

2002-4

鐵道事故調查報告書

東武鐵道株式会社野田線運河駅～梅郷駅間列車火災事故

平成14年10月25日

航空・鐵道事故調查委員會

本報告書の調査は、東武鉄道株式会社野田線運河駅～梅郷駅間列車火災事故の鉄道事故に関し、航空・鉄道事故調査委員会設置法に基づき、航空・鉄道事故調査委員会により、鉄道事故の原因を究明し、事故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、事故の責任を問うために行われたものではない。

航空・鉄道事故調査委員会

委員長 佐藤 淳 造

東武鉄道株式会社野田線運河駅～梅郷駅間
列車火災事故

[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	2
1.2.1	調査組織	2
1.2.2	調査の実施時期	2
1.2.3	原因関係者からの意見聴取	2
2	認定した事実	2
2.1	運行の経過	2
2.2	人の死亡、行方不明及び負傷	3
2.3	乗客の避難誘導の状況	3
2.4	気象に関する情報	4
2.5	車両に関する情報	4
2.5.1	事故発生車両の概要	4
2.5.2	損傷状況(5574号車)	5
2.6	鉄道施設に関する情報	7
2.6.1	電車線路	7
2.6.2	変電所	8
3	事実を認定した理由	8
3.1	車両及び施設の状況に関する解析	8
3.1.1	パンタグラフ及びトロリ線	8
3.1.2	パンタグラフの支持碍子	9
3.1.3	車両用避雷器	10
3.1.4	車両の屋根から車内天井に至る部分の損傷状況	12
3.2	火災の発生に関する解析	12
3.2.1	列車火災発生に至る経過	12
3.2.2	車内への延焼過程の詳細	14
3.2.3	変電所の故障選択装置の状況	15
4	原因	16
5	所見	16
6	参考事項	17

付図 1	路線図	18
付図 2	現場付近の地形図と電車線路の被害状況	19
付図 3	車両形式図(モハ 5574 号車)	20
付図 4	車両の屋根上の損傷状況	21
付図 5	車両室内の天井の損傷状況	22
付図 6	パンタグラフ支持部の断面構造図	23
付図 7	パンタグラフの損傷状況	24
写真 1	車両屋根上の損傷状況(1)	25
写真 2	車両屋根上の損傷状況(2)	25
写真 3	パンタグラフの支持部の状況	26
写真 4	車内の天井の損傷状況	26
写真 5	パンタグラフの損傷状況	27
付属資料		
1	避雷器に関する資料	28
2	車両の延焼経過に関する資料	38
3	事故発生経過の推定に関する資料	42
4	故障選択装置の動作仕様に関する資料	46

鉄道事故調査報告書

鉄道事業者名：東武鉄道株式会社

事故種類：列車火災事故

発生日時：平成13年10月12日 6時27分ごろ

発生場所：千葉県野田市

野田線運河駅～梅郷駅間

平成14年10月3日

航空・鉄道事故調査委員会（鉄道部会）議決

委員長	佐藤淳造
委員	勝野良平
委員	佐藤泰生（部会長）
委員	中川聡子
委員	宮本昌幸
委員	山口浩一

1 鉄道事故調査の経過

1.1 鉄道事故の概要

東武鉄道株式会社（以下「同社」という。）の野田線船橋駅発大宮駅行き6両編成の上り第538列車（以下「本件列車」という。）の運転士は、平成13年10月12日（金）、運河駅を定時（6時25分）に発車し、速度約70km/hでノッチをオフにして惰行運転に入ったところ、間もなく後方で異音を感知したため、直ちに気笛吹鳴とともに非常ブレーキを操作して列車を停止させた。

運転士は、列車が停止した後、後方を確認したところ、2両目（車両は前から数え、前後左右は進行方向を基準とする。以下同じ。）の車両のパンタグラフ付近及び車内からの発煙を認めたため、消火器を使用して消火作業を行った。その後、少量の発煙が続いたため、消防車による放水が行われた。

本件列車には、約100名の乗客が乗車していたが、乗客及び乗務員（運転士及び車掌）に負傷はなかった。

1.2 鉄道事故調査の概要

1.2.1 調査組織

(1) 航空・鉄道事故調査委員会は、平成13年10月12日、本事故の調査を担当する主管調査官及び担当調査官2名を指名した。また、委員及び調査官を現場に派遣して調査を行った。

関東運輸局は、本事故調査の支援のため、職員を現場に派遣した。

(2) 本事故における車両屋根上での火災について、各技術分野の専門的知見を総合することにより、その発生要因を解明するため、当委員会委員 宮本 昌幸、同 中川 聡子、日本ガイシ株式会社電力技術研究所 入江 孝 所長及び財団法人電力中央研究所横須賀研究所 合田 豊 上席研究員からなるワーキンググループ（以下「WG」という。）を設置した。また、本 WG の検討にあたり、社団法人海外鉄道技術協力協会、財団法人鉄道総合技術研究所及び鉄道車両用機器製造者の協力を得た。

1.2.2 調査の実施時期

平成13年10月12日、16日、22日	}	現場調査
11月6日、16日		
平成13年12月3日		WG 設置

WG では、車両及び電車線路に関する詳細な調査・試験を実施し、その結果の分析を行うとともに、推定される火災の発生原因等に関し討議を重ね、避雷器の損傷状況、避雷器内部におけるアーク¹の発生経過、火災の発生原因及び車両の延焼経過等についてとりまとめを行った。

(付属資料参照)

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 認定した事実

2.1 運行の経過

本件列車は、平成13年10月12日、運河駅～梅郷駅間を走行中に、2両目の車両の

¹ アークとは、気体中の電極間に電圧をかけた場合に発生する強い光様の電流の流れをいう。アーク部分の電圧降下は比較的低いが電流密度は大きい。大気圧下では、気体温度は数千 となる。

パンタグラフ付近より火災が発生した。

列車火災発生時の状況は、運転士の口述によれば、概略次のとおりであった。

本件列車は、運河駅を定時（6時25分）に出発した。速度約70km/hでノッチをオフにして惰行運転に入ったところ、間もなく後方でボンという異音を感知した。このため、直ちに気笛を吹鳴するとともに、非常ブレーキを操作して、列車を停止させた。列車の停止位置は、第184号踏切道（大宮駅起点32k280m。以下「大宮駅起点」は省略。）を約35m過ぎた付近（32k245m）であった。

列車が停止した後、後方を確認したところ、2両目の車両（5574号車）のパンタグラフ付近及び車内からの発煙を認めたため、列車無線で業平橋にある運転指令に通報を行った上で、パンタグラフを降下させ、消火器を使用して屋根上及び車内の消火作業を行った。

その後、消防車が到着し、き電停止²後、消防車による放水が行われた。

また、列車の最後尾にある車掌室に乗務していた車掌の口述によれば、本件列車が運河駅を出発後、第185号踏切道（32k668m）付近を走行中にビニールが焼けるような異臭がし、1～2秒後に臭いが急に強くなったように感じたとしている。

（付図1、2参照）

2.2 人の死亡、行方不明及び負傷

なし

2.3 乗客の避難誘導の状況

本事故における乗客の避難誘導の状況は、車掌の口述によれば、概略次のとおりであった。

本事故が発生した際、車掌室から車内の様子を見たところ、前方の車両に煙が立ち込めているのが見え、7～8名の乗客が車掌室に走ってきて「ドアを開けてくれ」と言った。

列車が停止したことを確認した後、車内放送により、左側のドアを開ける旨のアナウンスを行うとともに、避難に当たっては足下に注意するようアナウンスを行い、ドアを開けた。

乗客は、ドアから地面に飛び降り避難した。その際、松葉杖を使っている女性など数名の乗客が飛び降りることができずにいたため、先に降りた乗客とともに降車を手伝った。

² き電とは、変電所 - 電車線路 - 車両（モーター等） - 帰線（レール等） - 変電所からなる回路により、電車で電力を供給することをいう。また、変電所においてき電を止めることをき電停止という。

約 100 名の乗客は 3 箇所に分散して避難していたため、全員を近くの駐車場に誘導し、「けがをしている人、気分の悪い人はいませんか」と聞いたが、申告者はいなかった。

乗客には、「バスの手配をしておりますので、しばらくお待ちください」とのアナウンスを行っていたが、待っている乗客は徐々に少なくなった。

9 時ごろ、列車が発車できる状況になったため、待っていた約 20 名の乗客に梯子を使って乗車してもらい、梅郷駅まで移動した。

2.4 気象に関する情報

気象庁我孫子地域気象観測所における当日 6 時の気象状況の記録は、以下のとおりであった。

降水量	0 mm
気温	16.4
風速	0 m/sec

2.5 車両に関する情報

2.5.1 事故発生車両の概要

(1) 車両諸元等

車種	直流電車（直流 1500V）
編成両数	6 両
記号番号	モハ 5574（本件列車の編成を本文図 1 に示す。）
車体更新（モハ 5574）	昭和 59 年 10 月（昭和 33 年 11 月に新製した車両の車体を更新）
定員（モハ 5574）	170 名（座席定員 58 名）
ブレーキ装置の種類	電磁直通空気ブレーキ（発電ブレーキ及び回生ブレーキは有していない。）
パンタグラフの形式	PT4815-C-M（下枠交差型） 押し上げ力：58.8 N（6 kgf） 製造：昭和 47 年 4 月、すり板交換：平成 13 年 6 月 29 日
車両用避雷器の形式	RVDE-21AP 製造：昭和 59 年 5 月 （避雷器の接地線は、同社の仕様により、1500V 車両用架橋ポリエチレン電線（3.5 mm ² ）が取付けられていた。）

（付図 3、4 参照）

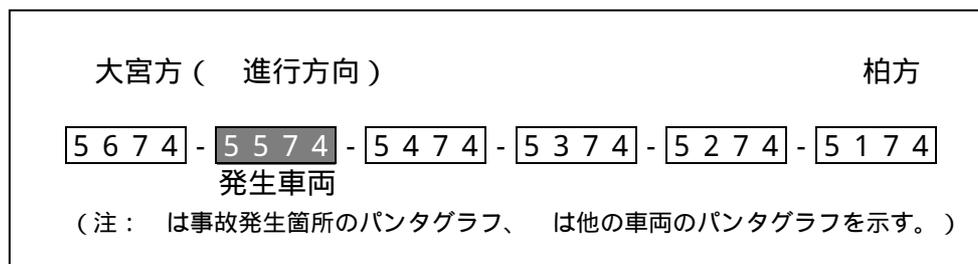


図1 本件列車の編成

(2) 検査歴 (5574号車)

重要部検査	平成 12 年 7 月 14 日
月検査	平成 13 年 9 月 13 日
列車検査	平成 13 年 10 月 9 日

各検査の記録には、本事故に直接結びつくと考えられるような記載は認められなかった。

また、同社によれば、始業前の点検時においても、パンタグラフ等に不具合は認められなかった。

(3) 運用状況

当該車両は、当日 4 時 57 分に高柳車両基地を出庫し、船橋駅で折り返し後、船橋駅発大宮駅行きの上り列車として運河駅～梅郷駅間を走行していたところ、本事故が発生した。

本事故発生の前日は、当該車両は、七光台車両基地を 21 時 06 分に出庫し、主に柏駅～船橋駅間の運行に用いられ、24 時 51 分に高柳車両基地に到着して留置された。

(付図1参照)

2.5.2 損傷状況 (5574号車)

(1) 5574号車の主な損傷状況は、以下のとおりであった。

屋根上

パンタグラフの左側後方の支持部にある4箇所の取付けボルトのうち3箇所が溶損して、屋根板に穴が生じており、車内天井まで貫通していた。屋根板に生じた穴の大きさは、2箇所が直径約3cm、1箇所が直径約8cmであった。また、避雷器の接地線を屋根板に取付けている箇所に溶損が生じていた。

上記のパンタグラフ周辺部から後方にかけて屋根上絶縁コーティング材が焼損し、パンタグラフの後方に近接するクーラー外キセ³の左側前部も焼損してい

³ クーラー外キセとは、屋根上のクーラー機器を覆っているカバーをいう。

た。

(付図4、6及び写真1、2、3参照)

車内

車内の天井化粧板は、屋根上から貫通する穴が生じ、その周辺の天井化粧板には、表面の剥離や浮き上がりが認められた。また、クーラーの吸込グリル及び吹出グリルが焼損し、吊り広告が焼失していた。(付図5、6及び写真4参照)

屋根上から貫通した穴の直下の車内床上には、本事故により溶融して落下したものと考えられる金属粒が複数認められた。

パンタグラフ

パンタグラフは、舟体⁴及び上枠を中心に大破していた。(付図7及び写真5参照)

分断した舟体の一部は、屋根上及び35号柱(32k450m)付近の地面に落下していた。(付図2参照)

パンタグラフの2段になっている支持碍子はいずれも破損し、碍子を固定している金属板の一部が溶損していた。(付図6及び写真3参照)

避雷器

避雷器は、パンタグラフの台枠の左側後方の位置に固定されており、保護カバーの中に納められている。(写真1参照)

避雷器は、碍子が細かく破損しており、避圧膜に放圧の形跡が認められた。また、保護カバーは、内側が黒くすすけており、焼損により一部にガラス繊維が露出していた。

また、避雷器をパンタグラフの台枠に固定している取付け金具部分に溶損が見られた。

避雷器と屋根板とを結ぶ接地線は、被覆内の電線が溶損していた。

- (2) パンタグラフ受電部からモーター部へ続く車両の主回路機器は、過大な電流が導通した痕跡等は認められず、事故後に行った絶縁耐力試験及び絶縁抵抗試験の結果にも異常は認められなかった。また、主回路に直列に接続された保護回路(避雷器は、主回路に並列に接続されているため、ここには含まれない。)に異常は認められず、保護装置が動作した形跡も認められなかった。

⁴ 舟体とは、パンタグラフの最上部にあり、トロリ線と直接接触するすり板が取付けられている弓形の部材をいう。

2.6 鉄道施設に関する情報

2.6.1 電車線路

(1) 構造等

吊架方式 シンプルカテナリ吊架式（本文図2参照）

トロリ線の種類 異形溝付き錫入り硬銅線（170mm²）

電車線路には、エアセクション⁵が、43号柱（32k810m）から41号柱（32k720m）の間に設けられている。エアセクションに設置された、両電車線路間の開閉器は、常時「閉」（両電車線路間は導通状態で、電位差は生じない状態）となっており、事故発生後に調査した結果においても「閉」の状態であった。

(2) 損傷状況

電車線路の主な損傷状況は、以下のとおりであった。

トロリ線

32k668m から 32k490m 付近にかけて約 178m にわたり、トロリ線にアークにより生じた溶融痕（以下「アーク痕」という。）が点在し、その先の 32k306m 付近のトロリ線にもアーク痕が認められた。

