

放射光白色 X 線による内部き裂先端近傍の イメージングとひずみマッピングの検討[†]

柴 野 純 一* 梶 原 堅太郎** 桐 山 幸 治***
菖 蒲 敬 久**** 鈴 木 賢 治***** 西 村 優*****
三 浦 節 男* 小 林 道 明*

Study on Imaging and Strain Mapping in the Vicinity of Internal Crack Tip Using Synchrotron White X-Ray

by

Jun-ichi SHIBANO *, Kentaro KAJIWARA **, Kouji KIRIYAMA ***, Takahisa SHOBU ****,
Kenji SUZUKI ***** , Suguru NISHIMURA ***** , Setsuo MIURA * and Michiaki KOBAYASHI *

An imaging and a strain mapping in the vicinity of a crack tip in material were investigated using a high energy white X-ray obtained from BL28B2 beam line at SPring-8 in Japan. Low-alloy and high-tensile steel (JIS G3128 SHY685) was used as a specimen prepared in the G-type geometry. A fatigue crack was introduced into the specimen by a cyclic loading. The imaging of the crack in the specimen was carried out by using the X-ray CCD camera that can detect the X-ray transmitted through the specimen. To measure the strain, the synchrotron white X-ray beam, which had a height of 80 μ m and a width of 300 μ m, was incident on the specimen with the Bragg angle θ of 5 degrees using the energy dispersive X-ray diffraction technique. The internal strain in the vicinity of the crack tip was mapped out by scanning the irradiated X-ray position around it. As the results, the imaging of the crack, with about 1mm length, in the specimen under the loading of crack opening was practicable by using the synchrotron white X-ray. The map of the internal strain near the crack tip of the steel of 5mm thickness could be obtained using the white X-ray with energy ranging from 50keV to 150keV. The plastic region estimated from the distribution of the FWHM of diffracted X-ray profile almost agreed with the theoretical value calculated by fracture mechanics. It was confirmed that the synchrotron white X-ray is useful for the imaging of the internal crack and the strain mapping near it.

Key words : Imaging, Strain mapping, Synchrotron radiation, High energy white X-ray, Internal strain, Energy dispersive method

1 緒 言

さまざまな構造物の部材に生ずるき裂は強度信頼性を揺るがす重大な欠陥となるため、その発生原因や進展メカニズムの解明と対策の確立が急がれている。例えば応力腐食割れ (SCC) の発生原因の一つに溶接部近傍の残留応力が指摘されており、その低減や除去に関するさまざまな研究が展開されている。表面引張残留応力低減の方策の一つとしてサンドブラストがあるが、その処理に伴う表層近傍内部における残留応力の再分布を正確に評価できなければ有効な処理ができない。材料内部の微小領域の応力分布を非破壊で高精度に測定する手法の開発が産業界から強く望まれている。材料内部の応力測定は中性子や放射光単色 X 線により精力的に行われているが、き裂先端近傍の応力については表面における測定が

主となっている^{1), 2)}。しかし、き裂などの内部欠陥近傍の応力を測定するためには、まず、材料深部の欠陥の位置を非破壊で正確に検出する必要がある。その近傍の応力は複雑かつ急激に変化していることが予想されるので、正確に評価するためには応力の分布を細かく測定する方法を確立しなければならない。

著者らはこれまでに、大型放射光施設 SPring-8 において得られる 50keV ~ 150keV の高エネルギー白色 X 線を用いて、材料の内部ひずみを測定するための基礎的検討を行った^{3), 4)}。その結果、高エネルギー白色 X 線は、特性 X 線では困難な数 mm レベルの深さまで侵入でき、中性子では回折強度の問題から時間的制約の大きい数 100 μ m オーダー領域のひずみ測定が可能ながわかった。このことから、高エネルギー白色 X 線による測定は、特性

[†] 原稿受理 平成 19 年 11 月 12 日 Received Nov. 12, 2007 ©2008 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 北見工業大学工学部 〒090-8057 北見市公園町, Dept. of Mech. Eng., Kitami Inst. of Tech., Kouen-cho, Kitami, 090-8507

** (財)高輝度光科学研究センター 〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町, JASRI, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148

*** スプリングエイトサービス(株) 〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町, SPring-8 Service Co., Ltd., Sayo-gun, Hyogo, 679-5148

**** 正 会 員 (独)日本原子力研究開発機構 〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町, JAEA, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148

***** 正 会 員 新潟大学教育人間科学部 〒950-2181 新潟市五十嵐 2 の町, Dept. of Tech. and Living Sci., Niigata Univ., Igarashi-2-no-cho, Niigata, 950-2181

***** 北見工業大学大学院機械システム工学専攻 〒090-8057 北見市公園町, Dept. of Mech. Eng., Kitami Inst. of Tech., Kouen-cho, Kitami, 090-8507

X線測定と中性子測定に対する相補的な役割を担えることが明らかとなった。Croftら⁵⁾は厚さ4mmの鋼板の内部疲労き裂先端近傍のひずみ分布を高エネルギー白色X線により測定し、その可能性を示した。しかしながら、白色X線による材料内部のき裂先端近傍のひずみマッピングについては、まだ十分な検討が行われていない。一方、放射光白色X線トポグラフィなど回折を使ったイメージングは多いが、放射光白色X線による金属材料の透過イメージングについてはコントラスト低下などの問題から著者らの知る限りほとんど行われていない。

