

メリヤス針からひもとく高炭素鋼のメタラジー

細谷 佳弘

柔軟な糸と剛直な無数のペラ針が目にも留まらぬ速さで運動して、しなやかで立体的なメリヤス(莫大小)地が編まれる様は圧巻である。近年、編機の高速化と複雑かつ高精細な編み地の編成が求められるようになり、必然的にメリヤス針に求められる性能も高度化している。本報では、メリヤス針に用いられる SK95 相当の過共析鋼にフォーカスして、針の加工性から熱処理後の諸特性に影響をおよぼす高炭素鋼のメタラジーについてひもとく。

はじめに

岡本恒彦著『新しいメリヤス学』¹⁾によると、メリヤスの機械編み技術は16世紀末に英国の William Lee が手動靴下編機を発明したのが起源とされ、日本にはその約 100 年後に機械編みのメリヤス製品が輸入された。日本にメリヤス編機が輸入されたのは明治初頭の 19 世紀後半であり、その後、明治、大正、昭和の激動の時代背景を映すように、輸入技術の改良から国産化、量産化、国産技術の多様化、多機能化などが進んだ。

織物 (textile) が経 (タテ) 糸と緯 (ヨコ) 糸を交互に交差させながら生地を織るのに対して、編物 (メリヤス = Knit) は 1 本の糸を手繰り寄せて順次編

み地に挿入させながら編成する²⁾。編成の方法は、緯 (ヨコ) 編みと経 (タテ) 編みに大別され、緯編みには、平面状に編む横編みと円筒状に編む丸編みがある (図 1)。

編成にはメリヤス針が欠かせない。針には、大別してひげ針とペラ針があるが、今日では後者 (図 3 に詳述) が大半である。メリヤス針は、板厚が 0.4 mm から 2 mm で 10 cm 以上の長さが一般的であり、針床に整然と並べられた数千本の針がカム機構によって高速で往復運動しながら順次糸を手繰り寄せて、多種多様な編み地を編成する。

糸と高速で摺動するメリヤス針のフック内面には優れた耐摩耗が求められるため、SK95 相当の過共析鋼が用いられ、焼入れ・焼戻し処理によってビッカース硬さ (HV) で 700 以上の値に調整される。また、針床に多数の針を並べて装着するため、メリヤス針用素材には厳しい板厚公差が求められ、針加工メーカーでは、編み地の不良やばらつきにつながる焼入れ時の針の伸びや曲がり厳しく管理される。

そこで本報では、メリヤス針に求められる諸特性について高炭素鋼のメタラジーからひもとき、使用される鋼の素材設計について開発事例に基づいて概説する。

メリヤス針の基本動作と各部位の機能

ペラ針による編成の基本動作は、針本体の胴部

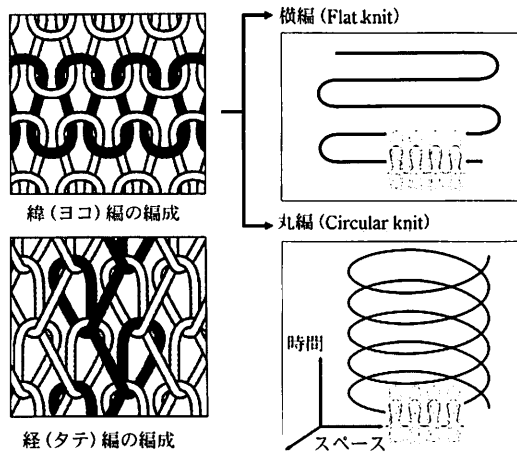


図 1 メリヤス編みの代表的な編成方式。

に設けられた矩形のバットが編機のカム溝を走しながら、上限運動して糸を手繰り寄せる。手繰り寄せられた糸はペラの開閉によってスムーズに編目に通されて、順次編成が進む(図2)。

ペラ針の主要部位は、針先端部のフック、フックを開閉するペラ、フックを往復運動させるバットである。フックは糸を手繰り寄せる重要な部位である。フック本体には疲労耐久性やじん性など

