

高強度の最先端をいく 棒鋼・線材(2)

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、用途に応じてさまざまな機能が求められている。シリーズ2回目は、線材の高強度化のメカニズムを解説するとともに、実用化するために不可欠な「強度」と「延性」の両立への技術的挑戦を紹介する。

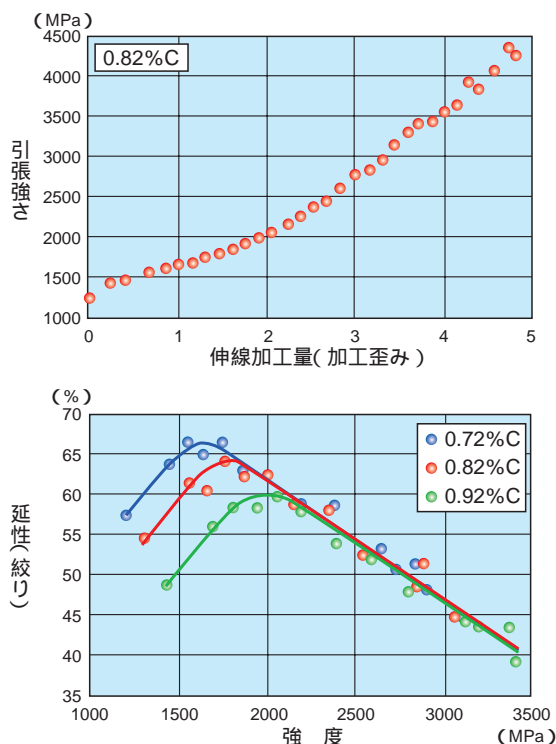
細くすればするほど 強度が増す高炭素鋼線

鋼線の強度はその線径と大きな関わりがある。線径が5～7mm程度の「橋梁用鋼線」「PC鋼線」の強度は約2,000MPaまで、0.2～0.4mmの「スチールコード」は4,000MPa前後まで強度を高めることができる。薄板、厚板、鋼管などの他鋼材とは桁違いの強度だ。鋼線を高強度化することで、建設コストの低減やタイヤの軽量化に寄与することができる。

では、なぜ線径が小さいと強度が増すのか。鋼線を細くするためには、伸線加工時に高い圧力をかける。そのときの伸線加工量（加工歪み）が大きくなるほど強度が上がるとい原理だ。鋼種にもよるが、1,200～1,500MPaの強度を持つパテンティング後の鋼線を伸線加工することで、どんどん強度が上がっていく。橋梁用鋼線やPC鋼線の歪み量を1.5前後とすると、スチールコードは3.5～4の歪みが加わる（グラフ1上段）。

この原理は鉄の組織変化で説明できる。フェライト相の幅（ラメラ間隔）が狭いほど強度が増すことは前号で触れた。パテンティング後の鋼線はフェ

伸線による強度・絞りの変化



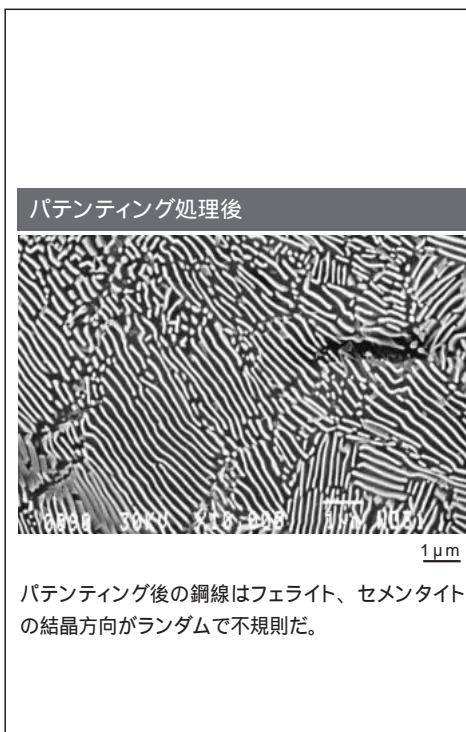
鋼線を細くするためには伸線加工時に高い圧力をかける。そのときの加工歪みが大きいほど、鋼線の強度が上がる。

