

## 7 対策について（考察）

- ・ 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。
- ・ 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。
- ・ 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。
- ・ 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。

## 8 市による対策工事等について

考察を踏まえた市の対応は以下のとおり。

### (1) 当該区間の運行速度の設定

- ・ 脱線ルートであるパターン8の制限速度については、5km/h以下とする。
- ・ なお、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PQ測定試験を行い、評価した上で設定する。

### (2) 対策工事の実施（図38）

- ・ 令和5年3月15日から4月25日にかけて、軌間の縮小及びカントの見直し工事を実施
- ・ 脱線係数が高くなる要因となっている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、当初、3mm程度軌間を縮める調整を行うこととしていたが、施工実施の中で、6mm程度の調整が可能であったことから、有識者確認の上、軌間を6mm程度、縮小した。
- ・ また、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た。

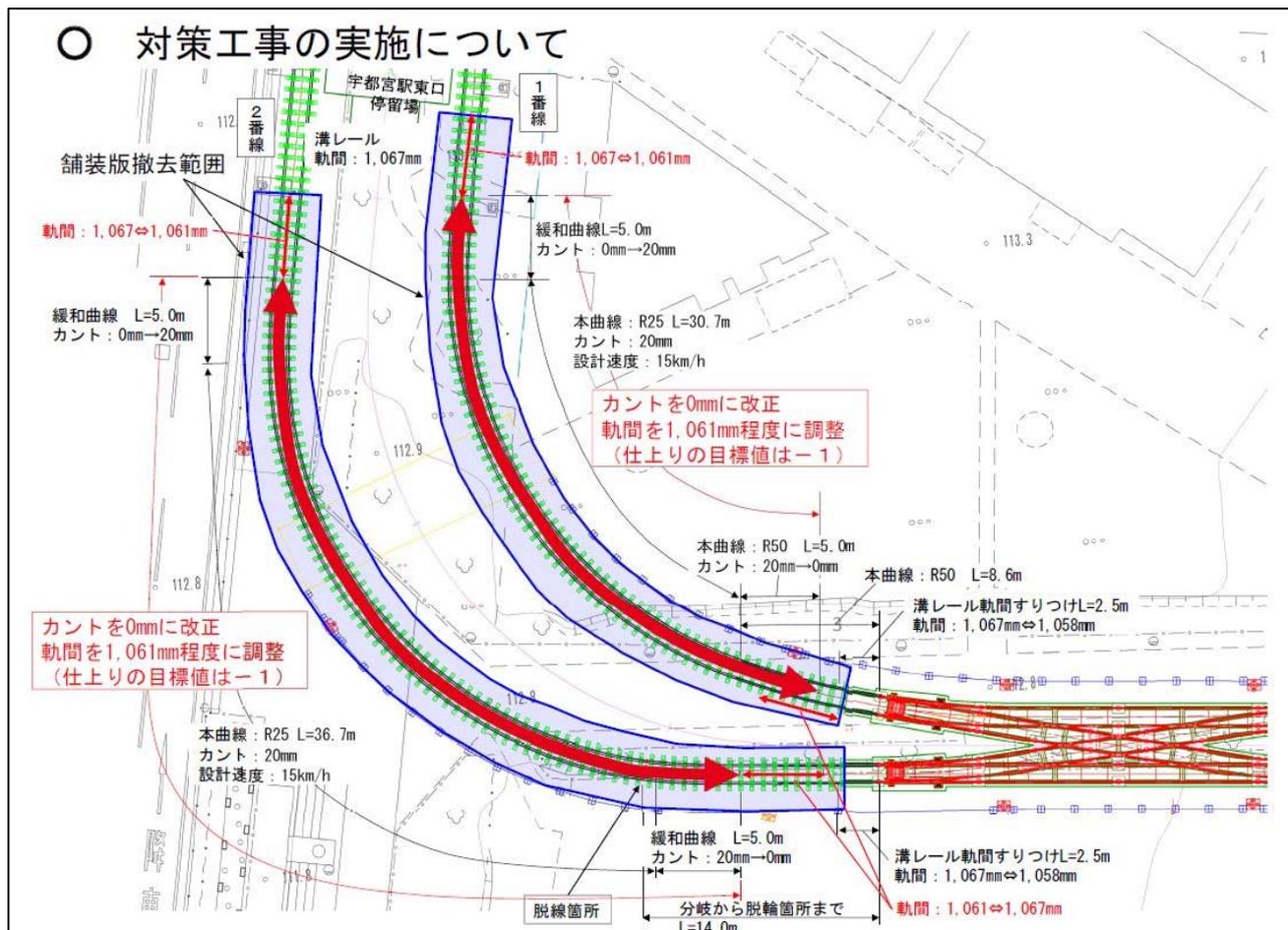


図 38 対策工事の概要



写真 2 軌間の縮小工事



写真 3 カントの見直し工事

## 9 対策工事後の測定試験

対策工事後、令和5年4月26日から28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) PQ測定試験

#### ア 限界脱線係数の考え方

- これまで限界脱線係数（1.25）については、外軌側に車輪の正面側が接触した場合に対して求めたものとして、安全側の目安値としていた。
- カメラ映像により車輪とレールの接触状況を確認したところ、溝付レールの曲線部の走行においては、内軌側に車輪の背面側が接触しながら走行している（内軌側が主で車輪を案内している）ことから、車輪背面側が接触した場合については、図39に示す車輪とレールの接触イメージから、実態に即した限界脱線係数を設定することとした。
- 限界脱線係数については、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り、溝付レールの正面側接触で1.25、背面側接触で-1.5となる。

