

連携記事

タイヤ補強用スチールコードの設計、最近の技術動向

Recent Trends of Steelcord Design for Tire Reinforcement

福田 征正
Yukimasa Fukuda

(株)ブリヂストン タイヤ材料開発本部
スチールコード開発部 SC設計開発ユニット

1 まえがき

現代社会において、自動車の存在はなくてはならないものである。最近の統計資料¹⁾から、日本の総人口を自動車保有車両数で割った試算によると、実に1.6人に1台の自動車が我々の身の回りにあることになる。これはかなりの普及率だと考えられる。我々の生活にこれほどの必需品となった自動車を、タイヤは文字通り底辺から支えている。

『黒くて丸い形をしている』、『ゴムの表面に溝の模様と文字がある』、…など、タイヤについて外見で判ることはこの辺までだろう。それで多くの方々には、タイヤはゴムでできていると思われているのではないだろうか。半分は正しい。しかし、ゴムだけではタイヤはできない。子供達が遊ぶゴム風船のように、どんどん膨らんではタイヤとしては使えない。空気を入れて必要な寸法で硬くなり、タイヤとしての形状を保持する必要がある。ここに、繊維補強材の骨格が必要となるのである。この外側からは見えない所、タイヤの内部に繊維補強材が張りめぐらされていることは、一般の方々にはあまり詳しく知られていない。

タイヤの骨格をなす繊維補強材料として代表的なものを表1²⁾に示す。この中で特にスチールは、高い引張り強度、

小さな切断伸び、大きな比重が特徴的な繊維補強材料であると言することができる。強度自体が高く、なおかつ伸びにくいという性質は、タイヤコードとして非常に重要な性質である。後で詳しく述べるが、この特性によりスチールコードはタイヤ性能の向上に大きく貢献してきた。一方で、重いということは依然スチールコードの欠点のひとつであり、その改善が望まれる。

今回、スチールコードの高強度化特集に関連して、タイヤメーカーからの視点で、スチールコードについての解説を以下に述べる。

2 スチールラジアルタイヤの基本構造

図1に示すように、自動車用タイヤには、ラジアルタイヤとバイアスタイヤという大きく分けて2種類の構造がある。これらは、タイヤ中のカーカスでプライコードの配置される方向がそれぞれ異なっている。

バイアスタイヤは、すだれ状に並べたコードの周囲をゴムで被覆した「プライ」を複数枚、斜め方向に向けて互いに交差して積層したカーカス構造のものである。コードを斜めに

表1 タイヤコードに使われる主な繊維補強材料の性質

	スチール	アラミド	ポリ エステル	66 ナイロン
構造	φ0.23	1500D	1500D	1260D
引張り強度 (N/mm ²)	3210	2788	1129	918
切断伸び (%)	1.8	4.0	11.9	21.0
比重	7.83	1.44	1.38	1.14

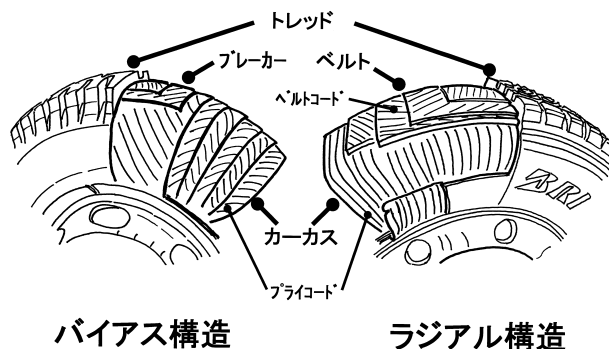


図1 タイヤ構造の模式図

配置している所から、バイアス構造と呼ばれている。バイアス構造は、走行時のタイヤの変形を積層カーカス全域で受けとめる柔軟性を有するため、緩衝効果に優れ、凹凸の多い砂利道等での耐久性が非常に良好である。その反面、接地面内にトレッドの不要な動きが多く、タイヤ寿命に関わる耐摩耗性や、自動車のハンドル応答に関わる操縦安定性、また燃費に影響がある転がり抵抗などに欠点がある。

