

3.6 現地走行試験の結果

3.6.1 現地走行試験の実施内容

現地走行試験は、脱線時の状況を再現するとともに、各因子の影響度合の検討が行えるよう、以下のような方法により、延べ4日間にわたり実施した。この試験は、実際に脱線が発生した箇所において、最終列車から始発列車までの間の深夜時間帯を利用して行った。

また、この機会に併せて、営業車の輪重・横圧等の測定も、地上に設置した測定器により実施した。

現地走行試験の方法

- 使用した車両・線路
 - ・現地走行試験に使用する車両は、事故車両と同形式の03系車両を用いた。
 - ・脱線箇所に使用するレールは、事故当時のレールを現場に搬入し、設置した。
- 設定した測定条件

現地走行試験では、静止輪重のアンバランスの大きさ、レールの塗油の有無、走行速度（数段階の速度及び加減速）等の条件を設定し、車上及び地上からデータを収集した。具体的な設定条件を表3.6-1に示す。

表 3.6-1 現地走行試験の試験条件

分類	因子		設定条件等
車両	静止輪重のアンバランス		実施日に応じて大、中、小を設定
	空気ばね		空気ばね、高さ調整弁、差圧弁は脱線車両のものを使用
	台車		左右動ダンパ、軸ばねは脱線車両のものを使用
	車輪		踏面形状を可能な限り脱線車両に合わせて設定
	車体の剛性・ねじれ等		試験車両の条件
軌道	線路線形		既存の線形
	軌道狂い		脱線箇所付近は脱線時の状況を可能な限り設定
	レール	脱線箇所付近	脱線時のレールを現場に設置
		円曲線部	研削レールの箇所と新レールの箇所を設定
塗油		摩擦係数を変化させるため、実施日により塗油の有無の設定及びレールの油除去作業を実施	
運転	運転パターン	速度	脱線箇所付近の通過速度 10～40km/h（停止状態からの力行も実施）
		運転条件	惰行、力行、制動、等速

注) 因子欄の番号は、「3.1 要因推定の手法」において述べた10の因子に付した番号に対応している。

主な測定項目

〔車上測定項目〕

- ・ 輪重、横圧
- ・ 空気ばねの圧力、変位
- ・ 車体の上下、左右、前後の振動加速度
- ・ 車輪の挙動（ビデオカメラによる撮影）

〔地上測定項目〕

- ・ 輪重、横圧
- ・ アタック角、レール小返り

地上測定における測定点

- A 測点（脱線した箇所手前の円曲線部）
研削したレールと新品のレールとの比較を行うため、トンネル出口側より中目黒駅に向かって、A-2 測点、A-3 測点、A-1 測点の順に以下の測定点を設けた。
A-1 測点 内軌：研削したレール 外軌：研削したレール
A-2 測点 内軌：新品のレール 外軌：新品のレール
A-3 測点 内軌：新品のレール 外軌：研削したレール
- B 測点（脱線した箇所）
脱線が発生した箇所における各種データを収集した。
- C 測点（中目黒駅近傍）
試験車両の静止輪重を地上側から測定するため、直線区間に C 測点を設け、輪重を測定した。

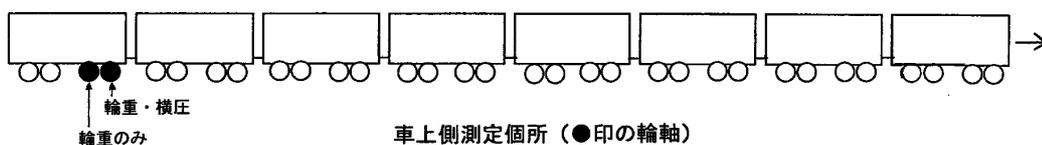
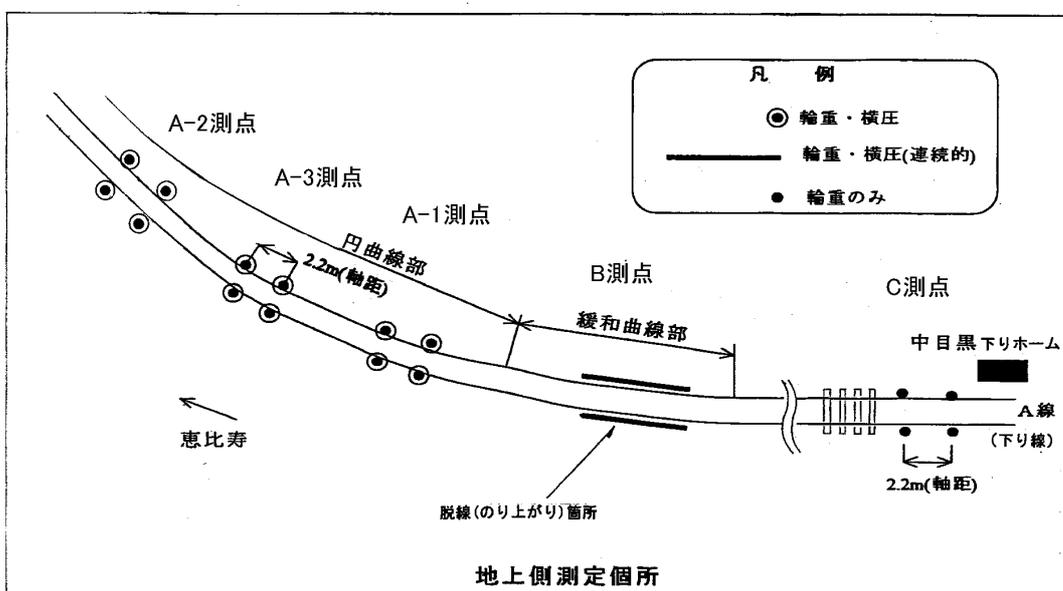


