

レーザー超音波可視化装置による配管内面き裂 の効率的超音波探傷法

An Efficient Method for Detecting Piping Inner Surface Cracking Using a Laser Ultrasonic Visualizing Inspector

黒住 保夫 (Yasuo Kurozumi)*¹ 高坪 純治 (Junji Takatsubo)*² 江淵 高弘 (Takahiro Ebuchi)*³

要約 原子力プラントの配管においては、プラントの運転中に種々の要因で発生する局所的な温度変動が原因で、高サイクル疲労が発生することがある。この高サイクル疲労に特徴的なことは、発生するき裂の向きおよび場所が、その時々々の環境条件に強く影響を受けることにより、予測できないことである。このような事例の検査については、超音波探傷法を用いるのが一般的である。しかし、超音波探傷法は検査範囲が超音波探触子の正面に限られているため、配管の広い範囲について360°方向の検査をする必要がある上、検査自体の信頼性が低い。本研究では、このような方向の特定できないき裂を検査する方法として、独立行政法人産業技術総合研究所が開発したレーザー超音波可視化装置の適用性を検証した。その結果、種々の向きのき裂を効率的に検知できることがわかった。

キーワード レーザー可視化, 超音波探傷, 疲労き裂

Abstract In nuclear power plants, local temperature fluctuations that occur due to various factors during plant operation may cause high-cycle fatigue in pipes. A typical feature of high-cycle fatigue is that the orientation and location of cracking are difficult to predict because the occurrence of cracking is strongly affected by changes in environmental conditions. Although ultrasonic testing is generally used to detect flaws caused by high-cycle fatigue, the applicable range of conventional ultrasonic testing is limited to the front area of the transducer, and so the scanning must be performed for 360° wide around the piping. Moreover, the conventional ultrasonic testing device itself is not reliable. This study verified the applicability of the laser ultrasonic visual inspector developed by the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, which can detect cracking whose orientation is difficult to identify. The results showed that the system can efficiently detect cracks in various orientations.

Keywords laser ultrasonic visualizing, ultrasonic inspection, fatigue crack

1. 緒言

原子力プラントの配管においては、その起動停止に伴う系統の熱過渡による疲労のほかに、プラントの運転中に種々の要因で発生する局所的な温度変動が原因で、高サイクル疲労が発生することがある。この高サイクル疲労に特徴的なことは、発生するき裂の向きが、その時々々の環境条件に強く影響を受けることにより、予測できないことである。

至近の例では、2007年に玄海2号機の余剰抽出配

管の曲り部において、高温水と低温水の熱成層境界面が存在し、この温度変動による高サイクル疲労割れが発見された。⁽¹⁾これを受けて、原子力安全・保安院から類似箇所に対し、検査を行うよう指示が出された。具体的には、このような高サイクル疲労の発生のある領域に対し、非破壊検査として超音波探傷検査を行う場合、き裂に対して直角に超音波が入射されるように探触子の向きを調整し、き裂の進展方向が予測困難な場合は、360°方向の超音波探傷検査を行うこととされた。⁽²⁾この指示に基づき、手探傷による超音

*1 元(株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 現在(株)原子力エンジニアリング

*2 元(独)産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門 現在つくばテクノロジー(株)

*3 非破壊検査(株) 技術本部 安全工学研究所

波探傷検査が行われた。このように広い範囲を 360° 方向手探傷するには、大変な労力がかかる。しかも当該箇所は、原子力発電所の心臓部に近接しており、作業エリアの放射線空間線量率が高いので、このように手間のかかる検査は、被ばく低減の観点からは好ましくない。

その後、各発電所において対策工事が行われた。しかし、今後同様なトラブルが発生した場合に備え、より効率的な検査法を検討する必要がある。一方、(独)産業技術総合研究所においては、パルスレーザーを材料表面に照射して超音波を発生させ、他方で受信した超音波をリアルタイムで映像化し、材料内のき裂等の欠陥を即座に検出するレーザー可視化装置が開発された。(3)(4)

本研究では、このレーザー可視化装置を利用して、様々な方向に進展したき裂を効率的に検出できるか検証するため、配管軸方向に対して傾きを持たせたき裂を有する試験体を用いて実験した。

2. 試験体および試験装置

2.1 試験体

実機トラブル発生箇所を模擬した長さ 2000mm、外径 100mm、肉厚 8.6mm の SUS304 ステンレス鋼配管試験体とその中央部に溶接を施したステンレス鋼溶接配管試験体、ならびに比較のため同形状の炭素鋼配

管試験体を製作した。各試験体の内面には、方向を変えた放電加工スリットを導入した。表 1 に製作した試験体の一覧表を示す。図 1, 2 に、製作した試験体の例を示す。

2.2 試験装置

(独)産業技術総合研究所が開発したレーザー可視化装置は、配管などの材料表面にパルスレーザーを走査させ、表面の熱ひずみにより発生した超音波が材料中を伝播する様子を別に配置した超音波探触子で受信して映像化するものである。この超音波伝播映像が部材損傷により変化することから、き裂や腐食等の欠陥を即座に検出・評価しようというものである。図 3 に、装置の概略図を示す。小型パルスレーザーから周期的に発信されたレーザー光を被検体表面で高速走査させる。各走査点では急激な熱ひずみによって超音波が発生し、その伝搬波形を配管の一方に取り付けた超音波探触子で検出する。レーザー照射範囲は、き裂の位置を中心に、縦横 100 × 300mm または 100 × 600mm とし、レーザー照射ピッチは 1mm である。

信号の検出には、中心周波数 1MHz の垂直探触子と斜角探触子ならびに中心周波数 100kHz の AE センサーを用い、配管端部に設置した。受信探触子とき裂との距離は、700mm である。表 2 に、使用した探触子を示す。受信探触子は、き裂の正面に配置されているときに、最もよく信号を検出する。本研究では、図

