

# パンタグラフすり板とトロリ線の材料と摩耗

久保 俊一

材料技術研究部(主任研究員)

菅原 淳

電力技術研究部(集電管理 研究室長)



くぼ しゅんいち すがはら あつし

## はじめに

電気鉄道において、電力の授受を行う境界にあるのが、パンタグラフすり板とトロリ線です。ここでの課題は、それぞれに適切な材料を選択することにより、すり板とトロリ線の間で良好な摩擦状態を保ち、各部材がなるべく摩耗しないようにしながら、電車の走行に必要な電力の授受を確実に行うことです。電力の授受の観点からは、パンタグラフと架線の構造、運動を適切なものとするのが最優先課題ですが、パンタグラフやトロリ線の保守の観点からは、摩擦部分に使われる材料の選択が重要な意味を持ちます。

ここでは、パンタグラフすり板とトロリ線に使われる材料とその摩擦摩耗特性について紹介します。

## パンタグラフすり板の材料 求められる特性

パンタグラフすり板には次のような性能が求められます。

- (1) 電気回路の素子としての高い導電性  
(すなわち、低い抵抗率)
- (2) 車両部品としての高い強度
- (3) 摩擦材としての自らが摩耗しない、相手を摩耗させない性質

- (4) 消耗品としての経済性(価格が安い)  
とりサイクル性

導電性と強度については鉄道車両関係の業界団体、(社)日本鉄道車輛工業会の規格により基準値が定められています。この規格では、例えば機械的な強度は材質によって異なる値が定められています(表1)。通常、同一部材として使われる材料に対しては単一の規格値が決められるものですが、すり板材料では材質ごとに異なる値が決められています。これは元々規格値が使用条件から導き出されたものではなく、実用材として実績のある材料の特性を参考として決められているため、鉄道技術の経験工学的な面が表れていると言えます。

## 材料の特徴

現在すり板として使われている材料には、大きく分けて焼結合金材料とカーボン系材料とがあります。

焼結合金は、様々な金属粉末を混合して成形し、融点より低い温度で焼いて金属粉を結合させて造るもので、混合する粉末の種類や量を調整して得られる合金の特性を調節でき、すり板のように複数の特性を求められる材料の製造には適しています。

一般に摩擦材料は、母材中に耐摩耗性を受け持つ硬質物質と潤滑性を受け持つ物質とを分散させた構造となっています。摩擦材の代表例は制輪子やブレーキライニングですが、すり板もこれらと同様の構造を持ちます。母材となる鉄粉や銅粉に耐摩耗成分としてクロム、フェロモリブデン、フェロチタン

などの硬い金属粒子を混合し、さらに潤滑成分として二硫化モリブデン、黒鉛など「固体潤滑剤」と呼ばれる粉末を添加します。母材となる粉末の粒径や形態のほか硬質金属粒子や固体潤滑剤の種類や量を変えることにより、また、製造するときの成形圧力や熱処理方法により、できあがる焼結合金の摩擦摩耗特性は様々に変化します。すり板の改良や開発とは、これら様々な条件の膨大な組合せの中から、最も適切なものを探し出す努力にほかなりません。最近では硬質の金属粒子としてタングステンなどの高融点金属を、潤滑成分としてビスマスなどの低融点金属を使うことが試みられています。図1は代表的な焼結合金すり板の金属組織です。図の丸く白い部分が硬質金属粒子、灰色の部分が母材です。

もう一方の材料がカーボン系(炭素系)材料です。JR 会社の新幹線や電気機関車以外の在来線電車の多くでは、すり板材料は、近年、焼結合金からカーボン系材料へ置き換えられました。

すり板として使われるカーボン系材料は、コークスなどのカーボン粉末を成形

表1 パンタグラフすり板の規格値(JRIS E6301:2005)

種類	引張強さ (MPa)	曲げ強さ (MPa)	シャルピー吸収エネルギー (J)	抵抗率 ( $\mu\Omega\cdot m$ )
銅系焼結合金	120以上	—	4.9以上	0.4以下
鉄系焼結合金	170以上	—	9.8以上	0.8以下
溶融合金	180以上	—	—	0.2以下
純カーボン	—	25以上	—	40以下
金属を含むカーボン	—	70以上	0.3以上	3以下