本報告では、大型放射光施設 SPring-8 の共用ビームライン BL28B2 において、高エネルギー白色X線を用いた材料内部のき裂先端近傍の透過イメージングとひずみ分布測定の検討を行った。試験片には疲労き裂を導入した梁部（厚さ5mm）を有する溶接用低合金高張力鋼を用いた。X線 CCD カメラによる材料内部き裂のイメージングと、き裂先端近傍に分布するき裂直交方向の内部ひずみの2次元マッピングを行い高エネルギー白色X線の有用性を検討した。

2 実験方法

2.1 試験片

試験片材料には溶接用低合金高張力鋼 WEL-TEN780E (JIS G3128 SHY685) を用いた。結晶粒径は約13 μ mである。引張試験の結果、ヤング率は200GPa、ポアソン比は0.29であった。また、降伏応力は779MPaである。まず、試験片形状を Fig. 1 に示すように G 型に加工し、⁴⁾ 図中左の梁（幅10mm、厚さ5mm）の部分の引張応力側中央にワイヤ放電加工により幅0.33mm、深さ0.3mmのノッチ加工を施した。一連の加工による残留応力を除去するため、Ar 雰囲気熱処理炉に試験片を設置し540℃で1時間保持後炉内徐冷による焼なましを行った。その後、島津 SERVOPULSER を用いて梁の部分に片振り曲げモーメントとして25.2N・mを5Hzの周期で負荷し、繰返し回数123461回でノッチ底から約1mmの疲労き裂を導入した。疲労試験時の引張側公称応力は315MPaである。試験片表面のき裂の光学顕微鏡写真を Fig. 2 に示

す。表面で観察されたノッチ底からの疲労き裂長さは約0.95mmであった。

2.2 内部き裂のイメージング

大型放射光施設 SPring-8 に設置された共用ビームライン BL28B2 を利用し、内部き裂のイメージングには空冷 X 線 CCD カメラ（浜松ホトニクス C4880-10-14A）およびビームモニタ（浜松ホトニクス AA40P）を用いた。このカメラにより得られる画像の画素サイズは縦横共に5.83 μ mであり、画素数は横1000個および縦1018個である。X線 CCD カメラを試験片後方約530mmに設置し、厚さ5mmの鋼板を透過したX線強度の濃淡分布より、内部き裂をイメージングした。測定の様子を Fig. 3 に示す。コントラストが明瞭な最適な画像を得るため、BL28B2 には照射 X 線のエネルギー範囲や強度を調節するための減衰板が試験片の上流側に設置されている。本実験では、減衰板として数種類の金属および厚さについていくつかの組み合わせを試行し、最終的にアルミニウム7mm、銅3mmと鉄1mmを選択した。このとき試験片に照射される白色X線のエネルギーは約50keV以上となる。このエネルギースペクトルはSPECTRA⁶⁾によって算出が可能であり、BL28B2 の WEB サイト (URL: <http://dp6.spring8.or.jp/BL28B2/>) の「紹介」欄で確認できる。

き裂に負荷をかけて開口させた場合と無負荷の場合を撮影した。き裂の開口は、疲労き裂導入時と同じ最大応力値になるように G 型試験片に曲げモーメントを負荷して行った。このとき、梁の圧縮側に貼付したひずみゲージ値は-1550 μ eを示した。撮影時間は1秒から7秒を試みたが、3秒が最も適切であった。

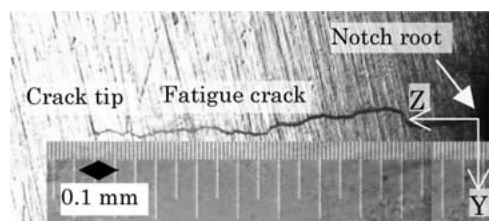


Fig. 2 Fatigue crack observed by optical microscope.

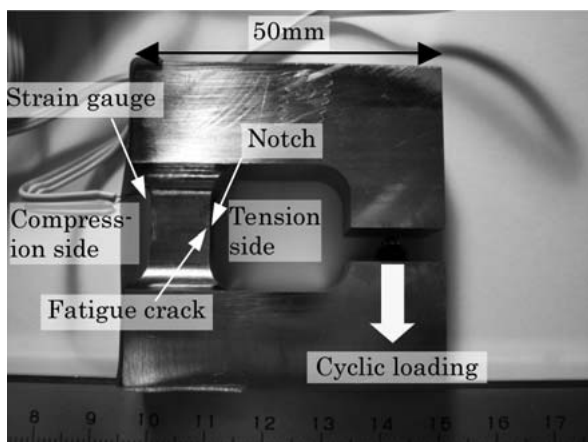


Fig. 1 G-type specimen configuration and loading direction for fatigue test.

