

模型列車による新幹線車両の 高速脱線・列車座屈解析



佐々木浩一*



鈴木史比古*

新潟県中越地震では、はじめて新幹線車両が脱線したが車両が大きく軌道から逸脱することがなかったため、2次的な被害を防止することができた。本論文では、地震による高速列車の脱線による被害を低減させるため、脱線後に生じる可能性がある列車座屈現象の解析を行った結果などを述べる。上越新幹線の脱線では先頭軸にあった台車部品がガイドとなり車両の逸脱を防いだとされている。しかし、そのほかにも連結器が脱落せずに引張状態のままで停車したことなどがあったため、連結状態の列車編成挙動への影響について模型実験および数値シミュレーション解析を行った。その結果、連結器に引張力が作用している場合は、列車座屈を防止する効果があることがわかった。

以下では、このような作用をもたらす新たな緊急ブレーキシステムなどの新幹線の高速脱線・列車座屈防止対策の研究開発について述べる。

●キーワード：新幹線車両、地震対策、高速脱線、列車座屈、緊急ブレーキシステム

1. はじめに

最高速度300km/hの高速鉄道が、フランス、ドイツなど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、今後もさらに路線が拡大していくものと考えられる。高速鉄道を取りまく沿線の自然環境条件として、欧州諸国とその他の場合の相違点は、大規模な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った上越新幹線の経験を生かし、大規模地震による被害軽減に向けた研究・開発を継続することは極めて重要なことと考えられる。

本論文では、高速走行時の列車に脱線が生じたときに、その後の被害を拡大させることなく、より安全に停車させるための要因やその対策などについて研究開発を行ったことを述べる。

2. 地震による高速列車の脱線挙動

高速鉄道の脱線事故としては、1992年12月、1993年12月、2000年6月の計3回、仏TGVが300km/hで走行中に脱線した例がある。いずれも乗客の被害は軽微で、連接方式列車の安全性が高いとする見解も表明された。一方、1998年6月に独ICEは、弾性車輪の破損により200km/hで走行中に脱線し、分岐器で異線進入による列車座屈を起こして、橋脚に激突した。これらの例だけを見ても脱線した後、停車するまでに編成列車がどのような挙動を示すかが、被害拡大の要因となることがわかる。

地震発生により高速鉄道が脱線した例は、新潟県中越地震による上越新幹線の脱線がはじめてで、200系車両の被災状況などについては、事故調査報告書¹⁾に詳細なまとめが行われている。10両編成の列車のうち8両で脱線を生じたが、列車としては軌道から大きく逸脱することなく、約1600m走行した後、奇

跡的に停止しお客さまと乗務員に怪我などはなかった。これらの経験から、今後の大規模地震による高速鉄道の脱線による被害の軽減をはかる対策としては脱線を防ぐ対策とともに、列車座屈にともなう車両の逸脱防止が重要であることがわかる。

3. これまでの地震対策

当社では、これまでもさまざまな地震対策を行っている。新幹線早期地震検知システムがその一例である。地震の主要な震動であるS波が到来する前に到来するP波を検知し、架線を停電させることにより、緊急ブレーキを動作させ、列車を停止させるシステムとしている。また、阪神・淡路大震災などを教訓として高架橋の耐震補強工事も積極的に推進してきた。

新潟県中越地震の直後からは、新潟中越地震の経験で先頭車の台車部品（歯車箱）と車輪がレールを挟み込み、大きな車両の逸脱を防いだなどとされたことにより、車上対策としてすべての新幹線の輪軸に「L型ガイド」を装備した。また、レールの破断の原因となったとされる接着絶縁継目を破損しにくい構造にあらためるなどの対策を推進している。

以上のような地震対策のほかにも、自然環境条件としてさらに大きな地震に遭遇する可能性があることも考え、引き続き、列車脱線を可能な限り防ぐような対策の検討を行うとともに、仮に脱線を防止できなかった場合でも、車両が軌道から大きく逸脱して被害が拡大するようなことを防止する対策を推進することが必要と考えられる。

