

# 油焼入れ時の熱伝達挙動に及ぼす試験片形状の影響

The Effect of Specimen Shape on Heat Transfer Behavior During Oil Quenching

渡邊 啓介\*<sup>1</sup> 中崎 盛彦\*<sup>2</sup> 大村 悟\*<sup>3</sup> 山田 茂則\*<sup>4</sup>

WATANABE Keisuke, NAKASAKI Morihiko, OMURA Satoru and YAMADA Shigenori

Synopsis: Quenching process for the production of high strength parts often causes a problem that the shape accuracy is deteriorated due to non-uniform deformation of the precisely machined parts during heat treating. It is known that the deterioration is caused by cooling conditions such as the part-shape, stacking, and agitation of coolant. The generation and collapse of vapor film during oil quenching process affect the cooling behavior of product. Understanding of the vapor film behavior is important to elucidate the mechanism of inhomogeneous cooling. To obtain accurate estimation of deformation and residual stress after quenching of steel materials by heat treatment, it is essential to actually measure the heat transfer coefficient at each part of the steel materials during quenching. In this study, the vapor film of the shaft specimen and the stepped-shaft specimen was observed, and the actual measurement of the cooling curve was carried out by laboratory experiments. Based on the experimental results, the heat transfer coefficient of each part of the specimen was calculated, and the effect of the shape of the specimen on the heat transfer behavior was clarified. As a result, the vapor film stage period at the edge of the specimen was shorter than that at the center. The edge in the large diameter part was cooled more slowly than that of small diameter part. In the different diameter connection part, the vapor film collapse was accelerated due to the earlier collapse of the vapor film at the adjacent edge of the large diameter part.

Keywords: heat treatment; quenching; steel shaft; vapor film.

## 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<sup>1,2)</sup>。また、焼入れ時の蒸気膜の発生、崩壊も部品内の冷却不均一発生の原因として挙げられる<sup>3-5)</sup>。

鋼材焼入れ時の変形や残留応力について、熱処理シミュレーションによる検証が行われてきた<sup>6-9)</sup>。それらを高精

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。しかし、実際の部品製造ラインにおいて焼入れ時の鋼材を精度よく測温することや、蒸気膜挙動を観察することは容易でなく、熱処理変形の対策立案には多くの実験や熟練技術者の経験に依存しているのが現状である。

そこで今回、シャフト系部品を模擬した軸状試験片、段付軸状試験片を対象として、ラボ実験により蒸気膜観察、冷却曲線の実測を行った。そして、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。

## 2. 実験方法

実験には、油焼入れ冷却能測定装置<sup>10)</sup>を用いた。本装置の外観を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。支持棒先端に取付けた試験片を加熱

\*1 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

\*2 研究・開発センター 部長 博士 (工学)

\*3 スズキ株式会社 マリン技術部

\*4 スズキ株式会社 環境・材料・生産技術開発部

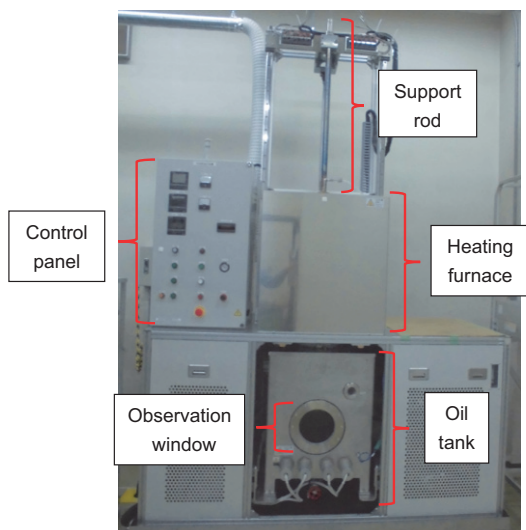


Fig. 1 Appearance of cooling capacity measurement equipment.

