

## 3605 乗り上がり脱線予兆検知手法の実車シミュレーションによる検証

正 [機] 安藝 雅彦 (東大)      ○ 学 [機] 辻 隆史 (東大院)  
正 [機] 洪 介仁 (東大院)      フェロー [機] 須田 義大 (東大)  
山下 高賢 (西日本旅客鉄道 (株))      日置 潤一 (西日本旅客鉄道 (株))  
国見 敬 (曙ブレーキ工業 (株))      [機] 川鍋 哲也 (曙ブレーキ工業 (株))

### Validation of a Method of Derailment Detection in Predictive Signs by Using a Real-Scale Vehicle Simulation

Masahiko AKI, The University of Tokyo, 4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo  
Takashi TSUJI, The University of Tokyo, 4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo  
Chiehjen Hung, The University of Tokyo, 4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo  
Yoshihiro SUDA, The University of Tokyo, 4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo  
Takayoshi YAMASHITA, West Japan Railway Company, 2-4-24, Shibata, Kita-ku, Osaka  
Junichi HIOKI, West Japan Railway Company, 2-4-24, Shibata, Kita-ku, Osaka  
Takashi KUNIMI, Akebono Brake Industry Co. Ltd, 5-4-71, Higashi, Hanyu-city, Saitama  
Tetsuya KAWANABE, Akebono Brake Industry Co. Ltd, 5-4-71, Higashi, Hanyu-city, Saitama

A non-conventional derailment detection system is validated by using a real-size vehicle dynamic simulation. The feature of proposed system is a fast detection before accident of wheel-climb derailment. The new derailment system was validated by using experiments of a 1/10 scale vehicle and availability of this system was indicated for the vehicle derailment in the experimental setup. In this paper, a vehicle model of a real-size commuter train is modeled by using SIMPACK and used for dynamic simulation of wheel-climb derailment in the next step. By using the real-size simulation model, our derailment system is examined in four derailment conditions. The effectiveness of our non-conventional system in a real-scale is shown by using the results of derailment simulation.

**Keywords:** Railway-Vehicle, Derailment Detection, Wheel-climb, Safety, Multibody Dynamics Simulation

#### 1. 緒言

鉄道車両の走行安全性の一層の向上には、車両の異常挙動を検知し事故の未然防止を図り、さらに万一事故が発生した場合の二次被害防止を図るシステムの構築が望まれている。例えば、列車の一部の車両での車輪脱線では、それに気付かずに走行を続けると大事故に繋がることから、異常挙動や兆候を検出して直ちに列車を停止させるようなシステムが好ましい。

このような背景から、脱線後の二次被害拡大を防ぐための脱線検知に関する研究が行われている<sup>1)4)</sup>。一方、脱線現象においては様々な形態があり、それらのメカニズムには未解明の部分があるため、脱線の予兆検知システムは実現していない。脱線予兆検知システム実現のためには信頼性の確保が重要であり、さらに高価で高精度のセンサを多数配置するのではコストの観点から現実的でない。

そこで本研究では、脱線予兆検知システムを提案し、その実現のための基礎的な検討を行ってきた<sup>5)7)</sup>。提案

しているシステムでは、既存の鉄道車両にも適応可能な安価な自動車用 MEMS 加速度センサ及び角速度センサの有効性の検証を行い、また 1/10 スケール模型シミュレーションによってセンシング位置の検討を行ってきた。さらに、1/10 スケール模型実験によって脱線実験を行い、実験結果を元に脱線予兆検知アルゴリズムを構築し、提案する脱線予兆検知システムの有効性を検証してきた。

次なる段階として、提案している脱線予兆検知システムを実スケールの鉄道車両に対して適用し、その有効性を検討することが課題である。そこで本稿では、SIMPACK を用いた実車両の乗り上がり脱線シミュレーションを行い、そのシミュレーション結果に対して提案する脱線予兆検知アルゴリズムを適用し予兆検知時間を検討することで、脱線予兆検知システムの有効性を検証する。

