

鋼管商品の差別化に寄与する非破壊検査技術

Non-destructive Inspection Technique for Assuring the High-end Quality of Our Pipes and Tubes

山 野 正 樹*
Masaki YAMANO

鈴 間 俊 之
Toshiyuki SUZUMA

上 田 佳 央
Yoshio UEDA

中 尾 喜 之
Yoshiyuki NAKAO

抄 録

非破壊検査 (NDI) による顧客満足維持向上と同業他社との差別化は新日鐵住金(株)鋼管事業の発展には欠かせないものとの基本思想の元、従来以上に体制を強化して NDI 技術の開発、実用化に取り組んできている。取り組み事例として超音波アレイ探傷技術を適用した SAW 溶接部の厳格検査、ならびにラミネーション面積の定量評価技術を紹介した。更には、油井管用特殊継手のシール面圧評価技術や重量磁界回転法による全方向きず検査技術など、独自開発してきた NDI 技術について紹介した。

Abstract

Non-destructive inspection (NDI) is one of the important technologies, not only to assure the high-end quality of our pipes and tubes but also to gain customer's great satisfaction. That is the main reason that we've developed new NDI technologies and applied them to our manufacturing process for more than several decades. This paper describes the NDI technologies, which have been developed in these 5 years, such as the ultrasonic phased array technique and the superimposed magnetic field rotation technique.

1. はじめに

新日鐵住金(株)の鋼管商品は様々な分野で使用されるが、中でも油井用鋼管、ラインパイプ、発電用鋼管といったエネルギー分野、メカニカル用鋼管に代表される自動車・建機分野の鋼管は重要部材であることから、国内外の規格や個別顧客要求仕様に基づくいわゆるスペックギャランティと使用用途に応じたパフォーマンスギャランティの両面で品質保証が必要とされる。

鋼管のきず、寸法に対する上記品質保証手段として、非破壊検査 (NDI) による全量保証は極めて重要な役割を担っており、顧客信頼の維持向上にかかせないものとなっている。UT (超音波探傷)、ET (渦電流探傷)、MFLT (漏えい磁束探傷) など様々な手法の NDI 技術は、1950 年代に鋼管製造ラインへの適用が開始された後に、センシングデバイス的高度化、アナログからデジタルへの電気/電子回路の発展の恩恵を享受して高精度化や保証精度の向上が図られてきた。さらにはコンピュータによる自動化、汎用化が進められている。

他方、従来以上の過酷環境下での使用に伴い、顧客の NDI 保証要求も厳格化し、汎用的な NDI 技術では、この

厳格要求に応えることが難しくなっている。言いかえると難しい検査・品質保証への要求に対するソリューションを提案することで競合他社との差別化を図ることが可能になると期待できる。また、適正品質の製品を、安定して、タイムリーに供給して顧客満足を確認するための造り込み支援としても NDI 技術は重要である。

上述のように NDI による顧客満足維持向上と同業他社との差別化は新日鐵住金の鋼管事業の発展には欠かせないものとの基本思想の元、従来以上に体制を強化して NDI 技術の開発、実用化に取り組んできている。

本稿では競合他社との差別化を図るために独自に開発してきた NDI 技術について、幾つかの事例を紹介する。

2. SAW溶接部の厳格検査技術¹⁻³⁾

2.1 開発背景

ラインパイプの高品質化要望と共に、UOE 鋼管の溶接部検査の厳格化が求められている。その 1 例として、従来、管軸方向きずに対しては内外面狙いの 2 対の斜角探触子で溶接部の全断面検査を実施してきたが、近年、更に数多くの探触子を併設した高精度な探傷が顧客から求められている。

* 鋼管事業部 鋼管技術部 上席主幹 和歌山県和歌山市湊 1850 番地 〒640-8555

2.2 開発したアレイ探触子の特徴

図1に示すように短冊状の微小圧電振動子を円弧状に配置したアレイ探触子を開発した。その特徴は以下の2点である。

- 1) 探傷面（鋼管外面）の曲率変化によるきずエコー強度の変動が少ない
- 2) 偏角走査範囲が広い（屈折角 0～80 deg）

特に屈折角0度の探傷（垂直探傷）では音響カップリングチェックを可能とし、また屈折角70～80度の探傷はX開先で発生する肉厚中央部のきずに対する直射探傷で威力を発揮する。

