

## C/C複合材製パンタグラフすり板の摩擦・摩耗特性評価

材料技術研究部 摩擦材料研究室  
副主任研究員 久保田 喜雄

### 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、メンテナンスコストの削減につながるため、多くの鉄道事業者において導入が進められている。従来のカーボン系すり板は破壊じん性が低く、焼結合金製すり板のように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。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（炭素繊維強化炭素）複合材製のすり板（以降、C/Cすり板）（図1）がこれまでに開発され<sup>1)</sup>、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すり板の摩擦・摩耗特性の改善を行っていく必要がある。摩擦特性を改善するには C/Cすり板の基本的な摩擦・摩耗特性を把握しておくことが重要と言える。そこで本研究では室内試験装置を用いて通電条件下における C/Cすり板の摩擦・摩耗特性評価を行ったので報告する。

### 2. 試験材

C/Cすり板は図2に示すようにC/C素材に銅合金を含浸して作られる。これらC/C素材と含浸金属が摩擦・摩耗特性に及ぼす影響を調べるために、本研究では3種類のC/Cすり板材を用いて試験を行った。表1にC/Cすり板の諸元を示す。AF4とAF5のC/C素材「AFC」は、高強度炭素繊維を用いて作られており、AN3MのC/C素材「ANC」と比べて機械的強度は高い。含浸金属は銅-チタン（Cu-Ti）合金を基本として、AN3MとAF5では、硬さの向上を目的としてさらにアルミニウム（Al）を添加している。

### 3. 試験方法

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 のローターに幅 5.25mm の純銅製円板（模擬トロリ線）を取り付け、そこにすり板試験片を押しつけてしゅう動・通電する試験装置である。図3に試験装置の模式図を示す。

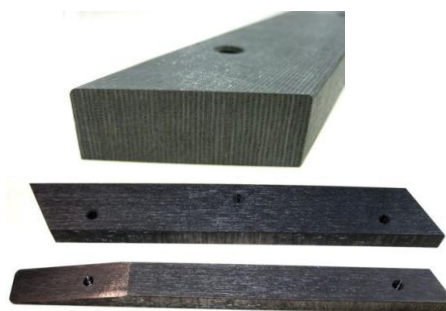


図1 C/C複合材製すり板の外観

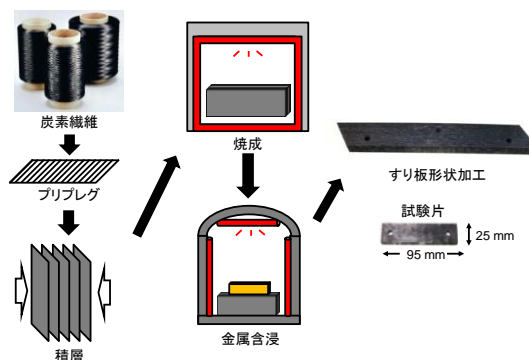


図2 C/C複合材製すり板の製造工程

試験中の主な測定項目は、すり板と模擬トロリ線の接触電圧, 通電電流, 摩擦力, 押付力である。すべての試験は通電条件下で行った。電流は直流 100~500A (極性: 模擬トロリ線側が正) とした。試験速度は 200km/h, しゅう動距離は 50km, 押付力は 59N である。

#### 4. 試験結果および考察

##### 4.1 摩擦特性

試験中の摩擦係数の変化の一例を図 4 に示す。押付直後の摩擦係数は 0.5 程度と高い値を示すが、時間の経過とともに減少し、約 60 秒後(しゅう動距離 3.3km, 530 周回相当)には 0.05 程度にまで低下し、その後は定常状態となり 0.1 前後で推移する。押付直後に摩擦係数が高いのは、すり板表面に存在する銅合金と銅製の模擬トロリ線とが凝着するためである。その後、表面近傍の銅合金はアーク熱や通電に伴うジュール熱によって溶出し、炭素に富む層がすり板表面に形成されるとともに、模擬トロリ線表面は平滑化し(図 5)炭素皮膜が形成されることで摩擦係数が低下すると考えられる。図 6 に試験後の摩擦面の電子顕微鏡写真を示す。灰色の部分が熔融した銅合金の領域である。

##### 4.2 摩耗特性

図 7 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。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る。次に次式で定義されるアークエネルギー量  $E_e$  とすり板比摩耗量の関係を図 8 に示す。

$$E_e = \sum_i^n (I_i \times V_i) \Delta t$$

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である。なお、すり板と模擬トロリ線間の電位差が 10~90V である時にアーク放電が生じていると判定した。図 8 から次のことがわかる。①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、高強度炭素繊維を用いたすり板の方が摩耗が多い, ③含浸金属を変

