

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

# トロリー線やちょう架線にスーパー繊維を応用する

高強度、高弾性率を有するスーパー繊維には、さらに耐熱性、難燃性、低熱膨張など高い性能と機能を合わせ持つ材料があります。スーパー繊維を架線材料に応用することで、強度や弾性率が高いだけでなく、耐熱性や温度による伸縮が抑えられるなどの機能を兼ね備えた新しいタイプのトロリー線やちょう架線が実現できる可能性があります。本稿では、PBO繊維やカーボン繊維といったスーパー繊維を適用した架線材料の研究、開発例を紹介します。



**上條 弘貴**  
Hiroki Kamiyo  
車両制御技術研究部  
主任研究員  
【専門分野】電気工学、  
材料工学、超電導工学

## はじめに

高強度で高い弾性率を有するスーパー繊維には、さらに耐熱性、難燃性、低熱膨張、高熱伝導など高い性能と機能を合わせ持つ材料があり、さまざまな用途に応用できる可能性があります。特に、架線材料として、引張強度や弾性率が高く、比重が小さく、さらに新しい機能を兼ね備えた材料を実現できる可能性があります。

には約2GPa以上の高い強度と、約50GPa以上の高い弾性率を持つ繊維が「スーパー繊維」と呼ばれ、通常のポリエステル、ナイロン、アクリル繊維などの汎用繊維とは区別されていません(図1)。代表的なものには、有機系の「ケブラー®」などの商品名で知られるアラミド繊維、超高分子量ポリエチレン繊維、PBO(ポリパラフエニレンベンゾビスオキサゾール)繊維、ポリアリレート繊維や、無機系の「トレカ®」などの商品名で知られるカーボン(炭素)繊維などがあります。こ

