クランク軸の表面処理による残留応力の評価技術と
疲労強度への影響*

松 田 真理子**

足 立 瞳***
兜 森 達 彦***池 上 智 紀***
佐々木 敏 彦****Evaluation Method for Residual Stresses Induced by Surface Treatments of Crankshafts and
Effect of These Stresses on Fatigue Strength

By Mariko Matsuda, Hitomi Adachi, Tomonori Ikegami, Tatsuhiko Kabutomori and Toshihiko Sasaki

Nowadays, crankshafts are required to use materials with higher fatigue strength to increase the output and efficiency of marine engines in an attempt to reduce of greenhouse gas emissions. Surface treatment is one of the means to fulfill this requirement. However, instead of giving rise to compressive residual stresses on treated parts, surface treatment causes tensile residual stresses to be produced around boundary positions between treated and non-treated parts. This report presents the distribution of residual stress when induction hardening is performed on a specimen. It also highlights ways to measure X-ray stress using the $\cos\alpha$ method that is applicable to crankshafts. Moreover, it shows the axial and torsional fatigue test results of specimens with different sizes of artificial defects using compressive and tensile mean axial stress as a substitute for residual stress. The end of the report introduces the fatigue strength assessment of specimens treated by induction hardening using the Murakami's equation with a modified coefficient, concluding that the defect in the tensile residual stress region of the specimen could be a starting point of failure.

1. はじめに

近年、地球環境問題が益々深刻となる中、船用分野においても排出ガス規制が非常に厳しくなってきた。特に温室効果ガス削減においては、エンジン高効率化・高出力化が必要となり、エンジンの主要部品であるクランク軸においては、従来にも増して高強度化、高疲労強度化が求められている。

クランク軸は往復運動を回転運動に変換する部品であり、エンジンの爆発力により発生する変動応力に耐える疲労強度が求められ、また往復運動部品との摺動部では摩擦・摩耗に耐える必要がある。これらの強化方法として有効な手段の一つが表面処理技術である。

表面処理技術としては、高周波焼入¹⁾、浸炭²⁾、窒化³⁾、および冷間加工^{4)~6)}等が挙げられる。浸炭および窒化は局所的に材料の硬さを向上させる技術であり、局所の疲労強度および耐摩耗性を向上させる目的では非常に有効な手段であるが、硬化層は極表面のみであり、船用クランク軸に発生する変動応力深さに比べる

と非常に浅い難点がある。そこで、船用クランク軸には比較的表面処理層が厚い高周波焼入れおよび冷間加工技術が選択される場合が多い。特に冷間加工技術は、加圧力を上げることで表面処理深さを増やすことが出来、大型クランク軸にも適用可能な技術である。

表面処理技術は前述の通り様々な利点を得ることができる一方で、表面処理部に圧縮の残留応力を与え、表面処理部と未処理部の境界に引張の残留応力を生じさせる。一般的に圧縮の残留応力は疲労強度を向上させる効果があるが、引張の残留応力は疲労強度を低下させることが知られており、適用部品の設計時には残留応力の影響を評価する必要がある。そのためには、第一に残留応力の測定技術が必要である。非破壊で残留応力を測定する技術としては、X線応力測定法が一般的であるが、従来はクランク軸のような複雑形状の応力測定が可能な装置が存在していなかった。近年、 $\cos\alpha$ 法を用いた可搬型のX線応力測定装置が市販され^{7,8)}、クランク軸においても工場内で簡便に残留応力測定が可能となった。著者らは、船用クランク軸のフィレット部に対して、 $\cos\alpha$ 法のX線応力測定技術が有効であることを示した^{9,10)}。

一方で残留応力が疲労強度に与える影響を評価するためには、残留応力に代わって平均応力下の疲労試験を実施することが有効である。ここで、船用クランク

*原稿受付 令和元年 10 月 20 日。

**正会員 (株)神戸製鋼所 鍛鍛鋼事業部 (高砂市荒井町新浜 2-3-1)。

*** (株)神戸製鋼所 鍛鍛鋼事業部 (高砂市荒井町新浜 2-3-1)。

****金沢大学 人間科学系 (金沢市角間町)

軸を対象にした場合、鋼材中に内在することが避けられない非金属介在物の影響も同時に考慮する必要がある。表面処理内部の引張残留応力発生域に介在物が存在した場合、母材よりも疲労強度を低下させる危険性が指摘されている¹¹⁾。また、引張平均応力下の疲労試験において、介在物サイズが大きくなるほど疲労強度が低下することも報告されている¹²⁾。よって、クランク軸に表面処理を適用する際には、表面処理により生じる残留応力と内在する可能性のある介在物サイズを考慮した評価が必要となる。

