

鉄 道 事 故 調 査 報 告 書

I 日本貨物鉄道株式会社 函館線 八雲駅～山越駅間 列車脱線事故

II 日本貨物鉄道株式会社 江差線 釜谷駅～泉沢駅間 列車脱線事故

III 日本貨物鉄道株式会社 江差線 泉沢駅～札苅駅間 列車脱線事故

IV 貨物列車走行の安全性向上に関する意見について

平成27年12月17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 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」

II 日本貨物鉄道株式会社 江差線
釜谷駅～泉沢駅間
列車脱線事故

鉄道事故調査報告書

鉄道事業者名：日本貨物鉄道株式会社

事故種類：列車脱線事故

発生日時：平成24年9月11日 19時26分ごろ

発生場所：北海道かみいそ磯郡きこない木古内町

えさし江差線 かまや釜谷駅～いずみさわ泉沢駅間（単線）

ごりようかく五稜郭駅起点29k032m付近

平成27年12月7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	横山茂
委員	石川敏行
委員	富井規雄
委員	岡村美好

要旨

<概要>

日本貨物鉄道株式会社の五稜郭駅発宮城野駅行き21両編成の上り高速貨第2050列車は、平成24年9月11日、五稜郭駅を定刻（17時56分）より1時間2分遅れて（18時58分）出発した。泉沢駅の上り出発信号機付近で非常ブレーキが掛かり停止したため、輸送指令の指示により運転士が降車して列車を点検したところ、9両目貨車と10両目貨車の間にあるブレーキ管ホースの連結器が外れており、9両目貨車の後台車全2軸が左側に脱線しているのを発見した。

列車には、運転士1名と青森信号場から五稜郭駅まで運転する予定の運転士1名の2名が乗車していたが負傷はなかった。

<原因>

本事故は、列車が半径300mの右曲線を通過した際に、事故現場付近においてコキ106形式の貨車後台車第1軸の外軌側の輪重が減少し、外軌に乗り上がったことにより脱線したものと考えられる。

外軌側の輪重が減少したことについては、事故現場付近において貨車に発生したと考えられる大きなロール振動によるものと考えられる。

貨車に大きなロール振動が発生したことについては、運転状況、車両及び軌道の状況は、省令に基づいて定められたJR貨物及びJR北海道の基準等に則った状態であったが、

- (1) コキ106形式の懸架装置の仕様は、積荷が比較的軽量であった場合、コキ104形式と比較して減衰が小さくなり、車体のロール振動が収束しにくいものであったこと、
- (2) 積荷が比較的軽量であり、重心が高い状態であったこと、
- (3) 事故現場付近における複合変位は、整備対象に近い比較的大きな変位量であったこと、走行速度に対して車体のロール振動の共振が生じやすい波長成分を含んでいたことが、車体のロール振動の発生を助長させた可能性があることから、これらの要因が重畳したことによるものと考えられる。

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	1
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	運転士の口述	2
2.1.2	運転状況記録装置に関する情報	4
2.2	人の死亡、行方不明及び負傷	5
2.3	鉄道施設及び車両等に関する情報	5
2.3.1	事故現場等に関する情報	5
2.3.2	鉄道施設に関する情報	6
2.3.3	車両に関する情報	12
2.4	鉄道施設及び車両の損傷、痕跡等に関する情報	19
2.4.1	鉄道施設の損傷及び痕跡等の状況	19
2.4.2	車両の損傷及び痕跡等の状況	20
2.4.3	落失した車両部品の発見位置	21
2.5	乗務員等に関する情報	22
2.6	運転取扱いに関する情報	22
2.6.1	事故前日及び当日の本件列車の状況	22
2.6.2	事故現場付近の運転取扱い	22
2.7	気象に関する情報	22
2.7.1	事故発生時の気象状況	22
2.7.2	事故発生前の気象状況	23
2.8	走行試験と数値シミュレーションに関する情報	23
2.8.1	走行試験と数値シミュレーションの実施について	23
2.8.2	J R 貨物及び J R 北海道による走行試験	23
2.8.3	貨車の走行に関する数値シミュレーション	25
2.9	江差線における最近の脱線事故の原因と再発防止策	34

2.9.1	平成24年4月26日発生の列車脱線事故について	34
2.9.2	平成26年6月22日発生の列車脱線事故について	34
2.10	その他必要な情報	36
3	分析	37
3.1	脱線車両等に関する分析	37
3.1.1	脱線地点	37
3.1.2	脱線時の時刻及び走行速度	37
3.2	車両に関する分析	38
3.2.1	コキ106形式の懸架装置の状況	38
3.2.2	事故前の本件貨車の状況	39
3.2.3	本件貨車の積荷の状況	39
3.2.4	本件貨車の静止輪重の状況	39
3.3	事故現場付近の軌道に関する分析	40
3.4	走行速度に関する分析	41
3.5	脱線に関する分析	41
3.5.1	貨車のロール振動	41
3.5.2	軌道変位の関与	42
3.6	泉沢駅のプラットホームの損傷に関する分析	42
3.7	本件列車の非常制動に関する分析	43
3.8	気象に関する分析	43
3.9	脱線事故発生後の安全性に関する分析	43
3.10	貨物列車の走行安全性の向上に関する分析	44
4	結論	45
4.1	分析の要約	45
4.2	原因	47
5	再発防止策	47
5.1	必要と考えられる再発防止策	47
5.2	本事故後にJR北海道が講じた措置	48
5.3	本事故後にJR貨物が講じた措置	48

添付資料

付図 1	江差線路線図.....	49
付図 2	事故現場付近の地形図.....	49
付図 3	事故現場～泉沢駅略図.....	50
付図 4	事故現場略図.....	51
付図 5	貨車からの落失物位置略図.....	52
付図 6	泉沢駅構内損傷箇所略図.....	53
付図 7	本件貨車の積荷の状況と車体の損傷状況.....	54
付図 8	本件貨車の後台車の損傷状況.....	55
付図 9	本件貨車後台車の車輪の損傷状況.....	56
付図 10	事故現場付近の軌道変位の状況.....	57
付図 11	走行試験の概要.....	59
付図 12	静止時のダンパ長（測定値）.....	59
付図 13	走行試験（本件曲線）の結果.....	60
付図 14	数値シミュレーションの概要.....	62
付図 15	数値シミュレーションモデル.....	63
付図 16	事故現場の曲線諸元.....	66
付図 17	数値シミュレーションによる走行試験の再現波形と 測定波形との照合.....	67
付図 18	数値シミュレーションによる本事故の再現に入力した軌道状態... ..	68
付図 19	数値シミュレーションによる本事故の再現結果.....	69
付図 20	数値シミュレーションによる本事故の再現結果 （カントを10mm増加させた場合）.....	71
付図 21	数値シミュレーションによる本事故の再現結果 （まくらばねダンパの減衰特性を“積車特性”に固定した場合）....	72
付図 22	数値シミュレーションによる本事故の再現結果 （軌道変位に通り変位のみ入力した場合）.....	73
付図 23	数値シミュレーションによる本事故の再現結果 （軌道変位に高低変位のみ入力した場合）.....	74
付図 24	数値シミュレーションによる本事故の再現結果 （レール上の痕跡の始点の1波長手前からのみ軌道変位が あったとした場合）.....	75
付図 25	数値シミュレーションによる本事故の再現結果 （パレットを8段積載した場合）.....	77

付図 2 6	数値シミュレーションによる本事故の再現結果 (車両形式をコキ 1 0 4 形式とした場合)	78
付図 2 7	貨車のロール運動に関する半車両モデルの概念図	79
付図 2 8	コキ 1 0 6 形式の積載条件ごとのロール振動の応答倍率	80
付図 2 9	積荷の重量と重心高さが車体のロール振動に及ぼす影響 (コキ 1 0 6 形式)	81
参考図 1	脱線の要因の推定	82
参考図 2	複合変位について	83

1 鉄道事故調査の経過

1.1 鉄道事故の概要

日本貨物鉄道株式会社の五稜郭駅発宮城野駅行き21両編成の上り高速貨第2050列車は、平成24年9月11日（火）、五稜郭駅を定刻（17時56分）より1時間2分遅れて（18時58分）出発した。泉沢駅の上り出発信号機付近で非常ブレーキが掛かり停止したため、輸送指令の指示により運転士が降車して列車を点検したところ、9両目貨車（車両は機関車を含めて前から数え、前後左右は列車の進行方向を基準とする。）と10両目貨車の間にあるブレーキ管ホースの連結器が外れており、9両目貨車の後台車全2軸が左側に脱線しているのを発見した。

列車には、運転士1名と青森信号場から五稜郭駅まで運転する予定の運転士1名の2名が乗車していたが、負傷はなかった。

1.2 鉄道事故調査の概要

1.2.1 調査組織

運輸安全委員会は、平成24年9月11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。その後、平成26年10月1日に1名、平成27年3月1日に1名の鉄道事故調査官を追加指名した。

北海道運輸局は、本事故調査の支援のため、職員を事故現場に派遣した。

平成26年10月8日、本事故の調査に従事する専門委員として、公益財団法人鉄道総合技術研究所鉄道力学研究部軌道力学研究室長名村明及び茨城大学工学部機械工学科准教授道辻洋平を任命し、調査すべき分野として名村明に「軌道の数値解析を用いた分析」を、道辻洋平に「車両運動の数値解析を用いた分析」を指定した。

さらに追加調査のため、委員、専門委員及び鉄道事故調査官を事故現場等に派遣した。

また、本事故に関し、国立大学法人茨城大学に「日本貨物鉄道株式会社江差線列車脱線事故に係る貨物列車の数値シミュレーションに関する研究」を委託した^{*1}。

1.2.2 調査の実施時期

平成24年9月11日及び12日	現場調査
平成24年9月12日及び13日	口述聴取及び車両調査
平成24年11月1日	車両調査

^{*1} 茨城大学：日本貨物鉄道株式会社江差線列車脱線事故に係る貨物列車の運動シミュレーションに関する研究報告書、2015.10

平成26年10月6日	
～平成27年10月30日	委託研究
平成26年10月16日	車両調査
平成26年11月21日～23日	走行試験及び車両調査
平成27年2月26日～28日	走行試験
平成27年7月16日	車両調査

1.2.3 原因関係者からの意見聴取

原因関係者から意見聴取を行った。

2 事実情報

2.1 運行の経過

2.1.1 運転士の口述

事故に至るまでの経過は、日本貨物鉄道株式会社（以下「JR貨物」という。）の上り高速貨第2050列車（以下「本件列車」という。）の運転士（以下「運転士A」という。）及び本件列車に便乗していた運転士（以下「運転士B」という。）の口述によれば、概略次のとおりであった。

(1) 運転士A

事故当日は、運転士B（運転士Bは、本件列車に便乗して青森信号場から下りの貨物列車に乗務予定）と2人で五稜郭駅から青森信号場へ向かう勤務であった。

五稜郭駅の出発は、通常のダイヤ（定刻17時56分）より1時間遅れの18時56分であった。本件列車の通常ダイヤでは、脱線して停止した箇所までに矢不來^{やふらい}信号場、茂辺地^{もへじ}駅、泉沢駅の3箇所でそれぞれ停車する予定となっていたが、当日は遅れを取り戻すため木古内駅まで停車しない運行に変更となっていた。

釜谷駅（五稜郭駅起点27k460m、以下「五稜郭駅起点」は省略。）を通過したあと、速度約70km/hから、半径300mの曲線の制限速度である60km/hに落とすためにブレーキを扱い、速度を約58km/h（曲線に入る前に確認）とした。この速度を保つため5ノッチか6ノッチにして力行運転でこの曲線を通過した。通過時に異常な振動などは感じず、曲線を通過した後、亀川道路踏切道（29k662m）の手前で惰行運転に切り換えて走行し、泉沢駅（30k570m）進入前に再度力行運転に切り換えて速度約58km/h

を保ちつつ、第1ホームの辺りで惰行運転に切り換えた。

泉沢駅の上り出発信号機の内方に入った後に、急にBP圧^{*2}が下がり、非常ブレーキが掛かった。このとき、BP圧の指示針の下がり方がゆっくりだったので、貨車の方でブレーキ管ホースが外れたのかなと思った。非常ブレーキが掛かってすぐにTE装置^{*3}のスイッチと防護無線のスイッチを押した。その後、北海道旅客鉄道株式会社（以下「JR北海道」という。）の輸送指令（以下「指令」という。）に非常ブレーキが掛かり停車したことを連絡した。

指令から、TE装置と防護無線の復位、パンタグラフの上昇及びエアーを込める指示を受け、TE装置と防護無線を復位した後、貨車にエアーを込める操作を行ったが、エアーを込めることができなかった。改めて指令に指示を仰いだところ、転動防止措置をしてから車両調査するようとの指示を受けたので、運転士Bと2人で本件列車の左右に分かれて、貨車のブレーキ管ホースを中心に調査を始めた。

調査していると、9両目の貨車（以下「本件貨車」という。）付近でエアーが漏れる音が聞こえたので、運転士Bと共に本件貨車と10両目に付いているブレーキコックを閉めて漏気を止めた。その際に、本件貨車の台車の位置がずれていることに気付いた。確認したところ、本件貨車と10両目貨車の間にあるブレーキ管ホースの連結器が外れていることと、本件貨車の後台車全2軸が左側に脱線していることを発見したので、持っていた無線機で脱線していることを指令に連絡した。さらに指令から本件列車の最後尾まで確認するよう指示を受けたので、引き続き貨車の確認を行い、ほかに脱線している箇所がないこと及び貨車が全て連結されていることを報告した。

貨車の確認を行っているときに、本件列車の先頭側からJR北海道の保線担当と思われる人達が来た。

なお、本件列車が停車するまでの間、本件列車の異常や脱線に気付かなかった。

(2) 運転士B

事故当日は本件列車に便乗して青森信号場まで行き、青森信号場から五稜郭駅までの下りの貨物列車に乗務予定だったことから、本件列車の出発時から運転席の右側にある助手席に座っていた。

^{*2} 「BP圧」とは、ブレーキの強さを指令する空気配管（BP（brake pipe））の空気圧をいい、通常は490kPaの一定圧力に保たれ、ブレーキ管を減圧するとブレーキが掛かり、増圧するとブレーキが緩む。

^{*3} 「TE装置」とは、one Touch operative Emergency deviceの略称で、ワンタッチのスイッチを押すことにより気笛吹鳴、砂撒き、非常ブレーキ、力行しゃ断、パンタグラフ降下、機関停止、車両用信号炎管点火、防護無線発報などを同時に行う装置で、緊急列車防護装置のことをいう。

本件列車の出発時から停車するまでの間、本件列車や運転操作に異常は感じなかった。

泉沢駅の出発信号機を過ぎた辺りで非常ブレーキが掛かり、ATSによる非常ブレーキが掛かる場所ではないのでブレーキ管ホースが外れたと思った。

本件列車が停止後に、運転士Aと運転台の各種ランプ及び表示灯の確認をした後で、指令の指示により車両の確認をした。

調査していると、エアーの漏れる大きな音が聞こえた。本件貨車と10両目貨車の間のブレーキ管ホースの連結器が外れていたため、運転士Aと共に本件貨車と10両目貨車のブレーキコックを閉めたときに、本件貨車が脱線していることを発見した。また、外れていたブレーキ管ホースの連結器部分は白っぽく汚れていた。なお、貨車の最後尾まで点検をしたが、このときに脱線痕の確認はしていない。

2.1.2 運転状況記録装置に関する情報

本件列車の機関車には、時刻、速度、力行ノッチの操作状況及びBP圧の状況等を、0.2秒ごとに記録することができる運転状況記録装置が設置されている。

同装置の記録によれば、本事故発生前後の運転状況は概略表1のとおりであった。時刻については、記録時刻から実際の時刻に補正を行った。

なお、3.1.2 に後述するように、本事故の発生時刻は19時26分ごろであった。

表1 本事故発生前後の運転状況

時刻	速度 (km/h)	力行 ノッチ	BP圧力 (kPa)	機関車や本件貨車の位置等
19時26分07秒1	59	切り	490	機関車が28 k 773mで曲線進入
19時26分11秒3	61	6ノッチ	490	機関車が28 k 843mで円曲線進入
19時26分27秒3	60	6ノッチ	495	機関車が29 k 110mで円曲線進出
19時26分31秒5	60	切り	495	機関車が29 k 180mで曲線進出
19時26分33秒5	59	切り	495	機関車が29 k 210m付近を走行 脱線した後台車は円曲線中の29 k 032m付近を走行
19時28分10秒1	58	切り	500	機関車が泉沢駅構内の30 k 710m 付近を走行 脱線した後台車は30 k 522m付近 (第1ホーム端部)を走行

19時28分45秒7	53	切り	494	B P 圧降下 機関車が31 k 247m付近を走行 脱線した後台車は31 k 062m付近 (16号分岐器ポイント部付近)を走行し、9両目と10両目の連結器は31 k 059m付近を走行
19時28分46秒3	52	5ノッチ	461	B C 圧上昇 機関車が31 k 256m付近を走行 脱線した後台車は31 k 071m付近 (14号分岐器リード部付近)を走行
19時28分53秒9	27	切り	345	T E 装置のスイッチ押下
19時29分00秒1	0	切り	4	機関車が31 k 368mに停止

(付図1 江差線路線図、付図2 事故現場付近の地形図、付図3 事故現場～泉沢駅略図、付図4 事故現場略図、付図5 貨車からの落失物位置略図、付図6 泉沢駅構内損傷箇所略図 参照)

2.2 人の死亡、行方不明及び負傷
なし。

2.3 鉄道施設及び車両等に関する情報

2.3.1 事故現場等に関する情報

- (1) 本件列車は、先頭（機関車）が泉沢駅～^{さつかり}札苅駅間の31 k 368 m付近に停止しており、最後尾は泉沢駅上り本線の30 k 935 m付近に停止していた。
- (2) 本件貨車は、泉沢駅構内の31 k 183 m付近に後台車の中心が停止しており、第1軸が約530 mm、第2軸が約520 mmそれぞれレールの左側に脱線していた。
- (3) 釜谷駅～泉沢駅間の右曲線（半径300 m）内の29 k 029 m付近から29 k 032 m付近までには、左レール（外軌）上に軌間内側から外側へと斜めに横切る車輪によるものと見られる痕跡があった。また、29 k 032 m付近には、右レール（内軌）のゲージコーナー^{*4}に車輪によるものと見られる痕跡があった。
- (4) 29 k 032 m付近から泉沢駅構内にかけて左レール軌間外側及び右レール

^{*4} 「ゲージコーナー」とは、敷設されたレール頭部の軌間内側で、車輪のフランジと接触する部分のことをいう。

軌間内側のまくらぎ及びレール締結装置に、車輪によるものと見られる痕跡が続いていた。

- (5) 泉沢駅構内の本件列車の進路上の分岐器（通過順に、11号イ、12号イ、16号、14号ロ及び14号イ）には、車輪によるものと見られる打痕及び線状の痕跡があった。
- (6) 事故当日、本件列車が事故現場を通過する前の1時間に、本件列車と同じ方向に走行する上り貨物列車2本及び特急列車1本並びに上下各1本の普通列車がそれぞれ事故現場付近を走行した。直近の列車は本事故発生の約11分前の下り普通列車及び約27分前の上り貨物列車である。なお、JR北海道及びJR貨物によると各列車の運転士から事故現場付近に関する異常の報告はなかったとのことであった。
- (7) 事故現場の曲線では、平成24年4月26日にJR貨物の広島貨物ターミナル駅発札幌貨物ターミナル駅行き20両編成の高速貨第3061列車が29k027m付近で脱線する事故^{*5}が発生した。

(付図1 江差線路線図、付図2 事故現場付近の地形図、付図3 事故現場～泉沢駅略図、付図4 事故現場略図、付図5 貨車からの落失物位置略図、付図7 本件貨車の積荷の状況と車体の損傷状況 参照)

2.3.2 鉄道施設に関する情報

2.3.2.1 路線の概要

JR北海道の江差線五稜郭駅～江差駅間は延長79.9km、軌間1,067mmの単線の路線であり、このうち、五稜郭駅～木古内駅間（延長37.8km）は交流20,000Vの電化区間である。なお、JR貨物は、第二種鉄道事業者^{*6}として、江差線五稜郭駅～木古内駅間において貨物列車の運行を行っている。また、同区間は、貨物列車の通過トン数が他の線区と比較して多くなっている。

江差線の五稜郭駅～木古内駅間の地形は、おおむね渡島半島の津軽海峡に面した海岸線に沿って敷設されていることから曲線が多く、釜谷駅～泉沢駅間においても津軽海峡に張り出したサラキ岬の海岸段丘の最下層の崖下に沿って敷設されている。

また、江差線五稜郭駅～木古内駅間は青函トンネルを通る海峡線（中小国駅^{なかおぐに}～木古内駅間、延長87.8km）の開業（昭和63年3月13日）に合わせて、列車の最高運転速度が向上するとともに、新たに特急列車や貨物列車の幹線ルートとなった。

^{*5} 運輸安全委員会：鉄道事故調査報告書RA2014-7、日本貨物鉄道株式会社 江差線 泉沢駅～釜谷駅間列車脱線事故、平成26年7月25日公表

^{*6} 「第二種鉄道事業者」とは、自らが敷設する鉄道線路以外の鉄道線路を使用して鉄道による旅客又は貨物の運送を行う事業者をいう。

これに合わせて、同区間の軌道や橋りょう等が強化されるとともに、小規模な軌道線形の改良が行われたが、本事故発生当時、半径350m以下の曲線は、同区間の約20%を占めていた。

なお、木古内駅～江差駅間（延長42.1km）は、平成26年5月12日に廃止された。

（付図1 江差線路線図、付図2 事故現場付近の地形図 参照）

2.3.2.2 線路に関する情報

- (1) 事故現場付近の軌道は、50kgNレール（レール高さ153mm）及びPCまくらぎが使用されたバラスト軌道（道床厚250mm以上）である。
- (2) 事故現場付近の線路は、28k773mから29k180mまでが半径300mの右曲線（以下「本件曲線」という。）である。このうち、28k843mから29k110mまでが円曲線であり、その前後のそれぞれ70mは緩和曲線である。本件曲線のカントは100mmに、スラックは10mmに設定されており、いずれも緩和曲線全長で逡減される。
- (3) 本件曲線付近の本件列車の進行方向を基準とした線路の勾配は、28k145mから28k756mまでが上り2.0%、28k756mから29k080mまでが下り0.5%、29k080mから29k469mまでが下り1.2%である。
- (4) 本件曲線から本件列車が停止した位置までの間には、亀川道路踏切道（第1種踏切道：29k662m）、泉沢踏切道（第4種踏切道：30k155m）、二ノ岱^{にのたい}道路踏切道（第1種踏切道：30k776m）、橋呉^{はしくれ}道路踏切道（第1種踏切道：31k308m）の4箇所の踏切道がある。
- (5) 泉沢駅構内には分岐器が10箇所設置されており、このうち本件列車の進路上の分岐器は、五稜郭駅方に50kgNレール用16番両開き分岐器（11号イ分岐器、30k365m～30k402m）及び50kgNレール用12番片開き分岐器（12号イ分岐器、30k446m～30k476m）の2基が、木古内駅方に50kgNレール用12番片開き分岐器（16号分岐器、31k036m～31k066m）、50kgNレール用8番乗越分岐器（14号ロ分岐器、31k066m～31k091m）及び50kgNレール用16番両開き分岐器（14号イ分岐器、31k109m～31k146m）の3基が、それぞれ設置されている。

各分岐器の軌道構造は、50kgNレールを締結装置（タイプレート）で分岐器用木まくらぎに固定しており、道床はバラスト道床となっている。

- (6) 泉沢駅にはプラットホームが2面設置されており、本件列車の進路には

第1ホームが左側に設置されている。第1ホームの構造は、線路に沿った部分は鉄骨の上に、コンクリート板の床板を並べ、その上をアスファルト舗装した桁式構造となっており、桁式構造の奥側は盛土式構造となっている。第1ホームの寸法は、長さ90m（30k522mから30k612m）、幅2m、レール面からのプラットホームの高さ0.92m、桁の厚さ9cm（コンクリート板6cm、アスファルト合材3cm）である。

第1ホームの五稜郭駅方端部付近の30k476mから30k540mまでは半径1,400mの右曲線があり、五稜郭駅方端部（30k522m）におけるホーム縁端と軌道中心の離れは1,529mmである。なお、第1ホームがある区間には勾配はついていない。

- (7) 事故現場付近では、事故の前夜及び当日に軌道に関する作業、工事は行われていなかった。

(付図3 事故現場～泉沢駅略図、付図4 事故現場略図 参照)

2.3.2.3 軌道状態検査に関する情報

「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）の実施に関する基準として、同省令に基づき、‘JR北海道が北海道運輸局長に届け出ている線路技術心得（実施基準）’（以下「線路実施基準」という。）では、軌道状態検査として軌道変位検査及び列車動揺検査を実施することとされている。

2.3.2.4 軌道変位検査に関する情報

軌道変位検査は、軌間変位、水準変位^{*7}、高低変位、通り変位^{*8}及び5m平面性変位^{*9}を検査することとされ、これらの軌道変位が線路実施基準に定められた一般軌道の整備基準値（以下「整備基準値」という。）に達した場合、早急に整備を行うこととされており、その整備基準値は表2のとおりである。

事故現場を含む江差線五稜郭駅～木古内駅間は、線路実施基準において2級線に

^{*7} 「水準変位」とは、左右レールの高さの差である「水準」に関する変位で、カントがない場合は水準そのものの値を用い、カントがある場合は水準測定値からカントを減じた量をいう。高速軌道検測車等により連続して測定されたデータの場合には、移動平均法等により基準となる線形を算出し、これと水準測定値との差を水準変位として軌道変位の評価に用いている。

^{*8} 「通り変位」とは、レール長さ方向の左右の変位で、一般に10m弦正矢の値で表され、曲線部では曲線半径に応じた正矢を差し引いた値をいう。高速軌道検測車等により連続して測定されたデータの場合には、移動平均法等により基準となる線形を算出し、これと測定された通り測定値との差を通り変位として軌道変位の評価に用いている。

^{*9} ここでいう「平面性変位」とは、レールの長さ方向の2点間の水準の差をいい、平面に対する軌道のねじれ状態を表す。2点間の距離が5mであれば、5m平面性変位という。なお、本文中では右前方が下がる向きにねじれている場合の平面性変位を正の値としている。

区分され、J R 北海道の社内規程である線路検査規程において、2 級線は1 年間に4 回検査を行うこととされている。

表2 整備基準値 (単位: mm)

軌道変位の種類	整備基準値
軌 間	・直線及び半径600mを越える曲線 20 (14)
	・半径200m以上600mまでの曲線 25 (19)
	・半径200m未満の曲線 20 (14)
水 準	平面性に基づき整備を行う。
高 低	25 (17)
通 り	25 (17)
5m平面性	23 (18) (カントの遞減量を含む)

※ 数値は、高速軌道検測車による動的値を示す。ただし、かっこ内の数値は、静的値を示す。

※ 平面性は、5m当りの水準変化量を示す。

※ 曲線部におけるスラック、カント及び正矢量(縦曲線を含む。)は含まない。

また、線路検査規程と同じくJ R 北海道の社内規程である軌道整備規程において、貨物列車が運行される区間については複合変位^{*10}を管理することとされ、複合変位は表3に示す種別により整備することとされている。なお、変位量は絶対値で管理している。

表3 整備対象となる複合変位

複合変位の種別	変位の 対象延長	対象の変位及び箇所数	
		変 位 量	変位の箇所数
第 I 種	80m	18mm	4 箇所
第 II 種	60m	21mm	3 箇所
第 III 種	30m	25mm	2 箇所
第 IV 種	---	35mm	1 箇所

備考 (ア) 高速軌道検測車の測定記録の複合変位が上の表の値以上になったものを対象とする。

(イ) 最高速度45km/h以下の線区は除く。

(ウ) 貨物列車運転線区の一般軌道に適用される。

(エ) 複合変位の箇所は、両側レールを対象とすることとし、左右レールの複合変位が10m以上離れている場合は別個の変位とする。

^{*10} 「複合変位」とは、軌道変位の管理指標の一つであり、通り変位の生じている向きに軌道面が傾くような水準変位が生じた場合に複合変位の絶対値が大きくなるように、通り変位に水準変位の1.5倍を減じるか又は加えたものである。複合変位が大きくなると、貨車のローリングや蛇行動が生じやすくなる。(参考図2 複合変位について 参照)

第Ⅰ種は80mの対象延長の中に変位量が18mm以上の箇所が4箇所以上あれば補修が必要になる。また、第Ⅳ種は対象延長がないことから1箇所でも35mm以上であれば補修が必要になる。

事故現場付近における本事故発生前の軌道については、2.3.1(7)に記述した平成24年4月26日の事故後に軌道整備が行われ、同年6月12日及び同年8月24日に軌道変位検査が軌道検測車により実施された。検査結果は、表2に示す軌間変位、水準変位、高低変位、通り変位及び5m平面性変位についてはいずれも整備基準値内であり、表3に示す複合変位は第Ⅰ種～第Ⅳ種のいずれも、整備する対象の変位量及び箇所数に該当するものはなかった。本事故前直近の同年8月24日に実施された検査結果の状況は、次のとおりであった。なお、軌道検測車による軌道変位の測定間隔は0.25mである。

- (1) 軌間変位、水準変位、高低変位、通り変位及び5m平面性変位は、いずれも整備基準値内であった。事故現場付近におけるそれぞれの変位の最大値は、軌間変位は29k028.50mで13.9mm、高低変位は29k037.50m（右レール）で-14.3mm（凹形の変位）、通り変位は29k037.50m（左レール）で-15.8mm（曲線内側への変位）、5m平面性変位は29k043.00mで13.9mmであり、水準変位は29k037.75mで9.4mmであった。なお、レール上の痕跡の始点より手前の軌道における水準測定値は、2.3.2(2)に記述した設定されたカント量と比較して10mm程度大きくなっていった。
- (2) 水準変位の測定値から、本件貨車の軸距に近い2m平面性変位及び本件貨車の台車中心間距離に近い14m平面性変位を求めたところ、2m平面性変位の最大値は29k028.00mで8.6mm、14m平面性変位の最大値は29k028.50mで8.9mmであり、特に大きなものはなかった。
- (3) 複合変位は、表3に示す第Ⅰ種から第Ⅳ種までのいずれについても、整備する対象の変位量及び箇所数に該当するものはなかった。ただし、事故現場付近において、29k037.50mに1箇所であるが第Ⅲ種複合変位（25mm以上の変位が30m間に2箇所）の整備対象となる変位量である25mmを超える29.8mmの変位があり、さらに、レール上の痕跡の始点付近から手前20mの範囲内に16.0～17.8mmの第Ⅰ種複合変位（18mm以上の変位が80m間に4箇所）の整備対象となる変位量に近い比較的大きな複合変位が存在した。

