



# 鉄鋼材料の熱処理変形に関する シミュレーション技術の研究開発

Research and Development of the Simulation Technology about Heat Treatment Deformation of Steel Materials

名越 亮太\*<sup>1</sup> 渡邊 啓介\*<sup>2</sup> 中崎 盛彦\*<sup>3</sup>

NAGOSHI Ryota, WATANABE Keisuke and NAKASAKI Morihiko

Synopsis: Quenching process to produce high strength parts often causes a problem that the shape accuracy is deteriorated due to non-uniform deformation of the precision-machined parts during the heat treatment. This deterioration in shape accuracy results in undesired noise from EVs and HEVs, which are known for their superior quietness compared to that of ICEVs in operation. Furthermore, environmental load might increase due to an addition of manufacturing process for shape correction, or re-manufacturing due to the deviation from the shape specification.

The heat treatment simulation is used as an effective tool to suppress these deformations. In this review, we outlined the overview of the heat treatment simulation technologies that we developed. Our heat treatment transform simulation system is comprised of observation of the surface cooling behavior and computer simulation, enabling both reproduction of deformations during the quenching and identification of its causes. This system contributed to the development of new steel grades that can suppress heat treatment deformations, and the elucidation of cooling behavior of the shaft parts which have multiple shapes. Furthermore, by integrating deformation data obtained from a non-contact Coordinate Measuring Machine (CMM) to this system, it has become possible to estimate detailed mechanisms which cause the deformations in parts with complex shapes, such as gears.

Keywords: heat treatment; quenching; vapor film; FEM; quenching deformation; CMM; steel shaft; keyway; gear; transformation.

## 1. はじめに

近年、地球温暖化に伴う気候変動を背景に、2050年までのカーボンニュートラル実現が社会課題であり、製造業においても脱炭素社会の達成に向けてエコプロセス、エコプロダクトのニーズは益々高まっている。特に自動車業界においては、運転時の環境負荷が小さいEVやHEV等の次世代自動車主流となりつつある<sup>1)</sup>。これらに使用されるギヤ、シャフトといった駆動系部品には、製造時のCO<sub>2</sub>排出量削減に加え、静粛性の改善を見込んだ形状精度の向上が求められている<sup>2)</sup>。

これらの部品は高強度化を目的として、一般的に焼入れによる硬化熱処理が施される。この熱処理により変形が生じると、部品の形状精度の低下に繋がることや<sup>3)</sup>、変形を

修正するための工程追加、または形状規格外れによる再製造により、環境負荷増大にも繋がってしまう恐れもある。

熱処理変形は部品の形状、配置や積み方などの荷姿、攪拌などの焼入れ環境に応じて個々の部品に生じる冷却不均一に起因することが知られている<sup>4,5)</sup>。この冷却不均一は焼入れ時の蒸気膜の発生と崩壊が不均一に起こることによって発生する<sup>6,7)</sup>。つまり熱処理変形は、熱処理時の様々な環境条件が複雑に組み合わさって生じる蒸気膜の状態が強く関係しており、一様な原因対策を行うことが難しい<sup>8)</sup>。

そこで、当社では熱処理中の蒸気膜状態と温度およびひずみの関係解明から、熱処理変形の原因究明とそれに基づく対策の立案を目指し、熱処理変形シミュレーションシステムを導入し<sup>9)</sup>、様々な部品への適用を試みてきた<sup>10,11)</sup>。

\*1 研究・開発センター 基盤研究室 予測研究グループ

\*2 研究・開発センター プロセス開発室 塑性加工グループ

\*3 品質保証部 部長 博士(工学)

本稿では、カーボンニュートラル達成への寄与を念頭に置いて、当社における熱処理シミュレーション技術の発展や、近年の取組みについて述べる。

## 2. 熱処理シミュレーションの概要

熱処理シミュレーションは熱処理時の温度、組織変化、内部の応力状態を、コンピュータを用いた有限要素法による数値解析により再現・予測する方法である。過去には、生産現場の長年の勘や経験から鋼種や形状ごとに様々な熱処理条件が適用されていたが、シミュレーションを適用することで大掛かりな実験や現場の量産テストに頼ることなく、形状や組織などを予測して最適な熱処理条件を探し出すことが可能となる<sup>12)</sup>。

熱処理シミュレーションは1950年代の熱応力解析に関する研究から始まり、1980年代に井上らによってFig.1に示す変態-熱-力学を連成させた数学モデルが構築された<sup>13)</sup>。当初、こうしたプログラムは高度な知識を必要とするため、二次元モデルを中心とした研究開発段階での限定的な使用に留まっていた。そして、1990年から2000年代にかけて、この理論を用いた熱処理シミュレーションソフトが開発されたことにより工業的な利用へ展開され始め、一般の技術者でも熱処理条件、部品形状、材料特性などのデータを入力することで部品の焼入れ後硬さや残留応力、変形の予測が可能となった<sup>13-15)</sup>。また、2000年代以降はモデリングなどの解析に関する技術やコンピュータの性能の発展、そしてシミュレーションに入力する材料データベースが組み込まれた市販ソフトの登場に伴い、より複雑な三次元モデルにも適用が広がっている<sup>16)</sup>。

