

RA2017-8

鉄 道 事 故 調 査 報 告 書

I 名古屋鉄道株式会社 三河線 猿投駅構内
列車脱線事故（踏切障害に伴うもの）

II 九州旅客鉄道株式会社 九州新幹線 熊本駅～熊本総合車両所間
列車脱線事故

平成29年11月30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 中橋 和博

《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」

II 九州旅客鉄道株式会社 九州新幹線
熊本駅～熊本総合車両所間
列車脱線事故

鉄道事故調査報告書

鉄道事業者名：九州旅客鉄道株式会社

事故種類：列車脱線事故

発生日時：平成28年4月14日 21時26分ごろ

発生場所：熊本県熊本市

九州新幹線 熊本駅～熊本総合車両所間
博多駅起点99k160m付近

平成29年11月6日

運輸安全委員会（鉄道部会）議決

委員長	中橋和博
委員	奥村文直（部会長）
委員	石田弘明
委員	石川敏行
委員	岡村美好
委員	土井美和子

要旨

<概要>

九州旅客鉄道株式会社の九州新幹線博多駅発熊本駅行き6両編成の第5347A列車は、熊本駅到着後、回送列車として、平成28年4月14日、熊本駅を定刻（21時25分）に出発した。その後、速度約78km/hで走行中に、運転士は、下から突き上げるような縦揺れを感じ、すぐにノッチオフして非常ブレーキ操作を行った。縦揺れの後、大きな横揺れがあった。列車が博多駅起点99k461m付近に停止した後、運転士が降車して床下を確認したところ、6両全ての車両が脱線していた。

熊本駅～熊本総合車両所間は、車掌が乗務せず、運転士のみ乗務していたが、死傷者はいなかった。

なお、平成28年4月14日21時26分ごろ、「平成28年（2016年）熊本地震」のうちの、熊本県熊本地方の深さ約11kmを震源とするマグニチュード6.5の地震が発生し、熊本県（^{ましき}益城町）で最大震度7を観測した。

<原因>

本事故は、「平成28年（2016年）熊本地震」のうちの、平成28年4月14日21時26分ごろ発生した地震の地震動を受けたため、列車が脱線したものと考えられる。

脱線に至る過程については、地盤の振動増幅により、事故現場付近の構造物直下に線路直角方向の大きな振動が加わったことに加え、構造物において車両にローリングを生じさせやすい振動数帯の左右の揺れを増幅したことにより、列車の各車両が左右に大きく揺れて左又は右車輪のフランジがレール上に乗るなどして、多数の輪軸がほぼ同時期に脱線したものと考えられる。

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	2
1.2.3	原因関係者からの意見聴取	2
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	6
2.3	事故現場に関する情報	6
2.3.1	本事故発生後の本件列車の状態	6
2.3.2	脱線の痕跡	8
2.4	鉄道施設及び車両に関する情報	8
2.4.1	鉄道施設の概要	8
2.4.2	車両の概要	11
2.4.3	その他の車両情報	12
2.5	鉄道施設及び車両等の損傷に関する情報	13
2.5.1	事故現場付近の鉄道施設の主な損傷状況	13
2.5.2	本件列車の車両の主な損傷及び痕跡の状況	15
2.6	同社の主な大規模地震対策に関する情報	17
2.6.1	対震列車防護システム	17
2.6.2	脱線・逸脱防止装置	18
2.7	乗務員等に関する情報	19
2.8	気象に関する情報	20
2.9	地震に関する情報	20
2.9.1	本件地震等の概要	20
2.9.2	本件地震の震央と事故現場との位置関係	20
2.9.3	事故現場付近の地震観測点における地震計の記録	21
2.10	脱線シミュレーションに関する情報	22
2.10.1	本件地震及び本震並びに余震の観測	22
2.10.2	脱線シミュレーション	23

2.1.1	事故現場付近を走行中の他の新幹線列車の情報	34
2.1.2	その他の情報	35
2.12.1	本事故発生後の復旧作業の状況	35
2.12.2	過去の大規模地震による新幹線列車脱線事故	35
3	分析	36
3.1	本事故発生前の軌道及び車両の整備に関する分析	36
3.1.1	軌道の整備	36
3.1.2	車両の整備	36
3.2	本件列車の脱線に関する分析	36
3.2.1	脱線発生前後の状況について	37
3.2.2	脱線の発生と軌道等の状態及び車両の状態との関連性について	39
3.2.3	脱線の発生と本件地震との関連性について	39
3.2.4	地盤の影響	40
3.2.5	構造物の影響	40
3.2.6	脱線のメカニズム	41
3.3	事故現場地表面の地震動の推定に関する分析	42
3.4	軌道及び車両の損傷に関する分析	44
3.4.1	軌道の損傷	44
3.4.2	車両の損傷	45
3.5	再発防止及び被害軽減に関する分析	45
3.5.1	脱線防止ガード	45
3.5.2	逸脱防止対策	46
3.5.3	対震列車防護システム	47
4	結論	48
4.1	分析の要約	48
4.2	原因	51
5	再発防止策	51
5.1	今後望まれる措置	51
5.2	事故後に同社が講じた措置	52
5.3	事故後に国土交通省が講じた措置	52

添付資料

付図1	九州新幹線路線図	53
付図2	事故現場付近の地形図	53
付図3	事故現場略図	53
付図4	事故現場付近の構造物	54
付図5	本件列車の脱線状況	59
付図6	対震列車防護システムの概略図	62
付図7	ブレーキ制御装置の記録（抜粋）	62
付図8	車体の左右振動加速度の記録（抜粋）	63
付図9	対震列車防護システム用地震検知点の位置	63
付図10	気象庁（熊本西区春日）の本件地震の観測記録	64
付図11	本震及び余震の観測位置	65
付図12	構造物位置で設定した地盤モデル（抜粋）	65
付図13	構造物群モデル	66
付図14	支承部及び桁のモデル化	66
付図15	車両挙動解析結果（1両目）	67
付図16	車両挙動解析結果（3両目）	68
付図17	脱線直前の車両姿勢の推移（1両目）	69
付図18	脱線直前の車両姿勢の推移（3両目）	70
付図19	車両挙動（脱線防止ガード有り）解析結果（1両目）	71
付図20	車両挙動（脱線防止ガード有り）解析結果（3両目）	72
付図21	車両の挙動（右側に脱線の場合）	73

1 鉄道事故調査の経過

1.1 鉄道事故の概要

九州旅客鉄道株式会社の九州新幹線博多駅発熊本駅行き6両編成の第5347A列車は、熊本駅到着後、回送列車として、平成28年4月14日（木）、熊本駅を定刻（21時25分）に出発した。その後、速度約78km/hで走行中に、運転士は、下から突き上げるような縦揺れを感じ、すぐにノッチオフして非常ブレーキ操作を行った。縦揺れの後、大きな横揺れがあった。列車が博多駅起点99k461m付近に停止した後、運転士が降車して床下を確認したところ、6両全ての車両が脱線していた。

熊本駅～熊本総合車両所間は、車掌が乗務せず、運転士のみ乗務していたが、死傷者はいなかった。

なお、平成28年4月14日21時26分ごろ、「平成28年（2016年）熊本地震」のうちの、熊本県熊本地方の深さ約11kmを震源とするマグニチュード6.5の地震が発生し、熊本県（益城町）で最大震度7を観測した。

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、平成28年4月14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。

また、平成28年4月22日、2名の鉄道事故調査官を追加指名した。

本事故は、「平成28年（2016年）熊本地震」のうちの、平成28年4月14日21時26分ごろ発生した地震の地震動が関与した可能性が考えられることから、平成28年9月15日に、表1のとおり、本事故調査に従事する3名の専門委員を任命し、調査するべき専門分野として、地震、構造物、車両を指定した。

表1 専門委員と調査するべき専門分野

所 属	職 名	氏 名	専 門 分 野
東京大学 地震研究所	教 授	古村 孝志	地 震
宇都宮大学 地域デザイン科学部	教 授	中島 章典	構造物
東京大学 生産技術研究所	教 授	須田 義大	車 両

（注）所属及び職名は、平成28年9月現在のものを示す。

九州運輸局は、本事故調査の支援のため、職員を事故現場等に派遣した。

本事故に関し、公益財団法人鉄道総合技術研究所に地震時の車両挙動に関するシミュレーション解析を委託したほか、脱線に至る過程の解析について、同研究所の

協力を得た。

1.2.2 調査の実施時期

平成28年4月15日及び16日	現場調査及び口述聴取
平成28年4月25日及び26日	車両調査及び現場調査
平成28年9月～平成29年3月	地震時の車両挙動に関するシミュレーション解析

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、九州旅客鉄道株式会社（以下「同社」という。）の九州新幹線博多駅発熊本駅行き6両編成の第5347A列車（熊本駅到着後、熊本総合車両所行き回送列車）（以下「本件列車」という。）の運転士（以下「本件運転士」という。）の口述によれば、概略次のとおりであった。

事故当日、博多駅で前運転士から「本件列車は異状なし」との引継ぎを受けた。同駅を定刻（20時17分）に出発し、熊本駅（東京駅起点1167k275m（博多駅起点98k180m）。以下、キロ程は博多駅起点とし、「博多駅起点」は省略する。）には定刻（21時11分）に到着した。途中、車両の状態に異状は感じられなかった。

本件列車は、熊本駅から熊本総合車両所までの間は回送列車となり、熊本駅を定刻（21時25分）に出発した。その時のATC信号は80信号（80km/h情報）であり、4ノッチで力^{りきこう}行した。その後、ATC信号が変化したため、力行ノッチを2ノッチとした。その時の列車の速度は80km/hだった。

ATC信号が85信号（85km/h情報）に変化してすぐに、縦揺れというか、下から突き上げられるような衝撃があったため、すぐにノッチオフして非常ブレーキを操作した。列車が自動的に非常ブレーキを動作させるより先に自分が非常ブレーキを操作したと思うが、ほぼ同時だったという感じもする。そして非常ブレーキを操作した瞬間ぐらいに左右（以下、前後左右は列車の進行方向を基準とする。）に激しい横揺れがきた。運転席に座っていたが、体が振られ

て踏ん張れないような状態だった。E G S^{*1}を操作しようと思ったが、揺れが激しくてボタンを押せる状況ではなかったため、列車が停止してからボタンを押した。

本件列車が停止したキロ程は1,168.6 km (モニタ装置^{*2}に表示される東京駅起点キロ程) であり、時刻は21時27分だった。

揺れについては、突然大きな衝撃があり、いつ収まるのかなという感じだったが、徐々に弱まって、1分も経^たたずに収まったと思う。走行中は、聞いたことがないような「ガリガリ」というすごい音がした。高い音ではなく、低く擦れるような音だった。

運転台の表示灯は、A T C信号が「×表示」、A T Cブレーキ、電気機器、V C B^{*3}、台車、緊急ブレーキの各表示灯は「点灯」であり、ブザーが鳴動した。車内が真っ暗になったので架線電圧を電圧計で確認したところ、0 Vであった。しかし、直流電源は活^いきており、予備灯は点^ついていた。

運転室の小窓から後方を確認したところ、ふだんは見えない車両間のズレがあったので、これは大変なことになったと思った。本件列車の停止後も体が上下左右に揺さぶられる感じで揺れが激しかったので、少し待ってから運行管理部新幹線輸送指令 (以下「指令」という。) に連絡したところ、「バッテリー放電防止処置をするように」、また、21時44分に「転動防止処置をして床下点検するように」と指示された。その後、非常ブレーキを掛けたまま逆転機ハンドルを「切」とし、降車した。本件列車の左側の線路上を最後尾の車両まで歩いて確認したところ、全車両が脱線していたため、指令にその旨連絡した。

台車以外には車両の連結部付近を確認した。また、車内を2両目 (以下、車両は前から数える。) まで確認した際は、特に異臭はなかったものの、ほこりっぽく、もやもやした感じだった。

22時42分に、指令から「パンタグラフを降下させるように」との指示があり、指示に従った。その後、車内で待機していたところ、翌日4月15日の0時ごろ、同社の社員が運転台に来た。同じ頃に大きな余震があり、車内においては危険だということで、車外に避難した。

(付図1 九州新幹線路線図、付図2 事故現場付近の地形図、付図3 事故現場略図、付図4 事故現場付近の構造物、付図5 本件列車の脱線状況 参照)

*1 「E G S」とは、「Emergency Ground Switch」の略であり、交流電車に設置され、動作させるとパンタグラフから直接接地する回路を構成し、安全確保を目的に緊急に架線停電させる際に使用するものである。

*2 「モニタ装置」とは、列車内の各機器の状態を監視し、乗務員を支援するために故障発生時における故障内容の表示や検修作業の簡略化を図る装置である。

*3 「V C B」とは、「Vacuum Circuit Breaker」の略であり、交流電車及び交直流電車において、電路の遮断を高真空中の容器の中で行う遮断器をいう。

2.1.2 運転状況の記録

2.1.2.1 本件列車の記録

本件列車には、運転状況をイベントドリブン^{*4}で記録する装置（以下「運転状況記録装置」という。）が装備されており、時刻、速度、ブレーキの操作状態等の記録が残されていた。その記録によれば、本事故発生前後の本件列車の運転状況は、概略表2のとおりであった。なお、同装置には21時26分43秒から同47秒までの記録は残されていなかった。

表2 本件列車の運転状況の記録（抜粋）

日時 (yy. mm. dd_hh. mm. ss)	速度 (km/h)	列車先頭位置 <キロ程> (km)	内容
16.04.14_21.26.41	79.2	99.265	架線電圧の低下による停止（02）信号受信（トリガ）
16.04.14_21.26.42	79.7	99.286	緊急停止（02E）信号受信（トリガ）
16.04.14_21.26.43	78.4	99.295	緊急停止（02E）信号受信（確定）により、受信部が非常ブレーキ指令
16.04.14_21.26.43	78.3	99.296	受信部の非常ブレーキ用リレー落下
16.04.14_21.26.43	78.8	99.298	運転制御部の非常ブレーキ用リレー落下
16.04.14_21.26.43	79.9	99.304	架線電圧の低下による停止（02）信号受信（確定）、既に受信部の非常ブレーキ用リレー落下中のため変化なし（非常継続）
16.04.14_21.26.43	77.2	99.310	非常ブレーキ継続中
16.04.14_21.26.47	0	0	A T C装置電源瞬断による再起動により、初期化中

（注）時刻は、補正した後の時刻である。

運転状況記録装置の時刻は本件列車のモニタ装置内の時計から取得した時刻（1秒未満は切捨て）であり、同時計の時刻は博多駅の出発前において本件運転士が携帯する鉄道時計（業務用懐中時計）の時刻を基に手動で補正したものであることから、若干の誤差が含まれている可能性がある。そのため、表2の日時欄に示す時刻については、2.1.2.2の表3に示す新玉東変電所^{しんぎょくとう}のき電用しゃ断器13が動作した時刻を基に補正を行った時刻である。また、速度について、車輪の空転や滑走等により、実際の速度との誤差が若干内在している可能性がある。

本件列車のA T C非常ブレーキは、地上からの緊急停止（02E）信号又は架線電圧の低下による停止（02）信号を受信した場合であっても、安定した制御を行

*4 「イベントドリブン」とは、定期的に動作する方式ではなく、イベント（事象の変化）があった場合のみ動作する方式である。

うために即時には動作しない。最初に架線電圧の低下による停止（O2）信号を受信したのは21時26分41秒、確定したのはその約2秒後であり、緊急停止（O2E）信号の受信が確定した21時26分43秒ごろとほぼ同じ時期であった。なお、本件列車のATC非常ブレーキは、緊急停止（O2E）信号によって動作していた。

また、21時26分47秒における速度及び列車先頭位置の記録は0となっており、0と記録される直前の列車先頭位置は99k310m付近であった。（同社によると、同装置は、電源投入の数秒後から記録が開始されるとのことである。）

なお、本事故は、3.2.1.2に後述するように、21時26分43秒～同44秒ごろから始まったものと考えられる。

2.1.2.2 系統制記録

系統制記録は、変電所*5（以下「SS」という。）、き電区分所*6（以下「SP」という。）、補助き電区分所（以下「SSP」という。）等における監視対象機器及び制御対象機器の状態変化及び制御状態を時系列に記録したものであり、運行管理部新幹線電力指令において管理されている。同社によると、系統制記録で使用される時刻は、電波時計によって毎日定期的に補正されることから、誤差はほとんどないとのことである。表3に示すとおり、「平成28年（2016年）熊本地震」のうちの、平成28年4月14日21時26分ごろ発生した地震（以下「本件地震」という。）時に本件列車が走行していた位置の電車線に電力を供給していた新玉東SSは、本件地震を検知した熊本車両基地SSから、新^{しんとみあい}富合SSP、新熊本SSP、新玉東SSへと順次転送されてくる連絡遮断信号を21時26分41秒に受信し、直ちにき電用しゃ断器13を動作させ、電車線への電力供給を遮断していた。

表3 系統制記録（抜粋）

発生日時	場 所	機器名	状態	記 事
4月14日 21:26:41	熊本車両基地SS	22LI	受信	(電気式) 沿線地震計動作
4月14日 21:26:41	新富合SSP	85FREK2B	受信	地震連遮信号(熊本総合車両所SSから)
4月14日 21:26:41	新熊本SSP	85FREK2B	受信	地震連遮信号(新富合SSPから)
4月14日 21:26:41	新玉東SS	85FREK2B	受信	地震連遮信号(新熊本SSPから)
4月14日 21:26:41	新玉東SS	13	開放	き電用しゃ断器13
4月14日 21:26:42	熊本車両基地SS	22LC	受信	(機械式) 沿線感震器動作

*5 「変電所」とは、受電設備、主変成器設備、き電設備等によって構成され、電車線へ電力を供給/遮断するための施設である。

*6 「き電区分所」とは、電車線に電力を供給することをき電といい、その範囲を開閉装置によって変更させるために変電所の中間に設置される施設をいう。

2.1.2.3 対震列車防護システム用地震計（熊本車両基地SS）の動作記録

本件地震が発生した時に‘架線への電力供給を遮断する信号’（以下「き電トリップ信号」という。）を送信した地震計は、熊本車両基地SS構内の沿線地震検知点に設置された地震計であった。その記録内容を表4に示す。

表4に示すように、21時26分40.08秒に早期検知用地震計による規定値超過が、以降、同41.31秒に制御用感震器による規定値超過、同42.70秒に早期検知用地震計によるP波*7推定、同43.32秒に気象庁の緊急地震速報が検知され、それぞれ熊本車両基地SSに対してき電トリップ信号を送信した出力が記録されていた。

表4 熊本車両基地SS構内に設置された対震列車防護システムの地震記録

送信時刻	き電トリップ信号	地震トリガーとの時間差	状況
21時26分38.46秒		-	地震トリガー
21時26分38.82秒		0.36秒	P波推定（第1報）
21時26分39.82秒		1.36秒	P波推定（第2報）
21時26分40.08秒	送信	1.62秒	表示用規定値超過
21時26分40.82秒		2.36秒	P波推定（第3報）
21時26分41.31秒	送信	2.85秒	制御用規定値超過
21時26分42.70秒	送信	4.24秒	P波推定（第4報）
21時26分43.32秒	送信	4.86秒	緊急地震速報（気象庁）

（付図6 対震列車防護システムの概略図 参照）

2.2 人の死亡、行方不明及び負傷
なし。

2.3 事故現場に関する情報

2.3.1 本事故発生後の本件列車の状態

現場調査時、本件列車は、先頭位置が99k461m付近に停止し、1両目第3軸及び2両目第3軸以外の輪軸は全て脱線していた。図1に示すように、各輪軸は線路の左右（右側：6軸、左側：16軸）に脱線した状態であり、レールからの離れが最も大きかった輪軸は6両目第2軸（軸箱支持装置損傷軸）で、左車輪が左レールの軌間内57cmの位置にあった。

*7 「P波」とは、地震計に最初に観測される縦波をいう。

2.3.2 脱線の痕跡

99k157m付近（以下「脱線痕開始地点」という。）の左レール頭頂面上にはフランジの通過によるものと考えられる線状の痕跡が、また、99k160m付近の左レール軌間外のレール締結装置及びレール底部には車輪の通過によるものと考えられる損傷が認められたが、車輪フランジ乗り上がりの痕跡は認められなかった。また、その位置から熊本駅方の軌道上には脱線に関係があると考えられるような痕跡は認められなかった。脱線の痕跡を図3に示す。また、99k160m付近の左レール頭頂面上には、駆動装置の歯車箱から漏れたギヤオイルと考えられる黒色の付着物があった。さらに、99k160m付近から熊本総合車両所方のレール上及び枠型スラブ*8上にも、上記と同様な黒色の付着物が断続的に続いていた。

99k200m付近から本件列車が停止していた位置付近までの、枠型スラブの枠内（以下「枠型スラブ穴部」という。）（図5参照）の前面壁には、車輪又は床下機器等が衝撃したと考えられる損傷があった。損傷の程度は、列車の進行につれて徐々に大きくなっていったが、本件列車の停止位置付近では徐々に小さくなった。同区間のレール上には上述した黒色の付着物や車両の床下機器及び床下ふさぎ板等が擦った痕跡等が、また、レール締結装置及びレール底部や枠型スラブ上には、車輪の通過及び車両の床下機器の接触によるものと思われる痕跡等が多数認められた。

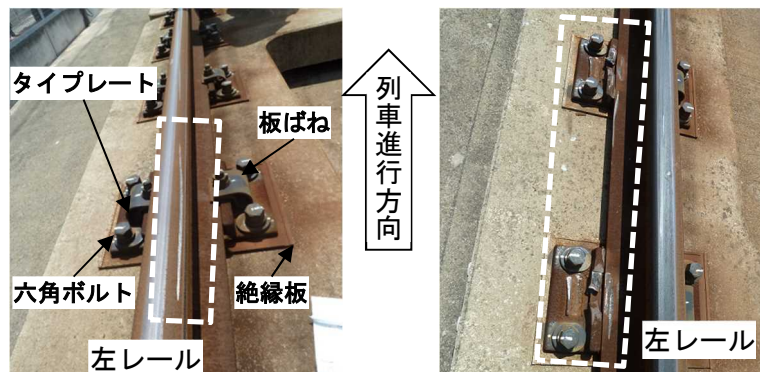


図3 脱線の痕跡（左：99k157m付近、右：99k160m付近）

2.4 鉄道施設及び車両に関する情報

2.4.1 鉄道施設の概要

2.4.1.1 路線

九州新幹線（博多駅～鹿児島中央駅）は、営業キロが288.9kmの複線、交流25,000Vの電化区間で、軌間は1,435mmである。当該路線は、独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構（以下「鉄道・運輸機構」という。）が建設・施設保有し、同社が運行している。

*8 「枠型スラブ」とは、コンクリート製の平板であるスラブの一種で、一般的なスラブ（A形）に対し、主に荷重を支持するレール長手部材と軌間保持する左右方向部材からなる枠型の形状を有するスラブをいう。

2.4.1.2 事故現場付近に関する情報

(1) 線形

本事故は、第2田崎高架橋（98k930m～99k332m、以下「第2田崎BL」という。）及び坪井川B（99k332m～99k427m）上で発生した。事故現場付近は、高架橋及び橋りょうが連続する区間に位置しており、線路の方向はおおむね北北西－南南東方向である。

線形は、98k725mから99k082mまでが半径402m（カント115mm）の左曲線区間であり、99k132mから99k620mまでが半径1,000m（カント105mm）の右曲線区間（99k132m～99k217mは緩和曲線）である。また、97k995m～100k651mは平坦区間である。

（付図3 事故現場略図 参照）

(2) 構造物（高架橋及び橋りょう）の概要

事故現場である第2田崎BLの構造形式は、ゲルバー式ラーメン高架橋*9（5径間×4か所、6径間×2か所）及びT形桁（7か所）であり、基礎は杭基礎（場所打ちコンクリート杭）で、地中梁が設けられている。なお、地表面からスラブ上面までの高さは約10mである。

また、坪井川Bの構造形式は、箱桁、T形桁及び壁式橋脚で、基礎は杭基礎（場所打ちコンクリート杭）である。

事故現場付近の構造物は、平成15年度に設計が行われており、当時の耐震設計に関する技術基準である「鉄道構造物等設計標準（耐震設計）平成11年」に準拠した設計がなされている。

（付図4 事故現場付近の構造物 参照）

(3) 地盤の概要

鉄道・運輸機構から提供された地質縦断面図（熊本駅周辺）によると、事故現場付近の地層は、地表面から地下約30mまでが第四紀完新世時代の沖積粘性土層と沖積砂質土層（各2層）、地下約30mから50mまでが第四紀更新世時代の洪積礫質土層、地下約50m以上が第四紀更新世時代の阿蘇4火砕流堆積物の層から成っている。また、事故現場付近の土質調査データ（柱状図）によると、地下20～25m付近には軟弱なシルト層*10の地盤があった。

(4) 軌道の概要

事故現場付近はスラブ軌道区間であり、長さが4,000mm又は5,000

*9 「ラーメン高架橋」とは、柱と梁が一体化した構造の高架橋をいう。

*10 「シルト層」とは、粒径が砂より小さく粘土より粗い碎屑物からなる透水性の小さな地層をいう。

mm、幅2,220mm、厚さ190mmの急曲線用タイプレート^{*11}式枠型スラブが敷設されており、レールは60kgレールが使用されている。

レール締結装置にはタイプレート式直結8改形又は直結8改（低）形が使用されており、レール締結装置の間隔は625mmである。

2.4.1.3 線路設備の維持管理に関する情報

(1) 定期検査

同社は、「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、「新幹線施設整備実施基準」を定めて国土交通大臣に届け出ており、その中で定期検査を規定している。この規定に基づき行われた線路設備の本事故発生前直近の定期検査の実施状況は表5に示すとおりであり、異常及び整備基準値の超過はなかった。

表5 本事故発生前直近の線路設備の定期検査実施状況

検査種別	検査周期	実施箇所	実施日	内容	検査結果
軌道変位検査	2か月	新幹線部工務課	平成28年 4月 8日	軌道状態検査	整備基準値 超過箇所なし
列車動揺検査	1年	熊本新幹線工務所	平成28年 4月 6日	軌道状態検査	整備基準値 超過箇所なし
ロングレール検査	1年	熊本新幹線工務所	平成28年 3月 6日	軌道状態検査	異常なし
レール等検査	1年	熊本新幹線工務所	平成28年 2月 9日	軌道部材検査	異常なし
スラブ検査	1年	熊本新幹線工務所	平成27年 7月14日	軌道部材検査	異常なし
その他材料検査	1年	熊本新幹線工務所	平成27年 8月 5日	軌道部材検査	異常なし
道床及び路盤検査	1年	熊本新幹線工務所	平成27年 7月14日	軌道部材検査	異常なし

(2) 営業車に装備した軌道検測装置による軌道変位測定

同社では、定期検査以外に軌道検測装置を営業車に装備して軌道変位の測定を行っている。本事故発生前直近の軌道変位測定において、軌道変位量（軌間、水準、高低、通り、平面性）が整備基準値を超過した箇所はなかった。

(3) 線路巡視

線路巡視の実施状況は表6に示すとおりであり、本事故発生前直近の徒歩及び車上からの線路巡視の結果に異常は認められなかった。

*11 「タイプレート」とは、レールとまくらぎ、軌道スラブなどの支承体の間に設置する板状の締結用部材である。

表6 本事故発生前直近の線路巡視の実施状況

検査種別	検査周期	実施箇所	実施日	内容	結果
線路巡視（徒歩）	1回／月	熊本新幹線工務所	平成28年4月8日	—	異常なし
線路巡視（車上）	1回／2週	熊本新幹線工務所	平成28年4月2日	—	異常なし

