

鋼軸における熱処理変形の抑制に関する研究

Investigation for Improvement of Heat Treatment Distortion and Dimensional Change of Steel Shaft

藤松 威史*1 中崎 盛彦*2

Takeshi FUJIMATSU, Morihiko NAKASAKI

Synopsis: Relatively small changes in shape of parts that result from the heat treatment is required in production of the steel shafts and gears. It is because undesirable distortion and dimensional change give rise to the increase of reject parts in production process or noise and vibration of working components. Although heat treatment distortion is related to strain distribution in steel parts, it has not clearly clarified yet. On the other hand, chemical composition of steel is often adjusted for the development of high-strength steel parts. Influence of it on heat treatment distortion and dimensional change has not been sufficiently discussed yet. In this study, we investigated and calculated the distortion of steel shaft with a keyway. Based on the result of that, we conducted the further experiments of a number of steels with various transformation start temperature during quenching. As a result, distortion of steel shaft is improved by lowering the transformation start temperature of steels. This favorable improvement is due to relatively low cooling power of quenching oil at that temperature. This change of a distortion behavior was also demonstrated by the heat treating simulation. Meanwhile, in this experiment, length change of a steel shaft is strongly related to its hardenability. This means appropriate alloy design will be able to improve the dimensional change of steel shafts.

Key words: heat treatment, quenching, distortion, dimensional change, steel shaft, simulation, transformation, heat transfer coefficient

1. 緒言

大量生産されるシャフトやギヤにおいて、部品の熱処理にもなつて発生する変形（熱処理変形）の抑制は実用上の重要課題である。これは、熱処理変形の矯正のためにリードタイムが増えたり、矯正しきれない場合には部品不良率が増加したり、あるいは駆動系部品として組み込んだ場合に変形に起因して騒音や振動を発生させるといった悪影響が生じるためである。熱処理変形に関し、特に焼入れのように急速に部品が冷却されることにより発生する変形とその過程におけるマルテンサイト変態やベイナイト変態にもなう変形が重畳する熱処理では、熱処理変形の発生機構は複雑になる。熱処理変形の度合いは、熱処理中に部品内部で刻々と変化するひずみの最終的な状態を反映すると考えられているが、その変化の過程の観察が困難なこともあり十分な現象解明はなされていない。他方で、部品の小型軽量化のためにより高強度なシャフトやギヤの開発ニーズがあり、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が、それらが熱処理変形にどのように影響する

のかについて明確な答えは未だ得られていない。本報では、特にシャフト状部品の熱処理変形に着目し、現象解明を容易にするため従来研究に倣ってキー溝を付与した鋼軸を用いて、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検証を行った。また、それをもとに熱処理変形抑制のための鋼の成分設計指針を得るため、種々の化学成分の鋼について熱処理変形挙動を確認した。

2. 従来知見の整理と熱処理変形抑制の考え方

熱処理変形は鋼材成分以外にも部品形状、熱処理前の鍛造や機械加工の条件、焼入油などの各種冷媒の物性値、あるいは冷却の不均一さといった様々な要因に影響を受けると考えられている。熱処理変形抑制に関する従来知見として、材料対策面では焼入れ鋼材の芯部に軟質のフェライト相を析出させて熱処理歪みを軽減する方法が提案されている¹⁾。また、冷却方法からのアプローチとして、従来型の油焼入れではなく加圧ガス冷却を利用する方法²⁾や、熱伝達係数を促進あるいは低減する手段を用いて被冷却物の均

*1 研究・開発センター 軸受・構造用鋼グループ 博士 (工学)

*2 研究・開発センター 加工プロセスグループ長 博士 (工学)

一冷却化を図る方法³⁾が提案されている。ただし、これらの方法は、部品内部に強度の低い軟質相が導入されることや、熱処理炉そのものの変更が必要なこと、そして個々の部品に対して処置が必要になることなど、汎用的な熱処理変形の抑制手段とは言い難い。

次に熱処理変形の発生機構に関して参考となる研究を数例挙げる。有本ら⁴⁾は、S45C製の直径 ϕ 10mmで長さ100mmのキー溝付き試験片を用いて、水焼入れ、油焼入れ、ポリマー焼入れの3種類の焼入れ実験を行い、シミュレーションとの対比を行っている。キー溝を付与した目的は、焼曲がりを顕著に発生させるためである。実験の結果、曲がりの大きい順から水焼入れ、ポリマー焼入れ、油焼入れの序列となり、冷却が比較的均一な油焼入れの場合に曲がりが小さいことを明らかにした。このとき、焼入れ過程のシミュレーションから導出した試験片断面内の各位置におけるひずみ量の総和（弾性ひずみ、熱ひずみ、変態ひずみ、塑性ひずみ、および変態塑性ひずみの5成分の総和）に関して、キー溝側とその反対側でのひずみ量の総和の差が大きいほど曲がりが大きくなるとした。また、冷却特性の違いは、熱ひずみ+変態ひずみの挙動の相違に反映され、これが塑性ひずみ分布の発生挙動に大きく影響を及ぼす結果、曲がりの挙動を変化させると解釈されている。この研究は、曲がりを支配する各種ひずみ成分の影響を解説した極めて重要なものである。なお、同研究は ϕ 10mm試験片を使用しており、焼入れ後は全面マルテンサイト状態であったと言及されている。それに対し、はだ焼鋼を主な素材とするシャフトやギヤの実部品においては、部品芯部が完全焼入れ状態にならない場合が多く、マルテンサイト変態以外にベイナイト変態が熱処理変形に関与する可能性もあるため、質量効果を考慮した検討を行う必要があると考えられる。また、奈良崎ら⁵⁾は、前述の有本らと同一形状のS45C、SK4、SCM435製のキー溝付き試験片を使い、ナトリウム浴焼入れにより相変態温度域での均一冷却化を図った結果、水焼入れに比べて焼曲がりが大幅に抑制されたことを報告している。このことから、マルテンサイト変態域での不均一冷却の軽減が熱処理変形抑制に有効なことが分かる。また、有本ら⁶⁾のS45Cリング状試験片の検討では、シミュレーションおよび実測により焼入れ後、および270℃焼戻し後の形状変化を調査した結果、焼入れ後と焼戻し後の形状差は比較的小さい。したがって、熱処理変形の大部分は焼入れによってもたらされるとみることが出来る。これらの従来知見の整理から、熱処理変形の抑制方策は焼入れ時の部品部位による冷却速度差を可能な限り小さくする、つまり冷却を均一化することにほぼ集約される。これは言い換えれば、相変態が生じる段階での部品の各部位の温度差が小さくなるようにすることで、熱処理変形が抑制されることを意味する。そこから、

