

ヘリカルギヤの焼入れによる変形シミュレーション

Finite Element Simulation of Quenching Deformation in Helical Gears

名越 亮太^{*1} 藤松 威史^{*2}

NAGOSHI Ryota, FUJIMATSU Takeshi

Abstract : In recent years, higher dimensional accuracy of gears has been required to improve noise performance in electric vehicle drivetrains, making distortion caused by quenching a critical issue. In particular, eliminating post-quench tooth grinding requires accurate prediction and control of heat-treatment-induced deformation. This study aims to establish a generalized simulation model capable of accurately predicting quenching deformation and hardness distribution of helical gears by considering local cooling characteristics.

Oil quenching experiments were conducted on helical gears made of S45C and SCM420 steels. Vapor film behavior on gear tooth surfaces was directly observed using a high-speed camera, while near-surface temperatures were measured at multiple locations during quenching. The results revealed asymmetric vapor film collapse and cooling rates between the acute and obtuse edge sides of helical gear teeth. Based on the measured temperature histories, region-dependent heat transfer coefficients were identified through inverse analysis and incorporated into a three-dimensional finite element simulation.

The proposed model successfully reproduced the experimentally observed tooth trace deformation and hardness distribution of S45C gears, including asymmetric deformation caused by edge-dependent cooling. Furthermore, by changing only the material properties, the simulation captured the deformation characteristics of SCM420 gears, suggesting that the proposed approach can also be extended to carburizing steels. Strain component analysis clarified that transformation strain dominates tooth trace deformation in S45C, whereas plastic and transformation plastic strains play a significant role in SCM420. These results indicate that steel hardenability alters the dominant strain components governing deformation. The developed simulation framework provides a versatile and high-accuracy tool for predicting quenching deformation of helical gears and contributes to improved gear quality without additional finishing processes.

Keywords : helical gear; oil quenching; heat treatment distortion; asymmetric cooling; vapor film behavior; heat transfer coefficient; finite element simulation; tooth trace deformation; hardness distribution; case-hardening steel

1. 緒言

自動車の電動化に伴い、ギヤやシャフトなどの駆動部品には静粛性向上の観点から従来以上に高い形状精度が求められている。しかし、焼入れ工程で生じる変形は、この要求を満たすうえで大きな障害となっている。特にギヤで

は、焼入れ後の変形を歯面研削によって補正する手法が一般的であるものの、工程負荷やコスト低減の観点から研削工程の廃止・省略のニーズがあり、熱処理変形そのものの抑制が重要な技術課題となっている¹⁻⁴⁾。

代表的な焼入れ方法の一つである油焼入れでは、焼入れ初期に部品表面に油蒸気膜が形成され、その安定性、崩壊

^{*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）

のタイミング、ならびに核沸騰域の持続時間が部材表面の冷却速度を局所的に変化させる原因となる⁵⁾。このような冷却の不均一性は、焼入れ過程で発生する変形に深く関与することが知られている。蒸気膜の形成・崩壊挙動は、油における物性・添加剤・劣化状態に加え、焼入れする部品の形状にも影響を受ける。また、部品の姿勢、油槽内の攪拌条件も影響を及ぼす要因である⁵⁻⁶⁾。

筆者らはこれまでに、スパーギヤを対象として焼入れ中の油蒸気膜の形成・崩壊挙動を直接観察するとともに、歯面近傍の多点温度計測結果を用いた逆解析により、部品形状・姿勢に依存した熱伝達係数の部位依存性を明らかにした⁷⁾。その知見に基づく熱処理変形シミュレーションにより、実験では逆“ハ”の字型となる焼入れ後の歯筋変形を再現した。部品全体を単一の熱伝達係数とすると特徴的な歯筋変形を再現できないことから、部位毎に適切な熱伝達モデルを設定することが熱処理変形の予測に不可欠であることを示唆している。

本研究では、このアプローチを発展させ、EV減速機で多用されているヘリカルギヤに対する熱処理変形予測に取り組んだ。ヘリカルギヤは、中心軸に対して歯筋が傾斜していることで特有の歯面幾何形状として鋭角エッジと鈍角エッジを有する。このとき、同一歯であっても歯面の両側において鋭角エッジと鈍角エッジの上下位置関係は互いに入れ替わる（Fig.1に示すTooth side I およびTooth side II）。それにより、蒸気膜崩壊の早い領域と遅れる領域が同一歯内に存在し、ギヤの同じ高さ位置であっても歯の左右で非対称な冷却が生じる可能性がある。そこで、このような蒸気膜挙動の差異を熱伝達挙動に反映させて、焼入れ後の歯筋形状および硬さ分布を高精度に再現可能な汎用性のあるシミュレーションモデルの構築を行った。

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

ギヤの油焼入れ実験を行うにあたり、供試材としてS45CとSCM420を用い、Fig.1に示す外径110 mm、内径25 mm、歯幅50 mm、モジュール5、歯数18のヘリカルギヤを作製した。焼入れ実験には、Fig.2に示す油焼入