2.3 性能評価結果

人工きずを加工した鋼管（図2）を通常速度で搬送させながら開発探触子で探傷した結果を図3に示す。所定の人工きずをSN比>3で検出できることを検証した。また肉厚中央部のきずを直射探傷することで優れたSN比が得られることが判明した（図4）。本開発技術は新日鐵住金鹿島製鉄所のUOE鋼管製造ラインに導入され、SAW溶接部の厳格検査に活用中であり、国内外の顧客から高い評価を得ている。

3. ラミネーション面積の定量評価技術⁴⁾

3.1 開発背景

鋼管の品質保証におけるきず深さや面積などの良否判定

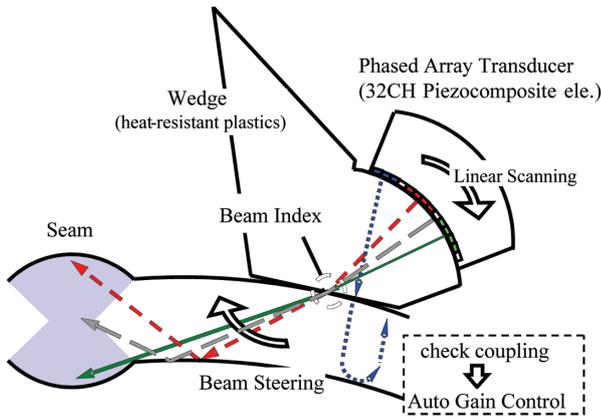


図1 開発した超音波アレイ探触子の概要
Diagram of developed phased array probe

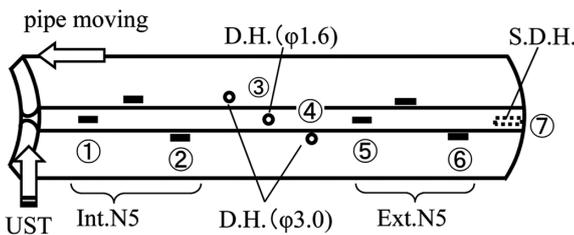


図2 ダイナミック探傷テスト材の概略
EDM notches and drilled holes for in-line test

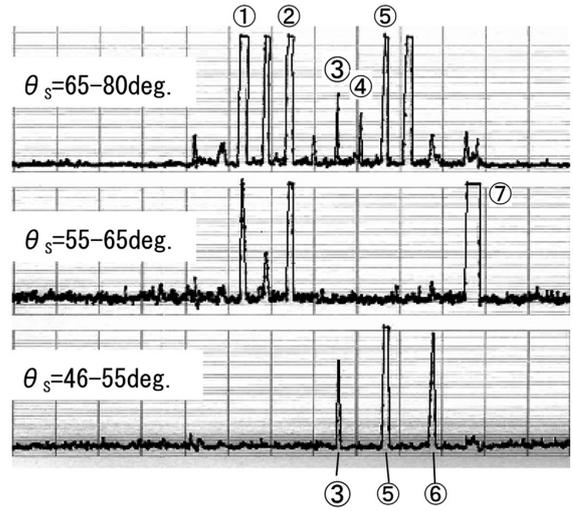


図3 ダイナミックテストで得られた探傷チャート例
Strip chart output of in-line test (32" OD x 38 mm WT)

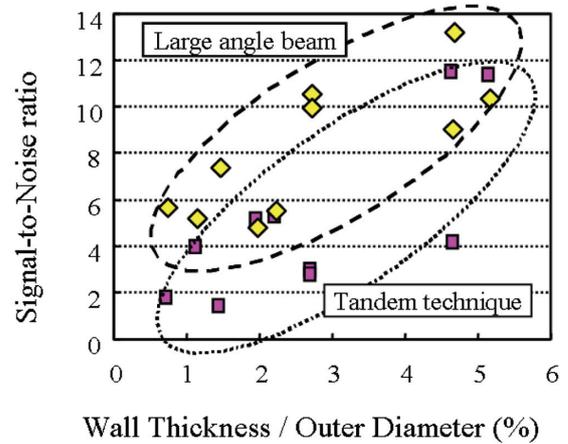


図4 直射探傷による肉厚中央部きずの検出能
Signal-to-noise ratio of imperfect penetration

基準は規格等によって規定されている。例えば、油井管に発生するラミネーション（lamination：内外表面に平行な層状きず）はその面積の判定基準がAPI-5CTに規定されている。従来、エコードロップ法などできず面積を評価してきたが、振動子寸法以下のきず面積を正確に評価できないとの課題があった。

