

(論文)

# 制御圧延・制御冷却による線材の高品質化

畠 英雄\*・家口 浩\*・下津佐正貴\*\*・外山雅雄\*\*\*

\*技術開発本部・材料研究所 \*\*鉄鋼カンパニー・神戸製鉄所・条鋼技術部 \*\*\*鉄鋼カンパニー・神戸製鉄所・条鋼圧延部

## Development of High Quality Wire Rod through Thermomechanical Control Process

Hideo Hata・Hiroshi Yaguchi・Masataka Shimotsusa・Masao Toyama

A thermomechanical control process (TMCP) was developed for the No.7 wire rod mill in the Kobe Works. Through TMCP, wire rod quality was improved by controlling the recrystallization or grain growth of austenite and subsequent transformations. The austenite grain size number for SCM435 was larger than 11(  $7\mu\text{m}$  ) when finishing rolling conditions were controlled. Grain size distribution in the wire rod was also very uniform. This paper describes the properties of developed wire rod having low tensile strength or a fine microstructure.

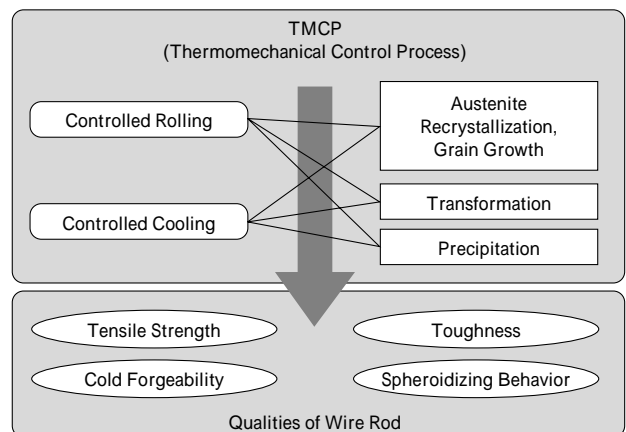
まえがき = 線材製品は、自動車用部品・家電製品など、多くの用途に使用され、最終製品に加工されるまでに、2次加工、3次加工と多岐にわたる工程を経ることが大きな特徴である。いっぽう、近年のコストダウン・環境意識の高まりなどにもとない、最終製品の高性能化や、工程設計の自由度を増すために、圧延線材の高品質化が求められている。制御圧延・制御冷却は、この要求にこたえる技術の一つである。圧延後の線材の冷却制御だけを見ると、ステルモア方式の冷却コンベアを始めとして、さまざまな技術が開発されてきた<sup>1)</sup>。しかし、いっそうの高品質化を進めるためには、熱間圧延から冷却までの圧延工程における、総合的な制御圧延・制御冷却技術が期待されている。

神戸製鉄所第7線材工場は仕上圧延ラインのリフレッシュを機に、制御圧延・制御冷却能力を高め、上述のように高度な品質要求への対応能力を強化し、従来の圧延ライン(以後従来ミルと呼ぶ)では不可能であった低温圧延、精密な温度制御が可能になった。ここではリフレッシュされた仕上圧延ライン(以後新ミルと呼ぶ)における制御圧延・制御冷却技術といくつかの製品への適用例を紹介する。

