

突合溶接部表面近傍に位置する面状欠陥 検出のための超音波探傷斜角法

白旗 弘実¹・三木 千壽²

¹正会員 修 (工) 武蔵工業大学助手 工学部土木工学科 (〒 158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

²フェロー 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒 152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

鋼橋の突き合わせ溶接部の検査に超音波探傷試験の適用が検討されている。溶接欠陥の中でも構造部材の強度、疲労に影響を及ぼす面状欠陥の検出能が問題となっている。高温割れなどは特に溶接第一パスに発生しやすく、V 開先溶接では表面近傍に位置することになる。表面近傍に位置する面状欠陥を検出するために、入射角度、送信周波数をパラメータとした基礎的検討を数値シミュレーション、実験により行った。現場溶接継手をモデルとした試験体を用いた実験を行い、開口合成により欠陥像の再構成を試みた。

Key Words : ultrasonic testing, field welded joint, planar defect, corner echo, directivity, synthetic aperture focusing technique

1. はじめに

溶接継手の品質管理に超音波探傷試験の適用が検討されはじめている。従来、溶接継手の品質管理には放射線透過試験が行われてきたが、放射線が周囲に影響を及ぼすことや、検査機器が稼働可能となるまでに時間がかかること、検査結果を判定するためのフィルム現像に時間がかかること¹⁾、板厚が厚くなると試験が適用できなくなることなどの問題がある。それに対し超音波探傷試験では、超音波は人体に影響を及ぼさないことや検査結果がすぐに得られる点で放射線透過試験よりも優れている。

従来、放射線透過試験で保証されてきた品質が今後、超音波探傷試験でも保証されるかどうか調べることを目的として、超音波探傷試験の適用性の検討が行われてきた。著者ら²⁾は工場板継ぎ溶接部を対象として放射線透過試験と超音波探傷試験結果を比較しているが、両者の結果が大きく異なる欠陥として、高温割れ、融合不良、溶け込み不足といった面状欠陥をあげている。面状欠陥は構造物の疲労や強度に大きな影響を与える。超音波探傷試験結果を信頼できるものとするためにも面状欠陥の検出性能の向上が望まれている^{3),4),5)}。

面状欠陥の検出が困難な理由は、入射超音波が欠陥で鏡面反射されるため、反射波が強い指向性をもっていることである。このため送信、受信を同一の探触子で行う一探触子法では欠陥からの反射波を受信できるとは限らなくなる。面状欠陥の先端を中心とした無指向性の端部エコーだけは探触子で受信することが可能である。端部エコーを受信することで面状欠陥の探傷面垂直方

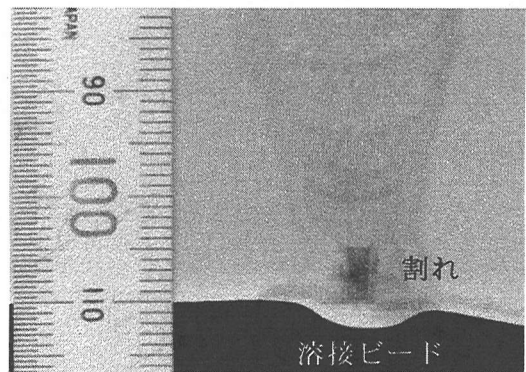


図-1 本研究で対象とする高温割れ欠陥

向の寸法を推定する方法として端部エコー法があり、従来は端部エコー法を利用して面状欠陥の検出を行ってきた^{6),7),8),9)}。

面状欠陥の中でも片側溶接ビードの裏面近くに残される割れ、溶け込み不足は欠陥の近くには溶接ビードが存在するため、検出が困難であることが予想される。端部エコー法を適用しようとしても微弱な端部エコーは、溶接ビードからの形状エコーの影響で容易に隠されてしまうといった問題が生じるからである。この問題は特に板が厚くなったときに深刻で、入射経路が長くなるほど探触子からの入射ビーム幅が広がってしまい、ビード形状エコーの影響も受けやすくなる。板厚に対する欠陥と溶接ビードとの相対的な距離は板が厚くなるほど短くなり、縦方向の分解能も問題となってくる。

近年、適用されはじめてきている現場溶接継手¹⁰⁾では開先形状はV形のものが多く、フランジの板厚も50mmを越えるような厚いものも使われている。著者ら¹¹⁾は

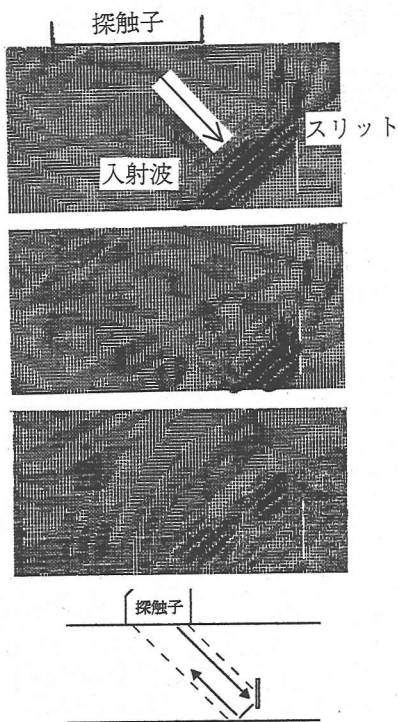


図-2 疑似コーナーエコー

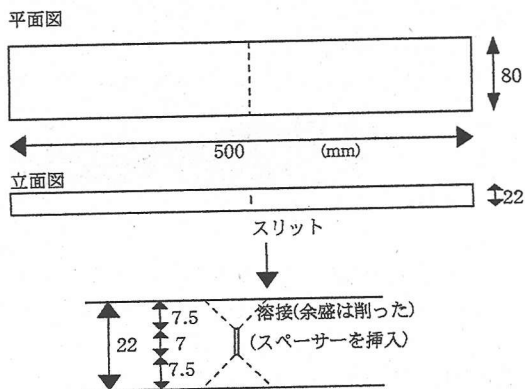


図-3 実験で用いた試験体

面状欠陥を含ませた現場溶接継手をモデルとした試験体で実験を行った。底面に近い縦割れ面状欠陥では欠陥と底面で構成される疑似的なコーナー反射したエコーとして欠陥エコーが得られることを溶接第一パスに含まれる縦割れをモデルとした数値シミュレーションにより確認した。

疑似的にコーナー反射したエコーを受信することにより、表面近傍にある面状欠陥を検出することができる。木村ら¹¹⁾は表面近傍にある面状欠陥からのエコー特性を調べる目的で波線理論¹²⁾をベースとした数値シミュレーション手法を開発した。木村らは疑似的なコーナー経路を含めた4つの波動伝播経路を考慮し、面状欠陥の傾きをパラメータとして欠陥エコー高さの変化を

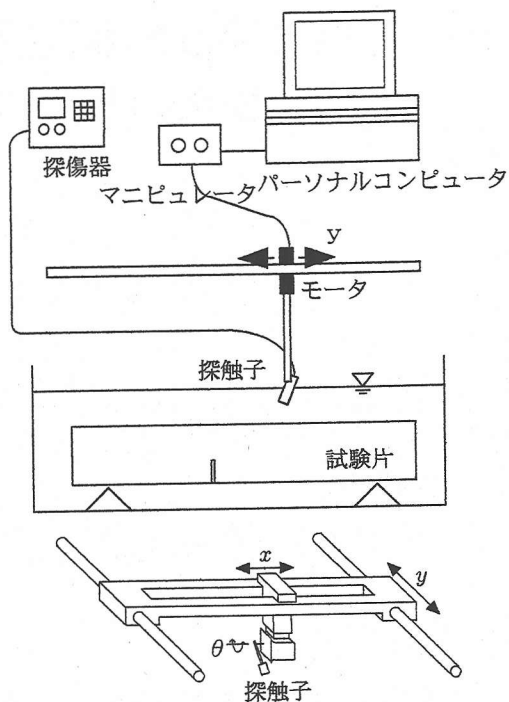


図-4 水浸法による実験システム

調べている。その結果、特に垂直な欠陥において疑似的なコーナー経路を伝播して受信される波のエコー高さに対する寄与が大きいことを示している。本研究では片側溶接ビード裏面近傍にある高温割れ、溶け込み不足の検出性能を向上することを目的として、図-1に示すような表面近傍にある面状欠陥検出の基礎的検討を行った。ここでは、欠陥と底面で構成される疑似的なコーナー経路を通して得られるエコーのことを疑似コーナーエコーと呼ぶことにするが、疑似コーナーエコー特性は入射波の周波数、入射角度といった入射波の条件の影響を受ける。ここでは波動伝播の観点から、入射波の条件として、入射波の周波数、入射角をパラメータに選び、疑似的なコーナーエコー特性を有限要素法に基づく数値シミュレーション^{13),14),15)}やスリットを含んだ試験体で基礎的な超音波探傷実験を行い、面状欠陥を見落とさない入射波の条件を検討した。そして、基礎的検討結果を検証することを目的として現場溶接継手をモデルとした試験体で実験を行った。

