

超音波探傷波のパターン認識による炭素鋼試験片の欠陥識別

Defect Identification of Carbon Steel Testpieces by Using Pattern Recognition Through Ultrasonic Inspection

黒住 保夫 (Yasuo Kurosumi)* 吉荒 俊克 (Toshikatsu Yoshiara)†

要約 原子力発電所の定期検査における供用期間中検査 (ISI) は、主に 1 次冷却材圧力バウンダリーの溶接部を対象に非破壊検査、特に超音波探傷検査を使用して行われている。一般に超音波探傷検査において評価対象となっている信号情報は、欠陥からの反射エコーの波形データである。この波形データに基づき、反射源位置および反射波高値の 2 つのデータで欠陥かどうかの判定を検査員が行っている。従って、このデータの判定は検査員の能力に大きく依存しているうえ、対象範囲のほとんどがステンレス鋼溶接部であり、欠陥エコーとまぎらわしい疑似エコーが非常に多く、検査員の負担となっている。

このデータの判定方法については、コンピュータの進歩と相まって種々の手法が開発されている。本研究においては、学習機能を保有する超音波探傷検査システムを使用して、探傷欠陥の判定能力を検証し、検査員の欠陥判定の支援ツールとしての適用可能性を検討する。

本報では超音波探傷波の時間領域、周波数領域におけるプロファイルパターン認識により、統計的に処理する学習機能の検証の第二ステップとして、炭素鋼試験片の自然欠陥 (ブローホール、溶け込み不良、スラグ巻き込み) を使用して検証した。また、標準試験片の人工欠陥 (スリット、縦穴、横穴) の識別性に対する探触子仕様、探触子位置の影響について検証した。

その結果、実機適用に係わる様々の課題が抽出された。

キーワード 超音波検査, 欠陥検査, エキスパートシステム, 学習, 欠陥同定, パターン認識

Abstract In-Service-Inspections (ISI) conducted as a part of the annual inspection of nuclear power plants are primarily conducted by non-destructive inspections, particularly ultrasonic flow detection inspections, on welded portions at primary coolant pressure boundaries. Typically, the signal data that is evaluated in ultrasonic flow inspections consists of pulse-shape data that is reflected as an echo from the defects. The presence of a defect is then determined by the inspector using two types of data such as the location of the reflection source and the peak value of the reflected echo data. The interpretation of this data is largely depending on the ability of the inspector. As the subjects on which this inspection is applied are almost stainless steel welds, there are many false echoes that can be easily confused with real defect echoes, thus placing a considerable burden on the inspector. Various techniques have been developed for evaluating this data with computer progresses. In this study, we used an ultrasonic flow detection system equipped with a AI function to verify the ability to locate and evaluate defects, and examined its potential for application as a support tool for defect evaluation by inspectors. In this report as a second step, we verified profiles of ultrasonic flow detection waves in the realms of time and frequency by pattern recognition using natural defects (blow holes, defective penetration and slag inclusion) of carbon steel testpieces in the verification of a learning function that performs statistical processing. In addition, we also verified the effects of probe specifications and probe location on the identification of artificial defects (slits, vertical holes and horizontal holes) in standard testpieces.

As a result, various topics were extracted pertaining to operation of the actual system in the reactor.

Keywords ultrasonic inspection, defect inspection, expert system, learning, defect identification, pattern recognition

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

† 非破壊検査(株) 安全工学研究所

1. はじめに

原子炉圧力容器をはじめとする1次冷却材圧力バウンダリーの健全性の確認のため、定期検査において供用期間中検査（ISI：In Service Inspection）を行う。ISIには、作業が比較的簡便で体積検査のできる超音波探傷検査が最もよく使用される。検査対象である1次冷却系配管のステンレス鋼溶接部では疑似エコーが多く、検査員の欠陥識別の負担となっている。

ISIが、定期検査の主要作業であることから定期検査工程への影響、また対象範囲が1次冷却材圧力バウンダリーであることから高い検査の信頼性を要求されること、更に検査員への被ばくを考えると、このISIの欠陥判定の信頼性を向上させると同時に能率を向上させることは、大きな意義があると考えられる。

一方、超音波探傷検査は、他の非破壊検査手法と比較して、(1)全試験範囲をカバーして欠陥の発生位置による適用性の著しい低下をきたさない。(2)入出力信号が電気信号であり、信号処理に順応性が高い。(3)実機適用に際し、法規制や作業制限が比較的緩やかである。(4)超音波の伝搬、反射および透過の各性質は、固体物性の基本定数である密度および弾性率に依存し、材料物性に敏感である等の特徴があり、分析方法の開発状況によっては、様々な信号データ利用可能性がある。

近年、超音波探傷データの分析方法は、コンピューター技術の進歩とともに急速な発展を遂げつつある。例えば、ニューラルネットワークの学習機能を利用して、欠陥の形状、寸法の分類、同定、解析を行う手法が検討されている^(1)X2X3X4X5X6X7)また、エキスパートシステムを利用したものでは、ファジイ理論による欠陥の判定^(8)X9X10)、クラスタ分析法、パターン認識法による欠陥検出精度の向上⁽¹¹⁾、超音波データの解析、弁別法の検討⁽¹²⁾、鉄骨溶接部の欠陥自動判定⁽¹³⁾、原子力発電所のステンレス鋼配管の応力腐食割れの識別⁽¹⁴⁾等様々な研究がある。