図 3.6-1 地上側及び車上側測定箇所

実施実績

現地走行試験及び営業車地上測定の実績は、表 3.6-2 のとおりである。

表 3.6-2 試験実施実績

実施日			現地走行試験		営業車測定実績
			実績	試験条件	
4月23日	日	昼			測定列車：98本
4月24日	月	昼			測定列車：159本
4月25日	火	夜	走行回数：17回	静止輪重比：小 塗油：あり	
4月27日	木	夜	走行回数：14回	静止輪重比：小 塗油：なし、あり	
4月28日	金	昼			測定列車：101本
		夜	走行回数：16回	静止輪重比：大 塗油：なし	
4月29日	土	昼			測定列車：66本
		夜	走行回数：14回	静止輪重比：大、中 塗油：なし	

測定データの補正

測定されたデータは、以下のとおり補正した。また、「3.7 営業車の地上測定の結果」に掲載した測定データも同様の補正を行った。

測定データの検定による補正

車上測定、地上測定とも輪重、横圧の測定値は、荷重の載荷位置（レール・車輪の接触位置）の違いにより、測定値が変化する。このため、地上及び車上のデータについて、荷重の載荷位置による検定を行い、その結果に基づき輪重及び横圧の測定データを補正した。

また、同一地点における地上データと車上データの間には、概ね高い相関があったが、若干の差も見られたので、これについては地上データを補正して車上データとの整合をとった。

測定データの信頼性

輪重及び横圧の測定データの補正後、データの読みとり等に伴う誤差を評価するため、車上データの信頼性の確認を行った。

その結果、車上データ（輪重及び横圧）の90%信頼区間の幅は±約2kNであった。

3.6.2 車上測定

(1) 車上測定の概要

a. 試験車両

現地走行試験に使用する車両は、脱線した車両と同じ03系車両を用いた。また、可能な限り脱線した車両の条件を再現するため、以下の部品については、脱線した車両のものを取り付けて試験を行った。なお、第一台車の左側の高さ調整弁は、事故時の衝撃による軸の曲がり認められたため、代替品を使用した。

- ・ 左右動ダンパ
- ・ 軸ばね
- ・ 空気ばね
- ・ 高さ調整弁
- ・ 差圧弁

試験車両の第一台車に挿架する測定用輪軸は、車輪踏面形状、踏面の表面粗さ、左右車輪直径差及びバックゲージを可能な限り脱線した車両に合わせて設定した。なお、車輪径は、脱線した車両の834mmに対し、試験車両は825mmである。

b. 静止輪重比の設定

現地走行試験の実施にあたり、試験車両の静止輪重のアンバランスを、小・中・大の三段階に設定することとした。「小」は、静止輪重のバランスが調整されている試験車両の条件をそのまま使うこととし、「中」、「大」は、第1軸右側車輪の静止輪重比をそれぞれ0.8、0.7程度とすることを目途とした。

静止輪重比の設定は、第一台車右側と第二台車左側の空気ばね高さ調整弁の高さを調整することにより行った。これは、車庫から試験実施箇所まで試験車両を安全に回送するため、試験車両が試験実施箇所に到着した後に静止輪重比を設定することが必要であったこと、台車の構造上の制約のため、軸ばねライナーや空気ばねライナーの調整による静止輪重比の設定が困難であったこと、による。

試験に先立ち行った静止輪重比の設定確認試験の結果、第一台車右側の空気ばね高さ調整弁の高さを-15mmとしたときに静止輪重比が0.83程度、同高さ調整弁と第二台車左側の高さ調整弁の両方を-15mmとしたときに静止輪重比が0.72程度となることが車上測定装置により確認された。この結果に基づき、現地走行試験では、この方法により静止輪重のアンバランスの設定を行った。現地走行試験における、各試験走行の静止輪重比を図3.6-2に示す(中目黒駅近傍のC測点にて計測した輪重より求めた)。

なお、高さ調整弁の不感帯の条件及び差圧弁の条件は、変更しなかった。

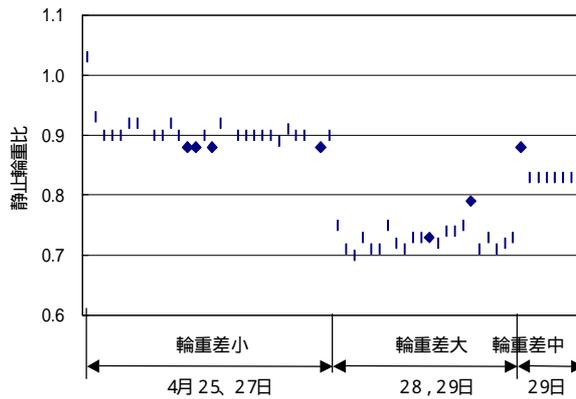


図 3.6-2 現地走行試験時の静止輪重比

c. 塗油条件に応じた車輪の油除去作業

現地走行試験の設定条件の一つとして、塗油の有無を設定することとし、「塗油なし」の条件では、地上側においてレールの油除去作業を行うこととしたが、これに合わせて車両側においても、7号車第二台車の4輪及び8号車第一台車の4輪の計8車輪を対象として、車輪表面の油除去を行った。