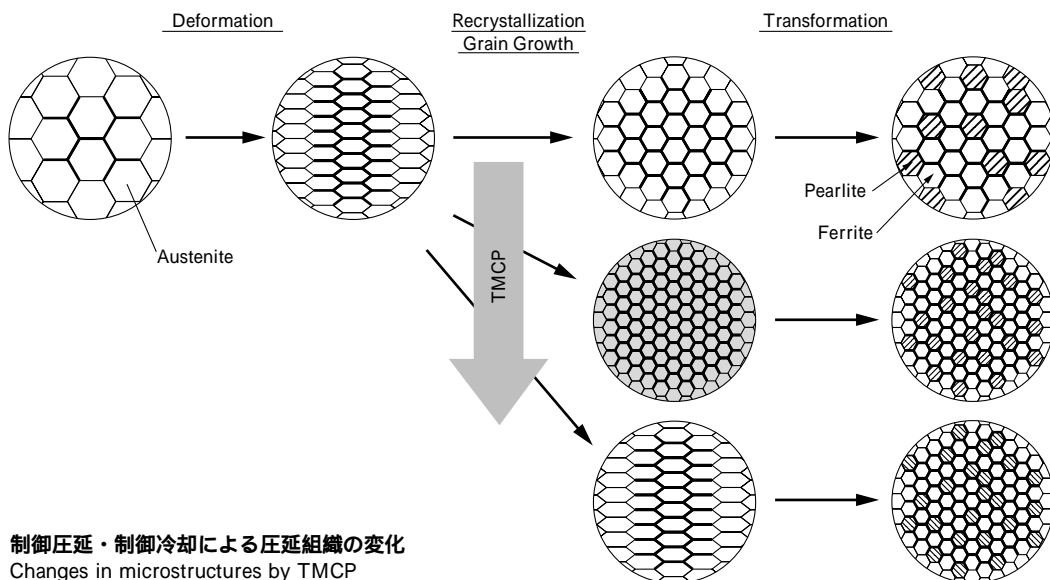
### 1. 制御圧延・制御冷却の目的

制御圧延・制御冷却技術とは、第1図に示すように、再結晶、粒成長、析出、変態などを制御することにより、さまざまな特性の高品質化を可能にするものである<sup>2)3)</sup>。

第2図に、圧延時のオーステナイトと変態組織の変化を模式的に示す。圧延温度を低下することにより、再



第1図 制御圧延・制御冷却と製品品質  
Fig. 1 Process of TMCP and required qualities of wire rod



第2図 制御圧延・制御冷却による圧延組織の変化  
Fig. 2 Changes in microstructures by TMCP

結晶・粒成長が抑制され、オーステナイト粒はより微細化あるいは未再結晶のままとなる。このようなオーステナイトでは、粒界や粒内の変形帯といった析出サイトからのフェライト変態が起こりやすい状態にある。第3図はこのときのCCT曲線の変化を模式的に表したものである。制御圧延によりフェライト変態が促進されることにより、CCT図上ではフェライト変態のノーズが短時間側にシフトする。したがって、同じ冷却の温度履歴でも、通常圧延ではベイナイト組織が混在していたものが、制御圧延材では完全なフェライト+パーライト組織をえることができる。これは、後述する強靱鋼の直接軟質化の基本的な機構である。

このような制御圧延と、変態時の温度履歴を制御する制御冷却との組み合わせにより、所定の組織・品質をえることができる。

狭い意味での制御圧延・制御冷却は、オーステナイトを未再結晶状態とし、冷却過程でオーステナイト粒内からフェライトを生成させる技術を指すことがある。ここでは、オーステナイトとその後の組織変化を制御する技術に対して広く制御圧延・制御冷却と呼んでいる。第2図はフェライト+パーライト組織鋼の場合であるが、フェライトに限らず組織変化を積極的に制御することにより、第1図のような品質向上を実現することができる。

## 2. プロセスから見た新圧延ラインの特徴

新ミルの大きな特徴の一つに、低温圧延を主とした制御圧延能力がある。これによるオーステナイト組織の微細化効果について調査した。SCM435を供試試料とし、圧延温度(仕上圧延機であるブロックミルおよびサイジングミルの入り側温度。これらの配置は本号 p.6を参照)を750 から1050 の範囲で変えたときの圧延後の線材をステルモアコンベア上で焼入れて試料を採取した。線材の断面において表面から半径方向に直径の25%だけ中心寄りの部分(以下1/4D位置と呼ぶ)でオーステナイト粒径を測定した。測定方法はJIS-G0551によった。実験の結果、圧延温度低下にともないオーステナイト粒径は微細化し、粒度番号11番以上(平均粒径約7μm以下)まで微細化できることがわかった。