以上のことから、本報では船用クランク軸に適用される表面処理技術の中から高周波焼入れを例に取り、試験片に高周波焼入れを適用した際の内部残留応力分布を一例に示す。また、様々な残留応力測定技術の中から、船用クランク軸のフィレット部にも適用可能な $\cos\alpha$ 法を用いた X 線応力測定技術を紹介する。さらに、残留応力と介在物サイズが疲労強度に与える影響として、引張および圧縮軸力平均応力下の軸力およびねじり疲労試験結果を示す。最後に、冒頭に示した高周波焼入れにより生じる残留応力発生部位に介在物が存在した場合を想定した疲労評価結果について報告する。

2. 表面処理により生じる残留応力例

表面処理技術の注意点は、表面処理部に圧縮の残留応力を与える代わりに、表面処理部と未処理部の境界に引張の残留応力を生じさせ、その引張残留応力が材料の疲労強度を低下させる因子となることである。そのため、表面処理の種類、適用範囲および深さによって、どのような残留応力が生じるかあらかじめ把握しておくことが重要である。ここでは、小型試験片のノッチ部に高周波焼入れを適用した際の残留応力分布を一例に示す。

材料には、中速ディーゼルエンジンのクランク軸に一般的に使用される低合金 CrMo 鋼で、焼入れ焼戻しによりベイナイト組織に調質したものを使用した。表 1 に化学成分範囲を、表 2 に機械的特性を、図 1 に試験片形状を示す。類似条件で高周波焼入れ試験片の曲げ疲労試験¹¹⁾を実施したため、ここでの試験片形状は疲労試験片と同一の形状で、ノッチ底の最小径が $\phi 4$ mm、ノッチ径が R7 の形状を使用した。一般的に高周波焼入れの場合、硬化深さは数ミリの条件が選択されるため、船用クランク軸の軸径に対し硬化深さの割合は 1/100 程度となるため、本試験片でも硬化深さと軸径の割合が出来るだけ実機と同程度になるように、ノッチ部の極表層のみに高周波焼入れを適用した。図 2 に高周波焼入れ後の試験片ノッチ部の断面マイクロ写真を、図 3 に断面の硬度測定結果を示す。本試験片の

硬化深さは 0.2~0.3 mm となっていることがわかった。

高周波焼入れ部に生じる残留応力分布を確認するために、試験片表面から内部方向に電解研磨を行い、表面から深さ 0.8 mm までの X 線応力測定を実施した。ここで使用した X 線応力測定法は、3 章で紹介する測定手法とは異なり、古くから工学分野で使用されている $\sin^2\psi$ 法による測定法である。また、電解研磨では測定部のみを局部的に研磨しており、その影響は表面

表 1 CrMo 系低合金鋼の化学成分範囲 (mass %)

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
Max.	0.45	0.40	1.20	0.50	2.50	0.35
Min.	0.36	0.15	0.80	0.30	1.50	0.15

表 2 機械的性質

Tensile Strength [MPa]	0.2% Proof Strength [MPa]
1021	868

図 1 高周波焼入れ試験片形状

図 2 高周波焼入れ部の断面マイクロ写真

図 3 高周波焼入れ部の深さ方向の硬度分布

図4 高周波焼入れ部の深さ方向の残留応力分布

近傍では無視できる程度と考えられるが、測定深さが深くなるほど電解研磨の影響をより多く受けていると考えられる。

図4に高周波焼入れ部の残留応力分布を示す。高周波焼入れの硬化範囲である0.2~0.3 mmの範囲に圧縮の残留応力が発生し、硬化領域の境界から0.8 mm深さまで引張の残留応力が発生していることがわかった。引張残留応力の最大値は圧縮残留応力の最大値に比べ小さくなっているが、引張残留応力の発生領域は圧縮残留応力の発生領域よりも大きくなっており、硬化領域よりも広い範囲に引張残留応力の発生領域があることは注意すべき点である。