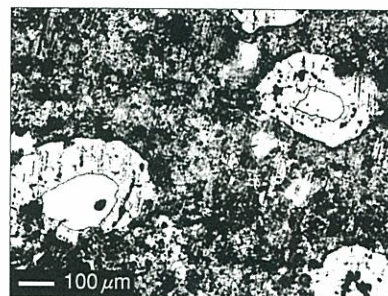


図1 焼結合金すり板(新幹線用鉄系)



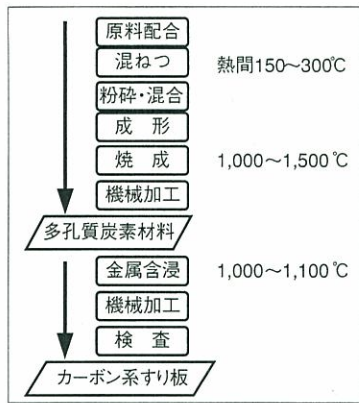


図2 カーボン系すり板(金属含浸型)の製造工程

1,000～1,500℃で焼くことにより造ります(図2)。焼いたカーボン単体のままでも使えますが、導電性と機械的強度を高めるために、カーボン粉に金属粉、金属繊維、炭素繊維を混ぜたり、焼いたカーボンに溶けた金属を含浸したりした材料が開発され、「カーボン系すり板」と呼ばれて使われています。図3は代表的なカーボン系すり板の組織です。図中の暗い部分がカーボン、明るい部分がカーボンに含浸された金属です。

カーボン系材料は、もともと焼結合金と比べて強度が小さく導電性は劣ります。したがって、直流電車で使うためには導電性を高める(抵抗率を低くする)必要があります。そのために金属を混合したり含浸したりしています。図4は約5mの架設トロリ線と実すり板の間に通電したときの、接触点付近でのトロリ線の温度上昇測定例です。トロリ線は、引張強度を保つために、その温度を90℃以下とする必要があります。そのためには通電による温度上昇は、気温の影響などを含めると約47度以下とする必要があります。抵抗率の異なるすり板での測定値から、通電電流がすり板1本あたり100Aでは、すり板の抵抗率が約 $3\mu\Omega\cdot m$ 以下であれば、トロリ線の温度上昇は約47度以下に抑えることが可能であることが知られています。

**材料の変遷**  
現在使われているすり板材料は上述のとおりですが、時代によって材料に求められる特性の優先度は移り変わり、使われる材料も変化してきました(図5)。

電気鉄道の発明当時はすり板には銅板が使われていました。その後、1880年代に炭素電極を使うことが考案され、

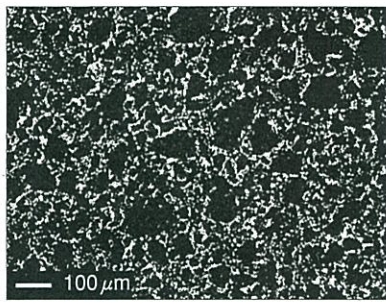


図3 カーボン系すり板(在来線用銅合金含浸)

1920年代にはカーボン(炭素)すり板が普及しました。以来、欧米ではカーボンが最も一般的なすり板材料となりました。日本でも当初は銅でしたが、一部は欧州と同様にカーボンへと変わりました。戦時体制下では、銅は軍需物資で入手困難となり、カーボンすり板の輸入も難しくなりました。そこで国産カーボンすり板が開発されましたが、使用中に割れたり、欠けたりして使えないものだったと言われています。

戦後間もなく銅粉を母材とした銅系焼結合金すり板が開発され、1950年頃には国鉄の全電車のすり板が銅系焼結合金となりました。以降日本では、焼結合金が最も一般的なすり板材料となっています。新幹線では開業時から鉄粉を母材とした鉄系焼結合金すり板が使われています。

