

## 鋼構造物の簡易自動超音波検査システムの開発

戸羽 篤也, 相山 英明, 五十嵐 正, 矢崎 憲治\*

Development of Semiautomated System for Ultrasonic Examination for Steel Structure .

Atsuya TOBA , Hideaki AIYAMA , Tadashi IGARASHI , Kenji YAZAKI\*.

### 抄 録

鉄骨建築における溶接接合部の非破壊検査は、建物の安全性確保の観点から欠かせない工程である。鉄骨溶接部の非破壊検査の方法として、超音波探傷法が用いられるのが一般的であるが、この検査法による欠陥の検出およびその判断には、かなりの熟練が要求される。しかしながら、検査技術者の絶対数は少なく、年々増加する検査需要に追いつかないのが現状である。

筆者らは、超音波検査の熟練による部分を機械化することで、実務経験の浅い技術者でも十分に信頼性の高い検査結果を引き出し得るような検査支援システムの開発を試みた。

### 1. はじめに

建築用鋼構造物は、数多くの鉄骨素材を溶接接合して製作された柱、梁などが現場で組み合わされて建築物の躯体となるものである。建築物は、人命保護の立場から、大地震などの災害時でも建物が壊れないための強度が要求される。建築物の強度を保障するには、理論的な強度計算に基づく構造設計はもちろんであるが、溶接による素材どうしの接合部の健全性確保も極めて重要である。

鉄骨溶接部の品質検査は、外観検査および内部欠陥を対象とした非破壊検査により実施される。わが国では、建築構造の溶接部に割れなどの欠陥が内在しないように、非破壊検査を行うことが法令で義務づけられている。鉄骨建築構造物の一般的な非破壊検査手段として、超音波探傷法<sup>1)</sup>が適用される。超音波探傷法は、探傷器と探触子以外に特別な機器を必要とせず、作業性のよい検査法である。しかしその反面、探触子の走査、欠陥の検出、欠陥状態の判断などに一定の熟練を要する。

(社)日本非破壊検査協会(以下「NDI」という)では、検査技術者の技量認定業務を行っており、超音波技術者においても1種(UD-1)、2種(UT-2)、および3種(UT-3)の資格がある。また、(社)全国鉄鋼工業連合会では、NDIの有資格者を対象に、特に鉄骨溶接部の超音波検査について教育と資格認定を実施している。現在、鉄骨超音波検査技術者は、全国で約1900人ほどいるが、年々建築物が高層化、複雑化するな

かで、検査需要が増加しており、鉄骨に関して検査需要を満足させるには極めて少い人数である。

技術職あるいは技能職における人員不足は、3K産業を中心に近年の傾向であるが、超音波検査に関して技術者の育成が遅れている要因として、探触子の走査など依然として手作業に頼っており、これに十分な熟練が要求されること、斜角探傷法では反射源位置について直観性に乏しいため、欠陥の推定には溶接状態、探触子位置なども含めた総合的な判断が要求されることなどがあげられる。

我々は、検査技術者確保の観点から、鉄骨超音波検査の非熟練化をはかるとともに、個人差による検査結果のばらつきを少なくして信頼性の高いものにするための装置開発を試みた。

### 2. 超音波探傷試験法の原理

一般に音波は、疎密波(縦波)、せん断波(横波)および表面波などに分けられる。音波は、同じ密度の物質中は直進するが、密度が変化する部分では反射、あるいは進む方向を変える。この際、物質の縦弾性係数と横弾性係数あるいはポアソン比が既知であれば、疎密波およびせん断波の伝播速度が定まり、音波を入射したときからの時間を測定することで、音波の伝達経路の距離を計算で求めることが可能になる。

超音波探傷法は、音波に関するこれらの性質を利用して、物質に直進性のよい超音波を入射し、その反射波の様子により内部の状態、すなわち欠陥の有無、位置、大きさなどを推定する非破壊検査法である。

\*北日本電極(株)((社)北海道機械工業会)

音波は、その周波数が高くなるにしたがって、指向性がよくなるが、材料の結晶粒界での散乱により減衰が大きくなるという波動特有の性質がある。このため、使用する音波の周波数は、検出しようとする欠陥、検査する材料特性などに合わせて選択される<sup>2)</sup>。

図1に示す垂直探傷法は、超音波検査法の一つであり、検査する母材に表面から垂直に音波を入射する。探触子は多くの場合音波の発振器と受信器を合わせたもので、一定間隔ごとに音波を発信し、その反射波を受信する仕組みになっている。母材の内部に欠陥がない場合には、板の裏面からの反射（底面エコー）を受信する。内部に欠陥が存在すると、底面エコーより前に反射波（欠陥エコー）を受信し、この波形から内部欠陥の存在を確認し、さらにその位置、大きさなどを推定する。欠陥の深さ方向の距離は、送信波から欠陥エコーの到達するまでの時間を測定し、予め測定しておいた材料の音速との積から音波の伝播距離（ビーム路程）を知り、その半分の値で求められる。

図2に示す斜角探傷法は板材の突き合わせ部、T継手などに用いられる超音波検査法である。音波の入射角は、入射面の法線に対して定義される。斜角探傷法では、内部に欠陥がない場合、底面エコーのような反射波は見られない。そこで、溶接溶け込み部のように欠陥の発生しそうな範囲を予め予測し、その範囲での欠陥エコーの有無に注目して検査を行う。

欠陥エコーを受信したとき、図2-aのように、音波が入射角  $\theta$  で送受信された場合を考えると、欠陥の深さ、入射点からの水平方向の位置は、次式で計算される。

$$\text{欠陥深さ： } d = W \cdot \cos \theta$$

$$\text{欠陥位置： } Z = W \cdot \sin \theta$$

(W:ビーム路程)