また、本事故後に、可搬式軌道変位計測装置により軌道変位の測定が行われているが、おおむね同様の傾向であった。なお、当委員会では、JR北海道から提出を受けたこれらの軌道変位データについては、軌道検測車による軌道検測波形との照

合を行った上で、調査に用いた。

(付図10 事故現場付近の軌道変位の状況、参考図2 複合変位について 参照)

2.3.2.5 列車動揺検査に関する情報

列車動揺検査は、旅客列車の列車動揺の状態について検査することとされ、この列車動揺がJR北海道の社内規程である軌道整備規程に定められた整備値以上の場合には、軌道変位が整備基準値に達した場合と同様の措置を採ることとされている。また、線路検査規程で高速線区に区分される江差線は、1年間に4回検査を行うこととされている。

列車動揺の整備値は、軌道整備規程において表4のとおりである。JR北海道では、列車動揺検査の測定値が整備値を超過すると乗心地が悪くなることから、整備値よりも小さな値の目標値を設定し、この値で軌道整備を行うことに努めている。

表4 列車動揺の整備値

測定車種 \ 動揺種別	上下動	左右動
高性能優等列車	全振幅 2.4m/s^2 (2.0m/s^2)	全振幅 2.4m/s^2 (2.0m/s^2)
その他の旅客列車	全振幅 3.6m/s^2 (3.0m/s^2)	全振幅 3.6m/s^2 (3.0m/s^2)

備考 (ア) 「高性能優等列車」とは、高性能車両(バネ下軸重2トン以下及び定員乗車時の最大軸重が13トン以下の車両諸元を有し、横圧等の走行性能のよい電車、気動車)で構成された特急急行列車などをいう。

(イ) 上記数値は乗心地を維持するためのものを示す。

(ウ) ()内は目標値を示す。

(エ) 目標値は整備値超過の発生を少なくするためのものを示す。

事故現場付近における本事故前直近の列車動揺検査は、平成24年8月23日に高性能優等列車により実施されており、整備値及び目標値を超過した箇所はなかった。

2.3.2.6 レールの摩耗状況

本事故後に事故現場付近のレールの摩耗状況を調査した結果、左レール(外軌)及び右レール(内軌)の摩耗量は29k028m付近で最も大きく、左レールではゲージコーナーで9.5mm、右レールでは頭頂部で5.3mmの摩耗量であった。これらの摩耗量は、線路実施基準に定められたレール交換基準(50kgNレール:16mm)

未満である。

なお、事故現場付近の、まくらぎ、道床及びレール締結装置等の軌道材料については、異常は見られなかった。

(付図4 事故現場略図 参照)

2.3.3 車両に関する情報

2.3.3.1 車両の概要

本件列車は、電気機関車（EH500形式）が貨車20両（コキ104形式17両及びコキ106形式3両）をけん引して21両編成で運行していた。また、編成は次のとおりであり、14両の貨車がコンテナを積載していた。編成図を図1に示す。

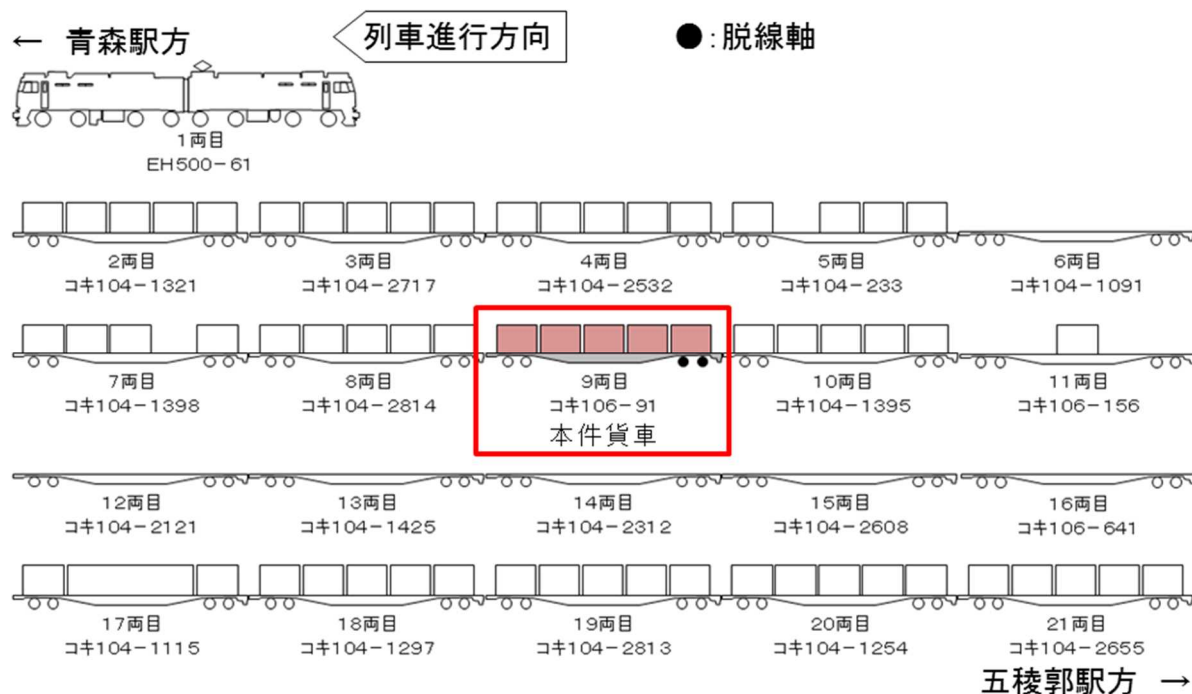


図1 本件列車編成図

本件列車に連結されていた貨車の主要諸元は次のとおりであり、本件貨車はコキ106形式である。

表5 コキ106形式とコキ104形式の比較

	コキ106形式 (本件貨車)	コキ104形式
空車重量	18.9 t ^{*11}	18.7 t
最大積載量	40.7 t	40.5 t
車両長	20.4 m	20.4 m
台車中心間距離	14.2 m	14.2 m
連結器高さ (空車時)	850 mm	850 mm
台車	インダイレクトマウント台車 (コイルばね)	インダイレクトマウント台車 (コイルばね)
軸箱支持方式	軸ゴム+軸箱支持ゴム	半円筒ゴム
軸ゴムのばね定数	9.720 kN/mm/軸箱	26.460 kN/mm/軸箱
軸距	1.9 m	1.9 m
まくらばねの構造	コイルばね	コイルばね
まくらばねのばね定数	2.985 kN/mm/台車片側	2.399 kN/mm/台車片側
まくらばねダンパの形式	OD54	OD54
左右動ダンパの形式	OD63	OD63
車輪踏面形状	修正円弧踏面	修正円弧踏面
車輪のフランジ角度 ^{*12}	65°	65°
車輪内面距離	990 mm	990 mm
ブレーキ装置	応荷重式電磁自動空気ブレーキ	応荷重式電磁自動空気ブレーキ
最高速度	110 km/h	110 km/h
製造開始年	平成9年	平成元年

本件列車に連結されたコキ106形式の特徴について調査したところ、概略次のとおりであった。

コキ106形式は、国際海上コンテナの輸送需要の高まりを受け、平成9年から製造開始されたコンテナ貨車である。

コキ104形式からコキ106形式への構造改良時に、国際海上コンテナの積載を可能とするため、まくらばねのばね定数を大きくし、軸ばねは半円筒ゴムから、軸ゴムと軸箱支持ゴムに分割してばね定数を小さくし、レールからの振動伝達量を低減させて車体及び積荷への衝撃を和らげる設計が行われた。一方、まくらばねダ

*11 [単位換算] 1 t = 1000 kg (重量)、1 kg (重量) : 1 kg f、1 kg f : 9.8 N

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

ンパについては、設計当初から部品の標準化を図るため、コンテナ貨車ではコキ100形式以降に用いられているOD54を使用することとして、車体への取付長を含めて見直しは行わなかった。なお、コキ100形式の設計は国鉄時代に始められており、懸架装置の設計に関する資料では、コンテナを積載していない状態（以下「空車状態」という。）と貨車に最大積載量の積荷を積載している状態（以下「最大積車状態」という。）を考慮した設計となっており、荷重が空車状態から最大積車状態までの範囲にある状態（以下「中間荷重状態」という。）を考慮した設計は行われていなかった。

JR貨物では、コキ106形式を含め新形式の貨車を製作した際、空車状態と最大積車状態を考慮した設計や走行試験を実施し、走行安全上の問題がないことを確認した上で事業の用に供しているが、中間荷重状態を考慮した設計や走行試験は実施されていなかった。

その後、平成23年3月10日に成田線くずみ久住駅～なめがわ滑河駅間で発生したJR貨物の列車脱線事故の調査において、中間荷重状態においてコンテナ貨車の走行安全性が低下する可能性があることが初めて分かり、同事故の報告書^{*13}でその重要性が指摘されている。JR貨物では、コキ106形式は、同事故で脱線したコキ200形式とは車体の剛性や懸架装置の特性が異なる形式の貨車と判断し、改めて検討は行わなかった。

^{*13} 運輸安全委員会：鉄道事故調査報告書RA2012-5、日本貨物鉄道株式会社 成田線 久住駅～滑河駅間列車脱線事故、平成24年6月29日公表

2.3.3.2 懸架装置の概要

本件貨車に設備された懸架装置^{*14}の特徴について調査したところ、概略次のとおりであった。懸架装置の位置を図2に示す。

客車に比べ貨車は空車状態から最大積車状態までの積載量の変動の幅が車体重量に比べて大きいことから、まくらばねダンパは積載重量すなわち‘まくらばねのたわみ量によって決まるまくらばねダンパの長さ（まくらばり側ダンパ受けと台車側ダンパ受けの距離）’

（以下「ダンパ長」という。）に応じて減衰特性が自動的に切り替わる構造になっている。空車状態で静止したダンパ長は430mmであるが、貨車に積荷等が積載されダンパ長が415mmより縮むと減衰

力が大きくなる特性（以下「積車特性」という。）に切り替わり（減衰特性が切り替わる415mmのダンパ長を、以下「特性切替長」という。）、415mmより伸びると減衰力が小さくなる特性（以下「空車特性」という。）に切り替わる構造である。このため、まくらばねダンパの減衰の特性は、静止時における減衰の特性で固定されるものではなく、走行中の車体の振動に伴って、まくらばねダンパも伸縮し“積車特性”と“空車特性”が切り替わる構造となっている。

貨車の走行安定性に関係する、車体のロール振動による輪重変動については、コキ100形式をはじめコキ106形式についても設計時の資料が不明であった。

コキ104形式とコキ106形式の諸元から、積載の状態に応じた静止時のダンパ長を計算したところ表6のとおりであった。特性切替長である415mmに縮む積載量は、コキ104形式は14.6tであるが、コキ106形式では18.3tで切り替わることとなり、積載量が14.6tから18.3tの間では、コキ106形式はコキ104形式よりも減衰特性が小さくなる。

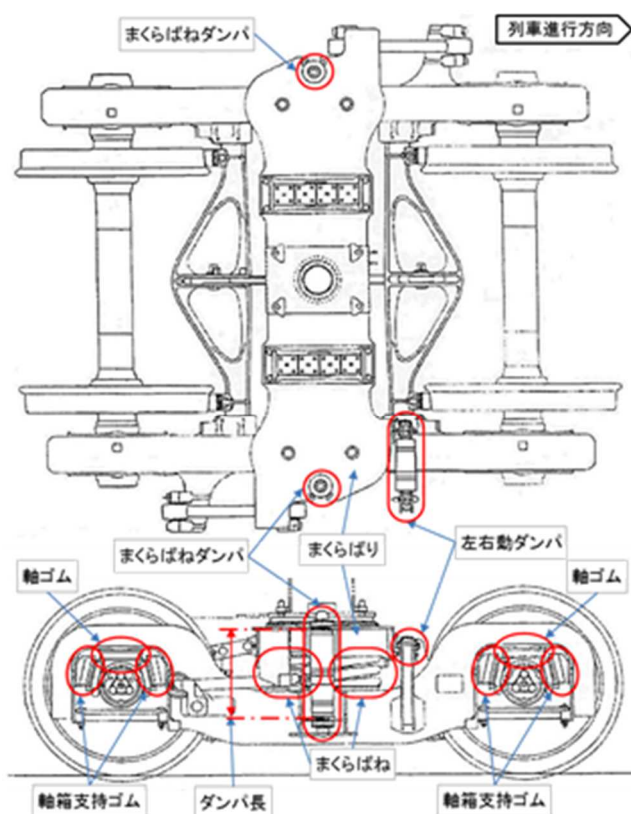


図2 本件貨車の懸架装置の位置

^{*14} 「懸架装置」とは、車軸と車体を連結する装置で、ばねやダンパと、それらを保持するフレーム等を配置した構造であり、車軸及び車体の位置決め機能、振動の緩衝機能を持ち、走行安全性や乗り心地の確保にかかわる。

表6 積載の状態に応じた静止時のダンパ長

コキ106形式	空車状態	事故発生時の積載量	まくらばねダンパの特性切替	最大積車状態 ^(注2)
1両当たりの積載量 (t)	0.0	14.8	18.3	39.0
まくらばね変位量 (mm)	0.0	-12.1	-15.0	-32.0
ダンパ長 (mm)	430.0	417.9	415.0	398.0
まくらばねダンパの減衰	小さい			大きい

コキ104形式	空車状態	まくらばねダンパの特性切替	事故発生時の積載量 ^(注1)	最大積車状態 ^(注2)
1両当たりの積載量 (t)	0.0	14.6	14.8	39.0
まくらばね変位量 (mm)	0.0	-15.0	-15.2	-40.1
ダンパ長 (mm)	430.0	415.0	414.8	389.9
まくらばねダンパの減衰	小さい			大きい

(注1 コキ104形式に事故発生時の本件貨車の積荷を積載した場合を仮想

(注2 12フィートコンテナを5つ積載する場合

2.3.3.3 本件貨車の状況

(1) 定期検査等の状況

本事故前直近の定期検査等の実施状況は、次のとおりであり、各検査の記録に異常を示すものは見られなかった。

新製	平成9年10月29日
重要部検査	平成22年5月13日 (車輪削正含む)
交番検査	平成24年8月6日
仕業検査	平成24年9月9日

(2) 車輪、踏面形状等の状況

本事故前直近の交番検査 (平成24年8月6日) における、本件貨車の輪軸各部の測定結果によれば、車輪直径、フランジ高さ、フランジ外側面距離^{*15}及び車輪内面距離のいずれも、「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」の実施に関する基準として、同省令に基づき、「JR貨物が北海道運輸局長に届け出ている貨車整備実施基準」(以下「貨車整備実施基準」という。)及びJR貨物の社内規程である貨車整備実施基準細則に定められた限度値 (車輪直径732mm以上、フランジ高さ25.0～34.5mm、フランジ外側面距

*15 「フランジ外側面距離」とは、車輪一对の中心線から、車輪踏面基準点の10mm下方位置までの水平距離をいう。

離520～527mm、車輪内面距離989～993mm)内であった。また、本事故後に測定された本件貨車の輪軸各部の寸法は、いずれも上述した限度値内であった。

また、本事故後に測定された各車輪の車輪踏面の描写記録は、打痕等により変形していた後台車の第1軸及び第2軸のフランジ先端部以外は、いずれもJR貨物の車輪図面上の形状とほぼ同じであった。

(3) 軸ゴム、軸箱支持ゴム及びまくらばねの状況

本事故後、本件貨車の軸ゴム、軸箱支持ゴム及びまくらばねについて、JR貨物等の調査によると、前台車の軸ゴム、軸箱支持ゴム及びまくらばねについて異常は見られなかった。一方、後台車については、まくらばねには異常が見られなかったが、軸ゴム及び軸箱支持ゴムについては、本事故による損傷及び変形のため寸法の測定ができない状況であった。

軸ゴム及び軸箱支持ゴムの損傷状況については2.4.2で後述するが、これらの損傷は、脱線時や脱線後に過大な荷重を受けたことによるものと推定しているとのことであった。

(4) コンテナ及び積荷の積載状況

本件貨車は、12フィートコンテナを5個積載し、コンテナの寸法は表7のとおりであり、各コンテナの積載荷重は5tである。また、本事故後に測定したコンテナ(前から順にコンテナ1～コンテナ5と付した。)及び積荷の重量は、表8のとおりであった。

5個のコンテナの重量の合計は、本件貨車の最大積載量である40.70t以下の14.81tであり、表6に示すように、このときのダンパ長は計算上417.9mmとなる。

本事故後、積荷のあるコンテナ1、3及び5の積荷の状況を確認したところ、プラスチック製プールパレット^{*16}(以下「パレット」という。)がそれぞれ84個(14段×6列)積まれていた。

コンテナの入口の高さ2,187mmに対して、パレットの高さは約2,016mmとコンテナの天井近くまで積載されており、いずれのコンテナにも大きな荷崩れは見られなかった。

それぞれのコンテナは、本件貨車の車体の両脇に設置されている5対の12フィートコンテナ用の緊締装置で固定されており、一对の緊締装置における車体から最も外側の幅員は2,645mmであり、最も外側の箇所の一

^{*16} 「プールパレット」とは、各輸送機関において相互に共通して使用され、互換性のある木製及びプラスチック製の平パレットのことをいう。大きさは1,100mm×1,100mm×144mm(JIS Z0601)である。

ル面からの高さは942mmである。

表7 コンテナの寸法 (単位：mm)

外法			内法			入口	
高さ	幅	長さ	高さ	幅	長さ	高さ	長さ
2,500	2,450	3,715	2,252	2,275	3,647	2,187	3,635

表8 コンテナ及び積荷の重量

	コンテナ1	コンテナ2	コンテナ3	コンテナ4	コンテナ5
重量	3.75 t	1.70 t	3.88 t	1.78 t	3.70 t
積荷	パレット	空	パレット	空	パレット

(5) 静止輪重及び静止輪重比の状況

本事故後に、損傷の激しい本件貨車の後台車を健全なものに交換して測定した静止輪重及び左車輪の静止輪重比^{*17}は、表9のとおりであった。

空車状態での左車輪の静止輪重比は、前台車の第1軸が1.03、第2軸が1.02であり、脱線した後台車の第1軸が0.96、第2軸が0.95であった。

一方、本件貨車に事故当時の積荷を積載した状態における左車輪の静止輪重比は、前台車の第1軸が1.02、第2軸が1.00であり、脱線した後台車の第1軸が1.00、第2軸が0.98であった。

また、本件貨車の新製時（平成9年10月）に測定された静止輪重は、メーカーに記録が残っていなかったため不明である。

なお、貨車整備実施基準において、本件貨車であるコキ106形式は静止輪重の管理を行う対象とはなっていない。

表9 本事故後の静止輪重及び左車輪の静止輪重比

		前台車				後台車			
		第1軸		第2軸		第1軸		第2軸	
		静止輪重(kN)	静止輪重比	静止輪重(kN)	静止輪重比	静止輪重(kN)	静止輪重比	静止輪重(kN)	静止輪重比
空車状態	右車輪	21.58	1.03	22.15	1.02	24.10	0.96	23.73	0.95
	左車輪	22.83		23.20		22.28		21.45	
事故当時の積載状態	右車輪	39.40	1.02	40.28	1.00	42.13	1.00	41.92	0.98
	左車輪	40.80		40.40		42.17		40.47	

*17 「静止輪重比」とは、1軸の輪軸に対し、片側の車輪の輪重をその軸の平均輪重で除した値をいう。

(6) 本件貨車の連結の状況

本件貨車と後続の10両目の貨車を連結する設備には、自動連結器、ブレーキ管ホース、元空気だめ管ホース及びジャンパー線^{*18}がある。五稜郭駅出発時には自動連結器及びブレーキ管ホースが連結されており、元空気だめ管ホース及びジャンパー線は本件列車の運行に必要ななかったため連結されていなかった。自動連結器及びブレーキ管ホースの連結器の位置は後台車中心の約3.1m後方にあり、ブレーキ管ホースの連結器はそれぞれの車体から、金属製のチェーンで吊り下げられている。

ブレーキ管ホースの連結器が外れていた本件列車の9両目（本件貨車、コキ106形式）、10両目（コキ104形式）と同形式の車両を使用し、積載量を事故当時に近い状態にしてブレーキ管ホースの連結器の高さを測定したところ、その下端はレール面から178mmであった。

なお、貨車整備実施基準において、ブレーキ管ホースの連結器の高さは測定の対象とはなっておらず、出発前の組成点検の際に目視とブレーキ試験で接続されていることを確認している。

2.4 鉄道施設及び車両の損傷、痕跡等に関する情報

2.4.1 鉄道施設の損傷及び痕跡等の状況

- (1) 本件曲線の29k029m付近から29k032m付近までの約3.5mの間に、左レール（外軌）上を軌間内側から外側へと斜めに横切る車輪によるものと見られる痕跡（29k029mの痕跡の始点について、以下「レール上の痕跡の始点」という。）、また、29k032m付近の右レール（内軌）ゲージコーナーに車輪によるものと見られる約0.4mの痕跡があった。
- (2) 29k032m付近から左レール軌間外側のまくらぎ上、軌間内のまくらぎ上及びレール締結装置上に、車輪によるものと見られるそれぞれ1本の痕跡が木古内駅方に続いていた。また、29k036m付近の軌間内のまくらぎ上には、車輪によるものと見られる痕跡が2本あり、以降の左レール軌間外側のまくらぎ上、軌間内のまくらぎ上、レール締結装置上には、それぞれ2本又は1本の痕跡が本件貨車の後台車の停止位置（31k183m）まで断続的に続いていた。
- (3) 釜谷駅～泉沢駅間の亀川道路踏切道並びに泉沢駅構内の泉沢道路踏切道及び二ノ岱道路踏切道のそれぞれの踏切敷板、踏切ガードなどには車輪による

^{*18} 「ジャンパー線」とは、編成中の補助回路機器や制御回路機器を動作させるため、各車両間を接続するために設けられている電線のことをいう。

ものと見られる打痕及び線状の痕跡があり、五稜郭駅方の踏切敷板は、木古内駅方の踏切敷板よりも大きく損傷していた。

- (4) 泉沢駅構内の本件列車の進路上にある11号イ分岐器、12号イ分岐器、16号分岐器、14号ロ分岐器及び14号イ分岐器の各種レール、まくらぎ並びに締結装置などには、本件貨車の車輪によるものと見られる打痕及び線状の痕跡があった。このうち、16号分岐器、14号ロ分岐器及び14号イ分岐器において、後台車のうちの1軸がリードレールに沿って左に大きく変位して、右側の車輪は軌間内の左レール付近を走行し、左側の車輪はまくらぎよりも左側を走行したと見られる痕跡があった。さらに14号ロ分岐器には、左トングレール及びリードレールに約3m、クロッシングから左レール上に約11mの車輪によるものと見られる線状の痕跡があった。
 - (5) 泉沢駅構内の本件列車の進路上にある11号イ分岐器、12号イ分岐器、16号分岐器、14号ロ分岐器及び14号イ分岐器の転てつ装置は、本件貨車の車輪によるものと見られる打痕及び線状の痕跡があり損傷していた。
 - (6) 泉沢駅の第1ホームは、五稜郭駅方端部から木古内駅方の約12m（30k522m～30k534m）にわたって、コンクリート板が線路側の端部から10cmの幅で損傷し鉄筋が露出しており、コンクリート板上のアスファルト舗装が線路側の端部から最大約1.8mの幅で損傷していた。また同ホーム中央部付近においても約3m（30k559m付近）にわたって、コンクリート板が線路側の端部から10cmの幅で損傷しており、コンクリート板上のアスファルト舗装が線路側の端部から約30cmの幅で浮き上がっていた。
第1ホームの五稜郭駅方端部付近のまくらぎ上には、右レールの左側約30cm、左レールの左側約35cmの位置に脱線した車輪によるものと見られる痕跡があった。
 - (7) JR北海道によると、本事故によりまくらぎ（木・PC）約2,000本、レール締結装置約3,000個、ATS地上子2個ほか多数の設備が損傷したとのことである。
- (付図3 事故現場～泉沢駅略図、付図5 貨車からの落失物位置略図、付図6 泉沢駅構内損傷箇所略図 参照)

2.4.2 車両の損傷及び痕跡等の状況

本件貨車の損傷状況は、次のとおりであった。

- (1) 後台車の車輪上方の車体下面には、脱線時及び脱線後の走行によって車輪が付けたと見られる打痕や擦過痕が多数あり、一部は曲損していた。また、車体左側にある12フィート用コンテナの緊締装置は、全5箇所のうち後側

の3箇所が変形し、白く汚れていた。

- (2) 本件貨車と10両目貨車を連結する自動連結器のうち、本件貨車の自動連結器の右側に接触痕があった。
 - (3) 本件貨車と10両目貨車の間にあるブレーキ管ホースの連結器が外れており、双方の連結器は白く汚れていた。
 - (4) 後台車1軸目付近にある元空気だめ管^{*19}（以下「MR管」という。）は曲損し接続部で破断しており、ブレーキ管は曲損していた。
 - (5) コンテナ4の左後ろの脚部、コンテナ5の左前及び左後ろの脚部に2本の線状の擦過痕があった。
 - (6) 後台車については、まくらばりの左側のスリ板が落失し、右側のスリ板は所定の位置からずれた位置にあり損傷していた。また、左側のボルススタアンカが変形し、3本のオイルダンパ（まくらばねダンパ2本、左右動ダンパ1本）が全て損傷していた。
 - (7) 後台車の第1軸については、左車輪の前後にある軸箱支持ゴム及び軸ゴムは損傷し、また、ブレーキ装置の制輪子及び制輪子キー^{*20}が落失していた。右車輪の前後にある軸箱支持ゴム及び軸ゴムは損傷していた。
 - (8) 後台車の第2軸については、左車輪の前後にある軸箱支持ゴム及び軸ゴムは損傷し、また、ブレーキ装置の制輪子及び制輪子キーが落失していた。右車輪の前後にある軸箱支持ゴム及び軸ゴムは損傷し、また、制輪子及び制輪子キーが落失していた。
 - (9) 後台車全4輪の車輪踏面及びフランジに、脱線時に付いたと見られる多数の打痕や擦過痕が全周にわたってあった。
- (付図7 本件貨車の積荷の状況と車体の損傷状況、付図8 本件貨車の後台車の損傷状況、付図9 本件貨車後台車の車輪の損傷状況 参照)

2.4.3 落失した車両部品の発見位置

29k320m付近から31k146m付近までの間に、本件貨車から落失した制輪子、制輪子キー、スリ板及び10両目第1軸の磁粉探傷リングが点在していた。

このほかに本件貨車後部左側にあるジャンパー線の収納部の蓋が落失したが、発見することができなかった。なお、この蓋の有無は列車の走行に影響を及ぼすものではない。

(付図5 貨車からの落失物位置略図 参照)

^{*19} 「元空気だめ管」とは、元空気タンクから空気圧機器へ圧縮空気を導く空気管のことをいう。

^{*20} 「制輪子キー」とは、ブレーキの摩擦材である制輪子を押し付け装置に固定するための金具をいう。

2.5 乗務員等に関する情報

運転士A 男性37歳

甲種内燃車運転免許 平成7年7月7日

甲種電気車運転免許 平成10年12月9日

運転士B 男性37歳

甲種内燃車運転免許 平成8年7月18日

甲種電気車運転免許 平成11年9月7日

2.6 運転取扱いに関する情報

2.6.1 事故前日及び当日の本件列車の状況

事故前日及び事故当日の本件列車の状況をJR北海道及びJR貨物に確認したところ、概略次のとおりであった。

本件列車の運行については、事故前日である平成24年9月10日に札幌貨物ターミナル駅発宮城野駅行き上り高速貨第2050列車（機関車1両＋貨車20両の21両編成）として札幌貨物ターミナル駅を定刻に出発したが、北海道内の降雨による運転規制により五稜郭駅到着後に運休となった。

11日は五稜郭駅発宮城野駅行き上り高速貨第2050列車（機関車1両＋貨車20両の21両編成）として運転される予定であったが、北海道内の降雨の影響による他列車の遅れにより、本件列車は五稜郭駅を1時間2分遅れて出発した。

2.6.2 事故現場付近の運転取扱い

「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」の実施に関する基準として、同省令に基づき、JR貨物が北海道運輸局長に届け出ている運転取扱実施基準によれば、本件曲線の制限速度は60km/hである。

2.7 気象に関する情報

2.7.1 事故発生時の気象状況

事故発生当時の天気については、気象庁の函館地方気象台（平成25年10月1日に函館海洋気象台から名称変更）の記録によれば18時～21時の天気は曇りであった。

事故発生当時の降水量については、事故現場最寄りとなる気象庁の木古内地域気象観測所（アメダス）の記録によれば、事故当日の19時～20時の降水量は0.0mmであった。

2.7.2 事故発生前の気象状況

事故現場付近における9月1日～11日の日降水量（当日0時～24時の降水量）は、木古内地域気象観測所の記録によれば、1日～5日：0.0mm、6日：10.0mm、7日：0.0mm、8日：23.0mm、9日：46.5mm、10日：20.5mm、11日：5.0mm（事故発生後は0.0mm）であり、11日間の日降水量の平均は約9.5mmであった。

また、平年^{*21}の9月1日～11日の11日間における日降水量の平均は約6.2mmであった。

2.8 走行試験と数値シミュレーションに関する情報

2.8.1 走行試験と数値シミュレーションの実施について

本事故の調査を進めるに当たり、収集した運転状況、車両、積荷及び軌道の状況に関する情報の分析では問題が認められず、これらの要素単独で脱線に至る可能性は低いが、これらが複合的に関与して脱線に至った可能性があるとの観点から、運転状況、車両、積荷及び軌道の状況について複合的に調査・分析することとした。

具体的には、JR貨物及びJR北海道により、江差線における脱線事故の自主的な要因の調査の一環として、コンテナ貨車の走行安全性の確認を目的とした走行試験が行われたことから、当委員会ではその走行試験に参加し、本走行試験で得られたデータ及び軌道変位データの一部の提供を受け、本事故の要因を推定する目的で、コキ106形式の貨車が曲線部を走行するときの挙動を、力学モデルを用いた時刻歴シミュレーションにより解析し、車両、積荷、軌道及び走行速度の各条件が貨車の挙動に与える影響について考察した。

2.8.2 JR貨物及びJR北海道による走行試験

JR貨物及びJR北海道では、江差線における脱線事故の自主的な要因の調査の一環として、コンテナ貨車の走行安全性の確認を目的とした走行試験を、平成26年11月21日から23日に江差線木古内駅～五稜郭駅間で実施した。試験区間の軌道変位は、走行試験の直前の同月5日に高速軌道検測車で測定された。