国鉄の分割民営化後は、トロリ線の摩擦低減が強く要請され、また、カーボン系材料が使われていた欧州でトロリ線の摩擦が小さいことが知られていたこともあり、再びカーボン系材料が見直されることとなりました。その結果、欧州などで使われているものよりもさらに導電性の高い「カーボン系すり板」が開発され、JR会社の電車の2/3以上で使われるに至っています。

最近、高速化やパンタグラフ数削減によりすり板に流れる集電電流が増加す

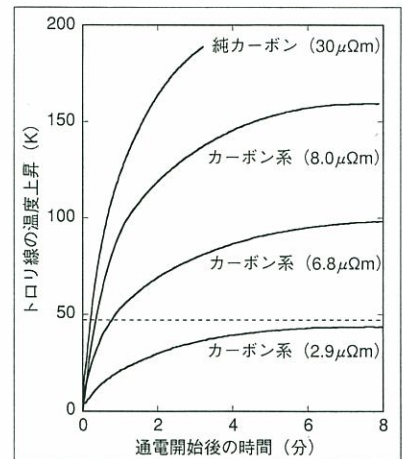


図4 すり板の抵抗率とトロリ線の温度上昇(すり板1本あたり100A通電)

る傾向があります。集電電流が増加すると、すり板とトロリ線とが離れて(離線して)アーク放電が発生したときにすり板摩擦面が損傷し、摩擦面の金属が溶けたり脱落したりして抵抗率が上昇するなどの悪影響があります。このため、すり板素材の耐熱性を高めたり含有金属を増量したりして抵抗率をより低くした材料も開発されています。

一方、炭素系の新たな材料として知られるC/C複合材もすり板として使われ始めています。C/C複合材とは、炭素繊維で織った布を積層し圧縮成形して焼いた「炭素繊維強化炭素複合材」のことで、軽量で耐熱性が高く、航空機のブレーキ材などでは実用されている材料です。

以上のような材料の変遷は、各時代で求められた特性と、それに対応した技術革新により成し遂げられてきたものと言えます。

### トロリ線の材料 求められる特性

トロリ線には次のような性能が求められます。

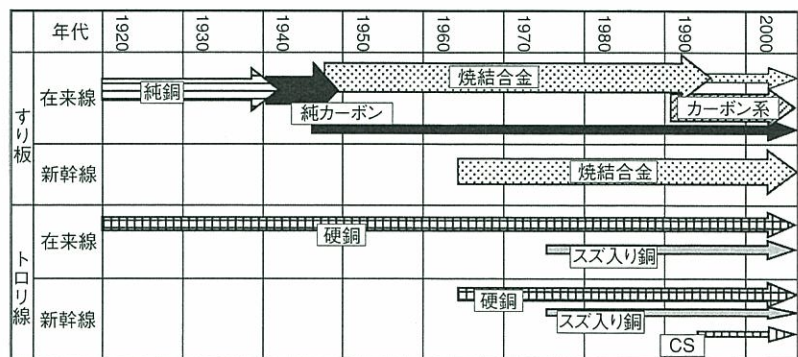


図5 すり板・トロリ線の材料の変遷



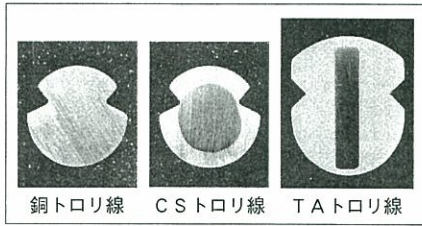


図6 主なトリリ線の断面形状

- (1) 電気回路の素子としての高い導電性
- (2) 電気設備の部材としての高い強度(特に引張強度), 耐食性, 耐疲労性, 耐熱性
- (3) 摩擦材としての耐摩耗性
- (4) 消耗品としての経済性(価格が安い)とリサイクル性

すり板に求められる性能と似通っていますが, 大きく違うのは, 張力をかけて架設されるがゆえの引張強度と, 設備として長い期間使用されるがゆえの耐食性や耐疲労性です。後述する硬銅トリリ線は日本工業規格(JIS)が制定されており, 導電性に加えて引張強度などの機械的性質も規定されています。

