

銅含浸型メタライズドカーボンすり板の通電に伴う温度上昇と摩耗

久保田 喜雄* 森本 文子 (鉄道総合技術研究所)

春日 英彦 (東日本旅客鉄道株式会社)

Temperature rise and wear behavior of Cu impregnated metalized carbon contact strip caused by electric current

Yoshitaka Kubota*, Fumiko Morimoto (Railway Technical Research Institute)

Hidehiko Kasuga (East Japan Railway Company)

Through some wear experiments, it was confirmed that the wear of the Cu-impregnated carbon contact strip (PC78A, Toyotanso Co., Ltd.) is strongly affected by the arc-discharge. In the previous studies, the wear experiments were conducted by using small test piece of the contact strip and applying relatively small electric current. In this study, we investigated the relationship between the wear of the strip and the amount of arc-discharge using an actual pantograph with a current of maximum about 1000A. We also measured the wear rate of the strip, collecting current and occurrence rate of arc-discharge on a commercial railway line. In this paper, we describe the experimental result and compare the wear rate in the experiment with the wear rate on the commercial line.

キーワード：パンタグラフすり板，摩耗，電流，温度上昇，アーク放電，離線
(Pantograph contact strip, electric current, temperature rise, arc discharge, contact loss)

1. 序論

多くの電気鉄道において、車両はパンタグラフを通じてトロリ線から電力を受け取っている。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)。すり板の摩耗低減はメンテナンスコスト低減のための長きにわたる課題であるといえる。ここでは JR の在来線で広く使用されている銅含浸型のメタライズドカーボンすり板の摩耗について取り上げる。

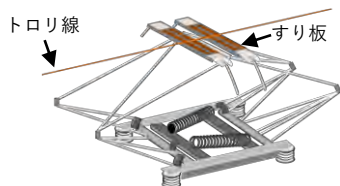


図 1 すり板とトロリ線

銅含浸型メタライズドカーボンすり板の摩耗に影響を及ぼす因子として、押上力、通電電流、離線時のアーク放電、トロリ線しゅう動面の粗さなどが挙げられる。これまでの研究により、アーク放電は摩耗に特に大きな影響を及ぼすことがわかっている⁽¹⁾⁽³⁾。アークが発生するとすり板摩擦面の温度が上昇し、含浸された銅の溶出⁽¹⁾や炭素基材の黒鉛化に伴う軟化が生じる⁽³⁾ことが摩耗増加の原因と考えられており、摩擦面近傍の温度は摩耗現象に深く関わっていると考えられる。摩擦面の温度を直接測定することはでき

ないため、筆者らはこれまで新幹線用の鉄系焼結合金を対象に内部温度の実測結果と数値解析を組み合わせることで摩擦面温度の推定を試みるなどしてきた⁽⁴⁾。一方、カーボンすり板では温度測定がなされた例は少ない。最近、鉄道総研は実パンタグラフが使用でき、走行時の集電状況をよりよく再現可能な試験装置を新設したことから、この装置を使い、最大 1000A の直流電流を負荷する通電しゅう動実験を行い、すり板の温度上昇を求めることとした。以下、実験の結果得られたすり板の温度、アーク電気量と摩耗率の関係、および大電流を集電する実車で測定したすり板摩耗率とアーク電気量の関係について報告する。

2. すり板材

供試すり板は銅含浸型メタライズドカーボンすり板 PC78A (東洋炭素(株)製) である。すり板の外観と材料組織を図 2 に、化学組成と物理的・機械的特性を表 1 に示す。

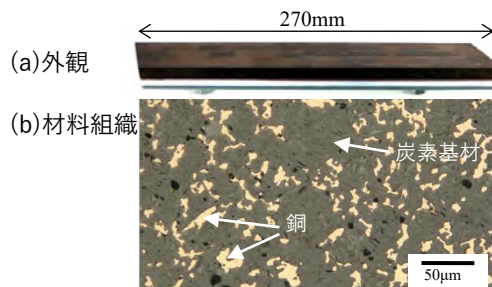


図 2 銅含浸型メタライズドカーボンすり板の外観と組織

表 1 PC78A の化学組成と物理的・機械的特性 (公称値)

