U.D.C. 621.771.237.073:539.319

中川師夫\* Mitsuo Nakagawa

# 冷間圧延機用作業ロールの諸性質に及ぼす残留応 カの影響

The Effect of Residual Stresses on Characteristics of Work Rolls in Cold Strip Mills

冷間圧延用作業ロールとして広く用いられている鍛鋼焼入れロールは、大きな残 留応力を内在する。残留応力はロールの諸性質に種々の影響を及ぼすため、この方 面の関心は高い。

この論文ではロールのかたさ、強さ、及びダル加工性に及ぼす残留応力の影響に ついて定量的な説明を行ない、ロールが残留応力をもっているがための功罪を明ら かにした。

また、ロールの性能を十分に発揮するために、ロールに適切な残留応力を与える こと、及びそれを有効に活用することの重要性を示唆した。

#### 言 1 緒

薄板の冷間圧延は高速, 高荷重のもとで行なわれ, 製品の 2.1 内孔冷却の効果 板厚に対する高い精度と美麗な仕上げ面が要求されるため, 大形のロールは残留応力を低減する目的で,一般に内孔を 作業ロールは耐摩耗性に優れ、且つ塑性変形しにくいことが

もっている。図1は均一に加熱した後、内外より冷却した場

必要である。従って、高い表面かたさと十分な硬化深度をも っていなければならない。

冷間圧延用作業ロールは特殊な小形のロールを除き、一般 に0.7~1.0%C, 1.0~5.0%Crの高炭素低クロム鋼をベース として、各社それぞれ顧客のニーズに応じて1.0%以下のSi, Mn, Ni, Mo, V, 及びCoなどを添加した材質を用い, 所要 の性能を与えるために鍛造、及び焼入れを行なうので、鍛鋼 焼入れロール(以下,ロールと称す)と呼ばれている。

ロールの表面層は高いかたさを保つ必要があるため,強烈 な水焼入れ後,200℃以下の低温で焼もどしが行なわれるにす ぎない。従って、焼入れ時に発生した応力が十分に緩和され ずロール内部には大きな残留応力が存在している。

残留応力はロールのかたさ,強さ,ダル加工性など機械的 及び金属的諸性質に及ぼす重要な因子であり、 ロール関係者 は、 ロールの諸性質に及ぼす残留応力の功罪について十分に 理解しておく必要がある。

以下はロールのかたさ、強さ、ダル加工性など、その諸性 質に及ぼす残留応力の影響についてまとめたものである。

# 2 残留応力の分布

ロールは高温から強烈な水焼入れが行なわれるため、 焼入 れ時にロールの内外に大きな温度差を生じ,これに伴い熱収 縮,変態膨張が時期的にずれて起こるので,熱応力,変態応 力が生ずる。また内外の組織差に起因する応力も発生し、こ れらの重畳された応力が焼入れ応力となる。しかし、ロール は低温ではあるが焼もどしが行なわれるため、応力緩和が起 こる<sup>(1)</sup>が, それでも表面では100~150kg/mm<sup>2</sup>の圧縮残留応力 が存在する。ロールの残留応力に関する計算や測定結果につ いては、種々の文献(2)~(8)に紹介されているので詳細な分布に ついては省略し、ここでは熱処理法と残留応力の分布状況に ついて整理して述べる。

合に内孔の冷却程度により残留応力分布がどのように変化す るかを示したものである。また、同図は内孔冷却が強烈にな るほど内孔面の残留応力が圧縮側に大きくなり、冷却効果が



残留応力分布に及ぼす内孔冷却の効果 2 内孔冷却が不十分な 場合、内孔面の残留応力は引張り応力となる。

79

\* 日立製作所勝田工場

888 日立評論 VOL. 57 No. 10(1975-10)

少なくなると引張り側に移行し、内孔無冷却の場合は内孔面 で最大の引張り残留応力となることを示している。

従って,内孔をもつロールにおいて内孔の冷却は重要な意味をもち,後述するように内孔の冷却効果が不十分な場合には,稼動中に発生する繰返し応力により内孔から疲れ破壊を 生ずることがある。

