

令和 6 年 5 月 17 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18807

研究課題名（和文）表面界面制御による雨滴発電の高効率化と雨でも発電する太陽電池への挑戦

研究課題名（英文）Challenge to improve the efficiency of a droplet-based electricity generator by controlling the surface and interface and its application to solar cells that generate electricity even in the rain

研究代表者

宇佐美 徳隆（Usami, Noritaka）

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：20262107

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、水滴発電デバイスの高効率化指針を明確化するとともに、雨でも発電可能な太陽光発電モジュールの動作実証を目的として研究を実施した。水滴発電デバイスの高性能化に対して、基板表面を加工することによる表面積の増加、表面電荷密度の高い非晶質フッ素樹脂の利用、強誘電体ナノ粒子との複合化、電極形状の改良による寄生容量の低減などの有用性を示した。表面電極を保護膜で覆うことにより、長期信頼性を担保するとともに、水滴と電極が直接接触しなくても発電可能であることを示した。さらに、太陽電池セル上部に、ガラス基板上に作製した水滴発電デバイスを設置し、水滴と太陽光の両方から発電できることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、水滴発電デバイスの高性能化研究を進め、得られたデバイスと太陽電池と融合することにより雨でも発電可能な太陽電池の動作を実証した。デバイスの動作原理の理解に基づき、材料選択、構造や形状パラメータの決定指針などを明確化したに学術的意義がある。また、雨でも発電できる太陽電池が実現できれば、天候の影響を緩和して電力を供給することができるため、新たな市場開拓や再生可能エネルギーの利用拡大に貢献できる。これは、地球温暖化や環境汚染などの問題に対処するための重要な一歩といえ、その社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：We aimed to clarify the guidelines for improving the efficiency of droplet-based electricity generators and to demonstrate the operation of solar modules capable of generating electricity even in the rain. We showed the effectiveness of increasing the surface area by processing the substrate surface, using high surface charge density amorphous fluororesin, composites with ferroelectric nanoparticles, and reducing parasitic capacitance by improving electrode shape to enhance the performance of droplet-based electricity generators. By covering the surface electrodes with a protective film, we demonstrated both long-term reliability and the ability to generate electricity even without direct contact between water droplets and electrodes. Furthermore, we successfully demonstrated the capability of generating electricity from both water droplets and sunlight by installing droplet-based electricity generators fabricated on a glass substrate on top of solar cells.

研究分野：電気・電子材料工学

キーワード：水滴発電 太陽電池

### 1. 研究開始当初の背景

脱炭素社会の早期実現に向け、太陽光発電の導入がますます進むことは、国際エネルギー機関によるあらゆるエネルギー導入シナリオで共通している。太陽光発電は発電時に温室効果ガスを発生しないという利点がある一方で、夜間はもちろん雨天時において出力が大きく低下することが課題となっている。

研究開発当初において、水滴の落下接触により 140V を超える高電圧を発生するデバイスが報告され、注目を集めた (Xu *et al.*, *Nature* **578**, 392, 2020)。このデバイスは、水滴が樹脂表面に接触し摩擦帯電する現象と、帯電した水滴が金属電極に接触した際の放電を利用している。我々は、独自に保有する太陽電池の高効率化技術の知見を援用することで水滴発電の高効率化が可能であり、さらに太陽電池セルとの融合により、雨でも発電可能な太陽電池モジュールの実現が可能と着想した。具体的には、太陽電池セルをカバーするガラスに水滴発電デバイスを実装したモジュールを作製することで、雨でも発電する太陽電池モジュールを実現することを目指した。

### 2. 研究の目的

本研究では、水滴発電デバイスの高効率化指針を明確化するとともに、雨でも発電可能な太陽光発電モジュールの動作実証と課題抽出を目的とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 水滴発電デバイスの基本構造

図 1(a)に水滴発電デバイスの基本構造を示す。ガラス基板の裏面電極、誘電体、表面電極の積層構造となっている。電極材料としては、金属、導電性酸化物や高分子などが用いられる。中間の誘電体材料は主として高分子材料であり、ラミネート、スピコート、スプレーなどの方法で作製される。表面電極は面積が小さく、等価電気回路ではスイッチの機能を担う。

