

# 放射光 CT によるステンレス鋼 SUS316L の応力腐食割れき裂の検出 Detection of SCC cracks in austenitic stainless steels by synchrotron radiation CT imaging

中東重雄<sup>a</sup>, 山本厚之<sup>b</sup>, 藤城智之<sup>b</sup>, 長谷川忠之<sup>a</sup>, 寺澤倫孝<sup>b</sup>, 梶原堅太郎<sup>c</sup>  
Shigeo Nakahigashi<sup>a</sup>, Atsushi Yamamoto<sup>b</sup>, Tomoyuki Fujishiro<sup>b</sup>, Tadayuki Hasegawa<sup>a</sup>,  
Mititaka Terasawa<sup>b</sup>, Kentaro Kajiwara<sup>c</sup>

<sup>a</sup> (財)発電設備技術検査協会, <sup>b</sup> 兵庫県立大学, <sup>c</sup> (財)高輝度光科学研究センター

<sup>a</sup> Japan Power Engineering and Inspection Corporation, <sup>b</sup> University of Hyogo,

<sup>c</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute

超音波探傷試験 (UT) における欠陥測定精度の評価は重要であり、また UT 測定条件の設定や UT 信号の解析支援のための UT シミュレーションでは、鋼中欠陥の 3 次元形状や分布状態に関する情報は重要かつ不可欠である。本研究では放射光 CT イメージングによりステンレス鋼の代表的な応力腐食割れ (SCC) である粒内型および粒界型 SCC き裂の 3 次元形状および分布状態を調べた。

キーワード： 応力腐食割れ、ステンレス鋼、超音波シミュレーション、CT イメージング

## 1. 目的

原子力発電プラントをはじめ多くの産業分野における非破壊検査技術、特に超音波探傷試験 (Ultra sonic Testing : UT) は、設備の健全性評価の基礎となる主要な技術の一つである。UT は検査対象部位に超音波を送信し、内部にき裂等の欠陥が存在するとそこで超音波が反射し、エコーとして検出できることを利用する方法である。しかし実用鋼として多く用いられるニッケル基合金やステンレス鋼溶接部の欠陥検査では、溶接組織や音速変化の影響を受けエコーの発生源の特定が困難になったり、得られた信号の解析が困難となったりする。そこでエコー発生源の推定や探傷信号の解析支援さらには UT の測定研修や教育を目的とした UT シミュレーションの開発が進められている [1] - [4]。この UT シミュレーションでは、材料の物性値をはじめ、鋼中き裂の 3 次元形状や分布状態、き裂幅等に関する情報が重要かつ不可欠であるが、これらに関する知見はこれまでほとんどなかった。そこで昨年度筆者らは、ニッケル基合金溶接金属内に生じた粒界型応力腐食割れ (IGSCC) について、放射光 CT イメージングによるき裂の 3 次元形状や分布状態の測定を試み、鮮明な 3 次元再構成像を得ることに初めて成功した [5] - [7]。

そこで今回は、ニッケル基合金とともに実用鋼として多く用いられているオーステナイト系ステンレス鋼母材部に生じた粒内型応力腐食割れ (TGSCC) および粒界型応力腐食割れ (IGSCC) について、それら鋼中き裂の形状および分布に関する基礎データを得るため、放射光 CT イメージングにより調べた。

## 2. 方法

供試材は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L で、その化学組成は、0.0015C - 12.39Ni -

2.12Mo - 16.28Cr - Fe (mass%) である。TGSCC は  $MgCl_2$  溶液にて、IGSCC は NaOH 溶液中にてそれぞれ付与した。測定用試料は、図 - 1 に示すような SCC を付与した約 50mm×約 200mm×約 13mm 厚の SUS316L 鋼ブロック試片より SCC き裂を含む約 2mm×約 1mm、長さ約 20mm の角棒を切り出し、エメリー紙により丸棒状に研磨し、仕上げた。作製した測定用試料の平均直径は、約 1.5mm である。図 - 2 に作製した測定用丸棒試料の外観を示す。

