

(論文)

冷間ロール加工を施した一体型クランク軸フィレット部用 自動X線応力測定システム

松田真理子* (博士(工学))・足立 瞳・兜森達彦・高松弘行 (博士(工学))・佐々木敏彦 (博士(工学))

Automatic X-ray Stress Measurement System for Cold-rolled Fillet of Solid-type Crankshafts

Dr. Mariko MATSUDA・Hitomi ADACHI・Tatsuhiko KABUTOMORI・Dr. Hiroyuki TAKAMATSU・Dr. Toshihiko SASAKI

要旨

近年、地球環境問題に注目が集まるなか、陸上発電用の中速ディーゼルエンジン向けクランク軸においてもさらなる高疲労強度化が求められており、その手段として表面処理技術が注目されている。しかし、いずれの表面処理技術においても、表面処理部と未処理部の境界に疲労強度低下の要因となる引張残留応力が生じるため、表面処理部周辺の残留応力分布を把握する必要がある。本稿では、大型鍛鋼材特有のマクロ偏析と、フィレット部の測定時に生じるX線入射角および入射角設定誤差が $\cos \alpha$ 法によるX線応力測定精度に与える影響を評価し、それらの改善策を示した。また、冷間ロール加工を施したフィレット部の残留応力を自動測定可能なシステムの有効性を示した。

Abstract

In recent years, attention has been paid to global environmental problems, and even higher fatigue strength is required for crankshafts used in medium-speed diesel engines for onshore power generation. Surface treatment technology is drawing attention as one of the means to achieve this. In any of the surface treatment technologies, however, a tensile residual stress, which causes a decrease in fatigue strength, occurs at the boundary between the surface treated portion and the untreated portion, and it is necessary to understand the residual stress distribution around the surface treated portion. This paper describes the evaluation of the macro-segregation peculiar to large forged steel, and the influence of the X-ray incident angle and incident-angle setting error generated during fillet measurement on the accuracy of X-ray stress measurement by the $\cos \alpha$ method. Improvement measures are also described. In addition, the effectiveness of a system that can automatically measure the residual stress in the cold rolled fillet has been demonstrated.

キーワード

 $\cos \alpha$ 法 X線応力測定, 残留応力, 冷間ロール加工, 偏析, 自動測定装置

まえがき = 近年、地球環境問題に対する取り組みが活発化するなか、陸上発電用の中速ディーゼルエンジンにおいても温室効果ガスの排出削減が主要命題となってきた。エンジンの主要部品であるクランク軸においても、エンジンの高効率化・高出力化に伴う高強度化・高疲労強度化が従来にも増して求められている。

当社はこれまでに、中速ディーゼルエンジン向けクランク軸に対し、鍛鋼品に内在する非金属介在物の低減(高纯净度化)による高疲労強度化を実現し¹⁾、さらなる材料の高強度化に取り組んできた。しかし、一般的な高強度鋼材で明らかになっているように、1,200 MPaを超える高強度材はギガサイクル疲労の懸念があり²⁾、製造コストの増加に相当するだけの疲労強度の向上は期待できないことがわかってきた。

そこで、さらなる高疲労強度化技術として、表面処理技術^{3),4)}が注目されている。当社は冷間ロール加工技術の開発を古くから進めてきた。冷間ロール加工技術は、他の表面処理技術と比べて表面処理深さが深いため、大型クランク軸にも適用可能な技術である⁵⁾。冷間ロール加工に限らずいずれの表面処理技術においても、

表面処理部に圧縮の残留応力を付与するいっぽうで、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という問題がある。圧縮残留応力は一般的に疲労強度を向上させる効果があり、引張残留応力は疲労強度を低下させる⁶⁾ことが知られている。このため表面処理を施す部品を設計する際には、表面処理部周辺の残留応力分布を把握することが重要である。

残留応力の非破壊測定技術としては、X線応力測定法が挙げられる。しかし、従来の $\sin^2\psi$ 法によるX線応力測定法⁷⁾は装置が大型で測定に必要なスペースも大きく、クランク軸のフィレット部のような狭隘(きょうあい)部に対しては測定が難しかった。そうしたなか近年、 $\cos \alpha$ 法を用いた小型で可搬型のX線応力測定装置が市販された^{8),9)}。この装置では、クランク軸のフィレット部に対しても工場内で簡便に残留応力測定が可能である。しかしながら、現在の汎用(はんよう)的な装置として普及し始めてからはまだ日が浅いため、 $\sin^2\psi$ 法と比べて実用上の材料を対象にした研究事例はまだ少ない。このため、大型鍛鋼品である実機クランク軸への適用に際しては、同手法の有効性を確認する必要がある。