表 1 使用した試験体

No.	試験体	材質	寸法 (L × D × t, mm)	欠陥
1	炭素鋼配管試験体	STPG-370	2000 × 100 × 8.6	EDM スリット, 3 個 (0°方向, 45°方向, 90°方向) 25L × 4.3d(50%t) × 0.5w(mm)
2	炭素鋼配管試験体	STPG-370	2000 × 100 × 8.6	EDM スリット, 3 個 (0°方向, 45°方向, 90°方向) 25L × 2.2d(25%t) × 0.5w(mm)
3	ステンレス鋼配管試験体	SUS304	2000 × 100 × 8.6	EDM スリット, 3 個 (0°方向, 45°方向, 90°方向) 25L × 4.3d(50%t) × 0.5w(mm)
4	ステンレス鋼溶接配管試験体	SUS304	2000 × 100 × 8.6	EDM スリット, 2 個 0°方向(溶接線から 25mm, 100mm) 25L × 4.3d(50%t) × 0.5w(mm)
5	ステンレス鋼溶接配管試験体	SUS304	2000 × 100 × 8.6	EDM スリット, 2 個 0°方向(溶接線から 50mm, 75mm) 25L × 4.3d(50%t) × 0.5w(mm)
6	ステンレス鋼溶接配管試験体	SUS304	2000 × 100 × 8.6	EDM スリット, 2 個 45°方向(溶接線上, 溶接線から 50mm) 25L × 4.3d(50%t) × 0.5w(mm)

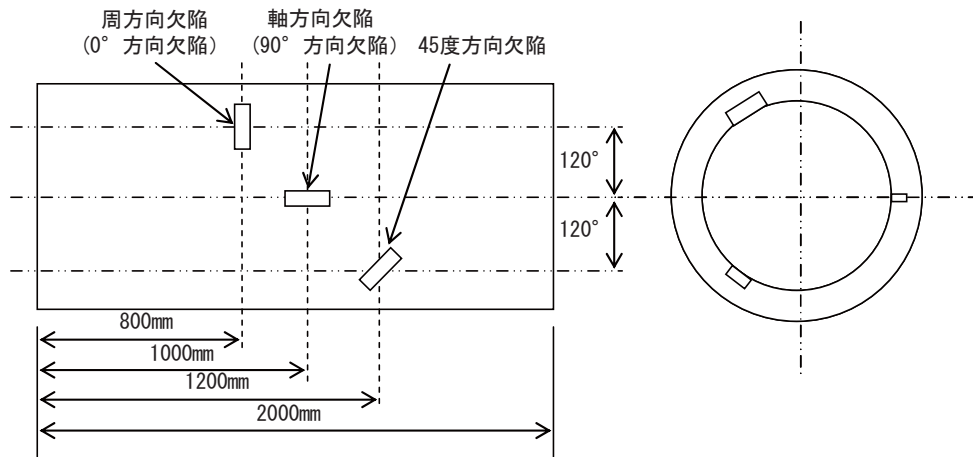


図1 炭素鋼配管試験体 No.1

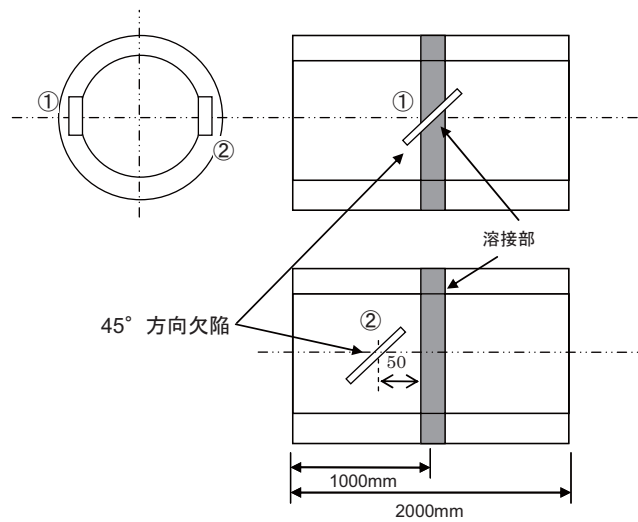


図2 ステンレス鋼溶接配管試験体 No.6

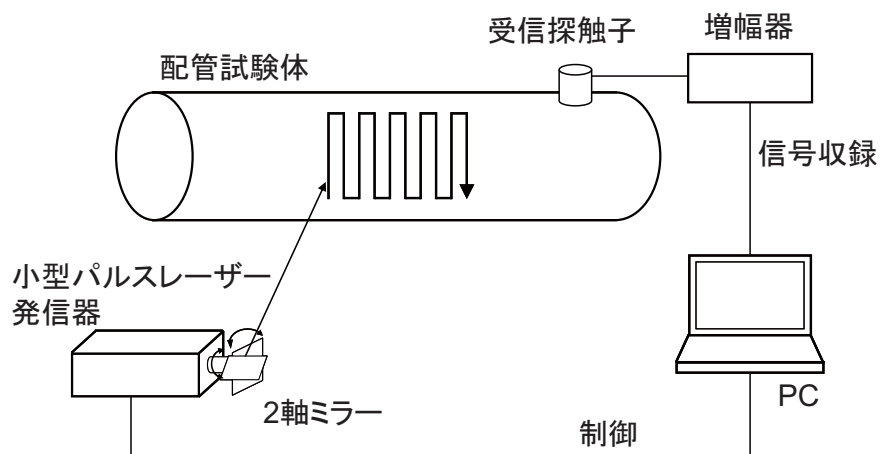
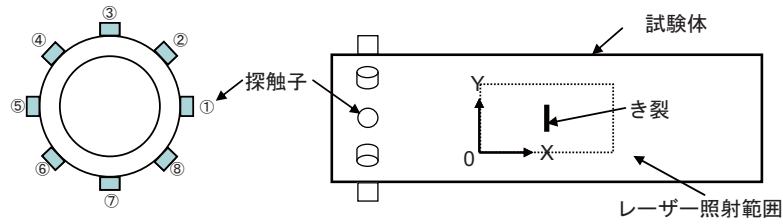
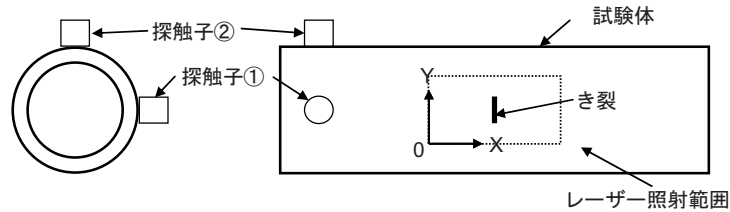


