

鉄道重大インシデント調査報告書

I 西日本旅客鉄道株式会社芸備線矢賀駅～戸坂駅間における鉄道重大インシデント

(「車両の走行装置、ブレーキ装置、電気装置、連結装置、運転保安設備等に列車の運転の安全に支障を及ぼす故障、損傷、破壊等が生じた事態」に係る鉄道重大インシデント)

II 大阪市交通局7号線(長堀鶴見緑地線)門真南駅構内における鉄道重大インシデント

(「閉そくの取扱いを完了しないうちに、当該閉そく区間を運転する目的で列車が走行した事態」に係る鉄道重大インシデント)

平成23年10月28日

運輸安全委員会

I 西日本旅客鉄道株式会社芸備線矢賀駅～戸坂駅間における鉄道重大インシデント

(「車両の走行装置、ブレーキ装置、電気装置、連結装置、運転保安設備等に列車の運転の安全に支障を及ぼす故障、損傷、破壊等が生じた事態」に係る鉄道重大インシデント)

本報告書の調査は、本件鉄道重大インシデントに関し、運輸安全委員会設置法に基づき、運輸安全委員会により、鉄道事故等の防止に寄与することを目的として行われたものであり、本事案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」

鉄道重大インシデント調査報告書

鉄道事業者名：西日本旅客鉄道株式会社

インシデント種類：車両障害（鉄道事故等報告規則第4条第1項第8号の「車両の走行装置、ブレーキ装置、電気装置、連結装置、運転保安設備等に列車の運転の安全に支障を及ぼす故障、損傷、破壊等が生じた事態」に係る鉄道重大インシデント）

発生日時：平成22年10月29日 23時11分ごろ

発生場所：広島県広島市

芸備線 やが 矢賀駅～へさか 戸坂駅間（単線）

びっちゅうこうじろ 備中神代駅起点152k400m付近

平成23年9月26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 岡本 美 好

目 次

1	鉄道重大インシデント調査の経過	1
1.1	鉄道重大インシデントの概要	1
1.2	鉄道重大インシデント調査の概要	1
1.2.1	調査組織	1
1.2.2	調査の実施時期	1
1.2.3	原因関係者からの意見聴取	1
2	事実情報	2
2.1	運行の経過	2
2.2	鉄道施設に関する情報	4
2.3	車両に関する情報	4
2.3.1	車両の概要	4
2.3.2	本件車両の検査等の履歴	4
2.3.3	ドア及び戸閉め機械の構造等に関する情報	5
2.3.4	ドア開閉の仕組み	7
2.3.5	戸閉めスイッチの作動と戸閉め表示灯の仕組み	7
2.3.6	本件車両の運行範囲とドアの開閉頻度	7
2.3.7	運転状況記録装置の状況	8
2.3.8	接手ねじの強度に関する情報	8
2.4	本件ドア及び戸閉め機械についての調査	8
2.4.1	本件ドアの調査	8
2.4.2	本件戸閉め機械の分解調査	9
2.4.3	本件接手ねじの破断面の電子顕微鏡による観察	9
2.4.4	本件接手ねじの化学成分及び硬さ	10
2.4.5	接手ねじに使用されていた材料	10
2.5	接手ねじに発生する応力の測定	11
2.5.1	通常のドア開閉時に発生する応力	12
2.5.2	ドアに物が挟まれた場合に発生する応力	12
2.5.3	戸吊り金具や二又、ピンの接触部に給油した場合に発生する応力	12
2.5.4	接手ねじの形状や構造を変えた場合の応力	13
2.5.4.1	接手ねじの形状を変更した場合の応力	13
2.5.4.2	接手ねじの形状を変更し、戸吊り金具ピン取付穴を削正した場合の応力	13
2.6	戸閉め機械の車体への取付け状態に関する情報	14

2.6.1	戸閉め機械と戸吊り金具についての状況	14
2.6.2	定期検査におけるドアの立付けに関する情報	14
2.6.3	戸閉め機械の取付け、二又金具と戸吊り金具の接続に関する情報	15
2.6.4	定期検査におけるドア及び戸閉め機械の修繕の状況	16
2.7	本重大インシデントと類似の事象についての情報	16
2.7.1	接手ねじの改良以前に発生した事象	16
2.7.2	接手ねじの改良後に発生した事象	17
2.7.3	本重大インシデント以降に発生した事象	17
2.7.4	他事業者の状況	17
2.7.5	接手ねじの変更に関する経緯	18
2.8	乗務員に関する情報	19
2.9	気象に関する情報	19
3	分析	19
3.1	走行中にドアが開いた状況に関する分析	19
3.2	本件接手ねじの破断等に関する分析	20
3.2.1	破断面の様相に関する分析	20
3.2.2	破断位置に関する分析	20
3.2.3	材料に関する分析	21
3.3	接手ねじに発生する応力の測定結果に関する分析	21
3.4	接手ねじに曲げの力が作用する状況に関する分析	21
3.4.1	ドア閉状態における曲げの力の作用	21
3.4.2	戸当たり衝撃による曲げの力の作用	22
3.4.3	戸挟みによる曲げの力の作用	22
3.5	接手ねじの強度に関する分析	22
3.6	接手ねじの破断に関する分析	23
3.6.1	本件接手ねじの破断に関する分析	23
3.6.2	本重大インシデントと類似の事象に関する分析	23
3.7	戸閉め機械取付けに関する分析	24
3.8	接手ねじ破断の防止に関する分析	24
3.8.1	接手ねじに発生する応力の低減に関する項目	24
3.8.2	接手ねじの強度向上に関する項目	25
3.9	戸閉め機械の設計管理等に関する分析	25
4	結論	26
4.1	分析の要約	26
4.2	原因	27

5	参考事項	27
5.1	再発防止策に関する事項	27
5.2	大村線報告書に対する対応	28
5.2.1	大村線報告書の周知	28
5.2.2	大村線報告書の所見に対する対応	28

添付資料

付図 1	芸備線の路線図.....	29
付図 2	重大インシデント発生現場付近の地形図.....	29
付図 3	本件列車の運転台と戸閉め表示灯の状況.....	30
付図 4	矢賀駅～戸坂駅間の線路状況等.....	30
付図 5	戸閉め機械と戸吊り金具等の概略図.....	31
付図 6	戸閉め機械と点検口における戸吊り金具と二又の状況.....	33
付図 7	接手ねじの破断面の電子顕微鏡観察.....	34
付図 8	ひずみゲージを用いた接手ねじに発生する応力の測定.....	36
付図 9	接手ねじに発生した応力.....	38
付図 10	ドアを閉めるときの解析イメージ.....	40
付属資料	本重大インシデント発生要因の分析概要図.....	41

1 鉄道重大インシデント調査の経過

1.1 鉄道重大インシデントの概要

西日本旅客鉄道株式会社の芸備線広島駅発下深川駅行き2両編成の上り気第3874D列車は、平成22年10月29日（金）、矢賀駅を定刻（23時07分）に出発した。列車の運転士は速度約70km/hで走行中、次の戸坂駅到着のためのブレーキをかけたところ、戸閉め表示灯の滅灯を認めたため、直ちに非常ブレーキをかけて停止した。車内を確認したところ、前部車両の進行前寄り左側（前後左右は列車進行方向を基準とする。）の旅客用乗降口の扉が約5cm開いていた。運転士は同旅客用乗降口の扉を鎖錠し、乗務中の車掌見習いを監視のために配置し、運転を再開した。同列車は下深川駅まで運転された後運行を取りやめ、広島運転所に回送された。同列車には、乗客約130名及び乗務員3名が乗車していたが、旅客用乗降口の扉が開いたことによる乗客の転落はなかった。

1.2 鉄道重大インシデント調査の概要

1.2.1 調査組織

本件は、鉄道事故等報告規則第4条第1項第8号の「車両の走行装置、ブレーキ装置、電気装置、連結装置、運転保安設備等に列車の運転の安全に支障を及ぼす故障、損傷、破壊等が生じた事態」（車両障害）に該当し、列車の走行中に客室の旅客用乗降口の扉が開いたものであり、運輸安全委員会設置法施行規則第2条第6号の定める特に異例と認められるものとして調査対象となった。

運輸安全委員会は、平成22年10月30日、本重大インシデント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た。

中国運輸局は、本重大インシデントの調査を支援するため、職員を現場に派遣した。

1.2.2 調査の実施時期

平成22年11月1日	車両調査
平成22年11月2日	口述聴取、現場調査及び車両調査
平成23年1月27日	類似事象調査

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

本重大インシデントに至るまでの経過は、西日本旅客鉄道株式会社（以下「同社」という。）の気第3874D列車（以下「本件列車」という。）の運転士（以下「本件運転士」という。）、車掌及び車掌見習いによれば、概略次のとおりであった。

(1) 本件運転士

広島運転所（車両基地）において、本件列車の旅客用乗降口の扉（以下「ドア」という。）の動作確認を含む出区点検を行い、異常は認められなかったため、そのまま広島運転所から出区し広島駅に据え付けた。据え付け後、進行方向が変わるため運転台を交換し、広島駅を定刻（23時03分）に出発し、次の矢賀駅も定刻（23時07分）に出発した。

矢賀駅出発後の運転取扱いについては、駅間のトンネル（中山隧道）までは上り勾配であるため力行ノッチを扱い、トンネルの手前で惰行とした。トンネル通過後は下り勾配となり半径360mの右カーブがあるため、速度制限を超えないように注意して運転を行った。

そして、次の停車駅である戸坂駅（備中神代駅起点151k930m、以下「備中神代駅起点」は省略。）に近づいたため、山根踏切（152k427m）付近で駅停車のための常用ブレーキを操作した。その後、戸閉め表示灯^{*1}の滅灯を確認したので、非常ブレーキを扱い停止手配を取った。戸坂駅ホームの手前約100mに停止後、車内の状況を確認したところ、先頭車両（以下「本件車両」という。）の前寄り左側のドア（以下「本件ドア」という。）が約5cm開いていた。手で確認すると、本件ドアの左側については圧がかかっているようで動かず、本件ドアの右側は手で開く状態であった。転落の可能性が考えられたので、付近の乗客に様子を聞くと「転落者はいない」とのことだった。

状況を指令に報告し、本件ドアの締切り扱いの指示を受けたので、本件ドアを鎖錠^{*2}し、車掌見習いを監視のために本件ドア付近に配置して、運転を再開した。戸坂駅到着後、車掌の操作により左側のドアが開き、旅客の乗降が終わりドアが閉まっても、戸閉め表示灯は点灯しなかった。指令に状況を報告後、非連動運転^{*3}の許可を受け、車掌と共に本件列車の全てのドアが閉まっているのを手で確認した後、運転を再開した。次の安芸矢口駅到着時に、指令から本

^{*1} 戸閉め表示灯は、運転台の計器盤上部に「戸」と表示されたランプで、列車の全てのドアが閉まっているときに点灯する。（付図3参照）

^{*2} 「鎖錠」とは、ドアに鍵をかけて固定することをいう。

^{*3} 「非連動運転」とは、通常ドアが開いた状態では列車は力行することができないが、同状態でも力行できるように機器を操作し、運転する方法のことである。

件車両の全てのドアを締切り扱いとするよう指示を受けたので、本件車両のドアを全て鎖錠し締切り扱いとし、乗客を後部車両に移動させ、運転を再開した。終点の下深川駅に到着後、指令から回送の指示を受けたので、回送として広島駅に向けて出発し、広島運転所に入区した。

(2) 車掌

車掌見習いの指導をしており、車掌見習いと共に本件列車には広島駅から乗務した。車内放送やドアの操作は車掌見習いが行っており、広島駅では進行方向右側となるドアが開閉したが、ドアの動作に異常は感じなかった。次の矢賀駅も右側のドアが開閉したが、同じく、ドアの動作に異常は感じなかった。

矢賀駅出発後、車掌見習いが次駅（戸坂駅）の到着案内放送をした後で、本件列車のブレーキがかかり、停止後、本件運転士から車側灯を確認するよう依頼があったので、後部車両の運転室の窓から本件車両の左側の車側灯が点灯しているのを確認し、本件運転士にその旨を報告した。車内から本件ドアが開いている状況を本件運転士と共に確認し、本件ドアを本件運転士が鎖錠し、車掌見習いが本件ドア付近を監視することとなったので、以降の車内放送とドアの操作は自分が行った。

戸坂駅に到着し、左側のドアを開け、旅客の乗降完了後ドアを閉めたが、本件車両の車側灯は点灯したままであった。本件運転士が指令から非連動運転の指示を受けたので、本件運転士と共に本件列車の全てのドアが閉まっていることを確認し、出発した。

(3) 車掌見習い

10月19日から乗務を開始しており、車掌の指導の下で車内放送とドア操作を担当していた。広島駅や矢賀駅でのドア操作では、異常はなかった。戸坂駅に到着する前にトンネルを抜けたところで、到着前放送をした後、ブレーキがかかり本件列車が停車した。

その後、車掌と共に本件車両の車側灯の点灯を確認し、車内から本件ドアが開いている状況を確認した。本件ドアの鎖錠後、本件運転士から本件ドア付近を監視しているよう指示があったので、下深川駅到着まで本件ドア付近で監視をしていた。

なお、本重大インシデントの発生時刻は、23時11分ごろであった。

(付図1 芸備線の路線図、付図2 重大インシデント発生現場付近の地形図、付図3 本件列車の運転台と戸閉め表示灯の状況、付図5 戸閉め機械と戸吊り金具等の概略図 参照)

ている。なお、直近の検査である重要部検査では、本件ドアの消耗部（溝金^{*4}）に関する修繕が必要なため本件ドアを取り外し、そのために戸閉め機械（以下「本件戸閉め機械」という。）を取り外しているが、本件戸閉め機械の分解検査は実施していない。

(1) 本件戸閉め機械の修繕履歴に関する情報

同社によると、平成12年12月の全般検査において、2.3.3(2)及び2.7に後述する改良型の接手ねじがついたピストン棒に取り替えている。

(2) 本件ドアの修繕履歴に関する情報

本件ドアの戸車は、製造当初は鉄製が取り付けられていたが、保守性の向上のため、樹脂製に変更されている。なお、通常の消耗品（戸先ゴム^{*5}、戸尻ゴム^{*6}、戸車、溝金等）と考えられる以外の部材については、新製から本重大インシデントに至るまで、取替や加修の実績はなかった。

(3) 車体の修繕履歴に関する情報

本件車両は、延命改造工事として平成15年3月の重要部検査において、2.3.3(1)に後述する上レールや脱輪防止金具を新品に取り替えている。なお、下レールは再使用している。

(4) 戸閉め機械についての情報

本件戸閉め機械と同形の戸閉め機械についての情報は、以下のとおりである。

形 式	TK106A
製造初年	昭和41年
使用車両	キハ47形、キハ41形、キハ66・67形
メーカ	A社

なお、同社には平成23年4月現在、キハ47形は184両、キハ41形は5両が在籍している。

2.3.3 ドア及び戸閉め機械の構造等に関する情報

本件車両は、旧日本国有鉄道（以下「旧国鉄」という。）時代に新製され、昭和62年4月に同社に承継されたものである。以下の記述は、同社より提供された図面を参考とした。

*4 「溝金」とは、ドアが下レールに案内される部分のことをいう。

*5 「戸先ゴム」とは、戸先（ドアの先端）に取り付けたゴム材のことをいう。

*6 「戸尻ゴム」とは、ドアを開閉する場合、その衝撃を緩和するために戸尻（ドアの後端）に取り付けたゴム材のことをいう。

(1) ドアの構造

本件車両のドアは両引戸*7であり、付図5（その1）に示すように、戸吊り金具に取り付けられた戸車が車体に敷設された上レールを走行する吊り戸式となっている。ドアの上部には戸閉め機械が設けられており、戸閉め機械とドアは、‘ピストン棒に取り付けられた金具’（以下「二又」という。）と戸尻側の戸吊り金具を、(3)に後述するピンにより連結する構造となっている。