35号柱（32k450m）付近のトロリ線に曲がりが見られた。

ハンガ

32k502m から 32k475m にかけて、複数のハンガが損傷していた。

振止金具等

35号柱（32k450m）付近の電車線路に、振止金具の屈曲、き電ブランチの素線断線が認められた。

（本文図2及び付図2参照）

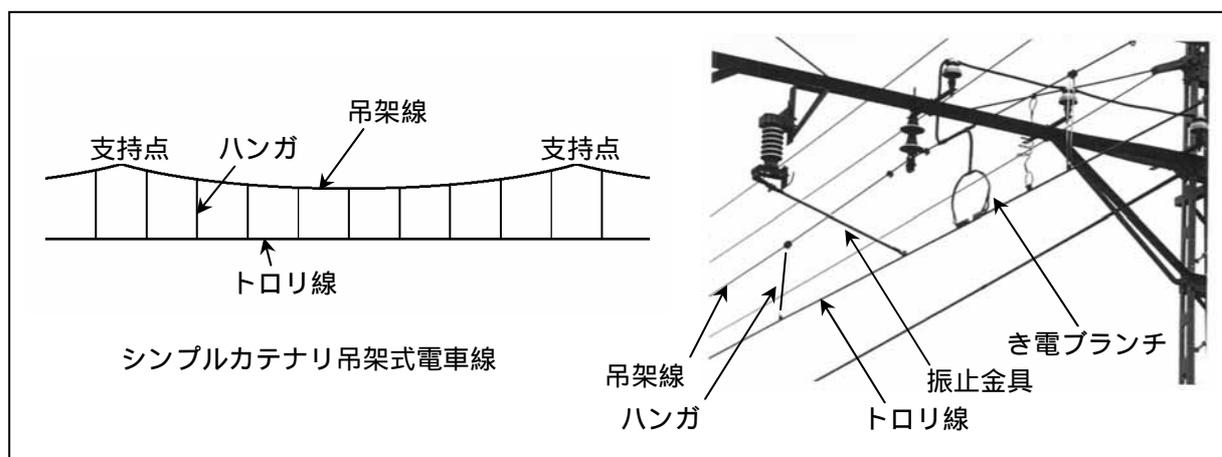


図2 電車線路の概要

⁵ エアセクションとは、電車線路の電氣的区分装置の一種で、電車線を重複平行させ、電車線相互間の平行部を一定間隔で保ち、空気の絶縁を利用した装置をいう。

2.6.2 変電所

(1) 変電所の位置関係等

事故が発生した区間は、野田変電所と豊四季変電所の双方からの並列き電となっている。電車線路に大きな損傷が生じていた 35 号柱（32k450m）と各変電所との距離は、野田変電所が上り方に約 3.6 km、豊四季変電所が下り方に約 8.1 km であった。

なお、野田変電所及び豊四季変電所には、き電用直流高速度遮断器⁶、 / 形き電線故障選択装置⁷（以下「故障選択装置」という。）及びき電線連絡遮断装置等のき電回路保護装置が設けられている。

(2) 事故発生時の記録

野田変電所及び豊四季変電所の動作記録によれば、6 時 27 分に、両変電所とも故障選択装置が動作してき電を遮断していた。

なお、各変電所の配電盤に設けられたき電系統別の電流計には置き針があり、電流計の示した最大値を知ることができるようになっている。

電流計の置き針の表示及び故障選択装置の動作後の表示等は、表 1 のとおりであった。

表 1 変電所の表示及び設定値

		野田変電所	豊四季変電所
電流計の置き針の表示（最大電流値）		5800 A	4800 A
き電用直流高速度遮断器の設定値		7000 A	6000 A
故障選択装置	事故後の最大 / 表示	3750 A	2750 A
	故障選択装置の設定値	2500 A	2500 A

3 事実を認定した理由

3.1 車両及び施設の状況に関する解析

3.1.1 パンタグラフ及びトロリ線

(1) パンタグラフの状況

⁶ き電用直流高速度遮断器とは、き電回路に設定値を超える過大電流が流れたとき、電流が大きくならないうちに早期に電極を開き、電流を制限して高速度に遮断することができる機能を持つ直流遮断器をいう。

⁷ /形き電線故障選択装置とは、微小時間内のき電電流増加分が設定値を超えた場合に、き電用高速度遮断器に対しトリップ信号を発生し、遮断動作させる装置をいう。

舟体の損傷状況

a パンタグラフの舟体は、わずかな間隔をあけて前後2つの部分で構成されている。当該舟体は、前側は3つに、後側は2つに分断していた。舟体のすり板には、進行方向に沿って3本の溝状の摩耗痕（以下「溝摩耗」という。）が認められた。これらの溝摩耗の位置は、舟体の中央から、左側に70mm、110mm及び200mmであった。（写真5（2）参照）

溝摩耗には、溶融痕及び球状の金属粒が付着したアーク痕が認められた。

b トロリ線は、列車の走行によるすり板の摩耗が極力均等になるよう、左右にジグザグの偏位を設けて吊架してある。すり板の溝摩耗の位置と事故発生区間におけるトロリ線の偏位とを照らし合わせたところ、上記200mmの位置の溝摩耗は、エアセクションによりトロリ線がオーバーラップしている箇所の偏位に相当していた。また、70mm及び110mmの位置の溝摩耗についても、アーク痕がトロリ線に点在している中で、溝摩耗の位置にほぼ相当する偏位の箇所に存在するアーク痕が多数認められた。なお、本事故におけるすり板の溝摩耗は、通常の運転時に比べ過大な電流が流れたことによりすり板が軟化して発生したものと考えられる。（付図2参照）

c なお、溝摩耗は舟体に対して垂直に形成されており、溝摩耗が形成された時点では、パンタグラフは、正常な角度でトロリ線と接触していたものと推定される。

パンタグラフの機構上の不具合の有無

パンタグラフは、本事故において上部を中心に大破したが、事故直後において同社係員がパンタグラフの残部を降下をさせた際には、降下可能であった。このため、パンタグラフの下枠及び主ばね等の動作機構に固渋等の不具合はなかったものと推定される。

(2) トロリ線のアーク痕の分析

トロリ線のアーク痕について、X線分析装置を用いて表面元素分析を行った。

その結果、トロリ線のアーク痕の溶融金属からは、銅（Cu）と微量の塩素（Cl）が検出された。銅は、パンタグラフのすり板及びトロリ線の主成分であり、塩素は、銅の表面生成物である緑青に含まれる成分である。このため、アーク痕の成分は、すり板若しくはトロリ線に由来するものと考えられ、飛来物等に由来すると思われるような他の成分は検出されなかった。

3.1.2 パンタグラフの支持碍子

パンタグラフは、台枠の四隅に支持碍子を2段重ね（下部は2個の碍子、上部は1個の碍子により支持）にして、屋根上に設置されている。（付図4、6参照）

事故発生車両のパンタグラフの支持碍子は、パンタグラフから見て左側後部のものが全て割れていた。また、この支持部のパンタグラフ取付台（下部の碍子と屋根とを固定している金属板）のボルト部において屋根板を貫通する穴が生じており、パンタグラフ取付金（上部の碍子と下部の碍子との間に設けられた金属板）やこの付近のパンタグラフ台枠にもアークにより生じた顕著な溶融痕が認められた。（写真1、3参照）

このため、事故により破損した支持碍子の破片及び当該パンタグラフを固定していた残りの支持碍子を用いて、破損状況や絶縁性能等について以下の調査を行った。

外観検査

直流フラッシュオーバー試験（碍子に電圧を印加し、絶縁破壊が起こる電圧を測定）

吸湿劣化試験（磁器片を試験液中に浸し、浸透状況を調査）

磁器内部のイオン移動調査（磁器内部の元素濃度を分析）

アークによる偏熱破壊試験（碍子をアークにより偏熱破壊させ、破損状態を調査）

これらの調査の結果、支持碍子が事故の起点となったと推定できる痕跡は認められず、また、支持碍子に、破損するに至る劣化も認められなかった。

3.1.3 車両用避雷器

（1）本件避雷器の状況

事故発生車両のパンタグラフに設置されていた避雷器（以下「本件避雷器」という。）を分解調査したところ、以下のような状況が認められた。

a 本件避雷器は、本文図3に示すとおり、内部要素（特性要素、ギャップ要素などから構成され、約3kgの質量を有している。）を、下部に設けたばねで受ける構造となっている。内部要素を構成する各要素は、相互に固定されずに積み重ねられており、ばねの力のみで押さえられていた。

b 内部要素には、碍子内で偏心していたことを示す痕跡が認められた。また、シャネツクロス⁸に、内部要素と繰り返し擦れ、摩耗することにより生じた穴が認められた。

c ギャップ要素の外周部の一部に削られたような溝状の痕跡が認められ、内部にはアークが吹き込んだことによるものと考えられる黒いすす状の痕跡が認められた。また、シャネツクロスのこれに対応する位置に穴が生じており、穴の下部にアーク発弧によるものと考えられる焦痕が認められた。

通常の使用状態における避雷器の状況を確認するため、本件列車の5両目に

⁸ シャネツクロスとは、碍子内部でアークが発生した際に碍子の偏熱破壊を防ぐため、内部要素と碍子との間に設けられた、遮熱効果の高いシリコンガラスクロス積層板のシートをいう。

設置されていた2台の避雷器（本件避雷器と同形式）を分解調査したところ、シャネツクロスに内部要素と擦れたことにより生じたものと考えられる穴が生じており、また、ばね部に巻き付けられた短絡銅帯の一部が破断した状況が認められた。

これらのことから、本件避雷器は、使用過程において、車両の走行により生じた運動に伴い、ばね上に積まれた内部要素が繰り返し振動し、内部要素を構成する各要素毎に偏心して、側面がシャネツクロスと擦れ合っていたものと考えられる。

（付属資料1参照）

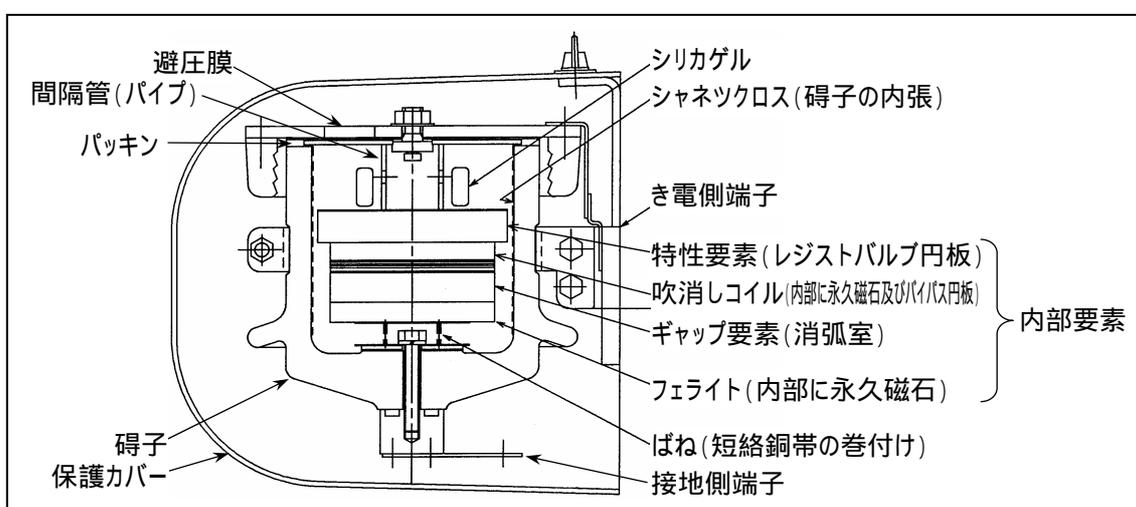


図3 避雷器の内部構造図

(2) 本件避雷器の設計の経緯

本件避雷器は、内部要素をその下部に設けたばねで受ける構造となっているが、この形式は、先に設計された上部にばねを設ける構造の避雷器を設計変更して製品化されたものであった。設計変更を行った際に、ばねの仕様は変更されなかったため、内部要素の押し付け力は、先に設計された形式と比較して、内部要素の質量相当分（約3kg）低いこととなる。これが結果として、内部要素の押し付け力の不足を招き、内部要素の振動・偏心の発生につながったものと推定される。

鉄道車両用直流避雷器の振動試験の方法は、「鉄道車両用直流避雷器の試験方法（JIS E 5003）」において、「鉄道車両部品 - 振動試験方法（JIS E 4031）」によることとされている。上記に述べた上部にばねを設ける構造の避雷器については、この振動試験が実施されていたが、下部にばねを設ける本件避雷器の形式については、振動試験は実施されていなかった。

3.1.4 車両の屋根から車内天井に至る部分の損傷状況

車両室内の天井化粧板を取り外し、屋根内部の損傷状況を調査したところ、以下のような状況が認められた。

- (1) パンタグラフ取付台のボルト部において生じた屋根板の穴の直下には、冷風ダクト（屋根上のクーラー機器で作成した冷気を車内に送り出すためのダクト）が設けられていた。冷風ダクトには、屋根板の穴に対応する位置に大きな溶損が認められ、この溶損箇所には、ダクトのアルミニウム材が溶融した痕跡が認められた。その下部の天井化粧板も溶損しており、車内まで穴が貫通した状態となっていた。
 - (2) 冷風ダクトは、(1)の溶損箇所からクーラー機器との接合部に至るまで変形し、内部の断熱材が変色しており、高温の熱風が吹き抜けた形跡が認められた。
 - (3) クーラー機器本体は、熱により損傷しており、空気の吸込口から吹出部にかけ高温の熱風が吹き抜けた形跡が認められた。
- (付属資料2 参照)

3.2 火災の発生に関する解析

3.2.1 列車火災発生に至る経過

(1) 本事故の発生の起点

本事故は、車両の屋根上のパンタグラフ付近においてアークが発生したことによるものと考えられる。

本事故においては、事故後に行った本件避雷器の調査結果から、3.1.3で述べたとおり、本件避雷器の内部要素の側面に、アークの痕跡が認められた。

仮に何らかの理由によって、パンタグラフの一部が屋根に落下して地絡し、アーク発弧したことが本火災の起点となったと想定した場合には、避雷器を経由しない地絡回路が形成されるため、避雷器内部に今回のような痕跡を伴うアークが発生する可能性は考えにくい。また、パンタグラフ支持碍子の絶縁破壊、導電性飛来物による地絡及び主回路機器の地絡も、同様の理由によりアークの起点となった可能性は考えにくい。

また、先に述べたとおり、パンタグラフ、支持碍子及び主回路機器の調査結果においても不具合の痕跡は認められず、飛来物等の痕跡も認められなかった。

これらのことから、本事故は、まず避雷器の内部でアークが発生したことを発端とし、これがパンタグラフ付近におけるアークの発生に発展したものと推定される。

本件避雷器は、使用過程において、車両の走行により内部要素が繰り返し振動し、偏心して側面がシャネツクロスと擦れ合っていたものと考えられる。

避雷器の内部でアークが発生した原因は、このような内部要素の振動によって引き起こされた不具合により、避雷器内部の金属導体（例えば、吹消しコイル端子、短絡銅帯など）が破断して、電圧が印加されている部分と接地されている部分が接触し、短絡したことによるものである可能性が考えられる。

