大型鍛鋼品の偏析部が $\cos\alpha$ 法による X 線応力測定に与える影響[†]

松田 真理子* 兜森 達彦* 高杢 弘行**
高島 一郎*** 佐々木 敏彦****

Influence of Segregation of a Large Forged Steel Product on X-Ray Stress Measurement by the $\cos\alpha$ Method

by

Mariko MATSUDA*, Tatsuhiko KABUTOMORI*, Hiroyuki TAKAMATSU**,
Ichiro TAKASHIMA*** and Toshihiko SASAKI****

Surface treatments involving residual stresses are an effective method to increase the fatigue strength of forged steel products. Therefore, X-ray stress measurement is important to evaluate the fatigue strength of these materials. For large forged steel products, regions where alloy elements are segregated cannot be avoided. Furthermore, because of the large size of these products, it may be difficult to measure their residual stresses in a laboratory. Nevertheless, compact and portable X-ray equipments operating based on the $\cos\alpha$ method using a two-dimensional detector, are appropriate for the measurement of the residual stresses at the manufacturing sites. Although it is known that carbon and alloy elements concentration influence X-ray stress measurement, there is little research about the influence of segregation in X-ray stress measurement using the $\cos\alpha$ method. This study evaluated the differences in X-ray stress results using the $\cos\alpha$ method in segregation regions of large forged products made of CrMo steel, under tensile stress. It was confirmed that the differences between the X-ray stress and nominal stress increased with increase of carbon concentration in segregation, and crystal grains in which coarse and fine grain size coexist worsen the linearity of the $\cos\alpha$ diagram. Because the level of carbon concentration and grain size varies at each X-ray irradiation points, we proposed an averaging method of X-ray stresses on plural measurement points as an effective way to avoid the effect of segregation.

Key words: X-ray stress, $\cos\alpha$ method, Forged steel, Surface treatment, Residual stress, Segregation

1 緒 言

近年、大型鍛鋼品においては、素材そのものの高強度化には限界が見え始めており、高周波焼入れ、浸炭、窒化およびショットピーニングに代表される冷間加工等の表面処理技術を適用することによる疲労強度向上の取組みが検討されている。これらの表面処理技術は表面処理部および周辺部に残留応力の発生を伴うため、構造物の疲労強度評価を行う上で残留応力分布の測定が必要である。

残留応力の評価技術は多数存在するが、非破壊で測定可能な X 線応力測定技術が産業上有効な手段の一つとしてあげられる。本研究の対象品である大型鍛鋼品の場合、その大きさ故に実験室での測定は困難であり、生産現場での測定が必要のため、測定空間が小さく可搬型の測定装置が必要である。近年、2 次元検出器を用いた $\cos\alpha$ 法による測定装置¹⁾が普及し始めている。従来の $\sin^2\psi$ 法による測定技術は複数の入射角で X 線照射を行う必要があ

ったが、 $\cos\alpha$ 法は単一の X 線照射にて応力測定が可能であるため、装置の回転機構が不要なため測定空間が小さくなり、装置も小型で測定時間も短いという多数の利点がある。

$\cos\alpha$ 法に基づく X 線応力測定技術は歴史が深く、1978 年に平ら²⁾により提案され、1990 年代に吉岡ら³⁾により 2 次元検出器にイメージングプレート(IP)の使用が提案され、その後、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⁴⁾が確立され、三軸応力測定に関する研究⁵⁾およびマクロ・ミクロ応力の測定法⁶⁾などの基礎的な研究がなされた。しかしながら、現在の汎用的な装置として普及し始めてからはまだ日が浅いため、宮崎・藤本らによるフーリエ法の活用⁷⁻⁹⁾といった研究事例はあるものの、 $\sin^2\psi$ 法と比べて実用上の材料を対象にした研究事例はまだまだ少ない。

一方、本研究の対象品である大型鍛鋼品には、鋼塊の凝固過程で生じるマクロ偏析が存在し¹⁰⁾、偏析部を完全

[†] 原稿受理 平成30年4月14日 Received Apr. 14, 2018 ©2018 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 (株)神戸製鋼所 鍛鍛鋼事業部 〒676-8670 高砂市荒井町新浜
Steel Casting & Forging Division, KOBE steel, LTD., Arai-cho, Takasago, 676-8670.