2. 入射角と疑似コーナーエコー高さ

図-2は疑似コーナーエコー発生時の数値シミュレーション変位ベクトル図である。図-2に示すように、面状欠陥が底面近傍にある場合、欠陥と底面の順に反射され、探触子にもどっていく経路、また、底面と欠陥の順に反射され探触子にもどっていく経路が存在することがわかる。

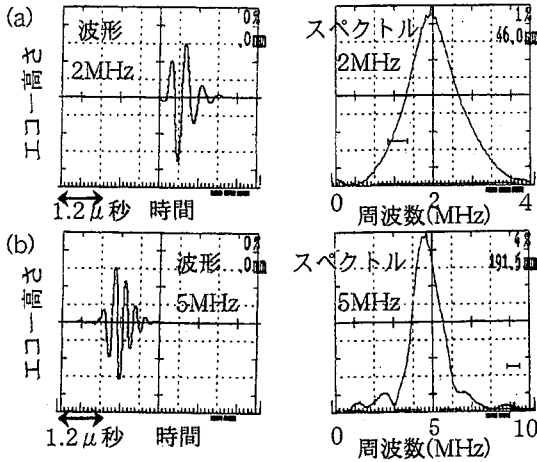


図-5 実験で用いた探触子から出される波形とスペクトル

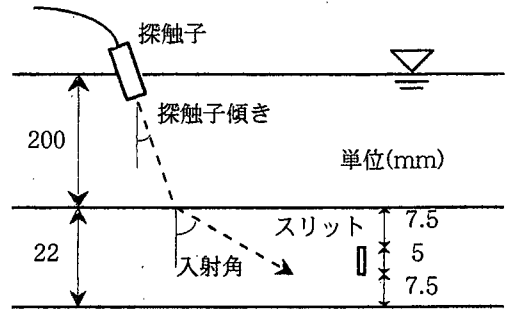


図-6 実験概略

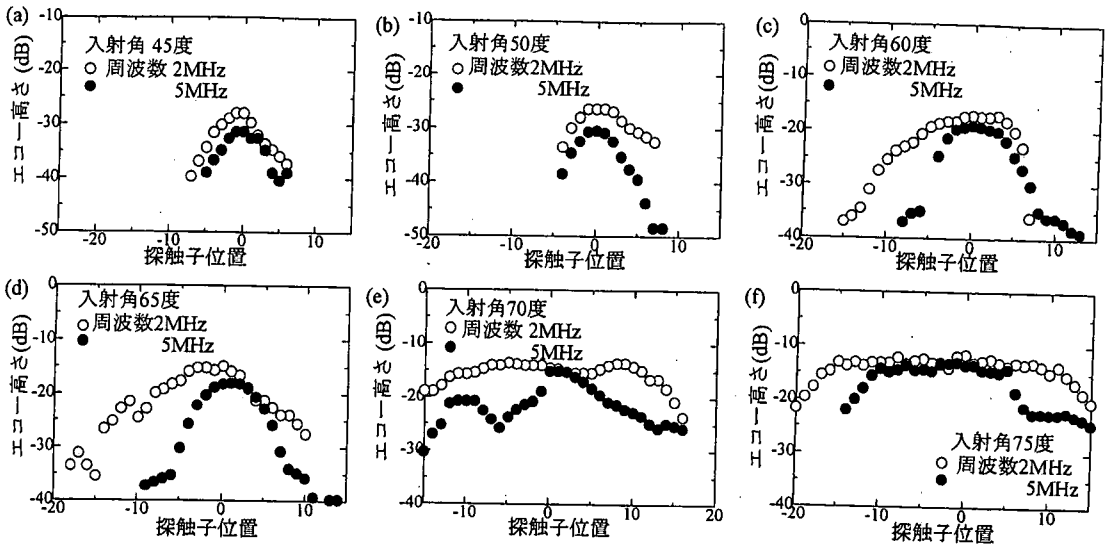


図-7 疑似コーナーエコー高さ曲線

疑似コーナーエコー高さに影響を与える要因としては送信波の周波数、入射角度などがあげられる。ここではこれらの要因の中の一つとして送信波の入射角と疑似コーナーエコー高さの関係を実験により調べた。

(1) 試験体および実験装置

本研究では図-3 に示すような試験体で実験を行った。この試験体は厚さ 22mm の鋼板であり、スリットをもっている。スリットは突き合わせ溶接で、突き合わせ部にスペーサーをはさむことにより作成した。スリットの高さは 7mm、幅は 0.5mm である。スリットは板厚方向中心部に位置している。

実験は水浸法により行われた。図-4 に実験システムを示す。探触子はモータによって動かされる。モータによる探触子の走査の精度は図-4 に示した x 方向、 y 方向に 0.05mm、角度 θ は 0.01 度である。モータを動かすに

はマニピュレータを用いる。マニピュレータからの指示がパーソナルコンピュータに伝達され、コンピュータからの指示によって、モータが動かされる。

本研究で用いた探触子は 2MHz 無集束型、5MHz 無集束型のものである。図-5 にそれぞれの探触子から出される波形とスペクトル分布を示す。この実験で 2MHz と 5MHz の探触子を用いたのは、鋼溶接部の超音波探傷に関して、JIS で定められている周波数だからである。分解能は音波の波長が短いほど高く、実際の探傷で用いられるのは 5MHz の波のほうが一般的であり、2MHz の波が用いられるのはむしろまれである。

実験概略を図-6 に示す。用いた探触子は水浸用垂直探触子である。探触子内部には厚さ方向に振動する圧電素子があり、放出される波は縦波である。水中を伝播してきた波は鋼との境界で屈折または反射される。鋼への屈折角はスネルの法則に従う。このとき水中で縦波で

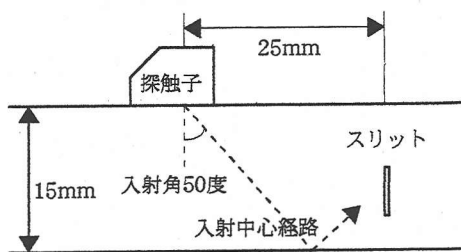


図-8 数値シミュレーションモデル (入射角 50 度)

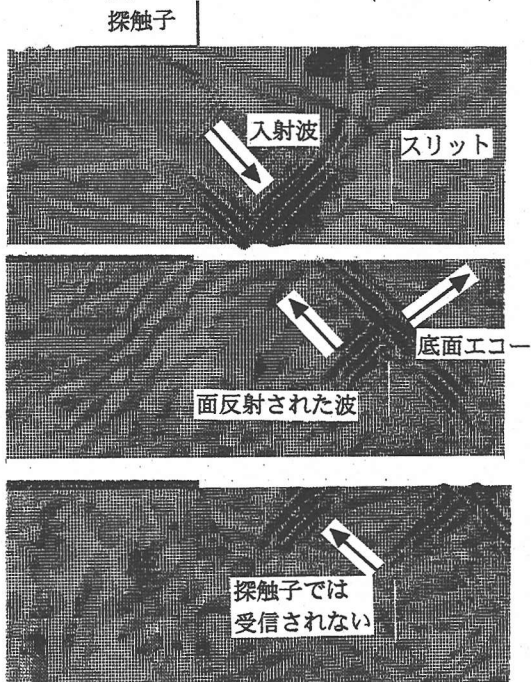


図-9 波動伝播のシミュレーション (入射角 50 度)