なお、付属資料 1 にこれらの解析結果の詳細が記述されているので、参照されたい。

(2) トロリ線のアーク痕と本事故の状況

本事故では、3.1.1の調査結果から、パンタグラフがエアセクション付近を通過している際に、通常より過大な電流が流れ始め、その後、トロリ線とすり板との間にアークが発生させながら走行し（この間、トロリ線にアーク痕が生じ、すり板は摩耗が進展）、35k502m 付近で舟体が分断してハンガと接触、35 号柱（32k450m）付近で舟体が振止金具等と接触し、舟体の一部が屋根上及び地面に落下したものと推定される。

その後 35k306m までの間は、トロリ線にアーク痕が認められないことから、パンタグラフとトロリ線との間の接触は、一旦、断たれた可能性が考えられる。35k306m 付近で認められたトロリ線のアーク痕は、舟体などの落下したパンタグラフの残部が走行中の振動などによりトロリ線と再び接触し、短絡回路を形成したことを示すものと考えられ、変電所の故障選択装置は、このときに動作したものと推定される。

(3) 本事故の経過に関する推定

本事故の発生経過について、考え得る一つの推定を行ったところ、以下のとおりである。

第 1 期（本事故の起点）

- a 本件避雷器の内部で短絡が起こり、アークが発生した。
- b 屋根上に設置されている本件避雷器の接地線が過電流により溶断し、この部分（屋根上）にアークが発生した。

第 2 期（アークによる被害の進展）

- a 本件避雷器に生じた接地線部のアーク及び避圧膜から吹き出したアークは一体となって、パンタグラフ台枠側面にある避雷器取付け金具と接地端子（接地線を屋根板に取付けるための端子）の間をバイパスし、避雷器の碍子を偏熱破壊させた。さらに、本アークは、走行風により、高電位側の電極が避雷器取付け金具部からパンタグラフ台枠後部（付図 7 及び写真 1 の円弧状溶損部付近）に転移し、次に、接地側の電極が、接地端子部からパンタグラフ取

付台ボルトの突起部に転移した。これにより、パンタグラフ取付台ボルト突起部の直上にあったシャント線⁹は溶融し、この部分に生じた大きなアークコラム¹⁰が、パンタグラフの台枠を円弧状に大きく溶融させ、また、走行風により後方に流れた熱風によりクーラー外キセを焼損させた。

- b アークの接地側の電極となったパンタグラフ取付台ボルト部では、屋根板が貫通して溶損した。
- c 屋根板の穴状の溶損箇所を通じて、アークの高温ガスが流入し、クーラーの冷風ダクト及びクーラー機器が焼損した。
- d パンタグラフの舟体が溶損により分断し、電車線路のハンガ等と接触した。舟体は、35号柱において振止金具と接触し、一部が屋根上及び地面に落下した。
- e パンタグラフとトロリ線との接触は途切れ、アークは消弧した。

第3期（再短絡による変電所でのき電遮断）

- a 屋根上に落下した舟体の一部がパンタグラフの下部と接触するとともに、パンタグラフの一部がトロリ線と再接触して短絡回路を構成した。この時点で、野田変電所及び豊四季変電所の故障選択装置が動作し、き電が遮断された。
- b 車内では、第2期において発生したアークに起因する高熱により火災が進展し、天井化粧板等が焼損するとともに、吊り広告が焼失した。

なお、屋根上に発生したアークが車内に進入し、火災を発生させるに至ったプロセスについての解析は、付属資料3を参照されたい。

3.2.2 車内への延焼過程の詳細

車両屋根上におけるアークの発生から、火災が車内にまで至る経過は、以下のよう
に推定される。屋根板には、パンタグラフ取付台ボルト部に3箇所の穴状の溶損
が見られたが、ここでは特に大きな溶損が生じた1箇所を例に記述した。なお、事
故発生時には、クーラーは動作していなかった。

- (1) 3.2.1(3)で述べた本事故の経過における の段階において、パンタグラフの台枠と取付台ボルト部との間に生じたアーク（本文図4の¹）により、ボルト部の屋根板が穴状に溶損し（本文図4の²）、その穴を通じて、アークによる高温ガスが屋根の内部に向かって吹き出す形（アークジェット¹¹）となった（本文図

⁹ シャント線とは、パンタグラフのパーツ間を短絡する導電性の接続線をいう。事故発生車両のパンタグラフに使用されていたシャント線は、可とう銅より線（断面積 22mm²）である。

¹⁰ アークコラムとは、アークの放電経路となっている部分で、電極間を結ぶ強く光る陽光柱をいう。

¹¹ アークジェットとは、kA級の大電流の場合に電極点から高速で噴出する金属蒸気のことをいう。

4の③)。このアークジェットにより、直下の冷風ダクトが溶融して穴が生じ、さらにその下部の天井化粧板も溶損して穴が生じた。

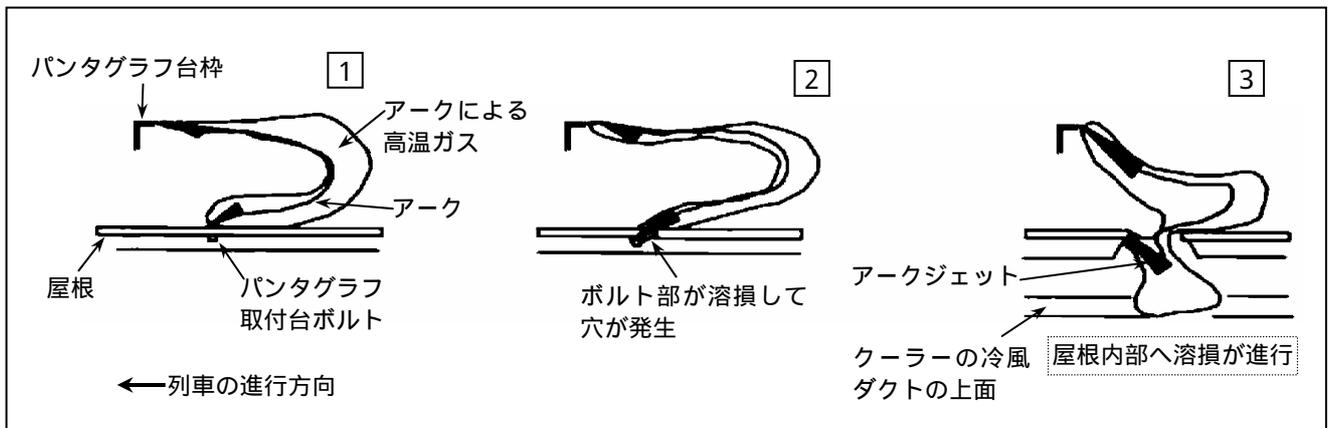


図4 アークの状況

(2)(1)により冷風ダクト内に高温の熱風が吹き込み、内部の断熱材が一部焼損するとともに、熱による変形、変色が生じた。

(3)熱風は、天井化粧板の穴状溶損部及び吹出グリルから車内に吹き出すとともに、クーラー機器を経由して吸込グリルからも車内に吹き出した。これにより、クーラー機器が焼損し、吹出グリルと吸込グリルとの間に設けられていた吊り広告が焼失した。

(4)これらの過程で溶融した金属が、一部、車内の床に落下した。

(付図4、5、6、写真3、4及び付属資料2参照)

3.2.3 変電所の故障選択装置の状況

変電所のき電電流は、き電区間に複数の列車が出入りしている場合や、列車のノッチの切替えにより、段階的に増加、減少を繰り返している。これらの各段階毎の電流変化量を、き電電流の I と称している。

故障選択装置は、 I が、ある時間幅 t に対して設定値を超えたときに、それを事故電流と見なし、き電用直流高速度遮断器を遮断動作させて、き電を停止することを目的とするものである。

野田変電所及び豊四季変電所における故障選択装置の設定値は、「電気工作物設計施工標準」に基づく標準想定短絡電流の値に対しては動作し、通常運転時の電流変化には動作しないよう、当該き電区間における運転実績を踏まえて、 $I = 2500A$ としていた。なお、当該故障選択装置は、 $t = 100\text{msec}$ の仕様となっている。

本事故の起点において故障選択装置が動作しなかったのは、本件避雷器の内部に

用いられている素子の特性(温度や印加電圧の上昇により抵抗値が一気に低下する)アークの転移や走行風の影響によるアーク長の変化、更には比較的高いアーク電圧の発生等により、アークの発生箇所が特殊かつ複雑な電氣的条件を有していたためと考えられる。これにより、事故電流が絞り込まれた可能性や、事故電流の立ち上がりが 100msec に対して、設定値の 2500A より緩やかだった可能性が考えられ、故障選択装置は、本事故発生時の I を事故電流として判別しなかったものと考えられる。

4 原因

本事故は、車両の屋根上のパンタグラフ付近に設けられた避雷器の内部においてアークが発生し、地絡したことに起因し、同避雷器の取付け金具及び接地線付近に生じたアークが走行風の影響によりパンタグラフ支持部付近に転移して、屋根上から車内に至る火災が発生したことによるものと推定される。

避雷器内部にアークが発生したのは、内部要素の押し付け力が不足していたことにより、車両の走行によって避雷器の内部要素に振動や偏心が生じ、それに起因して内部の金属が破断して接触し、短絡したことによるものである可能性が考えられる。

5 所見

1 . 本事故では、事故の起点である避雷器内部での短絡発生時に、変電所の故障選択装置が動作しなかった。仮に、この時点で故障選択装置が動作していれば、直ちに電を停止することができ、事故を初期の段階で食い止めることができた可能性があったものと考えられる。

現在の I 形の故障選択装置は、検知する電流の設定値を下げて感度を上げると、事故電流と列車の運転電流との判別が困難となり、正常な運転電流での不要動作を招くこととなるため、一定水準以上に感度を上げることができないという課題を有している。したがって、今後も類似の条件の下では、故障選択装置が事故電流を判別できない場合があり得るものと考えられる。

このようなことから、地絡事故について、その発生箇所が複雑な電氣的条件を有する場合であっても、より確実な検知が可能となるよう、変電所等の保護装置に関する研究への取り組みを一層強化することが必要であると考えられる。

2．鉄道車両用機器は、避雷器に限らず、長期間にわたり振動環境下で使用されることとなるため、機器の設計・製造、車両への取付け及び保守管理を行うに当たっては、振動に対する十分な配慮が必要である。また、各機器の電氣的・機械的特性を総合的に考慮して、システム全体として適切な協調が図られるよう配慮することも必要である。

このため、車両製造者、車両用機器製造者及び鉄道事業者は、連携を緊密化し、情報の共有化を図ることが必要であると考えられる。

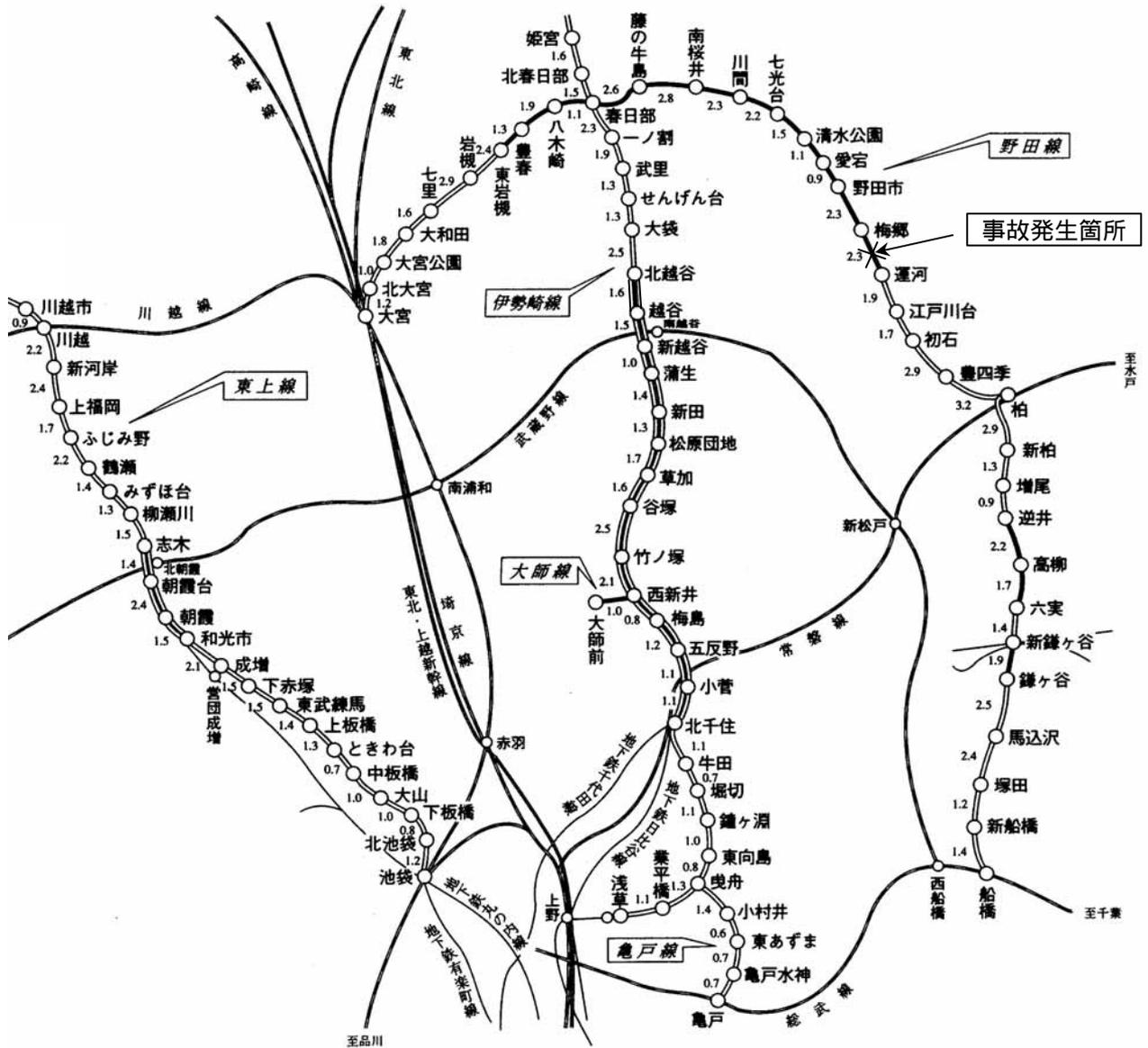
特にこれらの製造者は、鉄道事業者に対し、製造者のみが知り得る機器の特性や設計変更の情報などを積極的に開示し、必要に応じて、検査方法や更新時期等に関する的確な助言を行うことが必要であると考えられる。

6 参考事項

航空・鉄道事故調査委員会は、本事故の調査の過程において、本件避雷器と同形式の一部車両用避雷器の内部に不具合（シャネツクロスの穴の発生、短絡銅帯の断裂等）が生じている状況が認められたことから、類似事故の発生の可能性に鑑み、国土交通省鉄道局に情報提供を行った。

鉄道局では、平成 14 年 6 月、本情報提供に基づき、本件避雷器と同形式の車両用避雷器を保有している鉄道事業者に対し、早期に該当する避雷器の交換を実施するよう指導した。

