

1613 編成挙動に与える脱線軸の影響

正 [機] ○鈴木 史比古 (JR東日本)

正 [機] 佐々木 浩一 (JR東日本)

Influence of Derailed Wheelsets on Trainset Behavior

Fumihiko SUZUKI, Research and Development Center, East Japan Railway. 2-479, Nisshin-cho, Kita-ku, Saitama-City

Koichi SASAKI, Research and Development Center, East Japan Railway

Experiments for showing the derailment behavior of a Shinkansen using a 1:87 scaled model and MBD simulations were carried out in order to explain the phenomenon that the trainset had stopped without severe buckling under the condition of Niigata pref. Chuetsu Earthquake. With these experiments, it is shown that the direction of derailed wheels against rails influence the trainset behavior after the prior derailment. In addition, it is shown that a brake force exerted on the rear car can reduce the deviation of the train cars. About these behaviors, numerical simulations using characteristics corresponding to actual vehicles gave figures that result in substantially the same qualitative features.

Keywords: Railway, Railway vehicle, Vehicle dynamics, Derailment, Buckling

1. 緒言

最高速度 300km/h の高速鉄道が、欧州諸国や日本に留まらず、韓国、台湾、中国など世界各地で営業を開始し、今後もさらに路線拡大していくと考えられる。高速鉄道を取り巻く沿線の自然環境条件として、欧州諸国とその他の相違点には、大規模地震に遭遇する可能性があるかどうかがある。2004年10月に世界で初めて大規模地震の被害を被り脱線した上越新幹線は、半数以上の輪軸が脱線したにもかかわらず編成として列車座屈を起こさず、大きな車両逸脱なく停止した¹⁾。この経験を活かし、大規模地震による被害を軽減するための研究・開発を継続することは極めて重要である。

筆者らは、縮小模型車両の編成列車を用い、平板上において、最後部車にブレーキ力を作用させると、引張自連力により編成として列車座屈を回避することを示した。また、逆に先頭車にブレーキ力が負荷された場合は、編成は列車座屈を起こし、大きな車両逸脱に至ることを示した。これらの現象は、実車相当の諸元を用いた数値計算によっても、同様の結果が得られることを確認した²⁾。同じ実験装置を用いて、編成車両のある1輪軸が脱線した場合のその後の編成列車の挙動についても確認し、先

頭車両が脱線した場合は、連結器を介し車両が大きく逸脱し、横転などの現象が後位の車両へ伝播するが、その他の輪軸が脱線した場合は、連結器の作用などにより車両は大きく逸脱しないことを示した^{3,4)}。また、上述の実験を踏まえ、なお未解明な部分として、新潟県中越地震による新幹線脱線時には、編成内の車両単位で4つの脱線パターンがあり、これらのパターン発生の原因究明の必要性を説く^{4,5)}とともに、車輪形状の改良による脱線防止策を提案した^{5,6)}。しかし、これらの実験では、平板上ですべての輪軸が脱線しているという極限的な脱線状態、あるいは1輪軸のみの脱線によるその後の編成挙動を示しているにとどまっていた。

そこで、本研究では、1/87縮小模型車両の編成列車を用い、水平な直線レール上で複数輪軸が脱線した場合の編成列車の挙動を示すと同時に、同様の条件で、編成後方からブレーキ力を作用させた場合の挙動についても考察した。さらに、上述の編成列車の挙動について、実車相当の諸元を用いた数値シミュレーションを行い、検証した。

