

補助事業番号 2021M-211

補助事業名 2021年度 自転車競技者用のローラー練習台を用いたエネルギーハーベスティング 補助事業

補助事業者名 東京大学大学院工学系研究科 崔 峻豪

1 研究の概要

本研究は、自転車競技者の屋内練習のために使用されるローラー練習台を用いた発電システムを構築することを目的とする。ローラー練習台は3本のローラーで構成されており、練習時に自転車のタイヤとの接触により起きる3本のローラーの回転運動(マクロスケール電力)やタイヤとローラーの接触摩擦(マイクロスケール電力)を電気エネルギーに変換することで発電を行う。発電は、「マクロスケール電力」と「マイクロスケール電力」の、二つの異なるスケールの電力の発電を同時に行う予定である。マクロスケール電力の発電は、回転するローラーにベルトを介してオルタネータ等を連結させることで発電を行う。一般的に成人一人の発電能力は数百Wと言われており、練習時に100基のローラー台を同時に動かすことを考えると毎時数万Wの発電が見込まれる。自転車競技者の場合、一般成人に比べ数倍程の発電能力が期待できる。オルタネータをローラーに繋げることで、負荷をかけた練習をすることも可能である。マイクロスケール電力の発電は、回転するローラーと自転車のタイヤ間に摩擦発電機の機構(Triboelectric Nanogenerator, TENG)を設けることで発電を行う。摩擦帯電とは、異なる物質を接触・分離もしくは摩擦させることで、両物質にそれぞれ正と負の電荷を発生させ、その電位差による電子の流れを生じさせることで電気エネルギーを得る発電手法である。生活(歩きなど)や自然界(波、風など)で捨てられている機械エネルギーを電気エネルギーに変換することが可能である。特殊な発電装置などを必要とせず、二つの異なる材料の相対運動のみにより発電が可能であるため、構造がシンプルで低コストである。摩擦発電から得られる交流電圧および交流電流の波形の大きさや形の変化を用いて、タイヤの摩耗、空気圧、速度などの自転車の運転状況や走行状況のモニタリングができるセンサーとして応用することで自転車をIoT化することを目標とする。本研究でのマイクロスケールの発電は、数マイクロWから数W程度の電力を予想しており、得られたマイクロ電力を用いて、IoT化した自転車に装着するセンサーの駆動を行うことを目指して研究を行う。

2 研究の目的と背景

世界の経済や生活は、化石エネルギーに依存しており、あと数十年で枯渇すると言われている。資源有限に加え、環境的にCO₂排出の問題を有する化石燃料は、次第にほかのエネルギー、すなわち再生可能エネルギーに代替される必要がある。本研究は、自転車競技者がローラー練習台を用いて練習を行う際に捨てられる機械エネルギーを電気エネルギーに変換してそのエネルギーをハーベスティングできる発電システムを構築することを目的とする。発電は二つの異なるスケールである「マクロスケール電力」と「マイクロスケール電力」の発電を行う。ローラー台を用いる発電は、太陽光発電のように環境に左右されず、必要な時に発電ができ、非常用電力としても使用

できる利点がある。また、生活電力としてはもちろん地震、台風などの自然災害の際に非常用電力としても使用可能にする。さらに、マイクロスケール発電(摩擦発電)を組み合わせることにより自転車の状態、運転状況をモニタリングすることや、練習状況(走行距離、速度)および自転車の運行状態をリアルタイムで把握することができる。今後、利用が拡大されることが予測されるシェアサイクルのメンテナンス費用の大幅な削減も期待できる。

3 研究内容

(1) マイクロスケール電力の発電に関する研究(図1)

(URL : <https://sites.google.com/site/jhchoiut/jka補助事業>)

