

鋼管商品を支える非破壊検査技術

Non-Destructive-Inspection Technologies for Steel-Pipe Products

飯塚 幸理 IIZUKA Yukinori JFE 技研 計測制御研究部 主任研究員(課長)・工博
長棟 章生 NAGAMUNE Akio JFE 技研 計測制御研究部 計測チーム 主査(部長)・工博
正村 克身 MASAMURA Katsumi JFE スチール 鋼管セクター部 主任部員(部長)・工博

要旨

本論文では、鋼管商品の品質を支える NDI (非破壊検査) 技術の中から、主に UT (超音波探傷) の独自技術について述べている。超音波探傷の S/N 向上技術として、同期加算平均処理およびチャープ波パルス圧縮処理の高速デジタル信号処理技術を開発し、溶接鋼管のシーム UT に適用している。肉厚中央部のきず検出能向上技術として、UOE 鋼管では垂直入射法を、電縫鋼管ではマルチプローブ方式を開発、実用化している。これらの超音波探傷技術のベースとして、超音波の音場や伝播の解析技術を活用している。

Abstract:

This paper describes original ultrasonic testing(UT) technologies developed by JFE R&D and JFE Steel in non-destructive inspection(NDI) systems that assure the quality of JFE Steel's steel pipes. High-speed digital-signal-processing techniques of synchronous averaging and chirp-pulse compression have been developed to improve the signal-to-noise ratio and been installed in ultrasonic flaw detectors at welding steel-pipe miles. To improve detectability of flaws located at the center of wall thickness of the weld, a normal-incident-beam technique for UOE steel pipe and a multi-probe technique for ERW steel pipe have been developed. The analytical technique of ultrasonic field and ultrasonic-wave propagation is applied as a basis of the technical development.

1. 緒言

NDI (非破壊検査) 技術は、鋼管商品の検査・品質保証を担う中核技術である。また、高品質な製品を安定に製造するためのプロセス制御における品質計測手段としても、欠かせない役割を担っている。このため、JFE スチールでは、以前から、NDI 技術を重要技術の一つと位置付け、性能向上を目指した開発や最新技術の導入を図ってきた。特に、昨今では、鋼管商品の多様化や用途の拡大によって、お客様の検査への要求はますます厳格化すると同時に、製造プロセスの高度化にともなって、品質計測への要求も一層高くなってきている。これにこたえるため、NDI 技術についても、従来に増して開発体制を強化して取り組んでいる。

本論文では、これまで JFE 技研と JFE スチールとで開発した高精度・高信頼性を有する独自 NDI 技術のうち、特に超音波探傷技術 (UT) に関してその一端を紹介する。

2. デジタル信号処理 UT 技術

2.1 開発の背景

UT は、材料の表面から内部のきずまでを検出可能であり、NDI の主力として鉄鋼製品の検査に広く用いられている。鋼管分野においても、超音波探傷によって、製品の全数全長にわたり、オンライン検査が実施されている。

超音波探傷の欠陥検出性能は、主に超音波の周波数やビームサイズ、被検材の組織、ノイズ環境、設定感度などによって決まる。中でも周波数やビームサイズを決める超音波探傷子の仕様設計が最も重要な技術ポイントである。JFE 技研では、その上でさらなる性能向上を目指し、超音波探傷信号の S/N (信号対雑音比) 改善を行う技術として、同期加算平均処理およびチャープ波パルス圧縮処理の高速デジタル信号処理技術を開発した^{1,2)}。

Fig. 1 に超音波探傷におけるノイズの要因例を示す。ノイズには電気性ノイズとエコー性ノイズとがあり、これらの要因はさまざまである。さらに、これらのノイズが複合的な状態になっているということも多い。従来の S/N 向上

