

連携記事

環境負荷低減型超ハイテン橋梁ケーブル用線材の開発

Development of Environmental Load Reducing High-strength Wire Rod for Parallel Wire Strand

新日鐵住金(株)
技術開発本部 棒線研究部
主幹研究員
真鍋敏之
Toshiyuki Manabe

新日鐵住金(株)
棒線事業部 棒線技術部
棒線商品技術室 主幹
谷田部比呂志
Hiroshi Yatabe

新日鐵住金(株)
釜石製鉄所 製造部
品質管理室 室長
疋田尚志
Naoshi Hikita

1 はじめに

海峡などに架けられる大規模な橋には、つり橋や斜張橋が多く適用されている。これらの橋は2本の鋼製あるいは鉄筋コンクリートで出来た主塔と、鋼製の橋げた、メインケーブルとハンガーロープからなる構造であり、主塔間(センタースパン)が400mを超える長大化が可能である。中でもメインケーブルは、橋の構造やセンタースパンを決定する重要部材のひとつであり、溶融亜鉛めっき鋼線(以下ワイヤ)を撚らずに結束した平行線ケーブル(Parallel Wire Strand, PWS®)が採用されている。このワイヤを高強度化することにより、橋の長大化が可能となる。

国内では、ワイヤを従来の1570MPa級の強度から1770MPa級へと高強度化することにより、世界最長のセンタースパン(1991m)を有する明石海峡大橋が実現した(1998年に供用開始)。一方、新興国では交通インフラストラクチャが急速に整備されるなか、高強度ワイヤを適用する長大橋プロジェクトも数多く計画されている。

本稿では、メインケーブルに用いられる高強度ワイヤの素材(線材)における課題であった、環境負荷の低減と、生産性向上に関する当社の線材開発について解説する。

2 ワイヤの製造工程と金属組織の変化

メインケーブル用のワイヤは、大きく下記の3つの工程で製造される。

- ・線材の熱処理(調質)

- ・伸線(引抜き)加工(線径、強度の調整)
- ・溶融亜鉛めっき処理(防錆処理)

ワイヤの素材である線材には高炭素鋼が用いられる。線材はオーステナイト域に加熱されたのち、500~600℃の温度域に保持する恒温変態熱処理(パテンティング)により、フェライトとセメンタイトのラメラ構造を有する層状組織であるパーライト組織に調質される。その理由は、パーライト組織が他の金属組織に比べ、伸線加工時に優れた加工硬化特性を有するためである¹⁾。

その後の伸線加工では、塑性変形(すべり変形)に伴う結晶格子の回転が起り、パーライトのラメラ構造が伸線方向に揃う。ラメラフェライトの結晶方位が引抜き方向に対して<110>面に揃う集合組織が形成されるとともに、ラメラ間隔が微細化される(図1)。この際に、強度が向上する。

伸線された素材は、最後に防錆処理として約450℃の溶融亜鉛浴に浸漬される。表面で鉄と亜鉛の合金化反応が進むと共に、鋼中ではその熱影響により、ラメラセメンタイトの球状化や転位の回復が起り、強度が伸線後よりも低下すると共に伸びが向上する。

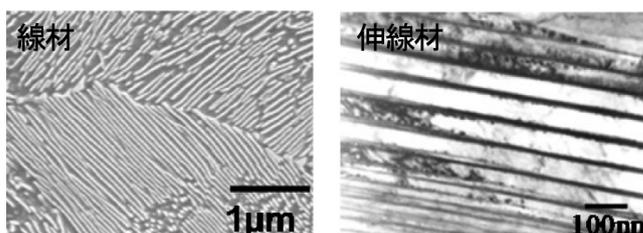


図1 線材と伸線後のマイクロ組織

3 線材、ワイヤの高強度化

パーライト組織の強度は、セメントイト分率、ラメラ間隔(狭いほど高強度)、フェライト相の強度に支配される。線材の高強度化のためには、合金元素の添加と熱処理が重要である。

まず合金元素については、セメントイト分率を増加させるC、ラメラ間隔を微細化させるCr、フェライト相の強化を目的としてSi(固溶強化)、V(VCによる析出強化)が添加される。また、前述の溶融亜鉛めっきによるラメラセメントイトの分断に対しては、Si、Crが添加される。これは、Siはフェライト、Crはセメントイトに分配するため、セメントイトの分断がSi、あるいはCrの拡散に律則されて、分断速度が遅延するためと考えられている²⁾。特にメインケーブル用の線材の高強度化には、高炭素鋼の添加元素として、C、Si、Crが選択される。

一方、熱処理としては、恒温変態時に出来るだけ低い温度でパーライト変態させることが重要である。この理由は、ラメラ間隔が共析温度からの過冷度に伴い微細化するからである³⁾。しかしながら、恒温変態曲線(Time-Temperature-Transformation, TTT)のノーズ温度を下回る変態温度で熱処理を行うと、上部ベイナイトが生じる。この組織はセメントイトが粗大に分散した組織であり、パーライトよりも軟質で、伸線加工時の加工硬化能も低い。更に、上部ベイナイト組織はメインケーブル用ワイヤの必要特性であるねじり特性を低下させる。ねじり特性はワイヤの延性指標であり、ワイヤをねじった際の破断までのねじり回数と破面形態で評価される。ワイヤの表層に上部ベイナイト組織が存在すると、ねじり開始直後に縦割れ(デラミネーション)が発生し易くなることも知られている⁴⁾。図2にワイヤの破面例を示す。デラ

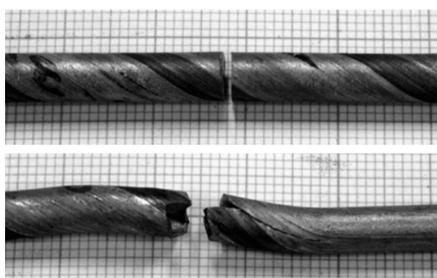


図2 ねじり試験破面(上段:正常、下段:デラミネーション発生)

ミネーションが発生すると破面形態が変化し、ねじり回数も低下する。そのため、上部ベイナイトを出来るだけ生成させずにパーライトを微細化させる熱処理条件を選択することがワイヤの高強度化にとって重要である。

4 線材のパテンティングの課題

従来、メインケーブル用の線材のパテンティングには、鉄鋼メーカーで熱間圧延した線材を、ワイヤメーカーで再加熱し、鉛浴に浸漬する鉛パテンティング(Lead Patenting, LP)処理が行われてきた。当該熱処理は、以下の3つが課題として挙げられる。

- ①環境負荷物質である鉛を使用
- ②線材の再加熱、鉛の加熱で製造時のCO₂の排出量とエネルギーコストが増加
- ③ワイヤメーカーによる処理能力に上限がある

特に③については、メインケーブルだけで1万トン以上の鋼材が必要となる吊り橋のプロジェクトでは、熱処理が製造上のボトルネックとなり、場合によっては数社のワイヤメーカーで製造しなければならない状況が生じる。その場合には、熱処理段階で各メーカーでの品質差が生じる懸念がある。また、海外でワイヤを製造する場合には、環境負荷物質である鉛の規制も影響する可能性がある。

5 DLP設備の適用とその課題

当社君津製鉄所のDLP(Direct in-Line Patenting)設備の模式図を図3に示す。DLP設備は、熱間圧延後の線材を直接溶融塩に浸漬することによりパテンティングを行うことが可能なインライン熱処理設備である⁵⁾。鉛パテンティングにくらべ、鉛を使用しないこと、再加熱が不要であること、約30倍の処理能力を有することから、DLP設備を適用することで前述の①~③の課題を解決することが可能である。

しかしながら、Siを1.0%近く添加した1860MPa級以上のメインケーブル用ワイヤには適用されていなかった。その最も大きな理由は、Siを添加すると前述の恒温変態曲線(TTT)におけるノーズ温度が上昇し、通常のSi量である鋼種に比べ線材の表層に上部ベイナイトが生成しやすくなるためであ

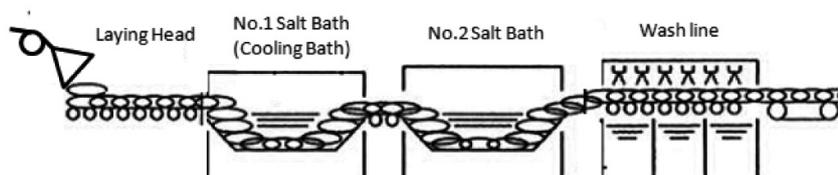


図3 DLPの模式図⁶⁾

る。更に、Siを添加すると上部ベイナイト組織のセメンタイトが粗大化する。図4に同一温度で変態させた際の0.2% Si材と1.0% Si材の上部ベイナイト例を示す。セメンタイトが粗大化する理由は、Si添加によりベイナイト生成時のセメンタイトの形成が遅れるためと考えられる。デラミネーションのメカニズムとして、セメンタイト分解による材料の不均一性の増大⁶⁾、セメンタイトとフェライト界面でのポイドの生成⁷⁾などが提唱されているが、これらの観点からもSiを添加した鋼種の粗大な上部ベイナイトは特に避けるべき組織であると考えられる。

