

# 事故に学ぶ脱線検知装置の開発史

Technological History of Derailment Detectors Learnt from Actual Accidents

長本昌樹 Masaki NAGAMOTO  
松岡茂樹 Shigeki MATSUOKA

本稿では、実際の脱線事故に学び、事故被害の減災化のために開発された、脱線検知装置（JR 東日本向防護無線自動発報装置）について述べる。一般的に、脱線事故それ自体の被害は小さいものの、脱線走行を続けて2次的衝突事故が起こると被害が拡大する。そのような2次的事故を減災化するため、自動的に脱線を検知する脱線検知アルゴリズムを開発・検証することで、防護無線機を自動発報して列車防護する脱線等検知装置を開発し、首都圏各線に設置した。その装置は実際の2件の脱線事故で脱線・転覆・衝突を検知し、その有効性が証明された。

This paper describes the development of Derailment Detectors learnt from actual derailment accidents. The harm from derailment itself is very small, but if the derailed train continues running, a secondary crash/collision accident can occur and the harm can become very severe.

In order to reduce severe harm from secondary accidents, Derailment Detecting Algorithms (DDAs) have been developed and its Derailment Detecting Performance (DDP) has been verified in derailment experiments. Also Derailment-Rollover-Crash (DRC) detector with DDAs for activating the Train Protection Radio (TPR) has automatically been developed and now widely used in the metropolitan area of JR-East. In two actual accidents, it has been proven that DRC detector is very effective for preventing secondary accidents.

## 1 序論

車両・インフラ・運転・外乱などのさまざまな要因により、列車が脱線することがある。実際に、重大被害を伴う脱線事故が発生している。

実際の脱線事故を分析した結果、脱線事故そのものによる被害は、一般的には軽微である。脱線現象は、車輪が線路から落下する現象で、落下高さは在来線で153mm程度と、航空機など他の交通機械の落下高さにくらべると非常に小さい。

そのため、乗務員が脱線現象を認知することは困難であり、脱線状態のまま気付かずに走行を続ける場合がある。車両が脱線状態のまま走行して、線路から逸脱、建築限界を超過すると、対向列車や地上構造物と衝突して重大被害に至ることがわかった。

そこで、脱線を自動的に検知して、重大な2次被害に至る前に列車を止めるという、脱線検知装置の概念が佐藤国仁氏（元東急車輛 開発担当）により、1995年に世界で初めて発案され、構築<sup>(1)</sup>された。

脱線検知装置は、JR東日本との共同研究開発により構築<sup>(2)</sup>され、2000年日比谷線中目黒事故<sup>(3)</sup>をきっかけとして脱線検知装置として開発<sup>(4)</sup>された。

さらに、2005年福知山線尼崎事故<sup>(5)</sup>をきっかけとして、

転覆・衝突検知機能を付加、防護無線自動発報装置<sup>(6)</sup>としてJR首都圏の各線に普及した。2013年中央線相模湖事故<sup>(7)</sup>、2014年京浜東北線川崎事故<sup>(8)</sup>で実際に脱線・衝突・転覆を検知して防護無線を自動発報し、脱線検知装置の有効性が実証<sup>(9)~(11)</sup>された。

本稿では、当社発祥の脱線検知装置の技術史について述べる。

## 2 脱線検知の概念構築

### 2.1 脱線事故の想定

日本の鉄道における脱線の歴史を顧みると、1960年代までは、車軸折損などの車両破損、軌道破損や障害物、速度超過・信号冒進などの運転のミス、天災などの外乱要因など、ほぼ単一要因による事故が多かった。

しかし、その再発防止対策が進むにつれて、1963年の鶴見事故のように複合要因による事故が目立つようになる。当初はメカニズムが未解明で「競合脱線」と呼ばれていたが、現在では「乗り上がり脱線」としてメカニズムが解明されつつある。

さらに、大地震における車両の逸脱防止装置や脱線防止ガードの設置などの対策は行われてきているが、事実として脱線事故は毎年発生している。

このように、脱線要因は多岐にわたっており、また未解明である。また、踏切障害物や想定以上の天災などにより列車が脱線することは、起こり得ることとして想定しなくてはならない。

