# 非破壊検査技術の開発とその応用

## Development of Non Destructive Inspection Techniques and Their Applications

製品の信頼性を確保するため,製品内部の透視検査が重要である。単なる欠陥検 出だけでなく,寿命評価の上で欠陥の大きさ及び形状の把握も要求されつつあり, また内部構造の変形も検査対象になる。そこで,欠陥や内部構造の映像化を目的と した非破壊検査技術を開発してきた。

欠陥検出能力の高い超音波検査では,瞬時に内部欠陥を映像で表示する電子走査 技術,欠陥を高解像の立体映像で表示するディジタル方式超音波ホログラフィー技 術を開発した。また,超音波では検査しにくい多層構造の製品検査には, γ線CT技 術を開発した。本稿では,これら検査技術を厚肉材溶接部,配管の内面腐食部やス テッピングモータの検査に適用した事例について述べる。

高橋文信*	Fuminobu Takahashi
尾崎典彦**	Norihiko Ozaki
園部 正***	Tadashi Sonobe
樋口真一***	Shin'ichi Higuchi
成瀬明輔***	Akisuke Naruse

#### 1 緒 言

簡便な機器を用いた超音波探傷法は,超音波探触子で受信 した信号波形を時間軸上に表示する方法である。試験体中に 欠陥があれば,反射波パルスが観測されるが,試験体の機械 加工による段差や溶接部からの反射波も同時に観測されるた め,単なる欠陥の有無の判定や反射波の伝搬時間から欠陥位 置を求めるにも,検査員に熟練さが要求される場合が多い。



熟練した技術をもっていなくても、欠陥の存在の有無を判 定したり、位置を把握できるようにするには、試験体内部を 映像として表示することが一つの解決策になる。同時に欠陥 の形状や大きさ、内部構造の変形などの把握も容易になる。

このような観点から,測定した物理量で実形状に忠実な透 視像を表示するための映像処理技術を駆使した検査装置を開 発するとともに,検査の自動化を進めている。

映像化を主体とする検査装置では、より速く、より詳細に が要求され、これらに対応した非破壊検査技術について紹介 する。

#### 2 ディジタル方式超音波ホログラフィー技術

超音波ホログラフィーは、入射超音波と欠陥からの反射波 との位相差を検出し、欠陥の情報を位相差によるしま模様(こ れをホログラムと呼ぶ。)で記録した後、ホログラムを回折格 子とした光学系によるレーザ光の干渉あるいは計算機による 複雑な干渉計算によって、欠陥の詳細な映像を得る技術であ る。欠陥像を3次元表示できることが大きな特長である。し かし、従来の超音波ホログラフィー<sup>11</sup>では、入射超音波と反射 波を電気的に干渉させて位相差を測定する方式のため、ホロ グラムのしま間隔を細かくして映像の分解能を高めるには、 高い周波数の超音波を用いる必要があった。周波数を高める と試験体中での減衰が大きくなるため、超音波周波数は数メ ガヘルツに制約される。

新しく開発したディジタル方式超音波ホログラフィー2)では,

図 | ディジタル方式位相検出の原理 反射波パルス受信時刻のクロ ックパルスの出力レベル"0", "I"で,ホログラムを記録する。

ックパルスの出力レベルに応じて、"0"及び"1"にした詳細なホログラムを記録する。本方法により、使用する超音波の周波数に無関係にクロックパルスの周波数を高くしてしま間隔を密にした、欠陥反射波の位相の精密な空間分布を測定できるようになった。

また,計算機によるホログラムから欠陥像の導出方法では, ホログラム各点を音源とした球面波同士の干渉計算に代わり, ホログラム面の中で再生面と同じ面積の部分を面音源とした 平面波を再生面上で干渉させる新しいアルゴリズム<sup>3)</sup>の計算方 式を開発し,この結果,小形計算機で3時間以上かかる計算 を2分に短縮できた。

干渉計算で導出した欠陥像は,鳥観図表示で立体的に表示 する。映像の鮮明さを保持するため,雑音信号による異常値 を除去し,近傍の値で補間する異常値除去処理を,また,映 像の立体感を強調するため,陰に隠れる映像を表示しない陰 線処理,反射面のこう配に対応し輝度を変化させる輝度階調

