

C/C 複合材製パンタグラフすり板の摩耗特性評価

久保田 喜雄* 宮内 瞳宙* 土屋 広志** 宮平 裕生*
古賀 進一郎*** 日置 潤一*** 長谷川 浩司#

Evaluation of Wear Characteristics of C/C Composite Pantograph Contact Strips

Yoshitaka KUBOTA Toru MIYAUCHI Hiroshi TSUCHIYA Yuki MIYAHIRA
Shinichiro KOGA Junichi HIOKI Koji HASEGAWA

The wear characteristics of copper alloy impregnated C/C composite contact strips were investigated to clarify the dominating wear factors of C/C composite contact strip. In this study, we conducted a series of wear experiments, field tests, and measurement of physical properties of the C/C composite contact strips. The results of the wear experiments indicate that the wear of C/C composite contact strips was proportional to the arc discharge energy. The C/C composite contact strips with high strength carbon fiber were more likely to wear under high arc discharge energy conditions. From the results of the wear experiments, it was found that the wear of C/C composite contact strip was proportional to the electrical current density under lower arc-discharge energy condition. It was also found that the wear of C/C composite contact strip increased significantly when impregnated copper alloy was melt and ejected from the inside of the contact strip. We clarified the relationship between the mechanical strength of C/C composite contact strips and the abrasive wear property of the strips.

キーワード：C/C 複合材，パンタグラフすり板，摩耗，アーク放電，酸化，熱分解，硬さ

1. はじめに

炭素を母材として銅または銅合金を加えたカーボン系すり板は、焼結合金製すり板と比べてトロリ線の摩耗を減らすことができることから、多くの鉄道事業者において使用されている。従来のカーボン系すり板は破壊じん性が低く、割れやすいため直接パンタグラフ舟体にボルトで締結することはできなかった。そこで、この破壊じん性の低さをカーボンファイバーによって補い、舟体に直接ボルトで締結できる C/C (Carbon fiber reinforced Carbon) 複合材製のすり板 (以降、C/C すり板) (図 1) が開発され¹⁾、実用化されている。C/C すり板は、すり板に必要とされる諸特性に優れているが、高価な炭素繊維を原料としているため、比較的高価格であることが従来のカーボン系すり板と比べて不利な点である。すでに C/C すり板を導入している鉄道事業者からも、すり板交換に伴うメンテナンスコストのさらなる低減が望まれており、こうした要望に応えるためにも C/C すり板の摩耗特性の改善を行っていく必要がある。摩耗特性を改善す

るにはさまざまな条件下での C/C すり板の摩擦・摩耗特性を把握しておくことが重要である。しかし、通電条件下における C/C 複合材の摩耗特性について調べた例^{2) 3)}は少なく、どのような因子が C/C すり板の摩耗に影響を及ぼすかも明らかになっていない。そのため、C/C すり板の摩耗低減指針も確立していないのが現状である。そこで本研究では定置摩耗試験、現車試験、物性測定を通して C/C すり板の摩耗特性評価を行うとともに、C/C すり板の摩耗低減策について考察した。

2. 供試材

C/C すり板は C/C 基材に銅合金を含浸して作られる (図 2)。本研究では C/C 基材の強度と含浸金属組成が摩耗特性に及ぼす影響を調べるため、基材と含浸金属が異なる 3 種類の C/C すり板材を用いて試験を行った。表 1 に本研究で用いた C/C すり板材の諸元を示す。AF4、AF5 は高強度の炭素繊維から成る C/C 基材を用いており、AN3M よりも曲げ強度が高い。いずれのすり板も導電性と硬さ向上のために、炭素と濡れ性の良い銅-チタン (Cu-Ti) 合金を含浸している。AN3M と AF5 ではさらなる硬さの向上を目的として Cu-Ti 合金にアルミニウム (Al) を添加している。

