

安研型防護無線自動発報システムの開発



木野 二郎*



寺田 和嗣**



石毛 哲雄*

脱線事故等の発生時に併発事故を防止する目的で防護無線機が導入されてきたが、列車衝突や脱線、転覆などの重大事故により乗務員が速やかに列車防護を行えない状況でも、併発事故を確実に防止できるように、乗務員を支援する装置として自動的に防護無線を発報するしくみを開発した。前面衝突・側面衝突・脱線・転覆を検知する機能を有した装置を試作し、2006年11月よりモニターラン試験を実施、通常走行において誤動作しないことを確認した。また、工場内および鉄道総研において動作確認試験を実施、設定したしきい値以上で動作することを確認した。2006年度に開発は終了し、現在営業車搭載に向け準備を進めている段階である。

●キーワード：列車防護、防護無線、センシング

1. はじめに

安研型防護無線自動発報システムは、発報の対象となる事象を、衝突・脱線・転覆と考え、対象となる事象を検知した場合は、その情報を自動的に防護無線機に伝送するしくみ（図1）である。開発にあたっては、加速度センサーにより列車衝突・転覆を検知する機能に、テクニカルセンターで過去に開発された脱線検知装置の機能を追加し新たな検知システムを開発した。

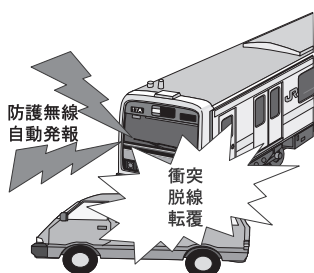


図1 安研型防護無線自動発報システムのイメージ

2. 開発した装置の概要および機能

安研型防護無線自動発報システムの主要装置である「衝突・脱線・転覆検知装置」は、加速度計によりそれらの状態を検知する（図2）。電源については、車両側からDC100V電源を受給させ、モニター搭載車両については、列車情報管理システム（MONまたはTIMS）を経由して動作検知箇所や故障情報をモニターに表示する。動作検知時は前後3分間の加速度データを内蔵のカードに記録す

ることにより、事後の分析に活用できるしくみとした。

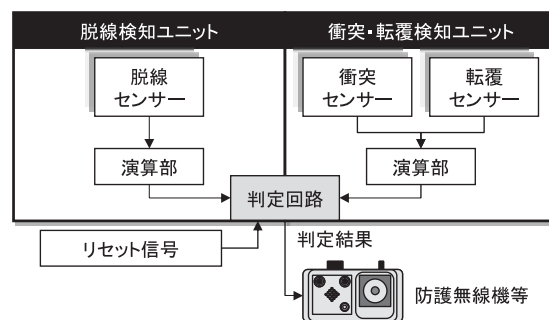


図2 検知装置機構のイメージ

2.1 自己診断機能

電源投入時等に検知装置内部で加速度センサーの状態や記録カードの処理状態の健全性チェックを自動的に行い、異常と判断した場合は、故障モードを出力するとともに、通常動作（検知処理可能状態）を停止させるしくみとする。このように、健全性チェック機能を設けるとともに、出力系を二重化して信頼性を向上させる方式を採用するなど、万一の場合に確実に動作するとともに誤動作を防止するしくみとし、あわせてメンテナンスフリーを実現することを考えた。

2.2 編成前後発報機能

前面衝突においては、衝突発生からごく短時間で先頭車両前頭部のクラッシュブルエリアが変形・損壊する可能性があり、その時間は約100msである。このとき、乗務員室内に設置された検知装置も損壊する恐れがある。従

って、検知装置動作時に90ms以内で引き通し線を加圧し、編成前後の運転台に出力を行うことで、前面衝突により先頭車両の防護無線機が損壊する前に、後部車両の防護無線機を自動発報させるしくみとした。

2.3 自己保持機能

衝突あるいは脱線事故等により車両のDC100V電源が断たれた場合、防護無線機の電源は自動的に緊急バッテリーに切り替わる。この場合、検知装置の電源も断たれて発報が停止する可能性があることから、より確実な列車防護を行うために発報を継続できるしくみが必要と考え、電氣的ではなく機械的に動作するリレーを用いることにより、無電源でも動作する自己保持機能を持たせた。

