

エコー波形の詳細解析による超音波探傷法の欠陥検出の定量的評価

三上修一*・大島俊之**・菅原 登***・
山崎智之*

本論文では鋼板材料中に製作した疑似欠陥を用いて超音波探傷画像を求め、同時に欠陥から得られるエコー波形を用いて欠陥の大きさや傾きを精度良く求める方法について検討した。超音波探傷装置には水浸式垂直探触子を用い、欠陥近傍より得られるエコー波形に詳細な波形解析・周波数解析等の詳細解析を行い疑似欠陥の深さや大きさ、傾きに関する情報を得た。また、ワークステーション上のグラフィックソフトウェアを用いた波形の3次元処理は、エコー波形の特性を詳細に検討する波形処理手法として有効であることを示した。

Key Words : waveform analysis, 3D display, ultrasonic inspection, frequency analysis

1. まえがき

構造物中の欠陥を評価する手法としての非破壊試験は構造物を安全に維持管理する上で不可欠なものとなっているが、中でも非破壊検査法としての超音波探傷法はエコー波形の振幅や到達時間から反射源となる欠陥の位置や寸法を推定する現場向きの有効な手法である。この分野においては最近の試験装置の性能向上、画像処理技術の向上からその測定精度の改善が多く報告されている。最近の非破壊検査においては部材の健全度診断に対して破壊力学を応用することを目的とした欠陥の定量的非破壊評価(QNDE)の研究が進められている^{1)~4)}。したがってこれらの研究に有効に応用する為にも欠陥の種類、位置、大きさ、角度などの欠陥に関する情報の高精度な計測の必要性がさらに高くなっている。一般に土木構造物の超音波探傷による欠陥寸法の評価は反射エコーの強度や到達時間によってAスコープ、Bスコープ、およびCスコープの画像表示が行われている。しかしこれらの方法は欠陥からの一部の情報によって得られた結果であり、反射エコーの持つ全ての情報に対する結果ではないので、欠陥からの反射波形に対する研究はまだ十分とはいえない。土木構造物における部材内部の小さな欠陥や微小な組織の変化を検出するためには、入射波の特性や試験方法を適切に選定するとともに受信波であるエコー波形の解析に対しても種々の工夫を必要としている。

著者らはこれまで超音波探傷装置に水浸法による垂直探触子を用い、探傷画像への測定条件の影響、内部欠陥

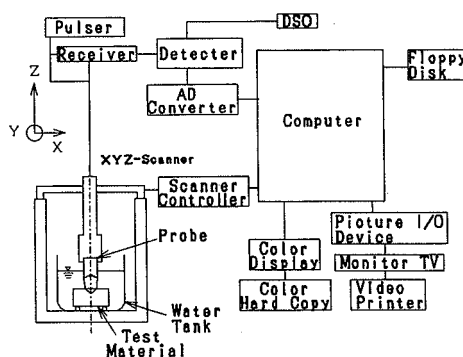


Fig.1 Measurement system.

からのエコー波形の特性について検討してきた^{7)~10)}。鋼材中に生じる欠陥はひびわれや溶接部に生じるブローホール、ひびわれ、溶け込み不良等があげられるが、ここでは溶接部に生じるブローホールを想定した微小欠陥供試体と、欠陥を欠陥面と欠陥端部で単純化したモデルとした溝形欠陥供試体とを用いて、超音波探傷映像装置から得られる欠陥の探傷画像に関するエコー波形情報に種々の高精度処理を施すことによる欠陥検出精度の向上について検討する。

さらにエコー波形の3次元表示処理によって欠陥境界付近での波形特性の検討を行いその有効性についても検討を行う。

2. 計測システム概要

実験に用いた計測システムはFig.1に示すような超音波探傷映像装置(AT 5000, 日立建機(株), 1989年)と超音波波形解析装置である。この超音波探傷映像装置は、超音波探傷器、自動走査装置、データ処理装置、画像処理装置から構成される。超音波探傷映像装置の超音波探傷器には探触子として水浸式焦点型垂直探触子(共

* 正会員 北見工業大学助手 工学部 土木開発工学科
(〒090 北見市公園町 165)

** 正会員 工博 北見工業大学教授 工学部 土木開発工学科

*** 正会員 北見工業大学教授 工学部 土木開発工学科

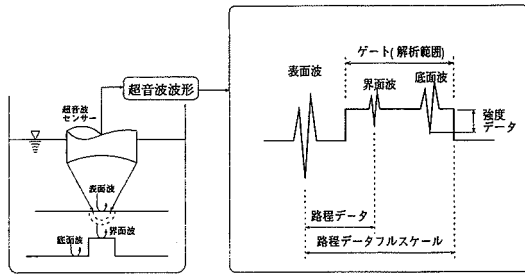


Fig.2 A-scope display.

振周波数 10 MHz) を用い、自動走査装置には直交座標型 3 軸スキャナーを用いる。画像処理装置には C スコープによる強度データと路程データの表示が可能である。画像処理は Fig.2 のように被検体の測定深さに応じた時間軸のゲートを設定し、このゲートを通過した反射波形を取り出す。この波形に対して強度データは、反射波形の最大振幅を欠陥エコー高さに比例した信号として取り出し画像処理のデータとして欠陥図形を二次元表示する。路程データは表面波のトリガー点からゲートの終わりまでをフルスケールとしてゲート内の最初の反射波が現れた点までの時間を画像処理のデータとして取り出し、欠陥図形を二次元表示している。本論文では以下供試体の表面での反射波を表面波、欠陥界面での反射波を界面波、供試体の裏面での反射波を底面波と表示している。超音波波形解析装置 (DSO) は画像処理で設定したゲートを通過する反射波形を取り込み、反射波形と FFT によるフーリエスペクトルを表示できる⁸⁾。

3. 溝形欠陥供試体によるエコー波形の解析

ここでは欠陥の形状を、欠陥面と端部とによって構成される単純化した欠陥モデルを用いて、境界周辺での波動散乱のモデル実験を行い、欠陥端部周辺でのエコー波形の散乱挙動について検討を行うことにする。