** (株)神戸製鋼所 生産システム研究所 〒651-2271 神戸市西区高塚台
Production Systems Research Laboratory, KOBE steel, LTD., Hishi-ku, Kobe, 651-2271.

*** (株)コベルコ科研 高砂事業所 〒676-8670 高砂市荒井町新浜
Takasago Laboratories, KOBELCO Research Institute .Inc, Arai-cho, Takasago, 676-8670.

**** 金沢大学大学院自然科学研究科 〒920-1192 金沢市角間町
Graduate School of Natural Science & Technology, KANAZAWA University, Kakuma-machi, Kanazawa, 920-1192.

に避けて製品を製造することは困難である。偏析部では、鋼中の炭素および合金元素の濃度に偏りが生じることが特徴として挙げられる。偏析部に生じた残留応力を X 線にて測定する場合、炭素および合金元素濃度の偏りおよびそれらに起因する組織変化が X 線応力に与える影響を把握する必要がある。浸炭および窒化による材料成分および組織変化が X 線応力測定に与える影響の研究^{11),12)}はいくつか取組まれているが、大型鍛鋼品を対象にした X 線応力測定に関する研究事例は非常に少なく、鋼の製造過程で生じる偏析が $\cos\alpha$ 法の X 線応力測定に与える影響を評価した研究は見られない。

本研究では、大型鍛鋼品の表面処理部近傍に生じた残留応力測定を想定し、表面処理の無い鍛鋼材料を対象に、引張試験機による引張応力下での $\cos\alpha$ 法の X 線応力測定を実施し、偏析の有無が X 線応力のばらつきに与える影響について調査した。また、炭素濃度の偏りと偏析に伴う粗大結晶粒の混在が、X 線応力と公称応力の差に与える影響について評価した。さらに、偏析の影響を最小限に抑えるための測定条件について検討した。

2 $\cos\alpha$ 法による X 線応力測定の概要

X 線応力測定は、(1)式の Bragg の条件を満たす際に回折 X 線が生じる特性を活用し、材料内の応力を解析する技術である。

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (1)$$

ここで、 d は格子面間隔、 θ は Bragg 角、 λ は X 線の波長、 n は回折次数を表す。通常、波長 λ は一定の特性 X 線が使用されるため、回折角 2θ を測定することで格子面間隔 d が測定される。つまり、X 線応力測定とは結晶の格子面間隔の変化から応力を決定する技術である。

$\cos\alpha$ 法は単一の X 線照射から 360 度の回折環を 2 次元検出器にて取得し、試料のひずみによる回折環形状の変化から応力を算出する手法である。Fig. 1 に回折環取得時の光学系を示す。回折環の中心角が α 、 $-\alpha$ 、 $\pi+\alpha$ 、 $\pi-\alpha$ である X 線のひずみをそれぞれ ε_α 、 $\varepsilon_{-\alpha}$ 、 $\varepsilon_{\pi+\alpha}$ 、 $\varepsilon_{\pi-\alpha}$ 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。

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

また、X 線照射点の x 軸方向応力 σ_x と a_1 の関係は次式が成り立つ。

Fig.1 X-ray optics used for the $\cos\alpha$ method.

$$a_1 = -\frac{1+\nu}{E} \sin 2\eta \sin 2\psi_0 \cos \alpha \cdot \sigma_x \quad (3)$$

ここで、 E 、 ν は試料の X 線のヤング率および X 線のポアソン比を表す。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(3)より、 $\cos\alpha$ と a_1 には直線関係が成り立つため、その直線の傾きを用いると σ_x は次式で求められる。

$$\sigma_x = -\frac{E}{1+\nu} \frac{1}{\sin 2\eta \sin 2\psi_0} \left[\frac{\partial a_1}{\partial \cos \alpha} \right] \quad (4)$$

式(4)からわかるように、算出される応力の値は X 線の弾性定数 $E/(1+\nu)$ の値に依存する。X 線の弾性定数は計測することも可能であるが、材料学会から従来法である $\sin^2\psi$ 法を対象に推奨値が提示されている。