* 材料技術研究部 摩擦材料研究室
** 前 材料技術研究部 摩擦材料研究部
*** 西日本旅客鉄道株式会社
株式会社ファインシンター

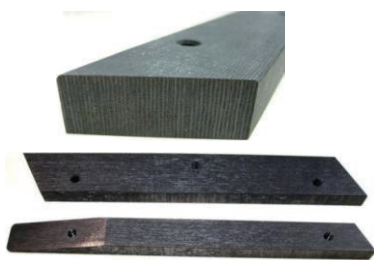


図1 C/C 複合材製すり板

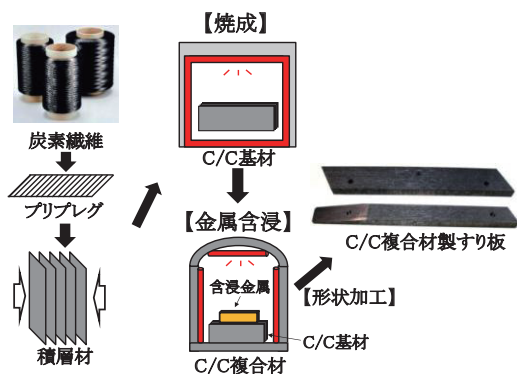


図2 C/C 複合材製すり板の製造方法

表1 C/C 複合材製すり板の諸元

C/C 基材			
基材名	ANC	AFC	
炭素繊維体積率 (%)	40		
繊維種類	PAN 系		
公称引張強度 (MPa)	3530	4900	
すり板材			
材質名	AN3M	AF4	AF5
密度 (g/cm ³)	2.5	2.9	2.9
電気抵抗率 (μΩ・m)	2.5	0.9	1.8
シャルピ [®] -衝撃値 (kJ/m ²)	6.2	15.4	15.7
曲げ強度 (MPa)	195	221	232
含浸合金	Cu-Ti-Al	Cu-Ti	Cu-Ti-Al

3. 試験方法

3.1 通電摩耗試験

通電摩耗試験には、鉄道総研所有の高速用集電材摩耗試験機を用いた。これは直径 2m の回転円盤側面に取り付けた幅 5.25mm の純銅製リング（模擬トロリ線）にすり板試験片（長さ 95mm × 幅 25mm × 厚さ 10mm）を押しつけ、しゅう動・通電する試験装置である。図 3 に高速用集電材摩耗試験機の模式図を示す。

3.1.1 測定項目とアークエネルギー量の算出

試験中の主な測定項目は、すり板と模擬トロリ線間の電位差、通電電流、摩擦力、押付力である。試験後に

電位差と通電電流の測定結果から次式で定義されるアークエネルギー量を算出した。

$$E_e = \sum_i^N (I_i \times V_i) \Delta t_i \quad (1)$$

ここで I_i はアーク放電時の通電電流、 V_i はアーク放電時のすり板と模擬トロリ線間の電位差、 Δt_i はアーク放電時間であり、すり板と模擬トロリ線間の電位差が 10 から 90V である時にアーク放電が生じていると判定した。

3.1.2 摩耗試験条件

通電摩耗試験は表 2 に示す 3 条件で行った。条件 1 では、アーク放電がすり板の摩耗に及ぼす影響を調べることを目的とし、アーク放電が生じやすい高速（55.6m/s = 200km/h）で試験を行った。条件 2 ではアーク放電がほとんど生じない場合の長時間通電によるすり板の摩耗特性変化を調べるため、しゅう動速度を 27.8m/s、電流を 0 または 500A、1 回の試験時間を 60min とし、摩耗限度まで繰り返しの試験を行った。条件 3 では電流密度がすり板摩耗に及ぼす影響を把握するため、すり板の幅を 25mm から 12.5mm に変えた試験片を用いて試験を行った。

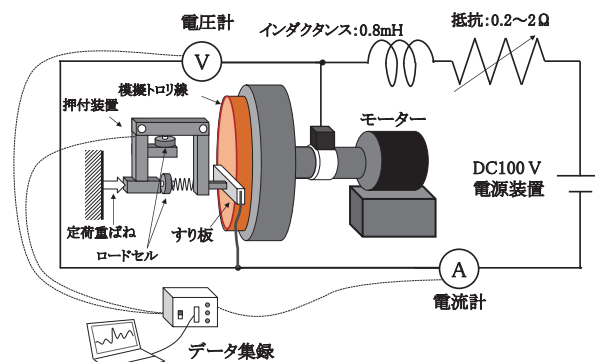


図3 高速用集電材摩耗試験機の模式図

表2 通電摩耗試験条件

項目	条件 1	条件 2	条件 3
目的	アーク放電	長距離しゅう動	電流密度
速度 (m/s)	55.6	27.8	27.8
電流 * (A)	100 ~ 500	0, 500	100 ~ 500
試験距離 (km)	50	800, 1600 (摩耗限度まで)	25
押付力 (N)	59	59	100
すり板材	AN3M, AF4, AF5	AF5	AF5