なお、本報告書においては、車内からドアを見て左側を「L側」、同じく右側を「R側」という。ドアのストロークはL側及びR側ドア共に550mmであり、ドアの質量は共に約40kgである。

(2) 戸閉め機械の構造

戸閉め機械には、ドアを開閉するシリンダ、ピストン棒及び圧縮空気を給排する電磁弁が設けられている。ピストンの直径は36mm、ピストン棒の直径は20mmである。

ピストン棒の先端には、二又を取り付ける接手ねじが皿リベットのかしめ加工により取り付けられ、二又を接手ねじにねじ込むことにより、ピストン棒と二又からなる長さを調整する構造となっている。二又は、接手ねじに対して六角ナット及び折り座金で固定されている。

接手ねじのねじ部は直径12mmの並目ねじであり、材質は、一般構造用圧延鋼材であるSS400と定められている。

(3) 二又と戸吊り金具のピン取付穴について

付図5（その2）に示すように、二又には直径10（寸法許容差+0.027、-0）mmの丸穴が、戸尻側の戸吊り金具には縦方向の寸法（以下「a寸法」という。）が20mmの小判形の穴が設けられ、両者の穴を重ね合わせ直径10（寸法許容差-0.280、-0.370）mmのピンを貫通させることにより、二又と戸吊り金具を連結する構造となっている。

ここで、戸吊り金具のピン取付穴の中心を基準とした場合、二又のピン取付穴の中心と上下方向のずれが±5mm以内であれば、ピンを組み込むことができる。また、このずれが5mmよりも小さく、ピンと戸吊り金具の穴との間に上下方向の隙間があれば、その隙間分戸吊り金具が上下に変位しても上下方向の力は摩擦力だけしか伝達しない構造となっている。以下、この上下方向のずれの寸法を「b寸法」、隙間の寸法を「c寸法」という。

*7 「両引戸」とは、互いに反対方向に開閉する2枚の引戸のことをいう。

(4) 戸閉め機械の取付ボルト

戸閉め機械は付図5（その1）に示すように、合計8本の取付ボルトで車体に取り付けられている。

(5) 戸車の脱輪防止金具

戸車が上レールから脱輪するのを防ぐため、上レールの上部に脱輪防止金具が設置されている。同社では、戸車と脱輪防止金具の隙間を2mm以下で管理している。

2.3.4 ドア開閉の仕組み

車掌スイッチによるドア開閉の仕組みは、以下のとおりである。

(1) 開扉

車掌スイッチで開操作を行うと2.3.3(2)に記述した電磁弁が作動し、戸閉め機械のシリンダに元空気タンクから圧縮空気が供給され、ピストン棒が動くことによりドアが開く。なお、本件車両の元空気タンクの圧力は、590～690kPaの範囲になるよう調整されている。

(2) 閉扉

車掌スイッチで閉操作を行うと、シリンダには元空気タンクからの圧縮空気が開扉時とは逆方向に供給され、ピストン棒が動くことによりドアが閉まる。

2.3.5 戸閉めスイッチの作動と戸閉め表示灯の仕組み

(1) 戸閉めスイッチ

戸閉めスイッチは、閉扉の際、付図5（その1）に示すように、L側ドアに取り付けられた補助金具が車体側に取り付けられたてこ吊りの中央部を、R側ドアに取り付けられた補助金具がてこの下部を、それぞれ押すことにより、てこの上部が戸閉めスイッチの押軸を押し込み、内部の接点が転換する仕組みとなっている。これにより、L側ドア又はR側ドアのどちらか一方が開いた場合でも、戸閉めスイッチが開扉を検出する。

(2) 戸閉め表示灯

戸閉めスイッチが閉扉を検出することにより、運転台に設けられた戸閉め表示灯が点灯する。戸閉め表示灯は、列車のドアが1か所でも開いた場合は滅灯する。

2.3.6 本件車両の運行範囲とドアの開閉頻度

本件車両は、芸備線、山陰線、山口線において運行され、一日当たりの走行距離

は平均で320kmである。(平成22年11月現在の情報)

本件ドアの一日当たりの開閉回数は、停車駅においてプラットホーム側の全てのドアを開閉し、左右のドアは均等に扱われるものと想定した場合、平均で約50回程度である。

2.3.7 運転状況記録装置の状況

本件車両には運転状況記録装置が搭載されており、力行やブレーキ等の接点情報、戸閉め表示灯、速度発電機からの速度情報、走行距離等のデータが0.2秒間隔で記録されている。記録される時刻は、装置の電源投入時にGPSで補正され、また、速度情報や走行距離等の演算の基本となる車輪径には853mmというほぼ実測値と等しい数値が設定されていた。走行距離は、速度情報と車輪径を基に演算し積算されていくが、装置の電源投入時またはドアが開いたときに、0mにリセットされる。

この運転状況記録装置の記録によると、走行中に戸閉め表示灯が滅灯したときの時刻は23時11分42秒、走行速度は69km/h、場所は矢賀駅を出発してから4,101m走行した地点であった。

2.3.8 接手ねじの強度に関する情報

A社によれば、ピストン推力により接手ねじに発生する最大の引張応力は戸閉め機械のシリンダ内に約880kPaの空気を供給してドアを閉めたときに7.35MPa(応力集中は考慮されていない)となることとあり、この値はA社が基準としたSS400に相当する材料の疲労限度の約110MPaに対して十分小さいこととであった。

2.4 本件ドア及び戸閉め機械についての調査

本件ドアの調査にあたり、本件ドアの取付状態や各部の寸法の調査、本件戸閉め機械の接手ねじ以外の部品の調査及び破断した接手ねじ(以下「本件接手ねじ」という。)の破断面観察や材質調査を行った。

2.4.1 本件ドアの調査

(1) 外観及び取付状態等

ドアの外観に傷などの異常は見られず、2.3.3(1)に記述した上レールや戸車及び下レール等に、異常な変形や摩耗等は認められなかった。

(2) 戸吊り金具のa寸法及びピン取付穴の形状

ドアのピンを取り外し、a寸法を測定したところ、L側ドアでは20.2mm、R側ドアでは20.9mmであった。付図6に示すように、R側ドアのピ

ン取付穴の一部が摩耗によりドア開閉方向に0.7mm 拡大していた。なお、R側ドアのピンの直径は9.6mm であり、異常な摩耗等は認められなかった。

(3) b寸法の状況

b寸法については、ピンを挿入して圧縮空気を供給し閉扉の状態で測定したが、R側ドアについては接手ねじ折損により二又がないため、ピストン軸中心を基準とした。この場合、R側ドアでは-4.5mm、L側ドアでは-4.9mm であった。後日R側ドア用ピストン棒に新しい接手ねじを取り付け再測定したところ、R側ドアでは-4.8mm であった。

(4) c寸法の状況

まず、上記(3)と同様の状態における二又の位置を基準とし、次に、圧縮空気の供給を断ち、二又が点検口の位置になるようピストン棒を伸長させ、その状態で、ピンが戸吊り金具に接触するまで二又を下方に動かし、その位置を記録する。この記録した位置と先程の基準とした位置の差を読み取ることにより、c寸法を求めた。測定結果は0mm であった。(付図6参照)

(5) 手動によるドアの開閉状態

戸吊り金具のピンを取り外し、本件戸閉め機械とドアを分離した状態でドアを手動により開閉させたが、異音やガタつきなどの異常は認められず、滑らかにドアを開閉させることができた。

(6) 戸閉めスイッチの開扉検出

戸吊り金具のピンを挿入し正常に接続された状態では、ドアの隙間が7mm となったときに、戸閉めスイッチは開扉を検出した。

2.4.2 本件戸閉め機械の分解調査

本件戸閉め機械を分解し、シリンダ、ピストン棒等について調査を実施したが、特に異常は認められなかった。

2.4.3 本件接手ねじの破断面の電子顕微鏡による観察

破断面の調査及び2.4.4に後述する本件接手ねじの化学成分の分析に当たり、同社は、鉄道総合技術研究所に調査を依頼した。以下及び2.4.4については、同社より提供された資料を基に記述した。

本件接手ねじは、付図7(1)に示すように、ナット直近のねじ谷部で破断していた。この破断面を走査型電子顕微鏡により観察したところ、以下のような様相が確認された。なお、本報告書では、破断面の円周方向の位置を特定するため、ピストン棒側の破断面について、車体に取り付けられた状態における上部を12時、下部を6時とし、他の位置も時計の文字盤の数字で呼ぶこととする。

(1) 12時付近及び破断面中央付近の様相

付図7(4)～(7)は、付図7(3)におけるa～d部を拡大した電子顕微鏡写真であり、疲労破壊^{*8}の特徴である縞状の様相が横方向に見られた。

(2) 10時と2時を結ぶ線の辺りの様相

付図7(8)、(9)は付図7(3)のe～f部を拡大したものであり、延性破壊^{*9}の特徴であるディンプル模様（多数の小さな窪み）が見られた。

2.4.4 本件接手ねじの化学成分及び硬さ

本件接手ねじの化学成分を調査したところ、‘JISG4804硫黄及び硫黄複合快削鉄鋼材’の付属書表3で規定される硫黄快削鋼の一種である11SMnPb28に近い成分であることが判明した。化学成分の調査結果と11SMnPb28の化学成分及び一般的な硫黄快削鋼材であるSUM23（SUM23L）の化学成分を、表1に示す。

表1 本件接手ねじと硫黄快削鋼の化学成分比較

単位：%

	本件接手ねじの 化学成分調査結果	11SMnPb28 の化学成分	SUM23Lの 化学成分
炭素（C）	0.074	0.14以下	0.09以下
マンガン（Mn）	1.25	0.90～1.30	0.75～1.05
リン（P）	0.079	0.11以下	0.04～0.09
硫黄（S）	0.32	0.24～0.33	0.26～0.35
鉛（Pb）	0.16	0.15～0.35	0.30以下

また、本件接手ねじのビッカース硬さを調査したところ、平均で191HV5^{*10}であった。

2.4.5 接手ねじに使用されていた材料

2.3.3(2)に記述したように、接手ねじの材料はSS400と定められていたが、2.7.5に後述する経緯により、硫黄快削鋼が用いられていることが判明した。金属材料に関する複数の文献^{*11}の記述をまとめると、硫黄快削鋼については概略次のと

^{*8} 「疲労破壊」とは、応力が繰り返される状況下において、亀裂が進展し破壊することをいう。

^{*9} 「延性破壊」とは、破断までに材料の著しい伸びや絞りを伴う破壊である。

^{*10} 末尾の5は、試験荷重が5Nであることを示す。

^{*11} 今井勇之進著「応用金属学体系⑤鉄鋼材料」（誠文堂新光社、1963年）、武井英雄著「金属材料学」（理工学社、1977年）

おりである。

硫黄快削鋼とは、鋼に炭素のほか硫黄やマンガン及び微量のリンを添加したもので、硫黄とマンガンが化合したマンガンサルファイトにより切削加工時の被削性を向上させたものである。マンガンサルファイトは、圧延加工に際して適度の塑性を有し、加工方向に繊維状に伸びるため、材料には異方性が生じ、特に加工方向と直角の方向（本件の場合、接手ねじの軸と直角の方向）の機械的特性が低下する。また、マンガンサルファイトなどの非金属介在物が疲労破壊の起点となることがあるため、硫黄比率の高い硫黄快削鋼は強さや靱性^{*12}をあまり必要としない所に用いられる。

2.5 接手ねじに発生する応力の測定

本件ドアR側の接手ねじに電気抵抗ひずみゲージ^{*13}（以下「ひずみゲージ」という。）を貼り付け、ドアの開閉に伴い接手ねじに発生する応力を測定した。ひずみゲージは、破断部であるねじ部に貼り付けることが困難なため、付図8(1)に示すように、接手ねじのねじ部近傍の12時と6時の位置に貼り付けた。

接手ねじの破断は、接手ねじに上下方向に作用する力による曲げが生じたことによるものと考え、曲げによる応力を測定した。以下に記述する計測値は、6時位置付近のひずみゲージに発生する曲げ応力の測定値であり、プラスの値が圧縮、マイナスの値が引張りを表す。なお、当該部分には、接手ねじが下に曲げられる場合に圧縮の応力が、接手ねじが上に曲げられる場合に引張り応力が発生する。

また、別途A社が実施したCAE（Computer Aided Engineering）解析^{*14}により、ひずみゲージ貼り付け位置に対する破断位置（キー溝がある場合のナット直近のねじの谷部）の応力は、‘ひずみゲージ貼り付け位置の応力に応力集中係数3.2を乗じた値’（以下、ひずみゲージ貼り付け位置の応力に応力集中係数を乗じた、各部位の推定応力を「換算値」という。）程度となることが示された。

同様に、同個所のキー溝がない場合の応力集中係数は2.3程度、ピストン棒に直近のねじの谷部の応力集中係数は3.5程度となることが示された。

なお、この測定は同社及びA社の協力を得て実施した。

*12 「靱性」とは、材料の粘り強さであり、衝撃による破壊されにくさをいう。

*13 「電気抵抗ひずみゲージ」とは、抵抗体を測定しようとする物体の表面に貼り付け、物体の変形に追従して変化する抵抗値を計測器により測定することでひずみを測定するものである。

*14 「CAE解析」とは、設計しようとする構造物の強度等を、電子計算機上に設定したモデルにより解析することである。

2.5.1 通常のドア開閉時に発生する応力

(1) ドアを閉状態とし、圧縮空気を供給したとき

ドアが閉まった状態における初期の「一定の大きさで発生している応力」（以下「定常応力」という。）は -1.17 MPa（引張り側）（換算値 -3.74 MPa）であった。（付図9(1)参照）

(2) ドアを開いたとき

車掌スイッチによりドアを開くと、ドア作動中のときは $+2.0$ MPa（圧縮側）（換算値 $+6.4$ MPa）程度であり、ドアが完全に開いたときの定常応力は $+6.0$ MPa（換算値 $+1.92$ MPa）程度であった。（付図9(2)参照）

(3) ドアを閉めたとき

車掌スイッチによりドアを閉めると、ドア作動中のときは $+2.0$ MPa（圧縮側）（換算値 $+6.4$ MPa）程度であり、ドアが閉まるときの衝撃（以下「戸当たり衝撃」という。）と同時に瞬間的に大きな応力変動^{*15}が計測された。戸当たり衝撃による最大値と最小値から求めた応力振幅^{*16}は、 9.2 MPa（換算値 2.94 MPa）であった。戸当たり衝撃後のドアが閉まった状態における定常応力は、 -1.35 MPa（引張り側）（換算値 -4.32 MPa）であった。（付図9(2)参照）

なお、ドア開閉を3回繰り返したが、(2)や(3)で測定された数値と同程度の数値であることをそれぞれ確認した。（付図9(3)参照）

2.5.2 ドアに物が挟まれた場合に発生する応力

ドアが閉まる際に物を挟んだ状態（以下「戸挟み」という。）において、以下の状況が確認された。なお、挟むものとして、厚さ 25 mm 高さ 40 mm の板（以下「戸挟み試験片」という。）を使用した。

ドアの最下部に戸挟み試験片を挟んだ場合、戸当たり衝撃による応力変動はわずかであるが、定常応力が -2.79 MPa（引張り側）（換算値 -8.93 MPa）と大きな値を計測した。（付図9(4)参照）