#### 2.2 加熱時の温度分布の影響

ロールの内部に靱性を与え、また硬化層を深くする目的で 誘導加熱や火炎加熱などにより、表面層だけを急速に加熱す るこう配加熱法が電気炉による均一加熱法に代わり広く普及 している。図2は加熱時の温度分布が変わった場合の残留応 力分布について示したものである。また同図は、温度こう配 が大きいほど内部の応力ピークは表面側に寄り、その値は小 さくなることを示している(ここでは内孔冷却は行なわないと 仮定した)。

また、従来の定置焼入れに代わり移動焼入れが広く行なわれているが、移動焼入れにおいて送り速度が速い場合には、 図中①に示すようになり、送り速度が遅くなると②→③と内 孔面の残留応力は上昇するので、適切な残留応力分布を得る ためには送り速度の選定と内孔冷却の併用が必要となる。

# 3 残留応力とかたさ

ショアかたさ(以下, Hsと記す)は応力依存性が大きく,引

である。従って, Hs90以上のかたさには基地のかたさに残留 応力によるかたさが付加されていることになる。

図3はロールを胴中央部から切断した場合の表面残留応力, 及びかたさの分布を示したものである<sup>(9)</sup>。すなわち,切断す ることによりその近傍では残留応力の解放,かたさの低下が 生じ,その影響は切断面から160~180mmに及び,残留応力の 解放によりかたさは*Hs*8低下している。

図4は軸方向,及び接線方向残留応力の相加平均をとり, 平均残留応力とかたさの関係を示したものである。同図より 残留応力とかたさの間には比例関係が認められ,8.6kg/mm<sup>2</sup> の圧縮応力によりかたさは*Hs*1上昇する。

## 4 残留応力と強さ

ロールの残留応力分布状況は,前述したように熱処理法に より異なるが,表面では100~150kg/mm<sup>2</sup>の圧縮応力,内部で はそれにつり合う引張り応力が存在する。従って,ロールの 強さについて考える場合に残留応力を無視することは危険で ある。ここではロールの破壊現象のうちで重要な胴部の置き 割れ,内孔からの破壊,及び軸ネック部の折損に及ぼす残留 応力の影響について述べる。

#### 4.1 置き割れ

置き割れは遅れ破壊の一種で、ロールの熱処理後にある時 間経過した後、外力の作用なしに引張り残留応力のピーク近

張り応力によりかたさは低下し, 圧縮応力により上昇することは古くから知られている。ロールのかたさは一般にHsにより管理されているので, 残留応力を考慮した議論が必要である。一般の鉄用圧延ではHs95以上, アルミはく用圧延ではHs100以上が要求される。しかし, 鋼の焼入れかたさには一定の限界があり, 通常の焼入れ法によるとHs約90がその限界



傍から突然爆発的に発生するもので,<br />
残留応力が主因である



図3 切断面からの距離とかたさ,及び残留応力の関係 切断面 に近づくにつれて,かたさの低下及び残留応力の解放は大きい。



温度こう配 (1)>(2)>(3)>(4)

図2 残留応力分布に及ぼす温度分布の影響 温度こう配が急なほど ど内孔面の引張り応力は低下し、応力のピークは表面側に移行する。

80

図4 残留応力とかたさの関係 圧縮応力の付加により、ショアかた さは直線的に上昇し、8.6kg/mm<sup>2</sup>の圧縮応力によりショアかたさは1度上昇する。

# 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 889



日立製作所では、このような考えのもとに残留応力を低減 するための特殊熱処理法を確立し<sup>(8)</sup>、ロール内部の引張り応 力を従来のものに比較し約30%下げ、置き割れは皆無となっ ている。

4.2 内孔からの疲れ破壊

外径300mm以上のロールは,一般に外径に対し約20%の内孔 をもっている。前述したように,内孔は残留応力低減のため に有効であるが,稼動中のロール内孔面には図5に示すよう にほぼ両振りの応力が作用するので<sup>(14)</sup>,残留応力分布が不適 切な場合には疲れ破壊を生ずる。

