

究極の強度を目指す
「スチールコード」

高強度の最先端をいく 棒鋼・線材(3)

タイヤ用スチールコードやピアノ線、釣糸などの極細の線材から、吊橋のケーブル、電信柱、構造物の補強材、ボルト、ナット、バネなど、さまざまな姿で社会に浸透している棒鋼・線材製品。これらの棒鋼・線材製品は二次加工メーカーに半製品で提供されるため、用途に応じてさまざまな機能が求められる。シリーズ3回目は、高強度が求められる「スチールコード」「橋梁用鋼線」の先端技術を紹介するとともに、線材技術の今後を展望する。

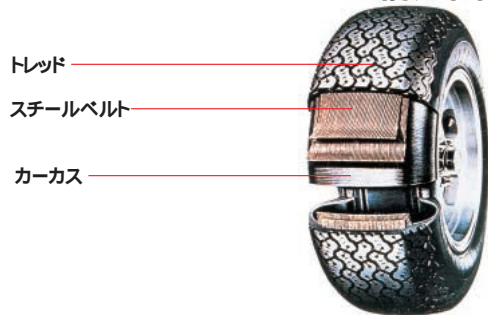
自動車のタイヤには耐久性をはじめ、圧縮・曲げに対する剛性、乗り心地、操縦性、燃費向上（転がり抵抗低減、軽量化）など、さまざまな性能が求められる。補強材となる「スチールコード」は、軟らかい有機繊維に比べて剛性が高いことから、タイヤの安全性、耐久性、操縦安定性など優れた性能が評価されている。スチールコードは釘などの踏み抜きによるパンクや外傷に対しても強く、タイヤユーザーの大きなメリットになる。

乗用車用タイヤではベルト部に使われ、トラックやバスなどの大型車では側面部のカーカスにも使われている（図1）。その重量は乗用車で1kg弱だ。

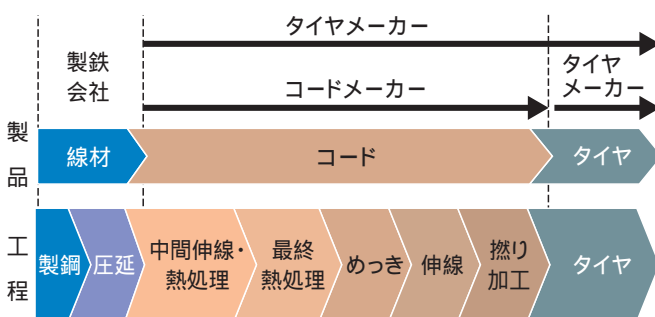
自動車タイヤ用スチールコードは工業化レベルで、1970年代に約2,800MPaだったものが、1980年代には3,600MPaになり、2000年以降は4,000MPaを超え、現在では線径0.2mmで4,500MPaまで高強度化されようとしている。4,500MPa級はまだ実用化されていないが、4,000MPa級は高級車用のタイヤですでに採用されている（1）。

新日鉄はスチールコードの世界シェアの約25%を占めるトップメーカーだ。また、素材提供だけでなく、ユーザーでのスチールコードの作り込みに対して、4,000MPaまで延性を確保するための研究開発や、自社

