

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

バッテリー電車充電用架線の保全周期を提案する

バッテリー電車は、電化区間においてパンタグラフすり板をトロリー線に接触させて集電し、非電化区間ではパンタグラフを降下してバッテリーに蓄えられた電力で走行します。したがって、バッテリー電車は大電流充電を行うタイミングがあり、場合によって、架線の温度上昇を引き起こします。

大電流充電での架線の温度上昇には、トロリー線とパンタグラフすり板との接触抵抗の大きさが影響します。そこで、トロリー線暴露試験を行い、被膜厚さやパンタグラフとの接触抵抗を測定しました。また、シミュレーションにより、トロリー線の温度上昇値を求め、トロリー線のメンテナンス周期を検討しました。



早坂 高雅
Takamasa Hayasaka
電力技術研究部
電車線構造研究室
室長
【専門分野】電車線、
離線アーク現象



臼木 理倫
Tadanori Usuki
電力技術研究部
集電管理研究室
副主任研究員
【専門分野】電車線の
メンテナンス

はじめに

日本国内におけるエンジンハイブリッド方式を除くバッテリー搭載型鉄道車両は、架線・リチウムイオン二次電池（もしくはキャパシター）ハイブリッドと燃料電池・リチウムイオン二次電池ハイブリッドが主です¹⁾。これらのうち、架線・リチウムイオン二次電池ハイブリッド車両については、2014年3月には東日本旅客鉄道株式会社からすやま烏山線で、2016年10月には九州旅客鉄道株式会社ちくほう筑豊本線（若松線）で、営業運転が始まっています²⁾³⁾。

架線とパンタグラフで行われるバッテリー搭載型鉄道車両（ここで対象とするバッテリー電車）の充電では、停車時に大電流が供給されます。一方、架線には張力が印加されているため、大電流が供給されることにともないトロリー線の温度上昇による断線の懸念

があります。そのため、電車線路の設計において、ちょう架方式、電圧降下、部材の抵抗値から推定される温度上昇値、電流容量などの検討が行われています⁴⁾。これに基づいて、1パンタグラフ当たりの充電電流などが設定されます。

充電が屋外で行われることを考えると、トロリー線のすり板との接触面の劣化が経年により進行し、架線の温度上昇に大きな影響を及ぼす懸念があります。バッテリー電車は、停車時に充電を行いますが、停車位置がずれる場合や、通常すり板がしゅう動しない箇所でもトロリー線から充電する場合には、トロリー線とすり板のしゅう動がまったく行われない箇所もあり、経年による劣化にともなう温度上昇が生じます。これを防ぐためには、トロリー線の表面を、定期的に磨く必要がありますが、その周期がこれまで明らかになっていませんでした。

そこで、トロリー線の劣化状態を模擬するために、山間部と海岸部で1週間～1年間のトロリー線暴露試験を行い、それら暴露試験片に形成される被膜厚さや実際のパンタグラフとの接触

☞ 温度上昇による架線の断線

トロリー線やちょう架線には、数kNの張力が印加されています。そのため、これらの線条が過度に熱せられると線条の強度が低下し、最終的には破断してしまいます。

抵抗を測定しました。また、シミュレーションにより、接触抵抗をパラメーターにしたトロリー線の温度上昇値を求め、それらからトロリー線のメンテナンス周期を検討しました。

ここではトロリー線の暴露試験結果、シミュレーション結果を示すとともに、これら結果に基づいたトロリー線のメンテナンス周期の考え方を紹介します。

バッテリー電車の充電方法

バッテリー電車は電化区間と非電化区間の両方を走行することができるため、乗客が電化区間から非電化区間、もしくはその逆の移動に際して電車を乗り換える必要がなくなり、利便性が向上します。

図1にバッテリー電車が適用される線区を模式的に示します。A駅、B駅間は電化区間で、架線から電力を得ながら走行します。B駅、C駅間は非電化区間で、バッテリーに蓄えた電力で走行します。したがって、バッテリー電車はB駅までで充電を行い、パンタグラフを下げてB駅からC駅へ向けて走行し、C駅において再びパンタグラフを上げて充電を行います。その充電が完了すると再びパンタグラフを下げてB駅へ向けて走行し、B駅においてパンタグラフを上げます。このとき、C駅ではトロリー線とすり板のしゅう動がまったく行われず、また、C駅方からB駅に入ってきた車両が停止する箇所も条件によってはトロリー線とすり板のしゅう動が行われないことが考えられます。

