

中実圧延ロールとスリーブ式圧延ロールの 残留応力解析ならびに疲労強度解析のまとめ (前編)

野田 尚昭・佐野 義一・高瀬 康・堀田 源治

中実圧延ロールに関するこれまでの 解説の概要

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。一般的な複合中実ロール (図 1 (a)) は遠心鋳造法で製造され、一部に用いられる複合スリーブロール (図 1 (b)) は焼嵌め技術によって製造されるが、操業上解決すべき課題も多い。前連載講座「産業用ロール・ローラの技術的課題と解決 (1)～(6)^{1)～6)}」では、一般的なローラとして、焼嵌めのない中実ロール (ハイス製複合中実ロール) を取り上げ、まず、その残留応力を解説した^{1)～4)}。具体的には、①焼入れ過程の残留応力の発生メカニズム¹⁾、②残留応力対策としての不均一加熱焼入れ²⁾、③焼戻し処理における残留応力低減効果³⁾、④残留応力に及ぼす内径、外径の比の影響⁴⁾について、順に解説した。特に、これらの①～④では、ハイスロールに導入される残留応力を求めるため、室温から熱処理温度までの材料特性をデータとして用い、数値シミュレーションによって求める手法を解説した。この手法により、ロール寸法、外内比、焼入れ方法および焼戻しの影響を明らかにした。続く前連載 (5) と現連載の (1)～(3) では、残留応力を有するロールがどの程度の疲労強度を有するかを説明した。具体的には、焼嵌めのない中実ロール (ハイス製複合中実ロール) を圧延ロールとして使用する際に、そのロールの回転

に対応して、ロール内部に生じる、応力振幅を明らかにした。そして、圧縮平均応力領域に対して与えた耐久線図に基づいて、その疲労強度を考察した。これによって、複合ロールの内部危険部位 (境界と中心) の疲労破壊危険度を定量的に示すことが可能となった。また、残留応力と圧延応力を重ね合わせる簡便な評価方法を検討した。その結果、重ね合わせ法によって簡便に安全側に破壊のリスクを評価できることが示された (前連載 (5) と続連載 (1), (2), (3)^{5)7)～9)}。このように、中実ロール (図 1 (a)) の残留応力と疲労強度に関して、報告された損傷事例を参考に FEM シミュレーションにより明らかにした内容を説明した^{16)～20)}。

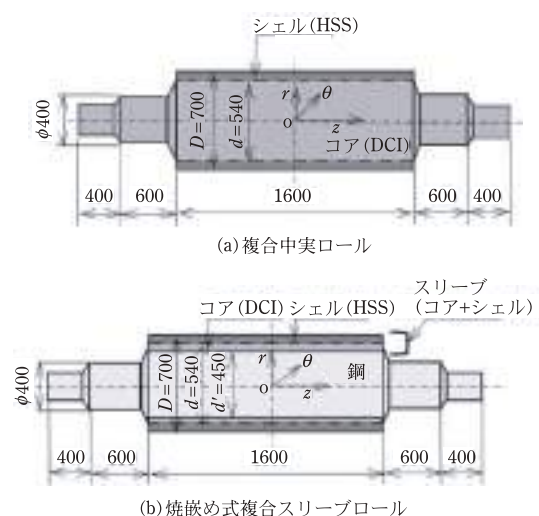


図 1 HSS/DCI 中実ロールと HSS/DCI スリーブロールの寸法 (mm)。

スリーブ式圧延ロールに関する これまでの解説の概要

ワークロールの構造を、シャフトをスリーブに焼嵌めする、図1(b)のスリーブ組立式に移行する考え方があり、次世代超硬ロールなどでは、その採用が不可欠である。このようなスリーブロール(ハイス製複合スリーブロール)に関して、まず、前連載(6)においてその残留応力を解説した⁶⁾。そして、現連載講座の「(続)産業用ロール・ローラの技術的課題と解決(1)~(9)^{7)~15)}」では、スリーブロールには「界面すべり」などの問題を紹介し^{10)~14)}、スリーブの焼嵌めに起因する固有の問題であることを述べた。特に、スリーブの円周すべりは、現象として知られていても、その生成機構を定量的に取り扱った報告は見当たらなかった。そこで、その現象を明らかにするために、FEMによる数値解析や実験を種々の条件で行った研究を解説した(現連載(4)~(8))。ロール回転を荷重移動で模擬する、独自の「荷重移動法」の数値シミュレーションによって、界面のすべり現象を実現できることを示した。また、嵌合面でのスリーブとシャフトとの相対すべりが可逆的な現象ではないことや、軸受けなどでクリープと呼ばれる現象と等価であることを解説した。また、圧延トルクが0すなわち自由転がりによっても生じることを実験とシミュレーションで実証した。なお、スリーブロールの焼嵌め構造には、ロール残留曲がりの問題もあるので、この問題については、本連載(9)¹⁵⁾において解説した。また、このような軸と穴の嵌合締結は、鉄道車両の車軸と車輪の嵌合など、ロール以外の広い分野で用いられているので、その本質を理解する観点からも、ローラチェーンの疲労強度や摩耗の問題を本連載(10)、(11)²¹⁾²²⁾で解説した。

本稿では、これまでの解説で取り扱ってきた、中実圧延ロールとスリーブ式圧延ロールの残留応力解析と疲労強度解析の要点を、読者の便利のため、まとめて示す。

複合中実ロールの残留応力に関する過去の研究のまとめ

鉄鋼製造業では、熱間圧延は金属を最も効率良く製品に加工する方法であり、大量生産に適しており、他のどの金属加工よりも生産量が多い^{23)~45)}。複合圧延ロールに関して、図1(a)のHSS/DCI複合中実式ロール(HSS:高速度鋼, DCI:ダクタイル鋳鉄)が主流である。図1(a)は熱間仕上げ圧延に広く使用されているハイス製複合中実ロールを示しており、ハイスが耐磨耗性、耐表面荒れ性、耐サーマルクラック性に優れているため広く用いられている⁴⁶⁾。筆者らは有限要素法(FEM)シミュレーションにより焼入れ・焼戻し時の残留応力や圧延時の疲労強度を明らかにしており^{20)39)47)~52)}、前連載講座「産業用ロール・ローラの技術的課題と解決(1)~(5)」で、それらを解説した^{1)~5)}。

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、高性能化の技術課題に対して残留応力の影響は少なくない。HSS/DCI複合中実ロールでは、その材質から熱処理によって残留応力が過大となり、圧延時の熱的な応力や機械的な応力によってロールが破壊に至る場合がある。よって、圧延用ロールの製造では、製品ロールの残留応力レベルを厳密に評価しておくことが極めて重要となる。ワークロールの表面の残留応力に関しては、知られている残留応力の測定法を適用することによって、実験的に測定されてきた⁵³⁾。用いられる破壊的機械的測定法には、深穴掘削法、ザックスボーリング法、スリッティング法^{54)~57)}があり、非破壊的方法にはX線回折法および超音波法⁵⁸⁾⁵⁹⁾がある。ロール全表面の非破壊探傷技術が導入されてきたが、ロール寿命の伸延とともに、内部残留応力の評価が必要とされてきた。このように大規模な複合ロールの場合、破壊法は測定精度の点から制約があり、非破壊法は測定できる表面からの深さの点から制限がある。このため過去数十年間、焼入れ

