

割れの検出確率に関する数値シミュレーション での検証

荒川 敬弘^{*1}

Arakawa Takahiro

低合金鋼に発生する低温割れを対象とした割れの検出確率に関する一つの検討結果を紹介し、溶接のテキストで紹介されている割れの断面形状をコンピュータに取り込んだ、数値シミュレーションによる検証を行った。数値シミュレーションの結果は、超音波探傷試験による割れの検出の様子によく一致した。すなわち、5MHz 探傷では、割れの反射指向性は、平面きずに比べてかなり鈍くなり、同時に、垂直に入射したときのエコー高さは約 1/3 に低下した。

キーワード：超音波探傷、割れ、シミュレーション、POD、検出確率

1. はじめに

著者は、以前に多くの割れを溶接部に作製し、自然欠陥としての割れの検出性を検討した。特に、1980 年前後に行われた当時の財団法人発電用熱機関協会（現在、一般財団法人発電設備技術検査協会）の委員会に参加して得られた割れの探傷データを独自に解析し、さらに追加のデータを補完することで割れの検出確率を求める統計式を提案した⁽¹⁾。

一方、近年コンピュータ技術の進歩も著しく、超音波探傷試験に関するシミュレーション技術も大変活用しやすくなってきた。今回、提案した割れの検出確率について紹介するとともに、コンピュータシミュレーションを用いて割れの検出性を検証した結果を紹介する⁽²⁾。

2. 傾きのある平面きずの検出

割れの検出性を検討する前に、スリットのような平面の検出性を考える。超音波が平面きずに斜めに入射する場合のきずからの相対エコー高さ (h_F/h_S) は、平面きずへの入射角があまり大きくない範囲では次式で近似できる⁽³⁾。

$$\frac{h_F}{h_S} = \left| \frac{\sin Z_1}{Z_1} \right|^4 \frac{\gamma_{G-F} \cdot \gamma_{I-F}}{\gamma_{G-S} \cdot \gamma_{I-S}} \quad (1)$$

帯形平面きずの場合（寸法 t_B ）

$$Z_1 = \frac{\pi}{\lambda} \cdot t_B \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot 2d_1}{\sqrt{2}t_B + 2d_1} \cdot \sin \psi$$

円形平面きずの場合（寸法 t_D ）

$$Z_1 = \frac{\pi}{\lambda} \cdot t_D \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 2d_1}{\sqrt{2}t_D + \sqrt{2}d_1} \cdot \sin \psi$$

ここで、

λ : 超音波の波長

$2d_1$: 斜角探触子の見掛けの振動子寸法

*1: フェロー 工学博士

ψ : 平面への超音波の入射角

t_B : 帯形平面きずの幅 (きず面に沿って測った高さ)

t_D : 円形平面きずの直径

式 (1) の計算例を図 1 に示す。4mmφ の横穴を対比きずとして、屈折角 45 度で振動子寸法 10mm (見掛けの振動子寸法 : 8.8mm) の斜角探触子で探傷を行い、帯形平面きずが深さ 60mm (ビーム距離 $x=85\text{mm}$) にある場合について計算している。図 1 から、超音波が斜めに平面に入射した場合、エコー高さの低下の度合いは、より大きなきずの方が大きく、より大きなきずの方が相対エコー高さはより低くなる場合も生じ、検出しにくくなるのがわかる。

ここでは、平面からの反射波の相対エコー高さのみを論じており、きずの端部で生じる散乱波のエコーレベルは無視している。とはいえ、検出レベルを論じる上では少々困った現象である。大きな平面きずを評価するには、きずの面に数度以内の傾きで超音波を入射する必要があると思われる。

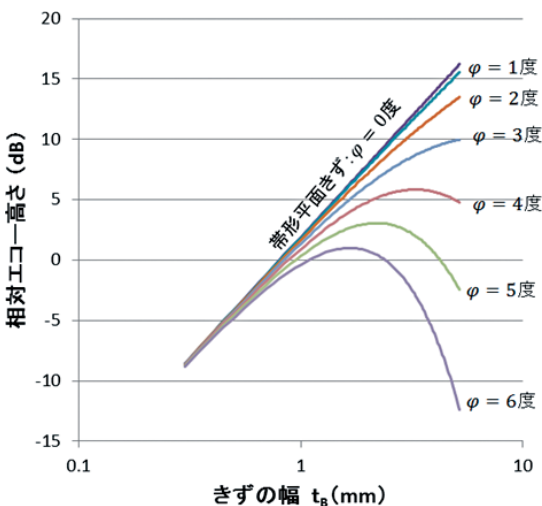


図 1 帯形平面きずに超音波が斜め入射する場合の相対エコー高さに及ぼす入射角およびきずの大きさの関係 (探触子:5C10×10A45、距離 $x=85\text{mm}$ の場合)

3. 割れの反射指向性

海面や湖面を眺めていると、さまざまな景色の移ろいに見とれることがある。風のない静かな水面は、鮮やかに対岸の景色を映し、また風によって生じる波の波頭がキラキラと光り輝くこともある。さまざまな波の形に対して、光の反射が織りなす景観の多様性である。

前章で述べた平滑な平面きずは、全く風がなく波のない水面の反射に相当しよう。自然界に発生する割れの破面は、むしろ波立つ水面に相当するかもしれない。このような場合、超音波の反射はどのようなようになるであろうか。図 2 に、超音波の反射の様子を模式的に示してみた。

割れ面は、モザイク状に小さな面が互いに傾きを持って連なっていると考えた。したがって、それぞれの面の傾きに応じて種々の方向に超音波が反射することになる。かつ、分割された各面は、小さな面積に分割されているので、反射の指向性も鈍くなる。これらの反射波が合成されて、一枚の平滑面の場合に比べて割れの反射指向性はかなり鈍くなり、より検出できる超音波の入射方向が広がると考えられる。

Civa シミュレーションソフトを用いて、これを確認した。まず、深さ 60mm の位置に、傾きを変化させた平面きずおよび割れ模擬きずを設定した。これを周波数 5MHz で屈折角 45 度の斜角探

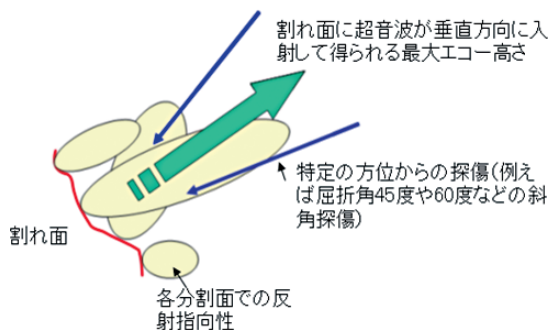


図 2 割れ面での反射指向性を示す概念図

触子（振動子寸法 10×10mm）を前後走査させて最大エコー高さを求め、同一形状のきずの面への入射角を変えたときのエコー高さの変化を求めた。用いた割れの模擬形状は、**図 3** に示す横割れ⁽⁴⁾の断面形状を、**図中**に示すように直線でな

ぞって求め、同寸法の平滑面のきずの場合と比較した。ただし、ここでは、長手方向に対しては同一形状を持つとして、二次元でのシミュレーションを行っている。

検討した結果を**図 4** に示す。**図 4** より、平滑

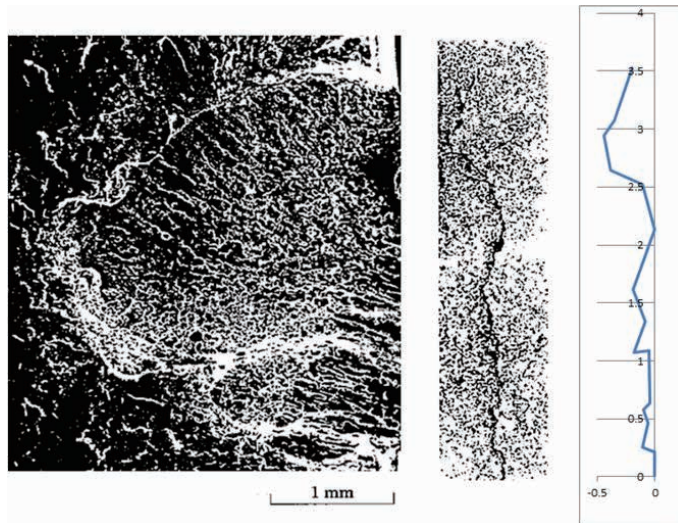


図 3 コンピュータシミュレーションに用いた割れの形態（自然欠陥）（直線で分割してモデル化）

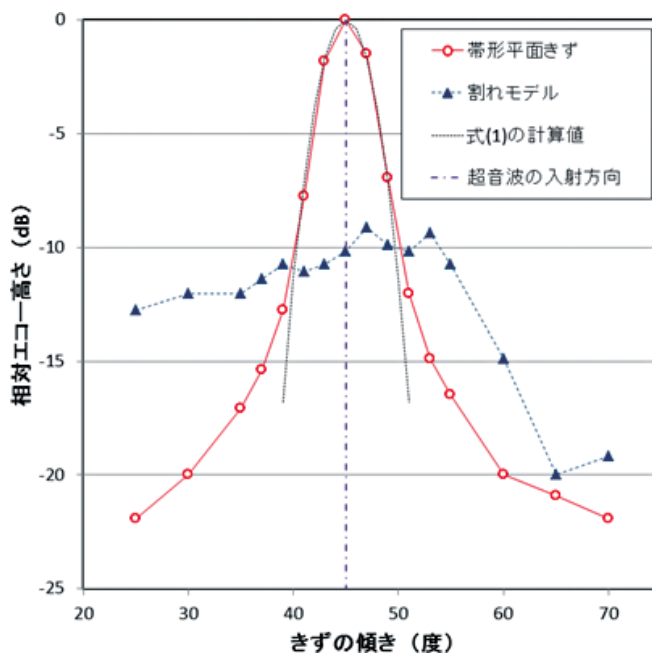


図 4 Civa シミュレーションでの帯形平面きずと水素割れモデルとのきずへの超音波の入射角度の影響の比較（探触子：5C10 × 10A45、帯形平面きずの幅：0.53mm、距離 x=85mm）

面（帯形平面きず）に比べて割れを模擬したきず（水素割れモデル）では、超音波反射の指向性は明らかに鈍くなり、より広い方向からの探傷できずを検出できると考えられる。一方、面に垂直方向に超音波が入射したときの最大エコー高さは、割れモデルの方が平滑面（帯形平面きず）に比べて約 10dB 低くなっているのがわかる。

なお、著者は、以前に割れの検出確率の統計式を導くために、溶接部に多くの水素による低温割れを導入して試験したことがある。このとき、割れの長手に直交する一断面で、垂直探傷、および

タンデム探傷を含んで屈折角 7.5 度間隔の探触子で試験片の両面両側から前後走査して最大エコー高さを求めた。さらに、特定の方向の組合せでの探傷での最大エコー高さを比較した⁽⁵⁾。

図 5 は、垂直探傷とタンデム探傷を含んだ屈折角 7.5 度間隔の斜角探傷で得られた最大エコー高さを、斜角探傷の間隔を 15 度間隔に間引いた探傷（タンデム探傷を 90 度方向のビームと考えて、超音波ビームがきずに 15 度間隔に入射する探傷）での最大エコー高さと比較した結果である。両者に大きな差異はなく、平面きずに比べて割れ