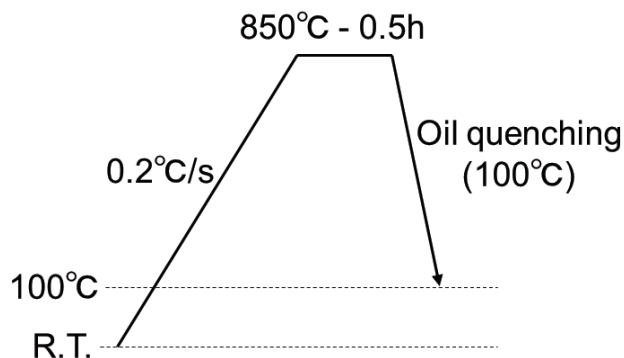
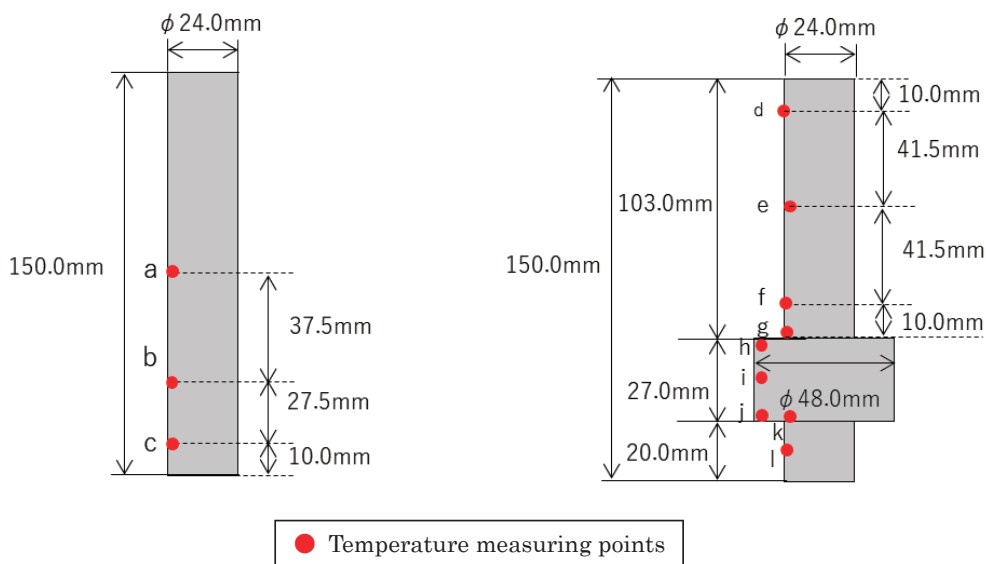


Fig. 3 Heat pattern for oil quenching test.



(a) Shaft specimen

(b) Stepped-shaft specimen

Fig. 2 Shape of specimen and temperature measuring points.

炉にて昇温後、支持棒を下降させ加熱炉下部の油槽内で油焼入れを行い、試験片各部位の冷却曲線の実測、蒸気膜の直接観察を行った。試験片形状および测温位置をFig. 2に示す。SCrベースの肌焼鋼から軸状試験片ならびに太径部を有する段付軸状試験片を作製した。試験片各部位の表面から1 mm位置に熱電対を挿入し、熱電対と試験片の隙間をなくすために銀ペーストを注入した。Fig. 3に熱処理パターンを示す。試験片を室温から850°Cまで0.2°C/sで昇温し、0.5 h保持したのちに100°Cの油で焼入れた。

### 3. 実験結果

#### 3.1 軸状試験片

Fig. 4に軸状試験片の焼入れ時の蒸気膜観察結果を示す。蒸気膜は試験片端部より徐々に崩壊していき、14 s時点において中央部に試験片長さの1/3程度付着していた蒸気膜が、15 s時に一挙に崩壊した。Fig. 5に実測冷却曲線を示す。下面エッジ近傍の点cは軸中央部の点aと比べて急冷開始が早く、冷却曲線からも端部の蒸気膜崩壊が早いことが確認された。以上の結果から、エッジおよび軸形状は蒸気膜崩壊挙動に影響し、それぞれの部位で熱伝達挙動が異なると考えられた。