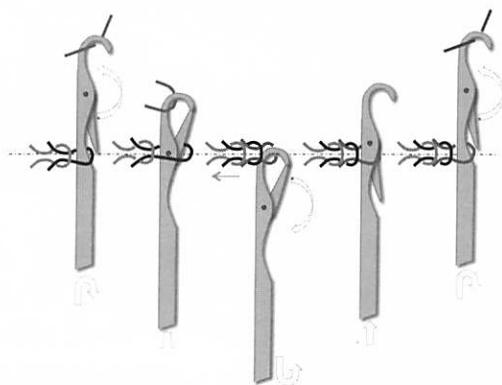


図2 ペラ針によるメリヤスの編成動作。

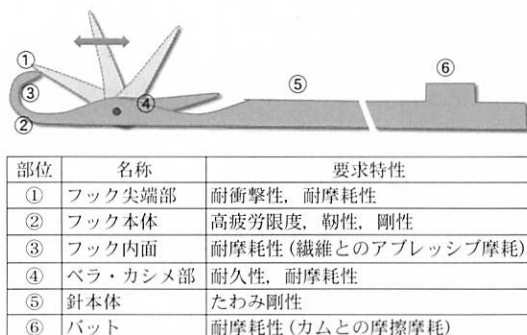


図3 ペラ針の構造と各部位の要求特性。

が、糸と高速で接触するフック内面には糸との耐摩耗性が、フック先端にはペラとの衝突による衝撃強度と耐摩耗性が求められる。ペラは針の板厚方向の側面をスリット状に切削加工した溝に挿入後、針の表裏面から機械的にカシメて本体に装着される。ペラは編目を形成する度に扇状に動いてフックを開閉する。針本体は剛性を維持しつつ他の針と干渉しないように、最適形状が決められる。バットはカムと直接接触して高速で駆動するため、耐摩耗性と高剛性が求められる(図3)。

メリヤス針の製造工程と材料面の課題

ペラばりの主要製造工程と各工程における材料面と二次加工面での留意点を表1にまとめて示す。針の外形型抜き→針先端の伸線加工(スウェーjing加工)→針先端部の加工とペラばり挿入用スリット加工→ペラの取り付け→針先端のフック加工の各工程では、素材の打ち抜き加工性、被削性、曲げ加工性などが必須要件となる。一方で、打ち抜き型や切削工具や鍛造工具にダメージを与えないような素材特性が求められる。

一貫製鉄メーカーから供給された熱延コイルは、複数回の冷間圧延と球状化焼鈍を繰り返すことで、板厚公差を極限まで狭小化すると同時に層状のセメントタイトを分断して、フェライト母相中に微細な球状セメントタイトが均一に分散した組織に制御される(図4)。針メーカーでは、表1に示した工程で針に加工後、焼入れ・焼戻し処理を行った後、低温焼戻しマルテンサイト相中に未溶解の球状セ

表1 ペラ針の製造工程における材料面の課題と二次加工上の制約条件。

加工工程	主要加工工程(抜粋)	加工様式	材料面の課題	二次加工上の制約条件
①	針外形型抜き	打抜き	針形状(曲り、捻じれ)端面のバリ・ヘタリ	打抜き型寿命
②	針本体のミーリング	切削	被削性	切削工具寿命
③	針先端の伸線加工(スウェーjing)	冷間鍛造	介在物性の割れ、疵、針先端の捻じれ	鍛造工具寿命
④	針先端の円錐状加工	切削	被削性 切削面仕上がり	切削工具寿命
⑤	ペラ挿入用溝加工			
⑥	溝部スリット加工			
⑦	ペラ取り付け	カシメ	カシメ部割れ	ペラ嵌合精度
⑧	針先端のフック加工	曲げ	フック割れ・形状・表面疵	曲げ加工精度

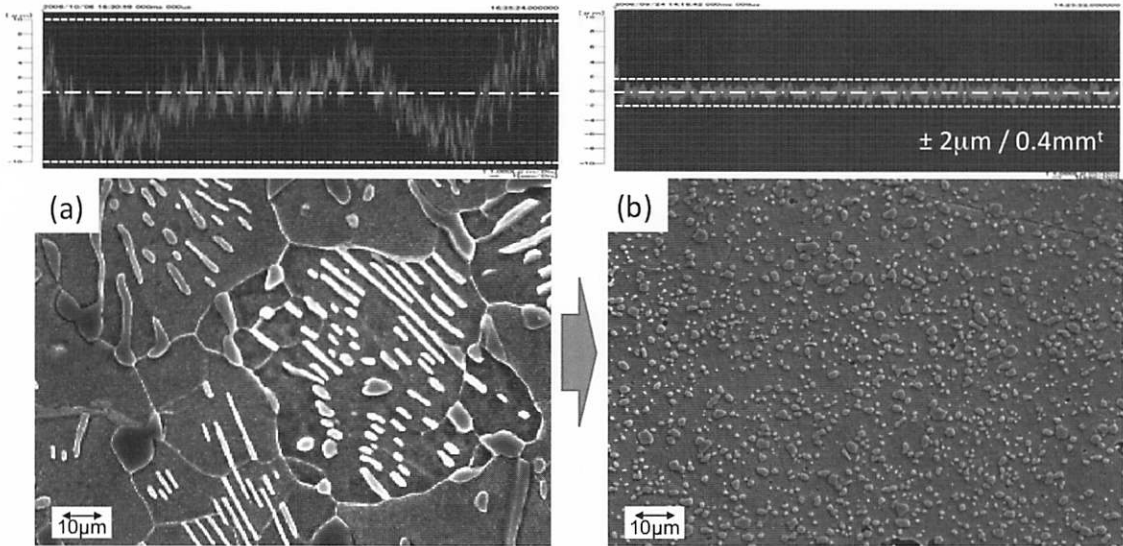


図4 メリヤス針用過共析鋼 (SK95) の組織と板厚の作り込み事例。(a) 受け入れまま熱延鋼帯の板厚プロフィールと炭化物分布、(b) 複数回の冷間圧延と球状化焼鈍によって製造されたメリヤス針素材の板厚公差と炭化物分布。

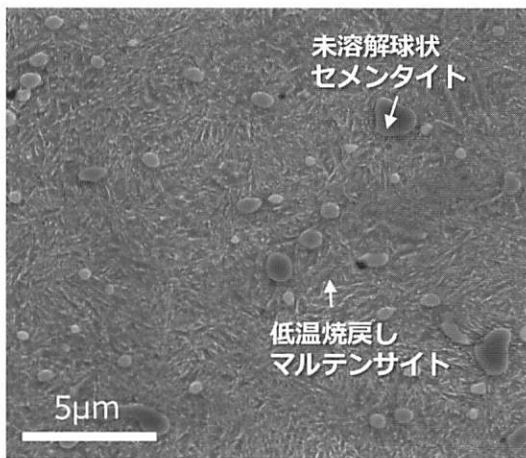


図5 焼入れ・焼戻し処理を経たメリヤス針の金属組織。

メンタイトが分散した組織に制御して、メリヤス加工メーカーに出荷される(図5)。

メリヤス針用高炭素鋼のメタラジー

JISに規定されたSC, SK材の炭素含有量の範囲をまとめて図6に示す³⁾。SK95相当のメリヤス針用素材は過共析鋼($C > 0.77\text{mass}\%$)であるため、

加熱後の冷却中に初析フェライトは析出しない。そのため、焼入れ性は加熱時の球状セメンタイトの溶解速度(フェライト相からオーステナイト相への逆変態速度)に支配される。

Krauss⁴⁾が整理した、低温焼戻しマルテンサイト鋼の実用上の諸課題に及ぼす炭素量と焼戻し温度の影響を基に、メリヤス針の製造条件を重ねて示した(図7)。75~225℃が低温焼戻しマルテンサイト鋼の実用範囲とされ、75℃以下は焼戻しが不十分な低じん性領域、225℃以上は低温焼戻し脆化領域とされた。低温焼戻しマルテンサイト鋼のじん性値は、 $C < 0.5\text{mass}\%$ の領域は炭素量で制御できるが、それ以上のC量では脆化が不可避であるため、①残留オーステナイト量を減らすために $\gamma + \theta$ 二相域で焼鈍する、②部品表面に圧縮の残留応力を付与する、③使用状態の応力負荷を圧縮またはヘルツ応力負荷状態にするなど、熱処理条件と使用条件に留意する必要がある。図中に示したメリヤス針の製造条件は、炭素量と焼戻し温度のいずれも最適範囲外にある。これは、耐摩耗性を付与するため $HV \geq 700$ の硬さを絶対条件として製造条件が決められたためと推定される。

そこで以下の章では、メリヤス針のじん性に及ぼ

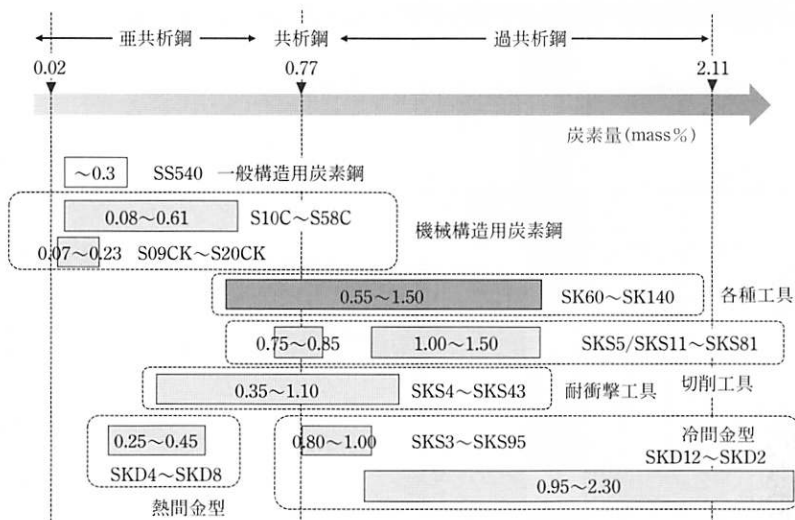


図6 JIS 炭素鋼～工具鋼の炭素含有量規格と主な用途。

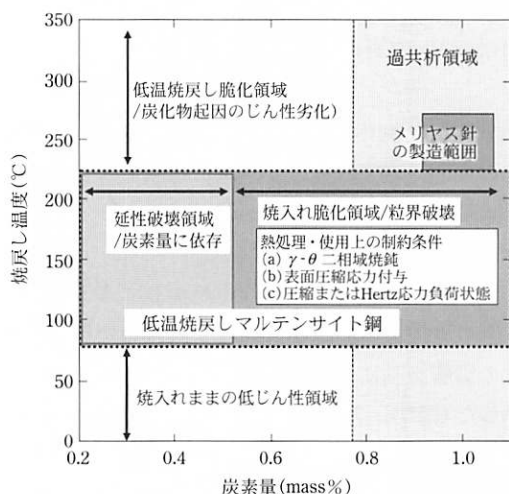


図7 炭素量と焼戻し温度のマトリクスにおける低温焼戻しマルテンサイト鋼の実用上の留意点とメリヤス針用素材の製造範囲。

す不純物レベルのPの影響と、メリヤス針の特性を向上させる新たな合金設計として微量Nbの添加効果について、具体的研究事例に基づいて紹介する。

メリヤス針の低温焼戻し挙動に及ぼす微量Pの影響

りん(P)は微量でも結晶粒界に偏析して鋼を脆化させるため、機械構造用炭素鋼鋼材(JIS G4051)

や炭素工具鋼鋼材(JIS G4401)では、Pの含有量が0.030 mass%以下に規制されている³⁾。ところが、過共析組成の低温焼戻しマルテンサイト鋼のじん性に及ぼす微量Pの影響を明らかにした例はほとんどない。SK2(C≒1.2 mass%)相当の高炭素マルテンサイト鋼のじん性に及ぼすPの影響を調べた小柴の研究⁵⁾では、300℃の焼戻しで0.010 mass% Pと0.052 mass% Pの鋼で有意差が認められておらず、さらに300℃以下ではPは拡散しないとする金子らの研究⁶⁾と考え合わせると、300℃以下での低温焼戻しにおける微量Pの影響に関心が寄せられなかったのも頷ける。

そこで、メリヤス針のさらなる性能向上を図るため、高炭素マルテンサイト鋼の低温焼戻し挙動に及ぼす微量Pの影響について再評価した⁷⁾。ベース成分を揃えた1.0 mass% C鋼に、0.005 mass%、0.016 mass%、0.023 mass%のPを添加した鋼を用いて、焼入れ後に200～400℃の温度で焼戻した時のじん性値の変化と原子レベルでのPとCの挙動を調べた。

0.005～0.023 mass%の範囲では硬さ(HV)に有意差は認められないが、じん性回復温度はP含有量の低減に伴って低温側にシフトする(図8⁷⁾)。

そこで、0.005 mass% P鋼(LP)と0.023 mass% P鋼(HP)における焼戻し前後のPとCの分布状態を、東北大学金研大洗センターの協力を得て、

Atom Probe Tomography (APT) 装置で分析した、針の縦断面における C 原子の分布は、焼入れままで短周期の濃度ゆらぎが観察されるが、LP と HP で顕著な差は認められなかった。250℃で焼戻すと、LP、HP ともに C 原子のクラスターリングが観察され、LP ではセメントタイトの析出を示唆する明瞭なコントラストが確認された(図 9⁷⁾。