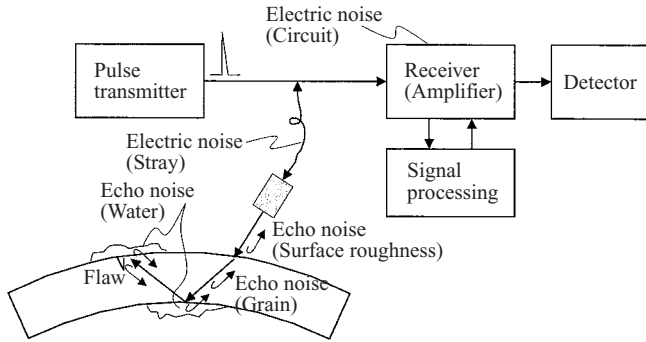


Fig.1 The cause of noises in UT

対策としては、信号線のシールド・アースの強化や、管に付着した水の処理などがあるが、それらの効果は個々の要因に限られる。これに対し、本技術は、ノイズの性質に基づいた処理であるために、種々のノイズに対して効果がある上、従来の対策に追加して適用可能である。

2.2 信号処理技術の概要

2.2.1 同期加算平均処理

Fig. 2 に同期加算平均処理の原理を示す。超音波探傷信号が繰り返し信号であることに着目し、数回分の信号を送信信号に同期して平均する。これにより、その繰り返しにおいて波形が変化するようなノイズを低減できる。このため、ランダムな電気性ノイズだけでなく、被検材に付着した水や探傷水の気泡のようなエコー性ノイズも低減可能と

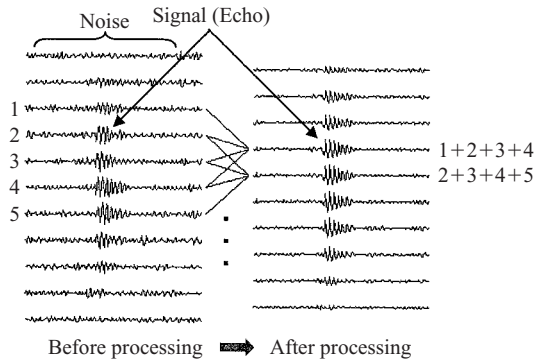


Fig.2 Principle of the synchronous averaging

いう特徴がある。

S/N改善量は、平均回数を N_a とすると単発ノイズで $20\log N_a(\text{dB})$ 、ガウス性ランダムノイズで $20\log\sqrt{N_a}(\text{dB})$ が得られる。本処理は、受信信号だけに行うものであるため、既設の探傷装置に対して容易に導入できる。

2.2.2 チャープ波パルス圧縮処理

Fig. 3 にチャープ波パルス圧縮処理の原理を示す。周波数を変化させた時間方向に長いバースト信号（チャープ波）を送信信号に用い、受信時に送信信号と逆の周波数-遅延特性を持つパルス圧縮フィルタに信号を通すと、時間軸上で広がっていたエコーは1点の位置に集まり、振幅が増大するとともにパルス幅が短く圧縮される。バースト信号は、平均電力が高いため、このパルス圧縮処理によって、短く大きな送信信号を用いた場合と等価的な効果が得られる。同時に、チャープ波形と相関のないノイズについては、このパルス圧縮効果はなく低いレベルのままとなるため、S/Nが大きく改善される。

S/N改善量はチャープ波の波形や探触子の周波数特性によって決まり、通常、10~20 dB程度が得られる²⁾。本処理は、電気性ノイズに対して、特に大きなS/N改善が期待できる。

2.2.3 信号処理実用化のポイント

上記の信号処理技術はレーダ分野などでは従来から知られていたが、超音波探傷分野に適用するためには高精度な演算を行うためにデジタル処理が必須であり、高速信号処理技術の開発が課題であった。これは、超音波探傷信号は比帯域幅が非常に広くMHzオーダーでのデジタル信号処理が必要なこと、オンライン検査のためには1ms以内に計算を行う必要があることが理由である。

この課題に対し、超音波パルスの繰り返し中の空き時間を利用して1パルスごとに計算処理を終えるハード技術³⁾を開発するとともに、種々の超音波探傷アプリケーションに応じた信号処理パラメータの最適化といった適用技術を開発し、世界に先駆けてオンライン超音波探傷信号のデジタル信号処理を実用化^{4,5)}した。