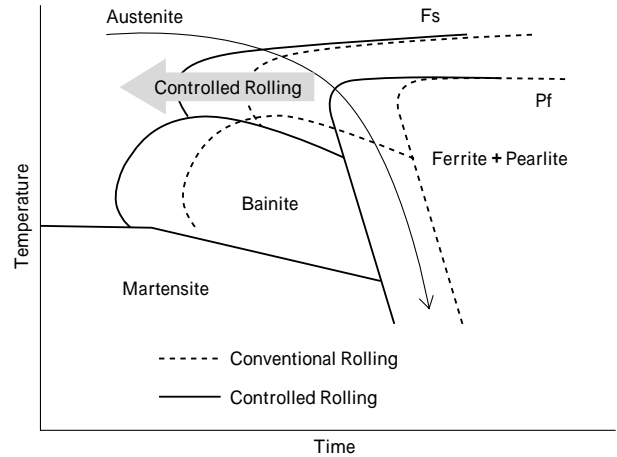
オーステナイト粒度(N)は、最終パスの圧延条件で決まるツェナー-ホロモンパラメータZをもちいて整理できることが報告されている<sup>3)4)</sup>。

$$Z = \dot{\gamma} \exp(Q/RT) \dots \dots \dots (1)$$

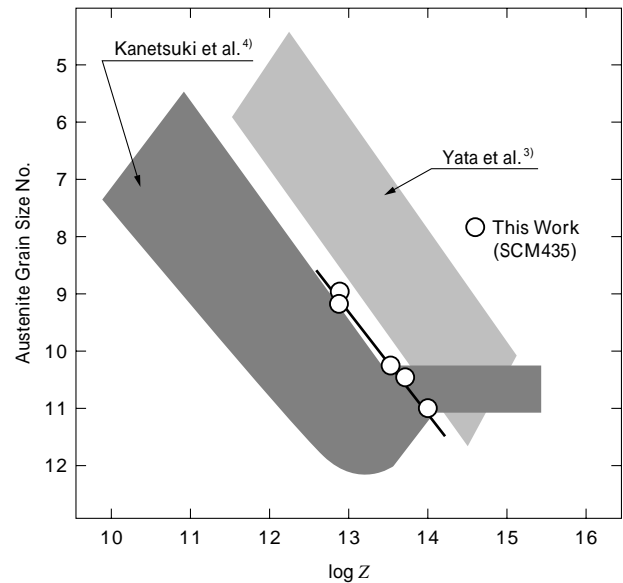
ここで

- : 最終パスの歪み速度
- T : 最終パスの圧延温度(K)
- R : 気体定数(J/mol・K)
- Q : 活性化エネルギー(63800J/mol)

第4図に、Z値とオーステナイト粒度の関係を示す。比較として、矢田ら<sup>3)</sup>と金築ら<sup>4)</sup>の結果をあわせて示す。ここで、活性化エネルギーQは鉄原子の拡散の活性化エネルギーをとった。この範囲では、logZとオーステナイト粒度番号に良い直線関係がみられる。このことは、圧延中に動的再結晶がおきていることを示唆している<sup>3)</sup>。



第3図 制御圧延による変態挙動の変化(CCT曲線)  
Fig. 3 Changes in transformation behavior by controlled rolling (CCT curves)

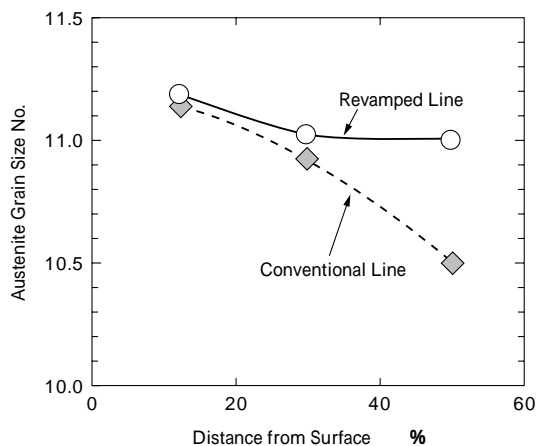


第4図 圧延材のオーステナイト粒径とZ値の関係  
Fig. 4 Relation between austenite grain size No. and Z parameter

ところが、実際に観察されたオーステナイト組織は、動的再結晶粒の特徴である屈曲した粒界組織は見られなかった。また、同じZ値に対するオーステナイト粒度番号の絶対値は、矢田らや金築らの結果と一致していない。したがって、再結晶機構に関しては、今後詳細な調査が必要であると考えられる。

