

Ni 基合金溶接部の SCC 割れ面の可視化

Visualization of a Stress Corrosion Cracking in Ni Based Alloy Weldment

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

要約 これまでに著者らは、接触または密着する欠陥の割れ面の可視化に有効とされる高調波法によって、超音波の散乱減衰の影響が大きいとされる Ni 基合金溶接部に人工的に付与した応力腐食割れの画像化が可能であることを示した。現行法である超音波パルス法のうち最も高度な手法とされるフェーズドアレイ探触子を用いて、Ni 基合金溶接部に付与加工された応力腐食割れを測定し、高調波法との比較、測定条件としての屈折角と焦点深さの影響に関する知見を得た。

キーワード 超音波探傷試験, 非線形超音波, 高調波, フェーズドアレイ探触子, Ni 基合金, 応力腐食割れ

Abstract The high harmonic method is effective for visualizing the crack surface having cracks which are close to each other or which are connected. So far, we have demonstrated that the high harmonic method is able to visualize stress corrosion cracking artificially applied to Ni-based alloy welds, which are greatly affected by ultrasonic scattering attenuation. Using a phased array probe, which is one of the most advanced devices for the currently available ultrasonic pulse technique, we measured stress corrosion cracking applied to Ni-based alloy welds and compared those results with results obtained by the high harmonic method. We obtained knowledge about the effects of refraction angle and focal depth as measurement conditions.

Keywords ultrasonic testing, nonlinear ultrasonic wave, high harmonic wave, phased array probe, Ni based alloy, stress corrosion cracking

1. はじめに

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。応力腐食割れ (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。

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する超音波パルス法^(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、超音波は割れ面を部分的に通過し、先端からの散乱波が十分生じず、捉えるべき信号を得ることができない。その結果、先端位置の不明、誤認が生じ、正確な寸法測定に影響する。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)、鑄造ステンレス鋼内の疲労き裂⁽⁶⁾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、模擬閉口き裂を含む試験片を製作し、水浸高調波法により模擬き裂部を可視化し、模擬き裂面の部分的開閉口により高調波が発生していることを実証した⁽⁶⁾。高調波法を実機に適用するためには、探触子を被検体に直接接触させての探傷が不可欠であることから、この直接接触斜角法による高調波測定手法の検討を進めてきた。これまでに、1 振動子集束型探触子を用いて Ni 基合金溶接部の SCC 割れ面の可視化が可能であることを確かめ、同じ探触子を用いた超音波パルス法よりも高い SN 比で可視化できることが分かった。しかし、超音波パルス法には、フェーズドアレイ探触子を用いた探傷法など高度な測定手法があり、これらとの比較も不可欠である。

本稿では、現行法のうち最も高度な手法とされるフェーズドアレイ探触子を用いた測定結果を報告する。

*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

2. 試験片

図1に、測定したインコネル溶接部SCC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(2)に示すような形状に加工したうえで、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。試験体長手方向に引張応力を負荷し、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、テトラチオン酸水溶液に局部的に浸漬させ、表面からの深さ 20mm、表面開口部長さ 13mm を SCC 付与寸法の目標値として、割れを進展させた。