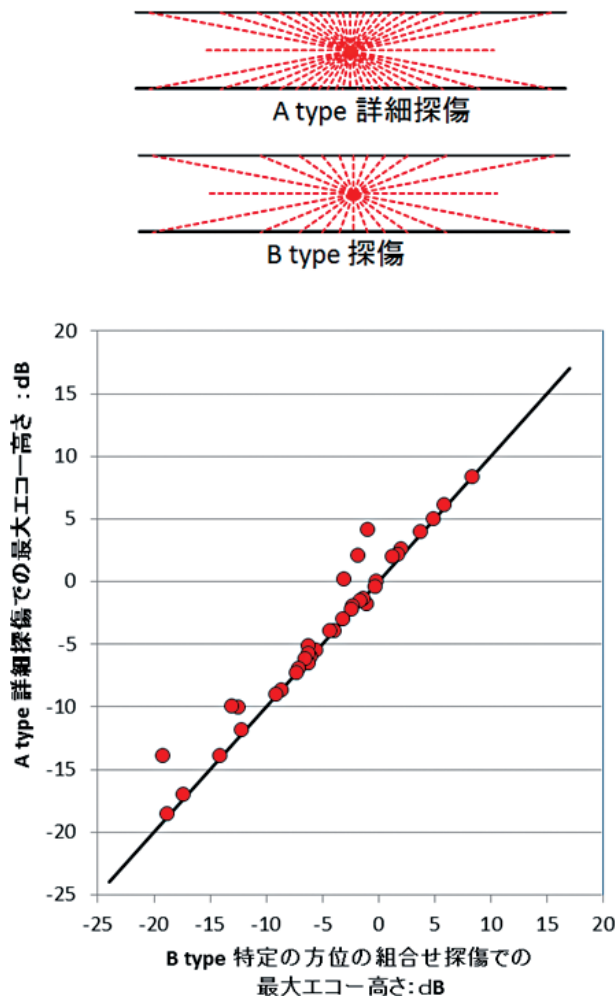


図 5 垂直探傷とタンデム探傷を含んだ屈折角 7.5 度間隔の斜角探傷（A type 詳細探傷）で得られた最大エコー高さと、斜角探傷の間隔を 15 度間隔に間引いた探傷（B type 探傷）での最大エコー高さの比較

面の鈍い指向性を理解できる。図4においても、割れの傾きが約40～55度の割れの傾き範囲でエコー高さに大きな変化は見られておらず、屈折角15度ごとの探傷で最大エコー高さに近いエコー高さが得られるのがわかる。

しかし、さらに探傷する超音波の入射方向を間引いていくと、より詳細な探傷での最大エコー高さにより大きなエコー高さの分散が生じることになる。図6は、試験体の片面両側より垂直探傷と屈折角45度と60度の探傷を行う場合のエコー高さを、詳細に全周方向からの探傷を行う場合の

最大エコー高さと比較した結果である。図6より、16dBの範囲まで分散してエコー高さが低下することがわかる。

なお、試験体の片面両側より屈折角45度の斜角探傷のみを行う場合のデータの分散範囲は26dBであった。また、タンDEM探傷および垂直探傷を含み、割れに30度間隔で超音波が入射する探傷の場合の分散の範囲は10dBであった。

4. 割れの検出確率

図6を用いて、片面両側より垂直探傷と屈折

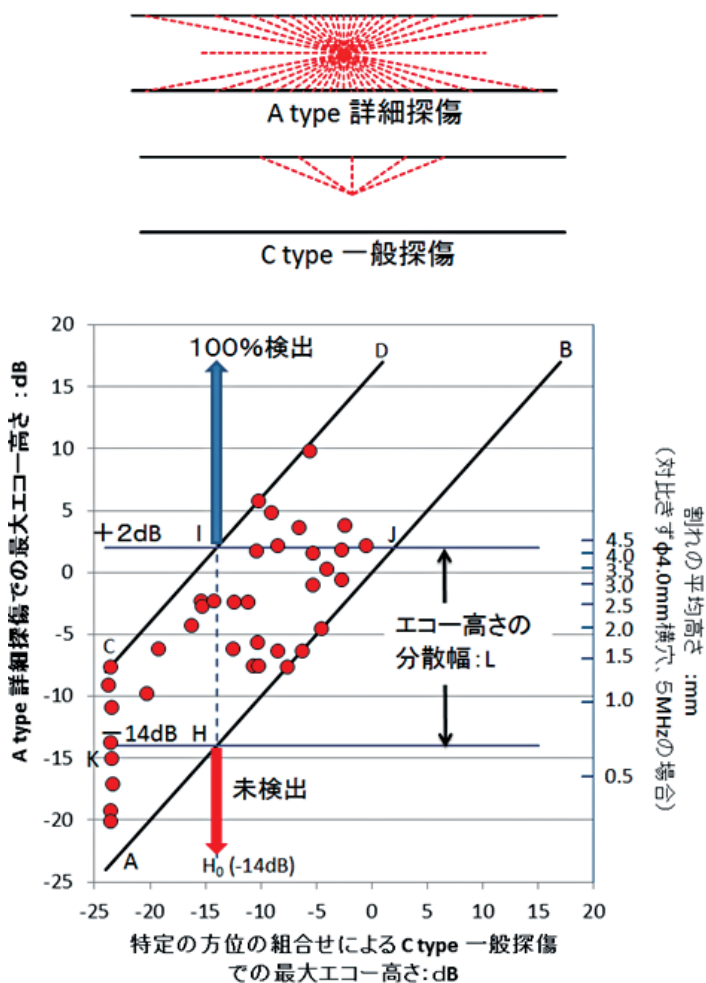


図6 垂直探傷とタンDEM探傷を含んだ屈折角7.5度間隔の斜角探傷 (A type 詳細探傷) で得られた最大エコー高さと試験体の片面両側より垂直探傷と屈折角45度と60度の斜角探傷の組合せ (C type 一般探傷) での最大エコー高さの比較

