

中心孔のない鍛鋼焼入ロールの開発

Development of Boreless Forged and Hardened Steel Rolls

冷間圧延用作業ロールとして使用されている鍛鋼焼入ロールは、製造上の理由から一般に中心孔をもっている。しかし、中心孔は使用上、特殊な場合を除き不必要であり、疲労破壊に対し、信頼性を低下させる原因となるので、あけないことが望ましい。

日立製作所は、低周波誘導加熱装置による移動焼入方式の採用により、低残留応力、高硬化深度の中実ロールを開発した。

中実ロールの納入実績は4,000本以上に達し、その半数以上が廃却径まで使用されているが、中空ロールに発生したような破壊事故は皆無であり、高い信頼性が実証された。

中川 師夫* *Mitsuo Nakagawa*
 片岡 勝利** *Katsutoshi Kataoka*
 大久保 太一** *Taichi Ôkubo*

1 緒 言

鉄あるいは非鉄材料の冷間圧延用作業ロールには、一般に鍛鋼焼入ロールが用いられている。鍛鋼焼入ロール(以下、ロールと称す。)が採用される理由は、摩耗、変形、強度など冷間圧延用作業ロールとして要求される諸性質を具備しているためである。

近年、ロールの原単位向上に対する厳しい追求がなされ、耐事故性、硬化深度、健全性などに優れたロールが要求されている。特に、ロールは硬化層がなくなると再焼入、又は小さなロール寸法に加工して使用する再生処理が一般的に行なわれるようになってきているため、内部まで健全性に優れたものでなければならない。そのため、特殊な溶解、造塊技術の開発がなされ、素材品質の向上が図られている。

一方、外径300mmを超える大形のロールは、一般に製造上の理由により中心孔をもっている。中心孔は使用上、特殊な場合を除き不必要なものであり、圧延時に作用する繰返し応力により中心孔からロールが疲労破壊するという事故も報告されている^{1)~5)}。特に、再焼、再生により内径と外径の比が大きくなると中心孔の表面に作用する応力が増し、疲労破壊の危険性が高くなる。この種の破壊事故を防止するために定期的に検査を行ない、き裂の発生や進展を監視しながらロー

ルを使用するという方法が一般に採られている。最良の方法は使用上、不必要な中心孔をあけないことであるが、従来の技術では中心孔のないロールを製造できなかった。

日立製作所では、約8年前に中心孔のない中実ロールの製造技術の開発に成功し、1974年以降、本格的に中実ロールを各ユーザーに納入開始して以来、1980年末までに4,000本以上の納入実績を得ている。中実ロールでは、中空ロールに発生したような破壊事故は皆無であり、今後ますますロール使用条件の厳しくなるなかで、信頼性の高いロールとして各ユーザーから好評を得ている。

本稿では中空及び中実ロールに作用する応力と強度、中心孔からの破壊事故例、熱処理を主とした中実ロールの開発、納入及び使用実績などについて述べる。

2 ロールの中心部に作用する応力と強度

2.1 応 力

ロールは圧延時に、180度相対する方向から半径方向に荷重を受けている。このような荷重を受ける場合のロール断面の接線方向応力分布を図1に示す。計算は中空ロールの内径と外径の比を0.2とし、弾性理論に基づいて行なっている。