3.2 開口合成によるきず定量評価技術

近年の電子デバイス・演算装置の発達に伴い、膨大な演算を要する探傷データの高度なポスト処理技術が実用化されつつある。レーダー分野で実用化が進んでいる開口合成技術（SAFT：Synthetic Aperture Focusing Technique）もその一つである。

アレイ探触子を用いて、きずからの反射波形を複数の位置で取得し、送信・受信振動子と材料の幾何情報と音速情報を元に被検査領域内での反射位置を導出し、きずの断面像を再構成する方法である（図5）。演算によって大開口

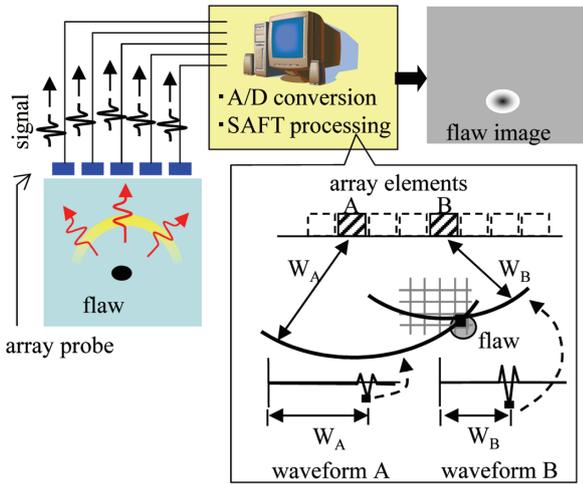


図5 開口合成処理の概略
SAFT processing

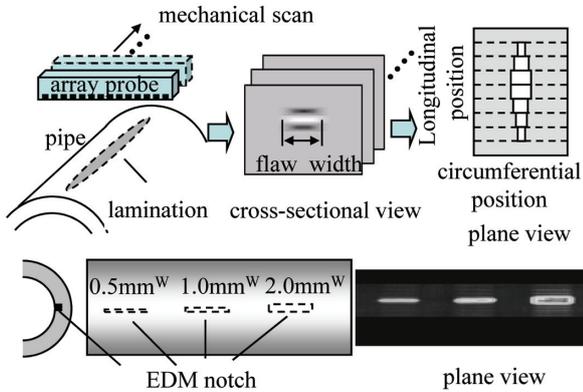


図6 ラミネーションの測定フロー
Schematic diagram of lamination measurement

の多焦点センサを仮想することで高精細な断面像を得ることができ、きず寸法の高精度測定を可能とする技術である。

このSAFTをラミネーション面積の高精度評価において鍵となるきず幅の同定に適用した。アレイ探触子を管軸方向に機械的に走査しながら各位置でSAFTによる断面像を連続生成する。各断面像におけるきず幅の管軸方向の和から面積を評価する。きずの平面像も得ることができる(図6)。

3.3 評価結果

図7に評価結果を例示するようにSAFTによるきず幅の評価精度は従来のエコードロップ法に比べて大幅に向上しており、またきずの深さ位置に依存しないという利点も有しているため、きず面積を定量的に評価するための強力な武器となることを確認した。