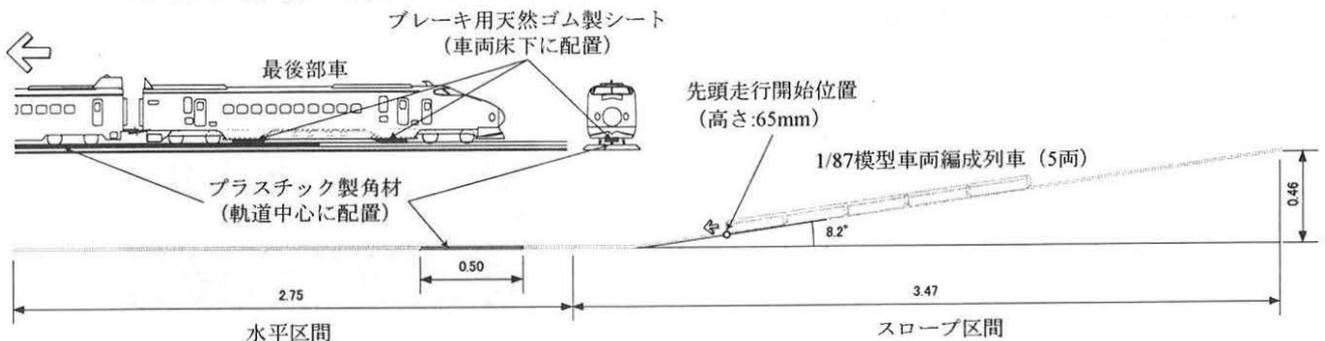


図1 実験装置及び模型車両の概要

表1 脱線軸が編成挙動に及ぼす影響

予め脱線させた輪軸位置の条件	1 両目				2 両目				3 両目				4 両目				5 両目				
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
(1) 2 両目 1 軸・3 両目 1 軸, 反対方向*					◎	●			◎	●											
(2) 2 両目 1 軸・3 両目 1 軸, 同方向					◎	●			◎	●											
(3) 2 両目 1 軸・3 両目 2 軸, 同方向					◎	●					◎										
(4) 2 両目 1 軸・3 両目 3 軸, 同方向					◎	●						◎	●								
(5) 2 両目 1 軸・3 両目 4 軸, 同方向*					◎	●							◎								
(6) 2 両目 1 軸・4 両目 1 軸, 同方向					◎	●								◎	●						
(7) 2 両目 3 軸・3 両目 1 軸, 反対方向							◎	●	◎	●											
(8) 2 両目 4 軸・3 両目 1 軸, 反対方向*								◎	●	◎	●										
(9) 2 両目 4 軸・3 両目 1 軸, 同方向								◎	●	◎	●										

◎ : 予め脱線させた輪軸
 ● : 走行開始後に脱線した輪軸
 ◻ : 停止時、顕著な逸脱が認められた車両
 反対方向 : 予め脱線させた 2 輪軸はレールに対して反対方向
 同方向 : 予め脱線させた 2 輪軸はレールに対して同方向

2. 縮小模型による実験

2.1 縮小模型車両と実験装置

模型車両は 200 系新幹線の 1/87 HO ゲージ模型(真鍮製)である。本実験では、限られた実験スペースの中で車両相互にはたらくブレーキ力の作用と連結の影響を実現するため、5 両編成とした。また、後方からのブレーキ力を発生させるために、最後部車の床下には天然ゴム製シートを 2 箇所装備した(図 1)。

実験装置は、位置エネルギーによる加速を利用して、編成列車を走行させるためのスロープ区間、水平直線線路上での脱線軸を有する編成車両の走行挙動を観察する水平区間から構成されている(図 1)。スロープ区間・水平区間ともに HO ゲージ(17mm)のレールを敷設した。スロープ区間は、最大高さ 457mm、長さ 3470mm、傾斜角 8.2° である。ブレーキ力を作用させる際には、水平区間に、車両側の天然ゴム製シートとの摩擦力でブレーキ力を発生するプラスチック製角材(2mm×2mm×500mm)を敷設した。

実験方法は、編成中の任意の 2 軸を予め脱線させ、編成車両をスロープ区間の定位置から走行開始させることにより加速させ、水平区間での編成挙動を観察することとした。

2.2 脱線軸の位置による編成挙動への影響

脱線させる 2 軸の位置は、新潟県中越地震の際の上越新幹線の直近の脱線 2 軸を有する台車の脱線軸のパターン(表 1 中、*を付したパターン)を中心に、表 1 に示した 9 通りとした。筆者らの実験により、奇数軸が脱線した台車では、同台車の偶数軸も脱線に至ることが示されているが^{4,5)}、表 1 より、本実験においても、同様の傾向があることがわかる。

