

銅含浸型メタライズドカーボンすり板の局部摩耗発生機構

久保田 喜雄* 早坂 高雅** 古賀 進一郎*** 野崎 秀彦#

Generation Mechanism of Localized Wear of Cu-impregnated Metalized Carbon Contact Strip

Yoshitaka KUBOTA Takamasa HAYASAKA Shinichiro KOGA Hidehiko NOZAKI

Localized wear of pantograph contact strips is an urgent problem to be solved, as it can lead to the fusion of the pantograph head and subsequent breakage of the overhead contact wire. However, the mechanisms underlying localized wear have not yet been clarified, and effective countermeasures have not been established. The aim of this study is to clarify the generation mechanism of localized wear in the copper-impregnated type of metalized carbon contact strip. Therefore, we analyzed actual worn strips using a micro Raman spectrometer and investigated the sliding wear behavior of contact strips with different degrees of graphitization of the carbon substrate using a block-on-ring-type wear tester.

キーワード：パンタグラフすり板，異常摩耗，メタライズドカーボンすり板，段付摩耗，溝摩耗，黒鉛化，ラマン分光分析

1. はじめに

電気鉄道の集電方式は架空電車線方式が主流であり，電気車はパンタグラフを通じてトロリ線から集電している。パンタグラフの最上部，トロリ線と接する部分には，パンタグラフすり板（以下，すり板）と呼ばれるしゅう動接点部材が取り付けられている（図1(a)）。

すり板はトロリ線との摩擦により摩耗し，通常はトロリ線のジグザグ偏位の分布に応じた摩耗形状となる図1(b)，(c)。しかし，まれにはあるが摩耗が局部的に進行し，段付摩耗や溝摩耗と呼ばれる異常摩耗が発生することがある（図2）。こうした局部摩耗は事故を未然に防ぐためにすり板を臨時交換する必要があることから遅延の原因となり，発見が遅れた場合にはパンタグラフの溶断やそれともなう架線の切断に至ることがある¹⁾ため，解決が望まれている。しかし，局部摩耗の発生や進展の機構は特にメタライズドカーボンすり板では未解明な点も多く，系統的な対策は確立されていない。トロリ線に設置したセンサによってすり板局部摩耗を検知する方法も検討されている²⁾が，根本的な解決のためには，局部摩耗の発生原因とメカニズムを明らかにする必要がある。機構解明にあたっては，局部摩耗の過程を「初期の局部摩耗（凹部）発生」と「初期摩耗箇所の急速な進展」に分けて考えることが重要である。本研究では，銅含浸型メタライズドカーボンすり板の初期の局部摩耗発

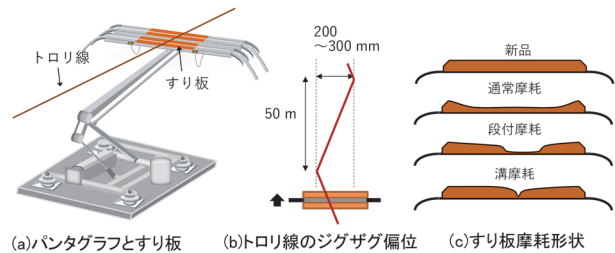


図1 パンタグラフとすり板の模式図



図2 すり板局部摩耗の例

生機構に着目し，実すり板の観察・分析と通電摩擦実験を行った結果，アーク放電によりすり板炭素基材の黒鉛構造が増加することで局部摩耗発生の原因となりうるすり板摩耗率の増加現象が起こるとの知見が得られたので以下に報告する。

2. すり板の局部摩耗に関する現在までの知見

2.1 発生原因が明らかになっているすり板の局部摩耗

これまでに発生原因が明らかになっているすり板の局部摩耗は以下の3つに分類できる。

- ①架線への着氷霜に起因する離線発生によるもの
- ②架線・パンタグラフ系の追随特性に起因する離線発生

* 材料技術研究部 摩擦材料研究室
** 電力技術研究部 電車線構造研究室
*** 西日本旅客鉄道株式会社
東洋炭素株式会社

によるもの

③主すり板と補助すり板の境界部で発生するもの

①は主に銅系焼結合金すり板で発生するもので、トロリ線摩擦面に氷霜が付着した箇所をパンタグラフが通過する際に連続的にアーク放電が生じ、すり板が溶損・摩耗するものである³⁾。特徴として、発生が冬季に集中すること、舟体側面にアーク放電による損傷が見られることが挙げられる。対策として、アーク放電に対する耐性が強いすり板材の使用や霜取り用パンタグラフによる氷霜の除去が実施されている。

②は、架線・パンタグラフ系の追随性能が低い状況で、離線が繰り返し発生し、すり板が急激に摩耗するものである。例えば、架線高さが低い区間でパンタグラフの押上力が低下したことで離線が増加し局部摩耗が発生した事例⁴⁾や、トロリ線に波状摩耗が生じた線区で局部摩耗発生件数が増加した事例が報告されている¹⁾。このように設備側の特定箇所に原因がある場合、離線はすり板上の決まった箇所で生じることから、いずれの車両でもすり板の同一変位付近に局部摩耗の発生が集中するという特徴がある。

③は、主すり板とアルミニウム製補助すり板の境界部で補助すり板側に局部摩耗が発生するものである。この局部摩耗の原因は、主すり板と補助すり板で電気抵抗率と摩耗特性が大きく異なることにあり、補助すり板の材料を主すり板と同一にすることが有効な対策となる⁵⁾。

