

複合圧延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¹⁾ 佐野 義一²⁾ 王 旭³⁾ 中川 雄策⁴⁾ 管 文海⁵⁾ 小野 騰⁶⁾ 胡 可軍⁷⁾

Residual Stress Simulation and Generation Mechanism for Hot Strip Composite Roll during the Quenching

Nao-Aki Noda Yoshikazu Sano Xu Wang Yusaku Nakagawa Wen-Hai Guan Katsuma Ono Kejun Hu

FEM simulation is performed during quenching process to investigate the generation mechanism and control the residual stress distribution for composite rolls. A large number of experimental data of shell and core materials are utilized for the wide range of temperature considering the quenching process. The results verify that initially the tensile stress appears at the roll surface but finally the compressive stress occurs. Furthermore, the effect of shell-core cross sectional ratio on the residual stress is considered. The results show that the residual stress only slightly increases with increasing the shell-core ratio.

KEY WORDS: Production • Manufacture, Forming Process, Material/Cost, Residual Stress, Rolling, Tool Steel, Elastic-Plastic FEM, Simulation, Heat Treatment (D4)

1. 緒 言

自動車用鋼板を中心に用いられる材料特性の高強度、寸法形状の高精度化への要求は依然として強い。したがって、その生産に用いられる主要工具である圧延ロール、中でも熱間圧延用ロールに対する品質要求、耐摩耗、耐事故性の向上は鉄鋼メーカーとロールメーカー双方の課題である。

ところで、熱間圧延用ロールにおいて耐摩耗性とこれに関連する耐肌あれ性に関する研究は多く、ハイスロールの開発により長足の進歩がえられた。しかし、耐事故性の中でも残留応力に強い相関をもつ胴折れ等の内部破壊に関しては、十分に説明されてきたとは言えない。その最大の課題はロール中心部の応力を把握できていないことにある。

熱間帯鋼圧延ロールは、ロール中心部が強靱で、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℃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、ロール回転毎の加熱・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

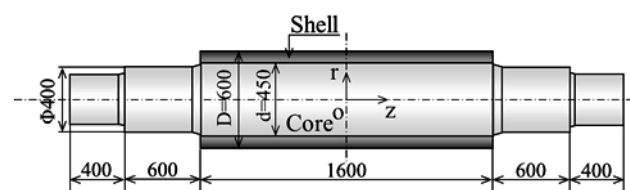


Fig.1 Model of the hot strip composite roll (mm)

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 $D=600\text{mm}$ 、外層厚さ 75mm 、内層直径 $d=450\text{mm}$ 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係りは少なくないため、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る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

*2015年2月3日受理。

1)・2)・3)・4)・5)・6)・7) 九州工業大学(804-8550 福岡県北九州市戸畑区仙水町1-1)

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. 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.

本研究では, 残留応力発生の過程を明らかにし, シミュレーション精度を向上させるために, 初めに複合ロールを対象に焼入れ過程に生じる残留応力の解析を行う. また, 複合ロールにおいて重要なパラメータとして考えられる外内比の残留応力への影響についても考察する.

2. 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 $T_{\text{Start}}^{\circ}\text{C}$ から室温 $T_{\text{Finish}}^{\circ}\text{C}$ に到るまでの軸断面でみた軸方向応力の分布であり, その求め方は本研究の方法に準じるが詳細は次章で述べるのでここでは省略する. この応力分布によるとロール長さ中央断面 $z=0\text{mm}$ 付近の応力は, 表面 $r=300\text{mm}$ で圧縮応力, 中心 $r=0\text{mm}$ で引張応力となり, どちらもロール中央断面で最も高いことが分かる. また, ロール製造中及び使用中のロール破壊は軸方向応力が原因となることが多い. 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で代表させ, 軸方向応力を中心に議論する.

