

軸受軌道輪の普通焼入れと浸炭焼入れの変形メカニズムの解析

Analysis of Distortion Mechanism of Rolling Bearing Rings in Normal Quenching and Carburized Quenching

木澤克彦 K. KIZAWA

This report introduces an application example of a heat treatment simulation technology in analyzing phenomena of the heat treatment process which are complicated and difficult to verify through experiments. Defining heat transfer coefficients conforming to actual temperature measurements has made it possible to perform heat treatment simulations that correspond closely to actual distortions. We have utilized this simulation technology to verify the heat distortion mechanism in normal quenching and carburized quenching, and as a result, predict that regarding heat treatment distortion produced in the oil quenching process, normal quenching, which causes martensitic transformation first on surfaces, is more sensitive than carburized quenching. From this, we have established that in the case of normal quenching, uniform cooling in the oil quenching process is effective for reducing heat treatment distortion, whereas for carburized quenching, it is important to implement measures in other processes.

Key Words: heat treatment simulation, oil quenching, heat transfer coefficient, distortion, transformation plasticity

1. はじめに

転がり軸受の軌道輪および転動体は、局部的に数GPaに及ぶ高い接触応力に耐える必要があるため、高炭素クロム軸受鋼（たとえば、JIS-SUJ系）に焼入れ焼戻し、あるいは浸炭鋼（たとえば、JIS-SCr系）に浸炭焼入れ焼戻しといった熱処理が適用される。

これら熱処理は強度を向上させる反面、熱処理変形を引き起こすという問題を生じさせる。この変形は後工程での矯正や研削により修正されるが、製造コストの上昇を招く主要因となる場合が多い。そのため、熱処理変形の低減に対する要求は高い。しかし、熱処理過程の諸現象（温度、相変態、応力、ひずみの変化など）は非常に複雑であり、また高温での浸炭や均熱、焼入れでの急速冷却などの各工程の可視化が困難である。このため、熱処理変形の低減に対しては「より単純な製品形状でより均一に加熱・冷却するといった定性的な指標」の対策から脱却できていないと思われる。たとえば、浸炭焼入れ過程における昇温、浸炭、均熱、焼入れ（冷却）の各工程の熱処理変形への影響度はいまだ不明点が多い。このため、熱処理変形の低減は、一般的に高度な熟練技術者

の体験に基づく試行錯誤により対策されているのが実状である。

一方、熱処理シミュレーションは熱処理過程の物理現象を有限要素解析によって計算する技術であり、いくつかの汎用のソフトウェアが実用化されている¹⁾。このシミュレーション技術は従来の実験で困難であった熱処理過程の諸現象の履歴を検証することが可能であり、熱処理変形を生じさせた条件と結果の因果関係を考察するための有効な手段と成り得ると考える。しかし、現状の熱処理シミュレーション技術も解析精度の面で課題があり、解析に必要なさまざまな入力データ（材料特性データや熱伝達係数など）の精度の向上を図る必要があることが指摘されている^{2,3)}。

そこで、本報では、当社の主力製品である軸受の軌道輪を対象とした熱処理シミュレーションの解析精度向上への取り組みと熱処理変形の低減に向けた一考察として、同一形状の軌道輪に普通焼入れと浸炭焼入れ処理を施したときの冷却過程における熱処理変形メカニズムの相違について実験とシミュレーションにより検証した事例を紹介する。

2. 熱処理シミュレーションの精度向上の取組み

2.1 熱処理シミュレーションの構成

熱処理工程の加熱・冷却における温度、相変態、応力、ひずみなどの諸現象をシミュレーションするための枠組みは1980年代に構築されている⁴⁾。熱処理シミュレーションの構成を図1に示す。【I. 数値解析】は熱処理を取り扱うのに必要な熱伝導、相変態、弾塑性、炭素拡散現象について、基礎方程式に基づいて有限要素法により計算される部分である。また、計算の中でお互いが及ぼし合う影響(以下、連成)が考慮されている。次に【II. 材料特性】は計算に必要な材料特性データを示し、鋼種に対する熱物性値、機械的性質、線膨張係数、相変態特性(等温変態線図、変態塑性係数など)の温度、炭素濃度依存性のデータが必要となる。最後に【III. 境界条件】は、弾塑性解析時に必要な力学的な拘束条件、焼入れ時(冷却時)の温度変化を計算するのに必要な熱伝達係数などが該当する。当社では以上のような構成をシステム化した熱処理シミュレーションソフトウェアDEFORMTM-HT⁵⁾を用い、軸受軌道輪の変形、残留応力分布、ミクロ組織相分布、硬さ分布、炭素量分布などの予測を行っている。