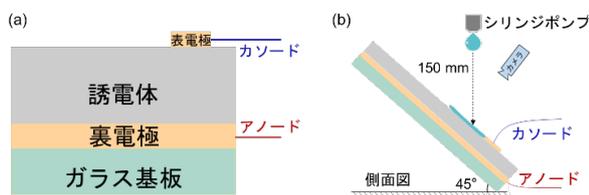


図 1 (a) 水滴発電デバイスの基本構造および (b) 性能評価用ステージの模式図

#### (2) 水滴発電デバイスの評価手法

水滴発電デバイスの表面や断面の形状は、光学顕微鏡、走査電子顕微鏡、レーザー顕微鏡を用いて調査した。水滴発電デバイスは、性能評価の標準化が進んでいない。そのため、水滴発電デバイスの出力性能を測定および比較するために、再現性良く一定の条件下で性能評価が可能な独自のシステムを構築した。図 1(b)に示すように、このシステムでは、水滴発電デバイスをステージに固定し、水滴の導電率、体積、落下高度およびステージの傾斜角を一定にして評価を実施できる。オシロスコープとピコアンメーターを併用し、電圧、電流、転移電荷量の経時変化を記録した。

### 4. 研究成果

#### (1) 非晶質フッ素樹脂中間層の効果

水滴発電デバイスの重要な構成要素の一つである誘電体層は、デバイスの性能に大きな影響を与える。誘電体層が出力に与える影響を明確にするために、理論式に基づいて誘電体層の厚み、表面電荷密度、表面積を調整しました。この実験では、非晶質フッ素樹脂 (CYTOP®) を用いた。CYTOP®は、表面電荷密度が高く、加工が容易で、スピコート法で均一なフィルムを形成できるほか、マイクロナノ加工にも優れた特性を有している。

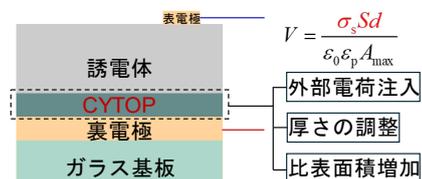


図 2 非晶質フッ素樹脂中間層の導入

実験結果として、CYTOP®を中間層として使用し、厚膜化、負電荷注入、表面積の増加などの処理を施すことで、水滴発電デバイスの出力が向上することが分かった。この実験により、水滴発電デバイスの性能改善手法について重要な指針が得られた。

#### (2) 針状電極の利用

従来の水滴発電デバイスの構造はトランジスタの構造に似ており、表面電極は「ゲート」としての役割を果たす。しかし、表面電極は重要な構成要素である一方で、誘電体材料との界面に寄生キャパシタンスを形成するなど、いくつかの欠点もある。特に、表面電極のサイズや誘電体材料の厚さに依存して、出力電圧が大幅に低下する現象が確認されている。

この問題に対処するために、我々は表面電極を針状に変更することを提案した (図 3)。この

構造では、水滴と針状電極との接触面積を減少させることで、寄生容量の効果を最小限に抑えることができる。また、針状電極の位置を調整し、水滴が拡散中に電極と一度だけ接触することで、正電流のみを生成することができる。つまり、直流出力に似た電気信号が得られブリッジ整流器が不要となる。その結果、水滴発電デバイスに用いられる典型的な誘電体である厚さ約 50  $\mu\text{m}$  のフッ素樹脂フィルム(テトラフルオロエチレン-ヘキサフルオロプロピレン共重合体) 上で、1 滴の水滴から 2000 V の高電圧出力を達成した。さらに、厚さ約 3  $\mu\text{m}$  の非晶質フッ素樹脂薄膜 (CYTOP®) での測定では、従来の表面電極と比較して出力を最大 40 倍まで増加させることができることが示された。

