
連続鍛圧法による中心無偏析の高品質線棒製品の製造

Production of High Quality Rod and Bar by Applying Continuous Forging Process

柳島 章也(Fumiya Yanagishima) 山本 義治(Yoshiji Yamamoto) 川縁 正信
(Masanobu Kawaberi) 藤田 利夫(Toshio Fujita) 中野 昭三郎(Shozaburo Nakano)
浅川 貞夫(Sadao Asakawa)

要旨：

当社は、線棒製品の中心部の無偏析化を目的として、連続鍛圧法を開発し、この鍛圧設備を水島製鉄所 No. 3 連铸機に建設した。この方法では、圧下条件を制御することにより、中心部の無偏析化のみだけでなく、化学成分の濃度制御も可能である。本法を線棒製品に適用することにより、高炭素鋼線材の伸線性、および、機械構造用炭素鋼の中心部ドリル穿孔性に関し顕著な向上効果が認められた。また、無偏析化に伴い、タンディッシュ溶鋼過熱度上昇がはかれ介在物の低減も可能となったため、軸受鋼の転動寿命の向上も認められた。

Synopsis：

Kawasaki Steel has developed a continuous forging process capable of producing rods and bars with no center segregation and installed a continuous forging machine at No.3 continuous bloom caster at Mizushima Works. The method also makes it possible to control the chemical composition at the center portion of blooms. The application of this method to obtain the optimum chemistry at the center portion of continuously cast blooms has resulted in a noticeable improvement in the drawability of high-carbon rods and the ease of drilling at the center portion of carbon steel for machine structural use. Because of the elimination of segregation problem, this method makes it possible to increase the super-heat at the tundish and thus reduce the number of non-metallic inclusions; thus, improved rolling-contact fatigue life has also been obtained in bearing steel.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Production of High Quality Rod and Bar by Applying Continuous Forging Process



柳島 章也
Fumiya Yanagishima
水島製鉄所 管理部長



山本 義治
Yoshiji Yamamoto
水島製鉄所 管理部条
鋼管理室 主査(課長)



川縁 正信
Masanobu Kawaberi
水島製鉄所 管理部条
鋼管理室 主査(掛長)



藤田 利夫
Toshio Fujita
鉄鋼研究所 鋼材研究
部厚板条鋼研究室 主
任研究員(掛長)



中野 昭三郎
Shozaburo Nakano
エンジニアリング事業
部 鋼構造研究所 建設
エンジニアリング研究
室 室長(部長)



浅川 貞夫
Sadao Asakawa
水島製鉄所 管理部技
術サービス室 主査(部
長)

要旨

当社は、線棒製品の中心部の無偏析化を目的として、連続鍛圧法を開発し、この鍛圧設備を水島製鉄所 No. 3 連続機に建設した。この方法では、圧下条件を制御することにより、中心部の無偏析化のみだけでなく、化学成分の濃度制御も可能である。本法を線棒製品に適用することにより、高炭素鋼線材の伸線性、および、機械構造用炭素鋼の中心部ドリル穿孔性に関し顕著な向上効果が認められた。また、無偏析化に伴い、タンディッシュ溶鋼過熱度上昇がはかれ介在物の低減も可能となったため、軸受鋼の転動寿命の向上も認められた。

Synopsis:

Kawasaki Steel has developed a continuous forging process capable of producing rods and bars with no center segregation and installed a continuous forging machine at No. 3 continuous bloom caster at Mizushima Works. The method also makes it possible to control the chemical composition at the center portion of blooms.

The application of this method to obtain the optimum chemistry at the center portion of continuously cast blooms has resulted in a noticeable improvement in the drawability of high-carbon rods and the ease of drilling at the center portion of carbon steel for machine structural use. Because of the elimination of segregation problem, this method makes it possible to increase the super-heat at the tundish and thus reduce the number of non-metallic inclusions; thus, improved rolling-contact fatigue life has also been obtained in bearing steel.

1 緒 言

ほとんどの線棒製品は、最終製品に至るまでに鍛造、伸線、調質などの二次加工が施され、万一、素材に何らかの欠陥があった場合は、上記加工中、割れまたは断線等の不良が発生する。言い換えれば、この加工は素材を全数検査しているのに等しい。近年、この加工方法はますます厳しくなり、そのうえ加工時の不良発生率の低減要求も非常に強くなり、鋼材製造側への品質要求は、極めて高くなってきている。

この品質要求の主なものに連続製線棒製品の中心部の無偏析化がある。従来より、種々の連続製鋼の中心偏析改善技術はあったが、いずれも中心偏析問題の解消という面では、十分ではなく、そのうえ付随的に他の品質面での問題が発生し、高級線棒の厳しい総合的な品質要求に十分応えられる技術とは言えなかった。