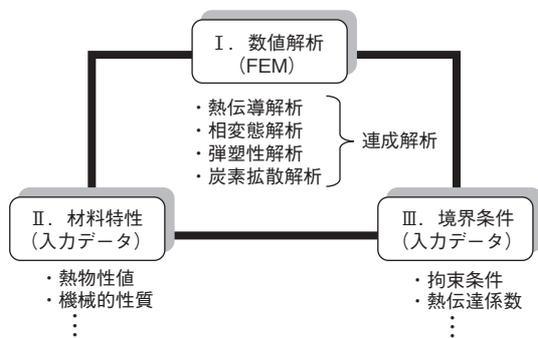


図1 熱処理シミュレーションの構成
Heat treatment simulation system

2.2 軸受軌道輪における熱伝達係数の導出事例

実際の熱処理現象を精度よくシミュレーションするためには、図1で示した【I. 数値解析】、【II. 材料特性】、【III. 境界条件】が三位一体であることが重要である。ここで、境界条件としての熱伝達係数は、被処理部材の寸法、形状、加熱温度、焼入れ冷却剤の種類、冷却剤のかくはん方法などの要因により、大きく変化し、解析結果に大きな影響を及ぼすとされている³⁾。そして、これらの要因は、一般的に熱処理を取り扱う企業(以下、シ

ミュレーションソフトのユーザ)の固有の技術や条件である場合が多い。すなわち、ユーザは、自社の製品、熱処理条件に対応する熱伝達係数をノウハウとして蓄積しておく必要がある。ここでは、軸受軌道輪を油焼入れした場合の熱伝達係数の導出事例について紹介する。

2.2.1 熱伝達係数導出法の選択

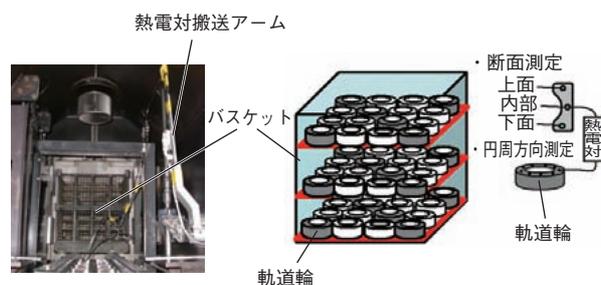
焼入れ時の急速冷却過程における熱伝達係数の代表的な導出方法として、温度勾配測定法、定常法、集中熱容量法、逆解析法がある。これらのうち一般的に用いられる方法は集中熱容量法と逆解析法である⁶⁾。本報では、熱伝導率が比較的小さい鋼部品に適用される逆解析法を用い、被熱処理部材の任意の位置における冷却曲線の実測値から表面熱伝達係数を導出した事例について紹介する。

2.2.2 熱伝達係数の導出

1) 冷却曲線の実測

当社では油槽真空パーシジ式横型バッチ炉を用いて昇温-均熱-冷却工程で連続的に温度測定を実施し、実際の焼入れ時の冷却曲線を取得している。図2(a)に示す加熱室から油槽へのバスケットの移動に追従する熱電対搬送アームを設けることにより、図2(b)のバスケット内の任意の位置における軌道輪断面や円周方向位置の昇温・均熱・冷却の温度変化を測定できる。

図3は外径 $\phi 72\text{mm}$ 、内径 $\phi 62\text{mm}$ 、幅17mmの軌道輪をバスケット内に1個置きし、保持温度である830℃からコールド油(油温80℃、かくはん無し)で焼入れしたときの冷却曲線である。なお、温度測定は $\phi 1\text{mm}$ の接地型シース熱電対で実施している。図より、軌道表面・上面・下面での冷却速度に差が生じ、それらの速度は下面、上面、軌道表面の順で大きいことが確認できた。



