

氏名	Wei Weiyang		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博甲第9415号		
学位授与年月日	令和2年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	システム情報工学研究科		
学位論文題目	高速鉄道に生じる蛇行動のヒステリシス特性 (軌条輪を利用した実験及び非線形解析)		
主査	筑波大学 教授	工学博士	藪野 浩司
副査	筑波大学 教授	工学博士	水谷 孝一
副査	筑波大学 教授	Ph. D. (工学)	堀 憲之
副査	筑波大学 教授	工学博士	坪内 孝司
副査	筑波大学 教授	博士(情報科学)	望山 洋
副査	慶應義塾大学 教授	工学博士	杉浦 壽彦

論文の要旨

本論文は、鉄道車両に生じる蛇行動に関する非線形特性を理論的並びに実験的に明らかにしたものである。蛇行動は車輪と線路との間に生じるクリープ力に起因して生じる自励振動で、物理的にはいわゆる循環項によって生じる非保存力による動的不安定現象である。従来の研究では、線形安定性解析により蛇行動の臨界速度が明らかにされてきた。さらに軌条輪装置を利用した実験的な検討も行われてきた。これに対し、近年の鉄道車両の高速化や安全性へ要求が厳しくなる中で、外乱の大きさに依存した安定性解析の必要が急務になっている現状を踏まえて、蛇行動に関する非線形特性解析が理論的・実験的に行われた。

理論解析においては、ヒステリシス現象を解析するため、5次の非線形性までを考慮した運動方程式(非線形のパラメータを16個を含む)に対して、中心多様体理論を利用した低次元化が行われ、2次系のシステムへ簡約化され、非線形現象を支配する本質的なパラメータ3つが特定された。これによって、分岐曲線を描き、蛇行動の5次の非線形特性が明らかにされた。特に亜臨界ホップ分岐とサドルノード分岐が発生し、ヒステリシス現象が生じる場合が詳細に解析され、線形解析では特定できない非線形臨界速度、ヒステリシス現象が理論解析により明らかにされた。実験に関しては、パラメータスタディーが実車よりも容易なため、古くから利用されている軌条輪試験装置に注目し、これまで行われてきた線形蛇行動速度に関する実験に加えて、非線形の蛇行動特性も計測できることが明らかになった。さらに、理論で導出された非線形蛇行動特性を特定する2つの非線形パラメータを実験的に同定する手法が提案され、実験によってその妥当性が示された。

審査の要旨

【批評】

本テーマは、鉄道車両の高速化に向けた安定性解析に関するものであり、近年の鉄道輸送に対する社会のニーズにマッチしている。とくに、高速化に向けて、有限外乱に対する蛇行動の安定性は、安全性を評価するうえで非常に重要であるが、従来の研究では十分に明らかにされていないことに注目したテーマ設定は、妥当なものである。

鉄道車両は多自由度系であるが、蛇行動特性の本質は2自由度で記述できることに注目して、非線形性を5次まで考慮して、運動方程式を導いている。方程式の解析はこれまで主として数値計算によっておこなわれてきたが、本研究では中心多様体理論や標準形をつかって、解析的におこなわれており、パラメータスタディーが行われ、蛇行動の非線形特性が、定性的に明らかにされている。この点が従来研究にはない、本研究の寄与の一つである。これによって、ホップ分岐やサドルノード分岐といった、いわゆる分岐理論の言葉で、蛇行動の非線形特性が特徴づけられた。そして、運動方程式に16個含まれるパラメータは簡約化された式では2つになることが明らかにされたことは、非線形蛇行動解析のさらに詳細な解析に向けた基礎的知見として、評価できる。

非線形蛇行動に対する実験的な研究はこれまで、実写走行試験に頼ってきた。その一方で、線形蛇行動に関する研究は、実車試験とともに軌条輪装置と呼ばれる特殊な装置を併用して行われてきた。軌条輪試験装置はパラメータを広く変えることができるという点で有利である。そこで、本研究では非線形蛇行動の実験的な検討が軌条輪装置でも可能であることを明らかにした。この結果は、蛇行動の非線形特性の実験解析が容易になったことを意味し、実験的アプローチの今後の発展に大きく寄与するものである。さらに、理論で明らかになった、非線形特性を支配する2つのパラメータを実験的に同定する方法が提案されている。運動方程式の非自己随伴性に注目した解析法を提案し、その解析結果から、2つのパラメータが実験で得られる非線形蛇行動現象の分岐曲線の特徴点（亜臨界ホップ分岐点とサドルノード分岐点）の値から、直接的に関連付けられることを見出した。この結果を用いて、2つのパラメータを実験同定する手法を提案している。これは、鉄道車両システムに発生する非線形蛇行動現象を実験から特徴づける手段を与えたことに対応しており、非線形蛇行動解析に大きく寄与するものである。

【最終試験の結果】

令和2年2月4日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。