* いずれも直流で極性は模擬トロリ線側が正

3.2 フィールド試験

実車で使用した場合の C/C すり板の摩耗特性を調べるため、直流近郊型電車（4両編成、2M2T、下枠交差型パンタグラフ、すり板 2 列）に C/C すり板 AF5 を搭載し、約 3 ヶ月間の摩耗率推移を測定した。使用条件を

明確にするため、同型編成、同線区において集電電流と紫外光式離線測定装置による離線測定を行った。なお、現車試験と定置試験の比較を行うにあたって、実車ではアーク電圧の測定が困難なため、次式で定義されるアーク電気量をアークエネルギー量に代わる指標とした。

$$Q = \sum_{i=1}^N (I_i \times \Delta t_i) \quad (2)$$

3.3 アブレシブ摩耗試験

C/C すり板は金属すり板よりも硬さが低く、アークなどによって荒れたトロリ線表面と接することで、すり板がトロリ線によって削り取られる摩耗（アブレシブ摩耗）が生じることがある。そこで、本研究ではC/Cすり板の機械的強度が耐アブレシブ摩耗性に及ぼす影響を調べた。試験方法と試験条件を以下に記す。

高速用集電材摩耗試験機の模擬トロリ線はすり板とのしゅう動によって平滑化するためアブレシブ摩耗の評価試験には適さない。そのため、本研究では帯状研磨布（三共理化学製，DAX-K，粒度：40）を用いたアブレシブ摩耗試験機（図4）を用いて試験を行った。すり板試験片（長さ20mm×幅32mm×厚さ45mm）を定荷重で研磨布に押付け、一定時間しゅう動させた後、試験前後の質量差から摩耗体積を算出した。押付力は6～24N、試験速度は5m/s、しゅう動距離は1500mとした。



図4 アブレシブ摩耗試験機

3.4 物性測定

3.4.1 熱物性の測定

レーザフラッシュ法（アルバック理工製，TC7000）により、室温（298K）におけるすり板厚さ方向の比熱と熱拡散率を測定し、比熱と熱拡散率、かさ密度の積から熱伝導率を算出した。

3.4.2 C/C 基材の酸化特性

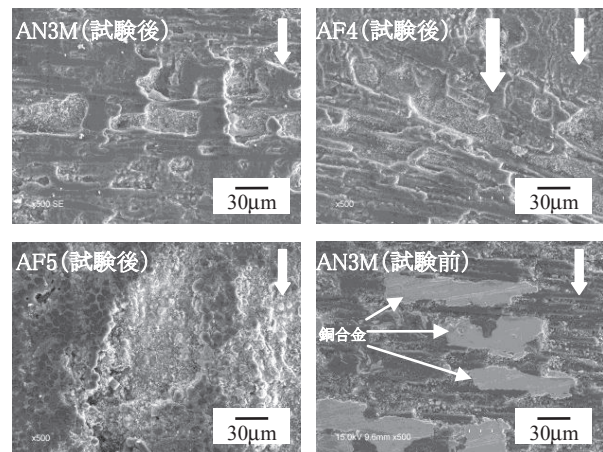
C/C 基材 2 種類（ANC および AFC）の酸化特性を、熱重量・示差熱同時測定器（TG-DTA）（リガク製，TG-8120）により測定した。測定温度範囲は298～1273K、雰囲気は大気および窒素ガスである。試料の質量減少率が1%を超えた温度を酸化開始温度とし、酸化開始後の単位温度上昇あたりの質量減少量を酸化速度とした。

4. 試験結果と考察

4.1 アーク発生条件下の摩耗特性

図5に条件1の試験後のすり板しゅう動面の一例を示す。すり板最表面に存在した銅合金は溶出し、C/C 基材が露出していることがわかる。

図6に通電電流とすり板の比摩耗量（摩耗体積を平均押付力としゅう動距離で除した値）の関係を示す。条件1ではアークが発生しやすい高速で試験を行っており、このような条件では同じ電流であっても摩耗量は大きくばらつくことがわかった。そこで、アークの発生度合いを定量的に表したアークエネルギー量 E_a を横軸に、すり板比摩耗量を縦軸にとって結果を整理しなおしたグラフを図7に示す。図7から次のことがわかる。①アーク発生条件下においてC/Cすり板の摩耗はアークエネルギー量に比例する、②アークエネルギー量が多い場合、高強度C/C基材から成るすり板（AF4，AF5）の方がAN3Mよりも摩耗が多い、③含浸金属を変えてもすり板の摩耗特性に大きな差は生じない。以下、これらの理由について考察する。



