

鋼材商品の品質を支える新しい QA 技術

New Inspection Technology for Steel Products

松井 稔 MATSUI Yutaka JFE スチール スチール研究所 サイバーフィジカルシステム研究開発部 主任研究員 (課長)
内富 則明 UCHITOMI Noriaki JFE スチール 西日本製鉄所 (福山地区) 溶接管部長
楯 真沙美 TATE Masami JFE スチール 東日本製鉄所 (京浜地区) 厚板部 厚板工場 副工場長 (副課長)

要旨

本論文では、鋼管や厚板製品に関する、きずの入った製品の流出を防ぐために JFE スチールで開発した独自検査技術について述べる。LSAW 鋼管の溶接部をより高い信頼性で探傷するため、溶接部内外面をリニアフェーズドアレイ UT で斜角探傷し、溶接部中央部をマトリクスフェーズドアレイ UT で垂直入射して探傷する自動超音波探傷装置を開発、実用化した。さらに、厚板製品表面に生じた凹形状きずを検査するため、凹みきずのみを明瞭に検出可能とするツイン投光差分処理表面検査法を開発し、厚板工場に自動検査装置として導入、実用化した。

Abstract:

In order to prevent products with flaws being shipped out of the plant, JFE Steel has developed new quality assurance technologies. A new automatic ultrasonic tester using the phased array UT has been installed at a pipe mill to achieve more reliable flaw detection in the welded part of LSAW pipes. It combines a matrix phased array UT with the direct incidence method in order to detect incomplete penetration defects at the center of a weld with high S/N ratio and good repeatability. For inspection of flaws on the plate surface, twin-illumination and subtraction technique has been developed. This makes it possible to detect dented flaws on the plate surface by canceling disturbances due to surface patterns. An automatic detector equipped with this technique has been applied to a plate mill in JFE Steel.

1. はじめに

品質検査技術は、高品質な製品を製造し市場へ供給するために欠かせない技術である。信頼性の高い品質検査技術により、製造条件の改善を図ることができ、また欠陥(きず)がある商品の市場への流出を防ぐことができる。JFE スチールでは、厚板製品や鋼管製品の製造工程において、各種超音波探傷試験、放射線透過試験、磁粉探傷試験、寸法計測など様々な検査を実施しており、これら品質検査技術を重要な技術として位置づけ、最先端の検査技術の導入および独自の新技術の開発を積極的に進めてきた。

当社では、このたび、新たに LSAW (Longitudinal Submerged Arc Welding) 鋼管溶接部の肉厚中央部を高感度で検査可能なマトリクスフェーズドアレイ UT を活用した検査技術を開発し、あわせて、福山地区溶接管工場の溶接部自動超音波探傷装置を全面更新しフルフェーズドアレイ化した。さらに、目視検査していた厚板製品の表面に発生する凹形状のきずを明瞭に検出可能とする新しい画像検査技術「ツイン投光差分処理表面検査法」を開発し、京浜地区厚板工場に設置した。本論文では、これらの新しい検査技術の概要について述べる。

2. フェーズドアレイ UT を活用した LSAW 鋼管溶接部の QA 技術

2.1 開発の背景

西日本製鉄所(福山地区)溶接管工場では、UOE 鋼管やベンディング鋼管を造管している。鋼管は厚板を原板とし、これをプレス成型またはベンディング成型し、突き合わせ部を溶接して製造される。溶接の際に、割れや溶け込み不良といった欠陥の発生があることから、溶接部が欠陥なく接合されていることを保証するために超音波探傷による検査が実施されている。

一般的に溶接部の超音波探傷では、溶接部内面および外面に対しては超音波斜角法、溶接部肉厚中央部に発生する溶け込み不良はタンデム探傷法(送信と受信とを切り分け二つのプローブを使用する)が適用される。しかし溶接部肉厚中央部を探傷するタンデム探傷法は、溶接部形状の影響を受けやすく超音波の伝搬経路が曲がり、狙い位置に対して超音波が送受されない、円周方向に対する検出範囲が狭い、タンデム探傷法を構成する二つのプローブの角度調整、位置調整が難しいといった課題があった¹⁾。そのため、当社では、タンデム探傷法に代わり、高屈折角度を用いて肉厚中央部の欠陥にほぼ垂直に超音波をあてる方式(超音波垂直入射法)を開発し、この方式が実装された自動超音