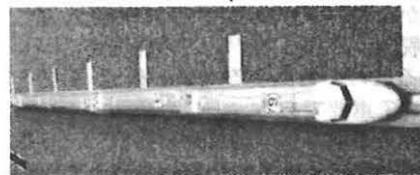
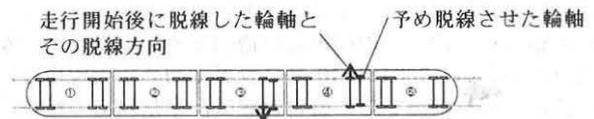
2.2.1 隣接する 2 両の両前位台車が脱線

隣接する 2 両の両方の第 1 軸がレールに対して反対方向に脱線した場合、それぞれの台車のもう一方の輪軸(偶数軸)は脱線するものの、車両は大きく逸脱せずに走行後、停止した(図 2(a))。それぞれの台車の脱線軸が相互に反対方向に脱線することにより、左右方向の荷重配分が均衡したため、2 つの脱線車両は大きく逸脱しなかったものと考えられる。よって、脱線輪軸がレールに対し反対方向に存在することは、車両逸脱に関していえば、より安全側にはたらくことが考えられる。

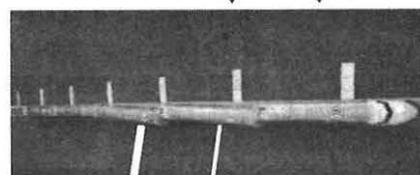
これに対し、隣接する 2 両両方の第 1 軸がレールに対して同方向に脱線した場合、走行後の脱線軸数は 4 軸で同数であるが、車両逸脱は顕著であり(図 2(b))、横転に至ることもあった。左右方向への荷重が一方に偏り、危険側に作

用したと考えられる。

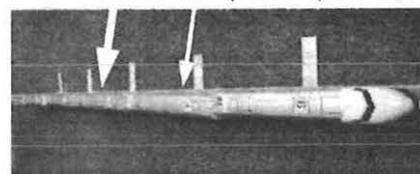
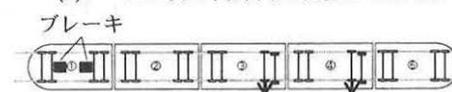
そこで、図 2(b)のような逸脱状態を防止することをねらい、プラスチック製角材を図 1 に示した位置に敷設し、後方車両にブレーキ力を作用させた。走行開始直後に大きく逸脱したまま水平区間を走行していた 2、3 両目の車両は、最後部車がこのブレーキ区間に突入すると、最後部車にはたらくブレーキ力とその他の車両にはたらく慣性力により発生した、車両全体にはたらく引張力により、逸脱した車両が軌道中心に引き戻された(図 2(c))。ただし、ブレーキ力が作用した車両から遠い車両(前から 2 両目)では、軌道中心方向へ十分に引き戻されていない状況も確認された。



(a)レールに対し反対方向に脱線させた場合(表 1 (1))



(b)レールに対し同方向に脱線させた場合(表 1 (2))