※1アークエネルギー量AN3M：2.2 J/m, AF4：3.0 J/m, AF5：2.0 J/m

※2図中の矢印はしゅう動方向を表す。

図5 試験後のすり板しゅう動面（500倍）

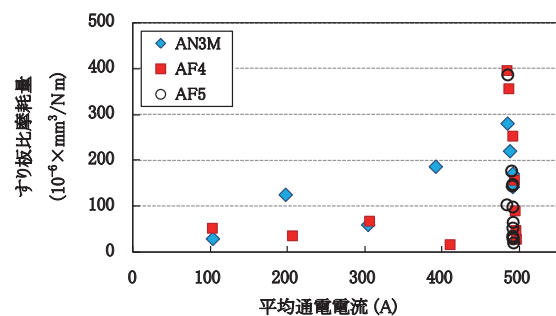


図6 通電電流とすり板比摩耗量

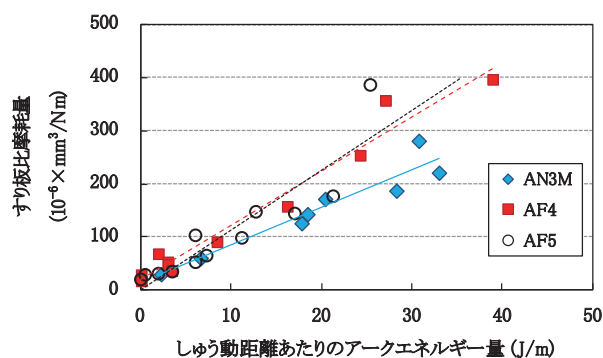


図7 アークエネルギーとすり板比摩耗量の関係

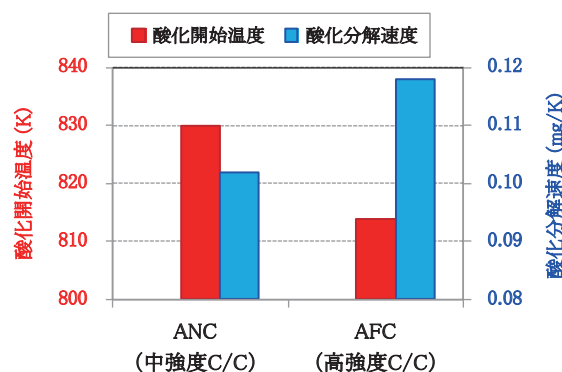


図9 C/C 基材の酸化特性測定結果

4.2 C/C 基材の熱・酸化特性

図8にC/Cすり板の熱伝導率測定結果を示す。AF4, AF5はAN3Mよりも熱伝導率が低いことがわかった。このため、同じアークエネルギー量であってもAF4, AF5のほうが表面近傍の温度は高くなりやすいと考えられる。

一般的なC/C複合材の摩耗特性については、航空機用ディスクブレーキ材料等を対象に欧州等でいくつかの報告がなされており、高温においてはC/C複合材の熱・酸化特性が摩耗特性に大きな影響を及ぼすことがわかっている^{4) 5) 6)}。C/Cすり板でもアーク放電が頻発するような高温環境下では、一般的なC/C複合材と同様にC/C基材の熱・酸化分解によって摩耗が促進されることが考えられる。

熱重量・示差熱同時測定器によりC/C基材の酸化特性を調べた結果を図9に示す。高強度炭素繊維を用いたC/C基材(AFC)のほうが、酸化開始温度が低く、酸化分解速度は高いことがわかった。AF4, AF5すり板はAN3Mよりも高強度であるにも関わらず、アークエネルギー量の大きい条件ではAN3Mより摩耗が多くなった理由は、AF4, AF5すり板の熱伝導率が低いことに加え、高強度C/C基材が熱・酸化分解しやすいためだと考えられる。

