

第7章 推定地震波を受ける構造物上の車両挙動

7.1 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)を用いて、推定地震動に対する車両の挙動を調査した。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、車輪がレール上でジャンプ、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については、実台車を用いた加振実験により精度の検証も行われている。

新潟県中越地震で脱線した「とき 325号」の200系新幹線車両は揺れまくらを有するダイレクトマウント方式の台車を装備している。この揺れまくら付き台車を台車枠と揺れまくら間にピンジョイント形の拘束条件を設定することでモデル化した。このVDSを用いて、「とき 325号」の200系新幹線車両をモデル化し、前章までに示された新潟中越地震による新幹線脱線地点の推定地震動で揺れる構造物上を走行する車両の挙動を解析した。

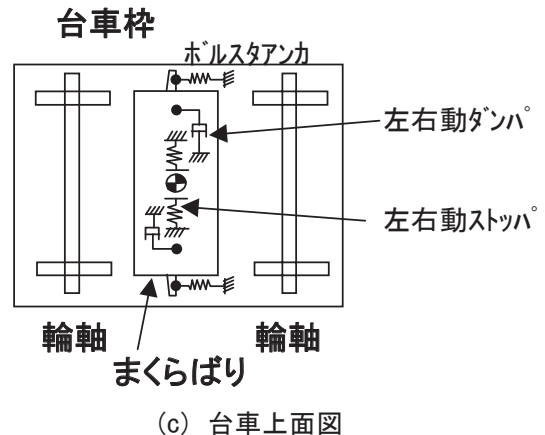
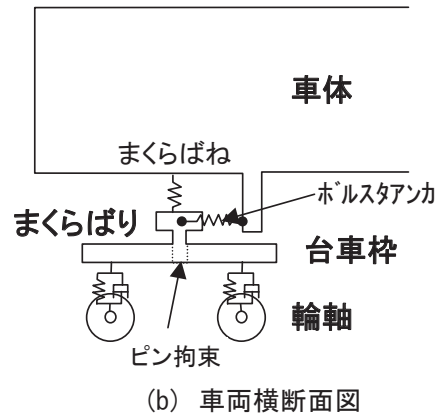
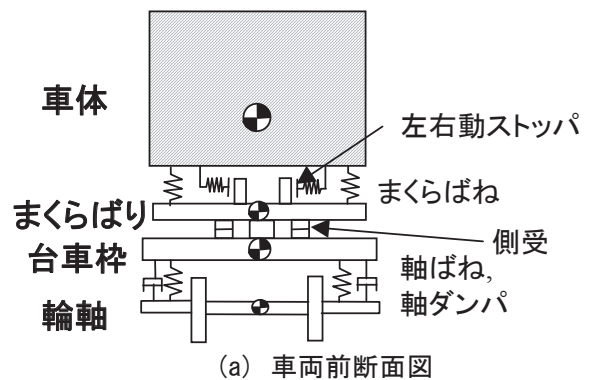
7.2 車両モデル

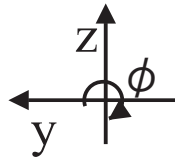
200系新幹線車両に採用されているダイレクトマウント方式まくらばり付き台車を、図7.1に示すようにモデル化した。車両モデルの概要は以下のとおりである。

- ・ 車体1個、まくらばり2個、台車2個、輪軸4個について各6自由度、各車輪下のレール8個について各2自由度とし、合計で17物体、70自由度でモデル化を行う。まくらばりと台車間は1自由度の拘束条件を持って結合していることから、運動方程式上の計算自由度は60自由度となる。
- ・ 対象車両：
 - ① 200系車両・中間車(M'226:「とき 325号」2,4,6,8号車)、空車、(編成中最も数の多い形式で、構造物毎十日町 BL R3,R5 および動的角折れシミュレーションで用いた。)
 - ② 200系車両・先頭車(Mc'222:「とき 325号」10号車)、空車、(構造物毎十日町 BL R4 シミュレーションの場合にのみ用いた。)
- ・ 一車両モデルとして車体-台車(まくらばり含む)間と台車-輪軸間の結合要素については、ばね・ダンパ要素として、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、ボルスタアンカを配置している。台車枠-まくらばり間はピン拘束(ヨー回転のみ自由)で結合すると同時に、摩擦要素として側受を配置している。

- ・ 車輪・レール間作用力には Kalker 理論に基づいたモデルを使用する。
- ・ 車輪はレールから離れて運動する状態も計算可能とした。





車両進行方向(x方向)を見て
枕木方向で左を正(y方向)
上下方向で上向きを正(z方向)
(d) 座標系

図 7.1 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

7.3 軌道と振動入力モデル

地震動は各車輪を支えるレール下の軌道面変位として図 7.2 に示す 2 方向 (左右 y, 上下 z) に入力する。ここでは前後方向の軌道振動が車両の挙動に及ぼす影響が小さいため省略した。

構造物毎のシミュレーション計算の際には一車両の 4 輪軸に同相の振動を入力する。一方、動的角折れを考慮した構造物上のシミュレーション計算では、各軸毎に異なる振動を入力する。

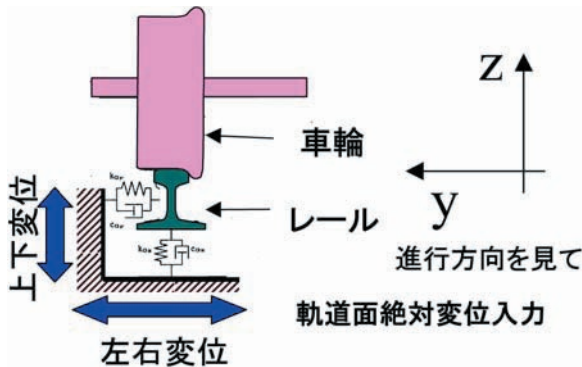


図 7.2 地震動の入力方法

7.4 200 系車両諸元

シミュレーションに用いた車両諸元などを表 7.1 に示す。この車両モデルにより求めた 200 系新幹線車両の中間車と先頭車の正弦波振動に対する走行安全限界線図を図 7.3 に示す。この走行安全限界線図は正弦波を一定振動数、一定振幅で 5 波入力した時刻歴シミュレーションを、振幅を 5mm 毎に大きくしながら繰り返し、車輪・レール相対左右変位 70mm を超えない (脱線しない) 最大の入力振幅を安全限界振幅として示した。この走行安全限界では車両が軌道不整や勾配の無い直線区間を速度 204km/h で走行中に、左右方向に加振されたことを前提としている。

「とき 325 号」の列車編成を図 7.4 に、200 系車両に使用されている DT201 台車組立図を図 7.5 に、

中間車と先頭車の形式図を図 7.6 に示す。

表 7.1 シミュレーションに用いた主な車両諸元

種類	中間車	先頭車
形式	M'226	Mc'222
車体質量(kg)	37500	41000
車体重心位置 (m)	前後	0
	左右	+0.1 (運転台側へ)
	高さ	0
まくらばり質量(kg)	575	
台車枠質量(kg)	5050	
輪軸質量(kg)	2440	
空気ばねのばね定数 (kN/m) (上下,左右)	300, 325	340, 345
軸ばねの上下ばね定数 (kN/m) (上下,前後,左右)	1131, 34300, 8580	
左右動ダンパ減衰係数 (kN/(m/s))	62.7 (0.2m/s 時)	
軸ダンパ減衰係数 (kN/(m/s))	58.8	
車体異常上昇止め遊間 (mm)	48	
左右動ストップ遊間 (mm)	20	
軸箱上下動ストップ遊間 (mm) (上方,下方)	21, 34	
空気ばね左右間隔(m)	2.45	
軸ばね左右間隔(m)	2.1	
台車中心間距離(m)	17.5	
台車軸距(m)	2.5	
車輪半径(m)	0.455	
軌間(m)	1.435	
車輪踏面形状	新幹線基本踏面	
レール断面形状	JIS-60kg	
レール支持剛性 (上下,左右) (MN/m)	58.8, 14.7	

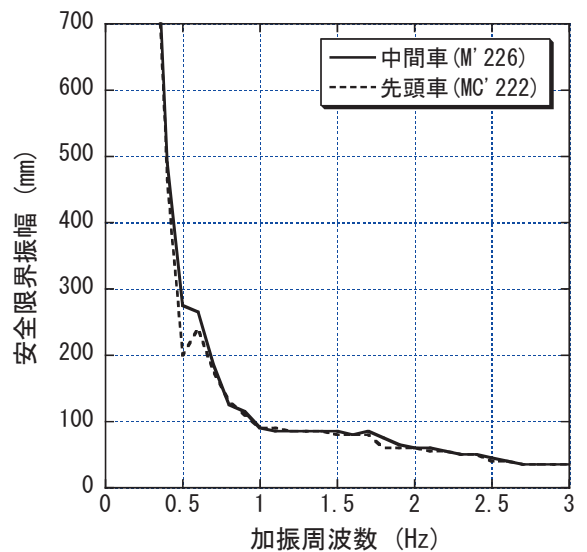


図 7.3 正弦波振動に対する走行安全限界線図
左右加振 200 系車両 走行速度 204km/h

東京 ←

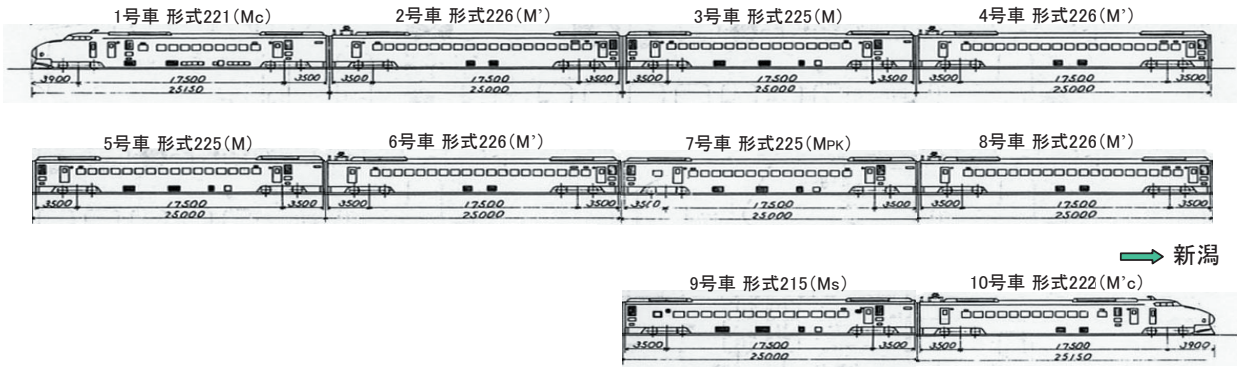


図 7.4 とき 325 号列車編成図 (200 系新幹線電車 10 両編成)

