

S7-3-3. 鉄道車両脱線時の安全性の研究 (鉄道版防護策の可能性)

○ [機] 宮本 昌幸 (明星大学)
香山 義人 (明星大 (院))

Study on the Safety of Railway Vehicles in Derailment Accident
(Possibility of Railway Protection Fence)

Masayuki Miyamoto (Meisei University)
Yoshito Kayama (Meisei University)

It is the research not to expand damage when a railroad accident occurs. This paper describes the results of an investigation about the past derailment accidents first. Subsequently, the examination results of the influence of ground equipment such as railway protection fence on the accident form after derailment by the computer simulation is described. Consequently, the validity of the railroad version protection fence was observed and the prospect which may be realized by the specification of the same level as the protection fence for cars was acquired.

キーワード：脱線事故，被害拡大，防護柵，シミュレーション

Keywords: derailment accident, damage expansion, protection fence, simulation.

1. はじめに

鉄道の安全については、長らく『いかに事故を起さないか』に主眼を置いて研究がなされてきた。その結果鉄道は他の乗り物と較べて格段に安全な乗り物となっている。しかし、事故を完全に無くすのは難しく、ある程度の確率のもとに事故は実際起きている。兵庫県南部地震は幸いにも 6 時前におこり、新幹線はまだ走行していなかったが、在来線の列車には脱線、転覆が生じた。より速度の速い新幹線の場合には状況によっては重大事故に発展する可能性も予想される。

そこで、事故が起きた時に被害が拡大しないようにするにはどうすれば良いかとの視点も重要である。現在にいたるまで、脱線、転覆事故に関して、このような視点からの研究はほとんど行われてきていない。

そこで本研究では、

- (1) 過去の脱線、転覆事故の調査
- (2) 模型実験による脱線後の事故形態に及ぼす車両、地上設備の影響の検討
- (3) 計算機シミュレーションによる脱線後の事故形態に及ぼす車両、地上設備の影響の検討

の面からの調査、検討を進めることを目的としている。

具体的イメージの例としては、車両の連結方法などで脱線後の事故拡大に差があるのか、トンネル、ホーム進入直前に脱線した列車をトンネル、ホームの壁面に激突させず、比較的軽微な損傷でトンネルやホームへ導く鉄道版防護柵、ガードレールの可能性、効果の推定などを念頭においている。この報告では上記 (1) と (3) について述べる。

2. 過去の脱線、転覆事故の調査

過去の脱線、転覆事故において、列車はどのような形態に座屈、転倒し、どのような被害があったかを調査することにより、車両構造、軌道構造、地上設備構造などの諸要因と事故被害の大きさとの関連の一端を知ることができる考えた。

2. 1 列車衝突事故

以下の二つの衝突事故における車両の損傷状況を比較検討した。

(1) JR 東中央線東中野駅構内列車衝突事故⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

1988 年 12 月 5 日 9 時 40 分頃発生した。東中野駅緩行線に停車中の中野行下り電車 (103 系 10 両編成) に、続行の下り (201 系 10 両編成) が約 30km/h で追突し、双方の電車が破損し 4 両が脱線、追突した電車の運転士と乗客 1 人が死亡、116 人が負傷した。追突列車の 2 両目に 3 両目が乗り上がるなど、いくつかの連結器面で乗り上がりがあった。また、6 両目が車体中央でくの字に折れ曲がった。車両は鋼製である。

(2) JR 九州鹿児島線列車衝突事故⁽⁴⁾

2002 年 2 月 22 日 21 時 30 分頃発生した。停車中の普通電車 (813 系 3 両+811 系 4 両) に無閉そく運転中の下り快速電車 (813 系 5 両) が速度約 40km/h で追突した。双方の電車が破損し、乗務員 3 名を含む 134 名が負傷した。連結器面での乗り上がりや 4 箇所が生じた。車両は客室部分がステンレス鋼製で運転室部分が鋼製であり、この接合部の損傷が大きかった。また、車体中央部には損傷は認められず

車体端部に損傷が集中していた。

(3) 両事故における車両損傷の比較

九州事故では、衝突速度が東中野事故より約 10km/h 大きいにもかかわらず、車両が軽量であり運動エネルギーが速度のわりには小さかったこと、車体端部が集中的に壊れエネルギーを吸収しヒューズのような役割を果たしたこと、などより東中野事故で見られた車体中央部の曲がりなどは生じなかった。運転席が鋼製で衝突時にもサバイバル空間が確保され運転士は死亡せず負傷ですんだ。これらのことから、軽量車体の設計の基本的考え方がうまく機能したと言える。