式中のビーム路程 W は、垂直探傷と同様に、音波送信との時間差から求める。

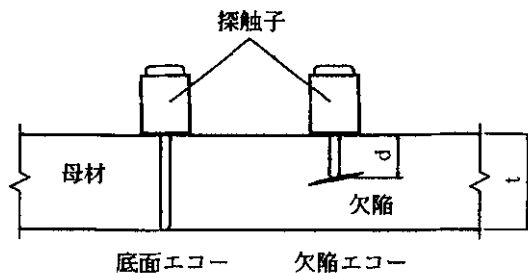
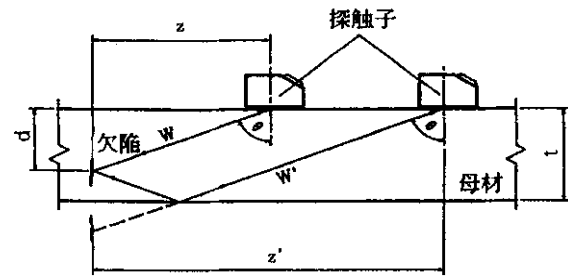
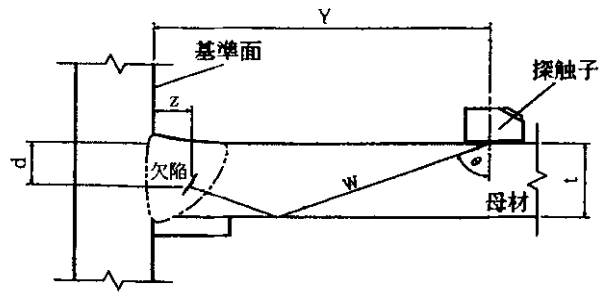


図1 垂直探傷法



a) 欠陥位置の推定



b) 記録するときの欠陥位置の決め方

図2 斜角探傷法

さらに、斜角探傷の場合、母材の底面で反射してから欠陥エコーを受信することがある。この場合の欠陥深さは、母材の肉厚との関係から、

$$\text{欠陥深さ： } d = 2t - W \cdot \cos \theta$$

で求められる。

超音波検査の結果を記録する場合、図2-bのように溶接箇所の特定位を基準にして、欠陥距離を定義するのが一般的である。このとき、その基準から探触子の入射点までの距離 Y を測り、

$$\text{欠陥距離： } z = Y - W \cdot \sin \theta$$

(Y:基準位置から入射点までの距離)

として、検査成績表に記録する。このほか、検査成績表には、欠陥の発見された起点、欠陥の長さ、エコーの領域（エコーの大きさ）なども記録される<sup>3)</sup>。

### 3. 超音波検査における現状と問題点

#### 3.1 超音波探傷器の動向と課題

超音波検査は、超音波を発信/受信する探触子と、それらを波形として表示する超音波探傷器本体を使用する。近年、探傷器の機能向上をはかるため、内部信号をデジタル信号に変換し、多くの目的で利用可能な機種が開発され、普及し

つつある。こうした機種は、総称して「デジタル探傷器」と呼ばれている。

デジタル探傷器は、受信感度、音速など従来ポテンシオメータで微妙に調整しなければならない探傷条件設定作業を、キー操作で数値入力できるようにし、またそれら条件をメモリすることにより、飛躍的に作業性を向上させた。

しかしながら、探触子の走査は、依然として手作業に頼っており、またエコー波形の解釈も、最終的に検査技術者の経験に委ねられる。このため、探傷器のもつ能力を引き出すには、検査技術者の熟練を要することは変わっていない。

### 3.2 超音波検査における探触子の走査

溶接部の斜角探傷で、探触子の走査は、検査品質に影響する重要な因子である。欠陥を見落とさないためには、溶接線方向への送り量が粗すぎないこと、探触子の向きと前後走査の方向が一致すること、超音波が欠陥の発生し得る領域を網羅していることなどに注意を払う必要がある。

しかしながら、実際の探傷作業は、必ずしも望ましい作業姿勢で行うことができず、また、探傷器のエコー波形表示を監視する必要があることから、探触子の走査状況を目視確認できない。このため、探触子の走査は、検査員の勘に頼ることになり、これが超音波検査に熟練を要する所以である。

### 3.3 エコー波形と欠陥の推定

超音波探傷による欠陥の検出、および欠陥の状態の判断は、すべて探傷器から得られるエコー波形をもとに行われる。

このエコー波形から読み取れる情報は、基本的に送信パルスからの時間経過と、そのときの音圧の大きさのみである。超音波は、ある広がりをもって母材中を進むことから、一つの反射源からある幅をもってエコー波形が検出される。一般に、最も高いレベルのエコーを検出したところで欠陥位置を推定するが、欠陥の状態や溶接状態によっては複数のピークが重なって現れるなど、欠陥の判断を難しくする場合がある。このことは、欠陥位置、欠陥指示長さなどの測定に関して、検査技術者による個人差の原因となる。

また、検査技術者は、探触子を走査しながらエコー波形を解釈し、欠陥の判定を行うが、特に斜角探傷法では、母材断面中の音波の経路を直観的にイメージすることが難しく、そのエコーが欠陥によるものか溶接部固有の条件に起因するものか、微妙に判断しきれないという場面もしばしばある。

### 3.4 検査結果の評価

超音波検査後の結果の評価は、建築学会、NDI等で決められた規則にしたがって処理される。現在、検査結果のまとめは、この規則にしたがって、人手によって機械的に処理されている。

こうした作業は、電算機による情報処理への移行が望まれ

ており、これまでいくつかの試みも行われている。この際、検査結果をデータとして入力する方法も併せて電算化する工夫が必要である。

## 4. 自動化の目的と課題設定

### 4.1 検査システム開発の目的

本開発は、溶接部の検査について、初心者でも熟練者並みの検査を可能ならしめ、品質管理に関する専門知識がなくても検査結果を有効に分析できるシステムの開発を目的とする。