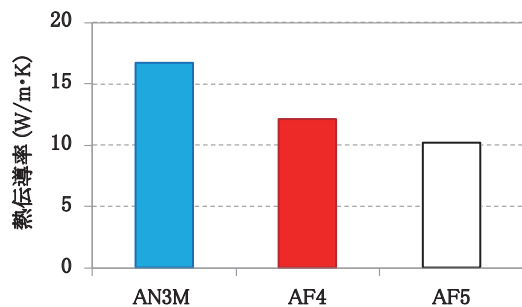


図8 C/C すり板の熱伝導率測定結果

含浸する銅合金の組成を変えてもすり板の摩耗特性に差が生じない理由は、前述のように銅合金はすり板最表面には存在しないため、C/Cすり板材内部においては熱伝導や導電を担っているが、摩耗特性に直接影響を及ぼしていないことによると考えられる。

4.3 アーク発生率が低い場合の摩耗特性

4.3.1 フィールド試験結果

図10に電流・離線測定の結果を示す。力行・回生時のすり板一枚当たりの最大集電電流はそれぞれ320A, 420Aであり、総離線アーク電気量のうち力行時の離線アーク電気量が90%程度を占めていることがわかった。このことから、すり板の摩耗に及ぼす離線アーク放電は力行時の極性のものが支配的であると考えられる。実車におけるアーク発生率(距離あたりのアーク電気量)は 10^3C/m のオーダーであり、条件1の摩耗試験の1/1000程度の値である。

図11にフィールドにおけるAF5すり板の摩耗率推移を示す。使用開始から17000km走行までは $1.0\text{mm}/10^4\text{km}$ 程度の摩耗率であったが、その後摩耗が $3.0\text{mm}/10^4\text{km}$ まで増加し、その後は再度低下する傾向にあった。摩耗率が増加する理由については次節で考察する。

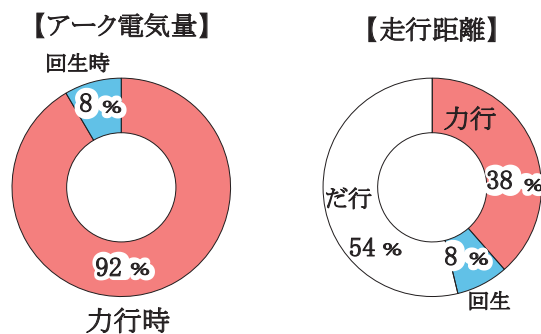


図10 電流・離線測定結果

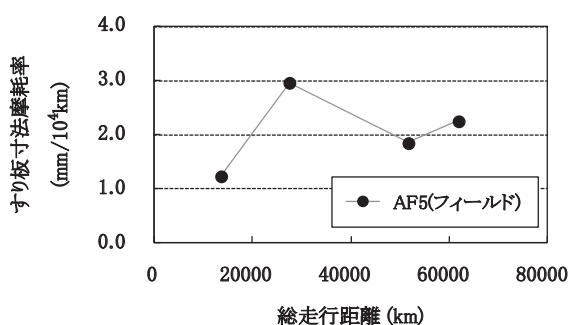


図 11 AF5 すり板のフィールドでの摩耗率推移

4.3.2 低アークエネルギー条件下での摩耗特性

実車と同程度のアーク発生率条件において繰り返しの摩耗試験を行った結果を図 12 に示す。1 回目の試験では、しゅう動距離が 1000km を超えたところですり板の摩耗が急増し、その後は無通電条件でも摩耗が多い状態が続いた。これはアークを伴わない通電しゅう動によってすり板材質に何らかの変化が生じ、機械的な摩耗が増加したことを意味する。再現性を確認するため、試験片を交換して再度試験を行ったところ、今度はしゅう動距離が 400km を超えた時点で比摩耗量の増加が確認された。このようにある程度の距離を通電しゅう動することで摩耗が増加する現象は、フィールドにおける傾向と同様であり、定性的ではあるが摩耗試験装置で実フィールドにおける現象が再現できたと考える。

通電しゅう動によって機械的摩耗が増加する理由を明らかにするため、定置摩耗試験およびフィールド試験後のすり板断面組織観察を行った。結果を図 13 に示す。定置試験の試験片、実すり板ともに表面下約 0.5mm の範囲に銅合金の溶出が認められた。C/C すり板の炭素基材 (C/C 基材) は炭素繊維を多く含むため、従来のカーボン系すり板の炭素基材よりも硬度が低い。そのため図 14 に示すように C/C すり板材の硬さは、含浸された銅合金がその大部分を担っており、含浸された銅合金が溶出することで表面の硬度が低下し、機械的摩耗が増大するものと考えられる。銅合金が溶出した理由については本研究で明らかにすることはできなかったが、長期間の通電しゅう動に伴うジュール熱によって Cu-Ti 合金中の