(a) バッチ炉加熱室内部構造 (b) 軌道輪の荷姿と温度測定位置

図2 冷却曲線の測定方法
Measurement method for cooling curves

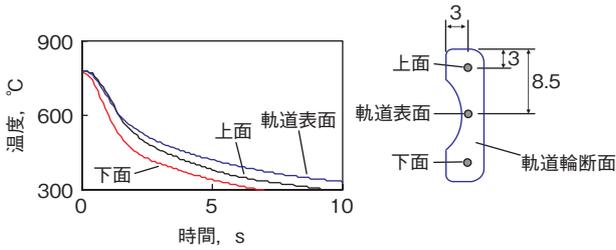


図3 軌道輪の冷却曲線
Cooling curves of rolling bearing ring

2) 逆解析法の適用と熱伝達係数の導出

逆解析では、図3で示したような実測値を入力データとし、DEFORMTM-HTの逆解析テンプレート「Inverse Heat Transfer Templates」を用いることによって、冷却曲線が実測値÷計算値となる熱伝達係数を導出している。ここで、逆解析法は、解に一意性がなく実測値÷計算値となる熱伝達係数の解が複数存在するという欠点があることに注意しなければならない。すなわち、逆解析の入力データで必要となる熱伝達係数の初期値の与え方によって導出される熱伝達係数の解が変化する。そのため、逆解析するにあたっては、物理的な原則に沿った適切な初期値を設定する必要がある。

そこで、当社では、図4に示す油のような液体冷却剤の特徴である蒸気膜・沸騰・対流の各段階に区分けすることを前提条件とし、かつ類似形状（軌道輪の場合はリング試料が相当）で過去に報告されている熱伝達係数⁷⁾を参考として、逆解析を行う際の熱伝達係数の初期値を定義する方法を採用している。この方法により、たとえば、図3で示した軌道輪の油焼入れの場合、図5に示すような①～④境界面のそれぞれについて、蒸気膜・沸騰・対流段階の温度依存性を考慮した熱伝達係数を決定でき、実際の不均一冷却に対応した焼入れシミュレーションが可能となる。

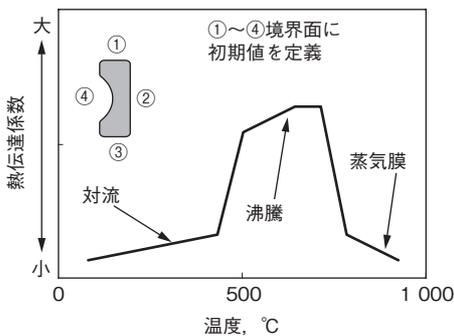


図4 熱伝達係数の初期値の前提条件
Precondition for the initial heat transfer coefficient

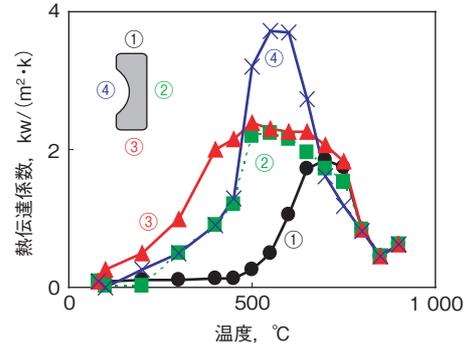


図5 導出された熱伝達係数
Calculated heat transfer coefficient

3. 普通焼入れと浸炭焼入れの熱処理変形メカニズムの検証

3.1 メカニズム検証の着眼点

図6に軌道輪における普通焼入れ品と浸炭焼入れ品の熱処理変形発生までの流れの一例を示す。図に示す通り、浸炭焼入れは普通焼入れに比べ材料が浸炭鋼であることや前工程の鍛造、旋削条件、また浸炭・均熱工程が追加される点で異なる。しかし、熱処理変形は熱処理(油冷)後の変形量で評価されることが多いため、たとえば、浸炭焼入れ品で追加される浸炭・均熱工程が最終の熱処理変形にどのように影響し、また均熱工程のみの普通焼入れ品に比べどのように異なるかなどについて論じた報告が少ない。換言すれば、普通焼入れや浸炭焼入れ軌道輪の熱処理変形の低減に対し、それぞれどの工程に注力すべきが明らかにされていないと思われる。ここでは、工程別の熱処理変形の寄与度を明らかにする第1ステップとして、普通焼入れと浸炭焼入れの油冷工程のみの熱処理変形に及ぼす影響を検証した事例を紹介する。具体的には、前工程の残留応力、および昇温・均熱・浸炭工程の影響を排除した軌道輪による焼入れ実験とその油焼入れに相当する熱伝達係数を用いた熱処理シミュレーションで検証した。

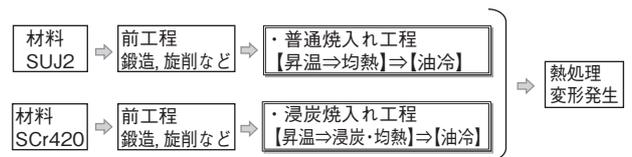


図6 普通焼入れと浸炭焼入れの工程
Process of normal quenching and carburized quenching for rolling bearing ring