すなわち、脱線事故の発生を防止する対策だけでなく、脱線事故の発生を前提とした被害低減（減災）対策が必要であるといえる。

## 2.2 脱線事故の知識化

【事例】中目黒脱線・衝突事故(2000.3.8)  
脱線に気づかず走行し(脱線痕50m)、逸脱して対向列車と衝突した。



【知識化】脱線しても乗員は認知不可能。  
・落下高は、高々レール高さ(50N-153mm)  
・脱線後も、そのまま道床上を走行できる  
※他の交通機械と落下との違い:脱線には対義語:復線がある

脱線検知アルゴリズム

【事例】尼崎転覆・衝突事故(2005.4.25)  
事故列車の乗務員は車載の防護無線機を発報できなかった。  
が、対向列車との2次衝突は避けられた。



【知識化】人間系を介した非常停止システムは、非常時に機能しない。

防護無線自動発報装置

図1 中目黒事故、尼崎事故の知識化<sup>(9)</sup>

図1左は、中目黒脱線・衝突事故<sup>(3)</sup> (2000年)を示す。この事故で、5人が死亡、63人が負傷した。第一の事故である8両編成列車の最後尾車両が脱線した時点では、誰も負傷していなかった。しかし、乗務員は脱線現象を認めることができず、そのまま走行を続けた結果、対向列車との衝突という第二の事故に至り、死者・負傷者が発生した。

中目黒事故から学ぶべき最も重要な知識は、列車の乗務員が乗務中の列車の脱線を認知することができないということである。この知識から、佐藤氏提唱の脱線検知装置の概念が着目され、実用機の開発が始まる。

図1右は、尼崎転覆・衝突事故<sup>(5)</sup> (2005年)を示す。この事故で、107人が死亡、562人が負傷した。列車の乗務員は、接近する列車との衝突を防止するために車両に装備されている防護無線機を発報することができなかった。