2.4.2 車両の概要

2.4.2.1 車両の諸元及び車歴等に関する情報

車種：800系交流電車（25,000V、60Hz）

編成両数：6両

主要諸元：表7のとおり

本件列車の編成と脱線した輪軸の部位を図4に示す。

なお、同社によると800系新幹線電車が速度80km/hから非常ブレーキを手動操作した場合の空走時間（計画値）は1.5秒、ATC非常ブレーキが動作した場合の空走時間は約2.4秒、停止までの平均減速度（計画値）は約3.6km/h/sとのことである。

表7 本件列車（800系新幹線電車U005編成）の主要諸元

編成位置	1両目	2両目	3両目	4両目	5両目	6両目
形式・番号	821-5	826-5	827-5	827-105	826-105	822-105
空車重量 (t ^{*12})	44.3	41.8	42.1	41.0	43.3	41.9
定員 (人)	46	80	72	72	58	56
車両長 (mm)	27,350	25,000	25,000	25,000	25,000	27,350
車両高 (mm)	3,994	4,500	4,137	4,137	4,500	3,994
車両幅 (mm)	3,380					
台車中心間距離 (mm)	17,500					
軸距 (mm)	2,500					
車輪径 (mm)	860					

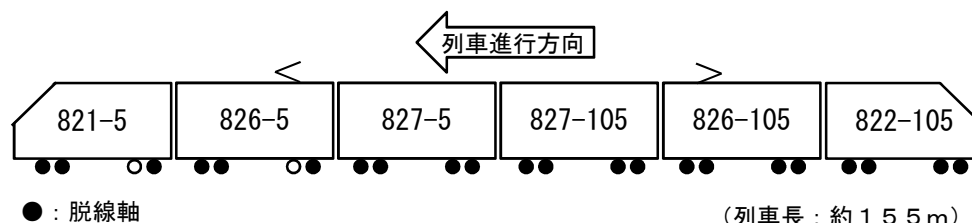


図4 本件列車の編成

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

本件列車の車歴及び改造履歴は次のとおりである。

新 製：平成15年12月28日 日立製作所
改 造：平成22年 7月 全線開業対応化工事

2.4.2.2 車両の維持管理に関する情報

(1) 定期検査

同社は、「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」に基づき、「新幹線電車整備実施基準」を定めて国土交通大臣に届け出ており、その中で定期検査を規定している。この規定に基づき行われた本件列車の本事故発生前直近の定期検査の実施状況は表8に示すとおりであり、異常は認められなかった。

表8 本事故発生前直近の本件列車の定期検査実施状況

検査種別	検査周期	実施箇所	実施日	本事故発生までの走行キロ
全般検査	36か月又は120万km	熊本総合車両所	平成27年2月10日（出場）	454,943.2km
台車検査	18か月又は60万km	熊本総合車両所	平成27年2月10日（出場）	454,943.2km
交番検査	30日 又は 3万km	熊本総合車両所	平成28年3月18日	26,441.0km
仕業検査	2日	熊本総合車両所	平成28年4月12日	2,571.3km

(注) なお、新製した電車に対する検査周期について、全般検査は使用開始後48か月又は120万km、台車検査は30か月又は60万kmと規定されている。

(2) 静止輪重比

平成27年2月に実施された全般検査における静止輪重測定結果によれば、全ての輪軸の静止輪重比^{*13}は15%未満であり、800系新幹線電車整備要領に規定されている管理値以下であった。

2.4.3 その他の車両情報

2.4.3.1 ブレーキ制御装置の情報

本件列車の各車両には、滑走検知時及び固着検知時の各輪軸の軸速度、各台車の左右の空気ばね圧力（AS圧）、ブレーキシリンダ圧力（BC圧）、ブレーキに関する指令線の状態等を記録できるブレーキ制御装置が装備されている。同装置の21時26分40秒以降の1両目及び6両目の記録を付図7に示す。付図7に示したように、車両の右側にある空気ばね1と空気ばね3及び車両の左側にある空気ばね2と空気ばね4の圧力はどちらも同相に、空気ばね1と空気ばね2及び空気ばね3と空気ばね4の圧力はどちらも逆相に振動している。付図7には示されていないが、

*13 「静止輪重比」とは、各車輪の静止輪重とその軸の静止輪重の平均値の比をいう。

その状態は編成内の全ての車両で同じ傾向であった。なお、同装置はモニタ装置の時計を使用しているため、付図7に示した時刻は元の記録時刻に補正を行った時刻である。

ブレーキ制御装置の記録によると、21時26分42秒ごろから各空気ばねの圧力が振動し始め、同44秒以前にBC圧が上昇し、同43～44秒ごろに各輪軸の軸速度が急激に低下している。軸速度の低下は、例えば1両目の第1軸は約1～2秒の間に、第2軸及び第4軸は約4～5秒の間に、6両目の全ての軸は約1～2秒の間にほぼ同時に発生していた。

また、停止後にレール上に載線していた1両目第3軸の軸速度は、約5～12秒の間も演算速度^{*14}とほぼ同様に低下していた。

(付図7 ブレーキ制御装置の記録(抜粋) 参照)

2.4.3.2 車体の左右振動加速度情報

本件列車の各車両には、前台車付近及び後台車付近の車体下部に加速度計が装備されており、車体の左右振動加速度の状態を監視している。車体左右振動加速度の記録例を付図8に示す。この記録は、同加速度計の値が基準値を超過した場合に記録される。なお、記録されている時刻はモニタ装置の時計を使用しているため、付図8に示した時刻は元の記録時刻に補正を行った時刻である。

21時26分42秒ごろから同47秒ごろにかけて、周期が約1秒で振動回数が5回程度かつ加速度が最大で約 10m/s^2 (約1G)の、車体左右振動加速度の記録が残されているが、同記録は上限値制限を受けていた可能性があることから、実際は 10m/s^2 より大きな加速度が生じていた可能性がある。

(付図8 車体の左右振動加速度の記録(抜粋) 参照)

2.5 鉄道施設及び車両等の損傷に関する情報

2.5.1 事故現場付近の鉄道施設の主な損傷状況

(1) 高架橋及び橋りょう等の構造物

事故現場付近の構造物は、平成28年4月15日の現場調査で確認した際には異状は認められなかったが、同社が同年4月20日及び24日に確認した際には表9に示すような損傷状況であった。表9に示すように、特に大きな損傷は発生していなかった。

*14 ここでいう「演算速度」とは、速度を20msごとにサンプリングして取得した速度と、1サンプリング前の速度から設定されている減速度を時間積分した値を減じた速度とを比較し、高い方の速度をいう。

表 9 事故現場付近の高架橋及び橋りょう等の損傷状況

構造物名	損傷箇所	キロ程	損傷内容
第2田崎BL	T5 (熊本総合車両所方)	99k204m	ひび割れ等 (柱、ストッパ)
第2田崎BL	T6 (熊本総合車両所方)	99k266m	ひび割れ (柱、ストッパ)
防音壁	右側	99k325m	43mmずれ (熊本総合車両所方へ)
防音壁	左側	99k325m	53mmずれ (熊本総合車両所方へ)
防音壁	右側	99k444m	18mmずれ (熊本駅方へ)
防音壁	左側	99k444m	38mmずれ (熊本駅方へ)

(2) スラブ軌道

現場調査時には、枠型スラブ穴部の前面壁及び左右側面壁及び枠型スラブの側面に割損等の損傷が認められた。この損傷は、99k200m付近～99k450m付近において発生していたが、99k200m付近～99k407m付近の損傷が顕著であった。枠型スラブの損傷状況を図5に示す。

なお、軌道には目違いや角折れは発生していなかった。

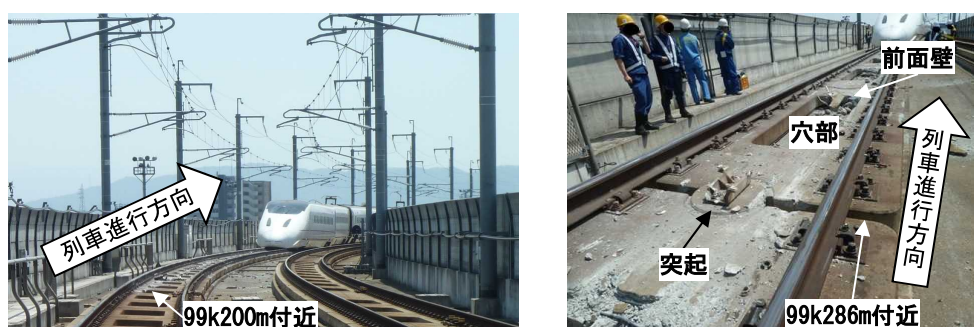


図5 枠型スラブの損傷状態

(3) レール締結装置

同社によると、下り線の99k154m～99k462m間のレール締結装置関連部品は、表10に示すような損傷状態であった。

表 10 事故現場付近のレール締結装置関連部品の損傷状況

		タイププレート	絶縁板	六角ボルト	板ばね
左レール	軌間外	273/497	169/497	543/ 994	363/ 497
	軌間内			347/ 994	425/ 497
右レール	軌間外	268/497	95/497	321/ 994	343/ 497
	軌間内			347/ 994	384/ 497
総 計		541/994	264/994	1558/3976	1515/1988

(注) 表中の数字は、損傷数/設置数を示す。

(4) 信号関係機器

同社によると、事故現場付近（99k125m～99k350m）の線路上にある信号関係機器は、表11に示すような損傷状況であった。

表11 事故現場付近の信号関係機器の損傷状況

設備名	機器名	名称	設置キロ程	損傷状態
代用保安装置	車軸検知子	DT1、DT2、DT3	99k179m	破壊
		DT4、DT5、DT6	99k199m	
列車情報処理装置	列番地上子1形	DN1	99k214m	破壊
		DN2	99k234m	
軌道回路	送着ボンド	下7TR、4RTS	99k246m	損傷
信号諸設備	位置補正用地上子	下7T-1	99k286m	破壊

- (注) ・車軸検知子 : ある区間における列車の進入/退出を検知するために、通過した輪軸の数をカウントする機器
- ・列番地上子 : 地上一車上間において列車番号ほかの情報を相互に通信する機器
 - ・送着ボンド : レールに溶着させてレールに信号電流を流すための機器
 - ・位置補正用地上子 : 走行中に発生する空転・滑走により生じる距離の誤差を補正する機器

(5) 電車線

同社によると、事故現場付近（99k316m～99k400m）のハンガーが損傷（外れ：10本、曲損：2本）していたとのことであった。

2.5.2 本件列車の車両の主な損傷及び痕跡の状況

本件列車の主な損傷状況を表12に示す。

表 1 2 本件列車の各車両における機器損傷状況

車両	損傷機器	損傷状況	車両	損傷機器	損傷状況
1 両目	先頭下部ふさぎ板（右側）	擦過痕	4 両目	車端ふさぎ板（前部）	曲損
	先頭下部構体	破損		(1, 2, 4位) 自動高さ調整装置調整棒	折損
	排障器	破損、落下		第(1, 3位) 軸歯車装置下部	擦過痕
	(1, 2位) 自動高さ調整装置調整棒	折損		(3位) 自動高さ調整装置高さ調整弁てこ	曲損
	第1 軸歯車装置（油面計含む）	破損、油漏れ		端部ふさぎ板取付ボルト	折損
	(2位) 主電動機下部	擦過痕		(4位) 主電動機下部	擦過痕
	(3, 4位) 自動高さ調整装置高さ調整弁てこ	曲損			
2 両目	車端ダンパ装置（右側）	破損	5 両目	(1, 3, 4位) 車体間ヨーダンパ	破損
	(3位) 車体間ヨーダンパ	破損		ほろ取付受金（前側）	曲損
	車端ふさぎ板（前部）	曲損		側ふさぎ板取付金	曲損
	側ふさぎ板取付金具（右側）	曲損		第1 軸軸箱（右側）	破損
	第1 軸軸箱（右側）	破損		(1, 2, 3, 4位) 自動高さ調整装置調整棒	折損
	(1, 2位) 自動高さ調整装置調整棒	折損		(1位) 主電動機配線	断線
	(2位) 自動高さ調整装置高さ調整弁締切コック	曲損		第1 軸歯車装置	破損
	第1 軸歯車装置	破損		(2位) 空気ばね（左側）	脱落
	(2位) 主電動機下部	擦過痕		(2位) 主電動機下部	擦過痕
	(3, 4位) 自動高さ調整装置高さ調整弁てこ	曲損			
	パンタグラフ	変形及び右側ホーン落失			
3 両目	ほろ取付受金（前側）	曲損	6 両目	車端ふさぎ板（前部）	曲損
	(1, 3位) 位自動高さ調整装置高さ調整弁てこ	曲損		斜めふさぎ板（前台車）	曲損
	(2, 4位) 位自動高さ調整装置調整棒	折損		前台車空気ばね（左側）	変形
	第2 軸歯車装置	破損		(2, 3, 4位) 自動高さ調整装置調整棒	折損
	第(1, 3) 軸歯車装置下部	擦過痕		側ふさぎ板（左側）	変形
	(4位) 主電動機下部	擦過痕及びカバー落失		第2 軸歯車装置	破損、油漏れ
	(3位) 車体間ヨーダンパ	破損		第2 軸軸ばね（左側）	落失
	水封装置	破損		第2 軸軸はり（左側）	外れ
	ふさぎ板取付金（汚物タンク部）	曲損		端部ふさぎ板	曲損
		床下ふさぎ板	破損		
		主変換装置下部ふさぎ板	破損		
		受電器部底面	変形		

損傷の多くは台車や床下機器（自動高さ調整装置、歯車装置下部、主電動機下部、ふさぎ板等）及び車体間ヨーダンパにおいて発生していた。また、5両目及び6両目において一部の空気ばねが損傷し、6両目第2軸左側の軸箱支持装置において、

取付ボルトの折損と軸はりの外れ及び軸ばねの落失が発生した。取付ボルトの破断面には金属疲労の痕跡であるビーチマーク等は認められなかった。



図6 軸箱支持装置の損傷状態（左：事故直後の状態、右：押さえ金と折損したボルト）

2.6 同社の主な大規模地震対策に関する情報

2.6.1 対震列車防護システム

対震列車防護システムは、大規模地震が発生した際に、走行中の新幹線列車等の速度を早期に低下させる目的で導入されたものである。同システムは、上記目的を達成するために、九州新幹線沿線に沿線地震検知点（12か所）及び九州内の海岸線に海岸地震検知点（6か所）を定めてそれぞれ地震計を設置し、伝搬速度の異なるP波とS波^{*15}の到達時刻に差があることを利用して、いずれかの地震検知点が大規模地震の到来を推定した場合に、電車線への電力供給を断ち、新幹線列車の非常ブレーキを動作させる機能を有している。

(1) システムの動作概要

上述した沿線地震検知点及び海岸地震検知点に設置される地震計システムのうち、地震の初期微動であるP波を検知して大規模地震の到来を推定し、運転制御判断を行った地震検知点は、施設内の変電設備に対してき電トリップ信号を送信する。

上記き電トリップ信号を受信した変電設備は上記地震検知点近傍の担当き電区域に電力を供給している変電所に向けて連絡遮断信号を送信し、同信号を受信した変電所はき電用しゃ断器を動作させて電車線への電力供給を遮断する。また、架線停電が発生すると、それを検知した地上側設備は緊急停止（02E）信号をレール（軌道回路）上に送信する。したがって、その軌道回路内に在線する列車は、その信号を受信するか、又は列車自身が架線電圧の低下による停止（02）信号を検知することにより、列車の非常ブレーキを動作させる。

*15 「S波」とは、P波に続いて地震計に記録される横波をいう。

(2) システムの動作状況

本件地震に対して運転制御判断を行ったのは、熊本車両基地SSの敷地内にある沿線地震検知点に設置された地震計であった。また、本件地震時に本件列車が走行していた付近の電車線に電力を供給していた変電所は新玉東SSであった。2.1.2.2の表3に示したように、き電トリップ信号を受けた熊本車両基地SSから新玉東SSに対して連絡遮断信号（連遮信号）が送信され、最終的に新玉東SSのしゃ断器13を動作させている。また、2.1.2.1の表2に示したように、本件列車はATC装置（受信部）において緊急停止（O2E）信号を受信し、非常ブレーキを動作させている。

（付図6 対震列車防護システムの概略図、付図9 対震列車防護システム用地震検知点の位置 参照）

2.6.2 脱線・逸脱防止装置

同社においては、地震による列車の脱線事故を極力防止するため、軌道上への脱線防止ガードの設置、さらに、脱線が発生した場合でも列車が線路から大きく外れて走行することを防止するため、車両への逸脱防止ストッパの設置がそれぞれ平成24年から進められている。脱線防止ガードは車輪背面と接触することにより、また、逸脱防止ストッパは脱線防止ガードと接触することにより、脱線及び逸脱を防止する。図7に脱線防止ガード及び逸脱防止ストッパの設置状態と接触時の状態を示す。同図は、説明を簡略にするために、台車枠に取り付けられた機器及び車両の床下機器等の記載を省略している。

なお、逸脱防止ストッパと脱線防止ガードの位置関係は、列車が脱線して線路から左右方向に最大限移動し、逸脱防止ストッパが脱線防止ガードに接触した場合、図7に示すように、輪軸が左右方向に48cm移動する。しかし、輪軸が42cm程度移動した段階で、車輪は枠型スラブ穴部に達する。

本事故発生当時、事故現場付近には、脱線防止ガードは設置されていなかった。同社によると、脱線防止ガードの設置対象区間は、設置目安（活断層文献^{*16}に確実度I^{*17}として掲載されている活断層と新幹線とが完全に交差する活断層で、地震が発生した場合に大きな揺れが想定される活断層近傍の高架橋、橋りょう区間を対象とする。）に基づいて計画されたが、事故現場付近はそれに該当する箇所ではないことから、脱線防止ガードを設置する計画はなかったとのことである。なお、博多駅～鹿児島中央駅間の軌道延長約577.8kmの区間中、本事故発生時に脱線防止ガードが設置されていた区間は、延長約48kmであった。

*16 活断層研究会編、「新編 日本の活断層 分布図と資料」、東京大学出版会、1991年

*17 ここでいう「確実度I」とは、活断層であることが確実なものをいう。

一方、逸脱防止ストッパについては、本事故発生当時、同社の新幹線電車20編成中13編成に装備されていた。しかし、本件列車の車両には平成28年7月に装備する計画はあったものの、事故発生時には装備されていなかった。

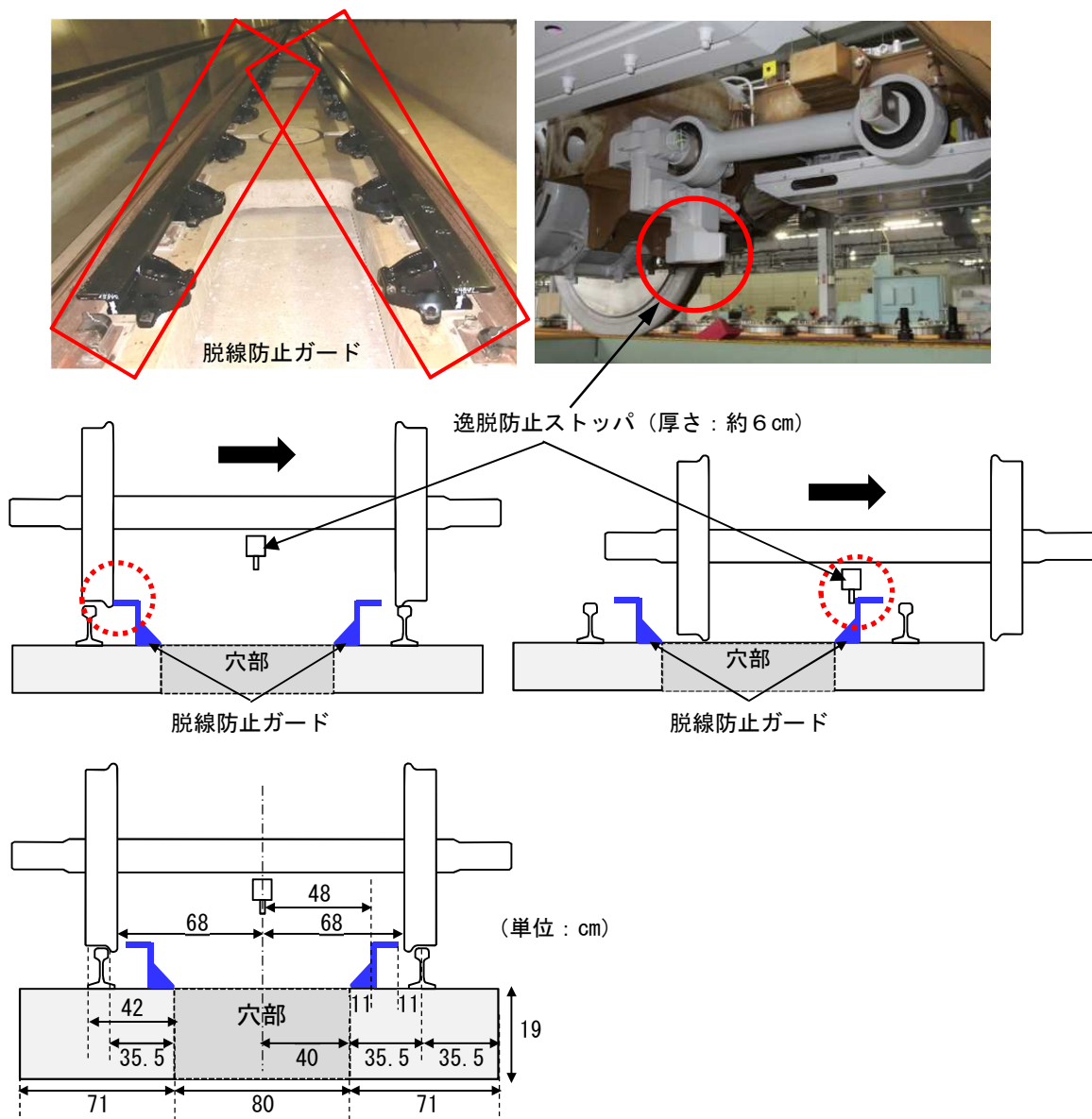


図7 脱線防止ガード・逸脱防止ストッパ及び枠型スラブの左右方向の位置関係

2.7 乗務員等に関する情報

本件運転士 男性 30歳

新幹線電気車運転免許

平成26年10月21日

甲種電気車運転免許

平成23年1月28日

本件運転士の健康診断結果及び運転適性検査結果には、特に問題は認められなかった。

2.8 気象に関する情報

本件列車が停止していた位置から北北東約800mにある気象庁熊本地方気象台の観測記録によると、本事故発生約12時間前から発生時までの事故現場付近の天気はおおむね晴天であった。また、本事故発生前の21時の風向、風速は北東の風1.0m/s、気温は18.7℃、湿度は45%であった。

2.9 地震に関する情報

2.9.1 本件地震等の概要

気象庁が公表している資料によると、平成28年4月14日21時26分34.4秒に、北緯32度44.5分、東経130度48.5分、深さ11kmの地点を震源とする、マグニチュード6.5、熊本県熊本地方（益城町）において最大震度7の揺れが観測された本件地震が発生した。本件地震は地殻内で発生し、発震機構^{*18}が北北西－南南東方向に張力軸を持つ横ずれ断層型とのことである。

その後、震度6弱以上を観測した地震が断続的に発生し、気象庁が公表している資料によると、本件地震発生約28時間後である平成28年4月16日1時25分5.4秒に、北緯32度45.2分、東経130度45.7分、深さ12kmの地点を震源とする、マグニチュード7.3、熊本県熊本地方（益城町及び西原村）において最大震度7の揺れが観測された地震（以下「本震」という。）が発生した。この地震も地殻内で発生し、発震機構は南北方向に張力軸を持つ横ずれ断層型とのことである。この地震により、同社の豊肥線において列車脱線事故^{*19}が発生した。

気象庁が公表している震度データベース資料によると、平成28年熊本地震の余震のうち、熊本県熊本地方を震源とするものについては、本件地震の発生から平成28年度末までの間に4,000回以上発生している。

また、本件地震発生前1か月間に熊本県内で最大震度1以上が観測された地震は5回で、最大震度2以上が観測された地震は平成28年4月3日14時22分ごろに熊本県熊本地方において最大震度2が観測された地震の1回のみであった。

2.9.2 本件地震の震央と事故現場との位置関係

図8は、気象庁発表の本件地震の推計震度分布図上に九州新幹線の路線図を重ねたものである。これによると、推計震度が6強以上の地域は限られた地域であり、事故現場付近はおおよそ震度6弱と震度6強の境界付近であった。また、事故現場

*18 「発震機構」とは、地震を起こした断層が地下でどのような状態なのか、及びその断層にどのような力が作用したのかを示すものである。

*19 「鉄道事故調査報告書（RA2016-8-Ⅲ、九州旅客鉄道株式会社 豊肥線 赤水駅構内 列車脱線事故）」、運輸安全委員会、平成28年11月24日公表

は、震央*20からおおよそ西北西に約12km離れた位置であった。

なお、震源付近には日奈久断層帯が存在し、活断層文献において布田川—日奈久断層系断層が示されており、その端部は九州新幹線の高架橋の直下には至っていないものの、事故現場から十数kmの位置であった。

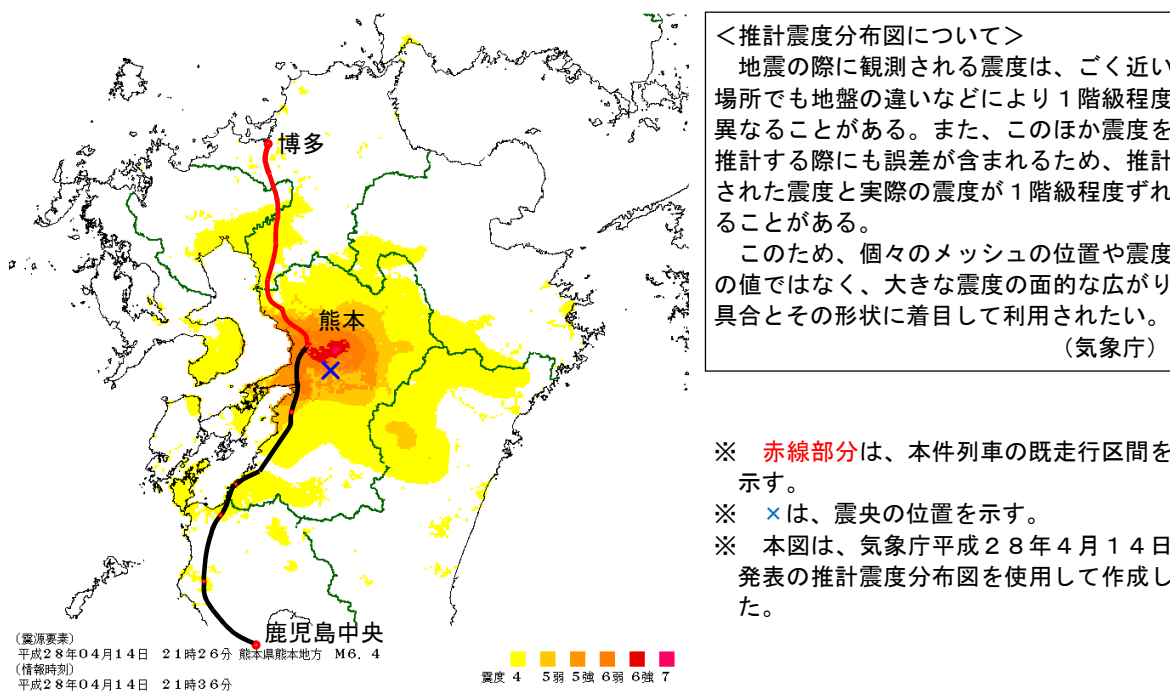


図8 本件地震の推計震度分布図及び九州新幹線の路線図

2.9.3 事故現場付近の地震観測点における地震計の記録

本事故の調査に際し、事故現場付近の地震観測点数箇所の観測記録を収集した。その中で事故現場に最も近い地震観測点は、図9に示すように震央からおおよそ西北西方向約12kmの地点に位置する「気象庁地震観測点（熊本西区春日）」（以下「気象庁（熊本西区春日）」という。）である。なお、同観測点からおおよそ南南西方向約550mの地点が事故現場であった。