3. 船用クランク軸に適用可能な残留応力測定法

残留応力を非破壊で測定する手法は古くから様々な研究がなされており、赤外線¹³⁾・音弾性¹⁴⁾・磁気ひずみ法¹⁵⁾といった手法が提案されているが、いずれも測定精度の面でまだまだ改善の余地がある。その中で古くから実用上広く適用されている手法はX線応力測定法である。X線応力測定法は、結晶の回折を利用して多結晶材料中の応力を測定する手法であり、1930年代から現代までも盛んに研究がなされている。

X線応力測定には長らく $\sin^2\psi$ 法と呼ばれる手法^{16)~19)}が一般的に適用されてきた。 $\sin^2\psi$ 法によるX線応力測定は、格子面間隔の変化を複数の入射角条件で測定し、格子面間隔と $\sin^2\psi$ との直線関係($\sin^2\psi$ 線図)から応力を算出するため、測定誤差を最小限に抑えた信頼度の高い測定が可能である。また、測定結果が信頼に足る根拠となるデータが多数存在し、実用上で注意すべき点も明らかとなっている。ただし、複数の入射角条件でX線照射を行うために装置の回転機構が必要であり、十分な回転スペースと複数角度分の測定時間が必要である。そのため、船用クランク軸のような複雑形状の部品を対象とする場合、装置を回転させるスペースが不足し、非破壊での測定は不可能であった。

図5 $\cos\alpha$ 法の光学系

近年、二次元検出器を用いた $\cos\alpha$ 法による小型で可搬型の測定装置^{7,8)}が広く普及し始めている。 $\cos\alpha$ 法は単一のX線照射にて応力測定が可能のため、 $\sin^2\psi$ 法に比べ装置が小型となり、測定に必要な空間が小さく、測定時間が短いという利点がある。 $\cos\alpha$ 法に基づくX線応力測定技術は1978年に平ら²⁰⁾により提案され、佐々木らによってIPを使った $\cos\alpha$ 法に基づくX線応力測定システム²¹⁾が確立されていたものの、近年ようやく汎用装置が販売されるに至った。

$\cos\alpha$ 法は単一のX線照射から360度の回折環を二次元検出器にて取得し、試料のひずみによる二次元の回折環の変化から応力を算出する手法である。図5に $\cos\alpha$ 法における回折環取得時の光学系を示す。回折環の中心角が $\alpha, -\alpha, \pi+\alpha, \pi-\alpha$ であるX線のひずみをそれぞれ $\epsilon_\alpha, \epsilon_{-\alpha}, \epsilon_{\pi+\alpha}, \epsilon_{\pi-\alpha}$ とした場合、これらのひずみから次式で表されるパラメータ a_1 が定義される。

$$a_1 = \frac{1}{2} \{ (\epsilon_\alpha - \epsilon_{\pi+\alpha}) + (\epsilon_{-\alpha} - \epsilon_{\pi-\alpha}) \} \quad (1)$$

また、平面応力状態を仮定した場合のX線照射点のx方向応力 σ_x と a_1 の関係は次式が成り立つ。

$$a_1 = -\frac{1+\nu}{E} \sin 2\eta \sin 2\psi_0 \cos \alpha \cdot \sigma_x \quad (2)$$

ここで、 E, ν は試料のX線的なヤング率およびポアソン比を表す。また、 ψ_0 はX線入射角を、 2η は入射X線と回折X線のなす角を表す。式(2)より、 $\cos\alpha$ と a_1 には直線関係($\cos\alpha$ 線図)が成り立つため、その直線の傾きを用いると σ_x は次式で求められる。

$$\sigma_x = -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta \sin 2\psi_0} \left[\frac{\partial a_1}{\partial \cos \alpha} \right] \quad (3)$$

以上の手順により、二次元検出器にて取得した回折環の変化から応力を算出することができる。

$\cos\alpha$ 法の装置の普及により、製造現場でのX線応力測定が簡便に実施可能となり、船用クランク軸の残留応力も非破壊で測定可能となった。しかしながら、 $\sin^2\psi$ 法に比べ汎用装置として普及し始めてからまだ日が浅いため、 $\sin^2\psi$ 法のように実用上の材料へ適用した研究事例が十分に存在せず、測定精度については事

前に十分な検討がなされる必要がある．そこで著者らは，船用クランク軸の残留応力測定に対し， $\cos\alpha$ 法による X 線応力測定法の有効性確認を行った^{9,10)}．