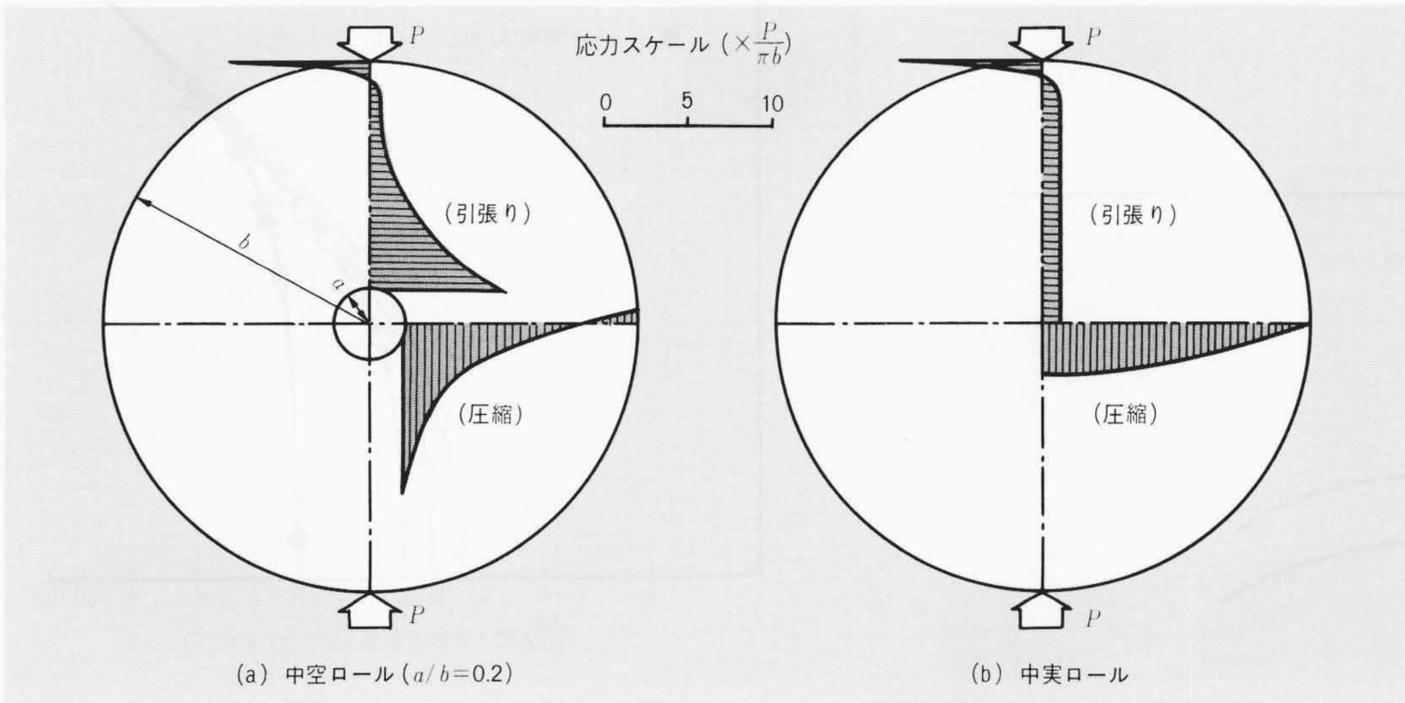


図1 ロール断面の接線方向応力分布 中空ロールの中心孔表面での応力は、中実ロールの中心での応力と比較して大きく、特に引張応力が大きくなる。

* 日立製作所鍛造事業部 ** 日立製作所勝田工場

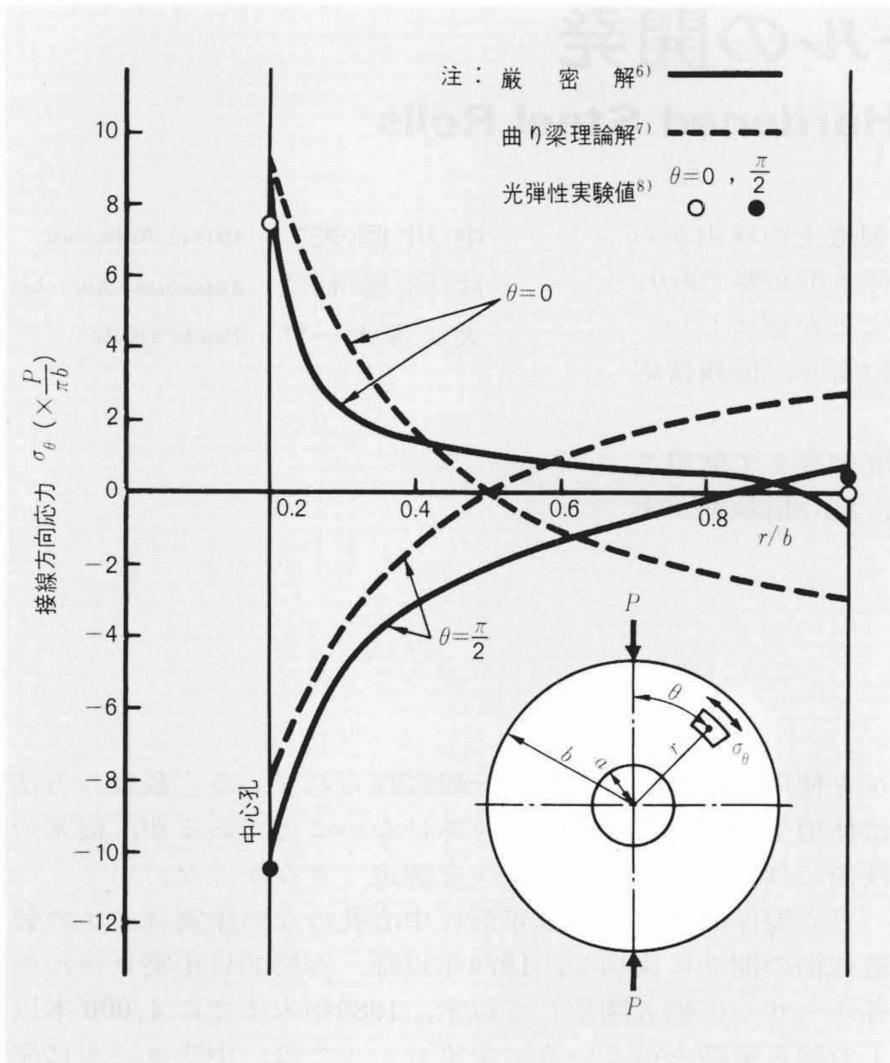


図2 厳密解と曲り梁理論による中空ロールの接線方向応力の比較(a/b=0.2) 中心孔表面では差が20%以内であるが、外表面では曲り梁理論は厳密解の4倍に達し、また分布状態も異なる。

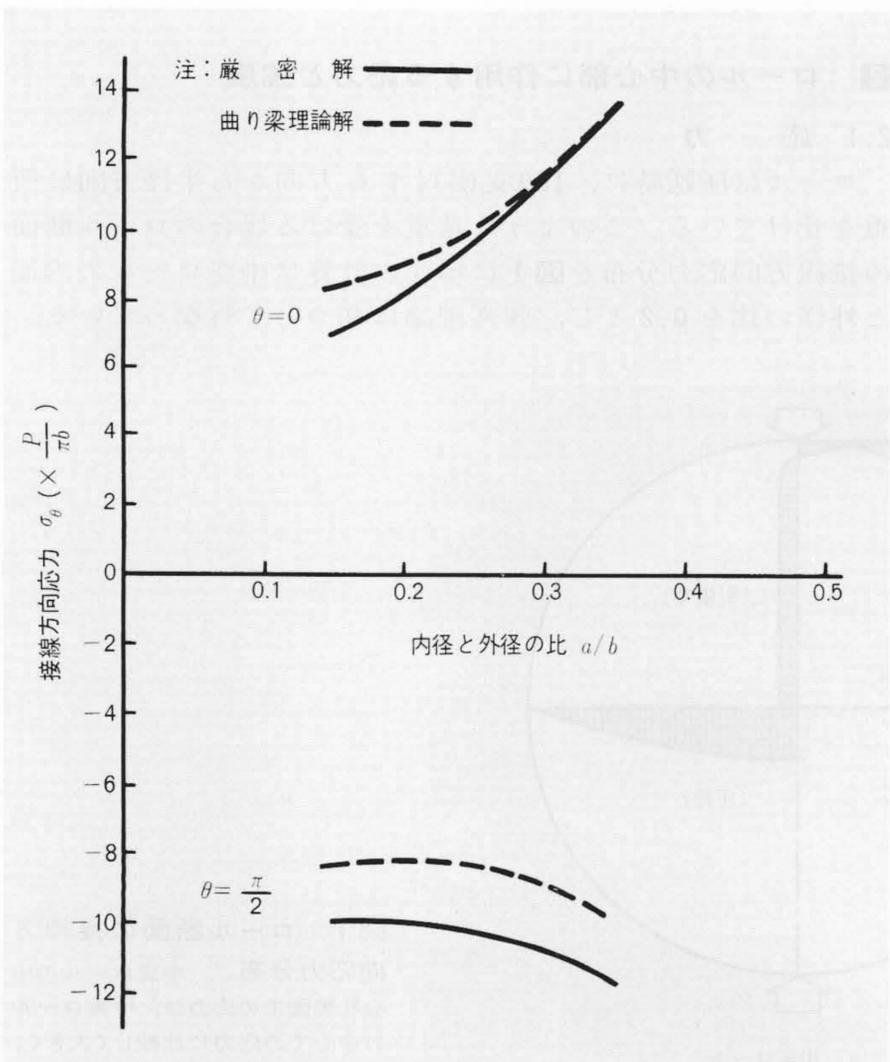


図3 内径と外径の比が異なる場合の中心孔表面の接線方向応力 theta=pi/2の位置では、内径と外径の比が異なっても厳密解と曲り梁理論解の差はほぼ一定であるが、theta=0の位置では内径と外径の比が小さくなると差は大きくなる。

中空ロールの中心孔表面での応力は、中実ロールの中心での応力と比較して大きく、特に引張応力の値が大きくなる。

図1では弾性理論に基づく厳密解を示したが、厳密解を求めるには面倒な計算を必要とするので、内径と外径の比が0.2の中空ロールについて一般に用いられている曲り梁理論との比較を行ない、曲り梁理論が中空ロールの応力解析に使えるか否かを検討した。図2に厳密解⁶⁾、曲り梁理論解⁷⁾及び光弾性による実験値⁸⁾を同時に示した。本図から実験値と厳密解は非常に近い値を示しているが、厳密解と曲り梁理論解の間には大きな差があることが分かる。しかし、中心孔の表面に着目してみると、曲り梁理論解は厳密解と比較して引張応力側で10%大きく、圧縮応力側で約20%小さくなっているが比較的近い値を示す。しかも安全側の値を与えるので、中心孔近傍の強度を議論する際には曲り梁理論を用いてもよいと思われる。なお、一般に中空ロールの内径と外径の比は0.2程度であるので、その近傍で内径と外径の比が異なった場合の中心孔表面での接線方向応力を厳密解と曲り梁理論解について求めた。その結果を図3に示す。本図から、荷重点を結ぶ線上theta=0では内径と外径の比が大きい場合、厳密解と曲り梁理論解の差は小さいが内径と外径の比が小さくなると、その差は大きくなる。しかし、荷重方向に対して直角な中心線上theta=pi/2での応力sigma_thetaは内径と外径の比が異なっても厳密解と曲り梁理論解の差はほぼ一定である。

