

低速乗り上がり脱線予兆検知システムの実証実験

日置 潤一* 山下 高賢 (JR 西日本)

川鍋 哲也 国見 敬 (曙ブレーキ工業)

安藝 雅彦 辻 隆史 洪 介仁 林 世彬 須田 義大 (東大生研)

Substantiative Experiment of Derailment Detection System in Early Signs

Junichi HIOKI*, Takayoshi YAMASHITA, (West Japan Railway Company)

Tetsuya KAWANABE, Takashi KUNIMI, (Akebono Brake Industry)

Masahiko AKI, Takashi TSUJI, Chiehjen HUNG, Shihpin LIN, Yoshihiro SUDA, (The University of Tokyo)

This paper examines a derailment detection system in early signs of a railway vehicle. In this paper, a wheel climb derailment experiment by using an actual bogie is performed for validation of the new derailment detection algorithm. Parameters in the detection algorithm need to be able to divide between abnormal signs and disturbance. In this experiment, one wheel is lift up by an experimental device which makes wheel climbing process. The results show an effectiveness of the derailment detection algorithm in the real scale experiment.

キーワード : 鉄道, 乗り上がり脱線, 低速, 脱線検知, 実験, 台車

Keywords, Railway Vehicle, Wheelclimb Derailment, Low Speed, Derailment Detection, Experiment, Bogie

1. 諸言

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。これまでに、脱線後の二次被害拡大を防ぐ脱線検知に関する研究は行われている⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾。一方、脱線には様々な形態があり、中でも鉄道固有の低速乗り上がり脱線については、車両挙動が未解明であり、乗り上がり脱線の予兆を検知する判定技術も確立されていない。

そこで本研究では、低速乗り上がり脱線の予兆を検知することが可能なシステムを提案し、その実現のための基礎的検討を行った⁽⁶⁾。

これまでに、既存の鉄道車両にも適用可能で安価な自動車用MEMS (micro-electro-mechanical system) 加速度センサ及び角速度センサを搭載した1/10スケール模型車両を用いて、低速乗り上がり脱線再現実験を行い、低速乗り上がり脱線時の車両挙動を把握した。その実験データから、低速乗り上がり脱線の予兆を検知するための判定アルゴリズムを提案した。

本論文では、提案した判定アルゴリズムの実車両スケールでの適用性を検証する為、実台車を用いた低速乗り上がり脱線模擬実験を行い、その実験データから判定アルゴリズムの有効性を検証する。

2. 低速乗り上がり脱線予兆検知システム

2.1 システムコンセプト

提案するシステムを図1に示す。台車枠に搭載した加速度センサ及び角速度センサにより台車枠挙動を計測し、低速乗り上がり脱線の予兆を検知する判定アルゴリズムにより、しきい値を越える台車枠挙動が発生した場合、運転席へ警報を出力する。

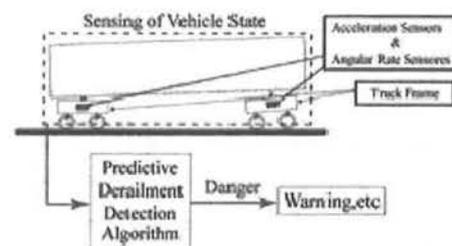


Fig.1 Derailment Detection System in Early Signs

2.2 判定アルゴリズム

提案する判定アルゴリズムを図2に示す。この判定アルゴリズムには、台車枠のピッチ角速度のピーク値と台車枠のロール角速度の積算値を用いる。また、しきい値は車両の走行速度に応じて設定する。

この2つの判定条件について下記に示す。

- ①台車枠ピッチ角速度 $\dot{\theta}$ がしきい値 $\dot{\theta}_{CR}(V)$ を越える
- ②台車枠ロール角速度の積算値 $\dot{\phi}$ がしきい値 $\dot{\phi}_{CR}(V)$ を越える