有本は熱処理シミュレーションの理論とそこから得られる情報に基づき、シミュレーションひずみ法 (simulated strains-based approach) と呼ばれる、熱処理変形と残留応力の発生メカニズムを解明するための手法を提唱している<sup>17)</sup>。熱処理シミュレーションでは、部品内部の温度、応力、ひずみ、相の体積分率などの経時変化を計算することができるが、それらの変化によってFig.2に示す様々なひずみが生じる。具体的には、熱処理中の任意の時刻における応力 $\sigma$ に対応した弾性ひずみ $\epsilon^E$ 、温度変化による熱膨張・収縮に対応した熱ひずみ $\epsilon^{TH}$ 、材料の降伏点を越えた応力である偏差応力 $s$ に対応した塑性ひずみ $\epsilon^P$ 、相変態による膨張に対応した変態ひずみ $\epsilon^{TR}$ 、相変態中の応力状態によって発生した塑性現象に対応した変態塑性ひずみ $\epsilon^{TP}$ があり、これらを合計した全ひずみ $\epsilon^{Total}$ がその部品の変形を表す<sup>17)</sup>。そして、熱処理が完了した最終的な全ひずみの分布から、それを構成しているどのひずみが寄与しているかを分析することで熱処理変形に関係しているひずみの種類を特定し、ひずみ発生に作用する要因の把握により解決の糸口を得る手法である。

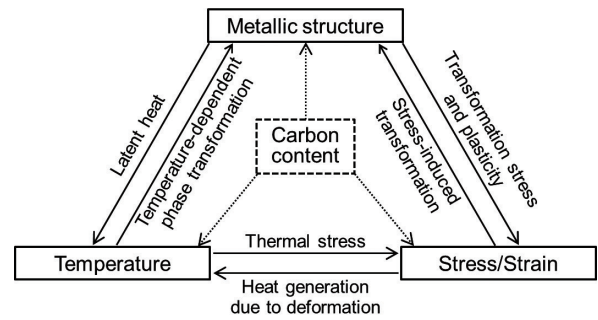


Fig.1 Outline of metallo-thermo-mechanics.

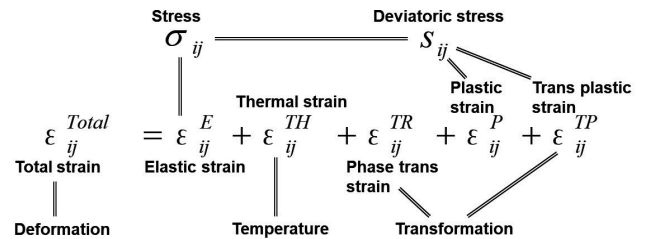


Fig.2 Relational expression of the strains.

当社では、このシミュレーションひずみ法の考え方に基づき、熱処理変形の主要因となるひずみの特定から変形原因の解明と熱処理変形対策の提案を行っている。

## 3. 当社の熱処理シミュレーションの取組み

ここでは、当社が行ってきた熱処理変形の実験・シミュレーションに関する研究について紹介する。

### 3.1 熱処理シミュレーションを活用した新鋼種の開発<sup>18)</sup>

当社における熱処理シミュレーションの導入は、2010年代の熱処理変形を抑制する新鋼種の開発がきっかけとなっている。

大量生産されるシャフトやギヤは、部品の小型軽量化のためにより高強度な鋼種開発のニーズがあり、高強度化のためにさまざまな合金成分の調整が行われている。しかし、それらの合金成分が熱処理変形の度合いにどれほど影響を及ぼすかということについては、熱処理変形の変化の過程を観察することが困難なため十分には解明されていなかった。そこで、マルテンサイト変態開始温度が異なる2鋼種でのシャフト状部品の熱処理変形に着目し、焼入れ実験による熱処理変形の挙動確認とシミュレーション活用による鋼材成分と熱処理変形との関係性の検証、それをもとに種々の化学成分の鋼について熱処理変形挙動を予測して熱処理変形抑制のための鋼の成分設計指針を得ている。

まず、汎用のはた焼鋼SCr420と、それに比べて大幅にマルテンサイト変態の開始温度が低い熱間工具鋼SKD61の2種類のシャフト状部品において、熱処理変形現象を容

易に観察するためにFig.3 (a)に示す全長に渡ってキー溝が付与された軸状試験片を作製した。そして、Fig.4 に示す治具を用いて吊り下げた状態で流動層炉にてFig.3 (b) に示す浸炭を模した熱処理を施し、無攪拌の油槽中に浸漬させることで焼入れした。その結果、Fig.5 に示すようにSCr420においては キー溝側を凸とする焼曲がりが発生した。一方で、SKD61ではSCr420の焼曲がりに対して逆向きのキー溝側を凹とする軽微な焼曲がりが発生し、鋼種によって焼曲がりの挙動が大きく異なることが分かった。

Fig.6に、前述の実験を模したキー溝付き試験片の熱処理変形シミュレーションを行った結果を示す。なお、SKD61、SCr420ともに左側にキー溝を配置し、また熱処理完了後の変位を30倍にして表示した。SKD61はキー溝側を凹とする逆向きの軽微な曲がり、SCr420はキー溝を凸とする曲がりとなることを定性的に再現できた。有本らのキー溝試験片の研究<sup>19)</sup>を参考にすれば、各ひずみ成分（ここでは弾性ひずみ $\epsilon^E$ 、塑性ひずみ $\epsilon^P$ 、熱ひずみ $\epsilon^{TH}$ 、変態ひずみ $\epsilon^{TR}$ 、変態塑性ひずみ $\epsilon^{TP}$ ）の総和である全ひずみ $\epsilon^{Total}$ について、キー溝側表面と背側表面の全ひずみ差が曲がりの大きさに反映される。そこで、Fig.7にシミュレーションによって求めた、冷却完了後の試験片長さ中央部における各ひずみ成分の差を示す。SKD61、SCr420のキー溝側の塑性ひずみ挙動の違いによって、SKD61ではキー溝側と背側の全ひずみの差がわずかな負の値となってFig.6に示した通りキー溝側を凹とする小さな焼曲がりが生じるのに対し、SCr420では大