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。

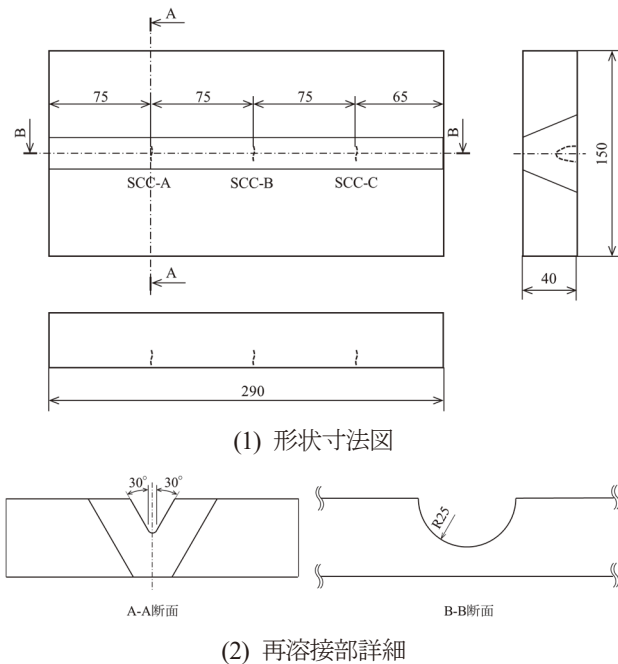


図1 インコネル溶接部 SCC 試験体

3. フェーズドアレイ探触子による測定

3.1 測定方法

図 2 に、フェーズドアレイ探触子による測定システムを示す。フェーズドアレイ探触子をフェーズドアレイ装置に接続し、コンピュータの制御解析ソフトにより、測定条

件の設定、測定データの採取・記録、記録データからの画像化と分析を行った。

試験体の SCC の付与面とは反対側の面に、フェーズドアレイ探触子を配置し、スキャナにより走査した。スキャナの位置情報は、測定データと合わせて記録された。

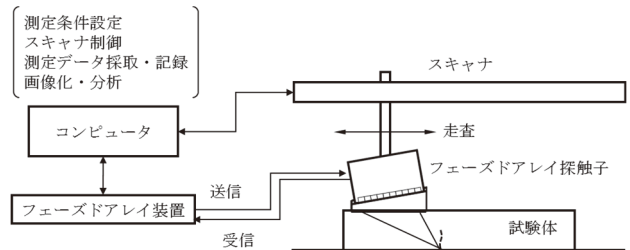
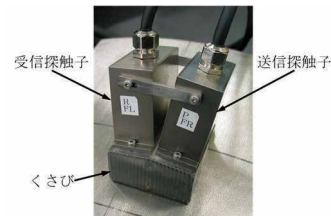


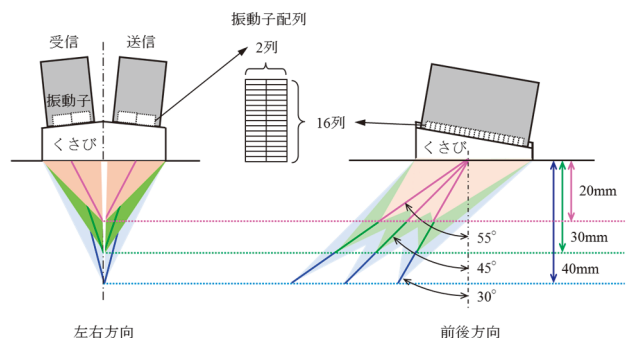
図2 フェーズドアレイ探触子による測定システム

図3に、フェーズドアレイ探触子を示す。振動子が左右方向に2列、前後方向に16列に配列されたフェーズアレイ探触子2個を送信用と受信用で使用し、斜角探傷用のくさびに入射方向に対して左右に配置した。