CT イメージング測定は、SPring - 8 放射光施設の産業利用ポート BL19B2 を用いた。測定に用いた SR 光のエネルギーは 37keV である。図 - 3 には、測定に用いた CT イメージング測定装置の外観を示す。SR 光は Si の (111) 面を利用した 2 結晶分光器を通り、試料を透過した後、蛍光板で可視光に変換され CCD カメラで測定、記録される。今回の測定は、光源（ベンディングマグネット）から最も近い BL19B2 ハッチ 1 を使用した。ビームの照射視野は 2.7mm×2.7mm、X 線透過像を受像する CCD カメラの画素数は 4000×2600 画素で、実効ピクセルサイズは約 2.6 $\mu$ m である。また像の画質に大きな影響を及ぼすカメラ長は、100mm、200mm および 300mm に変えて測定した。測定は、丸棒試料をサンプルステージ上に粘着ボンドで固定し、付設のレーザ光を用いた試料位置調整装置により左右・上下および回転軸を調整した。撮影は、試料を 0°～180°まで 0.2°ピッチで回転させ、X 線透過像を撮影した。撮影条件は、1.2 秒/1 フレームである。得られた X 線透過像は、Filtered Back Projection 法を用い、横断面および縦断面像として構築し、さらにそれら構成像より 3 次元像に再構築した。測定条件をニッケル基合金溶接金属中の SCC 測定条件とあわせて表 - 1 に示す。

### 3. 結果および考察

SUS316L 鋼中の TGSCC および IGSCC の光学顕微鏡による観察結果を図 - 4 (a) および図 - 4 (b) に示す。TGSCC のき裂（割れ）は粒内を貫通しており、IGSCC のき裂は粒界に沿って進展していることをそれぞれ確認した。カメラ長は、IGSCC 試料を用いて 100mm、200mm および 300mm にてそれぞれ撮影し、得られたき裂の横断面構成像を比較した。本測定条件では、300mm の場合がもっとも鮮明な構成像が得られることが分かった。そこで本測定では、カメラ長を 300mm に設定し、測定を行った。

図 - 5 に TGSCC き裂の結果の一例を示す。表面から 738 $\mu$ m の位置の横断面構成像では、ほぼ平行に 2 本のき裂が観察される。またき裂はほとんど分岐していない。表面から深くなるに従ってき裂は少なくなり、1044 $\mu$ m の深さではほとんど 1 本のき裂しか観察されない。また試料の側面から観た縦断面構成像（278 $\mu$ m および 894 $\mu$ m 位置の構成像を示す）では、き裂は表面から単調に進展している様子が見られる。図 - 6 には、これら横断面および縦断面構成像より再構成した 3 次元像の一部を示す。この 3 次元再構成像を回転させて観察すると、き裂の進展は直線的で、かつ単調であることがより明確に確認できる。他の TGSCC 試料についても酷似のき裂分布を示していることから TGSCC のき裂は、き裂発生起点からほぼ直線的に、しかも単調な進展挙動を示すことが明らかになった。

図 - 7 には IGSCC き裂の結果の一例を示す。IGSCC き裂は、結晶粒径や粒界性状に強く依存することが容易に想像される。本試料の場合図 - 4 (b) に示すように平均粒径は、約 80 $\mu$ m と比較的小さい。試料の粒径が小さいことから、得られたき裂の構成像は、細かく屈曲、分岐しながら進展しており、その様子が鮮明に捉えられている。横断面構成像では、深さ 160 $\mu$ m ではき裂は 1 本しか観察されないが、831 $\mu$ m 深さでは Y 字に分かれ、1389 $\mu$ m 深さでは再び 1 本になっている。このようなき裂の挙動は、縦断面構成像を観るとより明確になる。すなわちき裂は表面から約