図6は内孔面からの疲れ破壊の一例を示したものであり, 破壊は腐食孔を起点として生じている。このように内孔面に は腐食孔のほかに条痕やき裂など種々の欠陥をもっているの で、欠陥材としての強さの評価が必要である。残留応力を平 均応力と等価と見なすと、き裂の進展性に対し残留応力は引 張りの場合に進展を促進し、圧縮の場合抑制する。特に下限 応力が負の両振り状態における強度は著しく疲れ強さを増大 する<sup>(15)</sup>ので、内孔面に圧縮残留応力を残すことが、内孔面か らの疲れ破壊を防止するために欠くことのできないものとなる。 一般のロールに作用する内孔面の応力は±12~±15kg/mm<sup>2</sup> であるので、内孔面の残留応力は15kg/mm<sup>2</sup>以上の圧縮応力で あることが望ましい。従って、内孔冷却の管理を十分に行な っている。

図5 稼動時の内孔面に作用する接線方向応力 内孔表面には、両振りに近い応力がロール | 回転につき2回の割合で繰り返し作用する。

ことに異論はない。

置き割れの発生要因を気温の変化に伴う熱応力説<sup>(5)</sup>,残留 オーステナイトの分解による変態応力説<sup>(10)(11)</sup>,及び水素ぜい 化説<sup>(6)(12)</sup>など種々考えられているが,水素ぜい化説が現象を 良く説明できるものと思われる。

すなわち、常温におけるα-Fe中の水素溶解度は、1気圧の 水素のもとで0.01~0.1ppmと推定されており<sup>(13)</sup>、これに対し て一般のロールは、1.5~2.5ppmの水素を含有するため、大 部分の水素は空間、粒界、空孔や転位などのミクロ的欠陥部 に集積されており、この水素がき裂の発生や進展を助長する ものと考えられる。従って、置き割れの発生条件としては、 ロールのミクロ的欠陥部に水素の集積が生じ、遅れ破壊に対 する限界強さが低下し、残留応力が限界強さを超えた時点で 破壊に至るものと考えられる。以上に述べたように、遅れ破 壊の主因として引張り応力が挙げられるため、熱処理により 適切な残留応力分布をロールに与えることが置き割れ防止の ために有効である。

# 4.3 軸ネック部の折損

一般に四重圧延機用作業ロールに作用する曲げ応力は小さ く、軸ネック部(以下、ネック部と略す)の曲げ応力による疲 れ強さは問題にならないが、二重圧延機用ロールは圧延荷重 をロールの軸部で支えているので、ネック部の強さが問題と なる。ネック部の折損が問題となるのは特定の圧延機に限ら れ、一般にその圧延荷重は大きい。また、そのほかにロール の設計、製造などの問題を含んでいることが多い。これらの 要因のうち、ここでは残留応力に起因した折損事故について 述べる。

図7はネック部より折損したロールの一例について示した ものである。このロールにおけるネック部の応力分布を計算 した結果について図8に示す。これより最大応力はA点で22.3 kg/mm<sup>2</sup>, B点で20.8kg/mm<sup>2</sup>となり, A点ではB点より約10% 高い応力が作用していることが分かる。このロールにおける ネック部の回転曲げ疲れ限度は約25kg/mm<sup>2</sup>と推定され, 安全 率はA点で1.12, B点で1.20となり危険断面はA点となる。 しかし, 図7より明らかなようにB点より折損している。従 って, A点の強さを上昇させたか, あるいはB点の強さを低 下させた要因について検討する必要があり, この要因として



図6 内孔面より疲れ 破壊したロールの例 破壊の起点は内孔面の腐食 孔にあり、稼動中の繰返し 応力によりき裂が発生進展 し、残留応力により最終破 断した。

81

890 日立評論 VOL. 57 No. 10(1975-10)



