

超音波探傷データ評価システムの高度化

Development of Evaluation System of Ultrasonic Testing Data

技術本部 竹内五輪男*¹ 森本一夫*²
 浜名通夫*³
 神戸造船所 谷口優*⁴
 機械事業本部 平賀誠治*⁵

三菱重工においては、発電所や各種プラントの配管や構造物の非破壊検査を実施している。プラントの経年化に対し稼働率の向上や安全性確保のため、より小さなきずの検出技術並びに定量評価技術の向上が、プラント維持基準の策定と相まって求められている。本研究では、これらに対し新たに分割スペクトル処理 (SSP) といったノイズ除去方法や、散乱伝ば時間法 (TOFD) といったきずの定量化手法を取入れ、きずの検出性や定量化を高度化した。それとともに、各種の検査対象に対し表示や評価処理を共用化し、対象に応じた使い分けのできる評価システムを構築した。

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. performs non-destructive inspections on water pipes and construction in power stations and various plants. For countermeasures concerning efficient operating with extra safety for long time operating of plants, our customers have asked us for detection with more accurate inspections and improvements on evaluation skills for sizing defects. For these requirements we have adopted noise removal methods such as split-spectrum processing (SSP) and sizing technique for detects such as time of flight diffraction (TOFD). We developed accurate and easily operating evaluation systems which made detection for defects and sizing of defects which are highly developed. We have become possible to perform non-destructive inspections efficiently and effectively.

1. 背景

超音波探傷におけるデータ処理では、近年、多くの情報を含む探傷波形から、各種の処理によって必要とする情報の抽出を行っている。最近の計算機や周辺機器の進歩に伴い、大量の波形データを高速に採取・記録し、処理を行うことが可能となってきた。そして、これら大量の探傷波形データを用い、欠陥の定量化処理や各種の画像処理・表示処理が行われてきている。

現在、当社が実施している原子力や火力発電プラントの供用期間中検査においても、種々の検査対象に対しプラントの稼働率向上や安全性確保の面から、より高精度な検査が求められている。

そこで、これらの要求に対し、きずの識別及び定量化処理等の最新機能を取入れた独自の探傷データ評価システムの構築を行っ

た。同時に、これまで検査対象ごとに個別の探傷装置及び分析・評価装置を用いて行ってきた超音波探傷データの処理について、入出力を標準化し表示並びに評価処理の共用化を図った。

本報では、超音波探傷データ評価システムの全体構成と、新たに組み入れた主な処理・評価機能について述べる。

2. 処理システムの全体構成

現状では、各種の検査対象に対し、それぞれに適した超音波探傷装置を用いた検査を実施している。そして、得られた探傷データの処理・表示についてもまた、それぞれの探傷装置や分析装置を用いて評価を行っている。

そこで、本超音波探傷データ評価システムにおいては、入出力を標準化することで、探傷データの評価部分を中心に処理・表示

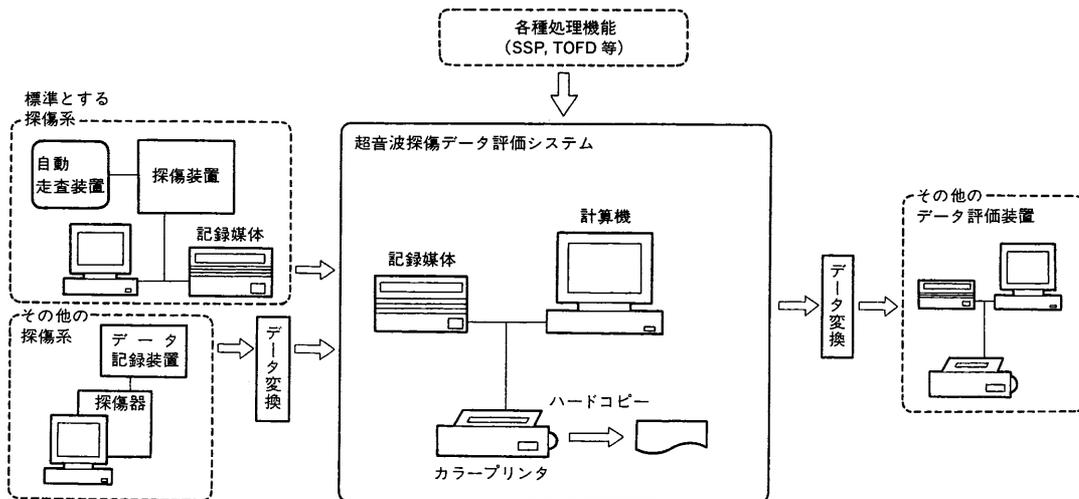


図1 超音波探傷データ評価システム全体構成 超音波探傷データの評価システムの全体構成を示す。
 Evaluation system of ultrasonic testing data