①の判定条件のみでは、継ぎ目部分の影響、②の判定条件のみでは、曲線部分の影響により、検知漏れ及び誤検知の可能性が懸念される。これらを排除する為、①と②が同時に条件を満たした場合に、警報を出力する。

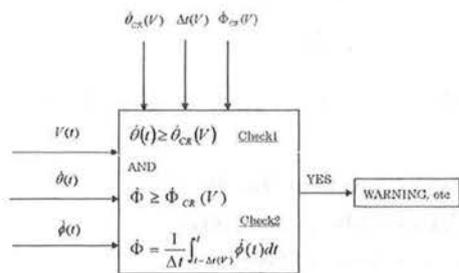


Fig.2 Proposed Derailment Detection Algorithm

3. 低速乗り上がり脱線模擬シミュレーション

シミュレーション (SIMPACK) により、1 車両モデルと 1 台車モデルで、低速乗り上がり脱線時のロール角速度及びピッチ角速度を比較した。シミュレーションは表 1 に示す値を用いて計算を行った。

軌道条件は直線区間、走行速度は 10km/h、乗り上がり脱線の模擬方法は先頭軸片側車輪踏面のみ、上り勾配をつけた軌道上を走行させることとした。

シミュレーション結果を図 3、図 4 に示す。車輪の乗り上がりは走行時間約 5.1 秒から開始しており、図中矢印で示す乗り上がり区間において、1 車両モデルと 1 台車モデルで台車枠のロール角速度とピッチ角速度の応答が定性的に一致している。この結果より、低速乗り上がり脱線までの過程において、1 車両条件での乗り上がり脱線模擬実験を行う代わりに、1 台車条件での乗り上がり脱線模擬実験により判定アルゴリズムの検証が可能であることを確認した。そこで、実台車を用いた乗り上がり脱線模擬実験を実施したので、次節以降で説明する。

Table1. Specification of Simulation Vehicle

	Specification
Wagon [kg]	25,970
Bogie Frame [kg]	3,373
Wheelset [kg]	1,485
Wheelbase [m]	2.1
Distance between Two bogies [m]	6.9
Wheel Radius [m]	0.43
Flange Height [m]	30

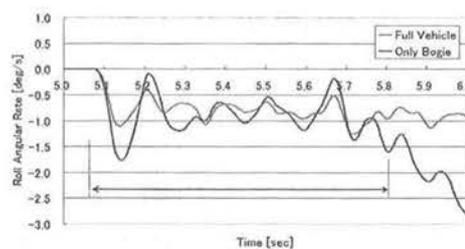


Fig.3 Roll Angular Rates of Full Vehicle and Only Bogie

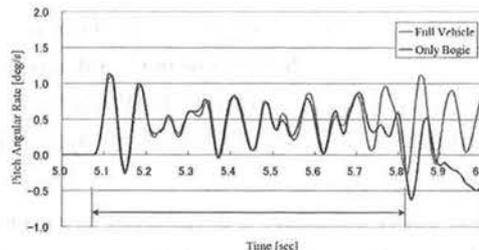


Fig.4 Pitch Angular Rates of Full Vehicle and Only Bogie

4. 実台車を用いた低速乗り上がり脱線模擬実験

4.1 実台車を用いた低速乗り上がり脱線模擬実験の概要

本実験を行う試験線、台車及び乗り上がり機構の概要について説明する。本実験は、東京大学生産技術研究所千葉実験所が所有する R48.5[m]の試験線と、FS-509 型台車を用いた。試験線諸元を表 2、台車諸元を表 3 に示す。

本実験では、トラックにより台車を牽引し、試験速度まで加速させ、試験線内に設置した乗り上がり機構を走行させることによって低速乗り上がり脱線を模擬した。また、台車枠に計測機器を仮設し、低速乗り上がり脱線時の台車枠の挙動を測定した。