2. 2 脱線転覆事故

JR 九州において 2003 年 7 月 18 日 21 時 45 分頃、6 両編成特急電車「かもめ」が線路上に落下していた 40cm 大の岩塊にぶつかり右に脱線した⁽⁴⁾。脱線した状態で約 160m 走行し半径 600m の右曲線にさしかかった頃からカントの影響が右によっていき、左車輪も右レールを乗り越え単線盛土区間で、1 両目は右の盛土下へ、2 両目は左の盛土下へ転落して大破した。重傷 3 名、軽傷 34 名の負傷者が出た。30～50m 手前で岩塊を発見して非常ブレーキをかけたときの速度は 120km/h ということから、岩塊にぶつかったときの速度は 90km/h 程度と推定される。

この事故から被害拡大に関して以下のことがわかる。

- ・ 40cm 大程度の岩塊によっても状況によっては脱線すること
- ・ 脱線しても直線で大きな外乱がなければ線路に沿って走行すること
- ・ 盛土区間では脱線から盛土下へ転落し転覆に至り大事故になる可能性が高いこと
- ・ 電車線柱には列車の転落を防止する効果は無いこと
- ・ 重傷者が少なかったのは転落車両が突っ込んだところが畑で柔らかかったことが関係したと思われること

2. 3 分岐器の影響

1998 年 6 月 3 日 10 時 59 分頃にドイツ Eschde で起きた ICE の脱線事故では死者 102 人、重軽傷者 200 人を出した。この事故では右側に脱線した状態で約 6km 走行した後分岐器区間で左車輪がリードレールに誘導されて列車は右へ大きく振られ道路橋の橋脚に激突し大事故となった⁽⁵⁾。

2000 年 3 月 8 日 9 時 01 分頃におきた営団地下鉄日比谷線中目黒脱線衝突事故では死者 5 人、負傷者 63 人を出した。この事故では 8 両目第 1 軸が右側に脱線後約 60m 走行した後、横取り装置のリードレールに誘導され列車は右に振られていき、対向車と衝突し大きな事故となった⁽⁶⁾。

この二つの事故では分岐器のリードレールが車体を左右に大きく振る役目をしていて、事故拡大要因となった。見方を変えると、線路間に設けたレールにより列車を誘導できるということである。すなわち、脱線後の列車を大きく左右に振らせずに、地上構造物への激突や、転覆を防ぐ、「逸脱防止レール」が成り立つことを示唆するものである。

3. シミュレーション解析

列車が脱線した後の挙動を計算機シミュレーションにより解析することがこの章の目的である。このような研究はいまだ報告されていず、基本的なモデリングをどのように行うかが最初の課題である。

3. 1 モデリングの概要

(1) 基本構想

脱線後の車両は前後、左右、上下、ロール、ピッチ、ヨーの 6 自由度全ての運動をすることが想定されるが、モデリングの基本的考え方を提示することがまず重要と考え、今回は高さ方向は考えず平面内の運動に限定したモデリングを行った。

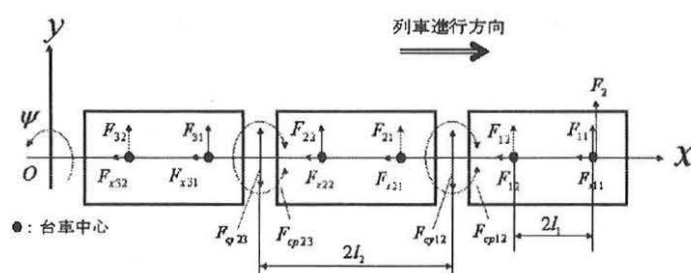


図 1 ボギー車両運動モデル

ボギー車両と連接車両の運動モデルを作成した。今回の計算の対象としたボギー車両の運動モデルを図 1 に示す。このモデルが走行する軌道構造としては、盛土、切通し、高架橋、橋梁、トンネルなど種々の状況が考えられるが、まず盛土複線軌道を想定した。

