

鐵道事故調查報告書

- I 東日本旅客鐵道株式会社 東北新幹線 仙台駅構内 列車脱線事故
- II 西武鐵道株式会社 西武園線 東村山駅構内 列車脱線事故
- III 日本貨物鐵道株式会社 石勝線 東追分駅構内 列車脱線事故
- IV 北海道旅客鐵道株式会社 留萌線 箸別駅～増毛駅間 列車脱線事故

平成25年 2月22日

本報告書の調査は、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 後藤 昇 弘

《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 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

鉄道事故調査報告書

鉄道事業者名：東日本旅客鉄道株式会社

事故種類：列車脱線事故

発生日時：平成23年3月11日 14時47分ごろ

発生場所：宮城県仙台市

東北新幹線 仙台駅構内

東京駅起点326k285m付近

平成25年2月4日

運輸安全委員会（鉄道部会）議決

委員長 後藤昇弘

委員 松本陽（部会長）

委員 小豆澤照男

委員 石川敏行

委員 富井規雄

委員 岡村美好

要旨

<概要>

東日本旅客鉄道株式会社の東北新幹線仙台総合車両所発、白石蔵王駅行き10両編成の試第7932B列車は、平成23年3月11日、仙台総合車両所を定刻に出発した。列車が速度約72km/hで仙台駅構内に進入中、運転士は強い揺れを感じると同時に、車内信号機に停止信号が現示されたのを認めたため、直ちに非常ブレーキを使用した。列車の停止後、車内及び車外から列車を確認したところ、4両目の前台車の2軸が左に脱線していた。

列車は、試運転列車であり、車両検修員12名及び乗務員1名が乗車していたが、死傷者はいなかった。

なお、同日14時46分ごろ、宮城県沖を震源とするモーメントマグニチュード9の「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震」が発生し、宮城県北部で最大震度7の揺れが観測された。

<原因>

本事故発生前には軌道を含めた鉄道施設、列車及び運転取扱いに問題はなかったと推定されること、また、列車が脱線した時刻は東北地方太平洋沖地震の主要動が仙台市内に到達した時刻の直後と推定されることから、列車は東北地方太平洋沖地震の本震による地震動を受けたために脱線したと推定される。なお、脱線した車両の前台車全2軸のみが脱線した理由は明らかにすることができなかった。

脱線に至る過程としては、まず東北地方太平洋沖地震の地震動の周波数成分のうち、本事故現場の高架橋の固有周波数とおおむね一致する周波数成分が、構造物の共振現象により増幅されて高架上で大きな変位として現れたこと、そして、その周波数成分が、車両に上心^{うわしん}ロールを生じさせやすい周波数帯にあったことから、車両に上心^{うわしん}ロールが生じて脱線に至ったと考えられる。

被害が拡大しなかったことについては、早期に列車を停止させるシステムが動作して脱線直前には低速になっていたこと、また逸脱防止ガイドが機能して脱線した（4両目）車両が軌道から大きく逸脱しなかったことが関与したと考えられる。

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	4
2.3	鉄道施設及び車両等に関する情報	5
2.3.1	事故現場に関する情報	5
2.3.2	鉄道施設に関する情報	6
2.3.3	地形、地質等の状況	7
2.3.4	車両に関する情報	7
2.4	列車の運行状況に関する情報	9
2.5	鉄道施設及び車両の損傷、痕跡等に関する情報	9
2.5.1	鉄道施設の主な損傷状況	9
2.5.2	車両の主な損傷状況	11
2.6	乗務員に関する情報	12
2.7	地震発生時に列車を緊急停止させるためのシステムに関する情報	12
2.7.1	新幹線早期地震検知システムの動作記録	12
2.7.2	本件列車以外の走行中の列車の停止状況	13
2.8	気象に関する情報	14
2.9	東北地方太平洋沖地震に関する情報	14
2.9.1	地震の概要	14
2.9.2	事故現場付近の地震計の記録	15
2.10	地震時の車両運動に関するシミュレーション解析	15
2.10.1	余震観測	15
2.10.2	車両運動シミュレーション	16

2.1.1	新幹線における同社の地震対策に関する情報.....	21
3	分 析.....	22
3.1	本事故前の鉄道施設、車両等に関する分析.....	22
3.1.1	鉄道施設.....	22
3.1.2	車両.....	22
3.1.3	運転取扱いに関する分析.....	22
3.2	脱線に関する分析.....	22
3.2.1	非常ブレーキの動作と脱線時の時刻及び速度に関する分析.....	22
3.2.2	脱線の原因に関する分析.....	23
3.2.3	本事故現場における地震動の分析.....	23
3.2.4	脱線に至る過程に関する分析.....	23
3.2.5	前後の車両の影響に関する分析.....	25
3.3	鉄道施設及び車両の損傷に関する分析.....	26
3.4	他の走行中の列車等に関する分析.....	27
3.5	新潟県中越地震後に実施された地震対策に関する分析.....	27
3.5.1	新潟県中越地震と東北地方太平洋沖地震での新幹線脱線事故の比較.....	27
3.5.2	新潟県中越地震後に実施された同社の地震対策に関する分析.....	29
3.6	再発防止に関する分析.....	30
3.7	被害軽減に関する分析.....	30
4	結 論.....	31
4.1	分析の要約.....	31
4.2	原因.....	33
5	再発防止策.....	34
5.1	事故後に同社が講じた措置.....	34
5.2	事故後に国土交通省が講じた措置.....	34
5.3	今後望まれる措置.....	35

添付資料

付図 1	事故発生箇所.....	36
付図 2	事故現場付近の地形図.....	36
付図 3	事故現場略図.....	37
付図 4	軌道の主な損傷状況（1）.....	37
付図 4	軌道の主な損傷状況（2）.....	38
付図 5	構造物の概要.....	38
付図 6	逸脱防止ガイドの状況.....	39
付図 7	車両の主な損傷状況.....	39
付図 8	本事故現場周辺の地震計で観測された東北地方太平洋沖地震の地震動..	40
付図 9	余震観測による高架橋上での加速度波形と計算による耐震設計上の基盤面 での加速度波形.....	40
付図 1 0	再現した本震の地震動（脱線箇所）.....	41
付図 1 1	構造物のシミュレーションモデルの概要.....	41
付図 1 2	脱線箇所の推定地震動.....	42
付図 1 3	車両モデルへの入力波形.....	42
付図 1 4	車両モデルの概要.....	43
付図 1 5	シミュレーションの結果（1）（第1軸の挙動）.....	43
付図 1 5	シミュレーションの結果（2）（第2軸の挙動）.....	44
付図 1 5	シミュレーションの結果（3）（第3軸の挙動）.....	44
付図 1 5	シミュレーションの結果（4）（第4軸の挙動）.....	45
付図 1 6	脱線直前の車両の挙動（第1軸の動き）.....	45
付図 1 7	脱線までの車両の挙動（周波数）.....	46
付図 1 8	脱線直前の車両の挙動の概念図.....	46
写真 1	本件列車の状況.....	47
写真 2	事故現場付近の状況（その1）.....	47
写真 3	事故現場付近の状況（その2）.....	47
参考図 1	セミアクティブ動揺防止制御装置における加速度センサの動作記録（4 両目）.....	48
参考図 2	走行安全限界線図の例.....	48
参考図 3	上越新幹線列車脱線事故における車両の姿勢.....	49
参考図 4	上心ロールと下心ロールの概要.....	49

1 鉄道事故調査の経過

1.1 鉄道事故の概要

東日本旅客鉄道株式会社の東北新幹線仙台総合車両所発、白石蔵王駅行き^{しろいしざおう}10両編成の試第7932B列車は、平成23年3月11日（金）、仙台総合車両所を定刻（14時40分）に出発した。列車が速度約72km/hで仙台駅構内に進入中、運転士は強い揺れを感じると同時に、車内信号機に停止信号が現示されたのを認めたため、直ちに非常ブレーキを使用した。列車の停止後、車内及び車外から列車を確認したところ、4両目（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。）の前台車の2軸が左に脱線していた。

列車は、試運転列車であり、車両検修員12名及び乗務員1名が乗車していたが、死傷者はいなかった。

なお、同日14時46分ごろ、宮城県沖を震源とするモーメントマグニチュード9の「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震」が発生し、宮城県北部で最大震度7の揺れが観測された。

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23年3月30日、本事故の調査を担当する主管調査官ほか1名の鉄道事故調査官を指名し、平成23年4月15日に1名の鉄道事故調査官を追加指名した。

東北運輸局は、本事故調査の支援のため、職員を事故現場に派遣した。

本事故は、平成23年3月11日に発生した、「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震」（以下「東北地方太平洋沖地震」という。）の地震動が列車脱線事故に関係したと考えられたことから、地震動、構造物及び車両に関わる、表1に示す3名の専門委員を任命し、地震時の車両運動に関する解析についての検討を行った。なお、本事故に関し、地震時の車両運動に関するシミュレーション解析を公益財団法人鉄道総合技術研究所に委託したほか、脱線に至る過程の解析について同研究所の協力を得た。

表1 専門委員とその分野

所 属	職 名	氏 名	分 野
東京大学大学院情報学環 総合防災情報研究センター	教授	古村 孝志	地震
宇都宮大学大学院工学研究部 循環生産研究部門	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

(所属及び職名は平成23年7月現在のものを示す。)

1.2.2 調査の実施時期

平成23年4月1日	現場調査、車両調査及び口述聴取
平成23年11月22日	現場調査、車両調査及び口述聴取
平成23年9月30日 ～平成24年3月16日	地震時の車両運動に関するシミュレーション解析

なお、東北地方太平洋沖地震の影響により、初動調査を行うことができたのは本事故発生日から21日後であった。早期に現場を復旧する必要から、東日本旅客鉄道株式会社（以下「同社」という。）において事故の状況を正確に記録することを前提に、初動調査の前に試第7932B列車（以下「本件列車」という。）の復線作業等を認めた。

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、同社の本件列車の運転士（以下「本件運転士」という。）及び本件列車に乗務していた車両検修員Aの口述によれば、概略次のとおりであった。

(1) 本件運転士

台車検査後の試運転列車を担当し、仙台総合車両所の10番線から定刻(14時40分)に出発した後、110信号を受信したので、速度107～108km/hを保ちながら運転を行った。その後、75信号を受信してATCブレーキが作動して速度が約70km/hとなった。東京駅起点326.4km付近(以下「東京駅起点」は省略。)を、速度約65km/hで惰行運転中に、ふだんとは明らかに違う揺れを突然感じたのと同時に、停止信号を受信したので直ちに非常停止手配を執った。

本件列車停止後も、いつ脱線してもおかしくないような今までに感じたことのない強い揺れを感じた。特に横揺れを強く感じた。中間車両に乗り込んでいる検修員から3両目と4両目の間に段差があるとの連絡を受けたので、連結部に行って車内から確認すると、4両目(以下「本件車両」という。)が30～40cm程度下がっていた。また、運転台にあるモニタにて、6両目のパンタグラフの降下とMR圧^{*1}が低下していくのを認めたので、それらを指令に報告し、停電時の取扱いを実施した。手歯止めをするために車外に出た時に床下を確認したところ、本件車両前台車の全2軸が約10cm程度左側に脱線しているのを確認したので、その旨を指令に報告した。その後、指令等と連絡を取り合い、20時59分に降車の指示があったので、転動防止手配を再度確認した後に、検修員とともに21時05分ごろに本件列車から離れた。

(2) 車両検修員A

台車検査後の本線試運転前に、本件列車の台車周りの検査を実施したが異常はなかった。3両目と本件車両の振動測定を担当するため、本件列車に乗り込んだ。走行中は3両目の後台車付近に当たる一番後ろの座席に座っていた。

本件列車は定刻に出発し、本線を走行している時に下りの新幹線2本とすれ違った後、個人所有の携帯電話で緊急地震速報を受信した。画面を確認すると「宮城県沖に地震発生」とあったので、身構えた。その後、「ドーン」という感じで下からの突き上げを感じ、次いでハンモックというか船に乗っているような、シートにつかまっていなければ立ってられないほどのすごい横揺れを3回感じた。1回目の揺れを感じてすぐに本件列車は停止した。停止時には「ガクン」といったショックを感じた。その時は進行方向に向かって座っていたので、本件車両の様子は見ていない。

揺れが収まった後、3両目と4両目(本件車両)の連結部を車内から見たら、本件車両側が左側に少し傾いていた。

^{*1} 「MR圧」とは、ブレーキ等を作用させるための圧縮空気を蓄える元空気タンクの圧力をいう。

(付図1 事故発生箇所、付図2 事故現場付近の地形図、写真1 本件列車の状況 参照)

2.1.2 運転状況の記録

本件列車の運転状況を記録する装置であるDS-ATC^{*2}車上装置の検査記録部(以下「ATC記録部」という。)は、受信制御部及びATC関係機器等の動作を0.3秒間隔で記録している。本件列車のATC記録部から取得した本件列車の停止に関わる情報は表2のとおりである。

なお、速度情報については実測試験等を実施して補正したものではないため、若干の誤差が内在している可能性がある。

なお、本事故の発生時刻は、後述する「3.2.1 非常ブレーキの動作と脱線時の時刻及び速度に関する分析」から、14時47分ごろであったと推定される。

表2 DS-ATC記録部から取得した列車停止に関わる情報

時刻	位置	速度 (km/h)	備考
14時47分01秒21	326k400m	72.2	停電検知が架線の停電を検知し、停電ブレーキの動作指令を出す
14時47分02秒11	326k384m	71.8	車上のATC装置が架線の停電を検知し、非常ブレーキの動作指令を出す
14時47分16秒21	326k208m	14.6	本件列車が脱線した付近
14時47分16秒51	326k208m	13.6	同
14時47分16秒81	326k206m	12.8	同
14時47分18秒91	326k204m	0	速度0km/hを検知

*表中の位置はトランスポンダ車上子のキロ程であり、列車先頭とは約7.2m離れている。

*DS-ATC記録の時刻は車上装置の時計によるものであり、本件列車の場合、本記録を実際の時刻に補正するには、記録された時刻(車上の記録)に約2.3秒を加える必要がある。

また、記録にはATCデータ記録処理の過程で±0.15秒程度の誤差が内在する。

2.2 人の死亡、行方不明及び負傷

なし。

^{*2} 「DS-ATC」とは、デジタル信号を使用した同社の新幹線用の自動列車制御装置のことで、Digital communication & control for Shinkansen - Automatic Train Controlの略である。

2.3 鉄道施設及び車両等に関する情報

2.3.1 事故現場に関する情報

(1) 線形

本事故は、第3小田原高架橋（326k212m～同331m）の橋脚2P付近（326k285m付近）で発生した。本事故現場付近は、高架橋及び橋りょうが連続する区間に位置している。線路の方向はおおむね東北東－西南西方向である。

326k060m～326k222m付近は直線区間で、そこから326k361mまではR4,000の左曲線（カント10mm、4%上り勾配）区間で、326k361m～同705m付近は直線区間である。また、326k118m～同182m及び326k392m～同456mには18番片開き分岐器が設置されている。

(2) 軌道構造

本事故現場付近はスラブ軌道で、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、直結8形または伸縮継目用締結装置が使用されており、それらの間隔は、直結8形では625mmまたは500mm、伸縮継目用締結装置では550mmである。

軌道スラブの寸法は、本件車両の前台車第1軸が停止した位置のスラブで長さ4,900mm、幅2,340mm、厚さ190mm、同第2軸が停止した位置で長さ5,030mm、幅2,340mm、厚さ190mm、そして、新青森駅方では長さ4,930mm、幅2,340mm、厚さ190mmとなっている。また、スラブ軌道の突起の形状は全円または半円で、その半径は200mm、高さは250mmである。

(3) 脱線状況

本件列車は先頭が326k202m付近に停止していた。

本件車両の前台車第1軸は326k280m付近に、第2軸は326k282m付近に停止していた。第1軸右車輪は約210mm、同左車輪は約95mm、前台車第2軸右車輪は約260mm、同左車輪は約155mm、それぞれ左に脱線していた。

326k283m付近及び326k286m付近の左右のレール頭頂面には、車輪によると思われる線状の痕跡があり、そこから本件車両の前台車の各軸が停止していた位置までのレール締結装置やスラブ上に、車輪によると思われる損傷等が認められた。また、第1軸の駆動装置、第2軸のモータ、前台車後方の底板取付用横ばり等がレールと接触した状態で停止していた。

(付図1 事故発生箇所、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 軌道の主な損傷状況(1)及び(2)、写真1 本件列車の状況、写真2 事故現場付近の状況(その1)、写真3 事故現場付近の状況(その2)参照)

2.3.2 鉄道施設に関する情報

(1) 東北新幹線の概要

同社の東北新幹線は東京駅から新青森駅に至る営業キロ713.7kmの複線、交流25,000Vの電化区間で、軌間は1,435mmである。

(2) 事故現場付近の高架橋及び橋りょうに関する情報

本事故現場である第3小田原高架橋並びにその新青森駅方の金剛院丁橋りょう(326k331m～同364m)の構造形式は、いずれも上部工は合成桁、下部工は鋼製橋脚である。基礎は深礎杭となっており、^{ちちゅうばり}地中梁が設けられている。

