

ロールの焼入れ過程における 残留応力解析とその生成メカニズム

野田 尚昭・佐野 義一・高瀬 康・堀田 源治

はじめに

ロールは搬送や塑性加工に使われる基本的な生産要素であり、広く産業用途に使われている。ロールの製作には遠心鑄造法や焼嵌め技術が使われることもあるが操業上解決すべき課題も多い。本連載においては製鉄機械に多数用いられるロールを取り上げ、その技術的課題や解決について説明する。まず、初めに一般的なローラとして、焼き嵌めのない中実ロールを解説する。具体的には①残留応力の発生のメカニズム、②残留応力に及ぼす内径、外径の比の影響、③残留応力対策としての不均加熱焼き入れ、④残留応力とクリーブの関係について順に説明する。

ロールの概要

製鉄所において圧延、メッキ、酸洗などに多くのロールが用いられている。その呼称は、主として圧延に用いられるものをロール、それ以外の用途ではローラと呼ばれることも多く、明確に区別されていない。製鉄所で最も多く用いられているのは、中間製品や製品移送に用いられる搬送用ロールで、これは他の多くの産業でも使用されている。鉄鋼に用いられる多くのロール・ローラは使用条件や使用環境などにより比較的早期に胴部表面に摩耗を生じ、許容範囲を越えると、装置から組外されて平滑な面に修正加工され、繰り返し使用される。そして繰り返し使用されて廃却径に達するとロール全体を交換する必要がある。一方、軸部

はほとんどの場合使用できる状態にある。したがって多くの場合胴部を中空スリーブ状にして、これに軸部を焼嵌め等で組立てるスリーブ組立構造の採用が試みられ、その技術検討が企業や研究機関において活発に進められてきた。

これらのロール・ローラはその使用中に受ける荷重に注目するとロール胴部に加わる荷重が大きいものと比較的小さいものに分けられる。熱間鋼板圧延ロールの場合、その最大圧延荷重は数百～数千トンと非常に大きい。このため圧延設備には被圧延材に直接接する作動ロールを補助するための補強ロールが組込まれており、作動・補強ロールを含めたロール数により、2段、4段や6段(または6重)などに区別される。一方、使用時の荷重が比較的小さいものには、鋼板移送用の搬送用ローラ、鋼板の表面スケールを除去する連続酸洗設備用ロールや鋼板表面にめっきを施す連続溶融金属めっき浴のロール(シンクロール)などが挙げられる。これらは使用荷重が比較的小さいため、胴部材(あるいはローラ・ロール全体)をセラミックスのような耐摩耗性、耐食性や耐熱性に優れた材料に変更することでメンテナンスや交換サイクルの大幅な延長が期待でき、一部で実用化されている。またロール(ローラ)の一部は一部焼嵌め接合型が適用されているものの、焼嵌め固有の問題(大型径による強度低下や使用環境による破損などの可能性)が残されており、それらの問題解決が必須である。

熱間圧延用ロールに生じる残留応力

熱間帯鋼圧延ロール(図1)は、ロール中心部

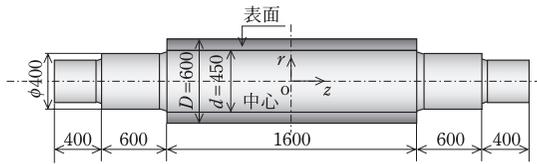


図1 熱間帯鋼圧延ロール。

が強靱で、表面は硬くて滑らかで摩耗しないことが要求されるだけでなく、1000°Cに加熱された鋼板との接触と水冷却に伴う熱サイクルを受けるため、耐摩耗・耐肌あれ性と耐熱き裂性の両立が求められる¹⁾。また、ロール回転ごとの加熱・冷却サイクルによる熱き裂や圧延中断時に生じる咬み止めき裂に伴う損傷を防ぐために適当な圧縮残留応力が必要とされる。これら相反する性質を同時に満たすためには、単一材質での実現は不可能であった。そのため、圧延に直接使用され、硬く滑らかなことが要求される胴表層部と、それを支持する強靱な軸部を同心状に接合させた複合ロールが古くから用いられてきた(図1)²⁾。図1ではロール外径 $D=600$ mm、外層厚さ75 mm、内層直径 $d=450$ mmで、解析に用いたモデルである。