表 1 C/C 複合材製すり板の諸元

C/C 素材			
名前	ANC	AFC	
炭素繊維の体積率 (%)	40		
繊維種類	PAN 系		
公称引張強度 (MPa)	3530	4900	
すり板材			
名前	AN3M	AF4	AF5
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.5	2.9	2.9
電気抵抗率 (μΩ・m)	2.5	0.9	1.8
シャルピ <sup>®</sup> -衝撃値 (kJ/m <sup>2</sup> )	6.2	15.4	15.7
曲げ強度 (MPa)	195	221	232
含浸金属	Cu-Ti-Al	Cu-Ti	Cu-Ti-Al

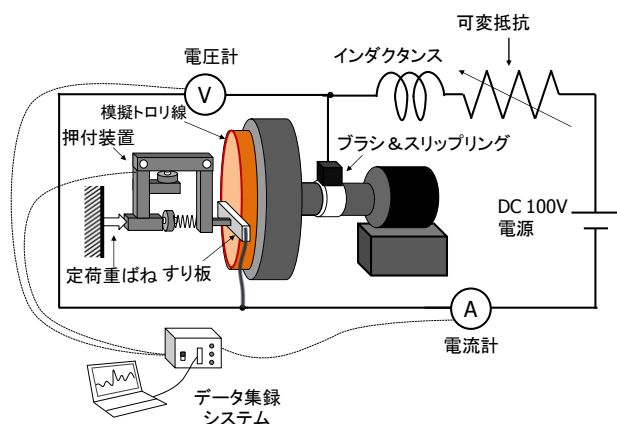


図 3 高速用集電材摩耗試験機の模式図

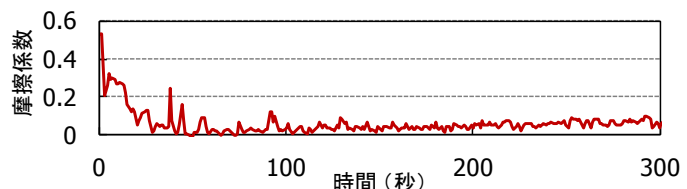


図 4 試験中の摩擦係数の変化



図 5 試験後の模擬トロリ線表面

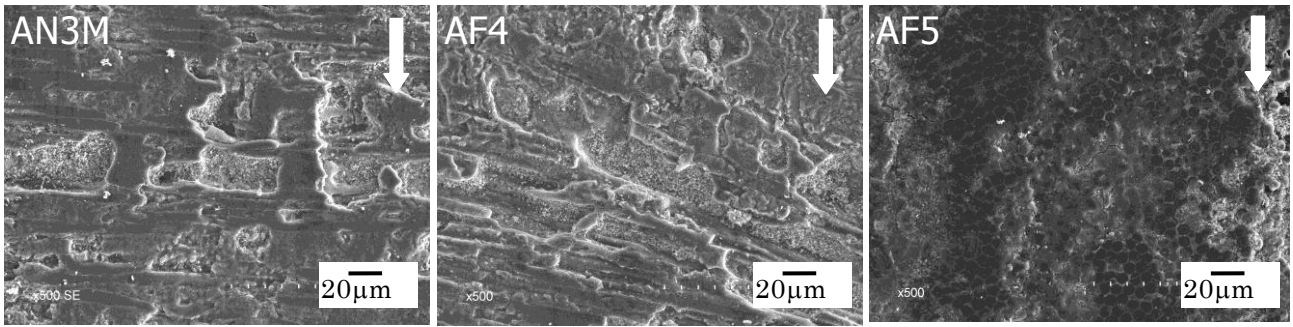


図6 試験後のすり板しゅう動面（500倍）※図中の矢印はしゅう動方向を示す

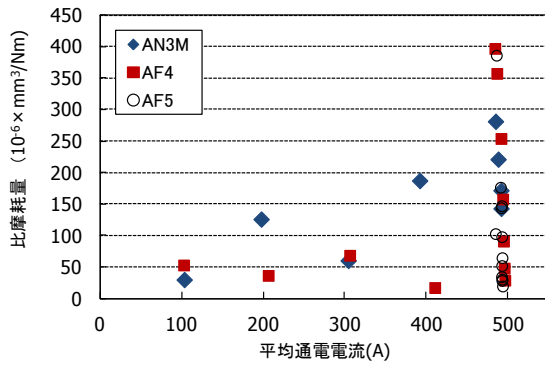


図7 通電電流とすり板の摩耗量の関係

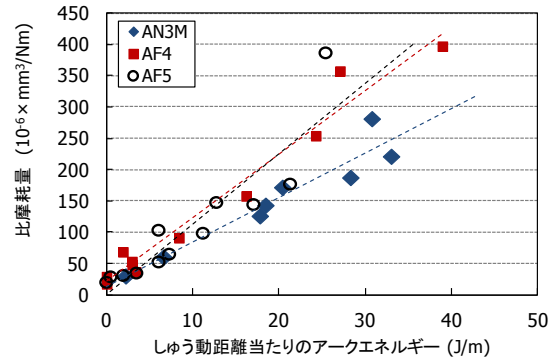


図8 アークエネルギーとすり板の摩耗量の関係

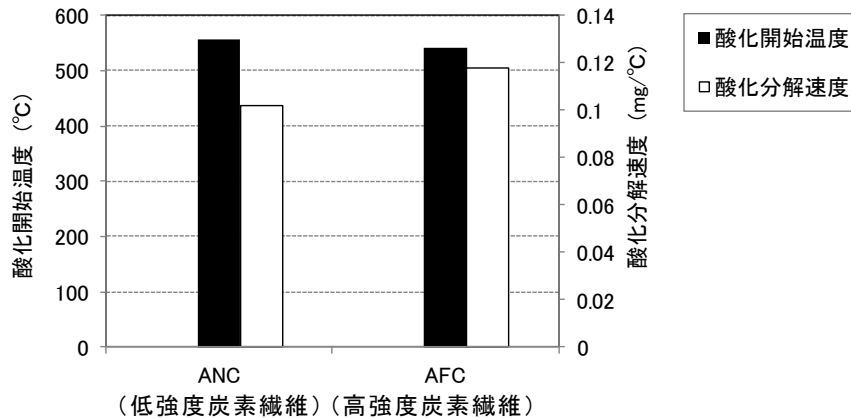


図9 C/C素材の酸化特性

えてもすり板の摩耗特性に大きな差は生じない。これらの理由について考察する。

含浸金属を変えてもすり板の摩耗特性に差が生じない理由は、前節で述べたようにすり板表面の含浸金属が熱により溶出し、実際に模擬トロリ線と接触しているのはC/C素材であるためと考えられる。すなわち、含浸金属はC/Cすり板材そのものとしての熱伝導や導電を担っているが、摩擦面には存在しないため摩耗特性に直接影響を及ぼさないと考えられる。次に、高強度炭素繊維を用いたすり板 (AF4, AF5) のアークエネルギーあたりの摩耗が、低強度炭素繊維を用いたすり板 (AN3M) よりも大きい理由について考察する。上で述べたように、表面から含浸金属は溶出するため、実際に模擬トロリ線と接触・摩擦しているのはC/C素材である。航空機用ディスクブレーキ材料として用いられるC/C複合材の摩耗特性については、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<sup>2)~6)</sup>。すり板材でも同様に、アークが発生するような高温環境下ではC/C素材は熱・

酸化分解し、摩耗が増加することが考えられる。そこで、本研究で用いた2種類のC/C素材の酸化特性を、熱重量・示差熱同時測定器(TG-DTA)により測定した。その結果、炭素繊維の強度を高めたすり板材料のほうが、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(図9)。アーク放電のエネルギー量が多い条件下で高強度炭素繊維を用いたすり板の摩耗が大きくなる理由は、高強度炭素繊維を用いたC/C素材の方が高温で酸化しやすいためであると考えられる。

