

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

早坂 高雅* 白木 理倫* 山下 主税**

A Proposal of the Maintenance Cycle of Overhead Catenary System for the Battery-powered Electric Trains

Takamasa HAYASAKA Tadanori USUKI Chikara YAMASHITA

A battery-powered electric train charges its batteries with a large current by use of the contact wires and the pantographs. The current tends to be larger than the one of the normal trains during their standstill at a station. Usually, the current raises the temperature of the contact wire. Especially, since the battery-powered electric trains do not make the contact strips of their pantographs slide on contact wires, the film such an oxide would grow on the contact wire according to the effect of the exposure days. The influence of the film for the temperature is expected to be appreciable, however, it has not been clarified yet. The authors conducted the exposure test, the film-thickness measurement, the contact-resistance measurement and have developed a simulation program to clarify the influences of the film. This paper shows the influence of film and proposes the maintenance cycle based on the experiment results.

キーワード：バッテリー電車，充電，カテナリ架線，シミュレーション，メンテナンス周期

1. はじめに

日本国内におけるエンジンハイブリッドを除く、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）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ある¹⁾。これらのうち、2014年3月には東日本旅客鉄道株式会社 烏山線で、2016年10月には九州旅客鉄道株式会社筑豊本線（若松線）で架線・リチウムイオン二次電池ハイブリッド車両の営業運転が始まっている^{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（本稿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る。一方で、架線には張力が印加されているため、温度上昇による断線の懸念がある。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、電流容量などの計算が行われている⁴⁾。これらに基づいて、1パンタグラフ当たりの充電電流などが設定されている。

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走行する。非電化区間走行前に、大電流充電を行うが、場所によっては充電箇所のトロリ線が長期間に渡ってしゅう動されない可能性がある。

充電が屋外で行われることを考えると、トロリ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る。しかし、これまでのところ、トロリ線の劣化状態が温度上昇に及ぼす影響に着目した研究は行われておらず、十分な知見もなかった。

そこで、筆者らはトロリ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抵抗を測定した。また、シミュレーションプログラムを構築し、接触抵抗をパラメータにしたトロリ線の温度上昇値を求め、それらからトロリ線のメンテナンス周期を検討した。

本論文ではトロリ線の暴露試験結果、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線のメンテナンス周期を提案する。

2. 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、利便性の向上が期待できる。

図1にバッテリー電車が適用される線区を模式的に示す。A駅、B駅間は電化区間であり、架線から電力を得

* 電力技術研究部 電車線構造研究室

** 電力技術研究部 集電管理研究室

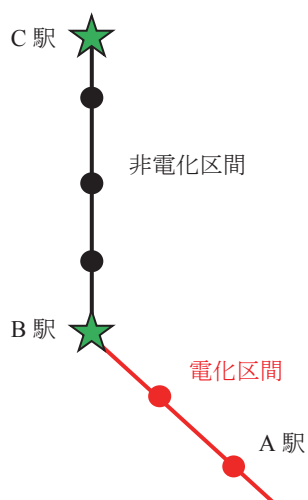


図1 バッテリー電車の適用線区の例

ながら走行できる区間である。B 駅、C 駅間は非電化区間であり、バッテリーに蓄えた電力で走行する区間である。したがって、バッテリー電車は B 駅で充電を行い、パンタグラフを下げ、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う。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る。このとき、C 駅ではトロリ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線とすり板のしゅう動が行われない。

充電時間は、充電電流の値に依存するが、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る。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る。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、トロリ線の断線リスクが増加する。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例もあるが、カテナリ架線を使用する場合に比べ、コストが増加してしまう。

そこで、カテナリ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となる。

3. 被膜がトロリ線温度上昇に与える影響

トロリ線表面に形成した被膜の温度上昇に与える影響を明らかにした上で、トロリ線のメンテナンス周期を提案するために、2つの実験とシミュレーションプログラムの開発を行った。図2にトロリ線メンテナンス周期提