2020 年 3 月 9 日受付

波探傷装置を用いて溶接部を検査している²⁾。この自動超音波探傷装置は、導入当時の非破壊検査技術を結集した最新鋭の装置であり、高い品質レベルの製品の提供に貢献してきたが、より高い信頼性と検出能の実現を狙い、フェーズドアレイ技術を適用した新しい自動超音波探傷装置に更新することとした。

2.2 フェーズドアレイ超音波探傷技術の導入

フェーズドアレイ超音波探傷技術は、複数の微小な振動子が直線または格子状に配列された超音波プローブを用い、これら微小な振動子の送受信タイミングを制御して超音波の送受信角度の制御や焦点制御を可能とするものである³⁾。

一般的な超音波探傷では、鋼種による音速の違いや、プローブ保持機構のバックラッシュによる入射角度変化により信号のばらつきが生じる。フェーズドアレイ超音波探傷技術を適用すると、送受信角度を電子的に振りながら探傷（セクター走査）することで、鋼種による音速の違いや、プローブ保持機構のバックラッシュによる入射角度変化の影響を低減できる。また、角度調整時にも広く角度を振ることができるので調整作業を簡便化できる。

写真1に更新した自動超音波探傷装置の外観、図1にシステムの概要、表1に主な仕様を示す。自動超音波探傷装置は、2台のマニピュレータから構成されており、様々な客先検査仕様に対応できる。また、マニピュレータ1台のみで探傷する際には、待機中のマニピュレータを次ロット用に設定し校正しておくことで、組み換え、調整時間なしで次ロットの探傷へスムーズに移行できる。マニピュレータは溶接トラッキングシステムにより、円周方向±2mm以内の精度で溶接位置に追従制御可能である。

各マニピュレータはオンビード探傷用のアレイプローブを1組、L探傷用のアレイプローブを3組保有している。L探傷用アレイプローブのうち1組はT探傷と兼用できるようになっている。オンビード探傷用と溶接部内外面のL探傷用およびT探傷用にはリニアアレイプローブを配置し、肉

