

補助事業番号 2019M-173

補助事業名 2019年度 ローラベアリングを用いた摩擦発電システムの開発とメガ発電への展開 補助事業

補助事業者名 東京大学大学院 工学系研究科 機械工学専攻 崔 峻豪

1 研究の概要

摩擦発電は、IoT、センサー、スマート/モバイル機器において自己発電(バッテリー不要)を可能にする。現在の摩擦発電システムは、2面間(帯電材間)が接触と分離を繰り返して発電を行う接触/分離型が主流であり、接触分離の周波数が小さいため発電量が少なく、将来のメガ発電への展開は困難である。将来のメガ発電への応用のためには極めて高い発電効率を有するシステムが必要であり、そのためには、接触分離型ではなく、高速回転(滑り)かつ極めて低い摩擦係数を有する発電システムの開発が必須である。本研究では、高速回転が可能で、極めて低い摩擦係数を有することから、小さい機械刺激でも長時間の運動が可能である、ベアリングを用いて、発電効率を画期的に向上した摩擦発電システムを開発することを目的とする。さらに、ベアリングをIoTすることができ、風力発電機など過酷な状況で使用される機械の稼働状況のモニタリングを可能にする。

2 研究の目的と背景

今日のスマート/ウェアラブル電子機器の普及に伴って、それらを駆動するための電源が求められている。さらに、身の回りのあらゆるものがIoT化することにより、今後1兆個以上のセンサー用電源が必要となり、これら全てに対してバッテリーを用いることは、バッテリーのサイズ、容量や環境汚染、危険性などの観点から困難であり、低コストの小型の電源が必要である。また、ベアリングは駆動系を有するあらゆる機械製品に使用される機械要素であり、IoT化することにより、機械の稼働状態を低コストでモニターすることが期待されている。本研究は、ベアリングを用いた摩擦発電システムを開発することで、まず、駆動系を有する機械製品では不可欠なベアリングをIoT化し、ベアリングの破壊、振動、温度や機械の稼働状態をモニタリングできるようにすることを目的とする。それにより、機械の保守・点検へのコストを大幅に削減することのできる。さらに、極めて低い摩擦抵抗や高速回転が可能であるベアリングを摩擦発電システムに用いることで、摩擦発電の発電効率を劇的に向上させることを目的とする。

3 研究内容

<https://sites.google.com/site/jhchoiut/jka%E8%A3%9C%E5%8A%A9%E4%BA%8B%E6%A5%AD>

(1) ベアリング摩擦発電システムへの低摩擦DLCコーティングの検討

低摩擦コーティング材および摩擦帯電材としての両方の機能を重ね持つDLC膜を、ベアリング摩擦発電システムへの応用に向けて、フッ素添加DLC膜(F-DLC膜)と高硬度ta-C膜(tetrahedral amorphous carbon膜)について摩擦特性と基礎的な摩擦発電特性の評価を行った。その結果を図1に示す。DLC膜とPTFE間の摩擦では、実験後のDLC膜表面の観察からDLC膜にPTFEの一部

が移着していることが分かった。DLC膜とF-DLC膜ではDLC膜の摩耗が大きく、DLC膜が摩滅している部分が観察できた。一方、ta-C膜とF-DLC膜との摩擦ではDLC膜の摩耗が非常に少なく、摩擦後にta-C膜表面の観察を行った結果、PTFEの移着はほとんど確認できなかった。これらの結果から、ta-C膜は摩擦発電用の帯電材として大いに期待できると言える。

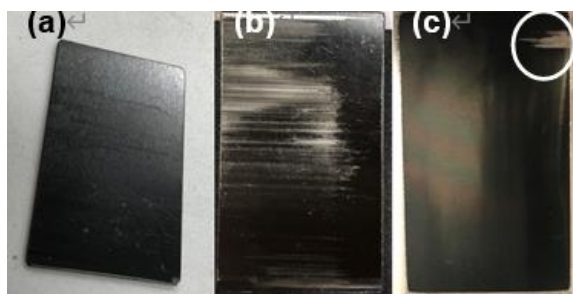


図1 摩擦試験後のDLC膜の写真: (a)PTFEと摩擦後のDLC膜, (b)F-DLC膜と摩擦後のDLC膜, (c)ta-C膜と発電後のF-DLC膜

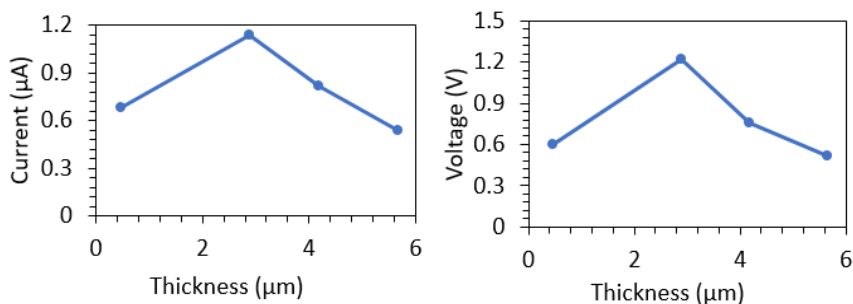


図2 摩擦発電特性に及ぼすDLC膜厚の影響(左図:電流値 右図:電圧値)

