

# インライン熱処理型線材の開発

## New Wire Rods Produced by In-Line Heat Treatment

吉江 淳彦<sup>\*(1)</sup> 伴野 俊夫<sup>\*(2)</sup> 杉丸 聡<sup>\*(3)</sup> 新保 泰広<sup>\*(4)</sup>  
 Atsuhiko YOSHIE Toshio BANNO Satoshi SUGIMARU Yasuhiro SHINBO  
 西田 世紀<sup>\*(3)</sup> 関 隆一<sup>\*(5)</sup> 川名 章文<sup>\*(6)</sup> 伴野 貢市<sup>\*(7)</sup>  
 Seiki NISHIDA Ryuichi SEKI Akifumi KAWANA Koichi BANNO

### 抄 録

インライン熱処理技術により製造される新しい線材の代表的な例として、室蘭製鐵所で製造されるインラインQT線材及び君津製鐵所で製造されるベイナイト線材の製造法と特徴について述べた。前者は線材圧延後の温水または冷水を用いた制御冷却技術にインラインテンパーを組合わせて製造される、焼きわれや焼きむらのない均質な中炭素鋼及び低合金鋼の線材である。後者は線材圧延後に直接溶融塩熱処理により恒温変態させて製造する上部ベイナイト主体の高炭素鋼線材である。上部ベイナイト組織は分断されたセメンタイトが疎に分散しているため転位の動きに対する障害が少なく、高い延性と伸線加工性を有する。

### Abstract

Main examples of newly developed wire rods produced by the In-line heat treatment such as the In-line QT wire rods of middle carbon and low alloy steels manufactured in Muroran works and the Bainitic wire rods of high carbon steels in Kimitsu works are introduced. The former manufactured by the combination of controlled cooling by spraying of cold or hot water and In-line tempering has homogenous properties free from crack during cooling. The latter manufactured by the direct isothermal heat treatment in the salt bath after wire rod rolling has upper bainite microstructure. As the cementite in upper bainite is short and scattered, dislocation moves smoothly during deformation leading to high ductility and drawability.

## 1. 緒 言

線材の分野では伸線性の向上、強靱化、スケール制御、二次加工工程の簡省略等の目的でインラインでの調整冷却技術が開発されてきた<sup>1-3)</sup>。新日本製鐵で開発された線材の調整冷却技術の初期のものに関しては矢田らによる<sup>2)</sup>詳細な解説がある。本報では、その後新たに確立されたインライン熱処理技術の代表的な例として、室蘭製鐵所で製造される直接焼き入れ、焼き戻し材(以下インラインQT線材)及び君津製鐵所で製造されるベイナイト線材の製造法と特徴について述べる。

## 2. インラインQT線材

### 2.1 インラインQT線材の概要

室蘭製鐵所の線材工場では1975年より、線材圧延後に噴流水を用いた制御冷却を適用して直接焼き入れを行った1500N/mm<sup>2</sup>級の高強度材を製造し、コンクリート製パイルやボール用のPC鋼棒に適用してきた。この直接焼き入れ線材は、再加熱による焼き入れ材に比べて強度のばらつきが少なく、極めて高い信頼性を得てい

る。この間に培った直接焼き入れ線材の製造技術を発展させ、さらにインラインテンパーを加えることにより、中炭素鋼と低合金鋼のインラインQT線材の実用化を図った。

### 2.2 インラインQT線材の製造設備

#### 2.2.1 製造工程

製造工程を図1に示す。加熱炉で圧延に適した温度に加熱された鋼片を垂直、水平交互に配列された圧延機で圧延し、仕上温度と巻取温度を調整して適当な焼き入れ温度から焼き入れ槽へ投入する。焼き入れ槽から引き上げた線材を結束前に低温テンパー炉で焼き戻して遅れ破壊の発生を防止する。その後、倉庫に保管後バッチ炉で焼き戻して所定の強度に調整する。

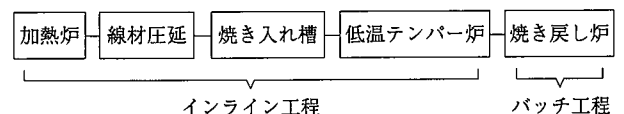


図1 製造工程

\*<sup>(1)</sup> 君津技術研究部 主幹研究員 工博  
 千葉県君津市君津1 ☎299-1141 ☎0439-50-2547  
 \*<sup>(2)</sup> ノーステクノリサーチ 総務部 次長  
 \*<sup>(3)</sup> 君津技術研究部 主任研究員