初心者にも、熟練者並みの検査を可能とするためには、検査を実施する上で要求される熟練への依存度を低減する必要がある。また、検査の結果得られた情報は、製作後の品質確認だけでなく、次に製作する製品の不具合の低減といった、QC活動のためにフィードバックされることも重要である。

この検査システムの開発にあたっては、検査作業の合理化とともに、今後の品質管理手法の合理化をも念頭に入れ、検査から最終のデータ処理まで、一連の検査業務に対応可能なシステムの試作を目指した。

### 4.2 自動化の考え方

超音波検査を自動化しようとする時、検査条件の設定、探触子の走査、欠陥検出および判定、欠陥指示長さ測定、結果の記録などの自動化についてそれぞれ解決しなければならない。

本開発課題では、開発経費と時間の節約をはかる意味から、完全自動化ということではなく、非熟練化に効果のあると考えられる、正確な探触子の走査、反射源イメージの視覚化の2点に的を絞り、具体的な装置の試作を行うこととした。さらに、検査結果のデータ処理など、今後の機能拡張の可能性をもたせるため、装置の設計段階で拡張性にも配慮した。

### 4.3 開発課題の設定

#### 4.3.1 探触子走査の自動化

探触子走査の自動化については、目視せずに正確な探触子の走査をする「走査装置」の開発を考えた。ここでいう「正確な探触子の走査」は、探触子の走査方向が直線となること、探触子の「首振り」が生じないこと、前後の走査幅が一定となること、溶接線方向の送り距離が過大にならず、一定であることなどの条件を満足することを意味する。

また、溶接で生じたスパッタ等に探触子が引っかかるなどのトラブルも予想できることから、探触子走査自体は手動で行うことを前提として設計した。

さらに、水平2軸方向の探触子位置を自動的に検出できるように、距離センサを2つ装備し、従来の物差しによる探触子位置測定の自動化を試みた。

#### 4.3.2 反射源イメージの可視化

捉えたエコーが、欠陥によるものか否かの判断の際、おおよその音波の経路が判れば、その判断を容易にし、検査の信頼性を高めることができる。従来、母材中の超音波経路は、検査技術者が頭の中でイメージしていたが、これを視覚化することを検討した。

具体的には、液晶表示装置を増設し、エコー波形から、ピーム路程を読みとり、探触子位置、板厚などの情報から、探触子の入射角に応じた音波経路を線表示するプログラムを試作した。

#### 4.3.3 検査データの処理

このほか、検査後のデータ処理の合理化も考慮して、検査結果の保存をする機能をつけ加えることとした。検査結果を記録する媒体には、規格化されたICメモリカードを使用し、メモリカードにデータを読み書きするためのインタフェースを備えた。

メモリカードに保存された検査データを利用し、検査報告書を作成することについては、今後の課題とし、継続して検討を進める予定である。

### 5. 試作システムの概要

#### 5.1 探触子スキャナ<sup>4)</sup>

試作した探触子スキャナの外観写真を、図3に示す。探触子スキャナは、ボディ、アーム、レールの3つで構成される。各パーツは軽量化の観点から、材料に硬質アルミニウム材を使用した。

図4に探触子スキャナの基本構造の模式図を示す。ボディはレールに取り付けられ、溶接線方向(X方向)に移動する。アームの先端に、探触子を着脱する機構を設け、ボディ内を貫通して溶接線に対して垂直方向(Y方向)に揺動する。

アームとレールに、それぞれ市販の黄銅製ラックギア(歯車モジュール=0.5)を取り付け、ボディ内部に設置されたロータリエンコーダによりX方向、Y方向の相対位置を検出する機構を備えた。

探触子の走査方法は、溶接線に対して垂直に、前後走査することを基本にするが、この際アームの動きを扇動運動に変え、レールのラックギアと噛み合う歯車に一定方向の間欠回転を与えて、ボディを右または左へ定ピッチ移動させるラチェット機構を設けた。これにより、目視で確認しなくても1回の前後走査ごとに決まった距離だけX方向にスキャンすることが可能となる。

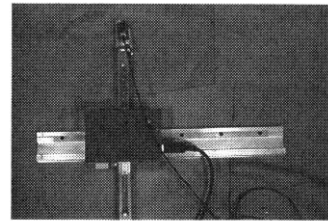


図3 探触子スキャナの外観

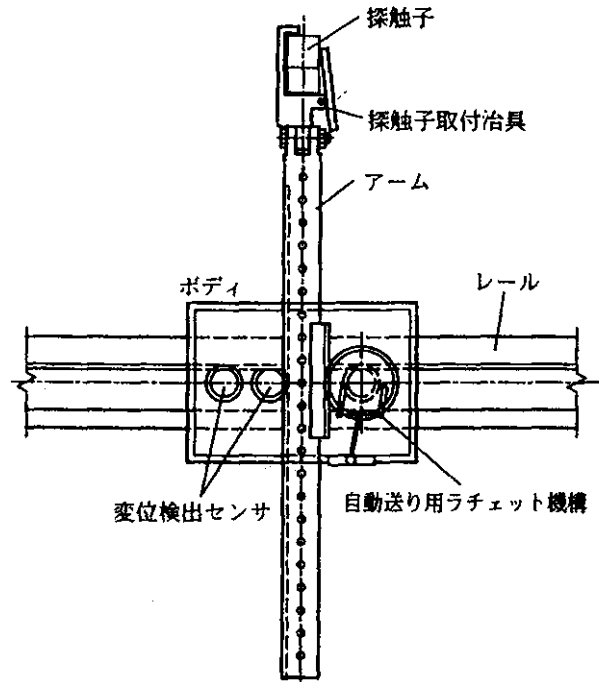


図4 探触子スキャナの構造模式図

このラチェット機構は、本スキャナの重要機構の一つで、レバー操作によって右送り、中立、左送りが選択でき、1回の前後走査によるピッチは約4mmとなっている。また、走査量を調節することにより、小さな前後走査によってピッチ約1mmの精密走査も可能である。これは、欠陥指示長さ測定時などに使用される。

