

冷間圧延用高硬化深度作業ロール

Deep Hardened Cold Work Rolls

冷間圧延用作業ロールは、ロールの原単位向上策から、再焼入れを必要とせず利用径60~80mmを一度に焼入硬化できる硬化深度の大きなロールの開発が望まれていた。焼入硬化深度を増すためには、ロール材の焼入性の向上及び熱処理方法の改善が必要である。

日立製作所は化学組成及び熱処理方法の検討により、焼入硬化深度30mm以上のKDH-30、40mm以上のKDH-40を開発した。これらのロールの硬化層は、微細で均一な組織と高い強度をもっており、既に多数のロールを製造し、良好な使用実績が得られている。

赤堀公彦* *Kimihiko Akahori*
 岡田亘右* *Sensuke Okada*
 大島俊彦** *Toshihiko Ôshima*
 佐藤研一** *Ken'ichi Satô*
 片岡勝利** *Katsutoshi Kataoka*

1 緒言

冷間圧延用作業ロールの利用深さは、30~40mmが一般的であり、従来ロールの焼入硬化深度(硬さHs90以上の硬化層深さ)は15~20mm程度であることから、使用中硬さが低下した場合には再焼入れを行ない使用していた。この焼入硬化深度を2倍にすることによって、使用途中で再焼入れをする必要がなくなり、ロールの原単位の向上及び常備本数の低減が期待できる。

従来のロール材質では、焼入時の加熱及び冷却法を改善しても焼入硬化深度を大きくすることは困難であり、例えば、焼入後にサブゼロ処理を採用しても焼入硬化深度は25mm程度であり、30~40mmの焼入硬化深度を得ることは不可能であった。焼入硬化深度を増すには、ロール材質の焼入性の向上及び焼入法の改善が必要である。

本論文では、焼入性を改善して焼入硬化深度30mm(KDH-30)及び40mm(KDH-40)の冷間圧延用作業ロールを開発したので、その焼入性向上策、KDH-30ロール及びKDH-40ロールの製造法、特性、使用実績などについて述べる。

2 焼入硬化深度増加法の基礎検討

ロールの焼入硬化深度を増す主な方法としては、

- (1) ロール材の焼入性の向上
- (2) 焼入時の加熱及び冷却方法の改善

が挙げられる。焼入性の向上に対しては、合金元素の添加が効果的であり、ロールの製造上での問題を発生せず、ロールの性能低下を来さない元素を選択する必要がある。焼入方法については、焼割れが発生せず、ロール表面から必要な深さまで均一に加熱し、できるだけ速く冷却する必要がある。ロール全体を均一にオーステナイト化するような加熱法は冷却速度が遅くなり、焼割れ、残留応力の分布などで問題があり、ロール表面から50mm付近まで硬化する場合には、漸進式低周波誘導加熱焼入法¹⁾が優れている。また、合金元素の添加量を多くして焼入性を良くすることは、焼入後の残留オーステナイト量が多くなり、硬さ及び特性の低下を来すので、硬化深度が30mm以上の場合にはサブゼロ処理²⁾が必要である。

2.1 ロール材の焼入性

図1はCr量を2%から5%の範囲内で変化させた表1の化学組成のロール材の恒温変態開始曲線(S曲線)を示す。パー

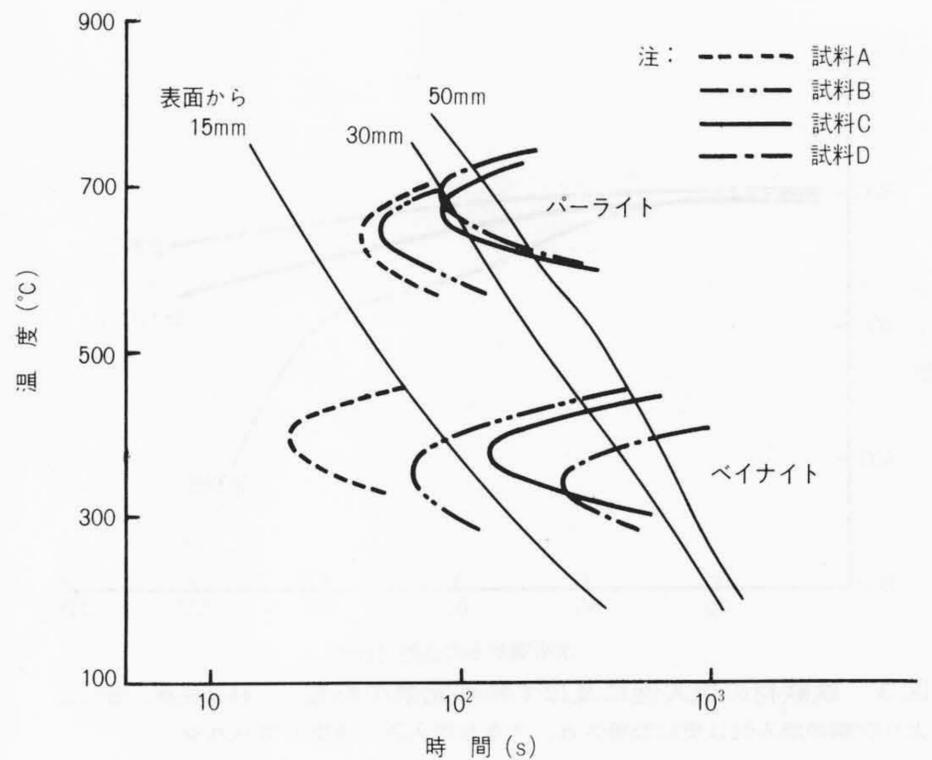


図1 試験材の恒温変態開始曲線 Cr量が多くなると、パーライト及びベイナイト変態の開始が遅くなる。

表1 試験材の化学組成(%) 焼入性を改善するため、Cr量を2~5%添加した。

試料	化学成分	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
A		0.80	0.69	0.40	1.91	0.19	0.07
B		0.91	0.66	0.39	2.90	0.23	0.01
C		0.93	0.83	0.45	4.14	0.26	0.05
D		0.88	0.86	0.48	4.99	0.26	0.03

ライト変態ノーズは試料A、Bで40秒前後、試料C、Dで80~90秒である。ベイナイト変態ノーズは、Cr量の増加とともに長時間側に移行している。同図中に均一に加熱したロールをシャワー冷却したときの冷却曲線を示す。連続冷却したときの変態開始曲線はS曲線よりもやや長時間側にずれるが、こ

