

溶接線の自動検査に向けた基盤調査

藤本 修平*, 津村 秀一*, 穴井 陽祐*, 丹羽 敏男*, 黒岩 隆夫**

Ultrasonic Measurement Methods for Automatic Nondestructive Inspection of Weld Lines

by

FUJIMOTO Shuhei, TSUMURA Shuichi, ANAI Yosuke,
NIWA Toshio and KUROIWA Takao

Abstract

The quality of weld lines correlates directly with the quality of hull structures because a hull is constructed by joining many weld lines. Non-destructive inspection is carried out to maintain the quality of weld lines. Conventional nondestructive testing is performed by radiographic testing or ultrasonic testing using the angle beam method, both of which are well established methods. However, the evaluation of the results when using these methods depends on the experience of the measurer. Furthermore, it takes a relatively long time to measure a wide area. Automatic nondestructive inspection should be possible if these problems are solved, and the quality of welding can be determined more quantitatively than before. In this study, advanced ultrasonic measurement methods, the phased array ultrasonic method and time of flight diffraction (TOFD) method, were investigated for their applicability in the shipbuilding process. These methods are more suitable for automation than conventional nondestructive testing methods (radiographic testing and ultrasonic testing using the angle beam method) and are expected to improve the efficiency and accuracy of nondestructive testing.

* 産業システム系, ** 構造安全評価系

原稿受付 令和3年11月1日

審査日 令和3年12月2日

目 次

1. はじめに	154
2. 溶接部の非破壊検査に関する現状調査	155
2.1 溶接部の非破壊検査に関する基準・規格	155
2.2 斜角探傷法	158
2.3 フェーズドアレイ超音波法と TOFD 法	158
3. 溶接部の非破壊検査実験	159
3.1 溶接試験体の作成	160
3.2 従来法 (RT, 斜角 UT) による非破壊検査	161
3.3 フェーズドアレイ超音波法と TOFD 法による非破壊検査	161
4. 非破壊検査結果の考察	161
4.1 従来法による非破壊検査の結果	161
4.1.1 放射線透過試験 (RT) の結果	161
4.1.2 斜角探傷法による超音波探傷試験 (斜角 UT) の結果	164
4.2 高度な超音波計測による非破壊検査の結果	166
4.2.1 フェーズドアレイ超音波 (PAUT) 法の結果	166
4.2.2 TOFD 法の結果	168
5. まとめ	170
References	170

1. はじめに

船体は多数の溶接で接合され建造されるため、溶接線の品質は船体構造の品質に直結する重要な部分である。溶接線の品質は適切な非破壊検査によって担保されている。従来の非破壊検査は放射線透過試験または斜角探傷法による超音波探傷試験で行われており、いずれも長年の実績があり確立された計測手法である。一方で、探傷結果の判断（きずの有無など）が計測者の技量・経験に依存する部分がある、広範囲の計測には比較的長い時間を要するといった特徴も有している。こうした点を解消できれば、非破壊検査の自動化（探傷結果の判断の自動化も含む）が可能になり溶接の品質を従来よりも定量的にかつ効率的に把握・議論できる下地になると考える。つまり、計測者ごとの技量差などに依存しない、より客観的な溶接の品質評価、言わば「溶接品質のデジタル化」に向かう基礎となる。このような「溶接品質のデジタル化」を念頭に置き、溶接線の非破壊検査の自動化に向けた基礎調査を行った。

本研究では、従来の非破壊検査手法（放射線透過試験、斜角探傷法による超音波探傷試験）に比べて自動化等に適しており非破壊検査の効率や精度の向上に資すると思われる、フェーズドアレイ超音波法や TOFD 法などの高度な超音波計測法の造船における船殻建造工程への適用性を検討した。これらの高度な超音波計測法は橋梁や圧力容器などの非破壊検査ではすでに適用されているが、船殻建造行程ではこれまでほとんど使われてこなかった。最近になって高度な超音波計測法に関して IACS の統一規則制定や日本海事協会のガイドラインの発行などが行われており、今後の普及が期待される。フェーズドアレイ超音波法や TOFD 法を造船溶接部の検査に適用することで従来よりも客観的な品質評価を効率的に行うことができ、「溶接品質のデジタル化」につながるものと考えられる。

2. 溶接部の非破壊検査に関する現状調査

本章ではまず溶接部の非破壊検査に関する国内の基準や規格の現況を概観する。次いで、最近の動きとしてフェーズドアレイ超音波法やTOFD法の造船溶接部検査への適用に関する状況について述べる。なお、以下で参照している日本海事協会・鋼船規則(M編)は、2021年6月30日改正版である。

2.1 溶接部の非破壊検査に関する基準・規格

溶接部の非破壊検査はさまざまな分野で実施されており、各分野で独自の判定基準等が用いられている。代表的なものを表1に示す(船舶をはじめ大型構造物を対象とする分野を中心に記載している)。船舶分野では船級協会の規則等により定められているが、日本の船級協会である(一財)日本海事協会の鋼船規則M編¹⁾では、表面欠陥、内部欠陥それぞれの検査の対象となる部位や検査方法等が定められている。その他の分野での非破壊検査の例として、例えば建築鉄骨分野では表面欠陥は(一社)日本建築学会による建築工事標準仕様書(JASS)に、内部欠陥は(一社)日本建築学会による鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査基準・同解説にそれぞれ基づいて検査が行われる。橋梁(道路橋)に対しては、国土交通省が定め、(公社)日本道路協会が発行する道路橋示方書・同解説に基づく検査が行われる。設計圧力が30MPa以下の圧力容器についてはJIS B 8265およびJIS B 8267に基づく検査が行われる。

