

# 脱線後の編成車両の挙動に着目した シミュレーション

葛田 理仁\* 宮本 岳史\* 植木 健司\*\*

**Numerical Dynamics Simulation of Train Set  
Running on Ballasted Track after Derailment**

Masahito KUZUTA Takefumi MIYAMOTO Kenji UEKI

Upon a train set derails, its dynamic motion should be affected by the change of running resistance when the wheels run over sleepers. Therefore, it is important to determine the change of running resistance experimentally and theoretically. Authors made a model vehicle of 1 to 10 scale, and carried out running tests under which the vehicle ran colliding against model iron sleepers. Authors also conducted running tests under which a real single bogie fell onto ballast or a concrete sleeper. Based on these experiments we have developed a numerical simulation, which is able to calculate the dynamical motion of train set when a derailment occurs, and computed dynamical motion of 5 cars after their derailment.

キーワード：車両運動シミュレーション、模型試験、編成座屈、バラスト軌道、ブレーキ力

## 1. はじめに

2004年に新潟県中越地震により新幹線車両が高速走行中に脱線した事故以降、自然災害により鉄道車両が脱線・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、脱線した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が、実車によってこのような状況を再現する試験の実施は困難である。文献1)2)などでは編成車両に対して初期条件として輪軸が脱線した状態を考慮した模型実験、数値解析の例が報告されているが、脱線後の車両の挙動が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ことまで考慮して脱線後に減速する編成車両の挙動を数値シミュレーションにより解析できるようになることが求められている。

そこで、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走行試験<sup>3)</sup>を行った上で模型車両に対する車両断面の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。さらに、実台車を線路端からバラスト軌道に落下させる試験を行ってフランジ先端がまくらぎと接触

する際の接触痕やバラスト上を台車が進んでいく際の減速度等から数値シミュレーションに用いるためのまくらぎと輪軸の接触モデルやバラスト上走行の数値解析モデルを作成し、それらを組み込んだ3次元車両運動シミュレーションを開発して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

まくらぎ上を走行する車両の挙動および走行抵抗を調査・測定する目的で、走行速度100km/h（実車換算約320km/h）までの模型車両走行試験を実施した。

### 2.1 1/10スケール模型車両

走行試験に用いた模型車両は図1に示すもので、標準的な新幹線車両を参考に車体重量、寸法を相似に近づけた。ばね系については振動加速度が実車と同一となるような相似則を採用した。代表的な諸元を表1に示す。

### 2.2 試験条件

模型車両走行試験装置（図2）の試験区間25mのうち始端部0.5mおよび終端部2.5mを平板とし、その間の22mをまくらぎ走行区間とした。この区間を模型車両がフランジ走行する。試験区間に敷設する軌道の種類として、まくらぎの無い①平板（図3（a））と、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②幅が狭いまくらぎ（図3（b）、線路方向幅19mm）③幅

\* 鉄道力学研究部 車両力学研究室

\*\* 鉄道力学研究部 車両力学研究室  
（現 研究開発推進室 設計・試作）

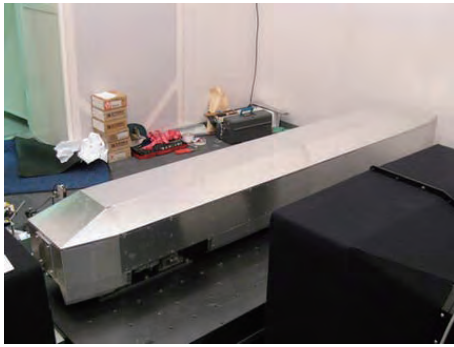


図1 1/10 模型車両

が広いまくらぎ（図3 (c)、線路方向幅 28.5mm）の計 3 通りを用意した。まくらぎの材料は SS400 で、間隔は約 55.5mm である。模型車両を打ち出す速度は、走行装置に取り付けるゴムチューブの本数によって 30km/h ~ 120km/h の間で変更し、速度段 20km/h 以下の条件での試験では、手で車体を押して加速した。