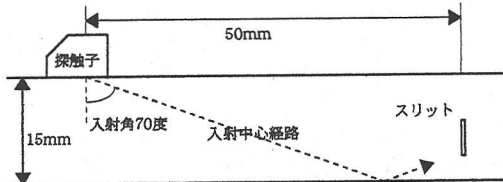


図-10 数値シミュレーションモデル (入射角 70 度)

あった波も鋼へ入射する際に横波にモード変換される場合がある。ここで検討した角度は45,50,60,65,70および75度であるが、鋼へ45度の横波で入射させるには水浸探触子を水中で18.9度傾ける必要がある。探触子を走査させ、欠陥からのエコーを受信した。走査間隔は1mmおきである。

(2) 実験結果

図-7(a)は入射角を45度としたときの欠陥エコー高さの変化である。欠陥エコーはJIS 20)に定められた標準試験片の直径4mm、深さ4mmの穴からのエコー高さ

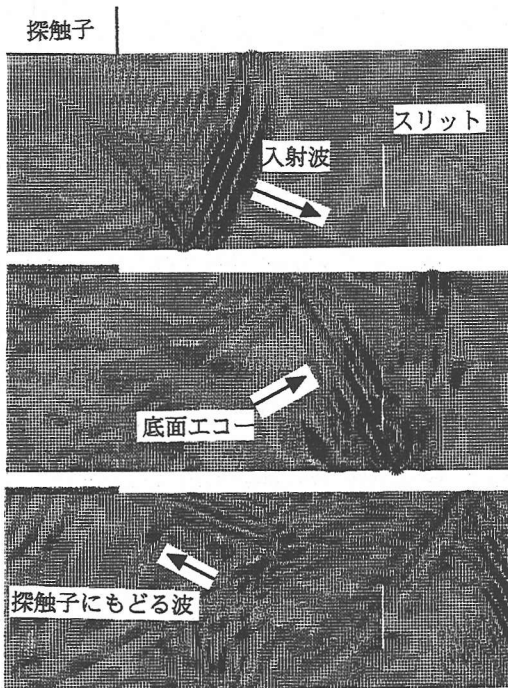


図-11 波動伝播のシミュレーション (入射角 70 度)

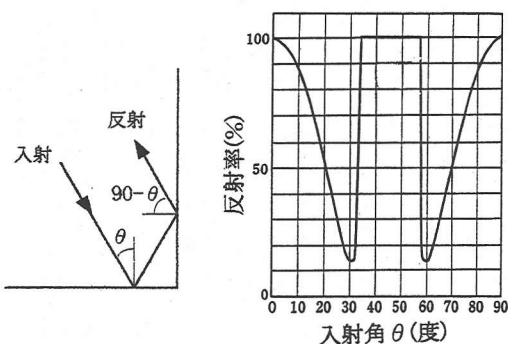


図-12 コーナー部での入射角と反射率¹⁶⁾

を基準とした相対高さである。エコー曲線にはピークが見られるが、その高さはきわめて低い。周波数2MHzと5MHzでは2MHzのほうが高い。図-7(b),(c),(d),(e),(f)はそれぞれ入射角50,60,65,70および75度ときのエコー高さ曲線である。図-7において横軸は欠陥からのエコーが最大となる位置を0としている。横軸の数字は最大エコー位置からの距離をmm単位で示している。入射角50度ときは入射角45度るときと同様にエコー曲線は低いピークが見られる。入射角が60度より大きくなるにつれてエコー曲線はなだらかに変化するようになり、エコー高さは高くなっている。欠陥検出レベルを、標準試験片の穴からのエコー高さを基準のH線レベルとして、L/2線レベルの-18dBとすると、入射角45度,50度ではエコーがほとんど検出レベルに達しないのに対し、入射角60度からは検出レベルをこえるように

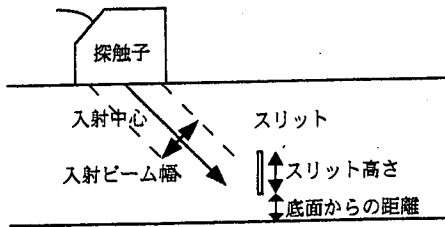


図-13 数値シミュレーションモデル

なる。

波動伝播挙動がどのように異なるのかを調べるために入射角を変えて数値シミュレーションを行った。モデルを図-8に示す。板にスリットがあるモデルで、板の厚さは15mm、スリットの高さは5mmである。スリットは底面から3mm離れている。入射角は50度で、入射波の中心はスリットから25mm離れた位置にある。入射ビーム幅は8mmである。

変位ベクトルを時系列順に並べたのが図-9である。入射位置とスリットとは距離が離れており、入射波は一度底面で反射しなければスリットには到達できない。スリットで波は面反射されるが、スリットからの反射波は指向性が強いので探触子では受信することができない。

次に入射角を大きく70度としたときのシミュレーションを行った。図-10は数値シミュレーション、モデルであり、板厚、スリットの幾何形状は入射角50度のとおりのものである。入射波の中心はスリットから50mm離れている。入射ビーム幅は8mmである。図-11は変位ベクトルを時系列順に並べたものである。図-11において入射波はスリットに到達するには一度底面で反射しなければならない。スリットで反射された波には探触子へもどっていく成分が存在する。これは入射角を70度と大きくすることで入射波が垂直入射に近くなり、反射波の指向性が弱くなったからである。

図-12はコーナー部で波が反射するときの入射角度と反射率の関係の理論解である¹⁶⁾。入射角が30度から50度の波は面反射すると、反射波の指向性は強く反射率は1.0になる。入射角を60度から70度にすれば反射率は低くなる。これは横波から縦波へのモード変換の影響の他に、反射波の指向性が弱くなっているからである。実験からも入射角60度以上となるとエコーが高くなったのは指向性の低下が理由である。疑似コーナー反射では、コーナー反射とは異なり、欠陥と底面に隙間があるためにエコーがそこから抜けていく。そのため反射波の指向性が強い45度の入射角は不利である。

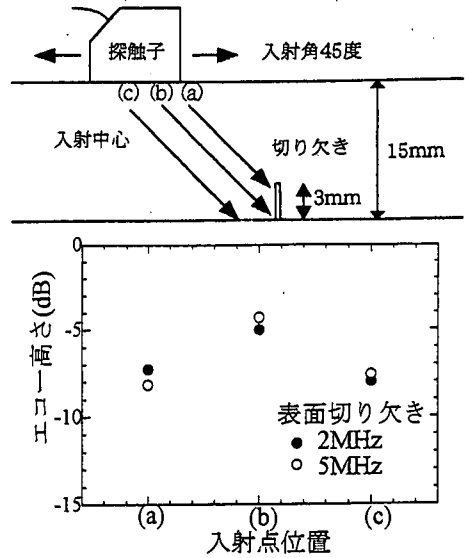


図-14 入射中心点とコーナーエコー高さ

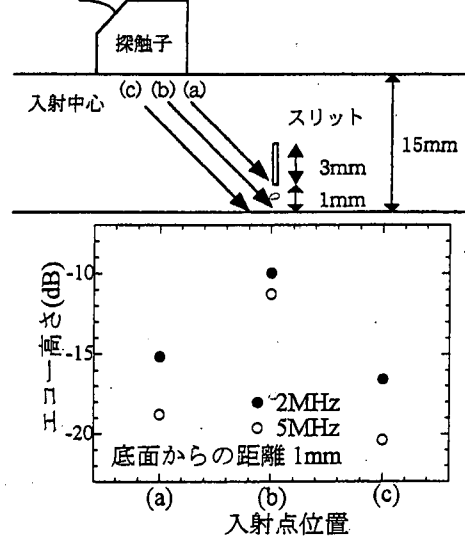


図-15 入射中心点と疑似コーナーエコー高さ(1mm)