## スーパー繊維<sup>1)</sup>

厳密な定義はありませんが、一般

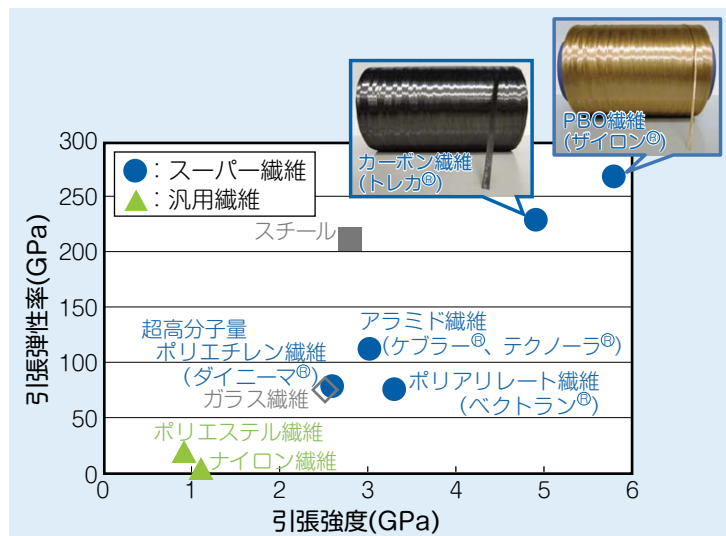


図1 代表的なスーパー繊維の強度，弾性率

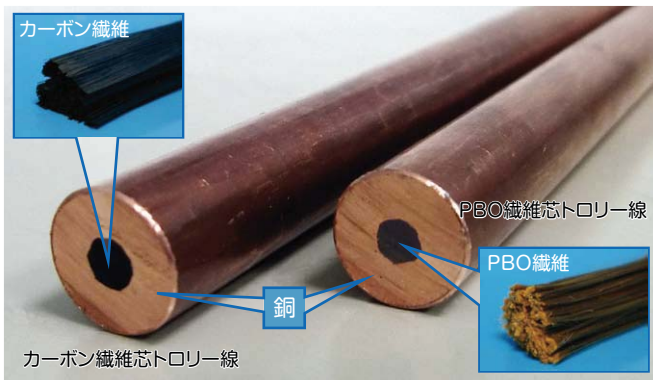


図2 PBO 繊維，カーボン繊維芯トロリー線

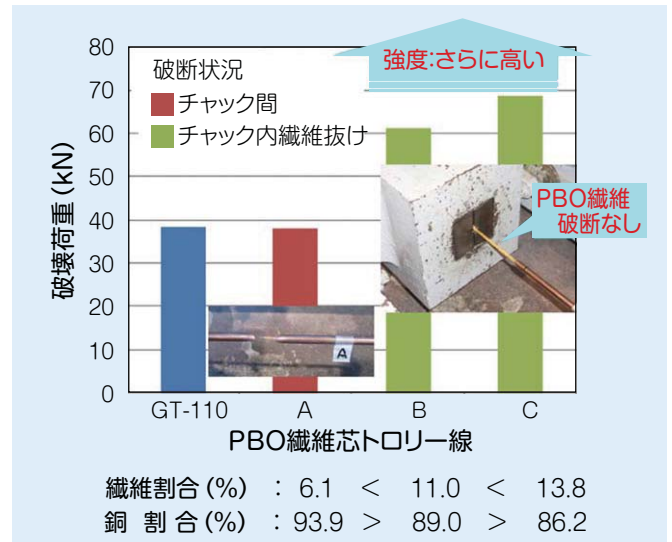


図3 PBO 繊維芯トロリー線の引張強度

したスーパー繊維は、一般に比重がスチール繊維の1/5程度と小さく、軽くて高強度な特性を生かして、土木建設資材、ロープをはじめ、タイヤなどのゴム補強材、耐切削用手袋などの防護衣料、光ファイバーの緊張材、飛行機の胴体などさまざまな用途に利用が広がっています。鉄道でも、高架橋柱の耐震補強をはじめ車体の一部部材として、アラミド繊維やカーボン繊維シートが使われています。

また、強度面の性能だけでなく、耐熱性に優れ燃え難い、温度変化に対して負の線膨張、高い熱伝導性などの特長を合わせ持つ繊維があります。これらの繊維は、高機能繊維、ハイテク繊維などとも呼ばれ、スーパー繊維本来の高強度、高弾性特性を活かした従来の応用だけでなく、さらに高い機能を兼ね備えた材料の開発も期待できます。

### 架線材料への応用

長尺な繊維材料で、引張強度や弾性率が大きく、比重も小さいスーパー繊維は、電線の補強材や光ファイバーの緊張材などに適用されており、鉄道分野においても架線材料への応用が期待されます。すでに、アラミド繊維の絶縁特性を活かして絶縁ちょう架線への応用などが検討されていますが、さらに

耐熱性や線膨張係数が抑制できるなどの機能を兼ね備えた新しいタイプの架線材料の研究、開発が進められています。

### 引張強度の向上<sup>2)</sup>

新幹線などでは、高速化にともない波動伝搬速度を向上させ離線の発生を抑える目的で、軽量かつ高強度なトロリー線が望まれており、CS（銅覆銅）トロリー線やPHC（析出硬化銅合金）トロリー線が開発されています。スーパー繊維は、密度が小さく、高弾性、高強度な材料なので、CSトロリー線の銅線をスーパー繊維に替えることで、より高強度で軽量なトロリー線を実現できる可能性があります。

スーパー繊維の中でも最高レベルの高強度、高弾性であるPBO繊維「ザイロン®」(図1)を銅線に替えて充填したPBO繊維芯トロリー線を試作しました(図2)。PBO繊維をはじめとする有機系スーパー繊維の多くは導電性を持たない絶縁物のため、絶縁ちょう架線などへの応用を除き、トロリー線、ちょう架線などに応用する場合には金属などの導電材料と複合して導電性を持たせる必要があります。有機系材料と金属系材料を複合する方法として、一般にエポキシ系接着剤などを

用いて接着することが考えられますが、耐熱性や接着硬化後の曲げ加工が難しいなど実用上の課題となります。そこで、銅パイプ中にPBO繊維を充填し、金型の径を減少させながら繰り返し高速回転させて絞るスエージング加工により、銅をPBO繊維に充分加圧して接着によらない機械的な方法で複合しました。直径は、GT110相当(12.5mm φ程度)で、充填するPBO繊維の割合を5から15%（断面積比）程度に抑え、銅の割合が85%以上と、CSトロリー線と比べ銅の割合を高くしました。