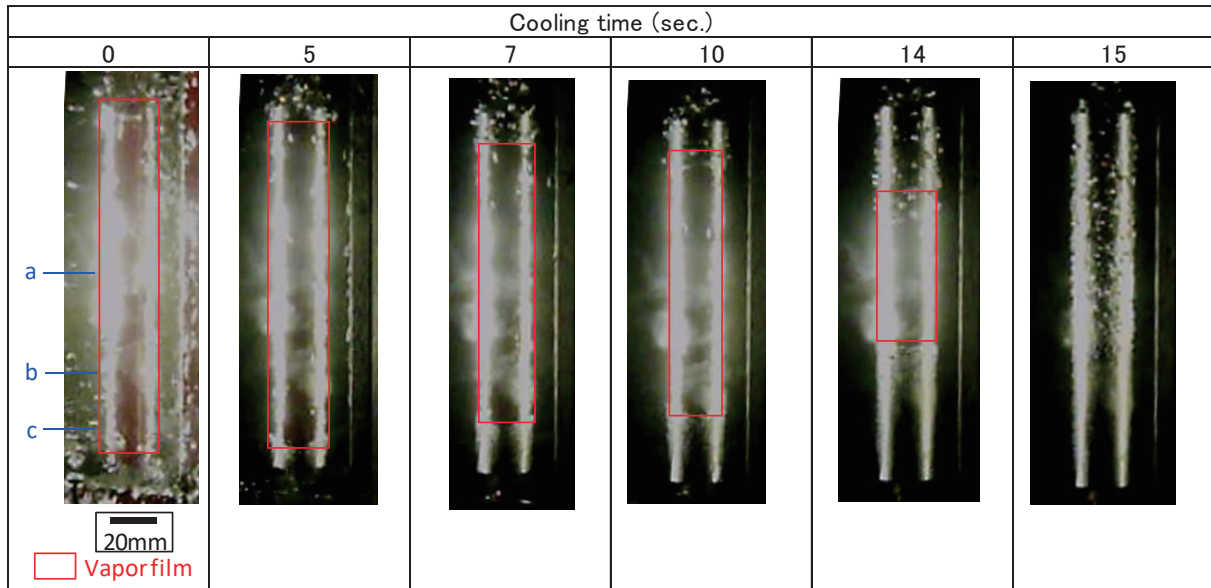


Fig.4 Transition of vapor film during quenching for shaft specimen (positions from “a” to “c” are the temperature measuring points).

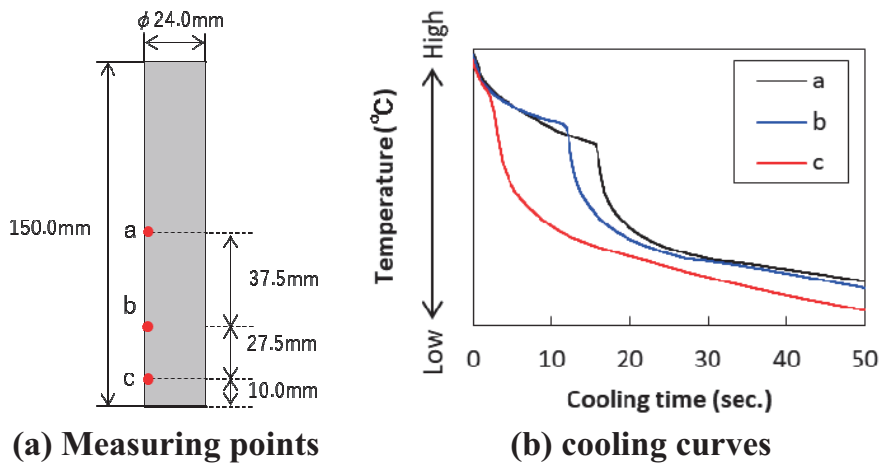


Fig.5 Measured cooling curves of shaft specimen.