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所勝田工場

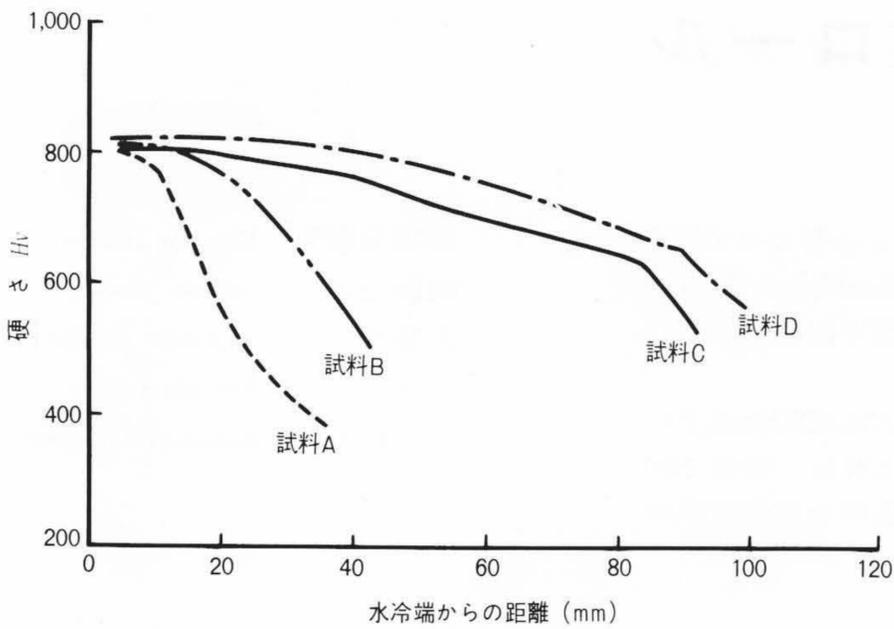


図2 試験材の大形一端焼入試験結果 Cr量の増加とともに焼入性が良くなり、内部まで高い硬さが得られる。

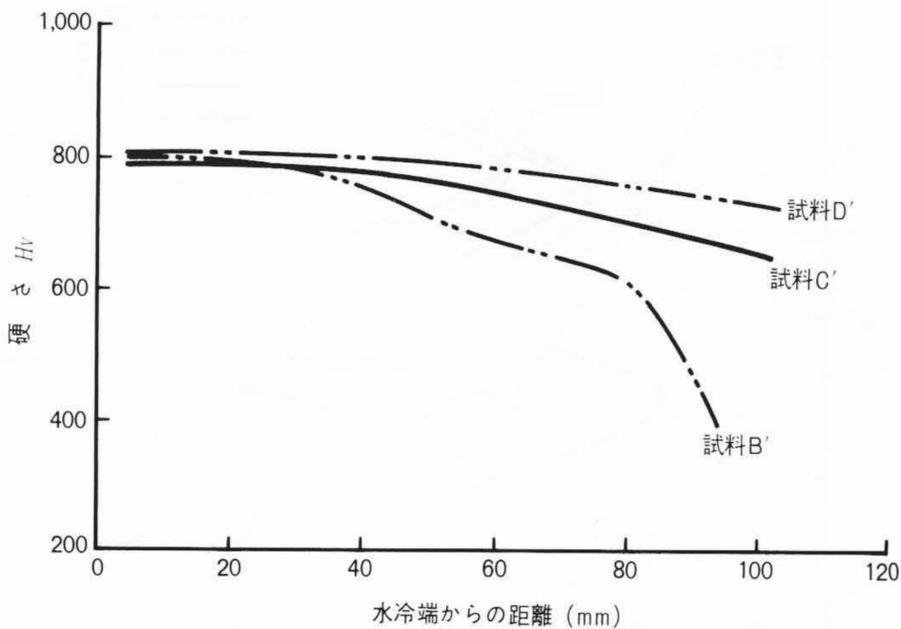


図3 試験材の焼入性に及ぼす特殊元素の影響 特殊元素の添加によりCr鋼の焼入性は更に改善され、大きな焼入硬化深度が得られる。

これらの鋼種では表面から30mm以上の内部でパーライト変態をする可能性がある。パーライト変態ノーズを長時間側にずらすにはMoの添加が効果的である。ベイナイト変態ノーズには表面から10~20mmで接触し、表面から30~40mmではCr量を増してもベイナイトの析出を防ぐことは困難である。しかし、ベイナイトの析出量が問題であり、ロール内部でのベイナイトの析出量を少なくすれば十分な硬さが得られる。

図2はCr量を変えた場合の大形一端焼入試験片の硬さ分布を示す。本実験では、均一に加熱した試験片の端面を最大冷却速度が得られるような条件で、シャワー冷却したものである。Cr量の増加とともに内部まで硬化するようになり、仮に焼入硬化深度として硬さHv775以上の深さを採用すると、試験材Aで約10mm、試験材Bで約20mm、試験材Cで約40mm、試験材Dでは60mmとなる。本試験及び実体ロールの結果を比較すると、実体ロールでの焼入硬化深度は本試験の値よりもやや小さな値となる。なお、Cr量が5%を超えると鋼塊中に共晶Cr炭化物が発生し、強度の低下及び製造時の作業性を悪くするので、大形ロールへの適用は困難となる。

また、合金元素の中で焼入性倍数の大きい元素³⁾の添加も焼入性の向上に対しては効果的である。図3は試験材B~Dに焼入性倍数の大きい元素を添加した場合(試験材B'~D')の大

形一端焼入試験結果である。図2と比較すると焼入硬化深度は大きくなっている。このように焼入性倍数の大きい元素の添加は焼入性改善に非常に効果的であるが、多量の添加は残留オーステナイト量を多くするので、ロール材の場合には多量の添加は好ましくない。このようにCr及びその他の元素を添加することによって焼入硬化深度を変えることが可能であり、焼入硬化深度50mm以下のロールでは化学組成によって目標の硬化深度にすることが可能である。

金属組織学的にはベイナイトの析出によって硬さが低下する。ベイナイトが析出し始める水冷端からの位置は、Cr量などを多くしても大きく変化しないが、これらの元素を加えることによって内部でもベイナイトの析出量が少なくなり、結果的に硬さが高くなっている。

2.2 焼入方法

焼入時の加熱法には全体を一度に加熱する一体加熱法と加熱部分を移動する漸進式加熱法がある。加熱方法及びその容量の関係で一体加熱法の場合には内部まで温度が高くなり、冷却時の抜熱量が多くなるため、硬化深度を大きくすることは困難である。50mmまでの焼入硬化深度に対しては漸進式低周波誘導加熱法(50Hz)が適している。漸進式低周波誘導加熱法の採用で重要なことは、温度変動がある短時間の間に均一にオーステナイト化することであり、一定量の炭化物が容易に固溶して、ロールに必要な硬さが得られるような前熱処理が必要である。図4は焼入焼戻しの前熱処理を施した後、900~960℃に1~5分間加熱後焼入れした試験材Cの硬さを示す。十分な硬さを得るためには、各保持温度に3分以上保持することが必要である。一般にCr量が多くなると、M₃C(セメントイト)のほかにCrを主体としたM₇C₃(特殊炭化物)を形成するようになるため、焼入保持時間は長くする必要がある。

漸進式低周波誘導加熱の際のロール表層部の温度分布は、誘導コイルの設計値によっても異なるが、電気出力、コイルとロールの間隔、移動速度、ロールの予熱温度、最高加熱温度などによって影響される。これらの条件を適宜組み合わせることによって、各焼入硬化深度に最適な温度分布が得られ

