

# アクセス不能構造物における弾性波伝播解析による 弾性波強度指標評価の試み

A Trial to Evaluate Elastic Waves Intensity Parameter on Inaccessible structure  
with Finite Element Elastic Waves Propagation Analysis

原子力安全システム研究所 石田 仁志 Hitoshi ISHIDA Member  
福井大学大学院工学研究科 飯井 俊行 Toshiyuki MESHII Member

This study details the results of a trial supporting the development of an ultrasonic testing system capable of detecting target flaw-reflected waves by means of simulation, through the use of elastic wave propagation analysis, the phenomenon of propagation of elastic waves that are input into a structure by an ultrasonic testing system, reflected by flaws, and then propagated throughout the structure.

Attaining this goal requires elastic wave propagation analysis that simulates elastic wave intensity by means of absolute values, and an adequate and reasonable selection of element division methods.

For this purpose, this paper considered an elastic wave intensity quantity denoting the elastic wave intensity of steel plates through the use of elastic wave propagation analysis, using an ultrasonic test on steel plates as an example. This quantity was used to predict the feasibility of detecting flaws through quantitative evaluation of flaw-reflected wave intensity. In this way, this study comprised a trial that supports system development, showing the effectiveness of this approach. During the trial, measured values of the ultrasonic transducer are reproduced quantitatively as elastic wave propagation intensity.

**Keyword** Inaccessible Structure, Elastic Waves, Finite Element Analysis, Ultrasonic testing system, Quantitative Evaluation

## 1. 緒言

本研究は、構造物におけるアクセス不能位置に対する超音波探傷試験システムの開発を、弾性波伝播解析により支援することを試み、迅速で合理的な超音波探傷試験技術の開発に資することを目的とする。

アクセス不能位置に対して超音波探傷試験を実施するためには、そのアクセスできない試験対象位置まで超音波を伝播させ、そこからの反射波をアクセス可能位置で受信する必要がある。そのためには、構造物伝播中の超音波減衰を経て、構造物の形状等により発生する他の反射波やノイズから識別できるだけの強度の反射波を与える定量的な超音波入力条件を選定することが必要である。

アクセス不能位置に対する超音波探傷試験技術の候補の一つとして、ガイド波が挙げられる。ガイド波は、構造物境界面に沿って超音波が伝播するものであり、ガイド波の理論として体系化されているが<sup>(4)~(7)</sup>、実機への適用研究<sup>(8)~(11)</sup>は、配管やレールなど複雑な断面形状の構造物と想定欠陥に応じて、装置の試作と模擬

試験体による実験検証という手法により進められているのが現状である。また、一般的な探触子の設計においては、扱う超音波モードを限定すれば、単純な音波としての音場計算<sup>(4)(6)(7)(12)~(17)</sup>により超音波伝播特性の評価が可能な場合もある。しかしアクセス不能位置を探傷とする場合に必要となる材料表面での反射を伴う伝播現象や欠陥反射波の評価は容易ではない。さらに、原子力発電所の容器、配管の溶接部を対象とするような供用期間中検査<sup>(1)~(3)</sup>は定型化されており、あらためて入力強度の評価が必要となるようなこともない。

このように採用する超音波の種類に応じて、その伝播理論に基づき、装置の試作と試験体対象構造物のモックアップを用いた実験検証がなされているようではあるが、入力強度を定量的に評価するために、明確な定量的な目標の下、評価選定が必ずしもなされてはいないのではないかと考えた。そこで、超音波探傷試験システム仕様の選定とモックアップを用いた実験検証を解析により実施し、超音波の入力強度などの仕様検討を定量的に行うことを考えた。

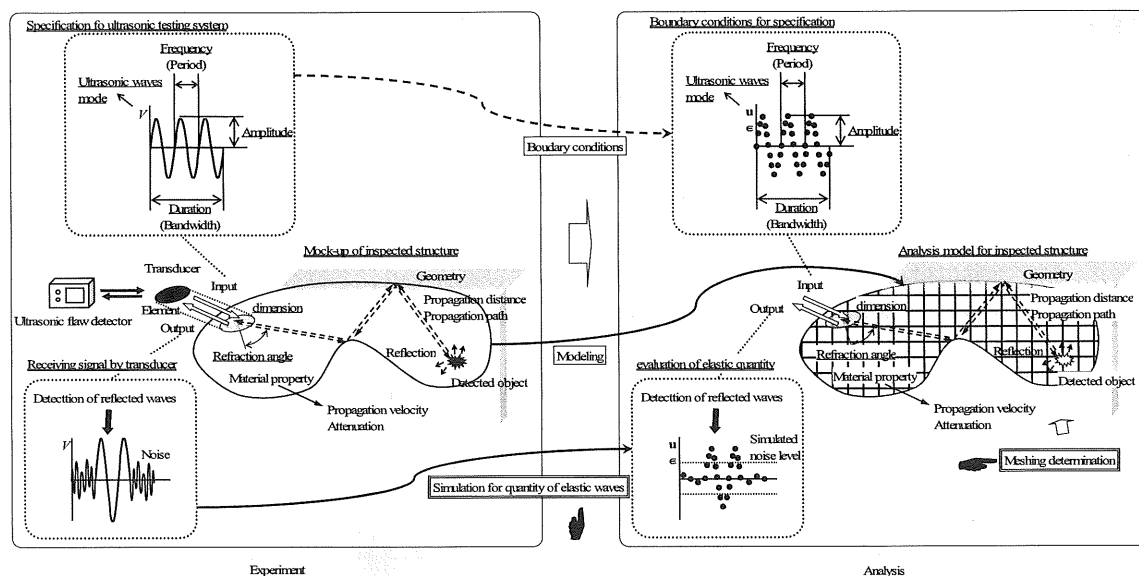


Fig.1 Ultrasonic testing system development supported by elastic waves analysis

Fig.1 に超音波探傷試験システム開発支援の概念を示す。超音波探傷システムにより構造物に入力され、欠陥において反射し、伝播する弾性波の伝播現象を、弾性波伝播解析により再現することによって、対象とする欠陥反射波の検出が可能な超音波探傷試験システムの仕様を選定することである。

そのためには、解析手法とした有限要素解析手法において適切に有効な解析結果を得ることと超音波探傷子計測値に対する弾性波伝播解析における弾性波強度指標を明らかにすることが必要であると考えた。そこで、合理的な要素分割選定法を検討し、これを用いた弾性波伝播解析により弾性波強度と欠陥反射波強度を定量評価し、欠陥検出可否を予測することによって、解析による支援を試みるものである。

本報では、まずは平鋼板上の超音波探傷子から伝播する弾性波を例に試みた結果を示す、弾性波伝播解析により弾性波伝播状況を可視化し、超音波探傷子計測値に対する弾性波伝播解析における弾性波強度指標を検討する。

最後に、欠陥反射波の発生と伝播を弾性波伝播状況の可視化により確認し、受信位置における欠陥反射波強度によりその検出可否を推定し、実験により検証する。

なお、有限要素解析手法における要素分割選定法の詳細は、既報<sup>(18)</sup>に委ねた。

## 2. 弾性波強度指標の検討

### 2.1 解析モデル

平鋼板における弾性波伝播の解析を、Fig.2によりモデル化し、寸法  $L=1.0\text{m}$ ,  $W=0.5\text{m}$ ,  $H=40\text{mm}$  の静止状態にある鋼板において、その表面上の  $L_1=40\text{mm}$ ,  $W_1=40$ ,  $120\text{mm}$  を探傷子の配置領域に相当する入力範囲とし、時刻  $t>0$  に変位  $\mathbf{u}(t)$  を与えることにより加振されるとした。今回の問題では、この  $\mathbf{u}(t)$  は、周波数  $f=0.3\text{MHz}$ 、振幅  $A_0=1.0 \times 10^{-11}\text{m}$ 、継続時間  $\tau=2T(=2/f)\text{s}$  の正弦波状のSH波(Shear horizontal waves: SH waves)を対象とした。また、入力範囲において加振振幅は一定とした。板の材料定数は、ヤング率  $E=206\text{GPa}$ 、ポアソン比  $\nu=0.3$ 、密度  $\rho=7700\text{kg/m}^3$  とした。解析モデルは、8節点六面体要素を用い、分割数はIM法<sup>(18)</sup>により選定し、総自由度は656760である。時間増分は、正弦波の時刻における離散化において、正弦波の振幅値を5%以内の誤差で再現可能な分割数である  $T/10$  とした。

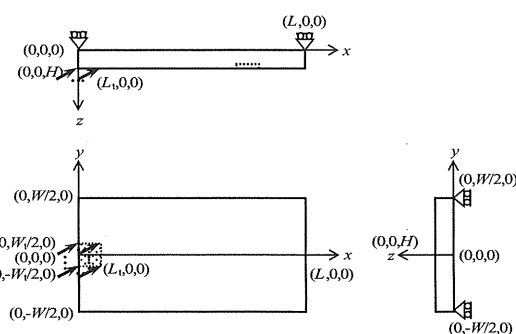


Fig.2 Analyzed model

## 2.2 試験体

平鋼板における弾性波伝播の実験に用いた試験体を Fig.3 に示す。試験体は、厚さ 38mm、長さ 2.0m、幅 1.0m の炭素鋼板である。試験体には、欠陥反射波の評価に使用する欠陥であるくぼみが加工され、これの影響のない範囲で、Fig.2 の解析モデルに相当する範囲で測定実験を行った。測定実験には、振動子寸法が奥行 40mm × 幅 40mm の SH 波探触子を使用した。弾性波伝播解析と同じく、周波数は、0.3MHz、公称屈折角は 90 度である。

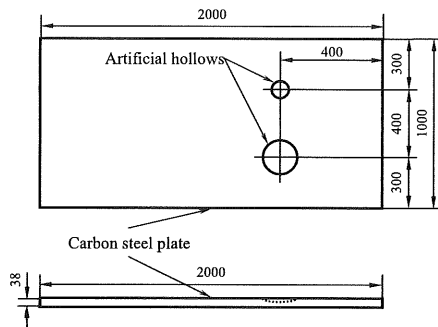
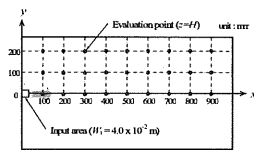


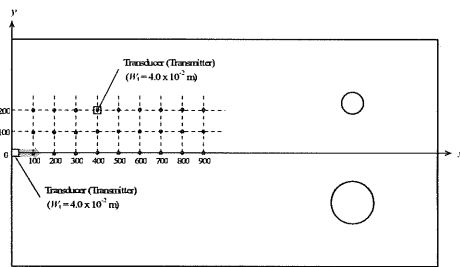
Fig.3 A mock-up test assembly for the experiments

## 2.3 弾性波強度の評価

Fig.4 に示す解析モデルおよび試験体の  $z=H$  の  $xy$  表面上の  $y=0, 100, 200, x=0-900\text{mm}$  の 100mm 毎の点における、 $W_t=40\text{mm}$  の場合の弾性波伝播解析による弾性波強度と超音波探触子の計測値を比較して検討する。



(1) Analysis model

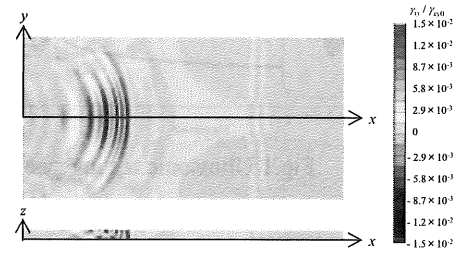


(2) Mock-up plate for experiment

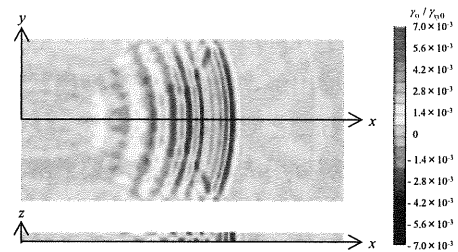
Fig.4 Evaluation points of elastic waves intensity

## 2.4 弾性波伝播状況の可視化

弾性波伝播領域における弾性波の伝播状況を可視化した。SH 波の伝播は波動方程式における回転により表される。ここでは、後述のように回転  $\omega_z$  と同等の値であるせん断ひずみ  $\gamma_{xy}$  により、弾性波強度の分布を表示した。Fig.5 に、解析モデル表面  $z=H$  (加振入力位置のある面) および断面  $y=0$  におけるせん断ひずみ  $\gamma_{xy}$  の分布の、時刻  $t/T=30, 60$  の例を示す。せん断ひずみの値について、加振入力節点の入力時刻における最大せん断ひずみ  $\gamma_{xy0}$  により規格化した値を区分し表している。



(1)  $t/T=30$



(2)  $t/T=60$

Fig.5 Distribution of shear strain  $\gamma_{xy}$  ( $z=H, y=0$ )

## 2.5 弾性波強度の解析と実験の比較

弾性波強度として、変位(displacement) $u, v, w$ , 体積ひずみ(volumetric strain) $\epsilon_v$ , せん断ひずみ(shear strain) $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ , 回転(rotation) $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ について評価した。それぞれ、Fig.6, Fig.7, Fig.8 および Fig.9 に、加振入力位置からの距離  $r$  による変化を、加振入力位置におけるそれぞれの値で規格化して示す。なお、解析値が 0 である  $y=0$  における、 $|u|, |w|, \epsilon_v, |\gamma_{zx}|, |\omega_y|$  は、表示していない。それぞれの位置における観測値において、Fig.5 において観察された最も早い時刻に到達する先端の伝播波に相当する時刻の振幅により算出している。それぞれの図には、超音波探触子入力位置の計測値により規格化した超音波探触子計測値も示している。

本研究で例とした平鋼板において伝播する SH 波に対しては、超音波探触子による計測値の分布状況は、 $v$ ,

$\gamma_{xy}$ ,  $\gamma_{yz}$ ,  $\omega_x$ ,  $\omega_z$  が良く対応している。これらの指標は、加振入力変位  $v$  の振動方向である  $y$  方向に関するものである。加振入力の振動方向が異なれば、対応する変位、せん断ひずみ、回転の成分は変化するものと考えられる。

これらの指標の中で、差はあるが定量的にも一致すると言えるものは、 $v$  であった。Fig.6 において、解析

値は計測値に対して、0.3–2.3 倍の差である。

さらに、弾性波の強度分布を表す指標以外の指標においては、加振入力変位を伝播させようとした方向以外の方向において、弾性波の広がりや反射によってその強度が生じている。このことは、加振入力の振動方向と伝播方向によって、異なる弾性波強度指標による評価の可能性または必要性を示唆するものである。

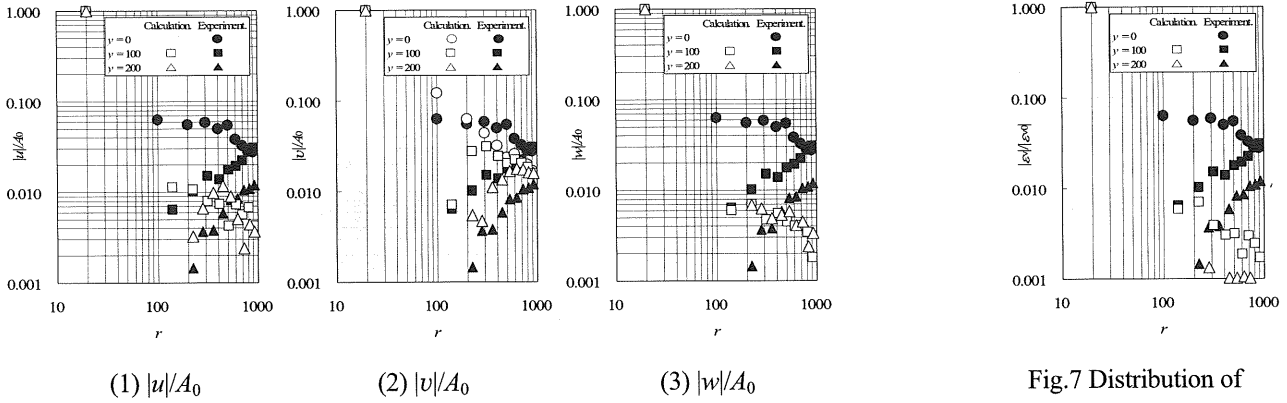


Fig.6 Distribution of displacement

Fig.7 Distribution of volumetric strain  $\varepsilon_v$

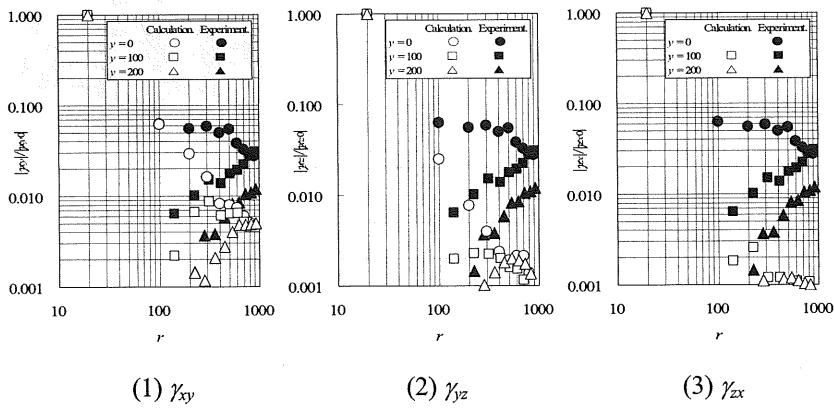


Fig.8 Distribution of shear strain

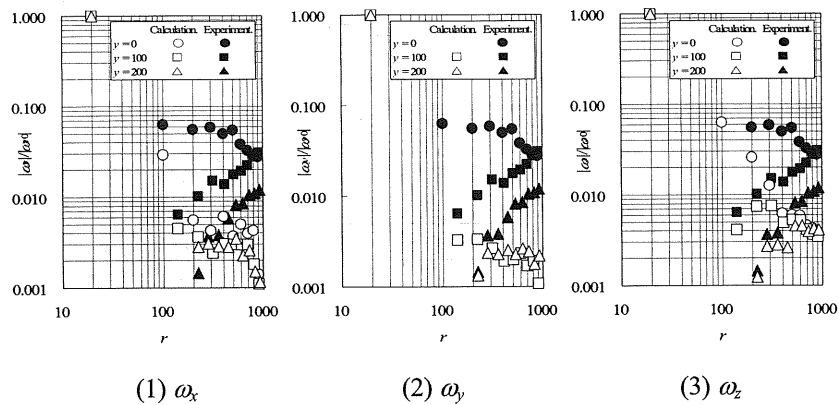


Fig.9 Distribution of rotation

### 3. 欠陥反射波強度の評価

#### 3.1 解析モデル

Fig2 に示した解析モデルに、Fig.10 に示す円形のくぼみを欠陥として配置した。  $z=H$  の表面上、  $x$  方向位置  $L_H=0.75\text{m}$  の位置を中心とする直径  $D_H=100\text{mm}$ 、 深さ  $d_H=8\text{mm}$  の円柱状のくぼみである。 表面上の  $L_t=40\text{mm}$ 、  $W_t=40, 120\text{mm}$  を探触子の配置領域に相当する入力範囲 (以下、それぞれ入力範囲 S および L とする) とし、その他の解析条件は 2.1 に示したものと同一である。

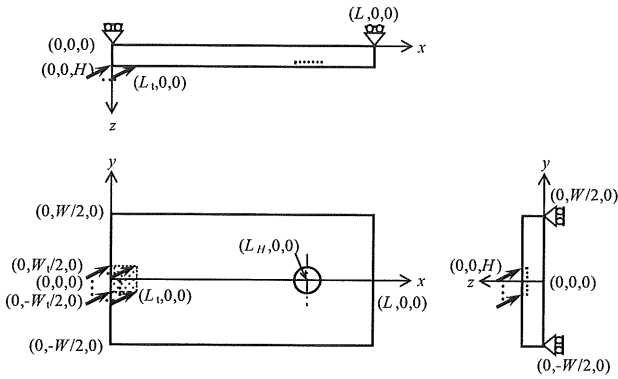


Fig.10 Analyzed model

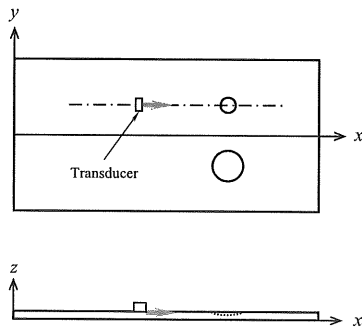


Fig.11 Measurement of ultrasonic reflection signal distribution

#### 3.2 試験体

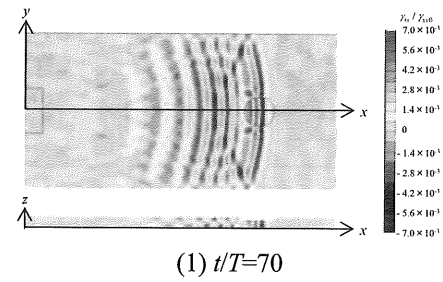
実験には、Fig.3 に示した試験体を用いた。 欠陥反射波の評価のための欠陥は、直径  $100\text{mm}$ 、最大深さ  $9.5\text{mm}$  の凹面状の人工のくぼみである。 くぼみの位置は、試験体長手方向の一方の端面からの距離約  $400\text{mm}$  の片側表面上である。

Fig.11 に欠陥反射波測定の実験方法を示す。 試験体の小さいくぼみから異なる距離の位置に超音波探触子を配置して、欠陥反射波の測定を行った。 超音波探触

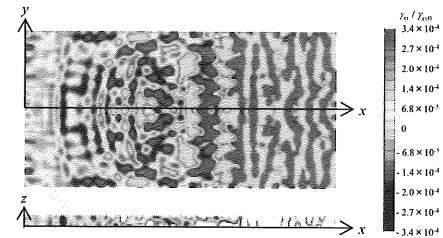
子は、2.2 で述べた 1 振動子探触子と、その振動子を 3 個並列に使用して、寸法が奥行  $40\text{mm} \times$  幅  $120\text{mm}$  相当の探触子を用いた。 この 2 種類の探触子は、解析における入力範囲 S および L に相当する。

#### 3.3 欠陥反射波伝播の可視化

Fig.12 に入力範囲 S、Fig.13 に入力範囲 L についての、解析モデル表面  $z=H$  および断面  $y=0$  におけるせん断ひずみ  $\gamma_{xy}/\gamma_{xy0}$  の分布による、時刻  $t/T=70$  および  $120$  における欠陥反射波を示す。

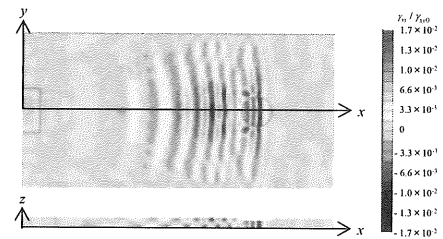


(1)  $t/T=70$

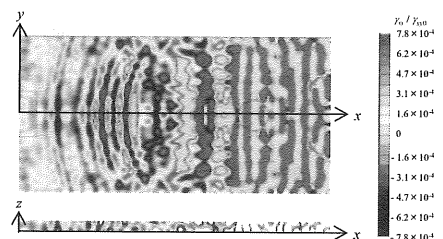


(2)  $t/T=120$

Fig.12 Distribution of shear strain  $\gamma_{xy}$  ( $z=0, y=0$ ) (Input area S;  $W_t=4 \times 10^{-2}\text{m}$ )



(1)  $t/T=70$



(2)  $t/T=120$

Fig.13 Distribution of shear strain  $\gamma_{xy}$  ( $z=0, y=0$ ) (Input area L;  $W_t=1.2 \times 10^{-1}\text{m}$ )

### 3.4 欠陥反射波強度の評価

Fig.14 に、小さいくぼみからの距離が異なる位置における反射波強度の計測値と 0.75m の位置における反射波強度の解析値の比較を示す。解析値は、3.5 において強度指標として評価選定した変位  $v$  である。計測値  $P$  は超音波探触子入力位置における計測値  $P_0$  により、解析値  $v$  は入力変位の振幅  $A_0$  により、規格化したものである。

解析値は探触子計測値に対して、探触子（入力範囲）L の場合には 1.9 倍、探触子（入力範囲）S の場合には 1.4 倍の差があるが、加振入力位置における値を基準に欠陥反射波強度を評価することが可能であると考えられる。

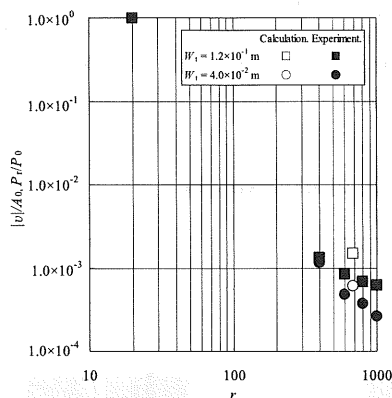


Fig.14 Comparison between calculation and experiment (reflected waves signals from small hollow)

## 4. 結言

平鋼板における SH 波の伝播を例に、超音波探触子計測値を再現するような弾性波伝播解析における弾性波強度の指標を検討し、弾性波伝播解析において、この指標によって実験計測により得られた欠陥反射波強度の再現を確認した。

このような弾性波強度指標による評価は、対象とする構造物と入力加振方向に応じて行うことが可能である。

一方、弾性波の伝播に伴い、加振入力の変動方向以外の方向に係る変位、せん断ひずみ成分および回転成分の発生が確認された。構造物の形状、超音波探触子の種類と配置位置、欠陥の形状等によって、計測すべき弾性波強度指標が変化する可能性が考えられる。このことは、弾性波伝播解析により、対象問題におけ

る弾性波伝播強度指標を明らかにすることによって、超音波の送信と受信における最適な振動方向を選定することに対しても有効であると考えられる。このようなことは、実験だけでは解決が困難であり、弾性波伝播解析によってこそ可能なものであり、解析による支援が有効、不可欠であると言える。

## 参考文献

- [1] (社) 日本機械学会, “発電用原子力設備規格 維持規格,” 2004. [2] (社) 日本電気協会, “軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査 電気技術規程 JEAC4205-2000,” 2000. [3] (社) 日本電気協会, “軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程 電気技術規程 JEAC4207-2008,” 2008.
- [4] J. L. Rose, P. B. Nagy, “Ultrasonic Waves in Solid Media,” 2000, ASA. [5] P. J. Shull, “Nondestructive Evaluation: Theory, Techniques, and Applications,” 2002, CRC Press. [6] J. D. Achenbach, “Wave propagation in elastic solids,” 1993, North-Holland. [7] “超音波技術便覧,” 1978, 日刊工業新聞社. [8] J. L. Rose, “A Baseline and Vision of Ultrasonic Guided Wave Inspection Potential, Journal of Pressure Vessel Technology,” Vol.124, No.3, 2002, pp.273-282. [9] J. L. Rose, D. Jiao, J. Spanner Jr, “Ultrasonic guided wave NDE for piping,” Materials Evaluation, Vol.54, No.11, 1996, pp.1310-1313. [10] 林高弘, 陶山光宣, 阿部司, “任意断面形状を有する棒状材料中のガイド波モードの解析,” 日本機械学会論文集 A 編, Vol.72, No.724, 2006, pp.1935-1940. [11] J. Li, J. L. Rose, “Guided Wave Testing of Containment Structures,” Materials Evaluation, Vol.59, No.6, 2001, pp.783-787. [12] J. クラウトクレマー, H. クラウトクレマー, “超音波試験技術 理論と実際,” 1975, 日本能率協会. [13] 高木堅志郎, “超音波便覧,” 1999, 丸善. [14] (社) 日本非破壊検査協会, “非破壊検査技術シリーズ 超音波探傷試験 II,” 2000, (社) 日本非破壊検査協会. [15] (社) 日本非破壊検査協会, “非破壊検査技術シリーズ 超音波探傷試験 III,” 2001, (社) 日本非破壊検査協会. [16] B. A. Auld, “Acoustic fields and waves in solids,” 1973, A Wiley-Interscience Publication. [17] K. F. Graff, “Wave Motion in Elastic Solids,” 1975, Dover Publications, New York. [18] 石田 仁志, 飯井 俊行, “弾性波伝播 3 次元有限要素解析における要素分割選定方法の一提案,” 保全学, vol.8, No.1, 2009, pp.62-67