### 3.2 段付軸状試験片

Fig. 6に段付軸状試験片の蒸気膜観察結果を示す。上部細径部の上端および下部細径部の下端においては、蒸気膜は軸状試験片での実験時と同様にエッジ部を起点として崩壊している。Fig. 7に実測冷却曲線を示す。この結果から、段付軸状試験片のエッジ部（点d,h,j,l：軸状試験片の点cに対応）、および中央部（点e,f,i：軸状試験片の点a,bに対応）では、冷却挙動は軸状試験片と同様であることが確認できた。しかし、太径部と細径部の接続部である点g,kは、太径部からの熱影響により冷却初期の温度がほかの部位よりも高いにも関わらず、同径の軸中央部（点e,f）と比較して蒸気膜崩壊が早いことがわかった。Fig. 8に冷却時間7 sにおける軸状試験片と段付軸状試験片の

蒸気膜挙動の比較を示す。蒸気膜挙動の観察結果から、点g,kでの蒸気膜崩壊の早期化は、隣接する太径部のエッジ部（点h,j）での蒸気膜崩壊が起点となっていることが推察された。

以上の結果より、軸状と段付軸状試験片とでエッジ部および軸部での冷却挙動は同様であることが分かった。一方で、段付軸状試験片の細径部と太径部の接続部においては、太径部のエッジの影響により軸中央部に比べて蒸気膜崩壊が早期化し、冷却挙動が特異的となっていることが推定された。

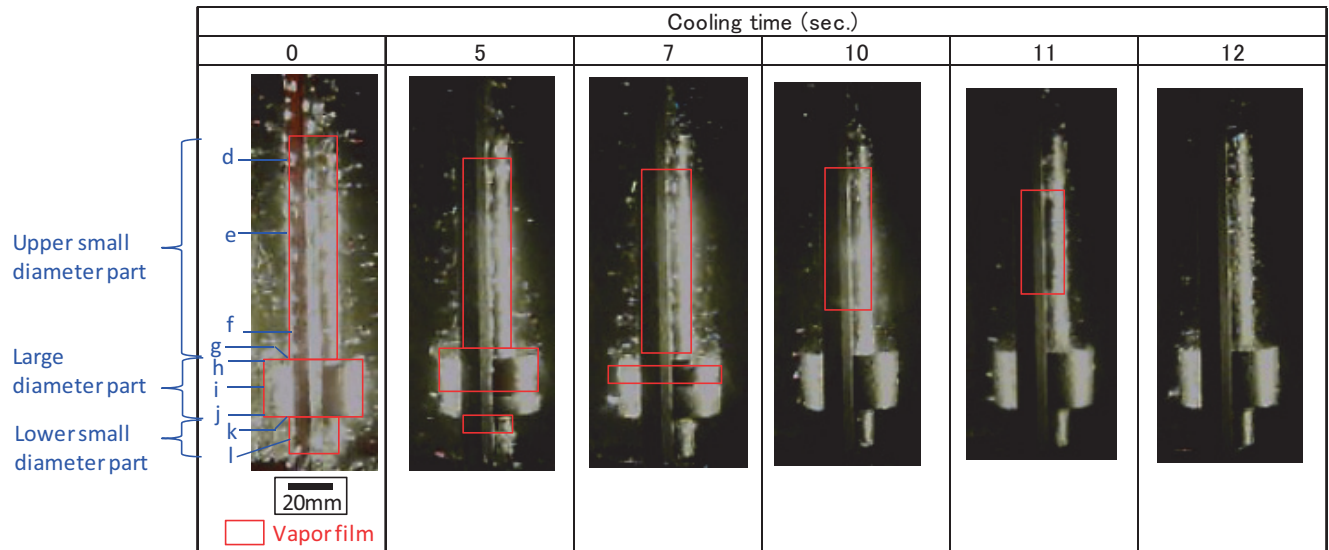


Fig.6 Transition of vapor film during quenching for stepped-shaft specimen (positions from "d" to "l" are the temperature measuring points).