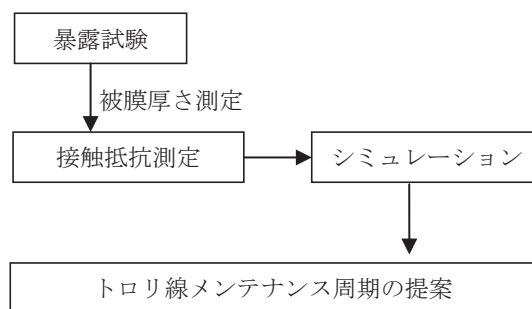


図2 メンテナンス周期提案までの流れ

案までの流れを示す。

まず、トロリ線表面に被膜を形成するために、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線との間の接触抵抗を測定した。

最後に、トロリ線とパンタグラフ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た。この手法では、通電電流、通電時間、接触抵抗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模擬することが可能である。

これら試験結果およびシミュレーション結果を用いて、トロリ線メンテナンス周期を明らかにする。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 である。

3.1 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箇所で行った。

表1に暴露試験条件を示す。暴露試験開始前のトロリ線表面状態のばらつきを小さくするため、暴露する12時間程度前に有機溶剤（アセトン）で表面を脱脂した後、

表1 暴露試験条件

場所	山間部	海岸部
試験片種類	硬銅トロリ線	
暴露日数	6日	10日
	21日	14日
	121日	27日
	205日	98日
	289日	198日
	361日	284日

市販の銅酸化膜除去剤にてトロリ線表面の酸化膜を除去した。

硬銅トロリ線の大弧面に形成した被膜厚さをトロリ線の断面に対して電界放出型走査電子顕微鏡の機能を用いて測定した。また、海岸部における暴露日数 284 日のトロリ線の被膜分析を X 線光電子分光分析で行った。

図 3 に被膜厚さ測定で得られた画像の例を示す。破線で囲んだ箇所が被膜に相当し、トロリ線表面を覆うように形成している様子が認められる。被膜厚さはトロリ線表面に対して一様ではないため、画像内の 5 箇所の被膜厚さを測定し、その平均値とした。

図 4 に暴露日数と形成した被膜厚さの関係を示す。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た。この結果から、山間部と海岸部の暴露日数と被膜厚さの関係は、式 (1) ~ (2) で表される。なお、暴露日数を D 、山間部の被膜厚さを $W_{f,M}$ 、海岸部の被膜厚さを $W_{f,B}$ とした。

$$W_{f,B} = 13.0 \times 10^{-3} D \quad (1)$$

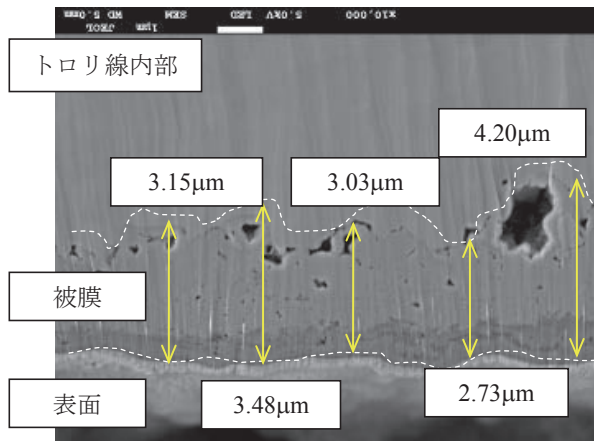


図 3 被膜厚さ測定例

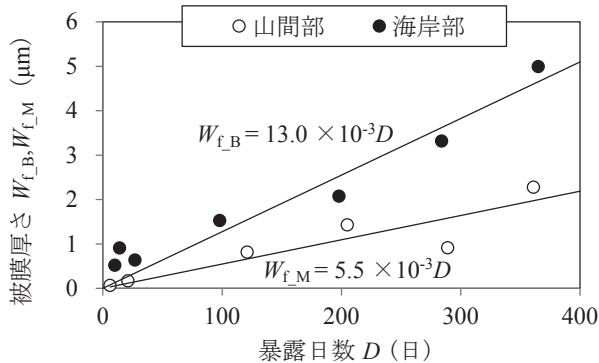


図 4 暴露日数と被膜厚さの関係

$$W_{f,M} = 5.5 \times 10^{-3} D \quad (2)$$

なお、海岸部の暴露日数 284 日のトロリ線大弧面被膜の化合物分析の結果、被膜は主に Cu_2O 、 CuO 、 $CuCl_2$ 、 $Cu(OH)_2$ 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た。

