

第6章 脱線車両の車両挙動解析

6.1 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る精度の検証も行われている。

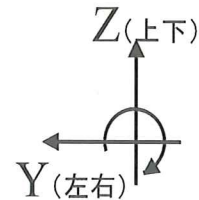
東北地方太平洋沖地震で脱線した試 7932B 列車の E2 系新幹線車両の台車はボルスタレス台車である。VDS を用いて、E2 系新幹線車両をモデル化し、東北地方太平洋沖地震による脱線地点の推定地震動で揺れる構造物上を走行する車両の挙動を解析した。

6.2 車両モデル

E2 系新幹線車両を図 6.1 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。

- (1) 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 個について各 2 自由度とし、合計 58 自由度のモデルとする。
- (2) 一車両モデルとして車体一台車枠間と台車枠一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、左右動ストップ、軸箱上下動ストップ、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。
- (3) 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。
- (4) 車輪は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 6.2 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とした。



車両進行方向(x方向)を見て、
まくらぎ方向の左向きを正 (y方向)、
上下方向を上向きを正 (z方向)

図 6.2 車両運動シミュレーションにおける座標系

6.3 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の方向に弾性支持されているモデルとした。

地震動は各車輪を支えるレール下のスラブ面変位として図 6.3 に示す 2 方向 (左右および上下) に入力する。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

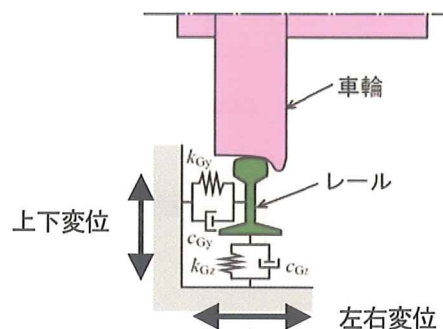
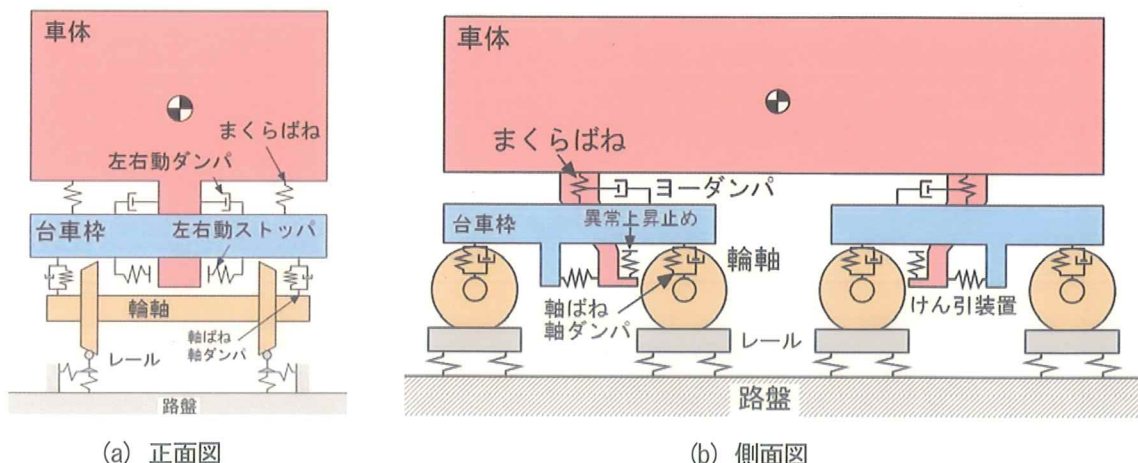


図 6.3 軌道モデルおよび地震動の入力方法



(a) 正面図

(b) 側面図

図 6.1 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

ため省略した。地震動の入力についても上下方向は上向きを正、左右方向は進行左向きを正とした。

6.4 車両条件

解析対象車両は東北地方太平洋沖地震で脱線した試7932B列車のJ69編成4号車である。試運転列車で乗客がないため、空車条件の車両諸元を用いた。なお、車両諸元のうち、空気ばね、左右動ダンパ、左右動ストップについては、地震時に車両が大変位するときの条件に合わせたモデル化および性能データを用いた（付属資料1）。