本研究において使用する「テストプロ」は、こういった新しい分析方法の一つで、欠陥からの反射エコーをパターン認識により識別し、これを学習する機能を保有する超音波探傷システムである。本研究では、このシステムが、上記ISIにおける検査員の

欠陥識別の支援ツールとして適用可能であるかどうかの確認を行う。

前報⁽¹⁵⁾では、その第一ステップとして標準試験片の人工欠陥に対する本システムの欠陥識別能力を検証した。本報では、第二ステップとして炭素鋼試験片の自然欠陥に対する識別能力の検証、標準試験片の人工欠陥の識別性低下要因の検討を実施した。

2. 炭素鋼溶接部自然欠陥に対する識別性能の検証

2.1 使用機器

本研究で使用した装置、探触子および試験片は、表1のとおりである。また、図1に試験状況写真を示す。なお、狭帯域用の5個の探触子は、JISに基づく探触子性能試験を実施し、試験周波数、屈折角等の性能パラメーターがばらつきの中心にあるものを学習データ採取用の標準探触子とした。

2.2 学習用データ、識別用データの採取

学習用データとして、図2に示すように、標準探触子毎に各欠陥に対して両面両側の4方向からそれぞれ10個、計40個の波形データを採取した。図3に採取波形例を示す。

標準探触子により採取した波形データをもとに、各探触子仕様ごとに弁別ファイルを作成した。弁別ファイル作成にあたっては、欠陥の種類毎に3個の欠陥があるので、この中から2個を取り出して弁別ファイルを作成し、残り1個を識別対象とした。

識別用データとしては、標準探触子以外の識別用探触子（各仕様ごとに4個）を各欠陥に対して両面両側の4方向からねらい、それぞれの最大波高値における信号を識別データとした。

2.3 検証結果

疲労割れ、溶け込み不良、スラグ巻き込みの各欠陥ごとに識別結果をもとに識別精度を調査した。結果を表2に示す。識別精度は、5 MHzで平均52.3%、2 MHzで平均54.1%、全体平均で53.2%であった。欠陥種類別では、溶け込み不良の識別率が最も高く、ついで疲労割れ、スラグ巻き込みの順で

超音波探傷装置	インフォメトリックス社製テストプロ		
超音波探触子	狭帯域 2 MHz、屈折角 45 / 60 / 70	各 5 個	
	狭帯域 5 MHz、屈折角 45 / 60 / 70	各 5 個	
試験片	寸法	幅 600 × 奥行 400 × 板厚 30 (mm)	
	対象欠陥	疲労割れ	: 高さ 5 × 長さ 25 (mm) 各 3 個
		溶け込み不良	: 高さ 4 × 長さ 22 ~ 24 (mm) 各 3 個
		スラグ巻き込み	: 高さ 4 × 長さ 23 ~ 30 (mm) 各 3 個

表 1 試験装置および試験片



図 1 試験状況写真

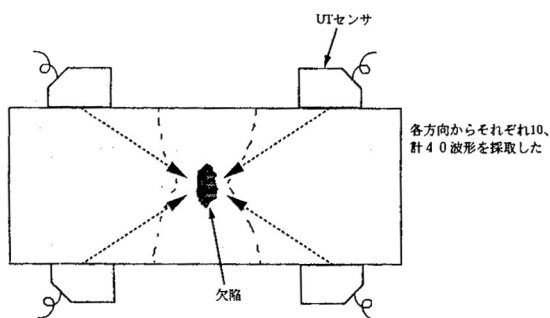
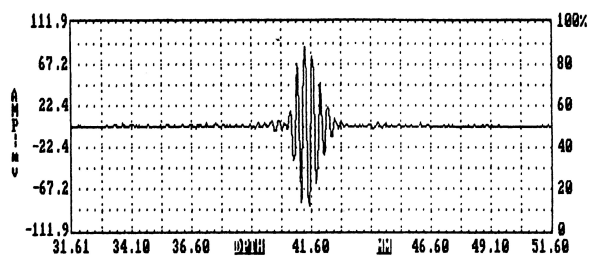
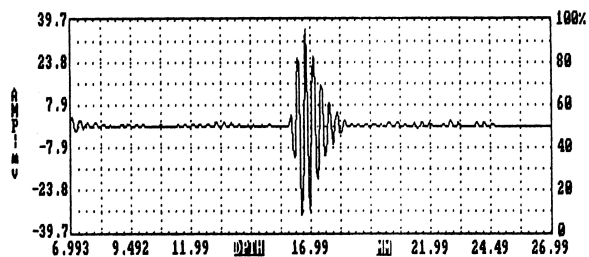


