

写真のタイヤは最新の高性能タイヤ。レースで使用されるタイヤ溝パターンを市販タイヤに採用。剛性を最適化することで旋回性を向上させている。また濡れた路面での高い運動性能も実現している。(写真提供: (株)ブリヂストン)

極限強度への挑戦 タイヤ用スチールコード

走る、曲がる、止まる。自動車の性能はタイヤの性能に左右される。今日の高性能なタイヤに高強度なスチールコードは欠かせない補強材となっている。近年ではタイヤのさらなる性能向上、軽量化を図るため、スチールコードのいっそうの高強度化が進行しており、引張強度4,000MPaを超える材料の研究開発が進行している。

タイヤに不可欠な補強材

2008年、オリンピック開催を迎える中国では高速道路網が拡大し、急速なモータリゼーションが進展している。これに伴い自動車が普及し、タイヤ補強材として使用されるスチールコードの需要が高まっている。このような中国をはじめとしたアジア地域、南アメリカ、アフリカ、ロシア等の需要増を受けて、スチールコードの生産能力増強が進められている。

スチールコードとは、極細の高炭素鋼線を撚り合わせたもので、主にタイヤ補強用に使用されているが、その他、コンベアベルト等、様々な工業分野に用いられている。

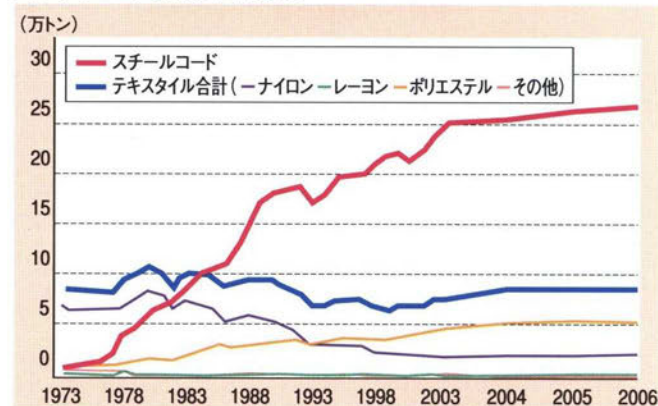
タイヤ補強用に使用されるスチールコードは、一般的な乗用車のタイヤ1本(5~15kg)に重量あたり10%程度使用されている。これによってタイヤの耐摩耗性や耐久性、操縦安定性が向上する。

タイヤ用スチールコードの歴史は古く、1937年に仏ミシュラン社によって「メタリック」と呼ばれるタイヤが開発され、これが世界初のスチールコードを使用したタイヤ^{*}となる。しかし当時は道路環境が悪く、スチールコードの特長はあまり生かせなかったようだ。

スチールコードが登場する以前は、タイヤ補強材は木綿に始まり、

レーヨン、ナイロンといった有機繊維が用いられていた。しかしこれらの補強材は、ほとんど引張軸方向にしか強度と剛性を持たないという欠点がある。一方、スチールコードは有機繊維コードに比べ数倍~数十倍の強度と弾性を持ち、さらに曲げ、せん断、圧縮方向に強度と剛性を有している。しかも線材の直径、撚り角度等を変化させることにより、ある程度それらを制御することが可能である。このような優れた特性から、現在ではスチールコードは乗用車、トラック、バス、建設車両用等のタイヤに多用されている。

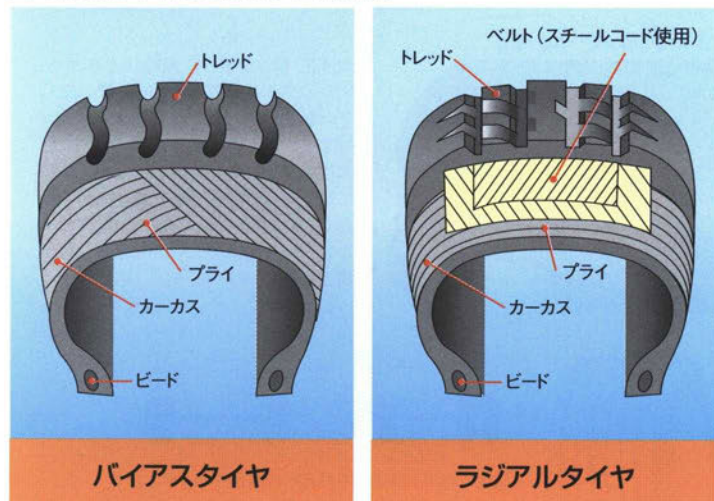
■タイヤコード材消費量の推移



(出典: (社)日本自動車タイヤ協会資料より)