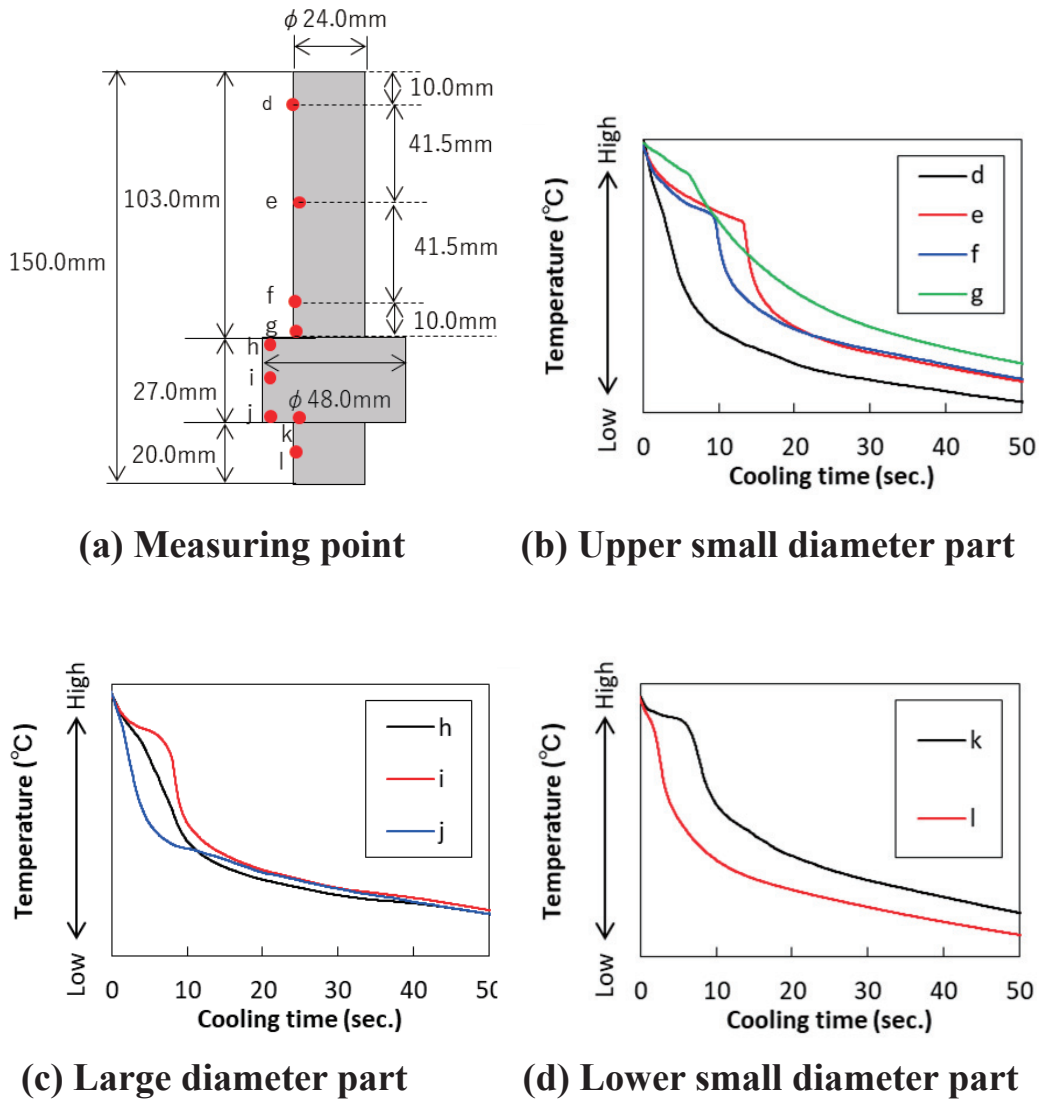
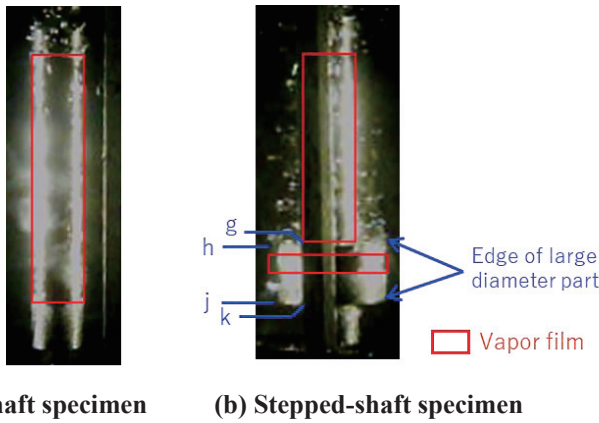


