

C/C複合材のパンタグラフすり板への適用

土屋 広志
材料技術研究部
(摩擦材料 主任研究員)

久保 俊一
同
(部長)



つちや ひろし



くぼ しゅんいち

はじめに

パンタグラフすり板(以下、すり板)は、電車のパンタグラフの最上部(舟体)に取り付ける部品で、銅製トロリ線と摩擦しながら電流を車両に導きます(図1)。JR発足の頃はすり板は焼結合金が主流でした。すり板はそれ自身摩擦しますが、同様に相手側のトロリ線も摩擦させます。焼結合金すり板は、銅製トロリ線と摩擦すると、同じ銅系の金属同士のためお互いに摩擦しました。その後、トロリ線の摩擦低減のために、カーボン(炭素)を主体とする「カーボン系すり板」が実用化され、トロリ線摩擦は1/2程度まで減少し、保守経費の節約に寄与しています。

一方で、カーボン系すり板は金属とは性質が大きく異なる材料で、例えば舟体に取り付けるには特殊な取付金具(さや)が必要など、実用上扱い難い点がありました。近年は、カーボン系新材料として様々な用途に使われるようになった「C/C複合材」のすり板への適用が進められています。

すり板に求められる性質

すり板には、トロリ線と摩擦し、電流を取り入れるという大きな役割があります。このため、すり板材料には、①

強度が高く容易に壊れない、②滑りが良く摩擦しにくく相手手を摩擦させない、③電気伝導が良い、の3つの条件を満たす必要があります。さらに、摩擦により取り換える消耗部品なので安価なことが必要です。しかし、これらを全て満たす理想の材料は残念ながら無く、実際はいずれかを優先させることになります。どれを優先させるかは、時代により変わってきました。

電車の黎明期では、材料の選択肢も少なく導電性を重視し純銅が使われ、その後、滑りの良さで純炭素が使われました。日本では第二次大戦後、焼結合金すり板が発明され、半世紀の間使われてきました。JR発足後は、鉄道の運営経費の節約にはトロリ線などの設備保守を少なくすることが有効なため、トロリ線の摩擦が少ないカーボン系すり板が開発されました。

カーボン系すり板は、戦前に使われていた純炭素の弱点である強度と導電性を改善するため、炭素微粉と銅粉を混合し焼結(金属粉混合焼結法)、多孔質の硬い炭素材料に金属を溶かし含浸(金属含浸法)等で製造されたカーボン(炭素)と金属の中間的な性質を持つ材料です。

すり板を舟体に取り付ける

パンタグラフの舟体は繰り返し使われる部材ですが、すり板は摩擦するたびに新品に取り換えられます。したがって、すり板は舟体に強固に取り付ける必要がありますが、取換えの際は容易に取り外せる構造が望まれます。このような部品の取付けで最も一般的なものはボルト(ねじ)止めです。すり板が焼結合金製の時は、すり板は舟体にねじで取り付けていました。焼結合金すり板は容易に雌ねじが切れ、ねじ止めで舟体に取り付けられます。ところが、カーボン系すり板は、強度こそ従来の純炭素の2倍以上ですが、脆さの点では金属に劣り、すり板自体に雌ねじを切ることが難しく、うまく切れてもねじを締めるとねじ山が割れてねじが抜けてしまいます。そのため、カーボン系す