ボディには、ボタンスイッチが1つ設けられており、探触子位置の相対原点設定などに使用される。

#### 5.2 データ処理ユニット

##### 5.2.1 超音波探傷器の選定とシステム開発方法

データ処理ユニットは、超音波探傷のための基本的な機能に加えて、母材断面の超音波経路表示器の増設、探触子位置検出のためのパルス信号カウンタ回路、検査データの保存のためのメモリカード読み書き用インタフェースなどを備えた、機能拡張基板を付加した構成となっている。

超音波探傷器部分には、市販の探傷器の中から、三菱電機(株)製のデジタル探傷器(UI-21型)<sup>5)</sup>を採用した。同製品は、ユーザーが必要に応じてハードウェアおよびソフトウェアに

よる機能拡張ができるように配慮されており、検査システムを設計するうえで超音波探傷機能のコアとして利用可能な数少ない機種の一つである。

UI-21型超音波探傷器は、探傷器本来の機能を担うアナログ信号処理系に加えて、そこから出力されたエコー波形をA/D変換し、様々な情報を得るデジタル処理系で構成される。デジタル処理の中心をなす演算処理部分には、ほぼ標準仕様のパーソナルコンピュータシステムを実装しており、入出力装置を拡張するための標準的な外部信号バスのコネクタが用意されている。

また、ソフトウェア拡張に関しても、基本ソフトとして「DR-DOS V5.0」が実装されているほか、操作パネルのキー入力、探傷条件パラメータの参照と設定、波形データの取り込みなど、機能拡張に必要な情報を簡単な手順で提供する低

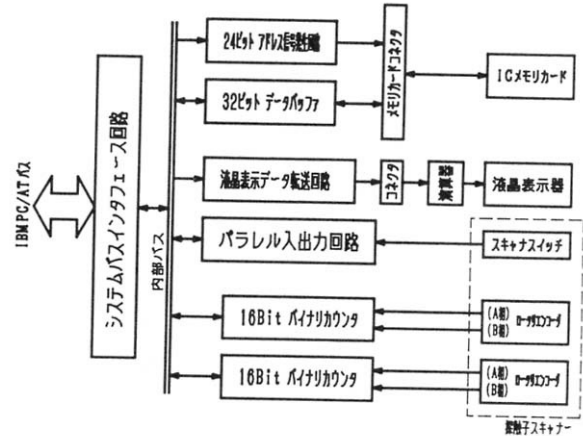


図7 機能拡張回路の構成ブロック図

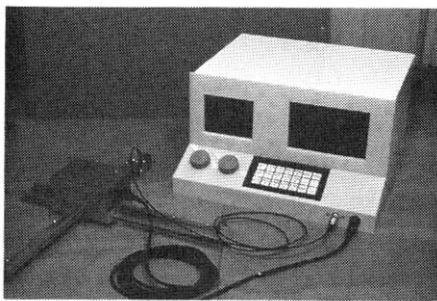


図5 試作したデータ処理ユニット外観

レベルサービスプログラムも充実しており、プログラム開発は、C言語などの高級言語を使用して、効率よく行うことができる。

本開発におけるハードウェア/ソフトウェアの拡張は、これらを有効に利用して行った。ソフトウェアの開発は、C言語コンパイラ (Microsoft C Ver6.0) と、マクロアセンブラ (Microsoft MASM Ver6.0) を使用した。

5.2.2 データ処理ユニットの機能と構成<sup>4)</sup>

試作したデータ処理ユニットの外観写真を図5に示す。データ処理ユニットは、本来の超音波探傷器の機能に加えて、以下の機能を付加したものである。

1. スキャナ出力による探触子位置自動検出。
2. エコー波形の解析。
3. エコー断面イメージの表示。
4. 欠陥位置の一時記憶および表示。
5. 欠陥位置、指示長さ、欠陥級などの自動測定。
6. ICメモ리카ードへの検査結果記録。
7. 検査済み情報の参照。

これらの機能を実現するために、図6に示すハードウェア構成とした。ハードウェアは、①UI-21本体部分、②外部拡張入出力部分、③拡張機能部分の大きめに3つの部分で構成される。

超音波検査装置本体部分は、探傷器本来の超音波の発信と受信、受信感度の調整、試験範囲の設定などを行うアナログ処理部分と、基本的なエコーの波形の表示、探傷条件の管理、操作パネルの制御、探傷器全体のシステム管理を行うデジタル処理部からなり、本システムの中心的な位置をなす。

外部拡張入出力部分は、外部記憶装置 (ハードディスク装置、フロッピディスクドライブ装置など) やCRT (ブラウン管表示装置) などを接続して、システム開発環境を整えるた

