

## 第5章 推定地震波を受ける構造物上の車両挙動解析

### 5.1 車両運動シミュレーションの概要

地震時の車両挙動を解析するために開発した車両運動シミュレーションプログラム（VDS）<sup>1)</sup>を用いて、推定地震動による構造物天端の応答波に対する車両の挙動を解析した。このシミュレーションプログラムは、通常の車両走行シミュレーション機能に加えて、レール下からの振動入力が可能であり、車輪がレール上で跳躍することや、車両が大きくロール変位する動きなどを精度よく解析できるように工夫したものである。このプログラムによる解析の妥当性については、実台車を用いた加振実験による検証が行われている<sup>2)</sup>。

平成28年熊本地震で脱線した九州新幹線5347A列車（回送列車，800系新幹線車両）をモデル化し、平成28年熊本地震前震による脱線地点周辺の推定地震動で揺れる構造物上を走行する車両の挙動についてVDSを用いて解析した。その際には、4章で得られた構造物天端（レールレベル位置）の応答解析結果から算定される各時刻における各車軸位置の絶対変位波形を入力している（以後、入力軌道面振動と記す）。なお、本解析では、構造物間で生じる動的な角折れ、目違いの影響も考慮されている。

### 5.2 車両モデル

800系新幹線車両はボルスタレス式台車を装着した車両であり、図5-1に示すようにモデル化した。車両モデルの概要は以下のとおりである。

- (a) 車体1個，台車枠2個，輪軸4個について各6自由度，各車輪下のレール8点について各2自由度と

し，合計58自由度のモデルとする。

- (b) 対象車両：800系新幹線6両
- ・車両間の相互作用は小さいとみなし，各号車をそれぞれ独立した一車両モデルとしてモデル化する。
  - ・車両基地への回送列車のため積載条件は空車である。
  - ・本列車は1号車が1両目（先頭）で以後2号車から順に連結されており，6号車が6両目（後尾）である。
- (c) 一車両モデルの車体－台車枠間と台車枠－輪軸間の結合要素については，ばねおよび減衰要素として，まくらばねや軸ばね，左右動ストッパ，軸箱上下動ストッパ，車体異常上昇止め，左右動ダンパ，ヨーダンパを配置している。
- (d) まくらばねの特性については，地震時を想定した大変位時の空気ばね特性同定試験結果を用いている。
- (e) 車体重心の車体中心からのずれを考慮する。
- (f) 車輪・レール間作用力はKalker理論に基づいたモデルを使用する。
- (g) 車輪がレールから離れて運動する状態も計算可能とする。

なお，座標系については，図5-2に示すように車両進行方向をx軸の正の向きにとり，上下（z）方向は上向きを正，左右（y）方向は進行左向きを正，ロール（ $\phi$ ）方向は進行方向に向いて時計回りの向きを正とした。

### 5.3 軌道と振動入力モデル

軌道は，車輪直下の各レールがスラブに対し左右および上下方向に弾性支持されているモデルとした。

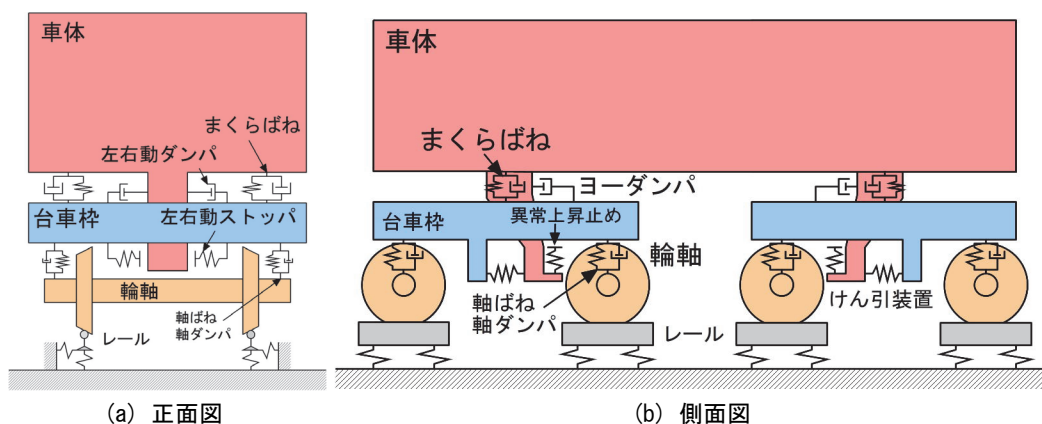


図5-1 地震時の車両運動シミュレーションに用いた一車両モデル

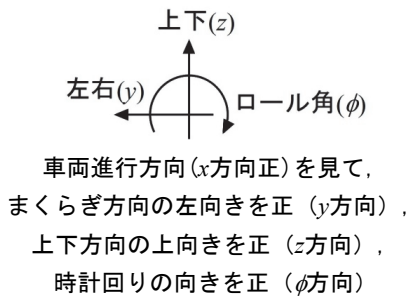


図5-2 車両運動シミュレーションにおける座標系

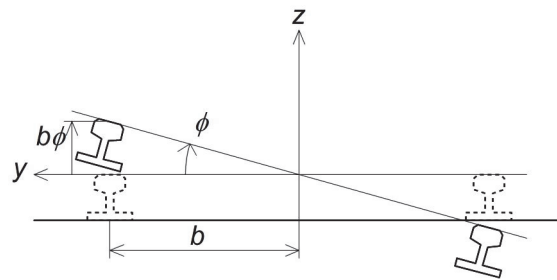


図5-4 軌道面ロール振動の入力  
(紙面奥向きが進行方向(X軸の正))

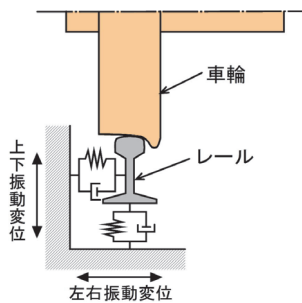


図5-3 軌道モデルおよび軌道面振動の入力方法

入力軌道面振動は、各車輪を支えるレール下のスラブ面変位として図5-3に示す2方向(左右および上下)に加え、軌道面のロール振動を入力する。軌道面のロール振動は図5-4に示すように左右のレールをロール角 $\phi$ 相当分だけ上下逆相に変位させるとともに、レール自体も軌道面ロール角 $\phi$ 分傾けている<sup>3)</sup>。図5-4中、 $b$ は軌道中心からレール頭頂面中心までの距離であり、軌道面ロール角 $\phi$ が微小であれば軌道面ロール角による左右レールの上下変位は $b \cdot \phi$ で表すことができる。また、ロール角 $\phi$ にともなうレールの左右移動量は十分小さいものと見なしている。前後方向の軌道振動は車両の挙動に及ぼす影響が小さいため省略した。

