

## 波形解析を応用した超音波探傷法の 微小欠陥検出精度向上に関する研究

Study on the Accuracy Improvement of Small Defect Detection for Steel  
Structure by Using Wave Analysis of Ultrasonic Inspection

菅原 登\*      三上修一\*\*      山崎智之\*\*\*      大島俊之\*\*\*\*  
Noboru Sugawara, Shuichi Mikami, Tomoyuki Yamazaki, Toshiyuki Oshima

When we use ultrasonic pulse echo method for steel structure, there are several effects of the characteristics of defect embedded in steel member on the image results of the analysis. The artificial defects of the size 1mm - 2mm were made on the steel plate of the thickness 9mm. The effects of depth from the steel surface and, inclination of crack and coupling effect of two close cracks, on the screen image, are analyzed by means of wave analysis on the detected reflection wave.

The series of image results are obtained under the tension test for a V-Notch specimen in order to find how the plastic zone around the crack tip propagates during the test.

### 1. まえがき

供用中の鋼構造部材の健全度診断を行い余寿命評価を行う場合、部材内部の欠陥を精度良く評価する手法の開発が必要である。特に最近の高度な溶接部の品質管理に対する要請から欠陥の検出精度の向上は必須の問題となっている。<sup>1), 2), 3)</sup> 著者らは鋼構造部材中に人為的に配置した微小欠陥を超音波パルスエコー法により検出し、画像処理する際に、画像結果に影響する種々の因子に着目し、これらの影響の程度を実験的に解析した。<sup>4), 5), 6)</sup> 本研究では1mm~2mm程度の種々の人工欠陥を鋼板中に配置し、これらの欠陥の画像を求める際に、鋼板内部の欠陥の長さ、傾き、さらに2個の微小欠陥の検出画像への干渉の影響などについて解析した。また微小欠陥からの反射波形の解析を行い、検出画像の高精度化に関する検討を行った。

また切欠部を有する鋼材の引張試験を画像処理による追跡をしながら実施し、ノッチ先端の応力集中による塑性域の広がり、亀裂進展の程度と関連させながら実験した結果についても報告する。

---

|      |           |          |                     |
|------|-----------|----------|---------------------|
| *    | 北見工大助教授   | 工学部土木工学科 | (〒090 北海道北見市公園町165) |
| **   | 北見工大教務職員  | 工学部開発工学科 | (〒090 北海道北見市公園町165) |
| ***  | 北見工大助手    | 工学部土木工学科 | (〒090 北海道北見市公園町165) |
| **** | 工博 北見工大教授 | 工学部開発工学科 | (〒090 北海道北見市公園町165) |

---

2. 計測システム概要

実験に用いた計測システムは図1に示すような超音波探傷映像装置（AT5000、日立建機㈱、1989）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。次に主な仕様を示す。

超音波探傷映像装置

- 探触子（焦点型垂直探触子 水浸式）
- 周波数            5MHz    10MHz    25MHz
- 焦点距離        約50mm    約40mm    約20mm
- 自動走査装置（直交座標型3軸スキャナー）
- 走査範囲        500×600×250mm
- 走査ピッチ      0.05～9.95（0.05mm可変）
- 走査速度        10～150mm/s
- （走査ピッチによる自動設定）

画像処理装置

- Cスコープ：白黒256階調表示、
- カラー16階調表示

超音波波形解析装置

- デジタル・ストレージ・
- オシロスコープ（DSO）
- サンプルレート        500MSample/sec，
- 垂直軸の分解能        10ビット，
- 垂直軸の周波数帯域    300MHz，
- FFT（高速フーリエ変換）計算機能

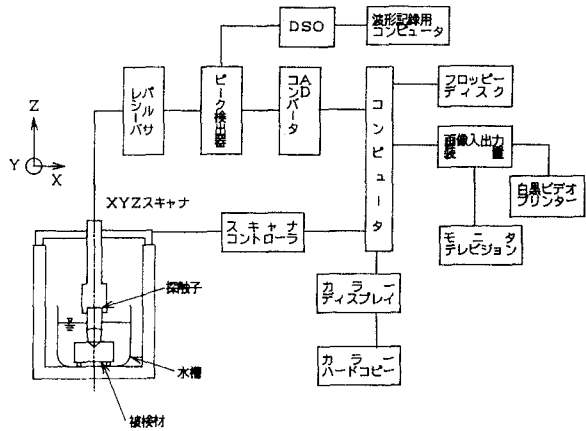


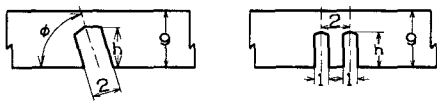
図 1 測定システム

画像処理は、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す。また、この電圧と可変基準電圧を比較電圧回路に通すことにより、欠陥エコーのA/D変換信号を画像処理のデータとして、欠陥図形を二次元表示する。超音波波形解析装置は、設定ゲート内の反射波形を取り込み、高速フーリエ変換によるスペクトル解析を表示出来る。

3. 近接する微小欠陥の干渉の影響

超音波による微小欠陥の検出を行う場合、探傷画像の精度は探触子の距離分解能や方位分解能の制約を受ける。本章では鋼材中に発生する微小欠陥が近接しているようなモデルについて、探傷画像の検出精度に与える微小欠陥の干渉の影響について検討する。この他に欠陥の深さ、微小欠陥の傾き度による影響、探触子の周波数による違いなどについても検討を行った。

表 1 供試体



| 供試体 | $\phi(^{\circ})$ | $h(\text{mm})$ | 供試体 | $\phi(^{\circ})$ | $h(\text{mm})$ |
|-----|------------------|----------------|-----|------------------|----------------|
| A   | 90               | 5              | G   | 60               | 5              |
| B   | 90               | 3              | H   | 60               | 3              |
| C   | 90               | 2              | I   | 60               | 2              |
| D   | 75               | 5              | J   | -                | 5              |
| E   | 75               | 3              | K   | -                | 3              |
| F   | 75               | 2              | L   | -                | 2              |

## (1) 実験概要

実験に用いた供試体は、9 mmの鋼板に穿孔角度(90°、75°、60°)、穿孔深さ(5mm、3mm、2mm)、ドリル孔の間隔(1mmのドリル孔、中心間隔約2mm)を変えた表1に示すような12種類の欠陥モデルである。測定は探傷子の周波数による違いを比較するため、3種類の探触子を用いた。反射波形の測定は、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。近接する微小欠陥の干渉の影響を検討するモデルとしてドリルホール深さによって供試体J(深さ5mm)、供試体K(深さ3mm)と呼ぶことにする。

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の画像と、設定したゲート時間を基準として、反射波がどの位置の深さから反射してきたかを相対的に示す路程データによる画像を同時に得ることにした。路程データとは超音波の伝播経路(路程と呼ぶ)に関連して入射波が反射した位置の深さを各走査点毎に求めたものである。

## (2) 実験結果

図2は供試体Kを探触子周波数25MHzを用いて測定した探傷画像である。また、同様に図3は供試体Jの探傷画像である。両図ともドリル孔先端の形状は精度よく表れているが、Jの探傷画像はKの画像に比べると底面近くでばやける傾向がある。これは、写真でいう露出深度が不足している場合に相当する現象と考えられる。近接する微小欠陥の干渉の影響はほとんど見られない。

この他に、探触子の周波数による探傷画像の比較を行うと、使用する探触子の周波数が高いほど欠陥の形状を精度良く画像表示している。しかし、実用的な焦点距離を考慮すると10MHzの探触子を用いるのが適当である。欠陥の形状、欠陥の傾きが画像精度へ与える影響は、ほとんど見られなかった。ただし、図4、図5のように傾斜面からのエコー強度は小さくなる傾向となったが、今回比較した12種類の欠陥モデルを探傷画像を用いて判別することが出来た。また図6に示すように路程データと強度データを比較して検討することにより、欠陥の深さに関する比較資料となる。

## 4. エコー波形解析による欠陥の高精度処理

超音波探傷映像装置から得られる探傷画像はエコー強度をもとに解析された画像である。このエコー強度は供試体からの反射波の最大振幅から決定される。超音波探傷で供試体に

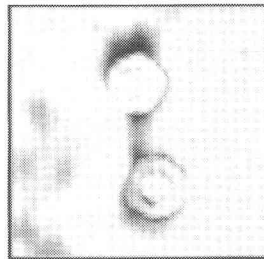


図 2 供試体Kの画像  
(6×6mm, pitch 0.05mm,  
scale → 0.8mm)

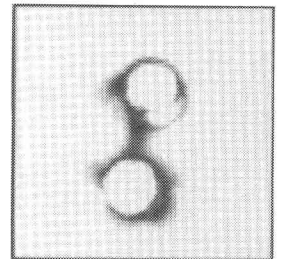


図 3 供試体Jの画像  
(6×6mm, pitch 0.05mm,  
scale → 0.8mm)

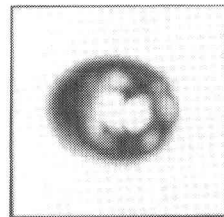


図 4 供試体Dの画像  
(5×5mm, pitch 0.05mm,  
scale → 0.8mm)

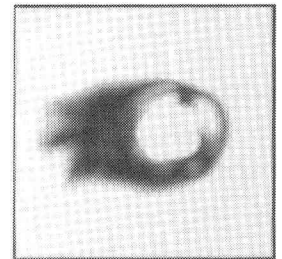
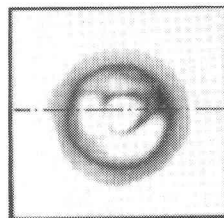
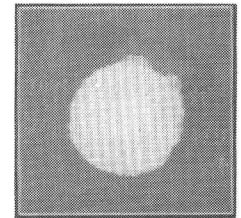


図 5 供試体Gの画像  
(6×6mm, pitch 0.05mm,  
scale → 0.8mm)



(a) 強度画像



(b) 路程画像

図 6 供試体Aのエコー強度画像と路程画像  
(5×5mm, pitch 0.05mm, scale → 0.8mm)

入射された超音波が内部欠陥に近づくと、供試体を伝播する超音波は底面での反射波（底面波）の他に欠陥からの反射波（界面波）が測定される。このときの反射波は欠陥の大きさや形状により散乱の影響が異なり、エコー強度による探傷画像だけでは、十分な測定精度が得られない。そこで反射波形に関する詳細な検討が必要となる。本章では、探傷画像解析に用いた設定ゲート内の反射波形について解析を行い、高精度画像処理について検討する。

(1) 実験概要

実験に用いた供試体は穿孔（直径2mm）深さを5mm、3mm、2mmと変えた円孔欠陥を有する供試体A、B、Cについて測定を行った。測定は、探触子10MHzを使用し、焦点を欠陥中央に合わせて欠陥を中心とした5mm角の範囲の探傷画像（図6）を得る。図6（a）の一点鎖線に沿って左側から順に反射波形を、欠陥の境界近くでは0.05mm、その他の箇所では0.1mm間隔で観測した。反射波形はDSO（Digital Storage Oscilloscope）を用いてAD変換し、FDに記録した。サンプリング間隔は0.5ns、サンプリング数は4096点である。同時にFFT解析

行ってディスプレイ上に表示し同様に記録した。これによって得られた測定波形の例を図7に示す。図7（a）の測定波形は、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。図7（b）は上の波形から順に欠陥から離れて行った場合の界面波と底面波の振幅の変化を示した図である。振幅は、それぞれの波形の最大値で基準化している。横軸は時間（ $\mu s$ ）を示す。図中、丸の中の数字は、波形を測定した位置を示す。この数字は図8の数字に対応する。