* 素形材事業部門 鋳鍛鋼ユニット 技術部

また、 $\cos\alpha$ 法によるX線応力測定法では、測定時のX線入射角が小さくなると測定精度は低下することが知られており¹⁰⁾、入射角は35度近傍が推奨されている。しかし、中速ディーゼルエンジン向けクランク軸は、大型鍛鋼品のなかではサイズが比較的小さいため、 $\cos\alpha$ 法の小型装置でX線応力測定を実施してもフィレット部測定時の入射角は20度以下にせざるを得ない場合もある。加えて、実製品は公差を持っていることから、凹曲面を有するフィレット部に対するX線入射角を正確に把握することは困難である。したがって、応力解析の際の設定入射角と実際の入射角に誤差が生じる可能性がある。そこで、 $\cos\alpha$ 法によるX線入射角と入射角設定誤差が測定精度に与える影響について検証の必要があった。さらには、クランク軸のフィレット部のような狭隘部を測定する際には、検査体に装置を接触させることなく適切な測定条件でX線を測定部位に照射させることは非常に煩雑な作業となる。したがって実機への適用においては、フィレット部のX線測定作業をいかに自動化させるかが課題の一つであった。

以上のような背景から当社は、中速ディーゼルエンジン向けクランク軸に使用される大型鍛鋼材への適用を目的に、代表的な材料であるベイナイト組織を有する低合金鋼を対象とする $\cos\alpha$ 法によるX線応力測定技術の有効性を確認した¹¹⁾。また、測定時に設定するX線入射角と実際の入射角に誤差が生じた場合のX線応力測定精度に与える影響について検討した¹²⁾。さらに、クランク軸のフィレット部の測定が可能な自動X線応力測定システムを開発した。この測定システムを用いることによって冷間ロール加工を適用したクランク軸のフィレット部を簡便に高精度で測定できることを確認した。本稿では、これらの検討結果について報告する。

1. $\cos\alpha$ 法によるX線応力測定技術の概要

X線応力測定に関する研究は古くからなされており、従来は $\sin^2\psi$ 法と呼ばれる手法¹³⁾が一般的であった。近年では二次元検出器を用いた $\cos\alpha$ 法による測定に注目が集まっている。 $\cos\alpha$ 法によるX線応力測定原理は1978年に平ら¹⁴⁾により最初に提案され、当時は写真フィルムが検出器として用いられた。

その後、1980年代にイメージングプレート（以下、IPという）が登場し、吉岡ら¹⁵⁾により検出器にIPを用いた $\cos\alpha$ 法の検討がなされた。IPでは通常、画素サイズが $100\mu\text{m}$ とやや大きく、基盤の目状に配列していた。このため、 $\cos\alpha$ 法の適用にあたっては極座標系状の回折X線強度のプロファイルに高精度に変換する必要があった。また、実用的な応力測定精度を得るには1/10画素以下のデータ処理技術が必要であった。さらに、回折環の中心位置の決定精度や画像の平滑化も重要な要素であった。

1994年以降、佐々木らはそれらの一連の課題を解決し、IPを使った $\cos\alpha$ 法によるX線応力測定システム¹⁰⁾が確立された。また、X線応力測定の課題であった三軸応力¹⁶⁾、マクロ・マイクロ応力¹⁷⁾、結晶粒が粗大な場合な

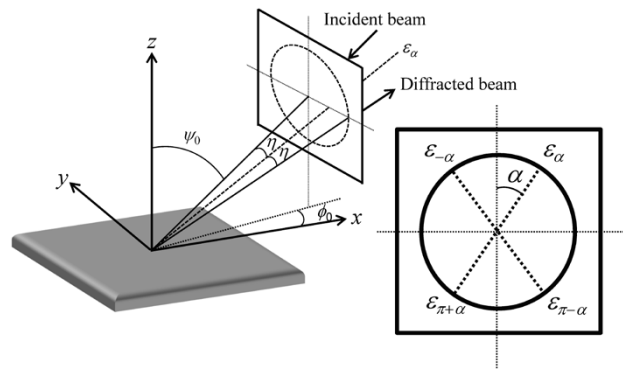


図1 $\cos\alpha$ 法のX線光学系
Fig.1 X-ray optics used for $\cos\alpha$ method

どに対する有効性¹⁸⁾を示した。しかし、X線露光部とIPリード部が分離していたため作業性が総合的に低く、普及の妨げとなっていた。

2009年に、JSTの新技术説明会において佐々木は本技術の装置化を呼びかけ、それが契機となり2012年以降に各社から一体型の $\cos\alpha$ 法専用機および類似機が相次いで商品化された。 $\cos\alpha$ 法は単一のX線照射によって応力測定が可能のため、 $\sin^2\psi$ 法に比べて装置が小型で測定に必要なスペースが小さい。さらに、測定時間が短いという利点を実証されたことから現在広く普及し始めている。

$\cos\alpha$ 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1に $\cos\alpha$ 法における回折環取得時の光学系を示す。ここで、 ψ_0 はX線入射角を、 2η は入射X線と回折X線とのなす角を表す。図中の回折環の中心角 α はX線管球側から見た角度であり、中心角が α 、 $-\alpha$ 、 $\pi+\alpha$ 、 $\pi-\alpha$ であるX線のひずみをそれぞれ ϵ_α 、 $\epsilon_{-\alpha}$ 、 $\epsilon_{\pi+\alpha}$ 、 $\epsilon_{\pi-\alpha}$ 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。