近年の地球温暖化の進行によりエネルギー資源の脱炭素化を目標とすることが世界で増えてきている。その中でこれまで化石燃料を用いていた自動車等の機械の電動化も進んできている。そこで重要になるのが温室効果ガスを発生させない手段による発電、いわゆる再生可能エネルギーということになる。その中でも日本は原子力発電所の事故により原子力発電の発電全体に占める割合が減ったことも相まって、火力発電所等の化石燃料を消費する発電方法の占める割合が多い。さらに従来型の大規模発電所では送電時の環境負荷や、長距離送電による停電のリスクも高い。ここで注目されるのが電力の地産地消という考え方である。そこで本研究では自転車競技者用の練習に利用されるローラー台に着目した。数十台のローラー台から同時に発電が可能になれば電力の地産地消と再生可能エネルギーの両方を実現することができる。この時、小規模発電ではなるべくコストを抑えたいという観点から車載用オルタネータを用いようという試みがある。そこで本研究ではオルタネータとローラー台を用いた発電システムを構築することを目的とし研究を行った。研究では、まずオルタネータとローラー台を用いたエネルギーハーベスティングシステムを構築した。この発電システムでは発電電力量を制御することによって、自転車競技者が練習の際に必要な負荷を調節することができる機能を付加することに成功した。発電システムを構築した後、異なる発電量やケイデンスにおける発電効率を測定した。その結果、発電量が大きくなればなるほど、発電効率も上昇すること、ケイデンスを上げれば上げるほど発電効率が上がることがわかった。さらに、発電損失を分析することにより本システムにおける損失の大部分は機械的損失によるものであるということを明らかにした。

(2) マイクロスケール電力の発電(摩擦発電)に関する研究(図2)

(URL : <https://sites.google.com/site/jhchoiut/jka補助事業>)

近年、さまざまな「もの」をインターネットに接続するIoT (Internet of Things) 技術が発展しており、ますますIoT社会の進展が見込まれているが、それに伴いセンサーが大量に必要とされる。しかし、これらの電源を全て従来型のバッテリーや送電網によってまかなうことはコスト面、環境面などの観点から困難である。その解決策として、ナノ発電機と呼ばれる発電システムが注目を集めている。中でも、摩擦発電機はシンプルな構造、低コストといった特徴から大きな注目を集めており、表面の摩擦や帯電状態によって出力が変化する性質からセンサーとしての応用も期待されている。また、IoT社会に必要な情報の一つとして、自転車走行状況のモニタリングがある。2020

自転車競技者用ローラー練習台を用いた エネルギーハーベスティング



1. 研究背景と目的

- 近年の地球温暖化や災害によって温室効果ガスを発生させない発電手法や電力の地産地消への期待が高まっている。電力を地産地消することで災害時のリスクや電力の輸送に関わる環境負荷を低減することができる。
- 本研究では自転車用トレーニング機器として用いられる3本ローラー練習台に着目し、車載用オルタネーターと3本ローラー練習台を組み合わせた発電システムを開発した。なお、発電量を制御することにより自転車の漕ぎ手にかかる負荷を調整することができる。

2. 発電システムの開発

■ 開発した発電システムの概要



図1 開発した発電システムの概要

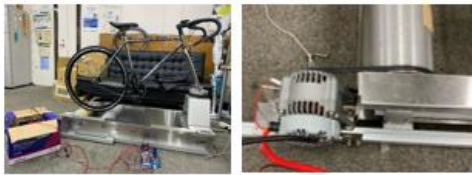


図2 発電システムのプロトタイプ
(左図が全体像, 右図がオルタネーター接続部)

■ 発電制御手法

- オルタネーターの出力をスイッチングすることによるPWM制御

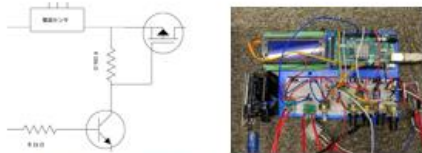


図3 開発した発電制御回路
(左図が主要部の回路図, 右図が全体像)