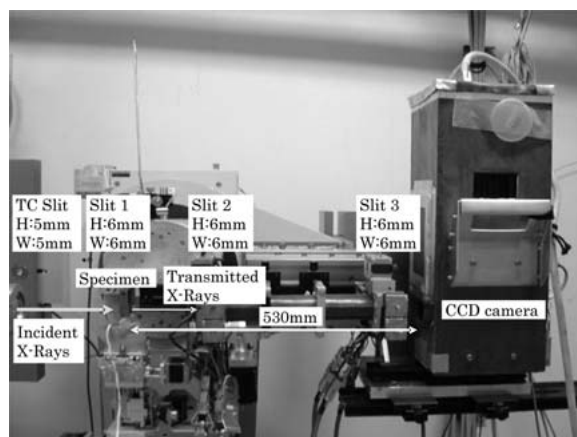


Fig. 3 Experimental setup of imaging using high energy white X-ray at BL28B2 in SPring-8.

2・3 き裂先端近傍のき裂直交方向のひずみ分布測定

イメージングと同様に SPring-8 の共用ビームライン BL28B2 を利用した。測定装置の概観を Fig. 4 に示す。BL28B2 では 28.9keV をピークとするエネルギースペクトルを有する放射光白色 X 線が利用できる。このエネルギースペクトルは先に示した SPECTRA で算出することができ、BL28B2 の WEB サイトでも確認することができる。ひずみの測定では約 50 ~ 150keV の放射光白色 X 線の回折を利用した。検出器には Ge の半導体検出器 (以下 SSD) を用いた。SSD は水平面で横振りとした。検出された X 線エネルギーはマルチチャンネルアナライザー (以下 MCA) によって 4096 チャンネルに弁別される。エネルギー較正式は、測定中に光軸近傍の遮蔽材から得られる鉛の蛍光 X 線 Pb-K α 1 (74.9694keV), Pb-K α 2 (72.8042 keV) と放射性同位元素 Co-57 (122keV) を用いて求め、式 (1) となった。

$$E_n = 0.0539 \times CH + 0.7243 [\text{keV}] \quad (1)$$

ここで、CH は MCA のチャンネルナンバーである。式 (1) から明らかなように、本実験では 1 チャンネルあたりのエネルギー幅は 53.9eV であり、4096 チャンネルで約 221 keV までのエネルギーの弁別が可能となっている。

Fig. 5 に試験片の設置方向と白色 X 線の入射・回折方向およびき裂面をノッチ側上方からみた場合のゲージボリュウムの概略図を示す。ひずみ測定は、利用できるマシンタイムの制約からき裂直交方向 (Fig. 5 の Y 方向) ひずみのみを行った。ひずみ測定においても、き裂を開口させない場合と開口させた場合のひずみ分布を測定した。放射光白色 X 線の照射時間は 1 点当たり 600 秒とした。この装置の SSD の X 線エネルギー検出効率が高いエネルギー範囲と主要な格子面の回折 X 線エネルギーが 100keV 前後に入るように考慮し、回折角 2θ は 10° とした。入射側のスリットは高さ $100\mu\text{m}$ 、幅 $300\mu\text{m}$ とし、検出側のスリットは高さ $80\mu\text{m}$ 、幅 $300\mu\text{m}$ とした。このとき、測定により得られるひずみは材料内部の長さ $3.44\text{mm} \times$ 幅 $0.3\text{mm} \times$ 高さ 0.08mm の極めて細長い平行六面体領域の平均値となる。また、測定領域中の結晶粒数は約 4200 ~ 8500 個である。BL28B2 ビームラインに

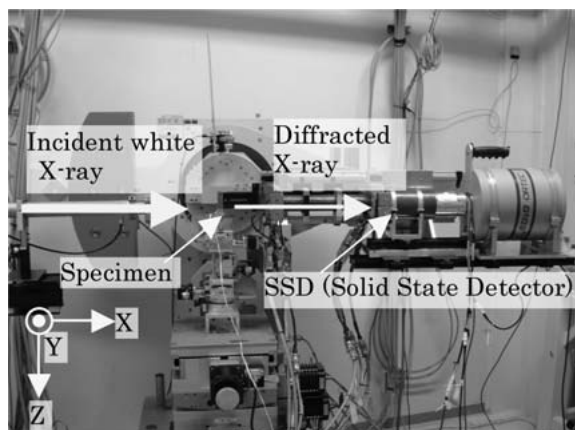
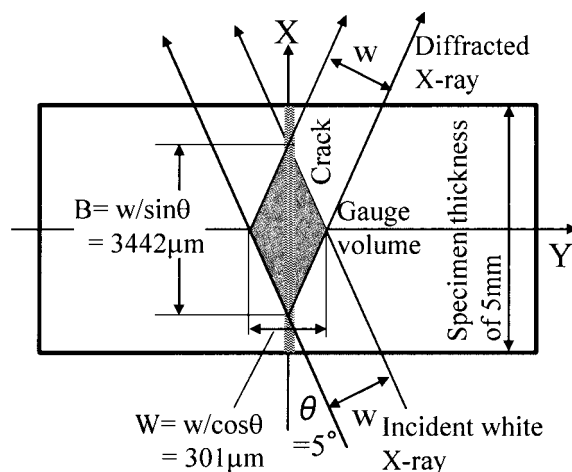
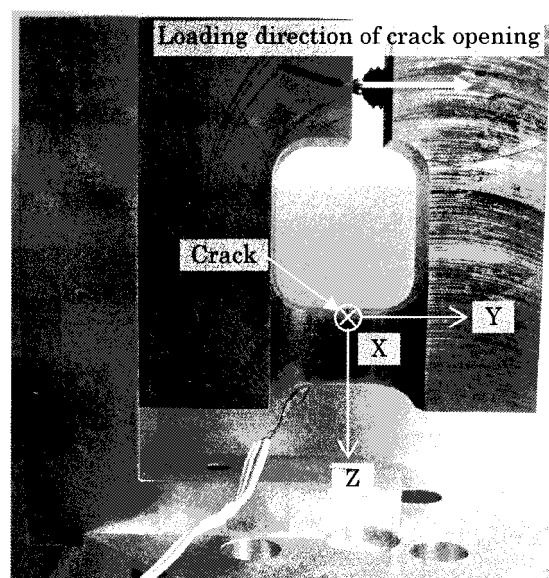