材料の特徴

トリリ線に求められる性能は数多くありますが, これらを満足する材料として古くから広く使われているのが銅です。戦時中は銅資源節約のため鉄やアルミニウムが使われたこともありましたが一時的なものでした。

現在でも, ほぼ純銅の(微量の不純物を含むが, 意図的に合金成分を添加していない)硬銅トリリ線が主流を占めています。純銅のほかに, 長大トンネル等で使うために耐熱性を向上させた銀入りトリリ線(銀 0.12%以上), スズを添加し硬くして耐摩耗性向上をねらったスズ入りトリリ線(スズ 0.3 ± 0.05%)などがあり, スズ入りトリリ線は比較的多く使われています。

新幹線で速度向上を目指す場合, トリリ線の波動伝播速度が集電性能に影響するため, 比強度(単位長さあたりの質量に対する引張荷重の比)が大きい材料が必要とされます。複合トリリ線は, 鋼心で強度を確保し, 導電性はアルミニウムや銅で担うという考え方で開発されたものです。ただし, 強度とひきかえに導電性が低下することはやむを得ません。TAトリリ線と呼ばれる鋼とアルミニウ

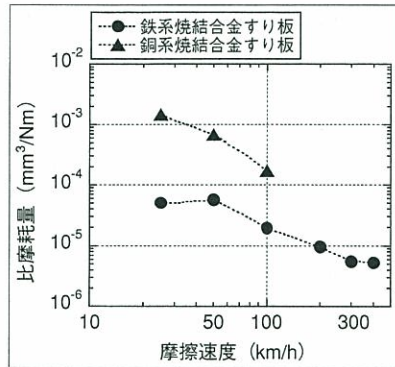


図7 焼結合金すり板の摩耗の速度特性(通電なし, 摩耗試験)

ムの複合材, CSトリリ線と呼ばれる鋼と銅の複合材が開発されています(図6)。

TAトリリ線のTAとは鉄・アルミニウムの略ですが, アルミニウムが軽量であるため比強度は他の材料に比べ突出しています。鋼心が摩擦面に露出すると摩耗が進みにくくなります。しかし, 異種金属の接触による腐食防止の観点からは銅トリリ線用の架設用金具をそのまま使うことができないほか, アルミニウムがトンネル内のアルカリ性漏水で腐食しやすく, トンネルがある線区では全線をTAトリリ線に統一しにくいことも難点です。そのため, TAトリリ線は本格的な実用化には至っていないのが現状です。

鋼心と銅の複合材がCSトリリ線で, CSとは copper-steel の略です。こちらは表面が銅のためTAトリリ線のようなアルカリ性漏水による腐食の心配は少なく, 試験架設を重ね十分確認がなされた結果, 北陸新幹線(高崎~長野), 東北新幹線(盛岡~八戸), 九州新幹線で全面的に採用されています。また, 銅の断面積比率を増やして導電性を上げたCSDトリリ線というものもあり, 東海道新幹線に適用されています。

一方, 高導電性と高強度の両立を実現すべく, 銅に微量のクロムとジルコニウムを添加した合金を適用して開発されたPHCトリリ線と呼ばれるものがあります。PHCとは Precipitation Hardened Copper Alloy(析出強化銅合金)の略で, 銅合金ながら軟鋼並みの強度とスズ入りトリリ線をしのぐ導電率を持ち, さらに高温で軟化しにくいという特長も有しています。PHCトリリ線は今後の実用化を目指して試験架設が行われている状況です。