(1) 実験概要

溝形切欠き欠陥供試体は、Fig.3 に示すような 100 mm×50 mm×9 mm の鋼板の中央に、幅 10 mm の溝形欠陥でその深さを 5 mm および 2 mm とした二つの供試体を作製した。ここでは、欠陥深さ 2 mm (H_1) のものを供試体 1、5 mm (H_2) のものを供試体 2 と呼ぶことにする。このような供試体の欠陥端部における超音波のエコー波形には、欠陥端部と供試体底面からの反射波が同時に測定されていることになる。この供試体を用いて超音波探傷映像装置によって得られた濃淡画像を Fig.4 に示す。この図は欠陥中央に探触子の焦点を合わせ、供試体全体の強度データと路程データによる画像を示している。強度データによる画像は超音波の距離減衰によって、欠陥深さが浅いほど全体に暗い画像として現れる。また、路程データによる画像は欠陥深さが深いほど欠陥面は明

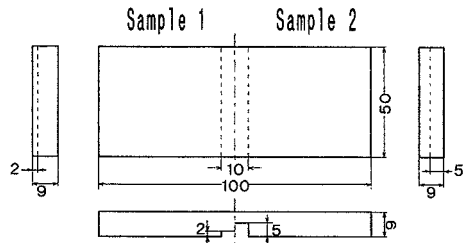
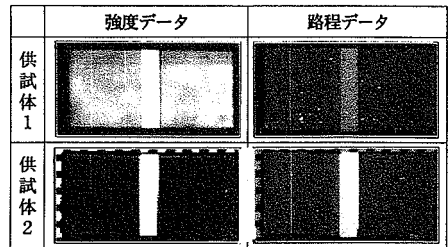
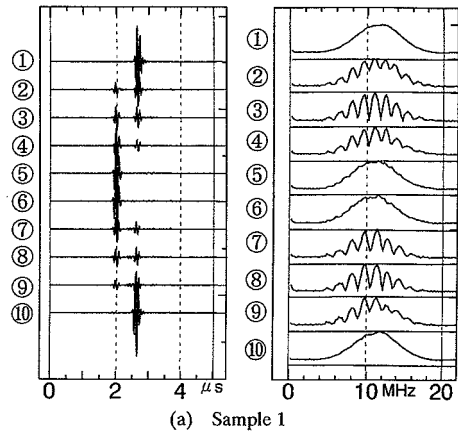


Fig.3 Groove specimen.

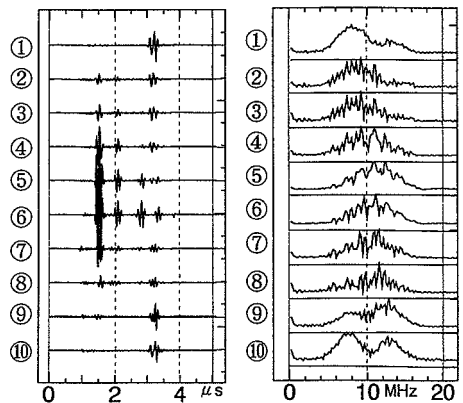


(Pitch 0.5mm, Scale \rightarrow 16mm)

Fig.4 Image of maximum amplitude data and time of flight data for specimens.

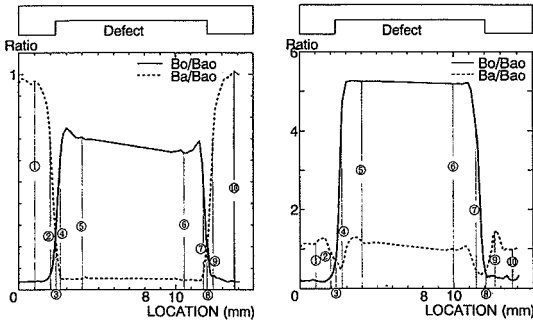


(a) Sample 1



(b) Sample 2

Fig.5 Measured waveforms and spectra of specimens.



(a) Sample 1 (b) Sample 2

Fig.6 Maximum echo level curve.

Table 1 Comparison of defect size. (Unit : mm)

	供試体 1	供試体 2
実 測 値	9.85	9.75
解 析 値	9.75	9.75
6dBドロップ法	9.35	9.10
10dBドロップ法	9.65	9.30

るい画像として現れる。反射波形の測定はこの画像データの欠陥を中心とした左右 14 mm の範囲に対して DSO で AD 変換し、同時に FFT を行って、それぞれのデータをフロッピーディスク (FD) に記録した。

(2) 切欠き境界付近からのエコー波形の特性

Fig.5 に測定波形と FFT によるスペクトル波形を示す。測定波形は、上から順に欠陥の左側から欠陥に近づいたときの、界面波と底面波の振幅の変化を示した図である。縦軸の振幅は波形の最大値で基準化している。横軸は時間 (μs) を示す。また、スペクトル図の縦軸は最大値で基準化し、横軸は周波数 (MHz) を表している。また丸の中の数字は、波形を測定した位置を示し、Fig.6 の図中の数字に対応する。欠陥の影響のない入射波のみのスペクトル図は Fig.5 の①および⑩と同じものとなる。Fig.6 では、測定波形から界面波と底面波それぞれの最大値を求め、界面波の最大エコー高さ (B₀) と底面波の最大エコー高さ (B_a) を基準底面波 (B_{a0}: 測定底面波形の最大値) で割って規準化している。また、横軸は探触子の移動距離を示し、LOCATION=8 mm 付近が欠陥の中心となっている。図中の実線は界面波との比を表し、破線は底面波との比を表している。ここで実線と破線の交点は、界面波と底面波のエコー高さが等しい点を示し、この交点間の距離は 9.75 mm となる。本論文ではこの値をエコー高さ曲線による解析値と呼んでいる。Table 1 はこの解析値と実測による溝形欠陥のサイズを比較したもので、この値は欠陥のサイズとよく一致している。これより最大 0.1 mm の誤差による欠陥寸法の測定が可能であることがわかる。また、Table 1 には従来の超音波探傷試験における欠陥寸法測定法の一つである dB ドロップ法 (6 dB, 10 dB) による結果と

Table 2 Defect Configuration.