図3 レーザー可視化装置の概略図



(a) 受信探触子位置の影響を調べる時の配置



(b) 重ね合わせ効果確認の時の配置

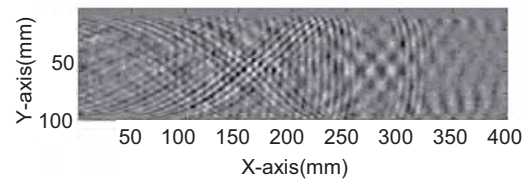
図4 受信探触子の配置

表2 使用した探触子

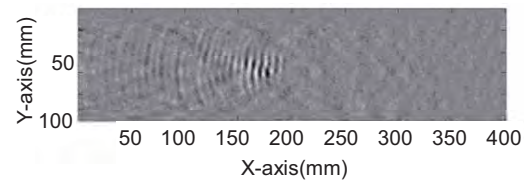
	品番	周波数
垂直探触子	V539	1MHz
AE センサー	AE104	100kHz



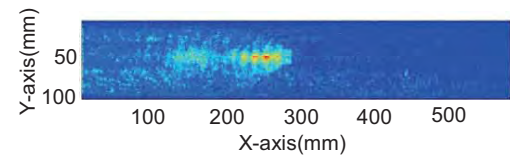
図5 試験状況写真



(a) 原波形



(b) 差分処理波形



(c) 最大振幅画面

図6 進行波の差分処理および最大振幅の表示

4(a)に示すように、き裂の正面から配管の周囲に8個の探触子配置と、図4(b)に示すように、き裂の正面(探触子①)と、これと90°ずれた配管上部(探触子②)の2箇所の受信探触子配置で試験した。図5に試験状況を示す。ただし、装置の制約上、同時にデータ採取可能なチャンネル数は、2である。

各レーザー照射点から発生した超音波の球面波は、可視化装置によりレーザー照射領域を伝わる様子が表示される。図6に可視化画像を示す。図6(a)、(b)は、ある時間における画像を示す。画面中央にき裂が

存在する。(a)には、通常の超音波探傷試験における送信信号に相当する伝送波が含まれており、これを差分処理する必要がある。差分処理した画像が(b)であり、き裂からの反射波が観察される。この差分画像の振幅最大値を表示したものが(c)であり、中央のき裂が検出されている。

3. 試験結果

3.1 き裂方向および受信探触子位置が検出性に与える影響

図3に示したレイアウトでは、個々のレーザーの照射点から発生する球面波がき裂に反射し、このうち配管軸方向に進んだものを受信することになる。したがって、き裂が受信探触子の方を向いている方が受信しやすいことと、受信探触子が正面側にある方が受信しやすいことは、容易に想像できる。そこで、最初に炭素鋼配管試験体 No.1 を用いて配管軸方向に対するき裂の傾きと受信探触子の位置と受信強度の関係を調べた。

図7は、受信探触子として用いた垂直探触子 (V539) の位置が図4(a)の①にある場合に、レーザー

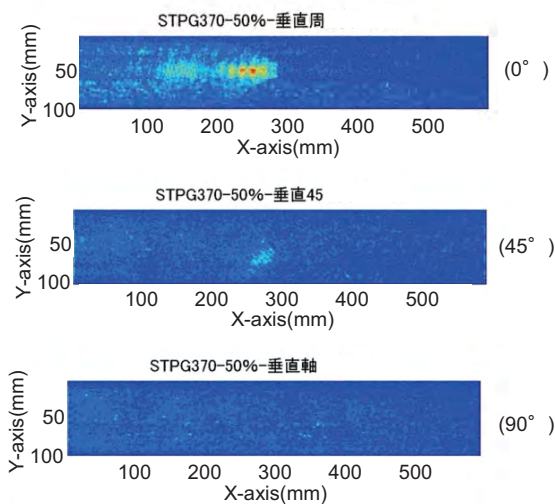


図7 炭素鋼配管試験体 No.1 の検出結果 (最大振幅画像)

照射範囲の各点についてき裂からの反射波の最大値の画像化データである。図の上から、それぞれ管軸方向に対する傾斜角 0° 、 45° 、 90° のき裂の検出結果である。受信探触子に対して正面を向いている傾斜角 0° のき裂場合、非常に鮮明に検出している。傾斜角 45° のき裂についても、検出は可能である。しかし、受信探触子の方を向いていない傾斜角 90° のき裂については、検出できなかった。予想どおり、き裂が探触子に対して傾きを持つと、検出性が悪くなった。

図8は、傾斜角 0° 、 45° のき裂に対して探触子が①から⑧の位置にあるときの検出信号の最大値をプロットしたものである。傾斜角 0° のき裂の場合、探触子がレーザー照射方向を向いている①にあるときと、反対側の⑤にあるときに振幅が大きくなっている。一方傾斜角 45° のき裂の場合、もともと振幅が小さいが、探触子の位置による変化は少ない。

図9は、①から⑧の各探触子位置で受信した検出信号の、き裂の方向に対するSN比をプロットしたものである。傾斜角 0° のき裂に対して傾斜角 45° のき裂は、大きくSN比が低下している。傾斜角 90° のき裂は、検出不能である。また、傾斜角 0° のき裂では、探触子の位置によるSN比の変化が大きいが、傾斜角 45° のき裂では探触子の位置による変化はほとんどない。

3.2 き裂深さが検出性に与える影響

き裂深さが検出性に与える影響について、き裂の深さが配管肉厚の25%である表1の炭素鋼配管試験体 No.2 を用いて、炭素鋼配管試験体 No.1 のデータと比較することにより検証した。探触子は、試験体 No.1 と同様、垂直探触子 (V539) を用いている。図

