

議員協議会資料

日時：令和5年2月21日（火）
11：00～
場所：議員協議会室

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の考察（中間報告）と それらを踏まえた対応について

【経過】

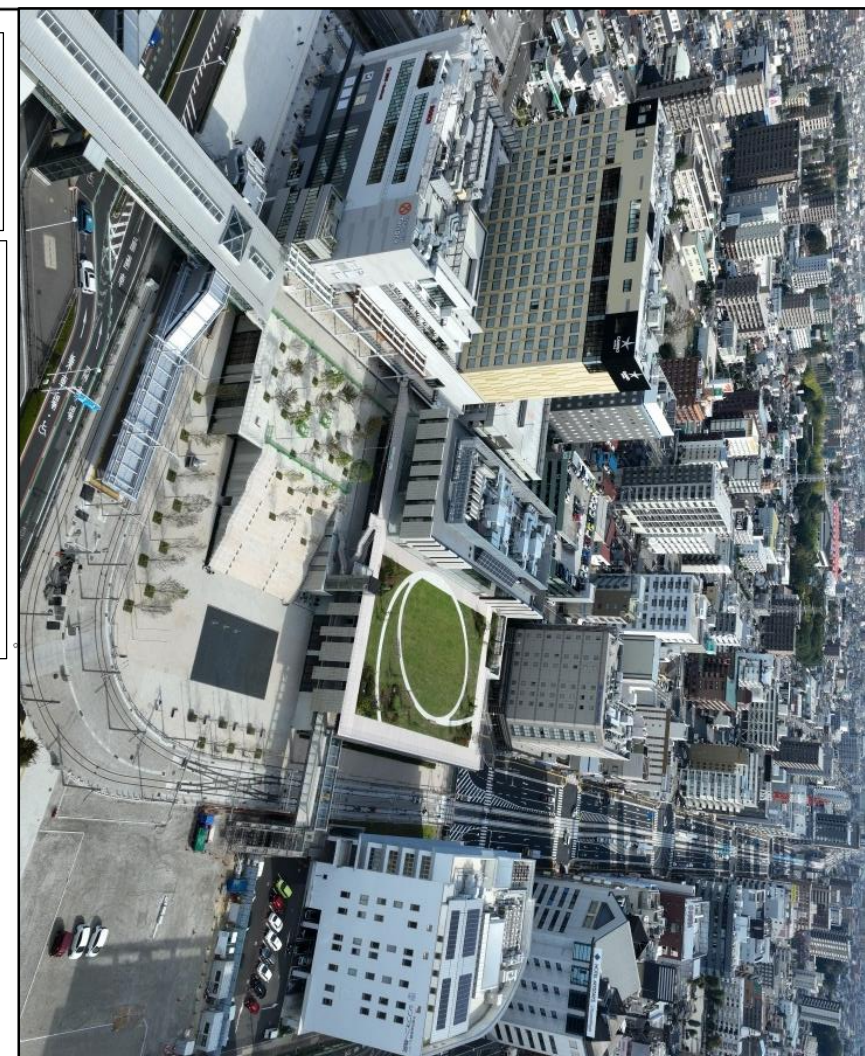
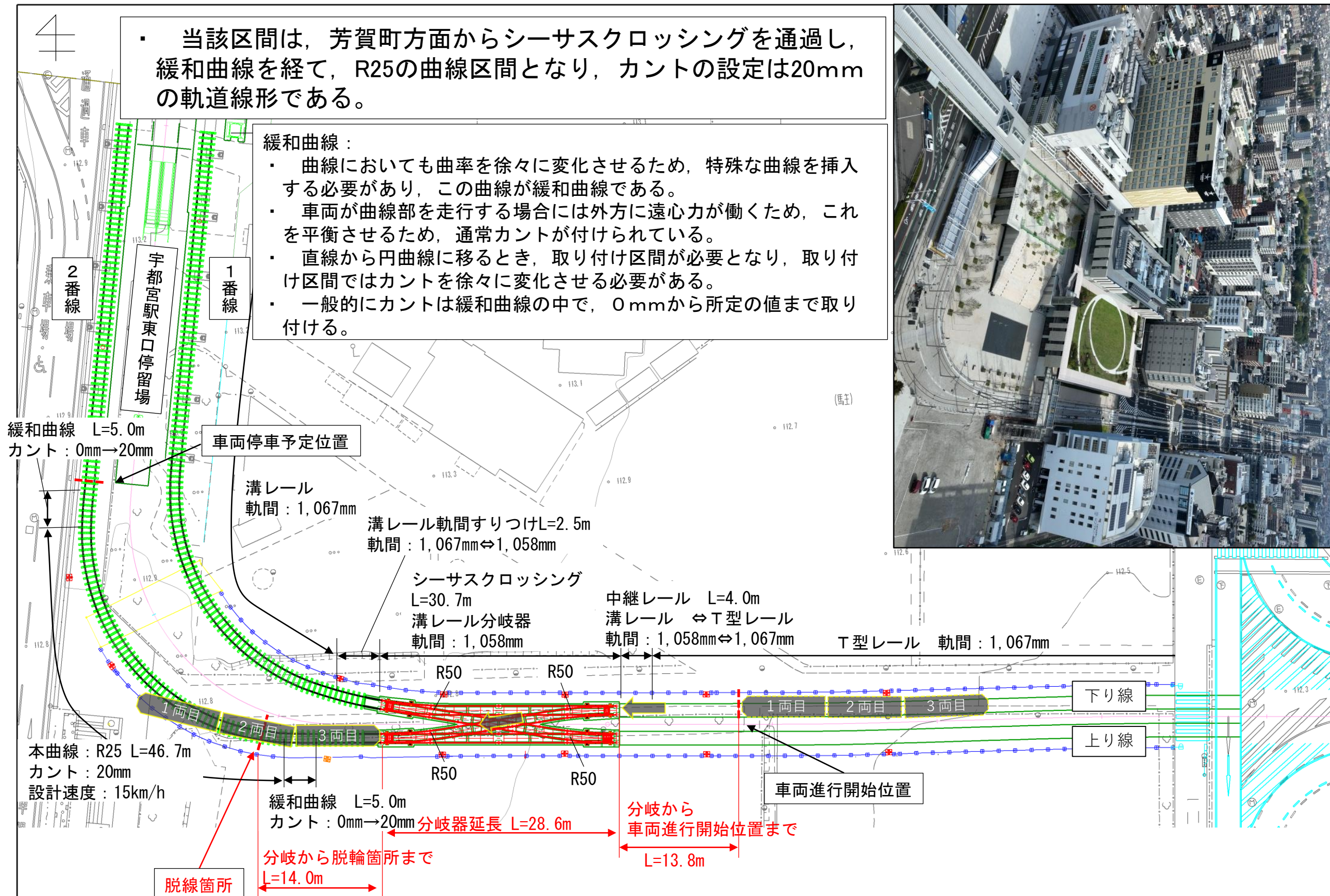
- 令和4年11月19日 脱線事故の発生
 - ⇒ 宇都宮駅東口停留場付近において、シーサスクロッシング（分岐器）の入線試験を行っている際、緊急時に使用する走行（逆走）パターンにおいて、下り線から停留場2番線ホームに向かう曲線部で脱線が発生
- 11月22日 有識者による現地調査の実施
 - ⇒ 振動加速度計を用いた走行調査を実施
(11月25日～12月2日)
- 12月16日 第1回有識者会議の開催
 - ⇒ 有識者立ち合いのもとPQ測定試験（※）等を実施
(12月23日～12月26日)
 - ※ 車輪に加わる輪重（P）と横圧（Q）の測定データ（Q/P）から、脱線発生に対する安全性を確認
- 2月13日 第2回有識者会議を開催
 - ⇒ 脱線事故に関する原因究明及び再発防止等に係る考察
2月17日 中間報告取りまとめ（別添 中間報告参照）

○ 駅東口の設計緒元等

- 当該区間は、芳賀町方面からシーサスクロッシングを通過し、緩和曲線を経て、R25の曲線区間となり、カントの設定は20mmの軌道線形である。

緩和曲線：

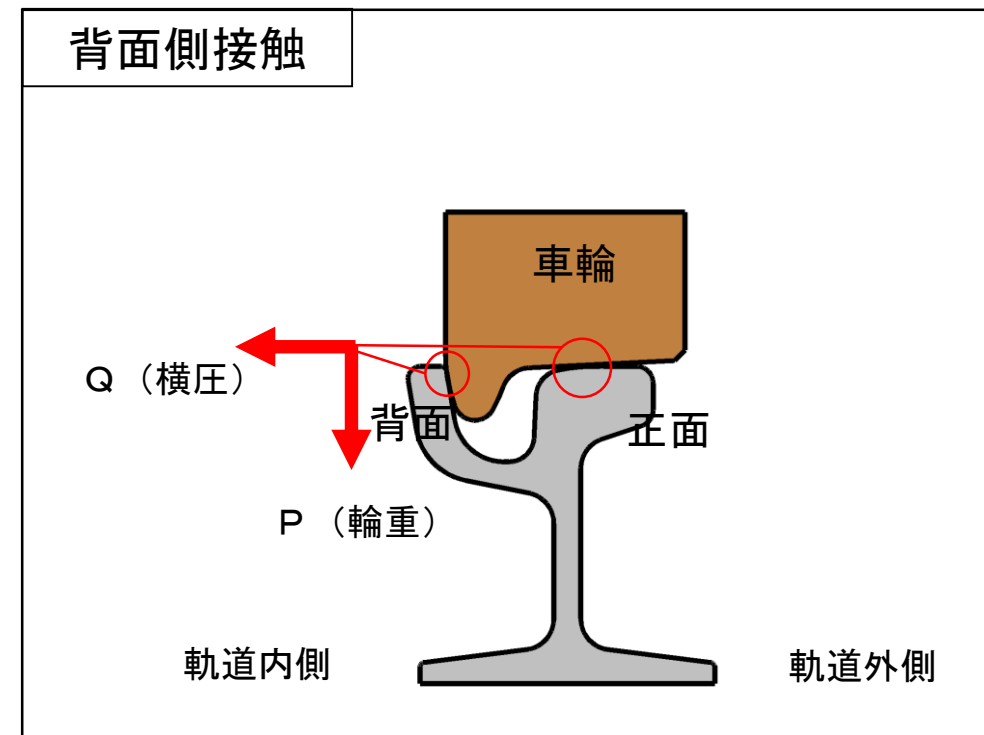
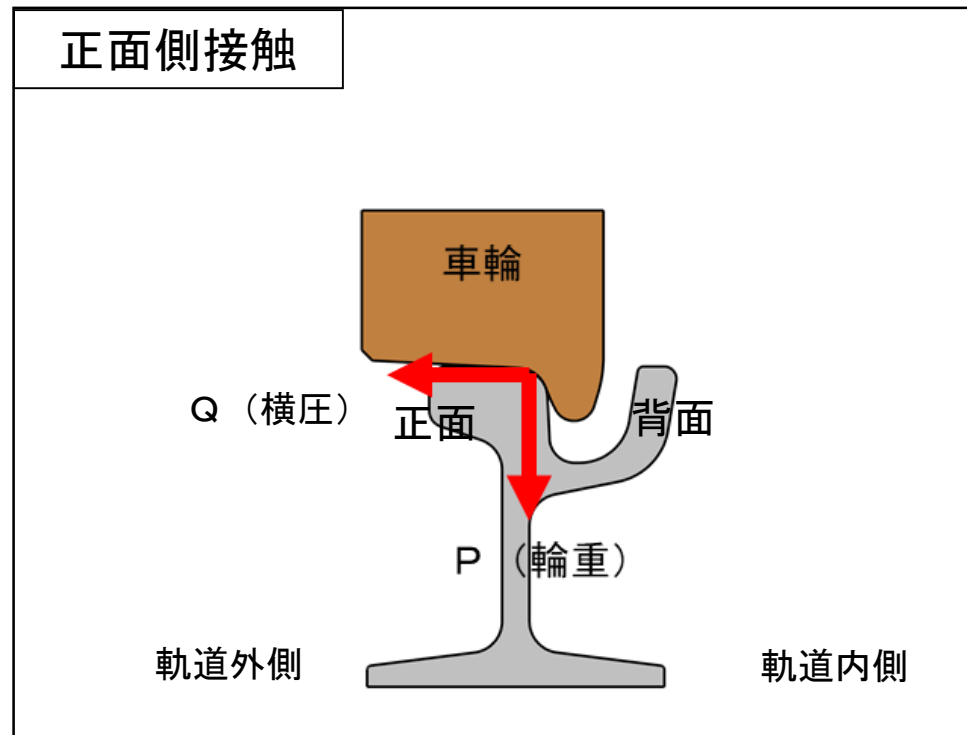
- 曲線においても曲率を徐々に変化させるため、特殊な曲線を挿入する必要があり、この曲線が緩和曲線である。
- 車両が曲線部を走行する場合には外方に遠心力が働くため、これを平衡させるため、通常カントが付けられている。
- 直線から円曲線に移るとき、取り付け区間が必要となり、取り付け区間ではカントを徐々に変化させる必要がある。
- 一般的にカントは緩和曲線の中で、0mmから所定の値まで取り付ける。