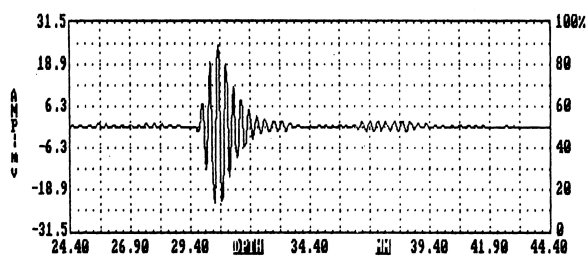
図 2 学習データの採取



(a) 割れ



(b) 溶け込み不良



(c) スラグ巻き込み

図 3 採取波形例 (5 MHz 45° による学習データ)

		割れ	溶け不	スラグ	平均
5 M H z	4 5	50.0	68.8	41.7	53.5
	6 0	45.8	47.9	45.8	46.5
	7 0	45.8	58.3	66.7	56.9
	平均	47.2	58.3	51.4	52.3
2 M H z	4 5	58.3	58.3	45.8	54.1
	6 0	58.3	68.8	45.8	57.6
	7 0	54.2	64.6	33.3	50.7
	平均	56.9	63.9	41.6	54.1
				全体平均	53.2

表2 テストプロによる鋼自然欠陥の識別精度 単位：%

あった。

いずれにせよ炭素鋼試験片の自然欠陥に対する識別精度は、第一報で紹介した標準試験片の人工欠陥と比べ、かなり低いものであった。

3. 自然欠陥の識別性改善のための検討

テストプロによる炭素鋼試験片の自然欠陥の識別精度を更に高めるために、自然欠陥の識別に有効性のある新しい評価パラメーターの検討を行った。

3.1 欠陥表面粗さ評価パラメーターの検証

自然欠陥の表面状態は、欠陥の種類により様々であるが、一般にスラグ巻き込みや割れは、溶け込み不良と比べて比較的粗いといえる。この欠陥表面粗さの評価パラメーターとして、4～7 MHzの入力波に対する欠陥からの反射波の周波数領域におけるバンド幅と周波数の相関係数 r が使用可能か検討した。

3種の各自然欠陥に対し、欠陥の両面両側の4方向から反射波を採取し、各周波数におけるバンド幅を測定した。この周波数 - バンド幅のプロットの一

次回帰曲線に対する相関係数 r を求めた。

この結果、平滑な面を有する溶け込み不良は、どの方向からの探傷に対しても高い相関係数を示すのに対して、表面粗さを有する割れ、スラグ巻き込みは、探傷方向によって相関係数は、高い値から低い値までばらつくことが確認され、この相関係数が欠陥表面粗さ評価パラメーターとなり得ることが確認された。図4に本手法の評価手順、図5に各欠陥における周波数 - バンド幅プロットから求めた相関係数を示す。

3.2 V反射波を用いた欠陥厚み評価パラメーターの検証

割れなど板厚方向の面状欠陥においては、欠陥上部の面積が小さく、スラグ巻き込みなどの体積的な欠陥においてはこの値が大きい。このため、垂直探傷やV探傷法により得られる欠陥上部からの反射波の振幅は、前者では小さく、後者ではより大きくなると考えられる。

これを検証するため、自然欠陥をV反射法により両面の2方向から探傷し、得られた欠陥上部からの反射波の振幅を測定した。その結果、割れの場合は

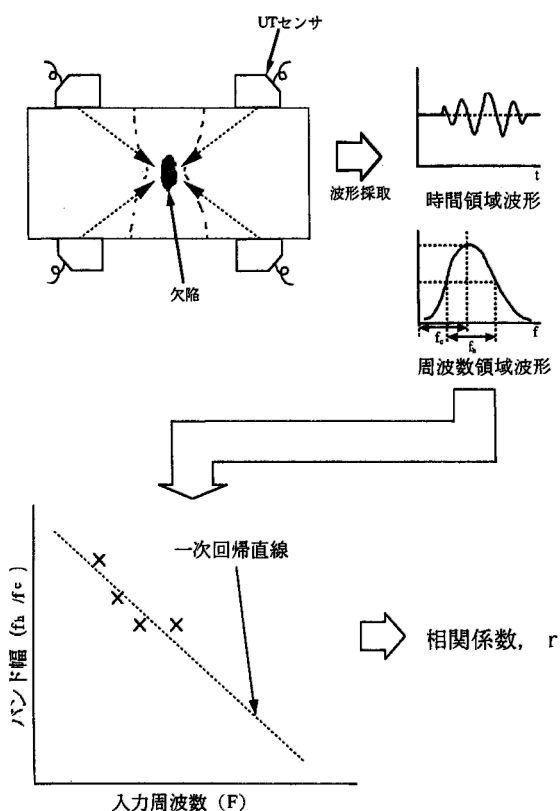


図4 欠陥粗さ評価パラメータ抽出手順

反射波振幅が低く、スラグ巻き込みの場合は -10dB 程度と割れに比べて高いレベルであることが確認され、欠陥上部からの反射波が欠陥厚さ評価パラメータとなり得ることがわかった。図6に測定状況、図7にV反射法により得られた各欠陥の上部からの反射波レベルを示す。

