

# スーパー繊維を鉄道に應用する



かみじょう ひろき

上條 弘貴  
車両制御技術研究部(主任研究員)

## はじめに

日本では、高い性能と機能を持つ繊維の開発が盛んに行われています。その技術水準は世界的に高く、産業資材用途を中心に応用が進められています。なかでも、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。

## スーパー繊維とは

厳密な定義はありませんが、一般には約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す。代表的なものには、図1のような有機系のパラ系アラミド繊維、超高分子量ポリエチレン繊維、PBO繊維、ポリアリレート繊維、無機系の炭素繊維などがあります。

例えば、「ケブラー®」などの商品名で知られるパラ系アラミド繊維は、同じ重量の繊維で比較した場合、引張強度はスチール繊維の約5倍、ポリエステル、ナイロン繊維の約3倍になります。一方、比重はスチール繊維の1/5程度

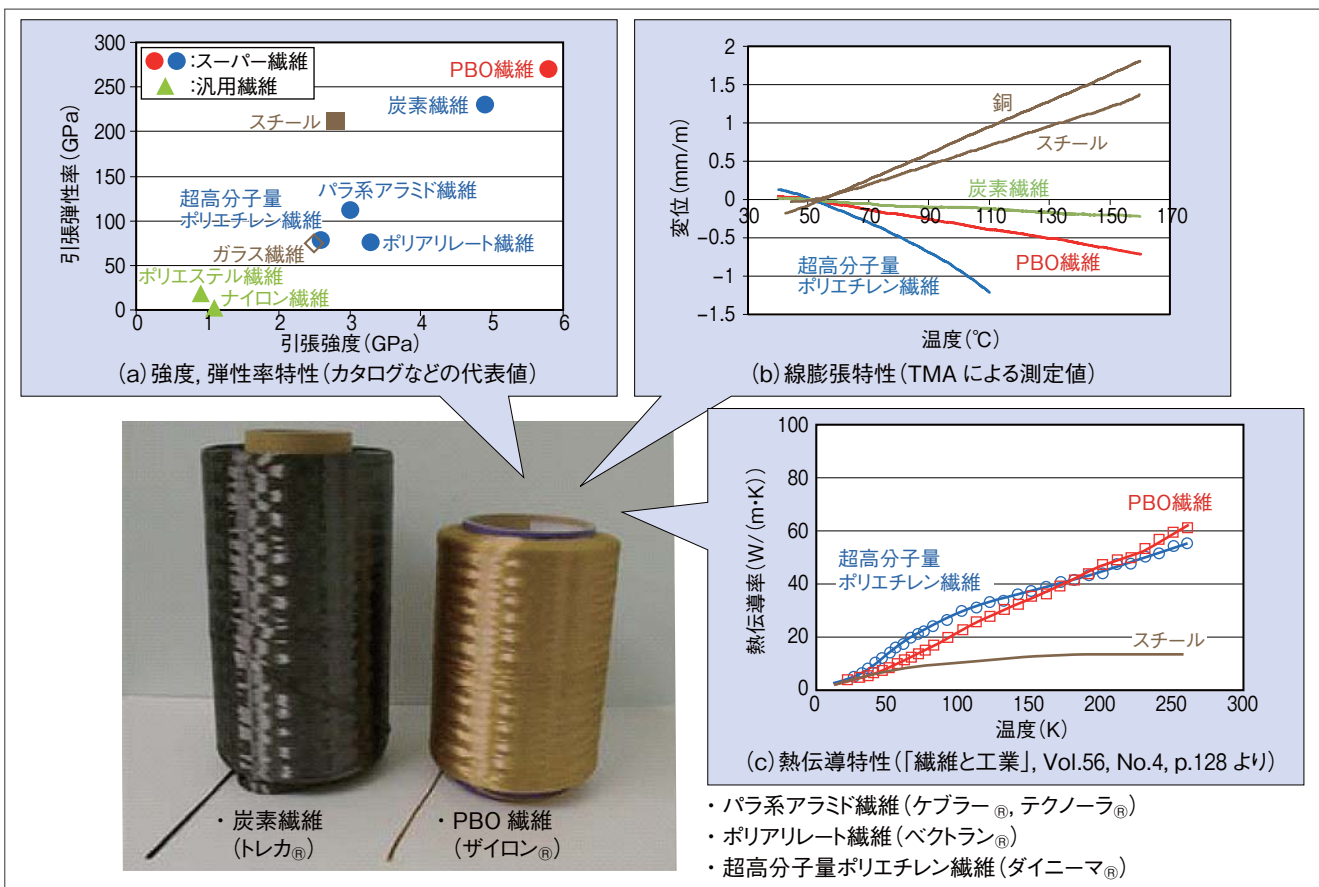


図1 スーパー繊維とその特性例

と小さいので、軽量化に寄与します。土木建設資材、ロープをはじめ、ベルト、ホース、タイヤなどのゴム補強材、防弾チョッキや耐切創用手袋などの防護衣料、光ファイバーの歪による光損失を抑えるための緊張材などとして使用されています。鉄道でも、高架橋柱の耐震補強のためにアラミド繊維や炭素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、燃え難い材料や、負の線膨張特性、高熱伝導特性を合わせ持つ繊維があり、これらの繊維は、高性能繊維、ハイテク繊維、ハイパフォーマンス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、さらに高い機能性を付加した材料の開発も期待できます。

