

Environmentally Friendly Bars and Wire Rod Steels



今村 晴幸
Haruyuki Imamura

形鋼セクター室長 兼
棒線営業部 主査(部長)



天野 虎一
Keniti Amano

技術研究所 厚板・条
鋼・接合研究部門長・
工博



笹田 幹雄
Mikio Sasada

水島製鉄所 条鋼圧延
部長

要旨

棒鋼・線材として供給される特殊鋼は、複雑な2次加工プロセスを経て最終製品となる。このため、環境負荷低減のためには、鋼材製造工程のみでなく、2次加工、最終製品の利用および廃棄までを考慮した鋼材の開発が必要である。このような観点から開発された代表的な製品は、(1) 900 MPa 級高強度高靱性非調質鋼、(2) 800 MPa 級 TCP 型高強度高靱性非調質鋼、(3) 軟化焼なまし、伸線工程省略鋼、(4) 機械構造用黒鉛鋼である。

Synopsis:

A complicated secondary machining process is usually applied to a steel for machine components, which is supplied in the form of either bar or wire rod. From the environmental point of view, steel makers should develop the steel according to a philosophy such as that of considering not only the simplification of manufacturing processes of bars and wire rods at the steel makers but also the simplification in the final use and disposal at the end users. Kawasaki Steel has developed many environmentally friendly steels based on the above-mentioned philosophy, and the typical products include (1) an as rolled 900 MPa class high tensile strength steel manufactured without a quenching and tempering process, (2) an 800 MPa class TCP type steel with high tensile strength and excellent toughness also manufactured without a quenching and tempering process, (3) a steel manufactured without softening and drawing processes, and (4) a cold forgeable graphitized steel with excellent free cutting properties without a Pb addition.

1 緒言

棒鋼・線材として供給される特殊鋼は、需要家で鍛造、機械加工および熱処理などの複雑な2次加工を経て最終製品となる。このため、鋼材による環境負荷の低減の観点からは、鋼材製造過程のみでなく2次加工、最終製品の利用および廃棄までを考慮することが必要である。

当社では、このような LCA (life cycle assessment)¹⁾ を踏まえて、各種鋼材の開発を進めている。本報においては、環境負荷低減へ大きな寄与が期待される代表的な棒鋼・線材の開発例について紹介する。

2 省エネルギーに貢献する棒鋼製品

2.1 棒鋼・線材の用途と2次加工

棒鋼・線材として供給される特殊鋼の用途と2次加工プロセス例を Table 1 に示す。棒鋼・線材は、先に述べたように需要家にて機

械加工、鍛造および熱処理を経て最終製品とされる点に大きな特徴がある。したがって、省エネルギーのためには、2次加工プロセスでの焼なましや焼き入れ・焼もどしなどの熱処理の省略が効果的であり、これらは、同時に工程省略と製造コストの低減にも寄与する。

2.2 非調質鋼

当社では、焼き入れ焼もどし処理の省略が可能な各種非調質鋼を開発し、需要家での省エネルギーおよび製造コストの低減に大きく寄与している。ここでは、引張り強さ 900 MPa 級非調質鋼である NH48MV および引張り強さ 800 MPa 級の TCP 型高靱性非調質鋼を紹介する。

2.2.1 引張り強さ 900 MPa 級高強度非調質鋼 NH48MV

NH48MV は、大型機械の構造用部材に用いられる調質合金鋼の非調質化を目的に開発されたフェライト+パーライト型直接切削用高強度非調質鋼である。大型部材として安定した機械的特性を付与するために、C, Mn, Cr および V 量を適正化するとともに低温加熱および低温強圧下圧延を行い、表面から中心まで均一なフェライト+パーライト組織になるように配慮している。

Fig. 1 に NH48MV $\phi 190$ mm 大棒の断面内での機械的性質の半径方向分布を SCM435 調質材と対比して示す。SCM435 調質材では、棒鋼中央部の引張り強さが 800 MPa であるのに対し、表面部

* 平成12年4月27日原稿受付

Table 1 Typical secondary working processes for special steels

Steel	Secondary working	Final products
Carbon and low-alloy steels for machinery structural use	Bar → Shearing → Machining → Quenching and tempering	Machine component for automobile
	Bar → Shearing → Hot-forging → Machining → Quenching and tempering	
	Bar → Shearing → Spheroidizing annealing → Cold forging → Quenching and tempering	
	Rod → Annealing → Drawing → Spheroidizing annealing → Drawing → Cold forging → Quenching and tempering	High tension bolts
Bearing steel	Bar → Annealing → Shearing → Hot-forging → Spheroidizing annealing → Machining → Quenching and tempering → Grinding	Ball bearing
	Rod → Spheroidizing annealing → Drawing → Cold-forging → Quenching and tempering → Grinding	
High carbon steel	Rod → Patenting → Drawing → Stranding → Bluing	PC wire
	Rod → Drawing → Patenting → Drawing → Electroplating → Drawing → Stranding	Tire cord

