

2次元検出器による溶接金属の応力評価

Fundamental Study on Stress Evaluation of Welded Metal using 2-Dimensional Detector

鈴木賢治¹⁾ 長谷川太一¹⁾ 小林真季子¹⁾ 西川 聡²⁾ 菖蒲敬久³⁾

Suzuki KENJI Taichi HASEGAWA Makiko KOBAYASHI Satoru NISHIKAWA Takahisa SHOBU

¹⁾新潟大学 ²⁾発電設備技術検査協会 ³⁾原子力機構

(要約 2～3行)

まず、S45C 材に既知の応力を負荷して IP によるひずみ測定の精度を実証した。粗大粒 SUS316L の測定では、個々の結晶の弾性挙動の平均は、マクロの弾性挙動に近いことがわかった。スパイラルスリットによる溶接金属の内部測定を試みたところ結晶粒による表面効果があった。

キーワード：残留応力，2次元検出器，粗大粒，高エネルギー放射光，溶接金属

1. 目的

溶接金属は、粗大かつ集合組織を持つために X 線による応力評価の困難な対象である。しかし、原子力発電設備の応力腐食割れ対策として、オーステナイト系ステンレスやニッケル基溶接金属の応力評価を避けて通ることはできない。そのため、従来の回折計を利用したひずみ測定から、2次元検出器(IP)を利用したひずみ評価を確立する必要がある。

本実験では、オーステナイト系ステンレスやニッケル基溶接金属を対象に IP によるひずみ評価を行うための基礎となる実験を行う。

- 1) 高エネルギー放射光 X 線回折の IP 測定がひずみ測定に適した精度を持つか、またそれを実現するための解析方法を見つけること。
- 2) IP による粗大粒のひずみ測定の精度評価および粗大粒の弾性変形挙動の IP による観察。
- 3) 内部残留応力測定のために開発したスパイラルスリットを溶接金属に適用し、内部測定における応力評価の課題を明らかにすること。

2. 方法

BL22XU において波長 69keV 相当の高エネルギー放射光を用いて透過法による回折像を IP にて測定した。その回折角度のシフトから格子面間隔を求め、試験片のひずみを測定した。放射光ビーム寸法は、 $0.2 \times 0.2 \text{ mm}^2$ とした。

最初に、細粒の S45C の板厚 2mm の平板試験片を試作した油圧引張試験器にかけ、引張負荷・除荷過程のその場測定を行った。図 1 にその様子を示す。両端の油圧ピストンにより、最大荷重 10000N

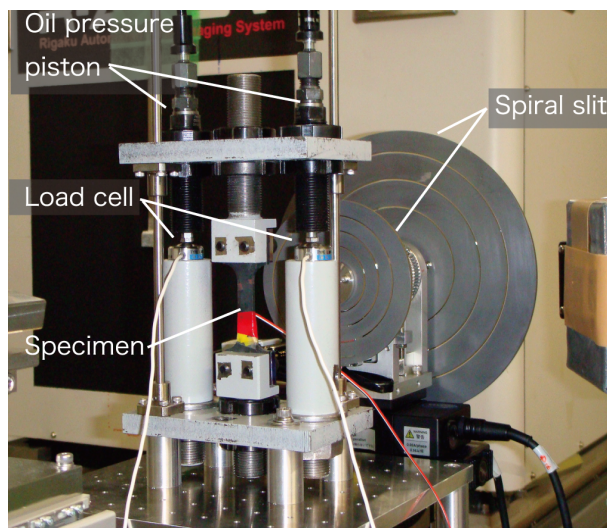


図 1 油圧引張試験機に装着した S45C 平板試験片。

を試験片に負荷することが可能である。油圧駆動は、ハッチの外から手動にて制御した。各負荷ステップにおいて、荷重は油圧ピストンと直列に配置した荷重変換器から測定し、機械的ひずみは試験片に貼り付けたひずみゲージにより計測した。回折の IP による測定は、BL22XU の IP 装置を利用した。IP 像の解析は winpip を利用した。

次に、S45C と同様の実験条件にて板厚 2mm のオーステナイト系ステンレス鋼 SUSF316L の試験片の引張、除荷過程をその場測定した。本試料は粒径 $170\mu\text{m}$ の粗大粒であるため、S45C のような連続環と異なり、2次元検出器の利点を生かした回折スポットによる測定を実行すると共に、各粒の弾性挙動を測定した。