*1 高砂研究所電子技術研究室
 *2 基盤技術研究所電子・光技術研究室長
 *3 高砂研究所電子技術研究室主務

*4 原子力品質保証部サービス品質管理課
 *5 化学プラント技術センター品質保証グループ

の共用化を図った。また、データ変換を行うことで、他の超音波探傷系やデータ評価装置との探傷データのやり取りが可能な構成とした。

図1に、超音波探傷データ評価システムの全体構成を示す。各ブロックの機能を、以下に示す。

(1) 探傷系

超音波探傷系では、各々の検査対象別に適合化された探傷装置や検査装置を用いて、探傷位置の情報とともに探傷波形データの採取・記録を行う。そして、採取・記録された位置情報と探傷波形データは、光磁気ディスク等の記録媒体を介して評価システムに引渡される。

ここで、超音波探傷系については検査対象別の検査条件により適合化されているため、ある特定の探傷系に統一せずに本システムでは標準の探傷系を一つ定めた。

標準の探傷系以外の探傷系については、記録された探傷データをデータ変換することで、評価システムに引渡せるようにした。

これにより、各種の検査対象からの探傷波形データを、同じ評価システムで処理可能とした。

(2) 超音波探傷データ評価システム

評価システムの主な仕様を、表1に示す。

本システムでは、各種の検査対象の検査結果を各々の探傷系から磁気媒体を介して受取り、断面表示や探傷波形の表示とい

表1 超音波探傷データ評価システムの主な仕様
Specifications of ultrasonic testing data evaluation system

項目	内容
表示機能	・探傷波形表示、断面表示 ・ゲート信号の平面表示 ・断面表示
処理機能	・きずの寸法計測処理 ・ノイズ低減のための各種処理 周波数フィルタ処理、移動平均処理、分割スペクトル処理 (SSP) ・きずの定量評価のための処理 散乱伝ば時間法 (TOFD) による処理 距離・振幅と伝ば時間特性法 (ALOK) による処理 ・ゲート設定位置の変更処理 ・探触子の超音波の入射角度による補正処理
入出力機能	・表示画面のカラープリンタへの出力 ・探傷データファイルの変換・処理・保存

った各種表示や、フィルタリング処理等の各種処理を行い、探傷データからきずの評価を行う。

ここで、これらの表示や処理機能については、モジュール単位で構成することによって任意の表示・処理の組合せが可能で、かつ、表示・処理の追加・拡張が容易なシステムを実現した。

さらに、検査対象が異なっても同じ超音波探傷であることから、超音波探触子の位置と、その位置における探傷波形データを扱う基本的な処理部分については、処理の共用化を図った。

そして、特定の検査対象に必要な表示や処理については、専用のモジュールを追加することで対応可能な評価システムとした。

また、本評価システムでは、汎(はん)用のアスキーフォーマットファイルに探傷データを変換できる機能を持たせ、他の特殊なデータ評価装置等への探傷データの引渡しを可能とした。

(3) 他の評価装置

他の従来からある専用化された評価装置においては、データ変換された超音波探傷データを取込み、従来の評価を行う。

基本的には、新しく構築した評価システムにすべての評価機能を移行していくが、これまでの評価・分析装置も使用可能な環境を残している。

以上のようなシステム構成としたことで、従来の個別のシステムで不十分となっていた次の2項目の改善・効率化が図られた。

(1) 操作方法の統一

これまで、個々のデータ処理システムごとにオペレータが異なる操作方法を習得しなければならなかったが、本評価システムでは、処理を一元化することにより同じ操作で統一して処理が行えるようになった。

(2) 汎用性の向上

これまで、個々の処理システムごとに可能な処理と可能でない処理があり、別の処理を行う場合に探傷データの互換性がないため、データの取直しが必要な場合があった。本評価システムでは、各種の表示・処理モジュールを拡充していく必要があるが、同じ環境で必要な処理が実行可能となった。また、新しい表示や処理の追加についても、本評価システムのみ新たなモジュールを追加すればよく、システム管理が容易となった。

