

審査の結果の要旨

氏名 ハローン アハメッド フォエド

身の回りの使われずに捨てられているわずかなエネルギーを電力として回収する環境発電技術が研究開発されている。その中で機械や人間が発する振動エネルギーを利用する振動型環境発電では、低い周波数領域で大きなストロークを有する振動を取り扱うことになるが、デバイスの小型化は高共振周波数化となり効率的なエネルギー変換が難しいという課題がある。

本研究は、小型でも低周波数で駆動し効率よくエネルギー変換が可能なことを特徴とする、フリー・インパクトモーション混合型電磁気振動環境発電のモデル化とその高いエネルギー回収効率の実証を目的としている。具体的には、デバイスへの振動入力によってコイル内部を自由に運動できる永久磁石と、その往復運動を規定しコイルを構成する軌道本体とで構成する発電デバイスを提案するものである。軌道の両端での衝突条件に応じて、(i)弾性衝突と自由運動との組み合わせ：**Free/elastic stops impact harvester (FEH)**と(ii)硬度衝突と自由運動との組み合わせ：**Free/hard stops impact harvester (FHH)**との2つに体系化している。両タイプにおける永久磁石の運動と電磁気振動発電に関して、非線形性を考慮した数学モデルを構築するとともに、シミュレーションと実験で詳細にその非線形挙動とエネルギー回収性能について論じている。

FEHは、例えば、コイルを巻いた振動軌道の両端あるいは磁石の両端にバネを置き、自由運動ストロークを確保しながら振動する構造で実現される。**FEH**は共振系であるが、いわゆるバネ質量系(**CH: Conventional Energy Harvester**)の環境発電システムとは異なり、永久磁石の自由運動のストローク比を大きく取ることによって低共振周波数を実現しながらその振幅を大きくすることができ、結果的にコイルとの相対速度を高めて発電効率を上げることができる。減衰項が大きく **Q** 値が制限されるような環境においては、**FEH**が **CH**と比較してより大きな発電が可能であることをシミュレーションで示している。これを試作した実験では、**10 Hz10mm**の入力振動に対して**8.6%**の回収効率を得た。**FEH**は、例えば、エンジンのような低い周波数入力が見られる機械構造のエネルギーの回収に適している。

一方、**FHH**では、例えば、コイルを巻いた振動軌道の両端を硬い材料で閉じて、軌道全長を自由運動ストロークとして確保しながら振動する構造で実現される。構築した数学モデルに基づいたシミュレーションによって、入力される

振動の振幅と振動数の2つのパラメータが、FHH の特徴的な4つの振動挙動、すなわち付着運動、自由運動、インパクト運動、多重インパクト運動、をどのように決定しているのかを明らかにしている。また、インパクト運動が瞬時的な回収エネルギーにどのように寄与しているかをシミュレーションで明らかにしている。FHH は非共振系であり、入力振動の振幅或いは振動数の増加によってFHH の回収エネルギーは増加する。FHH は、例えば、ウェアラブルデバイスのような特定の周波数入力が得られずかつ大きな振動入力を得られるような環境でのエネルギーの回収に適している。

プロトタイプによる実験では、自由運動する磁石の磁気極性に着目して、単一ボール形磁石、複列ボール形磁石、シリンダ形磁石を用意して、それぞれの回収エネルギー密度を評価している。回収エネルギー密度は、摩擦や粘性減衰の状況によって異なることは言うまでもないが、さらに磁気極性を一定方向に維持できるような磁石であることも重要であり、入力周波数を変えた回収エネルギーの実験的結果を用いてそれらを説明している。従来報告されてきた類似の環境発電デバイスに比べて高い回収エネルギー密度 $180 \mu \text{Wcm}^{-3}$ を実証している。

提案するデバイスは設計パラメータが多く、制約条件が発電効率に影響を与えることから、デバイスの設計指針について取りまとめてその適用範囲を明らかにしている。最後に、実用を想定して人間に装着できる全長 12mm のデバイスを試作し、歩行速度と取り付け場所を変えて実験を実施し、電圧波形や回収エネルギーの評価によって、提案したシステムの有効性を示している。

以上を要するに、提案されたフリー・インパクトモーション混合型電磁気振動環境発電システムが、FEH と FHH の2つの類型で体系化し、それぞれの非線形挙動を詳細に定式化したことは、学術的に大きな意義がある。いずれの場合においても、小型でも低周波数で駆動し効率よくエネルギー変換が可能なことを特徴とする。これまで報告された実例と比較して高いエネルギー回収効率あるいはエネルギー回収密度が得られることを実証したことは、この提案の実用可能性を示した点においても大きな成果である。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。