

直接接触高調波法による応力腐食割れの可視化

Higher harmonic imaging of stress corrosion cracking using a direct contact technique

石田 仁志 (Hitoshi Ishida)*¹ 川嶋 紘一郎 (Koichiro Kawashima)*²

要約 原子力発電所の供用期間中検査の超音波探傷試験は、パルス反射法により行われる。検出すべき欠陥の割れ面が接触または密着していると、超音波は割れ面を通過し、割れ先端から散乱波が生じない。その結果、先端位置の同定困難あるいは誤認が生じ、正確な寸法測定が困難となる。これまでに著者らは、入射振幅の増大に伴う欠陥面の接触状態の変化によって生じる高調波を用いて、水浸法により人工閉口欠陥の可視化を行い、従来のパルス反射法では困難な閉口き裂面の可視化が可能であることを明らかにした。高調波法を実機の配管などへ適用するためには、配管などの表面に探触子を直接接触させる測定が不可欠である。本報告では、超音波の散乱減衰が著しいNi基合金溶接部に人工的に発生させた応力腐食割れに対し、高調波直接接触式斜角探傷法を適用し、その画像化が可能であることを示した。

キーワード 超音波探傷試験, 非線形超音波, 高調波, Ni基合金溶接部, 応力腐食割れ

Abstract Ultrasonic testing as an in-service inspection on nuclear power plant components is usually performed by a pulse echo technique. If crack faces to be detected are closed and in contact, the ultrasonic waves pass through the crack faces, therefore no waves is scattered on the crack tip. Then, the crack tip location is not identified, thus accurate measurement of the crack size is impossible. So far, we have visualized artificial closed cracks of sub-micron gap by using higher harmonics with water immersion method. The harmonic wave amplitude reflected from the semi-closed crack increases with the incident wave amplitude. In order to apply the method using higher harmonic technique to ultrasonic testing for the piping of actual plants, the probe must be directly placed on the surface of the pipe. We tried to measure artificial stress corrosion cracking within Ni-based alloy weldments, which show the strong scattering and higher attenuation of ultrasonic waves. In this paper, we show higher harmonic image such SCC cracks by using the direct contact angle transducer.

Keywords ultrasonic testing, non-linear ultrasonic, high harmonic waves, Ni-based alloy weldment, stress corrosion cracking

1. まえがき

原子力発電所の原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する原子炉容器や1次冷却材管などの溶接部は、供用期間中検査の体積試験として、超音波探傷試験が行われる⁽¹⁾。応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking, SCC) などの欠陥が検出された場合には、その設備の健全性を評価するために欠陥の寸法が測定される。欠陥の深さは、割れの開口部からの反射波と先端からの散乱波のそれぞれの位置座標から算出される。ステンレス鋼やNi基合金溶接部では、

伝搬する超音波の材料組織による散乱減衰が著しいため、この組織散乱波が割れ先端からの散乱波の識別を困難にする。特に割れの先端からの散乱波を正しく識別、特定するためには、相応の装置、手法と試験員の高度な知見と技量が求められる。

供用期間中検査の超音波探傷試験は、入射したパルス状の超音波の音響的不連続部分における反射、散乱によって、割れを検出、測定するパルス反射法⁽¹⁾⁽²⁾により行われる。割れ面が接触または密着していると、超音波の一部は割れ面を通過し、先端からの散乱波振幅が低下し、捉えるべき信号を得

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

*2 (有)超音波材料診断研究所

ることができない。その結果、先端位置の検出が困難となり、誤認が生じ、正確な寸法測定が困難となる。原子力発電所の原子炉容器の管台異材継手部のNi基合金溶接部で検出されたSCCはこのような閉口き裂であったと著者らは推定する⁽³⁾。

このような問題に対処するため、非線形超音波法による閉口き裂の可視化が試みられてきた。高調波法により、Ni基合金溶接部の粒界SCC⁽⁴⁾⁽⁵⁾、铸造ステンレス鋼内の疲労き裂⁽⁵⁾が可視化された。従来のパルス反射法では困難な、閉口き裂面を可視化できるという点が、高調波法の優位な点である。

著者らは、接合する面に加工した深さが10 μmから0 μmまで直線状に減少する凹みを加工し、拡散接合⁽⁶⁾により模擬閉口き裂とした試験片を製作し、水浸高調波法により模擬き裂部を可視化した⁽⁷⁾。励起電圧の増大に伴い模擬き裂部からの反射(散乱)波の面積が増大するという結果から、模擬き裂面の部分的閉閉口により高調波が発生していることを示した。