3. 社内プロジェクトによるしきい値の設定

安研型防護無線自動発報システムの判定アルゴリズムについては、確実な検知が要求され、かつ誤動作が許されない。このため、当社内の関係各部（安全対策部、運輸車両部、設備部）およびテクニカルセンター、安全研究所にてプロジェクト体制を構築し課題を抽出、解決方法について検討を重ね、衝突・脱線・転覆の判断となるしきい値を決定した。

3.1 前面衝突のしきい値の設定

(1) 模型構体の衝撃実験

過去に安全研究所において、模型構体の衝撃実験を実施し、13箇所に加速度計を設置、データ計測を行った。(図3) 前後方向の最大加速度については、車体重心付近が最も小さく、その最大加速度は約15Gであった。運転台の側面や屋根等、その他の箇所ではさらに大きな値となっている(図4)。



図3 模型構体の衝突実験

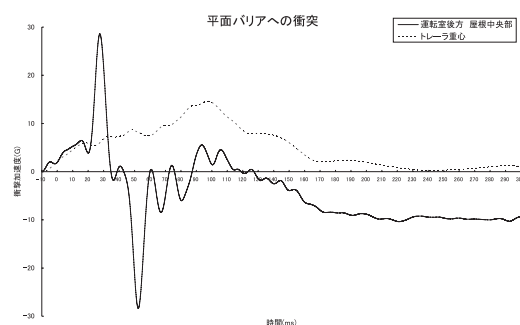


図4 模型構体の衝突実験結果

(2) 衝突シミュレーションを用いた衝撃加速度解析

実際に列車前面に自動車が衝突した場合、どの程度、衝撃加速度を生じるのか把握する必要があると考え、衝突シミュレーションを用いた衝撃加速度解析を実施した。解析方法としては、車両構造等設計標準のもととなった大菅踏切事故を模したシミュレーションモデルを使用して、E231系先頭車両（速度60km/hと想定）と大型ダンプカー、トラック、普通乗用車、軽乗用車とを衝突させた。衝突の状態は、自動車がレールに対して直角に静止しているものとし、自動車の車体側面全体が列車の前面に平面的に衝突するものと仮定した。

衝撃加速度の測定箇所は図5に示す計7箇所とした。シミュレーションの結果、検知装置を設置する予定としている運転台仕切上部付近の値は、大型ダンプカー、トラック、普通乗用車、軽乗用車のいずれの場合も、50Gを超える大きな値となった。

(3) 連結時の衝撃加速度測定試験

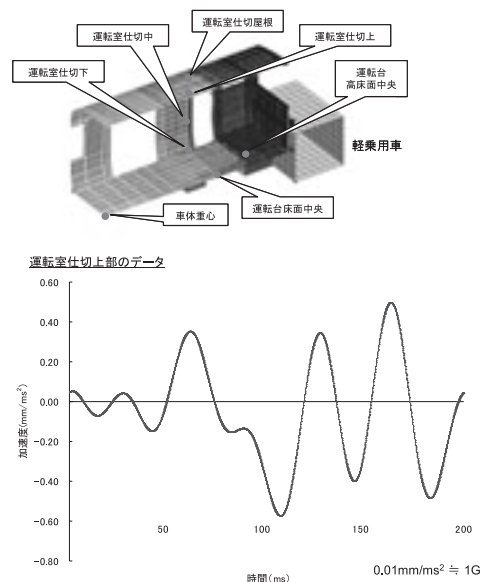


図5 軽乗用車のシミュレーション結果

検知装置は、営業運転中の車両の通常走行時の挙動を衝突と誤検知しないことが求められる。営業運転時の最大衝撃力は車両の連結時と考えられるため、連結時の衝撃加速度の測定を行った。密着連結器と自動連結器では構造の違いにより衝撃加速度が異なるため、機関車(EF81)、211系、E231系の3車種を選定した。

