

は、持ち運びができ簡易に非破壊で測定が可能なものである。本装置で検出可能な元素を図1に示す。今回の調査区間で使用されているトリ線やすり板に添加されている元素は、軽元素以外は全て検出可能である。元素分析の様子を図2に示す。

2.2 調査地点

九州新幹線のA駅とB駅で、トリ線摩擦面の観察と元素分析を行った。調査地点を図3に示す。A駅は全てPHCトリ線¹⁾区間であり、駅構内のパンタグラフ停止位置(A1～A4)およびホーム中央付近(⑨)の他に、減速区間および力行区間(①～⑧、⑩～⑬)；曲線引金具付近で2～3本おきに測定)の計17地点で、観察および元素分析を行った。B駅は本線がPHCトリ線区間(B1～B4)、側線がSnトリ線(すず入り銅合金トリ線)区間(B5～B8)で、パンタグラフ停止位置の計8地点で観察および元素分析を行った。雨天では、すり板の摩耗粉がトリ線摩擦面に付着してすり板成分が多く検出される傾向があるため、本報告では晴天時に行った3回の調査結果のみ報告する。新幹線のパンタグラフは編成に2つあり、両駅には2種類の車両が停車するため、パンタグラフ停止位置は駅の各番線に4地点存在する。本報告では今回の調査地点のうち、パンタグラフ停止位置と地点⑨を低速区間、それ以外を高速区間と記す。

2.3 元素分析結果

3回の元素分析結果のうち、例としてA駅で行った2018年8月の結果を表1に、B駅で行った2019年4月の結果を表2に示す。

2.3.1 すり板主成分(鉄)の分析結果

A駅とB駅の各調査地点で検出された、すり板の主成分(母材)である鉄(Fe)の割合を図4および図5に示す。パンタグラフ停止位置では、地点A2の2019年6月の調査で鉄の割合が1%を超えたが、それ以外では両駅とも鉄の割合は1%を超えなかった。地点⑨は地点A2から20mしか離れていないが、3回中2回の測定で鉄が1%以上検出された。

A駅のホーム中央から調査地点までの距離と鉄の検出量の関係を図6に示す。減速区間ではパンタグラフ停止位置に向かって一定の割合で鉄の量が減少する傾向が認められた。一方、力行区間ではそのような傾向は認められなかった。

2.3.2 すり板潤滑成分の分析結果

新幹線のすり板には、潤滑成分として二硫化モリブデン(MoS₂)、二硫化タングステン(WS₂)、ビスマス(Bi)が含まれている²⁾。これら潤滑成分に含まれる元素のうち硫黄(S)、タングステン(W)、ビスマスはほとんど検出されなかった。モリブデン(Mo)は検出されたが、

すり板には硬質粒子としてフェロモリブデン(FeMo)も添加されており、検出された元素が潤滑成分由来か否かは判別できない。

2.3.3 すり板硬質粒子成分の分析結果

新幹線のすり板には、耐アーキ・耐摩耗のためにクロム(Cr)やフェロモリブデンなど数種類の硬質粒子が含まれているが²⁾、そのうち最も添加割合が高い元素はク

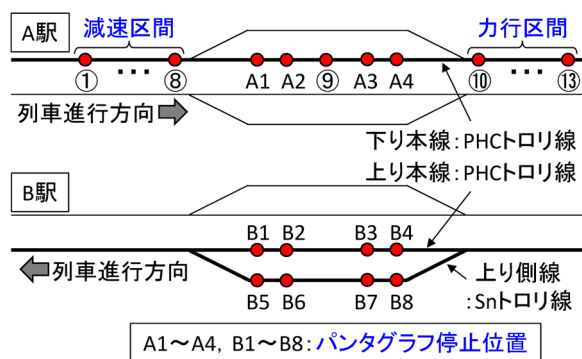


図3 調査地点

表1 A駅での元素分析結果(2018年8月)

