

RA2022-2

鉄道事故調査報告書

I 京成電鉄株式会社 本線 青砥駅構内
列車脱線事故

II 東日本旅客鉄道株式会社 米坂線 越後金丸駅～小国駅間
踏切障害事故

令和4年3月24日

本報告書の調査は、本件鉄道事故に関し、運輸安全委員会設置法に基づき、運輸安全委員会により、鉄道事故及び事故に伴い発生した被害の原因を究明し、事故の防止及び被害の軽減に寄与することを目的として行われたものであり、事故の責任を問うために行われたものではない。

運輸安全委員会
委員長 武田 展雄

《参 考》

本報告書本文中に用いる分析の結果を表す用語の取扱いについて

本報告書の本文中「3 分 析」に用いる分析の結果を表す用語は、次のとおりとする。

- ① 断定できる場合
・・・「認められる」
- ② 断定できないが、ほぼ間違いない場合
・・・「推定される」
- ③ 可能性が高い場合
・・・「考えられる」
- ④ 可能性がある場合
・・・「可能性が考えられる」
・・・「可能性があると考えられる」

I 京成電鉄株式会社 本線 青砥駅構内
列車脱線事故

鉄道事故調査報告書

鉄道事業者名：京成電鉄株式会社

事故種類：列車脱線事故

発生日時：令和2年6月12日 10時16分ごろ

発生場所：東京都葛飾区

本線 青砥^{あおと}駅構内

令和4年2月24日

運輸安全委員会（鉄道部会）議決

委員長 武田展雄

委員 奥村文直（部会長）

委員 石田弘明

委員 柿嶋美子

委員 鈴木美緒

委員 新妻実保子

要旨

<概要>

京成電鉄株式会社の京成高砂^{たかさご}駅発羽田空港第1・第2ターミナル駅行き8両編成の上り第1022N列車は、令和2年6月12日、京成高砂駅を定刻（10時13分）の約1分遅れで出発した。列車は、青砥駅のプラットフォームに速度約30km/hで進入中、非常ブレーキが作動し、停止目標位置の約44m手前に停止した。なお、非常ブレーキは、車掌が列車の異常な揺れを感知し車掌弁を引いて作動したものであった。

停止後、車掌が列車の側面を確認したところ、7両目が右側に傾き、脱線していた。その後、同社社員が脱線状況の確認を行ったところ、後台車の右前方の側ばりに亀裂が入っていることを確認した。

列車には、乗客約100名、運転士1名及び車掌1名が乗車していたが、負傷者はいなかった。

<原因>

本事故は、台車の側ばりの下面から側面上部に達する亀裂が発生・進展した状態で走行したため、台車前軸の輪重のアンバランスが大きくなり、右側車輪の輪重が減少した状態で曲線を通じたため、横圧が増加したことにより右側車輪がレールに乗り上がり、脱線防護ができなくなる脱線防止ガードレールの終端である青砥駅方端部付近で、脱線したものと考えられる。

台車前軸の輪重のアンバランスが大きくなったことについては、亀裂によって側ばりの強度が低下して、上下荷重を分担できなくなっていたためと考えられる。

また、側ばりに亀裂が発生したことについては、側ばり内部の補強板溶接箇所に応力が集中したことにより局所的に高い応力が発生し、それが亀裂の起点となって疲労破壊により亀裂が進展した可能性が考えられる。

事業者の定期検査において亀裂の進展を発見できなかったことについては、本事故発生前直近の全般検査時には、既に側ばり下面の表面に亀裂が達していた可能性が考えられるが、その亀裂は開口していなかった可能性があること、及び側ばりの磁粉探傷検査箇所が詳細に示されていなかったことにより、亀裂を発見できなかった可能性が考えられる。

目 次

1	鉄道事故調査の経過	1
1.1	鉄道事故の概要	1
1.2	鉄道事故調査の概要	1
1.2.1	調査組織	1
1.2.2	調査の実施時期	1
1.2.3	原因関係者からの意見聴取	1
2	事実情報	2
2.1	運行の経過	2
2.1.1	乗務員等の口述	2
2.1.2	運転状況の記録	4
2.2	人の死亡、行方不明及び負傷	5
2.2.1	負傷者に関する情報	5
2.3	鉄道施設等に関する情報	5
2.3.1	事故現場等に関する情報	5
2.3.2	鉄道施設に関する情報	6
2.4	車両に関する情報	9
2.4.1	車両の概要	9
2.4.2	車両の整備に関する情報	10
2.4.3	本件車両に関する情報	12
2.5	鉄道施設及び車両の損傷状況等に関する情報	26
2.5.1	鉄道施設の損傷、痕跡の状況	26
2.5.2	車両の損傷、痕跡の状況	27
2.6	乗務員等に関する情報	27
2.7	気象に関する情報	28
2.8	設計及び事故後の検証に関する情報	28
2.8.1	設計に関する情報	28
2.8.2	残留応力の計測結果	32
3	分 析	33
3.1	脱線に関する分析	33
3.1.1	本件列車の運転	33
3.1.2	軌道	33
3.1.3	本件列車の脱線した地点	33
3.1.4	本件台車車輪の乗り上がりの状況	33

3.1.5	本件列車の脱線要因.....	34
3.2	本件車両に関する分析.....	35
3.2.1	本件車両の車体及び台車.....	35
3.2.2	本件亀裂と本件台車の静止輪重比.....	35
3.2.3	本件亀裂の発生・進展に関する分析.....	36
3.2.4	本件亀裂と定期検査の関係.....	37
3.2.5	台車製造時の品質に関する分析.....	38
3.2.6	本件側ばりの設計に関する分析.....	39
3.2.7	本件板ばね破損に関する分析.....	39
4	結 論.....	40
4.1	分析の要約.....	40
4.2	原因.....	41
5	再発防止策.....	41
5.1	必要と考えられる再発防止策.....	41
5.2	事故後に同社が講じた措置.....	42
5.3	事故後に国土交通省が講じた措置.....	42

添付資料

付図1	京成電鉄 本線の路線図.....	43
付図2	事故現場付近の地形図.....	43
付図3	事故現場周辺略図.....	44
付図4	主な軌道の痕跡等.....	45
付図5	本件台車の主な損傷状況.....	45
付図6	台車概略図.....	46
付図7	本件亀裂の破面状況.....	47
付図8	本件列車の主な損傷状況.....	48

1 鉄道事故調査の経過

1.1 鉄道事故の概要

京成電鉄株式会社の京成高砂^{たかさご}駅発羽田空港第1・第2ターミナル駅行き8両編成の上り第1022N列車は、令和2年6月12日（金）、京成高砂駅を定刻（10時13分）の約1分遅れで出発した。列車は、青砥駅のプラットフォームに速度約30km/hで進入中、非常ブレーキが作動し、停止目標位置の約44m手前に停止した。なお、非常ブレーキは、車掌が列車の異常な揺れを感知し車掌弁を引いて作動したものであった。

停止後、車掌が列車の側面を確認したところ、7両目（以下、車両は前から数え、前後左右は列車の進行方向を基準とする。）が右側に傾き、脱線していた。その後、同社社員が脱線状況の確認を行ったところ、後台車の右前方の側ばりに亀裂が入っていることを確認した。

列車には、乗客約100名、運転士1名及び車掌1名が乗車していたが、負傷者はいなかった。

1.2 鉄道事故調査の概要

1.2.1 調査組織

運輸安全委員会は、令和2年6月12日、本事故の調査を担当する主管調査官ほか2名の鉄道事故調査官を指名した。

関東運輸局は、本事故調査の支援のため、職員を事故現場に派遣した。

1.2.2 調査の実施時期

令和2年	6月12日及び13日	現場調査、車両調査及び口述聴取
同年	6月25日	台車調査
同年	8月6日	台車探傷試験調査

1.2.3 原因関係者からの意見聴取

原因関係者から意見聴取を行った。

2 事実情報

2.1 運行の経過

2.1.1 乗務員等の口述

事故に至るまでの経過は、京成電鉄株式会社（以下「同社」という。）の京成高砂駅発羽田空港第1・第2ターミナル駅行き8両編成の上り第1022N列車（以下「本件列車」という。）の運転士（以下「本件運転士」という。）、同車掌（以下「本件車掌」という。）、本件事故発生前に本件列車と同じ編成（以下「本件編成」という。）で羽田空港第1・第2ターミナル駅発京成高砂駅行きの第723N列車（以下「第723N列車」という。）を押上駅から運転した運転士（以下「第723N列車運転士」という。）及び本件編成の入出庫作業を担当した検車区限定運転士^{*1}の口述等によれば、概略次のとおりであった。

(1) 本件運転士

本件列車には、京成高砂駅（京成上野駅起点12k660m、以下「京成上野駅起点」は省略する。）から乗務した。

京成高砂駅を定刻（10時13分）の約1分遅れで出発した。出発後、2ノッチで加速を行い、その後5ノッチで速度約50km/hまで加速をした後、ノッチオフの操作を行った。次の停車駅である青砥駅（11k510m）の第3場内信号機（11k690m）で45km/hの速度制限があるため、第2場内信号機（11k827m）の少し内方で常用ブレーキを扱って、速度約40km/hで第3場内へ進入した。進入後、惰行^{だこう}運転を行い、分岐器を通過するため再度常用ブレーキを扱って約30km/hまで減速して分岐器を通過し、その速度で列車の先頭部が青砥駅のプラットホームに差し掛かった付近にて、後方より引っ張られる感覚があり、その1～2秒後に警報音とモニタ表示により、車掌弁による非常ブレーキが作動したことを認め、本件列車は停止目標位置より約44m手前に停止した。この時に本件車掌から脱線しているようだと連絡があった。

運輸指令に「脱線しているようだ、これから現場を確認する」と報告を行い、本件列車から降車して現場を確認したところ、7両目の車両（以下「本件車両」という。）が傾いて、本件車両から外れたパンタグラフが架線に引っかかっている状況であり、脱線していることが確認できたので、運転台に戻って、脱線している旨を運輸指令に報告した。その後、駆けつけた社員と協力して車内の乗客を降車させ、降車完了後に扉を閉めて、留置対応を行った。

*1 ここでいう「限定運転士」とは、検車区や工場内での入換運転や入出庫運転等を行うため、運転の範囲を限定し、必要な条件を付された運転免許を受けた運転士のことをいう。

なお、本件列車の乗務開始から本事故発生に至るまでの間、本件列車の車両に異状は特に感じなかった。

(2) 本件車掌

本件列車は、京成高砂駅を定刻（10時13分）の約1分遅れで出発した。

本件列車の出発時に乗務員室の扉を閉め、車掌弁を左手で持ち、右手は外のバー（手すり）を持ち、列車の監視を行った。その後、青砥駅の上り線（外線）の第3場内信号機のあたりで、普段と異なる不可解な上下動が発生した異変を感じ、ほどなくして衝撃を感じた。右側の窓を開けていたところ、衝撃音（ガーッという音）が聞こえ、白煙のようなものが上がるのを窓から顔を出して確認し、ただ事ではないと感じたので、車掌弁を操作した。操作した場所はシーサースクロッシング*2（以下「本件分岐」という。）のクロスしている付近であったと思う。車掌弁操作時の速度は、通常より速度を出しているようには感じなかった。なお、異変を感じる前までは、通常とおりの走行で違和感もなかった。

本件列車停止後に列車の後方を見るとパンタグラフのようなものが垂れており、架線が垂れていると思い、列車無線の発報信号スイッチを扱った。また、列車の側面を見ると、本件車両が他の車両より傾いていることを確認した。さらに、車内を見ると、本件車両と8両目の間に高低差（上下のずれ）があり異常を感じたため、運転士に対して列車が脱線していることを連絡し、本件運転士に運輸指令への報告を依頼した。また、乗客に対し、列車が脱線した旨の案内放送を行い、列車の前方（押上方面）の車両に避難するよう伝えた。その後、運転室に駆けつけた駅の助役から、ドアロックを扱い避難させるよう指示があったため、6両目、5両目、4両目、3両目の順番で、各車両右側の3箇所あるドアのうち前方と後方のドアを開放して乗客を降車させた。

なお、乗客の降車が完了した際の京成高砂駅社員からの報告によると、約100名の乗客を誘導し、負傷者はいないことを確認したとのことであった。

(3) 第723N列車運転士

定刻の8時53分に都営地下鉄浅草線から押上駅に到着し、前任の運転士から「定刻異常なし」との報告を受け、引き継いだ。その後、押上駅から京成高砂駅まで運転したが、車両に異状を感じることはなく、通常とおり運転した。当日に乗務した本件列車と同形式車両を比べても特に違和感はなかった。

*2 「シーサースクロッシング」とは、2組の渡り線が交差するもので、4組の分岐器と1組のダイヤモンドクロッシングから構成されているものをいう。

第723N列車は、京成高砂駅到着後車庫へ入庫するため、検車区限定運転士に「異常なし」の旨報告し、引き継いだ。

また、本件列車と同一区間を当日事故発生前に他列車で運行したが、線路状況等については問題なく普段どおりに感じた。

(4) 検車区限定運転士

第723N列車の入庫対応の際、京成高砂駅で9時6分に第723N列車運転士から「異常なし」の報告を受け、引き継いだ。第723N列車がホームに入ってくる時の様子に、違和感は全くなかった。

入庫の際は、本件列車の脱線した7両目に近い8両目が先頭で、乗務員室の窓を開けて運転したので、音についてもよく聞こえる状況であったが、入庫している時も普段と変わらず、加減速、振動、異音とも特に違和感なく、異状は感じなかった。

また、10時10分に車庫から京成高砂駅に向けて出庫、1両目が先頭で乗務員室の窓を開けて運転を行ったが、異音も特になく違和感はなかった。

10時12分頃京成高砂駅に到着し、本件運転士に「異常なし」と報告して引継ぎを行った。

なお、入庫及び出庫時の点検では点検項目対象外のため、台車の確認は行っていない。

2.1.2 運転状況の記録

本件列車の運転状況は、自動列車停止装置（以下「C-A-T-S装置」という。）に時刻、速度、制限速度、走行距離等の情報が記録されていた。

このC-A-T-S装置に記録されていた本件列車の京成高砂駅出発から本事故発生までの間における主な記録は、表1のとおりであった。

なお、本件列車にはドライブレコーダーは搭載されていなかった。

表1 C-A-T-S装置による運転状況の記録（主要な記録のみ抜粋）

時刻	速度 (km/h)	制限速度 (km/h)	走行距離 (m)	備考
10時14分38秒	0	45.00	0	京成高砂駅出発
⋮	⋮	⋮	⋮	
10時16分07秒	36.30	45.00	937.2	11k750m付近、本件台車通過
⋮	⋮	⋮	⋮	
10時16分15秒	32.27	45.00	1019.0	11k670m付近、本件台車通過

：	：	：	：	
10時16分22秒	29.28	45.00	1078.8	減速直前
10時16分23秒	28.13	45.00	1086.8	急激な速度低下開始
10時16分24秒	25.05	45.00	1094.2	急激な速度低下
10時16分25秒	20.69	43.30	1100.4	同上
10時16分28秒	8.02	39.95	1112.1	同上
10時16分30秒	0	9.50	1114.5	本件列車停止

※時刻は、実際の時刻に基づき補正している。

※走行距離は、京成高砂駅出発時からの累計走行距離を示している。

※速度と走行距離は誤差が内在している可能性がある。

※制限速度は、C-A-T-S装置の照査速度である。

(付図1 京成電鉄 本線の路線図、付図2 事故現場付近の地形図、付図3 事故現場周辺略図 参照)

2.2 人の死亡、行方不明及び負傷

2.2.1 負傷者に関する情報

同社によると本件列車には約100名の乗客及び乗務員2名(本件運転士、本件車掌)が乗車していたが、負傷者はいなかった。

2.3 鉄道施設等に関する情報

2.3.1 事故現場等に関する情報

2.3.1.1 青砥駅周辺の状況

青砥駅は同社の本線及び押上線が接続する駅で、2面4線の2層構造で、2階が上り線のプラットホーム、3階が下り線のプラットホームとなっている。また、京成高砂駅は同社の本線、金町線及び北総鉄道株式会社(以下「北総鉄道」という。)の北総線が接続する駅となっている。

2.3.1.2 脱線の状況

本件列車の先頭は11k450m付近で停止していた。また、8両目の後端は、11k590m付近で停止していた。本件車両の後台車(以下「本港台車」という。)は11k570m付近で停止しており、本港台車の第1軸左車輪が約14cm、第2軸左車輪が約10cm、それぞれ左レールから右側に脱線していた。また、右車輪も右レールの右側に脱線していた。

脱線防止ガードレールの青砥駅方端部付近（11k670m付近）から本件車両の本件台車が停止していた11k570m付近の範囲で、まくらぎ、レール、レール締結装置等に、本件列車によるものと見られる痕跡があった。また、11k750m付近から11k670m付近までの脱線防止ガードレールには、車輪と接触したと見られる痕跡があり、右レールの頭頂面には車輪のフランジが走行したと見られる痕跡があった。

（付図3 事故現場周辺略図、付図4 主な軌道の痕跡等 参照）

2.3.2 鉄道施設に関する情報

2.3.2.1 路線の概要

同社の本線は、京成上野駅から成田空港駅に至る営業キロ69.3kmの路線であり、複々線区間（青砥駅～京成高砂駅）、複線区間（京成上野駅～青砥駅、京成高砂駅～空港第2ビル）、単線区間（空港第2ビル駅～成田空港駅）から成る直流1,500Vの電化区間で、軌間は1,435mmである。