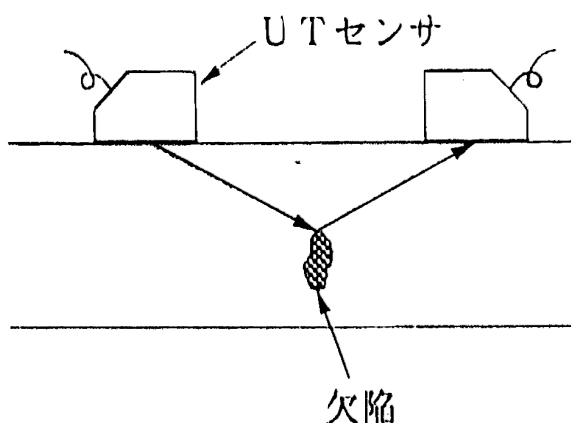


図6 欠陥厚み評価パラメータ抽出手順

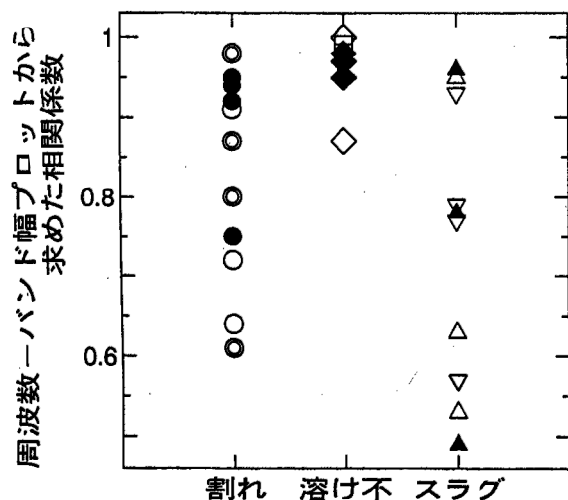


図5 各欠陥における欠陥表面粗さ評価パラメータ値

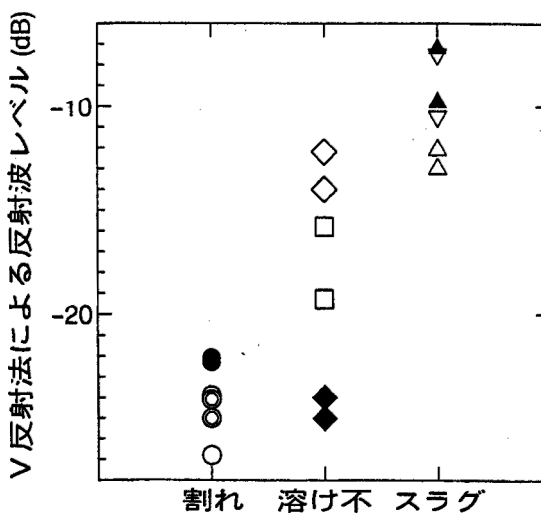


図7 各欠陥における欠陥厚み評価パラメータ値

3.3 新パラメータのパターン認識への適用

図8は、縦軸に欠陥表面粗さ評価パラメータとして周波数 - バンド幅プロットの相関係数をとり、横軸に欠陥厚み評価パラメータとして欠陥上部からの反射波レベルをとったものである。また、図9は、これを1つにまとめたものである。この結果、2つのパラメータを適用することにより、割れ、溶け込み不良、スラグ巻き込みの3種類の自然欠陥の波形を特徴量ベクトル空間上で分離することができた。

この結果から、炭素鋼溶接部の3種の自然欠陥の識別に、この新パラメータが有効であることがわかった。但し、このパラメータは、現状のテストプロのプログラムには組み込まれていない。また、

パラメータの抽出に異なった周波数における反射エコーのデータが必要であるなど、実際の適用において解決すべき課題がある。

4. 標準試験片の人工欠陥の識別性低下要因の検討

第一報では、識別用探触子仕様、探触子位置が最適な条件下において標準試験片の横穴、縦穴およびスリットが100%識別できること、課題としてこの2つの条件の変動の影響の低減が必要であることを報告した。