Fig. 4 Experimental setup of strain mapping using high energy white X-ray at BL28B2 in SPring-8.



(a) Schematic diagram of top view near crack of specimen



(b) Front view of specimen

Fig. 5 Setup of specimen for strain measurement and schematic diagram of gauge volume using transmission diffracted X-ray.

において同一材料でこれまでにを行った実験結果から、この結晶粒数であれば、測定ひずみの誤差は最大でも約 2×10^{-4} と推測される。⁷⁾

ひずみは、エネルギー分散法により無ひずみ時の回折 X 線エネルギー E_{n0} と有ひずみ時の回折 X 線エネルギー E_n から式 (2) で求める。

$$\epsilon = \frac{d - d_0}{d_0} = \frac{E_{n0} - E_n}{E_n} \quad (2)$$

ここで、無ひずみ時の回折 X 線エネルギーは、き裂導入試験片と同一材料、同一形状でき裂を導入していない試験片を残留応力除去焼鈍したものを測定して求めた。

ひずみ測定に先立ち、Fig. 5 の試験片 X 軸と放射光ビームを一致させ、その直線上にイオンチャンバーを設置した。測定位置の設定のためイオンチャンバーを用いてノッチ底の検出をゲージボリュウムの半割り (ゲージボリュウムが試験片に半分だけ架かる状態) により行った。その後、Fig. 5 の Z 軸回りに検出器 SSD を $2\theta = 10^\circ$

(回折角)の位置に設置し, 試験片は $\theta = 5^\circ$ だけ回転させた. 最初にノッチ底中央を原点とし, き裂に沿って梁全体を横断してひずみを測定した. 測定間隔と点数は, き裂近傍では0.2mmの14点, 残りを0.5mmの15点とした.

次に, き裂の長さを考慮し, ノッチ底から1mmの深さにある一辺が1.5mmの正方領域内の112点でひずみ測定を行った. 測定位置はき裂イメージング画像上 (Fig. 8) に示す. 負荷がない場合は深さ方向 (Fig. 5のZ軸方向)の測定領域を半分とした.

3 結果と考察

3.1 内部き裂のイメージング

Fig. 6にき裂を開口させる負荷をかけていない場合のイメージング画像を示す. この状態では, 画像上にき裂は判別できなかった. Fig. 7にき裂を開口させる負荷をかけた場合のイメージング画像を示す. Fig. 7より, き裂が細長い白い線として判別できた. き裂は直線的であり

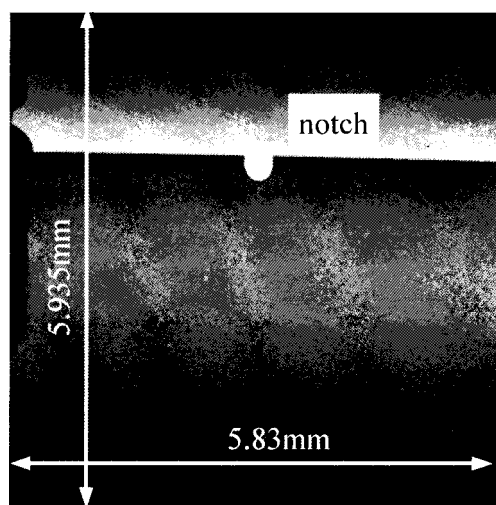


Fig. 6 Imaging of the crack in the specimen without loading of crack opening.

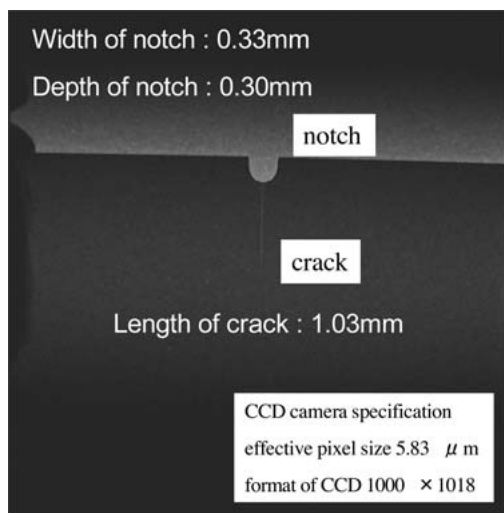


Fig. 7 Imaging of the crack in the specimen with loading of crack opening.