600 $\mu\text{m}$ の深さ付近で大きく2つに分岐している。図-8には3次元に再構成した像の一部を示すが、このようなき裂の分岐の様子がより明確に分かる。しかしき裂分布は一様ではなく、他のIGSCC試料では発生起点(表面)から捩れながら進展している場合も観察された。このように同じロット材で、同じ腐食環境であるにもかかわらず、採取場所によって多様なき裂進展パターンをしていることが確認された。き裂進展挙動の複雑さが明らかになった。

今回のTGSCCとIGSCCき裂を比較すると、TGSCCき裂は、複雑な分岐や屈曲はほとんどなく、比較的単調なき裂進展挙動を示しているのに対し、IGSCCの場合は、複雑に屈曲、分岐しながら進展している。き裂幅については、IGSCCはTGSCCよりも一般的に広い。また、横断面および縦断面構成像から両者のき裂コントラストが判別できる幅を比較すると、TGSCCき裂では約4~10 $\mu\text{m}$ 、IGSCCき裂では約4~6 $\mu\text{m}$ のき裂幅まで判別することができた。

一方、今回のステンレス鋼の測定条件は、ニッケル基合金溶接金属内SCCき裂の場合と異なることから同一試料を用い、構成像および再構成像に及ぼす測定条件の違いを調べた。その結果を図-9に示す。測定に用いた試料はNi基合金溶接金属内のIGSCC試料で、試料サイズは約 $\phi$ 0.71mmである。今回の測定(ハッチ1)は、前回の測定(ハッチ3)と比較して横断面構成像には多くのき裂が観察され、しかも像は明らかに鮮明である。この差異は、表-1に示すようにカメラ長が異なる以外に、CCDカメラの実行ピクセルサイズが約12 $\mu\text{m}$ から約2.6 $\mu\text{m}$ に、撮影ピッチが0.5°から0.2°と細かいピッチで撮影したことも大きく寄与していると考えられる。

これまでの放射光CTイメージング測定により、実用鋼として多く用いられているニッケル基合金溶接金属やステンレス鋼中に生じたSCCについて、それら鋼中におけるき裂の鮮明な3次元像およびき裂進展挙動に関する基礎データを得ることができた。これらき裂に関するデータは、UTシミュレーションの入力データとして直接取り込むことが可能となり、UTシミュレーションのより一層の効率化と高度化に反映できると期待される。

#### 4. 今後の課題

Ni基合金溶接金属内やステンレス鋼母材に生じたSCCは、同一ロット材や同一環境条件であっても生じたき裂の形態は採取場所により顕著に異なることが明らかになった。このことは少数の個体数データでSCCき裂の分布や形状を分類、特徴化することには問題があることを示唆しており、今後さらに数多くのき裂データの集積を図る必要があることがわかった。

またき裂の分布が鮮明に捉えられたことにより、き裂進展経路を決定する要因、特にき裂進展と結晶方位との相関性について調べる手段としてCTイメージングは有効と考えられる。早急にき裂の3次元分布と3次元的な結晶方位との相関を調べる手法の開発が望まれる。

#### 【参考文献】

- [1] 古村 他：超音波 TECHNO Vol.13, No.2(2001), P.10
- [2] 古川 他：保全学、Vol.3, No.3(2004), p.51
- [3] 非破壊検査 Vol. 48, No.4, No.5(1998)、p.234
- [4] 超音波 TECHNO Vol.13 No.2[2001], p.1
- [5] 財発電設備技術検査協会、技術レビューVol.3、pp.1-37(2007)
- [6] SPring-8 重点産業利用課題成果報告書(2007B1941)、pp.191-194
- [7] SPring-8 Research Frontiers 2007, p.158

