

技術資料



Technical Data

高減衰材向けアレイ超音波探傷技術の開発

樹神啓司*, 伊藤光宏*

Development of Ultrasonic Inspection Technique for High-Attenuation Billets by Phased Array Technology

Keishi KODAMA and Mitsuhiro ITO

Synopsis

Various types of nondestructive testing have been applied to steel products in manufacturing processes. Ultrasonic inspection is an important method to evaluate defects and inclusions in billets. Nevertheless, it is difficult to perform accurate ultrasonic inspection on some stainless steels because these have big grains which cause high attenuation and scattering noise. As a countermeasure, we use a low frequency, a large transducer and focusing of ultrasonic waves. However, the fixed type focusing transducer has a different detection capability for each depth. There is a problem that it is unsuitable for a target such as steel billets that require a wide inspection area.

So, we tried inspecting billets using phased array ultrasonic technology. This allows electronic scanning, which creates an ultrasonic focused beam with steering. This paper describes some development results of an ultrasonic inspection technique for high-attenuation billets by phased array technology.

- (1) Development of phased array probe for billets
- (2) Determination of active aperture size
- (3) Prevention of reduction in signal intensity by dividing inspection area
- (4) Optimization of DAC (Distance Amplitude Compensation) based on noise

1. 緒言

大同特殊鋼(株)は、スクラップを原料として、溶解、鑄造、各種圧延工程を経て、大型の角製品、丸製品から、棒鋼、線材、帯鋼製品などを生産している。これらの特殊鋼製品は、輸送機器や発電機、鋼構造物などの各種産業分野で使用されており、過酷な使用環境に耐えうる特性が求められている。そのため、使用用途に応じた厳密な製品検査を実施している。

その検査手法の一つに、超音波を用いた内質検査がある（以下、超音波探傷試験という）。超音波探傷試験は、検査対象材を破壊することなく内部に存在する欠陥（空

隙、介在物など）の有無や位置、大きさなどを検査する手法として広く用いられている¹⁾。本来、超音波探傷試験は出荷直前での実施が望ましいが、多種多様な形状や寸法に即した設備が必要となるため、出荷直前での超音波探傷試験が困難となる場合がある。また、内部欠陥を中間工程で検出することによって、以降の工程における内部欠陥を起点とした破断に伴う休転や歩留まり悪化などのリスクを回避できる。このため、中間製品にあたる鋼片状態での超音波探傷試験は重要な役割を持つ。

鋼片の超音波探傷試験において、一部のフェライト系ステンレス鋼などは、粗大な結晶粒に起因する散乱減衰が大きいため（以下、高減衰材という）、通常の鋼片と

2018年4月25日 受付

* 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

比較して超音波が伝搬しづらく、探傷が困難となる。このような減衰への対策として、低周波数（長波長）の使用、大開口（大径の振動子）、および超音波の集束が有効であり²⁾、開発事例も報告されている³⁾。

しかしながら、上記対策は、目標欠陥サイズや対象寸法の制約を受けるため、探傷条件を変化させづらいものもある。例えば、低周波数を使用することで減衰が抑制されるが、検出可能な欠陥サイズが大きくなるため⁴⁾、安易に探傷周波数を下げることは望ましくない。また、振動子を大きくした場合、近距離音場限界距離⁵⁾が長くなるため、振幅を基準とした方法では、表層付近の欠陥を正確に評価することが難しくなる。そこで、本報告では、超音波の集束に対する課題と対策について言及する。

超音波を鋼中で集束させる対策は、集束位置付近の欠陥検出能力が向上する一方で、集束位置以外の領域における欠陥検出能力が低下する。そのため、単一の探傷子（シングルプローブ）を用いてこの対策を実施した場合、鋼中の欠陥検出能力に差が生じる。つまり、鋼片のような内部欠陥の有無を確認すべき領域が広い対象には適していないと言える。加えて、シングルプローブを用いた探傷では、鋼片に対して横断方向と長手方向の走査が必要となるため、作業には慎重な走査が求められる（Fig. 1(a)）。

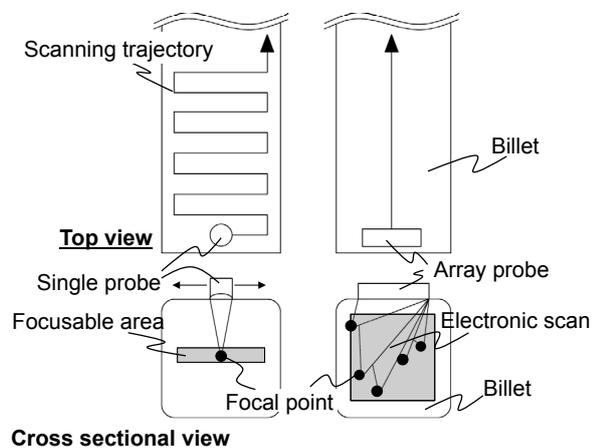


Fig. 1. Schematic view of (a) conventional UT and (b) phased array UT.