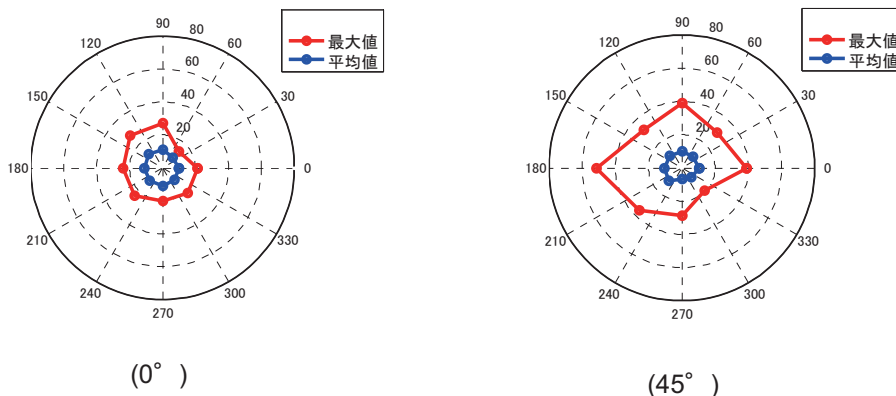


図8 受信探触子の位置が検出性に与える影響 (最大振幅のグラフ)

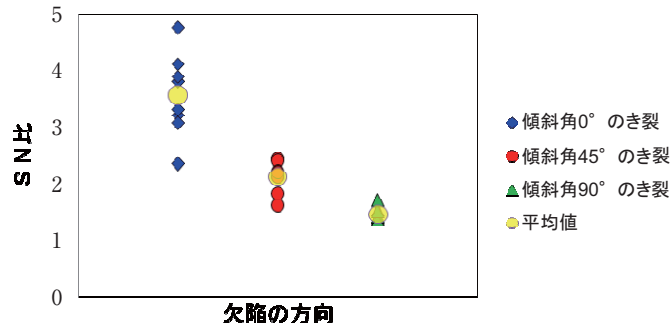
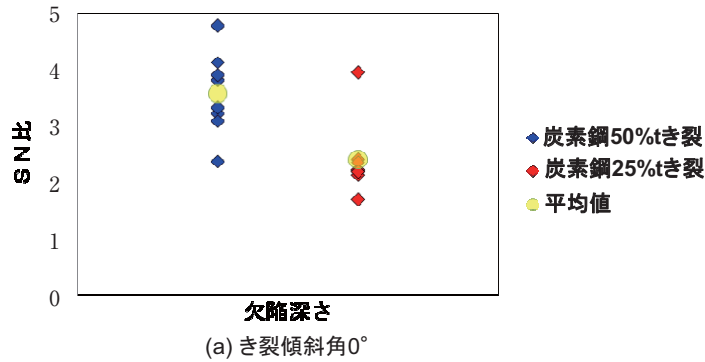
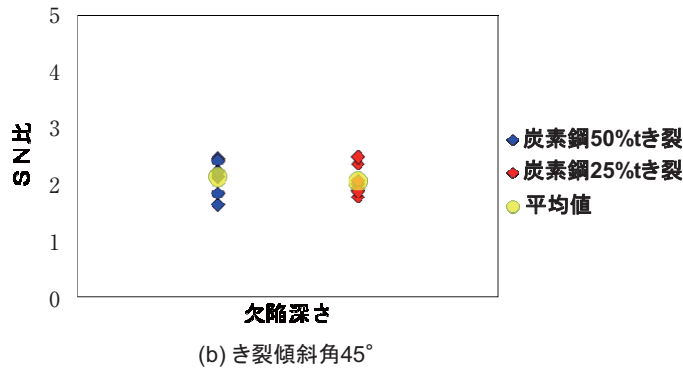


図9 き裂の方向が検出性に与える影響 (SN比の変化)



(a) き裂傾斜角0°



(b) き裂傾斜角45°

図10 き裂深さの違いによるSN比の変化

10は、傾斜角0°、45°のき裂に対して、その深さが配管肉厚の50%、25%のときのSN比を比較したものである。傾斜角0°のき裂では、深さが小さくなるとともにSN比が低下しているが、傾斜角45°のき裂では、深さが変わってもSN比はほとんど変わらなかった。

3.3 配管の材質が検出性に与える影響

実機の配管はステンレス鋼製である。一般に炭素鋼よりもステンレス鋼のほうが、結晶粒サイズが大きく、超音波の散乱減衰が大きい。図11は、ステンレス鋼配管試験体No.3を用いて行った試験の結果である。探触子は、試験体No.1と同様、垂直探触子(V539)を用いている。図6の炭素鋼配管試験体の場

合と比べ、検出信号の識別性が低下している。

図 12 は、傾斜角 0°、45° のき裂について、炭素鋼配管試験体とステンレス鋼配管試験体の SN 比を比較したものである。ステンレス鋼配管試験体の検出信号の SN 比は、傾斜角 0° のき裂については、炭素鋼配管試験体の場合と比べかなり低下している。一方、傾斜角 45° のき裂については、ステンレス鋼配管試験体の場合の方が低下するが、それほど大きな低下ではない。

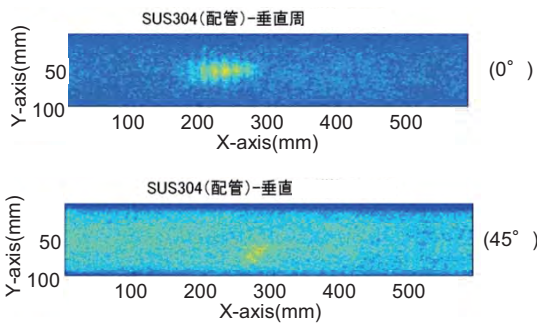


図 11 ステンレス鋼配管試験体 No.3 の検出結果（最大振幅画像）

4. 信号処理, 重ね合わせの効果

前章では、単独の垂直探触子 (V539) を検出用に用いて、炭素鋼配管試験体、ステンレス鋼配管試験体により、受信探触子の位置、き裂の方向、き裂の深さ、試験体の材質がレーザー可視化結果に与える影響について検証した。その結果、本方法により、広い範囲に種々の方向で発生するき裂に対して、検出可能な範囲、検出可能なき裂方向に制限があるものの、一度にまとめて検出できる見通しを得た。