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

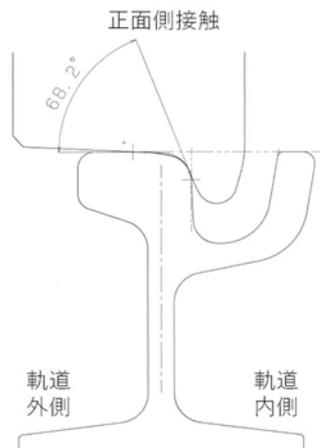
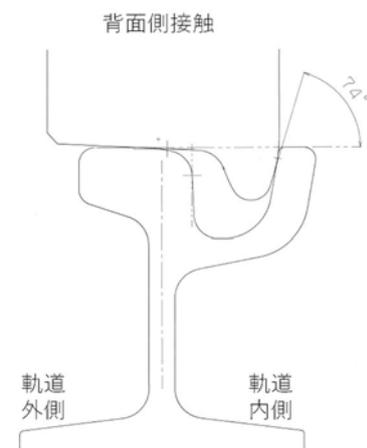
レール形状	溝付レール	溝付レール
車輪とレールの接触イメージ		
限界脱線係数 (安全率考慮)	1.25 (1.04)	-1.5 (-1.25)

図 39 溝付レール（正面側接触・背面側接触）の限界脱線係数

#### イ PQ測定試験

- 安全性を確認しながら段階的に速度を上げ測定。
- ただし、車輪正面側接触の限界脱線係数1.25を安全率1.2で除した値（1.04）及び車輪背面側接触の限界脱線係数-1.5を安全率1.2で除した値（-1.25）に余裕がないときは速度向上を行わない。

#### ウ 駅東口におけるPQ測定試験の確認パターン（図23）

- 対策工事後の駅東口におけるPQ測定試験の確認パターンは、前回のPQ測定試験と同様に通常走行4パターン、緊急走行4パターン 計8パターンを実施。

(2) PQ測定試験の測定速度の結果（表 2）

- ・ 段階的に安全性を確認した結果、通常時の走行パターンであるパターン1、3、6、7については、5 km/h、7 km/h、10 km/h、12 km/h の走行を実施。  
（当該曲線については、カントを無くしたことにより、遠心力による乗り心地の悪化を考慮し、最高速度を12 km/h 以下にする必要がある。）
- ・ 緊急時の走行パターンであるパターン2、4、5については、5 km/h、7 km/h、10 km/h の走行を実施。（緊急時の走行（パターン8を除く）については、10 km/h 以下の走行を想定）
- ・ パターン8については、5 km/h の測定データを確認した上で、速度向上による横圧への影響を確認するため、7 km/h までの走行を実施。

表 2 PQ測定試験の測定速度

	5km/h	7km/h	10km/h	12km/h
（通常） 駅東口(R25⇔分岐) パターン1, 3, 6, 7	○	○	○	○
（緊急） 駅東口(R25⇔分岐) パターン2, 4, 5	○	○	○	—
（緊急） 脱線ルート（分岐⇒R25） パターン8	○	○	—	—

## 10 急曲線部の対策工事後の測定試験結果とその評価

### (1) パターン8 (5 km/h) の測定結果 (脱線時の走行パターン)

- ・ 緩和曲線からR25曲線にかけて、全体的に内軌側の横圧が小さくなり、外軌側の横圧が大きくなっていることから、内軌側と外軌側の車輪で横圧を分担できていると考えられ、軌間を縮小した効果が確認できた。
- ・ 緩和曲線における輪重減少が小さくなっており、カントを無くした効果が確認できた。
- ・ 対策工事後においても、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、ストッパー当たりが発生し、内軌側車輪フランジ背面横圧の高まりが確認できた。
- ・ 曲線部全体を通して横圧は減少し、輪重変動も減少したことから、脱線係数の低下が確認できた (最大脱線係数  $-1.24 \rightarrow 0.54$ )。