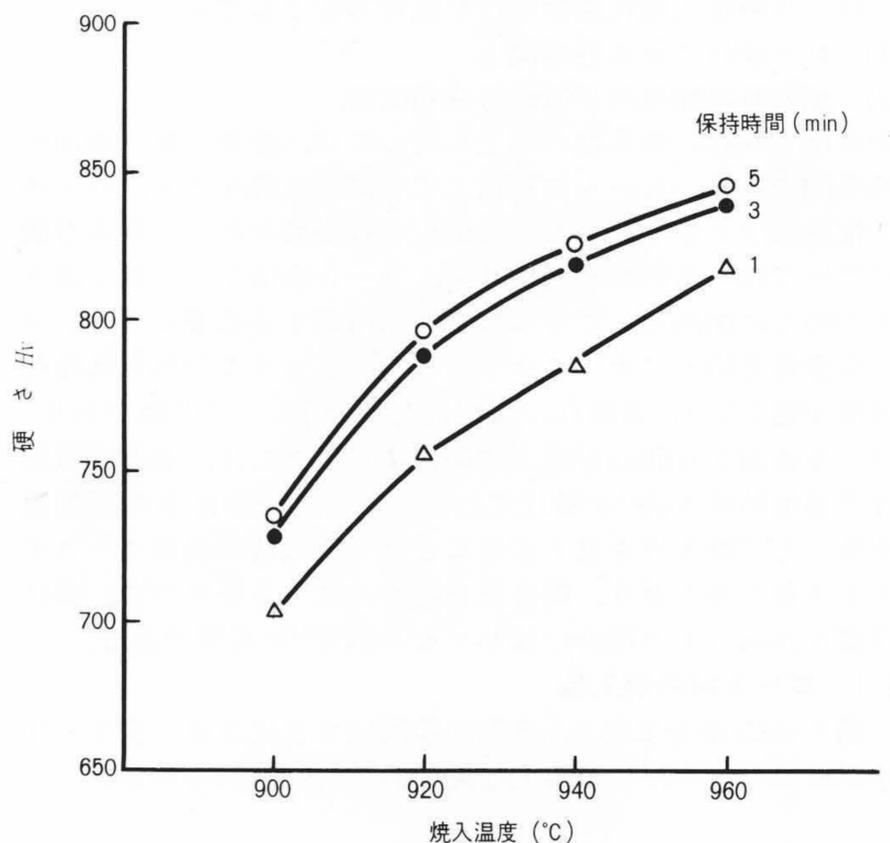


図4 短時間加熱時の焼入硬さ 漸進式低周波誘導加熱は加熱時間が短いため、短時間でオーステナイト化できるように前熱処理が必要である。

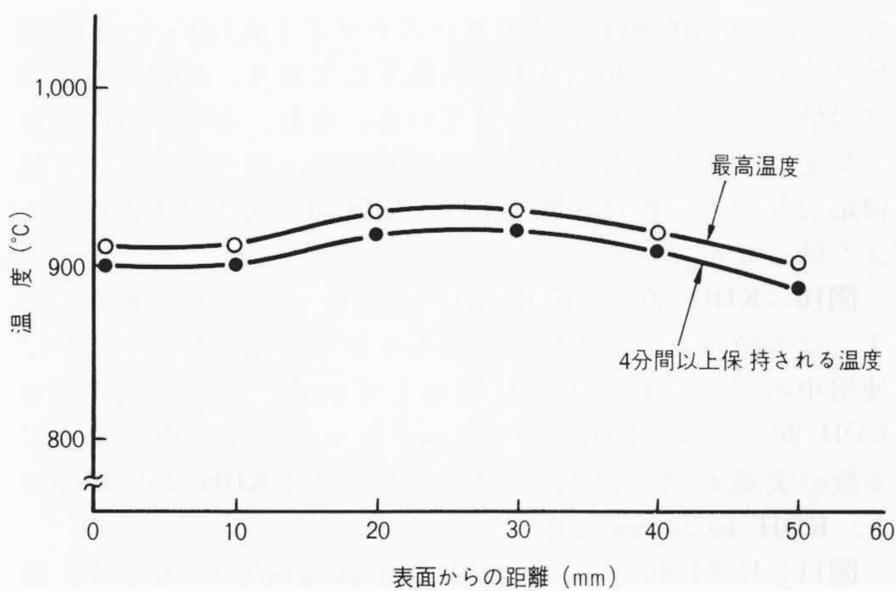


図5 漸進式低周波誘導加熱時のロール表層部の温度分布 誘導加熱の場合、表面よりもやや内部が最高温度となる。加熱条件を選ぶことにより、表面から50mmまで硬化可能なオーステナイト化ができる。

る。図5は焼入硬化深度40mm以上のロールを焼入れする際のロール表層部の最高加熱温度、及び4分間以上保持される温度を示す。同図は表面を最高温度900°Cに設定した場合であり、表面から20~40mmの温度は表面よりもやや高くなっている。最高加熱温度と4分間以上保持される温度との差は10~15°Cであり、この温度分布では50mm付近まで焼入硬化させることが可能である。冷却時はできるだけ速く冷却できるようにシャワーを設計する必要がある、焼入終了後、直ちにサブゼロ処理が行なわれる。

3 高硬化深度ロールの製造法及びその特性

前章で述べたように、50mmまでの焼入硬化深度をもつロールの製造は可能であるが、焼入硬化深度だけでロール材質としての適否を判定することはできない。静的及び動的強さ、疲れ強さ、耐熱衝撃性、耐摩耗性、耐はだ荒れ性などロールに要求される諸性質を満足させねばならない。焼入硬化深度を大きくした場合には、これらの性質が低下し、また、圧延事故に遭遇した場合の改削量が多くなるなど、ロールの寿命を短くする可能性が強い。新鋼種の開発にはこれらの点を考慮し、かつ、製造が容易な化学組成及び製造法を採用しなければならない。これらの条件を満足するロールとして、焼入硬化深度30mmのKDH-30及び焼入硬化深度40mmのKDH-40を開発した。使用実績でも高硬化深度ロールの特性を発揮することができたので、以下、これらのロールの特性について紹介する。

3.1 高硬化深度ロールの製造法

図6はKDH-30ロール及びKDH-40ロールの製造工程を示す。これらの鋼種は従来鋼種に比較して合金元素量がやや多くなっているため、成分偏析が増加し、鋼塊中に欠陥が発生しやすくなる。また、表層部の健全性も重要であるため、鋼塊の製造法としてはESR法(エレクトロスラグ再溶解法)を採用している。ESR法の特徴としては、凝固欠陥、成分偏析、非金属介在物などが少ない健全な鋼塊が得られることであり、ロールの性能及び製造上からも多くの利点がある。特に、高硬化深度ロールの製造では焼入後にサブゼロ処理を実施するため、素材中の欠陥は皆無であることが要求されており、通常の鋼塊でも製造可能であるが、ESR鋼塊のほうが望ましい。