加工歪みを増やし強度が限界を超えると、急激に延性が落ちていく。

実用化できる最高到達強度は、求められる延性とのバランスで決まる。

グラフ1

伸線による組織変化



ライト、セメンタイトの結晶方向がランダムで不規則だ。それを伸線加工すると、強度の高いセメンタイトと延性のあるフェライトの結晶が伸びて向きが伸線方向に揃ってくる。そして細くすればするほどラメラ間隔が狭まり強度が増していく。

通常、鋼は結晶粒径（フェライト粒径）が約10～30 μmで、国家プロジェクトとして開発が進められている「スーパーメタルの開発（高強度鋼）」（ ）でも0.5～0.8 μm程度だ。

しかし鋼線ではパテンティング直後に、その間隔が0.1 μm程度（1,200～1,500MPa）になり、最先端のスチールコードでは、さらに約20段階に分けて細く伸線加工することで、それを0.01 μmまで狭め、4,500MPaの強度までもっていくことができる（写真1）。

圧延後に結晶方向が揃い強度が向上する性質は、鋼材共通に見られる現象だ。しかし、薄板のような圧延材料の場合は、結晶が圧延方向だけに伸ばされ幅方向は伸ばされないため、方向によって結晶粒径が異なる。一方、線材では伸線加工に使われるダイス（ ）によって、圧延とは桁違いの強い圧力で均等に絞り込まれるため、結晶は伸線方向にしか向くことができない。その結果、ラメラ間隔が均等に狭まり、飛躍的に強

度が高まる。非常に強い圧力を加える超高強度鋼線の伸線には、ダイスに硬度の高いダイヤモンドが使われるケースもある（図1）。

高強度化のカギはパーライト変態

これまで述べてきたように、鉄の強度は低炭素の普通鋼に見られるフェライト単相よりも、高炭素のパーライト（セメンタイトとフェライトの2相）の方が高い。パーライトは少ない伸線加工量で高強度化しやすい。これは工業化する上で重要な要素だ。例えば、純鉄をいくら強い力で伸線加工しても高強度化の効果は得にくい。

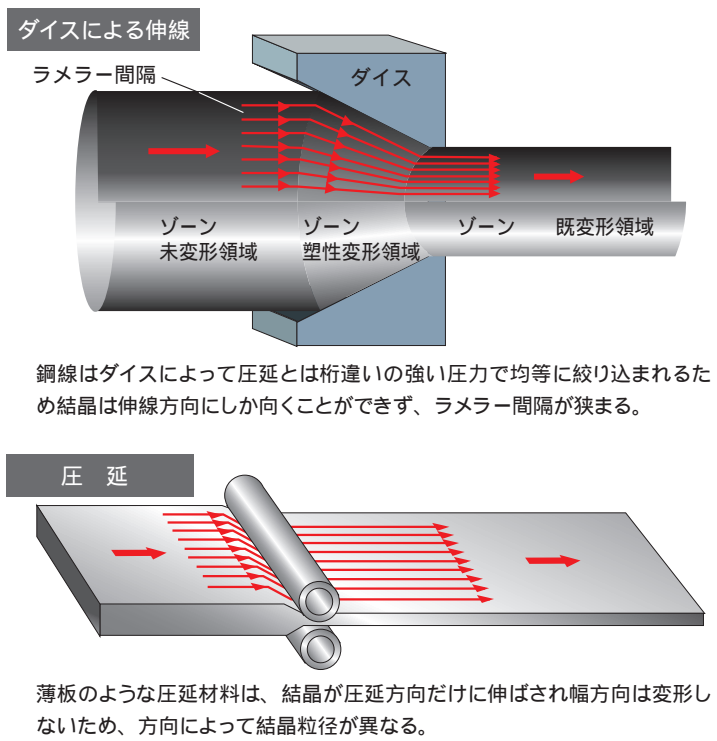
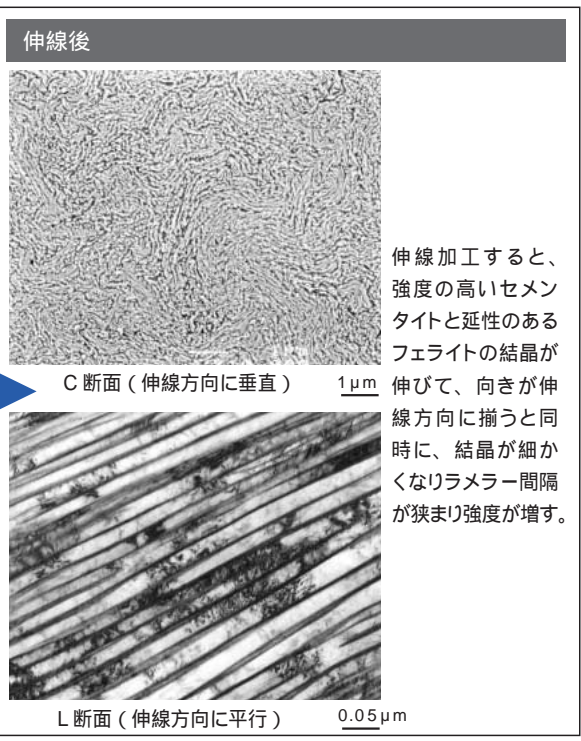
なぜパーライトを伸線加工すると飛躍的に強度が高まるのか。現在、そのメカニズムについて全ては解明されていない。一つの要因は、伸線で結晶が微細化されラメラ間隔が狭くなる「細粒強化」（前号参照）にある。また、加工によって転位の数が増加する結果、硬化していく「転位強化」（前号参照）も高強度化の要因となる。これは、針金を曲げ続けるとその部分が徐々に硬くなる現象と同じだ。