自然きずを対象に本手法で測定を行った後、比較のために点集束探触子を用いた水浸Cスキャン法にて測定を行った。きずの平面像ならびに面積の定量評価結果は極めて良

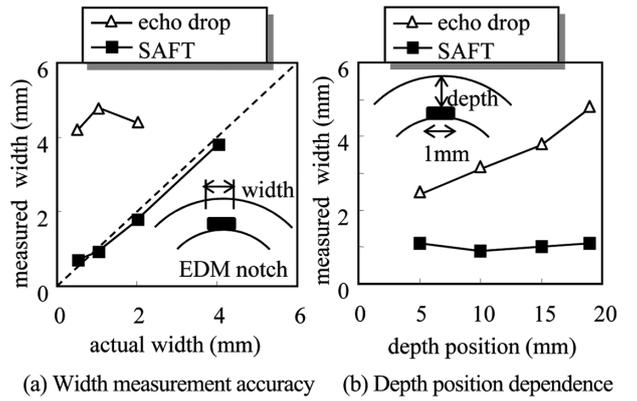


図7 従来法(エコードロップ法)との測定精度比較
Measurement accuracy comparison

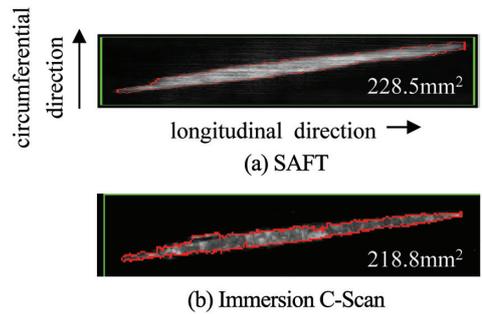


図8 自然きずの面積評価精度の検証
Verification of area estimation of natural flaw measurement

く一致しており(図8)、本手法が自然きずに対しても有効であることを確認したので、製造ラインへの適用を検討中である。

4. ねじ締結部の密着性評価技術⁵⁾

4.1 開発背景

図9に油井管特殊継手の外観を示す。油井管特殊継手の締結状態の評価は、従来、締結時のトルク測定(チャート目視)で行われてきたが、マクロ的な評価技術であり、局所的な密着不良や焼き付きなどについては検出が困難な場合があった。また、抜き取り+破壊検査以外に有効な補完技術もなかった。原油や天然ガスなど化石燃料を掘削する際に継手の締結品質は非常に重要であり、この品質に重大な影響を及ぼすメタルシール部の密着性を高精度に評価可能とする技術開発に取り組んできた。

4.2 超音波による密着性評価技術

メタルシール部には締結時に高い接触圧力が付加され、その密着性が保たれる。境界面での接触状況により超音波の境界面エコー強度が変化することは周知であるが、同時に入射面の表面性状、入射角などのセッティング条件、あるいは走査時の探触子姿勢の変動によって境界面エコー強

度は変動する。

図 10 に開発したメタルシール部の密着性評価技術の概略を示す。超音波探触子を管軸方向に走査しつつ、a) シール面からの境界面エコー強度と、b) 近傍の基準部エコー強度を比較評価する。境界面エコーのプロファイルを図 11 に例示する。式 (1) の相対係数を用いることで、前述の誤差要因を抑制し、高精度な密着性評価を実現可能な目処を得た。