充電時間は、充電電流の値に依存しますが、駅での停車時間に直接的に影響するため、乗客の利便性に影響を与えます。したがって、充電電流値を大きくし、停車時間を短くすることが望まれます。一方、充電電流の増加は、

部材の抵抗値や接触面の被膜抵抗の影響により、部材の温度を上昇させ、張力の印加された架線による電力送電において、トロリー線の断線リスクが増加します。その対策として、張力が印加されていない剛体電車線の適用も考えられますが、カテナリー架線を使用する場合に比べ、コストが増加してしまいます。

そこで、カテナリー架線とパンタグラフで充電を行う場合の温度上昇に対する充電電流と被膜の影響を明らかにし、架線の断線を防ぐ充電電流値とメンテナンス周期を明らかにすることが必要です。

被膜がトロリー線温度上昇に与える影響

トロリー線のしゅう動面に形成された被膜が温度上昇に与える影響を明らかにしたうえで、トロリー線のメンテナンス周期を提案するために、二つの実験とシミュレーションプログラムの構築を行いました。

まず、トロリー線表面に被膜を形成させるために、山間部と海岸部で1週間から1年間の暴露試験を行い、各サンプルの被膜の厚さを測定しました。続いて、実際に使用されている4枚のすり板を有するパンタグラフと暴露したトロリー線との間の接触抵抗を測定しました。

最後に、トロリー線とパンタグラフ

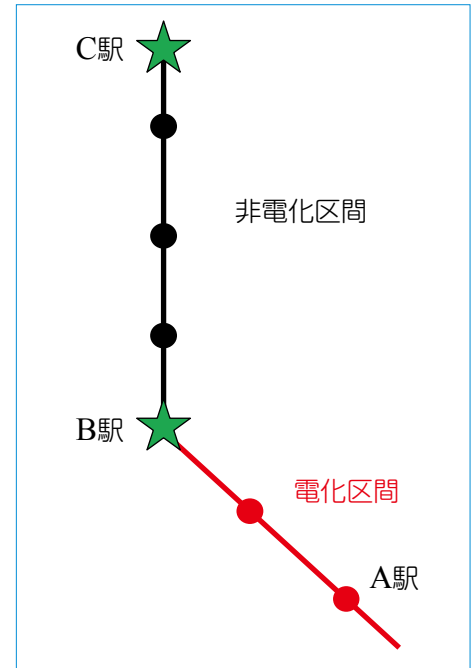


図1 バッテリー電車の適用線区の例

の温度上昇を解析するため、有限要素法による電場解析と熱伝導解析のシミュレーションを実施しました。

これら試験結果およびシミュレーション結果を用いて、トロリー線メンテナンス周期を検討しました。なお、モデル作成および解析に用いたソフトウェアは、ムラタソフトウェア製のFemtetです。

暴露試験と被膜厚さ測定結果

暴露試験は、海岸から十分離れた山間部と海岸から20m程度離れた海岸部の2箇所で行いました。それぞれのトロリー線を定期的に回収し、トロ

剛体電車線とカテナリー架線

剛体電車線やカテナリー架線は、いずれも電車に電力を供給するための設備です。剛体電車線は剛性の大きな導体を無張力で架空に設置しています。一方で、カテナリー架線は線条に張力を印加して架空に設置しています。

剛体電車線はカテナリー架線に比べて重いいため、剛体電車線を支持するための設備を増やす必要がありますが、張力を印加する必要がないため、温度上昇による架線の断線の心配がありません。

