

# 材料の品質を支える非破壊検査技術

## Non Destructive Inspection Technique to Support Products' Quality

鈴木 俊之\*  
Toshiyuki SUZUMA

山田 裕久  
Hirohisa YAMADA

上田 佳央  
Yoshio UEDA

### 抄 録

鉄鋼製品の使用状況を鑑みると、製品に存在する欠陥が破壊の起点となれば、重大な事故や災害の引き金になる危険性をはらんでいる。非破壊検査 (NDI) 技術は、顧客に対する自社製品の品質保証や、製造プロセス改善のための品質管理において重要な役割を担っている。安定的に製品全数を検査するための高速化、材質計測への展開、厳格化する顧客要求への対応、などに対応すべく、新日鐵住金(株)が独自開発したフェイズドアレイ超音波検査、電磁超音波検査、回転磁界を利用した電磁気検査などについて紹介した。

### Abstract

Non destructive inspection (NDI) is one of the important technologies, not only to assure the high-end quality of products to our customers but also to improve our manufacturing process. This paper introduces several NDI technologies recently developed to meet the demands of high efficiency, stricter specification, and measuring materials' property. New technologies, such as ultrasonic phased array, synthetic aperture focusing technique, electromagnetic acoustic transducer, and rotational magnetic field are used in these techniques.

## 1. 緒 言

新日鐵住金(株)が製造する板、棒線、管、車両部品などは、車両、船舶、航空機、石油採掘・輸送用鋼管、プラントなどに使用されている。これらの部材に欠陥が存在し、それが破壊の起点となれば、重大な事故や災害を引き起こすことにもつながりかねない。すなわち鉄鋼メーカーとして、材料開発はもとより、それらの製品に実使用上で問題となる“きず”がないことを顧客に対して保証し、“安心、安全”を提供する義務がある。また材料の品質を製造プロセスの要所で計測して管理し、問題があれば発生原因を特定して品質を改善することも、製造実力を向上させる重要な取り組みの一つである。

これら自社製品の品質保証や品質管理の手段として、非破壊検査 (Non Destructive Inspection, NDI) 技術はきわめて重要な役割を担っている。近年では、ハードウェアやソフトウェアの高度化を背景として、従来の標準的な探傷方法に加えて、全数を安定的に計測、検査するための高速処理技術、“きず”のみならず、材質特性を測定するための新技術、厳格化する顧客要求に応えるための新技術、などを

独自開発してきた。その中から代表的な事例を紹介する。

## 2. フェイズドアレイ探傷による高速検査技術開発

1990年代後半から、高性能なアレイ探触子の製造技術が発達しフェイズドアレイ探傷技術の進歩と工業用途への普及が進んだ。当時のフェイズドアレイ探傷技術としては、駆動素子を電子的に切り替えることによる電子スキャン、各素子の駆動タイミングに微小な時間差をつけることで超音波ビームを特定方向に偏向させるステアリング、特定位置に超音波ビームを集束させるフォーカシング、およびこれらの組み合わせが可能である(図1)。アレイ探傷技術により、探触子の機械的な走査を軽減させ高速化が図れることや、一つのアレイ探触子で自由な超音波ビーム、エネルギー分布を形成させるため任意の位置の検出能を向上できるメリットがある。新日鐵住金においても、ガス導管周溶接部検査(図2)やUO管溶接部オンライン検査(図3)においてフェイズドアレイ探傷技術を応用し、高精度・高速検査技術を開発した<sup>1,2)</sup>。