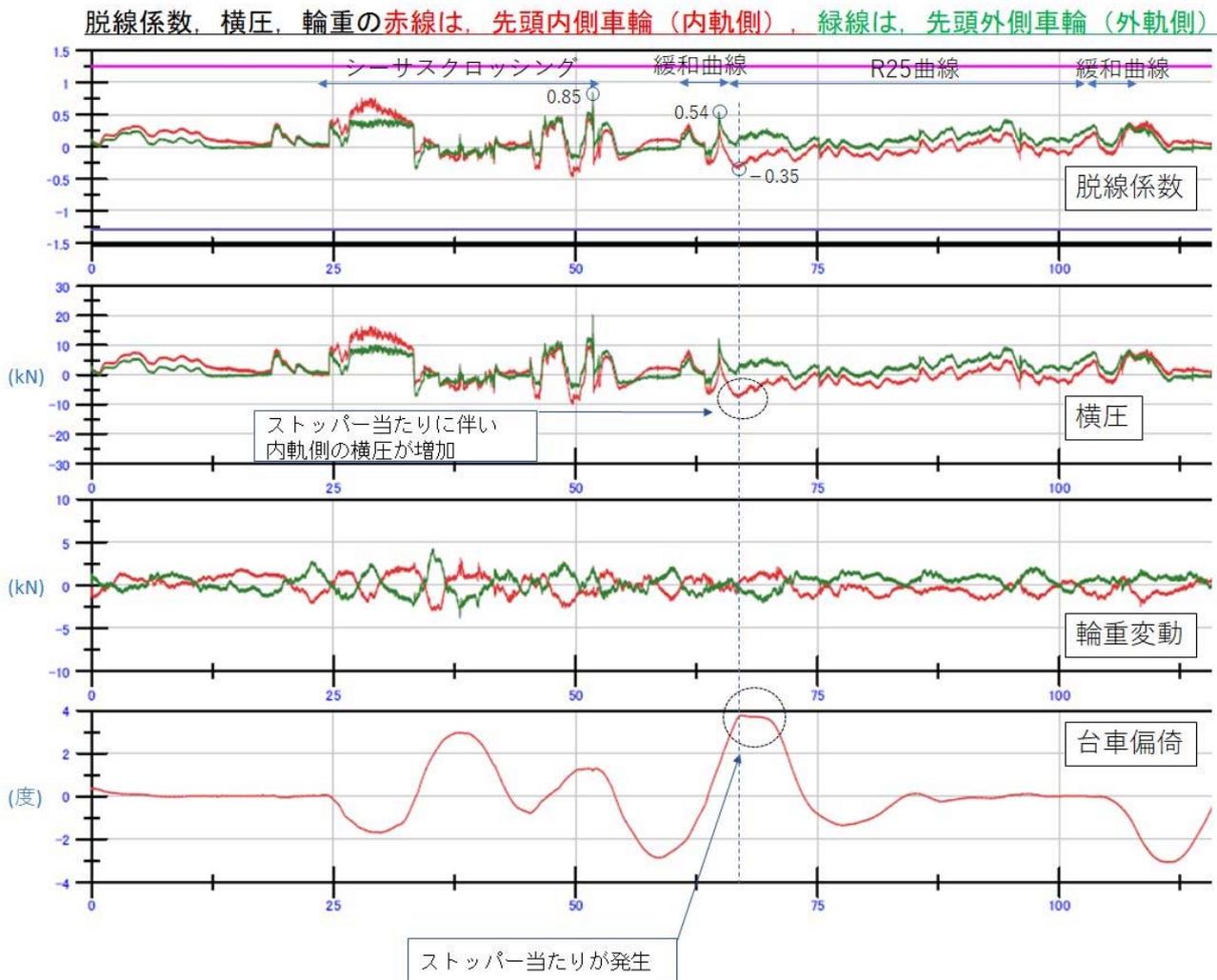


図 40 対策工事後のパターン8 (5km/h) の測定結果

(2) パターン8 (7 km/h) の測定結果 (脱線時の走行パターン)

- ・ 速度が上がることに伴い、ストッパー当たりによる内軌側の背面横圧の増加が確認された。  
(最大脱線係数 0.64)

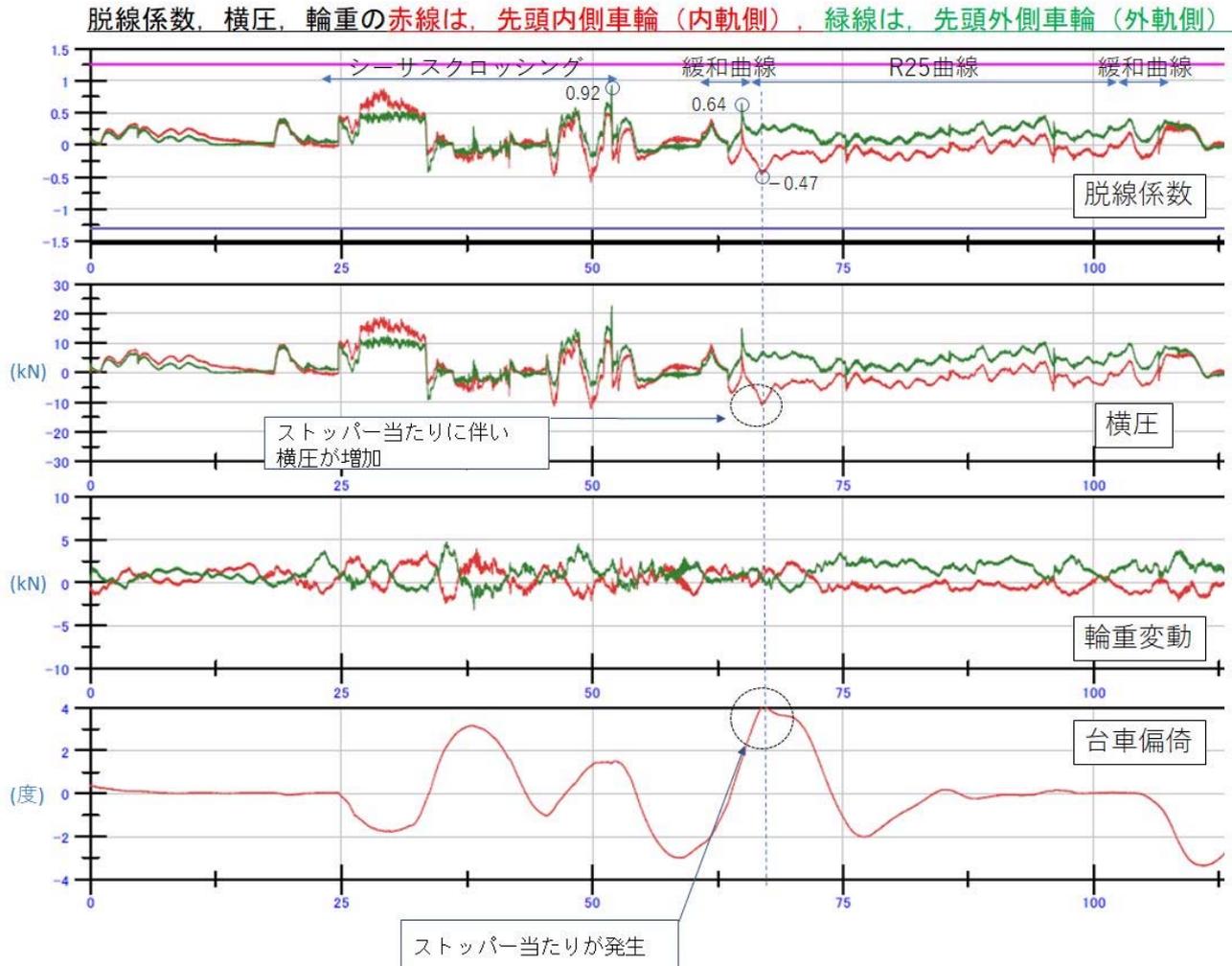


図 41 対策工事後のパターン8 (7km/h) の測定結果

(3) パターン7 (5 km/h) の測定結果 (最も脱線係数が高かった走行パターン)