気象庁が公表している気象庁（熊本西区春日）の観測記録によると、本件地震時の最大加速度は、平成28年4月14日21時26分41秒ごろに記録した南北方向約659gal*21、東西方向約433gal、鉛直方向約262galであり、3成分合成は737galであった。

(付図10 気象庁（熊本西区春日）の本件地震の観測記録 参照)

*20 「震央」とは、地震の震源の真上に当たる地表面位置をいう。

*21 「gal」とは、主に地震の分野で用いられている加速度の単位である。(1gal: 1cm/s²)



図9 震央と事故現場及び気象庁（熊本西区春日）の位置

2.10 脱線シミュレーションに関する情報

2.10.1 本件地震及び本震並びに余震の観測

脱線シミュレーションの実施に際し、本事故発生当時の事故現場付近の地表面地震動を推定することから、同社は臨時の常時微動^{*22}観測及び地震観測（以下「余震観測」という。）を行った。観測は、付図11に示すように、事故現場周辺（地表面上：R0G～R5G、第2田崎B L上：R1S、R4S、R6S）に簡易地震計を設置して行われた。また、本件地震の観測記録は、事故現場に近い気象庁（熊本西区春日）の観測記録を使用した。3.3に後述する、事故現場付近の地表面推定地震動を気象庁（熊本西区春日）の地震動との伝達関数を介して推定する手法（以下「伝達関数推定手法」という。）の選定を行う際に使用した地震記録一覧を表13に示す。

表13 地震動の伝達関数推定手法の選定に使用した地震記録一覧

発震日時		緯度(北緯)	経度(東経)	深さ(km)	規模(Mj)	記録の有無			備考
期日	時刻					脱線地点	気象庁(熊本西区春日)	在来線熊本駅	
4月14日	21時26分34秒	32度44.5分	130度48.5分	11	6.5	—	○	○	本件地震
4月16日	1時25分05秒	32度45.2分	130度45.7分	12	7.3	○	○	○	本震
	1時44分07秒	32度45.1分	130度45.6分	15	5.4	○	—	○	余震1
	1時45分55秒	32度51.7分	130度53.9分	11	5.9	○	○	○	余震2
	9時48分33秒	32度50.8分	130度50.1分	16	5.4	○	○	—	余震3

(注) 在来線熊本駅は、地震観測点である同社（在来線熊本駅）を指す。

*22 「常時微動」とは、地震が発生していない状態における微小な地盤振動をいう。この常時微動を高感度の地震計で観測することにより、サイトの増幅特性の1次のピークに関する情報を得ることが可能である。

(付図 1 1 本震及び余震の観測位置 参照)

2.10.2 脱線シミュレーション

脱線シミュレーションは、‘地震動の推定に使用する地震観測地点’（以下「基準地点」という。）及び事故現場（以下、2.10.2及び3.3において「評価地点」という。）の構造物直下における、余震観測記録及び土質調査データを用いて評価地点の地表面地震動を求め、これを構造物への入力地震動とした。次に、構造物の3次元フレームモデルを用いて動的非線形応答解析を行い、構造物天端^{てんば}の軌道面での地震動を推定した。推定された地震動を走行する車両直下の軌道面に入力し、構造物上を走行する車両の動的挙動を解析した。詳細な手順を2.10.2.1～2.10.2.3に記述する。

2.10.2.1 事故現場付近の地表面地震動の推定

基準地点については、気象庁（熊本西区春日）及び‘同社地震観測点（在来線熊本駅）’（以下「同社（在来線熊本駅）」という。）を検討した。選定に際しては、評価地点の近傍であること、土質調査データが存在すること、本震及び余震の観測記録があること、観測記録に液状化等の特異な地盤震動特性が含まれないこと等の条件を満たしている必要があるが、本件地震の場合、2.9.3に記述したように、気象庁（熊本西区春日）の位置は、評価地点からの距離が約550mと最も近い上、近傍の土質調査データが存在している。

一方、同社（在来線熊本駅）は、評価地点からの距離が約700mと、気象庁（熊本西区春日）よりも遠い上、近傍での土質調査データが存在しない。したがって、基準地点として気象庁（熊本西区春日）を選定した。

基準地点において観測された地震動の南北方向及び東西方向の成分は、評価地点の線路方向と線路直角方向の成分に座標変換した。

また、基準地点の地表面地震動から評価地点の構造物直下の地表面地震動を推定するに際し、計算手法を表14に示す手法①と手法②から選択した。詳細な検討内容は3.3に後述するが、検討の結果、手法①を選定し、図10に示す事故現場付近の地表面地震動を推定した。この地表面地震動推定波は、最大加速度が398galで、0.8Hz付近及び1.3Hz付近の振動数成分を多く含む波であった。

なお、大規模地震（新潟県中越地震、東北地方太平洋沖地震）を原因とする過去2回の新幹線列車脱線事故^{*23、*24}の調査の際は、地震動の伝達関数の計算は一般的

*23 「鉄道事故調査報告書（RA2007-8-I、東日本旅客鉄道株式会社 上越新幹線 浦佐駅～長岡駅間 列車脱線事故）」、航空・鉄道事故調査委員会（現：運輸安全委員会）、平成19年10月26日公表

*24 「鉄道事故調査報告書（RA2013-1-I、東日本旅客鉄道株式会社 東北新幹線 仙台駅構内 列車脱線事故）」、運輸安全委員会、平成25年2月22日公表

な手法である手法②を適用していた。今回の地震動の伝達関数の計算は、震源から近い事故現場付近の地震観測点において、地表面伝達関数の算出に適したおおむね震度5以上という本件地震と同じような大きさの地震を含む多数の余震等の観測記録を取得していることから、3.3に後述するとおり、手法②よりも推定誤差が小さくなると期待できる手法①を選択した。

表14 検討した地震動の伝達関数推定手法

手法	内 容
①	基準地点と解析対象地点の伝達関数を算出し、基準地点の基準波に伝達関数を乗じることで、解析対象地点の波形を算出する手法
②	基準地点と解析対象地点の波形を基盤面まで引き戻して両地点間の伝達関数を算出し、基盤面まで引き戻した基準波に伝達関数を乗じ、対象地点の地盤モデルに入力して動的解析を行い、解析対象地点の波形を算出する手法

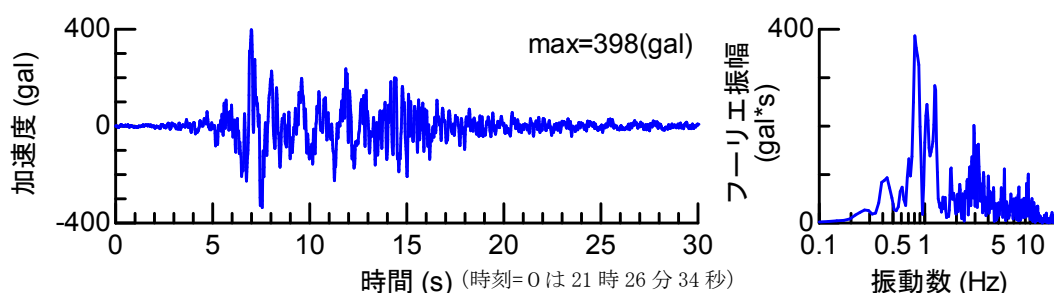


図10 評価地点における線路直角方向の地表面地震動推定波

2.10.2.2 構造物群の動的応答解析

評価地点の構造物群の動的応答解析は次の手順によって行った。

(1) 表層地盤のモデル化

2.10.1に記述したように、同社は脱線痕開始地点近傍における余震観測等を行っていることから、この観測記録の提供を受け、同地点における地盤条件を次の方針に従って設定した。設定結果を付図12に示す。

脱線痕開始地点近傍における地盤条件は、ボーリング調査位置のN値^{*25}及び土質区分を各種地盤調査結果に基づいて設定した。次に、ボーリング調査位置間の地層境界は直線補間によって表現した。また、N値の空間的な変化についてもボーリング調査データを線形補間することにより設定し、せん断

*25 「N値」とは、標準貫入試験において決められた質量のハンマを自由落下させて、標準貫入試験用サンプリングを規定量地中に貫入させるのに要する打撃回数のことをいい、土の硬軟、締まり具合の相対的な値を表すものである。鉄道の耐震設計上、砂質土でN値50以上、粘性土で30以上の連続した地層である場合、その地層の上面を耐震設計上の基盤面と設定することができる。

弾性波速度及び単位体積重量等の情報はN値から資料*26に従って設定した。

(付図12 構造物位置で設定した地盤モデル(抜粋) 参照)

(2) 構造物群のモデル化

同社及び鉄道・運輸機構から提供を受けた、設計計算書及び各種設計標準並びに図面を参考に、解析対象範囲内にある構造物(ラーメン高架橋、桁、支承部等)ごとに単体モデルを作成し、連結させることで構造物群モデルを構築した。詳細は次のとおりである。

① 解析対象の構造物

解析対象範囲は、脱線痕開始地点である第2田崎B LのR4の起点端を中心に、起点方は第2田崎架道橋(以下「第2田崎B v」という。)のP2、終点方は坪井川BのP2までの桁及び支承部を含めた構造物群とし、それを3次元フレームモデルによりモデル化した。

(付図13 構造物群モデル 参照)

② 構造物群モデル

構造物群のモデル化に際し、以下を基本とした。

a 基本方針

対象構造物ごとの設計計算書、鉄道構造物等設計標準・同解説【耐震設計】、同【コンクリート構造物】、同【基礎構造物】、図面等を参考とする。また、鉄筋コンクリート部材はM- ϕ モデル*27として要素分割を行い、非線形特性についてはトリリニア型*28とする。

b 柱、梁のモデル化(ラーメン高架橋、壁式橋脚)

ラーメン高架橋及び壁式橋脚の共通事項として、安全係数を1.0、材料修正係数を1.2(鉄筋の実強度相当で考慮)とした。

ラーメン高架橋の柱の剛性は、地震発生までにひび割れ程度の軽微な損傷は生じていると想定し、降伏点相当の等価剛性を設定し、スラブと上層梁のT型断面としてモデル化した。

壁式橋脚である坪井川BのP2の構造物の非線形特性は、坪井川BのP1橋脚の諸元を準用した。

c 基礎、周辺地盤のモデル化(ラーメン高架橋、壁式橋脚)

ラーメン高架橋及び壁式橋脚のモデル化の共通方針として、水平抵抗、周面抵抗、杭先端抵抗のばねを設定し、杭の特性値 β 及び杭の軸力変動

*26 国土交通省 鉄道局監修、公益財団法人鉄道総合技術研究所、「鉄道構造物等設計標準・同解説【耐震設計】」、丸善出版株式会社、2012年

*27 「M- ϕ モデル」とは、部材の復元力モデルの定義方法である。断面に発生する曲げモーメントMと曲率 ϕ の関係で表現される。

*28 「トリリニア型」とは、部材の骨格曲線を表現するモデルの一種であり、剛性の変化点(折れ点)を二つ有する3本の直線で、部材の非線形性を表すものである。

の影響を考慮した。また、地盤抵抗の上限値は $\alpha_f = 2.0$ とした。

ラーメン高架橋のフーチング^{*29}の前面抵抗ばね及び地中梁の前面抵抗ばねには、前後及び左右の影響を考慮して剛性を1/2倍とした。また、壁式橋脚の杭の前面抵抗ばねの初期剛性は、表15に示す群杭の補正係数を使用した。

表15 群杭の補正係数（壁式橋脚）

	線路直角方向	線路方向
第2田崎B V P 2 橋脚	0.49	0.56
坪井川B P 1 橋脚	0.41	0.41
坪井川B P 2 橋脚	0.41	0.41

(付図13 構造物群モデル 参照)

③ 支承部と桁のモデル化

鋼棒ストッパの非線形特性については、図面を参照した上で、文献^{*30、*31}の知見を適用できると判断して設定した。ゴム支承については、ゴムパッドのせん断剛性及びゴムパッドとコンクリートの摩擦を考慮した。桁については、全て剛な梁とした。

(付図14 支承部及び桁のモデル化 参照)

④ 減衰特性のモデル化

減衰特性はレーリー減衰^{*32}を用い、線路直角方向の1次モードの減衰定数^{*33}2.2%と同程度になり、1~10Hz程度まで振動数による変動が小さいように設定した。

(3) 余震観測記録を用いたモデルの妥当性検証

① 地盤モデル

2.10.2.2(1)で設定した地盤物性値及び地盤モデルの妥当性を、H/Vスペクトル比^{*34}によって確認した。その結果、3.2.4の図22に示すように、H/Vスペクトル比のピーク振動数が理論伝達関数のピーク振動数と

*29 「フーチング」とは、構造物の柱、受台、壁等を受け、基礎あるいは地盤へ荷重を伝えるために設けられた版状の構造物をいう。

*30 原田和洋、曾我部正道、谷村幸裕、金森真、柳博文、黒田聡共著、「支承構造の影響を考慮した構造物群の地震時挙動の解析」、第14回鉄道技術連合シンポジウム、2007年、pp.201-204

*31 原田和洋、曾我部正道、谷村幸裕、松橋宏治共著、「連続する鉄道高架橋群の地震時挙動（コンクリート工学年次論文集第31巻2号）」、2009年、pp.1-6

*32 「レーリー減衰」とは、構造物等の振動解析において、質量と剛性の双方に関わる減衰を考慮したものである。

*33 「減衰定数」とは、振動エネルギーが構造物の内部で熱等によって消費されること、構造物系の外部へ逸散してゆくこと等によって起こる減衰効果を表す指標のことをいう。

*34 「H/Vスペクトル比」とは、水平方向の振動と鉛直方向の振動のフーリエスペクトルの比をいう。

おおむね一致していることから、設定した地盤モデルの妥当性が確認された。

② 構造物群モデル

固有値解析によって、構造物群モデルの線路直角方向の1次モード及び固有振動数を得た。固有振動数は1.34Hzであった。

また、地表面に対する第2田崎BL（R4高架橋上）の振動について、周波数応答解析によって得られたスペクトル比と余震観測記録から得られたスペクトル比の比較を図11に示す。

比較の結果、線路直角方向の1次モードに対応するスペクトル比のピーク値とそのときの振動数について、解析結果と観測結果がおおむね一致しており、本構造物群モデルの妥当性が確認された。

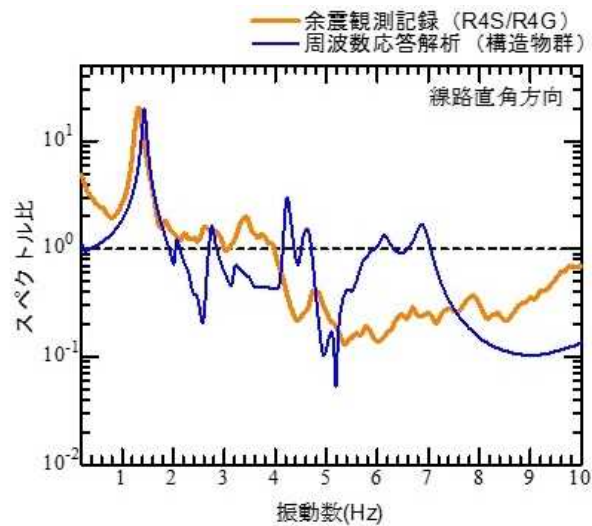


図 1 1 余震観測記録と周波数応答解析結果の比較

(4) 非線形動的解析による構造物群の応答解析

構造物群モデルの線路直角方向に、2.10.2.1の図10に示した地表面地震動推定波を入力して非線形動的解析を行った。

解析結果の波形の算出地点（7か所）を図12に示す。また、各算出地点における応答波形の一例を図13に、各算出地点における応答解析結果（応答の加速度及び応答速度の最大値）一覧を表16に示す。表16に示したように、加速度の最大値は②第2田崎BL（R2終点方端部）以外で地表面の1.8倍以上となり、速度の最大値は②第2田崎BL及び⑦坪井川B以外で100kine^{*35}より大きくなった。

*35 「kine」とは、主に地震の分野で用いられている速度の単位である。（1kine：1cm/s）

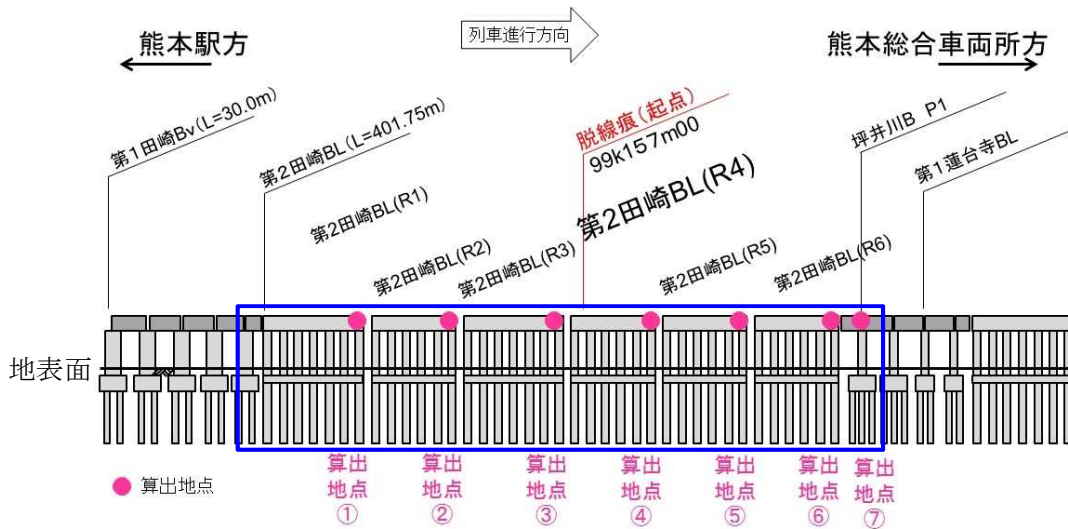


図 1 2 解析対象範囲及び地震動算出地点

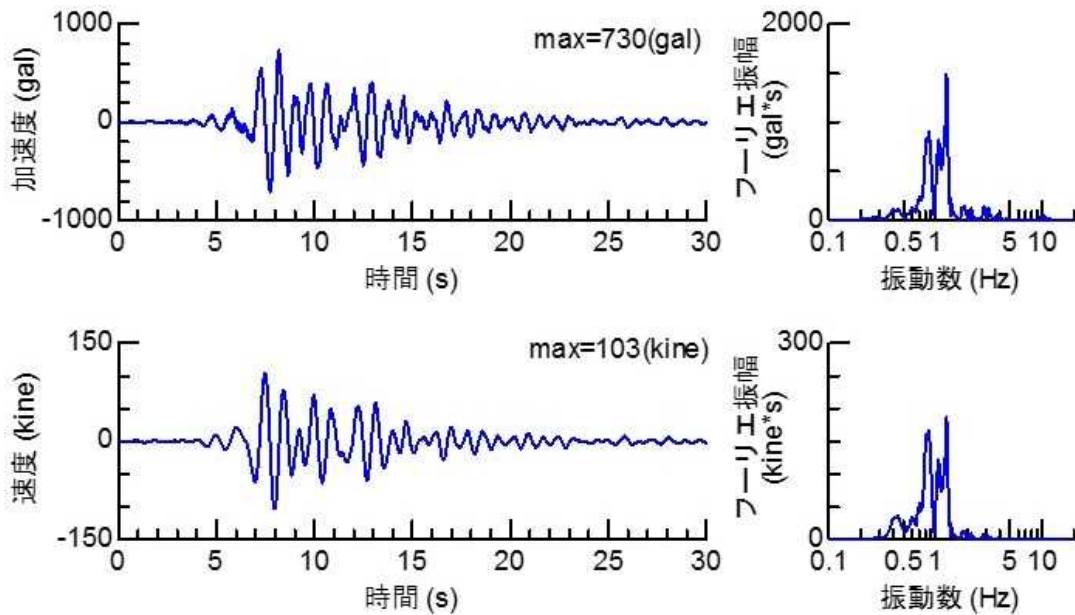


図 1 3 構造物群の応答波形例 (R 4 終点方端部 線路直角方向)

表 1 6 算出地点における応答解析結果一覧

算出地点	絶対加速度最大値 (gal)	絶対速度最大値 (kine)
①第 2 田崎 B L : R 1 終点方端部	861	110
②第 2 田崎 B L : R 2 終点方端部	542	87
③第 2 田崎 B L : R 3 終点方端部	972	115
④第 2 田崎 B L : R 4 終点方端部	730	103
⑤第 2 田崎 B L : R 5 終点方端部	757	114
⑥第 2 田崎 B L : R 6 終点方端部	794	108
⑦坪井川 B : P 1 橋脚調整桁上	940	83

2.10.2.3 車両の挙動解析

車両運動シミュレータ（VDS^{*36}）を使用して、2.10.2.2(4)に記述した本件地震の構造物天端の応答に対する800系新幹線電車（6両編成）の車両挙動を解析した。

(1) 車両モデル

図14に示すように車両をモデル化した。概要は次のとおりである。

- ① 車体1個、台車枠2個、輪軸4個については各6自由度、各車輪下のレール8個については各2自由度とし、合計58自由度のモデルとした。
 - ② 対象車両は800系新幹線電車6両であるが、車両間の相互作用は小さいものとみなし、各号車をそれぞれ一車両モデルとしてモデル化した。
 - ③ 一車両モデルの車体—台車枠間と台車枠—輪軸間の結合要素は、ばね・ダンパ要素として、まくらばね、軸ばね、左右動ストッパ、軸箱上下動ストッパ、空気ばね異常上昇止め、左右動ダンパ及びヨーダンパを配置し、まくらばねの特性については、公益財団法人鉄道総合技術研究所（以下「鉄道総研」という。）が別に実施した、空気ばね特性同定試験の結果を使用した。
 - ④ 車体重心の車体中心からのずれを考慮した。
 - ⑤ 車輪・レール間作用力にはKalker理論^{*37}に基づいたモデルを使用した。
- 座標系は、列車進行方向を x 軸、左右方向を y 軸、上下方向を z 軸とし、各々前向き、左向き及び上向きを正とした。

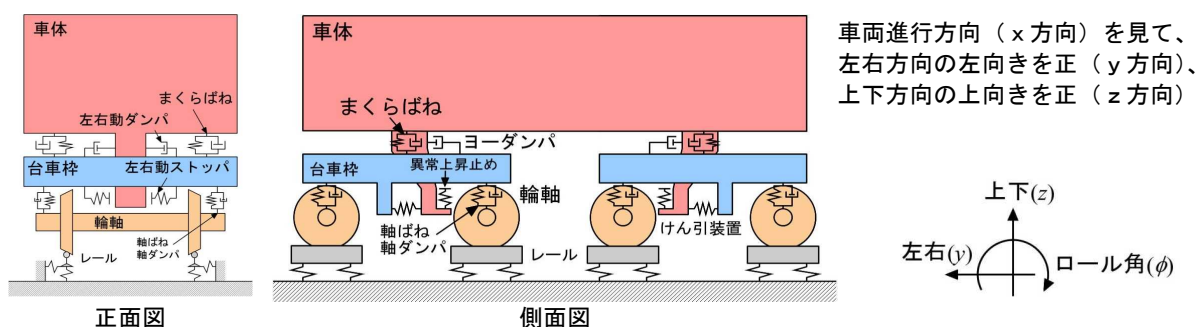


図14 シミュレーションで使用した一車両モデル

(2) 軌道と振動入力モデル

軌道は車輪直下の各レールが枠型スラブに対して左右及び上下の方向に弾

*36 「VDS」とは、鉄道総研のオリジナルソフトウェア「Vehicle Dynamics Simulator」の略であり、計算機上で車両の走行を再現するシミュレータである。地震により大きく振動する軌道上での車両の挙動解析に使用される。(参考文献：鉄道総研報告 Vol.28 No.12、2014年)

*37 「Kalker理論」とは、ころがり接触状態にあるレール—車輪間の接線力を求める理論であり、これに基づく計算アルゴリズムが車両運動解析に用いられている。

性支持されているモデルとし、地震動は各車輪を支えるレール下のスラブ面変位として、レールに対し、左右及び上下方向の2方向の並進変位（図15参照）と構造物のロッキングにより生じるロール角変位（ x 軸回りの回転角変位）を入力する。軌道面のロール角変位は、左右のレールをロール角 ϕ 相当分上下逆相に変位させ、かつ、レール自体もロール角 ϕ だけ傾けることで与えた（図16参照）。

地震動入力の場合も座標系は、左右方向は左向きを正、上下方向は上向きを正、ロール方向は左レールが上昇する方向を正とした。

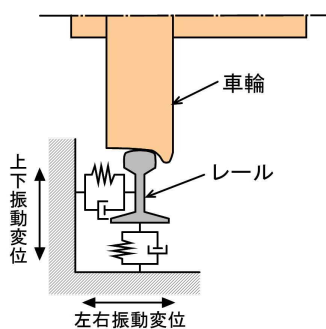


図15 軌道モデル及び地震動の入力方法

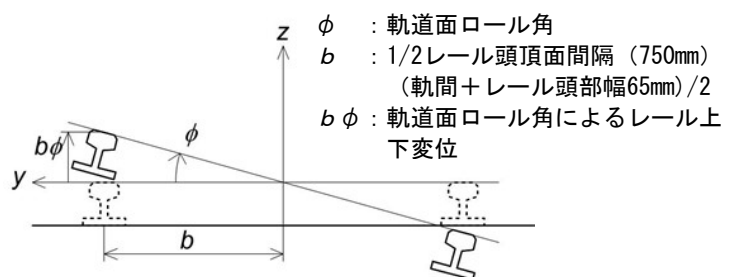


図16 軌道面ロール振動の入力方法

(3) 車両条件

車両条件については、同社から提供された800系新幹線電車の車両諸元、図面及び実測重量に従って設定した。脱線時の走行速度は、運転状況記録装置の記録を参考にして78km/hとした。

(4) 軌道条件及び車両の走行位置

軌道条件は事故現場付近の線形を基に設定した。軌道条件は、2.4.1.3(2)に記述したように、軌道変位の値が小さかったことから、本検討においては、軌道変位はないものとして扱った。車両の走行位置については、平成28年4月14日21時26分34秒当時、1両目第1軸が99k089mを走行していたとみなし、各車両の位置を算出した。

(5) 脱線判定

本シミュレーションでは、図17に示すように、左右いずれかの車輪のレールに対する相対左右変位が中正位置±70mmに達した時点で脱線と判定し、その時点でシミュレーション解析を終了した。

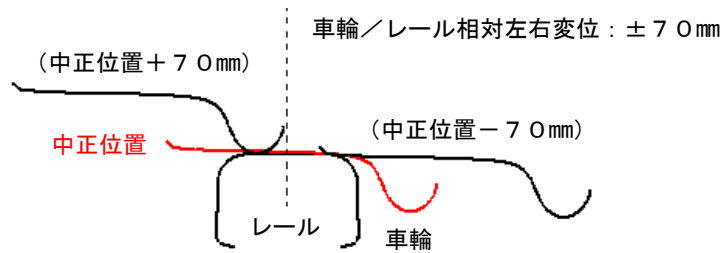


図 1 7 脱線判定基準

(6) 入力される軌道面振動

2.10.2.2(4)に示した非線形動的解析結果（算出地点7か所）から、列車の走行により変化する各軸位置（キロ程）に応じた軌道面の変位（左右方向、上下方向、ロール方向）を線形補間によって求めた。上下方向については、構造物のロッキングに伴う振動変位に地表面の上下振動を重畳させた。