鋼塊は拡散加熱によって偏析成分が均一化され、鍛造によってロール素材形状に加工される。鋼塊の凝固組織はデンド

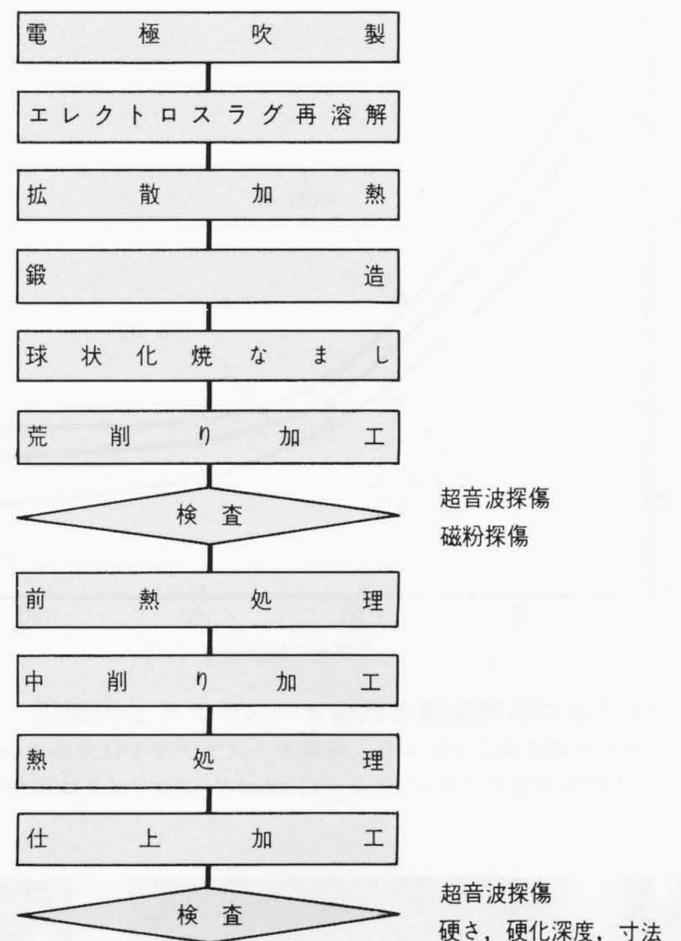


図6 高硬化深度ロールの製造工程 十分な焼入性をもつ化学組成で、健全性の良いエレクトロスラグ再溶解鋼塊が用いられる。熱処理は、漸進式低周波誘導加熱法及びサブゼロ処理が用いられる。

ライト(樹枝状晶)であるため、デンドライトの樹枝及び樹枝間部ではミクロ的な成分偏析を生じている。この偏析を均一化しないと、使用中にはだ荒れ(デンドライト模様の転写)を生ずる原因となる。鍛造後は球状化焼なまし及び荒削り加工を施して中間検査を行なう。球状化焼なましは焼入後の靱性、耐摩耗性などを決める重要な因子であるため、熱処理サイクル及び作業管理が重要であり、球状化組織のチェックも必要である。中間検査は主として素材の健全性チェックのために行なわれる。超音波による内部及び表層部の探傷並びに磁粉探傷による表面の検査が行なわれ、熱処理を進めるべきか否かについて判定を行なう。

前熱処理はロールの性能を出す焼入れ焼戻しに影響するため重要な処理である。その目的に二つあり、第一は低周波誘導加熱時に炭化物が固溶しやすく、最適なC量をオーステナイト素地に固溶させるための処理である。第二はロールの軸部の硬さを要求仕様にすることである。この熱処理は通常は焼入れ・高温焼戻し処理が用いられ、鋼種、軸部硬さにより焼戻し温度を変えている。

高硬化深度ロールの熱処理には漸進式低周波誘導加熱法が用いられる。詳細は前章で述べたが、ロールを回転しながらロールの胴端部から加熱し、定められた送り速度で加熱帯を移動する。加熱後は直ちにシャワー冷却されるが、ロール材の焼入性が十分に良い場合には硬化深度に対しては冷却速度よりも加熱時の温度分布が大きな影響をもっている。全体の焼入終了後、直ちにサブゼロ処理が行なわれる。通常の焼入状態では残留オーステナイト量は20%前後であるが、ロール内部では40%にも達する場合がある。残留オーステナイトは硬さの低下だけでなく、組織の不安定さを増し、耐摩耗性を低下させる。図7は高硬化深度ロール材の残留オーステナイト量とサブゼロ処理温度との関係を示したものであり、-100°Cまで下げることによって残留オーステナイト量は10%以下

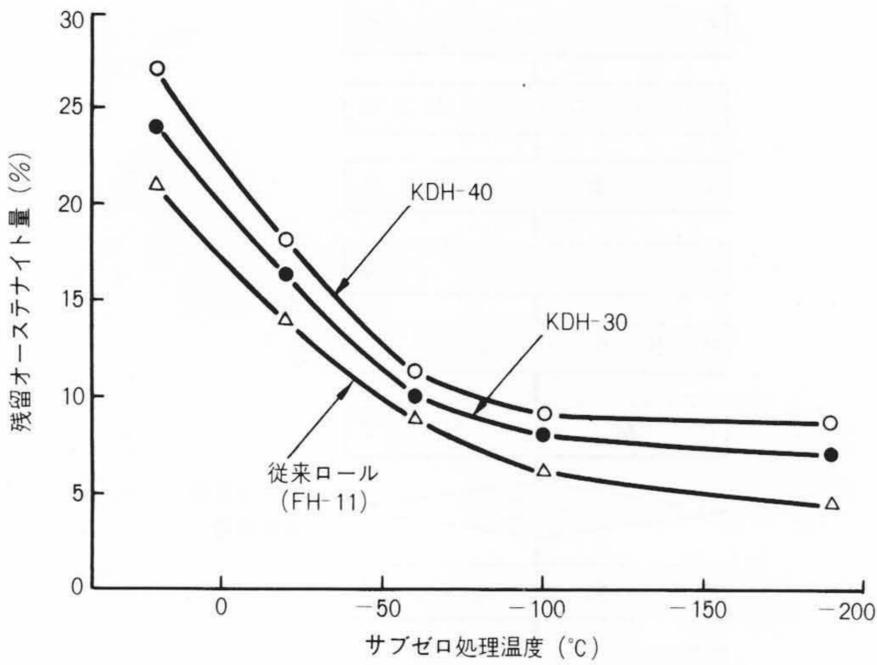


図7 サブゼロ処理温度と残留オーステナイトの関係 焼入後直ちにサブゼロ処理することにより、残留オーステナイトはマルテンサイトに変態する。-100℃まで下げることによって、残留オーステナイトは10%以下となる。