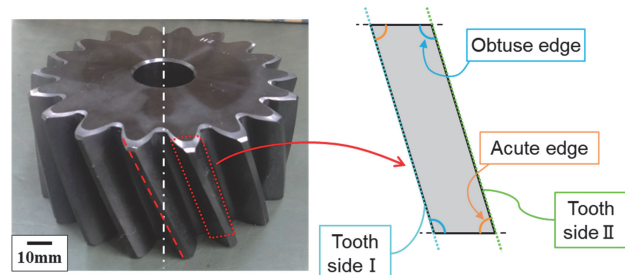


Fig.1 Appearance and Edge Geometry of the Helical Gear

れ冷却能測定装置を用いた⁸⁾。同装置の支持棒先端に取付けたギヤ試験片を装置上部にある加熱炉内で850℃まで昇温し2 hr保持した後、支持棒を下降させて装置下部にある80℃の無攪拌のコールドクエンチオイルを満たした油槽内に焼入れした。この際、Fig.3に示すギヤ歯面における①～③の各高さのそれぞれa～dの部位、および歯の上下面に合計14点の熱電対を取り付けて、焼入れ中の歯の表面近傍温度を測定した。また、油槽側面に設けた観察窓を通じて焼入れ中の油蒸気膜の崩壊挙動の観察を行った。ギヤ試験片は焼入れ前後で光学式の三次元形状測定機を用いて寸法測定を行い⁹⁾、基準円直径の周方向断面形状の焼入れ前後の差分から、歯筋の変形を求めた。

2.2 シミュレーション条件

熱伝達係数は上述の測温結果をもとに逆解析法¹⁰⁾により同定した。市販の熱処理シミュレーションソフトを用いて前節の焼入れ実験を模擬した解析を行った。解析条件をTable 1に、解析モデルをFig.4に示す。三次元のヘリカルギヤモデルは6面体要素で構成され、1歯分の形状を抜き出した周方向に対称な18分の1モデルを作成し、解析に使用した。また、鋼種毎の材料物性値には、市販の材料物性値計算ソフトウェアJMatProTMによる計算値、および材料特性データベースMATEQ¹¹⁾に収録された値を用いた。

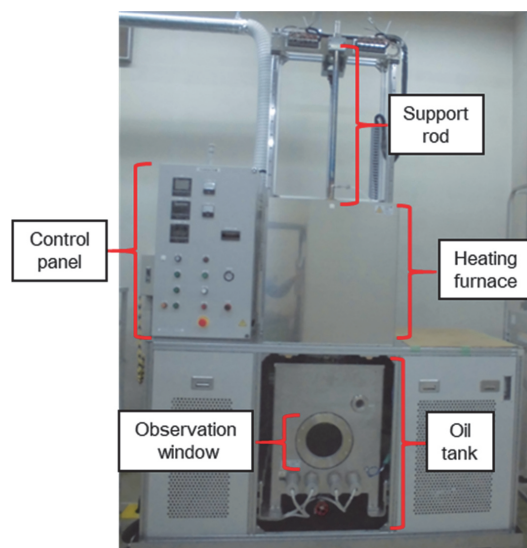


Fig.2 Overview of the Cooling Capacity Measurement Equipment

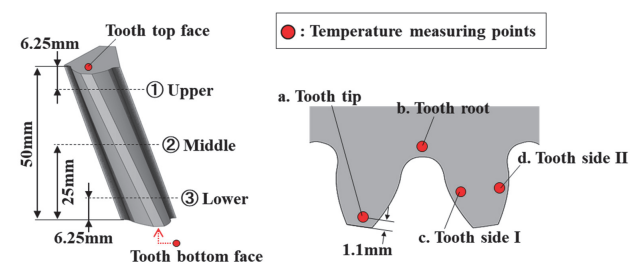


Fig.3 Temperature Measurement Positions

なお、シミュレーションモデルの構築にあたっては、まずS45Cを対象に、実験結果および材料データを用いたシミュレーションにより熱伝達係数の同定を行った。その後、メッシュ形状および熱伝達係数に関する境界条件は同一としたまま、材料物性をSCM420に変更したシミュレーションを実施し、焼入れ後の歯筋形状について実験結果との比較検証を行った。

Table 1 Numerical Simulation Conditions

FEM code	DEFORM HT TM
Type of elements	6 node hexahedral element
Number of elements	18960
Steel type	S45C, SCM420
Quenching temperature	850°C
Oil temperature	80°C

