

スパーギヤにおける熱処理変形発生原因の解明

Exploration on the Cause of Heat Treatment Strain for Spur Gear

名越 亮太*¹ 渡邊 啓介*¹ 中崎 盛彦*²

NAGOSHI Ryota, WATANABE Keisuke and NAKASAKI Morihiko

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 the heat treatment. It is known that the deterioration is caused by cooling conditions such as the part-shape, stacking, and agitation of coolant. In particular, gears are ground to remove these deformations, but they require restraining non-uniform deformations to reduce the production loads and costs.

In this study, a heat treatment distortion simulation system was applied to a spur gear to clarify the cause of heat treatment deformation. The generation and collapse behavior of vapor film on the spur gear was observed, and the cooling curves were measured by laboratory experiments. Based on the experimental results, heat transfer coefficients of each points of the specimen were identified. Also, the quenching deformation was calculated by means of an FEM model. As a result, the spur gear shape was deformed to a trapezoid with a large top after the quenching treatment. It was clarified that the quenching deformation of spur gear was mainly caused by transformation plasticity strain generated by the non-uniform cooling in the vertical direction near the transformation temperature.

Keywords: heat treatment; quenching; spur gear; vapor film; FEM; quenching deformation.

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。それらの部品には高強度化を目的とした焼入れ工程による硬化熱処理が施されているが、精密加工した部品がこの熱処理によって不均一に変形することで、形状精度が悪化するという課題がある¹⁾。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、攪拌などの焼入れ環境に依存して生じる冷却の不均一によるものであることが知られている^{2, 3)}。また、焼入れ時の蒸気膜の発生と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⁴⁻⁶⁾。

特にギヤについては、焼入れ時に発生する変形を除去する目的で歯面の研磨仕上げを付加した歯研ギヤが拡大しているが、製造の負荷軽減もしくはコスト低減を目的とした歯研工程の省略の観点から、焼入れ時における不均一変形の抑制が求められている。一方で、ギヤの焼入れ時の曲

がりに関する先行研究³⁾においては、焼入れ中のギヤ表面の蒸気膜状態や、温度差が生じる部位と変形やひずみとの関係性については明らかにされていない。

当社では、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、これまでに熱処理変形シミュレーションシステムを開発し⁷⁾、軸部品へ適用している⁸⁾。このシステムを複雑なギヤ部品に適用することで、明らかになっていない蒸気膜状態と温度およびひずみと変形の関係解明が期待できる。そこで今回、スパーギヤ（平歯車）試験片のラボ実験による蒸気膜観察、冷却曲線の実測を行い、実験結果をもとにシミュレーションを用いた試験片各部位における熱伝達係数の同定ならびに変形形状の再現から、ギヤにおける熱処理変形発生原因を明らかにした。

*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 部長 博士(工学)

2. 実験およびシミュレーションによる熱伝達係数の同定

2.1 油焼入れ実験方法

スパーギヤ試験片の油焼入れ実験から、試験片表面の温度データを採取した。実験には、油焼入れ冷却能測定装置⁷⁾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。また、焼入れ前後にて試験片を 3D スキャナ型三次元測定機⁹⁾にて測定することにより焼入れによる寸法変化を測定した。

実験に使用したスパーギヤ試験片の形状を Fig.2 に示す。ギヤの諸元は、外径 110mm、内径 22mm、歯幅 50mm、モジュール 5、歯数 20、材質 S45C の平歯車である。実験の熱処理パターンを Fig.3 に示す。試験片を室温から 850℃まで 0.1℃/s で昇温し、2h 保持したのちに 80℃の油へ焼入れした。測温は Fig.4 に示す位置にて、歯車の①上段、②中段、③下段のそれぞれの高さにて、a. 歯先、b. 歯底、c. 歯側面の合計 9 点について表面から 1.1mm 位置に熱電対を挿入して測定した。

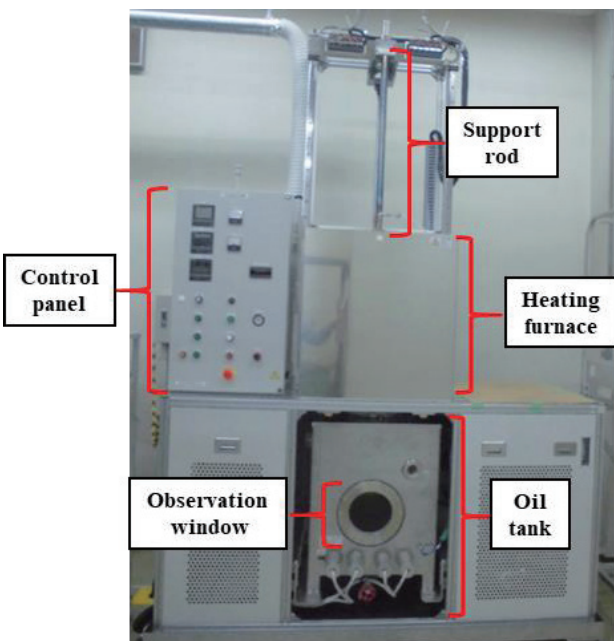


Fig. 1 Appearance of cooling capacity measurement equipment.