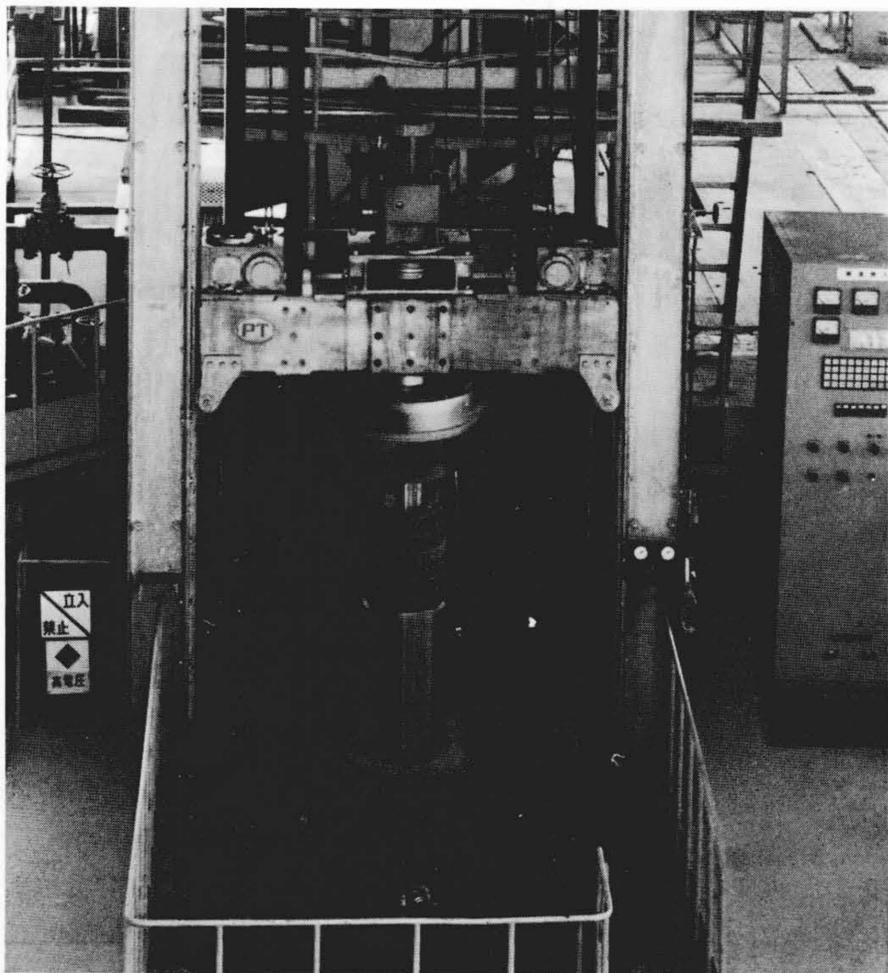


図8 熱処理装置外観 ロールを縦にし、下端部から熱処理を行なう。

に低下する。サブゼロ処理によって靱性が低下することが懸念されるが、本鋼種ではその心配はなく、後述のように高い靱性が得られている。サブゼロ処理後に焼戻しするが、焼戻し温度は要求硬さによって異なり、通常120~160℃の温度が採用されている。焼戻し温度が高いほど硬さは低く、靱性は高くなる。最終検査としては、超音波探傷、硬さ、寸法検査のほかに焼入硬化深度もチェックする。図8は熱処理装置の外観を示す。

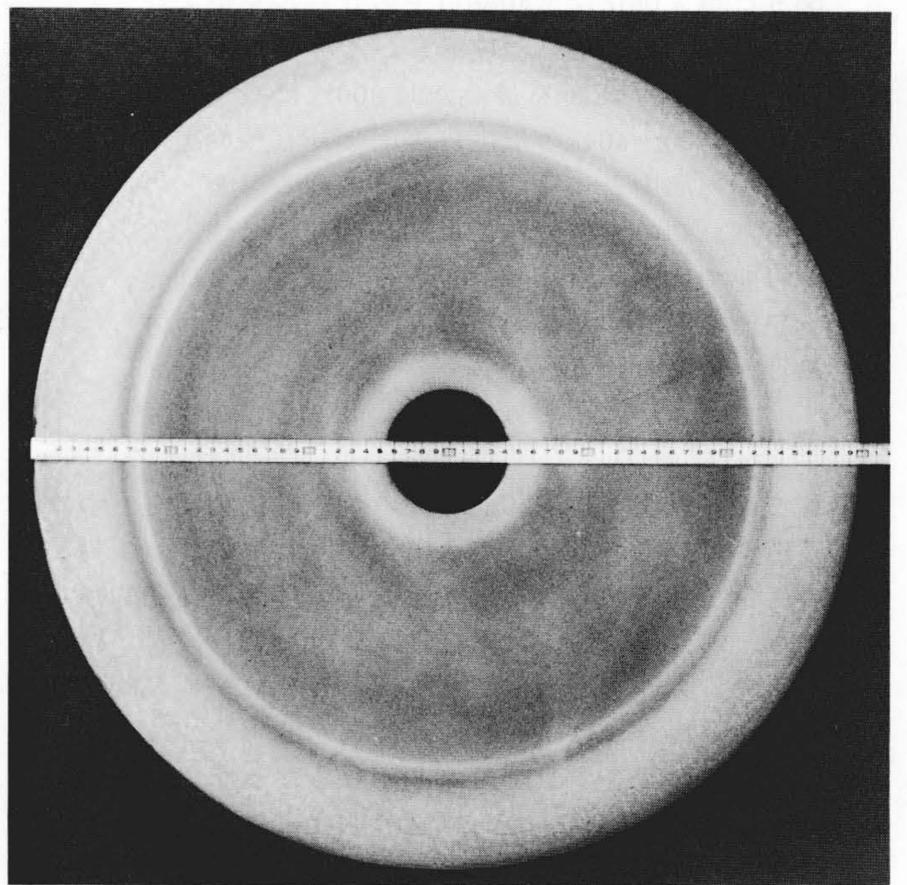
3.2 高硬化深度ロールの特性

前節で述べた製造工程により製造した直径600mmの高硬化深度ロールKDH-40の断面マクロ組織及び硬さ分布を図9に示す。表面から60mmまでが完全にオーステナイト化した部分

であり、60~80mmは不完全オーステナイト化($\alpha\text{Fe} + \gamma\text{Fe}$)部分である。硬さは30mm付近から低下しており、40mmから内部では低下の割合が大きくなっている。なお、本硬さ分布はロールを切断するために焼戻し温度を高め、かつ切断により残留応力が除去された状態であり、表層部の硬さは実体ロールより低くなっている。

図10にKDH-30及びKDH-40の実体ロールの硬さ分布を示す。この値はロール表面を改削しながら測定したものであり、使用中のロール表面硬さに相当している。焼入硬化深度はKDH-30で31mm、KDH-40で44mmとなっている。現在までに多数の実績が出ており、いずれのロールもKDH-30は30mm以上、KDH-40は40mm以上となっている。

図11にKDH-40のマイクロ組織(電子顕微鏡写真)を示す。表面及び表面から20mmでは残留炭化物と素地のマルテンサイトから成っており、サブゼロ処理を行なったため残留オーステナイトはほとんど観察されない。表面から40mmでは一部にベ