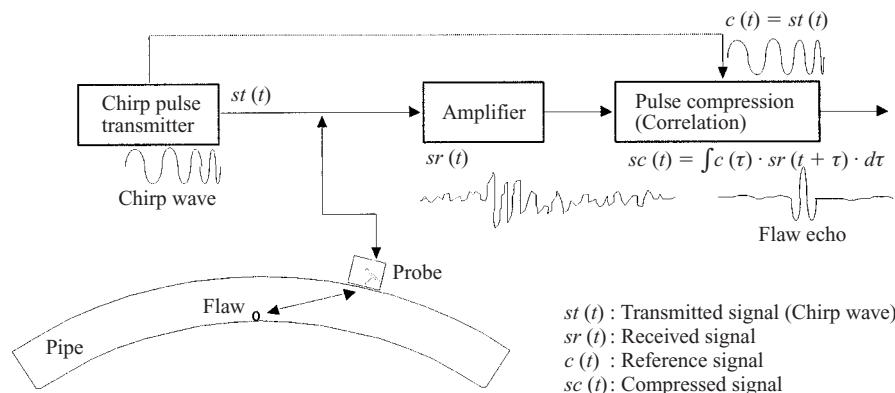


Fig.3 Principle of the chirp pulse compression

2.3 応用事例

2.3.1 同期加算平均処理による

電縫鋼管シーム UT の S/N 向上

電縫鋼管のシーム UT は、品質上最も重要な溶接部を検査する探傷装置であり、溶接直後および水圧直後に適用されている。これらシーム UT の S/N をさらに向上させるために、同期加算平均処理が非常に有効であった。

Fig. 4 に電縫鋼管シーム UT の一例を示す。数チャンネルの斜角探触子で、管軸方向に鋼管あるいは探触子を移動させてシーム部の内面から外面を長手方向に探傷する。

この探傷信号に対して同期加算平均処理を行うと、信号出力の特性は Fig. 5 のようになる。すなわち、平均回数にしたがって、ノイズは単調に減少するのに対し、きずエコーはある回数までほとんど減少しない。これは、きずがビーム幅の中を通過する間、エコーが数回にわたって現れるためである。この特性を持つ結果、パルス密度に応じて平均回数を最適に定めることで、S/N の改善が可能である。たとえば、パルス密度が 0.5 mm の場合、最適な平均回数は 4 であり、ガウス性ランダムノイズに対して 6 dB の S/N 改

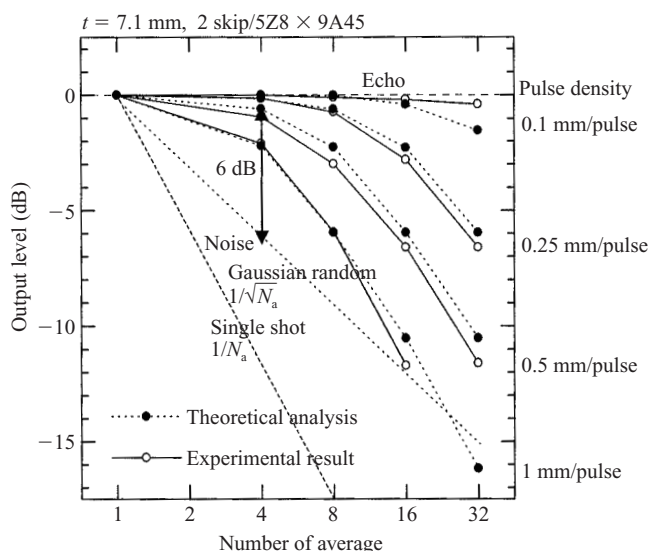


Fig. 5 Relationship between average and output level of the synchronous averaging