そこで、多数の振動子を配置したアレイプローブを使用し、各振動子が超音波を送信するタイミングや受信波形の位相合成を制御することで超音波の集束位置を電子的に制御可能な、フェーズドアレイ探傷法⁶⁾を用いた高減衰材向け超音波探傷技術の開発に着手した。フェーズドアレイ探傷法は、振動子の配列方向に電子的なビームステアリングが可能であり、集束効果を得つつ、上記

欠陥検出能力の差を低減できる可能性がある。また、電子的なビームステアリングは瞬時に行われるため、横断方向に振動子を配列した場合、横断方向の走査が不要となる（Fig. 1(b)）。

本稿では、高減衰材へのフェーズドアレイ探傷法適用に向けた、下記項目の検討結果について報告する。

- ①高減衰材向けアレイプローブの設計
- ②同時励振数の検討
- ③最適な集束深さの検討
- ④距離振幅補正の最適化

2. フェーズドアレイ探傷法

フェーズドアレイ探傷法における垂直入射ビームの集束および斜角入射ビーム（平面波）の様子を Fig. 2 に示す。フェーズドアレイ探傷法は、複数の独立した振動子を一次元もしくは二次元に配置したアレイプローブを用いる。各振動子の幅が十分に小さいとき、それぞれの振動子は円筒波の線音源と仮定することができるため、振動子の幅、間隔および数、対象の形状と音速が既知の場合、各振動子から超音波を集束させたい位置（集束点）までの伝搬時間を求めることができる。その結果から算出した遅延時間分だけ、振動子の送信を遅らせることで、全ての振動子から送信された超音波を集束点へ同時に到達させることができる。また、各振動子が受信した波形を遅延時間分だけシフトして合成することで、電子的に集束した波形を得ることができる⁷⁾。

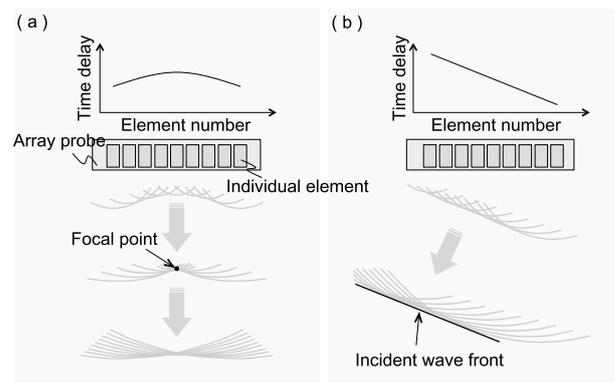


Fig. 2. Beam focusing principle for (a) no angled incidences and (b) angled incidences.

3. 開発目標

3. 1 高減衰材

本報告の対象とするフェライト系ステンレス鋼片断面のマクロ写真を Fig. 3(a) に示す。Fig. 3(b) に示した同寸

法の構造用鋼（通常の鋼片）断面マクロ写真と比較して、結晶粒が粗大であることが確認できる。これら結晶粒径の違いは超音波の減衰に影響を与える。

一般に、超音波が媒質中を x 方向に伝搬するとき、音圧の減衰は、式 (1) で表される⁸⁾。このとき、 P_0 は $x = 0$ における音圧、 P_x は伝搬距離 x での音圧、 e は自然対数の底 ($e=2.71828\cdots$) を示す。また、多結晶金属における超音波の減衰の減衰係数 α は、内部摩擦による減衰が十分小さいと仮定し、かつ結晶粒径が波長の $1/30 \sim 1/3$ のとき、式 (2) によって与えられる⁸⁾。

ここで、 D は結晶粒の直径、 λ は鋼中の波長である。

$$P_x = P_0 \exp \left[- \frac{\alpha}{20 \log(e)} x \right] \quad (1)$$

$$\alpha \propto \frac{D^3}{\lambda^4} \quad (2)$$

式 (2) に示したように、減衰係数 α は結晶粒の直径 D の 3 乗に比例するため、式 (1) を考慮すると、通常の鋼片に比べて、対象材の減衰が大きいことが分かる。

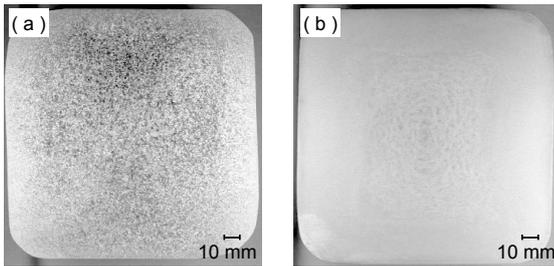


Fig. 3. Cross-sectional macro structure of (a) ferritic stainless steel and (b) structural steel.

粗大結晶粒による減衰を確認するために、市販のソフトウェアを使用して数値解析を行った。モデルを Fig. 4(a) に示す。このモデルは、実際の鋼片マクロ写真を画像処理することで粒界を再現している。また、マクロ写真における結晶粒ごとの濃淡を、結晶方位による腐食速度の差異⁹⁾と仮定して、異方性を持たせている。条件を Table 1 に、結果を Fig. 4(b) - (c) に示す。

Table 1. Condition of numerical analysis.