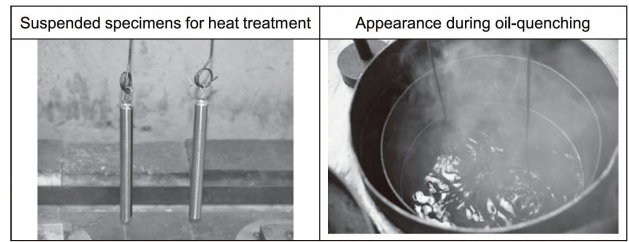


Fig.4 Appearance of oil-quenching experiment.

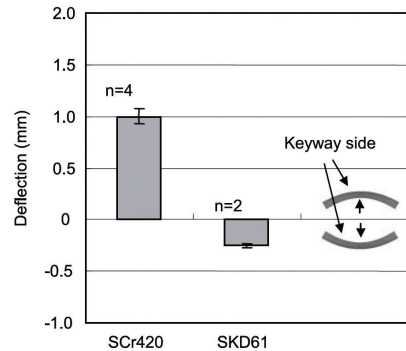


Fig.5 Deflection of oil-quenched keyway specimen.

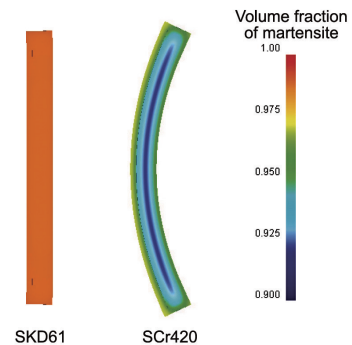


Fig.6 Deformation of keyway specimen. (Thirtyfold-amplified deformation is displayed.)

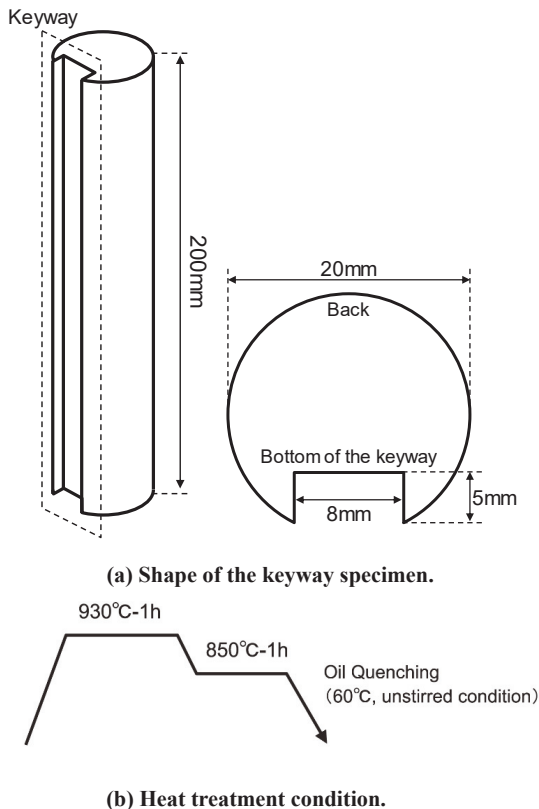


Fig.3 Experimental conditions.

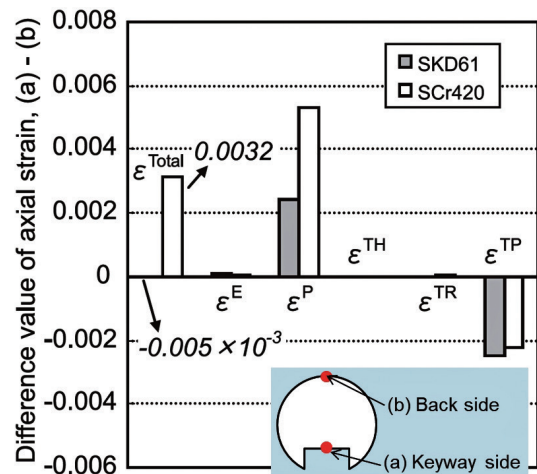


Fig.7 Difference of axial strain after quenching by simulation.

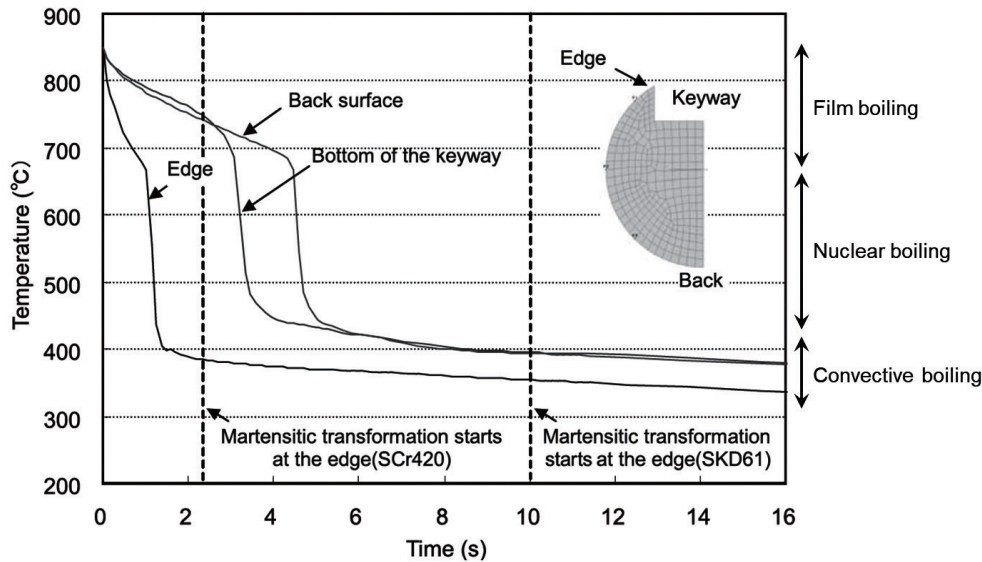


Fig.8 Cooling curve during quenching.