また、以下に示す項目は脱線状況から判断し別に設定した。

(1) 左右動ストップ遊間

左右動ストップの遊間は30mmとした。

(2) 軸ダンパ減衰特性

地震動を受けた直後に軸ダンパのピストン速度が設計域を超えて、エア混入等により減衰力低下したものと想定し、設計値の0.8倍の減衰力とした。

(3) 車輪／レール間摩擦係数

脱線時には通常走行では接触していない面で車輪・レールが接触したものと考えられること、当日の気象状況（曇り／小雨）を考慮し車輪・レール間摩擦係数0.2とした。

(4) 走行速度

脱線時の推定走行速度である14km/hとした。

6.5 軌道条件

脱線地点の線形より半径4000m、カント10mmの進行方向に向かって左曲線とし、軌道不整は無いものとした。

6.6 脱線判定

本シミュレーションでは、いずれかの車輪のレールに対する相対左右変位が $\pm 70\text{mm}$ に達した時点で脱線と判定し（図6.4）、その時点でシミュレーション解析も終了する。

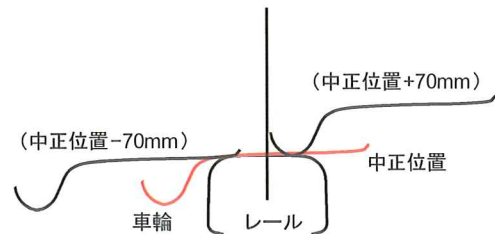


図6.4 脱線判定基準
(車輪／レール相対左右変位： $\pm 70\text{mm}$)

6.7 入力地震動

左右振動については、脱線地点における推定地震動による第三小田原 BI (2P) の天端応答波を4輪軸の直下に同時入力した。上下振動については車両の脱線挙動に対する影響度が左右振動に比べて小さいことを考慮し、脱線地点の地表面推定地震動をそのまま4輪軸の直下に同時入力した。入力地震動の時間波形とフーリエスペクトルを図6.5に示す。解析車両は曲線を走行しているが図6.5に示した左右軌道振動が常に軌道直角方向（まくら木方向）に生じているとした。なお、入力地震動の時刻0はおおよそ地震発生当日の14時46分26秒に相当している。

6.8 シミュレーション結果

図6.6に脱線1秒前からの車両の挙動をストロボシヨ

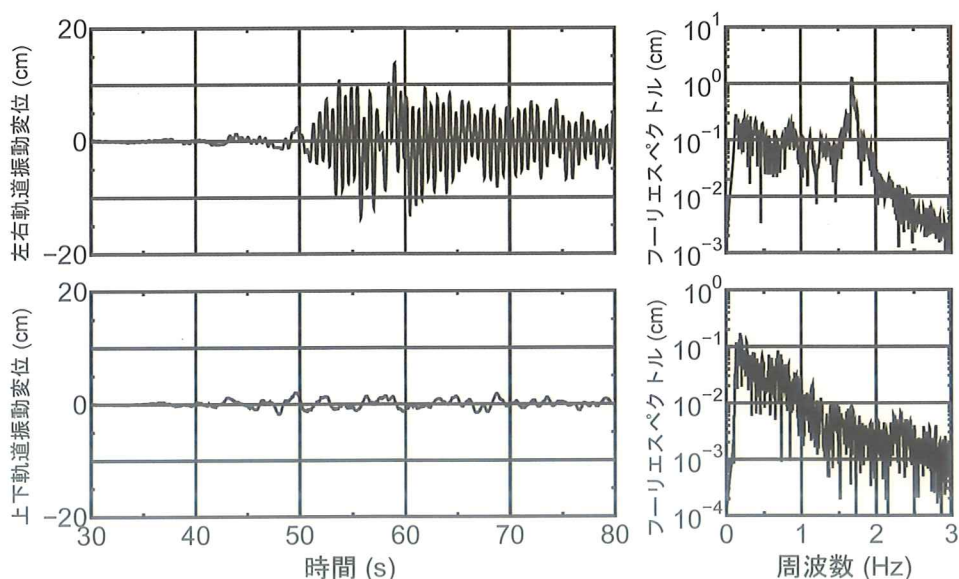


図6.5 車両運動シミュレーションへの入力地震動

ットで示す。図 6.6(a)が脱線 1 秒前から 0.5 秒前、図 6.6(b)が脱線 0.5 秒前から脱線判定時までである。各図中、左側の図は破線で表示している時間の初期位置、太い実線で同じく最終位置を示し、右側のグラフは入力軌道振動変位 (左右方向) を示している。また、進行左側車輪・レール部の拡大図を脱線 0.5 秒前から脱線までについて図 6.6(c)に示す。図 6.6 より、脱線形態は車両が上心ロールで振動しつつ、車輪フランジがレール頭頂面に上がって脱線となっている。シミュレーションで得られた主な時刻歴波形をシミュレーションで得られた主な時刻歴波形を図 6.7～図 6.11 に示す。各図の内容は以下のとおりである。