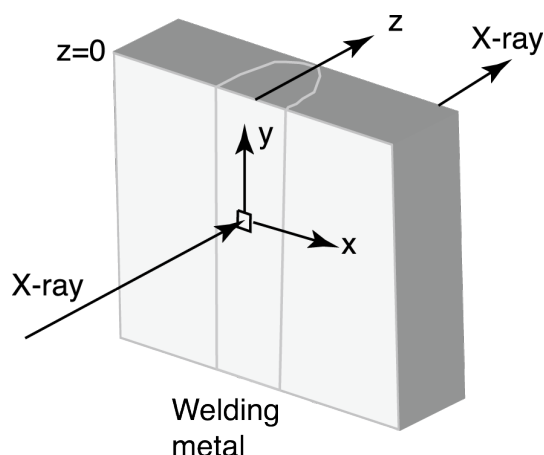


図2 溶接試験片のひずみ測定

最後に、Ni基溶接材の残留応力測定分布を試みた。図2に示すように試験片は板厚 12mm、幅 120mm の正方形の SUS316L の母材とし、その中央に先端曲率半径 5R、 30° 、深さ 10mm の開先加工をした。 7° の逆ひずみを付与した後、TIG 溶接を施した。溶接材料は、JIS Z3334 YNiCr-3 (Inconel 82 相当)、ワイヤー径 1.2mm を用いて 1 層 1 パスで 6 層まで積層した。溶接後、板厚 10mm になるように研削し、最終的には、高さ 90mm、幅 95mm、板厚 10mm にした。本報告では、溶接したままの試験片を AW 材、溶接後に 1173K、1hr の炉冷した試験片を SR 材とする。自動試料ステージに試料を載せ、溶接面から板厚方向に移動するたびに IP による回折像測定を行った。

材料内部を透過した X 線は表面から裏面までの回折がすべて IP に計測されると板厚方向の空間分

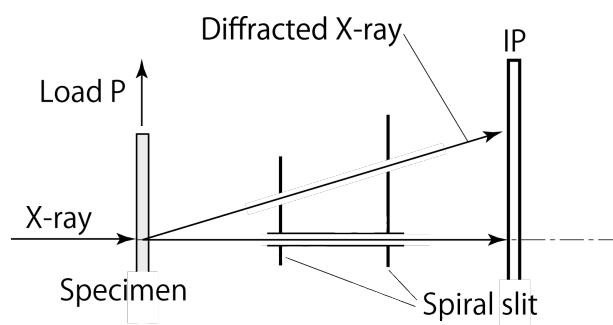


図3 スパイラルスリット概念図

解能が得られない。本実験ではスパイラルスリットを用いて透過 X 線からの回折領域を制限してゲージ体積を作る工夫を検討した。図3にスパイラルスリットの概念図を示す。IP 面のあらゆる位置が、図中の 2 枚のスリットにより試料内の同一焦点に対応する。これにより空間分解能を上げることができる。

3. 研究成果

3. 1 S 4 5 C の測定

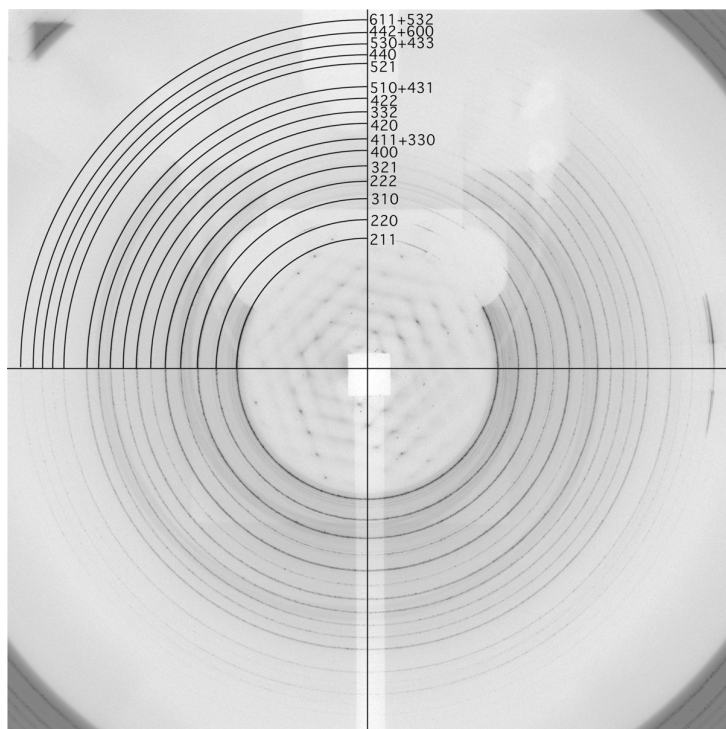
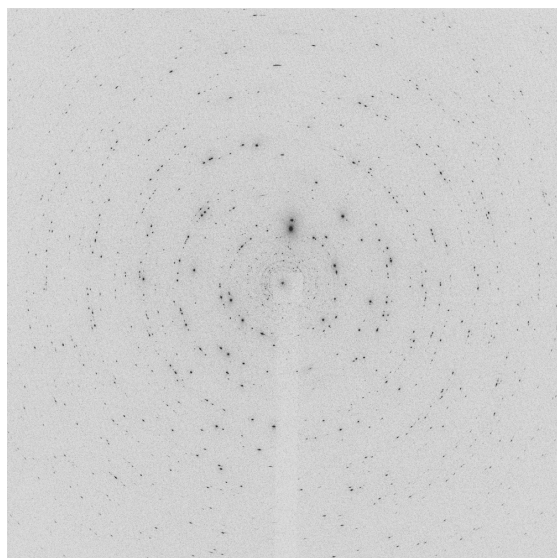


