主成分ファジィルールによる超音波波形からの定量的非破壊評価*

小 木 哲 朗^{*1}, 万 袋 俊^{*2}, 矢 部 泰 博^{*2}Quantitative Nondestructive Evaluation from Ultrasonic Waveforms
Using Principal Component Fuzzy Rules

Tetsuro OGI, Takashi MANDAI and Yasuhiro YABE

Ultrasonic waveforms reflected by various kinds of defects were calculated by numerical analysis based on elastic wave theory. By using these calculated results as a knowledge base, the development of a nondestructive evaluation system which provides quantitative information, such as types, locations, sizes and shapes of the defects, is expected. In this study, a fuzzy reasoning method based on principal component analysis was proposed and a prototype system was developed. This method can be used to characterize waveforms using the principal components and to interpolate the wave data using the membership functions in the fuzzy rules. In addition, by adjusting the membership functions, the error which depends on the difference between the numerical analysis and the experiment can be absorbed. This method was applied to crack depth evaluation for perpendicular and inclined cracks. In each case, both the numerical analysis data and the experimental data were evaluated with high accuracy.

Key Words: Nondestructive Inspection, Ultrasonic Inspection, Numerical Analysis, Expert System, Fuzzy Set Theory, Principal Component Analysis

1. 緒 言

材料や構造物の非破壊検査において、欠陥の種類、位置、大きさ、形状等を定量的に評価しようとする研究が盛んになってきた⁽¹⁾。例えば超音波探傷等において、反射された散乱波形から欠陥の定量的な諸量を推定しようとする研究である。このような定量的評価を実現する一つの方法として、既知の欠陥に対する超音波散乱波形を知識ベースとして蓄積していくことによって、未知の欠陥に対する評価を行うという方法が考えられる⁽²⁾。この方法は、対象とする問題に対してある程度大規模な知識ベースを構築することができれば、有効な方法として期待できる。

また近年、弾性波動論等の研究から超音波の挙動に関する理論計算が行われるようになり、数値解析等の方法により散乱波形のデータを生成することが可能になってきた⁽³⁾⁽⁴⁾。そのため、数値解析によって生成された波形データから知識ベースを構築し、定量的非破壊評価に適用するという方法が考えられる。

しかしながら、このような方法を実現するためには、いくつかの解決しなければならない問題が存在する。

- ・評価対象の波形データあるいは知識ベース内に格納されている波形データの特徴を読み取ることができること
- ・知識ベース内に直接存在しないデータに対しても、既知のデータから補間等の方法により適当な評価が行えること
- ・知識ベースの構築に用いる解析解と実際の計測データとの間の誤差を柔軟に吸収しながら推論を行えること

等が要求される。

知識ベースに基づいた定量的評価のための手法としては、これまでもエキスパートシステムやニューラルネットワーク等の適用が検討されているが^{(5)~(10)}、上記の要求を十分に満足することは困難であった。プロダクションルールに基づくエキスパートシステムはルールに従った厳密な推論が行われるが、柔軟性に乏しく、ルールで記述された情報しか利用することができない。一方、ニューラルネットワークはパターン認識の能力による柔軟な推論が可能であるが、推論の中身がブラックボックスとなり、結果を予測することが困難である。厳密でかつ柔軟な推論方法としてはファジ

* 原稿受付 1996年9月2日。

^{*1} 正員、東京大学インテリジェント・モデリング・ラボラトリ (〒113 東京都文京区弥生2-11-16)。

^{*2} (株)三菱総合研究所シミュレーション技術部 (〒100 東京都千代田区大手町2-3-6)。

ィ推論が有効であるが⁽¹¹⁾、定量的評価へ適用するためにはルールの作成方法などが課題となっていた。本研究ではこのような問題に対して、主成分分析に基づいたファジィルールの適用を提案し、プロトタイプシステムの開発を行った。以下、主成分ファジィルールの構築方法について説明し、実際にクラック深さの定量的評価問題に対して適用を行った。

2. 主成分ファジィルール

図1は、本研究で開発した定量的非破壊評価システムの構成を図示したものである。全体の処理の流れとしては、弾性波動論に基づいた数値解析によって知識ベースを構築し、これをもとに計測された超音波散乱波形の評価を行う。ただし、波形データの前処理として主成分分析を行い、知識ベースは主成分を用いたファジィルールによって記述されているのが特徴である。以下、各処理の詳細について説明する。