2.2 アーク放電がメタライズドカーボンすり板の摩耗に及ぼす影響

前節で述べたように局部摩耗は離線時のアーク放電に起因すると考えられるものが多く、アーク放電の熱で溶融・軟化する金属系すり板で比較的発生しやすい。しかし、常圧下で融点を持たない炭素を基材とするカーボンすり板でも局部摩耗は発生し、問題となっている。これまでの研究から、銅含浸型メタライズドカーボンすり板の摩耗はアーク放電のエネルギーに比例して増加するとの知見が得られている⁶⁾。また、メタライズドカーボンすり板がアーク放電に曝されると含浸された銅が溶出し、硬さが低下することも報告されている⁷⁾。これらのことから、メタライズドカーボンすり板の局部摩耗はアーク放電のエネルギーがすり板上の一箇所に集中した結果生じると考えられていた。しかし、筆者らがパンタグラフの一般的な押上力と同等の55Nの押付力条件で実験した結果、アークエネルギーの分布と摩耗形状は必ずしも一致せず⁸⁾、また、アーク損傷部を起点に局部摩耗が発生するかを検証するため行った実験においても、アーク損傷箇所の摩耗率は非損傷箇所と変わらず、局部摩耗の起点となりうる凹部が形成されることはなかった⁸⁾。一方、押付力を通常の2倍程度とした実験ではアーク電流量分布とすり板摩耗形状はよく一致した⁹⁾。以上

のことから、すり板の摩耗増加にはアーク放電の発生と高荷重条件の双方が影響していると推定されたが、その詳細な機構までは明らかにできなかった。

上記の既往研究を踏まえ、本研究ではこれまで調べられてこなかったメタライズドカーボンすり板の局部摩耗箇所の詳細な観察・分析を行うとともに、局部摩耗箇所で生じる銅の溶出や炭素基材の黒鉛化といった変質が生じたすり板を模した試験片を用い、押付力やトロリ線摩擦面の表面粗さが摩耗に及ぼす影響について調べることにした。

3. 局部摩耗の発生状況調査と局部摩耗が生じたすり板の観察・分析

3.1 すり板材

本研究で対象としたすり板は銅含浸型メタライズドカーボンすり板PC78Aである。PC78Aの材料組織を図3に、化学組成および物理特性を表1に示す。一般的にメタライズドカーボンすり板の炭素基材は1000～1500℃で焼成された非黒鉛質炭素で¹⁰⁾、PC78Aも同様である。こうした非黒鉛質炭素は2000℃を超える高温下では結晶構造の発達が進み、黒鉛質に変化する。この過程は黒鉛化と呼ばれる。

3.2 局部摩耗の発生状況調査

3.2.1 調査概要

2009年12月から2012年3月までに2つの地区(地区A、B)で発生した銅含浸型メタライズドカーボンす

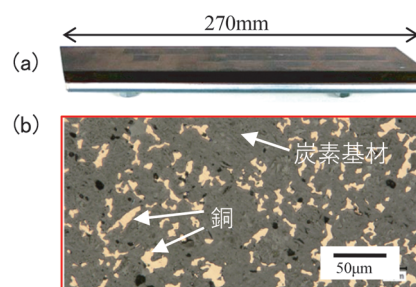


図3 銅含浸型メタライズドカーボンすり板の外観と材料組織

表1 銅含浸型メタライズドカーボンすり板の化学組成と物理特性(公称値)

化学組成 (mass %)	
C	52
Cu	48
物理特性	
密度 (10^3 kg/m^3)	3.0
シヨア硬さ (HSD)	90
電気抵抗率 ($\mu\Omega\text{m}$)	1.8
曲げ強さ (MPa)	120
シャルピー衝撃値 (kJ/m^2)	4.2

り板の局部摩耗発生状況を調べた。調査項目は局部摩耗が発見された日付と局部摩耗が発生した箇所の変位（中央からの距離）である。なお、同地区を走行する車両は115系または117系電車で、主にモーター車2両+付随車2両の4両編成で、1台のパンタグラフ（PS16型、40mm幅すり板2列）で集電している。各車両のすり板1列当たりの最大集電電流を主電動機の定格電流等から計算した結果、115系で約520A、117系で約450Aであった。

3.2.2 調査結果と考察

図4に局部摩耗が発見された月の分布を示す。トロリ線着氷霜が原因の場合、局部摩耗の発生は冬期に集中するが、今回の調査した線区ではそのような季節性は見られなかった。

図5、図6に局部摩耗発生箇所の分布を示す。これらより、舟体の中央付近もしくはトロリ線のジグザグ偏位

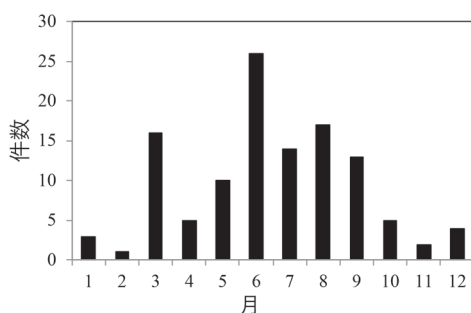


図4 局部摩耗が発見された月の分布

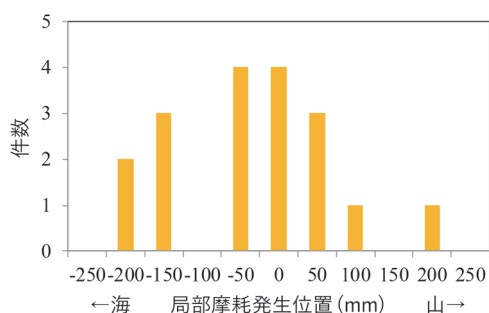


図5 局部摩耗発生箇所の分布 (地区A)