また、摩擦発電に最適なDLCの成膜条件を確立するために膜厚による発電特性の影響を調べた。発電実験により電流値と電圧値を測定した結果、図2に示すように、電流値、電圧値ともに膜厚およそ $3\mu\text{m}$ のDLC膜で極大値を示すことが分かった。これは、膜厚を小さくしすぎると、帯電材に十分な量の電荷が帯電することができなくなり十分な出力が得られなくなり、大きくしすぎると電極との距離が大きくなり生じさせる電圧が小さくなり、十分な出力が得られないと考えられる。よって、その中間で最大値をとる膜厚が存在していると考えられる。

(2) 油潤滑環境下でのDLC膜の摩擦発電特性の評価

乾燥摩擦環境下ではDLC膜には摩耗が生じる。DLC膜の摩耗を極限に抑えるためには油潤滑環境下での摩擦発電が有効であると考えられる。そのため、油環境下において摩擦発電が可能であるかを評価した。帯電材ペアとしてアルミとPTFEもしくはF-DLCを用いて、種々の潤滑油を用いて潤滑状態とし発電量を評価した。その結果、図3に示すように、CとHのみからなる炭化水素では良好な出力が得られ、特にPTFEの場合は潤滑油を使用しない場合よりも大きな出力が得られた。一方、COOH基を持つ液体ではそれほど大きな出力を得ることはできず、OH基を持つ液体はさらに小さな出力となった。本結果から、潤滑油環境下でも摩擦発電が可能であり、CとHのみからなる炭化水素系の潤滑油が摩擦発電にもっとも有効であることが新たに分かった。

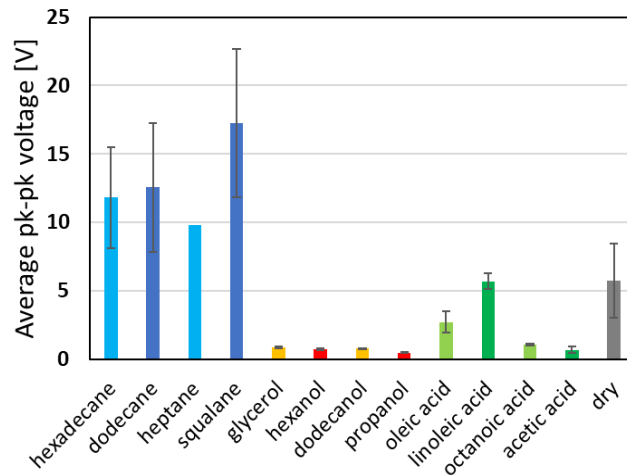


図3 種々の滑油中における摩擦発電実験(PTFE帯電材)

(3) ベアリングを用いた摩擦発電におけるグリース潤滑の影響

ベアリングの多くはグリース潤滑環境下で作動するため、グリース潤滑環境下での摩擦発電実験を行った。発電実験には、Si 添加 DLC 膜のパターンを有する外輪(または内輪)と PTFE ボールの組み合わせを有する実際のボールベアリングを用いた。図 4 に示すように実験の結果、グリース潤滑を施したベアリングでも摩擦発電による出力を得ることができた。また、出力電圧は潤滑無しの場合、回転数の増加に伴って増加するが、グリースで潤滑するとどの回転速度でもほぼ一定の、安定した発電量が得られることがわかった。しかし、グリースによる潤滑を行うと出力電圧の値は無潤滑に比べて少し減少することが観察された。

