

低速乗り上がり脱線予兆検知システムの実用化に向けた検証

○日置 潤一 児玉 佳則 (JR 西日本)
 [機]川鍋 哲也 国見 敬 (曙ブレーキ工業)
 [機]山下 隼平 (東京理科大) [機]安藝 雅彦 (東大生研)
 [機]須田 義大 (東大生研) [機]杉山 博之 (東京理科大)

Verification towards utilization of Derailment Detection System in Early Signs

○Junichi Hioki, Yoshinori Kodama, (West Japan Railway Company)
 Tetsuya Kawanabe, Takashi Kunimi, (Akebono Brake Industry)
 Shunpei Yamashita (Tokyo University of Science), Masahiko Aki (The University of Tokyo)
 Yoshihiro Suda (The University of Tokyo), Hiroyuki Sugiyama (Tokyo University of Science)

This paper examines a derailment detection system in early signs of a railway vehicle. A wheel-climbing simulation was carried out for verification of our detection algorithm. The wheel-climbing simulation was carried out in several conditions. Influences of track irregularities and wheel gauge size to detection algorithm were evaluated for practically using. From the results of the dynamic simulation, the effectiveness of our detection algorithm was shown in several running conditions.

キーワード：鉄道，乗り上がり脱線，低速，脱線検知，軌道不整

Keywords, Railway Vehicle, Wheelclimb Derailment, Low Speed, Derailment Detection, Track Irregularities

1. 諸言

鉄道車両の走行安全性向上のため，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ため，脱線検知に関する研究が行われている⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾．一方，脱線の形態は様々であり，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．フランジがレールに完全に乗り上がる前に，その予兆を検知することができれば，脱線事故の回避，または二次被害の軽減が可能となる．

そこで本研究では，図1に示す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，1/10スケールモデル実験⁽³⁾，実台車実験⁽⁴⁾および乗り上がりシミュレーション解析⁽⁵⁾を実施し，低速走行時における本システムの妥当性の検証を行ってきた．一方で，本システムの実用化を検討する上で，緩和曲線内のカントや軌道不整による振動など軌道に関する諸条件の影響により本システムが誤検知しないことを検証する必要がある．

そこで本論文では，昨年度実施した実台車実験結果と乗り上がりシミュレーション解析結果を比較することで解析モデルの妥当性を検証し，その解析モデルを用いてカント及び軌道不整に対する本システムの信頼性について検証を行う．

2. 低速乗り上がり脱線予兆検知システム

本システムのプロット図を図1に示す．本システムは，台車枠に搭載した加速度センサと角速度センサにより，台車枠に発生するロール角速度及びピッチ角速度を計測し，これらを指標とする判定アルゴリズムにより，低速乗り上がり脱線の予兆を検知する．この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は，運転席へ警報を出力する．

本システムの判定アルゴリズムを図2に示す．本脱線予兆検知システムでは，図1に示すように台車枠のピッチ角速度 $\omega_y(t)$ およびロール角速度 $\omega_x(t)$ を用いて判定を行う．

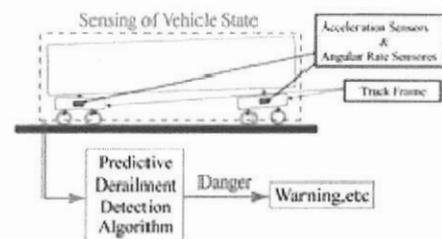


Fig.1 Derailment Detection System in Early Signs

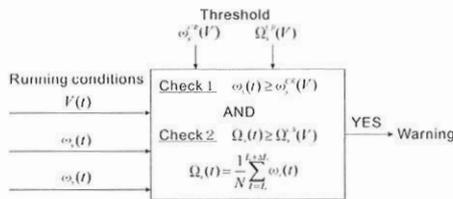


Fig.2 Proposed Derailment Detection Algorithm

乗り上がりの判定方法は、図 2 に示すように、ピッチ角速度 $\omega_y(t)$ およびロール角速度移動平均 $\Omega_x(t)$ が、ピッチ角速度およびロール角速度移動平均の閾値を同時に越えた場合に乗り上がりが発生したと判定する。ピッチ角速度およびロール角速度移動平均をアンド条件としているのは、レール継ぎ目部分および曲線部分、軌道不整等による誤検知を防止するためである。また、それぞれの閾値は走行速度 V の関数として定義される⁽³⁾。