3. 入射波の周波数と疑似コーナーエコー高さ

前章の実験では周波数2MHzのときのほうが5MHzのときよりもエコー高さが高かった。ここでは周波数をパラメータとして疑似コーナーエコー高さとの関係を数値シミュレーションにより検討した。モデルを図-13に示す。このモデルは厚さ15mmの板にスリットが含まれているものである。スリットの高さは3mmである。入射波は角度が45度で、ビーム幅は8mmである。検討した周波数は2MHzおよび5MHzである。スリットの底面からの距離を図-13のように定めるが、スリットの底面からの距離は0mm, 1mm および 3mm の場合を検討した。

スリットの底面からの距離が0mm、つまり表面切り

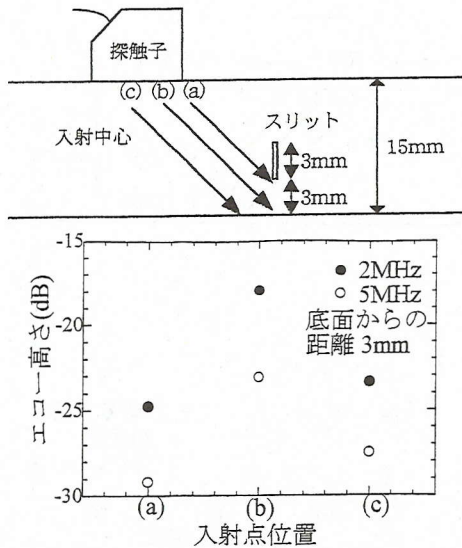


図-16 入射中心点と疑似コーナーエコー高さ (3mm)

欠きの場合を考える。入射波の中心は図-13に示すように探触子がスリットから離れていくにつれ(a),(b),(c)とする。(a)(b)間,(b)(c)間の間隔は3mmである。(b)のときは入射波の中心は切り欠きコーナー部に向かっている。

図-14に入射中心点とコーナーエコー高さの関係を示す。入射点が(b),つまりコーナー中心部のときがもっとも高いエコーが得られている。(b)点においては周波数5MHzのときのほうが2MHzのときよりもエコーが高い。しかし、それ以外の(a),(c)点では周波数2MHzのときのほうがエコーが高くなっている。

スリットの底面からの距離が1mmのときを考える。図-15に示すように、入射中心点はスリットから離れるにつれて(a),(b)および(c)となっている。点(b)においては入射中心はスリットから垂線を下し、底面と交わった点にむかっている。各点の距離は3mmずつ離れている。

入射中心位置と疑似コーナーエコー高さの関係を図-15に示す。入射中心点が(b)点にむかっているときにエコー高さをもっとも高い。表面切り欠きのときは異なり、周波数2MHzのほうが5MHzよりもエコーが高くなっている。(a),(c)点でのエコーも2MHzのときのほうが5MHzのときよりも高くなっている。以後、入射中心点(b)を疑似コーナー中心部とよぶことにする。

図-16はスリットの底面からの距離が3mmのときの入射中心点を示したものである。図-14,図-15のときと同様、疑似コーナー中心(b)点の左右に3mmずつ離れて(a)点,(c)点がある。各入射中心点と疑似コーナーエコー高さを図-16に示す。最大エコー高さは入射中心が疑似コーナー中心部にむかっているときである。最大エコー高さは周波数2MHzのときのほうが5MHzよりも

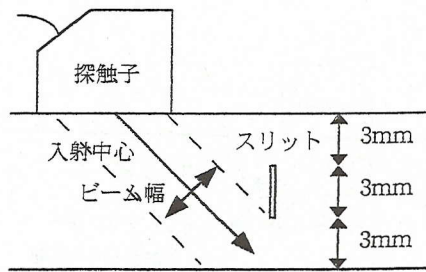


図-17 周波数による波動伝播挙動の違い, 数値シミュレーションモデル

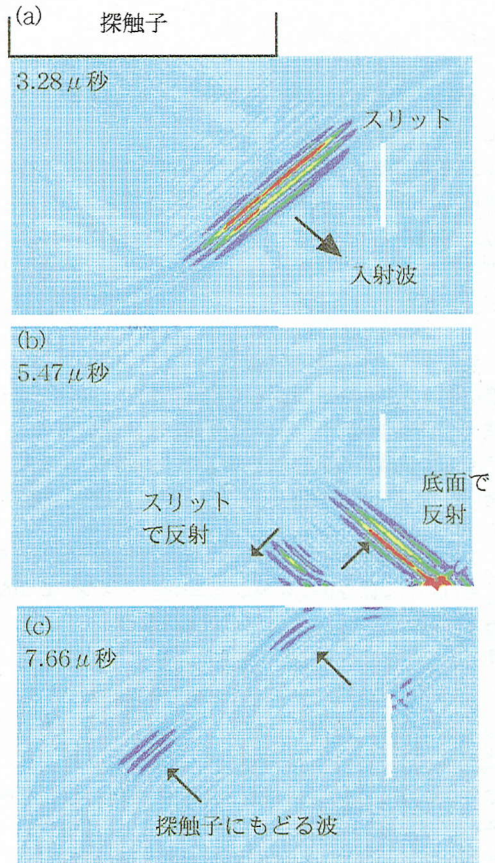


図-18 疑似コーナーエコー伝播挙動のシミュレーション (周波数5MHz)

高い。また,(a)点,(c)点でのエコー高さも周波数2MHzのときのほうが高いものとなっている。周波数2MHzのときのほうがピーク時のエコー高さが高いということ、ピークから離れた位置でもエコーの低下が5MHzのときよりも少ないことから、周波数2MHzのほうが有利であるといえる。

周波数により、疑似コーナーエコー反射挙動がどのように異なるか、数値シミュレーションを行った。モデルを図-17に示す。モデルとなる板の厚さは9mmである。板厚中央部には高さ3mm,幅0.25mmのスリットが

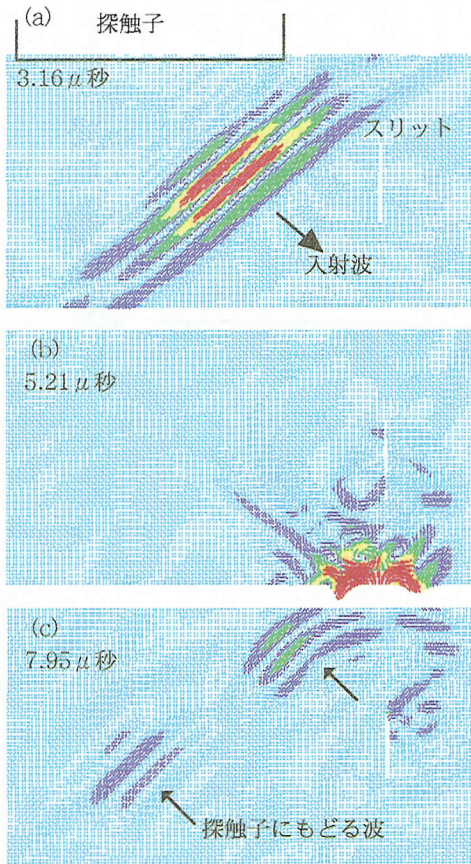


図-19 疑似コーナーエコー伝播挙動のシミュレーション (周波数 2MHz)

ある。スリットと底面との距離は 3mm 離れている。このモデルに入射角 45 度で波を入射した。入射波の中心は疑似コーナー中心部である。検討した周波数は 2MHz および 5MHz である。入射波はホイヘンスの原理を利用して、探傷面上の節点に強制変位を時間差を与えて加えることにより行っているが^{13),15)}、加振幅は周波数 2MHz, 5MHz 両方の場合において 10mm とした。

