

# 高強度の最先端をいく 棒鋼・線材(1)

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。今回のシリーズでは、棒鋼・線材製品がどのようにつくられ、どのような性質を持ち、「強さ」や「加工性」の点でどのような特長を持っているのかについて解説する。

## “鉄の棒” から さまざまな製品が生まれる

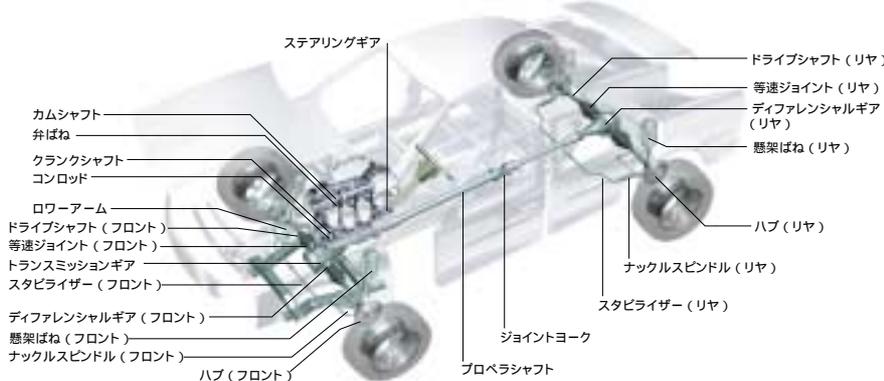
棒鋼・線材でできた製品をすぐにイメージできる人はどれだけいるだろうか。他の鋼材に比べ、実際に生活の中で目にする機会も少ない。

しかし、自動車には車体重量の約10%にあたる150キログラム前後の棒鋼・線材が使用されている。中でも、エンジン系部品(クランクシャフト、コンロッド、カムシャフト、弁ばねなど)や駆動系部品(ギア類、プロペラシャフトなど)の材料として棒鋼・線材は欠かせない(図1、写真1)。

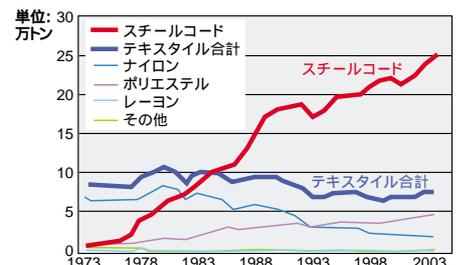
「走る、曲がる、止まる」という自動車の3つの基本機能を支えるこれらの部品は、一つでも壊れると自動車を走らせることができなくなる重要保安部品だ。

また自動車タイヤの補強材には、かつてナイロン、ポリエステルなどの有機繊維が使われていたが、「スチールコード」を使用することによりタイヤの耐久性(剛性)が著しく向上した。近年では走行中にタイヤがパンクする事故は減少している。現在、標準品となっている線径0.3mm前後のスチールコード(国内で年間30万t)は、高強度化により、省資源とタイヤの軽

自動車での棒鋼・線材の用途 図1



自動車用タイヤコード原材料消費量の推移 グラフ1



70年代後半からスチールコードが急増し、85年にテキスタイル(有機繊維)合計を上回った。

((社)日本自動車タイヤ協会の資料より作成)

自動車での棒鋼・線材部品 写真1



タイヤの構造図 図2



量化、高機能化に寄与している（グラフ1、図2）。

建築物や構造物では、PC（Prestressed Concrete）鋼棒、PC鋼線（\*）が電信柱などのポールやコンクリートの補強材に、橋梁用鋼線が吊橋・斜張橋のケーブル類に使われている（写真2）。これらの鋼材に共通する特徴は「強度が高い」ことであり、鋼線・鋼棒の強度は通常の鉄筋の3～4倍だ。

その他にも、棒鋼・線材から作られるボルト・ナット、各種ばねなどは、産業機械をはじめとする幅広い分野で使われており、身近なところではピアノ線、ギター弦、釣糸としても活躍している。これらの最終製品の形状や性能はさまざまだが、全てが同じような“鉄の棒”から作られており、新日鉄では材料となる棒鋼・線材を室蘭製鉄所、釜石製鉄所、君津製鉄所で生産している（表1）。