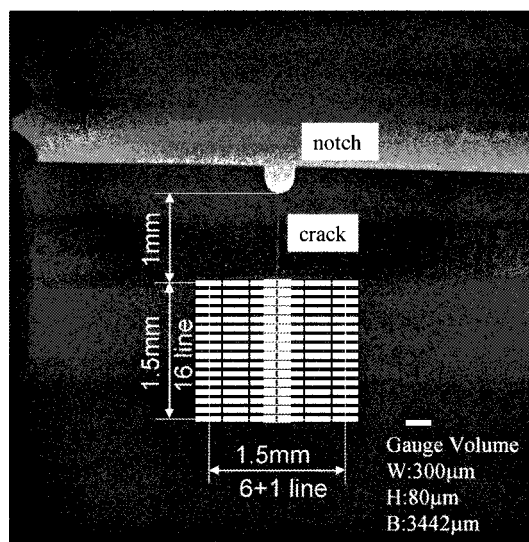


Fig. 8 Measurement area and positions for strain mapping in the vicinity of crack tip.

長さも約1.03mmと, Fig. 2に示した試験片表面で観察されたき裂に比べ長い. 一般にき裂の進展は表面よりも内部に進むことが知られており妥当な結果と考えられる. また, 5mmの厚さ全体において最も広く存在するき裂面が平面的に分布していると考えられる. 本実験では50keV以上の高エネルギーの白色X線を用いることで, 厚さ5mmの鋼板の内部であっても開口しているき裂であればイメージングが可能であることが確認できた. これにより, 内部の開口き裂先端近傍の検出の可能性が示された.

3.2 き裂先端近傍のき裂直交方向のひずみ分布

Fig. 9に本実験で使用した試験片の回折X線プロファイルを示す. バックグラウンドが若干高いが, 個々の回折ピークの強度も高く測定には支障ない. 回折X線のピークエネルギーはガウス曲線近似し求めた.⁴⁾

Fig. 10 (a), (b)に α Fe321面を用いて算出された, き裂に沿ったひずみ, 回折線プロファイルの半価幅FWHMと回折強度分布を示す. ノッチ底の検出をゲージボリュームの半割りにより行っているため, Fig. 10 (b)から明らかに, 最初の測定点の回折強度が他に比べ低い.

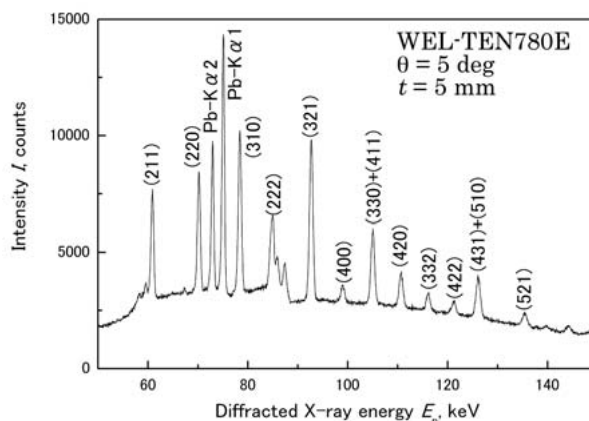


Fig. 9 Diffraction profile of specimen using high energy white X-ray.

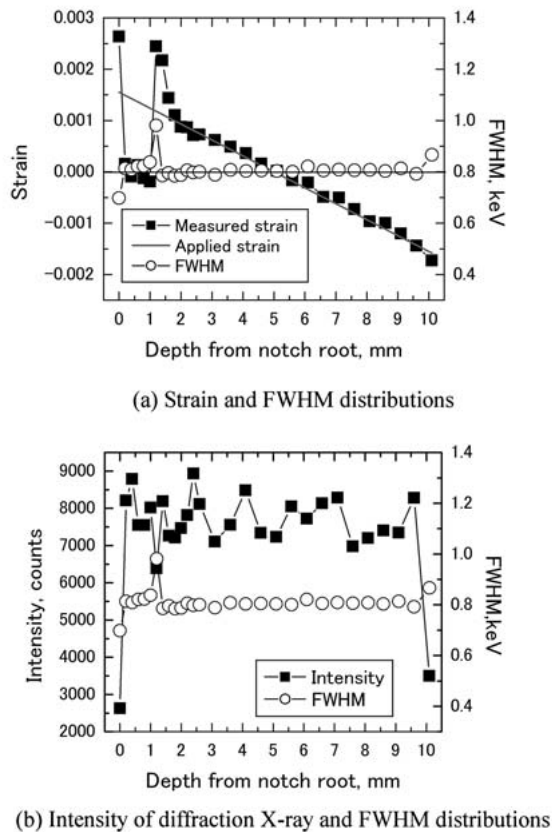


Fig. 10 Strain, FWHM and intensity of diffraction X-ray distributions along crack direction.

