

ハイテンスチールコードの現状

State of the Art for High Tensile Strength Steel Cord

田代 均^{*(1)}
Hitoshi TASHIRO

樽井 敏三^{*(2)}
Toshimi TARUI

抄 録

自動車の軽量化による燃費改善ニーズに対応してラジアルタイヤの補強材のスティールコードの高強度化は着実に前進した。中心偏析、非延性非金属介在物の少ない清浄な0.9% C 過共析鋼線材と二次加工による延性改善技術の組み合わせにより4 000MPaまで実用化された。高強度化の考え方、強化法、ミクロ組織の特徴、二次加工による延性改善技術、到達強度レベル、今後の技術課題について述べた。

Abstract

The tensile strength of steel cord, by which steel radial tire is reinforced, is steadily progressing in accordance with the need for lightening of cars. 4,000MPa class steel cord is commercialized by the improvement of ductility during wire drawing based on 0.9% C hypereutectoid steel wire rods. This report describes the strengthening concept, characteristics of strengthening method and micro-structure, improvement of ductility during wire drawing, maximum strength level, and the future technical subjects.

1. 緒 言

ラジアルタイヤの補強材のスティールコードは、モータリゼーションの波に乗り、世界で約100万 t/年使われている延性の優れた最強の工業材料である。これはスチールラジアルタイヤが安全性、耐久性、運動性などで優れた性能を示すためである¹⁾。スティールコードは超硬あるいはダイヤモンドダイスにより湿式潤滑極細伸線加工された0.15～0.38mmのプラスめっき鋼線を2～39本撚ったものである。図1にスチールラジアルタイヤの断面図を示す。

タイヤの軽量化、性能向上などの市場ニーズを反映してスティールコードの高強度化が進んだ。引張強さは1970年頃には0.20mmで2 800MPa程度であったが、1980年代には3 200～3 400MPa、1990年代初期に3 600MPa、1998年頃には4 000MPaに達した^{2,7)}。高強度化に伴いスティールコード用線材のC含有量は0.7% C 亜共析鋼から0.8% C 共析鋼、0.9% C 過共析鋼へと高くなってきた。この背景には中心偏析、非延性非金属介在物を低減する製鋼技術、及び生引き性に優れたパーライト組織、表面肌性状に制御する線材圧延、調整冷却技術と析出フェライト、セメントタイトを抑制するパテンティング、変形抵抗の大きい微細パーライト組織の延性を低下させない伸線などの二次加工技術の進歩がある^{2,3,7)}。

ここでは主に材料学的視点から高強度化の考え方、強化法、ミクロ組織の特徴、二次加工による延性改善技術、到達強度レベル、今後の技術課題を述べる。

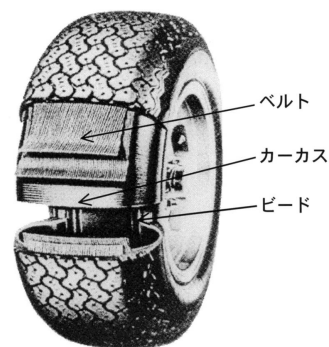


図1 スチールラジアルタイヤの断面図

2. 高強度化の考え方

パーライト鋼線の強度を増加させる方法は、パテンティング材強度の増加、伸線加工量の増加、伸線加工硬化率の増加がある。スティールコードの高強度化ではこれらをうまく組み合わせている。図2に細径、太径高強度鋼線の引張強さに占めるパテンティング、伸線加工強化比率の比較を示す。細径のスティールコードでは約60%以上が伸線加工強化であり、引張強さが高くなるほどその比率が大きくなる。高強度化には中心偏析、非延性非金属介在物の少ない高清浄度高炭素鋼線材と二次加工技術の最適組み合わせが必要である。図3にはスティールコードの高強度化時のパテンティング材引張強さ、伸線加工歪の推移を示す。C量を高め、パテンティング材の引張強さを高めるとともに伸線加工歪も大きくしている。C量が

*⁽¹⁾ 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番15号 〒026-8567 TEL:(0193)22-5554