2.1 主成分分析 数値解析では、想定する欠陥の種類、位置、大きさ、形状等のパラメータを変えながら、これらの欠陥に対する超音波散乱波形を計算した。計算では固体内における弾性波と欠陥の相互作用を弾性波動論に基づいてモデル化し、周波数領域での散乱波形を境界要素法によって計算した⁽¹²⁾⁽¹³⁾。しかし、ここで得られる波形データから直接、知識ベースを構成するルールを記述することは難しい。知識ベースとしてルール表現を行うためには、波形データから何らかの特徴量を抽出し、命題として利用することが必要である。ここでは、特徴抽出のための前処理として主成分分析を行った。

主成分分析は、できるだけ情報量の損失がないように、少ない変数で元のデータを表すことができ、波形データ等の特徴抽出に利用することができる⁽¹⁴⁾。こ

のとき新しく作られる変数が主成分である。例えば、元の変数を $x_1, x_2, \dots, x_m$ とすると、生成される主成分は次の線形式で表現される。

$$\begin{aligned} z_1 &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1m}x_m \\ &\dots \dots \dots (1) \\ z_n &= a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nm}x_m \end{aligned}$$

元の変数 $x_1, x_2, \dots, x_m$ としては、波形データから一定の間隔でサンプリングしたデータ値を使用した。主成分分析によって、変数の数はサンプリング数 m からたかだか5~6個の主成分数 n に減少され、新しく生成される主成分は元の波形データの特徴を抽出していると考えられる。また、このときの情報損失量は主成分の寄与率によって表される。

2.2 ファジィルール 知識ベースは、数値解析データの主成分を用いてファジィルールとして記述される。例えば、クラックの深さが1.6 mm のとき、解析解データから求められる第1主成分 z_1 の値が6.5であったとすると、ファジィルールは次のように記述される。

「IF 第1主成分 z_1 の値が6.5 ぐらいならば、

THEN クラック深さは1.6 mm ぐらいである」

このルールの記述中「6.5 ぐらい」、「1.6 mm ぐらい」という表現がファジィ集合によって表されている。

ファジィ集合は、変数の値によってある命題がどれだけ満足されるかを示すメンバシップ関数によって定義される⁽¹⁵⁾。ここでは図2に示す二等辺三角形の関数で定義を行った。例えば、クラック深さが1.4 mm, 1.6 mm, 1.8 mm に対する散乱波形が計算され、それ

Fig. 1 Block diagram of the fuzzy reasoning based on principal component analysis

Fig. 2 Membership functions used in the fuzzy rules

ぞれの第1主成分の値が5.2, 6.5, 7.4であったとする。クラック深さは間隔 $t (=0.2 \text{ mm})$ で計算が行われ、求められた第1主成分値の間隔は $d1 (=1.3)$, $d2 (=0.9)$ である。このときメンバシップ関数は、それぞれ隣り合う値の間隔のうち絶対値の大きいほうを底辺の半分とする二等辺三角形で定義する。この例では、IF部では隣り合う間隔 $d1, d2$ のうち長いほう $d1 (=1.3)$ が二等辺三角形の底辺の半分となり、THEN部ではクラック深さの計算間隔 t が底辺の半分となる。この方法により、知識ベース内のデータは隙間がないように覆い尽くされ、中間の値が入力されても両隣のルールが実行されて、データ間の補間が行われる。また、図中のクラック深さ1.8 mmの部分のように、主成分値が極大や極小になる場合でも、ルールが幅をもつため、極大値より大きい値や極小値より小さい値に対して柔軟に対応することができる。

2.3 ファジィ推論 定量的評価はファジィルールを使ったファジィ推論によって実行される。ファジィ推論の方法に関しては、これまでも問題に応じていろいろな方法が提案されているが⁽¹⁶⁾、ここでは図3に示す推論方法を基本メカニズムとして使用した。評価対象となる波形データは、ルール作成時と同様に主成分分析の前処理が行われ、主成分値が推論エンジンに入力される。ファジィルールはメンバシップ関数によるあいまいさを含む命題で定義されているため、入

力値がIF部の値に正確に合致しなくても、近い値が入力されるとルールは実行される。

各ファジィルールの出力は、IF部に入力された主成分の値 p が条件部を満足する度合い s によってTHEN部の出力値が頭打ちされる。これらの出力値は、条件部に含まれる主成分の寄与率 c によってスケーリングを行ってから面積の加算を行い、最終的な推論値は重心の値として算出する。すなわち、各ルールは条件部で使われている主成分の寄与率によって重み付けがされていることになる。図3では、第1主成分、第2主成分の寄与率が $c1, c2$ であるため、それぞれのルールからの出力値は $c1, c2$ にスケーリングされてから加算を行い、合計の出力値が計算されている。