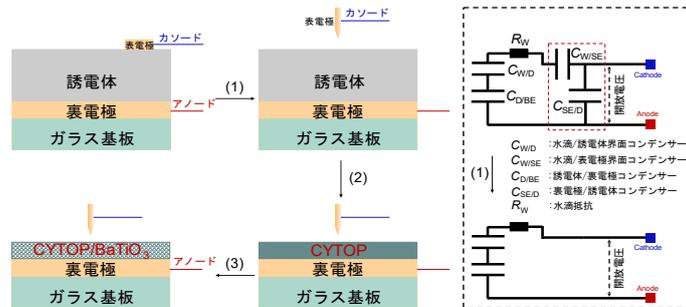


図3 水滴発電デバイス構造の改良：(1) 針状電極の導入 (2) 誘電体層の薄膜化 (3) チタン酸バリウムナノ粒子による複合化

さらに、厚さ約 3  $\mu\text{m}$  の非晶質フッ素樹脂薄膜 (CYTOP®) での測定では、従来の表面電極と比較して出力を最大 40 倍まで増加させることができることが示された。

### (3) 強誘電体ナノ粒子の利用

針状電極構造と非晶質フッ素樹脂薄膜を利用した水滴発電デバイスにおいて、比較的高い出力値 (出力電圧: 400 V、転移電荷量: 50 nC) を実証した。薄膜という制約の下で、高い表面電荷密度と耐久性を向上させるために、ナノサイズの強誘電体粒子の使用を提案する。実験により、適切な量のチタン酸バリウム BaTiO<sub>3</sub> (1 wt%) ナノ粒子を組み込むことで、出力電圧を 400 V から 900 V に引き上げ、1 滴の水滴からの電荷移動量として 150 nC を達成した。これは、BaTiO<sub>3</sub> ナノ粒子が水滴発電デバイスの出力に与えるポジティブな影響を示している。

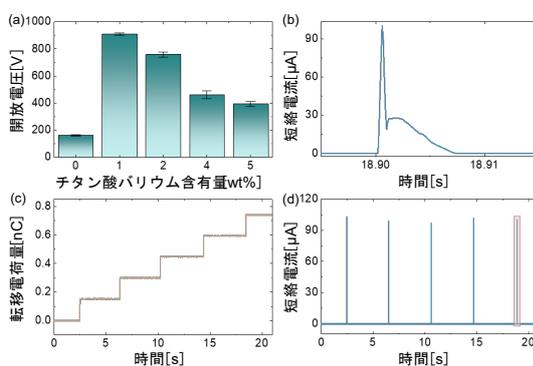


図4 (a) チタン酸バリウム含有量による開放電圧値の変化 (b) 短絡電流波形の拡大図 (c) 転移電荷量の経時変化 (d) 短絡電流の経時変化

### (4) 表面保護膜による長期信頼性の向上

これまでの水滴発電デバイス構造では、表面電極が空气中に露出していることから、長期信頼性に課題がある。このため、表面電極の保護膜について検討した (図5)。特に雨天時の使用を考慮すると、雨による腐食問題にも対処する必要がある。そこで、フッ化樹脂であるポリ(フッ化ビニリデン-co-ヘキサフルオロプロピレン)を使用することを試みた。保護膜の効果として、表面電極の酸やアルカリによる腐食を抑制することが期待される。また、優れた疎水性により、水滴が電極上に残留することがなくなり、水分の残留による短絡のリスクが軽減される。さらに、水滴が直接電極に接触しないため、表面電極のゲート機能が弱まり、代わりに静電誘導を通じて電荷が交換されることが分かった。したがって、表面保護膜の厚みを低減することで出力が強化されることが確認され、適切な厚みの水滴デバイスの開発に向けた指針となる。

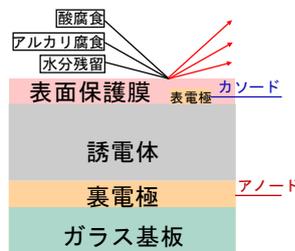


図5 表面保護膜がある水滴発電デバイスの構造

### (5) 雨でも発電する太陽電池の実現

研究開発当初からの提案として、水滴発電デバイスと太陽電池を組み合わせることで、雨天時においてもエネルギーを収集する太陽電池の実現を試みた。図6に、その構造を示す。ガラス基板上に作製した水滴発電デバイスを太陽電池の上部に設置している。水滴デバイスの優れた透明性により、広範囲の太陽光が水滴発電デバイスを通過して、太陽電池は光照射により動作する。雨天時には、雨滴が表面電極に達すると電力が発生する仕組み