○ 測定試験について

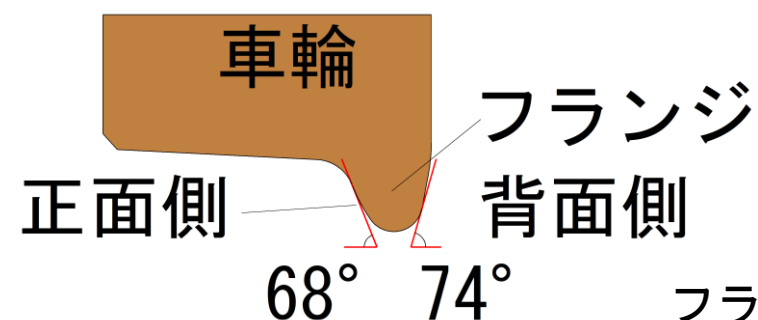
■ P Q測定試験

- ・ 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：横圧と輪重のイメージ

- ・ 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に安全率1.2を考慮した値1.04に余裕がないときは速度向上を行わない。
- ・ なお、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（図右）ではなく、フランジ角度が小さいフランジ正面側（図左）に対して求めたもので、安全側の目安値である。

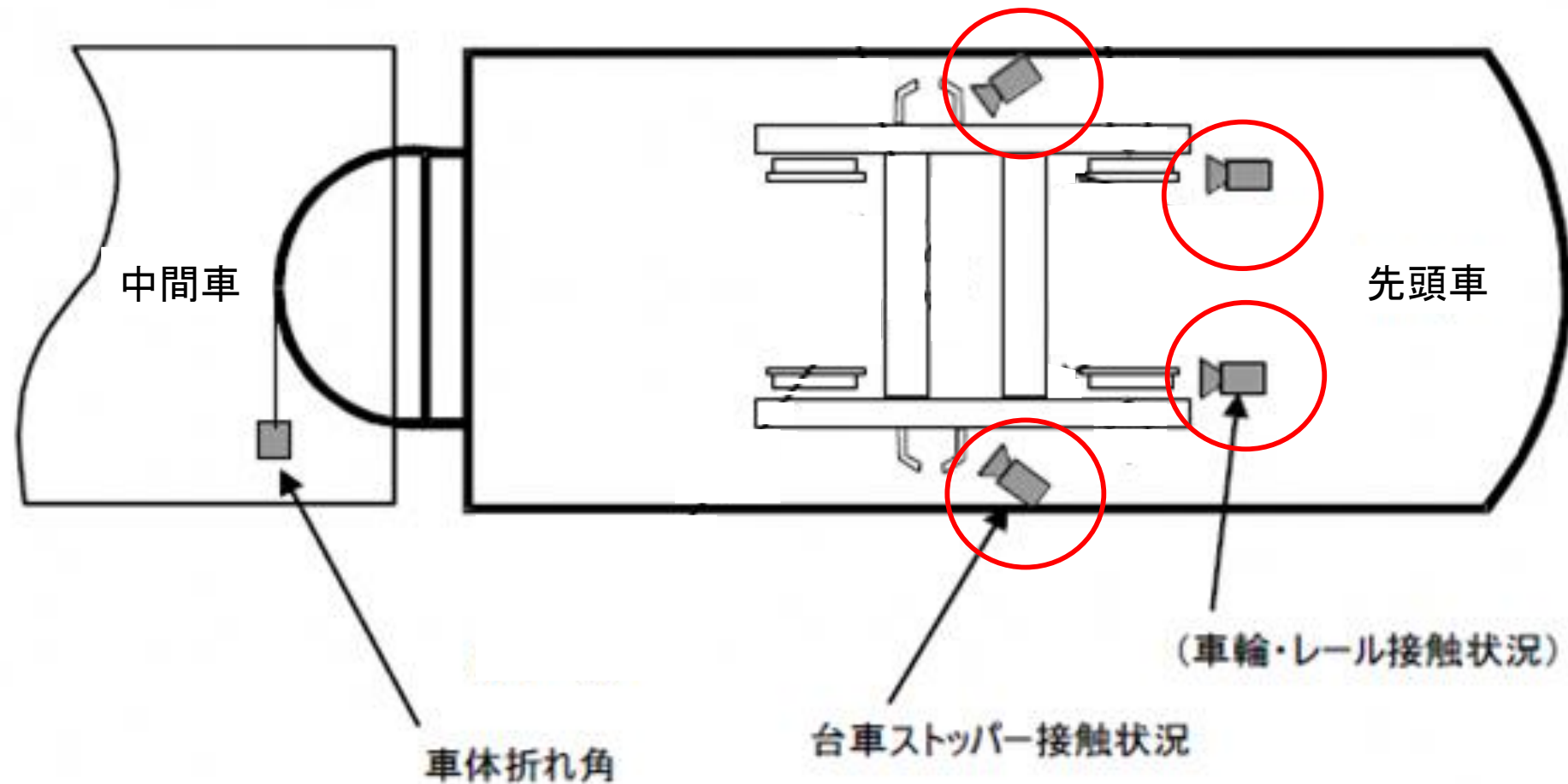


フランジ角が急なほど脱線しにくい

○ 測定試験について

■ カメラによるモニタリング

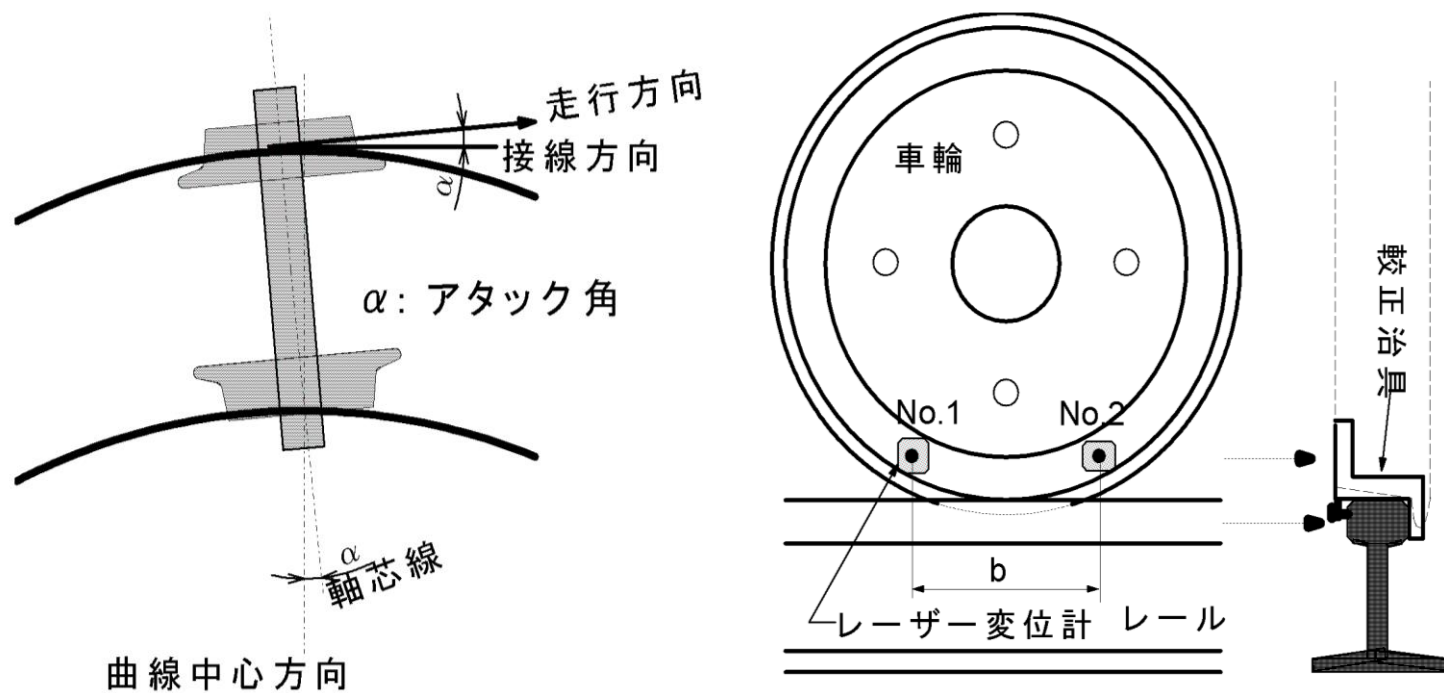
- ・ PQ測定試験時には、以下のとおり台車に小型カメラを設置し、走行時における車体と台車ストッパーの接触状況や車輪とレールの接触状況等を確認