図4 S45Cのスパイラル
スリットを用いたIP像

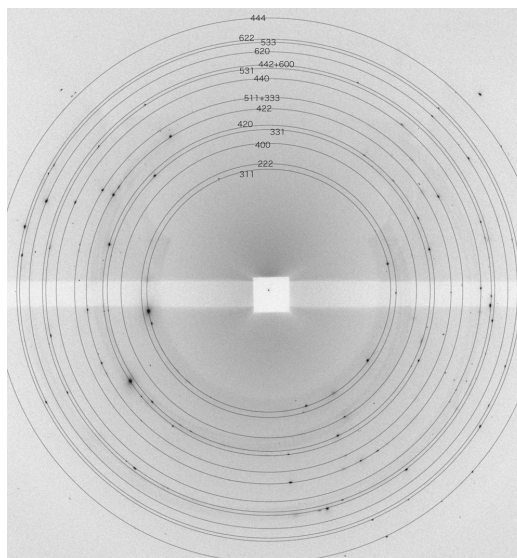
図4にS45CのIPで測定した回折像を示す．S45Cは細粒のため回折環は連続となっている．スパイラルスリットの支持部などの装置の影が図中の上側に見える．得られた各回折環の指数付けを図に示した．これらの各回折を利用して格子面間隔 d を測定した．負荷0の時の d を無ひずみの格子面間隔として各負荷のひずみを求めた．なお，格子面間隔では各回折面の結果を同一に扱う上で不便であるので，すべて格子面間隔 d を格子定数 a に変換して扱った．

3. 2 SUSF316Lの測定

SUSF316LのIP像を図5に示す．図5(a)はスパイラルスリットなしの透過像であり，(b)はスパイラルスリットをつけた場合のIP像である．S45Cのような細粒と異なり，粗大粒によるスポット環が明瞭となる．また，スパイラルスリットにより空間分解能が向上した結果，回折する結晶粒の数も減少するので，(b)の回折スポットの数が(a)に比較して少なくなっている．



(a) スパイラルスリットなし



(b) スパイラルスリットあり

図5 SUSF316LのIP像

回折スポットが減少するためにゴニオメータでは測定できない粗大粒でも，IP であれば測定が可能となり，粗大粒や溶接金属のひずみ測定の実現可能性が期待できる．

3. 3 Ni 基合金材の溶接部の IP 測定

図 6 に SR 材の透過像を示す．高エネルギー放射光の挿入光源を利用すれば，厚さ 10mm の板を透過して IP イメージが可能であることが確認できる．このことは，IP を用いて溶接部の残留応力解析が可能であることを示す重要な成果である．スパイラルスリットにより深さ方向の空間分解能を向上させることで，内部方向の残留応力分布を測定するが，粗大粒から得られるひずみについて検討する必要がある．