供試された貨車は、図3に示すようにコキ106形式、コキ107形式及びコキ104形式の計3両であり、積載条件は各貨車の5つのコンテナそれぞれにデッドウェイト（廃車輪）を3.5t積載した場合（平成26年6月22日、江差線において発生した列車脱線事故^{*22}を想定）と1.1t積載した場合（本事故を想定）の

^{*21} 「平年」とは、昭和56年から平成22年までの30年間の平均である。

^{*22} 運輸安全委員会：鉄道事故調査報告書RA2015-9、日本貨物鉄道株式会社 江差線 泉沢駅～札苺駅間 列車脱線事故、平成27年12月17日公表

2条件とし、本件曲線を60km/hで走行して、各貨車の輪重、横圧のほか車体の挙動を把握するための振動（変位、加速度）等が測定された。なお、走行試験中はおおむね晴天で降雨は見られなかった。走行試験の概要を付図11に示す。また、走行試験及び数値シミュレーションにおいて、輪軸は進行方向（木古内駅方）を基準に前から第1軸から第4軸とする。



図3 走行試験用列車の編成図

当委員会では、本走行試験で得られたデータ及び軌道変位データの一部の提供を受け、後述する貨車の走行に関する数値シミュレーションにおけるモデル化の妥当性を確認するために用いた。

当委員会において、付図12及び付図13に示す本件曲線の走行試験の測定結果などを分析したところ、コキ106形式について以下の知見が得られた。

- (1) 静止時のダンパ長の測定値は、1.1t積載時のまくらばねダンパは特性切替長の415mmより長いことから、積荷が積載されていてもその積載量によりまくらばねダンパの減衰特性は“空車特性”となることがある（付図12 A部）。
- (2) 車輪・レール間摩擦係数に近い値をとる^{*23}円曲線内での内軌側横圧輪重比は0.5程度の値であった（付図13（その1）、（その2） A部）。
- (3) 入口側緩和曲線において、台車の左右のまくらばねダンパの変位が逆位相で変動し、円曲線に入るとその変動が収束しないうちに再度大きくなりそのままの状態でも出口側緩和曲線まで継続していることから、貨車は本件曲線を走行中に大きくロール振動している（付図13（その1）、（その2） B部）。
- (4) 3.5t積載の場合と、1.1t積載の場合のそれぞれにおいて前後の車体端部で車体ロール加速度に位相差が認められ、走行中に車体がねじり振動している（付図13（その1）、（その2） C部）。
- (5) まくらばねの変位の左右差と輪重の左右差の変動に高い相関が認められる

^{*23} 参考文献：日本機械学会編「鉄道車両のダイナミクス ―最新の台車テクノロジー―」P.23 電気車研究会発行、平成8年

(付図13(その1)、(その2) D部)。

(付図11 走行試験の概要、付図12 静止時のダンパ長(測定値)、付図13 走行試験(本件曲線)の結果 参照)

2.8.3 貨車の走行に関する数値シミュレーション

2.8.3.1 数値シミュレーションの目的及び手順

2.1から2.7に記述した事実情報を結び付け、本事故の要因を推定する目的で、コキ106形式の貨車が曲線部を走行するときの挙動を、力学モデルを用いた時刻歴シミュレーションにより解析し、懸架装置、積荷、軌道及び走行速度の各条件が事故時の貨車の挙動に与える影響について考察した。なお、車両のモデル化と時刻歴シミュレーションは汎用マルチボディ・ダイナミクス解析ソフトウェア SIMPACK Rail (Version 9.7) *24を用いて以下の手順で行った。数値シミュレーションの概念図を図4に示す。

- ① 2.8.2に記述した走行試験のデータを使用した、数値シミュレーションモデルの妥当性の確認
- ② 数値シミュレーションによる本事故の再現
- ③ 本事故の要因の検討
まくらばねダンパの減衰特性、軌道変位、軌道変位の波数、積荷の重心及び車両形式をそれぞれパラメータとした解析
- ④ 半車両モデルを用いた貨車のロール振動に関する検討(数値解析ソフト MATLABを使用)

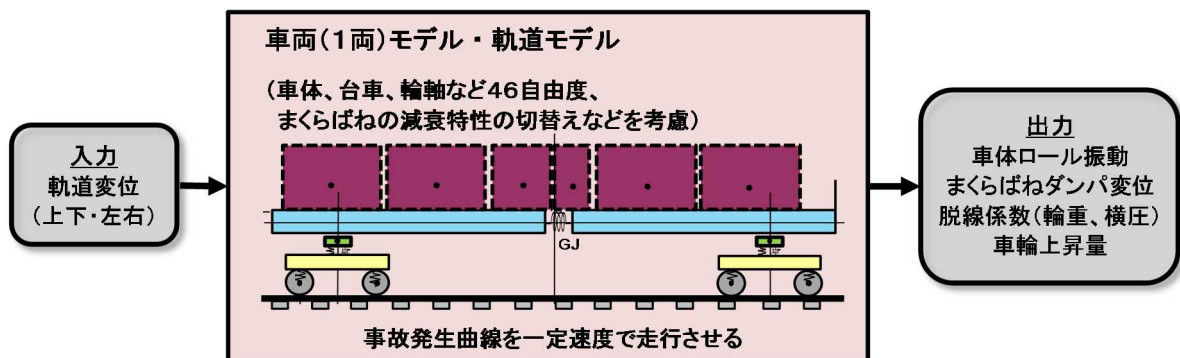


図4 数値シミュレーション概念図

(付図14 数値シミュレーションの概要 参照)

*24 シムパックジャパン株式会社 URL:www.SIMPACK.jp

2.8.3.2 数値シミュレーションに用いるモデル

(1) 車両モデル

貨車の図面情報及び 2.8.2 に記述した走行試験から得られた知見を基に、付図 15 のようにコキ 106 形式の数値シミュレーションモデルを作成した。

貨車の特徴である、車体と台車つなぎばりのねじり剛性が小さいことを模擬するため、付図 15 (その 1) に示す計 46 の自由度を持たせ、後述するように車体のロール振動の再現性を重視することも併せて、まくらばねダンパの特性を詳細にモデル化した。

なお、数値シミュレーションでは、車体、コンテナ、積荷をまとめて一つの剛体として扱っており、全体を「車体」と考えている。

(付図 15 数値シミュレーションモデル 参照)

(2) 軌道モデル

本数値シミュレーションを実施するに当たり、付図 16 に示す本事故の発生した曲線及びその前後の直線区間の軌道変位を計算対象とし、以下のようにモデル化した。

① 軌道線形

本事故発生時及び走行試験時とも本件曲線を含む同じ軌道線形とする。

② 軌道変位

2.3.2.4 に記述した事故直前、及び 2.8.2 に記述した走行試験直前にそれぞれ高速軌道検測車で測定した 0.25 m 間隔の通り変位と高低変位を、波長 6 ~ 50 m の範囲で復元した波形（以下「復元波形^{*25}」という。）を数値シミュレーションへの入力として用いる。

(付図 16 事故現場の曲線諸元 参照)

2.8.3.3 数値シミュレーションモデルの妥当性の確認

数値シミュレーションモデルの妥当性は、2.8.2 に記述した走行試験における貨車の挙動の測定結果と数値シミュレーション結果との比較による再現性の検証で確認することとし、コキ 106 形式の第 1 軸の横圧及び輪重変動、脱線係数、前後位の車体のロール変位、前後の台車のダンパ長を比較した時刻歴波形図を付図 17 に示す。

数値シミュレーション条件

積載条件：3.5 t 積載の 12 フィートコンテナ 5 つ

*25 「復元波形」とは、測量などで得られる実形状とは異なる形となる 10 m 弦正矢などで検測された軌道変位波形を、数値演算（検測特性の逆数を掛けるフィルター処理）により実形状に近い波形に戻したものをいう。

軌道変位：走行試験直前の平成26年11月5日に測定したもの

走行速度：60km/h

車輪・レール間摩擦係数：0.5

(1) 固有振動数の比較

3.5.1に後述するように、特に本事故で注目すべき挙動は車体のロール振動であることから、デッドウェイトを積んだ車体の左右動を伴う下心^{したしん}ロール^{*26}モードの固有振動数が、走行試験の実測データの解析結果と数値シミュレーション結果で整合するかを検証したところ、同実測データの解析結果で約1.3Hzで、数値シミュレーションモデルでも約1.3Hzであり、ほぼ一致していることを確認した。

(2) 走行時の波形との比較

走行試験の測定結果と数値シミュレーション結果を比較すると、横圧とこれに関連する脱線係数については、数値シミュレーション結果が測定結果より若干小さいものの、その他については両者の波形はほぼ一致している。特に、円曲線中において、車体のロール振動（付図17 C部）に起因する輪重変動（付図17 A部）が認められ、この卓越周波数は約1.3Hzである。なお、走行速度が60km/hの場合、輪重変動の波長は約12.8mとなる。また、内軌側横圧輪重比（付図17 B部）も約0.5となっており、2.8.2(2)で記述した走行試験の測定結果とほぼ一致している。これにより、以降の数値シミュレーションによる本事故の再現における車輪・レール間摩擦係数は0.5とする。

以上のことから、本数値シミュレーションモデルは、おおむね実際の車両の挙動を再現することができていると考えられる。

(付図17 数値シミュレーションによる走行試験の再現波形と測定波形との照合参照)

2.8.3.4 数値シミュレーションによる本事故の再現

数値シミュレーション条件

軌道線形：本件曲線の軌道線形

軌道変位：事故直前の平成24年8月24日に測定したもの

積載条件：本件事故を模擬した付図15（その2）の12フィートコンテナ5つ

走行速度：60km/h

*26 「下心ロール」とは、車体のローリングのうち、その回転中心が車体の重心より下にあるものをいう。

車輪・レール間摩擦係数：0.5

数値シミュレーションによる本事故の再現結果を時刻歴波形で付図19（その1）に示す。また、レール上の痕跡の始点、脱線した地点付近の波形を拡大して付図19（その2）に示す。

数値シミュレーションの結果から、以下のことがいえる。

- ① 左右のダンパ長が前台車、後台車共に左右逆位相で大きく変動し、“空車特性”の領域で変動している時間割合が大きい（付図19（その2）A部）ことから、車体に大きなロール振動が発生していると考えられ、車体のロール振動に伴い、輪重の変動も大きく繰り返されている。また、このときのダンパ長、輪重変動の周波数は約1.3Hzとなる（付図19（その1）A部）。
- ② 第3軸の外軌側の車輪ではレール上の痕跡の始点手前における輪重の最小値は約8.5kNであり、直前の最大値との輪重の変動量は約65.3kNとなっており、本数値シミュレーションにおける静止輪重（42.2kN）に比べて80%前後の輪重減少がレール上の痕跡の始点付近において繰り返し発生している（付図19（その2）D部）。
- ③ レール上の痕跡の始点付近における第3軸の外軌側車輪の輪重は約23.4kNとなっている（付図19（その2）B部）。
- ④ レール上の痕跡の始点付近において第3軸外軌側車輪が約11mm上昇している（付図19（その2）C部）。
- ⑤ 第1軸よりも第3軸の車輪上昇量が大きい（付図19（その2）C部）。

これらのことから、本数値シミュレーションは本事故の状況と符合しており、本事故を再現できていると考えられる。

なお、第2軸及び第4軸については、レール上の痕跡の始点において車輪の上昇は見られなかった。

また、2.3.2.4(1)に記述したように、レール上の痕跡の始点より手前の軌道における水準測定値は、設定されたカント量と比較して10mm程度大きくなっていたことから、入力した軌道状態からカントを10mm増加させて数値計算した結果が付図20である。上記の②～④と比較したところ、ほとんど変化はなかったことから、以降の数値シミュレーションでは、入力したカント量は2.3.2.2(2)のカント量とした。

（付図15 数値シミュレーションモデル、付図18 数値シミュレーションによる本事故の再現に入力した軌道状態、付図19 数値シミュレーションによる本事故の再現結果、付図20 数値シミュレーションによる本事故の再現結果（カントを10mm増加させた場合）参照）

2.8.3.5 数値シミュレーションに基づく本事故の要因の検討

(1) まくらばねダンパの減衰特性の関与

2.3.3.2 に記述したように、本件貨車のダンパは特性切替長である415mmにおいて減衰特性が切り替わる構造である。本事故を模擬した積載条件では、ダンパ長は特性切替長である415mmに近く、走行中は車体のロール振動に伴って、“空車特性”と“積車特性”が交互に切り替わりながら走行していたと考えられる。つまり、まくらばねダンパの減衰特性が交互に切り替わることで、車体のロール振動に対する減衰が不足し、車体のロール振動が大きくなった可能性がある。このため、2.8.3.4の数値シミュレーション条件のうち、まくらばねダンパの減衰特性を“積車特性”（減衰が大きい）に固定して数値計算した結果を付図21に示す。

まくらばねダンパを“積車特性”に固定したことにより、レール上の痕跡の始点付近の輪重は約26.1kNに増加していること（付図21 A部）、2.8.3.4に記述した数値シミュレーションによる外軌側車輪の上昇量が約11mm（付図19（その2） C部）から約3mm（付図21 B部）に減少したことが分かる。

（付図19 数値シミュレーションによる本事故の再現結果、付図21 数値シミュレーションによる本事故の再現結果（まくらばねダンパの減衰特性を“積車特性”に固定した場合） 参照）

(2) 軌道変位の関与

本事故では、2.3.2.4に記述した軌道変位はいずれも整備基準値内であったにもかかわらず、脱線が発生したことから、これらの変位のうち、輪重変動への関与が大きい水準変位、通り変位のどちらの軌道変位の成分が輪重変動に大きく影響したかを数値計算により検討した。

2.8.3.4の数値シミュレーション条件のうち、軌道変位のうち通り変位（付図18の3段目及び4段目の復元波形）のみを入力した場合と、高低変位（付図18の1段目及び2段目の復元波形。これにより高低変位から決まる水準変位なども入力されることとなる。）のみを入力した場合の、数値計算した結果を付図22及び付図23に示す。

レール上の痕跡の始点手前の輪重の最小値と変動量については、通り変位のみを入力した場合の最小値は約28.2kNであり、約30.4kNの変動（付図22 A部）が認められ、高低変位のみを入力した場合の最小値は約14.2kNであり、約52.1kNの変動（付図23 A部）が認められた。また、車輪の上昇量については、通り変位のみを入力した場合は車輪の上昇は見られず（付図22 B部）、一方、高低変位のみを入力した場合は車輪

が約3mm上昇した(付図23 B部)。

(付図18 数値シミュレーションによる本事故の再現に入力した軌道状態、付図22 数値シミュレーションによる本事故の再現結果(軌道変位に通り変位のみ入力した場合)、付図23 数値シミュレーションによる本事故の再現結果(軌道変位に高低変位のみ入力した場合) 参照)

(3) 軌道変位の周期性の関与

本事故では、2.3.2.4に記述した個別の軌道変位はいずれも整備基準値内であったが、2.3.2.4(3)に記述したように比較的大きな複合変位が連続して存在していたことから、周期的な軌道変位による影響の程度を検討するため、2.8.3.4の数値シミュレーション条件のうち、2.3.1(3)に記述したレール上の痕跡の始点の1波長手前からのみ軌道変位(付図24(その2)の1段目から4段目の各復元波形)を入力した場合の、数値計算した結果を付図24(その1)に示す。

レール上の痕跡の始点の1波長手前からのみ軌道変位を入力した場合(それより前の軌道変位は0とする)(付図24(その2))でも、車輪が約10mm上昇しており(付図24(その1) A部)、2.8.3.4に記述した数値シミュレーションの外軌側車輪の上昇量である約11mm(付図19(その2) C部)に近い結果である。

(付図19 数値シミュレーションによる本事故の再現結果、付図24 数値シミュレーションによる本事故の再現結果(レール上の痕跡の始点の1波長手前からのみ軌道変位があったとした場合) 参照)

(4) 積荷の重心高さの関与

本事故では、2.3.3.3(4)に記述したように、コンテナ2及び4は空のコンテナであり、またコンテナ1、3及び

表10 パレットの段数と車輪上昇量

段数	14	12	10	8
上昇量(mm)	11	5	1	0

5はパレットがコンテナの天井近くまで14段重ねて積載されていたことから、2.8.3.4の数値シミュレーション条件のうち、コンテナ1、3及び5のパレットの段数を1段ずつ減らして積荷の重心が輪重変動に与える影響を数値計算により検討した。この計算結果によるパレットの段数と車輪上昇量の関係を表10に示す。

14段積載した場合は、2.8.3.4に記述したように外軌側車輪が約11mm上昇したが(付図19(その1) C部)、パレットの段数を1段ずつ減らし、9段までは車輪の上昇が認められたが、8段積載した場合に、車輪の上昇は見られなくなった(付図25 A部)。

レール上の痕跡の始点手前の輪重の最小値と変動量については、最小値は約15.7 kNであり、約45.8 kNの変動（付図25 B部）が認められた。（付図19 数値シミュレーションによる本事故の再現結果、付図25 数値シミュレーションによる本事故の再現結果（パレットを8段積載した場合） 参照）

(5) 貨車の形式による比較

2.3.3.1 に記述したように、本件列車にはコキ106形式とコキ104形式の貨車が連結されており、最近の事故では脱線していないコキ104形式を用いて2.8.3.4の数値シミュレーション条件で計算した結果を付図26に示す。

2.8.3.4 に記述したように、レール上の痕跡の始点における第3軸外軌側車輪の輪重は、コキ106形式では23.4 kNであり、コキ104形式は約20.4 kNであった。また、同車輪の輪重の変動量は、コキ106形式では約65.3 kN（付図19（その2） D部）であり、コキ104形式では約53.1 kNと、コキ106形式より約19%減少していた（付図26 A部）。

また、コキ106形式の場合は、2.8.3.4 に記述したように外軌側車輪が約11 mm（付図19（その2） C部）上昇したが、コキ104形式の場合は約6 mmに減少した（付図26 B部）。

（付図19 数値シミュレーションによる本事故の再現結果、付図26 数値シミュレーションによる本事故の再現結果（車両形式をコキ104形式とした場合） 参照）

2.8.3.6 半車両モデルを用いた貨車のロール振動に対する積荷の重量と重心高さの影響

(1) 半車両モデルによるロール振動の応答倍率の検討

コキ106形式における懸架装置の特徴、積荷の状態、軌道の状態などから本事故発生要因の傾向を導き出すために、数値シミュレーションモデルに比べて繰り返し計算することが簡便な半車両モデルを用いて、軌道の変位によって貨車にどの程度のロール振動が発生するのか検討を行った。

本検討で用いた半車両モデルは、半車体及び1台車における上下、左右、ロール方向の6自由度に限定した線形モデルである。軌道変位（水準変位）に相当するロール角度の周期的な変動を輪軸に入力した場合、これによって生じる車体の周

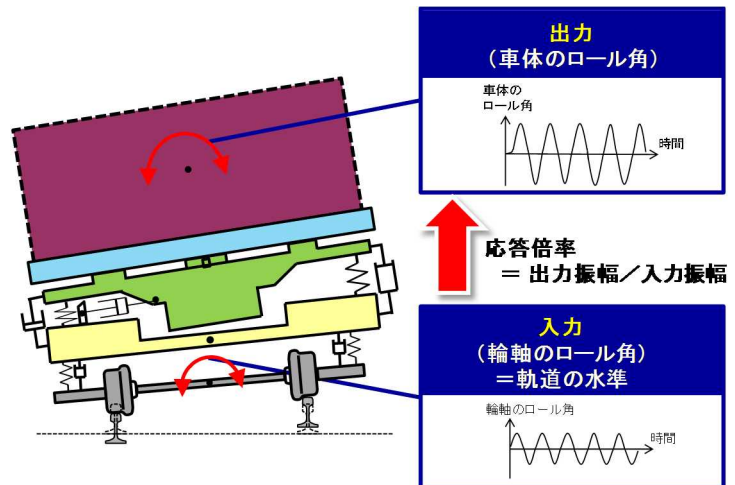


図5 半車両モデル概念図

期的なロール振動角度を出力とし、それら振幅の比を輪軸のロール角度に対する車体のロール振動特性を応答倍率として評価した。ここでの応答倍率は、軌道変位（水準変位）に相当するロール振動を輪軸に入力した場合に、これによって生じる車体のロール振動角度が、輪軸のロール角度に対して何倍になるのかをいう。概念図を図5及び付図27に示す。

このモデルを用いて、様々な周波数の振動入力に対する車体のロール振動の応答倍率について、空車状態（条件①）、空コンテナ積載（条件②）、走行試験時の3.5 t積載状態（条件③）、本事故時の積載（条件④）の4条件に関して数値計算を行った結果が付図28である。

この結果によると、条件①では半車両モデルにおける車体のロール振動の固有振動数は3.98 Hzとなり最大応答倍率は1.94倍である。これを基準にして各条件と比較すると、条件②では車体のロール振動の固有振動数は1.96 Hzに下がり、最大応答倍率は3.72倍と大きくなる。事故時の積載条件である条件④では、車体のロール振動の固有振動数が更に下がり1.59 Hzとなり、最大応答倍率は4.49倍と大きくなる。一方、3.5 t積載した条件③では、車体のロール振動の固有振動数は1.35 Hz、最大応答倍率は1.99倍となり、条件①と同程度の応答倍率となった。これはこの積載条件ではまくらばねダンパの減衰特性が減衰の大きい“積車特性”となるためである。

本事故発生時の車体のロール振動について考えてみると、2.8.3.4に記述したように、卓越周波数は約1.3 Hzであったと考えられるが、この場合の周波数での応答倍率は付図28より2.5倍程度であり、最大応答倍率をとる1.59 Hzに近い周波数であったため、比較的大きな応答倍率となったものと考えられる。

これらのことから、積荷の重量、これに伴うまくらばねダンパの減衰特性の変化、積荷の重心の高さが相互に影響し、応答倍率が大きくなる領域がある可能性があると考えられ、軌道変位の周期によって車体のロール振動の応答倍率が大きくなる可能性があると考えられる。

(2) 積荷の重量と重心高さの影響

コキ106形式の貨車において、積荷の重量と重心の高さを変化させ、ロール振動の最大応答倍率がどのように変化するかを、半車両モデルを使って数値計算した結果を付図29に示す。この図から車体のロール振動に対する最大応答倍率は、積荷の重量と重心高さにより「1.5～2.0」～「4.5～」の範囲で変化することが分かる。また、ダンパの特性切替長である415mmを境に応答倍率は大きく変化し、ダンパ長が415mmより長くなる“空車特性”の場合、積荷とコンテナを合わせた荷重が18.3t以下の領域で応答倍率が大きくなり、さらに、重心高さが高くなるほど応答倍率が大きくなることが分かる。

本事故発生時の積載の条件（荷重14.8t、重心高さ1.05m）では、前記(1)に記述したように最大応答倍率は4.49と大きな値となる可能性があり、2.8.3.5(4)に記述したように車輪の上昇が見られなくなる条件であるパレットを8段積載したときでも、最大応答倍率は約4.0倍となることが読み取れる。なお、前記(1)に記述した本事故発生時の積載条件で応答倍率が約2.5倍であったことから考えられるように、軌道の状態や運転速度によって必ずしも最大応答倍率をとるわけではなく、一般的にはそれより低くなる。

一方、積荷にジャガイモを積載することを想定した場合は、10kgの箱をコンテナ床面全体に均一に積載し、1段当たり72箱（9箱×8箱）、6段積載すると、最上段はコンテナの半分程度の高さになるが、この場合には、重心が低いため最大応答倍率は2.0倍程度であまり大きくならない。

これらのことから、コキ106形式において避けた方がよい積荷の積み方があることが分かる。

(付図27 貨車のロール運動に関する半車両モデルの概念図、付図28 コキ106形式の積載条件ごとのロール振動の応答倍率、付図29 積荷の重量と重心高さが車体のロール振動に及ぼす影響（コキ106形式）参照)

2.9 江差線における最近の脱線事故の原因と再発防止策

2.9.1 平成24年4月26日発生の列車脱線事故について

平成24年4月26日に江差線で発生した列車脱線事故について、当委員会は、平成26年7月25日に鉄道事故調査報告書（RA2014-7）を公表しており、この事故の原因は、以下としている。

本事故は、貨車にコンテナを積載した状態において、左右の車輪間で大きな静止輪重アンバランスが生じていたため、半径300mの曲線を走行中に、静止輪重アンバランスが生じていない車両と比較して、外軌側車輪の輪重が小さくなり、かつ、内軌側車輪の輪重が大きくなった影響によって外軌側車輪の横圧が増加したことにより、外軌側車輪の脱線係数が増大して外軌側車輪がレールに乗り上がり脱線したものと考えられる。

脱線した貨車に大きな静止輪重アンバランスが生じていたことについては、コンテナ内の積荷の偏積によるものと推定される。

なお、貨物列車が運行する区間において管理することとされている複合変位が、整備すべき対象には該当していなかったが、車輪のレール乗り上がり開始箇所の手前で比較的大きくなっていたことは、外軌側車輪の輪重減少を助長させた可能性があると考えられる。

また、今後必要とされる再発防止策は、以下としている。

本事故は、貨車に積載されるコンテナ内の積荷の左右偏積により、車両に大きな静止輪重アンバランスが生じたことが大きく影響したと考えられることから、コンテナ内の積荷に左右偏積が生じないようにする必要がある。

この点については、貨物運送約款において、コンテナへの貨物の積載並びにコンテナの施封及び開封は、貨物利用運送事業者により行うこととされており、JR貨物はコンテナ内の積載状態を直接確認できないことから、JR貨物は貨物利用運送事業者に対して、コンテナへ積荷（貨物）を積載する際に、偏積の防止及び積荷の積載状態の確認など、貨物運送約款の内容を周知徹底する必要がある。

また、JR貨物は、貨物利用運送事業者等と連携して、コンテナを貨車に積載する際に、必要に応じて、荷主の承諾を得た上でコンテナを開扉して積荷の積載状態を確認するなどの対策をすることが望ましい。

なお、コンテナ積載状態で輪重アンバランスを簡易に検知できるシステムの導入について、検討することが望まれる。

2.9.2 平成26年6月22日発生の列車脱線事故について

平成26年6月22日に江差線で発生した列車脱線事故について、当委員会は、平成27年12月17日に鉄道事故調査報告書（RA2015-9）を公表してお

り、この事故の原因は、以下としている。

本事故は、列車が半径350mの左曲線を走行した際、コキ107形式の貨車の車体に顕著なロール振動が励起されて外軌側（右）車輪の輪重が小さくなり、さらに外軌側（右）車輪の横圧が増加し、脱線係数が増加して外軌側（右）車輪がレールに乗り上がったことにより右に脱線した可能性があるものと考えられる。

車体に顕著なロール振動が励起されたことについては、乗り上がり開始地点の手前の軌道に整備の対象となる大きな複合変位が存在していたためと考えられる。

外軌側（右）車輪の横圧が増加したことについては、曲線半径を小さくする側の比較的大きな通り変位が存在したことが影響した可能性があると考えられる。

また、整備の対象となる大きな複合変位が存在したことについては、高速軌道検測車により計測された整備の対象となる複数種別の複合変位の存在を担当の現業機関で認識できなかったためであり、それには現業機関に計測結果を伝達して補修の可否を決める方法が不適切であったこと、現業機関での複合変位に関する知識が不足していたことが関与した可能性があると考えられる。

積荷の偏りが実際に脱線の発生に関与したかどうかを明らかにすることはできなかったが、事故直前の積載状態によっては、脱線を助長する要因となった可能性があると考えられる。

また、今後必要とされる再発防止策は、以下としている。

5.1.1 複合変位の適正な管理

今後適切に複合変位が管理されるために、以下のことが必要である。

- (1) 複数の種別からなる複合変位の管理方法について、現業機関の担当者がその主旨を正しく理解し、実行するように教育、訓練すること。
- (2) 重複した複合変位の種別を正しく認識するためには、高速軌道検測車からの情報が限定されたものであることを理解し、適切な複合変位の割り出し方法に習熟すること。
- (3) 基準に達した複合変位がそれぞれ重複して存在する場合、並びに該当する変位が著しくその基準値を超過する場合の補修の期限や速度制限等の対応方法について、早急に検討して適切に定めておくこと。

これらのことを徹底し定着させるためには、JR北海道では、複合変位の管理に関して、その目的と主旨を正しく理解させるために社員を教育するとともに、運用マニュアルの改善などを図ることが必要である。

さらに、複合変位を含む軌道管理の適切な運用のためには、軌道検測－複合変位の割り出し－補修計画の策定－補修の実施全体が管理される必要があり、これらに対して多重チェック体制が有効に機能するよう、適切な対応が継続されることが必要である。

なお、高速軌道検測車からの複合変位に関する情報としては、全ての種別と位置が明示されることが望ましいので、今後の高速軌道検測車のシステムプログラムの改修時等に考慮すべきである。

5.1.2 偏積の防止を目的とした積荷の管理

積荷の左右偏積を防止する対策は、2.10.1に記述した平成24年4月26日に発生した江差線貨物列車脱線事故の再発防止策として、本事故の発生とほぼ同時に、JR貨物及び利用運送事業者により対応が開始されている。

現実に偏積を防止するには、貨物が大量で多様であることから、積荷の積付けが適切に管理されるための仕組みが確実に機能する必要がある。一方、個別のコンテナに対しては、積み込み時の積載状態の把握と、荷役及び走行中の外乱で貨物が容易に移動しない積付け方法が必要である。

これらが効果的に機能するように、積荷の管理の仕組みが早期に安定して稼働されることが望まれる。

2.10 その他必要な情報

(1) 国土交通省の措置

平成24年4月26日の列車脱線事故に対する鉄道事故調査報告書が平成26年7月25日に公表されたことを受けて、国土交通省ではコンテナ内の積荷の偏積を防止するための有効な方策を検討することを目的として、関係者で構成される「鉄道貨物輸送における偏積対策に関する検討会」を開催し、平成26年12月25日に以下の取組を行うこととする中間とりまとめを公表した。

JR貨物による対策として、①利用運送事業者に対する貨物運送約款の周知徹底、②利用運送事業者向けのコンテナ積付けガイドラインの作成等の実施。

また、利用運送事業者による対策として、①現場作業員に対する適切な積付けの徹底及び教育訓練の実施、②コンテナ積付けマニュアルの作成及び遵守等の対策の実施。

(2) JR貨物の措置

平成24年4月26日の列車脱線事故後にJR貨物は次の措置を講じた。

① 平成24年5月7日に、貨物利用運送事業者に対して、コンテナへ積荷（貨物）を積み込む際には積荷の偏積防止を徹底するように要請するとともに、貨物運送約款の内容の周知徹底を図った。