*⁽²⁾ 鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 主幹研究員

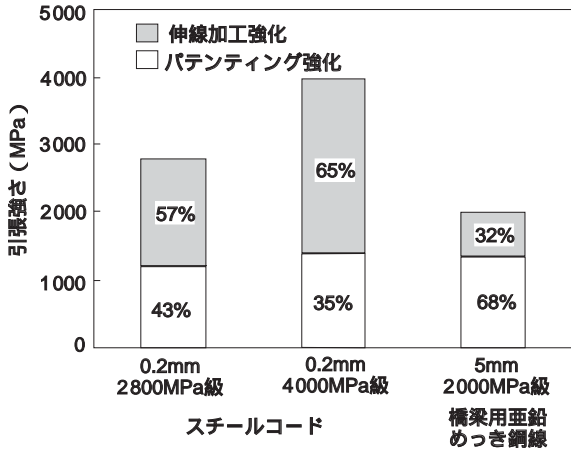


図2 細径、太径高強度鋼線の引張強さに占めるパテンティング、伸線加工強化比率の比較

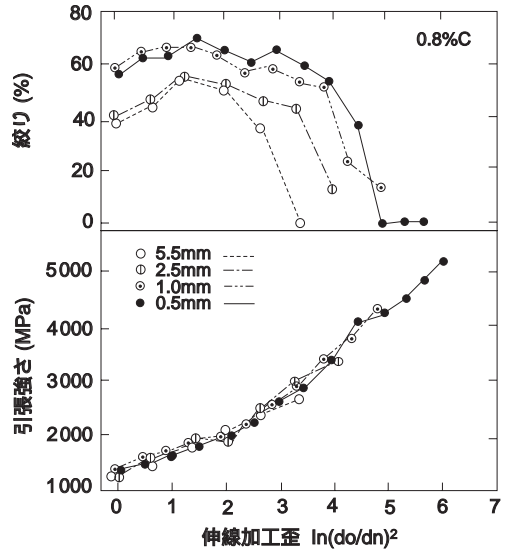


図5 種々の線径の共析パーライト鋼の伸線加工時の引張強さと絞りの変化

が高くなるので、同じ線径で延性を維持して引張強さを大きくする必要はある。

3. 強化法、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、細粒強化、析出強化がある⁸⁾。スチールコードでは転位強化(冷間伸線加工強化)、細粒強化(パーライトラメラ間隔微細化)が利用されている。最近、実用鉄鋼材料における結晶粒超微細化が注目されているが、ある意味では線材こそ最も早くから結晶粒微細化による高強度化を活用してきたと言える⁹⁾。

パーライト鋼の高強度化にはパテンティング材のパーライト組織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抑えることがデラミネーション防止に有効である⁵⁾。また、伸線加工による加工硬化の定式化が行われ極細鋼線の強度予測が可能になっている¹⁰⁾。写真1に4000MPa級の透過電子顕微鏡写真を示す。セメントイトは明確に残存し、ラメラ間隔は約10nmに超微細化していることがわかる。