調査箇所	ホーム中央からの距離(※1) m	元素割合 (wt%)										トリ線成分以外の合計
		Cu	Zr	Fe	Cr	Mo	W	S	Bi	Mn	その他※2	
①	-840	95.1	0.05	3.67	0.81	0.07	-	-	0.03	-	0.24	4.01
②	-710	95.7	0.05	2.90	0.90	0.07	-	-	-	0.03	0.31	3.31
③	-590	96.2	0.06	2.63	0.83	0.05	-	-	-	-	0.21	2.89
④	-480	96.9	0.04	1.98	0.82	0.07	-	-	-	-	0.23	2.28
⑤	-380	96.3	0.03	2.03	0.63	0.05	-	-	-	0.03	0.95	3.06
⑥	-270	96.5	0.06	1.78	0.58	0.04	-	-	-	-	1.08	2.89
⑦	-200	97.6	0.05	1.55	0.57	0.05	-	-	-	-	0.19	1.79
⑧	-130	98.1	0.08	1.18	0.34	0.04	-	-	-	-	0.28	1.50
A1	-60	98.8	0.05	0.50	0.36	0.01	-	-	-	-	0.23	0.74
A2	-10	98.9	0.04	0.24	0.32	-	-	-	-	-	0.48	0.72
⑨	10	96.4	0.05	2.50	0.73	0.05	-	-	0.03	-	0.20	2.77
A3	50	99.2	0.04	0.20	0.37	-	-	-	-	0.02	0.17	0.40
A4	60	98.8	0.05	0.17	0.32	0.01	-	-	-	-	0.66	0.85
⑩	110	97.0	0.06	2.10	0.56	0.04	-	-	-	0.02	0.21	2.37
⑪	260	95.9	0.05	2.60	0.73	0.06	-	-	-	0.04	0.66	3.36
⑫	480	95.5	0.05	1.86	0.62	0.06	-	1.01	-	-	0.93	3.87
⑬	720	97.0	0.07	1.91	0.72	0.05	-	-	-	-	0.27	2.23
トリ線成分		○	○	-	○	-	-	-	-	-	-	-
すり板成分		-	-	○	○	○	○	○	○	○	-	○

※1…A1とA4の間をホーム中央と定義
 ※2…主にケイ素、アルミニウム
 ※3…パンタグラフ停止位置

表2 B駅での元素分析結果(2019年4月)

調査箇所	トリ線種	元素割合 (wt%)										トリ線成分以外の合計	
		Cu	Zr	Sn	Fe	Cr	Mo	W	S	Bi	Mn		その他※1
B1	PHC	99.4	0.06	-	0.16	0.34	0.02	-	-	-	0.02	0.03	0.23
B2		99.0	0.06	-	0.29	0.37	0.01	-	-	0.02	0.01	0.25	0.58
B3		98.8	0.06	-	0.51	0.43	0.02	-	-	-	-	0.21	0.74
B4		98.7	0.06	-	0.33	0.43	0.01	-	-	-	-	0.43	0.77
B5	Sn	99.5	-	0.31	0.12	0.02	-	-	-	-	0.02	0.05	0.20
B6		99.6	-	0.21	0.06	-	-	-	-	-	-	0.13	0.19
B7		99.1	-	0.30	0.16	0.01	0.01	-	-	-	0.01	0.38	0.56
B8		99.4	-	0.21	0.17	0.04	-	-	-	-	-	0.14	0.35
トリ線成分		○	※2	※3	-	※2	-	-	-	-	-	-	
すり板成分		-	-	-	○	○	○	○	○	○	-	○	

※1…パンタグラフ停止位置
 ※2 PHCトリ線にのみ添加
 ※3 Snトリ線にのみ添加

ロムである。PHC トロリ線にはクロムが0.25～0.45%含まれており¹⁾、すり板成分との判別は難しいが、A 駅ではパンタグラフ停止位置と地点⑧以外では0.45%以上検出され、新品の状態よりも多かった。また、B 駅のSn トロリ線区間でもクロムが検出された。新幹線のすり板には硬質粒子としてクロムバナジウム(CrV)やフェロ窒化チタン(FeTiNx)が含まれているものもあるが²⁾、