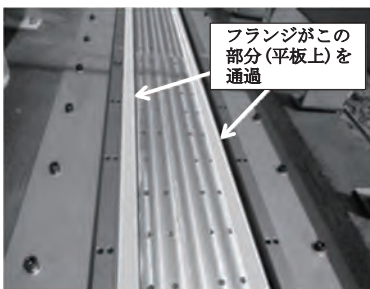
### 2.3 試験結果および考察

#### 2.3.1 走行抵抗の評価方法

走行試験結果より、試験区間の入口通過時と出口通過時の車両走行速度の差から等価的な摩擦係数（以下では等価走行抵抗係数と呼ぶ）を求めた。具体的な等価走行抵抗係数値は次のように導出される。すなわち、 $v_1$ ：試験区間入口通過時の走行速度 [m/s]、 $v_2$ ：試験区間出口通過時の走行速度 [m/s]、 $s$ ：車両の通過距離 [m]、 $g$ ：重力加速度 [m/s<sup>2</sup>] としたとき、等価走行抵抗係数  $\mu$  を

$$\mu = (v_1^2 - v_2^2) / (2gs) \quad (1)$$

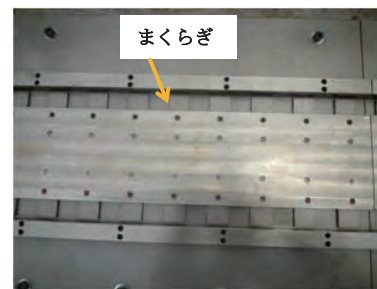
とおく。これは試験区間内を車両が走行する際に減速する現象を、車両に一定の摩擦力が働いて車両の運動エネルギーが失われるものと仮定した場合の式と解釈でき、等価走行抵抗係数  $\mu$  は等価的な摩擦係数に相当する無次元量といえる。車両の通過距離  $s$  は、車両が試験区間を完全に通過した場合には  $s=22.5\text{m}$  とした。入口通過時の速度が大きくない場合は試験区間出口に到る前に車両が停止する場合があります、その場合、 $s$  は第 1 軸の停止した位置と入口速度計設置位置との間の距離とした。



(a) 平板



(b) 幅の狭いまくらぎ



(c) 幅の広いまくらぎ

図3 軌道の種類

表1 模型車両の諸元

縮尺比	1/10
重量	約 50kg
車体長	2.45m
車体幅	0.34m
台車中心間距離	1.75m
軸距	0.25m
車輪径	0.086m
軌間	0.1435m

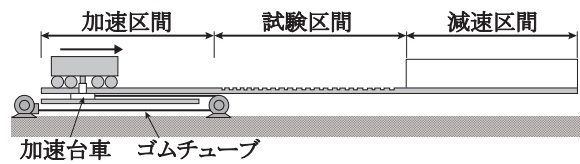


図2 模型車両走行試験装置

#### 2.3.2 等価走行抵抗係数

試験結果から①平板、②幅が広いまくらぎ、③幅が狭いまくらぎの各条件における等価走行抵抗係数を求めた。各条件での試験区間入口通過時の車両速度と等価走行抵抗係数との関係を図4に示す。なお、模型の走行速度を $\sqrt{10}$ 倍すると実車換算速度となる。図4より以下の知見が得られる。

- 平板上を走行した場合は走行速度が大きくなるにつれて等価走行抵抗係数は増加し、また速度 80km/h 程度以上で等価走行抵抗係数の増加の割合が大きくなる。
- 幅が広いまくらぎ、幅が狭いまくらぎ、いずれの場合も等価走行抵抗係数は速度 20km/h 付近までは速度と共に増加し、20km/h を超えて 70km/h 付近までは速度の増加と共に減少して、70km/h を超えると再び速度と共に増加する傾向がある。
- まくらぎ上での走行の場合は平板上を走行した場合に比べてどの速度域でも等価走行抵抗係数が高い。但し速度が大きくなるに従ってその差は小さくなる。