各軸の直下における入力軌道面振動について、左右方向及びロール方向並びに上下方向の時刻歴波形を図 1 8 に、左右方向及びロール方向のフーリエ振幅を図 1 9 に示す。図 1 9 から、軌道面振動のフーリエ振幅は、振動数 0.8 Hz 付近及び構造物の固有振動数である 1.3 Hz 付近にピークが見られ、最も大きなピークは、左右方向の場合は 0.8 Hz 付近、ロール方向の場合は 1.3 Hz 付近にあることが分かる。

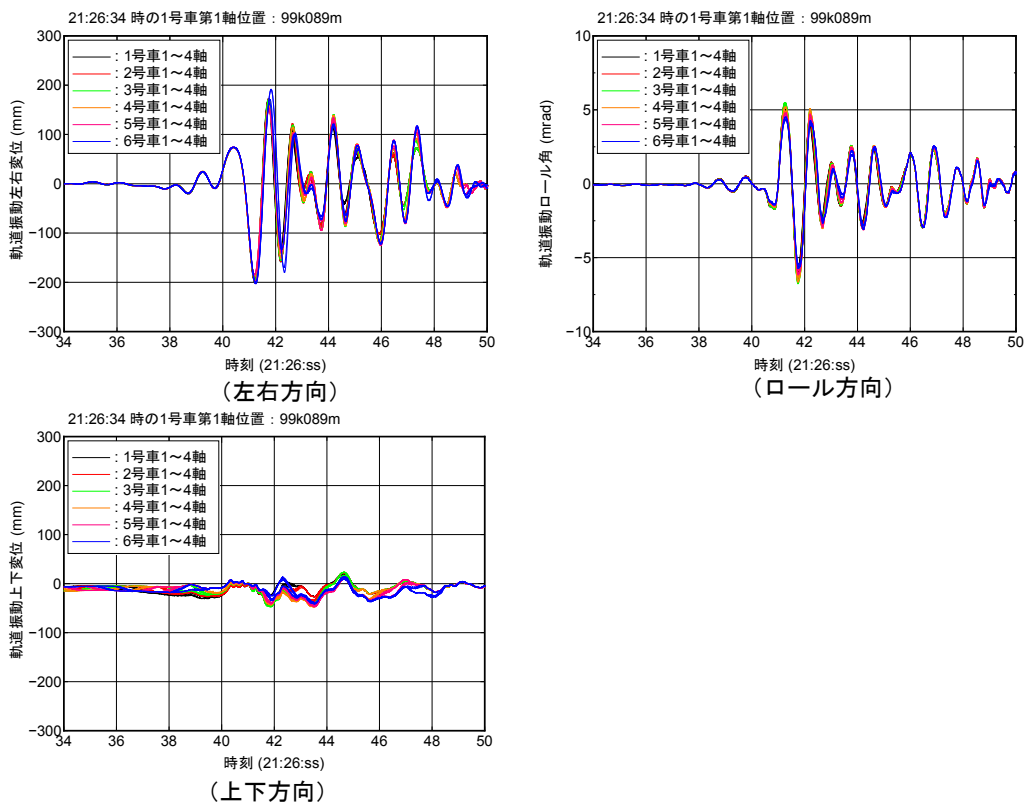


図 1 8 各軸直下の入力軌道面振動

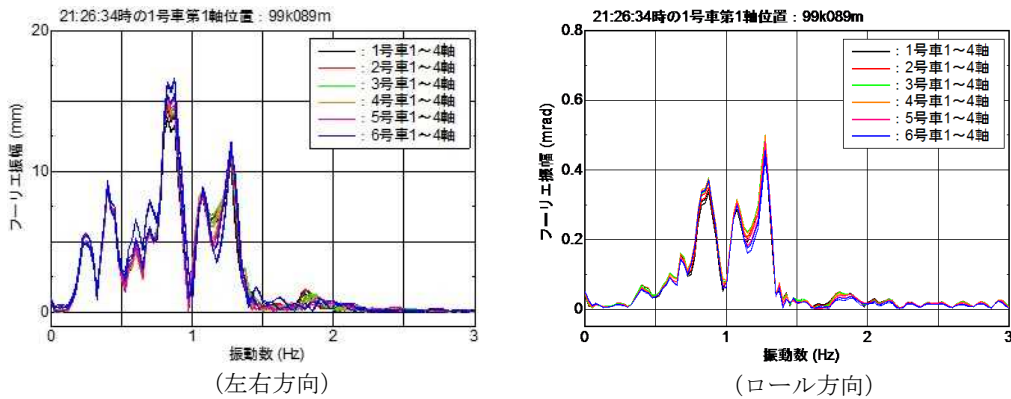


図 19 各軸直下の入力軌道面振動フーリエ振幅

(7) 解析結果

① 解析結果の概略

解析結果一覧を表 1 7 に示す。これによると、1、2、3、6 両目において脱線が発生し、脱線時刻はいずれも 21 時 26 分 43 秒～同 44 秒であった。脱線軸は 4 本であったが、車輪がレール上まで上昇していた軸がほかに 4 本あった。脱線方向は左右に分散しており、列車の中ほどの車両では左側に、列車の先頭及び最後尾の車両では右側に脱線していた。また、全ての車両において、車輪上昇量の最大値は 30 mm (フランジ高さ) 以上であった。

また、1 両目及び 3 両目の挙動解析結果を付図 1 5 及び付図 1 6 に示す。これによると、脱線は、事故現場に左右方向の大きな振動が到達して 1～2 周期揺れる間に発生した。

表 1 7 車両の挙動解析結果一覧

車両	脱線／非脱線	脱線時刻 (21時26分)	脱線軸	脱線方向	レール-車輪相 対左右変位の最大 値	車輪上昇量 の最大値	横圧 最大値
1 両目	脱線	43秒29	第 4 軸 (第 2 軸)	右	-70mm	38.4mm	156kN
2 両目	脱線	43秒76	第 1 軸 (第 2 軸)	左	70mm	47.1mm	146kN
3 両目	脱線	43秒79	第 1 軸 (第 2 軸)	左	70mm	54.8mm	145kN
4 両目	非脱線	—	—	—	16.2mm	41.2mm	148kN
5 両目	非脱線	—	—	—	-16.1mm	33.2mm	146kN
6 両目	脱線	43秒34	第 2 軸 (第 1 軸)	右	-70mm	67.8mm	169kN

(注) 脱線欄の括弧書きは、脱線時に車輪フランジがレール上に乗っていた軸を示す。

(付図 1 5 車両挙動解析結果 (1 両目)、付図 1 6 車両挙動解析結果 (3 両目) 参照)

② 車両姿勢の推移

進行方向右側に脱線した場合の例として、1両目の脱線発生時の約0.5秒前から脱線時までの車両姿勢を付図17に、また、進行方向左側に脱線した場合の例として、3両目の脱線発生時の約0.5秒前から脱線発生時までの車両姿勢を付図18に示す。いずれの図においても、車両姿勢は時間の経過につれて細破線→細実線→太実線のように推移している。

(付図17 脱線直前の車両姿勢の推移(1両目)、付図18 脱線直前の車両姿勢の推移(3両目) 参照)

③ 脱線発生時の本件列車の走行位置

解析結果から、本件列車の走行位置と脱線発生時の車両及び脱線軸の位置を図20に示す。脱線痕開始地点(99k157m付近)では、進行左側に脱線するタイミング(21時26分43秒76~同秒79)に6両目の後台車が走行していた結果となった。

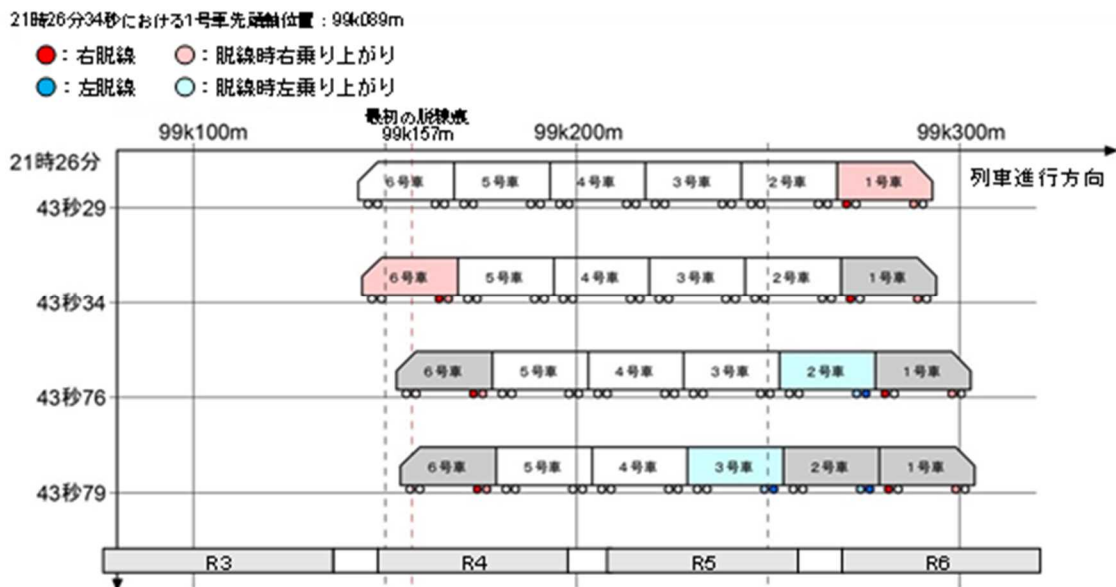


図20 脱線発生時の車両及び脱線軸の位置

2.10.2.4 脱線防止ガードの設置を仮定した場合の車両の挙動解析

事故現場周辺に脱線防止ガードが設置されていたものと仮定し(図21参照)、その場合の車両の挙動を解析した。結果の一覧は表18に示すとおりであり、脱線防止ガードがなかった場合に脱線が発生した1、2、3、6両目において、レール車輪相対左右変位の最大値は50mmを超え、車輪が脱線防止ガードに当たって脱線に至らない結果となった。また、車輪上昇量の最大値は、全ての車両において30mm(フランジ高さ)以上であった。

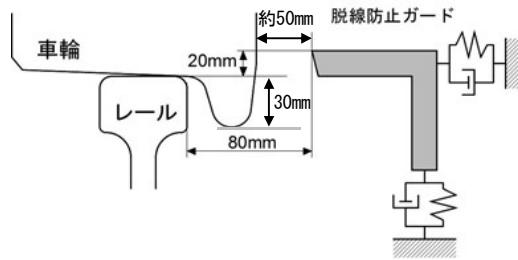


図 2 1 脱線防止ガードモデル

表 1 8 脱線防止ガードの設置を仮定した場合の車両挙動の解析結果一覧

車両	脱線／ 非脱線	脱線防止ガード (接触／非接触)	レールー車輪相對 左右変位の最大値	車輪上昇量の 最大値	横圧最大値
1 両目	非脱線	接触	-69.3mm	58.2mm	156kN
2 両目	非脱線	接触	50.6mm	47.1mm	146kN
3 両目	非脱線	接触	50.6mm	54.8mm	145kN
4 両目	非脱線	非接触	16.2mm	41.2mm	148kN
5 両目	非脱線	非接触	-16.1mm	33.2mm	146kN
6 両目	非脱線	接触	-50.2mm	67.8mm	179kN

(付図 1 9 車両挙動 (脱線防止ガード有り) 解析結果 (1 両目)、付図 2 0 車両挙動 (脱線防止ガード有り) 解析結果 (3 両目) 参照)

2. 1 1 事故現場付近を走行中の他の新幹線列車の情報

同社によると、本件地震の発生時に本事故現場付近を走行していた新幹線列車は表 1 9 のとおりであった。本件列車以外のいずれの列車も対震列車防護システムによって非常ブレーキが動作して停止し、脱線は発生しなかった。また、R 1 編成と U 0 0 8 編成は脱線防止ガードが設置されていた区間内を走行していたが、脱線防止ガードに車輪が接触した痕跡は確認できなかったとのことである。

表 1 9 事故現場付近を走行中の新幹線列車の停止位置

上/下別	列車番号	編成	列車先頭位置 (km)	非常ブレーキ初速 (km/h)	記事
上り	5350A	R1	76.751	117	5352A列車の先行列車
下り	5349A	U008	77.293	99	本件列車の後続列車
下り	5347A	U005	99.461	79	本件列車
下り	609A	R3	196.1	203	本件列車の先行列車
上り	5352A	R9	172.711	0	5350A列車の後続列車

(注) U編成：6両、R編成：8両

2.12 その他の情報

2.12.1 本事故発生後の復旧作業の状況

脱線復旧作業は、平成28年4月18日から始まり、同23日までに載線を完了した。本件地震発生後の九州新幹線は、同20日に新水俣駅～鹿児島中央駅間、同23日に博多駅～熊本駅間、同27日に熊本駅～新水俣駅間において、徐行規制を設けて運転を再開した。

2.12.2 過去の大規模地震による新幹線列車脱線事故

新幹線列車脱線事故が発生した過去2回の大規模地震と本件地震の比較情報を表20に、その際に発生した過去2回の新幹線列車脱線事故と本事故の比較情報を表21に示す。

本件地震は、新潟県中越地震と同様な内陸地震であると考えられ、震源深さ及び震央からの距離も約10kmとほぼ同程度であった。一方、東北地方太平洋沖地震は海溝型地震であり、震源深さは二十数km、震央からの距離は約170kmであった。

地震発生時の列車の走行速度は、本件地震の場合は東北地方太平洋沖地震の際と同様に70～80km/hであったのに対し、新潟県中越地震の際は204km/hであった。脱線軸数は、本件地震の場合は全24軸中22軸、東北地方太平洋沖地震の場合は全40軸中2軸、新潟県中越地震の場合は全40軸中22軸であった。

表20 過去の大規模地震と本件地震の比較情報

	新潟県中越地震	東北地方太平洋沖地震	平成28年熊本地震
発生日時	平成16年10月23日 17時56分ごろ	平成23年3月11日 14時46分ごろ	平成28年4月14日 21時26分ごろ
震源深さ	約13km	約24km	約11km
地震の規模	6.8 (M)	9.0 (Mw)	6.5 (M)
最大震度	7	7	7
地震種別	内陸地震	海溝型地震	内陸地震
主な列車被害	・上越新幹線浦佐駅～長岡駅間列車脱線	・東北新幹線仙台駅構内列車脱線 ・常磐線、東北線貨物列車脱線	・九州新幹線熊本駅～熊本総合車両所間列車脱線

表 2 1 過去の新幹線列車脱線事故と本事故の比較情報

	新潟県中越地震	東北地方太平洋沖地震	平成 2 8 年熊本地震
車両形式・編成	200系10両編成	E2系10両編成	800系6両編成
地震発生時の速度（推定）	約204km/h	約72km/h	約79km/h
脱線時の速度（推定）	約200km/h	約14km/h	約78km/h
震央からの距離	約9.6km	約172km	約12km
構造物形式	鉄筋コンクリート・ラーメン高架橋ほか	鋼複合単純桁高架橋	鉄筋コンクリート・ラーメン高架橋ほか
地形	山地から河岸段丘を経て沖積低地に至る地域	平野	平野
表層地質	第四紀更新世の段丘堆積物	第四紀更新世の段丘堆積物	第四紀完新世沖積粘性土層・同沖積砂質土層

3 分析

3.1 本事故発生前の軌道及び車両の整備に関する分析

3.1.1 軌道の整備

事故現場付近の線路設備（構造物及び軌道等）については、2.4.1.3(1)に記述したように、直近の定期検査において異常は認められておらず、また、2.4.1.3(2)に記述したように、本事故発生前直近に行われていた営業車に装備した軌道検測装置による計測において、軌道変位量は整備基準値を超過していなかったことから、本事故発生以前の事故現場付近の線路設備には特に問題はなかったものと考えられる。

3.1.2 車両の整備

2.4.2.2(1)及び2.4.2.2(2)に記述したように、本件列車は、直近の定期検査において異常が認められておらず、静止輪重比についても800系新幹線電車整備要領に規定されている管理値を超過していなかったことから、車両の状態には特に問題はなかったものと考えられる。

3.2 本件列車の脱線に関する分析

本事故は、3.2.1～3.2.6の分析結果から軌道や車両等の鉄道設備の異状によって発生したのではなく、本件地震の発生によって生じた線路直角方向の大きな振動が、高架橋上を走行していた本件列車の全車輪に、レールを介してほぼ一様に加わったこと

によって発生したものと考えられる。また、左右方向の振動を各車両の車輪に受けた本件列車は、21時26分42秒ごろから車体が左右に大きく揺れてローリングし始め、21時26分43秒～同44秒以降の数秒以内に、左又は右車輪のフランジがレール上に乗るなどして、多数の輪軸がほぼ同時期に脱線したものと考えられる。

3.2.1 脱線発生前後の状況について

3.2.1.1 脱線発生までの状況

本件列車の脱線発生前の状況は、2.1.1に記述した本件運転士の口述から、本件列車の運転状況に異状はなかったと考えられる。

2.10.2.3(6)の図18に示したように、21時26分41秒～同42秒ごろ軌道面上で本件地震による大きな揺れが生じたと考えられること、及び本件地震の揺れを感じた本件運転士はすぐに非常ブレーキを扱ったと口述していること、並びに2.1.2.1の表2に示したように、緊急停止（O2E）信号を受けたATC装置は、非常ブレーキを21時26分43秒ごろ動作させていたことから、運転士の非常ブレーキ操作とATC装置による非常ブレーキ動作はほぼ同じ時期であったと考えられる。

3.2.1.2 脱線の開始時期等に関する分析

2.4.3.1に記述したように、各車両のブレーキ制御装置には、21時26分43秒～同44秒ごろに軸速度が急激に低下している記録が残されており、この時期に各車両において脱線が発生したものと考えられる。

2.1.2.1に記述したように、この時の本件列車の先頭位置が99k310m付近であったことから、その時の本件列車の最後尾位置は99k155m付近となる。したがって、脱線痕開始地点（99k157m付近）に残されていたレール上の痕跡は、6両目後台車の左車輪フランジがレールに乗ったことによって生じたものと考えられる。また、2.3.2に記述したように、99k160m付近の左レール軌間外のレール締結装置に車輪の通過によるものと考えられる損傷が認められたことから、本件列車の脱線は99k160m付近から発生したものと考えられる。

さらに、2.1.2.1に記述したように、ATC装置は電源が投入されてから数秒後に記録を開始する仕様であること及び表2に示したように、運転状況記録装置には21時26分43秒から同47秒まで記録がなく、同47秒に速度及び列車先頭位置の記録がいずれも0となっていることから、ATC装置の電源が復帰した時刻は21時26分44秒ごろであったと考えられ、それ以前に1両目前台車の輪軸は脱線していたものと考えられる。

なお、ATC装置の電源が瞬断したことについては、1両目車内の前車付近に

装備されているATC電源回路に衝撃が加わり、同回路が瞬断してシステムが初期化したことによるものと考えられる。

3.2.1.3 減速度に関する分析

本件列車の非常ブレーキが動作してから停止するまでの平均減速度は、2.1.2.1の表2に示した運転状況記録装置の速度記録から計算によって求めると、約5.1 km/h/sであった。同減速度で距離を算定すると、速度約78 km/hから停止までの走行距離は約162 mとなり、ブレーキ開始地点は99 k 296 mであることから計算上の停止位置は99 k 458 mとなる。実際の列車停止位置は99 k 461 mであり、双方の停止位置はおおむね一致していることから、本件列車の実際の平均減速度はおおむね5.1 km/h/sであったと考えられる。

なお、2.4.2.1に記述したように、本件列車の平均減速度（計画値）は、約3.6 km/h/sであるが、本件列車は脱線後に車輪が枠型スラブの上を走行し、複数の車輪が枠型スラブ穴部の前面壁に衝撃するとともに、台車の一部及び車両の床下機器がレール等と接触して走行抵抗が増大したために、減速度が計画値よりも増大したのと考えられる。

3.2.1.4 脱線発生前後の車両の状況に関する分析

本件地震発生時における本件列車の各車両の台車に設置されている空気ばねの圧力は2.4.3.1に記述したとおりであったこと、及び2.3.2に記述したように、レール上には車輪フランジ乗り上がりの痕跡は認められなかったことから、脱線前の本件列車の編成車両は、車体を左右方向に揺らし、ローリングしながら走行していたものと推定される。

2.4.3.2に記述したように、車体左右振動加速度の記録により、本件列車の各車両の車体には、周期が約1秒で大きさが 10 m/s^2 （約1 G）程度、瞬間的には 10 m/s^2 以上の左右方向加速度が4～5秒程度連続的に加わっていた可能性があること、及び3.2.1.3に記述したように、枠型スラブ穴部の前面壁に車輪が衝撃することによって非常ブレーキ以上の大きな減速度が生じていた可能性があることから、仮に本件列車に乗客が乗車していた場合、乗客は身体を前後左右及び上下に大きく揺さぶられた可能性があったと考えられる。

3.2.1.5 載線軸に関する分析

2.3.1に記述したように、現場調査時における本件列車の1両目及び2両目の第3軸は載線状態であった。1両目第3軸については、2.4.3.1に記述したように、軸速度が演算速度とおおむね一致していること、また、2両目第3軸については、

1両目のような軸速度情報が取得できていなかったものの、2.3.1に記述したように、フランジの先端部にスラブ軌道上を走行した痕跡が認められなかったことから、脱線は発生していなかったものと推定される。したがって、2.3.1に記述した車輪外側面の擦過痕については、台車構成部品との接触によって生じた可能性が考えられる。

3.2.2 脱線の発生と軌道等の状態及び車両の状態との関連性について

軌道の状態については、3.1.1に記述したように、直近の定期検査において異常がなく、軌道変位量が全て整備基準値内であったこと及び2.5.1に記述したように、脱線の発生に直接結びつくような軌道の異状は認められず、構造物にも大きな損傷が発生していないことから、軌道等の状態が脱線に関与した可能性は低いと考えられる。

また、車両の状態についても、3.1.2に記述したように、本件列車の直近の定期検査において異常がなく、静止輪重比等にも問題がなかったこと及び2.1.1に記述したように、事故当日も博多駅～熊本駅間は異状なく運転していたと本件運転士が口述していることから、脱線に直接結びつくような車両の異状は認められず、車両の状態が脱線に関与した可能性は低いと考えられる。

3.2.3 脱線の発生と本件地震との関連性について

2.9.2に記述したように、震源付近には日奈久断層帯が存在し、活断層文献において、事故現場に最も近い布田川－日奈久断層系断層の端部は、九州新幹線の高架橋の直下には至っていないものの、その付近まで示されていた。

また、2.9.1及び2.9.2に記述したように、本件地震は、平成28年4月14日21時26分34.4秒に、北緯32度44.5分、東経130度48.5分、深さ11kmの地点を震源として発生したマグニチュード6.5の地震であり、事故現場は、震央から約12kmと近く、震度6弱～6強の激しい揺れに見舞われたことから、本件地震が脱線発生に影響を与えた可能性が考えられる。

図9に示したように、事故現場の北北東方向約550m地点に位置し、事故現場から最も近傍にある気象庁（熊本西区春日）の観測記録には、2.9.3に記述したように、平成28年4月14日21時26分41秒ごろに南北方向及び東西方向に大きな加速度が記録されていた。

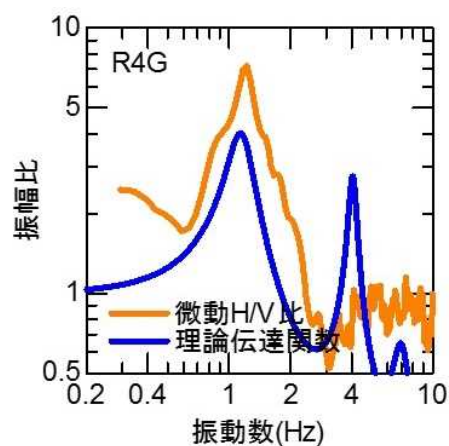
一方、車両の状態については、2.4.3.1に記述したように、本件列車の各車両の空気ばね圧力の状況は21時26分42秒ごろから振動し始めており、この時に車体が大きく左右に振動し始めたことを示唆していると考えられる。さらに、振動が、事故現場の最も近傍にある気象庁（熊本西区春日）において大きな加速度が記録さ

れた21時26分41秒の約1秒後から発生していること、及び3.2.1.2の記述から、脱線は21時26分43秒～同44秒ごろに始まり、多数の輪軸がほぼ同時期に脱線したと考えられる。

また、3.2.1に記述したように、脱線が開始した時の本件列車の先頭位置は99k310m付近であったと考えられ、列車の停止位置である99k461mまで約150mを走行する間に本件列車の全24軸中の22軸が脱線したという通常の走行状態では考えにくい事象が発生している。このことから、本件列車の脱線には本件地震が関与しているものと考えられる。

3.2.4 地盤の影響

2.10.2.2(1)に記述したように、事故現場付近の表層地盤は、付図12に示すようにモデル化されている。第2田崎BL(R4)付近の地盤における、Dg1層(耐震設計上の基盤面)に対する地表面位置での伝達関数を重複反射理論^{*38}を用いて算出した結果を図22の青色線で示す。なお、ここでは、鉛直下方からの入射を仮定している。また、同図には、常時微動観測により得られたH/Vスペクトル比^{だいたい}を橙色線で示している。いずれも1Hz付近に大きな卓越が見られることから、第2田崎BL(R4)付近の表層地盤において、1Hz付近の振動成分が増幅されていた可能性が高いと考えられる。その結果、事故現場付近の構造物直下に2.10.2.1の図10に示すような大きな左右振動が加わった可能性がある。



(付図11 本震及び余震の観測位置 参照) 図22 理論伝達関数と微動観測記録H/Vスペクトル比の比較(R4G位置)

3.2.5 構造物の影響

2.10.2.2(3)②の図11の橙色線に示したように、余震観測記録から得られた地表面に対する第2田崎BL上のスペクトル比は、1.3Hz付近にピークがあり、その値は周波数応答解析から得られた結果(青色線)とほぼ同じであること、及び構造物モデル群に2.10.2.1の図10に示した地表面地震動推定波(最大値398gal)を入力した場合の構造物上の各算出地点の応答波形は、2.10.2.2(4)の図13(R4の例)に示したとおり、最大値730gal、フーリエ振幅の値は1.3Hzで約

*38 「重複反射理論」とは、地盤振動に関する理論である。(参考文献：金井清著、「地震工学」、共立出版株式会社、1969年)

1, 500 gal*sであることから、構造物で振動が増幅されていたと考えられる。なお、1.3 Hz付近のフーリエ振幅の値が大きいことについては、構造物の固有振動数が影響したのと考えられる。

3.2.6 脱線のメカニズム

2.10.2.3(7)に記述した解析結果によると、脱線のメカニズムは、軌道の大きな左右振動を受けた輪軸が横圧によって左右に押され、車輪が30 mm（フランジ高さ）以上上昇し、その後、左又は右車輪のフランジがレール上に乗り、脱線に至ったものである。

脱線の発生した方向が進行方向の左右に分かれたことについては、同一時刻において車両の走行している高架橋上の位置は、図20に示したように車両によって異なる構造体上となることから、各車両が受ける軌道面振動に若干の相違があり、各車両の挙動に差（脱線し得るタイミングは0.5秒程度の間隔で2回存在し、1回目のタイミングで進行右側に脱線する車両と2回目のタイミングで進行左側に脱線する車両があった。）が生じたことによるものと考えられる。