バナジウムやチタンは検出されなかった。

2.4 トロリ線摩擦面の状態

元素分析を行ったトロリ線摩擦面の例として、A 駅で行った2018年8月の調査と、B 駅で行った2019年4月の調査時の写真を図7に示す。低速区間(パンタグラフ停止位置および地点⑨)は主に銅色を呈していた。一方、高速区間では黒色部が認められ、駅からの距離が離れるほど黒色部が占める割合が高い傾向にあった。

パンタグラフ停止位置では摩擦面に付着物(図7の地点A1では5mm程度の大きさ)が認められ、やや荒れた面であるのに対し、パンタグラフ停止位置から300m程度離れた地点(地点⑤など)では付着物は認められず、滑らかな面であった。

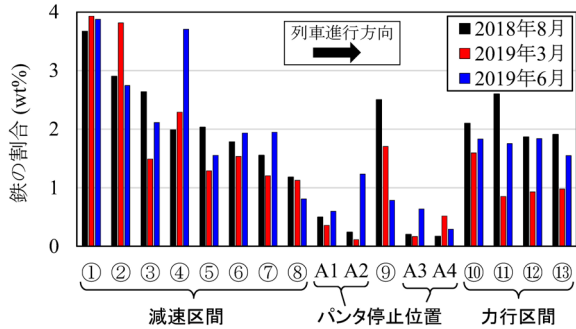


図4 A 駅のトロリ線摩擦面から検出された鉄の割合

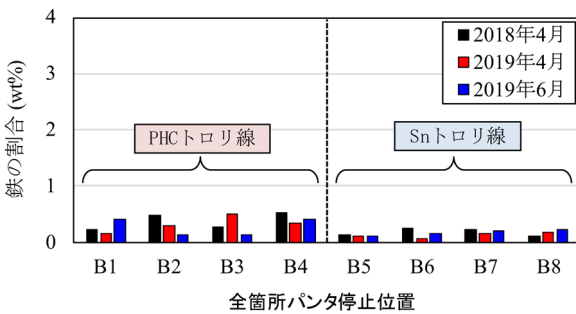


図5 B 駅のトロリ線摩擦面から検出された鉄の割合

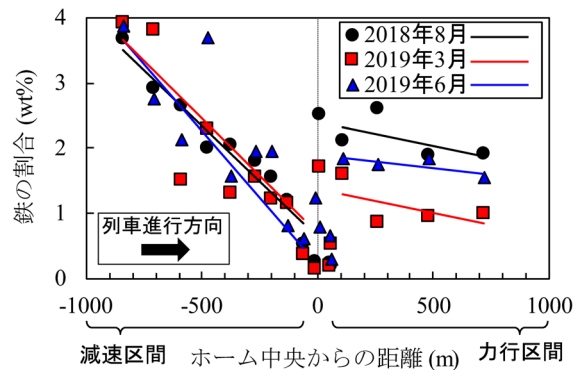


図6 A 駅ホーム中央からの距離とトロリ線摩擦面から検出された鉄の割合の関係

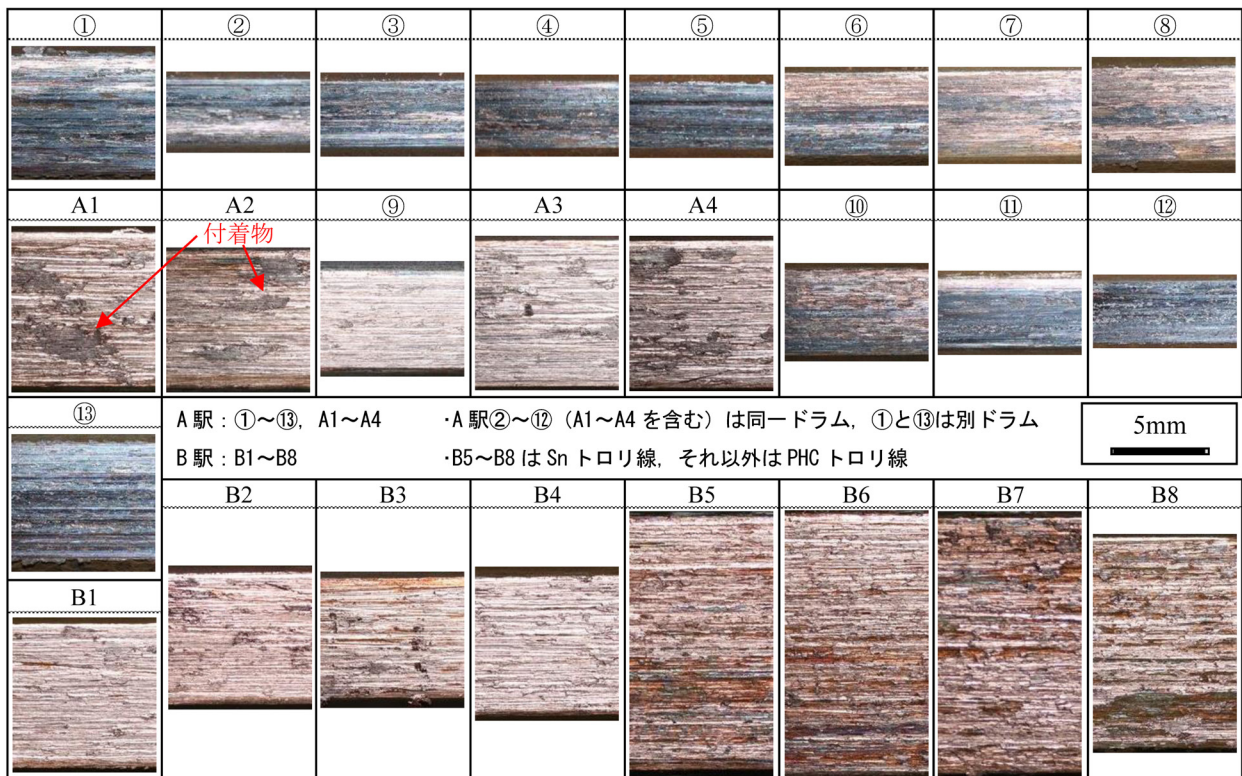