熱処理技術による均一冷却化の他に、鋼の成分設計を通じて冷媒の特性上、冷却が均一化されやすい温度域に焼入れ時の鋼の相変態温度域を調整することによる新たな熱処理変形抑制方案が想起される。

3. 予備実験方法ならびに 熱処理変形シミュレーション方法

3.1 予備実験方法

ここでは、相変態温度域と質量効果の影響を考慮して予備実験を行った。実験精度に影響する種々の要因は極力排除するように配慮した。まず、予備実験のために汎用のはだ焼鋼SCr420と、それに比べて大幅に相変態温度域が低い熱間工具鋼SKD61の2種類の棒鋼を準備した（化学成分はTable 1）。浸炭焼入れを想定した熱処理に先立ち、 ϕ 34mmのSCr420は900℃で1h加熱保持後に610℃の炉に移し変え、その温度で2h保持してから徐冷することにより全体がフェライト-パーライト組織になるように調整した。一方、 ϕ 25mmのSKD61は870℃で2h加熱保持後に徐冷する焼なましにより、熱間工具鋼の焼入れ前組織としては一般的なフェライトと微細炭化物の混合組織に調整した。試験片形状は、シャフト状部品を想定しつつも回転対称形状とはせず、不均一冷却を助長して積極的に焼曲がりを生じさせるために側面にキー溝を付与した長さ200mmの鋼軸とし、試験片直径は質量効果の影響を考慮して ϕ 20mmを選定した。Fig.1に試験片の断面形状を示す。 ϕ 20mmに旋削加工した鋼軸の側面に幅8mmで深さ5mmのキー溝を機械加工により全長に渡って付与し、さらに熱処理時用の吊り穴を鋼軸の一端から7mmの位置に溝底から背面を貫通するように ϕ 2.5mmキリで開けたものを試験片とした。試験片は、その断面形状に基づいて角部、および溝底部を含むキー溝側と背側とを区別した。次いで、試験片にFig.2に示す浸炭を模擬した熱処理を付与した。なお、浸炭部品の体積の大部分を占める非浸炭部の挙動が熱処理変形を大きく左右するものと仮定して、浸炭は行っていない。また、焼戻しについても、前述のように、熱処理変形に及ぼす影響は比較的軽微とみられるため、今回は実施していない。熱処理には流動層炉を用い、試験片をFig.3左のように吊り下げた状態で熱処理することで周囲から均一に加熱されるようにした。試験片の焼入れ時は、焼入油の攪拌によってキー溝部の

Table 1 Chemical composition of steels for preliminary experiment. (mass%)

Steel	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V
SCr420	0.22	0.22	0.82	0.04	1.18	0.02	—
SKD61	0.38	0.93	0.42	0.07	5.12	1.19	0.80

冷却が不均一になることや、試験片姿勢が垂直状態を保てなくなることを避けるため、油槽内攪拌は行わず、試験片を吊り下げた状態で60℃の静置油に浸漬して焼入れを行った。焼入油には1種2号油を使用した。焼入れ中はFig.3右のように油中浸漬した高温の試験片周囲に自発的な対流が生じ、試験片姿勢が保持される。熱処理変形の指標である焼入れ後の焼曲がりの測定は次のように実施した。本報では、Fig.4に示すように焼入れ後の試験片の両端をV字型ブロックで保持し、支点間距離190mmで試験片中央部の振れ量を測定し、焼曲がりの指標とした。ここでの振れ量は、両端を支持した試験片を一周回転させたときの試験片中央部における円周上の最大変位と最小変位の差をダイヤル

ゲージで測定するものであり、試験片円周上に存在するキー溝部の変位は無視した。使用したダイヤルゲージの最小表示単位は0.01mmである。また、振れ量は正負を持たない絶対量であるが、本報においてはキー溝側を凸とする振れの符号を正とし、キー溝側を凹とする振れの符号を負として取り扱うこととした。なお、実際の焼曲がりはこの振れ量を1/2倍したものに相当する。また、SCr420のジョミニー焼入れ性をJIS G 0561に準拠し、焼ならし、焼入れともに925℃の加熱条件により評価した。なお、SKD61は完全焼入れとなることが予め予想されるため焼入れ性評価は実施していない。

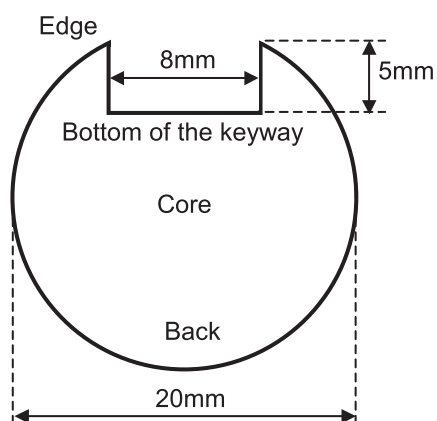


Fig.1 Cross-sectional shape of the specimen.

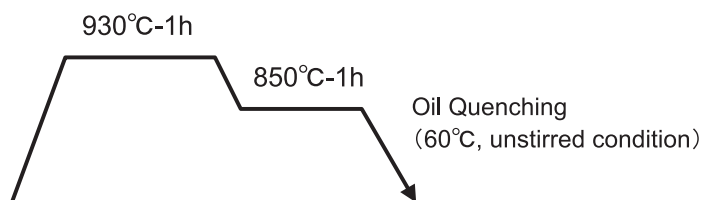


Fig.2 Heat treatment condition.