3.2 実験およびシミュレーション条件

3.2.1 焼入れ実験用試料

試料はSUJ2とSCr420の2種類の素材から製作した軌道輪(φ72 - φ62 - 幅17)とした。SUJ2の軌道輪は球状化焼鈍、旋削加工後、応力除去焼鈍した試料を準備した。一方、SCr420の軌道輪は旋削加工後、真空浸炭後放冷し所定の炭素濃度分布とし、応力除去焼鈍した試料を準備した。それぞれの試料における軌道表面近傍の熱処理品質を図7、8に示す。図7に示すSUJ2軌道輪は硬さが約200HVの均一な球状化焼鈍組織である。一方、図8に示すSCr420軌道輪は、表面が0.8%の炭素量のパーライト、セメンタイト組織、内部が0.2%の炭素量のフェライト、パーライト組織であり、表面硬さは約300HV、内部硬さは約150HVである。

3.2.2 焼入れ実験条件

焼入れ実験は、油冷工程のみの影響を検証するため、昇温・均熱工程を短時間で均一に処理可能な高周波誘導加熱を適用した。図7、図8で示したSUJ2軌道輪、SCr420軌道輪に対し、周波数1kHz、出力100kW、加熱時間1min以内で誘導加熱後、コールド油(油温80℃、かくはん無し)で焼入れ処理を実施し、前工程の残留応力、長時間浸炭による変形の影響を除外した油冷のみの熱処理変形量を評価した。また、焼入れ後の品質は、SUJ2軌道輪は全断面約820HVであり、SCr420軌道輪は表面硬さが約820HV、内部硬さが約480HVである。

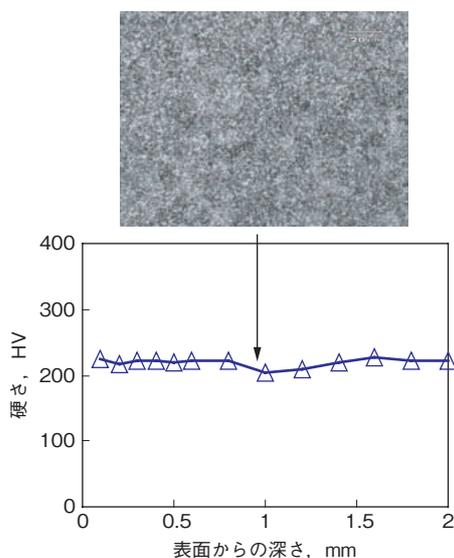


図7 SUJ2軌道輪の焼入れ前の品質

Pre-quenching hardness and microstructure of SUJ2 rolling bearing ring

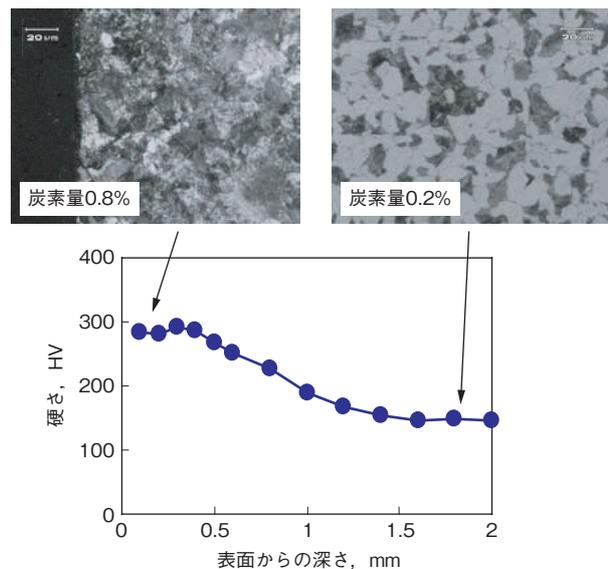


図8 SCr420軌道輪の焼入れ前の品質

Pre-quenching hardness and microstructure of SCr420 rolling bearing ring

3.2.3 焼入れシミュレーション条件

解析モデルはSUJ2軌道輪、SCr420軌道輪ともに図9に示す三次元有限要素モデルとし、YZ面を対称とする1/2モデルとした。要素数は19188、節点数は22089である。使用した材料特性データは、当社が保有するSUJ2、SCr420相当の温度、炭素濃度依存性を考慮した熱物性値、機械的性質、線膨張係数、相変態特性(等温変態線図、変態塑性係数など)である。実験に対応する昇温・均熱工程は全節点均一加熱とし、油冷のみ図5のコールド油(80℃、かくはん無し)の熱伝達係数によって不均一冷却をシミュレーションした。また、SCr420軌道輪は焼入れ解析前に炭素拡散解析を行い、図8の真空浸炭で得た熱処理品質と一致する図10の炭素量分布をシミュレーションした後、油冷解析を実施した。