化学組成 (mass %)	
C	52
Cu	48
物理的・機械的特性	
密度 (10^3 kg/m^3)	2.9
ショア硬さ (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

3. 通電摩耗実験

〈3・1〉 実験装置 実験には図 3 に示す高速パンタグラフ試験装置⁽⁵⁾を用いた。この装置は円盤に取り付けた実トロリ線を回転させ、実パンタグラフと接触・しゅう動させながら通電するもので、電流は最大 1000A を負荷できる。パンタグラフは PS33B (株)工進精工所製、舟体は東洋電機製造(株)製を使用)、トロリ線は GT-Sn110mm² (しゅう動面幅約 10mm) を用いた。パンタグラフはなびき方向に設置し、高さは 1230mm (標準作用高さ) とした。

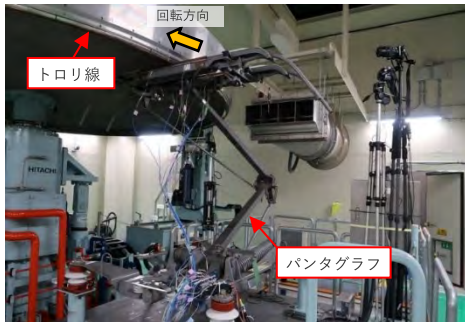


図 3 高速パンタグラフ試験装置の外観

〈3・2〉 実験条件 表 2 に実験条件を示す。速度は 100km/h、しゅう動距離は 200km を基本の条件とした。条件 9 のみ、すり板の摩耗が多いことが予測されたため、熱電対保護のため距離を 100km とした。押上力は 60N を基本とし、押上力の影響を調べるため 90N、30N に増減した。電流は直流 0A、500A、1000A の 3 条件とした。アーク放電の増加によるすり板摩耗率の変化を調べるため、離線誘発のためのトロリ線上下加振を行った。事前の検討から加振周波数は 5Hz、振幅は 1.5mm とした。トロリ線の偏位を模擬した左右移動は範囲を中心から $\pm 250\text{mm}$ 、速度を 0.3m/s とした。全ての実験は走行風模擬のため風速 100km/h の送風条件とし、室温 20°C、相対湿度 50% の温湿度環境制御下で行った。実験前にすり板とトロリ線の片当たりが解消されるまで約 7500km のなじみ運転を行った。

実験中の主な測定項目は、①すり板の温度、②トロリ線とすり板間の接触電圧、③通電電流である。図 4 に示す位置に K 型熱電対を挿入し、摩擦面から 5mm 下のすり板内部温度を測定した。実験前後に舟体の質量を測定し、前後の質

量差をすり板の摩耗量とした。さらに、PC78A の公称密度 (2.9g/cm^3) で除して摩耗体積とし、摩耗体積をしゅう動距離で除して体積摩耗率 (単位: $\text{cm}^3/10^4\text{km}$) を算出した。接触電圧が閾値 10V 以上の場合を離線とし、離線時の電流と離線時間の積の総和を離線アーク電気量とした。

表 2 実験条件

条件	速度 (km/h)	距離 (km)	押上力 (N)	電流 (A)	風速 (km/h)	トロリ線上下加振	
1	100	200	60	0	100	無	
2				500			
3				1000			
4			90	1000		100	無
5							あり
6							無
7			30	100		100	あり
8							無
9							あり

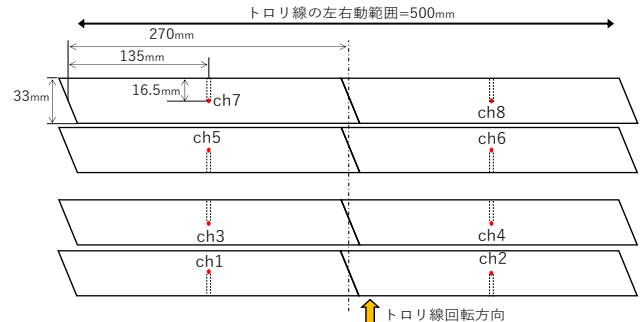


図 4 すり板温度の測定箇所 (図中赤丸位置)

〈3・3〉 実験結果と考察 表 3 に実験結果を示す。通電電流は最大 1000A に設定したが、実測値は 896A~927A であった。図 5 に温度測定結果の一例 (条件 3) を示す。温度上昇はいずれの条件でも通電開始後 600 秒程度にはおおよそ定常状態となった。