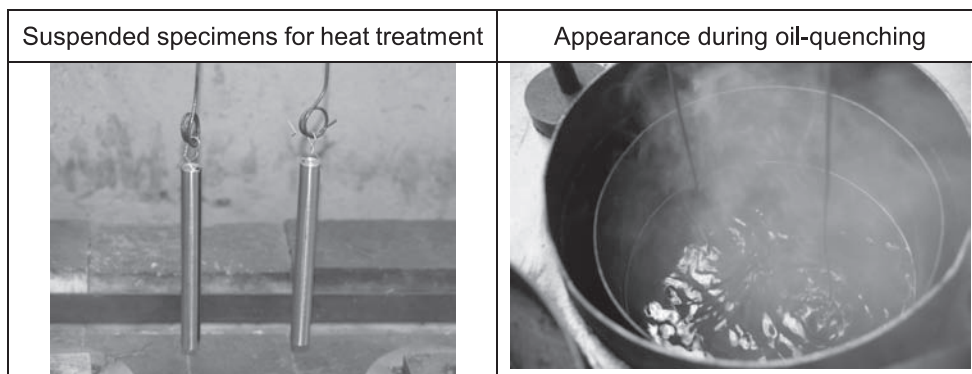


Fig.3 Appearance of specimens.

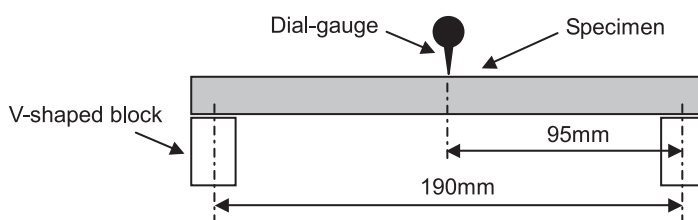


Fig.4 Schematic layout for measurement of deflection.

3.2 熱処理変形シミュレーション方法

熱処理変形のシミュレーションについては以下の方法で行った。解析にはDEFORM HT™を用いた。要素は六面体要素とし、表面を細分割した。油冷を想定した冷却時の冷媒の熱伝達係数はFig.5のデータを使用した⁴⁾。なお、今回は熱伝達係数に対する試験片部位の影響は考慮しておらず、部位に関わらず均一とした。解析対象はSKD61、SCr420の2鋼種である。両鋼の組織・温度毎の応力-ひずみ曲線は、直径8mmで長さ12mmの円柱型試験片を用い、この試験片に熱間加工再現試験機THERMECMAS-TER-Z（富士電工機械株式会社製）により、Fig.2における焼入れ温度保持までを模擬した加熱を与えた後、所定の各温度まで急冷して加工を加えてから直ちに急冷する試験により実測した。熱物性値についてはMiettinenの式⁷⁾により基礎データを算出し、下記の変態点測定結果をもとに調整を行った。主相の変態開始温度は、全自動変態記録測定装置formaster-F（富士電工機械株式会社製）を使用して測定した。まず、上述した両鋼種の棒鋼の中周部から直径3mmで長さ10mmの変態点測定用試験片を作製し、次いで全自動変態記録測定装置においてFig.2の熱履歴を模擬した熱処理を付与し、急冷過程における主相の変態開始温度を求めた。なお、同装置では油焼入れができないため、φ20mm棒鋼の油冷を想定して30℃/sの冷却速度になるようにHeガスで冷却した。急冷過程での両鋼の変態開始温度（この場合はマルテンサイト変態開始温度）の測定結果は後述する。本シミュレーションでのひずみの取扱いは以下のように行った。熱処理変形に対しては、変態塑性の影響が大きいと言われており⁸⁾、その変態塑性ひずみを求める式は、式（1）により表される。

$$d \varepsilon_{ij}^{TP} = 3K(1-\xi)d \xi s_{ij}' \quad \dots (1)$$

ここで、 $d \varepsilon_{ij}^{TP}$ は変態塑性ひずみ増分、 K は変態塑性係数、 ξ は体積分率、 s_{ij}' は偏差応力をそれぞれ示す。このうち、変態塑性係数 K は材料及び組織により異なると考えられるが、工具鋼での実測値は報告されていない。そこで、本報では両鋼種とも文献値⁹⁾より $K=5.08 \times 10^{-5}(1/\text{MPa})$ として取り扱った。また、熱処理時のひずみは、以下の式（2）により表される¹⁰⁾。

$$\varepsilon^{\text{Total}} = \varepsilon^E + \varepsilon^P + \varepsilon^{\text{TH}} + \varepsilon^{\text{TR}} + \varepsilon^{\text{TP}} \quad \dots (2)$$

ただし、 $\varepsilon^{\text{Total}}$ は全ひずみ、 ε^E は弾性ひずみ、 ε^P は塑性ひずみ、 ε^{TH} は熱ひずみ、 ε^{TR} は変態ひずみ、 ε^{TP} は変態塑性ひずみをそれぞれ示す。

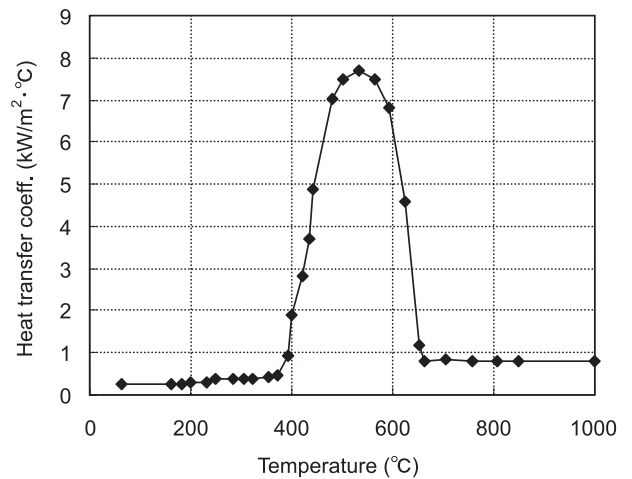


Fig.5 Heat transfer coefficient of quenchant for simulation⁴⁾.