本章では、この検出性をさらに向上させるために、探触子の受信帯域を変えることや、探触子の受信信号の最大値画像化データの信号処理を行うこと、ならびに複数の探触子の受信信号を重ね合わせることによる検出性向上効果について検討した。

受信信号の生データは、①伝送波の差分処理、②レーザーの各照射位置毎の最大値の平面表示により画像化されている。この画像化プロセスに対して、下記信号処理の検討を行った。

①伝送波の差分処理

当初行っていた方法は、各レーザービーム照射点の軸方向 1 ピクセル進む時間を、あらかじめ設定された材料中の超音波の音速に基づき計算し、その時間が経

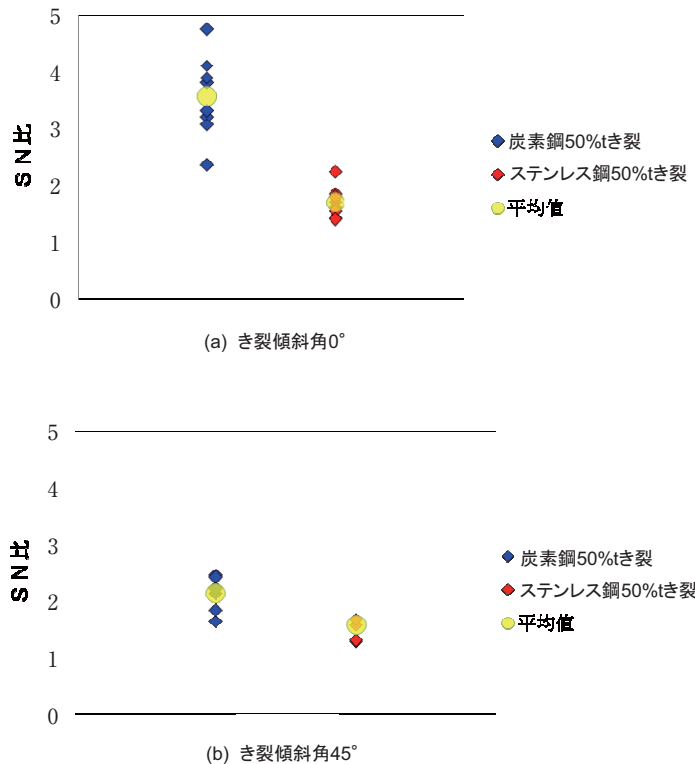


図 12 試験体材質の違いによる SN 比の変化

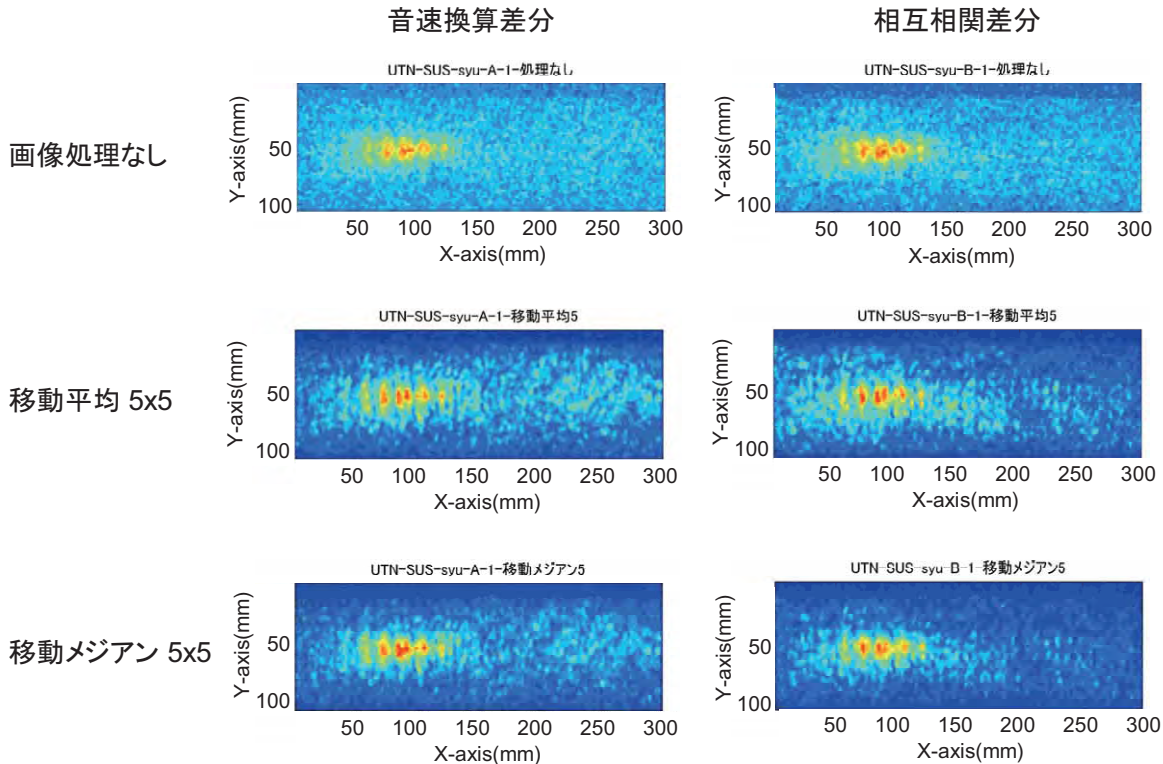


図 13 信号処理の効果 (垂直探触子, ステンレス鋼配管試験体 No.3, き裂傾斜角 0°)