図 6.7 : 第 1 軸および第 2 軸の車輪上昇量・車輪/レール相対左右変位

図 6.8 : 第 3 軸および第 4 軸の車輪上昇量・車輪/レール相対左右変位

図 6.9 : 第 1 軸および第 2 軸の輪重・横圧

図 6.10 : 車体および前台車の挙動

図 6.11 : 前台車の左右動ストップ作用力および左右動ダンパ作用力・ピストン速度

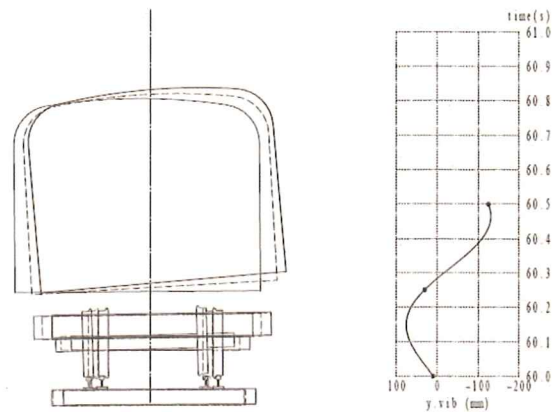
図 6.7 および図 6.8 より、地震波上の時刻約 61 秒で第 1 軸から第 4 軸までの左車輪フランジが左レール頭頂部に乗り、そのまま左車輪は左方向に変位して脱線した。最も早く脱線したのは第 2 軸であるが、この脱線時点での他軸との左右変位差は 20mm 以下であった。つまり、第 2 軸脱線時点では 4 軸いずれも左側車輪フランジがレール頭頂面に乗っていた。本解析結果では 4 軸共に左方向へ脱線したと言える。図 6.9 より、脱線前には 250kN 程度の横圧が発生していたと推定された。また、図 6.10 より、脱線前の車体左右加速度 (重心位置) はおよそ 20m/s^2 であったと推定された。さらに、図 6.11 より、左右動ストップには 250kN 程度の力が作用していたと推定された。

6.9 車両挙動の解説

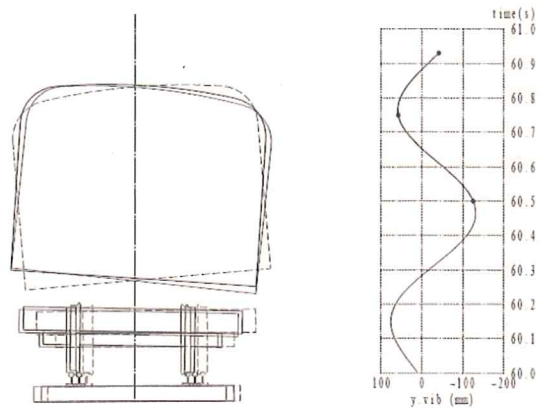
シミュレーション解析による脱線時の車両挙動は図 6.12 に示す状況であった。周波数 1.5～1.7Hz を主成分に持つ地震動を受けて当該車両は、車体の回転中心が車両の上部にあり、車体のロール回転に合わせて輪軸が左右に移動する上心ロールを起こし、左右車輪のフランジが交互にレールへ衝撃した。脱線時には、左車輪のフランジがレール肩部に接触した状態で、図 6.9 に示したように横圧の発生と輪重の減少が重なり、車輪フランジがレール頭頂面に上がって左方向に脱線した。

6.10 脱線車両の車両挙動解析のまとめ

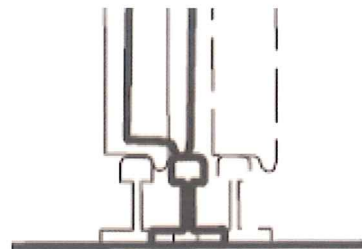
周波数 1.5～1.7Hz を主成分に持つ地震動を受けて試 7932B 列車 (E2 系 J69 編成) の 4 号車は、車体の回転



(a) 1 秒前から 0.5 秒前まで



(b) 0.5 秒前から
脱線まで



(c) 進行左側車輪・レール部拡大 (0.5 秒前～脱線)
図 6.6 脱線 1 秒前からの車両挙動 (第 1 軸上の断面)

