Japan Welding Society

新しい検査システムに必要な超音波探傷技術開発と適用

石川島播磨重工業㈱　技術研究所　　○　荒川　敬弘
米山　弘志

Approaches on Advanced Ultrasonic Testing for New Systematic Inspection

by T. Arakawa and H. Yoneyama

1，はじめに

非破壊検査の重要性がますます指摘されてきている。これに伴って，種々の新しい手法が提案されてきており，評価システムとして取り入れられつつある。

ここでは，非破壊検査技術の一つの動向として，溶接部の欠陥の寸法や性状を定量化し，破壊力学等によって構造物の健全性を診断するシステム，高温や極低温で稼働している構造物の劣化を，稼働を停止することなしに高温や極低温下で評価する稼働中検査システムやミクロ的な損傷を評価する材質劣化診断システムのための検討について紹介する。

2，溶接部マクロ欠陥に対する健全性診断システム

構造物は，それぞれの規格に従って検査され，合否の判定がなされることも多い。しかしながら，欠陥を精度よく定量化できれば，直接構造物の健全性を破壊力学を用いて評価することができる。このときに，個々の部位の環境条件を用いて評価することで評価精度を著しく向上させることができる。ここでは，球形貯槽を対象とした余寿命診断システムについて紹介する。

また，超音波探傷試験においては，欠陥からのエコー以外にも例えば溶接部の裏波等からの形状エコーを受信することがある。これの判断は探傷者の経験に委ねられていることが多い。診断システムを検討する上では，これを客観的にコンピューターに判断させる技術が必要であり，ニューラルネットワークを利用した評価システムの開発を行っている。

2.1 球形貯槽の余寿命診断システム[1]

球形貯槽は一般に，一時期内部流体を抜き，内部を開放した後に，磁粉探傷試験により内外面表面の検査が行われる。また，このときに検査用の足場が必要となる。球形貯槽外面を自動走行する検査ロボットを用いて，外面より超音波探傷を行えば，足場を用いることなく，かつ内部に貯蔵したままの稼働中に検査を行うことができ期待されている。また，表層部の欠陥の

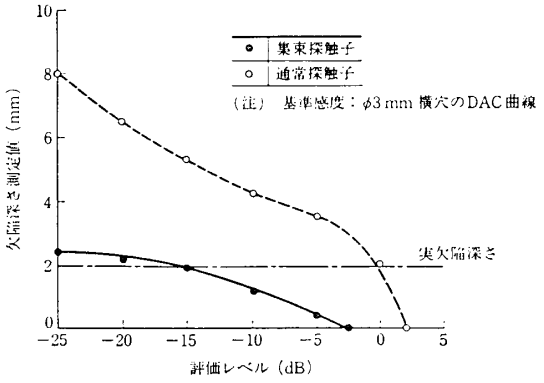


図1　欠陥深さの測定精度に及ぼす評価レベルの影響

NII-Electronic Library Service

Japan Welding Society

みならず，埋没した欠陥の評価ができ，球形貯槽の健全性の診断を向上できる。

破壊力学を用いて構造物の健全性を評価するには，欠陥寸法を精度よく測定することが必要である。この目的で，集束探触子が用いられる。通常の探触子を用いた場合には，超音波ビームが鋼中を拡散し広がっていくために，探傷感度によって大きく欠陥寸法の測定値が変動する結果になる。一方，超音波ビームを一定距離に集束させた集束ビームを用いた場合には，探傷感度の増大に連れて欠陥寸法の測定値は，実寸法をやや上回った辺りで収束する傾向が得られる。一例を図１に示している。

このときに測定精度を統計的に検討して最適探傷感度を設定することで測定精度を著しく改善できた。図２に集束探触子を用いた場合の欠陥寸法の測定精度の例を示している。この検査技術を用いて球形貯槽の診断ができる。図３に余寿命診断フローを示している。