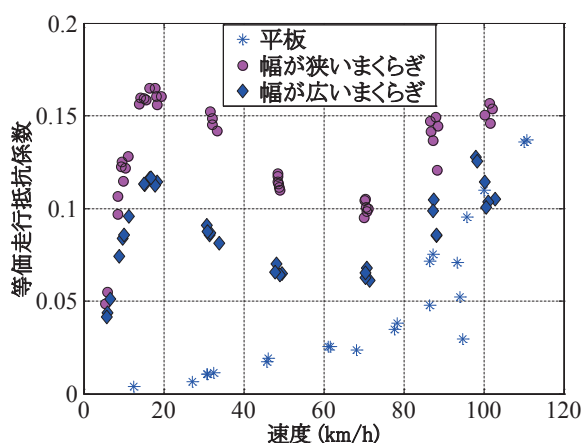


図4 等価走行抵抗係数

## 2.4 模型車両走行試験に対する数値解析モデル

### 2.4.1 輪軸とまくらぎの接触モデル

試験区間を車両が通過する際、輪軸とまくらぎとの幾何学的な接触状態は、図5に示すような4パターンが考えられる。数値シミュレーションの際には各時刻ステップにおいて各輪軸についてこれらの状態を考慮して計算を行った。接触力については、図6に示したような、車輪とレールが接触する角度方向を向いたばね・ダンパ並列モデルを用いた。ただし、モデル内の接触力のうちダンパが生ずる減衰力に関しては、ダンパが押し込まれる方向（実現象としては、まくらぎと接触状態にある輪軸が、まくらぎにより食い込もうとする場合に相当する）に動く場合のみ減衰力が発生するものとし、ダンパが引き伸ばされる方向（実現象としては、まくらぎと接触状態にある輪軸が、まくらぎと離れていこうとする場合に相当する）に動く場合は減衰力を生じないようなモデルとしている。輪軸とまくらぎが接触している場合、接触力が作用する方向については、図6中に記した角度 $\alpha$ を輪軸とまくらぎの接触角と考え、この角度方向に示したばね、ダンパの作用力が生じるものとした。

### 2.4.2 車両のモデル化

半車両を側面から見た車両断面モデルを図7に示すように仮定し、車両に取り付けられたばね・ダンパが生じる力について考察し、車両の自由振動の方程式を導出した。考慮する自由度は、輪軸：前後・上下、台車枠：前後・上下・ピッチ、車体：前後・上下の計9自由度である。実際に数値シミュレーションを実行する際には、各部が釣り合い位置にある状態を変位0とした場合の各部の自由振動の方程式を初めに導出し、各時刻ステップにおいて前項に述べた輪軸とまくらぎとの接触力、さらに車体、台車枠、輪軸間に取り付けた各種リンク・ストップパが生じる力を付け加えた上で数値計算を行った。リンク・ストップパとしては、①車体と台車枠間を結ぶ牽引リンク、②牽引リンクが台車枠とぶつかることで生じる上

下力（異常上昇止め）、③車体と台車枠との間に取り付けられている上下動ストップパ（枕ばね部）、④台車枠と軸箱との間に取り付けられている上下動ストップパ（軸箱吊り）について考慮した。