中心が車両の上部にあり、車体のロール回転に合わせて輪軸が左右に移動する上心ロールを起こし、左右車輪のフランジが交互にレールへ衝撃した。脱線時には、左車輪のフランジがレール肩部に接触した状態で、横圧の発生と輪重の減少が重なり、車輪フランジがレール頭頂面に上がって左方向に脱線した。本解析結果では 4 軸ともに左方向へ脱線したものとなった。

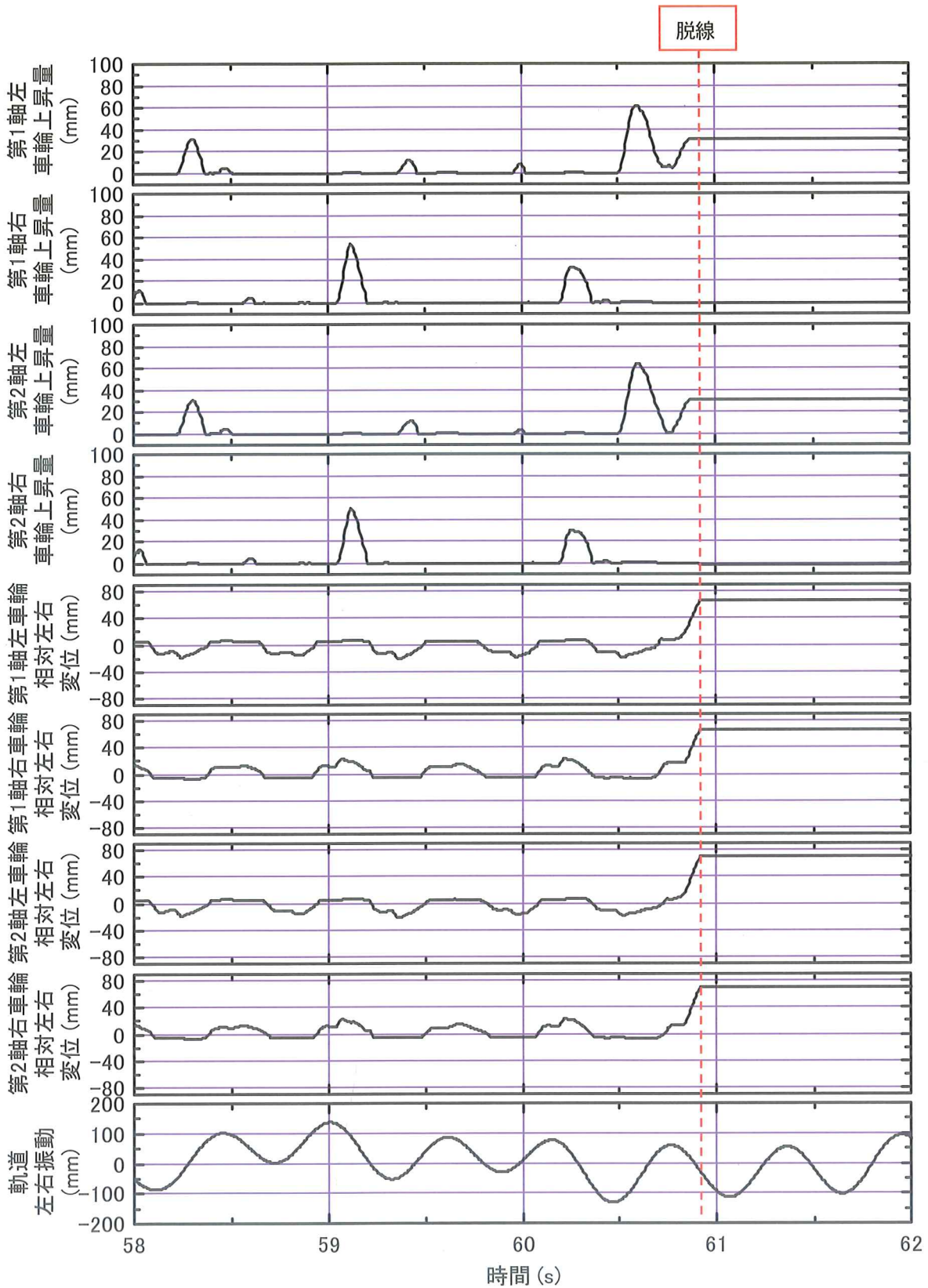


図 6.7 第 1 軸および第 2 軸の車輪上昇量・車輪／レール相对左右変位