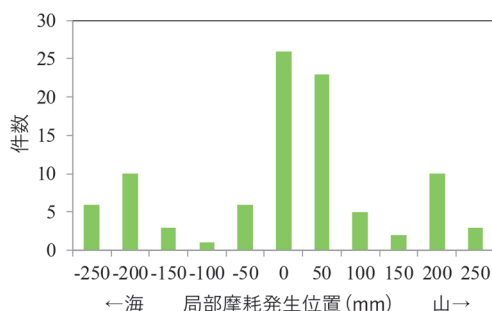


図6 局部摩耗発生箇所の分布 (地区B)

の端部である中央から±200mm位置で局部摩耗が発生しやすいことがわかった。舟体の中央付近はパンタグラフの追随性が他の変位よりも低く、離線が発生しやすい箇所である¹¹⁾。また、中央から±200mm付近はトロリ線が金具で支持されており慣性が大きいので、やはり離線が発生しやすい箇所である。これらの箇所ですり板の局部摩耗発生頻度が高いことから、メタライズドカーボンすり板の局部摩耗の発生には従来考えられていたとおり離線時のアーク放電が関係している可能性が考えられる。

3.3 局部摩耗箇所の断面組織観察とラマン分光分析

3.3.1 断面組織観察

すり板の局部摩耗箇所の断面組織をデジタルマイクロスコップで観察した。図7に観察結果の一例（複数箇所の撮像の合成）を示す。図中、やや黒く変色した部分は銅が溶出した領域である。銅の溶出深さは局部摩耗箇所の底面では最大1500μm程度である一方、局部摩耗箇所でも斜面部分では10μm程度であった。局部摩耗が生じていない箇所（以下、正常摩耗箇所と記す）の銅溶出深さは10~100μmであった。以上のことから、局部摩耗箇所の底面はその他の箇所よりもより強い熱影響を受けていたと推定される。

3.3.2 ラマン分光分析

断面組織観察では確認できない炭素基材の黒鉛化の有無を明らかにするため、ラマン分光分析法¹²⁾により局部摩耗箇所底面の炭素基材の黒鉛化の進行度合い（黒鉛化度）を評価することとした。ラマン分光分析は、レーザー光を物質に照射し、反射した光のうち照射光とわずかに振動数が異なる弱い光（ラマン散乱光）のスペクトルを解析することで炭素材料の結晶性等を評価する分析手法である。図8に銅含浸型メタライズドカーボンすり板のラマンスペクトル（図中黒線）の一例を示す。

炭素材料のラマンスペクトルには主に二つのピークがあり、1580cm⁻¹付近のピークはG (Graphite) バンドと呼ばれる黒鉛構造に起因するもの、1360cm⁻¹付近のピークはD (Disorder) バンドと呼ばれる黒鉛構造の乱れと欠陥に起因するものである。測定したスペクトルを図8の赤・青線のように波形分離することで、それぞれ

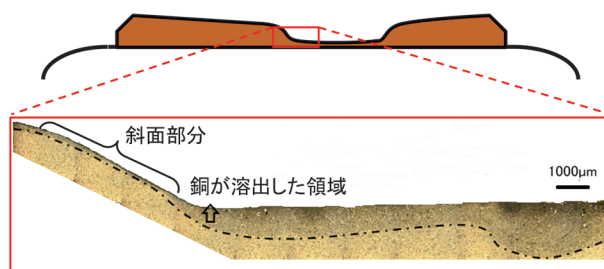


図7 局部摩耗箇所の断面組織例

のバンドのピーク強度 I_G , I_D が求められる。黒鉛化が進行すると G バンドが先鋭化し、R 値¹²⁾ と呼ばれる I_G と I_D の比 ($R = I_G/I_D$) が増加するとともに G バンドの半価幅 ($1/2 I_G$ におけるバンドの幅) は減少する。黒鉛化の程度はこれらの指標により評価される。

(1) 分析方法と黒鉛化度の評価指標

使用した装置は ThermoNicolet 製のレーザーラマン分光装置 *alpha* である。黒鉛化度の評価指標には R 値が用いられることも多いが、ここでは事前検討の結果、焼成温度との相関が高かった G バンドの半価幅を用いた。

(2) 標準試料の分析

実すり板の分析に先立ち、炭素基材の黒鉛化度と温度の関係を把握するため、炭素基材の焼成温度を変えた標準試料を複数作製し、それら試料に対しラマン分光分析を行った。焼成温度による基材硬さの変化を把握するため、各炭素基材のロックウェル硬さを測定した。

(3) 標準試料の分析結果と考察

炭素基材の焼成温度と G バンドの半価幅、硬さの関係を図 9 に示す。G バンドの半価幅 HG (cm^{-1}) は焼成温度 T ($^{\circ}\text{C}$) と強い負の相関があった。

$$HG = -0.024T + 113 \quad (1)$$

式 (1) より、実すり板に対し、ラマンスペクトルを測定することで、G バンドの半価幅から焼成温度にして何 $^{\circ}\text{C}$ 相当の熱履歴があったかを逆算することができる。以降、実すり板の熱履歴の評価には G バンド半価幅ではなく、式 (1) から算出した焼成温度相当の推定温度を用いる。