### 半製品で提供される 棒鋼・線材 パチンコ玉の例

棒鋼・線材が他の鋼材と異なる点は、半製品（熱間圧延までの製品）で提供され、その後、ユーザー（自動車メーカー、部品メーカーなど）での種々の加工・熱処理

工程を経て最終製品となることだ。厚板、薄板、パイプ、H形鋼など他の鉄鋼製品は、製鉄所で圧延し、形状や強度、伸びなどの材質を作り込んだ状態で提供される。

一例として、「パチンコ玉」が完成するまでの加工工程を紹介する。鉄鋼メーカーが製造した線材は二次加工メーカーに送られ、そこで図3のように伸ばしカットした後、表層と中心部の強度（硬さ）を変えるために表層の炭素量を増やす「浸炭処理」を行う。そして全工程間で数回研磨し、最後はクロムめっきを施す。

パチンコ玉が面白いのは、あの小さな玉が3層構造になっている点だ。表層約3μmのクロムめっきの下に、浸炭処理によって作り込まれた深さ約1mmの炭素を多く含んだ強度の高い層（0.8%C）があり、中心部にはもともとの材質である炭素が少ない比較的軟らかい層（0.2%C）がある（写真3）。材料の部位によって性質が異なるこうした材料を「傾斜材料」と呼ぶ。この構造によって、表面は硬く衝撃に強く、内部は衝撃を吸収してパチンコ玉の割れを防ぐ機能を持たせている。この浸炭処理はパチンコ玉だけではなく、歯車など棒鋼・線材を使った各種部品でも行われている。

また、パチンコ玉は寸法・重量の精密さが問われる。パチンコ玉の精度が「出玉」を大きく左右するからだ。

### 吊橋・斜張橋の事例



吊橋/因島大橋

斜張橋/横浜ベイブリッジ

写真2

### パチンコ玉の製造工程

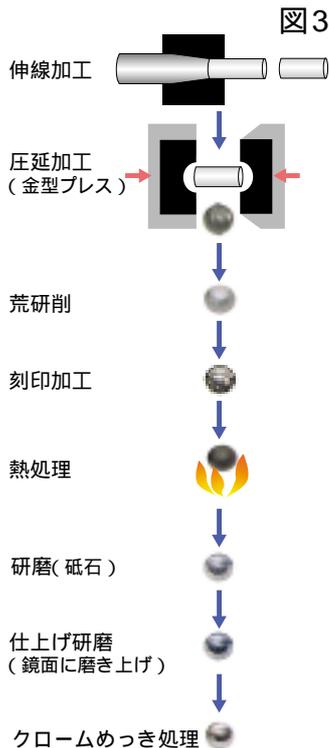
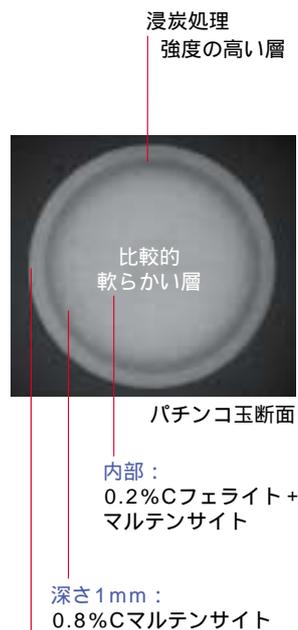


図3

### パチンコ玉断面

写真3



表層3μm :  
Crめっき

### 線材の種類と用途

表1

区分	規格名称	JIS 記号	主な用途
普通線材	軟鋼線材	SWRM	釘、針金、ホチキス針、金網
特殊線材	硬鋼線材	SWRH	ワイヤロープ、ビードワイヤ、スポーク
	ピアノ線材	SWRS	スチールコード、橋梁用鋼線、PC鋼線
	ばね鋼線材	SUP	懸架ばね、弁ばね
	極低炭素鋼線材		ガラス封入線
BIC (Bar in Coil)	冷間圧造用線材	SWRCH	各種ボルト・ナット、機械部品
	低合金鋼線材	SCM	各種ボルト・ナット、機械部品
	磨棒鋼用線材	SGD	磨棒
	鉄筋コンクリート用線材	SD	鉄筋