2.5.3 戸吊り金具や二又、ピンの接触部に給油した場合に発生する応力

2.3.3(3)に記述したように、接手ねじに作用する力は、摩擦力による影響が考えられるため、戸吊り金具と二又の摺動部分にグリスを塗布し、2.5.1と同様の調査

*15 「応力変動」とは、応力値が振動的に変化している状態のことをいう。

*16 ここでいう「応力振幅」とは、応力変動している時の振れ幅のことであり、この時の応力値の最大値から最小値を引いた値の2分の1としている。

を実施した。測定された波形の形状に違いはあるものの、ドアが閉まったときの定常応力や戸当たり衝撃における応力振幅は、2.5.1 に記述した測定値と同程度の大きさであった。(付図9(5)参照)

2.5.4 接手ねじの形状や構造を変えた場合の応力

2.5.4.1 接手ねじの形状を変更した場合の応力

2.5.1～2.5.3 に記述したように、接手ねじに大きな応力が測定されていることから、これらの応力低減を図るため、付図8(3)に示す、ねじサイズの変更(M12からM16)、キー溝なし、有効ねじ長の削減、SS400材の使用等の対策を実施した接手ねじ(以下、「対策型接手ねじ①」という。)を用いて2.5.1と同様な調査を実施した。

接手ねじの破断部位における応力集中係数は、CAE解析から2.9程度になることがA社から示され、調査の結果、ドア閉時の定常応力は-23MPa(引張り側)(換算値-67MPa)、応力振幅は29MPa(換算値84MPa)であった。(付図9(6)参照)

2.5.4.2 接手ねじの形状を変更し、戸吊り金具ピン取付穴を削正した場合の応力

2.4.1(4)に記述したように、c寸法は0mmであり、戸吊り金具と二又がピンを介して接触していることが考えられた。3.4に後述するとおり、応力の発生は戸尻側の戸吊り金具が上昇し二又が押し上げられたことによるものと考え、戸吊り金具が上昇しても二又が押し上げられないようにするため、付図8(4)に示すように戸吊り金具ピン取付穴下部を約3mm削正した。これにより、a寸法は24.1mmとなり、2.2mmのc寸法を確保したうえで、付図8(3)に示す対策を実施した接手ねじ(以下、「対策型接手ねじ②」という。)及び二又(以下「対策型二又」という。)を用いて、2.5.1と同様な調査を実施した。

対策型接手ねじ②とは、2.5.4.1に記述した対策型接手ねじ①の対策に加えて、S45C-H材の使用、転造による製造などを行ったものである。また、対策型二又とは、形状を変更し、戸吊り金具に接触する可能性を低減させたものである。

接手ねじの破断部位における応力集中係数は、2.5.4.1に記述したことと同様に2.9程度であることがA社から示され、2.5.1と同様な調査を実施した。

(1) ドアを閉状態とし、圧縮空気を供給したとき

定常応力は-3.3MPa(引張り側)(換算値-10MPa)であった。(付図9(7)参照)

(2) ドアを開いたとき

車掌スイッチによりドアを開くと、ドアが作動中のときの応力は-2MPa

以下（引張り側）であり、完全に開いたときの定常応力は－1.0 MPa（換算値－2.9 MPa）であった。

(3) ドアを閉めたとき

車掌スイッチによりドアを閉めると、ドア作動中のときの応力は±5 MPa以内であり、戸当たり衝撃による応力振幅は9 MPa（換算値2.6 MPa）であった。

なお、戸当たり衝撃後のドアが閉まった状態における定常応力は、ほぼ0 MPaであった。

2.6 戸閉め機械の車体への取付け状態に関する情報

2.6.1 戸閉め機械と戸吊り金具についての状況

2.5に記述した調査結果から、b寸法が－5 mmやc寸法が0 mmなど、ピンが戸吊り金具ピン取付穴の下端に位置する場合、戸当たり衝撃や戸挟みなどで戸尻側の戸吊り金具が上昇し、ピンと共に二又が押し上げられ、接手ねじに曲げの力が作用する状況が確認された。このような状況が本件ドア以外にもあるのかを確認するため、本件車両の全てのドア4か所の、圧縮空気を供給しドアが閉まった状態におけるa寸法、b寸法及びc寸法を調査した結果を表2に示す。（ドア位置は付図5参照）

表2 本件車両におけるドアと戸閉め機械取付の状況

単位:mm

ドア位置	1		2		3		4	
	1 L	1 R	2 L	2 R	3 L	3 R	4 L	4 R
a 寸法	20.5	20.7	20.2	20.9	20.5	20.7	20.9	20.8
b 寸法	-2.7	-3.2	-4.9	-4.8	-4.8	-5.4	+1.0	-2.8
ピン直径	9.5	9.6	9.5	9.6	9.5	9.5	9.5	9.5
c 寸法	1.6	1.8	1.9	0	2.6	1.4	2.4	2.6
				本件ドア				

なお、2 R ドアについては2.5.4.2に記述したように、本調査後に戸吊り金具ピン取付穴の削正を実施したため、a寸法は24.1 mm、b寸法は－3.6 mm、c寸法は2.2 mmに変更されている。

2.6.2 定期検査におけるドアの立付けに関する情報

2.3.3で記述したように、戸閉め機械はドアの上端で開閉の力を伝達しているた

め、ドア閉時に、戸先ゴムに隙間が生じる可能性がある。そこで同社では、ドアの取付けにおいて、圧縮空気なしの状態ではドアを閉めたときに戸先ゴム上部に2mm程度の隙間ができるようにドアの取付けを行い、圧縮空気を供給しドアを閉めたときに、戸先ゴム上部から下部の全域にわたり隙間がなく均等に接触するように調整しているとのことであった。

各ドアにおける、圧縮空気なしの状態ではドアを閉めたときの戸先ゴムの隙間を測定した結果を表3に示す。なお、圧縮空気を供給しドアを閉めたとき、隙間は生じなかった。

表3 本件車両の圧縮空気なしにおける戸先ゴムの隙間の寸法

単位：mm

ドア位置 床面からの高さ	1	2	3	4
200cm	2.4	2.7	1.9	2.3
100cm	1.7	1.4	0.9	1.0
0cm	0	0	0	0

2.6.3 戸閉め機械の取付け、二又金具と戸吊り金具の接続に関する情報

2.7.2 で後述するように、同社では平成19年に接手ねじの破断が発生していたため、対策として次のような手順にて戸閉め機械とドアの接続作業を行っているとのことであった。

- ① ドアの取付け状態（脱輪防止金具と戸車の隙間、ドア開時の車体とドアの隙間、下レールとドアの隙間、クツズリ^{*17}とドアの隙間）を確認する。
- ② 戸吊り金具と二又の隙間が均等になるように、シリンダに曲げの力が作用しないように、戸閉め機械を車体に取り付ける。
- ③ ピンを取り付けずにピストン棒とドアを手動で開閉させ、二又と戸吊り金具の隙間を確認する。
- ④ 戸閉めコックを閉（圧縮空気なし）とし、ドアを手で閉めた状態で、二又と戸吊り金具をピンにて接続し、二又がある程度自由に動き二又と戸吊り金具が干渉していないことを確認する。干渉している場合は、ドアの取付けを再調整するが、それでも干渉する場合は、戸吊り金具やピン取付け穴を削って調整する。
- ⑤ ドアを開けた状態とし、点検口から確認できる範囲で、④と同様に二又と戸吊

^{*17} 「クツズリ」とは、ドア入口の床に相当する部分である。

り金具の状態を確認する。干渉する場合は④と同様に調整する。

- ⑥ ドアを最大限開けた状態で、ピストン棒の傾きを確認する。
- ⑦ 手動でドアを閉め、戸閉め機械とピンの間の寸法を確認し、まわり止めや割りピンを取り付け、合いマークを記す。
- ⑧ ドアを手動で開閉し、動作を確認する。

2.6.4 定期検査におけるドア及び戸閉め機械の修繕の状況

2.3.2 に記述した全般検査及び重要部検査におけるドア及び戸閉め機械の検査等は、同社の協力会社が実施しており、その概要は以下のとおりである。

(1) 戸閉め機械の検査修繕について

戸閉め機械は、全般検査では車体から取り外して分解検査を行い、ピストン棒についてはキズや変形等がないか検査を実施し、不良のものは新品に取り替える。検査が完了した戸閉め機械は、取り外した元の位置に取り付ける。重要部検査では車体から取り外さず、在姿検査を行う。臨時修繕においては、この限りではない。

(2) ドアの検査修繕について

ドアは全般検査では、戸閉め機械を取り外した後、車体から取り外して外観や消耗部の検査を行う。上記(1)と同様に、取り外したドアは検査終了後、同じ位置に取り付けるので、他の位置に振り替わることはない。重要部検査では取り外さず、在姿検査を行う。

(1)や(2)における作業は、2.6.3 に記述した取付手順等により実施しているが、二又や戸吊り金具を削ったようなことはないとのことである。

2.7 本重大インシデントと類似の事象についての情報

同社によれば、本件戸閉め機械と同様の構造を有する車両において接手ねじが破断する事象が、本重大インシデント発生以前に11件、発生後に1件発生している。以下の記述は、同社より提供された資料を参考とした。

2.7.1 接手ねじの改良以前に発生した事象

同社では、平成6年から平成10年にかけて8件の接手ねじ破断が発生していた。このうち、平成10年には2件発生しており、このときに原因調査を外部に委託したが、材料の不良は確認できなかったことから、ドア開閉時の繰り返し負荷により、加工時の表面傷の存在から亀裂が発生進展したものと推定した。

このため、A社と協議のうえ接手ねじの形状を改良し（ねじの切り上げ加工及び軸を太くさせ、ねじの根元にかかる応力集中を緩和させたもの）、平成12年から

の定期検査において取替えを実施し、平成16年度に完了した。

2.7.2 接手ねじの改良後に発生した事象

平成19年4月に、吉備線のキハ47形車両で接手ねじが破断した。二又下部と戸吊り金具が接触した形跡が認められたことから、2.6.3で記述したように二又や戸吊り金具付近の取付状態を検査するポイントを明確化したうえで、全般検査や臨時検査等で用いる‘戸閉め機械取付要領’や、重要部検査・交番検査等にて用いる‘ピストン取付状態の検査のポイント’（以下これら2点の書類を「作業マニュアル」という。）を平成19年5月に制定し、全社的に統一した。

平成19年9月に、山陰線のキハ41形車両で接手ねじが破断した。二又と戸吊り金具の接触は認められないものの、目視による接触状態の確認を行う一斉点検のほか、上記作業マニュアル遵守の再徹底を行った。

平成21年4月に、城端^{じょうはな}線のキハ47形車両で接手ねじが破断した。二又下部と戸吊り金具の接触が認められたことから、接触を確認した場合に取付穴の削正を行うことや戸吊り金具の削正を行うなど、遊間確保を確実にを行うよう再度徹底した。

2.7.3 本重大インシデント以降に発生した事象

同社は、本重大インシデント発生直後の平成22年10月30日より、圧縮空気なしの状態における二又と戸吊り金具の干渉の有無の確認や、接手ねじの浸透探傷検査等を主な内容とする車両の一斉点検を実施していた。さらに、平成22年11月5日からは、圧縮空気を供給した状態における二又と戸吊り金具の干渉や接触の有無の確認、ピンと戸吊り金具接続部付近の給油（グリス塗布）等の項目を追加した一斉点検を実施していた。

しかし、平成23年1月24日に同社吉備線岡山駅構内において、入換車両であるキハ47形車両の接手ねじの破断が発見されている。なお、当該車両は、平成22年12月5日に上記の追加項目を含む一斉点検を実施しているが、その際には異常はなかったとのことであった。

2.7.4 他事業者の状況

本重大インシデントと同様の戸閉め機械とドアの構造を有する車両で、平成21年12月に重大インシデント（以下「大村線重大インシデント」という。）が発生しており、当委員会の鉄道重大インシデント調査報告書R I - 2 0 1 0 - 2 - II（以下「大村線報告書」という。）として公表している。なお、本重大インシデントは公表同日に発生した。

大村線報告書によると、戸閉め機械はA社製の同一形式であり、戸尻側戸吊り金

具の形状や戸閉めスイッチでこの形状等が一部異なるが、接手ねじや二又の寸法と構造、戸吊り金具ピン接続穴の形状は同一となっている。また、接手ねじの材料に関する手配の状況も同一である。

原因として、接手ねじの材料に硫黄快削鋼を用いたことが関与した可能性も考えられ、また、ピンと戸吊り金具ピン接続穴の隙間が少ない位置関係にあった可能性と、ピン接続穴が摩耗により変形していたことが複合して、接手ねじの端部に想定されていなかった上下方向の力（曲げ）が繰り返し作用し、疲労破壊により破断したと考えられる旨記述している。

所見として、(1) 部品の摩耗等に関する保守・管理を適切に行うこと、(2) 鉄道事業者間及び鉄道事業者と戸閉め機械メーカー間で不具合情報を展開・共有すること、(3) 図面記載事項のとおりには製作できない場合には変更による影響を明確にして不具合等が生じないよう十分な検証を行うことについて記述している。

2.7.5 接手ねじの変更に関する経緯

本件車両に用いられている戸閉め機械の接手ねじの変更に関する経過について、2.7.1～2.7.4 に記述した内容及び大村線報告書をまとめると、概略以下のとおりである。

昭和41年	TK106A形の戸閉め機械製造開始、接手ねじの材質はSS400。
昭和56年5月	本件車両の新造。
昭和62年4月	旧国鉄分割民営化、本件車両は同社に承継される。
平成元年	戸閉め機械のメーカーであるA社は、接手ねじの製造を外部に委託、このときからSUM23が用いられた。
平成10年	同社にて接手ねじが破断する事象が2件発生し、同社及びA社等が検討した結果、接手ねじの形状を改良し、取り替えることとした（A社の図面を改訂）。
平成12年～16年	定期検査を基本に、接手ねじの取替えを実施した。
平成16年	他の鉄道事業者であるB社にて接手ねじが破断する事象が発生し、B社では同社と同様に改良した接手ねじに全数取り替えることとした。
平成21年12月	大村線重大インシデントが発生し、この調査において、B社では接手ねじにSUM23が使用されていることが判明した。
平成22年10月	大村線報告書が公表された。
平成22年10月	本重大インシデントが発生し、調査過程において、同社で

も接手ねじにSUM23が使用されていることが判明した。

2.8 乗務員に関する情報

本件運転士 男性 50歳

甲種内燃車運転免許

昭和63年2月2日

車掌 男性 52歳

車掌見習い 男性 31歳

2.9 気象に関する情報

当日の現場付近の天気 晴れ

3 分析

3.1 走行中にドアが開いた状況に関する分析

2.1(1)に記述したように、本件運転士は、

(1) 戸坂駅到着のために山根踏切付近(152k427m)で常用ブレーキを操作したところ、戸閉め表示灯の滅灯を認めた、

(2) 列車を停車させた後、本件ドアは5cm程度開いていた

と口述している。

また、2.3.7に記述したように、本件車両に搭載された運転状況記録装置には、矢賀駅出発後4,101m走行した地点で戸閉め表示灯が滅灯した記録が残っており、矢賀駅のキロ程は156k470mであることから、この地点は152k369mであると考えられる。時刻はGPSで補正され、装置に設定された車輪径も実測値に近いものであることから、記録された時刻や速度、走行距離に関する誤差は小さいものであると考えられるが、矢賀駅出発位置が不明であるため、位置算定においては数十mの誤差が内在するものと考えられる。

以上のことから、本件ドアは、本件列車がブレーキを使用中の152k400m付近で開いたものと考えられる。

なお、開扉の状態は、2.4に記述したように、本件ドアR側のピストン棒の本件接手ねじが破断していたことから、R側のドアを閉める力が作用しなくなったため、R側のドアのみが開いたものと推定される。開扉の幅については、①2.1や2.2に記述したように、本件列車がブレーキ操作により減速を始めた辺りから停止までの線路状況は下り勾配から水平となっており、本件ドアR側が進行方向側であること、

