

複合圧延ロールの焼入れ過程における 残留応力に及ぼす内外比の影響

野田 尚昭・佐野 義一・高瀬 康・堀田 源治

はじめに

ロールは1回使用ごと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、内外比 A_s/A_c (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) を大きくすると外層厚さが増すため、ロール1本あたりの寿命を向上させることができる。一方では、大きな内外比 A_s/A_c 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、内外比 A_s/A_c の適正化は複合ロール設計課題の一つである。

ロールの外層材 (HSS) と内層材 (DCI)

図1に示した解析対象の複合圧延ロールは、胴

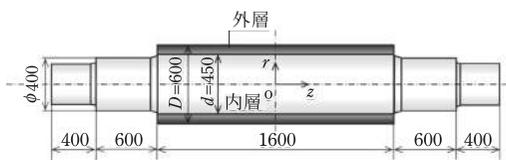


図1 熱間帯鋼圧延ロール。

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、遠心力鋳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¹⁾ および、内層ダクタイル材の化学成分²⁾ 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。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、内外比 A_s/A_c に注目する。内外比 A_s/A_c 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。

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

表2 常温の外層材 (HSS) と内層材 (DCI) の物性値。

物性値	外層	内層
降伏応力 (MPa)	835	294
ヤング率 (GPa)	233	173
ポアソン比	0.3	0.3
密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7.6	7.3
熱膨張係数 (K^{-1})	12.6×10^{-6}	13.0×10^{-6}
熱抵抗 ($\text{W}(\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)	20.2	23.4
比熱 ($\text{J}(\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$)	0.46	0.46

表1 遠心力鋳造法にて製造されたロールの外層ハイス材の化学成分¹⁾ および、内層ダクタイル材の化学成分²⁾。

成分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	V	W	Mg
ハイス材	1~3	<2	<1.5			<5	2~7	<10	<10	3~10	<20	<10
ダクタイル材	2.5~4	1.5~3.1		<0.1	<0.1	0.4~5	0.01~1.5	0.1~1				0.02~0.08

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

図2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圧縮応力は釣り合っており、外内比 A_s/A_c 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 A_s/A_c は重視されている。

図3に、 $A_s/A_c = 0.4$ での直径 $D = 500 \sim 1000$ mm の複合ロールの残留応力分布を示す。ここでの解析方法とロール表面温度は図4(第2回図2の再掲)に示す熱処理における場合と同じである。ロー

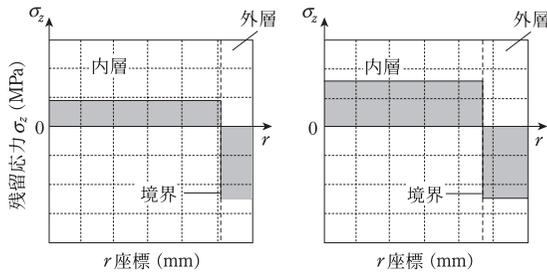


図2 ロール中心から表面までの残留応力。

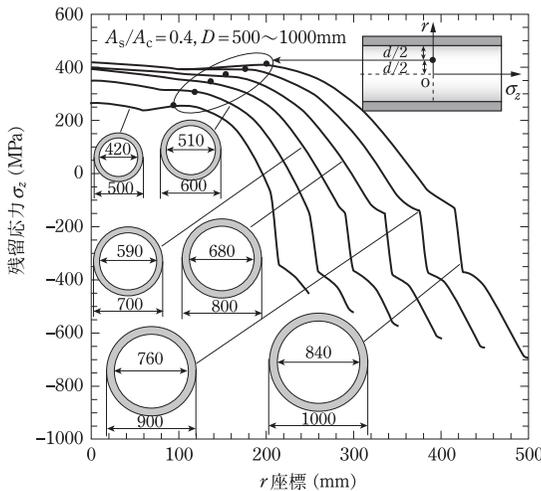


図3 中心から表面までの残留応力分布³⁾。

ル径の増加に伴い、中心応力が51%増加し、表面応力が55%増加する。対照的に、実際のロールの600 mmから800 mmの範囲では、中心応力が13%増加し、表面応力が19%増加する。結果は、ロール径が残留応力に大きな影響を与えることを示している。ただし、 $D = 900 \sim 1000$ mm の場合、中心応力は減少する。ただし、コアの最大残留応力のほとんどは $r = d/2$ で発生することが分かる。最大残留応力は、ロール強度の評価にとって重要である。したがって、中央の応力ではなく、この応力に焦点を合わせる。 $r = d/2$ の応力は、図3の黒丸(●)で示されている。ロール径が大きくなると、 $r = d/2$ での代表的な応力が大きくなる³⁾。