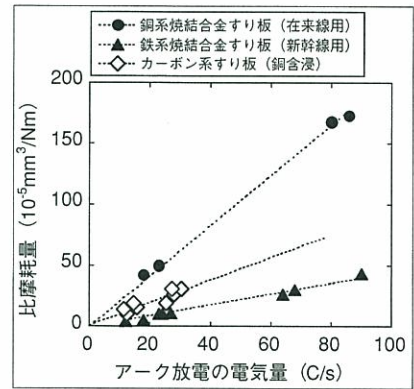


図8 アーク放電と摩耗率の関係

すり板とトリリ線の摩耗

耐摩耗性は, 消耗部品としてのすり板で最も重要な特性で, トリリ線でも必要な要件の一つです。固体同士の摩擦では, 材料の摩耗に影響を及ぼす要因としては次のものがあげられます。

- (1) 材料の組合せ
- (2) 押付荷重(接触力): パンタグラフの静的な押上力のほかに走行中の時間的な変動も含む
- (3) 摩擦速度: 車両の走行速度に相当する
- (4) 摩擦環境: 雨水, 油脂や塵埃などの摩擦面への介在など

すり板とトリリ線の摩擦では, これらのほかに, 通電が最も重要な要因です。すり板やトリリ線の摩耗を考える場合は, 通常の固体同士の摩擦摩耗以外に通電の影響を考える必要があります。

すり板の摩耗

焼結合金すり板と銅トリリ線では金属同士の摩擦摩耗となります。金属同士の摩擦では, 凝着摩耗と呼ばれる摩耗の形態が支配的です。固体同士が接触しているときには, 実際にはわずかな面積の点で接触しており, 荷重がかかるとそこではお互いが凝着しあった(くっついた)状態になり, この状態で相互に運動, すなわち摩擦すると, 接触点で凝着し合った部分が持ち去られて摩耗するというのが凝着摩耗です。

焼結合金では, 通電しないときは押付荷重に従って摩耗は増加し, 摩擦速度が高速になるほど摩耗は減少します。図7に銅系焼結合金すり板と鉄系焼結合金すり板の通電を伴わない摩耗試験での摩耗率の速度特性を示します。通電の影響は, 接触点での接触抵抗によるジュール



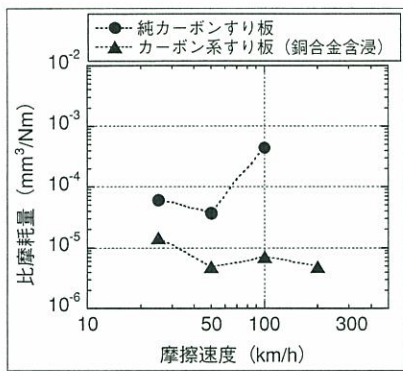


図9 カーボン系すり板の摩耗の速度特性 (通電なし, 摩耗試験)

発熱と、接触が離れるとき(離線したとき)のアーキ放電の発生に分けられます。ジュール発熱で接触点付近の温度が上がると多くの場合材料が軟化して摩耗が増える方向に進みます。一方、アーキ放電の発生ではアーキ熱で急激に温度上がり多くの場合アーキ近傍の材料が蒸発、溶融、軟化して摩耗は増える方向に進みます。実験結果によれば、ジュール発熱とアーキ熱とを比較するとアーキ熱の影響のほうが格段に大きく、アーキ放電が頻繁に発生する条件で摩擦すると、すり板の摩耗率はアーキ放電の電気量に比例して増えることが知られています(図8)。したがって、通電の影響としては、アーキ放電が発生する場合の影響を把握しておけばよいと考えられます。

カーボン系すり板では、カーボンと銅との間では凝着はほとんど起こらず、カーボン自体の潤滑性も高いため、焼結合金すり板と比べると、すり板・トロリ線ともに摩耗が少なくなります。カーボンの摩耗機構については古くから研究されているものの、必ずしも明確にされているとは言えませんが、主に摩擦熱などによりカーボンが酸化消耗する酸化摩耗と、トロリ線の摩擦面の微少な粗さにより削り取られて摩耗するアプレシブ摩耗とによるものと考えられています。カーボンでは、押付荷重の増加、摩擦速度の増加に従い摩耗は増加します。金属を含むカーボン系すり板では、焼結合金すり板と同様に摩擦速度が低くなると摩耗が大きくなる傾向もみられます。図9に金属を含まない純カーボンすり板と銅合金を含まないカーボン系すり板の通電を伴わない摩耗試験における摩耗率の速度特性

