

平成21年 6月 8日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19760615  
 研究課題名 (和文) 高エネルギー放射光 X 線による原子炉材料の微小部内部応力評価技術の高度化  
 研究課題名 (英文) Upgrade of the technology of internal stress evaluation in reactor materials by high energy synchrotron radiation X-rays  
 研究代表者  
 菖蒲 敬久 (SHOBU TAKAHISA)  
 独立行政法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・副主任研究員  
 研究者番号：90425562

研究成果の概要：原子炉の安全安心な稼動のために、応力腐食割れの機構解明およびその対策などを目的とした高エネルギー放射光 X 線を用いた微小部材料内部応力測定技術開発を実施し、揺動法を用いた内部応力測定法、2 次元検出器を用いた応力測定法、イメージング法と組み合わせた応力測定法を開発した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000	0	1,900,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	240,000	2,940,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：安全・リスク・信頼性・応力腐食割れ・非破壊残留応力評価・高エネルギー放射光

## 1. 研究開始当初の背景

応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking) は、材料特性、環境そして作用応力が重畳することによって発生・進行することはよく知られている。表面部粒界近傍での Cr 欠乏層による皮膜破壊、腐食ピットの生成、成長を経て、これを応力集中源とした SCC き裂が発生する。このときの表面残留応力は、通常き裂が入る応力よりもはるかに小さく、さらにその応力分布は結晶粒単位、またはそれ以下で変化することが予想される。また、いったん発生したき裂に対しては、き裂の進展速度や方向が材料内部の残留応力分布に大きな影響を受けるため、表面近傍の応力と

ともに、内部における応力分布を評価することが必須である。

ここで SCC に関係する作用応力は、外的な因子による応力と、部材の接合や各種加工に起因する残留応力からなり、前者については比較的容易に予測することが可能である。それに対して、残留応力については、予測が困難な場合が多い。特に溶接残留応力は、熱弾塑性解析や固有ひずみ法等、種々の解析的手法によって残留応力場の予測が行われているが、正確に予測することは困難であり、実験的方法によって、しかも非破壊的に測定する技術の開発が不可欠となっている。現在、表面近傍の引張残留応力を緩和もしくは圧

縮残留応力に移行させるために、各種表面改質が実施されることが多いが、その品質管理や、発生したき裂の危険性を判断するためには、やはり部材内部の残留応力場を非破壊的に実測することが求められる。

放射光X線は、エネルギー可変であることから材料の表面から内部まで非破壊で残留応力測定が可能な技術として最近特に注目されており、高輝度、高強度であることからこれまでの技術では実施困難な微小部やその場応力測定などが可能である。

申請者はこれまでに、フェライト材であれば表面から数100 $\mu\text{m}$ までの深さにおいて、数10 $\mu\text{m}$ 程度の深さ方向の分解能で応力分布測定に成功している。また9mm厚のTi材に関して、数100 $\mu\text{m}$ 程度の分解能で応力分布測定に成功している。さらに、フェライト材であれば、溶接部まわりやき裂先端まわりの応力測定が可能であることを確認した。しかしながら原子力材料として使われるオーステナイト系ステンレス鋼に関しては、フェライト材に比べて粗大粒であり、また集合組織を有しており、現状のままでは測定が困難であることがわかってきた。

## 2. 研究の目的

本研究では、SPring-8の高エネルギー放射光X線を用いて、原子力材料の表面から内部までの応力測定を可能にするシステムの開発を行う。

## 3. 研究の方法

(1) 現状のシステムに試料の揺動を組み合わせることで、原子力材料の表面から内部までの精密残留応力測定法を構築する。

(2) 多次元検出器および独自に開発中のスパイラルスリットなどを組み合わせて、原子力材料の表面から内部までの迅速応力測定法を構築する。

(3) イメージング法と放射光応力測定法を融合し、微小内部応力/ひずみ分布測定技術を確立する。

## 4. 研究成果

(1) 高エネルギー放射光応力測定手法の1つであるひずみスキニング法と回転揺動を組み合わせた回転スキニング法を提案し、その応力評価の有効性を評価した。図1に原子炉構造材で使用されているSUS316Lの表面に圧縮残留応力を施した材料中の表面内部応力分布測定結果を示す。白丸の従来のひずみスキニング法の結果では粗大粒の影響で応力分布にばらつきが大きく見られるのに対して、黒丸の回転ひずみスキニング法では表面部に圧縮応力、内部でそれとバランスするように引張応力が観測され、本手法により粗大粒でも十分に応