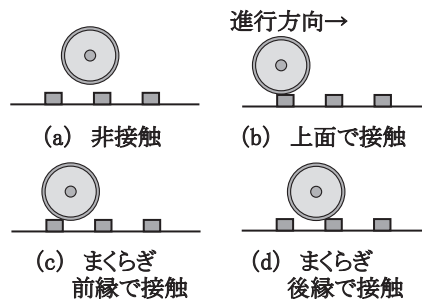


図5 輪軸とまくらぎの幾何学的な接触状態

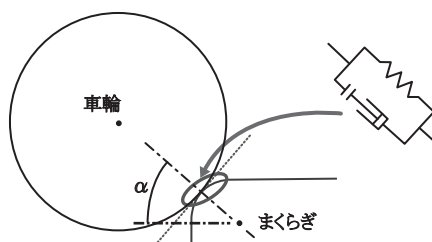


図6 輪軸とまくらぎの接触力モデル

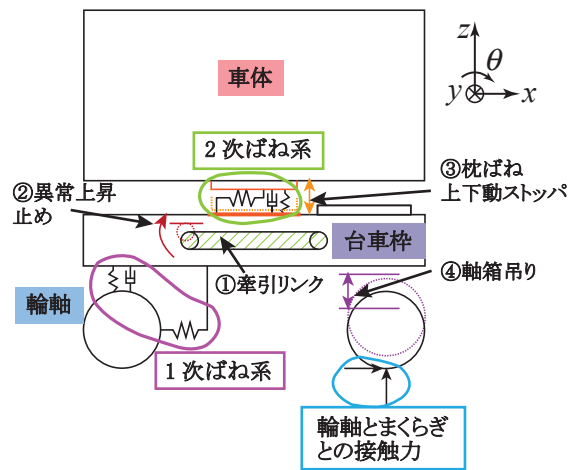


図7 車両断面モデル（半車両）

## 2.5 模型車両走行試験のシミュレーション結果と考察

本研究では2.4.2項に示した半車両断面モデルを1両に拡張した17自由度の1車両断面モデルを用いて模型車両走行試験と同様の走行シミュレーションを行った。シミュレーションの際の走行抵抗は、平板での走行試験結果から求めた走行抵抗力および輪軸とまくらぎの衝突による衝突力を考慮し、それらの合計とした。進行方向の初速が2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100km/hのそれぞれの場合に対し、模型試験において車両が突放される際車体の上下初速度がばらつく可能性を考慮して車体の上下初速度を-0.1, 0, 0.1m/sとした場合の走行シミュレーション

特集：鉄道力学

を行った。図8 (a) に幅が広いまくらぎの、図8 (b) に幅が狭いまくらぎの等価走行抵抗係数計算結果を示す。どちらの場合も試験結果によく合致した計算結果が得られている。また、計算結果より、車両の初速にも依るが車体上下初速度に±0.1m/sのばらつきがある場合に等価走行抵抗係数は0.02程度のばらつきがあることが見て取れる。

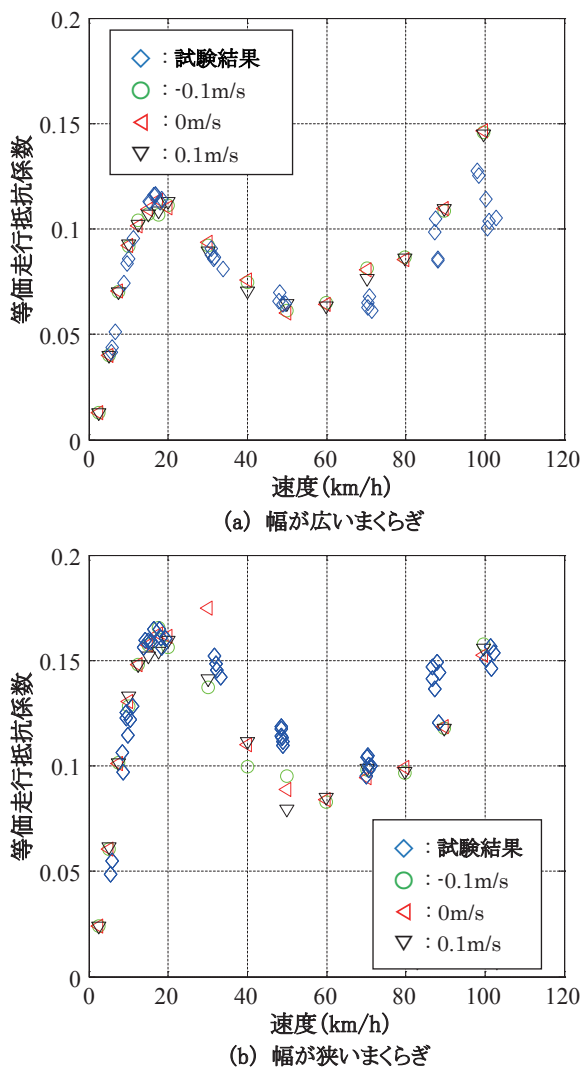


図8 1車両断面モデルにより求めた等価走行抵抗係数

### 3. 脱線後の3次元車両運動シミュレーションの開発

本研究では、文献1) 2)などで可能性が示されている、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脱線後の編成車両の3次元車両運動シミュレーションを開発し、開発したシミュレーションを用いて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