d. 測定項目

現地走行試験において車上側にて測定した項目と測定方法を表 3.6-3 に示す。

表 3.6-3 測定項目及び測定方法

測定項目 (すべて8号車)	箇所	数	測定方法	目的等
輪重	第1軸左右 第2軸左右	4	新連続法	車輪/レール間作用力
横圧	第1軸左右	2		
脱線係数	第1軸左右	2		
車軸ねじりひずみ	第1軸、第2軸	4	ひずみゲージ	車軸ねじり応力
空気ばね内圧(補助空気室圧力)	第一台車左右 第二台車左右	4	圧力センサ	空気ばね動作確認
空気ばね上下変位	第一台車左右 第二台車左右	4	変位計	空気ばね変位
車体-台車間左右 変位及びボギー角	第一台車前後	2	変位計	車体-台車間相対変位
軸ばね上下変位	第1軸左右 第2軸左右	4	変位計	軸ばねたわみ
車体上下振動加速度	第一台車中心上	1	20m/s ² 加速度計	車体動揺
車体左右振動加速度		1		
車体前後振動加速度		1		
軸箱上下振動加速度	第1軸左右	2	500m/s ² 加速度計	レール継ぎ目検知
車輪・レールのビデオ撮影	第1軸左右	2	CCDカメラ	輪軸の挙動
連結器力	7-8号車間	1	ひずみゲージ	力行, 制動時の前後力の影響把握
走行速度		1	8号車1軸エンコーダパルス積算	
力行情報・ブレーキ情報		2	運転台指令線	
キロ程		1		
地上との合マーク(地上反射板の検知)		1		地上側測定との同期
車輪踏面形状・粗さ	第1軸左右 第2軸左右	4	踏面形状描写器 粗さ計	走行試験1日目後と 走行試験4日目後に測定

(2) 車上測定の結果

a. 脱線の発生箇所における測定結果（B測点）

• 静止輪重比の影響

車両の静止輪重比と外軌側車輪の脱線係数との関係から、静止輪重のアンバランスが大きく、外軌側車輪の輪重が小さいほど、脱線係数は大きくなることが観測された。

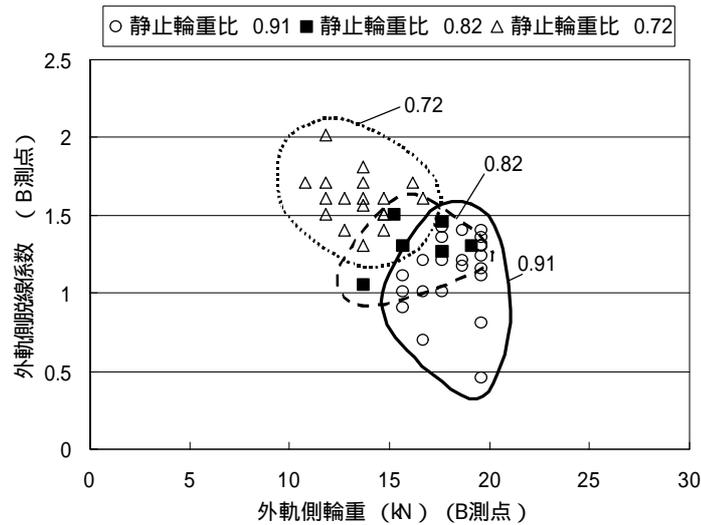


図 3.6-3 静止輪重比及び外軌側輪重と外軌側脱線係数との関係

• 内軌側車輪の横圧輪重比

内軌側車輪の横圧輪重比（内軌側車輪とレールと間の摩擦係数に近似する）が大きいほど、外軌側車輪の横圧が増加し、これに伴い、外軌側車輪の脱線係数も増大することが観測された。