4. 予備実験ならびに熱処理変形シミュレーションの結果および考察

4.1 予備実験結果および考察

Fig.6に浸炭焼入れを模擬した熱処理による両鋼の振れ量（焼曲がりの指標）の測定結果を示す。図中の振れ量の符号は、既に説明した通りキー溝側を凸とする振れを正、キー溝側を凹とする振れを負としてそれぞれ表している。また、Table 2に実測した両鋼における急冷時の主相の変態開始温度、ならびにSCr420の主要ジョミニ値を示す。今回、SKD61は一般的な推奨焼入れ加熱温度に比べて100℃程度低い温度で加熱焼入れしているが、その条件下でも相変態開始温度はSCr420より80℃程度は低く、十分な差異が見出せた。まずFig.6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、SCr420に対して急冷時の相変態開始温度が低い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、焼曲がりの挙動が大きく変化した。キー溝側を凹とする焼曲がりは奈良崎ら⁵⁾がナトリウム浴焼入れの実験において観測している。ここで、急冷による相変態が無いSUS304について、別途同様のφ20mmキー溝試験片を作製してFig.2の熱処理を付与した結果、キー溝側を凸とする焼曲がり（振れ量で0.49mm）が生じた。このことは、変態を伴わずに不均一冷却の作用のみを受けるとキー溝側を凸として曲がることを表すものであり、なおかつその効果のみでは逆向きの曲がりは起こらないことを示す。したがって、SCr420とSKD61における焼曲がりの挙動変化に対して、相変態が強く関与したことが示唆される。そこで、両鋼のキー溝試験片のミクロ組織を調査した。Fig.7に試験片の長さ中央部断面におけるキー溝底と芯部のミクロ組織を示す。Fig.7より、SCr420ではキー溝底はマルテンサイト組織であるが芯部にはマルテ

ンサイト組織以外にベイナイト組織も観察され、質量効果の影響がみられる。一方、SKD61ではキー溝底、芯部とも同様のマルテンサイト組織であり、完全焼入れ状態であった。両鋼の芯部ミクロ組織の違いはFig.8に示す同断面の硬さ分布にも反映されている。このときのSCr420の芯部硬さとFig.9に示す同鋼のジョミニー曲線を比較すると、芯部硬さは概ねジョミニー試験片の水冷端から9mmの位置の硬さ（以下、 J_9 と呼称）に相当した。ここで、Fig.10に焼入油の熱伝達係数と温度の関係の模式図を示す。SKD61の場合、主相であるマルテンサイトの相変態

開始温度がSCr420に対して大きく低下するため、油の熱伝達係数が小さく緩冷却となる対流段階付近の温度域で主相の変態が開始し、そこでは試験片部位間の温度差が小さくなるために、SCr420に比べて焼曲がりが軽減されたと推定される。なお、Table 2にはジョミニー比 ($J_9/J_{1.5}$) を併せて示した。これは $J_{1.5}$ （水冷端から1.5mm位置の硬さ）と J_9 の比を取ることでジョミニー硬さの低下度合いを表し、($J_9/J_{1.5}$) の値が大きいくほど焼入れ性が高いことを示す。次節の検証実験では、鋼種を特徴付ける指標として主相の相変態開始温度以外にジョミニー焼入れ性に

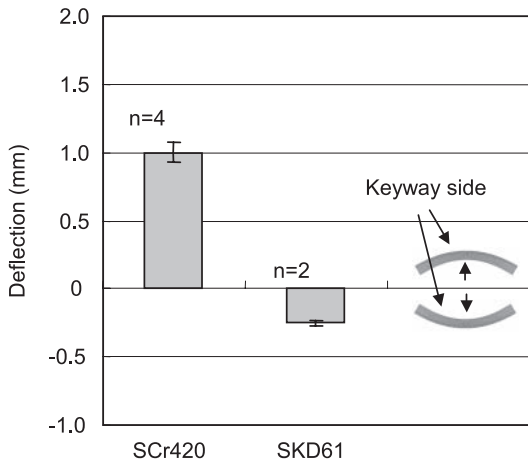


Fig.6 Deflection of oil-quenched specimens.

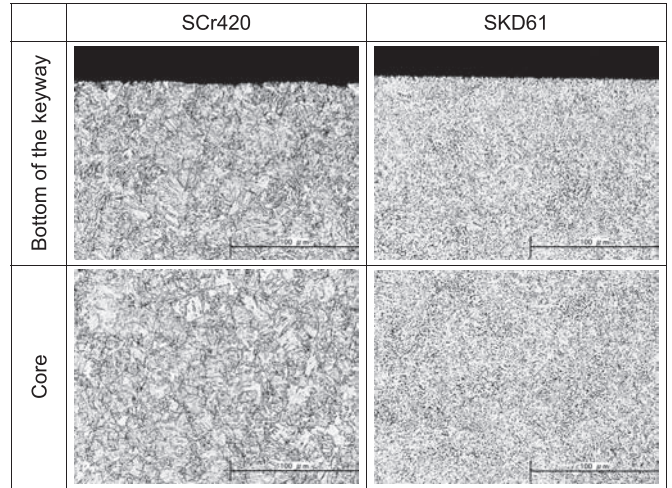


Fig.7 Microstructures of specimens etched by 5% nital.

Table 2 Transformation start temperature and hardenability of steels.

Steel	Transformation start temp.	$J_{1.5}$	J_9	$J_9/J_{1.5}$
SCr420	440°C	46.8HRC	32.2HRC	0.69
SKD61	363°C	—	—	—

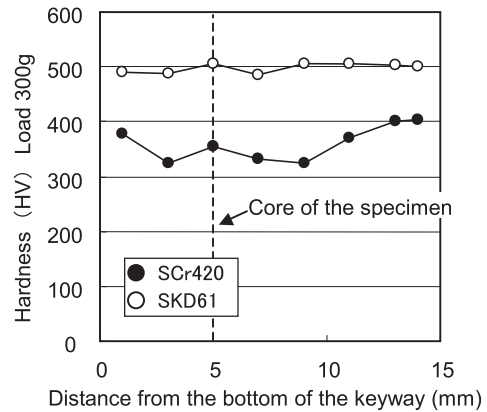


Fig.8 Hardness distribution of cross-section of specimens.