2.2 強度

ロールの中心部には非金属介在物や偏析などの存在が予測される。これらの欠陥に対する強度評価を行なうために、ロールの中心部から採取した試験片を用いて破壊力学的強度検

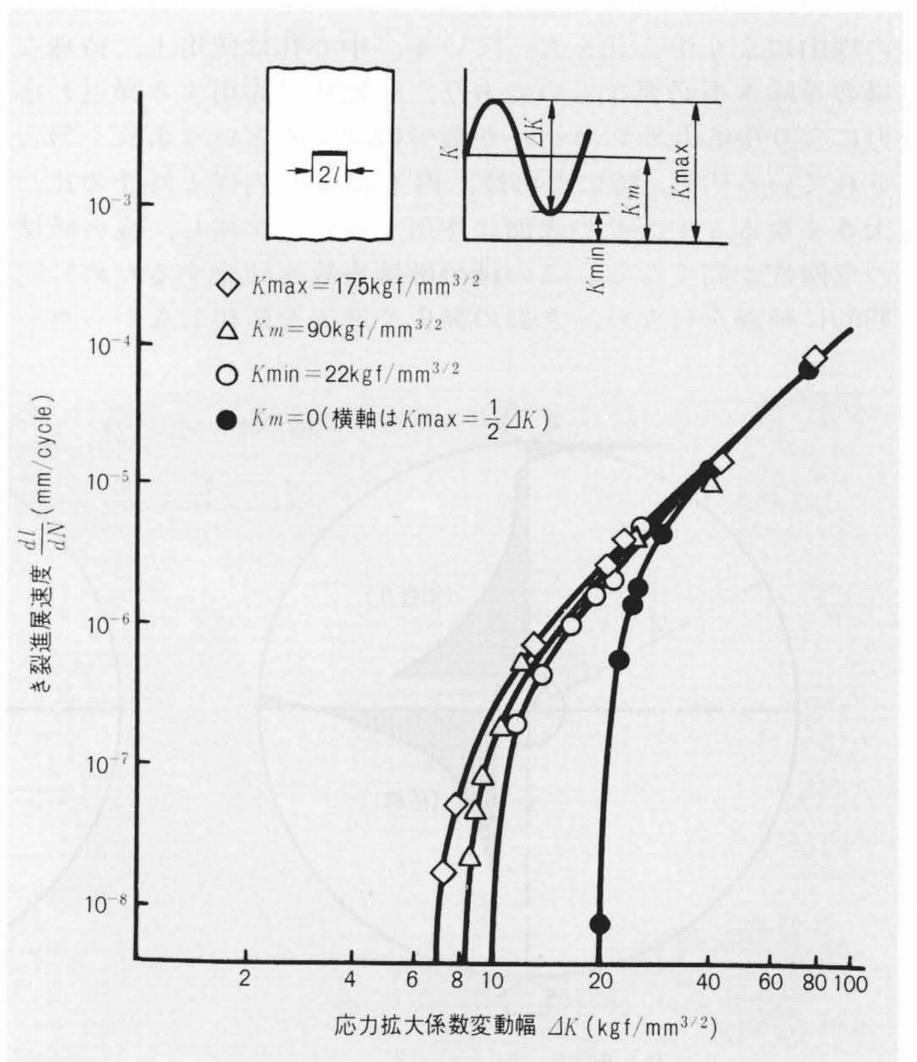


図4 き裂進展速度に及ぼす応力振幅と平均応力の影響(1) delta Kが約50kgf/mm^{3/2}以下の範囲では、平均応力が大きいほど同一delta Kに対するき裂の進展速度は大きい。delta Kが50kgf/mm^{3/2}以上の範囲でき裂進展速度に及ぼす平均応力の影響は認められない。

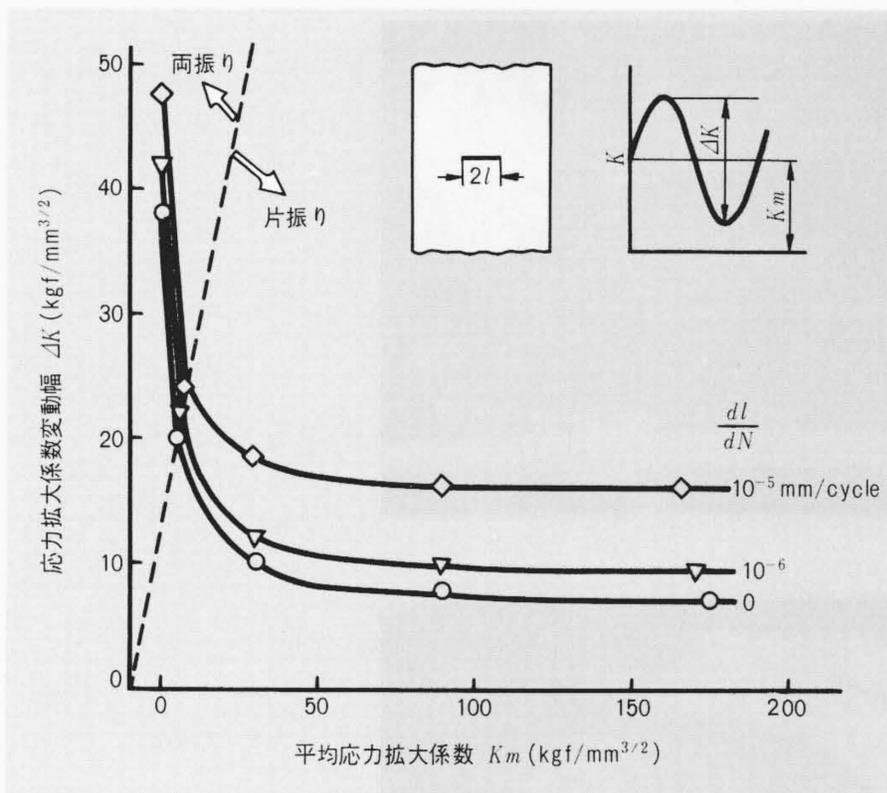


図5 き裂進展速度に及ぼす応力振幅と平均応力の影響(2) 疲労強度に及ぼす平均応力の影響は、平均応力が圧縮から引張りに変わり、しかも小さな値のところでは大きい。しかし、引張応力がある値以上になると疲労強度は一定値に達する。

討を行なった。長さ200mm、幅70mmの短冊状試験片の中央に長さ15mmのスリットを切り、スリットの先端に疲労き裂を付けて試験に供した。

試験は10t、140Hzのアムスラー社製パイプにフォー万能疲労試験機を用い、ステアケース法により行なった。図4はき裂進展速度に及ぼす応力振幅と平均応力の影響を求めた結果である。すなわち、平均応力拡大係数 K_m が0の場合、き裂進展速度 $\frac{dl}{dN}$ は 10^{-6} mm/cycle程度から応力拡大係数変動幅 ΔK を減少させると急激に低下し、 ΔK が $20\text{kgf/mm}^{3/2}$ 以下で、き裂は進展しなくなる。この値をしきい値 ΔK_{th} という。上限応力拡大係数 K_{max} が $175\text{kgf/mm}^{3/2}$ のとき ΔK_{th} は $7\text{kgf/mm}^{3/2}$ 、 K_m が $90\text{kgf/mm}^{3/2}$ のとき ΔK_{th} は $8.5\text{kgf/mm}^{3/2}$ 、下限応力拡大係数 K_{min} が $22\text{kgf/mm}^{3/2}$ のとき ΔK_{th} は $10\text{kgf/mm}^{3/2}$ であるが、 ΔK が大きくなるにつれて平均応力の影響は減少し、 ΔK が約 $50\text{kgf/mm}^{3/2}$ 以上では平均応力の影響は認められない。

