

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：17104

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18879

研究課題名（和文）トライボエレクトリック発電デバイスの開発と摩擦帯電メカニズムの解明

研究課題名（英文）Development of a rotary triboelectric generator and elucidation of its mechanism

研究代表者

宮崎 康次（Miyazaki, Koji）

九州工業大学・大学院工学研究院・特任教授

研究者番号：70315159

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）：トライボエレクトリック発電と摩擦帯電列の関係、回転数と摩擦トルクといった入力と発電量、発電機のサイズ依存性やブレード枚数の発電出力の関係を調べた。理想的なモデルでは、発電量と発電機の面積は比例し、ブレード枚数と回転数の積と発電量は比例する。さらに摩擦トルクが増加すれば、発電機への入力が増えるため、摩擦トルクと発電量も比例する。しかしいずれの条件下においても効率よく発電できる条件が存在した。特に摩擦トルクについては、効率よく発電できる値に上限があり、摩擦帯電現象に寄与しない過剰な摩擦力が存在した。摩擦帯電系列も回転型トライボエレクトリック発電機の発電量のすべてを説明できる指標とはならなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

メカニズムに踏み込まず発電量の報告にとどまるトライボエレクトリック発電について、発電機のサイズや材質、使用条件を系統的に変化させて発電量を調べ、表面帯電メカニズム解明を試みた。その結果、発電に関わる表面帯電に対して、効率よく帯電させる摩擦力が存在し、それ以上の摩擦は表面帯電に関わらないことが明確となった。さらに摩擦帯電列が発電機設計の指針とされてきたが、摩擦帯電列では発電量の大小すら決定できないことも明らかとした。

研究成果の概要（英文）：We investigated the relationship between triboelectric power generation and the triboelectric series, as well as the correlations between input parameters such as rotational speed, friction torque, and power output. We also examined the size dependence of the generator and the power output with varying blade numbers. In an ideal model, power output and the area of the generator are directly proportional, and the product of blade numbers and rotational speed is also proportional to power output. Furthermore, as the friction torque increases, the input to the generator increases, resulting in a proportional relationship between friction torque and power output. However, under any given conditions, there are specific criteria for efficient power generation. While considering the triboelectric series, we found that it is not the sole parameter determining the output of a rotary triboelectric generator.

研究分野：機械工学

キーワード：摩擦帯電 摩擦帯電発電 エネルギーハーベスティング

1. 研究開始当初の背景

本研究開始当初はトライボエレクトリック発電のメカニズムや設計方法が明確になっておらず、おおまかには摩擦で物質を帯電させることから、経験的な摩擦帯電列といったプラスからマイナスまで帯電のしやすさによって羽毛などの物質が並べられ、発電量の大小が整理されている程度であった。摩擦帯電のメカニズムに基づく定量的評価が見られず、トライボエレクトリック発電機の発電量限界なども不明瞭であった。

2. 研究の目的

トライボエレクトリック発電のメカニズムを明確にし、発電機の設計指針を得ることを目的とする。本研究ではステーターである電極とローターであるブレードを組み合わせた回転型トライボエレクトリック発電機を対象として、発電機のサイズ、材質、回転数、トルクが発電量に及ぼす影響を調べることで設計指針を得る。さらに設計指針からトライボエレクトリック発電のメカニズムについて考察する。

3. 研究の方法

様々な形状が提案されているトライボエレクトリック発電であるが、本研究では回転型トライボエレクトリック発電機とした。発電メカニズムを図1に示す。ブレード表面が摩擦によって負に帯電すると、電極表面は正に帯電する(図1 I)。次にブレードが電極表面上を移動すると、それに合わせて電極表面の帯電状態も変化し、結果、電極間に電流が発生する(図1 II, III, IV)。ブレードが隣の電極まで移動すると、電極間を流れる電流の正負が逆転し、結果として交流の電力を得る(図1 右下)。この発電機において、ステーターである電極とローターであるブレードの材料、サイズを変えて発電量を測定するとともに、回転数、ブレード枚数、トルクといった入力を変えて発電量の変化を調べて、発電メカニズムを考察した。実験装置を図2に示す。ブレードと電極形状はアルミ板(アルミ 2017)からワイヤー放電加工で切り出し、ともに表面を再切削して平滑表面とした。切削後のほうが真実接触面積が増加したと考えられ、回転数や摩擦トルクなど同条件で発電させた際の電圧と電流がともに増加し、10%ほど発電出力が増加した。