一方、熱間帯鋼圧延用ロールにとどまらず一般の圧延ロールに関しても、鉄鋼業の国際競争の激化とともに、圧延の苛酷化や圧延製品品質の高度安定化が進められ、高性能化のニーズは強い。これらの技術課題や製造コストに対して残留応力の影響は少なくないため、残留応力分布を把握することは、重要な要素の一つである³⁾。従来から行われている残留応力測定法としてはSachs法⁴⁾や輪切り法⁵⁾(円板切り出し法ともいう)があるが、これらは実体ロールの試作を行い破壊検査によって測定するもので、コストと時間の負担が大きい。このため異なる種々の熱処理による残留応力をシミュレーションする技術を確立することは長年の課題であった⁶⁾。

これまでの研究では、直径数mm程度の小型試験片を対象として鉄鋼の焼入れ・焼戻し時の熱応力の解析や実測値に対する比較、考察が主として行われている^{7)~11)}。しかし、圧延用ロールに比べ

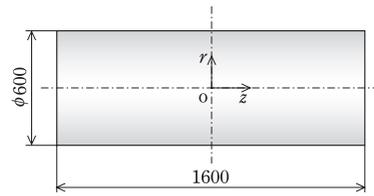
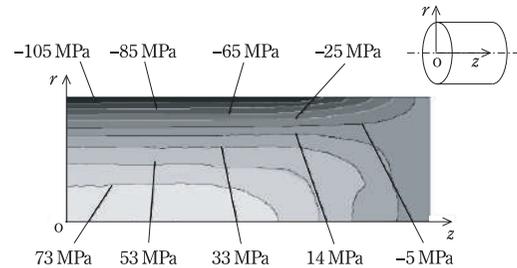


図2 単一材ロールのモデル。

図3 単一材ロールの焼入れ時の σ_z の応力分布。

て解析モデルの寸法が小さく、またロール寸法での熱処理過程における応力発生、変化に関する報告は見当たらない。すなわち、圧延用ロールに対しては冷間帯鋼圧延用の鍛鋼製ロールの研究例があるものの¹²⁾、残留応力に直結する焼入れ・焼戻し条件が熱間圧延ロールに比較して短時間で、かつ加熱・冷却方法も異なる。特に、本研究で対象としている内層と外層に異なる材料を用いる複合ロールにおいては、シミュレーションのために物性値を新たに計測する必要性があり、その量が膨大となるほか、シミュレーション精度に対する疑問からこれまでに解析がなされてこなかった。本稿では、残留応力発生過程を調べて、熱処理により生じる単一材ロールモデルにおける残留応力発生メカニズムを説明する。

熱処理により生じる単一材ロールモデルにおける残留応力発生メカニズム

複合ロールの解析に入る前に、ここではまず図2に示すダクタイル材を用いた単一材ロールを想定して、焼入れ過程における残留応力発生の基本メカニズムを考察する。簡単のためにロールモデルではロール軸を省略し、変態も無視している。

図3は単一ロール半長の軸対称モデルで、表面温度を焼入れ開始温度 T_{Start} °Cから室温 T_{Finish} °Cに到るまでの軸断面でみた軸方向応力 σ_z の分布であり、その求め方は次節で述べるのでここでは省略する。この σ_z の応力分布によると、ロール長さ中央断面 $z=0$ 付近の応力は、表面 $r=300$ mm で圧縮応力であり、中心 $r=0$ では、引張応力となる。これらの応力は、どちらもロール中央断面 $z=0$ で最も大きい。また、ロール製造中および使用中のロール破壊は軸方向応力 σ_z が原因となって生じることが多い。このような理由により、以下ではロールの残留応力分布を長さ方向中央断面 $z=0$ で代表させ、軸方向応力 σ_z を中心に議論する。