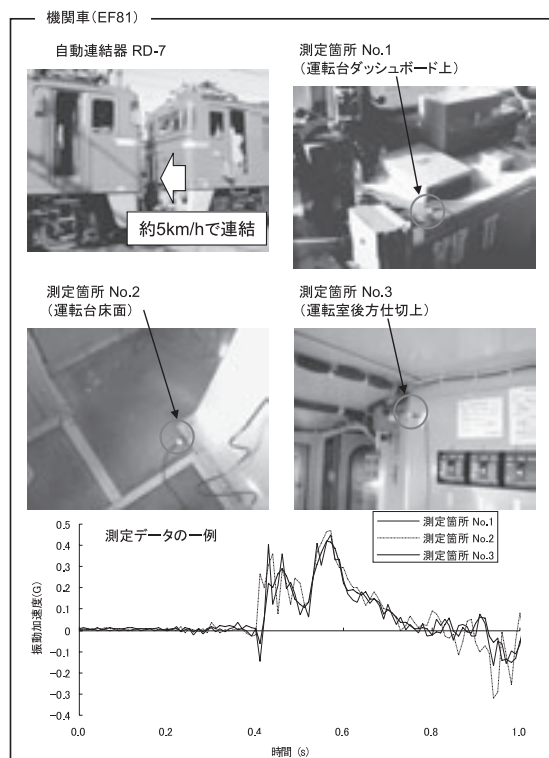


図6 連結時の衝撃加速度測定試験

図6に示すように運転台ダッシュボード上、運転台床面、そして運転室後方の仕切上部の3箇所に加速度計を設置し、車両同士を約5km/hで連結させ、測定を行った。結果として、機関車では最大約0.5G、電車では最大約0.3Gの衝撃加速度が得られた。

(1)～(3)の結果より、前面衝突のしきい値を10Gに設定することが妥当であると判断できる(図7)。

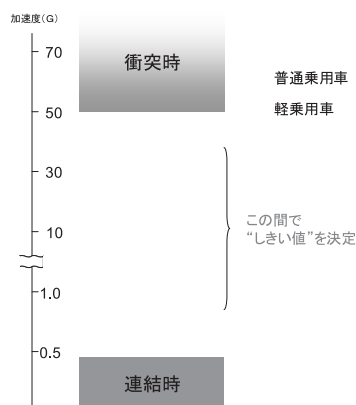


図7 前面衝突のしきい値決定の考え方

3.2 側面衝突のしきい値の設定

衝突については、側面衝突にも対応する装置とした。しきい値を決定するにあたり、前面衝突と同様にシミュレーションモデルを使用して、側面衝突状態の衝撃加速度を解析した。その結果、10Gを超える値となった。また、乗務員室扉を閉扉した際の衝撃を側面衝突と誤検知しないように検証した結果、左右加速度の最大値は1.3Gとなった。以上より、安全率を加味し、側面衝突のしきい値は3Gに設定した。

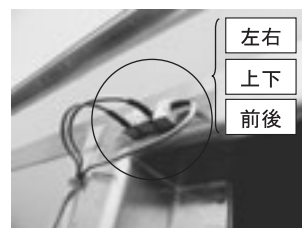


図8 乗務員室扉閉扉時の衝撃加速度測定

3.3 脱線のしきい値の設定

脱線判定のアルゴリズムは、車両がレールから逸脱し、車輪が道床に落下する際の下方向変位、道床上を走行する際に発生する異常振動を加速度センサーにより検出し、脱線と判定する。脱線判定については、過去にテクニカルセンターで開発された「脱線検知装置」の検知アルゴリズム(判定方法1～3のいずれかがしきい値を超えた場合に脱線判定)を踏襲した。

判定方法1および判定方法2については、車両がレールから逸脱し、道床上を走行することによって発生する異常振動を上下方向の加速度から検出し脱線判定する。また、判定方法3については、車輪が道床に落下する際の下方向変位を検出し脱線判定する。

(1) 判定方法1

上下加速度データを5ms周期で取得し、1秒間(計測回数200回分)のデータを蓄積して絶対値化する。この200データの中でしきい値(0.15G)を上回る加速度を50回以上検出した場合に脱線と判定する。