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

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。

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

ここで E 、 ν はそれぞれ、試料のX線のヤング率およびポアソン比を表す。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。

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

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。

2. 大型鍛鋼品のクランク軸材料に対する $\cos\alpha$ 法X線応力測定法の有効性¹¹⁾

中速ディーゼルエンジン向けクランク軸に適用される代表的な材料は、ベイナイト組織を有するCrMo系低合金鋼である。各化学成分の含有比率範囲を表1に示す。

表1 化学成分の含有比率範囲
Table 1 Range of chemical composition ratios

	(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

ディーゼルエンジン向けクランク軸のような大型鍛鋼品の製造にあたっては、鋼塊の凝固過程で生じるマクロ偏析を完全に避けることは困難である。そこで、マクロ偏析の有無が $\cos\alpha$ 法によるX線応力測定精度に与える影響について評価を行った。

実部品の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分からなければ測定精度の検証は難しい。そこで、生じている応力が既知の試験体を対象にX線応力測定を行って検証することにした。すなわち、実部品から試験片を切り出し、万能引張試験機を用いて引張応力を負荷した状態でX線応力測定を行った。このとき、X線応力測定によって得られた応力と試験片平行部に生じる公称応力との比較を行うことによってX線応力測定の精度検証を行った。図2に試験状況を示す。試験片形状はL150×W20×t3 mmの板材とした。試験片の採取にあたっては、実部品断面のミクロ観察によって偏析が多い部位を特定し、偏析の多い部位と少ない部位からそれぞれ2本ずつ採取した。

それぞれの機械的特性を表2に示す。また、図3に偏析が多い試験片におけるX線照射部位の組織と結晶粒径の観察結果を、図4に偏析が少ない試験片における同様の観察結果を示す。いずれの試験片も主な材料組織はベイナイトであった。偏析の多い試験片の平均結晶粒径は30~40 μm 、偏析の少ない試験片の平均結晶粒径は20~30 μm であり、いずれもX線応力測定には十分な細粒となっていることが分かった。ただし、偏析の多い試験片の場合は部分的に大きな結晶粒が存在する混粒状態であった。

X線応力測定装置にはパルステック社製 μ -X360 ロングレンジモデルを使用した。試験片の切り出し時に生じる加工層の影響を除外するため、試験片平行部中央の15×12.5 mmの範囲に深さ0.1 mmの電解研磨を行った。電解研磨を施した領域の外観、およびX線応力測定位置とそれらの番号を図5に示す。X線応力測定位置は、電解研磨範囲の中心部9×9 mmの範囲を3 mmピッチで3×3点の計9点とした。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。また、X線の弾性定数には(公社)日本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線測定条件を表3に示す。

万能引張試験機にて試験片に負荷した公称応力は弾性応力範囲内、すなわち0.2%耐力の1/4、1/2および3/4の3条件とした。具体的には、無負荷状態から徐々に負荷を増しながらX線応力測定を行った。ただし、2本目の試験片では1本目の結果の再現性を確認することを主目的とした。このため、測定効率の観点から0.2%



図2 X線応力測定の精度確認用引張試験
Fig.2 Tensile test to confirm accuracy of X-ray stress measurement

表2 試験片の機械的特性
Table 2 Mechanical properties of specimens

	Tensile strength (MPa)	Proof stress (MPa)
1st. specimen with much segregation	945	813
2nd. specimen with much segregation	987	828
1st. specimen with less segregation	1,035	899
2nd. specimen with less segregation	966	818

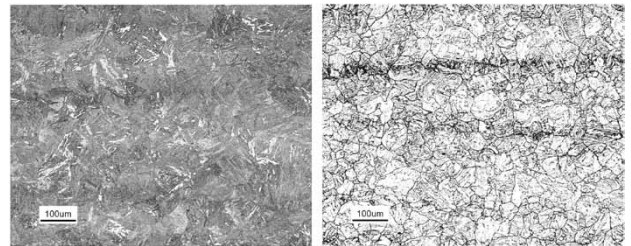


図3 偏析の多い試験片中央部のミクロ写真
Fig.3 Microstructures on center of specimen with much segregation

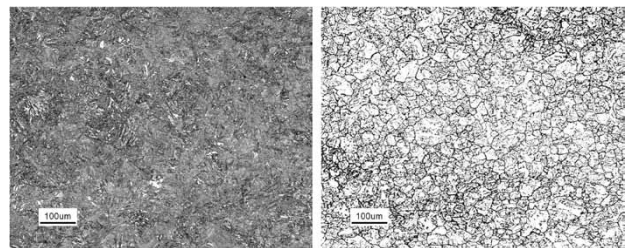


図4 偏析の少ない試験片中央部のミクロ写真
Fig.4 Microstructures on center of specimen with less segregation