図4に単一材ロールの残留応力発生メカニズムを示す。実際の焼入れ時の温度変化と異なり、ここでは応力変化を分かりやすくするために緩やかな温度変化を用いている。また、材料物性値は本研究に用いた内層材の値をベースにしている。図4(a)の実線に示すようにロール表面温度を焼入れ開始温度 T_{Start} °Cから室温 T_{Finish} °Cまで冷却させる。図4(a)の冷却過程に対応させて図4(b)は軸方向応力 σ_z の時間変化、図4(c)は縦弾性係数の時間変化を表したものである。また、本稿での縦弾性係数は引張試験による応力ひずみ線図のひずみが0.05%に対応する応力と原点を結んだ直線の勾配と定義する。ここで、図4で区分したそれぞれの範囲は、

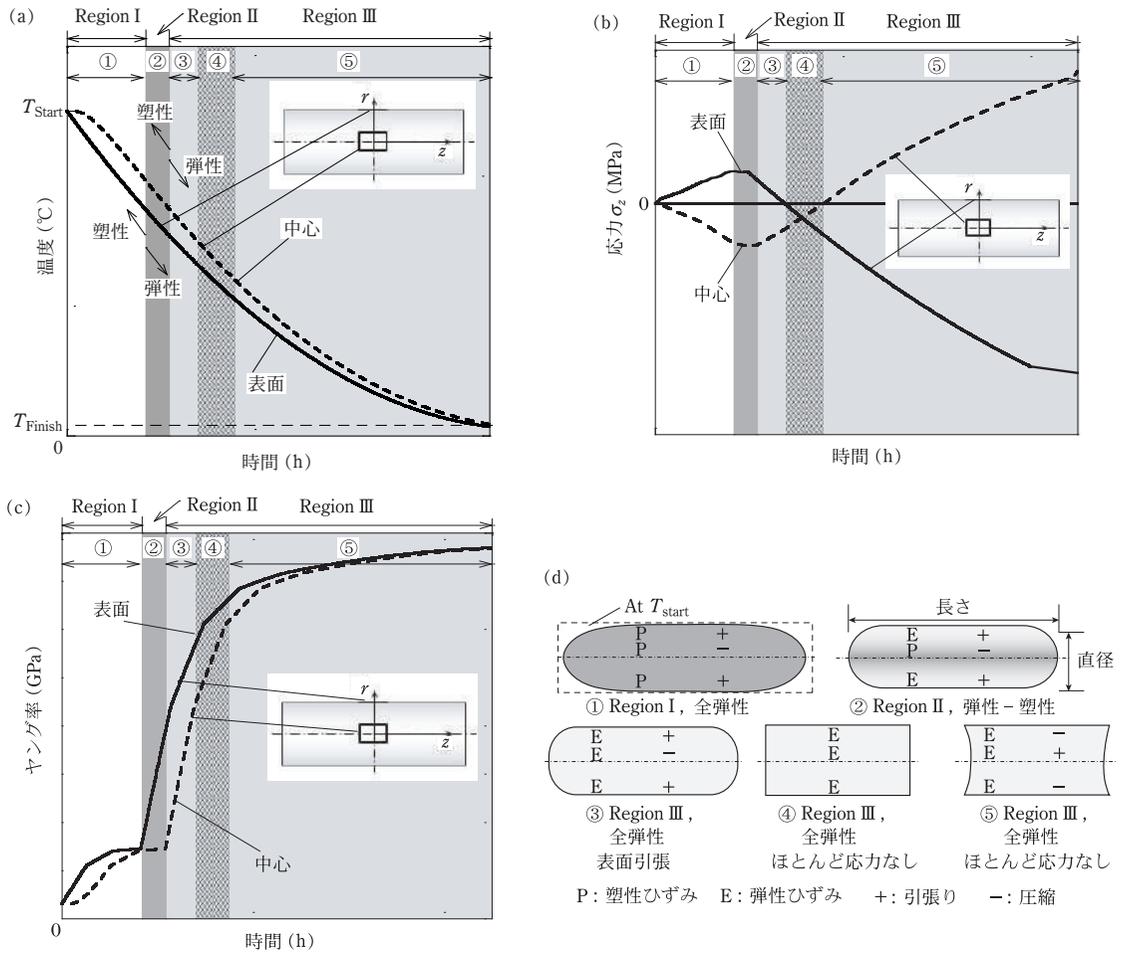


図4 単一材ロールの残留応力発生メカニズム。(a) 中央と表面の温度、(b) 中央と表面の応力 σ_z 、(c) 中央と表面のヤング率、(d) 単一材ロールの変形状態。