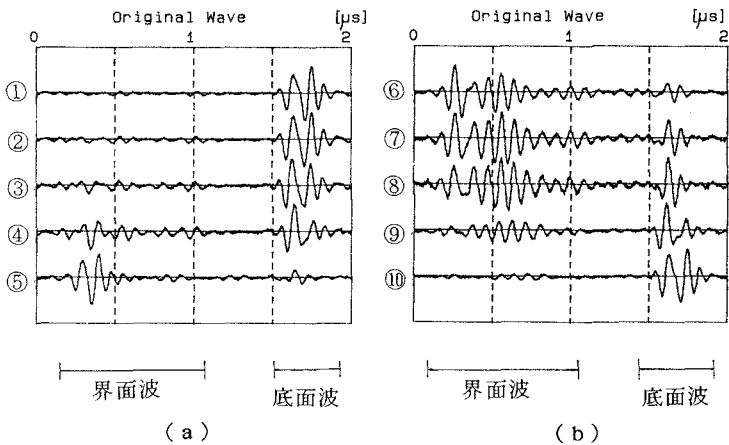


図 7 供試体Aの測定波形

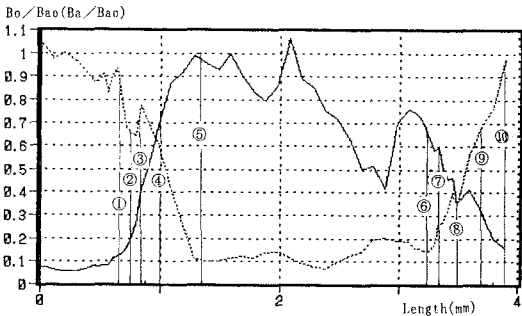


図 8 Bo/Bao(Ba/Bao)の比較（供試体A）

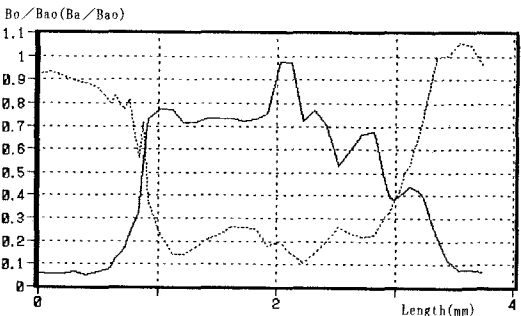


図 9 Bo/Bao(Ba/Bao)の比較（供試体B）

## (2) 実験結果

測定波形には欠陥との境界付近で界面波と底面波が存在している。欠陥に近づくほど界面波の振幅が大きくなり、底面波の振幅は小さくなる。この間に真の欠陥との境界が存在している。エコー強度による画像解析では反射波形の最大値を用いて評価しているため底面波より界面波の振幅が大きくなる図7中の番号⑤、⑨の波形を測定したとき欠陥からの反射波による画像が現れることになる。図8は、測定波形から界面波と底面波のそれぞれの最大値を求め、界面波の最大振幅( $B_o$ )を基準底面波( $B_{ao}$ : 欠陥から離れた位置の測定波形の最大値)で規準化した

$B_o/B_{ao}$ を、測定位置ごとにプロットして実線で結んだ図である。また、破線は底面波の最大値( $B_a$ )を $B_{ao}$ で規準化した $B_a/B_{ao}$ の図である。横軸は、測定位置をmm単位で示した。ここで、破線に注目すると、値が小さい部分が約2 mmの幅で続いている。これは欠陥の大きさ2 mmに対応している。また、実線部分は界面波の最大振幅の変化を示していることから、界面の凹凸形状を示しているものと考えられる。この解析を供試体B、供試体Cについて示したのが図9、図10である。供試体Aで得られた傾向と同様のことが考察される。さらに実線の $B_o/B_{ao}$ を3種類の供試体で比較すると、穿孔深さが小さくなるに従って欠陥での界面波の振幅が小さくなっている。

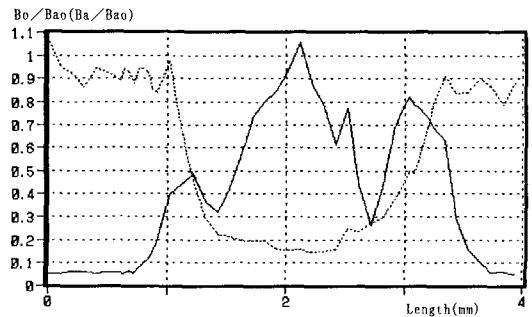


図 10  $B_o/B_{ao}(B_a/B_{ao})$ の比較 (供試体C)

## 5. 応力作用下における破壊プロセスゾーンの画像による追跡

一般に、亀裂を有する部材に応力が作用すれば、亀裂先端部及びその周辺に応力集中が生じ、さらに応力を徐々に増加させることにより、塑性域が拡大して遂には破壊が発生する。この過程を追跡する場合、塑性変形が超音波エコー強度に大きく影響を及ぼす。また、超音波エコーの相対的な反射位置の変化が生ずるので、画像の他に各断面における超音波エコー強度データ及び路程データ等を求め、これらから各荷重段階における亀裂周辺の変化を総合的に検討した。

### (1) 実験の概要

供試体は、SS41鋼材(80×6×280mm)の中央両側端面に、幅 5mm、深さ20mm(切欠角度14.25°)のV型切欠を付けたものを製作した。載荷方法としては、供試体の長手方向に引張応力を作用させるフレームを製作し、手動式オイルジャッキによる載荷を行った。また、超音波探傷における探触子は、25 MHzのものを使用した。

探傷画像を得るに当たっては、各荷重段階において画像の変化が識別できるゲインを設定した。また、探傷画像の横方向1ライン分について、超音波エコー強度を256階調によりデータ化し、それぞれのデータにおいて、変動の少ないところを基準線として、エコー強度変化の様子をプロットした。さらに、底面を基準としてエコーの位置を相対的に表した路程データを求めて、画像変化の範囲及びその程度を検討した。