SCC 割れ面に相当する表面から 20, 30, 40mm の深さに焦点を設定し、それぞれの焦点深さを屈折角 30, 45, 55 度で測定を行った。



(1) 外観写真



(2) 振動子配列と測定条件

図3 フェーズドアレイ探触子

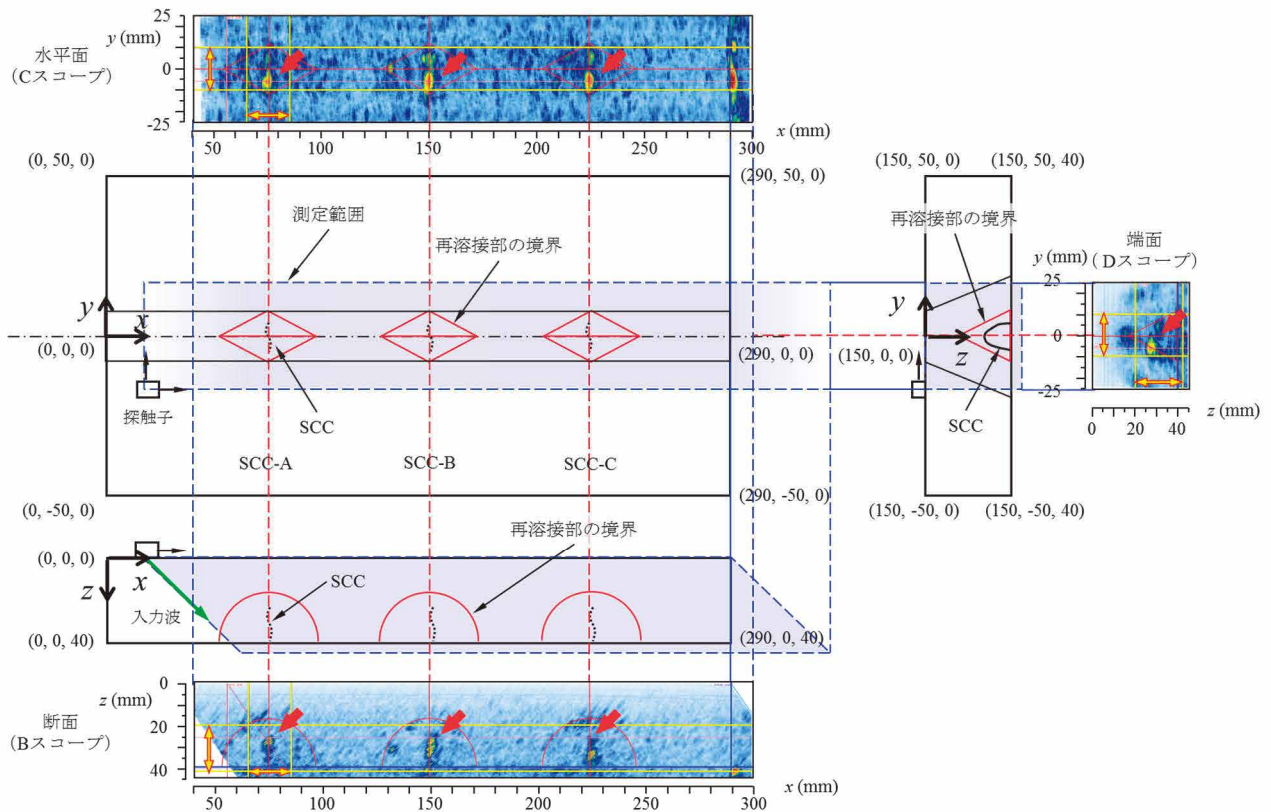


図4 SCC 試験体の測定と画像化の範囲

3.2 測定結果と考察

図4に、SCC 試験体の測定範囲と画像化の範囲を示す。この測定範囲に対し、試験体の3方向のCスコープ(水平面)、Bスコープ(断面)、Dスコープ(端面)として描画した。それぞれ3方向において黄矢印で示した範囲のデータを画像化し、DスコープはそれぞれのSCC近傍を画像化した。

赤線で示した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(2)に示したSCC付与加工した再溶接部の形状を示している。 $z=40\text{mm}$ の青線は試験体底面を、 $x=290\text{mm}$ の青線は試験体の端面を示している。端面と底面が交わる角部での反射波が表れている。

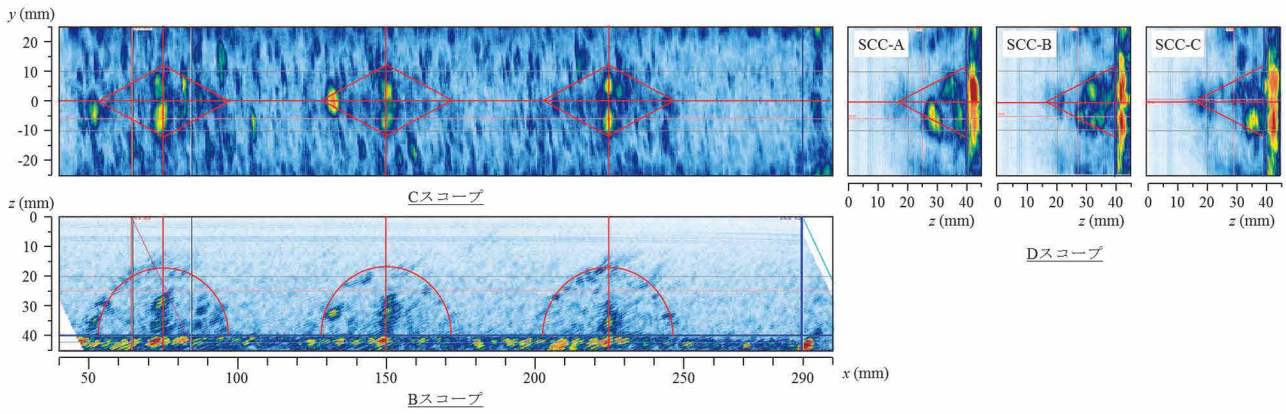
SCCのない位置における受信信号におけるノイズレベルを、信号波形画面の縦軸の5%に調整し、各スコープを描画した。