85

この問題を解決し低い周波数の超音波を使っても、ホログラ 処理をそれぞれモジュール化して使用している。立体映像を 表示するのに要する時間は、干渉計算を含めて1画面当たり ムのしまの間隔を細かく記録できるようにした。この原理は, 図1に示すように、超音波発信に同期したディジタルクロッ 3分である。 本技術に基づく検査装置の構成を図2に示す。詳細なホ クパルスを時間基準信号として用い、反射波受信時刻のクロ

\* 日立製作所エネルギー研究所 \*\* 日立製作所エネルギー研究所 工学博士 \*\*\* 日立製作所日立工場

746 日立評論 VOL. 67 No. 9 (1985-9)



図2 ディジタル方式超音波ホログラフィー装置の構成 信号処理装置は可搬性を重視した4ユニットで構成され、ホログラムデータはフロッピーディスクを介して小形計算機システムに入力する。

ログラムを記録するため,位置決め精度0.125mmの探触子走 査装置を用い,検査場所に移動が容易な4ユニット構成の信 号処理装置,フロッピーディスクに記録されたホログラムか ら立体映像を導出して表示する小形計算機システムで構成さ れる。以下,本装置を用いた検査例を示す。

内面が腐食した配管(肉厚約12mm)を外表面から検査し,腐 食した内面を映像化した結果を図3に示す。同図中の上が配 管内面の実形状,下が超音波による立体映像である。腐食に よる内面の凹凸が0.2mm以内の精度で立体表示できる。

肉厚250mmの鋼材中の溶接欠陥の映像を図4に示す。同図 左の像は鋼材表面から150mmの深さにある割れ状欠陥で,3 層であることや最下層の複雑な形状の欠陥が鮮明に表示され ている。右の映像はボイド状欠陥で丸みのある映像で表示さ れている。このように鮮明な立体映像により,複雑な欠陥形状の把握のほか,特徴的な映像から欠陥の種別を推察できる可能性が高まったと言える。直接目で見ることができない物体の透視技術として,幅広く活用できるであろう。

#### 3 電子走查形超音波探傷技術

一瞬のうちに,試験体内部の欠陥を映像化するために開発 した技術である。電子走査の原理を図5に示す。小さな超音 波送受信素子を列状に配置したアレー探触子を用いる。同図 (a)に示すように,送受信素子ごとに一定時間遅らせて発信パ ルスを印加すると,各素子から伝搬する超音波が干渉しあい, 特定方向に伝搬する超音波ビームを形成する。一方,同図(b) に示すように放物線状の時間間隔で発信パルスを遅延させて





図5 超音波ビーム走査の原理 送信パルスの遅延と同様に,受信信号を遅延してミキシングすると,特定の場所から反射された超音波パルスだけが強く受信できる。

各素子に印加すると,特定の深さで集束する超音波ビームが 形成される。そこで,同図(a),(b)を複合させて超音波の送受 信時間を制御すれば,探触子を機械走査せずに集束超音波ビ ームを扇状に空間走査できる。

試験体内部の小さな欠陥を確実に検出するためには,集束 ビームを欠陥に照射する必要がある。そこで試験体肉厚方向 の3箇所で焦点を結ばせ,かつその集束ビームを120度の範囲 で1度ごとに方向を変える扇形走査方式を開発した<sup>4)</sup>。焦点の 走査3回,扇形走査が121回で計363回の超音波送受信で,試 験体断面を映像化する。送受信の繰返し周期は80µsであり, わずか約30msで断面像を得る。

電子走査形超音波探傷装置の外観を図6に示す。本装置を 用いた探傷例を図7に示す。ステンレス鋼の深さ15mmにせん 孔した間隔4mm, 直径1mmの二つのドリル孔を瞬時に表示 できる。配管のように表面が曲面でも使用できるように, 32 ×32の送受信素子を2次元配列しわん曲可能(最小曲率半径 100mm)なアレー探触子も開発し, 100mm×100mmの範囲を 1秒で立体表示できる機能を実現した。このような高速検査 技術は, 欠陥などの検出はもちろんのこと, 動く物体の可視 化などにも活用可能である。