Fig.7 Measured cooling curve of stepped-shaft specimen.



(a) Shaft specimen (b) Stepped-shaft specimen

Fig.8 Comparison of vapor film during quenching between shaft specimen and stepped-shaft specimen at cooling time of 7 s.

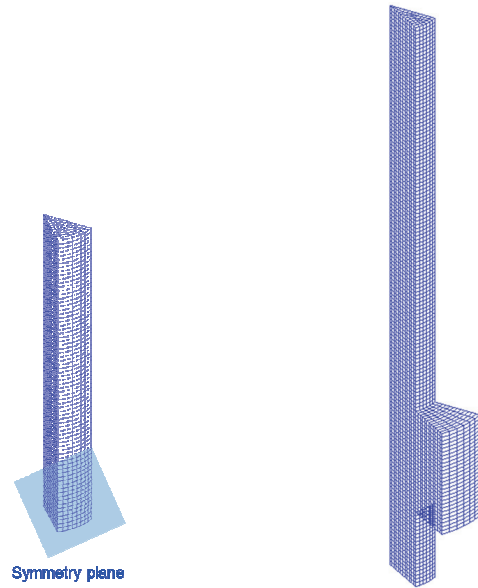
#### 4. シミュレーションによる熱伝達係数の同定

熱伝達係数は一般的に、集中熱容量法<sup>4)</sup>や逆解析法により同定される。このうち、集中熱容量法は試験片の温度分布がほぼ一様と仮定して試験片中心部の冷却曲線より近似的に熱伝達係数を求める方法であり、今回のように試験片寸法が大きく、熱伝導率の比較的小さい鋼部品には適さない。そこで今回は、実測冷却曲線から逆解析法により試験片各部位の熱伝達係数を同定した。

解析条件をTable 1に、解析モデルをFig. 9に示す。軸状試験片は、周方向および軸方向の蒸気膜崩壊挙動がほぼ対称であったため、周方向1/8、長さ方向1/2の1/16モデルとした。段付軸状試験片では周方向の蒸気膜崩壊挙動が対称であったため、周方向1/12の1/12モデルにて解析を行った。

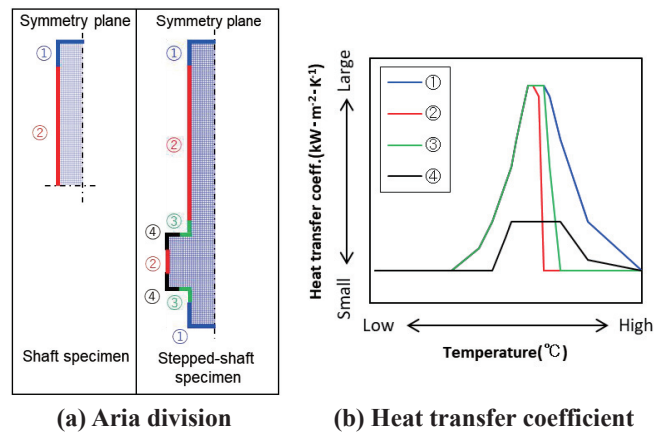
3.1、3.2で示した蒸気膜の生成・崩壊挙動観察結果および測温結果を元に、Fig. 10(a)に示すように熱伝達係数の領域分割を行った。細径部のエッジ部および軸中央部は軸状試験片、段付軸状試験片で同様の蒸気膜挙動であったため、それぞれ共通の領域①②とした。段付軸状試験片の細径部と太径部の接続部においては、太径部のエッジ形状による蒸気膜崩壊早期化の作用が推定されたため、領域③とした。太径部エッジについては、細径部に比べ体積が大きく熱伝達挙動が異なると推定されるため、細径部エッジ部の領域①と異なる領域④とした。

実測冷却曲線から逆解析法により得られたFig. 10(b)に示す熱伝達係数を上記の領域ごとに与えた結果、Fig.