4. 地震による脱線のプロセス

新潟県中越地震による上越新幹線200系車両の被災状況について、事故調査報告書¹⁾に記載されている停止時の状況のみ

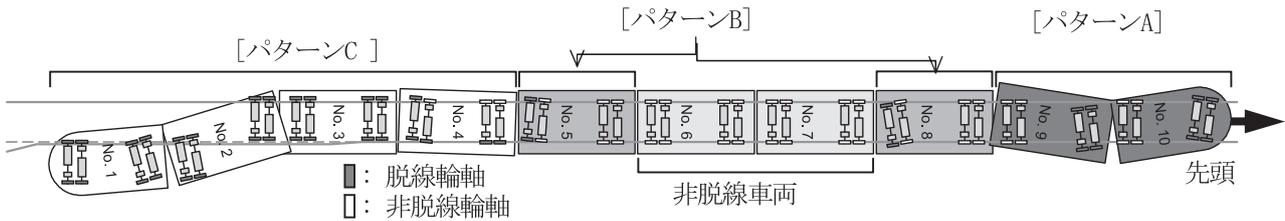


図1 地震による上越新幹線の脱線状況

と、脱線した状態にはいくつかのパターンがあることがわかる(図1)。

この下り列車は10両編成で、先頭車が10号車、最後部が1号車である。先頭車(No10)と2両目の車両(No9)は前側の台車が脱線し、脱線した方向は2両で逆となっている[パターンA]。また、3両目の車両(No8)と6両目の車両(No5)は進行方向で車両最後部の輪軸のみが脱線して、これも脱線した方向が逆となっている[パターンB]。4両目の車両(No7)と5両目の車両(No6)は脱線しなかった。7両目の車両(No4)から最後部の車両(No1)までは、全軸が脱線していた[パターンC]。

パターンCの脱線は、パターンAやパターンBなどの脱線にともない、車輪がレールの締結装置を破損しながら走行し、さらに伸縮絶縁継ぎ目を破損したことにより、車両から受ける著大な横圧によりレールが軌間を保持できなくなったために生じたものと推定される。

パターンAの場合は、同一のパターンで脱線した車両(No10、No9)で、脱線の方向が左右逆となっているのが特徴である。地震波に1Hzの震動があった場合には、走行速度は約200km/h(秒速56m)で、1両目と2両目が約0.5秒差であることから、同一地点で脱線したと考えても矛盾はない。

パターンBは後軸(第4軸)の脱線で、これまでの脱線例としてはめずらしく、また3両目と6両目で脱線の方向が左右逆となっていることに特徴がある。

以上のように脱線のパターンについて、列車編成の部位によりいくつかのパターンに分類されることなどの理由を明確にすることは、今後このような地震による脱線を防止する観点から重要と考えられる。

さらに、レールのなくなったところを走行した後部の車両が、編成全体としての非常ブレーキ作用のほかに、より大きな制動力を生じて、全体としては連結器に引張力が作用している状態で停車したということも想定される。

そのような状況は、列車座屈を防止する効果があったのかどうかについても検証が必要である。

5. 地震による脱線・列車座屈防止対策とその検証

地震による脱線や列車座屈などの列車の挙動について、実物の車両を用いた実験を行うことは困難であることから、縮尺模型による実験や数値シミュレーションを行って、これらの課題の検証を行った²⁻⁵⁾。

5.1 車輪踏面形状の改善

まず、脱線防止の基本的な考え方として、車輪フランジ角の変

更を中心とした車輪踏面形状変更の検討を行った⁶⁾。図2は、提案する車輪踏面形状の改善案である。特徴は、

- ① フランジ高さを現行30mmから32mmまで増大させるとともに、フランジ角を75°としている。
 - ② フランジ先端部の円弧の曲率半径を減少させて、フランジ角度の最大値が有効に作用する高さ(フランジ有効高さ)を22mmから26mmに増大させている。
 - ③ 等価踏面勾配を1/16から1/32にして、高速走行安定性の増大をはかるとともに、摩耗防止をはかれる円弧形状としている。
- などである。