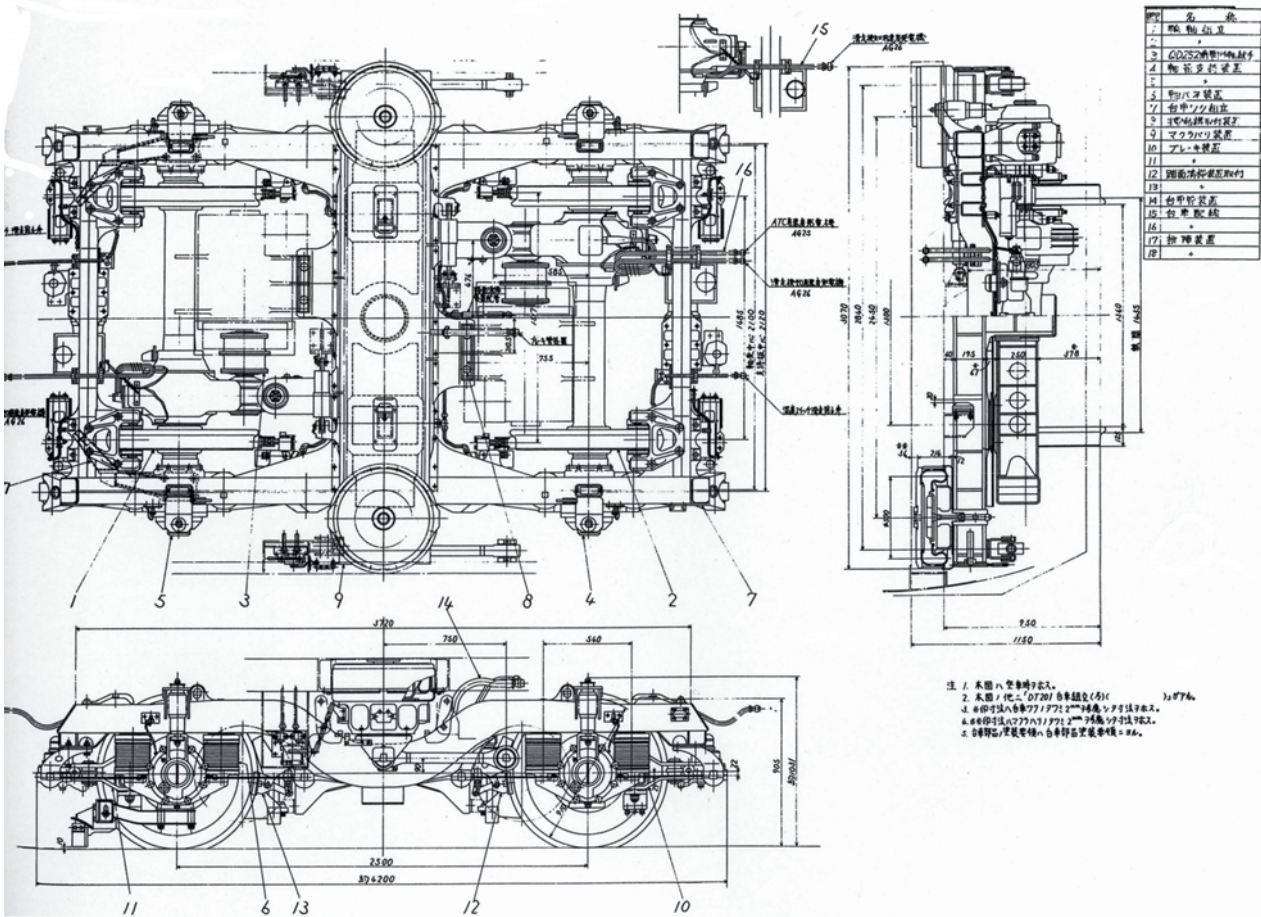
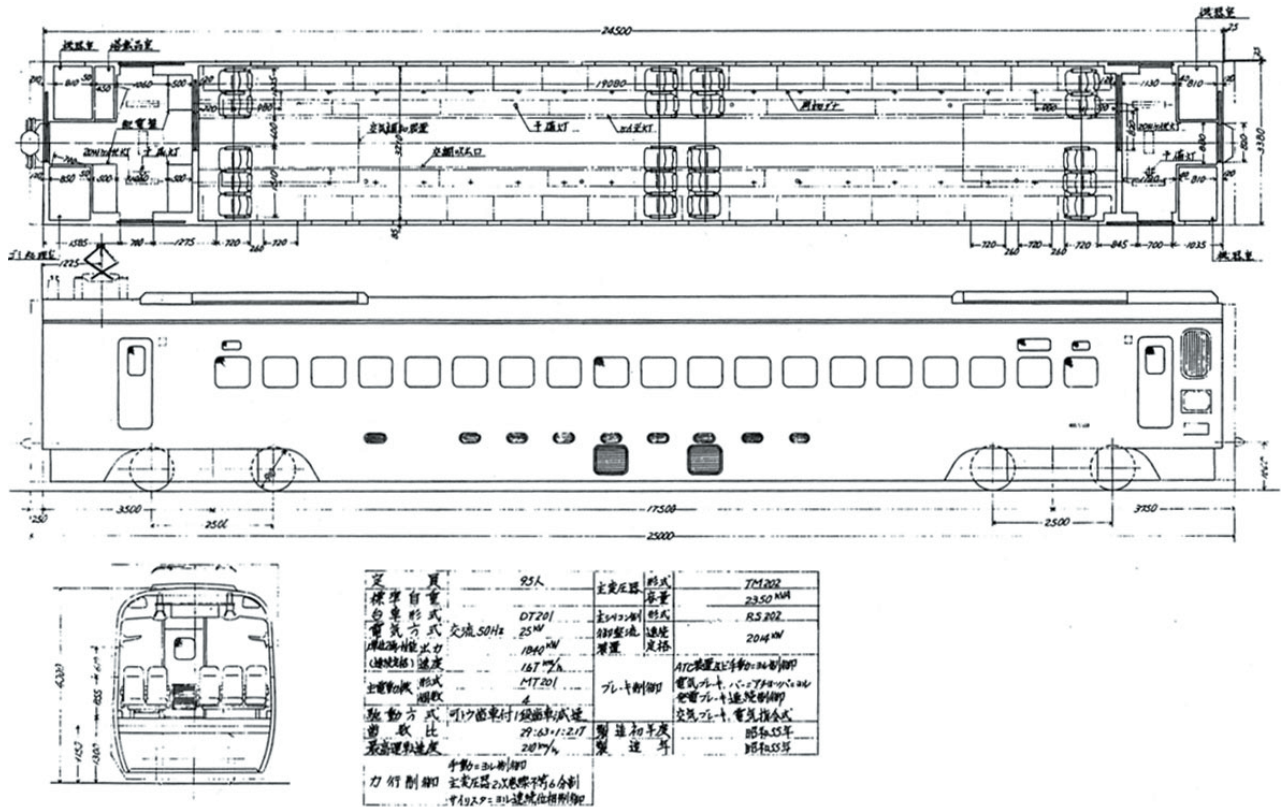
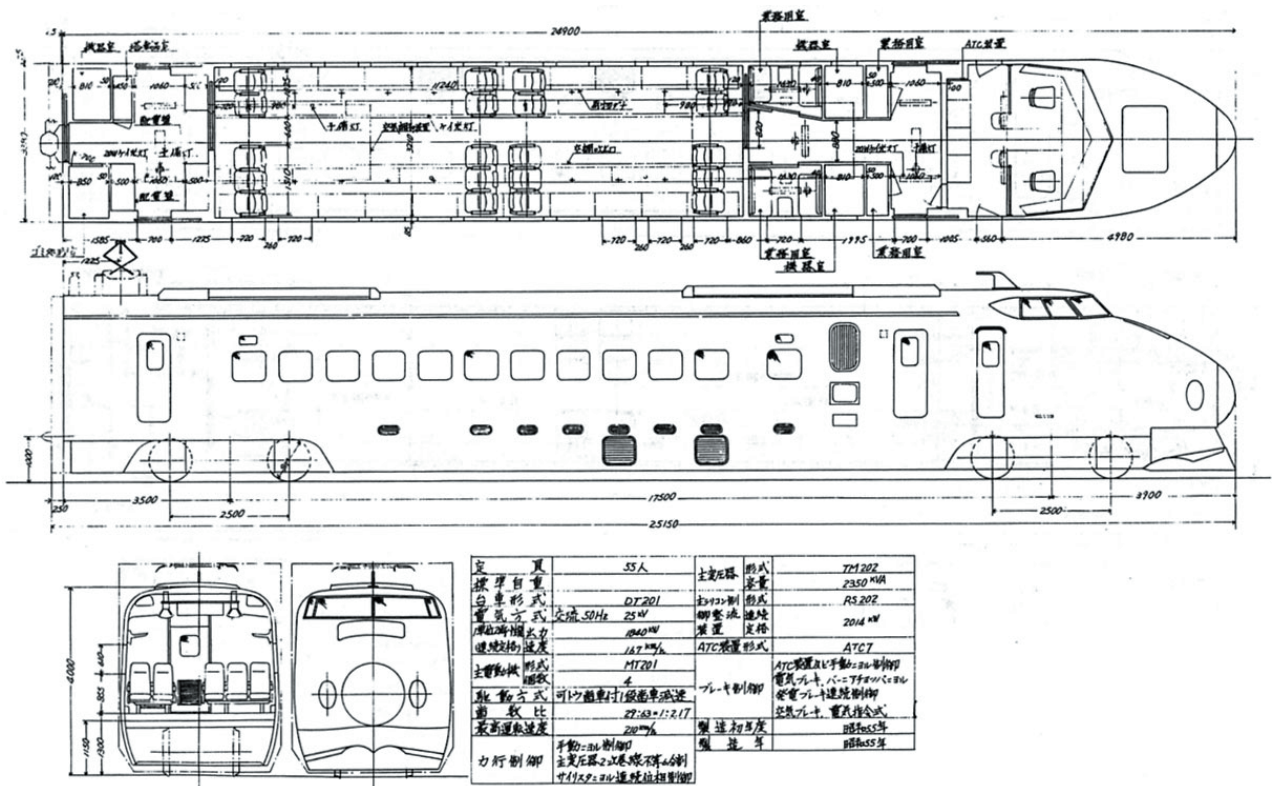


図 7.5 DT201 台車組立図



(a) 中間電動車 形式 226 (M') : 2, 4, 6, 8号車



(b) 制御電動車 形式 222 (M'c) : 10号車

図 7.6 200系新幹線電車の車両形式図

7.5 入力地震波

(1) 構造物毎の振動変位

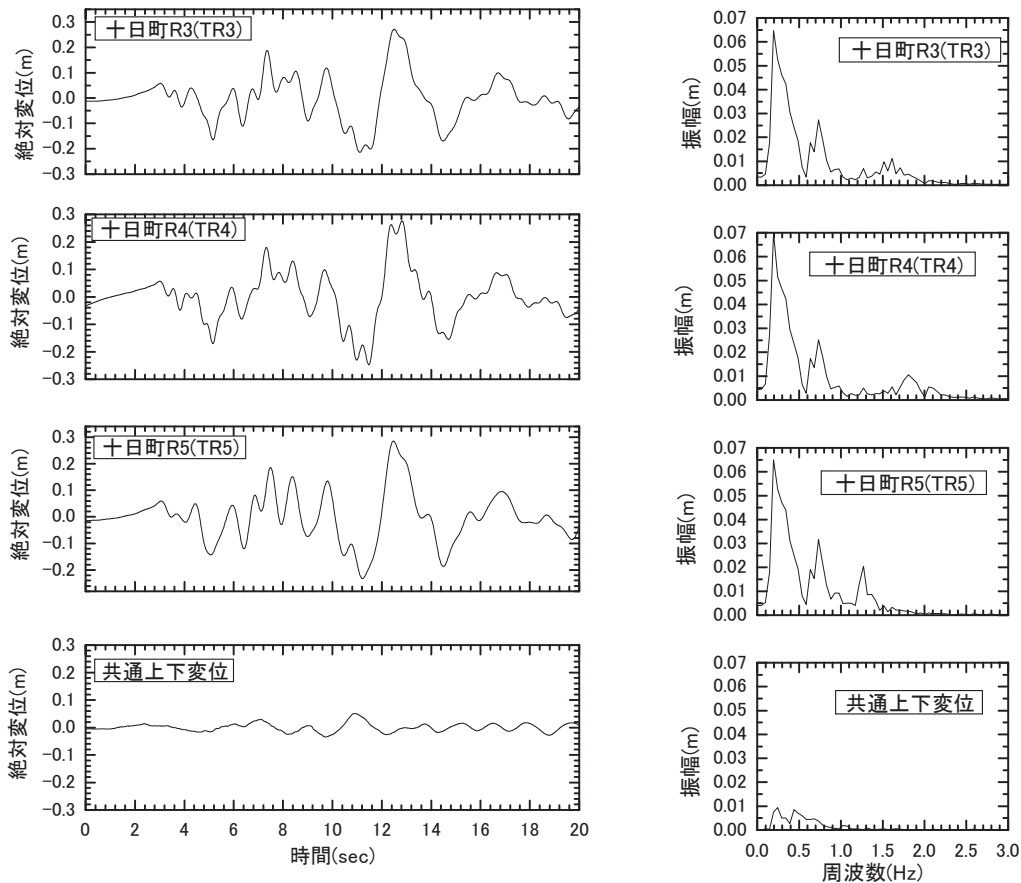
入力地震波について、図 7.7 に推定地震波による十日町 BL R3~R5 の各構造物上軌道面の絶対変位波形とそのフーリエスペクトルを示す。なお、これらの構造物の位置関係は図 4.1 に示されている。図 7.7 中の水平変位の正は東方向、上下変位の正は上方向を示す。シミュレーション上の走行条件について、車両は構造物上のスラブ軌道、直線区間を走行速度 204km/h で真北に向かって走行しているとき、地震が発生したものとする。つまり、シミュレーシ