\*<sup>(4)</sup> 室蘭製鐵所 製品技術部 マネジャー  
 \*<sup>(5)</sup> 室蘭製鐵所 圧延工場  
 \*<sup>(6)</sup> 君津製鐵所 条鋼工場 マネジャー  
 \*<sup>(7)</sup> ノーステクノリサーチ 開発営業本部

2.2.2 焼き入れ設備

焼き入れ設備の概要を図2に示す。レーイング巻き取りした線材をローラーコンベア上で復熱させた後に直接焼き入れ槽に連続的に投入する。投入された線材は焼き入れ槽内を冷却されながらチェーンコンベアで移送されて引き上げられる。焼き入れ媒体は温水と冷水の2種類を鋼種によって選択している。温水焼き入れはわれ感受性の高い合金鋼に適用し、線材表面にできる沸騰膜を活用してマイルドな焼き入れ状態を実現している。冷水焼き入れは焼き入れ性の低い中炭素鋼に適用している。焼き入れ槽内に冷水を噴射して生ずる旋回流で安定した焼き入れを実現している。

線材全長にわたって均一な冷却速度を得るために、焼き入れ処理のモデル槽を設置して流動状態を解析し、設備設計を行った。図3に示すように、焼き入れ槽へ供給する冷却水を水平方向に噴射すると、焼き入れ槽内の流動はピストンフローになって十分な混合攪拌が維持されず、線材の冷却速度にばらつきが生ずる。噴射冷水が線材を直撃すると線材が揺動して搬送障害が生じたり、局部的な偏冷却による焼きわれが発生する。図4に示すように、噴射冷水が線材を直撃しない様に垂直方向に噴射し、線材近傍に流速が均一な旋回流を生成させることによって、線材の冷却速度のばらつきがなく、焼き入れ媒体の槽内温度にむらのない、適度な混合を図った。

2.2.3 インラインテンパー炉

インラインテンパー炉は焼き入れ槽より引き上げて集束した線材を、パワーアンドフリー型のフックコンベアに積載したままの未結束状態で挿入して、速やかに焼き戻しをする図5に示す構造とし

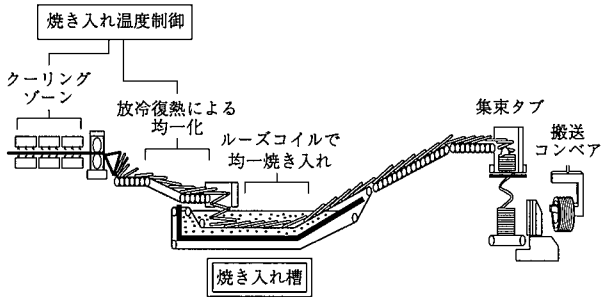


図2 焼き入れ設備の概要

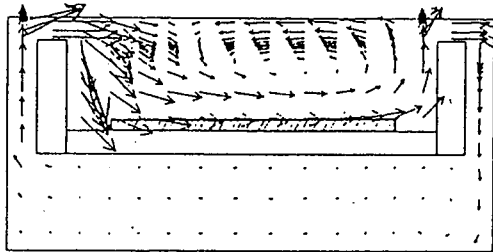


図3 冷水焼き入れ時の槽内流動軌跡(水平方向噴射)

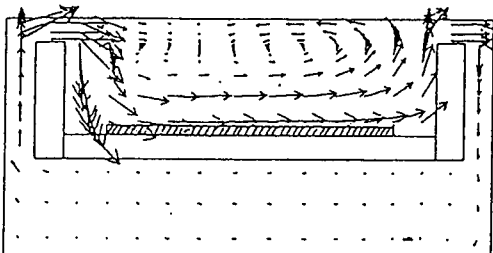


図4 冷水焼き入れ時の槽内流動軌跡(垂直方向噴射)

た。焼き戻し温度はフックコンベアに吊り下げられた線材が自重で変形しない範囲に制御している。低温焼き戻しすることによって拡散性水素を放出させると共に、線材の硬さを低減して遅れ破壊の発生防止を図った。

