

京都大学	博士 (工学)	氏名	横 井 裕 一
論文題目	Energy Conversion and its Control by Synchronization of Pendulum (振子の同期現象によるエネルギー変換とその制御)		
(論文内容の要旨)			
<p>現代の人間社会を支える電力送電技術と情報通信技術は同期現象をその根拠としており、その信号としての側面とエネルギー変換としての側面に由来している。本論文は、成熟した電力送電技術において研究対象として見直されることがほとんど無くなっている同期現象のエネルギー変換としての側面に再度着目し、基礎理論に基づいた検討によりエネルギー変換に関して支配的な運動状態を明らかにすると共に、位相とエネルギー変換の関係からこの支配的な運動状態への同期引込みを実現する制御手法を提案するなど、同期現象のエネルギー変換作用の工学的有用性を明らかにした一連の研究成果をまとめたものである。本論文は7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、本研究の背景および研究の意義について述べている。また、本研究の工学的応用として提案するパラメトリック振子によるエネルギースキューピングの説明も行っている。</p> <p>第2章では振子に生起する同期現象に関わる基礎事項として、位相の概念と本研究で着目するエネルギーの概念を導入している。位相は同期し得る各振動子の状態を特徴付ける変数であり、同期現象の理論構築の基礎を成す。同期現象を介したエネルギー変換は、対象とするシステムに蓄積されたエネルギーを用いて表現される。特に振子の状態は、同期状態に相当する状態空間の閉軌道近傍内において位相とエネルギーで一意に定めることができる。次に振子の同期運動状態である「振動」と「回転」を説明し、各同期運動の諸特性を一般的に解析するために、対応する自励運動と周波数引込みが生起するシステムの導入を行っている。</p> <p>第3章では、「振動」の周波数引込み現象に伴うエネルギー変換の諸特性を理論的かつ数値的に検討している。ここでは、振動の周波数引込みが生起するシステムとして、van der Pol 振動子を用いている。振動子が周期励振に引き込まれた引込み状態におけるエネルギー変換では、周期励振による供給エネルギーと減衰に伴う散逸エネルギーが等価になる。そこで供給エネルギーの応答特性を調べることにより、引込み状態におけるエネルギー変換を考察している。数値計算結果と平均法による理論結果が一致することから結果の妥当性を確認し、理論結果から供給エネルギーと振動振幅および位相との関係を明らかにした。その結果、振動の引込み状態におけるエネルギー変換量は振動振幅に伴い増大し、位相に依存しないことを確認した。次に、周波数引込みの過渡現象に相当する引込み過程におけるエネルギー変換を、振動子の蓄積エネルギーの変化に基づいて解析している。引込み過程を理論的に扱うために位相方程式を導出し、位相のダイナミクスと蓄積エネルギーの関係から引込み過程におけるエネルギー変換を考察した。その結果、振動の引込み過程を表す位相の変化はエネルギー変換と無関係であることを理論的に確認した。これは、振動の周波数引込みにおいてエネルギーが振動振幅にのみ依存し、位相に影響されないことに起因している。</p> <p>第4章では、「回転」の周波数引込み現象に伴うエネルギー変換の諸特性を理論的な</p>			

京都大学

博士（工学）

氏名

横井裕一

らびに数値的に検討している．ここでは，回転の周波数引込みが生起するシステムとして，機械振子や Josephson 接合回路，位相同期回路，一機無限大母線系統などを記述する位相同期系を採用している．また振動との比較のために，第3章と同様の方法で解析を行っている．回転の引込み状態に対して，数値計算結果と一致し妥当性が確認された理論結果からエネルギー変換量が回転周波数に伴い増大することを示した．続いて引込み過程におけるエネルギー変換の解析において，過減衰でない場合に対して位相方程式を導出し，引込み過程におけるエネルギー変換を考察した．その結果，回転の引込み過程を表す位相の増減は蓄積エネルギーの引込み状態からの偏差量に比例することを確認した．この結果は，エネルギー授受による位相調整の可能性を示唆するものである．また，本章では第3章の結果と比較することで，振動と回転という振子の同期運動におけるエネルギー変換の差異を明らかにしている．振動ではその振幅がエネルギー変換量に依存し，回転では位相の時間変化が支配的である．また，エネルギー変換量の観点で回転に優位性があることを確認した．