図5、6に画像化の結果を示す。図5は屈折角条件による差異を、図6は焦点深さ条件による差異を示している。

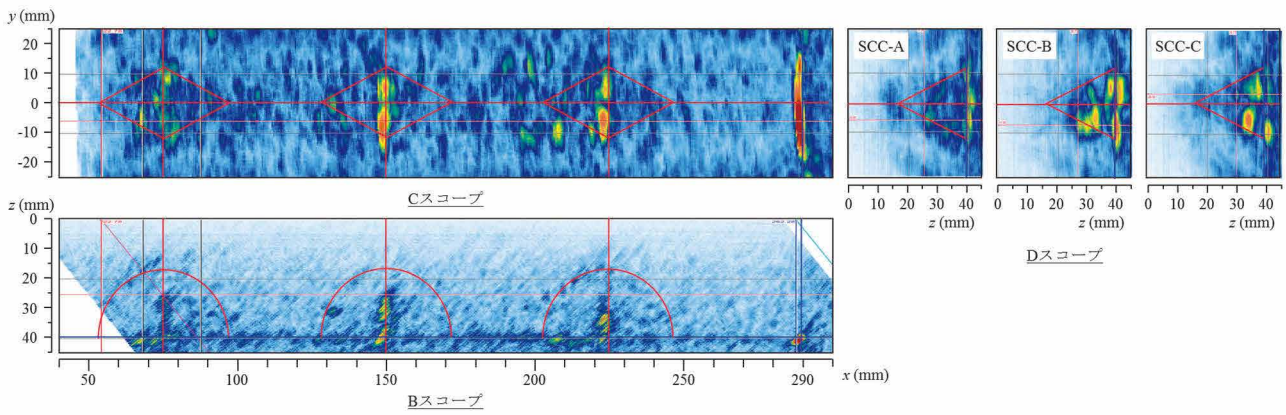
屈折角によって、SCC割れ面からの散乱波の分布が異なる。SCCの平滑でない屈曲する割れ面における散乱位置の違いが表れているものと考えられる。

また、SCC-BおよびSCC-Cの結果では、屈折角が大きくなると、割れ面からと推定される同じ位置の散乱波振幅が大きくなった。割れ面に対向する角度がより垂直に近くなるためと考えられる。しかし、SCC-Aでは、逆に小さくなっている。割れ面の凹凸の高さ、範囲などによって散乱波の発生が異なることも考えられる。割れ面からの反対側からの測定結果を加えて、このような割れ面の凹凸の高さ、範囲などによって変化すると推定される散乱波発生の状況を確認することが必要である。