きく正の値となり、鋼軸はキー溝側を凸とする大きな曲がりが生じることが分かった。

試験片各部位の冷却曲線とともに、各鋼種の塑性ひずみが最も大きくなるキー溝エッジ部の変態開始タイミングをFig.8に示す。鋼部品の油焼入れ時の冷却段階は、冷却速度によって膜沸騰段階、核沸騰段階、対流段階に分けられ<sup>20)</sup>、SCr420のように、急冷であるキー溝エッジ部とその他の部分の温度差が大きいときに変態した場合、エッジ部に続いて急冷となるキー溝側は既に変態したエッジ部の硬化の影響を受けることで塑性ひずみの発生が抑制され、逆に背側では、先行して変態する部分がないために塑性ひずみが発生することで、Fig.7に示したキー溝部と背側の塑性ひずみ差が生まれると考えられた。つまり、焼入れ油の熱伝達係数が比較的 low、冷却が均一化されやすい対流段階付近で変態が開始するように鋼材成分を設計することによって、キー溝付き鋼軸の焼曲がりが抑制されることを見出したのである。この研究にて得られた鋼材成分と熱処理変形との関連性についての重要な知見が、油焼入れ時に部位によって不可避に生じる変態開始の時間差を小さくするための成分設計を施した低熱処理ひずみ鋼である「ECO-MAX4」の開発に繋がっている<sup>21)</sup>。

### 3.2 熱処理実験炉とシミュレーションを組合わせたシステムの開発<sup>9)</sup>

自動車業界におけるEV化の進行等を背景として、ギヤやシャフトなどの部品に対し、静粛性の改善を見込んだ形状精度の向上が求められているものの、それらの部品の高強度化に不可欠な焼入れ工程で発生する不均一な変形は、部品の形状精度に悪影響を及ぼす。この変形には部品の形状、熱処理中の荷姿などの様々な要因が関与するため、個々の部品に対する変形原因の究明やそれをもとにした対

策の立案は難しい状況であった。そこで当社は、実際の部品を用いた焼入れ実験により、不均一な変形をラボで再現する油焼入れ冷却能測定装置を導入し、そこで実測した各部位の冷却カーブと当社が保有する鋼材データベースを熱処理シミュレーションに適用することで、部品各位置でのひずみや応力を計算し、実験で再現された不均一変形をコンピュータで予測・再現するのみならず、その原因を特定することを可能とする「熱処理変形シミュレーションシステム」を開発・導入した。

油焼入れ冷却能測定装置の外観をFig.9に示す。本装置は、大別して制御盤、加熱炉、油槽からなる。測定対象となる部品を支持棒下端に取付け、加熱炉にて所定の温度に昇温後、支持棒を下降させ加熱炉下部の油槽内で油焼入れを行う。その際、部品の複数箇所を同時に測温し、冷却の不均一さを定量的に評価することが可能である。また、油

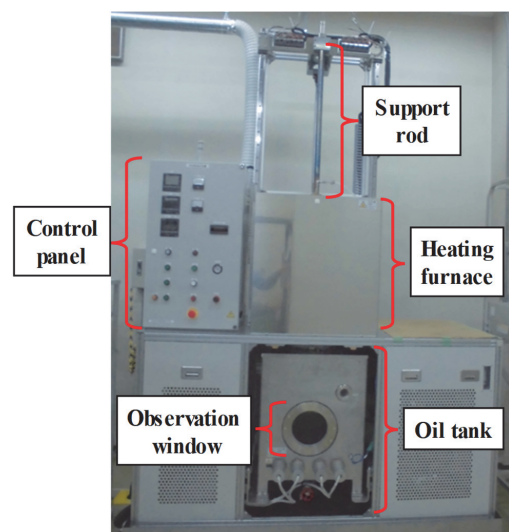


Fig.9 Appearance of cooling capacity measurement equipment.