そのため、測定精度も劣ることが懸念されるため検討の対象外とする。また、同様に反対側では回折強度が半減しており、10mmの梁を半分程度抜けた状態と考えられるので、同じく検討対象外とする。

Fig. 10 (a)において曲げモーメントによる負荷ひずみは直線で示している。Fig. 10 (a)からノッチ底からき裂が存在すると思われる範囲でひずみがほぼ零であることが分かる。これはき裂により応力が開放されているためと考えられる。ノッチ底から約1mmのき裂先端近傍と考えられる位置で、測定ひずみが負荷ひずみに比べ急激に増加し、約2mmの位置で再び負荷ひずみに一致している。き裂先端近傍に大きなひずみが発生していることがわかる。Fig. 10 (a)のFWHMの分布を見ると、ノッチ底からき裂が存在すると思われる範囲で若干広がっている。FWHMは塑性ひずみ発生との相関が知られており、き裂の進展に伴って発生した塑性域の残存を示しているものと思われる。さらに、ひずみと同様にノッチ底から約1mmのき裂先端近傍と考えられる位置で急激に増加し、約1.4mmの位置で再び減少している。負荷をかけているため、き裂先端に大きなひずみが発生しており、新たな塑性域の発生や転位の増加などによりFWHMが広がったと考えられる。ノッチ底より1.4mm以降は、ほぼ安定して低めの値を示している。FWHMの増加する範囲がひずみの増大する範囲に比べ狭いのは、FWHMが塑性域の発生にのみ関連していることから妥当な結果と考えられる。

Fig. 10 (b)の回折強度の分布をみると、FWHMが増加する位置で逆に減少している。大きなひずみにより321面が測定方向とは異なる特定の方向に揃うことが考えられるが、現時点では明らかにできていない。それ以外の測定位置では特徴的な分布は見られなかった。

Fig. 11とFig. 12に負荷をかけた状態の α Fe321面におけるき裂先端近傍のひずみとFWHMの分布を示す。Fig. 13とFig. 14に同様に無負荷時の分布を示す。さらに、Fig. 11～14におけるき裂に沿った直線上（横軸中央）のひずみとFWHMの分布を、それぞれFig. 15とFig. 16に示す。

Fig. 11からひずみの分布はき裂直交方向（Y軸方向）に広く、一般に知られているき裂先端近傍の応力分布に類似している。Fig. 15から先の内部き裂イメージングにより推定されたき裂先端と思われる約1.03mm付近には圧縮のひずみが存在し、約1.15mmから1.7mmに曲げの負荷ひずみを上回る引張りひずみが発生している。理論的にも、また、負荷によりき裂が進展するためにも、き裂の先端は引張応力場でなければならない。したがってき裂先端は、実際にはイメージングにより推定されたノッチ底から1.03mmの位置ではなく、さらに深部の

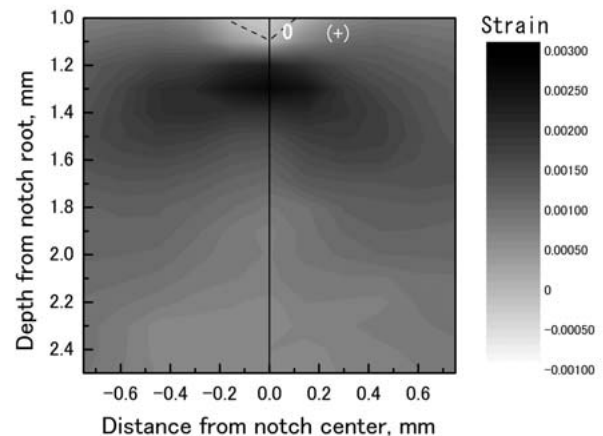


Fig. 11 Internal strain ε_y distribution of α Fe321 in the vicinity of crack tip with loading of crack opening.

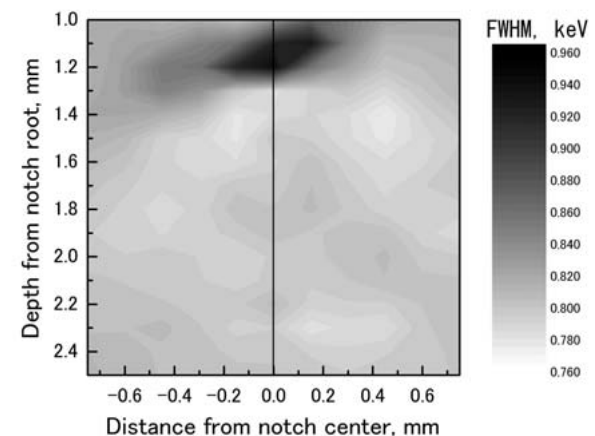


Fig. 12 FWHM distribution of α Fe321 diffraction in the vicinity of crack tip with loading of crack opening.