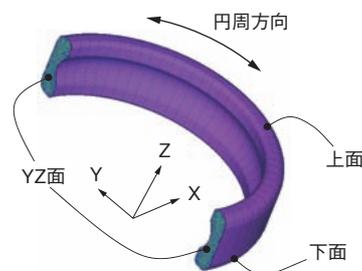


図9 有限要素モデル
Finite element model

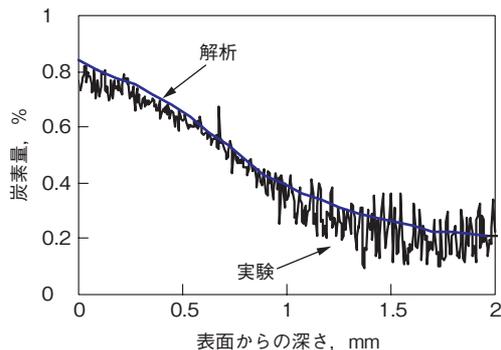


図10 SCr420 軌道輪の炭素量の実験と解析値
Experimental and simulated carbon profiles of SCr420 rolling bearing ring

3.3 結果と考察

3.3.1 油冷完了後の変形量と油冷過程の変形履歴

図11 に油冷完了後の熱処理変形の実測値と計算値を示す。なお、以降で述べる熱処理変形は、軌道輪の内外周面が軸方向に対して傾く変形状態(以下、たおれ変形)のことを指す。図より、実測値と計算値は良い対応を示し、普通焼入れのSUJ2 軌道輪の方が浸炭焼入れのSCr420 軌道輪より正のたおれ変形が大きくなることが分かった。

次に、シミュレーションにより求めた油冷過程のSUJ2 軌道輪とSCr420 軌道輪の温度とたおれ変形の履歴を図12 に示す。SUJ2 軌道輪の場合、油冷開始から5.3秒後において上面側と下面側の不均一冷却に伴う熱収縮差によって上面側の半径方向寸法が下面側より大きくなる正のたおれ変形が現れる。次に、22.6秒後に上面側と下面側の半径方向寸法の逆転により上述した5.3秒後と逆向ききの負のたおれ変形となり、油冷完了後は再度5.3秒後と同じ正のたおれ変形となる過程をたどる。一方、SCr420 軌道輪も同様に油冷開始(ただし、炭素量の相違により熱膨張はSUJ2 軌道輪と異なる)から5.4秒後に不均一冷却による熱収縮差によって正のたおれ変形が現れる。しかし、24.2秒後はSUJ2 軌道輪で発生したような上面側と下面側における半径方向寸法の相対関係の逆転がほとんど発生せず、油冷完了後も24.2秒後と同じ変形状態を保持しSUJ2 軌道輪で生じたたおれ変形が発生していないことが分かる。以上のことより、SUJ2 軌道輪とSCr420 軌道輪の油冷時の変形履歴は異なる可能性が高いと推測できる。

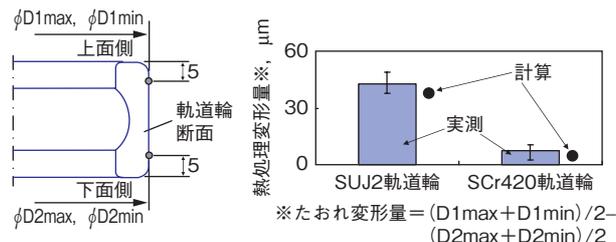


図11 油冷後の熱処理変形量の計算値と実測値
Simulated and experimental distortion after oil quenching

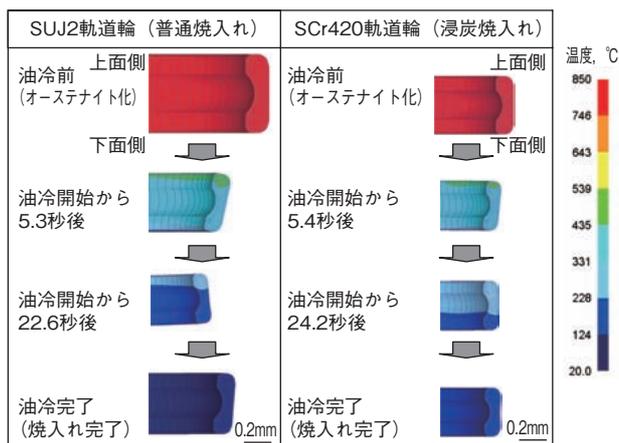


図12 シミュレーションによるSUJ2 軌道輪とSCr420 軌道輪の油冷過程の温度と熱処理変形
Simulated temperature and distortion change through oil quenching of SUJ2 and SCr420 rolling bearing rings

