

Study of residual stress evaluation methods in the fillet of large forged steel products

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2019-07-04 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/00054637

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



学 位 論 文 要 旨

大型鍛鋼品のフィレット部の 残留応力評価技術に関する研究

Study of residual stress evaluation methods
in the fillet of large forged steel products

金沢大学大学院自然科学研究科
機械科学専攻
山田 真理子

Summary

Most cold forming processes are effective methods for improving the fatigue strength of large forged steel structures. However, these methods give rise to compressive residual stresses on the surface, while causing tensile residual stresses around the cold-formed parts. This study evaluated surface and internal residual stresses in the fillet portion of the axisymmetric shaft with flange after the cold forming process. We selected a two-dimensional X-ray diffraction system based on a $\cos\alpha$ method for the surface and an inherent strain method for the inside of the fillet. For large forged steel products, regions where alloy elements are segregated cannot be avoided although segregation influences X-ray stress. This study confirmed that the differences between the X-ray and nominal stress increased with increase of carbon concentration. Therefore, an averaging method of X-ray stresses on plural measurement points was proposed to avoid the effect of segregation. On the other hand, we propose an efficient approach that combines the inherent strain method and the X-ray stress measurement along with a new measurement procedure. In the cold-formed parts, the inherent strains are induced by plastic deformation, and there is a relationship between the half value breadth of X-ray diffraction profile and the equivalent inherent strain. This study confirmed that it is important to set the conditions of the inherent strain area and the order of the inherent strain distribution functions while considering the half value breadth. Moreover, it is verified that the $\cos\alpha$ method is effective for the proposed new approach. Accordingly, evaluating the fatigue strength of the fillet portion can be performed considering the residual stresses.

1. 緒言

産業界において今後ますます環境保護に向けた活動が活発になる上で、鉄鋼部品の高疲労強度化技術への要求は今後も高まりを続け、表面処理技術、特に簡便に適用可能な冷間加工技術の適用が拡大すると思われる。しかし、表面処理技術はいずれの技術も残留応力の発生を伴うため、安全な部品を設計するためには残留応力を考慮した評価が必要となる。ここで、大型鍛鋼品は高応力が発生する深さが5~10 mmと深く、疲労強度を向上させるためには表面処理も十分に深い領域まで適用されるため、残留応力測定も5~10 mmの深い位置まで測定することが要求される。そこで本研究では、冷間加工が適用された大型鍛鋼品のフィレット部を対象とし、表層部と内部の二つの領域に対し、表層部はX線応力測定法を、内部は固有ひずみ法を選択し、残留応力評価を行う上でのいくつかの課題解決に取り組んだ。X線応力測定法には従来の $\sin^2\psi$ 法よりも装置が小型で測定時間の短い $\cos\alpha$ 法を選択した。大型鍛鋼品は一般的な機械部品よりも寸法が大きいものの、軸とフランジ部の繋ぎ部に設けられるフィレット部は狭隘部となり、 $\sin^2\psi$ 法によるX線応力測定は適用できないためである。

まず本研究では、大型鍛鋼品の残留応力測定に $\cos\alpha$ 法の X 線応力測定が有効であることを確認した。大型鍛鋼品は一般的な圧延材と比べ成分および組織が均一ではなく、製造上避けられない大型鋼塊の凝固過程で生じるマクロ偏析も存在するため、これらが $\cos\alpha$ 法の X 線応力測定に与える影響について検討した。次に、フィレット形状の内部の残留応力評価に固有ひずみ法を適用する上で、固有ひずみ法と X 線応力測定を融合した新たな手法を提案し、提案手法の予測精度を評価した。また、固有ひずみ法では固有ひずみ計算領域と分布関数の次数の設定が残留応力予測精度に大きな影響を与えることから、それらの条件設定において X 線半価幅と相当固有ひずみの一致性を考慮することの有効性を確認した。最後に、 $\cos\alpha$ 法は単一入射角にて測定可能なため測定時間が短く、装置が小型なため広範囲のフィレット表面応力の測定が可能であり、垂直応力と同時にせん断応力を取得可能な利点が存在する。これらの利点が固有ひずみ法の残留応力予測精度に与える影響について評価した。