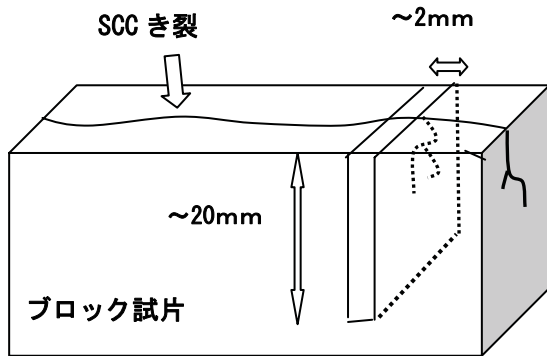


図-1 測定用試料の採取法



図-2 測定用試料の外観

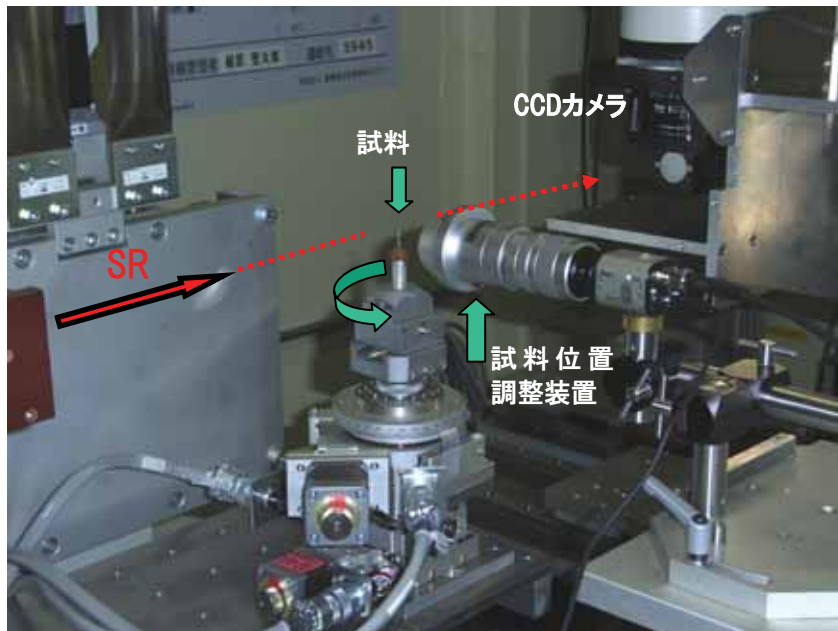


図-3 CT イメージング測定装置の概観

表-1 CT イメージング測定条件

	NI合金SCC	SUS-SCC
ビームライン	BL19B2	
使用ハッチ	ハッチ 3	ハッチ 1
SR光エネルギー	37 keV	
ビーム照射範囲	12×10 mm	2.7×2.7 mm
カメラ長	410, 800 mm	100 - 300 mm
ピクセル数	1024×1024	4000×2600
実効ピクセルサイズ	約 12 μm	約 2.6 μm
撮影条件	0 - 180° 回転	
撮影ピッチ	0.5°	0.2°
露出時間	3 秒	1.2 秒
復元法	Filtered Back Projection 法	

