BL01

ステンレス鋼 SCC き裂のコンプトン散乱γ線

イメージングによる観察

財団法人 発電設備技術検査協会 中東重雄 兵庫県立大学工学研究科 藤城智之、山本厚之 高度産業科学技術研究所 堀川賢、寺澤倫孝、宮本修治

【緒言】

超音波探傷(UT)における超音波の伝播状況をシミュレーションする技術は、試験体対 象部位内での超音波の伝播や反射の様子を時系列で把握し、反射エコーや探傷結果の解析を支 援する技術の一つとして大変有効な技術であり、UT 技術の向上にも有用である。そこで超音 波の伝播をシミュレートし、欠陥からの反射信号を解析する超音波計算機シミュレーション (UT シミュレーション)の開発が精力的に進められている。この UT シミュレーションに用 いられる代表的な超音波の伝播解析法には、有限要素法や差分法による数値解析やレイトレー ス法のような近似解析などがある[1-2]が、財団法人発電設備技術検査協会(発電技検)では、 有限要素法による大規模超音波探傷シミュレーションシステムの開発[3-4]を進めており、その 技術はすでに実用段階に達している[5]。

この UT シミュレーションの構築には、試験体の形状や物性値をはじめ、試験体中の欠陥 に関する 3 次元形状や分布に関する情報が重要かつ、必須となる。特に欠陥形状に関する情報 は、UT シミュレーションの高精度化や高度化に不可欠である。特に原子力発電設備や化学プ ラントにおいて損傷原因の大半を占めると言っても過言ではない応力腐食割れ (SCC)に関す る情報は、非常に重要である。しかし SCC 欠陥は、き裂幅が狭く、しかも複雑に分布する線 状欠陥であるため、その形状を模擬することは難しく、実際の 3 次元形状や分布を観察するこ とはこれまでは困難であった。しかし最近になって筆者らは、ステンレス鋼や Ni 基合金のよ うな実用鋼内に発生した SCC に関する 3 次元形状や分布について、S Pring-8 の 37keV の放射 光を用いた CT イメージング法によりはじめて観察した[6-7]。図1 には、オーステナイト系ス テンレス鋼 SUS316L 内の粒界型応力腐食割れ (IGSCC)についての CT イメージング結果の一 例を示す[8-11]。図 1(a) は、光学顕微鏡による試料のミクロ組織像、(b) は CT イメージン グによる横断面構成像、(c) は同じく縦断面構成像、(d) は Filtered Back Projection 法により 3 次元像に再構成した結果である。き裂は粒界に沿って複雑に進展している様子が鮮明に捉えら れている。このように CT イメージング法により SCC き裂の詳細な情報が得られたことによ り UT シミュレーションは、飛躍的に高精度化した。

一方、UT シミュレーションの使用に際しては、そのモデルの有効性の評価や検証が重要 であり、必須でもある。検証には、当該試験体について UT 測定を行い、UT シミュレーショ ンによる解析を行うとともに、非破壊にてその欠陥位置やサイズを測定し、それら結果を比較

1



 図1 37keV 放射光によるステンレス鋼中 SCC き裂の CT イメージング像

 (a) 光学顕微鏡によるミクロ組織
 (b) 横断面構成像、(c) 縦断面構成像
 (d) 3 次元再構成像



Table 1 *γ*線イメージング測定条件

	条 件
電子線のエネルギー	1.0 GeV
照射レーザの種類	$CO_2 \nu - \# (\lambda : 10.54 \mu m)$
(波長) / y 線最大	1.76MeV
エネルギー	Nd:YAG レーザ(λ : 1.064 n m)
	16.7MeV
レーザパワー	4 Watt
γ線照射時間	1 Hr. 3 Hrs. 6Hrs. 9Hrs.
透過像の記録	イメージングプレート(IP)
	FUJIFILM BAS-SR
再生までの時間	23 分
試験片の厚さ	$10\mathrm{mm}\sim\!50\mathrm{mm}$
人工スリット	幅:0.245mm、深さ:1mm、
	3mm, 5mm