によって生じる残留応力に焦点を当てた多くの研究がなされているけれども、ほとんどの研究は小型部品を扱っている^{60)~63)}。直前の解説で取扱った⁶⁴⁾円板切り出し法によればロールから切り出した円板の残留ひずみから、元のロールの状態の残留応力が求められるので、測定が簡便であるが、実体ロールを試作して破壊検査によって測定するため、コストと時間の負担が大きい。

筆者らの以前の研究では、焼入れ時の残留応力を調査するために熱弾性塑性有限要素シミュレーションを実行している³⁹⁾。また、ロールの外内比、直径、相変態、および材料の熱処理プロセスが残留応力に及ぼす影響を議論している。不均一加熱後に焼入れする方法は、表面の圧縮応力を低下させることなく中心の引張応力を低下させることができるので、破壊のリスクを軽減するのに役立つことが判明した³⁹⁾⁶⁵⁾。クリープ挙動を考慮すると、残留応力の低減を引き起こす焼戻し効果も明らかになる⁶⁶⁾。

複合中実ロールの残留応力の数値シミュレーションの主な成果

読者の便宜のために、中実ロールの残留応力解析方法の概要を付録A(後編参照)に示す。中実複合ロールの残留応力解析によって明らかとなった主要な成果を以下にまとめて記す。

1. 圧延用ロールの残留応力はロール製造条件(材質、サイズ、熱処理法など)によって様々な分布を示し、強度・硬化深度などのロール性能と深く関係している。ハイスロールでは、その材質から熱処理によって残留応力が過大となる。これによって、圧延時の熱的な応力や機械的な応力によってロールが破壊に至る場合がある。このため、圧延用ロールの製造では、ロールの破壊を防止するうえで、製品ロールの残留応力レベルを厳密に評価しておくことが極めて重要となる。

2. ロールの表面の残留応力分布の予測に関して、導入される残留応力をハイスロールの熱処理温度までの特性を用い、数値シミュレーションによ

って求める手法を提案し、焼入れと焼戻しのロール残留応力を内部応力まで含めて便利に予測できることを示した。実体ロール表面と同レベルの残留応力値が解析により得られたほか、ロール内部における応力分布を明らかにした。この成果は、ロール事故に伴う傷除去研削の大幅低減および、置き割れ事故の防止に対して貢献した。

3. 不均一加熱焼入れ後の内層の引張応力は、均一加熱焼入れ後に得られるものより24%小さくなり、顕著な違いが認められるが、表面の圧縮残留応力は均質加熱であるか不均質加熱であるかによらずあまり変化しない。よって、不均一加熱焼入れは、ロール表面のき裂進展を防止する効果を保持したまま、ロール中心部からの損傷の低減が期待できる。

4. 不均一加熱焼入れでは、パーライト変態時のロール中心部の応力の増加が小さいことから、引張残留応力が減少する。また、パーライト変態後の不均一加熱焼入れによる中心応力の増加も小さい。このことがその後の応力分布に移行されることによる。

5. ロール直径の変化を考慮した場合でも、不均一加熱焼入れの場合の中心引張応力は均一加熱焼入れの場合に比べて小さい。通常用いられる範囲での径大化(600~800 mm)により、内層引張残留応力は均一加熱では約14%増加したのに対して、不均一加熱ではほとんど変化しない。

6. 外内比を考察した結果からも、不均一加熱焼入れの場合の中心引張応力は均一加熱焼入れの場合よりも小さく、ロール表面の圧縮応力はどちらの結果でもほとんど変化しない。すなわち、外内比の複合ロールの残留応力に及ぼす影響は一般に考えられていたもののほど大きくない。

複合中実ロールの内部起点の疲労強度の数値シミュレーションの主な成果

上記の残留応力解析結果を引き継いで4段式圧延機に使用されるHSS/DCI複合ワークロールが

回転中に受ける応力振幅と平均応力を3次元的に明確にした。ここで、「圧延応力」とは圧延ロールで鋼板を圧延する際にロール内部に生じる応力の意味で用いており、残留応力がゼロの場合も解析してそれを明確にしたものである。中実複合ロールの圧延応力解析によって明らかとなった主要な成果を以下にまとめて記す。

1. 4段式圧延機に使用されるHSS/DCI複合ワークロールが鋼板を圧延する際の、ロール回転時のロール内部に生じる圧延応力(圧延により生じる応力の意味で用いる)を明確にした。実圧延での疲労破壊の経験に基づく危険領域(HSS/DCI境界近傍と中心)に注目して、疲労破壊に対する危険度を考察した。

2. 実圧延での疲労破壊の経験に基づく危険領域であるHSS/DCI境界近傍とロール中心に注目して、疲労破壊の危険度を考察した。その結果、圧延材側の荷重に対応するHSS/DCI境界部と、バックアップロール側の荷重のピークに対応する境界部で、それぞれ大きい応力振幅が生じ、疲労破壊の危険度が高いことを明らかにした。その結果、経験的に知られている危険部位である境界部のロール軸端付近で大きい半径方向応力振幅が生じ、疲労破壊危険度が高いことを明らかにした。

3. 疲労破壊危険部の考察において、ロール回転ごとに生じる最大・最小のロール半径方向応力 σ_r を基に、耐久線図上の相対安全率SFを定義して疲労破壊のリスクを評価した。その解析結果は、HSS/DCI境界と内層中央部それぞれを起点とする実ロールの破壊事例を裏付けるものである。

4. ロール内部疲労を支配する半径方向応力 σ_r に関して、圧縮応力域での公知の破壊条件がないため、圧縮応力下での疲労の研究を参照して耐久限度線図を提案した。具体的には完全片振荷重下では最終破断に至らないことから、必要な引張応力を推定することで新しい耐久限度線図を求めた(付録B(後編参照):大きな圧縮応力下での複合中実ロールの疲労限度線参照)。

5. 研究対象としたワークロールの内部からの疲労破壊は半径方向応力が支配的であるのに対して、

従来から研究がなされてきたバックアップロールのスポーリング(表層剥離)とは、全く異なる。すなわち、バックアップロールでは、そのメカニズムは転がり疲労によるスポーリングであり、主として表層数ミリの内部を起点とするもので、せん断応力に支配されると考えられている。