\* プロセス研究所 計測・制御研究部 主幹研究員 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

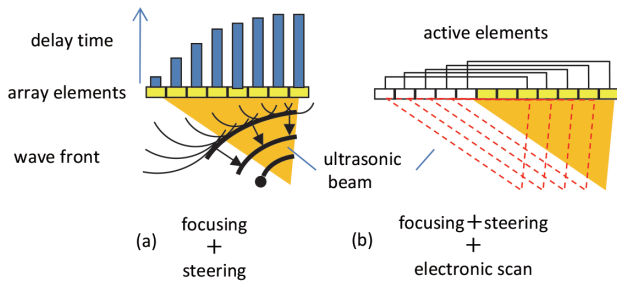


図1 フェイズドアレイ探傷技術  
Phased array ultrasonic testing technique

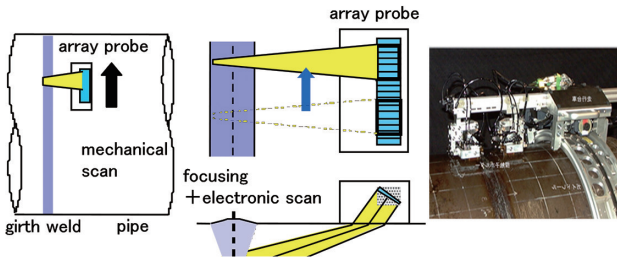


図2 管周溶接部超音波探傷装置  
Girth weld ultrasonic testing system

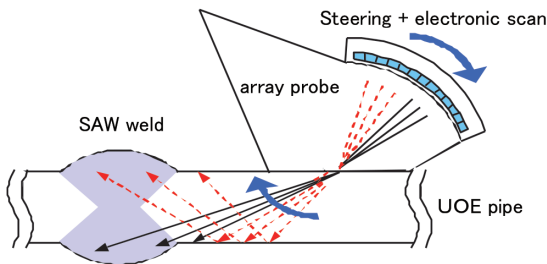


図3 UOE 管溶接部探傷用アレイ探触子  
Array probe for UOE pipe seam ultrasonic testing

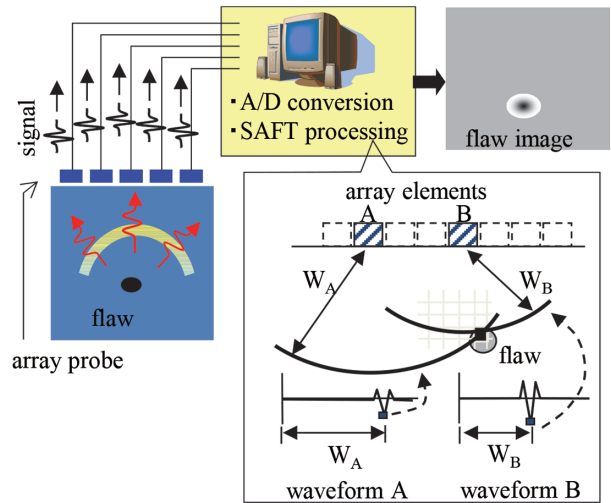


図4 開口合成処理  
Synthetic aperture focusing technique

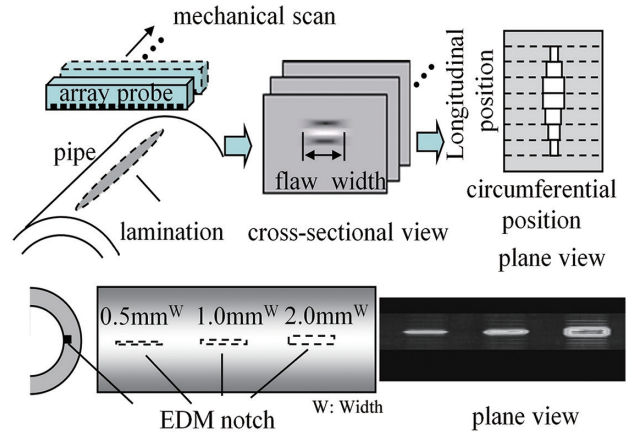


図5 ラミネーション定量評価技術  
Lamination quantitative evaluation technique

### 3. 開口合成処理を用いた探傷技術開発

フェイズドアレイ探傷技術は、送信時の遅延時間制御によるビーム制御と各素子で受信した信号波形の演算処理によって成り立つ。2010年代からFPGA(Field Programmable Gate Array)等の特定用途向けの高速度信号処理を安価に実装可能なデバイスがアレイ探傷装置にも搭載され始め、より複雑な信号処理を高速に実現できるようになった。その代表例として開口合成処理があげられる。レーダー分野において、送受信された電波信号を高解像度画像として出力するのに用いられている演算技術である。アレイ探触子の素子は微小故に指向性が広く、一つの素子で受信した探傷波形の振幅と位相(伝搬時間)は、被検査領域内に存在する反射源の大きさや位置情報を含んでいる。