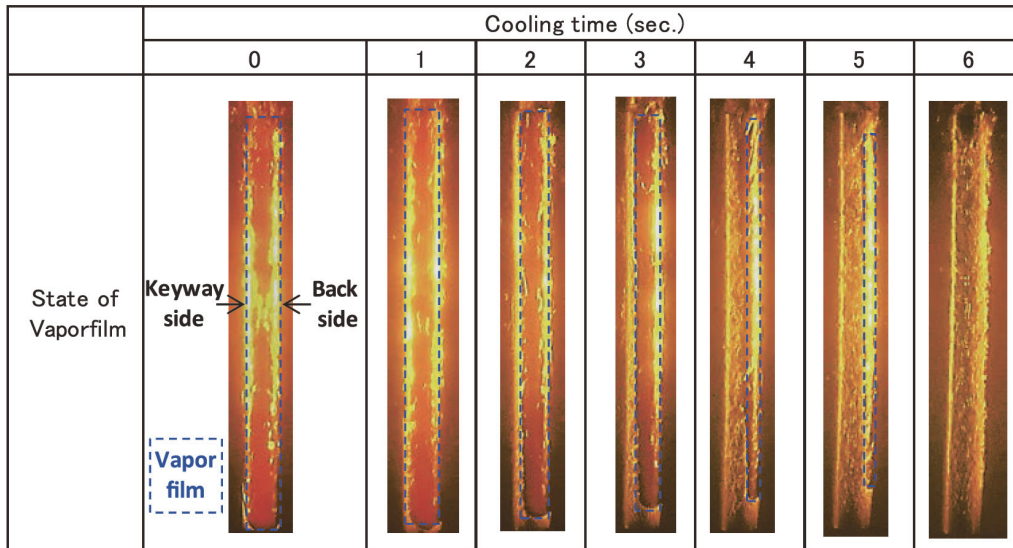


Fig.10 Collapse of vapor film during quenching for keyway specimen.

槽中央部にある観察窓より高速度カメラで観察することで、冷却の不均一さに大きく影響を及ぼす蒸気膜の発生・崩壊状態を直接観察できることも特徴である。

ECOMAX4およびSCr420の2鋼種において3.1節のFig.3に示すキー溝試験片に熱処理変形シミュレーションシステムを適用し、そこから得られた蒸気膜の崩壊挙動を観察した結果をFig.10に示す。冷却初期に試験片全体を覆っていた蒸気膜が溝側から先に崩壊し、この蒸気膜の崩壊は溝の背側へ向かって進行する様子が観察された。また、この蒸気膜挙動観察結果と同時に得られたキー溝試験片の溝側および背側の冷却曲線をFig.11に示す。膜沸騰段階から核沸騰段階への遷移は冷却初期に部品表面を覆っていた蒸気膜が崩壊することによって生じ、この遷移により、試験片は急冷となる。この遷移のタイミングが試験片部位によって異なるために、同一の試験片であっても冷却速度に差が生じ、熱処理変形を引き起こす冷却不均一となってしまふ。Fig.10に示した蒸気膜崩壊挙動と同様に、冷却曲線からも背側よりも溝側にて蒸気膜崩壊が早く、それに伴って溝側の冷却も速くなることで不均一冷却が生じていることが確認できた。

Fig.11の冷却曲線をもとに逆解析法<sup>22)</sup>を用いて熱伝達係数を同定し、熱処理シミュレーションへの入力データとした。熱処理変形シミュレーションから得られたSCr420およびECOMAX4のキー溝付き試験片の曲がり量を実測とシミュレーションにて対比させた結果をFig.12に示す。実測とシミュレーションの結果は、どちらもキー溝を凸とした曲がりを示しており、曲がり量はSCr420、ECOMAX4のどちらにおいても実測値と計算値が近かっただけでなく、SCr420よりもECOMAX4の曲がり量が小さいという鋼種ごとの熱処理変形挙動の違いを定量的に再

現できた。

以上の通り、開発した「熱処理変形シミュレーションシステム」の適用によって、鋼材部品の熱処理変形を高精度に推定する技術を確立した。

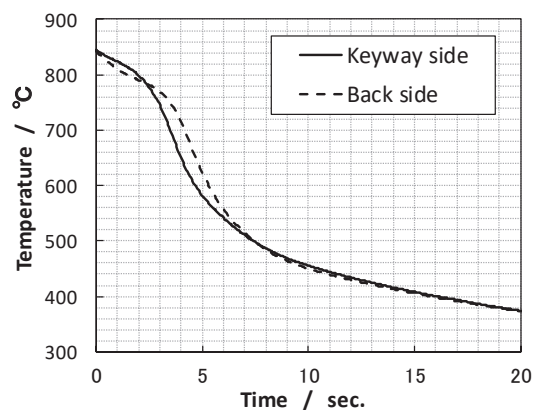


Fig.11 Measured cooling curve of keyway specimen.

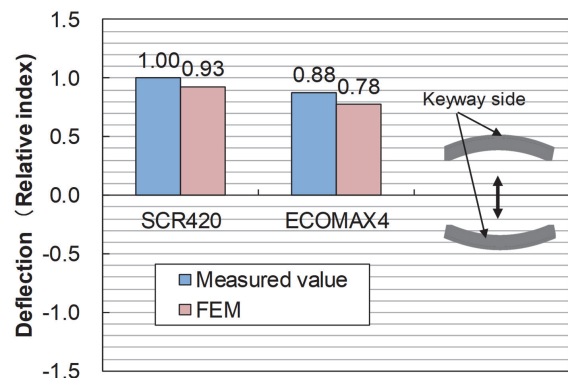


Fig.12 Comparison of deflection between measurement and simulation.