次に、P 原子と C 原子の存在位置を針の横断面で比較した。LP、HP ともに P の分布位置と C の

濃化位置が重なる傾向が複数の観察結果から明らかになった。焼戻し後はその傾向がより明瞭に観察された(図 10⁸⁾。

P と C の間には斥力相互作用が働くと考えられている⁹⁾が、以上の結果と Zhu ら¹⁰⁾が示したセメントタイト析出の前駆段階として C が 10~15 at% のクラスターを形成する現象とを考え合わせると、C のクラスター形成に対する P の関与が示唆される。つまり、マルテンサイト中に固溶した P 原子周囲に形成されるであろう弾性的な格子ひずみを緩和するため、C が P 原子の近傍に集まるのではなかろうか。固溶 C の析出が以上の素過程を経ると考えると、図 8 に示したじん性回復温度に及ぼす P

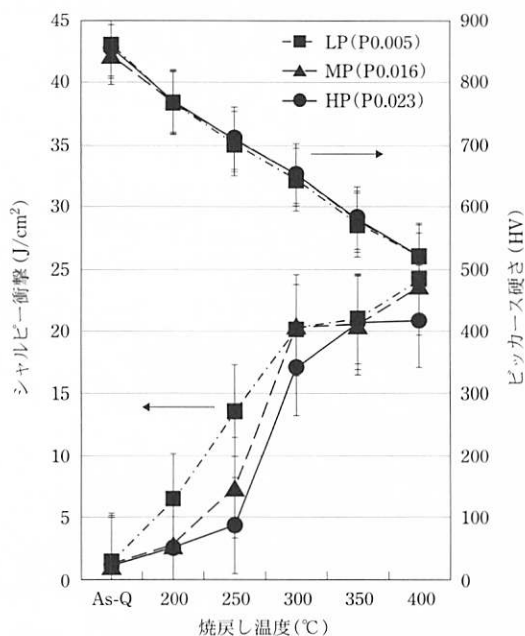


図 8 800℃から焼入れ後 200~400℃で焼戻した時の硬さ (HV) とシャルピー衝撃試験値に及ぼす P 量と焼戻し温度の影響⁷⁾。

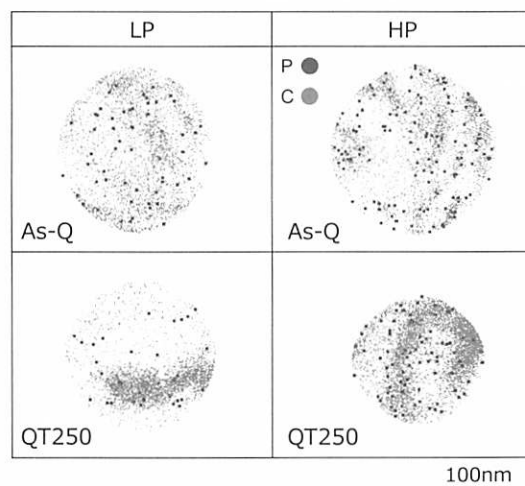


図 10 APT 針横断面で観た LP と HP における 250℃焼戻し前後における C 原子と P 原子の分布状態⁸⁾。

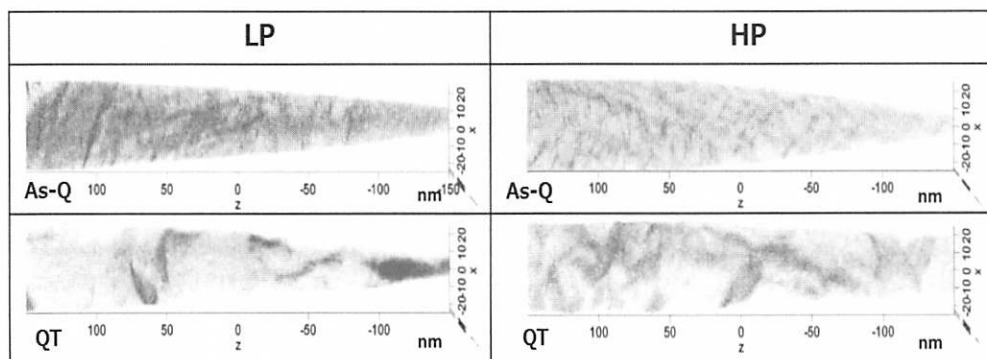