ここではこれら2つの条件の変動が、各特徴量に与える影響を検討した。

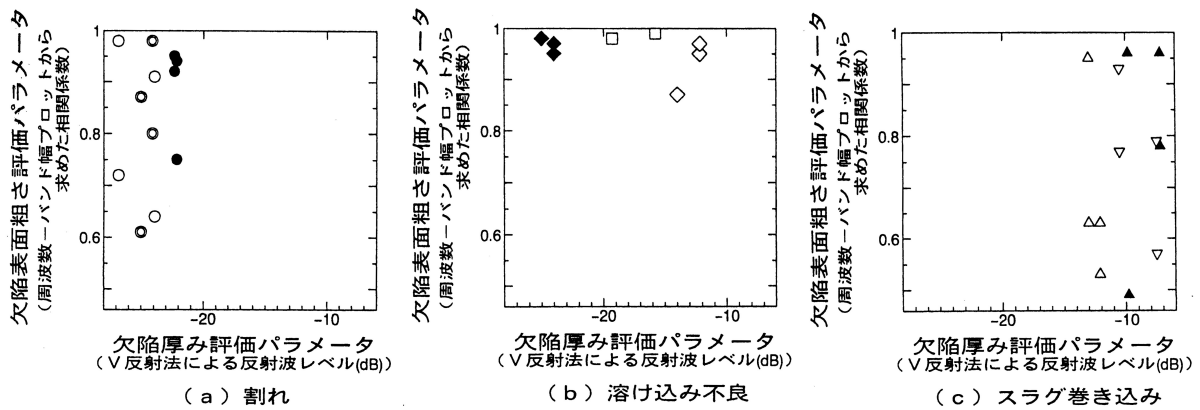


図8 各種欠陥における厚み評価パラメータと粗さ評価パラメータの関係

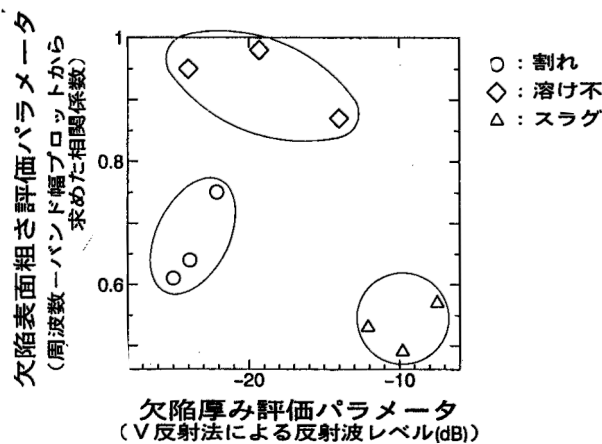


図9 各種欠陥における厚み評価パラメータと粗さ評価パラメータの関係

4.1 探触子位置の影響の検討

無指向性の横穴欠陥を対象に、探触子を欠陥に対し前後に走査し、テストプロが取り扱う71の波形特徴量の変化を求めた。図10に要領を示す。ここでは、各特徴量の位置ずれによる変動幅を±20%に設定して調査した。図11に各特徴量の変動幅が±20%以内である探触子の位置の範囲を示す。

この結果、周波数領域における特徴量が、概して探触子位置に敏感であった。従って、周波数領域の特徴量を用いて欠陥識別する場合は、欠陥エコーの最大位置を±1mm以内で正確に把握する技術が必要であると考えられる。

4.2 探触子仕様の影響の検討

探触子仕様の影響として、周波数、バンド幅、屈折角の差が欠陥識別に及ぼす影響を調べた。

(1) 周波数の影響

図12に探触子の周波数を4.5～5.5MHzに変化させた場合の識別率（正答率）を示す。図にみるように、欠陥種類によって中心周波数

が高周波数側、低周波数側あるいは両側にシフトした場合に識別率が大きく低下した。この結果から、周波数の差に起因するエラーの発生を抑えるためには、中心周波数の誤差は±1%以内である必要があると考えられる。

(2) バンド幅の影響

図13に探触子のバンド幅を変化させた場合の識別率を示す。図にみるように、バンド幅が広がっても狭くても識別率が低下した。この結果から、バンド幅の差に起因するエラーの発生を抑えるためには、バンド幅の誤差は±2%以内である必要があると考えられる。

(3) 屈折角の影響

図14に探触子の屈折角を35～60°に変化させた場合の識別率を示す。図にみるように、屈折角が大きい側、小さい側あるいは両側にずれた場合に識別率が低下した。この結果から、バンド幅の差に起因するエラーの発生を抑えるためには、屈折角の誤差は約2°以内である必要があると考えられる。