3.2 接触抵抗測定結果

図 5 に接触抵抗の測定方法を模式的に示す。4 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線との間の電圧と電流から接触抵抗を算出した。なお、すり板は銅系焼結合金すり板を使用した。

図 6 に暴露日数と接触抵抗の関係を示す。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る。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

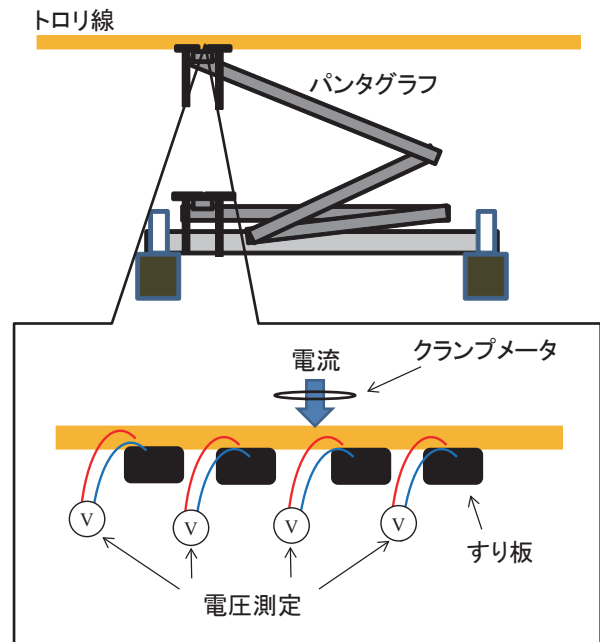


図 5 接触電圧測定方法

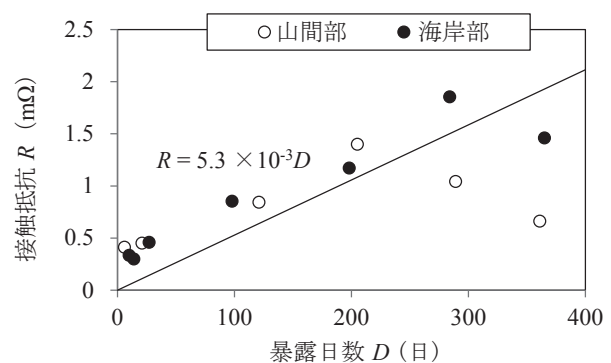


図 6 暴露日数と接触抵抗の関係

特集：電力技術

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ができなかった。しかし、海岸部における接触抵抗は、200日以上でも増加する傾向にあった。そこで、暴露日数を D とし、接触抵抗を R とすると、海岸部における接触抵抗は式 (3) で表される。

$$R = 5.3 \times 10^{-3} D \quad (3)$$

3.3 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模擬することが可能である。

図7に本シミュレーションモデルにおいて想定したトロリ線の断面を示す。すり板とトロリ線の接触面を定義する必要があったため、トロリ線は1mm切削した形状とした。また、トロリ線およびすり板の熱放散 W_h は自然対流によるものとし、Femtet 内で用いられている式 (4) で算出した。なお、 C は自然対流係数、 θ (°C) は対象物温度、 θ_r (°C) は室温である。

$$W_h = C (\theta - \theta_r)^{5/4} \quad (4)$$

また、表2にシミュレーションプログラムで使用した舟体、トロリ線、すり板、補助すり板の接触抵抗と熱放散係数を示す。これらのモデルを用いて、通電による温度上昇を解析するためには、トロリ線とすり板の接点半径 a (m) を設定する必要がある。接点半径はトロリ線とすり板の集中抵抗の式から算出することができる。なお、集中抵抗とは被膜の存在しない状態における接触抵抗である。