ョン上の座標系と地震動の関係としては、進行方向が北で、レール直角方向（左右方向）の西（左）を正とする。

(2) 連続した構造物通過時の振動変位

連続した構造物を通過する車両に入力される振動変位については、第 3 章の連続した構造物の動的応答解析で得られた振動波形を各軸毎の軌道面に入力する。

なお、後述するシミュレーション解析結果の解説では、軸位置、車輪部位を図 7.8 に表すように、進行方向の先頭から第 4,3,2,1 軸と呼び、進行方向に向かって左側車輪、右側車輪と呼ぶこととする。



(a) 時系列波形

(b) フーリエ振幅スペクトル

図 7.7 地震波による各構造物上軌道面の絶対変位波形

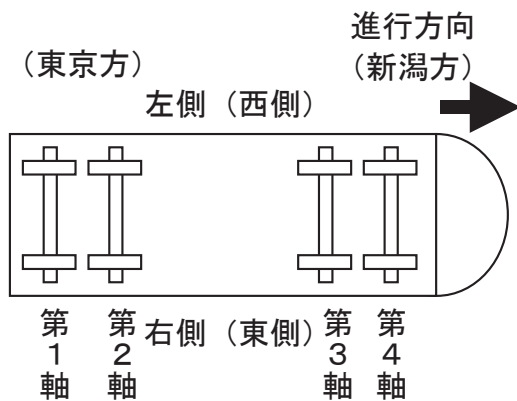


図 7.8 軸部位呼称

7.6 構造物毎の車両挙動

図 7.7 に示した各構造物毎の応答波で振動する軌道上を 200 系新幹線車両が走行した場合のシミュレーションで得られた車輪上昇量の結果を表 7.2 にまとめた。この結果、いずれの構造物上においても推定した地震動によって車両は脱線に至ることが分かった。なお、ここでは車輪とレール相対左右変位が 70mm 以上となる場合を脱線と判断した。これら構造物毎の車両挙動シミュレーションでは十日町 BLR3, R5 については 200 系 M'モデルを、十日町 BLR4 については 200 系 M'c モデルを用い、走行速度は 204km/h 一定として、一車両 4 輪軸下に同位相の地震波を入力している。

推定地震波によるシミュレーション結果の波形例として、十日町 BL R3,R4,R5 上構造物天端の応答波を入力した場合の 200 系車両の走行シミュレーション結果を図 7.9～図 7.11 に示す。ここでは進行方向を向いて左方向が正、上方向が正の右手系の座標系上で記述している。図 7.9～図 7.11 の (a) は一車両における全車輪の車輪／レール相対左右変位、車輪上昇量、(b) は最初に脱線した軸位 (第 i 軸) の輪重及び横圧、車輪／レール相対左右変位、車輪上昇量、車体と台車の各左右変位とロール変位、輪軸のヨー変位、左右方向の加振変位を示した。

図 7.9～図 7.11 に示した結果から、脱線あるいは車輪上昇量最大値を記録した付近の時刻を抜粋したものを図 7.12～図 7.14 に、またそれぞれの車両の姿勢を図 7.15～図 7.17 に示す。

(1) 十日町 BL R3

図 7.9 および図 7.12 に示した十日町 BL R3 上での脱線時の車両挙動は以下のとおりであった。時刻 6.6 秒付近で軌道が左から右へ変位する間に第 3 軸は左側車輪のフランジ接触から右側車輪のフランジ接触へと変化した、6.5 秒手前から左車輪では

100kN を超える輪重が発生し、200kN を超える左輪重最大値が発生するとともに、右車輪が上昇を開始し、6.7 秒付近で右車輪が 30mm 程度まで上昇した。6.75 秒付近で右車輪は若干下がるものの、車輪が高く上昇した状態の間に地震の左右変位が反転して軌道が左方向へ変位したため右車輪フランジ先端部分でレールに接触し、そのまま右車輪フランジがレールに乗り上がり第 3 軸は右方向へ脱線した。この脱線に至る付近で車体は概ね下心ロール振動を起こしている。

(2) 十日町 BL R4

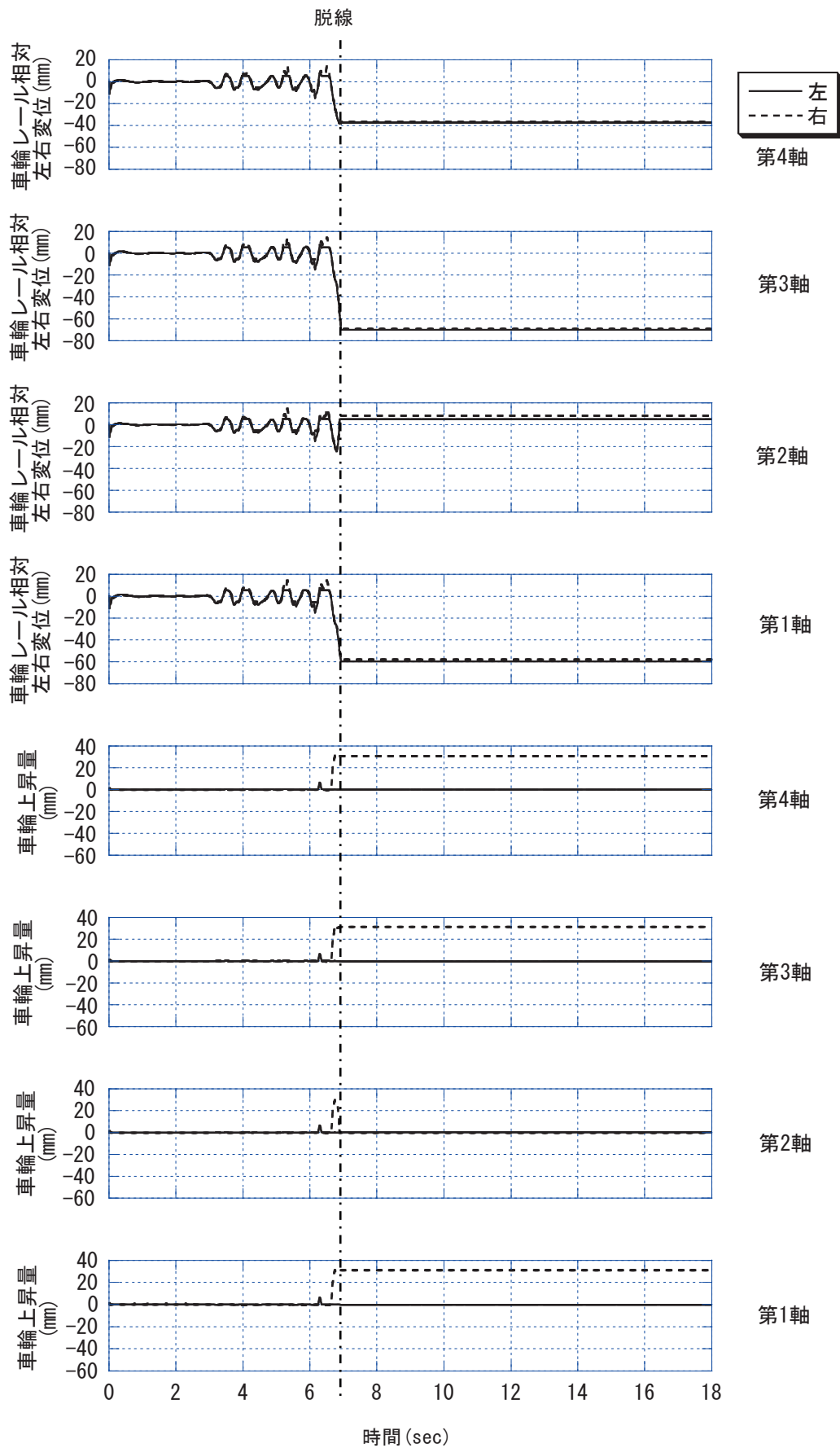
図 7.10 および図 7.13 に示した十日町 BL R4 上での脱線時の車両挙動は以下のとおりであった。時刻 7.4 秒付近で軌道が右から左へ変位する間に第 3 軸右車輪で 250kN 程度に達する大きな横圧が発生し、左車輪が 40mm を超えて上昇した。軌道が左向き変位で極大となる 7.6 秒付近までの間、左車輪はレールから浮いており、軌道が反転し右方向へ向かったとき左車輪フランジ先端近くでレールに乗り、さらに軌道は右方向へ変位したため第 3 軸は左方向へ脱線した。この脱線に至る付近で車体は概ね下心ロール振動を起こしている。

(3) 十日町 BL R5

図 7.11 および図 7.14 に示した十日町 BL R5 上での脱線時の車両挙動は以下のとおりであった。時刻 6.7 秒手前で軌道が右方向へ変位している間に、第 3 軸右車輪が上昇した。右車輪が上昇する間には、6.6 秒付近から左車輪で 150kN を超える大きな輪重が発生している。250kN 程度の左輪重最大値の発生と共に、右車輪が上昇を開始した。車輪上昇量最大値 37mm 程度に達した頃に軌道が反転し、右車輪は下降中にフランジでレール上に乗り、第 3 軸は右方向へ脱線した。この脱線に至る付近で車体は概ね下心ロール振動を起こしている。

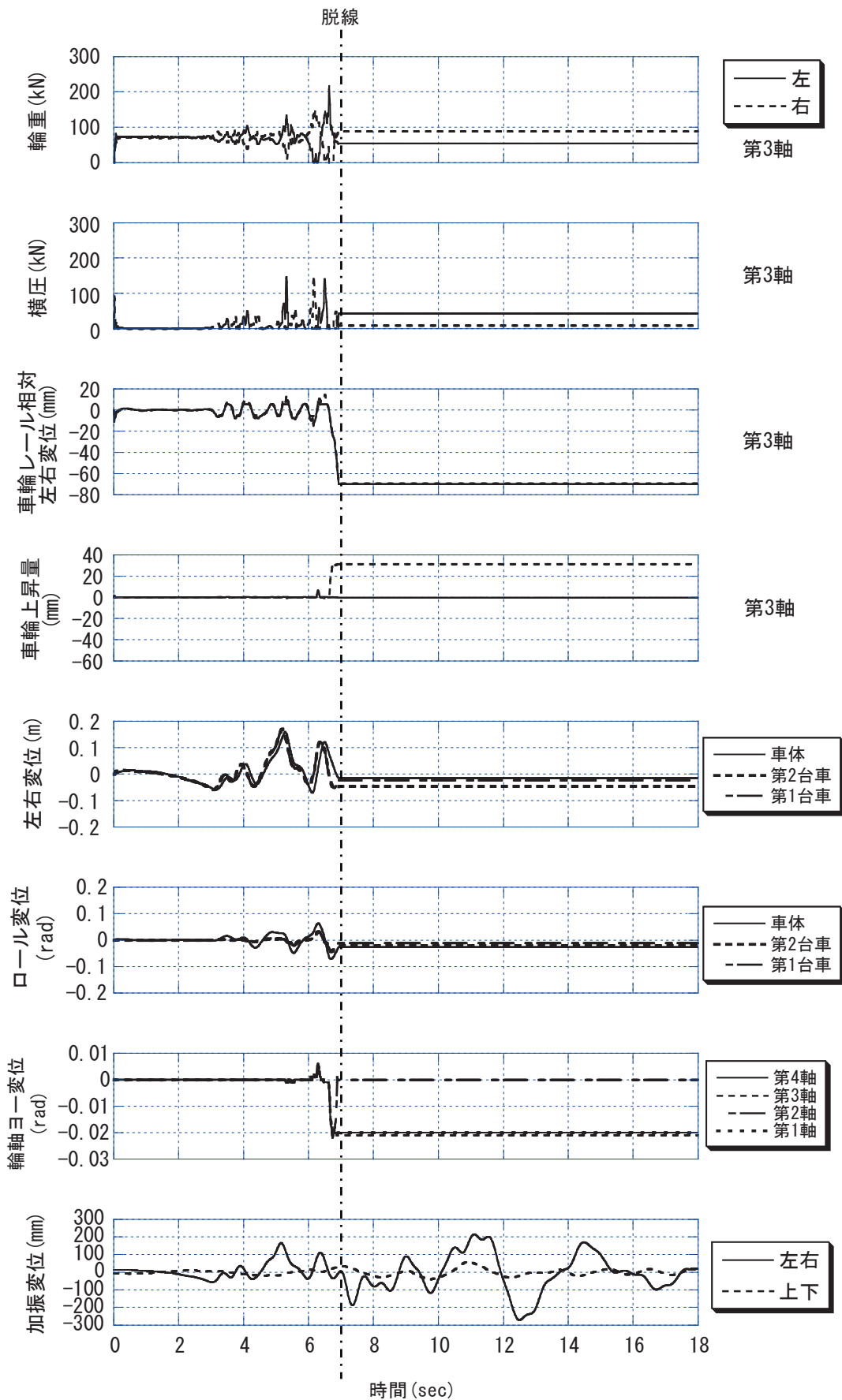
表 7.2 シミュレーション結果

構造物	状況	方向	時刻(sec)
十日町 BLR3(TR3)	脱線	右	約 6.9
十日町 BLR4(TR4)	脱線	左	約 7.7
十日町 BLR5(TR5)	脱線	右	約 7.0



