

L R T 試運転中の脱線事故に関する原因の究明及び
再発防止策等に係る考察について
(最終報告)

令和5年5月30日

L R T 試運転中の脱線事故に関する原因の究明
及び再発防止策等に係る有識者会議

目次

1	事故の概況について.....	1
2	軌道施設等に関する情報（市提供資料）	4
3	軌道施設の測定データ等（市提供資料）	9
4	原因究明及び再発防止策に係る測定試験について	13
5	原因究明に係る調査.....	16
6	測定結果より推察される脱線原因等について.....	25
7	対策について（考察）	26
8	市による対策工事等について	26
9	対策工事後の測定試験	28
10	急曲線部の対策工事後の測定試験結果とその評価	30
11	その他の箇所の測定状況.....	35
12	まとめ.....	39

1 事故の概況について

(1) 日時

令和4年11月19日（土）午前0時30分

(2) 場所

宇都宮駅東口停留場付近 上り線 曲線部

(3) 事故概要

緊急時に使用する走行パターン（逆走）における分岐器のレールと車輪との接触状況を確認するため、図1のとおり下り線（芳賀町方面）から停留場（2番線）へ向けて速度約13km/hで入線試験を行っている際、停留場2番線に向かう曲線部において、先頭車（A車）の4輪、中間車（C車）の後方2輪が脱線した。

脱線時の状況について、1両目については、脱線後のレール上および舗装面の走行痕が残っており、先頭車輪の内軌側から脱線したことが推察される。また、2両目については、1両目の脱線後の衝撃により、脱線したことが推察される。

○脱線事故の概要（市提供資料）

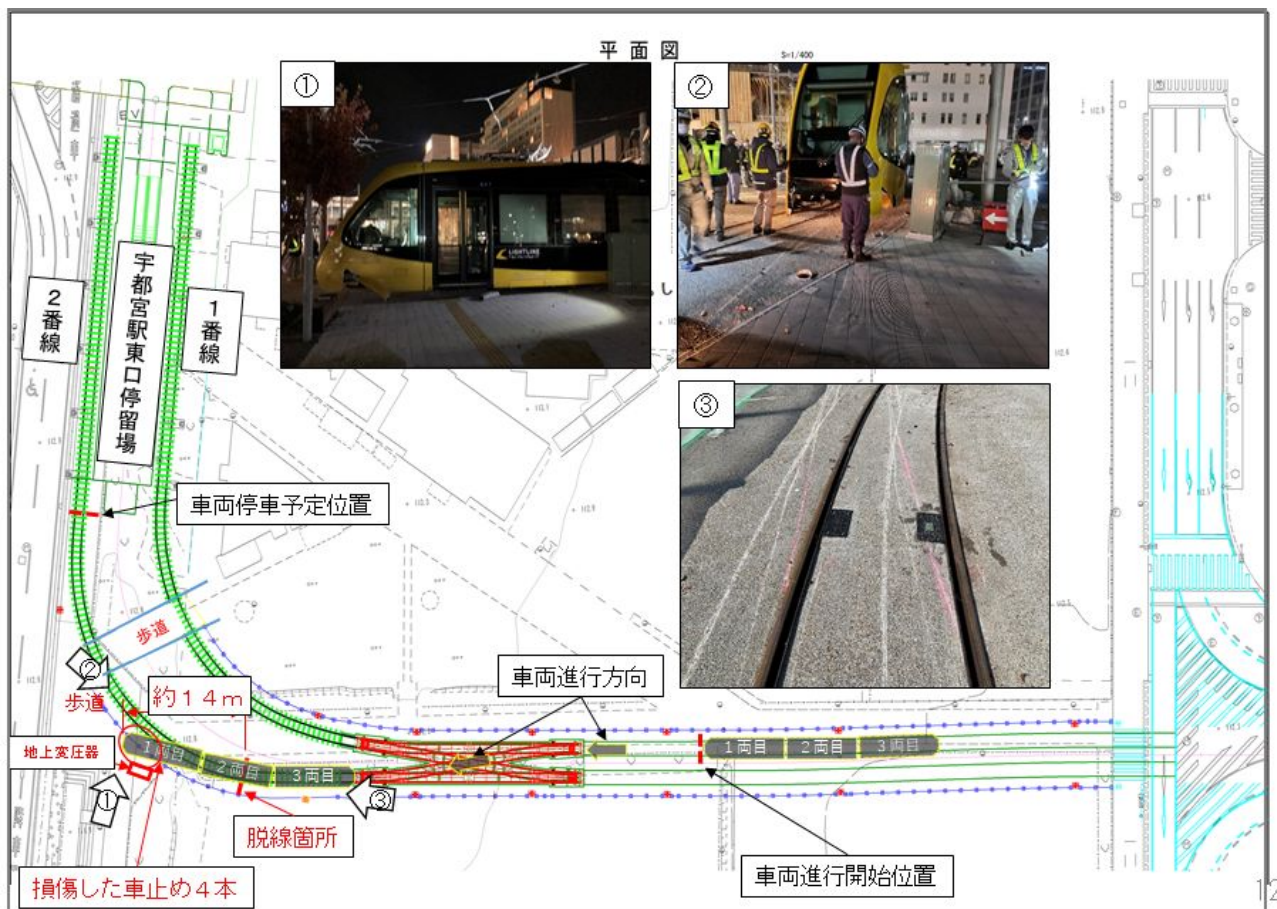


図1 事故概要

(4) 事故後の被害状況等

脱線事故に伴う人的被害はなかったところであるが、車両、架線、道路等に損傷が発生した。

ア 車両

- ① 先頭車及び中間車の台車、救援連結棒、前面カメラ等
- ② 先頭下部車体骨組み、前頭部FRP等
- ③ パンタグラフ
- ④ 車両連結器、側面部FRP等



図 2 車両の損傷

イ 地上用変圧器（東京電力パワーグリッド(株)所有）

地上変圧器の外箱のゆがみ（変圧器自体に損傷なし）



図 3 地上変圧器の損傷

ウ ボラード（車止め）

ボラード（車止め）の破損、4本

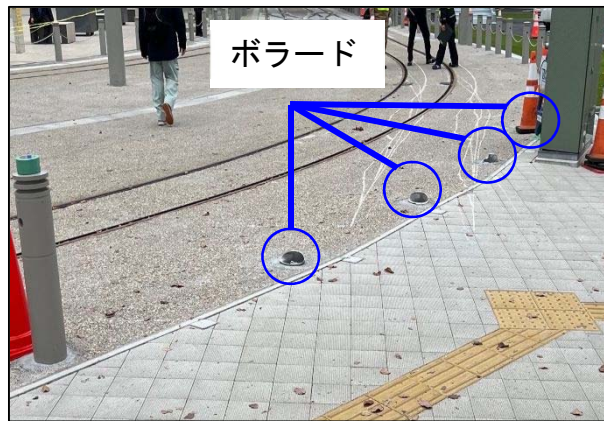


図 4 ボラードの損傷

エ 電車線支持材

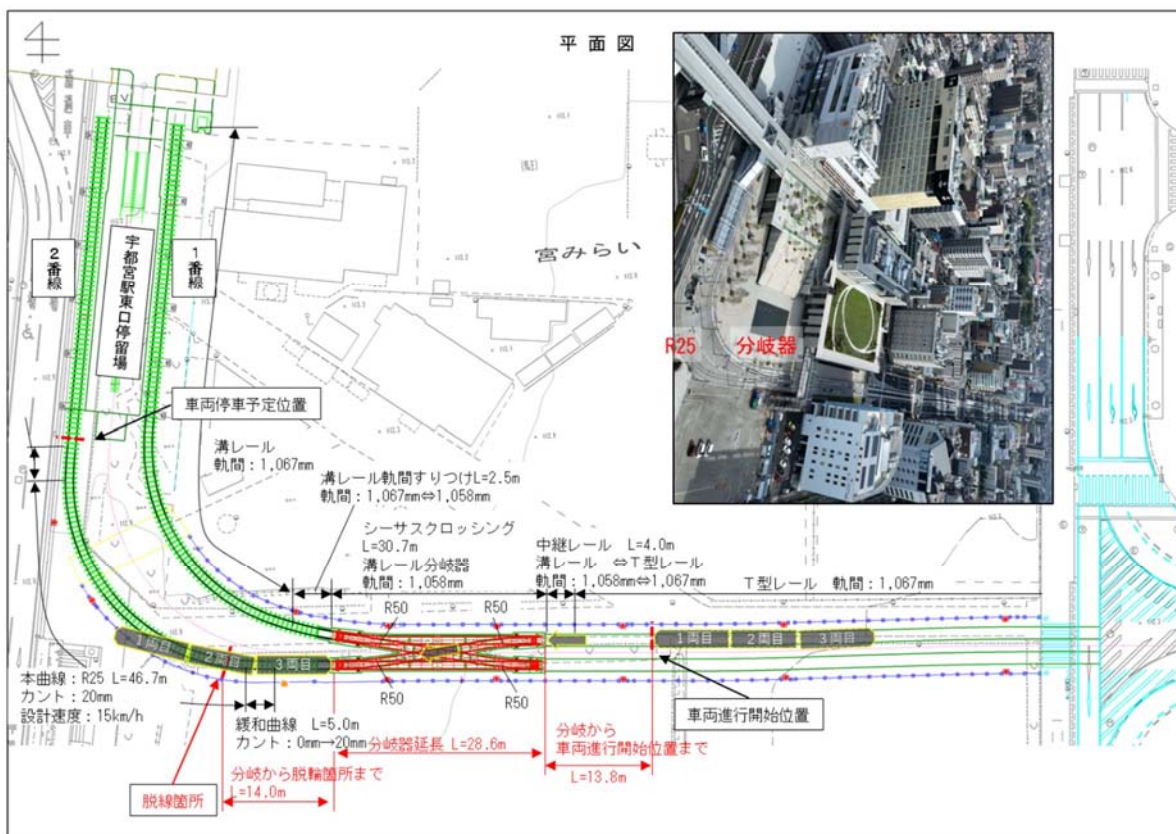
架線柱へ電車線を固定する金具の破損



図 5 電車線支持材の損傷

2 軌道施設等に関する情報（市提供資料）

(1) 駅東口の設計諸元等



緩和曲線：

- ・ 曲線においても曲率を徐々に変化させるため、特殊な曲線を挿入する必要があり、この曲線が緩和曲線である。
- ・ 車両が曲線部を走行する場合には外方に遠心力が働くため、これを平衡させるため、通常カントが付けられている。
- ・ 直線から円曲線に移るとき、取り付け区間が必要となり、取り付け区間ではカントを徐々に変化させる必要がある。
- ・ 一般的にカントは緩和曲線の中で、0mmから所定の値まで取り付ける。

