

# 高強度化の極限への挑戦

## Challenge for the Maximum Tensile Strength Steel Cord

田代 均<sup>\*(1)</sup>  
Hitoshi TASHIRO

### 抄 録

タイヤの補強材として使用されているスチールコードは最強の工業材料である。軽量化の強い要請により着実に高強度化が進み、0.20mm 4 000MPa級が実用化された。高強度化限界から推定すると伸線加工したパーライト鋼はさらに高強度化可能である。高強度化の極限への挑戦の視点からスチールコードのマイクロ組織の特徴、線径効果、高強度化限界、今後の発展性などについて述べた。

### Abstract

Steel cord used as tire reinforcement is the strongest industrial material. Strong demand for lighter weights propelled the steady increase in higher tensile strengths to the use of 0.20 mm/4,000 MPa class. Estimating from the boundary of high tensile strengths, higher tensile strength is possible with pearlite steel as drawn. The following describes the features of the micro-structure of steel cord, size effect, limit of high tensile strength and the potential for future expansion from the view of challenging for maximum tensile steel strength.

### 1. 緒 言

構造材料として鉄鋼、非鉄、高分子材料、セラミックスなど種々のものが利用されているが、ラジアルタイヤの補強材として使用されているピアノ線のスチールコードが最強の工業材料である。スチールコードはフェライト/セメンタイトが層状に並んだパーライト鋼を伸線加工強化したもので、高融点金属のWやNi, Mo, Coなどを多量に含んだ高合金鋼よりも高強度である。

軽量化ニーズに応える形で高強度化が着実に進み、0.9%C過共析鋼線材により0.20mm 4 000MPa級スチールコードが実用化された。更に5 000MPa級をも視野に入れた開発が進められている<sup>1)</sup>。このようにスチールコードの高強度化が進んだ背景には、中心偏析、非延性非金属介在物の低減などの製鋼技術、二次加工による延性改善技術の進歩がある。ここでは、高強度化の極限への挑戦の視点から材料学的にスチールコードのマイクロ組織の特徴、線径効果、高強度化限界、今後の発展性などについて述べる。

### 2. スチールコードのマイクロ組織の特徴

鋼の強化法には大きく分けて固溶強化、転位強化(冷間加工硬化)、粒界強化(微細粒化)、析出強化がある<sup>2)</sup>。スチールコードでは伸線による冷間加工硬化、パーライトラメラ間隔(以降ラメラ間隔と呼称)の微細化が利用されている。パーライト鋼の高強度化にはパテンティング材のラメラ間隔を微細化し、引張強さ、加工硬化率を大きくして、伸線加工歪をできるだけ小さく抑えることが

有効である<sup>1)</sup>。パーライト鋼の強度支配因子は主としてラメラ間隔であり、ラメラ間隔の微細化と延性確保に有利なパーライトの配向度の改善によって限界伸線加工歪をより大きくできる<sup>3,4)</sup>。

極細鋼線のスチールコードは、太径線と異なり伸線加工強化率が55%を超え、高強度化するほどこの比率が大きくなる。伸線加工によりラメラ間隔、セメンタイト厚さが減少するとともに伸線加工方向に整列し、〈110〉繊維集合組織を形成する。鋼中の薄い板状セメンタイトはかなりの塑性変形能を有する。図1<sup>5)</sup>に共析パーライ

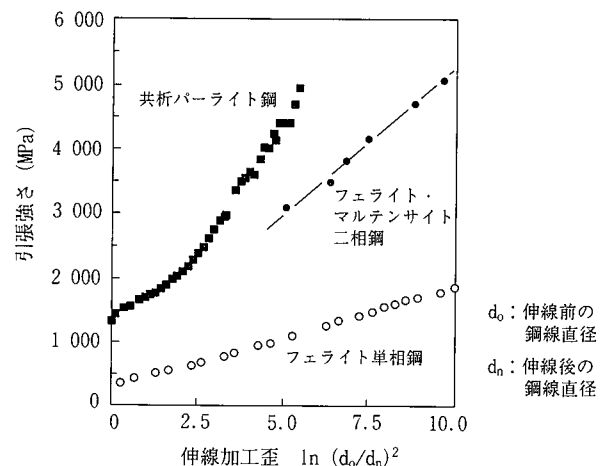
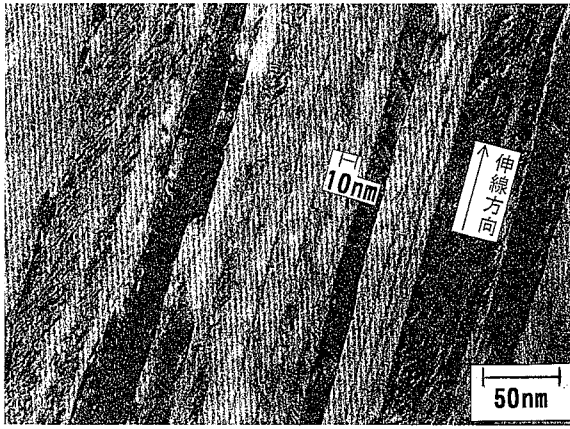