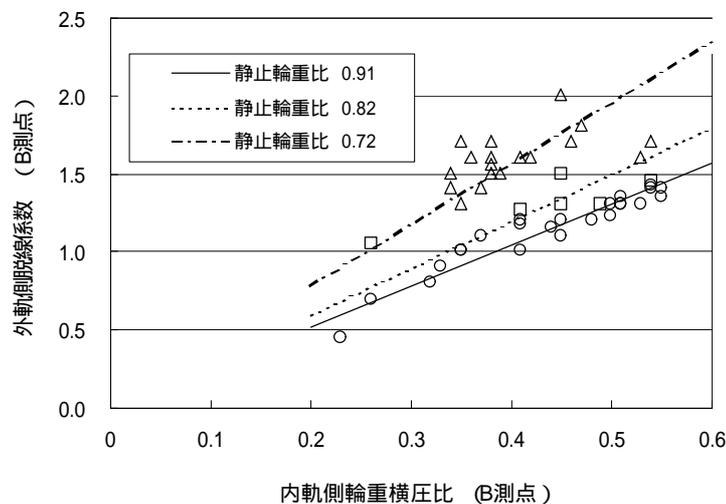


図 3.6-4 静止輪重比及び内軌側横圧輪重比と外軌側脱線係数との関係

内軌側車輪の横圧輪重比は、試験開始直後より走行回数を重ねるにつれて、徐々に大きくなる傾向が見られた。

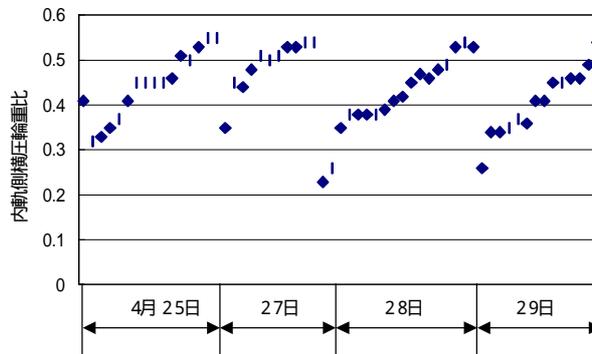
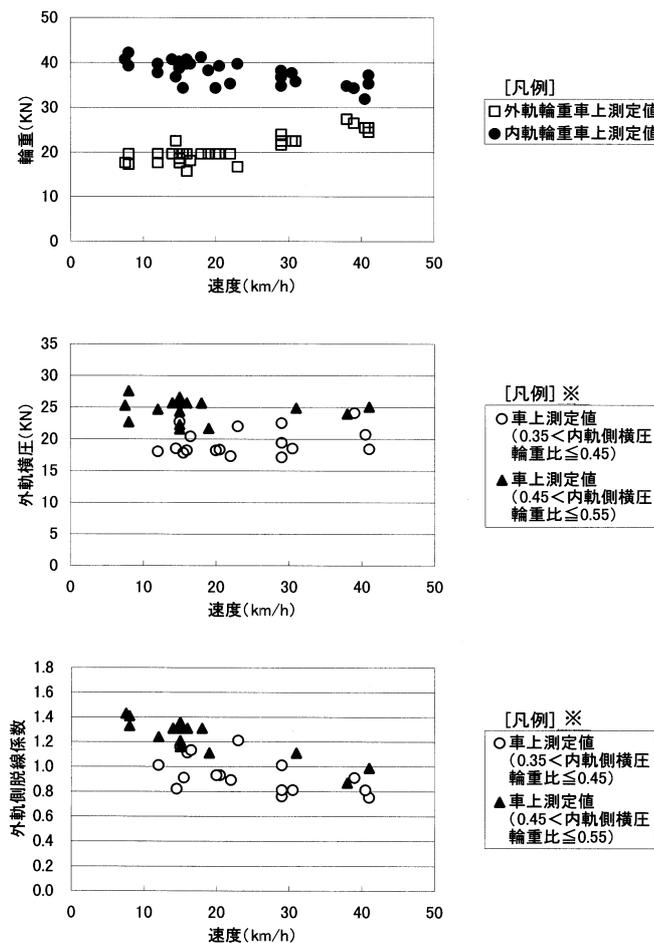


図 3.6 - 5 内軌側横圧輪重比の変化

• 運転条件の影響

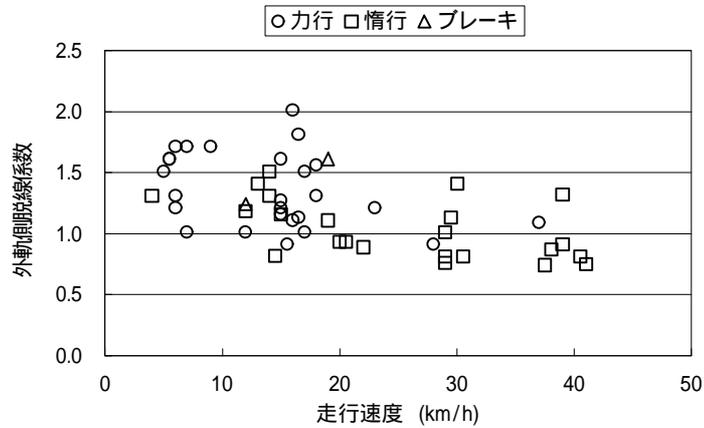
運転速度と外軌側車輪の輪重の関係から、速度の上昇とともに輪重が増加し、脱線係数は減少する傾向が見られた。



摩擦係数によるばらつきを少なくするため、摩擦係数に近似する横圧輪重比が一定範囲内のものに限定した。

図 3.6 - 6 速度と輪重・横圧・脱線係数の関係 (静止輪重比 :0.91)

運転条件（力行、惰行、制動）の影響については、運転条件の違いによる顕著な差は見られなかった。



内軌側輪重横圧比の影響を極力排除するため、0.35～0.50のものを抽出した

図 3.6-7 外軌側脱線係数と走行速度の関係

- 車両動揺の影響

車体の振動加速度、空気ばね変位及び空気ばね内圧変動の測定結果から、脱線箇所付近における車体の動揺の状況について検討したが、脱線箇所付近の測定値は他の区間と比較して小さく、輪重変動に及ぼす影響も顕著ではなかった。