### 3.3 試験片形状と表面冷却状態の関係の解明<sup>10)</sup>

熱処理シミュレーションにおいて、鋼材焼入れ時の変形や残留応力を高精度に推定するためには、焼入れ時の鋼材各部位における熱伝達係数の実測が不可欠である。そこで、よりアプリケーションに近い段階の研究として、シャフト系部品を模擬した試験片を対象に、3.2節の熱処理変形シミュレーションシステムを適用した。これにより、蒸気膜の挙動観察と冷却曲線の実測値を得るとともに、この実験結果をもとに試験片各部位の熱伝達係数を同定し、試験片形状が熱伝達挙動に及ぼす影響について検証した。

Fig. 13 に示すカウンターシャフト等のギヤ部を想定した太径部を有する段付軸状試験片および比較対象である単純軸状試験片の2種類を対象とし、焼入れ実験を実施して各部位の測温を行った。Fig. 14 に軸状試験片と段付軸状試験片について、焼入れ中の蒸気膜崩壊挙動の観察結果を示す。段付軸状試験片において、上部細径部の蒸気膜は軸状試験片での実験時と同様に上端エッジ部を起点として崩壊しており、軸状試験片と段付軸状試験片の細径部は類似した冷却挙動であることが分かった。また、段付軸状試験片の細径部と太径部の接続部においては、太径部からの熱影響によってほかの部位よりも冷却初期の温度が高いにも関わらず、太径部のエッジの影響により軸状試験片の同部

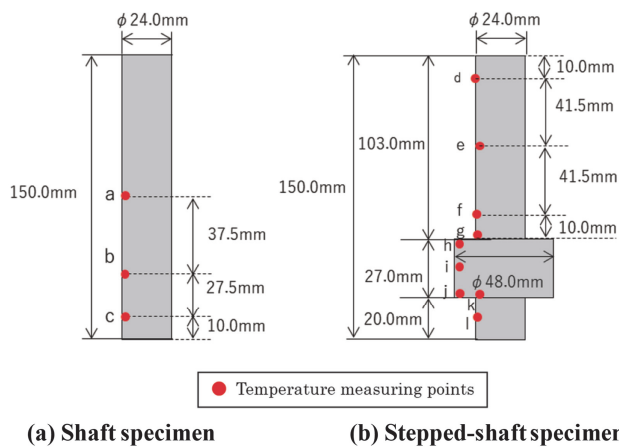


Fig. 13 Shape of specimens and temperature measuring points.

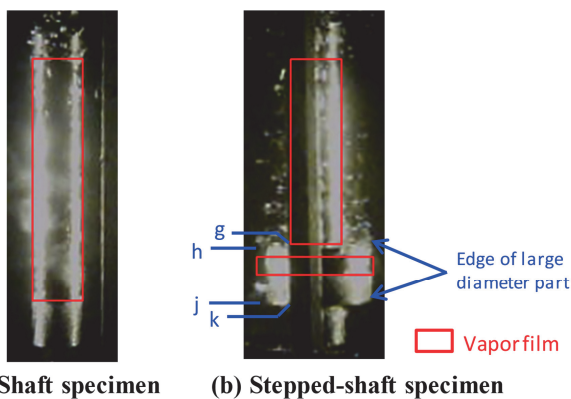


Fig. 14 Comparison of vapor film during quenching between shaft specimen and stepped-shaft specimen.

位に比べて蒸気膜崩壊が早期化する現象が観察されており、太径部を持つシャフト系部品の独特な冷却状態を明らかにした。

さらに、蒸気膜の生成・崩壊挙動観察結果および測温結果をもとに、試験片各部位の熱伝達係数を逆解析法により同定した。Fig. 15 に得られた熱伝達条件を示す。軸状試験片と段付軸状試験片の細径部は、同じ熱伝達係数を与えることで実測の温度履歴を再現することができた。また、段付軸状試験片の太径部近傍においては、表面を細かく領域分割しそれぞれに異なる熱伝達係数を与えることにより、実験で観測された独特な冷却状態を再現している。

以上の結果から、熱処理変形シミュレーションシステムは実際の部品に近い形状の試験片においても精度の高い表面温度データの取得および熱伝達係数の同定が可能であり、各種部品の熱処理変形抑制による形状精度向上に寄与できるシステムであるといえる。

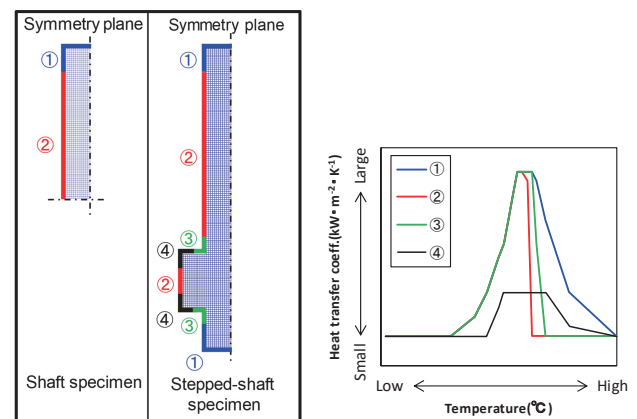


Fig. 15 Measured heat transfer coefficient.

### 3.4 高度な三次元形状測定機 (Coordinate Measuring Machine : CMM) の導入とギヤ変形メカニズムの解明<sup>11,23)</sup>

高精度な熱処理シミュレーションを行うための重要な要素には、これまでに紹介した表面の冷却データの他に、再現目標となる熱処理完了後の形状の正確な把握が挙げられる。当社が従来から保有していた接触式CMMは、複雑な形状を持つ部品に対してプローブが届かない入り組んだ箇所での測定が難しく、また、一度の測定では任意の断面の測定に限られることから、部品形状の全貌を三次元形状として把握することや立体的な変形の可視化が難しいという課題があった。

これに対し、Fig. 16 に示す光切断法を用いた非接触式CMM (株式会社キーエンス製 : VL-500) を導入した。この測定機は部品の三次元形状を高速に非破壊で測定でき、実部品の測定結果とシミュレーション結果を形状差分表示する機能により、熱処理変形のような微小な変形を可視化することができる。