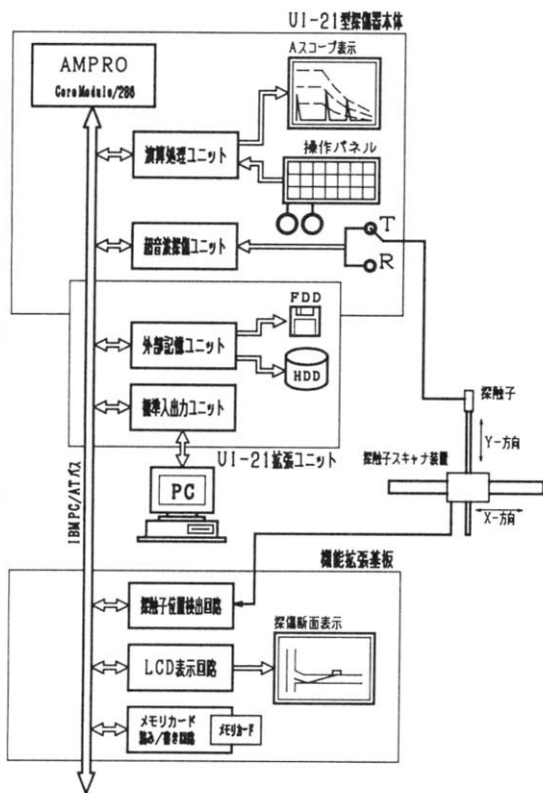


図6 データ処理ユニットのハードウェア構成

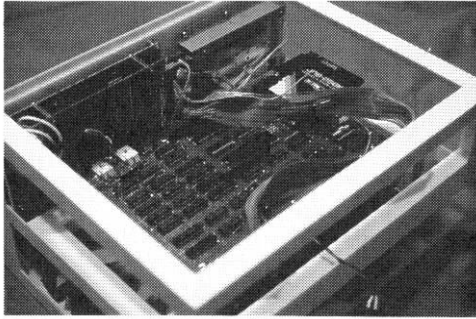


図8 データ処理ユニットの内部

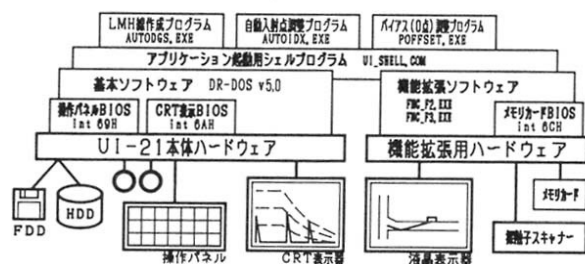


図9 データ処理ユニットのソフトウェア構成

めのもので、開発作業以外はこの部分は切り離して使用する。

図7は、機能拡張部分のハードウェア構成のブロック図である。機能拡張部分は、本開発事業で新たに開発する付加部分であり、探触子スキャナから出力されたパルス信号の処理、液晶表示器の制御、ICメモ리카ードの読み書きを行う。

探傷プローブ位置検出のためのパルスカウンタは、16ビットのバイナリカウンタ回路とし、最大約10mの距離測定が可能である。Y方向の移動は、数百mm程度であるが、それでも10ビット以上のカウンタが必要となることから、X方向、Y方向とも同じビット数のものを各1チャンネル用意した。

また、各方向の前進と後退は、ロータリエンコーダのA相とB相の信号間の位相差を利用して判別するが、細かな前後動作でパルスのカウント落ちが無いようカウンタ前段の信号処理回路を工夫した。

エコー断面イメージの表示などを行う表示装置には、ドットマトリクス液晶表示器(縦200ドット×横320ドット)を採用した。

メモ리카ードの読み書きのためのインタフェース回路は、JEIDA(日本電子工業振興協会)規格バージョン4.0<sup>6)</sup>に準拠し、アドレスバス24ビット、データバス16ビットのほかチップセレクト信号、読みだし要求信号、書き込みタイミング信号などを自由に設定できるように回路を設計した。24ビットのアドレスバス幅により、最大16MバイトまでのICメモ리카ードのアクセスが可能である。

このほか、入出力8ビットづつの外部信号インタフェースと、ハードウェア拡張をさらに可能とするための信号コネク

タを設けた。図8に示す写真は、試作したデータ処理ユニットの内部の様子である。中央に見える基板は、今回試作した機能拡張回路用の基板である。この基板の下には、UI-21型超音波探傷器の回路基板が納められている。基板の向こう側右手の箱型をしたものは、UI-21型に使用されている波形表示器であり、その左側に取り付けてあるのが、増設した液晶表示器である。

図9は、データ処理ユニットのソフトウェア構成図である。探傷器本来のシステムを管理する基本ソフトとして、DR-DOS V5.0(デジタル・リサーチ社製)が、探傷器に登載されている。機能拡張を行うためには、操作パネル、表示装置といったハードウェアを直接アクセスする必要があるが、これらを可能とするための、プログラム群が常駐型BIOS(それぞれ、int69H, int6CHでコールする)として、探傷器メーカーから提供されている<sup>7) 8)</sup>。

また、探傷器の機能をサポートするプログラムとして、エコー高さ区分(LMH)線の作成、入射点調整、および信号オフセット調整を行うプログラムも、基本ソフトのアプリケーションとしてメーカーから提供されている。

本開発で試作した機能拡張回路を管理するプログラムも、これらとの整合性をとって基本ソフトのアプリケーションの一つとして動作するように設計した。

また、ICメモ리카ードの読み書きなど、複雑な手順を要するプログラムは、常駐型BIOS(int6CHでコール)としてまとめ、アプリケーションの負担を軽減している。

これらプログラムは、操作パネルの操作により、目的のアプリケーションを起動する仕組みになっているが、この仕組みを実現しているシェルプログラムを一部変更してシステムに組み込んだ。

### 5.2.3 反射源位置の表示

反射源位置を知るためには、ビーム路程、エコー高さなど、エコー波形情報に加えて、超音波入射角、母材板厚、探触子位置などの情報が必要である。

本システムでは、超音波入射角、母材板厚の値として、探傷器に設定された数値を使用する。探触子位置は、探触子スキャナの変位センサ出力をカウントし、計算で求める。ビーム路程は、探傷器の常駐BIOSサービスプログラムを介して得られる超音波波形情報を解析して求める。

BIOSサービスで得られるエコー波形情報は、予め設定した時間軸幅(テストレンジ)を220に分割し、それぞれの時点に対応した整数配列要素(8ビット長)に、音圧レベルをゲインに応じて0~105%の106段階の値で得ることができる<sup>9)</sup>。