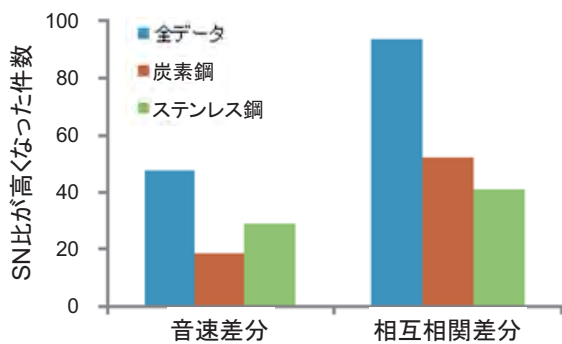


図 14 差分法の違いが SN 比に与える効果

過した後の画像データとの差分を得る方法(音速換算差分)であった。これに対する改良方法として、式(1)を用いて、ある点の波形と配管軸方向に1ピクセル進んだ波形との相互相関を計算し、相関が最大となるkを時間差として補正し差分することとした。(相互相関差分)

$$R_{xy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-k} x(n) \cdot y(n+k) \quad (k=0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (1)$$

②最大値の平面表示に対する画像処理

最大値の平面表示に対する画像処理は、ノイズ除去によく利用されている平滑化処理とし、2次元移動平

均、2次元移動メジアンを用いた。移動平均は、式(2)を用いて作成した。(このときM,Nはピクセルサイズ)2次元移動メジアンは、画像ピクセル内の中心値をピクセル中心位置での画像データとして置き換えた。ピクセルの要素数は、3×3、5×5、7×7の3種類実施した。

$$g(i, j) = \frac{1}{(2M+1)(2N+1)} \sum_{k=-M}^M \sum_{l=-N}^N f(i+k, j+l) \quad (2)$$

図 13 は、垂直探触子(V539)を用いてステンレス鋼配管試験体 No.3 の傾斜角 0° のき裂の検出データに、これら信号処理を施したものである。差分法の改良、画像処理により検出信号の識別性が向上している。

図 14 は、炭素鋼配管試験体、ステンレス鋼配管試験体の全てのデータについて、差分方法の違いが SN 比に与える影響をまとめたグラフである。データによっては、音速換算差分のほうが SN 比が高いケースがあるが、基本的には相互相関差分のほうが SN 比が高かった。

図 15 は、各条件で行った平滑化処理による SN 比向上効果をまとめたグラフである。グラフ中、non は元のデータ、ave3、ave5、ave7 は 3×3、5×5、7×7 のブロックで移動平均を行ったもの、med3、med5、med7 は 3×3、5×5、7×7 のブロックで

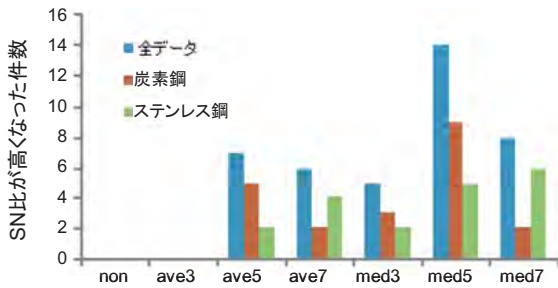


図 15 平滑化処理による SN 比向上効果

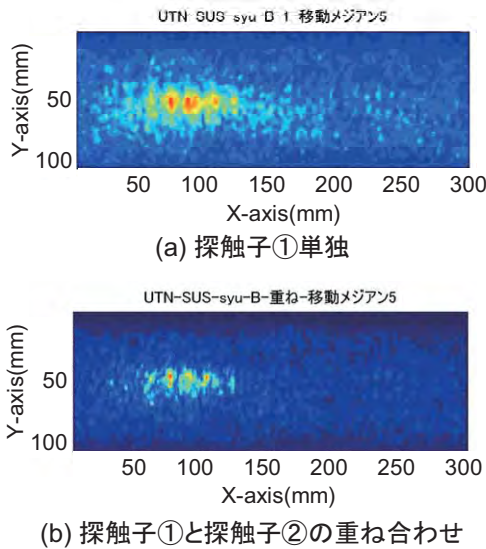


図 16 2つの探触子データの重ね合わせ効果 (ステンレス鋼配管試験体 No.3, き裂傾斜角 0°, 5 × 5 移動メジアン)

移動メジアンを行ったものを意味する。平滑化処理により、検出信号の SN 比が向上しているが、この中で特に 5 × 5 の要素ブロックで行った移動メジアンの効果が最も高かった。

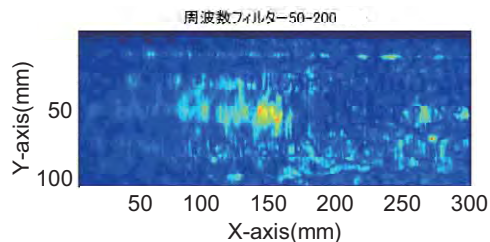
つぎに、2つの探触子で受信した検出信号を重ね合わせることによる効果について検証した。図 4(b)の受信位置①および②で受信した信号を重ね合わせた。なお、重ね合わせに当たっては、受信位置がき裂から等距離ではないため、各受信探触子へのき裂からの信号到達時間を精度よく測定する必要があるが、位相レベルでの調整は、き裂からの信号が小さい場合困難である。このため、各受信探触子の各レーザー照射点の差分処理後の波形の相互相関を計算し、その最大値がき裂からの信号であるとし、これを重ね合わせることにした。この方法により、各探触子での信号到達時間に関係なく、複数信号の重ね合わせを行うことができる。

図 16 は、垂直探触子(V539)を用いてステンレス鋼配管試験体 No.3 の傾斜角 0° のき裂を、図 4(b)の①の位置で受信したデータと、①と②の位置で受信したデータを重ね合わせたデータである。いずれのデータも、相互相関差分法、5 × 5 の移動メジアンによる平滑化処理を施したものである。2つの探触子のデータを重ね合わせるにより、き裂信号の識別性が向上している。