従来の第7線材工場仕上圧延ミルとの大きな違いとして、線材断面内の組織のばらつきが非常に小さい点が挙げられる。従来ミルでも、圧延線速を大幅に落として圧延温度をある程度低下することにより、11番程度の微細オーステナイト粒がえられていた。しかし、1/4D位置で同じ11番の粒度の場合に、線材断面半径方向での粒度分布を比較すると、従来ミル材は中心と表面で約1番の粒度の違いがあることが観察された(第5図)。

従来ミルにおける粒度の断面内ばらつきは、圧延前後の水冷帯における強水冷のために、温度のばらつきが生じた結果と考えられる。これに対し、新ミル材ではほとんどばらつきがみられない。圧延時の線材断面内の温度ばらつきを少なくするように水冷帯が設計・制御されており、その効果が現れていると思われる。このように、



第5図 線材断面内のオーステナイト粒度分布  
Fig. 5 Austenite grain size No. distribution in cross section of wire rod

線材断面内の組織ばらつきが小さくなることは、熱処理後の組織の均一化、冷圧時の変形の均一化などの効果がある。

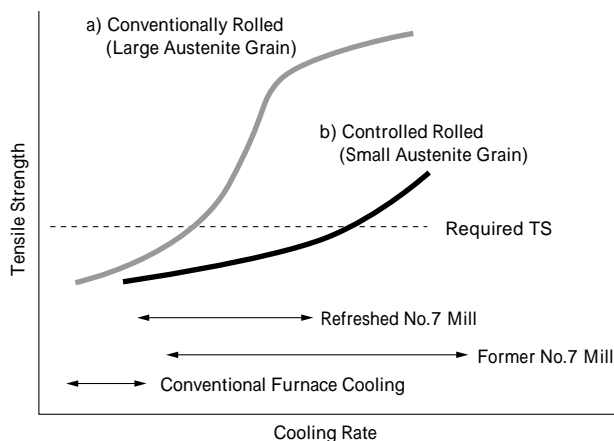
これに加え新ミルでは、徐冷・衝風冷却能力を強化したことにより、圧延後の変態時の冷却制御がより広い冷却速度・温度範囲で可能になった。さらに、コンベア長さを大幅に延長(48m → 100m)したことにより、より広い温度範囲で冷却制御ができる。従来の短いコンベアでは、コンベア上にコイルが滞在できる時間が短いため、変態が完了する前にコレクタに落下する場合もあり、十分な冷却制御ができていなかった。新ミルでは、変態温度域の大部分で冷却速度を制御できるため、高度な材質制御が可能になっている。

### 3. 開発製品

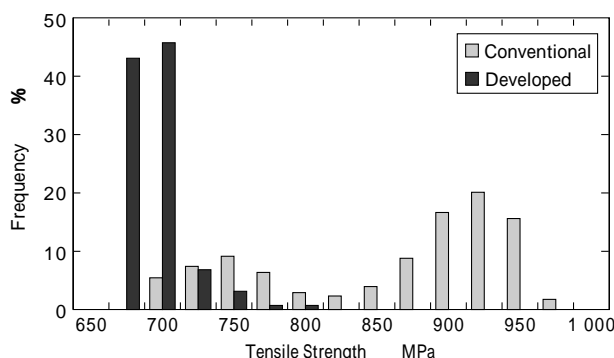
#### 3.1 直接軟質化線材

冷間圧造用線材の多くは、線材圧延後に軟質化焼鈍を経て加工されるが、この工程の省略や、加工性の向上のために、圧延まま材の強度を低下させる直接軟質化の研究がなされてきた<sup>3)</sup>。

強靱鋼を例にみると、第1章で述べたように、オーステナイト粒径を微細化することによりフェライト変態が促進され、軟質化できることが知られている。これを、圧延後の冷却速度と製品の引張強度の関係で説明すると、第6図に示すとおりである。新旧それぞれの第7線材工場の冷却コンベアと、一般的な炉冷の温度範囲を図中に示す。