（付図1 京成電鉄 本線の路線図 参照）

2.3.2.2 線路の概要

本事故現場付近の線路及び設備に関する情報は以下のとおりである。

事故現場付近の京成高砂駅方の軌道構造は、バラスト軌道であり、50kgNレールが使用されている。まくらぎは、PCまくらぎ及び合成まくらぎが使用されている。

- (1) 青砥駅（11k510m）と京成高砂駅（12k660m）間の距離は、約1.1kmである。（キロ程はいずれも駅中心キロ程を示す。）
- (2) 線形は、11k859mから11k670mまでが緩和曲線を含む曲線半径270mの左曲線（以下「本件曲線」という。）となっており、カント*³80mm、スラック*⁴0mmである。本件曲線の青砥駅側には、本件分岐がある。半径250m以上275m未満の曲線に対する制限速度は、同社が定める運転取扱実施基準により65km/h以下と定められている。また、勾配は、11k820mから11k680mまでは、15.3‰の下り勾配であり、11k680mから11k390m付近までは1.02‰の下り勾配である。
- (3) 本件曲線には、脱線防止ガードレールが左レールの内側に設置されており、絶縁継目（11k827m）の箇所を除いて、本件曲線の全長に敷設されていた。なお、脱線防止ガードレールと左レールの間隔は設計値で85mmであ

*3 「カント」とは、曲線部における、外側レールと内側レールとの高低差をいう。

*4 「スラック」とは、曲線部において軌間を拡大する量をいう。

る。

鉄道に関する技術上の基準を定める省令（平成13年国土交通省令第151号）に基づき、同社が関東運輸局長に届け出ている実施基準（以下「届出実施基準」という。）の一部である線路・建造物実施基準において、脱線防止ガードレールの敷設については、次のとおり規定されている。

（軌道構造）

第26条 軌道は、次の各号に適合するものでなければならない。

- （1） 車両の構造に適合し、車両を所定の方向に案内することができること。
- （2） 予想される荷重に耐えられること。
- （3） 車両の安全な走行に支障を及ぼす変形のおそれのないこと。
- （4） 保全に支障を及ぼすおそれのないこと。

2 本線における曲線半径の小さい曲線その他の脱線のおそれのある箇所又は脱線した場合に被害が甚大となるおそれのある箇所には、施設の状況、車両の構造等に応じ、脱線を防止するための設備又は脱線した場合の被害を少なくするための設備を設けなければならない。

- （1） 本線においては曲線半径250m未満、側線においては曲線半径160m以下の区間には脱線防止ガードレールを設けるものとする。また、次式により推定脱線係数比が、1.2未満となる曲線及びその他の脱線原文ママの恐れのある箇所には、脱線防止レール又は脱線防止ガードレールを設けるものとする。

$$\text{推定脱線係数比} = \frac{\text{推定脱線係数}}{\text{限界脱線係数}}$$

（2）～（5）（略）

- （4） 本件曲線と青砥駅の間には、上り線の上野方面行きと押上方面行きの2線を分岐する本件分岐が配置されており、押上方面行きには京成高砂駅方に22口分岐器、青砥駅方には23イ分岐器が設置されている。
- （5） 青砥駅の上り第1場内信号機が12k025mに、同駅の上り第2場内信号機が11k827mに、同駅の上り第3場内信号機が11k690mに設置されている。

（付図3 事故現場周辺略図、付図4 主な軌道の痕跡等 参照）

2.3.2.3 線路の整備に関する情報

線路の整備については、届出実施基準の一部である線路・建築物実施基準で定められている。軌道変位については、軌間変位、水準変位、平面性変位、高低変位、

及び通り変位の検査を年1回以上行うこととされ、静的な軌道変位及び平面性の保守維持値は、表2のとおりである。

表2 軌道の保守維持値

(単位：mm)

線別項目	本線	側線
軌間	半径140m以上600mまで増19(減4) その他 増14(減4)	同左
水準	平面性に基づき整備を行う	同左
平面性 (延長2.5mにおいて)	14	同左
高低 (延長10m以内において)	17	22
通り (延長10m以内において)	17	22

※1) 数値は、軌道検測車による静的値を示す。

2) 曲線部におけるスラック、カント及び正^{せいや}矢量(縦曲線を含む)は含まない。

3) 上記の保守維持値を超えた場合、すみやかに補修することを原則とする。

4) 「増」は軌間拡大の上限値、「減」は軌間縮小の下限値である。

また、軌道材料部材検査は、軌道材料(レール、道床・路盤、まくらぎ等)の損傷、摩耗、腐食等の状態について、年1回以上検査を行うこととされている。

2.3.2.4 軌道変位に関する情報

脱線防止ガードレールが敷設されている11k859mから11k670mまでの本事故発生前直近の軌道変位検査は、令和2年5月20日に軌道検測車を使用して行われており、その結果は表2に示した保守維持値の範囲内であった。

また、本事故発生後には、11k760mから11k655mまでの軌道変位測定を手検測によって実施し、その結果は表2に示した保守維持値の範囲内であった。

2.3.2.5 軌道部材に関する情報

本事故発生前直近の主な軌道部材の定期検査は、令和2年2月4日に行われており、各検査の記録及び検査結果に異常を示すものはなかった。なお、本事故発生後の事故現場付近の軌道部材についても、異常はなかった。

2.3.2.6 本件列車の青砥駅到着時の在線状況に関する情報

青砥駅1番線に到着する本件列車の在線状況は、地上側の装置に残された記録によれば、第1場内信号機の内方へ進入した約10秒後に第2場内信号機の内方へ進入、その約10秒後に第3場内信号機の内方へ進入し、さらに約10秒後に一番線ホームへ進入となっていた。

2.3.2.7 青砥駅の映像記録

青砥駅には、監視カメラが設置されており、プラットホームの状況を映像で記録している。

同カメラの本事故発生時の記録には、青砥駅1番線に本件列車が進入及び、停止目標位置の手前で停止する様子が記録されていた。

2.4 車両に関する情報

2.4.1 車両の概要

本件列車の車両は同社から北総鉄道へリースされており、北総鉄道の所属となっている。

車種	7800形直流電車（直流1,500V）
編成両数	8両
編成定員	1,068名
台車中心間距離	12,000mm
連結器間距離	18,000mm
本件車両の空車重量	34t ^{*5}
本件車両の完成年月	平成7年2月
本件台車の形式	FS547
車体支持装置	ダイレクトマウント式（空気ばね車体直結式）
軸箱支持装置	片板ばね式 ^{*6}
軸距	2,100mm
車輪踏面形状	円錐踏面
車輪フランジ角度 ^{*7}	69.3度
本件台車の製造年月	平成2年12月

*5 [単位換算] 1t = 1,000kg（重量）、1kg（重量）：1kgf、1kgf 9.8N

*6 「片板ばね式」とは、軸箱体の台車中央側にのみ板ばねを設置し、防振ゴムを介して台車枠と軸箱体を接続する方式をいう。

*7 「車輪フランジ角度」とは、車輪のフランジ面が車軸の中心軸となす最大角度をいう。一般にフランジ角度が大きいほど脱線しにくい。

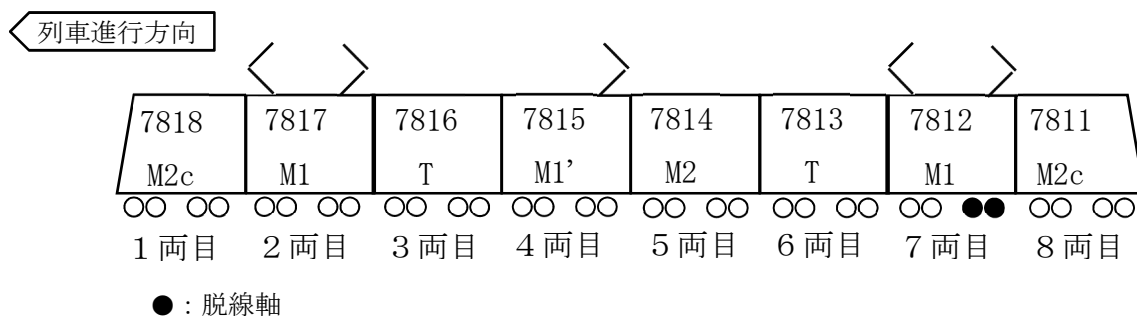


図1 本件列車の編成

2.4.2 車両の整備に関する情報

本件車両の検査については、北総鉄道の届出実施基準の一部である車両整備実施基準で定められている。車両の検査は、列車検査^{*8}、全般検査^{*9}、重要部検査^{*10}、月検査^{*11}、等があり、次に示す規定のとおり、検査ごとに定められた期間（検査周期）又は車両の走行距離によって行われている。なお、本件列車については列車検査及び月検査は北総鉄道で実施、全般検査及び重要部検査は北総鉄道からの委託により、同社が実施している。

（列車の検査）

第10条 車両の使用状況に応じ、10日を超えない範囲で、消耗品及び主要部分の機能について在姿で検査を行うものとする。

（定期検査の種類）

第11条 車両の定期検査の種類は、次の各号に掲げるとおりとする。

(1) 状態・機能検査(以下、月検査という)

(2) 重要部検査

(3) 全般検査

（月検査）

第12条 車両の使用状況に応じ、3月を超えない期間ごとに電車の状態及び機能について在姿状態で定期検査を行うものとする。

（重要部検査）

第13条 車両の使用状況に応じ、4年又は該当車両の走行距離が60万キロメートル

*8 「列車検査」とは、同社及び北総鉄道では、10日を超えない期間ごとに車両の主要部分について在姿で検査を行うものとしている。

*9 「全般検査」とは、同社及び北総鉄道では、8年を超えない期間ごとに、車両全般について定期検査を行うものとしている。

*10 「重要部検査」とは、同社及び北総鉄道では、4年又は当該車両の走行距離が60万キロメートルを超えない期間のいずれか短い期間ごとに、動力発生装置、走行装置、ブレーキ装置等重要な装置の主要部分について定期検査を行うものとしている。

*11 「月検査」とは、3月を超えない期間ごとに、車両の状態及び機能について在姿で定期検査を行うものとしている。

ルを超えない期間のいずれか短い期間ごとに動力発生装置、走行装置、ブレーキ装置等重要な装置の主要部分について定期検査を行うものとする。

(全般検査)

第14条 車両の使用状況に応じ、8年を超えない期間ごとに、動力発生装置、走行装置、ブレーキ装置、車体、その他車両装備品等の電車全般について定期検査を行うものとする。

台車は、月検査で目視検査の他に、輪軸については、車輪の直径、フランジ高さ、フランジ厚さ及びバックゲージの寸法検査を行うこととされている。各検査項目に関する限度値または基準値は表3のとおりである。

表3 輪軸に関する限度値または基準値

検査項目	限度値または基準値
タイヤの厚さ	一体圧延車輪 25mm以上
車輪直径の差	同一輪軸 1mm (1mm)
	同一台車 6mm (10mm)
	同一車両 11mm (20mm)
	()内は付随台車(T台車)の数値を示す。
フランジの厚さ	基準値 31mm 限度値 26mm
フランジの高さ	基準値 27mm 限度値 30mm
フランジの角度	基準値 69.3° 限度値 73°
バックゲージ	基準値 1,360mm
	限度値 1,359~1,361mm

台車枠については、重要部検査及び全般検査で台車から取り外され、図2に示す「○数字」の箇所については目視確認、「□数字」の箇所については磁粉探傷検査^{*12}を行うこととされている。なお、点線で囲まれた箇所については、他社における過去の亀裂発生事例^{*13}を参考に、「□数字」の検査箇所に加え、側ばり全体を磁粉探傷検査するように追加された箇所である。また、本件事故発生後に磁粉探傷検査の作業実施状況を確認したところ、側ばり全体の全周で実施していた。

*12 「磁粉探傷検査」とは、漏えい磁界によって表面及び表面近傍のきずを可視化し検出する非破壊試験のことをいう。磁性粉末を含む適切な試験媒体を利用する。

*13 「他社における過去の亀裂発生事例」とは、平成28年5月18日 東武鉄道株式会社 東上本線 中板橋駅構内 列車脱線事故のことをいう。

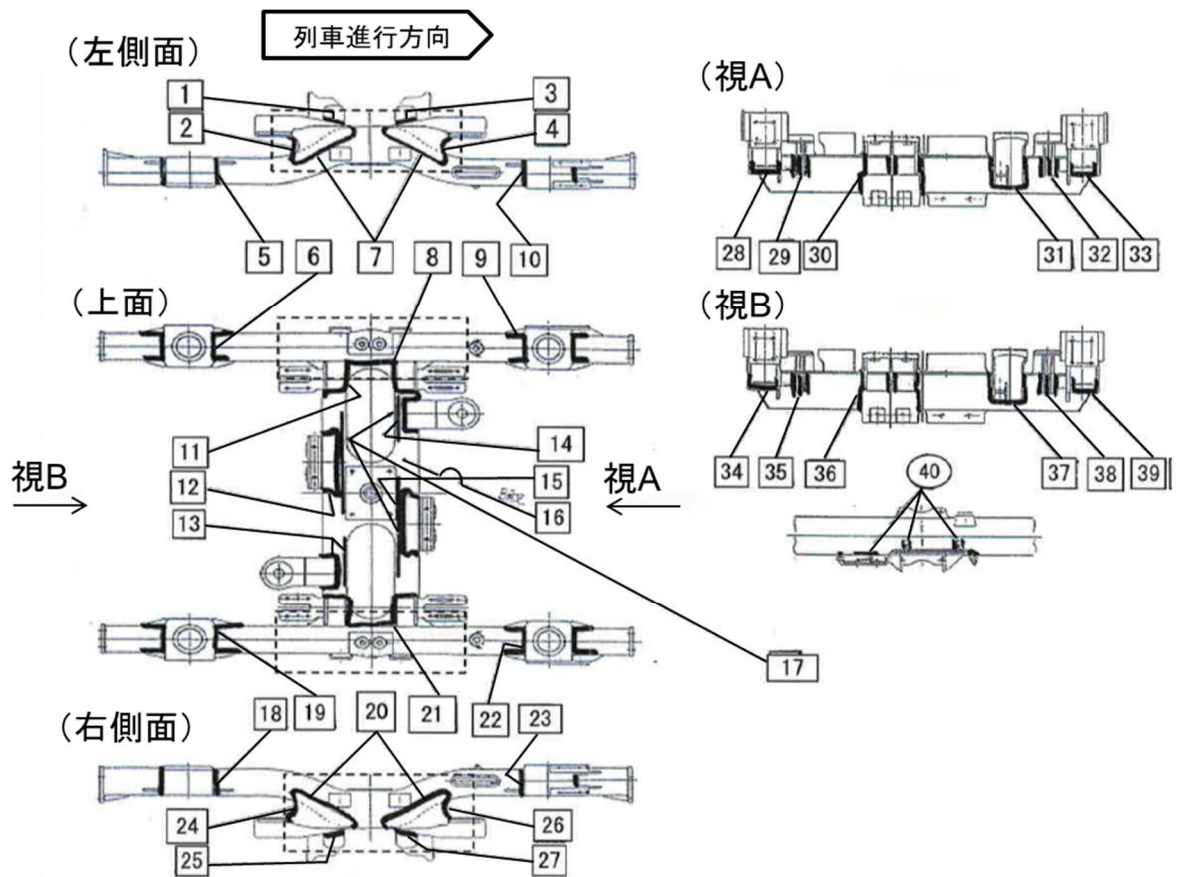


図2 台車枠の探傷検査箇所

なお、左右の車輪の静止輪重については、重要部検査及び全般検査で測定を行い、静止輪重比^{*14}が、10%以内となるように管理することとされている。

2.4.3 本件車両に関する情報

2.4.3.1 車両の検査等に関する情報

本件車両の本事故発生前直近における検査等の実施状況は、表4のとおりであり、これらの検査記録によれば異常は認められなかった。なお、平成28年12月1日の全般検査から本事故発生までの走行距離は約49万kmであった。

表4 本件列車の検査記録等

全般検査	平成28年12月 1日
重要部検査	平成26年 2月26日
月検査	令和 2年 4月 7日
列車検査	令和 2年 6月 8日

*14 「静止輪重比」とは、1軸の輪軸に対し、片側の車輪の輪重（静止輪重）をその軸の平均輪重で除した値をいう。管理値は、単位を%とし、100%との差の絶対値で表す。

2.4.3.2 輪軸の状況

本件車両の輪軸については、令和元年11月7日に車輪削正が行われていた。月検査時の輪軸の検査結果は表5のとおりであり、タイヤの厚さ、フランジの高さ、フランジの厚さ及びバックゲージは表3に示す限度値または基準値内で、異常はなかった。

表5 本件車両の本事故発生前直近における月検査時の輪軸検査結果

(単位：mm)

輪軸	前台車				後台車 (本件台車)			
	前軸		後軸		前軸		後軸	
車輪位置	右	左	右	左	右	左	右	左
タイヤの厚さ	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0	29.0
フランジの厚さ	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0
フランジの高さ	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0
バックゲージ	1359.0		1359.0		1359.1		1359.0	