図 6 に通電電流とすり板内部温度の最高値を示す。設定値 1000A 条件でのすり板内部温度の最高値は離線が頻発した 30N・トロリ線加振ありの場合で最も高く約 200°C で、通常の押上力 60N では加振無しの場合 (条件 3、条件 5) に約 64°C、56°C、加振有りの場合 (条件 4) に約 71°C であった。なお、温度測定結果を基に数値解析によりすり板表面の温度を推定した結果は本シンポジウムの「通電摩擦実験を模擬したパンタグラフすり板の熱伝導解析」に記したのでそちらを参照されたい。

すり板内部温度の最高値とすり板摩耗率の関係を図 7 に、しゅう動距離あたりの離線アーク電気量 (以下、アーク電気量密度とする) とすり板体積摩耗率の関係を図 8 に示す。内部温度の最高値、アーク電気量密度ともすり板摩耗率と強い相関があった。ただし、内部温度とアーク電気量密度の間にも強い相関があるため、どちらかは偽相関である可能性が考えられる。

表 3 実験結果

条件	電流 (A)	摩耗率 (cm ³ /km)	離線率 (%)	アーク電気量 (10 ³ C)	最高温度 (°C)
1	0	0.0	0.0	0.0	29.9
2	459	27.1	0.4	14.4	40.6
3	906	34.8	0.5	31.7	64.3
4	896	642.4	7.7	516.1	70.6
5	901	33.2	0.3	22.3	55.6
6	927	0.0	0.1	3.7	60
7	927	101.7	1.0	65.8	78.7
8	918	645.1	8.9	586.3	104.2
9	900	1965.1	36.1	1179.3	199.9

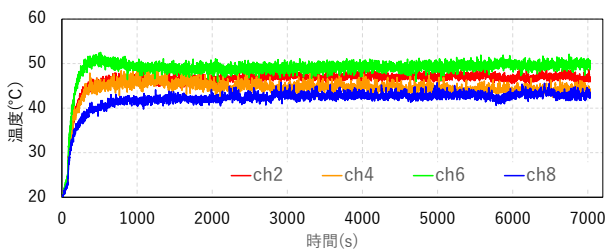


図 5 温度測定結果の一例 (条件 3)

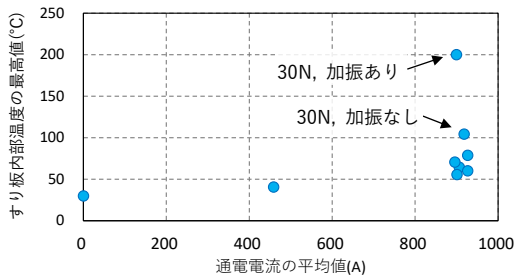


図 6 通電電流の平均値とすり板の最高温度の関係

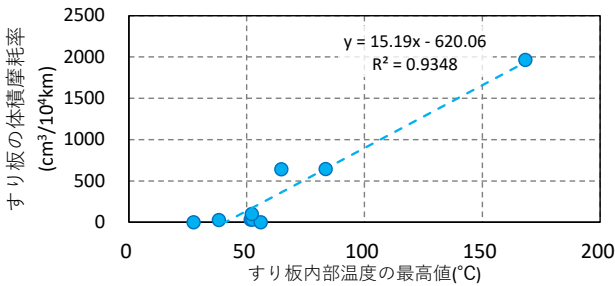


図 7 最高温度とすり板体積摩耗率の関係

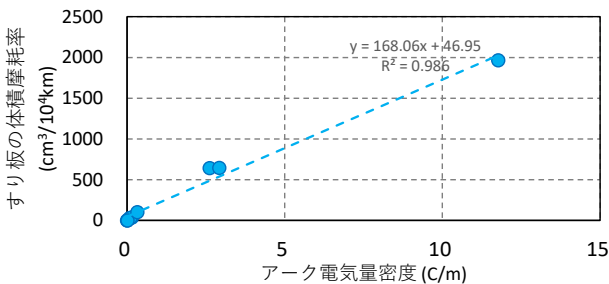


図 8 アーク電気量密度とすり板体積摩耗率の関係

4. 実車のすり板摩耗率と離線アーク電気量

実車でも実験と同様の測定を行うことが望ましいが、高圧部への測定器設置等の問題があるため、温度測定は行わず、アーク電気量とすり板摩耗率の関係を調べるに留めた。以下、実車で測定とその結果について述べる。