Parameters	Value
Frequency	5.0 MHz / 1.0MHz
Wave number	3
Transducer diameter	10 mm
Propagation distance	80 mm

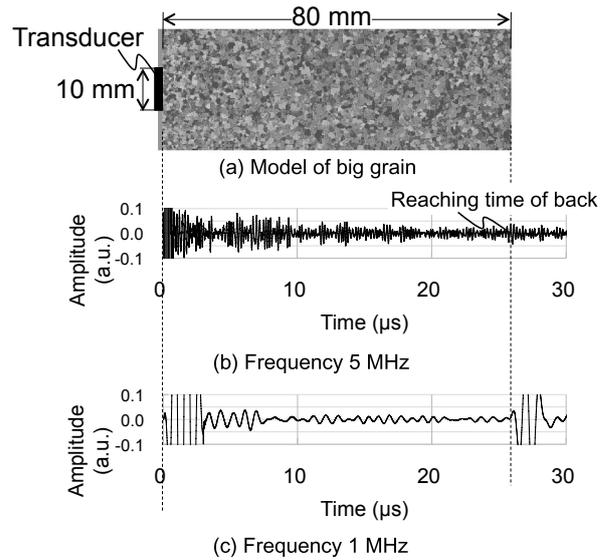


Fig. 4. Model of big grain and result of numerical analysis with (b) frequency 5 MHz and (c) frequency 1 MHz.

Fig. 4(a) に示すように、5 MHz を用いた場合、底面エコーを確認できないほど超音波が減衰していることが分かる。一方で、1 MHz を使用した場合、底面エコーを確認することができ、5 MHz の波形と比較して減衰が小さいと言える。また、両者とも全域に渡って粗大結晶粒による散乱ノイズを確認することができる。散乱ノイズは、粒界の散乱反射を探触子で受信したときに発生するため、探触子から近い位置 (5 ~ 10 μs あたり) で高い信号値を示し、次第に低下している。加えて、5 MHz に比べて 1 MHz の散乱ノイズが小さい。つまり、低周波数は、高周波数に比べて散乱反射の発生が少ないため、散乱反射を原因とする超音波の減衰が抑制される。

3. 2 欠陥検出性能の評価方法

一般に、超音波探傷試験における欠陥検出性能（以下、検出能という）は、欠陥信号 (Signal) とノイズ (Noise) の比をもって表す（以下、S/N という）。本報告では、欠陥信号測定用の鋼片とノイズ測定用の鋼片を別々に用意した。ノイズ測定用鋼片の内部に欠陥がないことを確認し、その鋼片の特定の領域（横断方向断面）をノイズ測定領域と定義している。以降、ノイズ測定領域内の最大信号値をノイズとして S/N を算出した。ノイズ測定領域は、各実験条件の図中もしくは文中に示す。

3. 3 開発目標と評価用試験片

開発目標を Table 2 に、評価用試験片を Fig. 5 に示す。今回、 $\phi 1.5 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ の横穴 (Side Drill Hole : SDH)

を用いて S/N を評価した。人工欠陥を施した位置は、鋼片の中心 (E)、目標とする探傷領域の四隅 (A, C, I, G) および辺の中心 (B, F, H, D) の9箇所である。ただし、探傷面から浅い位置に施した欠陥が、探傷面から深い位置の欠陥の S/N 算出に影響をおよぼす可能性を考慮し、探傷面からの欠陥深さごとに、試験片を分けて製作した。Fig. 5 はそれら全ての試験片を統合した断面視の様子を表している。

Table 2. Inspection target.

Item	Object and Target
Artificial defect	SDH(Side Drill Hole): $\phi 1.5 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$
Ability to detect defects	Higher than conventional transducer
Inspection area (cross-section)	Area of square ACIG (fig. 5)
Object material	Configuration: Square bar Surface: As-rolled Type: Ferritic stainless steel
Width (Height)	140 mm ~ 160 mm

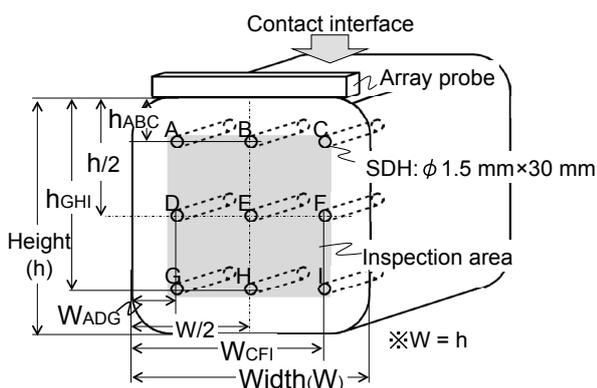


Fig. 5. Test piece (schematic view).