実機にて X 線応力測定を行っても，実際に生じている残留応力の正解値がわからなければ測定精度の検証にはならないため，本報では実機材から採取した試験片に対し，4 点曲げ試験にて既知の応力を負荷した条件で X 線応力測定を行い， $\cos\alpha$ 法による X 線応力測定法の精度検証を行った結果について報告する．

材料には 2 章と同様に CrMo 系低合金鋼を取り上げた．化学成分範囲は表 1 と同様であり，機械的特性を表 3 に示す．試験片形状は L150×W20×t3mm の板材とし，実機材料の一部を切断して試験片加工を行った．X 線応力測定において試験片加工の影響を除外するために，試験片中心位置 10×10mm 範囲を深さ 150 μm で電解研磨を行った．4 点曲げ試験の概要と電解研磨および X 線応力測定位置を図 6 に示す．X 線応力測定位置は試験片中央部周りの計 9 点とし，X 線照射位置と反対側の位置にひずみゲージを貼り付け，ヤング率 206GPa を使用して負荷応力を算出した．ここでは，4 点曲げ装置にて負荷可能な 0～160MPa の範囲にて計 6 条件の X 線応力測定を実施した．X 線応力測定装置にはパルステック社製の μ -X360 を使用した．X 線測定条件を表 4 に示す．X 線回折プロファイルのピーク位置決定には， μ -X360 でデフォルトとされているローレンツ近似法を使用した．X 線の弾性定数には，材料学会がフェライト／マルテンサイト系鉄鋼材料向けに推奨する X 線の弾性定数 $E/(1+\nu) = 175 \text{ GPa}$ ¹⁹⁾ を使用した．

X 線応力測定結果とひずみゲージ値から算出した負荷応力の関係を図 7 に示す．横軸にひずみゲージから算出した 4 点曲げの負荷応力を，縦軸に図 6 で示した 9 点の測定位置ごとの X 線応力値をプロットした．図中の実線は負荷応力と X 線応力が一致するラインを示す．9 点の X 線応力測定値には $\pm 25 \text{ MPa}$ 程度のばらつきが生じているが，9 点の平均値を用いると，X 線応力と負荷応力は良く一致する傾向が得られた．著者らは舶用品に適用されるいくつかの材料にて同様の試験を実施し，いずれも類似のばらつきが得られることを確認しており²²⁾，このばらつきは舶用品向け材料を $\cos\alpha$ 法の X 線応力測定法にて測定する上で避けられないものであると考えられる．佐々木らによると，結晶粒が粗大化すると二次元検出器にて検出される回折環が王冠状となり，測定誤差が大きくなることが指摘されている²³⁾が，著者らが使用した材料の結晶粒はいずれも十分に細粒化された材料であった．舶用品向け鍛鋼材は一般鋼材よりも内部組織・結晶粒が完全に均一ではないため，X 線照射部位によってそれらの差異

表 3 機械的性質

Tensile Strength [MPa]	0.2% Proof Strength [MPa]
976	796

表 4 X 線応力測定条件

Characteristic X-ray	Cr-K α
Diffraction plane	αFe (211)
Tube voltage	20 kV
Tube current	1 mA
Irradiated area	3 mm ²
Fixed time	30 s
ψ tilt angle	35 deg.
Diffraction angle in stress free	156.396deg.
Filter	Vanadium foil

図 6 4 点曲げ試験の概要と電解研磨および X 線応力測定位置

図 7 X 線応力測定結果と 4 点曲げ試験の負荷応力の関係

の影響を受けることが原因の一つとして考えられる．しかし，本報で紹介しなかった試験結果も含めて，いずれも複数点の平均値を用いると X 線応力と負荷応力は良く一致することがわかっている．そこで，これらの測定ばらつきを許容できない場合に，以下の対策が有効であると考ええる．