②2.4.1 に記述したように、圧縮空気がなくピンが接続されていないフリーの状態では戸車等の抵抗も小さくドアは軽々と動くこと、から大きく開く可能性もあったと考えられる。

3.2 本件接手ねじの破断等に関する分析

3.2.1 破断面の様相に関する分析

2.4.3 に記述した破断面の電子顕微鏡による観察から、破断面の様相に関して以下のように分析できる。

- (1) 10時と2時を結ぶ線の辺りに延性破壊の特徴であるディンプル模様が見られることから、本件接手ねじの破断に至る過程において、この部分が最後まで残り、本件接手ねじに作用した引張力に負けて破断したものと考えられる。
- (2) 10時と2時を結んだ上下の領域に、それぞれ疲労破壊の特徴である縞状しまの模様が見られることから、これらの領域では、疲労破壊により亀裂が進展したものと考えられる。また、この縞状の模様が横方向であることから、亀裂の進展はこれと直角の方向、つまり上下方向に進展したと考えられ、それぞれ6時と12時の位置付近から10時と2時を結ぶ線の方へ進展したと考えられる。
- (3) (1)、(2)から、亀裂は6時と12時の位置付近で発生したものと考えられるが、最終的に破断した延性破壊領域が12時の位置側に寄っていることから、6時の位置付近での亀裂発生のほうが早かった可能性と、この位置付近からの亀裂の進展速度のほうが高かった可能性が考えられる。

以上のことから、破断面には上下方向の力による曲げが作用したことで亀裂が発生・進展し破断に至ったと考えられるが、6時の位置付近から最終破断部までの亀裂の進展領域のほうが広いため、上向きの力による曲げの影響が大きかった可能性があると考えられる。

3.2.2 破断位置に関する分析

2.4.3 に記述したように、本件接手ねじはナット近くのねじ谷部で破断していた。2.5 に記述したCAE解析の応力集中係数の大小を比較すると、①二又に直近のねじ谷部(3.5)、②キー溝を考慮した場合のナット直近のねじ谷部(3.2)、③キー溝を考慮しない場合のナット直近のねじ谷部(2.3)の順番で応力が集中することになる。通常ならば①の位置で破断するのが妥当であると考えられるが、本件は②の位置で破断している。これについては、キー溝の加工において微細な傷が残り、そこに応力が集中した可能性が考えられるが、顕微鏡写真等で加工傷等を

明らかにすることはできなかった。

3.2.3 材料に関する分析

2.4.4 に記述したように、本件接手ねじから硫黄快削鋼と同等の成分が検出されたこと、2.7.5 に記述したように、平成元年以降に製造された接手ねじには硫黄快削鋼が用いられていることから、本件接手ねじには 2.3.3(2) で記述した図面指定の材料 (S S 4 0 0) とは異なる硫黄快削鋼が用いられていたと推定される。

3.3 接手ねじに発生する応力の測定結果に関する分析

2.5.1～2.5.4 に記述した接手ねじの 6 時位置付近に発生する曲げ応力の測定結果から、以下の事実が確認された。

- (1) ドアが閉まったとき、定常的な応力が発生しており、引張り（マイナス）側が主となっている。
- (2) ドアを閉めるときの戸当たり衝撃と同時に、瞬間的に大きな応力変動が発生する。
- (3) 戸吊り金具のピン取付穴を縦方向に拡大削正すると、上記(1)(2)のような応力は発生しない。
- (4) いずれの測定においても、ドア開閉作動中やドアが開いた状態では、大きな応力は発生しない。

上記(1)、(2)に記述した事実から、ドア閉状態では大きな定常応力が発生しており、さらにドアを閉める際の戸当たり衝撃時にも大きな応力変動が発生していると考えられる。また、戸挟みなどの場合にも大きな定常応力が発生していると考えられる。これらの応力の発生には、上記(3)に記述した事実から、二又やピン、戸吊り金具のピン取付穴の位置関係が関与していると考えられる。

3.4 接手ねじに曲げの力が作用する状況に関する分析

3.4.1 ドア閉状態における曲げの力の作用

3.3(1)に記述したように、通常の状態では大きな定常応力が発生することが確認された。ドアの取付けに関する整備方法は 2.6.2 に記述したとおり、圧縮空気がない状態でドア上部が 2 mm 程度開くように調整をしている。これは、戸閉め機械にドア閉のための圧縮空気を供給したときに、L側ドアとR側ドアの間に隙間が生じないようにするためである。

上記のドアの取付状態において、ドアが完全に閉まる直前には、付図 10 に示すようにドアが戸車を回転中心として片側で 1 mm 程度傾き、戸尻側の戸吊り金具が上昇すると考えられる。ドアの寸法は、高さ 2, 0 9 5 mm、幅 6 5 0 mm であるこ

とから、ドアが1mm傾いた場合の戸吊り金具の上昇量を計算すると0.3mm程度と考えられるが、樹脂製戸車や脱線防止金具の一時的なたわみ等もこれに加わる可能性も考えられる。ただし、条件によっても異なるので、その正確な量を特定することはできなかった。

このような状況で、2.6.1及び付図5(3)に示すように、ピンが戸吊り金具ピン取付穴の下端に位置する場合には、戸吊り金具の上昇に伴いピンを介して二又が上方向に押し上げられることにより、接手ねじに曲げの力が作用している可能性があると考えられる。(付図10参照)

3.4.2 戸当たり衝撃による曲げの力の作用

3.3に記述したように、ドアを閉めるときの戸当たり衝撃と同時に瞬間的に大きな応力変動が発生する事実が確認されたが、このことは3.3(2)に記述した事実から、通常の閉扉において、戸当たり衝撃と同時にドアが振動することで、戸尻側の戸吊り金具が瞬間的に上昇する状況が発生すると考えられる。

このような状況で、3.4.1に記述したのと同様に、ピンが戸吊り金具ピン取付穴の下端に位置する場合には、ピンを介して二又が上方向に押し上げられることにより接手ねじに曲げの力が作用している可能性があると考えられる

なお、戸吊り金具の上昇量の最大値は、2.3.3(5)に記述した脱輪防止金具により2mm程度に抑えられるものと考えられるが、樹脂製戸車や脱線防止金具の一時的なたわみ等の可能性も考えられるため、正確な量については明らかにすることはできなかった。

3.4.3 戸挟みによる曲げの力の作用

3.3に記述したように、戸挟みがあった場合において、大きな定常応力が発生することが確認された。これは、c寸法が小さい状況で戸挟みがあった場合には、物を挟んだ状態でドアを閉める力が作用することでドアが傾き、3.4.2と同様に、ドアが傾くことで戸吊り金具が上昇し、戸吊り金具によってピンを介して二又が押し上げられ、接手ねじに曲げの力が作用し続ける状況が発生すると考えられる。

3.5 接手ねじの強度に関する分析

2.5.1に記述したように、接手ねじの6時の位置に発生する定常応力は換算値で-374MPa(引張り側)、戸当たり衝撃の応力振幅は換算値で294MPaとなり、前者はSS400の引張強さ、後者はSS400の降伏に対する許容応力と比較しても同等又はそれ以上の値となっている。一般に機械部品に発生する応力の許容値は、発生頻度や使用条件、使用期間などを考慮して決定されるべきであるが、上述の測定さ

れた応力値は、ドア部品のような繰り返し荷重が作用する部品に発生する応力として過大であると考えられる。

また、本件戸閉め機械の接手ねじの材料として使用されていた硫黄快削鋼は、2.4.5 に記述したようにマンガンサルファイトが疲労破壊の起点となる可能性が考えられる。したがって、接手ねじの材料として硫黄快削鋼を使用していたことが、上記の強度不足となっていた状況において亀裂の発生や進展に関与した可能性もあると考えられる。一般的に硫黄快削鋼は強度が求められる部材として使用されることを想定していないため、疲労強度に関わる数値データが示されておらず、亀裂発生への関与の度合いを定量的に明らかにすることはできなかった。

3.6 接手ねじの破断に関する分析

3.6.1 本件接手ねじの破断に関する分析

3.2～3.5に記述した分析から、本件接手ねじの破断は、

- (1) 本件ドアR側のc寸法の測定結果から、ドアを閉めた状態においてピンが戸吊り金具ピン取付穴の下端に位置している状況において、ドアが閉まる際にドアがわずかに傾くことにより戸吊り金具が上昇し、二又を押し上げる力が作用すること、
- (2) 上記(1)と同様な状況において、通常の開扉の際にも戸当たり衝撃によってドアが振動することで戸吊り金具が上昇し、二又を押し上げる力が作用すること、
- (3) 上記(1)と同様な状況において、ドアの下部に戸挟みが発生すると、ドアが傾くことで戸吊り金具が上昇し、二又を押し上げる力が作用すること

などの要因が複合し、想定されていなかった曲げの力が本件接手ねじに作用して大きな応力が発生したものと考えられる。

3.5に記述したように、車両の通常状態であるドア閉状態にて約400MPaという引張りの定常応力が発生しており、戸当たり衝撃時には約300MPa程度の応力が繰り返し発生すること、また、疲労破壊は引張強度よりも小さな応力の繰り返しによって起こる現象であることなどから、接手ねじの破断にはこれらの応力が大きく関与した可能性があると考えられる。さらに、大村線重大インシデントと同様に、接手ねじの材料に硫黄快削鋼が使用されていたことが、破断に関与していた可能性もあると考えられる。

3.6.2 本重大インシデントと類似の事象に関する分析

2.7.2 及び 2.7.3 に記述したように、同社において最近では平成19年に2件、平成21年に1件、平成23年に1件の接手ねじの破断が発生していた。これらの

事象については、発生当時の c 寸法及び接手ねじの材料についての情報が得られなかったことから、接手ねじが破断した原因については明らかにすることができなかった。しかし、

(1) いずれの車両にも本件戸閉め機械と同一形式の戸閉め機械が用いられていること、

(2) 破断面に疲労破壊の様相が見られたこと

から、類似の故障 4 件は、本重大インシデントにおける接手ねじの破断と同様な要因によるものであった可能性があると考えられる。

3.7 戸閉め機械取付けに関する分析

平成 19 年に接手ねじが破断し、対策として 2.6.3 で記述したように、二又と戸吊り金具の隙間や接触の有無を確認して戸閉め機械を取り付けているが、圧縮空気なしの状態を実施していたため、通常のドア閉時における戸吊り金具上昇まで考慮していなかった可能性があると考えられる。

本重大インシデント発生後、2.7.3 に記述したようにドア閉時の戸吊り金具の上昇を考慮して圧縮空気を供給した状態での確認を実施しているが、戸吊り金具と二又の接触の有無の確認までであり、c 寸法がどれだけ確保できているかまでは確認していないと考えられる。c 寸法が僅少の場合は、3.4 で記述したように、戸当たり衝撃や戸挟みなどが発生した場合、接手ねじに曲げの力が作用すると考えられる。

3.8 接手ねじ破断の防止に関する分析

本件接手ねじの破断は、3.6 及び 3.7 に記述した要因の複合により発生したものと考えられることから、接手ねじの破断を防止するためには、以下の措置が有効と考えられる。

3.8.1 接手ねじに発生する応力の低減に関する項目

(1) 通常使用のみならず戸挟みも想定した c 寸法の確保

3.4 に記述したように、c 寸法が僅少の場合は、通常のドア閉時に接手ねじに曲げの力が作用する可能性があり、また、戸挟みが発生した場合はより大きな曲げの力が作用する可能性がある。戸吊り金具の上昇は、脱輪防止金具により約 2 mm 以下に抑えられると考えられるが、樹脂製戸車や脱輪防止金具の一時的なたわみ等により、更に上昇量が増える可能性が考えられる。したがって、接手ねじに曲げの力が作用しないようにするためには、戸閉め機械取付けやドア取付けの作業の際に、これらの上昇量を考慮した c 寸法の管理が必要であると考えられる。

また、戸閉め機械を臨時検査等で他のものに交換した場合や、戸車、脱輪防止金具、上レールを交換した場合など、戸閉め機械とドアの位置関係が現状と変わる可能性がある場合には、その都度 c 寸法等を確認する必要があると考えられる。

(2) 戸吊り金具ピン取付穴の改良

上記(1)により調整を行ったものの、c 寸法を確保できないドアについては、戸吊り金具の上昇によりピンとの接触が避けられないことになるため、戸吊り金具ピン取付穴を下方に拡大する措置も有効と考えられる。この措置を実施した場合において、可動範囲が広がり、二又と戸吊り金具が予期せず接触することなどが考えられるため、あらためて c 寸法の確認が重要である。

3.8.2 接手ねじの強度向上に関する項目

(1) 接手ねじの適切な材料の使用

3.5 に記述したように、接手ねじに硫黄快削鋼を用いたことが、接手ねじの亀裂の発生や進展に関与した可能性もあると考えられることから、接手ねじの製造に当たっては、作用する力や使用する期間などを考慮し、適切な材料を用いるべきであると考えられる。

(2) 接手ねじの形状変更

c 寸法を確保したとしても、戸車の摩耗、上レールや脱輪防止金具等の摩耗、一時的なたわみ等により、戸吊り金具の上昇量が c 寸法を上回る可能性が考えられる。このような場合でも接手ねじ破断の可能性を低下できるように、今回測定されたような条件においても十分な耐力を持つ接手ねじの形状に変更することが望ましい。

3.9 戸閉め機械の設計管理等に関する分析

2.7.5 に記述したように、大村線報告書にて平成元年以降に A 社から出荷されていたピストン棒の接手ねじに硫黄快削鋼が用いられていることが明らかになり、また、本重大インシデントの調査過程において、同社においても同様に硫黄快削鋼が用いられていることが判明した。また、同社では、改良された接手ねじに取替えが完了した平成 16 年度以降でも、疲労破壊と考えられる原因により接手ねじが破断していた事象が複数発生していたことから、戸閉め機械の取付時の注意点をまとめたマニュアルを全社的に整備するなどの対策を実施していた。しかし、接手ねじの強度や応力の発生原因を明らかにするなどの更なる原因究明が不足していたことから、度重なる接手ねじの破断を防止できなかったものと考えられる。これらの故障・事象の原因究明のためにも、全社的に情報を共有し活用できる仕組みを効果的に運営することが望まし

い。さらに、同様な構造を有する車両は他鉄道事業者でも広く使用されているため、戸閉め機械メーカを交えた上で、故障に関する情報に加えて保守方法の詳細に関する情報をも共有することが重要である。

4 結 論

4.1 分析の要約

3.1～3.9に記述した分析を要約すると、それぞれ概略以下のとおりである。

- (1) 本件運転士の口述及び戸閉め表示灯の仕組みから、本件ドアは、本件接手ねじの破断によりドアを閉める力が作用しなくなったため、本件列車がブレーキを使用中に開いたものと考えられる。
- (2) 本件接手ねじの破断面の様相から、本件接手ねじに上下方向の力による曲げが作用したことにより疲労破壊したと考えられる。また、材料の成分調査の結果、材料には図面指定とは異なる硫黄快削鋼が用いられていたと推定される。
- (3) 接手ねじの応力測定の結果、ドアが閉まったとき、ドアを閉めるときの戸当たり衝撃及び戸挟みにおいて、接手ねじに曲げの力が作用し、ねじ部に大きな応力が発生するものと考えられる。
- (4) 接手ねじに曲げの力が作用する状況は、ピンが戸吊り金具ピン取付穴の下端に位置し、ドアが完全に閉まるとき、戸当たり衝撃、戸挟みなどにより、戸尻側の戸吊り金具が二又を押し上げることにより発生すると考えられる。
- (5) 想定されていなかった曲げの力が作用することにより、結果的に接手ねじは強度不足になっていたものと考えられる。また、このような強度不足となっていた状況において、接手ねじの材料に使用されていた硫黄快削鋼が亀裂の発生や進展に関与した可能性もあると考えられる。
- (6) 接手ねじの破断は、ドアが閉まったときや戸当たり衝撃のときに、接手ねじに想定されていなかった曲げの力が繰り返し作用したことが大きく関与したと考えられる。また、本重大インシデント前後に発生した計4件の破断事象も同様であった可能性があると考えられる。
- (7) 戸閉め機械の取付けにおいて、同社では戸吊り金具と二又の接触の有無を確認しているが、c寸法が僅少な場合には、上記(4)のような状況になると考えられる。
- (8) 再発防止のためには、上記(4)のような状況にならないように、使用状況に応じた部品の寸法管理、取付時の調整が必要であると考えられる。
- (9) 重大インシデントに至るような事象や故障が複数発生している場合には、会