複合スリーブロールの特徴と固有の課題について

ワークロールの構造を、シャフトをスリーブに焼嵌めする、図1(b)のスリーブ組立式に移行する考え方があり、スリーブロールの一部は、1000 mmを超える大きな直径のバックアップロールや大型のH字型鋼圧延ロールとして実用化されている^{26)27)67)~69)}。スリーブ組立式ロールにはいくつかの利点があり、①シャフトの延性を保ちスリーブの耐摩耗性を単独で向上させることや、②破損・摩耗したスリーブを交換することで、シャフトを再利用できることなどが挙げられ、また、③次世代超硬ロールなどでは、その採用が不可欠である。図1(b)は複合スリーブロールを示しており、大型H形鋼圧延に使用される大型ロールよりもバレル径が小さい。したがって、図1(b)のスリーブロールでは、胴径 D と軸径 d' から決まるスリーブ厚さ $(D-d')/2$ が小さくなり、製造が困難となる。しかしながら、図1(b)に示すロールの場合でも、大型ロールと同様に、スリーブの組立構造については数多くの試作が行われており、実用化に向けた課題として、スリーブ組立式ロールには残留曲げ変形、スリーブ端部のフレッチング疲労き裂、スリーブすべりなどの特有の問題^{27)~33)}が知られている。

特に、スリーブすべりに関しては、焼嵌め部の摩擦抵抗トルクがモータのトルクよりも大きくしても、スリーブが周方向にすべる問題がある^{32)~35)}。同様の課題は転がり軸受における「界面クリープ」としても知られている^{70)~82)}。しかし、これらを定量的に扱った研究は見当たらなかった。このため、数値シミュレーションによって⁴³⁾、

界面すべりは不可逆であり、局所的で不均一に生じた不可逆すべりがロールの回転に伴って蓄積し、自由転がり下でもスリーブすべりとして生じることが、まず示された。そして駆動トルクによって、すべり量が大きく加速されることや^{42)~44)}、小型圧延機を使用した実験によって、シミュレーションの妥当性が確認された⁸³⁾。このようにして、スリーブすべりに影響する主要な要因が明らかにされた^{41)~45)83)84)}。しかし、スリーブすべりによるスリーブ割れはスリーブ内面から発生する可能性があるため、内面の残留応力を低減することも重要な課題となる。このように、図1(b)のHSS/DCI複合スリーブロールに関しては、実用化の課題となる、界面すべりの現象を説明するとともに、残留応力や疲労強度を調べて、それらを解説した^{10)~14)}。

スリーブロールにスリーブすべりが生じると、それによってスリーブの割れが生じることがある。この観点からも、スリーブの内面の内外面の残留応力を適切に導入することが重要となる。目標圧縮残留応力は $\sigma_\theta = 200 \sim 400 \text{ MPa}$ の範囲にすることが望ましく、内面の目標引張残留応力は $\sigma_\theta \leq 20 \text{ MPa}$ の範囲にすることが望ましい。スリーブロールは焼入れ・焼戻し熱処理したスリーブをシャフトに焼嵌めして作製するので、スリーブ加工のどの時点で熱処理を行うとよいのかを調べる必要がある。そこで本解説では、適切な残留応力を満たすために、図1(b)の複合スリーブロールの2つの極端な製造方法を解説する。1つは「仕上げ代」最大の中実ロールを熱処理した後スリーブ加工し焼嵌めする場合であり、もう一つは「仕上げ代」ゼロのスリーブを熱処理後そのまま焼嵌めする場合である。

スリーブロールの残留応力の数値シミュレーションの概要と熱処理時の仕上げ代

スリーブロールは、最終的にはスリーブにシャフトを焼嵌めして作製するので、その残留応力解

析は製造方法と関連して明らかにする必要がある。通常はスリーブ内面に適切な量の「仕上げ代」を残した状態のものを遠心鋳造で作リ、それに焼入れ焼戻しを行い、その後中ぐり(専用のバイトを使ってあらかじめ開けた下穴を切削して広げる加工)で、スリーブ内面を仕上げたのち焼嵌めする。焼入れ焼戻し熱処理前の「仕上げ代」が残留応力に影響するため、図2と図3に示すように熱処理時の「仕上げ代」の両極端で残留応力を比較検討した。

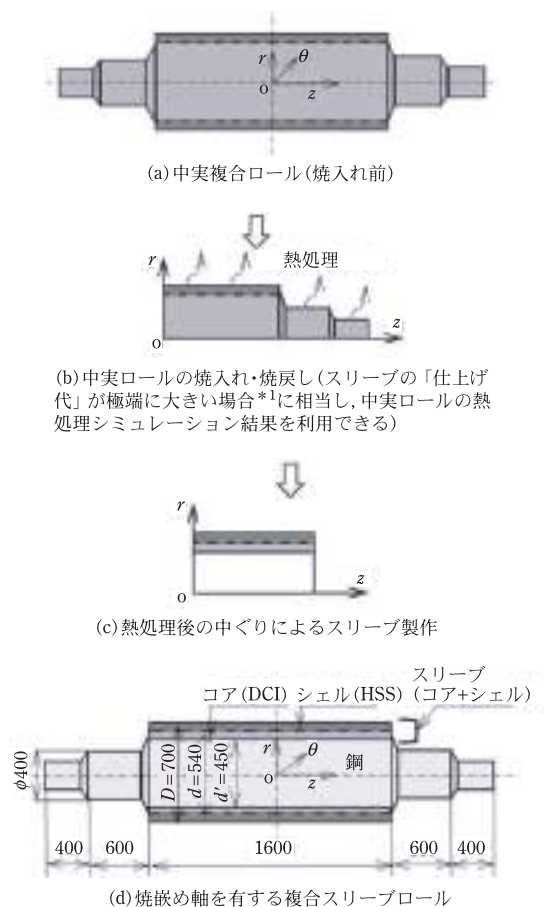


図2 中実ロールを焼入れ・焼戻した製造方法(「中実熱処理」と呼ぶ)

*1: 図2(b)の中実ロールの熱処理は、「仕上げ代」が極端に大きい場合を想定している。実際の製造では、遠心鋳造で図2(b)と図3(b)の中間的な形状を作り、焼入れ・焼戻しを行い、スリーブの内面を仕上げてスリーブを作製する。

図2は、「仕上げ代」が最大の中実ロールを焼入れ・焼戻しする製造方法であり、ここでは「中実熱処理」と呼ぶ。これは、「仕上げ代」が極端に大きい場合に相当する。図2(a)、(b)に示すように、その焼入れ過程では、中実ロールの解析結果を利用できる。図2(c)に示す第2の工程は、残留応力を有する中実ロールに下穴をあけた後、中ぐりしてスリーブを作製する工程である。第3の最終工程では、図2(d)に示すように、シャフトを焼嵌めする。このような中実ロールの熱処理のシミュレーションの詳細²⁰⁾³⁹⁾⁶⁵⁾についてはこれまでも解説している。読者の便利のため、付録A(後編)ではシミュレーションの概要のみを示す。得られた残留応力は後編の図7(a)、図11(b)、図12(b)に示す。