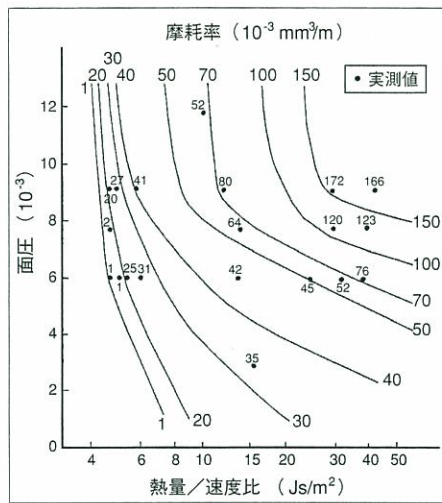


図10 トロリ線の摩耗率のマップ

を示します。通電の影響は、焼結合金すり板の場合と同様に、接触点でのジュール熱と離線した時のアーキ熱に大別できます。カーボン系すり板では、熱によりカーボンの酸化消耗が促進されるため、通電によるジュール熱、アーキ熱により摩耗は増える方向に進みます。金属を含むカーボン系すり板では、アーキ熱による急激な温度上昇ですり板内部の金属粒子の蒸発、溶融、脱落と、カーボンの急激な酸化消耗が進行し摩耗は増える方向に進みます。カーボン系すり板でも焼結合金と同様に、アーキ放電が頻発する条件ではすり板の摩耗率はアーキ放電の量に比例して増えることが知られています(図8)。通電の影響はここでもアーキ放電の発生によるものが支配的であり、アーキ放電の発生する場合の状況を把握しておけばよいと考えられます。

#### トロリ線の摩耗

トロリ線では摩耗特性の持つ意味合いがすり板とは異なります。すり板は消耗部品として頻繁に取り替えられるため、寿命すなわち走行距離あたりの摩耗率が重要です。しかも上に述べたとおり、アーキ放電が発生する場合の摩耗の寄与が最も大きいことから、アーキ放電が発生する場合の摩耗率が重要です。これに対してトロリ線では、駅構内や高速走行区間などの条件のほか、トロリ線の架設高さや特に高さの不整、および架設用具の有無などの条件によっても摩擦条件は変化します。したがって、摩擦条件の相違が摩耗にどのように影響するかのほうが

重要です。様々な摩擦条件のうち、すり板とトロリ線の接触点での面圧と、接触点で発生する熱量と摩擦速度との比に着目して、トロリ線の摩耗率を整理したのが図10です。この図はPHCトロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せに対して調べられたものです。図からは、同じ速度・電流条件の場所でもパンタグラフの運動やトロリ線の架設用具などによって、すり板とトロリ線の接触圧が増えるとトロリ線の摩耗率は大きくなることがわかります。一方、同じ接触圧、同じ速度でも通電電流が増加して接触点での発生熱量が増えれば、トロリ線の摩耗率は大きくなるなど、接触圧、通電電流、摩擦速度の3条件の摩耗率への影響を読みとることが出来ます。今後、様々な材料の組合せに対して、このような関係が調査され整理されれば、実際の架線に架設されたトロリ線における様々な条件の場所での摩耗の進行状況が予測できるようになることが期待できます。

#### おわりに

パンタグラフすり板とトロリ線は、電気鉄道に固有の技術分野であり、鉄道の高速度化や設備保守の軽減などの、鉄道事業にとって重要な施策を進める上では避けて通ることができない分野です。その中で、お互い接触しながら摩擦しあう2種の材料の選択や改良の方向によっては、集電システムの性能が大きく変わってしまうこともあり得ます。今後の研究開発の進展が期待されるところです。[RRR]

※記事に関するお問い合わせ先  
 材料技術研究部(摩擦材料)  
 NTT: 042-573-7341  
 J R: 053-7341  
 電力技術研究部(集電管理)  
 NTT: 042-573-7333  
 J R: 053-7333