図7 調査地点のトロリ線摩擦面 (A 駅：2018年8月, B 駅：2019年4月)

3. 摩耗試験

低速区間でのトロリ線摩耗機構の解明に際し、定置試験での状況再現が重要であるが、パンタグラフ停止位置近傍の走行条件を模擬した条件での定置摩耗試験はこれまで行われていない。そこで、定置摩耗試験を行い、実地での測定結果との比較を行った。

3.1 摩耗試験概要

鉄道総研の所有する直動型摩耗試験機（図8）を用いてパンタグラフ停止位置近傍の走行条件を模擬した低速の摩耗試験を行った。この試験は、予め所定の摩擦面積となるように摩擦面を切削したトロリ線に、一辺10mmの立方体のすり板試験片を押し当て、繰り返し摩擦させるものである。始点から終点まで摩擦後、終点ですり板をトロリ線から引き離し、始点に戻してから再度すり板を押し当ててを繰り返すことで、常に一方に摩擦させた。摩耗試験には、トロリ線としてPHCトロリ線とSnトロリ線を、すり板として新幹線で使用されている2種類（すり板A、すり板B）を供した。試験条件は、速度0.2m/s（0.72 km/h）、押付力15N、通電電流DC 5A、摩擦回数3,000回とした。これは、パンタグラフ停止位置近傍の摩擦速度、見かけの接触圧力および電流密度を模擬したものである。摩耗試験後、トロリ線の摩耗寸法測定とトロリ線摩擦面の元素分析を行った。