試験線全体図を図 5、実験写真を図 6 に示す。

Table2. Specification of the Test Track

Track	Total Length	107.0m
	Entrance Straight	16.4m
	Exit Straight	4.4m
	Transition Curves	Both 10.0m
	Constant Curve	66.2m
	Curve Radius	48.3m
Gauge	1,435mm	
Slacking	20mm	
Cant	0mm	
Gradient	Max 13‰	
Rail	50kgN rail	

Table3 Specification of the FS-509 Bogie

Length [mm]	3,259
Width [mm]	2,640
Height [mm]	950
Wheelbase [mm]	2,100
Weight [kg]	5,800



Fig.5 Test Course and Climbing Span



Fig.6 Wheel Climb Experiment by Using Actual Bogie

4.2 乗り上がり機構

低速乗り上がり脱線を模擬する乗り上がり機構の詳細について説明する。本試験線は急曲線であるため、台車が走行する際、図 7 に示すように大きなアタック角が付く。このように先頭軸と後尾軸は車輪の走行軌跡が異なっており、後尾軸フランジ遊間よりも小さなスロープを設置することで、先頭軸のみ乗り上がらせることが可能である。図 8 に乗り上がり機構の詳細を示す。図 8(a)は乗り上がり機構の断面図を示しており、本機構は下から順に土台部、傾斜部、スペーサ、車輪支持部の 4 つから構成される。これらの要素は枕木間に設置した土台部によって支持される。図 8(b)は乗り上がり機構設置後の写真であり、乗り上がり開始部分から見た車輪乗り上がり部を示している。乗り上がり区間は全長約 100m の試験線内の 8m の区間とし、急曲線の外軌側に乗り上がり機構を設置し、台車先頭軸外軌側車輪のみを乗り上げさせることで乗り上がり脱線を模擬した。乗り上がり脱線区間 8m のうち、最初の 3m が乗り上がり区間であり、フランジ部が走行するスロープを設置し、1 回転で車輪を 20mm 上昇させる。次の 3m がフランジトップ走行区間であり、車輪を 20mm 乗り上がった状態で走行させる。最後の 2m が下降区間であり、フランジ部が走行するスロープを設置し、車輪を乗り上がった状態から元のレール面まで下降させる。

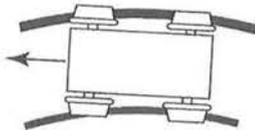
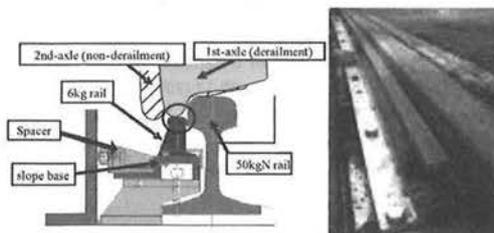


Fig.7 Attack Angle in the Sharp Curve



(a) Cross Section Diagram (b) Attached Device
Fig.8 Wheel-Climbing Device

4.3 計測機器

台車への計測機器の仮設状態を図 9 に示す。台車枠心皿部に 3 軸加速度センサ及び 3 軸角速度センサを設置し、低速乗り上がり脱線時の台車枠挙動を計測した。さらに台車枠の乗り上がり高さを計測するために台車枠前方の排障器にレーザー変位計を設置し、左右それぞれのレール頭頂面との距離を計測した。

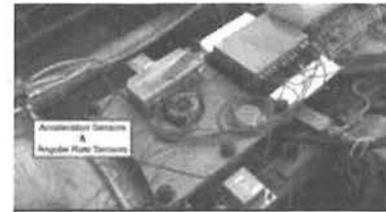


Fig.9 Acceleration Sensors and Angular Velocity Sensors Mounted on Track Frame



Fig.10 1st Axle of Wheel Climbing

4.4 実験結果

本実験は 3 日間で計 14 回実施した。乗り上がり時の走行速度は約 3km/h~12km/h であった。乗り上がり機構により車輪が乗り上がった状態を図 10 に示す。手前の車輪が進行方向先頭軸、奥の車輪が後尾軸である。50kgN レール脇に乗り上がり機構を設置しており、先頭軸外軌側車輪のみ乗り上がり、後尾軸は通常走行していることが確認できる。

