超音波探傷試験方法診断エキスパートシステム
の構築の試み*村上理一^{*1}, 林 英治^{*2}, 秋園幸一^{*1}

On Building Diagnostic Expert System for Ultrasonic Testing

Ri-ichi MURAKAMI, Eiji HAYASHI, and Koichi AKIZONO

Diagnostic expert system for an ultrasonic testing was built upon based on Method of Ultrasonic Angle Beam Testing and Classification of Test Results for Butt Welds in Steel Plates, WES2021-1987. In the present expert system, it may be advantage to use a production rule and a backward inference when knowledge presentation was done. The diagnostic time could be reduced because the inference process become evident. Non-destructive inspection engineers can use this expert system on a general microcomputer. In order to confirm the expert system, the ultrasonic testing, which was diagnosed by the present expert system, and the radiographic testing were performed on butt welded joints in steel plate. Results of ultrasonic testing were almost coincident with those of radiographic testing. Therefore, it has been confirmed that the expert system was available on inferring method of ultrasonic testing.

Key Words: Non-Destructive Testing, Expert System, Ultrasonic Testing, Butt Welded Joints

1. はじめに

情報処理技術の発達した現在, 各分野にわたって専門家の知識や経験を知識ベース化する試みがなされ, 一部実用化されている⁽¹⁾. これは専門家診断プログラムであり, エキスパートシステムと呼ばれる⁽²⁾. 非破壊検査には溶接欠陥を検査する最適な方法の選定と検査結果の正しい判定に高度な知識や経験が要求される. この高度な専門知識を知識ベース化してエキスパートシステムと非破壊検査技術を結びつけば, 検査水準を高め, 機械・構造物の安全性の確保に寄与すると思われる.

溶接欠陥の検査に広く用いられている超音波探傷試験とエキスパートシステムの関係を示すと, 図1のようになる. このように非破壊検査では検査方法の決定と検査結果の評価が重要となる. 本研究では手始めに検査方法を最適に選定する診断形のエキスパートシステムを開発することにし, 新しく起案されたWES 2021(鋼板の突合せ溶接継手の超音波斜角探傷試験方法および試験結果の等級分類方法)⁽³⁾に基づい

て, 専門技術者が探傷現場で容易に操作でき, 迅速に所定の目的が達成できるようにマイクロコンピュータを利用した超音波斜角探傷試験方法診断エキスパートシステムを構築したので, それを報告する.

2. WES 2021 について

超音波斜角探傷試験方法診断エキスパートシステムの構築にあたって用いた WES 2021⁽³⁾には次のような特徴がある.

- ① 板厚が 6 mm 以上のフェライト系鋼板突合せ溶接継手に対する超音波斜角探傷試験方法を規定.
- ② 評価対象の溶接欠陥を考慮して探傷試験条件を

図1 非破壊検査とエキスパートシステムの関係

* 昭和 63 年 11 月 23 日 中国四国支部・九州支部合同岡山地方講演会において講演, 原稿受付 昭和 63 年 4 月 14 日.

^{*1} 正員, 徳島大学工学部 (〒770 徳島市南常三島町 2-1).

^{*2} 徳島大学工学部 (現在 オリエンタル・モータ).

選定。

③ 欠陥の形状によって溶接欠陥を分類し、この溶接欠陥に対応した A, B および C のエコー高さを評価レベル規定。

④ 欠陥の等級分類は、縦方向欠陥に対しては欠陥の分類と欠陥指示長さ、横方向欠陥に対しては関係者の協議によって行う。

このように WES 2021 は、突合せ溶接継手に存在する欠陥の検出とその分類、寸法と位置の決定および等級分類の関連が論理的に規定されているので、事実から種々の検証を経て結論に到達する診断形のエキスパートシステム⁽²⁾の構築に適している。

3. 超音波探傷試験方法診断 エキスパートシステムについて

3.1 使用システム エキスパートシステムを構築するにあたり使用したマイクロコンピュータは 2 メガバイトに増設した PC-9801 vm で、OS に MS-DOS を使い、言語は BASIC および C 言語を使用した。

3.2 エキスパートシステムについて エキスパートシステムは一般に知識ベースと推論エンジンを持ち、ある特定領域の専門家の知識をコンピュータの知識ベースに移植し、推論エンジンを通じて複雑な問題を専門家と同じレベルで解決するためのシステムである⁽¹⁾。図 2 は、開発することにした超音波斜角探傷試験エキスパートシステムのアルゴリズムである。本研究では図 2 の上部の知識ベース部と下部の診断部および推定結果部に相当する超音波斜角探傷試験方法診断エキスパートシステムを開発した。