そこで、従来の方法の延長では限界があると考え、当社は、凝固末期の鋳片を連続的に大圧下することにより、鋳片中心部の濃化溶

鋼を連続的に強制的に鋳片未凝固側に排出し凝固完了点を形成する技術(連続鍛圧法)を開発し、顕著な改善効果を得た^{1,2,3)}。

そこで、本技術を工程的に適用するため、連続鍛圧設備を水島製鉄所第3連続機に1990年6月に設置した^{4,5)}。一部の用途に関してはすでにこの連続鍛圧法を適用した線棒製品を実用化し、需要家からその品質向上効果に対して好評を得ている。現在、連続鍛圧法適用によるさらに付加価値の高い線棒製品の開発を続けている。

本報では、連続鍛圧法を適用した線棒製品の品質について報告する。

2 従来の中心偏析軽減技術と連続鍛圧法

2.1 従来の中心偏析軽減技術

従来の連続製鋼の中心偏析軽減技術としては、鋳型内あるいは凝固末期の溶鋼電磁攪拌^{6,7)}、低溫鑄造⁸⁾、すなわち、タンディッシュ溶鋼過熱度の低減、凝固末期のロールによる鋳片軽圧下等がある。

* 平成3年5月23日原稿受付

しかし、いずれも中心偏析軽減効果は認められるものの、中心部の無偏析化という面では十分とは言えないのが現状である。電磁攪拌は、攪拌された部分に負偏析帯が生じるため、最終製品での焼入れ深さのばらつきが問題となる一部の用途に関しては、電磁攪拌を実施できなかった。低温鋳造は、タンディッシュ溶鋼過熱度を低くするため、タンディッシュ内での溶鋼からの介在物浮上が困難となり、溶鋼清浄度の劣化が認められ、製品で転動寿命が問題となる高清浄度が要求される鋼種では最適な対策とはいえない。また、ロールによる鋳片凝固末期の軽圧下は鋳片内部割れ発生の問題がある。このように、従来の中心偏析軽減技術は、中心部の無偏析化という面で十分でないだけでなく、付随的に発生する他の品質面の劣化が認められるため、高級線棒の総合的な品質要求に十分応えられる技術とは言えなかった。そのため、一部の中心偏析の厳しい用途に関しては、鋳片等の製造途中の半成品で拡散焼鈍を実施せざるを得ないのが現状であった。

2.2 連続鍛圧法と鋳片の品質

連続鍛圧法は、Fig. 1に示すように連続鋳片を凝固末期に金型により大圧下し、鋳片中心部の濃化溶鋼を未凝固側（反鋳込方向側）に排出し凝固完了点を強制的に形成する方法である。したがって、従来の中心偏析改善方法では、濃化溶鋼を排出しないため、それによって生じた個々の偏析部の面積を小さく分散できるだけであったが、連続鍛圧法では鋳片の無偏析化が可能である。圧下にはテーパー付金型を使用し、鋳片を所定量圧下し、その後鋳片から離れる。これを鋳込方向に一定周期で往復させることにより鋳片を連続的に圧下する。

当社では、本技術の開発にあたり、水島製鉄所 No. 1 ブルーム連続鋳機に研究設備を設置し¹⁾実験を行った。その結果適正な圧下条件を選択することにより、鋳片内部割れを発生させることなく中心部の無偏析化に成功した^{2,3)}。そこで、水島製鉄所 No. 3 ブルーム連続鋳機に連続鍛圧設備を1990年6月建設完了し、現在一部の線棒製品用途で工程的に本法を適用している。

Table 1に水島製鉄所 No. 3 連続鋳機と連続鍛圧装置の主な仕様を示す。連続鍛圧設備は、鋳片最適圧下条件より、設置位置はメニスカスから26.4 mの位置とし、鋳片圧下可能量は鋳片断面サイズ400×560 mm²のもので最大150 mmとした。また、圧下は電動ク

Table 1 Main specification of No. 3 bloom continuous casting machine and forging machine

Item	Specification
Continuous casting machine	
Machine type	Concast S
Casting radius	12.5 m, 22.25 m (tow points unbending)
Size of casting steel	300×400 mm ² (bloom) 400×560 mm ² (bloom) 120×400×460 mm (beam blank)
Number of strands	4
EMS	Strand+Final
Forging machine	
Machine type	Electric motor driven crank mechanism
Distance from meniscus	26.4 m
Amount of reduction	Max 150 mm (at 400×560 mm ² bloom)

ランク方式を採用し、電動モーターによって駆動されるクランク軸の回転により、4ストランドの位相を変えて順次圧下し、圧下量は、各ストランドごとに設定できるような構造となっている。

Photo 1にC=0.82%の高炭鋼で連続鍛圧を実施した鋳片のL断面マクロ組織を示す。また、鋳片の中心偏析を評価するにあたっては、Fig. 2に示すようにブルーム軸芯部から鋳込方向に30 mm間隔10点で5 mmφドリルでサンプリングし、化学分析をすることによって調べ、下式に示す中心偏析比(C_i/C_0)で評価した。

$$\text{中心偏析比}(C_i/C_0) = (\sum_{i=1}^{10} C_i) / C_0 / 10$$

C_i : 軸芯部のチェック分析値

C_0 : レードル分析値

Photo 1に示すように、非連続鍛圧材では、鋳片中心部のポロシティー、マクロ偏析および中心部近傍のV状の偏析線が認められるが、連続鍛圧材ではそれらが認められない。また、鋳込速度を大きくして、圧下時の残溶鋼厚さ(d)を大きくすると、鋳片中心部に負