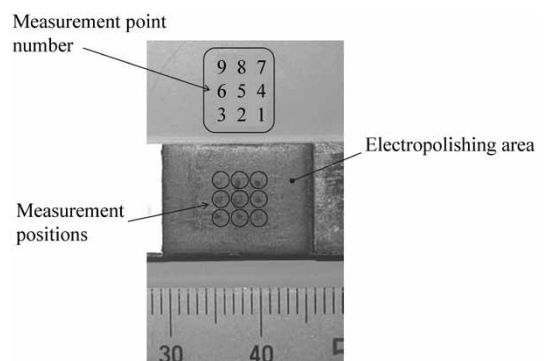


図5 電解研磨を施した領域の外観、X線測定位置とその番号
Fig.5 Appearance of electropolishing area and X-ray measurement positions and their numbers

表3 X線測定条件
Table 3 X-ray measurement conditions

Characteristic X-ray	Cr-K α
Diffraction plane	α Fe (211)
Tube voltage	30 kV
Tube current	1 mA
Irradiated area	3 mm ²
Fixed time	30 s
ψ_0 tilt angle	35°
Diffraction angle in stress free	156.4°
Filter	Vanadium foil

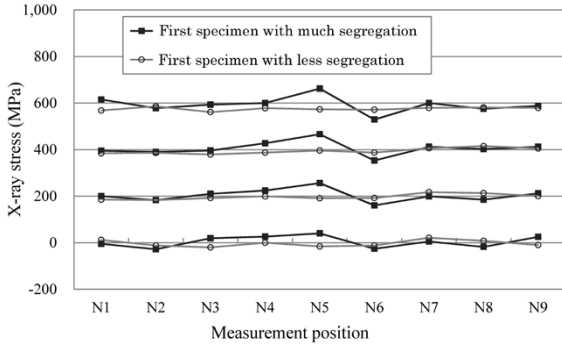


図6 1本目試験片の各測定位置におけるX線応力測定結果
Fig.6 Results of X-ray measurement at each position of first specimen

耐力の1/2条件のみでX線応力測定を行った。また試験片平行部に生じる公称応力は、試験機のロードセルの値と試験片平行部の断面積から算出した。このとき、電解研磨の影響として、試験片平行部の板厚減少のみを考慮した。電解研磨部の境界では応力集中が生じると考えられ、また片側だけの電解研磨によって試験片の表裏で若干の応力差が生じると考えられる。しかしながらそれらの影響は微小であることを予備検証で確認した。

1本目の偏析が多い試験片および少ない試験片における9点の測定位置でのX線応力測定結果を図6に示す。偏析が少ない試験片は、いずれの負荷応力においても9点の測定位置で測定値に大きな差異は見られなかった。いっぽう、偏析が多い試験片は9点の測定位置間で測定値に大きなばらつきが生じていることが分かった。また、偏析が多い試験片の測定値はN5位置で大きい値を示し、N6位置で小さい値を示し、その傾向は試験片の負荷応力の値に関わらず同様であることが分かった。これは、偏析部に生じた何らかの条件による差異がX線応力測定に影響を及ぼしていることを示唆している。

偏析部特有のX線応力測定に大きく影響を与える因子の一つとして、偏析部における炭素濃度の偏りが挙げられる。X線照射部位ごとに炭素濃度が異なるとセメントナイトなどの第二相の出現率が異なり、X線によるフェライト相の応力測定のばらつきに影響を与えと考えられる。そこで、偏析の多い部位から採取した2本目の試験片における9点のX線応力測定位置に対し、FE-SEMによる元素分析をEDS分析にて行った。X線照射範囲に比べてEDS分析の範囲は非常に小さいため、元素分析はX線照射範囲内の異なる2点を測定し、その平均値を使用した。元素分析結果を図7に示す。炭素および各合金元素の濃化度は測定位置ごとに傾向が異なってい

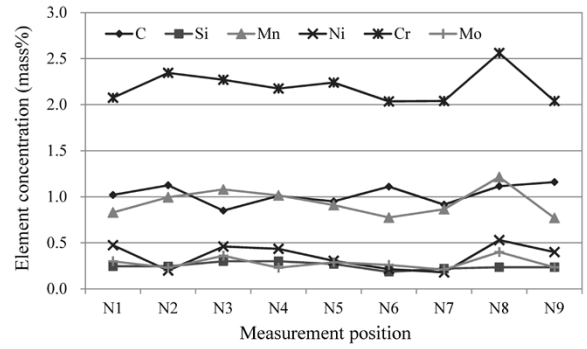


図7 偏析の多い2本目の試験片の各測定位置における元素濃度
Fig.7 Element concentration at each position of second specimen with much segregation