その他には、伸線加工により、最初は粒界のない

写真1

ダイスによる伸線と圧延の原理比較

図1





スーパーメタルの開発（高強度鋼）：強加工によって、フェライト粒径がサブミクロンの超微細粒鋼の実現を目指すプロジェクト。
ダイス：傾斜を持つ孔の開いた金型。棒鋼・線材を押し出す（引き抜く）ことで鋼材の径を細めることができる。

「強度」と「延性」の両立への挑戦

単結晶（セメンタイト）だったものがナノオーダーに細粒化され強度が高まる（セメンタイトの細粒強化）あるいは、安定した金属化合物のセメンタイト（ Fe_3C ）が伸線加工で分解され、分解したC（炭素）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）などの理由が考えられている。

強い力で加工すると、金属化合物の分解が起こることは従来から知られていたが、セメンタイトが全てなくなってしまうような現象も発見されている。「セメンタイト分解」の領域は、現在非常に注目されている材料研究分野だ。現在新日鉄は、高炭素鋼線開発の最先端を走っているが、セメンタイト分解による強度・延性の変化を重要な研究対象として位置付け、その分解機構を解明することでさらなる高強度鋼線の開発に結び付けようとしている。

セメンタイト分解のメカニズムが未解明な理由は、鉄の細かすぎる組織にある。強加工によって変化するセメンタイトは数ナノオーダー（結晶格子が数個サイズ）だ。あまりにも細すぎて通常の観察では見ることができないため、メカニズムがわからないというのが実状だ。

しかし最近では、100万倍（ナノ）オーダーで組織を解析できる「高分解能透過型電子顕微鏡（TEM）」（) や3次元アトムプローブ（) によって、点状に並ぶ鉄原子の一つひとつや、フェライトやセメンタイトの組織を見ることができるようになり、研究が大きく進展しつつある（写真2）。

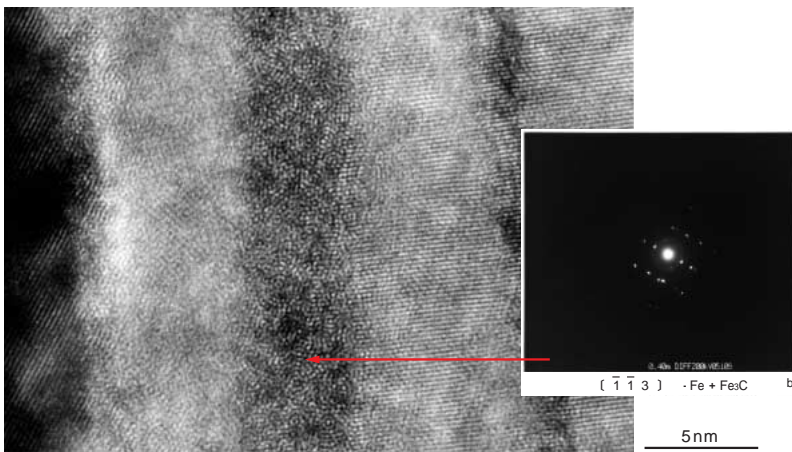
高炭素鋼線を実用化するためには、「強度」だけではなく、破断を防ぐ「延性」が欠かせない。