3.3.2 普通焼入れと浸炭焼入れの変形メカニズムの比較

前項で普通焼入れと浸炭焼入れにおける油冷後のたおれ変形の履歴とその量が異なることが実験とシミュレーションにより明らかとなった。この理由を油冷過程のマルテンサイト変態、およびひずみの変化から検討した。図13 にたおれ変形で異なる挙動を示した22.6秒後のSUJ2 軌道輪と24.2秒後のSCr420 軌道輪のマルテンサイト分率を示す。また、図13中に図示した表面・内部の位置におけるマルテンサイト体積分率の油冷過程における変化を図14 に示す。図13、14より、普通焼入れのSUJ2 軌道輪のマルテンサイト変態は冷却速度の大きい下面側表面から内部に向かって進行し、浸炭焼入れのSCr420 軌道輪は冷却速度と無関係に内部から進行することが分かる。この浸炭焼入れのマルテンサイト変態が内部から進行する挙動は、Ms点(マルテンサイト変態開始温度)が炭素量に依存し、その量が多くなると低下することに起因する⁹⁾。

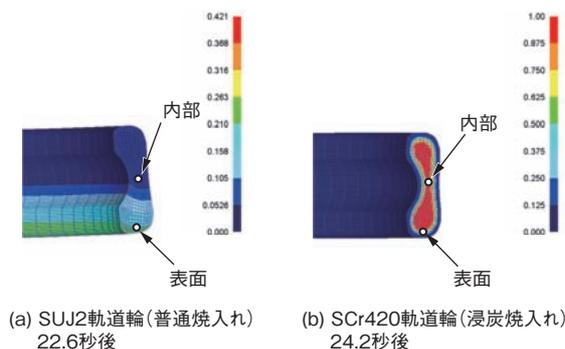


図 13 油冷過程のマルテンサイト体積分率
Simulated results of volume fraction of martensite during oil quenching

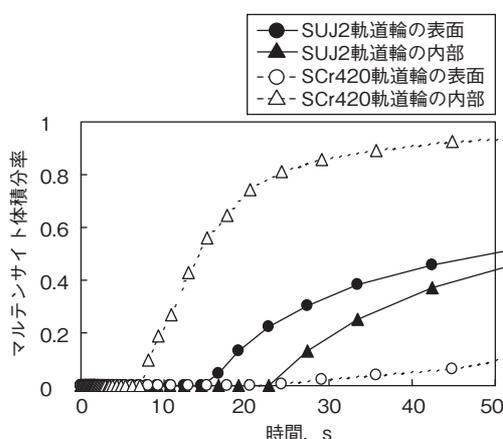


図 14 マルテンサイト体積分率の冷却時間に対する変化
Change of volume fraction of martensite during oil quenching

次に、上述の普通焼入れと浸炭焼入れのマルテンサイト変態進行の相違がたおれ変形に及ぼす影響をさらに検討するために、その変形に係る円周方向のひずみについて整理した。円周方向の各ひずみは軌道輪の上面側 AB と下面側 CD に沿って抽出した。図15、16 に油冷途中 (SUJ2 軌道輪 = 22.6 秒後, SCr420 軌道輪 = 24.2 秒後) と油冷完了後における円周方向の全ひずみと変態塑性ひずみを示す。ここで、全ひずみとは弾性、熱、変態、塑性、変態塑性の各種ひずみの総和であり、軌道輪のたおれ変形に直接対応する。また、変態塑性ひずみとはマルテンサイト変態中に材料の弾性域のような低応力下においても生じる熱処理特有の塑性ひずみのことであり、静水圧を除いた応力 (偏差応力) とマルテンサイト変態速度の積が変態塑性ひずみ速度に比例するという関係式により計算される⁸⁾。