(2) 判定方法2

1秒間(計測回数200回分)の加速度絶対値を積算し、最新の積算値と1秒前、2秒前、3秒前の積算値と比較する。3回の比較のうち2回以上で一定値(137.2m/s²)を超える変化があった場合に脱線と判定する。

(3) 判定方法3

5ms周期で取得した上下加速度データから10ms周期で

交互に取得し、200ms（計測回数40回分）を2回積分することにより下方変位量を算出する。算出した下方変位がしきい値（90mm）を超えた場合に脱線と判定する。

3.4 転覆のしきい値の設定

車両の転覆形態は、曲線走行における速度超過に起因する遠心力による転覆と、静止時の横風等の外力による転覆の2種類がある。現有の車両で、最も重心が低く転覆しにくい車両が転覆する限界角度を求め、その時の重力加速度の垂直分力変化量をしきい値と設定した。

最も重心が低い車両であるキハ38系気動車における転覆角度は 27.6° であり、この転覆角度に相当する重力加速度の垂直分力の減少は $-0.1138G$ であることが分かった。なお、加速度センサーの感度電圧のばらつきを加味して、しきい値を $-0.1252G$ とした。

また、脱線検知装置開発時の実車走行時のデータを用いた検証結果より、上記しきい値を0.3秒（計測回数60回）以上の場合に転覆と判定することとした。

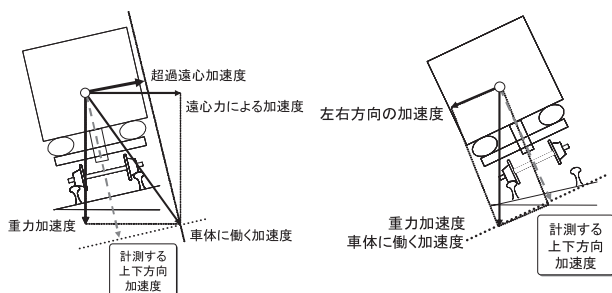


図9 計測する重力加速度の垂直分力

4. モニターラン試験

開発した装置が通常の走行時に発生する振動により誤動作しないかどうかを確認することを目的に、2006年11月～2007年1月までの3ヶ月間、モニターラン試験を実施した。モニターラン試験時は、走行中に装置が取得している振動加速度および検知状態をデータ記録装置に記録し、試験終了後にデータ解析によりしきい値の妥当性を確認した。



図10 E231系運転台への設置状況（左：検知装置 右：記録装置）

モニターラン試験車両は、新系列車両・旧系列車両や先頭車両・中間車両、振り子制御車両、気動車など今後の全車両への展開も考慮し選定した（表1）。

合計19万kmにおよぶ試験の結果、いずれの車種においても誤判定のないことを確認した。

表1 モニターラン試験 対象車両および結果

車種	走行線区	試験期間	走行距離	誤判定有無
E231系	東海道線 伊東線 横須賀線 高崎線 湘南新宿ライン	2006/11/13 ～ 2007/1/24	34,834.6km	なし
E217系	横須賀線 総武本線 成田線 外房線 内房線	2006/11/12 ～ 2007/1/18	36,187.2km	なし
205系	南武線	2006/11/11 ～ 2007/1/18	20,936.2km	なし
E233系	中央線 青梅線 五日市線	2006/11/12 ～ 2007/1/24	12,262.0km	なし
E351系	中央本線 篠ノ井線 大糸線 東海道線	2006/11/8 ～ 2007/1/16	67,840.0km	なし
キハ110系	小海線	2006/11/10 ～ 2007/1/26	17,306.8km	なし
合計			約19万km	

5. 装置の動作確認

設定したしきい値以上で検知装置が動作することを確認するために、衝突動作試験を鉄道総研の実験設備で行い、脱線・転覆動作についてはメーカー工場内で動作確認試験を行った。

5.1 鉄道総研における衝突実験

鉄道総研衝突実験装置にて、検知装置を装着した試験台車を走行させ、反力壁に衝突させる実験を行った。なお、衝突時の加速度がしきい値前後になるよう走行速度を調整した。



図11 衝突実験装置全景



図12 衝突実験装置台車

衝突実験結果より、装置に所定のしきい値を超える衝撃加速度が作用したときに、衝突（前面・側面）と判定し、異常（事故）検知出力することを確認した。また、所定のしきい値に満たない衝撃加速度が作用したときに