尼崎事故から学ぶべき最も重要な知識は、人間系を介した非常停止システムは、非常時には機能しないということである。

この知識から、4項にて後述する、防護無線自動発報装置の設計思想が確立した。

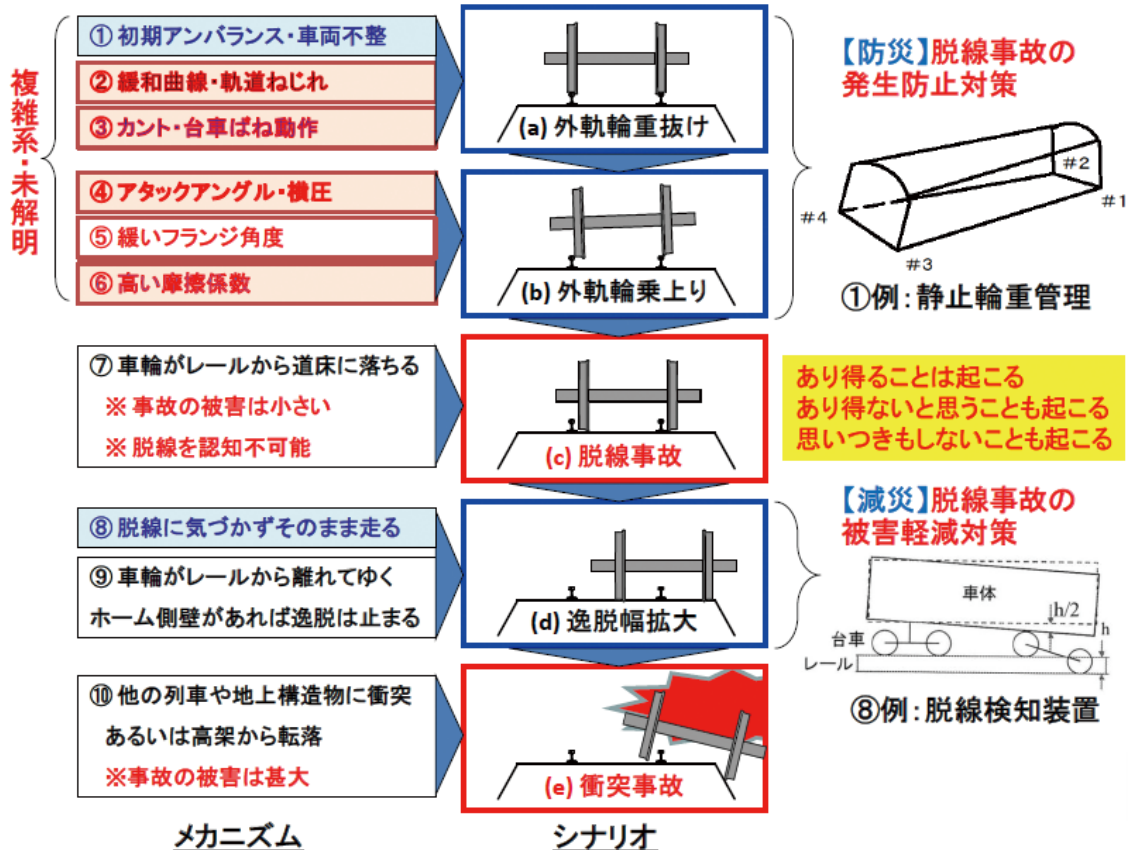


図2 乗り上がり脱線事故のシナリオ分析<sup>(9)</sup>

## 2.3 脱線検知の概念構築

前述のとおり、実際の事故で得られた知識から、当社では車両の脱線現象を検知して早期に停車させ、2次災害を軽減する脱線検知の概念を構築するに至った。当時の脱線検知装置の開発担当であった佐藤国仁氏（元東急車輦勤務）はこう語っている。

「脱線事故事例からシナリオ分析を行ってみると、脱線事故自体は通常は軽微な被害であるが、それに気付かず走り続けると、大きく逸脱して衝突など大規模な2次災害を引き起こすことになる。このことから脱線現象を検知して早期に停車させ、2次災害を軽減する脱線検知の概念を構築した。力学モデルを作成し、脱線時の確定現象である輪軸落下に着目、上下加速度の二重積分で演算。その後の確率現象である不整地走行検知も含め、検知が難しい低速脱線も検知可能であることを見出した。」(図2)

## 2.4 脱線検知アルゴリズムの構築

当社では、前述のとおり、脱線落下の力学モデルを作成、脱線時の確定現象である輪軸落下を、また脱線後の確率現象である不整地走行検知を検知方法として検討した。

前者の輪軸落下の検知は、車体上下加速度を計測ののち二重積分を行い、脱線時に車体の下方変位を得るものである(図3①)。

二重積分は次の条件を加えた特殊な条件で行う。

- (1) 二重積分開始時の変位・速度を0とする
- (2) 脱線変位を検知し軌道不整の影響を排除できる評価時間を設定する(200msに設定)
- (3) 車体変位の上昇分を分離するため、下方変位(沈下分)を検出する

上記手法により、縦曲線や軌道不整を含んだ軌道走行状態から得られる値と、脱線時における軌条からの落下から得られる値に差異があることを実車試験により検証した。

後者の不整地走行検知については、脱線後の上下加速度から脱線を判定する方法がある。開発時は2種類の脱線検知理論を構築し、実車試験にてこれらを評価した。

### (1) 加速度による脱線検知理論1

鉄道車両が軌道上を走行する場合と脱線時に道床を走行してしまう場合とでは、加速度の振幅に差異がある。この差異を検知することで脱線を検知するが、一方でレール継ぎ目、分岐器、および部分的に大きな軌道狂いに対しても、瞬間的に振幅の大きな加速度が発生すると考えられる。

そこで、計測された車体加速度から、車両設計上通常加速度を抑えている周波数帯の加速度を抽出し、一定時

間(判定時間)分蓄積、この中で既決されているしきい値をこえた加速度の頻度を求め、その頻度が既決されている判定回数のしきい値を超えた場合に脱線と判断する。

### (2) 加速度による脱線検知理論2

車両は車速の違いにより、車体上下振動も変化する。本理論ではしきい値を一意的に決定せず、かつ車体上下加速度以外の信号の入力を行わない方法を考案した。

車速は急激に変化せず、また、加速度は異常時突発的に大きく発生する。そこで、計測された車体加速度から車両設計上通常加速度を抑えている周波数帯の加速度を抽出し、一定時間の加速度を積算した加速度積算値を用い、現在の加速度積算値と、一定時間前の加速度積算値を比較し、極端に変化している場合に脱線と判定する(図3②)。