エコーピークは、これら220個の各配列要素の値を順次比較し、その最大値となる要素番号とテストレンジの値から計算で求める。

入射角70°の探触子を使用し、直射により内部欠陥をとらえ

たときの探傷器のエコー波形表示例を図10に、そのときの反射源表示例を図11に示す。図10の波形で、最もレベルの高い位置に、白い逆三角形が小さく表示されているが、これは試作した波形解析プログラムがエコー波形のピークを認識していることを表している。同表示で最も左にある高レベルの波形は、送信パルスであり、欠陥エコーピーク位置との時間差でビーム路程を算出する。

図11の表示は、T継手の溶接部検査をイメージしており、音波の経路は、斜めの線で表示されている。音波を示す線の右上は、母材面に接しており、超音波の入射点位置を示す。一方、左下方の端点は、超音波の反射源の位置を示す。

射角探傷の場合、探触子の位置を溶接線から遠ざけると、母材の底面で一度音波が反射し、同じ欠陥のエコーをとらえる場合がある。図12は、そうした場合の1回反射エコーをとらえたときの表示例である。

こうした反射源位置の表示により、従来技術者が頭の中で

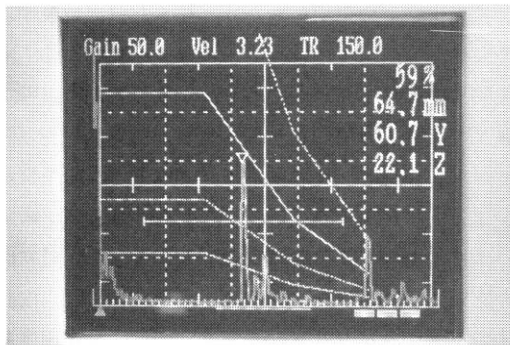


図10 超音波探傷器のエコー波形表示の例

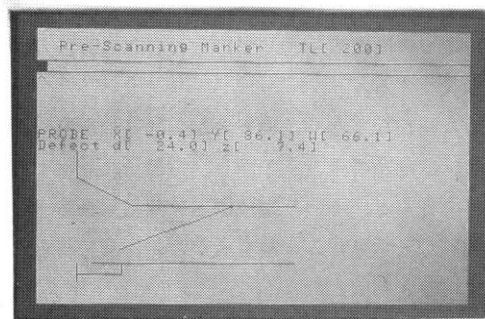


図11 反射源表示の例（直射）

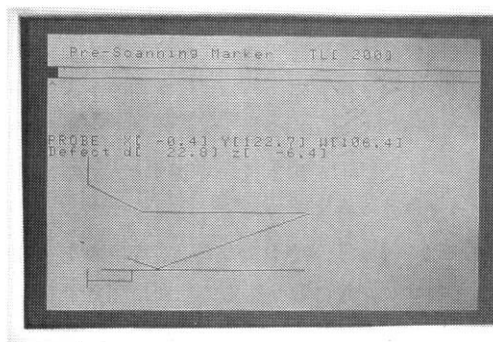


図12 反射源表示の例（1回反射）

イメージしていた母材内の音波の様子を、熟練によらず直観的に認識することが可能となり、エコーの原因が欠陥によるものか否かの判断に役立つ。

欠陥エコーを探す場合、その処理時間を短縮するためには、エコーピークの現れる可能性の高い部分だけを対象に解析する工夫が必要である。

試作した波形解析プログラムは、欠陥の対象を溶接時に生じたものだけを対象として、音波の伝播経路が溶接部分と交差する範囲だけを解析するように設計されている。したがって、溶接部位外に大きなエコーピークが現れてもこれを検出しない。このことは、解析に要する処理時間の節約だけでなく、検査技術者に無駄な検査を省き、欠陥判断を助ける効果をもたらしているといえる。

### 5.3 本システムを利用した探傷作業

試作した検査システムは、探触子スキャナおよび検査データ処理ユニットを利用して、一連の探傷作業を行う。検査を効率よく実施するためのプログラムを開発し、検査データ処理ユニットに登載した。このプログラムは、「予備探傷」と「精密探傷」の2つの検査モードを持ち、これらを適宜選択して検査を効率的に行うものである。

開発したプログラムは、UI-21型探傷器のシステムが提供する手順にしたがって、本体の'F2'キーを押すことによって起動される。プログラムが起動されると、波形画面に図13に示すようなメニューが表示され「予備探傷モード」あるいは「精密探傷モード」を選択するための入力待ちとなる。

#### 5.3.1 予備探傷

予備探傷モードは、欠陥の有無を調べる目的で、検査範囲を大まかに走査する検査モードである。このモードが選択されると、増設した液晶表示器の上部に欠陥検出表示エリアとエコー断面表示エリアにそれぞれ初期のパターンを表示させる。

欠陥検出表示エリアは、同画面の左端から右端までを、予め設定した溶接線長さに対応させ、予備探傷で検出した欠陥個所にマーキングする目的で使用され、後の精密探傷の際に参照される。

エコー断面表示エリアは、エコーの反射源位置を示す目的で使用される。探傷部の母材断面形状については、溶接条件によって、図14に示すようないくつかのパターンが考えられる。現在の試作段階では、最も頻度の高いT継手を扱っているが、別なパターンへの扱いについては継続して検討しているところである。

探傷作業の最初に、探触子位置の相対原点位置を設定する。設定は、探触子を相対原点位置に合わせた後、スキャナに用意したリセットボタンにより、探触子位置の原点を決定する。