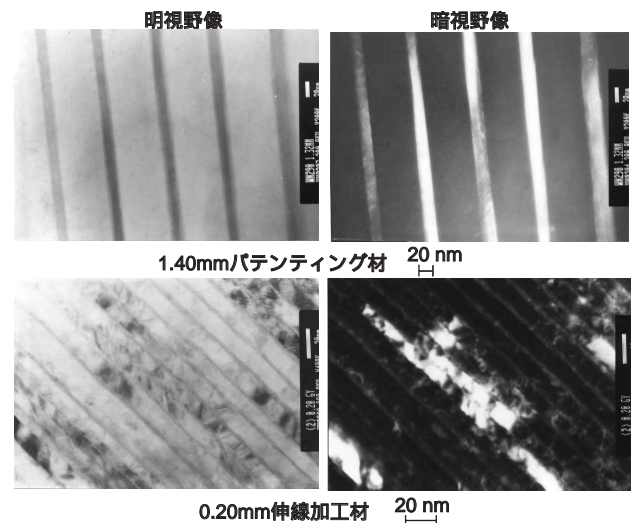


写真1 0.9% C 4000MPa級伸線加工、パテンティング材の透過電子顕微鏡写真

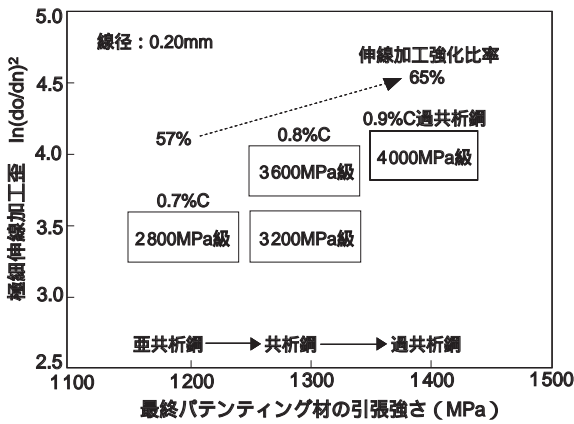


図3 スチールコードの高強度化時のパテンティング材引張強さ、伸線加工歪の推移

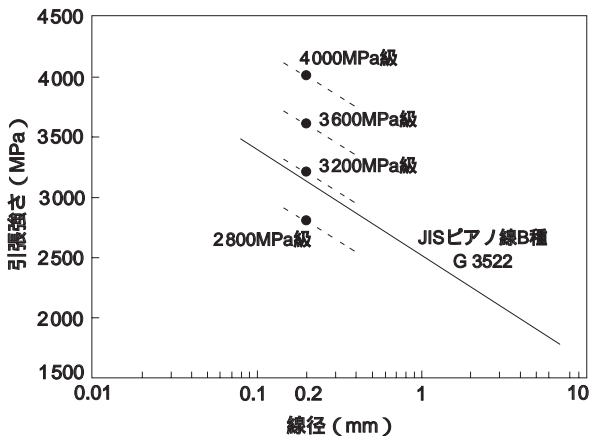


図4 スチールコードの線径と引張強さの関係(模式図)

高いほうが加工硬化率は大きくなるが、伸線加工は難しくなるので二次加工による延性改善技術が重要になる。

図4にスチールコードの線径と引張強さの関係を示す。図5に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を示す。線径が細くなるほど伸線加工性が良好になるので引張強さは大きくできる。いわゆる線径効果であるが、そのメカニズムは解明されていない。線径が細くなるほど二次加工工程の製造コスト

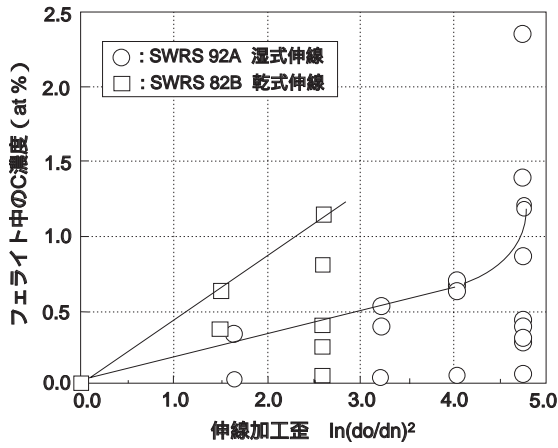


図6 パーライト鋼の伸線加工時のフェライト中のC濃度の変化

従来は伸線加工時のラメラ間隔の微細化に注意が払われてきたが、最近のメスパウアー効果、AP-FIM、中性子回折などによる解析でセメントタイトの分解、フェライトへのCの過飽和固溶が起こることがはっきりしてきた。セメントタイトの分解機構、分解したCの存在位置、強化メカニズムなどについて種々の仮説が出され、精力的な研究が進められている¹¹⁻¹⁹⁾。図6にパーライト鋼の伸線加工時におけるフェライト中のC濃度の変化例を示す¹⁹⁾。このようにセメントタイトが分解し、フェライトのC濃度が増加すれば、歪時効による機械的性質の変化が無視できないことになるので、歪時効の視点での解析も必要になる²⁰⁾。