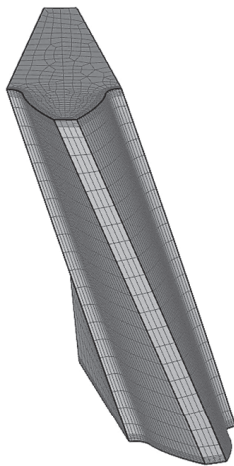


Fig.4 Finite Element Mesh Used in the Simulation

3. 実験結果

3.1 蒸気膜観察および測温結果

Fig.5に、S45C製ヘリカルギヤにおける焼入れ中の歯表面の蒸気膜状態をハイスピードカメラ(HiSpec1; Fastec Imaging Corporation)を用い、120 fpsにて撮影した動画の切り抜き画像を示した。図中の白い部分が蒸気膜を示しており、(A) 焼入れ直後はギヤの全体が蒸気膜で覆われている。その後数秒の間でまず歯先から蒸気膜が崩壊し、歯底へと進行していく。この挙動は、スパークギヤでも同様に見られる⁷⁾。一方で、ヘリカルギヤ特有の現象として歯の側面と上下面のなす角が鋭角なエッジ側において、

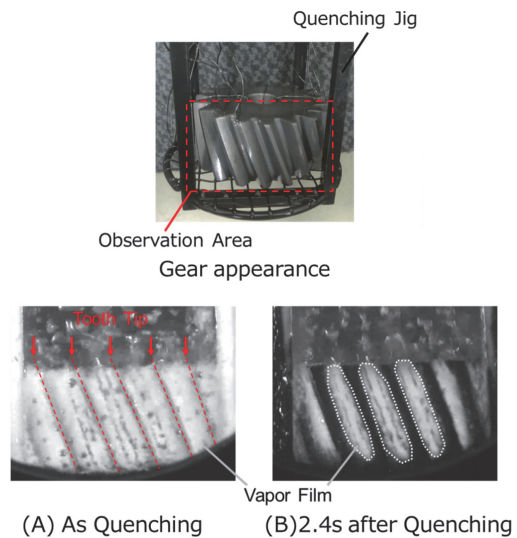


Fig.5 Vapor Film Condition during Quenching

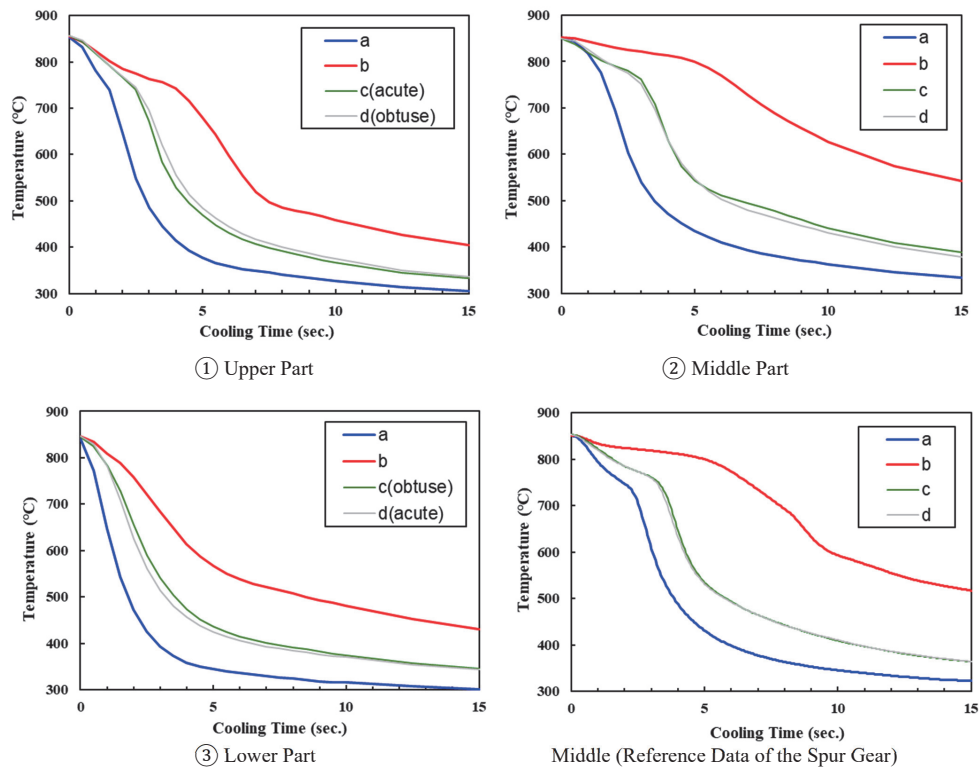


Fig.6 Cooling Curve of the Helical Gear from the Quenching Experiment

鈍角なエッジ側に先行して蒸気膜崩壊が起こり、(B) 歯側面の左右で蒸気膜が非対称な状態になることを見出した。

焼入れ中の各部位における温度変化をFig.6に示した。測温結果も蒸気膜観察の結果を支持しており、ギヤの①上部および③下部における同じ高さでの冷却速度は、核沸騰段階から対流段階にかけてギヤ左右の側面で冷却速度に違いが見られた。すなわち、歯の上下どちらにおいても鋭角側の歯側面の冷却が常に速くなる傾向が見られた。また、ヘリカルギヤの②中腹部の冷却はスパークギヤの同位置の冷却曲線と比べて、対流段階以降で左右の歯面温度に違いが見られた。ヘリカルギヤは歯筋が傾斜しているため、傾斜の下側に位置する歯面(Side I)が存在する。焼入れ時には、加熱された油によって生じる上昇流がこの歯面に接触し、油の攪拌と似たような効果によって熱伝達が促進される。その結果、Side IIにおいて冷却が促進されたと考えられる。