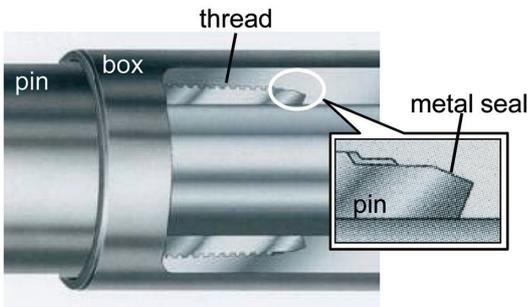


図 9 特殊継手の断面構造例
Cross-sectional view of a premium connection

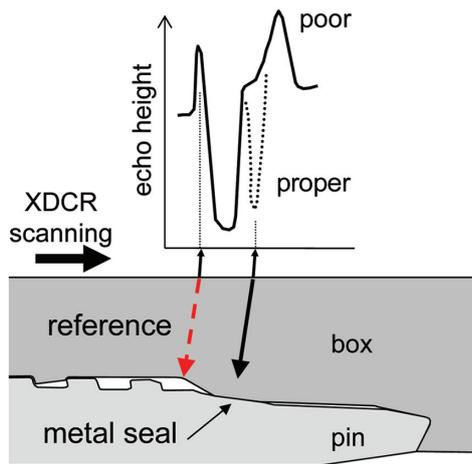


図 10 メタルシール部の密着性評価概略
Schematic diagram of the contact evaluation

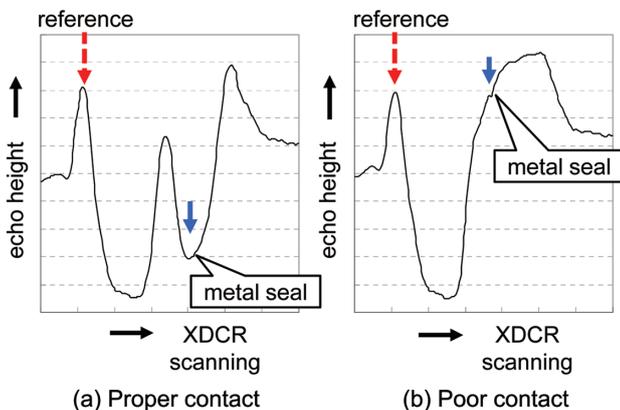


図 11 探触子走査で得られるエコープロファイル例
Typical echo profiles along scanning direction

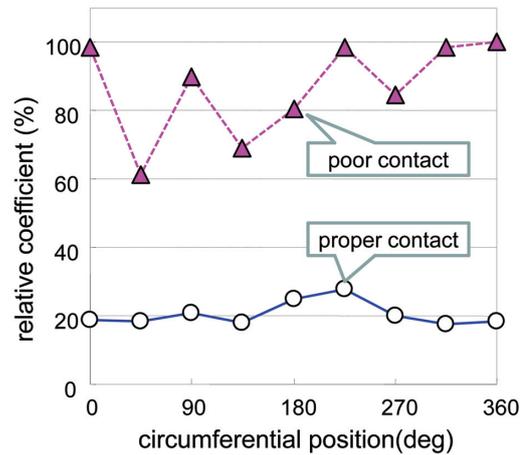


図 12 健全／不良締結部での相対係数の比較
Comparison results of the relative coefficient

$$\text{相対係数} = \text{境界部エコー} / \text{基準部エコー} \quad (1)$$

4.3 実験室評価結果

図 12 に故意に締結不良状態にした不良継手材の評価結果を示す。健全な締結部と比較して不良継手では全周にわたって相対係数が高いことから、式 (1) を利用した密着性評価が可能であることを確認した。本開発技術の実用化を進めることで、油井管特殊継手の締結品質を従来以上に高精度に評価し、高度に維持・管理することが可能になると考える。

5. 電磁気を利用した全方向きず検出技術

5.1 開発背景

鋼管の電磁気探傷（渦流探傷、及び漏えい磁束探傷）では従来、軸方向と周方向に伸びたきずの検出対象としてきたが、あらゆる方向に伸びたきずを高精度に検出可能とする技術開発を進めている。

5.2 重畳磁界回転法 (SMaRT) ^{6, 7)}

被検査材表面の微小きず探傷には交流磁気探傷法が一般的に用いられる。図 13 にセンサーが与える交流磁界の方向（センサー指向性）ときずの方向が変化した場合のきず信号振幅の変化を示す。磁界ときずの方向が直交した時に信号振幅が最大となり、両者が直交条件から外れるに従って信号振幅が低下する傾向にある。

また、センサー指向性をきずの方向と直交方向にすると同時に、図 14 に例示するようにバイアス磁界をきずと平行方向に与えることで特定の方向に伸びたきずの SN 比を最大化できる。これは、平行バイアス磁界を与えることで、材料の透磁率の不均一性に起因するノイズ（ μ ノイズ）を最も抑制することができるためである。

図 14 の探傷条件をあらゆる方向に伸びたきずに対して

実現するために考案したのが図 15 に示す重畳磁界回転法 (SMaRT: Superimposed Magnetic field Rotation Technique) である。互いに磁化方向が直交関係にある 2 個の電磁石を配置し、周波数が f_r で位相の 90 度異なる交流電流を通電することでバイアス磁界を発生させる。また検出コイル直上にも同様に、互いに磁化方向が直交関係にある空心コイルを配置し、 f_r と比較して 50~100 倍の高周波 f_t をそれぞれ位相の 90 度異なる周波数 f_r の正弦波で振幅変調した電流を通電することで、図 14 の状態を保ちながら回転する磁界を生成することができる。