線材 (Wire Rods) : 熱間圧延され、コイル状に巻かれた鋼材。  
線、鋼線 (Wires) : 線材を伸線など冷間工・熱処理したもの。

備光新星、佐藤鉄工㈱資料より改編

\*PC鋼棒、PC鋼線：引張に弱いコンクリートに圧縮力を付与してコンクリート構造物の強度を高めるプレストレストコンクリートに使用される高強度の鋼棒、鋼線。

寸法0.01mm、重量0.01gを誤差の許容範囲とする加工工程での高精度な形状制御が欠かせない。

そのため半製品である線材では、「加工性」が重要となる。こうした例からもわかるように、棒鋼・線材の特性の作り込みには、他の鋼材とは異なるアプローチが求められる。

## 加工工程を考え、あえて強度を落とす「調整冷却」

一般的に、棒鋼・線材部品では、素材となる棒鋼・線材のコストは部品製造コストの約20%といわれている。(グラフ2)。つまり、二次加工コストが大きい。必然的に鉄鋼メーカーでは素材だけの視点だけではなく、最終製品に至る全ての工程を見渡した鋼材開発が必要だ。

最終製品が高強度を求めるものであったとしても、鉄鋼メーカーで作られる半製品(熱間圧延品)は、「成形しやすく加工工程を省略できるような鋼材」を開発・提供することが求められる。言い換えれば、半製品の段階では、最終製品に必要なとされる高強度特性とは相反する「いかに軟らかくするか」という目標への挑戦が必要だ。

そのポイントとなる技術が「調整冷却」だ。通常、熱間圧延後に鋼材を急速に冷やすと強度は高まり、ゆっくり冷やすと強度が下がる。「徐冷設備」では、熱間圧延後、ヒーターでコイルを温め冷却速度を遅くして強度を落としている。

例えば、ボルトは線材を冷間鍛造(室温)して作られるが、加工の際には軟らかくなければ成形できない。そのため、熱間圧延後にそうした徐冷を行い強度を下げ、

冷間鍛造性を向上させている。そして加工後、再び熱処理を行い求められるレベルまで強度を高めている。

つまり、圧延後の半製品は軟らかい状態にしておき、ユーザーでの工程で加工(冷間鍛造)を行った後に高強度化させる。半製品までの製鉄所の工程ではこうした加工工程を踏まえ、あえて「軟らかい」材質をつくり込んでいる。

製品によって求められる強度が異なるため、調整冷却には冷却速度の遅い「徐冷設備」をはじめ、常温の空気を送り比較的速く冷却する「ステルモア(空冷)」、塩を加熱・液体化(約550℃)して、その中に線材を通す「DLP(ソルト浴冷却)」、沸騰したお湯に線材を通す「EDC(熱湯冷却)」などの方法がある。

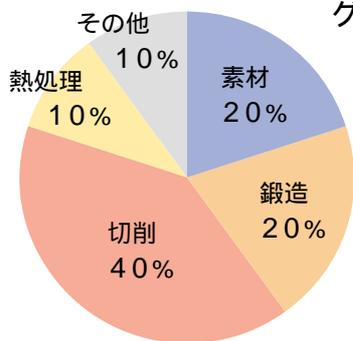
中でも「DLP設備」は、高強度が求められる高炭素鋼の強度と延性調整に効果的で、ユーザーでのパテント処理(後述)の工程省略に寄与している。鉛などの金属ではなく塩を使うのは、熱伝導性の良さに加えて、線材に付着した塩をお湯で簡単に流せ、回収・再利用が容易なことや鉛に比べ環境負荷が少ないなどのメリットがあるためだ(図4)。

## 組織制御で鉄の強度を操る

このように、棒鋼・線材の特性はユーザーでの加工性の良さが第1条件となるが、使用目的・ニーズが幅広いため、最終製品に求められる強度のレベルも300~5,000MPa( )と広範囲にわたる。例えば、針金やフェンスなどに使われる普通線材は300MPa程度で、先述した