3. 乗り上がりシミュレーション解析モデルの妥当性検証

本システムの誤検知の可能性について検証を行うため、昨年度実施した実台車を用いた低速乗り上がり脱線模擬実験結果と乗り上がりシミュレーション解析結果を比較し、乗り上がりシミュレーション解析モデルの妥当性を検証する。

3.1 実台車を用いた低速乗り上がり脱線模擬実験

実台車を用いた低速乗り上がり脱線模擬実験の概要について説明する。本実験に用いた台車および試験線を図 3 及び図 4 に示す。車輪は円弧踏面である FS-509 型台車、実験場所は、50kgN レールが敷設された東京大学生産技術研究所千葉実験所が所有する R48.5[m] の試験線を使用した。

次に乗り上がり機構を図 5 に示す。R48.5m の円曲線内の外軌レール内側に乗り上がり用レールを設置し、車輪の乗り上がりを模擬する。この乗り上がり用レールは、長さ 3m 間に高さが 20mm 線形に上昇する乗り上がり区間、高さが 20mm で一定であるフランジトップ走行区間および下降区間から成り、レール幅はフランジ遊間よりも小さく、フランジ接触が発生する前軸外軌のみが乗り上がり用レール上を走行するため、前軸外軌フランジのみを乗り上げる機構となっている。



Fig.3 Wheel Climb Experiment by Using Actual Bogie

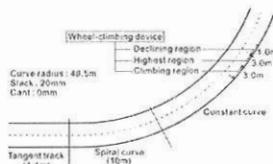


Fig.4 Test track

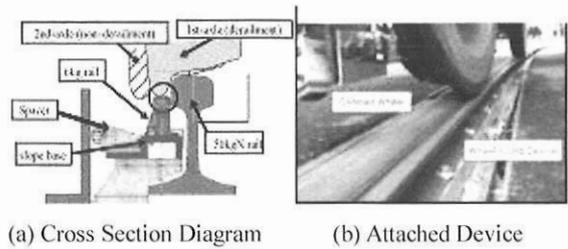


Fig.5 Wheel-Climbing Device

3.2 乗り上がりシミュレーション解析モデルの妥当性検証

実台車を用いた低速乗り上がり脱線模擬実験結果と乗り上がりシミュレーション解析結果の比較を行った。シミュレーション解析には汎用解析ソフト SIMPACK™ を用いた。

図 6(a), (b) に速度 5.3km/h における台車枠のピッチ角速度およびロール角速度の時刻歴変化を示す。実験結果において、軌道不整や計測ノイズに起因した高周波成分が確認されたが、乗り上がり区間におけるノミナルな変化の傾向は解析結果と一致している。また、図 6(c) にロール角速度移動平均を示す。乗り上がり区間におけるノミナルな変化の傾向が解析モデルにより模擬できていることが分かる。

次に、図 7(a), (b) に各走行速度における乗り上がり中のピッチ角速度およびロール角速度移動平均の最大値の傾きを示す。本システムのしきい値は、乗り上がり中における台車枠ピッチ角速度およびロール角速度移動平均の最大値付近に設定するが、走行速度の関数となるため、各速度における最大値の傾きが実験結果と解析結果で一致することが重要である。最大値を通る近似直線の傾きを実験結果と解析結果で比較したところ、ほぼ一致していた。各速度におけるピッチ角速度の最大値で差異が見られたが、実験における高周波振動の影響によるものと考えられる。一方、ロール角速度については移動平均をすることで高周波成分の影響が除去されているため、数値および近似直線の傾きともに良い一致が見られた。以上より、本解析モデルの妥当性を確認し、本解析モデルを用いて、カント及び軌道不整に対する本システムの誤検知について検証を行う。