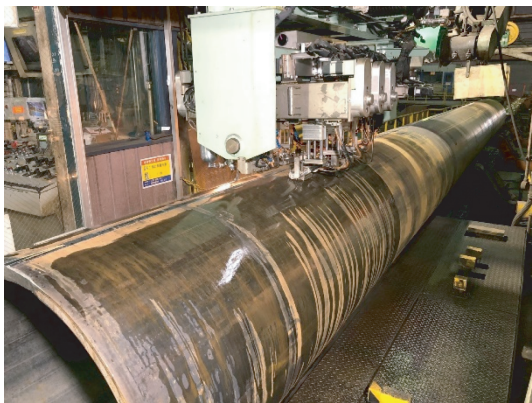


写真1 更新した自動超音波探傷装置

Photo 1 Renewed automatic ultrasonic tester

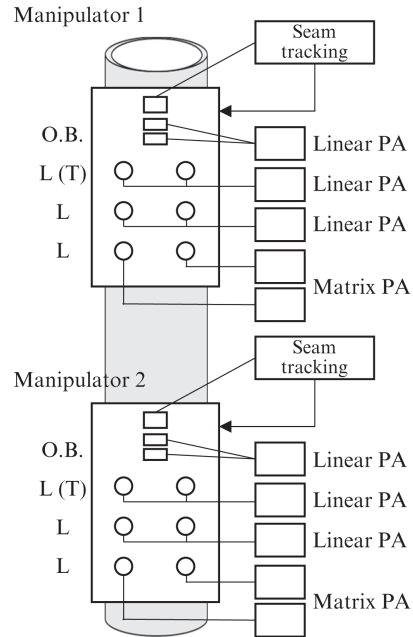


図1 自動超音波探傷装置のシステム構成

Fig. 1 System configuration of automatic ultrasonic tester

表1 自動超音波探傷装置の仕様

Table 1 Specification of automatic ultrasonic tester

Item	Specification
Size of pipe	Diameter 400-1 422 mm Thickness 6.5 mm-50.8 mm Length 5.5 m-19 m
Conveying speed	1 mpm-30 mpm
Inspection method	Inner zone, Outer zone : Angle method Middle zone : Direct incident method
Ultrasonic frequency	5 MHz
Coupling method	Water gap 0.5 mm-1.0 mm
Seam tracking	±2 mm

厚中央部探傷用には新しく開発したマトリクスアレイプローブを配置している。次節で新しく開発したマトリクスアレイプローブを活用した探傷法について説明する。

2.3 マトリクスフェーズドアレイ垂直入射法

前述のとおり、超音波垂直入射法は、溶接部の肉厚中央部にある溶け込み不良に対して垂直に超音波を入射する方式である。図2に超音波の屈折角度と超音波往復透過率の関係を示す。通常の超音波斜角法では最大で70度程度までの屈折角度を用いて探傷するのにに対し、垂直入射法は65度から83度の角度を用いる。屈折角度が大きくなることで超音波往復透過率は図2に示すように低下する。従来から、この超音波往復透過率の低下により超音波垂直入射法では十分なSN比で探傷できないという課題があった。当社では、

この課題に対しデジタル信号処理（チャープパルス圧縮，同期加算）を適用し²⁾，SN比を高めることで本探傷法を実用化していた⁴⁾。フェーズドアレイ化するにあたり，今までのデジタル信号処理の適用は大幅なコスト増を招くため，新しい手法で高いSN比を確保することを目指し，**図3**に示すマトリクスアレイプローブと垂直入射法とを組み合わせた超音波探傷法を開発した⁵⁾。板厚方向の走査により入射角度のばらつきによる角度変化影響を吸収するとともに，マトリクスアレイプローブを用いて長手方向に対してビーム集束可能とすることで，高屈折角使用時の感度低下を補う技術を実現した。また，マトリクスアレイプローブは，幅広い造管サイズに対して1種類のアレイプローブで対応でき，かつ超音波の集束効果が十分に得られるように設計した。

図4は外径56インチ，肉厚12.7mmの鋼管の肉厚中央部に加工されたφ3mmの平底穴を探傷した際の信号チャートである。この鋼管サイズで，欠陥に垂直に超音波をあてるために必要な屈折角度は82度である。開発した技術により，

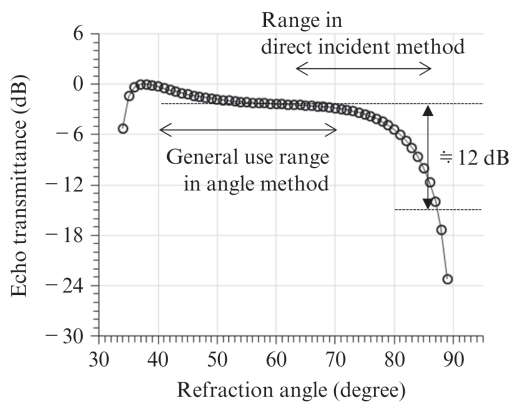


図2 超音波屈折角度と超音波往復透過率

Fig. 2 Relation between refraction angle and echo transmittance

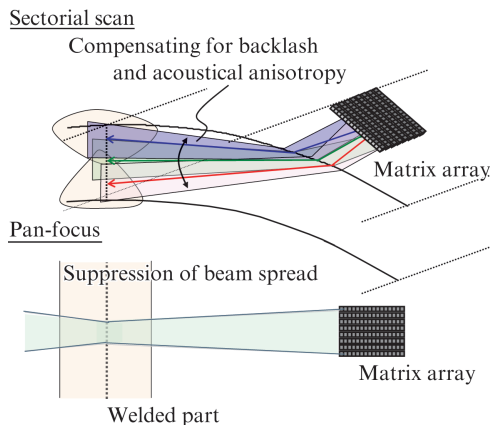


図3 肉厚中央部に対するマトリクスフェーズドアレイプローブを用いた垂直入射法

Fig. 3 Direct incident method at the center of wall thickness of welded part using matrix array probe