強度と延性の関係を見ると、橋梁用鋼線では強度が2,000MPaを超えると急激に延性が落ちていく。つまり、実用化できる最高到達強度は、延性とのバランスにかかっている。技術的に、強度だけを追求するのであればさらなる高強度化が可能だが、延性が著しく低下するため、現在、スチールコードでは4,000MPa前後が高強度化の限界値となっている。（グラフ1下段）

高炭素鋼線で重要な延性は、「伸び」や「絞り」ではなく、「ねじり」に強い特性だ。鋼線の延性の規格は、線径の100倍長の試験材の片側を固定して回転させる「ねじり試験」の回数によって決まる。製品が細くなればなるほどその回数が多くなる。

高い延性を持つ鋼線は、ねじれの力が鋼線断面に均一に加わり、数十回ねじれて最後は伸線方向と垂直のきれいな断面で破断する（正常破断）。しかし延性の低い線材は、ねじり変形の初期に伸線方向に沿って縦割れ（亀裂）が発生する（デラミネーション）。この「デラミネーション」の発生が、高強度化を阻害する最大の要因だ（写真3）。また、線径が太いと2,000MPa程度でデラミネーションが発生するが、線径が細ければ4,000MPaまで発生しない。これを「線径効果」と呼ぶ。こうしたデラミネーションの発生要因には多くの説が

高分解能電子顕微鏡で見た鉄の組織

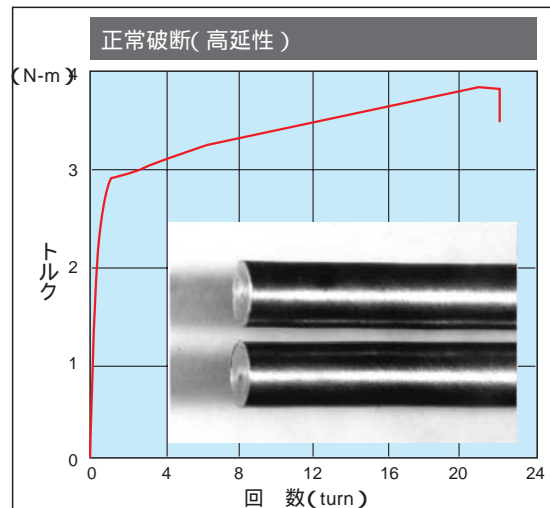


セメンタイト セメンタイト

100万倍（数ナノオーダー）で組織を解析できる「高分解能透過型電子顕微鏡（TEM）」で、点状に並ぶ鉄原子一つひとつや組織を見ることが出来る。

写真2

高強度化の阻害要因



高い延性を持つ鋼線は、ねじれの力が鋼線断面に均一に伝わり、伸線方向と垂直のきれいな断面で破断する。

高分解能透過型電子顕微鏡（Transmission Electron Microscope）：観察対象に電子線を当てて、透過した電子を拡大し組織や析出物を観察する電子顕微鏡。
アトムプローブ：観察対象の構成原子を1個ずつ分離測定し、その原子の種類と存在位置を調べる分析装置。

あるが、先述したセメントの分解も大きく影響していると考えられる。

高強度材を少ない伸線加工で

強度と延性を両立するための手法を加工工程で見てみる。加工工程で鋼線の高強度化を図るには、パテンティング処理後の鋼線自体の強度を向上させる、伸線加工量（加工歪み）を増やす、単位歪み当たりの強度の上昇量（加工硬化率）を上げる、また橋梁用鋼線やPC鋼線では、溶融亜鉛めっき（450）や熱履歴を与えるブルーイング処理時の強度低下量を抑えるなど、いくつかの方法が考えられる（グラフ2）。