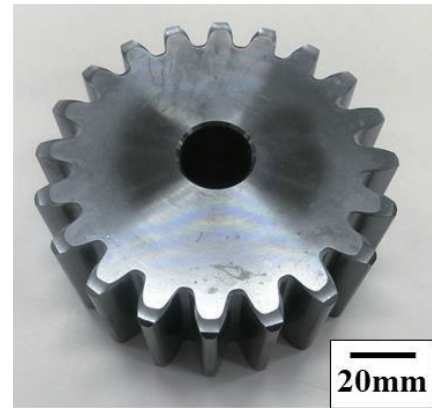


Fig. 2 Appearance of spur gear.

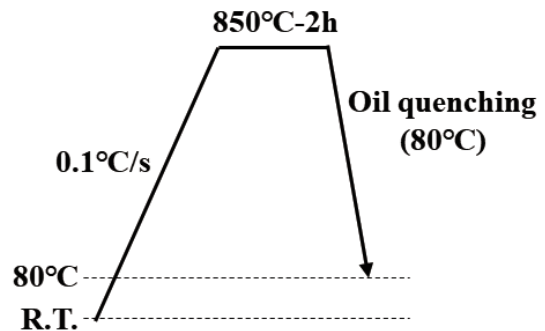


Fig. 3 Heat pattern for oil quenching test.

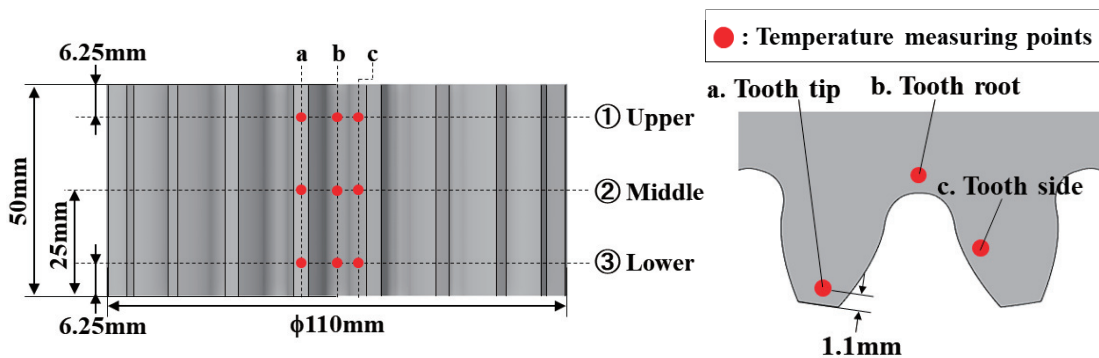


Fig. 4 Positions of temperature measurement on spur gear.

2.2 シミュレーション条件

2.1 節で実測した結果から得られる冷却曲線を解析で再現することによって求める逆解析法⁵⁾を用いて熱伝達係数の同定を行った。解析条件を Table 1 に、解析モデルを Fig.5 に示す。スパーギヤ試験片の解析モデルは、20 歯のうち 1 歯を抜き出した形状とし、周方向に対称な 1/20 モデルにて解析を行った。

Table 1 Numerical simulation conditions.

FEM code	DEFORM HT™
Type of elements	6 node hexahedral element
Number of elements	18880
Steel type	S45C
Quenching temperature	850°C
Oil temperature	80°C

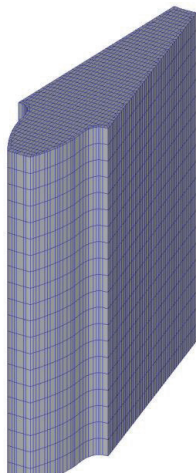


Fig. 5 Numerical simulation models of spur gear.

3. 実験結果

3.1 蒸気膜観察および測温結果

Fig.6 にスパーギヤの焼入れ時の蒸気膜観察結果を示す。エッジである歯先の蒸気膜は冷却開始直後から崩壊し始め、2s 以内に完全に崩壊した後、歯側面から歯底にかけて蒸気膜が崩壊する様子が観察された。上下方向では下端部の蒸気膜から崩壊し始め、続いて上端部、最後に中段歯底の蒸気膜が崩壊する様子が観察された。この中段歯底の冷却が遅い理由には質量効果が考えられる¹⁰⁾。