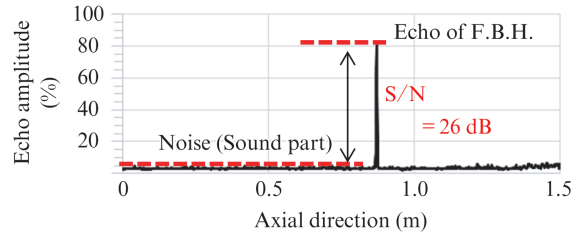


図4 人工きずの探傷結果の例

Fig. 4 Example of inspection chart

このような屈折角度が高く超音波往復透過率が大きく低下する条件でも，26 dBという高いSN比できずを検出することができた。

2.4 更新装置による実鋼管の探傷例

表2に実鋼管に加工した人工きずを探傷した際の検出能と再現性を示す。探傷で使用した鋼管のサイズは，外径18インチ×肉厚12mm，外径36インチ×肉厚38mmである。鋼管溶接部のφ1.6mmの貫通穴および，その肉厚中央部に加工したφ3.0mmの平底穴を探傷した。なお，外径36インチの鋼管の平底穴は，42%肉厚位置と58%肉厚位置に加工した。

φ1.6mm貫通穴はL探傷用リニアフェーズドアレイプローブを用いた内面および外面狙いの斜角法で探傷し，φ3.0mm平底穴はマトリクスフェーズドアレイ垂直入射法で探傷した。それぞれ8回繰り返し探傷し，その際の各人工きずに対するSN比の平均値とばらつきを整理し表2に記載した。鋼管溶接部の探傷規格では，10～12 dB以上のSN比が要求されているが，これらを十分に満足する検出能が得られている。また，再現性も良好な結果が得られた。

新たに更新した自動超音波探傷装置は，鋼管の鋼種によ

表2 検出能の事例

Table 2 Example of detectability

Pipe size	Defect type	S/N ratio Average (8 times)	Repeatability 3σ (8 times)
O.D. 18" t12 mm	T.D.H. 1.6 mm Inner	20.3 dB	1.4 dB
	T.D.H. 1.6 mm Outer	18.2 dB	0.7 dB
	F.B.H. 3.0 mm Middle	27.2 dB	0.6 dB
O.D. 36" t38 mm	T.D.H. 1.6 mm Inner	21.8 dB	2.2 dB
	T.D.H. 1.6 mm Outer	22.1 dB	1.4 dB
	F.B.H. 3.0 mm 42% middle	25.8 dB	1.2 dB
	F.B.H. 3.0 mm 58% middle	28.1 dB	0.5 dB

る音速の違いや、プローブの保持機構のバックラッシュなどの影響を抑制し、高い SN 比と再現性で溶接鋼管品質保証に貢献している。

3. ツイン投光差分処理表面検査法を適用した厚板製品表面の QA 技術

3.1 開発の背景

厚板製品は、圧延時や搬送時に表面にきずが発生することがあり、これらのきずが客先へ流出しないよう表面検査を実施している。

自動車用鋼板などの薄板分野では、高度なカメラ技術を駆使した表面検査装置の導入が進み、検査が自動化されている⁶⁾。一方、厚板製品等の黒皮（酸化鉄の膜）で覆われている鋼材製品の表面検査はこれまで目視検査が主流であり、自動化が進んでいなかった。厚板製品は薄板製品よりも表面性状が粗く、きずのない部分の表面模様ときずとが判別しにくいことがその理由であった。