#### 4.3 C/Cすり板の摩耗低減策

以上のことを踏まえて、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の低減

すり板の使用環境の観点からは、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、離線の発生を減らすか、集電電流を減らす必要がある。

##### (2)すり板材料の改良

材料設計の観点からは、C/C素材の熱・酸化特性はすり板の摩耗特性に大きな影響を及ぼすことから、C/C素材の熱・酸化特性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。熱・酸化特性は、例えば焼成温度を高めることで向上できるが、その場合、機械的強度は低下して機械的な摩耗が増える。実際の使用環境では、機械的摩耗もすり板全体の摩耗のうち大きな割合を占めるため、熱・酸化特性を改善して電気的な摩耗を減らしたとしても、機械的摩耗が増え、結果として摩耗が増加することもある。すり板の摩耗特性を向上させるには、この両者のバランスを考慮することが重要であり、また難しい点でもある。今後は、これらのバランスを取りながらさらなる摩耗特性の改善に努めるとともに、炭素繊維種類の変更なども試みることで、C/Cすり板の性能向上とコスト低下に取り組む予定である。

## 5. まとめ

室内試験装置により、カーボン素材と含浸金属の異なる3種類のC/C複合材製すり板の摩擦・摩耗特性を調べた。その結果、次のことがわかった。

- (1) C/C複合材製すり板と純銅製模擬トロリ線との摩擦係数は、押付直後は0.5程度であるが、時間の経過とともに減少し、定常的には0.1程度の値を示す。
- (2) 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。
- (3) C/C素材の機械的強度を高めても、C/C複合材すり板のアークに伴う電気的摩耗の減少は期待できない。電気的摩耗を減らすには、C/C素材の熱・酸化特性を向上させることが重要であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 久保, 土屋, 池内, 半田, 藤井: 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) M.P.Bacos, Journal de physique IV, Colloque C7, supplement au Journal de Physique III, Vol.3 (1993) 1895-1903
- 3) B.K.Yen, T.Ishihara, Carbon Vol.34, No.4 (1996), 489-498
- 4) J.R.Gomes, O.M.Silva, C.M.Silva, L.C.Pardini, R.F.Silva, Wear 249 (2001) 240-245
- 5) D.W.McKee, R.H.Savage, Wear 22 (1972) 193-214
- 6) H.W.Chang, Wear 80 (1982) 7-14