図 9 APT 針縦断面で観た LP と HP における 250℃焼戻し前後における C 原子の分布状態⁷⁾。

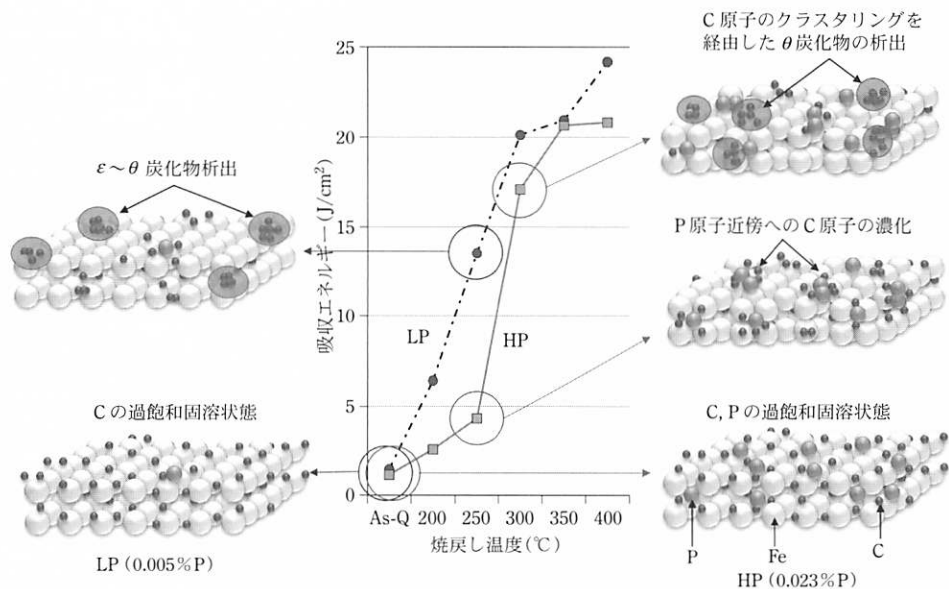


図 11 炭化物析出に及ぼす P の影響とじん性回復挙動の因果関係を示す模式図。

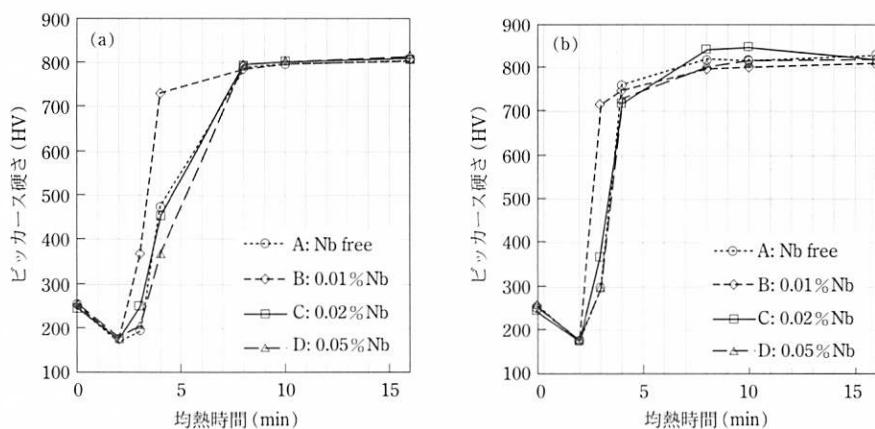


図 12 780℃と800℃に加熱後焼入れたサンプルのHVに及ぼすNb添加量と加熱時間の影響¹¹⁾。(a)加熱温度:780℃, (b)加熱温度:800℃。

の影響は、Cのクラスター形成頻度の差として解釈できそうである(図11)。

メリヤス針の靱性向上に及ぼす微量Nb添加の効果

メリヤス針には、熱処理後の針の硬さやじん性値のみならず、①短時間の加熱で焼きが入る、②焼入れ後の硬さのバラツキが小さい、③焼入れに

よって針の変形や寸法変化が小さい、などの特性が求められる。そこで、従来メリヤス針用素材として検討されていない、微量ニオブ(Nb)の添加効果について検証した¹¹⁾。

780℃と800℃で均熱後焼入れたサンプルのHVにおよぼす、均熱時間とNb添加量の影響を調べた(図12¹¹⁾)。780℃では、4minの均熱で0.01mass%Nb鋼のみHV>700に到達する。800℃加熱では全ての鋼で4minの均熱でHV>700

