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* (パーソナルコンピュータ用システムの構築および妨害エコー判定用知識の補充)

松 浦 洋 司*¹, 芳 村 敏 夫*²
森 本 和 憲*³, 川 人 明 美*⁴

Fuzzy Diagnostic Expert System for Ultrasonic Testing (Construction of Personal-Computer-Aided System and Supplemental Knowledge for Parastic Echo)

Hiroshi MATSUURA, Toshio YASHIMURA,
Kazunori MORIMOTO and Akiyoshi KAWAHITO

A diagnostic fuzzy expert system for ultrasonic testing (UT) which has been constructed by the authors shows good agreement between the results obtained by the system and by UT experts. In this study, we attempt to construct a personal-computer-aided system and to supplement knowledge of the parastic echo. In addition, the computational time required for inference is reduced because the blackboard model used in the proposed system is more improved than authors' former models. The results obtained with the proposed fuzzy expert system are compared with those obtained by UT experts, and it is confirmed that the system has the capacity to discriminate between parastic echo and defects.

Key Words: Expert System, Fuzzy Set Theory, Ultrasonic Testing, Weld Joint, Production Rule, Blackboard Model, Personal-Computer-Aided System, Parastic Echo

1. 緒 言

超音波探傷試験は各種溶接構造物の溶接部の非破壊検査の一つとして、資格をもった検査技術者によって行われており、その試験結果から溶接欠陥の種類、欠陥寸法および欠陥等級などを推定し、溶接部の可否の判定を行っている。しかし、これらの推定にはかなりの熟練が必要とされていることから、著者らは、初心者でも行えるように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を構築し、良好な結果が得られたことを以前に報告した⁽¹⁾⁽²⁾。そのシステムでは、知識やデータに含まれるあいまいさをファジィ理論を用いて扱った。

超音波探傷試験は現場で行われることが多いため、システムはポータブルなものが望ましいが、開発したシステムはワークステーション上に構築しており、推論速度の点では問題ないが、高価なために実用面では十分とはいえない難いと考えられる。したがって、パーソ

ナルコンピュータ上で動くシステムを構築することは、実用上有益と考えられる。

また、以前に開発したシステムでは妨害エコーについてまったく考慮されていないことなどから改良の余地が残されていると考えられる。

そこで本研究では、より実用性を高めるためにパーソナルコンピュータ上で使用できるシステムの構築を行うとともに妨害エコーについても判定できるように知識の補充を行ったので報告する。

2. 概 要

本システムは推論エンジン、知識ベースおよびワーキングメモリから構成されている。通常、知識やデータの量が多くなると推論に要する時間が長くなるので、この問題を解消するために知識やデータをグループ化する黒板モデル⁽³⁾を採用している。知識はプロダクションルール形式とし、フレームモデルによってグループ化した。

以下に、本研究で行った内容についての概要を述べる。なお、本研究ではパーソナルコンピュータとして NEC PC-9801 DX を用い、言語は muLisp-86 (MS-DOS 上で稼働) を使用した。

2・1 パーソナルコンピュータ用システム 超音

* 平成4年11月14日 松山地方講演会において講演、原稿受付 平成4年11月24日。

*¹ 正員、徳島大学大学院(〒770 徳島市南常三島町2-1)。

*² 正員、徳島大学工学部。

*³ 学生員、徳島大学大学院。

*⁴ 正員、(株)三浦研究所(〒799-26 松山市堀江町7)。

波探傷試験は現場で行い、その場で可否を判定することが多いため、現場にもち運ぶことができる超音波探傷試験評価システムを構築することは実用性の面で大きな意味があると考えられる。そのためには、この評価システムをもち運びの簡単なパーソナルコンピュータなどの上で動くシステムに変更する必要がある。パーソナルコンピュータ用のシステムを構築する際、ワークステーションの言語と若干の違いがあること以外に、推論速度がおそいという問題がある。そこで本研究では、パーソナルコンピュータ用のシステムを構築する際に、推論時間の短縮についても検討した。