社内あるいは鉄道事業者間で情報を共有し、速やかに原因究明を行い、再発防止に努めることが重要である。

4.2 原因

本重大インシデントは、本件ドアの戸閉め機械のピストン棒の本件接手ねじが破断したことにより、ドアを閉める力が作用しなくなったため、本件列車の走行中に本件ドアが開いたことにより発生したものと推定される。

本件接手ねじが破断したのは、破断面の状況から疲労破壊によるものと考えられるが、ドアが閉まったときや閉まる際に、想定されていなかった曲げの力が繰り返し接手ねじに作用したため、接手ねじが強度不足となっていたことによるものと考えられる。また、接手ねじの材料に、図面指定と異なり、強さや靱性を必要とされない場合に用いられる硫黄快削鋼を使用していたことが関与した可能性もあると考えられる。

想定されていなかった曲げの力が接手ねじに作用したのは、戸閉めの際にドアが傾くことにより戸尻側戸吊り金具が上昇し、戸閉め機械と戸吊り金具をつなぐピンが戸吊り金具ピン取付穴の下端に位置する関係にあったと推定されることから、接手ねじに上下方向の力が作用したためと考えられる。

5 参考事項

5.1 再発防止策に関する事項

本重大インシデント発生後、同社は再発防止策として下記の措置を講じた。

- (1) 本件車両と同様の戸閉め機械が用いられている車両（キハ40形、キハ41形、キハ47形、キハ48形、475系）について、2.7.3に記述したように、戸閉め機械のピストン棒、二又及び戸吊り金具等の状態を一斉点検し、平成22年12月末までに異常のないことを確認した。
- (2) 2.7.3に記述したように、上記(1)実施完了後も同様事象が発生したため、追加点検項目を含む点検を交番検査ごと（3か月間隔）に実施することとした。ただし、キハ41形、キハ47形については、1.5か月間隔で実施している。
- (3) 上記(1)の車両のうち、本件車両と同一形式の戸閉め機械を使用している車両（キハ47形184両、キハ41系5両）について、2.5.4.2に記述した対策型接手ねじ②及び対策型二又への取替えや、必要に応じ戸吊り金具ピン取付穴の削正を平成23年3月末までに完了した。なお、取替え等が完了した車両は、上記(2)の点検間隔を交番検査ごと（3か月）としている。

5.2 大村線報告書に対する対応

5.2.1 大村線報告書の周知

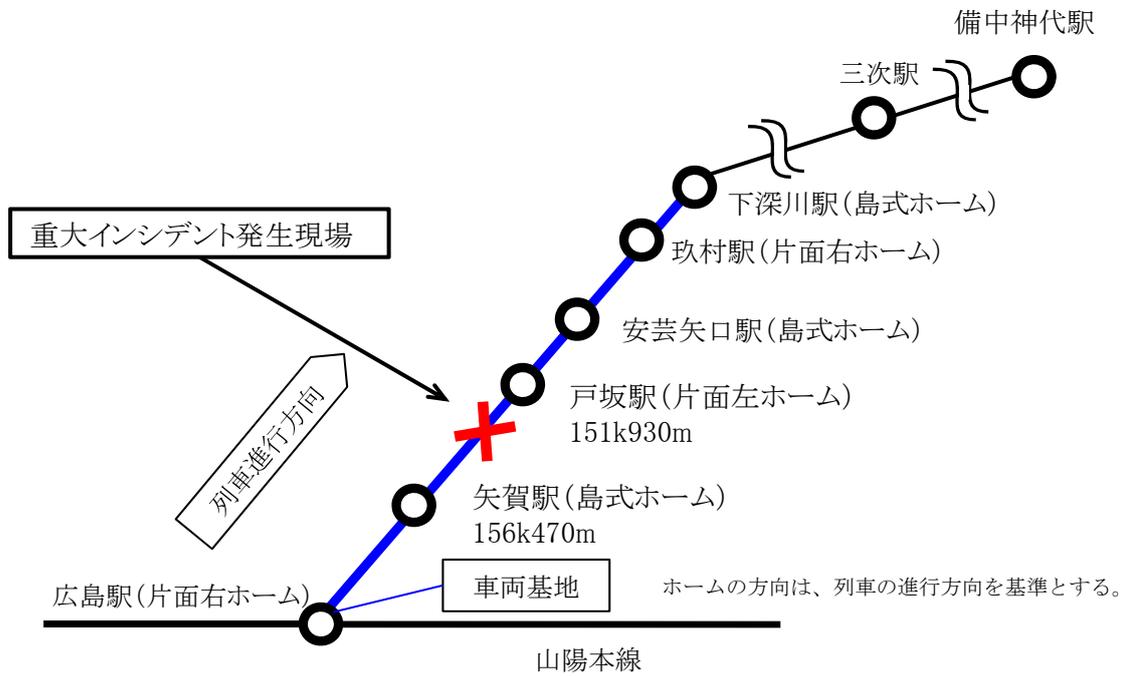
本重大インシデント発生当日に大村線報告書が公表されており、同社では平成22年11月25日付けで、大村線報告書の要旨と本重大インシデントを対比する形で説明資料を作成し、周知を実施した。また、この中で、同社の対応として、2.7.3で記述した一斉点検などの点検や給油の実施をソフト対策として、ねじ部の形状変更の検討や図面通りの材料とした接手ねじへの取替えの計画をハード対策としている。

5.2.2 大村線報告書の所見に対する対応

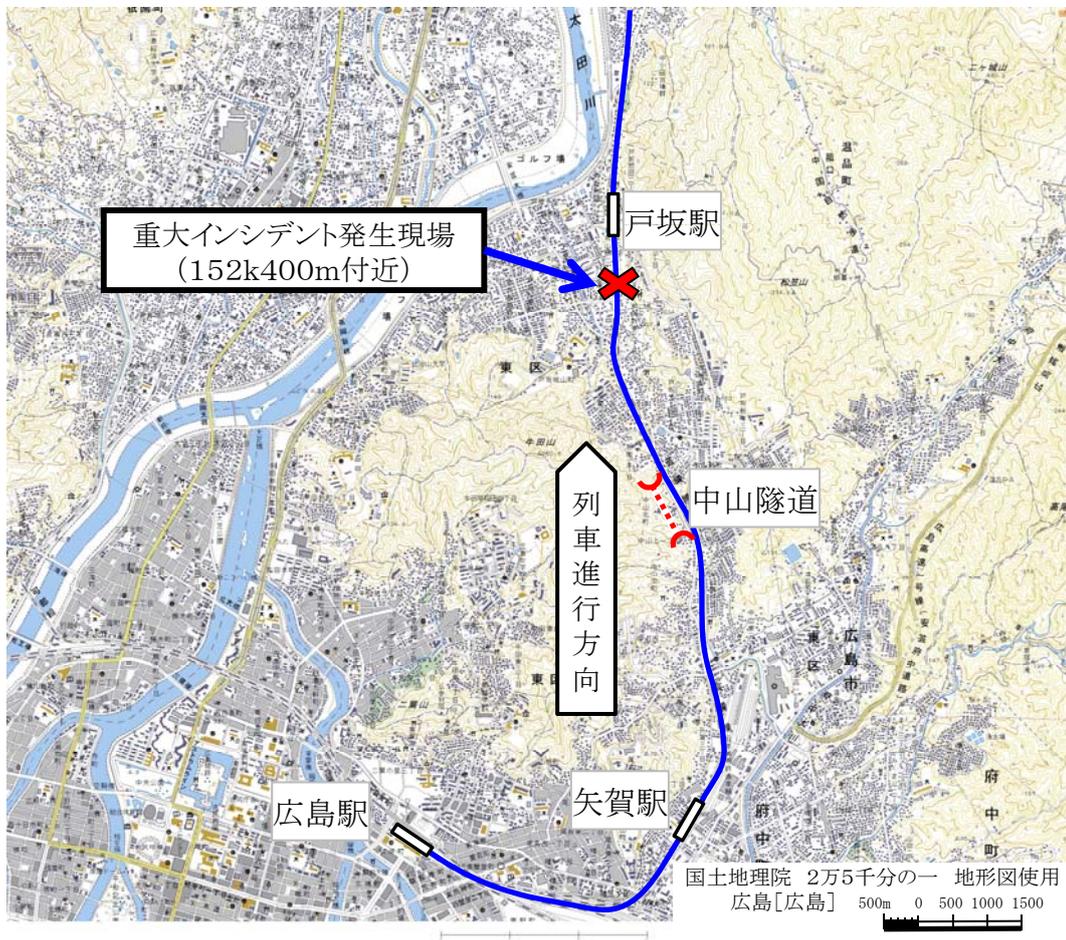
本重大インシデント発生後の平成22年12月28日に、同社はキハ47形車両を使用するJR各社の車両担当者を招集し、本件の情報を提供するとともに、B社から大村線重大インシデントに関する情報の提供があった。各社の担当者間でこれらの情報の共有を図り、合わせて、接手ねじの破断に関する対策について検討を行い、接手ねじの形状や材料等の変更を決定した。また、各社で実施している保守内容を確認した。

付図1 芸備線の路線図

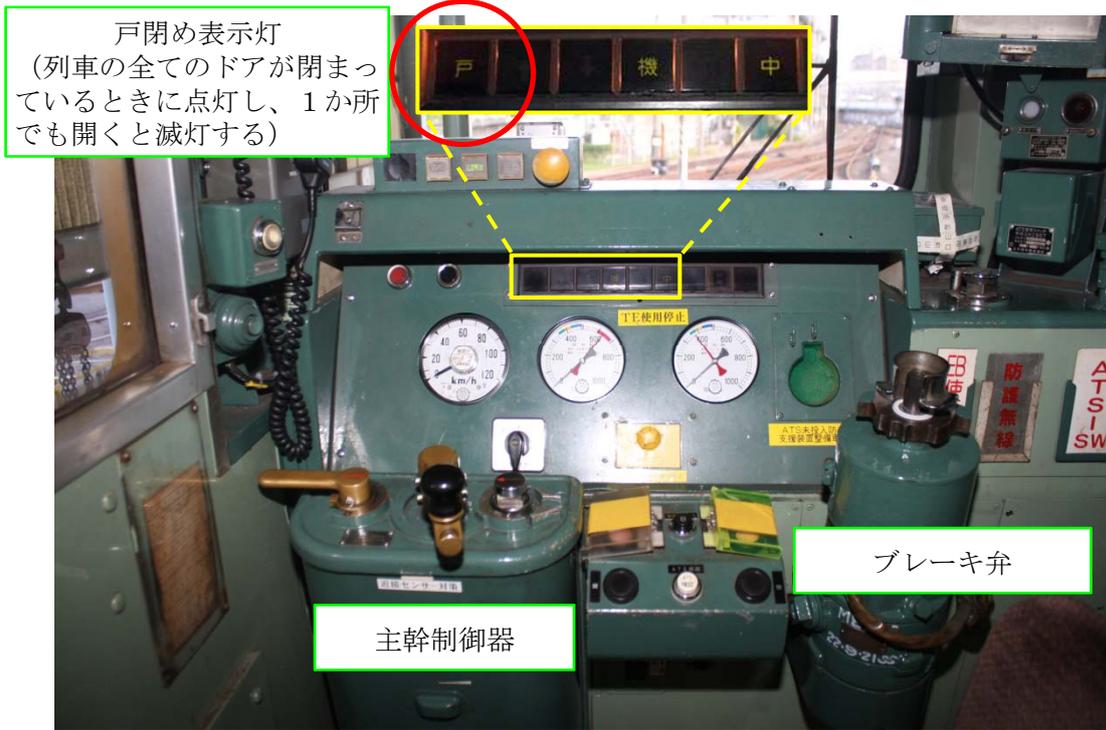
芸備線 備中神代駅～広島駅間 159.1km (単線)



