

補助事業番号 2023M-391

補助事業名 2023年度 自転車競技者用のローラー練習台へのエネルギーハーベスティングデバイスの実装 補助事業

補助事業者名 東京都市大学 理工学部 機械工学科 内燃機関工学研究室 崔 峻豪

1 研究の概要

近年の地球温暖化の進行や自然災害の多発により、温室効果ガスを発生しない発電手法やマイクログリッドと呼ばれるような電力の地産地消に注目が集まっている。本研究では自転車のトレーニング機器として用いられるローラー練習台に着目した。ローラー台は3本のローラーから構成され、前方の1本のローラーで自転車の前輪を、後方の2本のローラーで自転車の後輪を保持する。この時中間部のローラーと前方のローラーがベルトでつながっていることで前輪を回転させる。この練習機器で発生するエネルギーは現在すべて捨てられている。そこで我々の先行研究では車載用オルタネータを転用した発電システムを開発した。このシステムでは負荷が小さいとき（発電量が少ないとき）の発電効率が20%以下で低くなっている。そこで本研究では発電効率の向上と実用化に向けたシステムの安定化を目指して、永久磁石同期発電機に着目した。永久磁石同期発電機はオルタネータとは異なり発電機の回転子部分に永久磁石を用いていることから回転子の励磁のために電力を消費することがないことから発電効率の向上が狙え、またブラシと呼ばれる摩耗する部分がないことからメンテナンスフリーな発電機であり実用化に向いているといえる。一方で永久磁石同期発電機の出力電圧は回転速度によって変動してしまう。そこで本研究ではバッテリーの充電特性に着目し、スイッチングレギュレータの技術を用いた発電制御システムを開発した。さらにその実用化に向けて電子基板の開発や筐体の開発、様々な条件における発電効率の測定を行った。その結果、システムの電圧変換効率は概ね90%台後半を記録した。本システムではバッテリー充電電圧を制御することにより発電電力を制御し、自転車を漕いでいる人にかかる負荷を制御することができる。また異なる発電量やケイデンスといった条件で発電効率を測定することにより、先行研究で開発された車載用オルタネータを転用した発電システムと比較して6~16%程度の発電効率の改善が確認された。以上のようにして本研究では発電システム単体の実用化のめどを立てることに成功した。

さらに、本研究ではローラー練習台のローラーと自転車のタイヤ間において摩擦発電原理を用いた発電を行った。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。波、風、歩行、走行など、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。本研究では、摩擦発電から得られる交流電圧および交流電流の波形（大きさや形）の変化から、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をモニタリングするセンサとして応用することを可能にし、自転車をIoT化することを目指して研究を行った。

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。資源の有限性に加え、環境的にはCO₂排出の問題を抱える化石燃料は、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し、ローラー台に実装することを目的とする。発電には永久磁石同期発電機を用いた発電と摩擦発電の二つの異なるスケールでの発電を同時に行う。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、オンデマンドで発電を行うことができ、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である。さらに、摩擦発電を組み合わせることにより自転車の走行状況をモニタリングすることや、走行距離、速度などの練習情報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コストの大幅な削減も期待できる。

3 研究内容

(1) 発電制御装置の開発と発電効率の評価

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

① 発電制御装置の開発:本研究で開発した発電システムは主に発電機、三相ブリッジダイオード、発電制御回路、バッテリーの4つから構成されている。図1に開発した発電システムの概要を、図2に開発した発電制御装置の概要を示す。まず発電機から出力された三相交流を三相ブリッジダイオードを用いて直流に変換する。その後本研究で開発した発電制御回路により電圧をバッテリーの充電に最適な値(制御目標電流値になる)まで降圧する。この時電流センサを用いて出力電流を監視することで電流制御を可能としている。なお本発電制御回路は最大で140Vまでの入力に対応していることから、自転車を漕ぐ人のケイデンスは最低値の4.6倍まで対応している。また電流は最大10Aまで対応していることから、最大発電電力は約300Wとなっている。本研究では前述の制御回路を実装した基板の開発を行った。このときこの制御回路が大電流を扱うことから大きな電磁ノイズを生じさせ、容易には安定動作する基板を開発することができなかった。ここで基板の開発にあたって重要となった点が主に3つある。まず、ホットループと呼ばれる入力コンデンサと上下MOSFETで構成される部分の最小化である。この部分は流れる電流がスイッチングによって大きく変化することから大きな電磁ノイズを発生させるとともに、この部分の配線距離が長いと寄生インダクタンスが増大して大きな電圧を生じる原因となる。この電圧がノイズとして働き動作不良を引き起こしてしまう。したがってこの部分の配線距離を最短に設計する必要がある。次にインダクタ着火の銅箔パターンである。本回路において最も大きな電磁ノイズを発生させているのがインダクタである。そこで本研究ではインダクタ直下の配線の有無や基板の銅箔層数を変化させて動作実験を行った。その結果、6層基板においてインダクタ直下にグラウンドベタパターンを配置した際に最も安定した動作を確認することができた。最後にパワー系のグラウンドと信号系のグラウンドを分離するという点が挙げられる。上記のようにパワー系のグラ