図 4 に単一材ロールの残留応力発生のメカニズムを示す. 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. なお, 図 4 ならびに以下に示す図 7, 図 8, 図 11 では解析に用いている材料は一般に公表されず, メーカーの独自なものである. そのため, 化学成分, 溶解法, 鋳造 (成形) 条件および, 熱処理, 材料特性などすべて業界の慣例として, 共同研究先メーカー独自の極秘事項となっており, 特に高温特性は高度な秘密扱いにされている. このような理由で高温特性に関するこれらの図では縦軸と横軸の数値を記載していない. 本論文ではシミュレーション技術を確立するとともに数値解析に基づく残留応力の生成メカニズムを詳細に述べてい

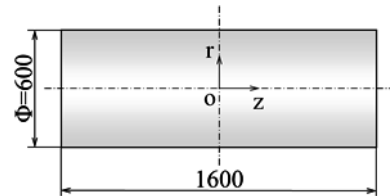


Fig.2 Model of the hot strip composite roll (mm)

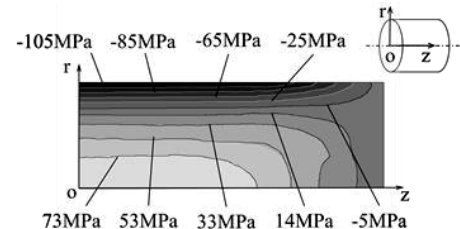


Fig.3 Stress distribution σ_z for single material roll after quenching

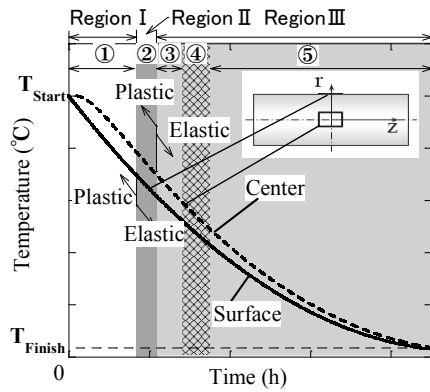
るため, 材料特性そのものの開示がなくても, 論文の目的とするところは理解頂けると考えている.

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 $T_{\text{Start}}^{\circ}\text{C}$ から室温 $T_{\text{Finish}}^{\circ}\text{C}$ 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, 本論文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 (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・中心共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・中心共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.

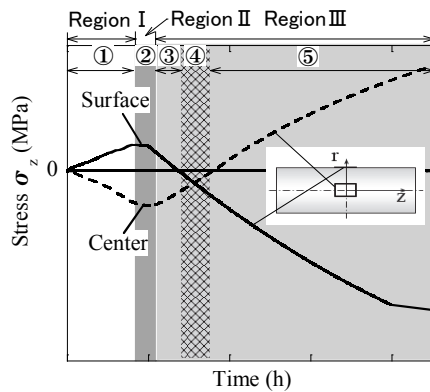
Region I では, 表面が急速に冷却され表面の収縮量が多い. 中心は表面よりも温度低下が小さく収縮量も小さいため圧縮応力, 表面に引張応力が発生する.

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, 内外のひずみ差が小さくなり表面及び中心の応力上昇が止まる.

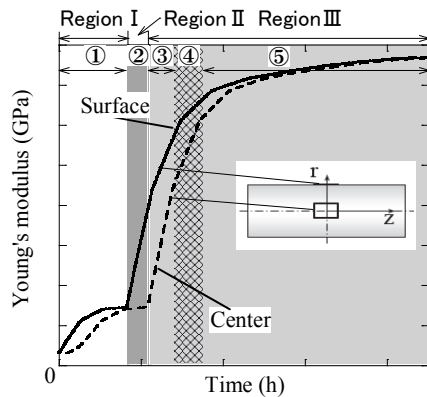
Region III では, 中心の収縮量が表面よりも大きいことさらに内外のひずみ差が小さくなり応力が減少する (③). 冷却が進むと, 中心から表面において収縮による変形量がほぼ等