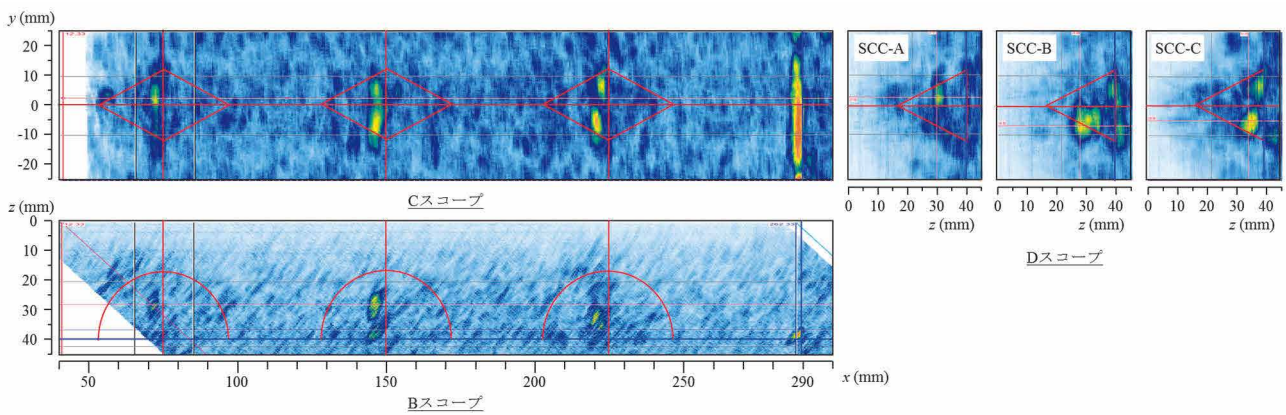
焦点が深くなると、SCC割れ面の散乱源から離れることとなって、割れ面からと推定される散乱波の強度が低下する。焦点深さ40mmは底面深さに相当し、割れ面からの散乱波の識別性は良くない。割れ面をねらう焦点深さが有効であると考えられ、前述の検討項目に加えて、焦点深さによる検討も必要である。



(1) 屈折角 30 度 (焦点深さ 30mm)

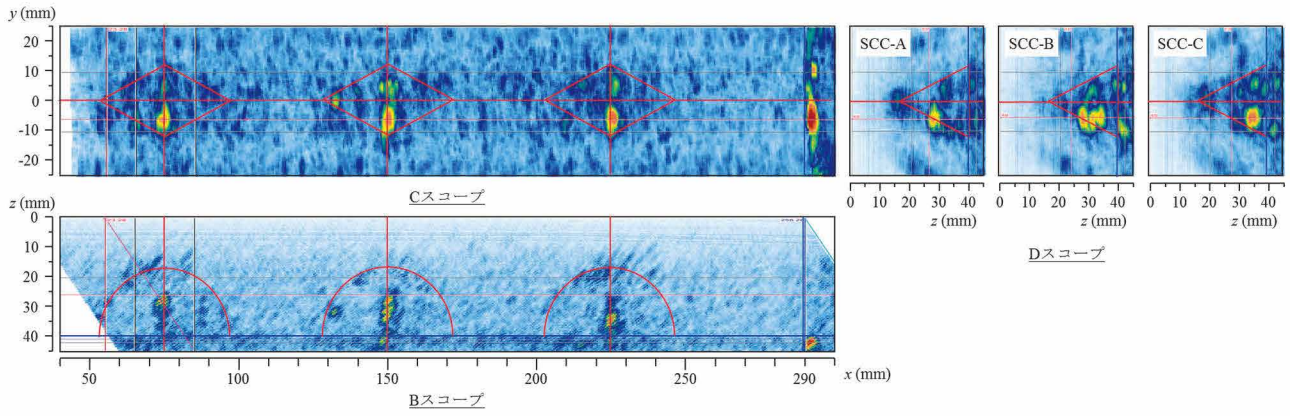


(2) 屈折角 45 度 (焦点深さ 30mm)