同社の第3小田原高架橋全体図によれば、第3小田原高架橋の地表からの高さ(桁までの高さ)は、桁により異なるが、おおよそ10～12mである。桁長も桁ごとに異なり、本件列車が脱線した橋脚2Pの前後では、同図によれば、それぞれ24.60m、44.25mとなっている。

第3小田原高架橋と金剛院丁橋りょうにおける、桁と橋脚を接合する支承、及び桁同士を連結する落橋防止工には、それぞれ可動形式と固定形式があるが、脱線箇所付近である第3小田原高架橋の橋脚2Pの支承は両側の桁とも可動形式であり、また落橋防止工の形式は固定形式が採用されている。

(付図5 構造物の概要、写真3 事故現場付近の状況(その2)参照)

(3) 土木施設及び軌道の定期検査に関する情報

同社の新幹線軌道施設実施基準及び新幹線土木施設実施基準に基づく直近の検査実施日は表3のとおりである。これらの検査記録によれば、高架橋等の土木構造物や軌道に異常は認められなかった。

表3 鉄道施設の直近の検査実施日

検査等の種類	検査周期	実施日
土木施設の検査	2年	平成23年2月7日
スラブ検査	1年	平成22年5月26日
レール等検査	1年	平成22年10月6日
ロングレール検査	1年	平成23年2月24日

列車動揺検査	1年	平成23年3月10日
本線の軌道変位等検査	2か月	平成23年3月10日（列車）
線路総合巡視	2週	平成23年3月9日（徒歩） 平成23年3月10日（列車）

2.3.3 地形、地質等の状況

本事故現場は更新世から完新世にかけて形成された仙台平野^{*3}に位置している。また、本事故現場付近の地質は、下位より新第三紀鮮新世に堆積した亀岡層、竜の口層、そして更新世後期に堆積した仙台上町段丘堆積物及び相当層が分布している。このうち、亀岡層は砂岩、凝灰岩、シルト岩等からなり、仙台上町段丘堆積物及び相当層は礫層、砂層及び粘土層からなっている^{*4}。

同社の東北新幹線工事史地質図^{*5}によれば、本事故現場の地質は、地表から深度1m付近までは表土、深度1m付近～6.5m付近までは先に述べた仙台上町段丘堆積物及び相当層に当たると考えられる礫・礫質土が分布し、深度6.5m付近から深部には亀岡層に当たると考えられる凝灰岩、泥岩、砂岩が分布している。また、土質工学的な性質としては、深度2m以深にはN値^{*6}がおおむね50を超える地盤が連続して分布している。

（付図5 構造物の概要、付図8 本事故現場周辺の地震計で観測された東北地方太平洋沖地震の地震動 参照）

2.3.4 車両に関する情報

(1) 車両の概要

車種：交流電車（25,000V、50Hz）

編成両数：10両

形式及び主要諸元：表4のとおり

^{*3} 小池一之・田村俊和・鎮西清高・宮城豊彦編（2005）：日本の地形3東北、東京大学出版会

^{*4} 地質調査所（2002）：1：50,000地質図「仙台」

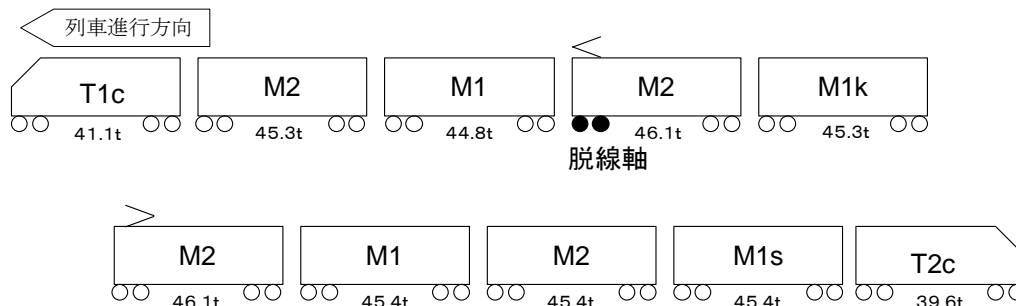
^{*5} 日本国有鉄道 仙台新幹線工事局（1981）：東北新幹線（桑折・有壁間）地質図

^{*6} 「N値」とは、標準貫入試験において、決められた重さ（質量63.5kg）のハンマを76cmの高さから自由落下させて、標準貫入試験用サンプルを規定量（30cm）地中に貫入させるのに要する打撃回数のことをいう。土の硬軟、締まり具合の相対的な値を表す。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。

表4 車両の形式及び主要諸元（新製時）

編成位置	1両目	2両目	3両目	4両目	5両目
形式	E223-1019	E226-1119	E225-1019	E226-1219	E225-1419
新製日	平成17年12月5日				
空車質量 (t)	41.1	45.3	44.8	46.1	45.3
定員(人)	54	100	85	100	75
車両長(m)	25.700	25.000			
車両高(m)	3.764	3.960		4.490	3.915
車両幅(m)	3.380				
軸距(mm)	2,500				
車輪径(mm)	860				

編成位置	6両目	7両目	8両目	9両目	10両目
形式	E226-1319	E225-1119	E226-1419	E215-1019	E224-1119
新製日	平成17年12月5日				
空車質量 (t)	46.1	45.4	45.4	45.4	39.6
定員(人)	100	85	100	51	64
車両長(m)	25.000				25.700
車両高(m)	4.490	3.960		3.700	3.764
車両幅(m)	3.380				
軸距(mm)	2,500				
車輪径(mm)	860				



(2) 車両の検査

同社の新幹線電車整備実施基準に基づく本件車両の直近の検査実施日等は表5のとおりである。これらの検査記録では、走行装置等に関して異常は認

められなかった。なお、台車検査とは、主電動機、動力伝達装置、走行装置、ブレーキ装置等の台車を構成する主要な部分について検査を行うものである。

表5 本件列車の直近の検査実施日

検査の種類	検査周期 ^{*7}	実施日
全般検査	36か月又は 走行距離120万km	平成22年2月3日
台車検査	18か月又は 走行距離60万km	平成23年3月11日
交番検査	30日又は走行距離3万km	平成23年3月1日
A T C装置の特性検査	90日	平成22年12月25日
列車無線装置の検査	6か月	平成23年1月12日

(3) 車両の地震対策

同社では、新幹線が脱線した場合の被害軽減を目的として、同社が所有する新幹線の全車両に逸脱防止ガイド^{*8}を設置している。

本件列車に設置されている逸脱防止ガイドは、軸箱の下面に設置されており、逸脱防止ガイドがレール側面と接触する部位（以下「ガイド部分」という。）は車輪リムの外側面から約242mm離れた位置にある。

（付図6 逸脱防止ガイドの状況 参照）

2.4 列車の運行状況に関する情報

本件列車は東北新幹線仙台総合車両所発、白石蔵王駅行きの試験列車で、東北新幹線仙台総合車両所を定刻の14時40分に出発した。また、本事故発生前の14時20分～24分間に、上り列車が本事故現場を異常なく走行していた。

2.5 鉄道施設及び車両の損傷、痕跡等に関する情報

2.5.1 鉄道施設の主な損傷状況

(1) 軌道

① レールに認められる損傷等

レール締結装置No.1付近（レール締結装置の番号は、レール頭頂面上の傷が最初に認められた箇所付近のそれをNo.1とし、列車の進行方向に向かって順に大きい番号を付した）の右レールの326k286.10

^{*7} 「検査周期」とは、標記の期間、又は走行距離を超えない期間のことをいう。

^{*8} L型車両ガイド、脱線防止L型ガイド等とも呼称されているが、本報告書では「逸脱防止ガイド」という。

m～同285.70m、及び左レールの326k285.89m～同285.66mの頭頂面には、それぞれ右側から左側に向かって、車輪によると思われる線状の傷が認められた。これらは、いずれもレール頭頂面上から始まり、頭頂面の左側端部にかけて連続していた。

レール締結装置No.5付近の右レールの326k283.55m～同283.10m、及び左レールの326k283.32m～同283.07mの頭頂面には、それぞれ右側から左側に向かって、車輪によると思われる線状の傷が認められた。右レールの傷はレール頭頂面上から始まっていたが、左レールの傷はレール頭部の内側から外側にかけて連続していた。

また、レール締結装置No.4付近(326k283.9m付近)の右レールの外側側面には、長さ0.2m程度の擦過痕が認められた。

さらに、以下に記述するような本件列車の脱線によると考えられる傷が認められた。

レール締結装置No.4とNo.5の間(326k283.84m～同283.32m)の左レール頭頂面には、灰色の塗料が付着した擦過痕が認められた。レール締結装置No.6付近の左レール内側の頭頂面から頭部側面にかけては擦過痕が、またレール締結装置No.6付近の左レール頭頂部の内側には第2軸のモータがレールと接触したことによる擦過痕が認められた。

上記以外にも、左右のレール頭頂面の所々に擦過痕が認められた。

② スラブ面及びレール締結装置に認められる損傷

レール締結装置No.2付近(326k285.1m付近)から前台車第2軸の停止位置(326k282.33m付近)にかけて、右レール内側のスラブ面上には脱線した車輪によると思われる打痕や連続した線状の傷が認められた。

レール締結装置No.2とNo.3の間及びNo.3とNo.4の間には、脱線した車輪によると思われる打痕が認められた。このうち、No.3とNo.4の間の打痕からは線状の傷が始まっており、第2軸右車輪の停止した位置まで続いていた。この線状の傷は、レール締結装置No.3付近からNo.4付近(326k283.9m付近)にかけて徐々にレールから離れ、No.4付近ではレール底部から約260mm離れた位置に付いていたが、ここより仙台駅方では、レール底部から200～210mm離れた位置に付いていた。

また、左レール外側には、レール締結装置No.2とNo.3の間に脱線した車輪によると思われる打痕があり、それより仙台駅方のレール締結装

置には、脱線した車輪によると思われる損傷が第2軸左車輪の停止位置にかけて認められた。

レール締結装置No.7付近の右レール内側、及び左レール外側のスラブ面には脱線した車輪によると思われる打痕が認められ、そこから前台車第1軸の左右車輪の停止位置にかけては、脱線した車輪によると思われるスラブ面上の線状の傷やレール締結装置の破損が断続して認められた。

(付図4 軌道の主な損傷状況(1)及び(2) 参照)

(2) 高架橋及び橋りょう

本事故現場の第3小田原高架橋から金剛院丁橋りょうの区間においては、桁、橋脚に損傷はなく、電線等が格納されているトラフにも変形等は認められなかった。また、支承部や落橋防止工に角折れ等による変形や著しい変位は認められなかった。

(3) 電路設備

本事故現場付近の架線等の電路設備には、上下線ともに異常は認められなかった。

2.5.2 車両の主な損傷状況

各車両の主な損傷状況は以下のとおりである。

(1) 3両目

① 自動高さ調整装置(以下「レベリングバルブ」という。)高さ調整棒(3か所)が曲損していた。

(2) 4両目(本件車両)

① 前台車の全車輪に複数の打痕があった。

② 前台車の第1軸の駆動装置底部にレールとの接触痕があった。

③ 前台車の第2軸のモータ底部にレールとの接触痕があった。

④ 前台車の左側の増圧シリンダーカバーにレールと接触した痕跡があった。

⑤ 4か所のレベリングバルブ高さ調整棒の全てが曲損又は破断していた。

⑥ 台車枠とストッパ金具に相互が接触した痕跡があった。

⑦ 前台車第2軸右側の逸脱防止ガイドの新青森駅方に擦過痕があった。

⑧ 車両後方左側の構体窓部の隅角部にひずみが認められた。

⑨ 前台車の空気ばねの内部に大きく変位した際に生じたものと思われるゴムの摩耗粉が混入していた。

⑩ 前台車及び後台車のセミアクティブ左右動ダンパのピストンが破損していた。

⑪ 1本リンクが異常上昇止受と接触したと思われる痕跡があった。

⑫ 左右動ストッパ受に変形が認められた。

⑬ 前台車前方の底板にレールと接触したことによると思われる変形が認められた。

(3) その他の車両

1両目の1か所、5両目の4か所、7両目の2か所、8両目～10両目の全てのレベリングバルブ高さ調整棒が曲損若しくは折損していた。さらに、多くの車両で左右動ストッパ受に変形が認められた。また、6両目のパンタグラフが降下していた。

(付図7 車両の主な損傷状況 参照)

2.6 乗務員に関する情報

本件運転士 男性 52歳

新幹線電気車運転免許

平成 8 年 11 月 13 日

2.7 地震発生時に列車を緊急停止させるためのシステムに関する情報

同社では、地震発生時に新幹線列車を緊急停止させるためのシステムとして、地震動を早期に検知し、き電を停止させる新幹線早期地震検知システム、及び停電情報を車上で直ちに検知し非常ブレーキを動作させるシステムを採用している。

新幹線早期地震検知システムは、沿線や海岸線に設置した合計97か所（平成23年3月時点）の地震計のうち、いずれかの地震計で地震の主要動（S波）より先に到達する初期微動（P波）を検知した際に、地震の発生位置や規模を推定し、その揺れが鉄道構造物に被害を及ぼすレベルと想定される場合、若しくは一定以上の大きさの揺れ（S波）を検知した場合に変電所へその情報を伝え、き電を停止させるシステムである。また、車両側では、き電停止による停電を、ATC車上装置が検知して非常ブレーキを動作させるシステムに加えて、これより約1秒早く検知して非常ブレーキを動作させるシステムを導入している。

2.7.1 新幹線早期地震検知システムの動作記録

新幹線早期地震検知システムの動作状況は、同システムの情報処理装置に記録されている。

東北地方太平洋沖地震では、同社の海岸地震計の一つである金華山地震計が14時47分03秒ごろに120gal (cm/s²) を超える大きさの揺れを検知し、同社の新仙台変電所他に規定値超過電文^{*9}を送出した。これにより、新仙台変電所では

^{*9} 「規定値超過電文」とは、ここではシステムにおける一定の規則に従った電子情報のことをいう。

14時47分03秒ごろにき電用遮断器が動作し、き電が停止している。なお、金華山地震計では、S波による表示用規定値超過電文の送信前にP波検知並びに地震の発生位置、規模の推定が行われていたが、き電停止に至る推定値ではなかった。

同社の金華山地震計は、直近の検査では異常はなかった。また、新幹線早期地震検知システムも直近の検査で異常はなかった。

2.7.2 本件列車以外の走行中の列車の停止状況

東北地方太平洋沖地震発生時、東北新幹線の東京駅～新青森駅間の上下線には33列車が運行しており、そのうち10列車が駅に停車していた。特に加速度の大きい地震動が観測された宇都宮駅～盛岡駅間には、本件列車を除いて16列車が運行しており、このうち駅間を走行していたのは表6に示す10列車であった。

これらの列車はいずれも非常ブレーキが動作して減速し、脱線せずに停車した。

なお、東北地方太平洋沖地震発生時には同社管内の新幹線の全区間で、早期地震検知システムにより、き電停止となった。

表6 本件列車以外の走行中の列車に関する情報
(宇都宮駅～盛岡駅間)

列車番号 (列車名)	駅間	方向	推定走行速度 ¹⁾ (km/h)	停止位置 ²⁾
3029B (はやて・こまち29)	宇都宮 ～那須塩原	下り	記録なし ³⁾	記録なし ³⁾
259B (なすの259)	那須塩原 ～新白河	下り	記録なし ³⁾	記録なし ³⁾
142B (Maxやまびこ・つばさ142)	同	上り	238	163k342m 付近
63B (やまびこ63)	新白河～郡山	下り	272	181k414m 付近
3026B (はやて・こまち26)	郡山～福島	上り	271	246k497m 付近
144B (Maxやまびこ144)	白石蔵王 ～仙台	上り	95	321k771m 付近
61B (やまびこ61)	仙台～古川	下り	271	340k532m 付近
3027B (はやて・こまち27)	同	下り	271	356k980m 付近
3028B (はやて・こまち28)	新花巻～盛岡	上り	267	474k738m 付近
59B (やまびこ59)	同	下り	270	488k568m 付近

1) 列車が停電を検知した時の推定速度

2) 車上の記録装置に記録されたキロ程

3) 列車停止後の早い段階で給電が開始され、地震発生時に停車した時のデータが上書きされたため、必要な記録を抽出できなかった

2.8 気象に関する情報

当時の現場付近の天気 雪

仙台管区気象台（仙台市宮城野区）の観測記録によると、3月11日14時40分の気温は5.0℃、南南西の風、平均風速6.0m/sであり、0.5mm以下の降雪量が観測されている。

2.9 東北地方太平洋沖地震に関する情報

2.9.1 地震の概要

気象庁によると、平成23年3月11日14時46分18.1秒に、北緯38度06.2分、東経142度51.6分、深さ24kmの地点を震源とし、震源域が岩手県沖から茨城県沖に及ぶモーメントマグニチュード(Mw)9.0、宮城県北部で最大震度7の揺れが観測された、東北地方太平洋沖地震が発生した。

この地震は海溝型地震で、震源域は南北（長さ）約400km、東西（幅）約200kmにわたると解析され、この範囲で幾つもの地震が僅かな時間差で連続して発生した。独立行政法人防災科学技術研究所のK-NE T仙台では、約1,808galの最大加速度（3成分合成値）が観測されている。

なお、本事故現場からの震央の方向は、おおむね東方で、距離は約172kmである。

気象庁発表の震度分布によれば、東北新幹線沿線の広い範囲で震度6以上の揺れが観測されており、特に宇都宮駅付近、郡山駅付近及び仙台駅～くりこま高原駅間の沿線では震度6強～7の揺れが観測されている。

既往の文献等^{*10}、^{*11}によれば、「平成16年（2004年）新潟県中越地震」（平成16年10月23日発生。以下「新潟県中越地震」という。）等の鉄道構造物等に大きな被害をもたらした地震と東北地方太平洋沖地震を比較した場合、東北地方太平洋沖地震の揺れの特徴として、①非常に強い揺れが北海道～関東の太平洋岸の広範囲に観測された、②広範囲に及ぶ震源域の破壊が順次発生したために揺れの継続期間が長かった、③「平成7年（1995年）兵庫県南部地震」（平成7年1月17日発生。以下「兵庫県南部地震」という。）や新潟県中越地震の震源近傍では構造物に影響を与える1～2Hz程度の地震動が卓越していたのに対して東北地方太平洋沖地震において強い揺れが観測された多くの地域では、それより高い3～5Hz程度の地震動が卓越していた、等が挙げられる。

*10 高井秀之（2011）：新幹線の地震対策 研究開発の経緯と今後の課題、JRgazette、Vol. 69、No. 9、pp. 26～30.