2. 対象試験材

本研究では、図 1 に示すフランジ付き軸対称鍛造部品を対象とした。材料は CrMo 系低合金鋼であり、大型鋼塊を鍛造後に焼入れ焼戻し処理が実施され、代表部位の組織はベイナイトで引張強度は 900MPa 級鋼である。本試験材は、軸とフランジの接続部分に設けられたフィレット部に対し、疲労強度向上を目的とした軸対称条件の冷間加工が適用され、フィレット表面から深さ 10 mm 程度の領域に圧縮の残留応力が生じていた。

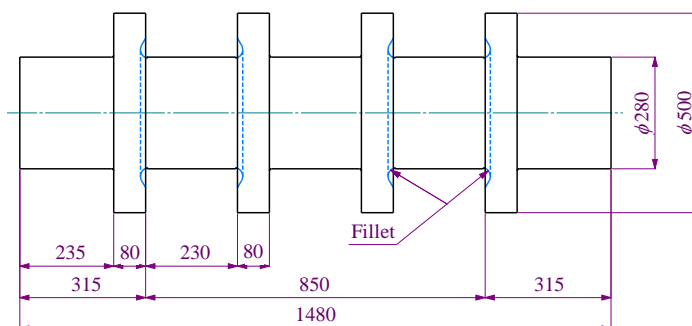


図 1 対象試験材

3. 大型鍛鋼品の残留応力測定における $\cos\alpha$ 法の X 線応力測定の有効性

3. 1 試験条件

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いる。本章では偏析が X 線応力に与える影響を評価するために、予め断面のマクロ観察にて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 deg. 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、それぞれ 2 本ずつ試験片を採取した。

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 $\cos\alpha$ 法の 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。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。X 線応力測

定はパルステック社製の μ -X360 ロングレンジモデルを使用し、試験片加工で生じた残留応力を除外するために、試験片平行部中央に深さ 0.1 mm の電解研磨を実施し、3 mm ピッチで 3×3 点の計 9 点測定した。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 $E/(1+\nu) = 175 \text{ GPa}^{18)}$ を使用した。

偏析の多い試験片の結晶粒径の観察結果を図 2 に示す。偏析の多い試験片も少ない試験片も平均結晶粒径は 50 μm 以下と比較的微小な状態であったが、偏析の多い試験片の方が平均結晶粒は若干粗めであり、部分的に大きな結晶粒が存在する混粒状態となっていた。

3. 2 試験結果

9 点の測定位置間の X 線応力の標準偏差を図 3 に示す。偏析の多い試験片は偏析の少ない試験片と比べ、9 点の測定位置間で X 線応力のばらつきが大きいことがわかった。また、偏析の少ない試験片は公称応力の値に関わらず X 線応力の標準偏差は 15 MPa 以下と小さいが、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 25 MPa から 35 MPa へと増加する傾向が見られた。

図 4 に、偏析の多い試験片と少ない試験片の $\cos\alpha$ 線図の比較を示す。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。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 $\cos\alpha$ 線図の直線性を低下させた原因の一つと考えられる。

偏析部において X 線応力値が大きくばらつく原因として、炭素濃度の偏りの影響が考えられる。そこで、偏析の多い 2 本目の試験片を対象に、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。偏析の多い 2 本目の試験片における 9 点の測定位置の炭素濃