3.2 焼入れ後のギヤ歯筋形状

S45C製ヘリカルギヤについて、熱処理前の歯筋形状を初期形状としてそこからの変形量を歯筋変形と定義し、焼入れ後の歯筋変形量についてFig.7に赤丸で示した。歯の片面の歯筋変形量に着目すると、鋭角側では側面が大きく膨張し、鈍角側へ向かうにつれて収縮し、鈍角端部では膨張する変形挙動を示した。鈍角と鋭角の上下の位置関係が逆転す

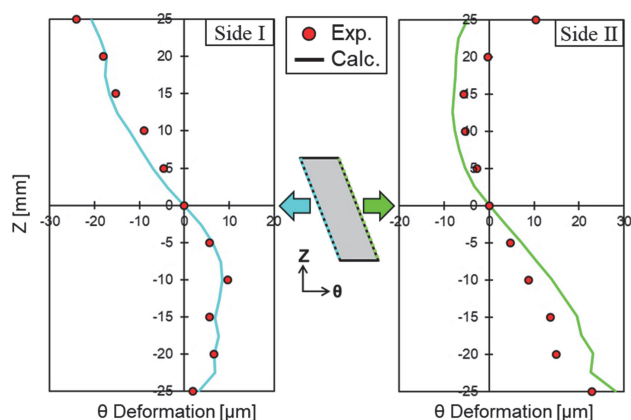


Fig.7 Tooth Trace Profile of the S45C Helical Gear after Quenching

る同一歯のもう一方の歯面においては、変形も上下で反転した様な挙動を示すことが分かった。焼入れ後のギヤ試験片の上端および下端近傍の歯幅方向の硬さ分布をFig.8に示す。Fig.8の通り、エッジの鋭角側と鈍角側では硬さに差が見られた。これは、エッジ形状に起因した冷却速度の違いによってマルテンサイト変態挙動に差が生じたことを示すと考えられる。スパークギヤでは焼入れ後の歯筋変形は同一歯の左右で対称形状であり、主に上下方向での冷却の差に起因した形状変化が生じるのに対し、エッジ形状に依存した変形の発生はヘリカルギヤに固有の特徴であり、同一歯における冷却の不均一性が歯筋変形に与える影響は大きいと考えられる。

4. 焼入れ実験の変形挙動再現のためのシミュレーション

4.1 熱伝達係数の同定

前節で捉えた蒸気膜挙動の観察結果および各部位の温度データから、逆解析法により各領域の熱伝達係数を推定し

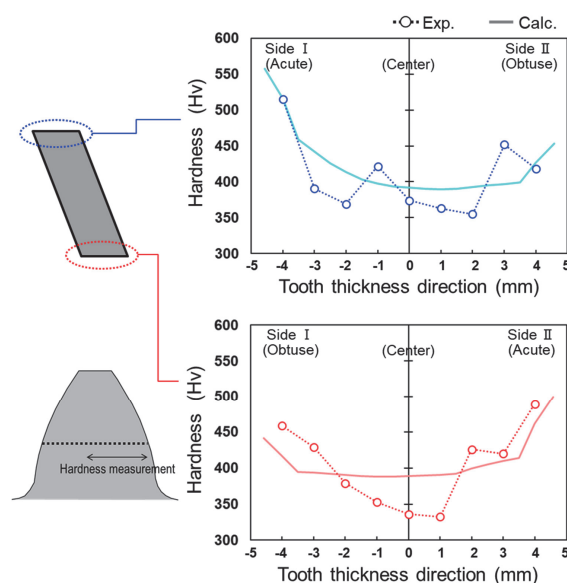
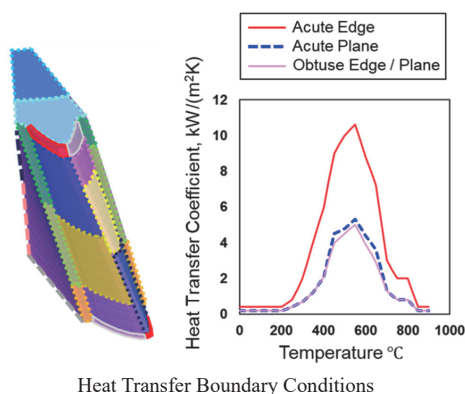
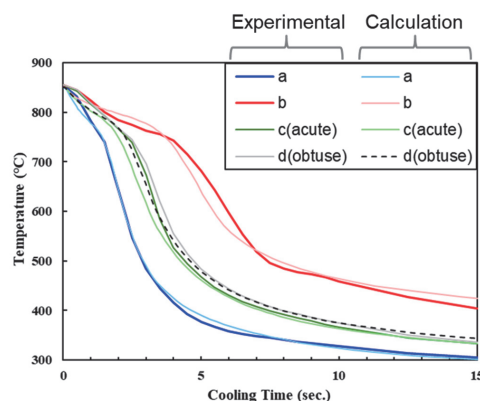