^{*}初めてスチールコードを使用したタイヤはバイアスタイヤで、ラジアルタイヤには1946年に地下鉄用タイヤに使用されたのが初となる。

■バイアスタイヤ、ラジアルタイヤの構造



スチールコードとゴムの接着性向上

スチールコードの登場によってタイヤの耐摩耗性や耐久性、操縦安定性は大幅に向上したが、スチールコードとゴムとの接着性の向上が望まれていた。タイヤは繊維強化ゴム（FRR, Fiber Reinforced Rubber）でつくられているが、スチールコードとゴムは接着しにくく、ラジアルタイヤが本格普及し始めた1970年代には接着不良によるベルト部のはく離が多発した。そのため、長年スチールコードとゴムの接着性向上について研究開発が進められてきた。

現在、線材の表面には黄銅（Cu60～70%、Zn30～40%）めっきが施され、これがゴムとスチールコードの接着の役割をする。接着機構は、Cuとゴム中のSが結合して界面に硫化銅を形成することによる。Znは、ZnOを形成し接着反応性を制御する働きがある。Cuの含有率が高いほどSとの反応性は高まるが、高すぎると脆い反応生成物の層が厚くなるため接着阻害となることがわかっている。一方Znは酸化しやすく、水との反応性が高い。そのため現在では低Cu黄銅の薄膜めっきを使用し、また使用中に水分がタイヤ内部に浸透するのを防ぐ工夫もなされており、乗用車のタイヤ等で接着不良を起こす心配はほとんどなくなっている。



ラジアルタイヤにおけるスチールコードの役割

スチールコードはタイヤ内部でどのように使用されているのだろうか。乗用車用タイヤは、大別してバイアスタイヤとラジアルタイヤの二種に分かれる。二つともタイヤの内側には「カーカス」と呼ばれる骨格部がある。カーカスは「プライ」と呼ばれるポリエステルやナイロンでできた繊維層があり、この繊維層の向きが斜め（Bias）に交互に重ね合わせたものがバイアスタイヤで、円周方向に直角に、つまり放射状（Radial）に配列されたのがラジアルタイヤである（上図参照）。

ラジアルタイヤのカーカスは、バイアスタイヤのように繊維層が交差しておらず、直線状であるため剛性が低く、タイヤの内圧でトレッド（溝付ゴム部）が膨らんでしまう。そこでトレッドを抑えるために、ベルト（補強帯）がカーカスの上に付与されている。例えるなら桶の箍^{たが}のようなものだ。そしてこのベルトに、スチールコードをすだれ状に組み合わせたものが使用されている。乗用車用タイヤのベルトは2枚重ねて使用する事が多い。スチールコードは、ラジアルタイヤのベルト部において、圧力容器であるタイヤの内圧や回転によるせり出しを抑え（箍効果）、車両の荷重に耐え、かつ走行時における外力からタイヤの破壊を防止する等の働きをしている。

一方、バイアスタイヤは繊維層が交差し剛性体となっているためベルトを必要としないが（カーカス保護部材は必要となる場合がある）、動きのロスが多く転がり抵抗が比較的高い。ラジアルタイヤは柔らかいカーカスが余分な動きの伝播を抑制するため、動きのロスが少なく転がり抵抗が低い。燃費も良好となる。柔軟なカーカスと高剛性なスチールコードを兼ね備えたラジアルタイヤは、現在では乗用車をはじめとして多くの自動車タイヤの主流となっている。

■用途別スチールコードの撚り構造

使用区分	スチールコード構造
乗用車用コード	
トラック・バス用コード	
建設車両用コード	

操縦安定性の向上、軽量化をめざした取り組み

スチールコードは極細の素線（フィラメント）が複数本撚り合わさって構成されている。用途にあわせて異なる撚り構造が用いられており、乗用車のタイヤでは1回の撚りから成る「単撚り」が多い。単撚りは、剛性としなやかさを持ち、高い操縦安定性が得られる。トラックやバスのタイヤでは、中心部から層状に2層以上周囲に巻きつけ