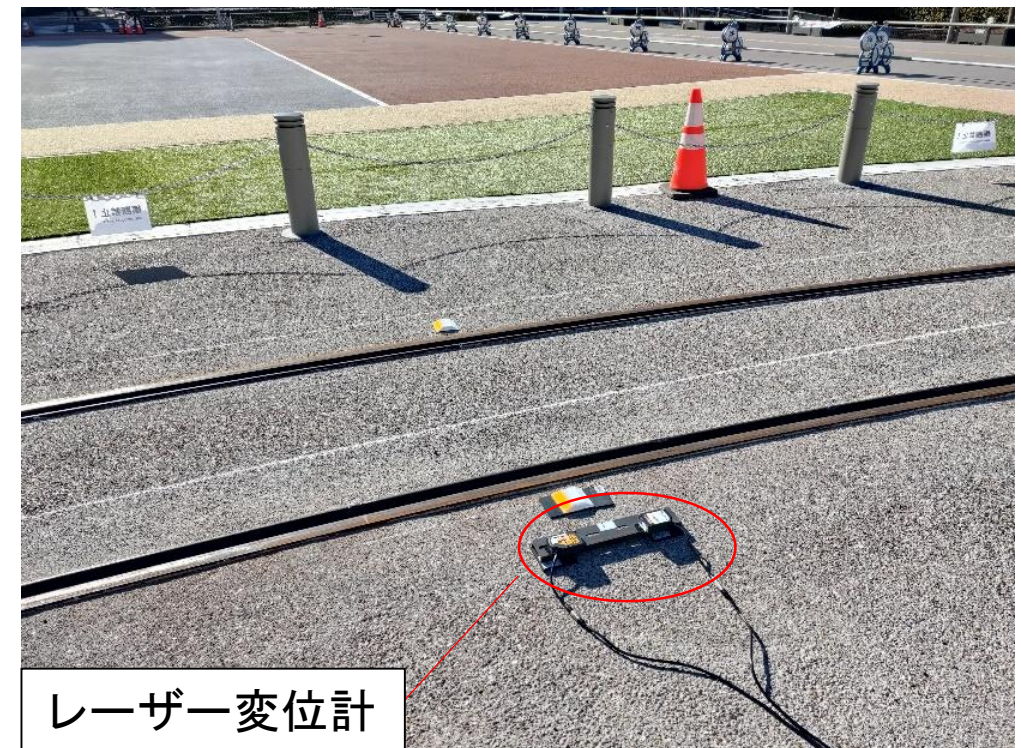
○ 測定試験について

■ アタック角の測定

- 図のとおり駅東口のR25と平石のR30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：地上側からのアタック角測定方法



脱線箇所のアタック角測定写真

○ P Q測定試験の測定速度の結果

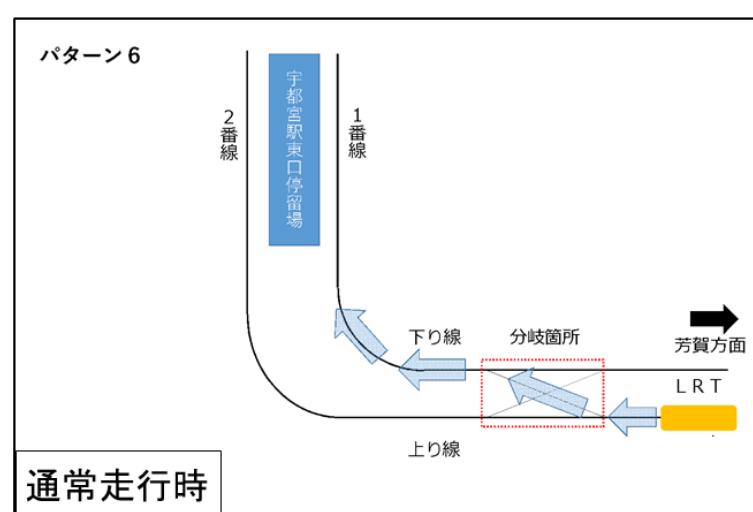
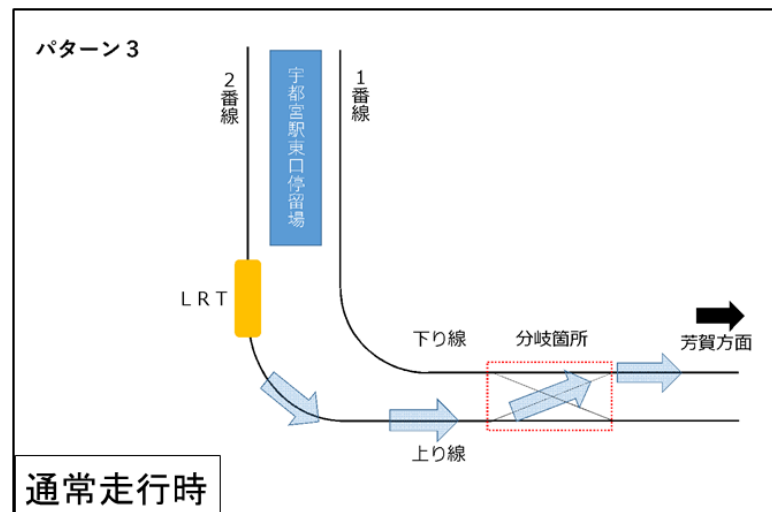
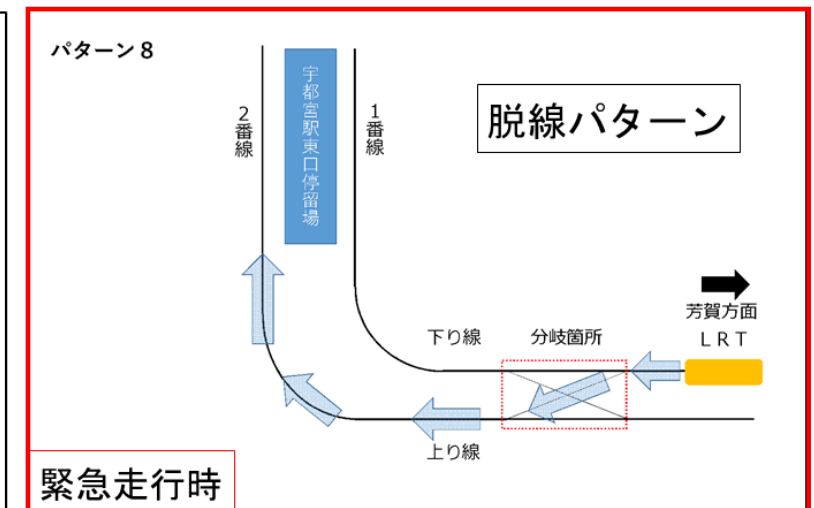
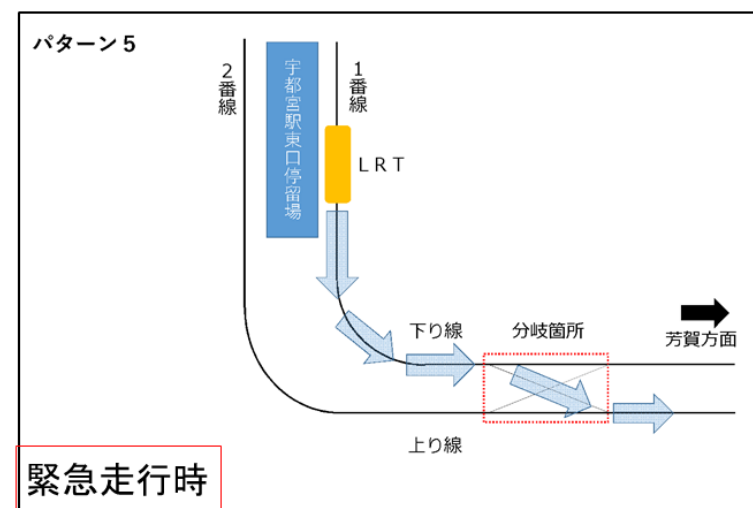
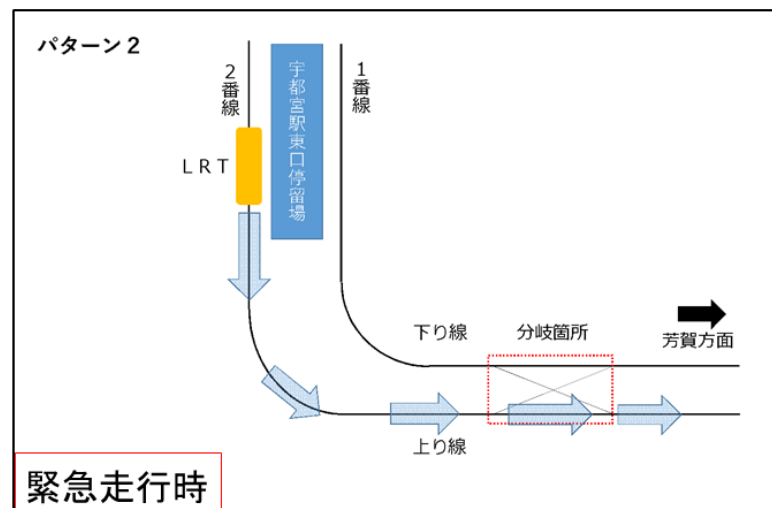
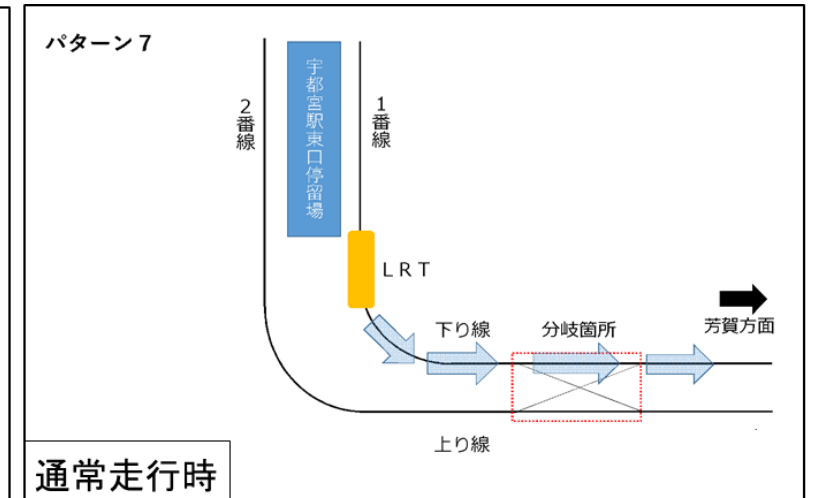
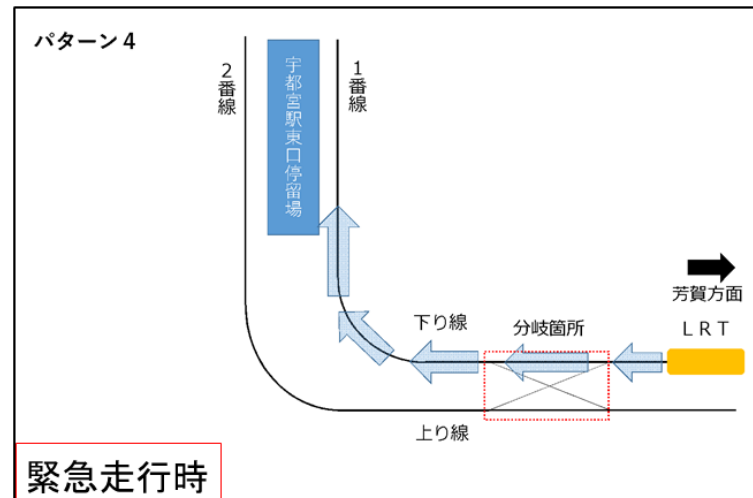
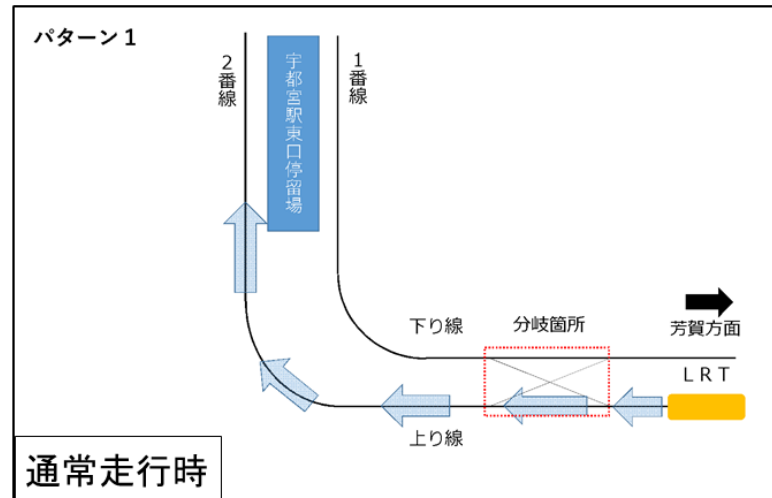
- ・ 段階的に安全性を確認した結果， 駅東口区間の速度向上については， パターン 1， 4 で7km/h， パターン 6 で7km/h， 10km/hのみ実施。
- ・ それ以外のパターンについては， 測定時に脱線係数が高かったことから速度向上は行っていない。
(5km/hのみ実施)
- ・ 駅東口以外の区間については， 予定通り段階的に速度を上げながら測定を実施。

