

油焼入れ冷却能測定装置による熱処理ひずみ特性評価

Evaluation of heat treatment distortion by measuring equipment for cooling capacity in oil quenching

渡邊 啓介* 山田 麻由*

Keisuke WATANABE and Mayu YAMADA

1. 緒言

自動車産業における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。それらの部品の大半が油焼入れによる硬化熱処理を経るため、材料・熱処理分野の課題として熱処理変形の原因究明とそれに基づく対策の立案が求められている。高強度部品の製造に不可欠な焼入れ工程では、精密加工した部品が熱処理において不均一に変形することで、形状精度が悪化する課題がある。この原因は主として部品の形状、配置や積み方などの荷姿、攪拌などの焼入れ条件に伴う冷却の不均一によることが知られている¹⁾。しかし、実際の部品製造ラインにおいて油流れを詳細に観察することや精度よく測温することは容易でなく、形状精度の原因究明やそれを基にした対策立案が難しいのが現状である。そこで当社は、実部品による焼入れ実験により、不均一な変形をラボで再現する装置を導入した。さらに、当社が保有する鋼材データベースと、上記装置で実測した各部位の実測冷却カーブをコンピュータ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した。本報では、特にシャフト状部品の熱処理変形に着目し、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による再現を行った。

2. 油焼入れ装置の概要と特徴

油焼入れ冷却能測定装置の外観をFig.1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先端に取付け、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。さらに実際の焼入れと同様に複数部品の同時焼入れも可能であり、部品荷姿の影響に

よる冷却の不均一についても検証できる。また、油槽中央部にある観察窓より高速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油の「蒸気膜」の発生・崩壊状態を直接観察することができる。Table 1に試験機の仕様について概要を示す。

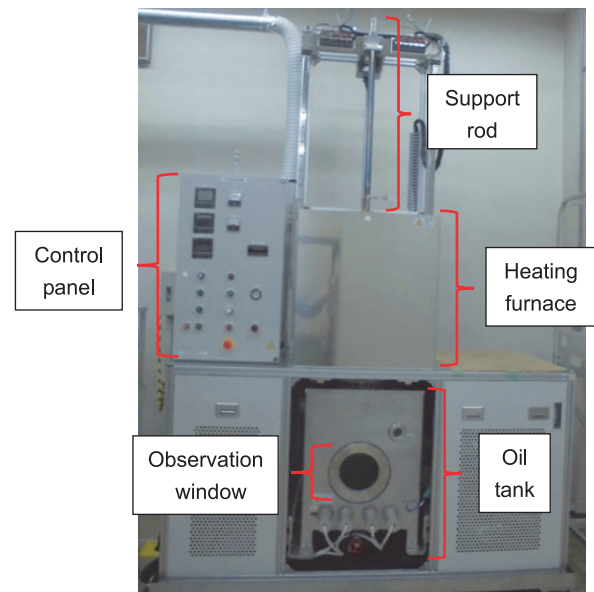


Fig.1 Appearance of cooling capacity measurement equipment.

Table 1 Overview of cooling capacity measurement equipment.

Specimen shape (Maximum)	φ 150mm × 300mm
Heating furnace atmosphere	Ar : H ₂ = 9 : 1
Heating temperature	R.T. ~ 1100°C
Oil temperature (Maximum)	200°C
Agitating speed (Maximum)	35L/min.
Temperature measurement point	12

3. キー溝付き試験片の油焼入れラボ実験

3.1 実験方法

Table 2に油焼入れ試験条件を示す。鋼種は肌焼鋼SCR420と、当社開発鋼ECOMAX4²⁾を用いた。ECOMAX4

* 研究・開発センター 新商品・技術開発室 プロセス開発グループ

の化学成分は、SCM420Hに比べて熱処理変形特性改善のためC増量、耐ピッチング特性向上のためSiを増量、Mnは結晶粒度特性の向上や加工性確保の観点から低減、Siと同じく軟化抵抗向上や焼入れ性確保のためCrを増量している²⁾。試験片形状をFig.2に示す。不均一冷却を助長して焼曲がりを生じさせるために側面にキー溝を付与した、直径20mm、長さ200mmの鋼軸¹⁾⁻³⁾とし、Fig.3に示すパターンで熱処理を行った。装置観察窓より焼入れ時の蒸気膜崩壊挙動の観察を行い、試験片端面より15mm位置の溝側、背側の冷却カーブの実測を行った。焼入れ後の試験片の両端をV字型ブロックで保持し、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る。

Table 2 Condition of oil quenching test.