#### 2. 脱線予兆検知システム

本章では、著者らが提案している脱線予兆検知システ

ムを説明する。この脱線予兆検知システムの概念を図1に示す。提案しているシステムとは車両に取り付けたセンサによってオンラインで車両の状態を計測し、これらの状態量を脱線予兆検知アルゴリズムに通すことで、車両に脱線の危険が生じたときに未然に警報を発生させるシステムである。脱線前に検知できるシステムであるため、事前に急ブレーキを掛けることも可能である。

これを実現するためには車体の状態センシングに安価で実績のあるセンサを使用することが必要である。そこで既存の車両にも適用可能なセンサとして、自動車用MEMS 加速度及び角速度センサを利用した検知システムを提案している。

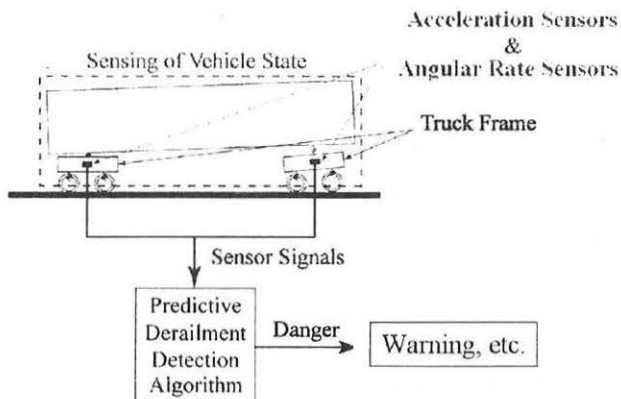


図1 脱線予兆検知システム概要

これまで著者らは、このシステムを実現するためのセンサの選定を行い、1/10 スケール車両模型実験を通じてセンシング位置の検討と脱線予兆検知アルゴリズムの提案を行ってきた。その結果から模型実験の脱線を予兆できる脱線予兆検知アルゴリズムを構築した(図2)。その予兆検知アルゴリズムの内容とは、車両走行速度に依存した2種類の閾値を設定し、これらによって判定するものである。まず一つ目の判定条件は車輪乗り上がりによって生ずる台車枠のピッチ角速度がある閾値を超えた場合を異常と判定する。しかしこれだけでは脱線予兆の誤検知の可能性があるので二つ目の判定条件を設定する。その条件が台車枠のロール角速度の積算値がある閾値を超えた場合を異常と判定するものである。これら2つの閾値を両方とも超えたときを脱線の危険性が高い状態として判定する。また、これらの閾値は走行速度によって車両の乗り上がり挙動が異なるため、速度に応じて閾値を設定する必要がある。これらの内容をまとめると

- ① 台車枠のピッチ角速度が閾値を超えるか判定。
- ② 台車枠のロール角速度積算値が閾値を超えるか判定。
- ③ 走行速度に応じた閾値(ピッチ角速度, ロール角速度積算値)設定。

というものである。

この脱線予兆検知アルゴリズムは 1/10 スケール車両模型の脱線シミュレーション及び脱線実験によって有効性が検証されている。そこで、このアルゴリズムは実車スケールでの検討が次なる課題である。次章以降で、SIMPACK を用いた一車両モデルによる車輪乗り上がりシミュレーションを行い、その挙動を検討することによって本アルゴリズムの実車スケールへの適用可能性を検証する。

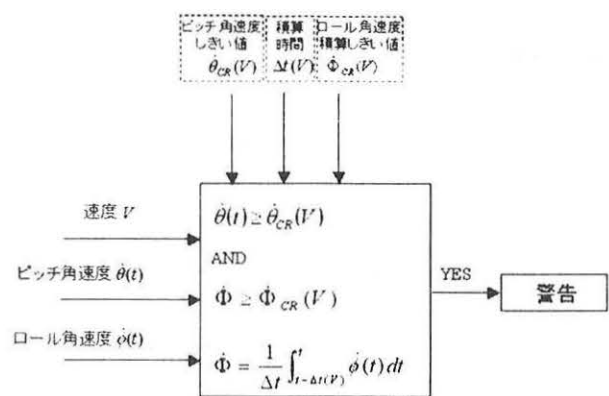


図2 脱線予兆検知アルゴリズム

### 3. 車輪乗り上がりシミュレーション

前章で説明した脱線予兆検知アルゴリズムの有効性を検証するために、SIMPACK によるシミュレーションで車両の乗り上がり脱線を模擬する。本章ではそのシミュレーションを行うために作成する実スケールモデルおよび解析条件を説明する。