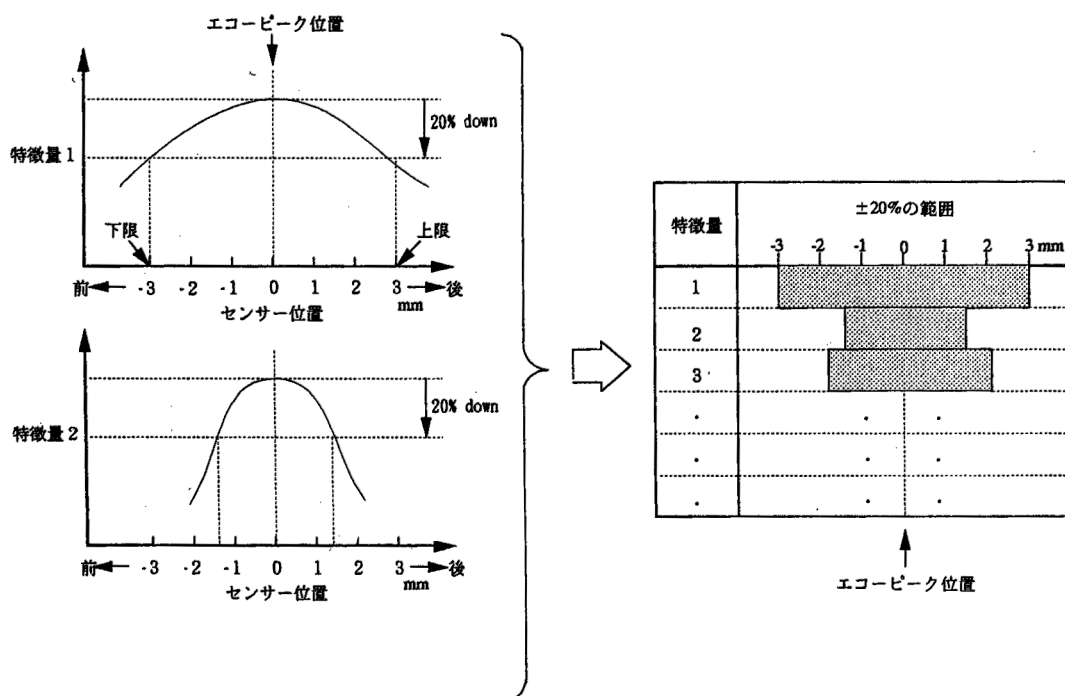


図10 データ整理方法

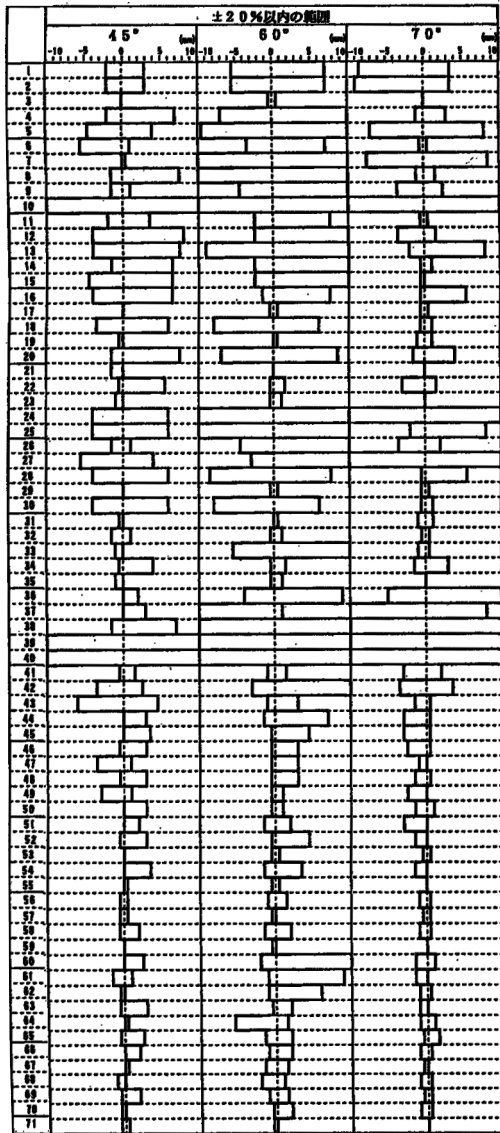


図11 サーチセンサ位置の特徴量変動に与える影響 (2 MHz)

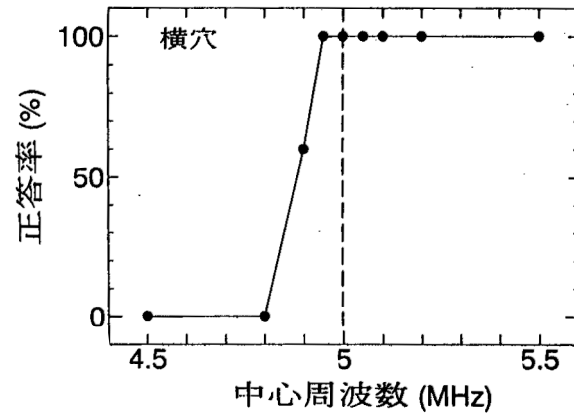
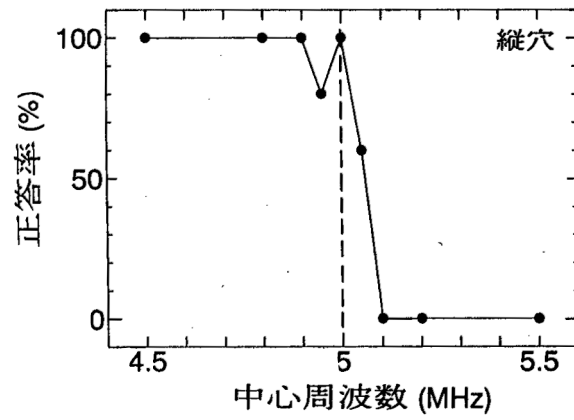
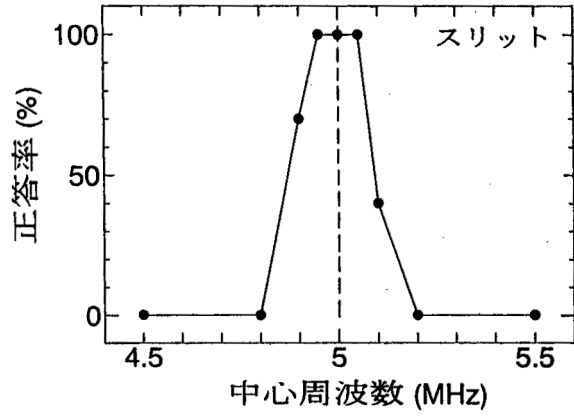