第6図 強靱鋼の冷却速度と製品強度の関係  
Fig. 6 Relation between tensile strength and cooling rate of alloy steels



第7図 強靱鋼 SCM435 の強度  
Fig. 7 Tensile strength of SCM435

オーステナイト粒径が大きいと、非常に遅い冷却速度が必要であるため、オフラインで炉冷しなければ軟質化できない(第6図 a))。いっぽう、制御圧延材はより速い徐冷速度で軟質化できる(第6図 b))。これは、第3図のように CCT 曲線のノーズが短時間側にシフトしているためである。この結果、徐冷能力を強化し、長さを十分にとった新ミルでは、インラインでの軟質化が可能になった。

従来、直接軟質化が非常に難しかった強靱鋼 SCM435 の、新ミルにおける開発材の特性を第7図に示す。従来材にくらべ、大幅に強度が低下し、約 800MPa 以下となっている。これは、ベイナイトが混在した組織であった従来材に対し、開発材はほぼフェライト+パーライト組織に制御された(写真1)効果である。このため、伸線や冷間加工前の軟化焼鈍工程を省略することを可能にしている。

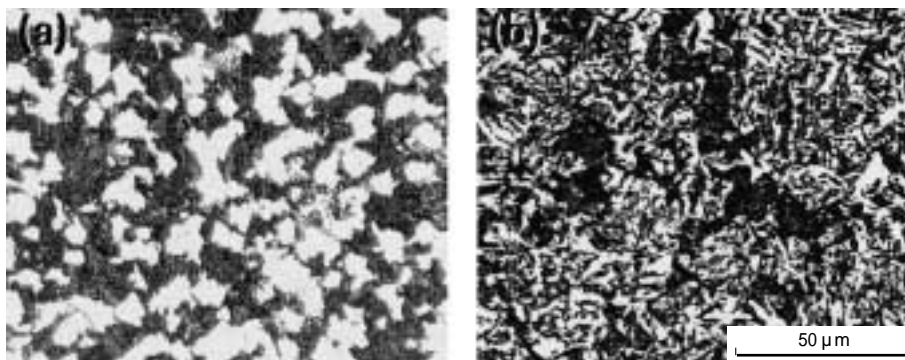


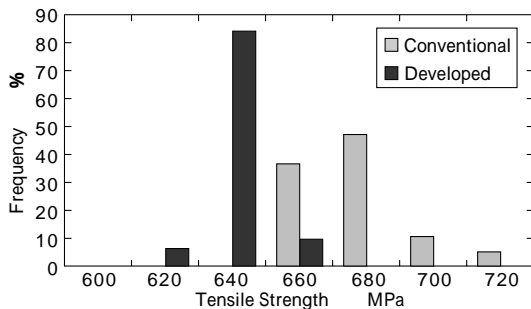
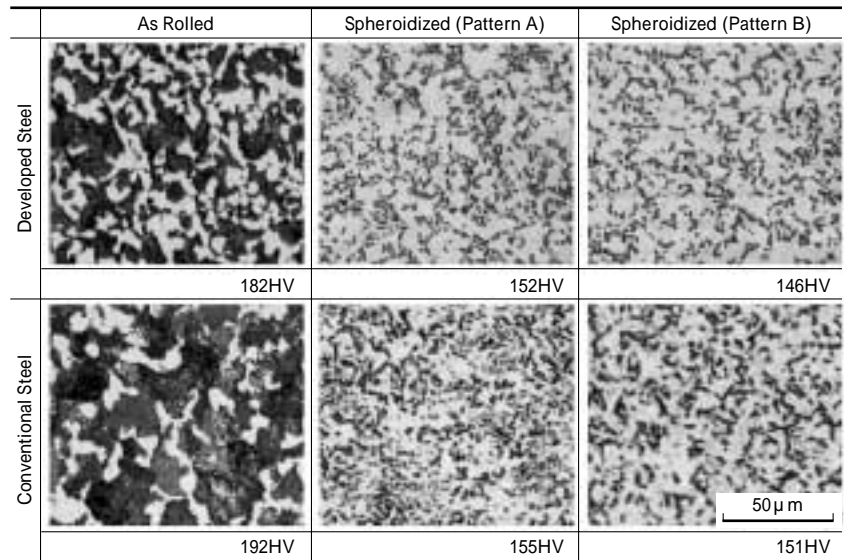
写真1 強靱鋼 SCM435 の組織  
Photo 1 Microstructures of SCM435

a) Developed steel (755MPa)