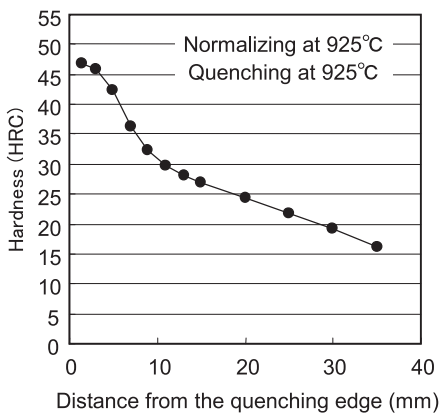


Fig.9 Jominy curve of SCr420.

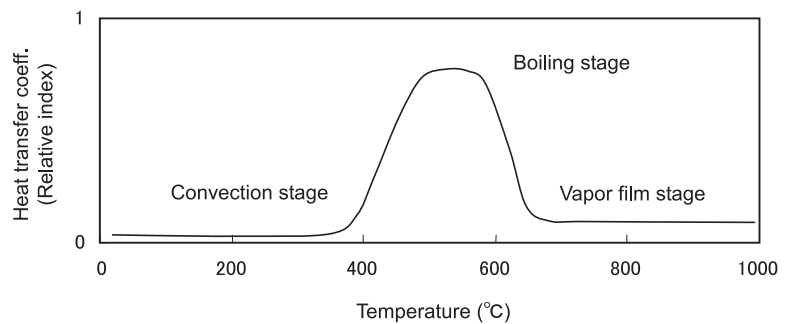


Fig.10 Schematic heat transfer coefficient of oil during quenching.

も注目して検討を進めた。

4.2 熱処理変形シミュレーション結果および考察

Fig.11にキー溝付き試験片の熱処理変形シミュレーション結果を示す。ここでは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。図より、SCr420におけるキー溝を凸とする振れ、およびそれと相対するSKD61におけるキー溝側を凹とする逆向きの軽微な振れが再現された。これは予備実験結果と定性的に合致するものであり、本シミュレーション結果は妥当と考えられる。また、このような熱処理変形挙動差がSCr420とSKD61における急冷時の変態開始温度を反映させることでもたらされることは重要な知見である。

続いて本シミュレーション結果を詳細に解析した。有本らの研究⁴⁾を参考にすれば、曲がりの大小にはキー溝側表面と背側表面の各ひずみ成分（ここでは弾性ひずみ ϵ^E 、塑性ひずみ ϵ^P 、熱ひずみ ϵ^{TH} 、変態ひずみ ϵ^{TR} 、変態塑性

ひずみ ϵ^{TP})の総和である全ひずみ ϵ^{Total} の差分が反映される。そこで、Fig.12に本シミュレーションにおける冷却完了後の試験片長さ中央部における各ひずみ成分とその量を示す。各ひずみ成分のうち、塑性ひずみと変態塑性ひずみは同じ塑性変形によるひずみであるが、発生原因が異なるため区別して示した。図より、SKD61の場合はキー溝側(図中(a))、背側(図中(b))ともに全ひずみに占める変態ひずみの割合が高いことが分かる。また、キー溝側と背側の全ひずみの差分を取ると(図中(c))、SKD61ではわずかな負の値となり、これは既にFig.11に示したようにキー溝側を凹とする焼曲がりであることを示す。一方、SCr420の場合、キー溝側、背側とも変態ひずみの割合が相対的に高いのはSKD61と同様であるが、さらにキー溝側の塑性ひずみが際立って高い正の値を示した。このキー溝側の塑性ひずみ挙動の違いによって、キー溝側と背側の全ひずみの差分がSCr420では大きく正の値をとり、鋼軸はキー溝側を凸とする大きな曲がりを示すことになる。

さらに、冷却過程の詳細解析により両鋼で熱処理完了後の塑性ひずみの状態に差が生じる原因を考察した。油焼入れにおける鋼軸の焼曲がりの発生要因として、以下の3つが考えられる。

- (1) 油冷中の試験片のキー溝側における①核沸騰段階での角部の急冷に伴う引張の塑性ひずみ発生、とそれに続く②キー溝底の急冷に伴う圧縮の塑性ひずみ発生、の各段階からなる塑性ひずみ変化過程の影響(背面側では、表面に続いて内部の順での同様過程)
- (2) 変態膨張に伴う変態ひずみとそれに付随する変態塑性ひずみの影響
- (3) 他の部位の塑性変形に付随する変形の影響

各ひずみ成分の推移を詳細解析した結果、上記(3)の影響は軽微であり、(1)、(2)の影響が強く認められた。

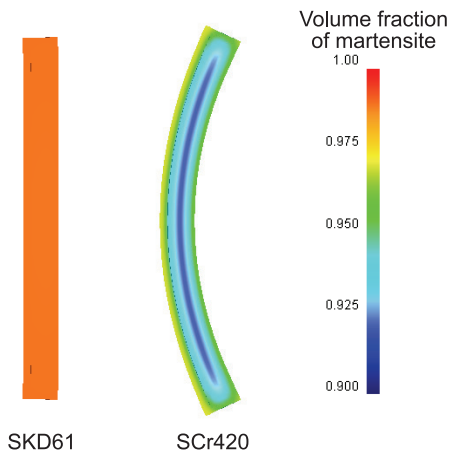


Fig.11 Deformation of steelshaft and volume fraction of martensite in steel shaft.

Note 1 - A keyway exists at left side in each model.
Note 2 - Thirtyfold-amplified deformation is displayed.