Type I	φ (°)	H (mm)	Type II	φ (°)	H (mm)
A	90	5	J	90	5
B		3	K		3
C		2	L		2
D	75	5	Type I		
E		3			
F		2			
G	60	5	Type II		
H		3			
I		2			

も比較している¹¹⁾。

斜角入射による超音波探傷の欠陥寸法測定法の一つとして周波数分析による方法がある¹²⁾。これは欠陥寸法 H は卓越スペクトルの周波数間隔 Δf に比例することを用いたものである。Fig.5 のスペクトル図には欠陥深さが大きくなると欠陥端部周辺において卓越スペクトルに山谷が多くなり、卓越スペクトル間隔が小さくなっていることがわかる。ここで各供試体の卓越スペクトル間隔は、供試体 1 は Δf₁ = 1.465 MHz, 供試体 2 は Δf₂ = 0.586 MHz となる。卓越スペクトル間隔と欠陥深さには次のような関係がある¹²⁾。

$$\Delta f = C / (2H \sin \theta) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、C は供試体の超音波伝播速度、θ は超音波の入射角度を表す。この場合超音波探傷装置は垂直探傷であるから sin θ = 1, C = 5 800 m/s として欠陥深さ H を代入すると式 (1) は Δf₁ = 1.45 MHz, Δf₂ = 0.58 MHz となり実験結果と良く一致していることがわかる。即ち、実験で用いた超音波探傷装置によって卓越スペクトル間隔と欠陥深さの逆数の間に比例関係があることを確認できた。

4. 微小ドリルホール欠陥供試体によるエコー波形の解析

超音波による微小欠陥の探傷画像による検出を高精度に行う場合、その精度は測定系自身が持つ基本的要因としてノイズによる障害、距離分解能や方位分解能の制約を受ける。超音波探傷において反射面の傾きが大きくなると欠陥の端部エコーが主体となり欠陥面からのエコーが得られないことから測定精度を悪くする。本章では鋼材中に発生する微小欠陥を欠陥の深さ、欠陥の傾きを変えてモデル化し、超音波探傷における反射波形の解析を行い、探傷画像の検出精度に与える影響について検討する。

(1) 供試体

実験に用いた供試体は、9 mm の鋼板に Table 2 に示す微小欠陥を 12 種類作製した。Type I は欠陥深さ (5 mm, 3 mm, 2 mm) と傾き (鉛直角 90°, 75°, 60°) をパラメータとしたドリル孔による微小欠陥モデルとす

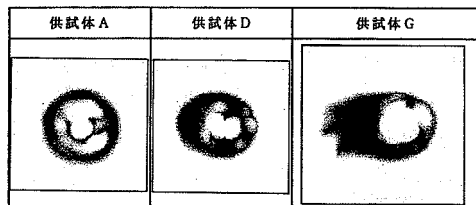


Fig.7 Image of maximum amplitude data for specimen A, D and G.

る。Type II は近接する微小欠陥とエコー波形の影響について検討するため、中心間隔 2 mm のドリル孔 2 個 (直径 1 mm) の場合で、ドリル孔の深さ (5 mm, 3 mm, 2 mm) を 3 種類に変えた微小欠陥モデルとする。ドリルによる穿孔を行ったため穴の先端部分は円錐状 (先端角度約 120°) でさらに小さな凹凸が先端部に残っており複雑な形状を呈している。

測定に使用した探触子は、焦点距離が鋼板の厚さ以上で、画像解像度の良い 10 MHz を用いた。探傷画像は設定ゲート内の反射波形の最大振幅による強度データと、設定したゲート時間を基準として反射波がどの位置に存在するかを相対的に表した路程データを同時に得ることにした。

エコー波形の測定は探傷画像を検討しながら特徴ある位置について解析を行った。エコー波形の測定時間間隔は 0.5 ns または 1 ns サンプリング間隔で、一波形あたりの測定データ数は 4096 点である。ここでは欠陥の深さが同じで傾きの異なる供試体 A (傾き 90°), 供試体 D (傾き 75°), 供試体 G (傾き 60°) に関して反射波形の特性を検討する。また、近接する微小欠陥の干渉の影響を欠陥の深さの異なる供試体 J (深さ 5 mm), 供試体 K (深さ 3 mm), 供試体 L (深さ 2 mm) についても検討を行った。

(2) 欠陥境界付近からのエコー波形の特性

ドリルによる穿孔角度を変えた供試体 A, D, G について探傷画像を Fig.7 に示す。この比較よりドリル先端部分の形状は供試体 A を基準に比較すると、穿孔角度 60° の供試体 G では一部分のみ判別できる程度に精度が悪くなっている。次に、傾斜面については、傾きが大きくなるに従って画像中央より左側の黒い部分が大きくなる傾向がみられる。これは超音波探触子の方向へ反射して来る反射波が小さいためと考えられる。このことは同時に測定している路程データ画像に、底面より上の表面に近い傾斜している反射面の存在を示す画像が得られていることからわかる。したがって、これらを総合的に考慮すると探傷画像から欠陥の大きさ、傾きの方向に関する欠陥評価が可能である。

a) 供試体 A

この供試体の測定区間は Fig.7 の探傷画像の中で、欠

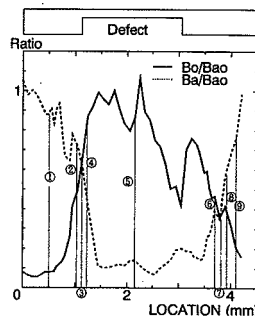


Fig.8 Maximum echo level curve for specimen A.

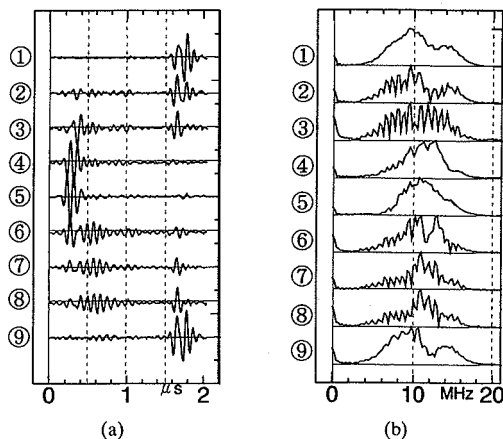


Fig.9 Measured waveforms and spectra of specimen A.