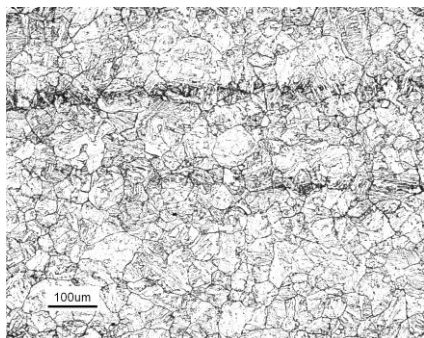


図 2 偏析の多い試験片の結晶粒径

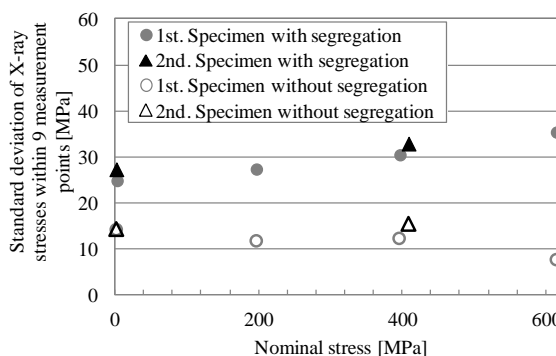
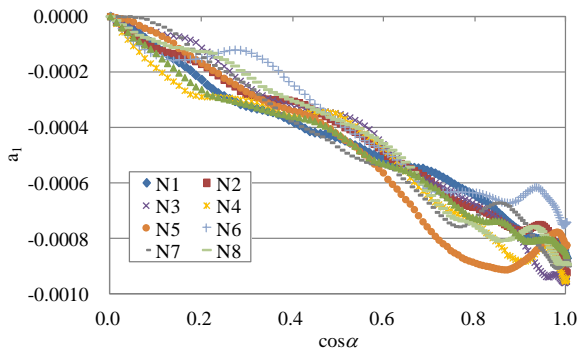
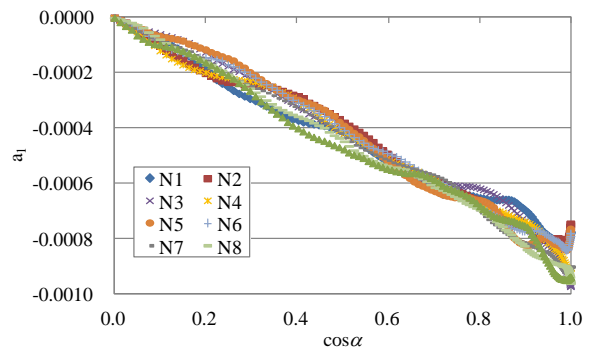


図 3 9 点の X 線応力の標準偏差



(a) 偏析の多い試験片



(b) 偏析の少ない試験片

図4 9点の測定位置における $\cos\alpha$ 線図の比較 (1本目試験片：公称応力 397 MPa)

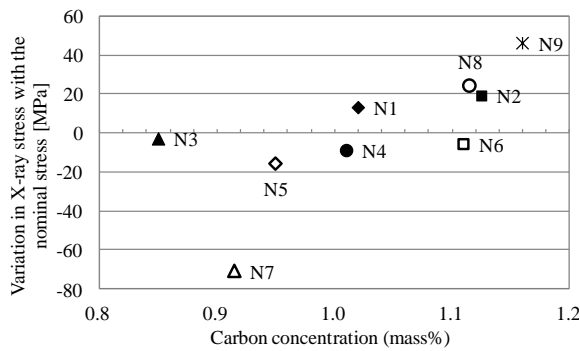


図5 X線応力値の公称応力からの差分と炭素濃度の比較 (偏析の多い2本目試験片：公称応力 377 MPa)

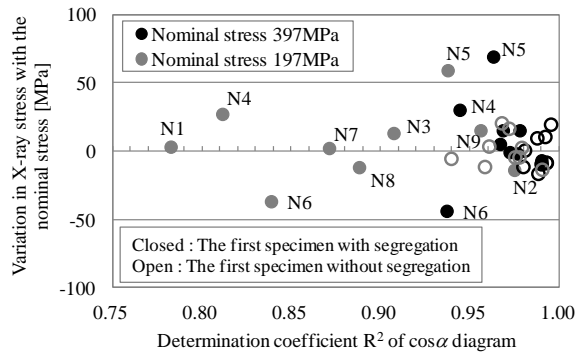


図6 X線応力値の公称応力からの差分と $\cos\alpha$ 線図の直線近似時の R^2 値の比較 (1本目試験片)

度 (mass %) と X 線応力の関係を図 5 に示す. 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.