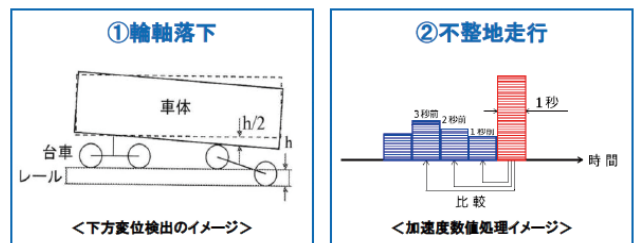


図3 脱線検知アルゴリズム<sup>(9)</sup>

上記で検討した脱線検知方法は、図4に示す実車両による脱線実験の実施により検証を行った。また、本線走行における、通常走行での妥当性確認も複数車種・線区にて2万kmで実施し、いずれの検知方法も本線走行での実用に耐えうるとの評価結果を得た。

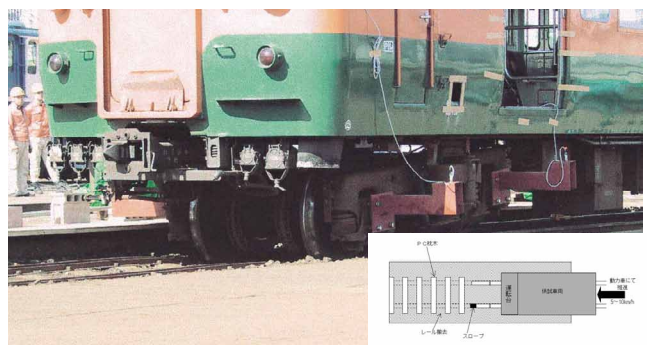


図4 実車両による脱線実験<sup>(1)</sup>

## 3 JR東日本向け脱線検知装置<sup>(4)</sup>の開発

前項で説明した脱線検知アルゴリズムの考案とほぼ同時期、1999年から2000年にかけて、JR東日本との共同開発にて、脱線検知装置の開発を行った。開発にあたっては、考案した脱線検知アルゴリズムの検証のため、営業車両各形式での仮設モニターラン(7車種10線区20973.4km)および、実車両による低速脱線試験(図4)





図5 脱線検知装置外観<sup>(4)</sup>

を実施し、得られた成果から車両表面に1台車あたり1台搭載としてE993系試験電車に本格的に装着し、実車による加速度データ収集および稼働試験により、実用レベルを高めていった。

そして2006年、初の量産型脱線検知装置としてE331系電車(14車体16台車)に編成全数搭載、運用開始が実現した。メンテナンス性と低コスト性に配慮したセンサ部と制御部の一体構造を採用し、車両の取り付けにおいても事故損傷の可能性の低い、車両床上・室内の高所とし、乗務員室内または連結妻内に搭載された。この装置は、次項で述べる防護無線自動発報装置の礎となった(図5)。しかし、E331系自体の増備が無かったこと、また当社も車載向け量産製品の拡販・取扱ノウハウが未熟であり、その点でさまざまな解決が必要な課題を提供してくれた製品としても重要なエポックである。

## 4 JR東日本向け防護無線自動発報装置の開発

### 4.1 仕様

表1は、JR東日本向けの防護無線自動発報装置の仕様を示す。防護無線自動発報装置は通常、列車編成の各先頭車両の運転台に取り付けられるが、全車両の脱線を検知するために各車両の妻面に設置することも可能である。

防護無線自動発報装置は、異常モードに対応した3つのレンジの3軸加速度センサ、CPU制御基板と内蔵記録媒体からなる一体構造の装置である。

異常(検知)モードと検知アルゴリズムは、次項4.2で、検知後の動作については4.3項で説明する。

### 4.2 脱線・転覆・衝突検知アルゴリズム

表2は、防護無線自動発報装置に搭載される3つの異常モードと5つの検知アルゴリズムを示す。3つの異常モードは、防護無線を発報すべき事故で生じる「脱線」「転覆」「衝突」であり、5つの検知アルゴリズムは、脱線:

「輪軸落下」「不整地走行」、転覆:「転覆(車体ロール)」, 衝突:「前面衝突」「左右衝突」である。

表1 防護無線自動発報装置 仕様<sup>(10)</sup>を和文化

機能名	詳細仕様
異常検知モード	脱線(落下高さ・異常振動) 転覆 衝突(前面・側面)
脱線検知性能 (脱線実験より)	輪軸質量: 8t/輪 脱線車両速度: 1m/s 脱線軸数: 先頭2軸
検知後の動作	防護無線機自動発報 乗務員に通知(画面表示) 加速度データの記録
基本構成	3軸加速度センサ CPU CFカード
外形寸法・質量	230mm×380mm×68mm, 4.5kg

表2 防護無線自動発報装置 検知アルゴリズム<sup>(9)</sup>

異常モード	検知アルゴリズム	
脱線 (輪軸落下)	①輪軸落下 判定時分200ms 	②不整地走行 判定時分1000ms 
	転覆 (ロール方向)	③転覆 判定時分700ms 
衝突 (前後・左右)	④前後衝突 瞬時値判定 判定時分5ms 	⑤左右衝突 瞬時値判定 判定時分5ms 

2つの脱線検知アルゴリズムは図3および2.4項で説明したものを採用している。転覆検知アルゴリズムは、車体の傾斜角度が大きくなると、装置におけるz軸方向の加速度(基本的に重力に支配)が縮小することを利用して。また、衝突検知アルゴリズムは、あらかじめ設定したx軸方向、またはy軸方向の瞬間的な加速度値によって検知する。

各々のアルゴリズムのしきい値は2.4項で述べた脱線実験を含む実車実験と、鉄道車両を模擬した実験装置を使用した衝突および転覆実験、5章で説明する営業列車における延べ数億kmにおよぶ通常状態での運用実績、およ

び事故時の検知実績で証明されている。

### 4. 3 検知時の動作

図6は、防護無線自動発報装置の検知後の基本的な動作を示す。防護無線自動発報装置が異常を検知すると、自動的に以下の動作を実行する。

- (1) 周辺の列車の運転席へ、防護無線を発報する。
- (2) 検知した列車の両運転台のモニタ表示器に通知する。
- (3) 装置の検知前後一定時間の3軸加速度データを記録し、外部記憶装置（CF）に保存する。

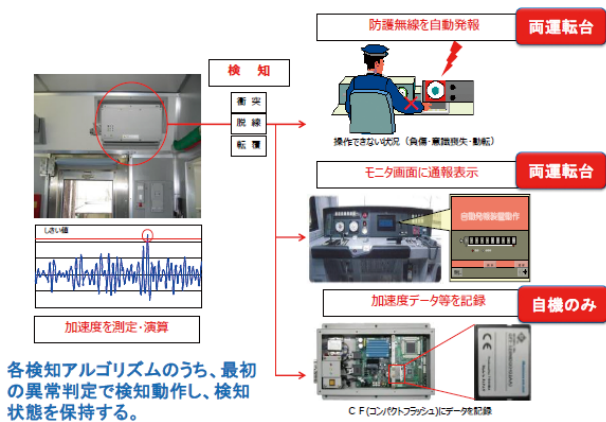


図6 防護無線自動発報装置 検知時の動作<sup>(9)</sup>

## 5 JR東日本向け防護無線自動発報装置の普及と実際に発生した事故時の動作

### 5. 1 首都圏各線への普及

図7に、JR東日本の首都圏での防護無線自動発報装置の普及状況を示す。



図7 JR 東日本向け防護無線自動発報装置普及状況<sup>(9)</sup>

2008年に量産初期ロットが出荷され、JR東日本E233系に搭載・運用開始したのを皮切りに、首都圏の各線区と走行車種に順次搭載運用され、近年では防護無線自動発報装置がJR東日本の首都圏すべての線区で使用され

ている。2017年現在、首都圏の走行車両編成の90%において使用され、当社納入実績は1969台、976編成となっている。累積走行距離は、年間約3億kmとなっている。

### 5. 2 実際の事故における検知動作

図8および図9は、防護無線自動発報装置が事故を検知した2つの実際の脱線事故を示す。

図8は、相模湖脱線事故<sup>(7)</sup> (2013年)を示す。10両編成の列車の最後尾の車両先頭車より台車にある2本の車軸が脱線した。脱線の後、防護無線自動発報装置は脱線を検知して、防護無線を発報、そして運転士が非常ブレーキを扱い停車した。最後尾の車両は、脱線の影響でプラットフォームの側壁に衝突したが、幸いにして負傷者はいなかった。