陥中心を基準とした全長 4.2 mm の範囲を 0.05 mm 間隔でエコー波形を測定した。前章 Fig.6 と同様に実験より得られた各測点毎のエコー波形を、底面波と界面波に分けて、最大エコー高さを基準に用いて、比により整理したものが Fig.8 である。図中の実線は界面波の最大エコー高さ (B_0/B_{a0}) を、破線は底面波の最大エコー高さ (B_a/B_{a0}) を示している。図の縦軸は最大エコー高さを示し、横軸は前述 Fig.6 と同様、探触子の移動距離を示す。この図より実線が破線より大きい範囲を欠陥寸法であるとすると供試体 A の欠陥寸法は 2.65 mm となる。また、図中の丸の中の数字は Fig.9 に示す測定波形の測定位置に対応している。①～⑤までの測定波形は底面波と界面波が独立した波形として観察できる。また、⑥～⑨の界面波は複雑に反射波が連成した波形である。これは界面波の主部の到達が徐々に遅れていることから、この区間の欠陥形状が傾斜していることによるものと考えられる。このことは探傷画像の欠陥形状が左右対称に現れていないことからわかる。Fig.9 の右側には FFT 解析によるスペクトル図を各測点ごとに示している。スペクトル図は、波形のサンプリング時間を約 4 μ sec としたときの解析結果を示すことにする。供試体 D, G, K, L の場合にもスペクトル図はサンプリング

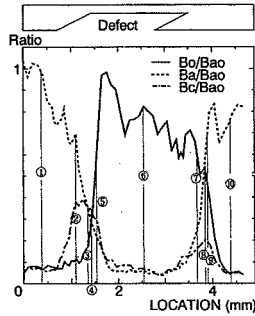


Fig.10 Maximum echo level curve for specimen D.

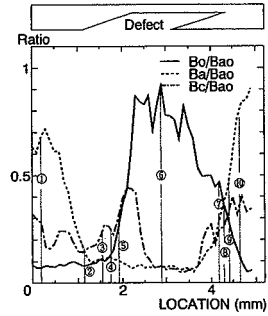


Fig.12 Maximum echo level curve for specimen G.

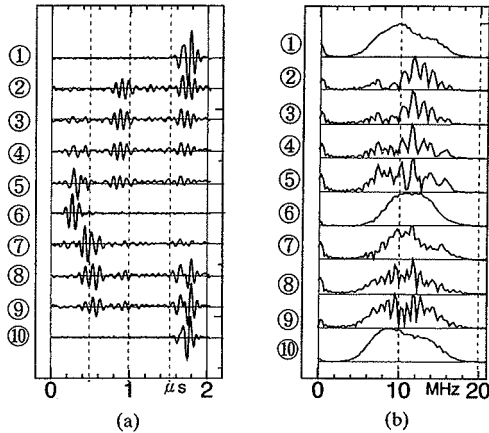


Fig.11 Measured waveforms and spectra of specimen D.

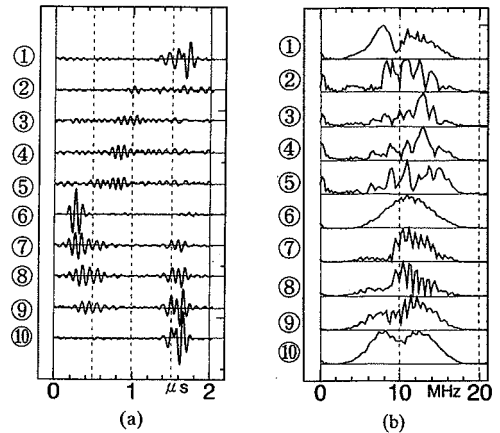


Fig.13 Measured waveforms and spectra of specimen G.

時間を約 $4 \mu\text{sec}$ とした場合を示すことにする。Fig.9 (b) の測点③、⑦の欠陥端部におけるスペクトル図の卓越スペクトル間隔は $\Delta f = 0.691 \text{ MHz}$ で、これは各ピーク間の周波数の差により求めたもので、式(1)の Δf に対応する。この値は溝形欠陥の欠陥深さ $H = 5 \text{ mm}$ の場合の $\Delta f_2 = 0.58 \text{ MHz}$ に近い値を示している。

b) 供試体 D

この供試体のエコー波形測定区間は Fig.7 の欠陥探傷画像の欠陥を中心とした全長 4.55 mm の範囲である。実験より得られた各測点毎のエコー波形は、底面波と界面波がそれぞれ単独で存在する区間と、それ以外の傾斜面からのエコー波形の区間に分けて、最大エコー高さをを用いて整理したのが Fig.10 である。図中の実線は界面波の最大エコー高さ (B_0/B_{a0}) を、破線は底面波の最大エコー高さ (B_a/B_{a0}) を、一点鎖線は傾斜面からの反射波の最大エコー高さ (B_c/B_{a0}) 示している。この図より供試体 D の欠陥先端部の寸法は 2.45 mm となる。また、実線と一点鎖線の交点は供試体 D の傾斜面の水平距離を表わすとすると 0.75 mm となる。この供試体の測定波形とその FFT 解析結果について示したのが Fig.11 である。これによると①、⑩の波形は底面波

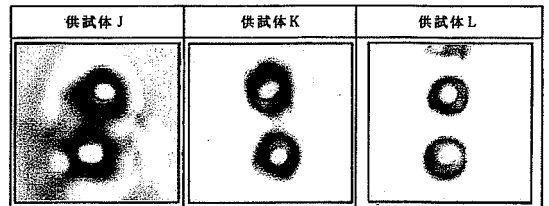


Fig.14 Image of maximum amplitude data for specimen J, K and L.

のみが測定され、②～⑤の波形には欠陥傾斜面と欠陥先端からの反射波形が測定されている。ここで傾斜面からの波形に着目すると②から⑤に測点が移動しても、反射位置は底面波と界面波の間のほぼ一定の位置で測定されることがわかる。FFT 解析によるスペクトル図を各測点ごとに右側に示している。欠陥周辺部の卓越スペクトル間隔は⑧の測点では $\Delta f = 0.73 \text{ MHz}$ となる。傾斜面は欠陥深さが徐々に変化する領域であるから、この影響を大きく受ける測点③の Δf は⑧より大きな値となる。

c) 供試体 G

この供試体のエコー波形測定区間は Fig.7 の欠陥探傷画像の欠陥を中心とした全長 4.9 mm の範囲である。実

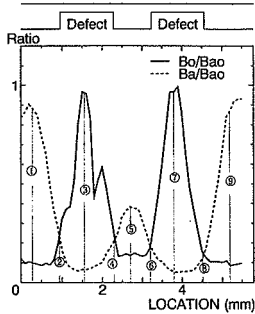


Fig.15 Maximum echo level curve of specimen J.