付図1 路線図



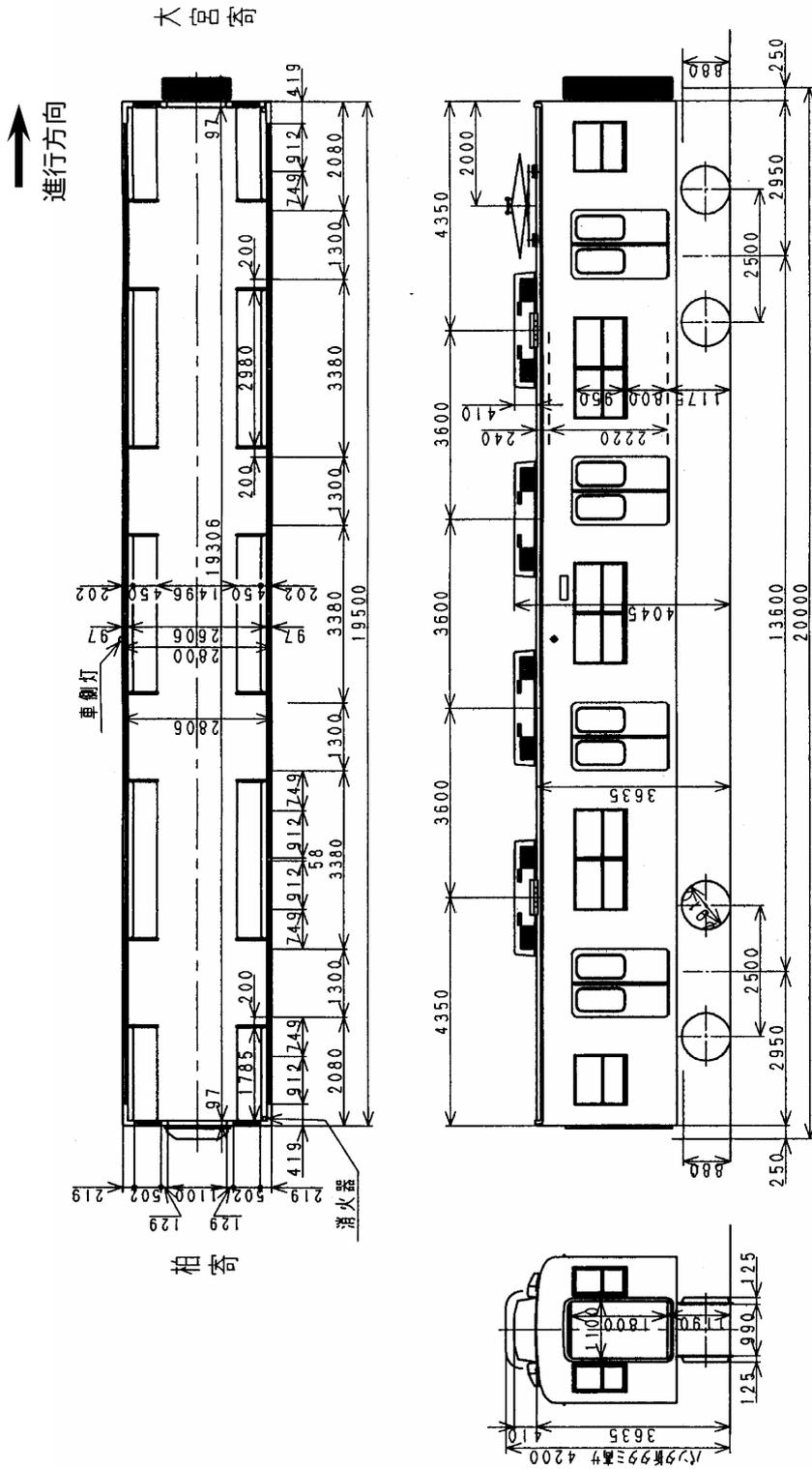
- 凡例
- 単線
 - == 複線
 - === 複々線

付図2 現場付近の地形図と電車線路の被害状況



(国土地理院 2万5千分の1地形図を拡大して使用)

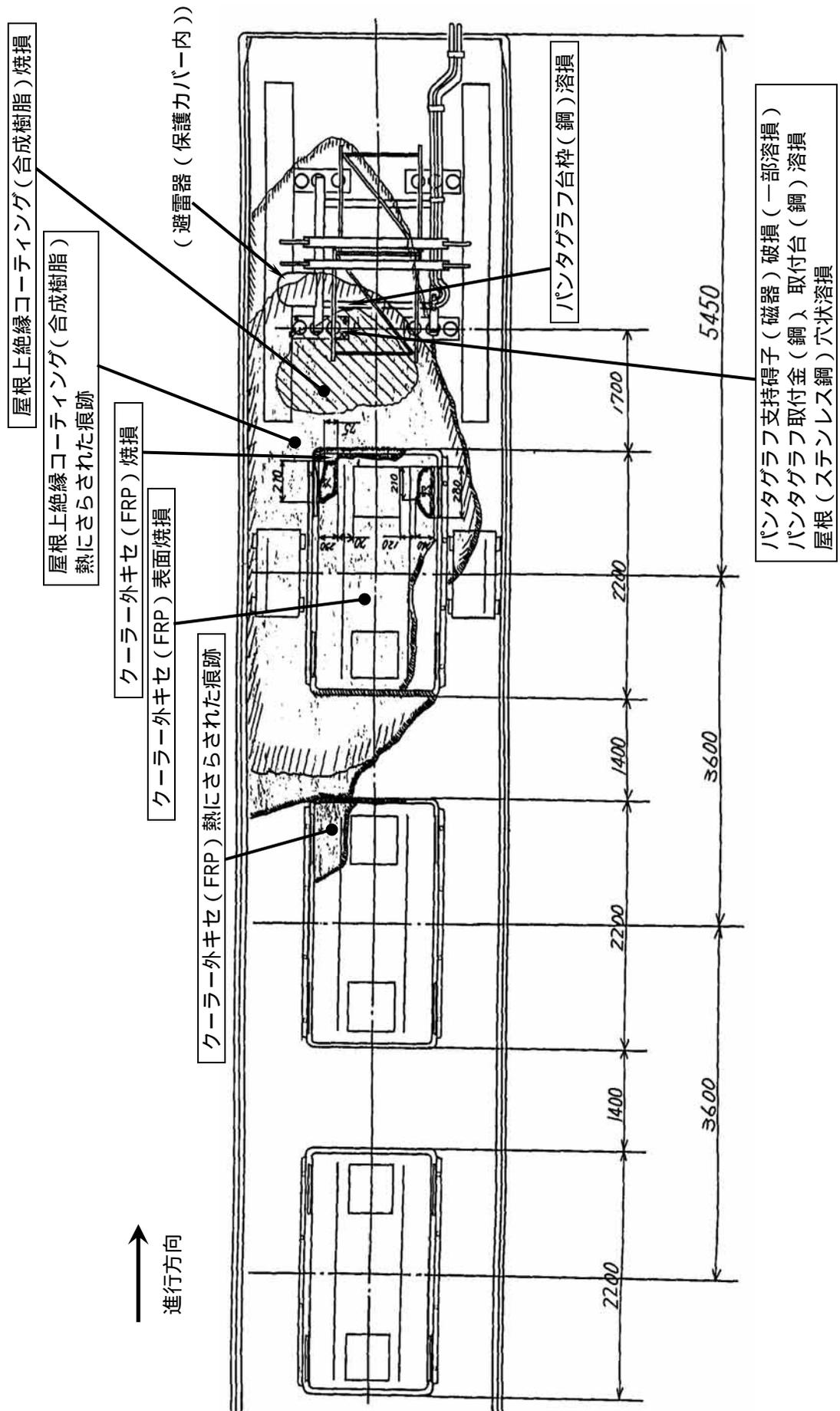
付図3 車両形式図(モハ5574号車)



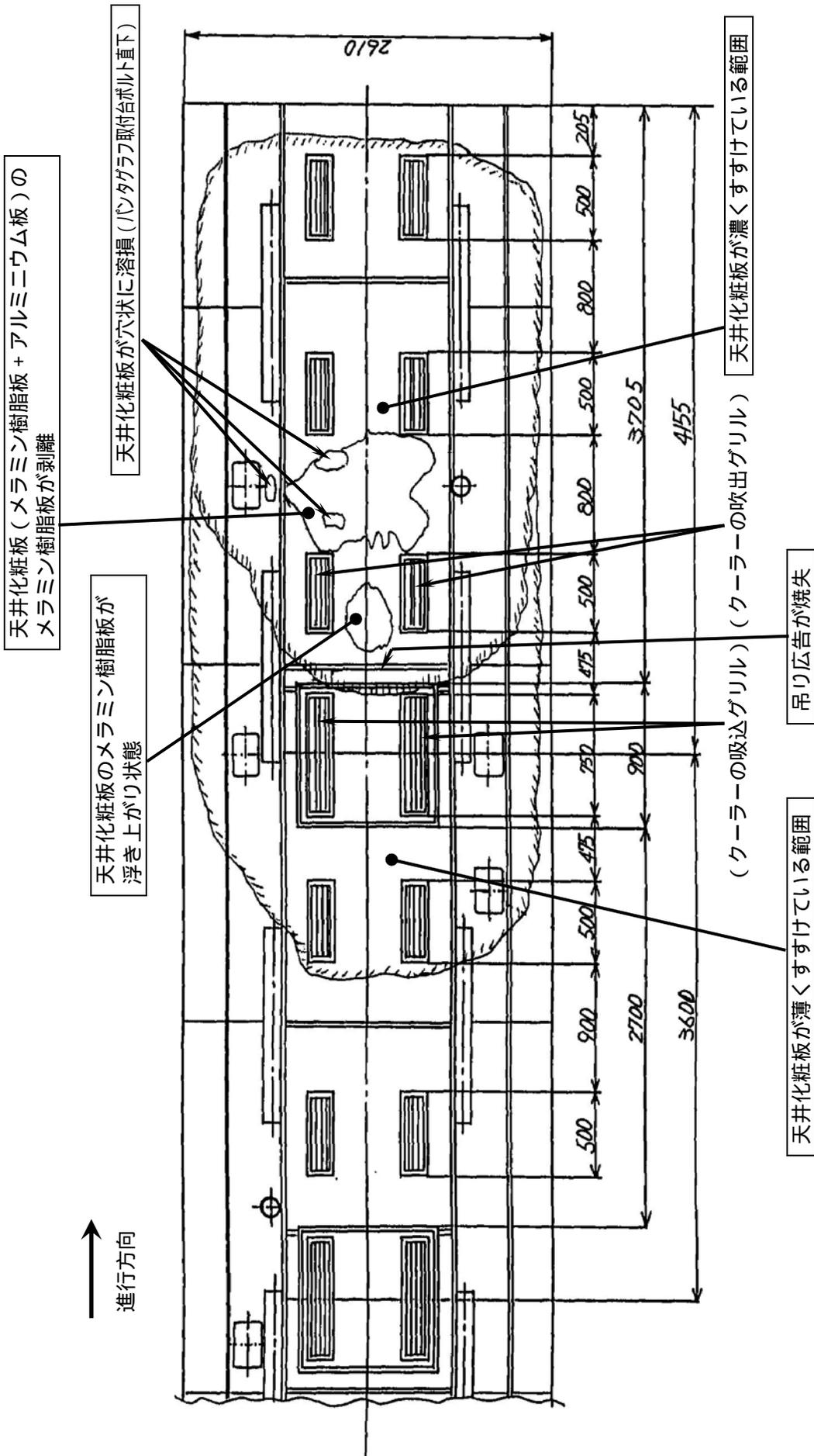
- 車種 直流電車
- 定員 170名(座席58名)
- 自重 41.0トン
- 最大寸法 20000×2806×4200

(提供：東武鉄道株式会社)