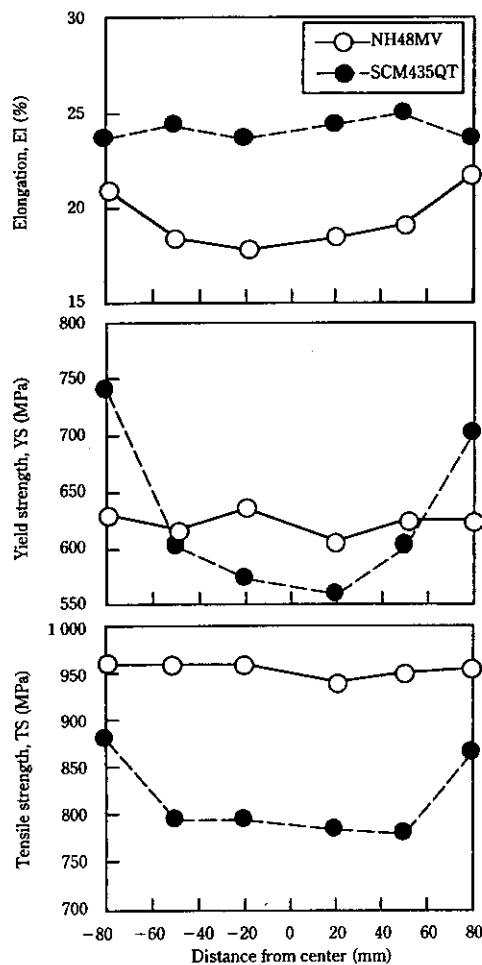


Fig. 1 Radial distribution of mechanical properties for NH48MV and quench-tempered SCM435 steels with a diameter of 190 mm

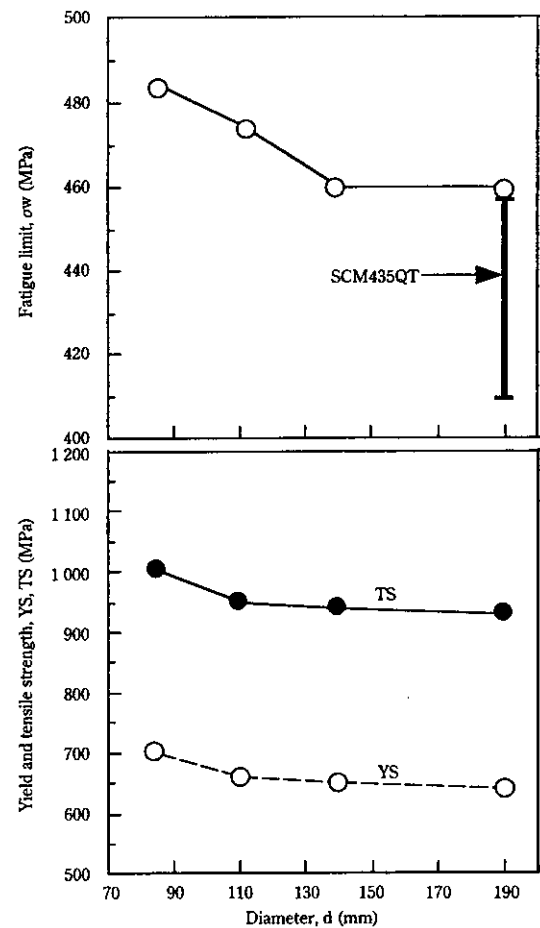


Fig. 2 Effect of steel bar diameter on strength and fatigue limit of NH48MV steel, of which properties were measured by the specimen collected from the position of a quarter diameter in each steel

は質量効果のため約 880 MPa と大きく変化している。一方、NH48MV では、断面内のどの位置においても引張り強さは、900 MPa 以上であり SCM435 調質材の引張り強さよりも高く、また均一性にも優れている。

Fig. 2 に NH48MV の棒鋼サイズと 1/4 直径部の強度および疲労強度との関係を示す。棒鋼サイズが、 $\phi 70$ mm から $\phi 190$ mm へ増加しても、降伏点および引張り強さはそれぞれ 600 MPa 以上およ