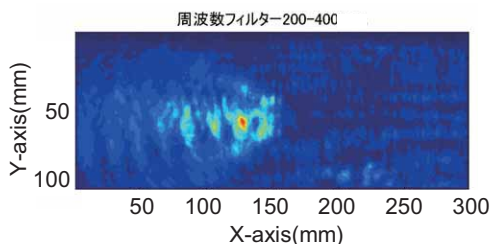
これまでのデータは、全て垂直探触子(V539)によるものである。本探触子の周波数スペクトルによれば、信号の帯域は概ね 300~600kHz であった。き裂と受信探触子の距離は、通常 500mm 以上と想定されるので、その間の超音波の散乱・減衰を考慮すると、周波数の低い方が検出に有利ではないかと想像される。このため、より低周波数で受信可能な中心周波数 100kHz の AE センサーを用いて比較を行った。図 17 に、ステンレス鋼配管試験体 No.3 の傾斜角 0° のき裂に対する受信周波数別の画像データを示す。これらのデータは、5 × 5 移動メジアン画像処理、重ね合わせ処理を施している。AE センサーのデータは、元のデータに 50-200kHz, 200-400kHz の周波数フィルターを施したものである。3つのデータを比較すると、200-400kHz, 300-600kHz, 50-200kHz の順で識別性が良かった。

図 18 は、同じ条件でデータ取得、画像処理したステンレス鋼配管試験体 No.3 の傾斜角 45° のき裂に対する受信周波数別の画像データを示す。傾斜角 0° のき裂と比べ著しく識別性が低下している。特に垂直探触子(300-600kHz)のデータは、き裂の識別がかなり困難である。3つのデータを比較すると、200-400kHz, 50-200kHz, 300-600kHz の順で識別性が良かった。

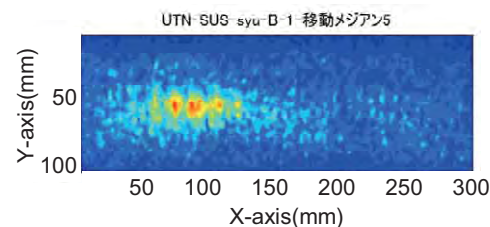
傾斜角 0°, 傾斜角 45° いずれのき裂の場合にも、200-400kHz の周波数帯域のデータの識別性が最も良かった。これは、レーザー照射により発信される超音波が広帯域であることと、受信探触子までの伝播距離が長いことによる。一般に周波数が高いほど、き裂から反射しやすい。一方、本実験のように伝播距離が長い場合、広帯域の超音波の減衰が大きい。この減衰は、周波数が低いほど小さい。配管形状も含め、今回の試験条件においては、この両者のバランスが 200-400kHz 付近で一番良かったためであると考えられる。



(a) AEセンサー(50 - 200kHz)

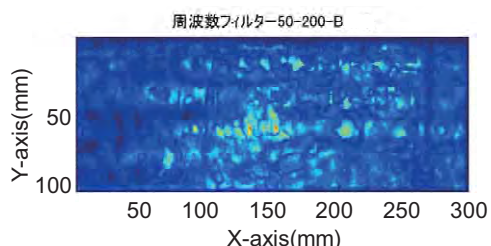


(b) AEセンサー(200 - 400kHz)

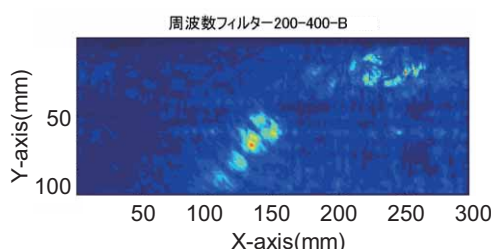


(c) 垂直探触子(300 - 600kHz)

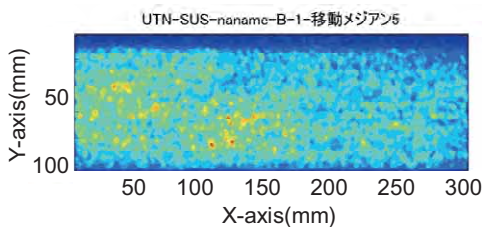
図17 受信周波数別の画像データ
(ステンレス鋼配管試験体 No.3, き裂傾斜角 0° ,
 5×5 移動メジアン, 重ね合わせ)



(a) AEセンサー(50 - 200kHz)



(b) AEセンサー(200 - 400kHz)



(c) 垂直探触子(300 - 600kHz)

図18 受信周波数別の画像データ
(ステンレス鋼配管試験体 No.3, き裂傾斜角 45° ,
 5×5 移動メジアン, 重ね合わせ)

5. 溶接試験体での検証

原子力発電所でのトラブル事例⁽¹⁾では、ステンレス鋼配管の溶接部を斜めに横断して疲労き裂が発生していた。このように検査対象となる領域には、溶接部が含まれることがあるため、図2に示すような溶接を施工したステンレス鋼配管試験体を製作して、溶接部がき裂検出性に与える影響について調べた。き裂の方向、き裂と溶接部の相対位置を考慮し、表1の試験体 No.5, 6, 7 の3種類のステンレス鋼溶接配管試験体を製作し、試験した。図19, 図20に、それぞれ垂直探触子(V539)とAEセンサーで試験したデータを示す。これらのデータは、 5×5 移動メジアン画像処理、重ね合わせ処理を施したものである。なお、傾斜角 0° のき裂については、溶接部に最も近い25mmの位置にあるもの以外は、溶接線から遠く、影響が少なかったため、試験体 No.4 の25mmの位置にあるき裂のデータのみ紹介する。図中の赤い点線は溶接線中心、赤い矢印はき裂位置を表す。傾斜角 0° のき裂に

ついては、溶接部から25mm離れておれば、検出可能である。傾斜角 45° のき裂については、溶接線から50mm離れていれば検出可能、溶接線上にある場合、かろうじて検出可能である。