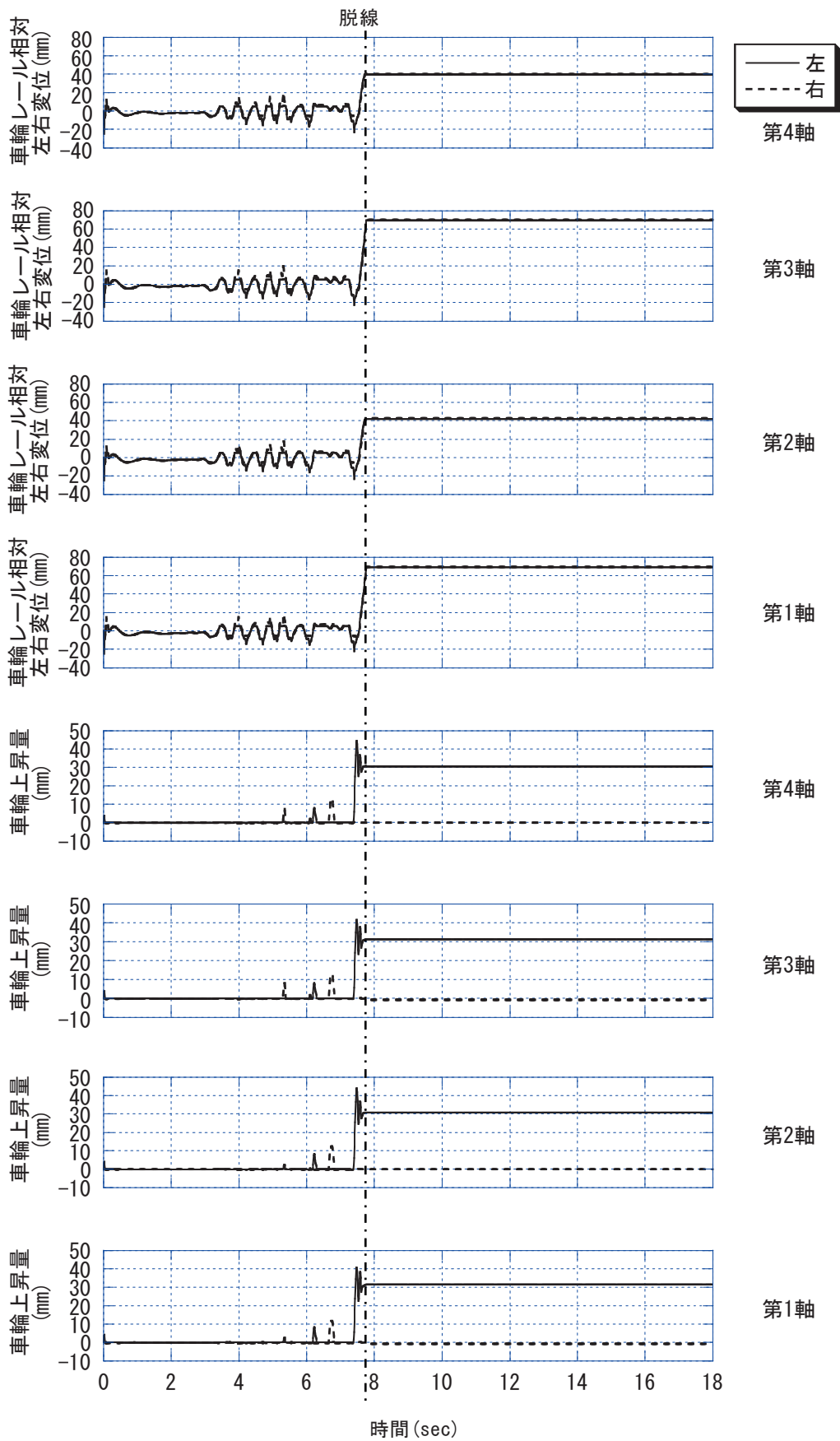
(a) 車輪／レール相対左右変位と車輪上昇量

図 7.9 脱線時の時系列波形 200系M' 空車, 推定地震波 十日町 BL R3



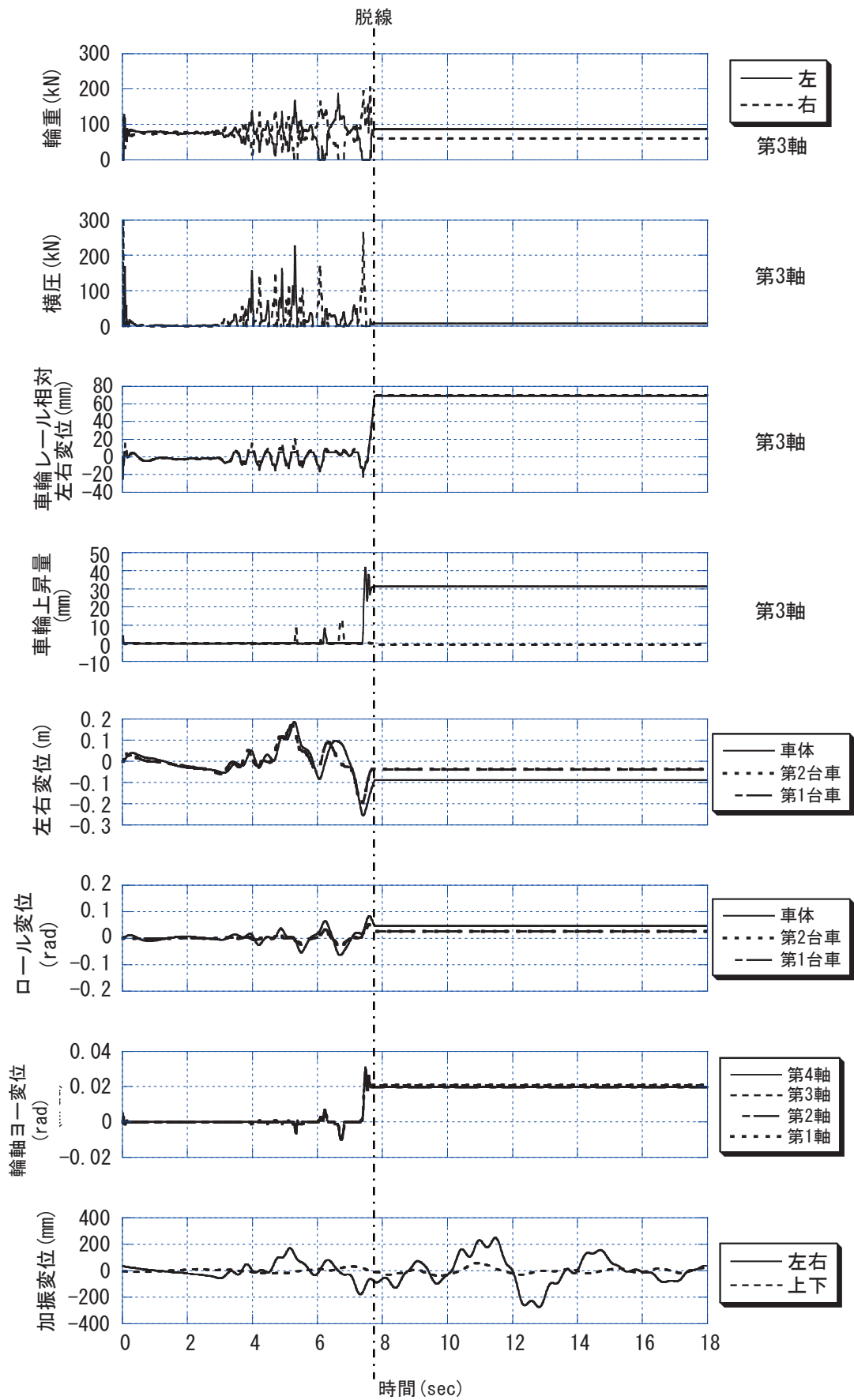
(b) 脱線した軸の輪重・横圧，車輪／レール相対左右変位，車輪上昇量，車体と台車の左右変位とロール変位，輪軸ヨ一変位，加振変位