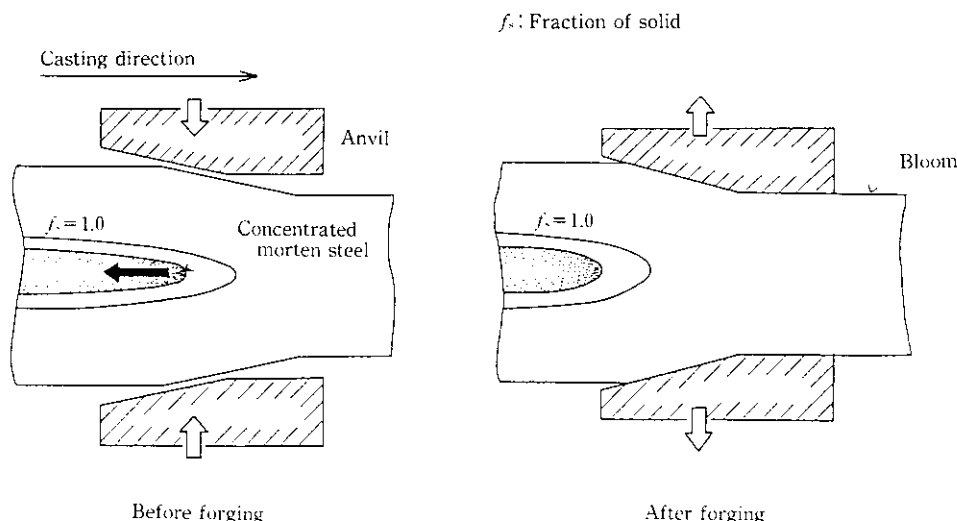


Fig. 1 Concept of continuous forging process

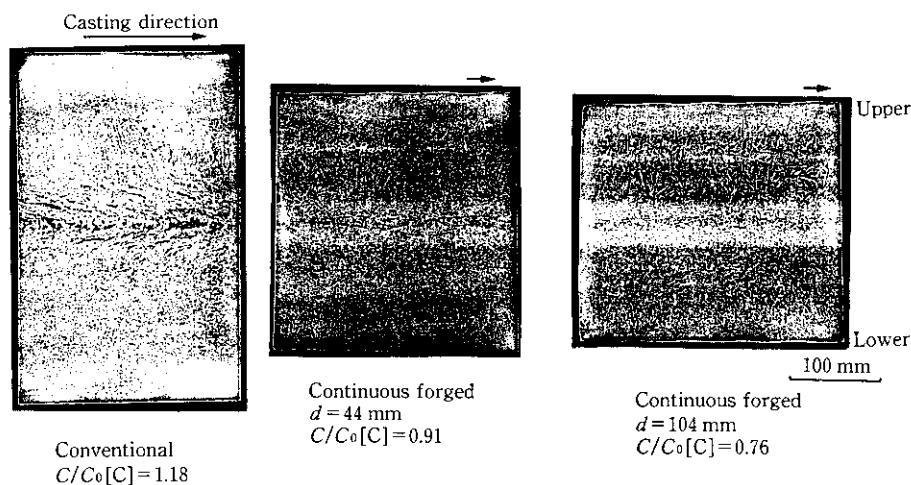
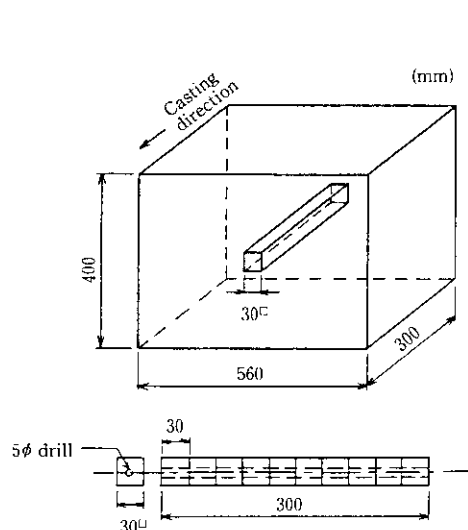
Photo 1 Macrostructures and center line segregation ratio (C/C_0) of forged bloom

Fig. 2 Sampling method for analyzing centerline segregation

偏析帯がより顕著になり、Cの中心偏析比 (C/C_0) がより負偏析になっていることが認められる。これは、残溶鋼厚さが大きいところで圧下する方が、そのとき排出される濃化溶鋼量がより多いためと考えられる⁹⁾。本連続鍛圧法は、鑄込速度制御による圧下時の末凝固厚さの制御および圧下量の制御により、鑄片中心部を無偏析化するだけでなく、必要に応じて中心偏析比 (C/C_0) を 0.7~1.0 の範囲で選択できる⁹⁾。