図-18 は周波数 5MHz のときのシミュレーション変位ベクトル図を時系列順に並べたものである。図-19 は周波数 2MHz のときの変位ベクトル図である。図-18、図-19(a) では波が入射された直後である。周波数 5MHz のほうがビームが中心に集中しており、2MHz のほうがビームが広がっていることがわかる。図-18、図-19(b) では入射波の一部はスリットで反射され底面に向かっているところである。また、底面で反射された波がスリット方向に向かっている。スリットや底面で面反射された 5MHz の波は、指向性が強いが、2MHz の波は 5MHz の波ほど鋭い指向性をもっていない。図-18、図-19(c) では疑似コーナー反射された波が探触子の方向へもどっていくところである。周波数 2MHz の波のほうが 5MHz

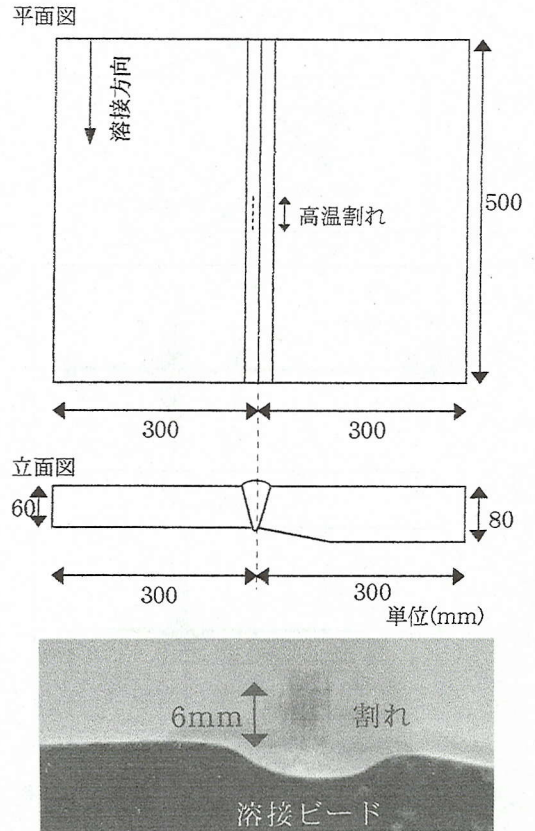


図-20 現場溶接継手モデル試験体

の波よりも探触子に波がもどっていくのが観察される。

探触子内部の振動子から放出される超音波の指向係数 D は式-(1) のように表わされる¹⁶⁾。

$$D(\theta) = \frac{\sin(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad (1)$$

ここに θ は振動子中心軸からの傾き、 k は入射波の波数、 a は振動子の径である。周波数 5MHz のときのほうがピークが鋭く指向性が強いことを示している^{17),18)}。垂直な表面切り欠きの場合、入射波の中心部は切り欠きコーナー部で反射され、探触子方向へもどっていくが、スリットが底面から離れると、入射波の中心部は通りぬけていき、探触子にはもどっていかない。面状欠陥の検出には周波数 2MHz のほうが 5MHz のときよりも有利であるという例¹⁹⁾があるが、ピークの鋭い 5MHz の波よりも指向性の弱い 2MHz の波のほうが疑似コーナーエコーとして受信されるエコーが高くなることが示された。

数値シミュレーションでは入射角 45 度の場合を検討したが、前章の実験において、他の入射角度においても周波数 2MHz のほうがエコーが高いのは式-(1) のモデルから同様に考えることができる。

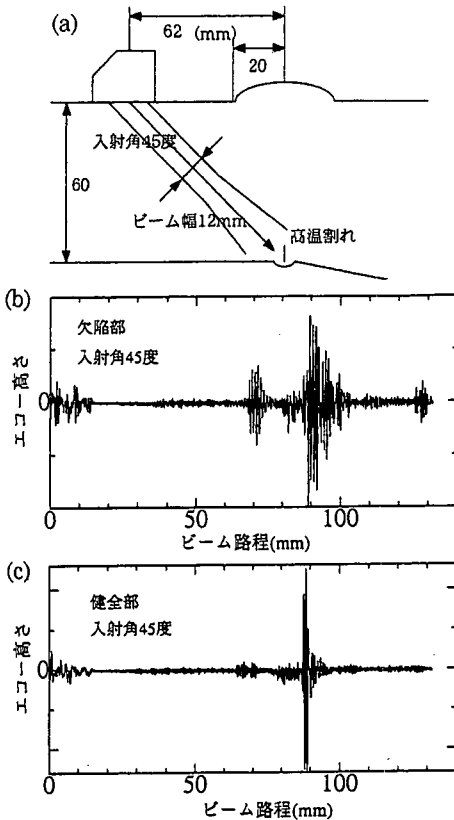


図-21 入射角を45度としたときの高温割れ探傷波形

4. 現場溶接継手モデル試験体での実験による検証

これまで行った検討結果を現場溶接継手に適用して欠陥検出性能が向上するかを検証することを目的として実験を行った。用いた試験体を図-20に示す。この試験体は厚さ80mmと60mmの板を突き合わせ溶接したもので、開先形状はV形である。試験体は溶接条件を人為的に変えることにより、高温割れを含んでいる。図-20に高温割れの位置と断面写真を示す。実験は直接法により行った。検討した入射角度は45および70度である。探触子の周波数は2MHzとした。入射角を45度と70度とした理由はJISで用いられる一般的な入射角度であることに加え、広範囲で疑似コーナー反射エコー受信が期待できる入射角70度と広範囲での疑似コーナー反射エコー受信が期待できない45度の場合を比較することがあげられる。

図-21(b)は入射角45度で高温割れのある位置を探傷したときに得られたAスコープ波形である。図-21(a)にはそのときの入射中心位置を示した。図-21(c)は高温割れがない位置での探傷波形である。図-21(b)と図-21(c)を比較すると図-21(b)ではビーム路程70mmの位置にエコーがあるのに対し、図-21(c)ではビーム路程70mmにエコーが見られない。よってこのエコーは欠陥エコー

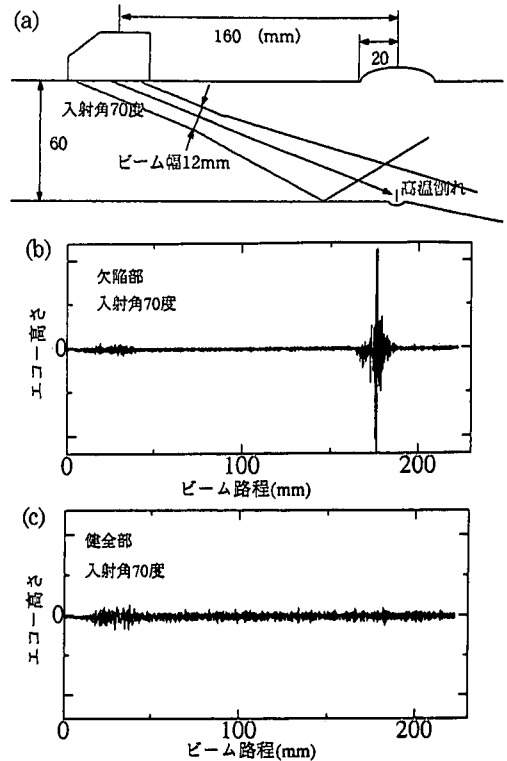


図-22 入射角を70度としたときの高温割れ探傷波形

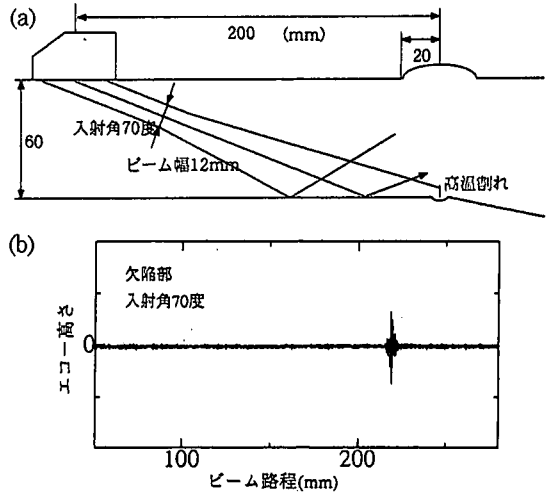


図-23 入射角70度、探触子を溶接線から離れたときの高温割れ探傷波形

である。図-21(b),(c)においてビーム路程90mmにあるエコーは溶接ビードからのエコーである。図-21(a)からもわかるように、入射角45度では疑似コーナー反射が得られる範囲で、入射波も溶接ビードに直接入射してしまうのでビードからの形状エコーと欠陥エコーが同時に得られる。形状エコーが得られない位置で欠陥エコーのみを受信することはできなかった。欠陥エコー高さに比較して、形状エコー高さはきわめて高いことから欠陥エコーは見落とされやすくなる。