- 連結器力の影響

連結器力が外軌側車輪の輪重、横圧に及ぼす影響は、見受けられなかった。

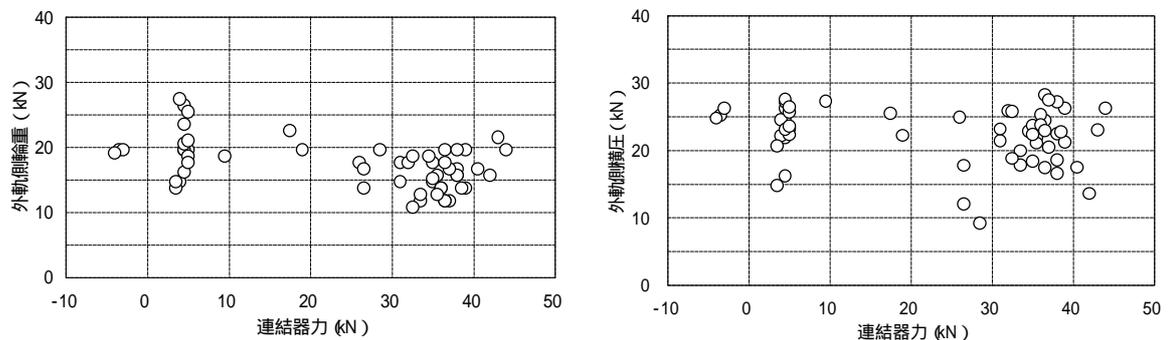


図 3.6-8 外軌側車輪の輪重・横圧と連結器力との関係

b. 研削したレールと新品のレールとの比較（A 測点）

トンネルの出口近傍の円曲線部に設けた A 測点では、研削したレールと新品のレールとを比較することを目的として測定を行った。

A-1 測点（内外軌とも研削したレール）において観測された外軌側車輪の横圧は、A-2 測点（内外軌とも新品のレール）及び A-3 測点（内軌は新品のレール、外軌は研削したレール）における横圧と比較して、若干大きいことが観測された。

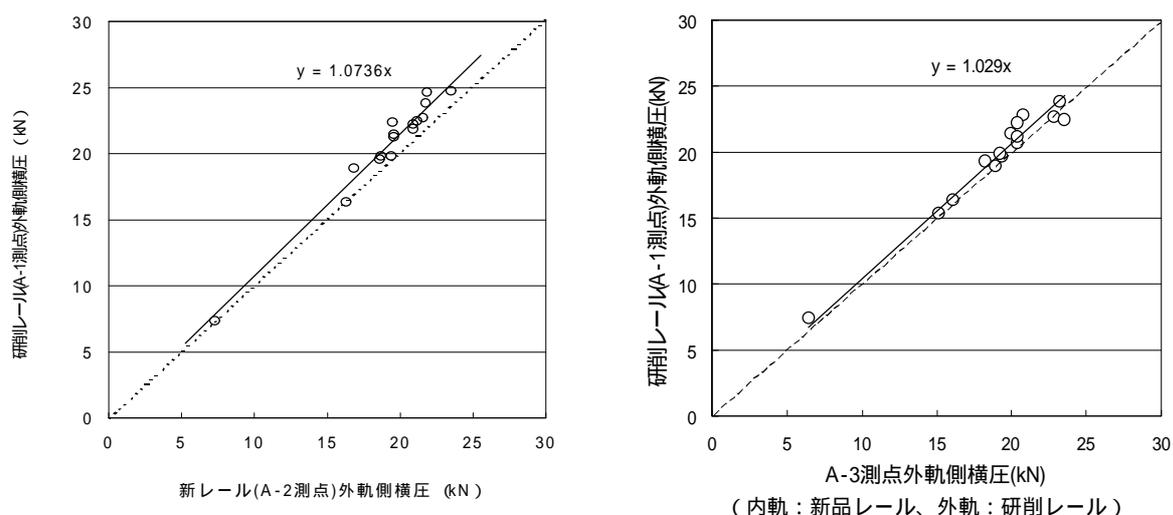


図 3.6-9 レール研削の有無と発生横圧の関係

c. 車輪踏面の浮き上がりの発生状況

試験車両の走行に際し、外軌側車輪のレールとの接触状況をビデオカメラの画像により確認したところ、表 3.6-4 のとおり、一部の走行パターンにおいて、脱線係数が特に大きくなった場合には、車輪踏面の浮き上がり（車輪のフランジがレールのゲージコーナーと接触し、車輪の踏面とレールの頭頂面との間に隙間が生じること）が観測された。

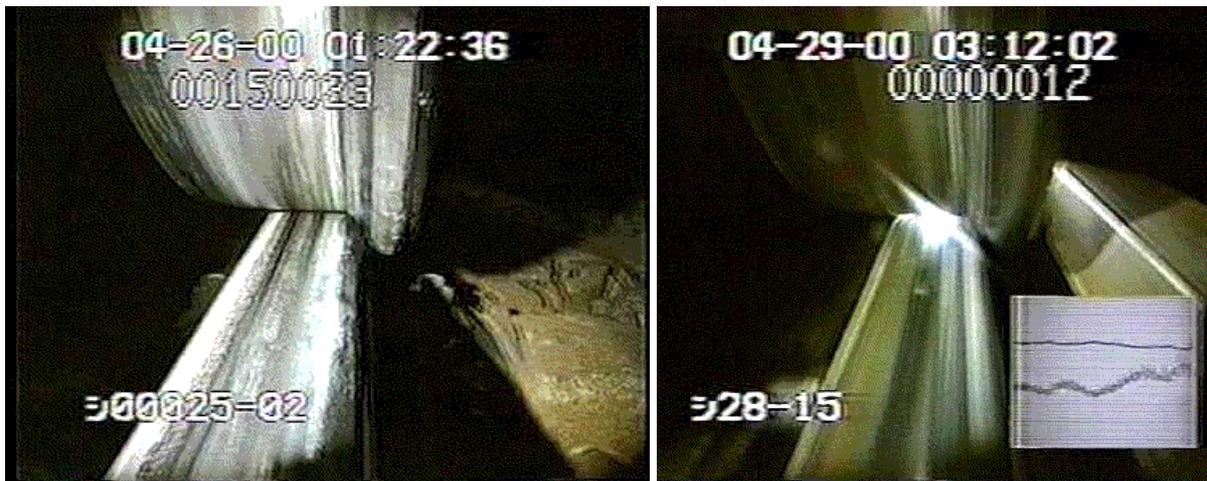
この浮き上がりは、現地走行試験における全走行回数 63 回（静止輪重測定のための走行 2 回を含む）のうち 9 回の走行中に、延べ 27 回にわたり観測された。浮き上がりの発生箇所は、すべて緩和曲線内であり、事故時の乗り上がり箇所の前後 5m の間では、15 回観測された。