本報告では、探傷領域内における欠陥検出能力の低下抑制を目的の一つとして、フェーズドアレイ探傷法の適用を検討している。つまり、人工欠陥 A ~ I 全ての位置において、S/N を一定以上とすることが目標となる。そこで、基準として従来プローブ（周波数 1 MHz、直径 $\phi 40 \text{ mm}$ 、鋼中集束距離 80 mm の点集束型シングルプローブ）の S/N を用いた。以降の S/N は、従来プローブを用いて測定した人工欠陥 E の S/N を 1 として正規化している。

4. 開発内容

4. 1 高減衰材向けアレイプローブの設計

設計したアレイプローブの仕様を Table 3 に示す。周

波数は、減衰の影響 (Fig. 4) と、目標の欠陥サイズを考慮して、1 MHz とした⁴⁾。また、探傷器の制約から振動子数は 64 ch とした。振動子配列方向の各振動子の間隔は、製造上の制約および鋼片横断面方向におけるコーナー部を除いた平坦部の長さ (Fig. 6) と、グレーティングローブの発生条件¹⁰⁾を考慮して 2 mm とした。また、振動子の長さは検出目標の人工欠陥の長さと同指向角¹¹⁾から 20 mm とした。加えて、本報告は作業者による探傷（水ギャップ方式）を想定した仕様としている。したがって、音響インピーダンスが水と等しくなるように設計した。

Table 3. Specification of array probe made as experiment.

Item	Target
Form	Flat
Acoustical impedance matching	Water (1.5 MRayl)
Number of elements	64 ch
Center frequency	1 MHz
Elementary pitch	2 mm
Elevation	20 mm

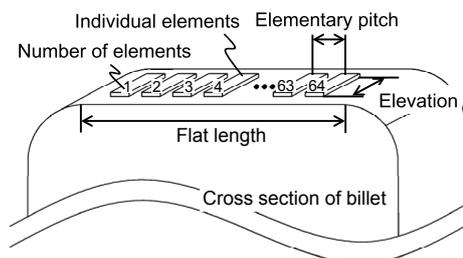


Fig. 6. Explanation of array probe and billet (upper half).

4. 2 同時励振数の検討

散乱減衰への対策の一つとして大開口（大径の振動子）が挙げられる。アレイプローブの場合、同時励振数を増やすことで大開口を実現できる。しかし、全ての振動子を同時に励振した場合、鋼片の寸法によっては、平坦部の長さを超えて、鋼片コーナー部直上の振動子も使用することになる (Fig. 7)。その際、コーナー部とアレイプローブの間で超音波が多重反射し、探傷領域内に多重反射が入ることで、S/N の低下を引き起こすおそれがある。

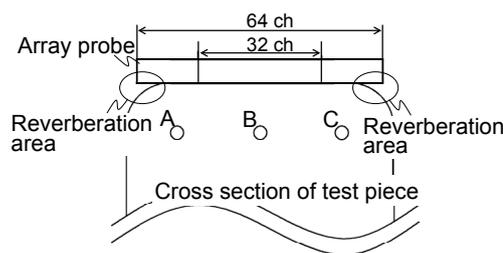


Fig. 7. Reverberation area (schematic view).

そこで、多重反射が発生した振動子を含む波形合成が表層不感帯に与える影響について、Fig. 8 のモデルを用いて数値解析した。このモデルでは、人工欠陥 A に集束した遅延時間を用いて各振動子の送信および受信波形の合成を行っている。この遅延時間は、振動子が全て鋼材に接している前提で算出されている。また、それぞれ中心の振動子を基準に波形合成を行った。このとき、基準となる振動子よりも早く励振する振動子は、波形合成時の表層不感帯に影響を与えないため、モデルから除外した。結果を Fig. 9 に示す。

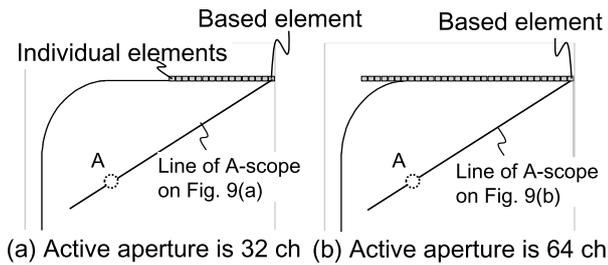


Fig. 8. Model of numerical analysis.

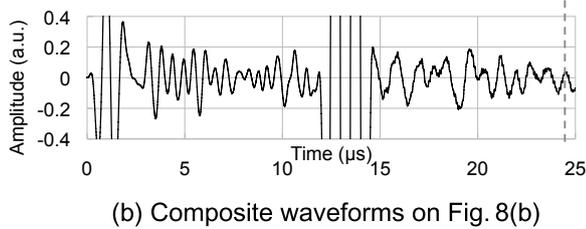
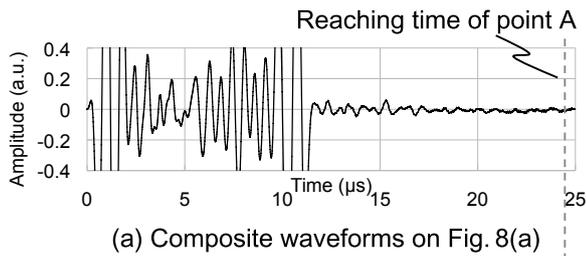


Fig. 9. Result of numerical analysis.