図3は、「仕上げ代」がゼロのスリーブそのものを焼入れ・焼戻しする製造過程である。これは「仕上げ代」が最小で極端に小さい場合であり、ここでは「スリーブ熱処理」と呼ぶ。図3(b)は、中実ロールを中ぐりして「仕上げ代」ゼロのスリーブを製作する説明図(図2との対比)である。実際には適当な仕上げ代を残した状態を遠心鋳造で作ればよい。図3(c)の第2工程はスリーブの焼入れ・焼戻しである。次に、図3(d)に示すように、シャフトを焼嵌めする。得られた残留応力は後編の図7(b)、図11(a)、図12(a)に示す。

スリーブの外表面の目標圧縮残留応力は $\sigma_\theta = 200 \sim 400 \text{ MPa}$ の範囲にすることが望ましく、内表面の目標引張残留応力は $\sigma_\theta \leq 200 \text{ MPa}$ にすることが望ましい。次の章では、スリーブロールにこのような適切な残留応力を与えるために、図2と図3の2つの「仕上げ代」が最大・最小の極端な場合を想定し、それらを焼入れ・焼戻しして考察する。実際の製造では、最初の工程として遠心鋳造を行い、図2(b)と図3(b)の中間的な形状を作る。2番目の工程は、スリーブにある程度の余裕を持たせて焼入れ・焼戻しを行う工程である。3番目の工程は、シャフトを焼嵌めするためにスリーブの内面に残った「仕上げ代」を取り除くためにスリーブを中ぐり(ボーリング)する。

スリーブの外表面の目標圧縮残留応力は $\sigma_\theta = 200 \sim 400 \text{ MPa}$ の範囲にすることが望ましく、内表面の目標引張残留応力は $\sigma_\theta \leq 200 \text{ MPa}$ にすることが望ましい。次の章では、スリーブロールにこのような適切な残留応力を与えるために、図2と図3の2つの「仕上げ代」が最大・最小の極端な場合を想定し、それらを焼入れ・焼戻しして考察する。実際の製造では、最初の工程として遠心鋳造を行い、図2(b)と図3(b)の中間的な形状を作る。2番目の工程は、スリーブにある程度の余裕を持たせて焼入れ・焼戻しを行う工程である。3番目の工程は、シャフトを焼嵌めするためにスリーブの内面に残った「仕上げ代」を取り除くためにスリーブを中ぐり(ボーリング)する。

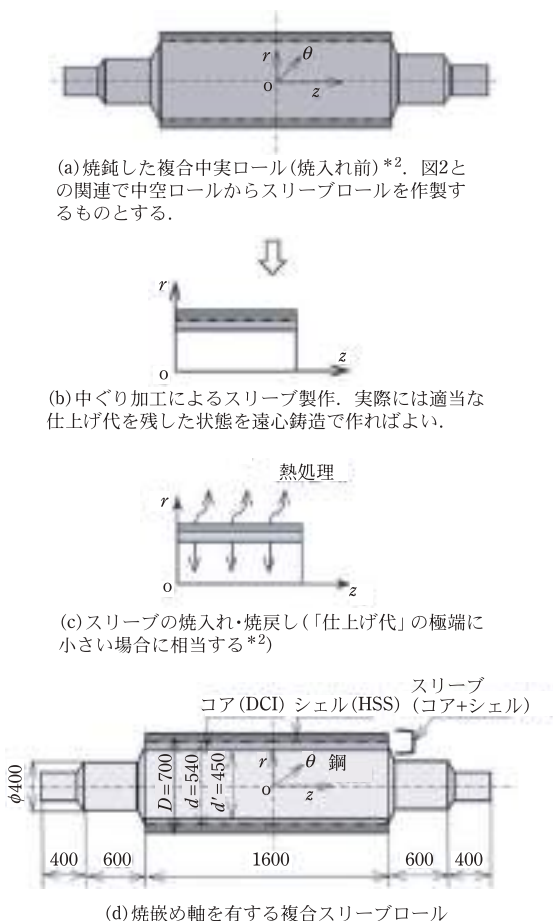


図3 スリーブを焼入れ・焼戻しする製造方法(「スリーブ熱処理」と呼ぶ)。

*2: 図3(a)の中実ロールは実際には図2(b)と図3(b)の中間的な形状を遠心鋳造で作る。図3(c)の熱処理は、「仕上げ代」がゼロの極端に小さい場合に相当しており、実際には、適当な「仕上げ代」が残るスリーブを焼入れ・焼戻しの後、スリーブの内面を仕上げでスリーブとする。

スリーブロールの残留応力の数値シミュレーションに用いる解析モデル

図1(a)に示すように、先に解析されたHSS/DCI中実ロールは、直径 $D=700 \text{ mm}$ 、外層の厚さ 60 mm 、長さ 1600 mm である²⁰⁾³⁹⁾。外層はハイス、シャフトを含む内層は遠心鋳造によるDCIを使用している。図1(b)と図3に示すように、複合スリーブロールの外形および寸法は、図1(a)の中実ロールと同様である。スリーブの厚さは 125 mm 、内

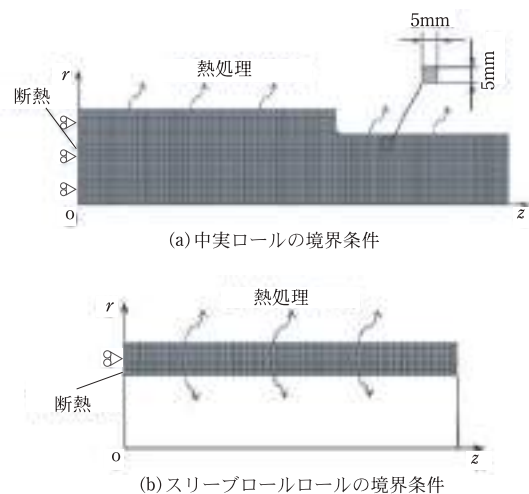


図 4 中実ロールとスリーブロールの境界条件.