#### 3.1 実スケール車両モデル

アルゴリズムの有効性検討のために使用する車両モデルとしては一般的な通勤電車とし、一車両モデルにて検討を行う。車両モデルは表1に示される構成であり、3次元モデルとして構築されている。車両各要素の質量・慣性モーメントは表2に示す値を用いている。これらを繋ぐ一次ばね及び二次ばねは、X, Y, Z方向それぞれの軸方向に復元力を作用させる線形ばねとダンパによって構成されている。また、センサ取り付け位置である台車枠から予兆検知アルゴリズムに用いる物理量を計測する。

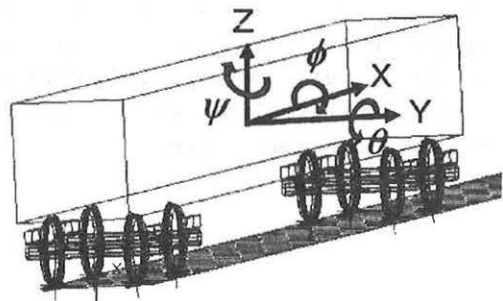


図3 SIMPACKによる実車シミュレーションモデル

表1 車両モデル構成

| 車両構成       | 車体×1, 台車枠×2, 輪軸×4 |
|------------|-------------------|
| 軸距[m]      | 2.1               |
| 台車間距離[m]   | 6.9               |
| 車輪半径[m]    | 0.43              |
| フランジ高さ[mm] | 30.0              |
| 軌間[m]      | 1.11              |

表2 車両の各要素パラメータ

|                       | 車体      | 台車枠    | 輪軸     |
|-----------------------|---------|--------|--------|
| 質量 m [kg]             | 25970.0 | 3373.0 | 1485.0 |
| x 方向慣性半径 $r_{xx}$ [m] | 1.500   | 0.680  | 0.600  |
| y 方向慣性半径 $r_{yy}$ [m] | 5.900   | 0.540  | 0.240  |
| z 方向慣性半径 $r_{zz}$ [m] | 5.900   | 0.910  | 0.600  |

### 3.2 脱線再現手法

本節では実車両モデルの脱線を再現させるための手法について述べる。シミュレーション内で脱線を再現する場合、通常は速度を高速にすればよい。しかし、本研究では低速域での乗り上がり脱線も対象とするので、そのような場合曲線を走行するだけで脱線を再現することは困難である。そこで、本研究では特定の車輪だけに勾配のついたレール上を走行させることで乗りあがりを起こし、擬似的に脱線を再現した。

具体的な乗り上がり軌道の条件を以下に述べる。車両の乗りあがりを扱う際、走行軌道は直線とし、その直線軌道の進行方向に対して左側のレールに勾配を付け、車輪を乗り上げさせることとする。そして、この車輪のフランジ高さ以上に脱線させる車輪側の軌道に勾配をつけ、車輪がこれ以上乗り上がった状態を脱線状態とする。

前節で作成した車両モデルにおけるフランジ高さは30[mm]である。よって作成する乗り上がり軌道は乗り上がり前後で40[mm]の高低差をつけている。またその際、車両がどのくらいの距離を走行しながら脱線に至るのかという勾配の付け方の設定も必要となってくる。そこで車輪の回転数を基準とし、ここでは車輪1回転及び3回転進んだ際に脱線状態に至るという設定を用いている。

脱線模擬シミュレーションを行う際、SIMPACK には図5、図6に示す乗り上がり軌道を入力し、左一軸目の車輪踏面を40[mm]乗りあがらせることとした。図4、図5では横軸に4軸目のスタート地点からのレールの位置をとり、縦軸には上部のグラフでは左一軸目の車輪踏面だけが通るレールの鉛直方向変位を取っている。