4. 二次加工による延性改善技術

4.1 極細伸線加工時の延性改善の考え方

スチールコードでは伸線加工強化比率が大きいので、加工硬化率、均一変形、セメントタイト分解抑制が重要になる。伸線加工では軸方向の強化に比較して半径方向の強化量が小さく²¹⁾、均一変形させるほど加工硬化率が大きくなる。ダイス伸線時に鋼線表面と中心部で塑性変形形態が異なり、不均一変形が生じる。不均一変形が大きくなるとデラミネーションなどの延性が低下する。図7に0.30mm極細鋼線の均一変形に及ぼす摩擦係数の影響の一例を示す。均一変形指標として横断面の硬度分布を用いた。表面と中心の硬度差が小さいほど均一変形しているのでデラミネーション発生が防止される。摩擦係数低減により均一変形促進とともに摩擦発熱が小さくなりセメントタイト分解も抑制される。延性確保には極細伸線

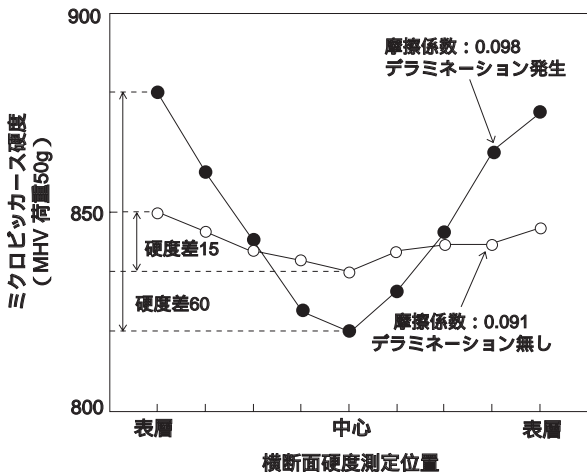


図7 0.30mm極細鋼線の横断面硬度分布に及ぼす摩擦係数の影響

加工時の潤滑被膜、潤滑剤、ダイス材質、形状、各段減面率などに工夫が必要である。

4.2 プラスめっきの潤滑被膜作用

極細伸線加工時、均一変形、摩擦発熱にプラスめっきの潤滑被膜作用が大きく影響する。スチールコードの場合、プラスめっき後極細伸線加工を行うが、プラスめっきにはタイヤゴムとの接着作用の他に極細伸線加工時の潤滑被膜作用がある²²⁾。図8にプラスめっき鋼線の極細伸線加工時の表面Fe濃度の変化を示す。伸線加工歪が大きくなるにつれ表面Fe濃度が増加する。伸線加工に伴い線径が細くなるので比表面積が増加する。プラスめっき厚さが2~3 μmと薄いので、内部のFeが表面に出てくるためと考えられる。表層Fe濃度が増加するとプラスめっきが硬くなり、潤滑被膜作用は劣化するので、伸線加工歪を大きくするにはプラスめっき厚さを大きくし、表面Fe濃度増加を抑制することが延性改善に有効である。

4.3 極細伸線加工時の均一変形促進技術

極細伸線加工時の均一変形促進の有効な手段の一つがダイスアプロ-チ角度の低角度化である。14度から10度へ低角度化することにより横断面表面層と中心の硬度差が小さくなる。更に、均一変形を促進するには最終段での10%以下の低減面率伸線が有効である。図9に示すように低アプロ-チ角度ダイスと最終段での低減面率伸線の組み合わせが効果的である。更に極細伸線加工後にも延性改善技術が適用できる。ロール矯正加工技術により降伏応力の低下、表層軟化を促進する事により、均一変形促進と同一の効果を得ることが可