Specimen shape	Shaft with keyway (φ20 × 200mm)
Steel	SCR420, ECOMAX4
Quenching temperature	850°C
Oil temperature	100°C
Agitation	None
Oil type	Cold quenching oil

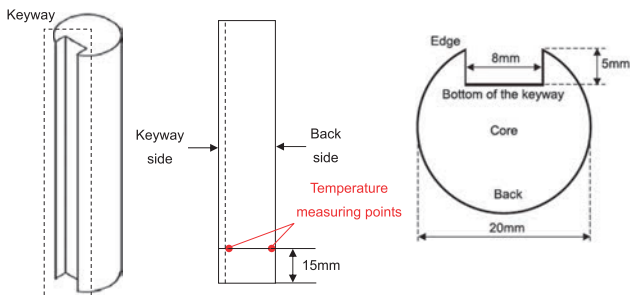


Fig.2 Shape of specimen.³⁾

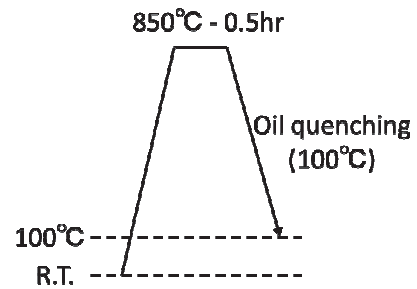


Fig.3 Heat pattern for oil quenching test.

3.2 実験結果および考察

ECOMAX4キー溝付き試験片の溝側並びに背側の実測冷却カーブをFig.4に示す。鋼部品の油焼入れ時の冷却段階は、膜沸騰段階、核沸騰段階、対流段階に分けられる。膜沸騰段階から核沸騰段階へ移行する際には、冷却初期に部品表面を覆っていた蒸気膜が崩壊し、急冷となる。蒸気膜崩壊は、溝側が3sec付近、背側が4sec付近で起こり、溝側の冷却が速くなって、試験片断面の不均一冷却が確認された。

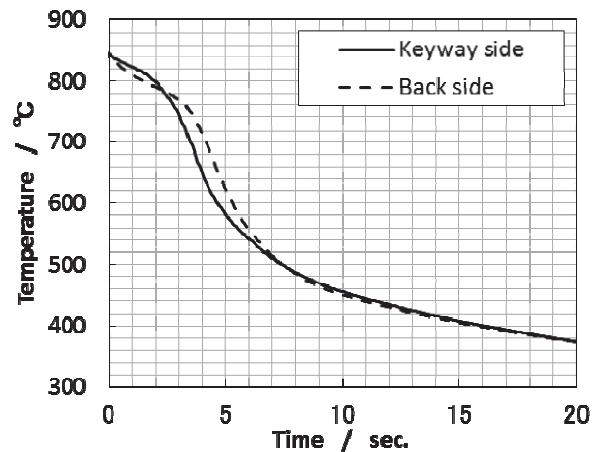


Fig.4 Measured cooling curve of specimen.

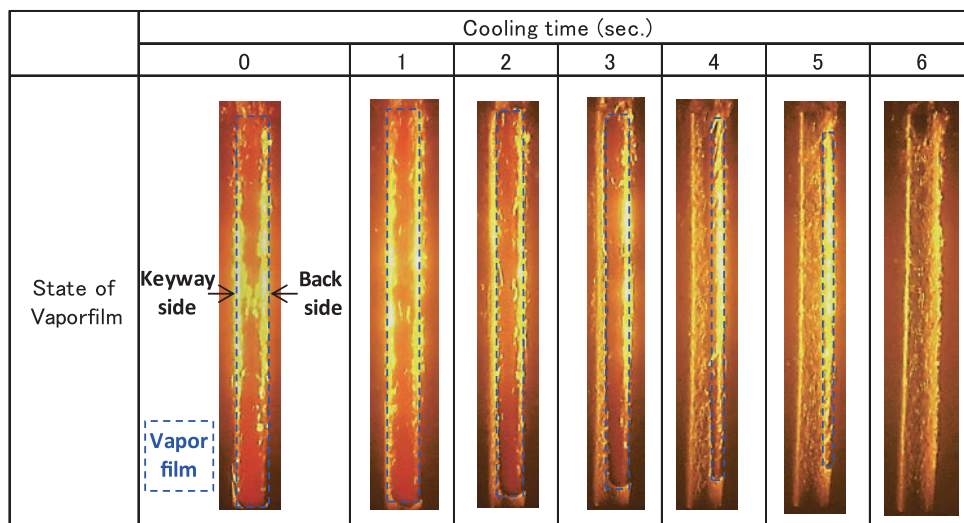


Fig.5 Transition of vapor film during quenching for specimen.

次に、キー溝付き試験片油冷時の蒸気膜観察結果をFig.5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する様子が観察され、観察結果からも溝側の蒸気膜崩壊が早いことが確認された。

4. キー溝付き試験片の焼入れシミュレーション

4.1 解析条件

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、要素は六面体要素とし、Fig.6に示すキー溝付き試験片1/4モデルを用いた。Fig.4の実測冷却カーブとの合せ込みを行い、Fig.7の実測熱伝達係数を同定し、シミュレーションに適用した。当結果は、過去に奈良崎⁴⁾が集中熱容量法により算出した、JIS 1種2号油の熱伝達係数と絶対値の差はあるものの、冷却段階は類似の傾向を示すことを確認している。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、焼入れラボ実験に用いたSCR420とECOMAX4の2鋼種である。

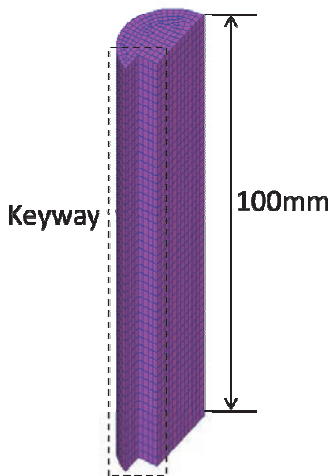


Fig.6 FEM model of shaft with keyway.