従って、Siを1.0%程度添加したメインケーブル用の線材にDLP処理を適用するための具体的な課題は、線材表層の上部ベイナイト組織の低減であった。

6 ボロン添加による上部ベイナイト組織抑制技術の開発

Siを添加した高炭素鋼の上部ベイナイト組織の抑制手法を検討するため、0.7% C-1.0% Si-1.0% Mnの鋼を用いて恒温変態時の変態過程を検証した。図5の様にパーライトと上部ベイナイトが混在する変態温度(525℃)にて、変態開始直後の組織形態を観察した。図6に一例を示す⁸⁾。一部の領域にてγ粒界から粒界に沿ってフェライトが生成し、更にフェライト部分に沿って上部ベイナイトが生成している様子が観察された。EBSD (Electron backscatter diffraction) による分析の結果、フェライトと上部ベイナイトは同一の方位関係を有することが分かり、フェライトが上部ベイナイトの先行相となっている可能性が考えられた。

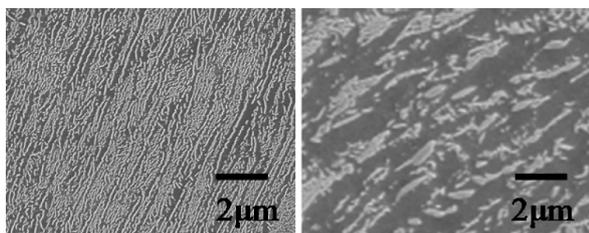


図4 Si添加に伴うベイナイト形態の変化(左:0.2% Si, 右:1.0% Si)

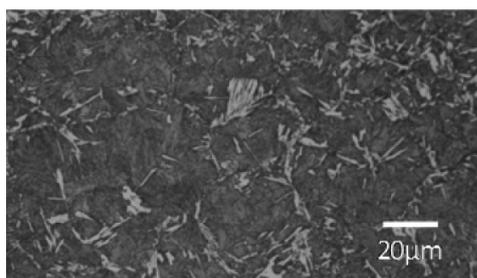


図5 525℃での恒温変態組織(淡いコントラスト部分が上部ベイナイト)

そこで、上部ベイナイトの先行相と考えられるフェライトを抑制すべくBの添加を行った。これまで、高炭素鋼へのBの添加は焼入れ性に対し効果がない⁹⁾と言われており、高炭素鋼の組織制御に対してBを有効に活用した事例は少ない¹⁰⁾。前述の鋼(0.7% C-1.0% Si-1.0% Mn)をベースに、Bを添加した鋼材を種々の温度で恒温変態させたところ、図7に示すようにBを添加した材料で上部ベイナイト面積分率が大幅に低下することが確認された¹¹⁾。525℃の恒温変態組織を図8に示す。

7 開発鋼を用いた試作ワイヤの特性と適用状況⁸⁾

以上の知見から合金成分としてBを添加したSi添加鋼を開発した。開発鋼のベースの成分を表1に示す。製造工程でBを安定的に効かせるため、更にTiを添加している。それぞ