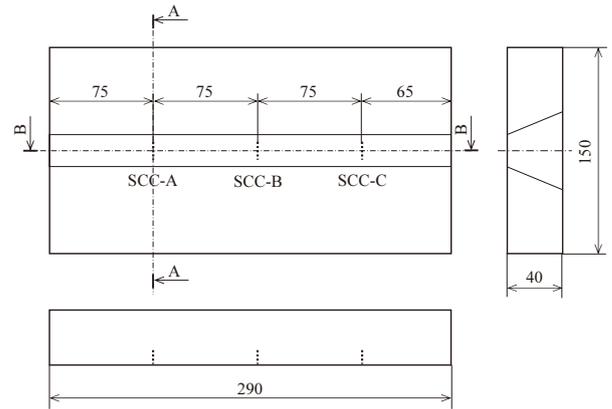
接触する割れ面の測定に有効な高調波法を実機に適用するためには、検査対象構造物を水に浸すことが容易ではないことから、探触子を被検体に直接接合させる探傷法が不可欠である。そこで、本研究では、直接接触高調波法によりNi基合金溶接部のSCCの可視化を試みた。

2. 試験片

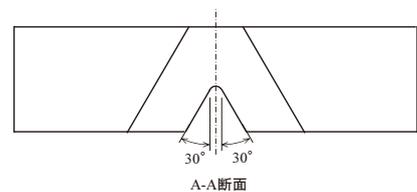
図1に、測定したNi基合金溶接部にSCCを付与した試験体を示す。ステンレス鋼(SUS316)製の平板の長手方向に、インコネル600溶接部があり、これと直交方向に割れ面を持つSCCが付与されている。

SCCを付与する領域は、図1に示すような形状に加工後、割れ感受性の高いインコネル溶接材により再溶接されている。割れの付与位置に加工した放電加工ノッチを起点として、試験体長手方向に引張応力を負荷し、テトラチオン酸水溶液に局部的に浸漬させ、目標値として表面からの深さ20 mm、表面開口部長さ13 mmのSCCを進展させた。

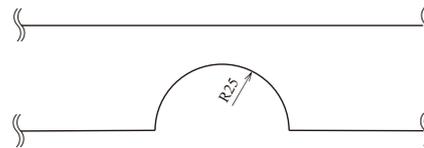
なお、この試験体は、過年度においてNi基合金異材接手溶接部のSCCを割れの開口面側から探傷する技術を検討するために製作したものであることから、通常の配管や管台の開先形状に対する欠陥発生想定位置が内外面に対して逆である。



(1) 形状寸法図



B-B断面



(2) 再溶接部詳細

図1 インコネル溶接部 SCC 試験体

3. 測定

3.1 測定装置

図2に、高調波測定システムの概要を示す。所定の入射角を持つ探触子を試験体表面上に配置し、スキャナにより走査する。トーンバースト超音波送信装置(RITEC製RPR-4000)により、連続する複数の波数を持つバースト波を送信し、SCCからの反射波または散乱波を受信する。受信波からハイ

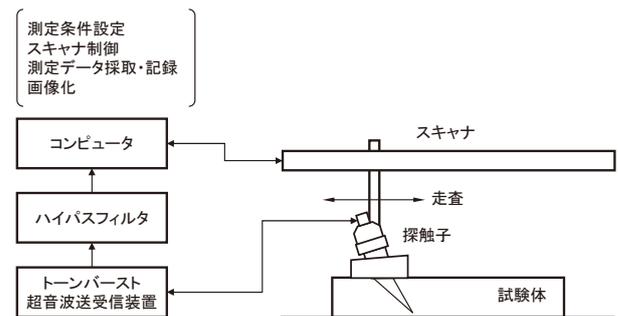


図2 高調波測定システム

パスフィルタ (High Pass Filter ; 以下, HPF) により抽出された高調波は, デジタルデータに変換され, スキャナの位置情報とともに, コンピュータに取り込まれ, Insight製データ採取・記録ソフト Insight Scanにより記録される. 記録された測定データを用いて, Insight製 Insight Analysisまたは Zetec製 Ultra Visionにより SCCを画像化した.

図3に, 直接接触斜角法の測定に使用した探触子を示す. 探触子には, 周波数5 MHz, 水中焦点距離300 mmの集束型垂直探触子を使用した. この探触子に液体の遅延材 (グリセリン) を充填させた筒と試験体表面に配置するくさびを組み合わせた. これにより, 遅延材内部で生じる縦波と横波のモード変換による損失と遅延材内部の多重反射波と受信波との重畳を避けることができる. SCC割れ面に相当する表面からの深さ20~40 mmの範囲を測定するために, 超音波の集束深さ位置を30 mmとした. くさびの形状は, 屈折角が45度となる入射角をもつ.