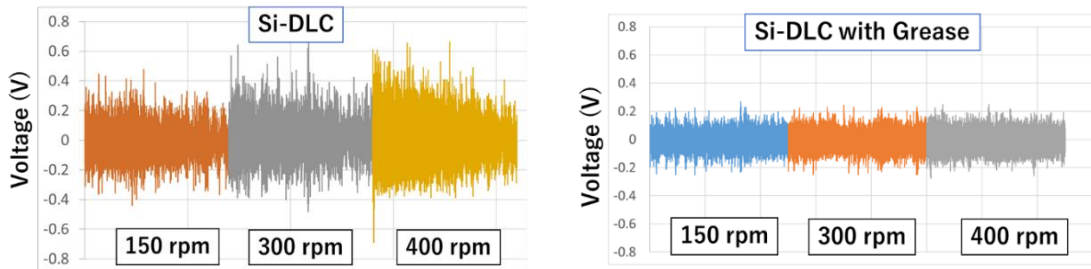
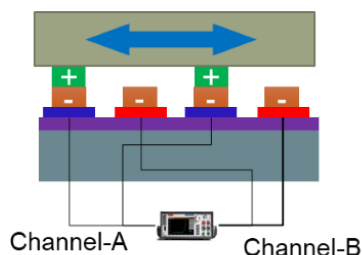


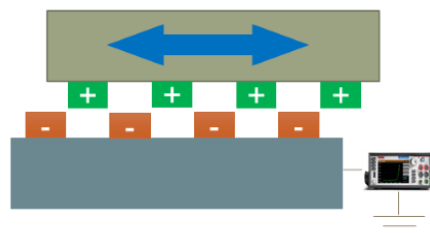
図 4 摩擦発電による出力電圧:(左図)Si-DLC 膜、(右図)グリースを施した Si-DLC 膜

(4) ベアリングへの応用に向けた共通電極型摩擦発電システムの開発

従来のベアリングを用いた摩擦発電システムは、図5に示すように金属電極と外輪(または内輪)を絶縁するために絶縁層が必要であり、摩擦発電システムの構造が非常に複雑になる。また、絶縁層を外輪(または内輪)に設けることでベアリングのボール(ローラ)と外輪(または内輪)とのクリアランスが影響されてしまうため、ベアリングを用いた摩擦発電機の作製は困難である。本研究では、図6に示すように金属電極と外輪(または内輪)を絶縁するために絶縁層を省き、外輪(または内輪)をそのまま電極として用いる共通電極型摩擦発電システムを開発し、その発電メカニズムをCOMSOLシミュレーション(図7)および発電実験(図8)を用いて明らかにした。



Conventional TENG
図5 従来の摩擦発電システム



Common Electrode Mode TENG
図6 新たに開発した共通電極型摩擦発電システム

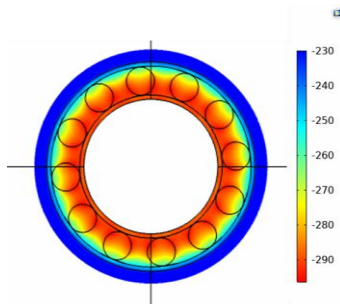


図7 COMSOL シミュレーションの結果

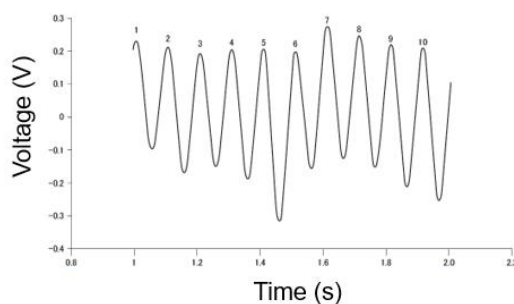


図8 摩擦発電実験の結果

4 本研究が実社会にどう活かされるかー展望

本研究で開発した摩擦発電システムは、大きく分けて二つの応用で実社会に活かされる。一つは、高効率・高耐久性を有する発電システムとして、エネルギーハーベスティングのための応用である。摩擦発電機において高い発電効率を得るためには、高速摺動、低摩擦、高耐久性が必須であり、低摩擦性を有するベアリングと高耐久性DLC膜を組み合わせることでエネルギーハーベスティングのための応用に大いに期待できる。もう一つは、機械要素の動作モニタリングセンサーとしての応用である。本研究の成果からベアリングをIoTすることができ、風力発電機など過酷な環境で使用されるベアリングの稼働状況をモニタリングすることが可能である。また、ベアリングのみならず、あらゆる機械要素、例えば、自動車のエンジン、タイヤ、ギヤーなどもIoTがすることができ、機械の稼働状況を遠隔で把握することができる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

本研究室は、薄膜工学、表面工学の観点から、機能性薄膜の創生や機械要素の耐久性を改善するための表面改質、表面処理を行っている。特に、炭素系薄膜を用いた機械要素表面の低摩擦化、長寿命化はもちろん表面に新たな電気・光学・化学特性を付与することで、全く新しい表面を創生することを目指している。炭素系薄膜はトライボロジー特性に優れ、また、その内部構造や組成を制御することで様々な電気特性を制御できる機能性膜として期待される。本研究では、優れた機械特性を有する炭素系薄膜に帯電特性といった電気特性という機能を付与することで、高耐久性、高効率の摩擦発電システムの開発に成功している。本研究をベースに、腐食環境、自動車のエンジンなど過酷な環境下で、エネルギーハーベスティングや機械要素のモニタリングにDLC膜をベースにした摩擦発電機の応用を目指して引き続き研究を行っていきたい。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

