

2次元検出器による内部応力評価技術の開発 Development of Internal Stress Evaluation Technology using Area Detector with High Performance Slit System

鈴木 賢治^a, 菖蒲 敬久^b, 西川 聡^c, 高木 愛夫^d, 田中 良彦^d
Kenji Suzuki^a, Takahisa Shobu^b, Satoru Nishikawa^c, Yoshio Takagi^d and Yoshihiko Tanaka^d

^a新潟大学, ^b日本原子力研究開発機構, ^c発電設備技術検査協会, ^d東京電力

^aNiigata University

^bJapan Atomic Energy Agency

^cJapan Power Engineering and Inspection Corporation

^dTokyo Electric Power Company

2次元検出器(IP: Imaging plate)による内部応力評価を目的に、回転スリットシステム・インボリュートスリットを開発・試作した。本スリットシステムによる内部応力分布の評価について基礎的実験を実施した。空間分解能はスリット装置により向上することができた。しかし、粗大粒の回折中心の移動により回折角が変化する方が、ひずみによる回折角の変化よりも大きかった。

キーワード： インボリュートスリット、イメージングプレート、残留応力

背景と研究目的：

応力腐食割れ(SCC)は材料因子に支配され、溶接の熱影響部(HAZ: heat affected zone)に沿ってき裂進展する。その改善として、耐 SCC の優れた SUS316L が開発され、原子力発電設備に使用されている。しかし、新たな問題も生じている。HAZ に沿って進展した SCC き裂が、今度は残留応力に支配され進展し、溶接金属内にき裂が入り込み、超音波によるき裂寸法の非破壊検査が困難となっている。このような事例は、オーステナイト系ステンレス鋼に限らず、Ni 基溶接部でも同様な問題が生じている。今後、原子力発電設備の経年化時代において、SCC き裂進展の予測は重要となる^[1]。そのために、溶接内部の残留応力を実測し、数値計算結果と比較・検討することが必要である。

溶接部は粗大粒かつ集合組織であり、これまで残留応力測定が測定困難な対象であった。それを解決するには従来利用されてきた 0次元検出器を離れ、スポット回折環を 2次元検出器で測定する必要がある。しかし、バルク材では透過 X線ビームの表面から裏面までの透過領域からの全回折線が 2次元検出器に測定され、結果としてひずみ測定の精度は期待できない。

したがって、回折装置のダブルスリットのように回折中心(ゲージ体積)の X線のみを取り出すスリット光学系の技術開発が不可欠である。2次元検出用スリットシステムを開発することは、応力評価技術の画期的進歩となり、原子力産業界をはじめ多くの分野で、溶接部の残留応力測定が実現できる。

このような目的のスリット装置の開発は、これまでいくつかの例はあるが^[2]、有効な装置や手法はいまだに確立していない。本課題では、2次元検出器のための高空間分解能を実現する独自の光学スリット、インボリュートスリットを開発し、応力評価技術のための基礎的実験を行い、その有効性、問題点の検証する。

実験：

試作したインボリュートスリット装置の外観を図 1 (a)に示す。スリットの回転中心と X線光軸を合わせるために、インボリュートスリットを 5軸ステージの上に設置した。インボリュートスリットの光軸合わせのために、インボリュートスリットの回転軸には、直径 0.2 mm の円孔が空いている。これと 4象限スリット 0.5×0.5 mm²の入射ビームとの光軸を合わせようとしたが困難であった。入射ビーム寸法を 1×1 mm²に拡大して光軸合わせを完了した。光軸合わせの効率化のために、後日、インボリュートスリットの中心孔を直径 1 mm に改良した。その結果、0.2×0.2 mm²