3.2 摩耗試験結果

摩耗試験におけるトロリ線の摩耗率を図9に示す。トロリ線の摩耗率は4.62～7.63 $\mu\text{m}/10^4\text{pass}$ であった。トロリ線摩耗率は、PHCトロリ線ではすり板Bの方が高かったが、Snトロリ線ではすり板Aの方が高かった。

トロリ線摩擦面で検出された鉄の割合を図10に示す。PHCトロリ線で検出された鉄の割合は1%以下で、実地測定との平均値と同程度であったが、Snトロリ線とすり板Bの摩耗試験では鉄が2.41%検出され、実地での測定結果より大きな値となった。

摩耗試験後のトロリ線摩擦面の写真を図11に示す。PHCトロリ線では両すり板とも実際の駅の摩擦面（図8）と同様な面であった。Snトロリ線では、すり板Aでは実際よりも凹凸のある摩擦面であり、すり板Bでは1mm以下の細かい黒色の付着物が摩擦面全体に認められた。

4. 考察

4.1 トロリ線摩擦面状態と摩擦面から検出されたすり板の成分

滑り摩擦における摩耗の形態にはアブレシブ摩耗（切削作用により相手面を削る激しい摩耗）と後に述べる凝

着摩耗がある。新幹線のすり板とトロリ線の摩耗形態は十分には解明されていないが、アブレシブ摩耗が主と考えるには摩耗率が低いと、凝着摩耗が支配的と考えられている。ここで凝着摩耗について若干の説明を加える。

物体の表面は粗さを持っているため、面と面を摩擦しても全面が接することはなく、ごく一部の凸部でしか相手面と接しない。この接触面は真実接触面と呼ばれるが、見かけの接触面積に比べて非常に小さいため、接触部に