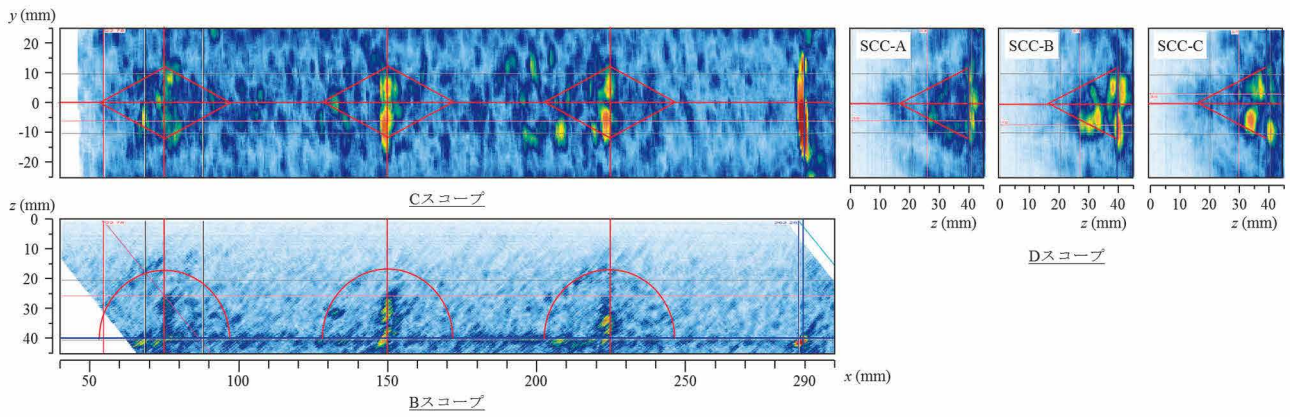


(3) 屈折角 55 度 (焦点深さ 30mm)

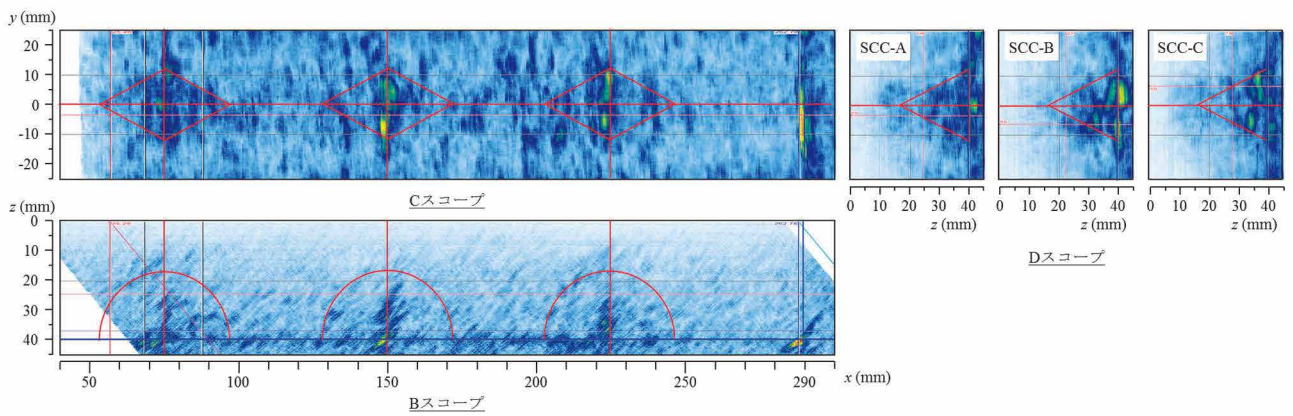
図 5 測定結果 (屈折角条件の比較)



(1) 焦点深さ 20mm (屈折角 45 度)



(2) 焦点深さ 30mm (屈折角 45 度)



(3) 焦点深さ 40mm (屈折角 45 度)

図 6 測定結果 (焦点深さ条件の比較)

4. 高調波法との比較

図 7 に、超音波パルス法であるフェーズドアレイ法と高調波直接接斜角法の D スコープ画像の比較を示す。フェーズドアレイ法は、焦点深さ 20, 30mm, 屈折角 30, 45, 55 度の結果を、高調波法は、くさび距離の異なる 2 種類の 1 振動子集束型 5MHz 探触子で入力周波数 3.5, 6.0MHz, ハイパスフィルタ (HPF) のない場合と 3 次高調波を抽出した場合の結果を示している。