推論時間を短縮するためには、推論を効率化することが考えられる。効率的な推論を行う方法の一つとして黑板モデルがある。このモデルは、推論の流れを階層化し、階層ごとにグループ化された知識が結び付けられており、個々の推論に必要な知識のみを利用することで効率的な推論を行おうとするものである。しかし、推論の階層化および知識のグループ化が不十分な場合、効率化も不十分となる。したがって、各知識がどのような役割を分担し、どのような状況で利用されるかを十分に把握し体系化する必要がある。本システムにおいても効率的な推論を行うために黑板モデルを使用していることから、知識の体系化が十分にできているかどうかを再検討し、不十分な部分についてモデルを再構築し、より効率的な推論が行えるように変更した。

2.2 妨害エコー 検査技術者は超音波探傷試験を行う場合、まずはじめにCRT上のエコーが欠陥によるものなのか欠陥以外の妨害エコーなのかを判定し

た後、欠陥によるエコーについてのみ判定を行い溶接の可否を決定している。妨害エコーは溶接の余盛りや裏当金などの溶接部の形状によって発生するため、エコーが欠陥によるエコーか妨害エコーかを判定することは非常に難しく熟練が必要といえる。しかし、妨害エコーは欠陥とはまったく関係ないエコーであるので、この判定を正確に行えるかどうか超音波探傷試験評価のなかでも最も重要な問題となってくる。以前に構築したシステム⁽¹⁾⁽²⁾では、エコーはすべて欠陥によるエコーであるものとして判定を行っており、妨害エコーについてはまったく考慮されていない。しかしながら、このシステムは初心者が扱うことを前提として開発していることから、妨害エコーについても判定できることが不可欠であると考えられる。そこで、妨害エコーについても判定できるように知識の補充を行った。

3. 推 論 時 間 の 短 縮

3.1 黑板モデルの改良 図1に以前に構築したシステム⁽¹⁾⁽²⁾の黑板モデルを示す。この図に基づいて以下に推論手順を述べる。

まず、溶接条件および超音波探傷試験結果のデータを対話式に入力する。入力が終わると、溶接条件データより知識 Weld-rules を用いて欠陥発生特性を、超音波探傷試験結果のデータより知識 Data-t を用いて欠陥位置を推論する。欠陥発生特性は、材質、溶接方法、開先形状などの違いによる各々の欠陥の発生頻度を表している。その後、欠陥発生特性と欠陥位置および超音波探傷試験結果より知識 Ut-rules を用いて欠

図1 黑板モデル

陥種類の推論を行い、さらに欠陥種類より知識 Figure-rules を用いて欠陥形状を、欠陥形状と超音波探傷試験結果より知識 Estimation を用いて欠陥高さを推論する。欠陥等級については超音波探傷試験結果より知識 Defect-class を用いて推論を行う。

この黑板モデルでは、九つの階層化された推論に対して六つのグループ化された知識ソースが作用するようになっている。この知識ソースのうち Weld-reles はルール数が 188 個と全ルール数 269 個の大部分を占めており、知識の体系化が不十分であることが考えられた。

そこで、推論全体の流れを見直した結果、Weld-rules は四つの小グループに分けるほうが合理的であると判断し、本システムの黑板モデルの改良を行った。

3.2 推論時間の変化 以前に構築したシステムと黑板モデル改良後のシステムの推論時間の違いを 10 個のデータについて比較した結果、改良後のシステムの推論時間は以前のシステムより平均約 24% 減少することが確認された。

4. 妨害エコーの判定

4.1 妨害エコー 妨害エコーの発生にはさまざまな状況が考えられるが、そのうち発生しやすいと考えられるいくつかの例を図 2 に示す。以下にこれらの妨害エコーについて簡単に説明する。

妨害エコー 1：突合せ継手の場合に発生し、特にレ形開先に発生しやすく、裏当金がある場合には母材と

裏当金とのすきまが大きいほど発生しやすい。

妨害エコー 2：超音波が突合せ溶接の裏波部で余盛りの方向に反射し、余盛りではね返って得られるエコーである。裏波部で反射する際に横波が縦波にモード変換する場合もある。余盛りからのエコーは比較的大きく母材欠陥などに誤判定する可能性がある。