■新しいベルト構造の例

●軽量化を目的とした新ベルト構造



●高強度化を図ったベルト構造



低床化、荷台容積の拡大を図るため、最近、トラック等では偏平タイヤの装着が増えているが、偏平タイヤは標準タイヤに比べて小さい容積に標準タイヤ同等以上の空気量を充填する。そのため高い内圧に対し、ベルトはさらに強い「押し付け」(箍効果)が必要となる。これに対応しスチールコードを波状にし、ベルト部を強化した構造も登場している。



強固なベルト構造等を採用した超偏平タイヤは、高付加荷重に対応でき、大型トラックやバスにおいて従来片側2本あった複輪タイヤを1本に減らすことが可能となっている。これによりタイヤ総重量の大幅な低減が実現している。

(資料提供: (株)プリヂストーン)

「層撚り」が用いられている。層撚りは強度が高く、高内圧下における箍効果に優れている。また、より強度の高い撚りコード数本をさらに撚り合わせた「複撚り」もある。

最近では、複撚りを層撚りへ、3層撚りを2層撚りへ、撚り構造の簡素化が積極的に進められている。

乗用車用タイヤの操縦安定性の向上が追求されるなかでは、ベルトも路面からの入力に対し変形して力を伝達する必要がある。このとき細くてしなやかなスチールコードをベルト部材に適用すれば、路面追従性が向上し、良好な操縦安定性が発揮できると言われている。

さらに近年高まっているのが、燃費低減をめざした軽量化要求である。コードの撚り構造が簡素化できれば、素線や素線に接するゴム量の低減が図れ、さらなる軽量化が可能となる。最近ではもう一歩進んで、素線を撚り合わせることなく、素線単体を束にして配置するなど、新しいベルト構造の提案も行われている。この構造は、素線を撚り合わせないことで素線や素線に接するゴム量を低減し、従来比15%の軽量化を実現している。このようなスチールコードの簡素化要求に対応するため、材料の高強度化は従来に増して重要な課題となっている。

強伸線加工に耐える線材

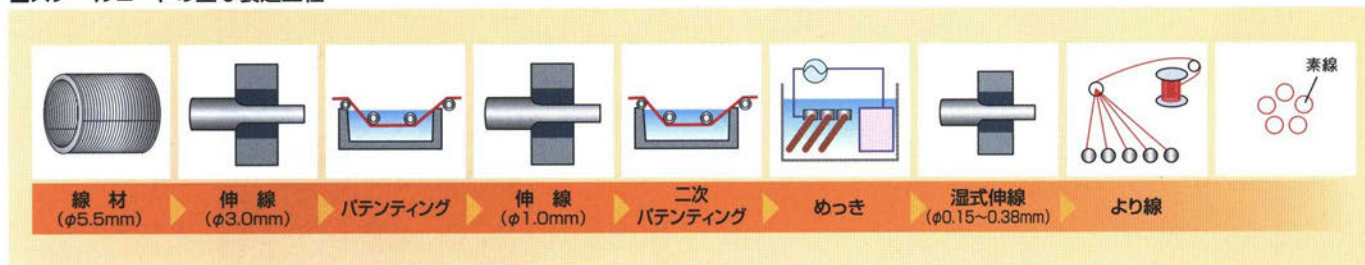
スチールコードの素線は、次のような工程で製造される。まず直径5.5mmの圧延線材をスケール除去、皮膜処理して、約3mmまで伸線して細くする。次に「パテンティング」と呼ばれる熱処理

を施す。これは線材を加熱し、鋼中に存在するフェライトとセメント組織をオーステナイトに変化させ、その後、急冷してパーライト変態を起こさせる。そして、このパーライト鋼を伸線して約1.0mmまで細くする。そして二次パテンティングを施し、めっきした後、湿式伸線で約0.15～0.38mmの所定の線径まで仕上げる。断線を防ぐため段階的に細くしていくのが特徴的だ。総減面率90%以上の強伸線加工である。

この強伸線加工によって、線材の強度は飛躍的に高まる。パーライト鋼を伸線加工すると強度が上がるメカニズムの全てが明らかとはならないが、要因の一つに細粒強化が挙げられる。パテンティング後、鋼中のフェライト、セメントの結晶方向は不規則であるが、伸線加工すると結晶方位が伸線方向に揃う。圧延後に結晶方位が揃うのは鋼材共通の現象であるが、線材ではダイスによる伸線で高圧力がかかるため、結晶は伸線方向にしか向くことができず、セメント相同士の幅(ラメラ間隔)が均等に狭まり、強度が飛躍的に増すのである。そのため使用される線材は、パテンティングや伸線加工など、加工工程を十分に考慮した材料開発が重要となる。