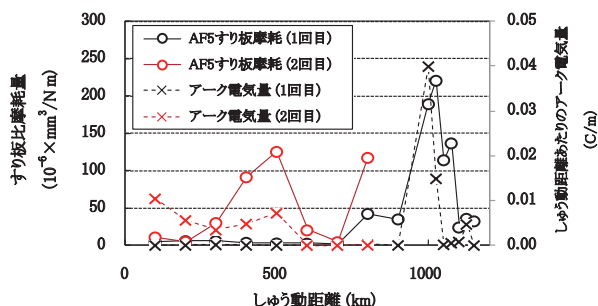


図 12 低アークエネルギー条件下での摩耗試験結果

Ti と周囲の炭素の反応が進み、TiC が生成すると共に Cu-Ti 合金の Ti 濃度が減少し、Cu-Ti 合金の炭素に対する濡れ性が低下することで離線アークなどによる加熱時に表面へ溶出すると考えられる。C/C すり板の銅合金の溶出は必ず生じるものではなく、線区や車種によって発生状況は異なる。どの程度の電流量で溶出が生じるかについては今後明らかにする必要がある。

4.3.3 低アークエネルギー条件下での電流密度とすり板摩耗の関係

押付力を 100N とした条件 3 の摩耗試験結果のうち、離線アーク発生率が $1.5 \times 10^2 \text{C/m}$ 以下となった試番について、電流密度とすり板比摩耗量の関係を図 15 に示す。アークが頻発する条件ではアーク放電の影響が支配的なため、4.1 節の図 6 では電流とすり板の摩耗に直接的な関係は見られなかったが、アーク発生率が低い場合には電流密度の増加に伴い、すり板の比摩耗量も増加することがわかった。

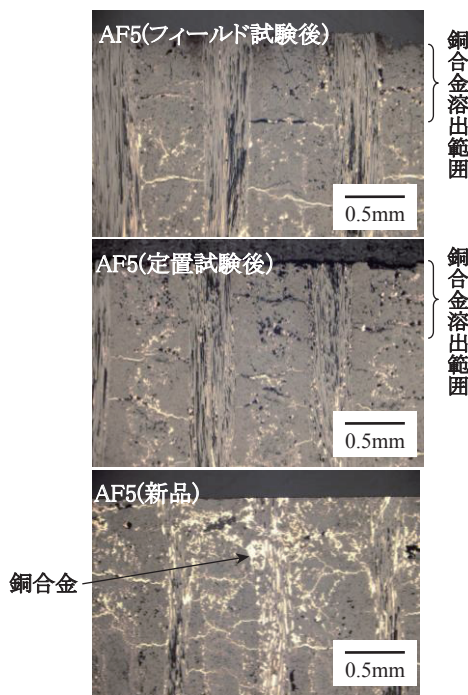


図 13 AF5 すり板断面組織

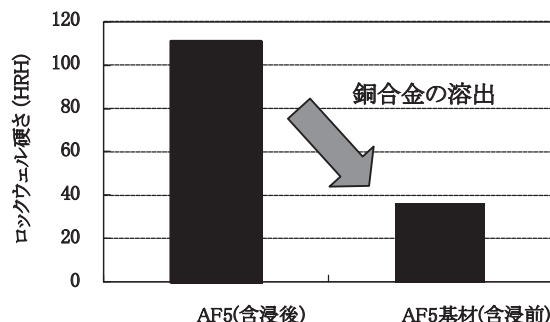


図 14 AF5 すり板金属含浸前後の硬さ比較

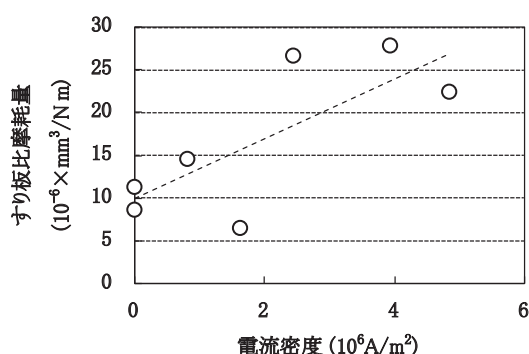


図 15 低アークエネルギー条件下における電流密度とすり板比摩耗量の関係

4.4 機械的（アブレシブ）摩耗特性

アブレシブ摩耗試験の結果を図 16 に示す。すり板表面が切削されるアブレシブ摩耗は一種の破壊現象だと考えられ、この場合にはすり板の機械的強度（曲げ強さ）が高いほど、摩耗が少ないことがわかった。