図4(c)に示す縦弾性係数の時間変化, すなわち縦弾性係数の温度による変化に基づくものである。

表面・中心ともに低い弾性係数の領域を Region I, 表面で大きくなる領域を Region II, 表面・中心ともに大きくなる領域を Region III とし, それぞれをロール全域が塑性, 弾塑性, 弾性と概念上区分する。なお, ここでは領域区分のために縦弾性係数を用いているが, 降伏点(耐力)を用いても同様のことがいえる。図4(d)は冷却開始後の各範囲①~⑤におけるロール中心から表面にかけての応力とひずみの状態を簡易的に表した概念図である。

Region I では, 表面が急速に冷却され表面の収縮量大きい。中心は表面よりも温度低下が小さく収縮量も小さいため圧縮応力, 表面に引張応力が発生する。

Region II では, 表面が弾性状態となり剛性が増す一方, 内部はまだ高温であるため, 表面の弾性状態と中心部の塑性状態が混在する。この状態では, 高剛性で弾性状態にある表面の拘束を受けて塑性状態にある中心が収縮していくことで, 内外の歪差が小さくなり表面および中心の応力上昇が止まる。

Region III では, 中心の収縮量が表面よりも大きいためさらに内外の歪差が小さくなり応力が減少する(③)。冷却が進むと, 中心から表面において収縮による変形量がほぼ等しくなり, 応力状態が入り替わる(④)。また内部が表面よりも高温であるため, 表面に比べて温度変化が大きく, 中心

の熱収縮量が表面より大きくなることで, 中心の引張応力が増加していき相対的に収縮の小さい表面側は圧縮応力が増加していく(⑤)。この過程で中心と表面応力が交差し, 表面が圧縮, 中心が引張応力となり, Region I と応力状態が入り替わる。そして, 図4(c)に示すようにロール全体の剛性が大きくなるので応力が増大し, 最終的に表面では圧縮, 中心では引張りの残留応力が生成する。

複合ロールの焼入れ条件 (均一加熱焼入れ)

図1に示した解析対象の複合圧延ロールは, 胴体直径 600 mm, 外層厚 75 mm, 胴長 1600 mm で, 外層はハイス材, 内層および軸にはダクタイル材を用い, 遠心力铸造法にて製造される。

図5は残留応力が生じる熱処理工程を示し, ロール表面温度の実測値を模式化したものである。図5に示すように, ロールには焼入れ処理と焼戻し処理が施され, この過程で残留応力が生成する。

均一加熱焼入れ過程では, 雰囲気, ロール表面温度ともに T_{Start} °C になるように均一加熱し, 一定時間保持後に冷却を開始する。冷却途中でロール表面温度を T_{Keep1} °C に保持する。この温度保持は, 焼入れによる表面温度の急速低下に伴う熱応力増大を防ぐことを目的としている。その後, T_{Finish} °C まで徐冷する。この状態における応力を, 中間残留応力と呼ぶが, 本論ではこの応力を残留応力と