することによって確実に検証できる。それに は UT 測定が可能な大きい試料についての 非破壊内部欠陥検出法が必要となる。そこ でその方法として、コンプトン散乱γ線イ メージング法の適用を検討した。

【実験方法】

測定に供した材料は、オーステナイト 系ステンレス鋼 SUS316L および SUS304 で、300℃の高温高圧純水中にて水質およ び応力条件を加速し、粒界型応力腐食割れ (IGSCC)を発生させ、ブロック状に切り 出した。板厚は 10mmから 50mmである。 また標準試料として 60W×20H×10 t m mのオーステナイト系ステンレス鋼 SUS 316L ブロックに、幅 0.245mm、深さ 1m m、3mmおよび 5mmの人工スリットを 付与した試料および SUS316L 鋼に幅 0.245



CO₂ レーザの場合 Nd:YAG レーザの場合
 図3 γ線イメージング測定装置全景

mm、深さ 2mmの人工スリットを等間隔 に 21本付与した試料をそれぞれ準備した。 SCCを付与したブロック試片の外観を**図2** に示す。 γ 線イメージング測定は、New SU BARU・BL01 ビームラインを用い、波長 10.54 μ mの CO₂ Laser および 1064 n mの Nd: YAG Laser を照射し、1.76MeV および 16.7MeV のコンプトン散乱 γ 線を発生さ せ用いた。透過像の記録は、分解能 50 μ mのイメージングプレート (IP)を用いた。 また Nd: YAG Laser 照射の場合は、電子 対生成によって生じる陽電子を排除するため IP の前面にマグネットを設置し測定した。主な 実験条件を Table 1 に、実験室内の測定装置の外観を図3 にそれぞれ示す。

【結果】

1.76MeV の γ線(CO₂ Laser 照射)を用いたイメージングに対するコントラストについて、 厚さ 10mmのステンレス鋼人工スリット試料(スリット幅 0.245mm、深さ 1.686mm、2mm 間隔で21本付与)を用いてその様子を調べた。その結果を図4に示す。γ線ビームの中心よ り左右に7本程度のスリットコントラストが確認できる。スリットのコントラストは、ビーム 中心より 3~6本分程度離れた位置でのコントラストが最も鮮明である。この位置でのγ線エ ネルギーは、約1MeV~0.6MeVと計算される。また板厚の効果について、厚さ10mmおよび 30mmのステンレス鋼人工スリット試料を用い、照射時間を 3Hrs.、6Hrs.および 9Hrs.まで変 えて調べた。その結果の一例を図5に示す。照射時間が3Hrs.の場合、厚さ10mmではスリ ットコントラストはビームの中心より5本(ビーム中心より10mmの位置)程度まで確 認できる。厚さ 30mmでは 4 本(同 8mm)程度まで確認できる。6Hrs.照射では厚さ 10 mmの場合、6本目(12mm)まで、30mm厚では7本目(14mm)まで確認できる。さ らに 9Hrs.照射になると、厚さ 10mmおよび 30mmともに 7 本目(14mm) まで確認でき る。以上の結果、CO₂ Laser 照射によるイメージング測定条件では、①スリットコントラス トは、ビーム中心より 3~6本離れた位置、すなわちビーム中心より 6~12mm離れた位置で のスリットコントラスト像が最も鮮明である、②幅 0.245mm、深さ 1.686mmのスリット試 料では、板厚10mmと30mmとでは得られた透過像コントラストに顕著な差異は認めら れない、③透過像のコントラストは、照射時間が 6Hrs.までは蓄積効果が認められるがそ れ以上では飽和傾向を示す、ことが明らかになった。



CO₂Laser、10mm t、Irrad. Time: 3Hrs.