図 6 に, 偏析の多い試験片と少ない試験片における, X 線応力と公称応力の差分と $\cos\alpha$ 線図の直線近似時の R^2 値の比較を示す. 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図 4 に示した通り $\cos\alpha$ 線図の直線性が悪く, 全体的に R^2 値が小さく測定位置間のばらつきも大きい結果となった. しかし, 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く, 偏析が多い試験片で R^2 値が小さくても X 線応力が公称応力と良く一致しているデータが複数存在する. 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. 局所的に炭素の濃化度が異なると, その影響でセメントイト等の出現率に差異が生じ, フェライト相の応力を測定する X 線応力のばら

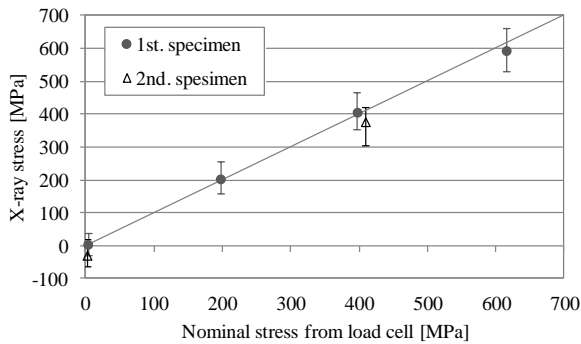


図7 偏析の多い試験片の X 線応力と公称応力の比較

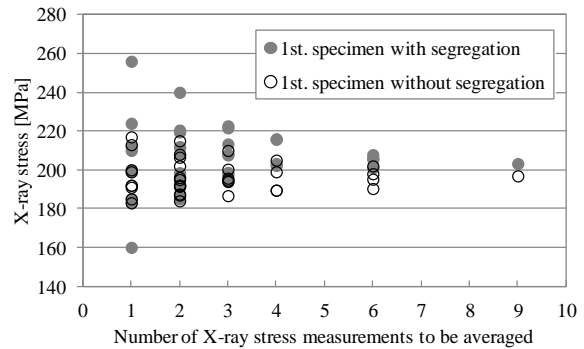


図8 平均化する測定点数と X 線応力のばらつきの関係（1 本目試験片：公称応力 197 MPa）

つきに影響を与えたと考えられる。

次に、偏析の多い試験片における、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図 7 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、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。9 点の X 線応力を平均化すると、偏析の多い試験片においても X 線応力と公称応力は良く一致する結果となった。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、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。図 8 に、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。偏析の多い試験片においても、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。以上の結果より、大型鍛鋼品の残留応力測定に $\cos\alpha$ 法の X 線応力測定を適用する場合、複数点の平均化が有効であることがわかった。

4. 固有ひずみ法における X 線半価幅の有効性

4. 1 本研究で提案した手法の概要

固有ひずみ法とは、残留応力の発生源となるひずみ（固有ひずみと呼ぶ）は部材が形状を変えても変化しないことに着目し、切断等を加えた条件で残留応力を測定し、その結果から有限要素法にて固有ひずみ分布を推定し、元形状の有限要素法にて残留応力分布を予測する手法である。固有ひずみ法は実測と有限要素解析の融合手法であり、冷間加工のような繰り返しの複雑な塑性経路をたどるために、有限要素法のみでは評価が難しい対象物に対しても有効な手法である。

本研究では固有ひずみ法をフィレット形状に適用する上で、従来法では急峻な応力勾配が一つの測定片に含まれてしまう課題を解決するために、フィレット部に図 9 に

示すフィレット径中心を基準とした局所座標系を導入し、図 10 に示す試験片形状にて X 線応力測定を行った。測定手順の概要を以下に記載する。まず、フィレット径中心を基準にそれぞれのフィレット角度ごとに円錐形状に加工した C 片を適用した。従来法で使用される L 片は軸に平行方向に採取されるため、フィレット形状に適用すると前述の課題が生じてしまう。C 片を適用することで、フィレット半径方向(Radial direction)および軸対称軸を基準とした周方向(Circumferential direction)の残留応力が測定可能である。次に、軸対称軸に沿ってスライスした T 片は従来法でも適用されており、本研究でも同様に適用した。T 片は軸対称面内の応力測定が可能のため、フィレット半径方向(Radial direction)およびフィレット角度方向(Tangential direction)の残留応力が測定可能である。最後に、初期形状に近い形状として、軸部を切り落としてフランジ部を円盤状とした F 片を適用した。F 片はフィレット角度方向(Tangential direction)および軸の周方向(Circumferential direction)の残留応力が測定可能である。以上で図 9 に示した局所座標系の 3 軸方向応力すべての測定データが取得可能となった。