### 機械部品製造コストの内訳例

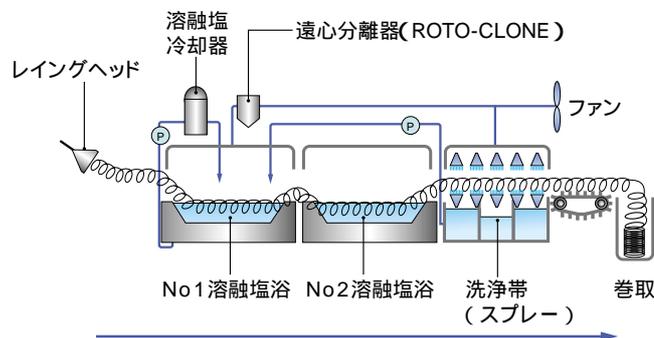
グラフ2



一般的に、部品製造コストのうち素材となる棒鋼・線材自体のコストは約20%に過ぎず、加工処理コストが大部分を占める。最終製品に至るまでの全ての工程とコストを見渡した鋼材開発が求められている。

### 調整冷却の例(DLP)

図4



「調整冷却」の一つ「ソルト浴(DLP)」は、塩を加熱・液体化(約550℃)して、その中に線材を通し強度をコントロールすることによって、ユーザーでの工程省略に寄与している。

メガパスカルは強度を示す単位。1kgf/mm<sup>2</sup>=9.80665MPa。1kgf/mm<sup>2</sup>は1mm<sup>2</sup>の面積に1kgfの力が加わっても耐える強度を表す。

タイヤの「スチールコード」やシリコンウェーハを切断するソーワイヤでは、強いもので4,000MPa級の高い線材が使用されている。

そのため棒鋼・線材の化学成分や結晶組織は多様だ。鉄は炭素量が増えるほど高強度化する。一般的に、薄板や厚板製品の場合は、延性（伸び）など他の特性との兼ね合いで約0.2%までしか含有することができない。しかし、棒鋼・線材では求められる強度に応じて含有する炭素量は0.01~1.1%にも及ぶ。そして、その幅広い炭素量に伴い、強度や延性、粘り強さ（靱性）に影響する組織形態も多岐にわたる（図5）。

現在、自動車メーカーはCO<sub>2</sub>排出削減に向けて、車体の軽量化による燃費向上を目指している。最近では、軽量のアルミを高強度化したアルミ合金も採用されるようになった。採用の目安となる指標は、重さ当たりの強度を表す「比強度（引張強さを比重で割った数値）」だ。

一般的に高強度鋼と呼ばれる800~1,200MPaの鋼材でもアルミ合金の比強度には及ばない。しかし、鉄鋼材料にはさまざまな組織形態があり、鋼材の強度を高める方法として、「細粒強化」「固溶強化」「析出強化」「転位強化」などの組織制御技術（ ）がある。

一例として「細粒強化」を説明する。これは通常20~30μmの結晶（フェライト）の粒径を細粒化し強度を上げる方法で、特にその粒径が1μm以下になると劇的に強度が増す（グラフ3）（写真4）。こうした微細な組織制御と加工熱処理技術を組み合わせることで、極限の強度を目指すことも可能だ。現在では、アルミ合金の強度に匹敵する、あるいは超越する「超高強度鋼」も開発されている。

## 強度の極限を追求する 「高炭素鋼線」

棒鋼・線材製品の中で、究極の強度を追求した材料が「高炭素鋼線」だ。まずその加工プロセスを、「橋梁用鋼線」を例に見てみる。

二次加工メーカーではまず初めに、熱間圧延した半製品に加工性を保ちながら強度を高めるための「パテンティング」と呼ばれる熱処理を施す。この技術は、19世紀にイギリスで特許（パテント）第1号の案件となったことから「パテンティング」と名付けられた。石炭掘削に使われていたワイヤロープの高強度化を図るために考案されたと言われている。（第1次産業革命の時代に強度の高い良質なワイヤが必要となり開発されたが、長いこと秘密にされ、1854年英国の特許法が成立した際、第1号の特許としてJames Horsoll（フォルスフォル）が申請した）。

この熱処理は、熱伝導の良い金属浴で等温かつ均一に熱処理し、常温で鋼中に存在するフェライトとセメンタイトの組織を高温時に現れるオーステナイトに変え、そこから急速冷却してパーライト（セメンタイトとフェライト2相でできた層状組織）変態を起こさせる。