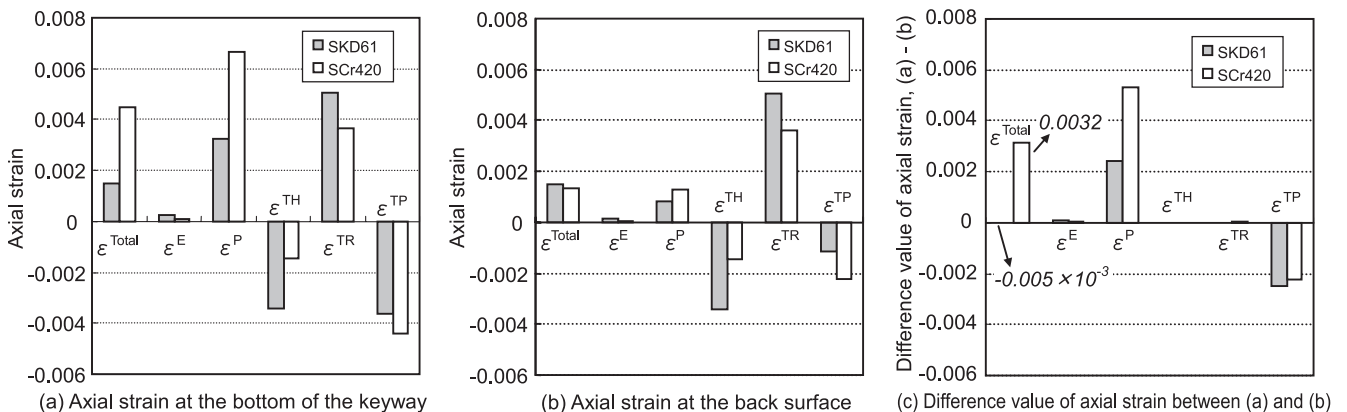


Fig.12 Axial strain and difference of axial strain after quenching by simulation.

SKD61の場合は、キー溝側、背側ともに (1)、(2) の過程が順番に発生し、その結果、キー溝側と背側で双方のひずみの差は小さくなる。これは、Fig.13に示すSKD61の試験片角部の塑性ひずみ推移において、溝底の急冷による圧縮の塑性ひずみが冷却開始から約6.5秒までに発生するのに対して、SKD61におけるオーステナイトからの急冷によるマルテンサイト変態開始は冷却開始から10秒経過後であるために、(1) の急冷におけるキー溝側の圧縮塑性ひずみに (2) の変態によるひずみが関与しないことによる。一方、SCr420では、キー溝側において (1) - ①が発生した直後 (冷却開始から2.3秒後) にマルテンサイト変態による (2) が発生する。これにより、その部分の材料が硬化して降伏強度が上昇し、塑性ひずみの発生を阻害す

る。その結果、Fig.13においてSCr420ではSKD61 とは異なり (1) - ②の圧縮の塑性ひずみが発生していないことを見出した。ただし、この挙動はキー溝側のみであり、一方の背側においてはSKD61と同様に (1)、(2) の過程が順番に起こることにより、結果的にキー溝側と背側での塑性ひずみの不均一が助長される。これが最も大きな要因となって、SKD61とSCr420の焼曲がりの向きを変化させた可能性が高いことがシミュレーションを通じて明らかになった。さらに、このひずみ挙動をFig.14に示すシミュレーションによるキー溝側 (角部、溝底部)、および背側の冷却曲線と対比すると、SKD61の方がSCr420に比べて変態開始時 (SKD61では10秒後) の部位毎の温度差が軽減されていることが分かる。この実質的な冷却の均一化

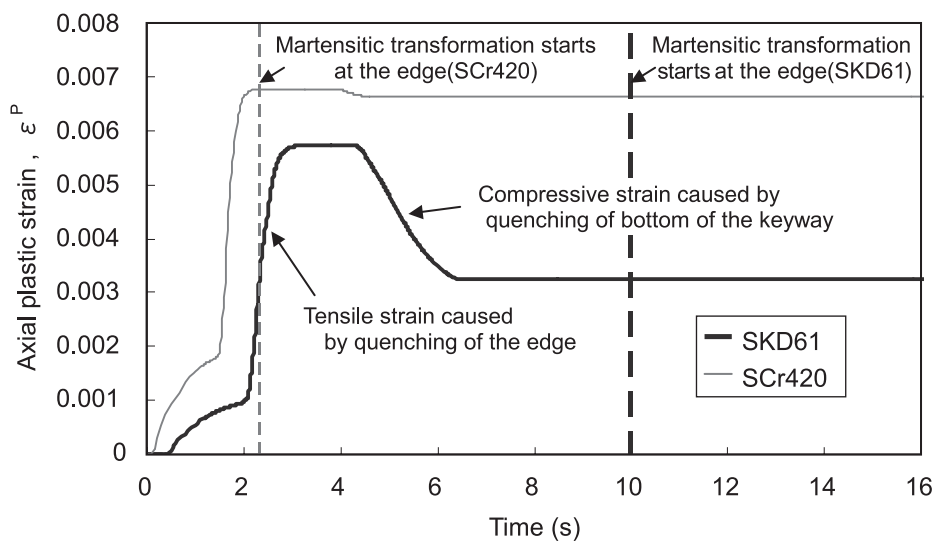


Fig.13 Variation of axial plastic strain at the edge of specimen during quenching.

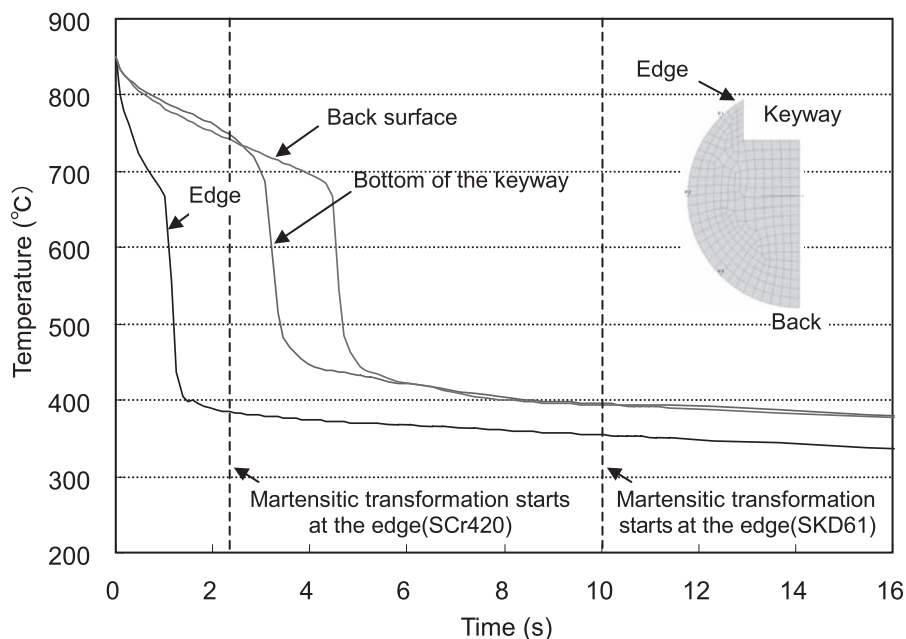


Fig.14 Calculated cooling curve during quenching.