図 6 駅東口の設計諸元等

(2) シーサスクロッシング・溝レール分岐器の構造について

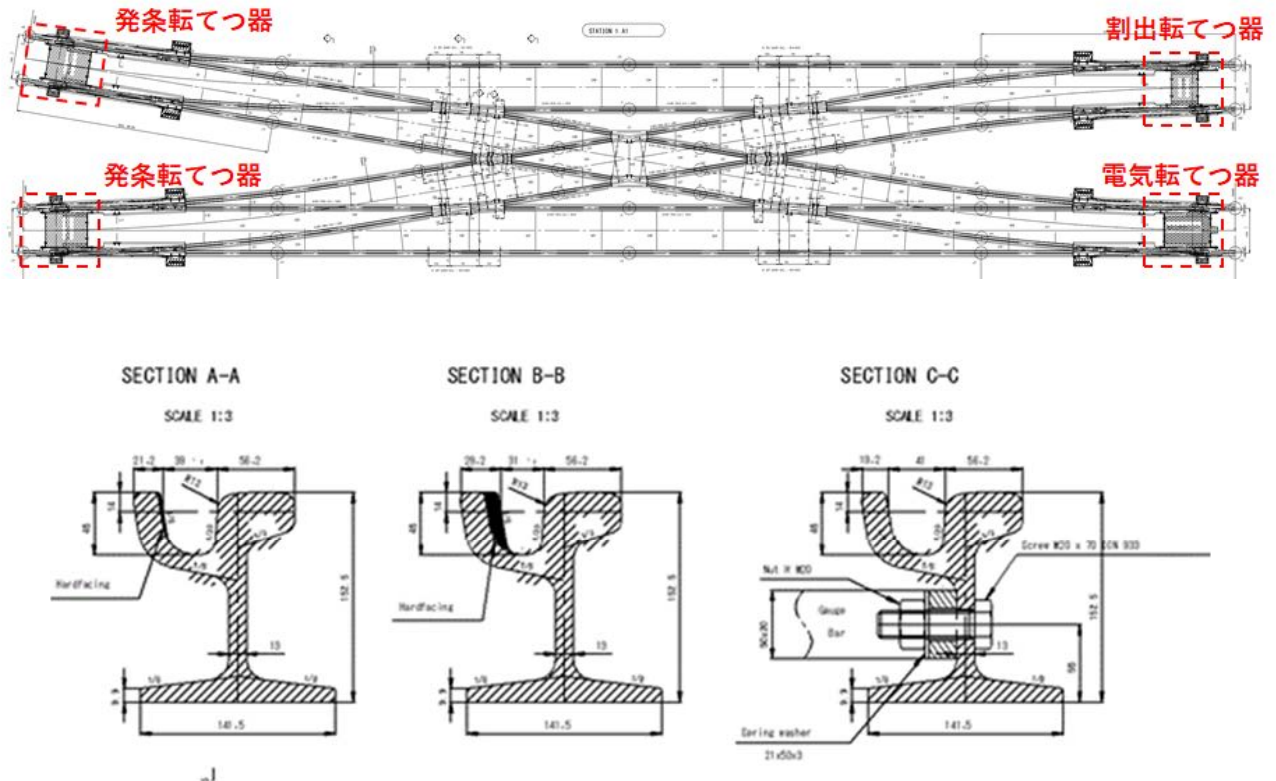


図 7 シーサスクロッシング・溝レール分岐器

(3) 車両の主要諸元



●車両の基本仕様

項 目		導入車両の基本仕様	
走行性能	軌 間	1,067mm(狭軌)	
	電 圧	DC750V	
	定 員	約160人(座席50席)	
	車両寸法	車 両 長	29,520m
		車 両 幅	2,650mm
		車 両 高 さ	3,625mm(パンタ折りたたみ時)
	最 急 勾 配	67‰	
運 転 最 高 速 度	70km/h		
基本性能	車 種	4輪ボギー連接電動客車 3両1編成	
	自 重	39.0t	
	主要寸法	固 定 軸 距	1,850mm
		ボ ギ ー 中 心 間 距 離	8,600mm
		車 輪 直 径	660mm
		車輪一对の輪鉄内側距離	994mm
	制 動 機 の 種 類 及 び 装 置	種類 電気(回生/発電)ブレーキ バネ式ディスクブレーキ トラックブレーキ	
	駆 動 装 置 の 方 式	モータ車体装架 直角カルダン方式	
	制 御 器 の 種 類	VVVFインバータ制御装置 2台	
集 電 装 置 の 種 類	シングルアーム式 1台		

図 8 車両の主要諸元

(4) 台車 (独立車輪方式)

- 台車については、左右の車輪が共通の車軸を必要としない構造となっており、左右それぞれの車輪が自由に回転し、走行安定性が高い。

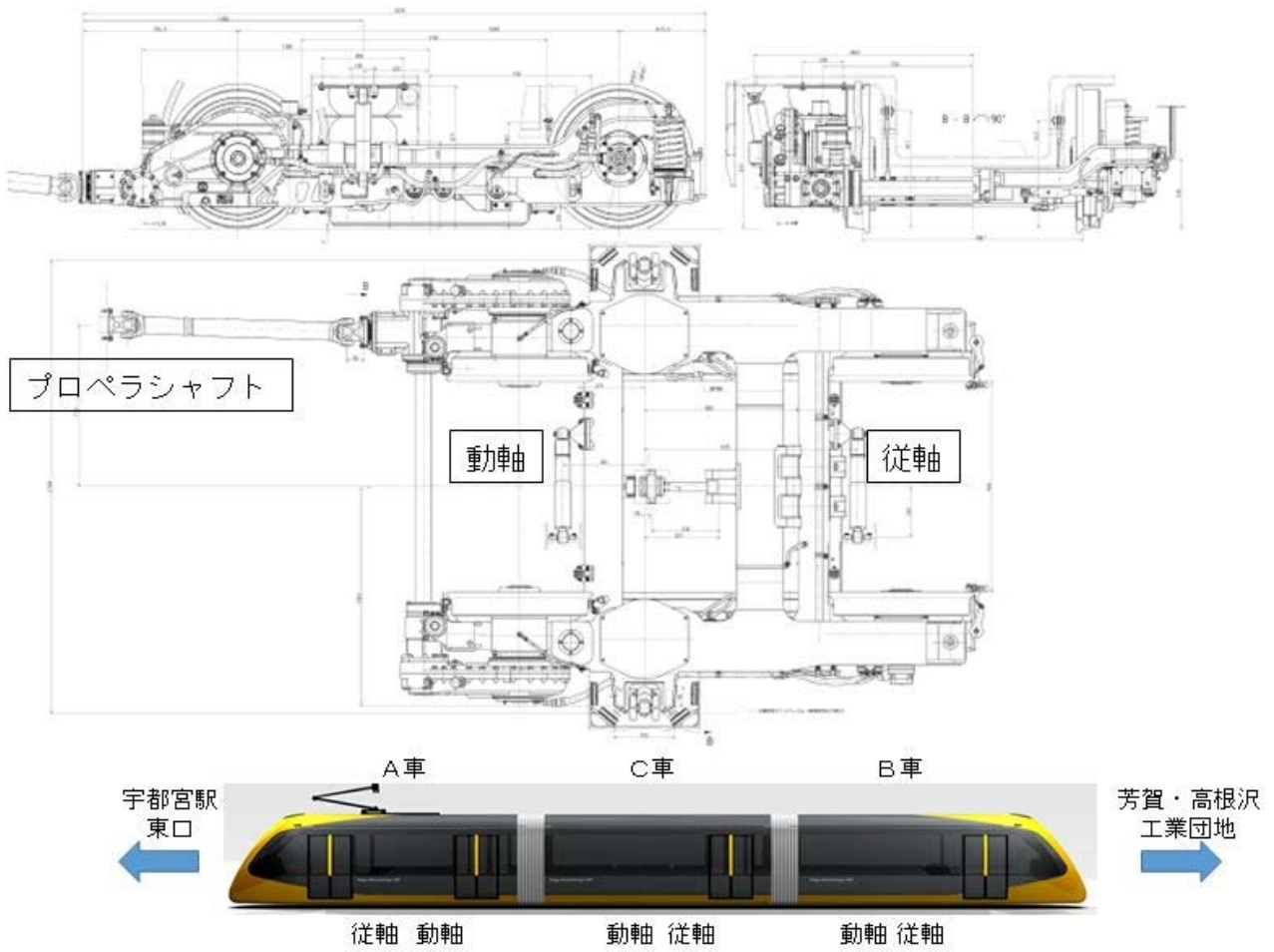


図 9 台車

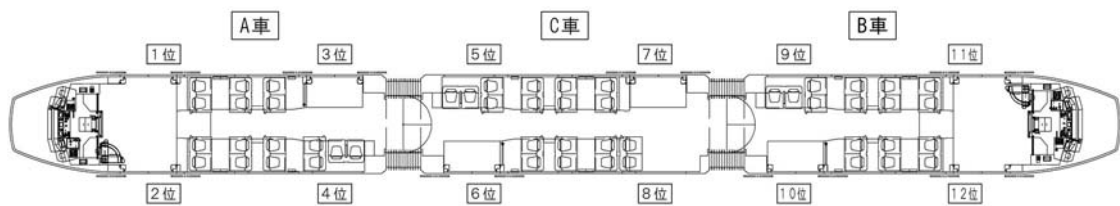


図 10 車輪の定義

(5) 運行に関する情報

- ・ 運転取扱心得について

宇都宮ライトレール(株)において、国に届出 (R4. 11. 1) ている「軌道運転取扱心得」において、脱線事故区間における曲線および分岐器を通過するときの速度は以下のように定められている。

(曲線の制限速度)

第30条 車両が曲線を通過するときの速度は以下に定める。

名称	場所	曲線半径	制限速度
宇都宮駅東口	宇都宮駅東口停留場内	25m	15km/h以下

(転てつ器を通過するときの速度)

第32条 車両が転てつ器を通過するときの速度は、対向、背向ともに15km/h以下とする。

※緊急時の制限速度については、特に定めていない。

(6) 気象に関する情報 (宇都宮気象台の情報)

11月19日 (土) 午前0時30分 (脱線事故発生時)

気温：7.8℃

湿度：89%

(参考)

11月17日 (木) 午前9時00分 (車両基地入線試験開始時)

気温：10.7℃

湿度：67%

同日 午後9時00分 (本線入線試験開始時)

気温：10.0℃

湿度：72%

11月18日 (金) 午後9時00分 (本線入線試験開始時)