び 900 MPa 以上であり、棒鋼サイズによらず安定した高強度が得られる。また、回転曲げ試験により求めた疲労強度も 460 MPa 以上と SCM435 調質材の値よりも高く、疲労特性にも優れている。

2.2.2 引張り強さ 800 MPa 級 TCP 型高靱性非調質鋼

一般にフェライト+パーライト型非調質鋼では、機械構造用合金鋼の調質材に比較すると靱性が低く用途が限定される。このような問題を解決し、機械構造用合金鋼の調質材よりも高靱化が可能な非

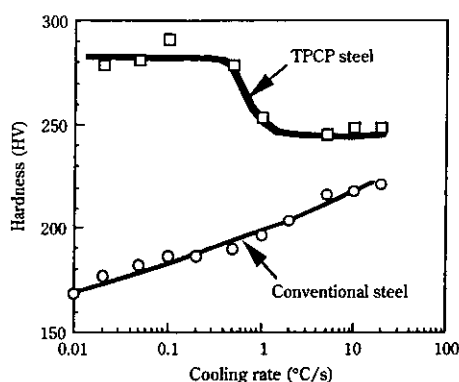


Fig. 3 Relation between cooling rate and hardness of newly developed ultra-low carbon bainitic steel and conventional one

調質鋼として TPCP 型非調質鋼を開発した。

従来のフェライト・パーライト型非調質鋼よりも高硬化が可能なものとしてベイナイト型非調質鋼が知られているが、降伏比が低くまた質量効果が大いという問題があり、大型部材への適用範囲に制限がある。従来のベイナイト型非調質鋼の問題点を克服するために、当社は極低 C 鋼に関する知見²⁾を基礎に thermo-mechanical precipitation control process (TPCP) と称する組織制御技術³⁾を開発し、これを非調質鋼の開発に適用した。

TPCP 法の基本概念は、ミクロ組織の冷却速度依存性の極めて小さい鋼組成を選択し、強度制御を従来の冷却速度制御に代わって、析出制御で行うものである。この TPCP 法に対しては、広範囲の冷却速度範囲で同一なミクロ組織が得られる極低 C ベイナイト鋼の適用が適切である。適用に際しては強度水準に応じて析出強化元素の種類および添加量を選定するとともに、適切な熱間加工条件を選択して析出制御を行うことにより、広い冷却速度範囲において安定した強度を確保できる。TPCP 法適用時の冷却速度と硬さとの関係を従来鋼と対比して Fig. 3 に示す。従来鋼では、冷却速度の低下に伴って硬さは単調に低下するが、TPCP 法を適用することにより 0.01~0.5°C/s の極めて幅広い冷却速度範囲においてはほぼ一定の硬さに制御できる。

TPCP 法は、直接切削用および熱間鍛造用のいずれにも適用することが可能であるが、直接切削用への適用例を以下に述べる。Table 2 に TPCP 法を適用して製造した $\phi 170$ mm 棒鋼の機械的特性を SCM435 調質材の特性と対比して示す。TPCP 鋼の降伏点は約 100 MPa も向上している。また、衝撃値は、800 MPa を超える高強度にも関わらず SCM435 調質材よりも優れている。このよう

Table 2 Mechanical properties of TPCP and quench-tempered SCM435 steels in a diameter of 170 mm

Steel	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	uE + 20 (J/cm ²)
TPCP	717	847	25	320
SCM435-QT*	605	788	22	146

*Quenching: 870°C × 1 h → Oil-quenching
Tempering: 600°C × 1 h

に本棒鋼の特徴は、TPCP 法の適用により非調質でありながら SCM435 調質材を凌駕する高靱性を有することである。

2.3 軟化焼なましと伸線工程省略鋼

低合金線材は二次加工において軟化焼なましと伸線を施した後、鍛造、切削などで最終加工を行い製品になる。代表例として Fig. 4 に示すように、軟化焼なまし処理、伸線工程の省略が可能な高寸法精度・直接軟化合金線材を開発した。

伸線工程の省略を可能にする高寸法精度でかつ任意寸法の線材製造は当社で開発したサイズフリー 4 ロール圧延技術⁴⁾により行われる。4 ロール圧延機の配置を Fig. 5 に、主な仕様を Table 3 に示す。4 ロール圧延設備は高い剛性とロール隙を 0.01 mm 単位で微調整できる調整機構を備えた圧延機と高精度で圧延機を組み立て分解するオフライン設備より構成される。製造実績を Fig. 6 に示す。 $\phi 7.2$ mm~ $\phi 8.0$ mm のサイズフリー範囲内で ± 0.07 mm 以内の超高寸法精度を達成し、伸線工程の省略を実現した。