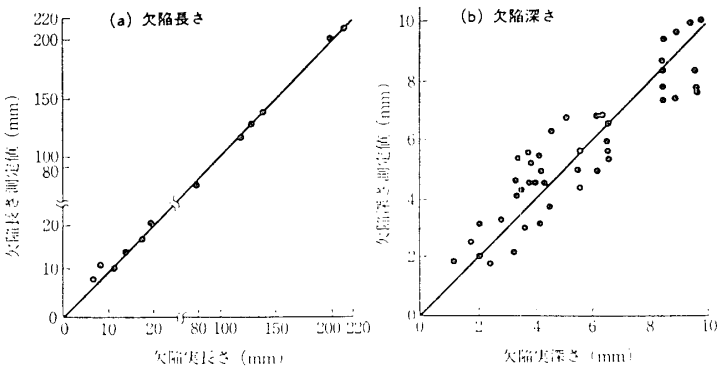


図２　集束探触子で測定した欠陥寸法と実欠陥寸法との比較

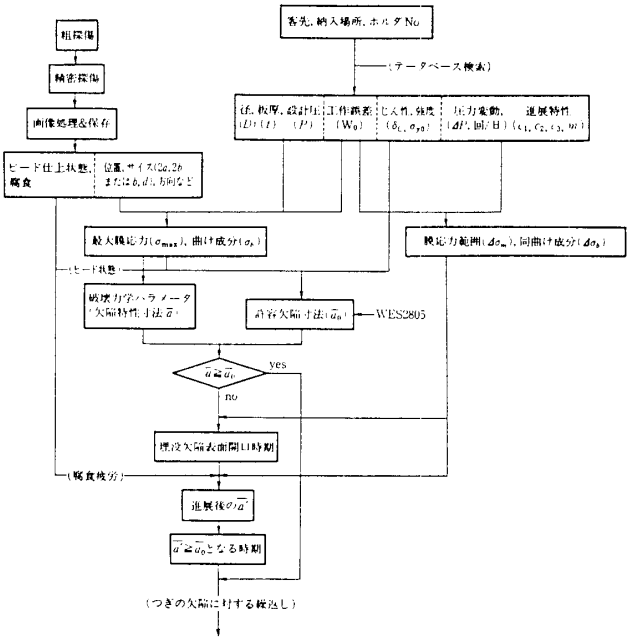
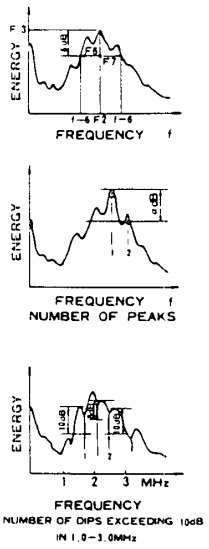


図３　球形貯槽の余寿命診断システム

表１　判別に用いた波形の特徴

F 1	ECHO HEIGHT
F 2	MAXIMUM PEAK FREQUENCY
F 3	MAXIMUM PEAK ENERGY
F 4	2…n PEAK FREQUENCY
F 5	2…n PEAK ENERGY
F 6	6 dB BAND WIDTH
F 7	6 dB MID-FREQUENCY
F 8	NUMBER OF PEAKS ABOVE 6 dB
F 9	10dB BAND WIDTH
F 10	10dB MID-FREQUENCY
F 11	NUMBER OF PEAKS ABOVE 10dB
F 12	20dB BAND WIDTH
F 13	20dB MID-FREQUENCY
F 14	NUMBER OF PEAKS ABOVE 20dB
F 15	PEAK ENERGY IN 2.0−2.5MHz
F 16	PEAK ENERGY IN 0−3.0MHz
F 17	NUMBER OF DIPS EXCEEDING 10dB IN 1.0−3.0MHz



2.2 ニューラルネットワークを利用したＵＴ評価システム

超音波探傷試験は，放射線透過試験に比べて作業性に優れることも多く，開口量の小さい割れの検出性に一般に優れているために，各種構造物の検査に用いられている。しかしながら，欠陥の形状・種類の識別に対しては劣っており，複雑なエコー信号の情報の判断を専門家に強く依存しているのが現状である。

あらかじめ，欠陥の種類や反射源が明らかな超音波エコー波形を周波数分析し，特徴を明確にすることで欠陥識別を行う手法を開発してきた。すなわち，判別に有効な２つの特徴を抽出し，２相