また、連続鍛圧材のC以外の元素に関する中心偏析比の例を Fig. 3 に示す。これは、Table 2 に示すC約 1.0%，Cr約 1.3%の化学組成をもつ軸受鋼のもので、鍛圧条件の違う2水準のものと、非連続鍛圧材のものを比較して示した。連続鍛圧材のPとSの負偏析度は、Cのそれに比べて大きく、Si、Mn および Crの負偏析度は、Cのそれに比べて同程度かまたはやや小さい。すなわち、非連続鍛圧材の正偏析度が大きい元素が連続鍛圧材の負偏析度が大きくなっている。これは、偏析しやすい元素は、凝固界面の凝固相内の濃度と末凝固相内の濃度比である平衡分配係数¹⁰⁾ が小さいため、鍛圧時より濃化した溶鋼が排出されるためと考えられる。

このように、連続鍛圧法の適用により、中心部無偏析化はもちろ

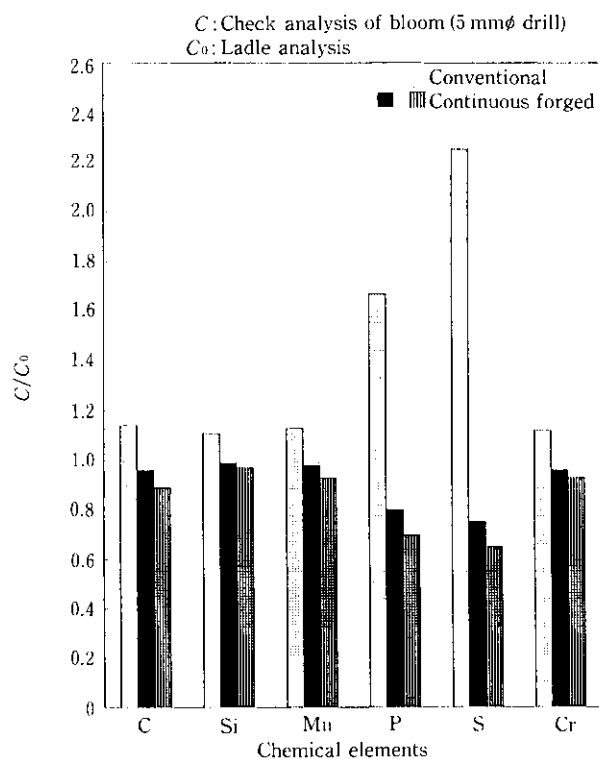
Fig. 3 Ratio of center line segregation (C/C_0) of SUJ2 bloom

Table 2 Ladle analysis of high carbon chromium bearing steel (mass %)

Steel grade	C	Si	Mn	P	S	Cr
JIS SUJ2	0.99	0.23	0.40	0.018	0.004	1.36

んのこと、品質要求に応じて製品中心部の成分濃度を選択することが可能である。そのうえ、鍛造加工性や伸線加工性に有害とみられる製品中心部のPおよびS濃度を低下でき、製品強度を確保する面で重要なC、Mn、およびCrを中心偏析比 (C/C_0) で1.0に近い水準に制御できる。

3 連続鍛圧を適用した線棒製品の品質

3.1 高炭鋼線材の伸線性の向上

Table 3 に示す化学組成の高炭素鋼を連続鍛圧し、その後 150 mm 角ビレットを経て 5.5 mmφ 線材に圧延し、ステルモ調整冷却した。その線材の L 断面マクロ組織を Photo 2 に示すが、連続鍛圧材は、非連続鍛圧材に観察された中心偏析線が認められない。この場合炭素の中心偏析比 (C/C_0) には、連続鍛圧材で 0.90、非連続鍛圧材は、1.15 であった。

連続鍛圧材の中心部は負偏析であるが、Fig. 4 に示すように線材では非連続鍛圧材に比べて引張強さ TS に差異はみられず、絞り値 RA はやや優れている。さらに伸線加工性を調査するにあたり、断線を生じやすくする目的でダイスアプローチ角を 25° に設定し伸線加工実験を行った。伸線中の線材中心偏析部の延性不足によって生じるシェブロンクラック¹¹⁾ 発生数は、その引抜き荷重の変化により測定した。Fig. 5 に示すように連続鍛圧材では、シェブロンクラックの発生は非連続鍛圧材より高加工度域にあり、その発生頻度も少なく、伸線限界も明らかに優れていた¹²⁾。これは、連続鍛圧材の中心部が適度な負偏析であるため、中心部の延性が非連続鍛圧材に比べ向上したことによると考えられる。

Table 3 Ladle analysis of high carbon steel wire rods (mass %)