3 実験方法

3.1 供試材

供試材には、クロムモリブデン鋼からなる 10 ton 以上の大型鋼塊を鍛造した材料を使用した。化学成分範囲を Table 1 に示す。本試験材は、鍛造後に十分にオーステナイト化される温度域まで加熱し、水溶性ポリマーを用いて焼入れし、823 K 以上の温度にて焼戻し処理が施され、Table 2 に示す機械的特性に調質された材料である。大型鋼塊においては、中心部に V 型偏析が、中層部には逆 V 偏析が発生することが知られており¹⁰⁾、鍛造時に形成されるメタルフローに沿って偏析部が帯状に出現する。本試験材は、直径 400 mm 程度の丸棒状に鍛造し、予め断面のミクロ観察にて逆 V 偏析が多い部位と少ない部位を特定し、偏析が多い部位においてはメタルフローに対し 45° 方向に、偏析の少ない部位においてはメタルフローに対し平行方向に、Fig. 2 に示す形状の試験片をそれぞれ 2 本ずつ取得した。偏析の多い部位においてメタルフローの 45° 方向に試験片を採取した理由は、鍛造において帯状となる偏析の多様な条件をより多く抽出するためである。Fig. 3 に偏析の多い試験片の X 線照射部位の組織と結晶粒径の観察結果を、Fig. 4 に偏析の少ない試験片の同

Table 1 Target of chemical composition of material. (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

Table 2 Mechanical properties.

	Tensile strength [MPa]	Proof stress [MPa]
1st. specimen with segregation	945	813
2nd. specimen with segregation	987	828
1st. specimen without segregation	1035	899
2nd. specimen without segregation	966	818

Fig.2 Specimen shape and dimensions.

Fig. 3 Microstructures on the center of the specimen with segregation.

Fig. 4 Microstructures on the center of the specimen without segregation.

Fig. 5 Image of tensile testing machine.

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り、偏析の多い試験片の平均結晶粒径は $30 \sim 40 \mu\text{m}$ 、偏析の少ない試験片の平均結晶粒径は $20 \sim 30 \mu\text{m}$ であることがわかった。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し、混粒状態となっていることがわかる。

3. 2 試験方法および試験片

本研究では、万能引張試験機を使用し、試験片に既知の引張応力を負荷した条件でX線応力測定を実施し、X線応力と試験片平行部に生じる公称応力の比較を行った。試験状況をFig. 5に示す。試験機の治具とX線装置との干渉を防ぐために、試験片平行部長さを通常の引張試験片よりも長く設定した。また、試験片加工により生じる残留応力を除外するために、試験片平行部中央 $15 \times 12.5 \text{ mm}$ の範囲に深さ 0.1 mm の電解研磨を実施した。電解研磨部の拡大写真をFig. 6に示す。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

Table 3 X-ray measurement conditions.

Characteristic X-ray	Cr-K α
Diffraction plane	αFe (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

Fig. 6 Schematic of electropolishing area and X-ray measurement position and numbers.

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、また片側のみの電解研磨により、試験片の表裏で若干の応力差が生じると考えられるが、それらの影響はX線応力値と比べて微小であることを予備検証で確認した。

試験片に負荷した公称応力は弾性応力範囲内とし、 0.2% 耐力の $1/4$ 、 $1/2$ および $3/4$ の3条件を選択した。具体的には、無負荷状態から順番に負荷を増やしながらX線応力を測定した。ただし2本目の試験片に関しては、1本目の結果の再現性を確認することを主目的とし、測定効率の観点から 0.2% 耐力の $1/2$ 条件のみでX線応力測定を行った。

3. 3 X線応力測定条件

本研究では、 $\cos \alpha$ 法に基づくX線応力測定装置として、パルステック社製の $\mu\text{-X360}$ ロングレンジモデルを使用した。Table 3にX線応力測定条件を示す。測定位置は、試験片平行部中央の電解研磨範囲内の $9 \times 9 \text{ mm}$ の範囲とし、 3 mm ピッチで 3×3 点の計9点測定した。Fig. 6にX線応力測定位置と測定番号を示す。試料距離は装置の推奨距離である 60 mm にできるだけ近づけるように設定したが、実際には $55 \sim 65 \text{ mm}$ の間で変動していた。ただし、X線応力を解析する際には装置付属のカメラにて測定した実際の距離を使用したため、測定点ごとの試料距離の変化の影響は微小であると考えられる。X線応力解析で使用したX線の弾性定数は、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 $E/(1+\nu) = -175 \text{ GPa}^{13)}$ を使用した。

4 実験結果

Fig. 7に1本目試験片における9点測定位置ごとの、偏析が多い試験片と少ない試験片のX線応力値の比較を示す。偏析が少ない試験片はいずれの負荷応力においても9

Fig. 7 Results of X-ray measurement of the first specimen at each position.