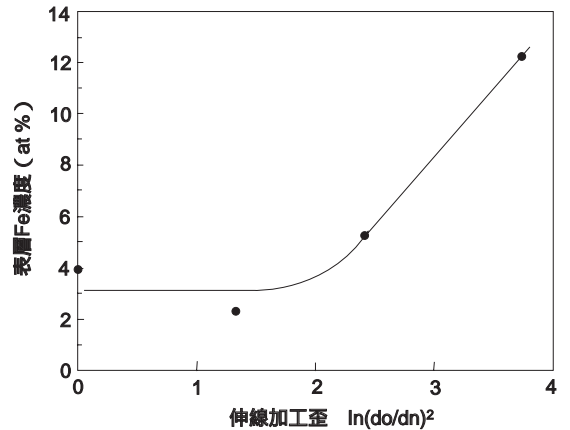


図8 0.30mmプラスめっき鋼線の表面Fe濃度に及ぼす伸線加工歪の影響

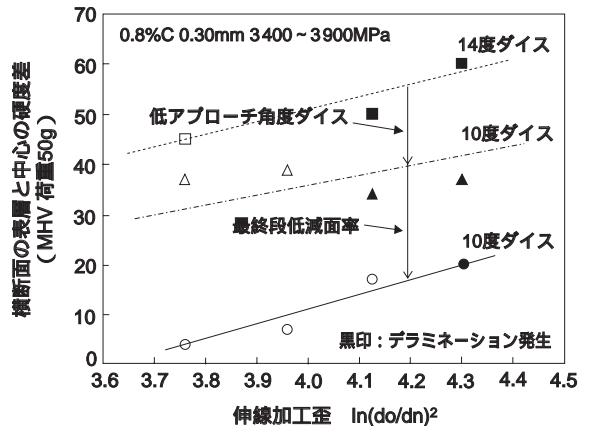


図9 プラスめっき鋼線の横断面硬度分布に及ぼすダイスアプロ-チ角度、最終段低減面率の影響

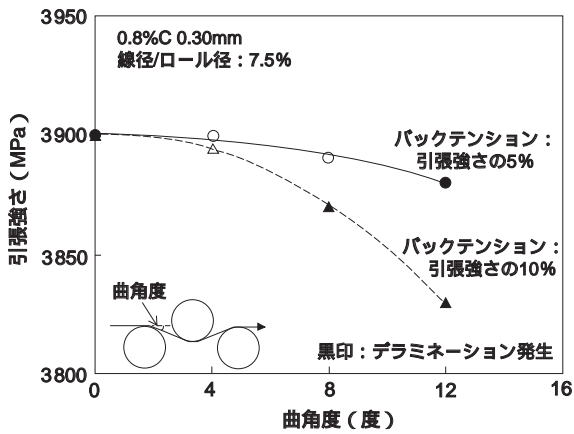


図10 極細鋼線の引張強さ、デラミネーションに及ぼすロール矯正加工条件の影響

能である。図10に示すように付与する曲歪、バックテンションを制御すれば引張強さが低下することなくデラミネーションが防止できる。

5. 到達強度レベル

表1に示すように、中心偏析、非延性非金属介在物の少ない0.9% C過共析鋼線材とプラスめっき、低アプローチ角度ダイス、最終段階減面率伸線などの二次加工による延性改善技術の組み合わせにより、デラミネーションの無い延性の高い0.20mm 4 000MPa級が得られた。この4 000MPa級スチールコードにより乗用車タイヤのカーカス部に初めてスチールが使用された⁷⁾。カーカス部以外にベルト部への適用検討も進んでいる。

6. 今後の技術課題

工業材料として使用されるには経済性の課題があり、強度ばかりでなく実際の使用状態に耐える延性が必要である。鋼線の延性指標にはデラミネーション、捻回値、絞り、伸び、キンクなど種々有るが、スチールコードではクリティカルな延性指標としてデラミネーションが使用される。デラミネーションの発生メカニズムも完全に解明されているわけではない。極細伸線加工時の真歪が大きくなるほどセメントタイトの分解とフェライトのC濃度が大きくなるので、歪時効による延性劣化抑制も課題である。

極細伸線加工時のパーライト鋼の組織形態変化は未だに不明な点が多いので、更なる高強度化を進めるには伸線加工されたパーライト鋼のナノレベルでの解析と強化理論の発展が不可欠である。線径を細くすれば到達強度を大きくでき、0.06mm以下であれば5 000MPa以上が可能である²³⁾。線径効果の系統的な研究は行われていなかっ

たが、最近新しい研究²⁴⁾が見られるようになった。これらのパーライト鋼に関する研究が進めば高強度化限界についてもう少し定量的な議論が可能になる^{25,26)}。

