

脱線後の編成車両の挙動解析シミュレーション

鉄道力学研究部 車両力学研究室

研究員 葛田 理仁

1. はじめに

2004年に新潟県中越地震により高速走行中の新幹線車両が脱線した事故以降、自然災害を原因として鉄道車両が脱線・転覆することによって生じる被害を低減するための技術開発が盛んに行われている。バラスト軌道の場合、走行中に車両が脱線した場合には車両はまくらぎ上を走行することになり、その際の車両あるいは列車の挙動を実験的、理論的な面から明らかにすることは重要であるといえる。一方で、実車によって車両が脱線した状況を再現する試験を行うことは困難である。そこで、まず本研究では1/10スケールの新幹線模型車両を用いて車両が脱線後にまくらぎ上を走行することを想定した模型走行試験を行った上で模型車両に対する車両断面の2次元数値解析モデルを構築して模型走行試験のシミュレーションを実行し、数値解析モデルの妥当性について検証した。次に、脱線後の車両挙動は脱線した輪軸がまくらぎやバラストから受ける作用力によって大きく影響されると考えられることから、実台車の脱線試験結果等によってそのパラメータを推定した。そして、これらを考慮して脱線後に減速する列車の挙動を数値シミュレーションにより解析することを目的に車両断面モデルを拡張した3次元編成車両運動シミュレーションを開発し、編成内の車両が脱線した後の挙動解析を行った。

2. 1/10スケール模型車両走行試験

2.1 模型車両

走行試験に用いた模型車両を図1に示す。標準的な新幹線車両を参考に縮尺比を1/10とし、加速度が実車と同一となる相似則を採用して、寸法および車体重量、ばね・ダンパ系の諸元を相似則になるべく近づくように設定した。

2.2 走行抵抗の評価と車両断面モデルによる

数値シミュレーション

模型車両走行路の試験区間(22m)に1/10スケールの鉄まくらぎを並べ、その上を模型車両が走行する試験を実施した。まくらぎ間での車輪の落ち込みが抵抗に及ぼす影響を調べるため、①(進行方向に)幅の狭いまくらぎ ②幅の広いまくらぎの2種類を用意した。模型車両が試験区間を通過中に減速する現象を車両に一定の摩擦力が働いて車両の運動エネルギーが失われるものと仮定することで等価的な走行抵抗係数(以下、等価走行抵抗係数と記す)を導出した。模型試験を近似するための数値シミュレーシ



図1 1/10 模型車両

ヨンの検討として、図 2に示した半車両の断面モデル、またそれを拡張した 1 車両断面モデルを用いて車輪とまくらぎとの衝突モデル（図 3）を組み込んだ上で数値シミュレーションを行い、模型試験と同様の手順で等価的な走行抵抗係数を導出した。図 4に、幅の狭いまくらぎ、幅の広いまくらぎ各々の等価走行抵抗係数を試験結果と 1 車両断面モデルを用いて行った計算結果を重ね合わせて示す。図 4のように、バラスト軌道上で脱線した場合の車両の走行抵抗はルール上を走行する場合とは異なる変化傾向にあることが分かった。また数値計算による等価走行抵抗係数はいずれのまくらぎの場合も概ね試験結果とよく一致した。