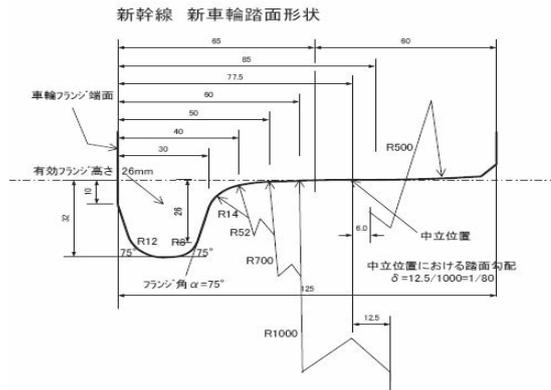


図2 新たな車輪踏面形状の提案

また、図3は、車輪の左右変位にともなうレールとの接触位置の変化を示したものである。文献⁷⁾の縮尺模型実験などによる検討結果により、この車輪形状について考察すると、脱線係数の限界値はフランジの角度変更と有効高さの増大により、約38%増加することがわかる。

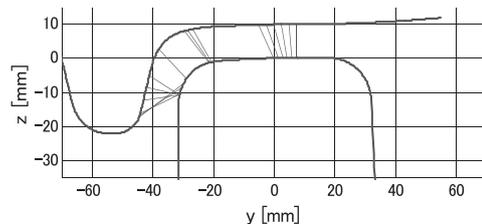


図3 輪軸の左右変位にともなう接触位置の変化

5.2 列車座屈へのブレーキ作用の影響

縮尺1/87のHOゲージ200系新幹線の模型列車(図4)を、レールのある斜路で自重による加速を与えて、レールのない平板に突き放す状況とする模型実験を行った。

先頭1両の下面にゴム板片を貼り付け、模型車両がレール上

にあるときは作用せず、平板上では作用するように、ブレーキ力を模擬させた。このブレーキ装置付きの車両を編成の先頭に連結するか、最後部に連結するか、などの条件を変化させて、平板上での列車の挙動を観察した。

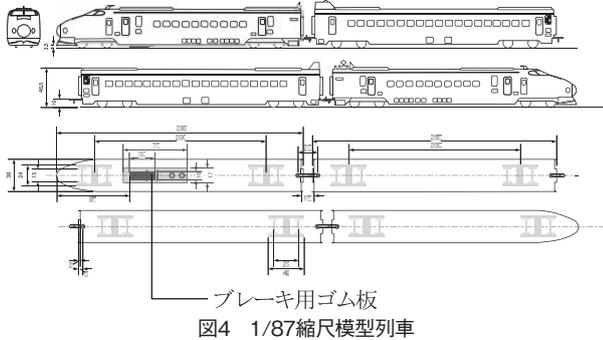
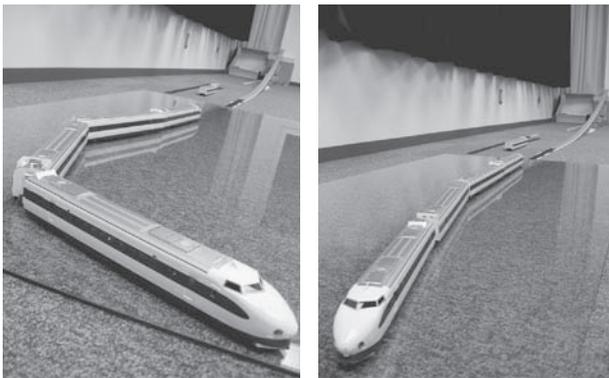


図4 1/87縮尺模型列車

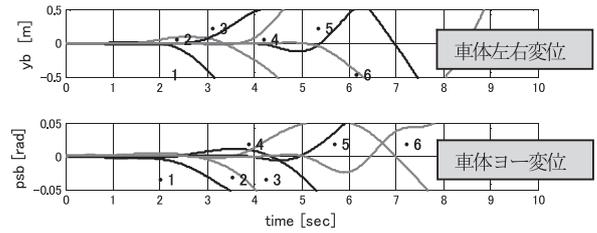
先頭車にブレーキ力を作用させた場合（図5 (a)）は、2両目以降の慣性力で、アコーディオンのように列車座屈する現象が再現できた。一方、最後部車にブレーキ力を作用させた場合（図5 (b)）は、列車座屈が回避された。