角 45 度と 60 度の探傷（以後、C type 一般探傷と呼ぶ）を行う場合の検出確率を考えてみよう。この C type 一般探傷を行うときの検出レベル（きずと識別するための最低エコーレベル）を -14dB （20%）とする場合について考える。C type 一般探傷で検出レベルの -14dB が得られた割れに対して、さらに詳細に垂直探傷およびタンデム探傷を含んで 7.5 度間隔の斜角探傷を行い、きずに極めて詳細に超音波ビームを全方向から入射させた探傷（以後 A type 詳細探傷と呼ぶ）を行えば、 -14dB から $+2\text{dB}$ までのエコー高さが得られることがわかる。

ここで、A type 詳細探傷で $+2\text{dB}$ 以上の最大エコー高さが得られた割れ（図 6 で DIJB に囲まれた割れ）は、C type 一般探傷においても検出レベルの -14dB 以上のエコー高さが得られており、C type 一般探傷における検出確率は 100% であるといえる。一方、A type 詳細探傷で -14dB 未満の最大エコー高さが得られた割れ（図 6 で KHA に囲まれた割れ）は、C type 一般探傷における検出確率は 0%

であるといえる。

A type 詳細探傷と C type 一般探傷での最大エコー高さの分散が、線分 AB と線分 CD 間に均一であると仮定すれば、A type 詳細探傷で $+2\text{dB}$ から -14dB までの最大エコー高さが得られる割れの検出確率は 100% から 0% まで直線的に変化するといえる。

ここで、A type 詳細探傷での最大エコー高さは、割れ面にほぼ垂直に超音波が入射していると考えられ、きずの大きさに関連付けることができる。帯形平面きずの形状反射能率を用いてきずの高さ（幅）を求め、試験体を切断して求めた寸法と比較した結果を図 7 に示している。

割れ面の多様性により、分散が見られるが、平均値を求めると、エコー高さより推定した割れの高さ（幅）は、公称探傷周波数 5MHz の場合に平滑面として求めた計算値の約 $1/3$ であり、平均値で -10.5dB 、標準偏差値で 3.69dB が得られている（ 2MHz では、平均値 -7.5dB 、標準偏差値 2.67dB ）。

帯形平面きずのエコー高さは、きずの高さ（幅）

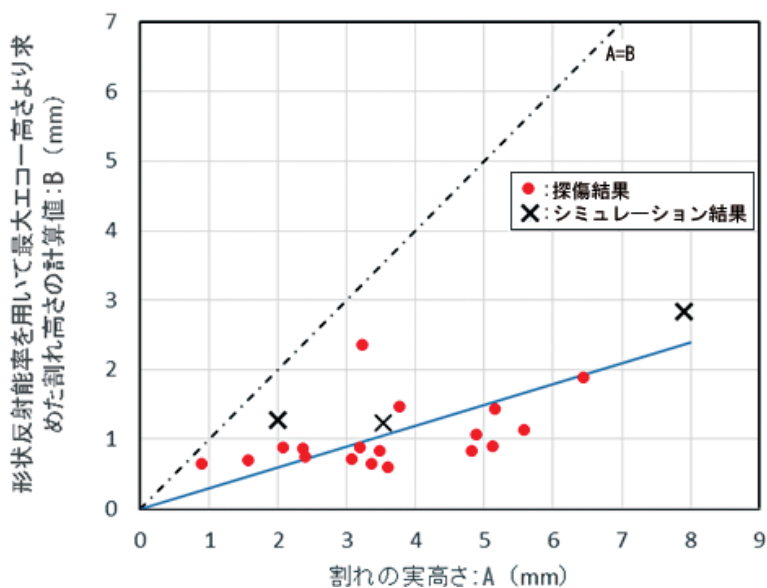


図 7 A type 詳細探傷で得られた最大エコー高さより形状反射能率を用いて求めた割れ高さの計算値と実割れ高さの比較（探傷周波数： 5MHz ）

に比例するので、同じサイズの平面きずに対して、割れのエコー高さは 5MHz を用いた探傷では約 10dB 低いといえ、割れ面での界面反射能率と考えることもできる。