処理の概要としては、アレイ探触子の各素子すなわち多点で受信した多量の探傷波形の各ポイントのデータの飛来位置を推定し、当該位置に振幅値を積算することで反射源を輝度画像として再構成する(図4)。被検査領域のあらゆる点に焦点を結ばせる演算に相当し、アレイ探触子を大開

口のセンサとみなせるため、被検査全域にわたって集束効果が高く、高空間分解能の画像を得ることができる。新日鐵住金では、当該処理を応用したシームレス鋼管に発生するラミネーション欠陥の定量評価技術を開発した<sup>3)</sup>。管軸方向に機械走査を行いながら各位置で開口合成処理を行い、連続生成した1連の断面画像から、各断面像におけるきず幅を算出し、管軸方向に測定ピッチと幅の積和から面積を評価する。併せてきずの平面像も得ることができる(図5)。

さらに、送信時の遅延時間制御により拡散ビームを形成させ受信時に開口合成処理を適用した丸棒鋼のオンライン探傷技術を開発した(図6)<sup>4)</sup>。丸棒鋼の超音波探傷は、一般に垂直ビームによる内部検査+斜角ビームによる表面・表層検査(条件①)が適用され、近年においては品質厳格化のための検出能向上(条件②)、生産能率向上のための高速検査(条件③)が求められる。従来の垂直1ch+斜角2chプローブ回転方式(図6(a))から電子走査によるフェイズドアレイ探傷方式(図6(b))にすることで条件①~②を満足する。しかしながら、検査速度の向上には電子切り

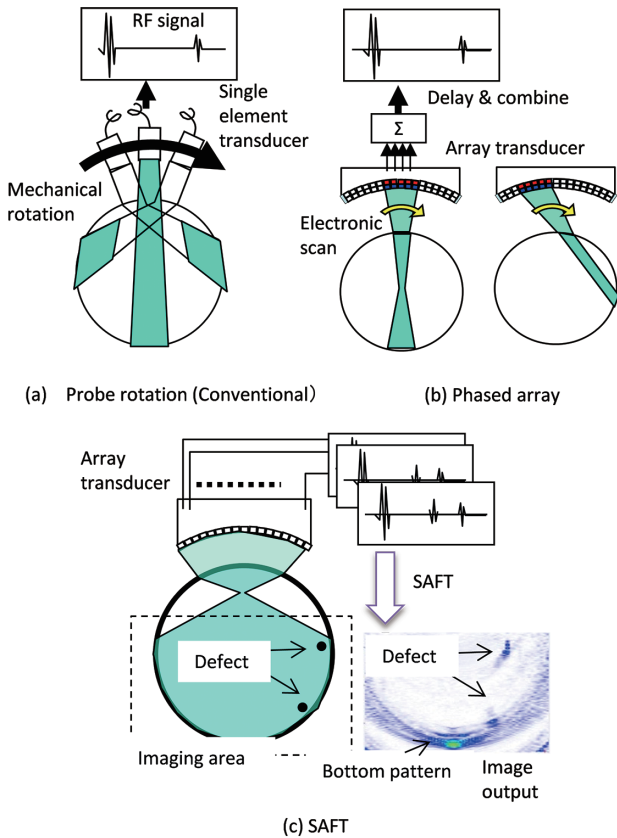


図6 丸棒鋼のオンライン探傷技術  
Ultrasonic testing technique for cylindrical products

替え（送受信）の短周期化が必要になるが超音波探傷において不可避な物理現象“残響エコー”問題がボトルネックとなる。そこで開発方式（図6(c)）は、広角拡散ビーム形成により1回の送信で垂直ビームと斜角ビーム成分を併せ持つ広範囲をカバーし、開口合成処理によってSN（signal/noise）比を向上させる。同一断面検査に必要な送受信回数を減らすことで高速検査を実現できる。

#### 4. 非接触超音波送受信法の開発

非接触に超音波を送受信することができれば測定対象が高温の場合や複雑な形状への適用、接触媒質の供給が困難な高速で移動する対象の検査等においても内部状態の把握が可能となり、鉄鋼プロセスでのメリットは大きい。