試作したPBO繊維芯トロリー線について、両端を引張荷重試験装置のチャックに直接挟んで固定し、破壊荷重を測定しました(図3)。その結果、PBO繊維の割合が5%程度では、従来のGT110トロリー線の破壊荷重とほぼ同じ40kN弱でしたが、充填されたPBO繊維数が多いほど向上し、繊維割合が10%程度でも引張強度は60kNを超えました。破壊状況も、チャックされた部分で銅のみが破壊しPBO繊維は破断せず抜けた状態で繊維自体は破断しておらず、CSトロリー線(65.1kN)やPHCトロリー線(59.0kN)と同等以上の高強度で、高導電性のトロリー線が実現できました。

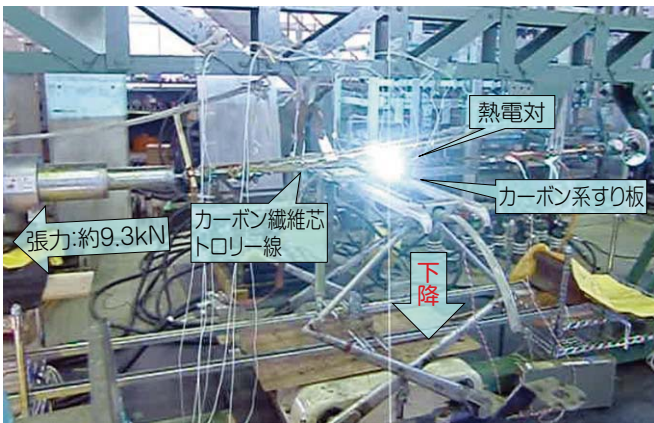


図4 カーボン繊維芯トロリー線の耐アーク試験

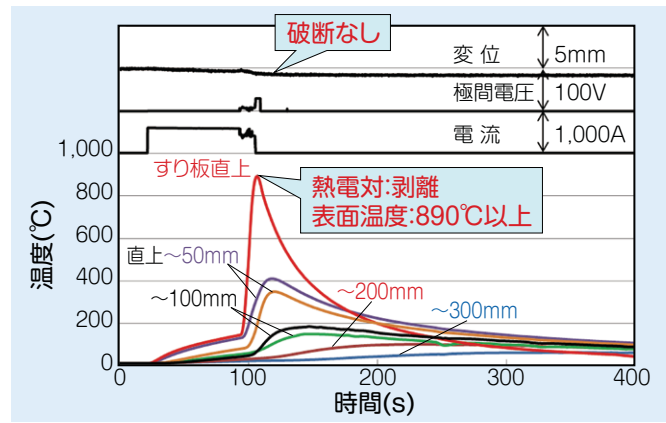


図5 耐アーク試験時の温度推移  
(通電電流：600A，下降速度：1mm/s-保持)

### 耐熱，耐アーク特性の向上<sup>3)</sup>

エアセクション箇所ではパンタグラフが接触した状態で電車が停止した場合、起動時の通電電流のためにトロリー線がアークやジュール熱により断線する事象が問題となっており、各種の対策が検討されています。もし、トロリー線自体の耐熱，耐アーク特性が向上できれば、通常の架線構成でも断線しにくいエアセクションを構成できる可能性があります。対策の一つとして期待されます。スーパー繊維の中で耐熱性が最も高く、高温においても高強度で温度に対する長手方向の伸びを抑制できるカーボン繊維を芯材とする手法が考えられます。そこで、PBO繊維芯トロリー線と同様に、銅パイプの中心部分にカーボン繊維を充填し、スエージング加工により機械的に複合したカーボン繊維芯トロリー線を試作しました(図2)。直径は、GT110相当(12.5mmφ程度)で、充填したカーボン繊維量は10から15% (断面積比)程度としました。

試作したカーボン繊維芯トロリー線について、カーボン系すり板との接触状態での通電および耐アーク試験を行いました。カーボン繊維芯トロリー線の片端をばね式張力調整装置で把持して架設し、低電圧大電流試験装置から電流を供給して、舟体上にカーボン系すり板(メタライズドカーボン)を1枚

取り付けしたパンタグラフ(PS201，押上力54N)に通電しました。

通電試験では、約400Aで8分程度，約600Aで6分程度，さらに800Aで1分程度の通電を順次実施しました。通電により、カーボン繊維芯トロリー線とすり板

の接触部では赤光が見られ、表面の最高温度が400°C以上に上昇しましたが、軟化による大きな伸びは見られず、破断などの異常は認められませんでした。

耐アーク試験では、通電状態からパンタグラフを徐々に下降させ、カーボン繊維芯トロリー線とすり板との間に離隔を作り、アークを発生させました(図4)。その結果、600A通電においてアークをできるだけ継続させた場合、アークエネルギー73kJ，表面温度890°C以上(実際には銅の溶融温度1,085°Cに達する)に上昇して銅が大きく溶解しましたが、カーボン繊維が露出してもトロリー線が破断することはありませんでした(図5，6)。カーボン繊維を芯材とすることで、トロリー線の耐熱，耐アーク特性が向上し、高温でも切れにくいトロリー線として、エアセクションに適用できる可能性があることを確認しました。