図7 軸ネック部より折損したロールの一例 このロールは2段R の軸ネック部のうち,応力レベルの低いほうから折損した。





図8 折損したロールの軸ネック部の曲げ応力分布 有限要素法に より計算した結果であり、A点の曲げ応力は、折損したB点の曲げ応力より約 10%高い。 図 9 軸ネック部の軸方向表面残留応力分布 軸方向表面残留応力 は、A点で圧縮、B点で引張りとなっている。



図10 疲れ強さに及ぼす平均応力の影響 平均応力が存在する場合, 材料の疲れ強さは引張応力により低下し, 圧縮応力により上昇する。

残留応力が考えられた。

82

折損ロールの反対側のネック部における軸方向表面残留応 力の測定結果を図9に示した。すなわち、A点の残留応力は -13kg/mm<sup>2</sup>、B点では+20kg/mm<sup>2</sup>であり、明らかに残留応力 に差が認められる。

疲れ強さに及ぼす残留応力の影響を定量的に把握するため に残留応力を平均応力と見なし,耐久線図を描くと図10に示 すようになる。 を残すための熱処理法を採用し,残留応力について十分な管理を行なっている。また特に問題のあるロールについては, ネック形状の変更による応力集中の緩和,ローラ加工による 疲れ強さの向上,及びさび止め塗料による腐食の防止を行ない,ネック折損防止のための十分な対策を施している。

### 5 残留応力とダル加工性

調質圧延用作業ロールは一般にダル加工を行ない、表面を 梨地状にして用いられる。ダル加工面は常に一定のあらさに 保つことが望ましいが、ロールの組成、組織、かたさ、及び 残留応力などによりダル加工性が異なる。ダル加工性に及ぼ すこれらの要因のうち、ここでは残留応力の影響について述 べる。 図11は残留応力とかたさの関係を求めたテストロールに、

同図よりA点の疲れ限度は27kg/mm<sup>2</sup>, B点では21.5kg/mm<sup>2</sup> となり, A点の作用応力がB点よりも大きいにもかかわらず, 安全率はA点で1.21, B点で1.03となり, B点より破壊が生 じた理由を説明することができる。 日立製作所では,以上の経験をもとに胴部の残留応力分布 ばかりでなく軸部についても考慮し, ネック部には圧縮応力

#### 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 891

一定条件でダル加工を行ない,ダル加工面の2乗平均あらさ (Hrms)を測定した結果を示したものである。図中〇印は測定 値であり,ダル加工面のあらさは実線で示すように表わせる。 これに対し点線は,実体ロールのかたさから推定したあらさ である<sup>(9)</sup>。すなわち,ダル加工面のあらさは切断面に近づく につれて上昇するが,ショアかたさ計により測定した見掛け 上のかたさから推定される値に比較して,その上昇の度合は 少ない。

図4に示した残留応力とかたさの関係を用いて、図11の結果より残留応力とダル加工面のあらさの関係を求めると、図 12に示すようになる。すなわち、平均残留応力( $\sigma_R$ )とあらさの変化( $\Delta Hrms$ )を示しており、比例関係が成り立つ。しかし、見掛け上のかたさから推定した値より、残留応力のダル加工性に及ぼす影響は少なく、ロールの表面かたさから推定した値の52.6%であり、ダル加工性に及ぼす残留応力の影響はかたさに及ぼす影響の52.6%であると解釈される。

以上の結果より, ロールのダル加工性に際してロールの基 地のかたさと残留応力によるかたさ上昇分とを定量的に把握 し, 適切なダル加工条件を選定する必要がある。

#### -0.4 かたさからの推定値 $(\Delta Hrms=3.8\times10^{-3} \ \overline{\sigma})$ -0.3 $(\pi)$ $\Delta Hrms$ $\Delta Hrms = 2.0 \times 10^{-3} \ \overline{\sigma}_R$ (96.3) の変化 0.2 (96.5)tu 0 2. (92.1) (95.5)(91.3) -0.1(92.0)(92.7) 注:( )の数字はかたさHs (90.5)(89.0) 基地のかたさ Hs = 88.5 (90.5)- 100 -80-20-40-60 平均残留応力 $\sigma_R$ (kg/mm<sup>2</sup>)