- ・ 内軌側の横圧が小さくなり、外軌側の横圧が大きくなっていることから、内軌側と外軌側の車輪で横圧を分担できていると考えられ、軌間を縮小した効果が確認できた。
- ・ 緩和曲線における輪重減少が小さくなっており、カントを無くした効果が確認できた。
- ・ 脱線係数が低下。(最大脱線係数  $-1.53 \rightarrow -0.73$ )

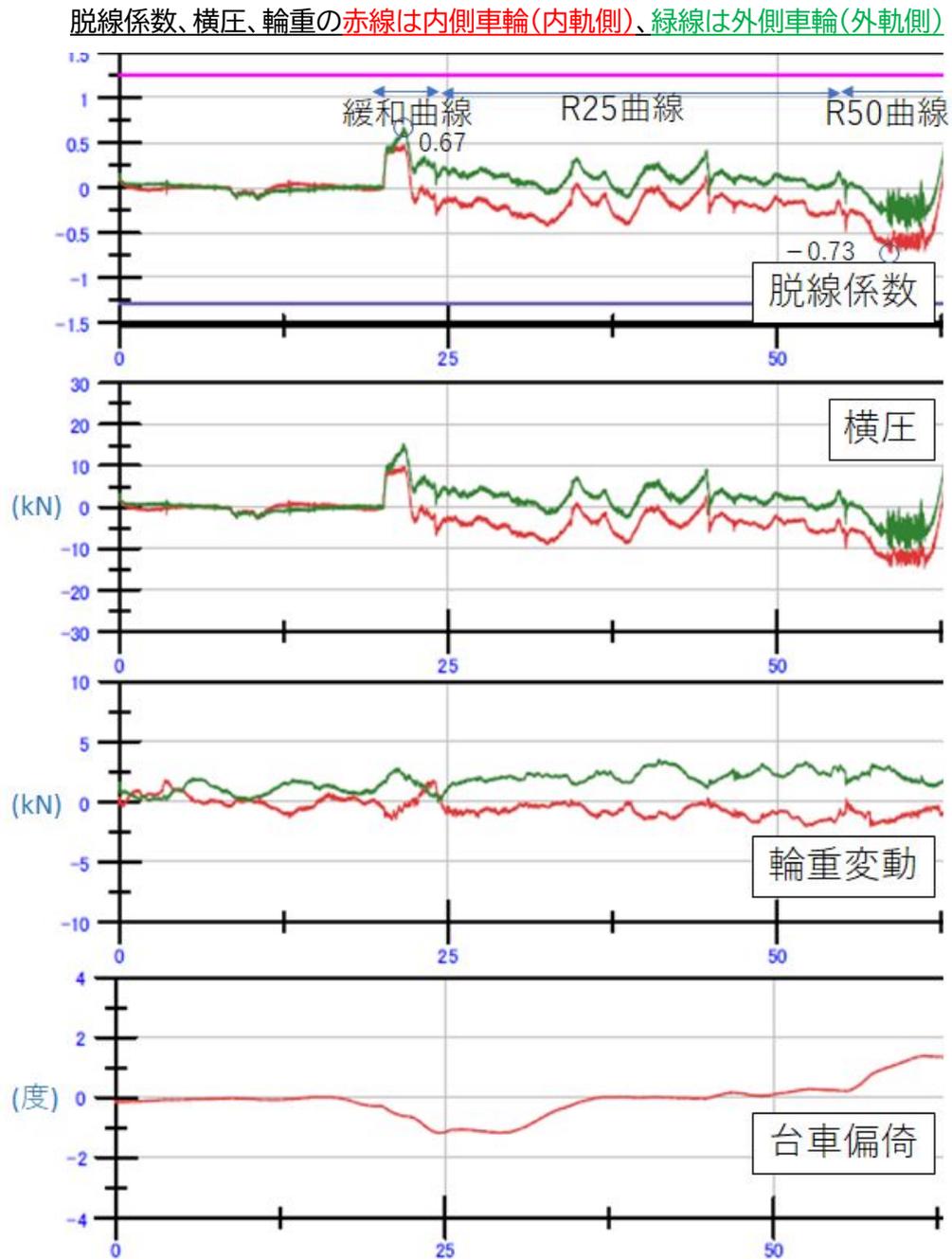


図 42 対策工事後のパターン7 (5km/h) の測定結果

(参考) パターン7 (12km/h) の測定結果 (対策工事後)

- 速度を12km/hまで向上した場合においても、脱線係数は安全率を考慮した限界脱線係数を下回っていることが確認できた。(最大脱線係数 0.64)

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)