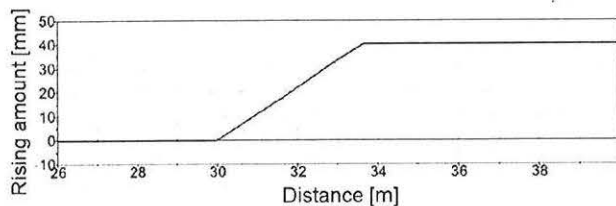


図4 乗り上がり軌道入力—40 [mm]上昇-1回転

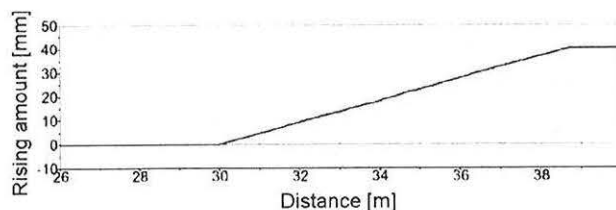


図5 乗り上がり軌道入力—40[mm]上昇-3回転

表3 乗り上がり走行軌道条件

| 項目      | 軌道条件                  |
|---------|-----------------------|
| 走行軌道    | 直線軌道                  |
| 上下狂い    | ホワイトノイズ (振幅 0.01[mm]) |
| 車両上昇量   | 40 [mm]               |
| 乗り上がり位置 | 左一軸車輪踏面部              |

### 3.3 乗り上がり条件

車両の脱線は車両の走行速度と乗り上がり速さに依存する。そこで車両乗り上がりシミュレーションのために4つの走行条件を設定する。この4つの走行条件は車両の走行速度及び脱線状態に至るまでの輪軸回転数（乗り上がり速さ）をそれぞれ二通り用意したものである。

表4 乗り上がり走行軌道条件

| 項目          | 走行条件 |     |     |     |
|-------------|------|-----|-----|-----|
|             | 条件1  | 条件2 | 条件3 | 条件4 |
| 走行速度 [km/h] | 10   | 15  | 10  | 15  |
| 輪軸回転数 [rev] | 3    | 3   | 1   | 1   |

## 4. 実車シミュレーションによる脱線予兆検知アルゴリズムの検証

前章で解析した車両乗り上がりシミュレーション結果を用い、提案する脱線予兆検知アルゴリズムがいくつかの走行条件における実車両の脱線予兆の適用可能性を検証する。

### 4.1 乗り上がりシミュレーション結果の検討

表4における4つの走行条件の内、走行速度10[km/h]、輪軸3[rev]（条件1）の乗り上がりシミュレーション結果を代表して示す。図6のグラフでは、横軸に左一軸目の車輪が乗り上がりを開始してから経過した時間を示しており、縦軸には上から順に、前台車枠のロール角速度、ピッチ角速度、ロール角速度積算値を示している。ここで、ロール角速度の積算時間は0.2[s]として計算している。