図15のSUJ2軌道輪の場合、(a)の油冷途中ではマルテンサイト変態が進行する下面側のみ変態膨張により圧縮の変態塑性ひずみが発生している。一方、上面側は

マルテンサイトが未変態のため変態塑性ひずみは発生していない。また、全ひずみは上面側の方が下面側より相対的に小さくなり負のたおれ変形を反映した値となっている。この上面側と下面側の変態塑性ひずみの関係は (b) の油冷完了でマルテンサイト変態が全断面で完了した後もおおむね変化せず、この関係が上面側と下面側の全ひずみの関係に反映されていることが分かる。すなわち、普通焼入れにおいて正のたおれ変形が生じる要因は、油冷過程で生じる上面側と下面側の変態塑性ひずみの差によるものと推定できる。

一方、図16のSCr420軌道輪の場合、(a)の油冷途中は表面が未変態のオーステナイトが内部を拘束した状態で内部からマルテンサイト変態が進行する。その結果、内部に圧縮の変態塑性ひずみが発生し、そのひずみはSUJ2軌道輪と同様、下面側の冷却速度が大きい不均一冷却の影響を受け下面側の方が上面側より大きい。ただし、SUJ2軌道輪の場合と異なり、表面近傍はマルテンサイト変態が発生していないため、変態塑性ひずみが発生せず上面側と下面側ともにゼロである。その後、(b)の油冷完了後に(a)の時点で未変態であったマルテンサイト変態が完了することによって、表面近傍に圧縮の変態塑性ひずみが発生している。ここで、注目すべきは、(b)の油冷完了後のSCr420軌道輪はSUJ2軌道輪に比べ上面側と下面側の変態塑性ひずみの差が明らかに小さい点である。この結果、浸炭焼入れのSCr420軌道輪のたおれ変形が普通焼入れのSUJ2軌道輪のたおれ変形に比べ小さくなったといえる。

以上のことより、普通焼入れと浸炭焼入れのたおれ変形量が異なる原因は、不均一冷却下における軌道輪の上面側と下面側の変態塑性ひずみの挙動が表面先行のマルテンサイト変態の場合 (普通焼入れ) と内部先行のマルテンサイト変態の場合 (浸炭焼入れ) で大きく異なるためと考えられる。この結果は、熱処理変形の低減の対策をするにあたり、普通焼入れは油冷工程における冷却の均一化が有効である一方で、浸炭焼入れは他の工程の対策も重要となるという指針を与えてくれる一例である。

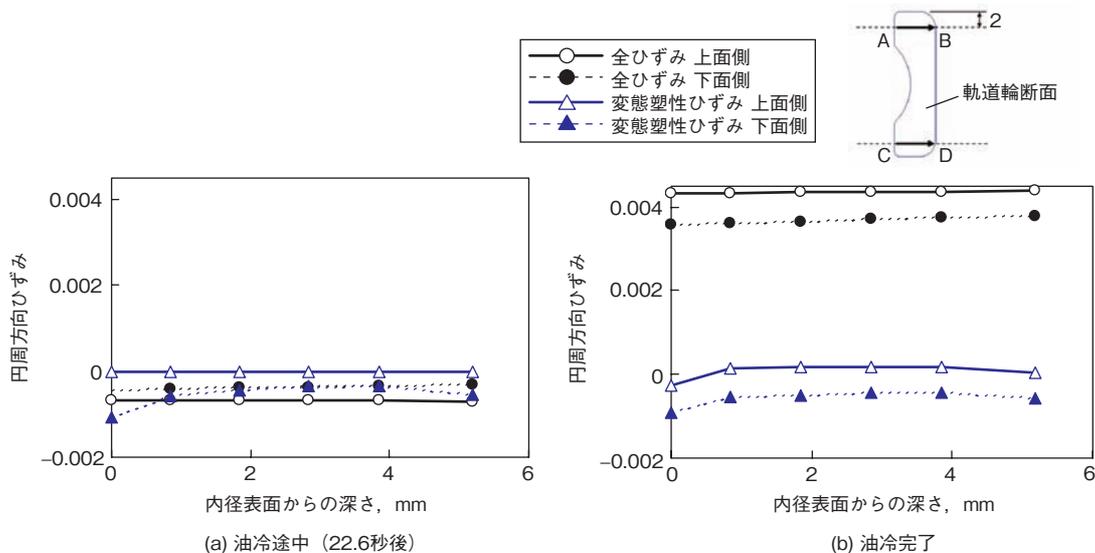


図15 SUJ2 軌道輪（普通焼入れ）の円周方向の全ひずみと変態塑性ひずみ

Simulation results of tangential total strain and transformation plasticity strain during quenching of SUJ2 rolling bearing ring