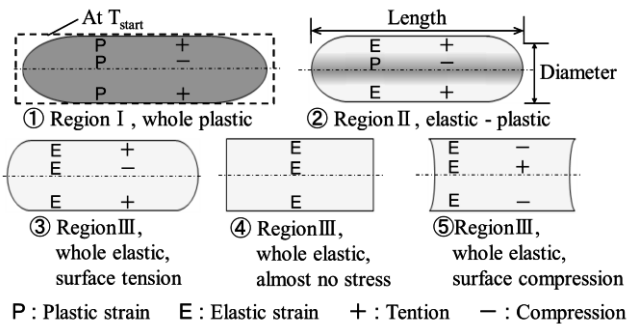
(a) Temperature at center and surface



(b) Stress σ_z at center and surface



(c) Young's modulus at center and surface



(d) Deformation state for the single material rolequenching

Fig.4 Residual stress generation mechanism for single material roll

しくなり、応力状態が入れ替わる (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 と応力状態が入れ替わる. 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.

3. 複合ロールの焼入れ条件とその解析方法

図 1 に示した解析対象の複合圧延ロールは、胴体直径 600mm、外層厚 75mm、胴長 1600mm で、外層はハイス材、内層及び軸にはダクタイル材を用い、遠心力鑄造法にて製造される. 参考までに、公表されている外層ハイス材の化学成分⁽²⁾ および、内層ダクタイル材の化学成分⁽¹³⁾ をそれぞれ表 1 に示す. また、常温の外層材 (HSS) と内層材 (DCI) の物性値を表 2 に示す.

Table 1 Chemical compositions of high speed steel and ductile iron for high speed steel type roll (mass%)

Composition	C	Si	Mn	P	S	Ni
HSS	1~3	<2	<1.5			<5
DCI	2.5~4	1.5~3.1		<0.1	<0.1	0.4~5

Cr	Mo	Co	V	W	Mg
2~7	<10	<10	3~10	<20	<10
0.01~1.5	0.1~1				0.02~0.08

Table 2 Mechanical properties for shell and core at room temperature

Property	Shell	Core
0.2% proof stress (MPa)	(1282) ^{*1}	415
Young's modulus (GPa)	233	173
Poisson's ratio	0.3	0.3
Density (kg/m ³)	7.6	7.3
Thermal expansion coefficient (K ⁻¹)	12.6×10 ⁻⁶	13.0×10 ⁻⁶
Thermal conductivity (W/(m·K))	20.2	23.4
Specific heat (J/(kg·K))	0.46	0.46

*1 Tensile strength of the shell material is indicated as the 0.2% proof stress because the deformation at break is small .

また、複合ロールは外層と内層の材料が異なり、それらの構成比率により、ロールとしての特性が左右されるため、外内比が注目される. 外内比としてここではロール外層の断面積 A_s をロール内層の断面積 A_c で除した値 A_s / A_c をとり、式 (1) で表す.

$$\frac{A_s}{A_c} = \frac{D^2 - d^2}{d^2} \quad (1)$$

ロールは1回使用毎に一定量摩耗すると、摩耗を除外するため胴部が修正研磨される。これを繰り返して所定の外層厚さまで使用される。したがってロール直径が同じ場合、外内比を大きくすると外層厚さが増すため、ロール一本あたりの寿命を向上させることができる。一方では、大きな外内比では内層の引張残留応力が高くなることが経験的に知られており、製造・使用上内層からの破壊リスクが増すため、外内比の適正化は複合ロール設計課題の一つである。

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。焼入れ加熱過程では、雰囲気、ロール表面温度共に T_{Start} ℃になるように加熱し、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} ℃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} ℃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して扱う。ついで、焼戻し処理ではロールを炉中で T_{Keep2} ℃まで加熱し一定時間保持した後、炉中で徐冷却するが、本論文では対象外である。

図6に示すように、解析モデルはロール半長の軸対称で、5mm×5mm メッシュで分割し、熱弾塑性有限要素法 (FEM) MSC.MARC/MENTAT 2012 を用いて解析する。焼入れにおける冷却では、図5に示す表面温度 T_{Start} ~ T_{Finish} を与える。ここでは焼入れ中のロールで実測された表面温度を与えて解析するが、必要に応じて雰囲気温度を与え、実測表面温度変化が表現できるように熱伝達係数 α (ふく射の効果も含む) を求めて解析することもできる。算出した熱伝達係数 α を模式的に図7に示す。材料特性として、内層材、外層材の T_{Start} から T_{Finish} にわたる一定間隔の温度において測定された物性値 (弾性係数、熱膨張率、比熱、密度、応力-歪み特性、熱伝導率、ポアソン比) を入力して、境界条件を設定し弾塑性有限要素法解析を行う。ここで、相変態の影響は各物性値に含める。なお、解析精度への影響が予想された材料特性については、試験条件の違いによる影響を検討した。