② 積荷の偏積防止を目的として、平成24年5月8日に、公益社団法人全国通運連盟に対して、貨物利用運送事業者が貨物運送約款の内容の遵守を徹底するよう要請した。

- ③ 積荷の偏積防止対策を検討するための基礎データの収集を目的とし、各支社の主要駅を対象に、重量計により無作為に発着コンテナの偏積調査を行うこととした。また、その結果コンテナに偏積が認められた場合には、貨物利用運送事業者を介して荷主の承諾を得た上でコンテナを開扉し、積荷の積載状態の確認（写真撮影）を、当分の間行うこととした。
- ④ JR北海道管内において、当面コキ107形式の運用を停止した。なお、コキ107形式自体に走行安全上の問題がなかったことを確認し、平成26年2月24日付けで運用を再開した。

3 分析

3.1 脱線車両等に関する分析

3.1.1 脱線地点

2.4.1(1)及び(2)に記述したように、

- (1) 本件曲線のレール上の痕跡の始点である29k029m付近から29k032m付近までの約3.5mの間に、左レール（外軌）上を軌間内側から外側へと斜めに横切る車輪によるものと見られる痕跡があったこと、
- (2) 29k032m付近の右レール（内軌）ゲージコーナーに車輪によるものと見られる約0.4mの痕跡があったこと、
- (3) 29k032m付近から泉沢駅構内にかけてのまくらぎ及びレール締結装置に車輪によるものと見られる痕跡が続いていたこと

から、本件列車が本件曲線を通じた際に、本件貨車の車輪がレール上の痕跡の始点である29k029m付近で左レールに乗り上がり、29k032m付近で脱線し、そのまま泉沢駅構内まで走行したものと考えられる。

また、2.4.1(2)に記述したように、29k036m付近から泉沢駅構内にかけてのまくらぎ及びレール締結装置に車輪によるものと見られる1本又は2本の痕跡が続いていたこと、2.4.2(6)～(8)に記述したように、本件貨車の後台車の第1軸及び第2軸の損傷状況に差異が見られないこと、及び2.8.3.4の数値シミュレーションでは第2軸の車輪上昇は見られないことから、29k032m付近で後台車の第1軸が最初に脱線し、それに伴って29k036m付近で第2軸が脱線したものと考えられる。

3.1.2 脱線時の時刻及び走行速度

2.3.1に記述したように、本件列車の機関車は31k368mに停止し、本件貨

車の後台車は31k183mに停止しており、また、2.1.2に記述したように、運転状況記録装置の記録によれば、本件列車が停止した時刻は19時29分00秒1である。

本件貨車の後台車は、事故現場付近である29k032m付近から31k183mまで2.151km走行していることとなるが、本件列車が脱線後に走行した区間には破鎖^{*27}が5m存在することから、実際に走行した距離は2.146kmである。

本件列車の運転状況記録装置に記録された走行距離から本件貨車が事故現場付近(29k032m付近)を通過した時刻を求めると、19時26分33秒5となり、そのときの運転状況記録装置の記録では速度は59km/hであった。

したがって、本件列車は、速度約59km/hで走行中の19時26分ごろに脱線したものと考えられる。

3.2 車両に関する分析

3.2.1 コキ106形式の懸架装置の状況

2.3.3.1に記述したように、コキ106形式をコキ104形式から構造改良する際に、まくらばねのばね定数を変更したが、まくらばねダンパはOD54のままで減衰特性を変更しなかった。並進1自由度系の場合において減衰比(ζ)は以下の式で表されることから、コキ106形式の設計において、まくらばね定数(K)を変更したが減衰係数(C)は変更されなかったため、コキ106形式はコキ104形式と同じ積載量(M)であっても減衰比が異なる場合がある。

$$\zeta = \frac{C}{\sqrt{2MK}}$$

さらに、2.3.3.2に記述したように、本件貨車等に使用されているまくらばねダンパは、積載量によって変化するダンパ長によって減衰特性が、“空車特性”と“積車特性”に切り替わる構造になっており、コキ104形式は積載重量が14.6tで減衰特性が切り替わるが、コキ106形式は積載重量が18.3tで切り替わることから、コキ106形式は積荷が比較的軽量な領域(14.6t~18.3t)で、コキ104形式に比べて減衰が小さく車体のロール振動が収束しにくいと考えられる。

2.3.3.3(4)に記述したように、事故発生時には本件貨車の積載量は14.81tと比較的軽量であり、静止時のダンパ長は計算上417.9mmであったと考えられ、まくらばねダンパの特性切替長である415mmよりも大きいことから、“空車特性”の状態であったと考えられる。よって、本件貨車はロール振動が収束しにくい状態

^{*27} 「破鎖」とは、建設時の設計変更により当初の計画よりも距離が短くなった場合などの削除した距離をいう。

であり、また、ダンパ長は4 1 5mmに近いことから走行時は車体のロール振動により“空車特性”と“積車特性”が交互に切り替わっていたと考えられる。

3.2.2 事故前の本件貨車の状況

2.3.3.3(1)～(3)に記述したように、本件貨車の検査記録に異常は見られなかったこと、本事故後の軸ゴム、軸箱支持ゴム、まくらばね及び車輪等の寸法測定等の結果、後台車の軸ゴム、軸箱支持ゴムは脱線時や脱線後に損傷したと考えられることから、本件貨車の状況について事故発生前に脱線に関与するような異常はなかったものと考えられる。

また、2.4.2(7)及び(8)に記述したように、本件貨車の後台車から制輪子、制輪子キー等の部品が落失していたが、2.4.3に記述したように、いずれも、脱線地点と考えられる2 9 k 0 3 2 m付近より木古内駅方の2 9 k 3 2 0 m付近から3 1 k 1 4 6 m付近までの間で発見されたことから、これらの部品は、本件貨車が脱線した後に、まくらぎ及び道床の上を走行したことによる振動や衝撃によって落失したものと考えられる。

3.2.3 本件貨車の積荷の状況

2.3.3.3(4)に記述したように、本件貨車に積載されていたコンテナのうちコンテナ2、4は空であり、コンテナ1、3、5にはパレットがコンテナの天井近くまで積載されていたが、いずれのコンテナにも大きな荷崩れは見られなかったことから、積荷の偏積はなかったものと推定される。

一方、2.8.3.5(4)に記述したように、数値シミュレーションにおいて1 4段積載した場合は車輪が約1 1mm上昇しており、段数を減らすと車輪の上昇量は徐々に下がり、8段で上昇は見られなくなったことから、積荷の重心の高さが輪重変動に関与した可能性があると考えられる。

これらのことから、コンテナ1、3、5にはパレットがコンテナの天井近くまで積載されており、コンテナを含めた積荷の重心の高さはコンテナの中心部付近の比較的高い位置にあったこと、さらに、コンテナ2、4は空であったことから、全てのコンテナの重心の高さは、上記と同様にコンテナの中心部付近の比較的高い位置にあったと考えられ、積荷の重心の高さが脱線した本件貨車のロール振動の発生を助長させた可能性があると考えられる。

3.2.4 本件貨車の静止輪重の状況

2.3.3.3(5)に記述したように、空車状態での後台車の静止輪重比は第1軸が0.96、第2軸が0.95であったことから、空車状態の本件貨車の輪重に、脱線

に關与するような異常はなかつたものと考えられる。

また、積載時の後台車の静止輪重比は第1軸が1.00、第2軸が0.98であつたことから、積載時の本件貨車の輪重に、脱線に關与するような異常はなかつたものと考えられる。

3.3 事故現場付近の軌道に關する分析

2.3.2.4 に記述したように、軌間変位、高低変位、通り変位及び5 m平面性変位はいずれも整備基準値内であり、また、2.3.2.5 に記述したように列車動揺についても整備値内であることから、脱線に直接影響するような軌道変位はなかつたものと考えられる。

一方、貨物列車が運行する区間において管理することとされている複合変位については、事故現場付近において整備すべき対象の変位量及び箇所数に該当するものはなかつた。ただし、29k037.50 mに1箇所であるが第Ⅲ種複合変位の整備対象となる変位量である25 mmを超える29.8 mmの変位があり、さらに、レール上の痕跡の始点付近から手前20 mの範囲内に16.0～17.8 mmの第Ⅰ種複合変位の整備対象となる変位量に近い変位があつた。

また、2.8.3.5(2)に記述したように、通り変位（復元波形）のみを入力した場合には車輪の上昇が見られなかつたのに対し、高低変位（復元波形）のみを入力した場合には車輪が約3 mm上昇したことから、事故現場付近の軌道変位については、高低変位（復元波形）の左右差である水準変位の方が車体のロール振動に対する影響は支配的であつた可能性があると考えられる。

事故現場付近の水準変位の波長については、図6（付図10（その2）の水準変位の抜粋）に示すように10.25 m～13.00 mであり、3.1.2 に記述したように本件貨車は事故現場付近を約59 km/hで走行してゐたと考えられることから、周波数に換算すると1.60（波長10.25 m）～1.26（波長13.00 m）Hzとなる。この周波数は2.8.3.6(1)に記述した事故時の積載条件である条件④の車体のロール振動の固有振動数（1.59 Hz）に近い値である。

これらのことから、事故現場付近の複合変位については、整備対象に近い連続した比較的大きな変位量であつたこと、走行速度に対して車体のロール振動を大きくする波長成分を含んでゐたことが誘因となり、車体のロール振動及び輪重の変動が繰り返して発生することを助長させた可能性があると考えられる。

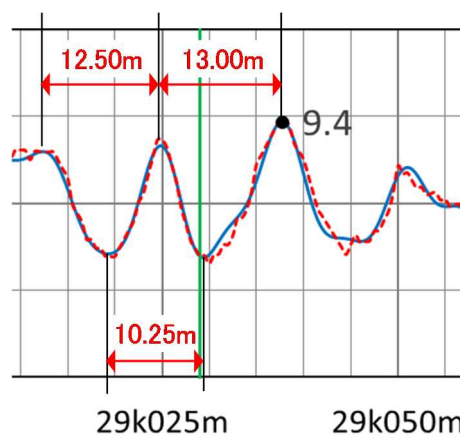


図6 事故現場付近の水準変位の波長

3.4 走行速度に関する分析

2.3.2.2(2)に記述したように、事故現場付近は半径300mの曲線区間であること、及び3.1.2に記述したように、本件貨車は速度約59km/hで事故現場付近を走行していたと考えられることから、本件列車は、2.6.2に記述した半径300mの曲線の制限速度である60km/h以内で事故現場を通過したものと推定される。

なお、2.3.2.2(2)に記述した本件曲線のカント（100mm）及び半径（300m）から求まる均衡速度^{*28}は59.8km/hであり、本件列車は、事故現場付近を均衡速度に近い速度で走行していたため、遠心力に伴う左右の車輪間での輪重差は少なかったものと推定される。

3.5 脱線に関する分析

3.5.1 貨車のロール振動

2.8.2(5)に記述したように、まくらばねの変位の左右差と輪重の左右差の変動に高い相関があることから、まくらばねの変位が輪重を変動させる主要な要因であると考えられる。さらに、2.8.3.4に記述したようにダンパ長が常に変動していることから、車体が常にロール振動していたと考えられる。

3.2.1に記述したように、本件貨車は、車体のロール振動によりまくらばねダンパが“空車特性”と“積車特性”に交互に切り替わる状態で本件曲線を走行していたと考えられ、また、2.8.3.4に記述したように、まくらばねダンパは“空車特性”の領域で変動している時間割合が大きいことから、車体のロール振動が収束しにくい状態であった可能性があると考えられる。

また、2.8.3.5(1)に記述したように、まくらばねダンパを“積車特性”に固定した場合は、レール上の痕跡の始点付近での外軌側輪重は、減衰特性を固定していない2.8.3.4の数値シミュレーションによる事故の再現の場合より増加し、外軌側車輪の上昇量が減少した。

これらのことから、本件貨車は本件曲線を走行中、まくらばねダンパの減衰が小さい“空車特性”である時間割合が多く、車体のロール振動が大きくなるとともに、外軌側車輪の輪重変動も大きくなったことが、脱線に大きく関与した可能性があると考えられる。

さらに、2.8.3.5(5)に記述したように、数値シミュレーション結果においても、コキ106形式はコキ104形式と比較して車体のロール振動に起因する輪重変動が大きいことから、コキ106形式では本事故時のように積荷がコンテナの積載荷

^{*28} 「均衡速度」とは、曲線上を車両が走行する際、車両に作用する超過遠心加速度（軌道面に平行な平面内の左右方向の定常加速度）が0となるときの走行速度をいい、カント、曲線半径及び軌間から求められる。

重に比べ軽量でかつ積荷の重心の高さが比較的高い状態において脱線に対する余裕度が小さい可能性があると考えられる。これはコキ106形式とコキ104形式における懸架装置の仕様の違いによるものと考えられる。

3.5.2 軌道変位の関与

軌道変位が整備基準値内であったにもかかわらず脱線が発生したことについては、以下によるものと考えられる。

- (1) 2.8.3.5(2)に記述したように、通り変位（復元波形）のみを入力した場合には車輪の上昇が見られなかったのに対し、高低変位（復元波形）のみを入力した場合には車輪が約3mm上昇したことから、通り変位よりも高低変位（復元波形）の左右差である水準変位の方が車輪の乗り上がりに関与したと考えられる。しかしながら、これは、事故発生時の軌道を模擬した通り変位と高低変位の両方の成分が含まれている2.8.3.4の数値シミュレーションによる本事故の再現結果である約11mmと比較すると小さな値である。このことから、車輪の乗り上がりには、通り変位と水準変位の両方の変位が逆位相で含まれる複合変位が関与していた可能性があると考えられる。
- (2) 2.8.3.5(3)に記述したように、1波長手前から軌道変位（復元波形）を入力した場合には車輪が約10mm上昇しており、これは2.8.3.4の数値シミュレーションによる本事故の再現の約11mmに近い値である。このことから、車体のロール振動の共振を生じやすい波長成分の複合変位が1波長分でも存在すれば、輪重変動が生じ、車輪の乗り上がりに至る可能性があると考えられる。

3.6 泉沢駅のプラットホームの損傷に関する分析

泉沢駅の第1ホームの線路側の端部が損傷していたことについては、2.4.2(1)に記述したように、本件貨車左側にある後方の3箇所 of 緊締装置が変形し、白く汚れていたことから、本件貨車の緊締装置が接触したことによるものと考えられる。

本件貨車左側にある緊締装置が第1ホームに接触したことについては、2.4.1(2)に記述したように、第1ホーム五稜郭駅方端部の左右のレールのそれぞれ左側のまくらぎ上に、車輪によるものと見られる痕跡があることから、本件列車の後台車が左に脱線したまま泉沢駅第1ホームの前を通過したことによるものと考えられる。

また、2.4.2(5)に記述したコンテナ4及び5の脚部の線状の擦過痕は、第1ホームのコンクリート板を緊締装置が損傷させた際に露出した鋼棒によるものと考えられる。

3.7 本件列車の非常制動に関する分析

2.1.1 に記述したように、本件列車が走行中に非常ブレーキが掛かり停止したことについては、本件貨車と10両目貨車の連結部にあるブレーキ管ホースの連結器が外れたことによるものと考えられる。

本件貨車と後続の10両目貨車を接続するブレーキ管ホースの連結器が外れたことについては、2.1.2、2.3.3.3(6)及び2.4.1(4)に記述したように、本件貨車の後台車は脱線したまま16号分岐器を走行し、後台車のうちの1軸がリードレールに沿って左に大きく変位することにより、左車輪はまくらぎ端部よりも左側を進行し、同車輪のフランジは道床バラストに沈み、車体を左に傾けながら走行したことになり、ブレーキ管ホースの連結器が16号分岐器のポイント部のレール等と接触した衝撃で外れたものと考えられる。

なお、ブレーキ管ホースの連結器が白く汚れていたのは、本件貨車の後台車が脱線したまま走行したため、粉じん等が付着した可能性が考えられる。また、本件貨車の後台車付近のMR管が破断したことについては、2.3.3.3(6)に記述したように、本件列車においては出発時から全ての貨車のMR管は連結されていなかったことから、本件列車に非常ブレーキが掛かったことについて、MR管が破断したことの関与はなかったものと認められる。

3.8 気象に関する分析

2.7に記述したように、事故直近で最も降水量が多かった日は、事故2日前の9日の46.5mmである。事故当日を含む11日間の平均の降水量は約9.5mmであり、同期間の平年の降水量である約6.2mmの約1.5倍となっているが、事故当日の降水量は5.0mmであった。

また、事故発生当時の事故現場付近の天気は曇りで、事故発生当時の降水量は0.0mmであった。

2.3.1(6)に記述したように、本件列車が通過する前の1時間に5本の列車が事故現場付近を走行しており、事故直近の列車をはじめ各列車の運転士から線路の異常について報告されていないこと、及び2.3.2.4に記述したように、事故後の軌道計測の測定値が整備基準値内であったことから、事故当日を含む11日間は平年の降水量よりも降雨が多かったものの、脱線に関与するような気象状況ではなかったものと考えられる。

3.9 脱線事故発生後の安全性に関する分析

2.1.1に記述した運転士A及び運転士Bの口述によれば、本事故では、運転士が脱線したことを認識できずに脱線状態のまま走行を続けた。また、3.6に記述したよ

うに、泉沢駅のプラットホームを損傷させた後も脱線状態のまま走行を続けた。

こうした事態は、貨物列車における貨車の脱線事故においてこれまでも複数回発生しており、事故による被害を拡大させる可能性があると考えられるため、今後、研究機関等において、運転士が列車における脱線の発生を早期に認識できる装置の研究開発を進め、早期に実用化されることが望まれる。

3.10 貨物列車の走行安全性の向上に関する分析

本事故は、運転状況、車両及び軌道の状況が省令に基づいて定められたJR貨物及びJR北海道の基準等に則った状態の中で、本件貨車の懸架装置の仕様、積荷の状態、事故現場付近の軌道の状態が、それぞれ脱線に対する余裕度を低下させた状況となり、これらが重畳したことにより発生した可能性があると考えられる。このため、脱線に対する余裕度を低下させないための対策について、貨車の使用実態を踏まえ、関係者が協力しつつ、それぞれの要因について相互に関連させながら、貨物列車の走行安全性の向上などに関して総合的に検討を行うことが必要と考えられる。

本件貨車については、3.5.1に記述したように、まくらばねダンパの減衰特性が脱線に対する余裕度を低下させていた可能性があると考えられる。すなわち、2.8.3.5(3)、3.5.1及び3.3に記述したように、現状の減衰特性では車体のロール振動に対する減衰比が小さくなる場合があり、走行速度に対して車体のロール振動の共振が生じやすい波長成分の複合変位が1波長分でも存在すると、車体のロール振動の減衰比が小さい場合には脱線に対する余裕度を大きく低下させる可能性があると考えられる。

2.3.3.1に記述したように、JR貨物では新形式の貨車を新製する際には、空車状態と最大積車状態で設計や走行試験を行っていたが、今後は、JR貨物では新形式の貨車を設計する場合に、空車状態、最大積車状態だけでなく、中間荷重状態も想定した、ばねやゴムのばね定数、まくらばねダンパの減衰比など懸架装置の特性についても考慮することが必要である。また、現在運用されている貨車については、使用実態を踏まえて、まくらばねダンパの特性切替長を変更するなどの改良の検討や、使用される貨車に応じた積載方法等の検討が必要である。

さらに、2.9に記述したように、JR貨物において偏積に関する検討が行われているが、3.2.3に記述したように積荷の重心が車体のロール振動を助長させる方向に関与している可能性があると考えられることから、引き続き、適切な積付けの徹底をするとともに、積載する貨車の特性によっては、ロール振動の減衰を著しく低下させないような積載方法についても検討していくことが必要であると考えられる。

2.8.3.5(2)、3.5.2(1)に記述したように、通り変位と水準変位の両方の変位が車体のロール振動に関与している可能性があること、3.3に記述したように車体のロー

ル振動及び輪重の変動には複合変位が関与していることから、車体のロール振動を抑制するために、水準変位及び通り変位から求められる複合変位を管理していくことが重要であると考えられる。現状の複合変位の管理手法は、昭和50年代の国鉄で導入され、導入当時に頻発していた貨車の乗り上がり脱線を激減させ、近年まで同種の事故が発生しなかったことから、一定の効果があると考えられる。

しかしながら、本件曲線において、複合変位が整備すべき対象となる変位量及び箇所数に該当していなかったにもかかわらず、本事故が発生した。よって、複合変位に関して、

- (1) 本事故においては、事故現場付近の連続した比較的大きな複合変位が、車体のロール振動を助長させた可能性があると考えられること、
- (2) 複合変位の導入に当たり検討対象とされた車種は、導入当時に走行していた2軸貨車等であり、現行の貨車の特徴を十分に反映していないこと、
- (3) 江差線における三回の脱線事故をはじめ、近年のJR貨物の脱線事故では、コキ106形式以降の比較的新しい貨車の脱線が見られること

から、今後、関係者及び研究機関において、現存する貨車や列車の運行形態に対応する、より効果的な軌道変位の管理に関する検討を進める必要がある。

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、次のとおりである。

(1) 脱線地点

本件列車が本件曲線を通過した際に、本件貨車の車輪がレール上の痕跡の始点である29k029m付近で左レールに乗り上がり、29k032m付近で脱線し、そのまま泉沢駅構内まで走行したものと考えられる。(3.1.1)^{*29}

(2) コキ106形式の懸架装置の状況

① 本件貨車のコキ106形式は、積載量によって変化するダンパ長によってダンパの減衰特性が、“空車特性”と“積車特性”に切り替わる構造になっており、積載量が比較的軽量の状態では、減衰が小さい“空車特性”になると考えられる。(3.2.1)

② コキ106形式では積荷が比較的軽量(14.6t～18.3t)な場合、コキ106形式への構造変更前の形式の貨車(本件列車に連結されていたコ

^{*29} 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」の主な項目番号を示す。

キ104形式など)に比べて減衰が小さく車体のロール振動が収束しにくいと考えられる。(3.2.1)

- ③ 事故時の本件貨車の積載量は比較的軽量であり、静止時のまくらばねダンパは静止時にはロール振動が収束しにくい“空車特性”の状態であり、走行時には車体のロール振動により“空車特性”と“積車特性”が交互に切り替わっていたと考えられる。(3.2.1)

(3) 事故前の本件貨車の状況

本件貨車には脱線に關与するような異常はなかったものと考えられる。

(3.2.2)

(4) 貨車の積荷の状況

本件貨車の積荷の重心の高さは、コンテナの中心部付近の比較的高い位置にあったと考えられ、積荷の重心の高さが本件貨車のロール振動の発生を助長させた可能性があると考えられる。(3.2.3)

(5) 事故現場付近の軌道

事故現場付近の軌間、水準、高低、通り、平面性の軌道変位はそれぞれ整備基準値内であり、脱線に直接影響するような状態ではなかったと考えられる。複合変位については整備すべき対象となる変位量及び箇所数に該当していなかったが、第Ⅰ種及び第Ⅲ種の複合変位の整備対象に近い連続した比較的大きな変位量があったこと、及び走行速度に対して車体のロール振動の共振が生じやすい波長成分を含んでいたことが誘因となり、車体のロール振動及び輪重の変動が繰り返し発生することを助長させた可能性があると考えられる。(3.3)

(6) 走行速度

本件列車は、事故現場付近を制限速度である60km/h以下の約59km/hで通過したものと推定される。(3.4)

(7) 貨車のロール振動

本件貨車は本件曲線を走行中、まくらばねダンパの減衰が小さい“空車特性”である時間割合が多く、車体のロール振動が大きくなるとともに、外軌側車輪の輪重変動が大きくなったことが、車輪の乗り上がりに大きく關与した可能性があると考えられる。

本件貨車のコキ106形式は、コキ104形式と比較して車体のロール振動に起因する輪重変動が大きいことから、コキ106形式では本事故時のように積荷が比較的軽量でかつ積荷の重心が高い状態において脱線に対する余裕度が小さい可能性があると考えられる。これはコキ106形式とコキ104形式における懸架装置の仕様の違いによるものと考えられる。(3.5.1)

(8) 軌道変位の関与

① 複合変位の脱線発生への関与

通り変位と水準変位の両方の変位が逆位相で含まれる複合変位が関与した可能性があると考えられる。(3.5.2)

② 複合変位の周期性

貨車の車体ロール振動の共振を生じやすい波長成分の複合変位が1波長分でも存在すれば、ロール振動が発生して輪重変動が生じ、車輪の乗り上がりに至る可能性があると考えられる。(3.5.2)

4.2 原因

本事故は、列車が半径300mの右曲線を通過した際に、事故現場付近においてコキ106形式の貨車後台車第1軸の外軌側の輪重が減少し、外軌に乗り上がったことにより脱線したものと考えられる。

外軌側の輪重が減少したことについては、事故現場付近において貨車に発生したと考えられる大きなロール振動によるものと考えられる。

貨車に大きなロール振動が発生したことについては、運転状況、車両及び軌道の状況は、省令に基づいて定められたJR貨物及びJR北海道の基準等に則った状態であったが、

- (1) コキ106形式の懸架装置の仕様は、積荷が比較的軽量であった場合、コキ104形式と比較して減衰が小さくなり、車体のロール振動が収束しにくいものであったこと、
- (2) 積荷が比較的軽量であり、重心が高い状態であったこと、
- (3) 事故現場付近における複合変位は、整備対象に近い比較的大きな変位量であったこと、走行速度に対して車体のロール振動の共振が生じやすい波長成分を含んでいたことが、車体のロール振動の発生を助長させた可能性があることから、これらの要因が重畳したことによるものと考えられる。

5 再発防止策

5.1 必要と考えられる再発防止策

本事故は、貨車の懸架装置の仕様、積荷の状態、事故現場付近の軌道の状態が、それぞれ脱線に対する余裕度を低下させた状況となり、これらが重畳したことにより発生した可能性があると考えられる。このため、脱線に対する余裕度を低下させないための対策について、関係者が連携して、下記の点を踏まえ総合的に検討する必要がある。

る。

- (1) 貨車の懸架装置の仕様により、中間荷重状態においてまくらばねダンパが、空車状態に対応する減衰が小さい特性となり、走行中の貨車に大きなロール振動が発生したことが脱線の発生に大きく関与した可能性が考えられることから、J R貨物は、懸架装置が適正な減衰領域で使用されること、及び積荷の積載量にかかわらず適正な減衰が得られる懸架装置を設備することについて検討すること。
- (2) 本事故は、積荷の重心が高かったことも要因の一つである可能性が考えられることから、J R貨物は貨物利用運送事業者等と連携して、当面の間、必要に応じて使用される貨車の特性を加味した積載方法を検討すること。
- (3) 本事故は、事故現場付近の複合変位に、整備対象に近い比較的大きな変位量があったこと、及び走行速度に対して車体のロール振動の共振が発生しやすい波長成分を含んでいたことが要因の一つであったことから、貨車や列車の運行形態に対応する、より効果的な軌道変位の管理方法について検討すること。

なお、これらの検討に当たっては、鉄道事業者、車両メーカー、貨物利用運送事業者、荷主及び研究機関等の関係団体における連携と、国土交通省の適切な対応が必要と考えられる。

5.2 本事故後にJ R北海道が講じた措置

J R北海道は、本事故後、平成24年9月16日までに、釜谷駅～泉沢駅間における本件曲線を含む28k764m～29k190mの内軌側軌間内に、脱線防止ガードを設置した。

また、J R北海道では、2.8.2に記述した走行試験の結果を受けて、J R貨物と協議の上、平成27年3月31日までに、泉沢駅～札幌駅間における平成26年6月22日の列車脱線事故の発生現場を含む32k663m～33k275mの区間において、軌道整備と脱線防止ガードを設置する対策を講じた。

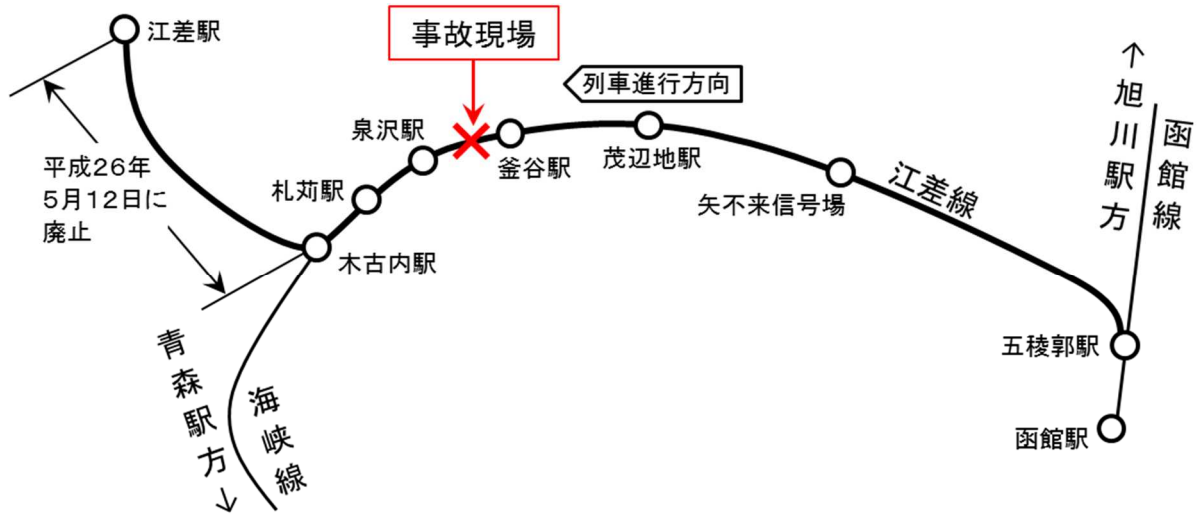
このほかに、平成26年6月22日の列車脱線事故を受けて、江差線の線路メンテナンスの軽減及び偏積などによる貨物列車脱線の可能性低減のために、本件曲線を含む半径400m以下の24の曲線について、設定カントを最大80mmに低減する工事を、平成28年度までに実施することとした。この工事により本件曲線のカントは100mmから80mmになった。

5.3 本事故後にJ R貨物が講じた措置

J R貨物は、2.8.2に記述した走行試験の結果等を踏まえ、まくらばねダンパの特性の見直しについて検討を開始した。

付図1 江差線路線図

江差線 五稜郭駅～江差駅間 79.9km (単線)