6. 考察

レーザー可視化装置を用いて、配管内面に発生するき裂の効率的検出法が適用可能か検証した。

最初に、基本的特性として、き裂の方向の影響、き裂深さの影響、対象配管材質の影響について調べた。き裂の方向については、き裂が受信探触子の方向を向いている傾斜角 0° と比べ、これより 45° 傾くと大きく検出性が低下し、軸方向(傾斜角 90°)き裂については、静止画像による検出は困難であった。き裂の深さの影響は、配管厚さの50%と25%のデータを比較すると、傾斜角 0° のき裂についてはSN比が大きく低下したが、傾斜角 45° のき裂では元々SN比が悪く、その低下の程度は小さかった。配管材質がステンレス

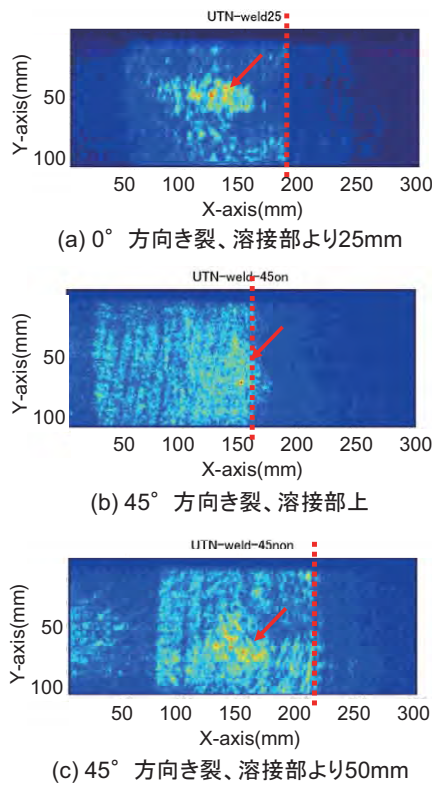


図 19 ステンレス鋼配管溶接試験体の画像データ (垂直探触子 V539, 5 × 5 移動メジアン, 重ね合わせ)

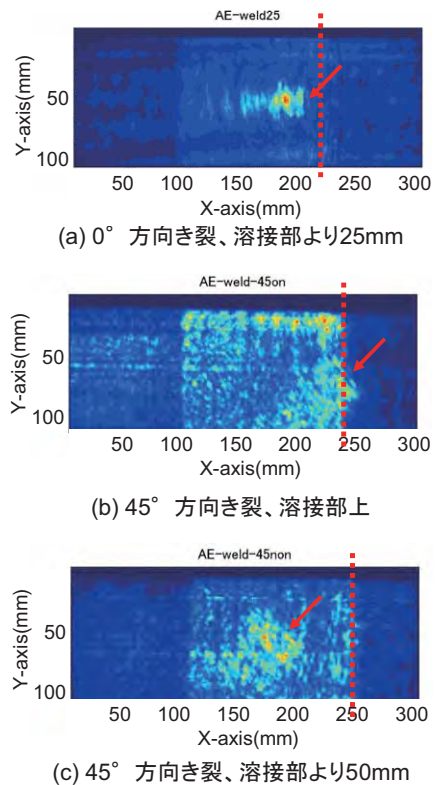


図 20 ステンレス鋼配管溶接試験体の画像データ (AE センサー, 5 × 5 移動メジアン, 重ね合わせ)

鋼の場合、予想どおり炭素鋼と比べ検出性が低下したが、傾斜角 45° のき裂でも、かろうじて検出可能であった。実機で問題となる配管はステンレス鋼製であることから、基本特性試験より、本手法が適用不可ではないが、さらに検出性向上が必要なことが明らかになった。

このため、検出性向上策として、平滑化画像処理の適用、データ重ね合わせ、受信周波数帯域の最適化を行った。これらの向上策により、き裂検出性はかなり向上した。実機の配管の状況に最も近いステンレス鋼溶接配管試験体のデータから、き裂の方向が探触子の受信方向に対し、傾斜角 45° 以内であれば、検出可能であることがわかった。

しかしながら、傾斜角が 90° である軸方向き裂については、静止画像による検出は不可能であった。広い範囲に対して方向がわからないき裂の効率的検出法として、本手法が適用可能であることは明らかにできたが、実際に適用するには、ステンレス鋼溶接配管試験体により、傾斜角が 45° より大きい場合の検証と、き裂深さが小さい場合の検証が必要である。

また、本報告では紹介していないが、受信信号最大値の静止画像ではなく、差分処理後の動画では軸方向

き裂の検出も確認できる場合があったことから、本手法は、将来再び同様のトラブルが発生した場合に備えて、動画の観察法も含め、さらに検討する価値があると考えられる。具体的な改良策は、受信探触子の多チャンネル化の検討および球面波に限らずより多様な超音波を送信できることから、具体的な改良策として、超音波探触子から送信し、レーザービームで受信する方法の検討などが考えられる。

7. 結論

溶接部を含む配管の広い範囲に発生し、その方向も予測できないようなき裂を効率的に検出する方法として、レーザーによる超音波可視化装置を利用する手法を検討した。超音波進行方向に対して傾斜角 45° のき裂まで検出できることがわかった。

謝辞

本研究遂行にあたり、レーザー可視化装置を所有する独立行政法人産業技術総合研究所の高坪純治氏に

は、装置の操作法等をご指導いただきました。非破壊検査株式会社の江淵高弘氏には、試験、信号処理法を立案・実施いただきました。ここに深甚なる謝辞を表します。

参考文献

- (1) 九州電力, “玄海原子力発電所 2 号機第 20 回定期検査の状況について (余剰抽出配管ひび割れの原因と対策)”, (2007)
- (2) 原子力安全・保安院, “高サイクル熱疲労に係る評価及び検査に対する要求事項について”, NISA-163b-07-1, (2007)
- (3) J Takatsubo, H Miyauchi, K Urabe, H Tsuda, N Toyama, W Bo, “Imaging of Scattered Waves from Rear Slits by Using a Synchronizing Differential Method with Laser UT” Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A Vol.75 No.750, pp.211-218 (2009)
- (4) 高坪純治, “レーザー超音波可視化探傷技術の開発 動画映像による分かり易い探傷法の開発を目指して”, 検査技術 Vol.15 No.1 pp.24-30 (2010)