2.3 インラインQT線材の品質

2.3.1 製造範囲

図6に示す温水による焼き入れは冷却速度が緩やかで、且つ沸騰膜を活用しているために冷却速度のばらつきが極めて少なく、安定した焼き入れが可能である。温水焼き入れにより、DI値3インチ以上の細径の低合金鋼の焼き入れ焼き戻しが可能である。太径材に適用すると、冷却速度が不足するためにベイナイト等の中間組織が混在し、強度が低下する。冷水による焼き入れは高速な冷却速度が得られるため、焼き入れ性の低い中炭素鋼の焼き入れが可能である。

しかし炭素含有量が多くなると、マルテンサイト変態による体積膨張量が大きくなって、焼きわれ感受性が高くなる。また、同一鋼種でも細径ほど冷却速度が高く、マルテンサイト量が増加して体積膨張量が増加するため、焼きわれの発生率が高くなる。一方、線径が大きくなると冷却速度が低下して強度が不足する。従って、若干の残留オーステナイトが混在したマルテンサイトが得られる適度なDI値の鋼種で、焼きわれの発生しない安定した焼き入れ材の製造が可能である。

2.3.2 ミクロ組織と機械的性質

ミクロ組織は写真1に示す均一な焼き戻しマルテンサイト組織である。SCM440の温水焼き入れ材とS45Cの冷水焼き入れ材の焼き戻し後の引張強さ(TS)のコイル内変動は極めて少なく、安定していることを図7に示す。SCM440の温水焼き入れ材とS45Cの冷水焼き入れ材の引張特性に及ぼす焼き戻し温度の影響を図8に示す。

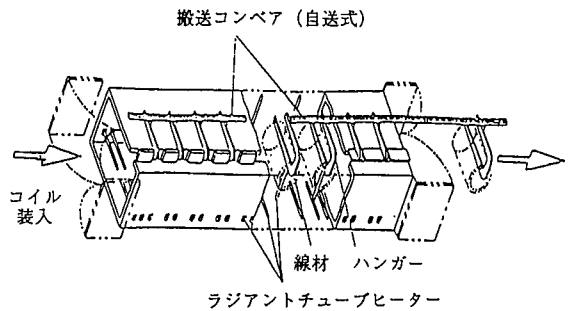


図5 インラインテンパー炉の概要

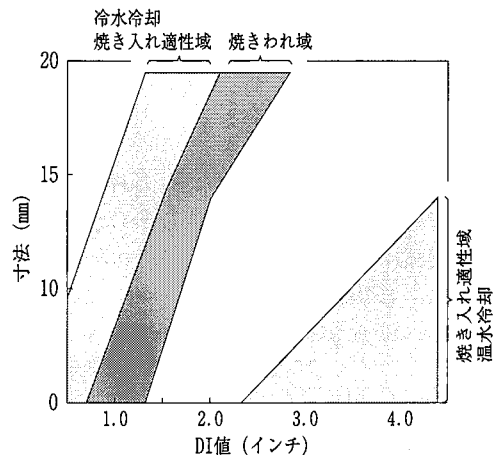
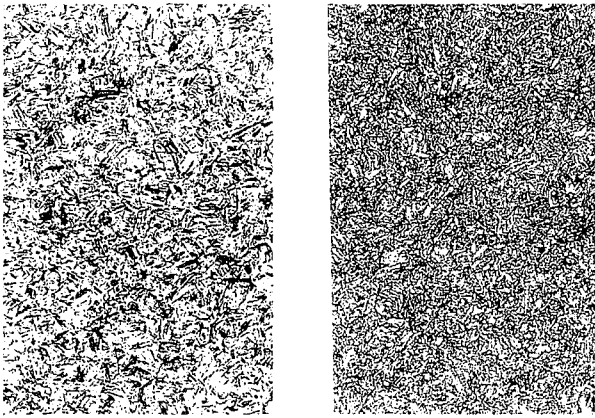


図6 インラインQT材の適正焼き入れの範囲



(a) 焼き入れのまま (b) 焼き戻し (500°C)  
写真1 ミクロ組織(×400)