図5は図4の結果を整理し、き裂進展速度が 10^{-5} 、 10^{-6} 及び 0mm/cycle となる応力拡大係数変動幅と平均応力拡大係数の関係を示している。本図から、き裂材の疲労強度に及ぼす平均応力の影響は大きく、平均応力が圧縮から引張りになるにつれて疲労強度は急激に低下することが分かる。しかし、平均応力がある値に達すると疲労強度はほぼ一定となり、平均応力拡大係数が約 $50\text{kgf/mm}^{3/2}$ 以上で疲労に対するしきい値は $7\text{kgf/mm}^{3/2}$ である。平滑材での疲労強度と平均応力の関係は一般に耐久線図として表わされ、直線関係にあるが、き裂材に対しては小さな引張応力でも急激な疲労強度の低下が起こるので注意が必要である。特に、熱処理により発生した残留応力は、使用中に消滅しにくく平均応力として作用するので、ロールの熱処理に当たっては慎重に管理しなければならない。

2.3 許容欠陥

ロールは一般に大きな残留応力をもっており⁹⁾、残留応力が平均応力として作用すると仮定して、中空及び中実ロールを通常の条件で使用した場合の許容欠陥寸法を図6に示した。本図から、中空ロールの中心孔表面と中実ロールの中心での

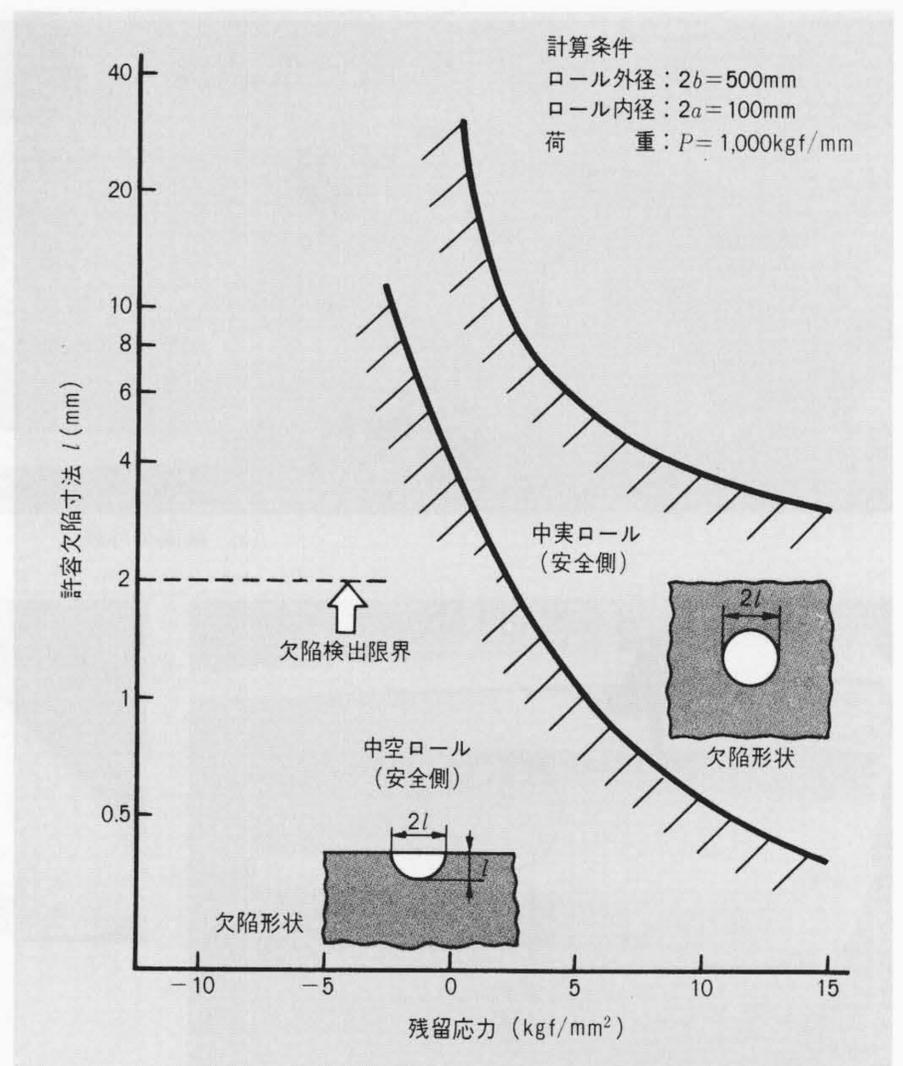


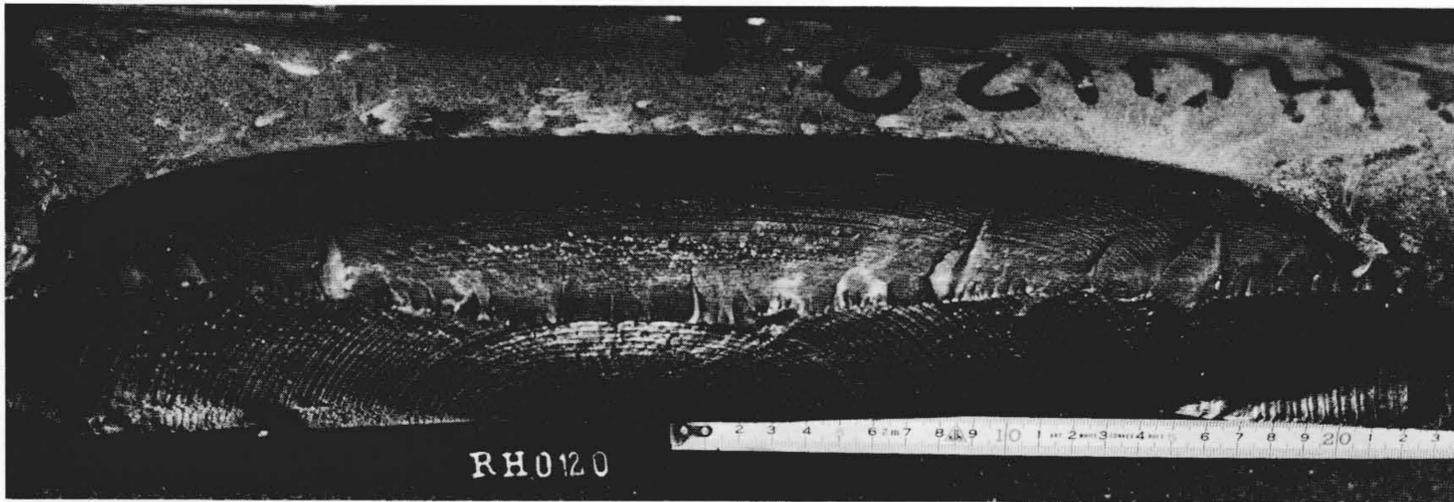
図6 ロール中心部の許容欠陥寸法に及ぼす残留応力の影響 引張りの残留応力により、許容欠陥寸法は小さくなる。また、中実ロールの許容欠陥寸法は中空ロールのものより大きく、現在の非破壊検査レベルで十分検出される。

