

## 超音波パルスエコー法の数値シミュレーション

Numerical Simulation of  
Ultrasonic Pulse-echo Method

三木千寿\* 池田清宏\*\* 沖中知雄\*\*\* 吉見昌宏\*\*\*\*

By Chitoshi MIKI, Kiyohiro IKEDA, Tomoo OKINAKA, and Masahiro YOSHIMI

This paper presents a numerical simulation of the ultrasonic pulse-echo method, which potentially is a powerful means for the non-destructive evaluation of cracks and flaws of steel structures. The finite element method is used to solve the equations of elastic waves for steel plates with circular and elliptic voids, and with a slit. The longitudinal and transversal input waves, simulating ultrasonic pulses, are input at the surface of the plate. The diffracting and reflecting waves at the voids and the slit are investigated in detail. The analysis and experiment are compared to show the validity of the simulation.

## 1. まえがき

各種の非破壊検査法のうち、超音波パルスエコー探傷法が内部欠陥の形状・寸法測定や表面き裂の深さの測定に最も有効な方法といわれており、構造工学におけるその必要性が近年叫ばれている<sup>1)</sup>。超音波探傷法は従来、結果の記録性がない、技能者のみしかわからず客観性に乏しいなどが欠点とされていた。しかし、最近の計測の自動化や通常のAスコープの他、BスコープやCスコープを用いた画像化によりそれらの問題点は解決されつつある<sup>2), 3)</sup>。しかしそれらによっても超音波探傷による欠陥の検出精度は改善されたとはいえず、破壊力学を適用して疲労やぜい性破壊に対する安全性を照査するための基礎データとするには欠陥先端の鋭さの程度の判定、寸法の評価の精度が不十分である。裏付けとなる理論、簡易式が十分整備されていないために、実験データから有為な情報がなかなか引き出せない状況であるといえよう。

超音波は物体表面から入力された弾性波動としてとらえることができる。クラックの評価法は順問題と逆問題とに大別される。順問題の代表であるクラックにおける散乱問題に関しては数多くの研究がなされている。SihとLoeber<sup>4), 5)</sup>はスカラポテンシャルを用いて、正弦波が角度を持ってクラックに入

---

\* 工博 東京工業大学 教授 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)  
 \*\* Ph.D 長岡技術科学大学 助教授 (〒940-21 長岡市上富岡町1603-1)  
 \*\*\* 東京工業大学大学院修士課程  
 \*\*\*\* 工修 運輸省 (研究当時、東京工業大学大学院修士課程)

射する際の散乱波の解析解を求めている。この手法はさらに種々の問題に適用され<sup>6),7)</sup>、散乱問題の理論的な基礎となっている。数値解析手法としては境界要素法<sup>8)</sup>、差分法<sup>9)</sup>、有限要素法<sup>10)</sup>等、さまざまな手法が用いられている。これらの手法により、縦波と横波の散乱パターンからクラックの方向を定めることができるが、クラックの概略に関する情報を予め持っている必要がある。

散乱波からきれつ形状を算定する手法として、逆散乱問題も盛んに研究されている<sup>11-13)</sup>。この方法は領域境界における散乱波の測定値をもとにきれつの形状を逆算する手法であり、原理的には正解を与えるものである。しかし、散乱波に関する多量のデータを必要とするので、非破壊評価実験との対応をいかにつけるかが、今後の課題であろう。

本研究の目的は、半ば経験的に行われている超音波パルスエコー法の数値シミュレーションを行い、その特性を明らかにすることにある。数値解析手法としては、境界条件の設定、波の入力の操作等が比較的簡単な有限要素法を用いた。対象物内部の波動の伝播状況を画像化して観察できること、および超音波の入力波形を精度よく再現できること等がこの手法の利点である。また、領域境界面における反射波の除去、表面波の影響の除去には特に力点を置いた。

## 2. 数値シミュレーション法

### (1) 解析方法

平面弾性体の振動方程式を有限要素法により解くことにより、超音波パルスエコーの伝播特性の数値シミュレーションを行う。解析対象として図-1に示す内部欠陥を有する $20 \times 40\text{mm}$ の長方形平面鋼板を用いる。内部欠陥として(a)円孔 (b)楕円孔(スリットホール) (c)スリットを用いる。欠陥の先端半径は円孔、楕円孔、スリットの順に $2\text{mm}$ 、 $1\text{mm}$ 、 $0\text{mm}$ と小さくなっている。同じ形状、寸法の人工欠陥を有する鋼板に対してパルスエコー実験を行い、高速デジタルオシロスコープで観察、記録した。