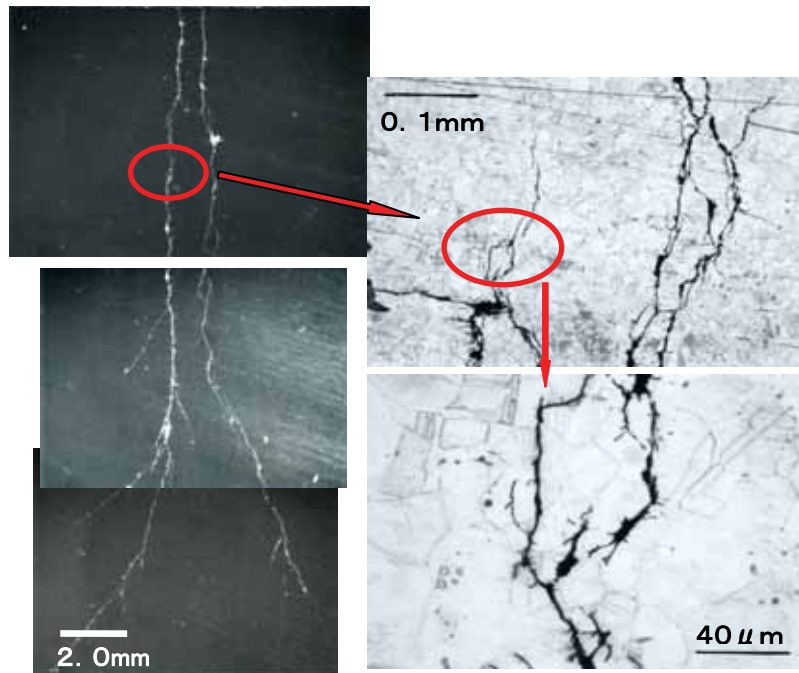


図-4 (a) TGSCC 試料の光学顕微鏡によるマイクロ組織観察結果

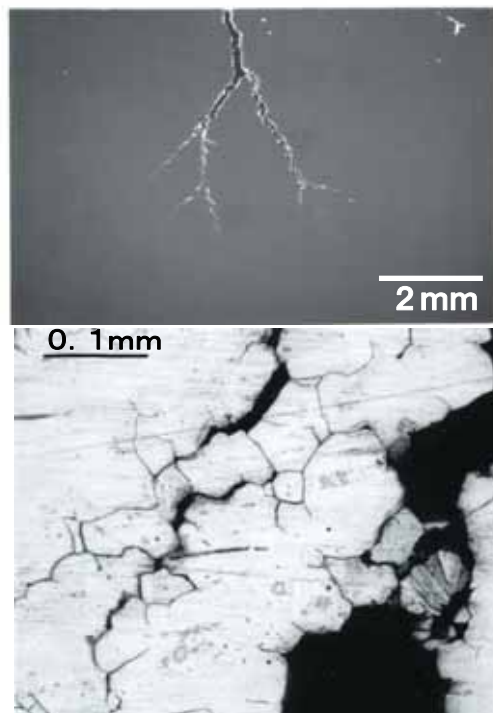
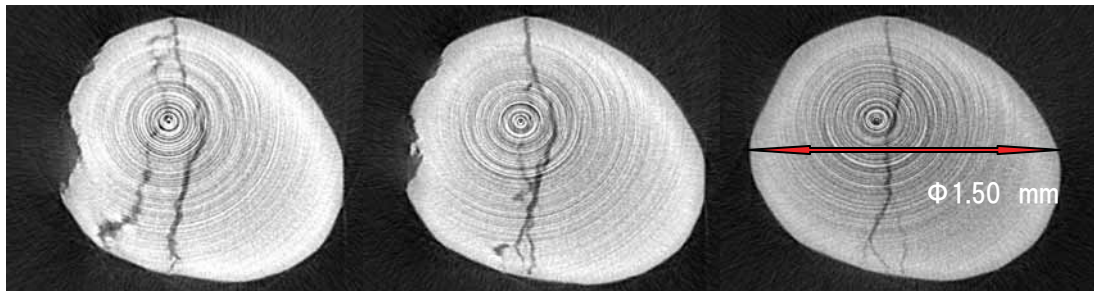