① X 線照射面積を増やす．

同等の残留応力が生じていると思われる部位に対し，

複数点の測定を行い平均化する, 揺動測定を実施する, もしくはX線照射径を大きくする, といった手段が考えられる。

②複数の入射角にてX線測定を実施し平均化する. 同一測定部位においても入射角を変えることでX線の侵入深さが変わり, 異なる結晶からの回折情報が得られる。

いずれの手段も, 回折情報を得る結晶の数を増やすという考えは同一であり, 測定対象に応じて有効な手段を選択すると良いと考える。

4. 残留応力が疲労強度に与える影響¹²⁾

4.1 疲労試験結果

残留応力が疲労強度に与える影響は, 同方向成分の平均応力と同等の効果を示すことが知られている. 本報でも, 残留応力の代わりに軸力平均応力下の軸力およびねじり疲労試験を実施した. 材料には2,3章と同様の化学成分を有する材料を使用した. 機械的特性を表5に示す. また, 軸力およびねじり疲労試験におけるそれぞれの試験片形状を図8に示す. 本試験では, 残留応力の影響に加えて, 大型鍛鋼品に内在することが避けられない非金属介在物の影響も同時に評価した. 非金属介在物の疲労強度への影響は, 同等寸法の人工欠陥を導入した疲労試験にて評価可能であることが示されている²⁴⁾. 本試験においても, 非金属介在物を想定した人工欠陥を試験片平行部中央に導入した. 人工欠陥寸法は, 直径 $\phi 100 \mu\text{m}$ ×深さ $100 \mu\text{m}$, 直径 $\phi 400 \mu\text{m}$ ×深さ $400 \mu\text{m}$ の2水準とし, ドリル穴加工により導入した. 人工欠陥導入後は, 試験片平行部をエメリー紙 $\#4000$ にて軸方向研磨を実施した.

軸力疲労試験は, 軸力の平均応力を引張側 600 MPa から圧縮側 -300 MPa の範囲で一定に設定し, 階差法にて実施した. 階差法とは, 最大繰返し数を超えて試験片が未破断であった場合, 同一の試験片にて階差応力分だけ応力振幅を増加し, 破断まで試験を繰り返す手法である. ねじり疲労試験の場合は, 軸力の平均応力を引張側 400 MPa から圧縮側 -400 MPa の範囲で一定に設定し, こちらはS-N法にて疲労試験を実施した. S-N法とは複数本の同一条件の試験片を用意し, 応力振幅と破断寿命の関係(S-N線図)を求める手法であるが, ここでは正確なS-N線図までは取得せず, 最大繰返し数で未破断となる疲労限度を特定するだけに留めた. どちらの疲労試験も, 試験環境は常温大気中で, 周波数は 20 Hz , 階差応力は 20 MPa , 最大繰返し数を 5×10^6 回として試験を実施した.

軸力平均応力下の軸力疲労試験結果を図9に, 軸力平均応力下のねじり疲労試験結果を図10に示す. こ

表5 機械的性質

	Tensile Strength [MPa]	0.2% Proof Strength [MPa]
Axial	982	817
Torsional	970	810

(a) Axial fatigue test specimen

(b) Torsional fatigue test specimen

図8 試験片形状

図9 軸力平均応力下の軸力疲労試験結果

図10 軸力平均応力下のねじり疲労試験結果

こで, 軸力疲労試験結果は, $\phi 100 \mu\text{m}$ と $\phi 400 \mu\text{m}$ のどちらの人工欠陥条件でも人工欠陥からき裂が発生し

たことを確認した。一方で、ねじりの疲労試験の場合、 $\phi 400 \mu\text{m}$ の場合は人工欠陥からき裂が発生していたが、 $\phi 100 \mu\text{m}$ の場合は人工欠陥以外の部位からき裂が発生していた。つまり、ねじり疲労試験の $\phi 100 \mu\text{m}$ の結果は、無欠陥の疲労試験結果と等価であると考えられる。

どちらの疲労試験結果においても、引張の軸力平均応力の影響により疲労強度が低下する傾向が見られた。一方で、圧縮の軸力平均応力の影響については、軸力疲労試験においては疲労強度が向上する傾向が見られたが、ねじり疲労試験においては $\phi 100 \mu\text{m}$ と $\phi 400 \mu\text{m}$ の人工欠陥で差異が見られた。これらの現象については、今後改めて精緻に評価していく必要があると思われる。しかしながら、ここで着目すべき点は、船用クランク軸に生じる曲げ（クランク軸サイズが大きいため、試験片サイズの疲労試験では軸力で評価可能）とねじりの負荷応力状態において、引張の残留応力が疲労強度を低下させる影響があるという点である。2章で実例を示した通り、表面処理を適用すると表面処理部の境界に引張の残留応力が生じるため、表面処理を適用した部品設計を実施する際には、引張の残留応力が疲労強度に与える影響を事前に評価することが重要である。

