

審査の結果の要旨

氏名 蘇 東旭

本論文は環境から微小なエネルギーを取り出して発電を行うエナジーハーベスティングに関する研究であり、その中でも非線形振動現象を利用して、環境振動からできるだけ多くの発電を行う方法を見いだすことを目的としている。

第1章では、振動発電技術の文献調査結果が書かれており、線形振動論を基礎とした共振を利用した方法、マルチモードの振動からの発電、振動の周波数を上げて（アップコンバート）発電を行う方法、自励振動、係数励振および非線形振動からの発電に関する過去の研究成果が整理されている。それぞれの方法について欠点と利点が整理されており、過去に検討されておらず、なおかつ、有望な手段として期待される、ダuffing方程式で表される安定点が1つである非線形ばね特性を持つ振動系（以下、単安定系と呼ぶ）の調和励振と帯域制限ランダム加振からの発電と、線形ばねが負ばね特性を持つ安定点が2つある非線形ばね特性を持つ振動系（以下、双安定系と呼ぶ）の帯域制限ランダム加振からの発電を研究対象とすることが述べられている。

第2章では、ダuffing振動系、双安定系およびその確率共振系の力学の原理が説明されている。

第3章では、調和励振単安定系における振動と発電電力を上昇させる方法が述べられている。ここでは単安定系を梁の横振動系で実現し、圧電素子によって発電を行い、圧電素子に接続された外部抵抗で消費される電力を発電電力としてみなす系のモデリングが行われている。また、ダuffing振動系の実験装置が紹介され、その応答の計測結果と、実験装置の諸元を用いた数値計算によってモデルの妥当性が検証されている。さらに、系の剛性もしくは減衰係数を変化させることによって、入力振動の周波数を変化させずに応答の跳躍を起こすことができることを実験および数値計算によって示している。

第4章では、調和励振単安定系において電磁および圧電トランスデューサを用いて振動発電を行う際に、発電電力を最大にする各種パラメータ値の最適設計法が述べられている。最初に、非線形項を無視した場合の固有周波数を基準周波数とし、トランスデューサが外部抵抗に電流を流して発電を行っている際に系に減衰を与える際の等価的な減衰係数を電気減衰係数と呼び、その2つの

パラメータの最適調整について検討を行っている。そこから外部抵抗および質量の最適値も導き、数値計算によりこれらの2つのパラメータを変化させた時の発電電力の変化を求め、最適値を見つけている。また、トランスデューサの電気機械変換係数を上げることが発電電力の増加につながるが、例えばボールねじのリードのような機械的な変換機構の比の変更が実現可能な選択肢であることが述べられている。圧電トランスデューサの場合も、同様の最適設計方法が述べられている。現実の系においては、剛性が変更できないことも多いため、基準周波数を一定にした条件の下で、最適設計を行う、単一パラメータの最適設計法についても述べられている。電磁および圧電トランスデューサにおいて、様々な電気機械変換係数に対する発電電力の最大値とその際のパラメータ値が数値計算により求められている。しかしながら実際の系においては、設計条件に制約があることが多いため、より現実的な最適設計を議論するために、電気減衰係数および質量の動作範囲（ストローク）に制限がある場合の最大電力の計算法と、最適パラメータ値の導出法についても纏められている。

第5章では、線形振動系、単安定系と双安定系における帯域制限ランダム加振に対する発電性能の比較検討を行っている。公平な比較を行うため、各条件において、最適なパラメータが選択されている。基準周波数付近を中心周波数とする加振においては、非線形特性の影響が少ないため、線形振動系の発電量が比較的大きくなる。ただし、加振振動の中心周波数が基準周波数から大きく外れる場合は、双安定系の発電性能は線形系を超える。すなわち中心周波数によって、発電に適した系は変わることが示された。なお、単安定系では、どちらの場合でも、非線形特性が発電に関して効果的に作用しないため、ランダム加振からの発電には適さないことがわかった。さらに、最適な電気減衰比は双安定系が最も小さいため、電気減衰係数の値に制約がある場合には、2つの平衡点の間の質量の移動によって発電するタイプの双安定系の発電性能が最も良くなる可能性が高いので、質量のストロークに制限がある場合は、双安定系の発電性能が最も高くなる可能性が高い。すなわち、加振周波数が共振周波数に近い場合は線形系が最も発電に有利であるが、それ以外の場合とストロークと電気減衰係数に制約がある場合には、双安定系が最も発電性能が高くなる傾向があることが示された。

第6章では、確率共振の理論を利用して、周期的な力を加えることによって、双安定系において発電量を増加させることが提案されている。特に、新たに方形波を用いて加振する方法が提案され、従来は事前情報が必要だった加振振動の大きさ等が不明な場合も、確率共振を起こすことができることを示した。

第7章では、本論文の概要がまとめられ、研究の成果が述べられている。

エネルギーハーベスティングに非線形振動を利用する利点を、線形振動との比

較を行いながら、実験および数値計算を通じて示し、さらなる発電能力向上手段として確率共振の利用に触れているなど、博士論文に相応しい工学的有用性、学術的新規性および完結性を持つ論文と認識された。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。