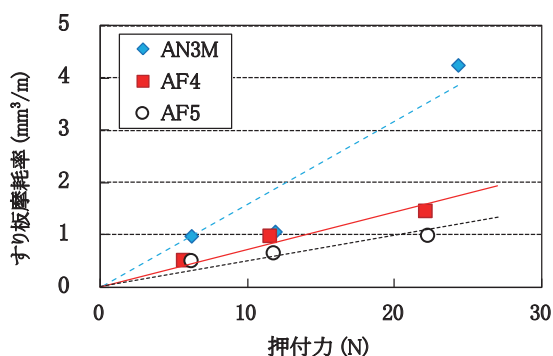


図 16 アブレシブ摩耗試験結果

5. C/C すり板の摩耗低減策

以上の結果を踏まえて、C/C すり板の摩耗低減策について述べる。

(1) アークエネルギー量と電流密度の低減

アーク放電条件下におけるすり板の摩耗量はアークエネルギー量に比例することから、アークエネルギー量を減らすことがすり板の摩耗を低減する上で重要となる。アークエネルギー量を減らすには、離線の発生自体を減少させるか、集電電流を小さくする必要がある。アークが発生しない条件では電流密度を小さくする、すなわちすり板の幅やすり板列数を増やし、すり板 1 枚当たりの集電電流を小さくすることがすり板摩耗低減につながる。

(2) すり板材料の改良

材料設計の観点からは、C/C 基材の熱・酸化特性と硬さ、銅合金の濡れ性はすり板の摩耗特性に大きな影響を

及ぼすことから、これらを向上させることが C/C すり板の摩耗低減につながると考えられる。今後は、上記の指針に基づいた改良を行うことで、C/C すり板のさらなる性能向上とコスト低下に取り組む予定である。

6. まとめ

定置摩耗試験および現車試験により、C/C 基材と含浸金属が異なる 3 種類の C/C 複合材製すり板の摩耗特性を調べた。その結果、次のことがわかった。

- (1) アーク発生条件下での C/C 複合材製すり板の摩耗は、離線にともなって発生するアーク放電のエネルギー量に比例する。この場合、C/C 基材の熱・酸化特性がすり板摩耗に影響を及ぼしていると考えられる。
- (2) 離線アークがほとんど発生しない低アークエネルギー条件では、C/C 複合材製すり板の摩耗は電流密度に比例して増加する傾向にある。含浸された銅合金が溶出することですり板の硬さが低下し、機械的摩耗が増大することがある。
- (3) すり板の機械的強度を高めることで、アブレシブ摩耗のような通電を伴わない機械的摩耗は減らすことができる。

文献

- 1) 久保 俊一, 土屋 広志, 他: カーボン系すり板の装着方法の開発, 鉄道総研報告, Vol.17, No.10, pp.35-40, 2003
- 2) Jia, L. X., Zhang, Y. Z., Li, J., Sun, L. M., Zhao, and Y. W., "Research on Frictional Wear Properties of C/C Composite with Electric Current", *Advanced Tribology*, No.3, pp.242-245, 2010.
- 3) Dao-chun, H., Lei, W., and Le-min, S., "Effect of arc discharge on wear properties of carbon-carbon composites sliding against Cu trolley under electric current", *Materials Science Forum*, Vols. 675-677, pp. 407-410, 2011.
- 4) Bacos, M.P., *Journal de physique IV, Colloque C7, supplement au Journal de Physique III*, Vol.3, pp.1895-1903, 1993.
- 5) Yen, B.K., and Ishihara, T., "An investigation of friction and wear mechanisms of carbon-carbon composites in nitrogen and air at elevated temperatures", *Carbon*, Vol.34, No.4, pp.489-498, 1996.
- 6) Gomes, J.R., Silva, O.M., Silva, C.M., L.C. Pardini, and Silva, R.F., "The effect of sliding speed and temperature on the tribological behaviour of carbon-carbon composites", *Wear*, Vol.249, pp.240-245, 2001.