また、本事故後に本件車両の車輪踏面形状の確認を行ったが、設計形状と大きな差異はなかった。

2.4.3.3 静止輪重比の状況

本事故発生前直近の全般検査における、本件車両の静止輪重の測定値から算出した静止輪重比は、表6に示すとおり10%以内となり、問題ない結果であった。

表6 全般検査時における静止輪重比

台車	輪軸	静止輪重比
前台車	前軸	3%
	後軸	5%
後台車 (本件台車)	前軸	6%
	後軸	1%

2.4.3.4 車体及び台車の状況

本事故発生前直近の全般検査の測定結果によれば、本件車両の台車組立て寸法は管理値内であり、月検査の結果にも異常はなかった。

また、本事故後に本件台車を確認したところ、台車枠右側側ばり（以下「本件側ばり」という。）のブレーキてこ用貫通穴付近に亀裂（以下「本件亀裂」という。）があった。また、本件亀裂以外では、本件側ばりの下にある板ばねが破損（以下「本件板ばね破損」という。）していたが、それ以外の軸箱支持装置及び空気ばね高さ調整装置等、車体支持装置には、異常はなかった。

（付図5 本件台車の主な損傷状況、付図6 台車概略図 参照）

2.4.3.5 本件台車の側ばりに関する情報

台車の台車枠は、主に前後車輪の間隔を維持し、車両の重量を受ける左右二つの側ばりと、その側ばりをつなぐ横ばりにより構成されている。

側ばりは、材料の種類が鋼材（SM400B、公称板厚：12mm）で、コの字型にプレス成形した台車枠の外側のものを「外側ばり」、同内側のものを「内側ばり」と定義して、この二つの部材を突き合わせて溶接し、ロの字型に組み立てたものである。側ばりのまくらぎ方向の断面は、本件亀裂の箇所では高さ（上下方向）170mm、幅（まくらぎ方向）180mmである。なお、製作当時におけるプレス形成後の板厚の製作公差は不明であるが、現在のプレス形成後の板厚下限値は、プレス形成時の局所的な伸びにより発生し得る局所的な板厚減少を考慮して、9.6mm以上とのことであった。

側ばりの内部には、側ばりの強度を保ち変形を抑えるため、まくらぎ方向に補強板（以下「横リブ」という。）が溶接されていた。横リブの材料の種類は鋼材（SM400B、板厚：6mm）である。

横リブは、内外の側ばりのそれぞれ同じ位置に7列ずつ、合計14枚が溶接されていた。横リブは、治具によって位置を決め、直線部は機械（ロボット）溶接し、端部及び曲線部は人の手によって溶接する。

本件台車を製造した会社（以下「本件台車メーカー」という。）の側ばりに溶接されている横リブの溶接ビード^{*15}及び溶接止端部^{*16}の主な管理基準は、本件台車製作当時と現在で、それぞれ次のとおりである。

(1) 本件台車製作時

① 判定基準

アンダーカット^{*17}及びオーバーラップ^{*18}ともに0.5mm以下としており、溶接外観検査項目について基準を定めている。

② 検査方法

*15 「溶接ビード」とは、溶接による接合面にできた盛り上がり部分のことをいう。

*16 「溶接止端部」とは、母材の面と溶接ビードの面が交わる点をいう。

*17 「アンダーカット」とは、母材又は既溶接の上に溶接して生じた止端の溝をいう。

*18 「オーバーラップ」とは、溶着金属が止端で母材に融合しないで重なった部分をいう。

溶接作業者が目視で検査（適宜、スケール及び隙間ゲージ等で測定）。
チョーク等で直接現品に指摘内容を書き込む。

(2) 現在

① 判定基準

アンダーカットは0.3mm以下、オーバーラップは0.5mm以下としており、溶接外観検査項目について基準を定めている。

② 検査方法

検査専従者が目視検査（適宜、スケール及び隙間ゲージ等で測定）、磁粉探傷検査、超音波探傷検査^{*19}を実施、目視検査の精度向上のため、定量評価が難しい箇所については、限度見本を用いた基準としている。また、視認性、検査時の作業性向上のため、携帯式蛍光灯を使用して検査を実施している。

(付図6 台車概略図 参照)

2.4.3.6 本件亀裂に関する情報

本件台車における側ばりの部位は図3のとおり、右前方を5位、左前方を6位、右後方を7位、左後方を8位とする。

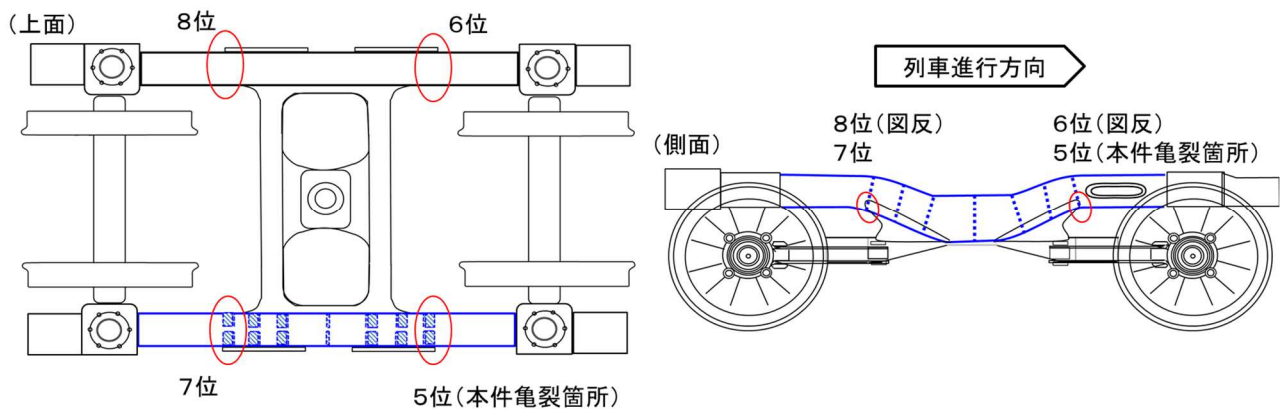


図3 本件台車における側ばり部位の定義

(1) 本件亀裂が発生した箇所に関する情報

本件亀裂が発生した箇所は、本件側ばりのブレーキてこ用貫通穴近くに横リブ2枚（以下、外側ばりの横リブを「本件外リブ」といい、内側ばりの横リブを「本件内リブ」という。）が溶接されている箇所（以下「本件亀裂箇所」

*19 「超音波探傷検査」とは、超音波を試験体中に伝搬させたときに試験体の示す音響的性質を利用して、試験体内部のきず又は材質を調べる非破壊検査のことをいう。

という。)付近であった。本件外リブ及び本件内リブの大きさは高さ(上下方向)146mm、幅(まくらぎ方向)58mmである。

本件台車の6位、7位及び8位の側ばりにおいて、本件亀裂箇所^{そご}に相当する箇所について、磁粉探傷検査を実施したが、亀裂はなかった。

また、本事故後、同社は保有している全1,244台車(内、同一形式128台車)、北総鉄道は全192台車(内、同一形式128台車)について、磁粉探傷検査及び目視確認を行ったが、側ばりに亀裂はなかった。

なお、本件亀裂箇所は、2.4.2に記述した探傷検査の対象となっている箇所である。

(2) 本件亀裂の状態に関する情報

事故後、本件亀裂の状態を同社の宗吾車両基地で確認したところ、内側ばり及び外側ばりの下面及び、側面に発生していた。

外側ばり及び内側ばりの亀裂のいずれも、下面は本件外リブ及び本件内リブの前側の溶接箇所付近で破断して、側ばりの側面上部(約170mm)まで続いていた。亀裂の開口部の大きさは、側ばり下面の開口部で最大28mm程度であった。

(付図5 本件台車の主な損傷状況、付図6 台車概略図、付図7 本件亀裂の破面状況 参照)

2.4.3.7 本件亀裂の破面及び溶接部の調査

同社と北総鉄道が行った本件亀裂の破面の調査結果、及び本件台車メーカーに委託して行った溶接部の強度評価は、次のとおりであった。

(1) 本件亀裂の破面調査

① 本件亀裂の破面をマクロ観察した結果によると、調査のため切断した強制開口部及び破面の潰れている箇所を除き、側ばり下面から約135mmの高さまで疲労破壊の特徴とされるビーチマーク^{*20}が見られ、疲労破壊の痕跡は全長約450mmであった。側ばり側面の破面では、凹凸模様が下方から上方に向かうにつれて大きくなっており、側ばり側面から上面への曲線部付近から破面が潰れていた。一般に破面の凹凸の大きさは亀裂が進展する速度に影響され、進展する速度が速い場合に凹凸は大きくなる。

また、本件外リブの溶接止端部付近にラチェットマーク^{*21}が見られ、そのラチェットマーク付近からビーチマークが側ばり下面に向かって亀裂が進展し、さらに側ばりの側面に向かって亀裂が進展していた。

*20 「ビーチマーク」とは、疲労亀裂が進展した痕跡をいう。

*21 「ラチェットマーク」とは、疲労亀裂の起点部近傍に生ずる段差をいう。

- ② 本件亀裂の破面をミクロ観察した結果、側ばり上面側の一部に、延性破壊の特徴である伸長ディンプル状の様相が見られた。それ以外の部分については、特徴的な様相はなかった。

(2) 本件亀裂箇所の溶接部の強度評価

- ① 本件亀裂が発生した溶接部(以下「本件溶接部」という。)の強度評価を行うため、本件台車(F S 5 4 7形式)と側ばり構造が同じである、F S 5 1 3形式台車を使用し、静荷重試験を実施した。

本試験では、F S 5 1 3形式台車の5位側ばりで、本件溶接部に相当する部位の溶接止端部及びその近傍において応力の直接測定を試みたが、測定部位の近くにブレーキでこ用貫通穴があるため、正確な応力を測定するための加工ができなかった。そのため、ブレーキでこ用貫通穴がない8位側ばりを、本件溶接部に相当する部位(以下「溶接部応力測定箇所」という。)として、溶接止端部及びその近傍において長さ5mmのひずみゲージを使用して、応力の直接測定を行った。なお、2.8.1.2に後述するように、本件溶接部と溶接部応力測定箇所の最大応力は同等であることを有限要素法解析(以下「FEM解析^{*22}」という。)により確認している。試験荷重は本件溶接部の強度に対する影響が最も大きい垂直方向に、同社における設計上の満車に相当する荷重(250%定員荷重234.2kN)まで負荷した。

設計上の空車荷重、150%定員荷重、250%定員荷重の条件における、溶接止端部とその近傍の側ばり下面の応力(代表点)を表7に示す。また、溶接止端部での測定値を平均応力とし、平均応力の0.3倍を変動応力としてプロットした応力限界図を図4に示す。

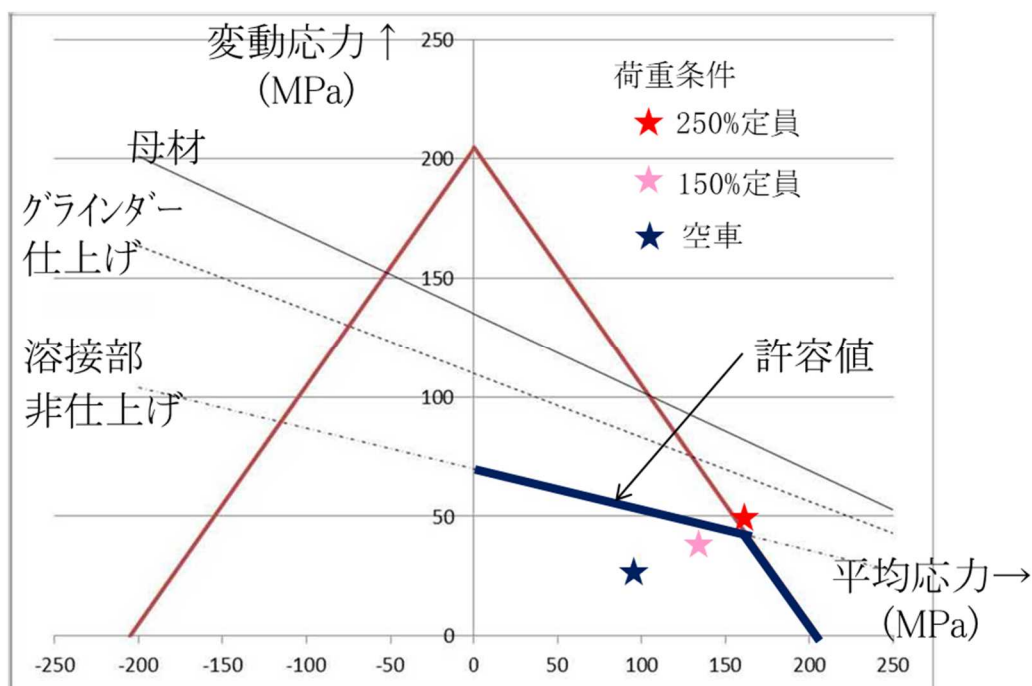
250%定員荷重の条件における静荷重試験結果については、応力限界図の許容値を超える結果となった。また、荷重条件に関わらず溶接部応力測定箇所における溶接止端部の応力測定値は、溶接部応力測定箇所近傍の側ばり下面の応力測定値に対し、約2.4倍となった。

*22 「FEM」とは、有限要素法(Finite Element Method)の略称であり、構造体等を単純な形状をした要素で細かく分割し、要素それぞれについて方程式を解き、その要素の箇所に発生するひずみや応力等を推定する数値解析の手法である。

表7 F S 5 1 3形式台車静荷重試験結果

計測部位 (代表点) 等	応力測定値 (MPa) 等		
	空車 (142.5kN)	150%定員 (197.6kN)	250%定員 (234.2kN)
溶接止端部	95.8	136.9	165.2
側ばり下面	40.8	57.9	70.1
応力の比率	2.3	2.4	2.4

※応力の比率は、溶接止端部の応力を側ばり下面の応力で除した数値である。



※母材：ここでは、溶接されていない部位をいう。

※グラインダー仕上げ：溶接部の表面仕上げを行った状態をいう。

※溶接部非仕上げ：溶接部の表面仕上げを行わない溶接のままの状態をいう。

図4 F S 5 1 3形式台車溶接部応力測定箇所垂直荷重負荷時の応力限界図

② 本件溶接部の寿命を評価するために、本件列車と同形式の列車で本線走行試験を実施した。試験区間は宗吾参道→成田空港→押上→成田空港→宗吾参道の1往復である。同試験は、本件車両と同一の7両目の車両に水タンクを積んで積車状態(約100%定員相当)とし、本件亀裂箇所に対応する箇所近傍の側ばり下面の母材にひずみゲージを貼り付けて応力を測定した。

この走行試験で得られた応力から、レインフロー法^{*23}により 0 MPa から 4 MPa 毎に応力頻度を計算し、その結果を疲労限度線図の判定曲線と照合した本件溶接部の推定寿命は、走行距離 2, 2 0 0 万 km 以上となった。

(3) 本件溶接部等の溶接状態調査

① 本件溶接部の溶接状況

図 5 に示すように、本件外リブの本件亀裂の破面を合わせた上で、想定される亀裂起点近傍付近の側ばり下面側の側ばりと内部補強との溶接部を精密切断によって試験片として採取し、本件溶接部の断面調査を実施した。

本件溶接部の溶接止端部において、溶接表面では溶接施工時から存在していたと見られる微小な凹み形状が見られたが、溶接止端部にオーバーラップ等の溶接不全部^{*24}は確認されなかった。その他、本件溶接部において、ポロシティ^{*25}等の溶接不全部が確認されたが、いずれの溶接不全部からも、亀裂の痕跡は確認されなかった。

また、図 6 に示すように、本件溶接部の溶接止端部における溶接ビードの形状は、6 位、7 位及び 8 位の同一箇所における溶接ビードの形状に比べ凸形の状況であり、溶接余盛角度が大きい状況であった。

*23 「レインフロー法」とは、不規則な繰り返し変動荷重を受ける機械や構造物などにおいて、疲労寿命を予測するための応力頻度あるいはひずみ頻度の計数法の一つである。