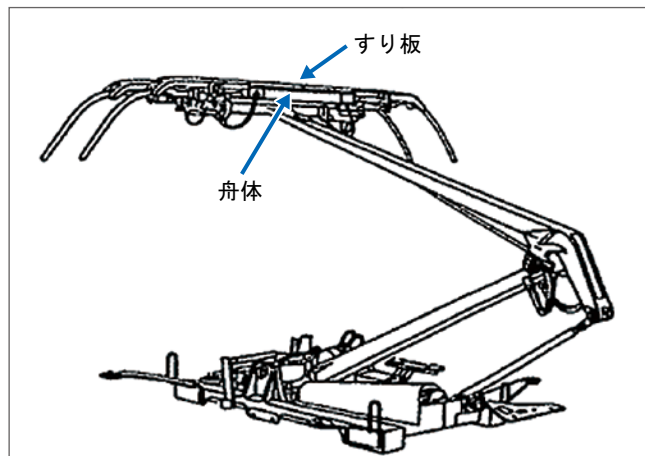


図1 在来線用パンタグラフの例

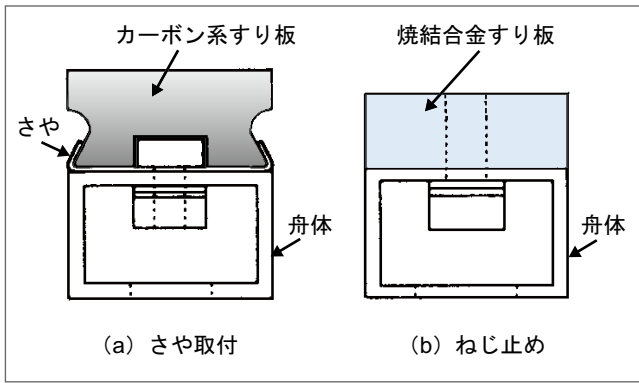


図2 すり板の装着方法例

り板を取り付けるには、すり板に「さや」と呼ばれる金具を取り付け、さやを介する必要があります(図2)。

さやを使う方法は、信頼性も高く、取付け・取外しも容易ですが、さやを取り付けるための部品が必要となり(図3)、さやに納められた部分はすり板としては使えず無駄になります。また、さやの分だけすり板が厚くなり、さやの取付部品も含め重くなります。近年のパンタグラフは、車両の高速化に対応して舟体部分を軽くし、舟体部分の形状を空気力学的に最適にするように改良されています。このような状況では、すり板部分が厚く重くなるさや取付方法は不利となります。

カーボン系すり板を有効に活用するため、欧州の高速鉄道では、さやを使わず、すり板を舟体に直接接着する方法が使われています。しかし、舟体の形状や使い方が異なる日本で同じような接着方法を実用するには、接着強さ、導電性の確認、および、接着部分の検査方法などを確認する必要がありますが簡単ではありません。むしろ、カーボンを主体とする様々な新材料の中から、焼結合金のようにねじ止め舟体に取り付けられる材料を探し出すほうが実現の可能性が高いと言えます。

炭素繊維とC/C複合材

近年、炭素繊維を強化材とした複合材料が様々な用途で使われています。炭素繊維は、直径5~10 μ mの炭素の極細繊維で、金属に優る力学的特性を持っています。PAN系とピッチ系の2種類があり、PAN系はポリアクリロニトリル(PAN)繊維を、ピッチ系はコールタールや石油重質分を原料として得られるピッチ繊維をそれぞれ炭素化したものです。PAN系炭素繊維は1961年に大阪工業試験所の進藤昭男博士が発明しました。現在世界で製造される炭素繊維のうち約70%が日本製と言われています。

炭素繊維を強化材とした材料では、航空機で翼や機体の

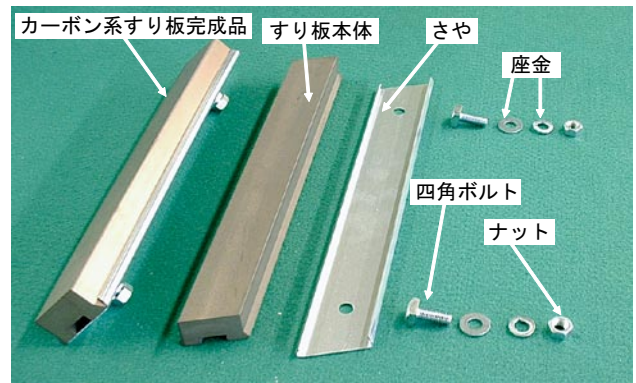


図3 カーボン系すり板の構成部品

軽量化のためにCFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics, 炭素繊維強化プラスチック)が使われています。CFRPは、炭素繊維を織ったり積層したもの(強化材)とプラスチック(母材)を組み合わせた複合材料で、繊維の種類、方向性、母材の種類を選定することにより様々な特性の材料を創り出せます。

炭素繊維を使った複合材料には、強化材が炭素繊維、母材がカーボンの「炭素繊維強化炭素複合材(Carbon Fiber Reinforced Carbon Composite, C/C複合材)」という材料もあります。C/C複合材は母材、強化材ともカーボンのため、カーボン系すり板と同様の摩擦摩耗特性が期待でき、炭素繊維の強化材が入っているため雌ねじ加工も可能で、新たなすり板として使える可能性が十分あります。