善が得られる。この値は、きず面積に換算して 1/2 まで検出可能になることに相当する。

本技術は、これまでに溶接機やアニラーからの電気性ノイズ低減、管内外面に付着した水からのエコー性ノイズ低減などで効果のあることを確認⁶⁾しており、東日本製鉄所・京浜地区、知多製造所各所のシーム UT にて、探傷感度の高感度化、誤検出の低減に貢献している。

2.3.2 チャープ波パルス圧縮処理による

UOE 鋼管の高感度シーム UT

UOE 鋼管についても、電縫鋼管と同様、溶接直後および拡管水圧後にシーム UT で溶接部の検査を行っている。このシーム UT においては、肉厚中央部の欠陥検出力向上・溶接部カバー範囲の増大を目的に、新たな発想による垂直入射法のチャンネルが付加されている⁷⁾。

この垂直入射法の探傷配置を、従来法と比較して、Fig. 6 に示す。上図は従来の斜角探傷配置であり、開先角に合わせて 60~70° 程度の屈折角が用いられる。この屈折角では、肉厚中央部に対して斜めに入射することから、肉厚中央部の探傷には必ずしも最適ではない。肉厚中央部に対しては、タンデム探傷法が一般的な方法だが、UOE 鋼管に適用する場合、0.25 skip の位置にはビードとの干渉のために探触子を配置できず、0.75 skip と 1.25 skip にするとビーム路程が長くなり S/N が低下する。また、3 章に記述する 45° マルチプローブ方式タンデム法では、ビードからの妨害エコーが検出されやすい問題がある。45° 斜角探触子 2 個のみのタンデム法ではカバー範囲がビームの交差す