*24 「溶接不全部」とは、理想的な溶接部からの逸脱をいう。

*25 「ポロシティ」とは、ガスを巻き込むことによって生じた空洞をいう。

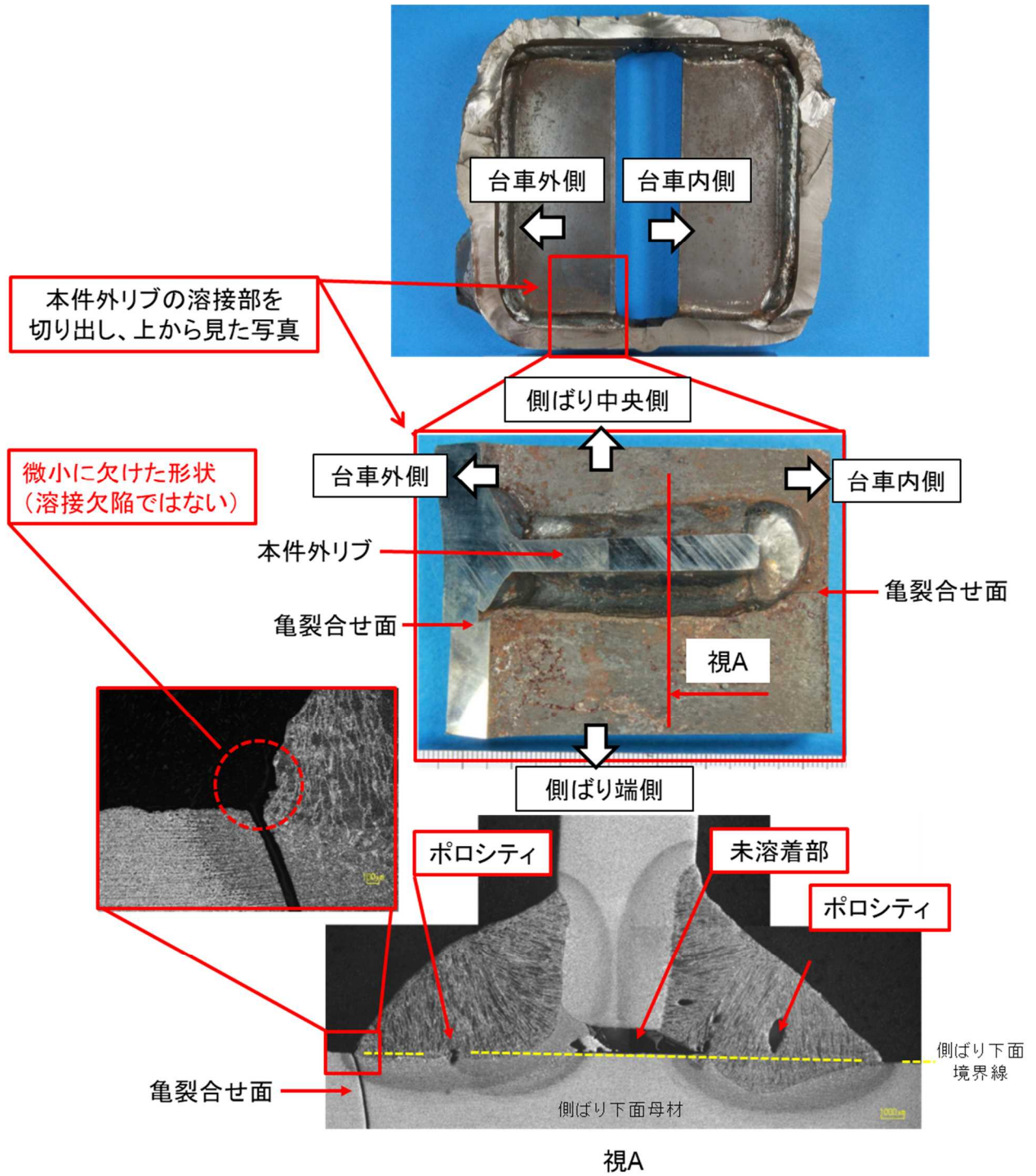


図5 本件溶接部の断面観察結果

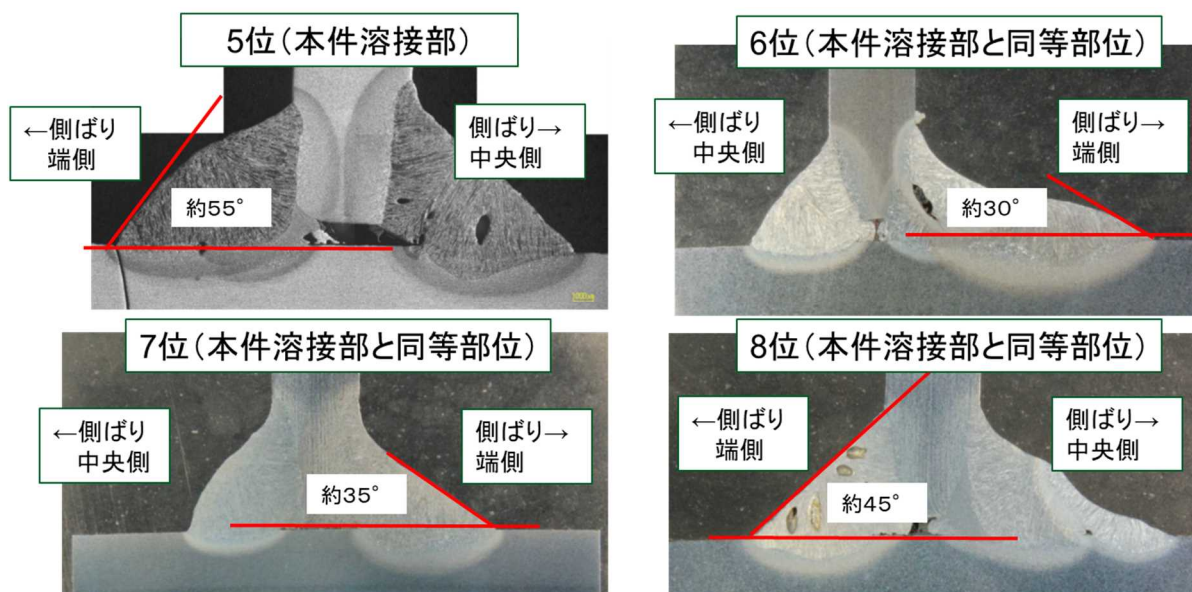


図6 本件亀裂起点部と他同等部における溶接形状の比較

② 本件台車の溶接状況

本件台車の6位、7位及び8位の側ばりにおける、本件亀裂箇所に対応する箇所について、事前の超音波探傷検査の結果、本件台車の6位にきずエコー^{*26}が確認されたことから、6位についてはきずエコーの反射源と考えられる箇所、その他7位、8位については、本件溶接部で確認を行った同等箇所の溶接状態を調査した。

本件台車の6位、7位及び8位の側ばりにおける、側ばりと横リブとの溶接部の外観調査において、6位ではスパッタ^{*27}が散見された。また、6位及び8位で、溶接ビードが2層以上の箇所があることを確認した。

本件台車の6位、7位及び8位の側ばりにおける本件亀裂箇所に対応する箇所の断面調査では、複数の溶接不全部が確認された。また、6位内側ばりでは、きずエコーの反射源であると考えられる、未溶着部があることを確認した。

この他、各溶接部において、オーバーラップ、ブローホール^{*28}等の溶接不全部が確認されたが、いずれの溶接不全部からも亀裂の痕跡は確認されなかった。

(図7 本件台車6～8位溶接部断面調査代表図 参照)

*26 「きずエコー」とは、不連続部又はきずからのエコーのことをいう。

*27 「スパッタ」とは、アーク溶接、ガス溶接、ろう接などにおいて、溶接中に飛散し、付着した金属粒のことをいう。

*28 「ブローホール」とは、溶接金属中に生じる球状の空洞ものをいう。

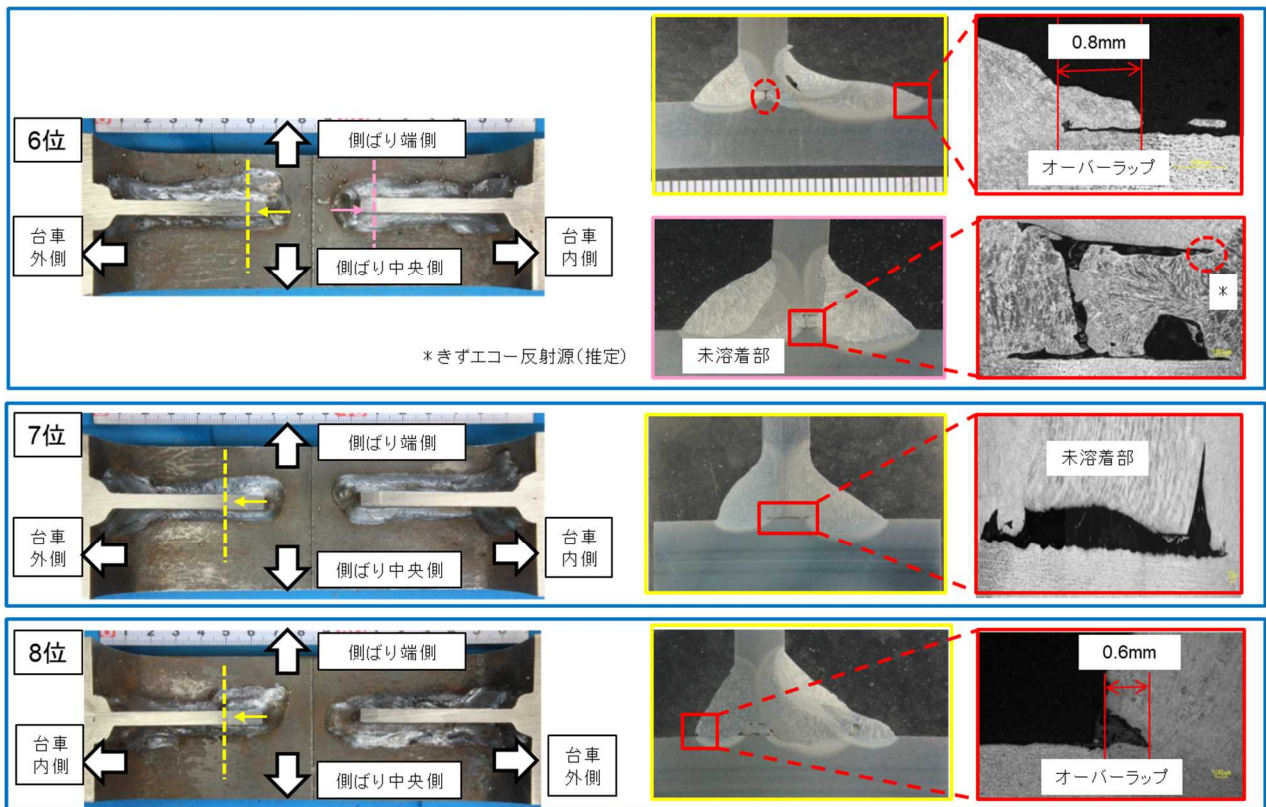


図7 本件台車6～8位溶接部断面調査代表図

(4) その他亀裂関係調査

- ① 本件亀裂の破面をEDX分析^{*29}を実施した結果、特に問題となる元素はなかった。また、本件亀裂近傍の母材の硬度測定を行ったが、硬度不足はなかった。
- ② 本件台車の本件亀裂近傍及び、同6位、7位及び8位側ばりの本件亀裂箇所に対応する箇所について、側ばり下面の板厚を確認したところ、公称板厚12mmに対し本件亀裂近傍では平均値11.29mm、6～8位においては平均値11.11mm～11.24mmであった。
- ③ 図8（本件板ばね破損部の破面状況）に示すように、マクロ観察では板ばね上部の破面から放射線状の模様が確認され、ミクロ観察では延性破壊の特徴であるディンプル状の模様のみが確認された。

*29 「EDX分析」とは、エネルギー分散型X線分析（Energy Dispersive X-ray spectrometry）であり、材料表面の異物の検出及びその構成元素の特定に用いられる。

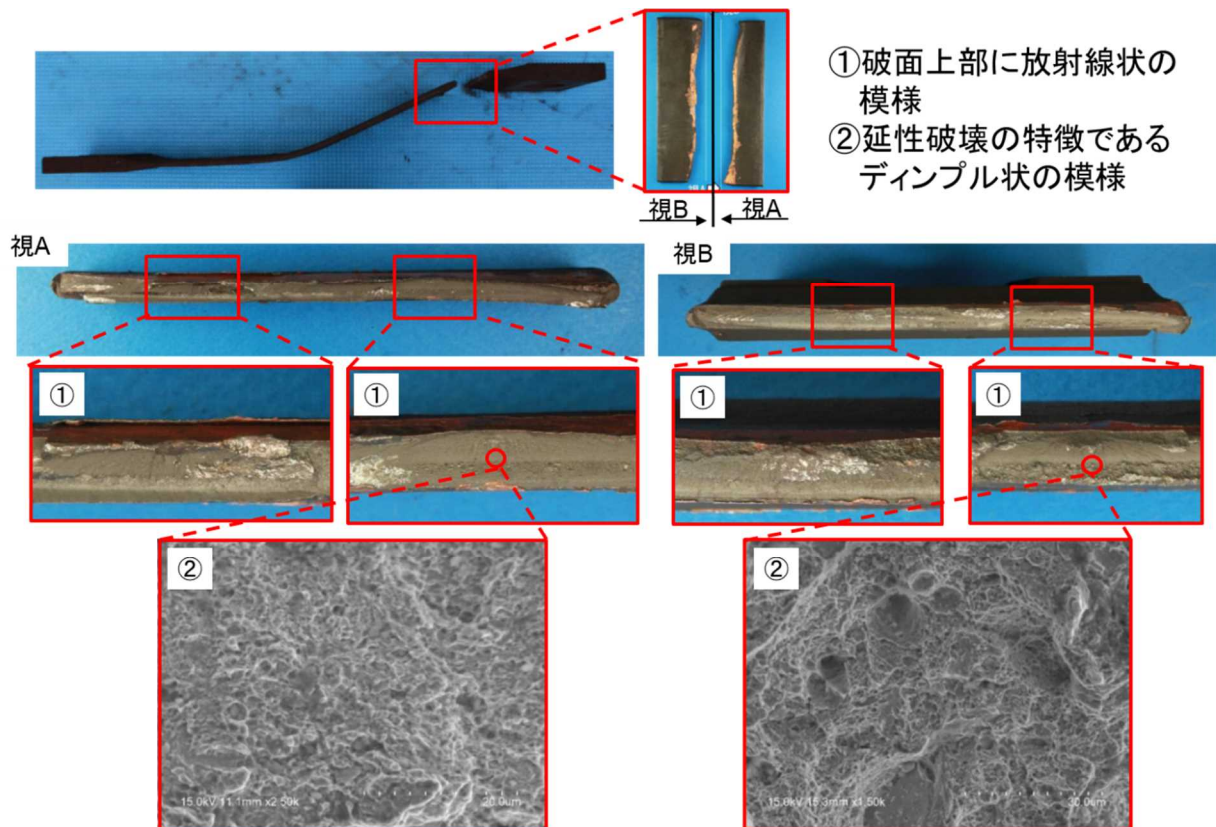


図8 本件板ばね破損部の破面状況

(付図5 本件台車の主な損傷状況、付図7 本件亀裂の破面状況 参照)

2.4.3.8 側ばりの亀裂と輪重等の関係

側ばりの亀裂と輪重の関係を調査するため、同社及び本件台車メーカーは、本件台車と側ばり構造が同一の台車を用いて、同台車の5位側ばりに本件亀裂と同じ箇所へ表8に示すような模擬亀裂を入れた台車（以下「試験台車」という。）に対し、無負荷から定員荷重まで荷重を負荷する試験（以下「定置試験」という。）を行った。

定置試験4の最大模擬亀裂（模擬亀裂幅：180mm、模擬亀裂高さ：134mm）における試験結果から、輪重減少率^{*30}を計算した結果は図9のとおりであり、5位及び8位の輪重が減少した。空車荷重時の台車前軸の静止輪重比は、50%程度となった。

*30 「輪重減少率」とは、静止輪重から輪重の測定値を引き、静止輪重で除した値をいう。この定置試験で得られた輪重減少率の絶対値は、静止輪重比の管理値に等しい。

表 8 定置試験における模擬亀裂条件

	定置試験 1	定置試験 2	定置試験 3	定置試験 4
模擬亀裂加工概略図				
模擬亀裂幅	約 1 5 0 mm	1 8 0 mm	1 8 0 mm	1 8 0 mm
模擬亀裂高さ (側ばり下面から)	0 mm	3 5 mm	1 0 0 mm	1 3 4 mm

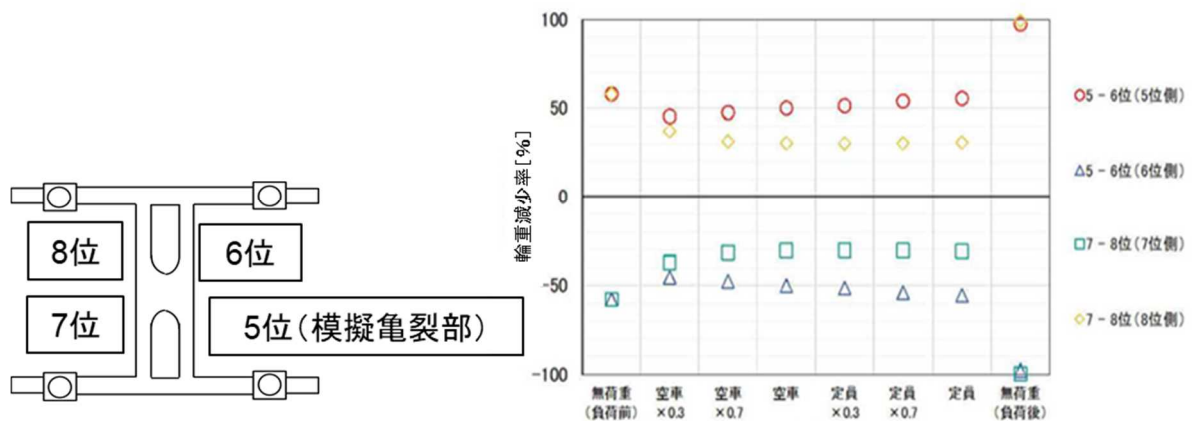


図 9 試験台車の最大亀裂長における静止輪重比測定結果

また、空車荷重条件での各定置試験に対する、側ばり下面の模擬亀裂開口幅は表 9 に示すように、模擬亀裂幅が約 1 5 0 mm、模擬亀裂高さ 0 mm の場合は開口幅に変化なし、模擬亀裂高さが高くなるにつれ側ばり下面の模擬亀裂開口幅も大きくなり、定置試験 4 では開口幅が 6. 8 5 mm であった。