当社では、厚板製品表面を自動検査可能な新しい検査技術「ツイン投光差分処理表面検査法⁷⁾」を開発し、東日本製鉄所（京浜地区）厚板工場に実用機を導入した。

3.2 検査技術の原理

開発した検査技術は、開口性かつ凹形状のきずを対象としている。具体的には、異物やスケールがロールで押し込まれて発生するきずや、開口性のへゲなどである。図5に開発技術の原理を示す。検査対象面に2方向から異なるタイミングで光を照射し、カメラ（2次元エリアセンサ）でそれぞれ撮像する。撮像された2枚の画像において表面の様子は平面であり、光源方向による陰影の違いはない。一方、凹形状のきず部分では、光源方向の違いにより陰影が異なる。そこで、両画像の差分を計算すると、表面の模様部分

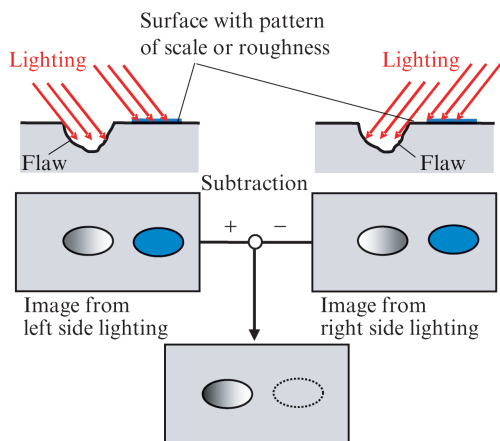


図5 ツイン投光差分処理表面検査法の原理

Fig. 5 Principle of twin-illumination and subtraction technique

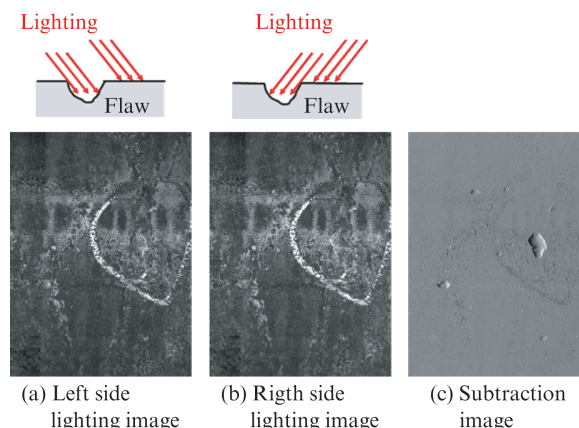


図6 開発技術の効果

Fig. 6 Effect of developed technique

は相殺され、凹状のきずのみが強調される。図6に開発技術の効果を実験で確認した結果を示す。自然きずがある試験片を準備し実験した。試験片には黒皮がついており、また、自然きずを囲むようにマーキングもされている。左右からそれぞれ光を投光して撮像した画像だけではきずを認識しづらいが、差分処理された画像では、平面部分の様子がキャンセルされ、きずがはっきりと確認できる。

搬送中の検査対象に開発技術を適用するには、それぞれ2方向から投光して撮像された画像の撮像位置がズレないようにすることが重要である。そこで、ストロボを用いて2方向からの投光および撮像を1万分の1秒で実行することで解決を図った⁷⁾。

3.3 自動表面検査装置の概要

図7に厚板工場に導入した自動表面検査装置の概要を示す。自動表面検査装置は、表裏面を目視検査している走間検査場の手前に設置した。厚板製品の全表裏面を検査するため、全幅方向をカバーできるようにカメラを複数台設置し