今回車両が受けた左右方向の軌道面振動は、2.10.2.3(6)に記述したように、振動数0.8 Hz付近及び1.3 Hz付近にピークがあり、車両にローリングを生じやすい振動数帯^{*39}であった。また、その振動数は、車体の回転中心が車両の下部にあって車体のロール回転に合わせて左右の車輪が交互に大きく上昇する下心ロール振動が成長する振動数よりも若干大きく、車体の回転中心が車両の上部にあって車体のロール回転に合わせて車輪が左右に移動し、著大な横圧が発生する上心ロール振動が成長する振動数よりも若干小さかった。したがって、車体の振動モードを特定することは困難であると考えられる。

2.10.2.3(7)に記述した解析結果は、軌道面に大きな左右振動が到達してから1～2周期の間である平成28年4月14日の21時26分43秒～同44秒ごろ、本件列車の1、2、3、6両目の車両が線路の左右に分かれて脱線したというものである。また、脱線の過程については、上述したように軌道の大きな左右振動を受けた輪軸が横圧によって左右に押され、車輪が30 mm（フランジ高さ）以上上昇し、その後、左又は右車輪のフランジがレール上に乗るなどして、脱線に至ったものと考えられる。これらの解析結果は、上記3.2.1～3.2.3に記述した脱線の時期やレール上の痕跡等に関する分析結果及び2.3.1に記述した事故後の本件列車の状態とおおむね一致した。

さらに、脱線防止ガードの設置を仮定した場合、2.10.2.4の表18に示したよう

*39 宮本岳史著、「地震時の車両脱線防止に向けた取り組み（RRR Vol.69 No.3）」、鉄道総研、2012年、P.15

に、非脱線という結果が得られていることから、仮に事故現場に脱線防止ガードが設置されていれば、脱線の発生リスクを低下させることができた可能性はあると考えられる。

(付図2-1 車両の挙動 (右側に脱線の場合) 参照)

3.3 事故現場地表面の地震動の推定に関する分析

事故現場地表面の地震動を推定するために、基準地点と評価地点間の地震動の伝達関数を確認した。その際、2.10.2.1の表1-4に示した手法①と手法②の二つの計算手法を用い、両者の結果を比較検討した。伝達関数は、気象庁(熊本西区春日)を基準地点とし、事故現場を評価地点として、本震及び余震の観測記録からフーリエ振幅比(評価地点のフーリエ振幅/基準地点のフーリエ振幅)を算出して求めた。

(1) 地表面位置で伝達関数を用いる手法(手法①)の場合

手法①により、本震及び余震の観測記録からフーリエ振幅比を算出して求めた2地点間の伝達関数を図2-3に示す。図2-3によると、本震及び二つの余震のフーリエ振幅比はおおむね1.0周辺で変動しており、それぞれの地震による振幅比は類似した傾向を示していることから、伝達関数が安定に求まっていると判断できる。

また、周期1s~1.5s(振動数0.8Hz)付近はフーリエ振幅比(平均値)が1よりもかなり大きな値になっており、評価地点の表層地盤の影響を受けて地震動が増幅した結果と考えられる。

この結果から得られた地表面の推定地震動波は、図2-5(上)のとおり、振動数0.8Hz付近及び1.3Hz付近の成分を多く含んでいると推定された。

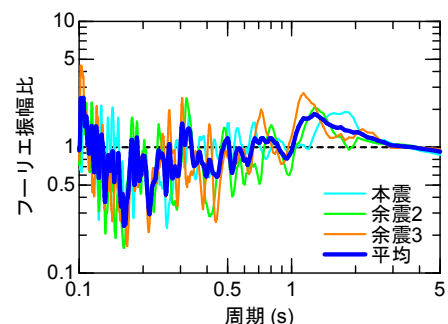


図2-3 地表面での2地点間の伝達関数(基準地点:気象庁(熊本西区春日))

(2) 基盤面位置で伝達関数を用いる手法(手法②)の場合

手法②は、手法①と同様にフーリエ振幅比を算出して求めるが、手法①と異なり、基準地点の地震動から表層地盤の影響を剥ぎ取り‘耐震設計上の基盤面位置’(以下「耐震設計上の」は省略する。)の地震動を算出し、これによって評価地点の地盤増幅特性の補正を行う手法である。地表面位置の地震動は、表層地盤の影響によりその特性が著しく変化し、特に振幅レベルの大きい地震の場合、表層地盤の非線形応答の影響が地震動に含まれる可能性がある。このため、表層地盤の影響を剥ぎ取り、基盤面位置(ここでいう基盤面とは、せん断

弾性波速度 $V_s = 700\text{m/s}$ 程度の工学的基盤面*40が望ましいが、今回の場合はこれを満足する深度までの情報が得られないことから、N値が50 ($V_s = 400\text{m/s}$ 程度)の地層を基盤面として設定した。)の地震動を算出した。

次に、上記で評価した地盤条件を使用し、基準位置及び評価位置における、本震及び余震の各観測記録を基盤面位置まで引き戻した。

求められた基盤面位置地震動について、地震ごとに基準地点と評価地点間のフーリエ振幅比を算出し、得られた結果の平均値を基盤面位置における2地点間の伝達関数とした。

基準地点と評価地点間の基盤面での伝達関数を図24に示す。基盤面での伝達関数は、図23に示した地表面での伝達関数よりも小さくなるのが期待されるが、逆に広い周期帯でそれを上回った。また、本震及び二つの余震のフーリエ振幅比は大きく変動しており、それぞれの地震による振幅比の違いが大きく、伝達関数が安定して求められていない可能性が考えられる。

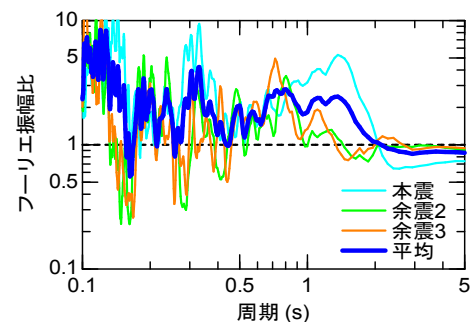


図24 基盤面での2地点間の伝達関数 (基準地点：気象庁(熊本西区春日))

次に、得られた基盤面位置地震動及び評価地点の地盤条件を用いた地盤応答解析を行い、評価地点における地表面地震動を算定した。その際の地盤物性値及び非線形特性については、引き戻し計算を行った際と同一の条件を設定した。その結果得られた推定地震動波を図25(下)に示す。

以上の検討結果より、基準地点と評価地点の間の地震動の伝達関数の計算手法として手法①を選定した。その理由は次のとおりである。

- ・震源が近いことから、その観測記録は鉛直入射だけでなく斜め入射の影響も含んだものとなる。手法②の場合は、使用する重複反射理論が鉛直入射のみ仮定して伝達関数を算出していることから、推定誤差が大きくなった可能性があること。
- ・基準地点から評価地点までの表層地盤がほぼ同様であることから、基準地点及び評価地点の余震の観測記録を活用して算出される地表面伝達関数を使用する手法①の方が、基準地点の表層地盤の影響の剥ぎ取りと、評価地点の増幅特性の補正のステップを踏んでその都度誤差が蓄積していく可能性がある手法②よりも推定誤差が小さくなると期待されること。

*40 「工学的基盤面」とは、「耐震設計上の基盤面」よりも広義の基盤面で、一般的には $V_s = 700\text{m/s}$ 以上の比較的強固な連続地層のことを指す。

- 手法②を適用した場合、引き戻しを行う際に使用する等価線形化法の適用限界を超えていること。
- 動的変形特性試験による十分な地盤特性が得られておらず、各地点の非線形特性として標準的なパラメータを使用しているため、手法②を適用した場合は推定誤差が大きくなった可能性があること。

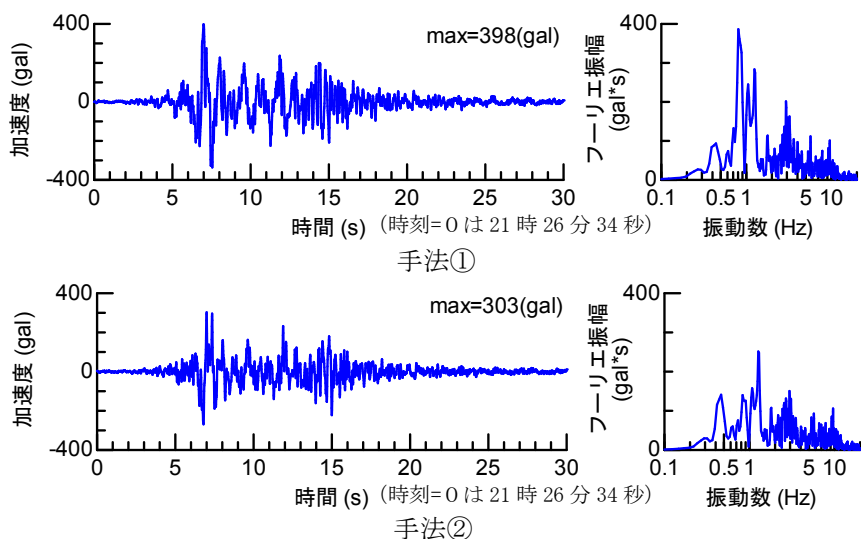


図 2.5 評価地点の地表面地震動推定波形

3.4 軌道及び車両の損傷に関する分析

3.4.1 軌道の損傷

2.5.1(2)に記述したように、枠型スラブの損傷は、99k200m付近～99k450m付近において発生したが、枠型スラブ穴部の前面壁については、損傷の位置及び損傷の程度から、3.2.1.3に記述したように、同損傷は脱線した複数の車輪が衝撃した結果、生じたものと考えられる。また、枠型スラブ穴部の大きな損傷が上記区間の始端付近から上記区間の中頃付近（99k200m付近～99k407m付近）で顕著であったことについては、脱線後に当該枠型スラブ穴部の上を通過した軸数が多かったことによる影響と考えられる。なお、同社の逸脱防止対策では、2.6.2に記述したように、輪軸が42cm程度移動した段階で、車輪は枠型スラブ穴部に達することから、車輪は枠型スラブ穴部に沈み込み、同穴部の前面壁に衝撃すると考えられる。

2.5.1(3)及び(4)に記述したように、レール締結装置関連部品及び信号関係機器の損傷は、最も熊本駅寄りの脱線痕開始地点付近から停止位置までの間で発生しており、これらは、脱線した輪軸の車輪通過又は床下機器との接触によって生じたものと考えられる。

3.4.2 車両の損傷

2.5.2に記述したように、6両目第2軸の軸はり及び軸ばねが台車から外れたことについては、軸はりを押さえ金によって台車枠に取り付けるためのボルトが折損したことによるものと考えられる。同ボルトの破断面には疲労破断の特徴が認められないことから、車輪が枠型スラブ穴部の前面壁に衝撃した際に、設計強度を超えた衝撃力が同ボルトに加わったことより同ボルトの損傷が発生したものと考えられる。したがって、今後、脱線が発生した後も台車の損傷によって逸脱防止ストッパによる逸脱防止機能が損なわれることがないよう、車輪が枠型スラブ穴部の前面壁に衝撃した場合に生じる衝撃力について評価し、必要に応じて安全性を向上させるための研究開発を行うことが望ましい。

また、5両目及び6両目の空気ばねが損傷したこと及び各車の自動高さ調整装置が損傷したことについては、3.2に記述したように、車体が軌道から左右方向の振動を受けて大きくローリングしたこと及び脱線の発生によって、各機器に可動域を超える変位が生じた可能性があると考えられる。

なお、2両目のパンタグラフホーンの折損については、2.3.1に記述したように、破片が坪井川Bよりも熊本総合車両所寄りの地上において発見されていること、2.5.1に記述したように事故現場付近のハンガーが架線から外れていたことから、同ホーンの折損は事故現場付近のいずれかのハンガーに接触したために発生したものと考えられる。同ホーンがハンガーに接触したことについては、パンタグラフの舟体が地震の揺れによって架線から外れたことによるものと考えられる。

3.5 再発防止及び被害軽減に関する分析

同社では、これまでに、過去の大規模地震を踏まえ、構造物の耐震化及び対震列車防御システムの整備などの大規模地震対策がなされてきたところである。しかしながら、今回の事象を踏まえ、安全性を更に向上させるために、再発防止及び被害軽減について、次のように分析する。

3.5.1 脱線防止ガード

高速で運転される新幹線列車は、一たび脱線事故が発生した際は大きな被害となるおそれがあることから、安全性の確保は最大限図られるべきであり、同社は、平成24年から実施してきた脱線防止ガードの設置を引き続き推進する必要がある。

本事故は脱線防止ガードが設置されていない位置で発生しており、事故現場に脱線防止ガードが設置されていなかった理由は2.6.2に記述したとおりである。事故現場付近の地表面は、3.2.4の図22に示したように、表層地盤の影響を受けて振動数1Hz付近の地震動が増幅する可能性がある。また、シミュレーション結果では、

2.10.2.2(4)の図13に示したように、構造物の天端の地震動は構造物の固有振動数1.3Hz付近にピークがあり、加速度は地表面の地震動の最大で1.8倍以上となる可能性がある。

したがって、同社の現状の設置計画では、事故現場と同様な設置目安に該当しない場所では脱線防止ガードが設置されない可能性があることから、設置計画の検討を行う必要がある。

脱線防止ガードの設置計画を検討する際には、以下に示す点を考慮して検討することが重要である。

- (1) 従来から行われていた活断層文献に確実度Ⅰとして掲載されている活断層や地震調査研究推進本部の長期評価等に基づく危険度の高い活断層と新幹線とが完全に交差する活断層に加え、新幹線沿線の活断層まで含めて見直した地震発生リスク
- (2) 全国地震動予測地図に基づく新幹線沿線地点が強い揺れに見舞われる確率
- (3) 新幹線直下の表層地盤の増幅特性及び構造物の振動特性等を考慮したスクリーニングから推定される脱線発生リスク
- (4) 列車の脱線後の走行によって生じる可能性がある被害の大きさ

また、同社が脱線防止ガードの設置を短期間に完了することは容易ではないと考えられること、大規模地震の発生場所及び発生時期は特定できないことから、地震に対する要注意箇所から優先的に設置を行うことが望ましい。

3.5.2 逸脱防止対策

2.3.1に記述したように、本件列車は多数の輪軸が脱線してスラブ軌道上を走行していた。本件列車には逸脱防止ストッパが取り付けられていなかったが、同社によると、全車両への逸脱防止ストッパ取付けは平成28年度末までに完了しているとのことである。同社の逸脱防止ストッパは、2.6.2に記述したように、脱線防止ガードと一体となって機能するものであることから、脱線防止ガードの設置は、3.5.1に記述した設置の優先度に従って順次実施されることが望ましい。

ただし、3.4.1に記述したとおり、本事故において車輪が枠型スラブ穴部の上を通過したと考えられる状況が発生していることから、車輪が枠型スラブ穴部に沈み込んだ状態になった場合に、逸脱防止ストッパと脱線防止ガードとの位置関係が想定以上に変化する可能性が考えられる。このため、上記の状態にあっても両者の位置関係及び脱線防止ガードへの作用力が設計の範囲内であることを確認することが望ましい。

3.5.3 対震列車防護システム

2.1.2.3の表4に示したように、熊本車両基地SSの地震計は本件地震の発生時に4種類のき電トリップ信号を出力していたこと、2.1.2.2の表3に示したように、熊本車両基地SSは連絡遮断信号を隣接SSに出力し、これによって架線への電力供給を遮断していること、2.1.2.1の表2に示したように、本件列車のATC装置（受信部）はレールからの緊急停止（02E）信号及び主変圧器3次巻線からの架線電圧の低下による停止（02）信号を受信して非常ブレーキを動作させていることから、対震列車防護システムは正常に機能していたものと推定される。

また、2.9.1に記述した気象庁が公表している資料及び表2～表4に示した記録内容によると、本件地震の検知から本件列車の非常ブレーキ動作までの流れは、次のとおりであった。

21時26分34.4秒に気象庁の地震計が観測した本件地震は、21時26分38.46秒に震央から約1.2km離れた熊本車両基地SS構内の沿線地震検知点に設置された地震計において検知され、21時26分40.08秒に同地震計から同SSに対してき電停止信号が出力された。同信号を受信した熊本車両基地SSは、21時26分41秒に地震連絡遮断信号を出力し、21時26分41秒に同信号を受信した新玉東SSは、21時26分41秒にき電用しゃ断器13を動作させ、き電停止した。架線停電を検知した地上施設からの緊急停止（02E）信号を21時26分43秒に受信確定した本件列車は、21時26分43秒に非常ブレーキを動作させていた。

したがって、熊本車両基地SS構内の沿線地震検知点の地震計が21時26分38.46秒に地震を初めて検知してから、本件列車の非常ブレーキが動作するまでは約5秒間であった。

本件列車は、2.1.2.1の表2に示したように、21時26分43秒に緊急停止（02E）信号受信を確定して非常ブレーキを動作させているが、速度が低下する以前に、図18に示したように21時26分41秒～同42秒ごろに本件地震のS波の影響と考えられる大きな左右方向の軌道面振動を受けている。

同社の対震列車防護システムは、2.6.1に記述したように、伝搬速度の異なるP波とS波の到達時間に差があることを利用して機能するものであり、震央から離れた位置を走行している列車に対しては有効であると考えられるが、震央からの距離が近く両波の時間差が小さい場合には効果が小さくなる。したがって、本件地震において震央に近い位置を走行していた本件列車においては、S波の到達前に列車速度を十分に抑制させるには至らなかったものと推定される。以上のことから、地震の検知時間及び地震検知時の列車の制動距離を更に短縮するための研究開発を今後も継続して進めることが望ましいが、同時に内陸地震の際には対震列車防護システ

ムにも限界があるため、脱線・逸脱防止装置の整備による対策を引き続き着実に進めていく必要がある。

4 結 論

4.1 分析の要約

(1) 本件列車の脱線に関する分析

① 脱線事故発生前後の状況の推移

各車両のブレーキ制御装置には、21時26分43秒～同44秒ごろに軸速度が急激に低下している記録が残されており、この時期に各車両において脱線が発生したものと考えられる。

また、この時の本件列車の先頭位置は99k310m付近であったと考えられることから、その時の本件列車の最後尾位置は99k155m付近となる。したがって、脱線痕開始地点（99k157m付近）に残されていたレール上の脱線痕は、6両目後台車の輪軸の脱線によって21時26分43秒～同44秒ごろに生じたものと考えられる。さらに、ATC装置の電源が復帰した時刻は21時26分44秒ごろであったと考えられることから、それ以前に1両目前台車の輪軸は脱線していたと考えられる。

空気ばねの圧力記録から、本件列車は、車体を左右方向に揺らし、ローリングしながら走行していたものと推定されること、車体左右振動加速度記録から、車体には周期が約1秒で大きさが 10m/s^2 又はそれ以上の左右振動加速度が約4～5秒間加わっていたこと、枠型スラブ穴部の前面壁に車輪が衝撃すること等によって約 5.1km/h/s の平均減速度が生じていた可能性があることから、仮に本件列車に乗客が乗車していた場合、乗客は身体を前後左右及び上下に大きく揺さぶられた可能性があったと考えられる。

(3.2.1) *41

② 脱線の発生と軌道の状態及び車両の状態との関連性

軌道の状態は、直近の検査記録において脱線に直接結びつくような異常は認められないことから、軌道の状態が脱線に関与した可能性は低いと考えられる。また、車両の状態は、直近の検査記録において脱線に直接結びつくような異常は認められないことから、車両の状態が脱線に関与した可能性は低いと考えられる。(3.2.2)

*41 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。

③ 本件地震との関連性について

事故現場の最も近傍にある気象庁（熊本西区春日）の観測記録には、平成28年4月14日21時26分41秒ごろに南北方向及び東西方向に大きな加速度が記録されていた。

一方、本件列車の各車両の空気ばね圧力の状況は、21時26分42秒ごろから振動し始めており、この時に車体が大きく左右に振動し始めたことを示唆していると考えられ、その振動が上記地震観測点において大きな加速度が記録された上記時刻の約1秒後から発生していること、続いてATC装置の電源瞬断及びブレーキ制御装置の軸速度が急激に低下している状況から、脱線は21時26分44秒以前に始まっていたと考えられること、さらに、脱線開始から約150m走行する間に本件列車の全24軸中の22軸が脱線したという通常の走行状態では考えにくい事象が発生していることから、本件列車の脱線には本件地震が関与しているものと考えられる。(3.2.3)

④ 地盤の影響

地盤において、振動が増幅されていたと考えられる。振動数1Hz付近の振動成分が増幅されていたことについては、表層地盤の影響を受けた可能性が高いと考えられる。(3.2.4)

⑤ 構造物の影響

構造物で振動が増幅されていたと考えられる。振動数1.3Hz付近のフリー振幅の値が大きいことについては、構造物の固有振動数が影響したものと考えられる。(3.2.5)

⑥ 脱線のメカニズム

軌道の大きな左右振動を受けた輪軸が横圧によって左右に押され、車輪が30mm（フランジ高さ）以上上昇し、その後、左又は右車輪のフランジがレール上に乗り、脱線に至ったものと考えられる。

脱線の発生した方向が進行方向の左右に分かれたことについては、同一時刻において車両の走行している高架橋は車両によって異なることから、各車両が受ける軌道面振動に若干の相違があり、各車両の挙動に差が生じたことによるものと考えられる。(3.2.6)

(2) 軌道及び車両の損傷に関する分析

枠型スラブの損傷については、損傷が発生した軌道上の位置及び枠型スラブ穴部の損傷部分並びに損傷の大きさから、同損傷は脱線した複数の車輪が衝撃した結果、生じたものと考えられる。

車両の損傷については、6両目第2軸において、軸はりを台車枠に取り付けるためのボルトに設計強度を超えた衝撃力が加わったことより、同ボルトが折

損したものと考えられる。したがって、今後、脱線が発生した後も台車の損傷によって逸脱防止ストッパによる逸脱防止機能が損なわれることがないように、車輪が枠型スラブ穴部の前面壁に衝撃した場合に生じる衝撃力について評価し、必要に応じて安全性を向上させるための研究開発を行うことが望ましい。

(3.4)

(3) 再発防止及び被害軽減に関する分析

① 脱線防止ガード

高速で運転される新幹線列車は、一たび脱線事故が発生した際は大きな被害となるおそれがあり、安全性の確保は最大限図られるべきであることから、同社は脱線防止ガードの設置を引き続き推進する必要がある。

同社によると、事故現場に脱線防止ガードが設置されていなかったのは、事故現場付近が脱線防止ガード設置目安に該当する箇所でなかったことが理由であり、脱線防止ガードを設置する計画はなかったとのことである。しかし、結果的に脱線事故が発生していることから、現状の設置目安によって策定された設置計画では、事故現場と同様な設置目安に該当しない場所では脱線防止ガードが設置されない可能性があることから、設置計画の検討を行う必要がある。

脱線防止ガードの設置対象区間を検討する際には、以下に示す点を考慮して検討することが重要である。

- a 従来から行われていた活断層文献に确实度 I として掲載されている活断層や地震調査研究推進本部の長期評価等に基づく危険度の高い活断層と新幹線とが完全に交差する活断層に加え、新幹線沿線の活断層まで含めて見直した地震発生リスク
- b 全国地震動予測地図に基づく新幹線沿線地点が強い揺れに見舞われる確率
- c 新幹線直下の表層地盤の増幅特性及び構造物の振動特性等を考慮したスクリーニングから推定される脱線発生リスク
- d 列車の脱線後の走行によって生じる可能性がある被害の大きささらに、設置の優先度も併せて検討することが望ましい。(3.5.1)

② 逸脱防止対策

同社は逸脱防止ストッパの車両への取付けを完了しているが、逸脱防止ストッパは脱線防止ガードと一体となって機能するものであることから、脱線防止ガードの設置は、上記4.1(3)①に記述した優先度に従って順次実施されることが望ましい。(3.5.2)

③ 対震列車防護システム

対震列車防護システムは正常に機能していたが、本件地震が内陸地震であると考えられること、かつ、震源から事故現場までの距離が短かったことから、S波が到達する以前に列車速度を抑制させるには至らなかった。今後も、地震の検知時間及び地震検知時の列車の制動距離を更に短縮するための研究開発を進めることが望ましい。また、同時に内陸地震の際には対震列車防護システムにも限界があることから、脱線・逸脱防止対策を引き続き着実に進めていく必要がある。(3.5.3)

4.2 原因

本事故は、「平成28年(2016年)熊本地震」のうちの、平成28年4月14日21時26分ごろ発生した地震の地震動を受けたため、列車が脱線したものと考えられる。

脱線に至る過程については、地盤の振動増幅により、事故現場付近の構造物直下に線路直角方向の大きな振動が加わったことに加え、構造物において車両にローリングを生じさせやすい振動数帯の左右の揺れを増幅したことにより、列車の各車両が左右に大きく揺れて左又は右車輪のフランジがレール上に乗るなどして、多数の輪軸がほぼ同時期に脱線したものと考えられる。

5 再発防止策

5.1 今後望まれる措置

高速で運転される新幹線列車は、一たび脱線事故が発生した際は大きな被害となるおそれがあることから、安全性の確保は最大限図られるべきである。新幹線を運行する事業者においては、これまでに、構造物の耐震補強や対震列車防護システムの整備などの対震対策及びそれらの対策によって防ぎきれない場合を想定した脱線・逸脱防止対策により、地震時の走行安全性と被害軽減を向上させる取組が進められてきたところである。

同社においても、脱線・逸脱防止対策を更に推進していく必要がある。

また、脱線・逸脱防止対策の推進に当たっては、今回の事象を踏まえ、地震発生リスク、様々な条件から推測される脱線発生リスク、脱線後の走行によって生じる被害の大きさ等を考慮して脱線・逸脱防止対策の整備計画の検討を行い、実施していくことが重要である。

さらに、脱線が発生した後も逸脱防止対策の機能が損なわれることがないように、

車輪が枠型スラブ穴部の前面壁に衝撃した場合に生じる衝撃力について評価し、必要に応じて安全性を向上させるための研究開発を行うことが望まれる。

5.2 事故後に同社が講じた措置

本件地震の発生後、同社は、平成28年5月27日以降に、以下に示す措置を講じた。

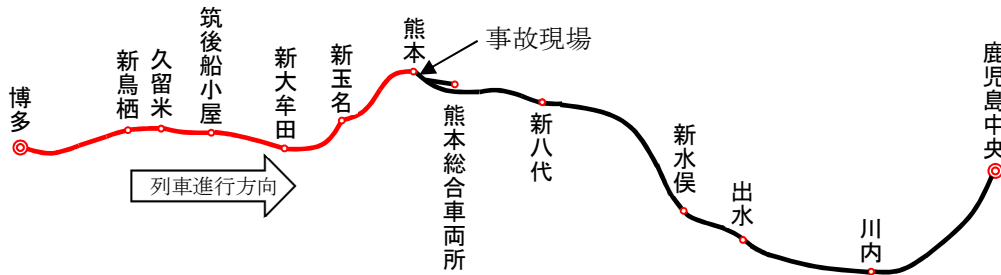
- (1) 今回の本件地震において列車が脱線した当該箇所周辺に14.5km、追加対策として熊本駅構内及び熊本総合車両所構内に2.5kmの合計17kmの区間に脱線防止ガードを設置した。(平成29年3月27日までに完了した。)
- (2) 本件列車を除く6編成に逸脱防止ストッパを取り付けた。(平成29年3月29日までに完了した。)