図 7.9 シミュレーション結果の時系列波形 200系M' 空車，推定地震波 十日町 BL R3



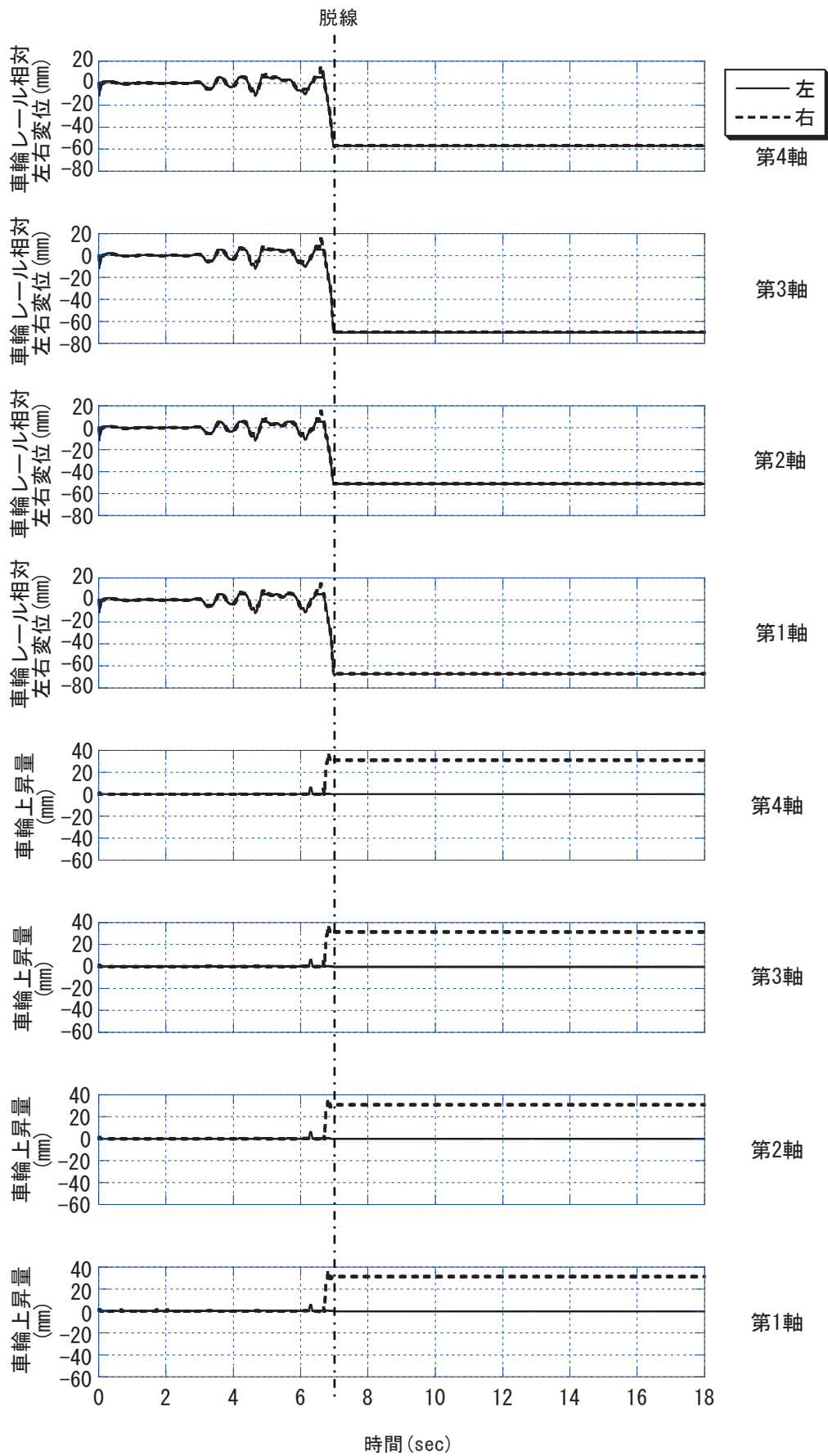
(a) 車輪／レール相対左右変位と車輪上昇量

図 7.10 シミュレーション結果の時系列波形 200 系 Mc' 空車, 推定地震波 十日町 BL R4



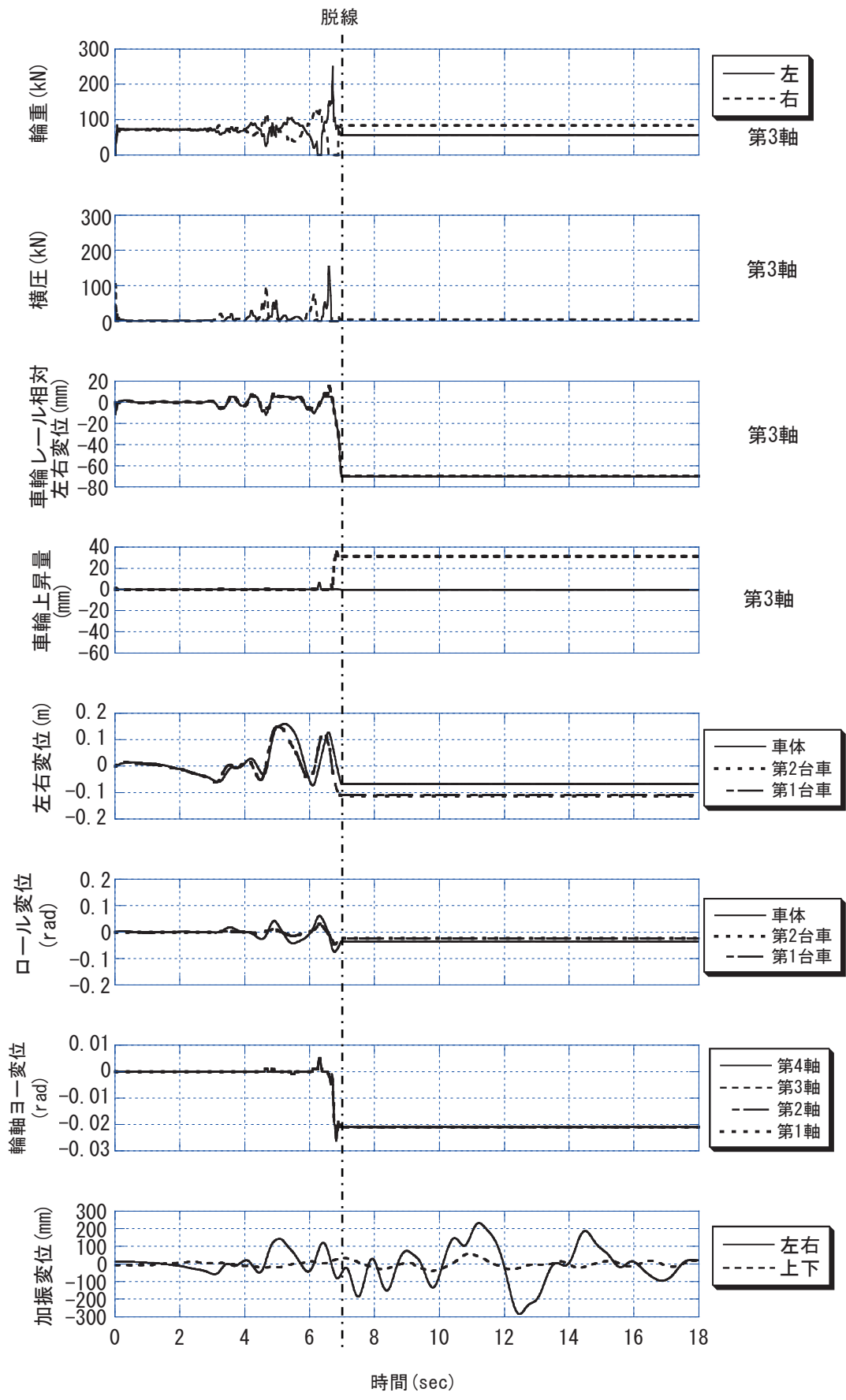
(b) 脱線した軸の輪重・横圧，車輪／レール相対左右変位，車輪上昇量，車体と台車の左右変位とロール変位，輪軸ヨ一変位，加振変位

図 7.10 シミュレーション結果の時系列波形 200系 Mc' 空車，推定地震波 十日町 BL R4



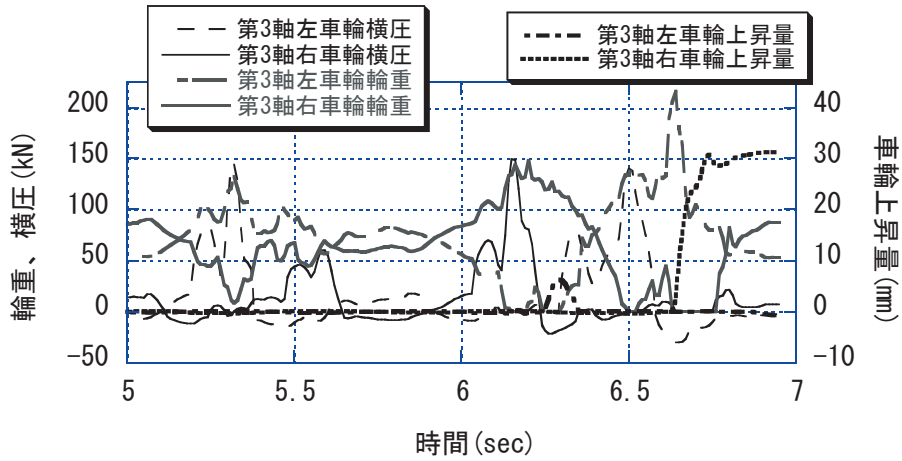
(a) 車輪／レール相対左右変位と車輪上昇量

図 7.11 シミュレーション結果の時系列波形 200系M' 空車, 推定地震波 十日町BL R5

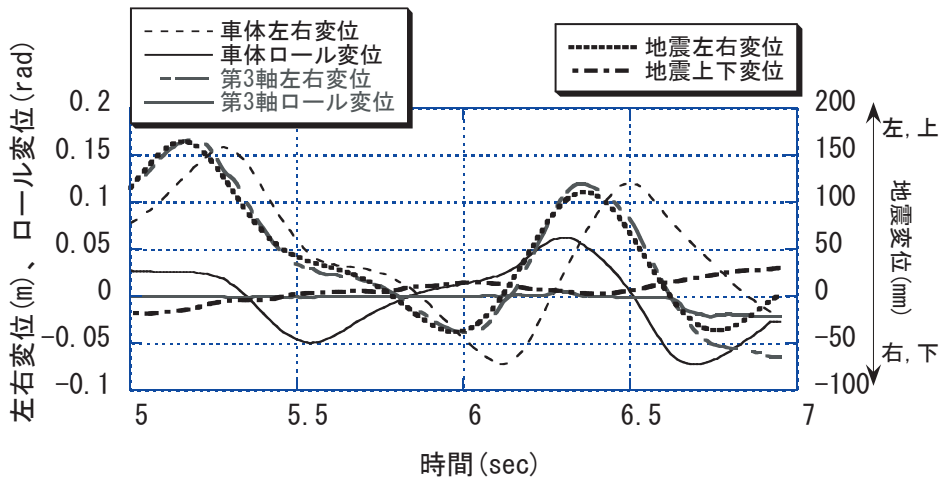


(b) 脱線した軸の輪重・横圧，車輪／レール相対左右変位，車輪上昇量，車体と台車の左右変位とロール変位，輪軸ヨ一変位，加振変位

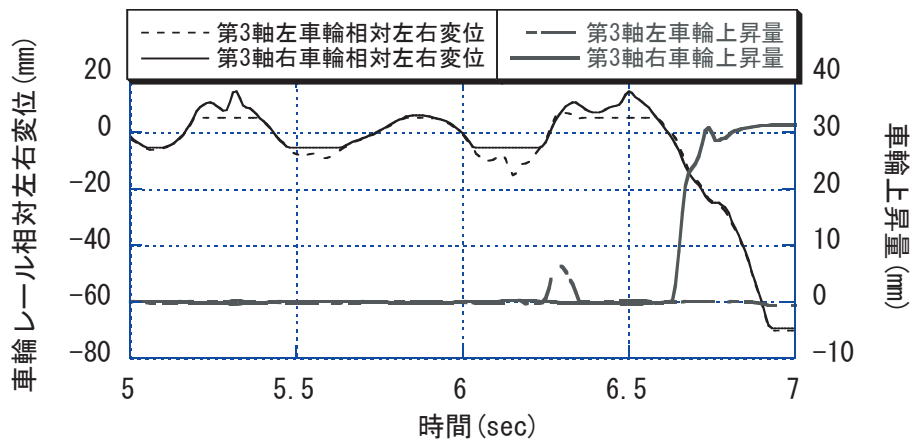
図 7.11 シミュレーション結果の時系列波形 200系M' 空車，推定地震波 十日町 BL R5



(a) 第3軸左右車輪の輪重・横圧と車輪上昇量

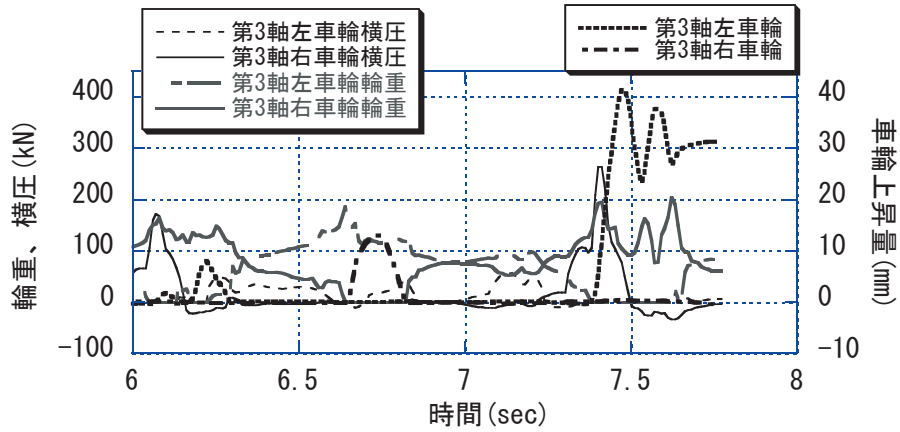


(b) 車体と第3軸の左右変位とロール変位、地震変位

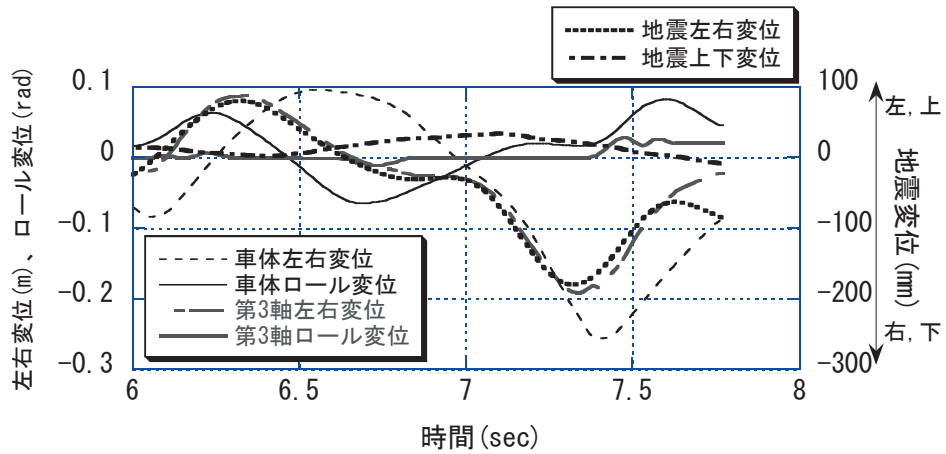


(c) 第3軸左右車輪の車輪／レール相对左右変位と車輪上昇量

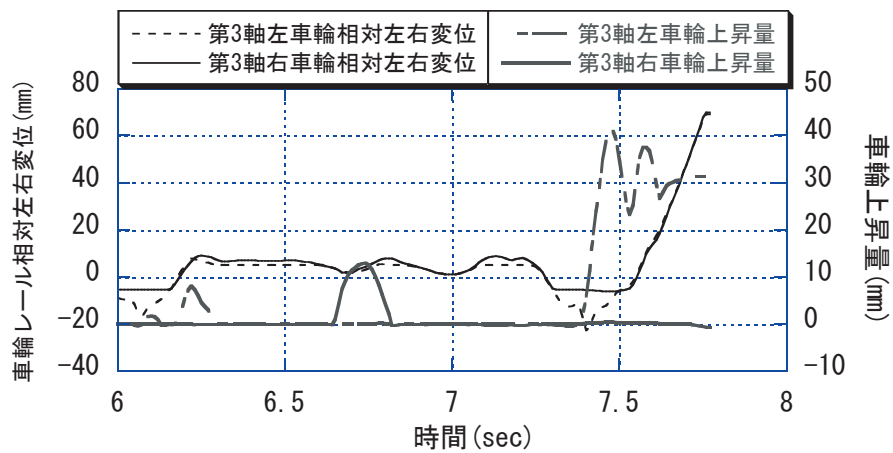
図 7.12 シミュレーション結果時系列 5～7 秒の拡大(推定地震波 十日町 BL R3)