の作用によってSKD61における焼曲がりの軽減がもたらされたと解釈される。

5. 熱処理変形抑制のための鋼の成分検討

キー溝付き試験片を用いた予備実験ならびにそれを模擬した熱処理変形シミュレーションによる検証の結果から、成分設計により鋼の変態開始温度域を冷媒の熱伝達係数が小さくなる低温側へ誘導し、マルテンサイト変態開始時の部位間の温度差を少なくすることが焼曲がり抑制に有効とみられた。そこで、種々の化学成分の鋼について追加実験を行い、妥当性を検証した。一方、熱処理寸法変化は鋼材のジヨミニー焼入性と強い関連性を持つことが報告されている¹¹⁾。その点も考慮して相変態温度域やジヨミニー焼入性を幅広く変化させる目的のもと、Table 3に示す組成範囲の鋼10種の内、既出のSCr420を除く9種を真空誘

導溶解炉により溶製して100kgの鋼塊を得た。それらを1250℃で加熱鍛伸してφ32mmの棒鋼としたのち、前述のSCr420と同様の調製方法によりφ20mmで長さ200mmのキー溝付き試験片を作製した。また、SCr420を含め、より質量効果の大きいφ27mmで長さ200mmのキー溝付き試験片も併せて作製した。φ27mm試験片のキー溝形状はφ20mm試験片と相似形とするため、キー溝幅は10.8mm、キー溝深さは6.75mmとした。浸炭を模擬した熱処理方法や、その後の焼曲がりの測定方法は前述の方法に倣った。さらに焼入れにともなう熱処理変形の指標の一つとして、焼入れ前後のキー溝付き試験片の長さをノギスで測定してその差分を評価し、長さ変化を求めた。使用したデジタル式ノギスの測定精度は0.01mmである。また、急冷時の変態開始温度やジヨミニー焼入性の評価も前述の方法と同様に行った。

Table 3 Chemical composition range of steels. (mass%)

Steel	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Ti	Nb	B
No.1~10	0.16~ 0.25	0.22~ 0.52	0.28~ 0.82	≤0.11	1.10~ 2.03	≤0.05	≤0.04	0~ 0.04	0~ 0.002

Note - SCr420 listed in Table 1 is included.

Table 4 Transformation start temperature and hardenability of steels.

鋼種	Transformation start temp.	J _{1.5}	J ₉	J ₁₁	J ₉ /J _{1.5}	J ₁₁ /J _{1.5}
No.1~10	412~500℃	41.8~ 49.6HRC	32.2~ 47.9HRC	27.8~ 46.5HRC	0.68~ 0.97	0.64~ 0.94

Note - SCr420 listed in Table 2 is included.

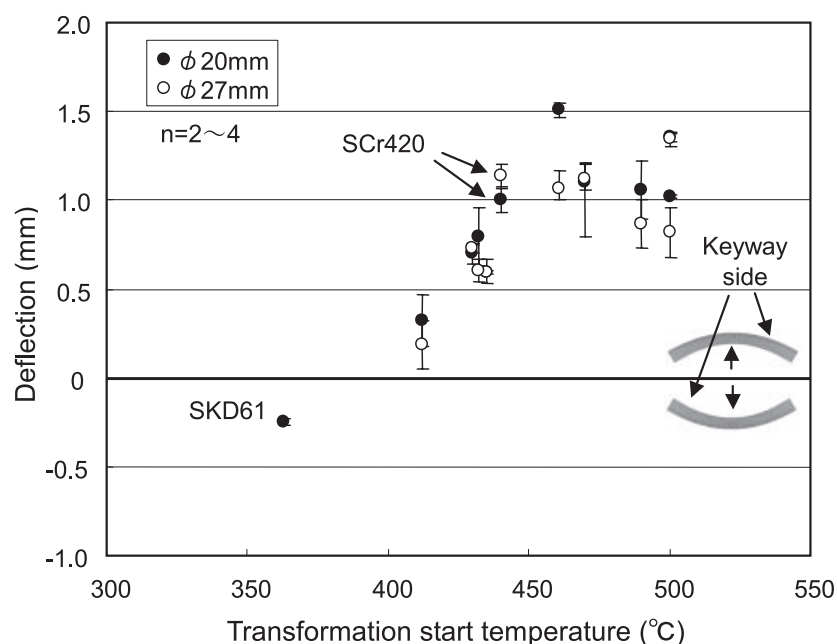


Fig.15 Relationship between deflection after oil-quenching and transformation start temperature.

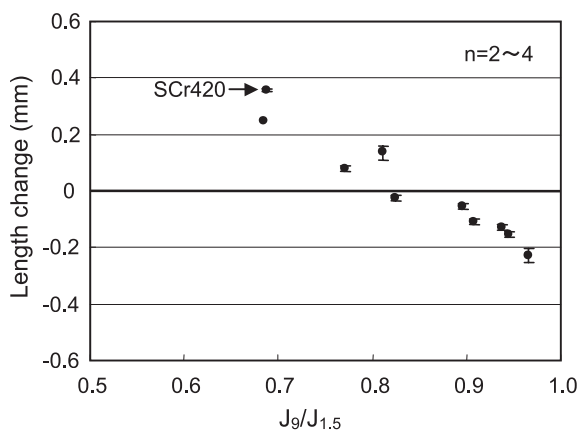


Fig. 16 Relationship between length change of specimen, 20mm in diameter, after oil-quenching and hardenability of steels.

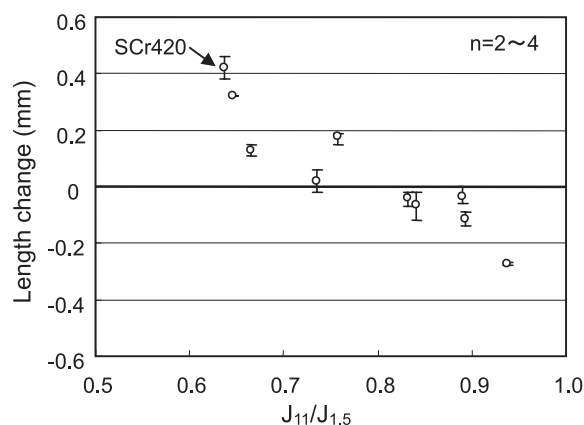


Fig. 17 Relationship between length change of specimen, 27mm in diameter, after oil-quenching and hardenability of steels.