3. 分割スペクトル処理⁽¹⁾⁽²⁾

本評価システムには探傷波形単位に行う演算処理機能として、

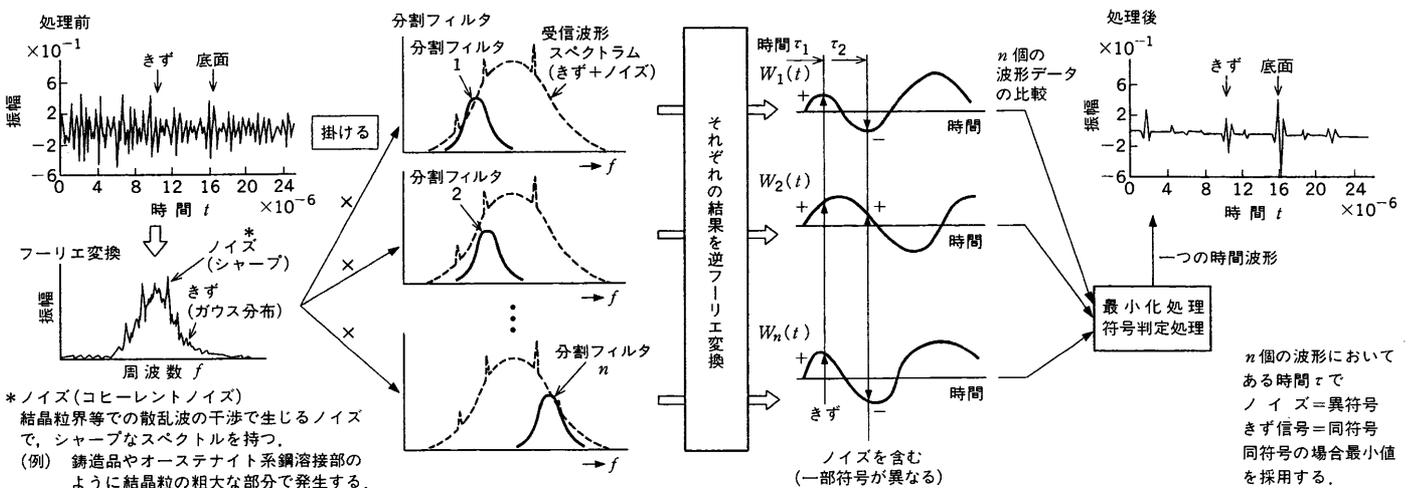


図2 分割スペクトル処理の概要
Outline of split-spectrum processing

n個の波形においてある時間τでノイズ=異符号きず信号=同符号同符号の場合最小値を採用する。

フィルタリング処理と分割スペクトル処理等が付加されている。

フィルタリング処理は、単純な高帯域通過フィルタや低帯域通過フィルタといった周波数フィルタリング処理である。

分割スペクトル処理 (SSP: Split-Spectrum Processing) は、従来の探傷装置には組込まれていないノイズ除去の処理手法である。本システムにおける具体的な処理の概要を図2に示す。

まず、探傷波形 $W(t)$ をフーリエ変換することにより、周波数成分を求める。周波数スペクトラムは、超音波探触子の周波数を中心とした分布と、ランダムにノイズ信号が合成された形で得られる。そのなかで、きずの信号に比べ、溶接部での結晶粒界における散乱波の干渉で生じるノイズ等は周波数依存性を強く持つ傾向にある。

そこで、受信探傷波形信号の周波数スペクトラムに、式(1)に示すように、互いにオーバーラップするような多数 (n 個) の帯域フィルタ Sf_i を掛け、それぞれの結果を逆フーリエ変換し再び時間軸に戻す。これにより、フィルタ数 n 個分の時間波形 $W_i(t)$ が得られる。

$$W_i(t) = F^{-1}[F[W(t)] \cdot Sf_i] \quad (1)$$

ただし、

$$i=1, 2, \dots, n$$

$F[\]$: フーリエ変換

$F^{-1}[\]$: 逆フーリエ変換

ここで、ターゲットであるきずからの反射のみが、これらの波形すべてを通して、ほぼ同じ強度を持つと考えられる。さらに、ある時間 τ における各波形上の値がすべて同じ符号となる確率も、ターゲットからの反射波上の点で非常に高くなる。