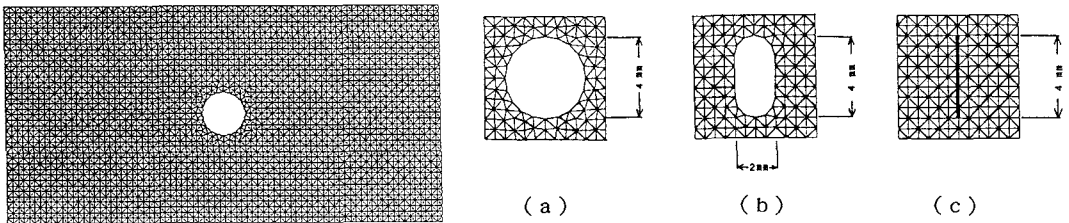


図-1 解析対象(欠陥付き平面鋼板)

三角形一次要素により剛性行列を与え、また集中質量行列を用いた。鋼材中では超音波は殆ど減衰しないので、減衰行列はゼロと仮定した。解析にあたり鋼のYoung率は $2.1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$ 、ポアソン比は $0.3$ 、単位質量は $7.85 \text{kg/cm}^3$ であるとした。縦波の波速は約 $5900\text{m/s}$ 、横波の波速は約 $3200\text{m/s}$ である。入力超音波の周波数は $1\text{MHz}$ であるので、縦波の波長は $5.9\text{mm}$ 、横波の波長は $3.2\text{mm}$ である。縦波の波長の約 $1/10$ 、横波の波長の約 $1/6$ にあたる値 $0.5\text{mm}$ を要素寸法として用いた。この値は波の特性を表すのに十分小さいメッシュである。時間応答解析は線形加速度法(Newmarkの $\beta$ 法で $\beta = 1/6$ とした)により行い、時間間隔として入力超音波の周期の約 $1/20$ にあたる値 $0.05 \mu\text{sec}$ を用いた。この時間間隔に対する計算結果と、時間間隔 $0.01 \mu\text{sec}$ で行った解析結果とは良く一致しており、 $0.05 \mu\text{sec}$ が十分細かい時間メッシュであることを示している。

### (2) 無反射境界

超音波の伝播解析を行うにあたり、計算機の容量および計算時間の制約により、限定された領域につ

いて解析せざるを得ない。しかし、領域境界を自由端の条件にして解くと、境界からの反射波による大きな誤差が発生してしまう。本研究では、解析領域の左右にCundallの方法<sup>14)</sup>による無反射境界を設けることにより領域境界からの反射波を取り除いた。領域の上下の境界における反射波は実験においても実際に発生する物理的な意味がある波であるので、上下端には無反射境界を設けず、自由端とした。

### (3) 超音波の入力波動

超音波の発信探触子にパルス状の電気信号を与えると、探触子が振動し、それが検査対象の物体内に伝わる。図-2は板表面から45度斜角探触子(5MHz)により入射した超音波を裏側で受信した波形である。この波形は受信側探触子の特性による誤差を若干含んでいるが、物体内にはこのような波が伝播していると考えられる。この種の波形を精度良く近似することが超音波の伝播シミュレーションにおいて重要である。