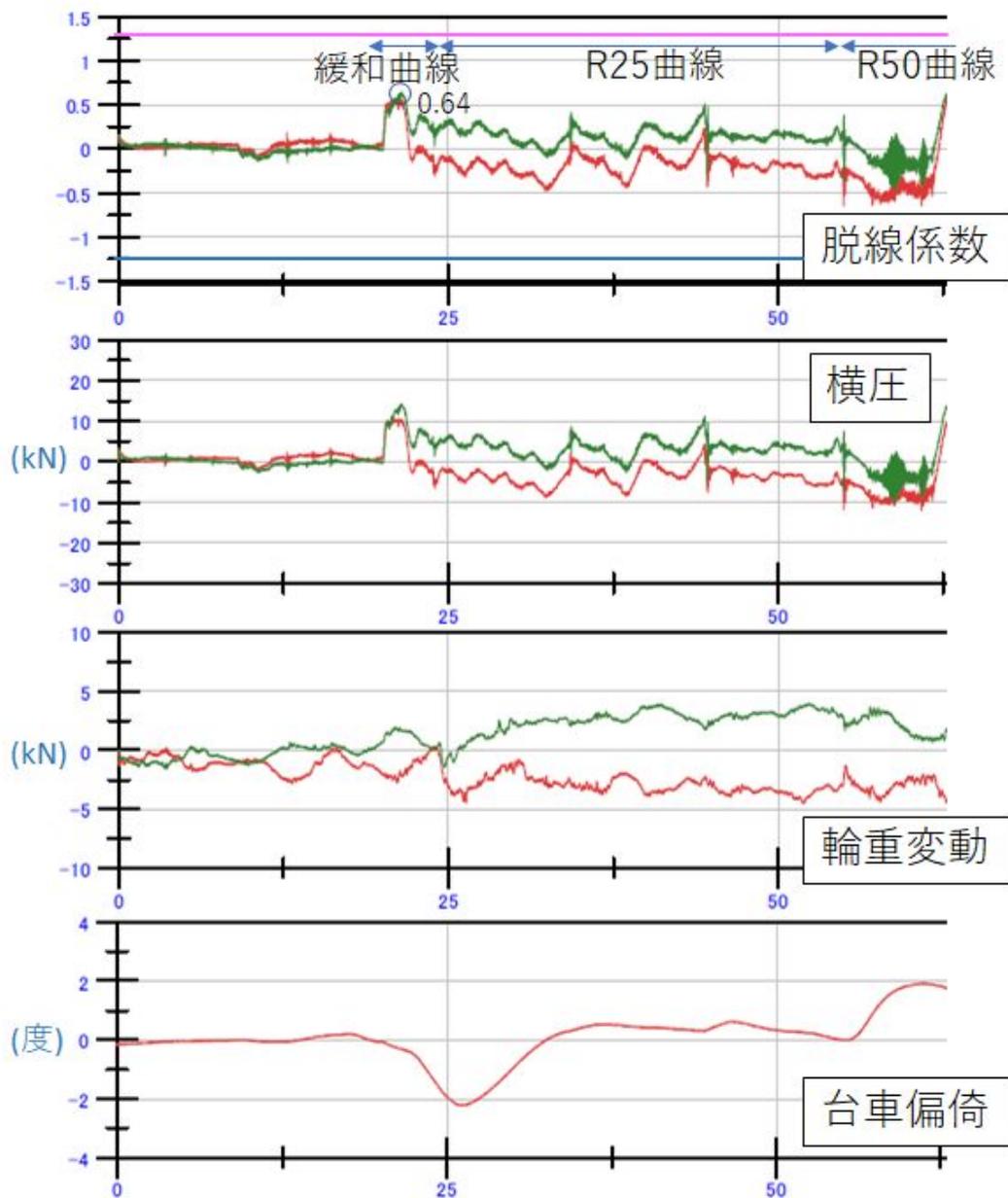


図 43 (参考) 対策工事後のパターン7 (12km/h) の測定結果

(4) 駅東口の各走行パターンの脱線係数測定結果

各走行パターンの脱線係数の最大値については、以下のとおり。(図 44、表 3)

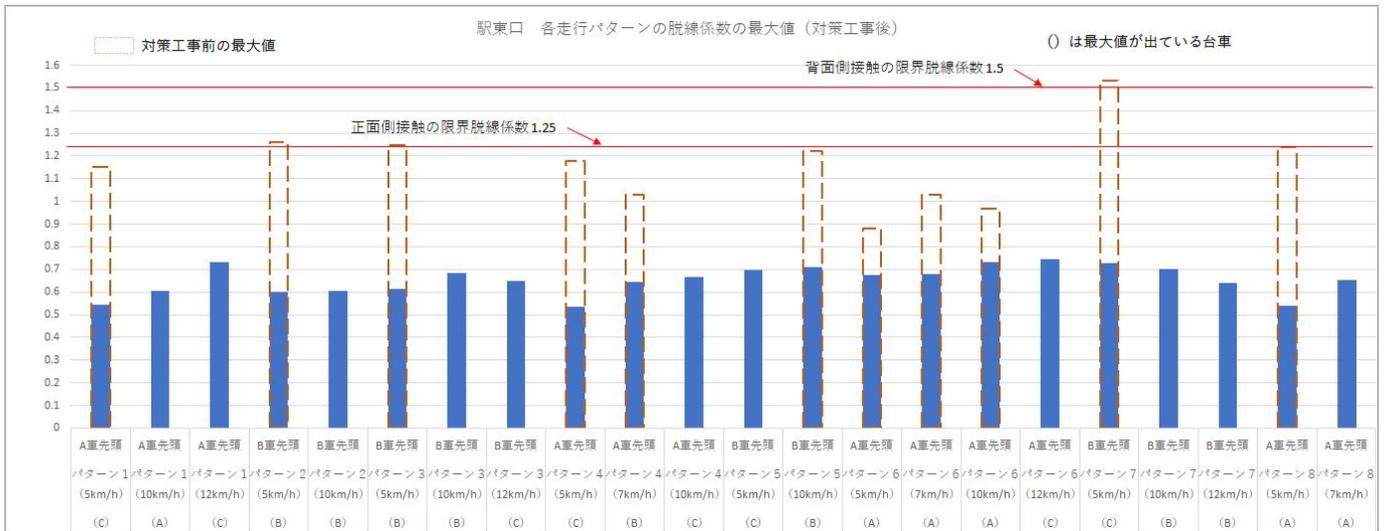


図 44 各走行パターンの脱線係数の最大値 (対策工事後)