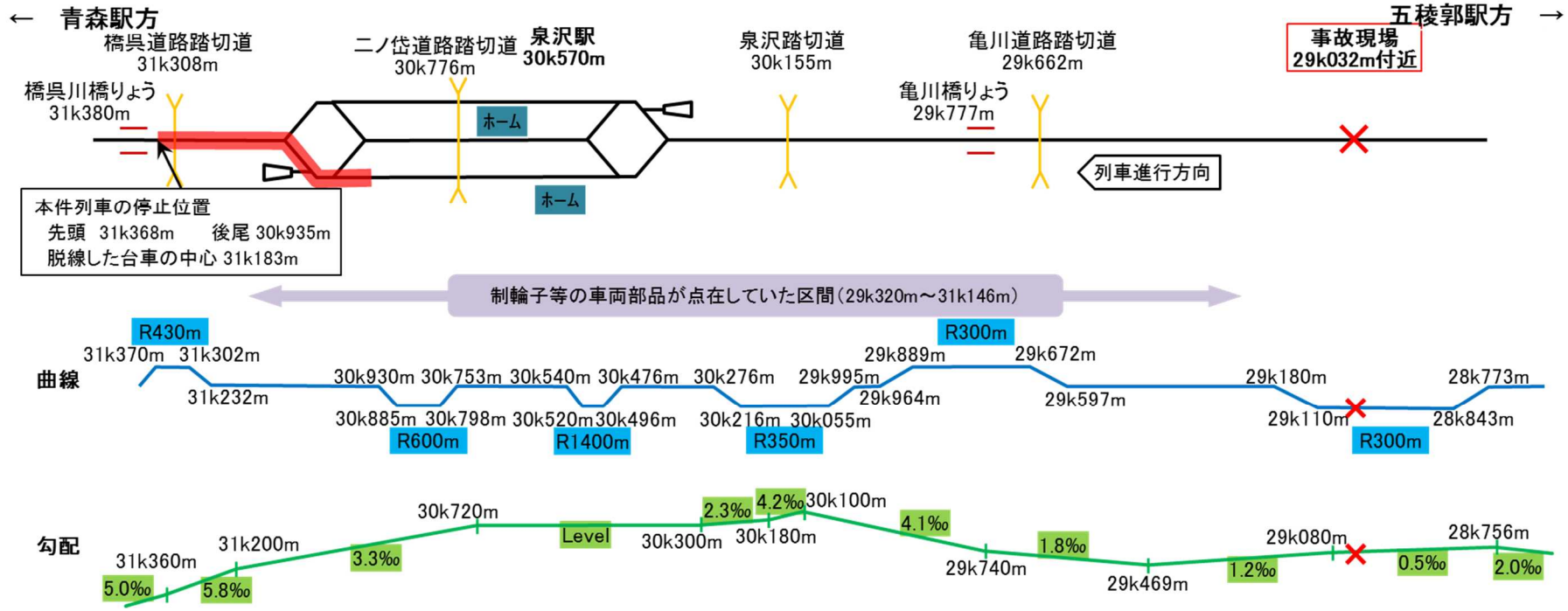


付図2 事故現場付近の地形図

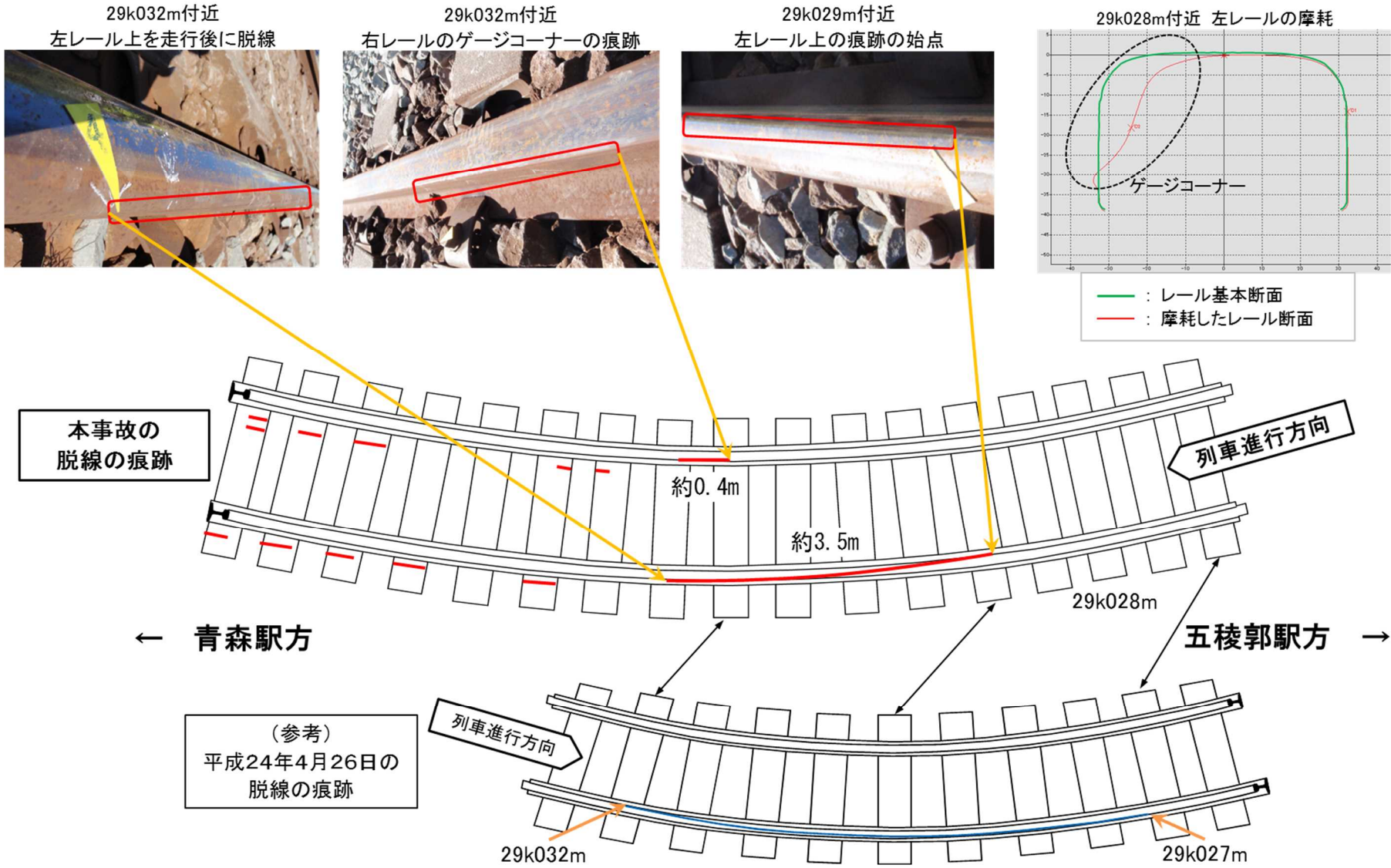


この図は、国土地理院の地理院地図(電子国土Web)を使用して作成

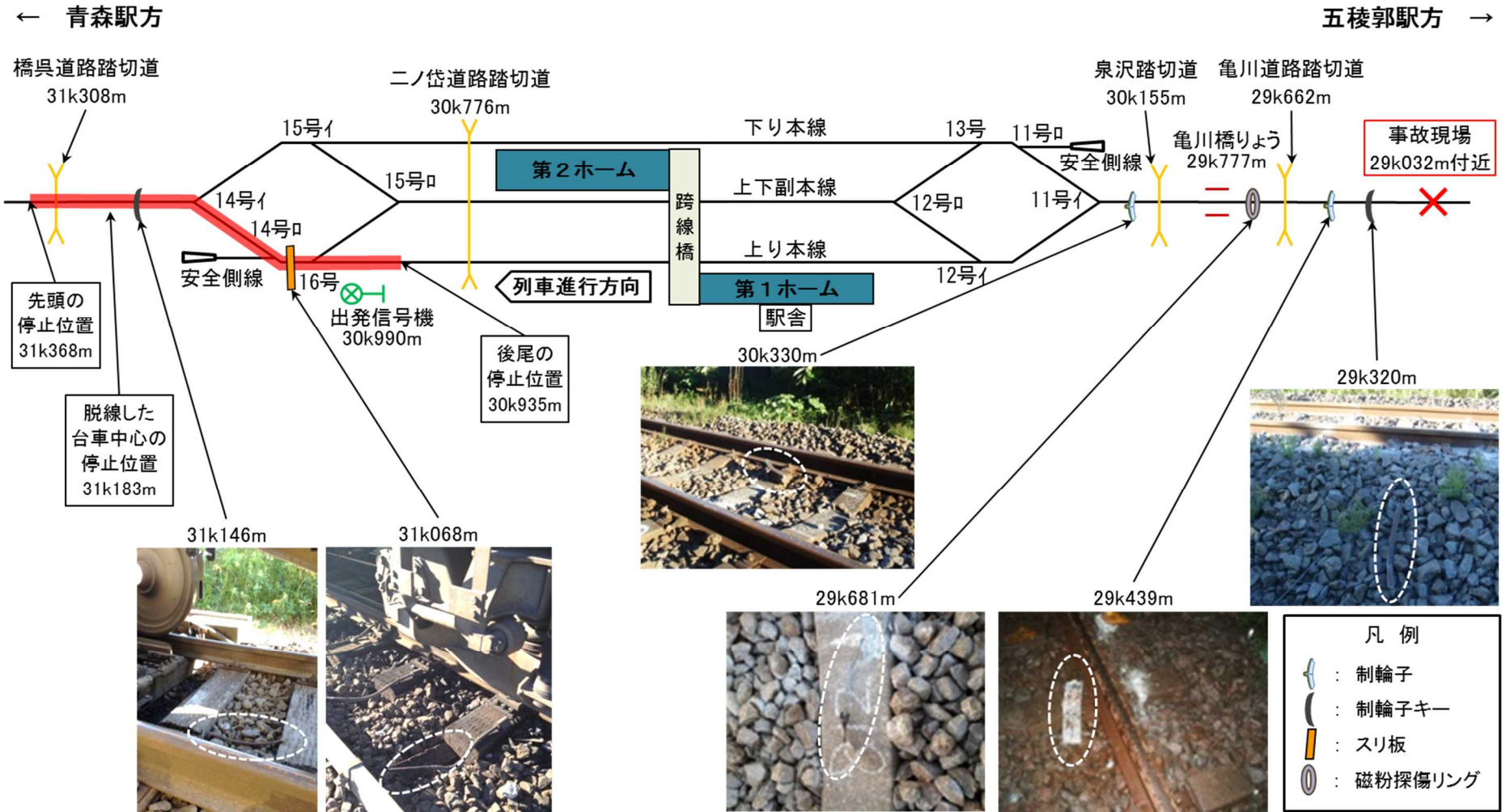
付図3 事故現場～泉沢駅略図



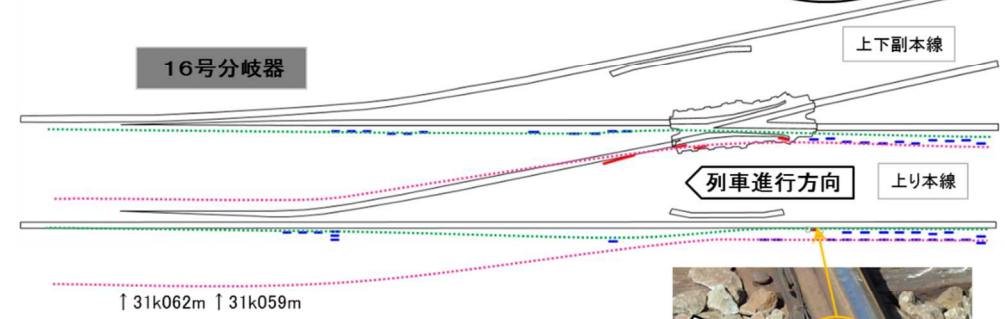
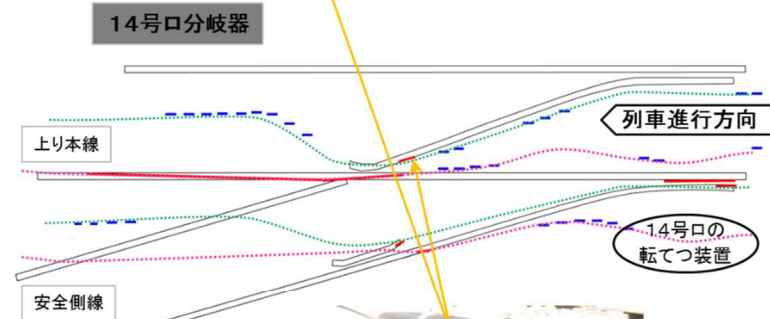
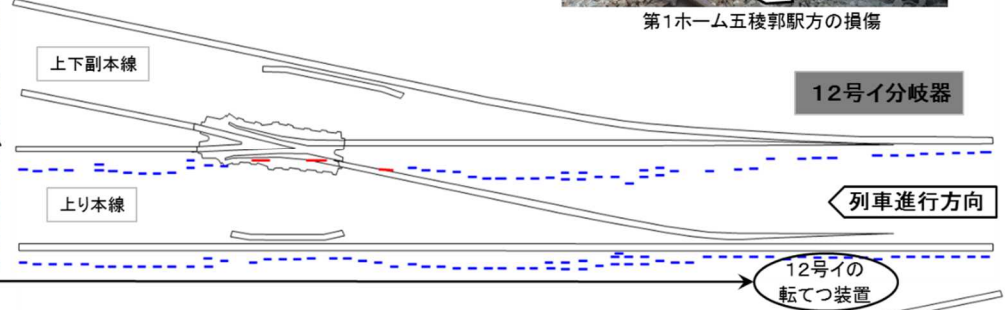
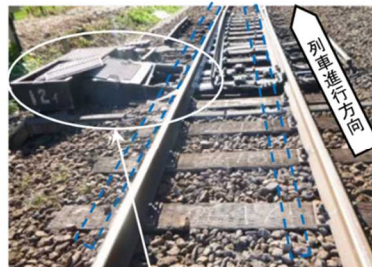
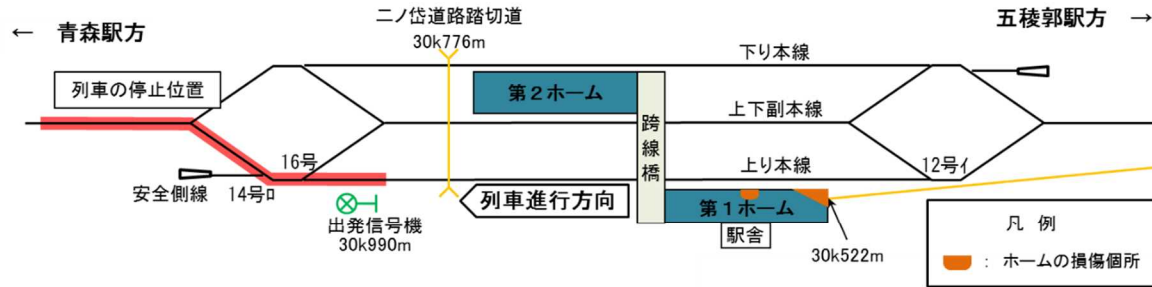
付図4 事故現場略図



付図5 貨車からの落失物位置略図



付図6 泉沢駅構内損傷箇所略図



- 凡例
- : まくらぎ上の痕跡
 - : レール上の痕跡
 - ⋯ : 車輪の経路(推定)

付図7 本件貨車の積荷の状況と車体の損傷状況

← 青森駅方

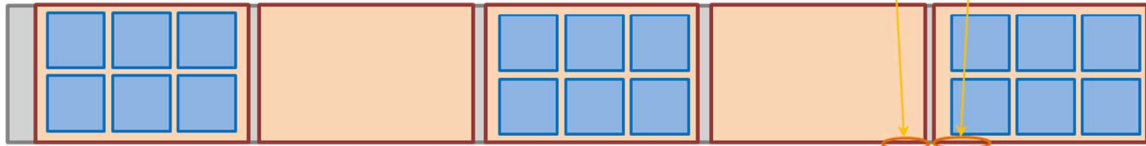
◀ 列車進行方向 ▶

五稜郭駅方 →

コキ106-91に積載された各コンテナの左側の扉を開けた状態



コキ106-91に積載された各コンテナの積載状況の平面図



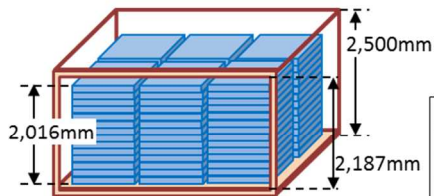
コンテナ1

コンテナ2

コンテナ3

コンテナ4

コンテナ5

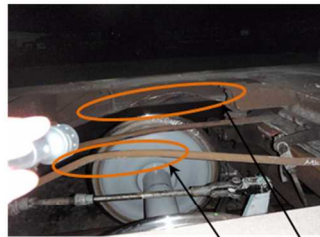


コンテナ1、3、5に積載されている
パレットの個数
14段 × 6列 = 84個



コンテナ脚部の擦過痕

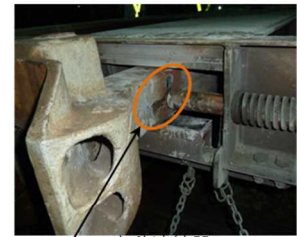
※ 上段左の写真と下段中央の写真の輪軸は、貨車の移動のために交換された台車の輪軸



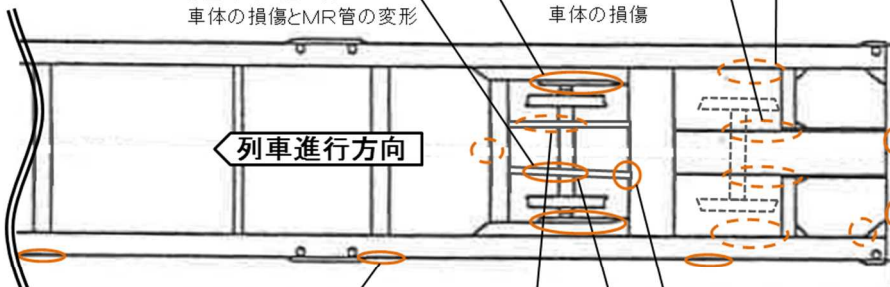
後台車第1軸上方の車体の損傷とMR管の変形



後台車第2軸上方の車体の損傷



自動連結器の接触痕



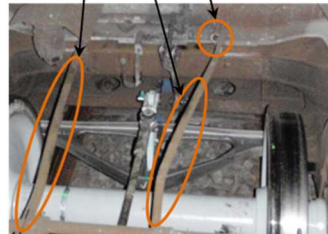
◀ 列車進行方向 ▶



9両目(左)と10両目(右)のBP管連結器の白い汚れ



後から2番目の緊締装置の変形

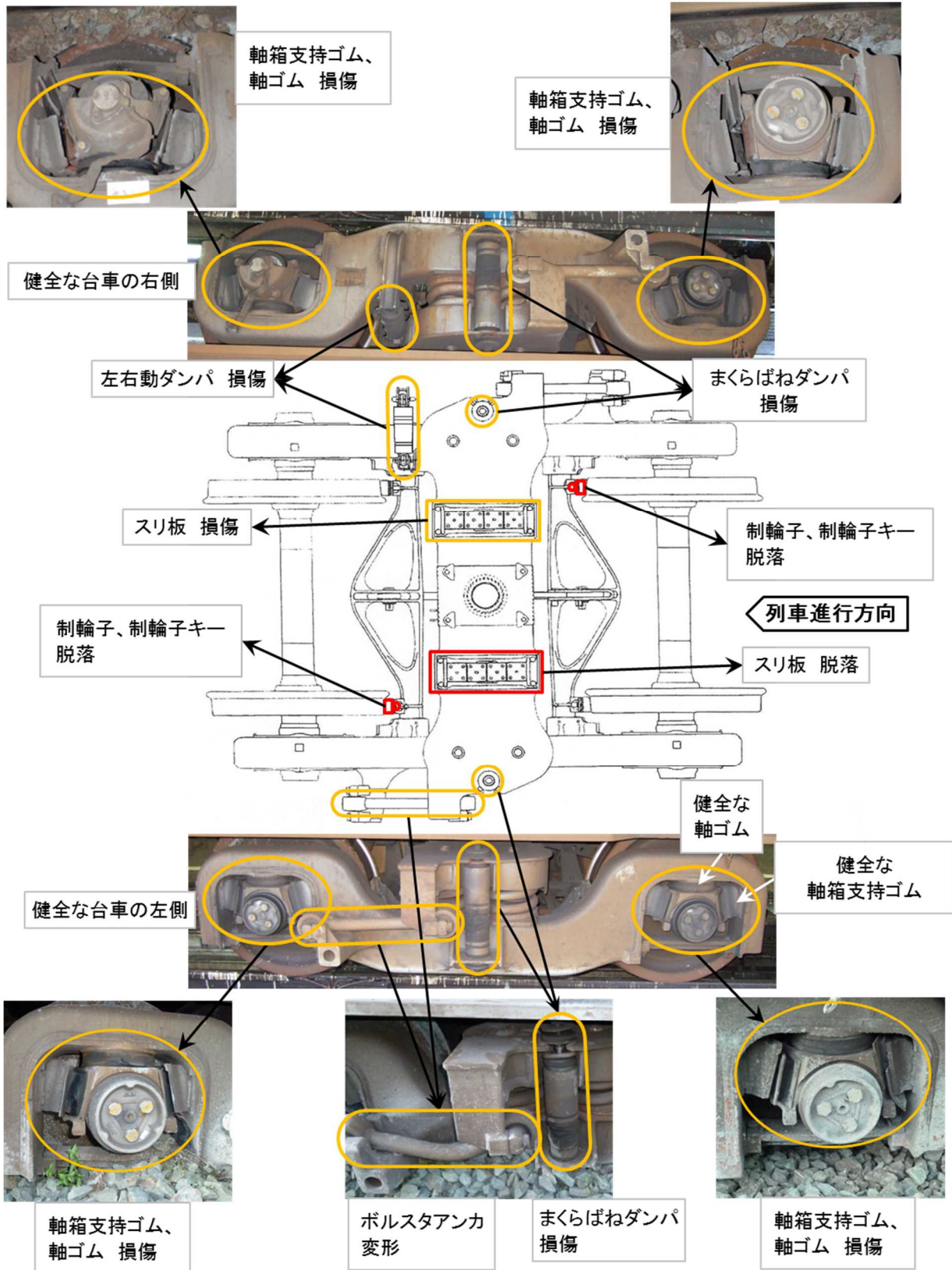


BP管(左)の変形とMR管(右)の変形及び破断



9両目(左)と10両目(右)のBP管連結器の分離

付図8 本件貨車の後台車の損傷状況



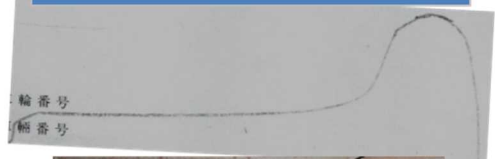
付図9 本件貨車後台車の車輪の損傷状況

第1軸右車輪の踏面描写と写真

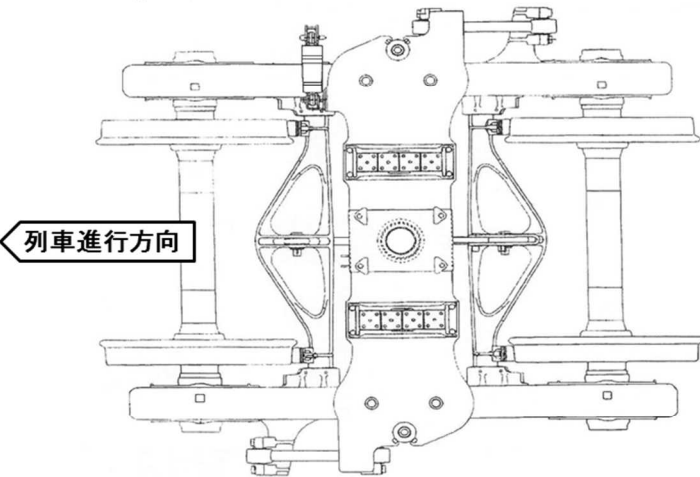


列車進行方向

第2軸右車輪の踏面描写と写真



列車進行方向



列車進行方向

健全な前台車の第1軸左車輪



列車進行方向



列車進行方向

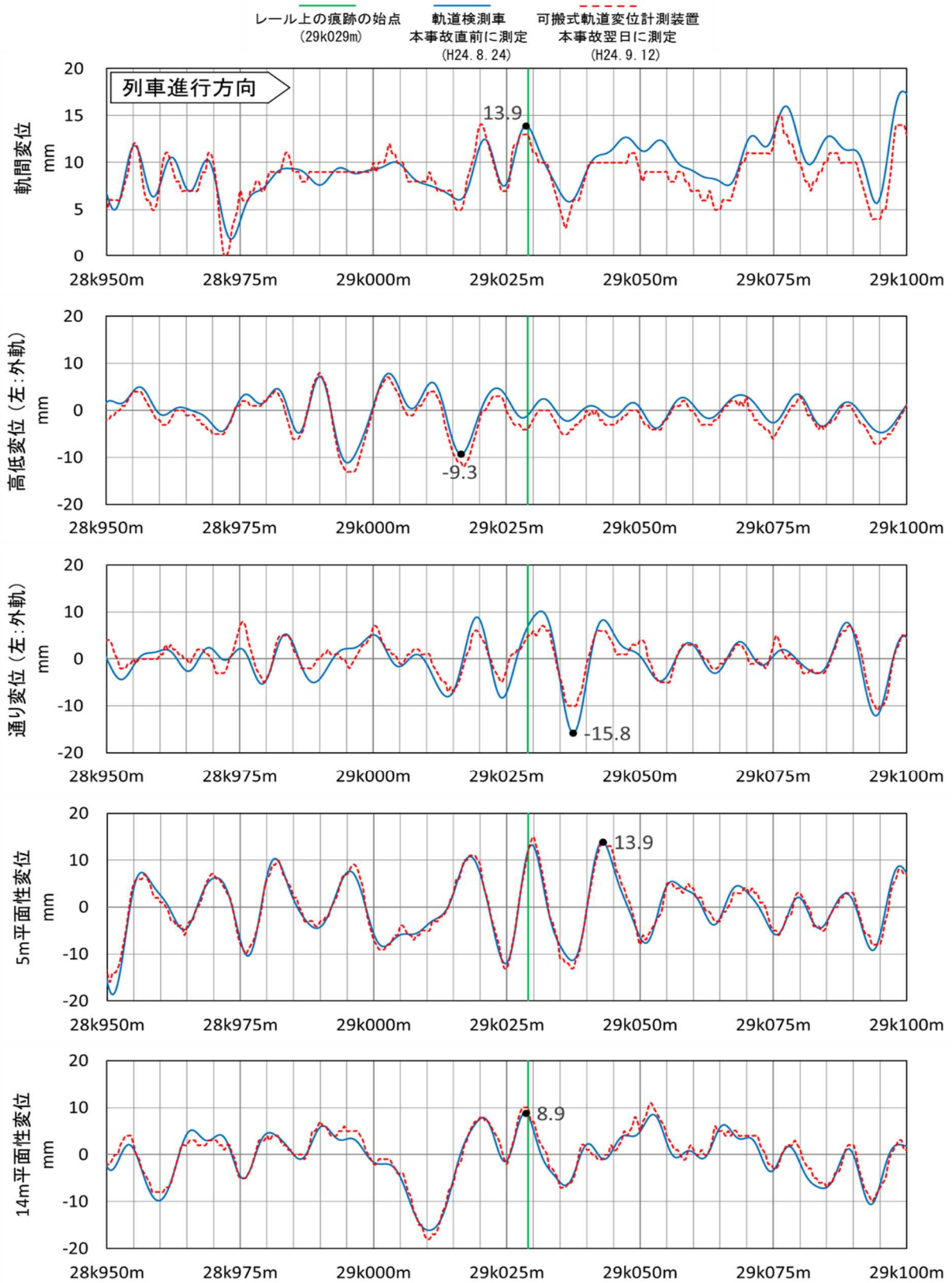
第1軸左車輪の踏面描写と写真



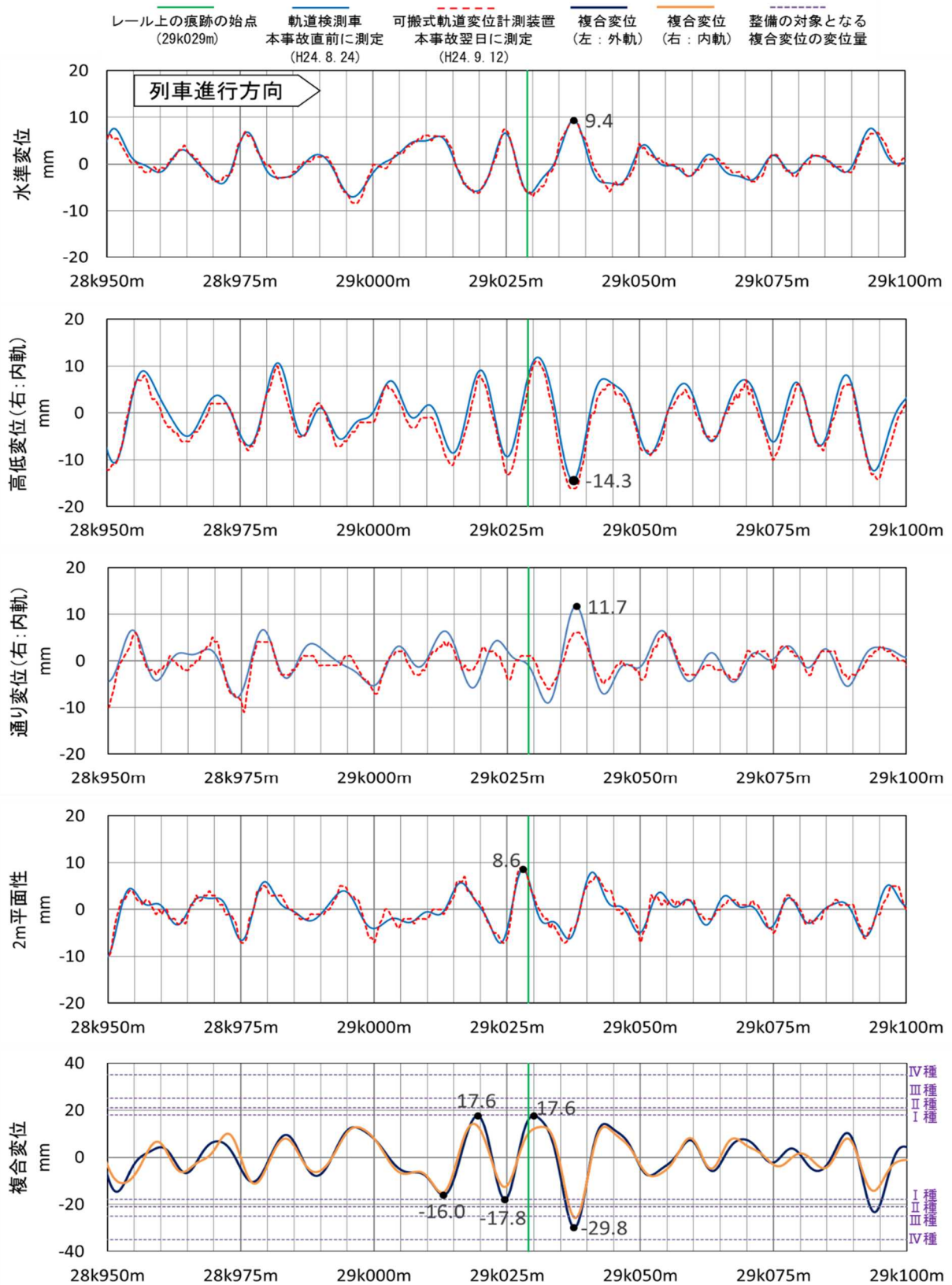
列車進行方向

第2軸左車輪の踏面描写と写真

付図 1 0 事故現場付近の軌道変位の状況 (その 1)