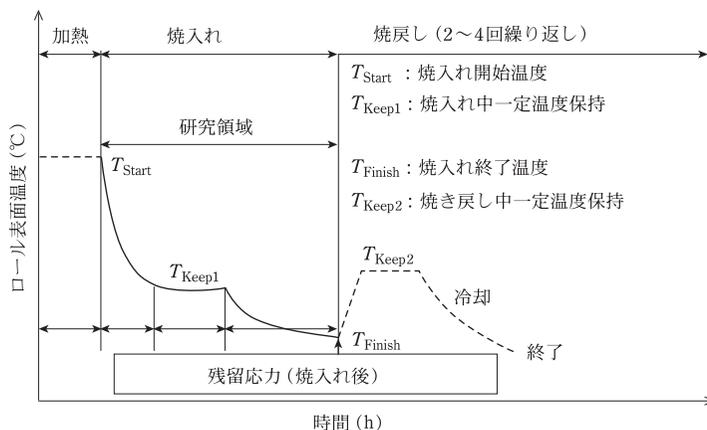


図5 残留応力が生じる熱処理工程
(均一加熱焼入れ)。

して扱う。ついで、焼戻し処理ではロールを炉中で T_{Keep2} °Cまで加熱し一定時間保持した後、炉中で徐冷却する。

複合ロールの残留応力シミュレーション結果と高温試験における試験片温度履歴の重要性

図6は外層材の試験温度600°Cで行った昇温過程と降温過程の引張試験の結果である。ここで、昇温過程とは常温から600°Cまで加熱した条件で、降温過程とは焼入れ熱処理と同様、一度 T_{Start} °Cまで加熱した後600°Cまで冷却保持した条件で、それぞれ試験したものである。一般的な高温引張試験は昇温過程の条件であるが、図6に示す600°Cの例で両者の同一ひずみにおける応力を比較すると最大で67%の差があるため、本研究では実体ロールと同様の条件に相当する降温過程の応力ひずみ線図と線膨張係数を採用する。

図7は焼入れ終了温度 T_{Finish} °Cにおけるロール軸断面の軸方向応力 σ_z の分布である。ロール長さ中央断面付近の応力は、端面や軸部の影響を受けず、内層中心で最大引張応力を示し、外層で最大圧縮応力を示す。また図7(a), (b)を比較すると高温試験片温度履歴による大きな違いは見られない。

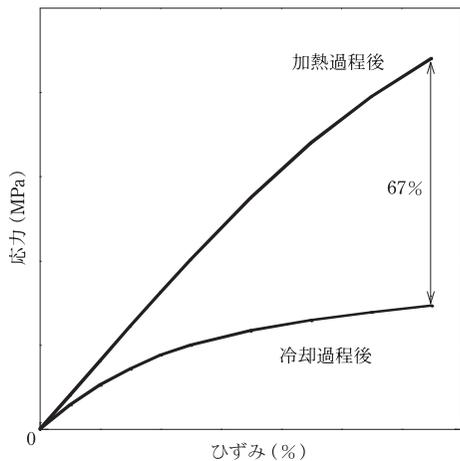


図6 外層材の試験温度600°Cで行った昇温過程と降温過程の引張試験の結果。

なお、応力分布状態は使用中のロール破壊が多くの場合ロール長さ中央断面付近で生じることと一致する。

図8には長さ中央断面における軸方向の残留応力 σ_z の分布を示す。図に示すように、実体に近い焼入れ温度からの降温過程における所定温度で得られた引張試験データを使用した結果は、昇温過程のデータを使用した場合よりも中心で15%、表面で27%低下し、これまでに公表されたハイスロール(ただし軸材は合金鋼)の残留応力¹³⁾に近づく傾向が見られた。そのため、降温過程のデータ

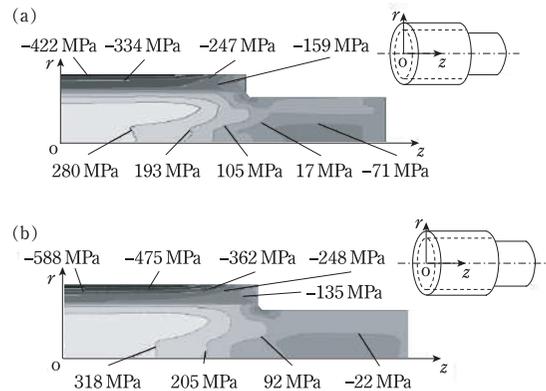


図7 焼入れ終了温度におけるロール軸断面の軸方向応力 σ_z の分布。(a) 加熱工程の応力分布、(b) 冷却工程の応力分布。

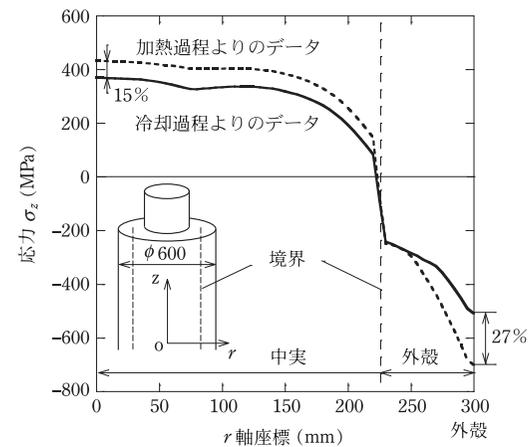


図8 加熱-冷却工程から得られた軸方向の残留応力 σ_z の分布。

を用いることの必要性が明らかとなった。しかし、降温過程を用いた残留応力でも中心で 368 MPa、表面で -510 MPa とこれまでの残留応力よりもまだ大きな値である。その理由として焼戻しによる応力低下が考慮されていないことや内層材の違いなどが考えられる。