この熱処理法で生まれるパーライト中のセメンタイト相同士の幅（ラメラ間隔）によって線材の強度が決まり、間隔が細かいほど強度が上がる。仮に、パテンティングを行わずにそのまま常温で冷やすと、ラメラ間隔が不均一になり伸線加工性が低下し、最終的な強度も低下する。そのため、パテンティングは高強度化を狙う線

### 状態図

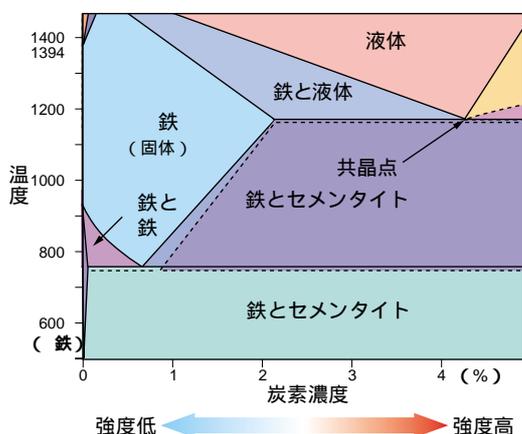
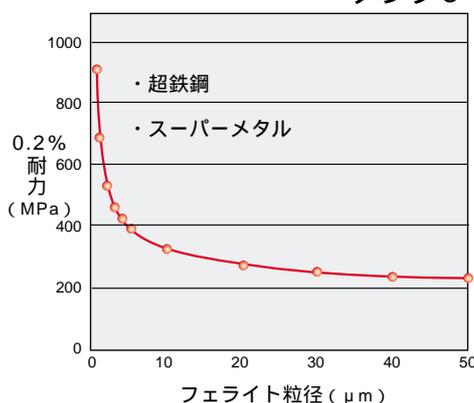


図5

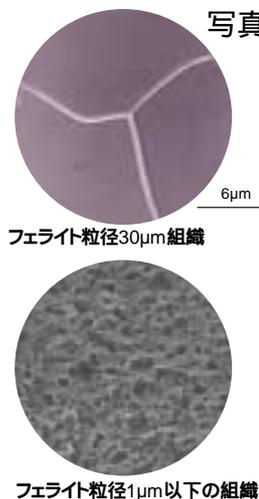
### フェライト粒径と強度の関連

グラフ3



### フェライト粒径比較

写真4



組織制御技術：「固溶強化」は多量の侵入型原子（炭素、窒素など）や置換型元素（シリコン、マンガンなど）を、「析出強化」は化合物（析出物）を加えることにより、転位を動きにくくし鋼材を硬くする方法。「転位強化」は、加工によって鋼材中に転位の数が増加する結果起こる硬化現象。

材製造には不可欠なプロセスとなっている。

鉄組織では通常、高温から低温にする際にオーステナイトの粒界（結晶粒同士の境界）からパーライトが生まれ成長していく（図6）。950 から550 まで一気に温度を下げる際に、均一にパーライト変態させることによって、非常に硬いがもろいセメントタイトの相と、軟らかくて伸びの良いフェライトの相が生まれる（写真5）。ちなみに自動車鋼板などの加工性に富む材料は軟らかいフェライトの単相できている。

このパテンティングを省略できれば、ユーザーでは大きな省力効果が生まれる。先ほど紹介した「DLP設備」はそのための技術だ。550 前後のソルト浴で均一に調整冷却し、半製品の段階でパーライト変態させている。「PC鋼線」の場合も、新日鉄では「DLP設備」によってユーザーでのパテンティングを省略している。

橋梁用鋼線ではパテンティング後、伸線加工しやすくするために酸洗・燐酸亜鉛皮膜処理という「潤滑処理」が施され、冷間(室温)で数段階に分けて徐々に伸線加工される。そのプロセスで、例えば、熱間圧延後の線径13mmの半製品が7mmまで細くされる。そして最後に、耐食性を向上させるための「溶融亜鉛めっき」が施される。

