

## 車体振動を用いた浮きまくらぎ検知手法の数値的検討

東京大学 学生会員 ○久野 元  
 東京大学 正会員 蘇 迪  
 東京大学 正会員 長山 智則

### 1. はじめに

浮きまくらぎとは、敷設された軌道内において、無荷重状態でまくらぎがバラストに接触せず、隙間が生じている状態である。浮きまくらぎにより、レールやバラストに衝撃的な荷重が作用することで、軌道状態が急速に悪化し、放置すれば輪重の変動より脱線の危険性を高めるため、検知の重要性が高い。しかし、浮きまくらぎは、軌道検測車や目視による検知が困難であり、評価方法が確立されていない。一方、浮きまくらぎは車両が走行するときのみ変位が発生するので、車体振動に影響があらわれると予想される。また、車体振動は各種車載設備による計測が容易であることから、本研究では、車体振動応答を用いた浮きまくらぎ検知手法を提案する。まず、汎用のマルチボディシミュレーションである SIMPACK を用いて、標準車両モデルに発生する振動応答を算出する。その後、様々な浮きまくらぎの発生状況において、算出した車両の振動応答を対象として、検知手法を検討する。

### 2. マルチボディシミュレーション

#### 2. 1 シミュレーション条件

日本の在来線特急車両を想定した剛体車両モデルを作成し<sup>1)</sup>、軌道モデルは図1の移動支持ばねモデルを採用し有道床軌道を再現した。また、浮きまくらぎは、レール下の上下支持ばね・減衰係数を低下させることで再現することを提案した。上下支持ばね・減衰係数の推移については、図2の離散支持ばねモデルを作成し、まくらぎ下のばねに遊間を設定することで浮きまくらぎを再現し、等価のばね・減衰係数を同定した。また、軌道狂いは、アメリカ連邦鉄道局 (FRA) の管理基準である PSD からランダムに作成し、浮きまくらぎとは独立に入力した。本研究では、現実的な軌道狂いレベルである Moderate、Poor、Very Poor の軌道狂いを入力し、走行速度は 20, 25, 30m/s について検討した。

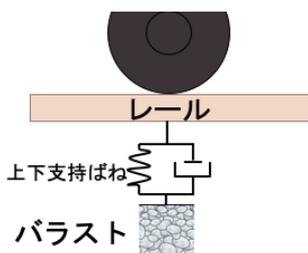


図1 移動支持ばねモデル

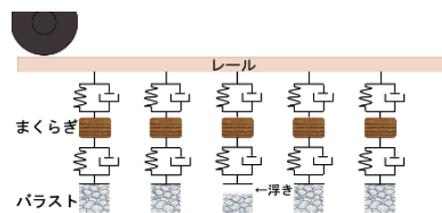


図2 離散支持ばねモデル

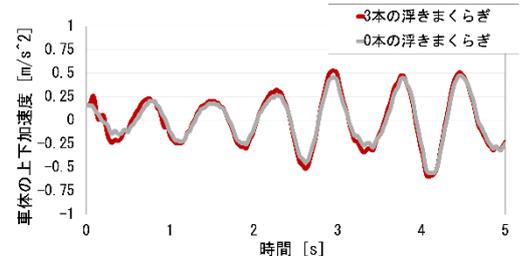


図3 車体上下振動応答比較

#### 2. 2 数値解析結果

浮きまくらぎの発生本数は1~5本とした。数値解析結果の一例として、図3に走行速度 20m/s、軌道狂いレベル Moderate の条件で、3本の浮きまくらぎが発生している軌道と発生していない軌道上を走行したときの車体上下振動を比較した。浮きまくらぎ以外の条件は全て同じである。0s 時点で浮きまくらぎ発生区間に入っており、影響区間は 1.2~3.0m 程度、車体の全長が 20m 弱であるので、走行速度 20m/s では通過するのに 1 秒程度かかる。微小な違いが観察できるが、単なる閾値により浮きまくらぎ発生位置を特定することは困難であると考えられる。