表：PQ測定試験の測定速度

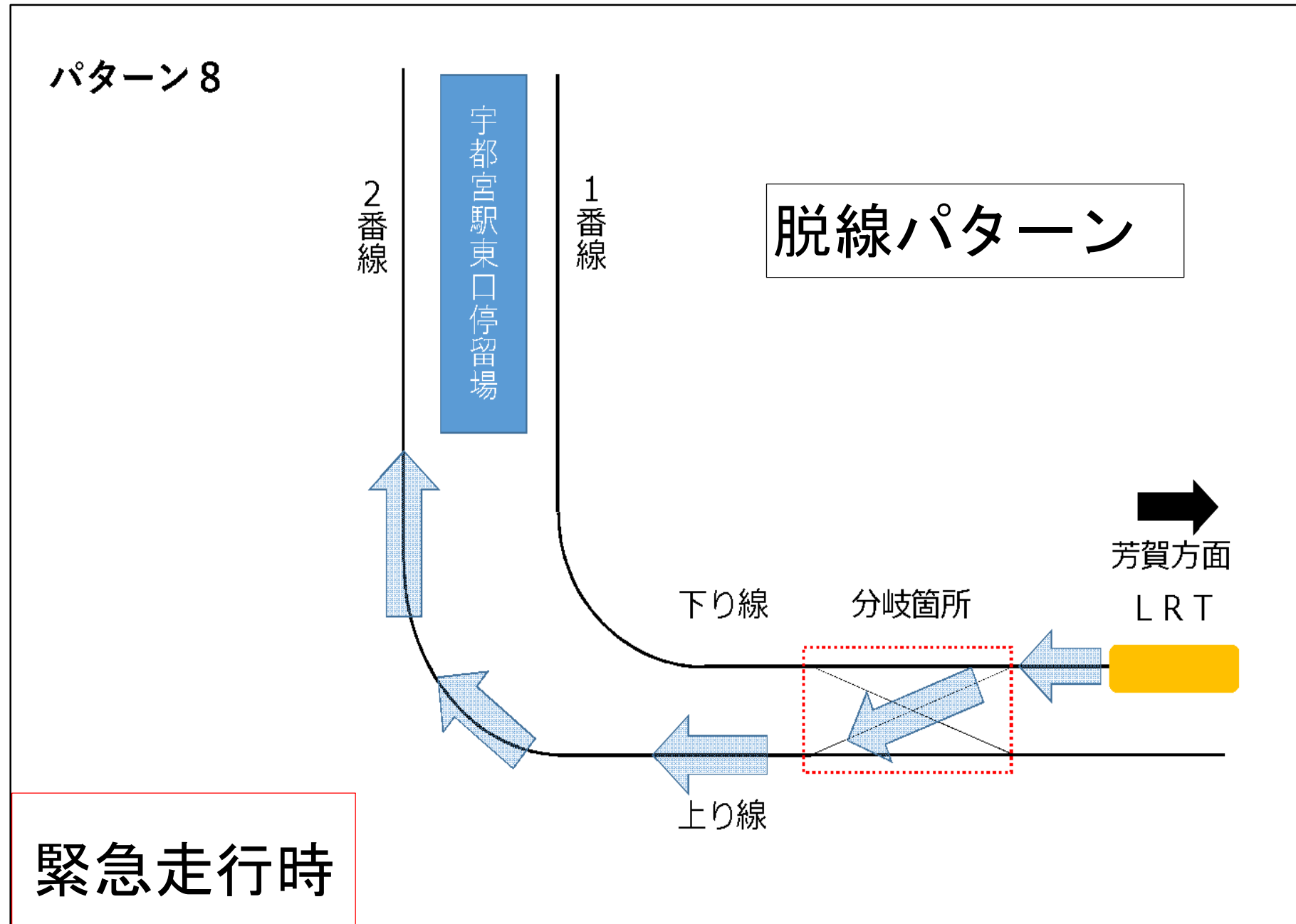
	5km/h	7km/h	10km/h	15km/h	20km/h	25km/h	30km/h	35km/h	40km/h
駅東口(R25⇔分岐) パターン1～7	○	パターン 1,4,6	パターン6						
脱線ルート (分岐⇒R25) パターン8	○	—	—						
峰立体(下り50%)				○	○				
直線区間				○	○	○	○	○	○
平出立体 (R100, 下り40%)				○	○	○			
平石停留場分岐	○	○	○						
入出庫線(R30)	○	○	○						

○ 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以下のとおり。
(通常走行4パターン, 緊急走行4パターン 計8パターン)



○ パターン8の測定結果について



○ パターン8の測定結果について

■ P Q測定試験等の結果

【横圧と脱線係数について】

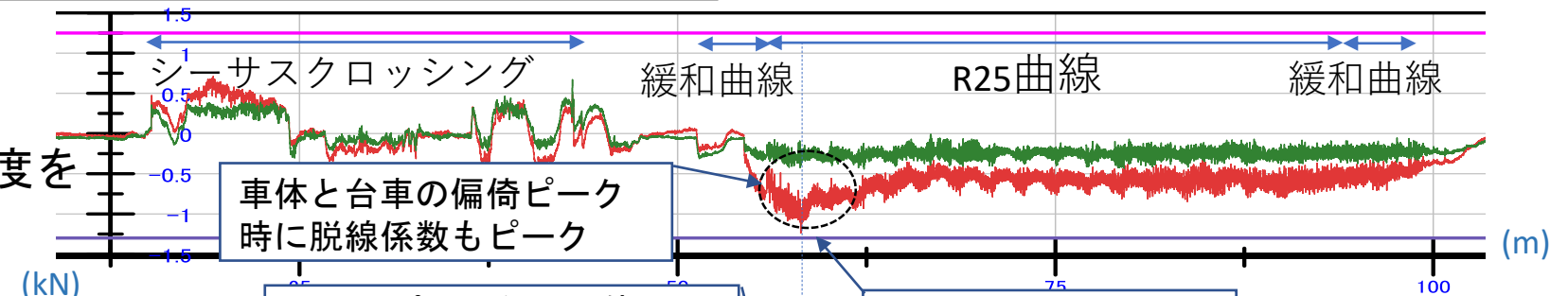
- ・ 曲線部はR25の急曲線であることから、大きな横圧(②)が発生している。
- ・ 脱線係数(①)が高い箇所では、シーサスクロッシングから曲線に入るS字曲線走行時の車体偏倚(④)により、車体と台車間との間隙が狭まった結果、ストッパー当たりが発生し、内軌側車輪フランジ背面の横圧が高まったことが確認された。
- ・ 緩和曲線部の入口付近において、横圧の増加が見られないことから、内軌側車輪フランジ背面による案内が十分にできていない可能性がある。

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)

※高い横圧に加えて、台車ストッパーへの強い当たりが発生しているところで、横圧及び脱線係数がピークとなっており、この強いストッパー当たりが脱線要因と考えられる。

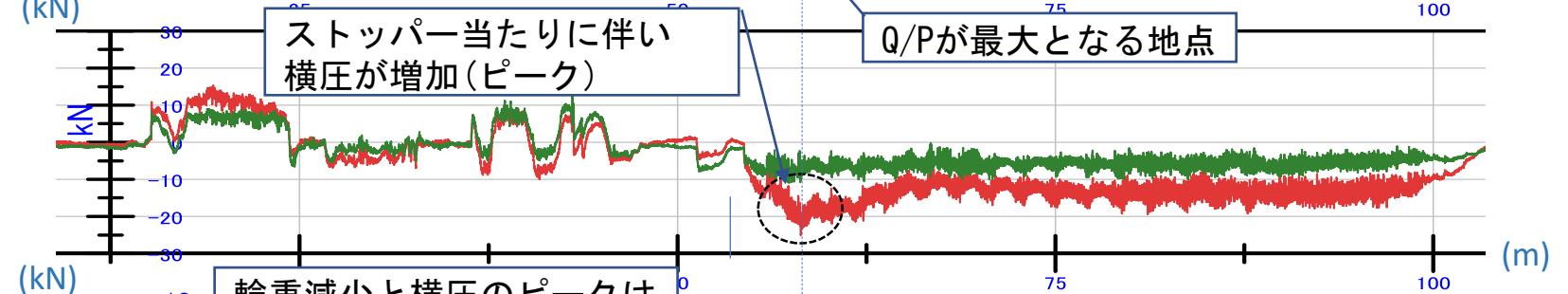
①脱線係数【Q/P】

(横圧と輪重から脱線に対する安全度を
確認するもの)