また、加工工程においては、材料の清浄度も高いレベルが要求される。強伸線加工に加えて、その後の撚線加工で素線に強いねじり応力が加えられるため、断線が発生しやすい。そのため、材料には全長にわたっての厳しい品質が要求される。断線の要因は、主に表面傷、中心偏析、介在物等が挙げられる。なかでも介在物は数10 μ mの大きさでも断線の起点となる可能性がある。特に製鋼段階で生成または混入するアルミナ(Al₂O₃)やスピネル(MgO・Al₂O₃)等の硬質の非金属介在物が断線を誘起する

■スチールコードの主な製造工程



ことが知られている。スチールコードの品質確保に鋼の清浄度は深く関係しており、介在物を低減した、高純度高炭素鋼が使用されている。

極限強度への挑戦

タイヤの性能向上、軽量化などのニーズを受けて、スチールコードの高強度化が進行している。1970年頃には引張強度2,800MPa程度のものが使用されていたが、1980年代には3,200~3,400MPa、1990年初期からは3,600MPaのものが使用されている。現在では4,000MPaに達した材料が開発されており、さらに4,000MPaを超えるスチールコードの研究開発が実施されている。

現在、スチールコード用線材の開発には、過共析-Cr添加鋼が主に用いられている。従来0.7%C亜共析鋼が使用されてきたが1980年代から0.8%C共析鋼、最近では0.9%C過共析鋼が使用され、C含有率が高くなっている。C含有率の高い鋼はパテンティング後に高い強度を有するだけでなく、伸線後に高い硬化率を示す。

さらにCr添加によって、同一のC量であっても強度が向上することがわかっている。これはCrがパーライト組織のラメラ間隔の微細化に寄与するためである。

このパーライト組織のラメラ間隔微細化は、スチールコード用線材において積極的に行われてきた技術である。最近では実用鋼において結晶粒の超微細化技術が注目されているが、スチールコード用線材は最も早くからこの技術を活用してきた分野であるといえる。例えば近年の高強度スチールコード線材では、パテンティング直後にラメラ間隔が $0.1\mu\text{m}$ 程度、引張強度1,200~1,500MPaとなり、さらにその後、伸線加工を施すことでラメラ間隔は10nmに、引張強度は4,000MPa以上に向上させることが可能となっている。

最近では、ラメラ間隔の微細化効果以外の強化機構についても関心が高まっている。例えば、セメンタイトが伸線加工で分解され、分解したCが転位に付着して転位の移動を起きにくくして強度を上げる(固着強化)等の働きが注目されている。伸線加

特許法成立後まもなく世に広まった「パテンティング」

パテンティングは、線材の高強度化に不可欠な熱処理である。仮にパテンティングを行わずに線材を加工すると伸線加工性は低下し、最終的な強度も低下する。

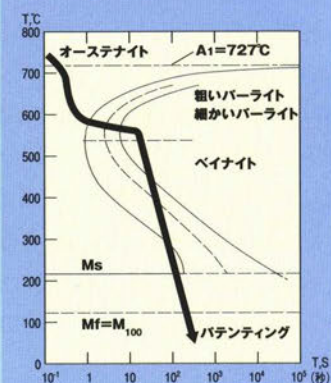
この技術は、1852年に英国の特許法が制定され、James Horsfallがピアノ線の高強度化を図るために熱処理技術(パテンティング処理)を考案し、1854年に特許を取得した。現在では「パテンティング」は世界的な用語となっている。

最近では、製造工程においてパテンティングを省略するダイレクトドロ잉の採用が増えている。通常パテンティングは、

スチールコードの製造工程において、断線防止のため2度行われているが、近年、効率化のため一次パテンティングを省略する傾向にある。しかしダイレクトドロ잉では表面傷による断線が発生しやすくなるため、従来にまして線材の残存傷等を低減する必要がある。またこれに対応した線材の開発も進められている。