### (2) 実験の結果

供試体の長手方向に一樣引張荷重を加え、各荷重段階における画像を得た。一例として、図11は引張荷重が0 tf, 7 tf, 9 tf, 11 tfの場合の画像である。この図から応力が作用すれば、V型切欠先端部及びそ

の周辺に応力集中が生じ、さらに応力が増加すれば、その部分から塑性域に入って、その範囲が拡大していく状況が分かる。荷重が徐々に大きくなれば、V型切欠先端部の画像は、黒色部分の形状が徐々に崩れるように変化している。V型切欠先端部は応力集中が最大の部分であり特に散乱の影響を強く受けるために図のような形状になる。

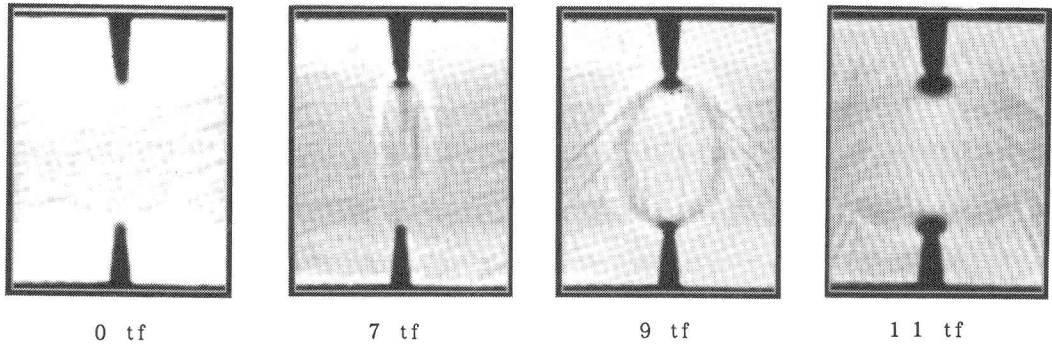


図 1 1 応力作用下の画像(60×82, pitch 0.2mm, scale  $\longleftrightarrow$  9.6mm)

図 1 2 は、引張荷重が 9 tf の場合について、長手方向各断面において超音波エコー強度データをまとめたものである。この図から超音波エコー強度の変化が大きい部分は、図 1 1 の画像が変化した部分に対応し、その変化の範囲を知ることができる。

図 1 3 は、引張荷重が 9 tf の場合について、路程データを波形化したものである。この図から V 型切欠先端部に近づくにしたがって、超音波エコー位置の相対的変化が大きくなっていることが分かる。これは、V 型切欠先端部に近づく程、塑性変形が大きくなると共に、超音波エコーの反射位置が変化するためである。

V 型切欠を有する部材に応力が作用すれば、荷重段階が初期の場合には弾性変形が生じ、さらに応力の増加に伴って、切欠先端部及びその周辺に応力集中による変形の他に材料の塑性化の影響が現れる。この場合