■ 発電効率の測定手法



- 自転車のクランクに取り付けたパワーメータの出力と発電量を比較することにより発電効率を測定

図4 実験に用いたパワーメーター

3. 実験結果

■ 発電制御回路導入前後の発電の様子

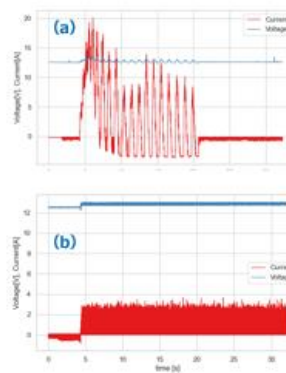


図5 発電の様子 (a) 制御回路導入前 (b) 制御回路導入後

■ 発電効率の分析結果

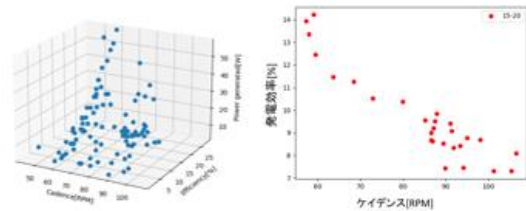


図6 ケイデンス, 発電量, 発電効率の関係

図7 発電量15~20Wにおけるケイデンスと発電効率の関係

■ 損失の分析

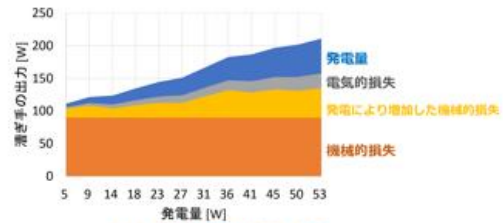


図8 発電システムの損失の概算

結論

本研究ではまずオルタネーターとローラー台を用いたエネルギーハーベスティングシステムを構築した。この発電システムでは発電電力量を制御することによって、競輪選手が練習の際に必要な負荷を調節することができる機能を付加することに成功した。このとき、本研究で使用したM27MFバッテリーの場合、2.5Aで発電すると40時間かかり、80台同時に発電すれば30分で充電可能である。発電システムを構築した後、異なる発電量やケイデンスにおける発電効率を測定した。その結果以下の2項目の内容がわかった。

- 発電量が大きくなればなるほど、発電効率も上昇する。
- ケイデンスを上げれば上げるほど発電効率上がる。

さらに、発電損失を分析することにより本システムにおける損失の大部分は機械的損失によるものであるということが分かった。

図1. マクロスケール電力の発電に関する研究に関する研究

摩擦発電機による自転車走行状況の モニタリングに関する研究



1. 研究背景と目的

- IoT社会では大量のセンサーが必要であり、電源としてすべてのセンサーにバッテリーを設けることは、コストや環境汚染面で困難である。環境からエネルギーを取り出し利用するバッテリーが不要な自己発電デバイスの開発が期待される。
- シェアサイクルの増加、新型コロナウイルスの影響による自転車の利用の増加により、メンテナンス経費削減や安全性の向上のための自転車走行状況のセンシングの必要が高まっている。
- 本研究の目的は、IoT社会に向けた自転車のタイヤと道路との間で発電する摩擦発電センサーを考案し、このセンサーによる自転車の走行状況検出の可能性を検証することである。

2. 摩擦発電機の実験

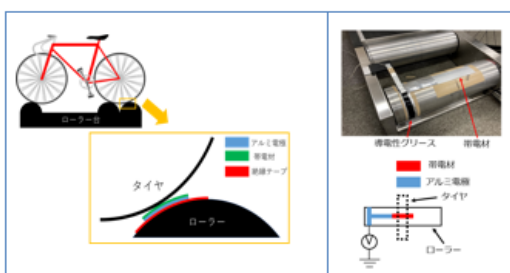


Fig.1 タイヤ・ローラー間に設置した摩擦発電機

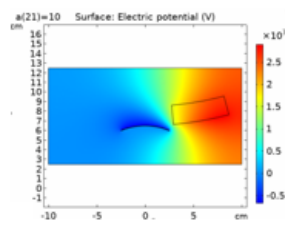
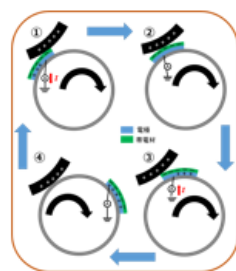


Fig.2 開発した摩擦発電機の発電メカニズム (左) およびCOMSOL Physicsによる発電シミュレーション (上)

3. 摩擦発電実験

Table 1 摩擦発電実験の条件

速度 (km/h)	10, 20, 30, 40
タイヤ空気圧 (kPa)	200, 300, 400, 500, 600
荷重 (kg)	0, 45, 60, 100
帯電材の長さ (cm)	1, 2, 3, 4, 5
帯電材	PTFE
評価方法	時速10km/hにつき上位100位のピーク値の平均 (10km/h→100点, 20km/h→200点)