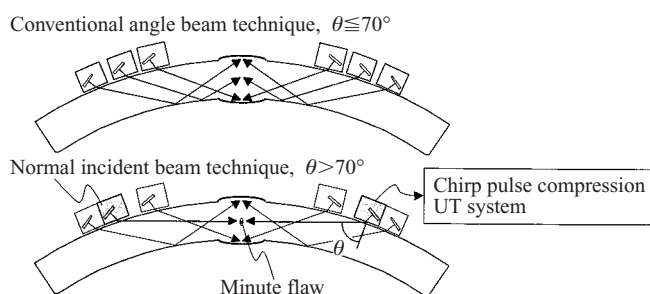


Fig. 6 New angle beam testing technique for UOE Steel pipes

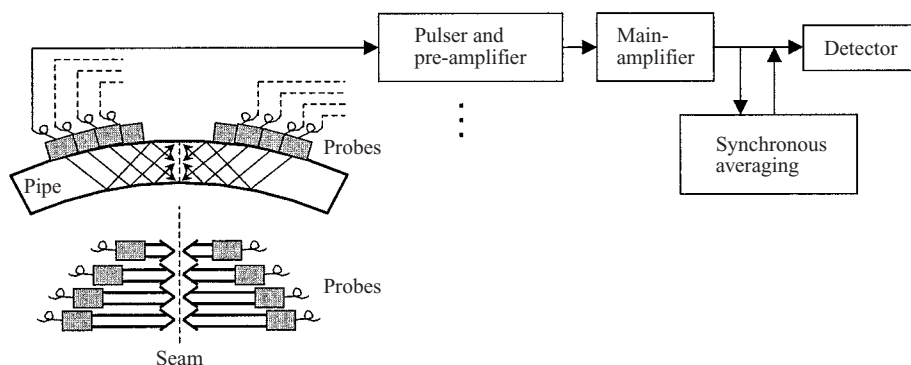


Fig. 4 Example of seam-UT system applied to ERW steel pipe

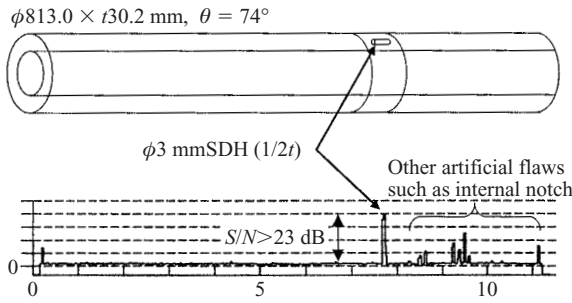


Fig. 7 Result of side drilled hole detection by normal incident beam technique

る部分に限られる。

一方、Fig. 6 下図の垂直入射法は肉厚中央部に対して垂直に超音波を入射させる方式であり、(1) 肉厚中央部の微小面状欠陥の検出力が高い、(2) 溶接部全体にビームが入射するためカバー範囲が広い、(3) ビードに対してごく浅い角度で入射するためビードからのエコーの影響を受けにくいといった特徴を持つ。

しかしながら、このような探傷方法はこれまで実用化されていなかった。UOE 鋼管のサイズで垂直入射条件を満たすためには、75°~83° 程度までの大きな屈折角が要求されるためである。このような大きな屈折角では、往復音圧通過率の低下や、見かけの振動子高さの縮小での拡散減衰の増加による感度低下が著しく、オンライン探傷では電気性ノイズが増大するため、屈折角 70° までが実用範囲というのがこれまでの常識であった。

これに対し、チャープ波パルス圧縮処理を適用して電気性ノイズを低減させるとともに、指向角が適当となるように振動子高さを設計することで、本垂直入射法の実用化を実現した。Fig. 7 に本法での探傷結果の一例を示す。肉厚中央部の φ3 mm 横穴が S/N = 23 dB で検出されている。各種きずの音圧反射率の計算により、この結果を方形平面傷での検出能に換算すると、1 mm² を検出できるレベルに相当する。

西日本製鉄所・福山地区の UOE 鋼管のシーム UT には、上記垂直入射チャンネルに加えて、すべてのチャンネルにもチャープ波パルス圧縮処理と同期加算平均処理が導入されており、その検出力はお客様から高い評価をいただいている。

3. マルチプローブ方式電縫鋼管 UT 技術

3.1 開発の背景

知多製造所中径電縫管 26" ミルでは、板厚 25.4 mm までの厚肉材を製造可能である。この厚肉溶接部の品質保証のため、溶接部全断面を高い検出能でカバーできるマルチプローブ方式 UT 技術を導入している^{8,9)}。

電縫鋼管のシーム UT では、Fig. 4 に示したような探触

子配置の一探触子法で溶接部全断面をカバーするのが、これまで一般的であった。その配置においては、肉厚中央部のきずに対しては、斜めにビームが入射することになる。肉厚が薄い場合はビームの広がり範囲でコーナー反射が形成されるため、感度を高めることで一探触子法でも検出可能である。しかしながら、肉厚が 20 mm を超えると、肉厚中央部のきずからのエコーは送信と同一の探触子には届きにくくなり、感度を極端に上げる必要が生じてくる。これは過検出などの問題を招き、作業上望ましくない。

これに対し、マルチプローブ方式 UT 技術は、片側 8 チャンネル連続配置した斜角探触子を用いて、全チャンネル同時にタンデム探傷を行うようにしたものであり、肉厚中央部のきずに対して優れた検出能を持つと同時に、シーム位置変動に対しても高い安定性を有する特徴を持つ探傷技術である。

3.2 マルチプローブ方式による全肉厚探傷原理

本方式の探触子配置を Fig. 8 に示す。溶接部の両側それぞれに 45° の斜角探触子が 8 個配置されている。この片側 8 個を同時励振・同時受信する点が本技術のポイントである。これによって、一探触子法だけでなく、各探触子のすべての組合せでタンデム探傷が行われる。たとえば、きずが肉厚中央部にある場合は、超音波は図中右側のような経路を通り、タンデム法としてエコーが検出される。また、きずが外面にある場合は、図中左側のような経路を通り、一探触子法としてエコーが検出される。

Fig. 9 に、外面側ノッチに対して、本マルチプローブを管周方向に走査し、探触子それぞれについて一探触子法により得たエコープロファイルを合成した結果を示す。各探触子のビームは有効ビーム幅内でオーバーラップするように設計されており、肉厚全断面が探傷可能となっているこ