スチールラジアルタイヤの構造図 図1

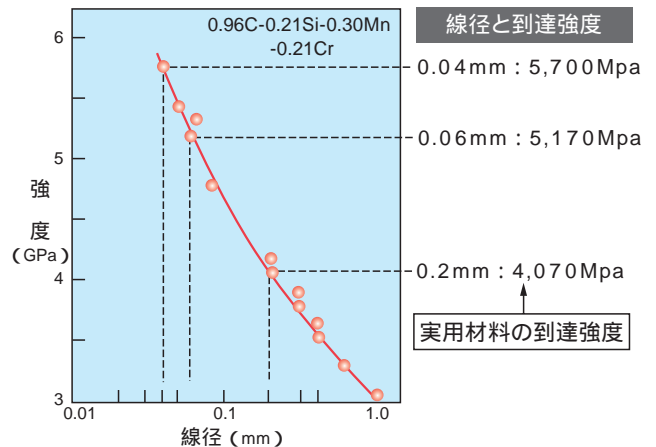


タイヤ製造の役割分担 図2



スチールコードの到達強度 表1

鋼種	C	Si	Mn	Cr
従来鋼	0.82	0.20	0.50	-
96ACr	0.96	0.20	0.30	0.20



現在の実用材料の到達強度は、0.96%C、線径0.2mmの高炭素鋼線で4,070MPaに及ぶ。

1 スチールコードの商品規格は、「RT（レギュラーテンサイル：2,800MPa級）」「HT（ハイテンサイル：3,200MPa級）」「ST（スーパーテンサイル：3,600MPa級）」「UT（ウルトラテンサイル：4,000MPa級）」、そして「MT（メガテンサイル：4,500~4,700MPa級）」に分類される。

で伸線加工技術の開発を行い、ユーザーの加工工程をサポートしている(図2)。

スチールコードの技術トレンドは、0.96%Cまで高炭素化し、クロムを微量添加してさらに高強度化を目指す方向にある。現在の実用材料の到達強度は、0.96%C、線径0.2mmの高炭素鋼線で4,070MPaに及び(表1)。

高炭素鋼線の作り込みの技術は、添加成分が偏る「中心偏析の抑制」や、「介在物の制御」など、高度な製鋼技術を必要とするため難易度が高く、そこが新日鉄の強みにもなっている。

特に、製鋼プロセスでの「介在物制御技術」では他社の追随を許さない(本企画2004年5、6、7、8・9月号参照)。線径0.2mmの線材では、大きな介在物が一つでもあると断線してしまう。特に高強度化すればするほど硬度が高まるため介在物の影響は大きくなる。線材に限らず鋼材の高強度化は、製鋼段階で介在物を微細化し、材質への影響をなくすことが前提となっている。

長大橋を支える「橋梁用鋼線」

一方、長大吊橋のメインケーブルのワイヤ強度はこの半世紀、センタースパン(主塔同士の距離)1,200~1,500m級で、1,500~1,600MPaだった。それが1998年に開通した明石海峡大橋ではセンタースパン1991mで、1,800MPa級の高強度鋼線が採用され、吊橋の長さ、ワイヤの強度とともに世界最大となった(グラフ1)。この長

大吊橋のメインケーブルに、新日鉄の「橋梁用鋼線」が使用されている。

橋梁用鋼線の技術的ポイントは、デラミネーション(2)を発生させず、かつ最後に450℃で溶融亜鉛めっきを施す際の強度低下を抑えることにある。450℃の熱が加わることで、伸線加工後に層状に揃っていたパーライト組織のセメントイトが球状化して太くなり、狭いラメラ間隔を持った相が破壊される(写真1)。また、熱による転位の回復や再結晶化も強度低下の要因となる。

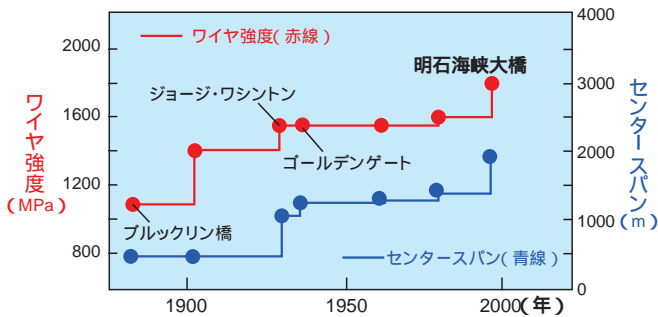
それを抑制するには、シリコンとクロムの添加が有効だ。同じ鋼種でも、高強度化すればするほど相対的に強度低下量が大きくなるが、それらの元素添加によって強度低下を抑えることができる。そのメカニズムは、「アトムプローブ」によるナノオーダーでの組織解析や元素分布の解析によって明らかにされた。新日鉄ではこの分析装置を業界に先駆けて導入している。

例えば、シリコンは、セメントイトとフェライトの界面(境界)に集まる性質がある(濃化)。セメントイトが太り、球状化すると界面にあるシリコンも一緒に動く(拡散する)。

つまり、シリコンが動かなければ球状化が進まないため、シリコン量を増加させれば界面にシリコンが集まり球状化を抑制し、溶融めっき時の強度低下を防ぐことができる(図3)。