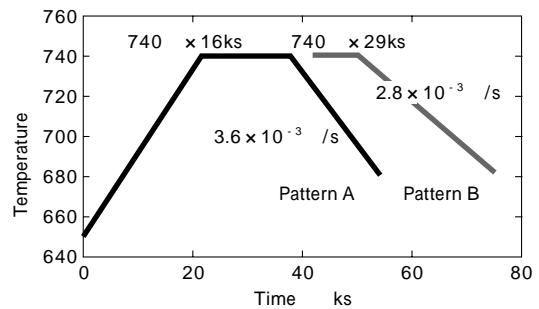
b) Conventional steel (925MPa)

写真2 微細組織線材と通常材の球状化前後の組織

Photo 2 Microstructures of fine-grained and conventional steel before and after spheroidizing annealing



第8図 ボロン鋼 SAE1035B の強度  
Fig. 8 Tensile strength of boron steel of SAE1035B



第9図 微細組織線材の球状化実験条件  
Fig. 9 Spheroidizing annealing conditions for fine-grained steel

第8図に、ボロン鋼の直接軟質化材の特性の例として、SAE1035Bの例を示す。ボロン鋼はもともと、軟質化焼鈍工程が省略できる線材として使用されることが多いが、伸線性や冷間圧造性の向上を目的として直接軟質化線材が求められている。SCM435同様に、従来材にくらべて軟質化したものがえられている。

### 3.2 微細組織線材

制御圧延・制御冷却により、圧延材の組織を従来よりも微細にすることができる。組織の微細化は、強度向上、冷間加工性の向上などに加え、球状化後の組織の改善に効果があることが知られている<sup>5)</sup>が、新ミルにおける制御圧延・制御冷却により、このような特性を有する微細組織鋼の製造を可能にした。

S45C鋼の微細組織線材に関し、第9図に示す実験条件で球状化実験をおこなった。球状化条件は、標準的な球状化条件(パターンB)と、処理時間を短縮した迅速球状化条件(パターンA)である。

写真2に圧延材と球状化後の組織と硬さを示す。開発材は制御圧延・制御冷却によって、従来材にくらべて組織が微細化し、フェライト分率を増加させている。このため、圧延材の硬さは開発材のほうが低い。同一球状化条件で比較すると、開発材は炭化物の球状化度が良好である。開発材は迅速球状化条件で、従来材の通常球状

化条件材と同等の球状化組織、硬さがえられている。

冷間加工性は、球状化度に相関があることが知られている。したがって開発材は、従来条件で球状化した場合、従来材以上の冷間加工性を有し、迅速球状化条件で球状化しても従来材と同等の冷間加工性を有すると考えられる。

むすび=第7線材工場のリフレッシュされた仕上圧延ラインにおける、制御圧延・制御冷却技術を開発した。制御圧延においてはオーステナイト組織の制御が重要であるが、粒度番号11番以上(平均粒径約 $7\mu\text{m}$ 以下)の微細粒がえられた。線材断面内の粒度分布も均一である。これによる製品開発の一例として、直接軟質化線材、微細組織線材を紹介した。これらは従来鋼に比較して、製品強度低下、組織微細化により、2次加工以降での冷間加工性の向上、工程の簡略化、省略が可能である。

### 参考文献

- 1) 鉄鋼便覧, 第巻(2), (1980), p.892.
- 2) 小指軍夫: 制御圧延・制御冷却, (1997), p.11, 地人書館.
- 3) 矢田 浩ほか: 製鉄研究, No.310, (1982), p.264.
- 4) 金築 裕ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.40, No.3(1990), p.73.
- 5) 相原賢治ほか: 材料とプロセス, Vol.1, (1988), p.847.