3.3 プログラムの構成 プログラムは MAIN および DIC, DATA の 2 部に分かれている。MAIN プログラムは知識ベースと推論エンジン部から構成され、知識ベースの構築には専用のエキスパート構築支援ツールである EXSYS を使用した。DIC, DATA プログラムは、マン・マシンインタフェース画面プログラム(解説画面や入力画面や探触子の操作画面および結果の画面を含み、以後外部プログラムと呼ぶ)とデータ部から構成される。それぞれの画面は専用のプログラムに対応し、診断実行中、これらのプログラムが階層的に呼出されるよう配慮した。これらの各部の相互関係を図 3 に示した。外部プログラムと推論エンジンの間のデータのやり取りは RETURN, DAT を介して行われ、必要に応じて推論エンジンに読み込まれる。

3.4 知識ベースの構築 超音波探傷試験方法は、溶接継手の形状と溶接欠陥の発生位置によって決定さ

れる⁽⁴⁾。WES 2021 では溶接欠陥とその発生位置の関係に基づいて探傷方法を規定している⁽³⁾。本研究ではこの特徴に着目して超音波斜角探傷試験方法診断エキスパートシステムを構築した。構築ルールにはプロダクション・ルールを使用した。このルールでは、知識を条件部(If)と実行部(Then)に論理的に分けて知識ベースを構築しなければならない。この思考過程をわかりやすく示したものが図 4 のツリー構造である。探傷方法および探傷条件を決定するための因子として欠陥の種類、板厚、開先形状および接触媒質を考え、それぞれに優先順位をつけた。図 4 では優先順位を円の大きさと表した。

図 4 に示したツリー構造に対応したルールの一例を図 5 に示した。Then 部の書式 RUN(……)は外部プログラムの読み込みを、また括弧の中の GAMEN およ

図 2 超音波斜角探傷試験方法診断エキスパートシステムのアルゴリズム

図 3 構築したエキスパートシステムの構造

び KEIJYOU はそれぞれ診断結果の表示画面および探触子の移動範囲と超音波の進行を表すグラフィック画面を意味している。

診断結果には探傷方法と探触子(周波数・屈折角)および操作範囲の情報を表示するとともに利用者の理解を助けるために注釈を設けた。探傷方法にはそれぞれ確信度を与え、採択すべき優先基準を示した。この確信度は、WES 2021 に基づいて著者らおよび超音波探傷検定 2 級免許を有する非破壊検査技術者との協議によって決定した。

規格で与えられた探傷方法が必ずしも現場での最適な方法でない場合がある。例えば、周波数が 2 MHz、屈折角が 70 度の探触子は指向角が大きいことから反

射エコーに多くの雑音が含まれて信頼できる結果が得られないことがある。WES 2021 では条件によってはこの探触子を使用する探傷方法を選ぶ場合がある。その不足を補うものが現場で培われた専門技術者の経験である。本研究では規格が周波数 2 MHz、屈折角 70 度の探触子を選択する場合には周波数 5 MHz、屈折角 70 度の探触子を指示するように知識ベース化した。

4. 超音波斜角探傷試験方法診断 エキスパートシステムの有効性について

利用者がエキスパートシステムの指示に従って試験体の検査要領書に記載された開先形状および接触媒質の条件を入力して検出すべき欠陥を選び、試験体の板厚を入力すると、エキスパートシステムは WES 2021 と照合して最適な超音波探傷方法を推論して表示する。図 6 にこのエキスパートシステムの推論結果の一例を示した。このときの推論には後向き推論を使用した。後向き推論は結論を仮説し、その仮説を導く条件部の内容をチェックしていく推論方法である⁽⁵⁾。そのためルールの重複が避けられるので推論に要する時間が短い。このエキスパートシステムが診断開始から終了までに要する時間は約 2 分であり、システムプログラムの読み込み時間を含めても 4 分程度である。

構築したエキスパートシステムの有効性を調べるために放射線透過試験と超音波探傷試験を行い、両者の結果を比較・検討した。まず、あらかじめ明らかな人工欠陥を含む板厚が 20(N 1)、30(N 2)、60(N 3)および 80 mm(N 4)の 4 種類の試験体を準備した。図 7 に示したように溶接欠陥は A-A 断面に 10×6×3 mm の金属小片を張り付けて人工的に融合不良を作った。

試験体はまず放射線透過試験され、得られた 3 枚の X 線フィルムから溶接欠陥の寸法を測り、その平均値を溶接欠陥の予想値とした。次にエキスパートシステムが推論した超音波探傷方法(UT 法)によってそれぞれの試験体を探傷した。表 1 に X 線法によって求めた欠陥の長さ方向の寸法とエキスパートシステムが指示した UT 法による試験結果の比較を示した。表 1 には比較のために他の探触子の条件の結果も併せて示した。表 1 は明らかにエキスパートシステムの指示によ

図 4 診断事象のツリー構造

RULE NUMBER: 18

IF:

D₁₁ and あなたが検出したい欠陥は、縦方向欠陥
and あなたが検出したい具体的欠陥は、内部溶込み不良
T₆ and [THICKNESS] >= 20.000
and [THICKNESS] < 40.000
S₁ and 探傷をおこなう試験片の開先形状は、K形開先 or X形開先
R₂ and [ROOT LENGTH] >= 2.000
M₁ and 探傷に使用する接触媒質は、グリセリン水溶液