## PBO繊維

スーパー繊維の中で、PBO（ポリパラフェニレンベンズオキサゾール）繊維は、パラ系アラミド繊維と比べてさらに約2倍の強度と弾性率があり、単位体積あたりの強度、弾性率でもスチール繊維を大きくしのぎ、有機系繊維では最も強い繊維で、一般には商品名である「ザイロン®」として知られています。

この繊維は、分解温度がパラ系アラミド繊維より約100℃高い650℃で、有機系繊維中最高レベルの耐熱性、難燃性があります。また、温度が上昇すると通常とは逆に繊維方向には縮み（線膨張係数が負）、有機系繊維でありながら熱伝導率がスチール以上に高いなどの機能性を持っています。もちろん、有機系のため絶縁性があり、比重も1.56程度とスチールに比べて軽量といった特性は変わりません。このような特性を活かして、温度変化による伸縮が問題となる長尺な電線、トロッコ線材料や、絶縁性を持った電子機器中の放熱材料への適用に向けた複合材料の研究開発を進めているので紹介します。

## 線膨張を抑える

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などは、その影響が大きくなります。鉄道では、レールやトロッコ線、吊架線は長尺なため温度変化による伸縮が大きく、また、超電導磁気浮上式鉄道に搭載される超電導機器では、極低温に冷却するために室温との大きな温度差による熱収縮が大きく、対策が必要となります。

線膨張係数の小さい材料には、インバ合金、炭素繊維などの材料があります。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、インバ合金、炭素繊維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。

有機系のスーパー繊維も、その分子構造などから繊維方向の線膨張係数が小さい特性があります。特に、図1(b)のように、PBO繊維は $-6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度、超高分子量ポリエチレン繊維は $-12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度の大きな負の膨張特性があります。なお、超高分子量ポリエチレン繊維は、PBO繊維と比べて、大きな負の線膨張係数を持ち、比重も小さいですが、強度、弾性率は小さく、分解温度も低いいため、適用先に注意する必要があります。

## (1) 永久電流スイッチ用巻軸

超電導磁気浮上式鉄道などで使用されている超電導コイルに流れる永久電流の開閉を行う永久電流スイッチでは、超電導線の母材として銅の代わりに電気伝導率の低い銅合金(CuNi)を使っているため超電導状態の安定性が低く、外乱による常電導転移が発生しやすくなります。それは、室温から液体ヘリウム温度( $-269^{\circ}\text{C}$ )に冷却されたときの超電導線と巻軸との熱収縮の差により、巻軸から超電導線が剥離したり、移動しやすくなるためと言われていました。

その対策として、冷却による熱収縮の小さいFRP（繊維強化プラスチック）を使用することが有効と考えられ、その候補として超高分子量ポリエチレン繊維を強化繊維とした巻軸が検討されました。各種FRPを用いた巻軸評価用コイル（図2）について、巻軸の周方向の熱収縮率と通電時の安定性を測定しました。ガラス繊維を用いた一般の巻軸に比べ、超高分子量ポリエチレン繊維を用いた場合は、室温から液体ヘリウム温度までの熱収縮量が約1/5に低減されました。その結果、通電安定性も良好であり、臨界電流値近くまで通電可能で、安定性の向上が確かめられました。

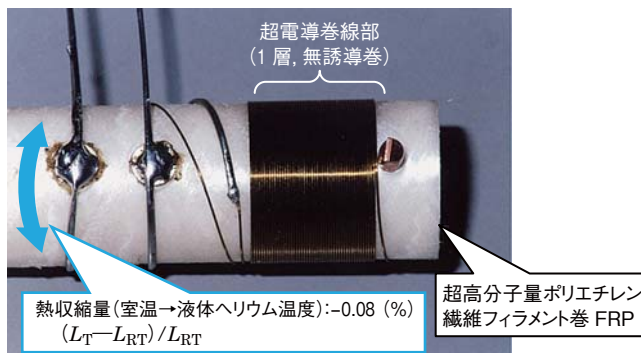


図2 超高分子量ポリエチレン繊維を用いた巻軸評価用コイル

## (2) 架線材料

トロッリ線、吊架線などの架線に使われる線状材料では、外気温の変化や通電に伴う温度上昇などにより伸縮が生じます。この伸縮を吸収して張力を一定に保つため張力調整装置を設置し、管理、調整する必要があります。敷設や保守管理において課題となります。そこで、熱伸縮に伴う架線支持部構造への影響を低減し、設備の簡素化や省メンテナンスといったニーズに応えるため、線膨張係数の小さい材料の応用が考えられます。