*11 室野剛隆（2012）：東北地方太平洋沖地震で地盤はどう揺れたか、RRR、Vol. 69、No. 3、pp. 2～5.

2.9.2 事故現場付近の地震計の記録

本件列車が脱線したと推定される時刻とほぼ同時刻における、本事故現場周辺の地震計で観測された東北地方太平洋沖地震の最大加速度等は付図8のとおりである。

なお、これらの観測点のうち、本事故現場から距離的に近く、かつ本事故現場の地盤状況とおおむね同様の地点は同社仙台駅に設置された同社の地震計（325km120m付近、上り線側に約50m離れた位置に設置されている。以下「同社仙台駅の地震計」という。）である。

同社仙台駅の地震計で観測された本震の地震動の記録では、南北方向で約712gal、東西方向で約566gal、上下方向で約367galの最大加速度が観測されている。

なお、気象庁資料^{*12}によれば、東北地方太平洋沖地震の主要動（S波）が仙台市に到達したのは14時46分48.8秒に発表された緊急地震速報（警報）から16秒後であった。このことから、本事故現場付近に同地震の主要動が最初に到達したのは14時47分05秒ごろと考えられる。

（付図8 本事故現場周辺の地震計で観測された東北地方太平洋沖地震の地震動参照）

2.10 地震時の車両運動に関するシミュレーション解析

3.1の「本事故前の鉄道施設、車両等に関する分析」で後述するように、本事故発生前に鉄道施設、車両等に異常が認められなかったこと、本事故発生直前に東北地方太平洋沖地震が発生したことから、本事故の原因に同地震が関係している可能性が考えられた。そこで、余震観測の結果を踏まえ、本件列車の脱線原因を分析するために地震時の車両運動に関するシミュレーション解析（以下「車両運動シミュレーション」という。）を行った。

2.10.1 余震観測

本事故現場である第3小田原高架橋上の326k282m付近とその橋脚（2P）近傍の地表面において平成23年3月31日～同年4月2日にかけて余震観測を行った。

観測された余震記録のうち、同社仙台駅の地震計でも記録された4月1日の7時17分に観測された余震記録を、2.10.2で後述する車両運動シミュレーションでの脱線現場における本震の「地震動波形の再現」に用いた。この余震は同日7時16分57.0秒に宮城県沖で発生した。震央は本事故現場から、おおむね東へ約

*12 気象庁：平成23年3月 地震・火山月報（防災編）。

7.4 km 離れた位置にあり、震源の深さは5.4 km、地震の規模を示すマグニチュード (M) は4.3で、震度2の揺れが仙台管区気象台で観測されている。

この余震により観測された線路に直交する方向（まくらぎ方向。以下「線路直交方向」という。）での加速度の最大値（加速度の符号は、左側を正とする。（付図1.4参照））と最も卓越した周波数は、本事故現場近傍の地表面では16.4 gal、9 Hz 前後、第3小田原高架橋上では-7.0 gal、1.8 Hz 前後であった。この両地点の観測データから得られた第3小田原高架橋（2P）の減衰定数^{*13}は1.5%であった。変位量は、最大でも線路直交方向成分で0.4 mm 程度（高架橋上）であった。また、観測結果を基に計算した耐震設計上の基盤面の加速度波形のフーリエスペクトルと、高架橋上の加速度波形のフーリエスペクトルを比較すると、付図9に示すように、他の周波数と比べて、1.8 Hz 前後の周波数域のフーリエ振幅が高架橋上で顕著に大きく、今回の計測及び解析によれば応答倍率は50倍程度となった。

さらに、余震観測を行った期間中に得られた他の余震の加速度波形をフーリエ解析した結果、いずれの余震においても、本事故現場付近の高架橋上では、線路方向、線路直交方向ともに卓越する周波数が1.7～1.8 Hz 付近に認められた。

（付図9 余震観測による高架橋上での加速度波形と計算による耐震設計上の基盤面での加速度波形 参照）

2.10.2 車両運動シミュレーション

ここでは、新潟県中越地震により発生した上越新幹線列車脱線事故における事故原因解明に用いた手法（鉄道事故調査報告書RA2007-8-I）とおおむね同様の車両運動シミュレーションを実施した。

車両運動シミュレーションは大きく3つの段階からなる。最初の段階では、周辺の地震計の観測記録から本事故現場における耐震設計上の基盤面^{*14}での本震時の地震動波形を再現した（地震動波形の再現）。次に、再現された地震動波形を地盤、構造物へ入力し、構造物の動的挙動を解析して高架橋上での推定地震動波形を得た（構造物の応答解析）。これにより得られた高架橋上での推定地震動波形を車両モデルへ入力して、走行時の車両の挙動についてシミュレーションを行った（車両挙動の解析）。

以下、それぞれの段階の内容及び本シミュレーションで得られた結果について述

^{*13} 「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。（財）鉄道総合技術研究所（1999）：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計、丸善）

^{*14} 「耐震設計上の基盤面」とは、表層地盤の下にあって、表層地盤の地震時の挙動に対して基盤と見なすことができる地盤の上面のことをいう。（財）鉄道総合技術研究所（1999）：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計、丸善）

べる。

(1) 地震動波形の再現

ここでは、周辺の観測地点直下での基盤面における地震動と同じ地震動が本事故現場付近直下の基盤面にも伝わったと仮定して、本事故現場付近の基盤面での地震動波形を再現するために、まず基準となる地震波（以下「基準地震波」という。）を選定した。

基準地震波の選定に当たっては、本事故現場と距離が近く、地盤条件が同様である場所の記録であることが必要である。そこで、本シミュレーションでは、2.9.2 で記述したように、同社仙台駅の地震計の記録を基準地震波として選定した。

本シミュレーションで実施した本事故現場の地表面における本震の地震動の再現方法は、概略以下のとおりである。まず、同社仙台駅で観測された本震の地震動について、耐震設計上の基盤面（車両運動シミュレーションでは新第三紀層の上面付近を耐震上の基盤面とした）での地震動を推定した。なお、本事故現場付近での列車の進行方向はおおむね東北東から西南西方向であるため、地震動の南北・東西成分を線路方向と線路直交方向（列車の前後と左右方向）の成分に変換した。

次に、同社仙台駅と本事故現場の表層地盤の相違による揺れ方の違いを除去するために、同社仙台駅で4月1日の7時17分に観測された余震記録と2.10.1 で述べた脱線箇所近傍の地表面での余震記録を、それぞれ基盤の深度での地震波形に換算し、それらの波形のフーリエスペクトルの振幅の比（応答倍率）を求め、同社仙台駅における耐震設計上の基盤面における本震の地震波に乗じて、本事故現場の耐震上の基盤面での地震波を推定した（以下「推定基盤波」という。）。推定基盤波の最大加速度は、線路直交方向で約 -579 gal となった。

（付図10 再現した本震の地震動（脱線箇所） 参照）

(2) 構造物の応答解析

第3小田原高架橋から金剛院丁橋りょうに至る延長約114mを解析範囲とし、同社から提供された構造物の竣工図面等を基に構造物を3次元フレームモデルで表現した。

第3小田原高架橋、金剛院丁橋りょうとも、桁は合成桁であり、線路直交方向の剛性は非常に大きく、また同方向の撓みも無視できると考え、剛梁としてモデル化した。

支承は線路方向の構造物の挙動において固定、可動の違いを考慮した。なお、線路直交方向の損傷は認められなかったこと、及び移動制限装置が取り

付けられていることを考慮し、線路直交方向には剛とした。

また、落橋防止工はばね要素としてモデル化した。ただし、地震によると思われる損傷がなかったことから、桁同士と一緒に動くように、その部分のバネの剛性を大きいものとした。

モデルの要素は、「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計：(財) 鉄道総合技術研究所(1999)」に示される標準的な分割方法に則り、桁を線路方向に1 m間隔に分割し、またレールレベルを確保する要素を各節点に設け、更に支承部と落橋防止工部分にも節点を設けた。

解析範囲と隣接する区間との境界は無拘束とした。また、構造物全体の減衰は余震観測データから得られた減衰定数等に基づき、レーリー減衰^{*15}を用いて設定した。

橋脚についてはその断面特性及び材質から部材剛性等を設定し、また非線形性を「鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物：(財) 鉄道総合技術研究所(2000)」に基づいて設定した。

深礎杭及び地中梁^{ちちゅうばり}は、損傷していないと想定されたため、弾性梁^{だんせいばり}としてモデル化した。これらと周辺地盤の間はばねでモデル化した。ばね特性は「鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物：(公財) 鉄道総合技術研究所(2012)」に基づき、バイ・リニア型の非線形特性を有するものと設定した。

構造物モデルの揺れがその周辺の地盤モデルに与える影響を考慮し、基礎の面積の100倍程度の領域を自由地盤としてモデル化した。この自由地盤モデルの基礎下端位置に2.10.2(1)で得た推定基盤波を入力し、時刻歴非線形解析により応答値を算定した。

応答値を算定したところ、脱線箇所付近の橋脚2 P付近の高架橋上では、線路直交方向で最大水平加速度約1,067 gal、卓越周波数1.5～1.7 Hz、最大変位167 mmの結果を得た。

(付図11 構造物のシミュレーションモデルの概要、付図12 脱線箇所の推定地震動、付図13 車両モデルへの入力波形 参照)

(3) 車両挙動の解析

車両モデルには車体、台車枠、輪軸、に各6自由度を、車輪下のレール8か所にはそれぞれ2自由度を与えた。

シミュレーションは一車両モデルとし、車体－台車枠間や台車枠－輪軸間

*15 「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。

の結合要素については、ばね・ダンパ要素とした。なお、左右動ストッパの遊間は4両目で確認された変形を考慮し、30mmでモデル化した。なお、軸ダンパ減衰特性は設計値の0.8倍の減衰力を与えた。

解析には車両運動シミュレーションプログラム（VDS：Vehicle Dynamics Simulator）（（公財）鉄道総合技術研究所）^{*16}を使用した。

後述する3.2.1の脱線時の列車速度に関する分析の結果を踏まえ、走行速度は14km/hとした。また、車輪とレール間の摩擦係数については、本事故発生時の天候を考慮して、0.2として解析を行った。

車両モデルへの入力波形は、車両の左右方向（線路直交方向）の振動に関しては2.10.2(2)で得られた第3小田原高架橋の橋脚2Pの天端での応答波を4輪軸の直下に、上下振動については脱線箇所の地表面の推定地震動をそのまま4輪軸の直下に、それぞれ同時入力した。

なお、本シミュレーションでは、いずれかの車輪のレールに対する相対左右変位が±70mmに達した時点で車両が脱線したと判定し、解析を終了させた。

（付図13 車両モデルへの入力波形、付図14 車両モデルの概要 参照）

(4) 車両運動シミュレーションの結果

① 本件車両

車両運動シミュレーションの結果では、付図15に示すようにシミュレーション上の時刻約6.1秒で第1軸から第4軸までの左車輪フランジが左レール頭頂面に乗り、そのまま左車輪が左方向に変位して脱線した。

最も早く脱線したのは第2軸であるが、この時点で、第2軸と他の軸との左右変位の差はごく僅かであり、第2軸脱線時点では4軸のいずれも左車輪のフランジがレール頭頂面に載っていた。

脱線直前の車両の挙動は以下のとおりである。

- a 60.5秒付近では車体が左側に、台車は右側に傾き、第2軸右車輪に大きな横圧が発生した。その直後の60.6秒付近では同左車輪がレール頭頂面から63mm上昇した。この時、軌道は左に向かって変位していた。（付図18（a））
- b 60.8秒付近直前で車体が右側に傾き、第2軸左車輪に大きな横圧が発生し、その直後に同左車輪のフランジがレール頭頂面に乗った。この時、軌道は右側に変位していた。（付図18（b））

^{*16} 宮本岳史・石田弘明・松尾雅樹（1998）：地震時の鉄道車両の挙動解析、日本機械学会論文集C、Vol.64、No.626、pp.236～243。

また、時刻40秒から脱線する直前の60.9秒までの車両の挙動を周波数解析した結果、左右の変位で1.7Hz付近に卓越周波数が認められた。

なお、本件車両には、セミアクティブ動揺防止制御装置（セミアクティブ左右動ダンパ、加速度センサ、ダンパ制御装置から構成される装置）が設置されている。更に同装置は、装置内に異常が生じた際に、加速度センサ等の情報を記録する機能を備えている。その加速度センサの動作記録によれば、本事故発生時には、その最大値が計測限界である1Gを超える加速度波形が、おおむね0.6～0.7秒の周期（おおむね1.4～1.7Hz）で計測されていた。

② 本件車両の前後の車両

本件車両と同様のシミュレーションを、3両目と5両目について行った。車両への入力波形は2.10.2(3)での解析結果を踏まえ、それぞれの車両位置での変位波形を入力した。その結果、3両目、5両目ともに本件車両が脱線する前には、脱線しないという結果が得られた。

(付図15 シミュレーションの結果(1)～(4)、付図16 脱線直前の車両の挙動(第1軸の動き)、付図17 脱線までの車両の挙動(周波数)、付図18 脱線直前の車両の挙動の概念図、参考図1 セミアクティブ動揺防止制御装置における加速度センサの動作記録(4両目) 参照)

(5) 前後の車両の影響

本件列車における車体間の主な構成要素として、連結器と車体間ダンパがある。そこで、各車両の解析結果からそれらに作用する力等の概算値を求めた。

① 連結器

各車両のロール角から求めた車体間の相対ロール角は最大で約2degであった。また、車両に軸力として作用する連結器作用力の左右方向の成分(線路直交方向の成分)は1kN以下、上下方向成分は0.5kN以下であった。

② 車体間ダンパ

本件車両が隣接する車両から受けるヨーモーメントの推定最大値は約40kNmで、これにより生じる台車直上左右振動加速度は約0.28m/s²である。また、車体間ダンパには連結器と同様に軸力が発生し、それにより車間での左右変位や上下変位が生じる。車体間ダンパの取付長を考慮してそれらの値を算出した結果、左右力成分、上下力成分ともに0.8kN程度であった。

2.11 新幹線における同社の地震対策に関する情報

平成16年10月23日に発生した新潟県中越地震の際、同社の上越新幹線浦佐駅～長岡駅間において地震動による列車脱線事故が発生した。この事故を契機として、様々な、新幹線列車の脱線防止対策並びに脱線した場合における被害軽減策が実施されてきている。

上述の上越新幹線列車脱線事故の鉄道事故調査報告書（鉄道事故調査報告書RA2007-8-I）では、再発防止策について、所見で以下のように記述している。

本事故のように列車が震央の近くで大きな地震に遭遇した場合には、列車脱線が起こることが考えられ、現行の鉄道システムではこれを完全に防ぐことは困難である。

本事故のような列車脱線を防止するためには、鉄道システム全体の問題としてとらえ、大きな地震動を受けた際に車両あるいは鉄道施設等について、列車脱線を可能な限り防ぐような装置や設備の設置を検討するべきである。

また、列車脱線を防止できなかった場合においても、車両が線路から大きく逸脱して被害が拡大することを防止するため、鉄道施設及び車両の両面からの対策を推進する必要がある。

なお、地震により構造物に著しい損壊が生じて、橋りょう等を走行中の列車の被害を拡大させないよう、耐震補強等の対策を引き続き推進する必要がある。

また、同事故後に国土交通省により設置された、新幹線の地震対策の検討や関連する技術開発等について実務者レベルで検討を行う「新幹線脱線対策協議会」においては、平成17年3月30日にとりまとめられた「新幹線脱線対策に係る中間とりまとめ」の中で、脱線対策等に関して以下の事項が示されている。