図 9 より製造時には 100HRH 程度であった炭素基材のロックウェル硬さは、焼成温度が 2000 $^{\circ}\text{C}$ を超えると 80HRH 程度に減少し、焼成温度 2800 $^{\circ}\text{C}$ では 40HRH 程度にまで減少することがわかった。本論文では、硬さが減少する 2000 $^{\circ}\text{C}$ を黒鉛化温度とし、上記推定温度が 2000 $^{\circ}\text{C}$ を超えた場合に黒鉛化が進行したと判定した。

(4) 実すり板の分析

局部摩耗したすり板の局部摩耗箇所と正常摩耗箇所

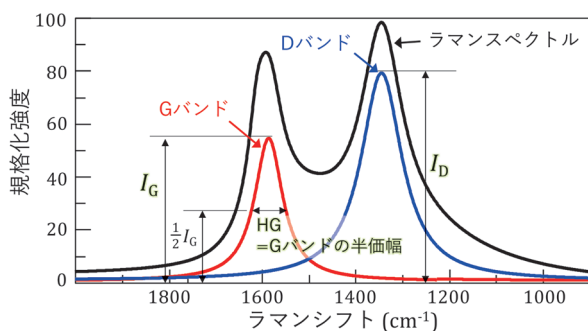


図 8 銅含浸型メタライズドカーボンすり板のラマンスペクトル例

ついて、図 10 に示す 3 点のラマンスペクトルを測定した。測定点数は、局部摩耗箇所は 2 サンプル計 6 点、正常摩耗箇所 4 サンプル計 12 点である。表面のラマンスペクトルを測定した後、すり板を切断し、表面から 0.2~0.3mm 深さ位置の断面に対し同様の測定を行った。

(5) すり板局部摩耗箇所の分析結果と考察

測定されたラマンスペクトルから熱履歴を推定した結果を図 11 に示す。正常摩耗箇所の摩擦面の推定到達温度は 12 点中 10 点が 2000 $^{\circ}\text{C}$ 以下 (1400~1750 $^{\circ}\text{C}$) であった。正常摩耗箇所のうち、推定到達温度が 2000 $^{\circ}\text{C}$ を超えていた 2 点はアーク放電が発生しやすいすり板の端部であった。一方、局部摩耗箇所の推定到達温度は 6 点中 4 点が 2000 $^{\circ}\text{C}$ 以上 (2300~3100 $^{\circ}\text{C}$) であり、すり板の中央部でも黒鉛化の進行が認められた。

摩擦面から 0.2~0.3mm 深さの断面に対する測定では、正常摩耗箇所の推定到達温度は 12 点中 11 点が 2000 $^{\circ}\text{C}$ 以下 (1200~1700 $^{\circ}\text{C}$) であるのに対し、局部摩

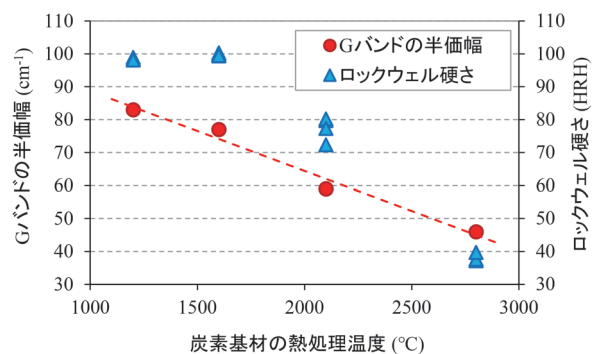


図 9 炭素基材の熱処理温度と G バンドの半価幅およびロックウェル硬さの関係



図 10 実すり板のラマンスペクトル測定箇所

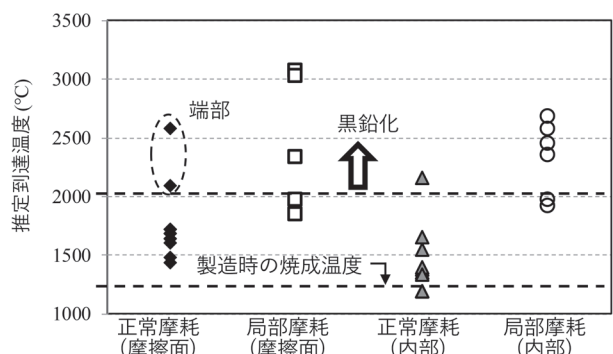


図 11 すり板摩擦面と内部の推定到達温度

耗箇所では6点中4点が2000℃以上(2300~2700℃)であった。このことから、局部摩擦箇所では摩擦面から0.2~0.3mm深さでも黒鉛化が進行していたことがわかった。

4. アーク放電実験

本章では、アーク放電による熱がすり板炭素基材の黒鉛化に及ぼす影響を明らかにするために行った実験について述べる。

4.1 実験方法

硬銅トロリ線を陽極、銅含浸型メタライズドカーボンすり板を陰極とし、それらを接触させた状態で通電したのち、すり板を鉛直下方に10mm/sで移動させることでアーク放電を発生させた。アーク発生後に電極間をサイリスタで短絡し消弧させることでアーク継続時間を制御した。実走行時のアーク継続時間は長くとも100msオーダーであることを考慮し、アーク継続時間は0.2ms~500msとした。実験後、アーク痕の表面と表面から0.2~0.3mm深さの断面のラマンスペクトルを測定した。