NII-Electronic Library Service

Japan Welding Society

分布を求め，一種のパターン認識による判別法である。表１に抽出した波形の特徴を示している。

この判別法を，原子力プラントのγ系ステンレス鋼配管溶接部の粒界応力腐食割れ（IGSCC）と形状エコーとの識別やステンレスクラッド内の割れとクラッドノイズとの識別に適用し，高い欠陥識別率を得ている[2]。２相分布による識別の例を図４に示している。

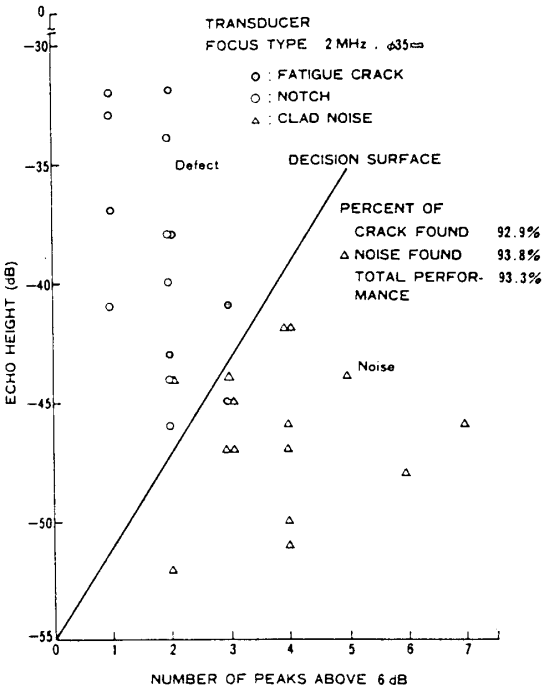


図４　実物大モックアップ試験による２相分布判別例

現在は，ニューラルネットワークの学習機能を用い，コンピューターによるより客観的でより精度よい自動判別法を開発している[3][4]。ニューラルネットワークの学習には，入力および入力に対する目標出力で構成される学習用サンプルデータ（教示データ）が必要である。

ここでは，図５に示すように，入力として前処理を行ったデータを，出力は欠陥か否かの反射要因とした。初期化されたニューラルネットワークに教示データを与えると，計算式にしたがって出力がでる。この出力と目標出力との誤差が計算され，この誤差が小さくなるようにニューラルネットワークのパラメータが変更される。これの繰り返しによって，最終的には目標出力との誤差が許容範囲となる（誤差逆伝播学習則）。

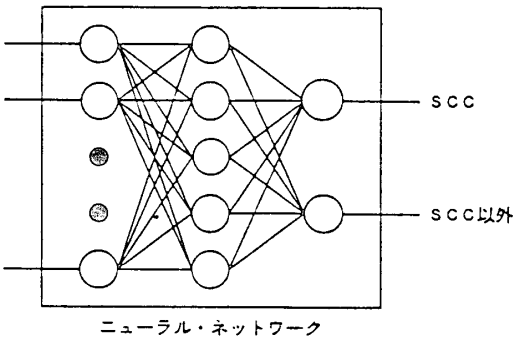


図５　周波数分析からのニューラルネットワーク学習・認識法

このように学習したニューラルネットワークに未学習（未知データ）の入力を与えた時の出力結果が認識結果となる。γ系ステンレス鋼配管溶接部の粒界応力腐食割れ（IGSCC）を対象として，既知のデータセット（欠陥データ15セット，非欠陥データ11セット）を学習させたニューラルネットワークを用いて，未学習データ26個認識させた結果，図６に示すような欠陥識別率73.3％，非欠陥識別率90.9％，全体の識別率80.8％が得られた。

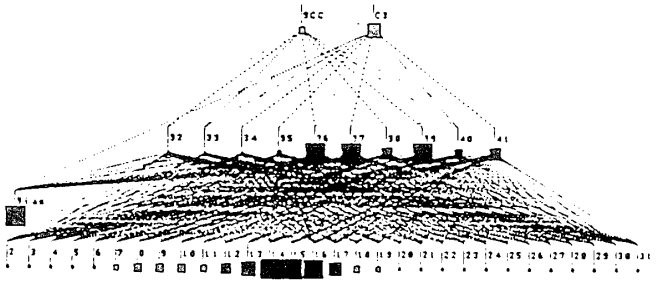


図６　ニューラルネットワークによる判別例

今後，データの前処理方法の改良やニューラルネットワークのチェーンアップを行うことにより識別率の向上を計り，更に追記学習も行っていく。

NII-Electronic Library Service

Japan Welding Society

3，高温・極低温での稼働中検査システム

非破壊検査は常温で行われることが多い。このため，高温や極低温で稼働している構造物では一時稼働を止め，構造物の温度を常温に戻してのちに検査（供用期間中検査）が行われる。