- ① 構造物（山岳トンネル、高架橋）の耐震補強
- ② 脱線防止対策（地震検知、警報装置に係る検知点の増設及び新型への更新）
- ③ 逸脱防止対策
- ④ 引き続き調査、研究する項目
 - ・ レール締結装置やレール継目部の損傷防止策
 - ・ 脱線防止ガードの構造、設置方法
 - ・ 非常ブレーキの停止距離短縮化
 - ・ 早期地震検知システムの充実

これらを受け、同社は沿線地震計を増設する等を行って、より早く送電を停止できるように、また、その停電を車上でより早く検知して非常ブレーキを動作させることができるように、システムの改良を行った。

更に万一、列車が脱線した場合の被害を軽減するために、車両側の対策として逸脱防止ガイドの設置、軌道側の対策として接着絶縁継目の改良やレール転倒防止装置の

設置等の対策を進めている。

また、兵庫県南部地震をはじめとする過去の地震による被害を受けて、同社は構造物の耐震対策として、高架橋柱、橋脚の耐震補強を行っている。このうち、せん断破壊先行型のものについては平成20年度末までに補強を完了している。

3 分析

3.1 本事故前の鉄道施設、車両等に関する分析

3.1.1 鉄道施設

2.3.2(3)に記述したように、本事故発生前の直近の高架橋や軌道等の鉄道施設の検査記録には異常は認められなかったこと、また2.4に記述したように本事故発生直前に上り列車が異常なく走行していることから、鉄道施設には本事故発生前に脱線に関わる異常はなかったと推定される。

3.1.2 車両

2.1.1に記述した本件運転士及び車両検修員Aの口述、並びに2.3.4(2)に記述した車両の検査記録から、本事故発生前には車両に異常はなかったと推定される。

3.1.3 運転取扱いに関する分析

2.1.1(1)に記述した本件運転士の口述、並びに2.1.2のATC記録部の記録等から、本事故発生前の運転取扱いには誤りはなかったと推定される。

3.2 脱線に関する分析

3.2.1 非常ブレーキの動作と脱線時の時刻及び速度に関する分析

2.1.2に記述したように、本件列車は、新幹線早期地震検知システムの作動による停電を検知して非常ブレーキが自動的に動作し、14時47分02秒ごろ(ATC記録部の記録を補正した時刻で14時47分04秒ごろ)に速度約72km/hから減速を開始したと推定される。その直後に、ATCによる停止信号を受け、運転士が非常停止手配を執ったと考えられる。本件列車の速度が0km/hとなった時刻は、ATC記録部に記録された時刻を補正した時刻で14時47分21秒ごろであったと考えられる。また、脱線の痕跡は本件車両の前台車が停止した位置より約3.5m手前からあることから、脱線した時刻はATC記録部の記録を補正した時刻で、14時47分18秒ごろであり、その時の速度は14km/h前後であったと考えられる。

このように、本件列車は、地震発生時に列車を早期に停止させるための一連のシステムによって、脱線時には約72km/h から約14km/h まで減速していたと考えられる。

3.2.2 脱線の原因に関する分析

3.1で分析したように、本事故発生前に軌道を含め鉄道施設、車両及び運転取扱いに問題はなかったと推定されること、また、3.2.1で分析した本件列車が脱線した時刻は、2.9.2で記述したように本事故現場付近に地震の主要動が到達した時刻のおおむね13秒後であること、また、100gal を超える加速度が主要動到達後からおおむね10秒後に到達していること、さらに2.1.1(2)の口述で記述したように、車体に大きな横揺れが加わった直後に本件列車が停止し、その後に脱線しているのを認めていることから、本件列車は東北地方太平洋沖地震の本震による地震動を受けたために脱線したと推定される。

3.2.3 本事故現場における地震動の分析

2.5.1(2)に記述したように、東北地方太平洋沖地震では本事故現場付近の高架橋に列車の運行に支障するような変形、破壊は認められなかった。

2.10.1に記述したように、東北地方太平洋沖地震の余震の際に、本事故現場の高架橋上で観測された振動のうち、線路直交方向で最も卓越する振動数は1.8Hz前後であることから、この付近の周波数が本事故現場である第3小田原高架橋の固有周波数であると推定される。また、この周波数域のフーリエ振幅が他の周波数帯に比べて、高架橋上では著しく大きくなっていることから、本事故現場である第3小田原高架橋では、固有周波数と推定される周波数域の地震動が共振により増幅され、脱線したと考えられる時刻の前後で140mm 近い線路直交方向の変位が生じたと考えられる。

3.2.4 脱線に至る過程に関する分析

2.10.2(4)に記述したように車両運動シミュレーションの結果から得られた脱線直前の本件車両の左右動における卓越周波数は、本件車両のセミアクティブ動揺防止制御装置における加速度センサで計測された動作記録とおおむね同様の周波数であった。このことから、今回実施した車両運動シミュレーションの結果は、おおむね妥当なものと考えられる。2.10.2(4)に記述したように車両運動シミュレーションの結果では、車体のローリングにあわせて車輪が左右に移動しレールと衝撃している。このことから、東北地方太平洋沖地震の地震動を外力として受けた際、本件車両の挙動として、「左右の正弦波振動の加振周波数に対応した車両の挙動」のう

ち、車体の回転中心が車両の重心の上側にある上心ロール^{うわしん}*17が生じていた可能性があると考えられる。

また、2.5.1(1)に記述したレール頭頂面に認められた車輪によると考えられる痕跡、及び2.10.2(4)に記述した車両運動のシミュレーションの結果から、本件列車が脱線に至った過程は以下のとおりであった可能性が考えられる。

- (1) 本件列車は、第3小田原高架橋上において線路直交方向で、1.5～1.7 Hz 付近の周波数を主成分とする地震動を受けた。(2.10.2(2))
- (2) 本件車両は、車体の回転中心が車両の重心の上側にあり、車体のローリングに合わせて輪軸が左右に移動する上心ロール^{うわしん}を起こし、左右車輪のフランジが交互にレールと衝撃した。(2.10.2(4))
- (3) 脱線時には、車輪のフランジがレール肩部に接触した状態で、横圧の発生と輪重の減少が重なり、まず第2軸左側の車輪フランジがレール頭頂面に上がった。(2.10.2(4))
- (4) 第2軸左車輪のフランジがレールに乗り上がる際に、地震動によりレールが右側に変位したため、レール頭頂面にフランジが跳び上がるように乗り、これに伴い同軸右車輪の踏面外端の角部が右レール頭頂面に接触し、直後に第1軸がすべり上がるようにレール頭頂面に乗り上がり脱線に至った。(2.5.1(1))

車両の挙動が上心ロール^{うわしん}となったことについては、車両運動シミュレーションの結果から、東北地方太平洋沖地震の際、本事故現場の高架上では、線路直交方向で、上心ロール^{うわしん}の生じやすい周波数^{*18、*19}である1.5～1.7 Hz 前後に卓越する周波数を持つ大きな揺れがあったためと考えられる。このような揺れが高架橋上で生じた理由としては、3.2.3 で記述したように、東北地方太平洋沖地震の地震動の周波数成分のうち、本事故現場の高架橋の固有周波数と推定される1.8 Hz 前後の周波数の揺れが、他の周波数域に比べて共振現象により著しく大きくなったためと考えられる。

なお、2.10.2(4)の車両運動シミュレーションでは、本件車両の全ての軸が脱線する結果を得たが、実際には本件車両の前台車の全2軸のみが脱線していた。既往

*17 車両が前後軸を中心に回転する運動をローリングといい、ローリングのうち回転中心が車両の重心より上側にあるものを「上心ロール」、下側にあるものを「下心ロール」と呼ぶ。ローリング振動が、「上心」、「下心」、またはその複合した状態になるかは、主にその振動数により決まる。(参考図4参照)

*18 松本信之(2005):地震時の構造物と車両の動的挙動、鉄道力学論文集 シンポジウム発表論文 第9号、pp.77～82.

*19 須田義大・宮本昌幸(1996):車両の運動力学入門-8～第8回固有振動数～、鉄道車両と技術、Vol.2、No.3、pp.34～57.

の文献などで示される新幹線列車の走行安全限界線図^{*20}の例^{*21}を参考にすれば、本件車両に入力したレール面上（高架橋天端）の地震動波形の卓越周波数は1.5～1.7 Hz 程度、脱線時までの最大変位は137 mm であり、これらの値はおおむねそれらの走行安全限界線の付近にプロットされる。そのため、実際に脱線するかしないかは、計算上では考慮できない車両や鉄道施設等における僅かな条件の差によると推定される。この僅かな条件の差を明らかにすることができなかつたため、本件車両の前台車全2軸のみが脱線した理由は明らかにすることができなかつた。

（付図18 脱線直前の車両の挙動の概念図、参考図2 走行安全限界線図の例参照）

3.2.5 前後の車両の影響に関する分析

本件列車の車体間の主な構成要素として、連結器と車体間ダンパがある。ここでは、2.10.2(5)で述べたシミュレーション結果から、前後の車両が本件車両の挙動に与える影響について分析する。

(1) 連結器

2.10.2(5)①に記述したように、車体間の相対ロール角は最大で約2 deg であり、この値は通常の走行時に生じる車体間の相対ロール角と同程度であることから、連結器のねじれが本件車両の脱線に及ぼす影響は小さかったと考えられる。また、連結器作用力は左右方向成分で1 kN 以下、上下方向成分で0.5 kN 以下と小さく、地震時の車両挙動には連結器作用力はほとんど影響しなかったと考えられる。

(2) 車体間ダンパ

2.10.2(5)②に記述したように、隣接する車両から受けるヨーモーメントの推定最大値から得られる台車直上での車体の左右方向の振動加速度は約0.28 m/s² であり、地震時にはこの値より大きい約1.5 m/s² の左右方向の振動加速度が生じていたと考えられることから、車体間ダンパによる車体ヨーイングが本件車両の脱線に及ぼす影響は小さかったと考えられる。また、車体間ダンパに発生する軸力は、左右力成分、上下力成分ともに0.8 kN 程度と小さく、車体間ダンパによって発生する作用は地震時の車両の挙動にほとんど影響しなかったと考えられる。

^{*20} ここでは、正弦波加振に対する走行安全限界を示した図を指す。横軸に加振周波数、縦軸に（安全限界）振幅をとる。車両の条件及び走行速度等により異なる。

^{*21} 例えば、1) (財)鉄道総合技術研究所（2006）：鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限、丸善、2) 西村和彦・曄道佳明・森村勉・曾我部潔（2009）：振動軌道上における高速鉄道車両の走行安全性に関する解析的研究（輪軸ヨーイングを考慮するモデルでの検討）、日本機械学会論文集（C編）、V o 1. 7 5、N o. 7 3 5、p p. 9 0～9 6、等。

また、2.5.2 に記述したように、連結器や車体間ダンパに目立った損傷は確認されなかった。

以上のことから、本件車両の脱線に、前後の車両の挙動はほとんど影響を及ぼさなかったものと考えられる。

3.3 鉄道施設及び車両の損傷に関する分析

2.5.1(2)及び(3)に記述したように高架橋及び橋りょう、並びに電路設備に損傷がなかったことから、2.5.1(1)に示した軌道の損傷は本件車両が脱線したことにより生じたものと認められる。

2.3.1(3)、2.5.1(1)に記述した脱線の状況及び軌道の損傷から、レール締結装置No.2からNo.6にかけて損傷していたレール締結装置及びスラブ面上の線状の痕跡は、本件車両の前台車第2軸によるものと、またレール締結装置No.6からNo.11にかけて損傷していたレール締結装置及びスラブ面上の線状の痕跡は、前台車第1軸によるものと推定される。

前台車第2軸右車輪のフランジによると推定されるスラブ面上に付いた線状の痕跡のレール底部からの離れは、レール締結装置No.4付近においては、2.5.1(1)②で述べたように260mmであるが、これより仙台駅方では200mm程度と小さい値となっている。このことは、脱線した前台車第2軸が急激に右側へ戻されたことを示していると考えられる。この痕跡のレール底部からの離れが急に小さくなる付近の右レール頭部側面の外側には擦過痕が認められる。スラブ面上の線状の痕跡から、この擦過痕が付いた右レール頭部側面までの間隔は約365mmである。車輪の幅を考慮すると、この値はおおむね軸箱下面に取り付けられた逸脱防止ガイドのガイド部分の位置に当たる。さらに、前台車第2軸右側の逸脱防止ガイドのガイド部分に擦過痕が認められる。これらのことから、前台車第2軸右側の逸脱防止ガイドのガイド部分がレールと接触したことにより、脱線した第2軸が右側に急激に戻されたと考えられる。

また、停止位置と床下機器の配置から、レール締結装置No.4とNo.5の間の左レール頭頂部の灰色の塗料が付着した擦過痕は前台車の増圧シリンダーカバー、レール締結装置No.6付近の左レール内側の頭頂部から頭部側面にかけての擦過痕は前台車第1軸の駆動装置によるものと考えられる。さらに、それ以外に断続して左右レール頭頂面にあった擦過痕は、底板や底板取付用横ばり等によるものと考えられる。

脱線した本件車両前台車以外のレベリングバルブ高さ調整棒や左右動ストッパ受の損傷、変形は、それらの台車が脱線した痕跡がないことから、東北地方太平洋沖地震の本震、若しくは余震の地震動によって車両に大きな揺れが加わったために生じたものと推定される。また、本件車両車体後方左側の構体窓部の隅角部に生じたひずみについても同様の原因で生じた可能性があると考えられる。なお、6両目のパンタグラフが

降下した原因は明らかにすることはできなかった。

3.4 他の走行中の列車等に関する分析

2.7.2 に述べたように、東北地方太平洋沖地震の発生時、特に強い揺れが観測された区間を走行していた本件列車以外の新幹線列車は、新幹線早期地震検知システム等の早期に新幹線を停止させるシステムによって非常ブレーキが動作して、減速走行中に東北地方太平洋沖地震の地震動を受けたと考えられるが、安全に停車している。また、乗客、乗務員に死傷者はいなかった。さらに、それらが走行していた区間の構造物には、いずれも列車の運行に支障する損傷等はなかった。

これらのことは、新潟県中越地震後に同社が実施した新幹線早期地震検知システム等の早期に新幹線を停止させるシステムの性能向上等のソフト対策や高架橋の耐震補強等といったハード対策が一定の効果を発揮したものと考えられる。

3.5 新潟県中越地震後に実施された地震対策に関する分析

3.5.1 新潟県中越地震と東北地方太平洋沖地震での新幹線脱線事故の比較

ここでは、まず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の鉄道事故調査報告書（RA2007-8-I）等から、新潟県中越地震と今回の東北地方太平洋沖地震での列車脱線事故における脱線原因、特に地震動による車両の挙動、を比較し、それらの相違点等について分析を行う。新潟県中越地震と東北地方太平洋沖地震の概要を表7に、両地震における新幹線脱線地点の概要を表8に示す。

表7 新潟県中越地震と太平洋沖地震の概要

	新潟県中越地震	東北地方太平洋沖地震
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
震源深さ	約13km	約24km
地震の規模	6.8 (M)	9.0 (Mw)
最大震度	7	7
地震種別	内陸直下型地震	海溝型地震
主な列車被害	・上越新幹線浦佐駅～長岡駅間列車脱線事故	・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

表 8 新幹線脱線地点の概要

	上越新幹線列車脱線事故 第325C列車	東北新幹線列車脱線事故 試第7932B列車
車両形式・編成	200系10両編成	E2系10両編成
地震発生時の 速度（推定）	約204km/h	約72km/h
脱線時の 速度（推定）	約200km/h	約14km/h
震央からの 距離	約9.6km	約17.2km
構造物形式	コンクリートラーメン高架橋他 (高さ：約9m、杭長：約10m)	鋼複合単純桁高架橋 (高さ：約12m、杭長：約12m)
地形	山地から河岸段丘を経て 沖積低地に至る地域	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

既往文献^{*22、*23、*24}によれば、新潟県中越地震の脱線現場近傍の高架橋（十日町R3）上で推測された本震地震動において、車両の挙動に影響を与えた周波数は0.7Hz付近と1.7Hz付近にあり、このうち、0.7Hz付近の周波数が顕著に卓越していた。

脱線の状況及び車両運動シミュレーションの結果から、新潟県中越地震発生時の第325C列車脱線の過程は、

新潟県中越地震のような大きな東西成分の地震動を、本件列車のように北行する列車が受けた場合、輪軸が大きく上下左右に振動して、片側の車輪がレールに接触したまま、他方の車輪がレールから浮き上がり、その状態でレールに接触している側の車輪がレール頭頂面を滑って輪軸が横方向に移動し、下降してきたもう一方の車輪のフランジがレール頭頂面に乗り、レールから外れるロッキング脱線の可能性が考えられる。（鉄道事故調査報告書RA2007-8-I）

と分析された。

また、新潟県中越地震の際の上越新幹線列車脱線事故の原因として、線路に直交する方向に加えられた主たる地震動の周波数が0.7Hz付近であったため、車両の回転中心が車両の重心の下側にある^{したしん}下心ロールの挙動が卓越した結果であることが