それに対し、ラジアルタイヤはタイヤの断面方向にプライコードが走るカーカス構造のものである。真横からタイヤを見たときにコードを半径方向に配置している所から、ラジアル構造と呼ばれている。ラジアル構造は、プライコードがタイヤ断面方向の力しか支えない構造である。そのため、タイヤ周方向の力を負担しかつ内圧による迫出しを抑えるタガの役割も果たす、強固なベルト層をトレッド部に入れて補強している。このベルトの高い剛性がラジアル構造の特徴である。これにより接地面内でのトレッドゴムの動きが小さくなるため、ラジアル構造のタイヤは耐摩耗性や操縦安定性のほか、特に高速走行性能に優れている。

3 タイヤの基本機能と
スチールコードが果たす役割

タイヤは自動車と路面をつなぐ唯一の部品である。自動車の走行性能を達成するために、タイヤに求められる機能をまとめると、表2のようになる。いずれも自動車の走行には不可欠な機能であるが、現在のところ、空気入りタイヤのみがこの4つの機能を十分なレベルで発揮できている。

この、タイヤが『空気入りである』という点から、タイヤは圧力容器として空気圧を保持する必要がある。この強度負担のほぼ全てを、骨格部材の繊維補強材が張力という形で担っている。タイヤに荷重がかかり[機能①]、駆動・制動[機能②]やカーブ[機能③]などで前後・横方向の力が加わると、タイヤが複雑に変形して、内部で繊維補強材が負担する張力も大きく変動する。また、石ころや路面の凹凸に乗り上げたりすれば[機能④]、局所的には大きな衝撃力が繊維

表2 タイヤの4大機能

機能①	荷重を支える
機能②	駆動・制動力を路面に伝える
機能③	自動車の方向を転換・維持する
機能④	路面からの衝撃を緩和する

補強材にのしかかってくる。このような状況から、繊維補強材は耐久性が非常に重要であり、スチールコードに対しても、耐久性に直接影響を及ぼす以下の3大基本特性が最低限のところで求められている。

3.1 強度

タイヤ使用時(荷重・走行・外力など)において、タイヤが破壊しないだけの充分な強度がコードに求められる。さらにまた、より強度が高いコードを使うことができれば、原材料の使用量を減らし軽いタイヤにすることもできる。

それは、高強度なコードほど細く、スチール素材の使用量が少なくできるのに加えて、前記したプライやベルトの厚み自体もコードが細くなる分薄くできることで、ゴムの使用量もまた低減することが可能となるからである。

3.2 耐疲労性

自動車の走行でタイヤが転動する時、繰返し変形がコードに与え続けられる。タイヤ使用中における強度保持の観点から、この繰返し入力に対する耐疲労性がコードに求められる。また、さまざまな環境下でタイヤが使用されることから、例えば水分の影響など、腐食環境下での耐疲労性が考慮される必要がある。

3.3 接着耐久性

コードとゴムの複合体であるタイヤがその機能を発揮する前提として、そのコードとゴムがしっかりと接着して一体となっていることが求められる。接着においても、ゴムの変形に伴う発熱や水分などの影響に対し耐久性を保持することが必要である。

上述のような基本特性を満足するために、スチールコードはブラスメッキされた細いスチールフィラメントを複数本撚り合わせた構造となっている。また他の有機繊維補強材がほぼ引張り軸方向にしか強度と剛性を持たないのに対し、スチールコードは曲げ・せん断・圧縮方向にも強度と剛性を持っている。このあらゆる変形に対する剛性の高さが、ラジアルタイヤにおいては強固なベルト層を実現する。わずかな変形で大きな力を路面に伝えることができるため、アクセル/ブレーキ/ハンドル操作において効きのよい感じを提供できることにつながっている。

4 スチールコードの製造方法

前記のような基本特性の大部分は、スチールコードの製造工程にて作り込まれる。実際の工程はかなり複雑・高度に工

表3 スチールコードの製造における基本特性の作りこみ

ステップ		材料	熱処理	メッキ	伸線	撚り線
ポイント						
		高炭素鋼	パーライト組織	ブラスメッキ	引抜き加工	構造化
基本特性	強度	○	○		○	○
	耐疲労性		○		○	○
	接着耐久性			○	○	○