焼入れにより生じる複合ロールの残留応力発生メカニズム

前節は残留応力分布の解析結果を説明した。ここでは、焼入れ開始から終了までの全過程における応力変化を、単一材ロールの考察(「熱処理により生じる単一材ロールモデルにおける残留応力発生メカニズム」の節)を基に内外層で材料特性の異なる複合ロールについて、変態の影響を加味して考察する。

図 9 (a) に残留応力 σ_z が生成する焼入れ過程におけるロール表面と中心における温度の時間変化を示す。図 9 (b) は応力変化、図 9 (c) はロール表面と中心における縦弾性係数の時間変化である。まず、ロール全体を炉中で T_{Start} °C に加熱・保持してロールを均一加熱した後ロール表面を冷却していく。冷却初期には外層部の冷却収縮により引張応力が増加するが、温度 T_{EP} にて表面応力が引張側から圧縮側へと大きく変化している。これは中心部の熱収縮量が表面よりも大きいので中心の圧縮応力が減少し、これに釣り合うため表面には圧縮応力が増える。その結果、表面応力が減少に転じることによるものと考えられる。温度 $T_{Pearlite}$ で内層にパーライト変態(膨張)が現れ、これが内層境界から中心に向かって進む。呼応して、中心の圧縮応力が一旦小さくなるが、その後中心における変態膨張で圧縮応力が増加する。

Region III では、中心部と表面の応力状態が入れ替わり、中心の温度変化の方が大きいので、内層がさらに収縮して引張応力、外層が圧縮応力になり、 T_{Keep1} 温度保持まで徐々に大きくなって行く。 T_{Keep1} では表面から中心にかけて温度差がなくなるために収縮量の差が小さくなり中心の引張、表