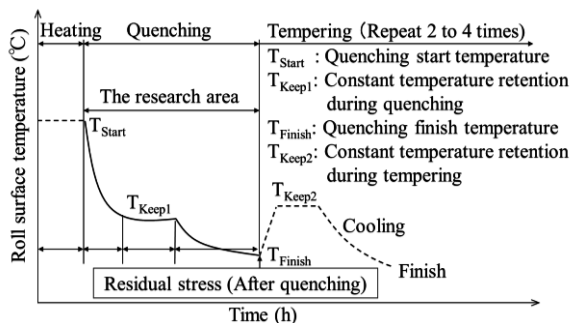


Fig.5 Heat treatment processes

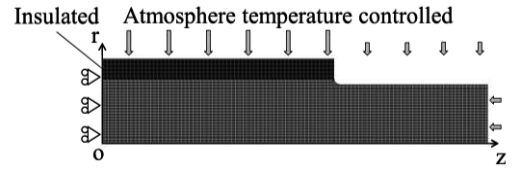


Fig.6 Boundary condition for composite roll

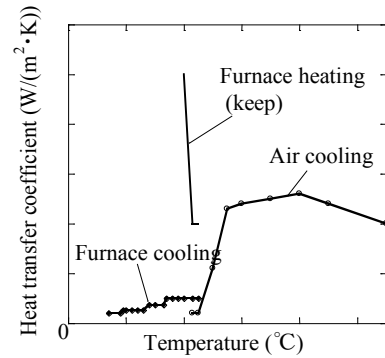


Fig.7 Heat transfer coefficients used for analysis

4. 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8は外層材の試験温度 600℃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℃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} ℃まで加熱した後 600℃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8に示す 600℃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。

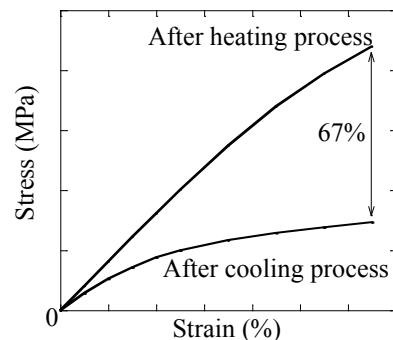
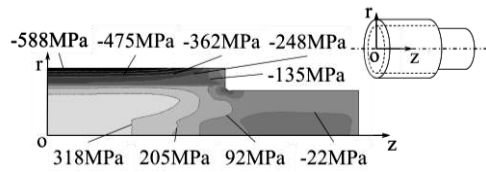


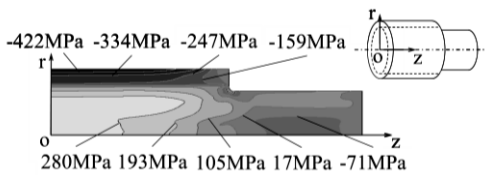
Fig.8 Stress and strain relations for the shell material at 600℃ obtained after cooling from higher temperature and obtained after heating from lower temperature

図9は焼入れ終了温度 T_{Finish} ℃におけるロール軸断面の軸方向応力分布である。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、外層で最

大圧縮応力を示す。また図 9 (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。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。



(a) Obtained from the heating process data



(b) Obtained from the cooling process data

Fig.9 Stress distribution σ_z after quenching

図 10 には長さ中央断面における軸方向の残留応力分布を示す。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⁽¹⁴⁾に近づく傾向が見られた。そのため、降温過程のデータ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 368MPa、表面で 510MPa 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ないことや内層材の違いなどが考えられる。なお、図 10 の昇温過程のデータを使用した場合における中心の残留応力 σ_z は 430MPa で表 2 の 0.2%耐力 415MPa を超えているが、これは 3 軸応力の影響である。