これらのことを利用して、式(2)、(3)に示すように、分割フィルタにより得られる n 個の波形データ $W_i(t)$ のある時間 τ における値 $W_i(\tau)$ の比較からノイズと信号の判別を行い、最終的にコヒーレントノイズが取除かれた一つの時間波形 $Y(t)$ を処理結果として得る手法が、分割スペクトル処理である。

$$Z(\tau) = W_j(\tau) \quad (2)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} |W_j(\tau)| &= \min \text{ of } \{|W_1(\tau)|, \dots, |W_i(\tau)|, \dots, |W_n(\tau)|\} \\ Y(\tau) &= Z(\tau), \text{ すべての } W_i(\tau) \text{ が負の場合} \\ Y(\tau) &= Z(\tau), \text{ すべての } W_i(\tau) \text{ が正の場合} \\ Y(\tau) &= 0, \text{ その他の場合} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ただし、

$$i=1, 2, \dots, n$$

なお、パラメータの設定については、設定画面を図3に示しているが、探傷データの時間波形と周波数スペクトラムを表示し、グラフィカルに設定が可能である。また、およそ最適と考えられるパラメータ値の自動設定機能を持ち、任意の探傷波形に対し簡易に分割スペクトル処理を行うことが可能となっている。

分割スペクトル処理による処理結果の一例を図4に示す。

これは、鍛造材試験片 (板厚 80 mm) に挿入されたドリル穴 ($\phi 4.8$ mm) を、公称横波 2 MHz, 45° の超音波探触子で探傷した波形である。一般に鍛造材は、製造上結晶粒が大きく散乱ノイズが発生しやすく、超音波信号に近い周波数成分を持つノイズであるため、超音波探傷が困難な材料の一つである。従来では、ノイズとの分離ができずノイズに埋れていたきずからの反射エコーが、分割スペクトル処理によってノイズ除去され、くっきりと判別できるようになっていることが分かる。

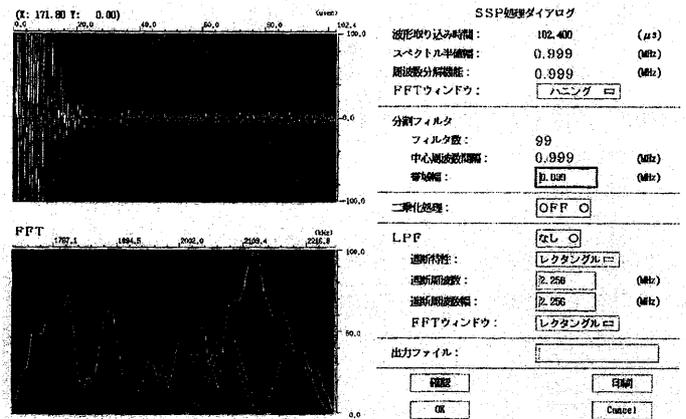
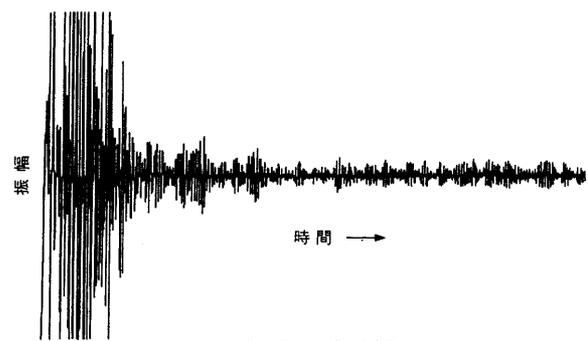
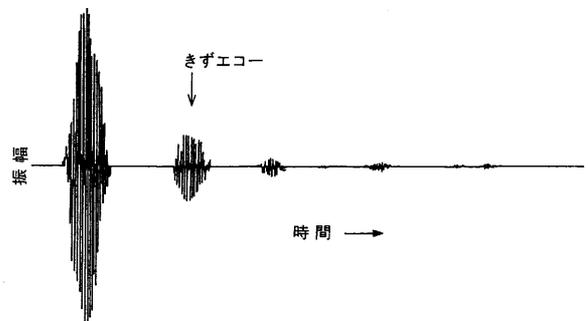