〈4・1〉 測定条件 測定対象は比較的大電流を集電する E353 系電車 (量産先行車・基本編成) とした。図 9 に編成図を示す。パンタグラフ (PS39、東洋電機製造(株)製、押上力 59N) は 3 基あり、いずれも母線で電氣的に接続されている。測定は 10 号車のパンタグラフで離線アーク光と集電電流を測定した。パンタグラフは離線アーク光の測定は図 10 に示すようにパンタグラフ下部の両側から光ファイバーによりアーク光に含まれる紫外線を検出することで行った。走行区間は松本-高尾間 (約 178km) とし、新品の PC78A すり板を搭載して 1 往復走行した。測定対象車両とは異なるが、量産車・基本編成の 10 号車から 48300km 走行後のすり板の重量を測定し、新品すり板の平均重量との差を摩耗重量とし、〈3.2〉と同様に摩耗重量を公称密度と走行距離で除して体積摩耗率を算出した。なお、使用前重量が不明なため新品すり板の平均重量を使用重量としているが、新品すり板の重量にばらつきがあることから、算出した体積摩耗率には±15%程度の不確かさがあると考えられる。



図 9 E353 系電車量産先行車の基本編成図



図 10 離線アーク光の測定

〈4・2〉 測定結果と考察

(1) 離線アークの発生状況 最大集電電流は上り走行時約 1900A、下り走行時約 2000A であった。離線率・離線ア

ーク電流量・アーク電流量密度は上り走行時 $0.011\% \cdot 824C \cdot 4.6 \times 10^3 C/m$ 、下り走行時 $0.003\% \cdot 105C \cdot 5.9 \times 10^4 C/m$ であった。実験と実車測定ではアークの検出方法が異なる(実車ではアーク光をパンタグラフ下部から検出しており、小さなアーク光は舟体に遮られ検出できない)ため、結果を単純に比較することはできないが、実験におけるアーク電流量密度は最も低かった条件 2 で $7.6 \times 10^2 C/m$ と実走行の 6 倍であり、測定法の違いを考慮しても実走行時のアーク電流量密度は実験より低い可能性が考えられる。

(2) すり板の摩耗率 すり板の体積摩耗率は $49 \pm 7 \text{ cm}^3 / 10^4 \text{ km}$ と推定された。この結果をアーク発生率(上り・下り走行の平均値 $2.3 \times 10^3 C/m$) に対してプロットしたグラフを図 11 に示す。グラフには図 8 の実験結果も併せてプロットした。(1)で述べたように実車のアーク電流量密度は実際より低く見積もられている可能性があるが、それを考慮したとしても実車は実験と比較してアーク電流量密度が低いにもかかわらず摩耗率が高い。すり板の摩耗は「アークに起因する電氣的摩耗」と「アークに起因しない機械的摩耗」の和であるとする考え方があがるが、(1)で述べたように実車では実験と比べアーク電流量密度は 1/6 以下程度であると推定され、すり板の摩耗全体においてアークに起因しない機械的摩耗の占める割合が高い可能性が考えられる。

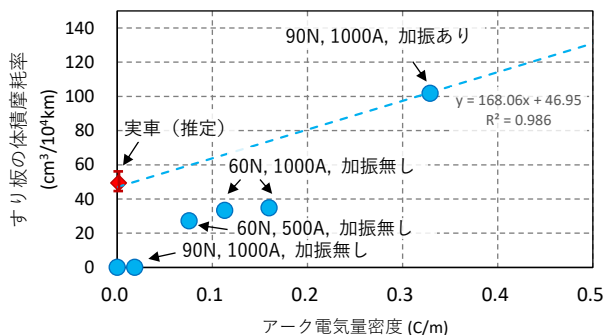


図 11 アーク電流量密度とすり板体積摩耗率の関係

(3) すり板の断面組織 実験後(条件 9 実施後)のすり板と実車の摩耗率を調査したすり板の端部から 2mm 位置をまくらぎ方向に切断し、断面組織を観察した。組織の一例を図 12 に示す。実験では摩擦面から約 $600\mu\text{m} \sim 1000\mu\text{m}$ の