表 9 模擬亀裂長に対する模擬亀裂開口幅 (空車荷重時)

試験番号	模擬亀裂開口幅 (mm)	備考
定置試験 1	0.08	開口幅変化無し
定置試験 2	0.32	
定置試験 3	3.53	
定置試験 4	6.85	

2.4.3.9 推定脱線係数比

本件曲線における、本件車両の推定脱線係数比^{*31}を通常の静止輪重比の管理基準である10%と、2.4.3.8に記述した、最大模擬亀裂（模擬亀裂幅：180mm、模擬亀裂高さ：134mm）の定置試験から計算した静止輪重比50%を条件として試算したところ、次のとおりであった。

なお、静止輪重比50%における推定脱線係数比は、1.0を下回っており、乗り上がり脱線に対する余裕がない結果となった。

- ① 静止輪重比を10%とした場合：2.45
- ② 静止輪重比を50%とした場合：0.81

2.4.3.10 本件台車の使用履歴等に関する情報

同社によると、本件台車の使用履歴は表10のとおりであり、総走行距離は約510万3,665kmであった。

乗車率については、編成ごとのデータは記録していないため、算出することは不可能とのことであったが、同社の営業線における最大混雑率は過去10年で概ね150%から160%の間で推移しているとのことであった。

本件台車の改造履歴については、平成17年8月に本件台車と同形式の台車において、軸ばね受部の補強リブ部に亀裂が発見されたため、強度向上のため補強リブの改造工事を行ったとのことであった。ただし、この改修箇所は本件亀裂の箇所とは異なる位置である。

*31 「推定脱線係数比」とは、急曲線低速走行時の乗り上がり脱線に対する余裕についての評価指標であり、1.0以上であれば脱線に対し一定水準の余裕が確保されていると考えられるものである。

表 1 0 本件台車の使用履歴一覧

期間	使用者	車号	営業使用線区	営業最高速度 km/h	走行距離 km	備考
平成 3 年 3 月 ～ 平成 20 年 6 月	京成電鉄	3712	京成本線、押上線、東成田線、北総線、浅草線、京急線、芝山鉄道線	110	3, 124, 592. 4	
平成 20 年 8 月 ～ 平成 22 年 7 月		3742	※1		385, 840. 6	台車枠の改修に伴う ※2 台車入替え。
平成 22 年 7 月 ～ 平成 27 年 3 月			京成本線、成田空港線、押上線、東成田線、北総線、浅草線、京急線、芝山鉄道線	120	848, 333. 0	平成 22 年 7 月 17 ※2 日成田空港線開業に伴うもの。
平成 27 年 3 月 ～ 令和 2 年 6 月	北総鉄道	7812	北総線、押上線、浅草線、京急線	110	744, 889. 5	北総鉄道への車両賃貸開始。

※1 芝山鉄道線は平成 1 4 年 1 0 月開業。

※2 車両管理システムの仕様上、平成 2 2 年 7 月末日を境に走行距離を算出。

2. 5 鉄道施設及び車両の損傷状況等に関する情報

2. 5. 1 鉄道施設の損傷、痕跡の状況

鉄道施設の損傷の主なものは以下のとおりであった。

2. 5. 1. 1 軌道関係

本件曲線の京成高砂駅方端部から本件台車が停車した位置における、軌道関係の主な損傷及び痕跡等の状況は次のとおりであった。

- (1) 本件曲線の脱線防止ガードレールの側面には、1 1 k 7 5 0 m 付近から 1 1 k 6 7 0 m 付近まで、車輪が接触したと見られる痕跡があった。
- (2) 本件曲線の (1) に記載した同じ区間の右レールには、頭頂面に車輪のフランジが走行したと見られる痕跡があった。なお、1 1 k 7 5 0 m 付近では一つの痕跡が見られ、青砥駅方に進むにつれ二つ目の痕跡が見られるようになり、さらに青砥駅側に進むと二つの痕跡は合流するように一つの痕跡となり、その痕跡は 1 1 k 6 7 0 m 付近まで続いていた。
- (3) 本件曲線の脱線防止ガードレールの青砥駅方端部から本件台車が停止した位置までの左レール及び右レールの右側の P C まくらぎ及び合成まくらぎに、車輪のフランジが走行したと見られる痕跡があった。

- (4) 本件分岐の22口分岐器に車輪のフランジが走行した際に生じたと思われる、フロントロッド*32などの損傷があった。
- (5) 本件分岐の23イ分岐器に車輪のフランジが走行した際に生じたと思われるトングレー*33、基本軌条などの損傷があった。

2.5.1.2 電力設備関係

本件分岐の上部に敷設されている電車線に、本件車両のパンタグラフが外れて引っ掛かった影響と見られる、電車線及び電車線支持金具、絶縁ハンガー、ジャンパー線などの損傷が見られた。

2.5.2 車両の損傷、痕跡の状況

本件車両の主な損傷等の状況は、次のとおりであった。

(1) 本件台車関係

- ① 右側側ばりに本件亀裂があった。
- ② 右側前位板ばねに損傷があった。
- ③ 全車輪に、車輪踏面及びフランジ先端に多数の打痕、裏リム面に擦過痕があった。
- ④ 前軸歯車箱の点検窓が損傷していた。
- ⑤ 後軸歯車箱の側面下部に擦過痕があった。

(2) 車体関係

- ① 本件列車8両目には、空調装置外板の損傷、屋根板の損傷、渡り板の曲損、連結器胴受の曲損、連結器の擦過痕などがあった。
- ② 本件車両には、パンタグラフ取付部及びその周辺の破損、台枠端部及び妻外板の凹み、渡り板の曲損、胴受の曲損、ジャンパー線のふたの損傷、妻部配管の損傷、台枠横ばり損傷及び配管受の溶接外れなどがあった。

(付図3 事故現場周辺略図、付図4 主な軌道の痕跡等、付図5 本件台車の主な損傷状況、付図8 本件列車の主な損傷状況 参照)

2.6 乗務員等に関する情報

本件運転士

51歳

甲種電気車運転免許 平成8年6月6日

*32 「フロントロッド」とは、分岐器でトングレールの先端の状態を転てつ機に伝えるために、左右のトングレールを結ぶように取り付けられる機器をいう。

*33 「トングレール」とは、ポイント部に用いる、先端の頭部がとがった転換されるレールをいう。

本件車掌 46歳
第723N列車運転士 31歳
甲種電気車運転免許 平成30年4月25日
検車区限定運転士 42歳
甲種電気車運転免許 平成27年3月26日

2.7 気象に関する情報

本事故発生時の事故現場付近の天気は晴れであった。

2.8 設計及び事故後の検証に関する情報

2.8.1 設計に関する情報

2.8.1.1 本件台車の設計内容

同社によると、製作当時の本件台車側ばり設計内容に関する本件台車メーカーからの情報は、次のとおりであった。

- (1) 平成2年当時に側ばりのプレス型は2種類あり、設計の際にいずれかを選択していた。
- (2) 側ばりの強度に関しては、前後及び左右の荷重に比べ、上下荷重による応力発生への影響が支配的であるため、図10に示すように、採用する側ばりプレス型を使用した過去の台車形式と比較して、上下荷重が同等か否かで強度評価の実施要否を判断していた。
- (3) 採用した側ばりプレス型は、昭和42年に運用開始の他社向けの台車形式で使用されたタイプである。図11に示すように強度計算は、①～⑧の側ばり主要断面に対して、断面係数から設計最大上下荷重時における応力の計算を行い、計算結果の最大応力106.3MPa（④断面）に対し、設計当時使用していた材質SS41の降伏応力216MPaの両振り疲れ限度108MPaを許容値として問題なしと判断した。なお、本件亀裂の該当断面は⑤であり、その応力計算結果は82.4MPaであった。

また、静荷重試験を実施し、主要断面の応力計算に対する強度評価を行い、問題ない結果であった。

なお、溶接止端部等に対する応力集中を考慮した強度設計、評価は行っていない。

- (4) この側ばりプレス型は、平成2年時点で同社を含む他の民鉄で使用しており、同社の3600形通勤車(昭和57年に運用開始)用のFS513形式台車にも使用されている。
- (5) 本件台車で要求される設計最大上下荷重は、他社向けの形式、FS513

形式台車と同等であり、使用材質についてもSS41とSM400Bの強度は同等であるため、強度は十分と判断した。

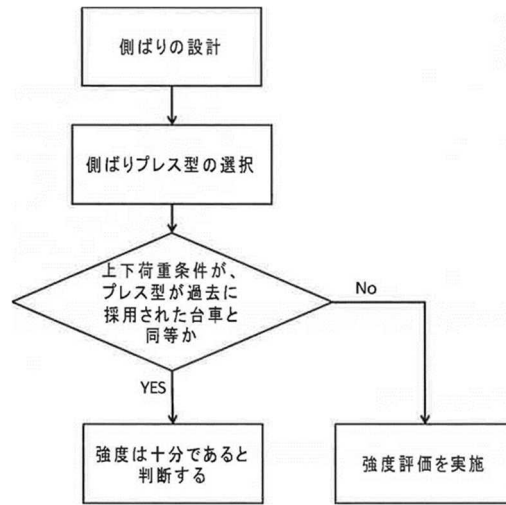


図10 側ばり強度評価実施判断フロー

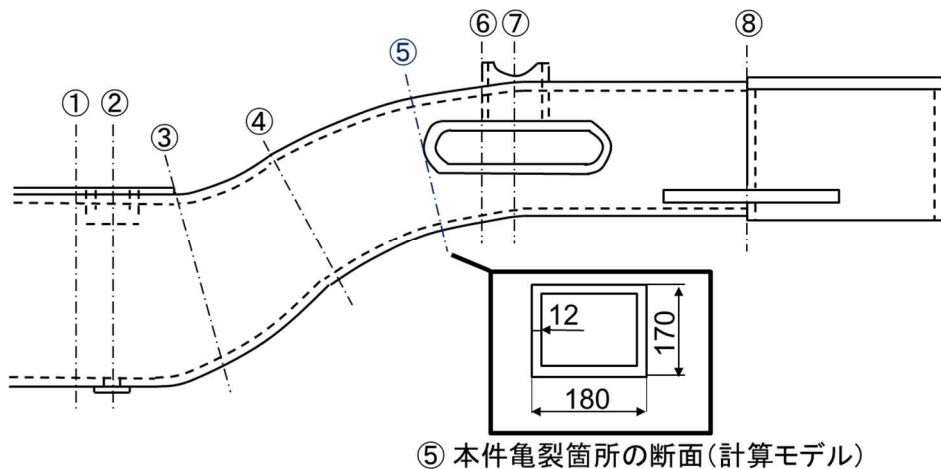


図11 側ばり強度計算概略図(本件側ばり設計当時)

2.8.1.2 事故発生後の強度設計評価

本件亀裂箇所の強度設計評価を行うため、FEM解析を実施した。なお、FEM解析の側ばりモデルは、溶接余盛角度を 45° で構成し、横リブの溶接部を一辺が13.6mm、二辺が8.3mmの二等辺三角形を一つの要素とし、それ以外は一辺16mmの正三角形を一つの要素として作成した。

図12に示すように、設計最大上下荷重時における本件溶接部に発生する最大応力は溶接止端部で124.7MPa、8位側ばりの溶接部応力測定箇所では溶接止端部

で131.0MPaとなり、上下荷重に対する上下振動分を考慮した応力は、本件溶接部及び溶接部応力測定箇所（8位）のいずれも応力限界図における溶接非仕上げ部の許容値以内であり、本件溶接部と溶接部応力測定箇所（8位）の最大応力は同等であった。

また、本件溶接部の溶接止端部に発生する応力分布を詳細に確認するため、溶接止端部の要素が一辺1mmの正三角形となるような側ばりモデルで、FEM解析を実施した。図13に示すように、本件溶接部の溶接止端部に発生する応力は230MPa以上となり、きわめて局所的に329MPaとなる解析結果であった。なお、溶接止端部を中心として垂直方向5mmの平均応力は、きわめて局所的に329MPaとなる箇所（8位）で約160MPaであった。

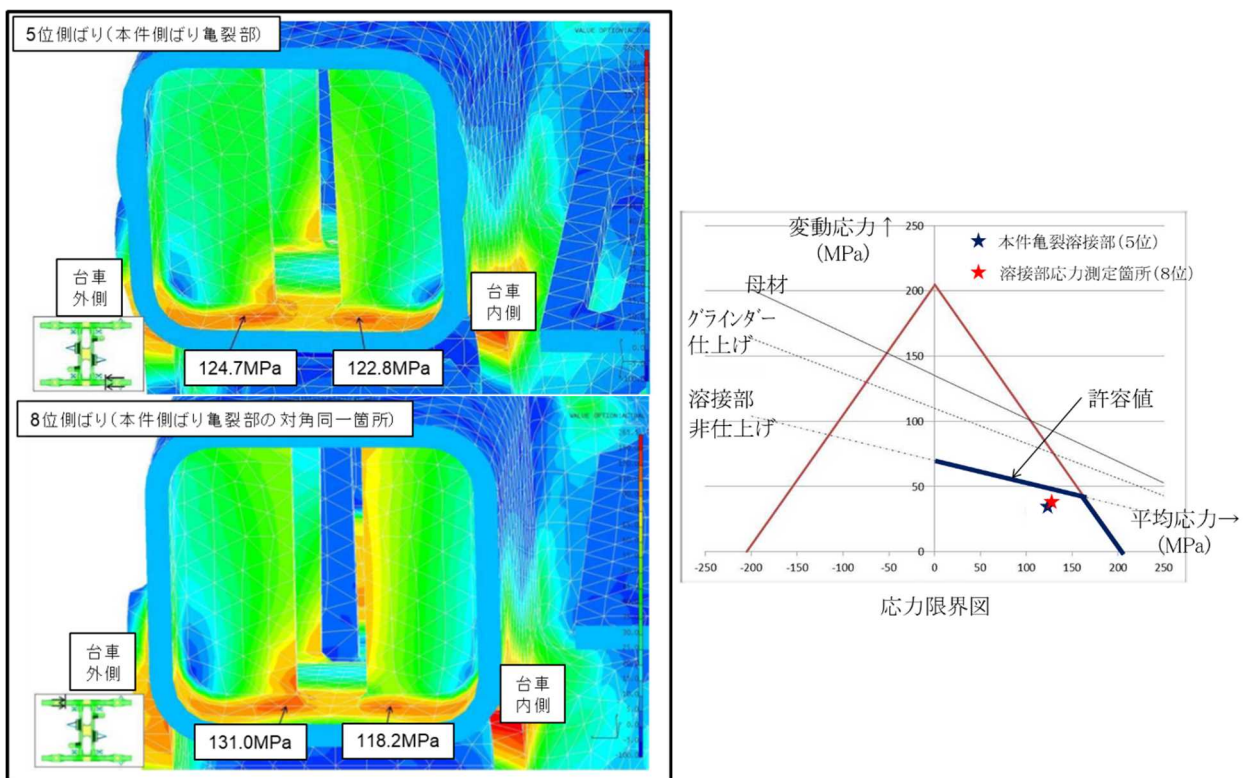


図12 本件台車の側ばり（5位、8位）FEM解析結果

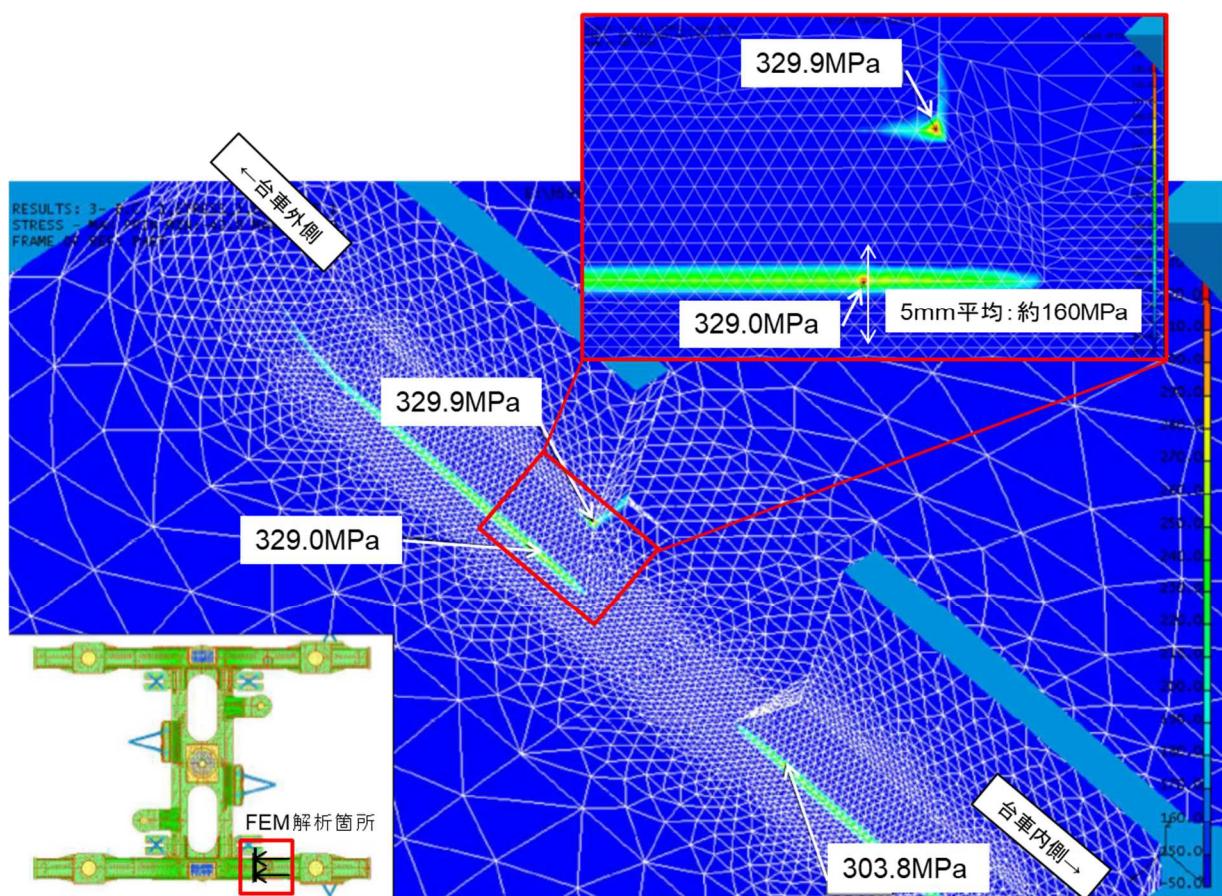


図 1 3 本件溶接部の溶接止端部（5位）における応力分布の詳細（FEM解析）

2.8.1.3 応力集中の傾向

本件溶接部の溶接止端部における応力集中の傾向を確認するため、一般社団法人日本溶接協会のホームページに掲載されている、曲げ荷重を受けるすみ肉T継手の応力集中係数^{*34}の計算式を参考に、応力集中係数を計算した。なお、計算時における溶接止端部の形状の条件は以下のとおりとした。