径は 450 mm で、焼嵌め代 δ で焼嵌めされている。
解析では、MSC Marc 2012 ソフトウェアを熱弾性塑性 FEM 解析に適用して、焼入れ/焼戻しプロセスをシミュレーションした。図 4 は、図 1 (a) の中実ロールの軸対称 FEM 解析モデルを示す。このような準静的シミュレーションには、メッシュサイズ 5 mm × 5 mm の 4 節点の線形軸対称要素が採用されている。対称性により、 $z = 0$ に変位境界条件と断熱条件を適用する。本研究では実験により測定したロール表面温度をロール表面に追加する。熱伝達率は、部品の材質、サイズ、表面状態などの多くの要因に依存する。そこで、本研究の開始当初は次のようにして熱伝達係数を求めている。まず、熱伝達係数の値を文献から推定し、周囲温度を FEM のロール表面に適用する。ここで、周囲温度は実験により測定して求めたものである。そして、FEM 解析によりロール表面温度を求め、実験的に求めたロール表面温度と比較する。第 3 に、想定される熱伝達係数が繰り返し変更される。実際の熱伝達係数は、シミュレーション温度がロール表面温度と一致したときに最終的に得られる。温度分布を解析した後、標準的な熱弾塑性 FEM 解析により熱応力分布を得ることができる。
この研究では、熱処理中に温度を一定に保った場合の残留応力に対するクリープの影響を考慮し

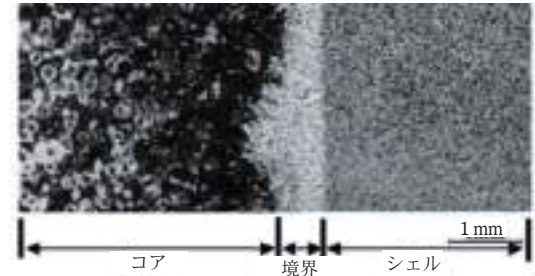


図 5 HSS/DCI 境界付近の組織^{15)~17)}.

表 1 室温における HSS および DCI の機械的特性.

機械的性質	HSS	DCI
引張強さ, σ_B (MPa)	1570	415
疲労限度*3, σ_B (MPa)	630	166
降伏点 (MPa)	1270	410
ヤング率 (GPa)	233	173
ポアソン比	0.3	0.3
熱度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^3$)	7600	7300
線膨張係数 (K^{-1})	12.6×10^{-6}	13.0×10^{-6}
熱伝導率 (W/mK)	20.2	23.4
比熱 (J/kgK)	0.46	0.46

*3: 疲労強度/引張強さ = $\sigma_{w0}/\sigma_B = 0.4$ より推定⁸⁵⁾.

ている。市販の FEM 解析ソフトウェアではクリープ解析は用意されていないので特別に考慮する必要がある。具体的には、さきの論文²⁰⁾に示したように、DCI 層から調製した試験片を使用してクリープ試験を実施し、クリープの応力ひずみ関係を仮定し、構成式を求めた。これらの式の妥当性を確認するため、応力緩和試験も実施した。その応力減少が一致することから、これらの構成式を組み込んだ FEM 解析が残留応力に対するクリープ効果を予測するのに有用であることを確認した。

図 5 に、HSS/DCI 境界付近の金属組織を示す⁴⁶⁾⁶⁵⁾。ハイス外層側には白色の微細な炭化物が均一に分布している。一方、内部の DCI 層側には粗大な炭化物が見られる。内層 DCI では、フェライトに囲まれた球状グラファイトが境界の周りに均一に分布しており、健全な複合構造を示す。表 1 は、相変態の影響を含む、室温での外側 HSS 層と内側 DCI 層の材料特性を示している。シミュレーションで使用した高温での特性は、同様に製造さ

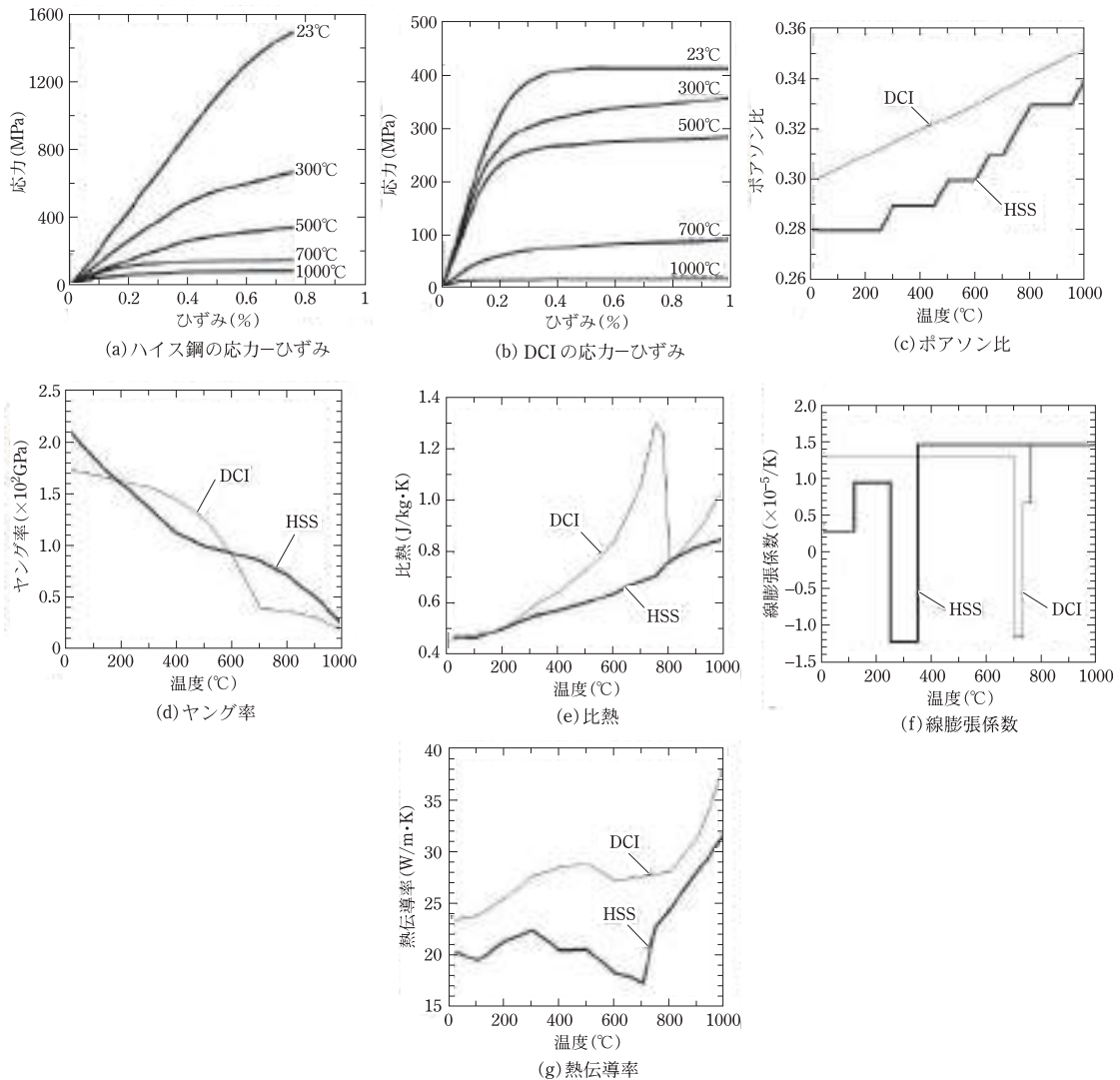


図6 HSSとDCIの材料の機械的特性.