4.2 疲労強度予測式¹²⁾

非金属介在物が疲労強度に与える影響については、村上らが体系的に研究を実施しており、介在物サイズを $\sqrt{\text{area}}$ パラメータにて取り扱い、破壊力学の考えに則った疲労強度予測式が提案されている^{24)~26)}。村上らが提案した、表面の介在物と平均応力の影響を考慮した軸力疲労強度予測式を式(4)に示す。

$$\sigma_w = \frac{1.43(Hv+120)}{\sqrt{\text{area}}^{\frac{1}{6}}} \cdot \left[\frac{(1-R)}{2} \right]^a \quad (4)$$

$$a = 0.226 + Hv \times 10^{-4}$$

ここで、著者らの経験によると、村上らの式は様々な材料を対象にした上で安全側に評価できる条件に設定されており、船用向け鍛鋼材料に適用すると試験結果と予測結果の乖離が大きいことがわかっている。しかし、村上らの提案の基盤にある、 $\sqrt{\text{area}}$ の平方根と下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} が比例関係にあるという考え方は、本試験結果にも成り立つことが確認できている。そこで、式(4)における $\sqrt{\text{area}}$ パラメータに掛かる分子の係数 1.43 を、図 9 の試験結果と予測値との誤差が最小になるように最小二乗法にて算出すると、1.92 に変更すると良いことがわかった。同様に、平均応力の影響を考慮する係数 a の定数項 0.226 は、0.207 に変更すると良いことがわかった。なお、こ

図 11 軸力平均応力下の軸力疲労試験結果と疲労予測式との比較

図 12 高周波焼入れ試験片の疲労評価結果

での計算には、ブリネル硬さ結果から変換した値 $Hv=320.7$ を適用した。図 9 の試験結果に加えて、係数を修正した式(4)の値を実線で示した結果を図 11 に示す。介在物サイズと軸力平均応力の影響が良く評価できていることがわかる。

5. 表面処理による残留応力と非金属介在物を考慮した疲労強度評価

最後に、2章で示した高周波焼入れ試験片の曲げ疲労強度予測を試みた結果を報告する。軸力と曲げでは負荷応力の勾配に差が生じるものの、破断面が軸方向に垂直となることは共通のため、どちらも式(4)にて評価可能と考えられる。ここでは、残留応力は軸方向のみを考慮し、介在物サイズは $\phi 100 \mu\text{m}$ と $\phi 400 \mu\text{m}$ の2条件で検討した。ここで、高周波焼入れ内部の疲労強度を評価する場合、内部介在物を起点とするき裂進展を考える必要がある。村上らの提案によると、内部介在物を評価する際には、式(4)における分子の係数 1.43 を 1.56 にすると良いことが示されている²⁶⁾。本報においては、表面介在物に対して係数 1.43 を 1.92 に修正すると良いことが判明しており、内部介在物に対しても 1.56/1.43 倍した 2.09 を修正係数として適用した。

高周波焼入れ試験片の疲労強度予測結果を図 12 に示す。図中の三角と四角のプロットは、高周波焼入れ部の深さ方向にそれぞれ $\phi 100 \mu\text{m}$ と $\phi 400 \mu\text{m}$ の人工欠陥と同等サイズの介在物が存在する場合を想定し、式(4)の係数を 2.09 とした場合の軸力疲労強度予測結果である。図中には、試験片表面の負荷応力が 406 MPa となる場合の、表面から内部の応力勾配も同時に示した。図 12 の結果からわかるように、高周波焼入れ部は硬度上昇と圧縮残留応力の効果で疲労強度が大幅に向上しており、破断の起点は引張残留応力が発生している 0.3 mm 付近であることがわかった。また、介在物サイズが $\phi 400 \mu\text{m}$ よりも $\phi 100 \mu\text{m}$ の方が内部の疲労強度が向上していることがわかった。本試験片は外径 $\phi 4 \text{ mm}$ に対し高周波焼入れ領域は 7/100 程度であり、実機に適用する場合よりも硬化深さは深くなっており、実部品において高周波焼入れ内部が破断の起点となることは避けられないように思われる。解決策としては、高周波焼入れにより生じる引張残留応力領域を十分に負荷応力の低い部位に設定すること、高周波焼入れよりも硬化深さの深い代替手法（冷間加工等）に切り替えること、内部の非金属介在物の少ない清浄度の高い材料に切り替えること、以上のような手段が有効である。いずれにしても、表面処理を実部品に適用する際には、表面処理部周辺の残留応力分布を把握し、それらが疲労強度に与える影響を事前に評価しておくことが肝要であると思われる。