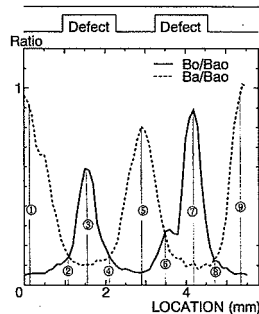


Fig.16 Maximum echo level curve of specimen K.

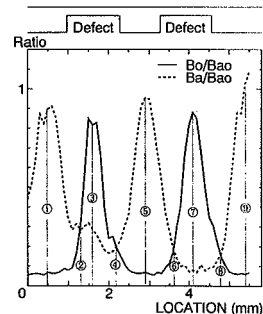


Fig.17 Maximum echo level curve of specimen L.

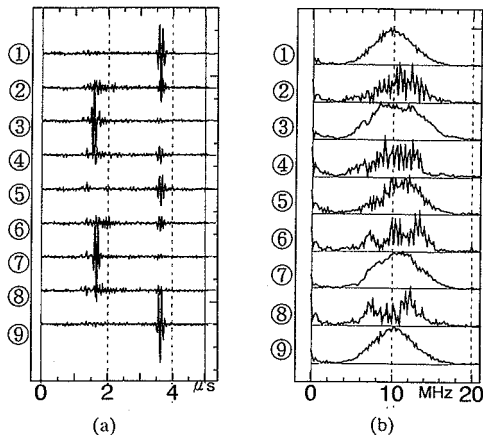


Fig.18 Measured waveforms and spectra of specimen J.

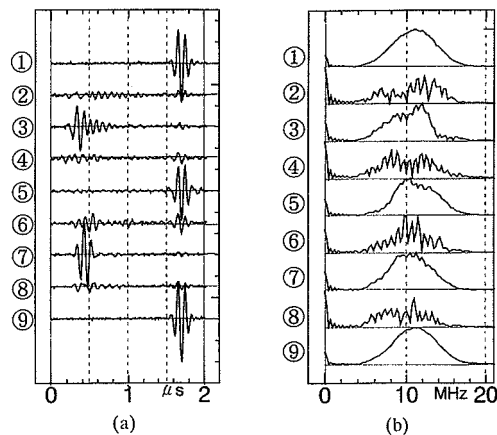


Fig.19 Measured waveforms and spectra of specimen K.

験より得られた各測点毎のエコー波形は、供試体 D の場合と同様に、Fig.12 に示している。ここでも底面波と界面波がそれぞれ単独で存在する区間と、それ以外の傾斜面からのエコー波形の区間に分けて、最大エコー高さをを用いて整理した。この図より供試体 G の欠陥先端部の寸法は 2.6 mm となる。また、供試体 D のように実線と一点鎖線の交点から傾斜面の寸法を推定することはできない。次に測定波形とその FFT 解析結果について示したのが Fig.13 である。①、⑩の測定波形は底面波のみが測定されている。②～⑤の波形には欠陥傾斜面と欠陥先端からの反射波形が測定されている。ここで、傾斜面からの波形に着目すると、②から⑤に測点を移動した場合、反射波の位置は底面波から界面波の方向へ変動していることがわかる。いずれにしてもこの区間からの反射波形の振幅は、⑩の振幅の 20% 程度と小さくなっている。FFT 解析によるスペクトル図を、各測点ごとに波形図の右側に示している。これによると欠陥周辺の卓越スペクトル間隔は、測点⑧で $\Delta f = 0.73$ MHz となった。この供試体の場合は供試体 D より緩やかに欠陥深さが変化する。この場合、測点③と⑧の Δf の違いはさらに大きくなる。

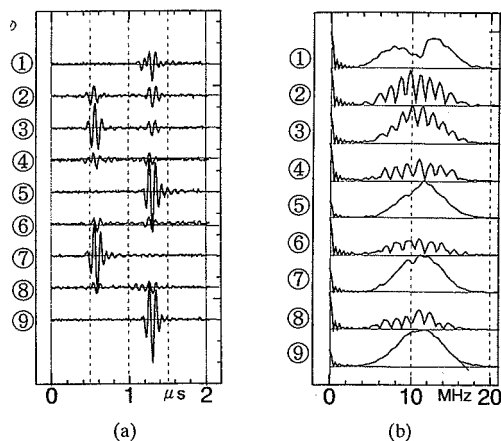


Fig.20 Measured waveforms and spectra of specimen L.

(3) 近接する微小欠陥からのエコー特性

Fig.14 に供試体 J, K, L の超音波探傷画像を強度データのみ示す。Fig.14 の探傷画像においては供試体 J, K, L の測定区間を、欠陥を中心とした全長 5.6 mm の範囲を、0.1 mm 間隔でエコー波形を測定した。前述と同様に実験より得られた各測点毎のエコー波形を、底面波と

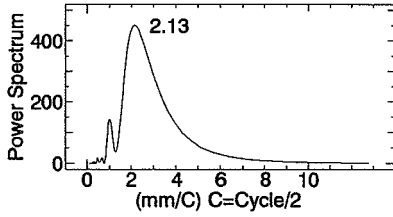


Fig.21 Defect size estimation by FFT analysis of the maximum echo level curve for specimen A.

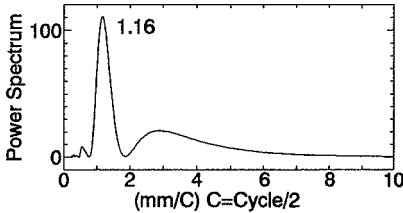


Fig.22 Defect size estimation by FFT analysis of the maximum echo level curve for specimen J.