4.2 実験結果と考察

アーク痕の表面と表面から0.2~0.3mm深さの断面の推定到達温度を図12に示す。表面ではアーク継続時間が0.2msの場合にも推定到達温度は2500℃を超えており、このような短時間でも黒鉛化が進行することが明らかとなった。すり板内部ではアーク継続時間が0.2ms~10msの場合、表面下0.2~0.3mm位置の推定到達温度はいずれも1200℃(製造時の炭素基材焼成温度)以下で、炭素基材の構造変化は認められなかったが、アーク継続時間が50ms以上の場合には推定到達温度は2000℃を超えており黒鉛化の進行が認められた。

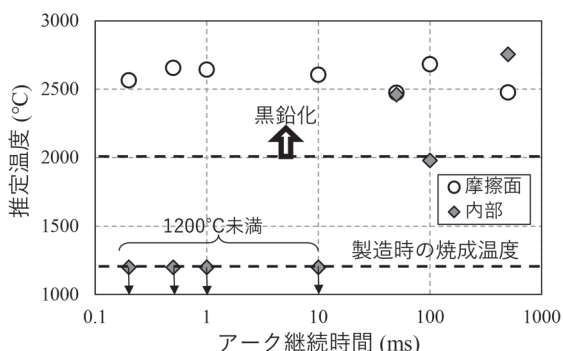


図12 アーク痕の推定到達温度

5. 通電摩擦実験

①すり板に含浸された銅の溶出が摩擦に及ぼす影響の把握, ②すり板炭素基材の黒鉛化促進因子の特定, ③炭素基材の黒鉛化がすり板の摩擦に及ぼす影響の把握の3点を目的に通電摩擦実験を行った。

5.1 実験方法

実験には鉄道総研の高速用集電材摩擦試験機を用いた。本試験機はトロリ線を模擬した純銅製リング(材質: JIS C1020P-1/2H, 摩擦面幅: 5mm)にすり板試験片(寸法: 長さ25mm×幅60mm×厚さ9mm)を押し付け、通電しながらしゅう動させる装置である。トロリ線のジグザグ偏位は押付装置を左右に揺動させることで模擬している。

実験中の測定項目は通電電流、すり板と模擬トロリ線間の電位差、押付力、摩擦力である。すり板とトロリ線間の電位差が10Vを超えた場合にアーク放電が発生したと判定し、アーク放電の影響を定量化するため、アーク放電時の通電電流とアーク発生時間の積の総和としてアーク電気量 Q (C) を算出した。

5.2 銅溶出が摩擦に及ぼす影響と黒鉛化促進因子

アーク放電による銅含浸型メタライズドカーボンすり板の摩擦増加の理由として、これまで銅溶出に伴う炭素基材の酸化消耗が挙げられていたが⁶⁾、3.3節に記したとおりアーク発生時には銅溶出と黒鉛化の双方が生じている。ここでは黒鉛化の影響を除外し、銅溶出がすり板の摩擦に及ぼす影響を調べるため、表面から銅を溶出させた試験片を用いて通電摩擦実験を行い、銅溶出がない通常の試験片の結果と比較した。試験片の表面近傍の断面組織を図13に示す。併せて、アーク放電以外にジュール熱によってすり板炭素基材の黒鉛化が生じるかを確認するため、通電電流300Aと500Aの銅溶出試験片について、実験後にすり板摩擦面上の9点のラマンスペクトルを測定した。

5.2.1 実験条件

実験条件を表2に示す。通電に伴うジュール熱によ

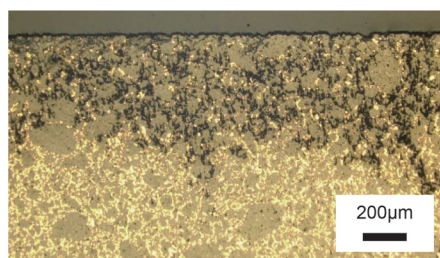


図13 銅溶出試験片の材料組織写真

てすり板炭素基材の黒鉛化が生じるかを確認するため、最大通電電流は実車両の最大集電電流（すり板1列あたり）に相当する500Aとした。なお、模擬トロリ線表面粗さの条件については5.3節で後述する。

5.2.2 実験結果と考察

図14に平均通電電流に対するすり板比摩耗量（単位押付力、単位しゅう動距離あたりの摩耗体積）のグラフを示す。表面からの銅溶出を模擬した試験片の比摩耗量が増大する傾向は認められなかった。実験中に発生したアーク放電の影響を考慮するため、横軸をしゅう動距離あたりのアーク電気量としたグラフを図15に示す。いずれのすり板もアーク電気量の増加とともに比摩耗量が増加する傾向にあり、銅溶出による比摩耗量増加は認められなかった。この結果と、実すり板の正常摩耗箇所でも銅の溶出は生じていることを併せて考えると、銅が溶出しただけではすり板の局部摩耗は発生しない可能性が

表2 実験条件（銅溶出が摩耗に及ぼす影響）

項目	条件
速度	100 km/h
電流	DC100, 300, 500 A
押付力	54 N
しゅう動距離	25 km
すり板	1200°C 焼成 通常品, 銅溶出品
模擬トロリ線表面粗さ	小*

*表面粗さ: 0.05-0.15 μ m (Ra), 0.1~1.0 μ m (Rz₁₅)