(a) 横断面マクロ組織

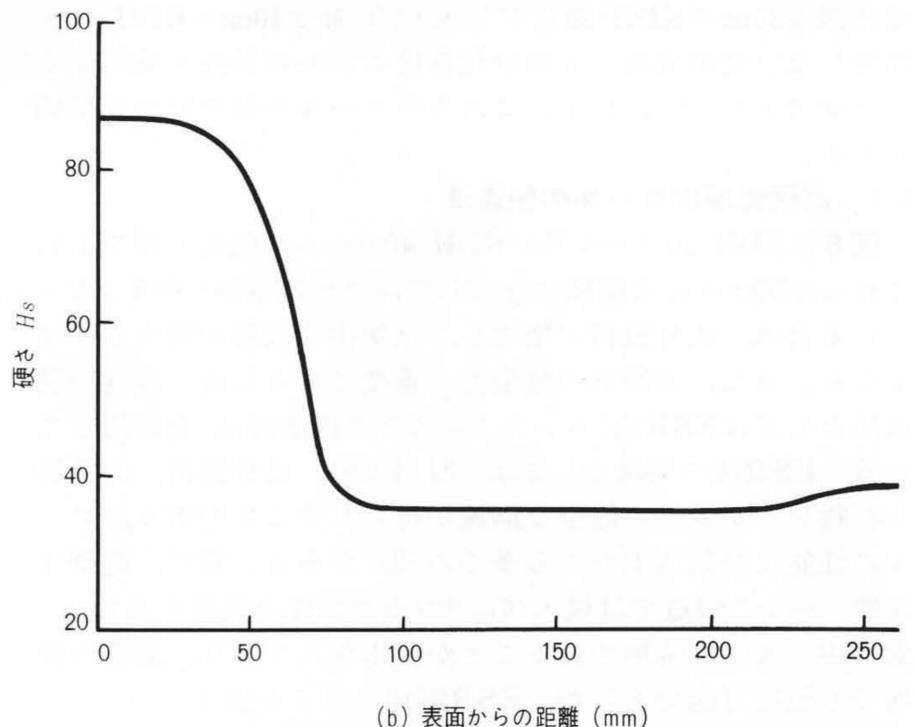


図9 KDH-40の断面マクロ組織及び硬さ分布 焼入硬化深度40mm以上、組織的にみた焼入時の熱影響部は、表面から80mmまでである。

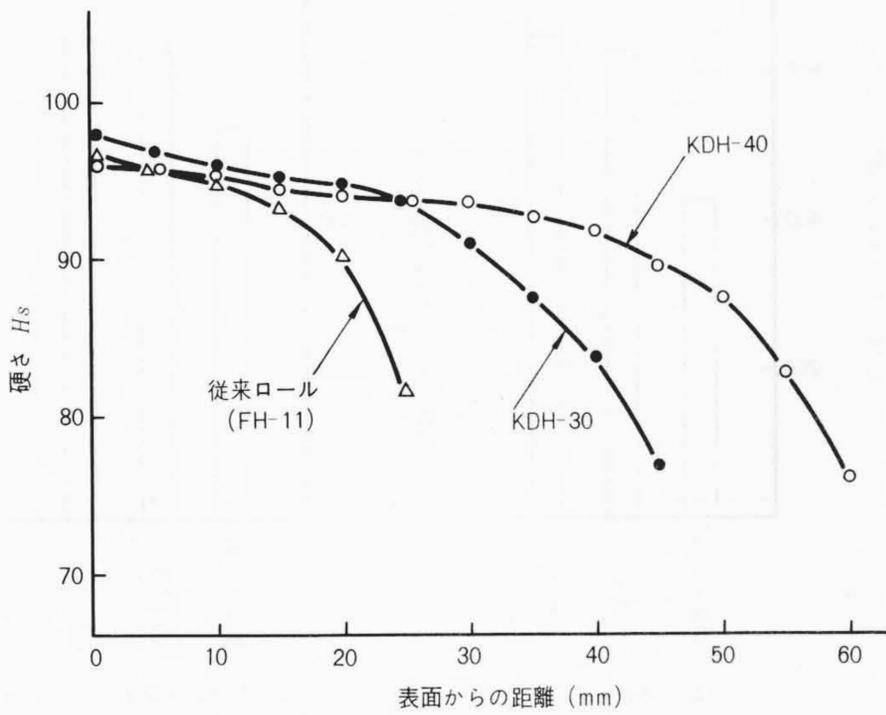


図10 高硬化深度ロールの表面硬さ分布 KDH-30及びKDH-40の焼入硬化深度は、30mm以上及び40mm以上である。

イナイトの析出が見られ、60mmになるとトルースタイトも観察されるようになる。表面から20~30mmは、焼入加熱温度が表面よりも高くなるために組織が粗大化することが推定されるが、本鋼種では粗大化は見られない。これは合金元素の調整によって、組織の温度依存性を小さくしたためである。

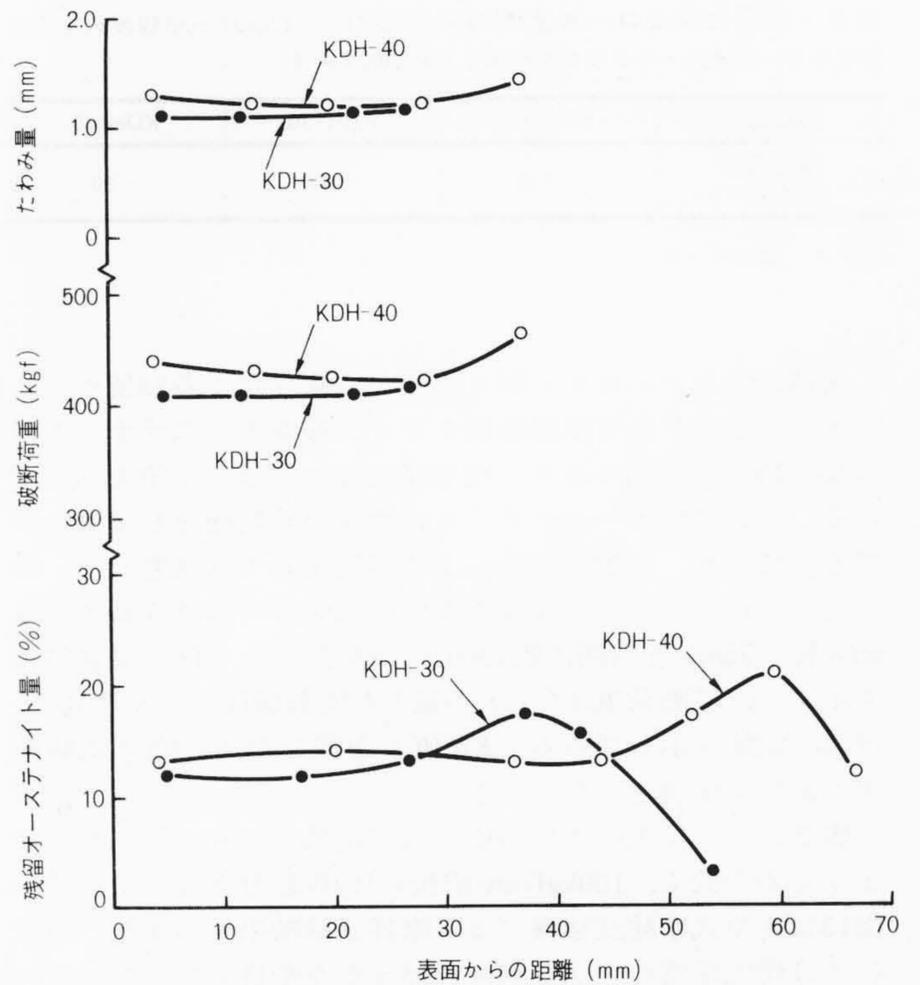
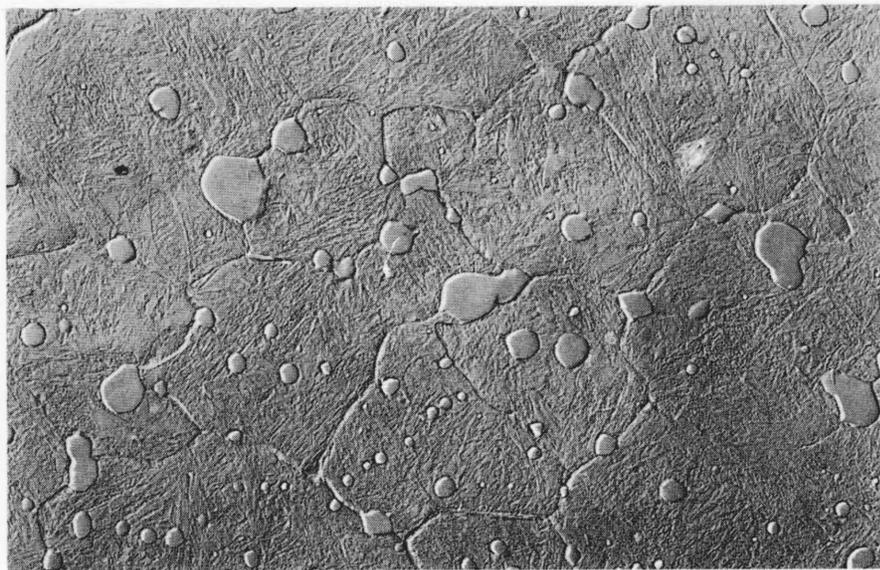
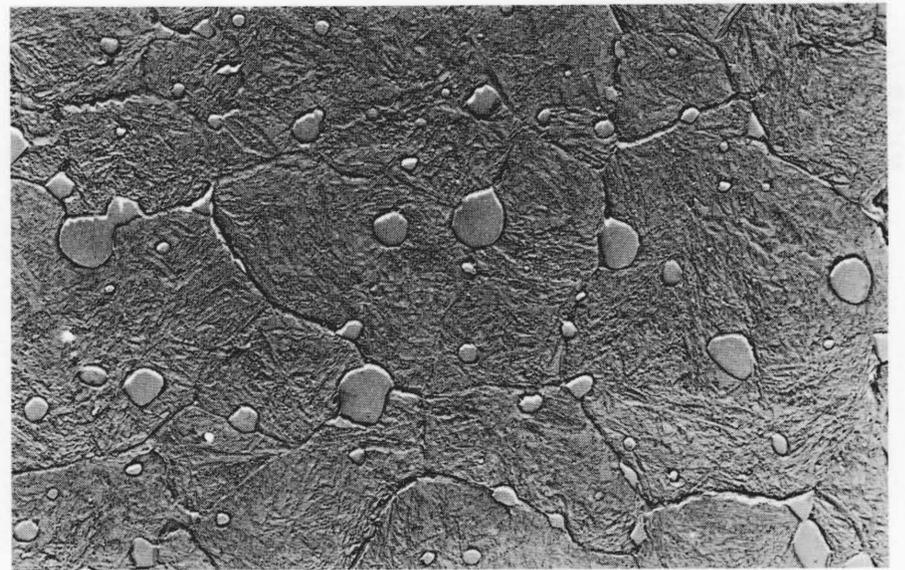