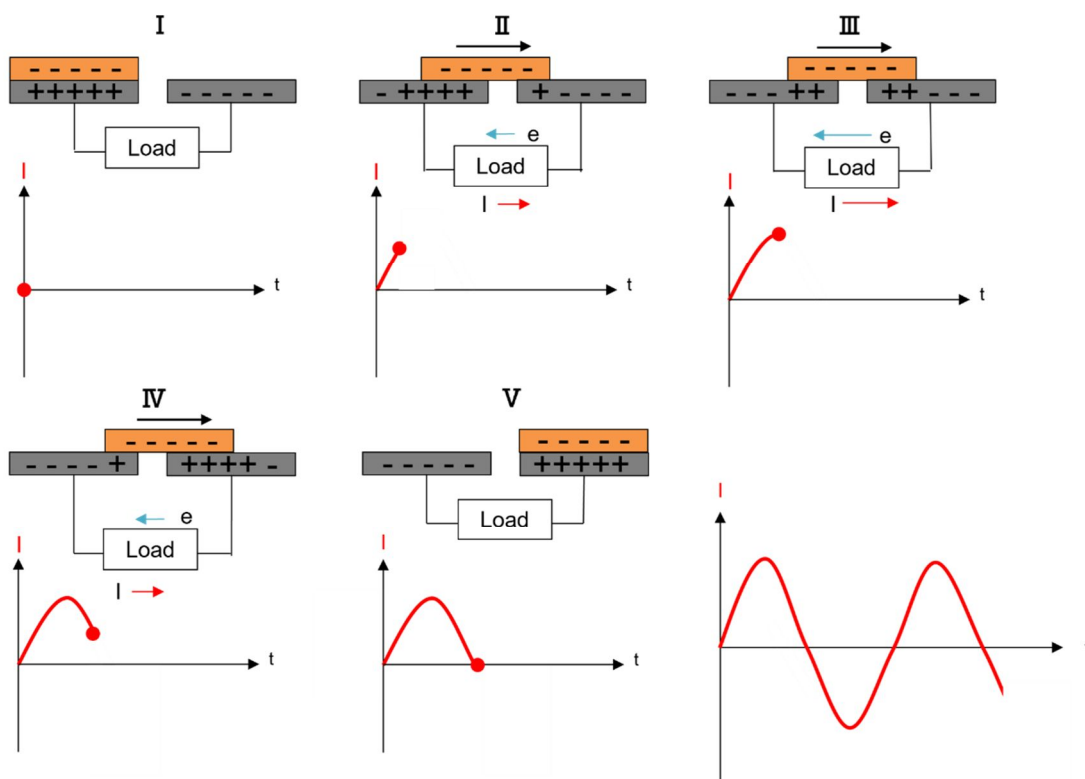


図1 トライボエレクトリック発電の概略

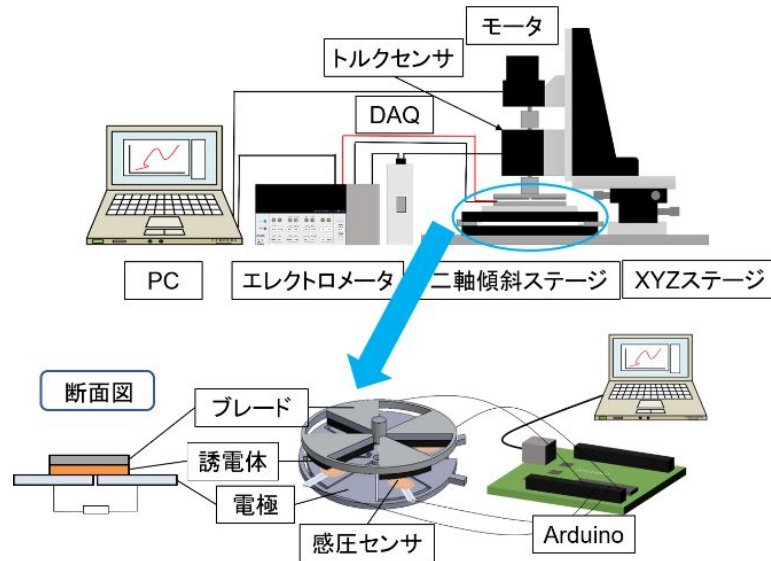


図 2 実験装置概略図

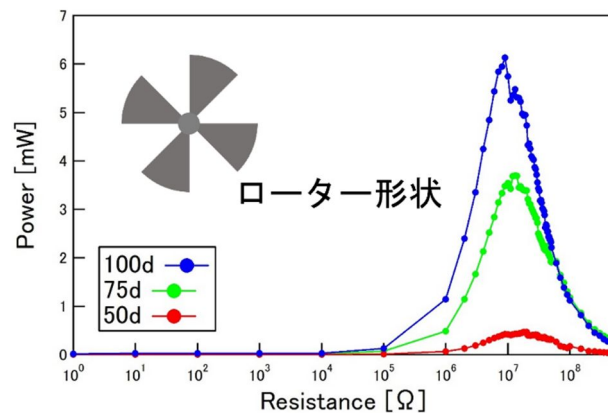


図 3 トライボエレクトリック発電機の発電出力結果（発電機直径 100d: 100mm, 75d: 75mm, 50d: 50mm）

トライボエレクトリック発電機のブレードと電極が水平に接触するようブレード側の位置を XYZ ステージで移動させ、電極側の背面に二軸傾斜ステージを設置した。回転軸を水平とすると装置のたわみによってブレードが電極に対して片当たりするため、回転軸を重力に対して垂直とした。さらに電極背面に 4 箇所感圧センサー(スイッチサイエンス社製: MF01-N-221-A01)を設置し、電極面の傾きを調整した。ブレードにモータ(Oriental motor 社製: BXS230A-5S)を取り付けてコンピューターから回転数制御し、微小トルクセンサ(Interface 社製: T5-1-A3A)をモータとブレードの間に取り付けて、ブレードと電極に生じる摩擦トルクを測定した。発電機への入力を回転数と摩擦トルクの積で評価できる。発電機の外に外部抵抗を取り付けて、発電された電圧と電流をエレクトロメータ(KEITHLEY 社製: 6514-901-01D)で測定した。一例として、カプトンを表面に張り付けたブレードを 4 枚とし、回転数 800rpm, トルクを 10mN·m となるようにブレード高さを調整して、横軸に外部抵抗, 縦軸に発電量(電圧×電流)を測定した結果を図 3 に示す。効率や発電量については、インピーダンスマッチして最大出力となる点での結果を用いた。100mm 程度のデバイスでおおよそ 5mW を発電し、入力仕事と発電量の比を効率とすると 5%前後となった。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 回転数と発電量