図6の条件は4つの走行条件中最も緩やかな脱線状態を模擬したものであるが、乗り上がり開始からそれぞれの物理量について影響が現われていることが確認できる。

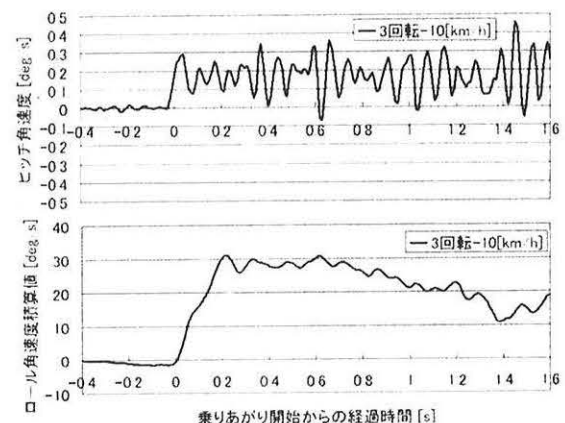


図6 速度10[km/h]、輪軸3[rev]（条件1）の結果

### 4.2 アルゴリズム閾値の設定

アルゴリズムの閾値設定を行うために、走行速度10[km/h]、輪軸3[rev]（条件1）に対して速度のみが向上している走行速度15[km/h]、輪軸3[rev]（条件2）でのシミュレーション結果を図7に示す。図6と図7を比較すると、速度が上がったことにより乗り上がり後の台車枠のロール角速度とピッチ角速度の値が増加しているが、上下狂いの影響による台車枠のピッチ角速度とロール角速度の値はあまり変化していないことが確認できる。このことから、本脱線シミュレーションにおいて閾値設定における検討項目の一つである速度に依存した閾値設定を行う必要はないことが確認できる。

このことから、本脱線予兆検知システムにおけるピッチ角速度ピーク値とロール角速度積算値の閾値は走行速度10[km/h]、輪軸3[rev]（条件1）の結果（図6）を元に誤検知をせずかつ予兆検知可能な適切な範囲に設定する。その結果設定された閾値を表5に示す。この閾値を用いて次節において脱線予兆検知の検討を行う。

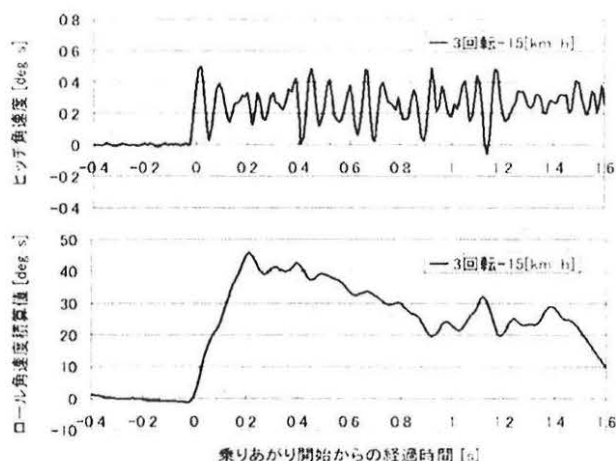


図7 速度 15[km/h]，輪軸 3[rev] (条件 2) の結果

表 5 アルゴリズムの閾値

|            |                   |
|------------|-------------------|
| ロール角速度積算値  | $\pm 20$ [deg/s]  |
| ピッチ角速度ピーク値 | $\pm 0.1$ [deg/s] |

#### 4.3 予兆検知時間の検討

前節における予兆検知アルゴリズムの閾値検討の結果，表 5 に示した値が設定された．その閾値設定による脱線予兆検知アルゴリズムを，乗り上がり走行シミュレーションの条件中最も走行速度が速くかつ乗り上がり速度が速い走行速度 15[km/h]，輪軸 1[rev] (条件 4) に適用する．その適用結果が図 8 と図 9 である．これらの図を確認すると 30[mm]乗り上がり完了までの 0.65 秒に対して，乗り上がり開始から 0.05 秒後（全体の時間に対して 7.7[%]）で予兆検知している．このことから，予兆検知にシビアな条件でも，乗り上がり完了（脱線模擬状態）より非常に早い段階で検知できていることが確認できる．