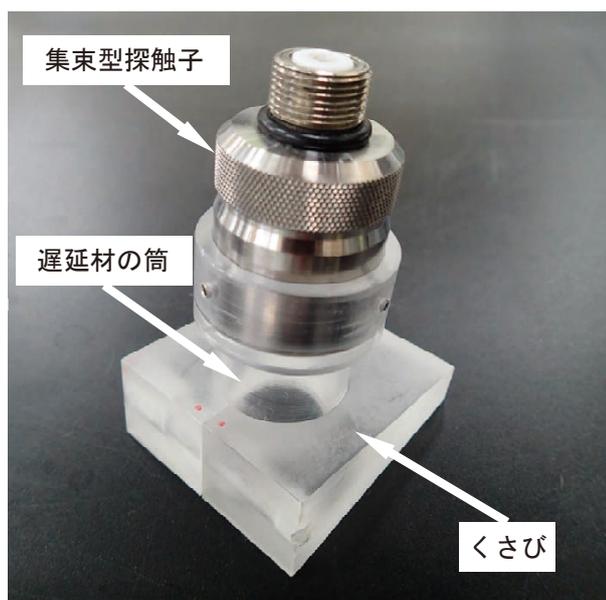


図3 探触子, 遅延材およびくさび

3.2 測定条件

トーンバースト超音波送受信装置による探触子への入力は, 周波数1.3, 2.0, 3.5, あるいは6.0 MHz, 波数3サイクル, 電圧860 V_{pp}の正弦波とした. 受信信号から3次高調波を抽出するために4種類の入力周波数に対してそれぞれHPFの遮断周波数を, 3, 4, 8, あるいは15 MHzに設定した.

深さ方向の位置座標は, 校正用横穴試験体の深さ20 mmから4 mm間隔で36 mmまで加工された横穴を持つ校正用試験体を用いて校正した.

3.3 測定方法と画像化

図4に, SCC試験体と測定画像の例を示し, 測定方法と画像化の範囲を説明する. 試験体のSCC付与面と反対面に探触子を配置し, 超音波をSCCに入射し, 探触子を配置した面のSCC-A側の端の中心を原点0として, 溶接線方向(x)と直交する方向(y)に探触子をスキャナにより走査し, 探触子走査面から試験体底面を含む範囲(z)の受信信号を記録した. 測定した範囲は, $x = 30\sim 310$ mm, $y = -25\sim 25$ mm, $z = 0\sim 45$ mmである.

測定画像は, 水平面(Cスコープ), 断面(Bスコープ), 端面(Dスコープ)の3種類に描画した. このなかから, 3方向において黄矢印で示した範囲のデータだけを画像化する. これにより, 対象とするSCC周辺のみを描画し, 表面近傍に現れる遅延材内部反射波や突合せ溶接部散乱波の除去が可能である. ここでは, SCC-B周辺を選定した例であり, DスコープはSCC-B近傍を画像化したものである.

Cスコープ上のひし形, Bスコープ上の半円形, Dスコープ上の三角形は, 図1に示したSCC付与加工部再溶接部の形状を示している. Bスコープ上の深さ $z = 40$ mm位置の水平方向の青線は試験体底面を, $x = 290$ mm位置の垂直方向の青線は試験体端面をそれぞれ表し, これらが交差する位置に, 試験体の底面角部からの反射波が表れている.

SCCのない位置における受信信号におけるノイズレベルを, 振幅を表す縦軸の5%になるよう信号強度を調整し, 各スコープを描画した.

図中の赤い矢印の位置に, SCCからのものと推定される反射波または散乱波が表示される.