実はC/C複合材は、既に40年以上前から航空機やレーシングカーのブレーキディスクとして使われてきた実績があります。C/C複合材ディスクは、耐熱性も良好で、質量も鋼製ディスクの約半分であることがメリットです。ただ、これらの分野で使われるC/C複合材は高性能ですが非常に高価で、すり板のような小型の消耗部材とするには、相応の価格とすることが必要です。

C/C複合材をすり板に

C/C複合材をすり板に適用するには、曲げ強さ、衝撃強さ、抵抗率、耐摩耗性で現用すり板以上の性能が必要です。さらに、価格が現用すり板並みで、ねじで取り付けられることも重要です。

C/C複合材は製法により数種類ありますが、「プリフォームド・ヤーン法」によるものは製造コストが比較的安く、金属を含ませることが容易です。プリフォームド・ヤーン法では、1万本以上の炭素繊維を1束にし、それに炭素微粉末や金属粉末を加え、樹脂で被覆して直径約2mmの1本の糸(プリフォームド・ヤーン)にし、この糸と樹脂糸

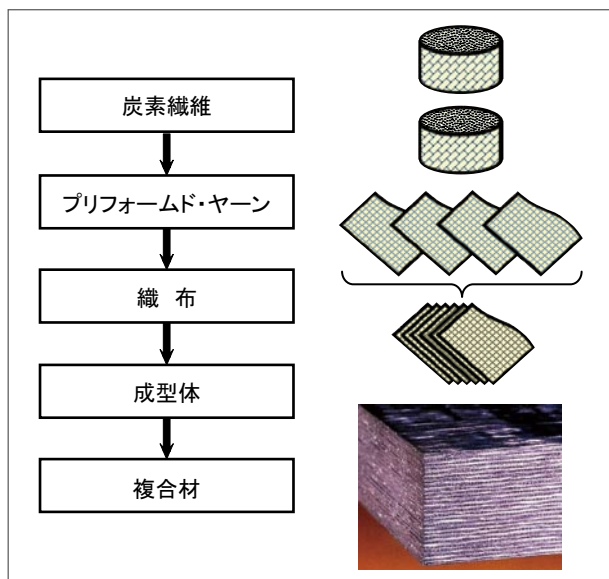


図4 プリフォームド・ヤーン法によるC/C複合材の製造方法

で平織の織布を作ります。織布を交互に積層し、加熱・加圧・成型し、成型体を約1,200度で焼成するとC/C複合材ができます。C/C複合材に銅合金を溶かして含浸すると、すり板に必要な導電性を持つC/C複合材となります(図4~5)。

この製法によるC/C複合材の物理特性を表1に示します。現用カーボン系すり板(金属含浸型・金属粉混合焼結型)と比較すると、抵抗率は若干高めですが、密度が小さくて軽く、曲げ強さや衝撃強さは2倍近くになっています。衝撃強さに幅があるのは、C/C複合材は織布を積層して製作するため、積層方向に垂直な方向と、水平な方向とで特性が異なるためです。

C/C複合材をすり板の使用条件を模擬した試験装置で摩擦した時の摩擦特性は図6のとおりです。すり板の摩擦は、機械的な摩擦によるものと、トリ線との間で電流を流すことに起因するものから成ります。後者では、トリ線とすり板とが離れた時に生じるアーク放電の影響が顕著で、通電しての摩擦実験では、すり板の摩擦量は実験中に発生したアーク放電の量にほぼ比例して増加することが知られています。C/C複合材すり板は、現用カーボン系すり板と比べ、アーク放電の量が増えてもすり板の摩擦量はあまり増えず耐摩擦性が高いことがわかります。一方、同じ装置で相手材側(トリ線側)の摩擦量を調べたところ、相手材側に対する影響は、現用カーボン系すり板と同等でした。