Fig. 9(a) に示すように、プローブが全て鋼材の平坦部に収まっているモデルでは、各振動子の励振による不感帯 (0 μs ~ 10 μs 程度) 以降、大きな信号は受信していない。人工欠陥 A の位置に相当する伝搬時間の信号値もほぼ 0 であるため、十分探傷可能であると言える。一方で、多重反射を含む波形を合成した Fig. 9(b) のモデルでは、各振動子の励振による不感帯 (0 μs ~ 14 μs 程度) 以降も多重反射の信号が続いている。Fig. 9(a) と比較して 5 倍以上も信号値が高く、この信号をノイズとした場合、S/N に大きく影響する。これらの結果から、多重反射の発生は、S/N を低下させる可能性があることを確認した。

数値解析の結果をふまえ、同時励振数の変化が S/N に与える影響について、試験片を用いて確認した。実験条件を Fig. 10 と Table 4 に、結果を Fig. 11 に示す。ここでは、各欠陥位置の対称性から A と C、D と F、G と I の結果は片側 (C、F、I) のみ示す。

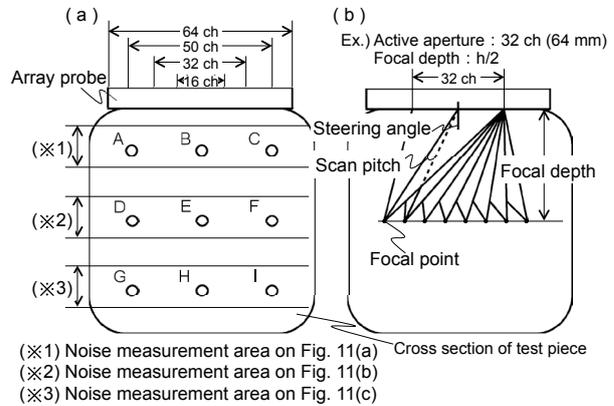


Fig. 10. Experiment model of (a) active aperture and noise measurement area, and (b) specific example.

Table 4. Experimental conditions.

Item	Value
Active aperture	16 ch (32 mm), 32 ch (64 mm), 50 ch (100 mm), 64 ch (128 mm)
Scan pitch	1°
Focal depth	h_{ABC} , $h/2$, h_{GHI}

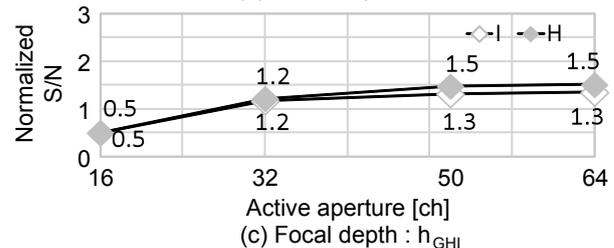
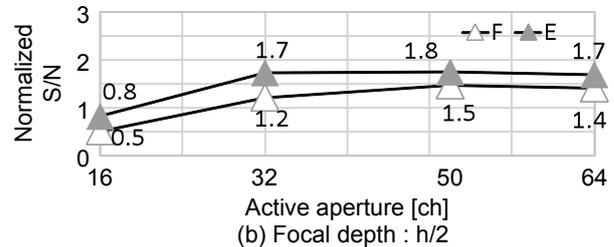
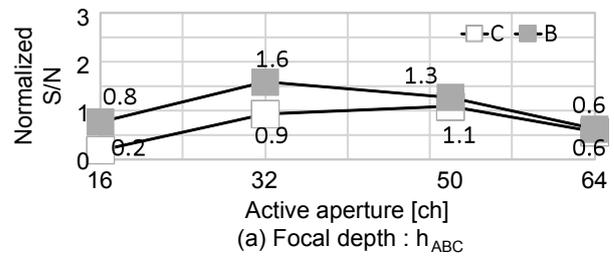


Fig. 11. Relation between active aperture and S/N.