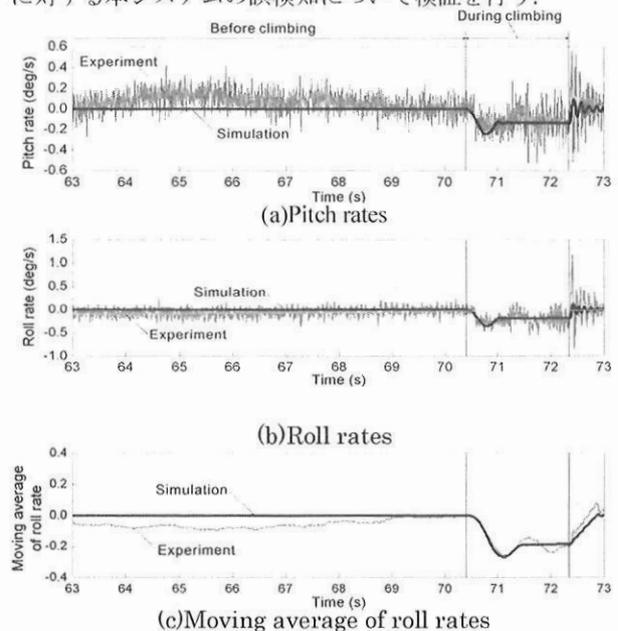


Fig.6 Comparison of pitch, roll and moving average of roll rates during flange climb (simulation and experiment)

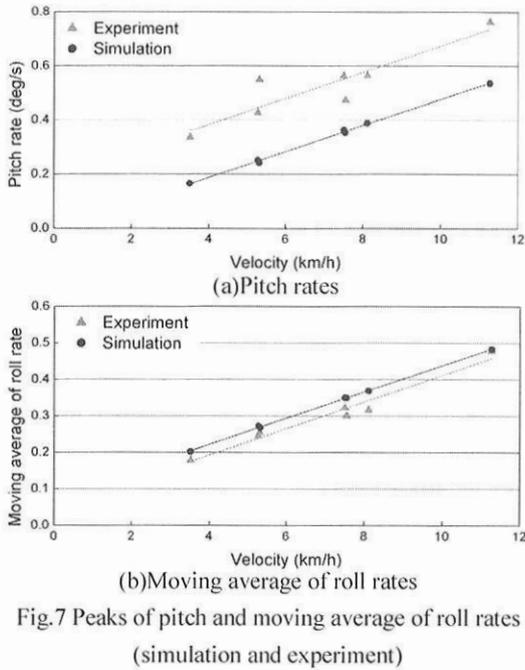


Fig.7 Peaks of pitch and moving average of roll rates (simulation and experiment)

4. システム実用化に向けた検証

本システムの実用化を検討する上で、緩和曲線内のカントや軌道不整による振動で誤検知しないことを検証する必要がある。そこで、乗り上がりシミュレーション解析によりカントおよび軌道不整による誤検知の有無を確認し、システムの信頼性を検証する。

4.1 カントによる影響の検証

図 8 に解析に用いた軌道モデルを示す。軌道モデルは R400m の円曲線であり、緩和曲線長 65m、カント 97mm、均衡速度は 70km/h である。また、乗り上がり模擬方法としては、図 4 に示す乗り上がり用レールを円曲線内 45m の位置にモデル化することで、乗り上がりを模擬した。

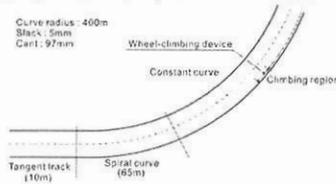


Fig.8 Track model (R400)

図 9 に、走行速度 13km/h におけるカントがある場合とない場合の台車枠ピッチ角速度およびロール角速度の時刻歴変化を示す。カントがある場合、緩和曲線入口および円曲線入口において、ロール角速度およびピッチ角速度に僅かながら変化が生じていることが分かる。この変化は、緩和曲線入口において、カントによる縦勾配が発生し、円曲線入口においてその勾配が無くなりカントが均衡したため、発生したと考えられる。この変化は、乗り上がり時に発生する変化に比べ極めて小さいレベルである。

次に、図 10 に各速度における乗り上がり前および乗り上がり中の台車枠ピッチ角速度およびロール角速度移動平均の最大値を示す。ロール角速度およびピッチ角速度とも、乗り上がり前および乗り上がり中で明確な違いが確認されたことから、カントによる誤検知の可能性は低いと考えられる。

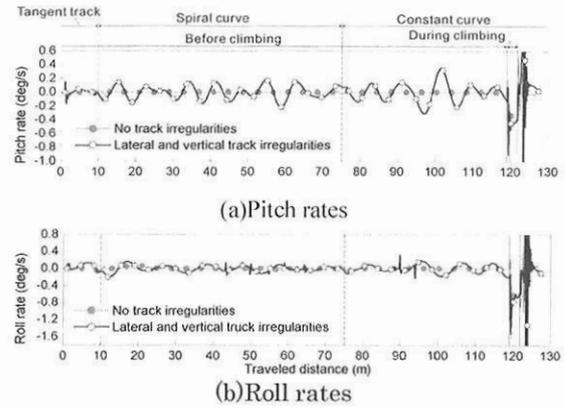


Fig.9 Pitch and roll rate of canted curve (13km/h)