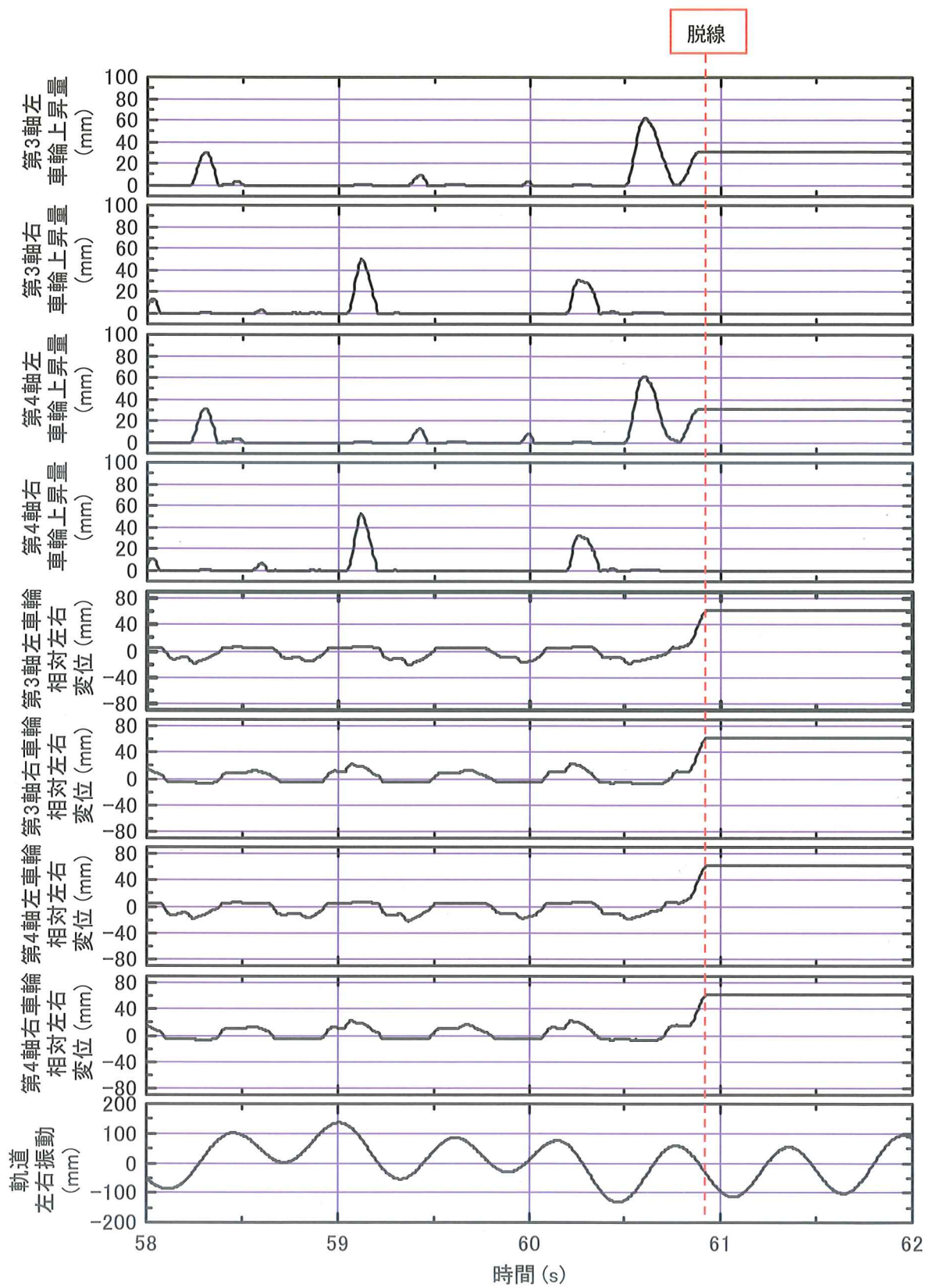


図6.8 第3軸および第4軸の車輪上昇量・車輪／レール相對左右変位

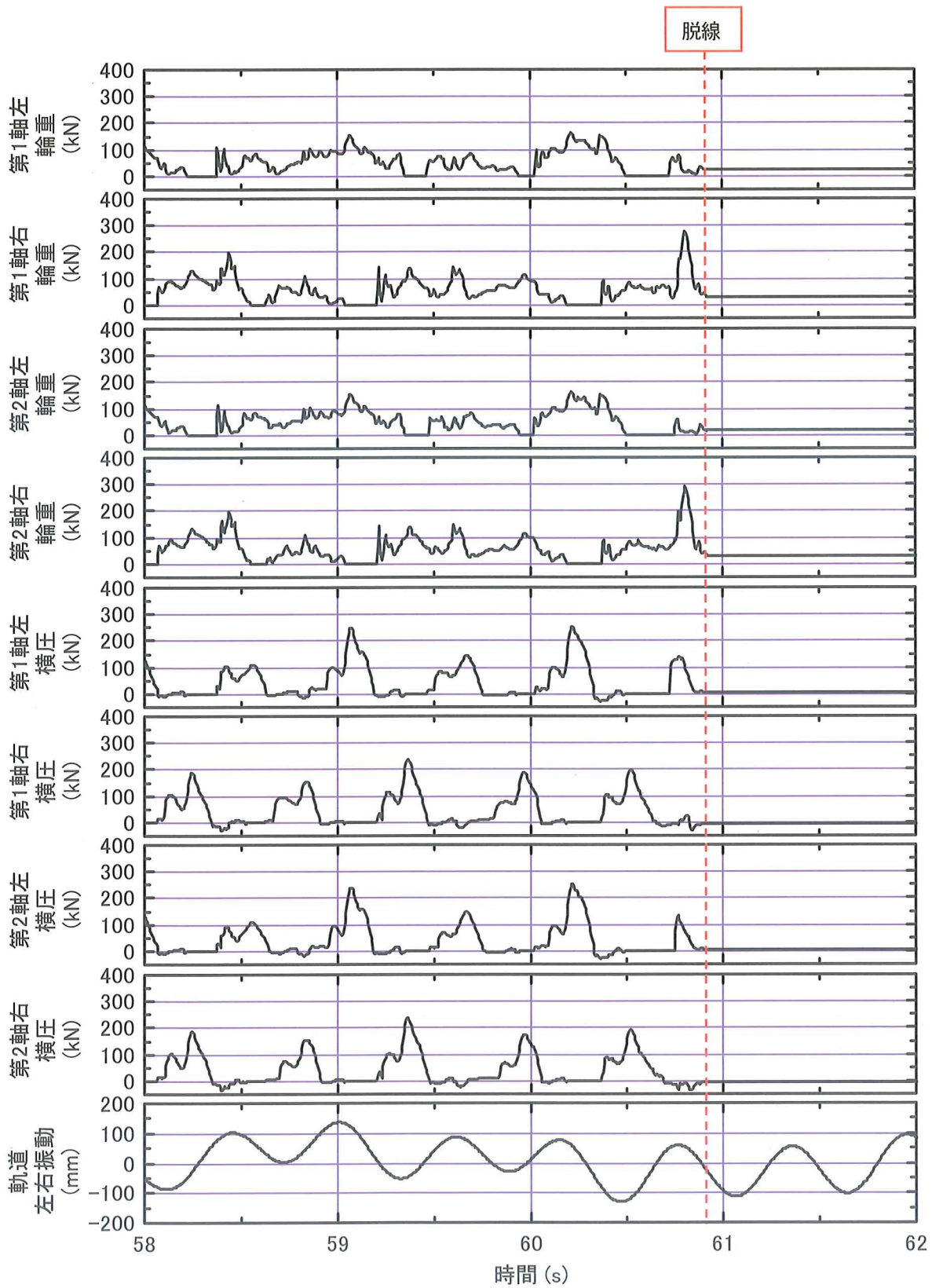