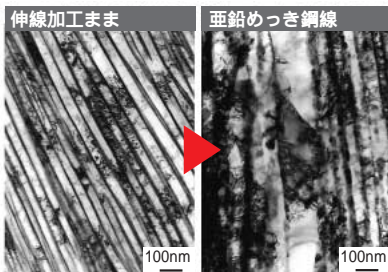
従来の1,600MPa級の橋梁用鋼線で0.2%だったシリコン添加量は、1,800MPa級では0.9%になっている。また、シリコンは固溶強化によってパテンティング材の強度

橋梁用亜鉛めっき鋼線の高強度化 グラフ1



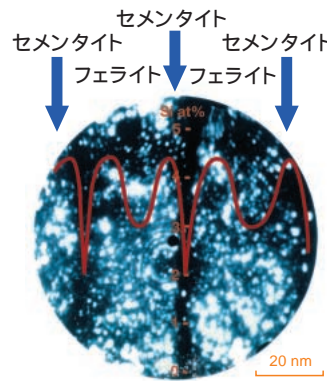
溶融亜鉛めっき後の組織

写真1

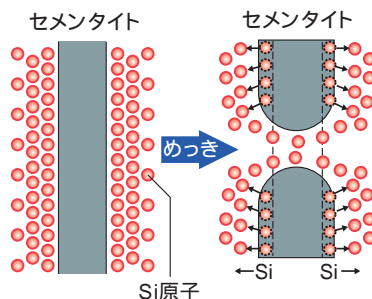


セメントイトの球状化・オストワルド成長
 ▼
 ラメラ組織の崩壊
 転位の回復、再結晶化

セメントイトの球状化抑制メカニズム 図3



アトムプローブで観察される組織にSiの濃度分布を重ね合わせた図。Si原子はセメントイト/フェライト界面に偏析していることがわかる。Si濃度分布、組織はアトムプローブの結果。白く光っている点が1個の原子に相当する。



Siがセメントイトの球状化を抑制する模式図。めっき前はSi原子が界面に濃化。セメントイトが球状化し太るためには、界面のSiが拡散しなくてはならない。Siが球状化に対して、バリアの役割を果たす。

2 デラミネーション(低延性): 延性の低い鋼線は、ねじり変形の初期に伸線方向に沿って縦割れ(亀裂)が生じる。

を高め、デラミネーションを抑制する効果も持つ。

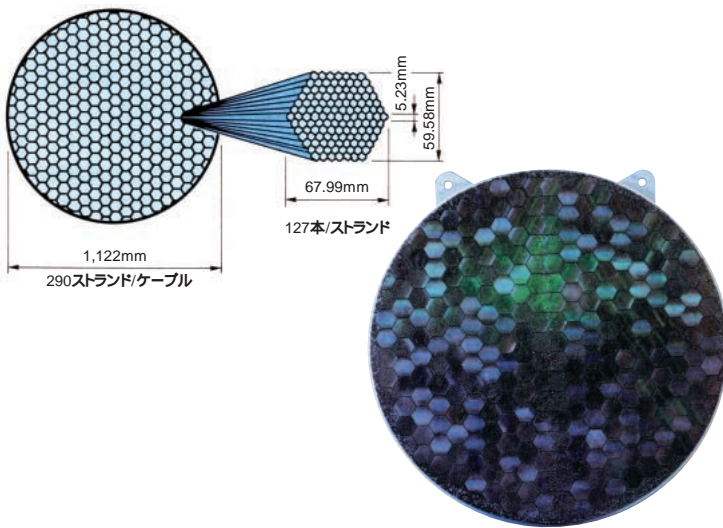
明石海峡大橋では、線径約5mmの鋼線を127本束ねたストランドを、290本束ねてメインケーブル（直径約1.2m）が作られた（図4）。1,600MPa級のワイヤを使うと安全上、片側2本、計4本のメインケーブルが必要になるが、1,800MPaのワイヤを使用することで2本にした。ストランド本数を減らして、主塔や補剛桁などの重量を低減し、コスト・工期両面で大きなメリットを生み出した（表2）（図5）。