(a) Shaft specimen (b) Stepped-shaft specimen

Fig.9 Numerical simulation models.



(a) Aria division (b) Heat transfer coefficient

Fig.10 Measured heat transfer coefficient.

11、Fig. 12に示すようにシミュレーションにより概ね実測冷却曲線を再現できた。細径部エッジ部(点cおよび点d,l)、軸中央部(点a,bおよび点e,f)それぞれ、試験片形状に関わらず同じ熱伝達係数によって熱履歴を再現できたことから、軸状試験片と段付軸状試験片で細径部の熱伝達挙動は同一であることが確認できた。一方、鋼材温度に対する蒸気膜挙動が特異的であった、段付軸状試験片の細径部と太径部の接続部(点g,k)については、太径部エッジ部による蒸気膜崩壊の早期化を考慮し、細径部の軸中央部よ

Table 1 Numerical simulation conditions.

FEM code	DEFORM HT™
Type of elements	6 node hexa hedral element
Number of elements	4950 (Shaft specimen), 8844 (Stepped-shaft specimen)
Quenching temperature	850℃
Oil temperature	100℃

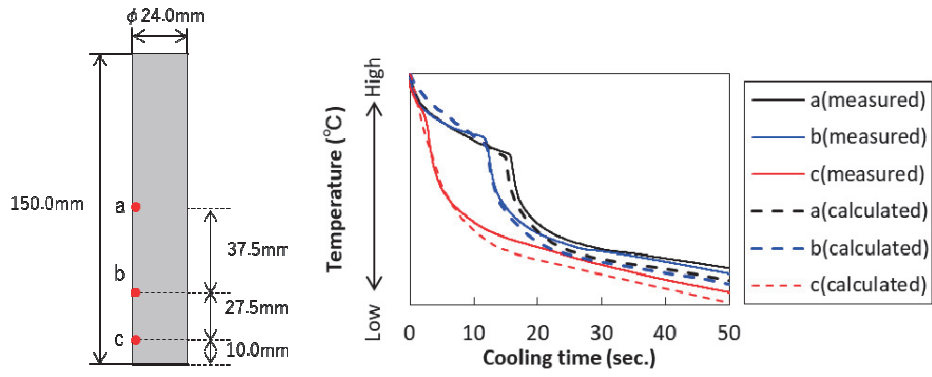


Fig.11 Cooling curves of shaft specimen.

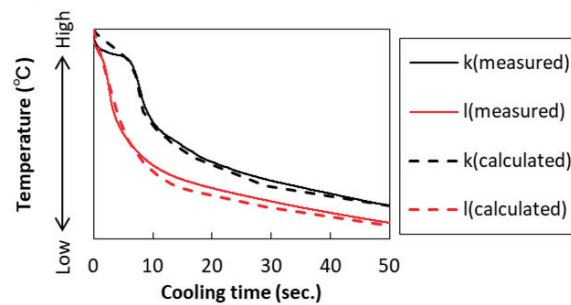
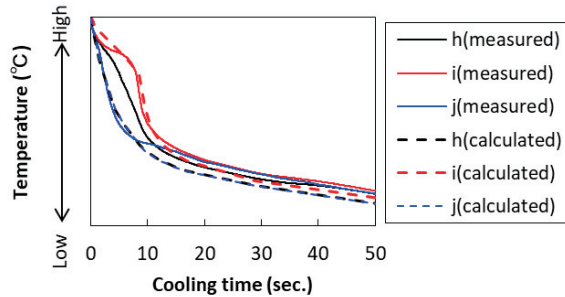
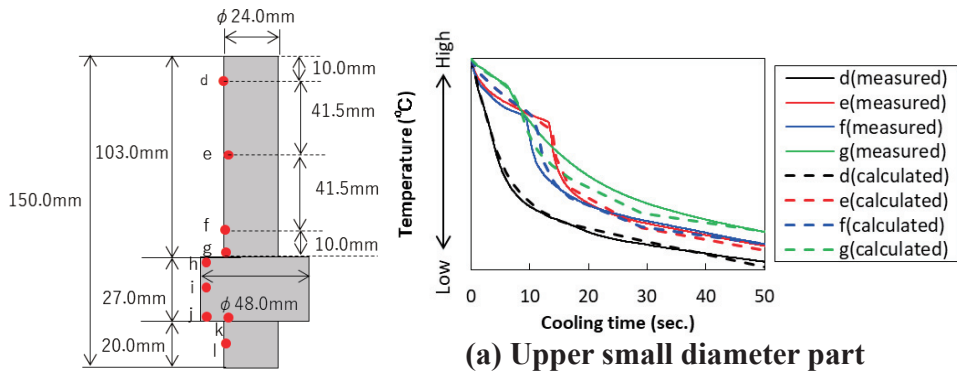