ンドにはノイズが大きく乗っていることから、ノイズに弱い信号系にそのノイズを載せないためにそれらのグラウンドを分離することが必要である。なおここでいう分離とは完全に絶縁するわけではなく、ベタパターンでつながずにビア等でつなぐということである。以上の点をふまえて本研究では制御回路の基板を開発した。

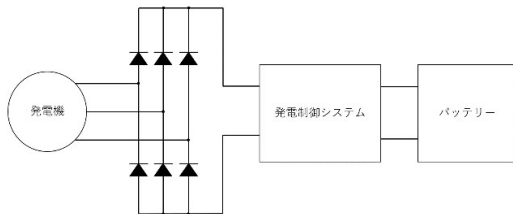


図1 開発した発電システムの概要

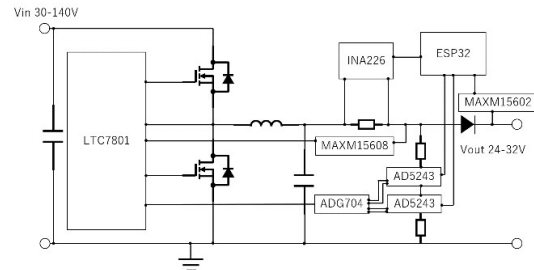


図2 開発した制御回路の概要

② 発電効率の評価: 本研究では発電システムの効率をバッテリーに充電する電力を、自転車漕いでいる人の出力で割ったものと定義する。ここで自転車を漕いでいる人の出力は自転車用クランク型パワーメータを用いて測定し、発電電力は発電システムに組み込んだ電流センサを用いて測定した。この時自転車を漕ぐ人のケイデンスと制御目標電流を変更してそれぞれの条件での発電効率を測定した。測定結果を図3に示す。この図から発電効率と発電量には正の相関があることがわかる。さらにこの図では確認しにくいことから発電量が20W～25Wの時のデータを切り出したものを図4に示す。この図より発電効率とケイデンスの間には負の相関があることがわかる。これはケイデンスを上げるほど機械部分(自転車, ローラー, 発電機)における損失が増えることが原因であると考えられる。本研究では永久磁石同期発電機を用いて自転車練習用ローラー台に搭載する発電システムを開発し、システムの電圧変換効率率は概ね90%台後半を記録した。本システムではバッテリー充電電圧を制御することにより発電電力を制御し、自転車を漕いでいる人にかかる負荷を制御することができる。また異なる発電量やケイデンスといった条件で発電効率を測定することにより、車載用オルタネータを転用した発電システムと比較して6～16%程度の発電効率の改善ができた。