※グラフは各脱線係数の絶対値で表記

表 3 脱線係数の比較

走行パターン	走行速度	対策前	対策後
パターン1 (通常)	(5km/h)	-1.15	0.55
	(10km/h)	-	0.60
	(12km/h)	-	0.73
パターン2 (緊急)	(5km/h)	-1.26	0.60
	(10km/h)	-	0.61
パターン3 (通常)	(5km/h)	-1.25	0.62
	(10km/h)	-	0.68
	(12km/h)	-	0.65
パターン4 (緊急)	(5km/h)	-1.18	0.54
	(7km/h)	-1.03	0.64
	(10km/h)	-	0.67
パターン5 (緊急)	(5km/h)	-1.22	-0.70
	(10km/h)	-	0.71
パターン6 (通常)	(5km/h)	-0.88	-0.68
	(7km/h)	-1.03	-0.68
	(10km/h)	-0.97	-0.73
パターン7 (通常)	(5km/h)	-1.53	-0.73
	(10km/h)	-	0.70
	(12km/h)	-	0.64
パターン8 (緊急)	(5km/h)	-1.24	0.54
	(7km/h)	-	0.64

## 1.1 その他の箇所の測定状況

### (1) PQ測定試験

- 令和5年5月10日から12日にかけて全線を通してのPQ測定試験を実施し、走行安全性の検証を行った。
- 全線における曲線部のレールについては、溝付レールに加え、護輪軌条の箇所もあることから、護輪軌条部については、図45に示す車輪とレールの接触イメージから、実態に即した限界脱線係数を設定することとした。
- 限界脱線係数については、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り、護輪軌条で背面側接触の場合、-2.1となる。

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

レール形状	護輪軌条
車輪とレールの接触イメージ	
限界脱線係数 (安全率考慮)	-2.1 (-1.75)

図 45 護輪軌条（背面側接触）の限界脱線係数

(2) 測定結果

- ・ 全線の各曲線箇所における脱線係数の最大値については、以下のとおり。(表4)
- ・ 図46の「ア 平出高架橋」、「ウ 清陵高校前停留場東側」、「エ 清原地区市民センター前」、「オ 野高谷高架橋」、「カ 芳賀町工業団地管理センター前」、「キ かしの森公園前」の曲線については、カントが付いているが、緩和曲線長が長く軌道の平面性変位が小さいため、脱線係数は安全率を考慮した限界脱線係数以下であった。
- ・ なお、カントが付いていない「イ 平石停留場周辺」の曲線についても、安全率を考慮した限界脱線係数以下であった。



図46 曲線箇所一覧

表4 各曲線箇所の最大脱線係数

箇所	レール形状	制限速度※1	PQ試験速度	限界脱線係数 (安全率考慮)	脱線係数	
ア 平出高架橋 (R100 カント50mm)	護輪軌条	30km/h以下	30km/h	-2.1 (-1.75)	上り	-1.04
					下り	-1.19
イ 平石停留場周辺 (R30 カント0mm)	溝付レール	10km/h以下	10km/h	-1.5 (-1.25)	上り	-1.22※2
					下り	-1.07
ウ 清陵高校前停留場東側 S字 (R80 カント25mm)	護輪軌条	25km/h以下	25km/h	-2.1 (-1.75)	上り	-1.25
					下り	-1.39
エ 清原地区市民センター前 (R36 カント5mm)	溝付レール	15km/h以下	15km/h	-1.5 (-1.25)	上り	-0.94
					下り	-1.19
オ 野高谷高架橋 (R110 カント50mm)	護輪軌条	30km/h以下	30km/h	-2.1 (-1.75)	上り	-1.00
					下り	-1.31
カ 芳賀町工業団地管理 センター前 (R30 カント5mm)	溝付レール	15km/h以下	15km/h	-1.5 (-1.25)	上り	-1.03
					下り	-1.15
キ かしの森公園前 (R180 カント20mm)	溝付レール	40km/h以下	40km/h	-1.5 (-1.25)	上り	-0.69
					下り	-0.85

※1 制限速度については、宇都宮ライトレール(株)が「軌道運転取扱心得」において定めるもの

※2 平石停留場周辺(R30)上りについては、5km/hの測定データが最大であったため、5km/hのデータを記載

(参考) 清陵高校前停留場東側 S字 (R80 カト 25mm) 下り (護輪軌条) 測定結果

- ・ R 8 0 曲線部において、軌道構造が他とは異なる道路との交差部で、脱線係数が若干高くなる傾向があるが、安全率を考慮した限界脱線係数以下である。(最大脱線係数 -1.39)

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)