(c)最後部車にブレーキ力を作用

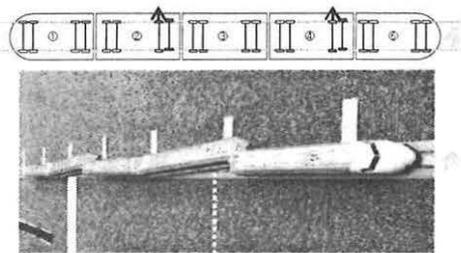
脱線車両の条件: 2 両目および 3 両目の第 1 軸を脱線

図 2 走行後の編成車両の状態

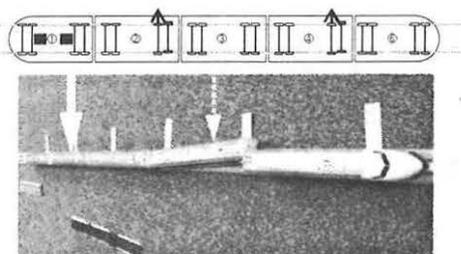
2.2.2 非脱線車両1両を挟んだ2両の両前位台車が脱線

2両目と4両目、すなわち、車両間に脱線軸のない1両を挟んだ2両の各第1軸がレールに対して同方向に脱線した場合、図2(b)の場合と同様、それぞれの台車のもう一方の輪軸(偶数軸)は脱線し、顕著な車両逸脱を伴って停止した(図3(a))。

最後部車にブレーキ力を作用させた場合も、図2(c)の場合と同様に4両目の車両は軌道中心に引き戻されたが、2両目は引き戻されず、顕著な車両逸脱を伴って停止した(図3(b))。2両目の車両を引き戻すに必要な引張力を発生するようなブレーキ力あるいは慣性力が得られていないことが考えられる。また、ブレーキ作用箇所に近い車両ほど、その効果が大きいことが確認できた。



(a)レールに対して同方向に脱線させた場合(表1(6))



(b)最後部車にブレーキ力を作用

脱線車両の条件:2両目および4両目の第1軸を脱線

図3 走行後の編成車両の状態

2.2.3 車両を跨いで隣接する2台車が脱線

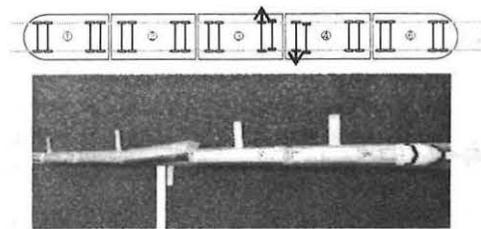
隣接2両で、前位の車両第3軸および後位の車両第1軸を脱線させた場合の編成挙動を観察した結果を示す。

図4(a)は予め脱線させる輪軸をレールに対して反対方向に脱線させたときの走行後の編成状態である。それぞれの台車の奇数軸が脱線しているため、同台車にある偶数軸も脱線した。車両逸脱に関しては、3両目の前位が顕著であるが、2両目の後位の逸脱は小さかった。これは3両目の逸脱による横方向への荷重(逸脱を大きくする方向の力)を、レールの反対側に脱線している2両目後位台車の両輪軸のレール反力によって支えている状態であり、その作用は2両目後位台車を軌道中心に引き戻す方向にはたらいたと考えられる。この場合も脱線輪軸がレールに対して反対方向にあることが安全側にはたらいているものと考えられる。

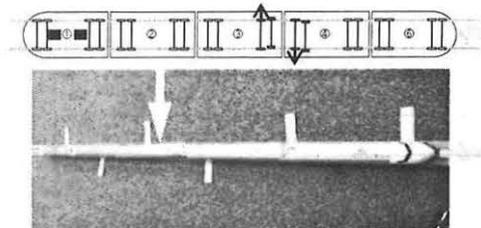
図4(b)は図4(a)の条件で、後方からブレーキ力を作用させたときの走行後の編成状態である。ブレーキ力を与えていない図4(a)と比較すると、逸脱が顕著であった3両目前位が軌道中心に引き戻されていることが確認できる。

新潟県中越地震で脱線した上越新幹線では、脱線した22軸のうち、進行右側への脱線が11軸、左側が10軸とほぼ半数ずつである。また、レールが破損して脱線したと考えられる後方3両を除く前方7両の隣接する脱線台車についても、2両目前位台車と3両目後位台車を除くと、レール

に対する脱線方向は反対になっている。このような状態で脱線が発生したことは、編成全体としての車両逸脱を小規模にとどめた要因の1つではないかと考えられる。



(a)レールに対し反対方向に脱線させた場合(表1(7))