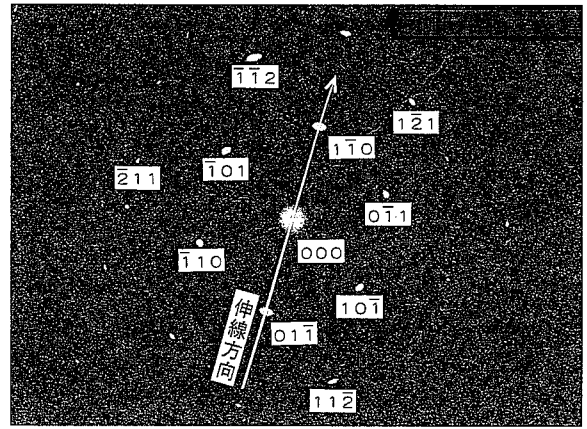
図1 共析パーライト鋼、フェライト・マルテンサイト二相鋼、フェライト単相鋼の伸線加工硬化曲線

<sup>\*(1)</sup> 釜石製鐵所 製造部 主幹研究員 工博

岩手県釜石市鈴子町23-15 ☎026-8567 ☎(0193)22-5554



明視野像



制限視野電子線回折像

写真1 0.20mm 4 000MPa級プラスめっき鋼線の透過電子顕微鏡組織

ト鋼と他の組織の鋼の伸線加工硬化曲線を示す。共析パーライト鋼は、C量の低いフェライト単相鋼あるいはフェライトとマルテンサイトからなる二相鋼に比較して加工硬化率が大きく、小さな伸線加工歪で高い引張強さが得られる。微細パーライト組織は引張強さが高いばかりでなく、伸線加工性も良好である。写真1の4 000MPa級の透過電子顕微鏡組織に示すごとく、セメントタイトの分断もなくラメラ間隔が約10nmに微細化している。

### 3. 線径効果

引張強さは、単位面積当たりの力(N/mm<sup>2</sup>=MPa)となっているので、線径の影響は既に入っていると考えられがちである。しかし、鋼線の引張強さを考える場合、線径が非常に重要な意味を持つ。線径が大きいものほど伸線加工時に均一変形させるのが難しく、延性が劣化しやすいので伸線加工歪を大きくとれず、高強度化が難しい。図2<sup>3)</sup>に示すように伸線加工歪に対する加工硬化量はほぼ同じなので、線径の大きいものほど絞りが低下しやすい。

各種高強度材料の線径と引張強さの関係を図3<sup>6)</sup>に示す。完全結晶のウイスカーにも線径依存性が見られ、線径が大きくなるほど引張強さが低下する<sup>7)</sup>。これは、線径が大きくなると完全結晶の形で成

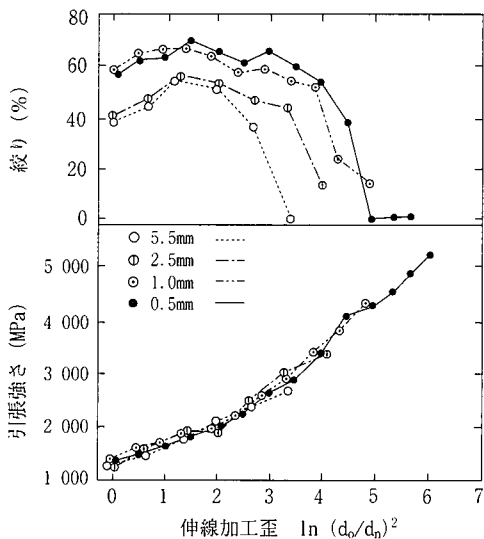


図2 種々の線径の共析パーライト鋼の伸線加工時の引張強さと絞りの変化

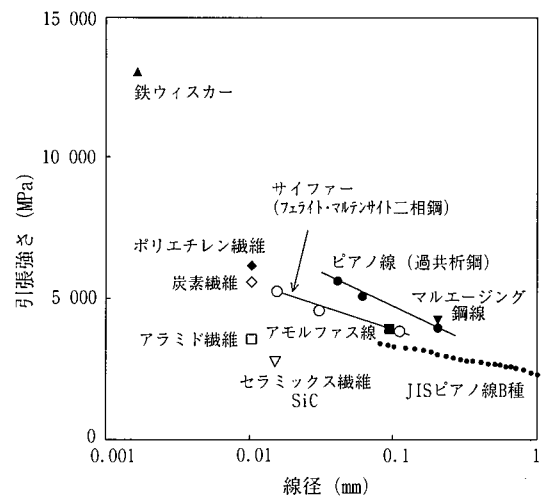


図3 各種高強度材料の線径と引張強さ

長するのが難しくなるためである。有機、無機繊維ともに線径は約10μmなので、線径を考慮すればピアノ線の強さがより一層際立つ。結晶質ではないアモルファス線も過共析鋼ピアノ線より引張強さが低く、捻りに弱い。