- (1) 溶接止端部の余盛角度を45°、50°、55°、60°、70°に変化させた場合。
- (2) 溶接止端部の曲率半径を0.5mm、1.0mm、2.0mm、3.0mmに変化させた場合。

(1)及び(2)の計算条件における、応力集中係数の計算結果を表11に示す。計算の結果、溶接止端部の余盛角度は大きいほど、曲率半径は小さいほどに、応力集中係数は大きくなる傾向となる。

*34 「応力集中係数」とは、局所的に生じる最高の応力と対象とする断面の平均応力との比をいう。

表 1 1 曲げ荷重を受けるすみ肉T継手の応力集中係数

		溶接止端部余盛角度(°)				
		45	50	55	60	70
溶接止端部 曲率半径 (R:mm)	0.5	2.86	2.97	3.06	3.15	3.30
	1	2.38	2.46	2.53	2.60	2.70
	2	2.02	2.08	2.14	2.18	2.26
	3	1.86	1.91	1.95	1.99	2.06

2.8.2 残留応力の計測結果

本件溶接部の溶接止端部の残留応力評価を行うため、本件外リブの溶接継手構造(T継手)の試験片を5個作製し、残留応力の計測を実施した。その試験片の計測図と計測結果(代表例)を図14に示す。

残留応力計測は、溶接止端部に対して垂直方向とし、溶接長に対して中心及び中心から各々25mm離れた部位(部位1A、部位2A、部位3A)について、溶接止端部から各々0.5~2.0mmで0.5mm間隔(計測点a:0.5mm、b:1.0mm、c:1.5mm、d:2.0mm)を計測点とした。

残留応力計測結果は、試験片毎に計測数値のばらつきは見られたが、図14に示す計測の代表例のように、溶接止端部に近い計測点aでは引張残留応力(+側への数値)が小さくなる傾向となった。

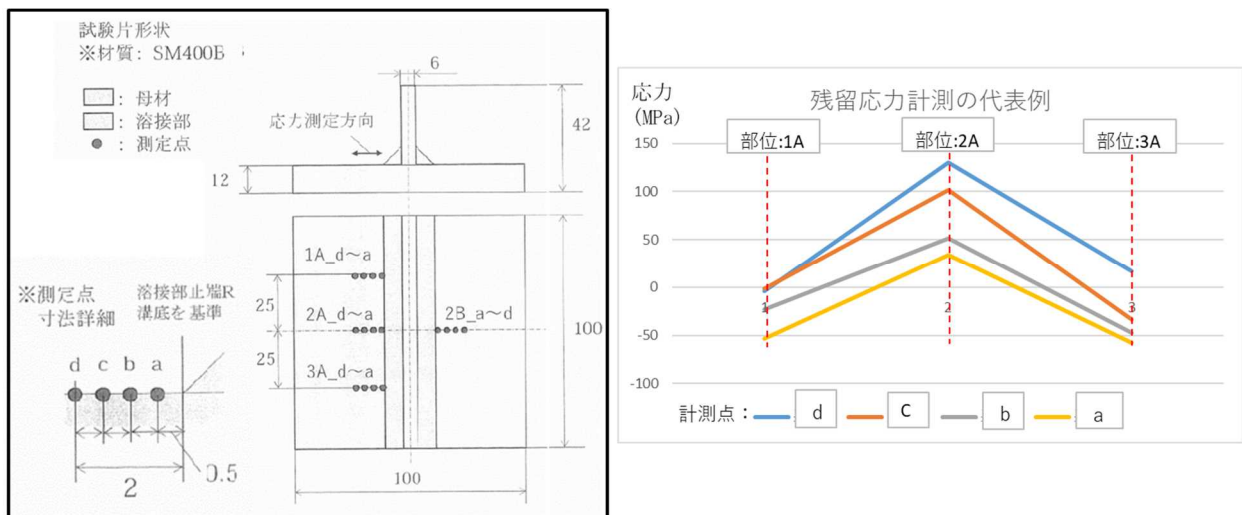


図 1 4 残留応力測定試験片と計測結果の代表例

3 分析

3.1 脱線に関する分析

3.1.1 本件列車の運転

2.1.2表1に記述したようにC-A-T-S装置の運転記録から、事故発生時の本件列車の速度は、C-A-T-S装置の制限速度（照査速度）以下であったため、本件運転士の運転操作が本件脱線に影響を及ぼすようなことはなかったと考えられる。

3.1.2 軌道

2.3.2.4に記述したように、軌道変位については本事故発生前直近の軌道変位検査及び事故後の測定において同社が定める保守維持値内であったこと、また、2.3.2.5に記述したように、軌道部材については、直近の定期検査及び事故後の状態に異常はなかったことから、本事故発生現場付近の軌道に異常はなかったと考えられる。なお、2.5.1.1に記述した損傷については、脱線した車輪等が接触した際に生じたものと考えられる。

3.1.3 本件列車の脱線した地点

本件列車の脱線した地点については、

- (1) 2.3.1.2に記述したように、脱線防止ガードレールの青砥駅方端部付近（11k670m付近）から、本件車両の本件台車が停止していた11k570m付近の範囲で、まくらぎ、レール、レール締結装置等に本件列車によるものと見られる痕跡があったこと、
- (2) 2.5.1.1(1)に記述したように、本件曲線の脱線防止ガードレールには、11k750m付近から11k670m付近まで、車輪との接触痕と見られる痕跡があったこと及び、同区間で2.5.1.1(2)に記述したように、レールの頭頂面に車輪のフランジが走行したと見られる痕跡があったこと

から、本件曲線中は脱線防止ガードレールによって脱線は防止されていたが、脱線防止ガードレールの終端である青砥駅方端部付近（11k670m付近）から、脱線が開始したと考えられる。なお、2.1.2の表1に記述したC-A-T-S装置の運転状況の記録から、本件列車が脱線を開始した時刻は10時16分ごろ、その時の走行速度は約32km/hであったと考えられる。

3.1.4 本件台車車輪の乗り上がりの状況

3.1.3に記述したように、本件曲線中は脱線防止ガードレールによって脱線は防止されており、その時の状況は2.3.2.2(3)に記述したように、脱線防止ガードレール

と左レールの間隔は85mmであることから、本件曲線における11k750m付近から11k670m付近の間では、図15に示すように本件台車の右側車輪は、右レールに乗り上がった形で走行していたと考えられる。

なお、2.5.1.1(2)に記述したように、11k750m付近では一つの痕跡が見られ、青砥駅方に進むにつれ二つ目の痕跡が見られるようになったことから、右レールに前軸の右側車輪が乗り上がった後に、後軸の右側車輪が乗り上がった可能性が考えられる。

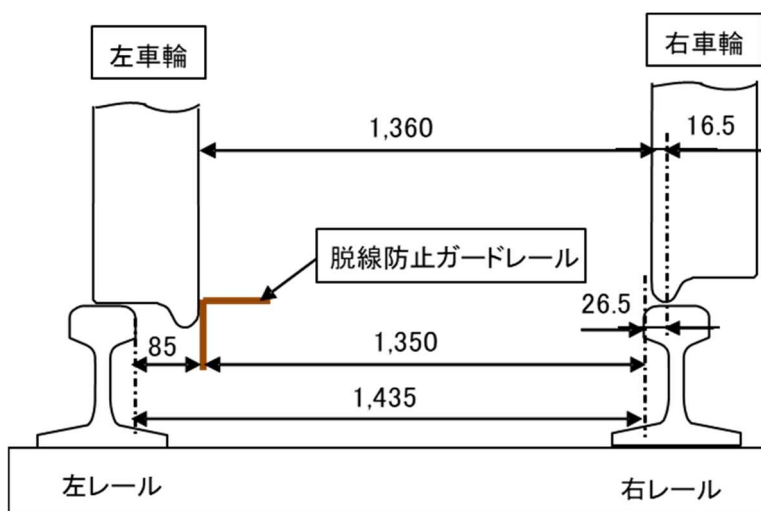


図15 レールと車輪の位置関係（11k750m付近～11k670m付近）

3.1.5 本件列車の脱線要因

2.4.3.7(1)①に記述したように、側ばり下面から約135mmの高さまで疲労破壊の特徴的とされるビーチマークが見られたことから、脱線する直前の走行では少なくともこの高さまで、疲労破壊による亀裂は進展していたと考えられ、この時の本件台車前軸の静止輪重比は、3.2.2に後述するように50%程度であったと考えられる。このように輪重のアンバランスを生じた状態で本件曲線を通じた場合、2.4.3.9に記述したように、乗り上がり脱線に対する余裕がない推定脱線係数比の試算結果が示すとおり、本件台車前軸右側車輪の輪重が大きく減少した状態で横圧が増加したことから、3.1.4に記述したように本件曲線の11k750m付近で本件台車の右車輪がレールに乗り上がったと考えられる。

また、3.1.3に記述したように、本件曲線走行中は脱線防止ガードレールにより脱線は防止され、脱線防止ガードレールの青砥駅方端部付近（11k670m付近）から、脱線が開始したと考えられる。

なお、本事故は台車に亀裂が発生したことに起因して、輪重のアンバランスが大きくなった結果、車輪がレールに乗り上がり脱線に至ったと考えられることから、

輪重のアンバランスの監視により、台車異常を早期に発見することで、事故の発生を防止する効果が期待できる。過去の鉄道重大インシデント^{*35}においても再発防止策の一つとして、空気ばね圧などのデータを有効活用し、乗務員などに台車異常を知らせる仕組みの検討について提言しており、同様の検討を行うことが望まれる。

3.2 本件車両に関する分析

3.2.1 本件車両の車体及び台車

本件車両については、2.4.3.1～2.4.3.4に記述したように、本事故発生前直近に実施された定期検査の結果、車体、台車の組立て寸法及び輪軸の寸法は、同社の社内規程で定められた管理値内の値であり、各部に異常はなかった。

一方、本事故後に本件車両の確認を行ったところ、2.4.3.4及び2.4.3.6に記述したように、本件台車（後台車）に本件亀裂及び本件板ばね破損があった。

なお、本件亀裂及び本件板ばね破損以外の2.5.2に記述した損傷については、本件車両が脱線後にレール等と接触した際に生じたものと考えられる。

3.2.2 本件亀裂と本件台車の静止輪重比

本件亀裂と本件台車の静止輪重比の関係については、

- (1) 2.4.3.8に記述したように、試験台車の側ばりに模擬亀裂を入れて行った定置試験の結果から、最大模擬亀裂長（模擬亀裂幅：180mm、模擬亀裂高さ：134mm）では空車荷重条件における静止輪重比が同社の管理値（10%）を大きく超える50%程度となり、側ばりの亀裂で静止輪重比が大きくなることが確認されたこと、
- (2) 2.4.3.7(1)に記述したように、本件台車の側ばり下面から疲労亀裂痕跡の最大高さは約135mmであったこと、
- (3) 2.2.1に記述したように、脱線時の本件列車に乗車していた乗客は約100名であり、1両あたりの荷重は空車荷重に近いと考えられること

から、本件台車においても疲労破壊による亀裂が進展した状態での静止輪重比は、50%程度であったと考えられる。

本件亀裂により、静止輪重比が大きくなったことについては、亀裂によって側ばりの強度が低下し、本件台車前軸右車輪側の側ばりが軸ばねの伸びる方向へ変位して、上下荷重を分担できなくなっていたためと考えられる。

*35 「過去の鉄道重大インシデント」とは、「平成29年12月11日 西日本旅客鉄道株式会社 東海道新幹線名古屋駅構内 車両障害」のことをいう。

3.2.3 本件亀裂の発生・進展に関する分析

- (1) 本件亀裂は、2.4.3.7(1)に記述したように、
 - ① 本件外リブの溶接止端部付近にラチェットマークが見られ、その付近からビーチマークが側ばり下面に向かって進展し、その後、側ばりの側面に向かって進展していたこと、
 - ② 側ばり下面から約135mmの高さまで疲労破壊の特徴的とされるビーチマークが見られ、疲労破壊の痕跡は全長約450mmであったことから、亀裂は本件外リブと側ばり下面との溶接止端部を起点として発生し、側ばり下面に広がった後、側ばり側面を下方から上方に進展したと考えられる。
- (2) 本件溶接部の強度については、
 - ① 2.4.3.7(2)に記述したように、本件台車と側ばり構造が同じである台車で行った溶接部応力測定箇所の応力測定では、250%定員荷重条件下の静荷重試験結果で応力限界図に示される許容値を超えていたこと、
 - ② 2.4.3.7(2)①に記述したように、荷重条件に関わらず溶接部応力測定箇所における溶接止端部の応力測定値は、溶接部応力測定箇所近傍の側ばり下面の応力測定値に対し、約2.4倍となったこと、
 - ③ 2.8.1.2に記述したように、FEM解析の結果、本件溶接部と溶接部応力測定箇所の最大応力は同等であることから、本件溶接部の溶接止端部に応力集中が発生し、応力限界図の許容限度を超える応力が発生していた可能性が考えられる。

ただし、2.4.3.10に記述したように、同社の営業線における最大混雑率は過去10年で概ね150%から160%の間で推移しているとのことから、実使用の荷重条件下における本件溶接部の溶接止端部への発生応力は、応力限界図の許容限度を常に超えていたものではなかったと考えられる。また、2.4.3.7(2)②に記述したように、約100%定員相当の荷重における走行試験で得られた応力から計算した本件溶接部の推定寿命は、走行距離2,200万km以上であることから、常に250%定員条件ではない実使用の荷重条件下においては、長期間をかけて亀裂の進展が進んだと考えられる。
- (3) 本件溶接部の溶接状態については、2.4.3.7(3)に記述したように、
 - ① 本件溶接部の溶接止端部において、溶接不全部とはならないが、溶接表面では微小な凹み形状が見られたこと、
 - ② 本件溶接部の溶接止端部における溶接ビードの形状は、6位、7位及び8位の同一箇所における溶接ビードの形状に比べ凸形の状況であり、溶接余盛角度が大きい状況であったこと、

③ 2.8.1.3に記述したように、溶接止端部の形状の違いによる応力集中計算の結果によると、溶接止端部の余盛角度は大きいほど、曲率半径は小さいほど、応力集中係数は大きくなる傾向となること

から、本件溶接部の溶接止端部には応力集中による高応力が発生していた可能性が考えられる。なお、本件溶接部の一部に未溶着部が見られたが、この周辺は良好な状態で溶接されていたため、溶接止端部の発生応力に影響を及ぼすものではないと考えられる。

(4) 本件亀裂の発生要因については、(2)及び(3)で示した通り、本件溶接部の溶接止端部には応力集中による高応力が発生していた可能性が考えられることから、平均的な応力が強度設計値以内であっても、溶接止端部の微小な凹み形状及び溶接余盛角度に起因する応力集中により局所的に応力が高まり、それが亀裂起点となって疲労破壊による亀裂が進展した可能性があると考えられる。

3.2.4 本件亀裂と定期検査の関係

「鉄道に関する技術上の基準を定める省令等の解釈基準（平成14年3月、国土交通省鉄道局長）」の通達で示している、台車枠の検査マニュアルの中では、「台車枠に発生するき裂の大きさに関しては、40mm程度のき裂が塑性変形に至るまでに拡大するには120～150万km程度の走行が必要であり、き裂が急激には進展しないことが明らかになっている」と記載されており、「台車枠側はり部のき裂進展シミュレーションの例」が示されている。

2.4.3.7(1)に記述したように、疲労破壊の痕跡は総延長約450mmであり、2.4.3.1に記述したように、本件車両の本事故発生前直近に行われた平成28年12月1日の全般検査からの車両走行キロは、約49万kmであったことから、本件外リブの溶接部付近から発生した亀裂は、同検査の際には既に側ばり下面の表面へ達していた可能性があると考えられる。