PBO繊維は、大きな負の膨張特性を持ち、さらに、比重が小さく、引張強度や弾性率も高く、耐熱性であるため、有用な材料と考えられます。一方、導電性を持たない絶縁物のため、絶縁吊架線などへの応用を除き、トロッリ線、吊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付与する必要があります。有機系材料と金属系材料を複合する場合は、一般的にエポキシ系接着剤などを用いた接着による方法が考えられますが、耐熱性や、接着硬化後の曲げ加工が難しいなどの実用上の課題が考えられます。そこで、接着によらない方法でトロッリ線および吊架線、電線を模擬した複合線材を試作しました。

### (i) トロッリ線を模擬した

#### 複合線材

トロッリ線への応用を考え、銅の中心にPBO繊維を配置した複合線材を試作しました(図3)。銅パイプ中にPBO繊維を充填して金型を高速回転させて絞り加工を行うことで、接着剤を一切用いることなく機械的に複合しました。金型の径を減少させながら繰り返し加工して充分に加圧することにより銅とPBO繊維を複合し、線膨張係数を小さくすることができました。図4に示すように、線膨張係数は、PBO繊維の割合が増えると反比例して減少し、PBO繊維の割合を25~30%に



図3 機械的に銅とPBO繊維を複合した線材



図5 銅メッキPBO繊維撚線

すると銅の半分程度になります。さらに、70%程度まで増やせばほぼ0となり、温度変化による伸縮のない線材が実現できます。しかし、線膨張係数を抑えると銅の割合が少なくなるため、導電率は小さくなります。

熱伸縮特性改善の他に、PBO繊維が持つ機械特性などから以下のような効果も期待できます。

- 銅線に比べると比重は1/5程度と小さく、軽量化。
- 対衝撃特性が高く、エネルギー吸収部材として使用されるので、振動特性向上。
- トロッリ線交換後の処理において、芯材が有機材料であるため銅との分離が容易になり、リサイクル性向上。

### (ii) 吊架線、き電線を模擬した複合線材

き電吊架線やき電線などの電線への応用を考え、繊維の特性を活かしつつPBO繊維に導電性を持たせる方法として、PBO繊維1本毎に銅をメッキして、銅を表面に直接付着させました。銅の付着量は、メッキの処理時間、条件で制御できます。PBO繊維1本の直径は10数 $\mu\text{m}$ と非常に細く、メッキする銅の厚さは1 $\mu\text{m}$ 以下から5 $\mu\text{m}$ 以上まで自由に調整することができ、PBO繊維と銅の割合を変えることで、線膨張係数を銅とPBO繊維の単体の間の値

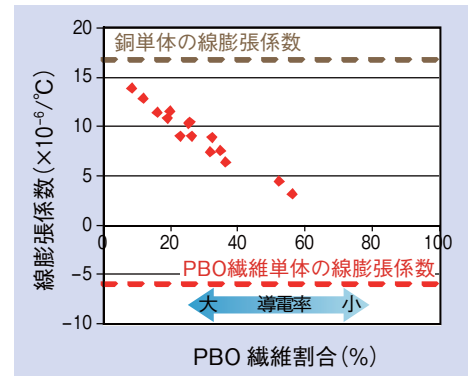


図4 線膨張係数の変化

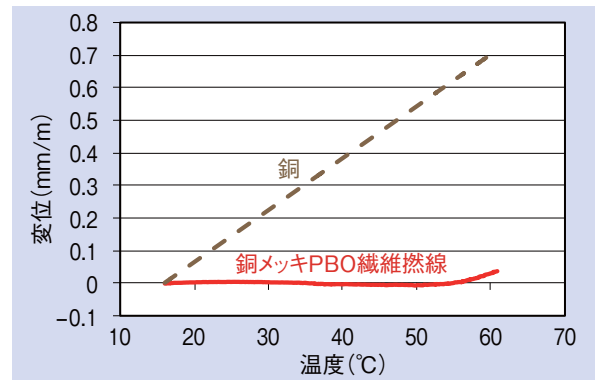


図6 線膨張特性

に調整できます。銅メッキにより、導電性が付加されますが、繊維本来の柔軟性は保持され撚（より）線などの加工もできます。

従来の吊架線の仕様を模擬して、厚さ1-2 $\mu$ mの銅をメッキしたPBO繊維を撚線し、直径16mm程度の撚線を試作しました(図5)。この撚線は、銅の割合が少なく、導電率は比較的小さくなりますが、実際に通電することで温度変化を与えて伸びを測定した結果、図6のように、温度変化による伸縮がほとんどない低熱膨張線材が実現できました。