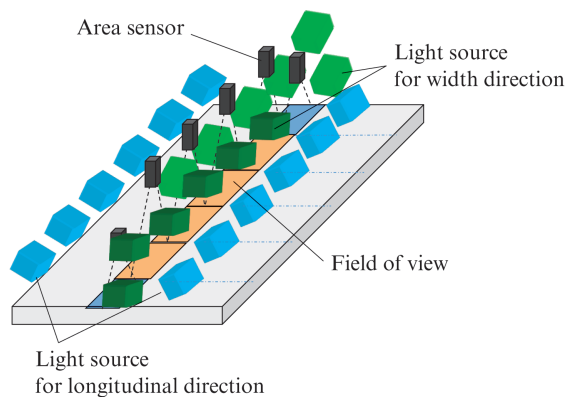


図7 自動表面検査装置の概要

Fig. 7 Overview of automatic surface inspection system for steel plate

た⁸⁾。

細長いきずの場合、きずの長手方向に対して平行な向きから光を照射すると、きずの斜面がきずのない部分と比較してなだらかなため、差分処理の効果が十分に得られず信号が弱くなってしまいます。厚板製品は細長いきずも発生することから、それぞれのカメラに対し、長手方向照射用の光源2台と幅方向照射用の光源2台を設置する構成とした。

ツイン投光差分処理では、得られた画像にシェーディング補正等の各種画像処理を施した後に差分処理し、きず候補を抽出し、各きず候補の明暗パターンなどの特徴量を算出する。算出した特徴量から、きずかどうかを判定し、更にきずの場合はヘゲやロールきずといったきず種も判定する。これらきずに関する判定は、機械学習により構築された決定木モデルで実行される。きずと判定された指示部位は走間検査場のオペレータにガイダンス表示され、オペレータはガイダンスされたきずをダブルチェックし、きずの流出を防止する。ガイダンスでは、鋼板全面におけるきずの位置およびきず画像がオペレータに表示される仕組みとなっている。

図8に自動表面検査装置が周期的なロールきずを検出した際のガイダンス画面の例を示す。きずを検出した場合、検査された製品が走間検査場に到達する直前に図8に示す検査結果画面がオペレータに表示される。この時、検出されたきず画像も併せて表示される。走間検査場では検査場の下を製品が通過するため、表示時点での製品と走間検査場の位置関係も合わせて表示し、また検出されたきずが近づくとき音で発報することで、検出されたきずが確認しやすいようにした。

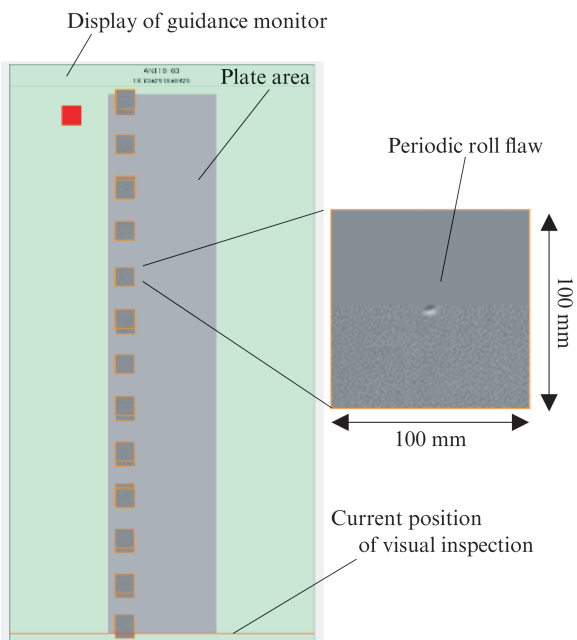


図8 自動表面検査装置のガイダンス例

Fig. 8 Guidance monitor of automatic surface inspection system

本装置の実現により高い信頼性で表面きずを検出できるようになり、きずの流出を抑止することで厚板の品質保証に貢献している。

3.4 きず判定アルゴリズムの構築方法

前述のとおり、きずは機械学習で構築された決定木モデルで判定している。決定木モデルを構築するには、自動表面検査装置で計測されるきず候補の特徴量と、それがきずかどうかを正しく判定した教師データとを突き合わせて機械学習をしなければならない。従来の目視検査では、きずかどうかの判定は定量的ではなく、個々のオペレータの判断が入る余地があった。