ブレードと電極の正負の逆転が発電と関係するため、回転角周波数  $\omega$  [Hz] とブレード枚数  $n$  の積と発電量は理想的には比例すると考えられる。発電機直径を 75mm, ブレード材質をカプトン, 摩擦トルクを 10mN·m として、発電短絡電流を測定した結果を図 4 に示す。 $n\omega$  が 60Hz 程度まで比例して発電量が増加するが、その後の増加は緩やかとなり、ブレード枚数を増やしたり、回転数を増加させても効果が小さくなることがわかった。実用的には発電源となる回転体の回転数がわかっていれば、60Hz となるようにブレード枚数を決定すればよいことがわかる。これらの詳細なメカニズムの理解については、ブレードと電極がもつ動的な静電容量を数値計算するこ

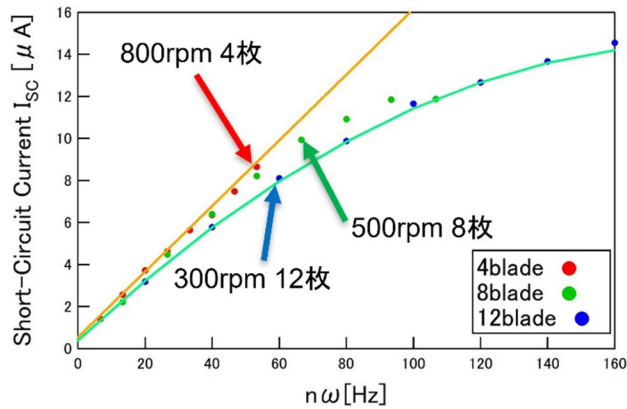


図 4 発電機から出力される短絡電流と回転数の関係（ブレード材質：カプトン，発電機直径 75mm，トルク 10mN・m）

とが考えられる．

#### 4.2 ブレード面積と発電量

ブレード材質をカプトン，ブレード枚数を 4 枚と固定して発電量を測定した結果は図 3 示したとおりであるが，横軸にブレード面積，縦軸に単位面積当たりの発電量としてプロットしなおした結果を図 5 示す．ブレードの面積が大きくなるほど電極間を移動する電荷量が比例して増えるため，簡単にはブレード面積と発電量が比例すると考えられる．ところが実験結果からは，ブレード面積が減少するにつれ，単位面積当たりの発電量も減少しており，発電装置の小型化には課題を残した．

