

令和 3 年 6 月 6 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04029

研究課題名（和文）蛇行動回避のための分岐解析に基づく車両パラメータ最適化

研究課題名（英文）Vehicle Parameter Optimization Based on Bifurcation Analysis for Avoiding Hunting Motion

研究代表者

安藝 雅彦（AKI, Masahiko）

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号：60560480

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：レール・車輪間に作用する非線形クリープ力によって発生する非線形蛇行動のホップ分岐を対象に、分岐特性を変化させるための車両パラメータを検討した。非線形クリープ力を含む1軸台車モデルの運動方程式を定式化し、この運動方程式を元に、中心多様体理論によりダイナミクスを低次元化し、蛇行動のリミットサイクルの振幅と各パラメータの関係を求めた。支持ばね剛性と分岐特性の関係では、ばね剛性がある一定以上に大きくなると超臨界ホップ分岐が発生し、それよりもばね剛性が小さいと亜臨界ホップ分岐となった。一方、輪軸質量は分岐特性に影響しなかった。これら結果より、車両パラメータ設計により分岐制御が可能であることが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

機械力学分野で分岐解析の手法によりホップ分岐特性を変化させようとする研究は多くない。本研究では鉄道車両における非線形蛇行動現象を対象として、ホップ分岐の特性を亜臨界ホップ分岐から超臨界ホップ分岐へと変化させるためのパラメータ設計を扱った。研究成果をさらに進めて、分岐特性を変化させるための車両パラメータ設計法を確立することで車両設計の利用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This research deals with a bifurcation analysis and bifurcation control of a nonlinear hunting motion caused by a non-linear creep force. The reduced-order model of the equation of motion of the single axle truck were obtained by the center manifold theory. The relationship between the amplitude of the limit cycle of hunting and each parameter using the bifurcation analysis. Based on the relationship, bifurcation characteristics were investigated. When the spring constant of the axle springs were higher than a certain level, supercritical Hopf bifurcation occurs, and when the spring constant is smaller than a certain level, subcritical Hopf bifurcation occurs. On the other hand, the wheelset mass did not affect the bifurcation characteristics.

研究分野：機械力学

キーワード：蛇行動 自励振動 分岐解析

1. 研究開始当初の背景

鉄道車両はある走行速度(蛇行動限界速度)以上になると蛇行動と呼ばれる自励振動が発生する。蛇行動は乗客が不快感を覚える乗心地の悪化だけでなく、レールの破壊や脱線の危険すら生じる走行安全上の問題もある⁽¹⁾。従来、蛇行動を抑制するために台車と輪軸間の支持ばね設計がなされてきた。この支持ばね設計では、レールと車輪間の力の非線形性を線形化がなされている。しかし、この設計式では蛇行動限界速度の正確な見積もりが難しいことが知られている⁽²⁾。近年では、レールと車輪間の力の非線形性を考慮した蛇行動挙動のシミュレーション⁽²⁾や非線形性により発生する蛇行動の分岐現象を解析した研究^{(3),(4)}が行われている。

このように非線形性を考慮し分岐解析を行うと蛇行動限界速度未満でも外乱によって蛇行動が発生する可能性が明らかになる。これは蛇行動の分岐特性が亜臨界ホップ分岐になることが多いことに起因する。しかし、車両パラメータの最適化によって分岐特性を亜臨界ホップ分岐から超臨界ホップ分岐に変更することで、蛇行動限界速度未満における蛇行動発生の可能性を排除しようとする研究はほとんど行われていない状況であった。

2. 研究の目的

本研究では地震やレール継ぎ目通過などの外乱によって蛇行動限界速度未満でも蛇行動が発生する危険性を排除するために、図1のように分岐解析に基づき亜臨界から超臨界にホップ分岐の特性を変更するように車両パラメータを最適化することである。