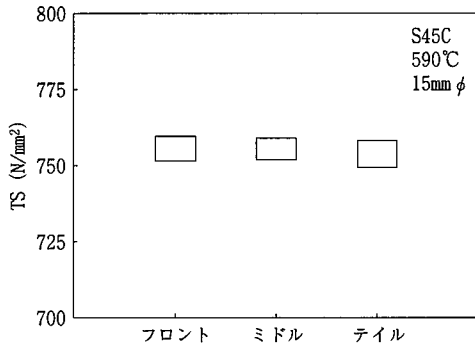


図7 TSのコイル内変動

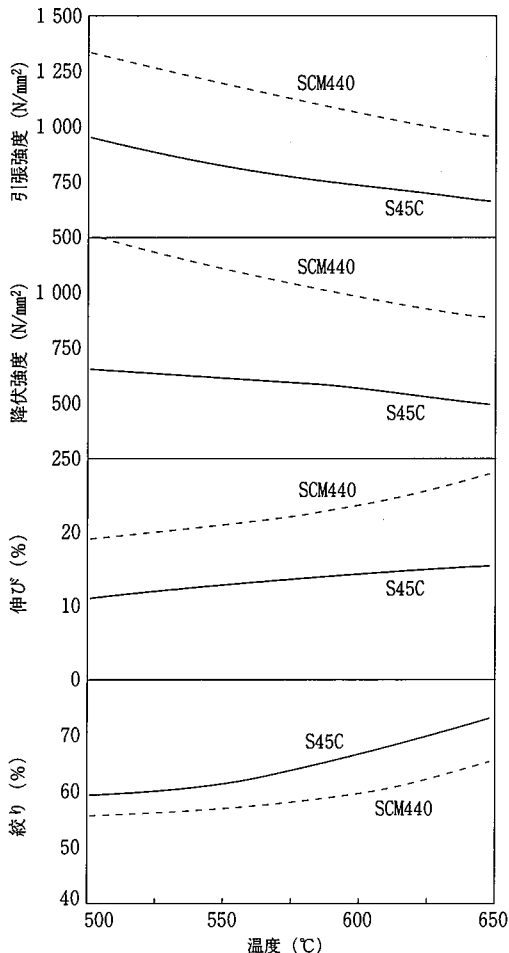


図8 焼き戻し性能曲線

## 2.4 インラインQT線材のまとめ

圧延後の直接焼き入れと結束前のインラインテンパー処理により、焼きわれや焼きむらの発生が無く、均質で安定した低コストの焼き戻し線材の製造を可能とした。この線材は鍛造加工度の少ない高強度の長尺部品などの用途に適しているため、自動車及び産業機械の特殊ボルトや回転体の軸に適用されている。

## 3. ベイナイト線材

### 3.1 ベイナイト線材の概要

高減面率の伸線加工を受けた鋼線には高強度化に伴う延性の劣化、デラミネーションの発生の問題がある。川名ら<sup>4)</sup>はこれを回避する目的で、従来のパーライト組織に代わり上部ベイナイト組織を主体とすれば、過共析鋼の線径3.25mmの鋼線では高減面率領域までデラミネーションなしに伸線可能であることを報告した。この伸線性向上の主たる理由は上部ベイナイト組織が伸線加工の過程で低い加工硬化率を示すことにある。従って、線材工場ではゆるい生引き性の良好な上部ベイナイト組織主体の線材(以下ベイナイト線材)を製造できれば、ユーザーの伸線工程での中間熱処理の簡省略による製造コストの低減も期待できる。本章では、より一般的な0.8% C鋼を用いてベイナイト線材を製造し、その特性を調査した結果について報告する。

### 3.2 ベイナイト線材の製造方法

供試鋼は君津製鐵所の250t転炉で溶製後、連続鋳造一分塊圧延—線材圧延により得られた線径5mmのSWRS82Aである。化学成分を表1に示す。鋼Bを実験室規模での上部ベイナイト線材の調査に用い、鋼Aを線材工場でのベイナイト線材製造試験に供した<sup>5,6)</sup>。鋼Bは実験室の単頭式伸線機で2mmまで伸線した後に、350~650°Cの温度範囲で鉛パテティングを行い恒温変態をさせた。また鋼Aは図9に模式的に示す君津製鐵所線材工場の溶融塩熱処理装置(DLP: Direct Lead Patenting)<sup>7)</sup>を用いて、熱間圧延終了後に直接ベイナイト変態温度域で恒温変態をさせた。