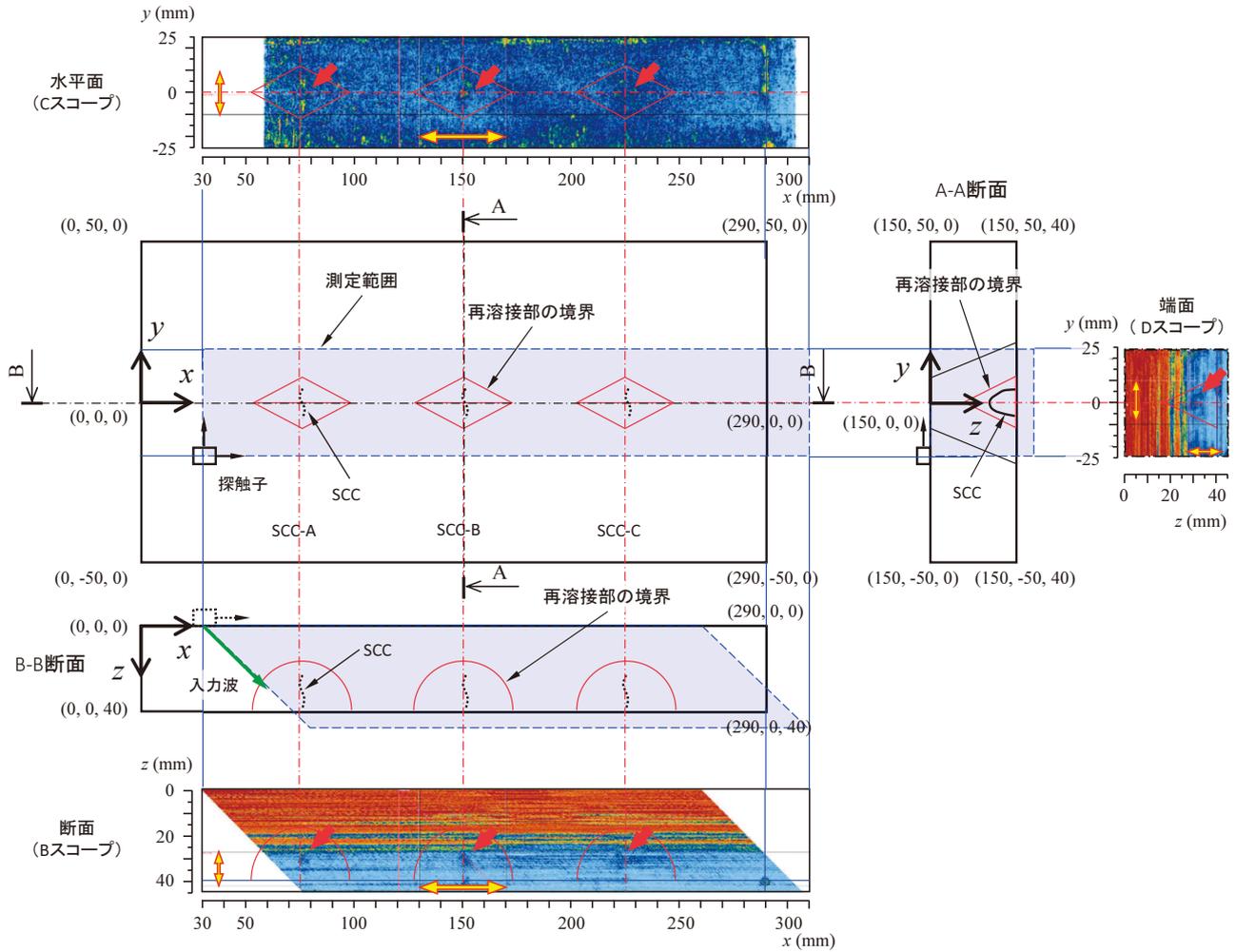


図4 試験体の画像化範囲

4. 測定結果および考察

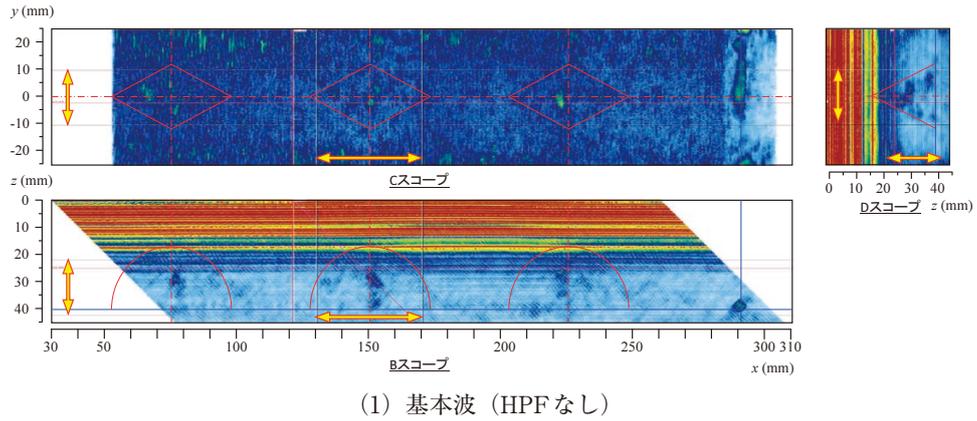
4.1 画像化結果

図5～8に、SCC試験体の測定結果を、異なる4種類の入力周波数でのHPFの有無を比較して示す。HPFを使用した場合が、高調波による測定画像、HPFを使用しない場合は、入力周波数による測定画像である（以下、基本波による画像という）。B、CおよびDスコープは、黄矢印で示した範囲のデータのみで描画したものであり、DスコープにはSCC-B近傍の画像を示した。