*22 航空・鉄道事故調査委員会（2007）：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

*23 地震による新幹線脱線シミュレーション解析グループ（2008）：新潟県中越地震新幹線脱線シミュレーション解析、鉄道総研報告特別第52号、(財)鉄道総合技術研究所。

*24 東日本旅客鉄道株式会社（2008）：上越新幹線脱線調査報告書。

示されている^{*23、*24}。

新潟県中越地震発生時の第325C列車脱線に対し、東北地方太平洋沖地震における試第7932B列車では、3.2.4の脱線に至る過程に関する分析で記述したように、線路に直交する方向に加えられた主たる地震動の周波数が1.5～1.7Hz付近であったため、車両の回転中心が車両の重心の上側にある上心ロール^{うわしん}が生じて脱線した可能性があると考えられる。

新潟県中越地震と東北地方太平洋沖地震では脱線地点付近の高架橋上では、線路に直交する方向から車両に加えられた地震動の大きさや性質が異なり、その結果、異なる車両の挙動が生じて脱線に至ったと考えられる。

(参考図3 上越新幹線列車脱線事故における車両の姿勢、参考図4 上心ロールと下心ロールの概要 参考)

3.5.2 新潟県中越地震後に実施された同社の地震対策に関する分析

2.1.1に記述した新潟県中越地震後に同社が実施し、本事故の被害軽減に直接関係したと考えられる事項について、以下で分析を行う。

(1) 地震発生時に列車を早期に停止させるためのシステム

3.2.1に記述したように、本件列車は地震発生時に列車を早期に停止させるためのシステムによって速度約72km/hから約14km/hに減速していたこと、また3.4で記述したように東北地方太平洋沖地震発生後、特に強い揺れが観測された区間を走行していた本件列車以外の新幹線列車は、営業運転における最高速度で運転していたものを含め、減速走行中に地震動を受けたと考えられるが全ての列車が脱線せずに停止していたことから、同システムは機能したと考えられる。

なお、東北地方太平洋沖地震では、P波の立ち上がりから推測される地震の主要動の規模^{*25}が実際の地震動よりも小さかった可能性があることが報告されている^{*26、*27}。このことから、結果として、新幹線早期地震検知システムでは、S波によると考えられる120gal以上の揺れを検知した時点で規定値超過電文を発し、新仙台変電所においてき電遮断が行われたと推定される。

(2) 逸脱防止ガイド

*25 例えば、東田進也・小高俊一・芦谷公稔(2002)：早期地震検知における新しい地震諸元推定方法、鉄道総研報告、Vol.16、No.8、pp.1～6。

*26 気象庁緊急地震速報評価・改善検討会(2012)：第4回緊急地震速報評価・改善検討会技術部会資料(平成24年10月1日)。

*27 芦谷公稔(2012)：東北地方太平洋沖地震の特徴と早期検知、：第24回鉄道総研講演会 巨大な自然災害に備えるー鉄道の安全性の更なる向上ー、pp.13～20、(公財)鉄道総合技術研究所。

3.3に記述したように、本件車両の前台車第2軸右側の逸脱防止ガイドのガイド部分が脱線後にレールと接触し、その結果、同軸が右側に戻されたと考えられる。このことから、本事故においては比較的低速ではあったが、逸脱防止ガイドが機能したと推定される。

3.6 再発防止に関する分析

本事故現場の高架橋では、東北地方太平洋沖地震の地震動による構造物の損傷は認められなかったこと、また、3.7に後述するように被害軽減策がある程度有効であったと考えられることから、脱線には至ったが、2.2で記述したように、人的被害の発生等の大きな被害が生じなかったものと考えられる。

しかしながら、本事故は、3.2.3及び3.2.4で記述したように東北地方太平洋沖地震の地震動を受けた高架橋において、構造物の固有周波数と推定される周波数の地震動が増幅された結果、本件列車が脱線に至る変位が高架橋上で生じたために発生したと考えられる。そのため、本事故現場における地震動に対する列車の走行安全性をより高いものにするためには、本事故現場の高架橋の振動特性を精査し、必要に応じて高架橋の共振による揺れの増大を抑制する対策等を検討し、その効果を検証した上で実施することが望まれる。

また、本事故は、地震動、構造物や車両の振動特性等の条件が複合して生じたと考えられる。そこで今後、特に高速走行を前提とする新幹線構造物においては、本事故と同様な、車両の走行安定性上で問題となる共振現象が生じることが想定される場所を明らかにするための研究、並びに適切な対策を実施するための研究や技術開発を進めていくことが望まれる。

3.7 被害軽減に関する分析

本事故のように、外力として地震動が作用した場合、脱線を防止するための対策とともに、万が一脱線した場合の被害を軽減させるための対策を講じることも重要である。

列車が停止していても地震動により脱線する場合がある^{*28}が、列車速度が低速なほど、脱線した場合の被害はより小さいと考えられる。

東北地方太平洋沖地震では、3.5.2に記述したように、列車を早期に停止させるためのシステムにより、走行中の全ての新幹線列車で非常ブレーキが動作し、減速走行

*28 例えば、1)東日本旅客鉄道株式会社越後線柏崎構内列車脱線事故（平成19年7月16日発生（平成19年（2007年）新潟県中越沖地震）、航空・鉄道事故調査委員会（2008）：鉄道事故調査報告書RA2008-6）、2)日本貨物鉄道株式会社東北線長町駅構内列車脱線事故（平成23年3月11日発生（東北地方太平洋沖地震）、運輸安全委員会（2012）：鉄道事故調査報告書RA2012-5）。

中に地震動を受けたと考えられるが、本件列車以外は脱線せずに停車している。また、本事故では、列車脱線時に速度が約14km/hまで減速しており、このことが被害軽減に一定の効果を発揮したと考えられる。

さらに、3.5.2(2)で記述したように、本事故においては逸脱防止ガイドがレールと接触し、車両が大きく逸脱するのを防いだと考えられる。

これらのことから、3.5.1で記述したように、地震の種別、震源との距離及び脱線時の車両の挙動は異なるものの、新潟県中越地震以降に、新幹線脱線対策協議会が、「新幹線脱線対策に係る中間とりまとめ」の中で取りまとめ、同社が実施してきたこれらの被害軽減策が有効であったと考えられる。同社及び関係諸機関は、本事故の分析結果を踏まえた上で、今後も、地震発生時に列車を早期に停止させるためのシステムの判断並びに伝達に要する時間の短縮についての研究、開発等の被害軽減策を継続して実施していく必要がある。

4 結 論

4.1 分析の要約

本事故における分析結果をまとめると、以下のとおりである。

(1) 脱線前の施設、車両

本事故に係る鉄道施設及び車両の異常、並びに運転取扱いの誤りはなかったと推定される。

(2) 脱線

① 非常ブレーキの動作と脱線時の時刻及び列車速度

本件列車は、早期地震検知システムの作動による停電を検知して非常ブレーキが自動的に動作し、ATC記録部の記録を補正した時刻で14時47分04秒ごろに速度約72km/hから減速を開始したと推定される。また、脱線した時刻は同14時47分18秒ごろであり、その時、約14km/hまで減速していたと考えられる。

② 脱線の原因

本件列車は東北地方太平洋沖地震による地震動を受けたために脱線したと推定される。

③ 本事故現場における地震動

地震動の成分のうち、本事故現場である第3小田原高架橋の固有周波数と推定される1.8Hz前後の成分が、高架橋の共振により増幅された結果、脱線時刻の前後で140mm近い線路直交方向の変位が生じたと考えられる。

④ 脱線に至る過程

車両運動シミュレーション及び脱線の痕跡から、本件車両は脱線時に東北地方太平洋沖地震による強い横揺れを受け、車体のローリングにあわせて左右の車輪が左右に移動しレールと激しくぶつかる上心ロールが発生し、脱線に至った可能性があると考えられる。

車両の挙動が上心ロールとなったことについては、車両運動シミュレーションから、本事故現場の高架上では、上心ロールの生じやすい周波数である1.5～1.7 Hz 付近に卓越周波数を持つ大きな揺れがあったためと考えられる。

なお、本件車両の前台車全2軸のみが脱線した理由は明らかにすることができなかった。

⑤ 隣接車両の影響

車両運動シミュレーションの結果から、本件車両の脱線に、前後の車両はほとんど影響を及ぼさなかったものと考えられる。

(3) 他の走行列車等

東北地方太平洋沖地震による特に強い揺れが観測された区間を走行していた本件列車以外の新幹線列車は、非常ブレーキが動作し、減速走行中に地震動を受けたと考えられるが安全に停車し、かつ乗客、乗務員に死傷者はいなかった。また、それらが走行していた区間の構造物は、いずれも列車の運行に支障する損傷等を受けなかった。

これらのことには、新潟県中越地震後に同社が実施した種々の地震対策が一定の効果を発揮したものと考えられる。

(4) 新潟県中越地震と東北地方太平洋沖地震における新幹線脱線事故の比較

新潟県中越地震では車体の回転中心が車両の重心の下側にある下心ロールの挙動が卓越して列車脱線に至ったのに対し、本件車両は車両の回転中心が車体の重心の上側にある上心ロールが生じて脱線したものと考えられる。

(5) 新潟県中越地震後に実施された地震対策

新潟県中越地震後に実施された地震対策のうち、本事故の被害拡大防止に直接関係したと考えられる事項について分析を行った。

① 地震発生時に列車を早期に停止させるためのシステム

本件列車は地震発生時には、列車を早期に停止させるためのシステムによって減速しており、また特に強い揺れが観測された区間を走行していた本件列車以外の新幹線列車は、非常ブレーキが動作し、脱線せずに停止していたことから、同システムは一定の効果があったものと考えられる。

② 逸脱防止ガイド

本件車両の前台車第2軸右側の逸脱防止ガイドが脱線後にレールと接触し、その結果、同軸が右側に戻されたと考えられる。この時の速度は比較的低速であったが、本事故においては逸脱防止ガイドが機能したと考えられる。

(6) 再発防止

本事故現場の高架橋では、地震動による構造物の損傷は認められなかったこと、また、被害軽減策がある程度、有効であったと考えられることから、脱線には至ったが、人的被害の発生等の大きな被害が生じなかったものと考えられる。

しかしながら、本事故は、東北地方太平洋沖地震の地震動を受けた高架橋の共振現象によって本件列車が脱線に至る変位が生じたために発生したと考えられる。そのため、地震動に対して、本事故現場における列車の走行安全性をより高いものにするためには、本事故現場の高架橋の振動特性を精査し、必要に応じて高架橋の共振に関わる対策等を、その効果を検証した上で実施することが望まれる。

本事故は、地震動、構造物や車両の振動特性等の条件が複合して生じたと考えられる。今後、特に高速走行を前提とする新幹線構造物においては、本事故と同様な、車両の走行安定性上で問題となる共振現象が生じることが想定される場所を明らかにするための研究、並びに適切な対策を実施するための研究や技術開発を進めていくことが望まれる。

(7) 被害軽減

今回のような大きな地震動による脱線を防止する対策を進めることとともに、脱線した場合の被害を軽減するための対策を進めることも重要である。

東北地方太平洋沖地震では、新潟県中越地震以降に新幹線脱線対策協議会の「新幹線脱線対策に係る中間とりまとめ」の中で取りまとめられ、同社が実施してきた被害軽減策が有効であったと考えられる。そのため、それらの対策を今後も継続して実施していく必要がある。

4.2 原因

本事故発生前には軌道を含めた鉄道施設、本件列車及び運転取扱いに問題はなかったと推定されること、また、本件列車が脱線した時刻は東北地方太平洋沖地震の主要動が仙台市内に到達した時刻の直後と推定されることから、本件列車は東北地方太平洋沖地震の本震による地震動を受けたために脱線したと推定される。なお、本件車両の前台車全2軸のみが脱線した理由は明らかにすることができなかった。

脱線に至る過程としては、まず東北地方太平洋沖地震の地震動の周波数成分のうち、本事故現場の高架橋の固有周波数とおおむね一致する周波数成分が、構造物の共振現

象により増幅されて高架上で大きな変位として現れたこと、そして、その周波数成分が、車両に上心^{うわしん}ロールを生じさせやすい周波数帯にあったことから、本件車両に上心^{うわしん}ロールが生じて脱線に至ったと考えられる。

被害が拡大しなかったことについては、早期に列車を停止させるシステムが動作して脱線直前には低速になっていたこと、また逸脱防止ガイドが機能して本件車両が軌道から大きく逸脱しなかったことが関与したと考えられる。

5 再発防止策

5.1 事故後に同社が講じた措置

同社は本事故発生後、新幹線における地震対策として以下のことを実施している。

(1) 列車緊急停止対策

地震観測、検知体制を強化するために30箇所^{箇所}に地震計を増設し、平成24年8月3日に新幹線早期地震検知システムへ導入した。また、平成24年10月28日に緊急地震速報（気象庁）を新幹線早期地震検知システムへ導入した。

(2) 耐震補強対策

曲げ破壊先行型の高架橋柱、橋脚のうち、強い地震動で被害が生じるおそれのあるものの補強を前倒し及び対象範囲を拡大して実施することとし、同対策を進めている。また、電化柱、駅やホームの天井の耐震補強を実施することとし、同対策を進めている。

(3) 逸脱防止対策

本事故発生前から進めているレール接着絶縁継目部の破断防止対策を平成23年度中に新幹線の全線区で完了した。また、一部のエリアにおいてレール転倒防止装置の設置を引き続き進めている。

(4) 共振対策

車両の走行安定性で問題となる共振現象の対策について、車両、構造物の両面から研究を進めている。

5.2 事故後に国土交通省が講じた措置

国土交通省鉄道局は、上越新幹線脱線事故を契機に設置された新幹線脱線対策協議会を本事故後に開催した。平成23年5月13日に開催された協議会では、これまでの新幹線の地震対策、東北新幹線の被害及び復旧状況を確認し、損傷した高架橋の柱及び電化柱に関する検討をワーキンググループで行うこととした。

5.3 今後望まれる措置

本事故現場の高架橋では、地震動による構造物の損傷は認められなかったこと、また、被害軽減策がある程度、有効であったと考えられることから、脱線には至ったが、人的被害の発生等の大きな被害が生じなかったものと考えられる。

本事故現場における列車の走行安全性をより高いものにするためには、本事故現場の高架橋の振動特性を精査し、必要に応じて高架橋の共振による揺れの増大を抑制する対策等を検討し、その効果を検証した上で実施することが望まれる。

本事故は、地震動、構造物や車両の振動特性等の条件が複合して生じたと考えられる。そのため、今後、特に高速走行を前提とする新幹線構造物においては、本事故と同様な、車両の走行安定性上で問題となる共振現象が生じることが想定される場所を明らかにするための研究、並びに適切な対策を実施するための研究や技術開発を進めていくことが望まれる。

被害軽減策については、新潟県中越地震以降に国土交通省により設置された新幹線脱線対策協議会の「新幹線脱線対策に係る中間とりまとめ」の中で取りまとめられ、実施されてきた種々の対策を今後も継続して実施していく必要がある。

付図1 事故発生箇所

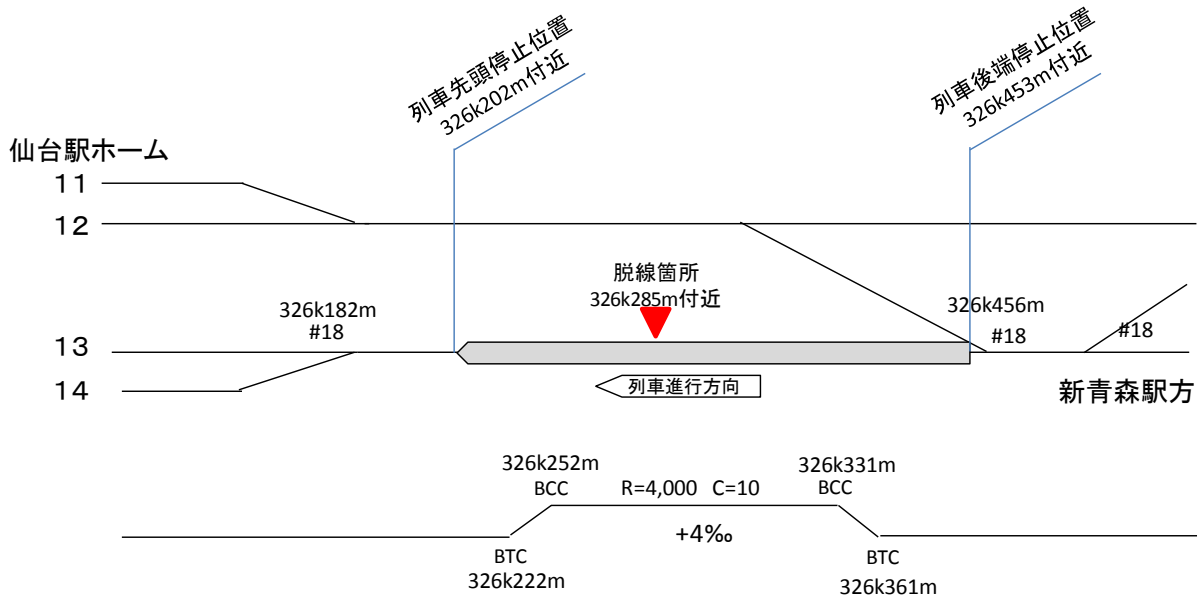
東北新幹線 東京駅～新青森駅間 713.7km (複線)



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 軌道の主な損傷状況 (1)

右レール外側側面の擦過痕 (レール締結装置No.4付近)

前側車端部底板とレールの接触

スラブ面上の線状の傷

列車進行方向

スラブ面上の線状の傷 打痕

○囲み数字: レール締結装置No.