固有ひずみ計算時の未知数を大幅に削減する目的で、固有ひずみを分布関数にて近似する手法を適用した。固有ひずみの計算領域を図 9 に示す通り、フィレット角度 α とフィレット半径方向深さ R で定める扇型に設定し、固有ひずみ分布関数を次式で定義した。

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_{ij} (1-\xi)^j \sin(j\pi\omega) \quad (1) \quad \xi = \frac{R-R_0}{\Delta R}, \quad \omega = \frac{\alpha-\alpha_0}{\Delta\alpha} + \frac{1}{2} \quad (2)$$

ここで、 m, n は図 9 に示す局所座標系におけるフィレット半径方向 ξ およびフィレット角度方向 ω に対応する分布関数の次数を表し、 $R_0, \Delta R, \alpha_0, \Delta\alpha$ はそれぞれの方向成分における固有ひずみ計算領域を定義するパラメータを表す。 $\Delta\alpha$ は α_0 を基準として両側均等に設定した。また、 A_{ij} は固有ひずみ分布関数の係数である。

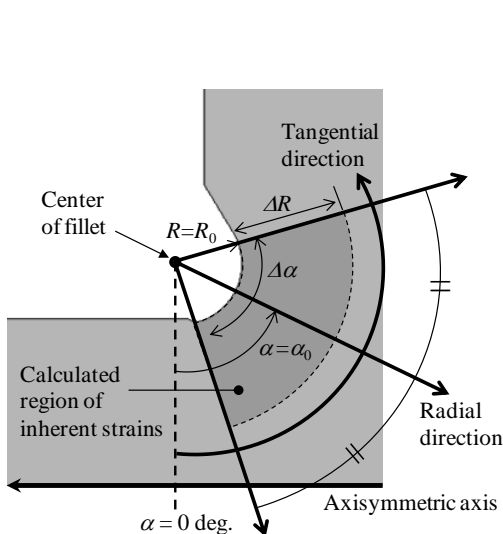


図 9 局所座標系の定義

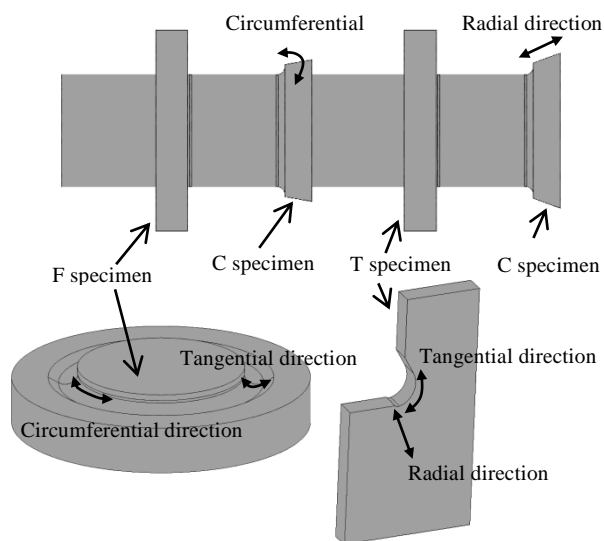


図 10 各試験片の形状例と測定応力方向

本研究では、冷間加工に起因する固有ひずみを扱うため、 A_{ij} を決める際に金属の塑性変形時に体積は変化しない（非圧縮性）条件を考慮した。非圧縮性の条件を適用すると、未知の固有ひずみの方向成分を一つ減らすことが可能となる。

4. 2 固有ひずみ法の精度検証のための切断法による残留応力測定

固有ひずみ法の精度評価のために、切断法による残留応力測定を実施した。図 11 に切断法の概要を示す。フィレット角度 40 deg. 方向に 3, 6, 9, 12 mm 深さのドリル穴を空け、ドリル穴底に 3 軸のひずみゲージを貼り、ひずみゲージ部を最小片に切断して開放ひずみを測定し、ヤング率を掛けて残留応力に変換した。