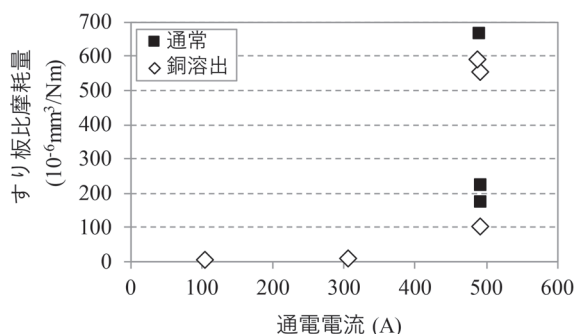


図14 実験結果（通電電流とすり板比摩耗量）

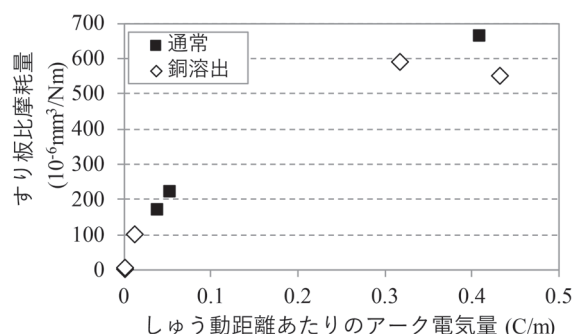


図15 実験結果（アーク電気量とすり板比摩耗）

考えられる。

ラマンスペクトルから算出したすり板試験片表面の熱履歴を図16に示す。アーク離線率（アーク放電が発生した時間割合）が0または0.1%であった2試番では、いずれの通電電流でも推定到達温度が黒鉛化温度である2000°Cを超える点はなく、炭素基材の黒鉛化は認められなかった。一方、アーク離線率が2.5%であった試番ではアークが発生しやすい試験片端部で推定到達温度が2700°Cを超えていた。実車でさらなる大電流が流れた場合にアーク放電の発生無しに黒鉛化が生じる可能性は否定できないが、アーク放電が黒鉛化を促進する主要な因子であることが確認できた。

5.3 押付力とトロリ線表面粗さが黒鉛化箇所の摩耗に及ぼす影響

5.3.1 実験条件

ここでは黒鉛化箇所の摩耗に及ぼす押付力とトロリ線表面粗さの影響について調べるため、3.3のラマン分光分析で標準試料とした焼成温度が異なるすり板材を供試した。実験条件を表3に示す。

押付力とトロリ線摩擦面の表面粗さが摩耗に及ぼす影響を把握するため、条件1：一般的なパンタグラフの押付力54Nでトロリ線摩擦面の表面粗さが小さい場合、条件2：押付力54Nでトロリ線摩擦面の表面粗さが大きい場合（実環境におけるアーク放電で荒損した箇所を模擬）、条件3：押付力98Nでトロリ線摩擦面の表面粗さが小さい場合の計3条件で実験を行った。なお、銅含

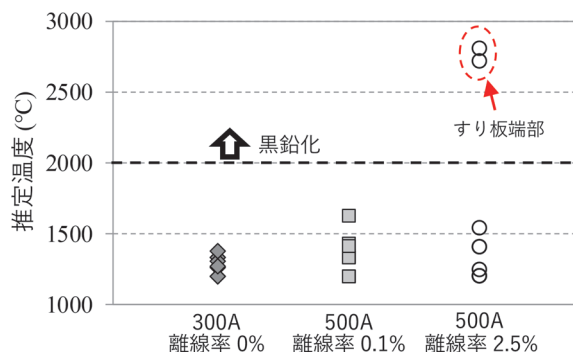


図16 すり板摩擦面の推定温度履歴

表3 実験条件（黒鉛化が摩耗に及ぼす影響）

項目	条件1	条件2	条件3
速度	100km/h		
電流	0~DC500A		
押付力	54N	54N	98N
しゅう動距離	25km		
すり板	1200, 1600, 2100(or 2200), 2800°C 焼成品		
模擬トロリ線 表面粗さ	小*1	大*2	小*1

*1 表面粗さ: 0.05-0.15 μ m (Ra), 0.1~1.0 μ m (Rz₁₅)

*2 表面粗さ: 1.5-2.5 μ m (Ra), 5~15 μ m (Rz₁₅)

浸型メタライズドカーボンすり板が使用されている線区の実トリ線線の摩擦面の表面粗さは、離線アーク等が発生していない一般区間でRa（算術平均粗さ）が約0.1～0.6 μm 、Rz_{JIS}（10点平均粗さ）が約2 μm 、離線時のアーク放電によって荒損した箇所ではRaが約2～18 μm 、Rz_{JIS}が約8～30 μm であった。

5.3.2 実験結果と考察

(1) 条件1（押付力54N，トリ線摩擦面表面粗さ小）

実験結果を図17に示す。この条件ではアーク放電が発生しなかったため、すり板の比摩耗量は通電電流に対してプロットした。いずれの通電電流においても、2100 $^{\circ}\text{C}$ 焼成材、2800 $^{\circ}\text{C}$ 焼成材の比摩耗量が1200 $^{\circ}\text{C}$ 焼成材、1600 $^{\circ}\text{C}$ 焼成材よりも大きくなる傾向は認められず、通常押付力でトリ線の摩擦面の表面粗さが小さければ、黒鉛化が進行したすり板であっても摩耗率が増加することはなかった。