(b)最後部車にブレーキを作用

脱線車両の条件:2両目第3軸および3両目第1軸を脱線

図4 走行後の編成車両の状態

一方、2両目の第4軸および3両目の第1軸を脱線させた場合(表1(8),(9))、2両目の第4軸は偶数軸であるため、同台車にある奇数軸(2両目第3軸)は脱線せず、2両目の車両逸脱は小さかったのに対し、3両目の脱線車輪が奇数軸であるため、第2軸も脱線に至り、3両目の逸脱は顕著であった。この条件においても、ブレーキ力を作用させると、逸脱の顕著であった3両目は、既述の通り、軌道中心に引き戻された。

3. 数値シミュレーションによる検証

3.1 シミュレーションに用いた編成列車モデル

以上の模型実験を踏まえて、汎用ソフトウェアであるSIMPACKを用いたMBDシミュレーションを行った。計算に用いた編成列車のモデルを図5に示す。編成両数は、模型実験と同じ5両とした。計算には、実車相当の車両の数値を用いている。

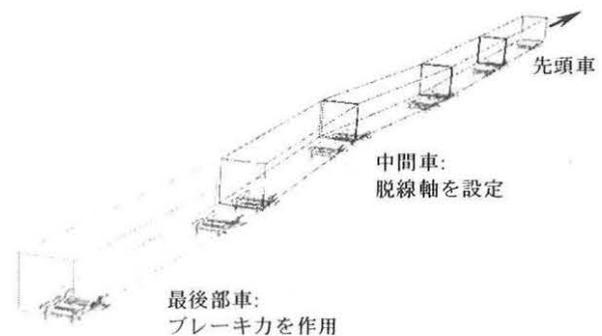


図5 シミュレーション・モデル(5編成)

輪軸・台車・車体間には、それぞれ1次ばね、2次ばねを配置、台車・車体間には、ヨーダンバ・左右動ダンバを考慮している。車体間には、レール長手方向および鉛直軸の回転方向に自由度を持つばね要素で簡略的に模擬された連結器で連結されている。

脱線車輪には輪軸のヨー角に比例して大きくなる抵抗力が負荷される。脱線車輪とレールとの接触も弾性復元力が作用するとした。

初期条件として、200km/h 定速走行中の5両編成列車の3両目後位台車および4両目前位台車をレールに対して反対方向あるいは同方向へ脱線させる条件を与えた。また、同方向に脱線させた場合は、後方からブレーキ力を作用させない条件と作用させる条件でシミュレーションを行った。ブレーキ力を作用させる場合は、初期状態から1秒後に最後部車の全8車輪にブレーキを作用させた。以上の条件を表2にまとめて示した。

表2 初期条件: 脱線方向とブレーキの有無

条件	レールに対する 2台車の脱線方向	ブレーキ力
①	反対方向	なし
②	同方向	なし
③	同方向	あり

3.2 シミュレーション結果

図6に、3両目後位および4両目前位台車を同方向に脱線させ、ブレーキ力を作用していない場合と作用している場合の同時刻での計算結果を示す。ブレーキ力が作用していない場合、3両目後位および4両目前位台車は、軌間に脱線した車輪が載線していたレールとは異なるレールに接触するまで横変位を生じ、3、4両目の連結部に顕著な車両逸脱を発生していることがわかる(図6(a))。それに対して、ブレーキ力を作用させた場合には、3、4両目間の連結器に引張自連力がはたらき、台車・車体とも軌道中心に引き戻されたために、車両逸脱が小さいことがわかる(図6(b))。