業化されているが、その中から基本特性と特に関係あるものをまとめると、表3のようになる。

まず材料で強度を決める。タイヤ用のスチールコードは高炭素鋼を使用しており、C濃度が高いほど素材として硬く、高強度を得られるポテンシャルを秘めている。

続いて熱処理を行い、強度と耐疲労性の両立を図る。結晶組織をパーライト組織とすることで、強度と延性のバランスに優れた素材に生まれ変わる。

さらにメッキを行うことで、接着耐久性を付与する。ブラスメッキはその後の加工における潤滑という非常に重要な役割も担うことになる。

そして、伸線と撚り線を行うことで、スチールコードに必要とされる基本特性をトータルにコントロールしていく。

以上より、基本特性のうち特に強度に関しては、さまざまな工程にて作り込まれる品質であると言える。従って、スチールコードの高強度化に取り組むには、製造工程全体における最適化が望まれる。製造現場においては、スチールコードのメリットと言える「コスト」面においても競争力を維持していく必要があり、性能との両立・改善努力がさまざまな形で行われている。

5 撚り構造の設計

スチールコードの撚り構造は、大きく分類すると表4のようになる。最も単純に、数本のフィラメントを1回撚ったものが「単撚り」($1 \times N$)、同心円状に2〜3層撚り重ねるのが「層撚り」($N + M + L$)、撚りコード数本をもってさらに撚り合わせたものが「複撚り」($N \times M$)である。

スチールコードを適用するタイヤ部材の要求特性に合わせて、表5のようにそれぞれの撚り構造が使い分けられる傾向がある。乗用車用タイヤには、基本的な耐久性のほかに操縦安定性などのトータルバランスが求められる。そこで乗用車用ベルトコードには剛性としなやかさが求められ、単撚りのような簡素な構造が使われる。トラック・バス用タイヤ、さ

表4 撚り構造の分類

分類	断面図	側面図
単撚り		
層撚り		
複撚り		

表5 タイヤ部材と撚り構造の例

使用区分	構造(断面図)
乗用車用 ベルトコード	   
トラック・バス用 ベルトコード	  
トラック・バス用 プライコード	   
建設車両用 コード	  

らには建設車両用タイヤには、さまざまなユーザーの過酷な使用環境における耐久性が求められる。そこでそれらのベルトコードやプライコードには、高内圧下で形状維持し、車両の荷重に耐え、走行時の色々な外力で破壊しないだけの強度と耐久性が求められ、2層撚り以上の構造が使われる。特に大型化が進んでいる建設車両用タイヤには、多数本のスチールフィラメントを用い非常に高い強度が得られる複撚り構造も使われることがある。

上記基本構造を選定し、実際にタイヤの要求性能を満足していく過程では、市場の入力に対するタイヤ耐久性を向上していく為のさまざまな技術を、コード設計に反映していかなければならない。その一例として、ゴムペネ構造化の設計技術を紹介する。

タイヤはスチールコードとゴムの複合体であるという点から、両者の一体化が非常に重要である。特にタイヤとして外傷を受けやすいトレッド部に配置されるベルトコードにおいては、トレッド面を貫通しスチールコードに達する深い外傷で、水分がコード内部に浸入してしまう場合がある。スチールコードは錆びやすい欠点を有しているため、水分がコード内部を伝達することを防ぐことが非常に重要である。これを達成するための技術として、表6のようなゴム浸入型コード構造がある。

スチールコードとしては隙間を確保した設計としておき、

表6 ゴム浸入型コード構造の例

隙間手法	オープン	異線径	素線 クセ付け	素線 間引き
コード 断面図				

タイヤ製造工程における加硫圧力を利用してコード内部にゴムを浸入（ゴムペネ）させようとするものである。コード内部の隙間が完全にゴムで満たされると、外傷からの水分がタイヤ内に進展しにくくなるため、タイヤ耐久性の著しい低下を抑えることができるのである。

上記基本構造において、撚り構造を設計する上で設定可能なパラメータは、スチールフィラメントの強度・太さ・本数・ピッチ・撚り方向などが挙げられる。それぞれの組合せ方で、強力・耐疲労性・接着耐久性・剛性のある程度変化させることができる。スチールコードの開発では、適用対象のタイヤにとって性能とコストが最適なバランスになるような撚り構造の選定～設計が求められる。