図12 欠陥識別に及ぼす周波数の影響

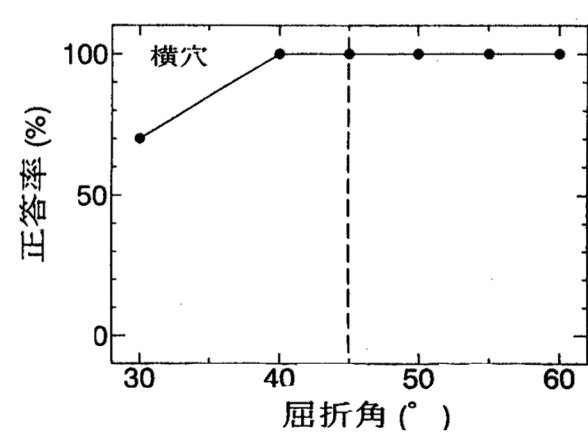
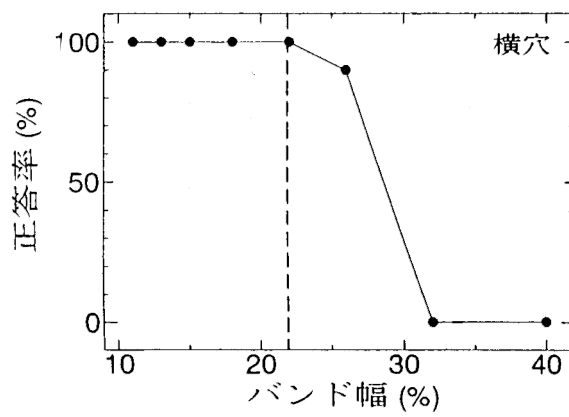
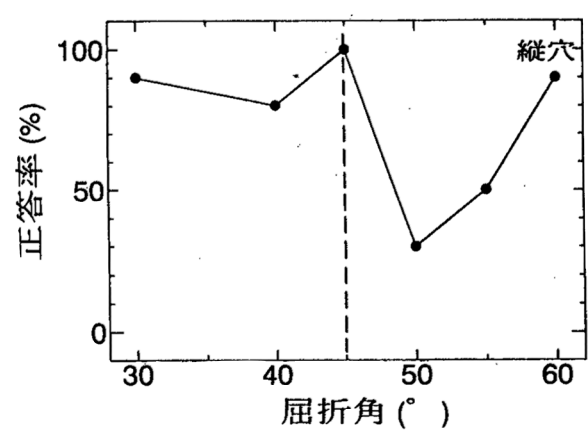
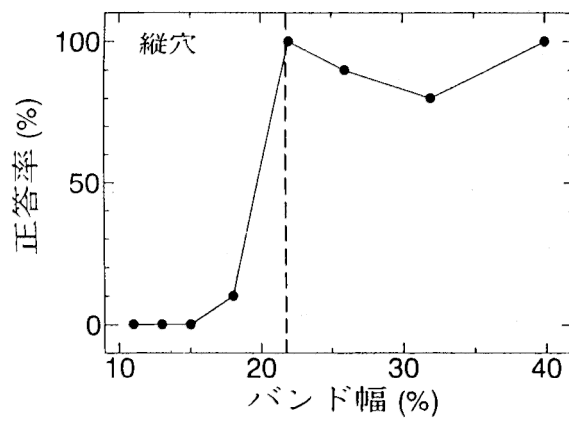
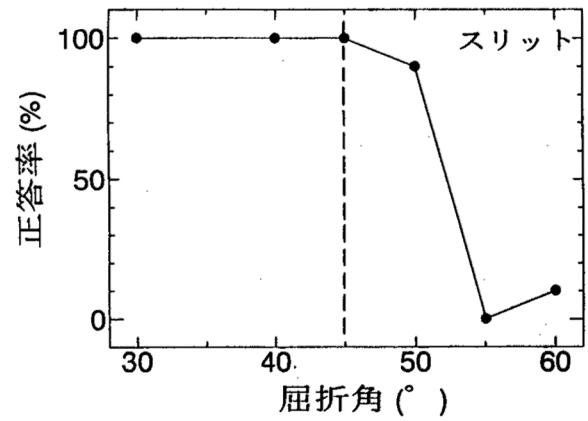
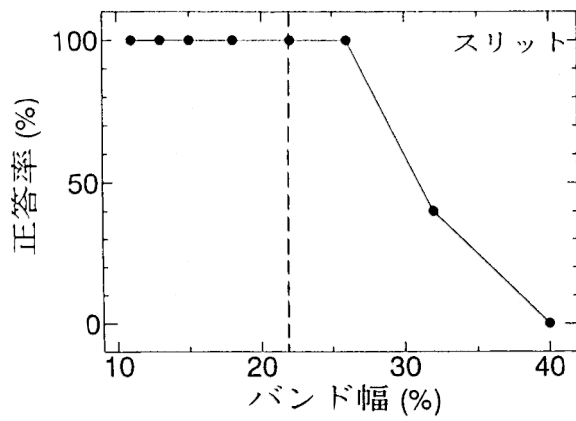


