 巻 14
2. 論文標題 Simple and highly efficient intermittent operation circuit for triboelectric nanogenerator toward wearable electronic applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 057001 ~ 057001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/abf405	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 M. Matsunaga, J. Hirotsu, and Y. Ohno
2. 発表標題 Carbon nanotube based, stretchable and transparent triboelectric nanogenerator
3. 学会等名 2021 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Matsunaga, J. Hirotsu, and Y. Ohno
2. 発表標題 Stretchable, transparent in-plane dual-electrode structured triboelectric nanogenerator
3. 学会等名 The International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Matsunaga, J. Hirotsu, and Y. Ohno
2. 発表標題 Output power enhancement of stretchable, transparent triboelectric nanogenerator by charge trapping layer
3. 学会等名 The 61st Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Kawaguchi, H. Uchiyama, M. Matsunaga, and Y. Ohno
2. 発表標題 Simple and highly efficient intermittent operation circuit for triboelectric nanogenerator toward self-powered wearable electronics
3. 学会等名 The International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松永正広, 川口敦司, 廣谷潤, 大野雄高
2. 発表標題 Carbon nanotube-based stretchable and transparent triboelectric nanogenerator toward wearable electronics
3. 学会等名 第31回日本MRS年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi Kawaguchi, Masahiro Matsunaga, Haruki Uchiyama, Jun Hirotsu, Yutaka Ohno
2. 発表標題 Simple and highly efficient intermittent operation circuit for triboelectric nanogenerator
3. 学会等名 The 59th Fullerenes Nanotubes and Graphene General Symposium
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------