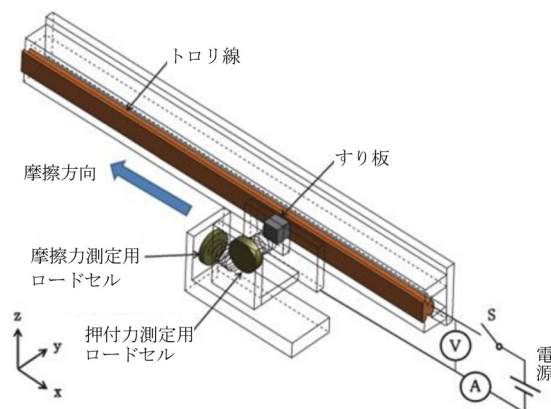


図8 直動型摩耗試験機の構成

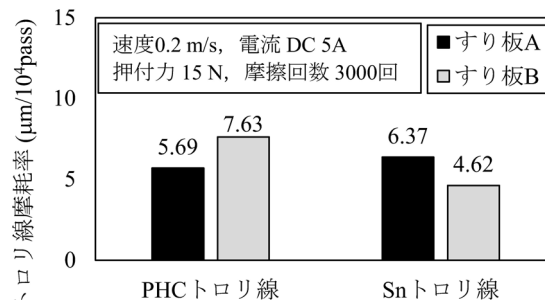


図9 定置試験のトロリ線摩耗率

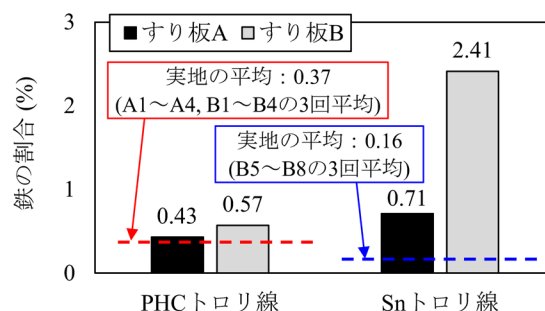


図10 定置試験トロリ線摩擦面から検出された鉄の割合

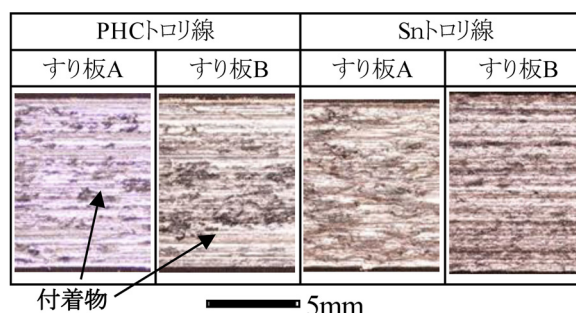


図11 摩耗試験後のトロリ線摩擦面

は大きな応力がかかる。このため2固体間の真実接触面は凝着し、凝着部分が摩擦運動によりせん断されることで摩擦が生じる。これを凝着摩擦という。図12に凝着摩擦に伴う移着摩擦粒子の成長過程を示す。真実接触面は大きな応力により塑性変形し(a)、そうした部分が相手面に移着して摩擦素子を作る(b)。その後、摩擦素子は集合堆積して摩擦面間で移着粒子となり(c)(d)、最終的に摩擦粉として脱落する。その際の程度により摩擦率の低いマイルド摩擦(e)と摩擦率の高いシビア摩擦(f)に分かれる^{3) 4)}。したがって、凝着摩擦において摩擦粉が排出される過程では、相手面への材料の移着が発生する。

新幹線すり板の主成分は鉄であり、トロリ線には鉄が含まれていないことから、トロリ線摩擦面における鉄の検出量が多いほどトロリ線にすり板が移着していると考えられる。パンタグラフ停止位置ではトロリ線摩擦面に5mm程度の比較的大きな付着物が認められたが、元素分析の結果、鉄は1%未満しか検出されなかったことから、この付着物はすり板の移着ではなく、主にトロリ線に由来するものと考えられる。低速走行後のすり板摩擦面は銅色を呈することがわかっており(図13)、すり板に移着した銅がトロリ線に再移着することで上記の付着物が生じると考えられる。パンタグラフ停止位置近傍では主にトロリ線側から摩擦素子が生成されるシビア摩擦が発生しており、摩擦粉として脱落する前の移着粒子がトロリ線摩擦面の付着物として観察されたと考えられる(図14(a))。一方で、ホーム中央付近の地点⑨も低速区間であるが、鉄が1%以上検出されており、すり板の移着が比較的多く発生していると考えられる。低速区間の中でもパンタグラフ停止位置近傍は特に摩擦率が高いが、それはこうした移着の様相の違いにも現れている。

高速区間ではパンタグラフ停止位置から離れるほどトロリ線摩擦面は滑らかになり、鉄の検出量も増加する。このことから、パンタグラフ停止位置から離れるほどトロリ線側からの摩擦素子の生成が減少し、シビア摩擦からマイルド摩擦に移行すると考えられる(図14(b))。

4.2 トロリ線摩擦面の黒色部について

低速区間ではトロリ線摩擦面に黒色部は認められなかったが、高速区間では黒色部が認められ、パンタグラフ停止位置から離れるほどその割合が増加し、それに伴って鉄の検出量が増加する傾向が認められた。一方で、ホーム中央付近の地点⑨の摩擦面は銅色を呈しているが、鉄の検出量は2.50%で摩擦面が黒色の地点と同程度であり、摩擦面に黒色部がほとんどなくても鉄の検出量が多い地点も存在する。

これまで黒色部はすり板の潤滑成分等が移着したものと考えられていたが⁵⁾、元素分析の結果、潤滑成分はほとんど検出されず、その大部分が黒色の摩擦面であって

もトロリ線以外の元素が3%程度しか検出されない地点もあった。この理由として、(A)すり板由来の移着膜厚さが分析深さに比べて小さいためすり板の成分が十分検出されない(相対量が小さい)、(B)黒色部はすり板由来の成分ではなく、銅の酸化物である、という2つの可能性が考えられる。今回の調査結果からはどちらの可能性も排除できないため、今後は撤去したトロリ線からサンプルを採取して詳細を調べる予定である。