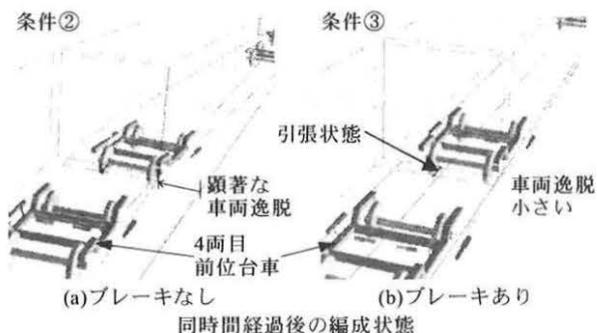


図6 シミュレーション結果

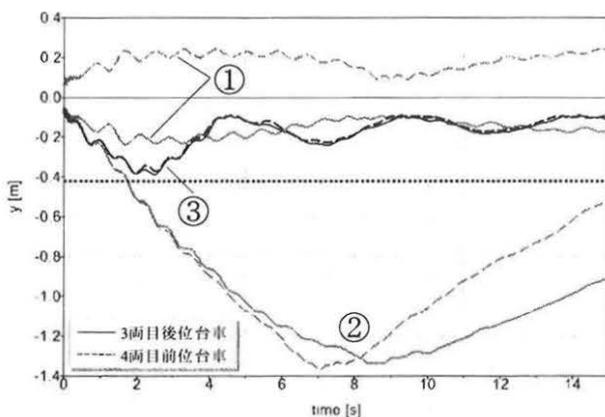


図7 脱線軸を有する台車の横方向変位

表2の条件で計算した、3両目後位および4両目前位台車の横方向変位の時間経過を図7に示す。横軸が時間、縦軸が横方向変位を表す。同方向に脱線させ、ブレーキ力を作用させない場合、スラブ軌道端を超える車両逸脱が発生する結果となったが、最後部車にブレーキ力を作用させた場合は、引張自連力が発生し、脱線させた両台車が軌道中心に引き戻されることを確認できた。

4. 結論

大規模地震による高速鉄道への被害軽減をめざした研究の一環として、脱線軸が編成列車の挙動に及ぼす影響について、縮尺模型実験と数値シミュレーションにより研究を行った。その結果、

- (1) 隣接する2両のそれぞれ1台車が、レールに対して反対方向に脱線した場合は、顕著な車両逸脱には至らなかった。
- (2) 隣接する2両のそれぞれ1台車が、レールに対して同方向に脱線した場合は、顕著な車両逸脱に至った。
- (3) (2)の場合でも、最後部車にブレーキ力を作用させ、このブレーキ力とその他の車両の慣性力により、連結器に引張自連力を発生させることにより、横方向に大きく変位を生じた台車を軌道中心方向に引き戻し、顕著な車両逸脱を防止できた。

以上より、地震によるさまざまな脱線・列車座屈現象が起こった場合でも、後方の車両からブレーキを作用させることの有効性を確認することができた。これらの研究をもとに緊急時のブレーキシステム開発につなげる予定である。

参考文献

- 1) 航空・鉄道事故調査委員会: 鉄道事故調査報告書・I 東日本旅客鉄道株式会社 上越新幹線浦佐駅～長岡駅間 列車脱線事故, 2007.
- 2) 佐々木浩一, 鈴木史比古: 高速鉄道車両の脱線挙動解析, 第17回交通・物流部門大会(TRANSLOG '08) No. 08-68, pp.75-76, 2008
- 3) 鈴木史比古, 佐々木浩一: 地震による新幹線脱線後の編成挙動の模型実験, 第15回鉄道技術・政策連合シンポジウム(J-RAIL '08), pp.337-340, 2008
- 4) Fumihiko Suzuki, Koichi Sasaki: EXPERIENCES ON DERAILMENT OF A HIGH SPEED TRAIN USING A SCALED TRAIN MODEL, STECH '09 Proceedings, CD-ROM ID 353750, 2009
- 5) 佐々木浩一, 鈴木史比古: 模型車両を用いた新幹線車両の高速脱線・列車座屈解析, 鉄道力学論文集 第13号, pp.91-96, 2009
- 6) 佐々木浩一, 鈴木史比古: 模型列車による新幹線車両の高速脱線・列車座屈解析, J R 東日本テクニカル・レビュー No.29 特集論文, pp.17-20, 2009