なお、車輪のフランジ先端部がレール上に乗り上がる状態にまで至ることはなかった。

表 3.6-4 外軌側車輪の浮き上がり発生時の状況

試番	走行条件	走行速度 [km/h]	浮き上がり 位置	外軌 脱線係数	内軌 横圧輪重比	静止輪重比	備考
25-17	停止 力行	1	18km335m	2.1	0.5	0.88	
		12	18km339m	1.9	0.5		
28-10	惰行 力行	17	18km332m	1.7	0.5	0.73	
		22	18km341m	1.6	0.5		
		24	18km344m	2.0	0.5		
28-11	停止 力行	8	18km331m	1.8	0.5	0.73	
		17	18km342m	1.9	0.5		
		20	18km345m	1.8	0.4		
28-14	停止 力行	3	18km331m	1.8	0.5	0.74	停止直前
		3	18km333m	1.6	0.5		
		18	18km348m	1.7	0.5		
28-15	惰行	14	18km330m	1.6	0.5	0.74	
		13	18km340m	1.8	0.5		
		12	18km346m	1.8	0.5		
28-16	停止 力行	4	18km331m	1.5	0.5	0.75	
		13	18km337m	1.7	0.5		
		19	18km346m	1.7	0.5		
-	停止 静止輪重測定 力行	4	18km330m	1.6	0.5	-	停止直前
		0	18km332m	1.6	0.5		停止
		0	18km332m	1.7	0.6		戻って、再度前進
		5	18km334m	1.7	0.5		測定終了後走行
		14	18km340m	1.6	0.5		
29-13	停止 力行	4	18km331m	1.4	0.5	0.83	停止直前
		4	18km334m	1.4	0.5		
		16	18km345m	1.6	0.5		
29-14	惰行	10	18km331m	1.5	0.5	0.83	
		8	18km342m	1.7	0.5		加速直前