付図 1 0 事故現場付近の軌道変位の状況 (その 2)



付図 1 1 走行試験の概要

(1) 走行区間



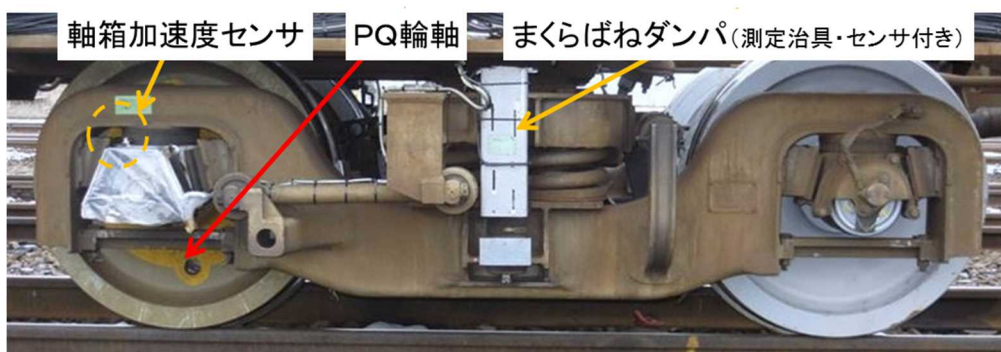
(2) 試験編成



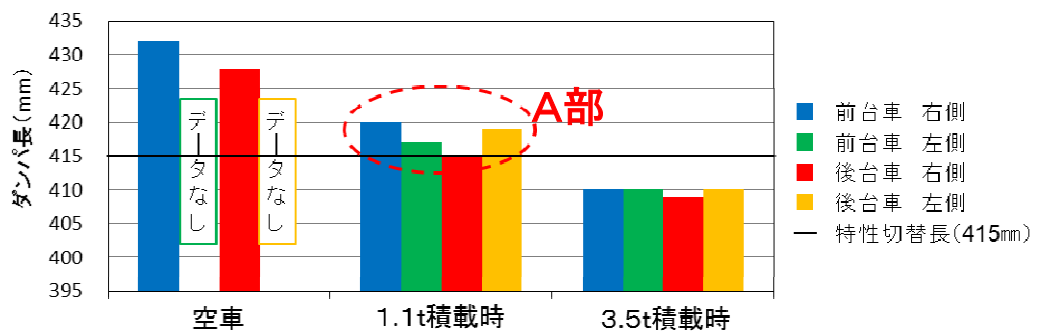
(3) デッドウエイトの状況



(4) 台車部の仮設状況 (コキ106形式)

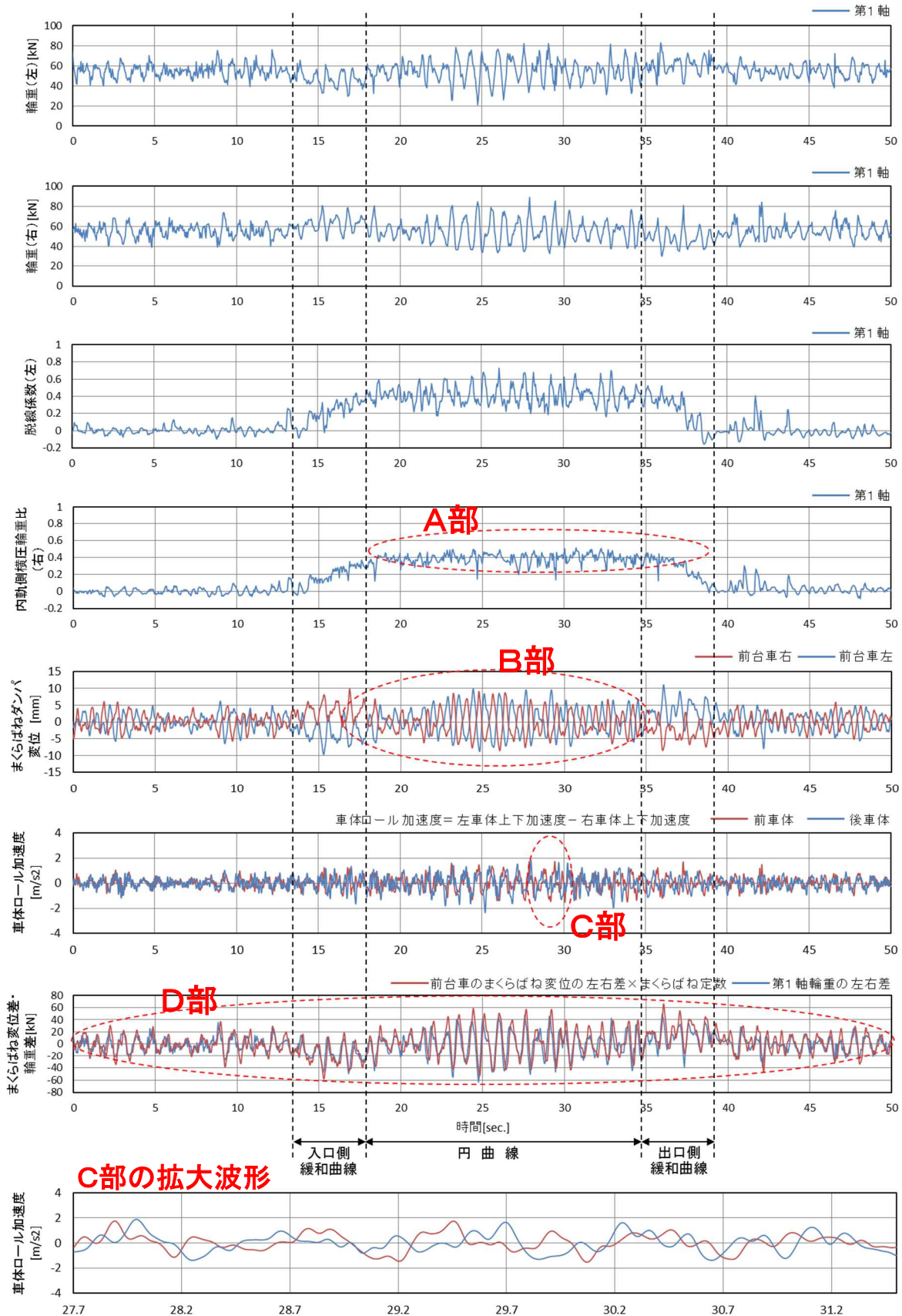


付図 1 2 静止時のダンパ長 (測定値)



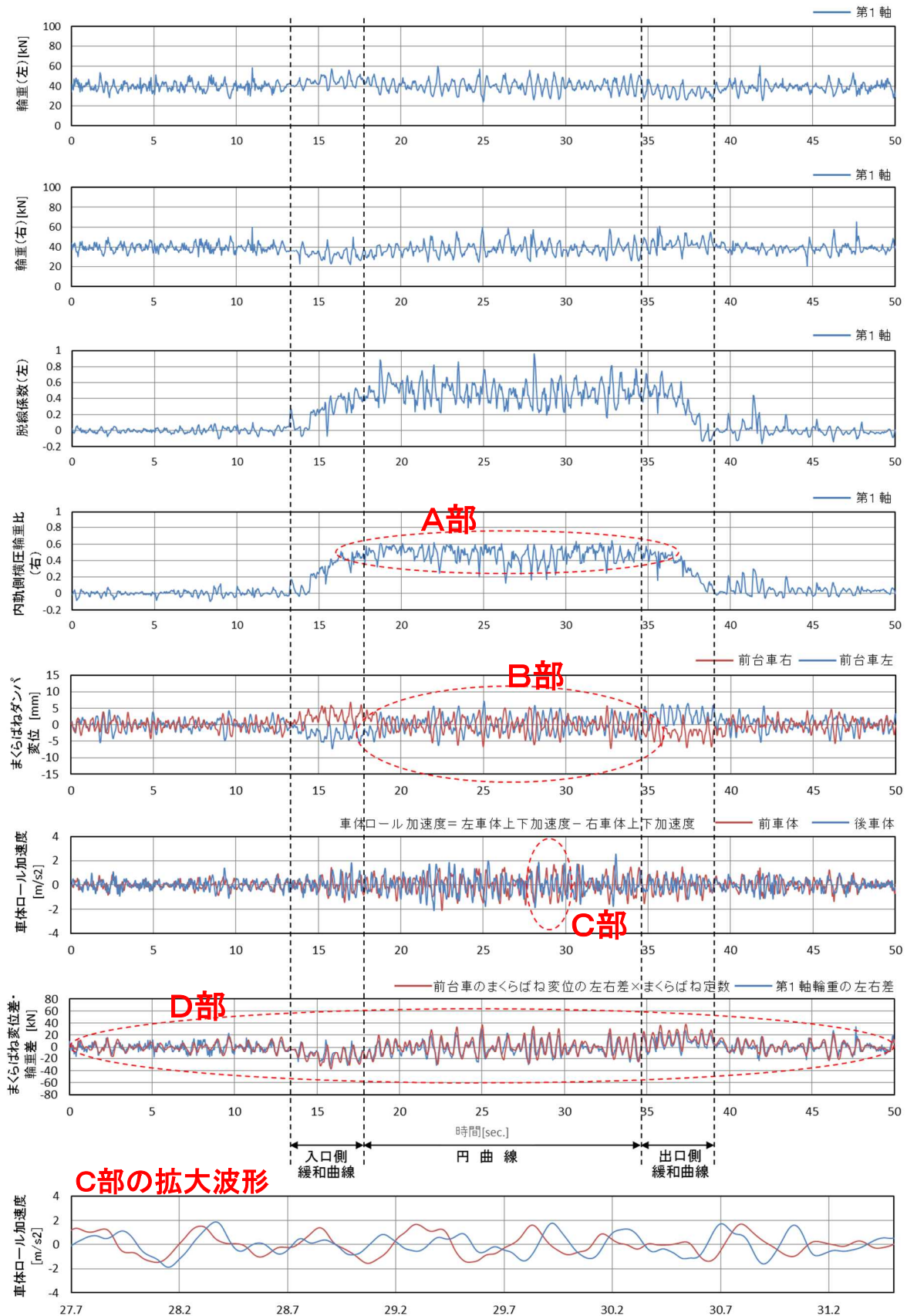
付図 1 3 走行試験（本件曲線）の結果 （その 1、3.5 t 積載時）

貨車: コキ106 軌道データ: 平成26年11月 積載: 3.5t*6 走行速度: 60km/h

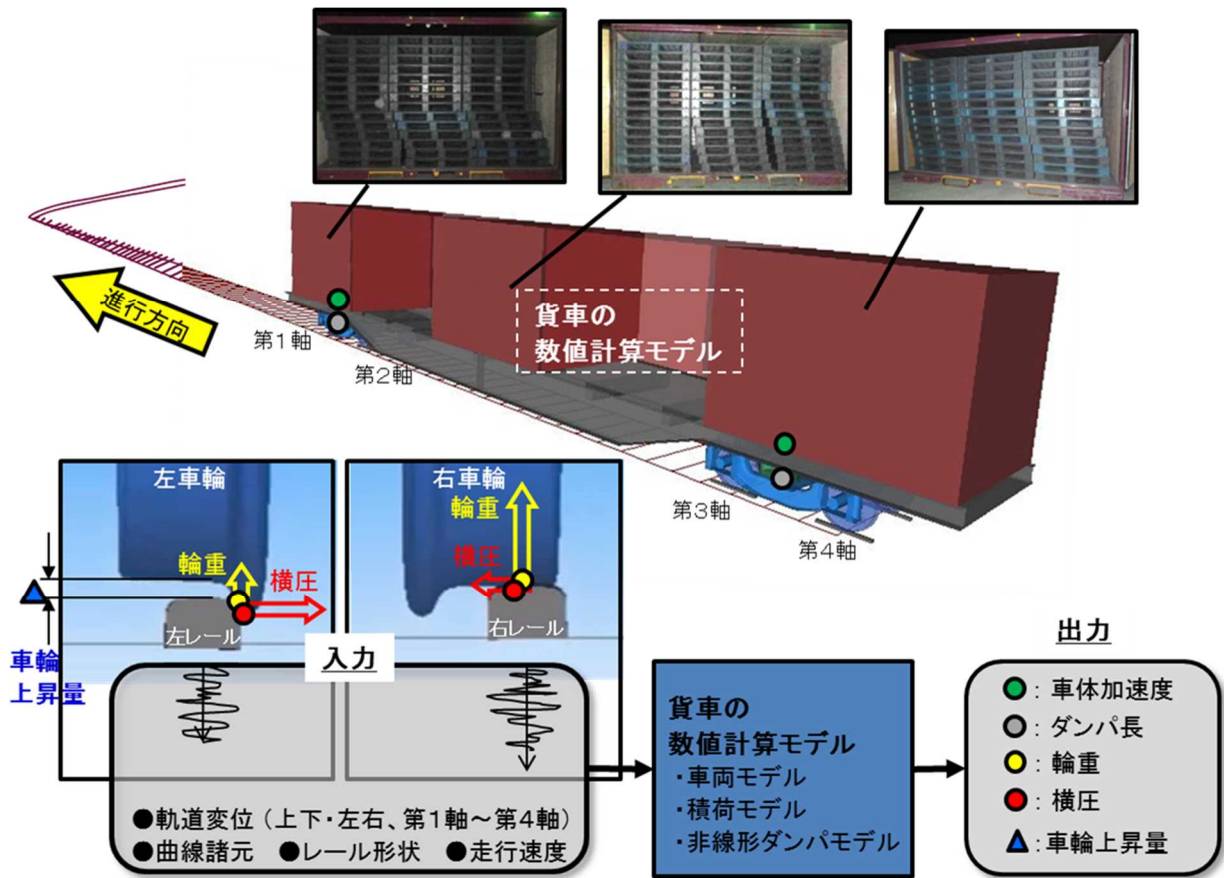


付図 1 3 走行試験（本件曲線）の結果 （その 2、1.1 t 積載時）

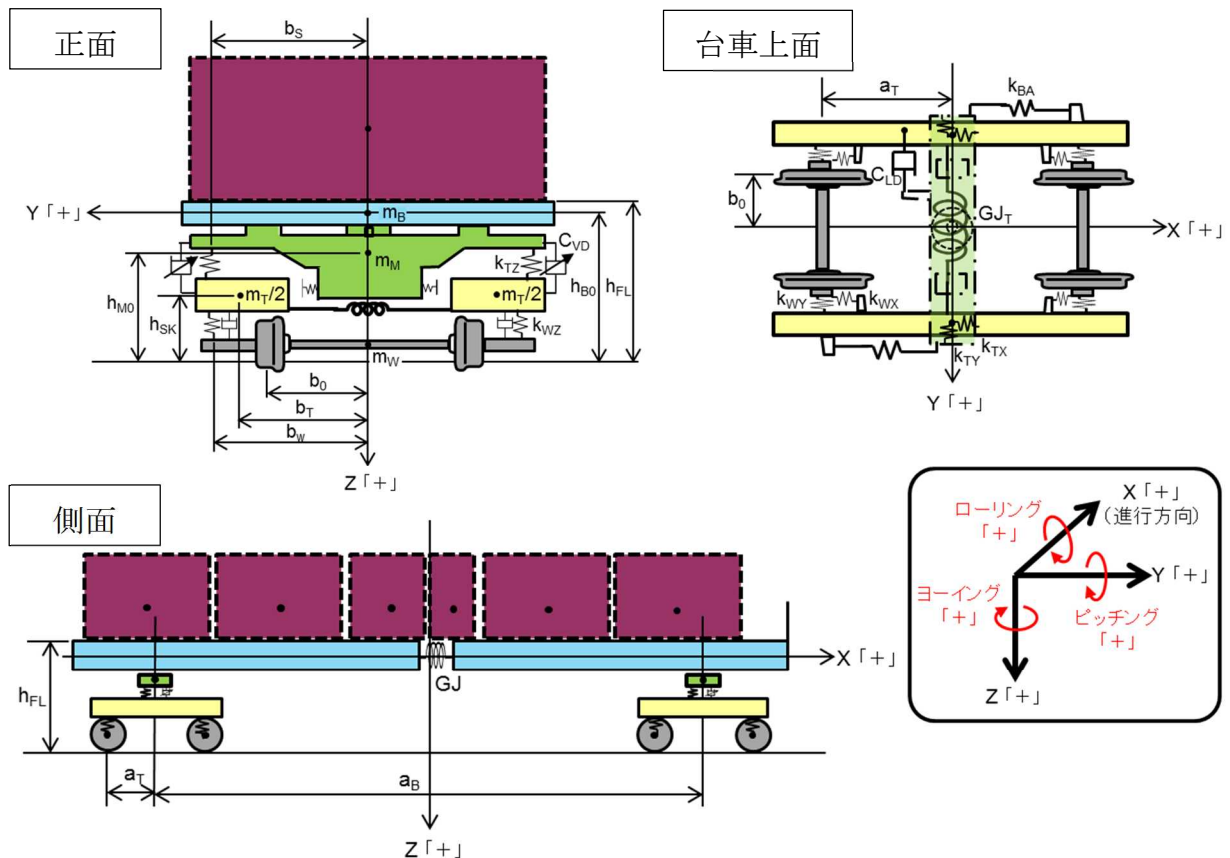
貨車: コキ106 軌道データ: 平成26年11月 積載: 1.1t*5 走行速度: 60km/h



付図 1 4 数値シミュレーションの概要



付図 15 数値シミュレーションモデル
(その 1、コキ 106 形式の車体・台車)



(自由度、拘束)

- 全ての剛体は、並進と回転の全 6 自由度をもつとする。
- ただし、車体のねじれ及びつなぎばりのねじれによって連結される剛体は、当該のねじれ以外の自由度を拘束される。
- さらに、コンテナと積荷は上述のように車体各部に拘束される。
- 車体は前後方向に一定速度で移動する相対座標系に固定されている。

(車体)

- 車体は、走行方向の軸のまわりのねじれを考慮するために前後に 2 分割した剛体とする。

(台車)

- 台車枠は、剛体である側ばり 2 本をつなぎばりで連結したものとする。
- つなぎばりは、まくらぎ方向を軸とするねじり曲げ剛性を考慮したものとする。
- 輪軸は全 4 本の剛体を配置する。

(コンテナ)

- 車体に積載されるコンテナは、曲げ剛性を車体に付与しないこととする。
- 5つのコンテナと積荷は、各コンテナの中央位置で車体床面と固定される。
- ただし、中央(3番目)のコンテナとその積荷は、車体の前後 2 分割に合わせて前後に分割されたものとし、それぞれの分割されたコンテナの中央で車体と連結する。

(積荷)

- 積荷はコンテナの床面に固定された剛体とする。

数値シミュレーションモデルの自由度

自由度 剛体	並進			回転			ねじり	自由度 数
	前後 (X)	左右 (Y)	上下 (Z)	ロール (X)	ピッチ (Y)	ヨー (Z)		
車体(前)	-*a	○	○	○	○	○	○ (ロール)	6
車体(後)								
まくらばり(前)								
まくらばり(後)								
台車枠(前・右)	○	○	○	○	○	○	○ (ピッチ)	7
台車枠(前・左)								
台車枠(後・右)	○	○	○	○	○	○	○ (ピッチ)	7
台車枠(後・左)								
輪軸1	○	○	○	○	○	○	—	6
輪軸2	○	○	○	○	○	○	—	6
輪軸3	○	○	○	○	○	○	—	6
輪軸4	○	○	○	○	○	○	—	6
計								46

*a 車体は一定の走行速度になるよう拘束されている。

数値シミュレーションモデルの主要パラメータ

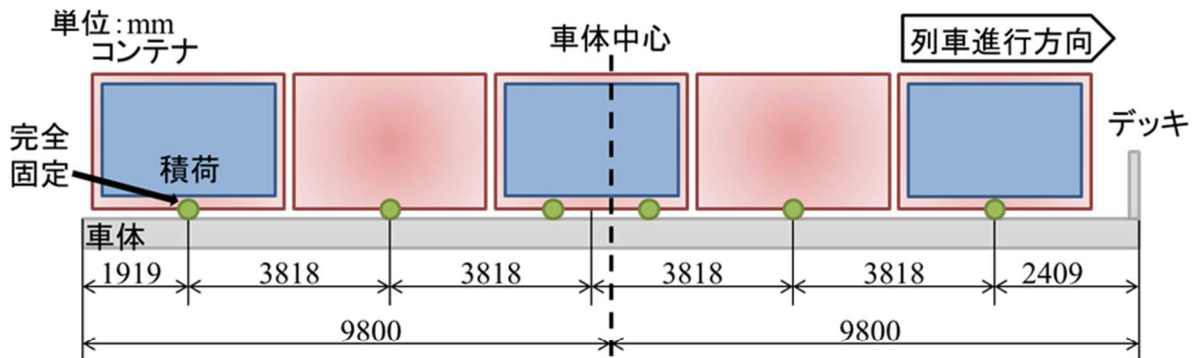
項目	記号	単位	数値
車体質量	m_B	kg	11110
上揺れまくら(まくらばり)質量	m_M	kg	600
台車枠質量(ばね間質量)	m_T	kg	1235
輪軸質量	m_W	kg	1030
まくらばねダンパ減衰係数	c_{VD}	kN/(m/s)	非線形
左右動ダンパ減衰係数	c_{LD}	kN/(m/s)	58.8
まくらばね前後ばね定数(空車:片台車)	k_{TX}	kN/m	2939.0
まくらばね左右ばね定数(空車:片台車)	k_{TY}	kN/m	2939.0
まくらばね上下ばね定数(空車:片台車)	k_{TZ}	kN/m	2984.7
軸ばね前後ばね定数(空車:片台車)	k_{WX}	kN/m	10400.0
軸ばね左右ばね定数(空車:片台車)	k_{WY}	kN/m	4000.0
軸ばね上下ばね定数(空車:片台車)	k_{WZ}	kN/m	10100.0
ボルスタアンカばね定数	k_{BA}	kN/m	5880.0
車体相当ねじり剛性	GJ	kNm ² /rad	8230.0
台車枠相当ねじり剛性	GJ _T	kNm ² /rad	10.9
レール面上 床面高さ(空車)	h_{FL}	m	1.000
レール面上 車体重心高さ(空車)	h_{B0}	m	0.812
レール面上 まくらばり重心高さ(空車)	h_{M0}	m	0.580
レール面上 台車つなぎばり中心高さ(空車)	h_{SK}	m	0.310
1/2左右車輪踏面中心(形状原点)間隔	b_0	m	0.560
台車中心-片台車枠重心間 距離	b_T	m	0.820
1/2軸ばね中心左右間隔	b_W	m	0.820
1/2まくらばね中心左右間隔	b_S	m	0.820
1/2台車中心間距離	a_B	m	7.100
1/2台車軸距	a_T	m	0.950

付図 1 5 数値シミュレーションモデル (その 2、積荷)

〈コンテナ配置〉

単位: kg

	コンテナ5	コンテナ4	コンテナ3	コンテナ2	コンテナ1
空	1800	1800	1800 (992+808)	1800	1800
積荷	2000	0	2000 (1153+847)	0	2000
計	3800	1800	3800 (2145+1655)	1800	3800



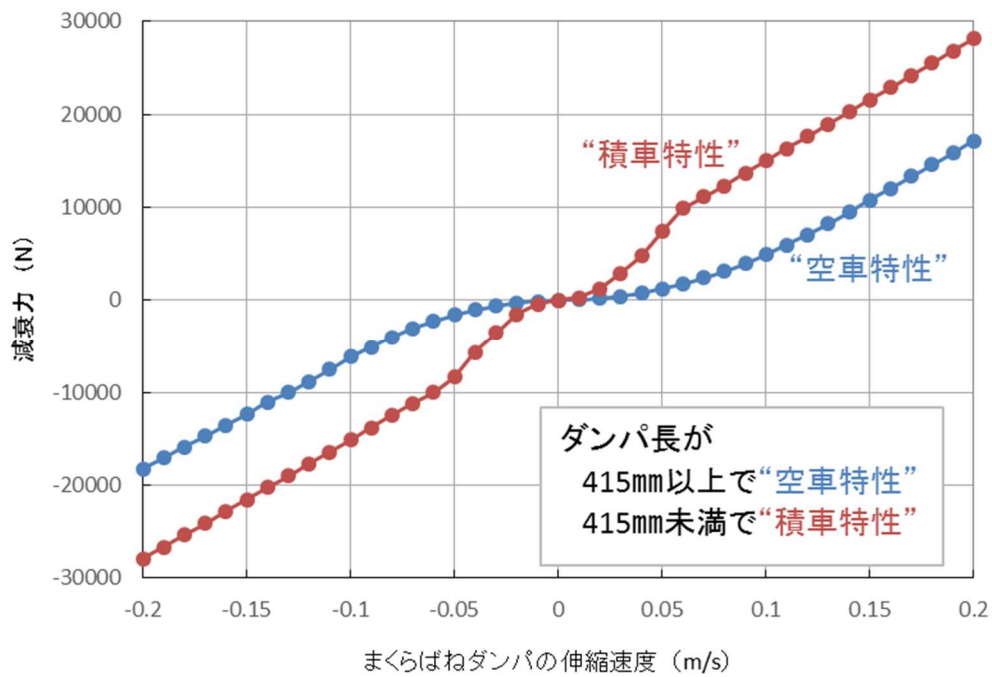
〈コンテナ詳細〉

単位: mm

● コンテナ重心
● 積荷重心

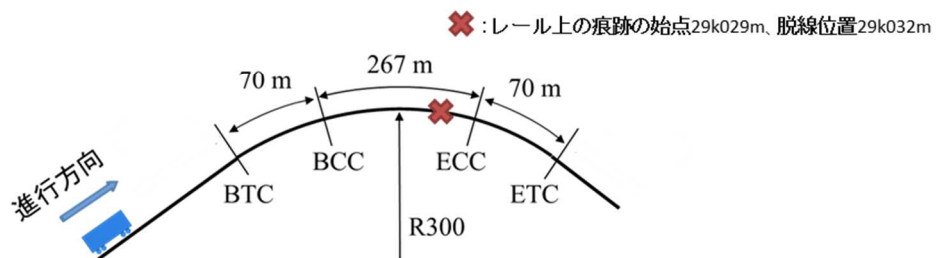
	空コンテナ	積載コンテナ
分割なし (通常)		
分割あり (コンテナ3)		

付図15 数値シミュレーションモデル
(その3、まくらばねダンパの減衰特性)

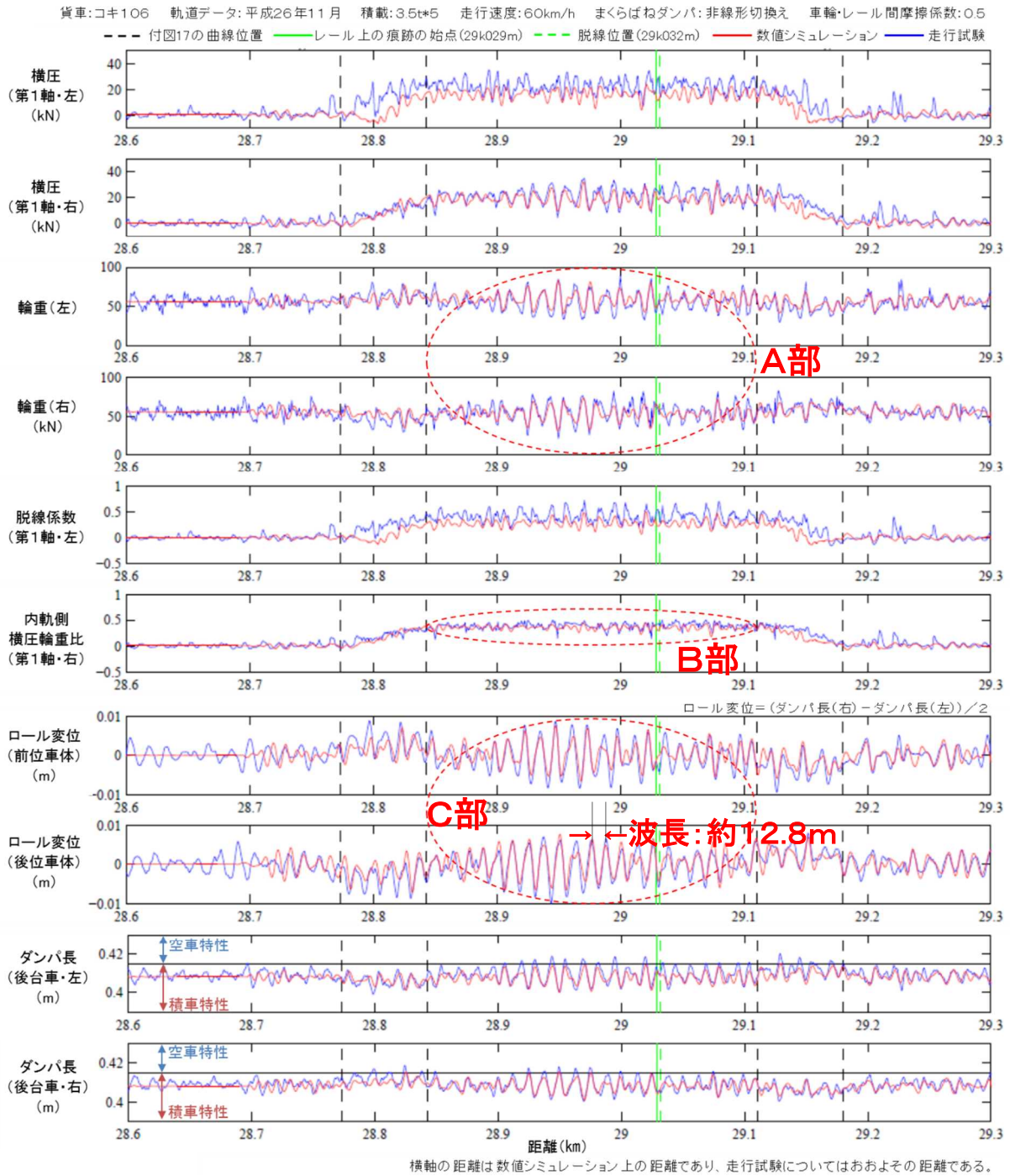


付図16 事故現場の曲線諸元

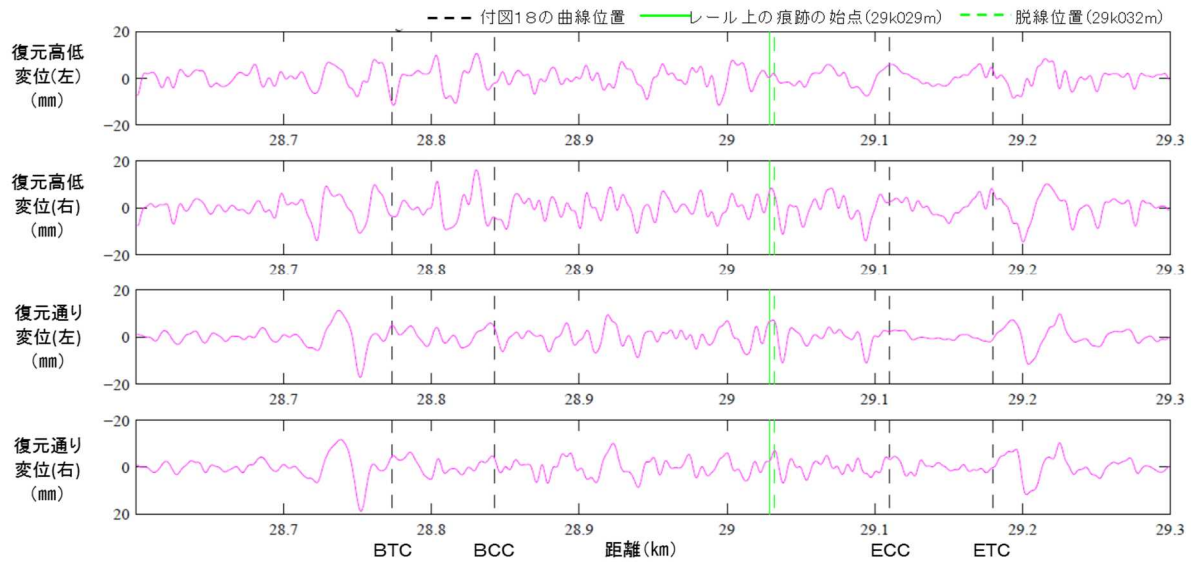
駅間	緩和曲線始点 (BTC)	円曲線始点 (BCC)	円曲線終点 (ECC)	緩和曲線終点 (ETC)	曲線半径	方向	カント	スラック
泉沢～釜谷	28k773m	28k843m	29k110m	29k180m	300m	右	100mm	10mm