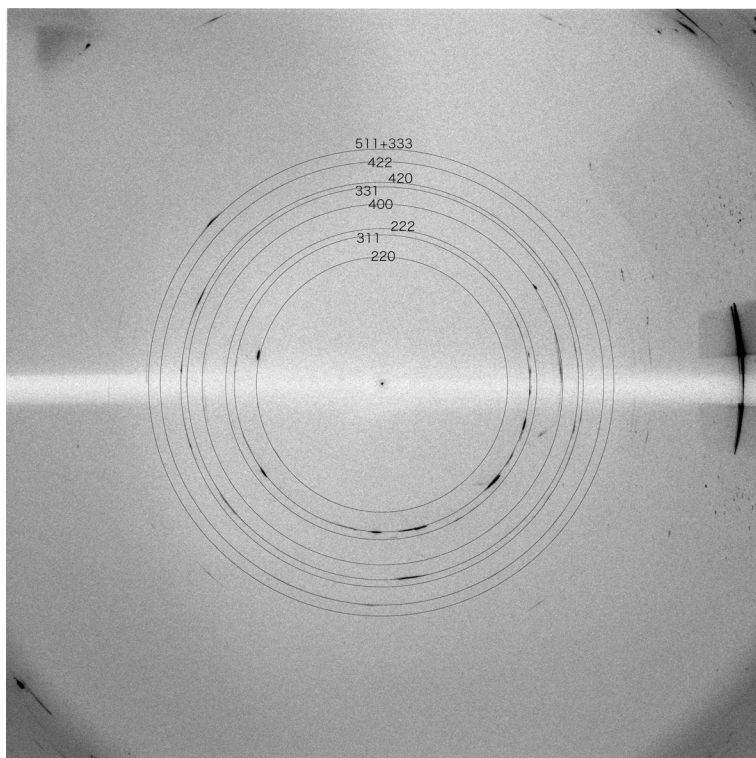


図 6 Ni 基溶接部の IP 像(SR)

4. 結論・考察

4. 1 IP による応力測定の精度の実証試験

負荷ひずみ ε_A の増加に伴う格子定数 a_{hkl} の変化を図 7 の左図に示す．回折面による格子定数に差はあるが，機械的負荷ひずみの増加に伴い，格子定数 a_{hkl} が増加しており，引張変形の弾性挙動を IP により測定することが可能である．X 線で捉える変形挙動は，あくまでも弾性ひずみであり，塑性ひずみを捉えることはできない．無ひずみの格子定数 a_0 は

$$d_{hkl} = a_0 \frac{1}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

の関係から， d_0 と $(h^2 + k^2 + l^2)^{1/2}$ の図を作成して傾きを計算し，無ひずみの格子定数 $a_0 = 0.2853298 \text{ nm}$ を得た．各面から測定した格子定数の平均格子定数を a とし，ひずみ ε は，