Fig. 8 Standard deviation of X-ray stresses within 9 measurement points on the first and the second specimens.

点の測定位置で X 線応力値に大きな差異は見られないが、偏析が多い試験片は 9 点の測定位置間で X 線応力値に大きなばらつきが生じていることがわかった。また、偏析が多い試験片の X 線応力は 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わかった。これは偏析部における何らかの条件の差異が X 線応力に影響を及ぼしていることを示唆している。

次に、9 点の測定位置間の X 線応力の標準偏差について、偏析が多い試験片と少ない試験片の比較を Fig. 8 に示す。偏析の少ない試験片は公称応力の値に関わらず、9 点の測定位置間の X 線応力の標準偏差に大きな変化は見られないが、偏析の多い試験片は公称応力が増加するにつれ標準偏差も大きくなる傾向が見られた。また、偏析が多い試験片の標準偏差は公称応力の約 6~14 %に相当し、偏析の多い部位の残留応力を評価する上では、1 点のみの測定では十分な測定精度であるとは言い難いことがわかった。

Fig. 9 に 0.2 %耐力の 1/2 条件 (公称応力 397 MPa) における、偏析の多い試験片と少ない試験片の $\cos\alpha$ 線図の比較を、Fig. 10 にデバイリングの比較を示す。偏析の多い試験片の方が $\cos\alpha$ 線図の直線性が悪く、測定位置ごとに差異があることがわかる。また、偏析の多い試験片のデバイリングは斑点状 (スポッティ) になっており、偏析の少ない試験片と比べ、360 度間のピーク強度が一定では

(a) The first specimen with segregation.

(b) The first specimen without segregation.

Fig. 9 Comparison between $\cos\alpha$ diagrams of the first specimen under the nominal stress of 397 MPa.

(a) Maximum stress condition at N5 of the first specimen with segregation.

(b) Minimum stress condition at N6 of the first specimen with segregation.

(c) Maximum stress condition at N8 of the first specimen without segregation.

(d) Minimum stress condition at N3 of the first specimen without segregation.

Fig. 10 Comparison between X-ray profiles of the first specimen under the nominal stress of 397 MPa.

なくばらついていることがわかる。佐々木ら¹⁴⁾によると、結晶粒が 50 μm 以上に粗大化するとデバイリングが斑点

(a) The first and the second specimens with segregation.

(b) The first and the second specimens without segregation.

Fig. 11 Comparison between averaged X-ray stress of 9 measurement points and nominal stress.

状になると指摘されている。本試験材の平均粒径はいずれも $50 \mu\text{m}$ 以下となっているが、偏析の多い試験片は粗大結晶粒を含む混粒状態となっており、それらがデバイリングの斑点状の原因の一つであると考えられる。

Fig. 11 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 線応力の平均値と公称応力の比較を示す。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、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 X 線応力と公称応力が一致する条件を示している。1 本目の試験片においては、9 点の X 線応力を平均化すると、偏析の多い試験片も偏析の少ない試験片も、どちらも X 線応力と公称応力は良く一致する結果となった。2 本目の試験片の場合、X 線応力と公称応力に若干の差が生じているが、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 線応力に初期残留応力が影響したと考えられる。

以上の結果より、偏析の多い試験片の場合、X 線照射位置ごとに X 線応力値が大きくばらつくため、産業上利用する上では 1 点のみの測定では十分な測定精度であるとは言い難いが、9 点の測定位置の結果を平均化すると、偏析の少ない試験片と同様に X 線応力は公称応力と良く一致することがわかった。

5 考察

前述の通り、偏析部において X 線応力値が大きくばら

Fig. 12 Element concentration of the second specimen with segregation at each position.