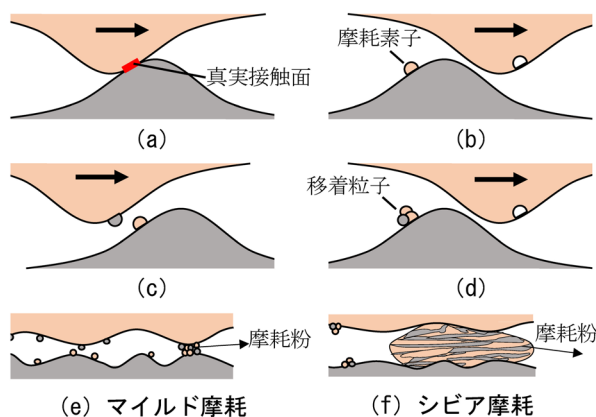


図12 移着摩擦粒子の形成過程

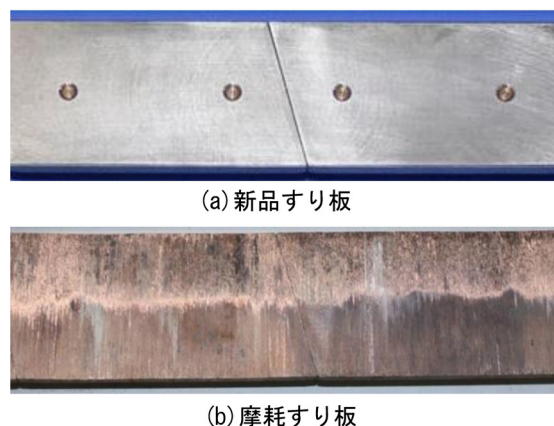


図13 トロリ線(銅)が移着した新幹線のすり板

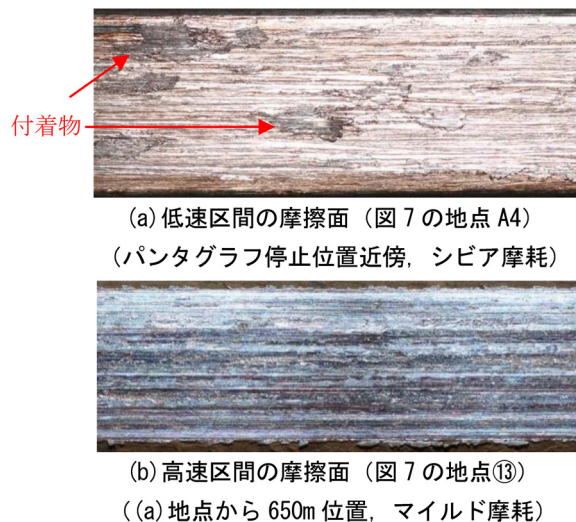


図14 速度域によるトロリ線摩擦面の相違

4.3 トロリ線摩擦面から検出されるすり板の硬質粒子成分について

潤滑成分とは異なり、硬質粒子の成分であるクロムはパンタグラフ停止位置近傍からも検出された。この一因としてすり板に含まれるクロムの量が潤滑成分よりも多い（潤滑成分が検出限界を下回っている）ことが考えられるが、クロムなどの硬質粒子がすり板から脱離し、摩擦面に付着している可能性も考えられる。B 駅のパンタグラフ停止位置では、PHC トロリ線からモリブデンが比較的多く検出される傾向にあり、このモリブデンが硬質粒子由来であれば、トロリ線種によって硬質粒子の付着しやすさが異なる可能性も考えられる。これらについても今後サンプルを採取して詳細を調べる必要がある。