5.3 実験室テスト結果

図 15 に示す磁化方法に信号処理方法を組み合わせるこ

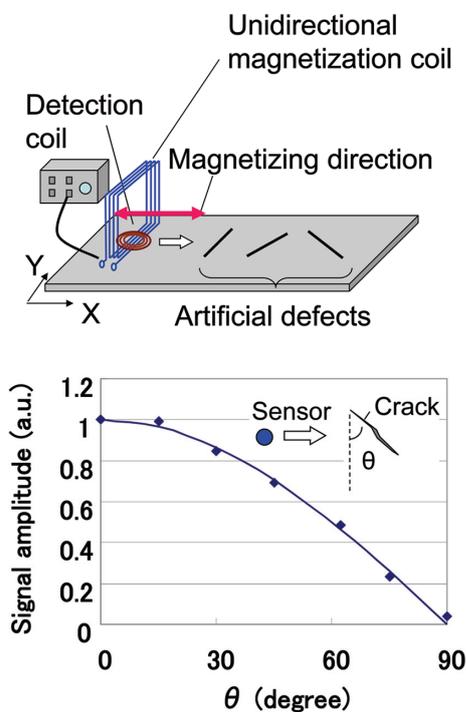


図 13 単一方向励磁型センサーのきず角度と振幅の相関
Signal amplitude corresponded with the crack angles

とで、全方向のきずを同等の感度で検出可能なことを確認した (図 16)。またきずの方向を ± 15 度の精度で把握することが可能である。更には、バイアス磁界を与えることで強磁性材料である炭素鋼管の μ ノイズを 70% 以下にまで低減でき、きず信号の SN 比を向上可能であることを確認した (図 17)。

SMaRT は現在、開発途上の技術であるが、早急に実用化を果たして、様々な方向に伸びたきずを検出可能とすることで鋼管の電磁気探傷の高度化を実現させ、鋼管品質の向上に寄与させる予定である。

6. おわりに

本稿では競合他社との差別化を図るために新日鐵住金が独自開発してきた NDI 技術の事例として SAW 溶接部の超音波アレイ探傷技術、ラミネーション面積の定量評価技術、更には、油井管用特殊継手のシール面圧評価技術や重畳磁界回転法による全方向きず検査技術などを紹介した。新日鐵住金では従来以上に NDI 技術の開発、実用化に尽力することで、顧客信頼の維持向上や同業他社との差別化を進めていき、新日鐵住金鋼管事業の発展に努めていく所存である。

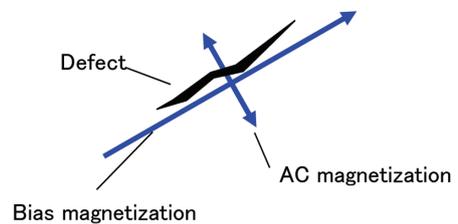


図 14 きず検出に最適な交流磁界とバイアス磁界
Optimum AC magnetization and bias magnetization for defect detection