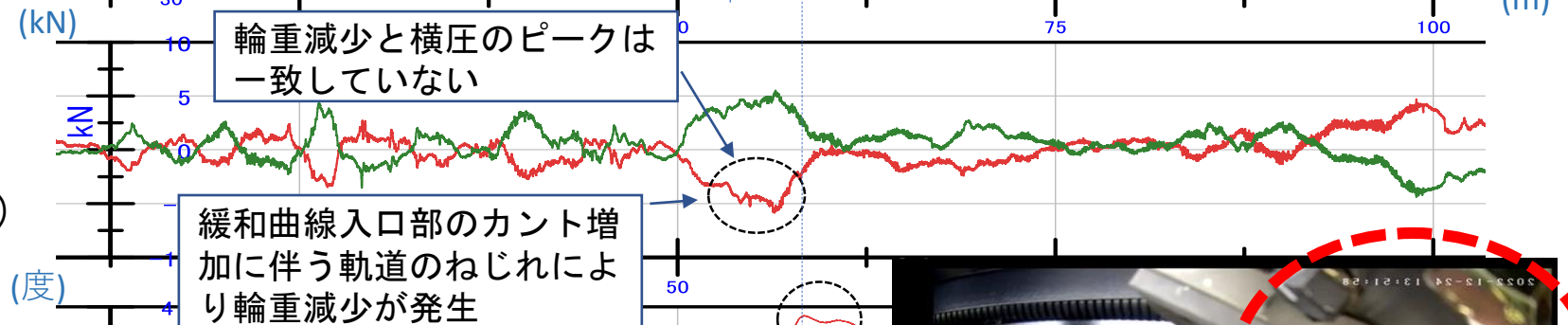
②横圧【Q】

(遠心力などにより車輪がレールを
水平方向に押す力)



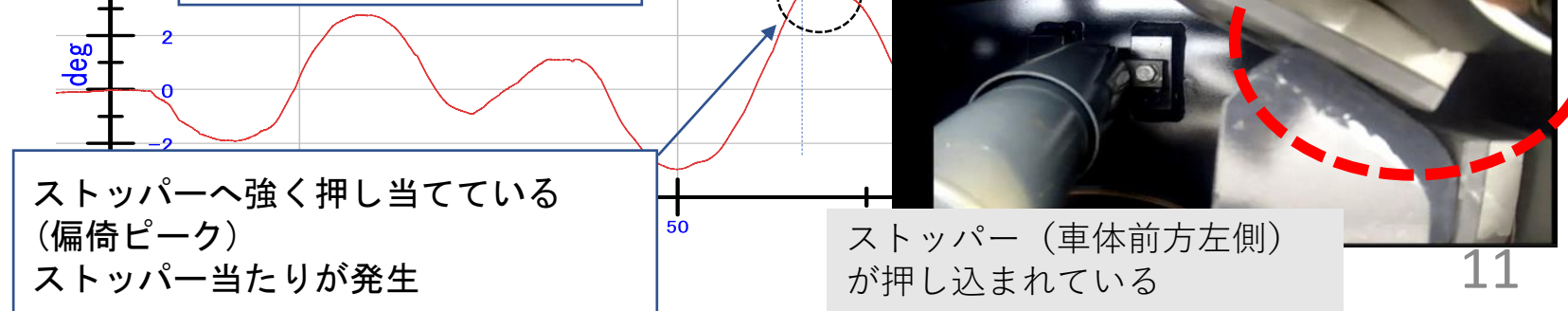
③輪重【P】

(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)



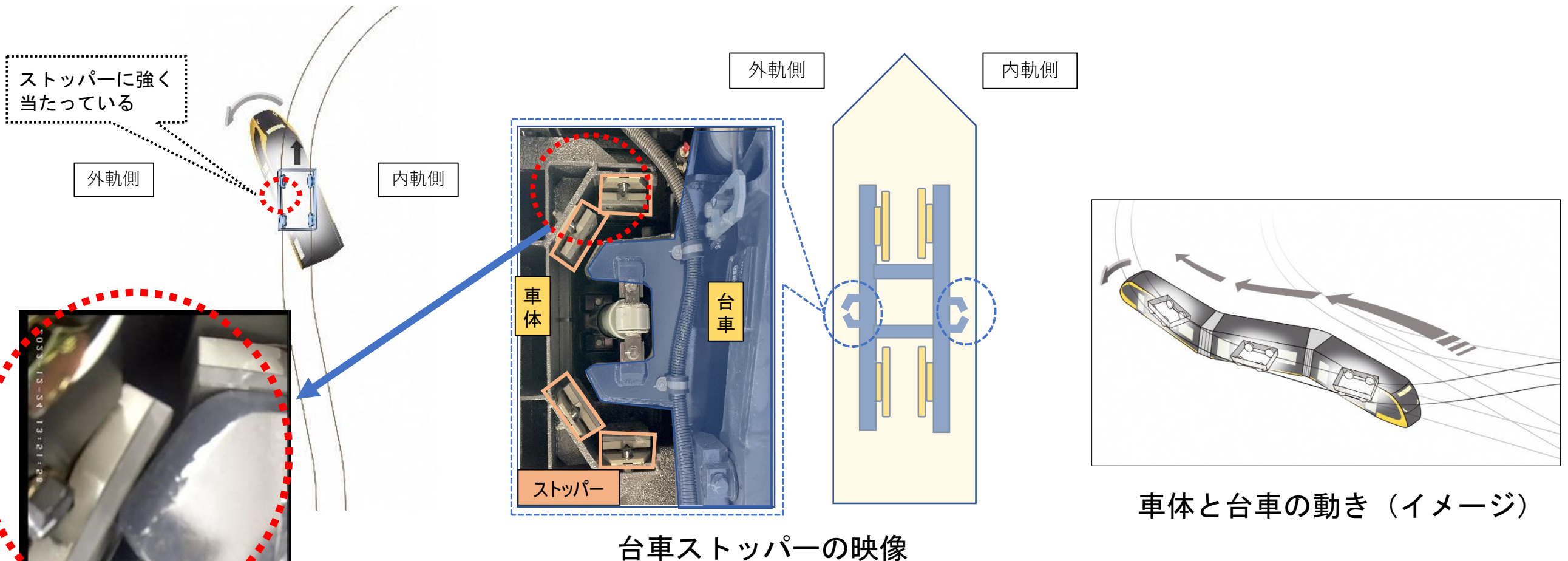
○ パターン8の測定結果について

【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。

【台車ストッパーの接触状況について】

- ・ 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。



車体と台車の動き

- ・ 急曲線等の曲線を走行するために、台車と車体にある程度の自由を持たせ、それぞれが挙動出来るような構造となっている。

台車ストッパー

- ・ 台車と車体間には挙動の自由度を許容する空隙を有している。
- ・ 車体には、台車と車体の左右の大きな横振れを制限するため、台車ストッパーが設けられている。

○ パターン 8 の測定結果について

【ドライブレコーダーの映像の解析】

- ・ シーサスクロッシングを通過後に R 2 5 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、5km/h走行時は 7 秒であったのに対し、脱線時の13km/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5km/h走行時と、脱線時（13km/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

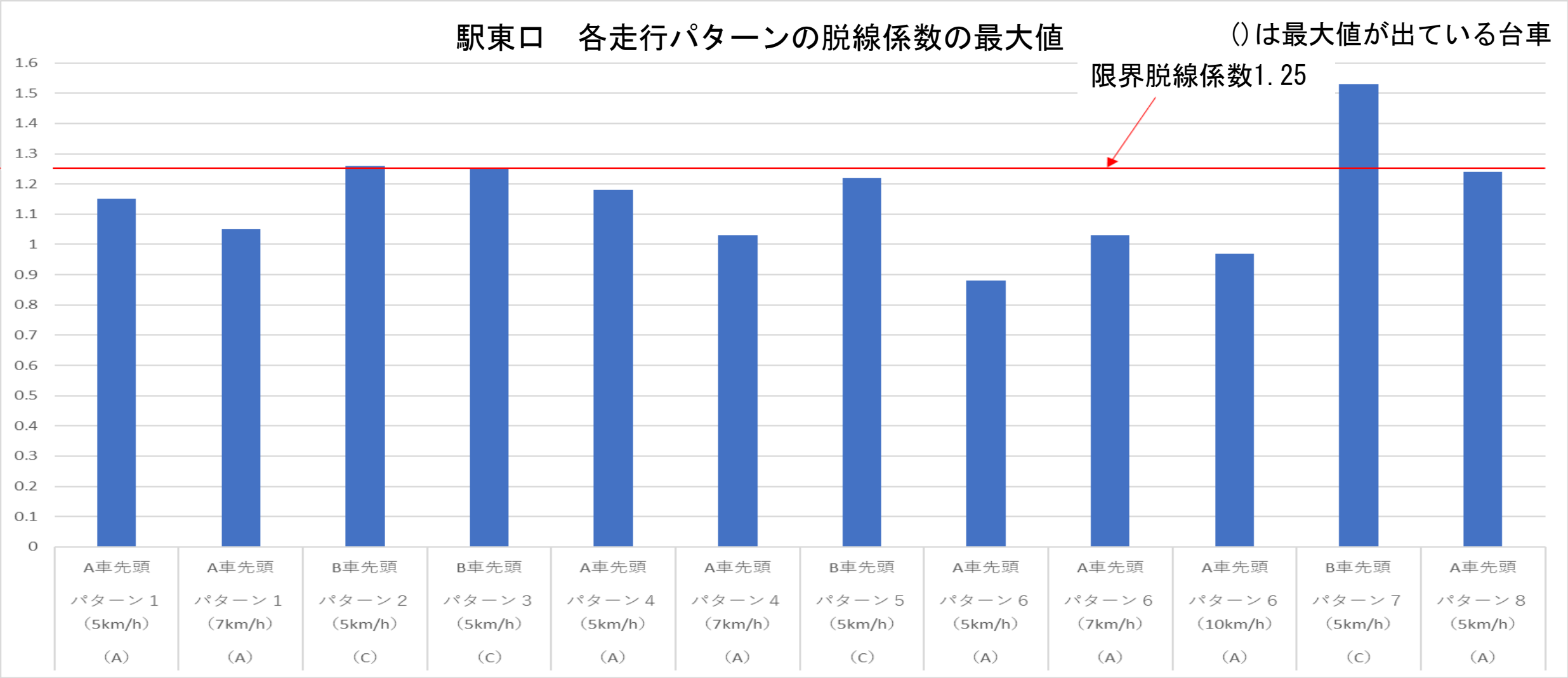
走行速度	車体の 旋回時間	旋回速度
5km/h	約 7 秒	約0.36km/h
13km/h (脱線時)	約 2 秒	約1.26km/h

○ 駅東口の各走行パターンの測定結果について

■ P Q測定試験等の結果

【脱線係数について】

- ・ 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 1.25 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）が生じるリスクを評価する際の最小の値であり、ただちに脱線が発生するものでない。
※ 加えて、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。