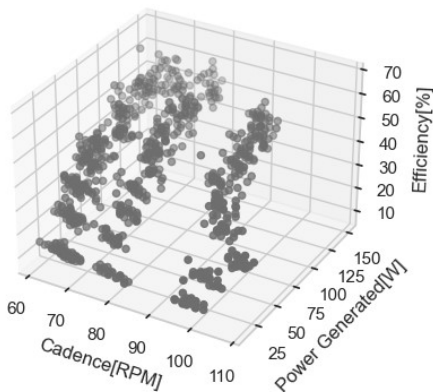


図3 測定結果の全容

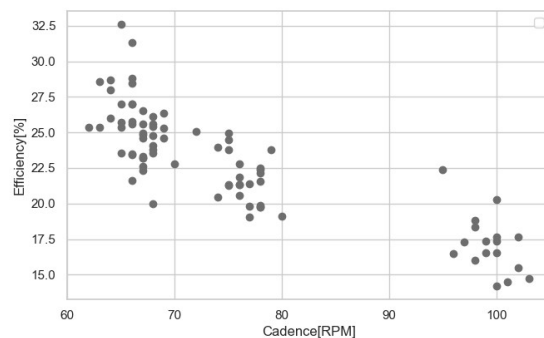


図4 発電効率とケイデンスの関係

(2) 摩擦発電機のローラー台への実装とタイヤ内圧のモニタリング

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

① ペイント帯電材の開発: 水性道路線引き塗料とPTFE粉末を混合することでペイント帯電材の開発を行った。PTFE粉末の含有量による摩擦発電機の実出力電圧への影響を調べるために、PTFE粉末の混入量を0wt%,10wt%,20wt%と変化させた3種類のペイント材を試作した。基板として120番のサンドペーパーを用いた。摩擦発電実験は独自開発した接触分離型摩擦発電試験機を用い、出力信号はオシロスコープを用いて記録した。図1に摩擦発電試験を行った結果を示す。PTFE粒子を20wt.%混合することで、発電電圧は15~16Vを示し、路面上の発電電圧(ほぼ0V)に比べ有意義な差が認められた。すなわち、路面と白線との発電量の明確な差が認められ、白線を用いた摩擦発電センサの構築が可能であることが分かった。

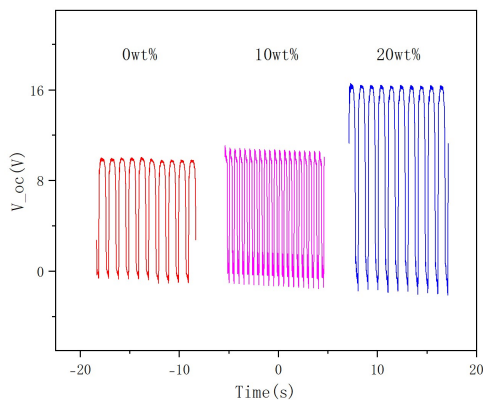


図1 ペイント帯電材からの出力



図2 ペイント帯電材のローラーへの実装

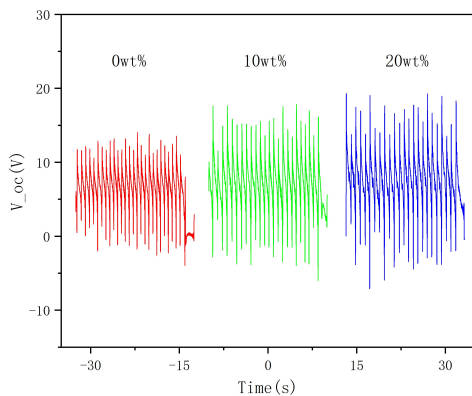


図3 実装したペイント帯電材からの出力

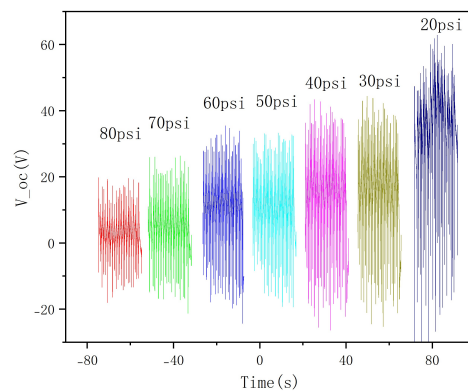


図4 出力のタイヤ内圧依存性

② ペイント帯電材のローラー台の実装: 道路標示用白線の発電特性を調べるために、図2に示すようにペイント帯電材をローラーに実装し、タイヤとの発電特性を評価した。ローラーのサイズは直径80mm、幅は120mmであった。走行時の出力装置の安定性を高めるために、信号を取り出すための配線に用いたカーボンブラシはネジを用いて固定した。図3にPTFEの含有量に対する発電電圧の変化を示す。PTFE含有量の増加とともに発電電圧が大きくなっていることがわかる。水性型道路線引き塗料にPTFE粉末を混入することでAD・DC変換回路で約15V