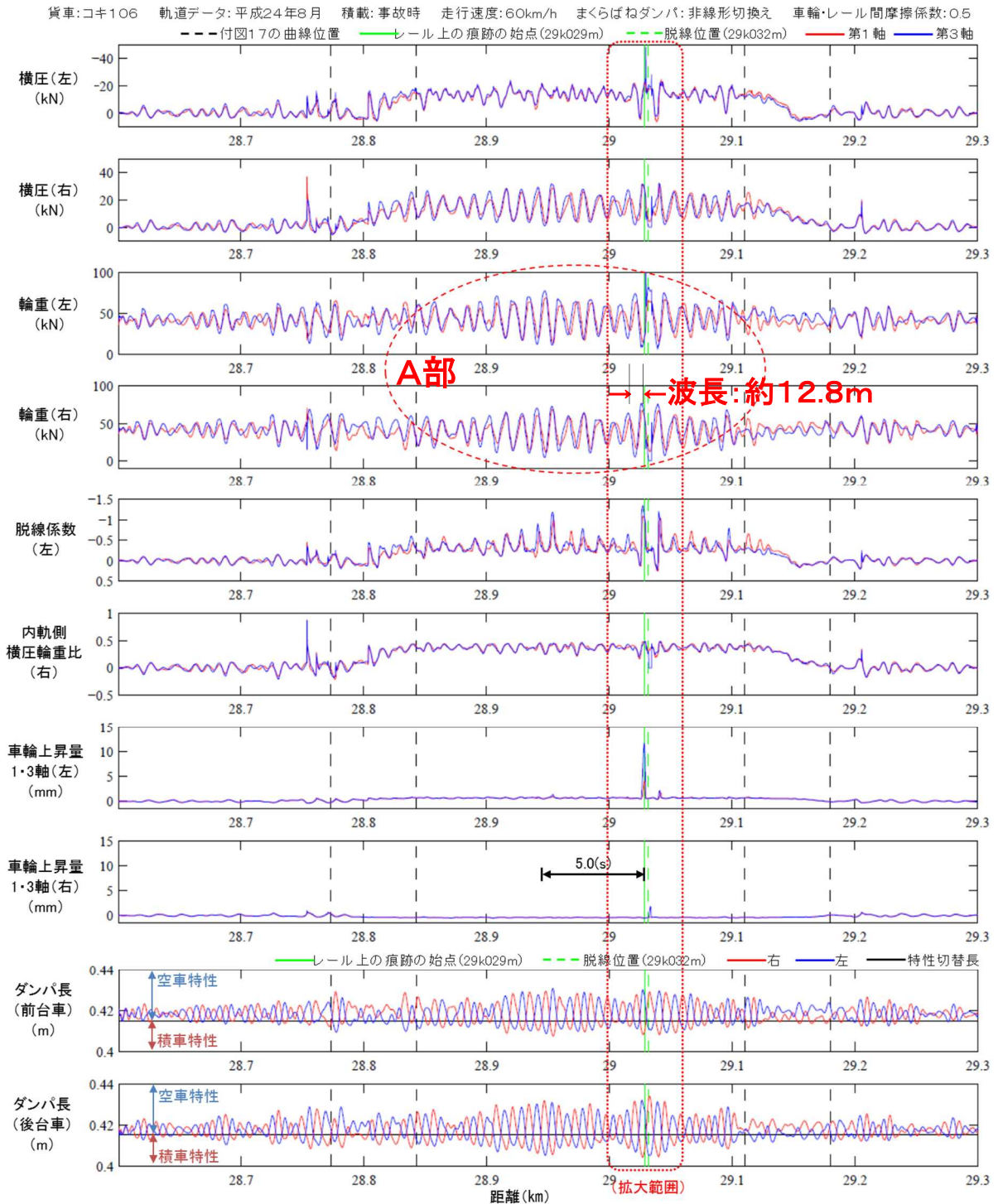
付図 1 7 数値シミュレーションによる走行試験の再現波形と測定波形との照合 (数値シミュレーションの妥当性の確認)



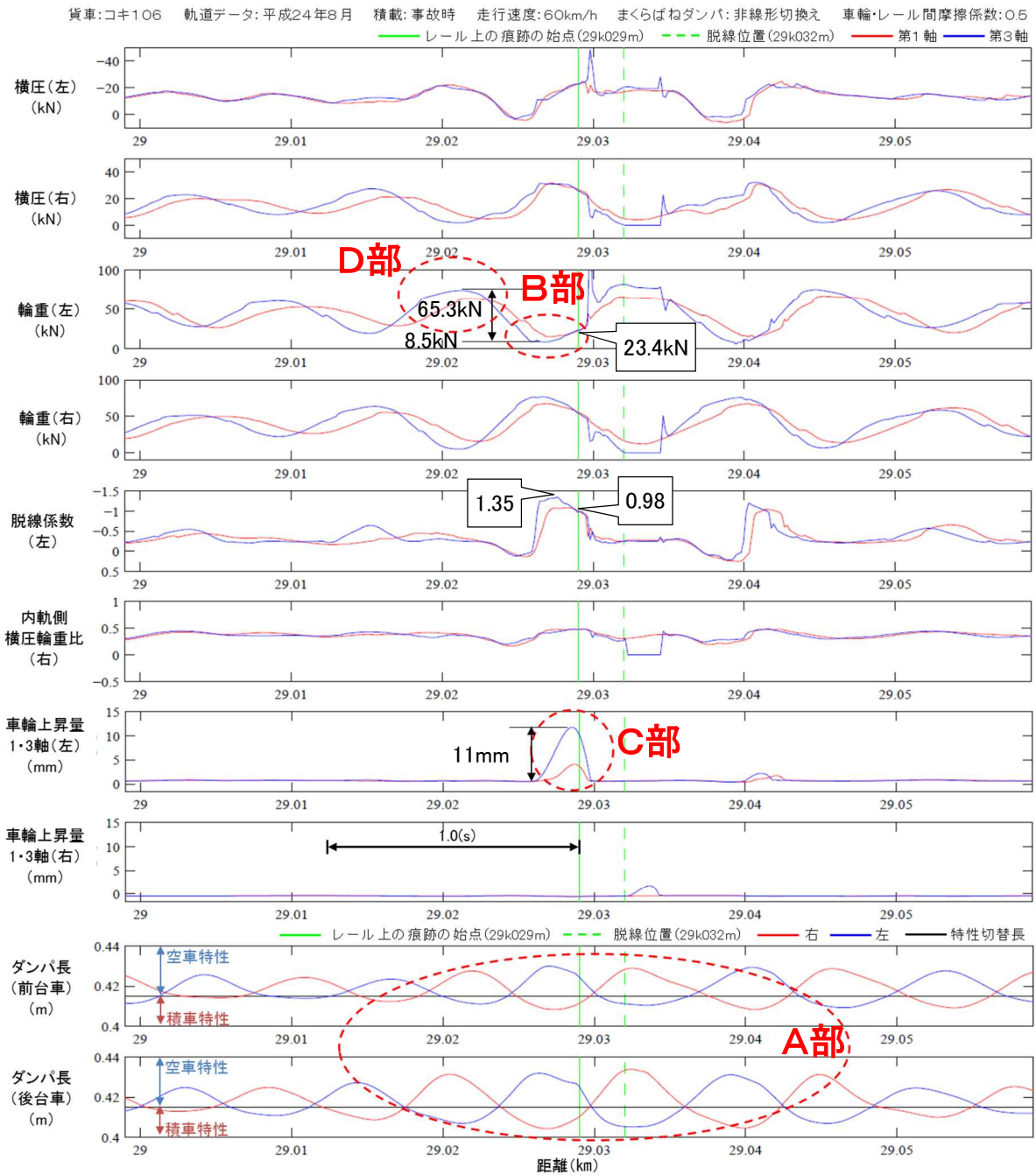
付図18 数値シミュレーションによる本事故の再現に入力した軌道状態
 (事故直前に測定した軌道変位の復元波形)



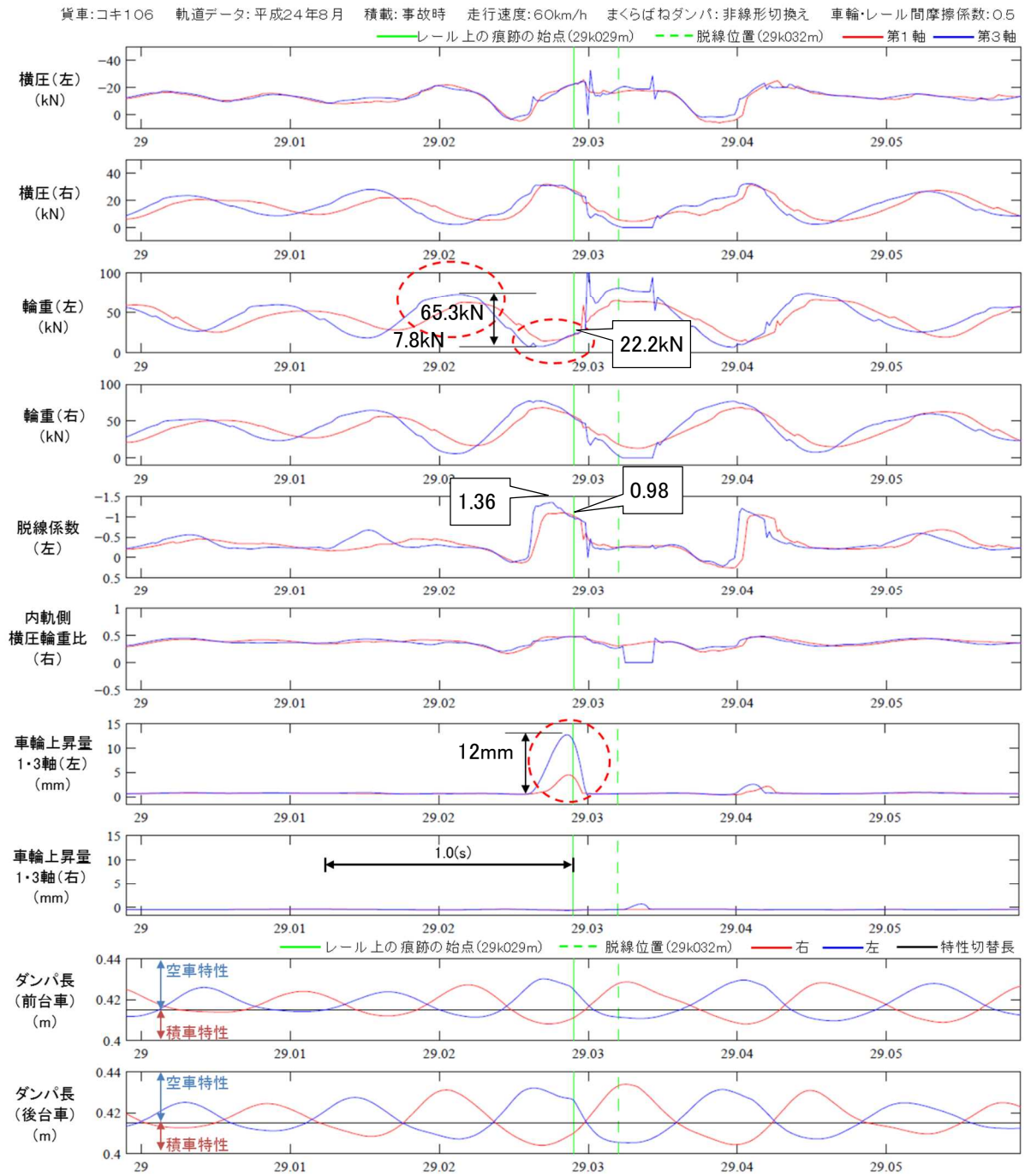
付図19 数値シミュレーションによる本事故の再現結果 (その1、全区間表示)



付図 1 9 数値シミュレーションによる本事故の再現結果 (その 2、拡大表示)

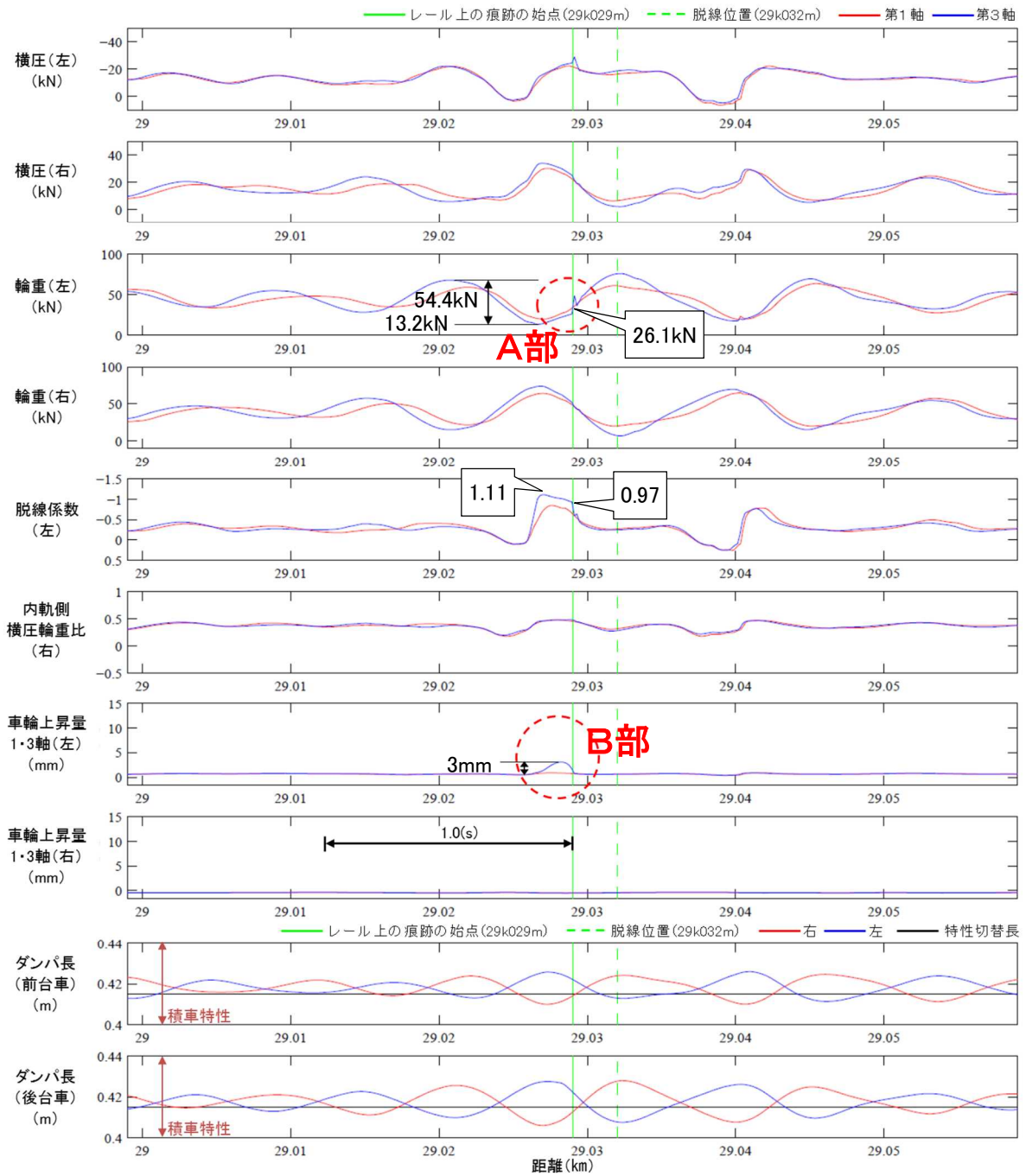


付図 20 数値シミュレーションによる本事故の再現結果 (カントを10mm増加させた場合)

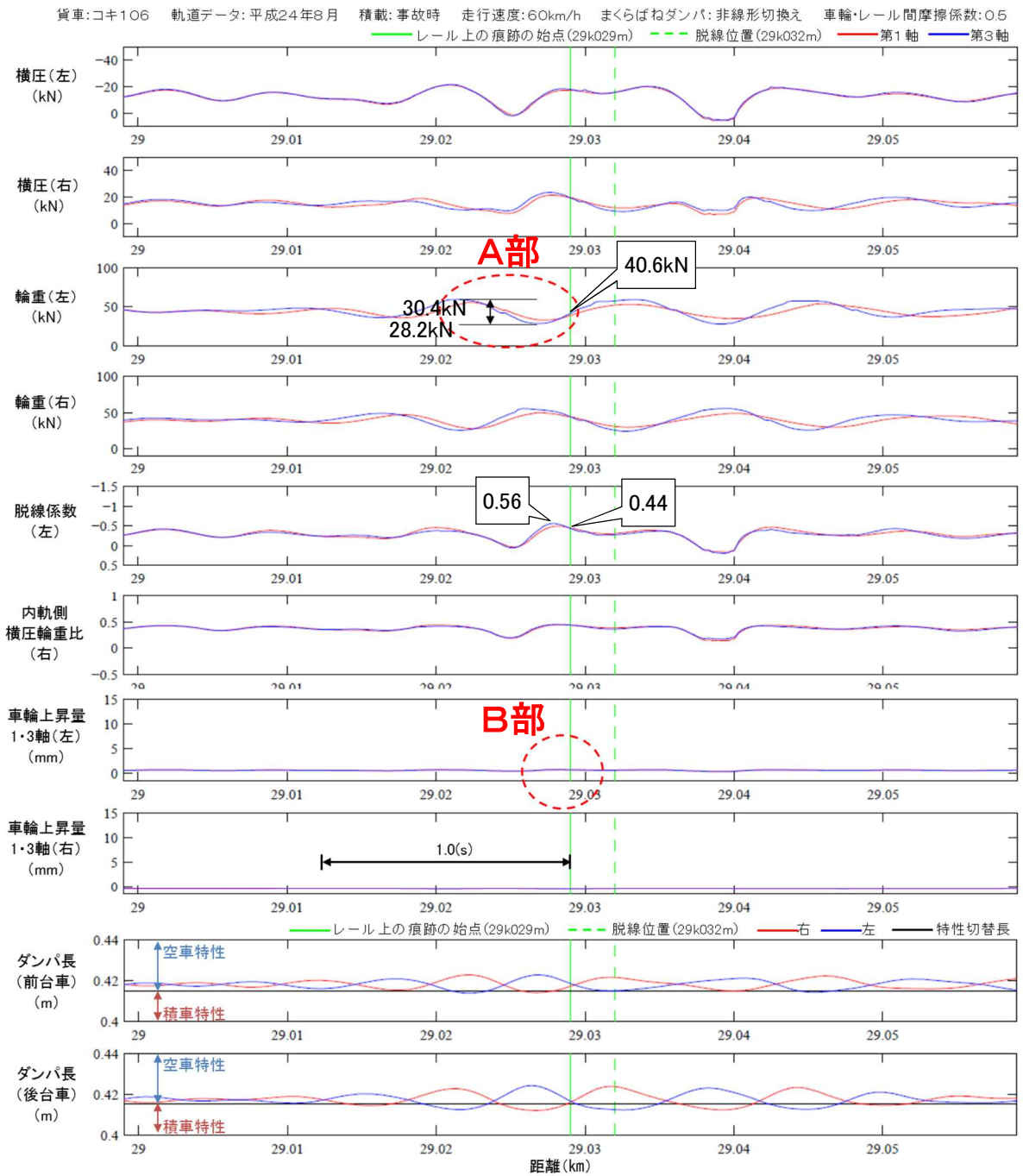


付図 2 1 数値シミュレーションによる本事故の再現結果 (まくらばねダンパの減衰特性を“積車特性”に固定した場合)

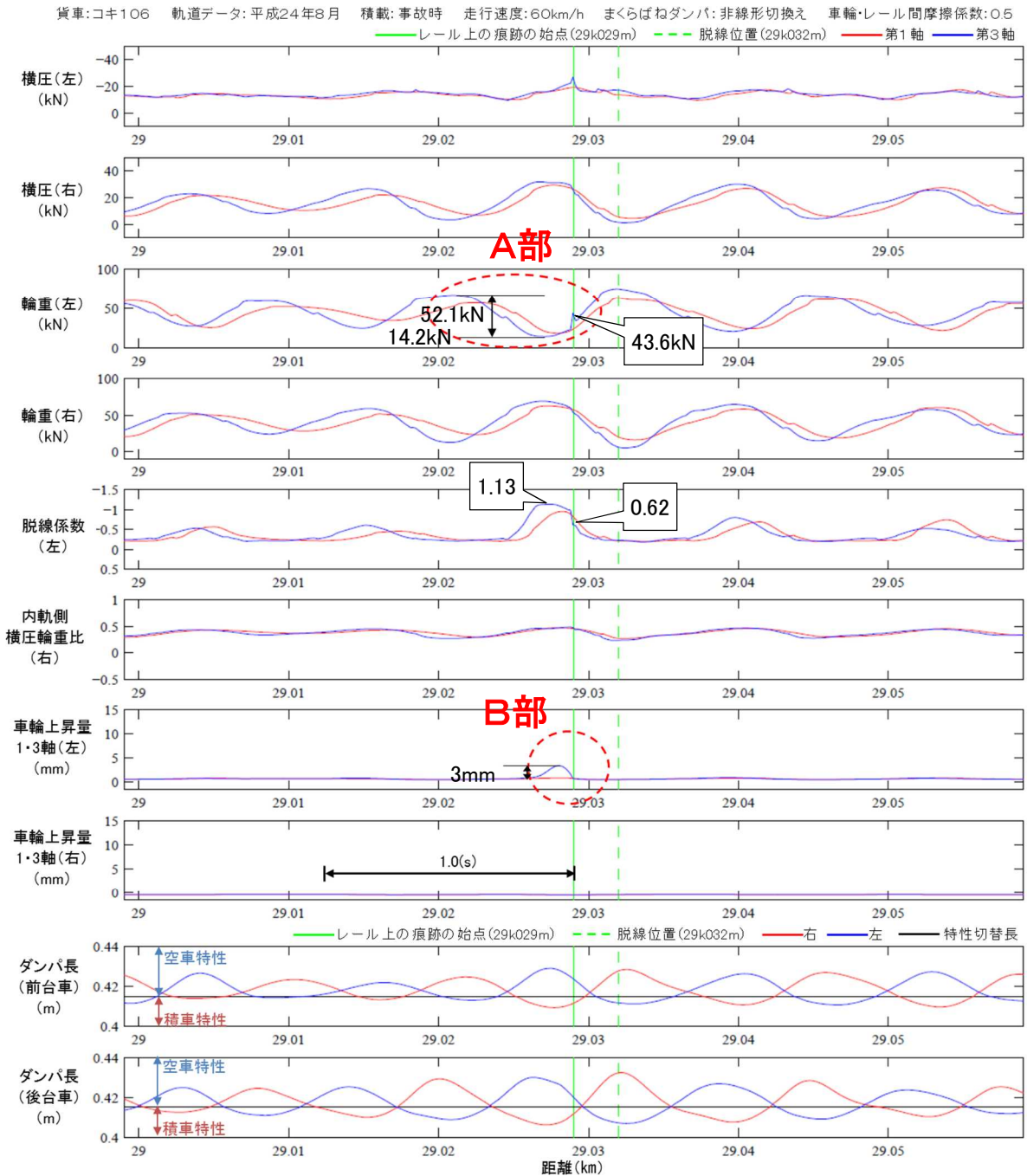
貨車: コキ106 軌道データ: 平成24年8月 積載: 事故時 走行速度: 60km/h まくらばねダンパ: 非線形“積車特性”固定 車輪・レール間摩擦係数: 0.5



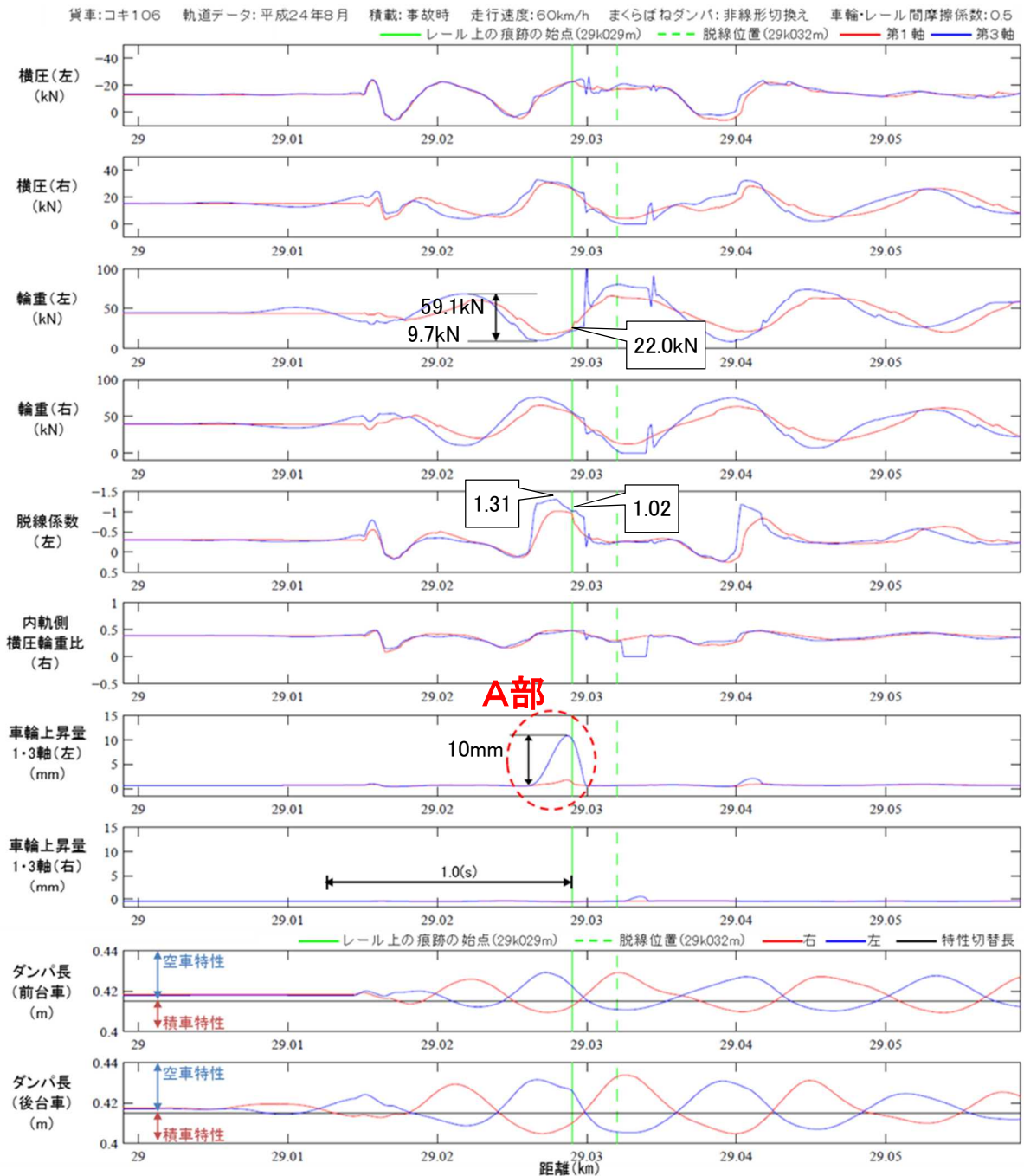
付図 2 2 数値シミュレーションによる本事故の再現結果 (軌道変位に通り変位のみ入力した場合)