許容欠陥寸法は大きく異なり、中空ロールでは中実ロールに比較して小さい。また、残留応力による影響が大きく、特に中空ロールの残留応力については慎重な管理が必要であることが分かる。すなわち、中心孔表面でのき裂状欠陥の非破壊的検出限界は、半径方向の寸法が2mm程度となっているので、残留応力が 2.5kgf/mm^2 以上になると非破壊的に検出されなかった微小欠陥からでも疲労破壊が起こる危険性がある。これに対して中実ロールでは、残留応力が 10kgf/mm^2 程度であっても、非破壊的に検出される欠陥に対して十分安全であるといえる。

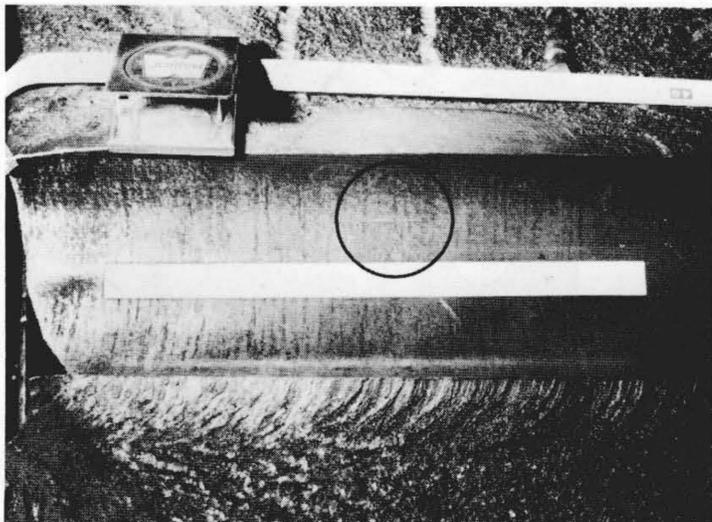
3 中心孔からの疲労破壊事故例

前述したように、従来のロールでは外径が300mm以上になると、一般に外径に対して約20%の中心孔をもっている。すなわち、中心孔は残留応力低減のため製造上必要であるが、使用時にロール内孔面には図2に示したようにほぼ両振りの応力が作用するので、不適切な残留応力、材料欠陥、加工きず、腐食などにより疲労強度が低下すると疲労破壊を生じさせる危険性がある。

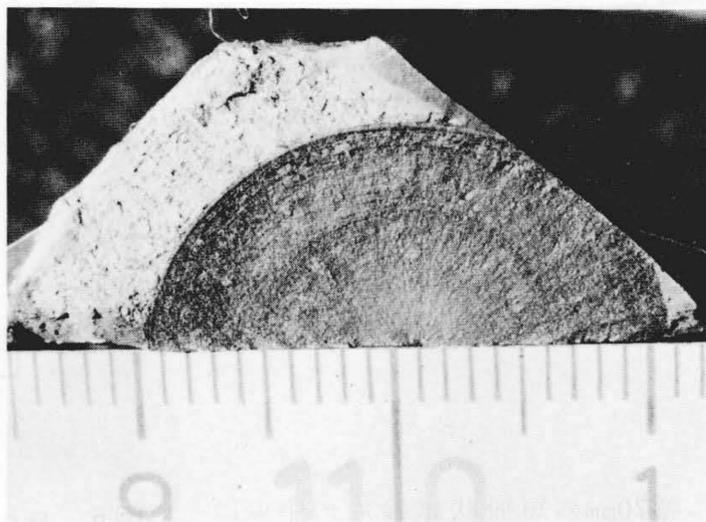
図7は中心孔表面からの疲労破壊の一例を示したものである。同図(a)は破面の外観を示しており、中心孔表面を起点として同心円状に疲労破壊の進展した様子が明瞭に観察される。また、中心孔表面には数多くの腐食孔が認められる。同図(b)は中心孔表面を磁粉探傷した際に検出されたき裂の一例であり、同様のき裂が多数観察された。同図(c)は同図(b)で○印で囲んだき裂部を切り出した後に強制的に破断した破面を示すものであり、破面から腐食孔を起点として同心円状にき裂が進展したものであることが分かる。本ロールの破壊原因に対



(a) 破面の外観



(b) 中心孔表面の腐食孔及びき裂



(c) き裂の強制破断面

図7 中心孔表面から疲労破壊したロールの一例
破壊は、中心孔表面に発生した腐食孔を起点とした疲労破壊である。

する力学的検討結果は割愛するが、本ロールは再生ロールであり内径と外径の比が大きく作用応力が大きかったこと、引張残留応力が中心孔表面に存在していたこと、腐食孔の発生により強度が低下したことなどが原因であった。したがって、力学的検討及び事故解析結果から中実ロールの必要性を重んじ、中実ロールの開発に着手した。

4 中実ロールの開発

4.1 加熱時の温度分布と残留応力

図8は、ロールの焼入による加熱時の温度分布と焼入後の残留応力分布を定性的に示したものである。①は均一温度に加熱後に水冷したもので、中心部が最大の引張応力となる。②から④はこう配加熱後に水冷した場合で、温度こう配が大きくなるにつれて中心部の応力は低下する。また、最大引張応力は温度こう配が急になるにつれて低下し、その位置は表面側に寄ってくる。すなわち、焼入による残留応力を中心部で小さくするには加熱時に温度こう配をつけられるような加熱法を採用することが不可欠である。

温度こう配をつけるに当たって、従来の電気抵抗炉やガス炉などの輻射加熱方式、又は炎加熱方式では必要十分な加熱層、保持時間、温度こう配を得ることが不可能であり、中心孔をせん孔し、それを冷却して温度こう配をつけることが必要である。しかし、このように外部から熱を流入させ、中心孔から熱を流出させる方法では温度こう配をつけることはできても、表面の温度を調節しながら必要十分な加熱層を得ることはできない。注目されたのが誘導加熱の表皮効果を利用して必要部分だけを加熱する方式である。誘導加熱は外部から熱を流入させる場合と異なり、ロール自身の電気抵抗により表層部に発熱があるため、温度分布は特有なものとなる¹⁰⁾。

図9は、50Hzの誘導加熱で投入電力量 Q を0、0.05及び0.1 W/mm^2 とし、表面の温度を $850^{\circ}C$ 、中心孔の温度を $200^{\circ}C$ とした場合の温度分布を計算した結果を示している。本図で $Q=0$ は従来の輻射加熱方式の温度分布を与えるものである。これに対し、 Q を大きくすると表層部の加熱域が深くなるのが分かる。すなわち、 $800^{\circ}C$ 以上の温度に加熱される深さをみ