$$\varepsilon = \frac{a - a_0}{a_0}$$

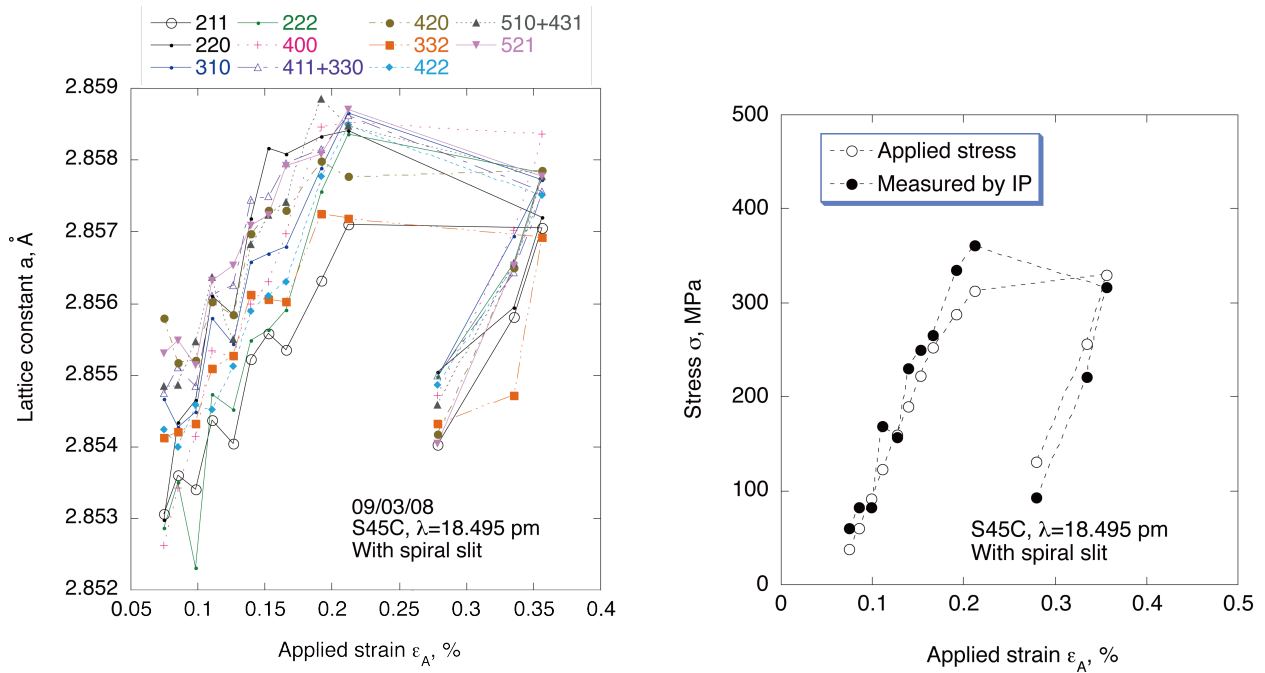


図7 S45C平板試験片のIPによる応力測定

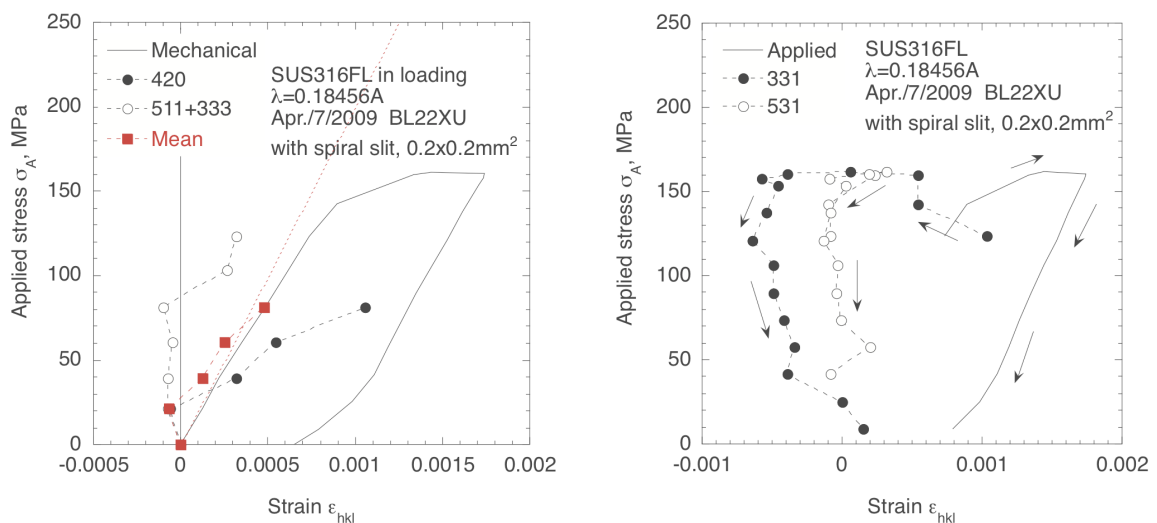
から計算した。そのひずみ ε に α -Fe の Kroner モデル¹⁾による機械的ヤング率 $E_m=211.4$ GPa を掛けて、測定された応力 σ を計算した。Kroner モデルに用いた単結晶の値は文献値²⁾を用いた。その結果を図7の右図に示す。図中に各格子面から求めた応力値に加えロードセルから測定した機械的応力も合わせて示した。

以上の実験から、IPにより測定された回折イメージから応力を測定することは、十分可能であることが実証された。また、各格子面から回折した格子定数の平均値からのひずみは機械的応力と同等である。

4.2 SUSF316Lのひずみ測定

図8に負荷応力に伴い測定したX線ひずみ ε_{hkl} を示す。図(a)が負荷過程、図(b)が除荷過程である。それぞれの図には、機械的ひずみの関係も合わせて示した。