BおよびCスコープにおいて、いずれの入力周波数でも基本波、高調波にかかわらず、3個のSCC付与位置で（再溶接部の中心）にSCCからのものと推定される散乱波が識別された。

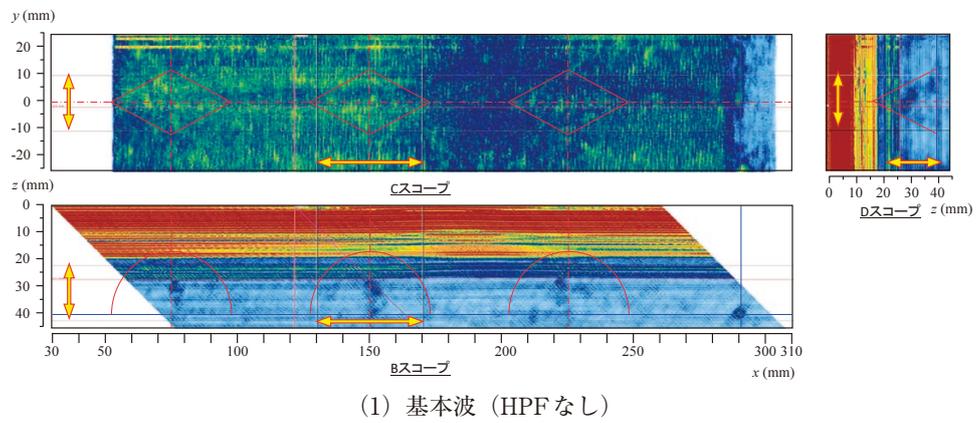
Dスコープにおいては、再溶接部を表す三角形の内側の領域に、複数の散乱波が観察された。これら

の散乱波の位置は、いずれの条件でもほぼ一致しており、散乱源となるものが存在することが推定される。



(2) 高調波 (3 MHzHPF)

図5 SCC試験体の測定結果 (1.3 MHz入力)



(2) 高調波 (4 MHzHPF)

図6 SCC試験体の測定結果 (2.0 MHz入力)

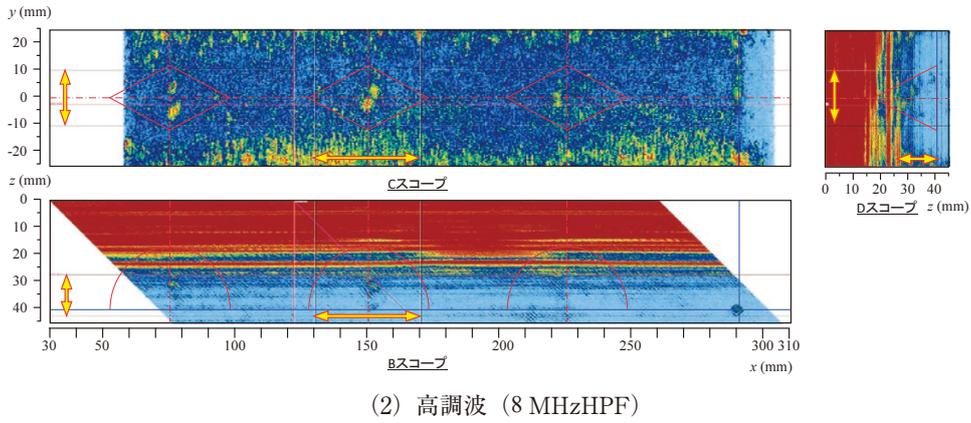
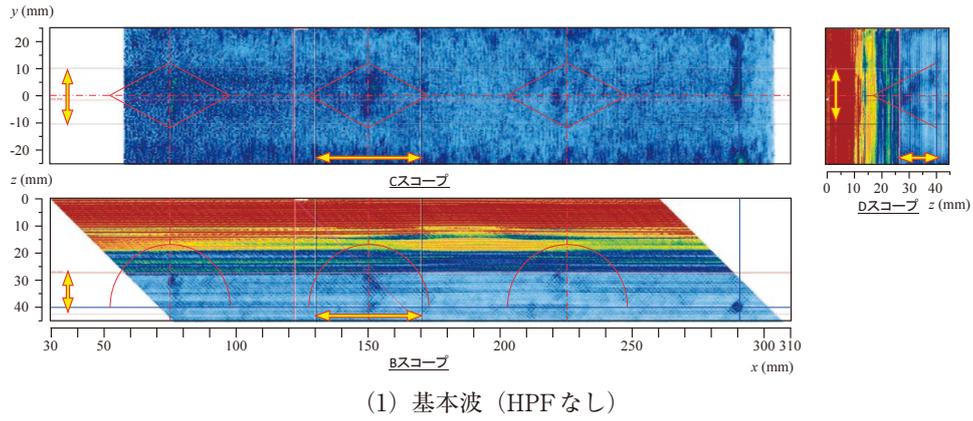