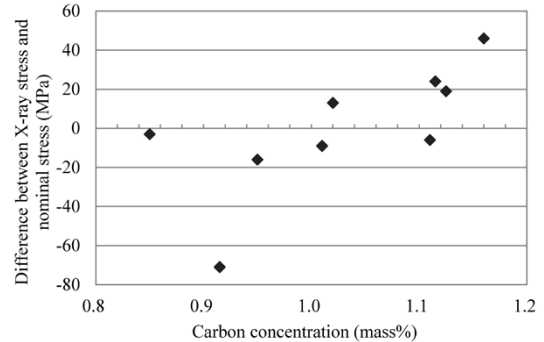
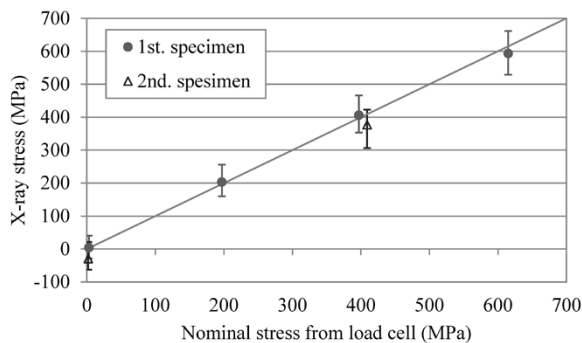


図8 偏析の多い2本目の試験片における炭素濃度に対するX線応力と公称応力の差
Fig.8 Relationship between carbon concentration and difference between X-ray stress and nominal stress in second specimen with much segregation

た。そこで、X線応力測定に影響を与えるセメントナイトの出現率に最も影響を及ぼす炭素濃度のみに着目し、9点の測定位置における炭素濃度とX線応力測定値とを比較した(図8)。図中の縦軸には、公称応力と測定値の差分を取った。炭素濃度が高い場合に公称応力よりも測定値が高く、炭素濃度の低い場合に公称応力よりも測定値が低い傾向が見られた。したがって、偏析部における炭素濃度の偏りがX線応力測定値のばらつき原因の一つであったと考えられる。

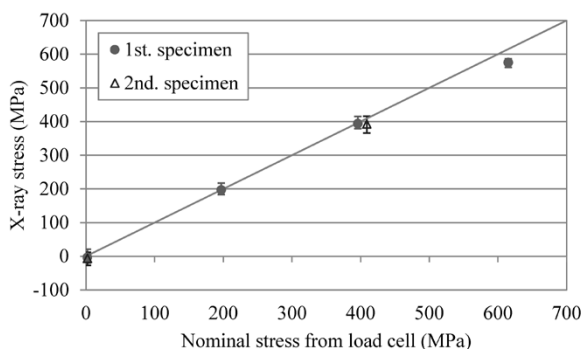
つぎに、偏析の多い試験片および少ない試験片における、9点の測定位置のX線応力測定値の平均値と公称応力の比較を図9に示す。図中のプロットはそれぞれの試験片における9点の測定結果の平均値を示し、誤差範囲は9点内の最大値と最小値の範囲を示す。また、図中の直線は測定値と公称応力が一致する条件を示している。1本目の試験片における9点の測定値の平均値は、偏析の多い試験片および偏析の少ない試験片のいずれの場合も測定値と公称応力は良く一致する結果となった。いっぽうで2本目の試験片の場合は測定値と公称応力に若干の差が生じている。これは、無負荷状態で若干の初期残留応力が生じており、9点の測定結果の平均値の傾きは1本目の試験片と同等であることから、X線応力測定値に初期残留応力が影響したと考えられる。

これらの結果から、偏析の多い試験片の場合、X線照射位置ごとに測定値が大きくなるため、1点のみの測定では十分な測定精度であるとはいえない。しかしながら、9点の測定位置の結果を平均化すると、偏析の少



(a) 偏析の多い1本目と2本目の試験片

(a) First and second specimens with much segregation

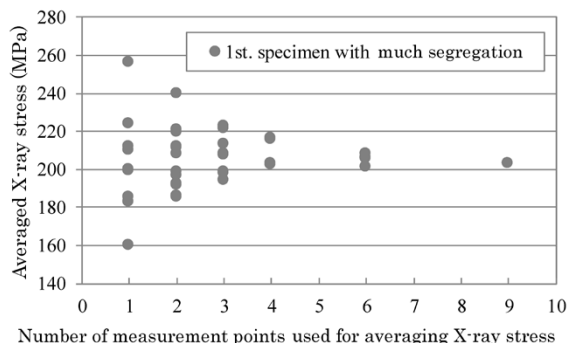


(b) 偏析の少ない1本目と2本目の試験片

(b) First and second specimens with less segregation

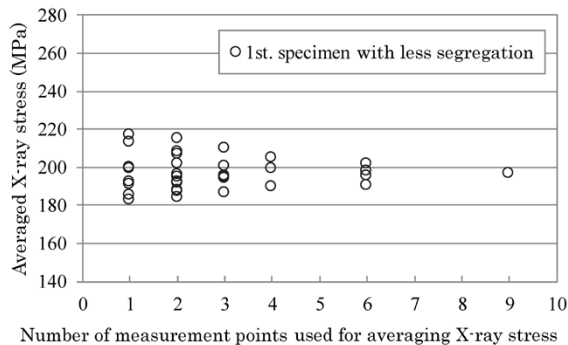
図9 9点の測定位置におけるX線応力の平均値と公称応力との比較
Fig.9 Comparison between mean value of X-ray stress and nominal stress at 9 measurement points