#### 5. 4 車両条件

解析には800系新幹線の設計諸元を用いることを基本としたが、空気ばねについては、地震時に車両が大変位する状況を考慮したモデル化を適用し、モデルの各パラメータの値は特性同定試験<sup>4)</sup>で得た値から設定した。なお、空気ばねの剛性は、ばね上荷重の増加(空気ばね内圧の増加)に伴い大きくなる傾向を示すが、空気ばねの個体差もあるため、厳密な補間を行わず切りの良い値とした。走行速度については、脱線時の推定走行速度である78km/hとした。

#### 5. 5 軌道条件および車両走行位置

脱線地点付近の線形より、図5-5に示す線形を設定し、軌道変位(軌道不整)が小さかったことから軌道変位は無いものとした。4章で述べた構造物天端の応答解析実施区間を図5-5にあわせて示す。また、車両の走行位置については、平成28年4月14日21時26分34秒当時、1号車第1軸がキロ程99k089mを走行していたとみなし、各



図5-5 設定した線形条件

号車の位置を算出した（前述したように走行速度は78km/hで一定としている）。なお、左曲線の円曲線長については解析結果への影響が無いと見做し、便宜上160mとした。

## 5.6 脱線判定

本シミュレーションでは、いずれかの車輪においてレールに対する相対左右変位が中正位置±70mmに達した時点を脱線と判定し（図5-6）、その時点でシミュレーション解析を終了する。

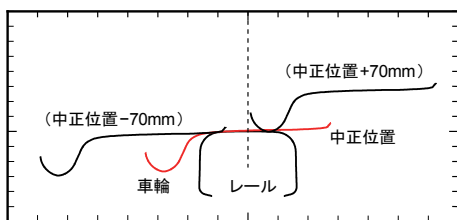


図5-6 脱線判定基準  
(車輪／レール相対左右変位：±70mm)

## 5.7 入力軌道面振動

4章で求めた構造物天端の応答から、各構造物端部（熊本駅方および鹿児島中央駅方）の下り線中心位置の絶対変位波形を算出し、走行により変化する各軸位置（キロ程）に応じて軌道面の変位（左右方向、上下方向、ロール方向）を線形補間により求めた。なお、上下方向については、地表面の上下振動に構造物のロッキングに伴う振動変位を加算することで算定した。また、構造物の応答解析を実施している区間よりも手前（起点）側では起点側構造物である第2田崎BL R1の熊本駅方端部と同じ波形を、奥（終点）側については終点側構造物である坪井川B P1と同じ変位波形を入力した。振動している構造物境界部のいわゆる角折れ、目違いが生じ得る箇所では緩和形状\*を挿入している。各軸における入力軌道面振動を図5-7に示す。各構造物端部の応答波形を付属資料6に示す。また、左右方向の入力軌道面振動のフーリエ振幅を図5-8に示す。図5-8より、今回の地震における入力軌道面振動は、振動数0.8Hz～0.9Hzに最も大きなピークをもち、構造物の固有振動数である約1.3Hzにもピークを有していることがわかる。

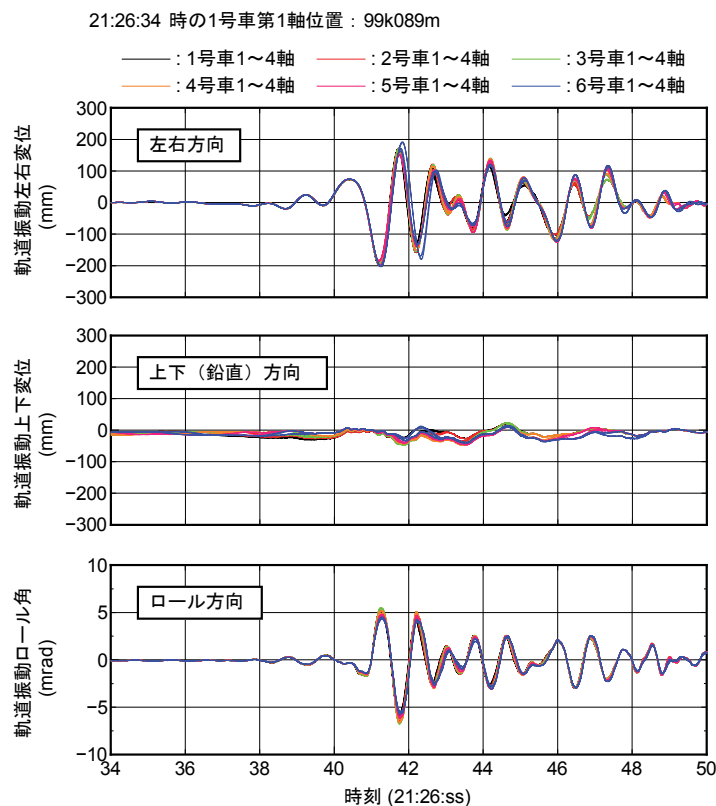


図5-7 入力軌道面振動

\*緩和形状：鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限）の付属資料6で示されている、単純化したモデルによる角折れ・目違い部の緩衝区間形状。本付属資料6で

は上下（鉛直）方向を扱っているが、ここではそれを左右（水平）、ロール角方向にも準用している。

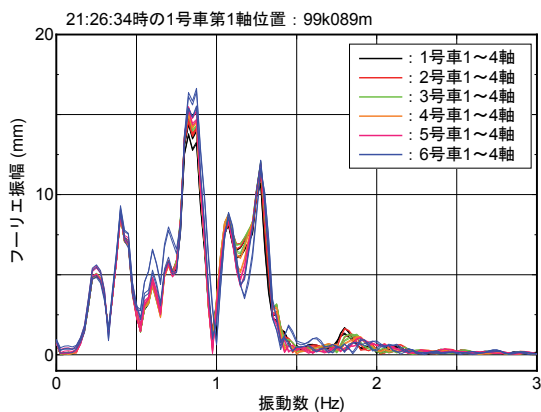


図5-8 左右方向の入力軌道面振動のフーリエ振幅

1号車第1軸が21時26分34秒に99k089mを走行していたとする条件でのミュレーション結果の総括を表5-1に、脱線発生時刻と車両位置、脱線軸の位置の関係を図5-9に示す。主な解析波形を付属資料7に示す。解析の結果、時刻21時26分43秒～44秒の間に1～3号車および6号車が脱線する結果となり、1および6号車は時刻21時26分43秒3付近で進行右側、2および3号車は時刻21時26分43秒8付近で進行左側への脱線となった。時刻の観点から脱線の発生した順序は1号車、6号車、2号車、3号車の順であったが、脱線時刻の差は1秒未満であるため、図5-9に示す車両位置を勘案すると、最も起点(熊本駅)側で脱線したのは6号車である。また、最も起点寄りの進行左側レールの脱線痕(最初の脱線痕)があるキロ程99k157mでは、進行左側に脱線するタイミング(43秒8付近)に6号車の後台車が走行していたと考えられる。