Fig.7 (a) から (c) に各部位における実測冷却曲線を示す。また、Fig.7 (e) に冷却曲線の一例を示す。液相に浸漬させて焼入れした鋼材の冷却過程は、鋼材が蒸気膜に包まれ冷却が緩やかな膜沸騰段階、蒸気膜が崩壊して鋼材表面が液相と直接接触することで冷却速度が速くなる核沸騰段階、鋼材表面温度が液相の沸点以下になり対流のみによって冷却される対流段階に分けられる¹¹⁾。③下段、①上段、②中段の順に膜沸騰段階から核沸騰段階の遷移が起きており、蒸気膜観察の結果と同様の傾向を示していた。さらに、a. 歯先、b. 歯底、c. 歯側面のすべての部位で、対流段階以降では上段の方が下段よりも冷却が速かった。これは、下段の冷却によって油が温められた際に自然対流が発生し、上段近傍の油の流速が速くなることで冷却能が向上したためと考えられる。

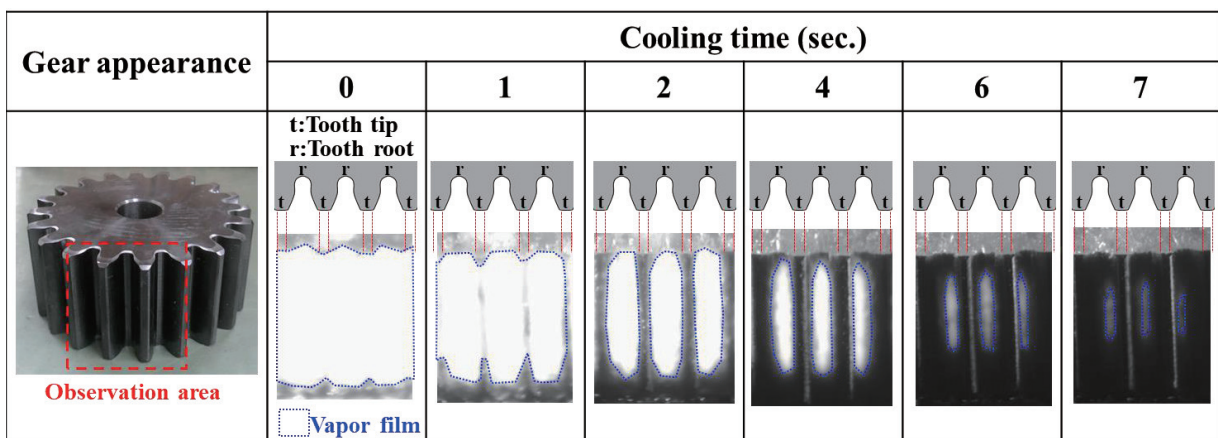
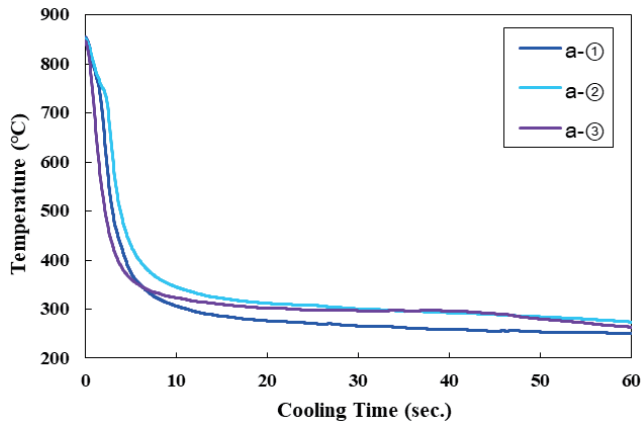
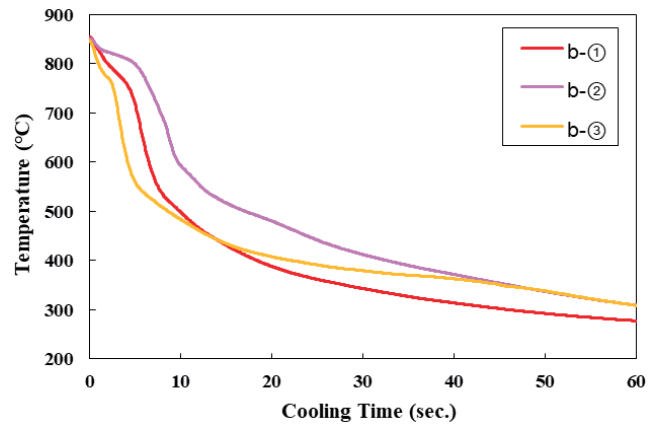


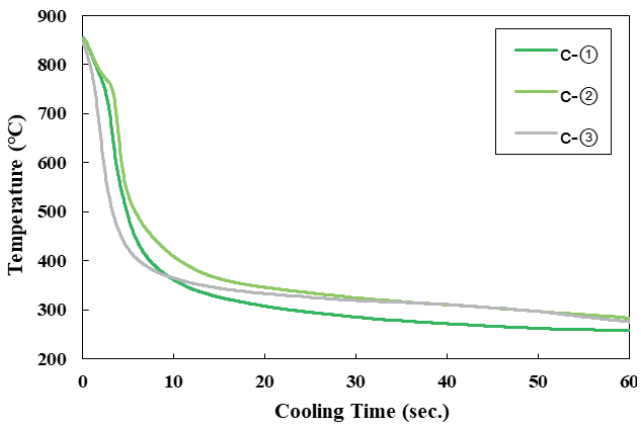
Fig. 6 Transition of vapor film during quenching.