用いる各記号は以下のとおりであり、今回の計算に用いた基本値の一部を同時に示す。

m : 車両質量 40 t

I : 車両ヨーイング慣性モーメント 1440tm²

F_{ij} : i 番目車両の台車と軌道間に働く左右力 ($j=1$: 前
台車, $j=2$: 後台車)

F_{xij} : i 番目車両の台車と軌道間に働く前後力 ($j=1$:
前
台車, $j=2$: 後台車)

F_{cyj} : i 番目と j 番目車両間の連結器に働く左右力

F_{cpj} : i 番目と j 番目車両間の連結器に働くヨーイングモーメント

$2l_1$: 前後台車中心間距離 17.5m

$2l_2$: 前後連結面間距離 25.0m

y_i : i 番目車両重心の左右変位

ψ_i : i 番目車両重心のヨーイング角

y_{ij} : i 番目車両の台車重心位置の左右変位 ($j=1$: 前
台車, $j=2$: 後台車)

y_{cij} : i 番目車両と j 番目車両間連結器の相対左右変位

$$(\quad = y_i - l_2 \psi_i - (y_j + l_2 \psi_j))$$

ψ_{cij} : i 番目車両と j 番目車両間連結器の相対ヨーイング
角 ($= \psi_i - \psi_j$)

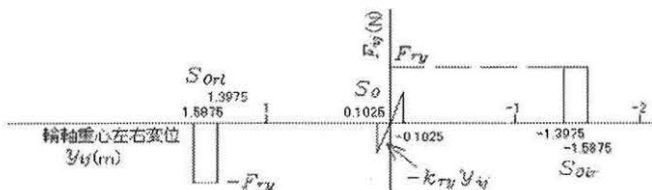


図2 レールによる抵抗力のモデル化 (対向軌道は省略)

(2) 車両モデルにおける仮定と基本値

- ・平面モデルとする。
- ・車体・台車・輪軸は一体の剛体とし、列車の各車両はそれぞれ左右、ヨーの自由度を持つ。
- ・連結器に働く力 F_{cij} 、モーメント M_{cij} はそれぞれ連結器の相対左右変位、相対ヨーイング角に比例するとした。いずれも破壊限界にくと値は0となる。今回の計算では F_{cij} のみ考慮し、破壊限界力は 300 kN を基本値とした。

(3) 軌道モデルにおける仮定と基本値

- ・台車と軌道間に働く左右力 F_{ry} としては図2の概念図に示すように、レール上にある輪軸が脱線する際に受ける拘束力 S_0 は変位に比例する力とした。脱線した車輪がレールを乗り越えるときに受ける拘束力 S_{0r1} 等の力は車輪がレールに接触してから乗り越えるまでの区間一定の力 F_{ry} が働くとした。

S_0 の最大値は軸輪重に対する脱線係数 2 に相当する 400 kN とした。 S_{0r1} 等は、脱線時 S_0 のフランジ高さ 30mm に比較してレール高さ 174mm をのりこえなければならないので S_0 の値より大きく設定した。左右片方の車輪のみレールに接触する際には $F_{ry}=800$ kN、左右両方の車輪がそれぞれ左右のレールに同時に接触するときには $F_{ry}=1200$ kN を基本値とした。これらの値は平面運動としてのモデリングとして、実現象とほぼ等価になるよう試算を繰り返し決定

した。

- ・台車と軌道間に働く左右力 F_{ry} には、脱線後車輪がレールを乗り越える時の輪軸左右速度に比例する減衰力 (減衰係数 C_{ro})、バラスト上を移動する時の輪軸左右速度に比例する減衰力 (減衰係数 C_{bo}) も働くとした。 $C_{ro}=C_{bo}=2$ kN/(m/s) を基本値とした。

- ・車両のヨーイングの運動に、脱線後輪軸がバラスト、枕木上を走行することにより受ける前後抵抗力 (1 g 相当と仮定) によるモーメントを考慮した。

(4) 鉄道版防護柵モデルにおける仮定と基本値

鉄道版防護柵と車両が接触する際の力は輪軸左右速度に比例する減衰力とした。その減衰係数を決めるにあたっては自動車用の防護柵についての調査を行った⁽⁷⁾。

防護柵の新しい設置基準は、平成 10 年 11 月 5 日付け建設省道環発第 29 号により建設省道路局長より有すべき性能を規定する方式として通知された。①車両の逸脱防止性能、②乗員の安全性能、③車両の誘導性能、④構成部材の飛散防止性能、が規定されている。