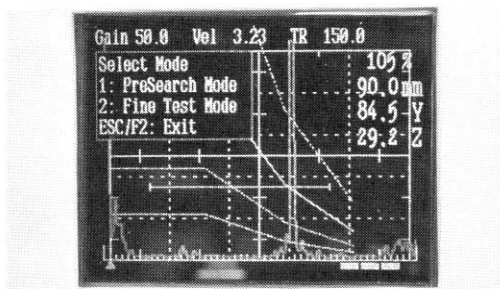


図13 探傷モード選択メニューの表示

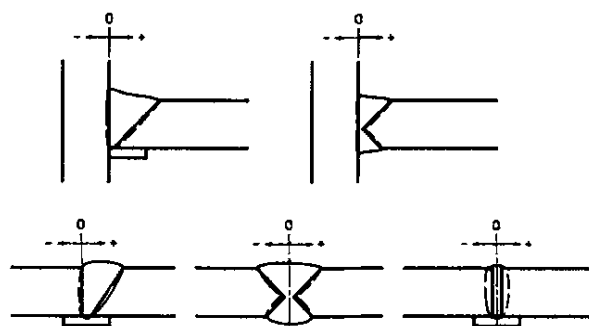


図14 溶接継手の種類

このとき、X方向原点は、溶接線の始点あるいは検査対象部分の始点位置とする。斜角探傷では、Y方向の基準位置を溶接部突き合わせ面におくが、この位置に探触子をもっていくことが不可能なため、この基準面から50mm触れたところで探触子原点を設定する。したがって、リセットボタンにより、データ処理ユニット内部のカウンタには、 $X = 0$ 、 $Y = 50$ がプリセットされる。また、座標の向きは溶接線に対してX軸を右向きに、Y軸を溶接線とは反対向き（手前側）にとる。原点位置設定は、欠陥位置の推定に直接影響するため、専用の治具を製作し、正確に行えるようにした。

原点セットのあと、探傷動作に入る。探触子のX方向、Y方向の移動は、探触子スキャナの粗ピッチにしたがって手動で行う。Y方向の走査移動量は、探傷すべき溶接部に関して直射、あるいは1回反射で捉えられる範囲とし、その範囲設定は走査範囲設定ピンを移動して行う。

粗探傷で欠陥が発見されると、欠陥検出表示エリアの所定の箇所にマーキングされる。欠陥判定は、エコー高さが設定されているLMH線のうちL線を超えた場合に欠陥を検出したものと見なす。探傷器メーカーが提供する波形情報に関するBIOSサービスでは、LMH線の情報と波形レベル情報がリンクしていないため、欠陥判定プログラムは、ビーム路程が長くなることによる超音波の減衰を補正して、欠陥の判断に用いている。

欠陥を検出すると、探触子のY方向位置と欠陥エコーのビーム路程から音の反射源位置を計算し、エコー断面表示エリ

アに音波の伝達経路を直線で表示する。また、欠陥検出表示エリアにも、探触子位置に相当する個所にマーキング表示する。マーキングは、液晶表示の横幅(320ドット)に対し、これを40個の要素に分割し、それぞれの領域に1つ以上の欠陥を検出した場合に行う。また、探触子のX方向位置を示すため、マーキングエリアの下に、ポインタマークを表示した。

予備探傷モードは、予め設定されたX方向の検査範囲を超えるか、操作パネルの'F2'キーが押されると終了し、はじめのモード選択メニューを表示してキー入力待ち状態となる。

### 5.3.2 精密探傷

精密探傷モードは、予備探傷で1つ以上の欠陥が発見されたとき、それぞれの欠陥状態を特定するため、細かい走査による探傷作業を行うことを目的とする。

精密探傷は、予備探傷で発見された欠陥の一つひとつについて、その欠陥位置、欠陥指示長さ、欠陥領域などを調べる。

精密探傷モードの選択にあたり、最も左側に位置する欠陥のやや左側(原点側)の位置に、探触子を移動する。検査者は、欠陥検出表示エリアのマーキングとX方向プローブ位置ポインタの表示を参照しながら、欠陥の左端のやや左側に探傷プローブを移動し、スキャナのリセットボタンを押す。その後、Y方向に探触子を往復させながら、スキャナの精密走査ピッチにしたがって右側に少しずつ移動する。最初に欠陥エコーを検出したら、欠陥開始位置がメモリされ、液晶表示器にその位置が表示される。さらに、右側に精密探傷を続けるが、プログラムは欠陥エコー高さの最大値を検出するごとにその高さレベル、ビーム路程、欠陥のY方向位置と深さを更新し、エコー断面表示エリアにそのときの音波の伝達経路を直線で表示する。

欠陥エコーがなくなり、検査者が欠陥終端を見つけたと判断したら、探触子の走査を中断し、探触子スキャナのリセットボタンを押すと、その終端位置と欠陥指示長さ(始端と終端の距離)が表示される。検査者がこの作業で得られた情報を記録すべきと判断したら、もう一度リセットボタンを押す。このとき、欠陥のデータがICメモリカード内に転送される。

終端指定後、あるいは探傷途中でエコーの状態から欠陥でないと作業者が判断した場合は、ICメモリカードに転送せず、次の欠陥位置まで探傷プローブを移動させる。

検出されたすべての欠陥について精密探傷を終えたら、操作パネルの'F2'キーを押すことで、最初のメニュー選択に戻る。メニュー選択で再び'F2'キーを押すと、このアプリケーションプログラムを終了する。

ICメモリカードに記録された情報は、専用のリーダ/ライタを介してパソコン等に取り込んで、別に開発するデータ処理ソフトでの利用が可能である。



6. 考察

6.1 検査精度

検査結果の精度は、欠陥見落としの有無、欠陥位置および欠陥指示長さの測定誤差などで評価される。ここでは、探触子スキャナを利用することによる効果を確認するため、欠陥位置と指示長さの測定値に対して、検査員による個人差のばらつきの状態を調べることにした。

試験は、鉄骨溶接部の模擬試験体を製作し、人為的に内在させた欠陥を探傷して、欠陥指示の起点と欠陥指示長さを、手動と探触子スキャナを用いる2通りの方法で測定し、測定者によるばらつきの程度を比較する方法で行った。