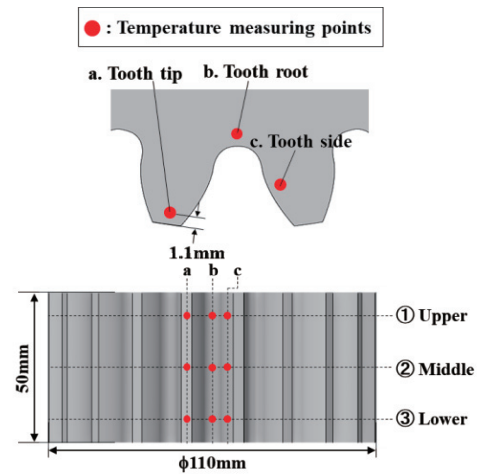
(a) Tooth tip.



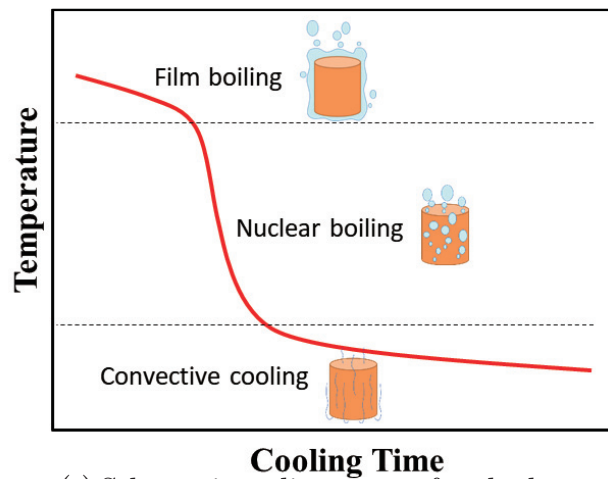
(b) Tooth root.



(c) Tooth side.



(d) measuring points.



(e) Schematic cooling curve of each phase.

Fig. 7 Measured cooling curve of spur gear.

3.2 焼入れ後のギヤ形状

Fig.8(a) にスパーギヤの焼入れ前後の三次元形状比較結果を示す。また、ギヤの噛み合いが起きる代表点として、歯たけ中央の歯すじ変形量を Fig.8(b) に示す。三次元形状の全体像から、焼入れ後のスパーギヤは上部の寸法が大きくなる逆「ハ」の字形状を示し、特に歯先でその傾向が顕著であった。また、ギヤ全体の変形に伴い歯面も上部が大きく変形しており、歯すじ誤差は55 μm であった。Fig.9 に上段、中段、下段の歯形の焼入れによる変形量を示す。a.b.c. いずれの部位においても、ギヤ下段よりも上段の方が変形が大きい傾向が認められた。また、変形の大きい歯先と比べて、歯底ならびに歯側面の変形は小さいこ

とが分かった。

今回の実験により得られた知見を以下にまとめる。

- ・スパーギヤの冷却はエッジである歯先が最も速く、焼入れ後の変形も大きい。
- ・上下方向の冷却不均一が生じており、膜沸騰段階から核沸騰段階にかけては下部の冷却が速いものの、対流段階以降では下部よりも上部の方が速い。
- ・焼入れ後のスパーギヤ全体の变形傾向として、上部で寸法が大きくなる逆「ハ」の字形状を示した。
- ・全体の変形に伴い、歯すじも同様に上部が大きくなる変形となる。