### 3.3 ベイナイト線材のミクロ組織と機械的性質

#### 3.3.1 ミクロ組織と機械的性質に及ぼす恒温変態温度の影響

写真2に鋼Aの代表的な恒温変態組織を示す。恒温変態温度が350°Cから550°Cに上昇するにつれて、下部ベイナイトから上部ベイナイトへ組織の主体が移り、625°Cではパーライト単一組織となる。この場合の引張強度(TS)、絞り値(RA)、及びセメントタイトの長さ(CL)及び間隔(CS)を画像処理により測定した結果を図10に示す。ベイナイトが生成するとセメントタイトの間隔がやや増加し、長さは著しく短くなる。また450°C付近で生成したベイナイト組織は600°Cで生成したパーライト組織と同程度に低強度となり、且つ高い絞り値を示す。引張強度と絞り値の関係を図11に示す。同じTSで比較するとベイナイトは極めて高い絞り値を示すことがわかる。

#### 3.3.2 高絞り値が得られる原因

強度が同程度で絞り値に大きな差のあった変態温度が450°Cと625°Cの材料について、引張前後での組織の変化をFE-SEMにより観察した。写真3に鋼線の表面から線径の1/4内部に入った位置(以

表1 供試鋼の化学成分(mass%)と冷却条件

鋼	C	Si	Mn	冷却条件
A	0.82	0.17	0.51	溶融塩浸漬
B	0.83	0.21	0.48	空冷

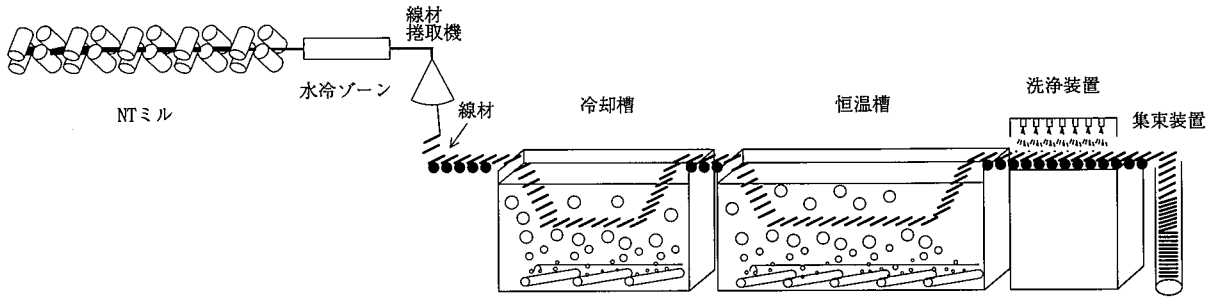