実験結果を図 11, 図 12 に示す。図 11 は速度 3.5km/h, 図 12 は速度 11.8km/h における結果である。

(a)は車輪上昇量を示しており濃い線が先頭軸外軌車輪上の台車枠、薄い線が先頭軸内軌車輪上の台車枠の上下変位を示している。(b)は台車枠心皿部のピッチ角速度を示しており、(c)は台車枠心皿部のロール角速度を示している。さらに(d)は(b)を元に計算したロール角速度積算値である。(d)においてロール角速度の積算時間を 0.1 秒, 0.2 秒, 0.5 秒の 3 通りで計算した結果を示す。また、これらのデータは外乱の影響を除去する為、ローパスフィルタ処理をしている。

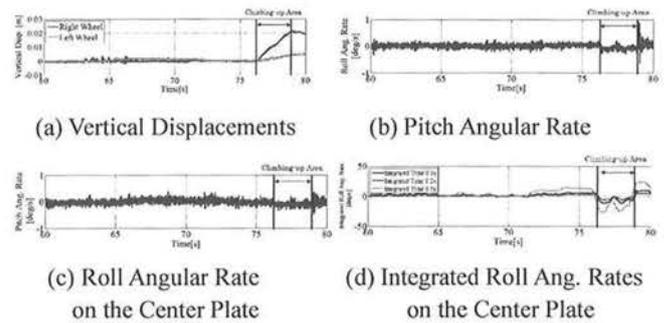


Fig.11 Measured Data (V = 3.5km/h)

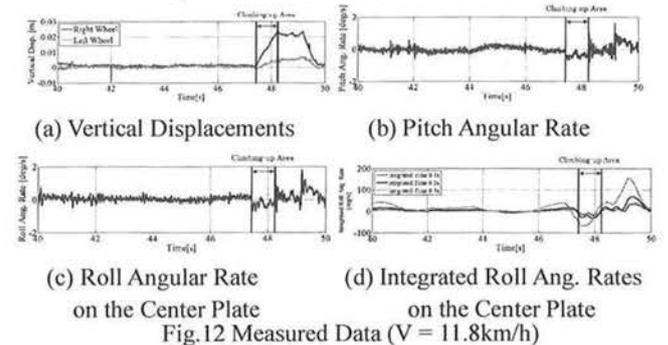


Fig.12 Measured Data (V = 11.8km/h)

図中、縦線によって区切られている区間は車輪がスロープ上を走行し、乗り上がっている区間でありこの区間を「乗り上がり中」、これより前を「乗り上がり前」の区間とする。

図 11 及び図 12 の結果から、乗り上がり前から乗り上がり中へ移り変わる際、ロール角速度、ピッチ角速度、ロール角速度積算値に変動が生じていることが確認できた。また、速度が大きくなるにつれて各物理量の変動幅も大きくなっていることが確認できた。

5. 判定アルゴリズムの検証

判定アルゴリズムの有効性を検証する上で、判定に用いる物理量が乗り上がり前の外乱と乗り上がり中の挙動変化及びしきい値の速度依存性の確認が重要となる。そこで、本実験結果から、乗り上がり前と乗り上がり中、各走行速度におけるピッチ角速度及びロール角速度積算値の傾向について検証した。

各走行速度における乗り上がり前と乗り上がり中のピッチ角速度最大値を図 13、乗り上がり前と乗り上がり中のロール角速度積算値の最大値を図 14 に示す。それぞれグラフ原点と乗り上がり前の最大値、グラフ原点と乗り上がり中の最小値を直線で結んだ。