図5に直径600 mmを一定として外内比 A_s/A_c 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 $A_s/A_c = 0.4 \sim 0.6$ を中心

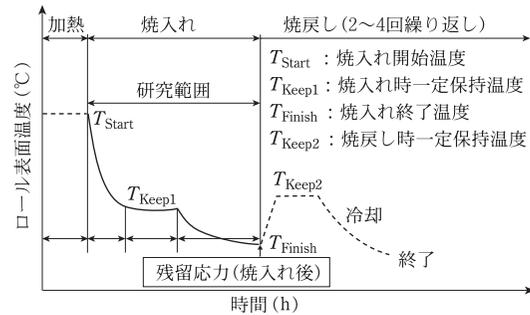


図4 残留応力が生じる熱処理工程(均一加熱焼入れ)。

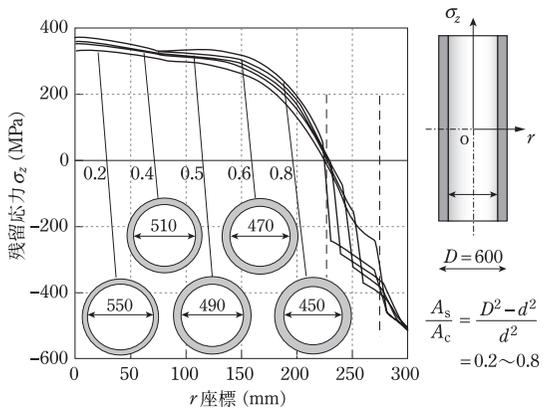


図5 直径600 mmで外内比 A_s/A_c を変化させた場合の残留応力の分布。

に、ここでは外内比 A_s/A_c による影響を顕著に見るために $A_s/A_c = 0.2$ 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 A_s/A_c を 0.2 から 0.8 に変化させ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%の増加しか見られない。また、実用上の外内比 $A_s/A_c = 0.4 \sim 0.6$ での残留応力の増加は2%に留まっており、外内比 A_s/A_c 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 A_s/A_c 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6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2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 A_s/A_c 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6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 A_s/A_c 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。

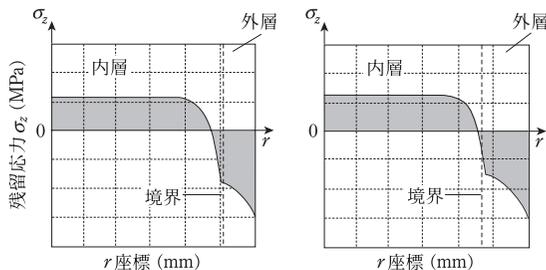


図6 中心から表面までの解析結果の残留応力分布。

均一加熱と不均一加熱の直径による影響の比較

図7に均一加熱焼入れにおいて、比較的外層が薄い場合の外内比 0.4 で直径を 500 mm から 1000 mm まで 100 mm 刻みで変化させて求めた残留応力の解析結果を示す。ここで、解析方法およびロール表面温度は、それぞれ図8に示すものと同じとした。外内比一定の場合で直径が大きくなると内層の残留応力は52%、表面では42%の増加となり残留応力が顕著に大きくなることが確認できた。また、通常用いられるロール径 600 mm ~ 800 mm での残留応力の増加は中心で14%、表面で15%となる。なお、直径 1000 mm の場合、中心応力が減少に転ずるといった現象が見られたが、直径を大きくしたときに外層と内層の平均的な応力をそれぞれの中間部で応力を代表させると中心も径とともに大きくなっており、経験上の概念と一致する。

図9に不均一加熱焼入れの解析結果を示す。ここでは、 600°C にロール全体を均一加熱した後、中心温度が $780 \sim 820^\circ\text{C}$ になるように加熱時間で制御した。すなわち、ロール径 660 mm で用いた熱伝達係数を用いて、各ロール径の加熱時間を決めた。