気温：9.2℃

湿度：84%

3 軌道施設の測定データ等（市提供資料）

(1) 軌道の測定結果（竣工時 R4. 10. 28 計測）

- ・ 工事竣工時において、軌間及び水準については、仕上がり基準値内であった。

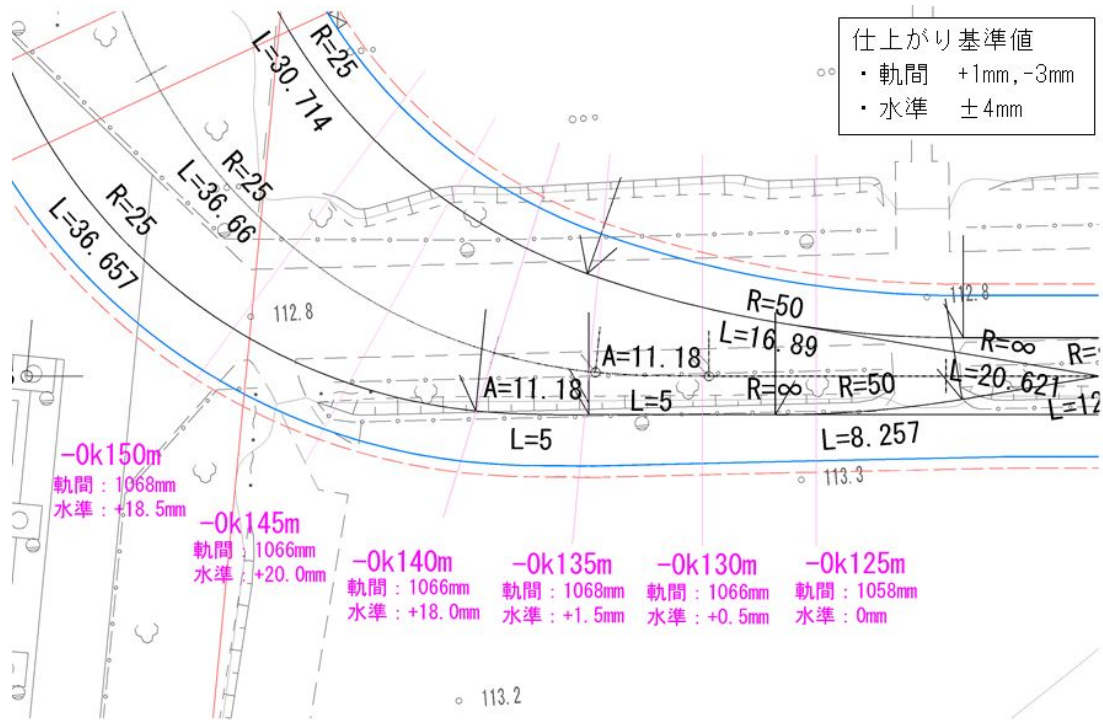


図 11 軌道の測定結果（竣工時）

(2) 軌道の測定結果（事故後 R4. 11. 19 計測）

- ・ 脱線事故発生後においても、軌間及び水準については仕上がり基準値内であった。

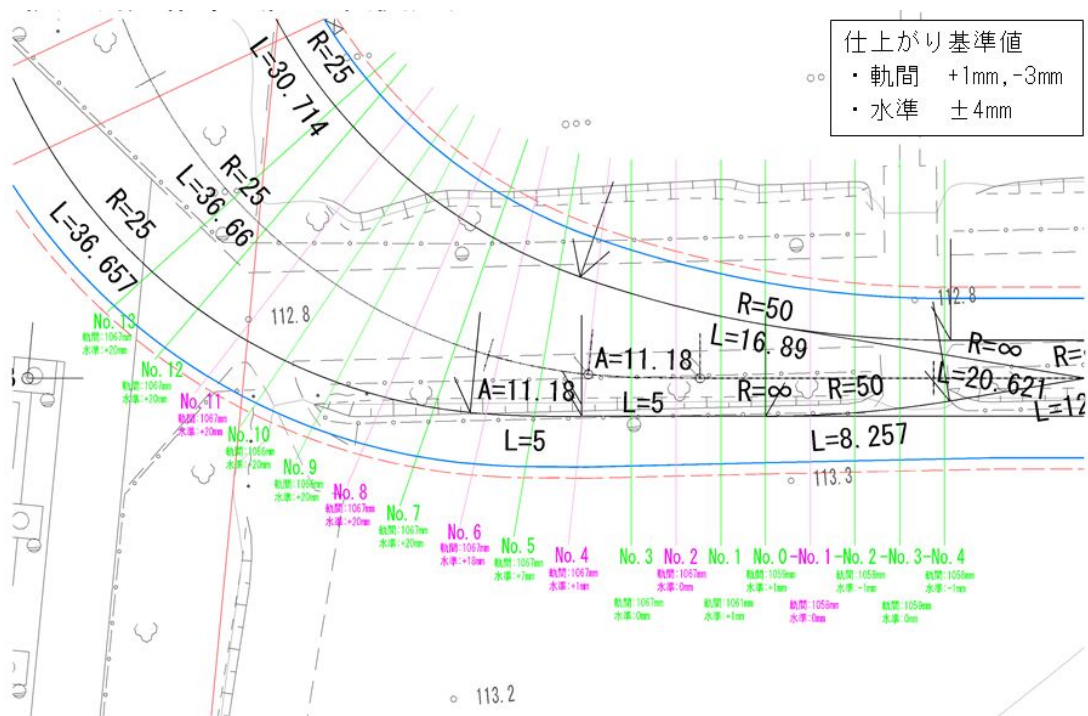


図 12 軌道の測定結果（事故後）

(3) 脱線の痕跡に関する情報

1 軸目脱線時の台車の位置

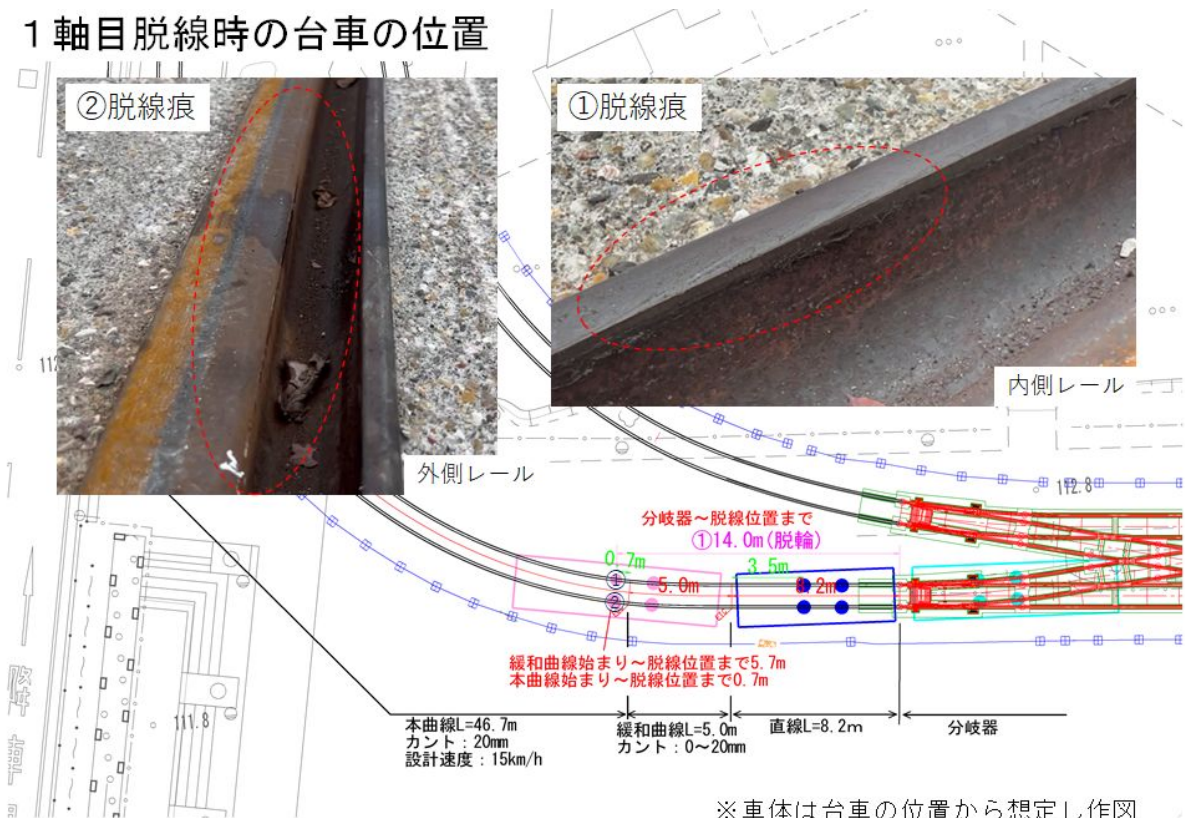


図 13 1 軸目脱線時の台車位置

2 軸目脱線時の台車の位置

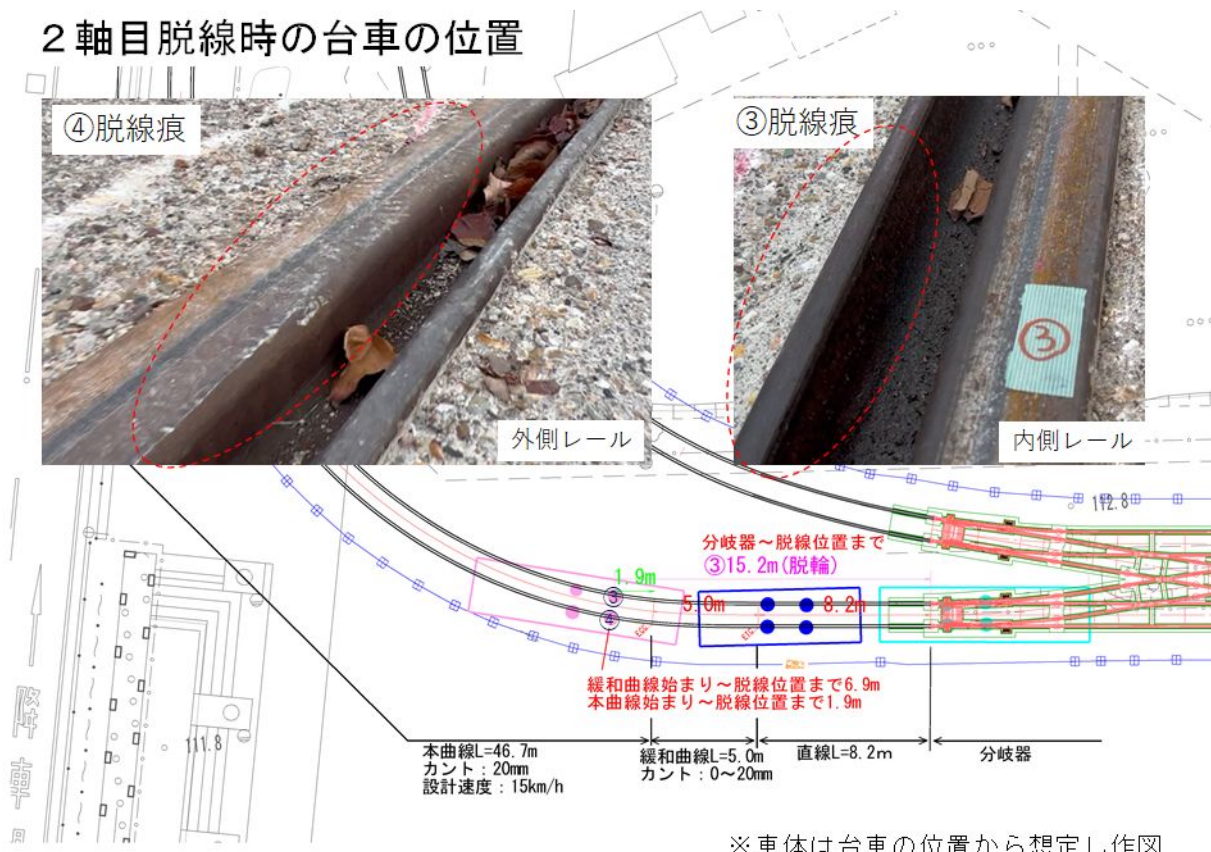
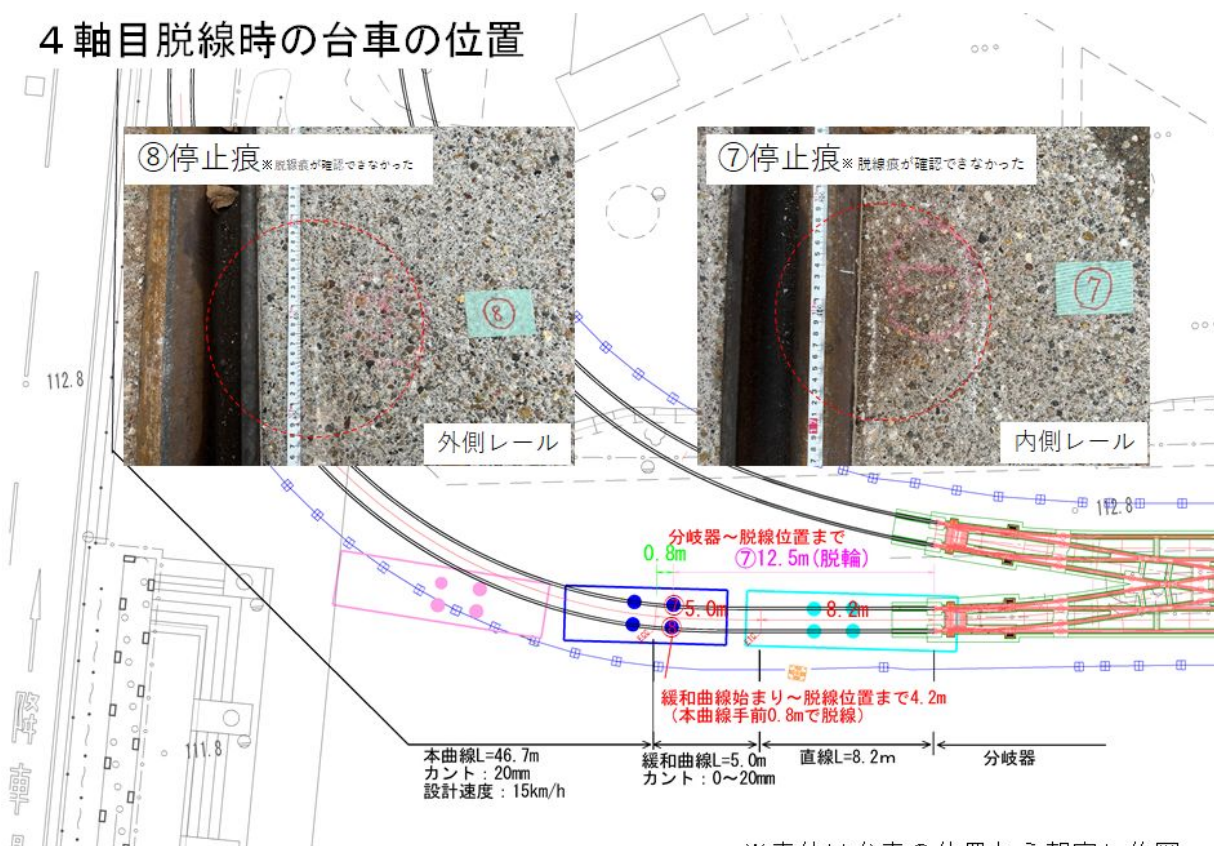


図 14 2 軸目脱線時の台車位置

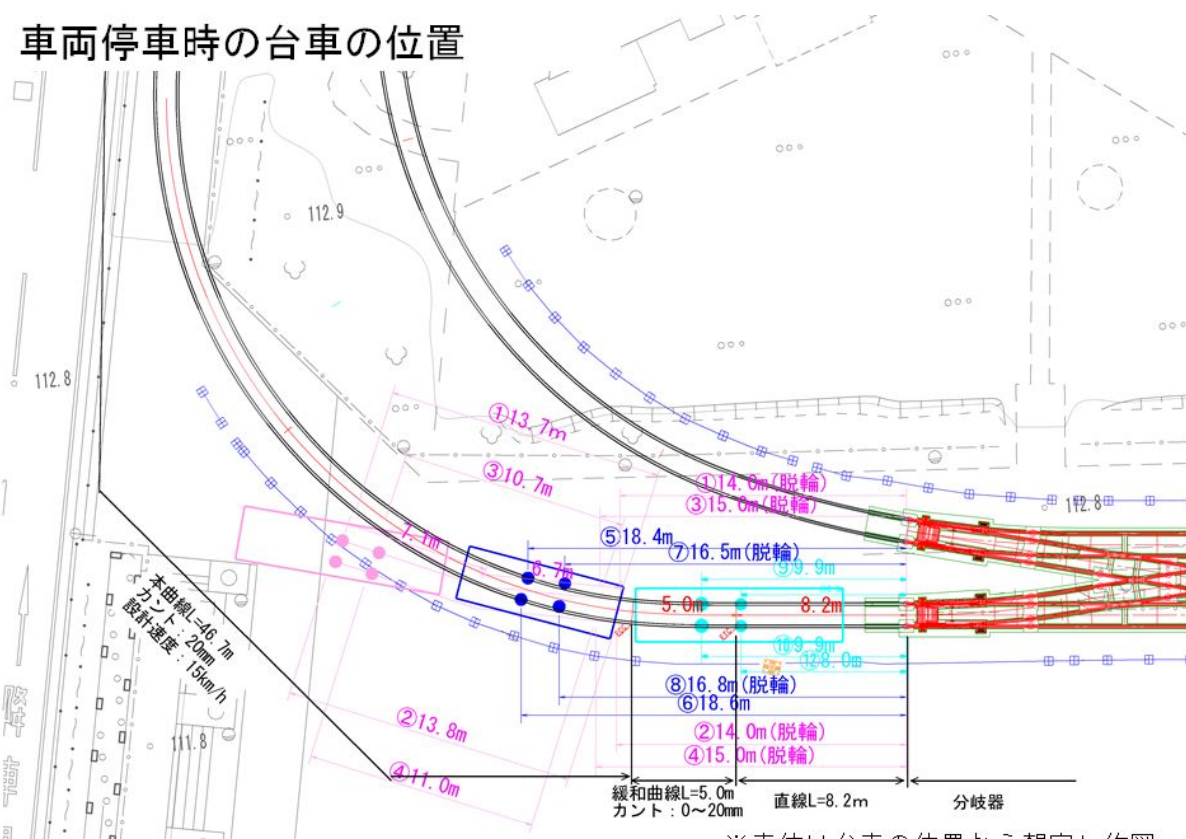
4軸目脱線時の台車の位置



※車体は台車の位置から想定し作図

図 15 4軸目脱線時の台車位置

車両停車時の台車の位置



※車体は台車の位置から想定し作図

図 16 車両停車時の台車位置

(4) ドライブレコーダーによる走行確認

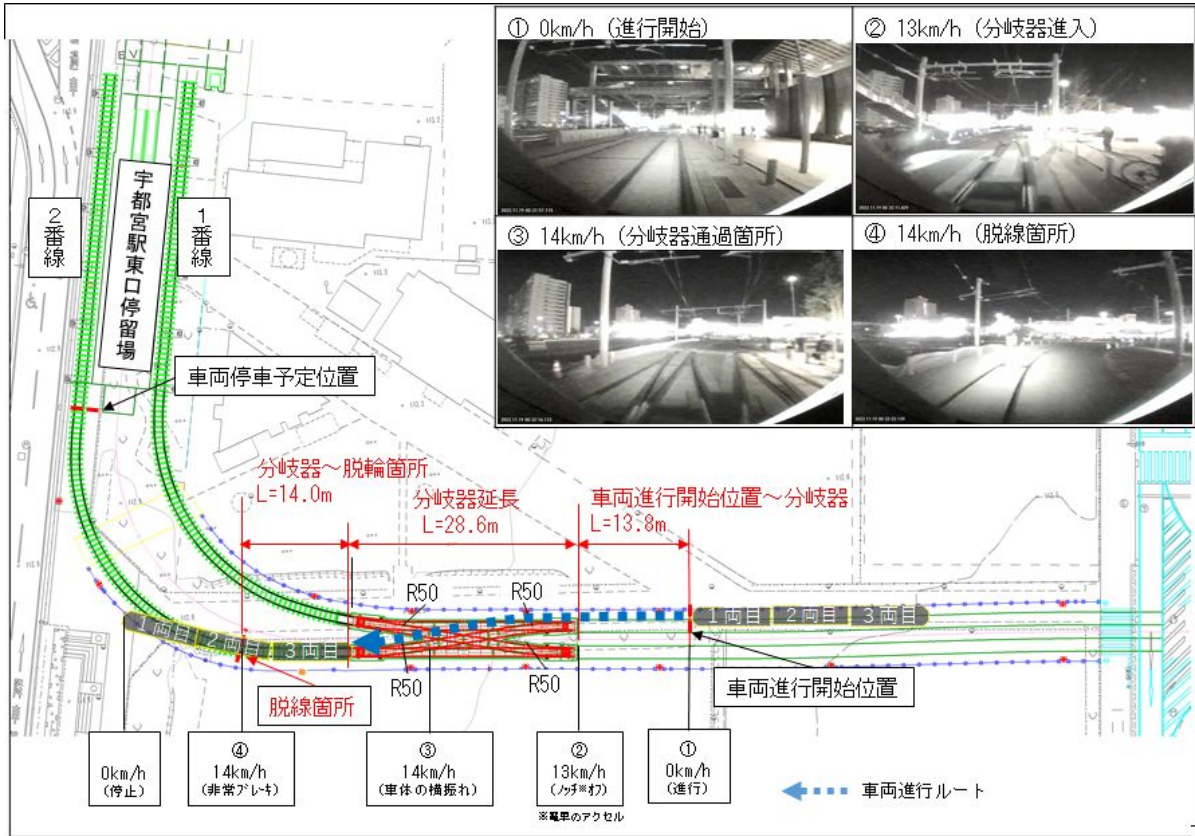


図 17 ドライブレコーダーによる走行確認

4 原因究明及び再発防止策に係る測定試験について

(1) P Q測定試験

- 図 18 のとおり車両の車輪がレールを下に押す力である「P (輪重)」と車輪がレールを横方向に押す力である「Q (横圧)」から脱線係数 (Q/P) を求め、走行安全性の評価を行うもの。



図 18 横圧と輪重のイメージ

- 限界脱線係数については、乗り上がり（車輪のフランジが上昇し始める）脱線が生じるリスクを評価する際の最小の値であり、以下の式（ナダルの式）により定義され、車輪とレールの接触角度により変わる。

$$\text{限界脱線係数} \left(\frac{Q}{P} \right)_{cr} = \frac{\tan\theta - \mu}{1 + \mu \tan\theta} \quad (\text{摩擦係数 } \mu = 0.3)$$

- なお、図 19 に示す限界脱線係数は、最初に脱線したと推定される車輪背面側ではなく、フランジ角度が小さいフランジ正面側に対して求めたものであり、安全側の目安値として 1.25 と設定。

レール形状	溝付レール
車輪とレールの接触イメージ	
限界脱線係数 (安全率考慮)	1.25 (1.04)

図 19 溝付レール（正面側接触）の限界脱線係数

- P Q測定試験については、駅東口から平石の区間において、安全性を確認しながら段階的に速度を上げ測定。
- ただし、限界脱線係数 (1.25 (正面側接触)) に安全率 1.2 で除した値 (1.04) に余裕がないときは速度向上を行わない。

(2) 測定機器設置箇所及び測定方法

- 歪みゲージ、変位計、加速度計を車両の各所に設置し、横圧、輪重等を連続的に測定（横圧は各台車、従軸2点ずつ、合計6点を測定、輪重は各台車、従軸の軸ばね変位を測定）しており、この測定方法については、独立回転車輪のLRV等で従来から実施している測定方法である。
- なお、PQ測定試験時には、台車に小型カメラを設置し、走行時における車体と台車ストッパーの接触状況や車輪とレールの接触状況等を確認

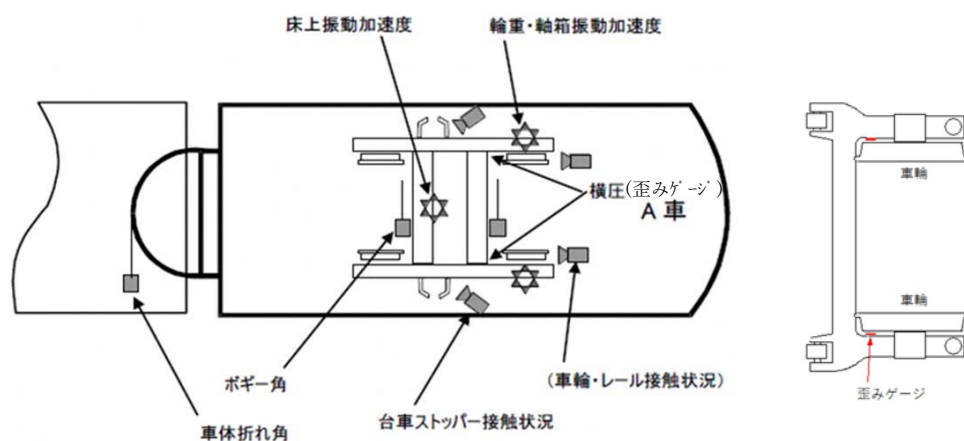


図 20 測定機器設置箇所

(3) アタック角の測定

- 図 21 のとおり、駅東口の R 2 5 と平石の R 3 0 の急曲線で発生する横圧を分析するため、地上側にレーザー変位計を設置し、アタック角を測定することで、車輪踏面に作用する摩擦力の影響などを把握。
- アタック角が、0.6° 以上と確認されたときは、摩擦係数は飽和し最大となる。

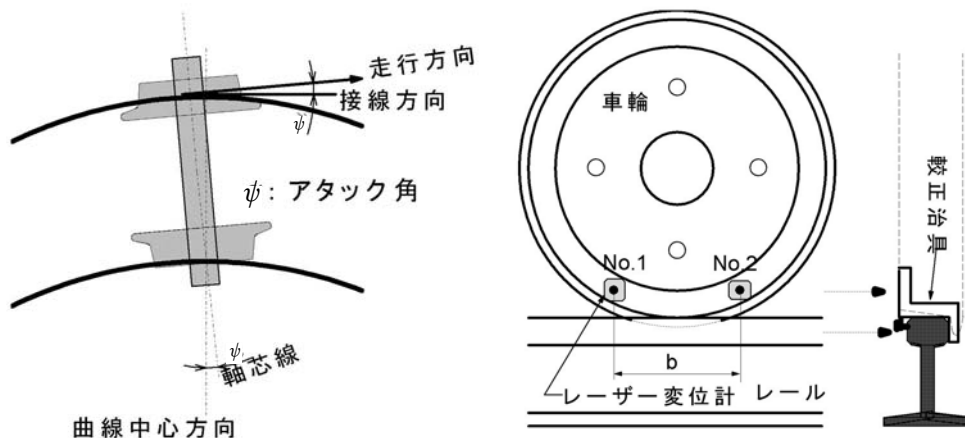


図 21 地上側からのアタック角測定方法

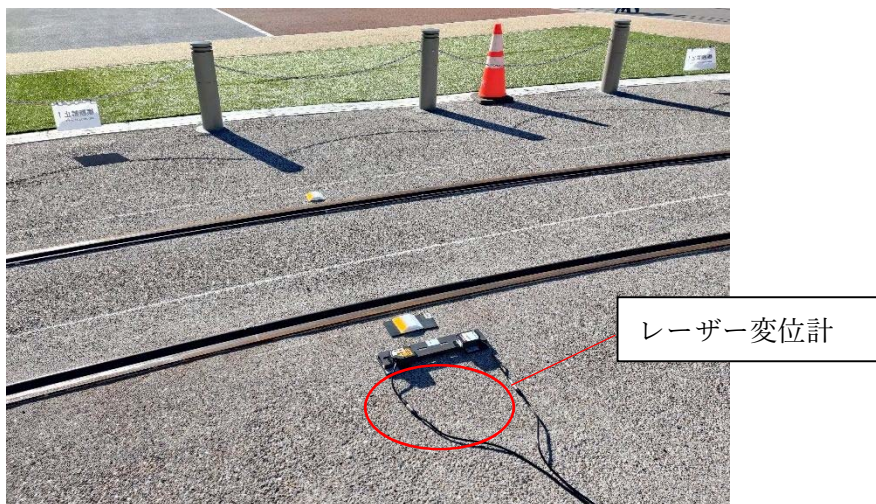


写真 1 脱線箇所のアタック角測定写真

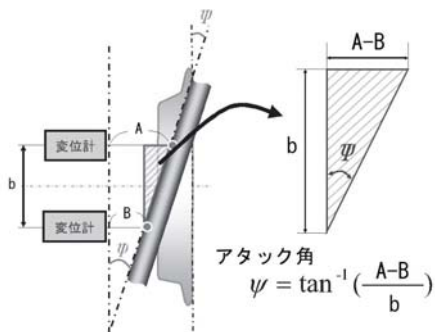


図 22 アタック角の測定原理

※ アタック角の測定については、原因究明に係る調査時のみ実施

5 原因究明に係る調査

- 令和4年12月23日から26日にかけてPQ測定試験を実施し、走行安全性の検証を行った。

(1) 駅東口におけるPQ測定試験の確認パターン

- 駅東口におけるPQ測定試験の確認パターンは図23のとおり。
(通常走行4パターン、緊急走行4パターン 計8パターン)

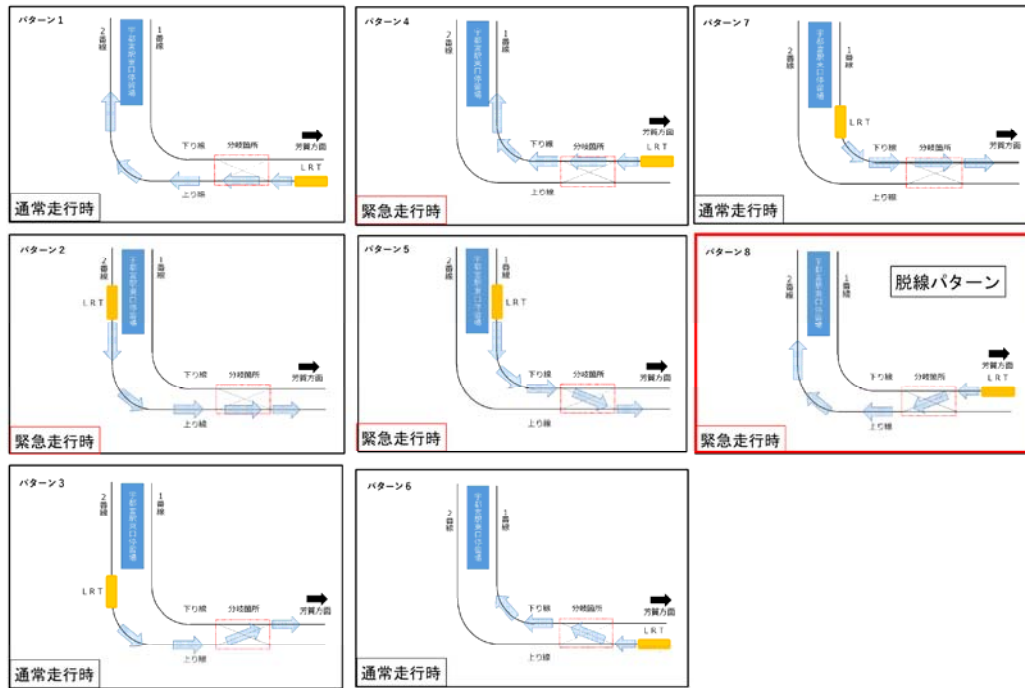


図 23 駅東口におけるPQ測定試験の確認パターン

(2) PQ測定試験の測定速度の結果 (表1)

- 段階的に安全性を確認した結果、駅東口区間の速度向上については、パターン1、4で7 km/h、パターン6で7 km/h、10 km/hのみ実施。
- それ以外のパターンについては、測定時に脱線係数が高かったことから、速度向上は行っていない。
- 駅東口以外の区間については、予定通り段階的に速度を上げながら測定を実施。

表 1 PQ測定試験の測定速度

	5km/h	7km/h	10km/h	15km/h	20km/h	25km/h	30km/h	35km/h	40km/h
駅東(R25⇄分岐) パターン1~7	○	パターン 1,4,6	パターン6						
脱線ルート (分岐⇒R25) パターン8	○	—	—						
峰立体(下り50%)				○	○				
直線区間				○	○	○	○	○	○
平出立体 (R100, 下り40%)				○	○	○			
平石停留場分岐	○	○	○						
入出庫線(R30)	○	○	○						

(3) パターン8の測定結果について

下り線から2番線に進入するパターン8（図24）の各種測定結果については、以下のとおり。

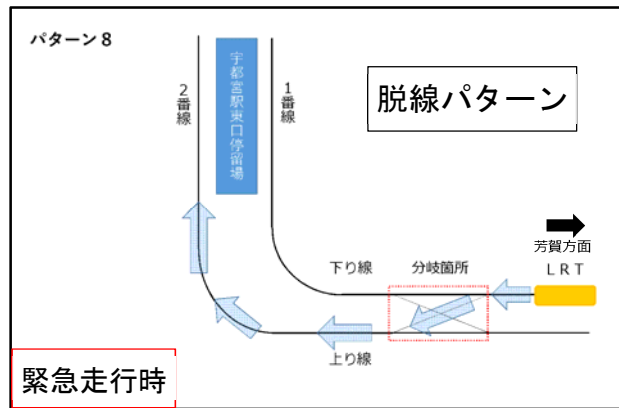


図 24 パターン8の走行経路

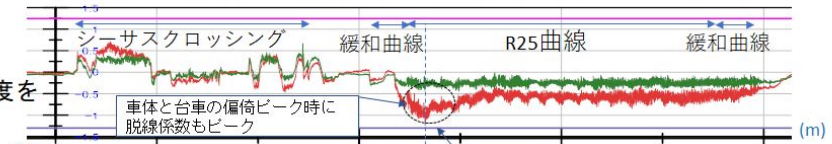
ア 横圧と脱線係数について（図25）

- ・ 曲線部はR25の急曲線であることから、大きな横圧が発生している。
- ・ 脱線係数が高い箇所では、シーサスクロッシングから曲線に入るS字曲線走行時の車体偏倚により、車体と台車間との間隙が狭まった結果、ストッパー当たりが発生し、内軌側車輪フランジ背面の横圧が高まったことが確認された。
- ・ 緩和曲線部の入口付近において、横圧の増加が見られないことから、内軌側車輪フランジ背面による案内が十分にできていない可能性がある。

①脱線係数、②横圧、③輪重の赤線は、先頭内側車輪（内軌側）、緑線は、先頭外側車輪（外軌側）

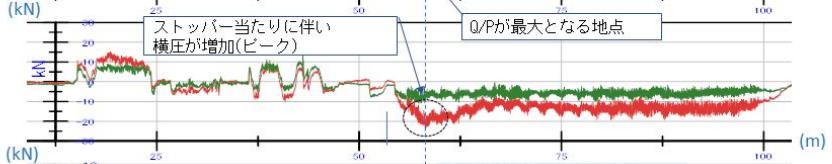
①脱線係数【Q/P】

（横圧と輪重から脱線に対する安全度を
確認するもの）



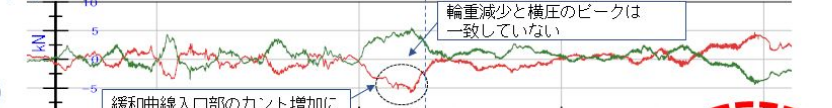
②横圧【Q】

（遠心力などにより車輪がレールを
水平方向に押す力）



③輪重【P】

（車輪がレールを垂直方向に押す力）



④偏倚(旋回角)

（曲線での車体と台車の角度）



ストッパーへ強く押し当てている(偏倚ピーク)
ストッパー当たりが発生

ストッパー（車体前方左側）
が押し込まれている



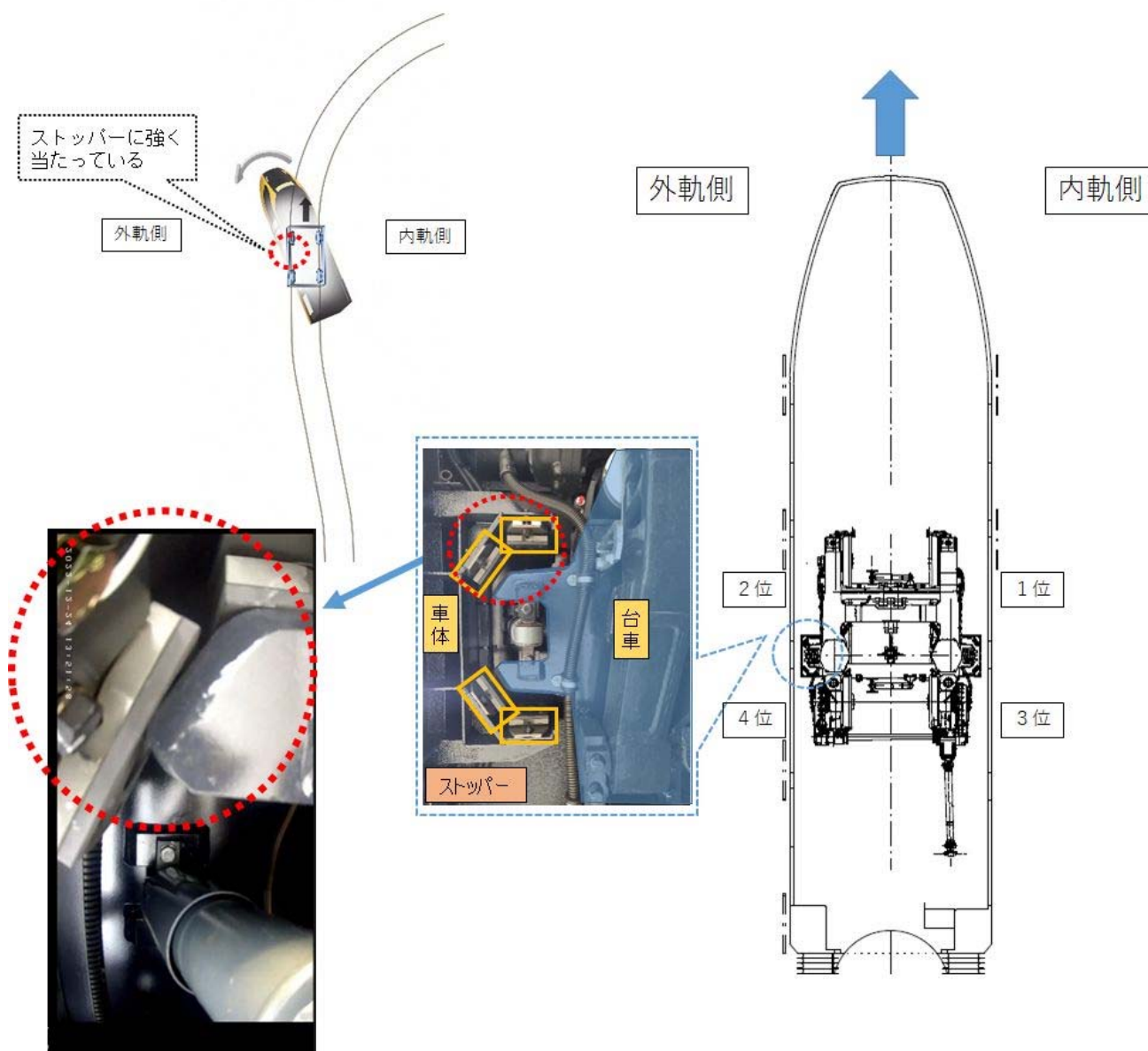
図 25 パターン8（5km/h）の測定結果

イ 偏倚（旋回角）について

- ・ 台車からの車体の偏倚は、他の走行パターンに比べ、走行経路がS字曲線となる（反向する曲線の半径や曲線間の距離が最も小さくなる）パターン8が最も大きい。

ウ 台車ストッパーの接触状況について（図26）

- ・ PQ測定試験時のカメラ映像により、横圧がピークとなる瞬間に車体が台車ストッパーに強く当たっていることが確認された。



※ 写真については、台車の下側から撮影したものであり、車両の上方からのイメージに合わせるため加工

図 26 台車ストッパーの映像

エ アタック角の測定結果について (図 27)

- 各台車先頭車輪のアタック角の測定結果は、 2° 以上であった。

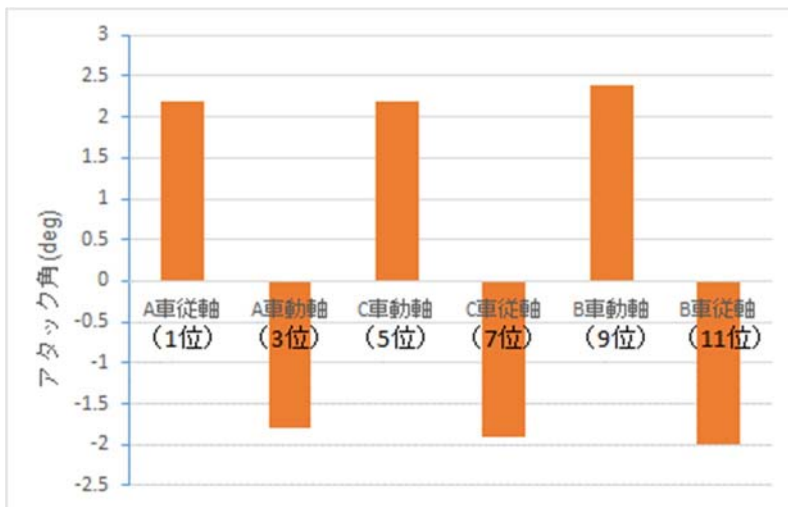


図 27 アタック角測定データ

オ ドライブレコーダーの映像の解析 (図 28)

- シーサスクロッシングを通過後にR 25の曲線に入るため、車体は左右に大きく振られることになる。車体の最大振れ幅 (右最大から左最大まで) を移動するのに要する時間を解析した結果、5 km/h 走行時は7秒であったのに対し、脱線時の13 km/h 走行時は2秒であった。
- 脱線時と同じ運転パターン (上記脱線係数走行試験のパターン8に相当) で5 km/h 走行時と、脱線時 (13 km/h) とを比較した結果、車体の左右の振れ幅は同等であった。この運転パターンでは台車と車体間でストッパー当たりが生じるため、偏倚量に差が出ないためと考えられる。

【右首振り最大時】



【左首振り最大時】



最大偏倚時の車体旋回時間と旋回速度

走行速度	車体の旋回時間	旋回速度
5km/h	約7秒	約0.36km/h
13km/h (脱線時)	約2秒	約1.26km/h

図 28 ドライブレコーダーの映像解析

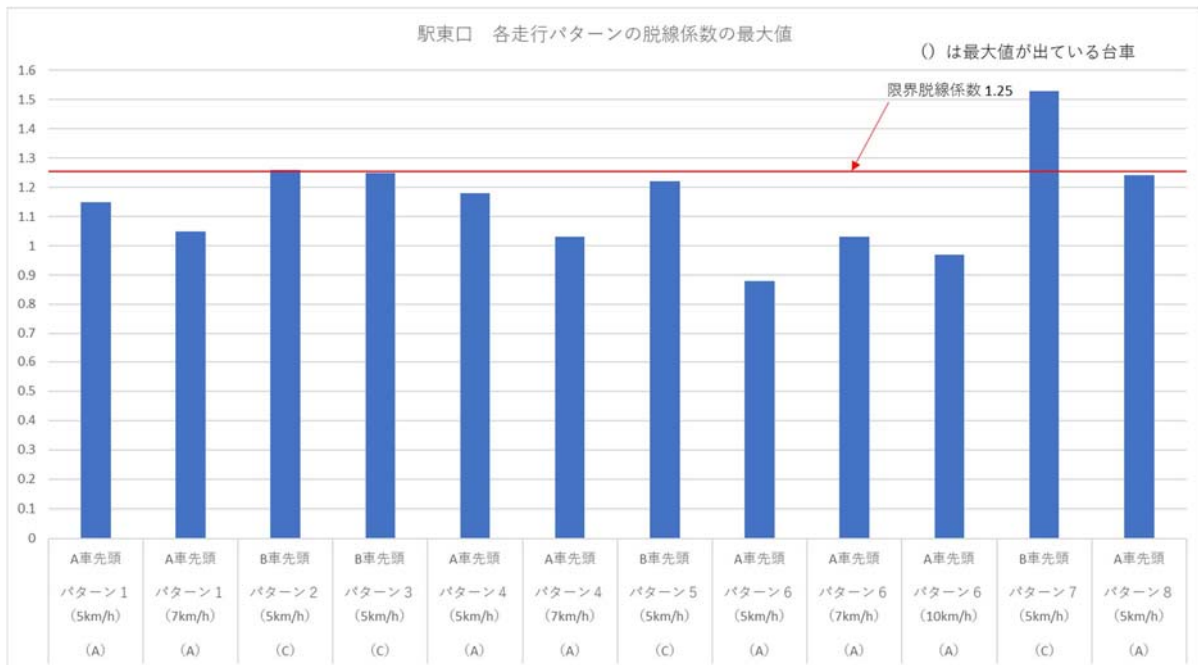
(4) 駅東口の各走行パターンの測定結果

駅東口の各走行パターン（図 23）について走行試験を行い、各種測定結果については以下のとおり。

ア 脱線係数について（図 29）

- ・ R 2 5 という急な曲線であることから、走行パターンや進行方向によらず、大きな横圧が発生している。
- ・ 脱線係数については、高い傾向がみられ、「パターン 2、3、7」では、曲線入口付近で限界脱線係数 1. 2 5 を超えていた。なお、今回の限界脱線係数を超えたパターンにおいて、レールと車輪の接触状況を小型カメラで確認したところ、乗り上がりは見られていない。