図9 溶融塩熱処理装置(DLP)模式図

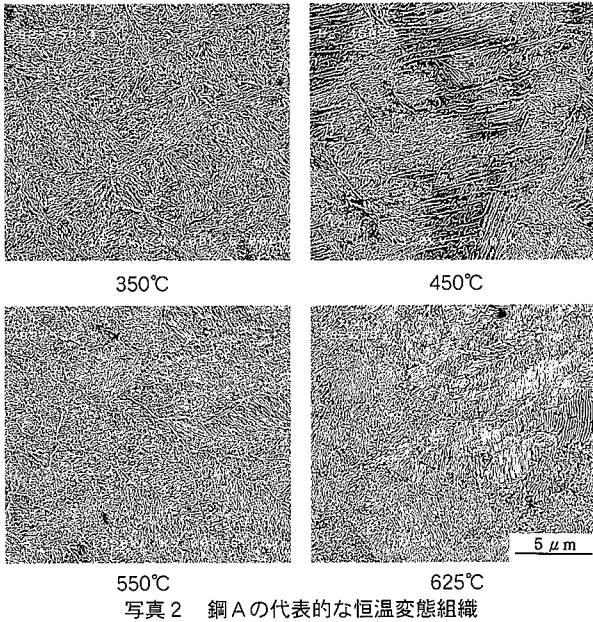


写真2 鋼Aの代表的な恒温変態組織

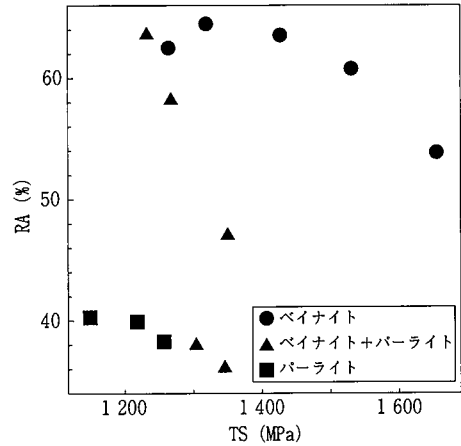


図11 引張強度と絞り値の関係

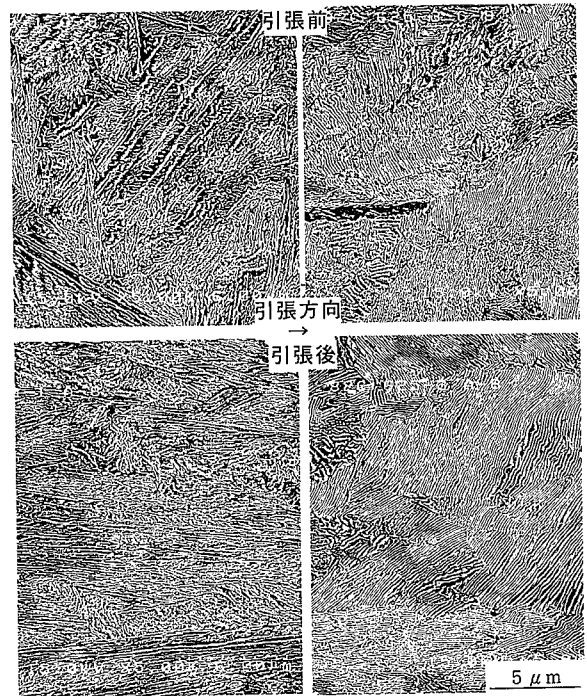


写真3 引張前後でのマイクロ組織の変化(1/4部)

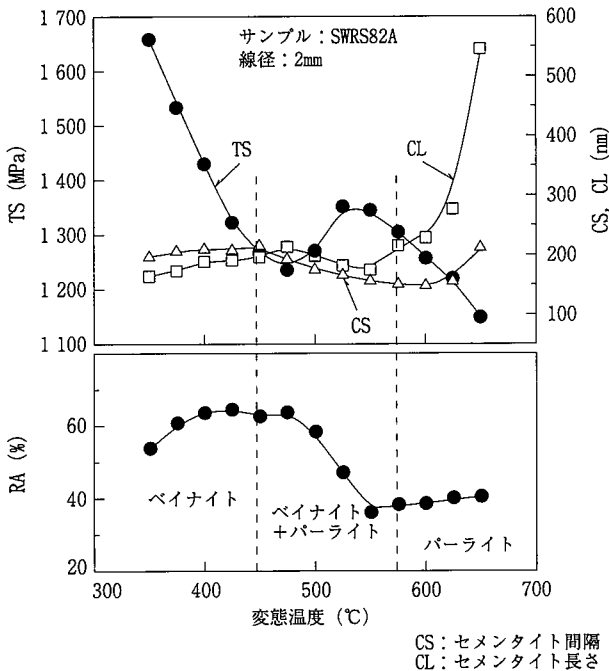


図10 引張強度, 絞り, セメンタイトの間隔及び長さに基づく恒温変態温度の影響

下1/4部)の組織写真を示す。引張後の写真を見ると、ベイナイト線材のセメンタイトの長軸方向は引張方向に揃う傾向が見られるが、パーライト線材ではその傾向は見られない。

このセメンタイトの配向性を引張軸方向からの傾角の形で表した

ものが図12である。これによるとパーライト組織、ベイナイト組織のセメンタイトは共に、引張試験前は特定の配向性を示さないが、引張試験後はベイナイト組織のセメンタイトのみが表層部、1/4部にかかわらず引張軸に平行な方向に揃う傾向を示す。これはベイナイト組織のセメンタイトが短く、且つ間隔が広いために地のフェライトがセメンタイトから強い拘束を受けず比較的容易に変形でき、変形が内部まで浸透しやすいためと考えられる。