図7 SCC試験体の測定結果 (3.5 MHz入力)

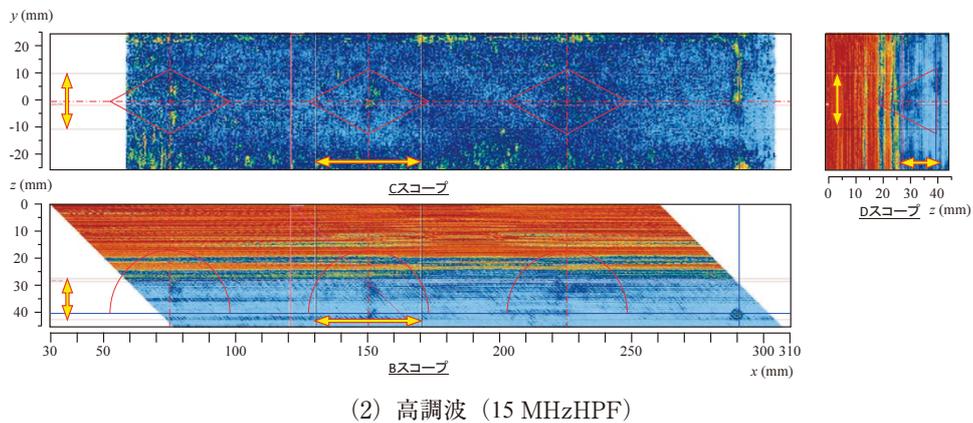
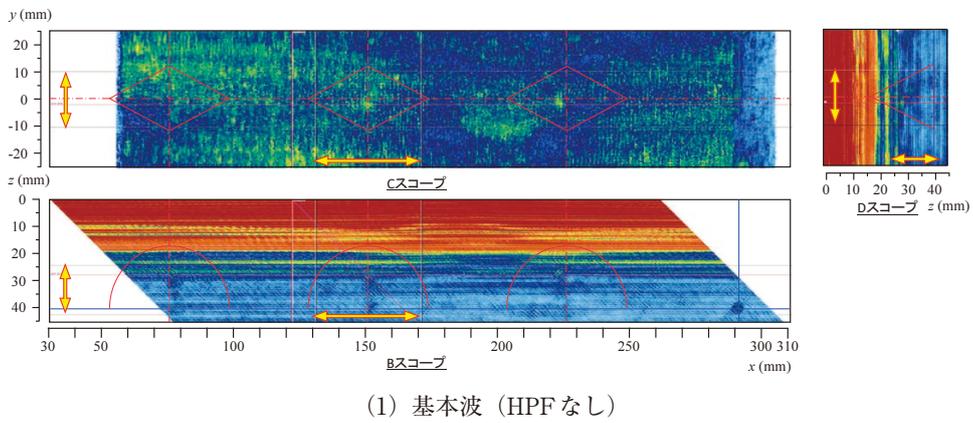


図8 SCC試験体の測定結果 (6.0 MHz入力)

4.2 画像の分析

(1) 入力周波数の影響

入力周波数が1.3および2.0 MHzである図5, 6について, 基本波と高調波を比べると, Bスコープにおいて, 基本波画像の方がSN比が大きく, SCCからの散乱波の識別が容易である. 入力周波数が3.5および6.0 MHzである図7, 8では, 高調波画像の方が, SN比が大きく, SCCからの散乱波を識別しやすい. 1.3および2.0 MHzは, Ni基合金溶接部のような減衰の大きい材料に対してパルス反射法で多用される周波数域に相当し, 高調波でなくてもSCCからの散乱波をとらえることができたものと考えられる. しかし, 減衰の大きい材料には必ずしも適切ではない周波数3.5および6.0 MHzでは, Bスコープにおいて, 高調波画像の方がSN比は高く, 散乱波の識別が容易である.

入力周波数1.3および2.0 MHzの3次高調波4および6 MHzは, 探触子の公称周波数5 MHz帯域に含まれるにもかかわらず, 3.5および6.0 MHz (3次高調波10.5および18 MHz)の方が, 高調波によるSCCの識別が容易である. 入力周波数と高調波周波数および探触子の公称周波数の最適な組み合わせについて, さらに検討が必要である.