THEN:

RUN(GAMEN7)
and RUN(KEIJYOU)
and タンデム探傷法
(1) 周波数: 5 MHz.
(2) 屈折角: $\theta = 70^\circ$.
(3) 原則として、片面両側から探傷する。
-Probability=10/10
and 一探触子法
(1) 周波数: 2 MHz.
(2) 屈折角: $\theta = 70^\circ$.
(3) 片面両側から直射法および 1 回反射法により探傷する。
-Probability=8/10

図 5 プロダクション・ルールと記号化表示の対比

図 6 診断結果の一例

表 1 N 試験体の X 線透過試験結果およびエキスパートシステムによる超音波探傷試験結果の比較

Number of specimen	Length of the welding defect					
	Results by X ray method		Probe *	Probe**	Probe**	Probe**
			2M, $\theta=45^\circ$	5M, $\theta=45^\circ$	5M, $\theta=70^\circ$	2M, $\theta=70^\circ$
N 1	12.5	12.2	12.0	×	×	×
	12.0					
	12.0					
N 2	12.6	12.3	10.7	×	×	×
	12.0					
	12.2					
N 3	13.0	12.6	11.2	×	×	×
	12.1					
	12.8					
N 4	12.5	12.4	×	×	×	×
	12.5					
	12.4					

* Results of UT method inferred by this expert system
 ** Results of the other UT methods

表 2 S 試験体の X 線透過試験結果およびエキスパートシステムによる超音波試験結果の比較

Specimen type	Defect number	Length of the welding defect		Depth of the welding defect	
		Results of X ray method	Probe *	Results of X ray method	Probe *
			5M, $\theta=70^\circ$		5M, $\theta=70^\circ$
S 1	1	20.0	18.4	???	8.8
		20.2			
		20.1			
	2	20.2	23.6	???	8.4
		27.0			
		26.7			
		26.8			

* Results of UT method inferred by this expert system

図 7 超音波探傷用試験体の形状・寸法

る UT 法だけが溶接欠陥を有効に検出できたことを示している。

UT 法は溶接欠陥を X 線法による予想値よりも過小評価する傾向にあったが、板厚が大きくなると超音波の減衰が著しいのでその精度から考えてもほぼ妥当な結果だと考えられる。事実、板厚が 80 mm の N 4 試験体では小さな反射エコーのみであり、これから欠陥か否かの判定はできなかった。

また、エキスパートシステムが指示した以外の探触子の条件では溶接欠陥を検出できなかった。これは開先形状に対する超音波の屈折角や溶接欠陥に対する超音波の周波数が適切でないことに起因しており、エキスパートシステムが欠陥検出に対して正確な UT 法を診断したことを示している。以上のことは溶接欠陥の幅方向についても全く同じであった。

次に、溶接欠陥の種類やその発生位置も不明な板厚 19 mm の突合せ溶接継手の試験体について X 線法とエキスパートシステムによる UT 法を用いて上述したと同様な試験を行い、その試験結果を比較したものが表 2 である。溶接欠陥の長さが X 線法と UT 法とでほぼ一致したことは表 1 と同じであるが、UT 法は欠陥の深さについても情報を与えた。以上のことから、本研究で構築した超音波斜角探傷試験方法診断エキスパートシステムが溶接欠陥を有効に検出する超音波探傷方法および探傷条件を推論することが確認できた。

5. ま と め

本研究は、専門技術者が容易に探傷方法および探傷条件の選定と溶接欠陥の評価ができるように、WES 2021(鋼板の突合せ溶接継手の超音波斜角探傷試験方法および試験結果の等級分類方法)に基づいて超音波斜角探傷試験方法診断エキスパートシステムを構築したものである。

構築したエキスパートシステムでは知識ベースの構築にプロダクション・ルールを使用したのでルール数は多いが、推論過程が明確になった。また、後向き推論を採用したことで診断時間の短縮をはかった。このエキスパートシステムは一般普及形のマイクロコンピュータを使って操作できるので、専門技術者を支援する有力な手段の一つになる。

溶接欠陥の形状および位置があらかじめ明らかな試験体と実際の突合せ溶接継手について放射線透過試験

法および本研究で構築したエキスパートシステムが診断した UT 法を用いて探傷試験した。両者の探傷結果はほとんど等しく、構築した超音波斜角探傷試験方法診断エキスパートシステムの有効性が確認できた。

文 献

- (1) Hayes-Roth, F., Waterman, D. A. and Lenat, D. B.

(AIUEO 訳), エキスパートシステム, (昭 60), 53. 産業図書.

- (2) 福田, 高温学会誌, 13-3 (昭 62), 98.
(3) 日本溶接協会編, 鋼板の突合せ溶接継手の超音波斜角探傷試験方法及び試験結果の等級分類方法, WES 2021-1987, (昭 62).
(4) 日本非破壊検査協会 関西支部編, 溶接構造物の超音波探傷検査, (昭 60), 電子科学研究所.
(5) 岸, 機誌, 89-815 (昭 61), 1189.