ない試験片と同様にX線応力測定値は公称応力とよく一致することが分かった。そこで、偏析の影響を最小限に抑えることができる測定点数（X線照射面積）について検討した。9点の測定位置に対し、測定点数を1点、2点、3点、4点、6点、および9点とした場合の隣接する位置の全組み合わせを考え、それぞれの測定点数のX線応力測定値を平均化した。0.2%耐力の1/4条件（公称応力197 MPa）における、測定点数と平均化したX線応力値との関係について、偏析が多い試験片と偏析が少ない試験片との比較を図10に示す。偏析が多い試験片も少ない試験片も、測定点数が多くなるほど公称応力197 MPaに近づく傾向を示した。偏析の多い試験片の場合、3点測定すれば偏析の影響による誤差は大幅に減少し、4点測定すれば測定値のばらつきは偏析の少ない試験片と同等レベルになるということが分かった。本研究ではX線照射面積約3 mm²の条件で測定を行ったため、4点以上つまり約12 mm²以上の面積にX線を照射し測定値を平均化すれば、偏析の影響を最小限に抑えることが可能である。本検討では複数点の測定を行い平均化した。ほかには、「X線を照射しながら計測器もしくは被測定物を揺動させて回折環を平均化する揺動測定を実施する」、「X線照射径を大きくする」、「同一部位を複数のX線入射角で測定し平均化する」といった手段が挙げられる。これらの手段も、回折情報を得る結晶の数を増やすという本法と同様の思考に基づいており、いずれも有効な手段と考えられる。



(a) 偏析の多い1本目の試験片

(a) First specimen with much segregation.



(b) 偏析の少ない1本目の試験片

(b) First specimen with less segregation.

図10 公称応力197 MPaにおける測定点数とその点数分を平均化したX線応力測定値との関係

Fig.10 Relationship between number of measurement points used for averaging X-ray stress and averaged X-ray stress in case of nominal stress of 197 MPa

3. フィレット部の測定におけるX線入射角と入射角誤差が測定精度に与える影響¹²⁾

$\cos\alpha$ 法によるX線応力測定法は、入射角が小さくなると測定精度が低下すること¹⁰⁾が示されている。しかし、中速ディーゼルエンジン向けクランク軸のフィレット部を測定する場合、測定位置によっては小さい入射角でしか照射できない場合がある。また、実製品は公差を持っており、フィレット部の凹曲面に対しX線入射角を正確に把握することは困難である。そこで、X線入射角と入射角設定誤差が $\cos\alpha$ 法によるX線応力測定精度に与える影響について検証した。

まず、X線入射角がX線応力測定精度に与える影響を評価した。2章と同等のベイナイト組織を有するCrMo系低合金鋼において偏析の少ない部位から鋼片を採取し、L150×W20×t3 mmの板状試験片を作製した。この試験片を対象に4点曲げ試験を行い、引張（曲げ）応力を負荷した状態で $\cos\alpha$ 法によるX線応力測定を行った。試験片に生じた応力は、試験片裏面（凹側）に貼付したひずみゲージから算出した。また、試験片中央部を10×10 mmの範囲で深さ150 μmの電解研磨を行い、X線入射角を35、15、10、5度とした場合の試験片中央部の応力測定を行った。X線応力測定条件の詳細は2章とおおむね同等である。

図11にX線入射角がX線応力測定精度に与える影響を示す。横軸は4点曲げ試験によって生じた公称応力、縦軸はX線応力測定値を示し、図中の実線は公称応力と

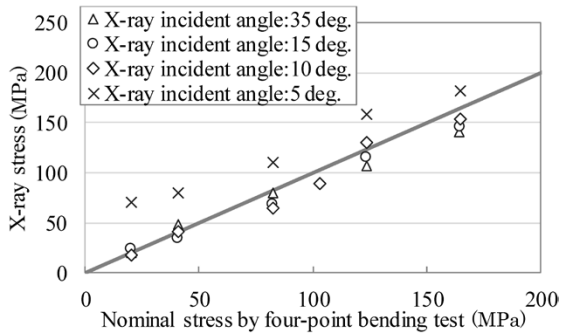


図11 X線入射角がX線応力測定精度に与える影響

Fig.11 Influence of X-ray incident angle on accuracy of X-ray stress measurement

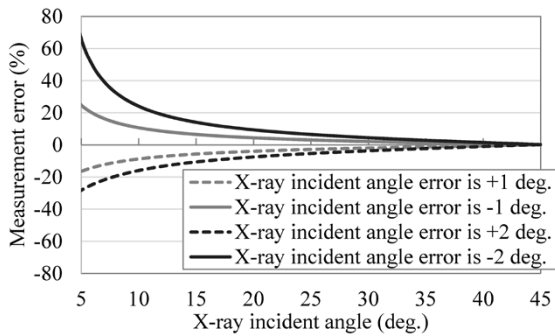


図12 X線入射角と測定誤差の関係

Fig.12 Relationship between X-ray incident angle and measurement error

測定値が一致する条件を表す。X線入射角が10~35度では測定値と公称応力はおおむね一致しているが、入射角が5度になると測定値は公称応力から大きく外れていることが分かる。すなわち、X線入射角が10度未満はX線測定精度が実用上十分ではないことが確認された。