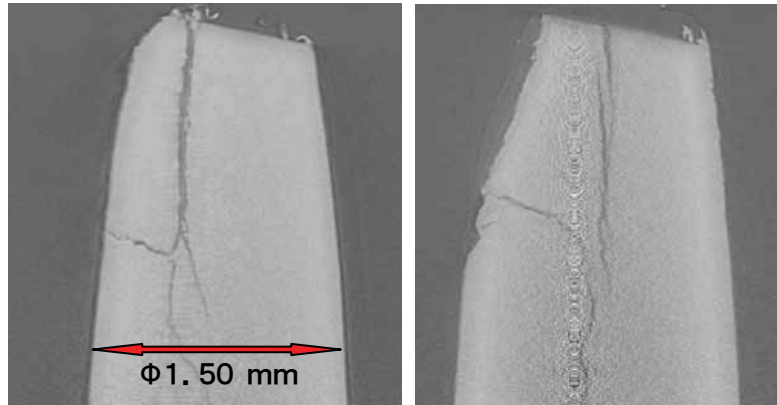
図-4 (b) IGSCC 試料の光学顕微鏡によるマイクロ組織観察結果



表面から738  $\mu$ m深さ

表面から840  $\mu$ m深さ

表面から1044  $\mu$ m深さ



側面から278  $\mu$ mの位置

側面から894  $\mu$ mの位置

図-5 鋼中 TGSCC き裂の横断面および縦断面構成像

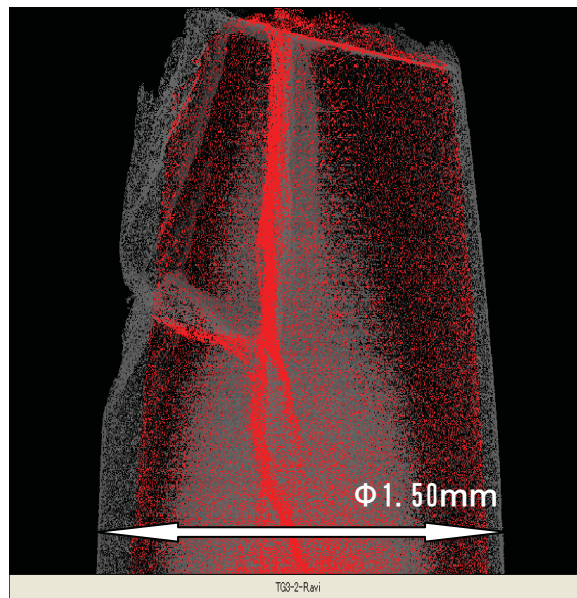


図-6 TGSCC き裂の3次元分布再構成像 (試料 No. TG-3-2-R)

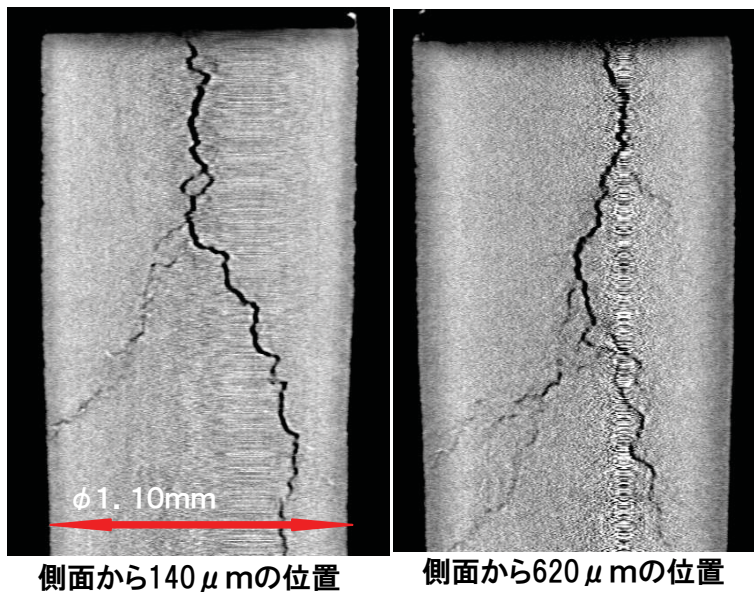
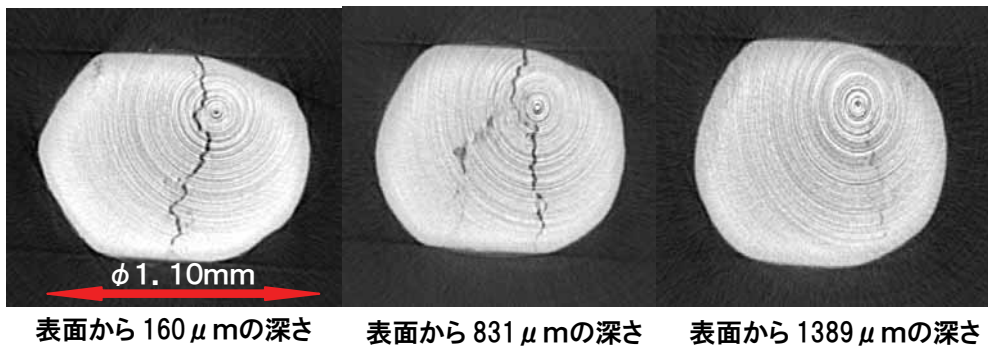