## 5. 8 シミュレーション結果

### (1) 解析結果概略

表5-1 シミュレーション結果の総括(各号車の脱線/非脱線)

号車	脱線/非脱線	脱線時刻 (21時26分)	脱線軸	脱線方向	車輪/レール 相対左右変位 最大値	車輪上昇量 最大値
1号車	脱線	43秒29	第4軸(第2軸)*	右	-70mm	38.4mm
2号車	脱線	43秒76	第1軸(第2軸)*	左	70mm	47.1mm
3号車	脱線	43秒79	第1軸(第2軸)*	左	70mm	54.8mm
4号車	非脱線	—	—	—	16.2mm	41.2mm
5号車	非脱線	—	—	—	-16.1mm	33.2mm
6号車	脱線	43秒34	第2軸(第1軸)*	右	-70mm	67.8mm

\*括弧内: 脱線時にレールに上がっていた軸

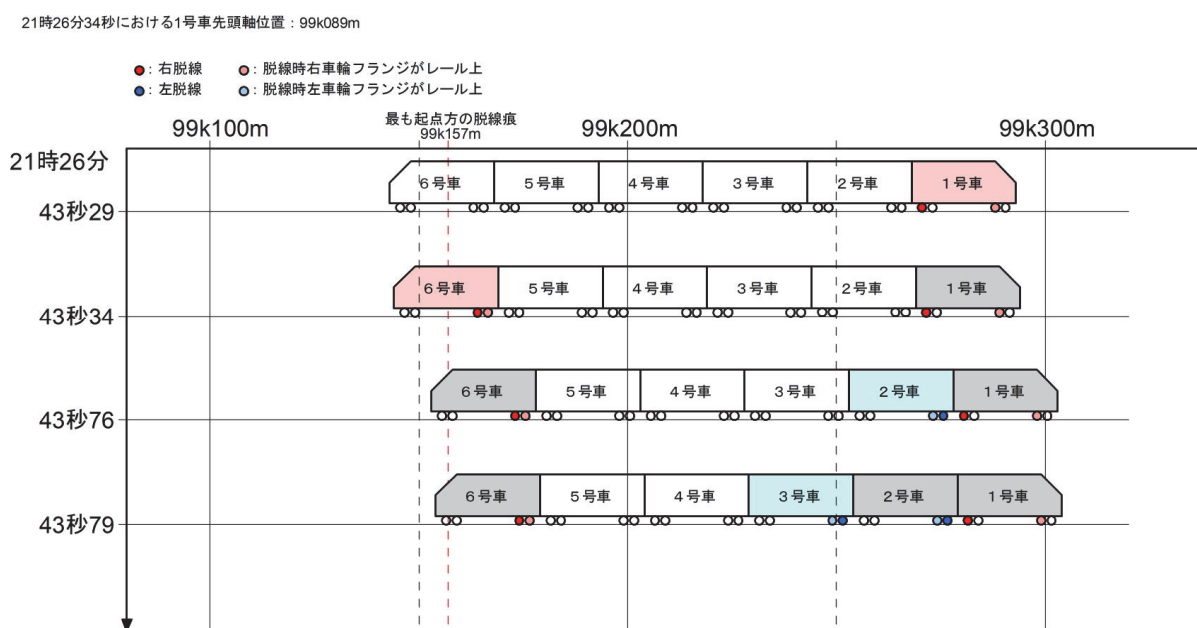


図5-9 シミュレーション解析における脱線発生時の車両および脱線軸の位置

なお、仮に前述の走行位置条件よりも列車が遅く脱線地点に進入したという条件（1号車第1軸が21時26分34秒に99k069mを走行，脱線発生時に5号車の台車がおおよそ最も起点側の脱線痕の位置にある条件）で解析を行うと，6号車が上記脱線痕よりもさらに起点方で脱線することを確認している。一方，列車が早く進入したという条件（1号車第1軸が21時26分34秒に99k112mを走行，最初の条件よりもおよそ1両分早く進入する条件）では，

上記脱線痕よりも終点方において脱線が発生した。これらの結果から，本シミュレーション解析において設定した「1号車第1軸が21時26分34秒に99k089mを走行していた」条件が，実際の脱線現象を表現するのに適切な条件であるといえる。