Fig. 11(a) に示すように、探傷面から h_{ABC} の深さに位置する欠陥 (B, C) では、最大同時励振数 (64 ch) のときに S/N が著しく低下する。これは、先述の通り、鋼片コーナー部とアレイプローブの間で発生した多重反射によるエコーがノイズ測定領域に入るためである。一方で、深さ $h/2$ および h_{GHI} に位置する人工欠陥 (E, F, H, I) では、ノイズ測定領域までその影響はおよばないため、同時励振数の増加に伴う著しい S/N の低下はない。むしろ同時励振数の増加に伴い S/N が増加する傾向を確認でき、高減衰材に対して、大開口が有効であることがわかる。しかしながら、各素子の指向角の影響から 32 ch 以降では欠陥信号 (Signal) が大きく増加することなく、波形の重ね合わせによるノイズの低減効果¹²⁾はあるものの、結果的に S/N は横ばいとなっている。

これらの結果と探傷器選定における性能とコストの関係から同時励振数を 32 ch とした。

4. 3 最適な集束深さの検討

探傷領域を、一度に網羅できる集束深さを検討するために、集束深さを変化させたときの、各深さの欠陥 (B, E, H) 信号値を確認した。実験条件を Table 5 に、結果を Fig. 12 に示す。ただし、各欠陥の信号値は、最も高い信号値 (集束深さ h_{ABC} のときの人工欠陥 B の信号値) を 1 として正規化している。

Table 5. Experimental conditions.

Item	Value
Active aperture	32 ch (64 mm)
Focal depth	h_{ABC} , $h/2$, h_{GHI}
Artificial defect	B, E, H

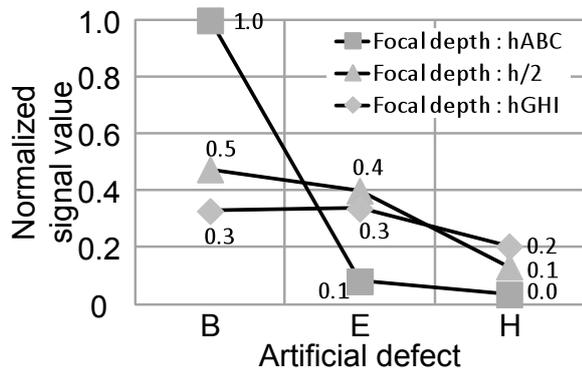


Fig. 12. Relation between focal depth and signal.

集束深さを h_{ABC} とした場合、人工欠陥 B は高い信号値で検出可能であるが、人工欠陥 E, H に関して著しく信号値が低下する。また、集束深さを $h/2$ としたとき、人工欠陥 B と H では、信号値に 5 倍の差がある。集束

深さが h_{GHI} のときでは、信号値のばらつきは少ないものの、全体的に信号値が低い。以上のことから、特定の集束深さで探傷領域全てを網羅できないことを確認した。しかしながら、集束深さと人工欠陥の深さが一致するとき、信号値が各条件の中で最も高くなる傾向 (集束効果) も確認することができた。

そこで、最大値を用いて各深さの人工欠陥を探傷するために、探傷領域を、異なる深さごとの 4 グループ (Gr.) に分割した (Fig. 13)。これら全ての Gr. の結果を統合することで、信号値低下の抑制を図った。

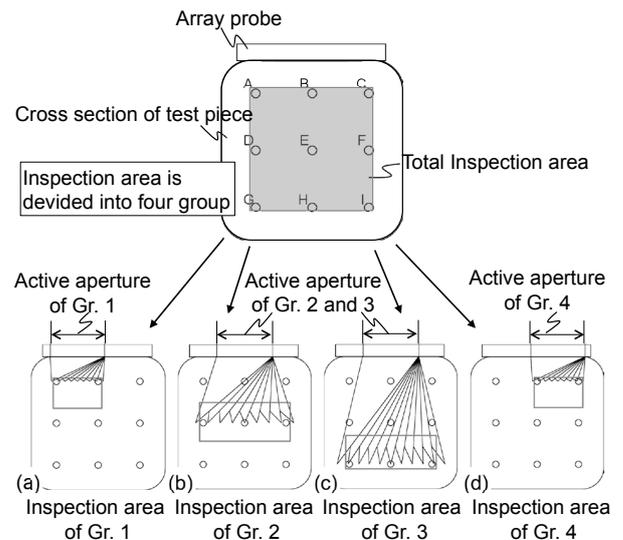


Fig. 13. Schematic view of dividing of inspection area.

ここで、表層側 (深さ h_{ABC}) を左右の Gr. に分割した理由について言及する。人工欠陥の信号値は、ビームステアリングの角度を θ としたとき、 $\cos^2\theta$ に比例して低下するため¹³⁾、探傷面に近い深さの欠陥ほど中心 (例: B) と側面 (例: A, C) の欠陥の信号値に差が生じる。そこで、表層側を Gr. 1 と Gr. 4 の左右に分割することで、ビームステアリング角度を抑制し、中心と側面の信号値の差を低減させた。また、各 Gr. の探傷領域はそれぞれが境界で重複するような範囲とした。

このように、異なる領域を、異なる設定で同時に探傷する方法は、溶接部を 2 箇所以上同時に探傷する際などに用いられている¹⁴⁾。

4. 4 距離振幅補正の最適化

探傷領域を分割する場合、各 Gr. の探傷領域が重なる位置の S/N を保証する必要がある。そこで、探傷領域が重なる位置に人工欠陥を施した試験片 (Fig. 14) を製作して S/N を確認した。探傷条件を Table 6 に、全ての Gr. の正規化した S/N を統合したものを Fig. 15 に示す。