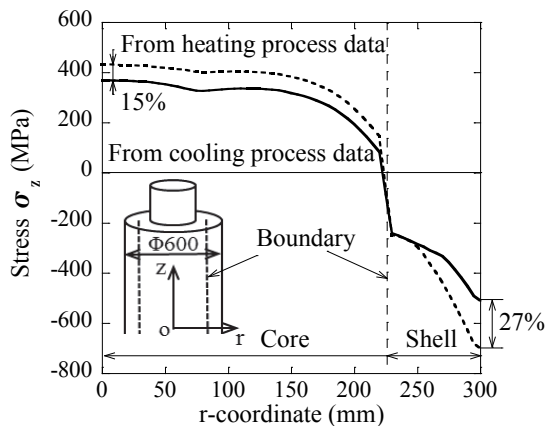


Fig.10 Residual stress distributions σ_z obtained from the data during heating and cooling process

5. 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

前章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（2 章）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。

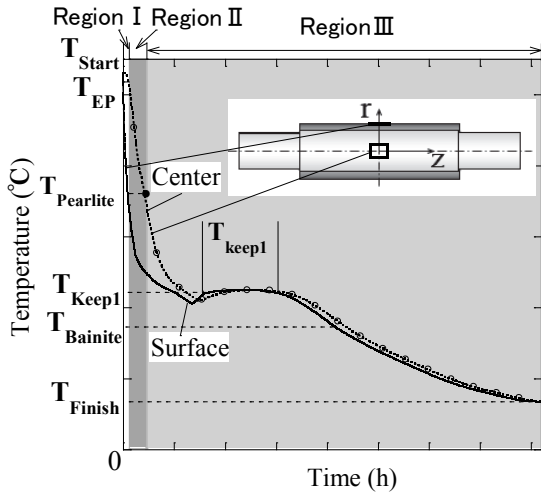
図 11 (a) に残留応力が生成する焼入れ過程におけるロール表面と中心における温度の時間変化を示す。図 11 (b) は応力変化、図 11 (c) はロール表面と中心における弾性係数の時間変化である。まず、ロール全体を炉中で T_{Start} ℃に加熱・保持してロールを均熱した後ロール表面を冷却していく。冷却初期には外層部の冷却収縮により引張応力が増加するが、温度 T_{EP} にて表面応力が引張側から圧縮側へと大きく変化している。これは中心部の熱収縮量が表面よりも大きいことため中心の圧縮応力が減少し、これに釣り合うため表面には圧縮応力が増える。その結果、表面応力が減少に転じることによるものと考えられる。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。

RegionIII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いく。 T_{Keep1} では表面から中心にかけて温度差が無くなるために収縮量の差が小さくなり中心の引張、表面の圧縮、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値が大きくなるので、内外層とも徐々に応力が増大する。

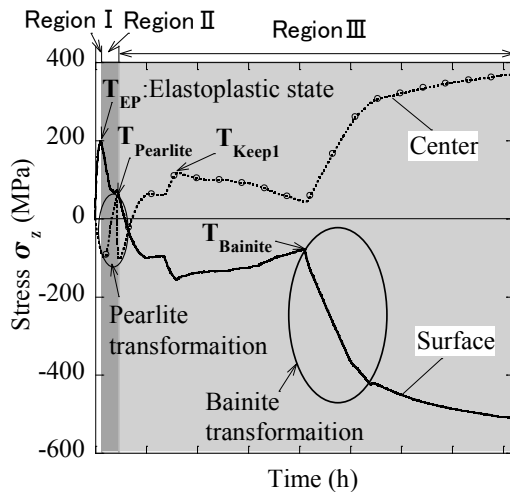
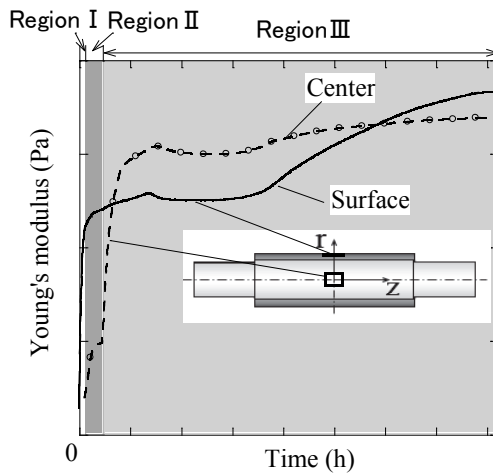
6. ロール残留応力に及ぼす外内比の影響