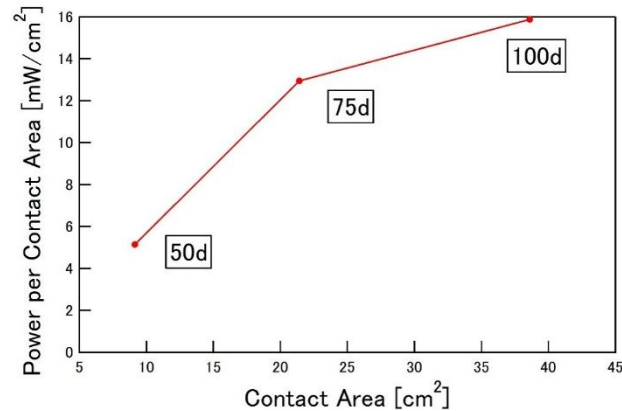


図 5 ブレード直径と発電量の関係(ブレード直径 50d: 50mm, 75d: 75mm, 100d:100mm)

#### 4.3 摩擦トルクと発電量

ブレードの高さを電極に近づけることで摩擦トルクを調整し，発電量を測定した結果を図 6 に示す．ブレードサイズは 50mm，ブレード枚数 4 枚，回転数を 800rpm と一定とした．図 6 右に

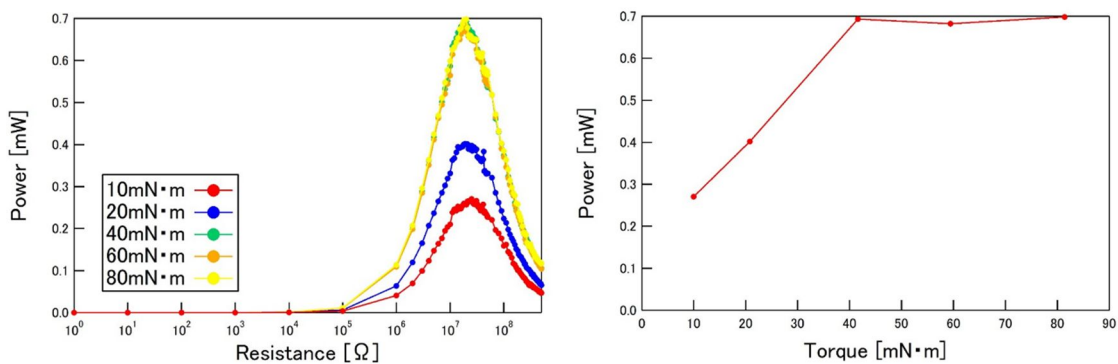


図 6 摩擦トルクと発電量の関係（左：外部抵抗と発電量，右：摩擦トルクとインピーダンスマッチング点における最大発電量）

は横軸をトルク，縦軸にインピーダンスマッチング下における最大発電量をプロットした．その結果，摩擦トルクが 40mN・m までは発電量が増加したものの，それ以上，ブレードを電極に押し付けても発電量が増加しない結果となった．摩擦帯電させるにあたり，効率よく表面電荷を生み出す摩擦力が存在することがわかる．

#### 4.4 ブレードと電極材質

ブレードと電極材質を変えて発電量を測定した結果を図 7 に示す．ブレード直径 75mm，ブレード枚数 4 枚，回転数 800rpm，摩擦トルクを 10mN・m とした．参考のため，経験的に知られているトライボエレクトリック系列を図 7 右に示す．摩擦帯電列に従えば，PTFE のほうがカプトンよりも発電量が大きくなり，電極はアルミニウムを使うべきである．ところが本研究においてはカプトンの方が PTFE よりも発電量が大きい結果が得られた．カプトン，PTFE の両方とも電極としてはアルミ電極の方が銅電極よりも発電量が大きく，この点では摩擦帯電列に従った．一方，Silk（繭玉からフィブロインを精製して成膜）をブレード材料とした場合，摩擦帯電列によれば銅電極の方が発電量が増えると考えられるが，本実験ではアルミ電極とするほうが発電量が大きかった．ブレード材料を紙としたとき，アルミ電極で 0.02mW，銅電極で 0.004mW の発電量となり，図 6 の他材料の結果と比べるとほとんど発電しない結果が得られた．アルミ，紙，銅は摩擦帯電列では近い関係にあり，このように摩擦帯電列は発電特性の一部を説明した．しかしながら，そもそも摩擦帯電列が定性的な指標であることから，発電量の定量的な評価が難しかった．