2.4.2項で示した車両断面モデルを3次元モデルに拡張

した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を用いた脱線後の3次元車両運動シミュレーションを行った。1車両は、輪軸4個、台車枠2個、車体、連結器2個の合計9つの剛体から構成され、それぞれが7自由度(回転姿勢をオイラーパラメータで表現しているため)を持っており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を表2に示す。

表2 シミュレーション諸元

軌道線形	軌道不整のない直線
軌間、タイプ レール傾斜	1435mm (スラックなし), 1/40
車両	新幹線車両, 定員乗車状態
車輪踏面形状	新幹線円弧踏面
レール形状	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 <sup>注1)</sup> , 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±70mmの範囲は文献4)に準じた1輪軸の接触ファイルによる接触計算, 左右変位が±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

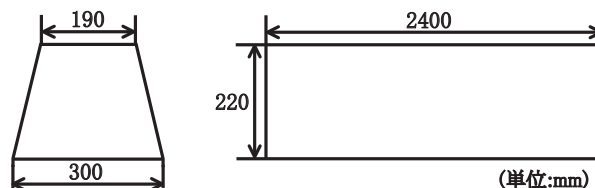


図9 想定したまくらぎ

#### 3.2 車輪とまくらぎ・バラストの接触モデル

新幹線で用いられている4Hk PCまくらぎを想定して、図9のような長手方向には一様な断面のまくらぎを想定し、25mあたり43本が配置されているものとした。なお、3次元でのシミュレーションの場合には輪軸がヨー角・ロール角を持つことで左右車輪の位置は異なってくるため、2.4.1項で示したまくらぎの幾何学的な接触判定は各車輪について行った。車輪がコンクリート上を走

注1) 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と考えられるが、本研究では4章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見るためにブレーキ力が加わり始める時刻をこのように設定した。

行する際の法線力については文献5)における試験結果を参考に接触ばね定数・減衰係数を定め、前後クリープ力 ( $F_x$ )、左右クリープ力 ( $F_y$ ) については、車輪/コンクリート間の摩擦係数測定<sup>6)</sup>(図10)を参考に合クリープ力 ( $F$ ) が法線力 ( $N$ ) の0.18倍で飽和するような折れ線近似特性とした。脱線した車輪がバラスト上を走行していく際にバラストから受ける作用力については、実台車(1台車)を線路端からバラスト軌道に落下させる試験において得られた試験結果をもとに、文献7)～文献9)等に述べられているテラメカニクスにおける手法を参考にして、バラストへの車輪の沈みこみ量、バラスト上を輪軸が走行していく際の減速度が試験結果を近似するような作用力特性として、前後力・左右力・上下力を  $hf$ : 車輪のバラストへの沈みこみ量 [m],  $\beta$ : 車輪の円周方向のスリップ角 [rad] (図11) の関数としてそれぞれ図12 (a)～図12 (c) のように仮定した。