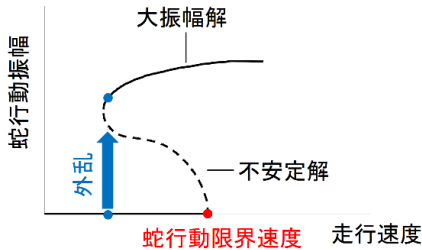


図1 非線形蛇行動の分岐特性

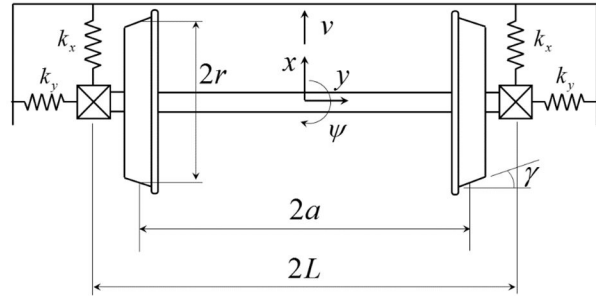


図2 本研究で用いた車両モデル

3. 研究の方法

輪軸の非線形蛇行動現象を検討するため、図2に示す1軸台車モデルを用いた。

この運動方程式は式(1)で表される。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{2f_{22}}{m\omega_v^2} \frac{dy}{dt} + \frac{2k_y}{m\omega_v^2} y - \frac{2f_{22}}{m\omega_v^2} \psi + \frac{a^2}{m\omega_v^2} F_t &= 0 \\ \frac{d^2 \psi}{dt^2} + \frac{2a^2 f_{11}}{I\omega_v^2} \frac{d\psi}{dt} + \frac{2f_{11} a^2 \gamma}{I\omega_v^2 r} y + \frac{2k_x L^2}{I\omega_v^2} \psi &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 v は速度、 y は輪軸の横変位、 ψ はヨー角、 m は輪軸の質量、 I は輪軸のヨー慣性モーメント、 r はレールとの接触点における車輪半径、 a はレール間隔の半分、 L は軸箱間隔の半分、 k_x, k_y は支持剛性、 f_{11}, f_{22} はクリープ係数である。さらに非線形クリープ力 F_t は

$$F_t = \alpha_{yyy} y^3 \quad (2)$$

とした。ここで α_{yyy} は非線形項の係数である。

この運動方程式を元に中心多様体理論によりダイナミクスを低次元化し、蛇行動のリミットサイクルの振幅と各パラメータの関係を得た。なお、これら非線形振動解析は Mathematica を用いた数式処理を行った。

4. 研究成果

蛇行動のリミットサイクルの振幅と各パラメータの関係に表1の車両パラメータを用いてリミットサイクルの振幅を計算した。図3は支持ばね剛性を変化させたときの走行速度に対する蛇行動リミットサイクルの振幅であり、図4は輪軸の質量を変化させたときの走行速度に対するリミットサイクルの振幅である。これを元に各パラメータ値を変動させたときの分岐特性を調査した。

図3における支持ばね剛性と分岐特性の関係では、ばね剛性がある一定以上に大きくなると超臨界ホップ分岐が発生し、それよりもばね剛性が小さいと亜臨界ホップ分岐となった。また、

$k_x = k_y = 2.13$ [MN] を境に分岐特性が変化した。

図 4 における輪軸質量と分岐特性の関係では、すべて亜臨界ホップ分岐となり分岐特性は変化しなかった。

これら結果より、車両パラメータ設計により分岐制御が可能であること確認できた。

表 1 車両パラメータ

項目	単位	値
輪軸質量 m	kg	1612
輪軸のヨー慣性モーメント I	$\text{kg} \cdot \text{m}^3$	881
レールとの接触点における車輪半径 r	m	0.46
車輪踏面勾配 γ	-	0.132
レール間隔 $2a$	m	1.435
軸箱間隔 $2L$	-	2.0
前後方向の支持剛性 k_x	MN/m	2.0
左右方向の支持剛性 k_y	MN/m	2.0
縦クリープ係数 f_{11}	MN	13.7
横クリープ係数 f_{22}	MN	11.1
非線形項 α_{yyy}	N/m^3	5.0×10^{11}