### 3. 検知手法の検討

#### 3. 1 検知手法の概要

キーワード 浮きまくらぎ, マルチボディシミュレーション, LSTM

連絡先 〒113-8654 東京都文京区本郷7丁目3-1 東京大学工学部 社会基盤学科 TEL 03-5841-6097

浮きまくらぎは上下振動に最も大きな影響が表れるため、検知用入力データは車体上下振動とし、サンプリング周波数は、簡易な振動計測装置を想定し 100Hz とした。また、浮きまくらぎの影響が大きく現れる帯域のバンドパスフィルタをかけた。浮きまくらぎの影響区間が 1.2~3.0m 程度であるため、走行速度 20m/s では、4~25Hz の帯域である。本研究では、自己回帰モデルを用いた検知手法を検討する。自己回帰モデルとは、過去の値を用いて未来の値を予測するモデルであり、例えば、 $t$  の時点の観測値を  $x_t$  とすると、 $x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+\tau}$  のデータを用いて、 $x_{i+\tau+1}, x_{i+\tau+2}, \dots$  の値を予測するようなものである。正常データを用いて作成した自己回帰モデルは、値の振る舞いが変化した位置では、予測値に誤差が発生する。その予測誤差を用いて、変化点を検知する手法が自己回帰モデルを用いた検知手法である<sup>2)</sup>。

本研究では、LSTM と呼ばれる時系列相関を考慮できるニューラルネットワークモデルを、走行速度・軌道狂いレベルごとに、浮きまくらぎの発生していないときの車体振動データによって学習させ、自己回帰モデルを作成した。この自己回帰モデルに浮きまくらぎ上を走行したときの車体上下振動のデータを入力すると、浮きまくらぎが発生した位置で予測誤差が大きくなり、発生位置を特定することができる。

異常度を  $x_{i+\tau+1}, x_{i+\tau+2}, x_{i+\tau+3}, x_{i+\tau+4}$  の予測誤差のマハラノビス距離と定義し、この異常度が従うカイ二乗分布をモーメント法によって推定し、右側累積確率が閾値より小さくなる位置を浮きまくらぎ発生位置と特定した。右側累積確率の閾値は本来誤報率などから決定する必要があるが、誤報率の事前検討が存在しないため、本研究では誤検知数の期待値が 1 時間に 1 個程度となる  $3 \times 10^{-6}$  とした。

### 3. 2 検知手法の結果

図 4 に走行速度・軌道狂いレベルごとの浮きまくらぎ検知成功率を示した。軌道狂いレベル Poor では、走行速度によって検知成功率に違いがないため、重なって表現されている。

図 4 より、走行速度 20m/s ・軌道狂いレベル Moderate では、2 本以上の浮きまくらぎを高い確率で検知できていることが分かる。走行速度が速くなることで検知成功率は若干下がり、軌道狂いレベルが悪くなると検知成功率が大幅に下がっていることが分かる。これらは、軌道狂い成分由来の振動が大きくなると浮きまくらぎによる影響が埋もれてしまうことが原因であると考えられる。

### 4. まとめ

本研究では、軌道支持ばね係数を低下させることで浮きまくらぎを再現し、マルチボディシミュレーションにより、車体振動を算出した。算出した車体振動に対して、LSTM による自己回帰モデルを用いた検知手法を適用し検討した。走行速度 20m/s ・軌道狂いレベル Moderate という条件ならば、高い確率で浮きまくらぎを検知できたが、走行速度があがり、軌道狂いレベルが悪化すると検知成功率が下がることが分かった。

### 謝辞

研究にあたり公益財団法人鉄道総合技術研究所の田中氏に貴重なご助言を賜りました。ここに深く謝意を示します。

### 参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：解説 鉄道に関する技術基準（土木編）-挑戦するエンジニアのために-，鉄道総合技術研究所，pp734-735，2002.
- 2) 井手剛：入門機械学習による異常検知，コロナ社，pp205-212，2015. 3.

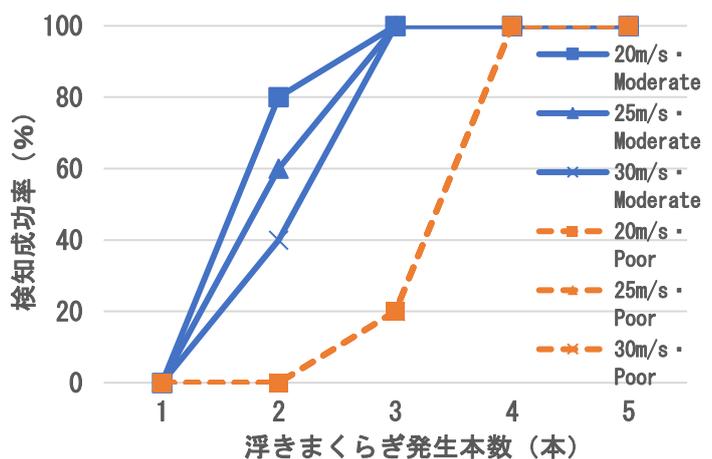


図 4 走行速度・軌道狂いレベルごとの検知成功率