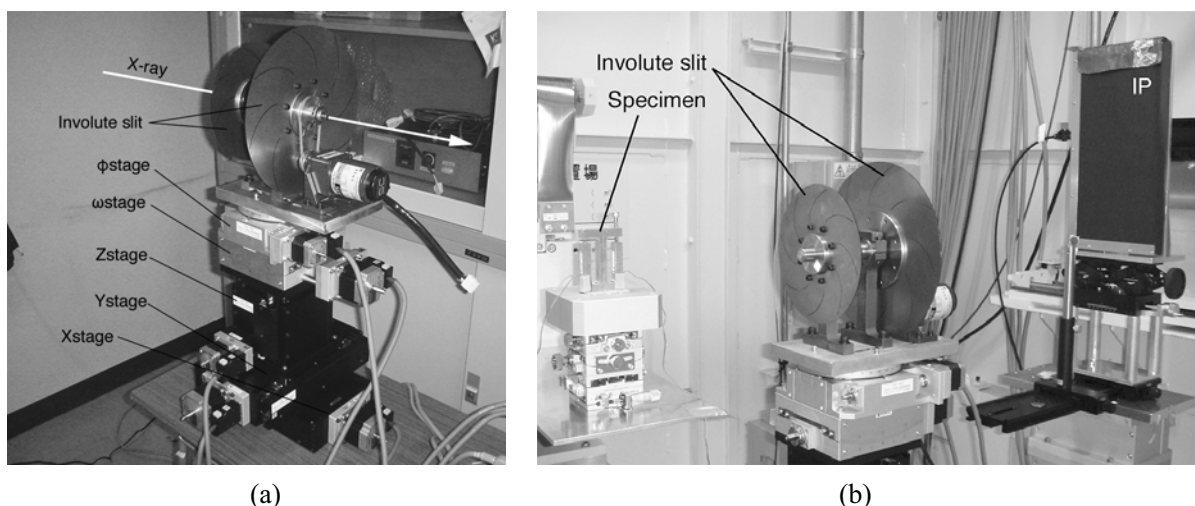


図1. インボリュートスリットを利用した二次元検出器(IP)による回折の測定

(a) 5軸制御ステージに搭載したインボリュートスリット装置, (b) 試験片の回折をインボリュートスリットと2次元検出器(IP)で測定している様子.

のX線ビームに対しても、容易に位置決めができるようになった。インボリュートスリットは、ベルトドライブでモータとつながっており、回転することができる。回転数は、ハッチ外から 0 ~1 Hz の範囲で制御できる。

図1(b)に示すように、左方向から来た入射X線は試験片を透過して、インボリュートスリットの中心孔を通り、IPの中心に到達する。一方、試験片で回折したX線は入射側の第一スリットを通過し、かつ後流の第二スリットを通過したものだけがIPに到達する。この2枚のスリットは、IPの各位置が回折中心を向くように構成されている。インボリュートスリットは回転しながらIPに結像するため、IPの全面に回折中心からのX線だけが測定される。

実験装置の構成を図2に示す。図のAl試験片にネジにより既知の曲げ負荷を与え、試料をスキヤニングさせて、応力分布を測定するようにした。曲げ負荷試験片の材料はアルミニウムA7075相当、透過部の厚さ10mm、幅15mmとした。