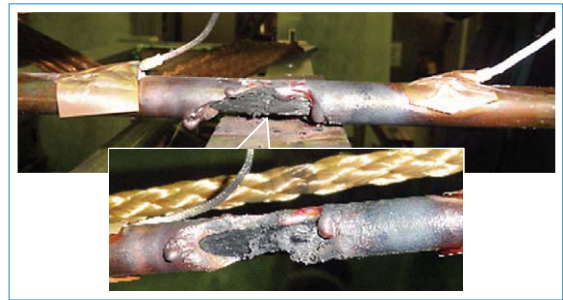


図6 耐アーク試験後のカーボン繊維芯トロリー線  
(通電電流：600A，下降速度：1mm/s-保持)

### 温度による伸縮を抑える<sup>4)</sup>

物質は、温度の変化により長さや体積が変化するため、温度変化が大きい場合や長尺な場合にはその影響が大きくなります。レールや電車線路は長尺であり、特にトロリー線，ちょう架線などの架線材料では、外気温の変化や通電にともなう温度上昇などにより大きな伸縮が発生します。この伸縮を吸収して張力を一定に保つことが、敷設や保守管理において重要な課題であり、設備の簡素化や省メンテナンスのために、線膨張係数の小さい材料の適用が考えられます。電力分野では、通電による架空送電線の発熱や外気温の温度変化による伸縮の影響を抑えるため、線膨張係数が小さいインバ合金やカーボン繊維と熱硬化性樹脂を複合し撚り合わせて成形したCFCCケーブルを芯線とした低熱膨張の送電線がすでに開発されています。