負荷過程のX線ひずみ ε_{hkl} と負荷応力 σ_A との関係には、フックの法則の関係は全く見られず、回折面ごと



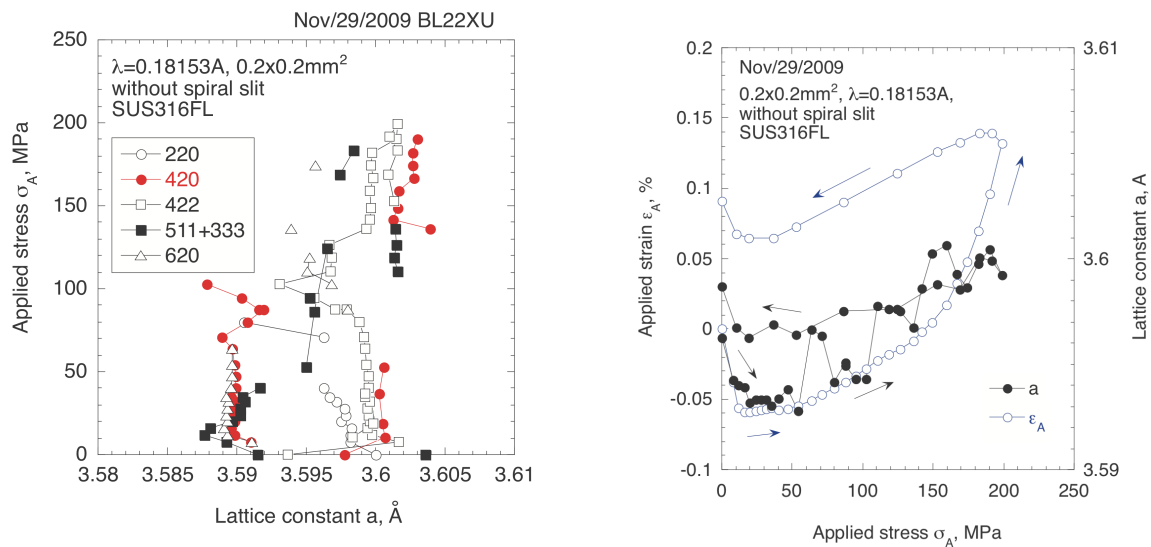
(a) 負荷過程

(b) 除荷過程

図8 SUSF316LのIPによる応力測定

にばらばらな挙動を示した。420 回折と 511+333 回折の平均を図(a)に示すと、やや機械的弾性定数の関係に近くなる。しかし、図(b)の除荷過程については、機械的な関係と全く異なる挙動を示している。いずれにしても、スパイラルスリットの高空間分解能および粗大粒の影響から回折データが少なくなり、平均的な弾性挙動を得ていない状態であり、機械的な挙動を見つけることはできない。つまり、個々の結晶粒は機械的な弾性変形挙動をしているのではなく、各結晶粒の境界の影響を受けて変形している。実際の結晶粒単位の変形挙動は、巨視的な連続体力学の関係と異なっており、それらの平均的な値が機械的挙動となることを示唆している。

前述の結果から粗大粒の挙動が正確に測定されているのか、否かを判断することは困難であるので、同一試験片を用いて、スパイラルスリットなしで測定し、より多くの回折スポットを測定して、粗大結晶粒の弾性挙動について再度検討を加えることを試みた。図 5 に比較したようにスパイラルスリットを使用しない方が、多数の回折スポットを得ることかできる。SUSF316L は平板試験片なので、試験片の板厚とゲージ体積の厚さはほぼ同等なので、スリットによる空間分解能と板厚が同じなので、ひずみ測定については、スリットの有無は大きく影響しない。



(a) 各回折の格子定数の変化

(b) 平均した格子定数の変化

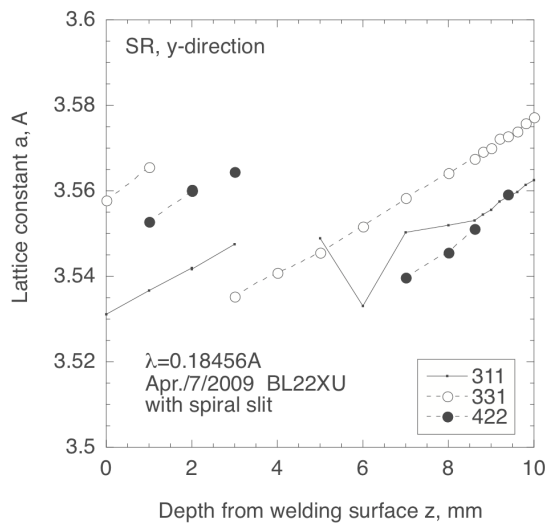
図9 SUSF316Lの負荷応力のIPによる測定（スパイラルスリットなし）

図 9(a)にスリットのない場合の負荷応力 σ_A による格子定数 a の変化を示す。測定データは増えたが、格子定数 a の変化挙動は個々ばらばらな動きをし、マクロな挙動とかけ離れている。ただし、この負荷実験に際しては、負荷ジグの調整が悪くて軸のずれが生じ、試験片に曲げモードの変形も加わっていた。