式 (5) にトロリ線とすり板の接点半径の算出式を示す。ここで ρ_1 , ρ_2 はトロリ線とすり板の電気抵抗率 (Ωm)、 R_c は集中抵抗 (Ω) である。

$$a = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4R_c} \quad (5)$$

トロリ線とすり板の集中抵抗を図5に示した方法で測定した。図8に押付力と集中抵抗の関係を示す。この結果から、集中抵抗は通電電流への依存性が小さいことがわかる。一方、押付力に大きく依存することも分かる。

図9に図8と式 (5) から計算した押付力と接点半径の関係を示す。シミュレーションプログラムではこれら結果を用いて計算を行っている。図10にシミュレーション結果の例を示す。

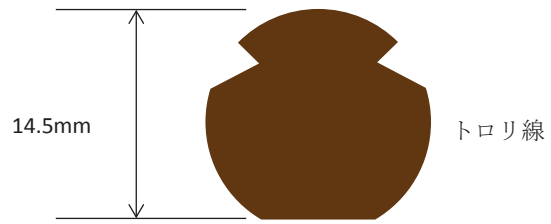


図7 シミュレーションモデルにおけるトロリ線形状

表2 シミュレーションパラメータ

部材	接触抵抗 (Ωm)	熱放散係数 (W/mK)
舟体	4.91×10^{-8}	140
トロリ線	1.17×10^{-8}	375
すり板	2.86×10^{-7}	55.5
補助すり板	7.46×10^{-8}	96