(2) 条件2（押付力54N，トリ線摩擦面表面粗さ大）

実験結果を図18に示す。本条件ではアーク放電が発生したため、すり板の比摩耗量はアーク電流量に対してプロットした。実車のアーク電流量が 10^{-3}C/m のオーダーであることを考慮し、図18でアーク電流量が0～0.01C/mの領域で結果を比較すると、1200 $^{\circ}\text{C}$ 焼成材と1600 $^{\circ}\text{C}$ 焼成材の平均値（ $40 \times 10^{-6}\text{mm}^3/\text{Nm}$ ）と比べ、

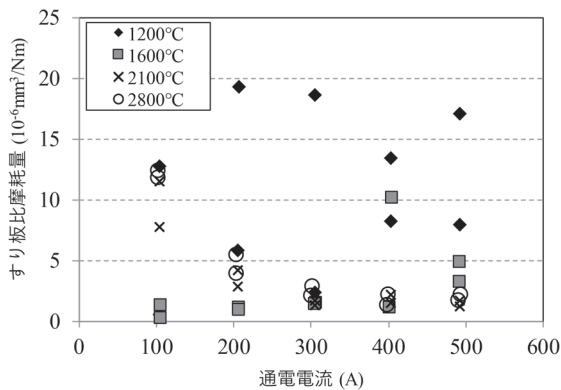


図17 実験結果（条件1：押付力54N，表面粗さ小）



図18 実験結果（条件2：押付力54N，表面粗さ大）

2100 $^{\circ}\text{C}$ 焼成材では平均で5倍程度、2800 $^{\circ}\text{C}$ 焼成材では9倍程度比摩耗量が大きかった。

(3) 条件3（押付力98N，トリ線摩擦面表面粗さ小）

実験結果を図19に示す。条件2と同様、アーク電流量が0～0.01C/mの領域で結果を比較すると1200 $^{\circ}\text{C}$ 焼成材と1600 $^{\circ}\text{C}$ 焼成材の平均値（ $54 \times 10^{-6}\text{mm}^3/\text{Nm}$ ）と比べ2200 $^{\circ}\text{C}$ 焼成材の比摩耗量は20倍程度大きかった。2800 $^{\circ}\text{C}$ 焼成材は100A通電条件で著しく摩耗し、実験を中断したためグラフにプロットしていないが、実験中断時の比摩耗量は $4232 \times 10^{-6}\text{mm}^3/\text{Nm}$ で1200 $^{\circ}\text{C}$ 焼成材と1600 $^{\circ}\text{C}$ 焼成材の平均値の約80倍であった。なお、実車両でパンタグラフとトリ線の接触力を測定した結果、98N以上の接触力は20%程度の頻度で生じていた例が報告されており¹³⁾、本条件で想定した高接触面圧状況は実環境でも生じうると考える。

5.3.3 まとめ

以上の結果より、銅含浸型メタライズドカーボンすり板の炭素基材の黒鉛化が進行し、かつ摩擦面が荒損したトリ線と接する場合、または押付力が通常よりも高い場合に、すり板の摩耗率が大幅に増加する可能性が考えられる。摩耗率の大幅な増加原因として切削作用によるアプレシブ摩耗が考えられる。アプレシブ摩耗はすべり合う固体表面間において、一方の面が硬くて粗い場合に柔らかい方の材料が切削的に摩耗する現象である¹⁴⁾。図20に示すように模擬トリ線とすり板炭素基材の硬さを比較すると、黒鉛化した場合には模擬トリ線と基材の硬さの大小関係が逆転しており、これによりアプレシブ摩耗が生じていた可能性が考えられる。なお、他の炭素材でも黒鉛化度が高くなるにつれ被削性が増加することは報告されている¹⁵⁾。

6. 局部摩耗の発生機構と対策

6.1 発生機構

以上の結果から、銅含浸型メタライズドカーボンすり板の局部摩耗は次のような機構で発生する可能性が考えられる。

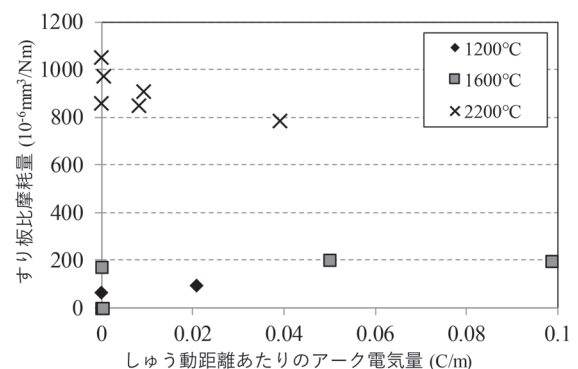


図19 実験結果（条件3：押付力98N，表面粗さ小）

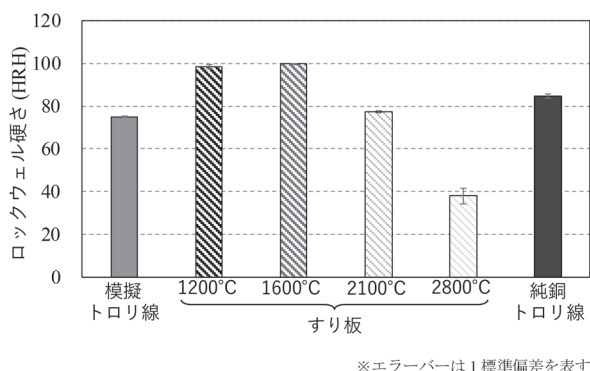


図 20 模擬トロリ線とすり板の硬さ比較

- (1) 車両走行時の離線に伴うアーク放電によってすり板炭素基材の黒鉛化が進行し、局所的に硬さが低下した部分が生じる。
- (2) 黒鉛化箇所がトロリ線摩擦面の表面粗さが大きな箇所に接触する場合や、押付力が高い場合、切削作用により摩耗率が大幅に増加し、局部摩耗が発生する。