6. 熱処理変形抑制のための鋼の成分検討結果ならびに考察

Table 4に検証実験用鋼における急冷時の主相の変態開始温度、主要ジョミニ値、およびジョミニ比の範囲を示す。これをもとに各鋼の変態開始温度と測定した振れ量との関係をFig.6の結果と併せてFig.15に整理した。図中の振れ量の符号はFig.6と同様に取り扱った。結果、両者の相関は強くはないものの、 $\phi 20\text{mm}$ 試験片、および質量効果のより大きい $\phi 27\text{mm}$ 試験片ともに変態開始温度の変化に応じて焼曲がりが増減する傾向が見られた。そして、本報の成分範囲、ならびに質量効果を加味した実験条件のもとではSCr420に比べて変態開始温度が低下する成分設計のもとで鋼軸の焼曲がりが増減することが明らかとなった。本結果より、鋼材成分設計による熱処理変形特性の改善は可能と結論される。個々の鋼に対して熱処理シミュレーションによる検証は行っていないが、変態開始温度の低下によって焼曲がりが増減する理由は、上述したように急冷変態時における試験片各部位の温度差軽減によるものとみている。

他方で、もう一つの熱処理変形指標として焼入れ前後の試験片の長さ変化を評価した結果、長さ変化はジョミニ比と良く相関することを見出した。 $\phi 20\text{mm}$ 、または $\phi 27\text{mm}$ の試験片芯部硬さに該当するジョミニ曲線の J_9 、 J_{11} （水冷端から11mm位置の硬さ）を水冷端硬さ $J_{1.5}$ で除したジョミニ比（ $J_9/J_{1.5}$ ）、（ $J_{11}/J_{1.5}$ ）と長さ変化の関係をFig.16、Fig.17にそれぞれ示す。結果として、熱処理後の長さ変化と（ $J_9/J_{1.5}$ ）、（ $J_{11}/J_{1.5}$ ）には総じて負の相関が認められ、かつ焼入性が高い、すなわち高ジョミニ比側になると膨張側から収縮側に転じる傾向を示した。これは焼入性の高い材料ほどマルテンサイト変態量が多くなることで、膨張しやすいという一般的な見方とは反する結果

であった。これに関し、本報とは試験片形状が大きく異なるがCook¹⁾による外径152mm、内径44mm、厚さ22mmの環状試験片を用いた浸炭-油焼入れ後の寸法評価事例によれば、焼入性が高くなるにつれて外形寸法が膨張側から収縮側に転じることが示されており、本報の長さ変化挙動と類似している。一方、同じ実験において環状試験片の内径寸法は焼入性の増大によって一貫して収縮傾向を示すことが報告されている。この知見と本報のキー溝付き試験片における寸法変化挙動を併せて考えると、焼入れによる部品の膨張収縮挙動は試験片寸法や形状にも強く依存すると推定される。いずれにしても、本報のように $\phi 20\text{mm}$ ないし $\phi 27\text{mm}$ 程度の軸部を有するシャフト部品を想定した場合、鋼材成分設計を通じて焼入性を適切に制御することで部品焼入れ後の長さ変化を抑制することが可能と考えられる。別途検討したところ、先に示した振れ量（焼曲がりの指標）と、ここで示した長さ変化との間に明確な相関は認められなかったことから、両者は互いに異なる要因によって発生している可能性がある。ただし、焼入性の変化に応じて鋼軸の長さ変化の挙動が変化するメカニズムについては現時点では不明であり、今後の検討課題としたい。

7. 結言

本報では、シャフト状部品の熱処理変形に注目し、現象解明を容易にするためにキー溝を付与した鋼軸を用いて、熱処理変形の抑制に関して実験と熱処理シミュレーションの両面から検討を行った。以下に得られた主要な知見を示す。

- (1) 焼入油の熱伝達係数が比較的低く、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増減することを見出した。
- (2) キー溝付き鋼軸の油焼入れを模擬した熱処理シミュ

レーションにおいて、冷媒の熱伝達係数が低い（緩冷却となる）温度域で変態が開始する場合、急冷に起因する塑性ひずみの挙動が変態ひずみにより影響されにくいことによつて焼曲がりが抑制される。

- (3) 鋼軸の熱処理後の長さ変化と鋼材のジヨミニー焼入性には相関が認められ、本報で用いた鋼軸サイズにおいて適切な焼入性制御による長さ変化の抑制は可能であった。

以上のように、従来の鋼種開発において十分考慮されていなかった鋼材成分と熱処理変形との関連性について重要な知見が得られた。鋼材成分は熱処理品質の良否を左右する重要な因子であることが明らかであり、本報の知見は熱処理変形特性に優れた高強度鋼の成分設計の指針になるものと期待される。

参考文献

- 1) 特開平9-111408号公報
- 2) 特開2008-121064号公報
- 3) 特開2010-174289号公報
- 4) 有本享三, 奈良崎道治:熱処理, 42 (2002), 346.
- 5) 奈良崎道治, 小河原稔, 二宮進, 柏谷英夫:日本熱処理技術協会講演大会講演概要集, 51 (2000), 13.
- 6) 有本享三, 井上達雄, 生田文昭:日本熱処理技術協会講演大会講演概要集, 37 (1993), 33.
- 7) J. Miettinen: Metal. Mat. Trans. B, 28B (1997), 281.
- 8) 井上達雄:材料, 56-4 (2007), 352.
- 9) 宮尾光介, 王志剛, 井上達雄:材料, 35-399 (1986), 1352.
- 10) 有本享三:工業加熱, 41-5 (2004), 16.
- 11) W. T. Cook:Heat. Treat. Metals, 26 (1999), 27.

■著者



藤松 威史



中崎 盛彦