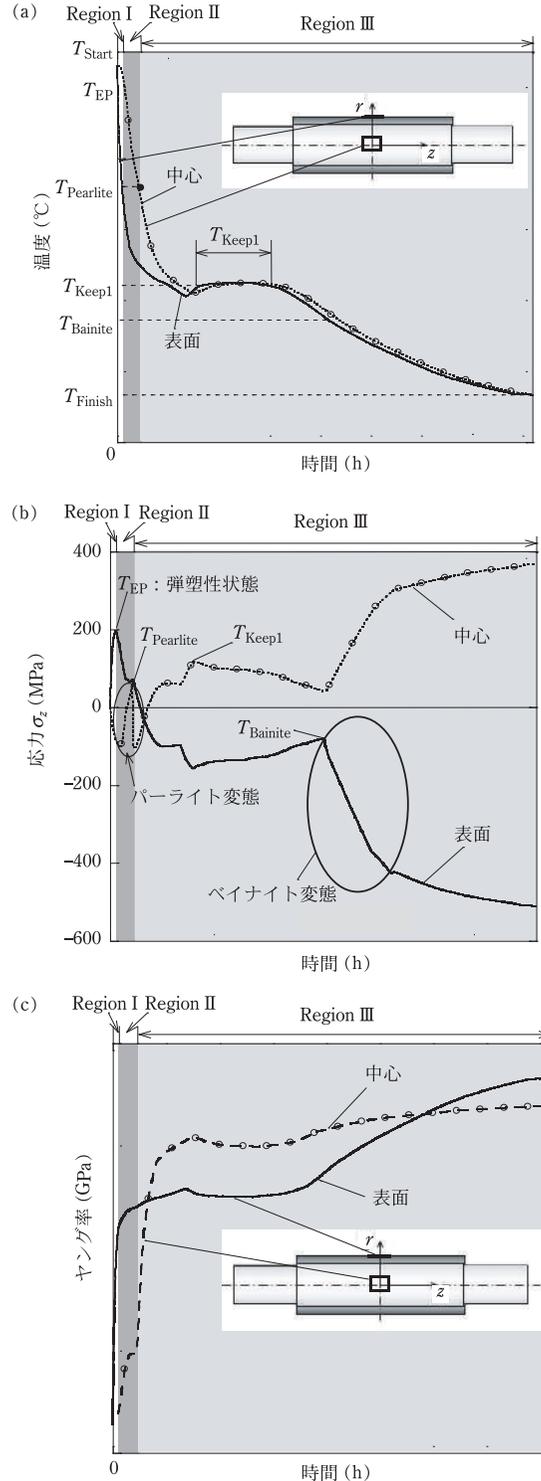


図 9 複合ロールの残留応力 σ_z の発生メカニズム。(a) 中央と表面の温度、(b) 中央と表面の応力 σ_z 、(c) 中央と表面のヤング率。

面の圧縮，それぞれの応力は小さくなっていく。表面が温度 T_{Bainite} でベイナイト変態が生じると，表面が膨張して圧縮応力は大きくなる。中心の引張応力は外層とバランスを取るため，大きくなる。外層のベイナイト変態終了後の冷却過程においては，中心の熱収縮が相対的に大きいことと，温度が下がることにより弾性係数が大きくなるので，内外層とも徐々に応力が増大する。

参考文献

- 1) 佐野義一：第 148・149 回西山記念技術講座，(1993)，193-226.
- 2) 佐野義一：塑性と加工，**39**-444 (1998)，2-6.
- 3) 小泉哲弥，松枝邦明：鉄と鋼，**67**-12 (1981)，426.
- 4) G. Sachs：Zeit Metallkunde，**19** (1927)，352.
- 5) 東田康宏，菊間敏夫，川並高雄，木村和夫：鉄と鋼，**72**-4 (1986)，308.
- 6) Y. Sano, T. Hattori and M. Haga: ISIJ Int., **32**-11 (1992)，1194-1201.
- 7) 阪部喜代三：日本製鋼所技報，**26** (1969)，3044-3052.
- 8) 坂井一男：鉄と鋼，**60**-12 (1974)，1591-1598.
- 9) 井上達雄，原口賢一，木村茂人：材料，**25**-273 (1976)，521-526.
- 10) 磯村良蔵：鉄と鋼，**47**-7 (1961)，936-950.
- 11) 有本享三：熱処理変形と残留応力，http://www.arimotech.com/Documents/Heat_Treating_Distortion_and_Residual_Stresses-II-2011-8-11.pdf, (2011).
- 12) 望月俊男，浦川俊吉，藤沼平一，茅野寛奈：三菱製鋼技報，**26**-1・2 (1992)，17-22.
- 13) O. Shitamura, H. Kodama, Y. Sano: New High-Performance Composite Roll, Hitachi Review, **39** (1990)，231-238.

のだ・なおあき NODA Nao-Aki

1984 九州大学大学院工学研究科機械工学専攻博士課程修了。九州工業大学工学部講師・助教授を経て，現在教授。焼嵌め式ローラや特殊ボルト等の産学連携に関する研究に従事。日本設計工学会論文賞受賞。日本機械学会フェロー。自動車技術会フェロー。2019-2021 日本材料学会九州支部長。

さの・よしかず SANO Yoshikazu

1967 九州大学大学院機械修了。日立金属㈱入社。1992 技師長。1996 九州大学より博士(工学)授与。学術研究員。九州工業大学支援研究員を経て㈱ホーシン技術顧問。焼嵌め式ローラの構造設計に関する研究に従事。(公社)日本設計工学会 2019 年度論文賞受賞。

たかせ・やすし TAKASE Yasushi

1985 九州工業大学技術職員。1993 同工学部設計生産工学科夜間主コース卒業。2002 技術専門職員。2007 「任意寸法の試験片に対して正確な応力集中係数を与える計算式に関する研究」で博士(工学)。2020 年度日本塑性加工学会教育賞受賞。

ほった・げんじ HOTTA Genji

1979 九州工業大学卒業。㈱日鉄エレックスを経て 2008 有明工業高等専門学校機械工学科教授。2012 熊本大学より博士(工学)授与。2019 より九州工業大学客員教授，2021 西日本工業大学客員教授。日本技術士会ものづくり部会長。2021 年度技術士功労章受章。