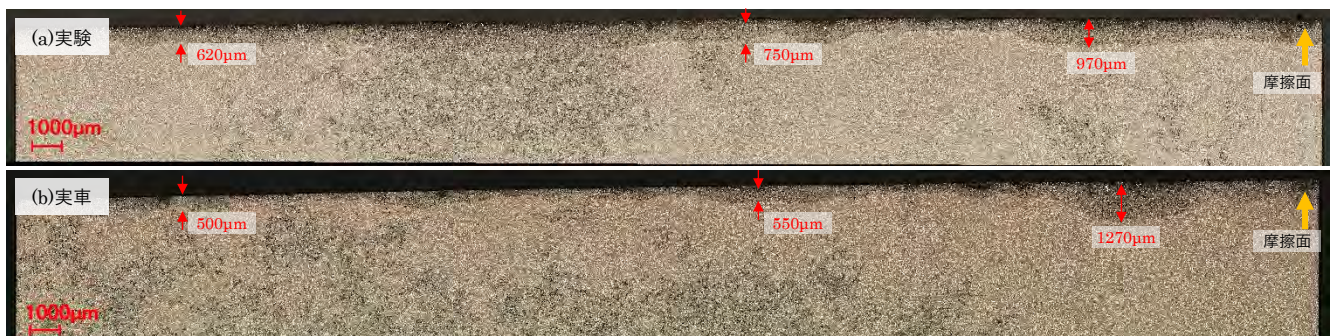


図 12 実験後および実車走行後のすり板の断面組織

深さで、実車では約 $100\mu\text{m} \sim 1300\mu\text{m}$ で銅の溶出(写真の色が濃い範囲)が認められた。このことから、実験・実車とも摩擦面から約 1mm 下範囲までは銅の融点 (1085°C) を超える温度上昇が生じていたと推定される。実験の条件 9 において表面下 5mm の最高温度は 199°C であり、従来から指摘⁽⁷⁾されるように摩擦面から内部に向かっての温度勾配は大きく、内部温度の測定のみから摩擦面温度を推定することは困難であると考えられる。

5. 結論

実パンタグラフを用いて最大 927A を負荷する通電しゅう動実験を行い、すり板の温度上昇、摩耗率を測定し、実車との比較を行った。その結果、次のことがわかった。

- (1) 押上力 60N、896A~927A 通電条件において、摩擦面から 5mm 下のすり板内部の温度上昇は最大でも 51°C であった。
- (2) すり板の摩耗率とすり板の最高温度およびアーク電流量密度の間に強い相関関係が認められた。
- (3) 実車でのアーク電流量密度は今回の実験の 1/6 以下程度と推定され、アークに起因しない機械的摩耗の占める割合が高い可能性が考えられる。

文 献

- (1) 久保俊一:「銅または銅鉛錫合金を溶浸した炭素製パンタグラフすり板のアーク放電下の摩耗機構の研究 第 3 章 Cu を溶浸した炭素すり板の摩耗特性に及ぼすアーク放電の影響」, 鉄道総研報告, Vol.35 (2000)
- (2) 久保田喜雄, 宮内瞳, 古賀進一郎, 長谷川浩司:「C/C 複合材製パンタグラフすり板の摩耗特性」, 電気学会論文誌 D, Vol.137, No.12 pp.866-875 (2017)
- (3) 久保田喜雄, 早坂高雅, 古賀進一郎, 野崎秀彦:「銅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)
- (4) 久保田喜雄, 森本文子:「通電しゅう動時のパンタグラフすり板内部温度測定および解析結果」, 第 26 回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2019)予稿集 (2019)
- (5) 小山達弥:「高速パンタグラフ試験装置の開発」, 鉄道総研報告, Vol.35, No.9 (2021)
- (6) 早坂高雅, 清水政利:「光学式離線測定における紫外光検出方法の検討とその適用結果」, 平成 20 年電気学会全国大会, No.5-097, pp.156-157 (2008)
- (7) 山本雄二:「摩擦面の温度上昇」, 潤滑, Vol.27, No.11, 1982