撚り構造の進化の方向として以前から指摘されている^{3,4)}もののひとつに、簡素化が挙げられる。これはタイヤの市場における耐久性を損なうことなく、より生産性の高い簡素なスチールコード構造を適用していくものである。例えば、より太いフィラメントを使用し層撚り構造を3層⇒2層へ工程削減したり、複撚り⇒層撚りへと構造自体の変更をするような場合である。このときにスチールコードの高強度化技術が同時に適用できると、コスト改善のみではなく、軽量化や強度向上、ゴムペネによる接着耐久性向上などを、高度な次元で両立していくことが可能となる。これはタイヤメーカー各社において、現在もさまざまな改善努力が続けられている。

6 最近の技術動向

以下に、スチールコードがタイヤ機能発現のために重要な役割を果たしている事例の中から、代表的なトピックスを紹介する。

6.1 高性能スポーツタイヤ（力の伝達～走る・曲がる）

運動性能を重視した自動車に装着されるタイヤには、高い操縦安定性能が求められる。ハンドル操作に対して、思い通りに自動車が反応することは、レーシングカーのドライバーでなくとも、スポーツ志向のドライビングを楽しむ誰もが描き求める理想の一つの姿であろう。

コーナリングのハンドル操作によりタイヤが自動車の進行

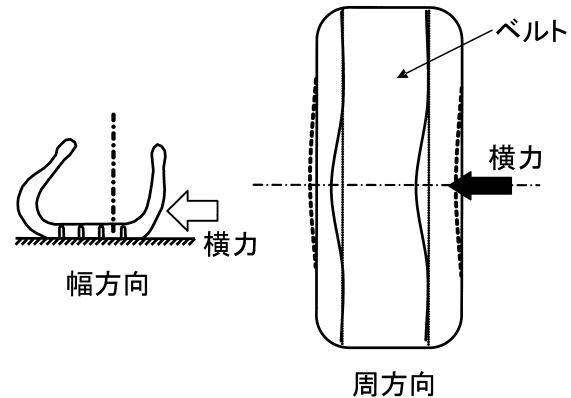


図2 ベルト部材の変形

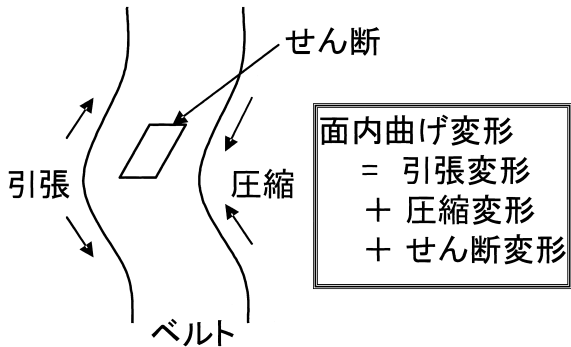


図3 ベルト部材の面内曲げ変形詳細

方向から向きを変えると、図2³⁾のようにタイヤは接地部分に横力を受ける。このときベルト部材は接地面内に曲げ変形を受け、その反力としてのコーナリングフォースが自動車を実際に横に曲げる作用となる。

従って、ベルト部材の面内曲げ変形が小さいタイヤのほうが、ハンドルの効きがよい、良好な操縦安定性を発揮することができる。そのため、ベルト部材はラジアルタイヤのタガ効果を発揮させるための高い周方向剛性ととともに、面内曲げに対しても高い剛性を持つ必要がある。

面内曲げ変形をもう少し詳しく分解すると、図3³⁾のようになる。すなわち、ベルト部材の変形は引張り変形・圧縮変形・せん断変形を複合した極めて複雑なものである。一般的なベルト部材は、交錯したスチールコードとゴムの複合材料で形成されているが、この剛性は、素材であるスチールとゴムの剛性のほか、これら材料の配置の仕方でもトータルに決まり、ある程度コントロールすることができる。特に軽量化のためスチール材料の使用量を低減すると、当然面内曲げ剛性は低下する方向に作用する。これを補うためには、材料配置を設計するベルトパッケージの取り組みが重要である。図4のように、ベルト交錯層の層間厚みや層内のコードとコードの間隔などを変化させることにより、面内曲げ剛性をコントロールすることが可能となる。