※ 限界脱線係数については、乗り上がり（車輪のフランジが上昇し始める）脱線が生じるリスクを評価する際の最小の値である。



※グラフは各脱線係数の絶対値で表記

図 29 駅東口の各走行パターンの脱線係数の最大値

イ 輪重について

- 特に脱線係数が高いパターン7においては、図30のとおり緩和曲線中のカント増大（図31）に伴う軌道のねじれにより、内軌側の輪重が減少したこと（図32）で、パターン8よりも脱線係数が高くなり、限界脱線係数を超えた。

脱線係数、横圧、輪重の赤線は内側車輪(内軌側)、緑線は外側車輪(外軌側)

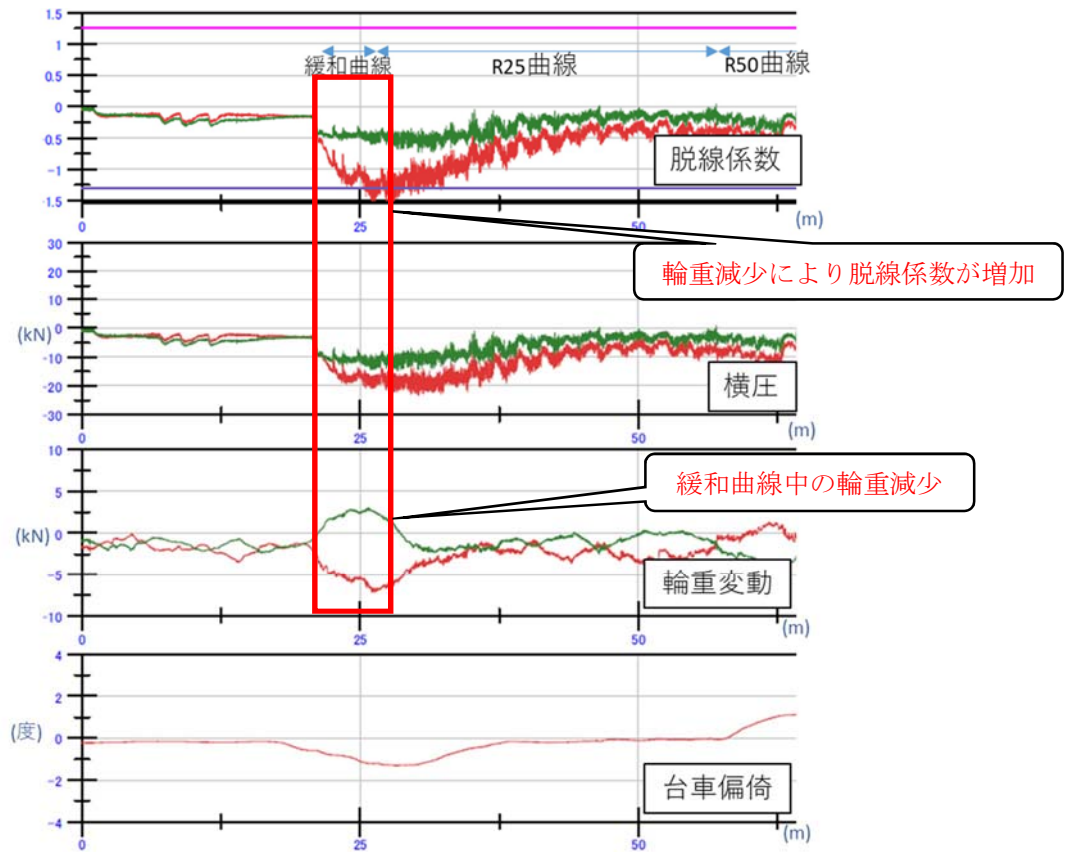


図30 パターン7 (5km/h) の測定結果

【カントと緩和曲線について】

- ・ 車両が曲線部を走行する場合には外方に遠心力が働くため、車両の転倒を防ぐとともに乗り心地を良くするために、外側のレールを高くするカントが設けられている。
- ・ 直線から曲線に移るとき、遠心力の変化を逡減し、車両を安全、快適に走行させるため、徐々に変化させる。