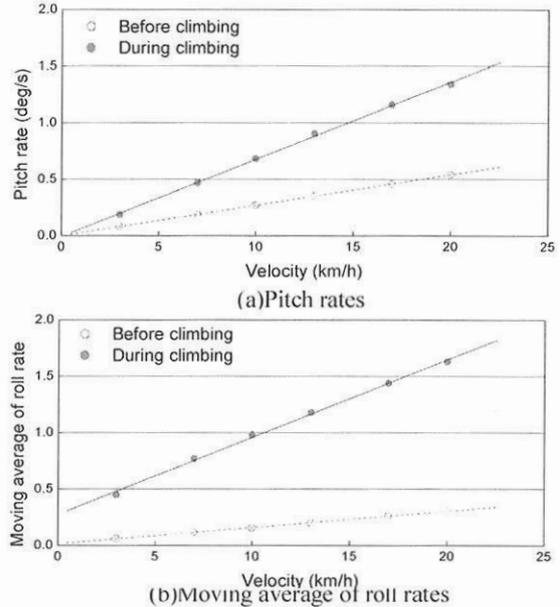


Fig.10 Peaks of pitch and moving average of roll rates during flange climb (canted curve)

4.2 軌道不整による影響の検証

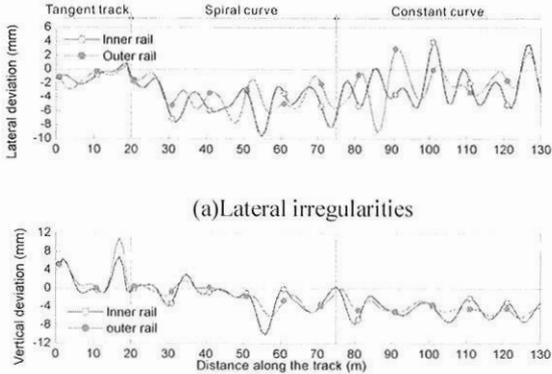
システムの検知精度に影響を及ぼすと考えられる左右方向の通り狂いおよび上下方向の高低狂いを軌道狂いを入力し、緩和曲線を含む曲線区間で誤検知の有無を検証した。軌道モデルは、カントの影響が大きい R300m の円曲線であり、緩和曲線長 80m、カント 100mm とした。均衡速度は 55km/h である。この軌道モデルに入力した軌道不整条件を図 11 に示す。通り狂いは、正方向が曲線外軌方向であり、高低狂いは正方向がレール上方である。

次に、図 12 に走行速度 13km/h における軌道不整がある場合とない場合の台車枠ピッチ角速度およびロール角速度の時刻歴変化を示す。軌道不整がある場合、軌道不整に起因した振動が台車枠のロール角速度およびピッチ角速度に発生していることが分かる。一方、乗り上がり中のロール角速度およびピッチ角速度については、乗り上がりによる変化が支配的であるため、軌道不整の影響は比較的小さい。

次に、図 13 に各速度における乗り上がり前および乗り上がり中の台車枠ピッチ角速度およびロール角速度移動平均の最大値を示す。乗り上がり前のピッチ角速度の最大値が乗り上がり中のピッチ角速度の最大値を僅かに超えている

ことを確認した。しかしながら、ロール角速度移動平均においては、乗り上がり中の最大値の方が、乗り上がり前の最大値よりも大きくなった。本システムの判定アルゴリズムでは、ピッチ角速度およびロール角速度移動平均が同時に閾値を超えた場合に乗り上がり判定を行う AND 条件としているため、軌道不整による誤検知の可能性は低いと考えられる。

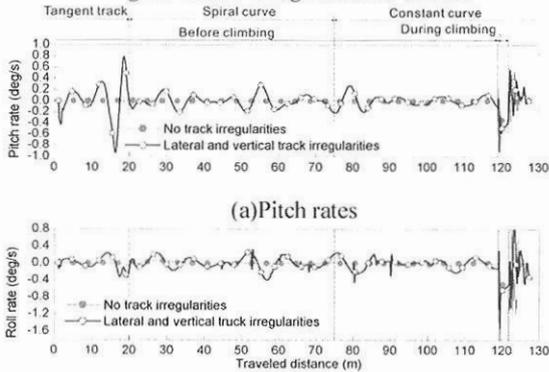
さらに、ロール角速度については、移動平均による角速度変化を抽出して判定を行うため、軌道不整による高周波成分に起因した誤検知の防止が可能であることが確認できた。