線径効果については断片的な研究があるのみで、説明は進んでいない<sup>3, 8-10)</sup>。線径効果が説明できればスチールコードの高強度化研究も一段と進むものと考えられる。

### 4. 高強度化限界

高強度化を図るには二つの方法がある。完全結晶化と不完全結晶の利用であり、構造材料としては不完全結晶が利用されている。鉄の完全結晶の理論強度については、10 000~13 000MPaの値が出され、数μm直径の鉄ウイスカーで強度が実測されている。スチールコードを含めて構造材料は転位などの格子欠陥を有する不完全結晶であり、限界強度を推定するのは非常に難しい。高木、河部により予測された転位強化、粒界強化、固溶強化、析出強化の限界値<sup>2, 11)</sup>を利用して単純加算により高強度化限界を推定すると、表1に示す11 500MPaと5 000MPaになる。既に40μmのパーライト鋼線では5 700MPaの引張強さが得られているので<sup>12)</sup>、高強度化限界は11 500MPaと考えたい。

パーライト鋼線の高強度化限界について、ラメラ間隔が主な強

表1 各強化素機構による強化能の予測 (MPa)

強化素機構	高木(1994)	河部(1982)	備考
転位強化	5 000	900	導入できる転位密度の限界
粒界強化	2 000	600	結晶粒微細化の限界
固溶強化	500	500	固溶量の限界
析出強化	4 000	3 000	析出量の限界
高強度化限界	11 500	5 000	各強化素機構の単純加算

度支配因子と仮定した(1)式<sup>13)</sup>を利用して推定する。

$$TS=1\,000+26\times l_p^{-1} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、TS：パーライト鋼伸線加工材の引張強さ (MPa)

$l_p$ ：ラメラ間隔 ( $\mu\text{m}$ )

伸線加工に伴いラメラ間隔が小さくなるとともに、セメンタイト板の厚さが薄くなる。セメンタイトの単位胞の大きさの0.4nm程度がセメンタイト板の変形限界と考えると、その時のラメラ間隔は約3nmであり、引張強さは約10 000MPaとなる。転位強化、粒界強化で約10 000MPaなので、パーライト鋼伸線材の更なる高強度化の余地は極めて大きく、スチールコードの高強度化は今後も進むと考える。

工業材料は実際の使用状態に耐える必要があるので、強度ばかりではなく延性が必要である。スチールコードは強度が強く、かつ延性に富んでいる。鋼線の延性指標にはデラミネーション(捻り試験時に観察される伸線加工方向に沿った鋼線の縦割れ)、捻回値、絞り、伸びなど種々ある。どの指標がクリティカルかについては議論があるが、デラミネーションがよく利用される。捻り試験でデラミ

ネーションが発生しなければ延性に富んでいると判断する。延性を無視すれば限りなく伸線加工できると誤解されがちであるが、延性が大きく劣化するとダイス口付け時に断線し、伸線加工できなくなるので得られる最大強度には自ずと限界がある。

## 5. 結 言

以上述べたように、スチールコードは延性の優れた最強の工業材料である。軽量化要求が続く限り今後も高強度化は進んでいくので、極限強度への挑戦の意味ではトップランナーである。パーライト鋼伸線材の限界強度は約10 000MPaと完全結晶並みと予測されるので、スチールコードの更なる高強度化が可能である。

## 参考文献

- 1) 高橋稔彦, 落合征雄, 田代均, 大橋章一, 西田世紀, 樽井敏三: 新日鉄技報. 354, 39(1994)
- 2) 牧正志: 第29・30回白石記念講座. 日本鉄鋼協会. 1995, p.65
- 3) 田代均, 佐藤洋: 日本金属学会誌. 55, 1232(1991)
- 4) 田代均, 佐藤洋: 日本金属学会誌. 55, 1078(1991)
- 5) 高橋稔彦: 金属. 66, 19(1996)
- 6) 田代均: まてりあ. 35, 1177(1996)
- 7) 後藤共子: 繊維と材料. 葦華房. 1991, p.27
- 8) 小川陸郎, 金築裕, 平井洋: 神戸製鋼技報. 35, 63(1985)
- 9) 五弓勇雄, 木原諄二, 前沢明広: 鉄と鋼. 60, A127(1974)
- 10) 浅川基男, 塚本孝, 相原賢治, 永井博司, 須藤忠三: 住友金属. 45(4), 41 (1993)
- 11) 友田陽: 鉄鋼の高強度化の最前線. 日本鉄鋼協会. 1995, p.45
- 12) 落合征雄, 西田世紀, 大羽浩, 川名章文: 鉄と鋼. 79, 1101(1993)
- 13) 樽井敏三, 田代均, 佐藤洋: 材料とプロセス. 5, 2062(1992)