Fig.12 Cooling curves of stepped-shaft specimen.

りも蒸気膜段階を短く設定した熱伝達係数を適用することで熱履歴を再現できた。また、太径部のエッジ部（点h,j）の熱伝達係数は細径部のエッジ部（点c,d,l）よりも小さかった。これは、細径部に比べ体積が大きく冷却され

にくいためと考えられる。

以上の結果より、軸中央部に比べてエッジ部は蒸気膜段階が短いため冷却が早く、また、エッジ部については軸径が大きいほど緩冷却となることがわかった。さらに、径の

異なる軸の連結部では、太径部のエッジ部の影響により蒸気膜崩壊が早期化し、同径の軸部とは冷却挙動が異なることがわかった。

## 5. 結言

本報では、シャフト系部品を模擬した単純形状試験片にて焼入れラボ実験による蒸気膜観察および測温を行い、シミュレーションで熱伝達係数を同定することによって熱伝達挙動を調査した。その結果、以下の知見を得た。

- (1)軸状試験片焼入れ時の蒸気膜観察および測温を行った結果、エッジと軸中央部の熱伝達挙動は異なることがわかった。
- (2)段付軸状試験片焼入れ時の蒸気膜観察および測温を行った結果、細径部と太径部の接続部においては、軸中央部に比べ蒸気膜崩壊が早期化した。この現象は、太径部のエッジの影響によるものと推定された。
- (3)実験結果をもとに試験片各部位の熱伝達係数を同定した結果、軸中央部に比べエッジ部の蒸気膜段階が短く、エッジ部については軸径が大きいほど緩冷却となることがわかった。また、径の異なる軸が連結すると、太径部のエッジ部の影響により連結部の蒸気膜崩壊が早期化し、同径の軸部とは冷却挙動が異なることがわかった。

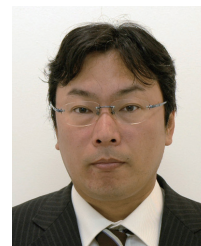
## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 奈良崎道治: 材料, 55(2006)6, 589.
- 4) 奈良崎道治: NACHI TECHNICAL REPORT, 15(2008)A1.
- 5) 巨東英, 市谷克実, 齊藤大道: 可視化情報, 27(2007)2, 75.
- 6) 岡村一男: 材料, 55(2006)5, 529.
- 7) 有本享三: 山陽特殊製鋼技報, 20(2013)1, 11.
- 8) 井上達雄: 材料, 64(2015)4, 247.
- 9) 藤松威史, 中崎盛彦: 山陽特殊製鋼技報, 21(2014)1, 28.
- 10) 渡邊啓介, 山田麻由: 山陽特殊製鋼技報, 26(2019)1, 51.

## ■ 著者



渡邊 啓介



中崎 盛彦



大村 悟



山田 茂則