ただしこの際、同一の主成分に対する出力は、面積形状が単調に増加して減少するまでの山を一つの解の候補とみなし、図4に示すような場合はそれぞれ別の解の候補と考える。また各主成分からの出力を面積加算する際には、各山の重心間の距離が計算間隔 t の基準値より小さい場合だけ加算を行い、それより大きい場合はそれぞれ別の候補とする。最終的な解は、これらの候補の中から山の高さが最大のものを選び、面積重心を計算する。

以上が、主成分ファジィルールによる推論方法であるが、この推論過程の中で、主成分分析の前処理は情報量をあまり損失させずに波形データの特徴を抽出する働きをもっている。また、ファジィルールによる推論は、あいまいさを持つ定義によって、データ間の補間を行いながら柔軟な推論を行うことを可能にしている。

3. クラック深さの評価

主成分ファジィルールによる推論方法の有効性を検証するために、以下に示すクラック深さの評価問題に適用した。

3.1 裏面クラック問題 想定した問題は、スチール板の裏面に入ったクラックの深さを定量的に評価

Fig. 3 Basic mechanism of the fuzzy reasoning method

Fig. 4 Candidates for the evaluation of the crack depth

する問題である。図5はクラックの様子および実験条件を示したものである。部材は均質、等方、線形な弾性体とし、クラックは部材裏面に垂直な場合と30度の斜めクラックの場合の2種類を取り上げた。このとき、クラックによって反射された超音波散乱波形から、材料裏面のクラック深さ a を定量的に評価することが課題である。

実験データの計測は、試験片を水中に入れ、クラックのある面に空気層を作り、水中圧電形トランスデューサを用いてクラックの反対側から超音波(縦波)を入射し、同一のトランスデューサで反射波を受信した。超音波の入射角度は18.9度で、水中を伝播した縦波が部材内で45度の横波にモード変換するように設定されている。実験に使用したトランスデューサの中心周波数は2.25 MHzである。

一方数値解析では、半無限の弾性固体を仮定し、45度で入射した平面横波に対する入射方向での周波数領域での後方散乱波形を、境界要素法によって計算した。数値解析における定式化の詳細については、文献(12)および文献(13)に詳述されている。

想定した垂直クラックと斜めクラックのそれぞれに対して、数値解析による波形から主成分ファジィルールを構築し、未知の数値解析解と実験データに対して定量的評価を行った。

3・2 数値解析解の評価 まず知識ベースの構築には使われていない、未知の数値解析解に対する評価を行った。これは知識ベース内に格納されているデータの補間能力を調べることが目的である。クラックの深さ a をパラメータとして変えながら数値解析を行

い、いろいろなクラックに対する超音波散乱波形を計算した。垂直クラックの場合には、0.6 mm から2.4 mm までの0.2 mm 間隔のクラック深さに対して、斜めクラックの場合には、0.8 mm から3.0 mm までの0.2 mm 間隔のクラック深さに対して計算を行った。図6はそれぞれのクラックに対して計算された周波数領域での散乱波形のデータを示したものである。

これらの波形データから、それぞれ101点(100分割)の値をサンプリングし、主成分分析の前処理を行った。主成分分析における累積寄与率を0.99とした結果、主成分は6個まで求まり、変数の数は101個から6個に減少された。図7は、主成分分析の結果を示したものである。これらの主成分値を使って、前述の方法に従いファジィルールを構築した。

この知識ベースを用いて、ファジィルールの構築には使われていない未知の数値解析解に対する評価を行った。すなわち、垂直クラックの場合には0.7 mm から2.3 mm までの0.2 mm 間隔のクラック深さに対する波形データの評価を行い、斜めクラックの場合には0.9 mm から2.9 mm までの0.2 mm 間隔のクラック深さに対する波形データの評価を行った。

表1はこれらの評価結果を示したものである。垂直クラックでは平均誤差が0.022 mm、斜めクラックで

Fig. 5 Application to the crack depth evaluation

Fig. 6 Waveform data used to construct the knowledge base

は 0.004 mm であった。この結果は、知識ベースの構築に用いたクラック深さの間隔 0.2 mm に比べて 1 けた以上小さく、かなりよい精度であることがわかる。すなわち、主成分ファジィルールでは直接知識ベース内に存在しない波形データに対しても、知識ベース内のデータを補間して、精度の高い評価を行えることが示された。