は、衝突判定・異常検知を行わないことについても確認した（図13、14）。

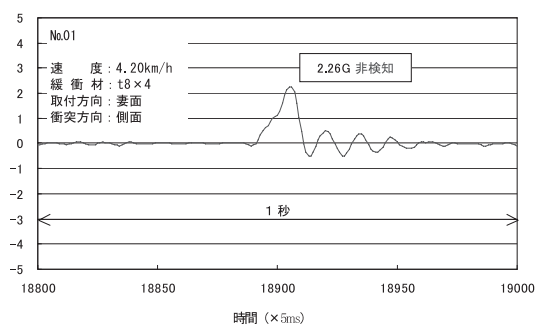


図13 側面衝突実験加速度波形（非検知）

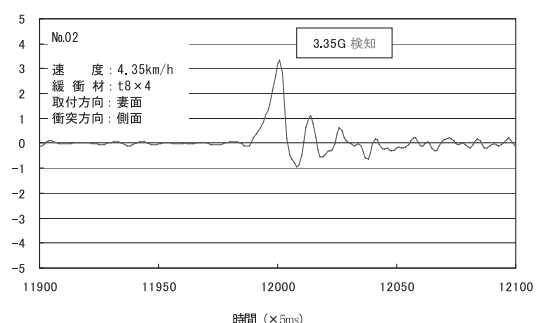


図14 側面衝突実験加速度波形（検知）

5.2 メーカー工場内における脱線実験

車両が脱線したことを検知し、異常（事故）検知出力を送出することを確認するために、2001年2月に当社大宮工場で実施した脱線実験時に測定した加速度データを電圧信号に変換し、検知装置の加速度センサーに擬似入力することにより、脱線検知機能の動作状態を確認した。



図15 脱線実験状況

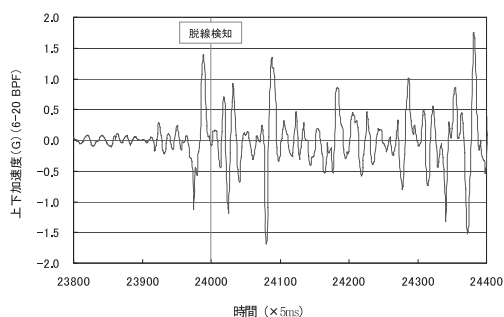


図16 脱線試験結果

5.3 メーカー工場内における転覆実験

停止状態の車両が横風等の外力により転倒する状況、および曲線走行中の車両が遠心力的作用によって曲線外側に転倒する状況を模擬できる装置により、転覆検知機能の動作状態を確認した。

(1) 静止状態からの転倒

検知装置を回転支柱の転倒中心軸から3m（ほぼ車両への取付け高さ）の位置に取付け、回転支柱から手を離して自然転倒させる。検知装置が転倒判定をしていることを確認し、計測器のデータより異常検知時の転倒角を確認した。

(2) 遠心力を受けながらの転倒

(1)と同様に検知装置を取付けた回転支柱を直立させた状態で、試験装置の回転機構を用いて試験装置全体を回転させる（車両が遠心力を受けながら転倒する場合の加速度が発生する速度で回転させた）。試験装置全体を回転させながら回転支柱を転倒させ、遠心力が作用した状態において検知状態および異常検知時の転倒角を確認した。

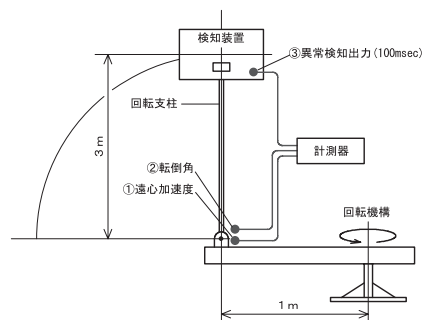


図17 転覆装置の模式図



図18 転覆試験実験状況

表2 転覆機能確認試験結果

判定条件	静止状態からの転倒		遠心力を受けながらの転倒	
	検知角度	検知種別	検知角度	検知種別
60回	28°	転覆	24°	脱線3
	29°	転覆	27°	転覆
	28°	転覆	26°	脱線3
			25°	脱線3
			20°	転覆
70回	28°	転覆		
	31°	転覆		
	30°	転覆		