高温や極低温で稼働している構造物を直接稼働中に検査ができれば，構造物の信頼性が更に高まり，また常温での定期検査の期間をより長くした連続稼働が期待できる。このためには，高温や極低温においても安定して使用できるセンサを開発する必要がある。例えば，超音波探傷検査においては，超音波を送受信するためのセンサとして探触子が用いられる。この探触子は一般には接着剤を用いて圧電素子を取り付けているために，高温や極低温では接着部に剥離等の劣化が生じて耐熱性に乏しい。

接着剤による取り付けをろう付で行い，探触子の耐熱性を著しく向上した[(5)(6)]。この時，圧電素子にはキューリー点が約1200℃にあるニオブ酸リチウム単結晶を用いている。図7にろう付式探触子の基本的構造を示している。また，図8にろう付式探触子の耐熱性を示している。400℃の高温で1年半を越える使用実績がある。また，液体ヘリウムに浸した試験でも安定した性能を示した。

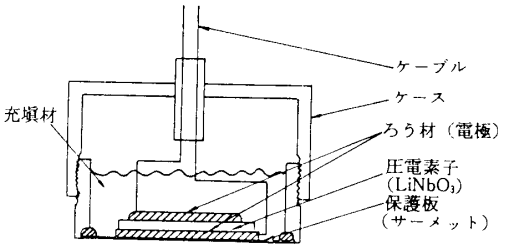


図7　ろう付式探触子の基本構造

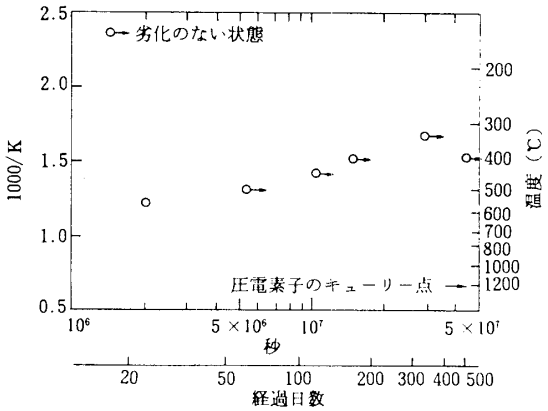


図8　高温用ろう付式超音波センサの耐熱性

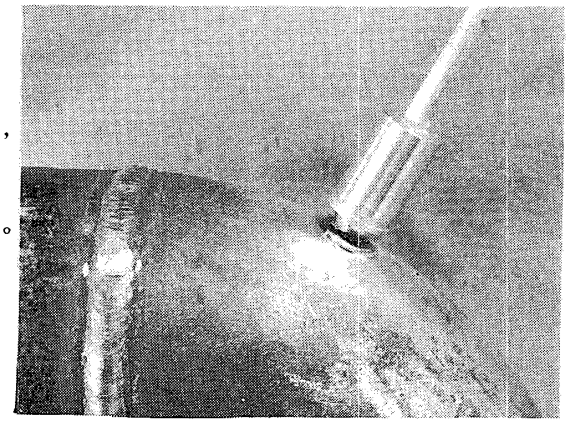
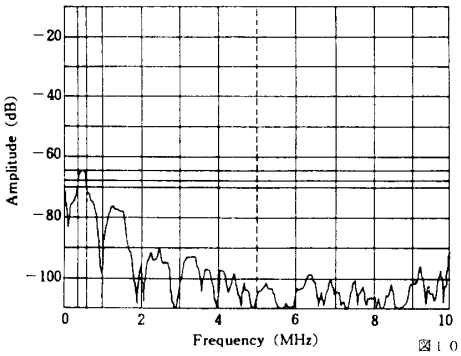