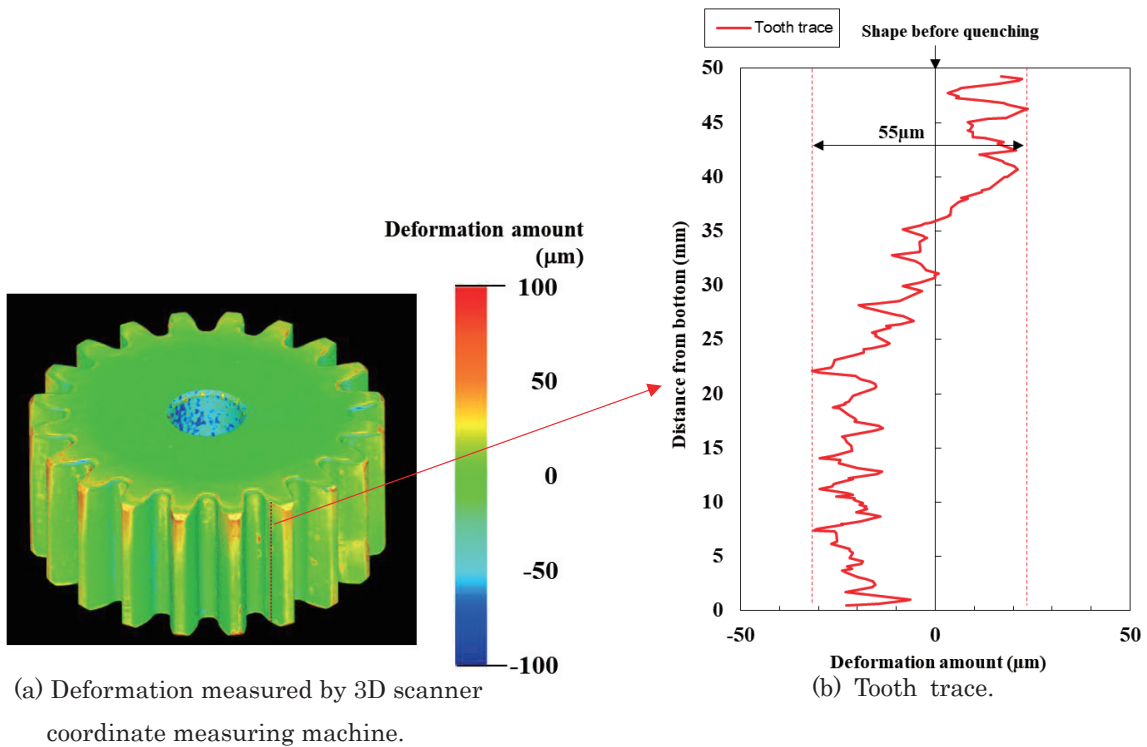


Fig. 8 Measured deformation amount of quenched spur gear.

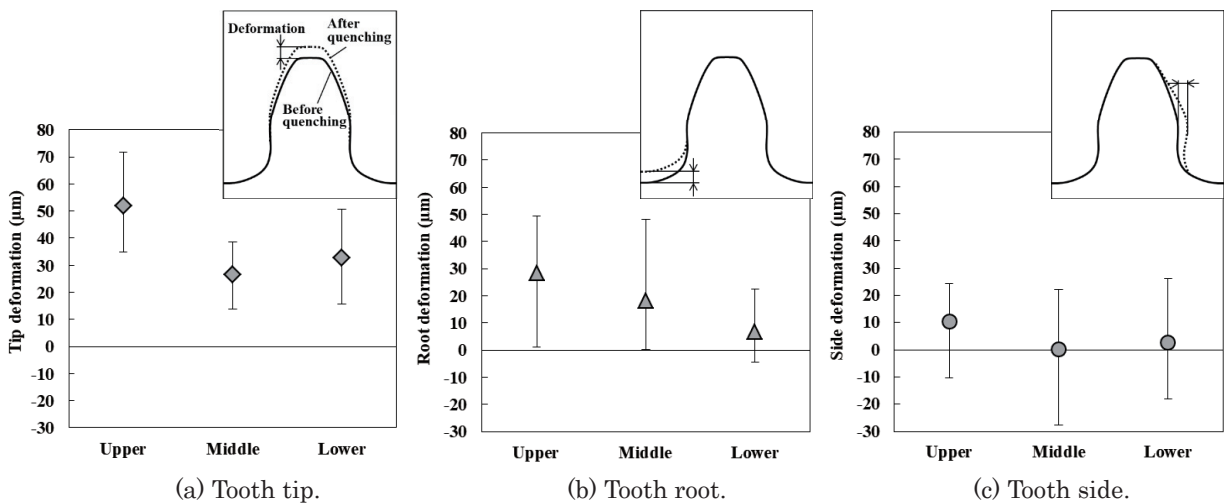


Fig. 9 Measured deformation of tooth profile.

4. シミュレーションによる焼入れ実験の再現

4.1 熱伝達係数の同定

3.1 節で示した蒸気膜の生成・崩壊挙動観察結果から熱伝達領域を分割し、また、測温結果を基にした逆解析法により各領域の熱伝達係数を推定した。設定した熱伝達領域および熱伝達係数を Fig.10 に示す。さらに、シミュレーション(破線)と実測(実線)の冷却曲線の比較を Fig.11 に示す。Fig.10 のとおり歯の表面を 7 領域に分割し、それぞれに熱伝達係数を適用したところ、概ね実測の冷却曲線をシミュレーションにより再現できた。

Fig.10 と Fig.11 から、歯先の熱伝達係数の値は上・中段(点 a-①および a-②)と下段(点 a-③)に大別できる。これらの上下方向の熱伝達係数の違いは、焼入れ実験でも確認された油の自然対流に起因すると考えられる。さらに、下段の歯底(点 b-③)および歯側面(点 c-③)は同じ熱伝達係数によって温度履歴を再現できた。これに対し、上・中段の歯底(点 b-①ならびに b-②)は核沸騰段階の後半から対流段階にかけての熱伝達係数を歯側面(点 c-①ならびに c-②)よりも大きくすることで再現できた。これは、歯底近傍の油は高温になった歯の表面に囲まれており、油の加熱による自然対流の影響がより顕著に表れたことが要因として考えられる。