防護柵はたわみ性防護柵と剛性防護柵に別けられる。前者は構成する部材と支柱基礎を塑性変形させる方式で、ガードレール、ガードケーブル、ガードパイプ、ボックスビームに分類される。後者は構成する部材の弾性限界内の変形しか見込まない防護柵で、衝突時の衝撃を車両の変形と防護柵形状の工夫で緩和するものであり、コンクリート製で単スロープ型、フロリダ型、直壁型に分類される。

いずれの防護柵も、衝撃度 (kJ) で種別別けされている。C (45kJ)、B (60kJ)、A (130kJ)、SC (160kJ)、SB (280kJ)、SA (420kJ)、SS (650kJ) の 7 種別である。耐衝撃度が最も高い SS タイプは、25t 車両が速度 100km/h で 15° の衝突角度で衝突する際のエネルギー約 650 kJ に対応している。そのときの防護柵に直角成分の衝突速度は 7.2m/s である。大きく別けるとたわみ性防護柵は低衝撃度用 (A あるいは SC まで、ただしガードレールは 7 種別全てに対応できる)、剛性防護柵は高衝撃度用 (SC 以上) である。

これらの情報を基に鉄道車両の場合について検討してみる。まず衝突角度だが、乗り上がり脱線で車輪 1 回転でレール幅を乗り越え脱線するとすると、その角度は約 2° となる。不確定な条件が多く明確にはできないが、自動車の場合よりはかなり小さくなることが予想される。仮に衝突角度を倍の 4° とすると、300km/h 走行時の防護柵に直角成分の衝突速度は約 6m/s となり、自動車用防護柵の種別 SA タイプが想定している衝撃速度となる。

衝突する際、車両の前部がまず防護柵と接触する。そのときの衝突等価質量を仮に車両の前半部分質量と考えれば 20 t となり、衝突する際のエネルギーは 337 kJ となる。従って 420kJ を想定している自動車用防護柵 SA タイプレベルの防護柵で構成できる可能性が高いと言える。その場合、今回のシミュレーションで用いる防護柵の減衰係数 C_e (kN/(m/s)) の値を検討する。減衰力を一定として簡略化

すると次式がえられる。

$$C_g \times 6 \text{ (m/s)} \times \text{移動距離 (0.1m とする)} = 337 \text{ (kJ)}$$

この式から C_g を求めると 560 kN/(m/s) となる。計算では 500, 1000, 2500, 5000 kN/(m/s) とパラメータとして変化させることとする。

防護柵の設置位置は衝突角度が大きくならないように、車体側面から 10cm の軌道中心から 1.8m で接触するとした。

(5) 初期条件

シミュレーション上でまず脱線を起こさせるには種々の方法が考えられるが、今回は 1 両目先頭台車のみが左に脱線して左車輪が左レール外側に接している状態で、1 両目車両に左方向への左右初速度を与えた。その値は (4) の検討で得られた 6 m/s を参考に变化させた。

3. 2 計算結果

以上の結果を基に運動方程式を導き、MATLAB によりプログラムを作成し、1 両あるいは 2 両走行時の初期速度の影響、1 両走行時の防護柵減衰係数の影響、2 両走行時の連結器破壊荷重の影響、2 両走行時の車両長・車両質量の影響を調べた。結果のいくつかについて以下に示す。

図 3 に 1 両走行時の前車初期速度が 4.0 m/s の場合の車体前車位置及び後車位置での左右変位 y_L, y_R の時間的变化を示す。前車が左、右のレール間で振動を繰り返すのは 1.0 m/s の場合と同じだが、後車は前車が左レールに衝突し跳ね返る際の反動で左レールも乗り越えて軌間外へ飛び出てしまう。初期速度が 5.0 m/s を越えると、前、後車ともに軌間外へ飛び出てしまう。

図 4 に防護柵を設けた際の初期速度が 4.0 m/s の場合の y_L, y_R を示す。前車は防護柵には接触せず、後車が接触する。その際の防護柵の移動距離は $C_g = 500 \sim 1000 \text{ kN/(m/s)}$ で $90 \sim 50 \text{ m}$ 程度である。初期速度が 5.0 m/s に増すと前、後車ともに防護柵に接触する。