ただし、探傷領域が重なる位置の欠陥は、正規化した S/N の低い方を採用している。また、Fig. 13(a) ~ (d) で示す領域をノイズ測定領域として各 Gr. のノイズを求めた。

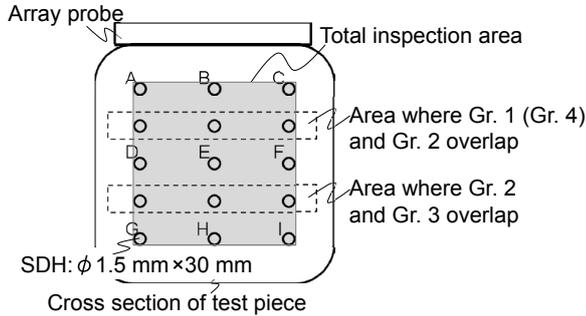


Fig. 14. Test piece of overlap area (schematic view).

Table 6. Experimental conditions.

Item	Value
Active aperture	32 ch (64 mm)
Scan pitch	1°
Focal depth	$h_{ABC}, h/2, h_{GHI}$

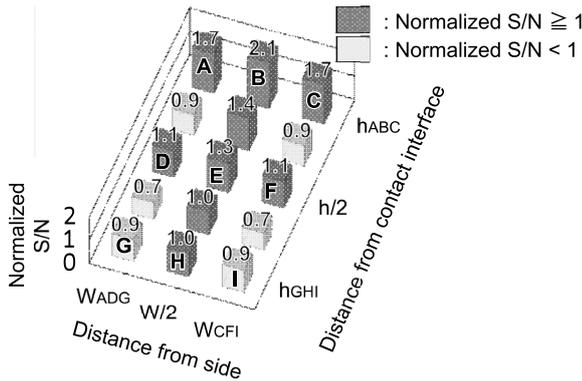


Fig. 15. Normalized S/N of each SDH.

Fig. 15 に示すように、正規化した S/N が 1 未満となる人工欠陥が散見した。特に、新たに製作した位置の人工欠陥は、6 箇所中 4 箇所ですべて正規化後の S/N が 1 未満となり、Gr. の重複部に検出能が低下する領域があることを確認した。

ここで、Gr. 3 の探傷領域の開始深さ (Fig. 16) を変化させたときの平均ノイズ (測定回数: 10 回) を Fig. 17(a) に示す。

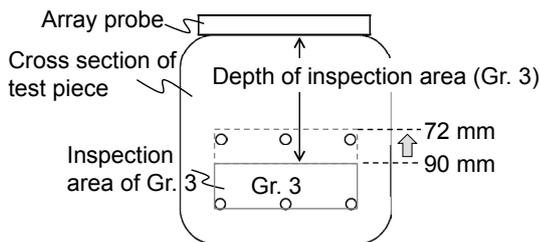


Fig. 16. Depth of inspection area (Gr. 3).

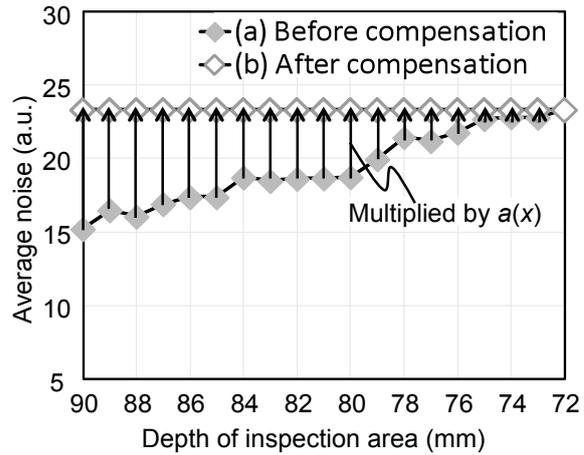


Fig. 17. Relation between average noise and depth of inspection area (Gr. 3).

このように、探傷領域の開始深さを浅くした場合、探傷領域内のノイズは増加する傾向がある。これは Fig. 4 で示したように、探傷面から浅い位置ほど粗大結晶粒による散乱ノイズの影響を受やすいためであると推測される。Gr. 2 と Gr. 3 の探傷領域を十分に重複させるために Gr. 3 の探傷領域の開始深さを浅くしたことで、深さ h_{GHI} 位置の欠陥の正規化した S/N も低位となっている (3 箇所中 2 箇所ですべて 1 未満)。

しかしながら、Fig. 17(a) の傾向は探傷面から深い位置でノイズは低くなると言い換えることができる。したがって、各 Gr. の探傷領域においてノイズ信号を一定にする程度の距離振幅補正 (DAC) であれば、S/N 算出時の N (Noise) に影響を与えない。例えば、Fig. 17 が Gr. 3 の探傷領域と仮定した場合、次の補正係数 $a(x)$ を探傷領域内の信号に積算しても、S/N 算出時の N (Noise) は一定の値となる (Fig. 17(b))。ここで、 $a(x)$ は深さ x における補正係数、 $n(x)$ は深さ x におけるノイズ信号値である。

$$a(x) = n(72)/n(x) \tag{3}$$

つまり、ノイズを基準とした DAC は、S/N 算出時のノイズ信号 (探傷領域内の最大ノイズ信号) に変化を与えないが、一方で、欠陥信号は補正した分増加するため、S/N を改善することができる。