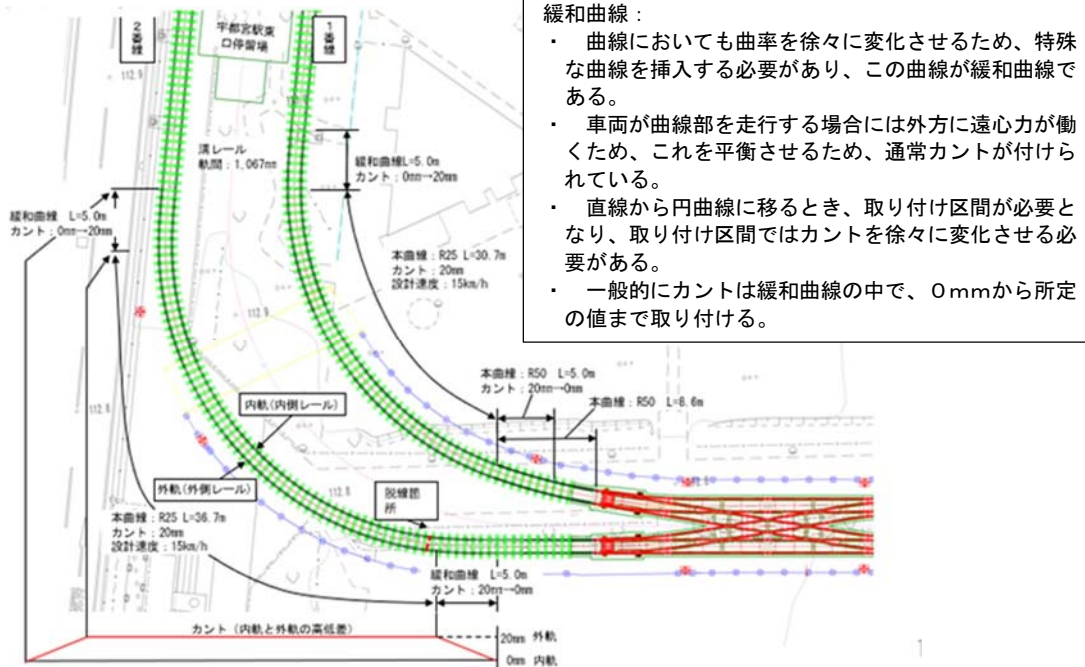


図 31 カントと緩和曲線について

【輪重減少のメカニズムについて】

- ・ 緩和曲線部におけるカント取付に伴い軌道面がねじれることにより、車輪に加わる力(輪重)が減少する。

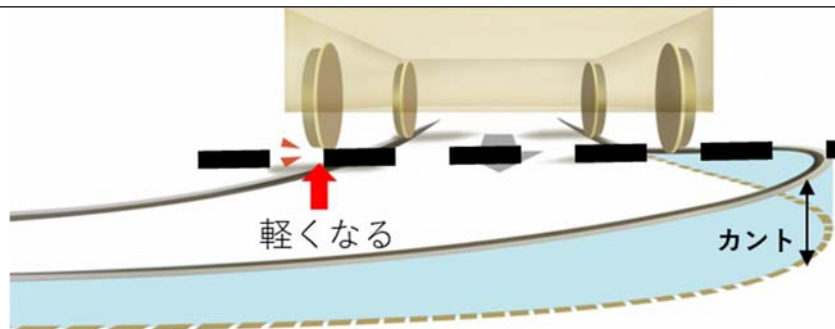


図 32 輪重減少のメカニズムについて

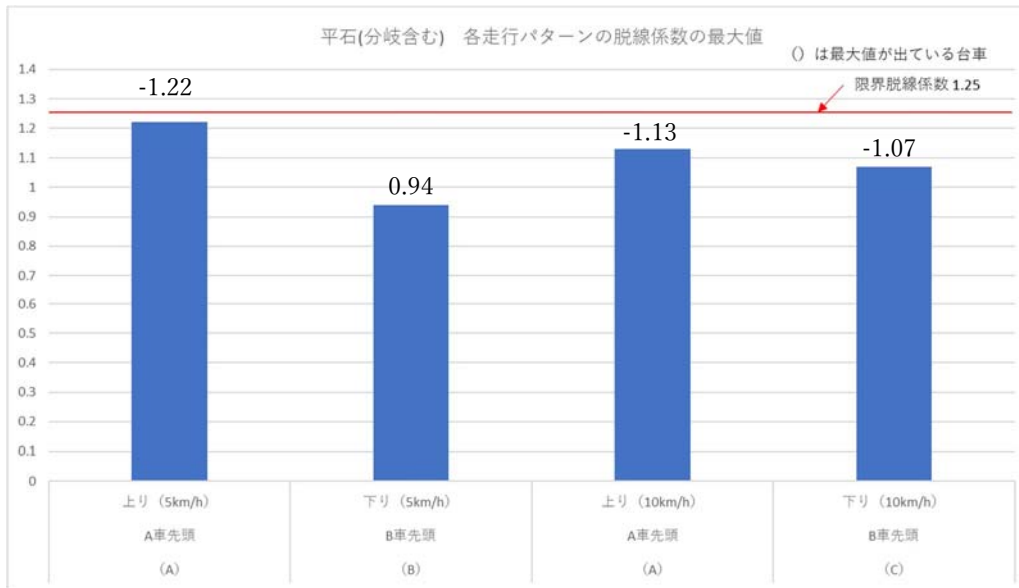
【台車ストッパーの接触状況について】

- ・ パターン1～7については、台車ストッパーへの強い当たりが小型カメラ映像で確認されなかった。

(5) 駅東口以外の区間における測定結果について

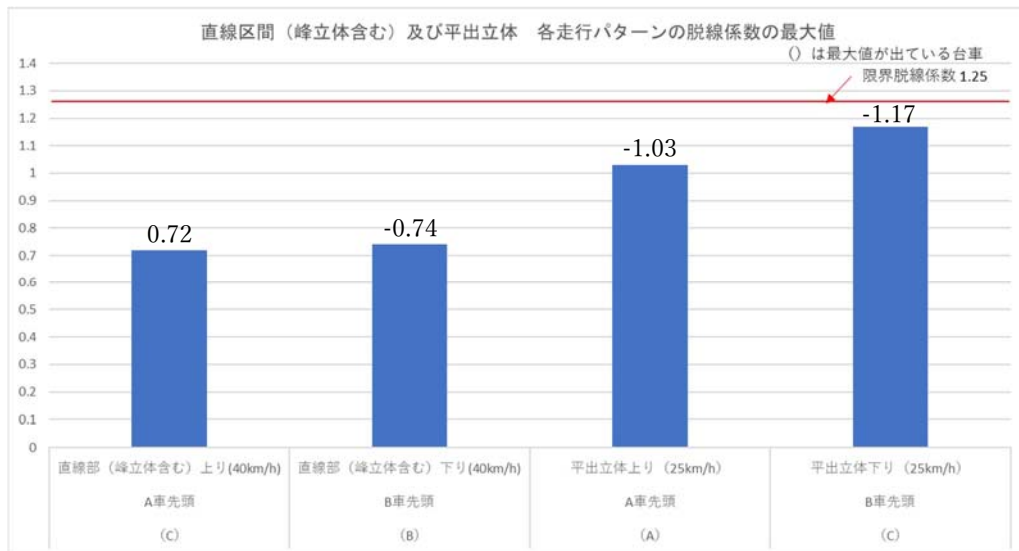
ア 脱線係数について

- ・ 「平石区間 (R30、カントなし、緩和曲線なし)」については、5 km/h、10 km/h とともに、限界脱線係数を下回っているものの、上り、下りとも脱線係数が高い傾向がみられ、曲線入口で最大値となっていることが確認できた。(図 33)
- ・ 「峰立体 (勾配区間)」、「直線区間」、「平出立体 (勾配及び曲線)」においても、各走行速度で限界脱線係数を下回っていることが確認できた。(図 34)



※グラフは各脱線係数の絶対値で表記

図 33 平石(分岐含む)の各走行パターンの脱線係数の最大値



※グラフは各脱線係数の絶対値で表記

図 34 直線区間(峰立体含む)及び平出立体の脱線係数の最大値

イ 輪重について (図 35)

- ・ カントが無い平石のR30では曲線入口の輪重減少が見られない。

脱線係数、横圧、輪重の緑線は内側車輪(内軌側)、赤線は外側車輪(外軌側)

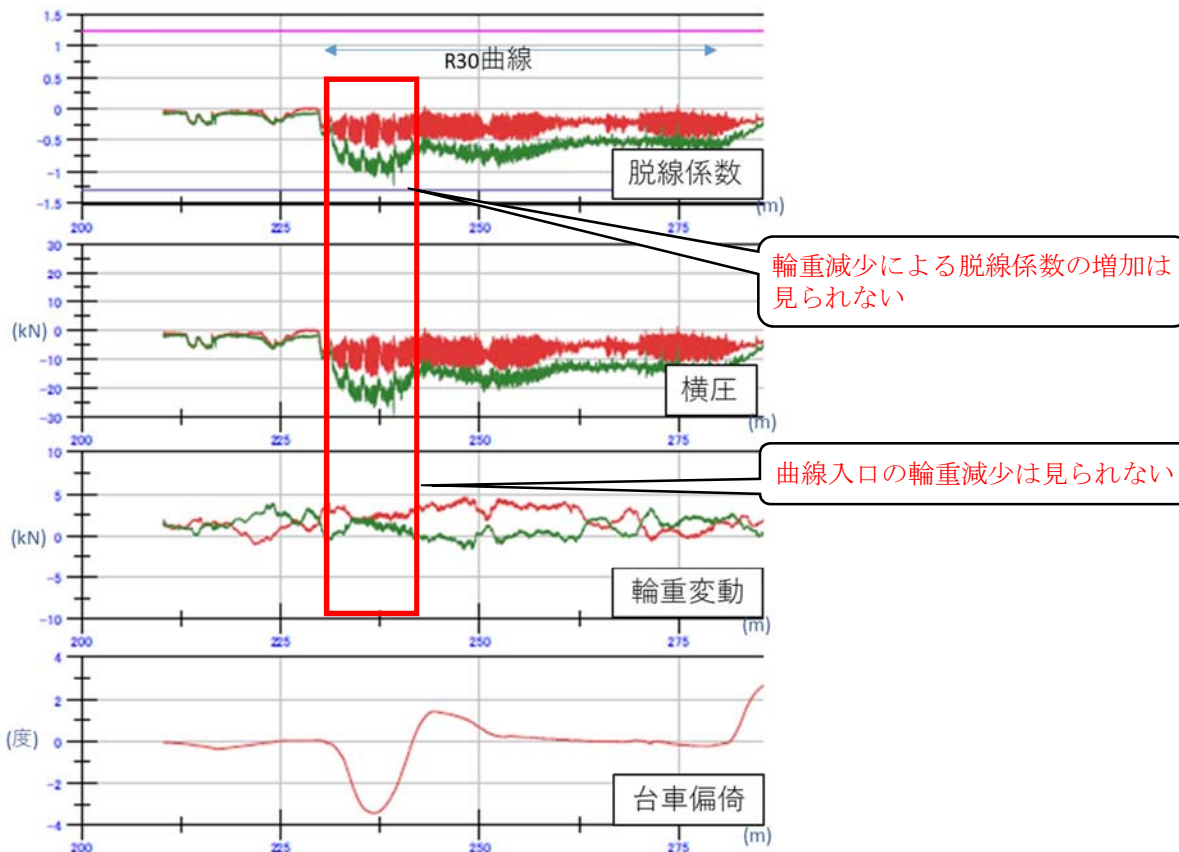


図 35 平石 (上り (5km/h)) の測定結果

ウ アタック角の測定結果 (図 36)

- ・ 平石区間のR30の曲線における各台車先頭車輪のアタック角の測定結果は、約2°以上であった。

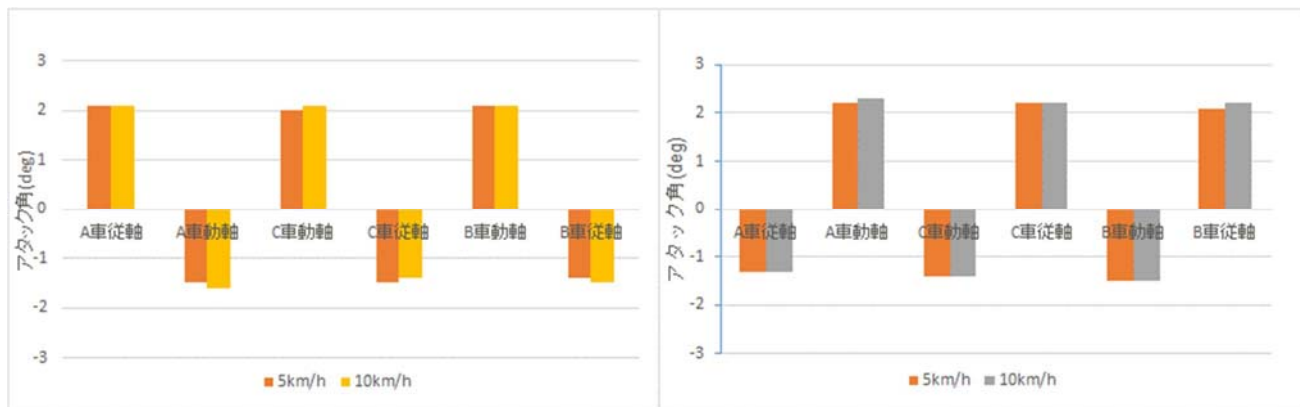


図 36 平石区間のアタック角の測定結果

6 測定結果より推察される脱線原因等について

- ・ パターン8においては、シーサスクロッシングとR25の曲線が近接しているため、S字曲線を通過することになり、車体は台車を中心に左右に大きく振られる。これにより車体・台車間の偏倚量は大きくなりストッパーに当たりが生じ、ストッパー当たりの衝撃は横圧の増加につながる。
- ・ 13km/h 走行時には、速度の増加によりストッパー当たりの衝撃も増加し、車体から台車に大きな力が加わり、先頭軸内軌の背面横圧も著大となった結果、車輪が軌道を逸脱し脱線に至ったものと推定される。
- ・ 13km/h 走行時にはより強い遠心力により内軌側輪重も減少することから、これによる脱線係数の増加も脱線に影響したと推定される。

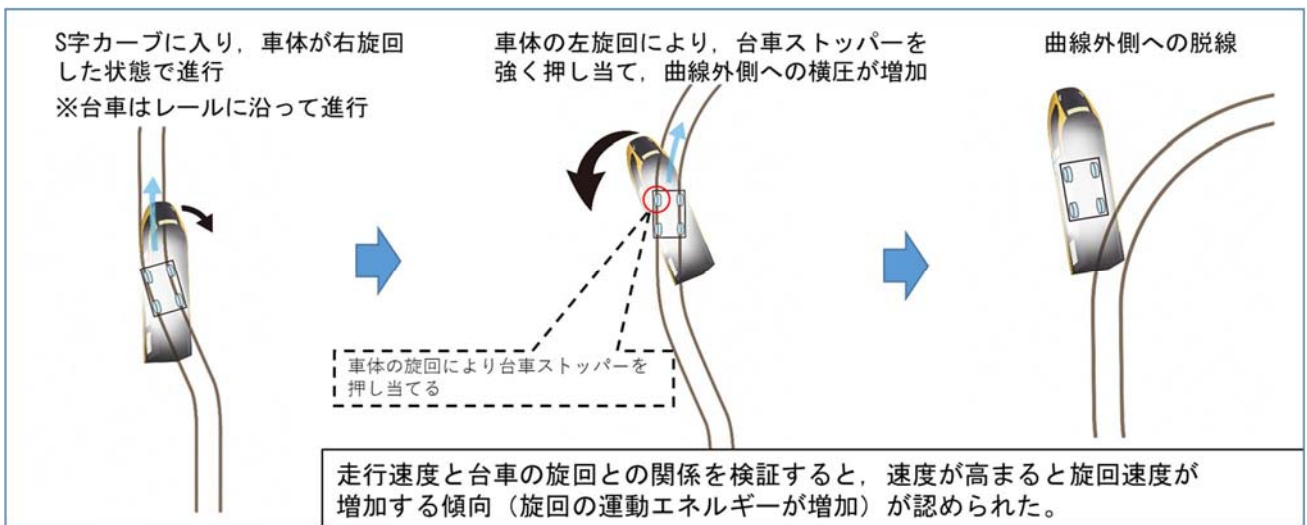


図 37 脱線発生のメカニズム

- ・ パターン8以外の各走行パターンにおいては、台車ストッパーへの強い当たりは確認されなかったものの、急曲線であるため、走行パターンや進行方向によらず横圧が大きいことに加え、緩和曲線部の輪重減少の影響により高い脱線係数が発生したものと推定される。