この時の脱線検知アルゴリズムは、図3②に示す不整地走行検知モードで、脱線を検知した。

脱線と反対側台車の脱線を検知したことは、想定した設計仕様の範囲ではないが、通常の走行振動よりも過大な振動が反対側まで伝達したことにより、検知できたと考えられる。

乗務員が脱線を認知する前に脱線を検知して、防護無線を自動発報しており、この装置の設計思想が妥当であることが示された。



図8 実際の事故における検知動作 (相模湖駅脱線)<sup>(7)</sup>

図9に、川崎脱線事故<sup>(8)</sup> (2014年)を示す。最終列車後の回送列車が人為ミスによって軌道に置かれた保守用機械に衝突し、先頭車両が転覆、その他の車両も脱線または大きな衝撃を受け2人の乗務員が負傷した。

列車が機械に衝突したとき、防護無線自動発報装置は衝突を検知して、防護無線を発報した。先頭車両は衝突後転覆したが、装置は転覆相当の検知加速度を記録していたことも確認された。

先頭車両の前面床部分は激しく損害を受けたが、防護

無線自動発報装置は運転室の天井付近に設置されていたため、損傷を受けずに、正常にその機能を発揮した。

このことにより、衝突被害を受けにくい天井付近に設置するという設計思想が妥当であることが示された。



図9 実際の事故における検知動作（川崎駅衝突）<sup>(8)</sup>

## 6 結論

実際の事故に学び、当社で発祥した脱線検知装置の技術史を概観した。

乗務員は脱線を認知できないと知識化し、脱線を自動的に検知することにより、重大な2次災害に至る前に列車を止めるという脱線検知の概念は、1995年に構築された。

脱線検知装置は2006年に開発・実用化され、防護無線自動発報装置として2008年に開発・普及した。2013年と2014年に発生した実際の脱線事故で検知することにより、その有効性が実証された。

鉄道システムの安全性向上に向け、脱線検知装置をさらに普及させるべく、開発を進めたい。

## 参考文献

- (1) 平林健一，他：「本線走行に対応した脱線検知措置の開発」，東急車輛技報，No.51，2-7，(2001)，東急車輛製造（株）
- (2) 金子健一，他：「脱線検知装置の開発（車体振動による検知方法とその検証）」，平成14年鉄道技術連合シンポジウム（J-Rail2002）講演論文集，131-134，(2002)
- (3) 事故調査検討会：「帝都高速度交通営団日比谷線中目黒駅構内列車脱線衝突事故に関する調査報告書」，(2000)
- (4) 平林健一：「車両モニタリングシステム」，東急車輛技報，No.53，65-67，(2003)，東急車輛製造（株）
- (5) 航空・鉄道事故調査委員会：「西日本旅客鉄道株式会

社福知山線塚口駅～尼崎駅間列車脱線事故 鉄道事故調査報告書」，(2007)

- (6) 茂呂貴史：「安研型防護無線自動発報システム」，東急車輛技報，No.58，46-53，(2008)，東急車輛製造（株）
- (7) 運輸安全委員会：「東日本旅客鉄道株式会社 中央線相模湖駅構内 列車脱線事故 鉄道事故調査報告書」，(2015)
- (8) 運輸安全委員会：「東日本旅客鉄道株式会社 東海道線（京浜東北線）川崎駅構内 列車脱線事故 鉄道事故調査報告書」，(2015)
- (9) 松岡茂樹：「脱線等検知システムの開発・実用化と動作実績に基づく開発コンセプトの検証」，第12回JSCMシンポジウム，(2015)，レール・車輪接触力学研究会
- (10) S. Matsuoka, K. Ishikami, M. Nagamoto, “Development of the Derailment-Rollover-Crash (DRC) Detector and its Derailment Detection in Actual Accidents” , Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology, Civil Comp Press, 2016
- (11) S. Matsuoka, M. Nagamoto, “Development of the Derailment-Rollover-Crash Detector learnt from and Actual Accidents” , JREA Japanese Railway Engineering, Vol. 56 No.3 pp17-20, 2016.7

## 著者紹介



長本昌樹  
生産本部  
技術部（商品開発）課長



松岡茂樹  
技術士（機械部門），日本機械学会フェロー  
生産本部  
技術部 部長（開発企画）