図3 分割スペクトル処理のパラメータ設定画面 超音波探傷データ評価システムにおける分割スペクトル処理についてのパラメータの設定画面を示す。

CRT display for setting parameter of split-spectrum processing



(a) 処理前の探傷波形



(b) 処理結果の探傷波形

図4 分割スペクトル処理の結果の一例 分割スペクトル処理による探傷波形データの処理結果の一例を示す。
Result of split-spectrum processing

4. 散乱伝ば時間法⁽³⁾

本評価システムは、個々の探傷波形ごとに行う演算処理のほか、1走査ライン分の断面を構成する探傷波形データに対して、ALOK (Amplituden und Laufzeit Orts Kurven) 法や TOFD (Time Of Flight Diffraction) 法による演算処理機能を持つ。

ALOK 法は、試験体表面で超音波探触子をターゲットに対し前後に走査し、探触子の移動距離と反射してくるエコーの伝ば時間、並びに探触子の移動距離とエコーレベルの関係から、きずからの反射エコーとノイズとを識別後、きずの実体を映像化する方法をいう。

TOFD 法は、送信用斜角探触子と受信用斜角探触子とを一定距離だけ隔てて対向させ、被検体の表面並びに底面反射して伝ばする信号ときずの端部からの散乱 (回折) 波の信号とを受信し、こ

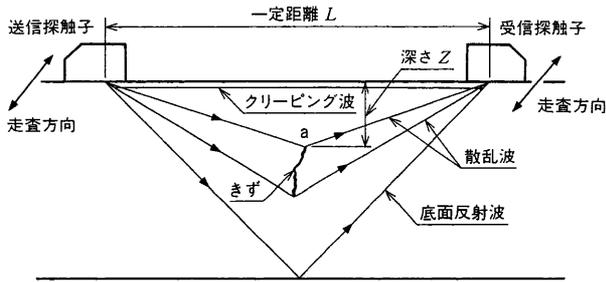


図5 散乱伝ば時間法 (TOFD) TOFD 処理の原理を示す概略図。
Explanatory drawing of Time Of Flight Diffraction (TOFD) method

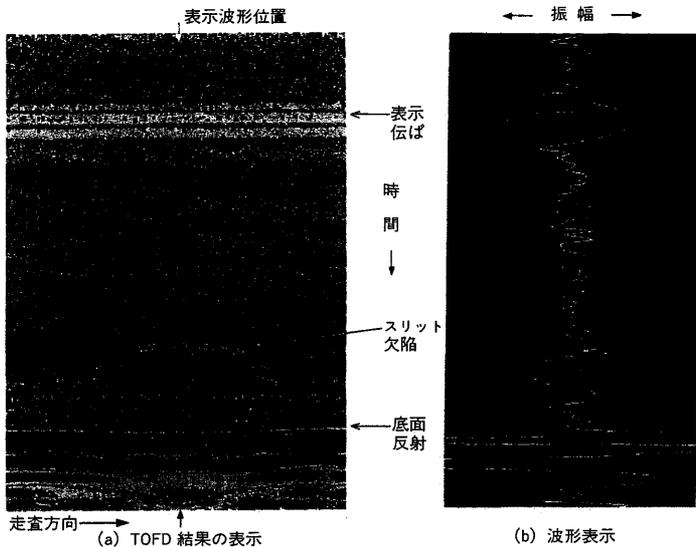


図6 TOFD 結果表示の一例 TOFD 処理による探傷波形データの処理結果の一例と、対応する探傷波形信号を示す。
Testing signal result by Time Of Flight Diffraction (TOFD)

これらの信号の伝ば時間差からきずの位置及び寸法を求める方法である。

ここでは、TOFD 法による処理の例について詳しく述べる。

TOFD 法では、図5に示すように被検体表面に送信及び受信の超音波探触子を一定の距離 L だけ隔てて配置し、紙面と垂直方向に連続して走査しながら、表面もしくは底面から反射してくる信号や、きずの端部での散乱波の受信信号を探傷信号として得る。