(a) 第3軸左右車輪の輪重・横圧と車輪上昇量

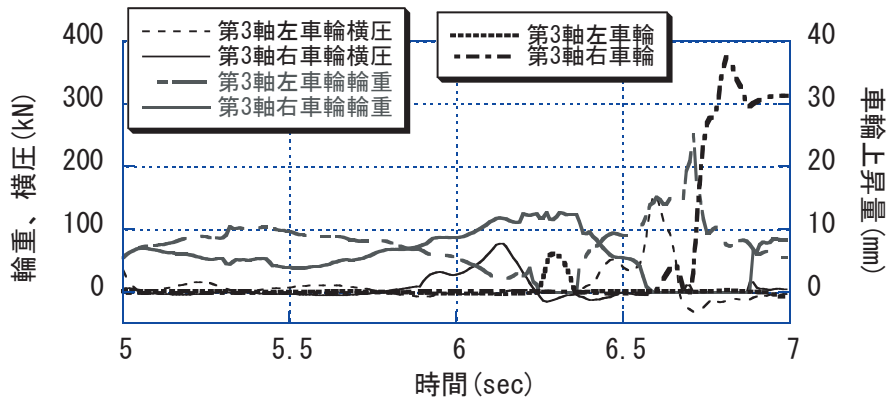


(b) 車体と第3軸の左右変位とロール変位、地震変位

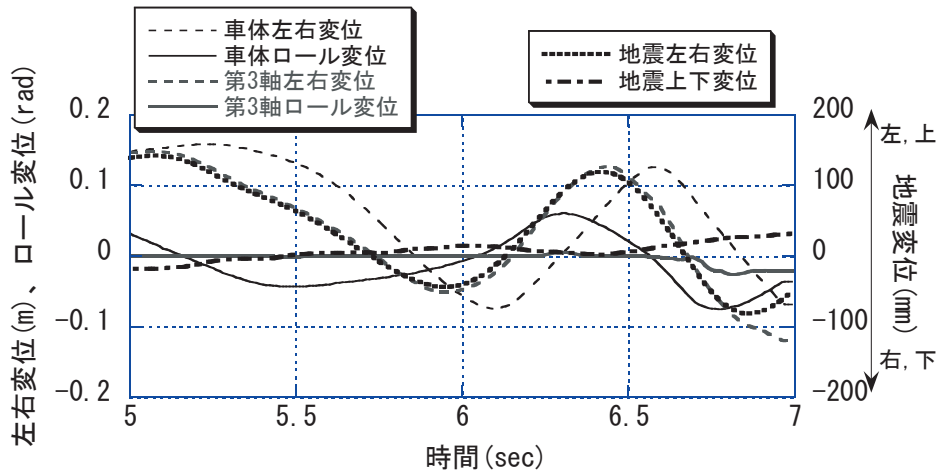


(c) 第3軸左右車輪の車輪／レール相対左右変位と車輪上昇量

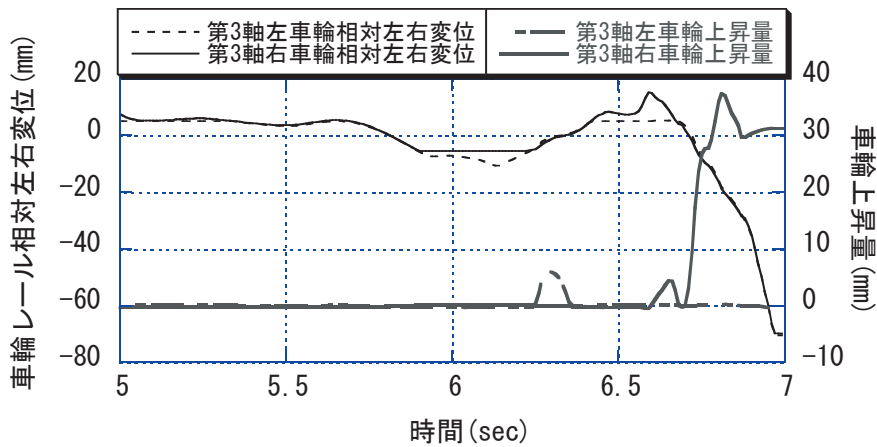
図 7.13 シミュレーション結果時系列 6～8 秒の拡大(推定地震波 十日町 BL R4)



(a) 第3軸左右車輪の輪重・横圧と車輪上昇量



(b) 車体と第3軸の左右変位とロール変位、地震変位



(c) 第3軸左右車輪の車輪／レール相对左右変位と車輪上昇量

図 7.14 シミュレーション結果時系列 5～7 秒の拡大(推定地震波 十日町 BL R5)

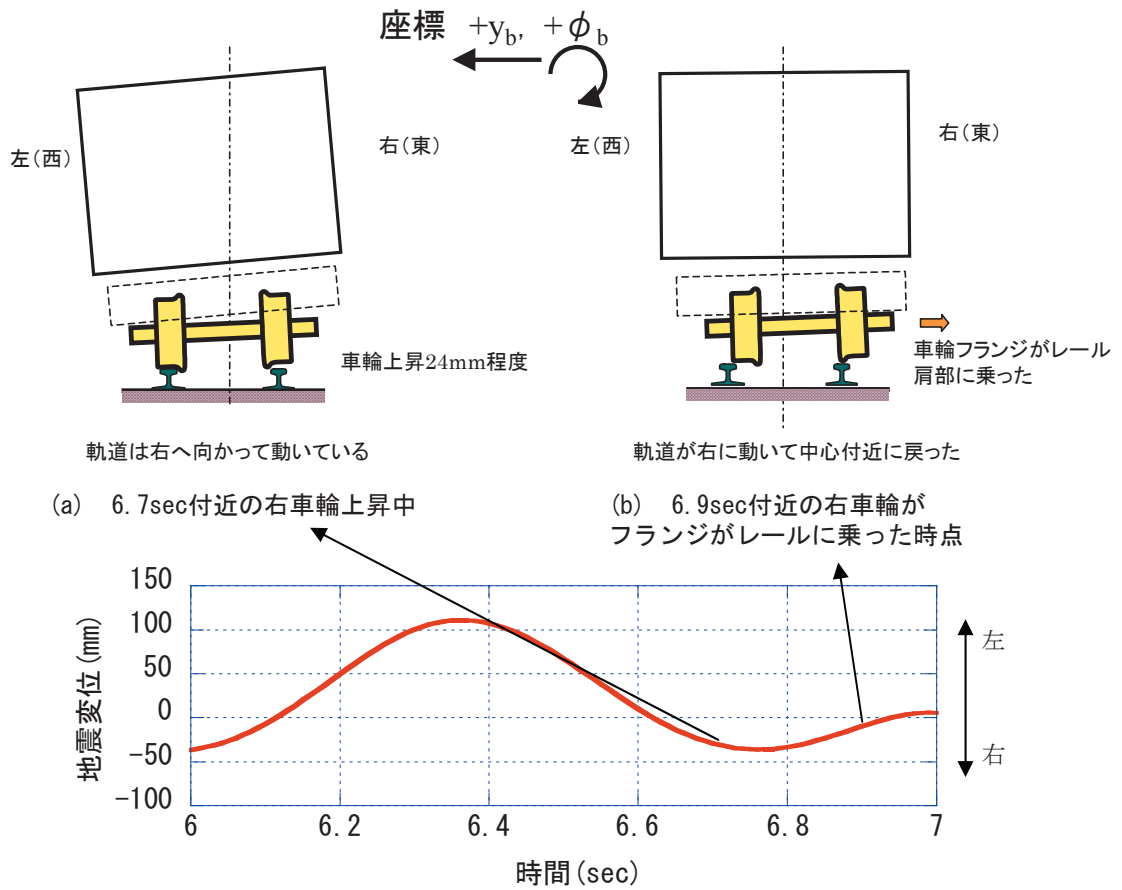


図 7.15 シミュレーション結果における車両の姿勢(推定地震波 十日町 BL R3)

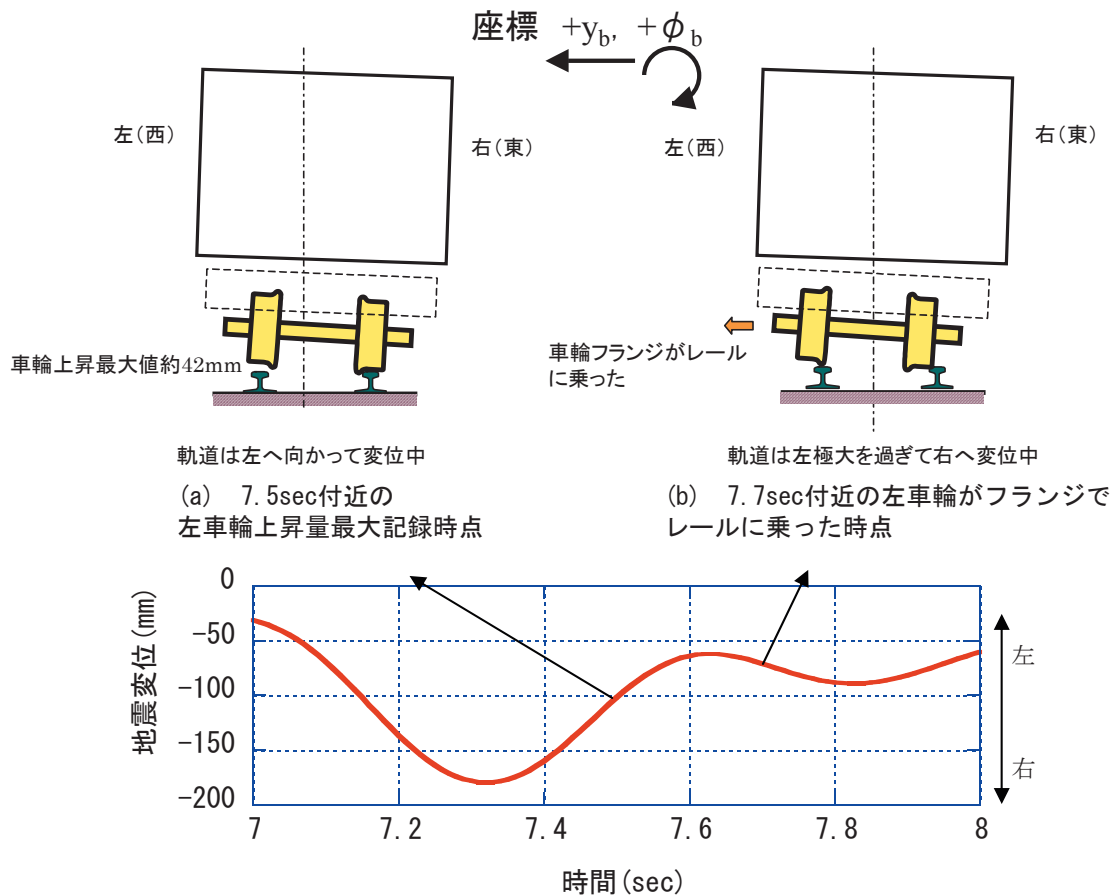


図 7.16 シミュレーション結果における車両の姿勢(推定地震波 十日町 BL R4)