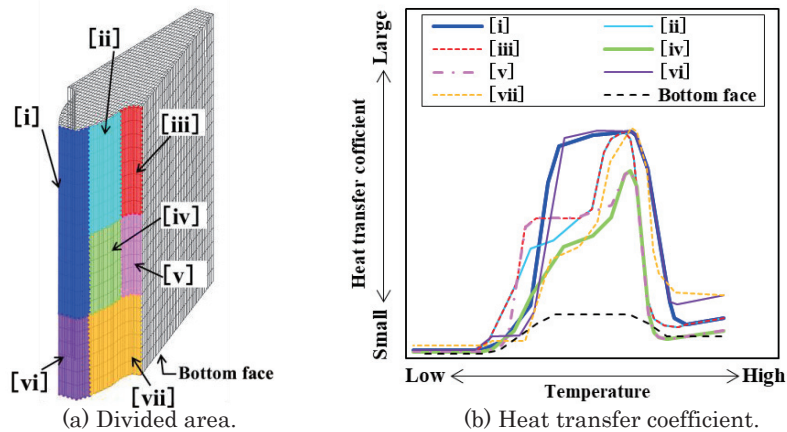


Fig. 10 Measured heat transfer coefficient.

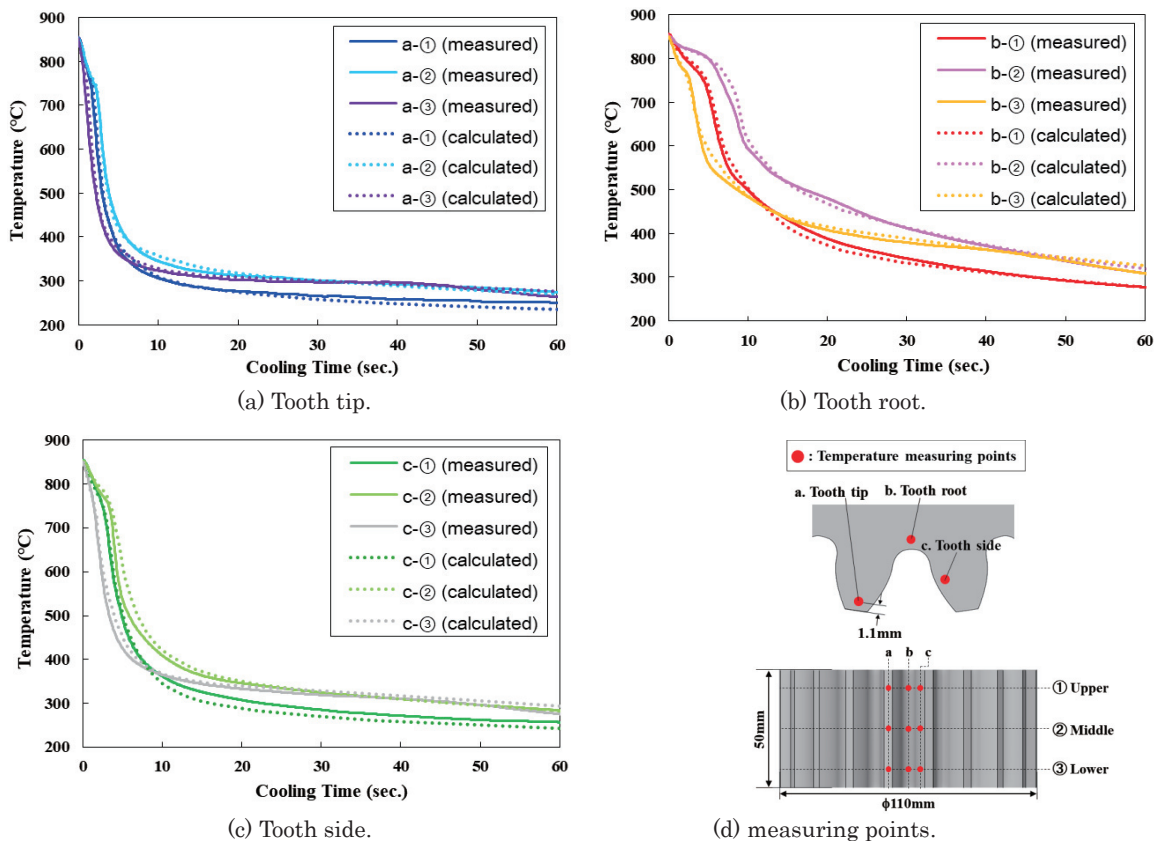


Fig. 11 Comparison of cooling curve between measured value and calculated value.