本検討でのフェーズドアレイ法の結果は、次の点から高調波直接接斜角法の結果よりも、次の点で優位にある。

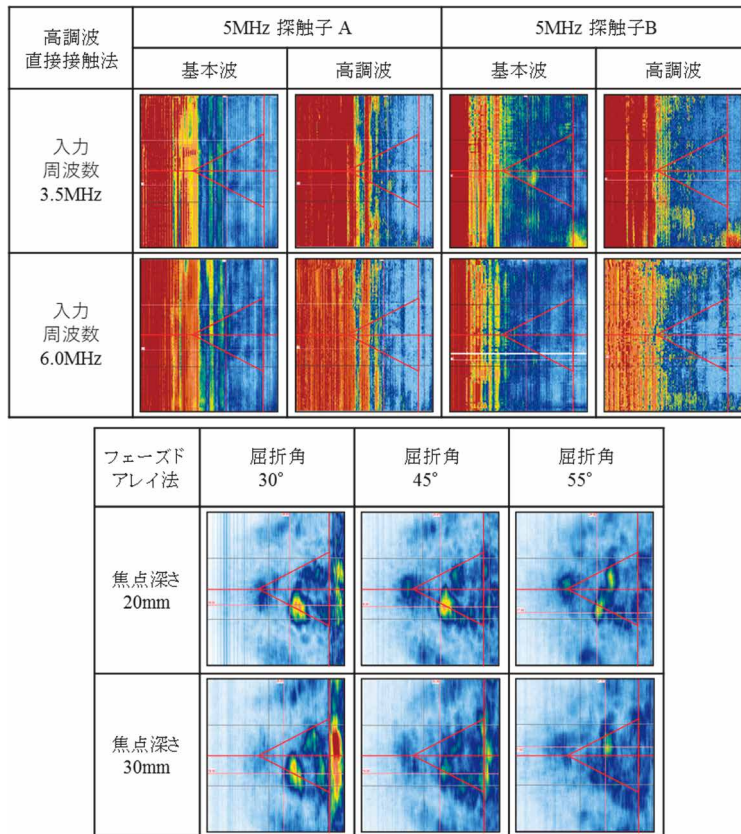
1) フェーズドアレイ探触子の配列全体の振動子の大きさは、高調波直接接斜角法の探触子の 1 個の振動子の大きさより大きく、焦点の効果が大きい。

2) 高調波直接接斜角法の探触子は 1 振動子送受信型であり、探触子くさび内の反射波によって、受信波の識別に影響している。フェーズドアレイ探触子は、送受信分割型であり、探触子くさび内の反射波の影響はない。

フェーズドアレイ法と高調波直接接斜角法のいずれの結果にも、SCC 割れ面に相当する領域において、割れ面からと推定される散乱波が識別される。

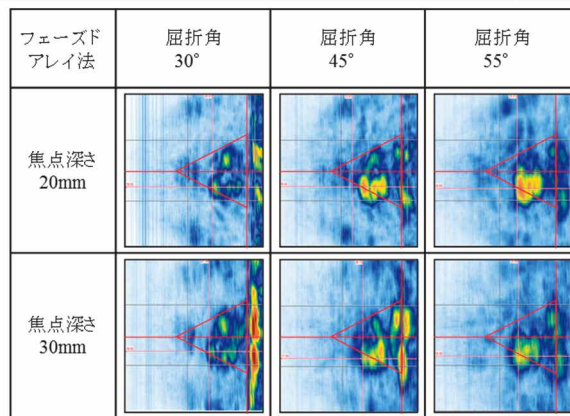
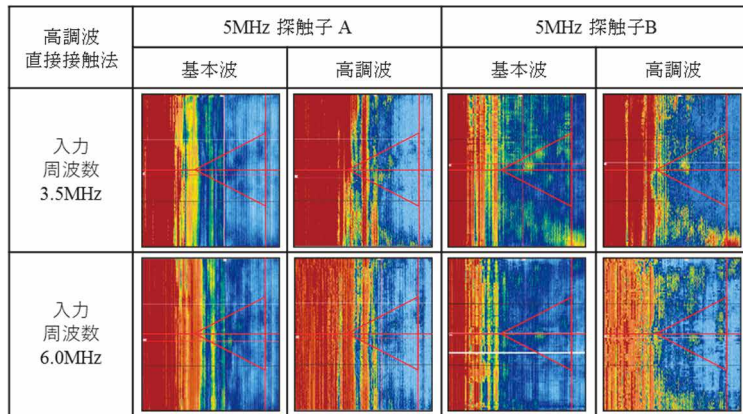
しかし、フェーズドアレイ法では識別されない位置に、高調波直接接斜角法によって明瞭に識別できるような散乱波は得られず、高調波法の優位な点である閉口き裂面を可視化には至らなかった。