れたロールから切り出した試験片を使用して実験的に得られる。

図6に、HSSおよびDCIの23℃から1000℃までの応力-ひずみ曲線、ポアソン比、ヤング率、比熱、線膨張係数、熱伝導率などの材料特性を示す。図6のデータは、合金の幅広い材料特性を計算するSente Software JMatProを利用した⁸⁶⁾。ロールの機械的特性の詳細を公開できないことが部分的な原因である。

参考文献

- 1) 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 堀田源治: 産業用ロール・ローラの技術的課題と解決 (1) 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, 金属, **91** 10 (2021), 96.
- 2) 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 堀田源治: 産業用ロール・ローラの技術的課題と解決 (2) 複合中実圧延ロールに生じる残留応力における不均一加熱焼入れの有用性, 金属, **91** 11 (2021), 88.
- 3) 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 堀田源治: 産業用ロール・ローラの技術的課題と解決 (3) 焼戻し処理における複合圧延ロールの残留応力低減効果と考察, 金属,

- 91 12 (2021), 83.
- 4) 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 堀田源治: 産業用ロール・ローラの技術的課題と解決 (4) 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, 金属, **92** 1 (2022), 91.
- 5) 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 堀田源治: 産業用ロール・ローラの技術的課題と解決 (5) 4 段式圧延機用複合ワークロールにおける圧延中の内部応力と疲労損傷評価, 金属, **92** 2 (2022), 81.
- 6) 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 堀田源治: 産業用ロール・ローラの技術的課題と解決 (6) 最終回 複合スリーブロールにおける残留応力への製造プロセスによる影響, 金属, **92** 3 (2022), 93.
- 7) 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 堀田源治: (続) 産業用ロール・ローラの技術的課題と解決 (1) 熱間圧延機における複合圧延ロールの疲労強度解析 (その 1), 金属, **93** 2 (2023), 55.
- 8) 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 堀田源治: (続) 産業用ロール・ローラの技術的課題と解決 (2) 熱間圧延機における複合圧延ロールの疲労強度解析 (その 2), 金属, **93** 3 (2023), 82.
- 9) 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 堀田源治: (続) 産業用ロール・ローラの技術的課題と解決 (3) 残留応力 0 として複合圧延ロールに生じる熱間圧延時の負荷を明確にしたときの複合圧延ロールに生じる圧延応力, 金属, **93** 4 (2023), 1.
- 10) 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 堀田源治: (続) 産業用ロール・ローラの技術的課題と解決 (4) 駆動トルクゼロの自由転がり条件下におけるスリーブ組立式複合ロールに生じる界面すべり, 金属, **93** 5 (2023), 66.
- 11) 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 堀田源治: (続) 産業用ロール・ローラの技術的課題と解決 (5) スリーブ組立式複合ロールの界面すべりに及ぼす駆動トルクの影響と新しい設計概念の提案, 金属, **93** 6 (2023), 68.
- 12) 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 堀田源治: (続) 産業用ロール・ローラの技術的課題と解決 (6) スリーブ組立式圧延用ロールの界面すべりの実験的検証とすべり損傷の発生と成長について (前編), 金属, **93** 7 (2023), 40.
- 13) 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 堀田源治: (続) 産業用ロール・ローラの技術的課題と解決 (7) スリーブ組立式圧延用ロールの界面すべりの実験的検証とすべり損傷の発生と成長について (後編), 金属, **93** 8 (2023), 59.
- 14) 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 堀田源治: (続) 産業用ロール・ローラの技術的課題と解決 (8) スリーブ組立式圧延用ロールの焼入れ界面のすべり損傷を考慮した疲労強度解析, 金属, **93** 9 (2023), 69.
- 15) 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 堀田源治: (続) 産業用ロール・ローラの技術的課題と解決 (9) 焼入れめスリーブロールに生じる残留曲がりの生成メカニズム, 金属, **93** 10 (2023), 87.
- 16) 野田尚昭, 佐野義一, 王旭, 中川雄策, 管文海, 小野騰, 胡可軍: 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, 自動車技術会論文集, **46** 4 (2015), 831.
- 17) 酒井悠正, 野田尚昭, 佐野義一, 張国偉, 高瀬康: スリーブ組立式圧延ロールの界面クリープに及ぼす駆動トルクの影響, 鉄と鋼, **105** 12 (2019), 1126.
- 18) N.A. Noda, K. Hu, Y. Sano, K. Ono and Y. Hosokawa: Residual Stress Simulation for Hot Strip Bimetallic Roll during Quenching, Steel Research International, **87** (2016), 1478.
- 19) N.A. Noda, K. Hu, Y. Sano, K. Ono and Y. Hosokawa: Usefulness of Non-Uniform Heating and Quenching Method for Residual Stress of Bimetallic Roll: FEM Simulation Considering Creep Behavior, Steel Research International, **83** 3 (2017), 1.
- 20) N.A. Noda, K. Hu, Y. Sano, K. Ono, Y. Hosokawa: Usefulness of Non-Uniform Heating and Quenching Method for Residual Stress of Bimetallic Roll; FEM Simulation Considering Creep Behavior, Steel Res. Int., **88**(2017)1600165. <https://doi.org/10.1002/srin.201600165>
- 21) 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 堀田源治: (続) 産業用ロール・ローラの技術的課題と解決 (10) 産業用ロール以外の嵌合技術: 圧入によるローラチェーンの疲労強度向上について, 金属, **93** 11 (2023), 75.
- 22) 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 堀田源治: (続) 産業用ロール・ローラの技術的課題と解決 (11) 産業用ロール以外の嵌合技術: 実際のローラチェーンに生じる摩耗を忠実に再現する円筒面摺動式摩耗試験機の開発について, 金属, **93** 12 (2023), 1.
- 23) 下田秀夫, 小野寺真作, 堀清, 土肥修: 焼ばめした圧延用大形補強ロールの残留曲りに関する研究, 日本機械学会論文集, **32** 237 (1966), 689. <https://doi.org/10.1299/kikai1938.32.689>
- 24) 滝川浩, 橋本光生, 紺野剛, 内田秀: 形鋼用鍛造ハイススリーブロールの開発, 材料とプロセス, **16** 5 (2003), 1150.
- 25) 入江利治, 高木圭治, 是永逸生, 佐野義一: 鋼矢板圧延用分割スリーブロールの開発について, 日本鉄鋼協会講演論文集, **65** (1979), 293.