これらから、例えば、図5中の点 a の深さ Z について求めると、点 a を通り散乱伝ばしてくる信号の時間 T_a と表面を伝ばしてくる信号の時間 T_s との時間差が T_d とすると、送受信の探触子間の距離 L と超音波の音速 V_s から次式で求められる。

$$Z = \sqrt{[(T_a \cdot V_s) \cdot (T_a \cdot V_s / 4 + L / 2)]} \quad (4)$$

ただし、

$$T_d = T_a - T_s$$

ここで、きずの平面方向の位置については、送受信の探触子間のはほぼ中央に存在するものとして計算処理される。

スリット欠陥を含む平板試験片 (板厚 40 mm) を探傷し、信号の振幅値を階調表示した TOFD 結果を図6 (a) に示す。また、図6 (b) には、スリット欠陥のほぼ中央の位置 [図6 (a) の↑部分] での探傷波形信号を示す。これから、被検体表面の伝ばと底面反射の信号が、走査位置にかかわらずほぼ同じ位置に平行して現れており、それに挟まれるように、円弧状にスリット端部からの散乱波の信号が得られていることが分かる。

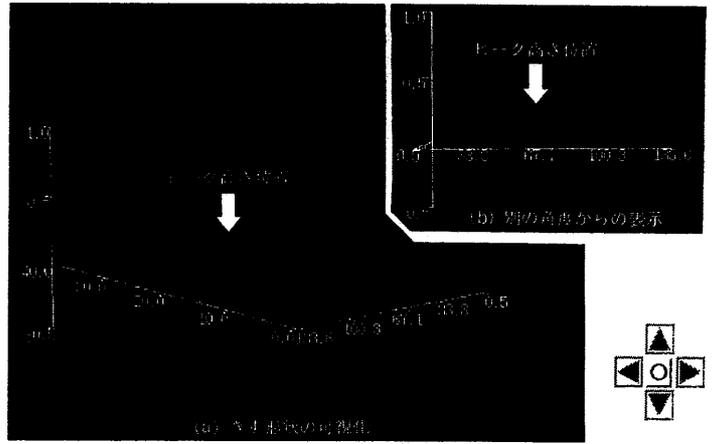


図7 TOFD 処理結果の三次元表示の例 TOFD 処理結果を、三次元的に可視化した表示を示す。
Solid display of Time Of Flight Diffraction (TOFD) result

なお、本システムでは、きずの寸法を求める上で必要なパラメータは、表示画面上をマウスで指示する等により簡単に設定できる。

さらに、本評価システムでは、これらの TOFD の断面表示の結果から、図7に示すような三次元表示機能を持つ。この三次元表示においては、画面上の表示キーを選択することで、図を回転することが可能で、任意の表示角度できずの寸法・形状を確認することができる。これにより、従来に比べ、より具体的にきずの寸法の評価が可能となった。

5. まとめ・今後の展開

本研究では、プラントの経年化に対する稼働率の向上や安全性確保のため、より高精度な検査として検出性並びに定量化評価技術を向上させ、表示・処理の共用化を行なった独自の探傷データ評価システムを開発し構築した。

この構築した評価システムは、以下に示す特徴を有する。

- (1) 新しい機能を有する。
 - 分割スペクトル処理 (SSP) による鋳造材の探傷波形における散乱波ノイズ等のコヒーレントノイズの低減処理機能。
 - 散乱伝ば時間 (TOFD) 法によるきずの定量評価機能。
- (2) 各種表示・処理がモジュール構成のため、追加・変更等の拡張性・汎用性が高い。
- (3) 表示並びに処理の共用化を実現した。

入出力を標準化するとともに同一の操作手順で、各種検査対象の探傷データの処理・評価が可能となった。

今後は、このシステムを現場で活用していくとともに、最新の処理・評価技術を追加し、機能向上を図っていく予定である。

さらには、オペレータの使いやすい、操作しやすいシステムへ改善を図り、より高度な処理を簡便な操作で実現できるシステムを目指す。

参考文献

- (1) Rose, J. L., et al., Ultrasonic of split-spectrum processing in ultrasonic nondestructive evaluation, Materials Evaluation 46 (January 1988)
- (2) Newhouse, V. L., Bilgutary, N. M., et al., Flaw-to-Grain Echo Enhancement by Split-spectrum Processing, Ultrasonics Vol.20 No.2 (March 1982) p.59~68
- (3) (社)日本非破壊検査協会編, 新非破壊検査便覧 日刊工業新聞社 初版 1992年10月15日