妨害エコー 3, 4：裏当金付きの突合せ継手において 1 回反射法で探傷する場合に現れるエコーである。これは、反対側からの探傷によって容易に判別がつく。

妨害エコー 5, 6：裏当金の補強隅肉溶接からのエコーで、反射源の位置を確認することによって判別は容易にできる。

妨害エコー 7：裏当金と母材とのすきまで反射し現れるエコーである。

妨害エコー 8：裏当金付きの T 字継手において 1 回反射法で探傷する場合に現れるエコーである。

以上の妨害エコーの中で、1 (特に両側探傷できない場合) および 7, 8 は熟練者でも判別の困難なものであり、1 および 7 は溶け込み不良もしくは融合不良、8 は開先面融合不良もしくは溶接金属内部割れなどと誤判定する可能性がある。

4.2 妨害エコー判定用の知識 上記の八つの妨害エコーのうち判別の困難な 1 (特に両側探傷できない場合)、7 および 8 の三つの妨害エコーの判別方法について説明する。図 3 に、これらの妨害エコーを判定するためのフローチャート⁽⁴⁾を示す。以下に、このフローチャートに基づいて説明する。

妨害エコー 1：この妨害エコーの場合、裏当金がな

図 2 妨害エコーの例

い場合には裏波部を指で触ることによりエコーの高さ
が変化するかどうかによって判別することができる。
また、裏当金の有無にかかわらず両側探傷することによ
っても判別は可能である。しかしながら、溶接部付
近の構造の関係から裏波部を触ることができない場合
や両側探傷できない場合は判別が困難となる。その場
合の判別方法がフローチャートに示した方法である。
溶接の基準線から探触子の超音波の発振点までの距離
 y を精密測定し、ビーム路程および屈折角(θ)より z
を算出する。この z の値によって妨害エコーか欠陥か
の判定を行うことができる。 a の値は裏当金の有無に
よって変わり、裏当金がある場合は2mm, ない場合
は0mmである。

妨害エコー7：この妨害エコーの判別方法として十
分な経験を積んだ検査技術者の最大公約数的方法をま
とめたものにND1202小委員会指針があるが、これ
には定性的判別項目が多数あり初心者には難しいと考
えられる。ここでは、簡易法をフローチャートに示し
た。妨害エコー1と同様に反射源の位置(z および d)
を算出しその値によって判別する方法である。

妨害エコー8：この妨害エコーは1回反射法を用い
る場合に現れるエコーで、通常溶接金属内部の欠陥と
誤判定しがちである。直射法によって反射源を探傷で

きる場合〔図3(c)の点線で示した位置での探傷がで
きる場合〕には簡単に判別ができるが、溶接の関係か
ら直射法によって探傷できない場合には判別が困難と
なる。この場合の決定的な判別方法は見出されていな
い。したがって、フローチャートに示す判別方法は妨
害エコーの決定的な判別方法ではなく、その可能性を
示すものである。

以上の三つの妨害エコーの判定用フローチャート中
の数値は、初心者には装置の調整、 y およびビーム路
程の測定に精度上の問題があると考えられるため、そ
のことを考慮して決められている。

4.3 知識ベース 前述の三つの妨害エコー以外
の妨害エコーは熟練者にとっては比較的判別が容易な
ものであるが、初心者が用いることを前提としたエキ
スパートシステムを構築する際には比較的判別が容易
な妨害エコーについても判定ができるように知識をデ
ータベースとしてもっておく必要があると考えられ
る。そこで、図2の八つの妨害エコーすべてについて、
前述した妨害エコーの判別方法などを基に知識ベース
を構築した。