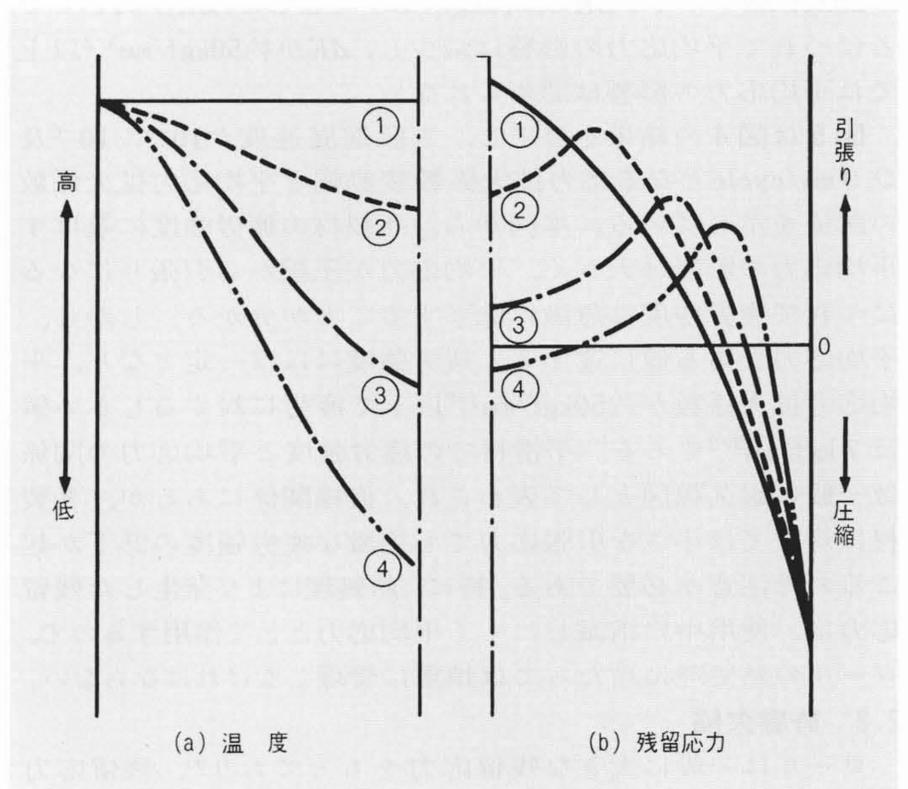


図8 焼入加熱時の温度分布と焼入後の残留応力分布(定性的)
均一加熱焼入では、中心部に最大引張応力が残留するが、温度こう配をつけることにより中心部の引張応力を低減することができる。

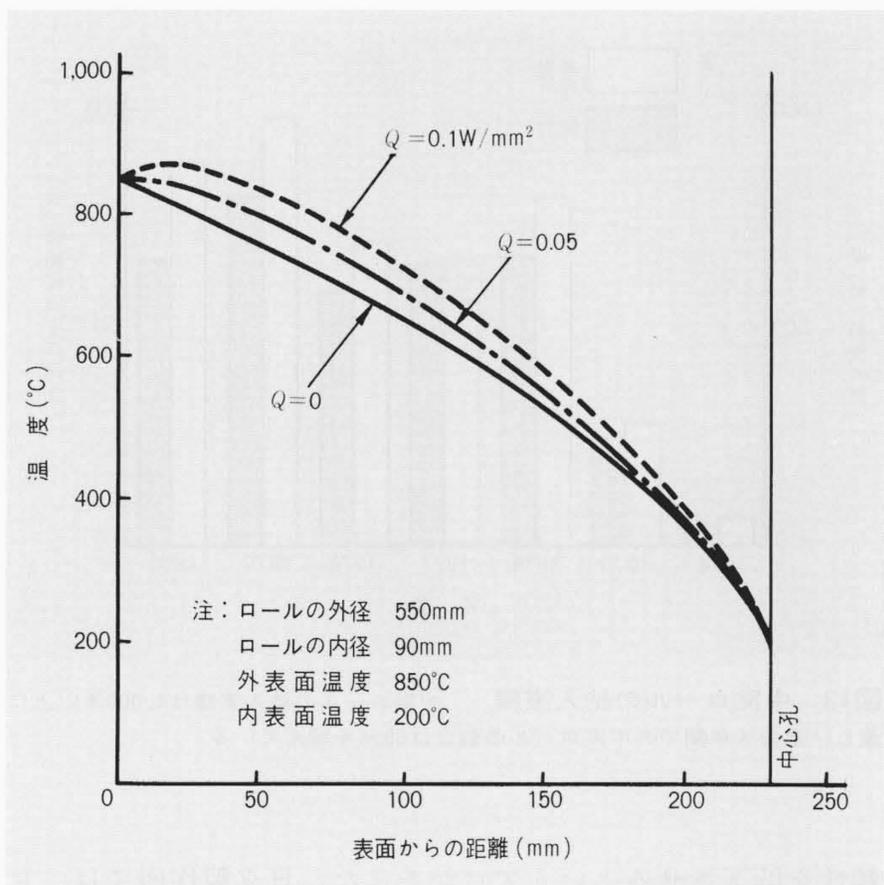


図9 50Hz誘導加熱方式を採用した場合の投入電力量 Q と温度分布の関係 輻射加熱 $Q=0$ に比較し、誘導加熱でしかも投入電力量を増すことにより、加熱層の深さは深くなる。

ると、 $Q=0$ の場合は約25mm、 $Q=0.05\text{W/mm}^2$ の場合は約50mm、 $Q=0.1\text{W/mm}^2$ の場合は約70mmとなる。また、 Q を大きくすると表面より表面下で最高温度に達するようになり、 Q を変えることにより広範囲に温度分布を変えることが可能である。また、誘導加熱では加熱層に及ぼす周波数の影響が顕著であるので、目的に応じて適切なものを選ぶことができる。すなわち、電流の浸透深さは周波数の平方根に逆比例するという性質があるので、ロールのように深い硬化層が要求される場合には周波数は低いほどよい。したがって、日立製作所では商用周波数である50Hz誘導加熱方式を採用した。

4.2 移動加熱焼入時の温度変化

誘導加熱焼入は、定置加熱方式と移動加熱方式の二つに分類することができる。より深い硬化層を得るためには加熱時の温度分布ばかりでなく、冷却速度も影響し、急速冷却が必要となる。定置加熱方式と移動加熱方式とを比較すると、局部加熱後に直ちに冷却される移動加熱方式では、加熱部近傍で温度こう配が急なため冷却効果が促進される。したがって、中心孔からの強制冷却源のない中実ロールでは移動加熱方式とする必要がある。

図10は、移動加熱焼入時の温度変化の一例を等温線で示すものである。本図から移動加熱によりロール表面層が高温にさらされている時間が少なく、しかも急速冷却により理想的焼入がなされることが分かる。温度変化は、予熱温度、加熱時の投入電力量、ロールの移動速度などによって異なり、更にロールの材質により適切な加熱、冷却条件を選ぶことで硬化層は比較的広範囲に変えることができる。しかし、より深い硬化層を得るには焼入性の優れたロール材の開発、又は中心孔の冷却による冷却の促進も必要となり、使用条件を勘案し、信頼性や経済性の評価も重要である。