脱線した車両について，脱線時の車両姿勢を図5-10に示す。いずれの車両も脱線と判定された時には車輪フランジがレール頭頂面に乗っていることがわかる。

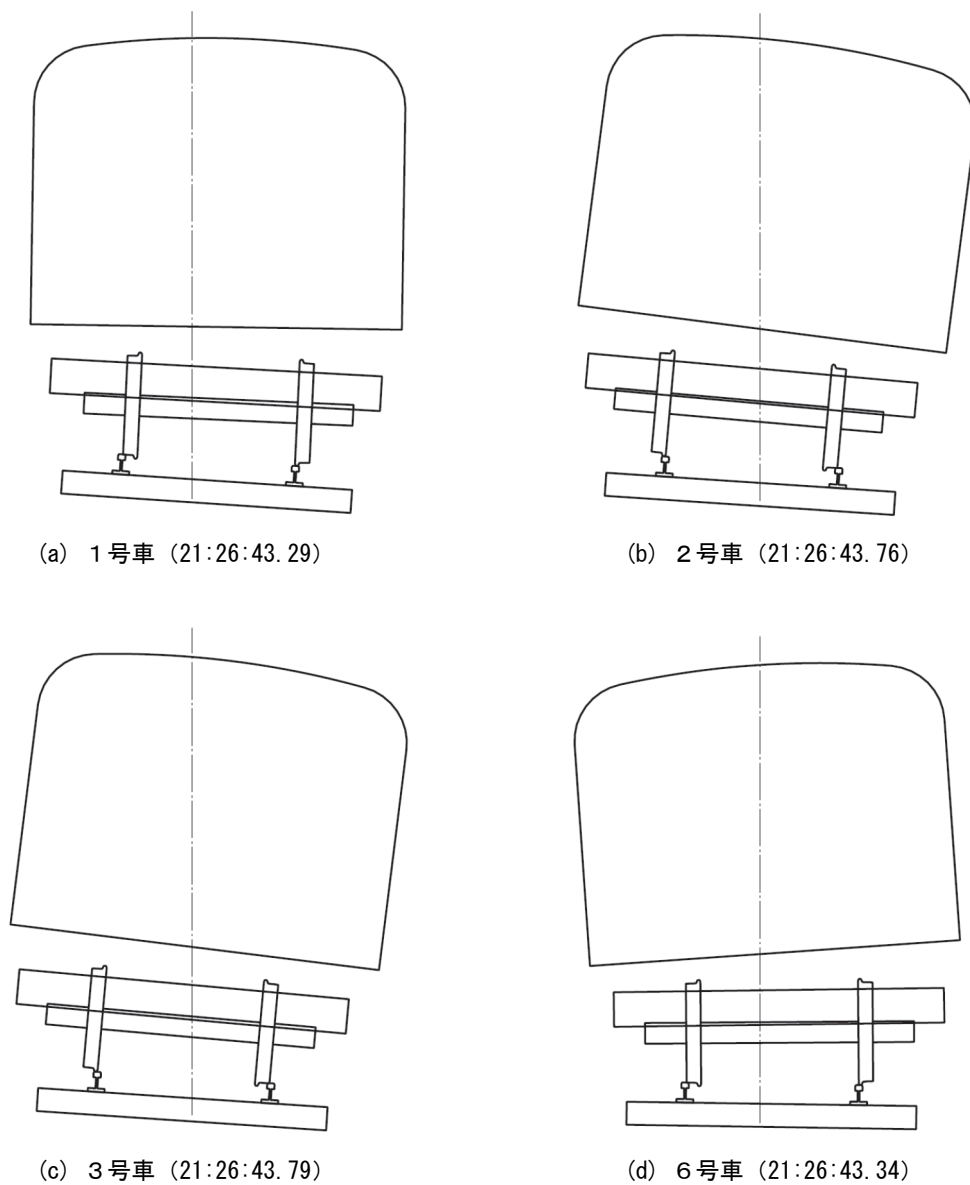


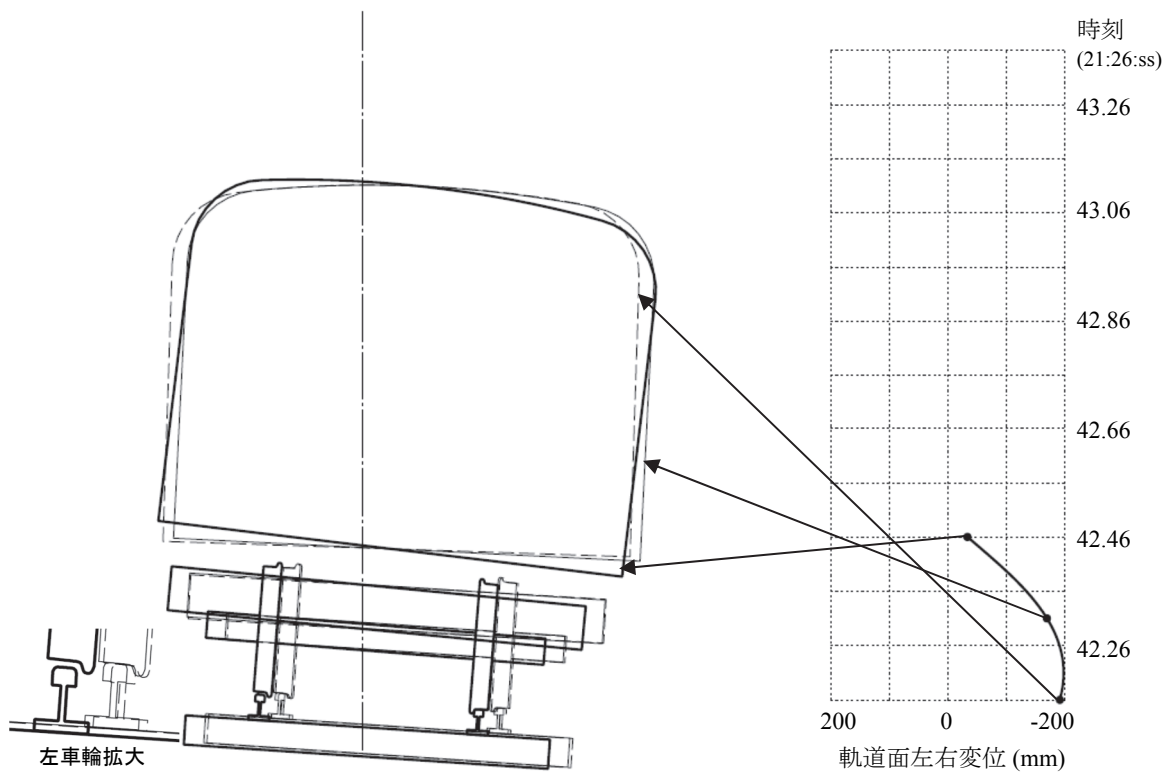
図5-10 脱線軸断面を後ろから見た脱線車両の脱線時の姿勢  
(括弧内は脱線時刻)