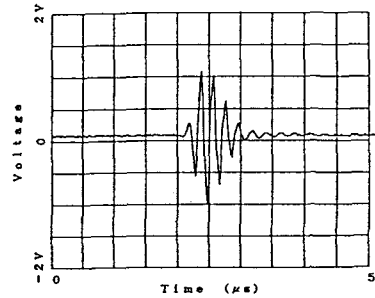


図-2 超音波の観測波形

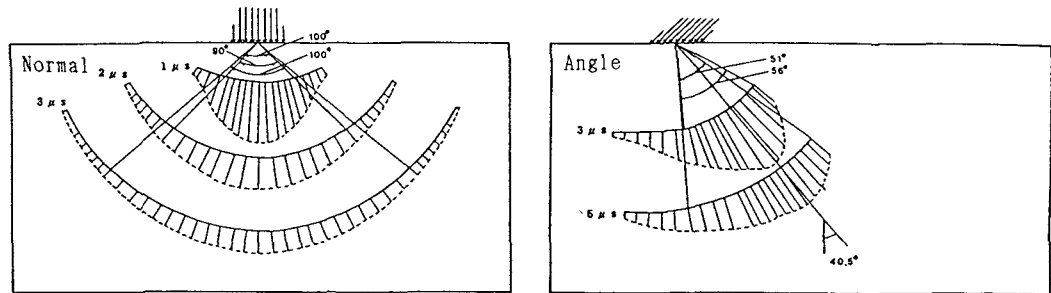


図-3 入射波の伝播特性

超音波探傷法は入射波の方向により垂直探傷法と斜角探傷法とに大別される。垂直探傷法は物体表面に対して垂直方向に加振するものであり、物体内には縦波および横波が発生する。これらの入射波を数値的にいかに表現するかが、シミュレーション結果の精度を大きく支配する。図-3に入射波の入力状況と物体内の波の伝播特性を示す。入力変位ベクトルの幅は4mmとした。図中、実線は超音波の波面の位置を、破線は波面の法線方向の変位の大きさをそれぞれ表す。ここでは垂直探傷法に対しては試験体表面を縦方向に同時刻に強制的に変位させることにより入射縦波を近似した。入力に幅をもたせ、その方向を適当に選ぶことにより、波に指向性を持たせている。これはパルスエコー法で分解能を向上させるために、特定の方向の音圧を増加させた集中型探触子を用い、指向性を持たせていることに対応している。斜角探傷法に対してはホイヘンスの原理を用い、斜めに時間差をつけて強制変位を与えることにより入射横波を近似した。臨界角の関係で物体内には主として横波が発生する。鋼材に対しては通常1-10MHzの領域の超音波が用いられている。ここでは入射波の周波数は、垂直、斜角とも1MHzとしている。

### 3. 波動伝播のシミュレーション結果

#### (1) 入射波

超音波の入力部の中央点の変位の時間履歴を図-4に示す。(a)は垂直波を入力したときの変位の垂直方向成分(縦波)、(b)は45度の斜角波を入力したときの、その直交方向成分(横波)である。

それぞれ両振りの1波を入力した後、自由振動が続き、さらに反射波が到達している様子がわかる。ここでは最初に伝わる第1波の伝播、および反射特性に特に注目することとする。

図-5に垂直および斜角超音波の伝播距離に対する減衰特性を示す。縦波、横波ともに波の振幅は距離の $-1/2$ 乗に比例して減少しており、弾性波動の距離減衰特性と一致している。また、裏側表面に近づく（横軸で16mm以上の部分に対応）振幅が大きくなっている。

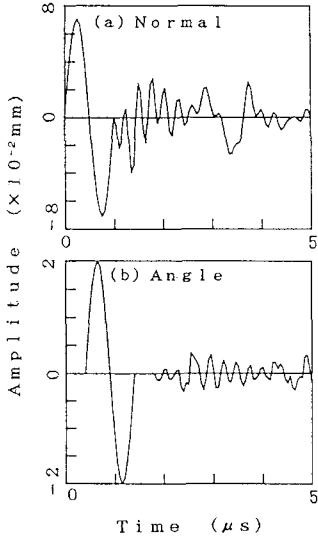


図-4 入力部の中央点の変位の時間履歴

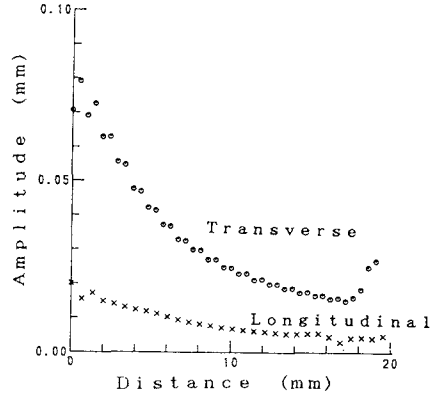


図-5 伝播距離に対する減衰特性

## (2) 伝播特性

図-6は円孔に対して垂直波を入力したときの波の伝播、反射状況の経時変化を示す変位ベクトル図である。進行波の先端部は伝播速度が速い縦波であり、その後に速度が遅い横波が進行していることがわかる。ただし左右対称性のため y 軸上では横波が発生していない。時刻1.6  $\mu$  sec以降に、円孔による