図9　減肉の常時監視用高温探触子の例

高温下での減肉計測を目的として二振動子垂直探触子を開発している。このとき，超音波を試験体中に伝播させるための液体（接触媒質）にはガラス質のものを開発しており，600℃を越える高温でも安定した計測ができる。



Characteristic		Value
Sensitivity		−36.5dB
Frequency ;	Peak value	475 kHz
	− 3 dB down	350〜575 kHz
	− 6 dB down	325〜625 kHz
Waveform ;	Rise time（0〜100%）	475 ns
	Rise time（10〜90%）	300 ns
	Ringing number（10% rise time）	11
	Ringing time	12.3 μs

図10　高温用AEセンサの特性の例

図9に示すような，鋼の遅延部を設けた探触子をスタッド溶接等で構造物に直接取付け，特定の部位の減肉を長期間に

NII-Electronic Library Service

Japan Welding Society

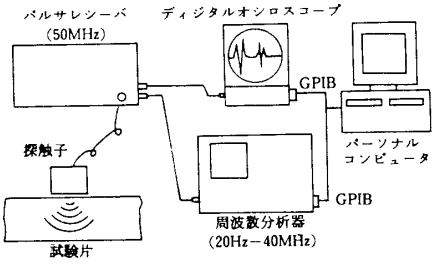
渡り監視できる。取付には，あらかじめ薄板をろう付し，その上にスタッド溶接することで母材に熱影響を及ぼすことなく取り付けられる。

この他，銀のくさびに圧電素子をろう付し，高温用の斜角探触子も開発している。更に，ＡＥ用のセンサとしても応用できる[6][7]。図10にろう付式の高温・極低温用ＡＥセンサの特性の例を示している。

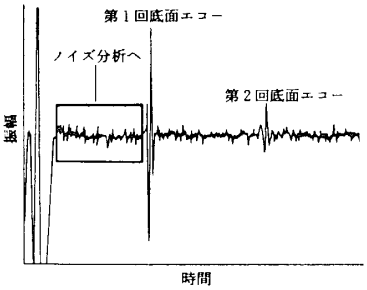
４，材質劣化計測システム

高温で長期間使用される構造物に対しては，供用中に発生する割れ等のマクロの欠陥の評価に加えて，ミクロ的な変化である材質劣化を評価する必要が生じることもあり，非破壊的に劣化を正確に評価することが期待されている。ノイズ成分を周波数解析し，クリープ損傷等を計測するノイズ分析法を紹介する。

クリープ損傷によって発生する結晶粒界の微小ボイドは，用いる超音波の波長に比べてはるかに小さいために，これからの明瞭なエコーは観察できない。反面，微小ボイドでの散乱波はノイズを構成し，このノイズ成分を評価することで微小ボイドの発生状況を把握でき，クリープ損傷を評価できた[8]。



(a) 超音波特性計測装置のブロックダイアグラム



(b) 採取波形

図１１　ノイズ分析法による経年劣化の計測方法

図11には測定方法を示している。垂直探触子から送信された超音波は，試験片裏面で高い底面エコーを発生させる。高い周波数を用いると，底面エコーに至る前の伝播距離においても，結晶粒界からの散乱波に起因するノイズが得られる。このノイズを周波数分析器で解析する。

クリープ損傷が生じ，結晶粒界に微小ボイドが多数発生したものと，健全材の場合を比較して図12に示している。15MHz の縦波を用いた試験で，15MHz を越える周波数帯域での振幅値に差が生じており，クリープ損傷材の場合のほうが値が大きくなっている。振幅に大きな差が生じる高い周波数帯域での振幅値の積分を求め，これをノイズ値とすると，ノイズ値と内部に発生したボイドの比率とに直線関係のあることが知られた。図13にこれを示している。