軟化焼なまし処理を省略する直接軟化処理は制御圧延、制御冷却により行われる。Table 4 に製造法と適用鋼種および寸法を示す。Photo 1 に直接軟化材と通常圧延材の顕微鏡組織の比較を示す。直接軟化材はフェライト・パーライト組織であり、通常圧延材のベイナイトと比べ軟化した組織である。

Photo 2 に適用例として、焼なまし工程を省略した本開発鋼を用いて製造した低合金六角穴付きボルトおよびつば付きボルトを示す。冷間鍛造性および製品精度に問題はなく、焼き入れと焼き戻しにより商品化されている。

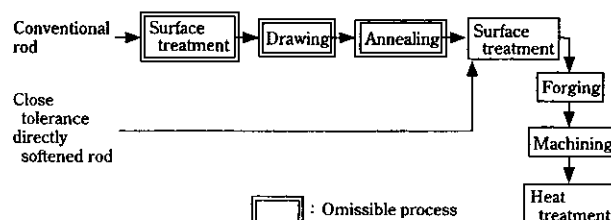


Fig. 4 Example of process applying close tolerance directly softened rod

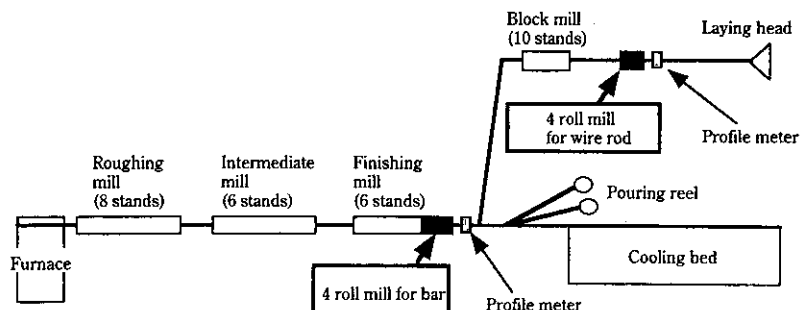


Fig. 5 Mill layout of bar and wire rod mills at Mizushima Works

Table 3 Main specifications of 4 roll mills for bar and wire rod rolling

Items	Specifications of 4 roll mill	
	For bar rolling	For wire rod rolling
Organization of mill	2 stands per unit Roll arrangement: + → ×	3 stands per unit Roll arrangement: + → × → +
Product size	16~85 mm ϕ	4.0~19.0 mm ϕ
Rolling speed	0.8~16 m/s	15~110 m/s
Rolling load	Max. 49 000 N	Max. 9 800 N
Rolling torque	Max. 47 000 N-m	Max. 1 200 N-m
Mill constant	980 MN/mm	20 MN/mm
Roll drive	2 rolls driven by motor and 2 rolls rotated by water spray	4 rolls driven by motor
Roll diameter	400 mm ϕ	220 mm ϕ
Roll gaps adjustment	Remote control from operation room Control accuracy = ± 0.01 mm	Remote control from operation room Control accuracy = ± 0.01 mm
Stand change	Automatic change system Changing time = 3.5 min/unit	Automatic change system Changing time = 3 min/unit
Maker	Sumitomo Heavy Industries, Ltd.	Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

Table 4 Production method for directly softened rod

Diameter	Steel	SCr420 ~440	SCN420 ~435	SCM440
5.5~10 mm ϕ				Slow-cooling
11~19 mm ϕ		Retarded stelmor		