つぎに、X線入射角設定誤差がX線応力測定精度に与える影響について検討した。 $\cos\alpha$ 法の応力は、 $\cos\alpha$ 線図の直線の傾きを用いて式(3)によって求められる。そこで、 E 、 ν 、 η を一定とした条件で、それぞれのX線入射角に対して σ_x が400 MPaとなる $\cos\alpha$ 線図の直線の傾きを計算した。さらに、回折環から応力を解析する際の設定入射角が実際の入射角から ± 1 度および ± 2 度ずれた場合の σ_x の変化を理論計算で算出した。X線入射角が5度から45度の条件において、入射角誤差が ± 1 度および ± 2 度生じた場合のX線応力測定誤差の理論計算結果を図12に示す。入射角が35度以上であれば入射角誤差による測定誤差への影響は微小である。入射角が小さくなるほど入射角誤差の影響が大きくなり、入射角が10度未満となると入射角誤差の影響が極端に大きくなる事が分かる。また、入射角がプラス側にずれた場合の方が、マイナス側にずれた場合よりも入射角誤差の影響は小さくなる事が分かる。また、入射角がプラス側にずれた場合の測定値は実際の値より小さくなり、マイナス側にずれた場合の測定値は実際の値より大きくなる事が分かった。残留応力の評価において、どちらにずれる方が安全側の評価となるか、使用時に本稿の理論計算を用いて適切に判断すべきと考えられる。

以上の検討より、X線入射角と入射角設定誤差のどちらの影響を考えると、X線入射角が10度未満の条件は測

定精度の面で不適當であることが分かった。すなわち、クランク軸のフィレット部を測定する際には、X線入射角が10度以上となるように測定条件を設定することが重要である。

4. 自動X線応力測定システムの開発

上記の検討結果を踏まえると、中速ディーゼルエンジン向けクランク軸のフィレット部に $\cos\alpha$ 法によるX線応力測定法を適用する場合、以下の点に注意することが必要である。

- 1) 大型鍛鋼品特有のマクロ偏析の影響を最小限にするため、複数点の測定、揺動測定、もしくは複数のX線入射角で測定して平均化する。
- 2) X線入射角はできるだけ大きく設定(10度以上)し、入射角設定誤差は最小限とする。

測定位置によって測定可能なX線照射距離に制約がある。このため、被測定物に装置が当たることなくX線入射角を制約範囲内でできるだけ大きく設定する測定条件を見つける必要がある。しかし、フィレット部は凹曲面であるため、X線入射角と照射距離はフィレット測定位置との相対角度と距離である。これらの値を理論計算によって求め、装置の最適な設置条件を決めることは可能であるが、実際に装置を最適条件に手で設置することは難しい。また、複数点の測定を行うことから、測定点ごとに装置の設置を複数回行う必要があり、膨大な時間と手間を要することになる。

そこで当社は自動X線測定システム(図13)を開発した。本システムは、図13の①~④に示す4種類の移動機構を有する。①はクランク軸の周方向の回転機構であり、②および③はそれぞれ軸に平行および垂直方向の移動機構である。④はX線入射角を調整するための回転機構である。②および③の移動機構によりX線照射距離の許容範囲内に装置を設置し、④によってX線入射角をできるだけ大きく設定する。被測定物と装置との接触判定機能を有しており、測定したい位置とX線測定条件の一覧を制御系に設定することができる。この機能によって、装置を被測定物に当てることなくクランク軸フィレット部の任意の複数位置を連続で測定可能であり、揺動測定にも対応している。例えば、②~④の位置条件を変

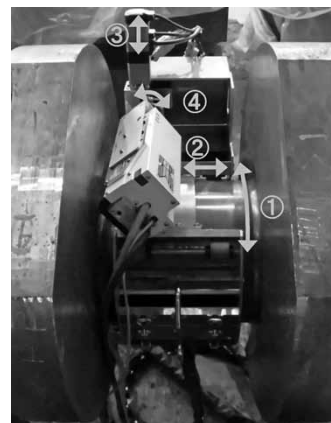


図13 開発した自動X線測定システムの外観

Fig.13 Appearance of developed automatic X-ray measurement

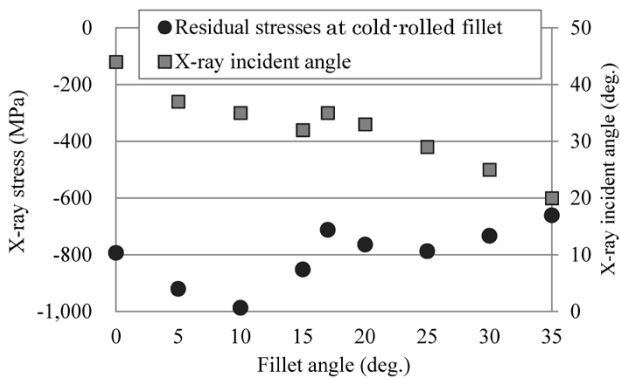


図14 冷間ロール加工を施したクランク軸フィレット部におけるX線応力と入射角度の測定結果

Fig.14 Measurement results of X-ray stresses and X-ray incident angles at cold-rolled fillet of crankshaft

えることなく①のみを動かすことにより、クランク軸の周方向に装置を回転させながら複数点の測定や揺動測定が可能である。

冷間ロール加工を施したフィレット部に対して本システムを適用したときのX線応力測定結果を図14に示す。横軸はフィレットの曲率中心を基準としたフィレットに沿った方向の角度（フィレット角度）とし、左縦軸はX線応力測定結果、また右縦軸には測定時のX線入射角とした。冷間ロール加工を施したフィレット部には、疲労強度向上に十分な圧縮残留応力が付与されていることが確認できた。

図14の結果はフィレット角度ごとに1点のみの測定結果を示した。大型鍛鋼品特有のマクロ偏析の影響が懸念される場合は、冷間ロール加工条件が均一と考えられる軸の周方向に複数点を測定するか、あるいは揺動測定を実施することによって測定精度を改善することができる。また、手動測定では入射角の設定誤差によって測定精度が低下する懸念がある。しかしながら本システムでは、入射角を図13に示した回転機構（④）によって設定するため、入射角の設定誤差を最小限に抑えることができる。

以上の検討結果より、本システムは中速ディーゼルエンジン向けクランク軸フィレット部に対する $\cos\alpha$ 法によるX線応力測定の精度を改善するのに有効であると考えられる。

むすび＝本稿では、中速ディーゼルエンジン向けクランク軸の代表的な材料であるCrMo系低合金鋼に対し、大型鍛鋼品特有のマクロ偏析が $\cos\alpha$ 法によるX線応力測定精度の低下要因となることを確認した。さらに、マクロ偏析の影響を最小限に抑えるためには複数点測定、あるいは揺動測定が有効であることを確認した。

また、X線入射角が10度未満になると測定精度が著しく低下することを確認した。さらに、フィレット部の応力測定時に実際のX線入射角と設定入射角に誤差が生じた場合、入射角が小さくなるほど応力測定精度に与える入射角誤差の影響が大きくなることを理論計算にて確認した。

こうした精度上の問題を解決する手段として当社は、

自動X線応力測定システムを開発した。冷間ロール加工を施したクランク軸のフィレット部を測定する際にこの測定システムを使用すると、マクロ偏析と入射角設定誤差の影響を最小限に抑えた高精度な測定を簡便に行うことができることを示した。

参考文献

- 1) Ryota Yakura et al. the 27th CIMAC World Congress 2013 in Shanghai. No.422.
- 2) 酒井達雄ほか. 材料. 2000, Vol.49, No.7, p.779-785.
- 3) Tero Frondelius. the 28th CIMAC World Congress 2016 in Helsinki. No.180.
- 4) Roberto Elvira et al. the 20th International Forgemasters Meeting. 2017.
- 5) 長坂英明ほか. R&D神戸製鋼技報. 1998, Vol.48, p.68-71.
- 6) 松田真理子ほか. 日本マリンエンジニアリング学会誌. 2020, Vol.55, No.1, p.3-10.
- 7) I. C. Noyan et al. Residual Stress Measurement by Diffraction and interpretation. Springer-Verlag, 1987.
- 8) 丸山洋一ほか. 材料. 2015, Vol.64, No.7, p.560-566.
- 9) 長尾圭悟. 表面技術. 2015, Vol.66, No.12, p.636-641.
- 10) 佐々木敏彦ほか. 材料. 1995, Vol.44, No.504, p.1138-1143.
- 11) 松田真理子ほか. 材料. 2019, Vol.68, No.3, p.285-291.
- 12) 松田真理子ほか. 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, p.97-100.
- 13) 日本材料学会編. 改著X線応力測定法. 養賢堂, 1981.
- 14) 平修二ほか. 材料. 1978, Vol.27, No.294, p.251-256.
- 15) 吉岡靖夫ほか. 非破壊検査. 1990, Vol.39, No.8, p.666-671.
- 16) 佐々木敏彦ほか. 日本機械学会論文集(A編). 1995, Vol.61, No.590, p.2288-2295.
- 17) 佐々木敏彦ほか. 日本機械学会論文集(A編). 1996, Vol.62, No.604, p.2741-2749.
- 18) 佐々木敏彦ほか. 日本機械学会論文集(A編). 1997, Vol.63, No.607, p.533-541.
- 19) X線材料強度部門委員会応力測定と弾性分科会. 材料. 1971, Vol.20, p.1257-1271.



松田真理子

素材材事業部門
鋳鍛鋼ユニット 技術部



足立 瞳

素材材事業部門
鋳鍛鋼ユニット 技術部



兜森達彦

素材材事業部門
鋳鍛鋼ユニット 鋳鍛鋼工場 加工部



高奈良 弘行

技術開発本部 生産システム研究所



佐々木敏彦

金沢大学
人間社会研究域 人間科学系