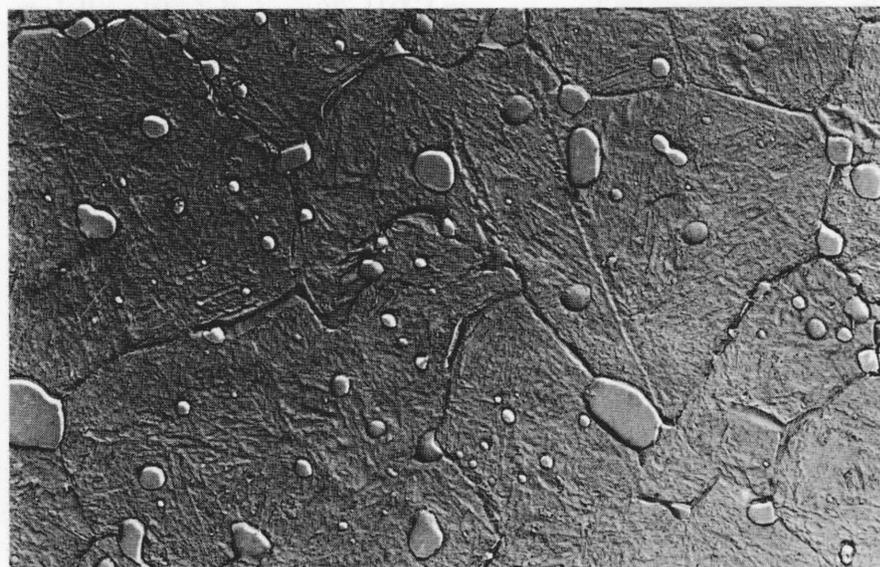
図12 実体ロールの残留オーステナイト量及び曲げ強さ 利用径部分の残留オーステナイト量及び曲げ強さはほぼ一定値を示しており、内外とも均一な特性値をもっている。



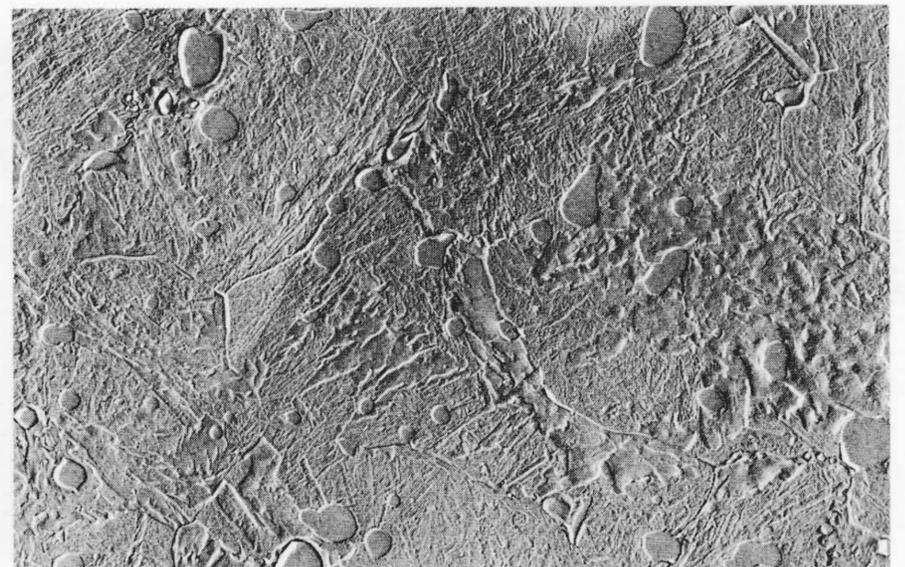
(a) 表面



(b) 表面から20mm



(c) 表面から40mm



(d) 表面から60mm

図11 KDH-40のマイクロ組織(電子顕微鏡写真) 残留炭化物の量及び大きさ、並びに結晶粒度、マルテンサイトの粗さは内外で差が少なく、均一な組織である。

表2 高硬化深度ロール表面の残留応力 100kgf/mm²程度の圧縮応力であり、従来ロールよりもやや低く、理想的である。

製品記号	FH-11*	KDH-30	KDH-40
残留応力 (kgf/mm ²)	-110	-100	-90

注：* 従来ロール

図12は実体ロールから切り出した試験片による残留オーステナイト量及び曲げ試験結果を示す。残留オーステナイト量は10~15%の範囲であり、利用径部分はほぼ一定値を示している。この残留オーステナイトはサブゼロ処理をしてあるので安定であり、軽度の事故による温度上昇では変態せず、耐熱衝撃性にも悪影響は及ぼさない。同図には厚さ4mm×幅5mm×長さ55mm(支点間距離40mm)の試験片による曲げ試験結果を示すが、破断荷重及びたわみ量とも従来鋼種よりやや高く、ほぼ一定値を示している。K_{1c}値も測定したが、曲げ試験結果と同様な傾向を示している。

表2はロール表面の残留応力測定結果であり、従来ロールよりもやや低く、100kgf/mm²前後の圧縮応力となっている。図13は西原式摩耗試験機による摩耗試験結果を示すが、耐摩耗性は硬化深度の大きな鋼種のほうがやや良くなっている。