## (2) 車両姿勢の推移（進行右方向脱線の車両）

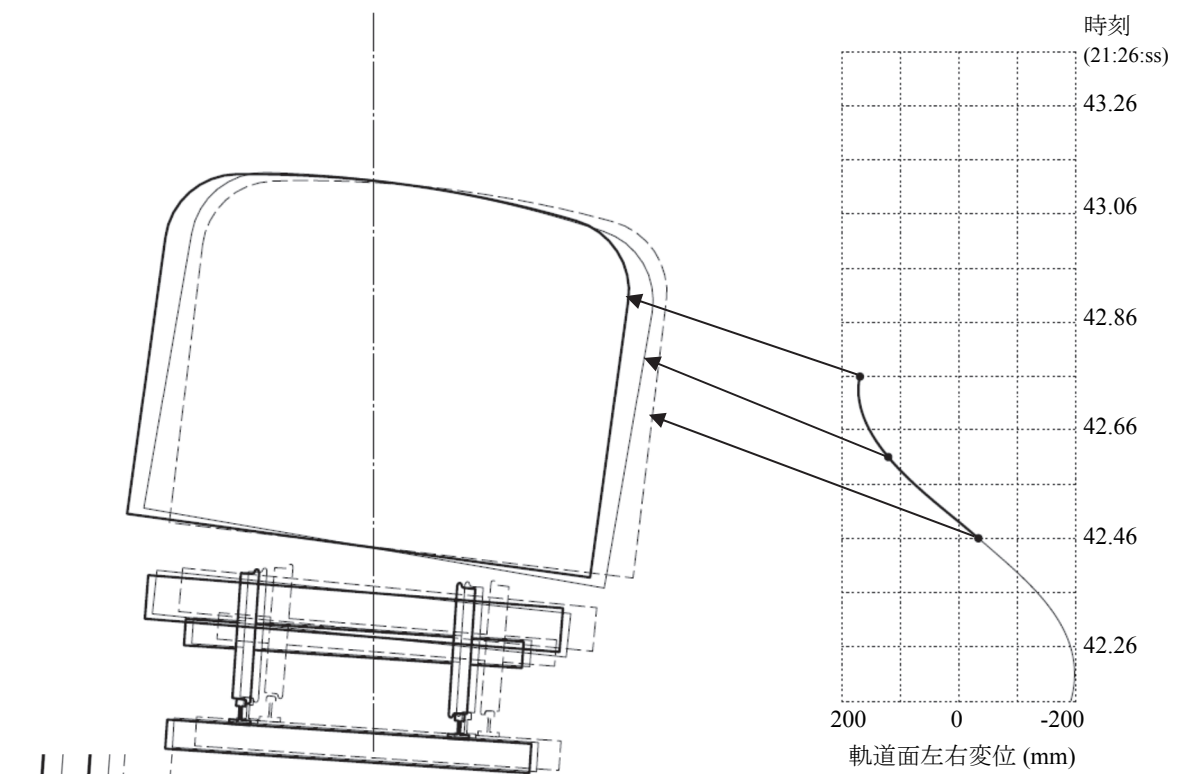
進行右方向に脱線した1号車について脱線前の1秒間の車両姿勢をストロボショットで図5-11に示す。各図中、時刻を追って細破線→細実線→太実線の順に姿勢が推移している。図5-11(a)より、42秒46では左車輪がレールから離れて上昇していることがわかる。その後、左車輪は正規の状態ではレール上に着地している（図5-11(b)）。次に、図5-11(c)に示すように42秒76から43秒06にかけて右車輪がレールから離れて上昇し、その後、図5-11(d)に示すように右車輪フランジがレール頭頂面上に接触（着地）しそのまま右に脱線している。

## (3) 車両姿勢の推移（進行左方向脱線の車両）

進行左方向に脱線した3号車について脱線前の約1秒間の車両姿勢をストロボショットで図5-12に示す。図5-11と同様、時刻を追って細破線→細実線→太実線の順に姿勢が推移している。図5-12(a)より、42秒96では右車輪がレールから離れて上昇していることがわかる。その後、43秒1（図5-12(b)の細実線で示されている姿勢）では右車輪フランジがレールゲージコーナ部に接触（着地）しているが、そのまま右車輪は正規位置に戻っている。次に、図5-12(c)に示すように43秒3から43秒56にかけて左車輪がレールから離れて上昇し、その後、図5-12(d)に示すように左車輪フランジがレール頭頂面上に接触（着地）しそのまま左に脱線している。

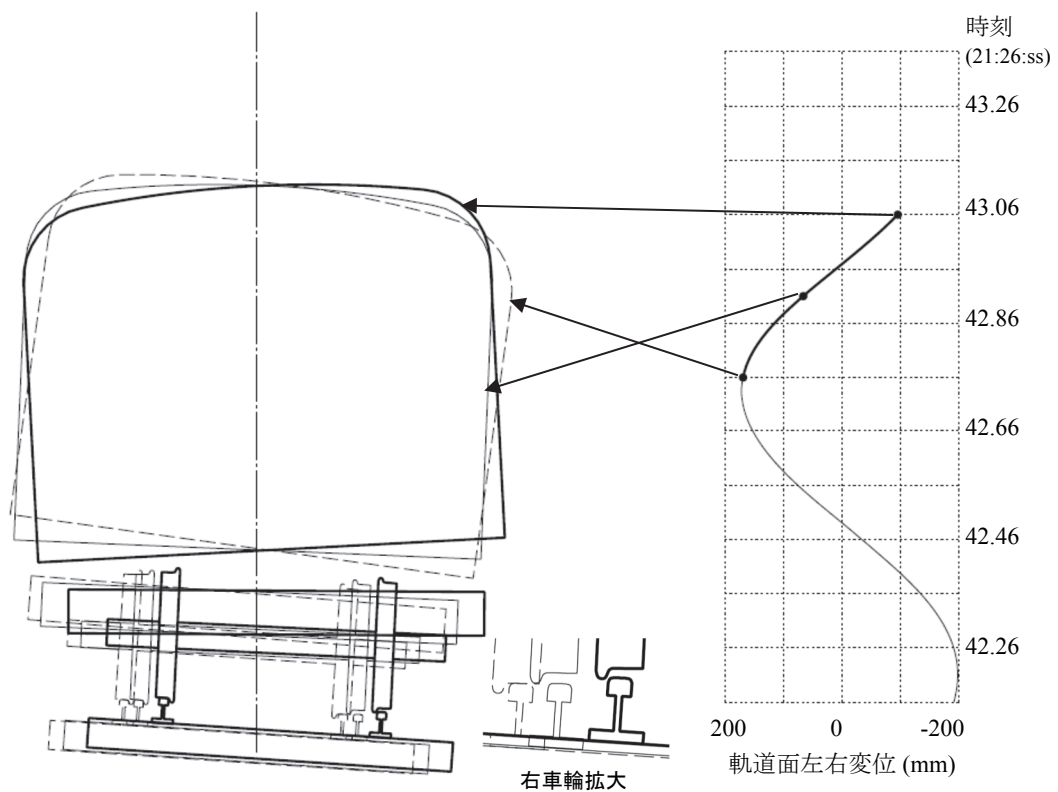


(a) 21:26:42.16~42.46まで

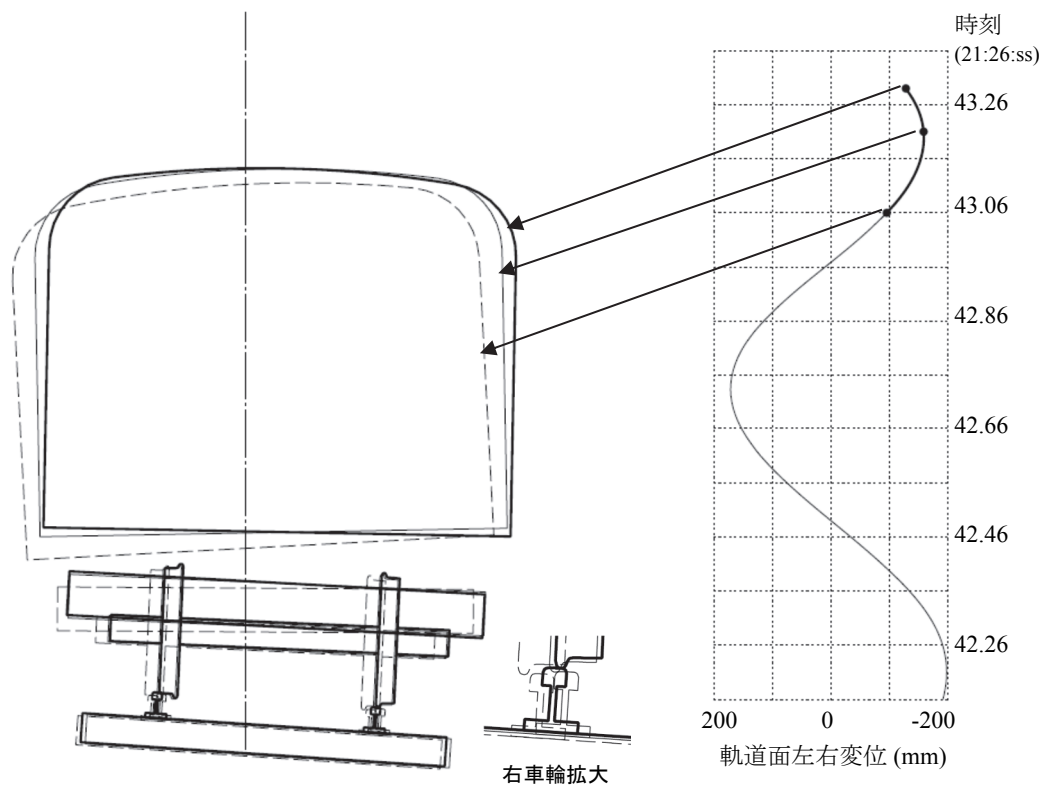


(b) 21:26:42.46~42.76まで

図5-11 脱線直前の車両姿勢の推移 (1号車) (その1)

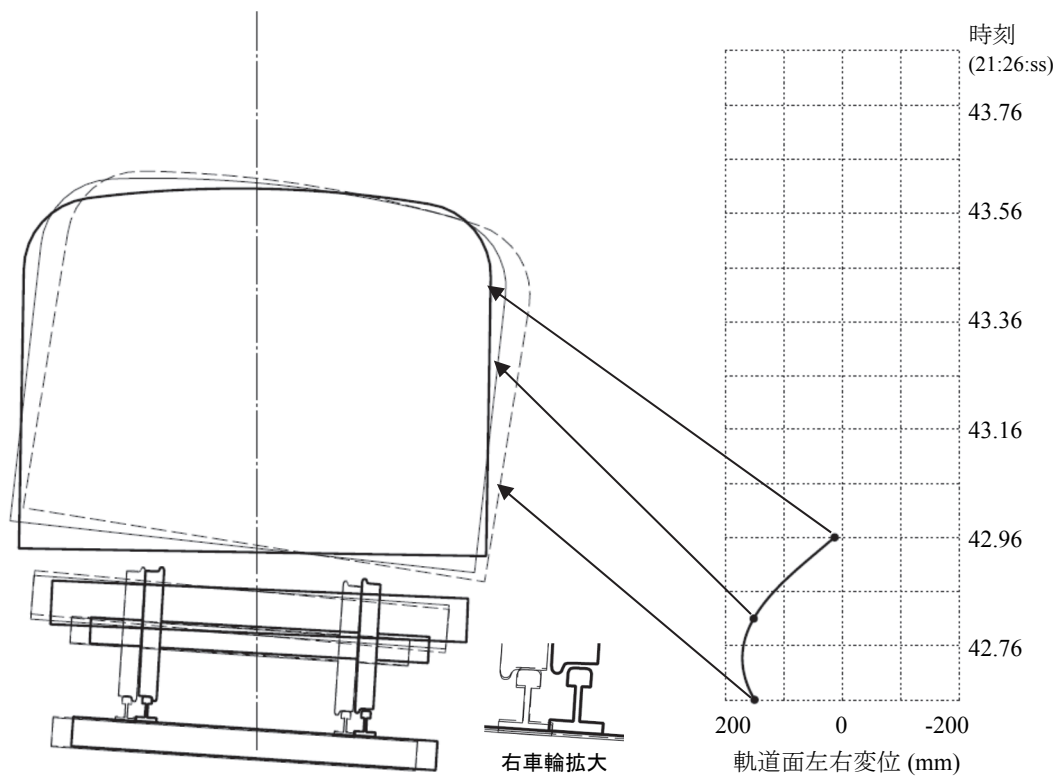


(c) 21:26:42.76~43.06まで

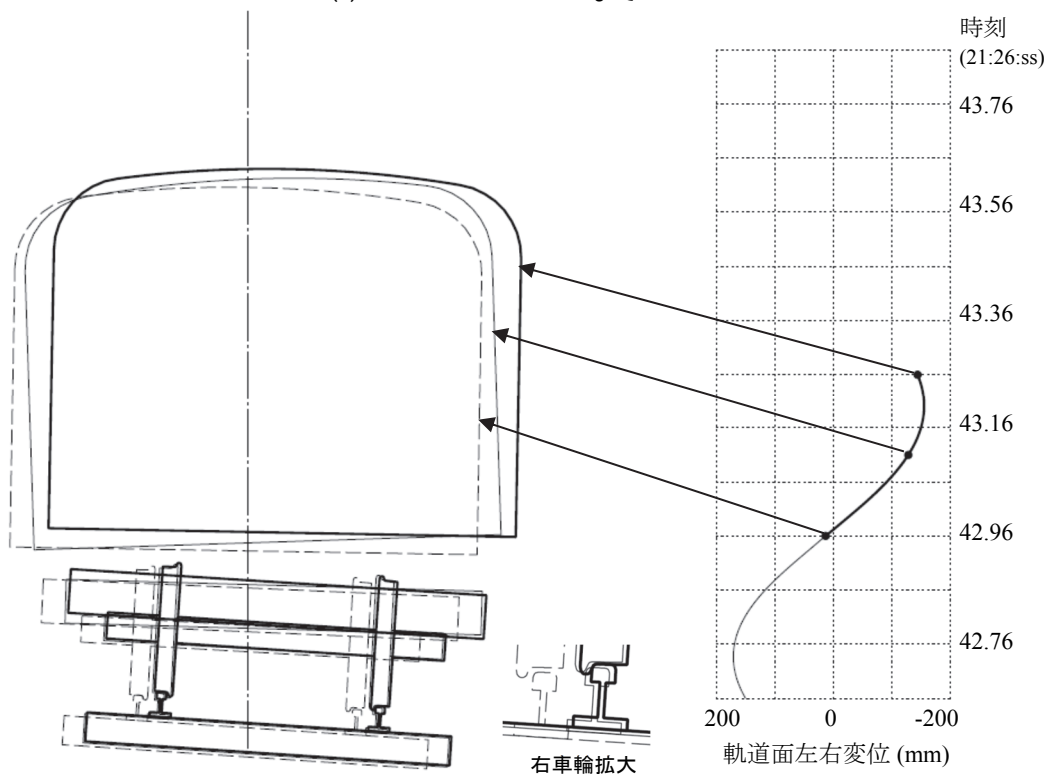


(d) 21:26:43.06~脱線まで

図5-11 脱線直前の車両姿勢の推移 (1号車) (その2)