- : レール頭部の擦過痕
- : レール頭頂面の線状の傷
- ⊗: レール締結装置の破損箇所 (板バネ、Tボルト)
- : スラブ面上の打痕
- : スラブ面上の線状の傷

* 図中の数字は全て概数(単位: mm)

4両目前台車 第1軸 326k279m81

4両目前台車 第2軸 326k282m33

第3小田原高架橋2P 326k285m付近

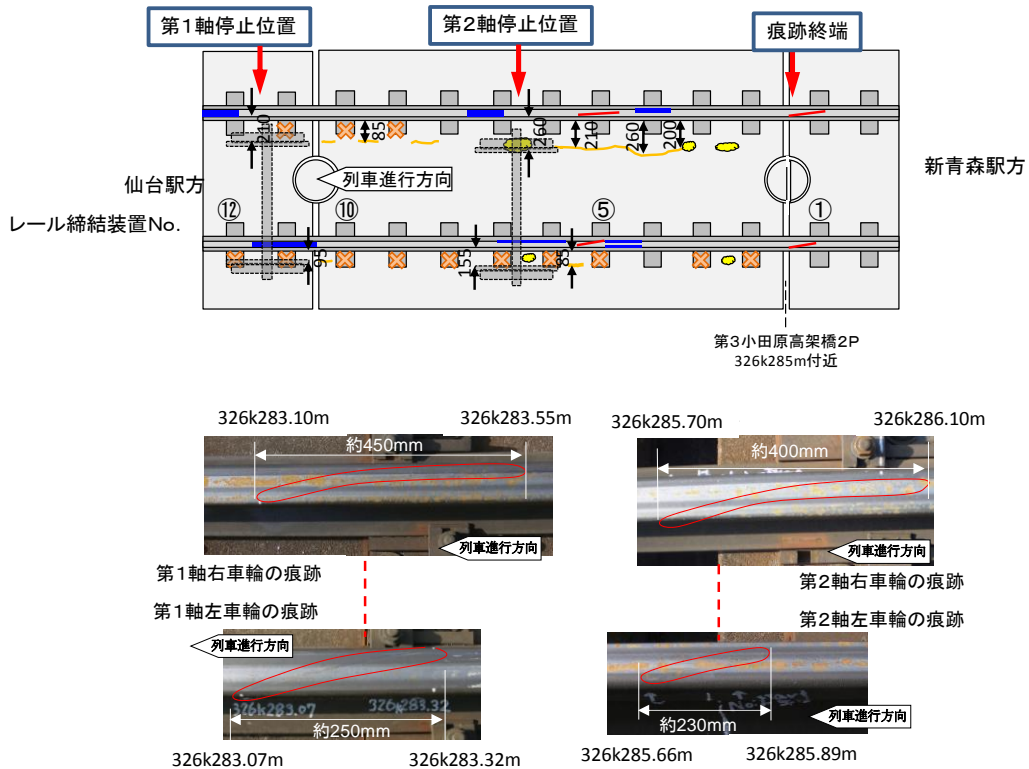
第2軸モーター下部との接触

第1軸駆動装置底部との接触

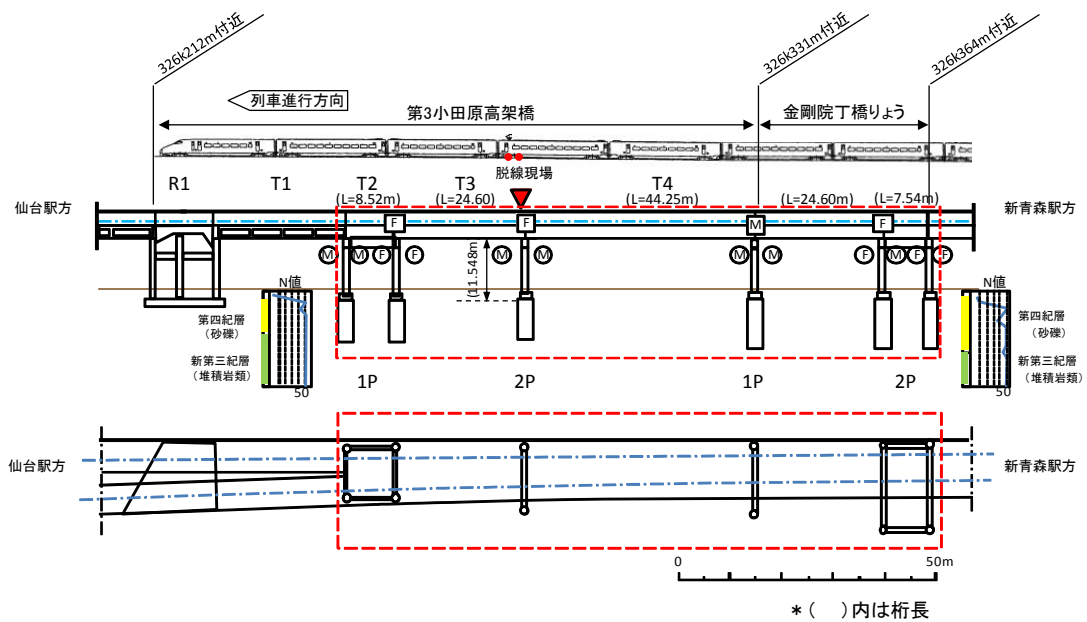
増圧シリンダカバーとの接触

列車進行方向

付図4 軌道の主な損傷状況（2）

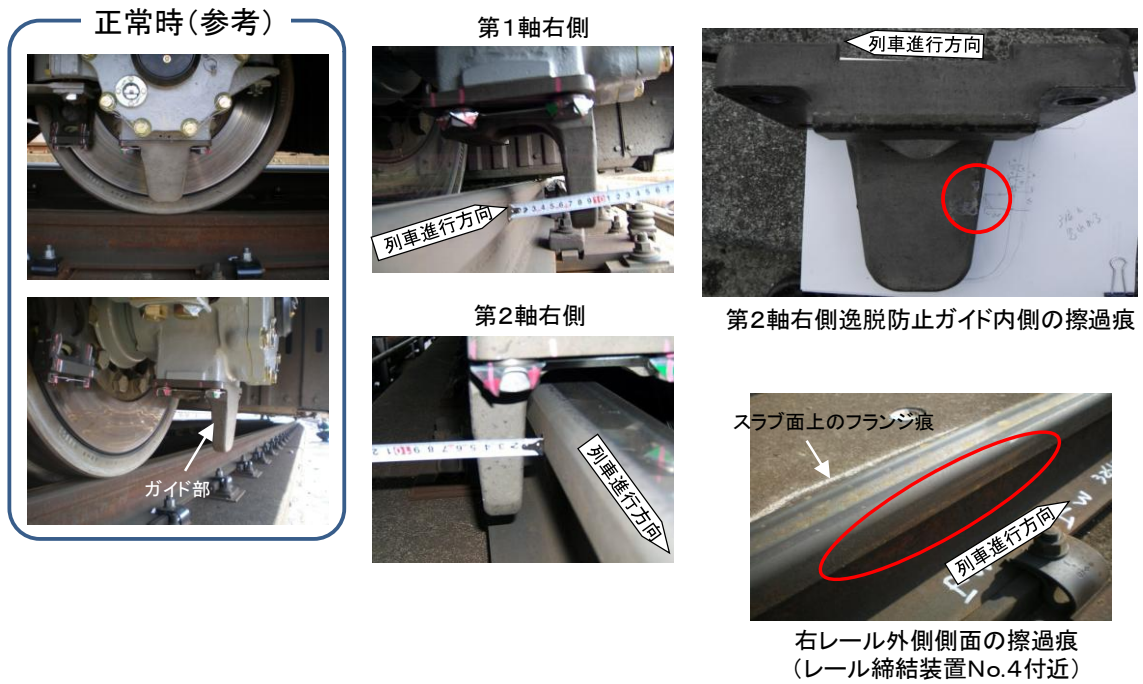


付図5 構造物の概要



- : 支承の可動(M), 固定(F)タイプ種別
- : 桁連結工(落橋防止工)の可動(M), 固定(F)タイプ種別
- [- - -]: 車両運動シミュレーションでのモデル化した範囲