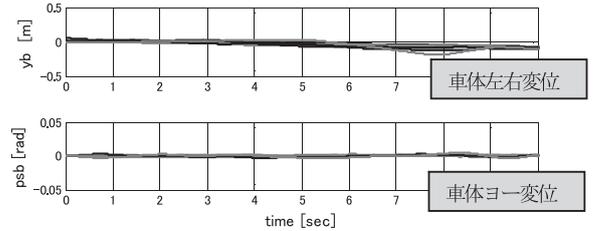
(a) 先頭車ブレーキ (b) 最後部車ブレーキ
図5 模型列車の挙動

さらに、これらの模型実験をふまえて、連結器の作用を加味した数値シミュレーションを行った。6両編成の車体左右変位 y_b 、ヨー角変位 ψ_b および前・後台車のヨー角変位 ψ_{t1} 、 ψ_{t2} (1両あたり4自由度) を考慮した運動方程式について、連結器を相対左右変位に対するばね作用として、前後の連結器力により車体ヨーイング角に回転トルクが作用するものとして、数値計算を行った。図6 (a) は、2両目に初期左右変位を与えた場合で、前後の車両で逆位相となる列車座屈の状況となった。図6 (b) は、最後部車からブレーキ力を作用させた場合の計算例で、各車両の変位は零に漸近して、車両の逸脱が生じない結果となった。さらに、図6 (c) は先頭車に初期左右変位を与えた場合の計算例で、左右変位が同一の方向に発散して、車両の逸脱が生じる結果となった。

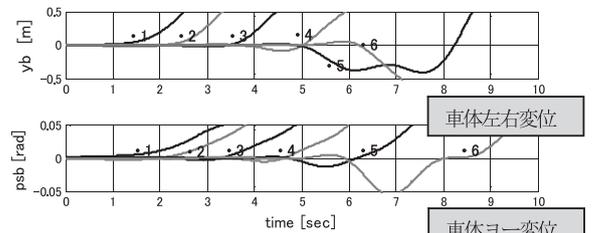
以上により、後側の車両にブレーキを作用させることにより、連結器の引張力の作用として、隣接する車両からの復元力が作用して、列車座屈の発生を抑制する効果があることがわかる。



(a) 2両目に初期左右変位



(b) 最後部車にブレーキ作用



(c) 先頭車に初期左右変位

図6 数値シミュレーションの計算例

5.3 列車脱線後の挙動

前章の縮尺模型により、斜路においてははじめから車軸を脱輪させた状態で列車を走行させる実験も行った。

図7は、先頭車の先頭軸を脱輪させた状態で走行させた場合で、この場合はすべての車両が引きずられて斜路から転落する状況となった。

同様に中間車であらかじめ1軸のみを脱輪させた状態で走行させた場合、列車が走行開始後にどのような挙動を示すかについての実験を行った。図8 (a) は中間車の先頭軸（第1軸）を脱輪させた場合の例で、また図8 (b) は中間車の最後部軸（第4軸）を脱輪させた場合の例を示す。これらの場合は、脱輪させた輪軸がそのままの状態、列車は走行し続けた。

初期の状態としてどの位置の輪軸を脱輪させ、その後、列車のどの軸が脱線して、どのような列車挙動を示したかについて、表1にまとめる。台車の前側の輪軸を脱輪させた状態で走行開始する場合は、最後部車両の後位台車を除き、同じ台車の後側の輪軸も脱線した。台車の後側の輪軸を脱輪させた状態で走行開始する場合は、その他の輪軸が引きつられて脱線するようなことはなかった。