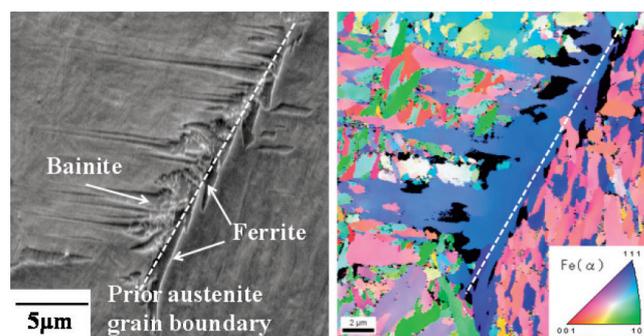


図6 525℃の変態初期組織とIPFマップ⁸⁾

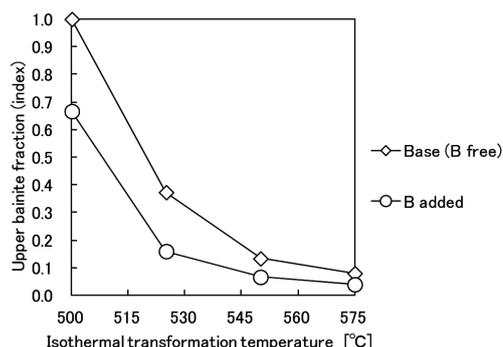


図7 恒温変態温度と上部ベイナイト組織率¹¹⁾

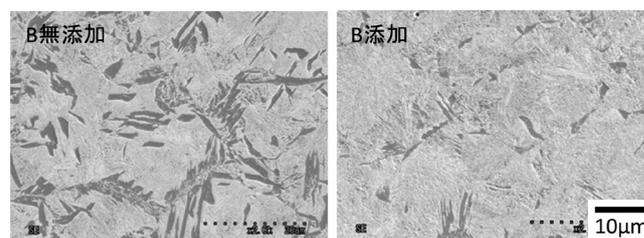


図8 525℃での恒温変態組織

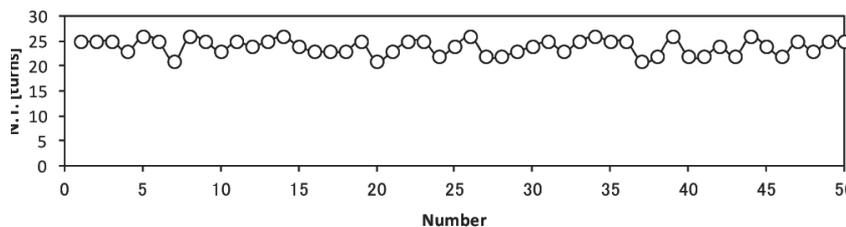


図9 50本連続ねじり試験

表1 開発鋼の化学成分

Steel	Chemical composition (mass%)					Applied Strength (MPa)	
	C	Si	Mn	Cr	B,Ti	5mmφ	7mmφ
S87BM	0.87	0.90	0.75	—	Added	1960	1770
S97AM	0.97	1.20	0.35	0.25	Added	—	1960

表2 ワイヤの試作結果

Steel	Tensile Test					Torsion Test	
	Dim. [mm]	TS [MPa]	YS [MPa]	Young's Modulus [GPa]	EL [%]	Number of Torsion [turns]	Delamination [%]
S87BM	5.42	2020	1796	204	6.2	25	0
	7.03	1864	1760	206	6.2	26	0
S97AM	7.01	2065	1872	210	5.8	25	0

れ、DLP設備によりパテンティング処理を施した線材を製造後、東京製綱(株)の中国合弁会社であるJTR(江蘇東綱金属製品有限公司、Jiangsu Tokyo Rope)にて線径5mm、7mmの1960MPa級ワイヤを試作した。

ワイヤの試作結果を表2に示す。1960MPa級の強度レベルでも、デラミネーションが発生することなく高い捻回値を示し、構造用ケーブル材料規格(JSS II 06、11-1994)で規定されるねじり特性(線径5mmで14回以上、線径7mmで12回以上のねじり回数)も満足した。

また、DLPはリング状での熱処理であるため、50本連続でワイヤを採取してねじり試験を行い、ワイヤ長手方向のねじり特性の安定性を評価した。図9に示すとおり、安定したねじり特性が得られていることがわかる。

開発鋼は、2010年に完工した中国の荊岳長江公路大橋(センタースパン世界8位の斜張橋)、2016年に完工したトルコのイズミット湾横断橋(センタースパン世界4位の吊り橋)に適用された(括弧内は何れも2016年12月完工時点での順位)。

8 おわりに

橋梁のメインケーブルに用いられる、高強度ワイヤの素材である線材の熱処理を、従来のLP処理からDLP処理に変更した。課題であった、Si添加した高炭素鋼の上部ベイナイト組織の生成を、B添加により抑制する手法を確立した。開発鋼から1960MPa級のワイヤを試作した結果、ねじり試験においてもデラミネーションが発生せず、ワイヤ長手方向のねじり特性も安定していることが確認できた。本開発により、高強度ワイヤ製造プロセスでの、熱処理の生産性を向上し、且つCO₂の排出量と鉛使用量の低減が可能となった。

以上の鋼材開発と実用化に対して、日本鉄鋼協会殿からご推薦いただき、新技術開発財団殿の第47回市村産業賞「本賞」を受賞いたしました。実機試作、評価に関して多大なるご支援を頂いた東京製綱(株)殿、NSST(株)君津事業所研究試験部殿をはじめ、その他の関係各位に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) T.Tarui, O.Ohashi, T.Takahashi and R.Uemori: Iron & Steelmaker, 21 (1994), 25.
- 2) 高橋稔彦: 金属, 66 (1996), 19.
- 3) C.Zener: Trans. AIME, 167 (1946), 550.
- 4) 落合征雄, 西田世紀, 大羽浩, 川名章文: 鉄と鋼, 79 (1993), 1101.
- 5) 大羽浩, 西田世紀, 樽井敏三, 吉村康嗣, 杉本雅一, 松岡和巳, 疋田尚志, 戸田正弘: 新日鐵技報, 386 (2007), 47.
- 6) 樽井敏三, 丸山直樹: 材料とプロセス, 13 (2000), 1247.
- 7) K.Shimizu and N.Kawabe: ISIJ Int., 41 (2001), 183.
- 8) 真鍋敏之, 山崎真吾, 磯新, 疋田尚志, 大羽浩, 西田世紀, 松井直樹: 新日鐵住金技報, 406 (2016), 70.
- 9) W.C.Leslie: レスリー鉄鋼材料学, (1985)
- 10) 長尾護, 家口浩, 茨木信彦, 落合憲二: 鉄と鋼, 89 (2003), 329.
- 11) 真鍋敏之, 山崎真吾: 材料とプロセス, 22 (2009), 254.

(2017年1月4日受付)