第5章では，同期現象に伴うエネルギー変換の工学的応用であるパラメトリック振子において，エネルギー変換量の意味で有用なその周期回転を初期状態に依存することなく発現させる時間遅れ要素を含む制御法を提案している．この制御は，第4章で得られたエネルギー授受による位相調整に基づいており，位相の状態は1周期間での角変位の変化で計測可能であり，エネルギー授受は印可するトルクの大きさと方向で調節される．提案手法は，カオス制御として提案されている時間遅れフィードバック制御と同形式であり，制御対象の厳密な数理モデルを必要としないという優位性を有している．この性質は，工学的応用での制御系の実装において非常に有効となる．ここでは，調整が必要な制御ゲインに関して，提案する制御法の性能を数値的に検討している．その結果，提案手法の性能は制御ゲインに依存するものの，初期状態に依存することなく周期回転を始動可能な制御ゲインが存在することを明らかにした．

第6章では，パラメトリック振子の非線形力学を表す機械振子装置を設計・製作し，第5章で得られた数値結果を実験的に検証している．まず機械振子の周期回転の確立および共存する運動を確認し，提案した制御法により共存する運動状態から周期回転を発現できることを実験的に示すことで，提案手法の有効性を確認した．ここで，制御対象の厳密な数理モデルを必要としないという提案手法の性質により，制御法は実験装置に容易に実装できる．また，遅延時間のずれに関する提案手法の性能を検証することで，エネルギーキャベンジング応用において厳密な励振周波数を把握できない場合や，励振周波数が増加する場合における制御法の実際上の利用可能性を明らかにした．さらに，パラメトリック振子の周期回転による加振機の励振からのエネルギーキャベンジングを実験的に確認し，機械振子に取り付けた回転機により電気エネルギーとして振動エネルギーを収集した結果を得ている．

第7章は，本論文の結論であり，得られた成果を要約すると共に，今後の研究課題について要約している．

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、広く自然界ならびに工学システムに普遍的に生起する同期現象に関して、その現象を介したエネルギー変換作用に着目し、特性の基礎理論に基づいた検討によりエネルギー変換に関して支配的な運動状態を明らかにすると共に、位相とエネルギー変換の関係からこの支配的な運動状態への同期引込みを実現する制御手法を提案するなど、同期現象のエネルギー変換作用の工学的有用性を明らかにした一連の研究成果をまとめたものである。本論文により得られた主要な結果は以下の通りである。

- (1) 振子に現れる2種類の典型的な運動状態である「振動」と「回転」に対し、周波数引込み現象に伴うエネルギー変換作用を理論的に示した。その結果、各運動状態のエネルギー変換が互いに異なることを明らかにした。同時に位相縮約理論に基づき、各引込み現象が同形式の位相方程式で記述されることを確認し、位相の観点から同様のメカニズムで発生することを示した。また、エネルギー変換作用の観点から各運動状態を比較することで、それぞれの特徴を明らかにした。
- (2) 特に回転に対しては、過減衰でない場合に関して、周波数引込み現象を記述する位相方程式を導出した。さらに、エネルギー変換作用の関係を理論的に検討し、エネルギーの偏差量と位相の時間変化が表す引込み現象のメカニズムの関係を見出した。これは、エネルギー授受により位相の調整が可能であることを示唆するものである。
- (3) 振動および回転が共存する非線形素子であるパラメトリック振子に着目し、工学的応用に有用なその周期回転を、初期状態に依存することなく発現させる時間遅れを用いた制御法を提案した。実際に機械振子装置を設計・製作し、その周期回転の確立および特性を実験的に確認すると共に、結果の妥当性を数値的に検証し、提案した制御法の工学的応用上の有効性を実験的、数値的に確認した。また、提案した制御法を適用したパラメトリック振子を波動発電機構に適用できる可能性を示した。
- (4) エネルギー的に異なる特性を有する共存する複数の同期運動状態に対して提案した制御手法を適用し、各同期状態を選択的に達成可能であることを数値的および実験的に検証し、提案手法の有効性を示した。これらの結果より、本手法を同様の位相構造を有する系に適用できる可能性を得た。

上記のように、本論文は同期現象に伴うエネルギー変換作用の諸特性を理論的に検討した結果に基づき、同期現象のエネルギー的観点からの有用性を明らかにすると共に、振子の回転状態の発現に関して、エネルギーと位相の関係に基づく制御法の提案を行ったものである。基礎理論からエネルギー変換およびその制御、応用に展開した、極めて意義深く優れた研究であり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成22年12月28日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。