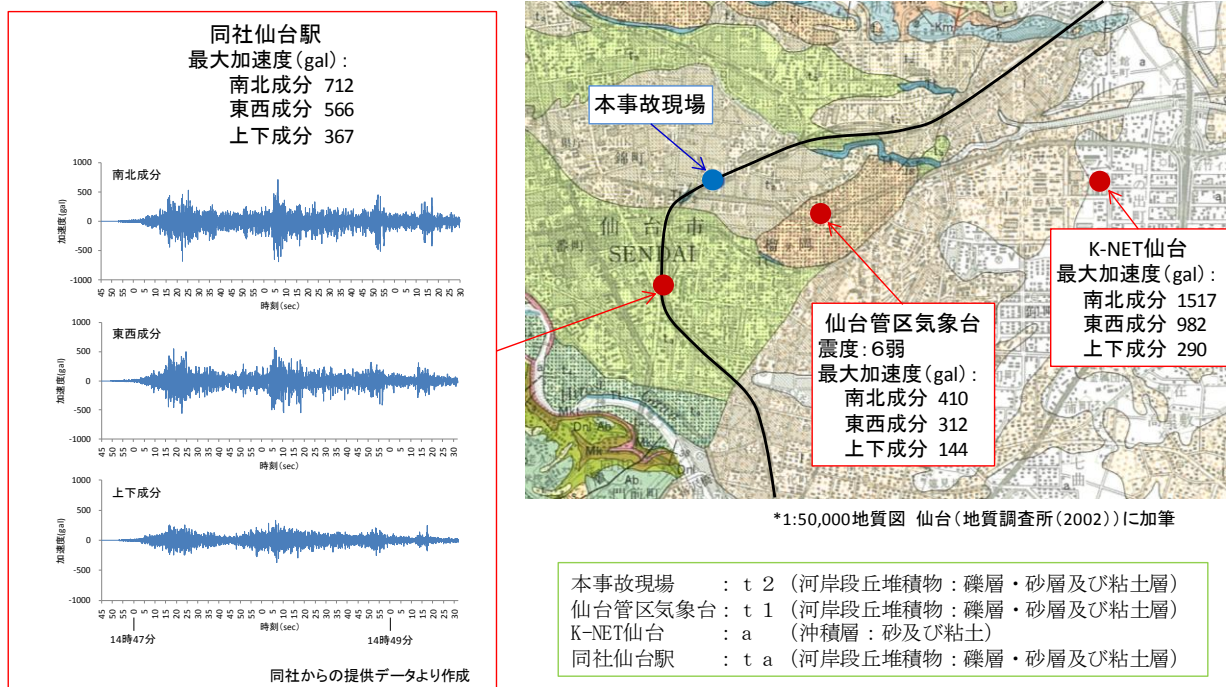
付図6 逸脱防止ガイドの状況



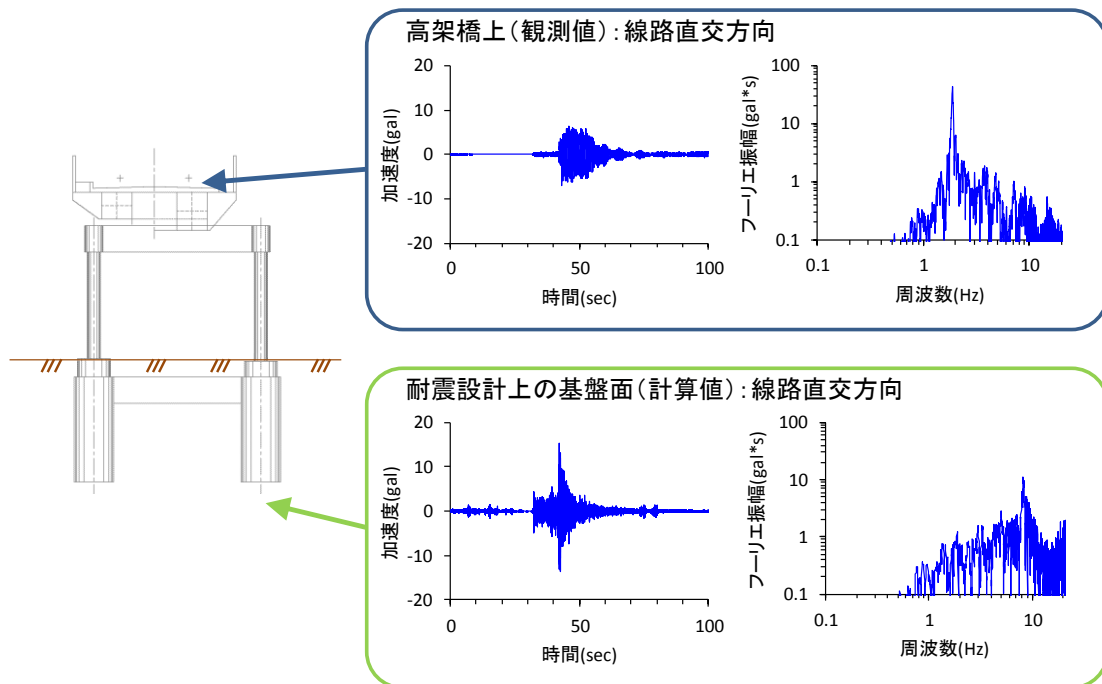
付図7 車両の主な損傷状況



付図8 本事故現場周辺の地震計で観測された東北地方太平洋沖地震の地震動

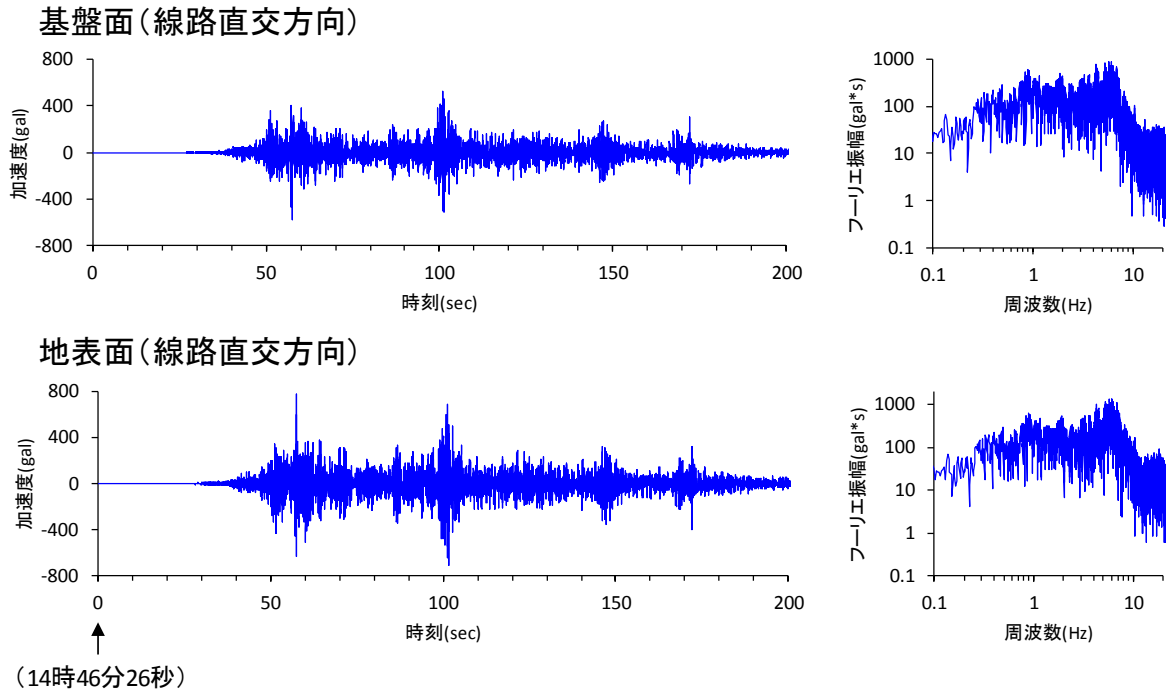


付図9 余震観測による高架橋上での加速度波形と計算による耐震設計上の基盤面での加速度波形

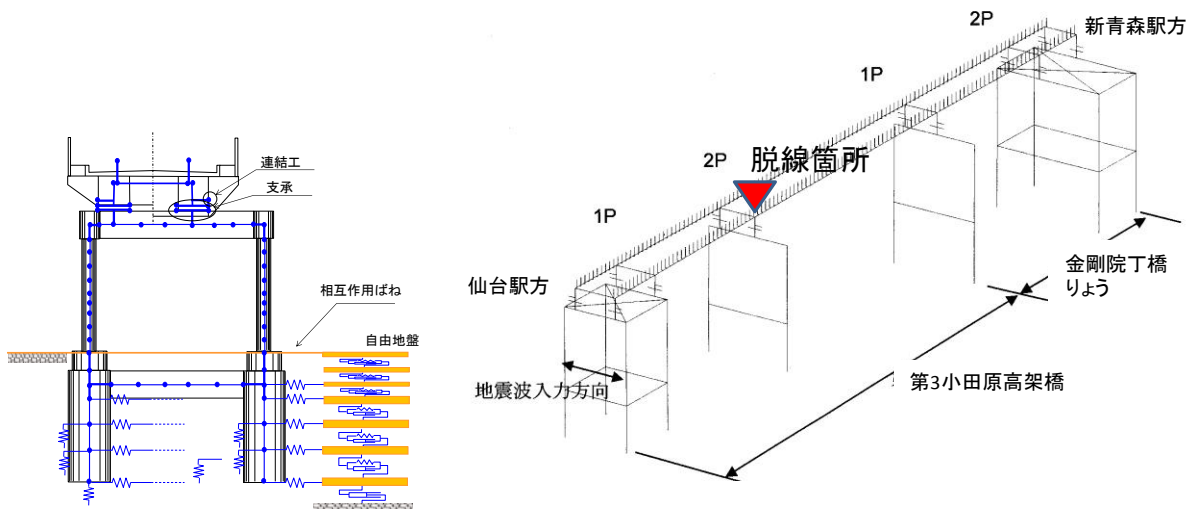


*余震の発生時刻及び規模: 平成23年4月1日 7時17分、M4.3

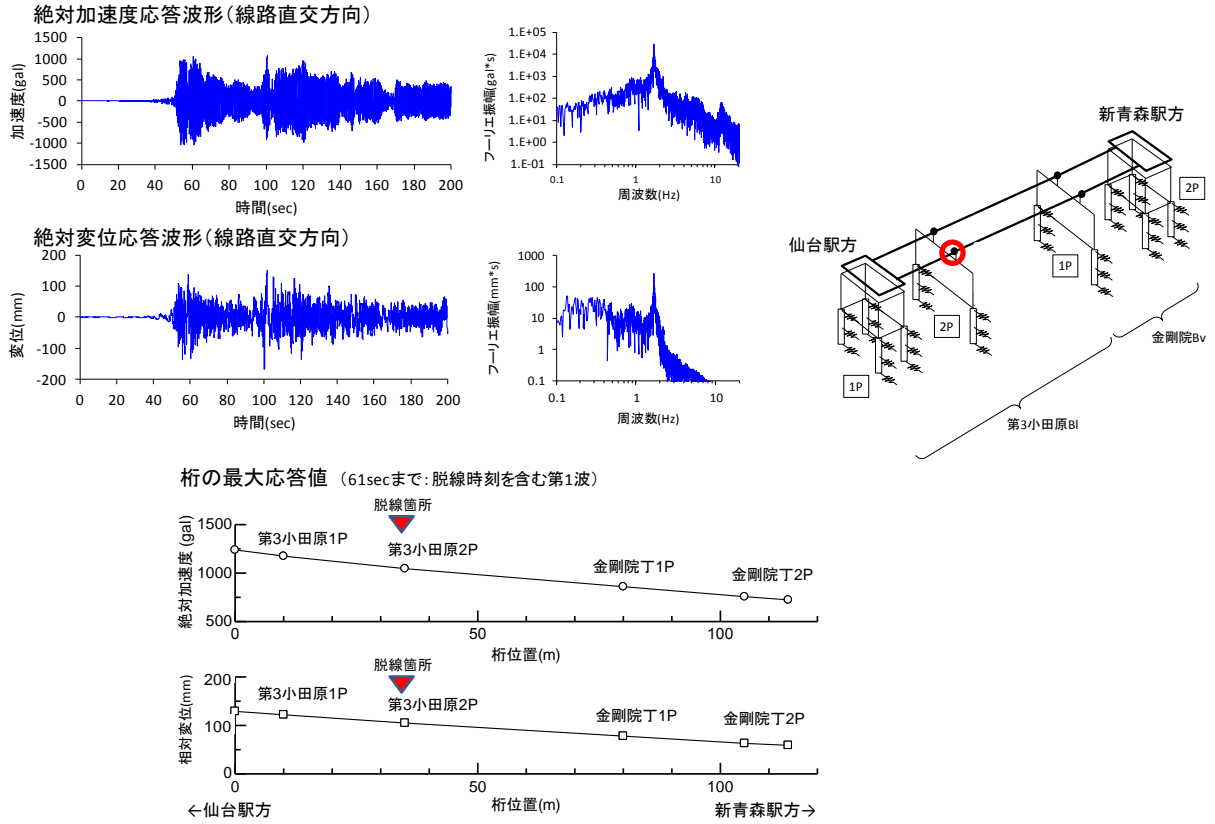
付図 1 0 再現した本震の地震動 (脱線箇所)



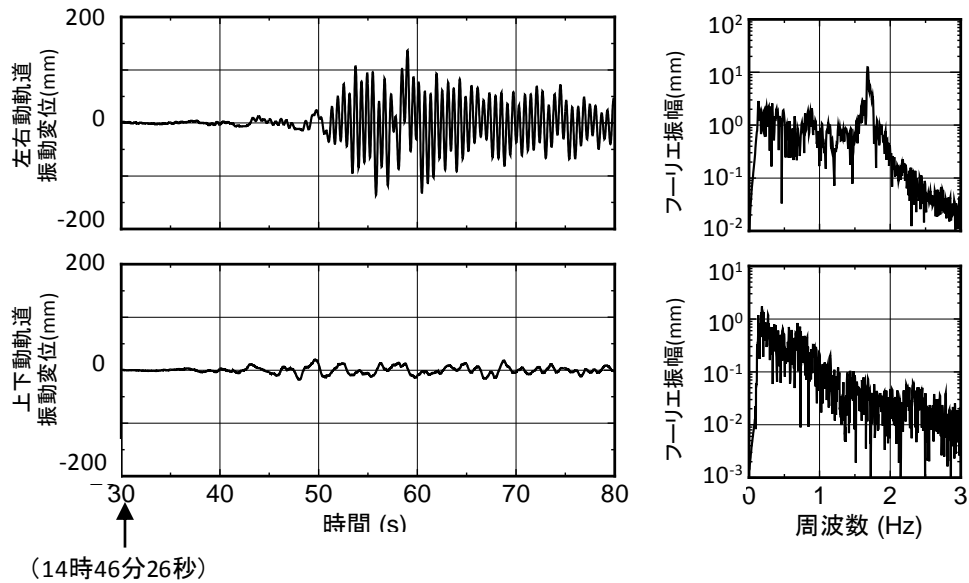
付図 1 1 構造物のシミュレーションモデルの概要



付図 1 2 脱線箇所の推定地震動

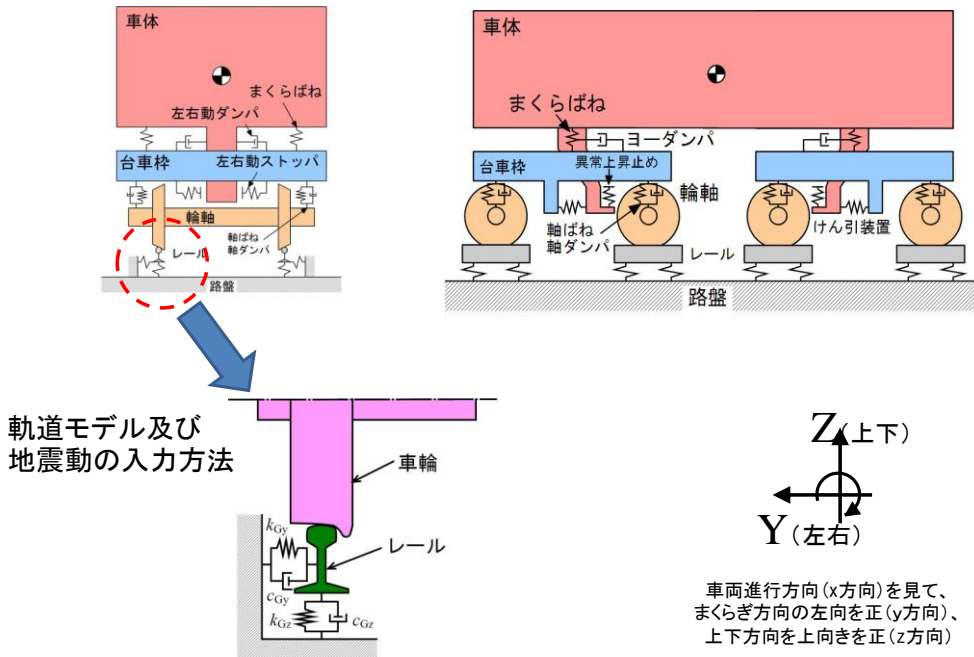


付図 1 3 車両モデルへの入力波形

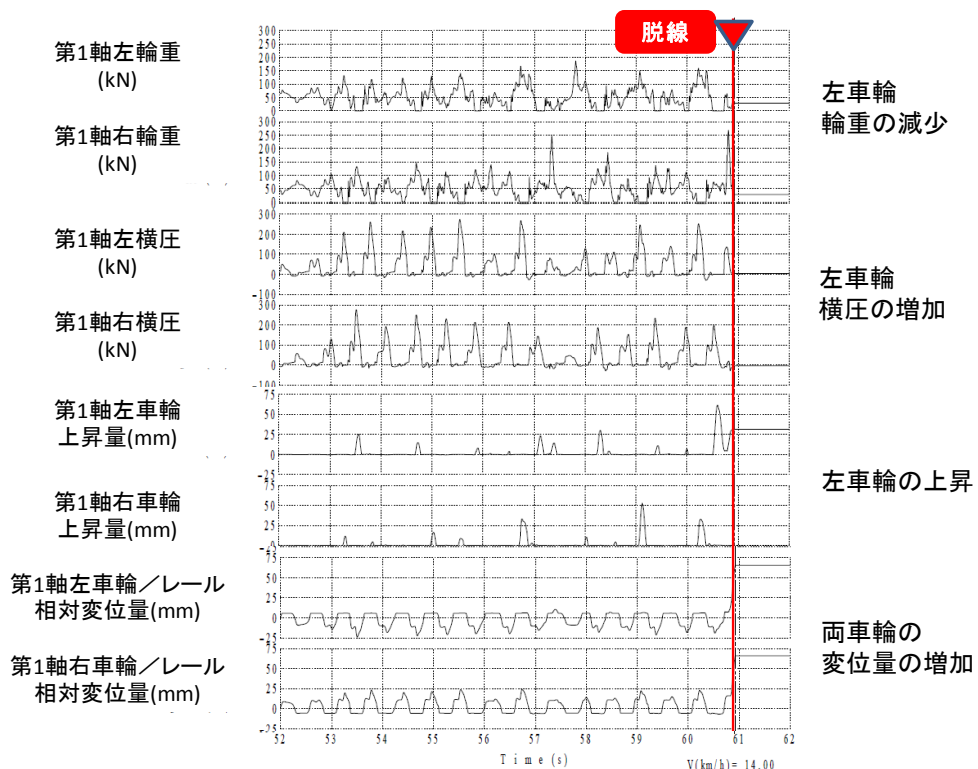


付図 1 4 車両モデルの概要

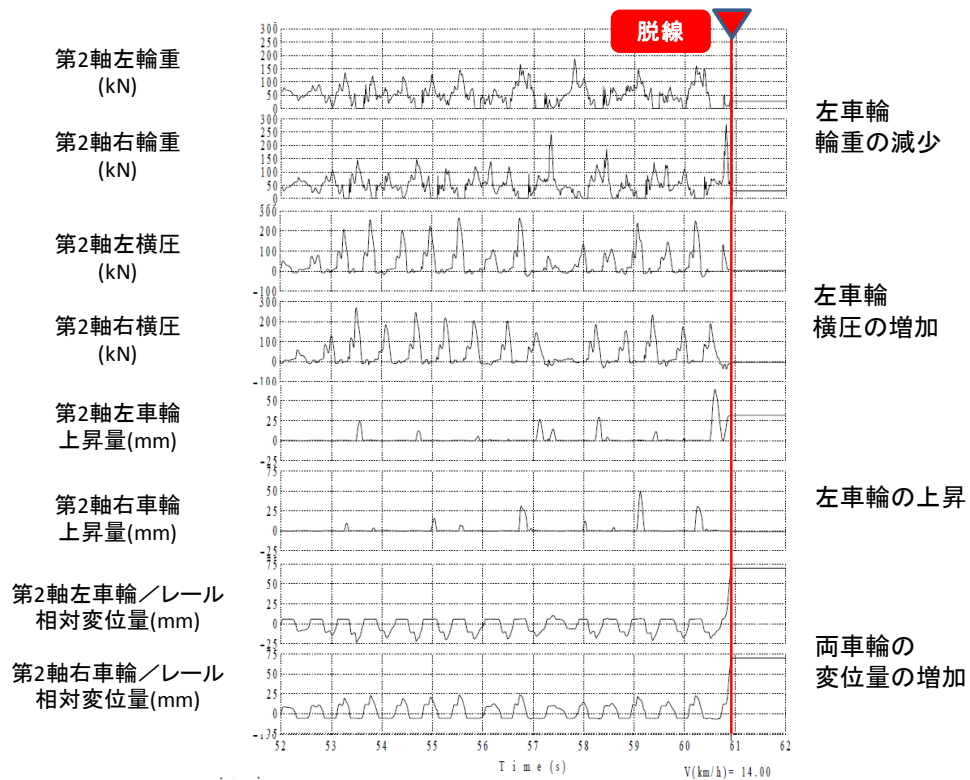
車両モデル * 58自由度(車体・台車枠・輪軸は各6自由度、車輪下レールは各2自由度)



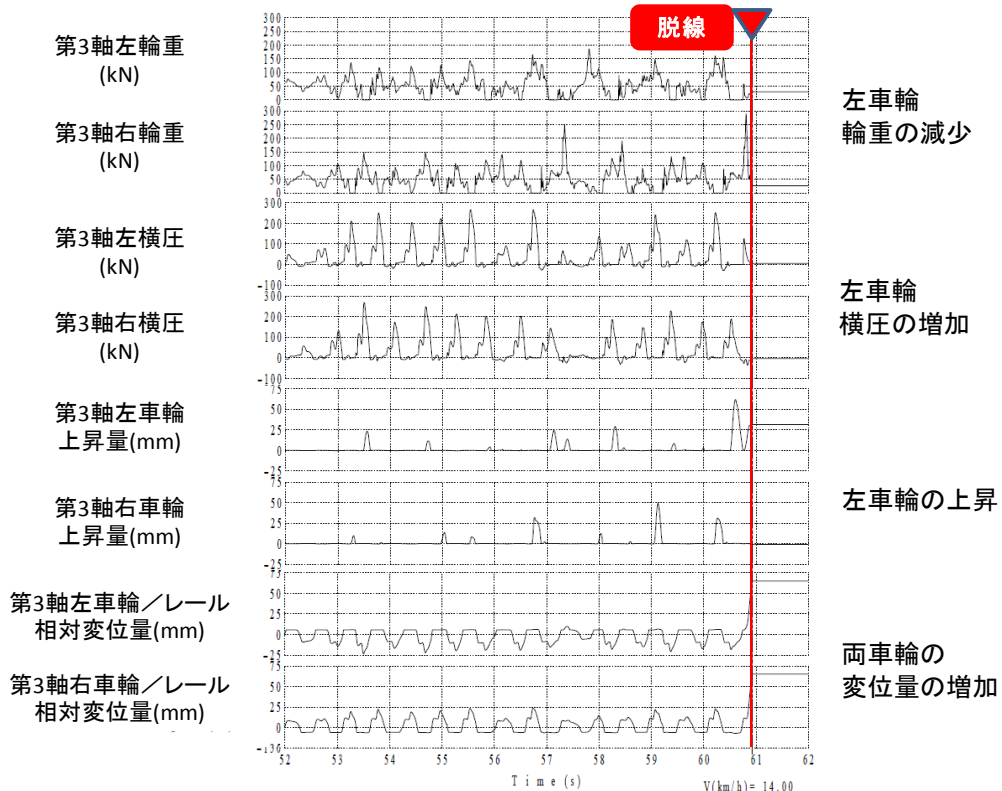
付図 1 5 シミュレーションの結果 (1) (第1軸の挙動)