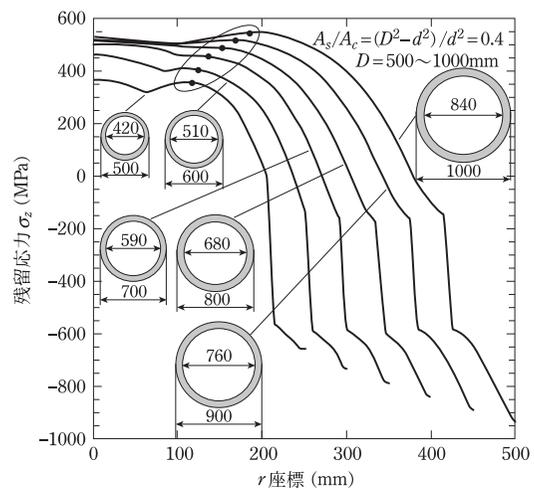


図7 異なる直径における残留応力分布 (均一加熱焼入れ)。

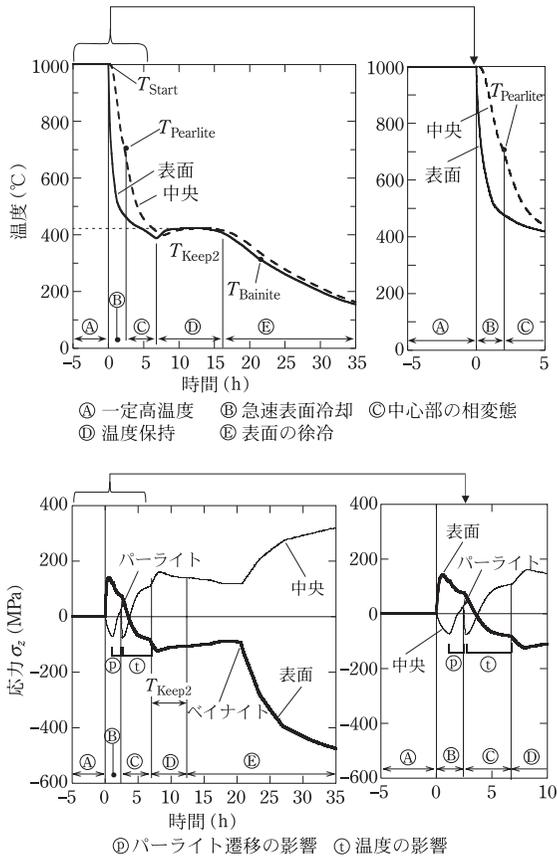


図8 均一焼入れにおける応力変化。(a)表面と中央の温度、(b)表面と中央の応力 σ_z 。

不均一加熱焼入れにおいては、内層境界近くの最大引張応力の変化は小さい。また、通常用いられるロール径600~800mmでは表面で7%増加するが、その変化は小さい。一方、均一加熱焼入れでは同様のロール径変化で内層の最大引張応力は14%増加し、不均一加熱焼入れより影響が大きい。

参考文献

- 1) 佐野義一：塑性と加工，39-444 (1998)，2-6.
- 2) 日立金属株式会社：熱間圧延用遠心鑄造複合ロール及びその製造方法，WO2013042528 A1，2013-3-28.

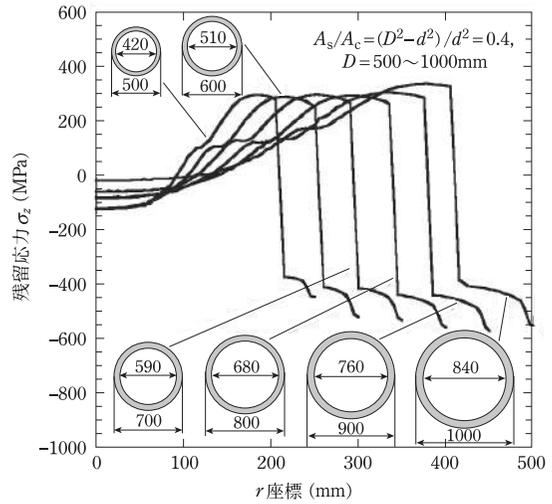


図9 異なる直径における残留応力分布(不均一加熱焼入れ)。

3) Hu Kejun: Study on Residual Stress for Hot Strip Rolling Bimetallic Rolls during the Heat Treatment Process.

のだ・なおき 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(株)ホーシン技術顧問。焼嵌め式ロール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。(株)日鉄エレクトクスを経て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賞。