Fig.8 Hardness Profile of the S45C Helical Gear



Heat Transfer Boundary Conditions



Comparison of Cooling Curves (Upper Part)

Fig.9 Heat Transfer Boundary Conditions and Comparison of Experimental-Calculated Cooling Curves (Example of the Upper Part of the Model)

た。熱伝達条件とシミュレーションにおける温度の比較をFig.9にまとめる。歯の部位毎の冷却の違いを考慮するため、ギヤの表面を19個の領域に分割し、実測の温度履歴が再現されるように各領域の熱伝達係数を同定した。これによりヘリカルギヤの熱伝達挙動をシミュレーションに反映できるようにした。なお、測温を行っていないエッジ近傍に関しては、蒸気膜の崩壊タイミングが鋭角と鈍角なエッジで顕著に異なる事実に基づき、鋭角なエッジの熱伝達係数を大きくした条件を設定した。

4.2 焼入れ後形状

S45C製のヘリカルギヤの歯筋変形量のシミュレーション結果をFig.7に実線で示す。エッジ部の冷却の違いを反映させたことにより、歯筋全体の変形を精度よく再現する結果が得られた。また、Fig.8に示す通り、シミュレーションで予測した歯の断面硬さ分布についても、実測値で見られる鋭角側の硬さが鈍角側より高くなる傾向を再現することが出来た。

本シミュレーションモデルにおける歯筋形状の結果を既報の文献値と比較したところ³⁻⁴⁾、本モデルは実験値とシミュレーションにて良い一致を示しており、特に実験値の上下端部の歯筋が膨張する変形を精度良く表している。

4.3 鋼種の違いによるギヤ変形の特徴

SCM420製ヘリカルギヤの実験結果をFig.10に示す。なお、実験中の蒸気膜観察および代表点の測温よりSCM420においても焼入れ中の冷却速度はS45Cと大差ないことを確認している。実測ならびにシミュレーションで予測した歯筋形状について、全体的な歯筋変形の傾向はS45C製ギヤと類似しているものの、SCM420製ギヤの場合は歯筋の上下最端部が内側へ折れ込む形状となり、鋼種によって形状に違いが生じた。また、Fig.11に示した硬さに関して、SCM420はS45Cと比べ鋭角側と鈍角側での硬さの差が小さいという結果となった。SCM420のシミュレーションの結果は、これらのギヤの変形や硬さの

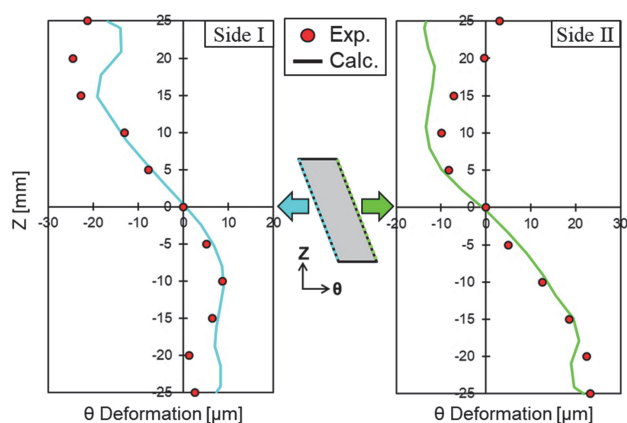


Fig.10 Quenching Experiment Results of the SCM420 Helical Gear

特徴をよく再現しており、鋼種データを変更するだけでヘリカルギヤの変形や硬度分布の高精度予測が実現できている。以上のように、本報で同定したS45CとSCM420製ギヤの熱伝達係数は共通であり、構築した熱処理変形シミュレーションモデルは炭素鋼や肌焼鋼に適用可能である。

4.4 エッジ形状に起因した変形メカニズムの考察

シミュレーション結果をもとにひずみ成分を分析することによって、鋼種毎のヘリカルギヤの変形メカニズムを推定することが可能である。代表的なひずみ成分として、ギヤの周方向に生じるひずみに注目し、ギヤの高さ位置と周方向ひずみ(ϵ_θ)の関係をFig.12に示す。歯筋の変形は歯の表面のひずみだけで直接決まるのではなく、同一高さ断面内における歯の内部のひずみが累積し最終的に表面に現れるひずみ量によって決まると考えられる。その考えを基に、シミュレーションで求めた周方向ひずみについてギヤの各高さにおける歯の中心から歯表面に生じたひずみデータを一定間隔で採取し、平均化したものを示している。左右の歯面における周方向ひずみの平均値によって表されるギヤの高さ方向のひずみ変化の傾向は、Fig.7およびFig.10に示す各鋼種の歯筋変形の傾向とよく似た特徴を示すことが分かった。