界面波に分けて最大エコー高さを用いて整理したのが Fig.15, Fig.16, Fig.17 である。図中の実線は界面波の最大エコー高さ (B_0/B_{a0}) を、破線は底面波の最大エコー高さ (B_a/B_{a0}) を示している。

Fig.15~Fig.17 の最大エコー高さ曲線の実線と破線の交点間距離は供試体 J, K, L それぞれつぎのようになる。測点②, ④間が 1.4 mm, 1.0 mm, 0.9 mm, 測点⑥, ⑧間が 1.3 mm, 1.2 mm, 1.2 mm となる。また、欠陥の中心間隔にあたる③, ⑦間の距離は 2.1 mm, 2.7 mm, 2.3 mm となる。これらの距離は各供試体の欠陥寸法とほぼ一致している。つぎに、Fig.18 の欠陥端部からの波形 (②④⑥⑧) には界面波と底面波が測定されているが、その振幅は底面波だけの測点①⑨に比べると 1/3 程度となっている。この波形の界面波と底面波の時間差が欠陥深さになる。Fig.18, Fig.19, Fig.20 の FFT 解析によるスペクトル図には探触子の共振周波数である 10 MHz を中心としたピークが見られる。特に欠陥端部周辺のスペクトルには卓越ピークに山谷が多くなっていることがわかる。この山谷の卓越ピーク間隔は供試体 J が $\Delta f_J = 0.59$ MHz, 供試体 K が $\Delta f_K = 0.98$ MHz, 供試体 L が $\Delta f_L = 1.47$ MHz となった。これらのことから近接する欠陥の相互干渉の影響はほとんど見られないことがわかった。

(4) 最大エコー高さ曲線の FFT による欠陥寸法評価

最大エコー高さ曲線の大小は欠陥面からの反射波の振幅によって決まることは既に述べてきた通りである。このエコー高さ曲線に含まれる欠陥の幅を周期的な物と仮定すれば、FFT 処理をすることによって欠陥寸法を卓越振動数として求めることが出来る。Fig.21 は供試体

Table 3 Comparison of measured defect size for type I. (Unit : mm)

欠陥名	実測値	画像サイズ	解析値	dB ドロップ	
				6dB	10dB
A	1.90	2.80	2.65	1.74	3.05
B	1.85	2.70	2.15	2.04	2.55
C	1.90	2.55	2.05	1.00	1.24
D	2.80	3.40	2.50	2.29	2.96
E	2.20	2.95	2.10	1.56	1.81
F	2.20	2.60	1.70	1.25	1.54
G	4.30	4.70	3.20	2.14	2.50
H	2.95	3.50	2.60	1.37	1.87
I	2.90	3.00	2.35	1.33	1.76

Table 4 Comparison of measured defect size for type II. (Unit : mm)

欠陥名	画像サイズ	解析値	dB ドロップ		
			6dB	10dB	
J	upp	1.44	1.40	0.50	1.25
	low	1.44	1.40	0.75	1.05
K	upp	1.44	1.00	0.56	0.83
	low	1.44	1.20	0.54	0.73
L	upp	1.60	0.90	0.54	0.69
	low	1.68	1.20	0.62	0.96

upp, lowはType IIの欠陥の探傷画像において各々 upperは上の欠陥、lowerは下の欠陥を示す。

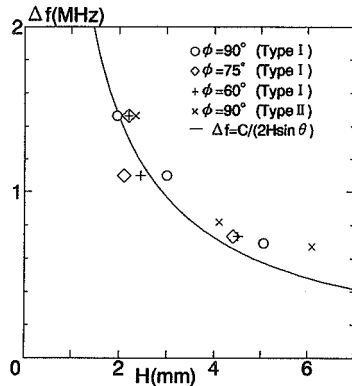


Fig.23 Relation of Δf and H .

A の界面波のエコー高さ曲線 (B_0/B_{a0}) を FFT 解析した結果である。横軸は欠陥寸法 (mm/c) をあらわし、縦軸はスペクトルの振幅である。最大スペクトルを示す卓越周期は 2.13 mm/c となる。また、Fig.22 は供試体 J について同様の解析結果である。最大スペクトルを示す卓越周期は 1.16 mm/c となり欠陥寸法とほぼ一致している。

(5) 微小欠陥の寸法測定についての考察

a) エコー高さ曲線による欠陥寸法

各微小欠陥の寸法を測定する方法として前述のエコー高さ曲線による解析値と、dB ドロップ法、探傷画像より測定した寸法を Table 3, Table 4 で比較している。Table 3 の解析値のうち欠陥が傾斜している場合には斜面の長さの影響も考慮した欠陥サイズとなっている。ま

た、実測値は樹脂を用いて欠陥の型どりをし、ドリルホール形状を測定した。この型どりした欠陥をノギスを用いて欠陥高さや大きさ等の形状の測定を行った。ただし直径 1 mm の供試体は型どりができなかったので欠陥深さだけをノギスで測定した。Table 3 は供試体 A~I の比較を示している。これによると、画像サイズは全体として実測値の欠陥サイズより大きく評価することがわかる。また、解析値は欠陥深さが小さく欠陥の傾きが大きいほど実測値より小さい値を示した。さらに、解析値は全体として dB ドロップ法より大きい値を示している。Table 4 は Type II の供試体についての寸法を比較している。供試体 J~L には欠陥が 2 個ずつあるので、Fig. 14 の欠陥画像の上になる欠陥を up, 下になる欠陥を low と区別している。この結果、解析値は dB ドロップ法より大きな値を示しており、真の欠陥寸法は 10 dB ドロップ法と解析値の間にあると考えられる。

b) 周波数解析と欠陥寸法

周波数解析の結果得られる卓越スペクトル間隔 Δf と欠陥寸法 H には式 (1) のような関係がある。ここでは、Table 2 の供試体の卓越スペクトル間隔と欠陥深さの関係について検討を行う。Type I の供試体の欠陥深さは、欠陥より直接型取りした凸型の模型を用いてノギスで測定した。卓越スペクトル間隔は、最小の卓越スペクトル間隔を用いることにする。このようにして求めた供試体 A~L までの卓越スペクトル間隔と欠陥深さの関係をプロットしたのが Fig. 23 である。図中の曲線は式 (1) を表しており実験値とほぼ一致していることがわかる。

5. 微小ドリルホール供試体のエコー波形の三次元画像処理

前述のような欠陥からの反射波形は解析区間全体では大量の測定波形となるが、高精度化のためにはこのデータを詳細に解析する必要がある。ここでは記録された波形をワークステーション (WS) によって三次元処理などの画像処理を行い、一度に大量のデータの処理と測定波形の特性について視覚的に比較、検討を行った。ここで得られた結果は通常の画像処理ソフトウェアの中でプロシジャプログラムを新たに作成して求めたものであり、エコー波形の全体的特徴を直感的に推定するとともに、波形の詳細解析の際、着目点の選定に役立つものである。