3.3.3 ベイナイト線材の伸線加工性

表2に線材工場のDLP熱処理装置を用いて製造した線径5mmのベイナイト線材とパーライト線材の機械的性質と組織の比較を示す。ベイナイト線材のベイナイト組織分率は85%であった。実験室規模での試験結果と同様に、ベイナイト線材は高強度にもかかわらず高い絞り値を示す。この線材の伸線限界を単頭伸線機を用いて調査した。伸線限界は破断した線径の1ダイス前の線径とした。図13に伸線限界を示す。パーライト組織に比べてベイナイト組織は3ダイス分伸線限界が向上し、5mmから0.635mmまでの生引きが可能である。

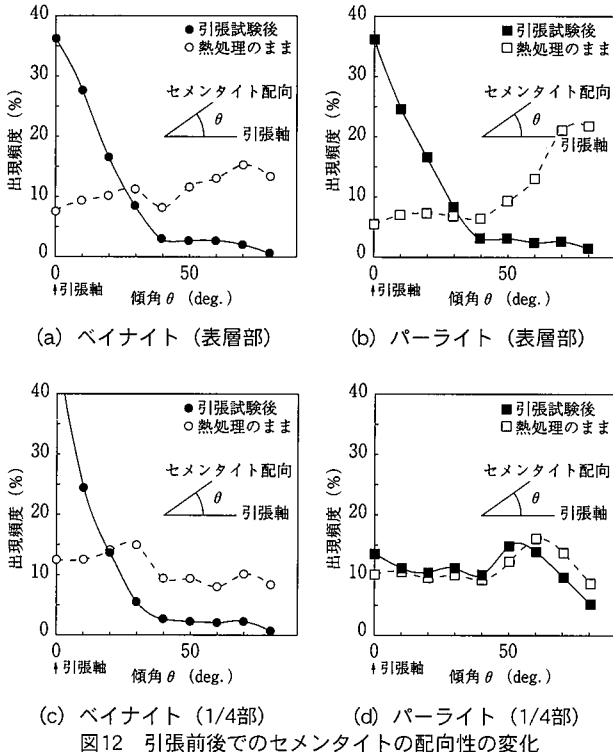


図12 引張前後でのセメントタイトの配向性の変化

表2 線材の機械的性質と金属組織

鋼	TS(MPa)	RA(%)	金属組織
A	1 183	60.8	ベイナイト(85%)
B	1 090	45.4	パーライト

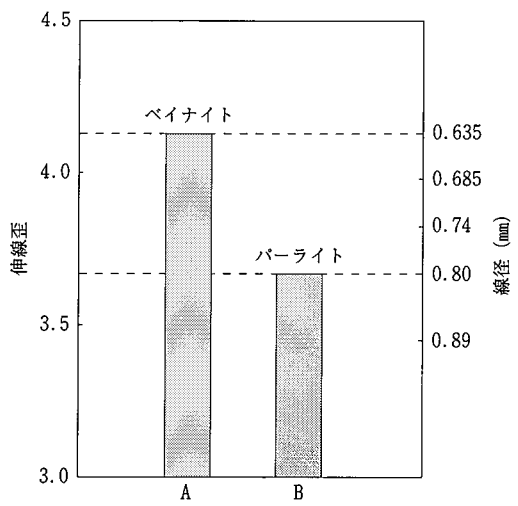


図13 ベイナイト線材の伸線限界

3.3.4 高生引き性が得られる原因

写真4にパーライト組織(鋼B)とベイナイト組織の薄膜(鋼A)を透過電子顕微鏡内で引張った場合のセメントタイトと転位の様子を示す(九州大学の超高圧電子顕微鏡を使用)。パーライト組織の転位が移動可能な領域は長いセメントタイトに囲まれた狭いフェライト内に限られている。一方、ベイナイト組織のセメントタイトは短く断断されているため、転位がセメントタイトの間をすり抜けて長い距離にわたって移動できる。これを模式図で示したものが図14である。一般に、個々の転位の移動距離が長いほど同じ歪みを与えるための転位の数は少なく、転位強化量も小さくなる<sup>8)</sup>。すなわちベイナイト組織では転位へのセメントタイトの拘束が弱く、転位が長い距離を移動できるために、同じ線径まで伸線加工をしても加工硬化量が小さくなる。これがベイナイト線材が高い生引き性を示す原因と考えられる。