一方、タイヤ補強材として使われる線径の細い「スチールコード」は、「橋梁用鋼線」「PC鋼線」よりも工程が多い。例えば、線径5.5mmの圧延線材（半製品）であ

ば、中間伸線によってまず約3mmまで細くした後、中間パテンティングを行い再び伸線して1.5mmにし、そして最終パテンティングおよび黄銅（プラス）めっき（タイヤゴムとの密着性を高める）を施し、0.3mmまでさらに伸線加工して撚り線にする（図7）。

中間パテンティングが必要な理由は、冷間での伸線だけでは5.5mmから1.5mmまで1回で伸線加工できないからだ。強い圧力を一気にかけると断線してしまう。新日鉄では現在、この中間パテンティングなどの熱処理を省略できる線材開発にも取り組んでいる。

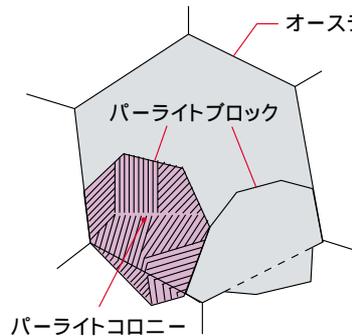
一般的に全ての鋼材は、高強度化すればするほど延性（軟らかさ）が低下するため、実用化するうえで高強度化の限界は延性がネックとなっている。つまり、高強度の高炭素鋼線の技術的ポイントは、「高強度化」を図りながら「延性」を確保するからだ。次号ではその技術的挑戦について説明する。



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

## パーライトの組織構成

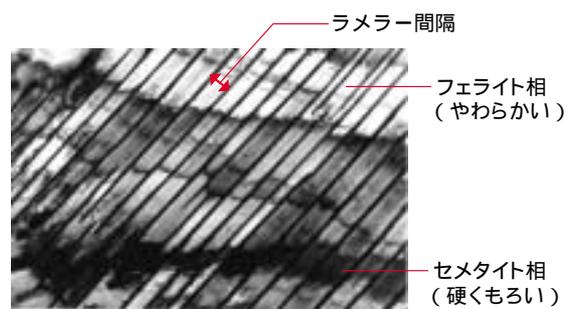


鉄組織は高温から低温になるときに、オーステナイトの粒界（結晶粒同士の境界）からパーライトが生まれ成長していく。このパーライトは硬いセメントタイト相と軟らかいフェライト相でできた層状組織で、鋼材の加工性と強度を両立させる性質を持つ。

パーライトブロック：線材の延性( 絞り )に影響する組織因子で、細かいほど延性が向上。フェライトとセメントタイトの結晶方位が同一の領域。

図6

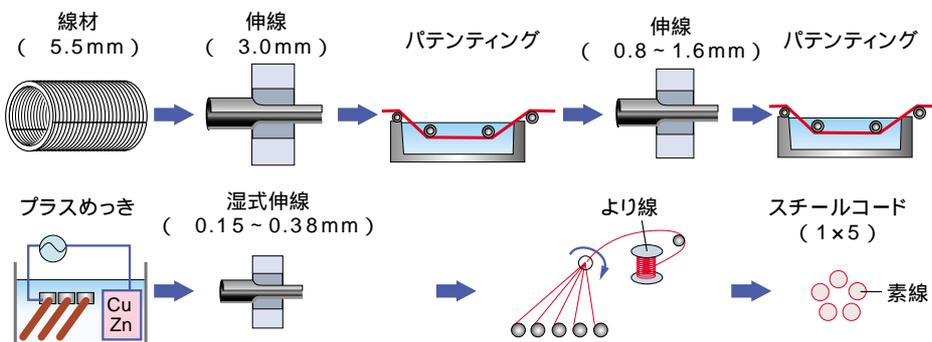
## ラメラ間隔を示す相の写真 写真5



線材の強度は、パーライト中にあるセメントタイト相同士の幅（ラメラ間隔）によって決まる。線材の高強度化を図るためには、この幅を均一かつ狭くする必要がある。

## スチールコードの製造工程

図7



線径の細いスチールコードは、断線を防ぐため段階的に伸線される。線径5.5mmの圧延線材（半製品）の場合、中間伸線でまず約3mmまで細くした後、中間パテンティングを行い再び伸線して1.5mmにし、最終パテンティングおよび黄銅（プラス）めっきを施し、0.3mmまでさらに伸線加工して撚り線にする。