では、スチールコードのような4,000MPa級の高強度

鋼線をなぜ使わないのか。橋梁の寿命は100年以上であるのに対し、タイヤは数年の寿命だ。したがって、実用実績が豊富で信頼性が高く、大量に使用した際のコストもリーズナブルな千数百MPaの線材が使われている。また、線径の小さいスチールコードは、撚り線にすると隙間が多く空気に触れる表面積が増えるため、腐食に対する新たな対策も必要になる。

現在では、イタリア本土とシチリア島を結ぶ世界最長3,300mの「メッシナ橋」の計画が動き出している。明石海峡大橋で使われた線材総量5万t強に対して、メッシ

明石海峡大橋メインケーブルの断面 図4



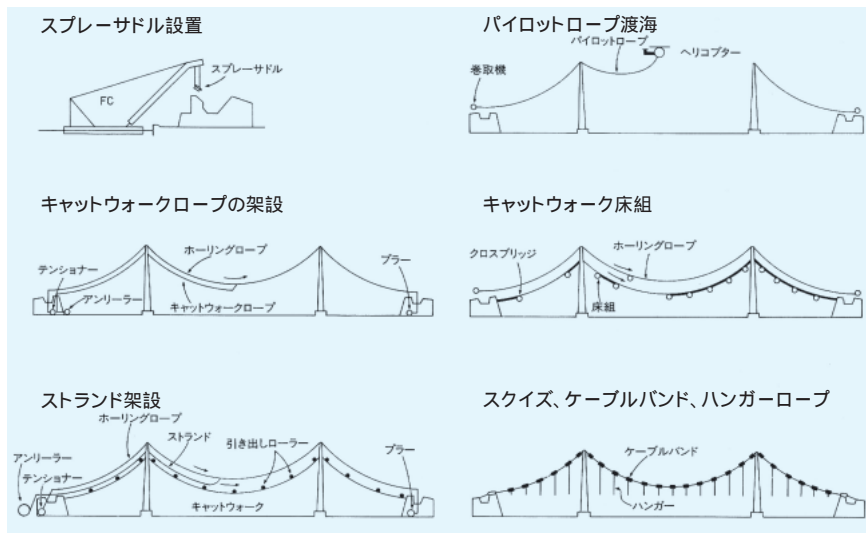
高強度鋼線のメリット 表2

明石海峡大橋の例

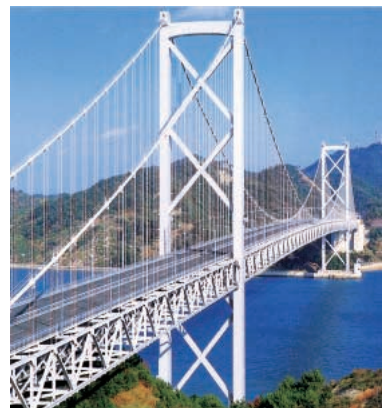
	160キ口級	180キ口級
メインケーブル本数	4本	2本
ストランド本数	676本	580本
ケーブル重量	5.9万t	5.0万t
主塔高さ	320m	283m
主塔重量	5.7万t	4.9万t
補剛桁重量	8.8万t	8.3万t
鋼材総重量	20.4万t	18.2万t

出典 / 高橋稔彦：水曜会誌、23-1(1999)、26.から抜粋

明石海峡大橋における長大吊橋のケーブル架設手順 図5



明石海峡大橋



因島大橋

最初に基礎を作り、そこに東京タワーぐらいの高さの主塔を建てる。
 初めに主塔同士の間には細いパイロットロープ（ポリアミド繊維）をわたす。
 ロープを通して 足場となるキャットウォークロープを架ける。
 工場で1,800MPa級の垂鉛めっき鋼線を用いてメインケーブル用ストランドを作り、それを1本ずつ現場でわたす。
 ハンガーロープを垂らし、自動車が通る補剛桁をハンガーロープに吊り下げ完成。

ナ橋では約17万tの線材が使用される予定だ。

一方、比較的短スパンの斜張端のケーブルは全て工場で製造される。現在建設中で、斜張橋としては世界最長となる香港の「ストーンカッターズ橋（1,000m級）」に新日鉄の高強度の橋梁用鋼線が使われることが決定している。