4.4 減速区間と力行区間の元素分析結果について

A 駅の減速区間では、パンタグラフ停止位置に近づくほど鉄の割合が減少する傾向が認められたが、力行区間ではパンタグラフ停止位置からの距離と鉄の検出割合に明確な関係は認められなかった。電流量や速度の影響が考えられるため、これらの影響評価は今後の課題である。

4.5 定置試験と実際の駅のトロリ線摩耗について

定置試験後の PHC トロリ線の摩擦面の状態は、実際の状態と類似していたが、Sn トロリ線では異なる性状を呈していた。摩耗試験後の PHC トロリ線の摩擦面からは、A 駅や B 駅と同程度の鉄が検出されたが、Sn トロリ線とすり板 B の摩耗試験では実際より多い 2.41% の鉄が検出された。また、B 駅におけるパンタグラフ停止位置近傍のトロリ線の摩耗率は $0.1 \sim 0.3\text{mm}/10^4\text{pass}$ (pass: パンタグラフ通過数) であり、定置の数十倍である。

駅のパンタグラフ停止位置近傍の走行条件を想定し、摩擦速度、見かけの接触圧力および電流密度を模擬した摩耗試験を行ったが、以上の結果を見る限りトロリ線の摩耗率は実際の数十分の一であり摩耗を定量的に再現するまでには至らなかった。また、Sn トロリ線では摩擦面状態や元素分析結果が駅構内のトロリ線とは異なり、定性的にも異なる摩耗試験となった。実際の走行において、低速区間にいたるすり板の摩擦面は高速走行の履歴を有するため、すり板がトロリ線の摩耗に及ぼす影響を適切に評価するためには、高速で摩擦させたすり板を供試するなどの工夫が必要と考えられる。

5. まとめ

パンタグラフ停止位置近傍でのトロリ線摩耗メカニズ

ム解明の一助とすべく、可搬型蛍光 X 線分析装置を用いて新幹線のトロリ線摩擦面の元素分析を行い、摩擦面の状態と元素分析結果を比較した。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 低速区間のトロリ線摩擦面は銅色を呈していた。パンタグラフ停止位置近傍では摩擦面に移着物が観察されたが、鉄の割合は減速区間や力行区間よりも小さく、1%を超えることはほとんどないため、この移着物は主にトロリ線に由来するものと考えられる。パンタグラフ停止位置近傍では主にトロリ線側から摩耗素子が生成されるシビア摩耗が発生しており、摩耗粉として脱落する前の移着粒子がトロリ線摩擦面の付着物として観察されたと考えられる。
- (2) 高速区間のトロリ線摩擦面は、駅から離れるほど黒色部が増加する傾向が認められた。元素分析の結果、この黒色部からすり板の潤滑成分はほとんど検出されなかった。また、パンタグラフ停止位置から離れるほどトロリ線摩擦面は滑らかになり、鉄の検出量も増加することから、パンタグラフ停止位置から離れるほどトロリ線側からの摩耗素子の生成が減少し、シビア摩耗からマイルド摩耗に移行すると考えられる。

謝 辞

本研究におけるトロリ線調査の実施にあたり、九州旅客鉄道株式会社の関係者には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

文 献

- 1) 長俊之, 戸路暁, 細川浩一, 橋本幸治, 林隆行: 整備新幹線向け析出強化型銅合金トロリ線, 三菱電線工業時報, No.105, pp.42-45, 2008
- 2) 宮平裕生, 土屋広志, 久保田喜雄: 潤滑性能を向上させた新幹線用すり板の開発, 鉄道総研報告, Vol.28, No.2, pp.47-52, 2014
- 3) 笹田直: 摩擦による固体表面の損傷—とくに凝着摩耗について—, 日本機械学会誌, Vol.75, No.641, pp.905-912, 1972
- 4) 三科 博司: 凝着摩耗機構と摩耗理論, トライボロジスト, Vol.64, No.5, 2019
- 5) 原田智, 清水政利: CS シンプル架線におけるトロリ線摩耗の特徴と局部摩耗対策, 鉄道総研報告, Vol.20, No.9, pp.29-34, 2006