7. 結 言

以上述べたように、スチールコードの高強度化は大きく前進し4 000MPa級まで実用化された。自動車の軽量化ニーズは一段と強まっているので高強度化を更に進め比強度を大きくし、競合するポリエステル、アラミドなどの有機繊維との差を広げる必要がある。具備すべき延性を見極め4 500MPa以上の次世代スチールコードを早期に開発したい。

参考文献

- 1) 西川道夫: 塑性と加工 39, 303 (1998-4)
- 2) 佐藤洋, 田代均, 野口義哉: 塑性と加工 31, 965 (1990-8)
- 3) 高橋稔彦, 落合征雄, 佐藤洋: 新日鉄技報 (343), 86 (1992)
- 4) Ochiai J., Nishida S., Tashiro H.: Wire J. Int 26 (12), 50 (1993)
- 5) 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)
- 6) Tarui, T., Takahashi, T., Tashiro, H., Nishida, S.: Metallurgy Processing and Applications of Metal Wires. TMS, 1996 p.87
- 7) 田代均, 西田世紀, 樽井敏三, 大橋章一, 佐々木正司, 中村謙一, 吉江淳彦, 出町仁: 新日鉄技報 (370), 39 (1999)
- 8) 牧正志: 第29・30回白石記念講座“鋼の強靱性はどこまで高められるか”. 日本鉄鋼協会, 1995 p.65
- 9) 瀬戸一洋: 第177・178回西山記念技術講座“実用鉄鋼材料における結晶粒超微細化の動向”. 日本鉄鋼協会, 2002 p.27
- 10) Nishida S., Yoshie A., Imagunbai Y.: ISIJ Int 38 (2), 177 (1998)
- 11) Araujo F. G. S., Gonzalez B. M., Cetlin P. R., Coelho A. R. Z., Mansur A.: Wire J. Int 26 (2), 191 (1993)
- 12) Languillaume J., Kapelski G., Baudelet B.: Acta Materialia 45(3), 1201(1997)
- 13) 大藤善弘, 浜田貴成: 鉄と鋼 86, 105 (2000)
- 14) Sauvage X., Copreaux J., Danoix F., Blavette D.: Philos Mag A 80, 781 (2000)
- 15) 樽井敏三: まてりあ 39, 235 (2000)
- 16) 友田陽: 第53回日本熱処理技術協会講演大会“パーライト鋼の組織と変形挙動”. 日本熱処理技術協会, 2001
- 17) Hono, K., Onuma, M., Maruyama, M., Nishida, S., Yoshie, A., Takahashi, T.: Scripta Materialia 44, 977 (2001)
- 18) 長尾護, 中山武典, 家口浩, 茨木信彦: R&D神戸製鋼技報 51 (1), (2001)
- 19) Maruyama N., Tarui, T., Tashiro, H.: Scripta Materialia 46, 599 (2002)
- 20) 中村謙一, 田代均, 樽井敏三: CAMP-ISIJ 15, 1251 (2002)
- 21) 横山忠正, 山田凱朗, 木下修二: 鉄と鋼 63, S673 (1977)
- 22) Sasaki S., Tashiro, H.: Wire J. Int 31 (7), 104 (1998)
- 23) 落合征雄, 西田世紀, 大羽浩, 川名章文: 鉄と鋼 79, 89 (1993)
- 24) 浅川基男: 線材とその製品 40 (2), 6 (2002)
- 25) 田代均: まてりあ 35, 1177 (1996)
- 26) 田代均: 新日鉄技報 (370), 8 (1999)

表1 0.20mm 4 000MPa級プラスめっき鋼線特性

鋼種	化学成分 (mass%)						5.5mm 線材の品質		0.20mm プラスめっき鋼線の機械的性質			
	C	Si	Mn	P	S	Cr	偏析指数	非延性非金属介在物指数	引張強さ (MPa)	捻回値 (回, l=100d*)	デラミネーション	横断面の表層と中心の硬度差
SWRS 92A	0.92	0.22	0.48	0.014	0.008	-	0	1	4 012	27	無	15
92ACr	0.91	0.20	0.31	0.006	0.007	0.20	0	1	4 008	28	無	13