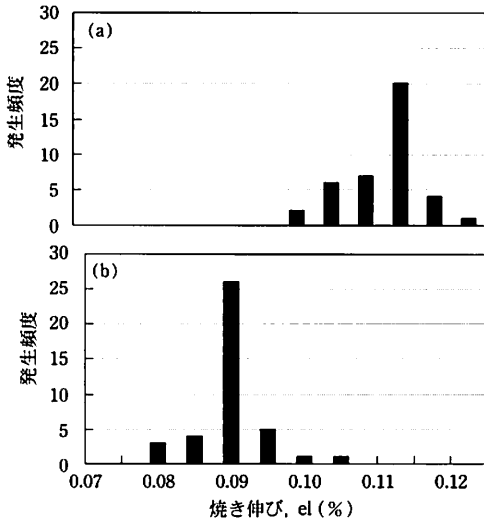


図 13 800℃×12 min 均熱後油焼入れした時の焼き伸び量とバラツキに及ぼす微量 Nb 添加の効果¹¹⁾。(a) Nb 無添加鋼、(b) 0.01 mass% Nb 添加鋼。

に到達するが、0.01 mass%Nb 鋼では 3 min の均熱で HV>700 に到達する。

焼伸びにおよぼす微量 Nb 添加の影響を確認するため、Nb 無添加鋼と 0.01mass%Nb 添加鋼について、2.5 mm^W×135 mm^Lの試験片を各 40 本、800℃×12 min 均熱後油焼入れした時の、焼入れ前後での焼き伸び率を測定した(図 13¹¹⁾)。0.01 mass% Nb を添加することによって、Nb 無添加鋼に比べて焼伸び率 (el) の最頻値が約 0.02% 減少し、そのばらつきも小さくなる傾向が確認された。微量 Nb 添加による焼伸び低減のメカニズムを集合組織解析によって検証した結果、0.010 mass%Nb 添加によって焼入れ前のフェライト相の集合組織がランダム化する傾向が認められ、焼入れ後のマルテンサイト相の配向もランダムに近い状態であった。つまり、マルテンサイト結晶の C 軸方向の伸びが板面内でランダム化することが、針の長尺方向の焼伸び低減に有効に作用したと考えられる。

高速で往復運動する針には疲労耐久性が求められる。そこで、Nb free, 0.01 mass%Nb, 0.02 mass% Nb の 3 鋼種について、800℃×10 min 加熱後油焼入れした後 250℃と 300℃で焼戻したサンプルか

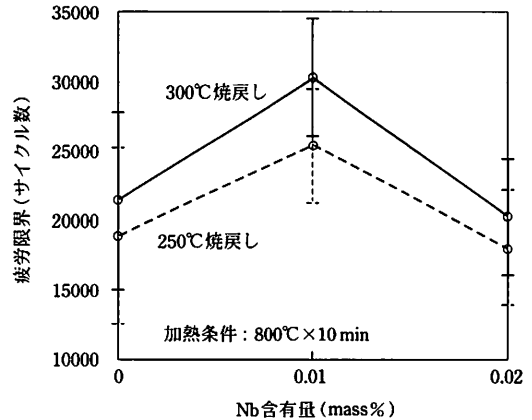


図 14 800℃×10 min 均熱後油焼入れしたサンプルの疲労寿命に及ぼす Nb 添加量と焼戻し温度の影響¹¹⁾。

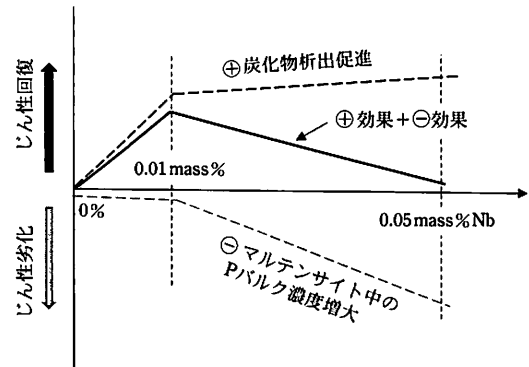


図 15 0.01 mass% Nb 添加によるメリヤス針の諸特性向上メカニズムの模式図¹¹⁾。

ら、平行部幅:2 mm, 平行部長さ:15 mm, つかみ部の半径 12.5 mm の試験片を採取して、最大荷重:984 N, 応力比:0.1 の片振り引張疲労試験を行って、破断寿命を評価した(図 14¹¹⁾)。いずれの焼戻し温度でも、0.01 mass%Nb 鋼において最も疲労寿命が長くなった。