図4 ステンレス鋼スリット試料のγ線 イメージング透過像





図 6 には、板厚 10mmの SUS316L 鋼中に生じた IGSCC き裂の透過像の結果を示す。測 定は、1.76MeV のγ線(CO₂ Laser)を用い、3Hrs.照射した。ビームの中心は、き裂位置より 約 5mm (10mm)離れた位置に設定した。その結果、Y 字状の IGSCC き裂のコントラスト が確認できた。この IGSCC き裂の幅は、20 倍の拡大鏡による 2 次元面測定では、表面近傍 のき裂幅は、約 250 μm、き裂先端部近傍のそれは約 50~100 μmであった。



また図7には、ステンレス鋼溶接部近傍に生じたSCCについて1.76MeVの γ 線を用いたイメージング結果を示す。板厚は10mm、照射時間は、3Hrs.である。この試料は、上部母材部の溶接熱影響部(HAZ)にSCC起点があり、溶接金属に沿ってき裂は母材部を進展し、途中より溶接金属内に侵入しているステンレス鋼では珍しい形態のSCCである。本法によりき裂の進展挙動が確認できた。またき裂長さは、約13mmと測定された。同じ試料について6MeVのX線によるイメージング測定を行った結果、き裂長さは約16mmであった。

【まとめ】

New SUBARU の BL01 に設置された γ線ビームラインを用い、CO₂ Laser 照射により発 生させた 1.76MeV のコンプトン散乱 γ線によるイメージン測定を行った。その結果、ステン レス鋼に付与した人工スリット試料 (スリット幅 0.245mm、深さ 1.686mm) では厚さ 30 mmまで鮮明なスリット像を確認することができた。またステンレス鋼中に生じた IGSCC き 裂については、厚さ 10mmまでき裂像を確認することができた。しかし Nd: YAG Laser 照射 (16.7MeV γ線) の場合については、いずれの試料についても透過像を観察することができ なかった。

【結論】

UT シミュレーションの検証のため、UT 測定が可能なブロック状試料内の欠陥、特に SCC き裂の非破壊検査法としてγ線によるイメージング法を検討した結果、1.76MeV のγ線イメ ージングにより板厚 10mmのステンレス鋼中 SCC き裂の観察が可能であることが明らかと なった。この板厚はUT測定が可能であり、本法が有効な非破壊検査法であることがわかっ た。

【今後の課題】

UT シミュレーションの検証に用いるためには、γ線イメージング法によって得られたき 裂長さについての精度評価が必要である。また現状はイメージングプレートによる測定である が、最終的には CCD カメラによる CT イメージング測定を行い、き裂の3次元情報を得る予定である。さらにγ線エネルギーが高く、Laser のエネルギー移送が可能であることから現場での適用可能性が期待ができる Nd: YAG Laser 照射によるγ線イメージング法について、その測定条件の検討を行う予定である。

参考文献

- [1]古村一朗他、非破壊検査 Vol. 48、No. 4、No. 5(1998) p. 234
- [2]古村一朗他、超音波 TECHNO Vol.13 No.2(2001)
- [3] 古村一朗他、超音波 TECHNO、Vol. 13、No. 2 (2001) p. 10
- [4]古川敬他、保全学、Vol.3、No.3 (2004) p.10
- [5]古村一朗他、発電技検技術レビューVol.4 (2008)、p.10
- [6] 中東重雄他、日本原子力学会 2007 年春の年会、A36、2007, 3, 27、名大
- [7] 中東重雄他:日本原子力学会秋の大会、Q8、2008,9,4、高知工大
- [8] 中東重雄他、平成18年度先端大型研究施設戦略活用プログラム成果報告書(2006B)p.204、2007,7、(財)高輝度光科学研究センター
- [9]S. Nakahigashi et al, SPring-8 Research Frontiers 2007, p. 158 (2008), JASRI
- [10] 中東重雄他日本金属学会 2009 年秋期(第145回),287、2009,9,16,
 - 京大・吉田キャンパス
- [11]中東重雄他、保全学、Vol.8, No.3 (2009) 69-75