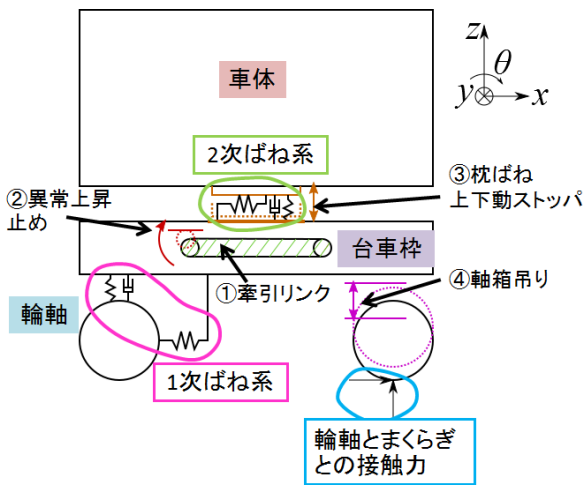


図 2 車両断面モデル（半車両）

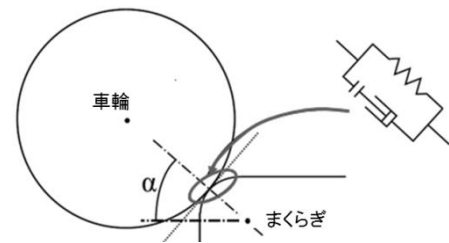
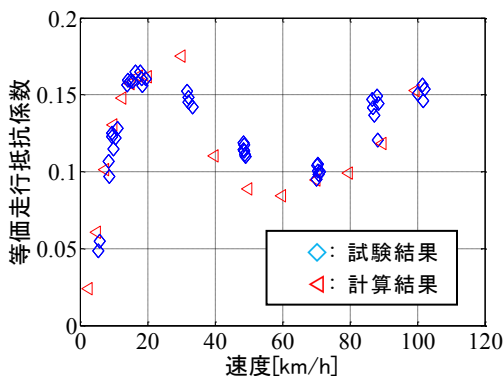
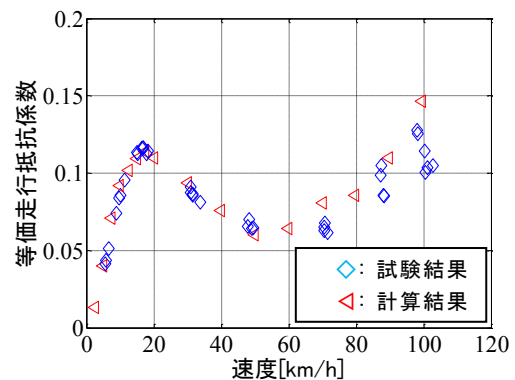


図 3 輪軸とまくらぎの接触力モデル



(a) 幅が狭いまくらぎ



(b) 幅が広いまくらぎ

図 4 1 車両断面モデルにより求めた模型車両の等価走行抵抗係数

3. 5 両編成の脱線後シミュレーション

1 列車の中で脱線車両よりも後部の車両にブレーキ力を与えることによって脱線した車両が偏倚することを防ぐ効果¹⁾²⁾を検証するために、2.2 節で示した車両の断面モデルを拡張した 3 次元車両運動シミュレーションを開発し、新幹線車両相当の諸元による 5 両編成車両の脱線後の挙動解析を行った。

3.1 車両のモデル化

1 車両は、輪軸 4 個、台車枠 2 個、車体 1 個、連結器 2 個の合計 9 つの剛体から構成され、それぞれがオ일러パラメータを含む 7 自由度を持っているため 1 車両で 63 自由度となる。その他、シミュレーションにおける主な条件について表 1 に示した。ブレーキ力を付加する設定につ

いては、例えば地震時に緊急ブレーキがかかるような際には脱線が生じる前にブレーキがかかるものと考えられるが、本研究では次節のシミュレーションのように脱線が生じた後に編成の後部車両に集中的にブレーキをかけた場合の効果をみるために、表 1のようにブレーキ力が加わり始める時刻を脱線設定軸が脱線した後になるように設定した。

表 1 シミュレーションの主な条件

軌道線形	軌道不整のない直線
軌間、タイプレート傾斜	1435mm(スラックなし)、 1/40
車両	新幹線電車、定員乗車状態
車輪踏面形状	新幹線円弧踏面
レール頭頂面形状	60kg レール
脱線設定軸	任意の輪軸を設定可能
脱線設定軸を脱線させる力	走行開始後 $t=0.5s$ 以降、脱線軸の左右変位が 40mm となるまで脱線設定軸重心位置に脱線方向の左右力を付加
ブレーキ力(設定する場合)	走行開始後 $t=1.5s$ 以降、設定した減速度に相当するブレーキトルクを輪軸に付加
接触計算	各輪軸について、左右変位が $\pm 70mm$ の範囲は予め計算した 1 輪軸の接触特性ファイルによる接触計算、左右変位が $\pm 70mm$ を超えた場合は車輪とまくらぎ・バラスト及び車輪リム面とレール側面の接触を考慮したオンラインでの計算

3.2 5 両編成車両の脱線後の挙動解析シミュレーション

5 両編成の編成車両の場合について、3 両目第 1 軸に横力を与えて脱線させるシミュレーションを、ブレーキ力の設定パターンを表 2のように、車両の初速度および減速度を表 3のように設定して行った。車輪のまくらぎとの衝突やバラスト上走行に関するパラメータについては実台車の脱線試験結果等に基づいて推定した値とした。表 2のパターン②のシミュレーションについては、脱線車両よりも後部の車両にブレーキ力を与えることによって脱線した車両が偏倚することを防ぐ効果を検証するために数値検討し、パターン①に概ね 2km/h/s の減速度を増したパターンとした。図 5にそれぞれ初速度 70、160、275km/h の場合における脱線した 3 両目 1 位台車の左右変位を示す。パターン②の場合、図 5(a)より初速度 70km/h の場合は脱線した 3 両目 1 位台車の車輪がほぼまくらぎ上に乗っている程度（輪軸左右変位で 0.5m 程度）まで軌間中心側に引き戻しているのに対し、図 5(b)(c)では $t=5$ 秒付近ま