2 両走行時、連結器破壊荷重 F_c が 150 kN 以下だと 1 両目は 2 両目と分離し、1 両の動きと同じで 1 両目後車車が軌間外へ飛び出る。 F_c が $300 \sim 600 \text{ kN}$ だと 1 両目が分離するのは同じだが、軌間外へ飛び出るのは 1 両目前台車となる。 F_c が 1500 kN 以上になると、1, 2 両目は分離せず 2 両目前台車も脱線する。

現実的ではないが車両長の影響を明確にするために 40 m と極端に長くなると、台車位置と連結位置間距離（オーバーハング長さ）が長くなり、1 両目ヨーイング運動の影響が 2 両目により大きく伝わり、2 両目は後台車まで脱線するようになる。車両質量が 20 t と軽くなっても、 60 t と重くなっても 2 両目は脱線しなくなる。しかし 20 t の場合は 1 両目の動きによる慣性力が小さくなり、連結器を通して伝わる力が小さく非分離なのに対して、 60 t の場合は慣性力が大きく分離してしまう結果 2 両目は脱線しなくなる。

4. まとめ

過去の脱線、転覆事故の調査により、分岐器のリードレールが車体を左右に大きく振る役目をしていて、事故拡大

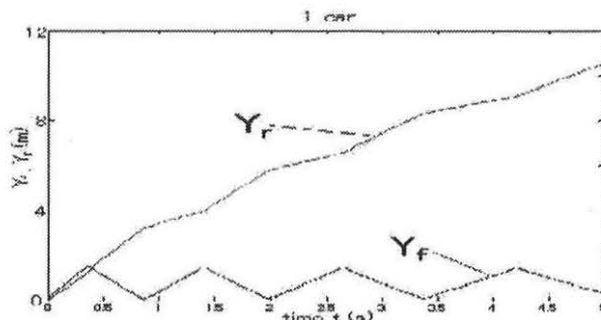


図 3 1 両走行 ($\dot{y}_{1f} = 4 \text{ m/s}$)

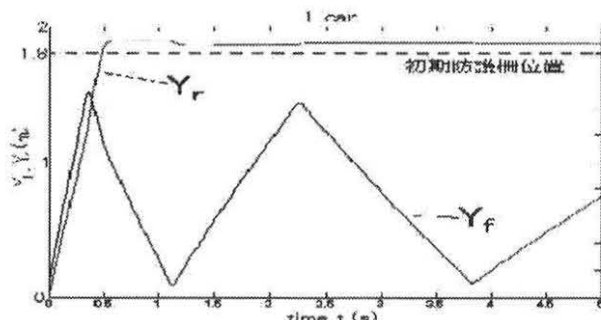


図 4 1 両走行 防護柵あり

$$(C_g = 1000 \text{ kN/(m/s)}, \dot{y}_{1f} = 4 \text{ m/s})$$

要因となった事例があった。これは、見方を変えると、線路間に設けたレールにより列車を誘導できるということであり、脱線後の列車を大きく左右に振らせずに、地上構造物への激突や、転覆を防ぐ、「脱線防止レール」が成り立つことを示唆するものである。

シミュレーション解析により、列車が脱線した後の挙動を計算機シミュレーションにより解析するモデリング方法を、基本的な平面モデルを例として提示した。この方法により今後の 3 次元モデルへの拡張も可能と考えられる。

平面モデルによる計算より、車両、軌道の諸パラメータが脱線後の挙動に及ぼす影響の一端が明らかになった。レールは脱線後の車両のレール外への脱線防止に効果がある場合があること、また「鉄道版防護柵」の効果が確認され、自動車用防護柵と同レベルの仕様で成り立ち得る見通しが得られた。

参考文献 (1)久保田博：鉄道重大事故の歴史，グランプリ出版，2000.6，(2)山之内秀一郎：なぜ起こる鉄道事故，東京新聞出版局，2000.12，(3)毎日新聞 1988.12.5 夕刊・朝日新聞 1988.12.5 夕刊，(4)航空・鉄道事故調査委員会：鉄道事故調査報告書 2003-4B，2004.1，(5)宮本昌幸：ドイツ版新幹線 ICE 脱線事故の教訓，日本信頼性学会誌「信頼性」，Vol.23, No.6，2001.9，(6)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に関する調査報告書，2000.10，(7)（社）日本道路協会：車両用防護柵標準仕様・同解説，1999.3