なお、**図 7**には、**図 4**の低温割れの結果、および溶接・接合技術特論（溶接学会編）⁽⁶⁾から採取した割れ断面形状を二次元でシミュレーションした結果を×印で示している（シミュレーションでは、割れは内部に存在するものとして、割れの形状のみを模擬した）。結果より、やや高めではあるが、妥当な相関性を確認できている。

図 6に戻って割れの検出確率について考えてみよう。**図 6**の縦軸の A type 詳細探傷で得られた最大エコー高さを、形状反射能率と、**図 7**による割れ面の界面反射能率を用いてきずの寸法に置き換えることができる。きずを帯形平面きずとして、 $\phi 4\text{mm}$ の横穴を対比きずとして 5MHz で探傷したときの A type 詳細探傷の最大エコー高さを、割れの平均高さ（実在する割れは種々の傾きを持つが、ここでは安全サイドの評価として試験片に垂直方向の割れとして扱っている）に換算し、

図 6の右側に示している。

すなわち、割れ高さ 4.2mm 以上の割れの検出確率は 100%であり、割れ高さ 0.7mm 未満の割れの検出確率は 0%であることがわかる。**図 8**に点線で、各割れ高さに対する検出確率の関係を示している。

なお、**図 7**において、割れ面の界面反射能率は割れの形態の多様性によりかなり分散した値を持っている。この界面反射能率を確率分布で表して割れの検出確率を求めた方がより合理的かもしれない。**図 7**における分散を正規分布と仮定して検討を行った。

図 9に検討結果を模式的に表している。横軸は、A type 詳細探傷で得られた最大エコー高さ（**図 6**の縦軸）を表している。図は、 $\phi 4\text{mm}$ の横穴を対比きずとして、C type 一般探傷での検出レベルを -14dB として、5MHz で探傷したときの、割れ高さ 1mm の割れの検出確率を求めている。割れ高さ 1mm の割れに垂直に超音波が入射したときの平均的なエコー高さは -10.5dB であるが、割れ面の多様性を考慮して正規分布の確率関数 $R(x)$ と

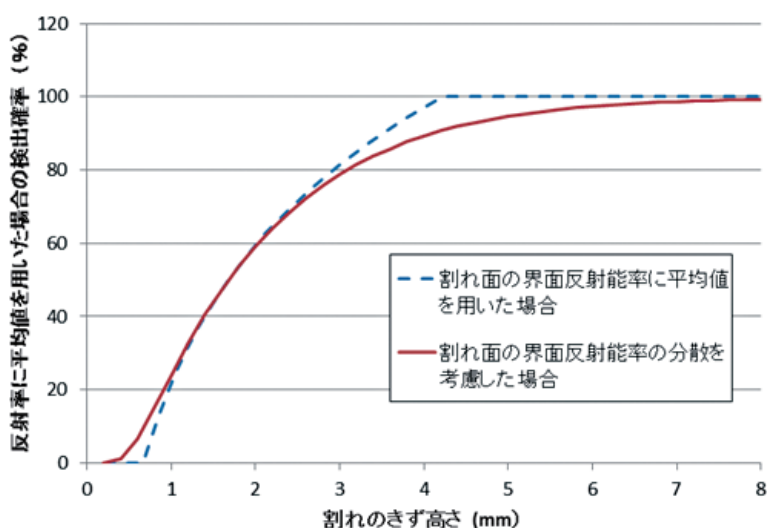


図 8 割れ面での界面反射能率の平均値を用いる場合と分散を考慮した確率計算による場合の割れの検出確率の例（対比きず $\phi 4\text{mm}$ 横穴、C type 一般探傷での検出レベル -14dB (20%)、5MHz 探傷の例）