Fig. 13 Relationship between carbon concentration (mass %) and variation of X-ray stress with the nominal stress in the second specimen with segregation.

つくことが確認されたため、その原因として以下の二つの要因について考察した。一つ目は偏析部における炭素濃度の偏りの影響であり、二つ目は偏析部において結晶粒が混粒となっている影響である。

まず、炭素濃度の偏りの影響を調べるために、偏析の多い部位から採取した 2 本目の試験片に対し、9 点の X 線応力測定位置ごとの元素分析を FE-SEM による 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 Fig. 12 に示す。炭素および合金元素が測定位置ごとにそれぞれの割合で濃化しており、測定位置と濃度の関係に特別な法則は見られなかった。そこで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 線応力の比較を Fig. 13 に示す。図中の縦軸には、公称応力と X 線応力の差分を取った。炭素濃度が高い場合に公称応力よりも X 線応力が高く、炭素濃度の低い場合に公称応力よりも X 線応力が低い傾向が見られた。この結果は、偏析部における炭素濃度の偏りが X 線応力に影響を与えることを示している。

次に、偏析部において結晶粒が混粒であることの影響について検討した。Fig. 14 に、 $\cos \alpha$ 線図の直線近似における R^2 値と、X 線応力と公称応力の差の関係について、偏析の多い試験片と少ない試験片の比較を示す。 R^2 値が 1.0 に近くなるほど、 $\cos \alpha$ 線図の直線性が良いことを表している。偏析の少ない試験片は R^2 値が 0.94 以上に安定し

ているが、偏析の多い試験片は全体的に R^2 値が小さくばらつきも大きい結果となった。偏析が多い試験片は粗大な結晶粒が混在する影響でデバイリングが斑点状になり、 $\cos\alpha$ 線図の直線性が悪くなり、 R^2 値も小さくなったと考えられる。つまり、結晶粒が混粒であることは X 線応力に影響すると言える。しかし、Fig. 14 の結果によると、 R^2 値が小さい場合に必ずしも X 線応力が公称応力から大きく離れている訳ではない。むしろ、偏析が多い試験片で R^2 値が 0.90 前後の際に、X 線応力は公称応力と良く一致している。よって、偏析の多い試験片において X 線照射部位ごとに X 線応力がばらつく原因は、結晶粒が混粒であることだけでは説明ができず、X 線照射部位ごとの炭素濃度の差異が影響していると考えられる。X 線照射部位ごとに炭素濃度が異なると、セメンタイト等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際にばらつきに影響を与えた可能性がある。これらの詳細な分析については今後の課題としたい。

一方で、偏析の多い部位を対象に X 線応力測定を実施する場合、X 線照射部位ごとの炭素濃度および結晶粒径の差異に応じて X 線応力値がばらつくことは、産業上利用する上で不都合な場合も存在する。ただし、Fig. 9 に示した通り、ある一定面積の X 線応力測定結果を平均化すれば、偏析の多い試験片においても、公称応力と X 線応力はよく一致することがわかった。そこで、偏析の影響

Fig. 14 Relationship between variation of X-ray stress and determination coefficient R^2 of $\cos\alpha$ diagram.

Fig. 15 Relationship between X-ray stress and number of X-ray stress measurements to be averaged at the nominal stress of 197 MPa.

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、1,2,3,4,6,9点を測定点数とした場合の隣接する位置の全組合せを考え、それぞれの測定点数の X 線応力値を平均化した。Fig. 15 に 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の比較を示す。測定点数が多くなるほど、偏析が多い試験片も少ない試験片も公称応力 197 MPa に近づく傾向を示し、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 X 線応力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わかった。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。

6 結 言

本研究では、大型鍛鋼品の偏析部が $\cos\alpha$ 法の X 線応力測定に与える影響を調査し、偏析部における炭素濃度の偏りと結晶粒が混粒であることが X 線応力測定値のばらつきに与える影響について検討した。その結果、以下の結論を得た。

引張応力負荷時の X 線応力測定を行ったところ、本研究で対象とした鍛鋼材においては、偏析の有無に関わらず 9 点の測定結果を平均化すれば公称応力と良く一致することがわかった。また、偏析の多い試験片の場合、X 線応力の標準偏差は公称応力の 6~14 %に相当することがわかった。