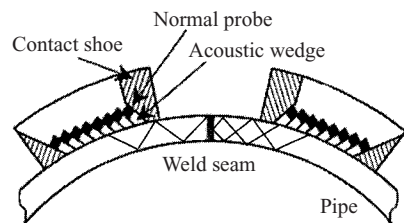


Fig. 8 Probe layout of the multi-probe UT for ERW Steel pipe

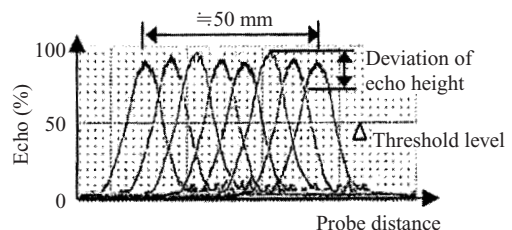


Fig. 9 Echo profile of the multi-probe

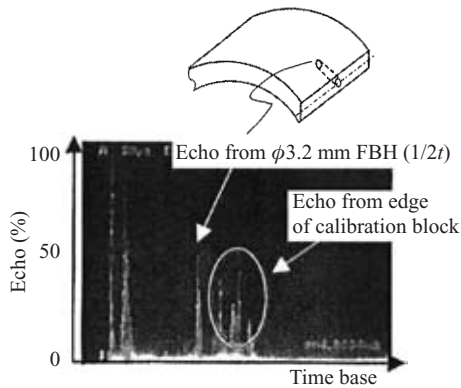


Fig. 10 Detection of a flat bottom hole located at middle of wall thickness for calibration

とが分かる。

3.3 校正データの例

本方式では、通常の内外面 5% T ノッチや $\phi 3.2$ mm ドリルホールなどの人工きずだけでなく、肉厚中央にシームに直角に加工した $\phi 3.2$ mm 平底穴を感度校正に用いている。その人工きず検出時の探傷図形を Fig. 10 に示す。同図から分かるように、通常の 45° 一探触子法では検出が難しい肉厚中央部のきずを、タンデム探傷によって高い S/N で検出可能となっている。

本技術は、シーム位置変動に対する高いロバスト性も相まって、お客様から高い評価を頂いており、ERW ラインパイプの信頼性向上に寄与している。

4. UT 解析技術

上述の各種 UT 技術のベースとして、超音波の解析技術が重要な役割を果たしている。JFE 技研にて保有する解析技術の例を以下に紹介する。

(1) 超音波音場解析

パルス密度や、超音波探触子の間隔などの設定において、超音波の有効ビーム幅の把握は欠かせないものである。また、2 章にて述べた同期加算平均処理の最適平均回数を理論的に求めるためにも、有効ビーム幅が必要である¹⁾。

このビーム幅を計算する方法として、ホイヘンスの定理に基づいた音場解析を行っている。これは、微小に分割された振動子からの球面波の重ね合わせとして、任意の点の音圧を計算するものである。Fig. 11 に計算例を示す。このような計算を、集束型を含めた任意の振動子形状、種々の媒体音速に対し数秒以内に可能であり、有効ビーム幅の解析検討に非常に有用なツールとなっている。本解析技術はフェーズドアレイ探触子の設計やサイドローブの検討にも活用している。