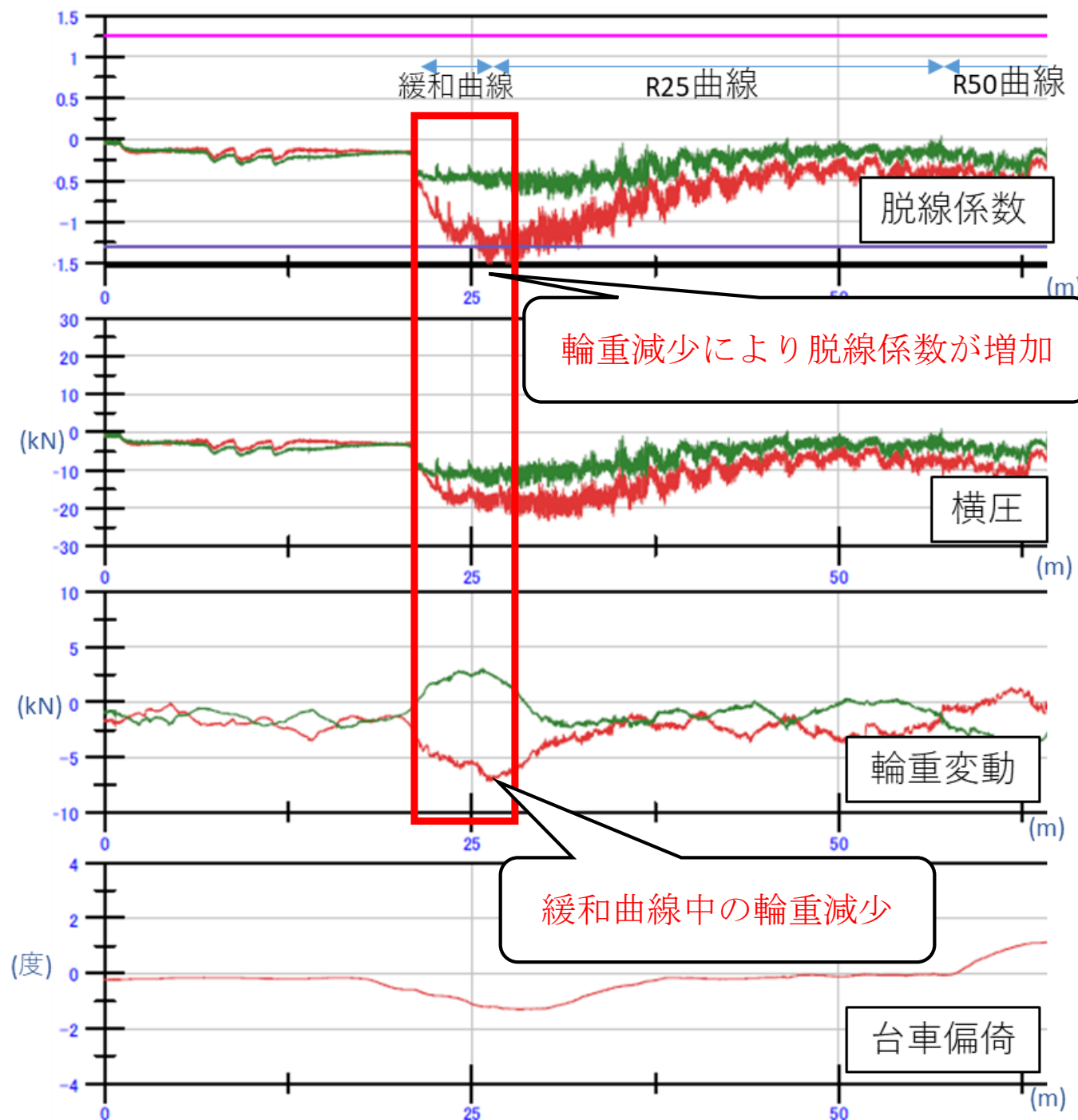


○ 駅東口の各走行パターンの測定結果について

【輪重について（パターン7の測定結果から）】

- 特に脱線係数が高いパターン7においては、緩和曲線中のカント増大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。

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



【参考】

カントについて

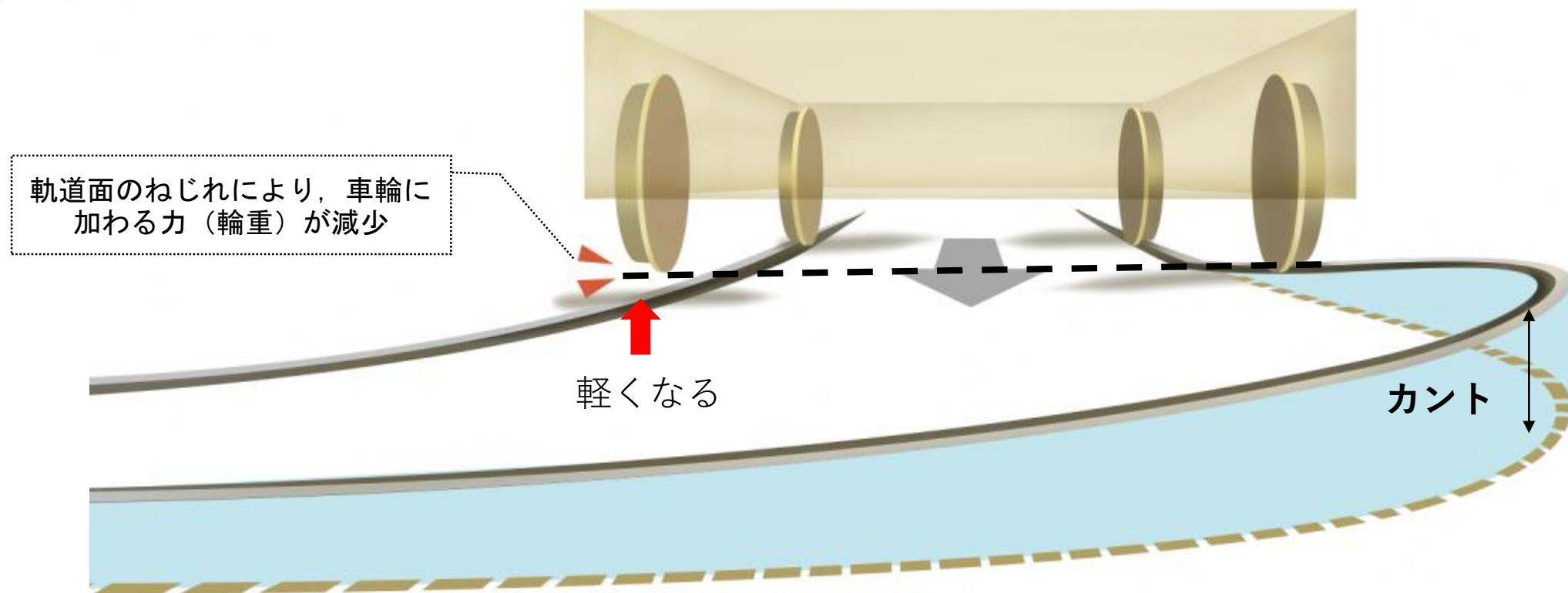
- ・ 車両が曲線部を走行する場合には外方に遠心力が働くため、車両の転倒を防ぐとともに乗り心地を良くするために外側のレールを高くするカントが設けられている。

緩和曲線について

- ・ 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。

輪重減少について

- ・ 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。



輪重減少のメカニズム (イメージ)

【台車ストッパーの接触状況について】

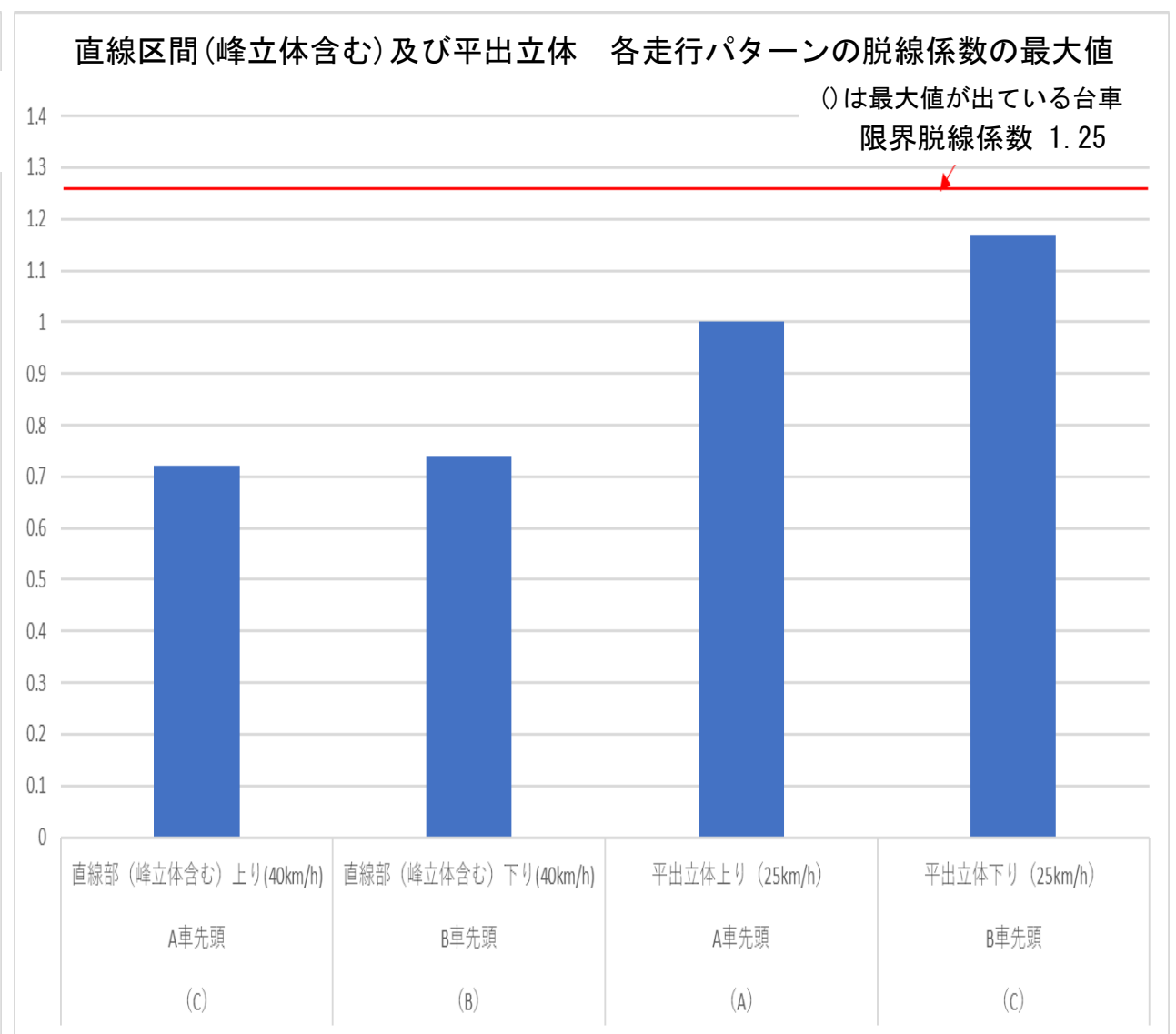
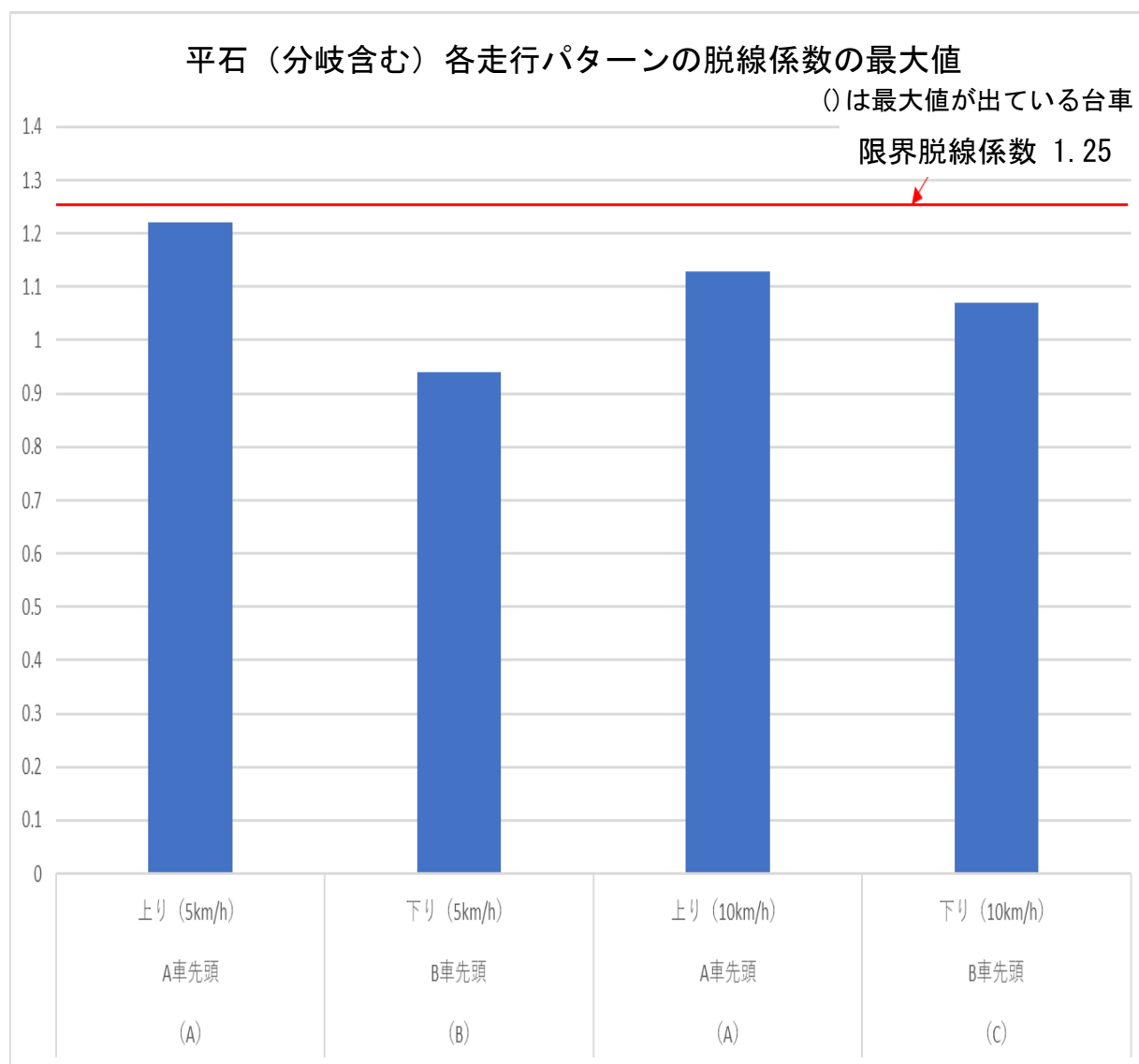
- ・ パターン1～7については、台車ストッパーへの強い当たりが小型カメラ映像で確認されなかった。