非接触超音波送受信法の代表的なものにレーザー超音波法と電磁超音波（EMAT）法がある。前者は検査対象との距離を比較的大きくとることができるが、表面のスケール性状による反射率変化や、光路中の雰囲気の影響を大きく受け、超音波送受信の感度が高いとはいえない。また、レーザーや干渉計等の光学系が高価で導入コストが高いという課題もある。一方、EMAT法は電気回路とコイル、磁石等で構成されるためコストはレーザー超音波と比較して低いものの、検査対象に発生する渦電流や磁歪効果を利用して超音波の送受信を得るため感度が低く、センサと対象との距離は数mm程度とあまり大きくすることができない。

対象が薄鋼板の場合には、対象鋼板に発生するゼロ群速板波の音速を周波数領域で測定することにより、感度が低いというレーザー超音波の欠点を補うことが可能である<sup>5)</sup>。我々も相変態率やポアソン比等の材質測定に応用した例を報告してきた<sup>6)</sup>。本報では薄鋼板の応力測定への適用について述べる。

#### 4.1 測定原理

パルスYAGレーザーで発生されたパルス光をレンズで集光し対象材表面に照射すると、瞬間的な金属の蒸発反力によるアブレーション効果や、急激な熱膨張、収縮による熱弾性効果により超音波が発生する。照射面におけるパルスレーザー光のパワー密度が高い場合にはアブレーション効果が大きく、発生する超音波の振幅も大きい。一方、熱弾性効果による超音波励起の場合、パワー密度は比較的小さく、感度低下が生じるものの照射痕が発生しないという利点がある。

アブレーション効果による超音波発生を使った計測例として、対象材に発生した板波超音波の群速度ゼロの $S_1$ モードの周波数（以下では $S_1f$ と表記）、群速度ゼロの $A_2$ モードの周波数（以下では $A_2f$ と表記）を検出し、その値からポアソン比、縦波音速および横波音速を算出した実験結果が報告されている<sup>5)</sup>。また、 $S_1f$ 、 $A_2f$ は理論的に次の式(1)、(2)で表されることが知られている。

$$S_1f = \beta_1 \cdot \frac{V_L}{2d} \quad (1)$$

$$A_2f = \beta_2 \cdot \frac{3V_S}{2d} \quad (2)$$

$\beta_1$ 、 $\beta_2$ ：ポアソン比の関数で表される係数、 $V_L$ ：縦波音速、 $V_S$ ：横波音速、 $d$ ：板厚を表す。対象に応力が発生している状態では弾性率が極僅かだが変化し、超音波の音速も変化する。この応力による音速変化は音弾性現象と呼ばれ、(3)式で表される<sup>7)</sup>。

$$\Delta V = C_A \cdot V_0 \cdot \sigma \quad (3)$$

$\Delta V$ 、 $C_A$ 、 $V_0$ 、 $\sigma$ はそれぞれ音速変化、音弾性係数、初期音速、負荷応力である。(1)～(3)式より、応力が存在する場合、縦波や横波の音速に変化が生ずるため、計測される $S_1f$ と $A_2f$ の値にも変化が現れると考えられる。

これまで薄鋼板を対象に照射痕が生じない熱弾性領域での超音波励起を検討してきたが、照射のパルスエネルギー密度を照射痕が生じない程度に低下させた場合、 $S_1f$ は計測可能であるが、 $A_2f$ の計測は困難であることがわかった。そこで $S_1f$ のみを用いた応力計測方法を検討した。

#### 4.2 応力測定評価試験結果

##### 4.2.1 試験装置と試験条件

図7に薄鋼板の応力計測実験装置の概略図を示す。試験に用いたレーザーは発生用が波長1064nm、エネルギー密

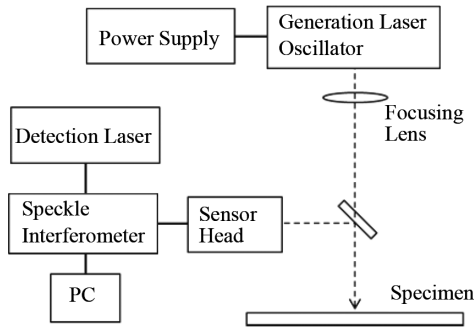


図7 応力計測装置ブロック図

Schematic diagram of the stress measurement system

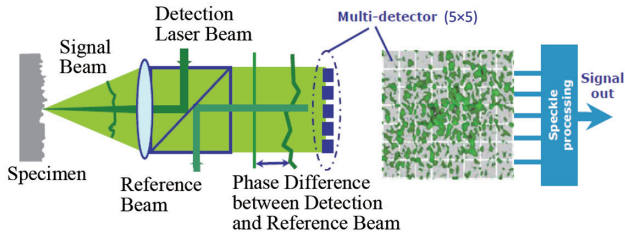


図8 レーザ干渉計の検出原理

Principle of the detection of ultrasound with interferometer

度  $1.8\text{mJ}/\text{mm}^2$  のパルス発振 YAG レーザ，検出用が波長  $52\text{nm}$ ，出力  $1\text{W}$  の連続発振 YAG レーザである。