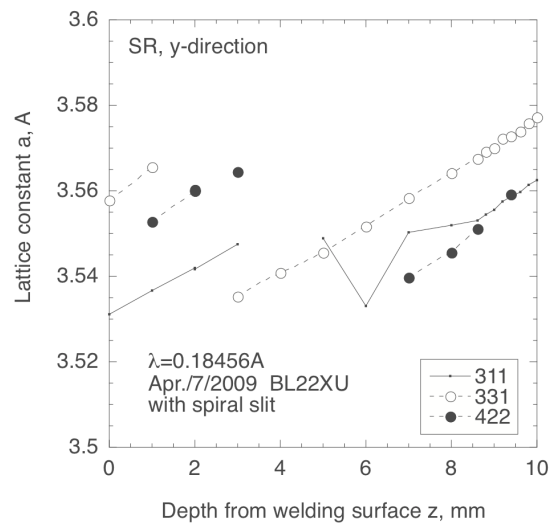
負荷応力 σ_A に対する機械的ひずみ ϵ_A および格子定数の平均の a を求めた結果を図 9(b)に示す。軸のずれでの影響で負荷に伴う機械的ひずみの変化がきれいなフックの法則からずれていることが一目瞭然である。IP で測定した格子定数 a の変化も塑性変形部分を考慮すると、IP で測定した各回折面による平均の格子定数の変化は、機械的ひずみの変化挙動と良く対応している。このことから、粗大粒の変化挙動を IP でとらえて、測定することは可能である。ただし、空間分解能があがったときに測定されるのは、個々の結晶粒の変化であり、機械的応力を測定することはできない。機械的応力を測定する場合には、本実験のようにスパイラルスリットを用いずに、ある程度の結晶数を確保して IP 測定する必要がある。

4. 3 Ni 基溶接部の内部応力の測定

z ステージを移動させながら IP にて溶接材 SR および AW の回折を測定した。 x および y の 2 方向について可能な限り回折を測定して格子定数 a を計算した結果を示す。図 10 は SR 材の Ni 溶接部の深さ方向の格子定数 a の分布である。また、図 11 は AW 材の Ni 溶接部の深さ方向の格子定数 a の分布である。ひずみスキャンにより、溶接表面 ($z=0$ mm) から板厚方向にゲージ体積の深さ z が増加するに従い、各結晶方位の回折が現れては、格子定数が大きくなり、やがてゲージ体積から回折が消え、また回折が現れることを繰り返しているようにも見える。