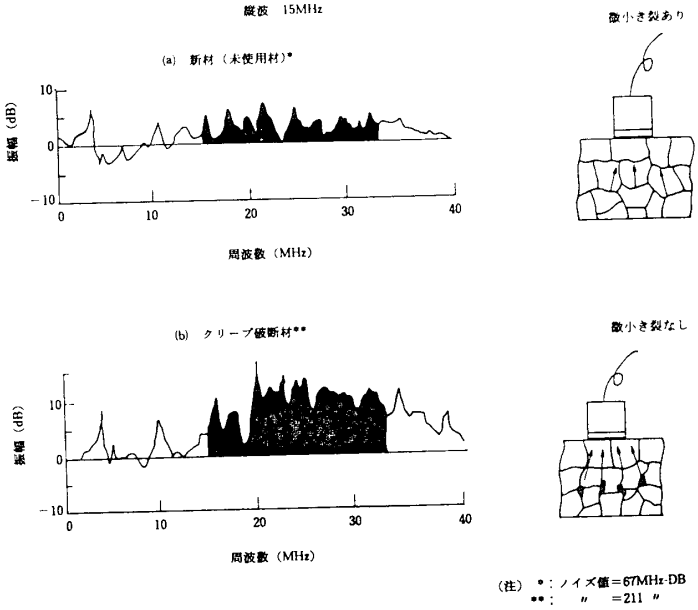


図１２　ノイズ分析法の原理

あらかじめ，ノイズ値の比と損傷

NII-Electronic Library Service

Japan Welding Society

比の関係を示すマスター曲線を求めておき，ノイズ分析結果からクリープ損傷の度合が求められる。実際の適用では，測定部位や使用探触子を一定にしておき，定期的にノイズ値を測定するクリープ損傷評価システムとなる。

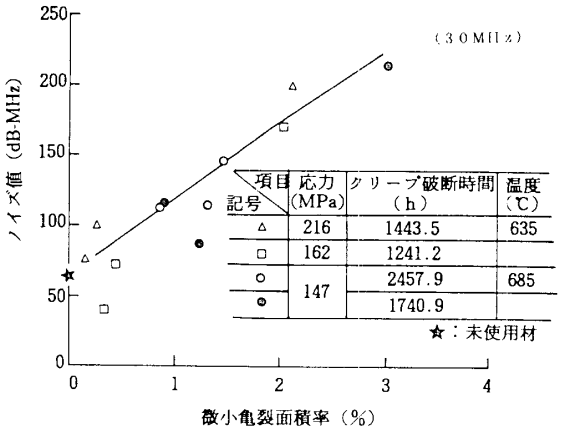


図13　クリープによる微小亀裂面積率とノイズ値の関係（SUS321）

5，まとめ

非破壊検査は，構造物のますます長寿命化の傾向や大型化，高度化の傾向と相俟って，ますますその重要性を高めてきている。また，これに伴って非破壊検査は，従来のマクロの欠陥を評価するに留まらず，ここに紹介した材質劣化のミクロの評価にいたるまで，大きく多様化してきている。このために，現在多くの新検査技術が開発されてきており，これらは新しい信頼性の評価システムとして適用されつつある。ここに著者らの関係深いものの一部を紹介したが，今後もこの傾向は強まっていき，多方面から構造物の信頼性がより合理的に評価されていくと考えている。

参考文献

(1) 中西他；溶接構造物の余寿命診断システム，石川島播磨技報　Vol.32 No.3, pp187-
(2) H.Yoneyama et al."Ultrasonic Pattern Recognition Study of Feedwater Nozzle Inner Radius Indication" 5th International Conference on NDE in the Nuclear Industry, May 1982 (San Diego)
(3) T.Sasahara et al."Application of New NDE Techniques for Nuclear Industry" 10th International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industry, June 1990 (Glasgow)
(4) 高野他；ニューラル・ネットワークを利用した超音波探傷評価システムの開発，日本非破壊検査協会　平成４年度春季大会講演概要集　(1992)
(5) 三島他；高温・低温用超音波探触子の開発と高温下の割れ監視技術，非破壊検査 第38巻10号
(6) T.Arakawa et al."Application of brazed-type ultrasonic probes for high and low temperature use" 5th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials, 1991 (Karuizawa)
(7) 武藤他；ろう付式超音波センサのＡＥへの適用試験，第８回アコースティック・エミッション総合コンファレンス　1991
(8) 米山他；超音波によるクリープ損傷評価技術の開発，石川島播磨技報　第28巻５号
(9) 荒川；新しい非破壊検査技術とその応用，ジョイテック　1992　７月号

NII-Electronic Library Service