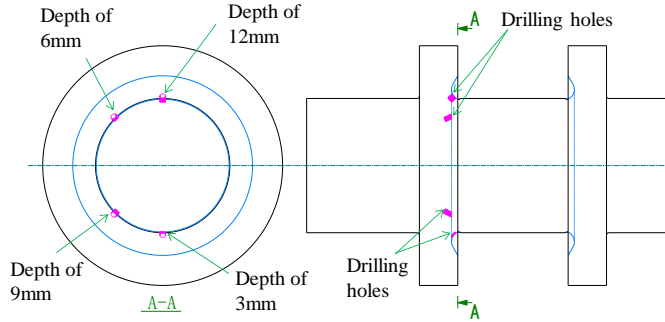


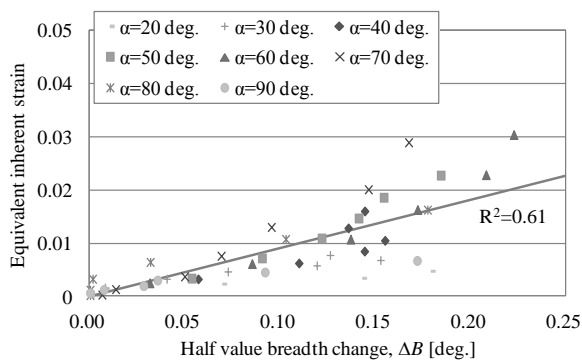
図 11 切断法による残留応力測定概要

4. 3 X 線半価幅と相当固有ひずみの関係

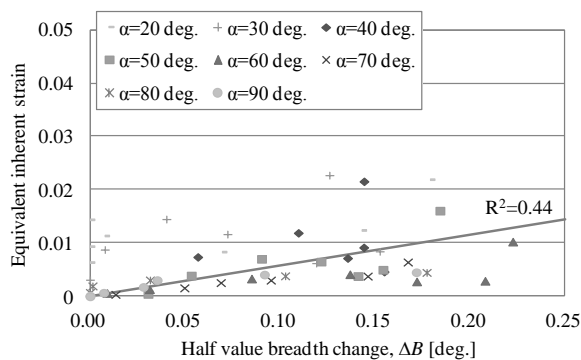
一般的に X 線半価幅と相当塑性ひずみには良い相関があることが知られており、本研究の固有ひずみは塑性ひずみに起因するため、半価幅と固有ひずみにも相関があると考えられる。ただし、半価幅は方向成分を持たない値であるが、固有ひずみは 3 軸方向成分を有するため、本研究では固有ひずみを次式の相当ひずみの式に導入し、相当固有ひずみとして半価幅と相対的な比較を行った。

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \{ (\varepsilon_{xx})^2 + (\varepsilon_{yy})^2 + (\varepsilon_{zz})^2 \} + \frac{1}{3} \{ (\gamma_{xy})^2 + (\gamma_{yz})^2 + (\gamma_{zx})^2 \}} \quad (3)$$

固有ひずみ計算領域の設定パラメータを $\Delta R=10.5$ mm, $\alpha_0=40$ deg., $\Delta\alpha=120$ deg. で固定し、固有ひずみ分布関数の次数 m, n を変更した際の、半価幅増加量と相当固有ひずみの関係を図 12 に、フィレット角度 40 deg. 位置における固有ひずみ法による残留応力予測結果と切断法による測定結果の比較を図 13 に示す。半価幅増加量と相当固有ひずみは非常に良い相関があり、固有ひずみ法による残留応力予測結果は実測結果と非常に良く一致していることがわかる。ただし、次数 m を大きくすると半価幅増加量と相当固有ひずみの相関のばらつきが大きくなり、残留応力予測結果は実測値のない最表面位置の応力が極端な値を持つ結果となった。有限の実測データから予測を行う以上、分布関数の次数には適正值（上限）が存在すると考えられるが、適正条件であるかの判断は難しい。半価幅増加量と相当固有ひずみの一致性の評価は、固有ひずみ計算条件の適正判断を行う上で、実測に基づく判断指標の一つとして有効であることがわかった。