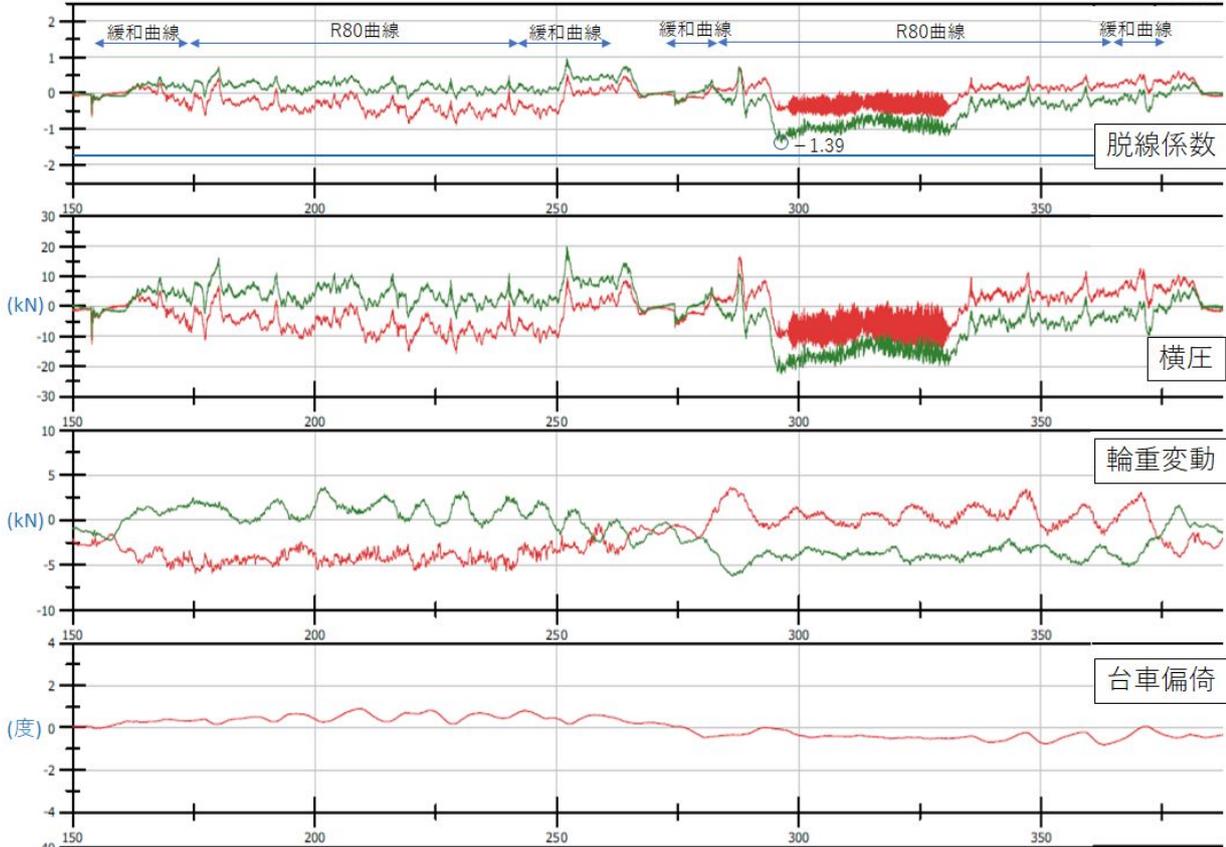


図 47 (参考) 清陵高校前停留場東側 S字 (R80 カト 25mm) 下り (護輪軌条) 測定結果

(参考) 清原地区市民センター前 (R36 カット5 mm) 下り (溝付レール) 測定結果

- ・ R36 曲線部において、レール継目で瞬間的に脱線係数が高くなる地点が認められたが、安全率を考慮した限界脱線係数以下である。(最大脱線係数 -1.19)

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)

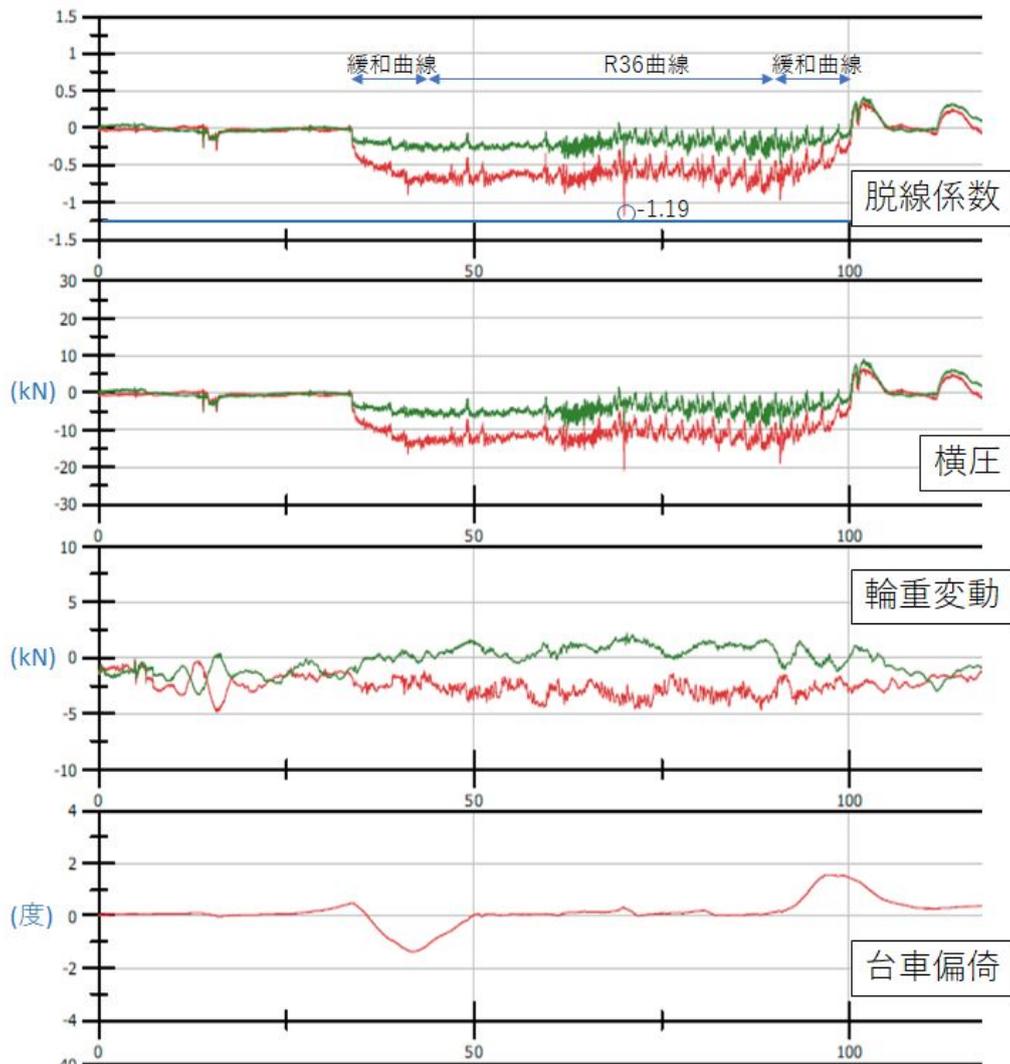


図 48 (参考) 清原地区市民センター前 (R36 カット5 mm) 下り (溝付レール) 測定結果

## 12 まとめ

令和4年11月19日に発生したLRT試運転中の脱線事故について、事故原因の究明及び再発防止策の検討、更には、対策工事後における検証等を行った。

### 【脱線の原因について】

原因究明及び再発防止策の検討に当たり測定試験を実施し、脱線原因等について推察し、その結果、宇都宮駅東口停留場の進入・進出ルートのうち脱線時の走行ルート（パターン8）においては、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ことで、事故時の速度である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た。