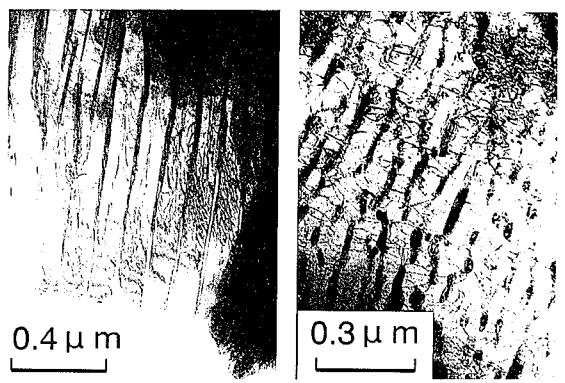


写真4 セメントタイトと転位の相互作用(九州大学超高圧電子顕微鏡)

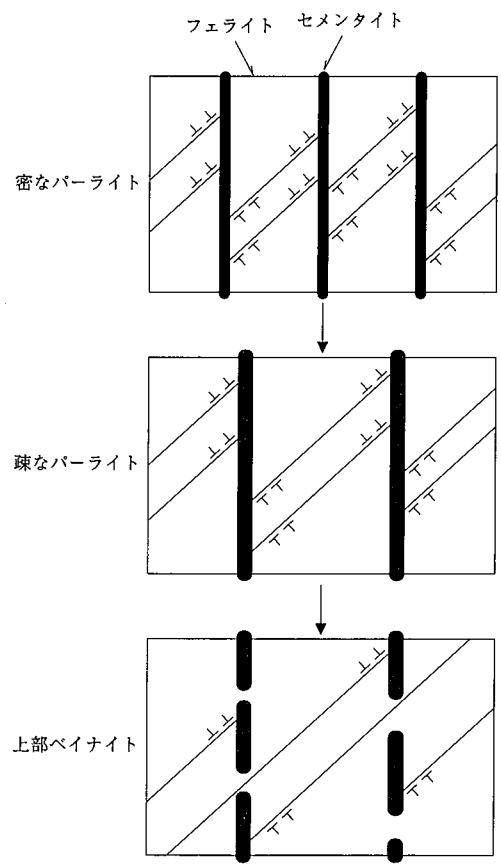


図14 転位の移動距離に及ぼすセメントタイトの影響模式図

### 3.4 ベイナイト線材のまとめ

0.8%C鋼の上部ベイナイト組織はパーライト組織の線材と比べて高い絞り値と伸線限界を示す。これはベイナイト組織のセメントタイトの間隔が粗く長さが短いことに起因する。すなわち、ベイナイト線材では表層から中心まで線材横断面全域にわたり変形が浸透しやすいために、局所絞りが発生しにくく、絞り値が大きくなる。また転位がセメントタイトに拘束されることなく、短く分断されたセメントタイトの間を抜けて長い距離を移動できるため、低い転位密度で同じ量の変形をすることができる。この結果、加工硬化率が小さくなり、良好な伸線加工性(生引き性)が得られるものと考えられる。

## 4. 結 言

新日本製鐵で開発されたインライン熱処理型線材の例として、室蘭製鐵所で製造されるインラインQT線材及び君津製鐵所で製造されるベイナイト線材の製造法と特徴について述べた。いずれの線材

もインライン熱処理の特徴を活かした組織制御と均質化がなされており、従来のオフラインでの熱処理で製造される線材と比較して一段と良好な特性が付与されている。

### 参考文献

- 1) 例えば、21世紀のインフラを支える条鋼製品、第157・158回西山記念技術講座、1995.5、日本鉄鋼協会
- 2) 矢田浩、森俊道、村上雅昭、富永治朗、落合征雄：製鉄研究、(310)、264(1982)
- 3) Ammerling, Willi-Jurgen:Iron and Steel Engineer. (1970.12), 99
- 4) 川名章文、大羽浩、落合征雄：第36回伸線技術分科会資料、1993.11.12
- 5) 杉丸聡、西田世紀、吉江淳彦、大羽浩：第43回伸線技術分科会資料、1997.6.13
- 6) 西田世紀、川名章文、杉丸聡、吉江淳彦、今輩正名、柴田俊太郎：CAMP-ISIJ、10、552(1997)
- 7) Tominaga, J. et al. : Proc. of 54th Annual Convention of Wire Association International, 1984
- 8) 例えば、日本金属学会編：新版転位論、東京、丸善、1975