(1) 画像処理概要

WS とコンピュータ・グラフィックス (CG) ソフトの発達はこれまで理論や実験で理解してきた超音波の伝播現象を視覚的に表す事によって直接的に理解し易い形に表現することを可能としている。本研究では SVA (Scientific Visual Analysis) ソフトの PV-WAVE を用いて、前節で得られたエコー波形の三次元処理による

波形解析を行い、これについて検討を行った。

実験で測定された欠陥からの反射波形を測定位置の順に並べ、隠線処理とシェーディング処理によって三次元表示をした。座標軸は x 軸方向を経過時間 (2.048 μs , 4.096 μs), y 軸方向を測点移動距離 (ピッチ 0.05 mm, 移動距離約 4 mm, 軸の原点側が Fig. 7 の探傷画像の左側と一致), z 軸方向を振幅 (mV) として表示した。

(2) 傾斜を有する微小欠陥からのエコー波形の画像処理結果

Fig. 24, Fig. 25, Fig. 26 に示した写真は供試体 A, D, G の反射波形を三次元処理をした結果である。WS 上では、この図形をあらゆる角度に回転して検討することが出来る。この Fig. 25, Fig. 26 では、供試体の左側傾斜面からの反射波形の様子が見やすい位置になっている。図中の波形の左側にある振幅の大きな部分は、欠陥からの反射波 (界面波) で、右側の振幅の大きな部分は底面からの反射波 (底面波) である。傾斜面からの反射波形に着目して両図を比較すると Fig. 25 の供試体 D, Fig. 26 の供試体 G についても傾斜面からの反射波が見られる。しかし、Fig. 26 の反射波は Fig. 25 の場合とは異なり、底面波と界面波の間を結ぶように、また界面に近いほど振幅が大きくなっていることがわかる。これは傾斜面で反射するため散乱の影響により反射波エネルギーは探触子方向には逸散するためと考えられる。これに対して Fig. 25 の場合は 70° の傾斜面からの反射波形が一定の位置に現れている。この反射波形の現れる時間は P 波が傾斜面で反射しモード変換した S 波の到達時間とほぼ一致することから反射波は S 波であると考えられる。すなわち波動エネルギー Flux が集中している P 波の反射波は、傾斜面の影響により小さな振幅で入射点にもどるとともに、新しく界面で発生した反射 S 波モードが卓越して入射点に回帰している¹³⁾。

(3) 近接する微小欠陥からのエコー波形の画像処理

Fig. 27, Fig. 28, Fig. 29 に示した写真は供試体 J, K, L の反射波形を三次元処理をした結果である。

Fig. 27 の x 軸のスケールが 4.096 μs であるため他の図と単純に比較はできないが、測定位置によって反射波形がどのように変化するかを波形全体の中で比較することができる。図より界面波、底面波の反射位置の違いが明確にわかり欠陥位置に関する比較も可能である。この供試体のように近接した微小欠陥からの反射波形を三次元表示することによって欠陥の境界附近での反射波形の特性についても波形全体の中で検討することができる。

6. 結 論

超音波探傷装置を用いて、鋼構造物中に作製した溝形疑似欠陥とドリルホールによる、微小疑似欠陥の欠陥周辺からのエコー波形を測定し、エコー波形の反射位置に

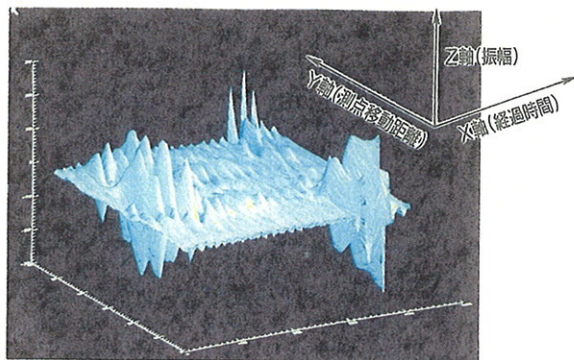


Fig.24 3 D image of measured waveforms for specimen A.

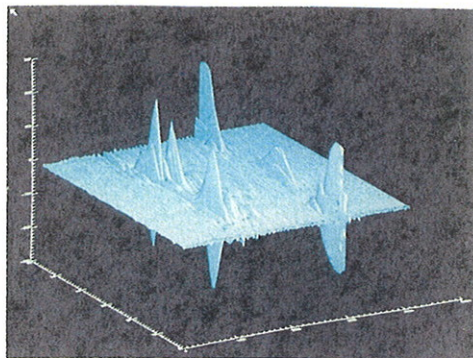


Fig.27 3 D image of measured waveforms for specimen J.

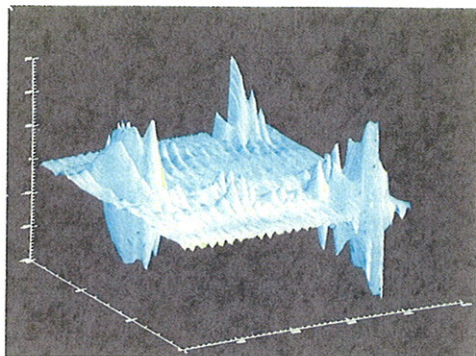


Fig.25 3 D image of measured waveforms for specimen D.

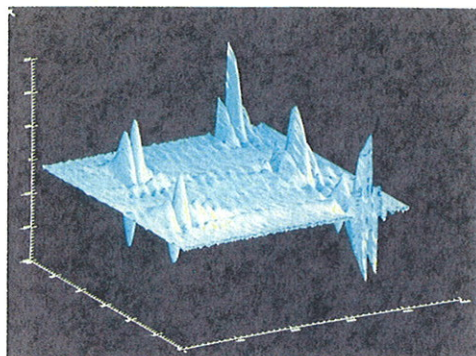


Fig.28 3 D image of measured waveforms for specimen K.

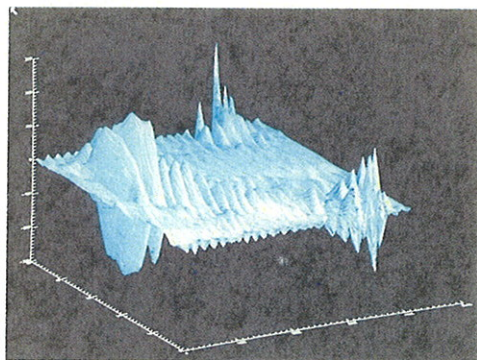


Fig.26 3 D image of measured waveforms for specimen G.