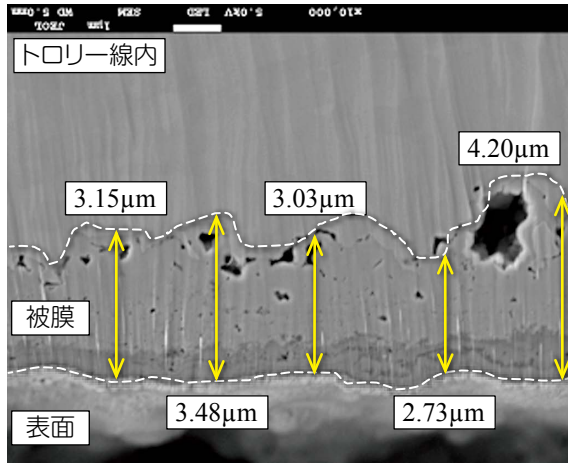


図2 被膜厚さ測定例

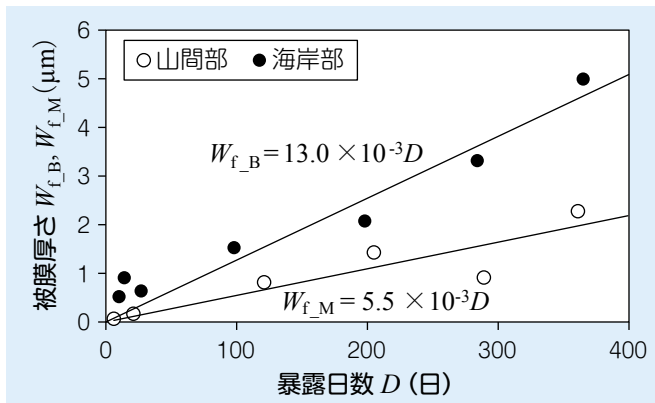


図3 暴露日数と被膜厚さの関係

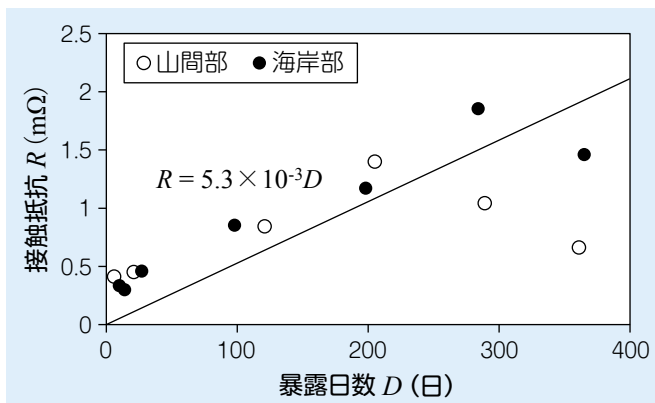


図4 暴露日数と接触抵抗の関係

りー線のすり板との接触面に形成された被膜厚さを電界放型走査電子顕微鏡で測定しました。また、海岸部における暴露日数284日のトロリー線の被膜分析をX線光電子分光分析装置によ

り行いました。

図2に被膜厚さ測定で得られた画像の例を示します。破線で囲んだ箇所が被膜に相当し、トロリー線表面を覆うように形成している様子が見られます。

被膜厚さはトロリー線表面に対して一様ではないので、画像内の5箇所を被膜厚さを測定し、その平均値を厚さとしてしました。

図3に暴露日数と形成された被膜厚さの関係を示します。今回の暴露試験の範囲においては、被膜厚さは暴露期間に応じて増加することが確認されました。また、山間部に比べ、海岸部の被膜の成長が早いことも確認されました。

また、海岸部の暴露日数284日のトロリー線の被膜の化合物分析の結果、被膜はおもにCu₂O, CuO, CuCl₂, Cu(OH)₂から構成されており、酸化物および外来付着物に起因する化合物が混在していることが確認されました。

接触抵抗測定結果

トロリー線とパンタグラフとの接触における抵抗(以下、接触抵抗)は、四つのすり板を有するパンタグラフの押上力を54Nに設定し、暴露試験で得られたトロリー線と接触させたときの接点間の電圧と電流から算出しました。なお、すり板は銅系焼結合金すり板を使用しました。

図4に暴露日数と接触抵抗の関係を示します。接触抵抗は約200日まで暴露日数とともに増加する傾向にありました。山間部では200日以上で接触抵抗が減少する傾向が確認され、これがどのような理由で生じているのかを明らかにすることはできませんでしたが、傾向として接触抵抗は、暴露日数に応じて増加する傾向にあることがわかりました。

シミュレーションプログラムの構築とその結果

通電による温度上昇を解析するため、有限要素法による電場解析と熱伝導解

析のシミュレーションモデルを構築しました。この手法では、通電電流や通電時間を変化させた解析が容易であり、定置試験で行えない条件についても検討することが可能です。

図5に本シミュレーションモデルにおいて想定したトロリー線の断面を示します。すり板とトロリー線の接触面を形成するため、トロリー線は1mm切削した形状としました。また、トロリー線およびすり板の熱放散 W_h は自然対流によるものと仮定しました。シミュレーションの詳しい内容、計算例は文献4をご覧ください。