実際には、重量と耐久性は背反に近い関係にあり、タイヤ

製品ごとのトータルバランスを考えた最適点で設計されることになる。

6.2 超偏平シングルタイヤ（荷重を支える）

大型トラック・バス車両の後輪は、通常タイヤを2本リムでつなげた複輪と呼ばれる構造となっている。図5⁵⁾のように、この複輪タイヤを1本に（シングル化）することができれば、表7のようなメリットを得ることができる。

複輪タイヤのシングル化のためには、タイヤを偏平比50%以下の超偏平形状にすることが必要である。例えば、

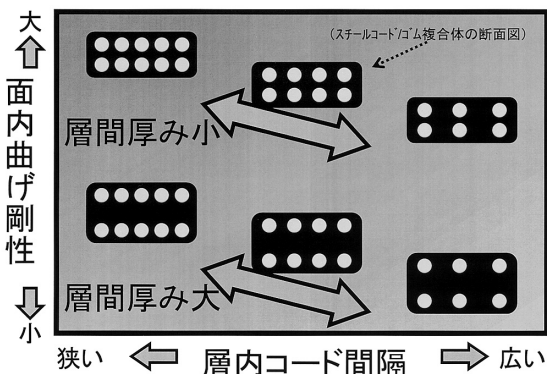


図4 ベルトパッケージによる剛性コントロール

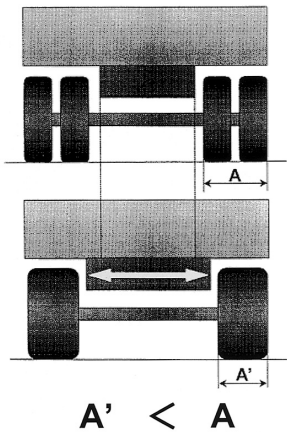


図5 複輪タイヤのシングル化

表7 シングルタイヤの特徴とメリット

特徴	メリット
タイヤ横幅の低減 ($A' < A$)	荷台や通路幅の拡張に貢献
タイヤ総重量の低減	積載量アップ・廃材ゴム削減に貢献
転がり抵抗の低減	消費燃料 / 排ガス量 低減に貢献

市内バスに使われる275/70R22.5の複輪タイヤを置き換えるシングルタイヤのサイズは、435/45R22.5となる。この偏平比を実現するのに、ベルトには従来のタイヤにはない特別な技術が必要となる。

圧力容器であるタイヤは、内圧を充填すると断面内で丸く膨らもうとする。接地部分を平坦にするために、ラジアルタイヤではベルトのタガを配し強制的に形状を調整している。超偏平形状では、この形状を維持するために、ベルトに非常に高い張力を負担させる必要がある。しかし、トレッド部にスチールコードを斜めに交錯配置する通常のベルト構造では、ベルトの径方向の迫出しが大きくなり、ベルト部に大きな歪が発生する。この歪を低減し、ベルト耐久性を向上させるためには、周方向にスチールコードを巻きつけたタイヤ構造が適している。

一方で、タイヤは製造過程における成型時および加硫時に、ある程度部材を伸ばして製造することが多い。この製造時の伸びに追従し、かつタイヤ製品になってからは高い周方向の剛性を発揮できる機能材料が求められる。この周方向ベルト構造に適用されているコードのひとつに、図6のような波状のクセ付けをした（ウェーブド）スチールコードがある。

このウェーブドベルト構造の採用により、タイヤ製造と耐久性の両立が高度に実現されている（図7⁶⁾）。ウェーブドベルトには、高い張力負担が必要である。そこでスチールコー