次に広い範囲で疑似コーナーエコー反射受信が期待

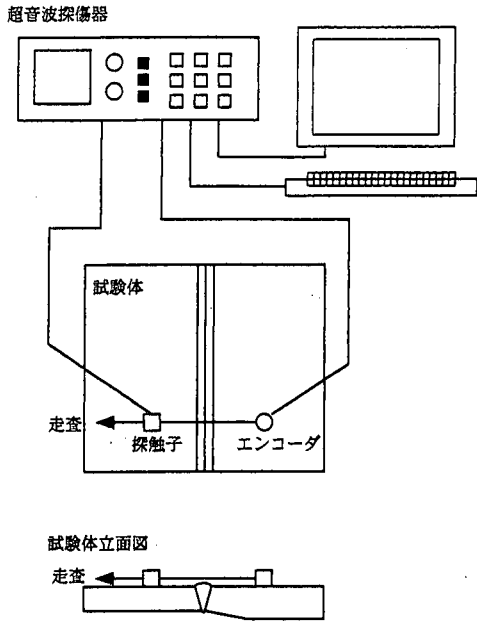


図-24 開口合成実験概略

できる入射角 70 度での検討を行った。図-22(b) は入射角を 70 度としたときの高温割れ位置での A スコープ探傷波形である。図-22(c) は欠陥がない位置での探傷波形である。図-22(c) では 170mm の位置にエコーが見られず、図-22(b) での 170mm のエコーは欠陥エコーである可能性がある。図-22(a) に示すように、入射中心位置は溶接部から 160mm 離れている。このとき、入射波は溶接ビードに直接入射するので図-22(b) のエコーはビード形状エコーである可能性も高い。そこで、入射波が溶接ビードに直接入射しないような位置での探傷を試みた。

図-23(a) に示すように探触子を溶接中心から 200mm 離れた位置に置いた。図-23(b) はそのとき得られた波形である。220mm のビーム路程にエコーが見られる。図-23(a) から入射中心部と溶接部は 200mm 離れているので、入射波は溶接ビードに直接入射することはおこらず、入射波が欠陥に到達するのに一度底面で反射しなければならない。入射角が大きいので欠陥で反射されたエコーを探触子で受信することが可能である。よって、図-23(b) のエコーは欠陥エコーである。前々章の基礎的検討結果と同様、入射角度を 70 度にする事で欠陥エコーを受信できる範囲が広がった。

図-22(c) においては溶接ビードからの形状エコーがまったく見られない。他に数箇所欠陥がない部分での探傷を行ったが、形状エコーはほとんど見られなかった。これは溶接止端部のフランク角の影響によるものと思われるが、詳細な検討を別途行う必要がある。

図-21(b)、図-22(b) で得られた欠陥エコーがどのくら

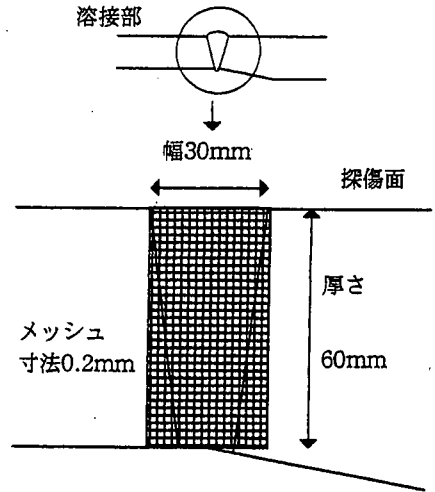


図-25 開口合成再構成領域

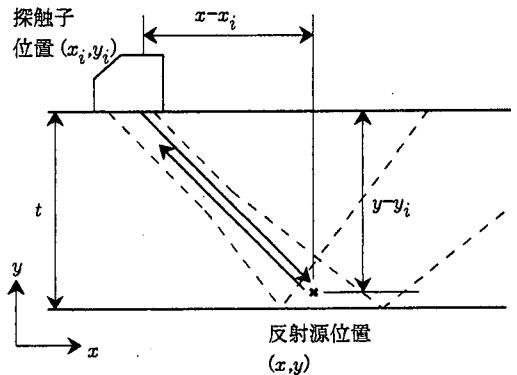


図-26 各点での反射レベルの計算

いのレベルなのか調べた。JIS 20) に定められた A2 試験片を用いて探触子の距離感度曲線を作成した。直径 4mm 深さ 4mm の穴からのエコー高さを 0.5, 1.0 スキップのように 0.5 スキップおきに受信しエコー高さを記録した。

入射角 45 度の場合、欠陥エコー高さは標準試験片の直径 4mm、深さ 4mm の穴からのエコー高さを基準として -17dB であった。入射角 70 度の場合、欠陥エコー高さは標準試験片の穴からのエコー高さを基準として -6dB であった。入射角 45 度の場合、欠陥検出レベルを -18dB の L/2 線レベルとしなければ高温割れを検出できない。入射角 70 度の場合、検出レベルを -6dB の M 線レベルで欠陥の検出ができることになる。入射角を 70 度としたことで標準穴からのエコーレベルは 12dB 高くなり、欠陥の検出性は向上したといえる。