ここで、説明のために、上記の考え方をシングルプローブの受信波形に適用した例として、Fig. 18 を示す。この補正では、ノイズ測定領域内の信号値を指数関数 $f(x)$ で近似し、探傷領域内の各信号値に補正係数 $b(x)$ を乗じている。

$$b(x) = n(s)/f(x) \tag{4}$$

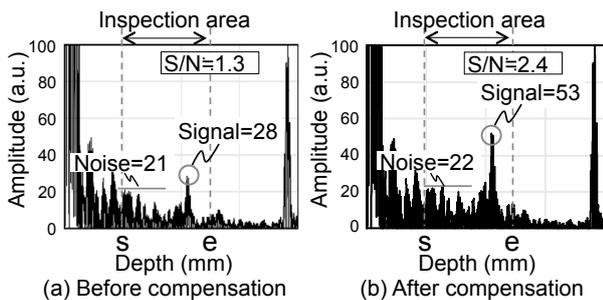


Fig. 18. Compensation example.

この波形の場合、S/N算出時のノイズ信号は 5% 以下の変化量である一方で、補正後の欠陥信号は補正前の信号と比較して 1.9 倍されており、S/N が向上している。

全ての Gr. における探傷面からの深さとノイズの傾向を測定したのち、ノイズを基準とした補正係数を各 Gr. 内の信号値に積算して、再度 S/N を測定した。結果を Fig. 19 に示す。

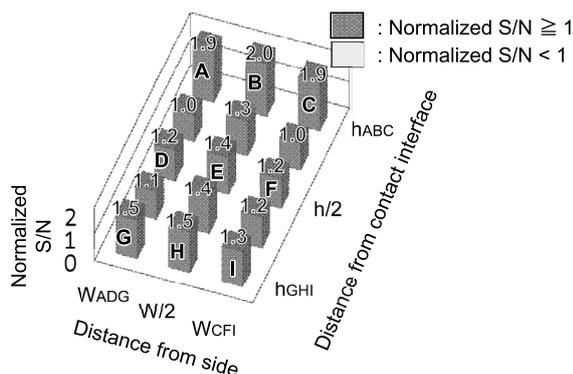


Fig. 19. Normalized S/N of each SDH (after compensation).

Fig. 19 に示すように、ノイズを基準とした DAC を適用することで、S/N を改善し、探傷領域内全ての位置の人工欠陥を、正規化した S/N が 1 以上で検出可能であることを確認した。つまり、フェーズドアレイ探傷法を用いることで、従来プローブの集束位置付近の検出能と、同等以上の検出能で、目標の探傷領域が探傷可能であることを確認した。

ただし、上記補正は、再現性のない突発的なノイズ（電気ノイズなど）が発生した場合、ノイズも同様に増幅し、欠陥を誤検出する可能性があるため、作業者による探傷など、確認探傷を速やかに行える環境に限定される。

5. 結 言

フェーズドアレイ探傷法を高減衰材に適用するにあたり、下記を開発した。

- ①周波数、振動子間隔および振動子長さを決定し、高減衰材に適したアレイプローブを設計した。
- ②同時励振数と S/N の関係を測定し、探傷器の導入コストと併せて 32 ch 同時励振が最適であると判断した。
- ③探傷領域を 4 分割することで、探傷領域内における信号値低下の抑制を図った。
- ④ノイズを基準とした DAC を提案し、S/N を向上させた。

その結果、高減衰材における探傷領域内全ての位置の人工欠陥に対し、従来プローブと対比して検出能を向上させ、探傷領域を拡大した。

(文 献)

- 1) 片岡克仁：特殊鋼，64 (2015)，5，15.
- 2) 黒住保夫：INSS JOURNAL，7 (2000)，159.
- 3) 片岡克仁：電気製鋼，79 (2008)，281.
- 4) 日本非破壊検査協会：超音波探傷試験 II，2000，7.
- 5) 日本非破壊検査協会：超音波探傷試験 II，2000，14.
- 6) 杉浩二：特殊鋼，79 (2008)，281.
- 7) Olympus NDT：Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications，2007，5.
- 8) 日本非破壊検査協会：超音波探傷試験 III，2001，49.
- 9) 佐藤知雄：鉄鋼の顕微鏡写真と解説，1985，6
- 10) 森大輔，兼重健一：電気製鋼，83 (2012)，97.
- 11) 日本非破壊検査協会：超音波探傷試験 III，2001，45.
- 12) 岩田彰：デジタル信号処理，2013，16.
- 13) Olympus NDT：Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications，2005，113.
- 14) Olympus NDT：Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications，2005，231.



樹神啓司



伊藤光宏