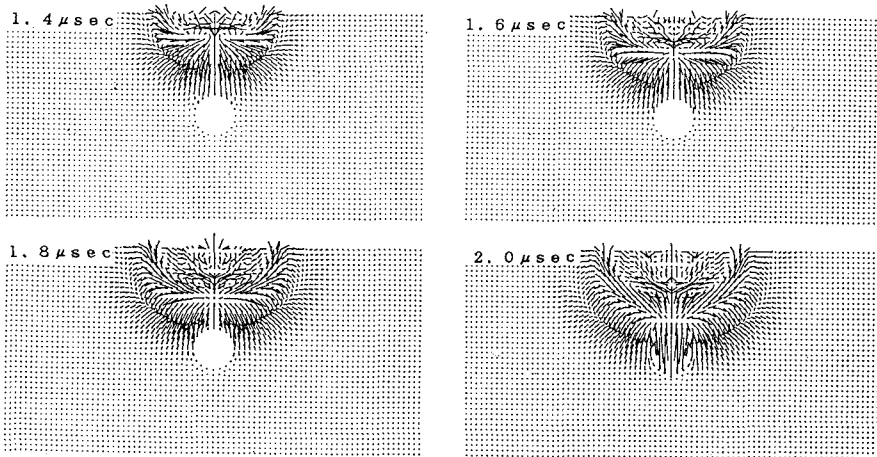


図-6 超音波の伝播、反射ベクトル図（円孔）

反射波が見られる。円孔で、最初に到達した縦波が縦波と横波とに分かれて反射し、遅れて伝播してきた横波も縦波と横波として反射している。超音波の反射、散乱特性を理解するにあたり、このような種々の波を区別する必要がある。ここでは入射波が縦波のときの縦波と横波の反射波をそれぞれL L波、L T波と呼ぶことにし、入射波が横波である場合にも同様にT L波、T T波と呼ぶことにする。

図-7にスリットで発生する反射波を示す。スリットでは、殆どの波がそのまま通過してしまい、反射波は殆ど見られない。

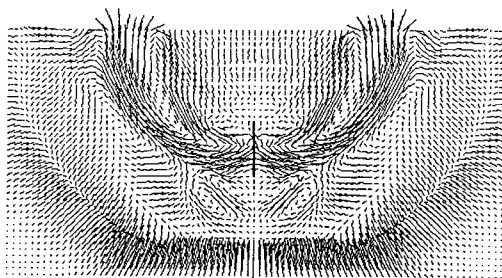


図-7 スリットにおける反射波 (4  $\mu$  sec)

次に、楕円孔に斜角超音波を入射したときの波動の伝播特性を図-8に示す。横波が楕円孔で反射し、T L波およびT T波を発生している。振幅が非常に小さい縦波に続き、振幅が大きい横波が伝播している。図-9に円孔とスリットにおける反射・散乱波の状況を示す。スリットの先端からかなり強い円筒波が発生していることがわかる。これが端部エコー法による超音波探傷に利用される波である。

図-6、8から明かなように、垂直波および斜角波を入力したことにより、かなり強い直達表面波が発生している。超音波エコー法は表面で反射波を観測するのであり、この表面波は反射波を観測する際に障害となるので、必ず取り除かねばならない。実際の探傷においては振動を吸収する物体を試験片にあてる等の操作により直達表面波を除去しているが、ここでは以後各時刻について

(欠陥付きの結果) - (無欠陥の結果)

(1)

という引算を行うことにより直達表面波の影響を除去した。

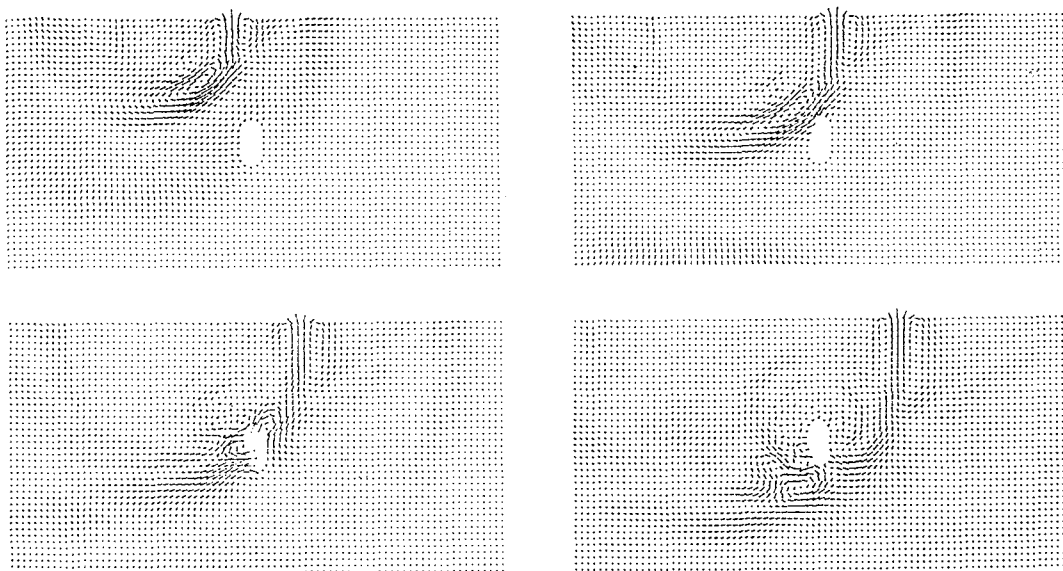


図-8 超音波の伝播、反射ベクトル図 (楕円孔)