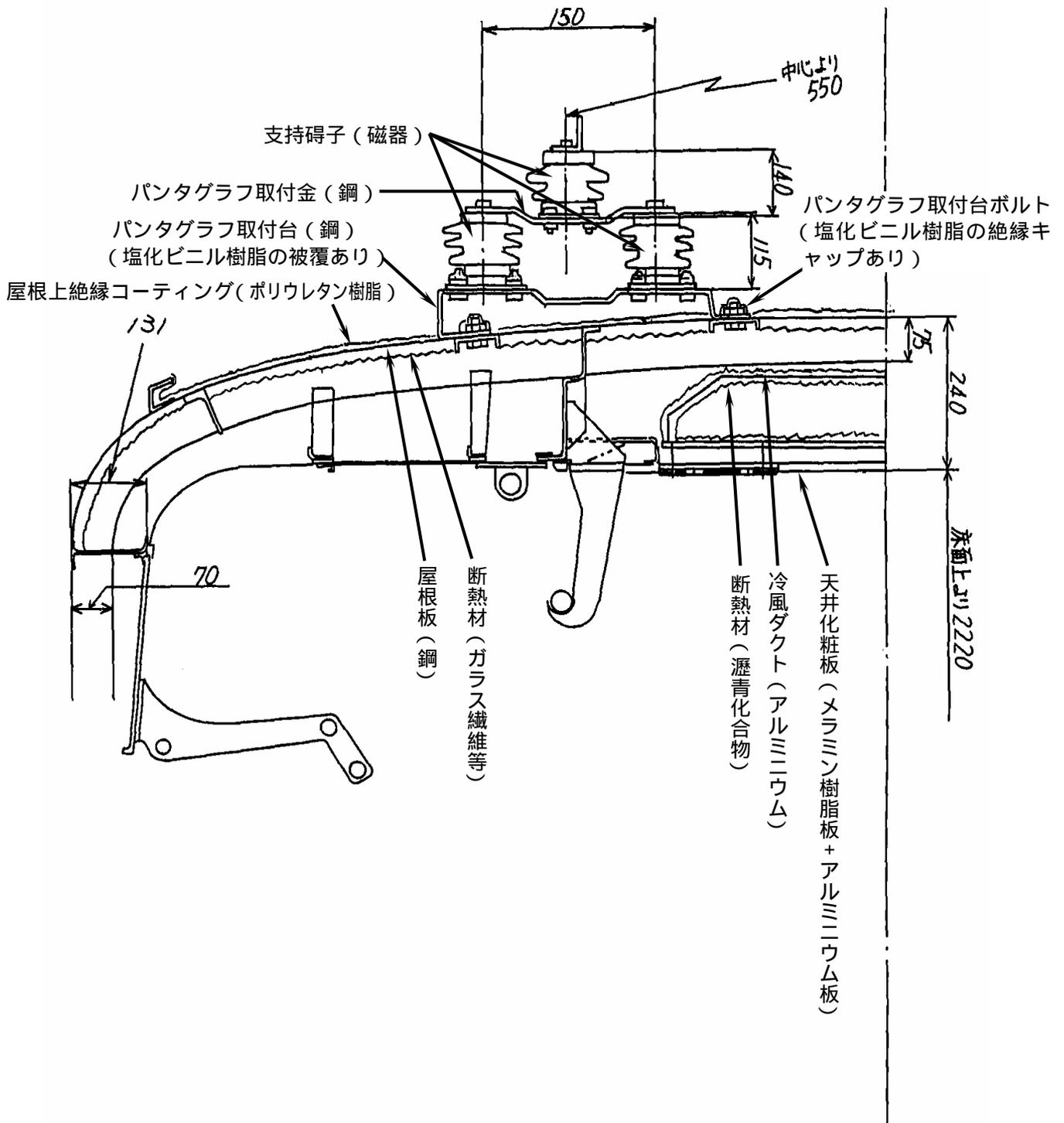
付図4 車両の屋根上の損傷状況



付図5 車両室内の天井の損傷状況



付図6 パンタグラフ支持部の断面構造図



付図7 パンタグラフの損傷状況

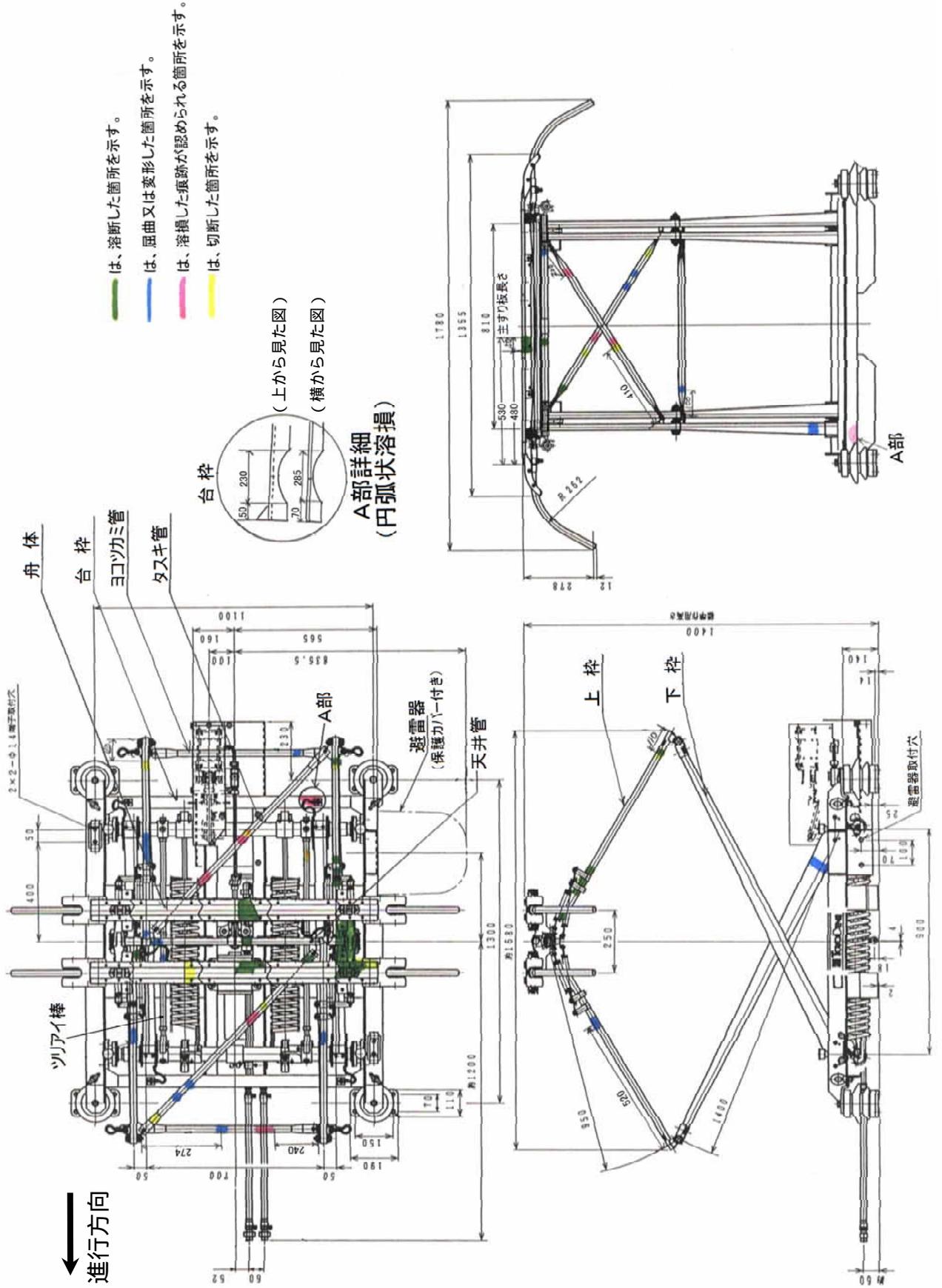


写真1 車両屋根上の損傷状況(1)

(事故後、パンタグラフを畳んだ状態)



写真2 車両屋根上の損傷状況(2)

(パンタグラフを撤去した状態)

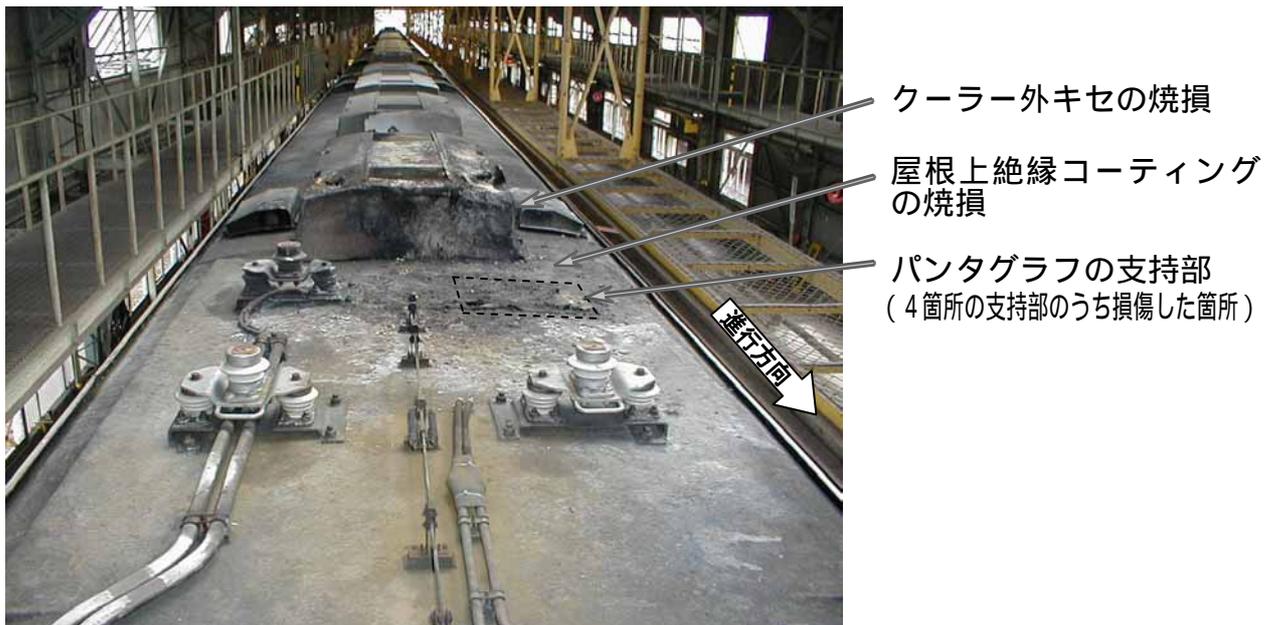
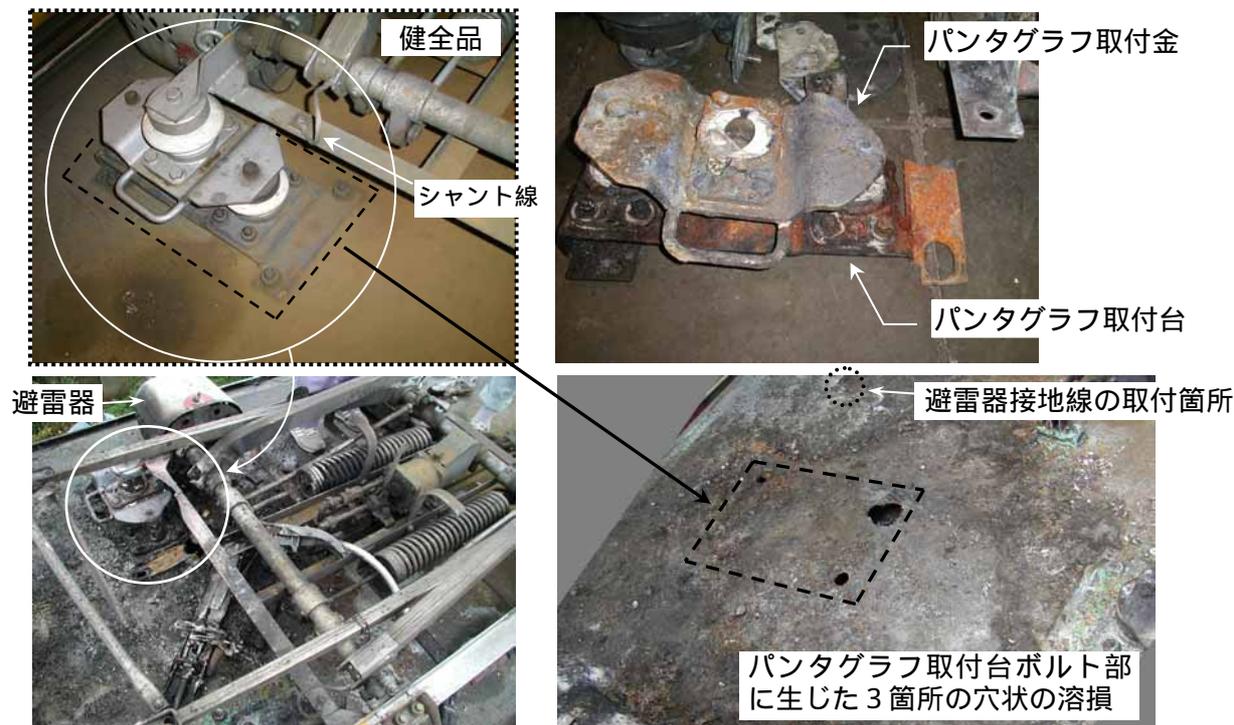


写真3 パンタグラフの支持部の状況



(注：左上の健全品の写真は、正常な車両の状態を示したもので、矢印で事故発生車両の対応箇所を示した。)

写真4 車内の天井の損傷状況



(注：事故発生時は、クーラーは動作していなかった)

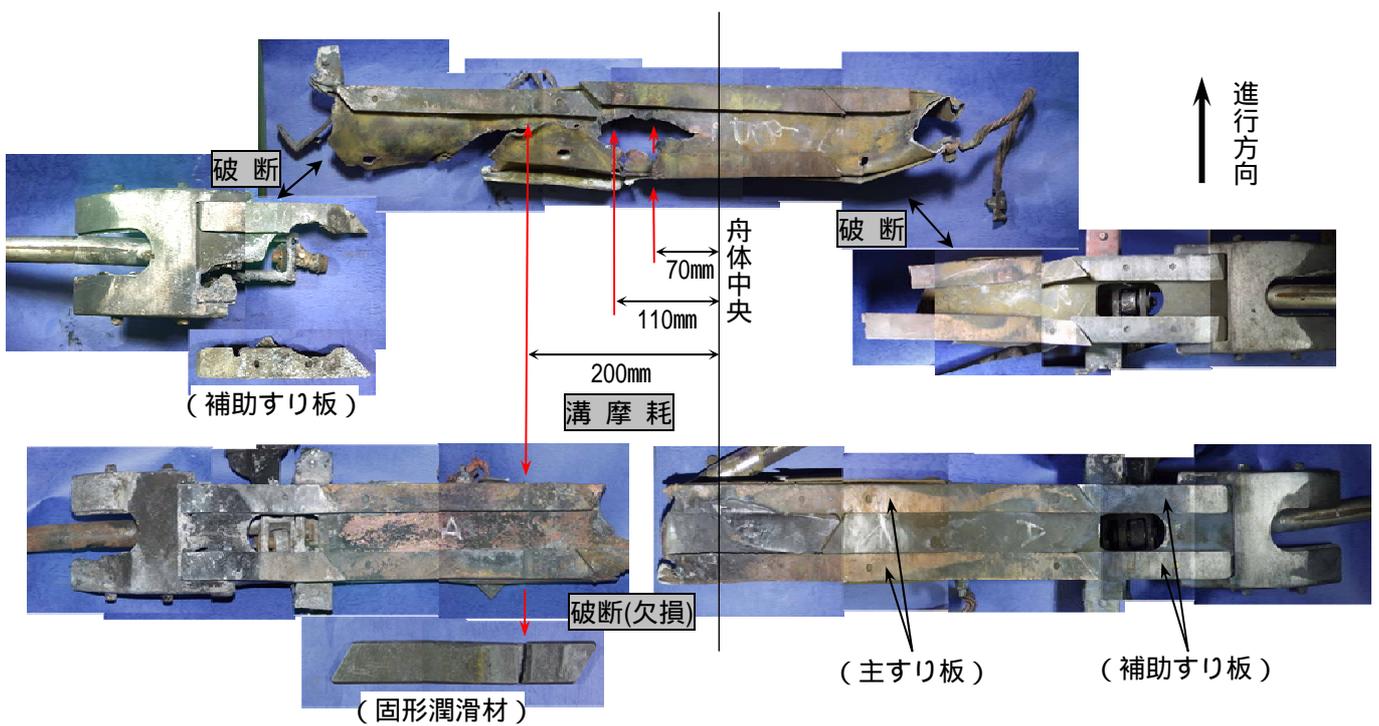
写真5 パンタグラフの損傷状況

(1) 事故発生直後のパンタグラフの状況



(提供：野田市消防本部)

(2) 舟体の主な損傷状況



1 避雷器に関する資料

1.1 避雷器の性能に関する規格

本件避雷器の性能に関する製造上の規格は、以下のとおりである。

形 式：RVDE-21AP

製造年月：昭和 59 年 5 月

公称電圧		1500 V		標準動作責務	基準	印加電圧	2300 V
定格電圧		2300 V				IMP. 放電電流	5000 A (8 × 20 μ S)
放電特性	直流	4300 V 以上		特別動作責務	低電圧	印加電圧	750 V
	インパルス	100%	5500 V 以下			IMP. 放電電流	5000 A (8 × 20 μ S)
		0.5 μ S	6300 V 以下			基準	800 A
緩波頭波		5500 V 以下		大電流	1200 A	5 回 (参考 10 回)	
制限電圧	2 kA	4500 V 以下		小電流	400 A	100 回	
	5 kA	5500 V 以下		印加電圧	1900 V		
	10 kA	6500 V 以下		動作中制限電圧	5500 V 以下		
放電耐量	衝撃大電流	100 kA (4 × 10 μ S) 2 回		防爆性能	電圧 AC (rms)	20,000V or 25,000V	
	矩形波	1200 A × 2 mS 20 回			電流 AC (rms)	500A, 2000A, 5000A	
				凍結融解試験	- 15 ↔ +10 30 サイクルに耐える		

1.2 破損した避雷器の調査結果

本事故において破損した避雷器を分解し、各部の損傷の状況について調査を行ったところ、以下のとおりであった。

碍子の破損状況

碍子の復元及び破断面調査を行った（図 1）。破片は 30 個以上に分割される複雑な割れ方で、破断面の大半は黒くすすけているが、比較的きれいな破断面も存在した。きれいな破断面は、事故後の復旧に当たり、損傷したパンタグラフ及び避雷器を屋根上から地上に落下させたために生じた可能性が考えられる。破断面には、破壊の方向を示すような破面模様は認められず、破損の仕方も複雑であることから、破壊の起点や経路の特定はできなかった。なお、碍子の破



図 1 碍子破損状況（上下反転）

片の一部は、熱により溶融していた。

気密特性

避雷器は、内部の金属部品の発錆、絶縁物の劣化等を防ぐため、水分が浸入しないよう、内部に窒素ガスを封入し、パッキンで気密を確保している。

本件避雷器のパッキンの硬度及び厚さを測定したところ、メーカー製造時における管理値を外れており、硬化傾向が認められた。しかしながら、パッキンの圧縮永久歪みは80%以下であったこと、及び、内部の亜鉛メッキ部品には光沢があり、発錆も認められなかったことから、気密は保持されていたものと推定される。

内部要素の状況

内部要素は、主に上から間隔管及び間隔管取付け円板（材質：黄銅）、特性要素（材質：炭化珪素（SiC））、吹消しコイル、ギャップ要素、フェライトにより構成される。内部要素は、全体的に損傷が激しく、黒くすすけた状況であった（図2）。特性要素の上に重なる間隔管取付け円板は、外周部が溶損しており、アーク発生時の内圧上昇により生じたものと考えられる変形（反り上がり）が生じていた。

ギャップ要素の上部にある吹消しコイルの樹脂リール外周面と、下部にあるフェライトの樹脂外周面は、いずれも熱により炭化していた（図3）。炭化の最も激しい箇所は、吹消しコイル半田付け部（コイルの端部を半田付けしてある端子の突起部）近傍であることから、この部分でアークが発生したものと推定される。

内部要素の破損状況を取りまとめると、以下のとおりである。

ア) 特性要素の破損の状況

特性要素は、図4に示すように、ほぼ左右対称形の大小4分割に破損していた。また、特性要素の上面の外周部は、一部が溶融して窪んでいた。

特性要素の破損起点を調べるため破面調

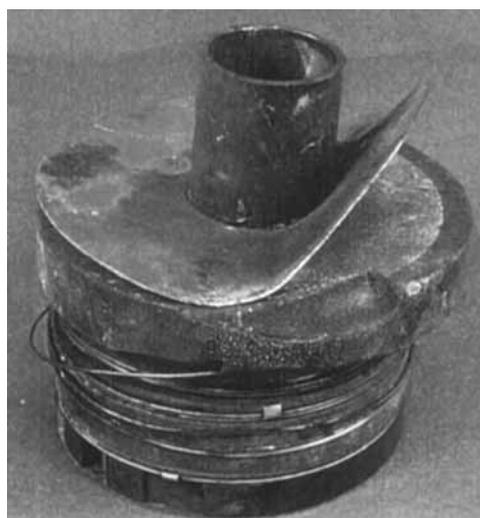


図2 内部要素の状況

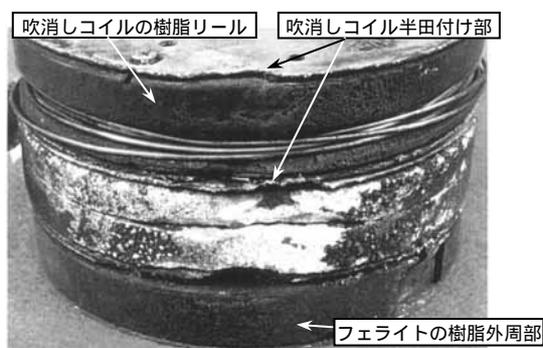


図3 ギャップ要素側面の状況

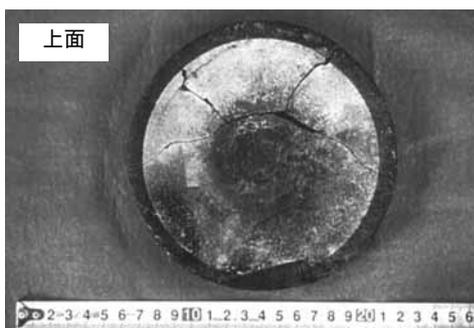


図4 特性要素の状況

査を実施したが、破壊の起点や方向を示す破面模様は認められず、特定できなかった。特性要素の破損の要因は、アークによる熱応力、電流通電時の衝撃的な熱応力及び事故後の落下による機械的衝撃等の可能性が考えられる。

イ) 吹消しコイルの断線の状況

吹消しコイルを上下から挟んでいる円板端子（材質：黄銅）には、それぞれ1箇所ずつ、吹消しコイルの銅線を半田付けしてある端子が設けられているが、これらの半田付け端子突起部は溶損し、コイルは断線していた。コイルの断線部の先端の破断面は丸みを帯びていることから、コイルは溶断したものと推定される。

コイルの全長を健全品と比較した結果、240 mm 短くなっていた。

ウ) バイパス円板の特性

吹消しコイルの内部に設けられたバイパス円板の電圧 - 電流特性は、健全品とほぼ同等であり、異常は認められなかった。なお、バイパス円板の外周の1箇所には微少な亀裂が認められた。

エ) ギャップ要素の損傷の状況

ギャップ要素は、避雷器が動作する際にギャップ端子間にアークを発生させ、このアークを吹消しコイルの働きによって作り出される磁場及び永久磁石（吹消しコイル及びフェライトの内部に、それぞれ9個ずつ設置してある）の磁場により引き伸ばして消弧し、電流を遮断する役割を果たすものであり、消弧室とも呼ばれる。

ギャップ要素内の電極の損傷は、避雷器が正常にサージを処理した場合にも多少生じるものであるが、破損した避雷器のギャップ要素に設けられた電極には、健全品に比べ若干大きな損傷が認められた。この損傷が生じた時期は不明であるが、正常な遮断を行っている場合に比べ、ギャップ要素内にアークが長時間持続していた可能性が考えられる。なお、電極の周囲には、アークにさらされた痕跡が認められた。

当該ギャップを用いて放電特性試験を実施したところ、以下のような結果が得られた。この結果は、メーカー製造時の管理値を満足している。

- | | | |
|---|-------------|-----------------------|
| ・ 絶縁抵抗測定：2000 M 以上 (1000 V メガーによる) | 2000 M 以上 | 〔 内は、メーカー製造時の管理値を示す。〕 |
| ・ DC SOV (直流放電開始電圧)：5100 V | 4300 V 以上 | |
| ・ Imp. SOV (インパルス放電開始電圧)：+ 5143 V、 - 4714 V | ± 5500 V 以下 | |

ギャップ要素の外周部（材質：アルミナ）は、削られたように損傷しており（図3）、溶損した可能性が考えられる。また、この部分から、ギャップ要素の内部に向けてアークが吹き込んだ黒いすす状の痕跡が認められた（図5）。

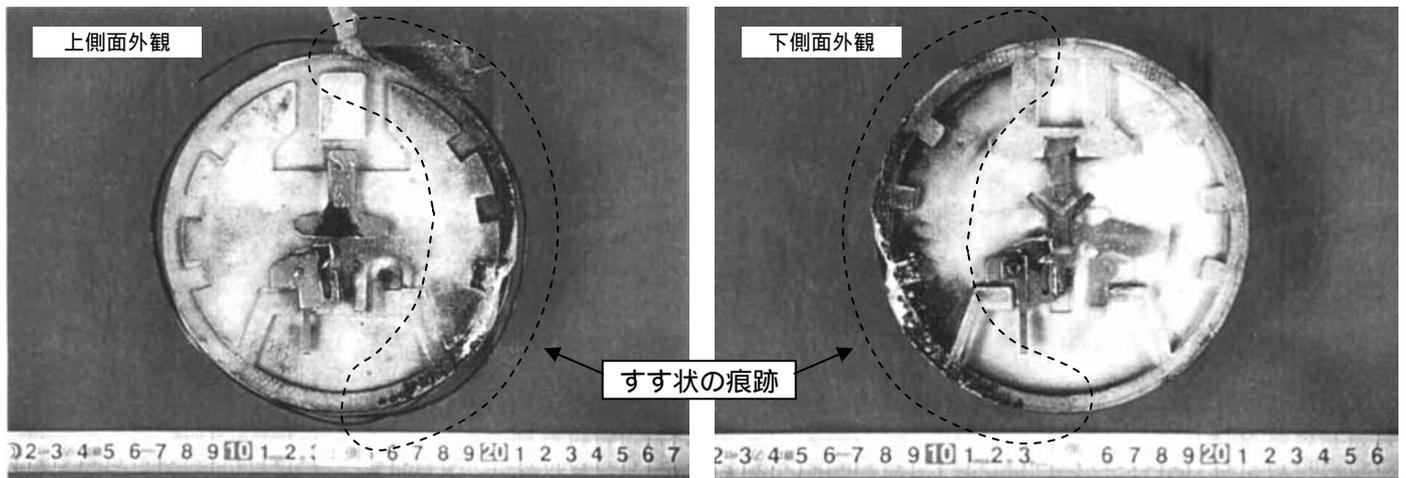


図5 ギャップ要素消弧室の状況

オ)ばね及び当て板の状況

本件避雷器は、内部要素の下部にばねが設けられており、また、短絡銅帯（薄い銅板）をばねに巻き付けることにより、電気的な導通を確保する構造となっている。

破損した避雷器のばねは、熱により劣化し、圧縮された形に変形していた。短絡銅帯も押しつぶされるように変形し、溶損していた。

フェライト下面に設けられたばねの当て板（材質：アルミニウム）は、位置が中心よりずれており、穴の周りは溶損していた。また、フェライト下面に円形で筋状の痕跡が認められたことから、内部要素は偏心し、回転していたものと推定される（図6、図7）。



図6 ばねの状況

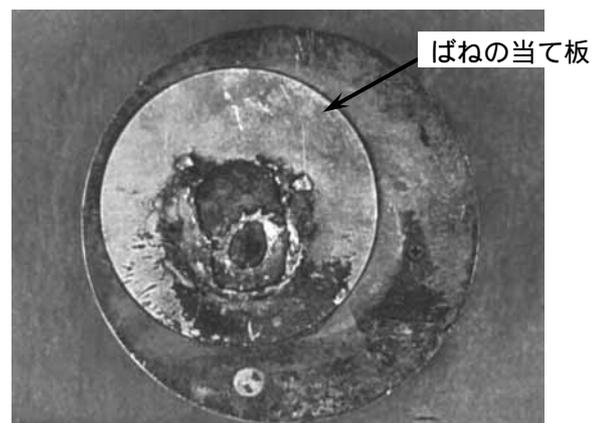


図7 フェライト下面（ばね側）の状況

カ) 永久磁石の磁界強度

永久磁石の磁界強度測定を行ったところ、18個中、3個の磁石が製造時の管理値より2～5%下回っていた。

キ) 避圧膜の状況

避圧膜の状況を調査したところ、蓋の解放部において外側にふくらみ引きちぎ

られた様相であり、避雷器の内部でアークが発生したことにより内圧が上昇し、開口したものと推定される。

ク) 内部要素とシャネツクロスの穴の位置関係

シャネツクロスには、穴が生じていた(図8)。

シャネツクロスに開いている横方向にすり切れたような穴(図8 穴(1))は、特性要素の位置に対応しており、特性要素が偏心し、回転していたことによって擦られたものと推定される。また、斜め方向に開いた穴(図8 穴(2))は、ギャップ要素の位置に対応しており、穴の下部に、アークの発火痕のような焦跡が認められた。



図8 内部要素とシャネツクロスの位置関係

注) 写真は、避雷器の使用状態に合わせるため、撮影時の上下を逆にして掲載した。

避雷器の保護カバーの破損状況

避雷器の外側を覆っている保護カバーは、黒くすすけて焼損しており、焼損箇所の一部はガラス繊維が露出していた。

避雷器取付板の痕跡の状況

避雷器及び保護カバーをパンタグラフの台枠に取付けている取付板は、黒くすすけており、一部は溶損していた。

1.3 同形式の健全な避雷器の調査結果

今回の事故により破損した避雷器とほぼ同時期に製造された、同社の所有する同形式の避雷器3台について調査を行ったところ、結果は以下のとおりであった。

形 式：RVDE-21AP

製造年月：(1) 昭和59年2月製、(2) 昭和59年2月製、(3) 昭和60年5月製

電気特性

絶縁抵抗測定、直流放電開始電圧測定、インパルス放電開始電圧測定及び制限電圧測定を実施したところ、これらの電気特性は3台ともにメーカー製造時の管理値内に入っており、異常は認められなかった。

気密特性

湯密試験を実施したところ、泡の発生は認められず、気密は確保されていた。

封入ガスの状況

避雷器の内部に封入してある窒素ガスの分析及び露点の調査を行ったところ、窒素の割合は84～90%、露点は0～-2であり、異常は認められなかった。

分解調査の結果

避雷器の分解調査を行ったところ、以下の状況が認められた。

- ・ 避雷器の内部には、黒い粉末が大量に認められた。この粉末は、成分分析及び内部要素の状況から、特性要素や吹消しコイル端子突起部がシャネツクロスと擦れて発生したものと推定される。
- ・ シャネツクロスには、上記の内部要素と擦れたことによる穴が複数生じていた。
- ・ ばねに巻き付けてある短絡銅帯は、中間部で屈曲し、破断していた。
- ・ 吹消しコイルの断線は、認められなかった。
- ・ 避圧膜は、異常は認められなかった。
- ・ パッキンは、硬度及び厚さがメーカー製造時の管理値を外れており、経年劣化による硬化の傾向が認められたが、圧縮永久歪みは80%以内であったため、気密は確保できていたものと考えられる。

永久磁石の磁界強度

永久磁石の磁界強度の測定を行ったところ、3台中1台に、メーカー製造時の管理値を2～5%下回っているものが認められた。

ギャップ要素の電極の状況

ギャップ要素の電極の状況を調査したところ、アークの痕跡が認められたが、この痕跡は、避雷器を使用していた際に、通常の動作過程において生じたものと考えられる。痕跡の程度は、本件避雷器の電極の痕跡に比べ小さかった。

避雷器の内部で認められた黒い粉末は、ギャップ要素の外周には付着していたが、電極部分には認められなかった。

1.4 本件列車に搭載されていた健全な避雷器の調査結果

本事故が発生した列車は、列車火災が発生した2両目のほかに、5両目の車両にも2つのパンタグラフが設けられていた。これらのパンタグラフに設置されていた避雷器2台について分解調査を行ったところ、以下の状況が認められた。

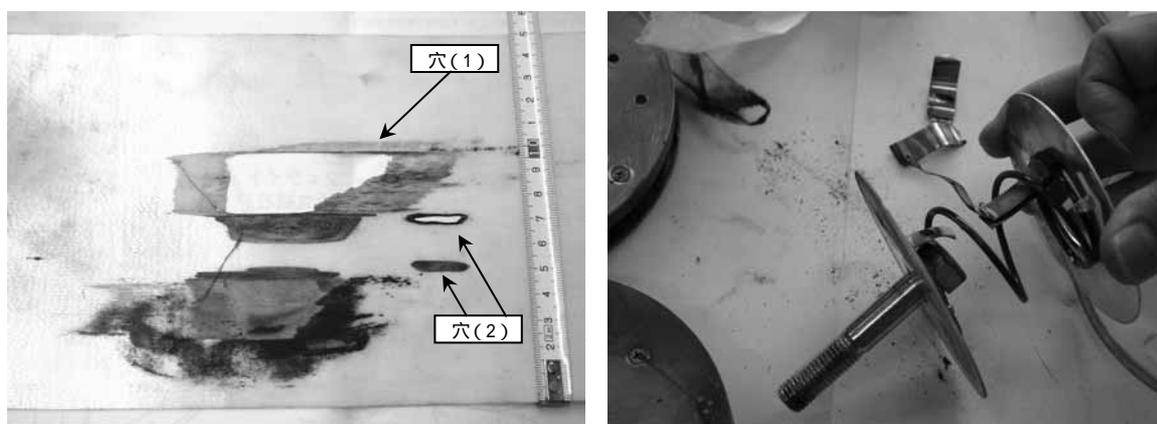
シャネツクロス及びばねの状況

調査した避雷器のシャネツクロスには、特性要素及び吹消しコイル端子突起部と擦られたことによる穴（図9(a) 穴(1)(2)）が生じていた。

また、フェライト下面の金属板には、ばねの当て板との間で擦れたことにより生じたものと考えられる円形で筋状の痕跡が認められた。このため、内部要素は偏心し、回転していたものと推定される。

ばね部に設けられた短絡銅帯は、中央部で屈曲し、破断していた。また、破断した短絡銅帯の一部は、避雷器の内部に落下していた。

短絡銅帯は、ばねに取付けられていることから、車両の振動により生じる内部要素の上下振動を繰り返し受けたために破断したものと考えられる。



(a) シャネツクロスの穴

(b) ばねの短絡銅帯の破断

図9 本件列車の他の避雷器の内部の状況

金属付着物の状況

調査した避雷器の内部には、以下のような金属の付着物が認められた。

(a) 吹消しコイル側面：直径約 1.7mm の球形金属粒など複数の金属粒（図 10）

(b) 特性要素側面：アルミニウム状の光沢を有する高さ約 3 mm の三角形の金属片

これらの特定を行うため分析を行ったところ、前記(a)は、鋼材の溶接時に発生するスパッタと推定されたが、混入した経緯は特定できなかった。前記(b)は、ばねを固定する当て板(材質:アルミニウム)の爪部が破損したものであった(図 11)。

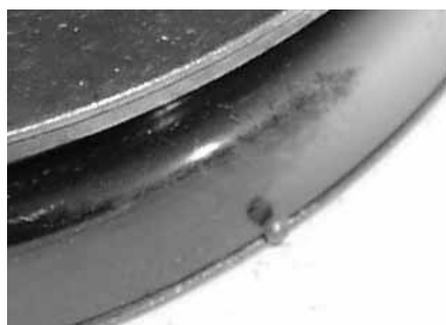


図 10 金属付着物の例

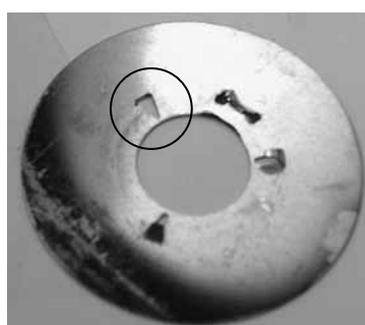


図 11 ばねの当て板の爪部破損

1.5 本件避雷器の特徴

避雷器に関する調査の結果から、本件避雷器の特徴を整理すると、以下のとおりである。

本件避雷器の内部は、下部にばねを設け、その上に内部要素が配置されていた。同種形式の避雷器は、当初、上部にばねを設ける仕様のもので製品化され、その後、上下を逆に配置する今回の仕様のもので製品化された経緯がある。

このため、内部要素を固定する「押し付け力」が、ばねを上部に設けている仕様と比べて、内部要素の重量（約3kg）相当分低下することとなる。

避雷器の内部要素を構成する各要素は、相互に固定されずに積み重ねられており、ばねの「押し付け力」によってのみ固定されていた。このため、各要素が偏心し、回転することとなり、特性要素及び吹消しコイル端子突起部がシャネツクロスと擦れて穴が生じていた。

で述べた構造のため、内部要素は上下に運動しやすく、避雷器の内部に共振部が存在する状況となっていた。本件避雷器と同一形式の避雷器において、ばね部に設けられた短絡銅帯が、ばねの上下運動に伴って曲げられることにより疲労破断を起こしている状況が認められた。

避雷器の内部は、多くの導体が存在する。特に吹消しコイルの端子は突起しているため、シャネツクロスと擦れることにより破損し、電気的な不具合を招く可能性が考えられる。また、ばね部の短絡銅帯についても、破断した銅帯の破片が避雷器内部で動き回り、電気的な不具合を招く可能性が考えられる。

1.6 避雷器内部におけるアークの発生原因の推定

(1) 本事故において、避雷器の内部でアークが発生した経過については、以下のような可能性が考えられる。

下部にばねが配置されていることにより、内部要素の押さえ力が低下
避雷器の内部において、内部要素の偏心、回転及び上下運動などが発生

- ・吹消しコイル及び特性要素が偏心
- ・吹消しコイルの端子突起部がシャネツクロスと摩擦

吹消しコイルの端子突起部が破断

健全な避雷器の分解調査では、端子突起部が破断しているものはなかったが、突起部の先端がシャネツクロスと擦れ、平らに摩耗している状況は認められた。破断した端子突起部（吹消しコイルの端部が半田付けされている）が、内部要素の偏心、回転及び上下運動により垂下（図12、図13）

破断した端子突起部がギャップ要素の下面の金属板に接触して地絡し、アークが発生（図14（1））

本件避雷器のシャネツクロスには、この箇所斜めの穴が認められた。これは、端子突起部がシャネツクロスと擦れながら垂下していく過程でシャネツクロスに穴が生じ、この斜めの穴が短絡時に発生したアークの経路となった可能性が考えられる。

シャネツクロスは、内部のアークから碍子を遮熱する目的で設けられており、高い耐熱性を有しているが、摩擦に対しては比較的弱く、図 9(a)の穴(2)のように、端子突起部との摩擦により穴が生じているものが見受けられた。

また、図 13 に示したとおり、斜めの穴の端部には、短絡により生じたものと思われる焦痕があることから、この箇所で吹消しコイルが地絡した可能性が考えられる。

短絡による電流により特性要素が加熱し、その直後に避雷器内にて沿面アークが発生(図 14(2))

避雷器の内部の圧力上昇により、避圧膜が開口して放圧

避雷器の接地線が溶断し、接地線にアークが発生(図 14(3))

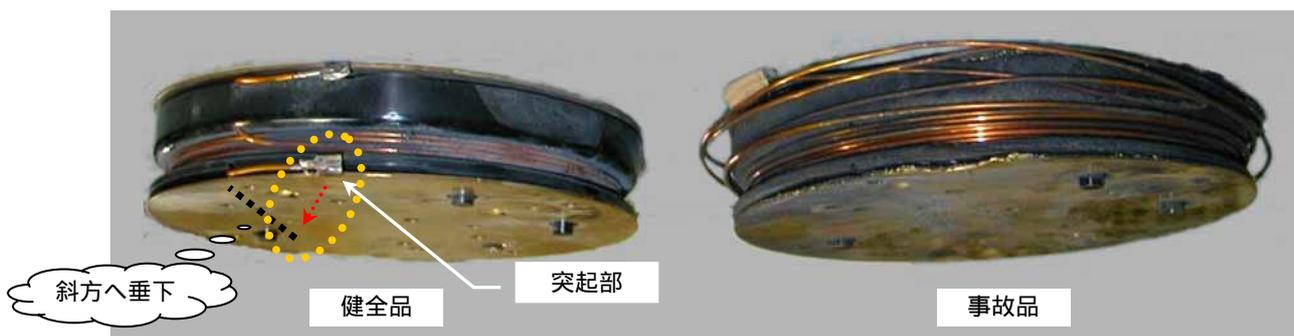


図 12 吹消しコイルの状況



図 13 ギャップ要素及びシャネツクロスの状況

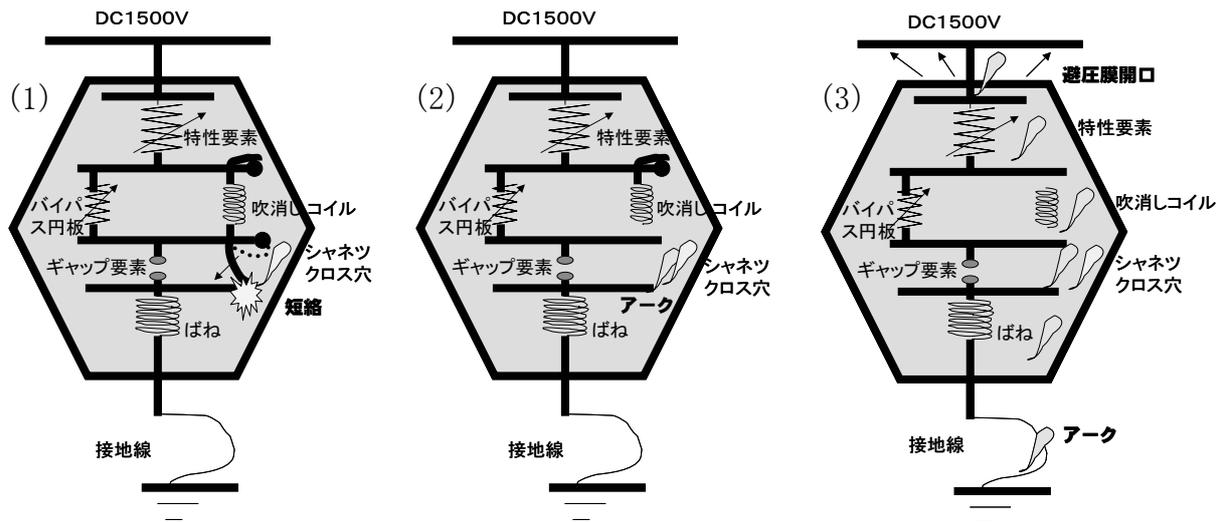


図 14 避雷器内部のアークの状況

(2) 避雷器のギャップ要素に関する考察

- ① 本件避雷器のギャップ要素は、図 5 に示したとおり、外部から内部にアークが吹き込んだ黒いすす状の痕跡が認められた。このため、避雷器内部における最初のアークの発生箇所は、(1) で述べたように、ギャップ要素の外側であったものと推定される。
- ② 吹消しコイルの地絡が発生した場合、ギャップ要素の電極を經由しない地絡回路が形成されることから、電極に大きな損傷を与えることは考えにくい。吹消しコイルの端子突起部が破断した状態で一定期間動作を行っていたとすれば、その間、永久磁石のみで電極のアークの消弧を処理していたことになり、正常な状態に比べて大きな続流の痕跡が残ることが考えられる。

本件避雷器の電極の損傷程度は、大きな溶損に至ってはいないまでも、調査した健全な避雷器に比べて大きい点については、上記の理由によるものと考えられる。

本件避雷器の電極の損傷状況は、図 5 に示したとおり、電極が黒く変色していた。健全な避雷器を用いて行った放電試験の結果では、大きな電流を遮断した場合には、電極は溶損し、表面が荒れるものの、黒色化の程度はそれほど大きくないのに対し、比較的小さい続流が長く留まっていた場合には、電極の表面が黒色化すると結果が得られた。このため、本件避雷器の電極に見られる損傷も、比較的小さい続流が留まっていた結果と考えられ、本事故により生じたものではなく、吹消しコイルの端子突起部が破断してコイルが断線した状態で避雷器が使用されていたことによるものである可能性が考えられる。

2 車両の延焼経過に関する資料

車両の屋根内部の損傷状況に関する調査結果等を踏まえ、推定される車両の延焼経過について、以下のとおり取りまとめた。

2.1 延焼に伴う損傷状況

(1) 屋根上の状況

パンタグラフ取付台ボルト部の3ヵ所において溶損による穴が生じ、穴周辺の断熱材も溶損していた(図15～図17)。

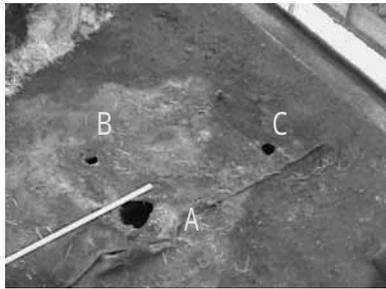


図15 パンタグラフ取付台ボルト部
(屋根上)

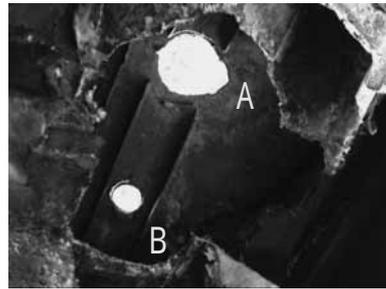


図16 パンタグラフ取付台ボルト部
(屋根裏側)



図17 パンタグラフ取付台ボルト部
(屋根裏側)

避雷器接地線取付部が溶損していた(図18)。損傷したパンタグラフの後方に近接するクーラー外キセの前側部分が焼損していた(図19)。

クーラー本体は内部に熱風が通過した形跡が認められた(図20)。



図18 避雷器接地線取付部の溶損



図19 クーラー外キセの焼損



図20 クーラー本体の焼損

(2) 室内の状況

車両の天井内部には、クーラーの冷風ダクトがあり、屋根板のパンタグラフ取付台ボルト部に生じた溶損箇所の直下にある冷風ダクトには、穴状の溶損が生じていた(図 21)。また、冷風ダクトのアルミニウム材は、高温により溶融した痕跡が認められた(図 22)。



図 21 冷風ダクトの穴状溶損



図 22 冷風ダクトの溶損部の断面

天井化粧板は、穴状の溶損が生じており、その周辺は高温にさらされた形跡が認められた。天井化粧板の穴状の溶損箇所は、屋根板のパンタグラフ取付台ボルト部及び冷風ダクトに生じた穴状溶損部の直下に位置していた(図 23)。



(a) 室内天井



(b) 裏側



(c) 裏側損傷部(拡大)

図 23 天井化粧板の損傷状況

冷風ダクトとクーラーとの接合部付近は高温にさらされた形跡が認められた(図 24、図 25)。



図 24 冷風ダクト(クーラーとの接合部)