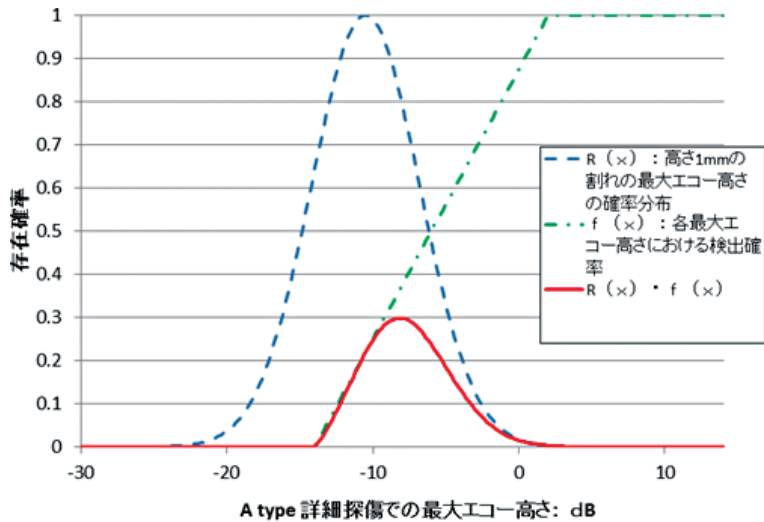


図9 割れ面での界面反射率の分散を考慮した検出確率の求め方の模式図（対比きずφ4mm横穴、C type一般探傷での検出レベル-14dB（20%）、5MHz探傷で1mm高さの割れの検出確率の求め方の例）

して、図の破線（青）で表している。このA type 詳細探傷での最大エコー高さにおいて、C type 一般探傷とのビームの入射方向の粗密に伴う検出確率を一点破線（緑）の $f(x)$ で表している（A type 詳細探傷での最大エコー高さが+2dB以上の場合が100%の検出確率で、検出レベル $n-14$ dB未満の場合が0%で、その間を直線で結んだ関数）。したがって、検出される高さ1mmの割れの数、関数 $R(x)$ と $f(x)$ を掛け合わせて積分した値となるから、高さ1mmの割れの検出確率 P は次式で表される。

$$P = \frac{\int (R(x) \times f(x)) dx}{\int R(x) dx} \quad (2)$$

各きず高さに対して求めた検出確率を、割れの界面反射率として平均値を用いて求めた場合と比較して、図8に太い実線（赤）で示している。

なお、ここでの検出確率は、あくまでも割れの一断面に着目して検討したものである。大きな割れでは、超音波ビームは異なる割れの断面を複数回横切ることになる。割れの断面形状は長手方向で異なる形状を持つと考えられるので、大きな割

れの見落とし確率としては、超音波ビームが断面を横切る複数回ともに割れを検出しない確率として定義されるべきである。したがって、割れの検出確率は、今回一断面で検討した検出確率より、特に大きな割れに対してはかなり改善されることが予測される。

5. おわりに

低合金鋼に発生する低温割れを対象とした割れの検出確率に関する一つの検討結果を紹介した。同時に溶接のテキストに紹介されている割れの断面形状をコンピュータに取り込んで、数値シミュレーションによる検証を行った。数値シミュレーションの結果は、超音波探傷試験による割れの検出の様子によく一致した。すなわち、割れの反射指向性は、平面きずに比べてかなり鈍くなり、同時に、垂直に入射したときのエコー高さは約1/3に低下した。

また、実割れの超音波探傷試験による探傷能力を数値シミュレーションで予測・検証することが有効であることを確認できた。今後、実構造物に

発生する割れの三次元形状を多数収集して、コンピュータシミュレーションによって評価できれば、検出確率など超音波能力をさらに定量的に評価できると考えられる。

一方、近年一つの振動子を小さな素子に分割し、それぞれの素子の励起する時間をコンピュータ制御したフェーズドアレイ探傷が実用化されている。この中で、探傷屈折角を連続して順次変化させるセクタスキャンが用いられる。この探傷方法は、割れ面に垂直に入射する確率がより増えるとともに、画像化によりきずを識別することで割れの検出性に大きく寄与できる。ここでは、あくまで従来の限られた方向からの探傷の組合せにより、一定の検出レベルを設けて探傷するときの検出性について考察している。

参考文献

- (1) 荒川：超音波探傷による溶接割れの定量的評価、学位論文、東北大学、1987年11月
- (2) 荒川：非破壊検査基礎講座第6回、ボイラー・クレーン・溶接の Jitsu・Ten 実務 & 展望、No.290、2016/3、pp.27-36
- (3) 仙田、広瀬、裏垣：傾きをもった平面状欠陥の検出について、非破壊検査、23巻2号、1974、p.92
- (4) 日本溶接協会：溶接構造物の試験・検査 2008、p.263、図 5.1.4
- (5) T.Arakawa, S.Hirose, T.Senda：The detection of weld cracks using ultrasonic testing、NDT INTERNATIONAL、Vol.18、No.1、Feb.1985、pp.9-16
- (6) 溶接学会：新版 溶接・接合技術特論、2005年、pp.142、516



フェロー
工学博士
荒川 敬弘

TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547