図 - 7 鋼中 IGSCC き裂の横断面および縦断面構成像

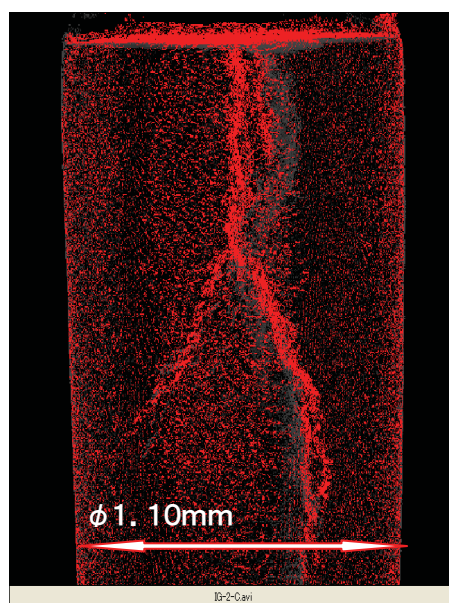


図 - 8 IGSCC き裂の 3 次元再構成像 (試料 No. IG-2-C)

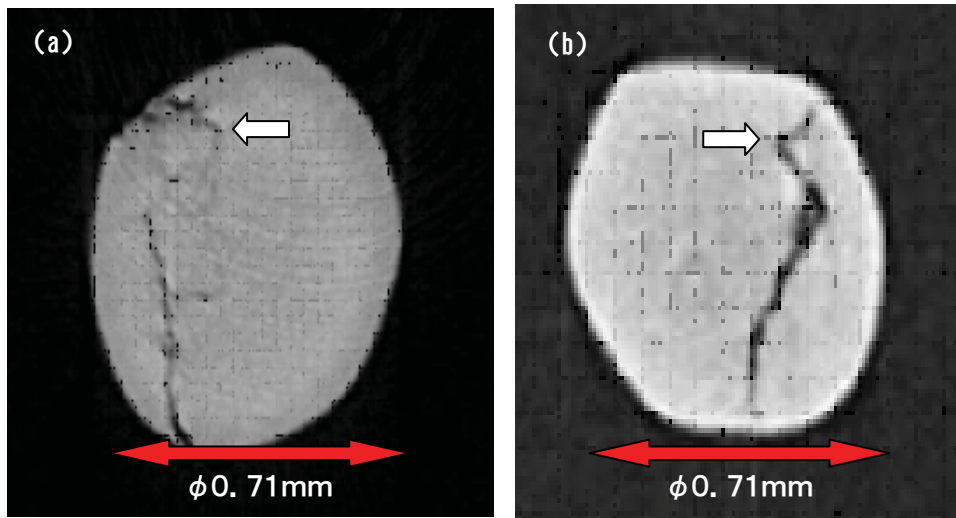


図 - 9 Ni 基合金溶接金属内 SCC き裂の横断面構成像の比較  
(a) ハッチ 1、カメラ長：300mm (SUS-SCC 条件)  
(b) ハッチ 3、カメラ長：410mm (Ni 基合金 SCC 条件)