そこで周方向ひずみを有力な変形支配要因と捉え、周方向ひずみの内訳をさらに詳細に分析した¹²⁻¹³⁾。ひずみを塑性ひずみ(ϵ_θ^P)、弾性ひずみ(ϵ_θ^E)、変態塑性ひずみ(ϵ_θ^{TP})、変態ひずみ(ϵ_θ^{TR})の4成分に分解してその構成の内訳をFig.13に示した。なお、ひずみ成分のうち、熱ひずみ(ϵ_θ^{TH})は最終的なシミュレーション結果においてほとんど生じなかったためここでは無視した。S45C製ヘリカルギヤの歯筋において鋭角なエッジが顕著に張り出す変形は、

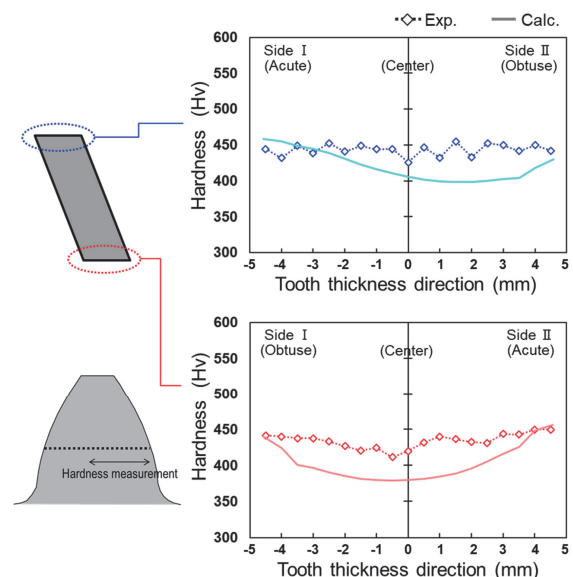


Fig.11 Hardness Profile of the SCM420 Helical Gear

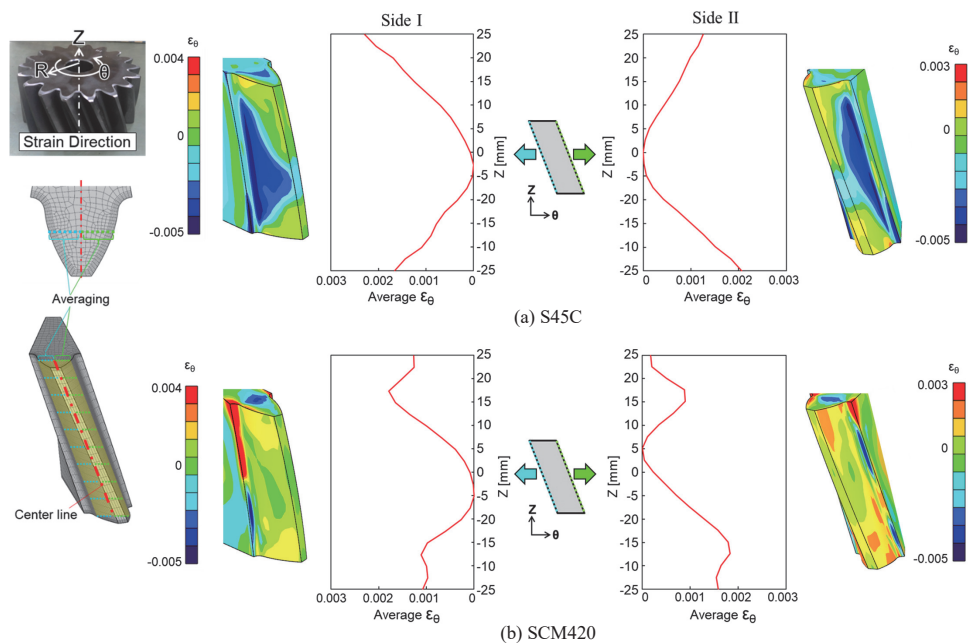


Fig.12 Average Strain (ϵ_{θ}) in the Circumferential Direction of the Helical Gear

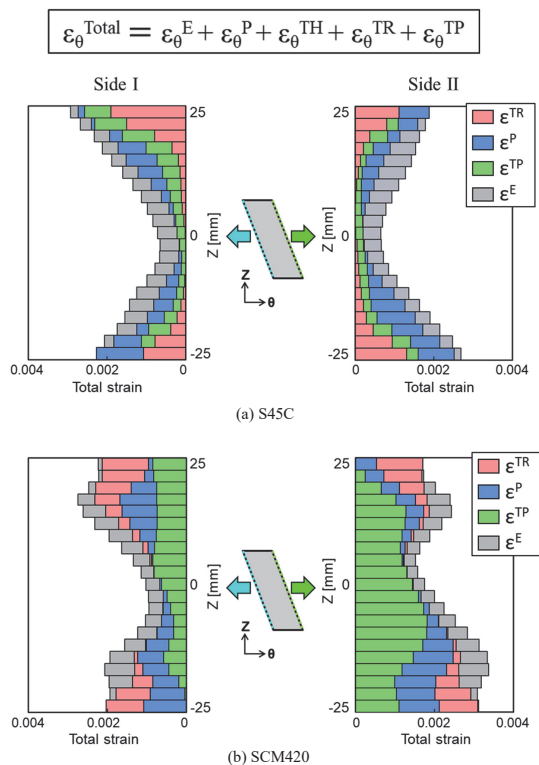


Fig.13 Total Strain ($\epsilon_{\theta}^{\text{Total}}$) Components in the Helical Gear