1.1mm ~ 1.2mm 付近と考えられる。負荷がかかっていてもき裂先端近傍は非常に狭く、イメージング画像では判別できなかったと考えられる。

Fig. 12 から半価幅 FWHM の広い領域が、やはりき裂先端と思われる位置に存在している。前述のひずみの分布に比べややノッチ側に近い。新たに発生する塑性域はき裂先端を中心に分布することから、値が大きい FWHM 分布の中心がき裂先端である可能性が高い。Fig. 16 から、その位置は約 1.2mm であり、Fig. 11, Fig. 15 から推定されたき裂先端位置とほぼ同じである。

Fig. 13, Fig. 15 から、無負荷時においてはノッチ底から約 1.1mm の位置を中心に大きな圧縮残留ひずみが存在する。疲労き裂導入時、および今回新たに負荷された荷重によってき裂先端に発生した塑性ひずみと考えられる。

Fig. 14, Fig. 16 から、半価幅 FWHM の分布は負荷時に比べ、最大となる分布位置は同じであるが、その分布領域は小さい。負荷時は転位の発生などによる FWHM の増加も含まれているのに対し、無負荷時では残留塑性ひずみのみに関係していることによるものと思われる。深さ 1.4mm からは、負荷時と無負荷時でほぼ一致しており、これより深い位置では塑性域の発生はないことがわかる。

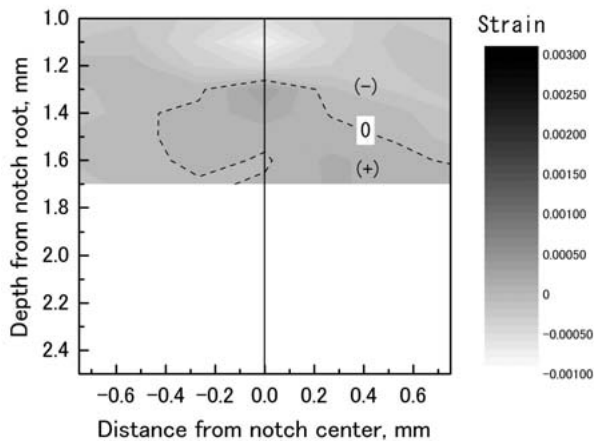


Fig. 13 Internal strain ε_y distribution of αFe321 in the vicinity of crack tip without loading of crack opening.

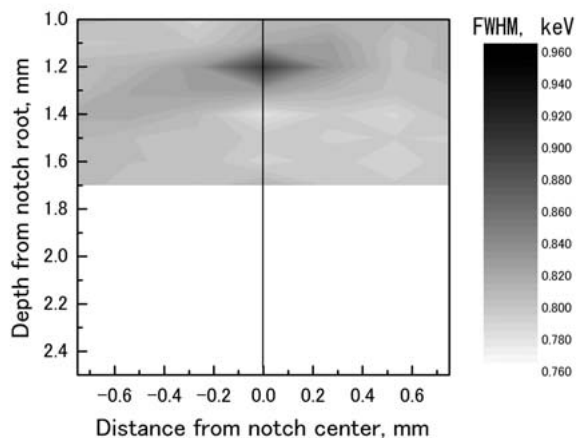


Fig. 14 FWHM distribution of αFe321 diffraction in the vicinity of crack tip without loading of crack opening.

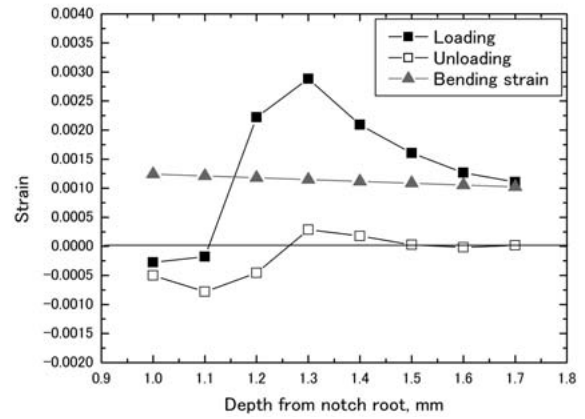


Fig. 15 Strain distribution in the vicinity of crack tip along crack direction.

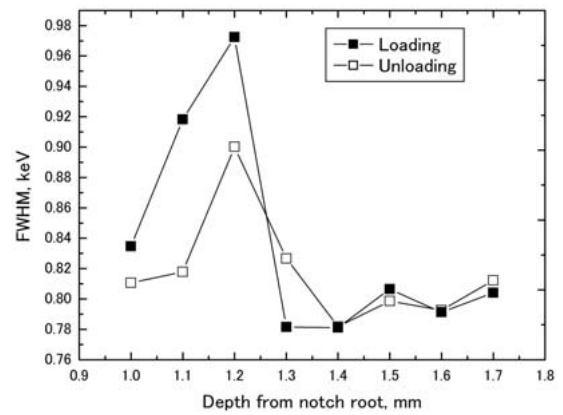


Fig. 16 Distribution of FWHM of diffracted X-ray profile in the vicinity of crack tip along crack direction.