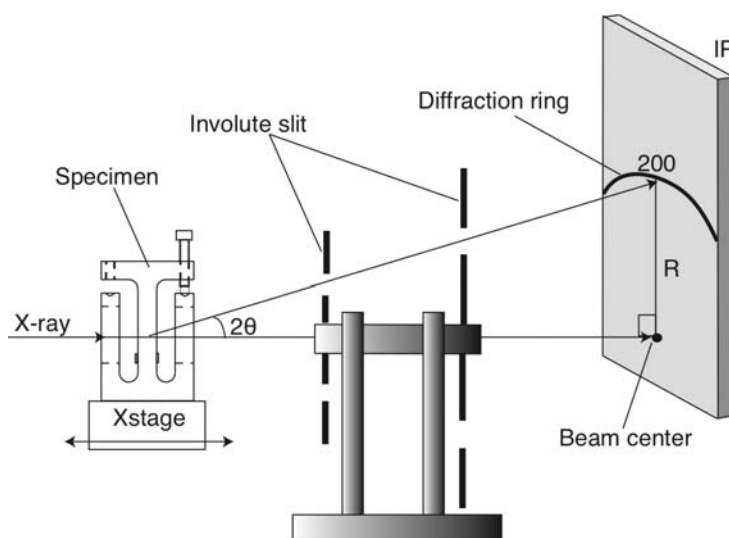


図2. 試験片からの回折をインボリュートにより測定

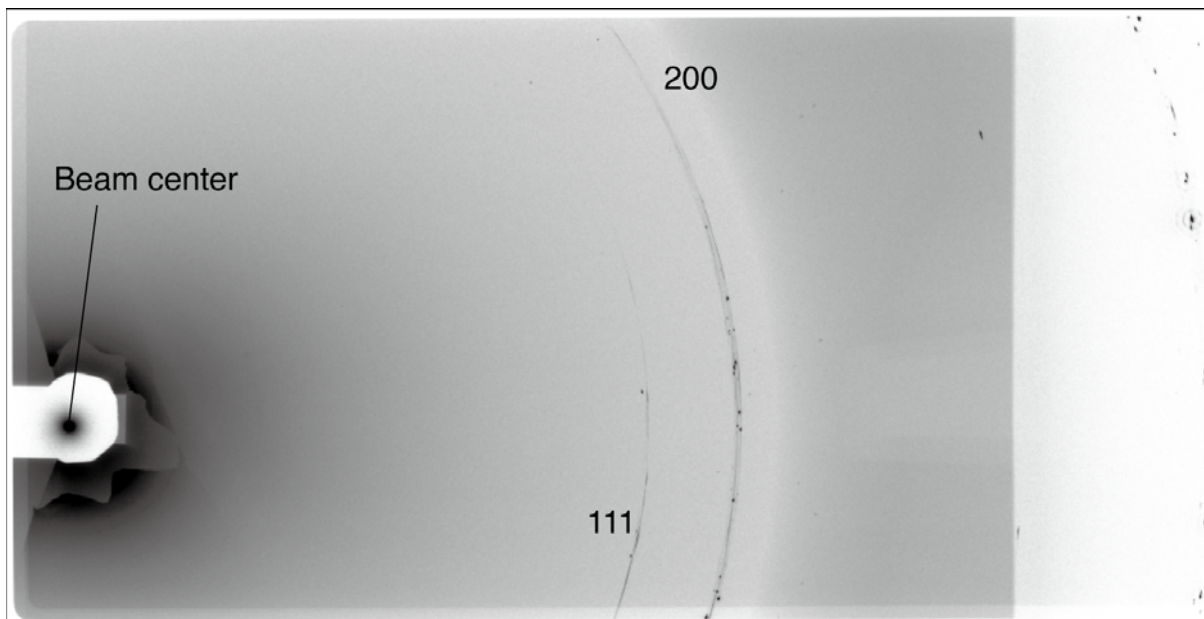


図3. インボリュートスリットを用いて撮影した Al 試験片の 2 次元回折像

検出器は IP ($200 \times 400 \text{ mm}^2$) を利用し、その解像度は、 $50 \mu\text{m}$ である。X 線の波長エネルギーは 30 keV を使用した。

結果および考察：

セリアの回折を IP で撮影し、光学中心と IP との距離 L_0 などを決定し、次に入射ビームとインボリュートスリットの光学系を 5 軸ステージにてあわせた。次に、セリアから Al 試験片に変更したところ強度不足のため、入射ビーム寸法を $0.2 \times 0.2 \text{ mm}^2$ から $1 \times 1 \text{ mm}^2$ へ拡大した。この条件でスリットの焦点と回折中心を合わせるために、インボリュートスリットの位置を光軸方向にスキャンすることで、Al の 200 回折を検出することができた。ただし、111 および 220 回折が検出されないことから、スリットの焦点の調整が不十分であった。後日、レーザー光をスリット孔の後方から焦点に置いた鋼球に当て、鋼球からの反射光を用いてスリットの調整を行った。その結果、図 3 に示すように 111 回折、200 回折および 220 回折も測定できた。