図 25 クーラー下部(ダクト取り外し後)

クーラー吹出口付近の屋根の垂木部は熱変形を生じていた（図 26）。
クーラー吸込口付近の分電箱の配線被覆材が焼損していた（図 27）。



図 26 屋根垂木の熱変形部



図 27 分電箱の配線の焼損部

冷風ダクト内部は、図 21 に示した溶損部からクーラー吹出口にかけて焼損、変形し、断熱材も白く変色しており、冷風ダクト内部が高温の熱風にさらされた形跡が認められた（図 28）。



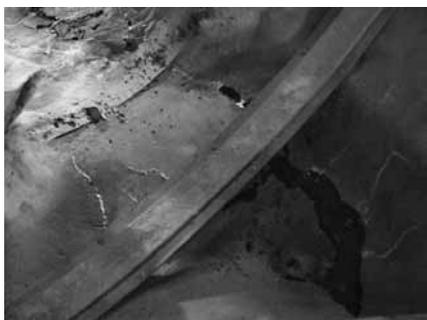
(a) クーラーとの接続開口部の焼損



(b) 冷風ダクト上部の焼損、変形



(c) 冷風ダクト上部の断熱材を剥がした状態



(d) 補強用のアルミニウム材の溶損



(e) 冷風ダクト内の断熱材の焼損

図 28 冷風ダクトの損傷状況

2.2 延焼経過に関する推定

車両の損傷状況の調査結果から、屋根上から車内に至る延焼の経過は、以下のように推定される。

屋根板のパンタグラフ取付台ボルト部における穴状の溶損箇所を通じて、アークにより直下の冷風ダクトに溶損による穴が生じ、さらにその下部の天井化粧板にも溶損による穴が生じた。

クーラーは動作していなかったため、電車の走行とともに空気がダクト溶損部の穴から内部に流れ込み、後方のクーラーの吹出口に向かう高温の熱風が発生した。これにより、冷風ダクトの内部が焼損した。(図 29 に赤矢印で熱風の経路を示す)

クーラーの吹出口から熱風がクーラー内部へ流入し、クーラー機器が焼損した。熱風がクーラーの吸込口から出ることで、分電箱及び配線の被覆が焼損した。冷風ダクトとクーラーの吹出口との接合部が熱により変形し、熱風が冷風ダクトの上面に噴き出し(図 29 に黄矢印で示す) 近接する屋根垂木に熱変形が生じた。

吹出グリルと吸込グリルの間の吊り広告は、吹出グリル、吸込グリル及び天井化粧板の穴状溶損部からの熱風により焼失した。

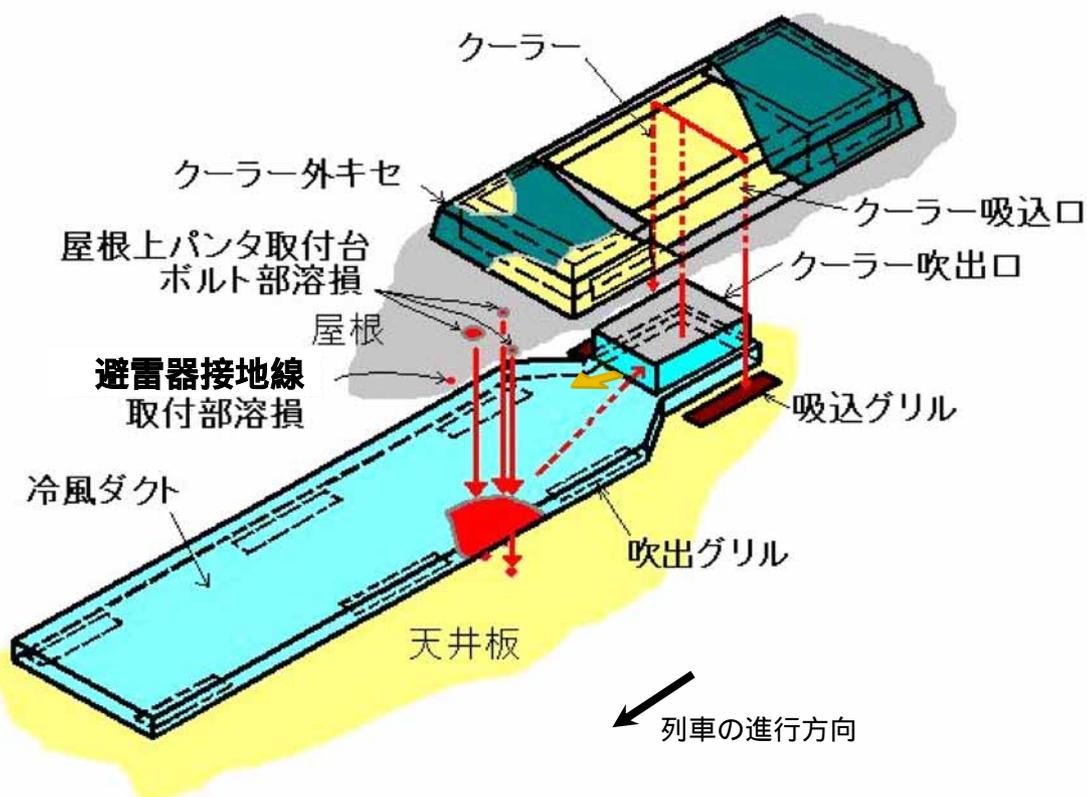


図 29 各損傷箇所の位置関係

3 事故発生経過の推定に関する資料

本事故の発生経過について、考え得る一つの推定を 3.2.1 (3) に示したが、その詳細は、以下のとおりである。

また、推定結果を取りまとめた図を図 31 に示す。ここに記載した、各事項の発生時期及び電流値等は、調査結果を踏まえて推定したものであり、ある程度の幅を有している。(別紙参照)

なお、本事故が発生した際、運転士はボンという異音を感知していたが、異音を発生した可能性のある事項は複数考えられ、運転士が感知した異音を特定することはできなかった。ここでは、大きな異音を発生した可能性のある事項に 印を付している。また、文章中の ~ は、図 31 に付した番号に対応している。

第 1 期 (パンタグラフすり板の溝摩耗の形成開始及び避雷器の内部から外部へのアークの移行。)

避雷器内でアークが発生 (変電所の故障選択装置動作せず)

(すり板の溝摩耗の形成の起点はエアセクションの位置と考えられることから、本事故の起点は、パンタグラフがエアセクションを通過していた際であったものと推定される)

避雷器の避圧膜が開口 () (避雷器の保護カバー内に高温ガスが噴出)

接地線部にアークが発生 () (接地線の溶断によりアークへ移行したものと考えられる (図 30)。また、放圧板から噴出したアークが接地線に転移した可能性も考えられる)

避雷器の碍子が偏熱破壊 ()

避雷器周りにてアークが継続

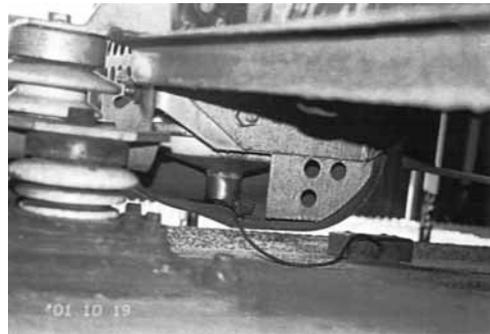


図 30 避雷器接地線 (健全品)

第 2 期 (アークが避雷器からパンタグラフの支持部に転移し、新たな地絡回路を形成。パンタグラフすり板の破断、パンタグラフ台枠の溶損、屋根内部の溶損及びパンタグラフ落下までの過程。この期に、車掌は焦臭を感知し、運転士は異音を感知したものと推定される。)

走行風によりアークは後方に流され、パンタグラフ取付金・取付台ボルトへ転移 (アークの陰極側電極の移動)

パンタグラフ台枠へアーク転移 (アークの陽極側電極の移動)

[避雷器の地絡回路は断路し、パンタグラフを介した新たな地絡回路が形成]

パンタグラフ台枠溶損

パンタグラフ支持碍子偏熱破壊 ()

パンタグラフすり板が割断し、それに伴い電車線路 (ハンガ等) 損傷

パンタグラフ取付台のボルト溶損・走行風によりクーラー外キセ焼損

屋根板が穴状に溶損 ()

高温ガスによりクーラーダクト溶損 ()

屋根上クーラー機器焼損

パンタグラフ舟体は 35 号柱において振止金具に衝撃し落下 ()

アーク消弧 (トロリ線とパンタグラフ舟体との間のアークは、舟体の落下により伸ばされ、パンタグラフ台枠と屋根板との間のアークは、走行風で伸ばされることにより、アーク長が増大し、それに伴う抵抗値の増加により電流が減流されて、アークは消弧した可能性が考えられる)

第 2 期においても、継続的な大電流であったため、変電所の故障選択装置は動作しなかった。

第 3 期 (地絡回路の断路による無給電状態から地絡回路の再構成による変電所の保護動作に至る過程。この間、火災は継続。)

屋根上に落下した舟体の一部がパンタグラフ下部と屋根接地部に接触して回路を構成

パンタグラフの一部がトロリ線と再接触してアークが発生 ()

変電所の故障選択装置動作

この間、車内では、第 2 期のアークにより生じた高熱により火災が継続

アーク電流及びアーク時間に関する推定値

(1) 吹消しコイル地絡時の電流値及び継続時間

避雷器のギャップ要素内の電極を銅板で短絡したアーク発生試験（特性要素とバイパス円板の抵抗分が直列に入った回路）を実施した結果、アークの発生に至る短絡電流は、初期電流値から 320 A まで、約 1 秒間増加した。

本事故においては、特性要素のみの抵抗分が入る短絡回路が構成されたものと推定されることから、短絡電流は、数十 A から始まり 500 A 前後まで 1 秒間程度で増加し、避雷器内部のアークの発生に至るものと推定した。列車は力行中であったため、パンタグラフの受電部には、この短絡電流に列車の運転電流が加算され、少なくとも 1 kA 以上の電流が流れたものと推定される。

(図 31)

(2) 避雷器内部の沿面アーク発生時の電流値及び継続時間

吹消しコイルの下側の端子部でコイルの端部を切断し、ギャップ要素の側面を垂下させて接地側と約 1 mm のギャップを作り実施したアーク発生試験の結果及び接地線溶断試験の結果より、避雷器内部の沿面アーク発生時には、電流値は、一気に 2 ~ 3 kA 程度まで上昇し、その後もさらに電流は増加すると推定される。

(図 31)

(3) 避雷器接地線の耐力

接地線溶断試験の結果より、避雷器接地線の溶断から接地線部がアークに至るまでの過程では、増加電流は 5 ~ 6 kA に達し、0.01 ~ 0.02 秒程度継続した後、接地線が溶断して、接地線部にアークが発生すると推定される。

(図 31)

(4) 避雷器接地線のアーク発生後の電流値及び継続時間

接地線アーク電圧試験の結果より、避雷器接地線部のアーク電圧を 1000 V 程度と仮定すると、電流の絞り込みにより、避雷器の電流は、上記(3)で述べた 5 ~ 6 kA 程度から 1 ~ 2 kA 程度に減少する可能性が考えられる。この電流値での継続時間は、接地線溶断試験の結果より、2 ~ 3 秒と推定される。

(図 31)

4 故障選択装置の動作仕様に関する資料

- (1) 野田変電所及び豊四季変電所に設けられた故障選択装置は、図 32 に示すとおり、き電電流の変化を装置内に取り込み（図 32 (A)）、メモリ内の 100msec 前のき電電流（図 32 (B)）との差分をとることにより、何段階にも発生する I を分離して検出している（図 32 (C)）。
- (2) 故障選択装置は、 I の検出を 2msec 刻みで行っており、信頼性を高めるため、検出された I が 3 回連続して設定値を上回った場合に、事故電流と見なす仕様となっている。
- (3) 本事故の発生地点のき電区間における故障選択装置の設定値は、野田変電所、豊四季変電所とも 2500A であった。なお、本事故の発生区間は、両変電所からの並列き電となっており、両変電所には、き電用連絡遮断装置が設けられているため、一方の変電所において故障選択装置が動作すれば、他方の変電所にその情報が伝達され、両方の変電所のき電用直流高速度遮断器が連動して遮断動作をすることとなる。
- (4) なお、故障選択装置は、設定値の電流において動作することを基本としているが、実際の動作電流は、き電回路の抵抗及びインダクタンスの大きさに応じて、設定値より大きくなる場合や小さくなる場合がある。

また、実際の事故発生時の I は、仮に事故点の電気的条件が同一であっても、当該き電区間における列車の運転電流の大きさによって異なる値となるため、列車の運転状況が故障選択装置の動作の有無に影響を与える場合も考えられる。

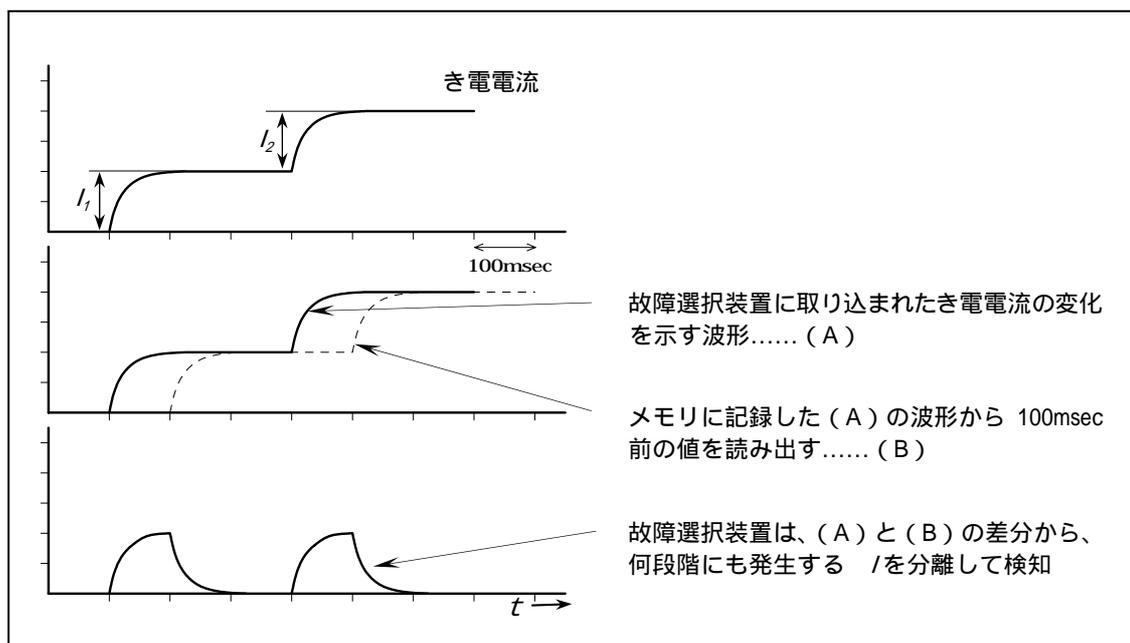


図 32 故障選択装置の検出法のイメージ図