5. 開口合成による画像化

前章で欠陥エコーと思われるエコーを受信することができたが、欠陥からのエコーであるというためには、さらに詳細に欠陥の位置を推定する必要がある。そこで、

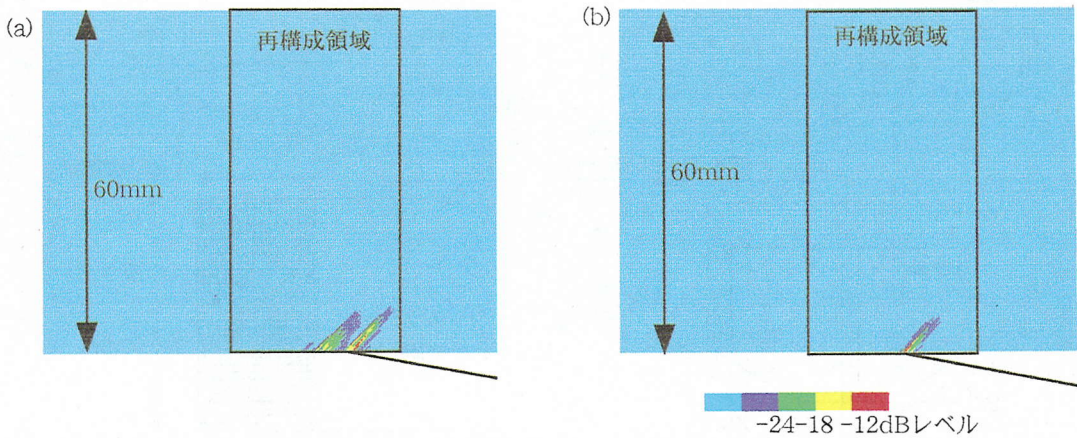


図-27 入射角 45 度, 開口合成結果 (a) 高温割れ部, (b) 健全部

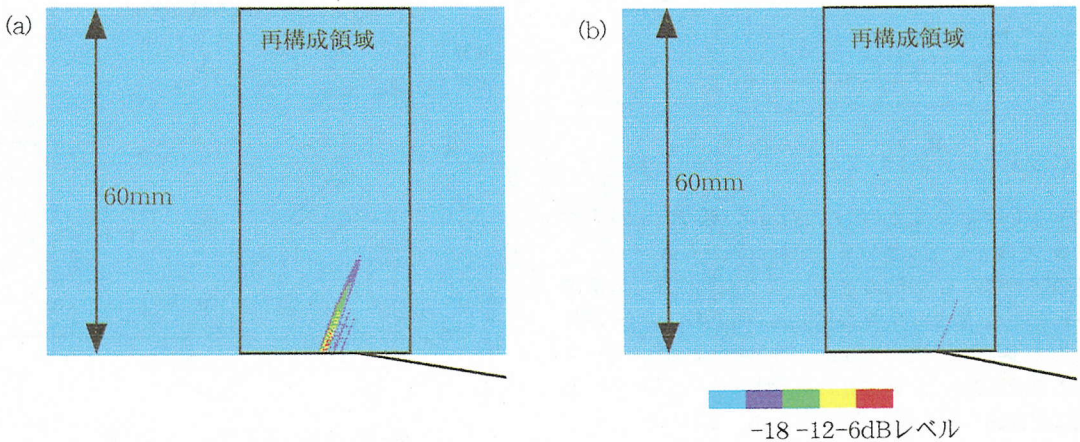


図-28 入射角 70 度, 開口合成結果 (a) 高温割れ部, (b) 健全部

開口合成^{21),22)}により高温割れ欠陥の画像化を試みた。

開口合成は探触子を線走査させ, 各点で波形を受信し反射源からのエコー高さを伝播時間と探触子位置とを考慮しながら重ね合わせることで反射源を再構成する技術である。実験概略を図-24に示す。探触子にはエンコードが取り付けられている。図-24に示したように, 探触子を溶接線に垂直方向に走査した。そのとき, エンコードからのシグナルで1mmおきに, 探触子で受信される波形をとった。受信された波形は超音波探傷器内部にあるハードディスクに保存した。使用した探触子は周波数2MHzであり, 入射角度は45度および70度である。

開口合成により再構成する領域を図-25のように決定し, その領域をメッシュ分割した。メッシュ間隔は0.2mmである。再構成領域は溶接部を中心とした高さ60mm, 幅30mmの領域である。余盛部からきたと思われるエコーは再構成のデータとして用いなかった。

図-26に示す再構成領域の格子点 (x, y) において探触

子位置の座標が (x_i, y_i) のとき格子点と探触子との距離 l を計算する。

$$l = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \times 2 \quad (2)$$

各格子点の反射レベル $H(x, y)$ は,

$$H(x, y) = \sum_i r_i(x_i, y_i, l/c) \quad (3)$$

で表わされる。ここに r_i は探触子で得られる波形の振幅, c は波速である。

図-27(a)は入射角45度で高温割れ欠陥部を走査して得られた波形をもとに開口合成した図である。図-27(b)は入射角45度で健全部を走査して得られた波形で開口合成した図である。健全部では溶接止端部からのエコーによる像が一つだけ得られているのに対し, 欠陥部での像は溶接止端部以外に溶接ビード内部にも像が得られている。

図-28(a)は入射角70度で高温割れ欠陥部を走査して得られた波形で開口合成した図であり, 図-28(b)は健全

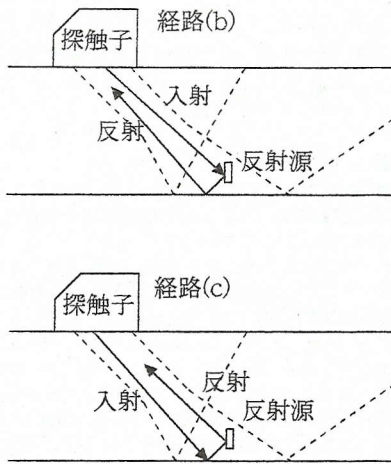


図-29 開口合成に新たに考慮する疑似コーナー経路

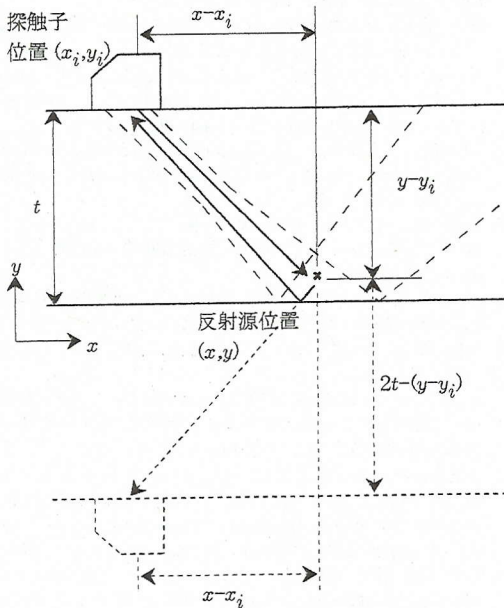


図-30 疑似コーナー経路を考慮した開口合成

部での像である。図-28(a)では大きな像が得られているのに対し、図-28(b)ではきわめて小さな像が得られている。図-28(b)の像は幾何形状から溶接止端部からのエコーによるものとわかる。図-28(a)の像は図-28(b)の像よりも右側溶接止端部から5mmだけ溶接内部にずれている。よって図-28(a)の像は溶接ビード内部にあり、溶接欠陥であるといえる。実際の欠陥は図-20を参照して溶接止端部から5mmほど中にあり、開口合成の結果と一致する。

欠陥のエコーレベルは-6dBであるが、このレベルをしきい値として開口合成像より欠陥高さを推定すると約7mmとなる。実際の欠陥高さ6mmより若干高い値である。入射角45度では欠陥形状や欠陥高さが評価できなかったが、入射角を70度とすることで縦割れ状の

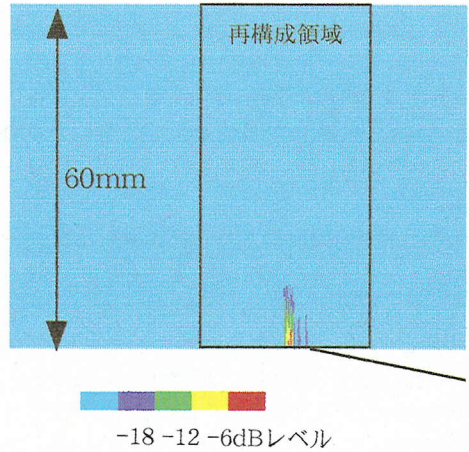


図-31 疑似コーナー経路を考慮した開口合成像

像を得ることができた。

前々章での検討から、入射角を70度とすると、疑似コーナー反射によりエコーが受信されやすくなった。そこで、開口合成する際に入射角70度で得られた波形は疑似コーナー反射経路を通して得られたものと考え、欠陥の再構成を試みる。つまり、通常の図-26(a)に示す反射経路ではなく、図-29(b),(c)の経路を考慮する。図-29(b)では入射波ははじめにスリットで反射され、その後底面で反射され探触子にもどっていく経路であり、図-29(c)はその逆の経路である。

図-30において位置(x, y)の反射源と位置(xi, yi)の探触子の間で波が疑似コーナー経路を通るとすると経路長lb, lcは

$$\begin{aligned}
 l_b &= \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \\
 &+ \sqrt{(2t-(x-x_i))^2 + (y-y_i)^2} \\
 &= l_c
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

となる。ここにtは探傷する板の厚さである。疑似コーナー反射経路を考慮した開口合成では反射レベルH(x, y)は、

$$H(x, y) = \sum_i r_i(x_i, y_i, l_b/c) + \sum_i r_i(x_i, y_i, l_c/c) \tag{5}$$

となる。

図-31は入射角70度で高温割れ欠陥部を探傷し、疑似コーナー経路を考慮して得られた開口合成像である。疑似コーナー経路を通る波が強調されるので、縦割れ状の像となる。図-31での欠陥の位置は図-28(b)での欠陥像と同じ場所に位置し、これは溶接ビード内部である欠陥エコーレベルの-6dBをしきい値とすると欠陥高さは6mmとなる。実際の欠陥高さは6mmである。図-28(b)の像では欠陥高さは7mmであり、疑似コーナー経路を考慮することにより、欠陥高さがより正確に評価された。