インボリュートスリットを用いて試験片ステージを移動(scanning)して 200 回折を IP にて逐次

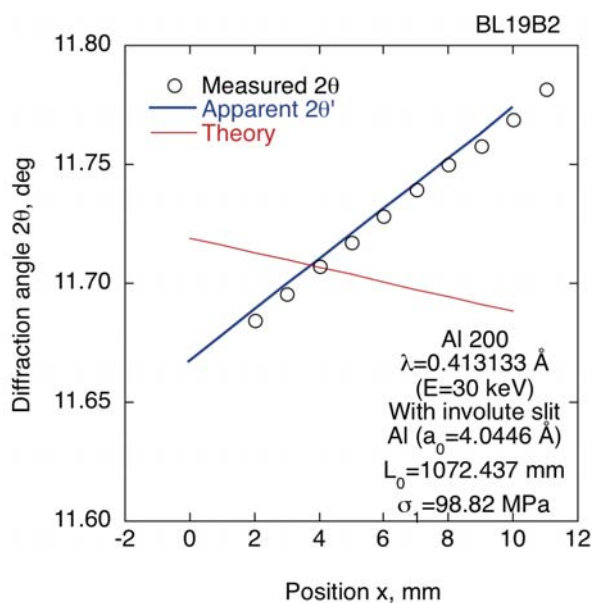


図4. スキャンニングに伴う回折角の変化

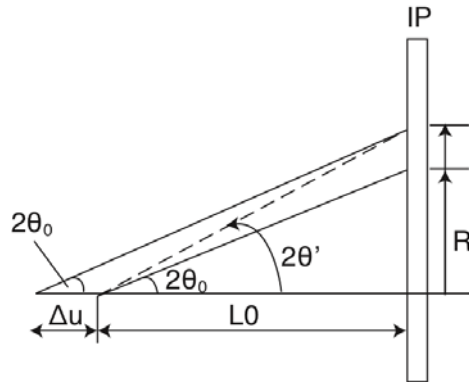


図 5. インポリュースリットの誤差要因

測定した。試験片は引張側で 98.8 MPa の既知の曲げ応力を負荷して測定した。そのスキヤニングにより、圧縮から引張りの曲げひずみを測定した。その結果を図 4 に示す。測定結果 (○) は、きれいな直線関係が得られたが、既知のひずみ分布(Theory)よりも大きなひずみが測定され、その傾向も異なった。

この原因は、負荷応力による格子面のひずみ(回折角)の変化よりもスキヤニングによる回折角の変化が大きいことに原因がある。測定された回折はスポット状であり、入射 X 線とスリットで構成されるゲージ体積全体からの回折ではない。回折を起こす結晶の X 線光学の中心は、スキヤニングによりゲージの中を移動する。図 5 のゲージ中心 L_0 から Δu だけずれたときに回折角 $2\theta_0$ は L_0 から計算される見かけの回折角として計測されてしまう。スキヤニングによる回折中心の移動が回折角を変化させ、それがひずみによる回折角の変化よりも大きなオーダーとなる。具体的には、図 4 の太線(apparent)で示す結果が計算された見かけの回折角である。実験結果と見かけの回折角は、よく対応している。

スキヤニングしたとき、個々の粗大粒の実際の回折位置がゲージ体積内の中で移動することをどのように理解すべきか、どのように対応すれば、ひずみ評価が可能になるかを検討する必要がある。

今後の課題：

粗大粒の応力評価のためには、2次元検出器によるひずみ測定は不可欠である。今後の課題としては、

1. スリットのコリメーションをより厳しくし、ゲージ体積を小さくすることで、ゲージ体積中心と回折中心を一致させる。
2. 試料を散乱ベクトル周りに回転させゲージ中心と回折中心が一致するようにする。
3. スキヤニングに伴いスリット内を移動するスポットの回折強度の変化を追うことで回折位置を補正する。

などの方法で解決することが考えられる。

1 については、コリメーションが厳しくなり、回折スポットが得られないので、あまり期待はできない。2 については、回転により回折強度が低下するために長い時間を必要とする。3 については、基礎的な実験を通して動的な回折スポットの挙動を検討し、有効かつ精度の高い手法を見つけ出し、的確に検証する必要がある。いずれにしても、基礎的技術開発には十分な実験態勢と地道な努力が必要である。

参考文献：

- [1] 鈴木賢治, 原子力発電設備と残留応力, 第 158 回 X 線材料強度部門委員会研究討論会資料, pp. 1-6 (2009), 日本材料学会.
- [2] R. V. Martines, Residual stress analysis by monochromatic high-energy X-ray, Neutron and Synchrotron Radiation in Engineering Material Science, ed. by W. Reimers, A.R. Pyzalla, A. Schreyer and H. Clemens, pp. 177-194 (2008), Wiley-VCH.