5.3 事故後に国土交通省が講じた措置

本事故の発生を踏まえ、国土交通省鉄道局は、平成28年5月27日、第13回新幹線脱線対策協議会を開催した。同協議会において、同社から九州新幹線の被害状況の報告を受けるとともに、新幹線を運行している各鉄道事業者が実施している対策の熊本地震における効果の検証、今後の対策をできる限り早期に進めていくための検討を行っていくことを確認した。

付図1 九州新幹線路線図

九州新幹線 博多駅～鹿児島中央駅間 288.9km (複線)

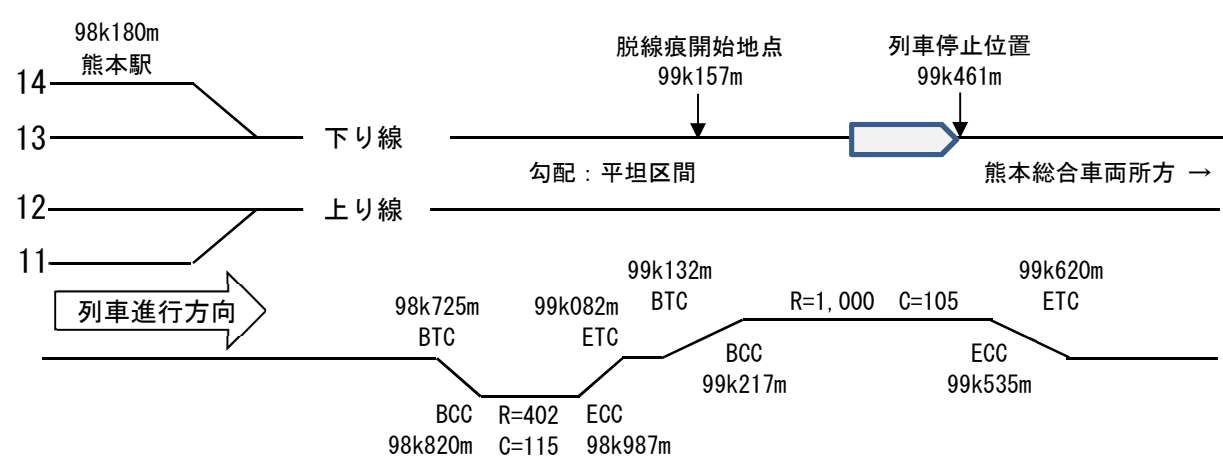


付図2 事故現場付近の地形図

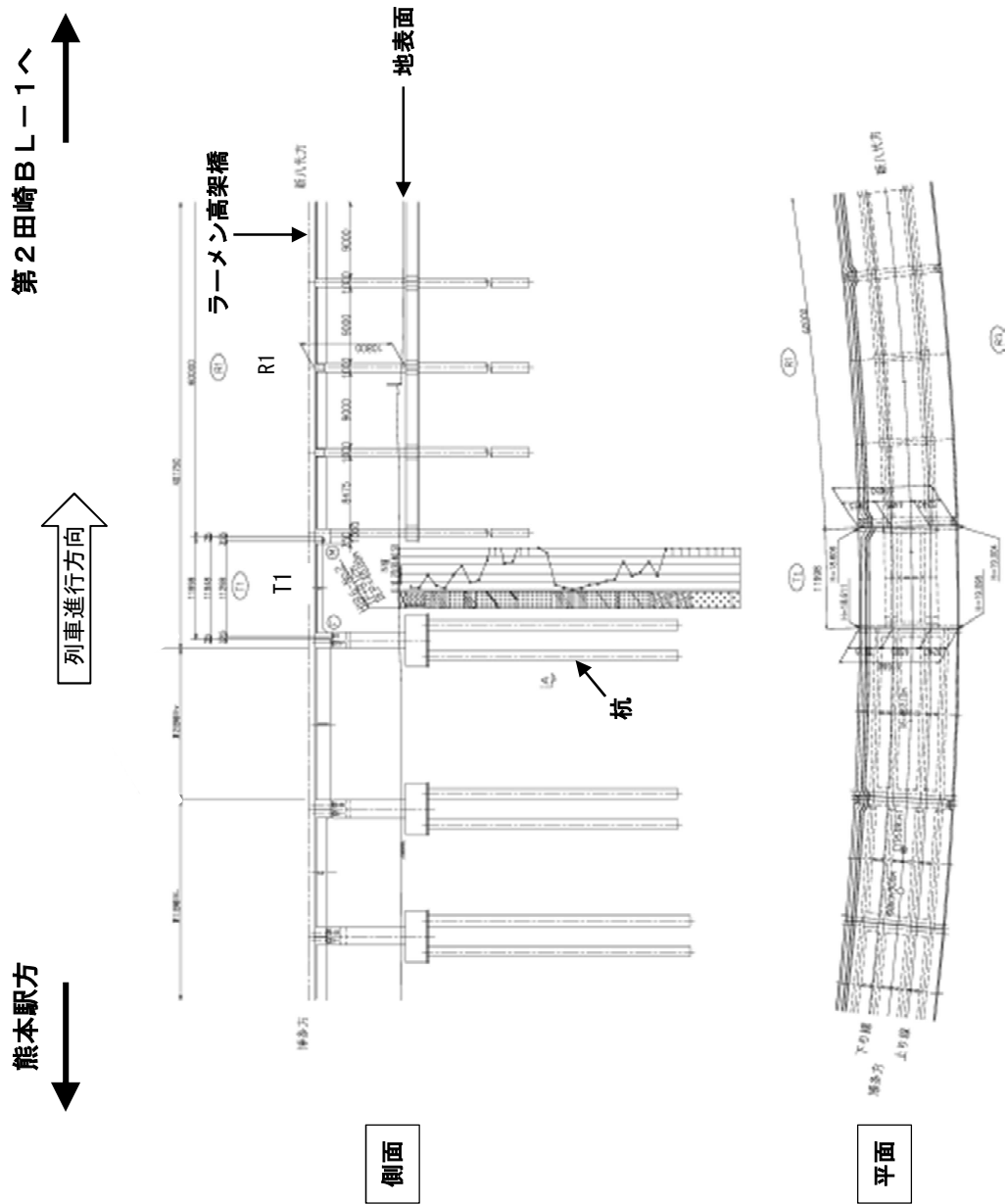


※この図は、国土地理院の地理院地図（電子国土WEB）を使用して作成。

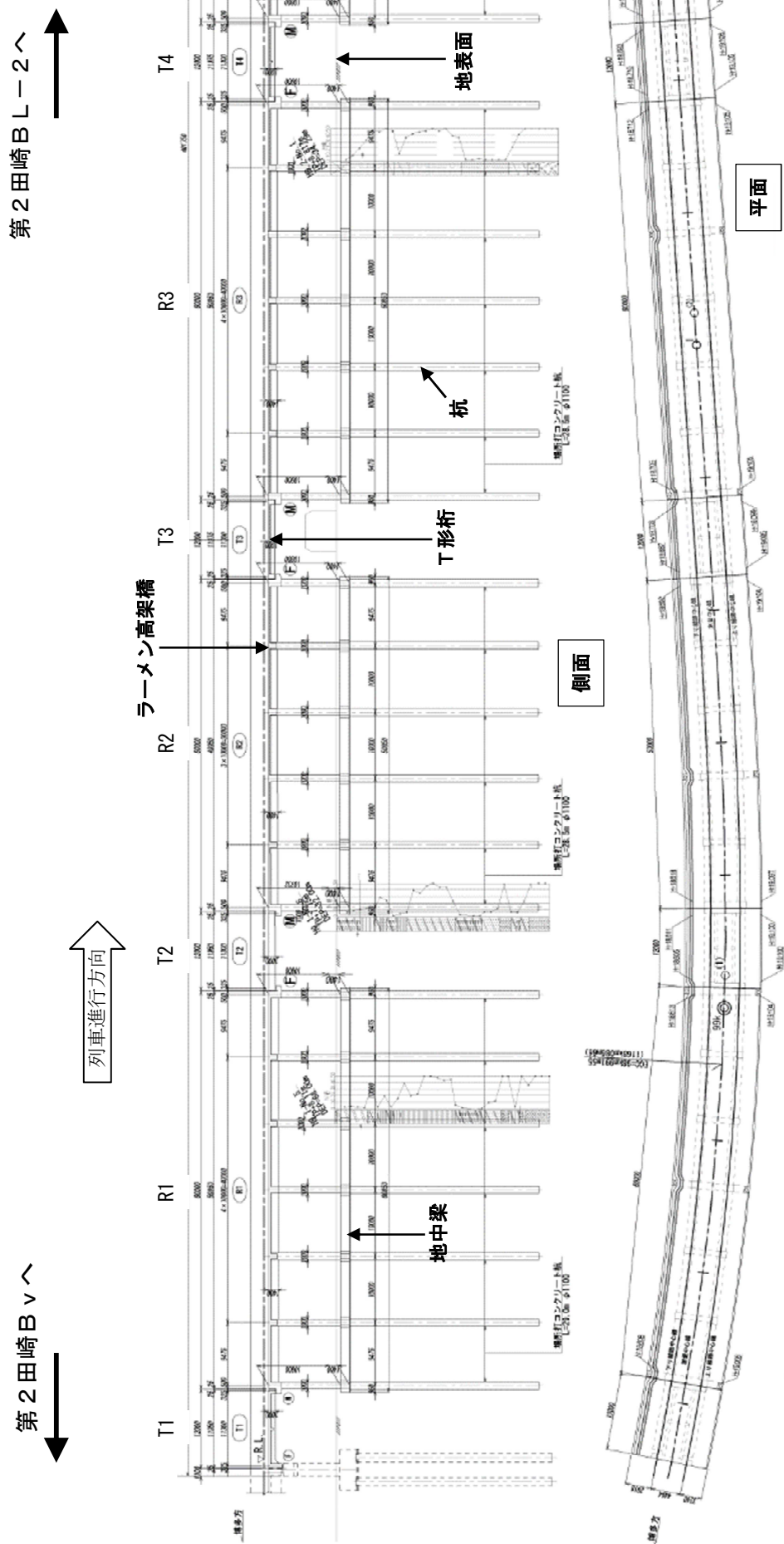
付図3 事故現場略図



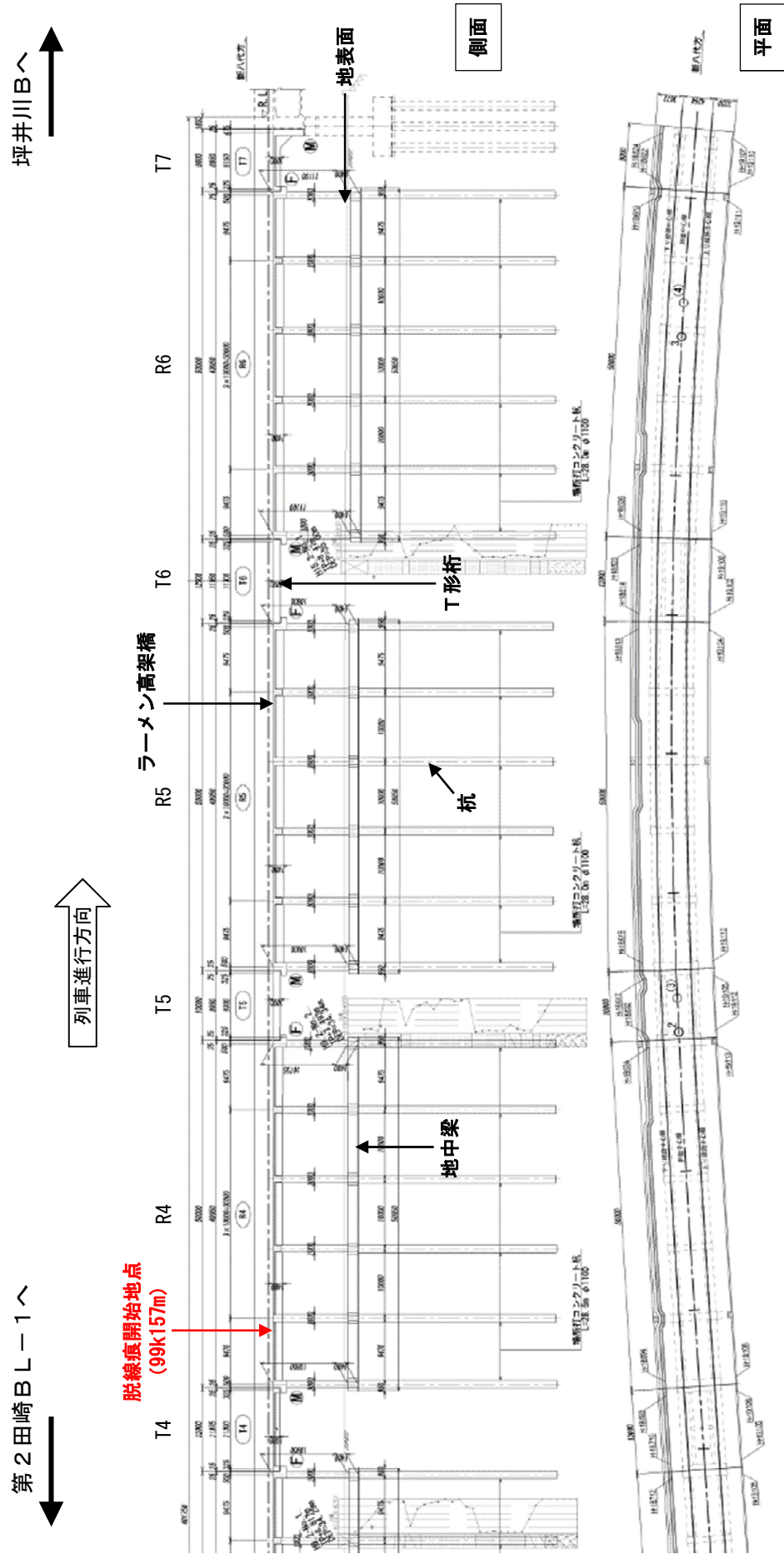
付図 4-1 事故現場付近の構造物 (第2田崎B v)



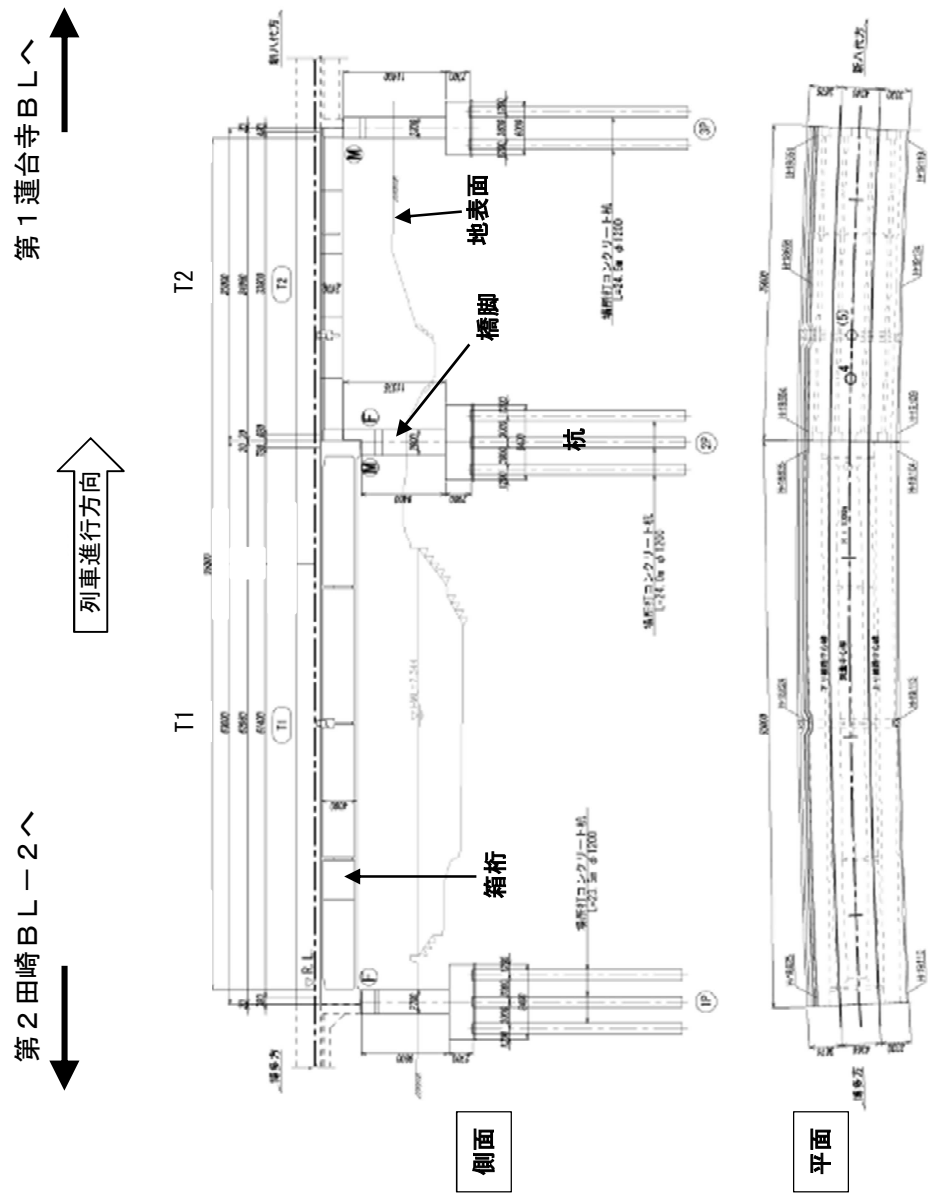
付図4-2 事故現場付近の構造物 (第2田崎BL-1)



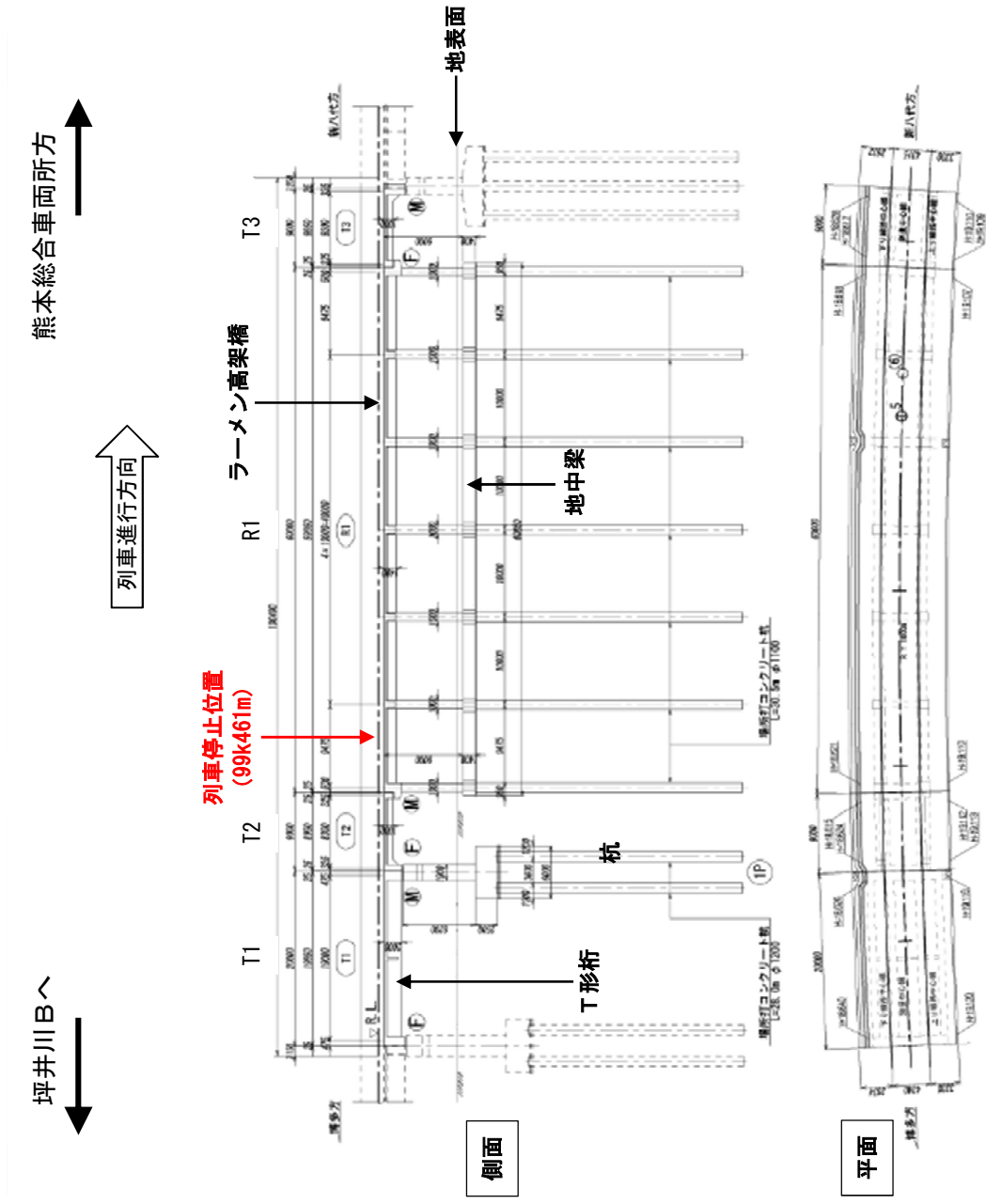
付図 4-3 事故現場付近の構造物 (第2田崎BL-2)



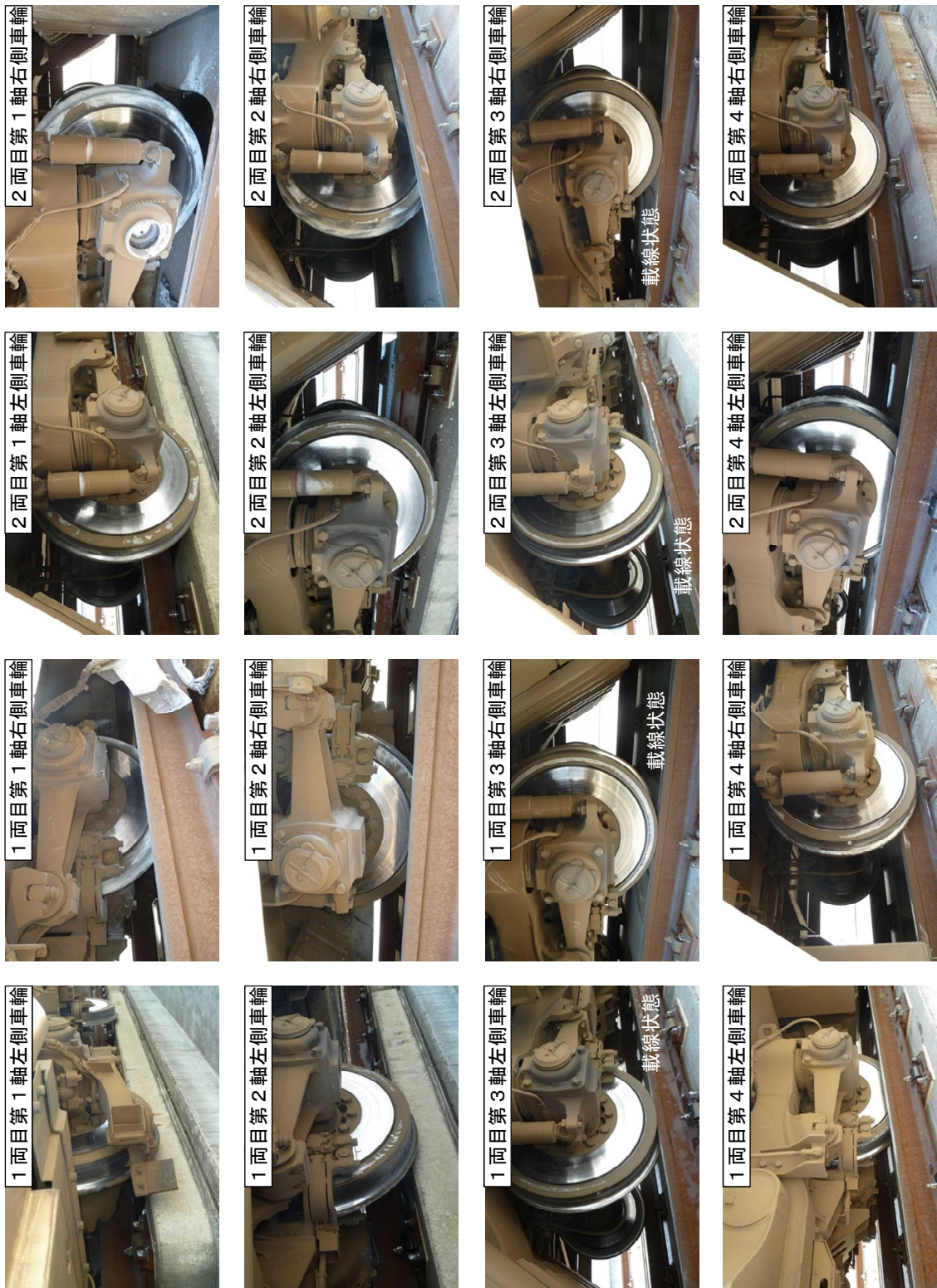
付図4-4 事故現場付近の構造物（坪井川B）



付図4-5 事故現場付近の構造物（第1蓮台寺BL）



付図5-1 本件列車の脱線状況（1）



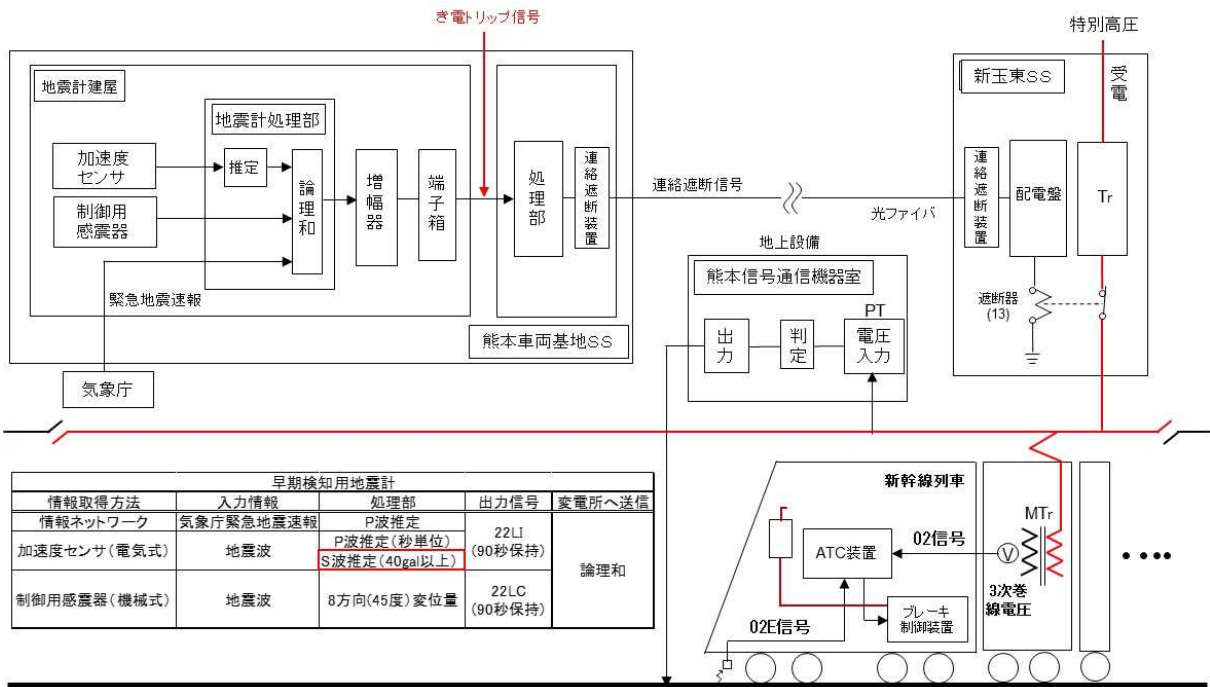
付図5-2 本件列車の脱線状況(2)