一方、2.4.2に記述したように、重要部検査及び全般検査では、側ばり全体を磁粉探傷検査するように台車枠の探傷箇所へ追加されていたが、2.4.3.8に記述したように、空車荷重条件で行った試験では、模擬亀裂幅が約150mm、模擬亀裂高さ0mmの場合は開口幅に変化なしであったことから、無負荷の状態で台車枠の磁粉探傷検査を行った本件事故発生前直近の全般検査時に、亀裂は側ばり下面の表面には達していたものの開口していなかった可能性があること、また、側ばりの磁粉探傷検査は検査箇所が詳細に示されておらず、側ばり全体の全周を対象に実施していたことにより、側ばり下面の亀裂を発見できなかった可能性があると考えられる。

従って、側ばりの磁粉探傷検査を行う場合は、FEM解析などによる設計情報に

基づき高応力が発生する箇所を明確にした上で、亀裂の発生に対する磁粉探傷検査箇所の明確化を行うことが必要と考えられる。また、側ばりは構造上、上下荷重により発生する応力が大きく、側ばり下面に高応力が発生することから、列車検査及び月検査での側ばり目視検査は、側ばり下面を重点的に検査することが必要と考えられる。さらに、本件亀裂のように、側ばり下面の内側から表面に向けて亀裂が進展してくる場合は、亀裂進展の早期発見を可能とする超音波探傷などの検査方法の併用を検討することが望ましい。

また、将来的には、亀裂の進展を遅延させる構造や、亀裂の発見を容易にする構造など、保守性向上に重きを置いた設計の導入を検討するとともに、解析技術等の活用で亀裂の発生や進展を予測し、目視もしくは非破壊検査との連携により早期発見が可能な新たな検査手法の開発が望まれる。

3.2.5 台車製造時の品質に関する分析

2.4.3.7(3)に記述したように、本件溶接部及び本件台車の本件溶接部に相当する他3箇所における溶接状況は、オーバーラップ、ブローホール等の溶接不全部が確認されたが、亀裂の起点と考えられる本件溶接部の溶接止端部には溶接不全部が確認されなかったことから、今回においては溶接不全部が亀裂の要因となった可能性は低いと考えられる。しかしながら、オーバーラップ等の溶接不全部は応力集中を発生させる、及び溶接部の強度不足をまねく等の事象が考えられるので、溶接時の検査で溶接不全部を発見することが重要である。

2.4.3.5(1)に記述したように、本件台車製作当時の検査方法は、溶接作業者が目視で検査を行っていたが、現在は2.4.3.5(2)に記述したように、検査専従者が目視検査、磁粉探傷検査、超音波探傷検査を行っており、定量評価が難しい箇所については、限度見本を用いた基準としている等の対策を実施していることから、本件台車が製造された当時に比べ現在は、溶接の検査体制、及び品質向上は図られており、溶接不全部の発見精度は改善していると考えられる。

なお、溶接ビードが溶接不全部とは認められない形状では、検査では正常と判断されると考えられるが、3.2.3(4)に記述したように、溶接止端部には微小な凹み形状及び溶接余盛角度により応力集中が発生する可能性があることから、3.2.6に後述するように、設計時には応力集中を考慮する必要がある。また、溶接止端部の応力集中が強度に影響を及ぼす懸念がある場合は、溶接止端部の曲率半径及び溶接余盛角度を設計段階で指示を行い、検査により確認を行うといった対応を検討することが望ましい。

3.2.6 本件側ばりの設計に関する分析

本件側ばりの強度計算は、2.8.1.1(3)に記述したように、昭和42年に運用開始の他社向けの台車形式のために実施され、その内容は側ばり主要断面に対して、断面係数から設計最大上下荷重時における応力の計算を行い、その計算結果は最大応力106.3MPa（本件亀裂の該当断面は82.4MPa）となり、設計当時使用していた材質SS41の降伏応力216MPaの両振り疲れ限度108MPaの許容値内であった。このことから、当時の強度設計は妥当であったと考える。

一方、事故発生後に実施したFEM解析の結果は、2.8.1.2に記述したように、図12における応力は、本件溶接部及び溶接部応力測定箇所いずれも応力限界図における溶接非仕上げ部の許容値以内であったが、図13に示すように、溶接止端部の要素が一辺1mmの正三角形となるような側ばりモデルでFEM解析した応力は、本件溶接部の溶接止端部で230MPa以上となった。また、FS513形式台車を使用した静荷重試験では、2.4.3.7(2)①に記述したように、溶接部応力測定箇所における溶接止端部の応力は溶接部応力測定箇所近傍の側ばり下面の応力測定値に対し、約2.4倍であった。

従って、本件側ばりのように側ばり内部に補強板が溶接される構造では、その溶接止端部に応力集中による高応力が発生することが考えられることから、応力集中を緩和するためグラインダー仕上げなどによって、溶接止端部の曲率半径を大きくするような設計が必要と考える。なお、構造上の理由などにより溶接止端部の曲率半径を大きくするような設計ができない場合、使用する材料の種類を最大と考えられる応力集中係数を考慮した上で、溶接部近辺の側ばり下面における許容応力を設定するような構造設計が望ましい。

また、設計段階において応力集中など局所的な応力についてFEM解析で検討を行う場合、要素面積をできる限り小さくして発生する応力分布の詳細を把握するなど、解析精度を上げるための注意が必要と考えられる。

3.2.7 本件板ばね破損に関する分析

本件板ばね破損は、2.4.3.7(4)③に記述したように、破面に延性破壊の特徴であるディンプル状の模様のみが確認されたことから、疲労破壊によるものではなく、材料の降伏点を超える応力が急激に発生したためと考えられる。なお、材料の降伏点を超える応力が急激に発生した理由については、脱線による急激な上下荷重の変動が影響した可能性が考えられる。

4 結 論

4.1 分析の要約

- (1) 本件列車が脱線を開始した地点は、脱線防止ガードレールの終端である青砥駅方端部付近（11k670m付近）と考えられる。（3.1.3）^{*36}
- (2) 本件台車車輪の乗り上がり状況は、本件曲線における11k750m付近から11k670m付近の間で、本件台車の右側車輪は、右レールに乗り上がった形で走行していたと考えられる。（3.1.4）
- (3) 本件列車の脱線要因は、台車に亀裂が発生したことに起因して、輪重のアンバランスが大きくなった結果、車輪がレールに乗り上がり脱線に至ったと考えられる。（3.1.5）
- (4) 本件亀裂により、静止輪重比が大きくなったことについては、亀裂によって側ばりの強度が低下して、本件台車前軸右車輪側の側ばりが軸ばねの伸びる方向へ変位して、上下荷重を分担できなくなっていたためと考えられる。（3.2.2）
- (5) 本件亀裂は、本件外リブと側ばり下面との溶接止端部を起点として発生し、側ばり下面に広がった後、側ばり側面を下方から上方に進展したと考えられる。（3.2.3(1)）
- (6) 本件溶接部には、溶接止端部に応力集中が発生し、応力限界図の許容限度を超える応力が発生していた可能性が考えられる。（3.2.3(2)）
- (7) 本件溶接部の溶接状態は、溶接止端部において溶接不全部とはならないが溶接表面では微小な凹み形状が見られたこと、及び6位、7位及び8位の同一箇所における溶接ビードの形状に比べ、溶接余盛角度が大きい状況であった。このことから、本件溶接部の溶接止端部には応力集中による高応力が発生していた可能性が考えられる。（3.2.3(3)）
- (8) 本件亀裂の発生要因は、平均的な応力が強度設計値以内であっても、溶接止端部の微小な凹み形状及び溶接余盛角度に起因する応力集中により局所的に応力が高まり、それが亀裂起点となって疲労破壊による亀裂が進展した可能性があると考えられる。（3.2.3(4)）
- (9) 本件台車の本事故発生前直近の定期検査では、亀裂は側ばり下面の表面に達していたものの開口していなかった可能性があること、及び車両整備実施基準において、側ばり全体を磁粉探傷検査するように台車枠の探傷箇所へ追加されていたが、検査箇所が詳細に示されていないため、側ばり下面の亀裂を発見できなかった可能性があると考えられる。（3.2.4）
- (10) 溶接止端部の応力集中が強度に影響を及ぼす懸念がある場合は、溶接止端部

*36 本項の各文章末尾に記載した数字は、当該記述に関する「3 分析」の項目番号を示す。

の曲率半径及び溶接余盛角度を設計段階で指示を行い、検査により確認を行うといった対応を検討することが望ましい。(3.2.5)

- (11) 設計では、本件側ばりのように、側ばり内部に補強板が溶接される構造では、その溶接止端部に応力集中による高応力が発生することが考えられるため、応力集中に対する設計を考慮する必要がある。(3.2.6)

4.2 原因

本事故は、台車の側ばりの下面から側面上部に達する亀裂が発生・進展した状態で走行したため、台車前軸の輪重のアンバランスが大きくなり、右側車輪の輪重が減少した状態で曲線を通じたため、横圧が増加したことにより右側車輪がレールに乗り上がり、脱線防護ができなくなる脱線防止ガードレールの終端である青砥駅方端部付近で、脱線したものと考えられる。

台車前軸の輪重のアンバランスが大きくなったことについては、亀裂によって側ばりの強度が低下して、上下荷重を分担できなくなっていたためと考えられる。

また、側ばりに亀裂が発生したことについては、側ばり内部の補強板溶接箇所に応力が集中したことにより局所的に高い応力が発生し、それが亀裂の起点となって疲労破壊により亀裂が進展した可能性が考えられる。

事業者の定期検査において亀裂の進展を発見できなかったことについては、本事故発生前直近の全般検査時には、既に側ばり下面の表面に亀裂が達していた可能性が考えられるが、その亀裂は開口していなかった可能性があること、及び側ばりの磁粉探傷検査箇所が詳細に示されていなかったことにより、亀裂を発見できなかった可能性が考えられる。

5 再発防止策

5.1 必要と考えられる再発防止策

側ばり内部に補強板が溶接されている台車においては、既に行われている定期検査の側ばり探傷検査において、設計情報などから内部補強板溶接の高応力発生箇所を検査対象として詳細に指定をした上で、探傷検査を実施することが必要であると考えられる。さらに、内部からの亀裂進展の早期発見のため、超音波探傷検査などの検査方法併用についても検討することが望ましい。また、側ばりは構造上、上下荷重により発生する応力が大きく、側ばり下面に高応力が発生することから、特に月検査における目視検査では、側ばり下面を重点的に検査することが必要であると考えられる。

今後の設計については、側ばり内部に補強板が溶接される構造では、溶接止端部へ

の応力集中を緩和するため溶接止端部の曲率半径を大きくするような設計、もしくは構造上の理由などによって溶接止端部の曲率半径を大きくするような設計ができない場合、使用する材料の種類を最大と考えられる応力集中係数を考慮した上で、溶接部近辺の側ばり下面における許容応力を設定するような構造設計を行うことが必要であると考えられる。

5.2 事故後に同社が講じた措置

本事故後に同社が講じた措置は、次のとおりである。

同社及び北総鉄道が保有する全ての台車を対象に、列車検査及び月検査において本件亀裂発生箇所と同様箇所、拭き取り後の目視点検実施及び打音検査を追加した。

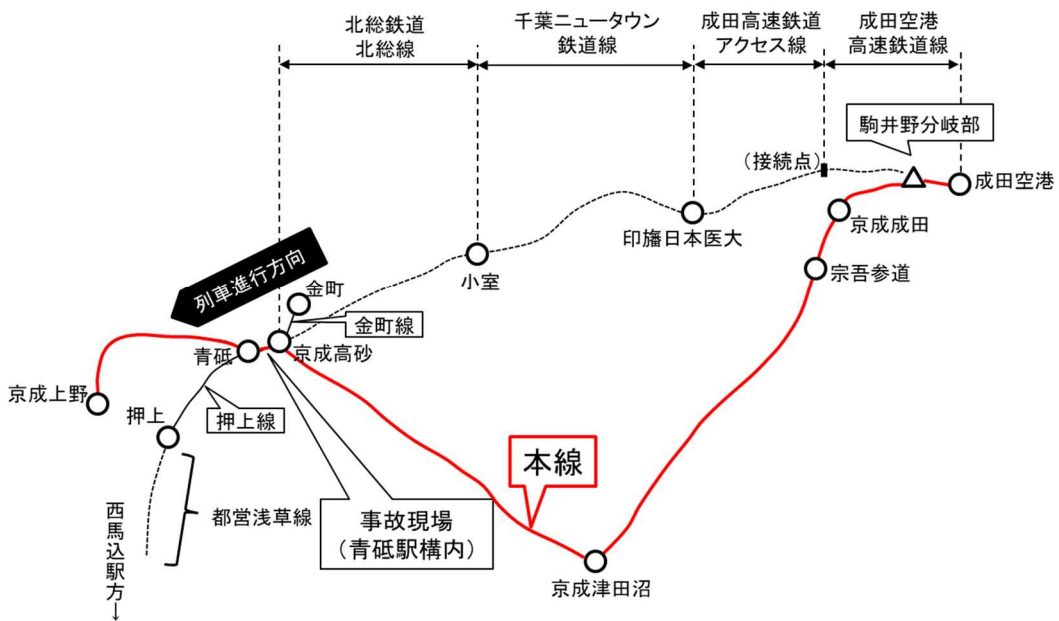
なお、本件台車と同形台車を対象に重要部検査及び全般検査の磁粉探傷検査では、本件亀裂発生箇所及び同様箇所、重点点検箇所としてチョークで現物に明示、側ばり下面の塗装除去の徹底、及び検査者2名によるダブルチェックを追加した。また、磁粉探傷検査の教育を年1回実施とし、原因が究明されるまでは2年毎の磁粉探傷検査対応とした。

5.3 事故後に国土交通省が講じた措置

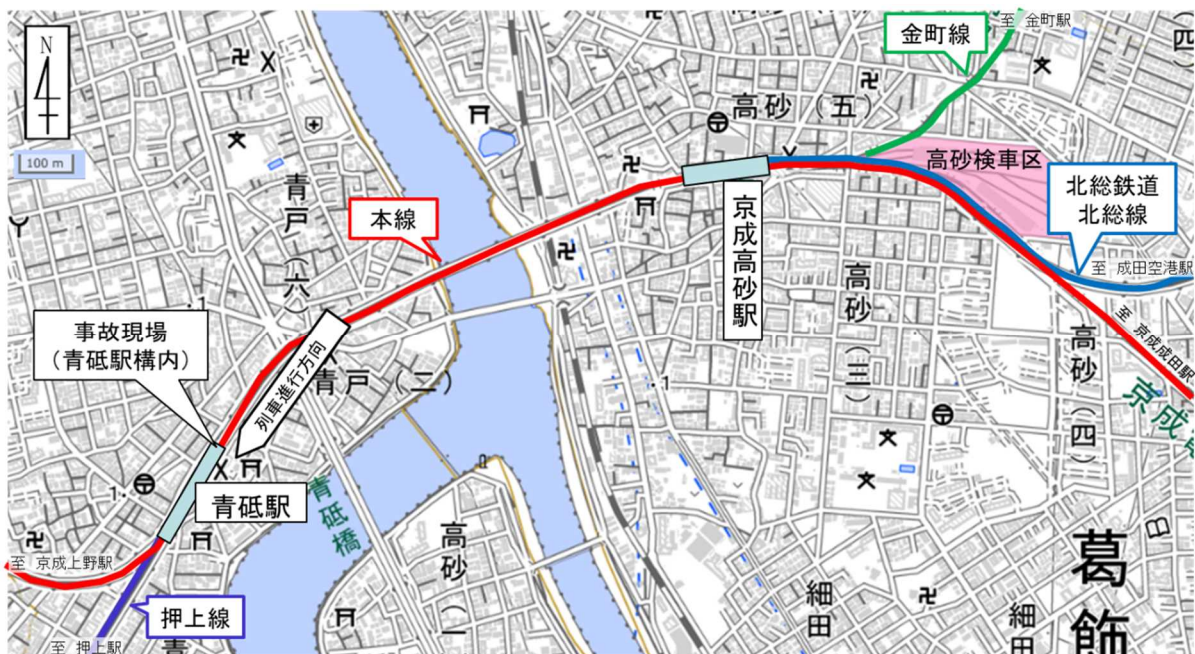
国土交通省は、令和2年6月12日、類似構造台車を所有する鉄軌道事業者に対し、目視等による緊急点検を指示した。なお、点検の結果、対象台車数約9,900台車(同社含む。)に異常はなかったとのことであった。

付図1 京成電鉄 本線の路線図

京成上野駅～成田空港駅間 69.3km (単・複・複々線、電化)