○ 駅東口以外の区間における測定結果について

■ P Q測定試験の結果

【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，5km/h，10km/h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。
- 「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。

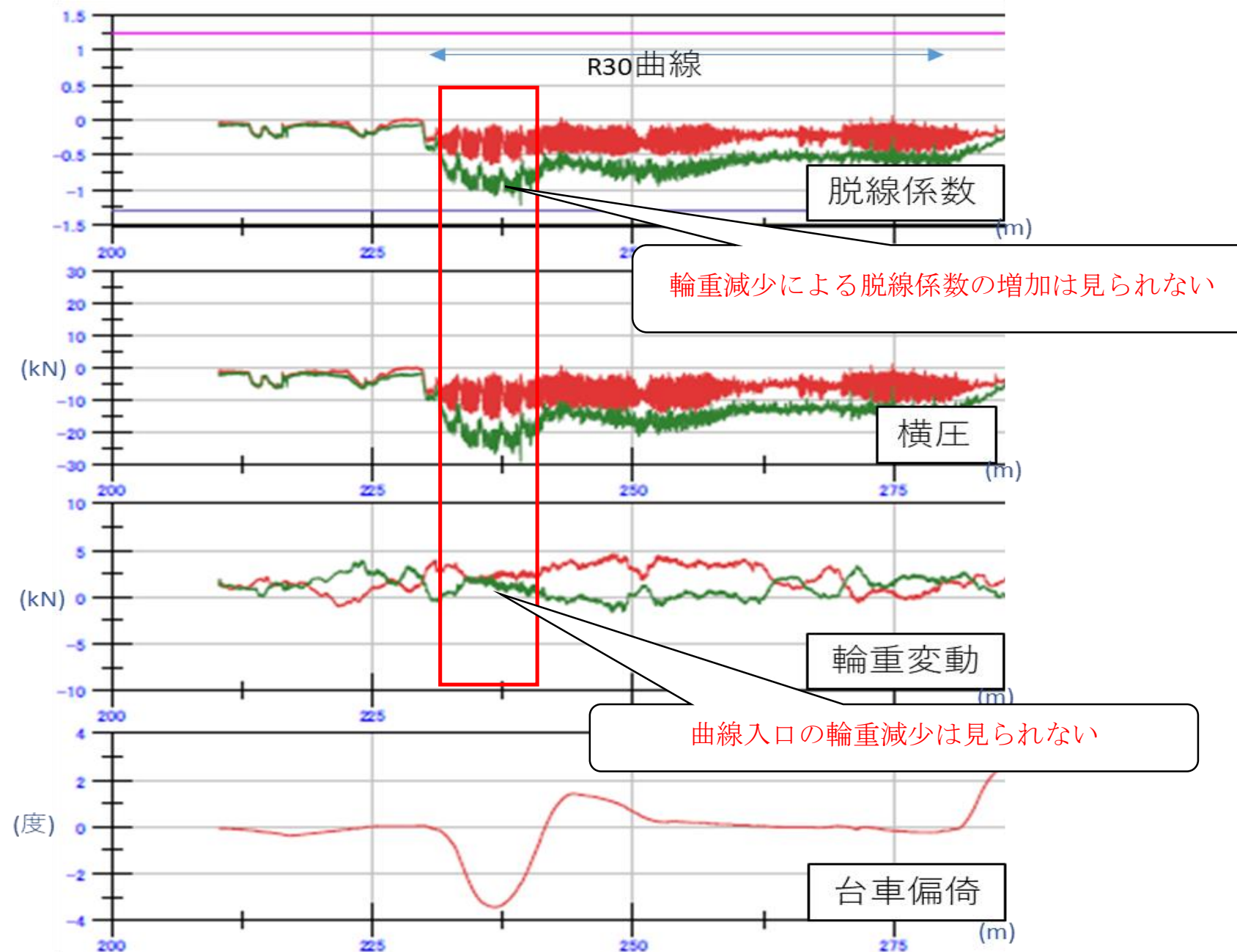


○ 駅東口以外の区間における測定結果について

【輪重について】

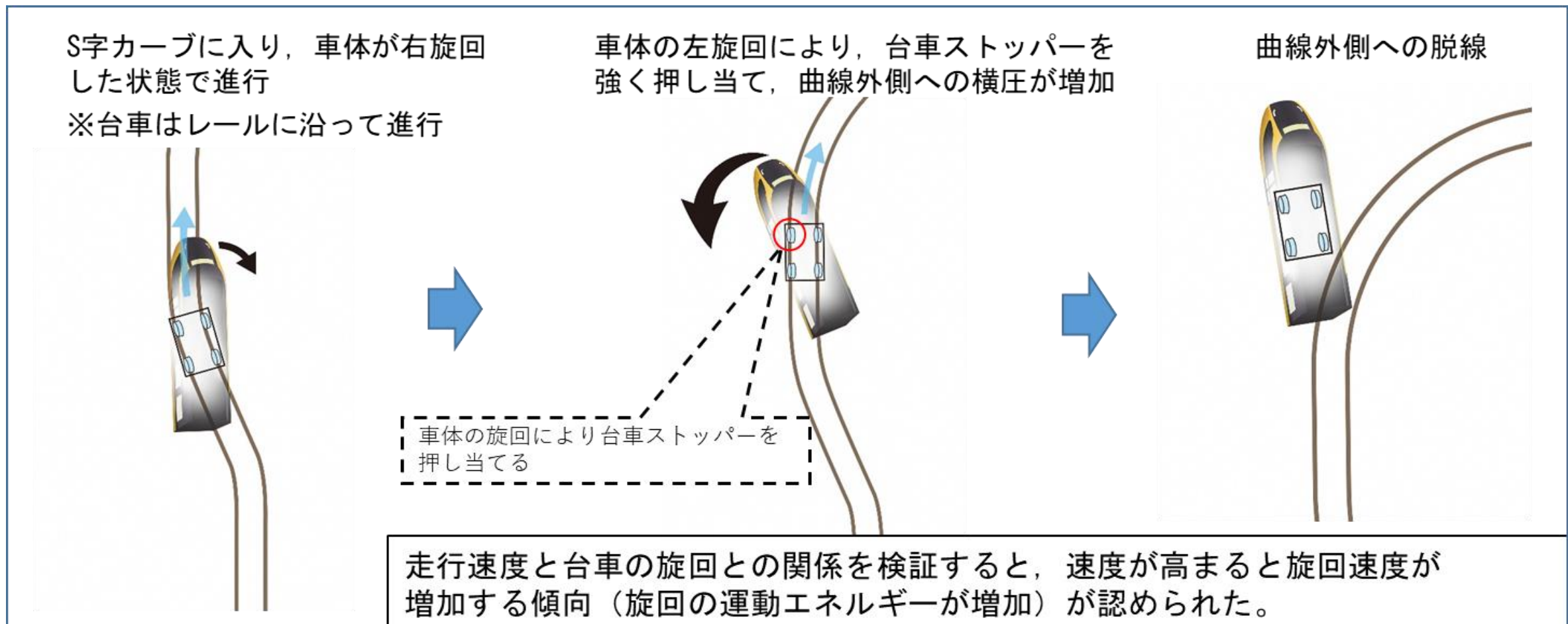
- ・ カントが無い平石のR30では曲線入口の輪重減少が見られない

①脱線係数, ②横圧, ③輪重の緑線は, 内側車輪 (内軌側), 赤線は外側車輪 (外軌側)



○ 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。
- ・ 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。



脱線発生メカニズム

○ 対策について

【脱線事故に対する対応】

- ・ シーサスクロッシング単体及びR25曲線単体の制限速度は、それぞれ15km/hとしているが、その二つが近接し、S字曲線であるシーサスクロッシングから連続して急曲線に進入する特殊な走行パターンでは、制限速度を単体の場合より引き下げる必要がある。今回の測定結果から、その二つの近接の解消が困難な場合については、パターン8の走行速度は5km/hとすることが望ましい。