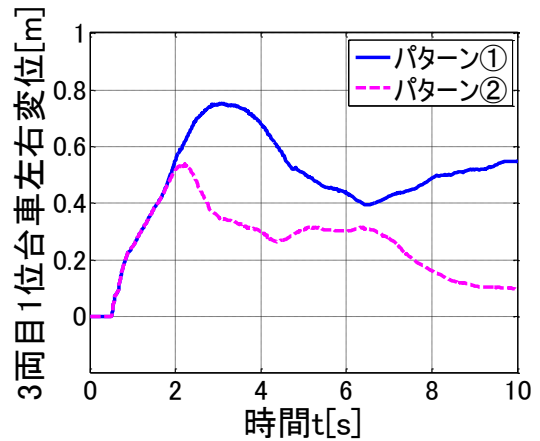
表 2 ブレーキ力の設定

パターン	ブレーキトルクの設定方法
①	全軸に均等に表 3①の減速度相当のブレーキトルク
②	4 両目、5 両目の各軸に表 3②の減速度相当のブレーキトルク
③	②に加え、4 両目、5 両目各台車に 10kN の減速力を付加

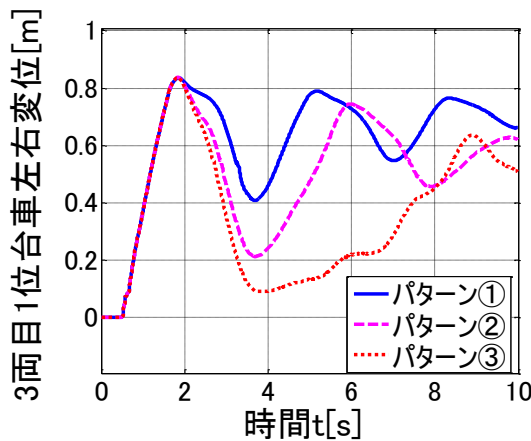
表 3 車両速度と減速度

車両の初速度 [km/h]	パターン①の減速度 [km/h/s]	パターン②の減速度 [km/h/s]
70	3.1	5
160	2.5	4.5
275	1.9	3.9

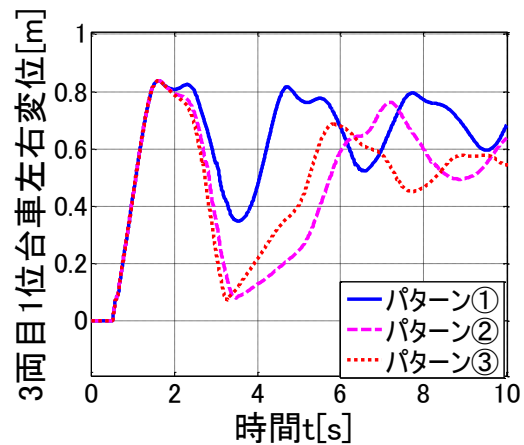
ではパターン①より左右変位を抑えられるが $t=6\sim7$ 秒付近ではパターン①よりも左右変位が大きくなる場合もあった。車輪・レールの粘着力に依らないブレーキを想定し、パターン③として②のブレーキ条件に加えて4両目・5両目に1台車あたり10kNの減速力を与えた場合のシミュレーション結果を図5(b)と(c)に加えた。最も後部車両のブレーキ力が強いパターン③では、脱線した台車の左右変位を常に元の位置(ゼロ付近)に引き戻して留めておくことまでは出来ないものの、160km/hの場合についてはパターン①に対し脱線後 $t=10$ 秒となるまで常に脱線した台車の左右変位が小さくなった。このように編成内の後方の車両の減速力を大きくすることで高速域でも脱線した車両の偏倚をある程度抑える可能性があることが分かった。



(a) 初速度 70km/h



(b) 初速度 160km/h



(c) 初速度 275km/h

図5 脱線した3両目1位台車の左右変位(シミュレーション結果)

4. まとめ

- (1) まくらぎ軌道上で脱線した車両の走行抵抗はレール上走行時とは異なる変化傾向にあることが分かった。
- (2) 脱線後の編成車両挙動解析が可能な3次元車両運動解析プログラムを開発した。
- (3) 70km/h程度までは後部の車両にブレーキ力を集中的に与えることで、編成内前部で脱線した車両の逸脱を防ぐ可能性があることが分かった。
- (4) 脱線した車両よりも後部の車両にさらに強いブレーキ力を期待できる場合には、より高速域でも脱線した車両の逸脱を抑える可能性があることが分かった。

参考文献

- 1) 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, JR EAST Technical Review, No.29, pp.17-20, 2009.
- 2) 鈴木史比古, 佐々木浩一: 編成挙動に与える脱線軸の影響, 日本機械学会第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.511-514, 2009.