(a) 21:26:42.66~42.96まで



(b) 21:26:42.96~43.26まで

図5-12 脱線直前の車両姿勢の推移 (3号車) (その1)

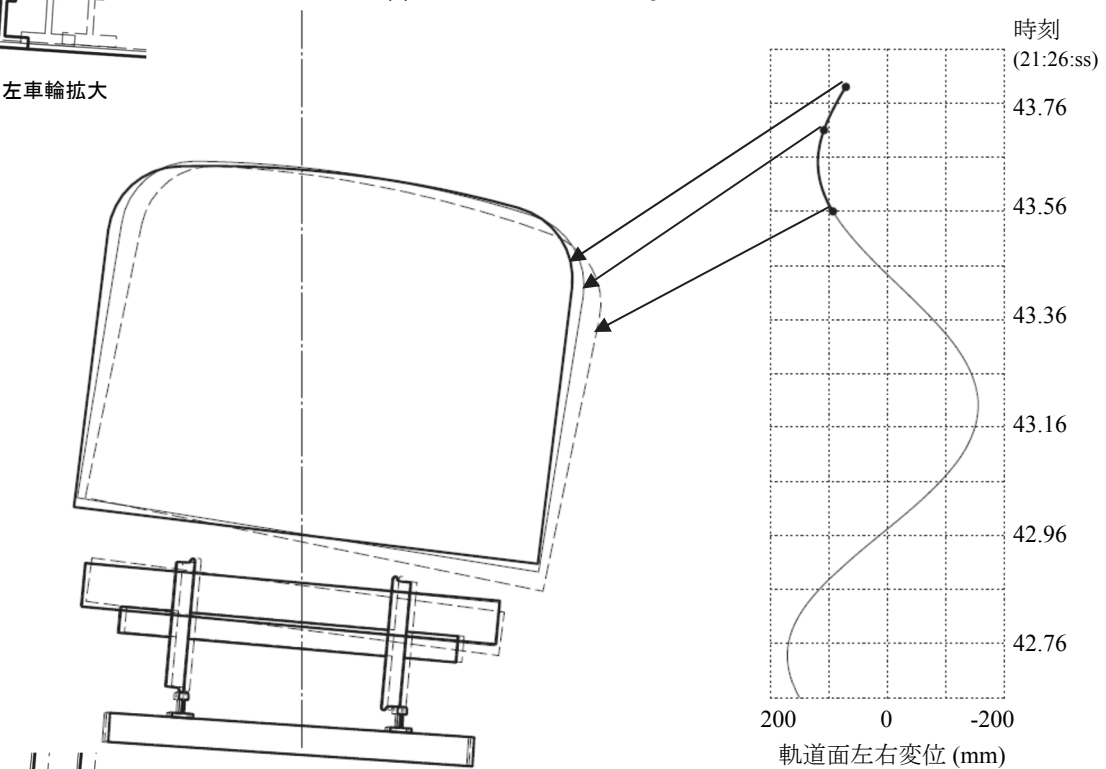
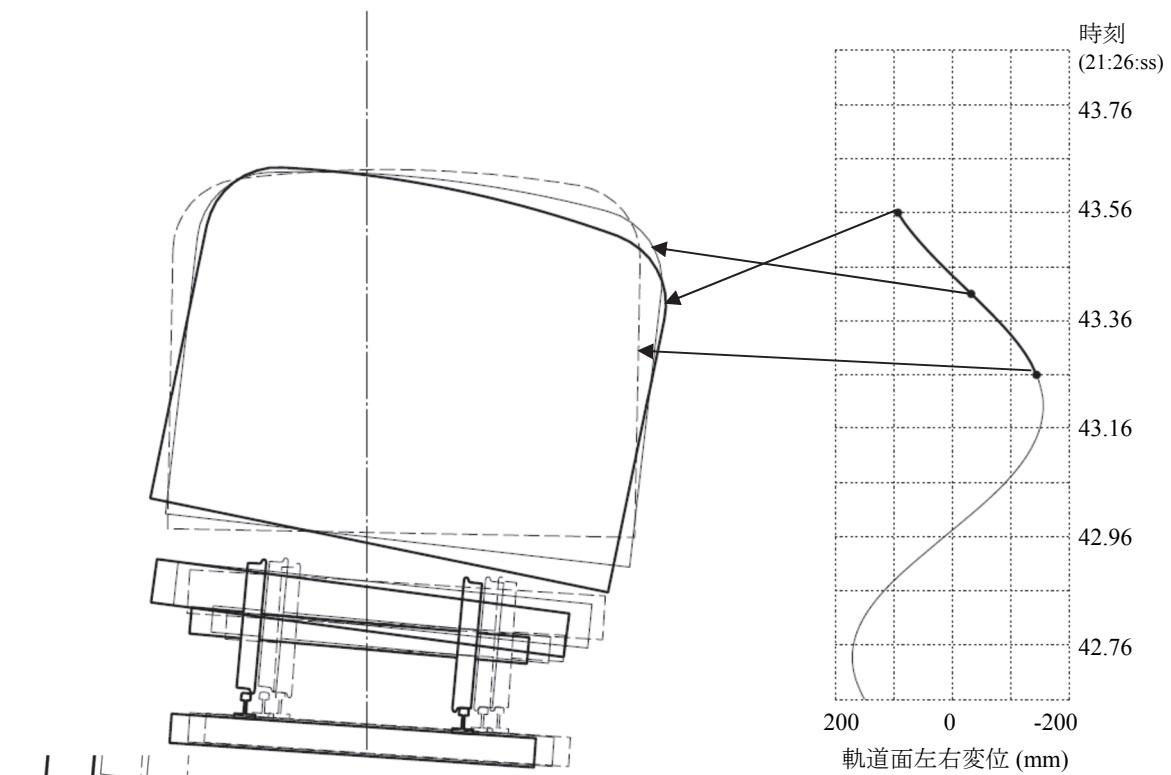