#### 4 γ線CT技術

超音波では検査しにくい多層構造の製品内部を透視する目



図6 電子走査形超音波探傷装置の外観 表示部にアレー探触子を 押し当てた部分の映像が実時間で表示される。

的で開発した技術である。原理は、医用機器として用いられ ているX線CT(Computed Tomography)装置と同様, 試験体 の放射線透過強度を測定し、その透過強度の空間分布から試 験体内部の放射線吸収分布を算出し,映像として表示する方 法である<sup>5)</sup>。 y線を用いたのは、X線より20倍以上透過力があ る(厚さ50mmの鋼材に対して)こと、X線と異なりエネルギー が単一なためエネルギー弁別により試験体内部で散乱したY線 を除去できる利点があるためである。γ線を用いるに当たり、 小形BGO(Bismus Germanate Oxide)シンチレータ及び光電 子増倍管の形状,配置の最適化を図り,検出器窓幅3mm,20 chのアレー形y線検出器と、y線による光電パルスをCAMAC (Computer Automated Measurement and Control)システ ムで10<sup>5</sup>カウント/秒の高計数処理方式を実用化した。開発した γ線CT装置の外観を図8に示す。線源及び検出器を、試験体 を間にはさみ並進,回転走査する方式である。検査可能な試 験体の大きさは直径256mm以内である。本装置を用いた検査 例を図9に示す。同図中(a)は直径56mmのステッピングモータ で、(b)がモータ上端から約2cmの横断面を密度に応じてカラ

87



748 日立評論 VOL. 67 No. 9 (1985-9)



図 8 r線CT装置の外観 散乱放射線をパルス計数の段階 で除去できるため, r線検出器 の遮へいが簡単になる。このた め, 医用X線CTに比べてスキャ ナが小さくなっている。



図 9 ステッピングモータ の映像化 濃白色の部分が 鉄,淡白色の部分が銅線コイル に相当する。回転子内の6個の 空気層が明確に表示されている。

ー表示した映像である。線源として<sup>137</sup>Csの30mCi(Y線エネル ギーは662keV)を用いたときの測定時間は10分で,分解能は約 1.5mmである。直径0.5mmのボイド状欠陥が検出でき,製品 内部の変形,部品欠損の検査が可能な映像が得られる。

非接触で多層構造の製品内部を透視できる点で,超音波検 査技術にはかなり利点があり,今後適用範囲の拡大が期待で きる。

## 自動サイジングや検査データのファイリングなど,ソフトウ ェアの充実も図った。映像表示を主体とした検査だけでなく 上記ソフトウェアの適用により,種々の要求に対応した自動 検査装置の提供を図ってゆく考えである。

#### 5 結 言

88

より速く、より詳細にというニーズに対応して、映像化を 目的とした非破壊検査技術を開発した。超音波を用いた検査 で、欠陥の詳細な立体映像の表示は、ディジタル方式超音波 ホログラフィー技術で実現し、高速検査はフレキシブル2次 元アレー探触子と集束ビームの扇形走査による電子走査技術 で、100mm×100mmの範囲を1秒で立体表示することを可能 にした。 複雑な多層構造の製品検査用としては、透過能力の高い7線 を用いたCT技術で、ステッピングモータ内部を分解能1.5mm で映像化する装置を開発した。 これら非破壊検査技術の開発では、欠陥の映像化と同時に

### 参考文献

- B. P. Hildebrand, et al. An Introduction to Acoustical Holography, Plenum Press, New York (1972)
- 2) 高橋,外:ディジタル方式超音波ホログラフィ探傷装置の開発 とその応用について,非破壊検査, p.2~10(昭55-1)
- 3) F. Takahashi, et al. Computer Reconstruction for Digital Acoustical Holographic Inspections of Turbine Rotors and

Pipes, The 2nd Japanese-German Joint Seminar, pp. 26~40 (February, 1983)

4) S. Ogura, et al. : Electronic Beam Focusing for Ultrasonic Linear Array Transducers IECON'84, pp. 637~639(1984)
5) K. Tsumaki, et al. : Measurement of Void Fraction Distribution by Gamma Ray Computed Tomography, JNST. Vol. 21, No. 4, pp. 315~317(1984)