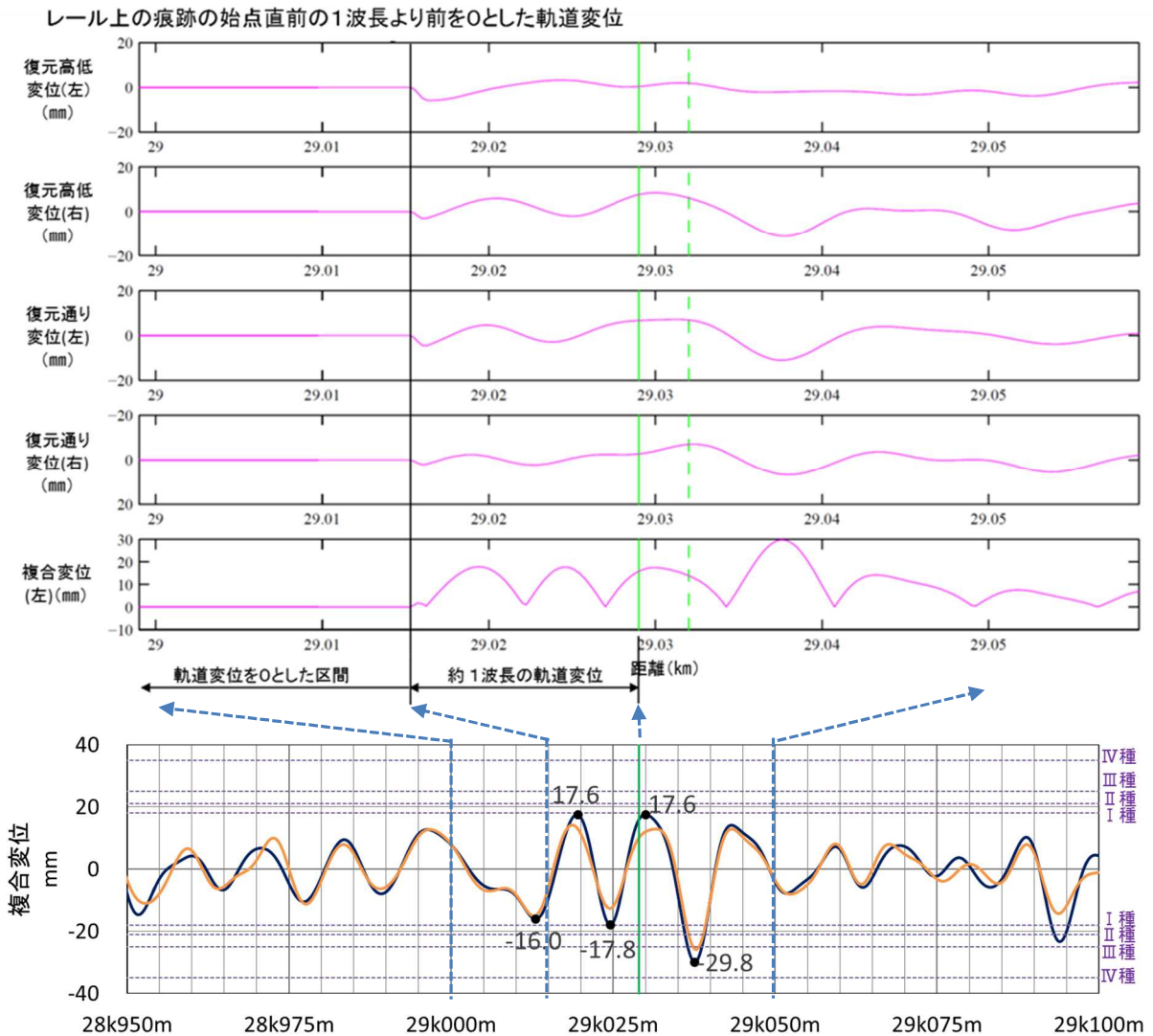
付図 2 3 数値シミュレーションによる本事故の再現結果 (軌道変位に高低変位のみ入力した場合)



付図24 数値シミュレーションによる本事故の再現結果
 (レール上の痕跡の始点の1波長手前からのみ軌道変位が
 あったとした場合) (その1)



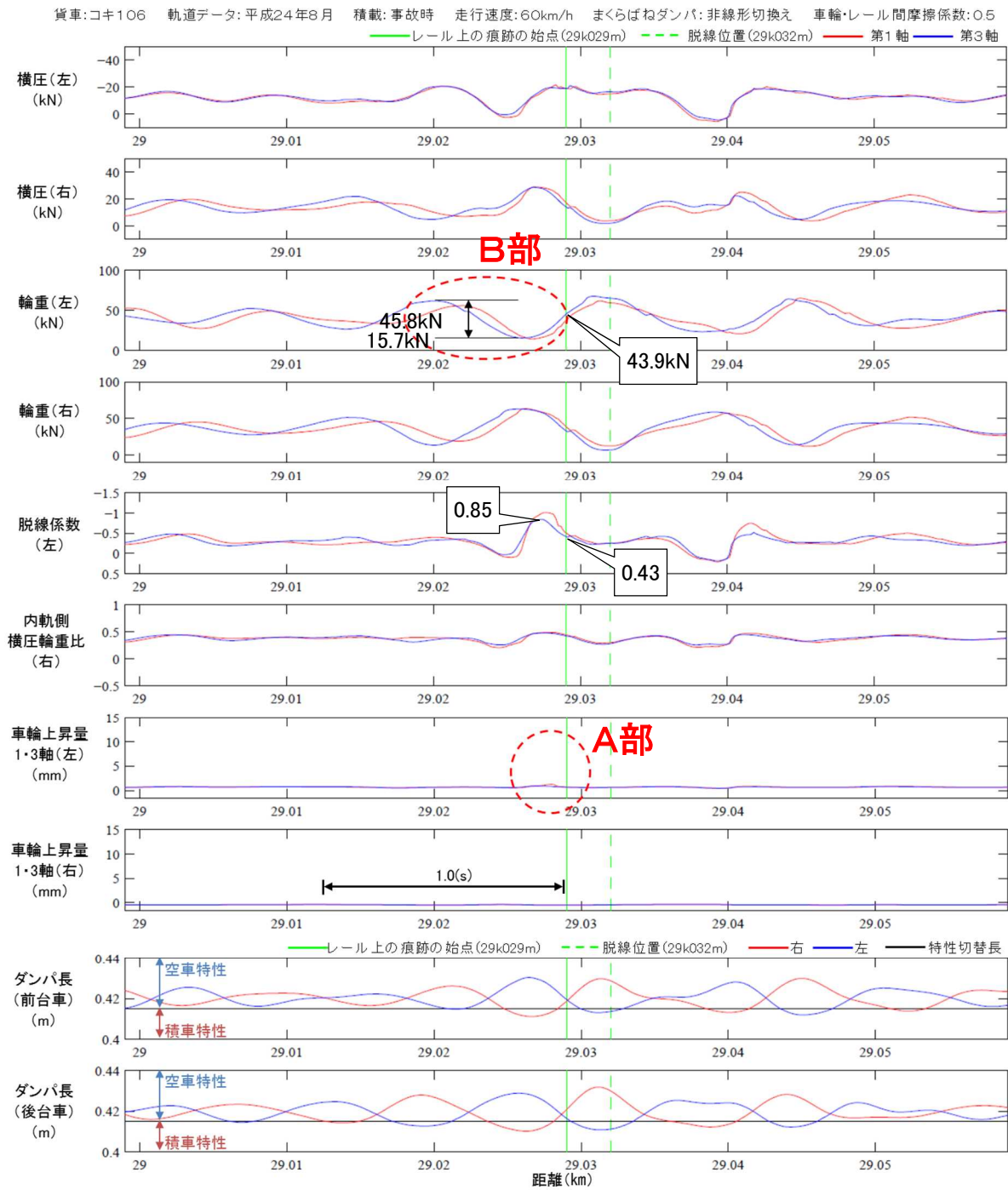
付図24 数値シミュレーションによる本事故の再現結果
 (レール上の痕跡の始点の1波長手前からのみ軌道変位があったとした場合) (その2、入力した変位置)



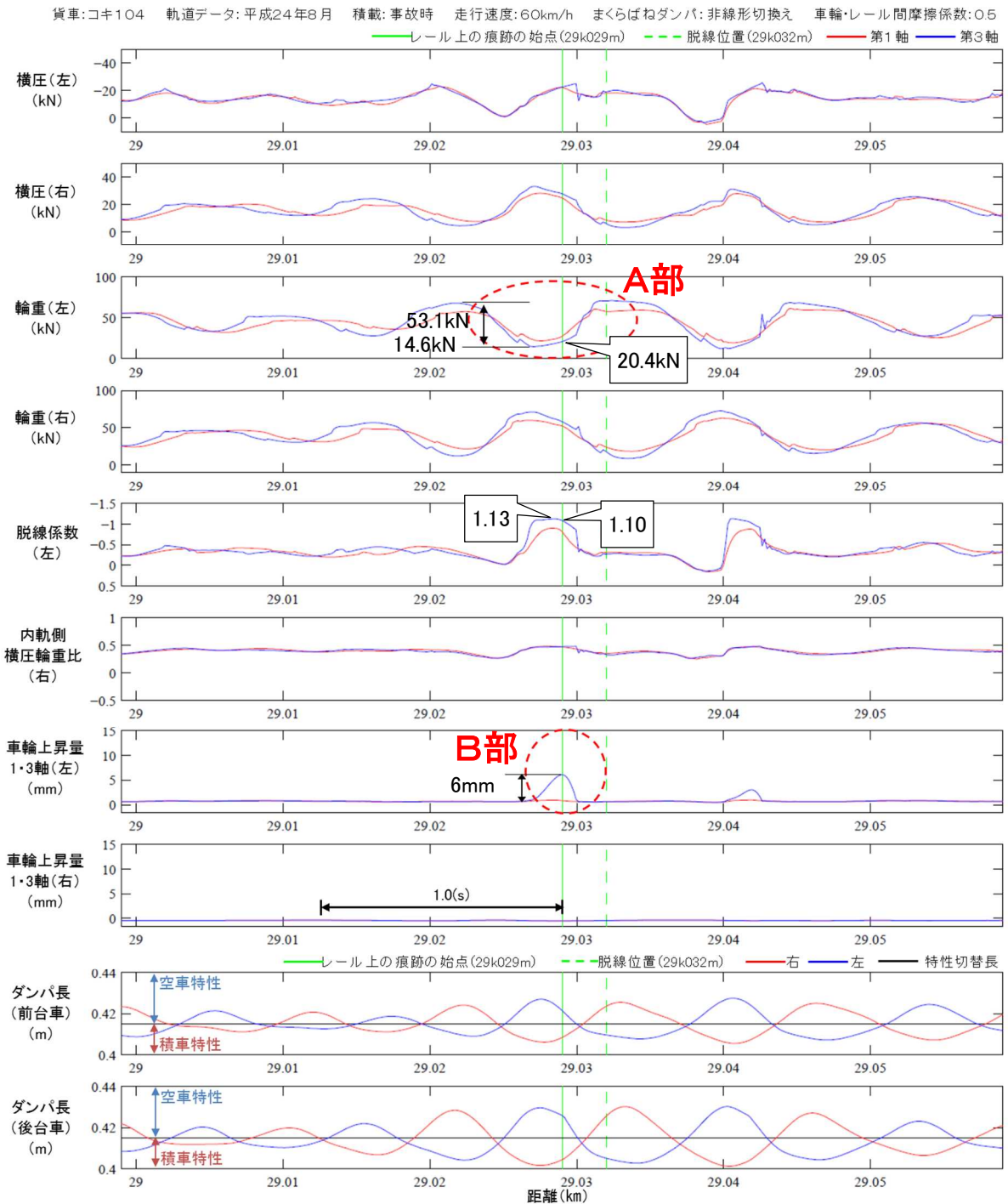
「付図10 事故現場付近の軌道変位の状況」の左レールの複合変位を例にすると、レール上の痕跡の始点から約1波長手前からのみ軌道変位を入力し、それより手前の軌道変位を0にしたものが5段目の複合変位(左)の波形である(変位置は絶対値である)。

複合変位は通り変位と高低変位(復元波形)の左右差(水準変位)から求められることから、軌道変位1波長分のみ変位を入力するに当たり、複合変位元となる通り変位及び高低変位の左右レールそれぞれの波形(1段目から4段目の波形)を入力した。

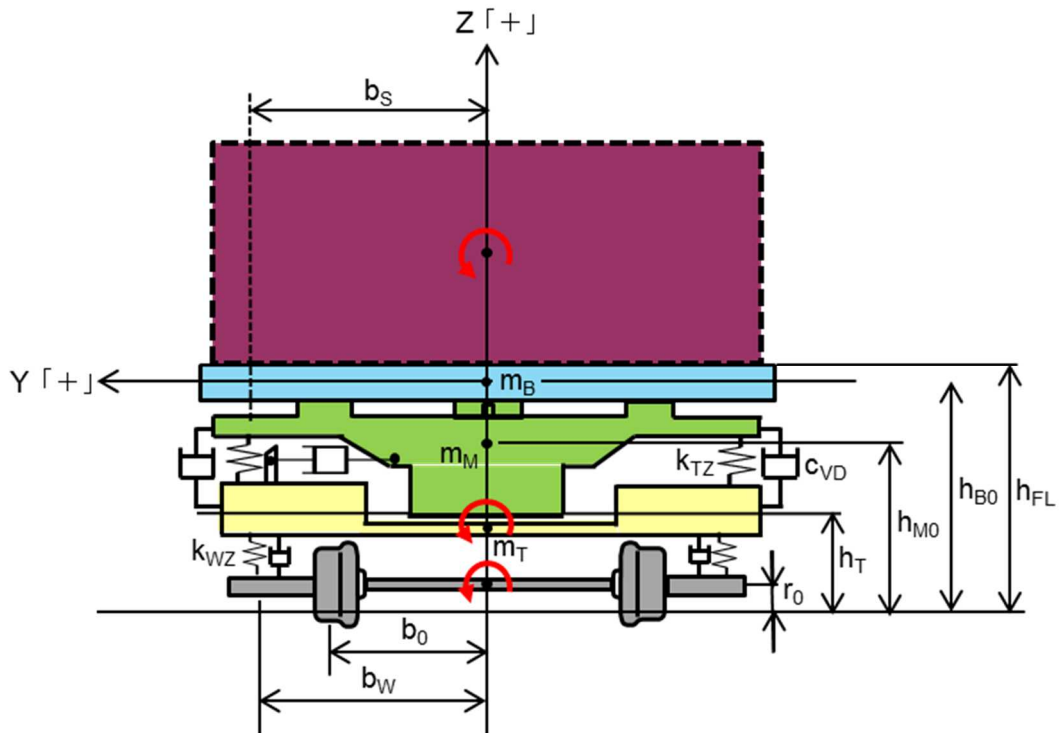
付図 2 5 数値シミュレーションによる本事故の再現結果 (パレットを8段積載した場合)



付図 2 6 数値シミュレーションによる本事故の再現結果 (車両形式をコキ104形式とした場合)



付図 2 7 貨車のロール運動に関する半車両モデルの概念図



(自由度)

- ・自由度は、車体と台車枠の、左右と上下の並進及びロールに限定する。

(車体)

- ・車体は半分の長さとする。
- ・走行方向の軸のまわりのねじれは考慮しない。一つの剛体とする。

(台車)

- ・台車は一つとする。
- ・台車枠とつなぎばりは剛体とする。
- ・輪軸は自由度をもたず、輪軸のロールを入力する。

(コンテナ、積荷)

- ・コンテナ 2.5 個分とその積荷を考慮する。
- ・積荷は本件貨車の 1 両分を合計して単純に半分にする。
- ・積荷の形状は幅 2.1 m の荷物を積み上げた直方体のものを想定する。

(まくらばねダンパ)

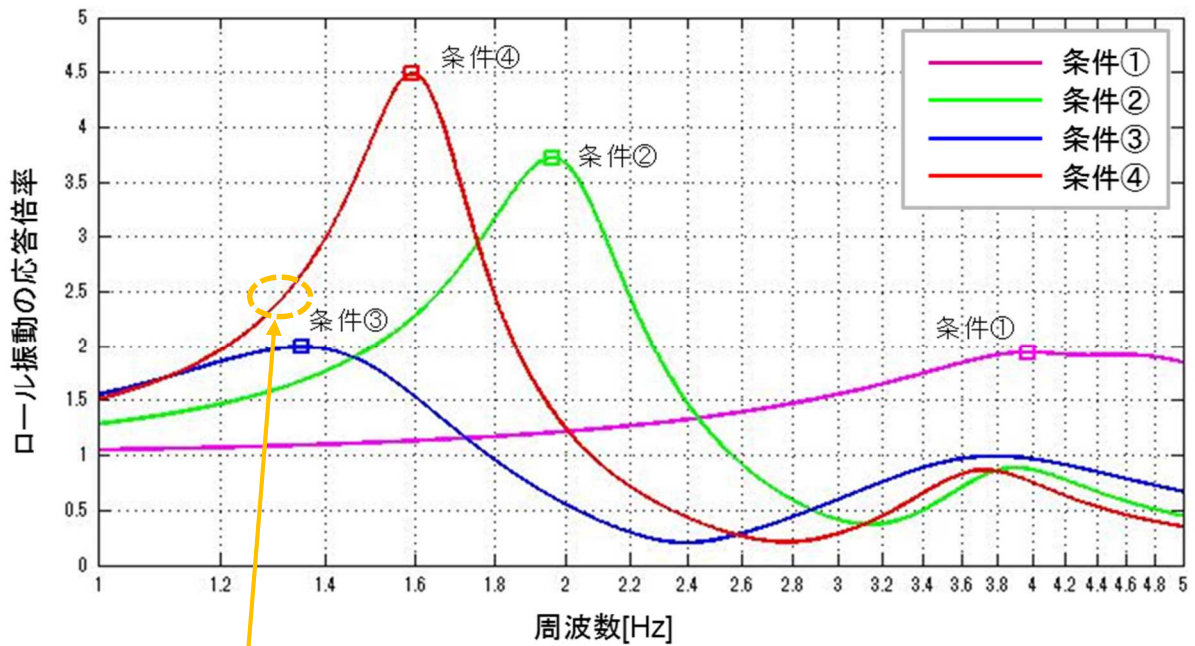
- ・線形の減衰特性とする。(非線形、切替え特性をもたない)

(入出力)

- ・輪軸に与えるロール角度を入力とする。
- ・車体のロール角度を出力とする。

付図 2 8 コキ 1 0 6 形式の積載条件ごとのロール振動の
応答倍率

	積載の状態	減衰特性
条件①	空車状態	空車特性
条件②	空コンテナ積載（空コンテナ5つ）	空車特性
条件③	走行試験（3.5 t 積載コンテナ5つ）	積車特性
条件④	本事故時の積載（パレット積載コンテナ3つ 空コンテナ2つ）	空車特性

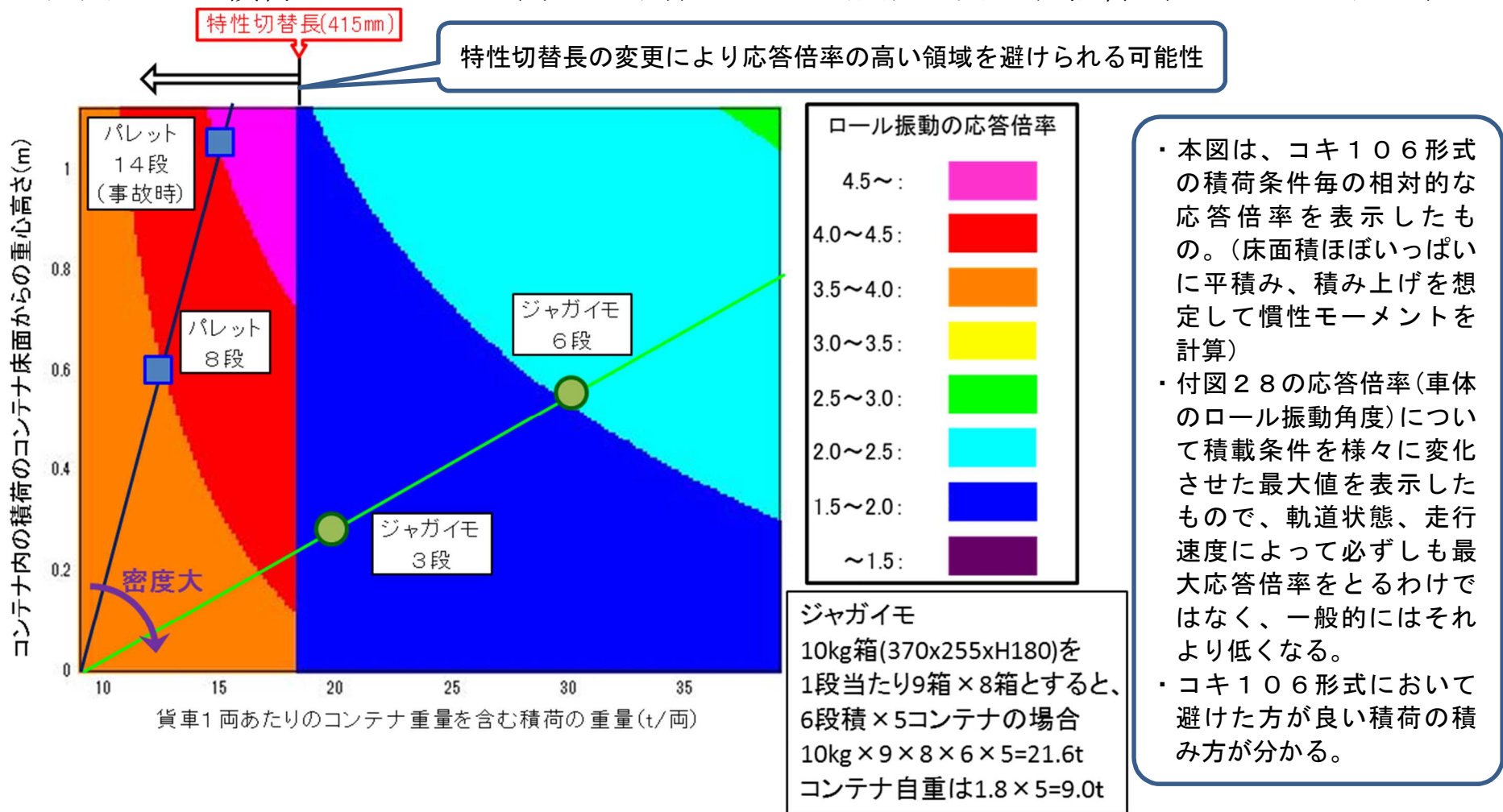


本事故発生時の車体のロール振動は、卓越周波数が約 1.3 Hz と考えられ、応答倍率は約 2.5 倍となる。

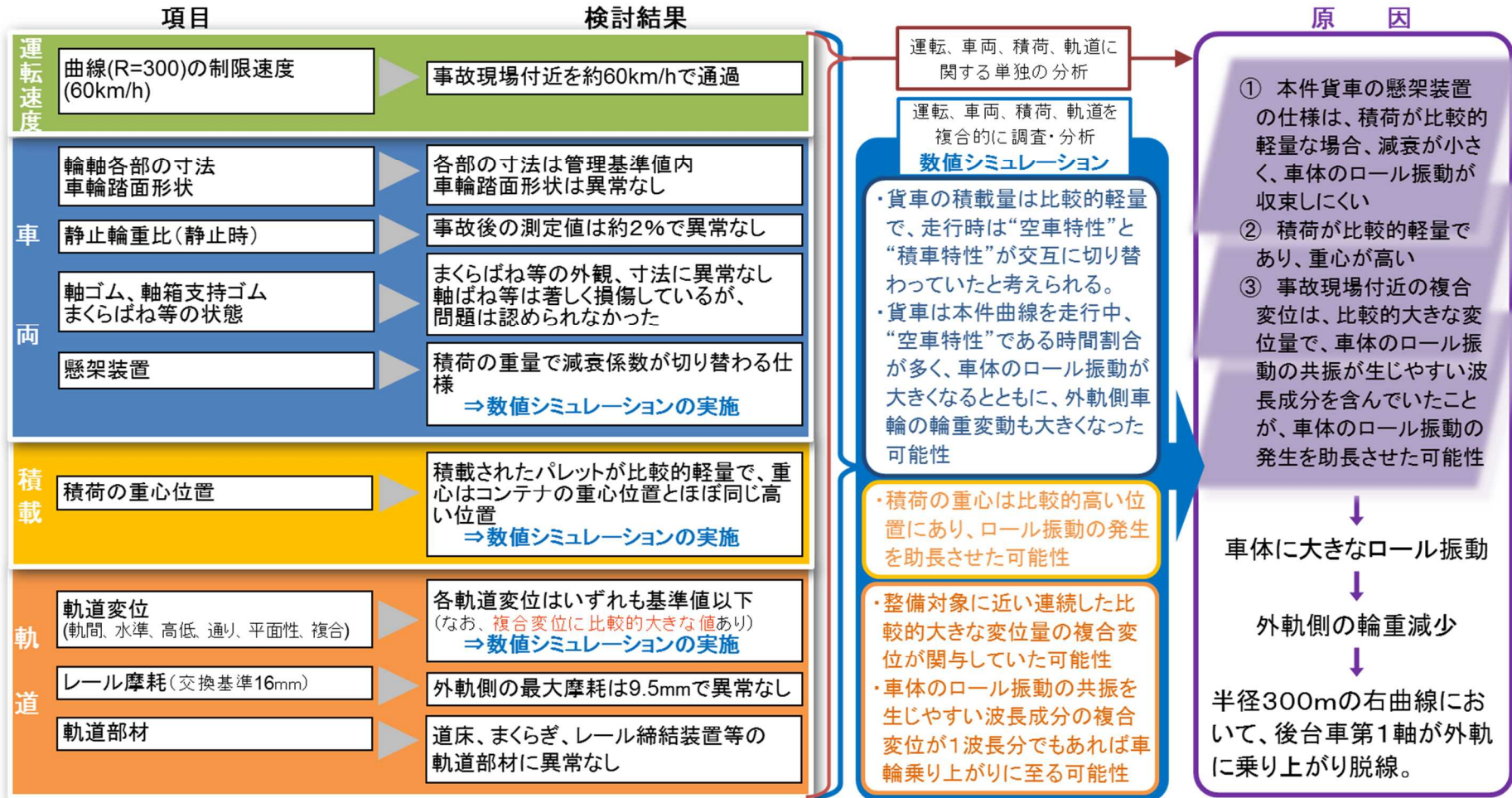
	条件①	条件②	条件③	条件④
応答倍率	1.94	3.72	1.99	4.49
周波数 [Hz]	3.98	1.96	1.35	1.59

※ 応答倍率とは、軌道変位（水準変位）に相当するロール振動を輪軸に入力し、これによって生じる車体のロール振動角度を出力とし、輪軸のロール角度に対する振幅の比をいう。

付図 2 9 積荷の重量と重心高さが車体のロール振動に及ぼす影響 (コキ 1 0 6 形式)



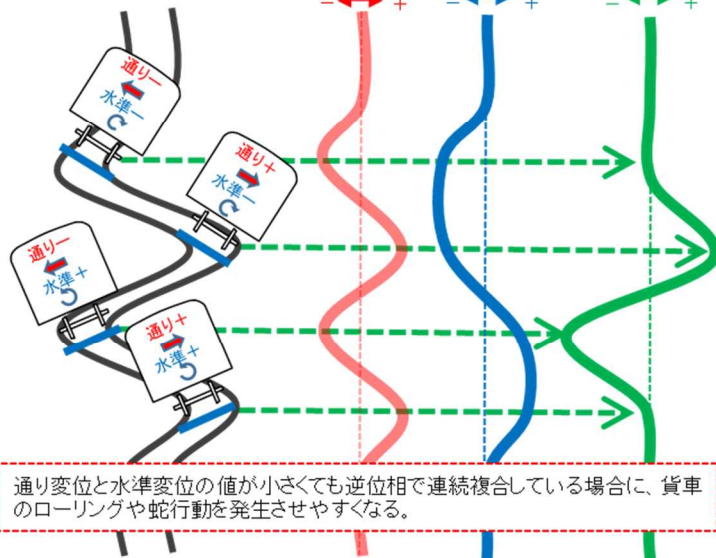
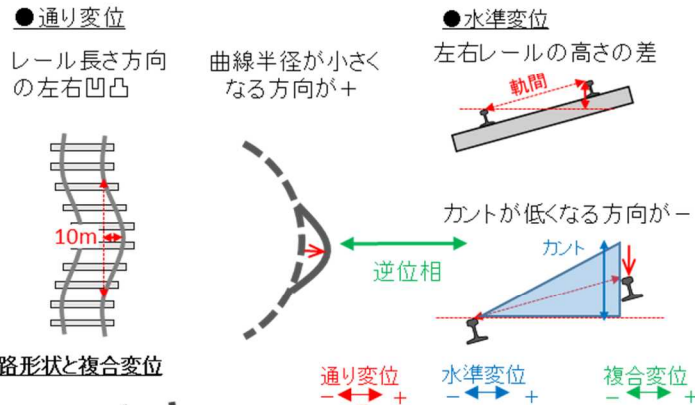
参考図1 脱線の要因の推定



参考図2 複合変位について

複合変位とは
軌道変位の管理指標の一つ。通り変位と水準変位が逆位相で複合している変位
算出式： $複合変位 = 通り変位 - 1.5 \times 水準変位$

通り変位と水準変位の逆位相



導入の経緯:

貨車の本線走行中の乗り上がり脱線は昭和50年代半ばまで頻発しており、これらの脱線事故の原因は、競合脱線(車両・軌道ともに管理基準値内であるが、様々な要素が競合することによって発生した脱線)とされた。昭和38年11月には貨車の脱線による多重衝突事故となり死者161名を出す大惨事となった東海道本線鶴見事故が発生し、当時の国鉄は調査委員会を発足させ、北海道の根室本線の廃線跡を利用した狩勝実験線での実車による脱線再現試験やシミュレーションなどにより、種々の検討を行った。その結果車両・軌道両面からの競合脱線防止対策が確立された。

複合変位は軌道に関する防止対策の一つで昭和40~50年代に掛けて研究され、全国の貨物列車走行線区に適用された。昭和57年には複合変位の整備標準が制定されほぼ現在の形となり、国鉄分割民営化以降は各JR会社の社内規程に盛り込まれ実施されている。

複合変位の管理基準

複合変位が大きく、繰り返されるほど、車両がローリング共振を起し脱線しやすくなることから、下記の基準により管理している。

種別	波数	波高	波形例
第I種	80m間に4箇所以上	18mm以上	
第II種	60m間に3箇所以上	21mm以上	
第III種	30m間に2箇所以上	25mm以上	
第IV種	1箇所	35mm以上	

※ 左右のピーク位置の離れが10m未満の場合は一つの複合変位と見なし、左右の最大値とする。

【補修時期】

- ・基準に達した場合は1箇月以内に補修する。
- ・基準に達した複合変位種別が重複して存在する場合や、変位が著しくその基準値を超過する場合は、補修の時期を早める。