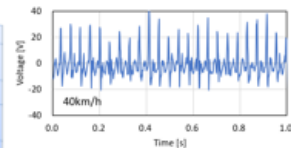
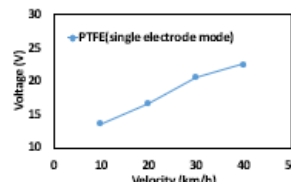


Fig.3 摩擦発電実験から得られた発電電圧波形の例

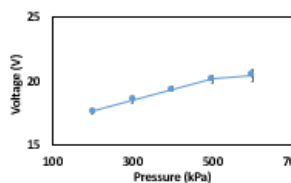
3. 実験結果

■ 走行速度に対する出力変化



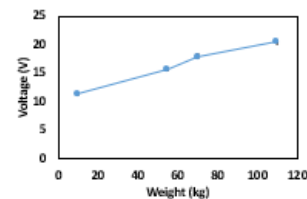
速度が上昇により、タイヤと帯電材が接触する頻度が増加することで、一度に誘導される電荷量が増え出力は増加する。

■ タイヤ空気圧に対する出力変化



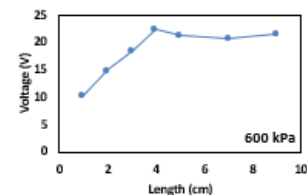
空気圧が大きくなると接触面積が減り、PTFE-ゴム間の面圧が上昇する。面圧が上昇すると真実接触面積比が大きくなり、電荷密度が増加するため、出力は増加する。

■ 荷重に対する出力変化



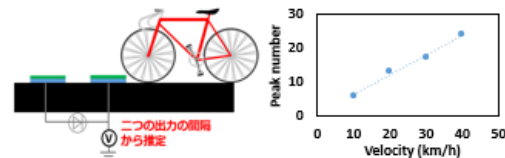
荷重が大きくなると面圧が大きくなり接触面積も大きくなるので電荷密度と接触面積が増え、出力が増加する。出力の大きさにセンシング可能である。

■ 帯電材の長さに対する出力変化



接触する長さが長くなると電極に誘導される電荷量が増え出力が上がる。
・タイヤが地面と接触する長さが最大となり、それ以上電極が長くなってもタイヤと同時に接触しないので出力が飽和する。

■ 速度センサーとしての応用例



Conclusion

- 路面に設置した摩擦発電機とタイヤとの間で発電が可能であることが分かった。走行速度、タイヤ空気圧、荷重に対して発電量は増加傾向を示す。また、帯電材のタイヤ周方向長さを変化させると出力は増加するが、タイヤが地面と接触する長さは空気圧や荷重が一定であれば一定であるため、ある一定の長さで飽和する。また雨による路面状況を想定して出力に対する水の影響を調べたところ、はじめは水の導電性によって出力が小さくなるが走行によって水が排出され、水で濡らす以前と同等の出力に回復した。
- 路面に設置した摩擦発電機を用いて速度センサーと車重センサーを実現することが可能である。速度センサーは、出力のピーク間隔を用いて速度を推定することが可能である。車重に対して出力は増加傾向を示し、ヒステリシスが生じなかったため出力の大きさを荷重センシングに用いることが可能であると考えられる。

図2. マイクロスケール電力の発電(摩擦発電)に関する研究

年以降、COVID-19の大流行により、自転車利用数が増加した。このような背景から、交通事故を低減するための自転車の安全性に関する懸念が浮上している。また、自転車の通過を検知し街灯のオンオフを切り替えることで省エネ化も可能である。自転車関連では、タイヤの回転を利用して発電するTENGが既に報告されている。本研究では、より簡単でIoT社会に向けた自転車のタイヤと道路との間で発電する摩擦発電センサーを考案した。このセンサーによって自転車の速度や車重を検出することができ、走行の安全性の向上へとつなげることができる。さらに、タイヤ内部にTENGを設置し走行中のタイヤの変形によって発電するセンサーを考案した。タイヤ内部にあるため、それぞれの自転車ごとにセンシングすることができ、例えばシェアバイクなどのメンテナンスに役立てることができる。今回我々が考案したものはタイヤ内部においても帯電材同士を直接接触させずにキープすることで、接触分離をより効率よく行うことができ、より大きな出力を得られると考えている。本研究の結果、ローラーに設置した摩擦発電機を用いてタイヤとの間で発電が可能であることが分かった。発電出力は、速度、タイヤ空気圧、荷重に対して増加傾向を示した。また、摩擦発電機のタイヤ周方向長さを変化させると、出力は増加するが、タイヤが地面と接触する長さは空気圧や荷重が一定であれば一定であるため、ある一定の長さで飽和することがわかった。さらに、摩擦発電機を用いて速度センサーが実現可能であることを実証した。速度センサーは、出力のピーク間隔を用いて速度を推定することが可能であった。