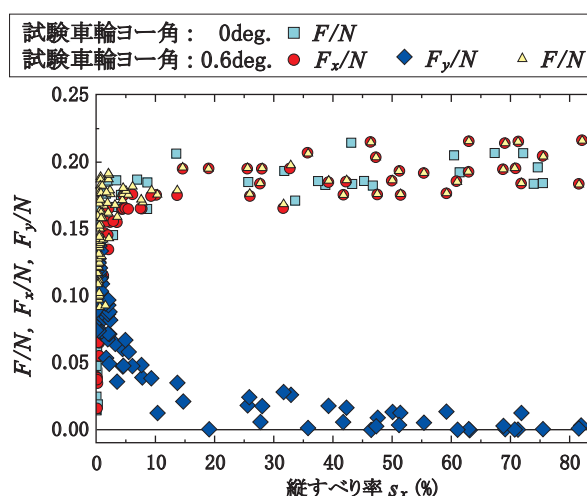


図10 クリープ力特性試験結果



図11 スリップ角

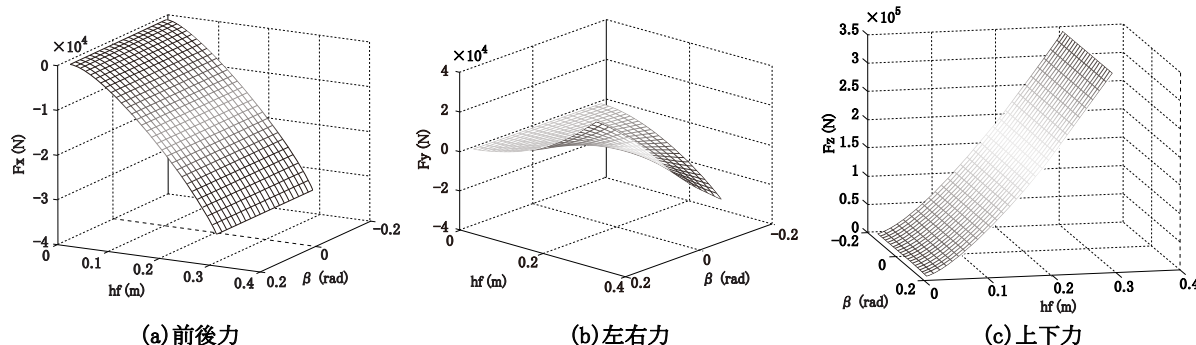


図12 車輪がバラストから受ける作用力

#### 4. 5両編成の脱線後シミュレーション

##### 4.1 車両のモデル化

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、初速度を70, 160, 275km/hとし、減速度およびブレーキ力を表3, 表4のように設定した。以下、表3のパターン①の場合のシミュレーションのことをパターン①等と記す。②のパターンは①のパターンに概ね2km/h/sの減速度を増したパターンとし、編成内でのブレーキ力の違いを大きくする意図でブレーキ力を与える車両以外の車両についてはノーブレーキとした。

図13 (a)～図13 (c) 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13 (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まで軌間中心側に引き戻しているのに対し、図13 (b), 図13 (c) では  $t=1.5$  秒か

表3 ブレーキ力の設定パターン

パターン	ブレーキトルクの設定方法
①全車に均等なブレーキトルクを与えた場合	全軸に表4①の減速度相当のブレーキトルク
②脱線車両よりも後部の車両にブレーキトルクを与えた場合	4両目, 5両目各軸に表4②の減速度相当のブレーキトルク

表4 車両速度と減速度

車両速度 [km/h]	①の場合の減速度 [km/h/s]	②の場合の減速度 [km/h/s]
70	3.1	5
160	2.5	4.5
275	1.9	3.9

らブレーキをかけはじめて  $t=5$  秒付近まではパターン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13(b)と図13(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に比べて脱線後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ており、例えばこのような編成内の後方の車両の減速力を大きくすることによって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見て取れる。

### 5. まとめ

脱線後の編成車両の挙動を把握するために、1/10 模型車両走行試験を実施し、まくらぎと輪軸が衝突することによる走行抵抗およびその数値解析モデルについて検討した。また実台車を線路端からバラスト軌道に落下させる試験において得られた試験結果よりバラスト上を車輪が走行する際の作用力モデルについて検討した。これらの知見を組み込んで脱線後の車両挙動解析が可能な3次元車両運動シミュレーションを開発し、5両編成の脱線後の編成車両運動シミュレーションを行った。