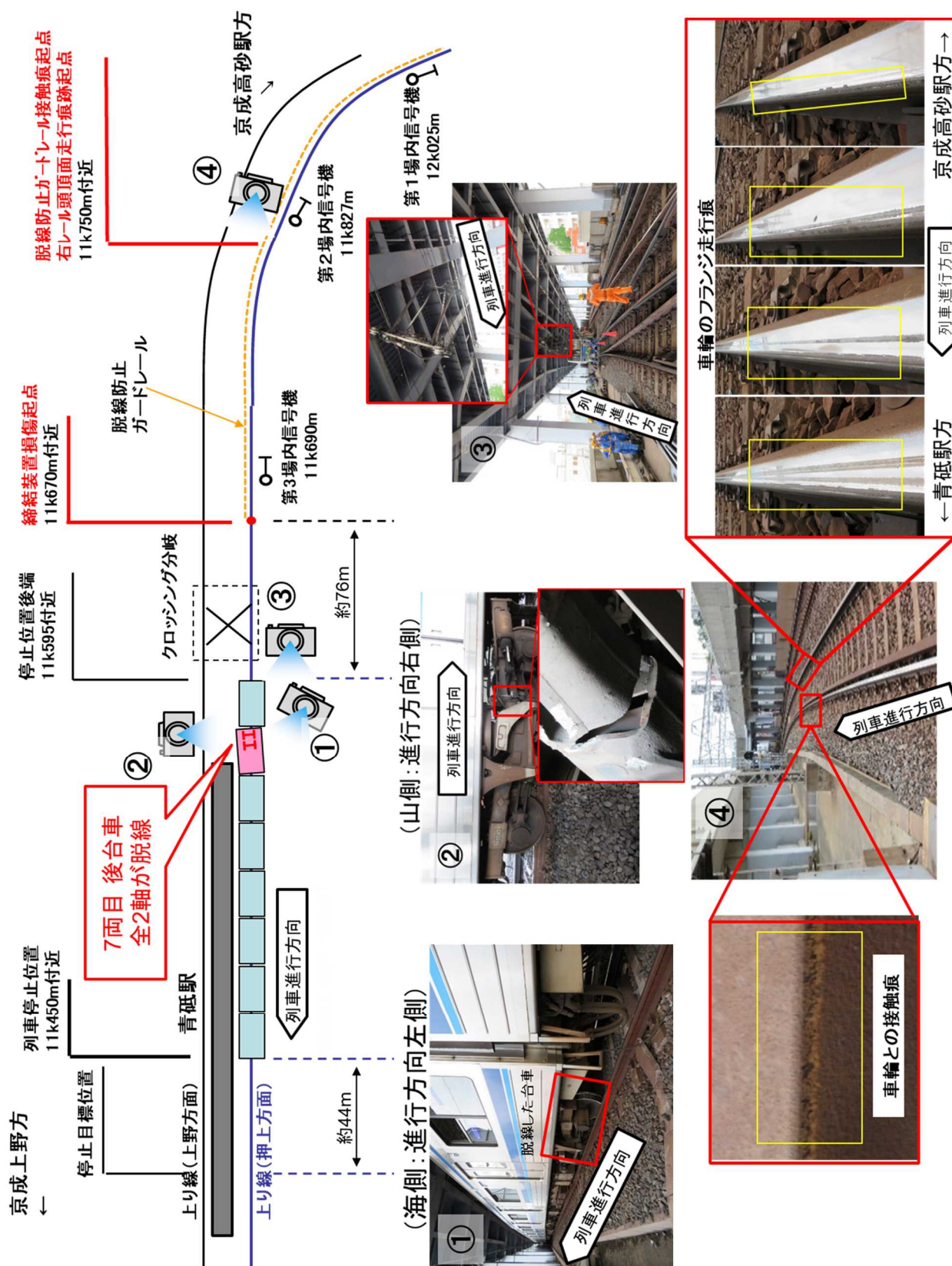


付図2 事故現場付近の地形図



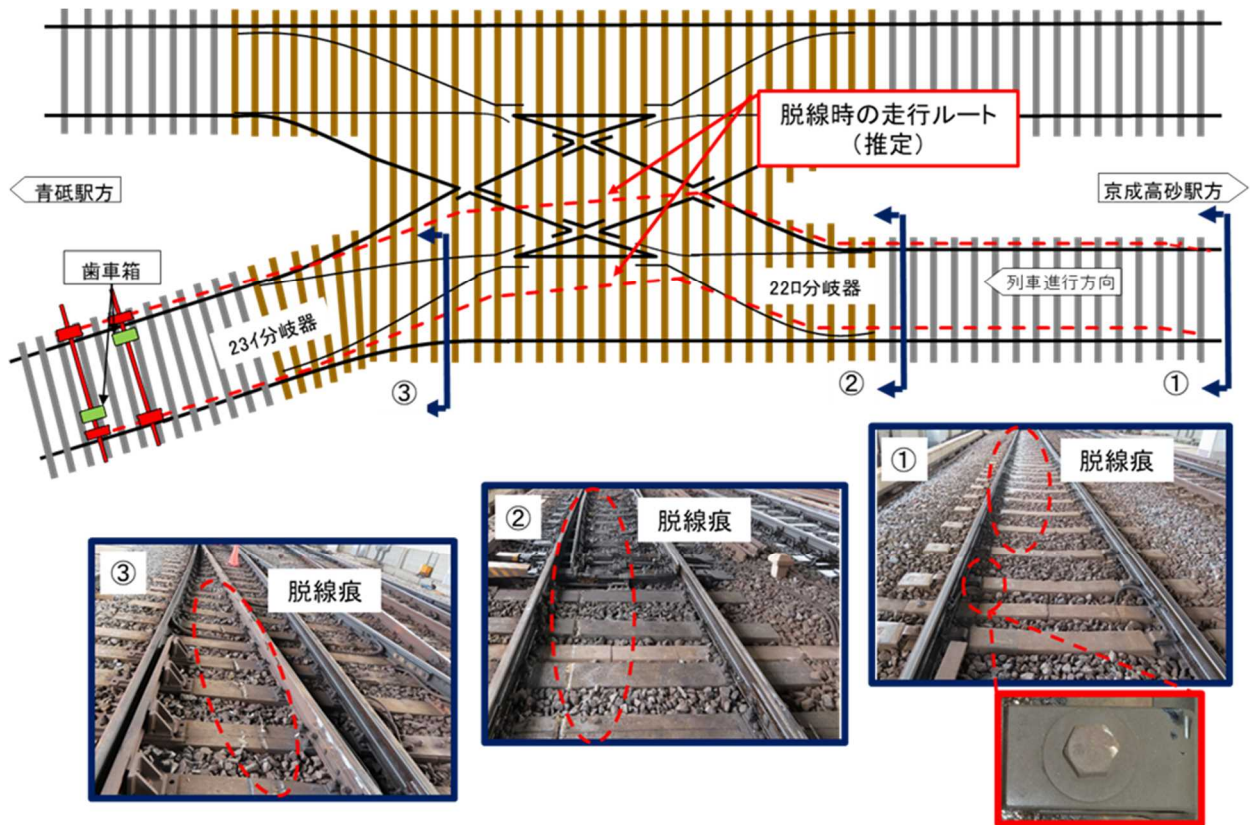
※この図は、国土地理院の地理院地図（電子国土Web）を使用して作成した。

付図3 事故現場周辺略図

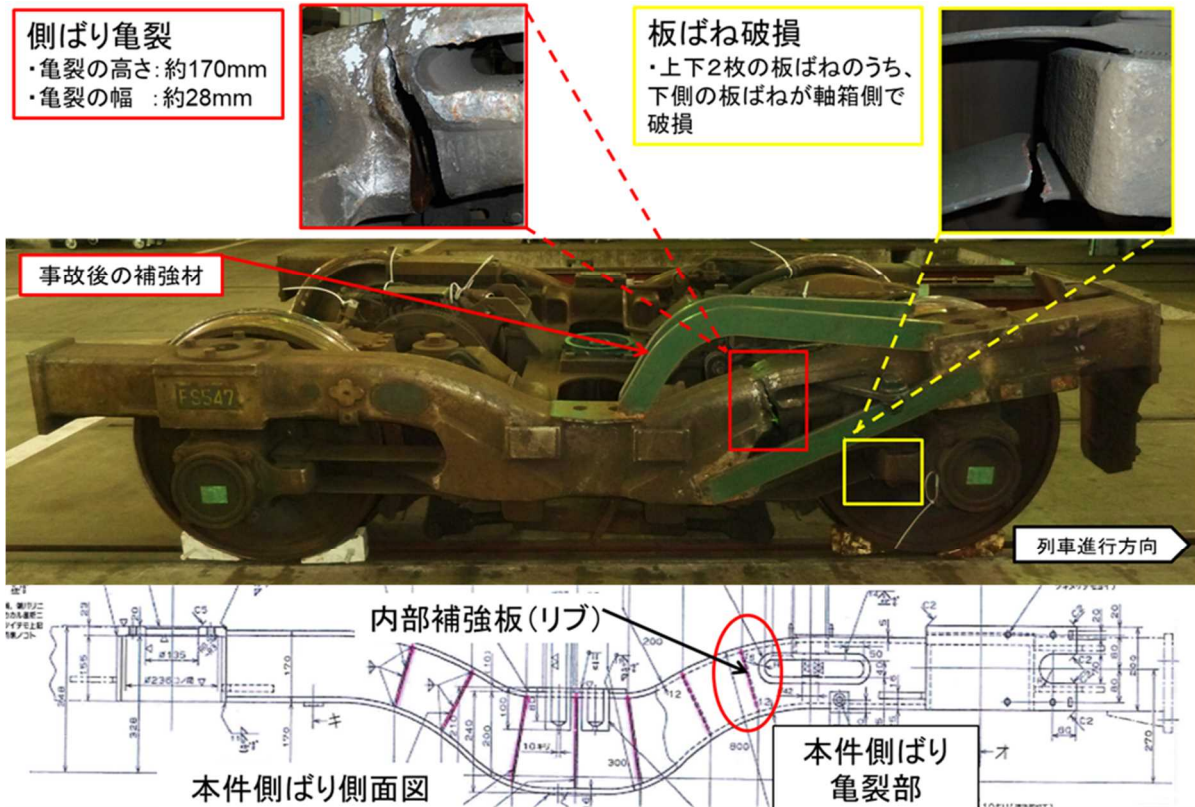


※この図は、事故調査時点の状況を基に線路、道路に対する主な設備の大まかな配置を示した略図であり、正確な縮尺、大小、位置関係にはなっていない。

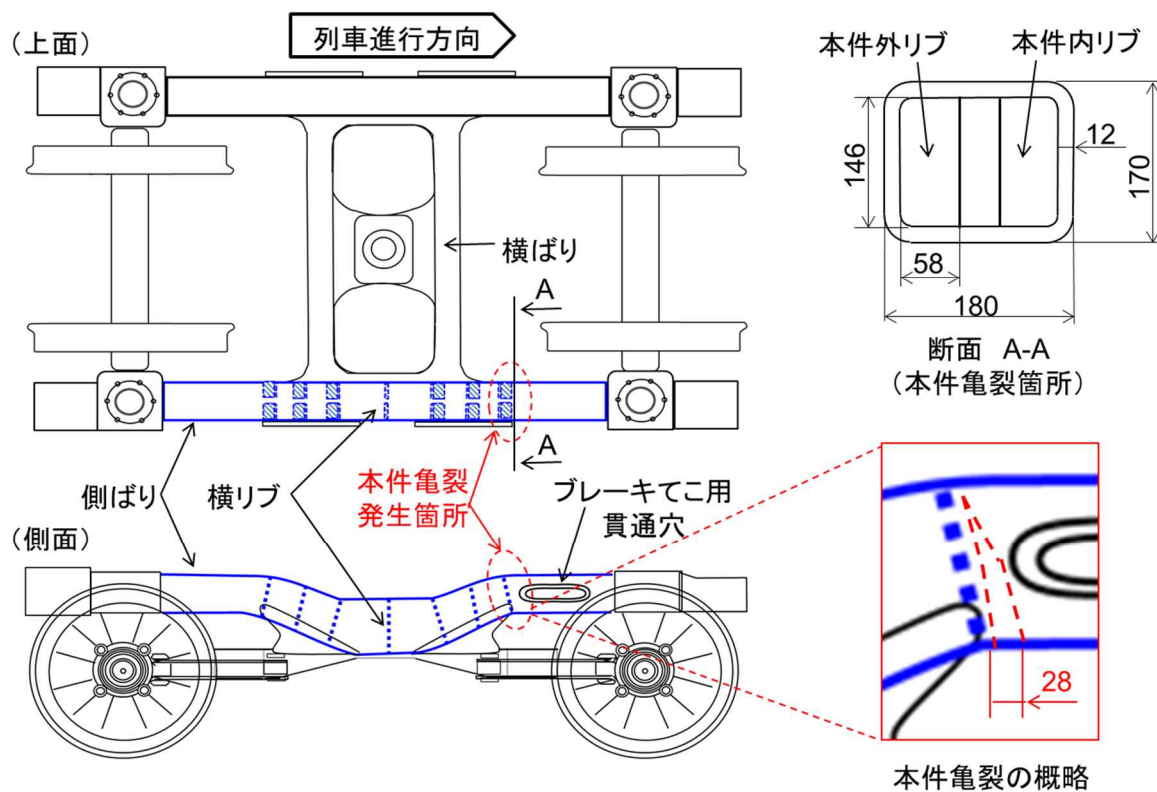
付図4 主な軌道の痕跡等



付図5 本件台車の主な損傷状況

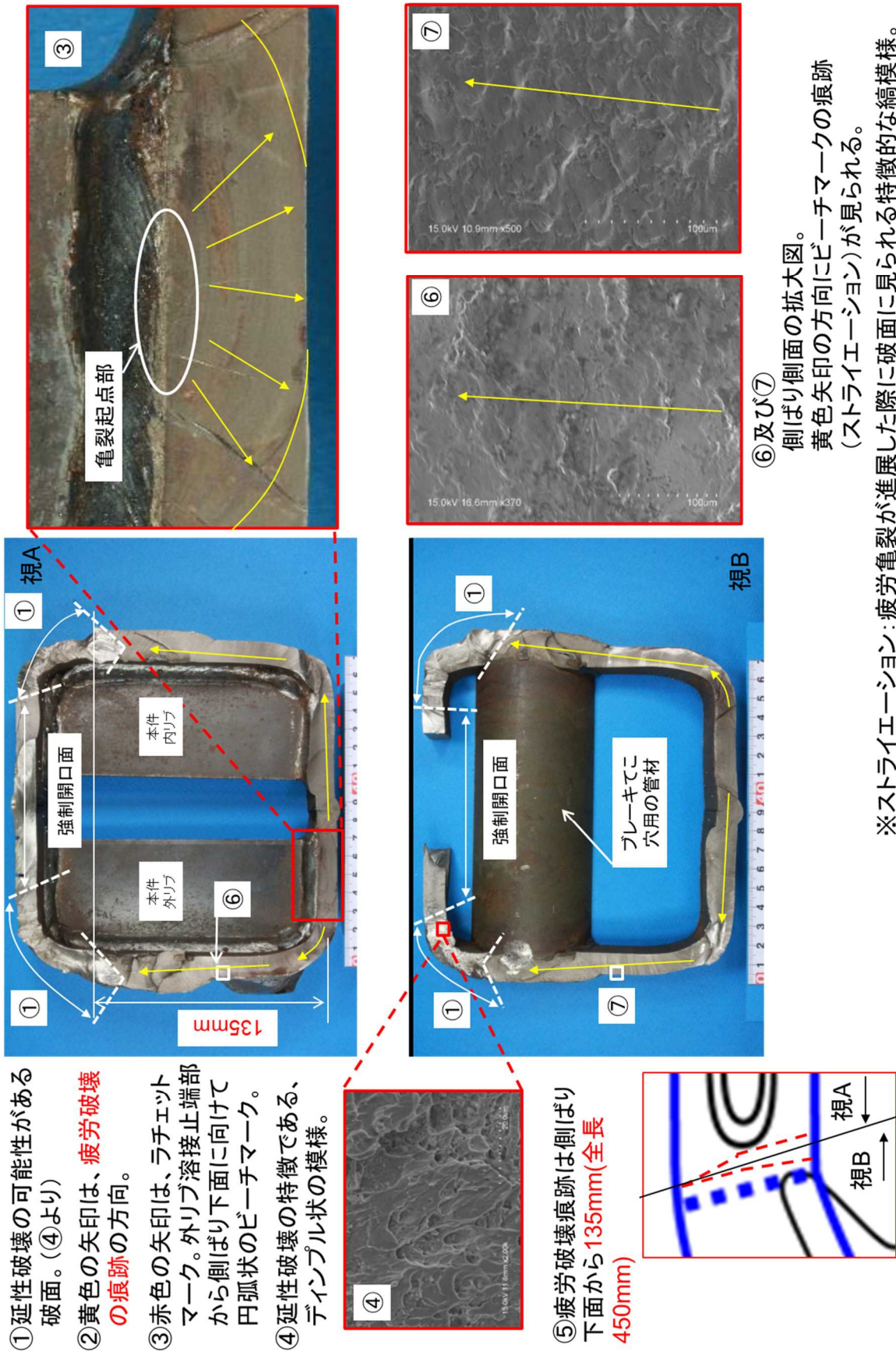


付図6 台車概略図



※この図は、イメージ図である。

付図7 本件亀裂の破面状況



- ①延性破壊の可能性がある破面。(④より)
- ②黄色の矢印は、**疲労破壊の痕跡**の方向。
- ③赤色の矢印は、ラチェットマーク。外リブ溶接止端部から側ばり下面に向けて円弧状のビーチマーク。
- ④延性破壊の特徴である、デインプル状の模様。

⑤疲労破壊痕跡は側ばり下面から**135mm(全長450mm)**

⑥及び⑦
側ばり側面の拡大図。
黄色矢印の方向にビーチマークの痕跡(ストライエーション)が見られる。

※ストライエーション: 疲労亀裂が進展した際に破面に見られる特徴的な縞模様。

付図 8 本件列車の主な損傷状況