6. まとめ

本報では、船用クランク軸に適用される表面処理技術の中から高周波焼入れを例に取り、試験片に高周波焼入れを適用した際の内部残留応力分布を示した。その結果、表面処理部には圧縮の残留応力が生じるものの、表面処理部の境界に引張の残留応力が生じることがわかった。引張残留応力は疲労強度低下要因となるため、適用部品の設計時には注意が必要である。

次に、残留応力の影響を評価するためには残留応力の測定技術が必要なため、船用クランク軸にも適用可能な $\cos\alpha$ 法を用いた X 線応力測定法の有効性を示した。また、船用向け鍛鋼材を測定する上での X 線応力のばらつき低減策を紹介した。

また、残留応力と非金属介在物が疲労特性に与える影響を評価するために、人工欠陥を導入した試験片にて、軸力平均応力下の軸力およびねじり疲労試験結果を示した。どちらの荷重条件においても軸力引張平均応力下では疲労強度が低下することが確認できた。加えて、村上らの提案による $\sqrt{\text{area}}$ パラメータを使った疲労強度予測式を適用すると、式内の係数を適正に修

正することで、介在物と残留応力を考慮した軸力疲労強度予測が可能であることを示した。

さらに、高周波焼入れ試験片に対し、本報で提案した村上の式の修正式を使用して、残留応力発生部位に非金属介在物が存在した場合の疲労強度評価を行った。その結果、破断の起点は内部の引張残留応力発生域となることを示した。表面処理を実部品に適用する際には、表面処理部周辺の残留応力を実測し、それらが疲労強度に与える影響を事前に評価しておくことが重要であると考えられる。

最後に、本報での検討結果が、船用部品への表面処理技術の適用拡大につながり、船用業界における環境規制対策へ寄与することを願う。

参考文献

- 1) 福井ほか2名, 日本船用機関学会誌, 10-6 (1975), 467-472s.
- 2) 小川ほか1名, 日本機械学会論文集 (A 編), 66-641 (2000), 92-97.
- 3) 井上, 材料, 63-10 (2014), 741-745.
- 4) 長坂ほか5名, 神鋼 R&D, 48-1 (1998), 68-71.
- 5) Roberto Elvira, Javier Cordon and Emilio De Diego, the 20th International Forgemasters Meeting, (2017).
- 6) D. Regazzi, S. Cantini, S. Cervello and S. Foletti, 3rd International Symposium on Fatigue Design and Material Defects, FDMD (2017), 19-22.
- 7) 丸山ほか2名, 材料, 64-7 (2015), 560-566.
- 8) 長尾, 表面技術, 66-12 (2015), 636-641.
- 9) 松田ほか3名, 日本非破壊検査協会 第 48 回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム講演論文集, (2017), 97-100.
- 10) 松田ほか4名, 材料, 68-3 (2019), 285-291.
- 11) 菊池ほか8名, 材料, 66-12 (2017), 893-899.
- 12) 池上ほか3名, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 52-3 (2017), 273-277.
- 13) 水野ほか4名, 土木学会論文集 A1, 72-2 (2016), 338-349.
- 14) 村田ほか4名, 実験力学, 16-1 (2016), 47-52.
- 15) 安福, 溶接学会誌, 72-2 (2003), 130-133.
- 16) 日本材料学会編, 改著 X 線応力測定法, 養賢堂, 1981.
- 17) I. C. Noyan, J. B. Cohen, Residual Stress Measurement by Diffraction and interpretation, Springer-Verlag, 1987.
- 18) 田中, 鈴木, 秋庭, 残留応力の X 線評価, 養賢堂,

2006.

- 19) 日本材料学会 X 線材料強度部門委員会, X 線応力測定法標準 (鉄鋼編), 2002.
- 20) 平ほか 2 名, 材料, 27-294 (1978), 251-256.
- 21) 佐々木ほか 1 名, 材料, 44-504 (1995), 1138-1143.
- 22) 兜森ほか 3 名, 日本材料学会 第 50 回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集, (2016), 113-116.
- 23) 佐々木ほか 2 名, 日本機械学会論文集(A), 63-607 (1997), 533-541.
- 24) 村上, 鐵と鋼, 75-58 (1989), 1267-1277.
- 25) 鳥山ほか 2 名, 材料, 40-458 (1991), 1497-1503.
- 26) 村上ほか 3 名, 日本機械学会論文集(A), 56-525 (1990), 54-61.