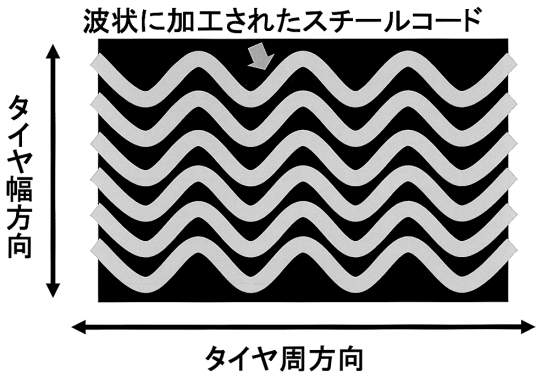


図6 ウェーブドコードの模式図

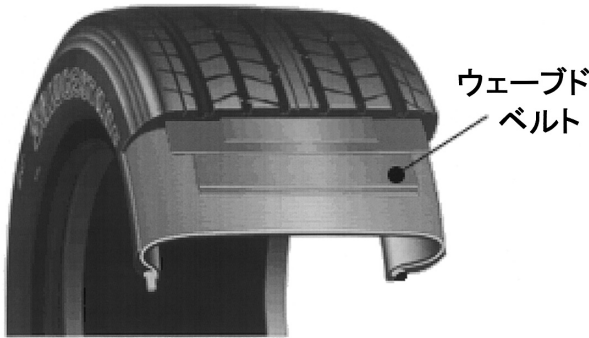


図7 ウェーブドベルト構造を適用したタイヤ（GREATEC®）

ドには、高強力で安全性が十分確保されることが求められる。

普通タイヤと同様、超扁平シングルタイヤにおいても今後さらなるタイヤの軽量化が必要である。スチールコード高強力化技術の適用は、タイヤの耐久性を落とすことなく軽量化できる方策のひとつである。このような技術を取り入れながら、周方向ベルト構造はさらに進化していくものと考えている。

6.3 超大型タイヤ（荷重を支える）

現在世界最大のラジアルタイヤは、タイヤサイズ59/80R63である。これは図8⁷⁾のような、タイヤの直径が4 mにもなる超大型タイヤで、その重さは5.1トンにもなる。現在、北米・豪州・中南米などを中心とした海外の露天掘り鉱山で鉱石を運搬する図9のような超大型のダンプトラックに装着されている。

これはタイヤ1本で荷重101トンを支えられるよう設計されたタイヤであり、積載物の荷重だけでもかなりのものである。それに加えて、採石場という岩石の凹凸が激しい路面を常に走行することから、カット外傷に対しても、かなり厳し



図8 世界最大のタイヤ

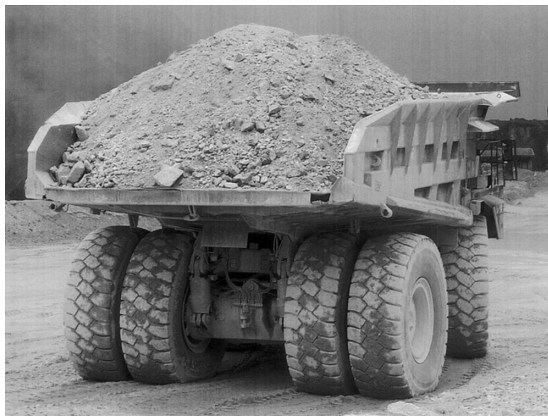


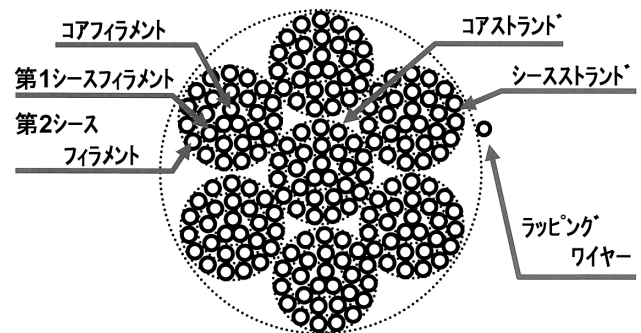
図9 ダンプトラック

い入力が入力に加わって来る。またその他にも、タイヤ使用現場における車両速度向上や運搬効率向上が求められるようになった。これらの結果として、耐摩耗性・耐発熱性等に優れるラジアル構造が超大型タイヤにも必要とされるようになった。これを実現するためには、非常に高度なタイヤ設計・製造技術、および材料技術が重要となっている。