本CMMの測定例として、スパーギヤのずぶ焼入れにお

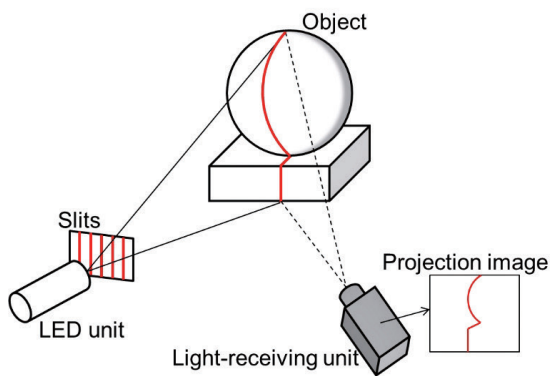
ける熱処理変形の測定結果を紹介する。Fig.17に焼入れ前後にてギヤ三次元形状を測定し、得られた形状を重ね合わせて変形量を算出した結果を示す。焼入れ前の形状を基準としており、赤くなっている部分は焼入れ後に膨張したことを表している。Fig.17(a)より、ギヤは焼入れ時の姿勢で上部に当たる部分が顕著に膨張していることが分かった。また、重ね合わせ比較結果から任意の断面形状を抜き出すこともでき、ギヤの噛み合いが起こる代表点として歯たけ中央の歯すじの円周方向における変形量をFig.17(b)中に実線で示す。全体の変形に伴って歯すじにおいても上部が膨張する変形を示した。

本CMMと前節までに紹介した熱処理変形シミュレーションシステムを組み合わせることにより、より詳細な変形メカニズムを推定することができる。上記のスパークギヤのずぶ焼入れに対して、歯部表面の温度実測データを適用したシミュレーションによって計算した焼入れ後の歯すじ形状をFig.17(b)中の破線で示す。焼入れ後のギヤの形状は上部が大きく、実測の歯すじ形状と概ね一致しており、焼

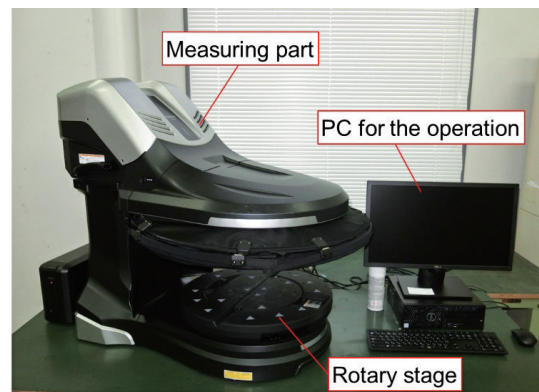
入れによる歯すじの形状変化を再現できた。

形状変化とひずみの関係を明らかにするために、冷却中の歯先における上端部と下端部の径の差分ならびに同部位での径方向全ひずみの差分を評価した。その結果をFig.18に示す。径の差分は、値が正のときに上部が膨張した形状、負のときに下部が膨張した形状であることを示している。冷却中における上下端部の径の差分と全ひずみ差分は同様の挙動を示しており、ギヤの歯すじ変形は焼入れ時に生じる上下の径方向全ひずみ差分により説明できることが分かった。焼入れ後の全ひずみ差分を、構成する各ひずみ成分に分解した結果をFig.19に示す。全ひずみ差分の傾向を顕著に表しているのは変態塑性ひずみであり、変態点近傍にて上下の冷却不均一により発生する変態塑性ひずみが変形を引き起こす主な原因であると推定された。

以上の通り、熱処理変形シミュレーションシステムと非接触式CMMから得られる変形データを組み合わせることで、変形が起こる詳細なメカニズムを推定することが可能となった。

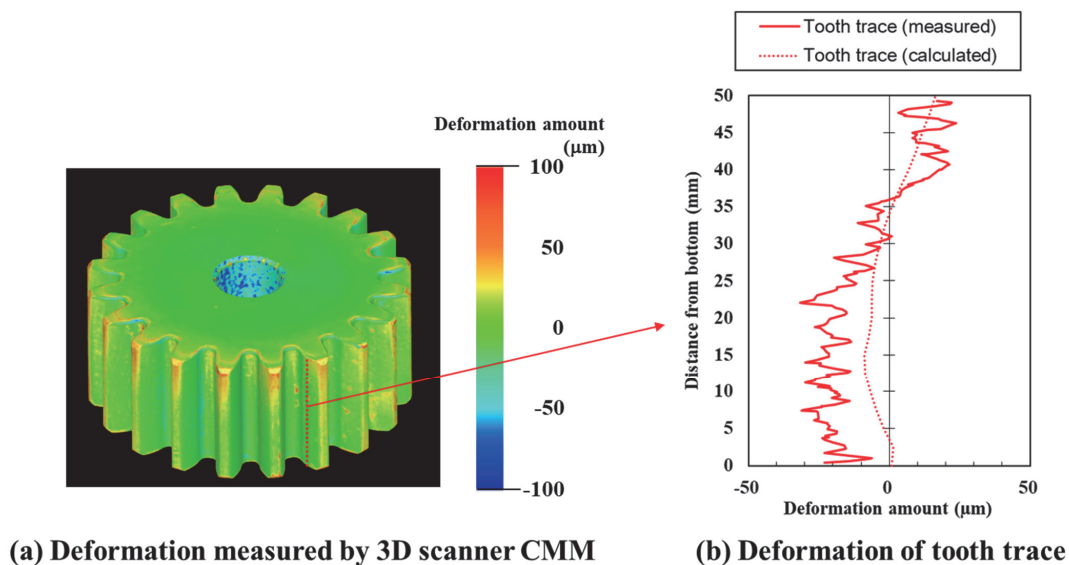


(a) Principle of the light-section method



(b) Appearance of 3D scanner CMM

Fig.16 Principle and appearance of the machine.