一方、前述の妨害エコー判定用フローチャート中の
判定を行う際に求める反射源の位置(z および d)に
は測定誤差が含まれている。また、判定部の数値も実

図3 妨害エコーの判定方法

表 1 本システムの適用結果

No.	Profile of groove	Thickness (mm)	Results by experts (Type of defect)	Results by this expert system		
				Type of defect (certainty factor)	Width of defect (mm)	Defect class (JIS Z 3060)
1	L	14.0	FB	FB(0.67) GB(0.50) FM(0.45) GM(0.34)	0.12 0.12 0.12 0.12	2
2	V	16.0	FB	FB(0.82) FM(0.74) GB(0.62) GM(0.55)	0.33 0.33 0.33 0.33	3
3	L	16.0	J8	J8(1.00) FB(0.83) GB(0.62) FM(0.31) I(0.25) GM(0.23)	0.86 0.86 0.86 0.86 0.86	4
4	L	18.0	C	C(1.00) GM(0.25)	2.42 0.13	2
5	L	27.0	J6	J6(1.00)		3
6	K	28.0	B	B(1.00) FB(0.78) FM(0.60) GB(0.59) GM(0.45) E(0.22)	0.33 0.33 0.33 0.33 0.33	4
7	L	19.0	FM	FM(0.83) GM(0.78) E(0.30) C(0.22)	0.25 0.25 0.25 5.70	4
8	L	27.0	J3	J3(1.00)		4
9	L	25.0	A	A(1.00) J1(0.39) I(0.30) FB(0.24) FM(0.24) C(0.22)	0.84 0.84 0.84 0.84 25.11	4
10	K	28.0	B	B(0.91) FB(0.76) GB(0.71) FM(0.28) H(0.27) GM(0.26) C(0.20)	0.31 0.31 0.31 0.31 0.31 7.82	4
11	L	30.0	GM	FM(0.93) GM(0.87) C(0.21)	0.36 0.36 11.10	1
12	L	32.0	FM	FM(1.00) GM(0.75) D(0.20)	0.34 0.34 10.06	3
13	L	32.0	J4	J4(1.00) J3(0.69)		4
14	L	32.0	J1	J1(0.77) H(0.30)	0.44	4
15	K	22.0	B	B(0.76) FB(0.56) GB(0.42) H(0.28) FM(0.21)	0.61 0.61 0.61 0.61	4

16	L	18.0	FM	FM(0.79) GM(0.59) FB(0.48) GB(0.36)	0.28 0.28 0.28 0.28	3
17	X	22.0	FM	FM(0.83) GM(0.78) C(0.24)	0.25 0.25 5.44	2
18	L	16.0	FB	FB(0.80) GB(0.75) FM(0.60) GM(0.56) C(0.23)	0.20 0.20 0.20 0.20 3.75	2
19	L	22.0	FM	FM(1.00) GM(0.75) D(0.20)	0.53 0.53 11.20	4
20	V	9.0	J1	J1(1.00) J2(0.43) H(0.30) FB(0.25) A(0.19) GB(0.19)	0.24 0.24 0.24 0.24	4
21	K	75.0	FB	FB(0.52) GB(0.39) B(0.30) H(0.30)	1.23 1.23 1.23 1.23	3
22	X	25.0	GB	FB(0.83) GB(0.78) FM(0.53) GM(0.50) B(0.24)	0.25 0.25 0.25 0.25 0.25	4
23	V	9.0	J2	J2(0.67)		4
24	K	40.0	C	C(1.00) GB(0.50) B(0.38) GM(0.22) H(0.21) FB(0.20)	6.60 0.27 0.27 0.27 0.27 0.27	4
25	K	19.0	FB	FB(0.67) GB(0.62) FM(0.45) GM(0.42) C(0.22) E(0.20)	0.49 0.49 0.49 0.49 10.47 0.49	4
26	V	21.0	FM	FM(0.81) GM(0.61) FB(0.41) GB(0.31)	0.30 0.30 0.30 0.30	3
27	K	36.0	B	B(1.00) FB(0.83) GB(0.78) FM(0.31) GM(0.29) C(0.22)	0.62 0.62 0.62 0.62 0.62 17.17	4

where A : Lack of joint penetration at root zone
 B : Lack of joint penetration at weld metal
 C : Porosity
 D : Blow hole
 E : Crack at weld metal
 FB : Lack of fusion at weld bond
 FM : Lack of fusion at weld metal
 GB : Slag inclusion at weld bond
 GM : Slag inclusion at weld metal
 H : Crack at heat affect zone
 I : Crack at root zone
 Ji : Parastic echo i in Figure 2 (i=1, 2, ...8)

際にはある程度の幅をもっているものと考えられる。本システムではあいまいなデータや知識を扱うためにファジィ理論を用いてきたので⁽¹⁾⁽²⁾、妨害エコー判定用の知識に含まれるこれらのあいまいさについてもメンバシップ関数および確信度を用いて表現する。ここで用いたメンバシップ関数および確信度は上記のフローチャート中の数値および検査技術者の経験を基に決定した後、検査技術者の推定結果に最もよく一致するようにチューニングを行ったものである。