ここで、曲げを受ける帯板中の片側き裂のモード I の応力拡大係数 K_I は、例えば Tada ら⁸⁾により以下のように定義されている。

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} F(\xi), \quad \xi = a/W \quad (3)$$

$$F(\xi) \equiv \sqrt{\frac{2}{\pi \xi} \tan \frac{\pi \xi}{2}} \frac{0.923 + 0.199 \left(1 - \sin \frac{\pi \xi}{2}\right)^4}{\cos \frac{\pi \xi}{2}} \quad (4)$$

上式において、 W は帯板の幅、 a はき裂長さ、 σ は曲げ応力である。式 (3)、(4) の W に梁の幅 10mm、 a にはノッチの深さにイメージングで得られたき裂長さを加えた 1.33 mm、 σ に引張側最大応力の 315MPa をそれぞれ代入すると、応力拡大係数 K_I は式 (5) となる。

$$K_I = 22.666 \left[\text{MPa} \sqrt{\text{m}} \right] \quad (5)$$

このとき、試験片表面の平面応力状態とみなせる領域の単調塑性域寸法は式 (6) で表される。

$$2r_p = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (6)$$

式 (6) に試験片の降伏応力 $\sigma_Y = 779\text{MPa}$ と式 (5) を代入すると、単調塑性域寸法は約 0.269mm となる。試験片内部の平面ひずみ状態とみなせる領域の単調塑性域寸法は式 (6) の 1/3 とされており、その場合は約 0.09mm となる。Fig. 15 の無負荷時の FWHM の分布をみると、

1.1mm ~ 1.4mm の約 0.3mm の範囲に塑性域の存在が見られる。したがって、本測定による塑性域は平面応力状態に近い。今回のスリット条件における測定領域は厚さ 5mm に対して内部の 3.44mm の領域であり、表面に近い領域も含まれている。その影響が塑性域の大きさにも現れていると考えられる。

他の回折面から得られる負荷をかけた状態のき裂先端近傍のひずみ分布でも約 1.3mm の位置にひずみの最大値が生じていた。しかし、 α Fe321 面とやや異なる分布形態を示しており、回折面依存性がみられた。回折面毎の FWHM の分布と結晶塑性との関係やき裂先端近傍の応力値での検討は、今後実験を重ね詳しく行う予定である。

4 結 言

大型放射光施設 SPring-8 の共用ビームライン BL28B2 において、高エネルギー白色 X 線を用いた材料内部のき裂先端近傍のイメージングとひずみ分布測定の検討を行った。試験片には長さが約 1mm 程度の疲労き裂を導入した梁部（厚さ 5mm）を有する溶接用低合金高張力鋼 (JIS G3128 SHY685) を用いた。得られた主な結果を以下に示す。

(1) 50keV 以上の高エネルギー白色 X 線を用いることで、厚さ 5mm の鋼板内部であっても、開口き裂であればイメージングが可能であることを確認した。

(2) 高エネルギー白色 X 線を用いたエネルギー分散法により、厚さ 5mm の材料内部のき裂先端近傍のひずみと塑性域に関連する回折 X 線半価幅 FWHM の 2 次元マッピングが可能である。

(3) FWHM から推定される塑性域の大きさと単調塑性域寸法の理論値との比較から、高エネルギー白色 X 線エネルギー分散法による測定結果の妥当性を確認した。

なお、本研究は (財) 高輝度光科学研究センターの SPring-8 利用研究 2007A1641 の援助を受けた。本研究を遂行するにあたり、(財) 高輝度光科学研究センターの今井康彦博士に多大なご協力をいただいた。また、試験片作製では北見工業大学技術部の堂田誠治氏、山田忠永氏、石澤真也氏にご協力をいただいた。ここに記して心から感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Y. Sakaida, K. Tanaka, Y. Akiniwa and Y. Sawaki, "In-situ local stress measurement near notch tip in alumina ceramics using synchrotron radiation source", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.52, No.10, pp.1225-1230 (2003).
- 2) Y. Akiniwa, H. Kimura and K. Tanaka, "Measurement of stress distribution near notch and fatigue crack in ultra-fine grained steel by synchrotron radiation", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.53, No.7, pp.752-757 (2004).
- 3) T. Hirata, J. Shibano, T. Shobu, K. Suzuki, H. Kaneko and M. Kobayashi, "Strain measurement in the depth of the order of millimeter using high energy white X-rays", Key Engineering Materials, Vols.324-325, pp.1225-1228 (2006).
- 4) J. Shibano, T. Shobu, K. Suzuki, T. Hirata, H. Kaneko and M. Kobayashi, "Measurement of internal strain in materials using high energy synchrotron radiation white X-rays", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.56, No.10, pp.985-992 (2007).
- 5) M. Croft, Z. Zhong, N. Jisrawi, I. Zakharchenko, R. L. Holtz, J. Skaritka, T. Fast, K. Sadananda, M. Lakshminpathy and T. Tsakalakos, "Strain profiling of fatigue crack overload effects using energy dispersive X-ray diffraction", International Journal of Fatigue, Vol.27, pp.1408-1419 (2005).
- 6) T. Tanaka and H. Kitamura, "SPECTRA : a synchrotron radiation calculation code", Journal of Synchrotron Radiation, Vol.8, pp.1221-1228 (2001).
- 7) J. Shibano, T. Shobu, K. Suzuki, K. Kiriya, K. Kajiwar, H. Kaneko, S. Nishimura and M. Kobayashi, "Strain measurement in the depth of the order of millimeter and the gauge volume of the order of micrometer using synchrotron white X-rays", Proceedings of the 42nd Symposium on X-Ray Studies on Mechanical Behaviour of Materials, The Society of Materials Science, Japan, pp.120-125 (2007).
- 8) Edited by JSMS, "The strength and fracture of materials 9th ed.", p.69 (1996) The Society of Materials Science, Japan.