図13 欠陥識別に及ぼすバンド幅の影響

図14 欠陥識別に及ぼす屈折角の影響

5. 考察

本報においては、炭素鋼の3種の自然欠陥に対するテストプロの識別能力を検証した。その結果、現状のテストプロの能力では総合識別率が53.2%と低く、そのままでは実機適用が困難であることがわかった。

ここで、新しい識別パラメーターとして、各自然欠陥の特徴を考慮し、欠陥表面粗さ評価パラメーターに周波数 - バンド幅プロットの相関係数をとり、欠陥厚み評価パラメーターに欠陥上部からの反射波レベルをとって合成すれば、識別可能であることがわかった。

しかし、実機適用にあたり、この方法には、現状のテストプロの識別ソフトに含まれていない、両パラメーターは、周波数を変化させたデータが何点か必要であるという課題がある。

また、標準試験片の3種の人工欠陥の識別に対する識別用探触子仕様、位置の変動による識別率への影響を検証した。この結果、所定の識別率を得ようとすれば、探触子仕様、探触子位置の両方に非常に高い精度が要求されることがわかった。

従って、通常のJIS規格による探触子では、これを満足できないこと、検査員に由来よりずっと厳しい探触子位置精度が要求されることといった問題点が明らかとなった。

6. まとめ

本報においては、炭素鋼の3種の自然欠陥に対するテストプロの識別能力の検証ならびに標準試験片の3種の人工欠陥の識別に対する識別用探触子仕様、位置の変動による識別率への影響の検証を行った。

その結果、以下のことがわかった。

1. 炭素鋼試験片の3種の自然欠陥に対するテストプロの識別能力の検証

(結果)

- ・現状では、総合識別能力が53.2%と非常に低い。
- ・3種の自然欠陥の表面粗さ、上部の面積の違いに着目したパラメーターの導入により、識別が可能である。

(課題)

- ・このパラメーターは、異なった周波数のデータが必要である。
 - ・実機適用には、このパラメーターを取り入れたソフトの変更が必要である。
2. 探触子仕様、位置の変動による標準試験片の3種の人工欠陥の識別率への影響の検証

(結果 / 課題)

- ・欠陥エコーの最大位置を ± 1 mm以内で正確に把握する技術が必要である。
- ・中心周波数の誤差は $\pm 1\%$ 以内、バンド幅の誤差は $\pm 2\%$ 以内、屈折角の誤差は約 2° 以内といった探触子仕様に対する厳しい精度が必要である。

参考文献

- (1) 矢川元基 芳村忍, レーザー超音波による欠陥同定問題へのニューラルネットワークの適用, 東京大学工学部総合試験所年報, 1994
- (2) 小野数彦 岩崎章夫, UT溶接欠陥自動判別システムの開発, 溶接技術, Vol.42, 1994
- (3) 矢川元基 芳村忍, ニューラルネットワークと計算力学による欠陥の同定, 東京大学工学部総合試験所年報, 1993
- (4) Chiou C-P Schmerr L W, A neural network model for ultrasonic flaw sizing, Nondestr Test Eval, Vol.10, No.3, 1993
- (5) Song S J Schmerr L W, Ultrasonic Flaw Classification in Weldments Using Probabilistic Neural Networks, J Nondestr Eval, Vol.11, No.2, 1992
- (6) 大石篤哉 矢川元基, 波動伝播シミュレーションとニューラルネットワークによる欠陥同定, 構造工学における数値解析法シンポジウム論文集, 1992
- (7) 大石篤哉 矢川元基, 超音波法に基づく欠陥同定へのニューラルネットワークの応用, 日本機械学会論文集, 1992
- (8) 松浦洋司 芳村敏夫, 超音波探傷試験評価のためのファジイ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, 日本機械学会論文集, 1993

- (9) 松浦洋司 芳村敏夫, 超音波探傷試験評価のためのファジイエキスパートシステム 推論法などの改良とパソコン用システムの構築, 日本機械学会論文集, 1992
- (10) 平尾友二 芳村敏夫, 超音波探傷試験による溶接部検査結果のデータベース化とその評価支援エキスパートシステムの構築に関する研究, 徳島県立工業技術センター研究報告, 1992
- (11) Kalyanasundram P, High sensitivity detection and classification of defects in austenitic weldments using cluster analysis and pattern recognition, J Nondestr Test, Vol.33, No.6, 1991
- (12) Perron Marie-Claude, Feature extraction and learning decision rules from ultrasonic signals, 1988 Ultrasonic Symposium No.1
- (13) 森本 匡, 画像表示超音波探傷器の開発, 非破壊検査, 第43巻, 第2号, 1993
- (14) G. Selby R. Williams, Feature-Enhanced-Imaging Field Trials, Peach Bottom Unit 3, EPRI Report NP-5865, 1988
- (15) 黒住保夫 吉荒俊克, 超音波のパターン認識による欠陥識別, INSS JOURNAL No.1, 1994