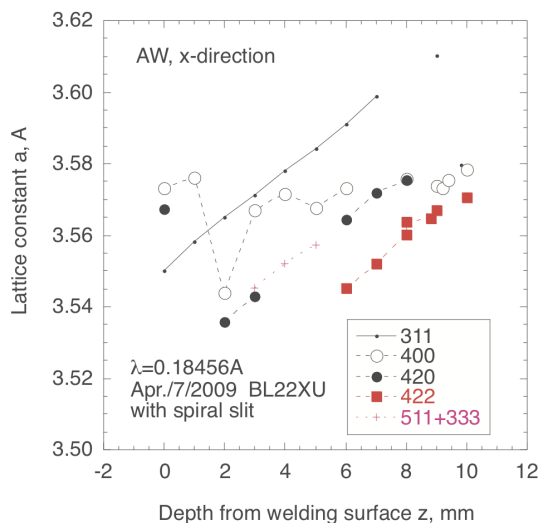


(a) x 方向

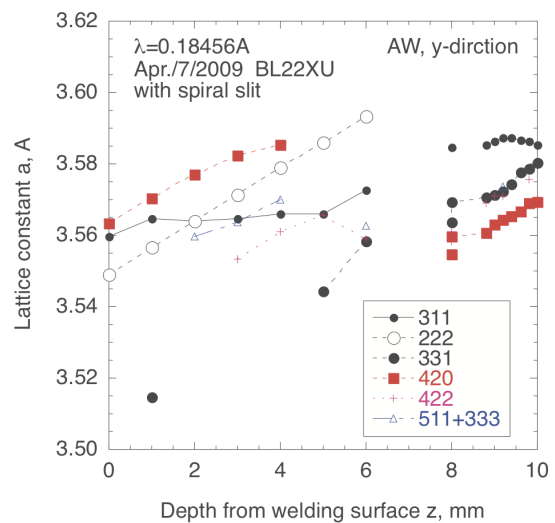


(b) y 方向

図 10 SR材(ひずみ除去焼鈍材)の IP によるひずみスキャンニング法



(a) x 方向



(b) y 方向

図 11 AW材(溶接したまま)の IP によるひずみスキャンニング法

このような周期的に格子定数が変化している挙動は、回折面に依存せず、ゲージのスキャンニングに伴う現象と考えられる。例えば、図 12 に示すようにゲージ体積が溶接表面から板厚方向に移動する際に、回折に寄与する粗大粒が A で現れる。これは、ゲージ体積の右側で回折している。z ステージをスキャンニングすると粗大粒は図中の左側へと移動し、B の位置でゲージから外れ始める。このとき、スパイラルスリットの発散を考慮すると図に示すように、スキャンニングに伴いゲージ体積が深くなるに従い、回折角 2θ が高角から底角側に移動する。

これを深さ z と回折角との関係、または格子面間隔との関係で考えると図 12 の右側の図に相当する。結晶粒の移動が、図の右側に示すように回折角、格子定数の変化の繰り返しとなって現れる。このような現象がゲージ体積と試料表面で問題になる場合は、表面効果(surface aberration effect)と言われ、測定における問題として研究されてきた³⁾。スパイラルスリットなどを利用する場合は、表面とゲージ体積の相互作用でなく、ここでは粗大結晶粒とゲージ体積の相互作用が表面効果と同様に干渉し、粗大粒がゲージ体積に現れては格子定数がゲージ移動に対して見かけ上、大きくなる変化を示し、やがて粗大粒がゲージ体積から消えて行くことを繰り返す。

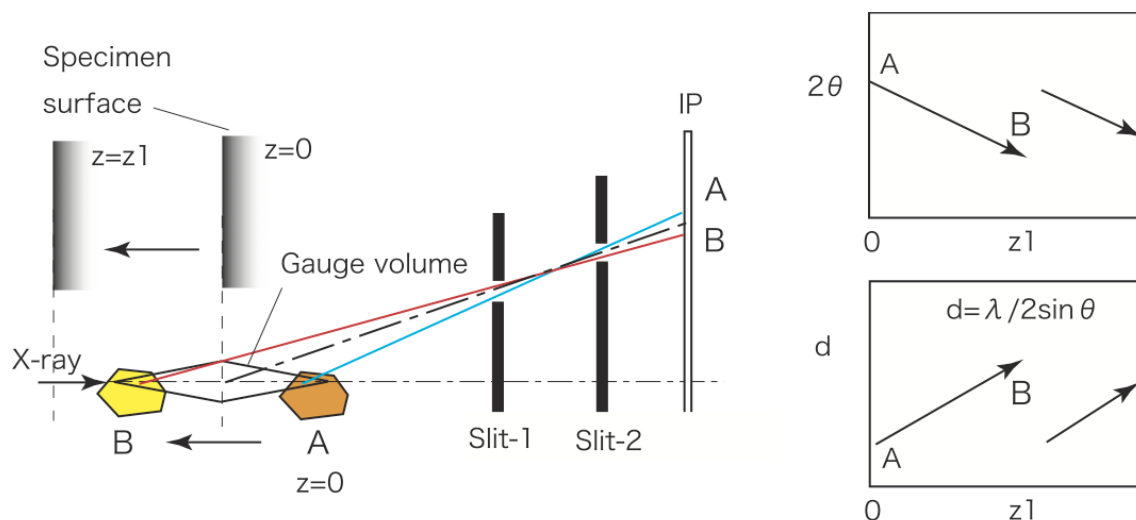


図 1 2 IP 歪みスキャンニングにおける粗大粒による回折中心のずれ（表面効果）

このような表面効果を少しでも補正するためには、揺動が役立つものと考えられる．散乱ベクトルを軸に回転をすると回折に対し対象となり，正確に表面効果を補正することも可能と思われる．その場合は，2次元検出器はあらゆる回折角が測定されるので，回転させながら ω および ϕ 軸での揺動をする必要があり，やや複雑な軸操作を要する．

5. 引用(参照)文献等

- 1) E. Kroner, Berechnung der elastischen Konstanten des Vierkristalls aus den Konstanten des Einkristalls, Zeitschrift Physik, Vol. 151, pp. 504-518 (1958).
- 2) A.E. Load, Jr and D.N. Beshers, J. Appl. Phys., Vol. 36, 1620 (1965).
- 3) P. J. Withers, M. Preuss, P. J. Webster, B. J. Hughes and A. M. Krosusky, Materials Science Forum, Vol. 404-407, 1 (2002).