図 6.9 第 1 軸および第 2 軸の輪重・横圧

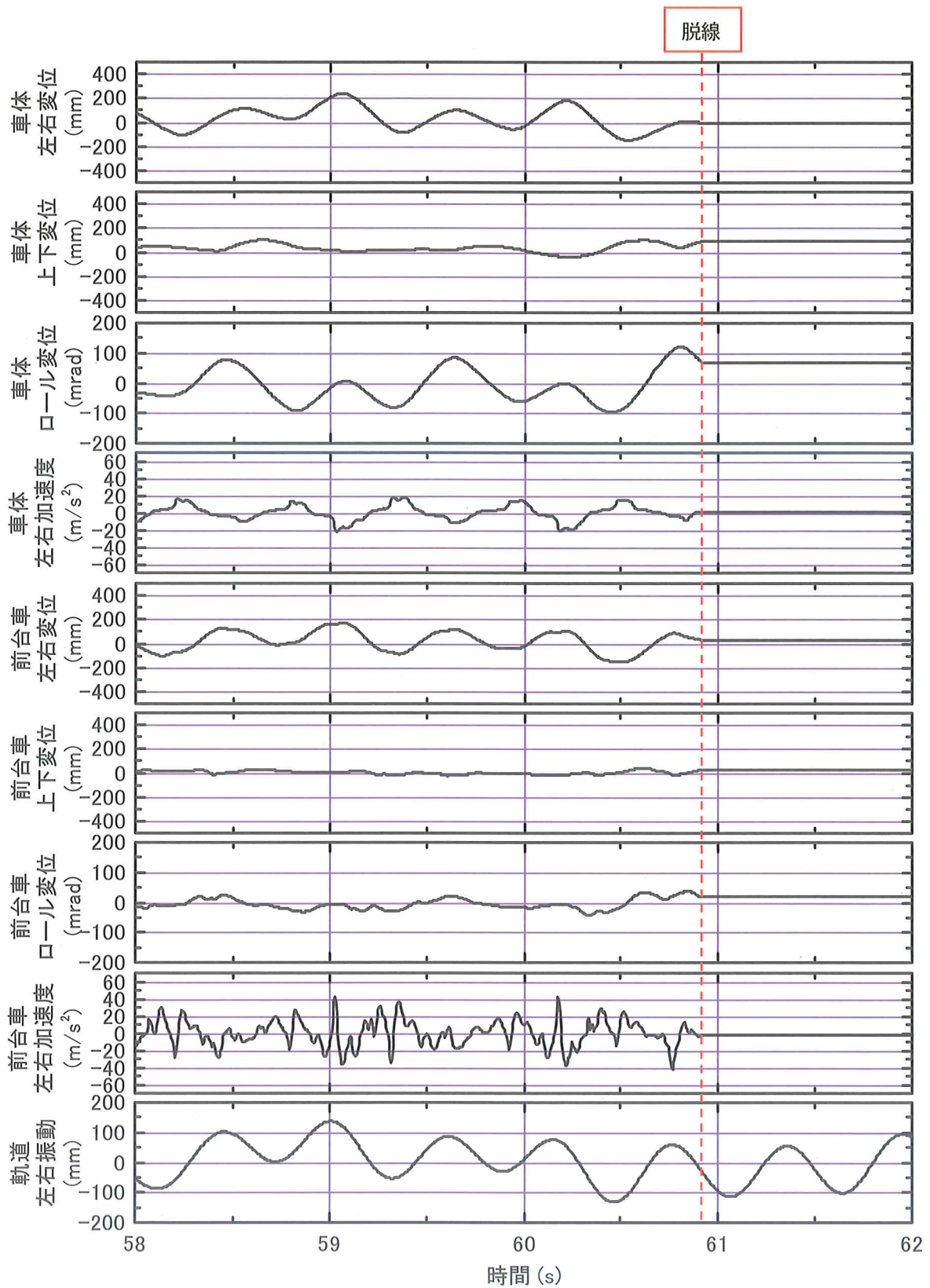


図 6.10 車体および前台車の挙動

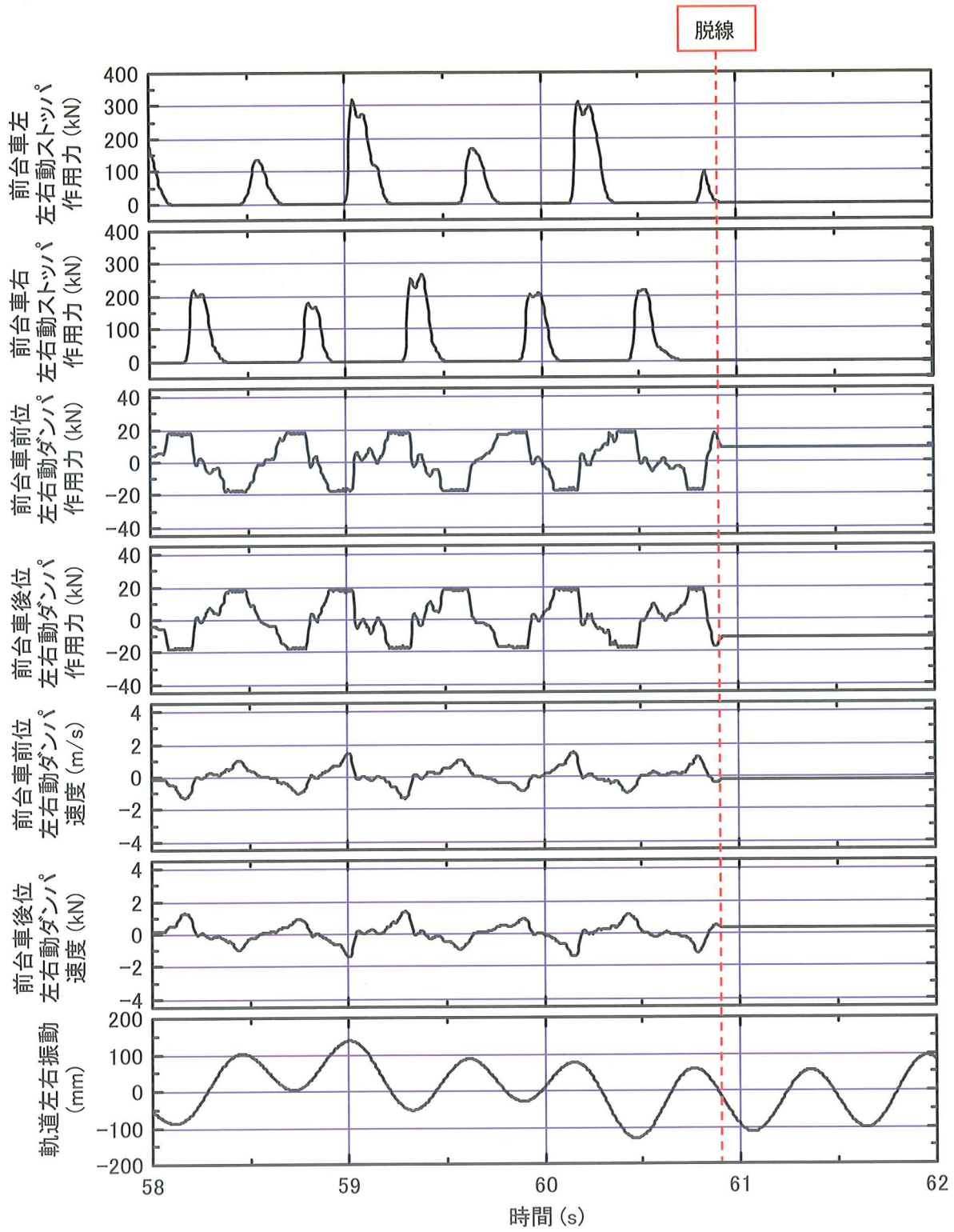