試験体に超音波発生用パルス発振レーザ光源から発せられたレーザ光を照射して超音波を励起すると，試験体内部に縦波，横波，および板波超音波が発生する。本開発では超音波信号の受信のために市販のレーザ干渉計を用いた<sup>8)</sup>。

本レーザ干渉計の構成を図8に示すが，ファブリーペロー干渉計のように共振器内での多重反射を使用しないため，比較的小型で振動等外乱に対するロバスト性が高いという特徴を持つ。5×5素子のマルチ・ディテクタを用いており，粗面からの弱い拡散反射光（スペckル光）から超音波を検出可能である。本試験では，レーザ干渉計の受信信号をPC内のAD変換ボードで取り込み，周波数解析（FFT）を行うことで  $S_{if}$  の周波数を求める。薄鋼板への応力付加は4点曲げ治具により行った。実験に使用したサンプルは  $250\text{mm} \times 70\text{mm}$ ，板厚  $1.0\text{mm}$  のSS400鋼板である。

#### 4.2.2 試験結果

図9は引張応力のない状態での測定結果，図10は  $15\text{MPa}$  の引張応力を付加した状態での測定結果である。図9，10より試験体に引張応力が付加された状態では  $S_{if}$  の周波数ピークが2つに分離することがわかった。応力を付加していない状態の  $S_{if}$  は  $2.65\text{MHz}$ ，応力付加状態の  $S_{if1}$ ， $S_{if2}$  は，それぞれ  $2.66\text{MHz}$ ， $2.74\text{MHz}$  である。応力付加状態では引張応力のため伝搬方向による縦波の音速差が増加し，式(1)により  $S_{if}$  のピークが複数現れたと考えられる。

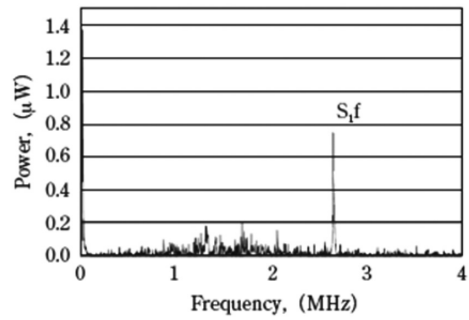


図9 パワースペクトル（応力なし）

Power spectrum of the output signal from the sample without stress

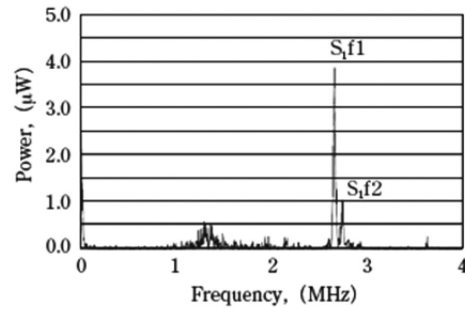


図10 パワースペクトル（応力あり，15MPa）

Power spectrum of the output signal from the sample with stress (15MPa)

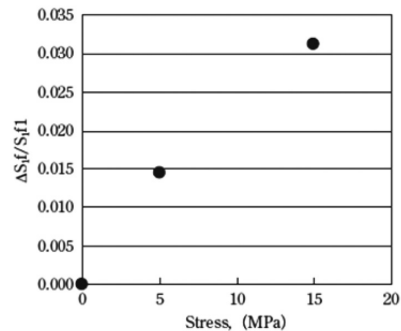


図11 応力と  $\Delta S_{if}/S_{if1}$  の関係

Relationship between the stress and the parameter  $\Delta S_{if}/S_{if1}$

試験体に付加する引張応力の大きさを変えると，図11に示すように2つの周波数の分離の大きさと，引張応力の大きさには相関があることが明らかになった。分離の大きさは，分離した2つの周波数を  $S_{if1}$ ， $S_{if2}$  ( $S_{if1} < S_{if2}$ )， $\Delta S_{if} = S_{if2} - S_{if1}$ ， $\Delta S_{if}/S_{if1}$  として表している。