- 26) T. Inoue, S. Uchida and S. Ogawa: Characteristics of wear and rolling on fiber reinforced metal at high temperature, *ISIJ International*, **55** 9 (2015), 1987. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2015-123>
- 27) T. Hattori, Y. Kamitani, K. Sugino, H. Tomita and Y. Sano: Super cermet rolls for manufacturing ultra-fine-grained steel, *International Conference on Tribology in Manufacturing Processes ICTMP 2007 International Conference 24-26 September (2007)*, Yokohama.
- 28) 濱吉繁幸, 小川衛介, 清水健一郎, 野田尚昭, 岸和司, 古賀慎一: 連続溶融めっき鋼板製造ライン用大型セラミックスロールの開発, *素形材*, **51** (2010), 54. <http://hdl.handle.net/10228/00006066>
- 29) A.V. Mezentsev, V. A. Il'in and A. Y. Syusyukin: Mastering of the technology of assembling of composite mill rolls under the conditions of rail and structural steel shop at the JSC "EVRAZ ZSMK", *Metallurgist*, **63** 5 (2019), 562. <https://doi.org/10.1007/s11015-019-00860-5>
- 30) 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 下田祐太郎, 張国偉: 焼嵌めで構成された圧延用補強ロールに生じる残留曲がり生成メカニズムの解明, *塑性と加工*, **58** 672 (2017), 66. <https://doi.org/10.9773/sosei.58.66>
- 31) N.A. Noda, H. Sakai, Y. Sano, Y. Takase and Y. Shimoda: Quasi-equilibrium stress zone with residual displacement causing permanent slippage in shrink-fitted sleeve rolls, *Metals*, **8** 12 (2018), 998. <https://doi.org/10.3390/met8120998>
- 32) 松永榮八郎, 佐野義一, 西田新一: 複合スリーブロール内層材の疲労特性 (熱間圧延用スリーブロールの強度設計-1), *日本鉄鋼協会講演論文集 (Camp-ISIJ)*, **10** (1997), 1078.
- 33) 松永榮八郎, 津行武信, 佐野義一: スリーブロールの適正焼嵌率の検討 (熱間圧延用スリーブロールの強度設計-2), *日本鉄鋼協会講演論文集 (Camp-ISIJ)*, **11** (1998), 362. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10002551803>
- 34) 堤三郎, 原千里, 吉井省三: 組立式補強ロールの残留曲がりについて, *鉄と鋼*, **5** (1971), 818. https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.57.5_818
- 35) M. D. McMillan, J. D. Booker, D. J. Smith, C. F. Onisa, A. M. Korsunsky, X. Song, et al.: Analysis of increasing torque with recurrent slip in interference-fits, *Eng Fail Anal*, **62** (2016), 58. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.12.005>
- 36) 日本鉄鋼協会: 製鉄技術の最近の進歩と将来, 第146・147回西山記念技術講座, (1993), 1.
- 37) 佐野義一: 熱間圧延用ロールにおける内部疲労破壊と課題—実機におけるき裂発生問題と評価—, 第245回日本材料学会疲労部門委員会 第36回強度設計・安全性評価部門委員会 合同委員会報告書, 京都 1-10.
- 38) C. Bataille, E. Luc, M. Bigerelle, R. Deltombe and M. Dubar: Rolls wear characterization in hot rolling process, *Tribol Int*, **100** (2016), 328. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.03.012>
- 39) N.A. Noda, K. Hu, Y. Sano, K. Ono and Y. Hosokawa: Residual stress simulation for hot strip bimetallic roll during quenching, *Steel Res. Int*, **87** 11 (2016), 1478. <https://doi.org/10.1002/srin.201500430>
- 40) K. Hu, Y. Xia, F. Zhu and N.A. Noda: Evaluation of thermal breakage in bimetallic work roll considering heat treated residual stress combined with thermal stress during hot rolling, *Steel Res. Int*, **89** 4 (2017), 1700368. <https://doi.org/10.1002/srin.201700368>
- 41) H. Sakai, N.A. Noda, Y. Sano, G. Zhang and Y. Takase: Numerical simulation on interfacial creep generation for shrink-fitted bimetallic roll, *ISIJ Int*, **59** 5 (2019), 889. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-749>
- 42) 酒井悠正, 野田尚昭, 佐野義一, 張国偉, 高瀬康: スリーブ組立式圧延ロールの界面クリープに及ぼす駆動トルクの影響, *鉄と鋼*, **105** 12 (2019), 1126. <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2019-048>
- 43) N.A. Noda, R. A. Rafar, H. Sakai, X. Zheng, H. Tsurumaru, Y. Sano and Y. Takase: Irreversible Interfacial Slip in Shrink-Fitted Bimetallic Work Roll Promoted by Roll Deformation, *Eng. Fail. Anal*, **126** (2021), 105465. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105465>
- 44) R. A. Rafar, N. A. Noda, H. Tsurumaru, Y. Sano and Y. Takase: Novel design concept for shrink-fitted bimetallic sleeve roll in hot rolling mill, *Int J Adv Manuf Technol*, **120** (2022), 3167. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08954-4>
- 45) N.A. Noda, R. A. Rafar and Y. Sano: Stress due to interfacial slip causing sleeve fracture in shrink-fitted work roll, *Int J Mod Phys B*, (2021), 2140020. <https://doi.org/10.1142/S0217979221400208>
- 46) Y. Sano, T. Hattori and M. Haga: Characteristics of high-carbon high speed steel rolls for hot strip mill, *ISIJ Int*, **32** (1992) 1194. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.32.1194>
- 47) 阪部喜代三: 鍛鋼焼入ロールの残留応力, *日本製鋼所技報*, **26** (1969), 3044.
- 48) 坂井一男: 円柱鋼材の冷却過程における熱応力の計算, *鉄と鋼*, **60** 12 (1974), 1591.
- 49) 井上達雄, 原口賢一, 木村茂人: 焼入れ・焼もどし