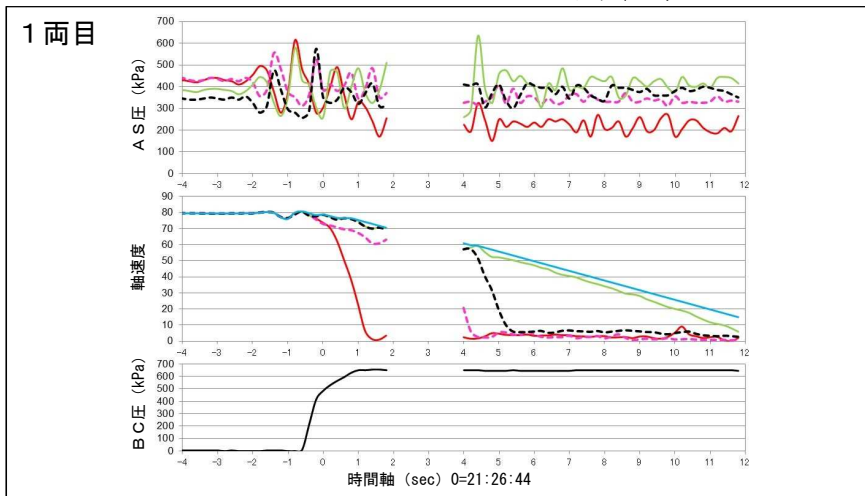
付図5-3 本件列車の脱線状況(3)



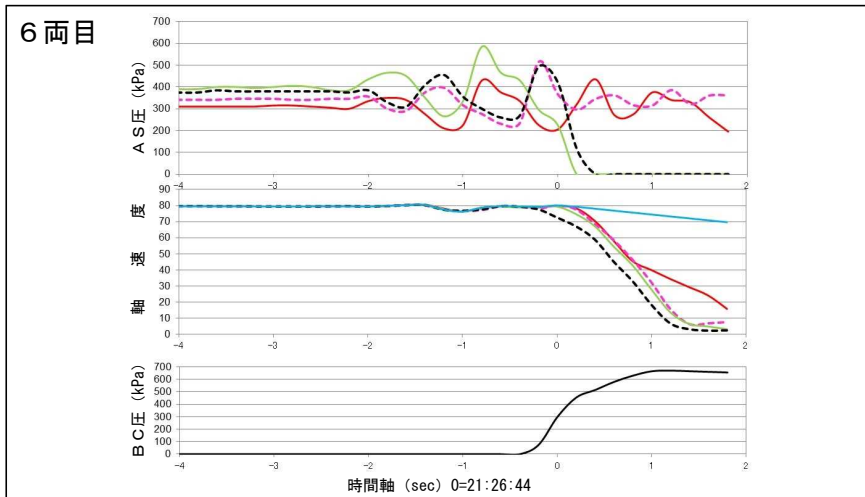
付図6 対震列車防護システムの概略図



付図7 ブレーキ制御装置の記録 (抜粋)

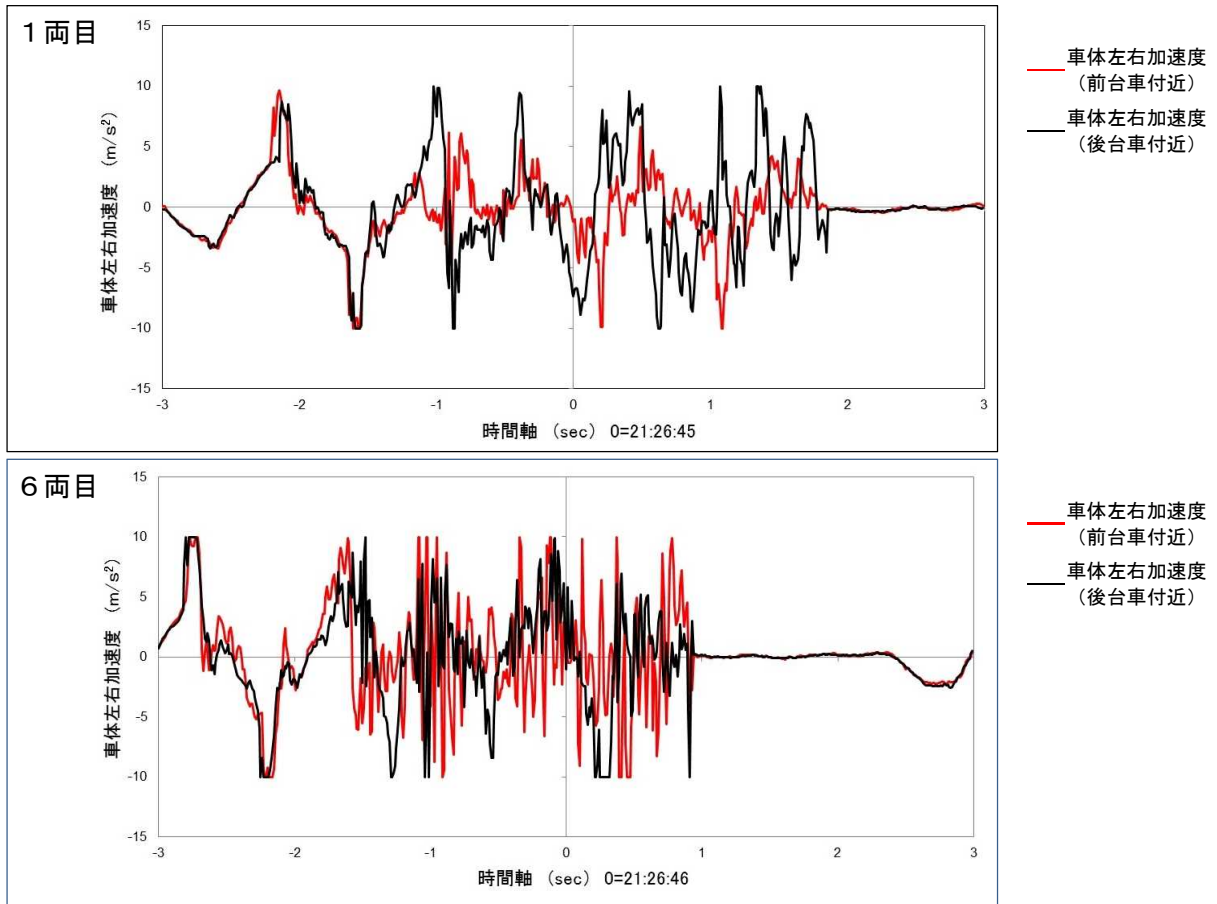


- 空気ばね 1 : 前台車右側
- - - 空気ばね 2 : 前台車左側
- 空気ばね 3 : 後台車右側
- - - 空気ばね 4 : 後台車左側
- 1 軸速度
- - - 2 軸速度
- 3 軸速度
- - - 4 軸速度
- 演算速度



- 空気ばね 1 : 前台車右側
- - - 空気ばね 2 : 前台車左側
- 空気ばね 3 : 後台車右側
- - - 空気ばね 4 : 後台車左側
- 1 軸速度
- - - 2 軸速度
- 3 軸速度
- - - 4 軸速度
- 演算速度

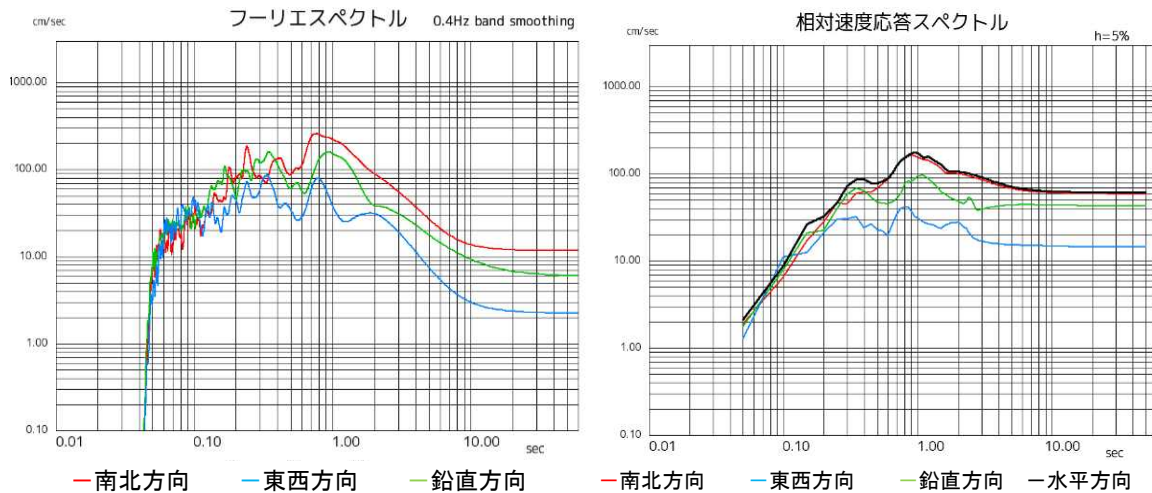
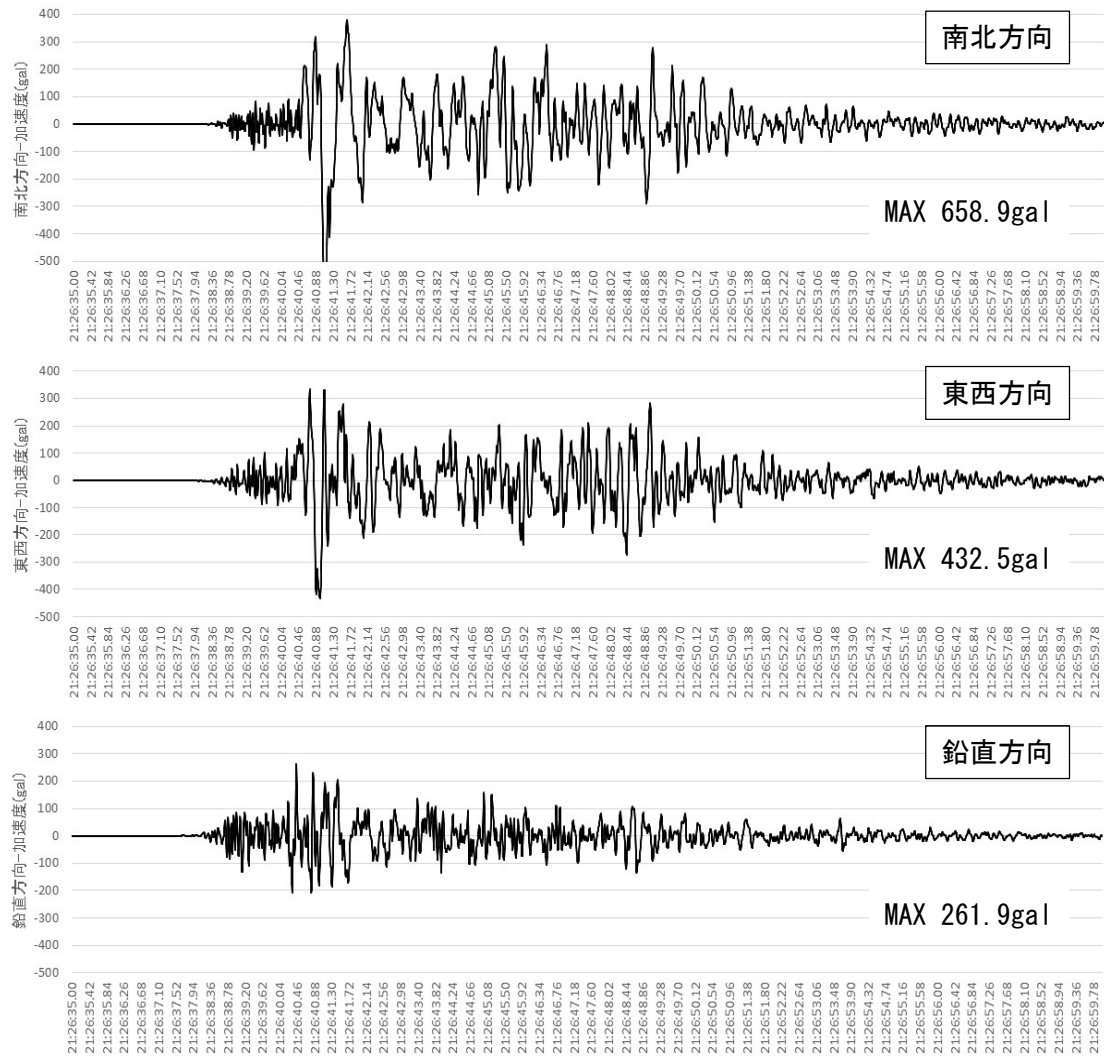
付図8 車体の左右振動加速度の記録（抜粋）



付図9 対震列車防護システム用地震検知点の位置

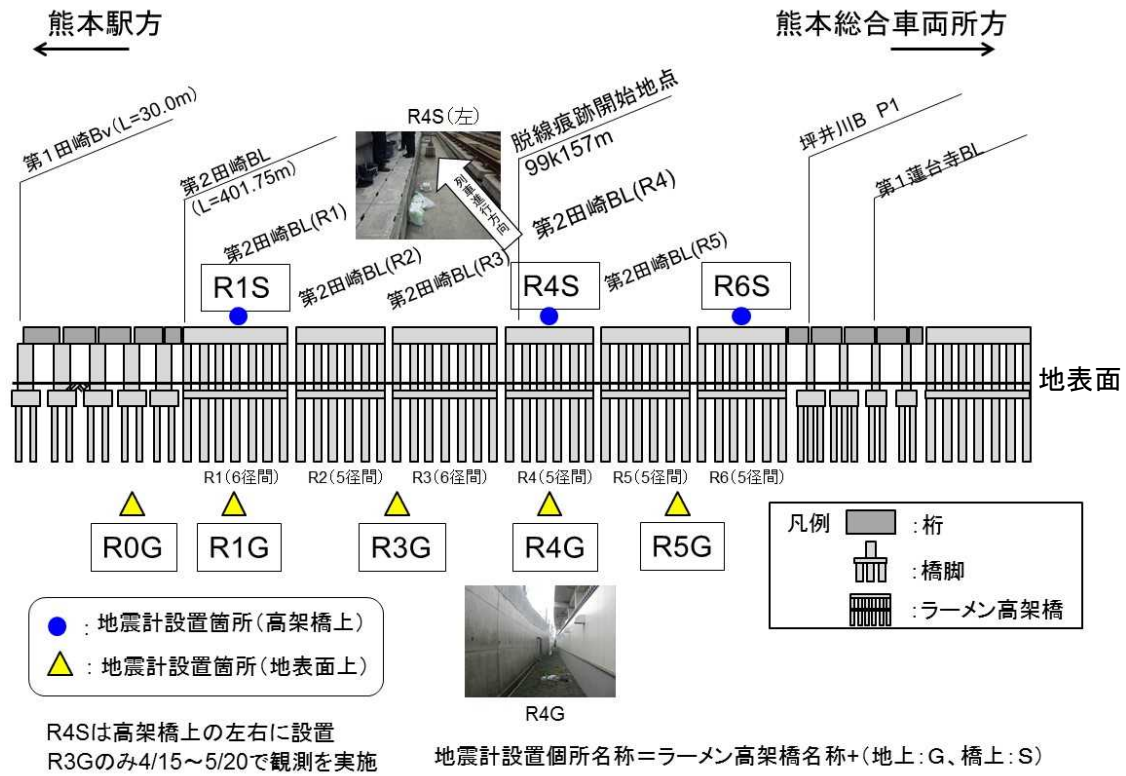


付図 10 気象庁（熊本西区春日）の本件地震の観測記録

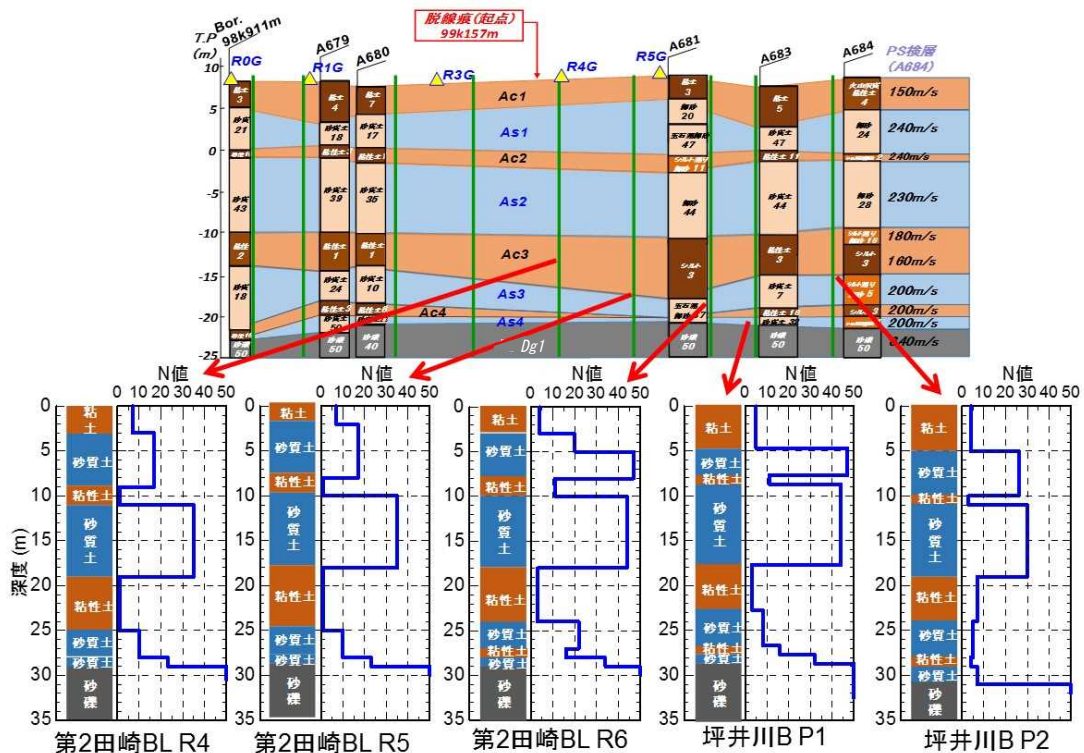


※ 本図は気象庁ホームページ（強震観測データ）を使用して作成した。

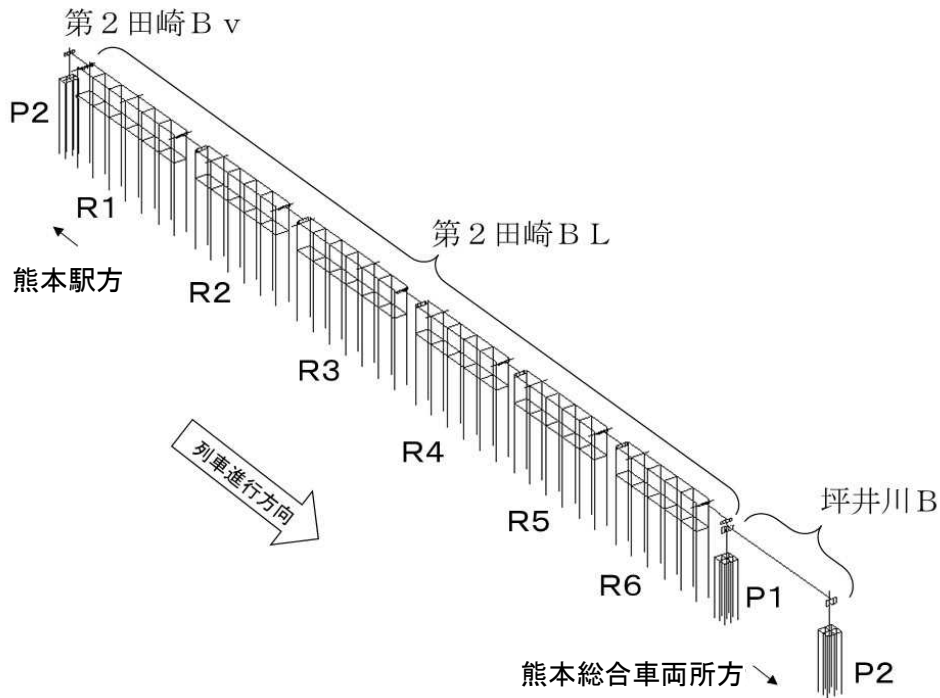
付図 1 1 本震及び余震の観測位置



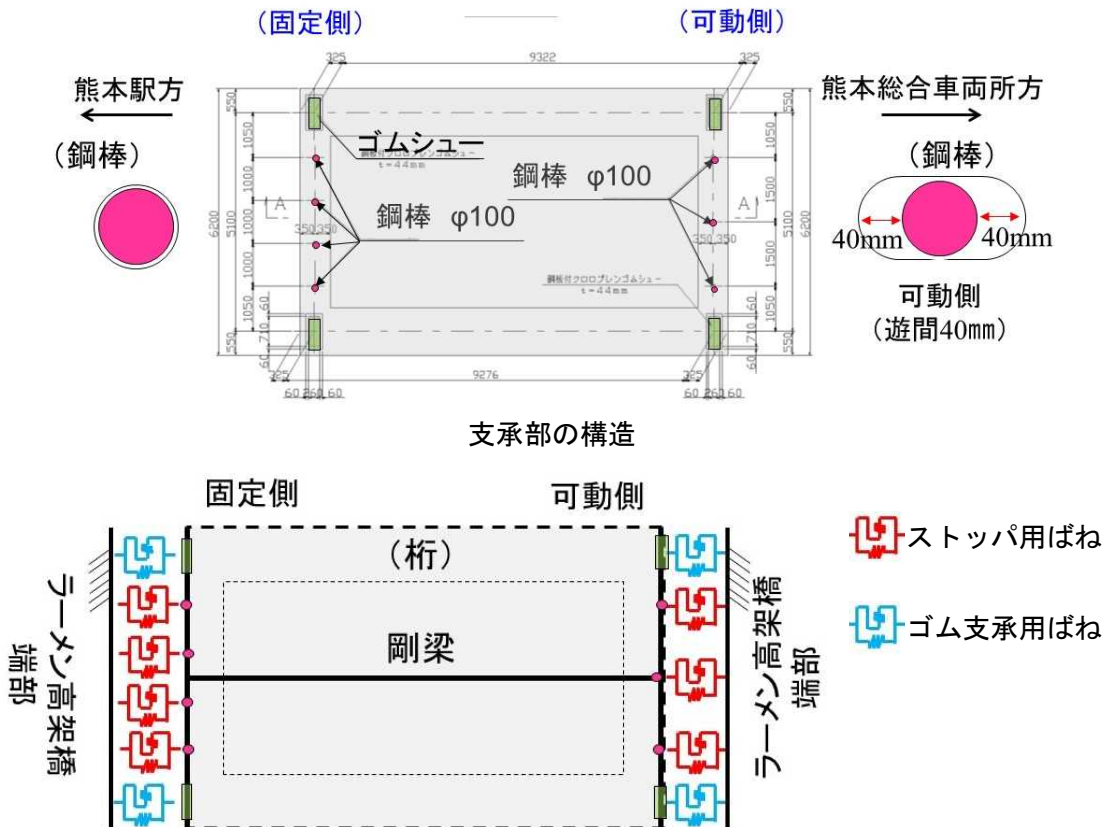
付図 1 2 構造物位置で設定した地盤モデル (抜粋)



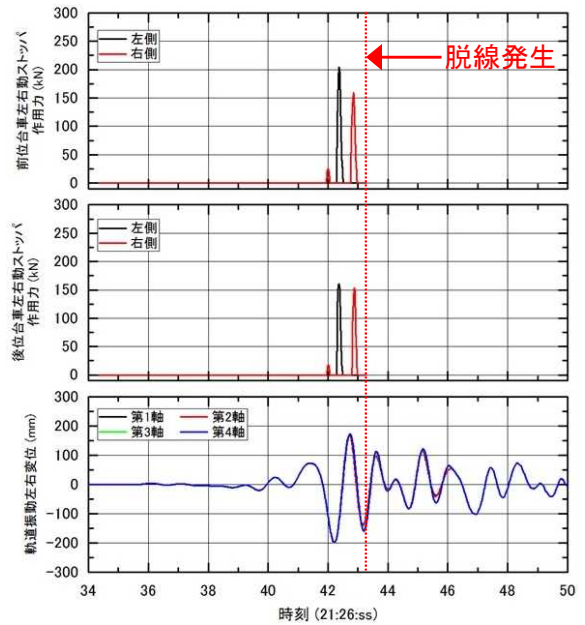
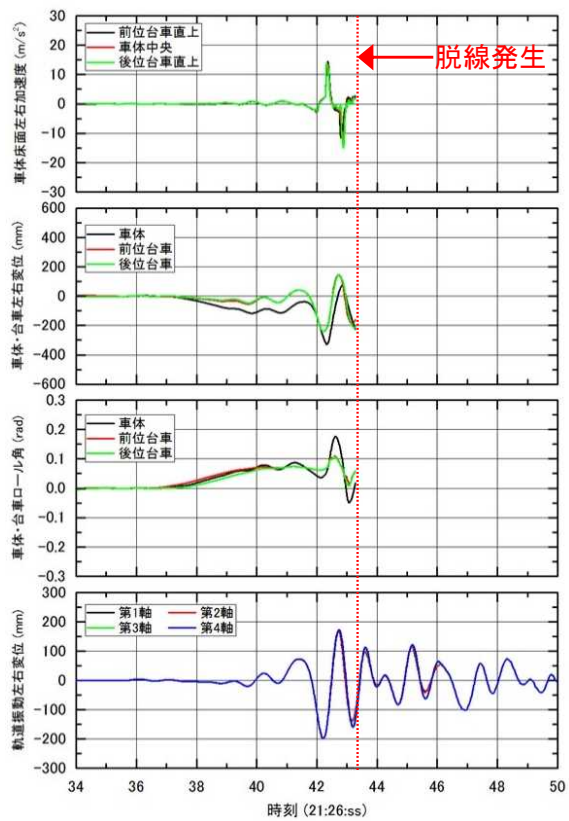
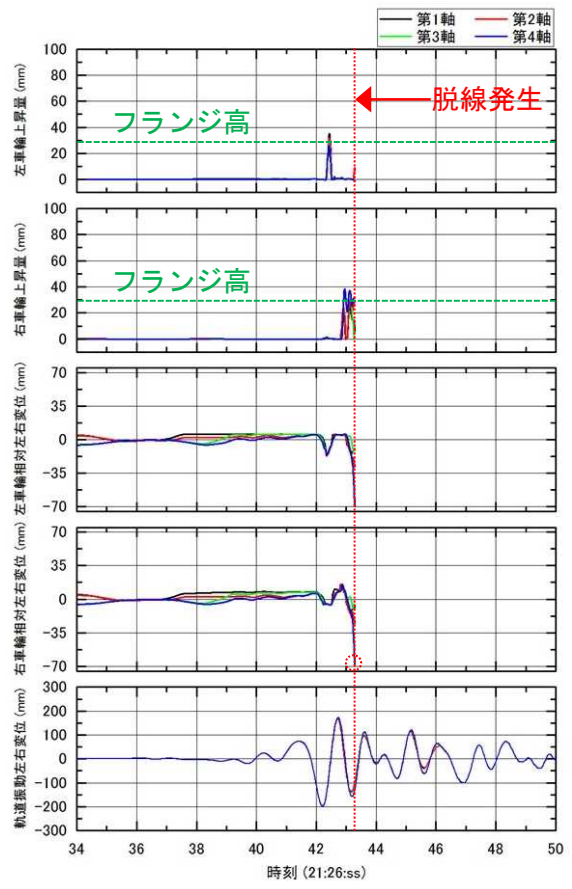
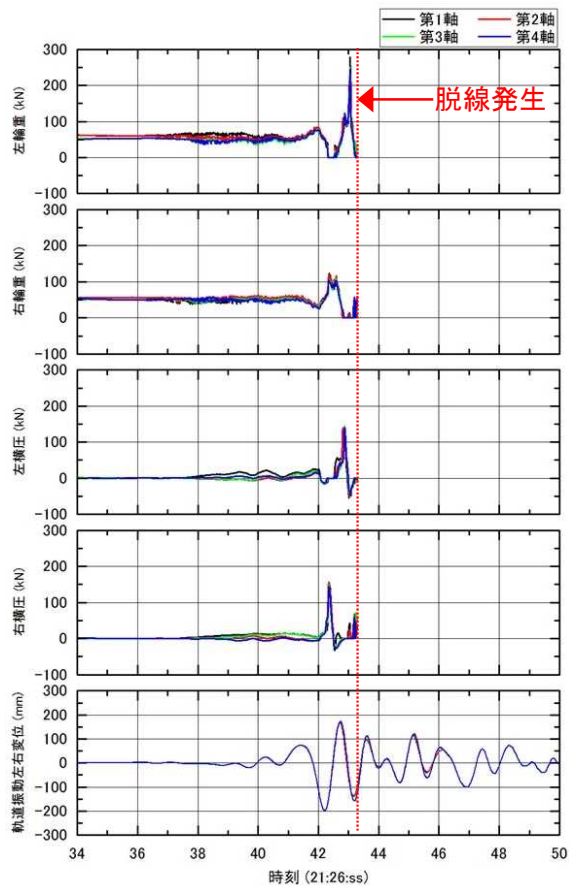
付図 1 3 構造物群モデル