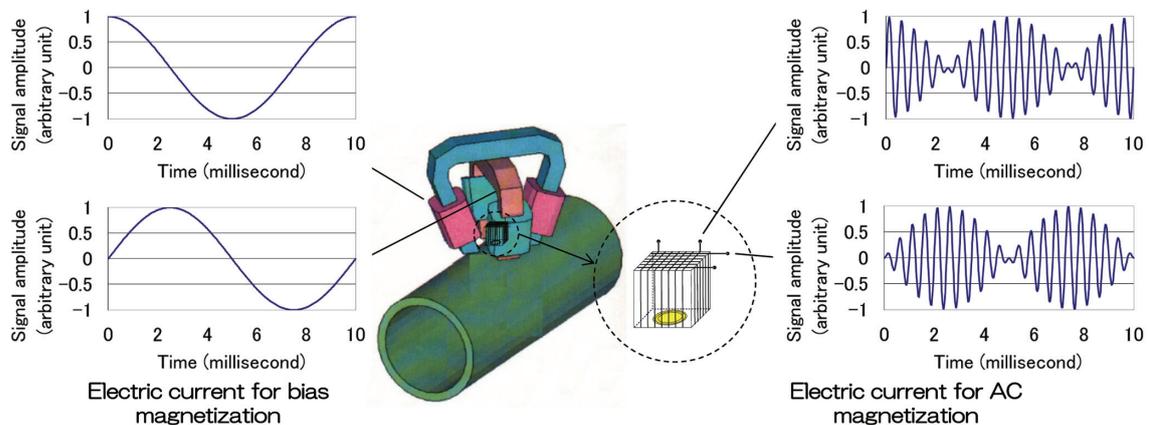


図 15 重畳磁界回転探傷法の概略
Schematic design of SMaRT devices

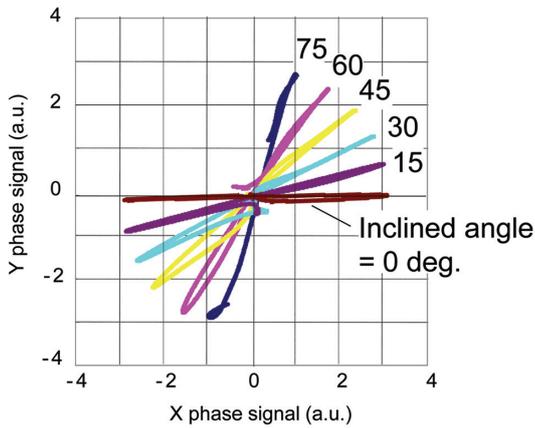


図 16 きず角度と信号振幅の相関

Signal waveform corresponded with the crack angles on SMaRT method

参考文献

- 1) Yamano, M. et al.: Development of Ultrasonic Phased Array Probe for SAW Seam Inspection of UOE Pipe. 26th International Conference on OMAE. San Diego, 2007
- 2) Nagase, M. et al.: New UST Inspection Procedure for Heavy Wall SAW Pipe. 18th International Offshore and Polar Engineering Conference. Vancouver, 2008
- 3) 山野正樹 ほか：大径管溶接部の超音波アレイ探傷技術の開発（第2報）. CAMP-ISIJ. 21, 1135 (2008)
- 4) 稗田剛士 ほか：開口合成処理を用いたシームレス鋼管のラ

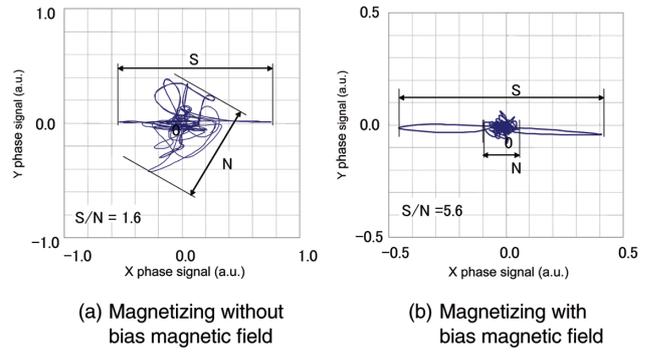


図 17 バイアス磁界による S/N の向上 (0.25%炭素鋼)
Improvement of SNR on a 0.25% carbon steel pipe

ミネーション定量評価技術の開発. 日本非破壊検査協会平成 24 年度春季講演大会公演概要集. p. 5

- 5) 星野郁司 ほか：油井管継手締結部超音波探傷試験方法の開発. 日本非破壊検査協会平成 22 年度秋季講演大会. p. 137
- 6) Suzuma, T. et al.: New Signal Processing Method for Electromagnetic Inspection Using Multidirectional Magnetizing Type Sensor. 6th Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting and Nano-Materials. Bucharest, 2009
- 7) Suzuma, T. et al.: Superimposed Magnetic Field Rotation Technique for Multidirectional Crack Detection. The 17th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation. Rio de Janeiro, 2012



山野正樹 Masaki YAMANO
鋼管事業部 鋼管技術部 上席主幹
和歌山県和歌山市湊1850番地 〒640-8555



上田佳央 Yoshio UEDA
プロセス研究所 計測システム研究開発部
主幹研究員



鈴木俊之 Toshiyuki SUZUMA
プロセス研究所 計測システム研究開発部
主幹研究員



中尾喜之 Yoshiyuki NAKAO
和歌山製鉄所 品質企画部 品質統括