3.3 実験データの評価 次に、この知識ベースを使って、実際の実験計測による波形データの評価を行った。数値解析解を用いて構築された知識ベースを使って、どれだけ正確に実験データの評価を行えるかを調べることがここでの目的である。垂直クラック、斜めクラックのそれぞれにつき、4 種類の試験片に対する実験データの評価を行った。垂直クラックでは、0.67 mm, 1.05 mm, 1.49 mm, 2.19 mm の深さのクラックを試験片として用意し、斜めクラックでは 1.19 mm, 1.56 mm, 2.32 mm, 2.78 mm の深さのクラックを用意した。

実験データと数値解析解のデータの間には、一般に解析の際のモデリングに基づく誤差や実験条件のばらつき等に依存する誤差が存在する。これらの誤差を完全に無くすることは不可能であるため、解析解を知識ベースとした欠陥の評価手法では、ある程度の誤差を

吸収できる柔軟な推論機能が望まれる。本研究では、ファジィ集合を定義しているメンバシップ関数の形状を変化させることで、実験と解析間の誤差に対する吸収力を調べた。メンバシップ関数の形状変化としては、図 8 に示すように、主成分値のファジィ集合を表す二等辺三角形の底辺の長さを伸縮させた。このとき、2.2 節で定義した基本となる二等辺三角形の底辺長さ d に対する伸縮の比率を k で表す。

図 9 は k の値を変化させたときの結果を示したので、実験データに対する平均誤差の変化と、解析解に対する平均誤差の変化が示されている。グラフからわかるように、解析解の評価に比べて実験データに対する評価は全体的に誤差が大きくなっている。これは、解析解に基づいて知識ベースが構築されているため、前述したように実験と解析間の条件の違いが誤差の原因になっていると考えられる。しかしながら k の値を少しずつ大きくしていくことで、解析解に対する評価精度は高く保ちながら、実験データに対する誤差が減少されていることがわかる。 k の値が大きくなることは、ファジィルール内の命題が示す範囲が広がり、多少誤差を含むデータに対しても近くの関係する

Table 1 Evaluated results for the numerical analysis data

(1) Perpendicular Crack Depth

Crack Depth (mm)	0.70	0.90	1.10	1.30	1.50	1.70
Evaluation (mm)	0.77	0.83	1.12	1.30	1.51	1.70

Crack Depth (mm)	1.90	2.10	2.30
Evaluation (mm)	1.89	2.11	2.28

Average Error = 0.022 (mm)

(2) Inclined Crack Depth

Crack Depth (mm)	0.90	1.10	1.30	1.50	1.70	1.90
Evaluation (mm)	0.92	1.10	1.30	1.50	1.69	1.90

Crack Depth (mm)	2.10	2.30	2.50	2.70	2.90
Evaluation (mm)	2.10	2.30	2.50	2.70	2.89

Average Error = 0.004 (mm)

Fig. 7 Principal components of the waveform data

Fig. 8 Change of the shapes of the membership functions

(1) Perpendicular Crack

(2) Inclined Crack

Fig. 9 Variations of the average errors caused by the shapes of the membership functions

ルールが起動されることを意味している。つまり、推論規則にあいまいさをもたせることによって逆に柔軟な推論が可能となり、結果として判定精度が向上したと考えられる。

このように、ファジィルールによる推論方法では、メンバシップ関数の形状を調整することで、数値解析と実験との間の誤差をある程度吸収することが可能である。しかし、 k の値がある程度以上大きくなり過ぎると、誤ったルールが起動するため誤差はまた大きくなる。この結果では、垂直クラックの場合はメンバシップ関数の底辺を標準の1.7倍にしたとき平均誤差は最小になり、斜めクラックの場合は2.3倍にしたとき誤差は最小となった。

表2は平均誤差が最小となるようにメンバシップ関数の係数を調整した場合の、各実験データに対する評価結果を示したものである。垂直クラックの場合は平均誤差が0.075 mm、斜めクラックの場合は0.084 mmであり、実験データに対しても精度の高い評価結果を得ることができた。

4. 結 論

本研究では、超音波散乱データに基づく欠陥の定量的評価を行うために、解析解によって知識ベースを構築する方法として、主成分ファジィルールを提案し、プロトタイプシステムの開発を行った。この方法で

Table 2 Evaluated results for the experimental data

(1) Perpendicular Crack Depth

Crack Depth (mm)	0.67	1.05	1.49	2.19
Evaluation (mm)	0.78	1.12	1.46	2.10

Average Error = 0.075 (mm)