力測定が可能であることを明らかにした。

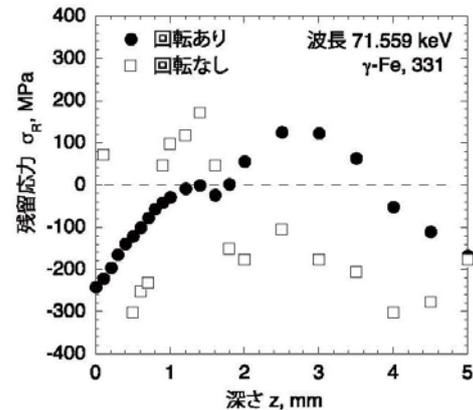
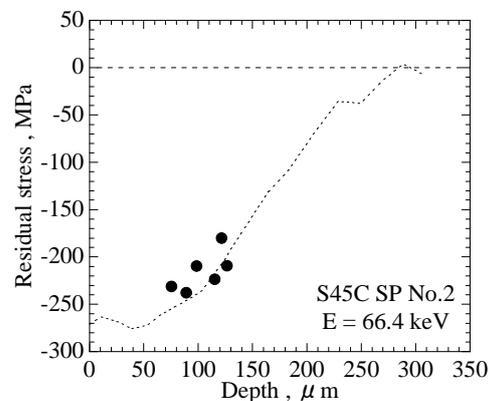


図1 回転ひずみスキニング法

(2) (1)の手法により原子炉構造材の応力測定が可能となったが、(1)より測定時間の短縮、より微小部( $\sim 50\mu\text{m}$ 以下)の応力測定を可能にすることを目的として、多次元検出器と独自に開発したスパイラルスリットを組み合わせた応力測定法を開発した(図2(a))。測定結果を図2(b)に示す。点線で示すひずみスキニング法で測定した表面内部応力分布に対して、黒丸で示す多次元検出器を用いた応力測定法は非常によい一致を示していることから、本手法により応力測定が十分な精度で実施できていることが明らかとなった。特筆すべきはその測定時間であり、点線の測定が4時間に対して、黒丸はわずか1分であるということ、加えて測定試



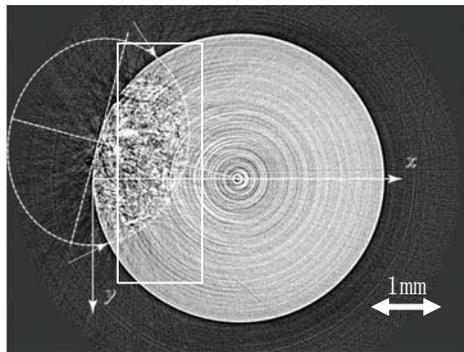
(a) 多次元検出器+スパイラルスリット



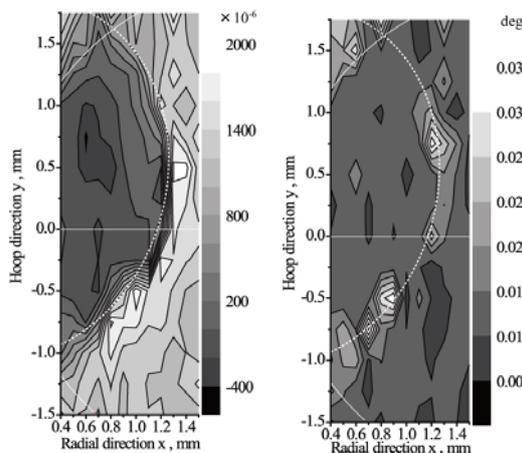
(b) 表面内部応力測定結果

図2 多次元検出器を用いた応力測定  
 料をほとんど動かすことなく材料中の表面  
 内部応力分布測定が可能であることである。  
 今後、本手法を利用することで非常に大きな  
 材料の応力分布測定や、SCC の機構解明には  
 必要不可欠となる高温高压水中のような材  
 料中の環境を変化させながらのその場観察  
 測定で十分な成果に役立つものと思われる。