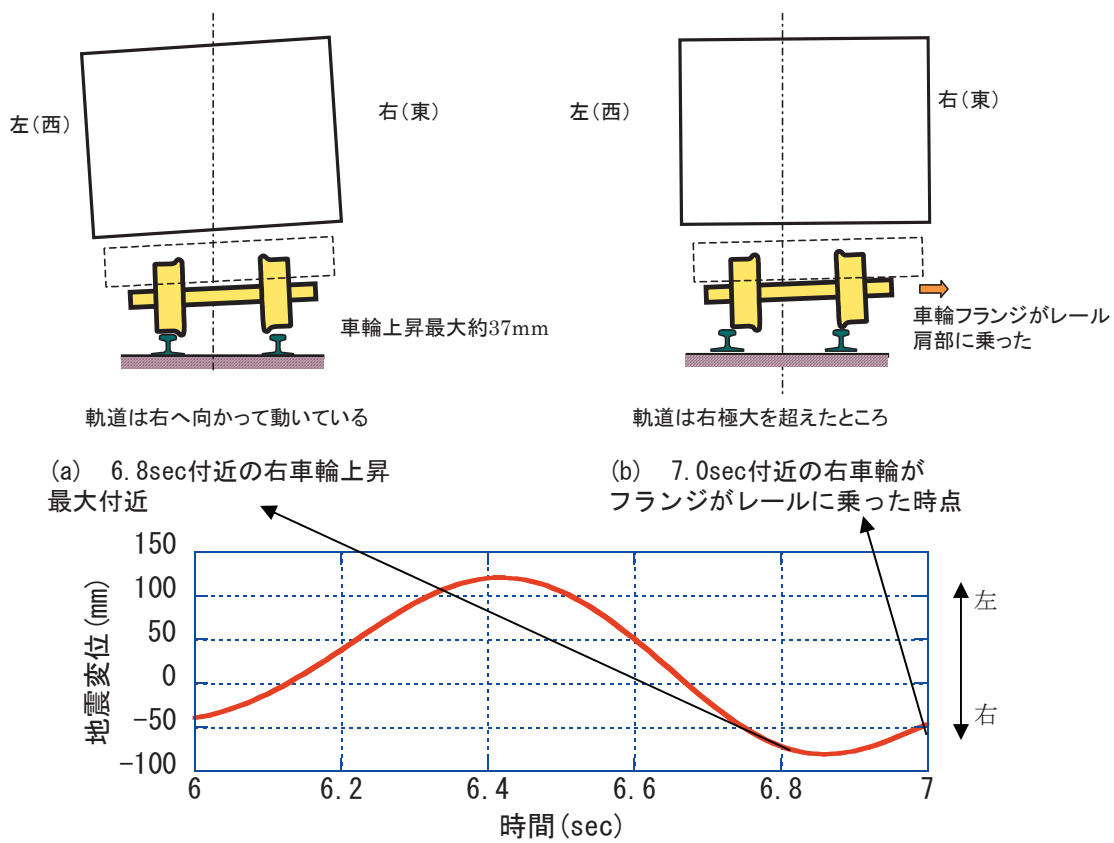


図 7.17 シミュレーション結果における車両の姿勢 (推定地震波 十日町 BL R5)

7.7 連続した構造物上の車両挙動

脱線箇所付近の構造物の動的角折れを考慮したシミュレーションを実行する場合、各構造物上と車両の位置関係にはさまざまな組合せが考えられる。そこで入力地震波の時刻ゼロにおける車両の位置（シミュレーションの開始時刻に先頭軸（第4軸）があるキロ程）をずらしながら、シミュレーション解析を繰り返し行った。図7.18に推定地震波による脱線箇所付近の構造物の動的角折れシミュレーション結果を示す。図7.18には横軸に時刻ゼロにおける車両の位置を、縦軸にはシミュレーション結果を脱線（×印）もしくは車輪上昇量最大値（黒丸印）が発生した位置（イベント記録位置）として示した。この図7.18から、入力した推定地震波の時刻ゼロのときに、車両の第4軸がキロ程約205k786m～826mもしくは205k646mにあったタイミングで走行している場合に、十日町BL R3からR6の間で脱線することが推測されることが分かる。このように動的角折れを考慮し連続する構造物上を走行する車両の挙動を解析することにより、実際の脱線地点周辺でシミュレーションでも脱線することが示された。

これらシミュレーション結果の中から、時刻ゼロに205k801mに車両があったときに206k228m（十

日町BL R4上）で脱線した場合のシミュレーション波形を図7.19に示す。図7.19の(a)は一車両における全車輪の車輪／レール相対左右変位、車輪上昇量、(b)は最初に脱線した第1軸の輪重及び横圧、車輪／レール相対左右変位、車輪上昇量、車体と台車の各左右変位とロール変位、輪軸のヨー変位、左右方向の加振変位を示した。図7.19の結果の脱線を記録した付近の時刻6～7.7sec付近の抜粋を図7.20に、車両姿勢を図7.21に示す。なお、これらの動的角折れを考慮したシミュレーションでは200系M'モデルを用い、走行速度は204km/h一定として、各輪軸下に独立した地震波を入力している。ここでは進行方向を向いて左方向が正、上方向が正の右手系の座標系上で記述している。

図7.19および図7.20より、車両は時刻7.3秒付近で軌道が右極大を過ぎて左方向へ変位しはじめた頃に、第1軸右車輪で100kNを超える横圧が発生し、横圧最大値が290kN程度まで発生したとき左車輪が上昇開始したことが分かる。左車輪は7.4秒付近で最大値35mm弱まで上昇し、下降する途中で、軌道が左方向の極大になり右に反転したところで左車輪がフランジでレールと接触し、車輪は再度小さく飛び上がって、フランジがレール上に乗った。軌道は右方向へ変位したため、第1軸は左方向へ脱線した。

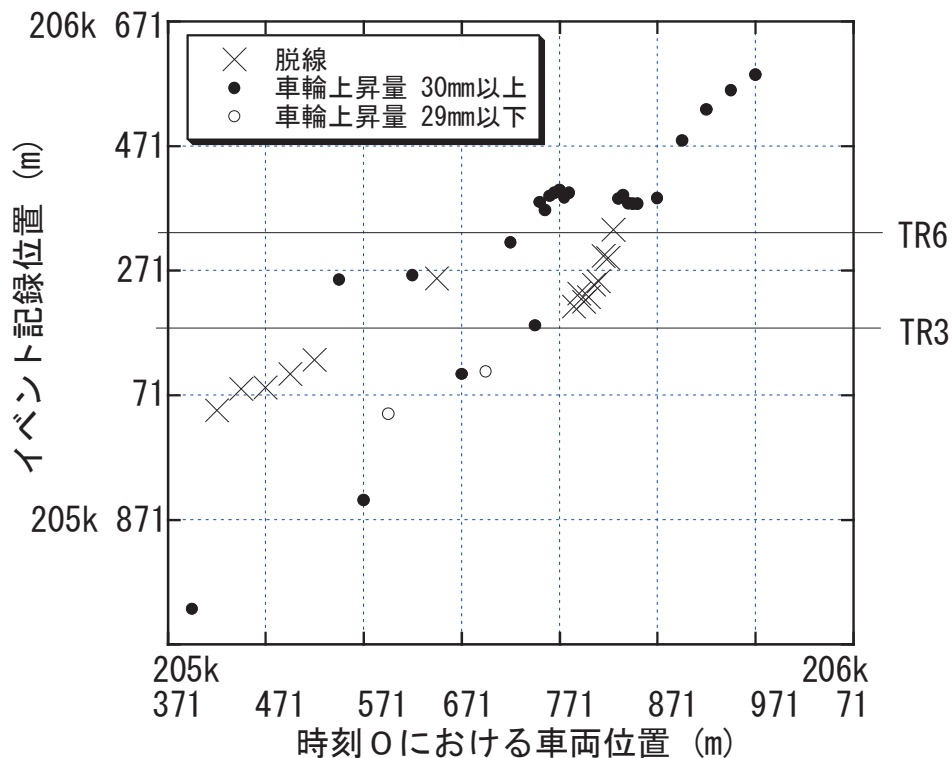
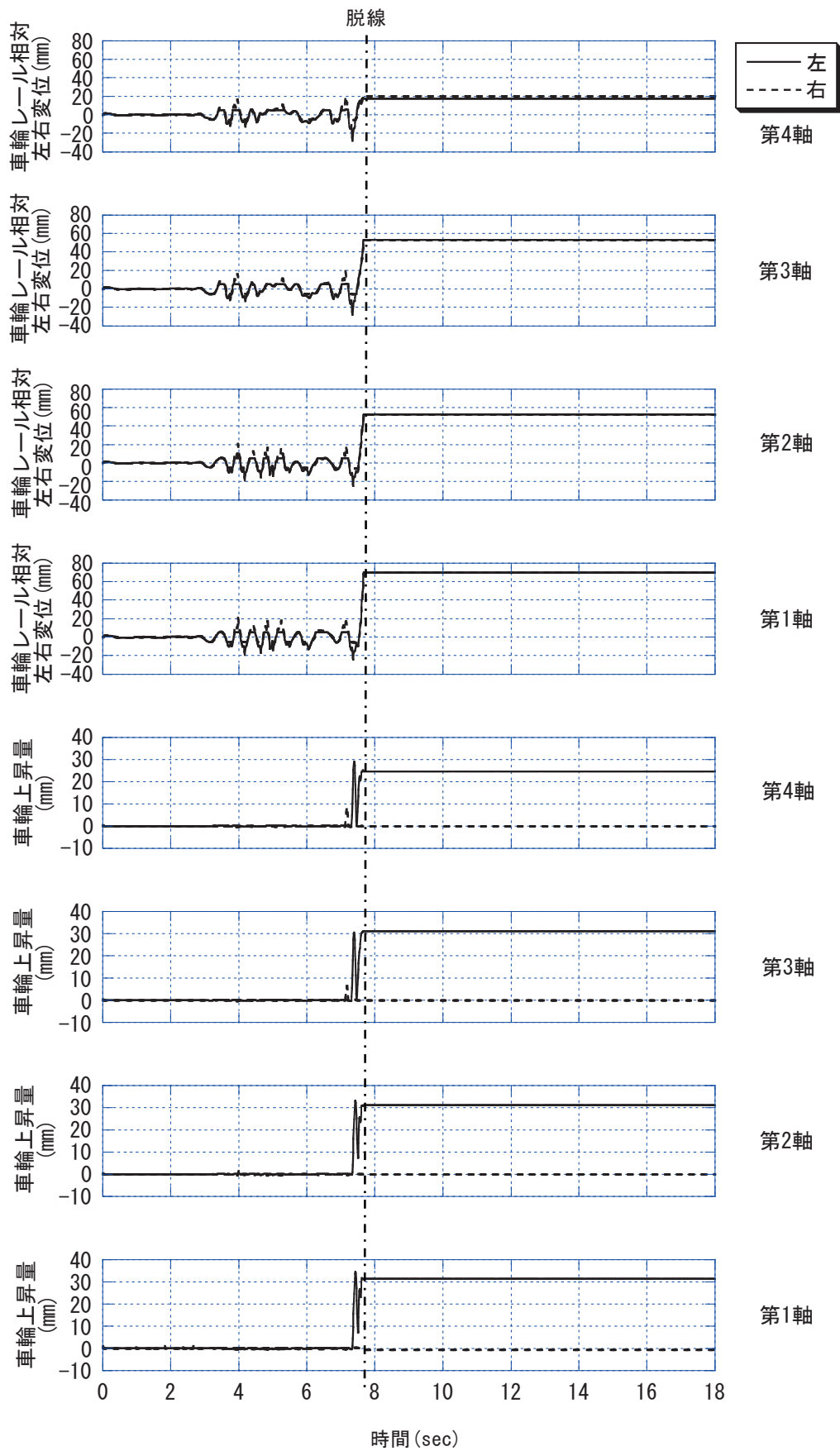
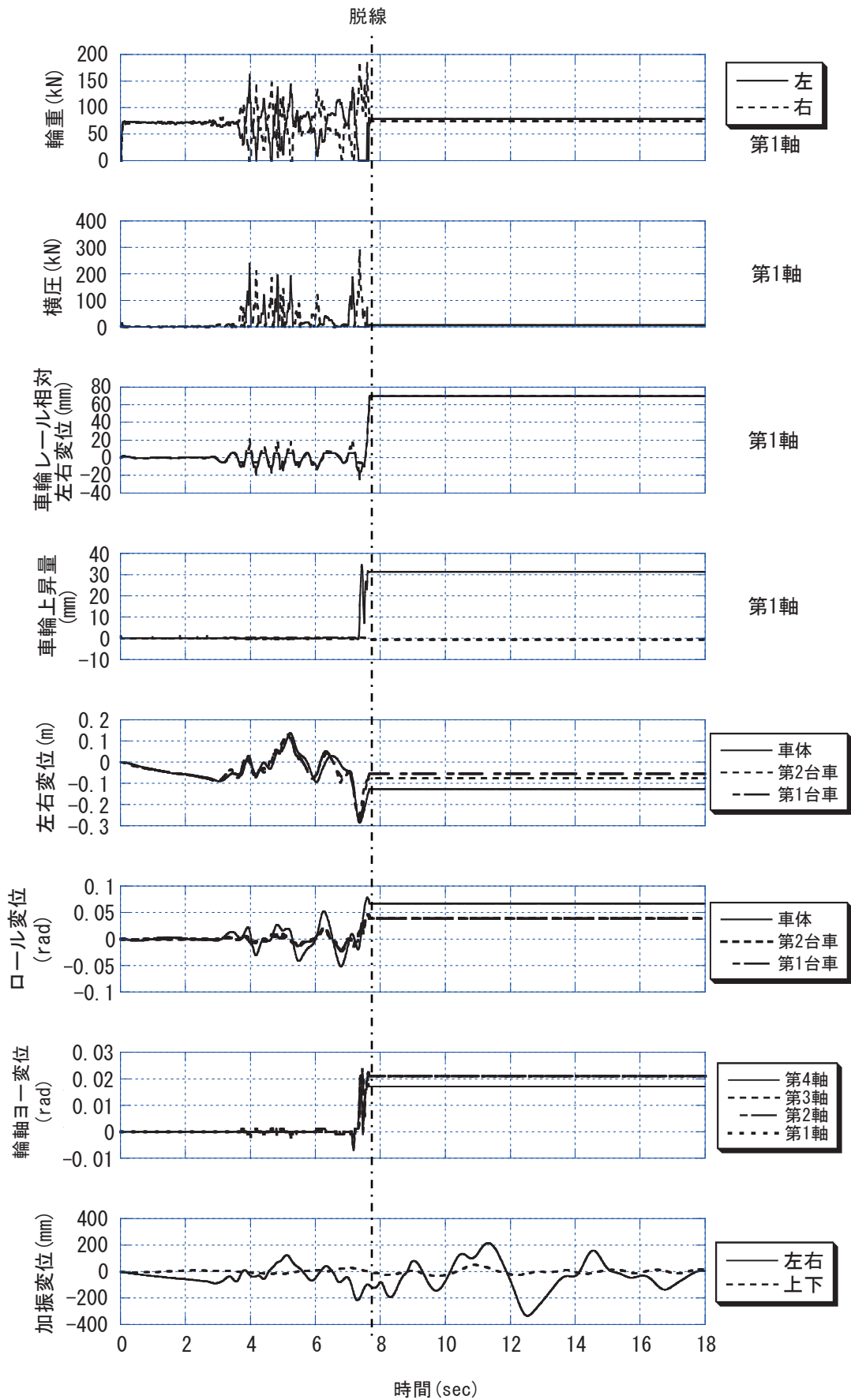


図7.18 角折れを考慮したシミュレーション結果
(時刻ゼロにおける車両第4軸の位置とイベントが記録された位置)



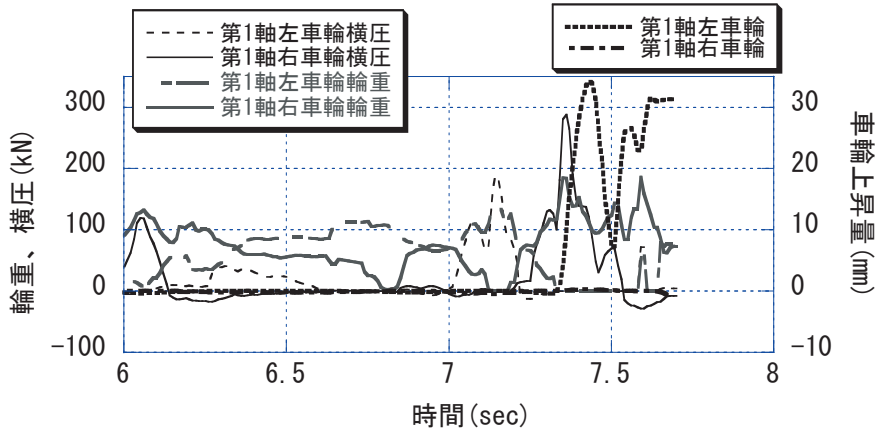
(a) 車輪／レール相対左右変位と車輪上昇量

図 7.19 シミュレーション結果の時系列波形 200系M'空車，推定地震波動的角折れ走行，時刻ゼロにおける車両位置 205k801m

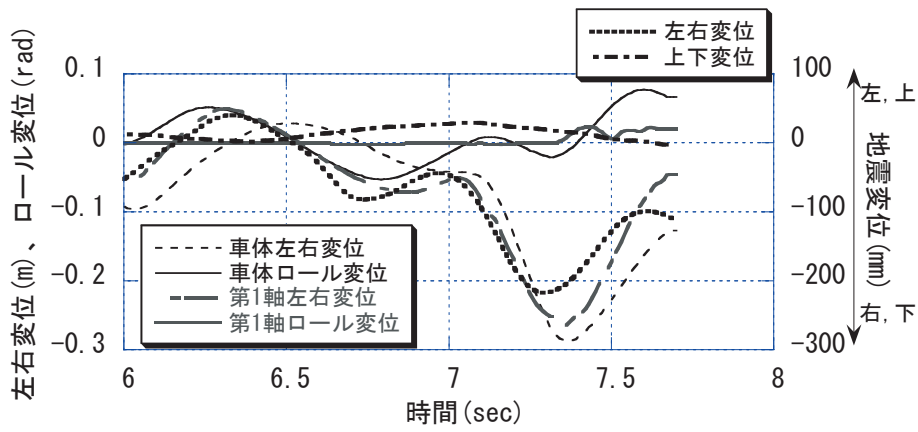


(b) 脱線した軸の輪重・横圧，車輪／レール相対左右変位，車輪上昇量，車体と台車の左右変位とロール変位，輪軸ヨー変位，加振変位

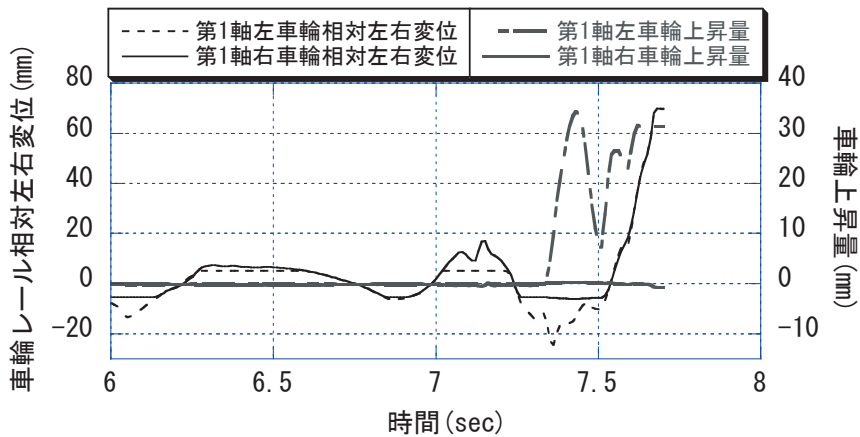
図 7.19 シミュレーション結果の時系列波形 200系 M' 空車，推定地震波動的角折れ走行，時刻ゼロにおける車両位置 205k801m



(a) 第1軸左右車輪の輪重・横圧と車輪上昇量



(b) 車体と第1軸の左右変位とロール変位、地震変位



(c) 第1軸左右車輪の車輪／レール相対左右変位と車輪上昇量

図 7.20 シミュレーション結果時系列 6~8 秒の拡大
推定地震波 動的角折れ走行, 時刻ゼロにおける車両位置 205k801m

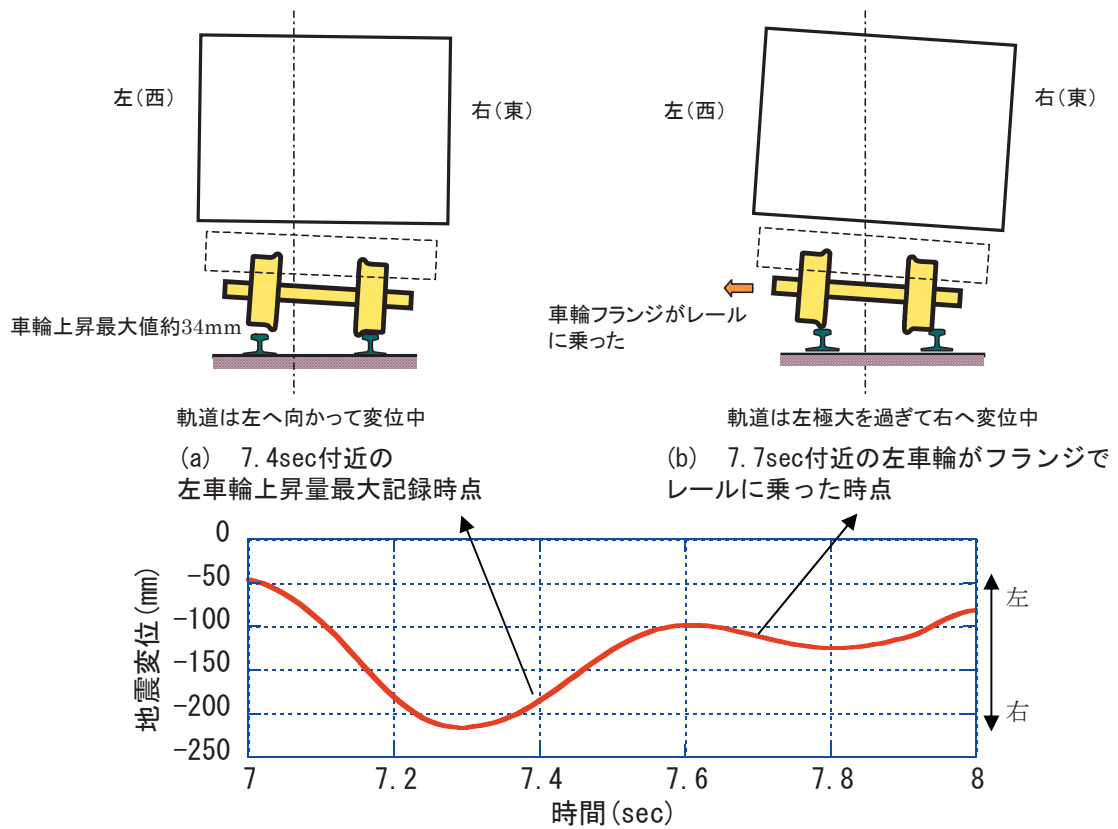


図 7.21 シミュレーション結果における車両の姿勢
(推定地震波 動的角折れ走行, 時刻ゼロにおける車両位置 205k801m)

文献

- 1) 宮本岳史, 田弘明, 尾雅樹: 地震時の鉄道車両の挙動解析, 機論 C, 64-626, 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, 機論 C, 71-706, pp.1849-1855, 2005.