(2) 入力波数の影響

図9, 10に, 入力周波数1.3および3.5 MHzの場合の, 入力波数による変化を示す.

前述したように, 1.3 MHz入力の場合, 高調波より基本波のSCC識別性が良いことは波数に依存しない. しかし, 5サイクル入力の場合, 高調波, 基

本波いずれの場合も, 受信波の波数が多いために散乱波の範囲も大きくなり, 散乱波源位置が見かけ上大くなり, 位置の特定, 識別に影響することが懸念される.

3.5 MHzの場合は, 1サイクル入力においても, 高調波の方が識別性が良く, 反射源位置の特定, 識別性も十分である. 著者らが見出した1サイクル入力による高調波測定の可能性⁽⁸⁾が, SCCに対しても有効であることを示している. SCCの割れの接触状況によっては, さらに割れ面を可視化できる可能性も考えられる. 今後のさらなる検討が必要である.

(3) パルス反射法との比較

従来のパルス反射法によってSCC試験体の測定を行った.

高調波測定と同じ探触子と探傷器とするZetec製フェーズドアレイ装置Dynarayを使用し, 1振動子探触子で探傷する設定により測定を行った. 受信信号に対して, 遮断周波数域2~10 MHzのバンドパスフィルタを使用した.

図11にパルス反射法による測定結果を示す. いずれのSCC付与位置にもSCCからと推定される散乱波は検出されなかった.

前述のように, 高調波だけでなく基本波の画像においても, SCCからと推定される散乱波が識別された. 高調波および基本波の測定で用いた探傷器の入力波形はバースト波であるのに対して, 超音波パルス法で用いた探傷器ではスパイク状であることから, 入力エネルギーの差により結果が異なると考えられる. すなわち, 入力エネルギーの大きいパー

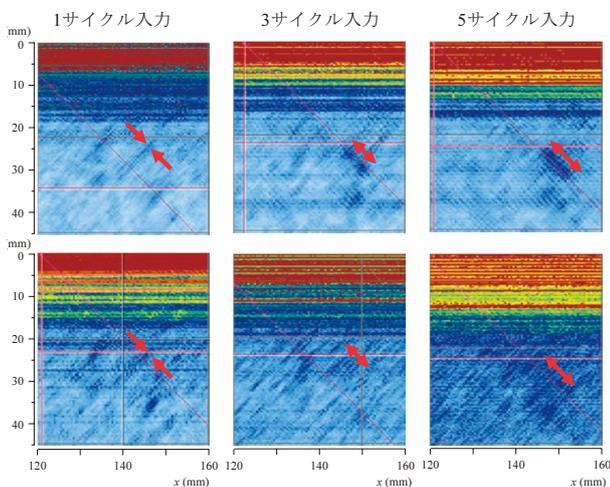


図9 入力波数による変化 (入力周波数 1.3 MHz)

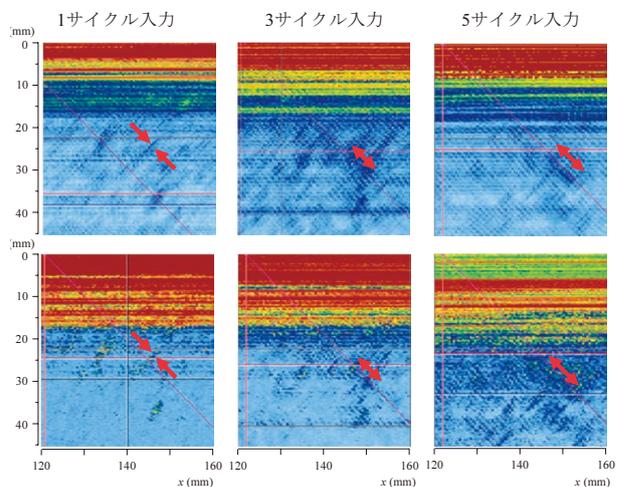


図10 入力波数による変化 (入力周波数 3.5 MHz)