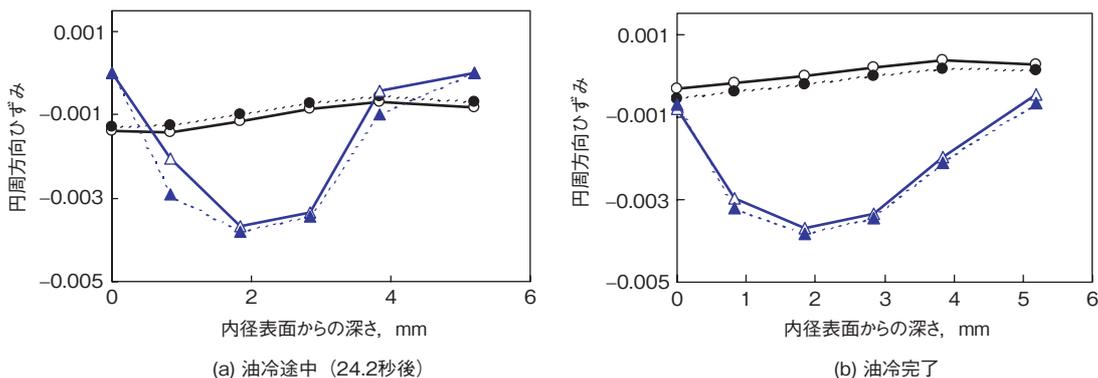


図16 SCr420 軌道輪（浸炭焼入れ）の円周方向の全ひずみと変態塑性ひずみ

Simulation results of tangential total strain and transformation plasticity strain during quenching of SCr420 rolling bearing ring

4. おわりに

熱処理シミュレーションにおける解析精度向上の取組み、およびその熱処理シミュレーション技術を利用した普通焼入れと浸炭焼入れの熱処理変形メカニズムについて検証した事例を紹介した。実測による冷却曲線に準じた熱伝達係数の定義により実際の変形と良い対応をする熱処理シミュレーションが可能となり、また、メカニズム検証の結果、油冷工程における熱処理変形は表面先行でマルテンサイト変態する普通焼入れの方が浸炭焼入れより敏感であると推定できた。すなわち、熱処理変形の低減対策において、普通焼入れは油冷工程における冷却の均一化が有効であり、浸炭焼入れは他の工程の対策も重要となるということが示唆された。

実験によって検証困難な複雑な熱処理プロセスの現象解明に対し、本報で紹介したような熱処理シミュレーション技術を今後も積極的に活用することによって、低変形や高機能化に貢献する次世代の材料・熱処理技術の開発を推進していきたい。

参考文献

- 1) たとえば 七野勇人, 長坂悦敬, 高橋知之, 高田 徹 : 建設機械歯車における熱処理シミュレーションシステムの開発, Komatsu Technical Report, vol. 44, no. 131 (1993)46.
- 2) K. Okamura : Material Properties and Database, Journal of the Society of Material Science, Japan, vol. 55, no. 5, (2006)529.
- 3) M. Narazaki, E. Oki, M. Kogawara, A. Shirayori, S. Fuchizawa : Effect of Surface Heat Transfer Coefficients on Quenching Simulation Accuracy of Steel Parts, Journal of the Visualization Society of Japan, vol. 23, Suppl, no. 2, (2003)197.
- 4) 岡村一男, 河嶋寿一 : 熱処理応力の有限要素解析 (熱処理作業へのコンピュータの応用特集), 熱処理, vol. 28, no. 3(1988)141.
- 5) K. Arimoto, D. Lambert, G. Li, A. Arvind, W. T. Wu : Development of Heat Treatment Simulation System "DEFORM-HT", Proc. 18th Heat Treating Conf., ASM International, (1998)639.
- 6) 奈良崎道治 : 焼入れ冷却と焼入れシミュレーション, NACHI TECHNICAL REPORT, vol. 15A1, (2008).
- 7) 市谷克実 : 熱処理シミュレーション精度向上のための熱伝達率算出方法, 第 29 回熱処理研究会, (2006)1-1.
- 8) 山中 茂, 坂之上隆行, 吉井聡一, 井上達雄 : 浸炭焼入れ後の変形に及ぼす変態塑性の影響, 材料, vol. 48, no. 7, (1999)733.

筆者



木澤克彦*

K. KIZAWA

* 研究開発本部 研究開発センター
材料技術研究部