2つの周波数の分離の大きさ  $\Delta S_{if}/S_{if1}$  と付加された応力の大きさとの関係をあらかじめ求めて修正曲線として保持しておき，付加された応力の大きさが未知の試験体について  $\Delta S_{if}/S_{if1}$  の値を計測すれば，応力の大きさを求めることができると考えている。

#### 4.3 レーザ超音波による材質計測

レーザ超音波による薄鋼板の応力測定について報告す

る。ゼロ群速モード板波音速の利用により、レーザ超音波法の欠点である感度の低さを補い、高いSN比で信号検出が可能となった。本手法は応力測定に限らず、薄鋼板の粒径測定や変態率測定、機械特性等を非接触に測定できる可能性があるものであり、今後も材質計測への適用を進めたい。

## 5. 電磁気を利用した全方向きず検出技術

### 5.1 開発背景

銅管の電磁気探傷（渦電流探傷、および漏えい磁束探傷）では従来、軸方向と周方向に伸びたきずを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) <sup>9, 10)</sup>

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12にセンサが与える交流磁界の方向（センサ指向性）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、センサ指向性をきずの方向と直交方向にすると同時に、図13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（ $\mu$ ノイズ）を最も抑制することができるためである。

図13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14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芯コイルを配置し、 $f_r$  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。

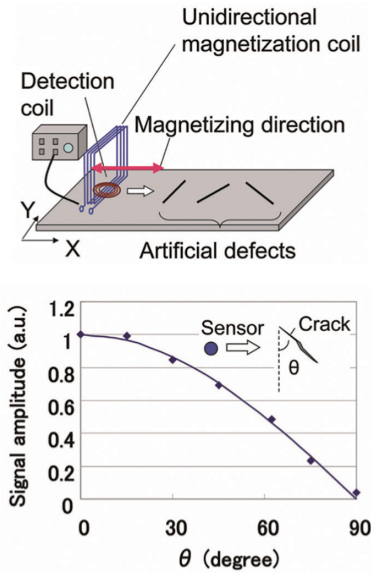


図12 単一方向励磁型センサのきず角度と振幅の相関  
Signal amplitude corresponded with the crack angles

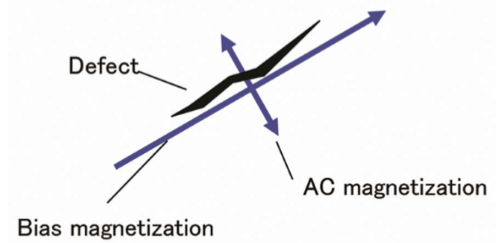


図13 きず検出に最適な交流磁界とバイアス磁界  
Optimum AC magnetization and bias magnetization for defect detection