試験に参加したのは、(社)全国鉄鋼工業連合会が開催した「鉄骨超音波検査技術者講習会」の受講者で、NDIの超音波の有資格者であるが、比較的斜角探傷の実務経験に浅い者である。

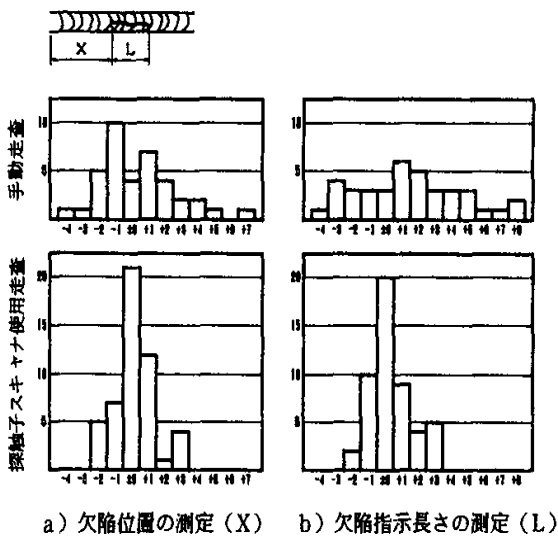


図15 探触子スキャナ利用による効果

図15は、実技指導者が測定した標準値を基準に誤差と測定者の度数分布を示したものである。

手動で探触子を走査した場合、測定値のばらつき範囲は、指示長さ起点で10mm、指示長さで12mmと大きく、鉄骨超音波検査としては問題がある。これに対し、スキャナを用いた場合、測定値のばらつき範囲は、ともに5mm程度で、 $2\sigma = 2.5\text{mm}$ であった。通常の熟練検査技術者であっても手動操作では2mm程度のばらつきがあり、初心者でもスキャナを使用することで熟練者並みの測定精度が得られることを確認した。

探触子スキャナの操作に慣れることで、測定精度は、より向上することが期待できそうである。

6.2 今後の課題

本システムは、一応の試作段階を終え、実用化へ向けて、改良等の作業を継続している。実用上検討あるいは改良すべき課題について、以下にまとめた。

1) 動作の安定化

本システムの試作では、回路の結線、基板どうしの接続に細い導線を使用したことから、ノイズによる誤動作がしばしば発生した。これまで、できる限りのノイズ対策を行ったが、動作の安定性を確保するためには、プリントパターン基板の使用、耐ノイズ性の高いケーブルの使用などを考える必要がある。

2) 電源容量の確保

本システムは、屋外での使用を想定しているため、電源に大容量のバッテリーが必要である。今回機能拡張を行うためにハードウェアを追加したが、この中でとくに液晶表示器の電力使用量が大きく、この電力消費を小さくするか、あるいはバッテリーの容量を大きくするなどの対策が必要である。

3) ソフトウェアパフォーマンスの向上

試作したソフトウェアは、十分な動作チェックが行われておらず、予期しない誤動作の発生などについて検証する必要がある。また、プログラムフローの無駄を省き、動作速度をあげるなど、ソフトウェア完成度を向上させなければならない。

4) 耐環境試験の実施

試作したシステムは、未だ実際の建設現場での動作試験を行っていないことから、屋外使用を想定した場合の耐環境性(温度、湿度、粉塵、振動など)の試験が必要である。

5) 製品化を考慮した検討課題

本システムの完成度を高めて、製品化を考えた場合には、可搬性の観点から、丈夫なボディの設計、商品価値としての外観デザインなど、いくつか検討を要する課題がある。

7. まとめ

超音波検査において、従来熟練に頼っていた部分を機械化し、初心者にも手軽に扱え、熟練者と同等の検査結果を得ることのできる超音波検査システムの開発を目指し、探触子スキャナ、検査データ処理ユニットなどからなる検査システムを試作した。

試作した探触子スキャナは、正確な探触子走査を実現し、加えて従来の物差しによる探触子位置計測を行わなくても済むことから、検査の作業性を向上させた。

検査データ処理ユニットは、市販のデジタル探傷器を利用し、これに探触子位置検出、反射源位置表示、検査結果のICメモリカードへの保存など、必要な機能を実現するためのハードウェアおよびソフトウェアを付加し、その構成とした。

探触子スキャナの利用により、個人差による測定結果のばらつきを低減し、効果のあることを確認した。さらに、検査システムの実用化あるいは製品化にむけて、いくつかの改

良・検討すべき課題があるものの、開発当初の目的は達成した。今後これらの課題について継続して改良を加えていく予定である。

なお本開発は、(社)北海道機械工業会が主体となって実施した、中小企業技術高度化事業の一環で進められたものである。北日本電極(株)の矢崎常務はじめ(社)北海道機械工業会関係各位の協力に対し、深く感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 石井勇五郎：新版非破壊検査工学（産報出版）
- 2) (社)日本非破壊検査協会：超音波探傷試験 I（1990）
- 3) (社)日本建築学会：鋼構造建築の超音波探傷検査基準（丸善 1989）
- 4) (社)北海道機械工業会：中小企業技術高度化事業実績報告書（1994）
- 5) 小池光裕, 市川宏, 手島靖文：三菱超音波探傷器 UI-21, 超音波テクノ第 5 巻第 9 号（日本工業出版）
- 6) (社)日本電子工業振興協会：PC カードガイドライン（1993）
- 7) 小池, 市川, 手島：UI-21 付属資料「INT69H」, 三菱電気（株）（1993）
- 8) 小池, 市川, 手島：UI-21 付属資料「INT6AH」, 三菱電気（株）（1993）
- 9) 小池, 市川, 手島：UI-21 のハードウェア概要, 三菱電気（株）（1993）