4.3 残留応力

図11に移動加熱焼入を行なった中実ロールの残留応力分布を測定した結果の一例を示す。中心部の応力は特に重要であ

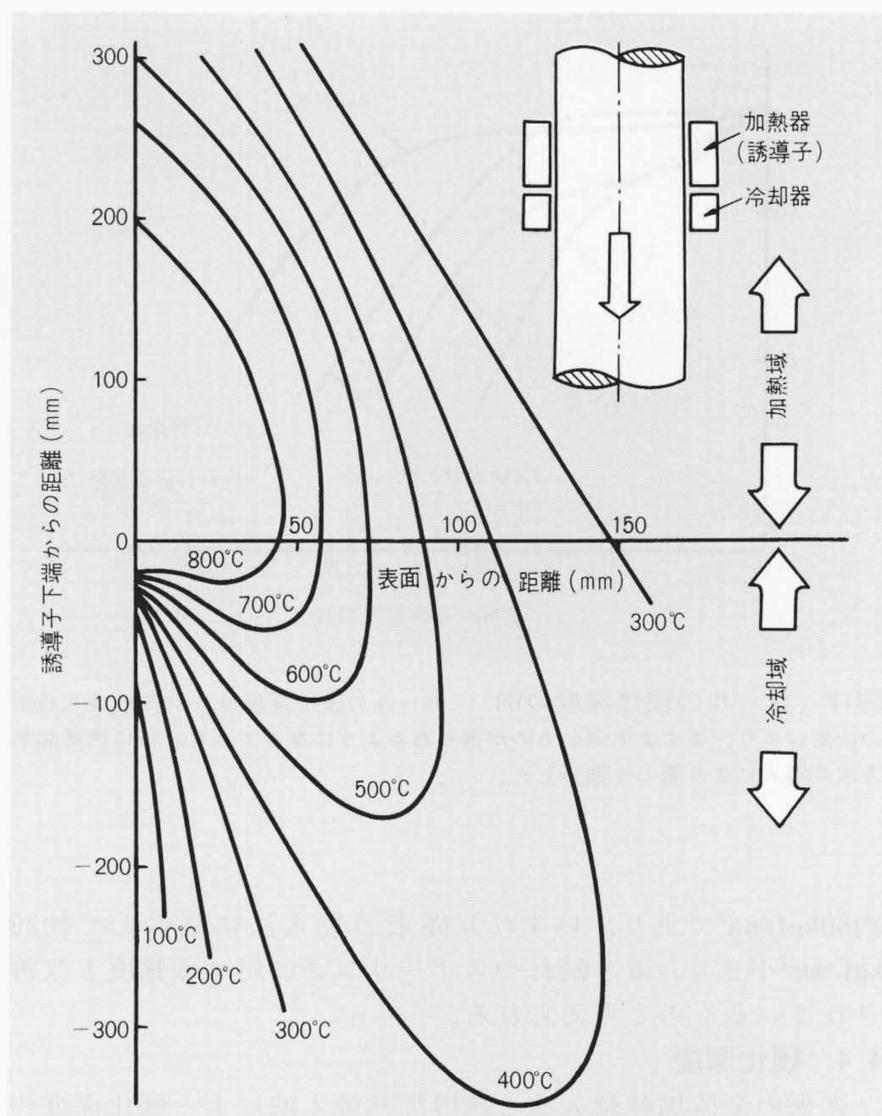


図10 移動加熱焼入時の温度変化の一例 移動加熱焼入法の採用により、必要な部分の急速加熱、冷却がなされ深い硬化層が得られる。

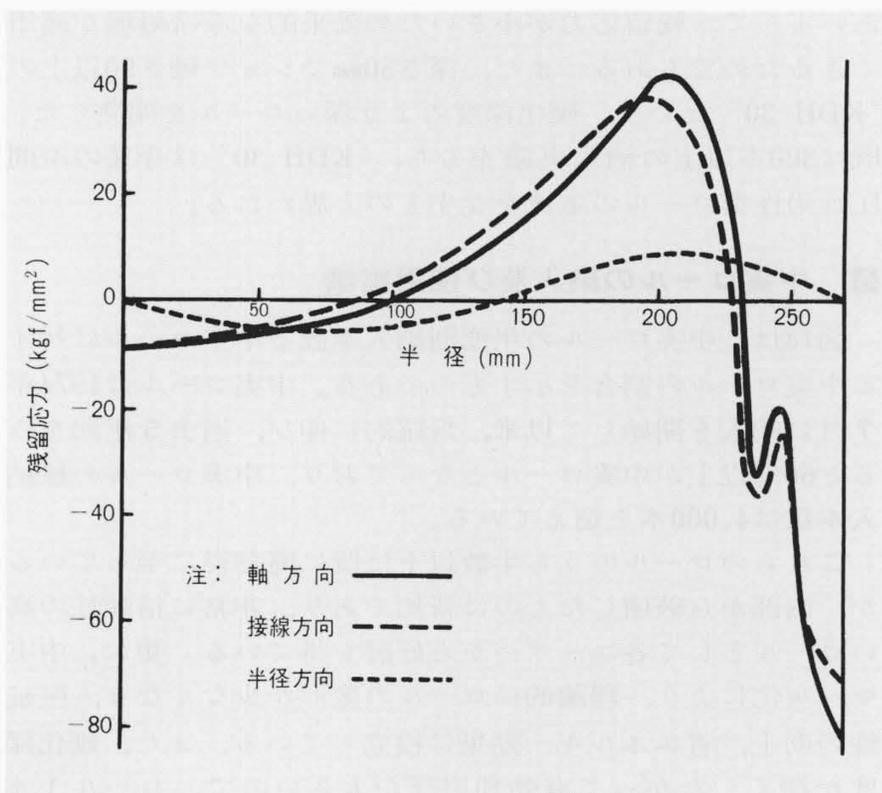


図11 中実ロールの残留応力分布の一例 中心部は約 10kgf/mm^2 の圧縮応力、最大引張応力は 40kgf/mm^2 、最大圧縮応力は 80kgf/mm^2 となっており、特に中心部で圧縮応力となるように作業管理がなされている。

るので、引張応力が残留しないような加熱、冷却がなされるよう作業管理を行なっている。本図から、中心部の接線方向残留応力は約 10kgf/mm^2 の圧縮応力であり、図6から、中実ロールは疲労破壊に対し、信頼性の非常に高いロールであるといえる。また、最大引張応力は約 40kgf/mm^2 、最大圧縮応力は

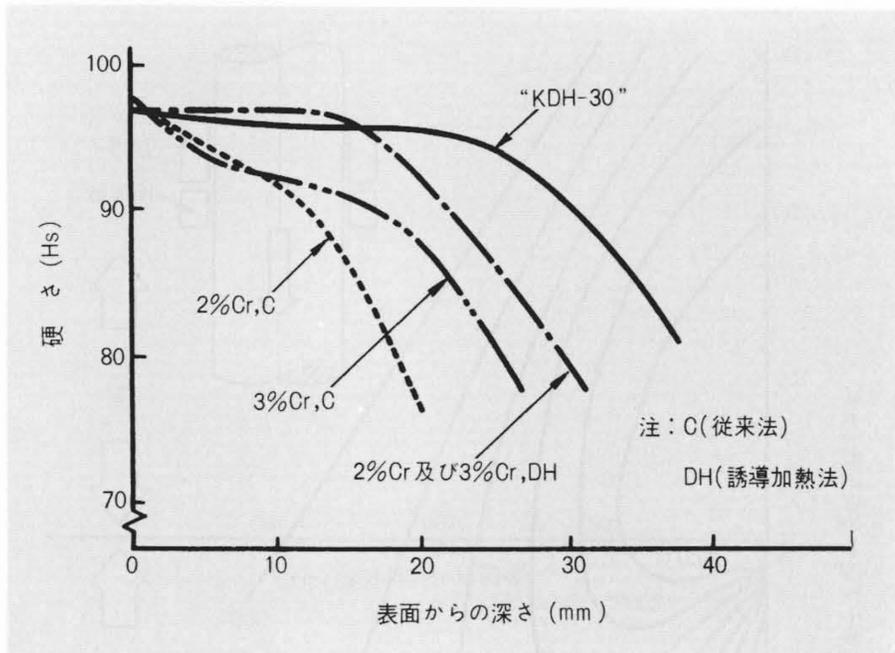


図12 ロールの硬化深度の例 ロールの硬化深度は、材質や焼入技術の改良により、ますます深いものが得られるようになってきた。特に誘導加熱方式の導入により著しく進歩した。