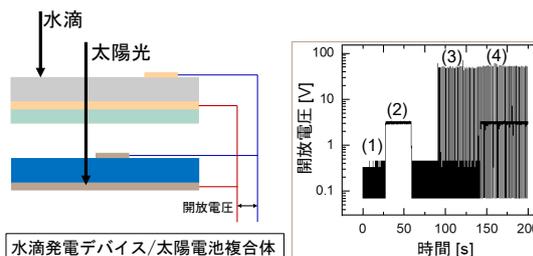


図6 水滴発電デバイスが太陽電池との組み合わせで発電の実証 (1)水滴なし/太陽光なし (2) 水滴なし/太陽光あり (3) 水滴あり/太陽光なし (4) 水滴あり/太陽光あり

となっている。図 6 右側に、水滴と太陽光の有無の 4 つの条件下での出力結果を示す。水滴と太陽光を同時入射することにより、水滴発電デバイスが生成する電気信号と太陽電池で生じた電気信号が結合して観測されることがわかる。水滴からの信号は高電圧のパルス波形を示し、太陽電池は直流の連続信号を示す。このように、雨でも発電する太陽電池の基本概念を具現化し、その動作を実証することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Wang Haitao, Kurokawa Yasuyoshi, Wang Jia, Cai Wentao, Zhang Jia Han, Kato Shinya, Usami Noritaka	4. 巻 12
2. 論文標題 Free Standing Electrode and Fixed Surface Tiny Electrode Implemented Triboelectric Nanogenerator with High Instantaneous Current	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Small	6. 最初と最後の頁 2308531 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/smll.202308531	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Wang Haitao, Kurokawa Yasuyoshi, Zhang Jia-Han, Gotoh Kazuhiro, Liu Xin, Miyamoto Satoru, Usami Noritaka	4. 巻 17
2. 論文標題 Core-shell yarn-structured triboelectric nanogenerator for harvesting both waterdrop and biomechanics energies	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 017005 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/ad1f06	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Haitao Wang, Yasuyoshi Kurokawa, Kazuhiro Gotoh, Shinya Kato, Shigeru Yamada, Takashi Itoh and Noritaka Usami	4. 巻 62
2. 論文標題 Performance enhancement of droplet-based electricity generator using a CYTOP intermediate layer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SC1032 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/acaca7	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5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 王 海濤, 黒川 康良, 王 嘉, 宇佐美 徳隆
2. 発表標題 CYTOP/BaTiO <sub>3</sub> ナノ粒子複合膜を用いた薄膜系直流水滴発電デバイス
3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 H. Wang, Y. Kurokawa, K. Gotoh, S. Kato, J. Zhang and N. Usami
2. 発表標題 Mover Electrode/Stator with Double Electrodes Triboelectric Nanogenerator with High Instantaneous Current Triggered by a Surficial Contact Electrode
3. 学会等名 MRS Spring Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 王 海涛, 黒川 康良, 宇佐美 徳隆
2. 発表標題 表面接触電極デザインに基づき開発された高電流出力を持つ新たな摩擦発電機
3. 学会等名 第10回 応用物理学会名大SC 東海地区学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Haitao Wang, Yasuyoshi Kurokawa, Kazuhiro Gotoh, Satoru Miyamoto, Shinya Kato, Shigeru Yamada, Takashi Itoh, Noritaka Usami
2. 発表標題 Boosting the output of droplet-based energy harvester by a CYTOP intermediate layer
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Haitao Wang, Yasuyoshi Kurokawa, Kazuhiro Gotoh, Satoru Miyamoto, Shinya Kato, Shigeru Yamada, Takashi Itoh, Noritaka Usami
2. 発表標題 Performance enhancement of droplet-based electricity generator using a CYTOP intermediate layer
3. 学会等名 2022 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2022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
---------	---------