の出力が得られることからArduinoなどのMCUを駆動することが可能になる。摩擦発電信号と帯電材同士の接触面積は正の関係があるため、タイヤの内圧を変化させながら発電信号の変化を調べた。タイヤ圧はメーカー規定の80psiから20psiまで10psiずつ減らしながら発電電圧を測定した。その結果を図4に示す。結果に示すように、タイヤの内圧と出力信号とでは正の相関が認められ、摩擦発電信号からタイヤの内圧がモニタリングできることがわかる。

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究では、ローラー練習台と永久磁石同期発電機を用いた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。また、摩擦発電システムの開発は、自転車のタイヤとローラー間の摩擦発電から得られる発電信号を用いて自転車のIoT化が可能になる。今後、タイヤと路面間との摩擦発電信号を用いる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な削減できると考える。本原理は、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。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

本研究室では、表面工学および薄膜工学の観点から、機能性薄膜の創製を通じて、機械要素の低摩擦化および耐久性の向上を目指した研究を展開している。これにより、省エネルギー・省資源化を実現し、カーボンニュートラル社会の構築に貢献することを重要な目標としている。とりわけ、炭素系硬質膜を活用した超低摩擦・超潤滑現象の実現に関する研究は、相対運動する二つの表面間における摩擦抵抗を極限まで低減することで、究極の省エネルギーを達成しようとする取り組みである。本研究の遂行により、従来のトライボロジー特性の制御によるエネルギー削減を目指す段階から、積極的にエネルギーを創出する新たな研究フェーズへと移行することが可能となった。今後は、本研究の成果を基盤に、究極的省エネルギーの実現にとどまらず、エネルギー創成、さらにその融合による革新的技術の創出に向けた研究を継続的に推進していきたい。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

- ・ 岩崎, 崔, 永久磁石同期発電機を用いた自転車ローラー練習台発電システムの開発, 日本機械学会関東支部第30期総会・講演会講演論文集, No.240-1, 2024, pp.14E11 (3pp)
- ・ Z. Yang, M. Gao, J. Choi, Smart walking cane based on triboelectric nanogenerators for assisting the visually impaired, Nano Energy, Vol.124, 2024, pp.109485 (11pp)
- ・ S. Kimura, M. Gao, Z. Yang, J. Choi, Monitoring of lubrication behavior of metal-polymer plain bearing based on triboelectric principle, 5th Japan-Korea Tribology Symposium, トライボロジー会議2024秋名護予稿集, 2024, pp. P12(2pp)
- ・ 楊, 高, 城谷, 今村, 崔, 摩擦発電原理を用いたすべり軸受の摩耗センシング, トライボロジー会議2024春東京予稿集, 2024, pp.384-385 (F11)

- A. Farghali, T. Aizawa, J. Choi, Enhancing interfacial strength of DLC films on plasma-nitrided stainless steel, Surface and Coatings Technology, Vol.507, 2025, pp.132106 (10pp)
- Z. Yang, M. Gao, S. Imamura, T. Shiroya, J. J. Delaunay, J. Choi, Lubrication state monitoring of sliding bearing based on triboelectric Stribeck curve, Nano Energy, Vol.140, 2025, pp.111059 (13pp)
- J. Choi, Condition Monitoring of Sliding Bearings using DLC-based Triboelectric Nanogenerator, 韓国トライボロジー学会春大会予稿集, 2025, pp.17-20.
- 楊, 崔, フッ素添加DLC膜を用いた高出力・高耐久性摩擦発電機の開発, トライボロジー会議2025春東京予稿集, 2025. pp.330-331 (D29)
- 海野, ベ, 崔, シリコン添加DLC膜の水分子吸着特性および摩擦特性, トライボロジー会議2025春東京予稿集, 2025. pp.42-43 (A21)
- 永久磁石同期発電機を用いた自転車ローラー練習台発電システムの開発, 東京大学修士論文 (2024.3)
- Development of intelligent cane for the visually impaired using triboelectric principle, 東京大学修士論文 (2023.9)
- 摩擦帯電センサによるすべり軸受の潤滑状態のモニタリング, 東京大学修士論文 (2024.3)

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

<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: 東京都市大学理工学部機械工学科
(トウキョウトシダイガクリコウガクブキカイコウガクカ)

住 所: 〒158-8557

東京都世田谷区玉堤1-28-1

担 当 者: 教授 崔 竣豪(チェ ジュンホ)

担当部署: 機械工学科(キカイコウガクカ)

E-mail: choi@tuc.ac.jp

URL: <https://sites.google.com/site/jhchoiut/>