(a) Lateral irregularities

(b) Vertical irregularities

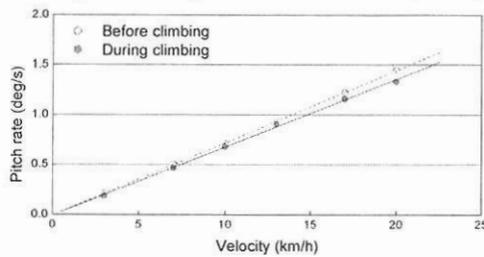
Fig.11 Track irregularities (R300)



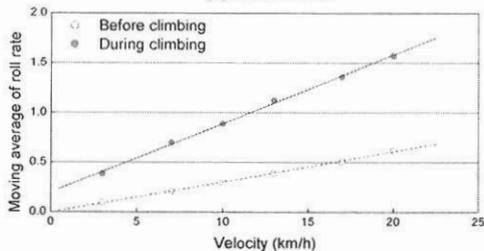
(a) Pitch rates

(b) Roll rates

Fig.12 Comparison of pitch and roll rates (R300, 13km/h)



(a) Pitch rates



(b) Moving average of roll rates

Fig.13 Peaks of pitch and moving average of roll rates during flange climb (R300)

5. 結言

本研究では、カント及び軌道不整の影響による誤検知を確認し、低速乗り上がり脱線予兆検知システムの実用化に向けて信頼性の検証を行った。以下に内容をまとめる。

- ① 実台車を用いた低速乗り上がり脱線模擬実験結果と乗り上がりシミュレーション解析結果を比較し、台車枠ピッチ角速度およびロール角速度に良い一致が見られ、乗り上がりシミュレーション解析モデルの妥当性を確認した。
- ② 乗り上がりシミュレーション解析モデルを用いて、カントに対する誤検知の可能性について検証を行い、ロール角速度およびピッチ角速度とも、乗り上がり前および乗り上がり中で明確な違いが確認されたことから、カントによる誤検知の可能性は低いことを確認した。
- ③ 乗り上がりシミュレーション解析モデルを用いて、軌道不整に対する誤検知の可能性について検証を行い、乗り上がり前のピッチ角速度およびロール角速度移動平均の最大値が乗り上がり中のピッチ角速度およびロール角速度移動平均を同時に超えることはないことを確認されたことから、軌道不整による誤検知の可能性は低いことを確認した。

今後、本システムの実用化に向けて、システムの信頼性向上策及び乗り上がり防止に有効となる検知後の動作機能について更なる検討を行っていく。

文 献

- (1) Elkins, A. J., Carter, A., 1993, "Testing and Analysis Techniques for Safety Assessment of Rail Vehicle: The State-of-the-Art", *Vehicle System Dynamics*, Vol. 22, 185-208.
- (2) 石田, 2005, "急曲線低速走行試験における安全性評価手法", 鉄道総研報告, Vol. 9, 5-10.
- (3) Hung, C., Suda, Y., Aki, M., Tsuji, T., Morikawa, M., Yamashita, T., Kawanabe, T., Kunimi, T., 2010, "Study on Detection of the Early Signs of Derailment for Railway Vehicle", *Vehicle System Dynamics (IAVSD Supplement)*, Vol. 48, 451-466.
- (4) Aki, M., Tsuji, T., Suda, Y., Hung, C., Lin, S., Hioki, J., Yamashita, T., Kodama, Y., Kawanabe, T., Kunimi, T., Yamashita, S., Sugiyama, H., 2011, "Real-scale Experiment of Wheelclimb Derailment in Low Speed for Derailment Detection System in Early Signs", *Proceedings of IAVSD 2011*.
- (5) Yamashita, S., Sugiyama, H., Aki, M., Suda, Y., Hioki, J., Kodama, T., Kawanabe, T., Kunimi, T., 2011, "Flange-climb Detection of Railroad Vehicles at Low Speeds using Roll and Pitch Rates", *Proceedings of ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics*.