(3) 高エネルギー放射光単色 X 線を用いたイ  
 メージング (CT) とひずみ分布を同時測定す  
 るシステムを構築し、炭素鋼で直径 4mm の丸  
 棒試験片の表面のドリル穴から発生した表面  
 疲労き裂に適用した (図 3)。図 3(a) の CT  
 再構築画像から求めた疲労き裂の形状は半  
 楕円形状で近似でき、表面での長さは表面測  
 定の結果とほぼ一致することを明らかにし  
 た。この結果を踏まえ、図 3(b) に図 3(a) 中  
 た。本手法は白色応力測定においても同様  
 に行うことが可能であり、本手法により内部  
 に発生するき裂もしくはボイドを視覚的に確  
 の四角枠内の負荷時の負荷方向の格子ひず  
 み分布の測定結果を示す。図 3(a) と比較す  
 るとき裂先端部に非常に大きい引張ひずみ  
 および半価幅の広がった領域、つまり塑性変  
 形している領域を明らかにすることに成功し  
 認め、その周りの応力分布を求めることによ  
 る SCC き裂の進展メカニズム解明に十分に役



(a) き裂近傍の CT



(b) ひずみ分布 (c) 半価幅分布

図3 鉄鋼丸棒の内部疲労き裂のCTとひずみ

分布

立てられると考えている。加えて、より微小  
 部の精緻な測定するための技術開発を実施  
 することにより、内部き裂の先端領域に関す  
 る学術的な研究とともに、内部き裂に関連し  
 た実用機器の健全性の保証に関わる産業利  
 用課題への適用などに役立つ手法として発  
 展させていく予定である。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 菫蒲敬久, 田中啓介, 橋本篤, 成田純一,  
 高エネルギー放射光単色 X 線を用いた鉄  
 鋼丸棒の内部疲労き裂の CT とひずみ分  
 布のハイブリッド測定, 材料, 2009 年 7  
 月掲載決定, 査読有
- ② 柴野純一, 桐山幸治, 梶原堅太郎, 菫蒲  
 敬久, 鈴木賢治, 新居恭征, 三浦節男,  
 小林道明, 放射光白色 X 線による丸棒鋼  
 内部き裂先端近傍の CT とひずみマッピ  
 ング, 材料, 2009 年 7 月掲載決定, 査読  
 有
- ③ 鈴木賢治, 菫蒲敬久, 柴野純一, 回転ひ  
 ずみスキャンニング法, 材料, 2009 年 7  
 月掲載決定, 査読有

[学会発表] (計 6 件)

- ① 菫蒲敬久, 小西啓之, 多次元検出器を用  
 いた高エネルギー放射光 X 線による材料  
 内部残留応力分布測定技術開発, 第 21 回  
 日本放射光学会年会・合同シンポジウム,  
 2008 年 1 月, 立命館大学 (草津)
- ② 鈴木賢治, 菫蒲敬久, 柴野純一, 回転ひ  
 ずみスキャンニング法による粗大粒の応  
 力測定, 第 21 回日本放射光学会年会・合  
 同シンポジウム, 2008 年 1 月, 立命館大  
 学 (草津)
- ③ 菫蒲敬久, 田中啓介, 橋本篤, 成田純一,  
 高エネルギー放射光単色 X 線を用いた鉄  
 鋼丸棒内部の疲労き裂の CT 観察とひずみ  
 分布同時測定, 第 57 期日本材料学会通常  
 総会, 2008 年 5 月, 鹿児島大学 (鹿児島)
- ④ T. Shobu, K. Tanaka, Simultaneous  
 measurement of Imaging and Strain of  
 fatigue crack in steel bars using high  
 energy synchrotron radiation, The 8<sup>th</sup>  
 International Conference of Residual  
 Stresses, 2008. 8, Denver (U. S. A).
- ⑤ 菫蒲敬久, 2 次元検出器を用いた応力測  
 定技術開発, 第 52 回日本学術会議材料工  
 学連合講演会, 2008 年 10 月, 日本材料  
 学会 (京都)
- ⑥ 菫蒲敬久, 放射光高エネルギー単色 X 線  
 を用いた鉄鋼丸棒の内部疲労き裂の CT 観  
 察とひずみ分布のハイブリッド測定, 第 22  
 回日本放射光学会年会・合同シンポジウ  
 ム, 2009 年 1 月, 東京大学 (東京)

[産業財産権]

○出願状況（計1件）

名称：回転法によるひずみ測定装置および測定方法

発明者：鈴木賢治，菖蒲敬久

権利者：新潟大学，原子力機構

種類：特許願

番号：特願 2007-255782

出願年月日：2007年9月28日

国内外の別：国内

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

菖蒲 敬久 (SHOBU TAKAHISA)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・

量子ビーム応用研究部門・副主任研究員

研究者番号：90425562

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし