

部材裏面クラックの一検出法

A METHOD OF DETECTION FOR SURFACE-BREAKING CRACKS

北原道弘* 野竹正義** 小木哲朗** J. D. ACHENBACH***

By Michihiro KITAHARA, Masayoshi NOTAKE, Tetsuro OGI and J. D. ACHENBACH

A neural network is used to determine the depth of surface breaking cracks in plates. The cracks are insonified from the opposite plate face using 45 degree transverse waves. The back scattered ultrasonic signal is employed for neural network training and recognition. A three-layered perceptron type network is utilized. The learning mechanism is the back-propagation algorithm for error correction. The network is trained by using results from a theoretical and numerical analysis which is based on an application of the boundary element method. The boundary element calculations are verified using experimental results. wave scattering data in both the time and frequency domains are used in the network for crack characterization. The performance of the network is discussed for an input of experimental data.

1. はじめに

数ある非破壊検査あるいは評価手法のうちで、最近、定量化に向けた動きが主に超音波（固体内では弾性波）から始まった^{1)~4)}ことには、いくつかの理由があるように思われる。波動の計測装置の基本は、ある波形を出力し、欠陥により散乱した波動を記憶出来ればよいという意味において、装置自身が比較的簡単で、最近の信号処理技術の飛躍的發展に伴い、この装置が安価になってきたこと、また、従来のいわゆる超音波探傷器に必ずしもこだわる必要はなく、波形を記録するという立場からは計測位置、チャンネル数、周波数など多くのバラエティーに富んだ波形計測が、計測者自身の立案により比較的簡単に出来るという長所がある。工学的により重要なことは、超音波が力学量と直接関係する量、特に破壊力学パラメーター、と密接に関係していることであろう。クラックの幾何学的諸量を定量的に決めてから破壊力学パラメーターを評価する方法と共に、破壊力学パラメーターを超音波により直接評価しようとする試みも研究段階ではあるが始まっている。^{5)~8)} 何れの方法を取るにせよ、構造物あるいは構造物材の寿命評価と深く係わっている。⁸⁾ ⁹⁾もう1つの理由として、欠陥の数学的モデル化¹⁰⁾の重要性と並んで弾性波動解析手法の最近の大きな進展が挙げられる。周波数域で表現すれば、いくつかの手法を組み合わせれば全周波数域をほぼカバー出来るような波動解析法が整う状況^{8), 11)~16)}が生まれてきたと言える。これらの波動理論・数値解析と実験との

* 工博 東海大学助教授 海洋学部海洋土木工学科 (〒424清水市折戸3-20-1)

** 工修 三菱総合研究所 数理工学部 数理工学第2室 (〒100東京都千代田区大手町2-3-6)

*** Ph.D. ノースウェスタン大学教授 Center for Quality Engineering and Failure Prevention
(Evanston, IL 60208, USA)

比較も行われ、理論と実験の両面において、欠陥評価という観点から、ある物理量の観測に対し何が信頼し得る量であり、また何が今のところ信頼性に乏しい量であるかについても明らかになりつつある。^{17)~21)}

一方、最近の人工知能(AI)に関する研究及びその応用には目を見張るものがあり、非破壊評価分野における応用では、エキスパートシステム²²⁾とニューラルネットワーク^{23),24)}がその代表であろう。

本論文では、部材の裏面に存在する表面クラックの一検出法として、実験値との照合を経た弾性波動論に基づく数値解析のデータを知識ベースとするニューラルネットワーク法を提案し、その基本的性質について考えてみる。ここで設定した問題は、裏面に垂直な表面クラックの深さを決定するという単純なものであるが、弾性波動論に立脚した知識ベースという意味では、誰が、何処で、いつ、作っても同じ結果を与える知識ベース、他の欠陥形状、境界条件などについての解析の積み重ねによる同精度発展型知識ベースという性格を持つ。

2. 問題設定と処理方法

厚さ h の部材の一方の側から、深さ a の表面クラックが入った場合を想定する。部材は均質、等方、線形な弾性体とし、クラックは表面に対し垂直であるとする (Fig.1 参照)。この部材を水槽に入れ、クラックが存在する面と反対側の水中から超音波を発振することにより、裏面クラックの深さ a を決めることを考える。このとき、部材のクラック側の側面には、クラック面を含め、空気層を作る。水中圧電型トランスデューサーにより超音波 (縦波 (L)) を発振し、トランスデューサーの角度を部材表面に対する法線から 18.9° に設定する (Fig.1)。この角度 18.9° は、水中を伝播する縦波が部材内でクラック面に対し 45° で入射する横波 (TV) にモード変換するように選ばれている。この入射横波がクラックとの相互作用を経て後方に散乱した波動を、発振と同一のトランスデューサーで受信し、受信された後方散乱波形からクラックの深さを推定することを試みる。

実験と解析とのマッピングを取るために、まず、トランスデューサーから発振された超音波の伝播経路について考える。実験において、トランスデューサーで受信されたクラックからの後方散乱場は、周波数域で、次のように表される。

$$Y_{exp}(\omega) = T_o H_w H_b H_{ws} H_{crack}^{exp} H_{sw} H_w T_r \tag{1}$$

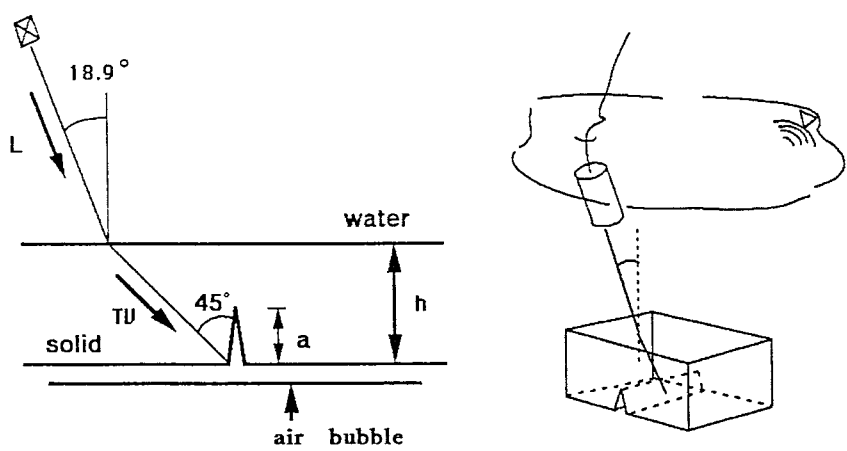


Fig.1 Surface-breaking crack in a plate

ここで、波動伝播過程の線形性を仮定している。上式中の諸量は次のような周波数域の応答を表す関数である。

- $T_o(\omega)$: トランスデューサーからの出力
- $H_w(\omega)$: 水中の超音波経路
- $H_b(\omega)$: 水中における超音波ビームの広がり
- $H_{ws}(\omega)$: 水→固体界面の影響
- $H_{crack}^{exp}(\omega)$: 固体内における弾性波のクラックとの相互作用
- $H_{sw}(\omega)$: 固体→水界面の影響
- $T_r(\omega)$: トランスデューサーでの受信信号

いま、固体内における弾性波のクラックとの相互作用経路を除いて、実験に完全に対応する解析が出来たとする。このとき、解析的なトランスデューサーでの受信後方散乱場は次のように書ける。

$$Y_{theory}(\omega) = T_o H_w H_b H_{ws} H_{crack}^{BEM} H_{sw} H_w T_r \quad (2)$$

ここに、 $H_{crack}^{BEM}(\omega)$ は固体内での弾性波のクラックとの相互作用を表し、後に、この項は積分方程式法により評価することになる。

後方散乱場 (1), (2) のデコンボリューションとコンボリューションについて考えるために、いま、部材コーナー部での反射波形を参照信号として選ぶ (Fig. 2 参照)。このとき、トランスデューサーの位置、角度などは Fig. 1 と全く同一の状態に配置されており、固体内のクラックが 45° のコーナーに置き換えられた点だけが異なるものとする。このコーナーでの反射参照信号は次のように書ける。

$$X_{ref}(\omega) = T_o H_w H_b H_{ws} H_{cor} H_{sw} H_w H_r \quad (3)$$

ここで、 $H_{cor}(\omega)$ は固体内における弾性波のコーナー部での反射を表す。このとき、コーナーは固体-気体境界面とする。

いま、コーナー部での反射を表す参照信号を用いて、実験と解析による後方散乱場のデコンボリューションを行うと次のようになる。

$$\frac{Y_{exp}(\omega)}{X_{ref}(\omega)} = \frac{H_{crack}^{exp}(\omega)}{H_{cor}(\omega)} \quad (4a)$$

$$\frac{Y_{theory}(\omega)}{X_{ref}(\omega)} = \frac{H_{crack}^{BEM}(\omega)}{H_{cor}(\omega)} \quad (4b)$$

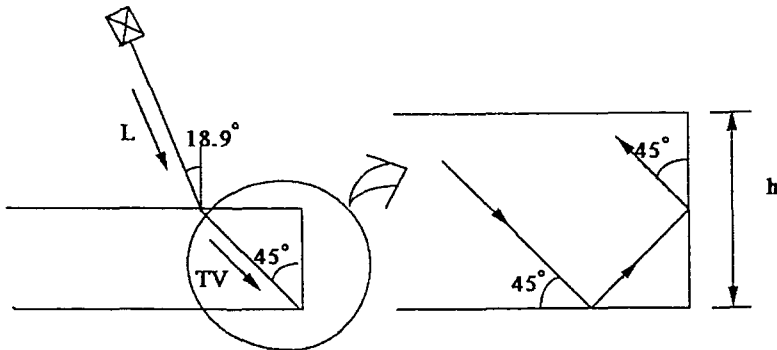


Fig.2 Corner reflection of the reference signal

上式(4)のようにデコンボリューションされた量は、固体内における波動の伝播にのみ関係している。上式(4)の右辺の分母 $H_{cor}(\omega)$ は固体内でのコーナー部の反射を表し、具体的に書き下すと次のようになる (Fig. 2 参照)。

$$H_{cor}(\omega) = X_{solid}^{in} R_{cor} X_{solid}^{back} = R_{cor} e^{2ik_T \sqrt{2}h} \quad (5)$$

ここに、 X_{solid}^{in} と X_{solid}^{back} は弾性波のコーナーへの入射経路と反射経路であり、 R_{cor} はコーナーでの反射率である。また、 k_T は横波の波数、 h は部材厚である。 R_{cor} は、 45° の入射角を持つ固体-気体境界面での横波の反射率を $R_{sa}^T(45^\circ)$ としたとき、次のように書ける (Fig. 2 参照)。

$$R_{cor} = R_{sa}^T(45^\circ) R_{sa}^T(45^\circ) \quad (6)$$

横波の反射率 $R_{sa}^T(45^\circ)$ は半無限境界面での値を用いてよいから、値を書き下すことが可能であり、よって R_{cor} は解析的に評価できる。

以後、実験値と解析値を比較することを考えて、式(4b)を次のように変形する。

$$Y_{theory}(\omega) = \frac{X_{ref}(\omega)}{H_{cor}(\omega)} H_{crack}^{BEM}(\omega) \quad (7)$$

これは解析値をコンボリューション型に修正したもので、式(3)からわかるように係数 X_{ref}/H_{cor} は主に超音波の水中経路を表しており、参照信号の水中経路と固体内の解析値とのコンボリューションとなっている。実験値 $Y_{exp}(\omega)$ との対比を考えると、以後、式(7)の意味における後方散乱場を、便宜上、単に解析値と呼ぶことにする。このとき、解析値 $Y_{theory}(\omega)$ は直接、実験値 $Y_{exp}(\omega)$ と比較できる。

3. 積分方程式

式(7)において、固体内における弾性波のクラックとの相互作用を表す項 H_{crack}^{BEM} を決めるために、ここでは積分方程式法を用いる。この項は固体内での波動現象を示配していることから、Fig. 3 に示すような半無限弾性固体の表面クラックに対する解析法について考える。

定常状態における2次元弾性体の運動方程式は次のように書ける。

$$\sigma_{\alpha\beta,\beta} + \rho\omega^2 u_\alpha = 0, \quad \alpha, \beta = 1, 2 \quad (8)$$

また、応力と変位の関係式は次のようである。

$$\sigma_{\alpha\beta} = \lambda\delta_{\alpha\beta} u_{\gamma,\gamma} + \mu(u_{\alpha,\beta} + u_{\beta,\alpha}) \quad (9)$$

半無限境界 Γ_S とクラックの上下面 $\Gamma_c^\pm$ では応力零とする。

$$t_\alpha = \sigma_{\alpha\beta} n_\beta = 0, \quad \mathbf{x} \in \Gamma \quad (\Gamma = \Gamma_S + \Gamma_c^+ + \Gamma_c^-) \quad (10)$$

いま、全変位場 u_α を入射波 u_α^I と散乱波 u_α^{sc} の和として表すとき、

$$u_\alpha = u_\alpha^I + u_\alpha^{sc}, \quad \sigma_{\alpha\beta} = \sigma_{\alpha\beta}^I + \sigma_{\alpha\beta}^{sc} \quad (11)$$

散乱波は無限遠で放射条件を、全変位場はクラック端の条件を満足するものとする。

Fig. 3 に示すクラック座標 $(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ において、散乱場の積分表現は次のように書ける。

$$u_\gamma^{sc}(\mathbf{x}_p) = \int_{\Gamma_S} \sigma_{\alpha\beta\gamma}^G(\mathbf{x}; \mathbf{x}_p) u_\alpha^{sc} n_\beta ds(\mathbf{x}) + \int_0^a \sigma_{\alpha 2\gamma}^G(\mathbf{x}; \mathbf{x}_p) \Delta u_\alpha(\mathbf{x}) dx_1, \quad \mathbf{x}_p \notin \Gamma \quad (12)$$

ここに、 $\Delta u_\alpha = u_\alpha^+ - u_\alpha^-$ はクラックの開口変位、 a はクラックの長さである。また、 $\sigma_{\alpha\beta\gamma}^G$ はクラックの

ない無限体中の応力に関するグリーン関数である。いま、 $u_{\alpha\gamma}^G$ を無限体中のグリーン関数（基本解）：

$$u_{\alpha\gamma}^G(\mathbf{x}; \mathbf{x}_p) = \frac{i}{4\mu} [H_0^{(1)}(k_T r) \delta_{\alpha\gamma} + \frac{1}{k_T^2} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \frac{\partial}{\partial x_\gamma} \{H_0^{(1)}(k_T r) - H_0^{(1)}(k_L r)\}] \quad (13)$$

とすると、 $\sigma_{\alpha\beta\gamma}^G$ は次のように表現できる。

$$\sigma_{\alpha\beta\gamma}^G(\mathbf{x}; \mathbf{x}_p) = -[\lambda \delta_{\alpha\beta} u_{\gamma\delta,\delta}^G + \mu(u_{\gamma\alpha,\beta}^G + u_{\gamma\beta,\alpha}^G)] \quad (14)$$

ここに、カンマは点 $\mathbf{x}$ に関する積分を意味する。

式(12)と表面力の表現

$$t_\alpha^{sc} = \sigma_{\alpha\beta}^{sc} n_\beta |_{\mathbf{x}_p} \quad (15)$$

より、次のような表面力の積分表現を得る。

$$t_\alpha^{sc}(\mathbf{x}_p) = -n_\beta(\mathbf{x}_p) \left\{ \int_{\Gamma_S} K_{\alpha\beta\delta\epsilon}^G(\mathbf{x}; \mathbf{x}_p) u_\delta^{sc}(\mathbf{x}) n_\epsilon ds + \int_0^a K_{\alpha\beta\delta 2}^G(\mathbf{x}; \mathbf{x}_p) \Delta u_\delta(\mathbf{x}) dx_1 \right\}, \quad \mathbf{x}_p \notin \Gamma \quad (16)$$

ここに $K_{\alpha\beta\delta\epsilon}^G$ は次のようである。

$$K_{\alpha\beta\delta\epsilon}^G = \lambda \delta_{\alpha\beta} \sigma_{\delta\epsilon\gamma,\gamma}^G + \mu(\sigma_{\delta\epsilon\alpha,\beta}^G + \sigma_{\delta\epsilon\beta,\alpha}^G) \quad (17)$$

式(16)で極限 $\mathbf{x}_p \rightarrow \mathbf{x} \in \Gamma$ を取り、境界条件(10)を用いれば、解くべき積分方程式を得るが、このとき積分核は超特異核となる。そこで、ここでは極限を取る前に次の操作をする。式(16)の表現において、半無限境界 Γ_S を N_1 個に、クラック表面 Γ_C を N_2 個に分割する。このとき、 $\mathbf{x}_p \notin \Gamma$ に対し、式(16)の右辺第1項は、ある一つの要素上で次のように変形できる（第2項についても同様）

$$\begin{aligned} \int_{S_j}^{S_{j+1}} K_{\alpha\beta\delta\epsilon}^G(\mathbf{x}; \mathbf{x}_p) u_\delta^{sc}(\mathbf{x}) n_\epsilon ds &= H_{\alpha\beta\delta}^1(\mathbf{x}; \mathbf{x}_p) u_\delta^{sc}(\mathbf{x}) \Big|_{S_j}^{S_{j+1}} \\ &- \int_{S_j}^{S_{j+1}} H_{\alpha\beta\delta}^1(\mathbf{x}; \mathbf{x}_p) \varepsilon_{\lambda\mu} u_{\delta,\lambda}^{sc}(\mathbf{x}) n_\mu ds - \rho\omega^2 \int_{S_j}^{S_{j+1}} H_{\alpha\beta\delta}^2(\mathbf{x}; \mathbf{x}_p) u_\delta^{sc}(\mathbf{x}) ds \end{aligned} \quad (18)$$

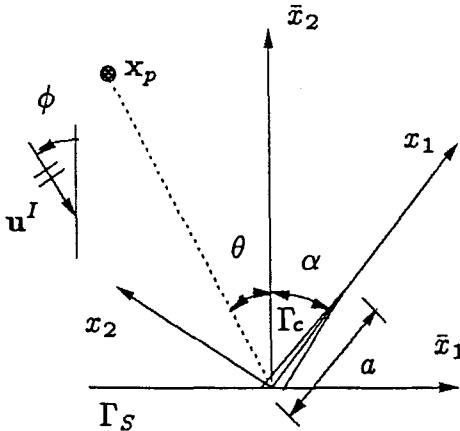


Fig.3 General crack configuration for BIE formulation

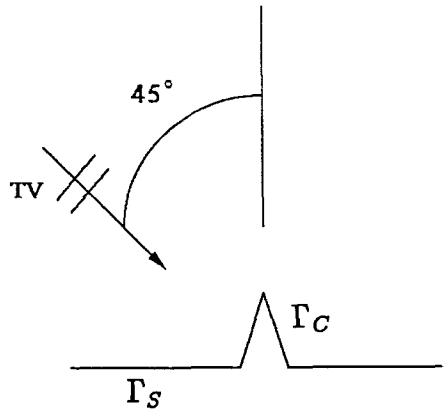


Fig.4 Surface-breaking crack model in a half-space

ここに、 $H_{\alpha\beta\delta}^{1,2}$ は次のようであり、

$$\begin{aligned} H_{\alpha\beta\delta}^1 &= \lambda\delta_{\alpha\beta}\varepsilon_{\gamma\epsilon}\sigma_{\delta\epsilon\gamma}^G + \mu(\varepsilon_{\beta\epsilon}\sigma_{\delta\epsilon\alpha}^G + \varepsilon_{\alpha\epsilon}\sigma_{\delta\epsilon\beta}^G) \\ H_{\alpha\beta\delta}^2 &= \lambda\delta_{\alpha\beta}u_{\delta\gamma}^G n_\gamma + \mu(u_{\delta\alpha}^G n_\beta + u_{\delta\beta}^G n_\alpha) \end{aligned} \quad (19)$$

$\varepsilon_{\alpha\beta}$ は 2 次元の置換記号である。式(18)の表現において、特異要素上では極限を取る前に解析的に積分を実行しておくことにする。この操作の後に、極限 $\mathbf{x}_p \rightarrow \mathbf{x} \in \Gamma$ を取り、境界条件(10)：

$$\begin{aligned} t_\alpha^i(\mathbf{x}_p^i) + t_\alpha^{sc}(\mathbf{x}_p^i) &= 0, \quad \mathbf{x}_p^i \in \Gamma, \quad i = 1, 2, \dots, N \\ (N &= N_1 + N_2) \end{aligned} \quad (20)$$

を用いて、解くべき積分方程式系を得る。なお、数値解析上、クラック端では次のクラック要素を導入している。

$$\Delta u_\delta = C_\delta(a - x_1)^{1/2} \quad (21)$$

非破壊評価においては、一般にクラック端から遠い点での散乱場の計算が必要となる。式(12)の積分表現は實際上、半無限境界 Γ_S の取り方に依存する。遠方散乱場の Γ_S への依存性を除き、解析精度をクラック表面 Γ_c 上だけで保証すればよいように、次の処置をとる。式(16)-(21)を用いて境界上の諸量を決めた後の散乱場の表現には、半無限境界上の境界条件を満足する半無限体のグリーン関数 $\bar{\sigma}_{\alpha\beta\gamma}^G$ を用いる。

$$u_\gamma^{sc}(\bar{\mathbf{x}}_p) = \int_{\Gamma_c^+} \bar{\sigma}_{\alpha\beta\gamma}^G(\bar{\mathbf{x}}; \bar{\mathbf{x}}_p) \Delta u_\alpha(\bar{\mathbf{x}}) \bar{n}_\beta ds \quad (22)$$

$\bar{\sigma}_{\alpha\beta\gamma}^G$ に関する詳細はここでは省略するが、例えば文献25 に詳しい。上式(22)を用いて周波数域における後方散乱場を決めた後、時間域における後方散乱場を決めるには、FFTが利用できる。

4. 解析値の実験値による照合

前節3で述べた、任意の入射角、任意のクラックの傾き、任意の観測点について成立する解析において、実際の解析では、Fig. 4に示すように 45° で入射する平面横(TV)波、クラックは半無限境界に対し垂直、観測点も入射波の入射方向（後方散乱の方向）と諸量を設定した。クラックの深さ a として $a=1.49\text{mm}$ と $a=2.19\text{mm}$ の2種類を選び、解析値の実験値による照合を取るために、両者を比較したものをFig. 5 とFig. 6 に示す。Fig. 5 が $a = 1.49\text{mm}$ の場合、Fig. 6が $a = 2.19\text{mm}$ の場合である。各図の上側(a)が時間波形、下側(b)が周波数域の波形である。また、実線が実験値、各点が解析値である。実験に使用したトランスデューサーの公称中心周波数は 2.25 MHz である。

5. ネットワーク・トレーニング

ここで採用するニューラルネットワークの計算メカニズムは、次のような前進階層型²⁶⁾ (Fig. 7 参照)とする。

$$I_j^k = \sum_i W_i^{k-1} I_j^{k-1} O_i^{k-1} \quad (23)$$

ここに、上指標はネットワークの各層を、下指標は各ユニットを表す。また、 I 、 O 、 W は次のような量である。

- I_j^k : 第 k 層の第 j ユニットの入力
 O_i^{k-1} : 第 $(k-1)$ 層の第 i ユニットの出力
 $W_i^{k-1 k}$: 第 $(k-1)$ 層の第 i ユニットの第 k 層の第 j ユニットの重み (結合の強さ)

Fig. 7に示すネットワークの入力(I)層の各ユニットに情報が与えられると、式(23)のアルゴリズムに従って、中間(H)層、出力(O)層へと情報は伝達される。いま、第 k 層の第 j ユニットの式(23)に従い値 I_j^k を入力として受け取ったとき、このユニットは次のロジスティック則に従い、入力 I_j^k を出力 O_j^k に変換するものとする。

$$O_j^k = f(I_j^k) = \frac{1}{1 + \exp(-I_j^k + \theta_j^k)} \quad (24)$$

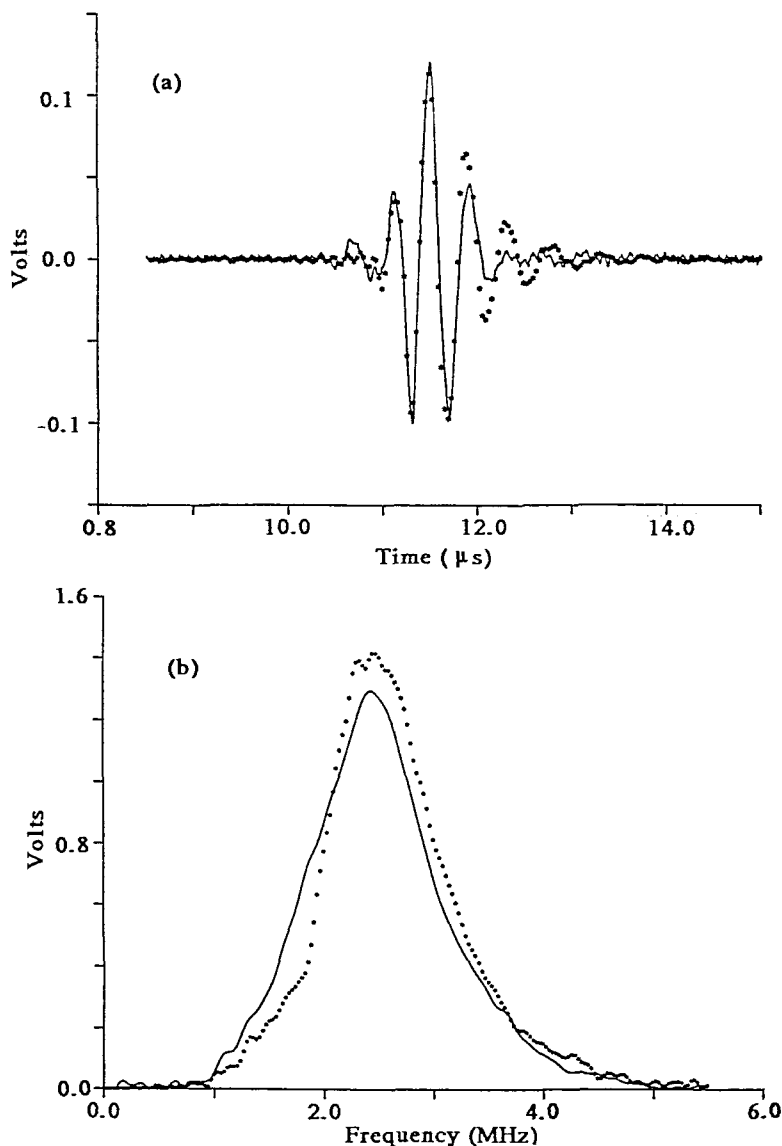


Fig.5 Convolved BEM data(----) vs.experimental data(—) for 1.49mm crack ((a):time domain,(b):frequency domain)

ここに、 θ_j^k はユニットのしきい値である。出力層で教師信号を与えたとき、学習誤差が所望の値となるまで学習を続けさせる必要がある。このとき、各ユニット間の結合の重み W の修正量 ΔW を、次の誤差の逆伝播学習アルゴリズム^{27), 28)}に従い、出力層、中間層、入力層へと修正する。

$$\Delta W_{i-1}^{k-1}{}^k(t+1) = -\varepsilon d_j^k O_{i-1}^{k-1} + \alpha \Delta W_{i-1}^{k-1}{}^k(t) \quad (25a)$$

$$d_j^m = (O_j^m - y_j) f'(I_j^m) \quad (25b)$$

$$d_i^k = \left(\sum_l W_{i-1}^{k-1}{}^k d_l^{k+1} \right) f'(I_i^k) \quad (25c)$$

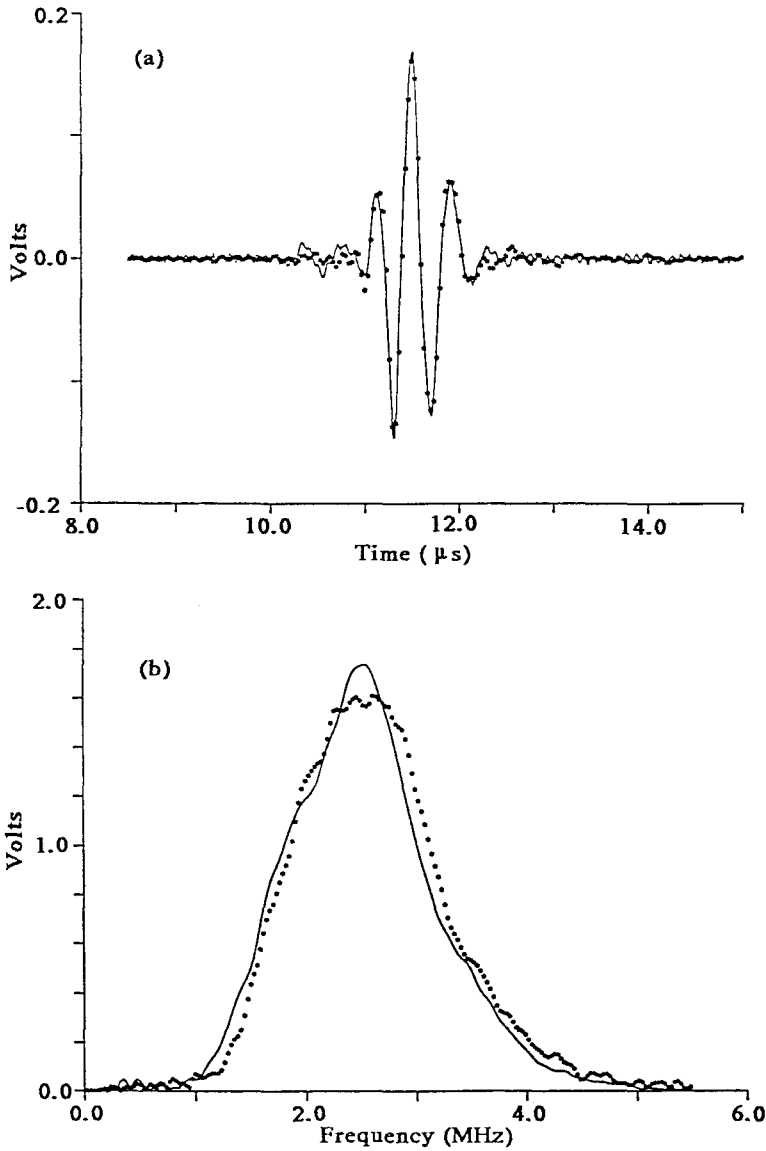


Fig.6 Convolved BEM data(····) vs. experimental data(—) for 2.19mm crack ((a):time domain,(b):frequency domain)

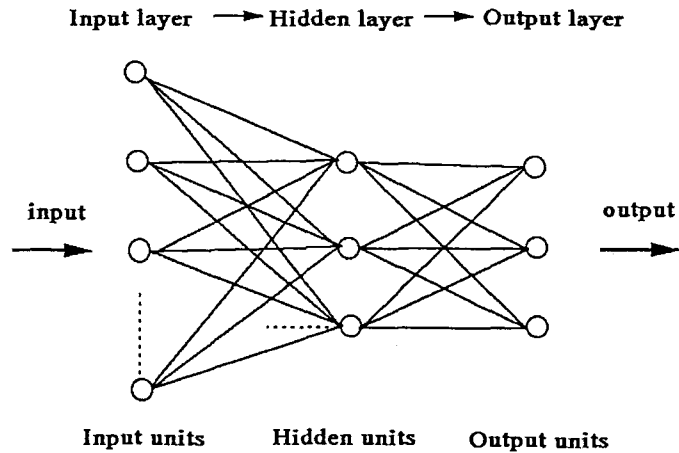


Fig.7 Layered feed-forward neural network

ここに、式(25b)は出力層においてのみ適用され、Fig. 7に示した3層ネットワークの場合、 $m=3$ であり、 y_j は教師信号である。出力層以外、結合の重みの修正(25a)に用いる学習信号には式(25c)を用いる。また、 $f'(\cdot)$ はロジスティック関数(24)の引数に関する微分であり、次のようになる。

$$f'(I_j^k) = O_j^k(1 - O_j^k) \quad (25d)$$

式(25a)において、 t は修正の回数を表すパラメーターであり、 ε と α は小さな正の数である。

本研究において、上記ネットワークのトレーニングは、前節2.～4.で述べた意味における解析値を用いて行い、結合の重みを決定した。具体的に、用いた波形はFig. 5と6に示した深さ1.49mmと2.19mmのクラックに対する後方散乱場の、解析による時間波形と周波数域における波形である。

6. ネットワーク・パフォーマンス

前節5.の手順に従い、解析値を用いて学習を完了したネットワークのパフォーマンスを確認するために、今、実験値をこのネットワークに入力してみる。Fig. 8に、2.19 mmの表面クラックに対する時間域の実験波形(Fig. 6(a)の実線)を入力した場合のネットワークの応答結果を示す。この場合、実験波形は50個の入力ユニットでサンプリングされ、ネットワークに入力された。2つの表面クラックの深さ、1.49mmと2.19mmを識別するための教師信号は次のように与えた。

	左ユニット	右ユニット
1.49mmクラック	(1 ,	0)
2.19mmクラック	(0 ,	1)

Fig. 8の出力ユニットの横に記したように、このネットワークは(0.03, 0.97)の意味で、入力2.19mmのクラ

ックに対応する波形であると判定していることがわかる。ネットワークの判断過程を確認するために、各ユニット間の結合の重みの大きさを、線の太さで表している。太い線は結合の重みの絶対値が大きいことを意味する。また、濃い実線は正の重みを、薄い実線は負の重みを意味する。例えば、太く濃い実線は正の（相対的に）大きい重みを意味している。中間（隠れ）層の各ユニットは、そのユニットに連結する結合の重みの大小と共に入力信号の特徴付けを行っており、例えば、右側の中間ユニットは、入力信号が大きいという事象を認識するユニットであることがわかる。このユニットは、例えば、 $11.5 \mu \text{sec}$. 付近の正のピークを先に学習した 1.49mm のクラックのものと比較して、 0.72 の意味で大きいと認識している。入力波形のいくつかの点における大小関係に注意を払いながら、このネットワークは、ここで入力された波形が 2.19mm のクラックに対応する波形であると判定している。

最後に、ニューラルネットワークが、ある意味であいまいさを持つデーターによりトレーニングを受けたとき、どのような識別を行うかについて考えた。ここでは、解析値のまわりに、その標準偏差 σ を 0.3 とするように、正規乱数を用いて $a=1.49 \text{mm}$, $a=2.19 \text{mm}$ それぞれのクラックに対し50個のデーターを作り出し、この計100個のデーターを用いてネットワークのトレーニングを実行した。Fig. 9に、周波数域におけるこれら

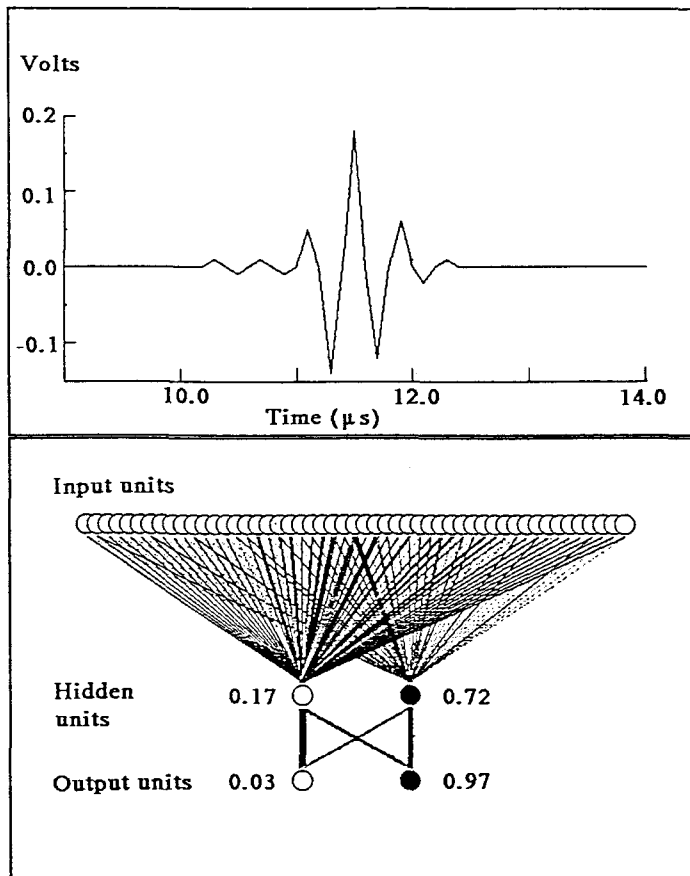


Fig.8 Network performance for the time domain experimental data input (2.19mm crack)

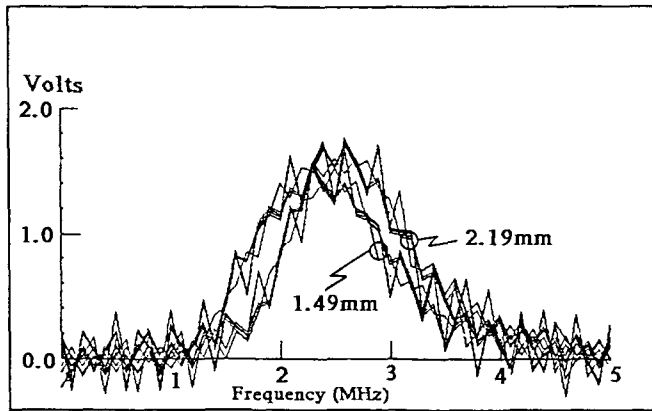


Fig.9 Random frequency domain signals with standard deviation of $\sigma=0.3$

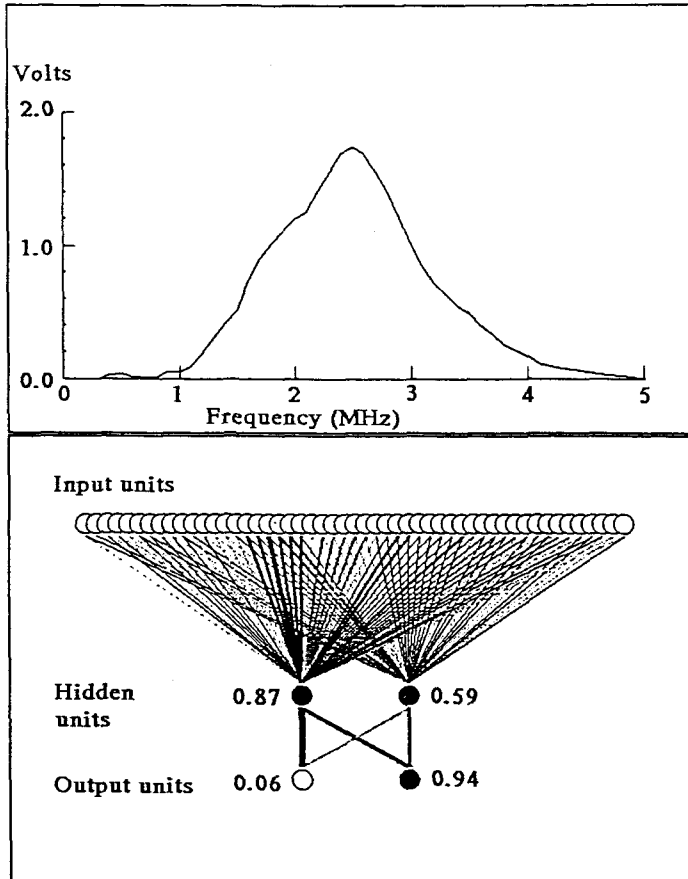


Fig.10 Network performance for the frequency domain experimental data input (2.19mm crack)

のデーターの一部を示す。Fig.10は、周波数域における2.19mmの表面クラックに対する実験値を与えたときの、ネットワークの判定結果である。1.5MHzから2.2MHz域にわたる小さなコブ状の応答の高まりと、3.2MHz付近の曲率の変化に注目しながら、このネットワークは、(0.06,0.94)の意味で入力波形は2.19mmの表面クラックに対応するものであると判定していることがわかる。

謝辞

ノースウェスタン大学 Quality Engineering and Failure Prevention センターの Q.G.Guo 氏と M.Peterson 氏には実験と解析の両面において、多大な御助力を頂いた。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) Thompson, D.O. and Thompson, R.B.: Quantitative ultrasonics, Philos.Trans. Roy. Soc. London, Vol. A292, pp. 233-250, 1979.
- 2) Thompson, R.B.: Present status and future needs for quantitative measurement techniques, In: Review of progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Eds. D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, Vol. 1, pp. 23-41, 1982.
- 3) Thompson, R.B.: Quantitative ultrasonic nondestructive evaluation methods, J. Appl. Mech., Vol. 50, pp. 1191-1201, 1983.
- 4) Thompson, R.B. and Thompson, D.O.: Ultrasonics in nondestructive evaluation, Proceedings of the IEEE, Vol. 73, pp. 1716-1755, 1985.
- 5) Budiansky B. and Rice, J.R.: On the estimation of a crack fracture parameter by long-wavelength scattering, J. Appl. Mech., Vol. 45, pp. 453-454, 1978.
- 6) Fu, L.S.: Mechanics aspects of NDE by sound and ultrasound, Appl. Mech. Reviews, Vol. 35, pp. 1047-1057, 1982.
- 7) Buck, O., Rehbein, D.K. and Thompson, R.B.: Crack tip shielding by asperity contact as determined by acoustic measurements, Eng. Fracture Mech., Vol. 28, pp. 413-424, 1987.
- 8) Achenbach, J.D.: From ultrasonics to failure prevention, In: Elastic Waves and Ultrasonic Nondestructive Evaluation, Eds. S.K. Datta, J.D. Achenbach and Y.S. Rajapakse, Elsevier Science Pub., pp. 3-15, 1990.
- 9) Annis, Jr., C.G., et al.: Gas turbine engine disk retirement-for-cause: an application of fracture mechanics and NDE, Journal of Engineering for Power, Vol. 103, pp. 198-200, 1981.
- 10) Coffey, J.M.: Mathematical modelling in NDT - what it is and what it does, In: Mathematical Modelling in Non-Destructive Testing, Eds. M. Blakemore and G.A. Georgiou, Clarendon Press, pp. 7-21, 1988.
- 11) Gubernatis, J.E. and Domany E.: Rayleigh scattering of elastic waves from cracks, J. Appl. Phys., Vol. 50, pp. 818-824, 1979.
- 12) Coffey, J.M. and Chapman, R.K.: Application of elastic scattering theory for smooth flat cracks to the quantitative prediction of ultrasonic defect detection and sizing, Nucl. Energy, Vol. 22, pp. 319-333, 1983.
- 13) Bond, L.J., Punjani, M. and Saffari, N.: Review of some recent advances in quantitative ultrasonic NDT, IEE Proceedings, Vol. 131, pp. 265-274, 1984.

- 14) Visscher, W. M. : Elastic wave scattering by a surface-breaking or surface planar crack. II. three-dimensional geometry, J. Appl. Phys., Vol. 57, pp. 1538-1550, 1985.
- 15) Opsal, J. L. and Visscher, W. M. : Theory of elastic wave scattering: applications of the method of optimal truncation, J. Appl. Phys., Vol. 58, pp. 1102-1115, 1985.
- 16) 西村, 広瀬, 堀井, 北原 : クラック問題に対する境界積分方程式法の適用, 構造工学論文集, Vol. 35A, pp. 255-267, 1989.
- 17) Adler, L. and Achenbach, J. D. : Elastic wave diffraction by elliptical cracks : theory and experiment, J. Nondestructive Evaluation, Vol. 1, pp. 87-99, 1980.
- 18) Thompson, R. B. and Gray, T. A. : A model relating ultrasonic scattering measurements through liquid-solid interfaces to unbounded medium scattering amplitudes, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 74, pp. 1279-1290, 1983.
- 19) Yew, C. H., Chen, K. G. and Wang, D. L. : An experimental study of interaction between surface waves and a surface breaking crack, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 75, pp. 189-196, 1984.
- 20) Dong, R. and Adler, L. : Measurements of reflection and transmission coefficients of Rayleigh waves from cracks, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 76, pp. 1761-1763, 1984.
- 21) Vu, B. Q. and Kinra, V. K. : Diffraction of Rayleigh waves in a half-space. I. normal edge crack, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 77, pp. 1425-1430, 1985.
- 22) Englemore, R. S. : Artificial intelligence and knowledge based systems: origins, methods and opportunities for NDE, In: Review of Progress in Quantitative NDE, Eds. D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Plenum Press, Vol. 6A, pp. 1-20, 1987.
- 23) Baker, A. R. and Windsor, C. G. : The classification of defects from ultrasonic data using neural networks : the Hopfield method, NDT International, Vol. 22, pp. 97-105, 1989.
- 24) Udpa, L. and Udpa, S. S. : Eddy current defect characterization using neural networks, Materials Evaluation, Vol. 48, pp. 342-347, 1990.
- 25) Zhang, Ch. and Achenbach, J. D. : Scattering of body waves by an inclined surface-breaking crack, Ultrasonics, Vol. 26, pp. 132-138, 1988.
- 26) Rosenblatt, F. : The perceptron : a probabilistic model for information storage and organization in the brain, Psychological Review, Vol. 65, pp. 386-408, 1958.
- 27) Rumelhart, D. E., Hinton, G. E. and Williams, R. J. : Learning internal representations by error propagation, In: Parallel Distributed Processing : Explorations in the Microstructures of Cognition, Eds. D. E. Rumelhart and J. L. McClelland, MIT Press, Vol. 1, pp. 318-362, 1986.
- 28) Rumelhart, D. E., Hinton, G. E. and Williams, R. J. : Learning representations by back-propagating errors, Nature, Vol. 323, pp. 533-536, 1986.

(1 9 9 0 年 1 0 月 1 2 日 受付)