このいずれの方法でも高強度化が図れるが、先述したとおり「延性」がネックとなる。上記のいずれの方法が「延性」を維持するのに最も良いのか。

延性を阻害するデラミネーション発生との因果関係で発生限界強度を見ると、実験の結果、パテンティング材の高強度化と、伸線加工量を減らし加工硬化率を上げる方法が、伸線加工量を増加させるよりも延性の維持に効果的なことがわかった。

例えば、最終的に2,000MPaの強度を目指す場合、低いパテンティング強度（1,000～1,300MPa程度）に対して伸線加工量を増やし目標値にもっていこうとするとデラミネーションが起きやすいが、1,400MPaのパテンティング材で伸線加工量を低減させるとそれが起こら

ない。つまり、高い強度のパテンティング材を使い、比較的少ない伸線加工量によって高強度化する方法が延性を維持するために有効だ。

パテンティング材の強化方法にはいくつかの方法がある。代表的手法は合金化だ。カーボン（C）、バナジウム（V）、クロム（Cr）、シリコン（Si）を添加すると強度が上がるが、最も汎用的なカーボンを使う方法が基本になっている。シリコンはフェライトを固溶強化させる働きで、クロムはパテンティング時のラメラ間隔を微細化させる働きで高強度化する。また、カーボンをベース（0.82%の炭素鋼）にクロムを添加（0.2～0.5%）すると、伸線加工後の加工硬化率が高いため高強度化しやすくなる。

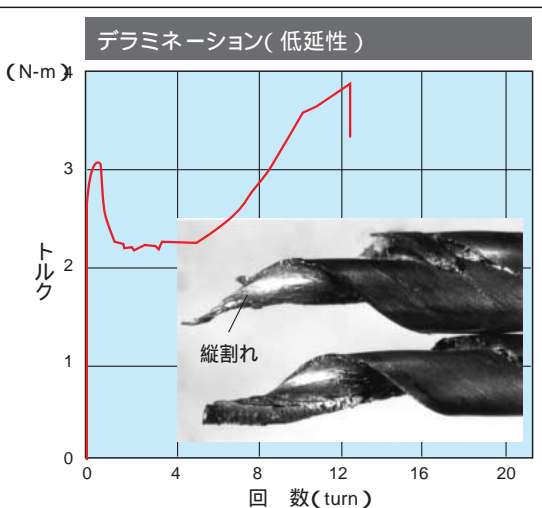
次号では、これまで述べてきたさまざまな技術をベースに進化し続ける「スチールコード」「橋梁用鋼線」の技術的動向を紹介するとともに、新日鉄の棒鋼・線材技術の今後を展望する。



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。

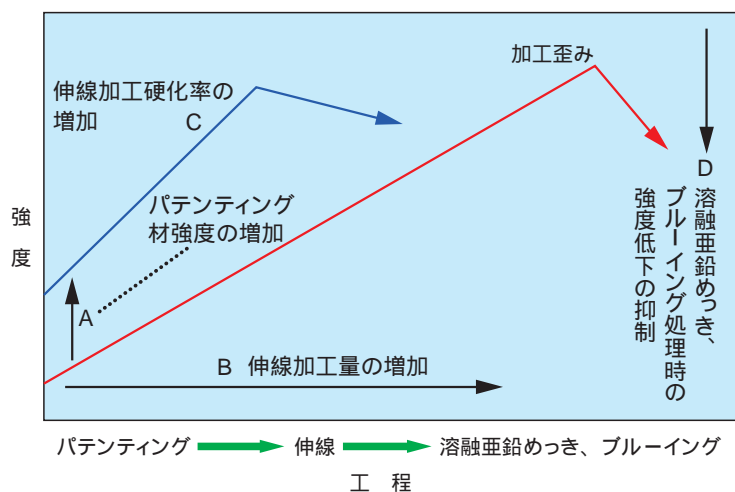
写真3



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。

高炭素鋼線の高強度化の考え方

グラフ2



強度と延性を両立するにはパテンティング材の高強度化と、伸線加工量を減らし加工硬化率を上げ延性を維持する方法が効果的だ。