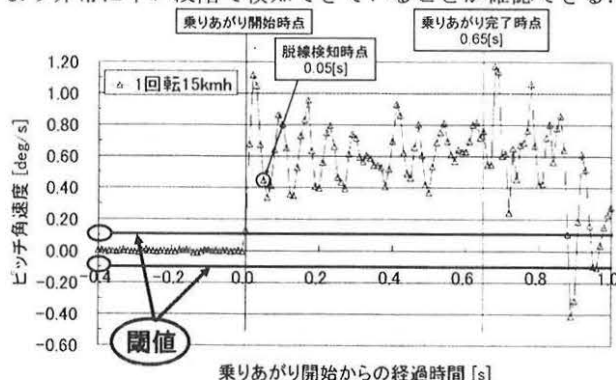


図 8 速度 15[km/h]，輪軸 1[rev] (条件 4) における  
前台車枠ピッチ角速度

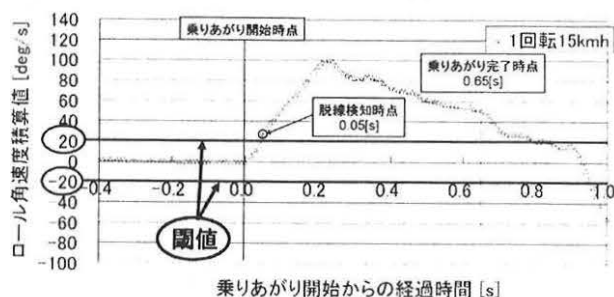


図 9 速度 15[km/h]，輪軸 1[rev] (条件 4) における  
前台車枠ロール角速度の積算値

表 6 シミュレーション結果における検知時間

| シミュレーション<br>条件 | 30mm<br>乗り上がり<br>時間<br>[sec] | 検知<br>時間<br>[sec] | 乗り上がり時間<br>に対する<br>検知時間の割合<br>[%] |
|----------------|------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| 10[km/h]-3 回転  | 2.30                         | 0.12              | 5.2                               |
| 10[km/h]-1 回転  | 0.95                         | 0.07              | 7.4                               |
| 15[km/h]-3 回転  | 1.54                         | 0.05              | 3.3                               |
| 15[km/h]-1 回転  | 0.65                         | 0.05              | 7.5                               |

表 6 はすべての走行条件について 30[mm]乗り上がり完了時間，乗り上がり開始からの検知時間，乗り上がり完了に対する検知時間の割合を示したものである．この表からすべての条件で誤検知や検知漏れがなく，乗り上がり完了に対する検知時間の割合が 10[%]未満で脱線の予兆を検知することが可能であるという結果が得られた．

#### 5. まとめ

実スケール車両の脱線を模擬するシミュレーションを行い，その結果を元に我々が提案している脱線予兆検知システムを検証した．その結果，走行速度及び脱線までの輪軸回転数を変化させた 4 つの条件をすべてにおいて脱線が起こるまでの 10[%]未満の時間で脱線予兆検知することが可能であった．このことから実スケール車両に対しての脱線予兆検知システムの有効性が確認された．

#### 参考文献

- 1) 佐藤国仁，平林健一，春木英将：本線走行に対応した脱線検知装置の開発，東急車輛技法，Vol.51，pp2-7，2001
- 2) 小島崇，網島均，松本陽，緒方正剛：車上測定データによる軌道の異常検出，日本機械学会第 13 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，No.06-52，2006
- 3) Boronenko, Y., Orlova, A., Iofan, A. and Galperin, S.: Effects that Appear During the Derailment of one Wheelset in the Freight Wagon: Simulation and Testing, *Vehicle System Dynamics Supplement 1* Vol.44 (2006), pp.663-668
- 4) Brabie, D. and Anderson, E.: Post-Derailment Dynamic Simulation of Rail Vehicles - Methodology and Applications, *Vehicle System Dynamics Supplement 1* Vol.46 (2008), pp.289-300
- 5) 森川真人，山下高賢，川鍋哲也，国見敬，須田義大，洪介仁，王文軍：乗り上がり脱線の予兆検知に関する研究，日本機械学会第 15 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp.439-440，2008
- 6) 川鍋哲也，国見敬，山下高賢，森川真人，須田義大，洪介仁，王文軍：鉄道車両の脱線予兆の検知に関する研究，日本機械学会第 17 回交通・物流部門大会 TRANSLOG 講演論文集，pp.265,2008
- 7) Chiehjen Hung, Yoshihiro Suda, Wenjun Wang, Tkayoshi, Yamashita, Masato Morikawa, Takashi Kunimi and Tetsuya Kawanabe: Study on Detection of Signs of Wheelclimb Derailment for Railway Vehicles, *Proceedings of The International symposium on Speed-up, Safety and Service Technology for Railway and Maglev Systems 2009*, CD-ROM