6. 実用化に向けてのしきい値の決定

モニターラン試験の結果より、前面衝突、脱線、転覆のいずれの判定も設定したしきい値で誤検知がないことが分かった。なお、過去に行った衝突実験およびシミュレーション結果より、加速度センサーの設置箇所によって衝撃加速度に差があり、前面衝突の場合においては車両の衝突安全性要求から前面衝突した場合でも設定しきい値10Gを超えない可能性があることが分かった。

よって実用化に向けてしきい値の精査を行った。

6.1 前面衝突しきい値の精査

E217系以降の車両の衝突安全性要求に「客室の衝撃加速度を10G以下に抑える」基準があることから、前面衝突した場合でも、場所によっては10Gを超えない可能性がある。そこで実用化にあたっては、開発目的である「乗務員が速やかに列車防護を行えない状況でも併発事故を確実に防止する」という要件により乗務員側に着目した。

過去に鉄道総研において、運転士が傷害を受けることにより防護無線を発報できない事態を、運転士が衝撃により座席から転落する状態と見なし、運転士に見立てたダミー人形を用いて座席から転落する際の前後加速度を測定した結果、転落直前の加速度が2.7G、転落した際の加速度が5.4Gであった。安全側に判断すればしきい値を転落直前加速度に近い値とすることが望ましく、ダミー人形が無抵抗であるのに対し、生体の人間には衝撃抑制があることを考慮し、前面衝突しきい値を3Gに決定した。

6.2 側面衝突しきい値の精査

モニターラン試験で誤検知がなかったことから、試験実施時のしきい値3Gを採用した。

6.3 脱線しきい値の精査

脱線検知の開発段階における評価について調査を行い脱線判定方法1～3の特徴をまとめた。

(1) 判定方法1

車速の変化によって上下加速度が増加。車速依存性が高い。

(2) 判定方法2

定常的な軌道狂いや速度変化に伴う影響はない。

(3) 判定方法3

メーカーにおいて既に開発済の判定方法である。

上記内容について検討を行った結果、判定方法1～3のいずれの場合も脱線検知は可能であるが、判定方法1についてはモニターラン時に誤検知はなかったものの、車速依存性が高いという特徴により、線区・車種によっては誤検知の可能性も否定しきれないことから、判定方法2または判定方法3のいずれかがしきい値を超えた時を脱線判定とした。なお、脱線検知までの時間は、判定方法1、2が1秒、判定方法3が0.2秒であるため、判定アルゴリズムを変更した場合でも判定時間は同等であり、本システムの機能に与える影響はない。

6.4 転覆しきい値の精査

モニターラン試験の結果、転覆しきい値に対する最大値の到達割合が高く、誤検知が発生する可能性があるため、しきい値の見直しが必要と判断した。転覆判定では検知角度（重力加速度の垂直分力減少：-0.1252G以下）と判定回数（連続60回）の2種類のパラメータがあり、重力加速度の垂直分力については転覆角度（27.6°）から算出された値であるため、変更することは難しい。故に、しきい値の見直しを判定回数の変更で対応し、60回から70回へ変更することとした。なお、しきい値の変更によって、検知角度が深くなることは避けられないが、判定回数の変更による検知角度の変化（遅れ）は最大3°程度に過ぎない。このことから検知遅れによる影響はほとんどないと考えられる。

7. 今後の進め方

2006年度に開発が終了し、今後、営業車両搭載に向けて準備を進めていく。営業車両搭載後、衝突（前面および側面）、脱線、転覆の各項目について、動作状況を把握する目的で一定期間モニタリングを行う予定である。また、今後新たに設計される車両における装置設置箇所については、車体衝撃緩衝構造等を考慮し、シミュレーションなどにより、しきい値を超える衝撃加速度が適正に得られる箇所に装置を設置していく必要がある。