前述のフェーズドアレイ探触子の優位な点、すなわち振動子寸法と送受信分割型について、高調波直接接斜角法に対しても適用し、閉口き裂面を可視化を追究することが必要である。

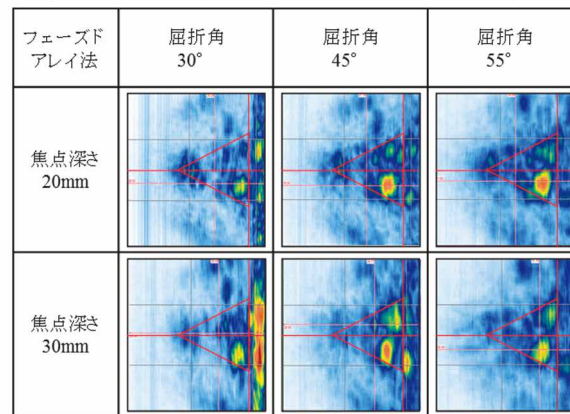
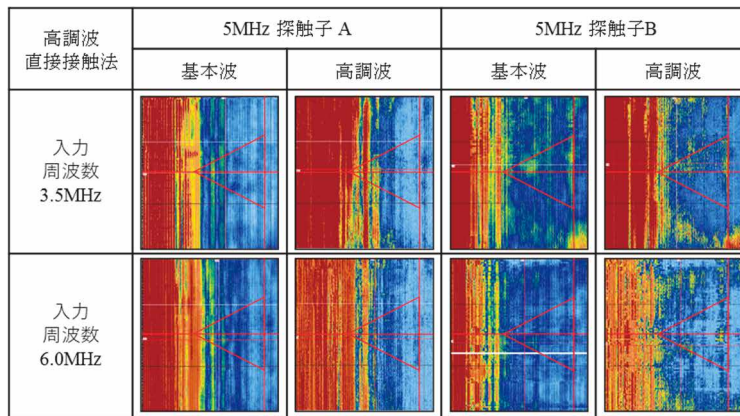


(1) SCC-A

図 7 フェーズドアレイ法と高調波直接接斜角法の比較 (1/2)



(2) SCC-B



(3) SCC-C

図7 フェーズドアレイ法と高調波直接接触斜角法の比較 (2/2)

5. おわりに

実機適用のために検討を進めている高調波法と比較するために、現行法である超音波パルス法のうち最も高度な手法とされるフェーズドアレイ探触子を用いて、Ni 基合金溶接部に付与加工された SCC の測定を行った。

得られた結果は次のとおりである。

- ① フェーズドアレイ法によって SCC 割れ面に相当する領域において、割れ面からと推定される散乱波が識別でき、高調波法においても同様の散乱波が観察される条件があった。
- ② フェーズドアレイ法では識別されない位置に、高調波直接接触斜角法によって明瞭に識別できるような散乱波は得られなかった。従来手法である超音波パルス法では得られないような結果を提供できるような特徴をさらに追究することが必要である。
- ③ フェーズドアレイ法の結果から、屈折角が大きくなると、散乱波振幅が大きくなる。割れ面に対向する角度がより垂直に近くなるためと考えられるが、逆に小さくなる割れもあり。割れ面の性状によって散乱波の発生が異なることも考えられる。
- ④ 焦点深さに応じて、散乱波振幅の大きい領域は変化する。焦点深さ 40mm は底面深さに相当し、割れ面からの散乱波の識別性は良くない。割れ面をねらう焦点深さが有効である。

今後、高調波直接接触斜角法の実機適用化を図るためには、次の検討が必要、有効である。

- ① 従来手法である超音波パルス法では得られないような結果を提供できるような、高調波直接接触斜角法の特徴をさらに追究すること。
- ② 割れ面からの反対側からの測定結果を加えて、割れ面性状による散乱波発生の状況を確認すること。
- ③ 送信と受信の探触子構成、1 振動子集束型探触子またはフェーズドアレイ探触子の使用について検討すること。

参考文献

- (1) 発電用原子力設備規格 維持規格 (2012 年版) (JSME SNA1 - 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) 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).