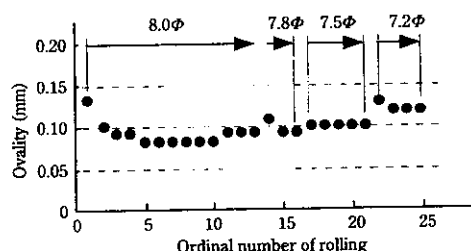


Fig. 6 Size-free rolling results of wire rod by the 4 roll mill

3 有害物質排除に貢献する開発製品

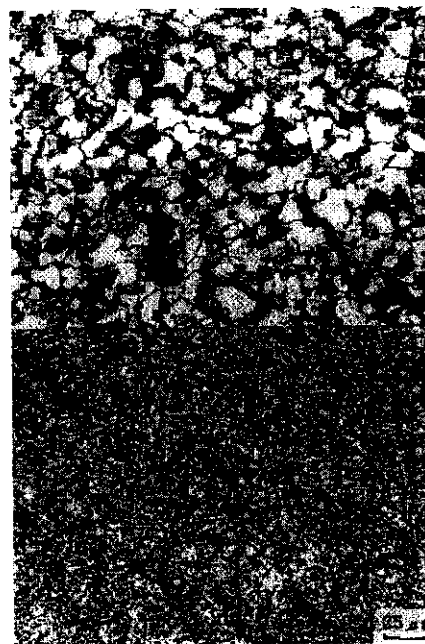
機械構造用鋼を用いた自動車や産業機械部品の製造において、機械加工性は極めて重要である。このため、Pb、S および Ca などの快削元素の添加が一般的に行われている。特に、Pb は機械的性質への影響が小さいことと同時に各種の切削形態においても被削性を向上させることのために快削元素として広範囲に用いられている。しかし、Pb は人体に有害⁹⁾であるため、Pb 快削鋼は、その製造、使用およびリサイクルの面で問題が多く、有害物質の排出抑制の観点から Pb を用いない快削鋼が求められている。

また、部品の製造工程として、従来、熱間鍛造と機械加工の組み合わせが主流であったが、省エネルギーおよび省資源の観点から冷間鍛造と機械加工の組み合わせが増加しつつあり、冷間鍛造性と被削性を兼ね備えた鋼が強く要望されるようになった。

このような要求に対応するために開発したのが、機械構造用黒鉛鋼である。黒鉛鋼は、硬質なセメントタイトを軟質な黒鉛に変化させることにより、冷間鍛造性を向上させるとともに黒鉛の潤滑作用により被削性の向上を狙った鋼材である。鋳鉄では、含有する C を黒鉛化して用いる例¹⁰⁾はあるが、鋳鉄を機械構造用として用いる

(a) Directly softened

(b) Conventionally rolled

Photo 1 Microstructure of 14 mm ϕ SCM440 steel

(a) Hexagon socket bolt

(b) Flange bolt

Photo 2 Example of products from directly softened rods

ことは困難である。

開発鋼は、化学組成および熱間圧延条件の最適化により鋼中に黒鉛を微細分散させることで、機械構造用途への適用を可能とした。Fig. 7 に外周切削時の工具寿命と冷間鍛造性との関係を 0.53% C 黒鉛鋼、S30C (S: 0.010%) 球状化焼きなまし材、一般構造用快削鋼 SAE1117 (S: 0.12%, P: 0.028%) および SAE12L14 (S: 0.32%, Pb: 0.33%, P: 0.063%) に対して示す。ここで、冷間鍛造性は、 $\phi 15$

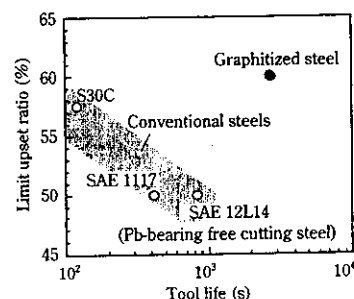


Fig. 7 Relation between tool life in turning test and limit upset ratio in cold forging test

mm×22.5 mm の円柱状試験片を用いた圧縮試験による限界圧縮率により評価した。被削性は、超硬工具 P10 を用いた外周旋削試験時の工具寿命により評価した。工具寿命は、工具の逃げ面摩耗が 0.2 mm に達するまでの切削時間とした。黒鉛鋼は被削性および冷間鍛造性の両特性に優れている。また、Pb 快削鋼と同等以上の被削性を有することから有害な Pb を用いない快削鋼として有望である。

4 結 言

鋼材の環境負荷低減のためには、鋼材メーカーから最終需要家までのトータルのプロセスでの取り組みが必要である。当社ではこのような観点から今後とも顧客との連携を密にして、地球にやさしい製品の開発・製造に注力して行く所存である。

参 考 文 献

- 1) 山本良一：「人間・社会・環境との調和を求めて」，日本鉄鋼協会 社会鉄鋼工学部会 1995 年度シンポジウム論文集，日本鉄鋼協会 (1996)，71
- 2) 岡津光浩，林 透，天野慶一：川崎製鉄技報，30(1998)3, 131
- 3) 天野慶一，川端文丸，星野俊幸，谷川 治，今村晴幸：まてりあ，39 (2000)2, 184
- 4) 武田 了，小川隆生，川縁正信，丹下武志：川崎製鉄技報，32 (2000)1, 54
- 5) 石川秀雄：第 157，158 回西山記念講座，(1995)，209
- 6) 山本 悟，川野 豊，村上陽太郎：日本金属学会報，11(1972)，903