### 【脱線係数が高いことについて】

脱線時の走行ルート（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ているものと推定された。

### 【対策について】

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線形である、脱線時の走行ルート（パターン8）においては、制限速度を抑え5km/hとすること、また、当該曲線区間において脱線係数が高くなる要因となっている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、軌間を縮める調整を行うとともに、内軌側の輪重減少を抑えるため、カントを無くす対策工事を実施し、軌道の平面性を確保することが実行された。

### 【対策工事後の評価】

対策工事後に再度測定試験を行った結果、以下のことが確認された。

- ・ 内軌側のフランジ背面横圧が小さくなり、外軌側のフランジ正面側の横圧が同時に発生する傾向となったことから、内軌側と外軌側車輪とともに横圧を分担できていると考えられ、6mm程度の軌間の縮小を行った効果が確認された。
- ・ 緩和曲線における輪重減少が顕著に小さくなっていることから、カントを0mmにした効果が確認された。
- ・ 全ての走行パターンにおいて、脱線係数の低下が確認され、安全率を考慮した限界脱線係数以下となった。
- ・ 脱線時の走行ルート（パターン8）において、速度が5km/hから7km/hと高くなるに伴い、ストッパー当たりによる、先頭軸内軌の背面横圧の増加が確認され、脱線に至る原因の推察の妥当性が示された。
- ・ なお、脱線時の走行ルート（パターン8）については、7km/hでの走行は可能であるものの、速度向上により、横圧が高まる速度依存性が確認できたことから、5km/h以下とすることが望ましいと考える。

- ・ 宇都宮駅東口の走行パターン(脱線時の走行ルートを含む)における脱線係数の最大値は安全率を考慮した限界脱線係数以下であるため、走行安全上の問題はないものと判断できる。
- ・ 当該区間における通常時の走行パターンは12 km/h、緊急時の走行パターン(脱線走行パターンを除く)は10 km/hまでの安全性は確認できた。

【その他】

- ・ 当該区間のほか、他の曲線箇所を含む全線での測定データを確認したところ、制限速度内の運行上適切な速度において、脱線係数の値は全て安全率を考慮した限界脱線係数以下であることから、走行安全上の問題はないものと考えられる。
- ・ 今回の対策を踏まえると、LRT車両の安全な運行のためには、軌間、軌道におけるバックゲージやレールのフランジウェー間隔および車輪内面間距離などの適正な管理が重要である。
- ・ これらの寸法は、レールや車輪の摩耗で変化するが、特に急曲線部においては、車輪やレールの摩耗が早期に進展する可能性も考えられる。そのため、車輪やレールの形状を開業直後から継続的に確認し、摩耗傾向を調査することが望まれる。さらに、必要に応じて摩耗防止策を検討していくことが望ましい。

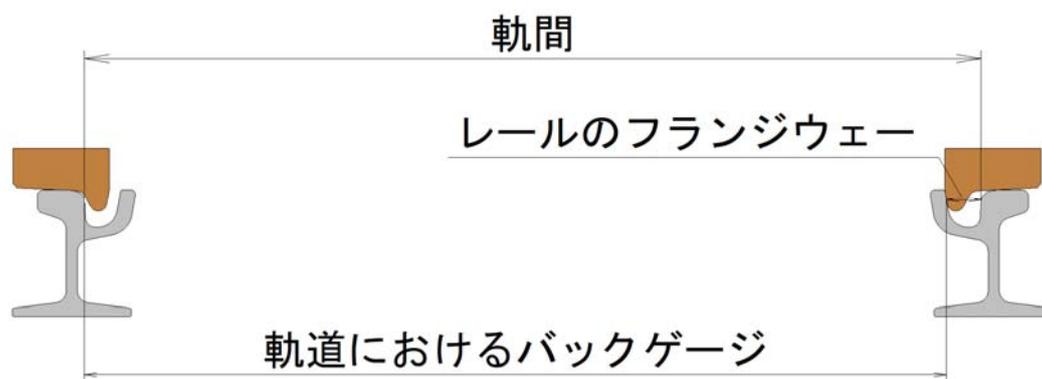


図 49 軌間、バックゲージ、フランジウェーの位置

○ 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  
委員名簿

(委員長) 須田 義大	東京大学 生産技術研究所 教授
水間 毅	元東京大学 特任教授
中橋 順一	(公財) 鉄道総合技術研究所 車両技術研究部 車両運動研究室 上席研究員
坪川 洋友	(公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道管理研究室 研究室長

○ 検討経過

- 令和4年12月16日 第1回有識者会議の開催  
 ・今後の取組について  
 ・L R T 脱線事故の概要について  
 ・走行調査の結果概要について  
 ・P Q測定試験の実施方法(案)について
- 12月23日  
 ～12月26日 P Q測定試験を実施(立会)
- 令和5年 2月13日 第2回有識者会議の開催  
 ・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(中間報告のとりまとめ)について
- 2月17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考察(中間報告)の提出
- 3月15日  
 ～4月25日 対策工事を実施(カントをなくす工事、軌間を縮める調整)
- 4月26日  
 ～4月28日 駅東口のP Q測定試験を実施(立会)
- 5月10日  
 ～5月12日 全線のP Q測定試験を実施
- 令和5年 5月29日 第3回有識者会議の開催  
 ・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(最終報告のとりまとめ)について