APT によって、鋼中の C 原子と P 原子の挙動に及ぼす Nb の影響を分析した結果、マルテンサイトの低温焼戻し過程で、Nb が C のセメンタイト析出を促進させるプラスの作用と P のバルク濃度を上昇させるマイナスの作用を併せ持つことが明らかになった(図 15¹¹⁾)。以上の結果に基づいて、0.01 mass%の Nb を添加した、メリヤス針用新鋼種を開発した¹²⁾。

おわりに

「金属」2007年11月号に「薄鋼板製造技術の進歩と今後の高級鋼戦略」と題して、自動車用薄鋼板を念頭においた拙文¹³⁾を寄稿させていただいた。改めて読み直すと、今日高級鋼の代名詞として頻繁に取り上げられる自動車用薄鋼板が、鋼板そのものの成分設計や機械特性よりむしろ、製鋼～圧延～熱処理の一連の製造工程における精緻なプロセス制御技術と、二次加工性や部品性能まで見据えたインフラストラクチャーの総合技術に支えられた、バラツキの少ないマスプロ型の高級鋼と言える。

これに対し、当時は専門外であったメリヤス針に用いられる高炭素鋼のメタラジーをひもとくと、炭化物の分布と形態を冷間圧延と球状化焼鈍で丁寧に制御して、焼入れ性を維持しながら相反する諸特性を精緻にバランスさせるメリヤス針用過共析鋼は、カスタムメイド型の高級鋼と言えよう。

日本の繊維産業が斜陽産業と言われて久しいが、近年、医療、スポーツなどの様々な分野で伸縮性を生かしたスマートテキスタイルとしてメリヤス(ニット)製品が注目されている¹⁴⁾。日本には炭素繊維や導電性繊維など先端的な繊維製造技術、無縫製のホールガーメント編成技術など、国際競争力のある素材や編成技術が蓄積されている。同時に編機のAI化やIoT技術を駆使した編成技術の開発も進んでおり、コア部品としてのメリヤス針の開発もうかうかしてられない。

参考文献

- 1) 岡本恒彦著：“新しいメリヤス学”，繊維研究会出版局発行，(1965)。
- 2) ㈱特殊金属エクセル：“日本のものづくり力”，ふえらむ，17 (2012)，30。
- 3) 細谷佳弘：ふえらむ，20 (2015)，13。
- 4) G. Krauss: ISIJ Int., 35 (1995), 349.
- 5) 小柴定雄：日立評論，12 (1959)，101。
- 6) 金子秀夫，西澤泰二，玉置維昭，谷藤暁男：日本金属学会誌，29 (1965)，166。
- 7) 細谷佳弘，松村雄太，小川恭平：熱処理，58 (2018)，291。
- 8) 松村雄太，細谷佳弘，土屋栄司，戸村恵子，井上耕治，永井康介：CAMP-ISIJ, No.173, (2017), 186.
- 9) H. Numakura: Archives of Metallurgy and Materials, 60 (2015), 2062.
- 10) C. Zhu, A. Cerezo and G. D. W. Smith: Ultramicroscopy 109 (2009), 545.
- 11) 土屋栄司，松村雄太，細谷佳弘，宮本友佳，小林崇，瀬戸一洋，戸村恵子，井上耕治，永井康介：鉄と鋼，15 (2019)，76。
- 12) 特許 No.6089131
- 13) 細谷佳弘：金属，77 (2007)，1217。
- 14) 経済産業省製造産業局生活製品課編：“繊維産業の課題と経済産業省の取組”，平成30年6月13日。
https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/fiber/pdf/180620seni_kadai_torikumi_r.pdf (accessed Oct.2019) (accessed Oct. 2019)

ほそや・よしひろ HOSOYA Yoshihiro

1977 東北大学大学院修士課程修了，日本鋼管㈱入社，1999 同社総合材料技術研究所薄板研究部長，2003 JFE スチール㈱スチール研究所薄板研究部長，2006 理事・主席研究員，2012 ㈱特殊金属エクセル技術開発本部長，2014 取締役，2019 退職，同社技術顧問 兼 細谷技術士事務所代表，現在に至る。工学博士，技術士(金属部門)。