“新日鉄モデル”でさらなるブレイクスルーを

新日鉄が提供する棒鋼・線材はあくまでも半製品（中間製品）だ。しかしユーザーは、最終製品の特定強度を達成するための製品を求める。当然ながら、熱処理や伸線加工など二次加工の工程まで踏み込まなければ、求められる性能を実現する材料は提供できない。橋梁用鋼線を例にとれば、試験的に熱処理、伸線加工を施し、強度・延性が確保できることを確認した上で、二次加工メーカーと共同で、実際の製造プロセスを使って試作するというケースが多い。また、自動車部品などの場合は、一つの部品に対して数社の二次加工メーカーが関わっていることもあり、協業する二次加工メーカーは分野によって多岐にわたる。

新日鉄の役割は簡単に言うと、「加工時にはある程度軟らかく加工しやすいが、加工後に延性を維持しながら求められる強度を実現する半製品を提供する」ことだ。加工工程を無視した開発はあり得ない。

最終製品に対する加工コストの割合は大きいと、棒鋼・線材製造技術の革新により加工工程の省略が実現す

れば、最終製品のコスト削減にも寄与できる。したがって、鋼材開発は「鉄をいかに加工し使えば最大限の効果が得られるか」といった「利用加工技術」なくしては成立しない。

この利用加工技術のポイントとなる二次加工メーカーとの協業の深さは、世界で強みを発揮できる“新日鉄モデル”だ。こうしたパートナーシップも含めて、新日鉄は世界ナンバーワンの棒鋼・線材メーカーだ。

現在、スチールコードの高強度化は4,000～5,000MPaまで進んでいる。このような最先端の領域を研究開発する意義は、先頭を走ることによって、最先端の情報をキャッチし、ユーザーニーズに信頼性のあるソリューションを提供できることだ。

例えば、4,500MPa級の線材を実用化するためには鋼材開発だけではなく、伸線加工技術の高度化も必要だ。それらのブレイクスルーによって、ユーザーにもさまざまなノウハウが蓄積される。今後も棒鋼・線材分野は素材技術と加工技術の両輪で進化を遂げ、さらに効率的な生産技術も確立されるだろう。

鉄鋼材料の第1のメリットは、他素材よりも「高強度」という点だ。棒鋼・線材分野における研究開発はその先端を追求していく役割を担っている。スチールコード、橋梁用鋼線の技術開発だけではなく、例えばボルトの世界では、「水素脆化」が一つの重要な課題となっている。

「高強度化＝水素脆化」という図式は、薄板など高強度化を目指す鉄鋼製品共通の課題だ。棒鋼・線材の技術開発は、その課題解決でもトップランナーになっていく使命がある。

極限強度・高機能化の追求「新日鉄の高炭素鋼線」

鉄鋼材料はコストがリーズナブルで大量生産が可能であり、加工性、溶接性などに優れるといった多くのメリットを有していますが、他の素材に比べ強度が高いことが最大の特徴です。量産鋼種の中で最も強度が高い鉄鋼材料が高炭素鋼線です。

高炭素鋼線は古い素材ですが、近年の高強度化の進展は目覚ましく、鉄鋼材料の極限強度の追求という意味では、ナノオーダーで組織制御された最先端をいく素材です。スチールコードでは、タイヤの軽量化・低コスト化を目的に4,500～5,000MPaを視野に入れた開発が進められています。また、橋梁用鋼線は明石海峡大橋を上回る大型の吊橋が計画されており、建設費の削減が可能なケーブル用鋼線の高強度化への期待が高まっています。これらの開発は工業的に重要であるばかりでなく、鉄鋼材料の極限強度・高機能化の挑戦という側面もあります。また、高強度鋼線の実用化にあたっては、鋼材開発もさ

ることながら製鋼、圧延、熱処理、伸線の一貫開発の視点が必要であり、加工メーカーも含めた総合力の向上が今後ますます重要になると考えています。

新日鉄は、原子レベルでの組織制御と偏析・介在物制御技術を高め、今後も加工メーカーとの協業で高強度・高機能の高炭素鋼線を開発し提供することによって、社会貢献をしていきたいと考えています。



監修 技術開発本部 鉄鋼研究所
鋼材第二研究部 主幹研究員
樽井 敏三（たるい・としみ）

プロフィール

1955年生まれ、長野県出身。
1981年 新日鉄入社。
一貫して線材・棒鋼の研究開発に従事。
1992年 現職。