図12 残留応力によるダル加工面のあらさの変化 ダル加工性に及ぼす残留応力の影響は、ショアかたさに及ぼす影響の52.6%である。

# 6 結 言

冷間圧延用作業ロールとして広く用いられている鍛鋼焼入 れロールは、あらゆる機械部品のうちで最も大きな残留応力を

#### 参考文献

(1) 武市,門瀬,中川,「鍛鋼焼入れロールの焼もどしによる応力

もち,残留応力はロール諸性質に種々の影響を及ぼしている。

この論文ではロールのかたさ,強さ,及びダル加工性に及 ぼす残留応力を定量的に説明し,ロールが残留応力をもつた めの功罪について明らかにした。

日立製作所ではロールの製造に際し,常に残留応力を念頭 におき,ロールとしての性能を十分に発揮させるための適切 な残留応力分布が得られる熱処理法,及び残留応力の測定法 を確立し,早期破壊に対し十分に信頼性の高いロールを提供 している。

一方, ロールのユーザーはロールの諸性質に及ぼす残留応 力の影響を十分に認識し,残留応力を有効に活用するための 使用条件の選定,及び保守管理の実施が必要である。

なお,耐事故性,及び耐摩耗性に及ぼす残留応力の影響については,まだ十分な解明がなされておらず,今後究明しなければならない問題が多々ある。

終わりに, 平素よりロールの使用, 及び調査に深い御理解 をいただいている製鉄所の関係各位に対し, 深い謝意を表わ すとともに, 今後いっそうの御指導をお願いする次第である。



- 緩和」鉄と鋼 第53年,第4号,69(1967)
  - 200°C以下の低温度で焼もどしを行なったロール表面の応力 緩和について述べている。
- (2) 本多,広根,「鋼材の冷却による熱的内部歪について」理研彙法 14,7 525 (1935)
- (3) H. Treppshüh, "Die Berechnung Der Eigenspannungen In Gehärteten Gröberen Hohlzylindern aus Werkzengstahl" Archiv für das Eisenhüttenwesen 13, 429 (1940)
- (4) 下田,「変態を考慮に入れた残留応力の計算」理研彙報 14, 3,13 (1949)
- (5) F. W. Jones, "HARDENED STEEL ROLLS" STEEL & COAL August 24, 354 (1962)
- (6) 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 第53年,第6号 611 (1967)
- (7) 下田,「ロールの残留応力と強度」第10回 材料強度に関す る討論前刷集 日本材料学会 51 (昭48-11)
- (8) 星,八重樫,清野,「最近の冷間圧延機用ロール」日立評論
   56,995(昭49-10)
- (9) 中川,「ロールのダル加工性に及ぼす残留応力の影響」鉄と鋼 第60年, 第11号 S469 (1974)
- (10) B. L. Averbach, M. Cohen and S. G. Fletcher, "The Dimensional Stability of Steel Part III-Decomposition of Martensite and Austenite at Room Temperature" Trans. ASM 40, 728 (1948)
- B. L. Averbach and M. Cohen, "The Isothermal Decomposition of Martensite and Retained Austenite" Trans. ASM 41, 1024 (1949)
- (12) R. P. Frohmberg, W. J. Barnett and A. R. Troiano, "Delayed Failure and Hydrogen Embrittlement in Steel" Trans. ASM 47, 892 (1955)
- (13) K. Ono and L. A. Rosales, "On the Anomalous Behavior of

図|| 切断面からの距離とダル加工面のあらさとの関係 ダル加 工面のあらさは、切断面に近づくにつれて上昇する。 Hydrogen in Iron at Lower Temperafure" Trans. Met. Soc. AIME 242, 244 (1968)
(14) M. Nakagawa, "Fatigue Failure of Hollow Work Rolls in Four-High Cold Strip Mills" Thesis in Syracuse University, July, (1971)
(15) 宇佐美,「疲れき裂の挙動に及ぼす平均応力の影響」日本材 料強度学会講演論文集 25 (昭49-5)

83