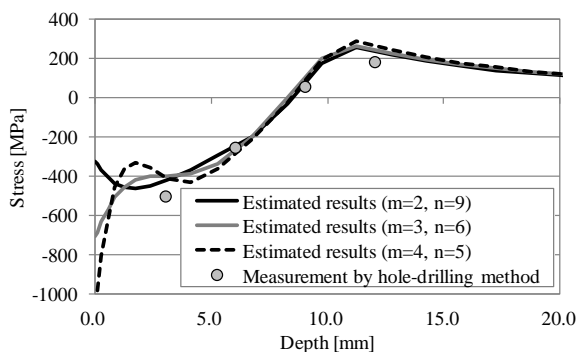


(a) $m=2, n=9$

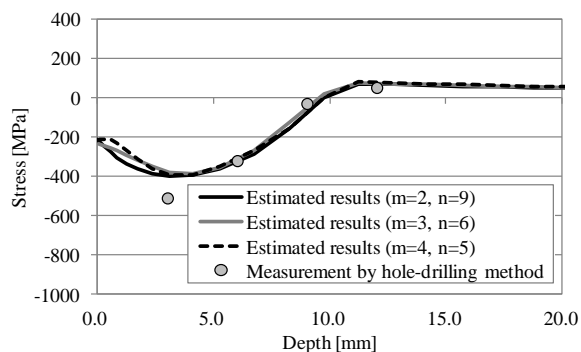


(b) $m=3, n=6$

図 12 相当固有ひずみと半価幅増加量の関係



(a) フィレット角度方向応力



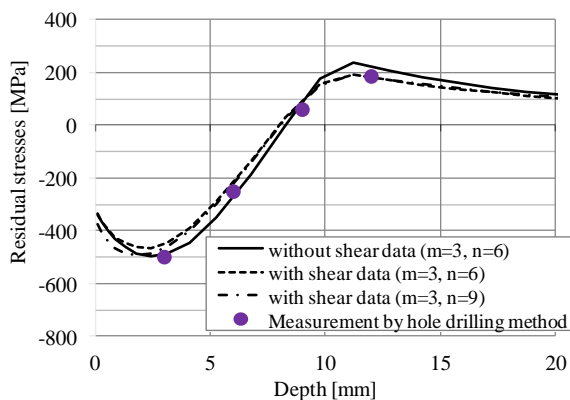
(b) 周方向応力

図 13 固有ひずみ法による初期形状の残留応力予測結果と切断法による結果の比較

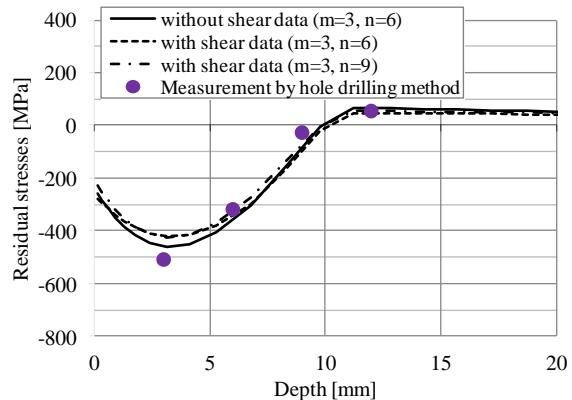
4. 4 $\cos\alpha$ 法 X 線応力測定適用の利点の検証

緒言に記載の通り、固有ひずみ法に $\cos\alpha$ 法の X 線応力測定を適用する上で、大きく分けて 3 つの利点が存在する。まず、測定時間が短い利点は、固有ひずみ法は測定データが多いほど予測精度が向上するため、多数の測定データを取得する上で有効である。次に、装置が小型で広範囲のフィレット表面応力の測定が可能である利点も、固有ひずみ法は残留応力が生じている部位全体の測定データの取得が望ましいため、固有ひずみ法の予測精度を向上させる上で有効である。最後に、3 つ目の利点である、せん断応力成分を固有ひずみ法に適用した際の効果について以下に示す。

せん断応力成分を適用した際の、フィレット角度 40 deg.位置における固有ひずみ法による初期形状の残留応力予測結果と切断法による測定結果の比較を図 14 に、その際の半価幅増加量と相当固有ひずみの関係を図 15 に示す。せん断応力成分を適用した場合、固有ひずみ分布関数の次数 m を増加させることで、初期形状の残留応力予測精度が向上し、半価幅増加量と相当固有ひずみの一致性も図 12 に示したせん断応力成分を適用しない場合の結果よりも向上した。以上のことより、固有ひずみ法の予測精度向上において、 $\cos\alpha$ 法のせん断応力成分の適用が効果的であることが確認できた。