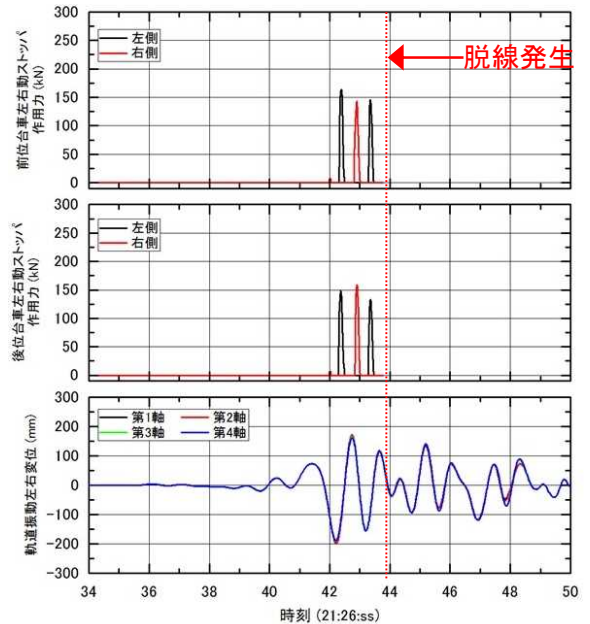
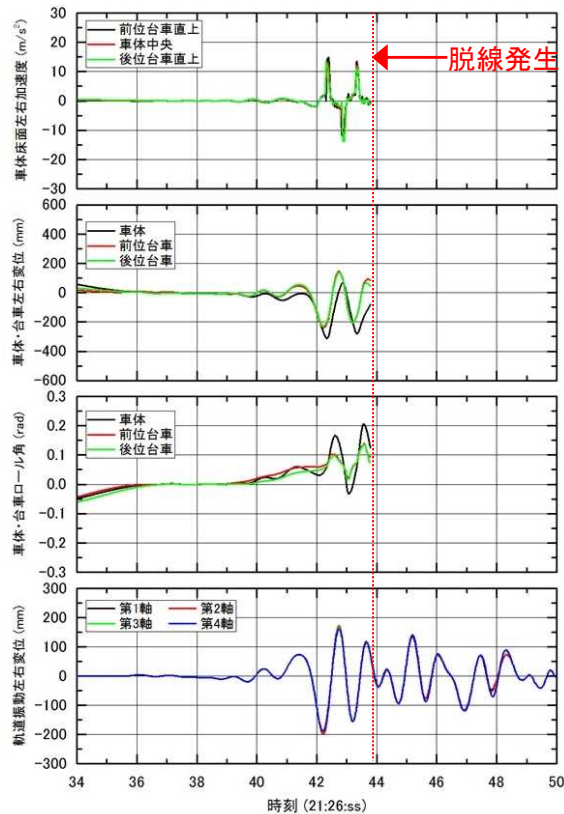
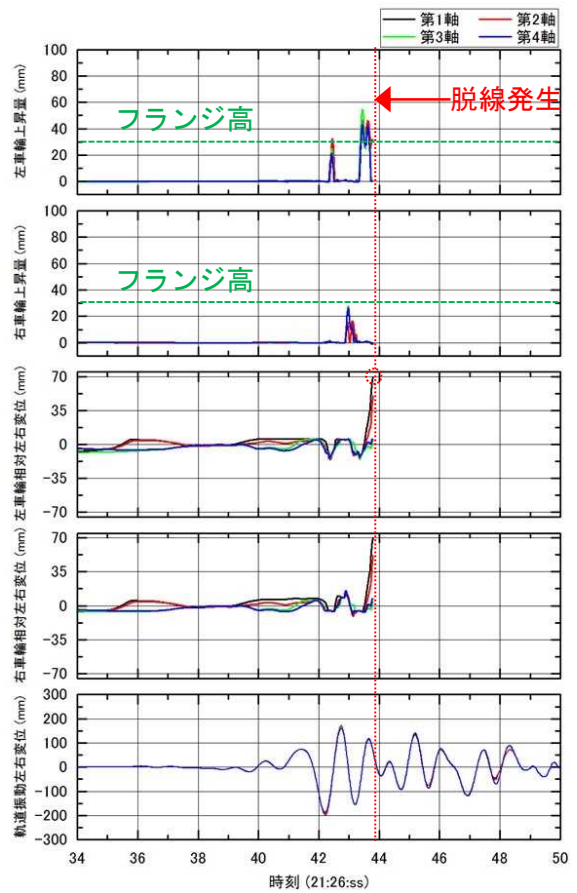
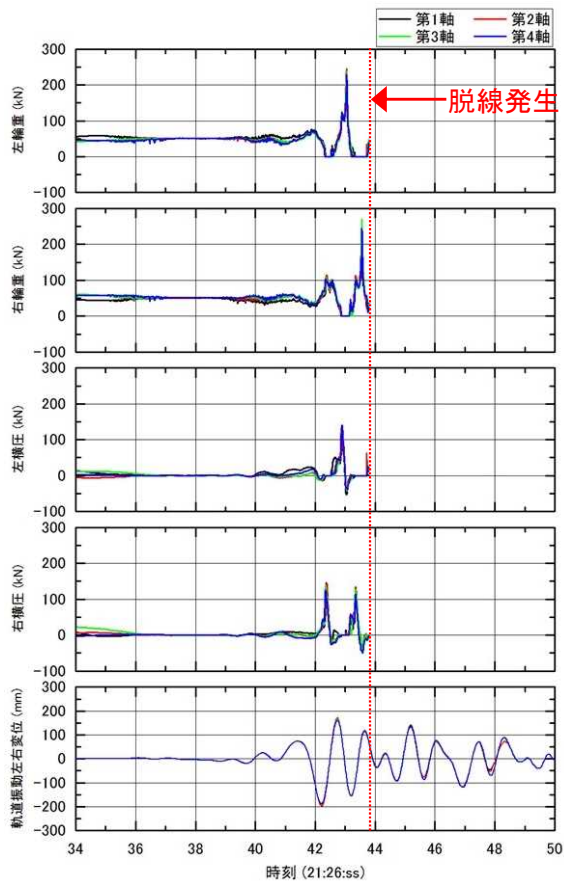
付図 1 4 支承部及び桁のモデル化



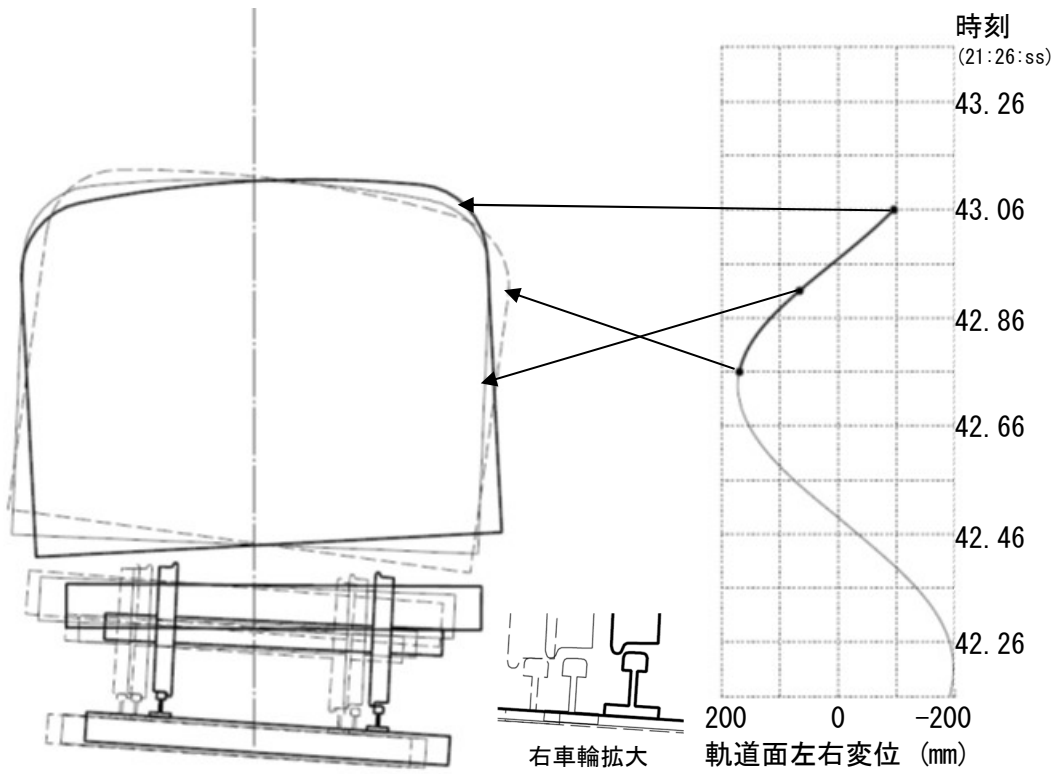
付図 1 5 車両挙動解析結果 (1 両目)



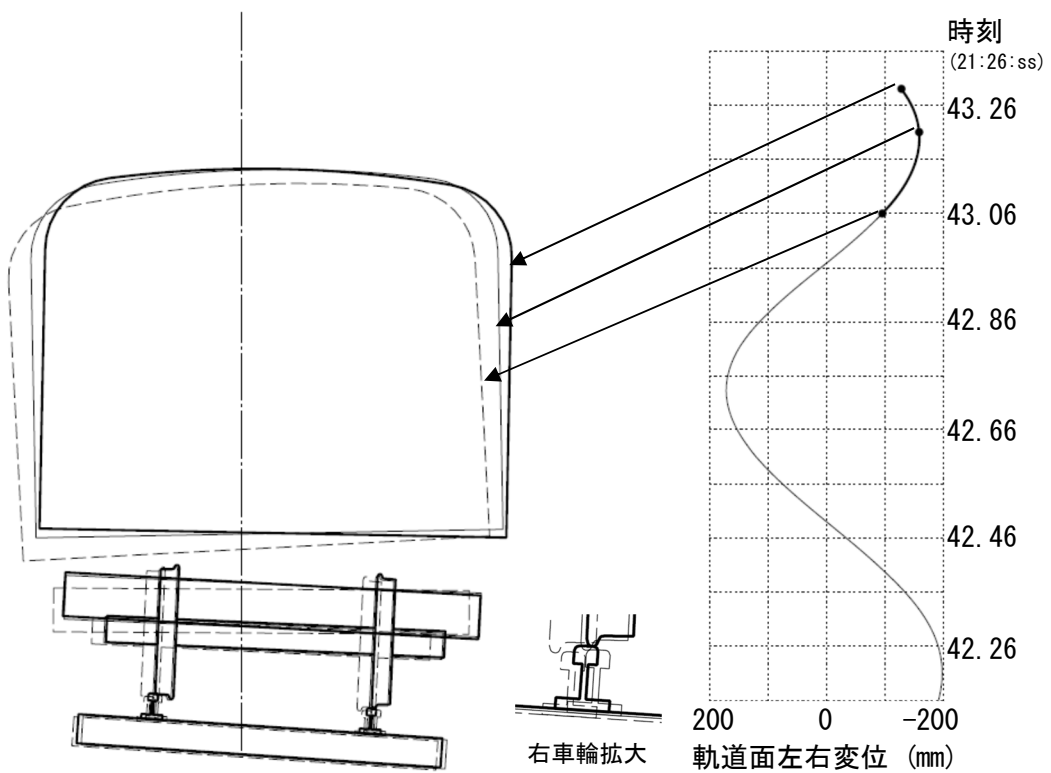
付図 1 6 車両挙動解析結果 (3 両目)



付図 1 7 脱線直前の車両姿勢の推移 (1両目)

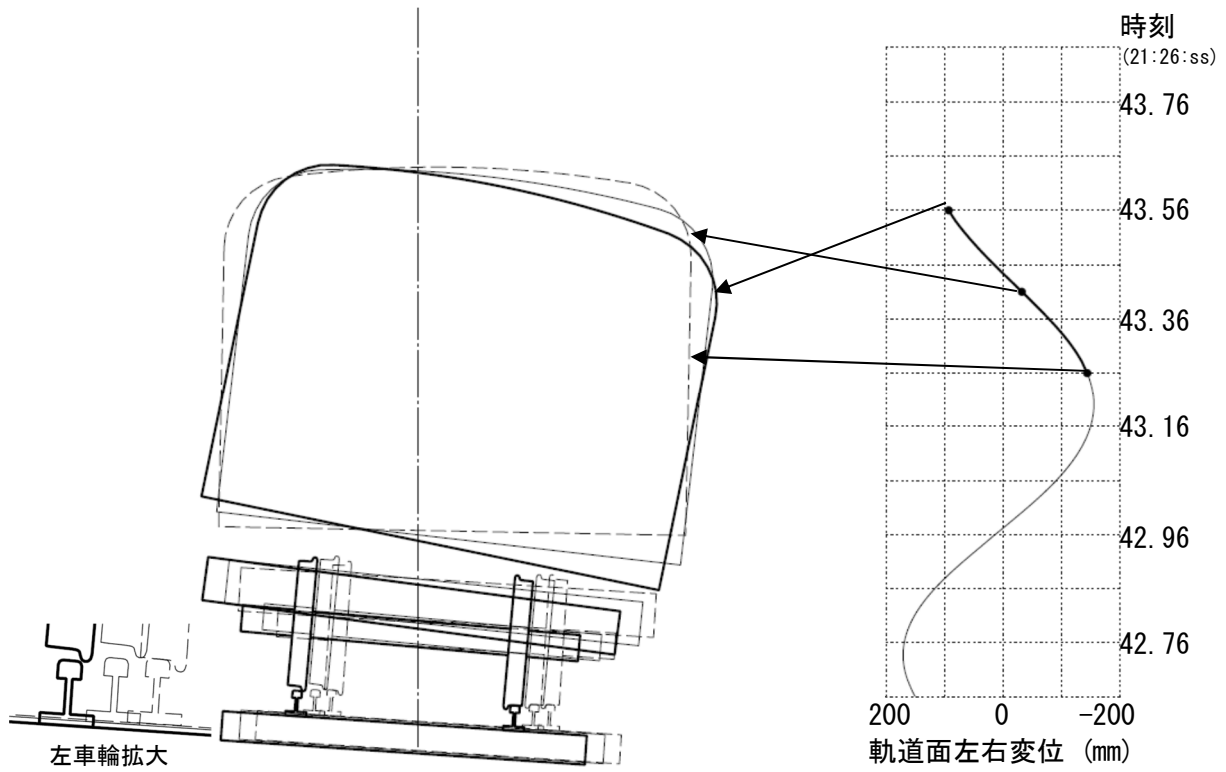


(a) 21:26:42.76~43.06まで

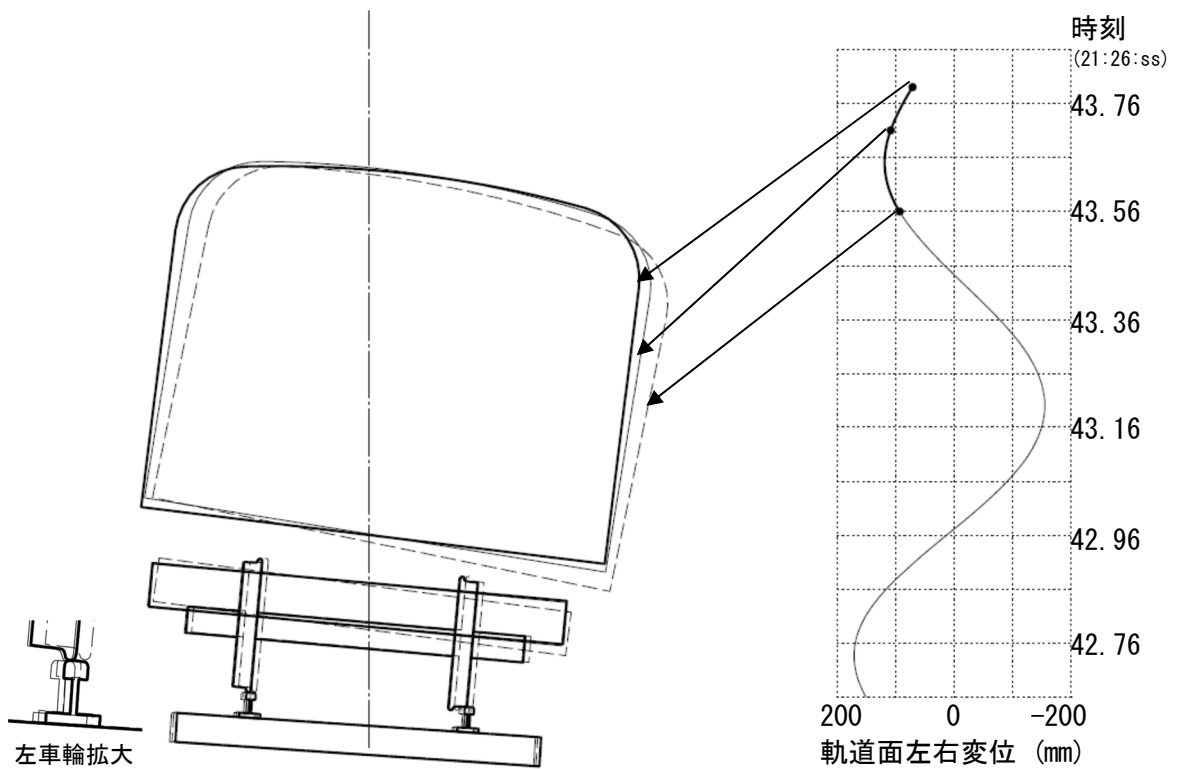


(b) 21:26:43.06~脱線まで

付図 1 8 脱線直前の車両姿勢の推移 (3両目)

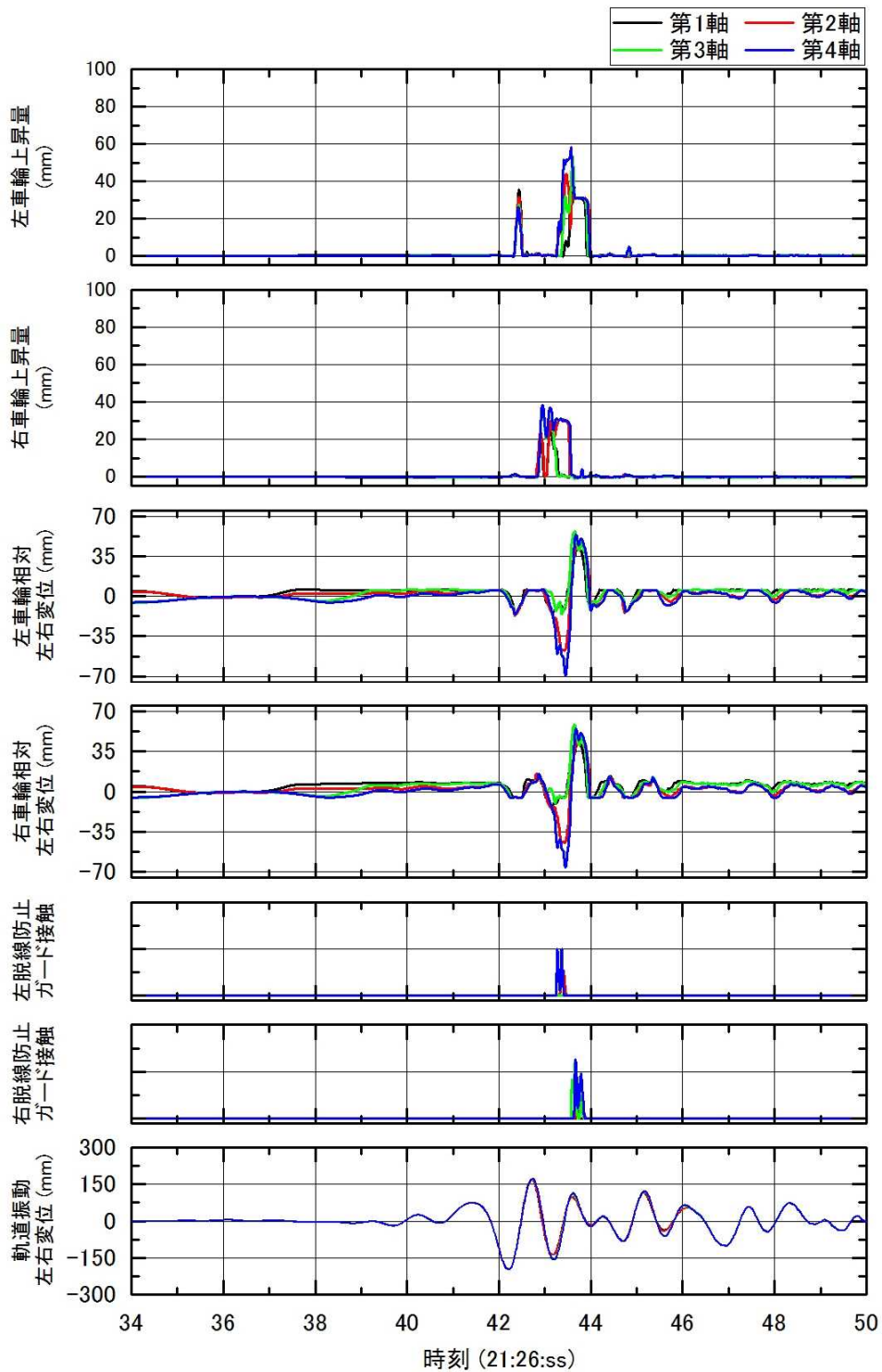


(a) 21:26:43.26~43.56まで

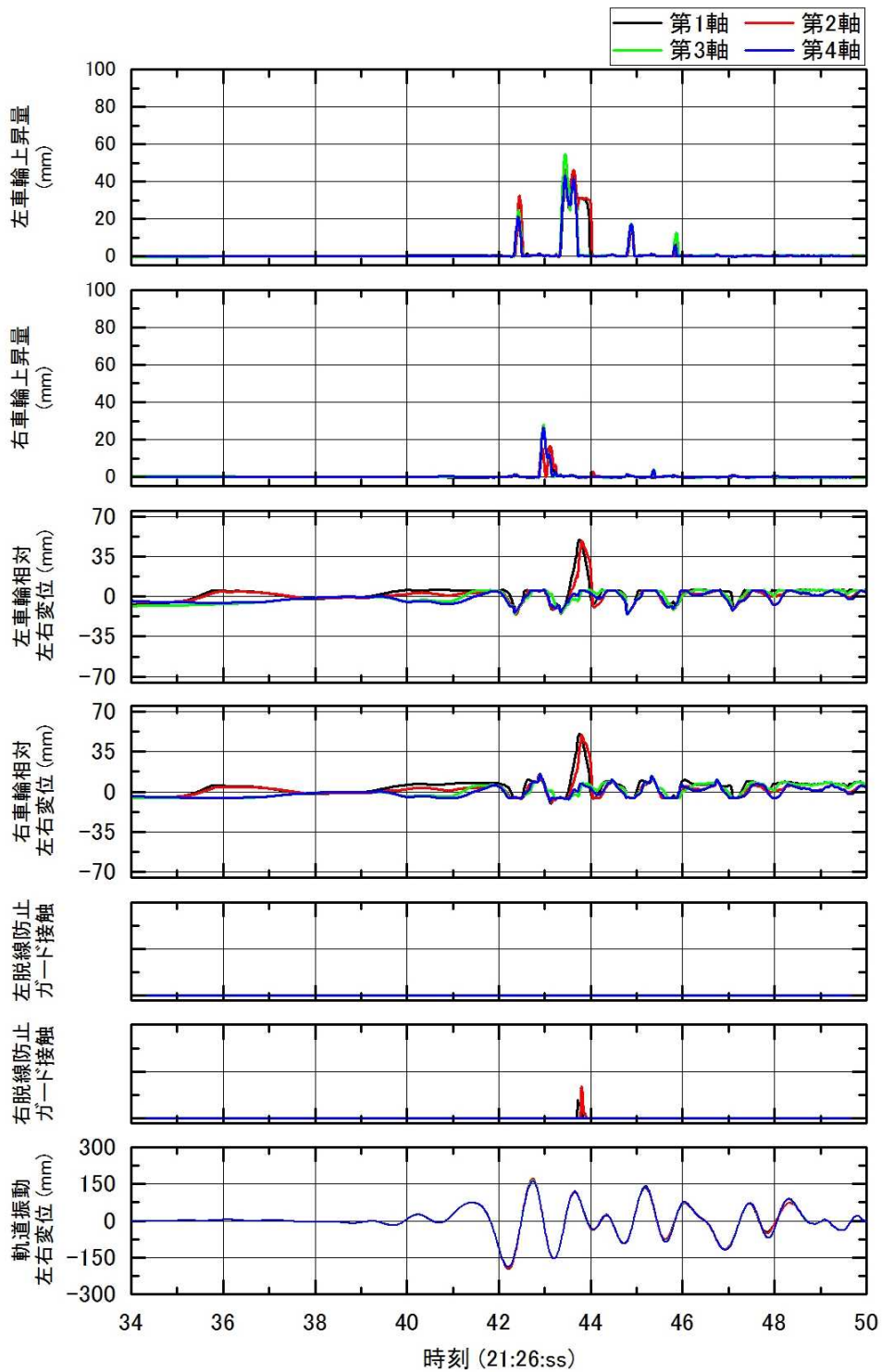


(b) 21:26:43.56~脱線まで

付図 1 9 車両挙動（脱線防止ガード有り）解析結果
（1両目）



付図 2 0 車両挙動（脱線防止ガード有り）解析結果
（3 両目）



付図 2 1 車両の挙動（右側に脱線の場合）