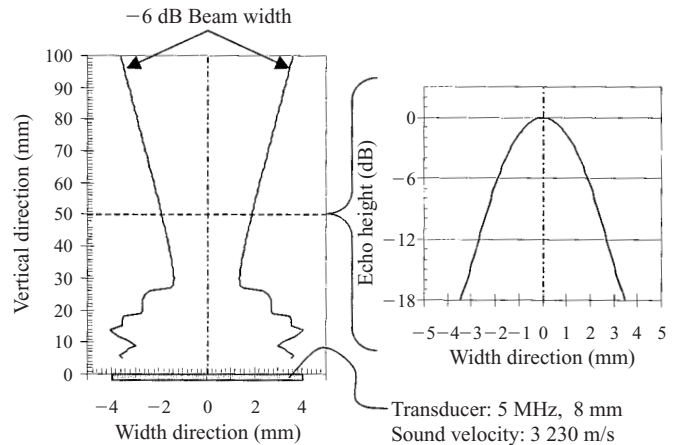


Fig. 11 Calculation result of ultrasonic field analysis

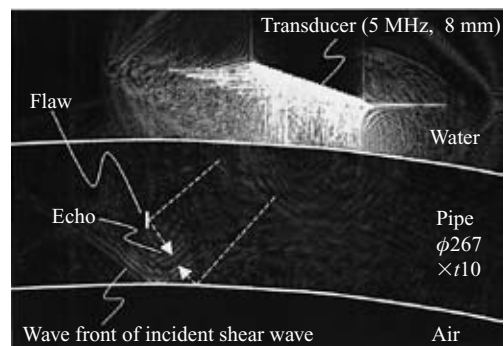


Fig. 12 Calculation result of ultrasonic propagation analysis

(2) 超音波伝播解析

きずにおける超音波反射挙動・モード変換などの把握や、エコー性ノイズの原因調査、最適入射位置の検討などにおいては、超音波が被検体中をどのように伝播するかを解析することが重要である。

この解析については、差分法による超音波伝播解析を行っている。これは、弾性波動方程式を差分法で近似し、超音波が伝播する様子を逐次計算していくものである。Fig. 12 に計算例を示す。同図は、 45° 斜角探傷による鋼管肉厚中央部のきず検出にて、肉厚が薄い場合にコーナー反射が形成される様子を示したものである。この例のように、任意形状かつ複数の媒体を設定することも可能であり、探傷手法の最適化や探傷結果の解析に活用している。

5. 結言

本論文では、JFE スチールの鋼管商品を支える NDI (非破壊検査) 技術から、デジタル信号処理 UT 技術、マルチプローブタンデム式 UT 技術、UT 解析技術など、独自の最先端 UT 技術を紹介した。

JFE スチールでは、今後も NDI 技術の高度化に尽力し、鋼管製品の品質向上に努めていく所存である。

参考文献

- 1) Iizuka, Y. et al. "Real time digital signal processing of on-line ultrasonic flaw detection." Proc. of the 1995 IEEE IECON. 1995, p. 867-871.
- 2) Iizuka, Yukinori. High signal-to-noise ratio ultrasonic testing system using chirp pulse compression. Insight (The J. of the British Inst. of Non-Destructive Testing). vol. 40, no. 4, 1998, p. 282-285.
- 3) 飯塚幸理ほか. 超音波探傷における実時間デジタル信号処理技術. CAMP-ISIJ. vol. 5, 1992, p. 1357-1360.
- 4) 飯塚幸理ほか. 超音波探傷信号のデジタル信号平均処理技術の実機化 (高 S/N 電線管超音波探傷システムの開発-2). CAMP-ISIJ. vol. 7, 1994, p. 1272.
- 5) 飯塚幸理ほか. デジタル信号処理を導入した厚板自動超音波探傷装置の設備化. CAMP-ISIJ. vol. 11, 1998, p. 957.
- 6) 飯塚幸理ほか. 鋼管非破壊検査における信号処理技術. CAMP-ISIJ. vol. 12, 1999, p. 929-933.
- 7) 橋本達也ほか. 高感度鋼管溶接部超音波探傷技術 (その1 面状欠陥高感度探傷法). CAMP-ISIJ. vol. 13, 2000, p. 1041.
- 8) 江木基明ほか. ERW ラインパイプの溶接部タンデム探傷技術の開発. CAMP-ISIJ. vol.17, 2004, p.322.
- 9) 小出竜男ほか. ラインパイプ用高強度高靱性 ERW 鋼管. JFE 技報. no. 9. 2005, p.25-29.



飯塚 幸理



長棟 章生



正村 克身