(2) Inclined Crack Depth

Crack Depth (mm)	1.19	1.56	2.32	2.78
Evaluation (mm)	1.11	1.71	2.36	2.84

Average Error = 0.084 (mm)

は、前処理として行われる主成分分析によって、情報量をあまり損失させずに波形データの特徴抽出を行うことができる。また知識ベースを構築するファジィルールは、ファジィ集合のもつあいまい性によって補間に基づいた推論を実行することができる。さらにこの方法は、メンバシップ関数の形状を調整することによって、誤差を含むデータに対しても柔軟に対応することが可能である。この方法の有効性を証明するために、垂直クラックと斜めクラックの深さ判定問題を取り上げ、未知の解析解と実験データに適用したところ、非常に精度の高い評価を行うことができた。

本研究で開発された主成分ファジィルールによる推論方法は、欠陥の評価手法としてだけではなく、広くパターン認識に基づく逆問題や定量的な判定問題に対して利用することが可能である。また、ここではクラックの深さ判定という一つのパラメータだけを判定する単純な問題への適用しか示さなかったが、欠陥の位置、形状、大きさ等の複数のパラメータを同時に評価する、より実際的な問題に適用していくことが今後の課題である。

謝 辞

本研究は、科学技術庁振興調整費による「高度信頼性を要する材料・構造物の定量的・知能的非破壊評価法の基盤技術に関する研究」として行われた。また、Center for Quality Engineering and Failure Prevention, Northwestern UniversityのJ. D. Achenbach教授、東海大学海洋学部の北原道弘教授には、解析解の計算および実験データの計測に関して多大なご協力をいただいたことを感謝する。

文 献

- (1) Tompson, R. B., Present Status and Future Needs for Quantitative Measurement Techniques, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1 (1982), 23-41.
- (2) Englemore, R. S., Artificial Intelligence and Knowledge Based System: Origins, Methods and Opportunities

- for NDE, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, **6**, A(1987), 1-20.
- (3) Achenbach, J. D., Mathematical Modeling for Quantitative Ultrasonics, *Nondestructive Characterization of Materials V*, (1991), 363-377.
- (4) 北原道弘, 弾性波動解析と非破壊評価への一応用, *超音波テクノ*, **4**-11(1992), 34-39.
- (5) Schmerr, L. W., Christensen, K. E. and Nugen, S. M., Development of an Expert System for Flaw Classification, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, **6**, A(1987), 879-888.
- (6) Baker, A. R. and Windsor, C. G., The Classification of Defects from Ultrasonic Data Using neural Networks: The Hopfield Method, *NDT Int.*, **22** (1989), 97-105.
- (7) Udpa, L. and Udpa, S. S., Application of Neural Networks for Classification of Eddy Current NDT Data, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, **9**, A(1991), 673-680.
- (8) Ogi, T., Notake, M., Yabe, Y. and Kitahara, M., A Neural Network Applied to Crack Type Recognition, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, **9**, A(1990), 689-696.
- (9) 小木哲朗・野竹正義・矢部泰博・高堂谷正樹・北原道弘, ニューラルネットワークを用いた欠陥の定量的評価, 日本非破壊検査協会平成3年度春季大会講演概要集, (1991-3), 95-96.
- (10) 矢川元基・吉村忍・大石隆寛, 階層形ニューラルネットワークと計算力学による三次元き裂の形状同定, *機論*, **59**-559, A(1993), 526-533.
- (11) 芳村敏夫・森本和憲・松浦洋司・川人明美, 超音波探傷試験評価のためのファジィエキスパートシステム(欠陥エコーの波形判定におけるデータ処理の適用), *機論*, **61**-582, C(1995), 724-729.
- (12) Zhang, Ch. and Achenbach, J. D., Scattering of Body Waves by an Inclined Surface-breaking Crack, *Ultrasonics*, **26** (1988), 132-138.
- (13) 北原道弘・野竹正義・小木哲朗・Achenbach, J. D., 部材裏面クラックの一検出法, *構造工学論文集*, **37**, A(1991), 465-477.
- (14) 加藤寛・香川新太郎, 溝付き軟鋼平板の拡散接合特性と超音波波形との関係, 日本非破壊検査協会平成7年度春季大会講演概要集, (1995-3), 7-12.
- (15) Zadeh, L. A., Fuzzy Sets, *Information and Control*, **8** (1965), 338-353.
- (16) 水本雅晴, ファジィ理論とその応用, (1988), 39, サイエンス社.