この結果から、ピッチ角速度及びロール角速度積算値について、乗り上がり前の外乱と乗り上がり中の挙動で差があり、乗り上がり中の挙動を分離できることが確認できた。また、走行速度が大きくなるにつれてその差が大きくなっていることから、しきい値には速度依存性があり、グラフ原点と乗り上がり前の最大値、グラフ原点と乗り上がり中の最小値を結んだ直線の範囲内でしきい値を設定すれば、低速乗り上がり脱線の予兆を検知出来ることが確認できた。

以上より、実台車を用いた低速乗り上がり脱線模擬実験において、実車両スケールにおける判定アルゴリズムの有効性を確認できた。

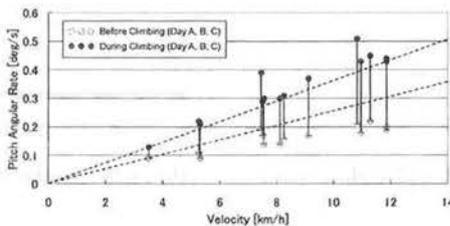


Fig.13 Relationship between Velocity and Pitch Angular Rate

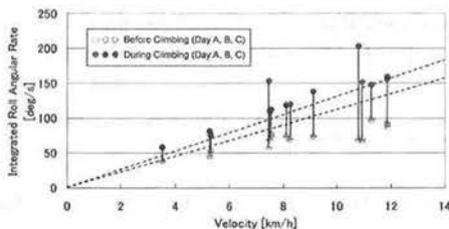


Fig.14 Relationship between Velocity and Integrated Roll Angular Rate

6. 結言

本論文では、低速乗り上がり脱線予兆を検知する判定アルゴリズムの実車両スケールへの適用性を検証する為、実車両スケールでのシミュレーション、実台車を用いた低速乗り上がり脱線模擬実験を行った。以下に内容をまとめる。

- ① シミュレーション(SIMPACK)により 1 車両モデルと 1 台車モデルで、低速乗り上がり脱線時におけるロール角速度、ピッチ角速度を比較し、実台車を用いた低速乗り上がり脱線模擬実験で判定アルゴリズムの検証が可能であることを確認した。
- ② 実台車を用いた低速乗り上がり脱線模擬実験において、乗り上がり機構により先頭軸外軌側車輪のみを乗り上げさせ、低速乗り上がり脱線を模擬し、乗り上がり時の台車枠挙動を把握した。
- ③ 実験結果から、提案する判定アルゴリズムに用いるパラメータについて、乗り上がり中の挙動を分離できることを確認した。また、しきい値の速度依存性を確認した。

今後、本実験結果を反映させたシミュレーションを実施し、実験以外の条件における判定アルゴリズムの有効性を検証してゆく。

7. 謝辞

本研究は、東京大学生産技術研究所 須田研究室と曙ブレーキ工業株式会社との共同研究によって行われました。関係各位に深謝します。

文 献

- (1) Garg, V. K. and Dukkipati, R. V., Dynamics of Railway Vehicle System, Academic press, pp.63-68, 1984.
- (2) Boronenko, Y., Orlova, A., Iofan, A., Galperin, S., Effects that Appear During the Derailment of one Wheel set in the Freight Wagon: Simulation and Testing, Vehicle System Dynamics Supplement 1 Vol. 44, pp. 663-668 (2006)
- (3) Suda, Y., Study of Safety Factor against Derailment for Rail Vehicles (in Japanese), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (Part C), Vol. 57 No.542, pp. 52-55 (1991)
- (4) Hirabayashi, K., Kawada, N., Ohno, M., Kaminaga, T., Eguchi, F., Development of Derailment Detector with Road Service, Tokyu car technical review, No.51, pp. 2-7 (2001)
- (5) Saito, K. et al., Development of Derailment Detector (in Japanese), JR EAST Technical Review No.2, pp.69-72 (2003)
- (6) Hung, C., Suda, Y., Aki, M., Tsuji, T., Morikawa, M., Yamashita, T., Kawanabe, T. and Kunimi, T., Study on detection of the early signs of derailment for railway vehicles, Vehicle System Dynamics Supplement, in press (2010).