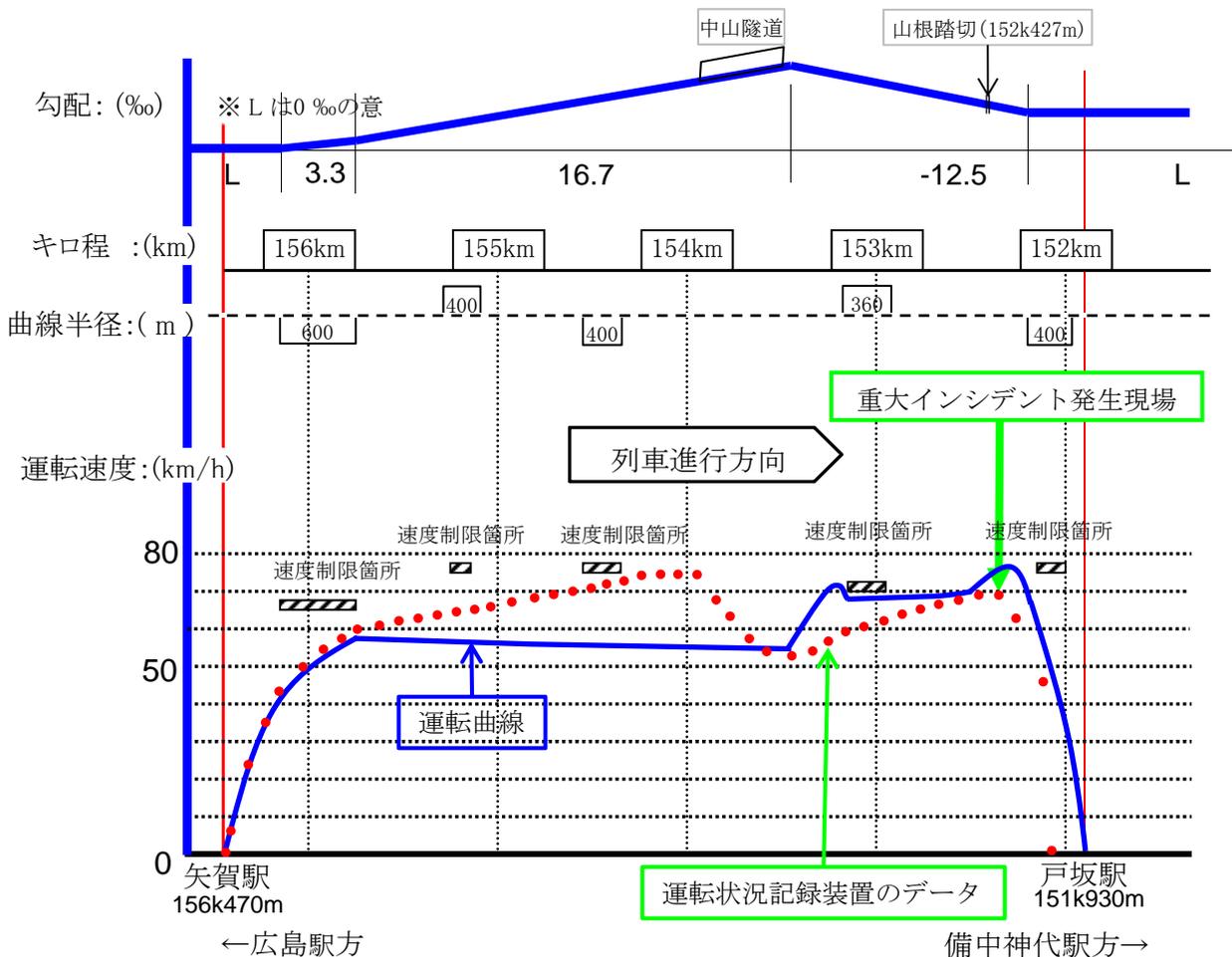
付図2 重大インシデント発生現場付近の地形図



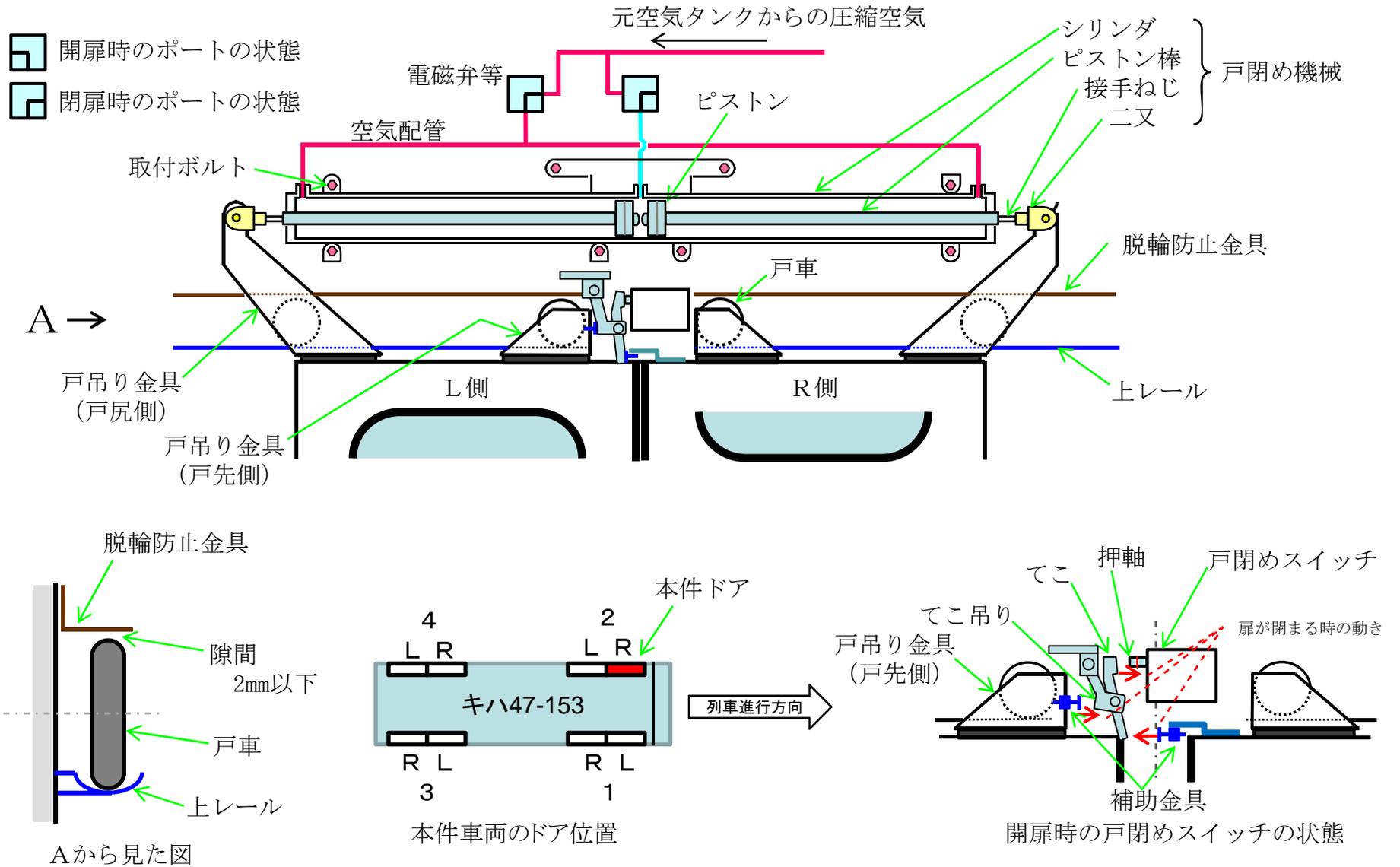
付図3 本件列車の運転台と戸閉め表示灯の状況



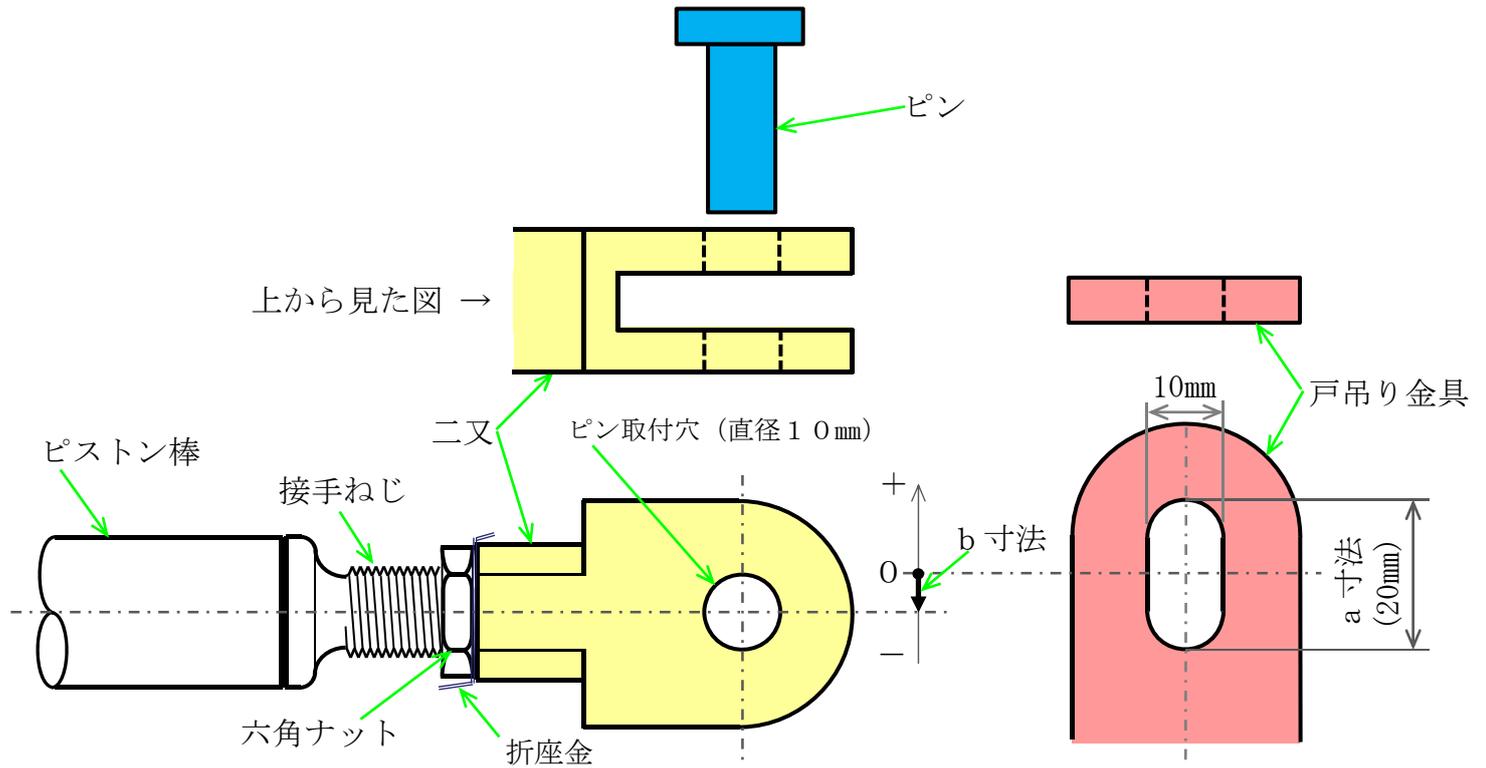
付図4 矢賀駅～戸坂駅間の線路状況等



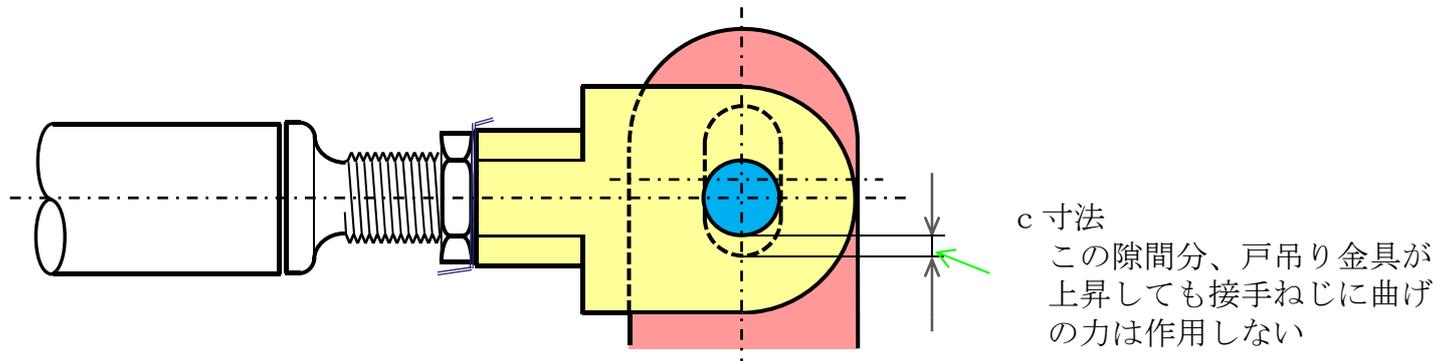
付図5 戸閉め機械と戸吊り金具等の概略図（その1）



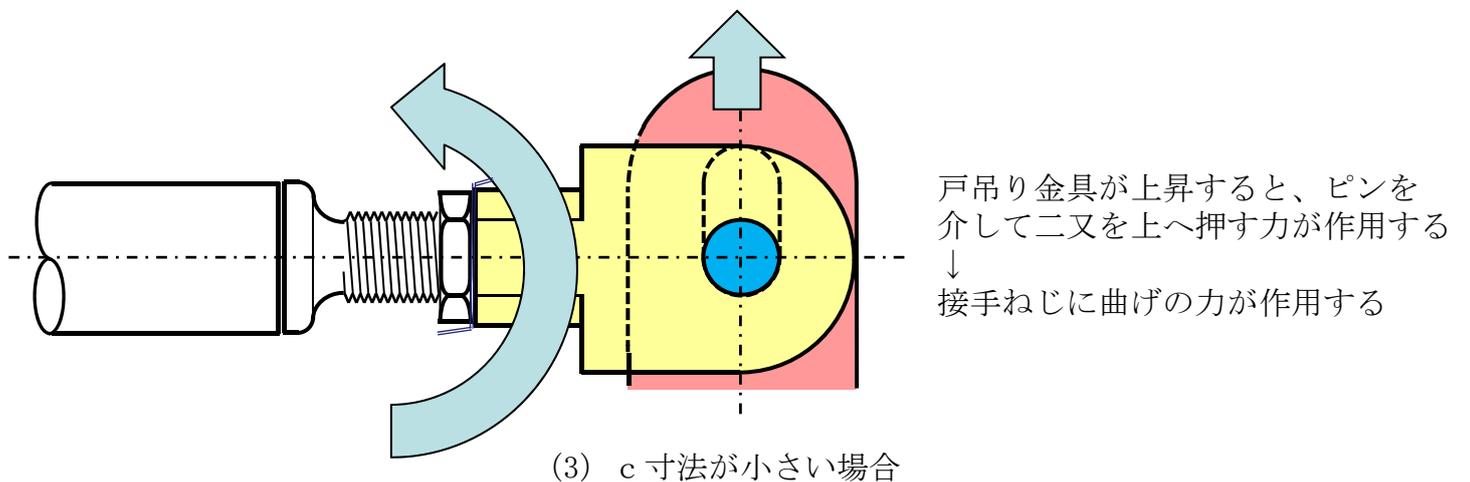
付図5 戸閉め機械と戸吊り金具等の概略図（その2）



(1) 戸閉め機械と戸吊り金具接続部の部品構成

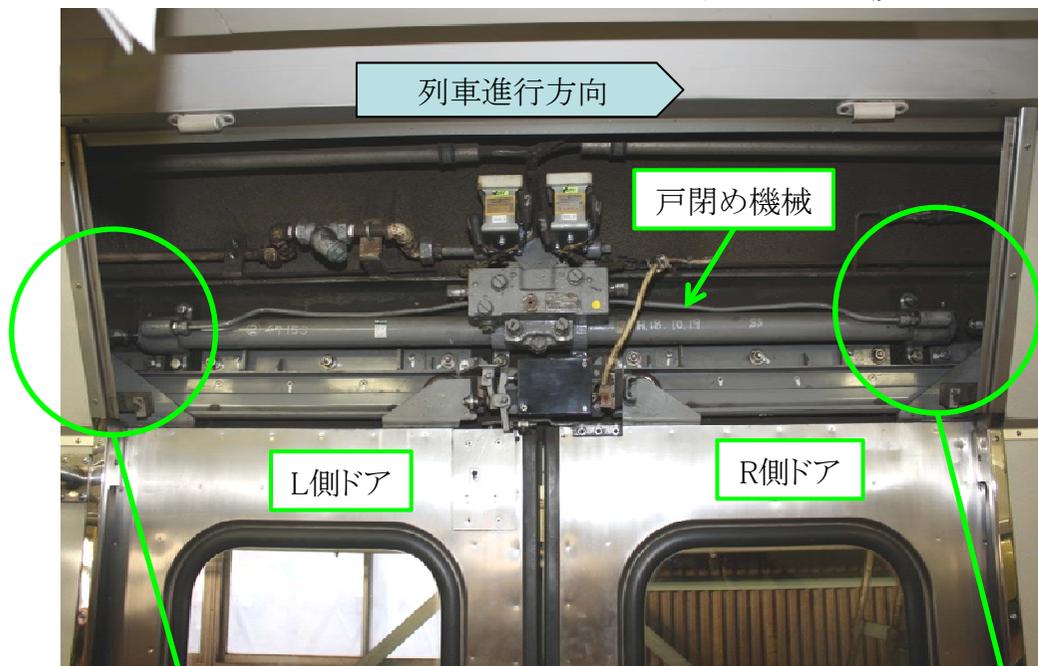


(2) 戸閉め機械と戸吊り金具をピンにより接続した状態

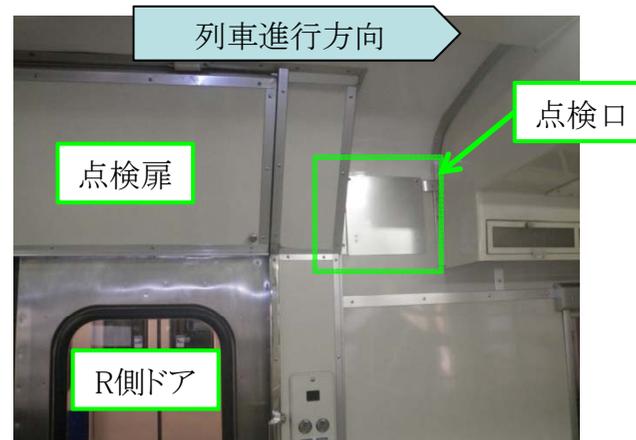


(3) c寸法が小さい場合

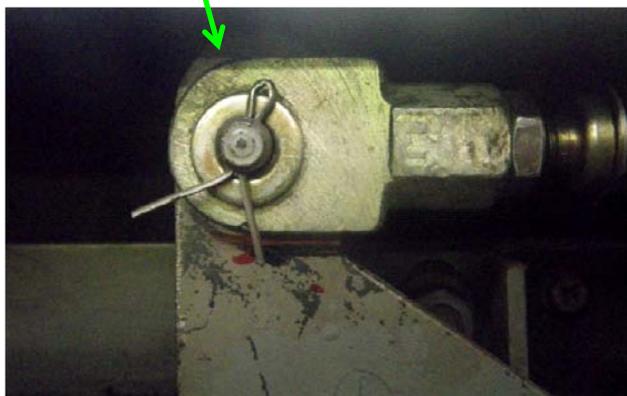
付図6 戸閉め機械と点検口における戸吊り金具と二又の状況



(1) 本件ドアと戸閉め機械（点検扉を開けた状態）



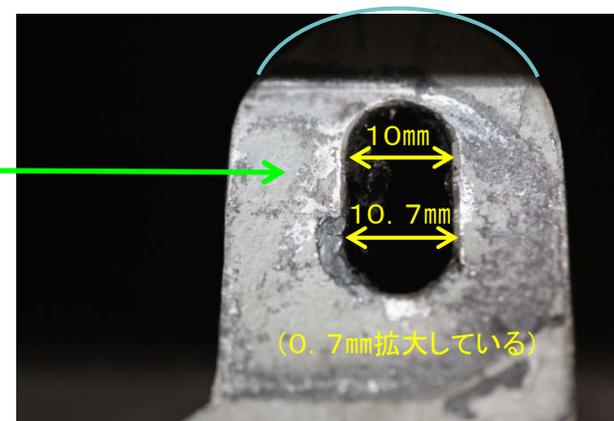
(2) 点検口の状況



(3) L側ドアの二又と戸吊り金具の状況



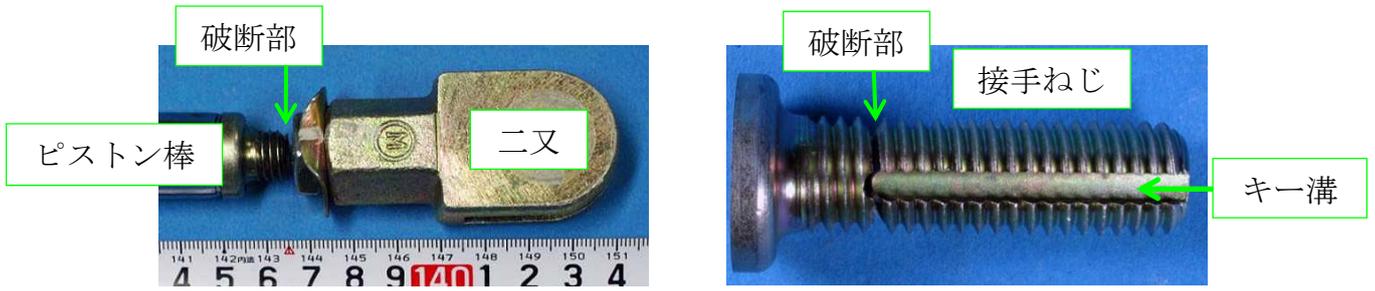
(4) 破断した接手ねじと二又及び戸吊り金具の状況（割りピンを外した状態）



(5) 戸吊り金具ピン取付穴の状況

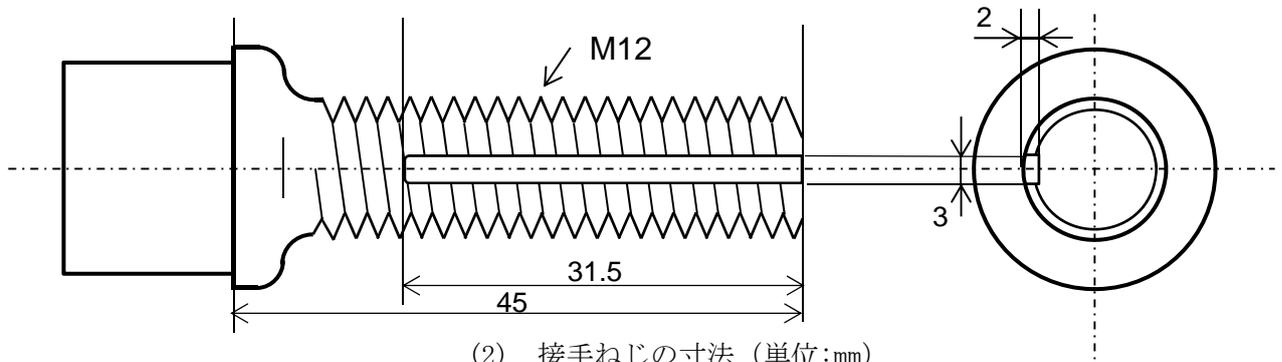