5. 適用結果

4章で示した妨害エコーについての判定用の知識を補充したシステムを実際の超音波探傷試験に適用した。本システムの推論結果の評価の妥当性を確かめるために検査技術者による推定結果と比較したものを表1に示す。表には参考のために材料の開先形状および板厚を記した。本システムの推論結果として、確信度の大きい欠陥種類と欠陥高さおよびJIS Z 3060による欠陥等級を記した。試験データ数は27例である。

本システムの推論によって確信度が最大になった欠陥種類(妨害エコーを含む)と検査技術者が推定した欠陥種類が一致したのは27例中26例であり、精度よく推論できていることが確認された。また、本システムおよび検査技術者ともに27例中20例を溶接欠陥、7例を妨害エコーと判定しており、妨害エコーについても本システムは精度よく推論できることが確認された。

以下に、表1の中の数例について簡単に説明する。

(1) No.3は本システムによって確信度が最も大きい欠陥種類として妨害エコーが推定されており、検査技術者による推定結果と同じになっているが、そのほかに開先面融合不良(FB)および開先面スラグ巻込み(GB)の確信度も比較的大きな値となっている。この妨害エコーは前述したように直射法による探傷ができない場合、判別が非常に困難となる。そのため、本システムの推論結果において妨害エコー以外の欠陥種類の確信度が大きく推定されているものと考えられる。また、検査技術者の推定結果には妨害エコーのみが記されているが、実際には探傷試験を行った際、最初融合不良と推定し補修を行ったにもかかわらずエコーに変化が見られなかったことから最終的に妨害エコーであると判定し直したという経緯がある。そのようなことを考慮すると、本システムの推論結果は妥当なものであると考えられる。

(2) No.9は検査技術者がルート溶け込み不良(A)と推定しているのに対して本システムはルート溶

け込み不良の確信度が最大になってはいるものの妨害エコーである可能性もあるという結果になっている。

また、No.14および20では検査技術者の推定結果の妨害エコーに対して本システムでは妨害エコーの確信度が最大になってはいるもののその他の欠陥種類の可能性もあるという結果となっている。このことは、これらのデータが比較的判別が困難な妨害エコー1に関係しているためと考えられる。

(3) No.22では検査技術者の推定結果が開先面スラグ巻込みになっているのに対して本システムでは開先面融合不良の確信度が最大となっており、両者の結果が一致していない。しかしながら、本システムの推論結果において開先面スラグ巻込みは2番めに推定されており確信度も大きな値となっていることから、検査技術者とほぼ同程度の推論ができていると判断して差し支えないと考えられる。

6. 結 言

本研究では、パーソナルコンピュータ上で動く超音波探傷評価システムを構築するとともに妨害エコーについての判定も行えるように知識の補充を行った。以下に得られた結果を記す。

(1) 効率的な推論を行うために黑板モデルを採用する場合、対象とする問題に用いる知識をいかに体系づけるかがポイントとなる。特に、推論時間が問題となるパーソナルコンピュータ上にシステムを構築する際には十分な検討が必要と考えられる。

(2) 妨害エコー判定用の知識を補充し、その知識に含まれているあいまいさをメンバシップ関数および確信度を用いて表しファジィ理論によって扱うことにより、妨害エコーの判定についても精度よく行うことのできる超音波探傷試験評価システムを構築することができた。

(3) パーソナルコンピュータ上で動くシステムとしたことで、より実用性の高いシステムとなった。

最後に、本研究を遂行するにあたり終始多大なご指導をいただいた徳島大学・村上理一教授ならびに妨害エコーの判定用の知識の獲得および超音波探傷試験データの取得にあたって御協力いただいた(株)山村鉄工所・岡島博代表取締役社長に謝意を表する次第である。

文 献

- (1) 松浦・芳村・川人, 機論, 58-551, C (1992), 2268.
- (2) 松浦・芳村・川人, 機論, 58-555, C (1992), 3434.
- (3) 上野, 知識工学入門(改訂2版), (1989), 147, オーム社.
- (4) 日本非破壊検査協会編, 溶接部の超音波探傷試験, (1979), 149, 日本非破壊検査協会.