スーパー繊維も、その分子構造など

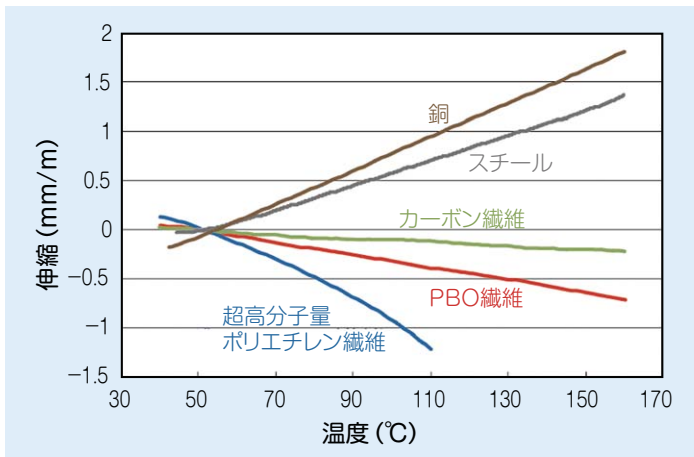


図7 スーパー繊維の線膨張特性

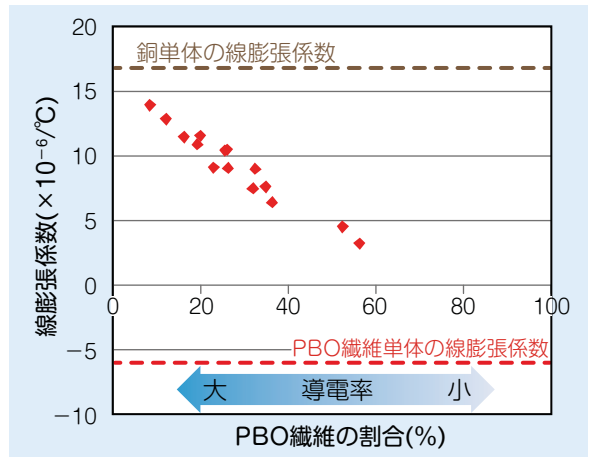


図8 PBO 繊維芯トローリー線の線膨張係数

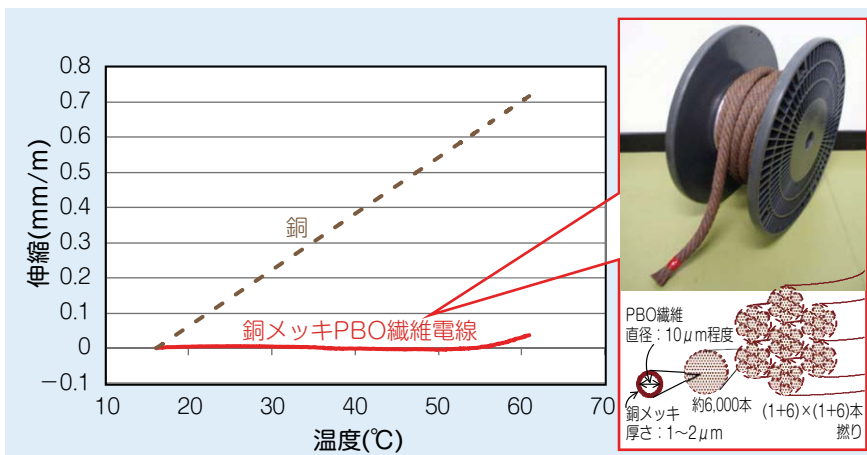


図9 銅メッキPBO繊維電線の線膨張特性

から繊維方向の線膨張係数が小さい特性を持つ繊維があります(図7)。特に、PBO繊維は大きな負の膨張特性を持ち、弾性率が高く、耐熱性もあることから、線膨脹係数を抑えるためには有用な材料です。そこで、機械的に銅とPBO繊維を複合したPBO繊維芯トローリー線や、き電ちょう架線、き電線などへの応用を考えPBO繊維1本毎に銅をメッキにより複合して撚り合わせた銅メッキPBO繊維電線を試作しました。

線膨脹係数は、銅とPBO繊維の複合割合により銅単体とPBO繊維単体の間の値に制御でき、PBO繊維の割合を大きくすると小さくなります。

例えば、PBO繊維の割合を変えて試作したPBO繊維芯トローリー線の線膨脹係数は、PBO繊維の割合を25～30%に増やすと銅の半分程度に、60%

程度まで増やせば1/5程度となり、温度変化による伸縮の少ないトローリー線が実現できました(図8)。

また、き電ちょう架線を模擬して、厚さ1～2μmの銅をメッキしたPBO繊維を撚り合わせて直径16mm程度の銅メッキPBO繊維電線を試作し、実際に通電して温度変化を与えて伸縮を測定しました。その結果、温度変化による伸縮がほとんどない低熱膨脹電線が実現できました(図9)。銅の付着量は、メッキの処理時間、条件により変わり、PBO繊維1本の直径10μm程度に対して、銅の厚さを1μm以下から5μm以上に制御することができます。銅メッキにより、PBO繊維に導電性が付加され、また、線膨脹係数を調整できます。なお、繊維本来の柔軟性は保持され、撚線する際の加工性低下などの問題もありませんでした。

### おわりに

PBO繊維やカーボン繊維といったスーパー繊維を使った架線材料への適用例を紹介しました。スーパー繊維は、汎用の繊維と比べて現状では高価で、用途展開の課題となっています。しかし、スーパー繊維の特徴を活かして、用途、仕様、条件、使用環境などに合わせて、使用する繊維量を低減することや、付加価値の高い新しい特性を持った材料を実現できる可能性があります。紹介したPBO繊維やカーボン繊維だけでなく、アラミド繊維をはじめとした各種のスーパー繊維を含めて、今後の応用展開が期待できます。

RRR

### 文献

- 1) 上條弘貴：スーパー繊維を鉄道に応用する，RRR，2011.11
- 2) 上條弘貴：銅-PBO繊維複合トローリー線模擬材料の引張強度，平成24年電気学会全国大会，5-062，2012.3
- 3) 上條弘貴，赤木雅陽，菅原淳，久須美俊一，川口育夫：カーボン繊維芯トローリー線の耐熱，耐アーク試験，平成24年電気学会産業応用部門大会，5-16，2012.8
- 4) 上條弘貴：PBO繊維-銅複合低熱膨脹材料の開発，電気学会交通・電気鉄道/リニアドライブ合同研究会資料，TER-07-32/LD-07-28，2007.7