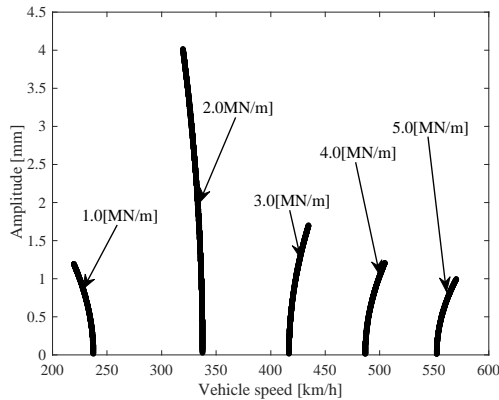


図 3 軸ばね剛性の蛇行動特性への影響

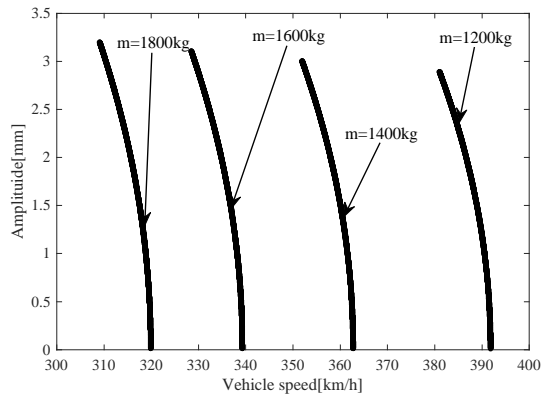


図 4 輪軸質量の蛇行動特性への影響

これらの結果を元にマルチボディダイナミクスソフトウェア Simpack を用いたシミュレーションによる分岐特性の変化の検証およびパラメータ最適化、車輪踏面形状と分岐特性の関係と模型実験(図 5 の環境を構築した)による検証については未達成であり、今後の研究においてそれらの項目についても実施する予定である。

< 引用文献 >

- (1) Knothe, K. and Böhm, F., "History of Stability of Railway and Road Vehicles", Vehicle System Dynamics, Vol.31, Issue 5-6 (1999) pp.283-323.
- (2) 坂本東男, 山本三幸, "台車振動に及ぼすクリープ力非線形特性の影響", 日本機械学会論文集中編, Vol.52, No.473 (1986), pp.302-309.
- (3) Yabuno, H., Okamoto, T. and Aoshima, N.: Effect of Lateral Linear Stiffness on Non-linear Characteristics of Hunting Motion of a Railway Wheelset, Meccanica, Vol. 37, No. 6 (2002), pp. 555-568.
- (4) Oldrich Polach and Ingo Kaiser, "Comparison of Methods Analyzing Bifurcation and Hunting of Complex Rail Vehicle Models", Transactions of ASME Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, (2012), 041005-1 - 041005-8.

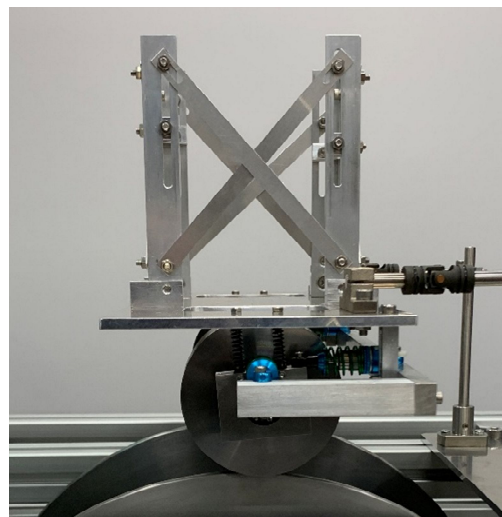


図 5 模型実験環境の構築

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Masahiko AKI and Yuki TANAKA
2. 発表標題 Simultaneous Control of Tilting and Vibration for Car-body by Air Springs
3. 学会等名 The 14th International Conference on Motion and Vibration Control (MoViC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安藝雅彦, 田中友基
2. 発表標題 空気ばねによる車体傾斜と振動の同時制御 (半車両モデルによる制御シミュレーション)
3. 学会等名 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2018 (D&D2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taichi WATANABE and Masahiko AKI
2. 発表標題 Vibration Control of Air Spring Type Tilting Train
3. 学会等名 The 15th International Conference on Motion and Vibration Control (MoViC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

日本大学研究者情報システム
<http://kenkyu-web.cin.nihon-u.ac.jp/Profiles/129/0012859/profile.html>
日本大学理工学部機械工学科 堀内・安藝研究室ウェブサイト
<http://www.mech.cst.nihon-u.ac.jp/studies/horiuchi/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------