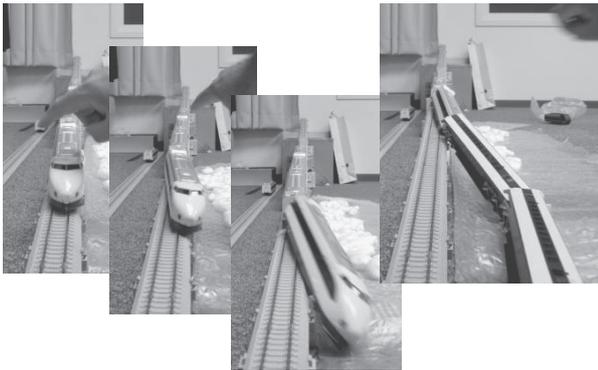


図7 先頭車の先頭軸を脱輪させた場合



(a) 中間車 第1軸脱輪 (b) 中間車 第4軸脱輪

図8 中間車の輪軸を脱輪させた場合

表1 脱輪設定軸と脱線した輪軸

脱輪設定		走行開始後に脱線した輪軸															
車両部位	輪軸部位	先頭車両				No2 車両 全軸	No3 中間車両				No4 車両 全軸	最後部 車両					
		1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4		
先頭	#1	◎	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	#2		◎														
	#3			◎	●												
	#4				◎												
中間 (No3)	#1						◎	●									
	#2							◎									
	#3							◎	●								
	#4								◎								
最後部	#1													◎	●		
	#2														◎		
	#3															◎	
	#4																◎

◎脱輪設定輪軸
●脱線した輪軸

これらの実験結果は、台車の後側輪軸を脱輪させた場合には輪軸に負のアタック角の作用により常に軌道中心に戻るような復元力が作用すること、逆に台車の前側輪軸を脱輪させた場合には輪軸に正のアタック角の作用による逆復元力が作用すること、中間車の場合は連結器により隣接する車両からの復元力が作用すること、などの影響であることが考えられる。唯一、先頭車の先頭軸の場合が大きな車両逸脱につながる結果となった。すなわち、先頭車両の先頭軸について脱線をどう防ぐかが、その後の列車座屈・車両逸脱を防止する観点からとくに重要であることがわかる。

6. まとめ

大規模な地震による高速鉄道への被害を軽減する対策を研究する一環として、編成列車に作用する連結器力の影響などについて、縮尺模型実験と数値シミュレーションなどによる研究を行った。その結果、

- (1) 縮尺1/87 HOゲージ模型車両により、列車座屈に与える連結器の影響などを実験的に模擬することができた。
- (2) 後部の車両からブレーキ力を作用させた場合は、引張の連結器力による列車座屈の抑制作用があることを縮尺模型実験と数値シミュレーションにより示した。
- (3) 列車のどの位置で輪軸が脱線するかによって、その後、列車がどのような挙動を示すかについて模型実験を行った。先頭車の先頭軸が脱線した場合は、連結器を介して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、その他の場合は連結器の引張力の作用により、車両は大きな逸脱を起こさないことを示した。これらにより先頭車の先頭軸の脱線防止がとくに重要である。
- (4) 連結器に引張力を作用させる緊急ブレーキシステムや車輪形状の改善などがさらなる高速列車の脱線防止対策として有効であると考え、あらたに提案を行った。

今後、より定量的かつ具体的な縮尺模型実験や数値シミュレーションを実施することにより、編成列車の挙動について研究を進め、高速脱線・列車座屈防止対策としての緊急時のブレーキシステムなどの開発を実施していく計画である。

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 上越新幹線浦佐駅～長岡駅間 列車脱線事故, Report RA07-8-1 (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, P75-76, (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-RAIL08) p337-340 (2008)
- 4) Fumihiko SUZUKI, Koichi SASAKI: EXPERIMENTS ON DERAILMENT OF A HIGH SPEED TRAIN USING A SCALED TRAIN MODEL (STECH09)
- 5) 佐々木浩一, 鈴木史比古：模型列車を用いた新幹線車両の高速脱線・列車座屈解析, 土木学会第13回鉄道力学シンポジウム講演論文集 (2009.7)
- 6) 特開2007-145224号 鉄道車両用車輪およびその設計方法
- 7) 松平精, 横瀬景司：車輪の横衝撃による脱線について、東海道新幹線の研究 (第3冊) p235-244