Steel grade	C	Si	Mn	P	S
JIS SWRH82A	0.83	0.19	0.50	0.010	0.007

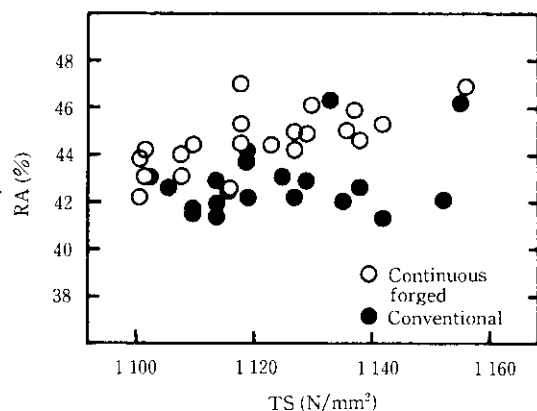


Fig. 4 Relationship between TS and RA of 5.5 mmφ wire rods

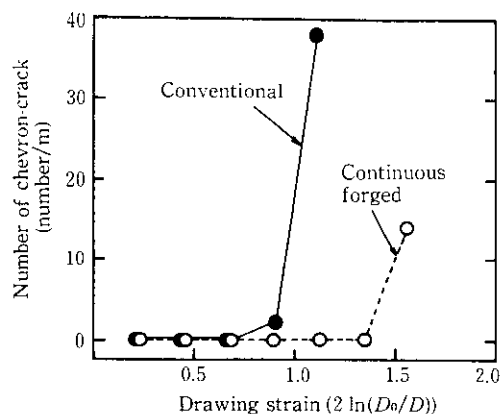


Fig. 5 Relationship between drawing strain and number of chevron-crack of 5.5 mmφ wire

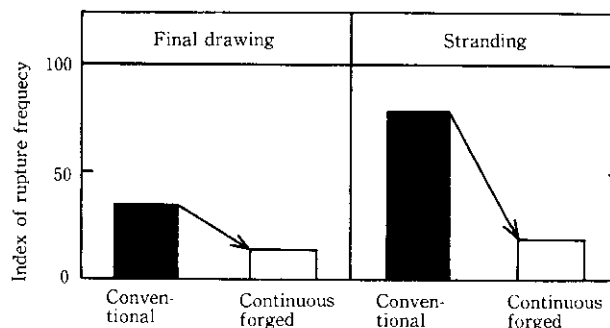


Fig. 6 Frequency of rupture at drawing process

また、本鋼種の実機での伸線結果を Fig. 6 に示す。このように、連続鍛圧法の適用により、断線率を大幅に低減できた。

3.2 軸受鋼の転動寿命の向上

軸受用鋼材に要求される高転動寿命に影響する因子として、中心偏析と溶鋼の清浄度がある。連続鍛圧を行い、150 mm 角ビレットを経て 65 mmφ に圧延した SUJ2 丸棒の横断面マクロ組織を Photo 3 に示す。また Fig. 7 にその X 線分析による中心偏析比 C_x/C_{0x} を示す。ただし、この場合の C_{0x} および C_x はそれぞれ丸棒の 1/4 D 部および中心部の X 線強度であり、X 線強度は 2 mm 角の視野の強度の平均値で評価した。Photo 3 に示すように、連続鍛圧により従来認められた中心偏析は解消され、中心偏析比 C_x/C_{0x} は炭素で 0.95 程度のやや負偏析を示した。

一方、2.1 項で述べたタンディッシュ溶鋼温度を低下させる低温鍛造による中心偏析改善技術では、溶鋼清浄度の劣化という付随的な問題があったが、連続鍛圧法では、タンディッシュ溶鋼過熱度を上昇させることが可能である。そこで、タンディッシュ溶鋼過熱度を

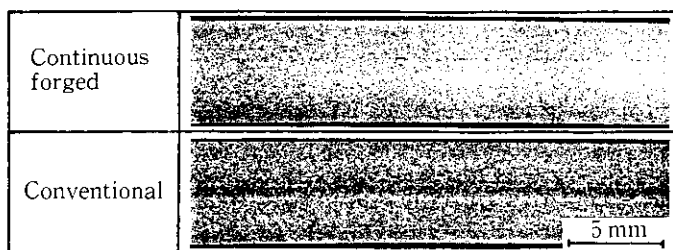


Photo 2 Macrostructures of 55 mmφ wire rods (SWR H82A)