C/C複合材すり板をねじで取り付ける

C/C複合材はすり板として実用可能であるため、すり板にねじを切り、舟体に取り付けられるかを調べました。C/C複合材は織布を積層して製造されるため、方向性があ

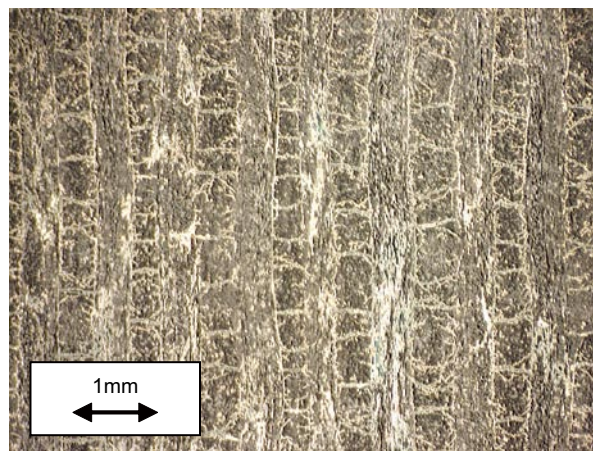


図5 C/C複合材すり板の断面組織

表1 在来線用すり板材料の物性比較

材 料	密度 (g/cm ³)	抵抗率 (μΩm)	曲げ強さ (MPa)	衝撃強さ (kJ/m ²)
焼合金	7.6	0.3以下	-	120
純カーボン	1.7	32	50	1.5
金属含浸型*	2.9	1.8	110	4.0
金属粉混合焼結型*	3.6	1.1	100	3.5
C/C複合材	2.5	2.8	195	6.2~7.6

※現用カーボン系すり板

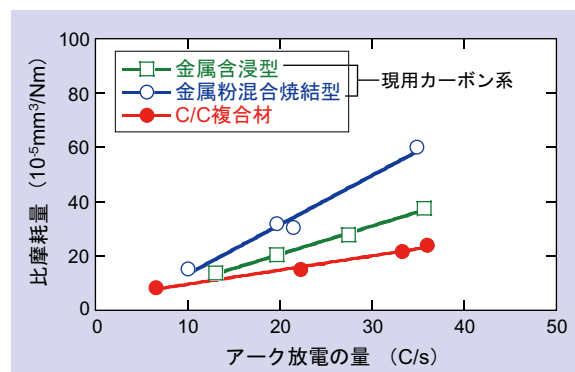


図6 現用カーボン系すり板とC/C複合材の摩擦特性の比較

ります。すり板としての摩擦方向と雌ねじを切る方向とは直交します。一般に、積層構造を持つ複合材料は層が剥かれるように壊れます。したがって、摩擦が少なく、かつ雌ねじが壊れにくい方向で使う必要があります。それぞれの方向で摩擦特性を調べたところ、層と垂直に摩擦するほうが摩擦が少ないとの結果が得られました(図7)。

C/C複合材すり板をねじで取り付けるにあたり、雌ねじ部分の強度を確認する必要があります。厚さの異なるすり板材料に雌ねじを切り、ねじ部分の長さを変えた試験片を製作し、ボルトを締め、荷重を加えて雌ねじが破壊する荷重を調べました。すり板の厚さが増すとねじ部分の長さ(有効ねじ長さ)が増し、ねじ山の破壊荷重は増えますが、そ

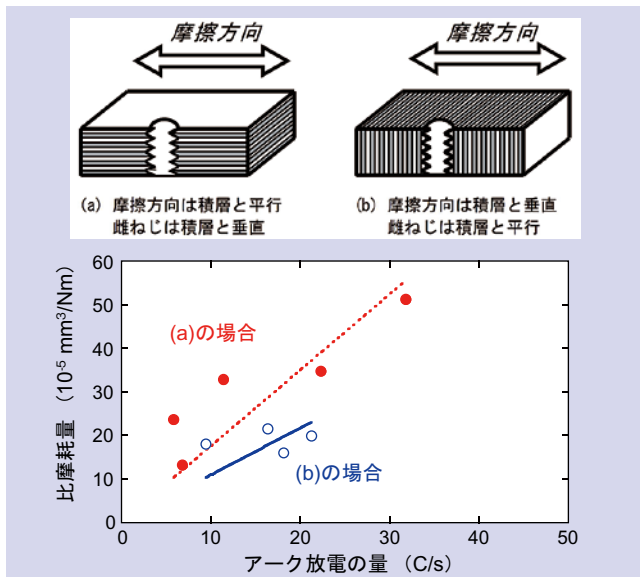


図7 C/C複合材の摩擦方向による摩耗特性の比較

の増加率はすり板材質によって異なっています。C/C複合材すり板は増加率が少なく、雌ねじの強度は小さいですが、雌ねじの長さが9mmあれば、銅系の焼結合金すり板の厚さ3mm（焼結合金すり板の摩耗限度厚さ）に相当する破壊荷重であることがわかります。したがって、C/C複合材すり板も9mm以上の厚さがあれば焼結合金すり板と同程度のねじ強度を確保できると言えます（図8）。