6.2 対策

銅含浸型メタライズドカーボンすり板の局部摩耗はアーク放電の発生に起因すると推定されることから、その抑制には離線アークを低減することが基本的な対策といえる。アーク放電は離線時に限って発生するわけではなく、トロリ線摩擦面に生じた酸化被膜によってトロリ線とすり板の電氣的接触が阻害されアーク放電が発生する事象¹⁶⁾も報告されており、この場合、酸化被膜を除去することによりすり板局部摩耗の発生を抑制できた。また、6.1節で述べたように局部摩耗はすり板炭素基材が黒鉛化した箇所で発生すると考えられるが、黒鉛化した箇所は光沢を有し、目視でも確認できることから、そうした黒光部が生じたすり板の早期交換が局部摩耗の発生頻度低減に効果的であることがこれまでに保守の現場で確かめられている。

7. おわりに

銅含浸型メタライズドカーボンすり板の局部摩耗発生機構を明らかにするため、局部摩耗の発生状況調査、局部摩耗すり板の観察、通電摩擦実験を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) すり板の局部摩耗は舟体中央部もしくはトロリ線偏位の端部で発生しやすい。
- (2) 局部摩耗箇所ではすり板の炭素基材が黒鉛化している。
- (3) すり板炭素基材の黒鉛化はごく短い時間のアーク放電でも進行し、アーク放電の継続時間が長くなるにつれ黒鉛化箇所はすり板内部に拡大する。
- (4) 黒鉛化したすり板は硬度がトロリ線より低く、トロ

リ線摩擦面の表面粗さが大きい場合や、押付力が高い場合には黒鉛化していないすり板と比べ摩耗率が5倍～20倍程度に増加する。

なお本稿は「電気学会論文誌D」第141号に掲載された論文¹⁷⁾の内容を一部修正したものである。

文献

- 1) 佐藤文夫, 尾野崎達夫, 天海清: 日光線におけるビデオ撮影によるパンタグラフのスリ板浴損・段付摩耗防止対策について, 車両と機械, Vol.2, No.4, pp.14-18, 1988
- 2) 白田隆之, 池田充: トロリ線の振動測定によるすり板段付摩耗の検出, 鉄道総研報告, Vol.25, No.4, pp.35-40, 2011
- 3) 横井一雄, 横井一雄, 岩瀬勝, 日高冬比古, 寺岡利雄, 熊谷正博, 福原邦夫, 前田正巳: 寒冷地用すり板, 鉄道技術研究所速報, 1973
- 4) LIU Guo-liang: Analysis of pantograph carbon contact strip abnormal wear on Guangzhou Metro Line 2 train, Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, No.2, 2008.
- 5) 大熊茂, 森本大観, 小林英治, 橋本一郎, 真野辰哉, 土屋広志, 久保俊一: 主すり板, 補助すり板境界部分での段付摩耗対策, J-Rail2004 (第11回鉄道技術連合シンポジウム), pp.113-114, 2004
- 6) S. Kubo, K. Kato: "Effect of arc discharge on wear rate of Cu-impregnated carbon strip in unlubricated sliding against Cu trolley under electric current", Wear, Vol.216, Issue 2, pp.172-178, 1998.
- 7) 林屋均, 萬代毅, 中島等, 出野市郎: 直流電気鉄道における定常アークがパンタグラフ材料に与える影響, 電気学会論文誌B, Vol.127, No.6, pp.718-724, 2007
- 8) Y. Kubota, T. Hayasaka, T. Miyauchi: "Effect of Arc Discharge on the Wear Profile of Cu Impregnated Carbon Based Pantograph Contact Strip", ICEC 2014 (The 27th International Conference on Electrical Contacts), 2014.
- 9) 久保田喜雄: 離線アークエネルギー分布とパンタグラフすり板摩耗形状の関係, J-Rail2016 (第23回鉄道技術連合シンポジウム), 2016
- 10) 炭素材料学会編: 新・炭素材料入門, リアライズ社, p.199, 1996
- 11) 白田隆之, 池田充: パンタグラフ解析モデルの改良と追従性能向上手法の提案, 鉄道総研報告, Vol.19, No.7, pp.35-40, 2005
- 12) F. Tuinstra, J.L. Koenig: "Raman spectrum of graphite", J. Chem. Phys. 53, 1126, 1970.
- 13) 白田隆之, 池田充: パンタグラフ接触力データの電車線保守への活用, 鉄道総研報告, Vol.31, No.2, p.27, 2017
- 14) 日本トライボロジー学会編: トライボロジー辞典, 養賢堂, 1995

- 15) 柳瀬徹：炭素材料の黒鉛化度と被削性，炭素，Vol.1964，No.39，pp.15-25，1964
- 16) 出羽真生，湯藤淳一，國重亮太，酒井陽兵，田中弘毅，山口友則，早坂高雅，久保田喜雄，白木理倫：トロリ線異常損耗の発生原因の推定と保全手法の検討，J-Rail2015（第

- 22回鉄道技術連合シンポジウム）講演論文集，2015
- 17) 久保田喜雄，早坂高雅，古賀進一郎，野崎秀彦：銅含浸型メタライズドカーボンすり板の局部摩耗発生機構，電気学会論文誌D，Vol.141，No.5，pp.395-404，2021