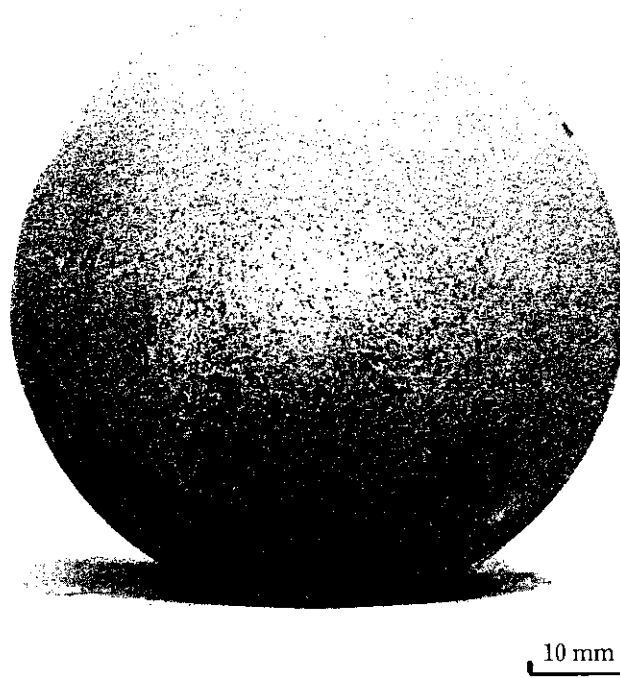


Photo 3 Macrostructure of continuous forged SUJ2 bar

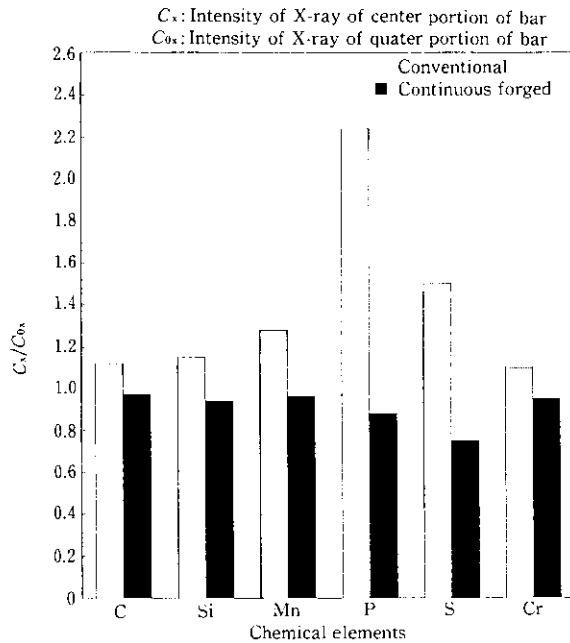


Fig. 7 Ratio of center line segregation (C_x/C_{0x}) of SUJ2 bar (65 mmφ)

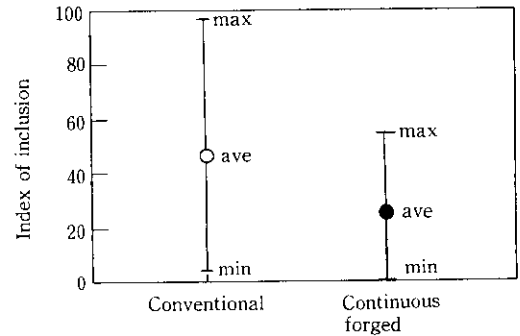


Fig. 8 Index of B-type inclusions at the center portion of 65-mmφ SUJ2 bar (ASTM-A295 SAM method)

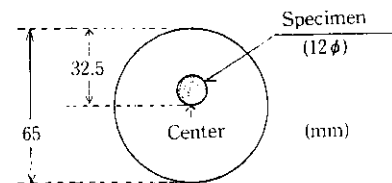


Fig. 9 Specimen taken from bar for rolling-contact fatigue life test

従来材のそれより 10°C 上げ連続鍛圧を行った丸棒中心部の清浄度を調べた。調査方法は、ASTM-A295 SAM Method に従った。Fig. 8 に B 系介在物（アルミナ系介在物）の結果を示す。このように、連続鍛圧材は従来材に比べ B 系介在物指数の平均値は約半分に低減し、そのばらつきも減少している。

このように、連続鍛圧の適用により中心部無偏析化と清浄度の向上が明らかになったため、Fig. 9 に示す丸棒中心部より 12 mmφ の転動寿命用試片を抽出し、通常の熱処理を付与した後、Fig. 10 に

示す装置を用い、Table 4 に示す条件で転動寿命試験を行った。ここの寿命評価は、転動寿命試験で供試個数のうち 10% 疲労剥離が発生した転動回数 L_{10} で行った。Fig. 11 に示すように、連続鍛圧の実施とタンディッシュ溶鋼過熱度の 10°C 上昇により、約 2 倍程度の転動寿命向上が認められた。

現在、連続鍛圧の最適実施条件の見極めだけでなく、改善も併せ

て進めており、転動寿命をさらに向上していく方針である。また、従来、中心偏析の問題で連铸化できず造塊で製造しているボールおよびコロ用軸受鋼への連鋼材の適用も検討中である。