模型車両による走行試験およびシミュレーションにより、車両が脱線してまくらぎ上を走行するときの走行抵抗を求めた。走行抵抗は速度に依存しレ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。

ブレーキ力の与え方による5両編成車両の脱線後の挙動の違いを調べた。概ね70km/h程度までは脱線車両よりも後部の車両にブレーキ力を集中的に与えることで脱線した車両の偏倚を防ぐ可能性が示されたが、それよりも高速域ではその効果はあまり見られなかった。但し車輪・レールの粘着力に依らないブレーキ等(例えば、レールブレーキや空気ブレーキなど)によってさらにブレーキ力を期待できる場合には編成内の後方の車両の減速力を大きくすることによってより高速域でも脱線した車両の偏倚を抑える可能性があることが分かった。

### 謝辞

模型車両の走行試験の実施にあたり、ご協力頂いた佐々木浩一氏、鈴木史比古氏をはじめとする東日本旅客鉄道株式会社安全研究所の諸氏に心より感謝申し上げます。

### 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
- 3) 植木健司, 葛田理仁, 宮本岳史, 前橋栄一, 鈴木史比古, 佐々木浩一: 脱線後にまくらぎ上を高速走行する車両の縮尺模型試験, 日本機械学会第19回交通・物流部門大会講演論文集, pp.97-100, 2010
- 4) 佐藤栄作: 鉄道車両用操舵機構付き独立車輪台車の運動力学に関する研究, 鉄道総研報告, 特別第37号, 2000
- 5) 後藤恵一, 曾我部正道, 浅沼潔: 鉄道車輪とまくらぎ間で発生する接触力に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.781-786, 2011
- 6) 土井久代, 宮本岳史, 西尾壮平, 後安慧, 上田洋: クリープテストを用いた車輪/コンクリート間の摩擦係数測定, 鉄道総研報告, Vol.24, No.4, pp.23-26, 2010
- 7) 室達朗, テラメカニクス, 技報堂出版, 1993
- 8) Genya Ishigami, Akiko Miwa, Keiji Nagatani, Kazuya Yoshida: Terramechanics-Based Model for Steering Maneuver of Planetary Exploration Rovers on Loose Soil, Journal of Field Robotics, 24(3), pp.233-250, 2007.
- 9) 吉田和哉, 永谷圭司, 山名克尚, 石上玄也: 応力分布測定ホイールによる土壌パラメータの推定, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, pp. 2P2-A19 (1) -2P2-A19 (4), 2008

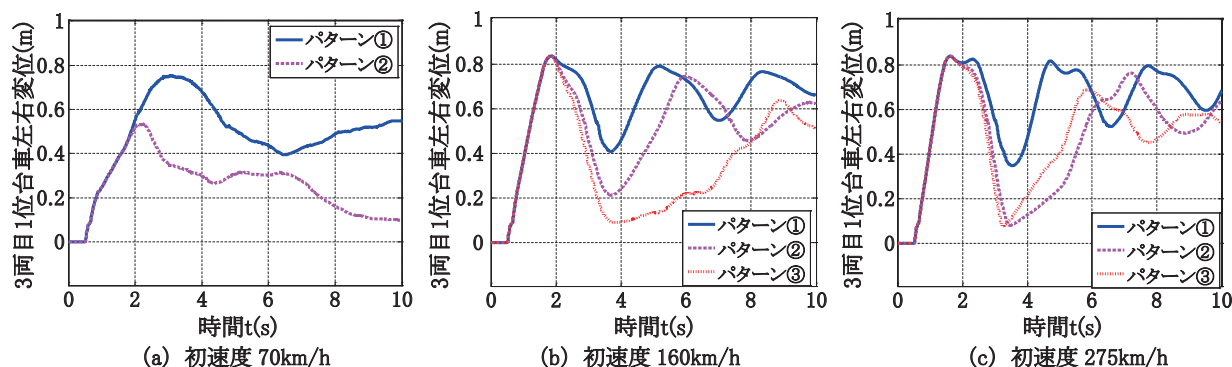


図13 脱線した台車の左右変位