ギヤ端部に変態に伴う引張のひずみ（符号が正のひずみ）が集中している傾向がみられることから、変態ひずみが主要因であると考えられた。これに照らし、SCM420製のギヤでは、S45Cと同様に端部に変態ひずみが集中しているものの、変態ひずみだけではSCM420の特徴である端部で内側に折れ込む変形を説明することができない。端部よりも高さ方向の中央寄りの $Z=20\text{mm}$ ならびに -20mm 近傍では塑性ひずみと変態塑性ひずみが高いことが、SCM420の歯筋変形の傾向と一致することから、両ひずみ成分が特徴的な変形の主要因と考えられた。

鋼種によるひずみの構成要素の違いについて、鋼種の焼入れ性およびギヤの冷却挙動の観点より考察した。Fig.14にS45CおよびSCM420のCCT¹¹⁾と、シミュレーションにより得られたヘリカルギヤの上部エッジ表面における冷却曲線を重ね合わせた結果を示す。S45CはSCM420と比べて焼入れ性が低く、より短時間側でベイナイト変態が開始する。冷却の遅い鈍角エッジにおける冷却曲線は、ベイナイトの変態開始点を通過することに対し、鋭角エッジは通過せずマルテンサイト変態開始点(M_s 点)まで到達する。この際、鈍角エッジは M_s 点に到達する

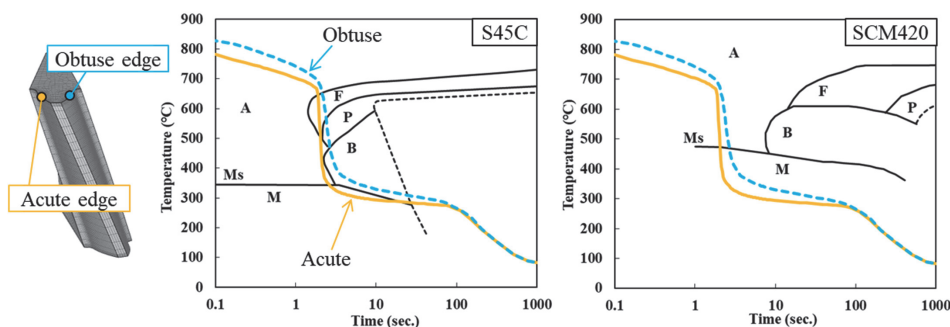


Fig.14 Relationship between the CCT diagram¹¹⁾ and Edge Cooling Curves

前にベイナイト変態がある程度進行する。このため、最終的に鋭角エッジと鈍角エッジでは、変態による体積変化の大きいマルテンサイトの変態量に顕著な差が生じることで、エッジの形状によって構成する変態ひずみ量に差が生じると考えられた。

これに対して、SCM420は焼入れ性が高く、鋭角エッジと鈍角エッジの冷却曲線はいずれもオーステナイト相のままMs点に到達する。このため、両エッジ間におけるマルテンサイト変態量の差は小さく、変態ひずみに大きな差は生じにくいと考えられる。一方、高温域において変形抵抗の小さいオーステナイト相では、エッジ形状に起因する冷却速度の違いにより冷却中の熱応力に差が生じ、その結果、鋭角エッジと鈍角エッジの間で塑性ひずみ量に差が生じたと考えられる。さらに、この冷却速度差はMs点通過後も維持されていることから、両エッジにおけるマルテンサイトの変態速度にも差が生じていると推察され、これが変態塑性ひずみ量の違いに影響していると考えられる。以上より、S45Cではエッジ形状による冷却挙動の違いが相変態挙動に直接影響し、変態ひずみが主要因となるのに対し、SCM420では主として冷却中の熱応力およびそれに起因する塑性ひずみ、ならびに変態塑性ひずみが支配的であると整理できる。

Fig. 15にS45CおよびSCM420製ヘリカルギヤの上端部近傍における焼入れ後のミクロ組織を示す。SCM420のミクロ組織は、鈍角側と鋭角側で大きな違いが見られず、芯部を含めて均一な組織であった。これに対して、S45Cの鈍角側ではベイナイト相が主相である一方、芯部ではフェライト相が、鋭角側では鈍角側よりもマルテンサイト相が多く見られ、部位により組織に差が見られた。これらの結果はFig. 8、およびFig. 11に示したように部位による硬さの差がSCM420よりS45Cで顕著となる結果と一致しており、S45Cの変形にマルテンサイト変態挙動が影響することを示唆し、シミュレーションにより予測され