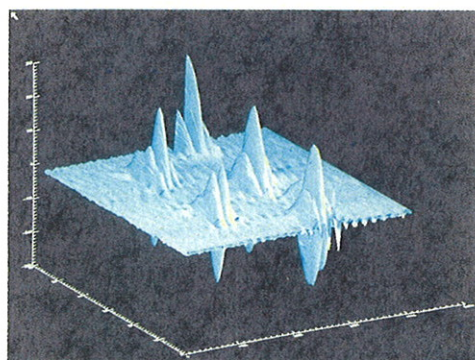


Fig.29 3 D image of measured waveforms for specimen L.

よる特性や周波数特性などから欠陥寸法を求める手法についての検討を行った。また、波形データをワークステーションで詳細解析することによる有用性についても検討を行った。以下に本研究で検討を行った内容を結論としてまとめることにする。

1) 溝形欠陥供試体の波形解析による欠陥寸法の測定結果は最大0.1 mmの誤差で得られ、dBドロップ法と比較して精度良く欠陥寸法を評価することが出来る。

2) 微小欠陥供試体の最大エコー高さ曲線による欠陥寸法評価(解析値)を実測値、画像サイズ、dBドロップ法と比較した。その結果、解析値は欠陥深さが小さく欠陥の傾きが大きいほど実測値より小さい値を示した。さらに、解析値は全体としてdBドロップ法より大きい値を示している。

3) FFTによる周波数解析精度を十分考慮して卓越スペクトル間隔を求めると、欠陥深さを精度良く測定できることを示した。

4) 測定エコー波形の三次元画像処理表示によって、欠陥境界付近での表面波、界面波、底面波の変化状況が明瞭に判断できることを示した。また、傾斜を有する欠陥の傾斜面からの反射波形は傾斜面での散乱の影響によりモード変換した反射S波の到達が卓越した。

これらの結果は欠陥検出精度向上のためのいくつかの手法についてその有用性を検討したものであり、さらにこれらの手法を探傷画像の高精度化に結びつけることによって非破壊評価による欠陥検出精度の向上につながると考える。

最後に、本研究の一部は平成5年度文部省科学研究費(代表者大島俊之)の補助を受けて行われました。また、実験・解析に協力いただいた杉浦伸哉氏(現(株)鴻池組)に厚く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Thompson, D.O. and Chimenti, D.E.: Review of progress in quantitative nondestructive evaluation, Plenum Press, Vol.1 (1981)~Vol.10 (1991).
- 2) 三木千寿・深沢 誠・加藤昌彦・大睦久雄: 表面疲労亀裂検出に対する各種非破壊試験の適用性, 土木学会論文集, 第386号/I-8, pp.329~337, 1987.10.
- 3) 田島二郎・福井宗博・三木千寿・深沢 誠: かど溶接ルート部に発生する疲労亀裂検出に対する非破壊試験の適用性, 土木学会論文集, 第386号/I-8 (報告), pp.427~434, 1987.10.
- 4) 深沢 誠・大睦久雄・加藤昌彦・三木千寿: 非破壊試験による表面疲労亀裂検出に及ぼす塗膜の影響, 土木学会

- 論文集, 第398号/I-10 (報告), pp.395~404, 1988.10.
- 5) 構造工学委員会非破壊評価小委員会: 土木構造・材料の定量的非破壊評価へのアプローチ, 土木学会論文集, 第428号/I-15, pp.9~26, 1991.4.
- 6) 三上修一・黒田隆博・安田基治・大島俊之: 超音波エコー波形解析を応用した欠陥境界検出精度向上に関する研究, 土木学会北海道支部論文集, 第48号, pp.121~124, 1992年2月.
- 7) 三上修一・山崎智之・菅原 登・大島俊之: 超音波パルスエコー法による鋼構造の微小欠陥検出精度向上に関する研究, 土木学会における非破壊評価シンポジウム講演論文集, 1991.10.
- 8) Sugawara, N., Oshima, T., Mikami, S. and Sugiura, S.: On the accuracy improvement in ultrasonic inspection by using computer graphics and waveform analysis, 土木学会論文集, 第459号/I-22, pp.49~58, 1993.1.
- 9) 三上修一・杉浦伸哉・大島俊之・菅原 登: 疑似欠陥を有する鋼材中を伝播する超音波の波形解析, 土木学会北海道支部論文報告集, 第49号, pp.129~132, 1993年2月.
- 10) 本間美樹治・黒田隆博・大島俊之・三上修一: 超音波探傷法における内部欠陥からの反射波形特性と欠陥検出精度向上に関する研究, 第47回年次学術講演会概要集第I部, pp.24~25, 1992年9月.
- 11) 大島榮次監修: 設備診断予知保全実用事典, 第1巻, 1988.
- 12) 日本非破壊検査協会編: 新非破壊検査便覧, 日刊工業新聞社, 1992.10.
- 13) 三上修一・大島俊之・R.D.クリッツ・菅原 登: 積層複合ばりを伝播する応力波動と Energy Flux 分布の研究, 構造工学論文集, Vol.39 A, pp.435~444, 1993.3.
(1993.10.27 受付)

DEFECT ESTIMATION FOR STEEL STRUCTURE BY USING QUANTITATIVE ANALYSIS OF REFLECTION WAVE IN ULTRASONIC INSPECTION

Shuichi MIKAMI, Toshiyuki OSHIMA, Noboru SUGAWARA and Tomoyuki YAMAZAKI

The C-scan images of artificial defects in a steel plate with 9 mm thickness are obtained by an ultrasonic inspection. The quantitative waveform analysis on the echos is performed for the estimation of reliable size and inclination of a defect. Two types of specimens are used. In the first type two specimens which have a channel type of groove defect with different depth, are used. In the second type a steel plate specimen with 9 mm thickness which has twelve artificial defect holes drilled with different depth, diameter and inclination, is used. By using an immersion type of transducer reflection waves returned from a defect are detected and stored on floppy disk. Those are used for waveform and spectrum analysis to get more accurate and detail information on defects. It is shown that 3 D display/rotation of reflection wave using graphic software of a workstation is very helpful for a precise waveform analysis of a reflected echo.