1. 静止輪重比は、試験走行開始直後に直線区間を走行中に測定したものの
2. 試番は、測定日と走行番数の組み合わせにより表される。



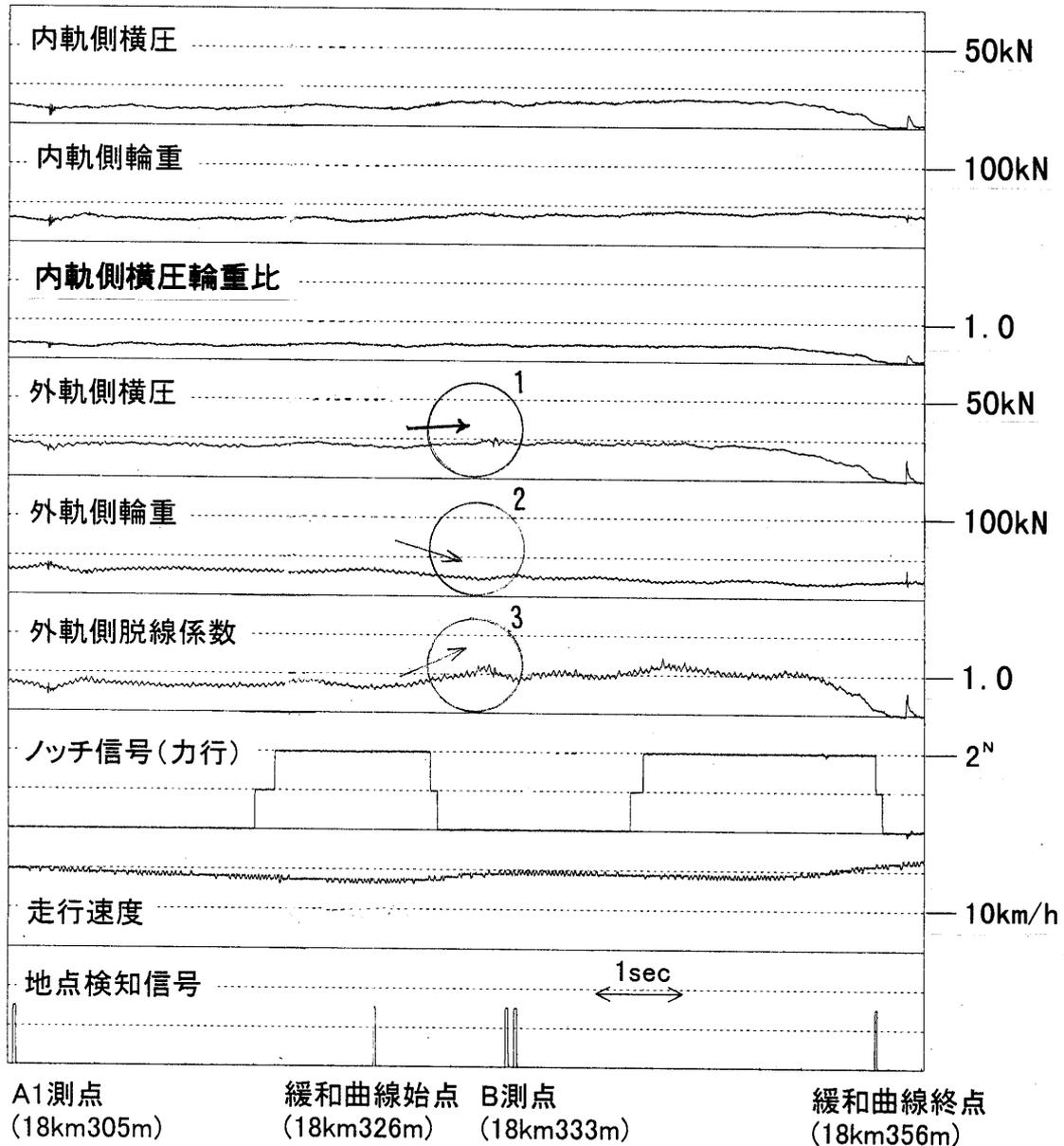
車輪踏面がレールと接している状態

車輪踏面がレールから浮き上がった状態
(後方から照らした光が隙間から見える)

図 3.6-10 車輪踏面がレールから浮き上がった状態

d. 線路線形と軌道狂いの影響

車両が脱線箇所付近を走行する際の外軌側車輪の横圧、輪重及び脱線係数の推移から、線路線形及び軌道狂いの影響を検討したところ、図 3.6-11 のような結果が見られた。



- 車両が緩和曲線に進入後、カントの逡減による構造的な軌道面のねじれ及び平面性の狂いにより、外軌側輪重が減少する。(図の「2」)
- 外軌側横圧は、円曲線部の走行により生じた横圧が緩和曲線に進入後も維持されるとともに、外軌側輪重の減少による内軌側輪重の増加に伴って、内軌側車輪の踏面とレール間の曲線外方に向く接線力が増加し、それが車軸を伝って外軌側横圧も若干増加する。(図の「1」)
- 外軌側横圧の増加及び輪重の減少により、脱線係数が増加する。(図の「3」)

図 3.6-11 線路線形と軌道狂いの影響 (走行パターン: 定速20km/h)

e. 差圧弁、高さ調整弁の動作状況

差圧弁

差圧弁は、左右の空気ばねの内圧の差が一定以上となった場合に動作する。このため、差圧弁の動作の有無は、試験走行に際し測定していた空気ばねの内圧から、左右の空気ばねの内圧差を求めることにより推定できる。

その結果、静止輪重のアンバランスを最大（外軌側車輪の静止輪重比 約 0.72）に設定した走行試験において、脱線箇所付近で一旦停止し、再度力行を行った5つのケースについて差圧弁の動作圧力値を超える内圧差が観測されたが、差圧弁の動作が輪重の変動を招いたと考えられるような測定結果は観測されなかった。

高さ調整弁

高さ調整弁は、定常状態において不感帯の中間に設定されている場合に、空気ばねの高さが $\pm 10\text{mm}$ 以上変位すると給排気を行うものとなっている。このため、高さ調整弁の動作の有無は、試験走行に際し測定していた空気ばねの変位から推定できる。

その結果、静止輪重のアンバランスを最大に設定したケースでは、緩和曲線を車両が進行するにつれて徐々に第一台車外軌側の空気ばねの変位が大きくなり、高さ調整弁が動作した走行があったものと考えられる。

しかしながら、高さ調整弁の動作と輪重の値との明確な関連を示す測定結果は観測されなかった。

3.6.3 地上測定

(1) 地上測定の概要

地上測定は、脱線箇所付近の試験車両、営業列車の輪重、横圧等の測定並びにレール研削形状の違いによる輪重、横圧の差異の把握を目的として行った。測定点ごとの測定内容は、表 3.6-5 のとおりである。また、各測定点の配置を図 3.6-12 に示す。

表 3.6-5 地上測定の測定点と測定内容

測定点	測定内容
A-1 測点	円曲線部(内外軌とも研削レール)における輪重、横圧、レール小返り測定(輪重、横圧は内外軌各2測点、計4測点、小返りは外軌側1測点)
A-2 測点	円曲線部(内外軌とも新品レール)における輪重、横圧、レール小返り測定(輪重、横圧は内外軌各2測点、計4測点、小返りは外軌側1測点)
A-3 測点	円曲線部(内軌は新品レール、外軌は研削レール)における輪重、横圧、レール小返り測定(輪重、横圧は内外軌各2測点、計4測点、小返りは外軌側1測点)
B 測点	緩和曲線部における輪重、横圧およびアタック角測定(輪重、横圧は内外軌各6測点、計12測点、アタック角は外軌側1測点)
C 測点	直線部における輪重測定(内外軌各2測点、計4測点)