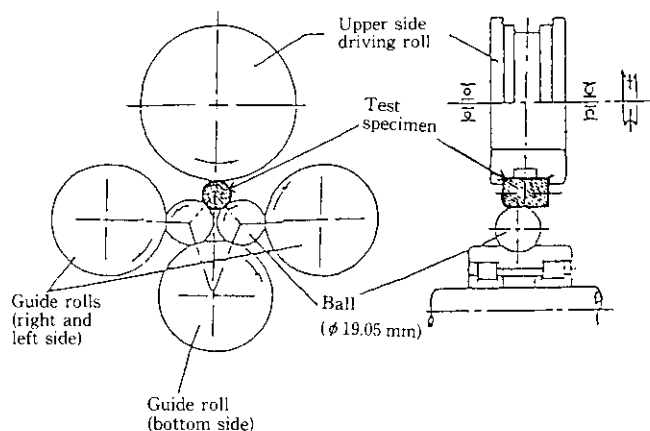


Fig. 10 Illustration of rolling-contact fatigue testing machine

Table 4 Testing conditions of rolling-contact fatigue life test

Item	Value
Total load	3 599 N
Hertz maximum contact stress	5 884 N/mm ²
Rotating speed of the test specimen	46 240~46 800 cpm
Lubricating oil	#80 turbine oil

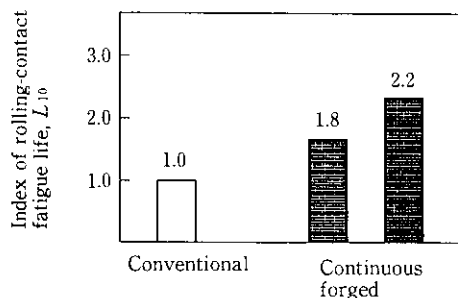


Fig. 11 Index of rolling-contact fatigue life, L_{10} , of SUJ2 bar

3.3 SC 材の中心部ドリル穿孔性の向上

線棒製品では、製品中心部にドリルによる孔明け加工を施すものがある。従来の中心偏析が認められる材料では、中心偏析部の硬さが高いため、ドリル工具の短寿命およびドリルの芯のぶれによる加工穴の寸法精度の不良という問題があった。

そこで、Table 5 に示す化学組成の機械構造用炭素鋼 S45C 鋼で連続鍛圧を実施し、150 mm 角ビレットを経て、54 mmφ に圧延した丸棒の中心部ドリル穿孔試験を行った。製品のマクロ組織と中心偏析比 C/C_0 をそれぞれ Photo 4 と Fig. 12 に示す。C および S の中心偏析比 (C/C_0) は、それぞれ約 0.8 および 0.4 であった。

Fig. 13 に、ドリル穿孔試験結果とその切削条件を示す。ドリルの寿命評価方法としては、ドリルに焼きつきが発生し穿孔加工が不可能となるまでの穿孔総長さで評価した。

一般に、硬さおよび S 濃度は炭素鋼の切削加工性を決定する重要な因子であり、炭素鋼の場合の硬さは炭素濃度に最も影響を受け、S 濃度は高い方が切削性がよいと言われている。今回比較材として

Table 5 Ladle analysis of carbon steel for machine structural use (mass %)

Steel grade	C	Si	Mn	P	S
JIS S45C	0.44	0.24	0.79	0.017	0.015

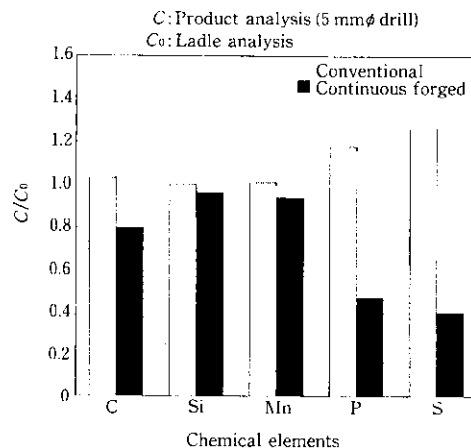


Fig. 12 Ratio of centerline segregation (C/C_0) of S45C bar (54 mmφ)

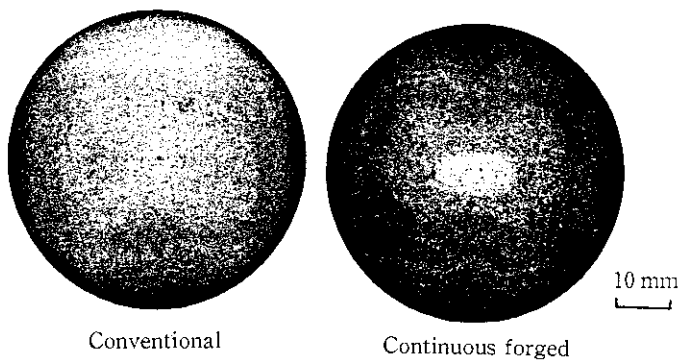


Photo 4 Macrostructures of S45C bar (54 mmφ)

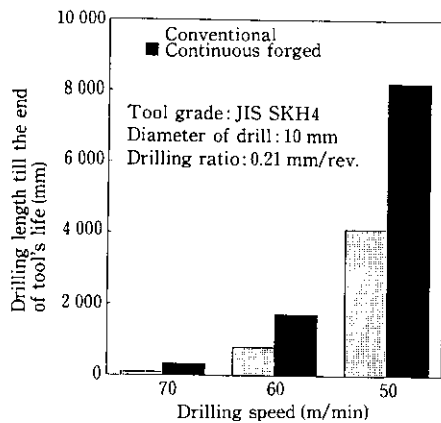


Fig. 13 Drilling length till the end of tool's life of S45C bar (54 mmφ)