【急曲線の脱線係数が高いことに対する対応】

- ・ 内軌側に作用している大きな横圧への対策としては、既存の施設で調整が可能な3mm程度軌間を縮める調整を行うことで、内外軌双方に横圧を分散させることが望ましい。
- ・ 遠心力による内軌側の輪重減少を防ぐためには、曲線の通過速度を引き下げる。
また、輪重減少に起因する脱線を予防するためには、線形に起因する軌道の平面性変位を小さくする必要があり、カントを無くすか、カント量を減らすなどにより構造的な平面性変位を低減させる方法をとる必要がある。
- ・ 軌道の平面性を確保する対策を講じた後に、再度PQ測定試験を行って、安全性を確認する必要があると考えられる。

【当該区間の運行速度の設定】

- ・ パターン8以外の制限速度については、対策を講じた上で、再度PQ測定試験を行い、評価した上で、設定することが望ましい。

【摩耗防止策の検討】

- ・ なお、横圧が大きいことが確認されており、運行の状況などによっては、レールや車輪の摩耗が懸念されることから、その状況を踏まえ、必要に応じて、摩耗防止策について検討していくことが望ましい。

考察を踏まえた市の対応について

○ 対策の実施について

【急曲線の脱線係数が高いことに対する対応】

- ・ 脱線係数が高くなる要因となっている内軌側の輪重減少を抑えるため、カントを無くす工事を実施し、軌道の平面性を確保することにより、脱線係数を下げる。
- ・ また、工事にあわせ、大きな横圧の対策として、内外軌双方に横圧を分散させるよう、3 mm程度軌間を縮める調整を行う。
- ・ 対策工事を実施した後に、再度P Q測定試験を行って、安全性を確認する。

【当該区間の運行速度の設定】

- ・ パターン8の制限速度については、5 km/h以下とする。
- ・ パターン8以外の制限速度については、対策工事を行った上で、再度P Q測定試験を行い、評価した上で、設定する。

【摩耗防止策の検討】

- ・ 摩耗防止策の検討については、維持管理を行う中でレールや車輪の摩耗状況を確認しながら、その状況に応じて必要な検討を行っていく。

○ 対策工事の実施について

【工事内容】

- ・緩和曲線及び本曲線部のカントを無くす工事
(軌間を縮める調整を含む)

【工事予定】

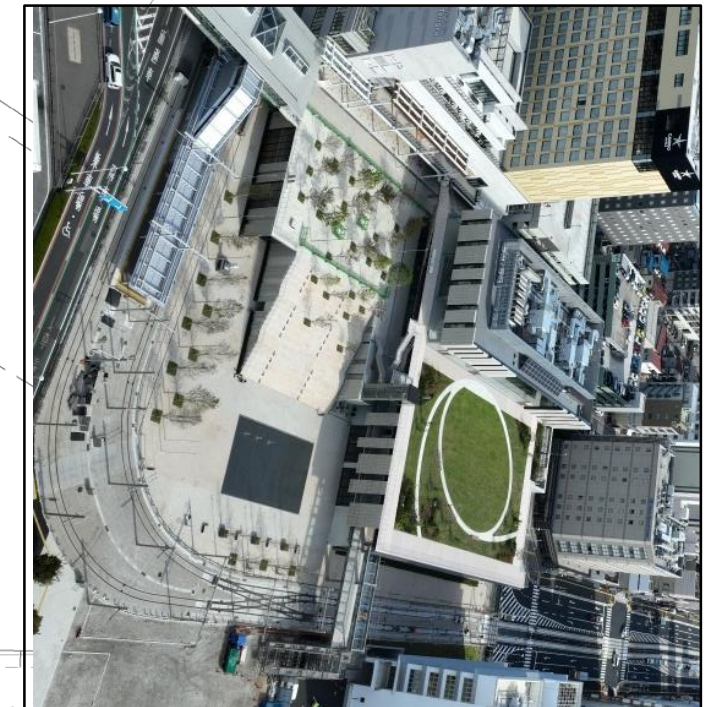
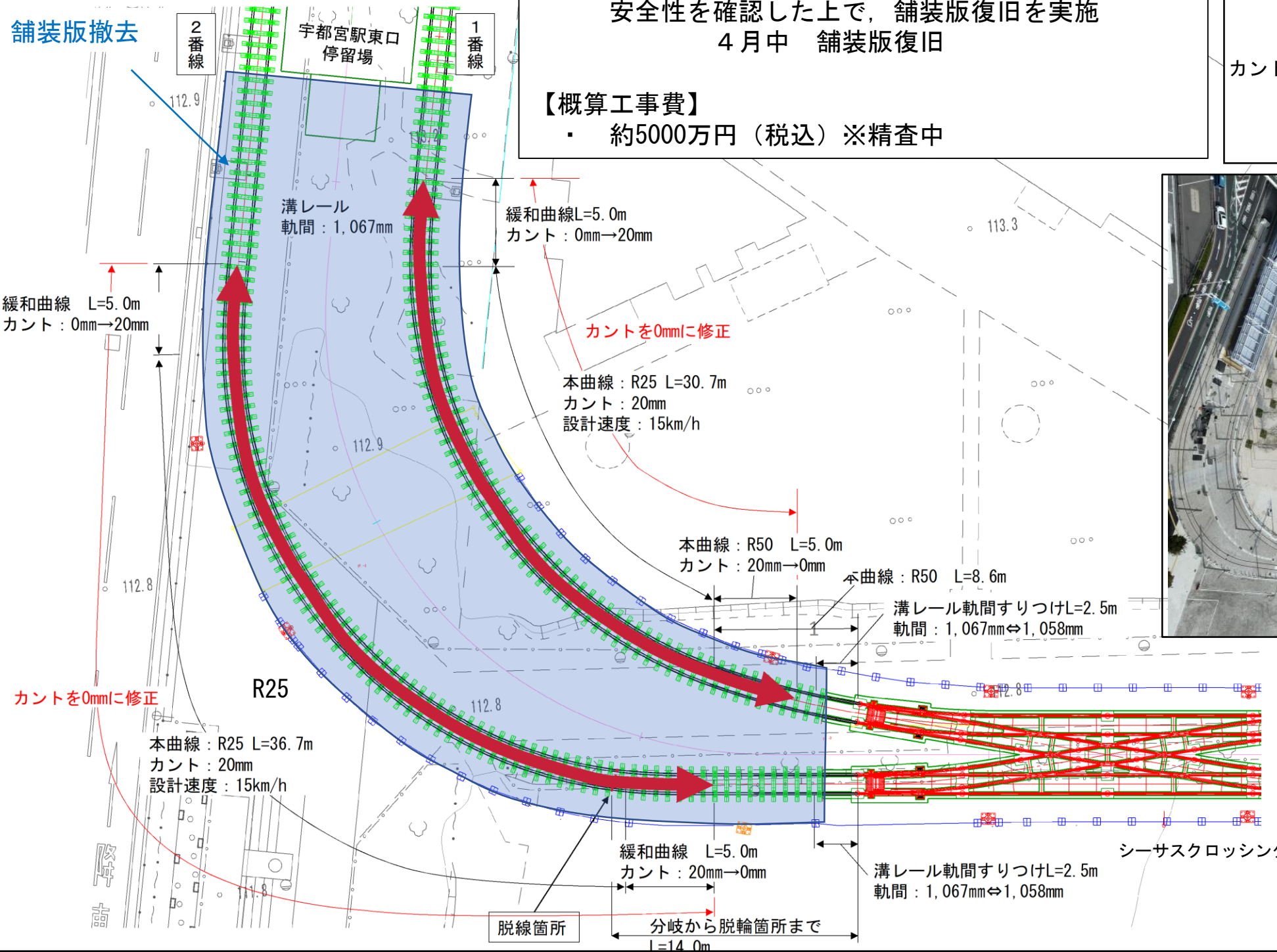
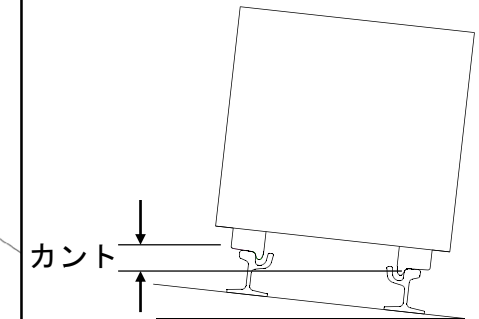
- ・令和5年3月中 舗装版撤去, カントを無くす工事
※ カントを無くした後, PQ測定試験を実施し,
安全性を確認した上で, 舗装版復旧を実施
4月中 舗装版復旧

【概算工事費】

- ・約5000万円(税込) ※精査中

カント

(内側と外側のレールの高低差)



車両等の損傷と対応状況について

○ 車両等の損傷と対応状況について

1 車両

【主な損傷箇所】

- 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

【概算費用】

- ・ 約1億7千万円（精査中）
 - ※ 外観調査を実施し、概算費用を算出

【対応状況】

- ・ 今後、別車両からパンタグラフを取付し、通電した上で、電気機器の損傷状況を確認
 - ※通電後、電気機器に損傷が発見された場合は増額の可能性あり
 - ※車両保険について保険会社と調整中



2 地上用変圧器（東京電力パワーグリッド(株)所有）

- 変圧器と基礎の修繕

【概算費用】 約 3 0 0 万円

【対応状況】

復旧工事のスケジュールについて調整中

※損害賠償保険について保険会社と調整中



3 ボラード

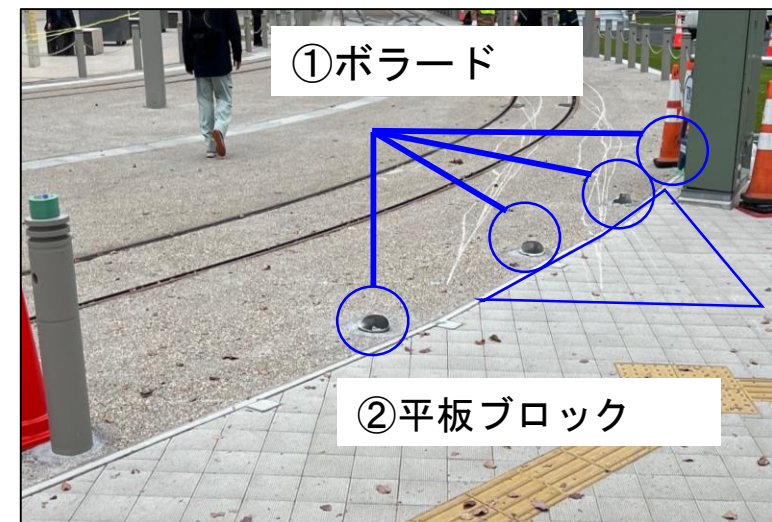
- ボラード等の復旧
- 耐衝撃性車止めの追加

【概算費用】 約 3 0 0 万円

【対応状況】

カントを無くす工事と合わせて復旧予定

※市有財産のため、損害賠償保険の対象外



4 電車線支持材

- 電車線支持材の修繕

【概算費用】 約 1 2 8 万円

【対応状況】

修繕済

※市有財産のため、損害賠償保険の対象外



今後の取組スケジュール

今後の取組スケジュール