図 6.11 前台車の左右動ストップ作用力および左右動ダンパ作用力・ピストン速度

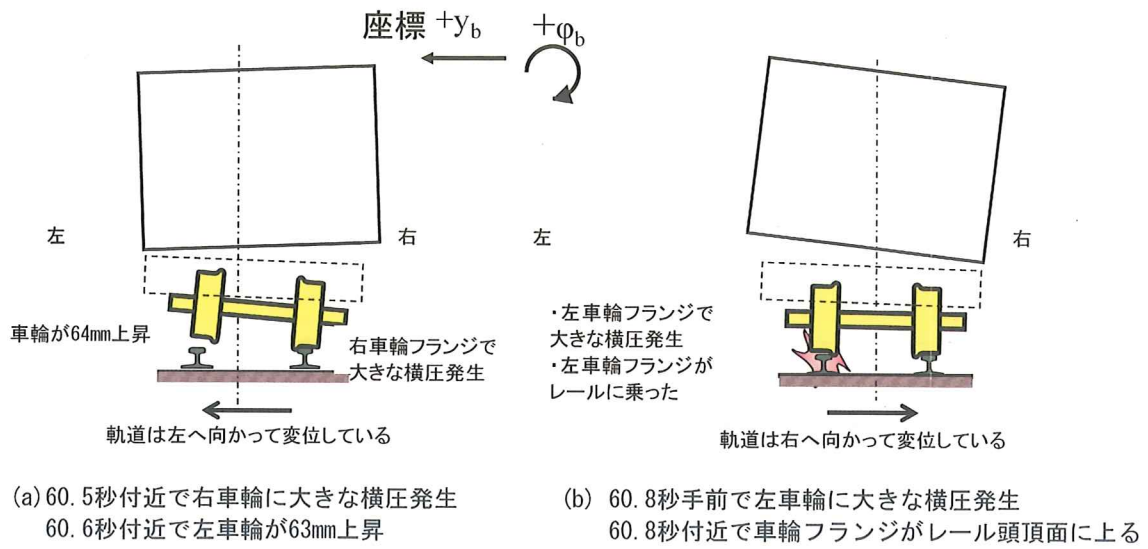


図 6.12 東北地方太平洋地震時(推定地震動による)の車両挙動概要