本付図の写真は、いずれも車内から見た状況である。

付図7 接手ねじの破断面の電子顕微鏡観察（その1）



(1) 破断したピストン棒の接手ねじ

※ 本付図の(1)、(4)～(9)の写真は、同社の提供によるものである。

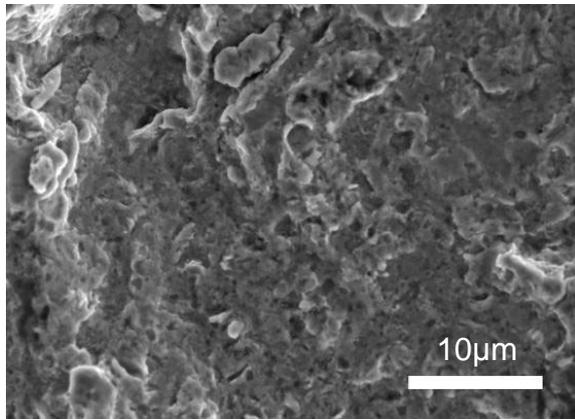


(2) 接手ねじの寸法（単位:mm）

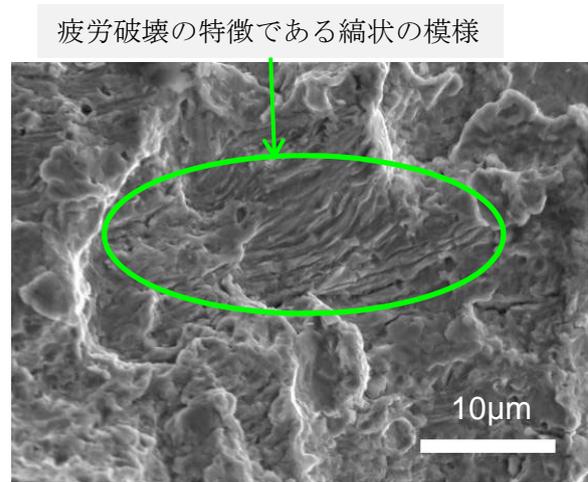


(3) ピストン棒側の破断面

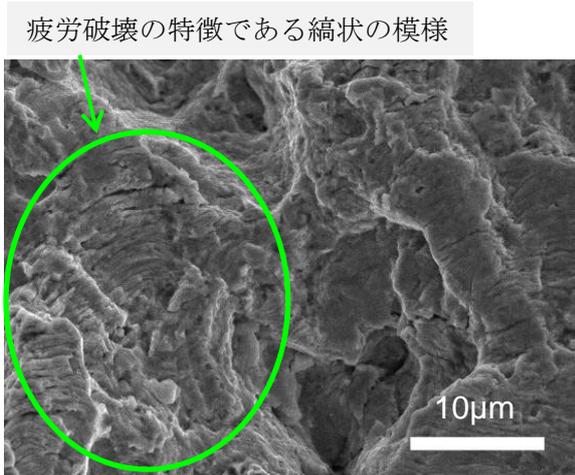
付図7 接手ねじの破断面の電子顕微鏡観察（その2）



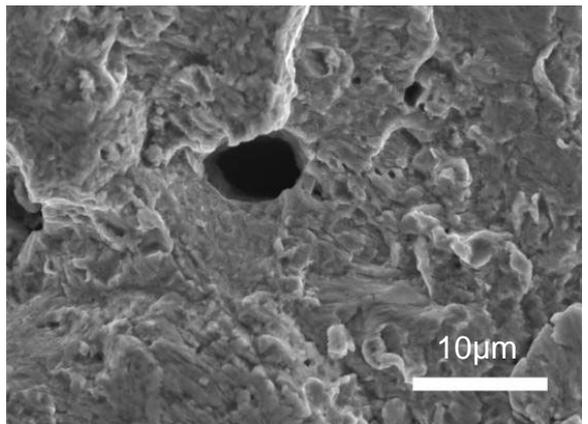
(4) a部の状況 二次電子像



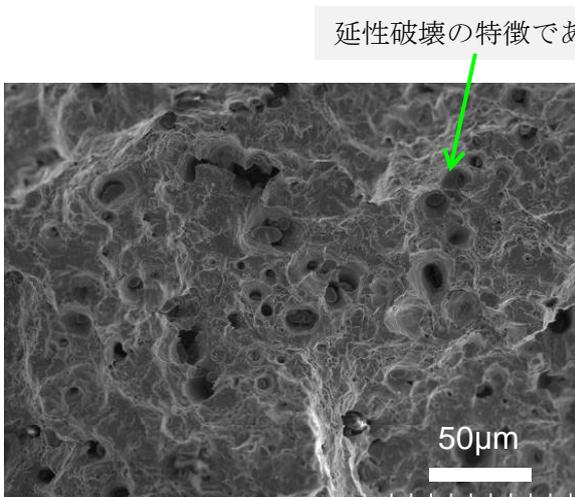
(5) b部の状況 二次電子像



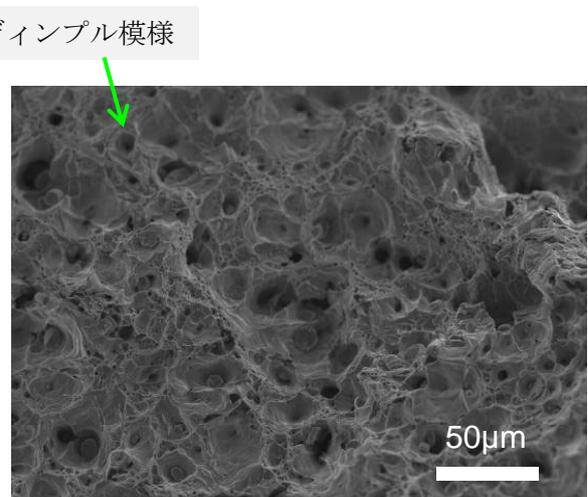
(6) c部の状況 二次電子像



(7) d部の状況 二次電子像



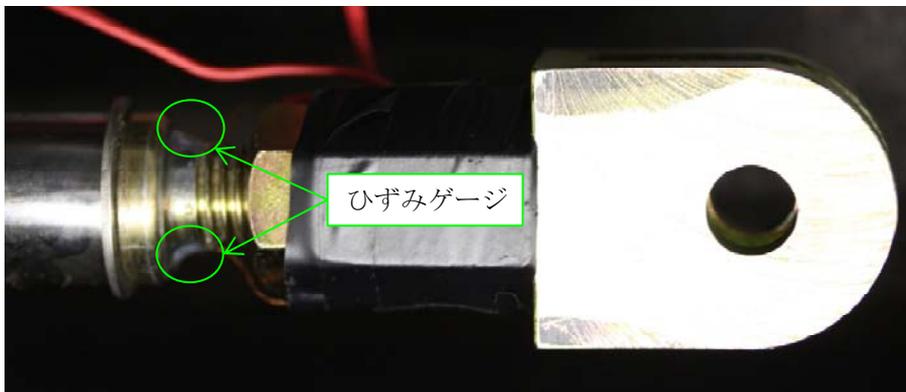
(8) e部の状況 二次電子像



(9) f部の状況 二次電子像

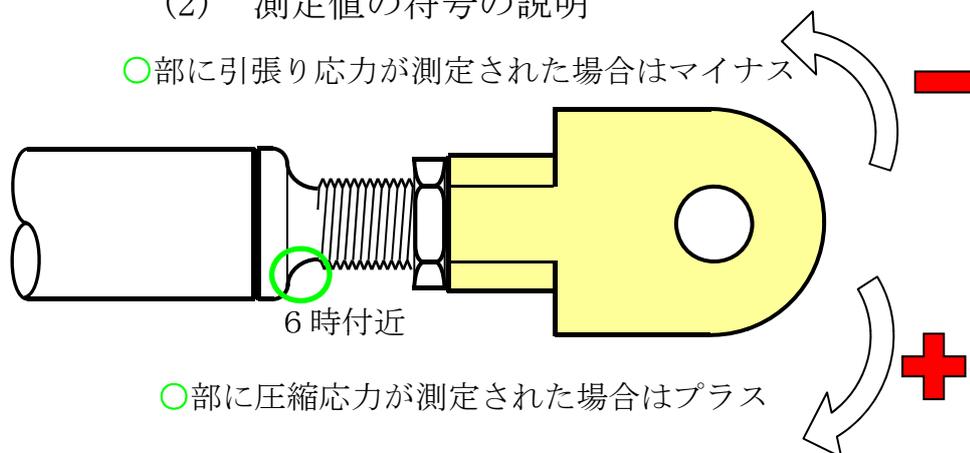
付図8 ひずみゲージを用いた接手ねじに発生する応力の測定 (その1)

(1) ひずみゲージ貼付の状況



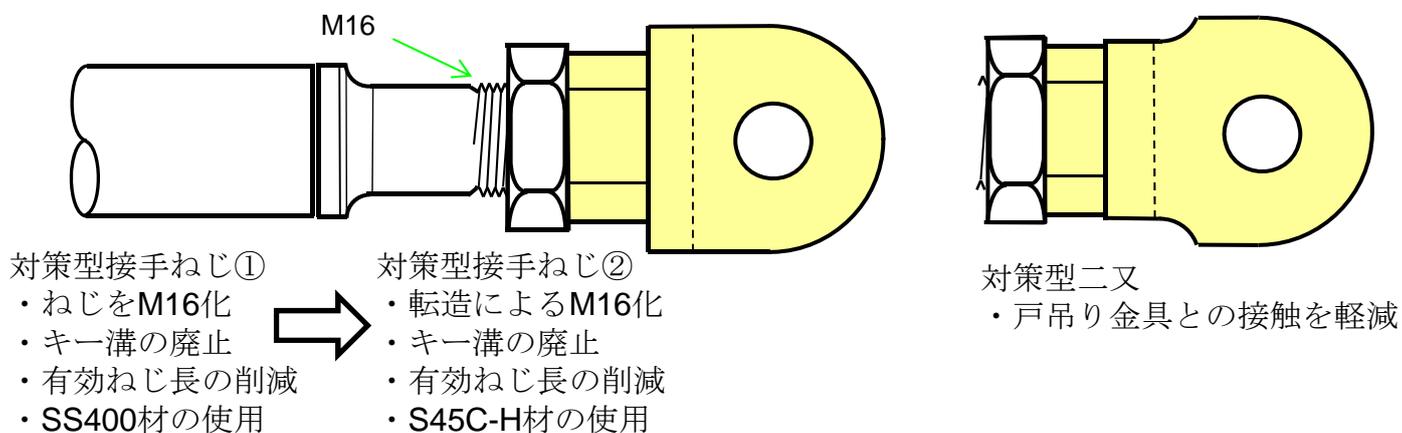
上図のようにひずみゲージを貼り、曲げによる応力のみを測定した。

(2) 測定値の符号の説明



付図8 ひずみゲージを用いた接手ねじに発生する応力の測定 (その2)