そこで、オペレータによる判定のばらつきが影響しないように、目視検査で表面欠陥候補とされた部位について、レーザー形状計を用いて幅、長さ、深さ、面積といった情報を取得し、さらにきずの定義を定量的に定め、これらを教師学習のデータとした。また、きずを見逃さず検出するようきず判定モデルを構築する必要があることから、新しい判定アルゴリズムの機械学習方法を開発した⁹⁾。通常、きずの検出率を上げようとすると、過検出(きずでない部位をきずと判定すること)が増え、逆に過検出を減らそうとすると、きずの見逃しが発生しやすくなる。従来は、使用者が検出率と過検出率の度合いを調整できなかったが、きずのデータときずのないデータの間違えやすさの差を変化させることで、自動的に意図する検出率に調整できるようにした。今回の判定モデルは、許容可能な過検出率を予め設定し、検出率が100%となるよう調整のうえ機械学習を行った。

製造方法の変更や設備変化により、新しいきずや地肌変化が発生する可能性がある。新しく生じたきずや地肌変化は、既存のきず判定モデルには含まれていないため、きずの未検出や過検出増加のリスクが考えられる。そこで、定期的いきずの形状を3D計測し、きずかどうかをあらかじめ定めてきず定義データベースに追加し、追加された定義に基づいて新しいきず判定モデルを再構築できる仕組みとした。なお、この仕組みは専門的な知識がなくとも容易に運用できる。この仕組みの導入により、判定モデルの検出能を恒久的に維持できることとなった。

4. おわりに

本論文では当社の鋼材商品を支えている検査技術の中から、高感度かつ高い再現性で鋼管溶接部を探傷可能な自動超音波探傷装置、厚板製品の表面性状による外乱をキャンセルし凹形状のきずを検出可能な自動表面検査装置を紹介した。

当社は、今後とも高い信頼性を持つ検査技術の開発と導入に尽力し、鋼材製品の品質向上に努めていく所存である。

参考文献

- 1) Matsui, Y.; Iizuka, Y. Basic Performance of Normal Incidence Method for Inspection of Middle Zone of Wall Thickness of LSAW Steel Pipes. IPC 11th. 2016, IPC2016-64328.
- 2) 飯塚幸理, 松藤泰大, 前田孝三, 岩倉進. 高性能 UOE 鋼管溶接部自動超音波探傷装置. NKK 技報. 2001, no. 175, p. 36-40.
- 3) Noel Dube. INTRODUCTION TO PHASED ARRAY ULTRASONIC TECHNOLOGY APPLICATIONS. 1st edition, R/D TECH, 2004, 348p.
- 4) 飯塚幸理, 長棟章生, 正村克美. 鋼管商品を支える非破壊検査技術. JFE 技報. 2005, no. 9, p. 40-45.
- 5) 松井穰, 飯塚幸理, 内富則明. マトリクスフェーズドアレイ UT を活用した UOE 鋼管溶接部の高感度探傷技術. CAMP-ISIJ. 2019, vol. 32, p. 202.
- 6) 大重貴彦. 鉄鋼製品の品質評価のための自動検査技術. 計測と制御. 2016, vol. 66, no. 3, p. 228-233.
- 7) 大野紘明, 小川晃弘, 山崎孝博, 腰原敬弘, 児玉俊文, 飯塚幸理, 大重貴彦. 鋼管表面の熱間における凹凸欠陥検出を目的とした「ツイン投光差分方式」の開発. 鉄と鋼. 2018, vol. 104, no. 1, p. 11-17.
- 8) 大野紘明, 大重貴彦, 楯真沙美. ダブルツイン投光差分方式を用いた厚板表面検査装置の開発. CAMP-ISIJ. 2020, vol. 34, p. 112.
- 9) 大野紘明, 大重貴彦. ツイン投光差分方式による鋼管表面検査装置の開発—検出率向上と過検出抑制のトレードオフを制御する欠陥判定ロジック調整法—. 第 35 回 SICE センシングフォーラム, 2018, 1C1-1.



松井 穰



内富 則明



楯 真沙美