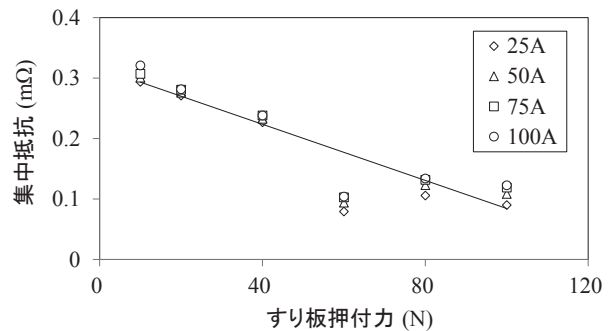


図8 すり板押付力と集中抵抗の関係

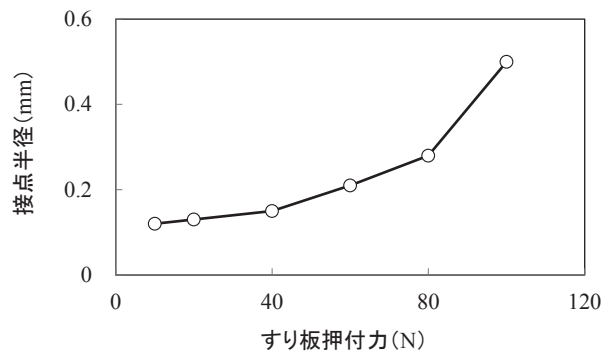


図9 すり板押付力と接点半径の関係

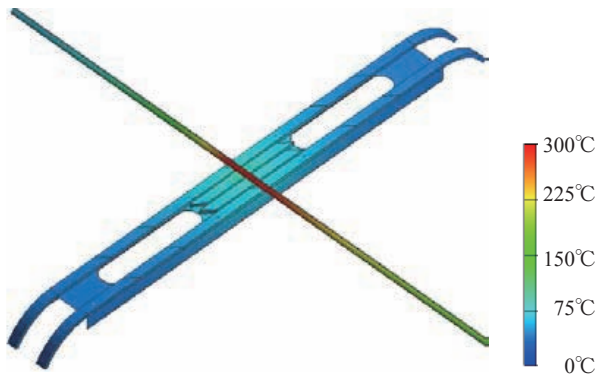


図 10 シミュレーション結果例

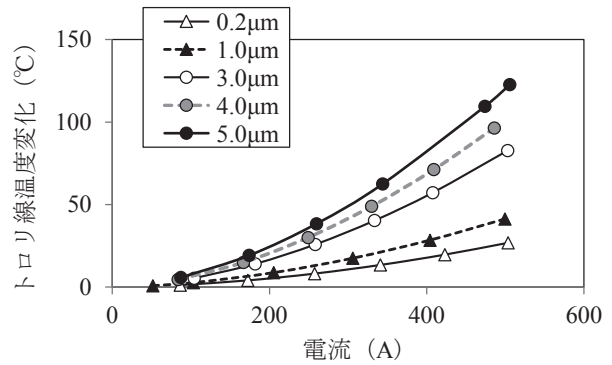


図 11 シミュレーション結果

図 11 に、トロリ線にパンタグラフを接触させた状態を仮定し、被膜厚さを $0.2\mu\text{m}$ ～ $5.0\mu\text{m}$ で変化させた場合のシミュレーションによるトロリ線の温度上昇値を示す。

4. トロリ線メンテナンス周期の提案

トロリ線の許容温度は 90°C であるが、外気温や太陽光などの影響による最高温度が $40 \sim 43^\circ\text{C}$ 程度と考られている。そのため、ジュール熱で許容できる温度は 47°C 程度である⁵⁾。

表 3 に図 11 から求めた充電電流と許容被膜厚さおよび式 (3) から与えられる接触抵抗の値を示す。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が必要であることがわかる。

その定期的なメンテナンスは、表 3 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る。したがって、表 3 の許容被膜厚さと式 (2) 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る。

充電電流：250A，許容日数：13.8 ヶ月

充電電流：275A，許容日数：11 ヶ月

充電電流：325A，許容日数：6 ヶ月

充電電流：490A，許容日数：4 ヶ月

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む。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 4 のようになる。

充電電流が大きくなるとメンテナンス周期が短くなる。したがって、このような状況下では、架線以外の充電設備の検討が必要と考えられる。

表 3 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
250 A	$5.0\mu\text{m}$	$2.23\text{m}\Omega$
275 A	$4.0\mu\text{m}$	$1.86\text{ m}\Omega$
325 A	$3.0\mu\text{m}$	$1.16\text{ m}\Omega$
490 A	$1.0\mu\text{m}$	$0.74\text{ m}\Omega$

表 4 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
250 A	7 ヶ月
275 A	5 ヶ月
325 A	3 ヶ月
490 A	2 ヶ月

5. まとめ

バッテリー電車は停車中に大電流をトロリ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ない。特に、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、トロリ線表面に被膜が形成される。この被膜は充電時のトロリ線温度上昇

に大きな影響を与えるものと考えられる。

そこで筆者らは、トロリ線の暴露試験、接触抵抗測定、シミュレーションプログラムの開発を行い、トロリ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った。結果をまとめると以下となる。

- (1) 暴露日数に応じて被膜厚さや接触抵抗が増加する傾向にあった。
- (2) すり板押付力と集中抵抗や接点半径、接触抵抗の影響を考慮できるトロリ線とパンタグラフの温度上昇シミュレーションプログラムを開発した。
- (3) 充電電流および接触抵抗に対応するトロリ線温度上昇値をシミュレーションにより求めた。
- (4) 充電電流が 250A, 275A, 325A, 490A の場合、トロリ線の許容温度に達する暴露日数は、それぞれ 13.8 ヶ月、11 ヶ月、6 ヶ月、4 ヶ月と推定される。
- (5) 保守余裕を見込むと、トロリ線のメンテナンス周期は充電電流 250A, 275A, 325A, 490A のそれぞれに対して、7 ヶ月、5 ヶ月、3 ヶ月、2 ヶ月となる。

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, No. 213, 2014
- 2) News Release, <https://www.jrkyushu.co.jp/news/pdf/> (参照日：2016年11月15日)
- 3) 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
- 4) 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
- 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