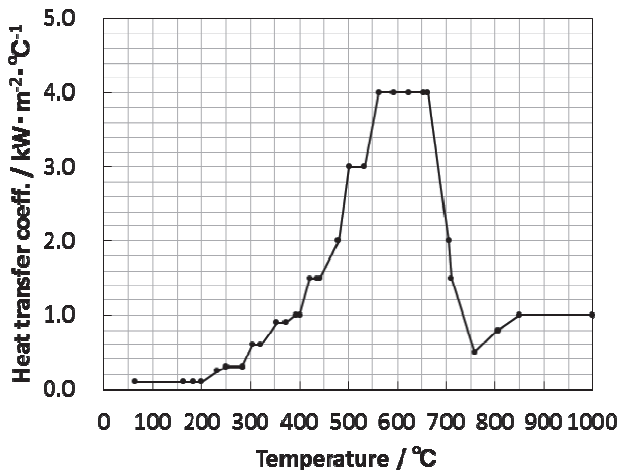


Fig.7 Heat transfer coefficient of quenchant for simulation.

4.2 解析結果および考察

Fig.8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SCR420、ECOMAX4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強調するため10倍にして表示した。SCR420、ECOMAX4いずれもキー溝を凸とする振れであった。次に、キー溝付き試験片の油焼入れ後の振れ量相対指数（SCR420実測値を1.00）をFig.9に示す。SCR420、ECOMAX4いずれもキー溝側を凸とした振れであり、SCR420よりもECOMAX4の振れが小さいという傾向もシミュレーションにより再現できた。この傾向は、SCR420に比べ、ECOMAX4のマルテンサイト変態開始温度が低いことによってもたらされたものと推定される。

以上の取組により、ラボ実験により得られた実測冷却カーブを用いて熱処理シミュレーションを行うことで、キー溝付き試験片の熱処理ひずみを高精度に推定する技術を確認した。

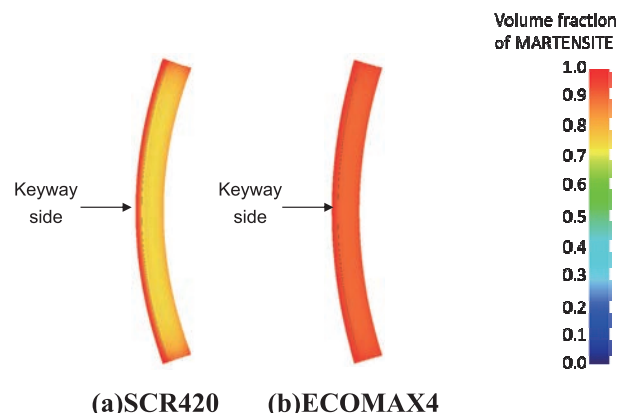


Fig.8 Deformation of steel shaft and volume fraction of martensite in steel shaft.

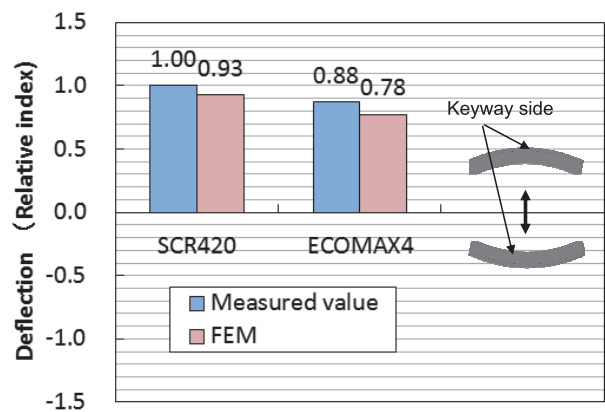


Fig.9 Deflection after quenching of specimen.

5. 結言

本報では、シャフト状部品の熱処理変形に注目し、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による再現を行った結果、以下の知見を得た。

- (1)油焼入れ冷却能測定装置を用いたラボ実験により、鋼部品の油焼入れ時の冷却曲線の実測ならびに蒸気膜崩壊挙動の観察が可能となった。
- (2)ラボ実験より得られた実測熱伝達係数を熱処理シミュレーションに適用することで、熱処理変形を高精度に推定することができた。

参考文献

- 1) 藤松威史, 中崎盛彦: 山陽特殊製鋼技報, 21 (2014)1, 28.
- 2) 山陽特殊製鋼技報, 23 (2016)1, 74.
- 3) 有本享三, 奈良崎道治: 熱処理, 42 (2002)5, 346.
- 4) 奈良崎道治: NACHI TECHNICAL REPORT, 15 (2008)A1.