(a) Deformation measured by 3D scanner CMM

(b) Deformation of tooth trace

Fig.17 Deformation amount of quenched spur gear.

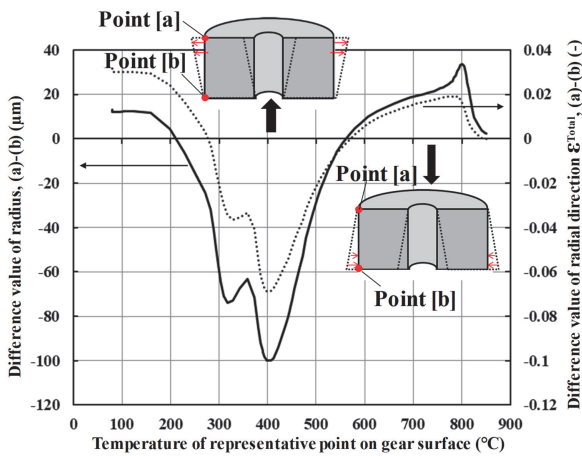


Fig.18 Behavior of deformation and strain of spur gear during quenching.

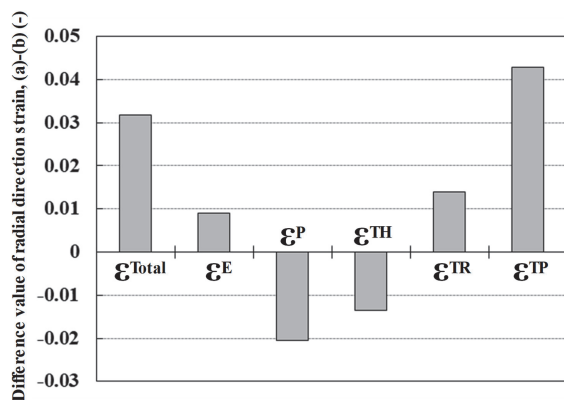


Fig.19 Difference of radial direction strain after quenching.

#### 4. まとめ

当社における熱処理変形シミュレーション技術の発展や具体的な活用事例を中心に概説した。当社が開発した熱処理変形シミュレーションシステムは、実験装置とコンピュータによるシミュレーションの組み合わせで構成されており、下記に示す二つの特徴を持つ。

- ① 実際の部品で起こる熱処理変形の再現：三次元形状測定機によって得られる精細な形状測定データに対し、当シミュレーションから予測した変形は高精度に一致する。
- ② 焼入れ変形の原因特定：焼入れ中の蒸気膜や温度などの部品表面の冷却状態の把握とシミュレーションによる各種ひずみ量の推移から、ギヤなどの複雑な形状を持つ部品で変形が起こる詳細なメカニズムを推定することが可能である。

これらの一連のシステムは、新しい鋼種の開発や、シャフト部品の複雑な形状に起因する冷却挙動の解明に貢献してきた。さらに本技術は、これからは鋼を素材とする各種部品の熱処理変形抑制により形状精度を向上させ、製造プロセスの最適化を通じたカーボンニュートラルの達成に寄与するものであるといえる。

#### 参考文献

- 1) 一般社団法人 日本自動車工業会：日本の自動車工業 2023(2023).
- 2) 杉本剛：熱処理,62(2022)1,4.
- 3) 岡村一男：材料,55(2006)5,529.
- 4) 沖田圭介, 堤一之, 新堂陽介, 藤田学, 永濱睦久, 岩崎克浩：KOBE STEEL ENGINEERING REPORTS, 61(2011)1,70.
- 5) 杉本剛, 谷口光一, 市谷克実, 下里吉計, 奈良崎道治, 町哲司, 園部勝, 杉浦良憲, 木島秀彌：熱処理,55(2015)1,30.
- 6) 奈良崎道治：材料, 55(2006)6, 589.
- 7) 巨東英, 市谷克実, 齊藤大道：可視化情報,27(2007)2, 75.
- 8) 巨東英：材料, 55(2006)7, 712.
- 9) 渡邊啓介, 山田麻由：山陽特殊製鋼技報,26(2019)1,51.
- 10) 渡邊啓介, 中崎盛彦, 大村悟, 山田茂則：山陽特殊製鋼技報,28(2021)1,29.
- 11) 名越亮太, 渡邊啓介, 中崎盛彦：山陽特殊製鋼技報,29(2022)1,49.
- 12) 渡邊陽一：素形材,55(2014)2,42.
- 13) 井上達雄：熱処理,42(2002)5,304.
- 14) 井上達雄, 有本享三：材料,44(1995)496,103.
- 15) 七野勇人：材料,55(2006)8,790.
- 16) 杉本剛, 藤川真一郎：特殊鋼,68(2019)2,49.
- 17) 有本享三：山陽特殊製鋼技報,27(2020)1,12.
- 18) 藤松威史, 中崎盛彦：山陽特殊製鋼技報,21(2014)1, 28.
- 19) 有本享三, 奈良崎道治：熱処理, 42(2002)5, 346.
- 20) 多賀谷正義, 田村今男：金属表面技術,13(1962)5,181.
- 21) 山陽特殊製鋼技報,23(2016)1,74.
- 22) 奈良崎道治：NACHI TECHNICAL REPORT,15(2008)A1.
- 23) 名越亮太：山陽特殊製鋼技報,28(2021)1,74.

#### ■著者



名越 亮太



渡邊 啓介



中崎 盛彦