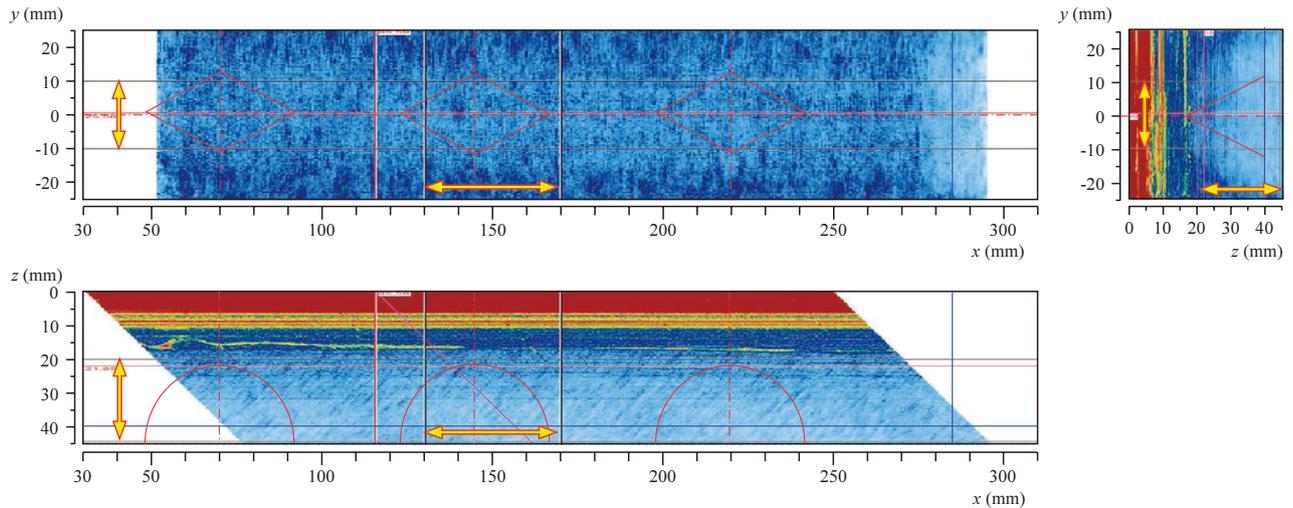


図11パルス反射法による測定結果

スト波では、散乱波の強度が大きくなり、識別が容易になったと考えられる。パルス反射法においては、1振動子探触子より欠陥検出性に優れたフェーズドアレイ技術を用いた探傷法があり、今後これらとの比較検討が必要である。

5. あとがき

高調波超音波法を実機配管等への適用するために不可欠な直接接触式斜角探傷法により、Ni基合金溶接部のSCCを測定し、その画像化を試み、次のことが分かった。

- (1) 直接接触斜角法による高調波測定によって、SCCの画像化が可能である。
- (2) パースト波の高調波による測定では、今回の入力条件の中では3.5および6.0 MHzという高い入力周波数条件において、高いSN比でSCCが識別できる。
- (3) 1振動子探触子を用いた測定では、SCCの識別性において、パースト波による測定はパルス反射法より優れている。

このように、Ni基合金溶接部のSCCに対する直接接触斜角法による高調波測定の可能性を確認することができた。

さらに、実機への適用性を確かなものとするために、次の検討が必要である。

- (1) 入力周波数、高調波周波数および探触子公称周波数の最適な組み合わせ。
- (2) 高調波に期待される割れ面の可視化。
- (3) フェーズドアレイ技術を用いたパルス反射法

による測定との比較検討

参考文献

- (1) 発電用原子力設備規格 維持規格 (2012年版) (JSME S NA1 - 2012), 日本機械学会, (2013).
- (2) 日本工業規格 非破壊試験用語, JIS Z 2300, (2020).
- (3) 関西電力, 大飯発電所3号機の定期検査状況について (原子炉容器Aループ出口管台溶接部の傷の原因と対策), プレスリリース, <http://www.kepco.co.jp/pressre/2008/0926-3j.html>, (2008).
- (4) 川嶋紘一郎, 今西龍介, “Ni基合金溶接部粒界応力腐蝕割れの高調波画像化”, 非破壊検査, 60 (12), pp.713-719, (2011).
- (5) 石田仁志, 川嶋紘一郎, “高調波超音波法のNi基合金溶接部およびステンレス鋳鋼材への適用性の検討”, 第19回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, pp.25-28, (2014).
- (6) 高田一, 碓信光, “拡散接合超音波探傷試験片の接合面品質”, 日本非破壊検査協会平成23年度秋季講演大会講演概要集, pp.91-92, (2011).
- (7) 石田仁志, 川嶋紘一郎, “変動間隙幅を持つ模擬閉口き裂の高調波画像化”, 非破壊検査, 66 (12), pp.595-600, (2017).
- (8) 川嶋紘一郎, 石田仁志, “受信波形のゆがみの特徴量を用いる非線形超音波法の提案 (第1報: 模擬閉口き裂面からの散乱波波形

のゆがみの観察)”, 日本非破壊検査協会,
第23回超音波による非破壊評価シンポジウム
講演概要集, pp.159-162, (2016).