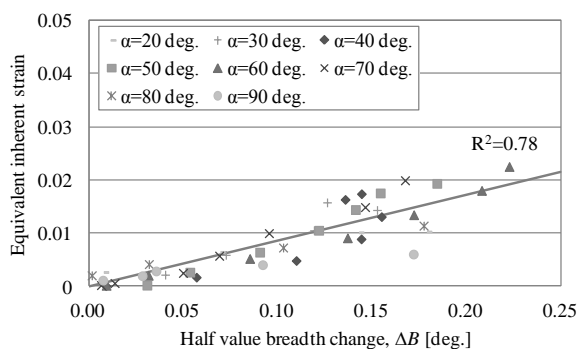


(a) フィレット角度方向応力

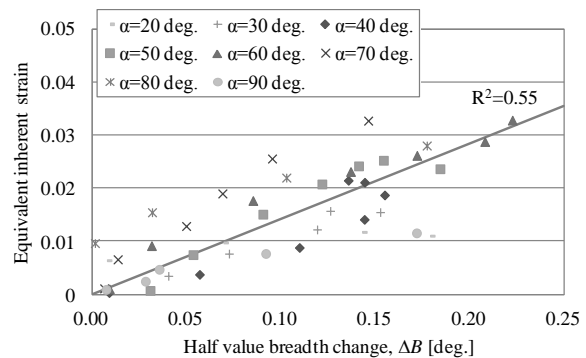


(b) 周方向応力

図 14 固有ひずみ法の残留応力予測における $\cos\alpha$ 法のせん断応力成分適用の効果



(a) $m=3, n=6$



(b) $m=3, n=9$

図 15 $\cos\alpha$ 法のせん断応力を適用した場合の半価幅増加量と相当固有ひずみの関係

5. 結言

本研究は、冷間加工が適用された大型鍛鋼品のフィレット部を対象とし、 $\cos\alpha$ 法の X 線応力測定における大型鍛鋼品特有のマクロ偏析の影響を明らかにし、その影響を最小限に抑える手法を提案した。また、内部の残留応力評価において、固有ひずみ法と X 線応力測定の融合手法を提案し、固有ひずみ計算条件の設定において、X 線半価幅と相当固有ひずみの一致性の評価が有効であることを示した。さらに、固有ひずみ法を実施する上でも、残留応力測定に $\cos\alpha$ 法の X 線応力測定を適用することが有効であることを示した。本研究の成果により、大型鍛鋼品のフィレット部の表層部および内部両方の残留応力分布が取得可能となり、残留応力を考慮した部品設計が可能となった。

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

大型鍛鋼品のフィレット部の残留応力評価技術に関する研究

2. 論文提出者 (1) 所属 機械科学 専攻
(2) 氏名 山田 真理子

3. 審査結果の要旨（600～650字）

当該学位論文に関し、平成31年2月5日に第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文および関連資料について詳細に検討した。同日に口頭発表の後、第2回学位論文審査会を開催し、慎重に協議の結果、以下の通り判定した。

申請者は本学位論文において、疲労強度向上の目的で冷間加工が適用される大型鍛鋼品のフィレット部を対象とし、表層部と内部の二つの領域に対する残留応力評価技術について検討した。まず、比較的狭隘なフィレット部を非破壊で測定可能なX線応力測定法($\cos\alpha$ 法)に注目し、応力測定精度に対する計測条件の最適化や塑性ひずみ、マクロ偏析の影響等を明らかにした。次に、固有ひずみ法と $\cos\alpha$ 法を融合した内部の残留応力推定法に関する検討を行い、データ収集範囲や固有ひずみ分布関数の有効な取り扱い方法を解明した。また、 $\cos\alpha$ 法はその特長である狭隘部に対する適用性および応力測定の高速度性により固有ひずみ法に最適なデータ収集法となることが判明した。本研究成果は、大型鍛鋼品のフィレット部の表層部および内部両方の残留応力を有効に取得することを可能とし、残留応力を考慮した部品設計技術の確立に貢献するものである。

以上のように、本研究は大型鍛鋼品の強度保証技術の向上に貢献するものであり、工業的価値が高く、博士（工学）の学位に値すると判定した。

4. 審査結果 (1) 判定（いずれかに○印） 合格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博士（工学）