図 12 は中心から表面までの残留応力分布を模式的に表した図である。焼入れ後における外層の圧縮応力と内層の引張応力は釣り合っており、外内比が大きくなると外層の圧縮応力範囲が増加するため中心の応力が増加し、中心からの破壊リスクが増大すると考えられている。そのため、外内比は重視されている。

図 13 に直径 600mm を一定として外内比を変化させて求めた残留応力の結果を示す。実際に多く使用される外内比 0.4～0.6 を中心に、ここでは外内比による影響を顕著に見るために 0.2 と 0.8（図 1 のモデル）の結果も示している。解析にあたり、焼入れ時のロール表面温度変化を内外比によらず同一とする。外内比を 0.2 から 0.8 に変化した場合に増加が懸念される内層中心の残留応力に注目すると 9%の増加しか見られ



(a) Temperature at center and surface

(b) Stress σ_z at center and surface

(c) Young's modulus at center and surface

Fig.11 Residual stress generation mechanism for composite material roll

ない。また、実用上の外内比0.4~0.6での残留応力の増加は2%に留まっており、外内比の残留応力に及ぼす影響はさほど大きくないことが明らかとなった。

外内比による影響が従来考えられていた程度よりも小さい結果がえられた理由は次のように考えられる。図14に解析結果の残留応力分布を模式的に表した図を示す。これまでの経験からは図12のように外層の残留応力は均一分布に近いと考えられていた。この場合、外内比を大きくすると外層の圧縮応力値は変わらずその範囲が増加し、外内の力の釣り合いから内層応力が大きく増加することになる。しかし、今回の解析による応力分布をみると図14のように外層の圧縮応力は表面から内部にかけて急激に減少し、しかも圧縮応力の範囲は外層厚さによらずあまり変わらない。そのため、外内比の増加に対して外層の圧縮応力の増加量が従来の推定に比べ小さくなり、中心の応力に及ぼす影響が小さくなったと考えられる。このように考えると、外層の圧縮応力分布形体によって外内比の変化に伴う内層残留応力への影響が異なってくることが予想される。

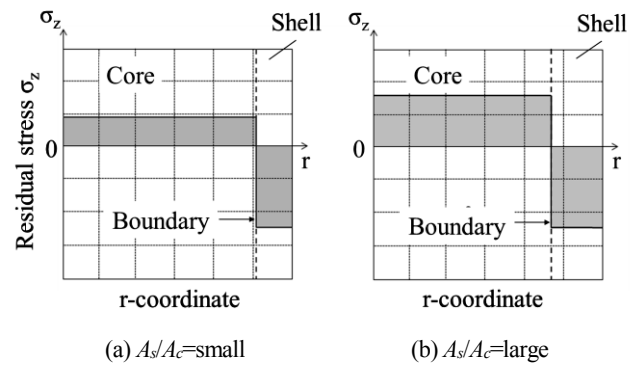
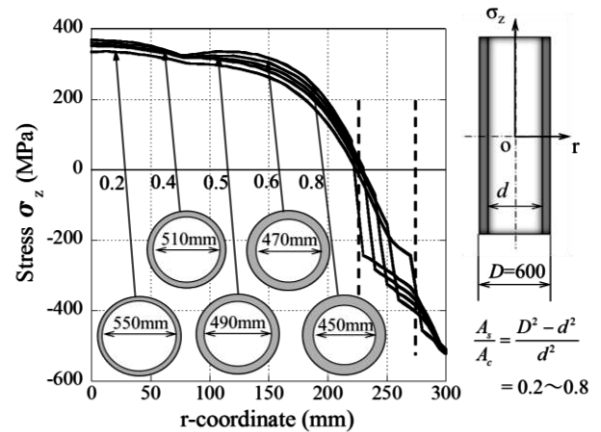