トロリー線メンテナンス周期の提案

トロリー線の許容温度は90℃ですが、外気温や太陽光などの影響による最高温度が40～43℃程度と考えられています。そのため、充電にともなうジュール熱で許容できる温度は47℃程度です⁵⁾。

表1に実験とシミュレーションから求めた充電電流と許容被膜厚さおよび接触抵抗の値を示します。充電電流の増加にともない許容される被膜の厚さや接触抵抗は減少するため、定期的なメンテナンスとして、たとえばトロリー線の研磨などが必要であることがわかります。

その定期的なメンテナンスは、表1で示した被膜厚さに達する前までに実施される必要があります。したがって、表1の許容被膜厚さと図3から与えられるメンテナンスまでの許容日数は以下となります。

電流：250A、許容日数：13.8か月
 電流：275A、許容日数：11か月
 電流：325A、許容日数：6か月
 電流：490A、許容日数：4か月
 通常、設備のメンテナンス周期を決

定する際には許容日数に対して実際の保全を行うまでの期間に余裕を見込みます。それを許容日数の半分と考えると、充電電流とメンテナンス周期の関係は表2のようになります。

充電電流が大きくなるとメンテナンス周期が短くなります。したがって、メンテナンス周期が極端に短いような状況では、カテナリ架線以外の充電設備の検討も必要です。

おわりに

バッテリー電車は停車中に大電流をトロリー線とパンタグラフに流し、充電を行うため、これにともなうジュール熱の発生が避けられません。とくに、設備が屋外に架設されており、また、充電箇所によってはトロリー線とパンタグラフすり板のしゅう動が生じないため、トロリー線表面に被膜が形成されます。この被膜は充電時のトロリー線温度上昇に大きな影響を与えます。

そこで筆者らは、トロリー線の暴露試験、接触抵抗測定、シミュレーションを行い、トロリー線被膜が温度上昇に与える影響を明らかにし、メンテナンス周期の提案を行いました。

今後、バッテリー電車の採用がますます増加するものと考えられます。今回行った提案が、バッテリー電車への電力供給に貢献できることを期待しています。[RRR]

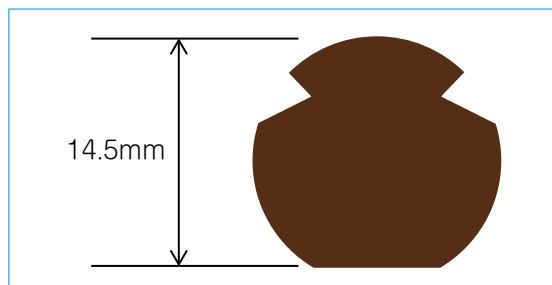


図5 シミュレーションモデルにおけるトロリー線断面形状

表1 充電電流と許容被膜厚さおよび接触抵抗の関係

充電電流	許容被膜厚さ	接触抵抗
250A	5.0 μ m	2.23m Ω
275A	4.0 μ m	1.86m Ω
325A	3.0 μ m	1.16m Ω
490A	1.0 μ m	0.74m Ω

表2 充電電流とメンテナンス周期

充電電流	メンテナンス周期
250A	7か月
275A	5か月
325A	3か月
490A	2か月

文献

- 1) 小笠正道：バッテリー電車をめぐる最近の技術開発～国内外の技術～ その1 燃料電池電車の歴史的系譜、鉄道車両と技術、pp.2-10, Vol.20, No.5, 2014
- 2) 滝口裕之：蓄電池駆動電車EV-E301系 (ACCUM) の概要、JR EAST Technical Review, No.51, pp.45-50, 2015
- 3) 青柳東樹, 古山幸男, 山崎猛志：蓄電池駆動電車導入に伴う電車線路設備の設計手法、平成25年電気学会産業応用部門大会, 第5分冊, pp.109-112, 2013
- 4) 早坂高雅, 臼木理倫, 山下主税：バッテリー電車充電用カテナリ架線のメンテナンス周期の提案、鉄道総研報告, Vol.31, pp.29-34, No.2, 2017
- 5) 鉄道総合技術研究所編：電車線とパンタグラフの特性、研友社, p.152, 1993