偏析の多い試験片の X 線応力のばらつき原因を検討するために、X 線照射部位ごとの元素分析を行ったところ、炭素濃度が高い位置で X 線応力は公称応力よりも高くなり、炭素濃度が低い位置で X 線応力は公称応力よりも低くなる傾向にあることがわかった。また、偏析部の結晶粒が混粒であるために、デバイリングが斑点状となり $\cos\alpha$ 線図の直線性が悪くなり、 R^2 値も小さくなる傾向を確認したが、X 線応力のばらつきは結晶粒の混粒状態だけでは説明できないことがわかった。よって、偏析の多い試験片においては、X 線照射部位ごとの炭素濃度の差異が X 線応力のばらつきに影響したと考えられる。

最後に、偏析の影響を最小限に抑えた X 線応力測定条件について検討し、本研究で対象とした鍛鋼材においては、4 点 (約 12 mm²) 以上の範囲で X 線を照射し、X 線プロファイルもしくは解析応力を平均化すれば、X 線応力値のばらつきは偏析の少ない試験片と同等になることがわかった。

参 考 文 献

- 1) Y. Maruyama, T. Miyazaki and T. Sasaki, "Development and validation of an X-ray stress measurement device using an image plate suitable for the $\cos\alpha$ method", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.64, No.7, pp.560-566 (2015).

- 2) S. Taira, K. Tanaka and T. Yamasaki, "A method of X-ray microbeam measurement of local stress and its application to fatigue crack growth problems", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.27, No.294, pp.251–256 (1978).
- 3) Y. Yoshioka, S. Ohya and T. Shinkai, "Application of imaging plate to micro-beam X-ray diffraction", *Journal of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection*, Vol.39, No.8, pp.666–671 (1990).
- 4) T. Sasaki and Y. Hirose, "Single incidence X-ray stress measurement for all plane stress components using imaging plate of two-dimensional X-ray detector", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.44, No.504, pp.1138–1143 (1995).
- 5) T. Sasaki and Y. Hirose, "X-ray triaxial stress analysis using whole diffraction ring detector with imaging plate", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.61, No.590, pp.2288–2295 (1995).
- 6) T. Sasaki, Z. Lin and Y. Hirose, "X-ray measurement of macro- and microstresses using imaging plate and its application to ferritic and austenitic dualphase stainless steel", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 62, No.604, pp.2741–2749 (1996).
- 7) T. Miyazaki and T. Sasaki, "X-ray stress measurement with two-dimensional detector based on Fourier analysis", *International Journal of Materials Research*, Vol. 105, No.9, pp.922–927 (2014).
- 8) T. Miyazaki and T. Sasaki, "Linearized analysis of X-ray stress measurement using the Debye-Scherrer ring", *International Journal of Materials Research*, Vol. 106, No.9, pp.1002–1004 (2015).
- 9) Y. Fujimoto, T. Miyazaki and T. Sasaki, "X-ray stress measurement of ferritic steel using Fourier analysis of Debye-Scherrer ring", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol. 64, No.7, pp.567–572 (2015).
- 10) H. Hirahara, M. Hashimoto, O. Marukawa and H. Shiraishi, "On the solidification and segregation of the large killed steel ingots", *Tetsu-to-Hagané*, Vol. 62, No.13, pp. 1641–1652 (1976).
- 11) Y. Sakaida, S. Yashiro and H. Yoshida, "Influence of carbon content on mechanical and X-ray elastic constants of carburized case layer in chrome molybdenum steel", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.62, No.5, pp.335–341 (2013).
- 12) J. E. Hoffmann, "X-ray residual stress analysis of nitride low alloyed steels", *Materials Testing*, Vol.54, No.6, pp.395–407 (2012).
- 13) Division of X-Ray Stress and Strain Measurements Committee for X-Ray Study on Deformation and Fracture of Solid, "Dependence of lattice strain on diffraction plane measured by X-ray method", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.20, No.219, pp.1257–1271 (1971).
- 14) T. Sasaki, Y. Hirose and S. Yasukawa, "X-ray stress measurement of coarse-grained polycrystalline material by imaging plate method", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.63, No.607, pp.533–541 (1997).