### 熱伝導を向上する

近年、電子機器では小型化、高密度化、高性能化が進み、電子部品から発生する熱の処理が重要な課題とされ、高熱伝導の金属、セラミック、炭素などを用いたグリースや基板といった熱伝導材料の開発が進められています。有機材料のうち、これまで一般的に用いられている非晶性高分子は、金属や半導体に比べて熱伝導率は小さいとされ、主に断熱材としての応用が考えられてきました。しかし、スーパー繊維のように、結晶性高分子は高い熱伝導性を持つという報告があります。実際に、PBO繊維や超高分子量ポリエチレン繊維は、図1(c)のように、繊維方向にスチール以上の高い熱伝導率を示します。特に、PBO繊維は、絶縁性のもとより、高耐熱、難燃、低熱膨張などの特性があり、各種の機能を付加できる放熱材料としての応用が期待できます。

そこで、PBO繊維を用いて、半導体素子と冷却フィンとの間などの熱伝達を向上するための放熱シート、および半導体素子内や回路基板への適用を考えた基板を試作しました(図7)。

放熱シートは、平織したPBO繊維クロスを1枚および2枚重ねにして、作業性、密着性を考慮してエポキシ樹脂を塗布し、半硬化状態のシートにしました。基板は、平織したPBO繊維クロスを6枚重ね、エポキシ樹脂を塗布して、真空中で加圧しながら熱硬化させて板状にしました。

試作した放熱シートおよび基板の熱伝導率を測定した結果、PBO繊維方向である面内では10W/(m $\cdot$ K)程度の高い熱伝導率が得られることが確認できました。しかし、PBO繊維と直交する厚さ方向では、繊維の寄与がほとんど見られず、熱伝導率はエポキシ樹脂と同程度の0.3W/(m $\cdot$ K)程度と低く、大きな異方性がありました。そこで、図8のように、PBO繊維クロスに起毛処理を行い、繊維を毛羽立たせることで厚さ方向の繊維を増やし接触状態を向上させ、厚さ方向の熱伝導率の向上を試みまし

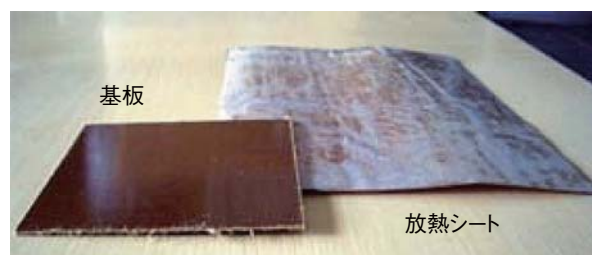


図7 PBO繊維クロスを用いた放熱シート，基板



図8 起毛処理によるPBO繊維クロスの変化

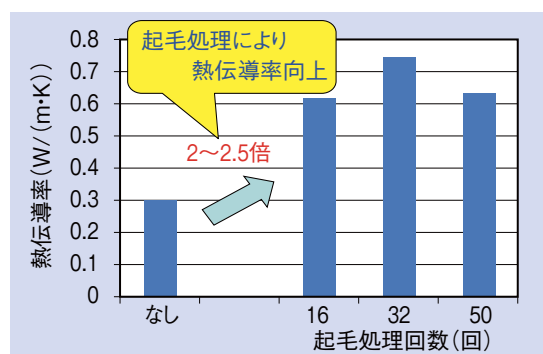


図9 放熱シートの厚さ方向の熱伝導率

た。起毛処理により、PBO繊維の一部が毛羽立ち、厚さ方向に貫通することで、図9に示すように、厚さ方向の熱伝導率が処理前の2倍以上に向上することが確認できました。なお、試作した放熱シート、基板は、有機系繊維とエポキシ樹脂のみで構成されるため、高い絶縁性と低い誘電率を持つ材料になります。

### おわりに

PBO繊維を中心にスーパー繊維の新しい鉄道への応用検討の例を紹介しました。スーパー繊維は、残念ながら汎用の繊維と比べてコストが著しく高く、用途展開の障害となっています。しかし、スーパー繊維の特徴を活かし、付加価値の高い材料が実現できる可能性があり、PBO繊維だけでなく、炭素繊維やアラミドをはじめとした各種の有機系スーパー繊維を含め、用途、仕様、条件、使用環境などに合わせて今後の応用展開が期待されます。[RRR]