(3) 接手ねじ及び二又の対策の概要



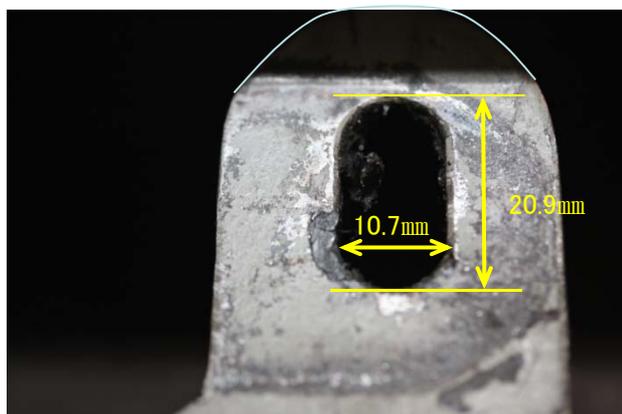
対策型接手ねじ②の外形



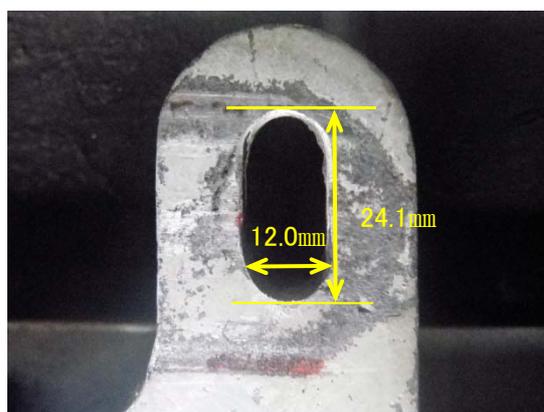
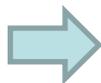
対策型二又の外形



(4) 戸吊り金具のピン取付穴の削正の状況

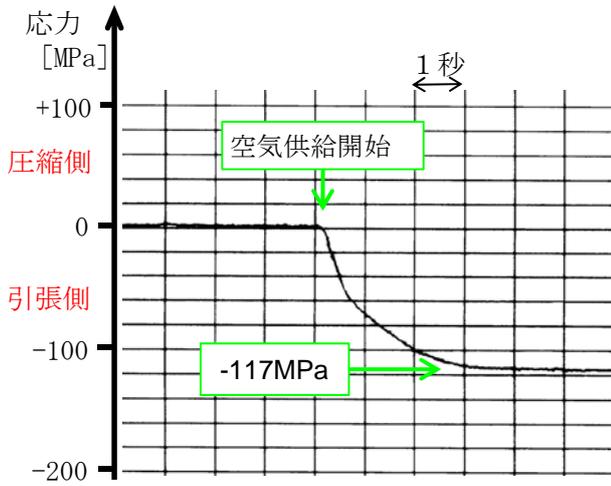


現状

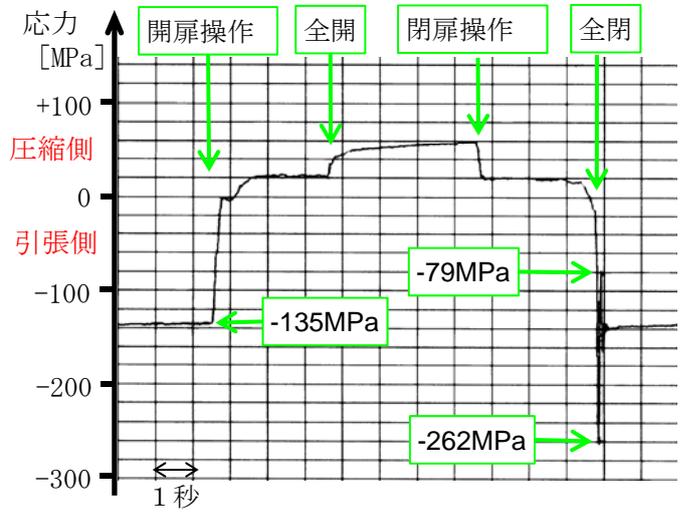


削正後

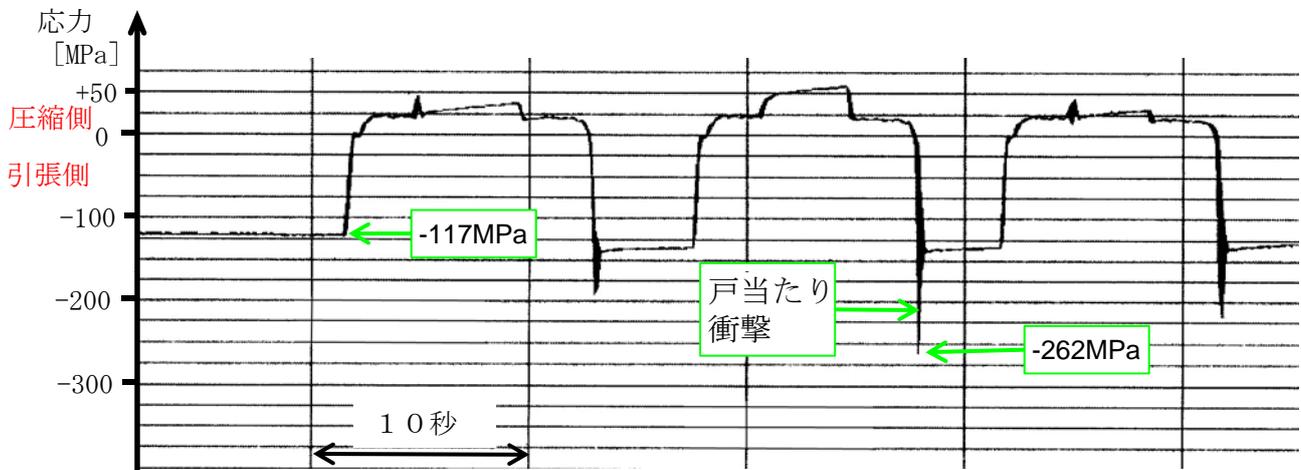
付図9 接手ねじに発生した応力（その1）



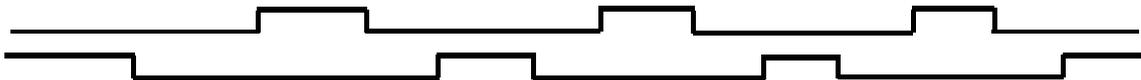
(1) ドアを閉状態として圧縮空気を供給した場合



(2) 通常動作の場合

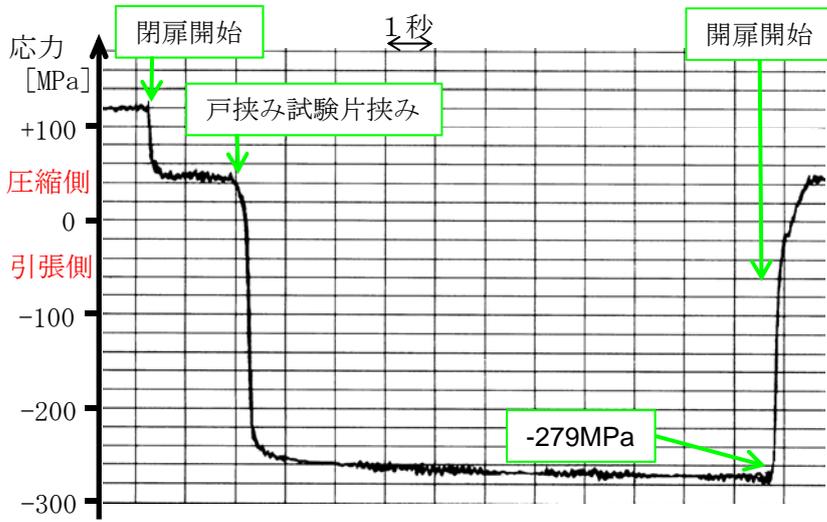


開扉の状態
閉扉の状態

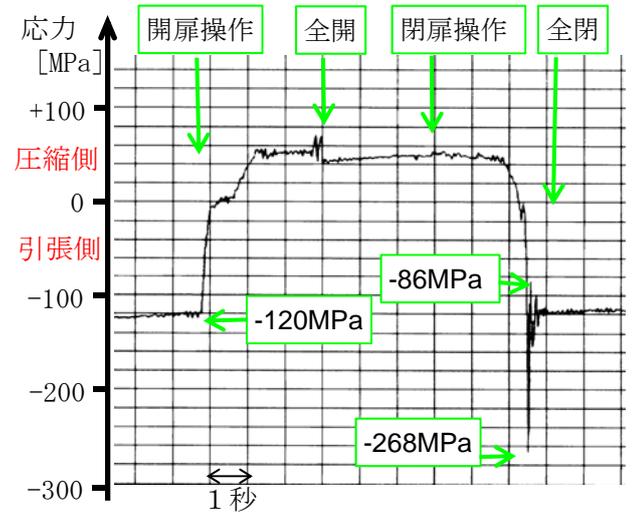


(3) 通常のドア開閉における状況

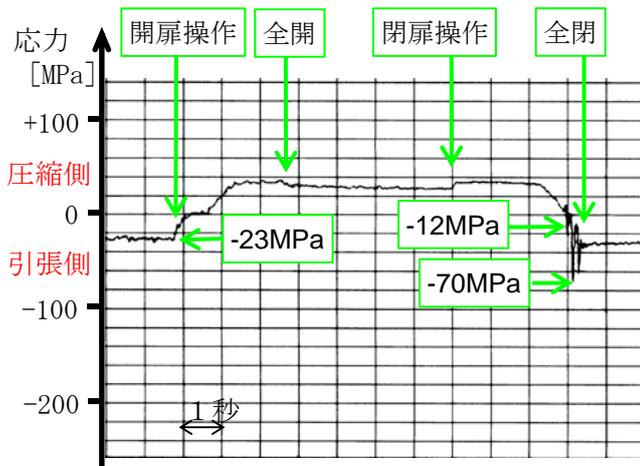
付図9 接手ねじに発生した応力（その2）



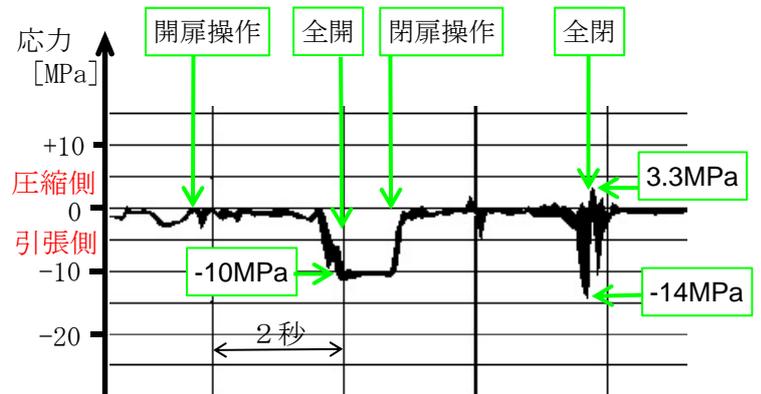
(4) ドアの最下部に戸挟み試験片を挟んだ場合



(5) 戸吊り金具等にグリス塗布した場合



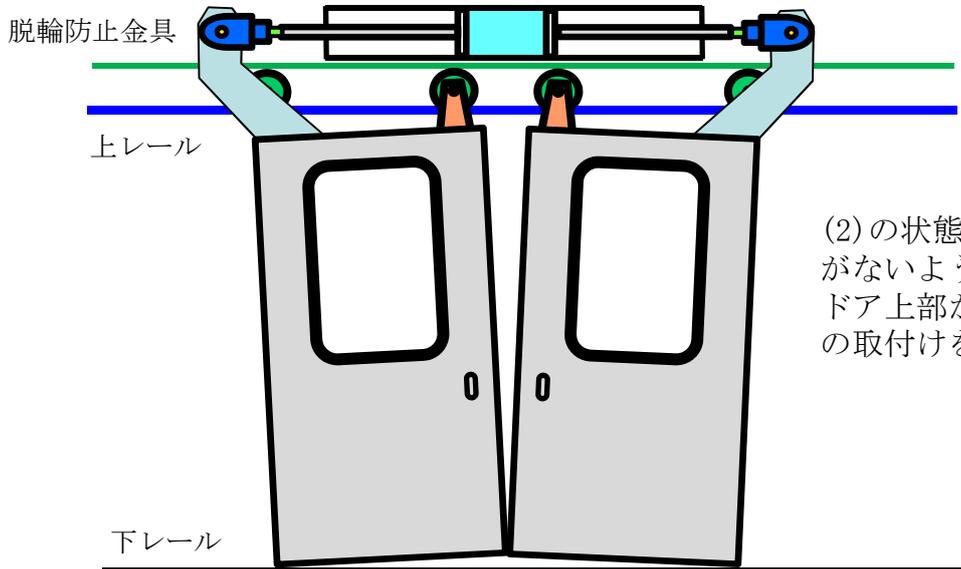
(6) 対策型接手ねじ①の場合



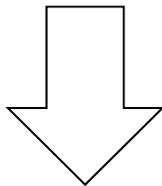
(7) 対策型接手ねじ②及び対策型二又とし、戸吊り金具ピン取付穴を約3mm削正した場合

付図10 ドアを閉めるときの解析イメージ

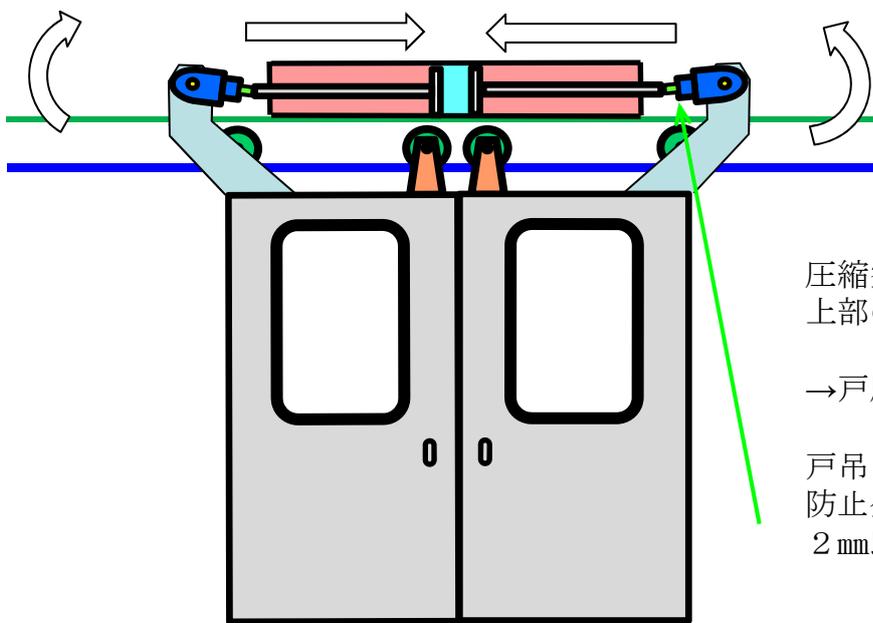
(1) 圧縮空気がなくドアを閉めた状態



(2)の状態のときに戸先ゴムに隙間がないよう、圧縮空気がない時にドア上部が2mm程度開くようにドアの取付けを調整している。



(2) 圧縮空気を供給し、ドアを閉めた状態



圧縮空気の供給により、戸先ゴム上部の隙間2mmが無くなる。

→戸尻側が上昇する。

戸吊り金具の上昇は、戸車が脱輪防止金具に接触することにより約2mm以下に抑えられる。

c寸法が小さい場合、戸吊り金具が上昇することにより、ピンを介して接手ねじに曲げの力が作用する。

本重大インシデント発生要因の分析概要図

(FTA*における「フォールトの木」を参考に作成) *FTA:Fault Tree Analysis