- 過程の応力解析, 材料, **25** 273 (1976), 521.
- 50) 磯村良蔵: 鋼の熱処理応力, 鐵と鋼, **47** 7 (1961), 936.
- 51) 有本享三: 熱処理変形と残留応力, 京都大学博士論文, (2007). (online), available from, (accessed 2020-10-28).
- 52) 野田尚昭, 佐野義一, 王旭, 中川雄策, 管文海, 小野騰, 胡可軍: 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, 自動車技術会論文集, **46** 4 (2015), 831.
- 53) G. S. Schajer: Practical residual stress measurement methods, John Wiley & Sons. Hoboken, 7 (2013).
- 54) E. Kingston and D. J. Smith: Residual stress measurements in rolling mill rolls using deep hole drilling technique. Ironmaking Steelmaking, **32** 5 (2005), 379.
- 55) G. Sachs: Zeit Metallkunde, **19** (1927), 352.
- 56) Y. Higashida, T. Kikuma, T. Kawanami and K. Kimura: Measurement method of residual stress of rolls and countermeasure to thermal stress breaking, Tetsu-to-Hagane, SHAPING & FABRICATION · INSTRUMENTATION & CONTROL, The 111th ISIJ Meeting, **72** (1986), 308.
- 57) A. F. Costa Neto, C. A. Barbosa and F. Dialeachi: X-Ray diffraction technique applied to manufacture and control of rolling mill rolls, 34th Mechanical Working and Steel Processing Conference, Vol.XXX, Iron and Steel Society of AIME, Warrendale (PA), (1993), 199.
- 58) A. Kokosza, J. Pacyna, A. Wojtas: Residual stress measurement in steel mill rolls using magnetic Barkhausen noise anaysis, J. Nondestr. Test, **4** 8 (1999). <https://www.ndt.net/?id=446>
- 59) J. Yasuhiro: Study on residual stress measurement of roll for rolling mill, 33rd Mechanical Working and Steel Processing Conference, Vol.XXIX, Iron and Steel Society of AIME, Warrendale (PA), (1992), 187.
- 60) S. H. Kang and Y. T. Im: Thermo-elasto-plastic finite element analysis of quenching process of carbon steel, J. Mater. Proc. Technol, **192-193** (2007), 381. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.101>
- 61) A. Majorek, B. Scholtes and H. Müller: Macherauch E. Influence of heat transfer on the development of residual stresses in quenched steel cylinders, Steel Research, **65** 4 (1994), 146. <https://doi.org/10.1002/srin.199400944>
- 62) C. G. Sun, J. W. Kim and S. M. Hwang: Investigation of the thermo-mechanical behavior of type 304 stainless slab in hot charge rolling condition by the finite element method, ISIJ International, **43** 11 (2003), 1773. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.43.1773>
- 63) K. Arimoto, F. Ikuta, T. Horino, S. Tamura and M. Narazaki, Y. Mikita: Preliminary study to identify criterion for quench crack prevention by computer simulation, Trans. Mater. Heat Treat, **25** 5 (2004), 486.
- 64) 野田尚昭, 佐野義一, 高瀬康, 堀田源治: (続) 産業用ロール・ローラの技術的課題と解決 (12) 中実ワークロールの残留応力測定のための円板切り出し法について, 金属, **94** 2 (2024), 1.
- 65) N.A. Noda, Y. Sano, M. R. Aridi, K. Tsuboi and N. Oda: Residual stress differences between uniform and non-uniform heating treatment of bimetallic roll; Effect of creep behavior on residual stress, Metals, **8** (2018), 952. <https://doi.org/10.3390/met8110952>
- 66) N.A. Noda, M. R. Aridi, R. Torigoe, K. Tsuboi and Y. Sano: Reduction of residual stress in bimetallic work roll by tempering, J. Technology Plasticity, **61** 716 (2020), 183.
- 67) R. B. R. Hamid, M. Ahmad, H. I. Mohd, R. A. K. Mohammed and J. Hassan: Premature failure analysis of forged cold back-up roll in a continuous tandem mill, Mater. Des, **32** (2011), 4376. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.078>
- 68) X. Kang, D. Li, L. Xia, J. Campbell and Y. Li: Development of cast steel back-up roll, Int. J. Cast Met. Res, **19** (2006), 66. <https://doi.org/10.1179/136404606225023327>
- 69) D. Wang and S. Rong: Study on cast-weld process and composite interface of bimetal composite roll sleeve, J. Mater. Res. Technol, **12** (2021), 848. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.032>
- 70) 曾田範宗: 軸受け, 岩波全書, (1964), 196.
- 71) M. Imai: Creep of the roller bearing. Lubrication, J Jpn Soc. Lubr Eng, **4** 6 (1959), 307.
- 72) 村田順司, 鬼塚高晃: 内輪クリープの発生機構, Koyo Engineering. Journal., **166** (2004), 41.
- 73) 丹羽健: 転がり軸受のクリープメカニズム, NTN テクニカルレビュー, **81** (2013), 104.
- 74) J. Zhan, Y. Sakajiri, H. Takemura, K. Yukawa: Tech J NSK, 680 (2006), 13.
- 75) New Bearing Doctor: Diagnosis of bearing problems. Objective: Smooth & reliable operation. NSK, (1997). [accessed 28 June 2020]. <https://www.nsk.com/common/data/ctrGpdf/e7005c.pdf>
- 76) J. Zhan, H. Takemura and K. Yukawa: A study on bearing creep mechanism with FEM simulation, Proc

- Int Mech Eng Congr Expo. Seattle (2007). <https://doi.org/10.1115/IMECE2007-41366>
- 77) J. Zhan, K. Yukawa and H. Takemura: Analysis of bearing outer ring creep with FEM. Adv Tribol. Berlin, (2009). https://doi.org/10.1007/978-3-642-03653-8_74
- 78) 野口昭治, 市川顕太郎: すきまばめにおける軸と内輪のクリープに関する研究, 日本機械学会 [No.12-14] 第12回機素潤滑設計部門講演会論文集 [松山], (2010), 89.
- 79) 寺本貴之, 佐藤穰: 軸受荷重負荷下のボールベアリングの外輪クリープに対する予測手法の確立, 自動車技術論文集, **46** 2 (2015), 355. <https://doi.org/10.1135/jsaeronbun.46.355>
- 80) C. Bovet and L. Zamponi: An approach for predicting the internal behaviour of ball bearings under high moment load. Mech Mach Theory, **101** (2016), 1. <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2016.03.002>
- 81) A. Maiwald, E. F. E. Leidich: Simulations of irreversible relative movements (creeping) in rolling bearing seats – Influential parameters and remedies, Proc World Congr Eng Comput Sci San Fr. 2 (2013). http://www.iaeng.org/publication/WCECS2013/WCECS2013_pp1030-1035.pdf
- 82) T. Schiemann, S. Porsch, E. Leidich and B. Sauer: Intermediate layer as measure against rolling bearing creep, Wind Energy, **21** 4 (2018), 26. <https://doi.org/10.1002/we.2170>
- 83) N.A. Noda, R. A. Rafar, Y. Taruya, X. Zheng, Y. Tsurumaru, Y. Sano, Y. Takase, K. Yakagawa and K. Kondo: Interfacial slip verification and slip defect identification in shrink-fitted bimetallic sleeve roll used in hot rolling mill, Tribol Int., (2022). <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107793>
- 84) M. R. Aridi, R. A. Rafar, N.A. Noda, Z. Sun, Y. Sano, K. Takata and Y. Takase: Residual stress simulation for bimetallic sleeve roll constructed by shrink-fitting in comparison with bimetallic solid roll, Journal of Manufacturing Processes, **107** (2023), 252. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.09.068>
- 85) 濱田繁, 迫田優, 佐々木大輔, 上田正治, 野口博司: 微視組織構造に注目したパーライト鋼の疲労限度特性評価について, 材料, **60** 9 (2011), 790.
- 86) Sent Software-JMatPro®. <https://www.sentsoftware.co.uk/jmatpro>
- 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、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。日本機学会材料力学部門賞業績賞/貢献賞, 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。2022.04 九州工業大学名誉教授。
- 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。㈱日鉄エレクトックスを経て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。