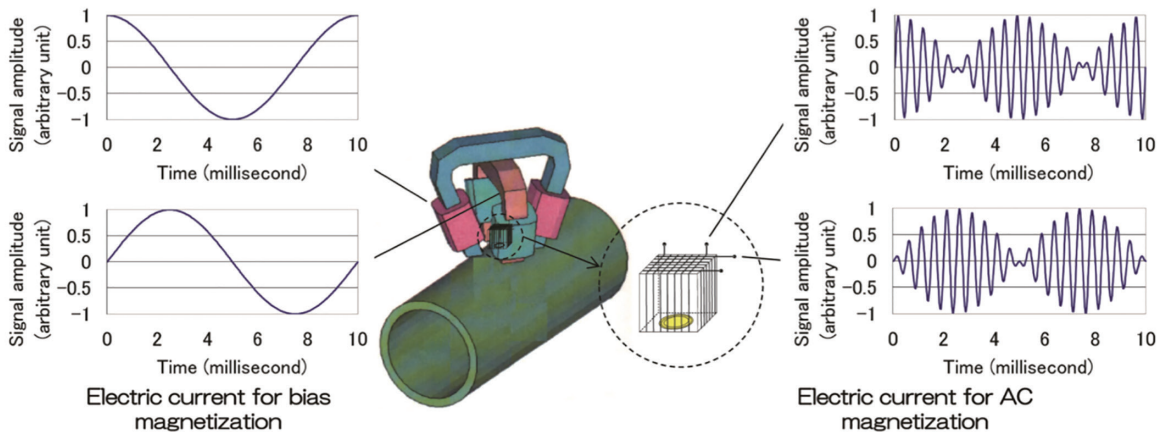


図14 重畳磁界回転探傷法の概略  
Schematic design of SMaRT devices

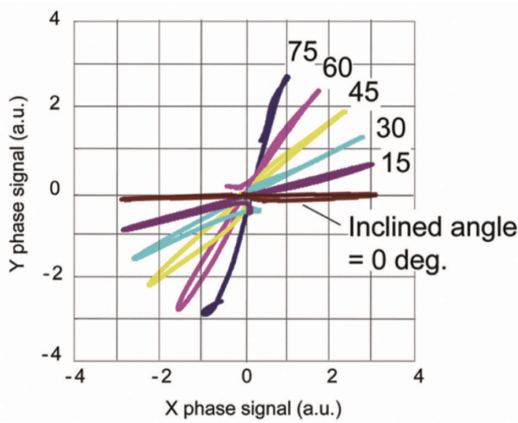


図 15 きず角度と信号振幅の相関

Signal wave form corresponded with the crack angles on SMaRT method

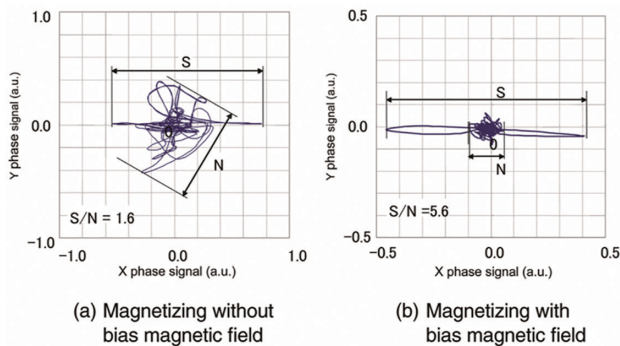


図 16 バイアス磁界による S/N の向上 (0.25%炭素鋼)  
Improvement of SN ratio on a 0.25% carbon steel pipe

### 5.3 実験室テスト結果

図 14 に示す磁化方法に信号処理方法を組み合わせることで、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 15)。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。さらには、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 16)。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. 結 言

本稿では、新日鐵住金の材料の品質を支える非破壊検査技術について、独自開発技術のいくつかを紹介した。より安心、安全な社会を実現するために、検査技術に要求される水準は今後ますます厳格化していくことが予想される。コンピュータの高速化などの恩恵により高度な処理の実装が可能となりつつある現在、ハードウェアの高度化に加えて、従来人間しか判断のできない検査技術に人工知能を適用するなどの試みも必要になってくると考えられる。革新的な技術の開発、実用化に挑戦し、これらのニーズに応え

ていく。

### 参照文献

- 1) 星野 ほか：高速ジグザグスキャン方式高速超音波探傷技術の開発. 非破壊検査. 47 (1), 35 (1998)
- 2) 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
- 3) 稗田剛志 ほか：開口合成処理を用いたシームレス鋼管のラ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
- 4) 上田 ほか：開口合成法を用いたオンライン棒鋼超音波探傷システムの開発. CAMP-ISIJ. 31, 241 (2018)
- 5) Dominique Clorenec et al.: Journal of Applied Physics. 101, 034908 (2007)
- 6) 永田泰昭 ほか：非破壊検査. 63 (4), 182 (2014)
- 7) 三角 ほか：日本非破壊検査協会 2005 年度秋季講演大会予稿集. 2005, p.149
- 8) Pouet, B. et al.: Review of Progress in QNDE 25. Edited by Thompson, D.O., Chimenti, D.E., AIP Conference Proceedings. Vol.820, Melville, NY, 2006, p.233-239
- 9) 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
- 10) 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



鈴木俊之 Toshiyuki SUZUMA  
プロセス研究所 計測・制御研究部  
主幹研究員  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



山田裕久 Hirohisa YAMADA  
プロセス研究所 計測・制御研究部  
主幹研究員



上田佳央 Yoshio UEDA  
プロセス研究所 計測・制御研究部  
主幹研究員