●パテンティング処理

線材を加熱し、鋼中に存在するフェライトとセメンタイト組織をオーステナイトに変化させ、その後急冷してパーライト変態を起こさせる。

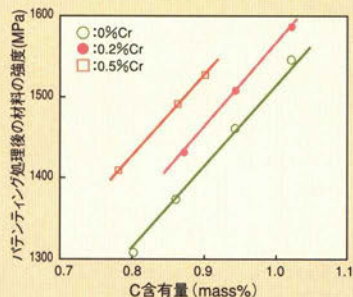


工によって変化するセメンタイトは数nmレベルの大きさであるため、従来の分析装置では強化メカニズムの解明は困難であったが、最近では高分解能透過型電子顕微鏡(TEM)や3次元アトムプローブ(3DAP)の活用によって、研究が大きく進展している。伸線加工時のパーライト鋼の組織形態変化は未だに不明な点が多く、さらなる高強度化を進めるにはナノレベルでの解析が重要となっている。

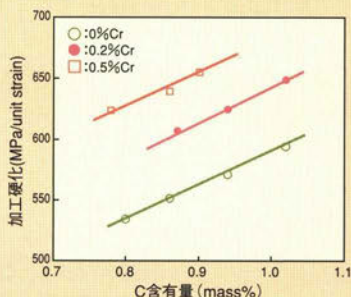
また、高強度スチールコード用線材の実用化には強度だけで

■スチールコード用線材の開発

●バテンティング処理後の材料強度に及ぼすC、Cr量の影響



●加工硬化率に及ぼすC、Cr量の影響

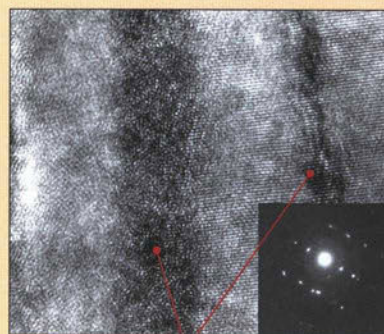
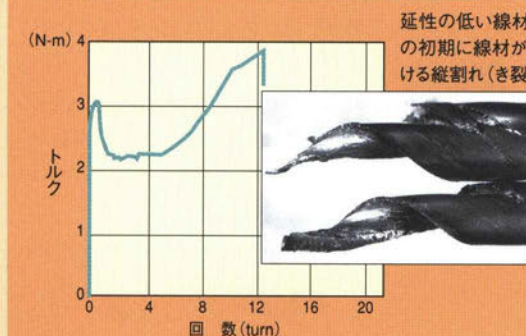


●高強度化に重要となるラメラ間隔



スチールコード用線材の高強度化には、パーライト組織のラメラ間隔 (セメンタイト相同士の幅) の微細化が重要となる。

●デラミネーションの発生



高分解能透過型電子顕微鏡 (TEM) による、強伸線加工した過共析-Cr鋼線の格子像。ラメラ間隔は10nmレベルに細粒化し、セメンタイトは数nmレベルになっていることがわかる。高性能な分析装置によりナノレベルでの解析が可能となっている。

(資料提供:新日本製鐵(株))

なく、製造工程での断線を防ぐために延性の確保が重要である。そこで求められる延性とは、「伸び」や「絞り」のみならず、「ねじり」にも強い特性となる。線材の強度が高くなると延性が低下し、ねじり変形の初期に「デラミネーション」と呼ばれる線材が長手方向に裂ける縦割れ (き裂) が発生する場合がある。現在、このデラミネーションが線材の高強度化を阻害する最大の要因となっている。強度だけを求めるのであればさらなる高強度化が可能だが、延性との両立のため、引張強度4,000MPa前後が材料開発の限界となっている。

デラミネーションの発生原因としては、種々の提案がなされているものの、未だ発生メカニズムは明らかにされていない。しかしながら防止策として、伸線加工量を減らして延性を維持する方法が効果的であることがわかっている。

スチールコードの高強度化要求はいつそう高まっており、ニーズに応じるにはデラミネーションの抑制技術の確立や、パーライト鋼の強化メカニズムの解明等が望まれ、ナノレベルでの組織解析および伸線加工技術の開発が進められている。高炭素鋼線は古くから開発された製品であるが、今やナノオーダー制御による最先端を走る材料となっている。わずか髪の毛ほどの細さの

線材には、幾多の最新技術が詰め込まれているのである。

現在、このような優れた線材に対する需要が高まっており、国内の鉄鋼メーカーではフル生産体制でこれに对应している。我が国のスチールコードは、経済成長著しい中国をはじめとして、アジア地域に広がるモータリゼーションの進展を力強く支えているのである。



●取材協力 (株)ブリヂストン、新日本製鐵(株)

●文 藤井 美穂