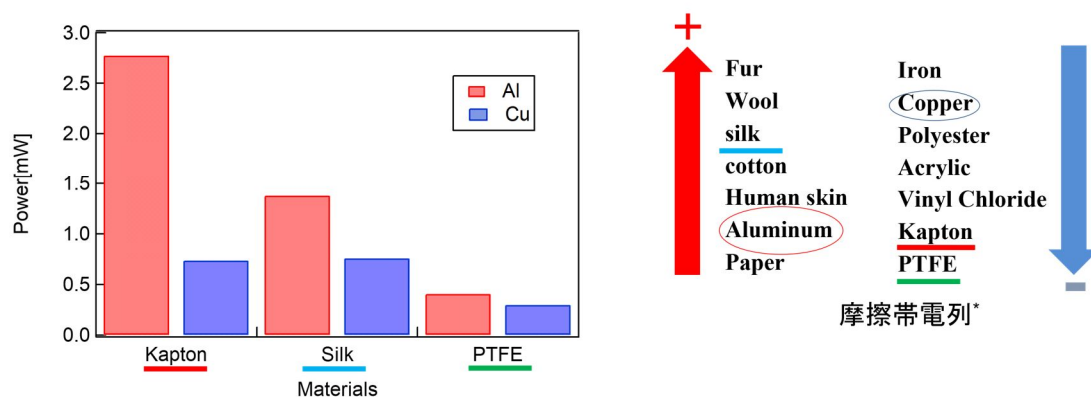


図 7 ブレード材質，電極材質と発電量の関係（右図：摩擦帯電列 \*Chi Zhang et al. *Advanced Materials*. 26 (2014) 3580-3591 )

#### 4.5 まとめ

発電機的设计指針を得るために，トライボエレクトリック発電と摩擦帯電列の関係，回転数と摩擦トルクといった入力と発電量，発電機のサイズ依存性やブレード枚数の発電出力の関係を調べた．理想的なモデルでは，発電量と発電機のサイズ（面積）は比例し，ブレード枚数と回転数の積と発電量は比例する．さらに摩擦トルクが増加すれば，発電機への入力が増えるため，摩擦トルクと発電量も比例する．しかしいずれの条件下においても効率よく発電できる条件が存在し，トライボエレクトリック発電機のマイクロ化にあたっては不利となる結果となった．摩擦トルクについては，効率よく発電できる値に上限があり，摩擦帯電現象に寄与しない過剰な摩擦力が存在することがわかった．この点は摩擦帯電メカニズム理解に関して，唯一手掛かりになりそうな結果となった．回転型トライボエレクトリック発電において，発電量が必ずしも摩擦帯電列に従わなかった．発電メカニズムを考えると静電誘導が含まれていることは明らかであり，摩擦帯電列だけでなく，今後，ブレード材料の誘電率が回転型トライボエレクトリック発電機の発電量に及ぼす影響も考慮すべきである．ブレード枚数，回転周波数と発電量の関係と併せると，電極とブレードが作るコンデンサー容量を非定常な部分まで含め数値解析する必要性など定量的な発電量予測の課題が明確となった．

他，ブレードが乾燥しているか否か，ブレードと電極の接触状態など，ブレードのわずかな状態変化が大きく発電量を左右するため，同日，同ブレードを用いての連続した実験の比較は容易であるものの（回転数やトルクを変化させる実験），サイズの異なるブレードや枚数の異なるブレードを付け替えることにより条件を変更させた際は，実験の再現性を得るのが難しかった．実用化の際には，発電装置全体のパッケージも含め，水分管理やブレードと電極のアライメントなど技術的な課題も重要と考えられる．

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Keenan Chatar, Shu Uehara, Hiroki Kojima, Asuka Miura, Tomohide Yabuki, Koji Miyazaki	4. 巻 1
2. 論文標題 Experimental Analysis of Rotary Freestanding Triboelectric Nanogenerators	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of PowerMEMS2021	6. 最初と最後の頁 84-87
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 上原 脩, Keenan Chatar, 児嶋 広紀, 三浦 飛鳥, 矢吹 智英, 宮崎 康次
2. 発表標題 回転型トライボエレクトリック発電機の開発
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 児嶋 広紀, 山崎 隼, 上原 脩, 矢吹 智英, 宮崎 康次
2. 発表標題 生体材料を用いた回転型トライボエレクトリック発電機の出力特性
3. 学会等名 熱工学コンファレンス2022
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
---------	---------