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究では、ローラー練習台を用いて「マクロスケール電力」と「マイクロスケール電力」の、二つの異なるスケールの電力を同時に発電することを目指しており、それぞれ後述のように実社会に活かされると考えている。ローラー練習台によるマクロスケール発電システムの開発は、高い発電効率の達成により、今後、非常用電力供給機能を備えた家庭用やフィットネスセンターのトレーニングマシンとして応用することが期待できる。マイクロスケール発電システムでは、自転車のタイヤとローラー間の摩擦発電を用いて自転車のIoT化を可能にする。また、タイヤと路面間での摩擦発電を行うことで道路を走行する自転車のIoT化も可能であり、今後、利用の拡大が予測されるシェアサイクルのメンテナンス費用を大幅に削減できると考える。さらに、本コンセプトは、道路を走る自動車はもちろん車のIoT化にも応用可能であると考えている。

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、表面工学、薄膜工学の観点から、機能性薄膜の創生により機械要素の低摩擦化、耐久性向上を目指して研究を行っている。そのために、表面改質や表面処理手法を屈指し、省エネルギー、省資源化によりカーボンニュートラル社会の達成に一助することを目標としている。特に、炭素系硬質膜を用いた超低摩擦、超潤滑発現の研究は相対運動をする二つの表面間の摩擦抵抗を極限までに減らすことで究極的な省エネルギーを達成するための研究である。本研究の遂行により、今まで行っていた、トライボロジー特性の制御による超低摩擦化を達成しエネルギーを極限まで削減するための研究から、積極的にエネルギーを生み出すための新しいフェーズの研

究に入ることができた。本研究をベースに、今後、究極的省エネルギーの研究に加え、積極的にエネルギーを創成する研究、また、その二つを融合した研究を引き続き行っていきたい。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

- ・ 岩崎, 崔, 自転車競技者用ローラー練習台を用いたエネルギーハーベスティング, 日本機械学会2022年度年次大会予稿集, 2022, pp. S091-01(3pp).
- ・ 福島, 崔, 摩擦発電センサーを用いた自転車走行状況のモニタリングに関する研究, 日本機械学会IIP2022情報・知能・精密機器部門(IIP部門)講演会予稿集, No.22-5, 2022, pp. A-1-1(2pp).
- ・ I. Fukushima, M. Yamamoto, J. Choi, Application of triboelectric nanogenerator as a sensor for bicycle monitoring, Proceedings of 2022JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment, 2022, pp. ODVP-59(2pp).
- ・ M. Gao, S.B. Kim, Y. Li, J. Choi, Triboelectric Nanogenerator with Enhanced Output and Durability based on Si-DLC films, Nano Energy, Vol. 105, 2023, pp. 107997 (11pp).
- ・ M. Gao, Y. Li, J. Choi, Triboelectric pad journal bearing for self-powered condition monitoring, Nano Energy, Vol. 103, 2022, pp. 107581 (10pp).
- ・ T. Yonezawa, T. Ishikawa, J. Choi, Effect of water adsorption layers on the friction properties of fluorinated amorphous carbon films in ambient air, Langmuir, Vol. 38, 2022, pp. 12894-12904.
- ・ 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.
- ・ 自転車競技者用ローラー練習台を用いたエネルギーハーベスティング, 東京大学卒業論文(2022.3).
- ・ 摩擦発電センサーによる自転車走行状況のモニタリングに関する研究, 東京大学修士論文(2022.3).

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

(URL) <https://sites.google.com/site/jhchoiut/jka補助事業>

(2)(1)以外で当事業において作成したもの

なし

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/>