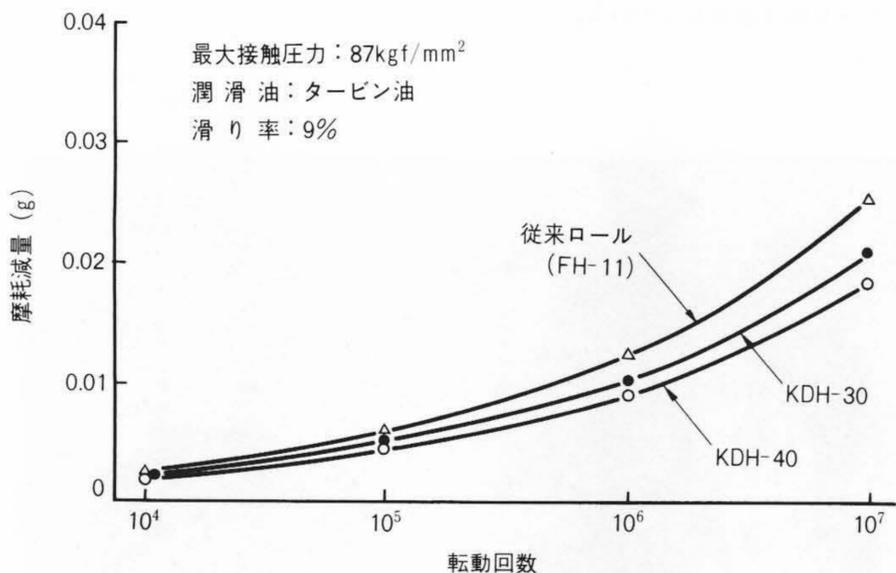


図13 高硬化深度ロール材の摩耗試験結果 硬化深度の大きなロール材のほうが耐摩耗性はやや良くなっている。

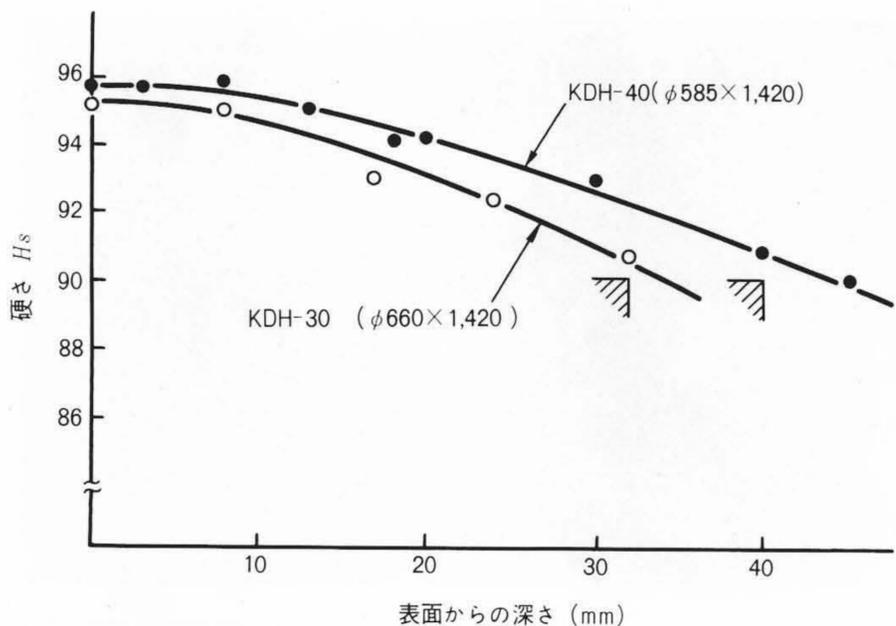


図14 廃棄ロールの硬化層実績 径小廃棄ロールの使用途中での硬さ分布を示しており、いずれもそれぞれの仕様を十分満足している。

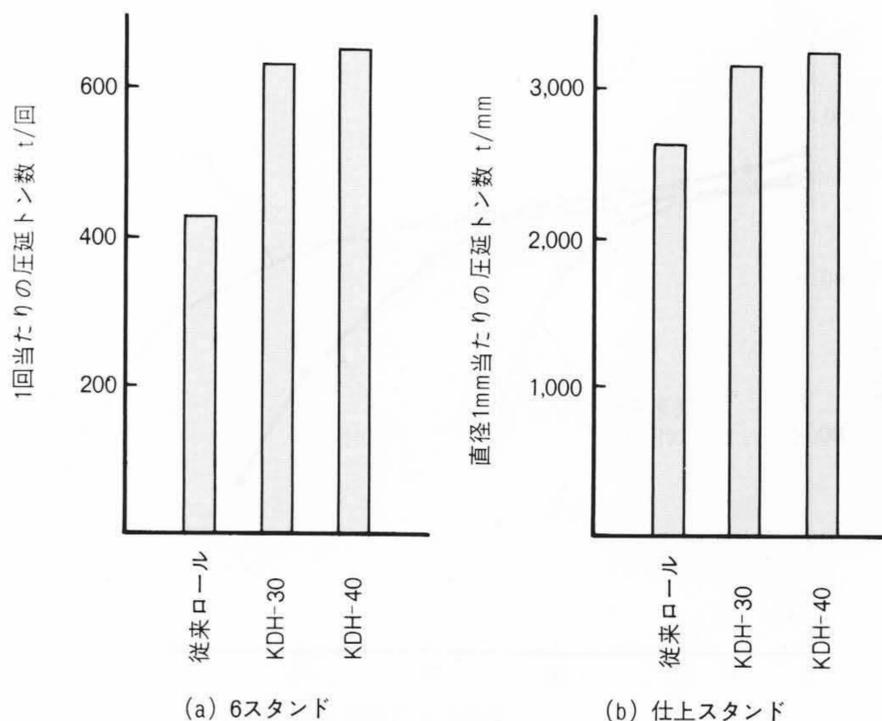


図15 稼動中ロールの使用実績 56inタンデムミルでの稼動中ロールの使用実績比較を示したもので、KDH-30及びKDH-40は従来ロールに比べて成績は良好である。

4 使用実績

これまでに冷間圧延用高硬化深度作業ロールとしてKDH-30を480本、KDH-40を32本製造し、納入している。このうち現時点で既に使用寿命を達成し径小廃棄されたロールは14本程度であるが、その硬化層実績はいずれも図14に示すように仕様を満足しているとともに、稼動中ロールもそれぞれ予定の硬さを保持している。

一方、顧客が稼動ロールの使用実績から従来ロールと比較した結果を図15に示す。

使用実績はKDH-30、KDH-40共にいずれも従来ロールに比べて優れていると評価されている。

5 結 言

再焼入れを必要としない焼入硬化深度30~40mmの高硬化深度ロールの開発を目的に、焼入性及び熱処理方法の検討を行ない、下記の結果を得た。

- (1) ロール材の焼入性改善にはCrなどの添加が効果的であり、硬化深度を大きくする熱処理法として漸進式低周波誘導加熱法が適している。
- (2) 焼入硬化深度30mm以上のKDH-30鋼種及び40mm以上のKDH-40鋼種を開発した。
- (3) KDH-30及びKDH-40の焼入硬化層は、微細で均一な組織及び均一で高い強度をもっている。
- (4) KDH-30及びKDH-40は合わせて約510本を製造しており、信頼性の高いロールが得られている。

圧延機の高性能化に伴い高強度、高耐摩耗性の要求がますます強くなっており、これらの両性質を備えたロールの開発を進めている。

参考文献

- 1) 星, 外: 低周波誘導加熱焼入による高硬度・高硬化深度ロールの開発, 鉄と鋼, 66, 4, 337 (1980)
- 2) 星, 外: 最近の冷間圧延機用ロール, 日立評論, 56, 10, 995~999 (昭49-10)
- 3) ASM: Metals Handbook, 489 (1948)