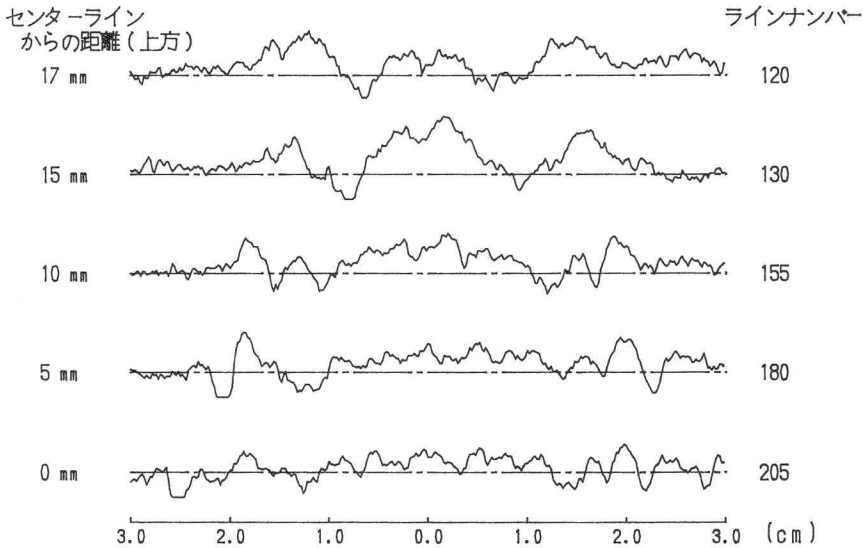
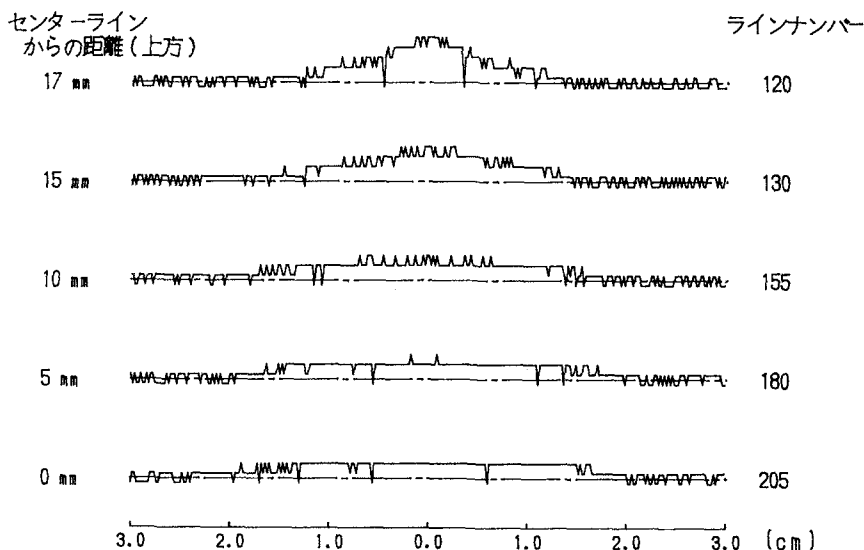


図 1 2

切欠周辺部の  
エコー強度の分布

(基準線は  
256 階調中 175)



変形量は極く微小であり、超音波エコー強度の変化は主に塑性化に相関した変化であると考えることができる。図13の路程データの結果にはこれらの影響が総合的に含まれている。したがって、応力作用下におけるV型切欠先端部の応力集中は、切欠先端部で最大となるから、切欠先端部に近づく程、超音波伝播速度の変化も大きいのでこれらのデータを参照すれば塑性域の拡大を追跡する上で精度を向上させることができる。

## 6. 結論

鋼構造部材中の微小欠陥検出精度に影響を与えるエコー波形等に注目して探傷画像の検討を行った。また、応力作用下におけるノッチ周辺の微小欠陥検出精度向上に関する研究について検討を行った。その結果をまとめると次のようになる。

- (1) 本測定システムにおいて、 $\phi 1\text{mm}$ の欠陥を中心間隔約 $2\text{mm}$ に近接させた探傷画像について検討を行った。近接する欠陥相互の干渉が探傷画像に与える影響はほとんどなかった。
- (2) 探傷画像の高精度処理について、 $\phi 2\text{mm}$ の疑似欠陥にからの反射波形を解析した。その結果、底面波と界面波のそれぞれの最大値は、欠陥の大きさ、欠陥先端の形状、穿孔深さを示すことがわかった。
- (3) V型切欠を有する供試体の引張試験において切欠先端の破壊プロセスゾーンの進展状況を画像処理により追跡した。その結果切欠周辺の塑性領域の広がりを示すエコー強度分布及び路程分布が明らかとなった。

本研究の実施に当たり平成3年度文部省科学研究費奨励研究A（研究者三上修一）の補助を受けました。また、本研究の実験・解析に際してお世話になった北見工業大学卒業生、落合良隆氏及び北見工業大学の杉浦伸哉、高畑智考、松原忠幸の各氏の援助をここに感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 三木千寿、深沢誠、加藤昌彦、大畦久雄：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、1987.10、p329-337.
- 2) 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）、1987.10、p427-434。
- 3) 深沢誠、大畦久雄、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）、1988.10、p395-404。
- 4) 山崎智之、菅原登、大島俊之、三上修一：画像処理による破壊プロセスゾーンの追跡、土木学会第45回 年次学術講演会第1部、平成2年9月、p230-231。
- 5) 山崎智之、菅原登、大島俊之、三上修一：構造部材の状態変化による欠陥画像の研究、土木学会北海道支部論文集第47号、平成3年2月、p101-104。
- 6) 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、土木工学における非破壊評価シンポジウム講演論文集、1991.10。

(1991年9月30日受理)