すり板をねじ止めで取り付ける場合、ねじ山（はめ合い）部が通電経路になり得ます。パンタグラフ1台あたり最大1,500A程度の電流が流れるため、すり板1列あたりで500A近い電流が流れる可能性があります。全ての電流がねじ部だけを流れると、ねじ山部の発熱や材料の劣化が起これ、ねじの破損や緩みの可能性もあります。そこで、ねじ部分のみに通電するよう回路を組み、直流400Aを通電してねじ部周囲の温度変化を調べました。その結果、温度上昇は約20度ですり板やボルトに影響がないことを確認しました。

以上の確認を経て、焼結合金すり板用のパンタグラフにC/C複合材すり板をねじ止めで取り付けました（図9）。現用カーボンすり板では、端部の補助すり板部分はアルミ合金を使うのですが、C/C複合材すり板では、補助すり板部分も含めて全てカーボン系材料で舟体しゅう動面を構成することができ、主すり板と補助すり板との間での摩耗異常の心配もありません。

実車でねじ止めC/C複合材すり板を使う

図9のねじ止めC/C複合材すり板を、実車に取り付け使ってみました。営業車で約10万km走行する間にねじ部の破損や緩みはありませんでした。使用後ねじを外して取付ボ

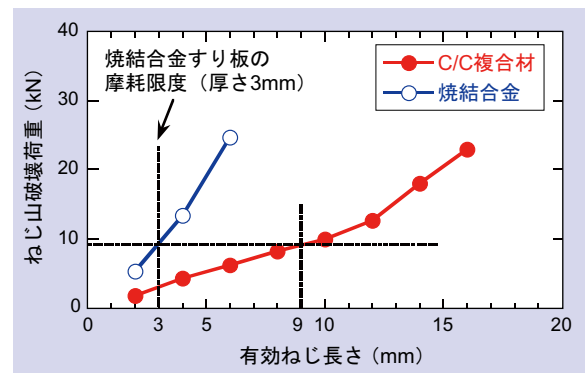


図8 雌ねじ長さともねじ山の破壊荷重

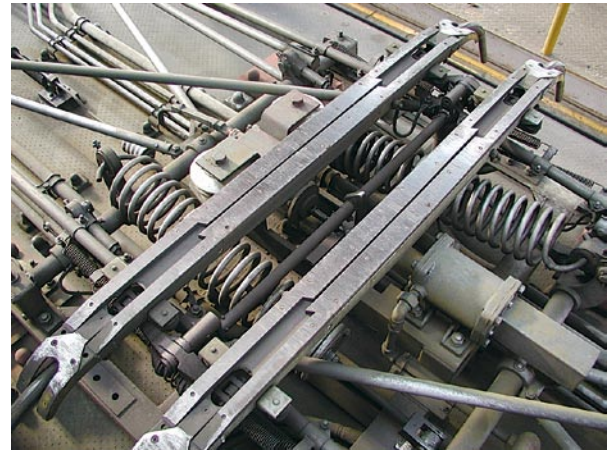


図9 C/C複合材すり板の実車への取付状況

ルトと雌ねじのねじ山部の断面の材料組織を観察した結果、異常は認められず、ねじ止めC/C複合材すり板が十分実用可能であることが確認できました。

ねじ止めC/C複合材すり板は、現在大手民鉄2社で実用化が進められています。また、JR会社でもねじ止めC/C複合材すり板用の舟体の検討が進められています。

新材料導入に伴う新たな課題

新材料のすり板への適用により現用材での課題は解決できましたが、一方で新たな課題もあります。例えば、材料組合せの変更による問題で、焼結合金すり板で使っていた取付ボルトをそのままC/C複合材でも使っていますが、取付ボルトの耐久性には懸念される点があります。そこで、C/C複合材をねじ止めするのに適した材質のボルトの検討が進められています。

おわりに

本稿では、新たな素材C/C複合材のすり板への適用について紹介しました。今後は、さらなる高強度化や耐摩耗性向上によって、新幹線を含む多くの車種で使える材質の開発を進めます。RRR