た変形メカニズムを支持するものである。以上の考察から、鋼種の焼入れ性の違いは歯筋変形に与えるひずみ成分を変化させ、それによって歯筋形状に鋼種による違いをもたらすことが見出された。

5. 結言

ヘリカルギヤ歯面の冷却挙動を焼入れ実験により捉え、それをFEMにおける熱伝達係数の設定にフィードバックすることにより、焼入れ後の歯筋形状を再現するシミュレーションモデルを構築した。以下に得られた知見を示す。

- ・測温や油蒸気膜の観察からエッジ形状の違いに起因する蒸気膜崩壊挙動の差が、同一歯内で非対称な冷却を生じさせることを、観察および測温により明らかにした。
- ・焼入れしたS45C製ヘリカルギヤより、エッジ形状依存の冷却速度差によって、歯面左右で上下が反転したヘリカルギヤの特徴的な歯筋変形が生じた。
- ・実験で得られた歯面各部位の冷却挙動をもとに、部位依存の熱伝達係数を逆解析により同定し、ヘリカルギヤ特有の非対称冷却を反映可能な三次元熱処理シミュレーションモデルを構築した。
- ・構築したシミュレーションモデルは、焼入れ後の歯筋形状および硬さ分布を高精度に再現し、特に鋭角／鈍角エッジに起因する特徴的な歯筋変形を適切に捉えられることを示した。
- ・本シミュレーションモデルにて同定した熱伝達係数はS45CとSCM420製ギヤにて共通であり、炭素鋼や肌焼鋼にて焼入れ後の歯筋形状の予測が可能なモデルであると考えられた。
- ・鋼種によって異なる歯筋変形が生じる原因として、焼入れ性の違いによって歯筋変形に与えるひずみ成分が変化することが影響していると考えられた。

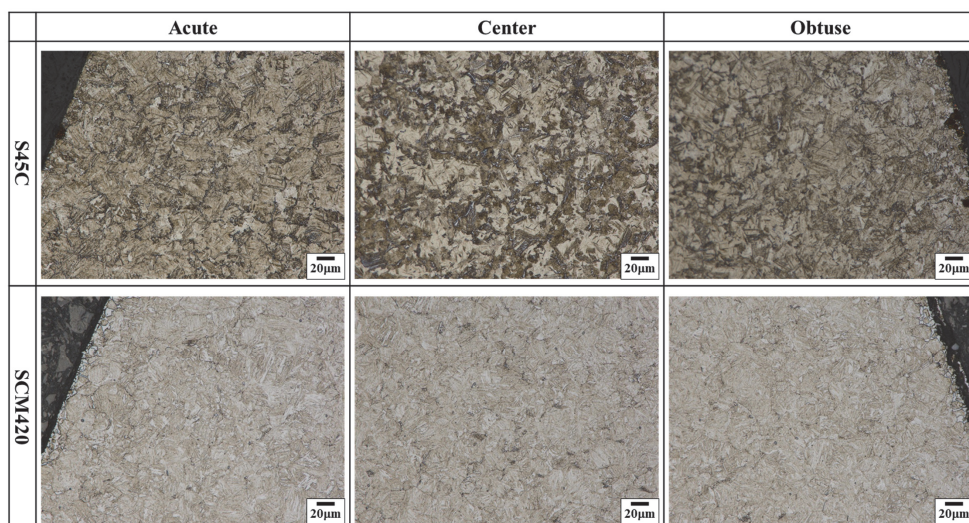


Fig. 15 Microstructure near the Upper Part of the Helical Gear

参考文献

- 1) J. Wang, S. Yang, J. Li, D. Ju, X. Li, F. He, H Li, Y. Chen : Coatings, 11(2011), 1132.
- 2) 今村哲平, 赤塚寛之 : 住友重工技報, 211(2013), 1.
- 3) 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.
- 4) 福本学, 吉崎正敏, 今高秀樹, 岡村一男, 山本憲司 : 材料, 50(2001)6, 598.
- 5) T. Sugimoto : NETSU SHORI, 64(2024), 1.
- 6) H. P. Horane, B. N. Naik, K. D. H. Kumar, P. Charkha, R. G. Biradar, R. Saini : IJME, 12(2025)2, 39.
- 7) 名越亮太, 渡邊啓介, 中崎盛彦 : 山陽特殊製鋼技報, 29(2022)1, 49.
- 8) 渡邊啓介, 山田麻由 : 山陽特殊製鋼技報, 26(2019)1, 51.
- 9) 名越亮太 : 山陽特殊製鋼技報, 28(2021)1, 74.
- 10) 奈良崎道治 : NACHI TECHNICAL REPORT, 15(2008)A1.
- 11) 塑性工学部門委員会材料データベース研究分科会 : 材料, 51(2002)3, 350.
- 12) 有本享三, 奈良崎道治 : 熱処理, 42(2002), 346.
- 13) 井上達雄 : 熱処理, 42(2002)5, 304.

■著者



名越 亮太



藤松 威史