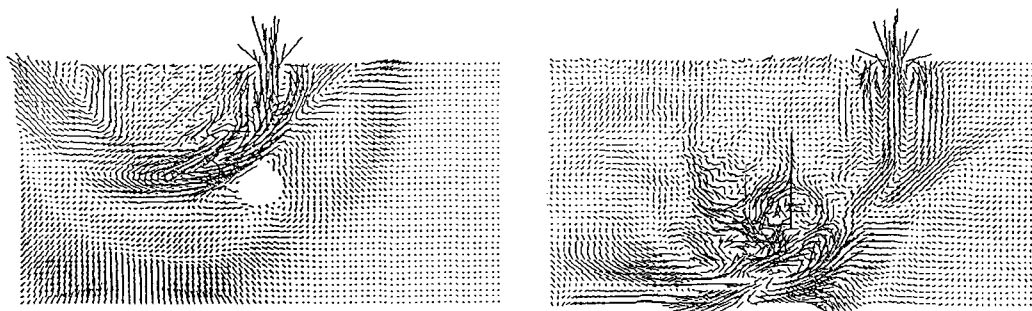


図-9 超音波の反射ベクトル図 (円孔、スリット、 $4\mu\text{sec}$ )

#### 4. 超音波エコーの特性

##### (1) 観測点

この研究で用いる超音波の入力点と超音波エコーの観測点 (欠陥の先端に対し  $45^\circ$  の角度をなす点①、③と欠陥の真上の点②) を図-10に示す。通常のパルスエコー探傷実験では、1つの探触子が超音波発信源と受信器を兼ねている。すなわち、垂直法では②で入射し、受信し、斜角法では①で入射し、受信する。しかし、観測点を増加させ、複数位置での受信波の強さ、到達時間等の性質を利用することにより、反射源に関するより詳しい情報を得ることができると考えた。

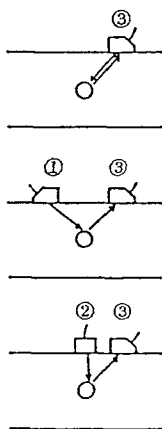


図-10 超音波の入力点と観測点

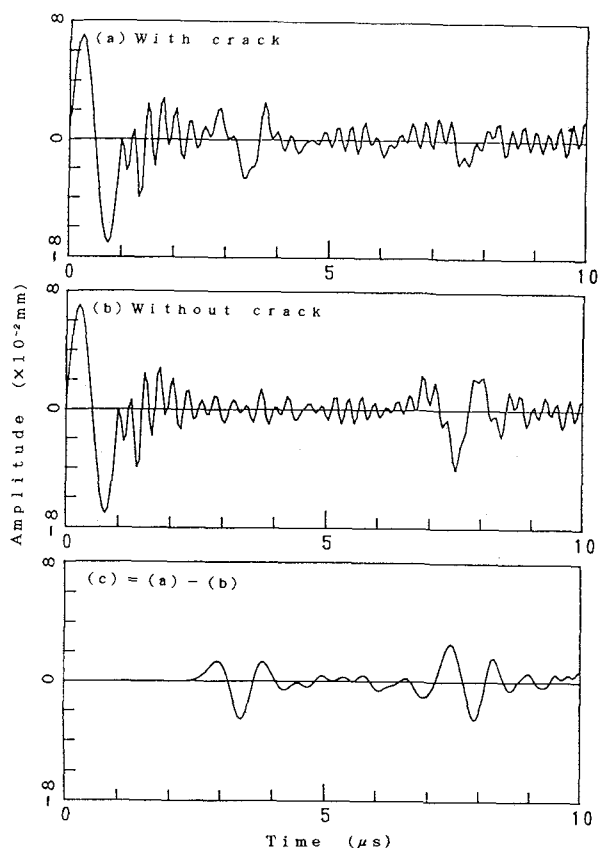


図-11 変位履歴応答における表面波の除去 (垂直法、入力点②、観測点②)

## (2) 垂直探傷

図-11 (a) は円孔に対して点②から垂直波を入力したときの、観測点②での変位履歴応答である。この応答には表面の振動が残っており、反射の特性だけを取り出して調べるのは若干困難である。したがって、式(1)に示したように、(b)の無欠陥物体に対する応答を(a)の欠陥付きの応答から差し引くことにより(c)を得た。(c)では表面から8mmの位置にある円孔からの反射波(エコー)および底面からの反射波がはっきりと識別できる。以下の検討ではここでの(c)に対応する表面の振動を取り除いた応答を用いることとする。

図-12は3種類の反射源(円孔、楕円孔、およびスリット)からの観測点②での反射波である。図-6で既に示したように、この位置では反射波は縦波のみである。このように1種類の反射波しか返ってこない点は、観測点として理想的である。円、楕円、スリットからの反射波の最初のピークが観測点②まで到達するのに要した到達時間から逆算したそれぞれの深さはそれぞれ、8.0mm、7.9mm、8.2mmである。円孔、楕円孔の深さの推定値は実際の深さ8mmとよくあっており、ここでの有限要素法を用いた応答解析が妥当なものであったことを裏付けている。超音波のピークの到達時刻は必ずしも厳密値と一致しないのは、超音波の振幅が反射源の各点から返ってきた波の重ね合わせとなるからである。スリットの深さの推定値は比較的大きな誤差を生じているが、これはスリットにおける反射波が微弱であり、ほとんどが放射波であるためであると思われる。先端の曲率半径が大きい反射源ほど強い反射波が存在しており、曲率半径ゼロのスリットでの反射波の振幅は極めて小さい。

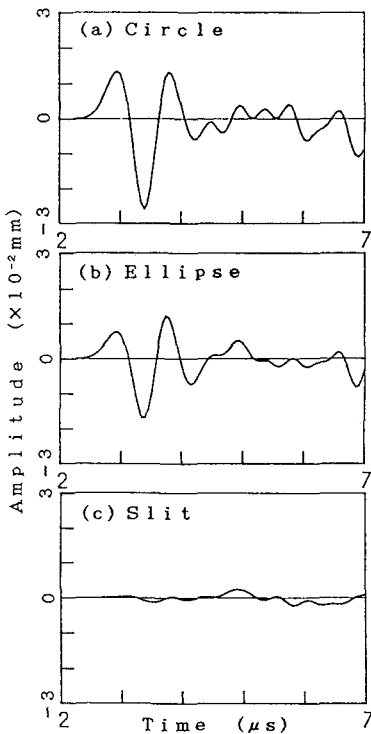


図-12 種々のクラックに対する変位履歴応答  
(垂直法、入力点②、観測点②)

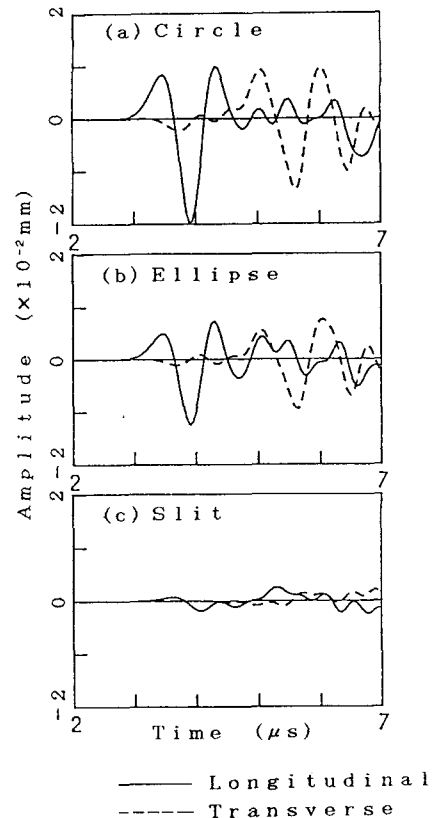


図-13 種々のクラックに対する変位履歴応答  
(垂直法、入力点①、観測点②)

図-13は図-12と同じケースに対する観測点①での反射波である。ここでは縦波と横波が混在するため、それを区別すべく進行方向成分（縦波）とそれに直交する成分（横波）に分けて示している。ここで、観測点①ときれつを結ぶ最短経路の方向が進行方向であると仮定した。パルスエコー法によりきれつの寸法を評価するにあたり、反射波のピークの時刻が最も重要な情報である。しかし、このように数種の波が混在する場合には、着目する波以外の波の影響によりピークの時刻が正確に求まらなくなってしまうので注意が必要である。円孔および楕円孔に対しては、最初の数波はLT波が卓越しており、正確な情報を与え得るものと思われる。しかし、その後の波はLT波とLL波が混在しており、正確な情報を引き出すのは難しそうである。円孔、楕円孔ともまずLL波が表面に到達し、その後LT波が到達する。両者の強さを比較すると、円孔ではLL波の方が大きい、楕円孔およびスリットとなると両者の差は殆ど見られない。図-14に円孔、楕円孔に対する実験結果を示す。エコーの強さは円孔：楕円孔=3：2であり、図-13の解析結果8：5とはほぼ一致している。

スリットからの反射・散乱波は観測点②の場合よりはかなり大きく、これはスリット端部から発生した円筒波である。微弱な波しか反射・散乱しないようなクラックに対しては、観測点①のほうが観測点②よりも有利であるといえよう。

反射波の最初のピーク時刻から逆算した欠陥の深さは円孔、楕円孔、スリットの順に8.4mm、8.4mm、8.8mmとなっており、観測点②の場合よりも大きな誤差が発生している。これはこの観測点に到達するまでに波が伝播する経路が観測点②の場合より複雑であるためであると思われる。とくに、スリットからの反射波から正確な情報を得ることは難しそうである。

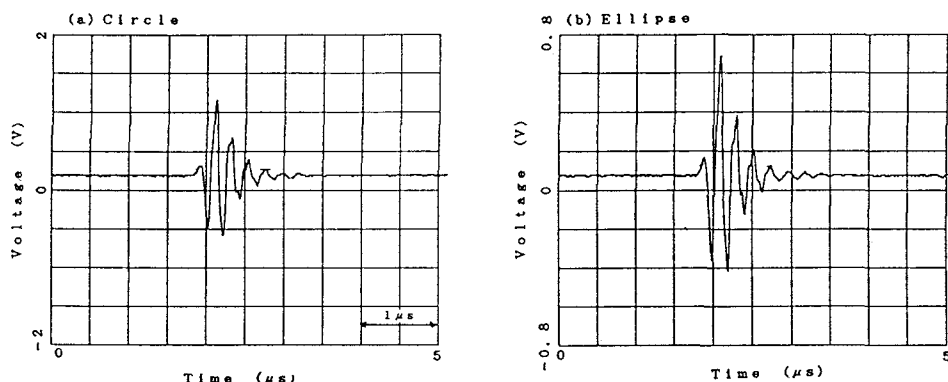


図-14 超音波エコー実験結果（円孔、楕円孔、入力点②、観測点①）

### （3）斜角法

斜角入射波に対する観測点①での反射エコーを図-15に示す。円孔および楕円孔では4-5.5  $\mu$  secの時刻に縦波が到達し、約8.5  $\mu$  sec以降にかなり強い横波（TT波）が到達している。TT波の最初のピーク時には混在する縦波の比率が比較的小さいが、2番目以降のピークではその比率が大きくなっている。超音波探傷において、第1番目のピークが最も正確な情報を与えるものと思われる。一方、スリットでは垂直法と同じく全体的にエコーレベルはかなり低く、縦波（TL波）の方が横波（TT波）よりかなり小さい傾向を示している。図-16に実験結果を示す。各反射波のエコーの強さは円孔：楕円孔：スリット=6：2：1であり、図-15の解析結果8：5：1とはほぼ一致している。

図-17、18に図-15と同じケースに対する、観測点②、③における反射波を示す。いずれの観測点においても、TL波とTT波がかなり混在しており、超音波探傷における誤差の原因になるものと思われる。各種の波の混在度から判定すると、観測点①、③、②の順に良好なデータを与えるものと判断される。

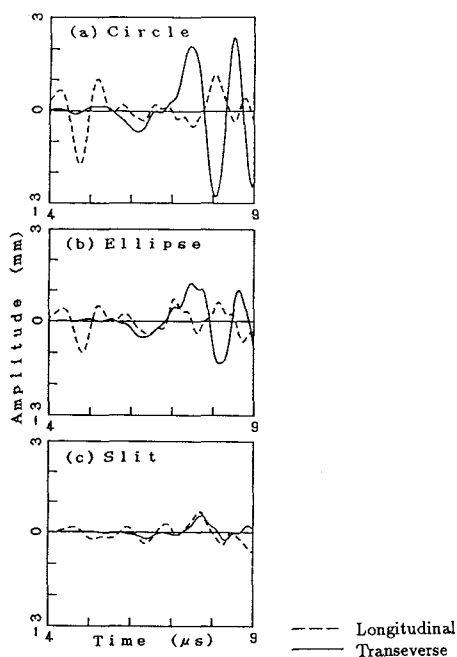


図-15 変位履歴応答シミュレーション  
(斜角法、入力点①、観測点①)

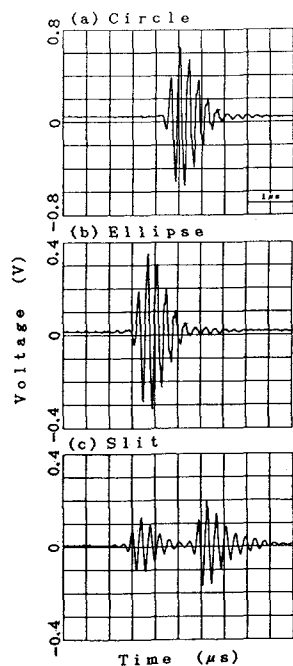


図-16 超音波エコー実験結果  
(斜角法、入力点①、観測点①)