このようなタイヤに使用される繊維補強材としては、剛性があり高強度が得られるスチールコードが、最適な材料のひとつとして確固たる地位を築いている。図10に、超大型タイヤ用の代表的なスチールコード構造を例示する。

この例では、コア・第1シース・第2シース合わせて27本のフィラメントからなる1本の真直ぐなコアストランドの周囲に、同じ構造のストランドを6本シースに撚り合わせた基本構造（複撚り）をしている。この1本のスチールコードの中に、合計189本ものフィラメントがあり、その周囲がラッピングワイヤーで束ねられている。コードを太くすることで、超大型タイヤを内部から支えるに相応しい、より高強力なスチールコードとしている。先に述べた乗用車タイヤ用スチールコードが3～5本程度のフィラメントで簡素にできているのと比べると、これはもうスチールコードと言うよりは、ワイヤロープと言いたくなるような、超極太スチールコードである。

超大型タイヤ用スチールコードにおける高強力化技術の課題は、上記189本のフィラメントに協調性を持たせることにある。たとえスチールフィラメント1本1本が高強力化されていても、コード全体としてその強度のポテンシャルを引出すためには、束になった189本が同時に力を発揮しなければならないからである。このフィラメントの協調性は、大入力時の破断強度のほか、疲労に対する耐久性など、あらゆる面でタイヤコードとしての最適化が必要とされている。そこで超大型タイヤを開発するメーカーでは、現在も日々技術開発に取り組んでいる。



7x(3+9+15)+1 構造

図10 複撚り構造の例

今後の展望

タイヤを取巻く環境は、時代とともに変化している。自動車の存在が現代社会に必要不可欠なものとなり、それは生活のあらゆる側面に大きく影響を及ぼしている。特に昨今の地球温暖化の原因とされる炭酸ガスの排出削減は、資源・環境・経済的な側面に対して待ったなしの問題となっており、タイヤを開発する立場からも、軽量/低燃費/ロングライフという形で非常に重視されている。また一方で、日常生活の面においては安全・快適であることがさらなる付加価値としてこれまで以上に求められている。タイヤの事例では、パンクに対する安全性を高めたランフラットタイヤ、操縦安定性を高めたスポーツタイヤ、静粛性を高めた高級タイヤなどが挙げられる。

スチールコードに対しても、これまでは骨格部材としてタイヤの安全面・耐久面に大きく貢献してきた訳だが、この役割を損なうことなく、今後はタイヤ性能向上への更なる貢献が期待されている。本来、タイヤはゴムと繊維補強材が一体となることで初めてその機能を発揮する複合材製品である。スチールコードが今後もタイヤ性能向上に貢献し続けるためには、当然のことながら周囲を包むゴムを含めた高機能化が不可欠となる。スチールコードが材料単体でその基本特性（強度、耐疲労性、接着耐久性）を向上していくことが必要であると同時に、ゴムとスチールコードの複合材料としてのパッケージで進化していくことが今後極めて重要である。

例えば、軽量・低燃費・ロングライフなタイヤのためには、スチールベルト部材が軽量かつ接地面内でゴムの無駄な変形を抑制することが必要である。また、スポーティーな操縦安定性を追及する高性能なタイヤのためには、スチールベルト部材が接地面内で剛性を保ちながら、柔軟に路面に喰らいついていくことが必要である。

以上のように、これからのスチールコードの設計に際しては、適用されるタイヤ部材ごとにそのあるべき姿を追求し、その理想形に向かってゴム/スチールコードパッケージを最適化していく地道な努力が続けられていくであろう。

参考文献

- 1) 第五十六回 日本統計年鑑 平成19年，総務省統計研修所編集，総務省統計局発行，(2007)，第2章，第12章.
- 2) 渡邊徹郎：タイヤのおはなし，日本規格協会，(1994)，72.
- 3) 自動車用タイヤの基礎と実際，(株)ブリヂストン編，山海堂，(2006)，295-303.
- 4) 西川道夫：塑性と加工，日本塑性加工学会，39 (1998)，303.
- 5) (株)ブリヂストン：ニュースリリース，14 (2000)
- 6) (株)ブリヂストン：ニュースリリース，20 (2004)
- 7) (株)ブリヂストン：ニュースリリース，84 (2001)

(2007年12月28日受付)