約80kgf/mm²であり、いずれも従来の焼入法に比較して約20kgf/mm²小さく、置き割れやスポーリングに対する強度も改善されているものと考えられる。

4.4 硬化深度

従来の全体加熱焼入法と誘導加熱焼入法による硬化深度の測定例を図12に示す。本図から、従来法に比較して誘導加熱法による硬化深度は同一材質であっても非常に深くなり、大幅に改善されていることが分かる。その理由としては、前述したように急熱、急冷による理想的焼入がなされているのとあいまって、残留応力が小さいため効果的な深冷処理が適用できるためでもある。また、深さ30mmでショア硬度90以上の“KDH-30”という、硬化深度のより深いロールを開発した。既に300本以上の納入実績をもち、“KDH-30”は今後の冷間圧延用作業ロールの主流をなすものと思われる。

5 中実ロールの納入及び使用実績

図13は、中実ロールの年度別納入本数と中空ロールに対する中実ロールの割合を示すものである。中実ロールは1974年7月に納入を開始して以来、飛躍的に伸び、過去5年間をみると60%以上が中実ロールとなっており、中実ロールの総納入本数は4,000本を超えている。

これらのロールのうち半数以上は既に廃却径に至っているが、内部から破壊したものは皆無であり、非常に信頼性の高いロールとして各ユーザーから好評を得ている。更に、中実ロール化により、理論的にロールの変形が少なくなり、圧延性の向上、省エネルギー効果に役立っている。また、硬化深度が深くしたがつて有効利用径が大きいので、ロール1本当たりの累計圧延トン数は従来ロールに比較して格段に多くなっている。更に、再焼、再生により径小となっても圧延時に疲労破壊の原因となる中心孔がないので、安心して使用できるというメリットがある。

6 結 言

冷間圧延用作業ロールとしては、一般に中心孔をもっている鍛鋼焼入ロールが用いられている。従来の製造技術では中心孔のせん孔は不可欠のものであったが、使用中には一般に不必要なものであり、むしろ中心孔からの疲労破壊に対する信

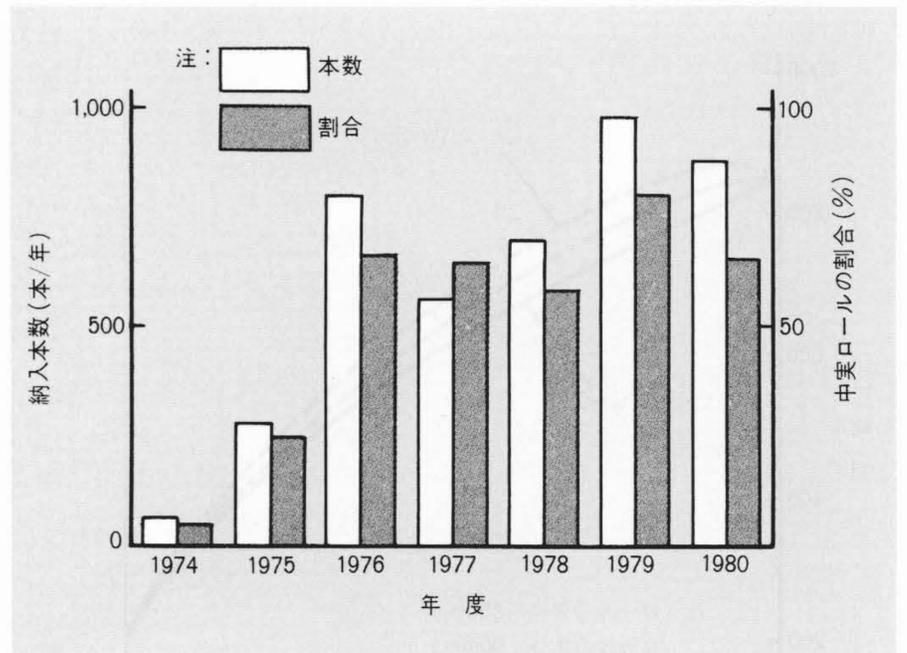


図13 中実ロールの納入実績 中実ロールの納入実績は4,000本以上に達し、過去5年間での中実ロールの割合は60%を超えている。

頼性を低下させるという欠点があった。日立製作所では、ロールの熱処理による残留応力、使用時の応力解析を詳細に行ない、中心孔のないロールの開発の必要性から、50Hzの誘導加熱焼入法を採用することにより、低残留応力、高硬化深度の中実ロールを開発した。現在まで中実ロールの納入実績は4,000本以上に達し、廃却径まで使用されたものは半数以上あるが、中空ロールに発生したような破壊事故は皆無であり、各ユーザーから信頼性の高いロールとして非常に好評を得ている。

本稿では、中実ロールの開発に当たって種々検討した事項について、その要点を述べた。ロールの使用条件はますます厳しくなり、それに伴って、より高品質のロールが要求されている。日立製作所は、本稿で述べた中心孔のない鍛鋼焼入ロールが、信頼性の高い冷間圧延用作業ロールとして業界に貢献できるものと確信している。

参考文献

- 1) A.H. Waive : Forged Steel Rolls : A Review of their Application and Manufacture, Journal of the Iron and Steel Institute, 165, 7, 279 (1950)
- 2) A.A. Brad : Material and Design Defects in Forged Steel Rolls, Iron and Steel Engineer, 38, 2, 85 (1961)
- 3) V.G. Borisenko et al. : Investigation into the hardened layer on the rolls for cold rolling strip, 5, 384 (1962)
- 4) A.V. Gurév et al. : Causes of certain defects in cold rolling rolls, 5, 379 (1963)
- 5) 阪部 : 鍛鋼焼入れロールの早期破壊現象についての考察, 鉄と鋼, 53, 6, 611 (1967)
- 6) M.Nakagawa : Fatigue Failure of Hollow Work Rolls in Four-High Cold Strip Mills, Thesis at Syracuse University, July (1971)
- 7) 日本機械学会編 : 機械工学便覧, 4-74 (1951)
- 8) O.J. Hoger : Photoelastic Analysis Practically Applied to Design Problems, Journal of Applied Physics, 9, 457 (1938)
- 9) 中川 : 冷間圧延機用作業ロールの諸性質に及ぼす残留応力の影響, 日立評論, 57, 887 (昭50-10)
- 10) 星, 外 : 低周波誘導加熱焼入れによる高硬度, 高硬化深度ロールの開発, 鉄と鋼, 66, 4, 337 (1980)