【論文】

- 1) S. H. Ramaswamy, R. Kondo, W. Chen, K. Fukushima, J. Choi, Development of highly durable sliding triboelectric nanogenerator using diamond-like carbon films, Tribology Online, Vol. 15, No. 2, 2020, pp. 89–97.
- 2) T. Ishikawa, J. Choi, Effect of water adsorption on the frictional properties of hydrogenated amorphous carbon films in various relative humidity, Langmuir, Vol. 37, 2021, pp. 1012–1024.

【特許】

- 1) 摩擦帯電発電機(転がり軸受けへの応用)(2021年6月に出願予定)
- 2) 摩擦帯電発電機(すべり軸受けへの応用)(2021年6月に出願予定)

7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの

- <https://sites.google.com/site/jhchoiut/jka> (URL)

(2) (1)以外で当事業において作成したもの

- Development of Highly Durable Sliding Triboelectric Nanogenerator Using Diamond-Like Carbon Films (DOI: <https://doi.org/10.2474/trol.15.89>)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/trol/15/2/15_89/_article/-char/ja/ (URL)

Tribology Online

[資料トップ](#) [巻号一覧](#) [特集号](#) [この資料について](#)

[J-STAGEトップ](#) / [Tribology Online](#) / 15 卷 (2020) 2 号 / 書誌

Article

Development of Highly Durable Sliding Triboelectric Nanogenerator Using Diamond-Like Carbon Films

Shreeharsha H. Ramaswamy, Ryusei Kondo, Weihang Chen, Ichihiko Fukushima, Junho Choi

著者情報

キーワード: [triboelectric nanogenerator \(TENG\)](#), [sliding-TENG](#), [diamond-like carbon \(DLC\) film](#), [durability](#), [H-DLC](#), [F-DLC](#)

[ジャーナル](#) [オープンアクセス](#)

2020 年 15 卷 2 号 p. 89-97

[DOI](https://doi.org/10.2474/trol.15.89) <https://doi.org/10.2474/trol.15.89>

- Effect of water adsorption on the frictional properties of hydrogenated amorphous carbon films in various relative humidity (DOI: <https://dx.doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c02416>)

ACS Publications
Most Trusted. Most Cited. Most Read.

Search text, DOI, authors, etc.

RETURN TO ISSUE | < PREV ARTICLE NEXT >

Effect of Water Adsorption on the Frictional Properties of Hydrogenated Amorphous Carbon Films in Various Relative Humidities

Takumi Ishikawa and Junho Choi*

Cite this: *Langmuir* 2021, 37, 3, 1012–1024
Publication Date: January 14, 2021
<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c02416>
Copyright © 2021 American Chemical Society
[RIGHTS & PERMISSIONS](#)

Article Views 208 Allmetric - Citations -
LEARN ABOUT THESE METRICS

Share A

Read Online PDF (4 MB) Supporting Info (1) » SUBJECTS: Friction, Microstructures, Adsorption, Layers, ▾

Abstract

The tribological properties of hydrogenated amorphous carbon (a-C:H) films in ambient air were investigated from the microstructural point of view. a-C:H films with various microstructures (polymer-like, diamond-like, and graphite-like structures) were prepared, and the thickness of water adsorption layers on the films was measured. The adsorption behavior of water molecules on a-C:H films could be expressed with the Brunauer–Emmett–Teller (BET) isotherm, while the thicknesses of icelike and liquidlike water layers adsorbed on the films could be determined using the BET parameters C and n_m^2 . The polymer-like films exhibited the thickest icelike and liquidlike water adsorption layers, which decreased as the film structure changed to a diamond-like or a graphite-like structure. A strong relationship was observed between the thickness of water adsorption layers and the surface oxidation of the a-C:H films. The friction coefficient of the films in ambient air can be well explained by the surface oxidation and the thickness of water adsorption layers. Polymer-like films showed high friction coefficients due to the

Friction coefficient

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 東京大学大学院工学系研究科

(トウキョウダイガクダイガクインコウガクケイケンキュウカ)

住 所： 〒113-8656

東京都文京区本郷7-3-1

担 当 者： 准教授 崔 竣豪 (チェ ジュンホ)

担 当 部 署： 機械工学専攻 (キカイコウガクセンコウ)

E - m a i l : choi@mech.t.u-tokyo.ac.jp

U R L : <https://sites.google.com/site/jhchoiut/>