4.2 焼入れ後形状の再現および考察

シミュレーションにより求めた焼入れ後のギヤ形状と歯すじを Fig.12 に示す。焼入れ後のギヤの全体形状は上部で大きくなり、実測でも見られた逆「ハ」の字形状を再現した (Fig.12(a))。また、シミュレーションにおける歯すじ形状は実測と概ね一致しており、実測の焼入れ後歯すじ形状を再現できたと考える (Fig.12(b))。Fig.13 にシミュレーション結果から得られた焼入れ過程におけるギヤの冷却中の表面温度と形状および径方向の全ひずみの関係を示す。ギヤの形状変化は歯先における上部の径と下部の径の差分により評価しており、値が正のときに逆「ハ」の字形状、負のときに「ハ」の字形状に変化していることを

示している。また、全ひずみについても形状と同様の部位での差分を算出した。

形状評価結果および冷却曲線より、焼入れ初期の膜沸騰から核沸騰段階 (850℃ ~ 530℃) では、上部よりも下部の冷却が速いため、下部の熱収縮が大きくなり逆「ハ」の字形状となる。続く対流段階以降では上部の冷却が下部よりも速く、より収縮するため「ハ」の字形状となった後、300℃以降にて再び上部が大きくなり、最終的に逆「ハ」の字形状となった。また、径方向の全ひずみ差分の結果も形状の変化と同様の挙動を示したことから、ギヤの変形は焼入れ時に生じる上下部の径方向ひずみ差分により起きることが分かった。

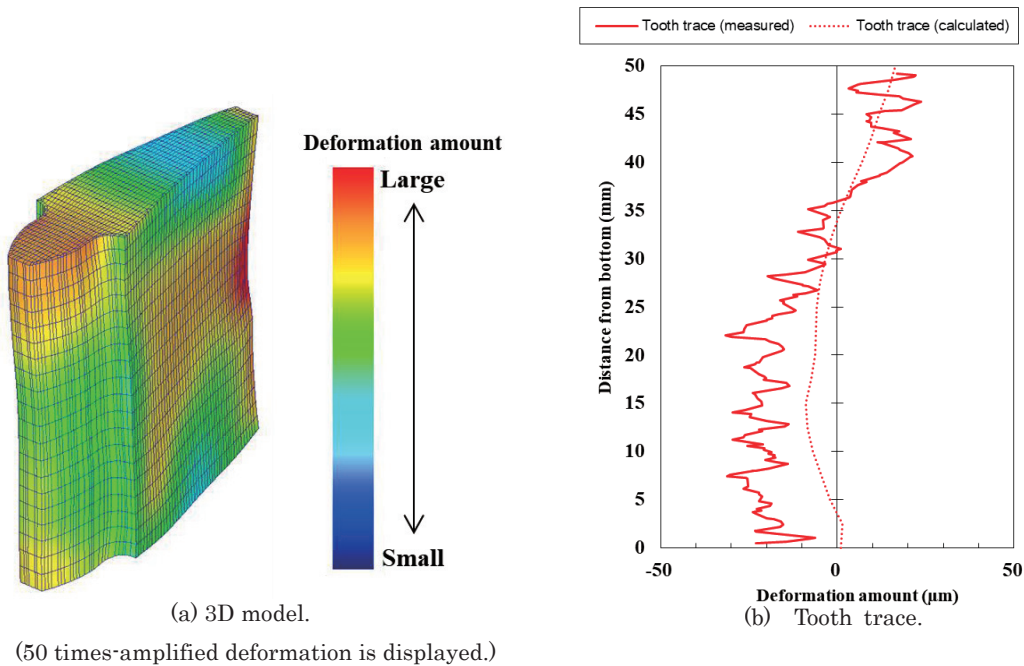


Fig. 12 Calculated deformation of quenched spur gear.

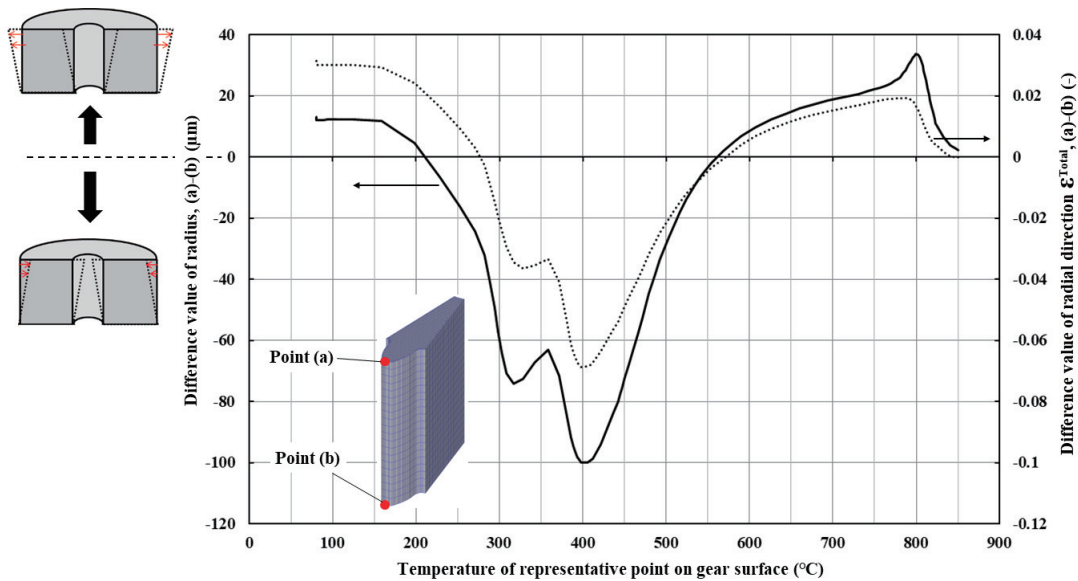


Fig. 13 Behavior of deformation and strain of spur gear during quenching.