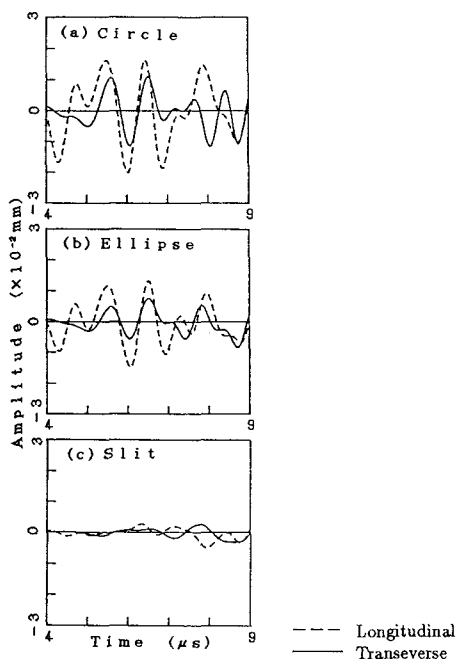


図-17 変位履歴応答シミュレーション  
(斜角法、入力点①、観測点②)

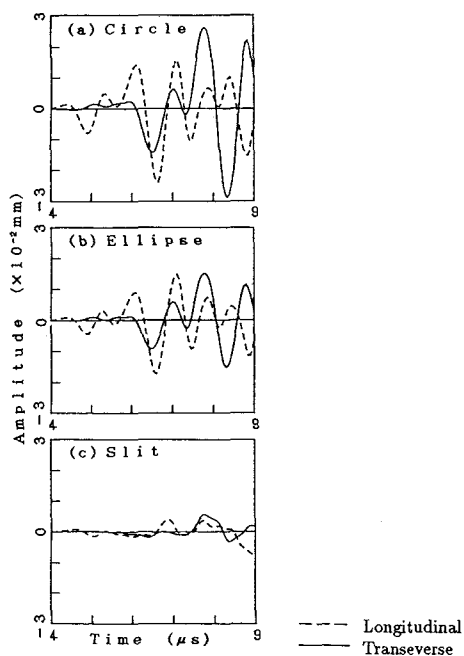


図-18 変位履歴応答シミュレーション  
(斜角法、入力点①、観測点③)

## 5. まとめ

本研究では、超音波エコーの特性および好ましい測定点の位置等を明らかにした。きれつ先端半径等のエコーの値から算定する手法を確立することが今後の課題である。なお、橋梁検査センター加藤昌彦氏、ホロソテックの梅田晶一氏には実験を行っていただくとともに、超音波探傷に関する有益なご助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) B.R. Thompson and D.O. Thompson, Ultrasonic in nondestructive evaluation, Proc. of IEEE, Vol. 73, No. 12, 1716-1755, 1985.
- 2) 田島, 福井, 三木, 深見: 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, No. 386, 1987-10.
- 3) 飯島, 深見, 三木, 田島: 補剛トラス部材溶接継手の疲労亀裂検出に関する実験, 土木学会論文集, No. 410, 1989-10.
- 4) G.C. Sih, Some elastodynamic problems of cracks, Int. J. Fracture Mech. 4, 51-68 1968.
- 5) J.F. Loeber and G.C. Sih, Diffraction of anti-plane shear waves by a finite crack, Acoust. Soc. Amer. 44, 90-98, 1968.
- 6) R.L. Ryan and S. Mal, Scattering of antiplane shear waves by a submerged crack, Int. J. of Solids and Structures Vol. 18, No. 12, 1145-1152, 1982.
- 7) A.K. Mal, Interaction of elastic waves with a Griffith Crack, Int. J. Engng Sci., Vol. 8, 763-776, 1970.
- 8) N. Nishimura, S. Hirose, H. Horii, and M. Kitahara, クラック問題に対する境界積分法の適用、構造工学論文集、Vol. 35A, 255-267, 1989.
- 9) L.J. Bond, M. Punjani, and N. Saffari, Ultrasonic wave propagation and scattering using explicit finite difference methods, In Mathematical modeling in Non-destructive testing, M. Blakemore and G.A. Georgiou eds, Clarendon Press, 1988.
- 10) Z. You and W. Lord, Finite element study of wave interaction with cracks.
- 11) J.H. Rose and J.A. Krumhansl, J. Appl. Phys., 50(4), 2951-2952, 1979.
- 12) D.H. Hsu, J.H. Rose, and D.O. Thompson, J. Appl. Phys., 55(1), 162-168, 1983.
- 13) Y. Niwa and S. Hirose, Struct. Eng./Earthquake Eng., 3, 267-272, 1982.
- 14) R.R. Kunar and L. Rodriguez-Ovejero, A model with non-reflecting boundaries for use in explicit soil-structure interaction analyses, Earthquake Eng. and Structural Dynamics, Vol. 8, 361-374, 1980.

(1990年10月12日受付)