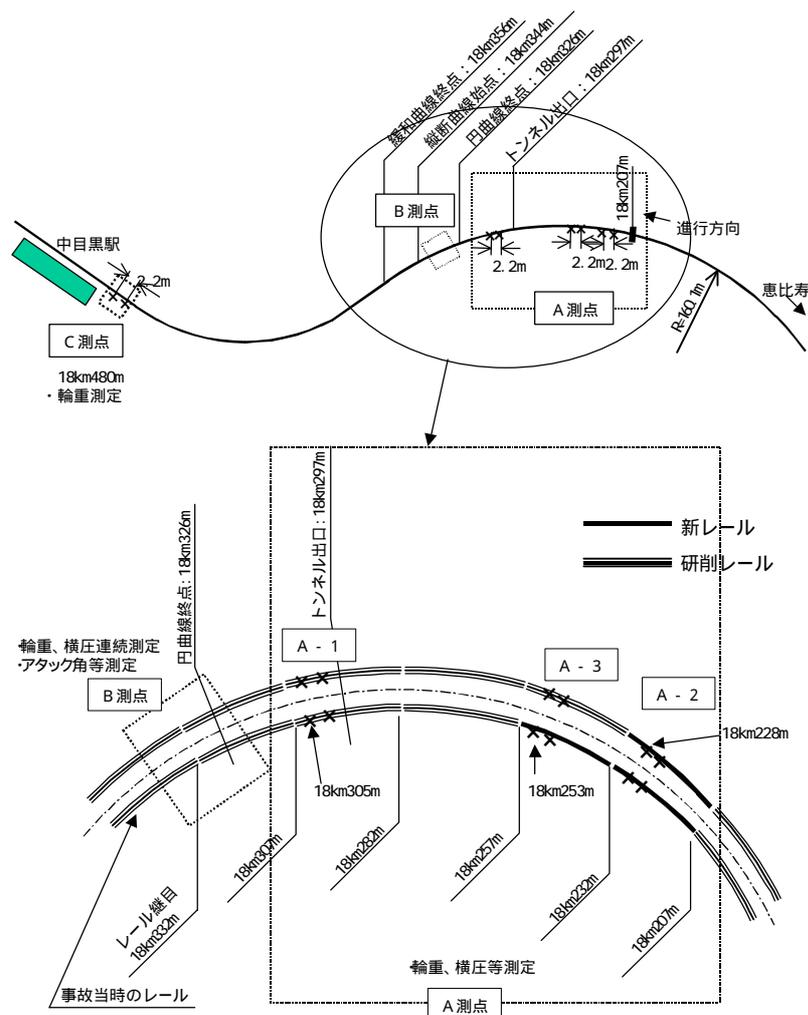


図 3.6-12 地上測定位置概要図

(2) 地上測定の結果

地上測定において行った輪重及び横圧の測定においても、車上測定と同様の測定結果が得られており、車上測定の結果を裏付けるものとなった。

また、地上測定により明らかとなった車輪のアタック角とレールの小返りについては、シミュレーションの精度向上に活用した。

a. 車輪のアタック角

B 測点において測定した車輪とレール間のアタック角(8両目第1軸)については、図 3.6-13 に示す結果となった。アタック角の最大値は 16.3m rad、最小値は 6.3m rad であり、特に走行条件による差異は見られなかった。

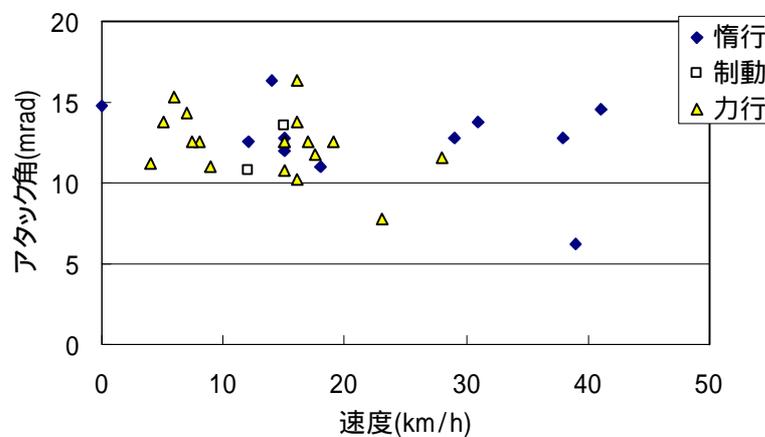


図 3.6-13 車輪・レール間のアタック角の測定結果 (4月25日測定)

b. レールの小返り

B 測点におけるレールの小返りの測定結果に基づき、外軌側のレール頭部の変位置を整理したところ、図 3.6-14 の結果となった。レール頭部の変位置は、外軌側車輪の横圧にほぼ比例して大きくなるとの結果が得られた。

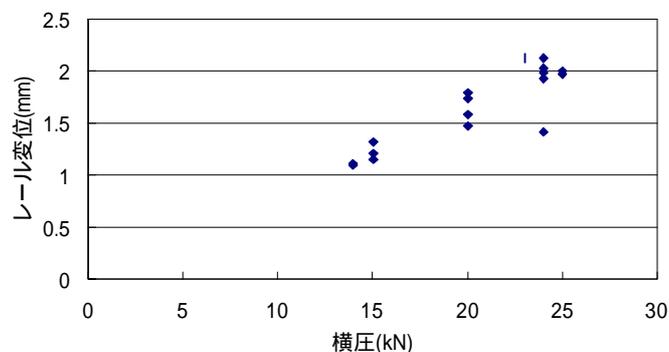


図 3.6-14 外軌側車輪の横圧とレール頭部の変位 (4月25日測定)