使用した非連続鍛圧材のCのC/C₀がほぼ1.0とマクロ偏析が認められず、かつ連続鍛圧材のSのC/C₀が0.4程度と低いにもかかわらず、切削スピードが50, 60, 70 m/minいずれの水準においても、連続鍛圧材の中心部ドリル穿孔長さは比較材に比べ2倍程度に向上している。これは、0.45%Cにおけるドリル穿孔性の向上には、中心部におけるS濃度より、中心部の炭素濃度の方が影響する、すなわち、中心部C濃度の低下による中心部の硬さの低下がドリル穿孔性向上に有効であったためと考えられる。

3.4 その他の品質向上項目

連続鍛圧法は、中心偏析の解消を可能にするだけでなく、加工工程および最終製品品質の要求に応じた適切な中心部濃度の選択を可能にする。またタンディッシュ溶鋼過熱温度の上昇を可能にすることによる介在物の減少が図れる。

したがって他の品質向上項目として以下が考えられ、これら品質向上効果を現在評価中であるが、一部については、需要家からその品質向上効果に対して好評を得ており、すでに連続鍛圧材が実用化されている。

(1) 中心部無偏析化および負偏析の有効活用により改善される項目

- (a) 偏析に起因する焼割れ
- (b) 摩擦圧接部の組織不良

(2) 清浄度の向上により改善される項目

- (a) 疲労寿命
- (b) 冷間および温間鍛造性

上記改善効果により、従来加工前および加工途中に必要であった熱処理または検査等の省略の可能性が考えられ、連続鍛圧の適用は、品質の向上に加えて、需要家での工程省略すなわちコスト低減に大きく寄与できる。

5 結 言

連続鋳片凝固末期に鋳片を連続的に大圧下し、鋳片中心部の濃化溶鋼を強制的に排出する連続鍛圧法を開発し、1990年6月に水島製鉄所 No. 3 連鋳機に鍛圧設備を建設した。

連続鍛圧法を適用した線棒製品の品質を調査し判明した点を次に示す。

- (1) 連続鍛圧を高炭素鋼線材に適用することにより、その伸線加工性を大幅に改善できた。
- (2) 連続鍛圧を軸受用鋼材に適用した場合、タンディッシュ溶鋼過熱温度の上昇をはかることにより介在物低減効果も加わり、転動寿命の向上が認められた。
- (3) 機械構造用炭素鋼 S45C については連続鍛圧法適用により中心偏析比 C/C₀ を約 0.8 程度の負偏析にすることにより、中心部ドリル穿孔加工性が改善された。

連続鍛圧法は鋳片中心部の無偏析化および必要に応じて中心部濃度の選択が可能のため、線棒製品に本法を適用することにより、品質が改善されるのみではなく、これにより従来加工前および加工中に必要であった熱処理や検査等が省略できる可能性が高い。したがって、連続鍛圧法の適用は、工程省略による需要家でのコスト低減に大きく寄与できる。

参 考 文 献

- 1) 小島信司, 松川敏胤, 今井卓雄, 溝田久和, 川縁正信, 山崎久生: 鉄と鋼, **73** (1987), S209
- 2) 楠田宏一, 藤村俊生, 今井卓雄, 小島信司, 田野口一郎, 萱野朋生: 鉄と鋼, **73** (1987), S210
- 3) 藤村俊生, 楠田宏一, 溝田久和, 松川敏胤, 小島信司, 山崎久生: 材料とプロセス, **2** (1989), 討 16
- 4) 小島信司, 溝田久和, 松川敏胤, 数土文夫, 藤村俊生, 吉元義夫: 材料とプロセス, **4** (1991), 293
- 5) 楠田宏一, 藤村俊生, 馬田 一, 松川敏胤, 秋本圭一, 浜西信之: 材料とプロセス, **4** (1991), 294
- 6) 山崎久生, 新庄 豊, 木下勝雄, 中西恭二, 水藤政人, 川縁正信, 大西正之: 鉄と鋼, **71** (1985), S208
- 7) T. Fujimura, H. Yamasaki, T. Kayano, and M. Kawaberi: Steel making Proceeding Conference, **70** (1987), 213
- 8) 水藤政人, 川縁正信, 蓮沼純一, 新庄 豊: 鉄と鋼, **71** (1985), S210
- 9) 鍋島誠司, 中戸 参, 藤井徹也, 楠田宏一, 溝田久和, 数土文夫: 材料とプロセス, **4** (1991), 296
- 10) たとえば日本鉄鋼協会: 鉄鋼製造法, 第一分冊「製鉄, 製鋼」, (1972), 691, [丸善]
- 11) 田中 浩, 吉田一也: 塑性と加工, **24** (1983), 737
- 12) 藤田利夫, 天野慶一, 中野昭三郎, 川縁正信, 山本義治, 小野秀俊: 材料とプロセス, **4** (1991), 296