入射角を45度から70度と大きくすることで、溶接ビードに直接入射波を入射させず、形状エコーの影響を受けずに欠陥エコーを得ることができるようになったことが実際の現場溶接継手をモデルとした試験体でも検証された。入射角70度のときでは、開口合成で縦割れに近い像が得られ、欠陥高さもより正確に評価することができた。

さらに今後の課題として欠陥の底面からの位置や、欠陥の高さなどについて検討が必要であるが、溶接第一パスにある高温割れの検出には本研究の結果は有効であると考えている。また、長さのパラメータとして欠陥高さ、入射波の波長、板厚および入射ビーム幅などがあり、これらのパラメータを組み合わせて無次元化することにより厚板のみならず、検出に関する指標をつくれる可能性があると思われるが、さらに実験を重ねていく必要があると考えている。

6. まとめ

突き合わせ溶接部第一パスに発生する高温割れのような表面近傍に位置する面状欠陥を対象として、欠陥と底面から構成される疑似的なコーナー反射経路に着目し、入射角、周波数に関する基礎的検討を実験、数値シミュレーションを行った。

(1) 入射角度を大きくすることで、疑似コーナーエコー曲線はなだらかに変化するようになった。疑似コーナーエコー高さは入射角45度、50度では低かったが60度になると急激に高くなった。

(2) 入射波の周波数は2MHzのときのほうが、5MHzのときよりも疑似コーナーエコー高さは高かった。疑似コーナーエコーの場合は欠陥と底面には隙間があり、5MHzの指向性の強い波は隙間を抜けていきやすいからで、数値シミュレーションでもそれが示された。

(3) 現場溶接継手モデル試験体において入射角を45度とすると、欠陥エコーとビード形状エコーが同時に得られたが、形状エコーは欠陥エコーよりも高く欠陥エコーを見落としやすい。入射角を70度とすると形状エコーに妨害されることなく欠陥エコーを受信することができ、欠陥検出性が向上した。欠陥エコーレベルは入射角45度のとき、標準試験片の4φ×4mm穴からのエコー高さに対し-17dBであったのが入射角70度で-6dBに向上した。

(4) 入射角70度で走査して得られた波形により開口合成で欠陥像を画像化した。縦割れ状欠陥の像を得ることができた。欠陥位置も正確に推定できた。疑似コーナー経路を考慮することで欠陥高さがより正確に評価された。

謝辞: 本研究は文部省科学研究費補助金(基盤研究(A))(1)代表:三木千壽)の補助を受けて実施されました。ここに記して謝意といたします。

参考文献

- 1) 原章, 高田 和守, 宮本 義雄, 藤本 亘, 多田 賢, 一井 延明: 鋼床版現場溶接への自動超音波探傷検査の適用, 川田技報, Vol.7, pp.51-56, 1988.
- 2) 三木 千壽, 成宮 隆雄, 森下 統一, 加藤 昌彦: 自動超音波探傷システムの板継ぎ溶接部品質保証への適用性の検討, 鋼構造論文集, Vol.1, No.4, pp.105-117, 1994.
- 3) Murgatroyd, R.A., Highmore, P.J., Burch, S.F., Bann, T. and Ramsey, A.T.: PISC II parametric study on flaw characterization using the tandem and TOFD techniques, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol.35, pp.137-169, 1988.
- 4) Arakawa, T., Hirose, S. and Senda, T.: The detection of weld cracks using ultrasonic testing, NDT International, Vol.18, No.1, pp.9-16, 1985.
- 5) 荒川 敬弘: 非破壊試験の欠陥検出能力調査の動き, 溶接学会誌, Vol.55, No.4, pp.213-220, 1986.
- 6) Harunmi, K., Ogura, Y. and Uchida, M.: Ultrasonic defect sizing - Japanese tip echo handbook -, Japanese society for Non-Destructive Inspection, 1992.
- 7) Thompson, R.B.: Quantitative ultrasonic evaluation methods, Journal of Applied Mechanics, Vol.50, pp.1191-1201, 1983.
- 8) 春海 佳三郎, 小倉 幸夫, 宮島 猛, 内田 政則: 端部エコーのシミュレーション映画, 非破壊検査, Vol.34, No.9, pp.849-850, 1989.
- 9) 岸上 守孝: 鋼溶接部の端部エコー法による欠陥高さ測定法に関する指針, 非破壊検査, Vol.34, No.1, pp.22-28, 1985.
- 10) 山懸 敬二: 省力化に応じた橋梁構造, JSSC No.13, pp.2-11, 1994.
- 11) 木村 友則, 亀山 俊平, 和高 修三, 馬目 裕一, 小池 光裕: 斜角探傷法による面状きずからの超音波エコーの解析, 日本音響学会誌, Vol.54, No.4, pp.276-284, 1998.
- 12) Sánchez-Sesma, F.J., Chávez-García, F.J. and Bravo, M.A.: Seismic response of a class of alluvial valleys for incident SH waves, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.78, No.1, pp.83-95, February, 1988.
- 13) Chitoshi Miki, Kiyohiro Ikeda, Kazuo Tateishi and Masanori Takahashi: Numerical simulation of ultrasonic pulse-echo inspection, Proc. of JSCE, No.459/I-22, pp.39-48, 1993.
- 14) Cundall, P.A., Kumar, R.R., Carpenter, P.C. and Marti, J.: Solution of infinite dynamic problems by finite modelling in the time domain, Proc. 2nd Int. Conf. Appl. Number of Modelling, Madrid Spain, pp.339-351, 1978.
- 15) 三木 千壽, 池田 清宏, 沖中 知雄, 吉見 昌宏: 超音波パルスエコー法の数値シミュレーション, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.493-502, 1991.
- 16) Krautkrämer, J. and Krautkrämer, H.: Ultrasonic testing of materials, Springer-Verlag, 1983.
- 17) Stepanishen, P.R.: The time dependent force and radiation impedance on a piston in a rigid infinite phase baffle, Journal of The Acoustical Society of America, Vol.49 No.3, pp.841-849, 1971.
- 18) 福原 照明: 傾斜した円形平面反射源の反射指向性: 非破壊検査 Vol.36 No.7, pp.468-474, 1985.
- 19) 三木 千壽, 白旗 弘実, 塩崎 匡克: 厚板突き合わせ溶接部に存在する面状欠陥の超音波非破壊評価に対する基礎的検討, 土木学会論文集 No.598/I-44, pp.323-332, 1998.

- 20) 平山 一男:新版 非破壊検査マニュアル, 日本規格協会, 1995.
- 21) 岩立 次郎, 田中 雅人, 館石 和雄, 三木 千壽: 回転探触子を用いた開口合成システムによる超音波探傷の分解能向上の試み, 土木学会論文集, No.507/I-30, pp.121-127, 1995.
- 22) 石井 潤市, 佐々木 莊二: 開口合成超音波探傷に関する基礎的検討, 非破壊検査, Vol.34, No.5, pp.326-332, 1985.

(1998.6.9 受付)

DEVELOPMENT OF ANGLE BEAM TECHNIQUE OF UT FOR PLANAR DEFECT LOCATED NEAR SURFACE IN BUTT WELDED JOINTS

Hiromi SHIRAHATA and Chitoshi MIKI

Ultrasonic testing could be applied to evaluate field welded butt joints of steel girder bridges. It is, however, a difficult problem to detect planar defects like cracks. Cracks should influence on the fatigue strength of the member of structures. Hot cracks are formed in the first weld path. In case of groove weld, hot cracks are located near the surface. Numerical analyses and experiments were carried out to investigate the detectability of planar defects near the surface. Experiments on a field welded joint specimen were also conducted to investigate detection and sizing of a planar defect.