Fig.12 Residual stress distributions conventionally estimated

Fig.13 Residual stress distribution for different A_s/A_c under the same diameter $D=600\text{mm}$

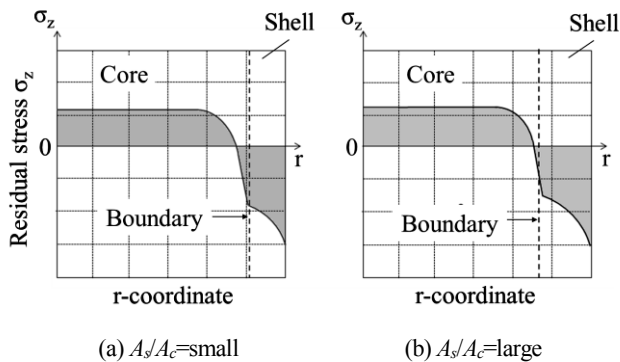


Fig.14 Residual stress distribution newly analyzed

7. 結 言

熱間圧延用複合ロールを構成する外層ハイス材・内層ダクタイル鉄各材質の常温から高温域までの特性を実験により求め、焼入れ時の冷却条件を与えて、弾塑性応力解析を行った。以下に得られた結果をまとめる。

(1) 焼入れによって得られる複合ロールの残留応力分布をシミュレーションにより明らかにすることができた。

(2) 外内比を大きくすると中心の残留応力は、実用的な外内比範囲 0.4~0.6 では最大 2% の増加で、従来考えられていた程度より小さいことが分かった。外内比の増加によって焼入れ後のロール中心からの破壊リスクは小さいことを示唆するもので、新たな知見である。

(3) 焼入れによって生じる残留応力の生成過程を焼入れ開始から終了までの全工程にわたる応力変化で示し、そのメカニズムを説明した。

なお、シミュレーションで得られた残留応力は、公表されたハイスロールの残留応力⁽¹⁴⁾より大きな値であった。その理由は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ので今後検討する予定である。

謝 辞

本研究には日立金属株式会社からの種々の情報提供、ならびに貴重な助言を頂きました。心よりお礼申し上げます。また、研究の一部は九州工業大学大学院知念秀作氏の助力を得ました。深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 佐野義一：第 148・149 回西山記念技術講座，p. 193-226 (1993)
- (2) 佐野義一：塑性と加工，Vol. 39, No. 444, p. 2-6 (1998)
- (3) 小泉哲弥・松枝邦明：鐵と鋼，Vol. 67, No. 12, p. 426 (1981)
- (4) G. Sachs：Zeit Metallkunde, No. 19, p. 352 (1927)
- (5) 東田康宏・菊間敏夫・川並高雄・木村和夫：鐵と鋼，Vol. 72, No. 4, p. 308 (1986)
- (6) Sano, Y., Hattori, T. & Haga, M.：ISIJ Int., Vol. 32, No. 11, p. 1194-1201 (1992)
- (7) 阪部喜代三：日本製鋼所技報，No. 26, p. 3044-3052 (1969)
- (8) 坂井一男：鐵と鋼，Vol. 60, No. 12, p. 1591-1598 (1974)
- (9) 井上達雄・原口賢一・木村茂人：材料，Vol. 25, No. 273, p. 521-526 (1976)
- (10) 磯村良蔵：鐵と鋼，Vol. 47, No. 7, p. 936-950 (1961)
- (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，Vol. 26, No. 1・2, p17-22 (1992)
- (13) 日立金属株式会社：熱間圧延用遠心铸造複合ロール及びその製造方法，W02013042528 A1, 2013-3-28. (2013)
- (14) O. Shitamura, H. Kodama, Y. Sano：New High-Performance Composite Roll, Hitachi Review No. 39, p. 231-238 (1990)