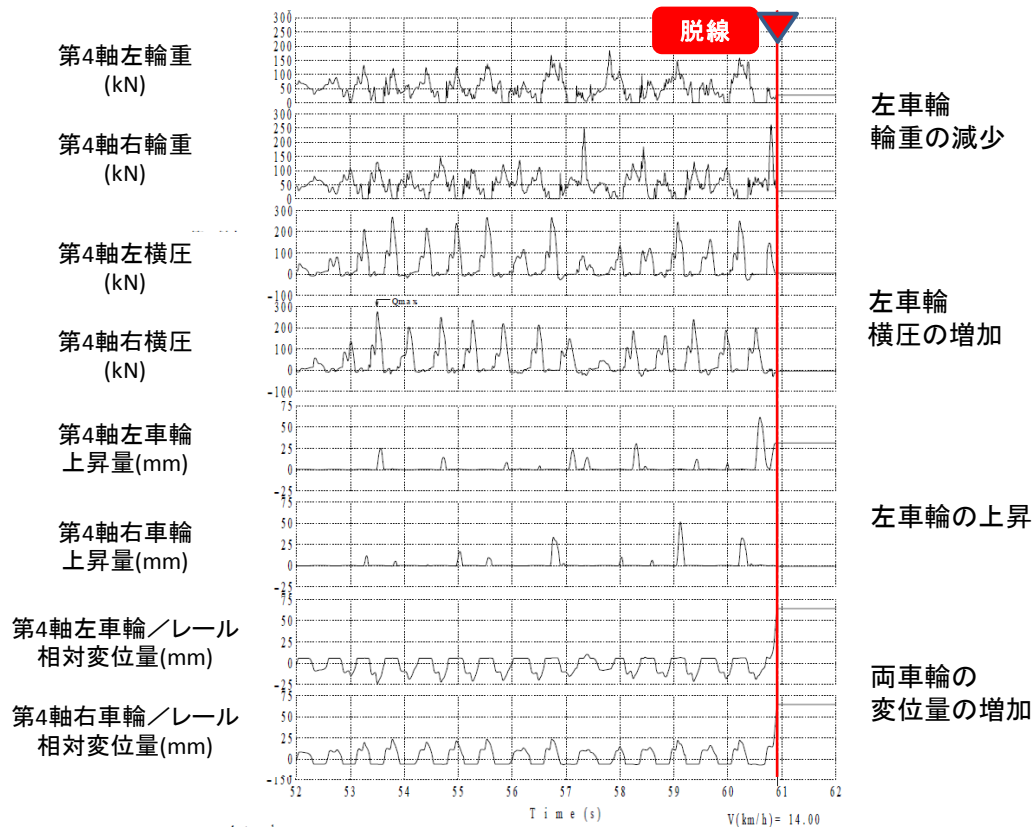
付図 1 5 シミュレーションの結果 (2) (第2軸の挙動)



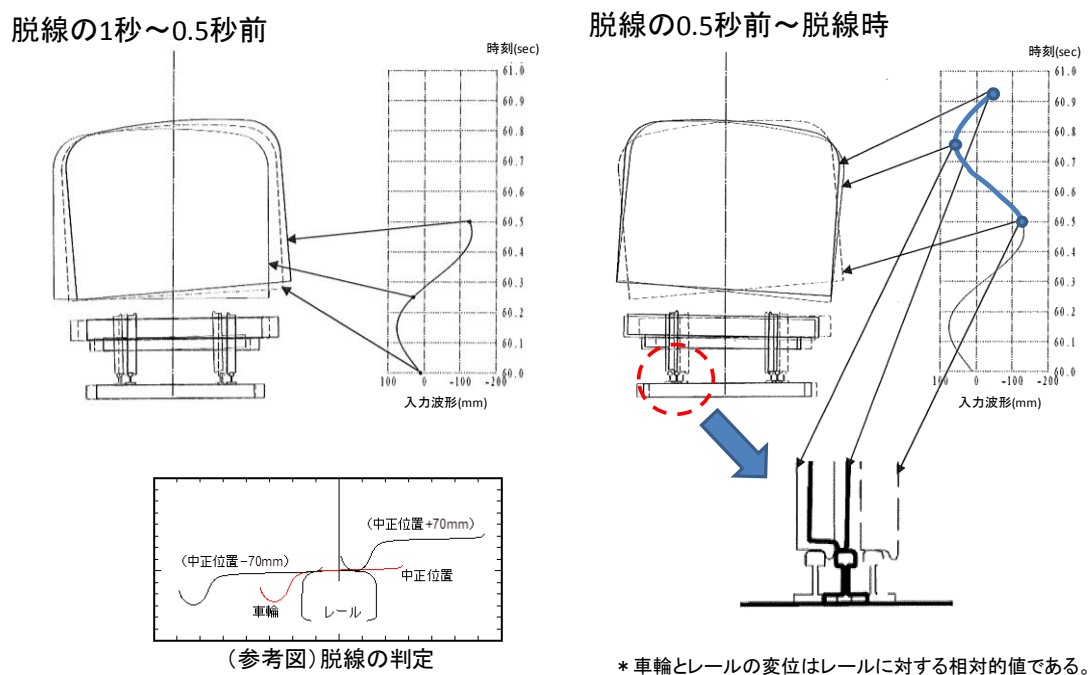
付図 1 5 シミュレーションの結果 (3) (第3軸の挙動)



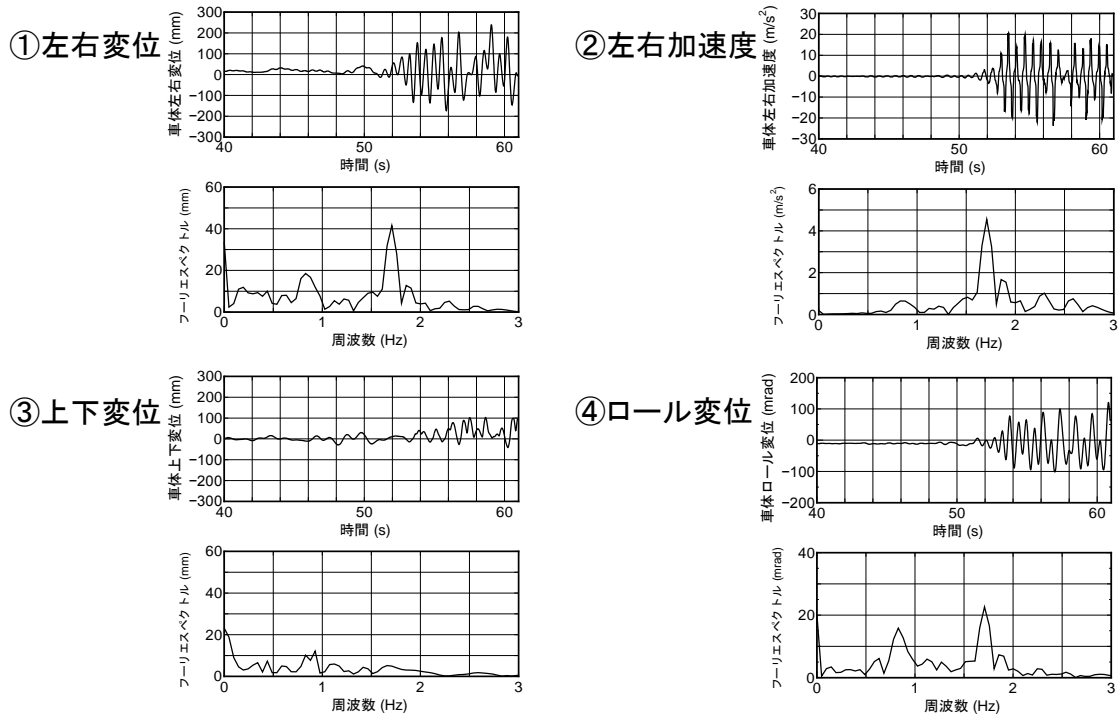
付図 1 5 シミュレーションの結果 (4) (第 4 軸の挙動)



付図 1 6 脱線直前の車両の挙動 (第 1 軸の動き)

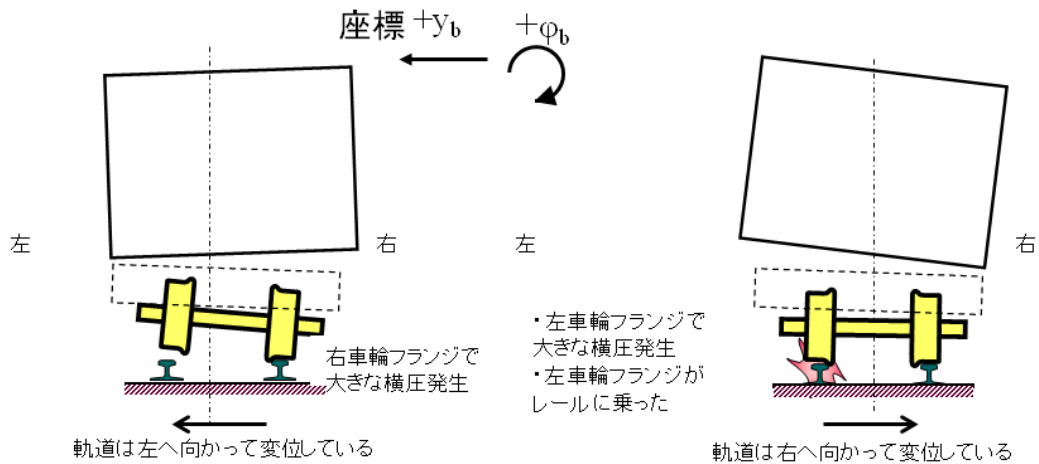


付図 1 7 脱線までの車両の挙動 (周波数)



注: 周波数解析は脱線地点における推定地震動の揺れが大きくなり始める地震波上の時刻40秒～脱線する直前の60.9秒で行った。

付図 1 8 脱線直前の車両の挙動の概念図



(a) 60.5秒付近で右車輪に大きな横圧発生
60.6秒付近で左車輪が63mm上昇

(b) 60.8秒手前で左車輪に大きな横圧発生
60.8秒付近で車輪フランジがレール頭頂面上る

写真1 本件列車の状況

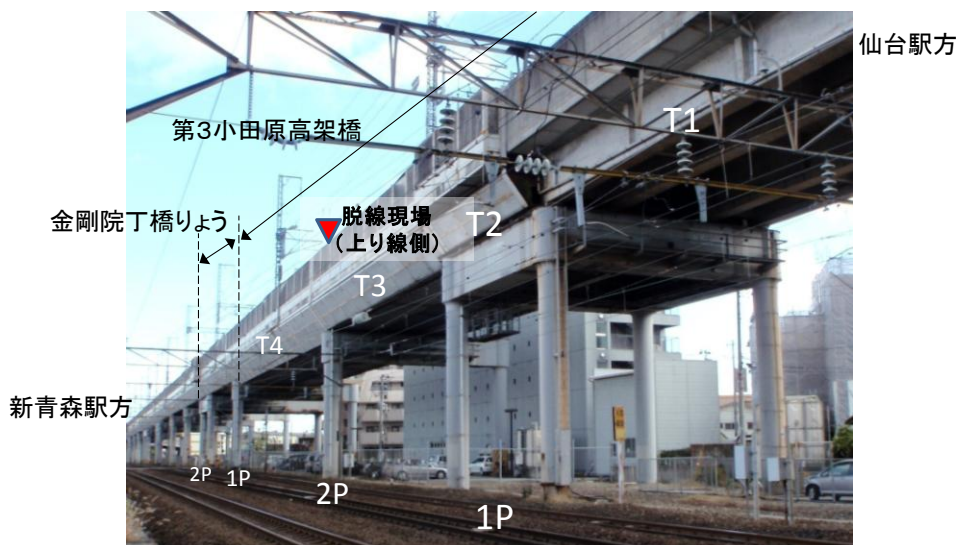


写真2 事故現場付近の状況（その1）

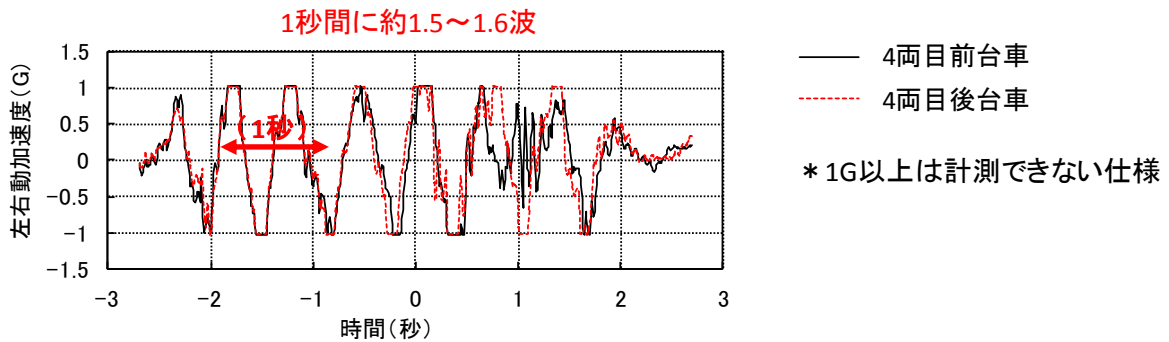


* 本件列車を仙台駅方に移動後に撮影

写真3 事故現場付近の状況（その2）

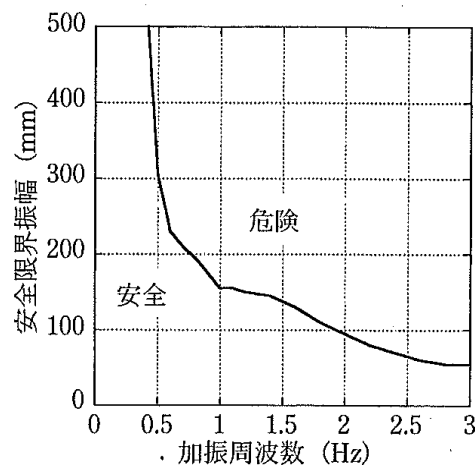


参考図1 セミアクティブ動揺防止制御装置における
加速度センサの動作記録（4両目）



注：セミアクティブ動揺防止制御装置における加速度センサの動作記録は、同装置の故障時の状況把握と原因調査に活用することを主な目的として取得されたものである。そのため、本報告書中では、車両運動シミュレーションの結果の妥当性を検証する上での参考として使用した。

参考図2 走行安全限界線図の例

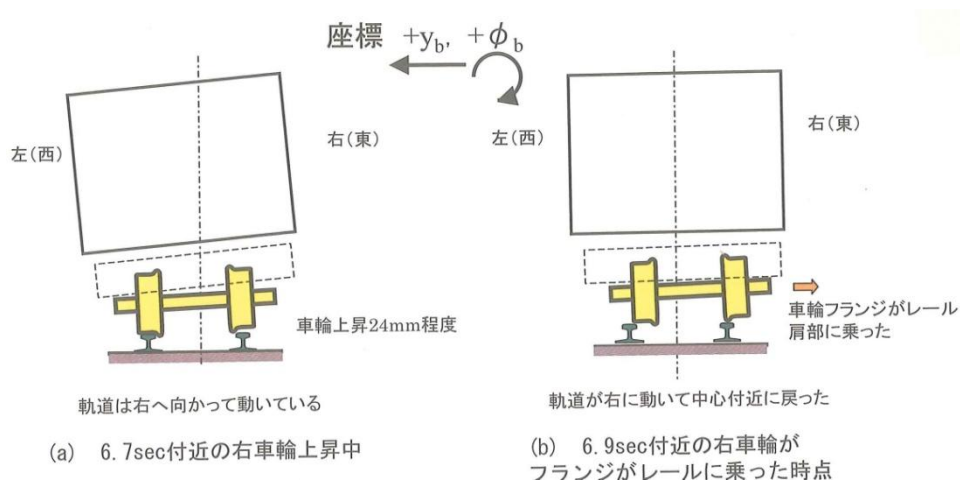


高速新幹線車両 300km/h, 正弦波左右加振

付属図 8.2 走行安全限界線 (シミュレーション)

「(財) 鉄道総合技術研究所編、鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限 (2006)、丸善、p.130」より引用

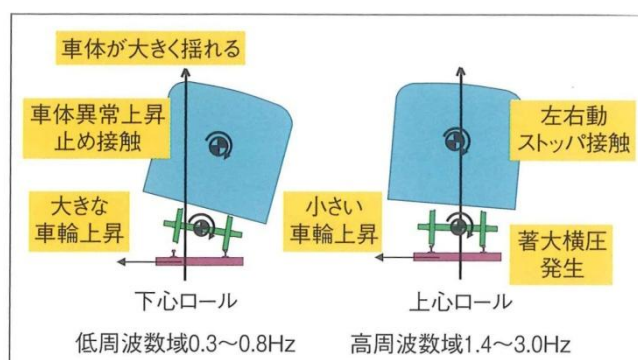
参考図 3 上越新幹線列車脱線事故における車両の姿勢



十日町高架橋R3におけるシミュレーション結果

「地震による新幹線脱線シミュレーション解析グループ(2008)：新潟県中越地震新幹線脱線シミュレーション解析、総研報告特別第52号、(財)鉄道総合技術研究所、p.59」の図7.15シミュレーション結果における車両の姿勢(推定地震波 十日町BL R3)から、一部を引用

参考図 4 上心ロールと下心ロールの概要



左右の正弦波振動の加振周波数に対応した車両挙動

「宮本岳史(2012)：地震時の車両脱線防止に向けた取り組み、RRR、Vol.69、No.3、p.15」より引用