図5-12 脱線直前の車両姿勢の推移 (3号車) (その2)

## 5.9 車両挙動の解説

シミュレーション解析による脱線時の車両挙動について、進行右に脱線した車両は図5-13に、進行左に脱線した車両は図5-14に示す状況であった。今回車両が受けた軌道面振動は図5-8に示すように振動数0.8~1.3Hzに主成分を有していた。この振動数は、車体の回転中心が車両の下部にあり、車体のロール回転に合わせて左右の車輪が交互に大きく上昇する下心ロール振動が成長する振動数よりもやや高い。一方、車体の回転中心が車両の上部にあり、車体のロール回転に合わせて車輪が左右に移動し、著大な横圧が発生する上心ロール振動が成長する振動数よりもやや低い。このように、下心ロール振動が発生する振動数と上心ロール振動が発生する振動数の中間の振動を受けたことにより、車輪が数十mm上昇しつ

つ、反対側車輪に100kNを超える横圧が作用し、輪軸が左右に押し込まれ車輪フランジがレール頭頂面上に乗り脱線に至ったと推定される。その際、車両は地震の主要動（大きな揺れ）をうけて直ちに（数秒程度以内に）脱線していることから、車両において共振現象が起きていたかどうかは判断できない。編成中の多くの車両が脱線に至った原因として、編成全体にわたって大きな軌道振動を受け、この軌道振動に対し6両編成の列車がほぼ同様の挙動を示したことが考えられる。また、脱線方向が左右に分かれた原因としては、5.8節で述べたように、脱線し得るタイミングが0.5秒程度の間隔で2度あり、1度目のタイミングで進行右に脱線する車両、2度目のタイミングで進行左に脱線する車両が、わずかな車両挙動の差で発生したためと考えられる。

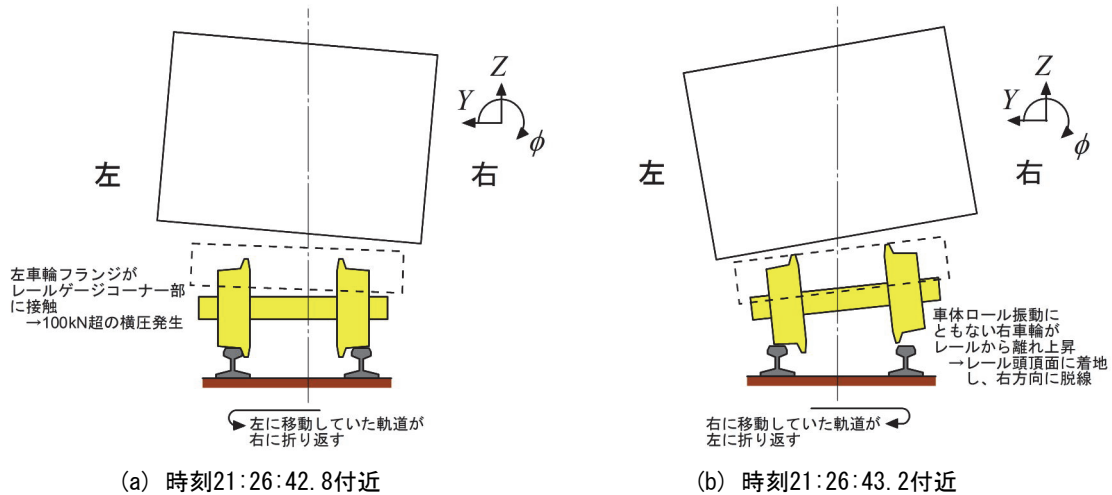


図5-13 平成28年熊本地震時（推定地震動による）の車両挙動概要  
（進行右に脱線する車両の場合）

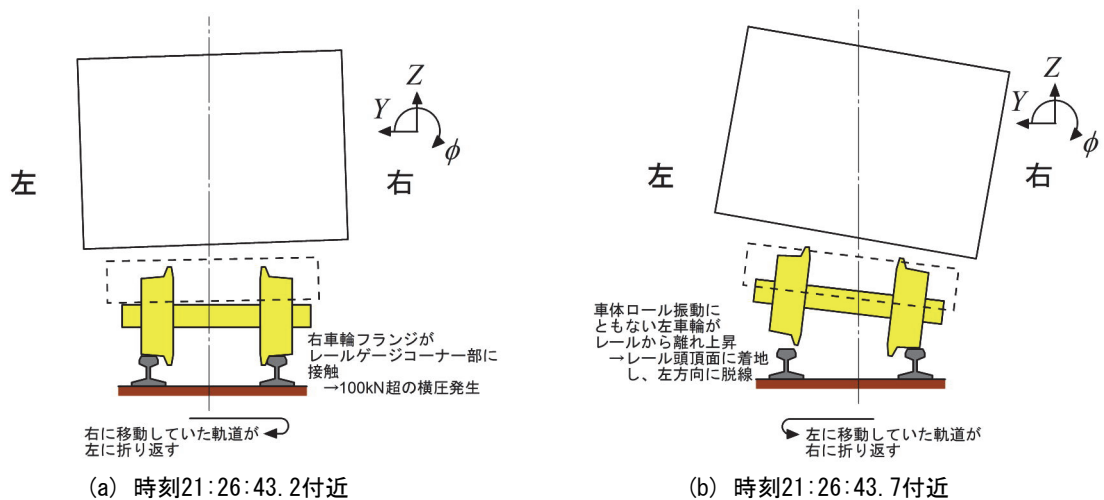


図5-14 平成28年熊本地震時（推定地震動による）の車両挙動概要  
（進行左に脱線する車両の場合）

## 文 献 (5章)

- 1) 宮本岳史, 石田弘明, 松尾雅樹: 地震時の鉄道車両の挙動解析, 日本機械学会論文集C編, Vol.64, No.626, pp.3928-3935, 1998
- 2) 宮本岳史, 松本信之, 曾我部正道, 下村隆行, 西山幸夫, 松尾雅樹: 大変位軌道振動による実物大鉄道車両の加振実験, 日本機械学会論文集C編, Vol.71, No.706, pp.1849-1855, 2005
- 3) 飯田浩平, 坂井公俊: レール小返りおよび軌道のロール振動を考慮した鉄道車両の地震時走行シミュレーション, 第25回交通・物流部門大会講演論文集, 日本機械学会, 講演No.2102, 2016
- 4) 飯田浩平, 鈴木貢, 宮本岳史, 遠竹隆行, 植木健司: 車両2次サスペンションの大変位時における特性, 鉄道総研報告, 第25巻, 第6号, pp.23-28, 2011