径方向全ひずみをさらに詳細に分析することにより、上下のひずみ差分の発生原因について考察した。全ひずみ差分を各ひずみ成分（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} ）に分解した¹²⁾結果を Fig.14 に示す。これより、スパークギヤの逆「ハ」の字変形において、ひずみの主な構成要素は変態塑性ひずみであることが分かった。Fig.13 から、本ギヤの逆「ハ」の字変形は焼入れ終盤（300℃以下）にて起きている。本鋼種のマルテンサイト変態開始点（Ms 点）は 300℃であり、変態点近傍における冷却は下部よりも上部の方が速かった。このため、最終的な逆「ハ」の字変形は上部で先に変態が生じることに伴う変態塑性ひずみ¹³⁾に起因すると推測される。

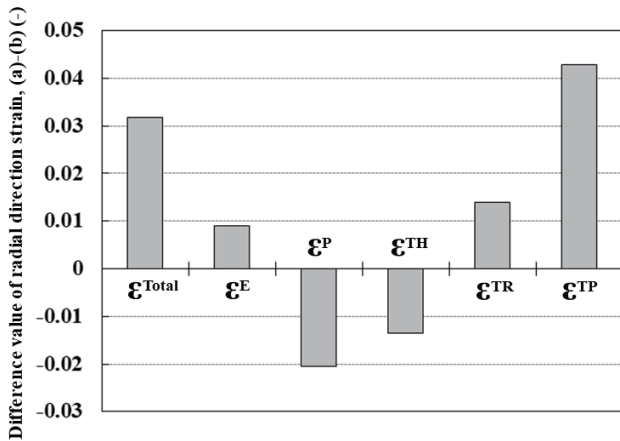


Fig.14 Difference of radial direction strain after quenching by simulation.

以上の結果より、エッジなどの形状の他にも、油の自然対流に起因すると考えられる上下方向の熱伝達係数の差が存在することが分かった。これらを踏まえた熱処理変形シミュレーションから、焼入れによるスパークギヤの変形を再現することができた。さらに、シミュレーション結果より、ギヤの変形は焼入れ時に生じる上下部の径方向ひずみ差分により起こることが分かった。また、径方向全ひずみの詳細な分析から、実験にて観察された逆「ハ」の字形状は、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によって形成されることが分かった。

5. 結言

本報では、スパークギヤ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の同定と焼入れ後形状を再現し、スパークギヤにおける熱処理変形発生原因を特定した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) スパークギヤはエッジである歯先の冷却が最も速く、焼入れ直後に蒸気膜が崩壊し、次いで歯側面、歯底と崩壊することが分かった。また、上下方向の冷却不均一が存在し、膜沸騰段階から核沸騰段階にかけては下部

の冷却が速いものの、蒸気膜崩壊後の対流段階以降は上部の冷却が下部よりも速い傾向が見られた。

- (2) 焼入れ後のスパークギヤの形状は、上部で寸法が大きくなる逆「ハ」の字形状であった。また、全体の変形に伴い、歯すじも同様に上部が大きくなる変形となることが分かった。
- (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、エッジなどの形状の他に、油の自然対流に起因すると考えられる上下方向の熱伝達係数の差が存在することが分かった。
- (4) シミュレーション結果より、ギヤの変形は焼入れ時に生じる上下部の径方向ひずみ差分により起きることが分かった。径方向全ひずみの詳細な分析から、実験にて観察された焼入れ後スパークギヤの逆「ハ」の字形状は、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主な原因であることが分かった。

参考文献

- 1) 岡村一男：材料,55(2006)5,529.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 奈良崎道治：材料,55(2006)6,589.
- 5) 奈良崎道治：NACHI TECHNICAL REPORT,15(2008)A1.
- 6) 巨東英, 市谷克実, 齊藤大道：可視化情報,27(2007)2,75.
- 7) 渡邊啓介, 山田麻由：山陽特殊製鋼技報,26(2019)1,51.
- 8) 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.
- 9) 名越亮太：山陽特殊製鋼技報,28(2021)1,74.
- 10) 赤塚寛之, 筑後了治, 奈良崎道治, 白寄篤：日本熱処理技術協会講演大会講演概要集,84(2017)57.
- 11) 多賀谷正義, 田村今男：金属表面技術,13(1962)5,1.
- 12) 有本享三, 奈良崎道治：熱処理,42(2002),346.
- 13) 井上達雄：材料,64(2015)4,247.

■著者



名越 亮太



渡邊 啓介



中崎 盛彦