表1 分野別の溶接部検査方法と判定基準

分野	規格・判定基準等の例	検査対象とその方法 ^{※1}
船舶	鋼船規則 M 編 鋼船規則検査要領 M 編	表面欠陥：VT, MT, PT で実施。 内部欠陥：RT か UT で実施。
建築鉄骨	表面欠陥：JASS6 付則 6 鉄骨精度検査基準 内部欠陥：鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査基準・同解説	表面欠陥：VT で実施。 内部欠陥：主に UT で実施。一般には斜角一探触子法。一部で垂直一探触子法を実施。
橋梁(道路橋)	道路橋示方書 道路橋示方書・同解説	表面欠陥：VT で実施。 内部欠陥：RT または UT。
圧力容器 ^{※2}	JIS B 8265 圧力容器の構造一般事項 JIS B 8267 圧力容器の設計	表面欠陥：MT, PT で実施。 内部欠陥：基本は RT。それが困難な継手は UT を実施。

※1 検査手法の略称は次の通り。VT：目視検査 (Visual Testing)，MT：磁粉探傷試験 (Magnetic Testing)，PT：浸透探傷試験 (Penetrant Testing)，RT：放射線透過試験 (Radiographic Testing)，UT：超音波探傷試験 (Ultrasonic Testing)。

※2 表に記載の情報は、設計圧力が 30 MPa 以下の圧力容器に対してのものである。

本研究では目視検査では確認できない溶接部内部欠陥の非破壊検査を検討対象とする。内部欠陥は放射線透過試験 (RT) または超音波探傷試験 (UT) によって検査される。検査の具体的な内容として表2に示す各種の ISO 規格や JIS 規格がある。このうち、ISO 17636「溶接部の非破壊試験-放射線透過試験-」、JIS Z 3104「鋼溶接継手の放射線透過試験方法」、ISO 17640「溶接部の非破壊試験-超音波探傷試験-技術、試験レベルおよび評価」、ISO 11666「溶接部の非破壊試験-超音波探傷試験-許容レベル」、ISO 23279「溶接部の非破壊試験-超音波探傷試験-溶接部の不連続性の特性評価」は鋼船規則 M 編に参照されている。

船舶などの大型構造物では溶接部の長さはかなりの距離になる。そのため、基本的には全長検査ではなく適切な条件の下での抽出検査が行われている。表3に船舶分野での放射線透過試験での抽出検査の方法等を記す。比較用に圧力容器の基準も記した。船舶では、船の長さや部材、溶接方向により抽出数が決定される。試験方法は ISO 10675-1 に基づいて行われる。可否の判定基準や否となった場合の対処方法等も規定されている。

圧力容器では溶接継手の種類によって検査対象を 100%検査する全長検査または対象部の 20%を検査する抽出検査が行われている。合否は基本的に当該の JIS 規格 (JIS Z 3104) に準じて判定される。

表 2 溶接構造物内部欠陥の非破壊検査関連の ISO, JIS 規格

試験方法	規格番号	規格の表題
放射線透過試験 (RT)	ISO 17636	溶接部の非破壊試験-放射線透過試験-※3
	JIS Z 3104	鋼溶接継手の放射線透過試験方法※3
	JIS Z 3105	アルミニウム溶接継手の放射線透過試験方法
	JIS Z 3106	ステンレス鋼溶接継手の放射線透過試験方法
超音波探傷試験 (UT)	ISO 17640	溶接部の非破壊試験-超音波探傷試験-技術、試験レベルおよび評価※3
	ISO 11666	溶接部の非破壊試験-超音波探傷試験-許容レベル※3
	ISO 23279	溶接部の非破壊試験-超音波探傷試験-溶接部の不連続性の特性評価※3
	JIS Z 2344	金属材料のパルス反射法による超音波探傷試験方法通則
	JIS Z 3060	鋼溶接部の超音波探傷試験方法
	JIS Z 3070	鋼溶接部の超音波自動探傷方法
	JIS Z 3080	アルミニウムの突合せ溶接部の超音波斜角探傷試験方法

※3 鋼船規則 M 編 8 章で引用されている ISO または JIS の規格。

表 3 船舶と圧力容器での試験方法, 判定基準等の比較 (放射線透過試験)

分野	対象継手	検査する割合・数	試験方法 (ISO, JIS の 例)	合否判定基準
船舶	突合せ溶接	船の長さ, 部材, 溶接方向により検査点数を決める。(検査要領 M 編 M8 表 M8.1.1-1)	ISO 10675-1	きずの種類に応じて寸法に基づき判定する (M 編表 M8.5)
圧力容器	突合せ両側溶接, 突合せ片側溶接 (裏当て付)	溶接継手の種類により, 100% (全長検査) または 20% (抽出検査)	JIS Z 3104	JIS Z 3104 の 1 類, 2 類に分類 (きずの種類に応じて寸法または寸法に基づき判定)。あるいは, 別途の規定に応じて判定

表 4 に船舶と圧力容器での超音波探傷試験の試験方法の比較を示す。船舶では基本的には放射線透過試験 (RT) が求められているが, 日本海事協会 (NK) の承認を得る等の条件が整えば RT の代替として超音波探傷試験による溶接部検査が認められている。RT と同様に船の長さ, 部材, 溶接方向により抽出数が決定される。試験方法は ISO 17640, ISO 11666, ISO 23279 に基づく。検査の合否は ISO 11666 に基づいて判定される。

圧力容器では検査対象を 100%検査する全長検査または対象部の 20%を検査する抽出検査が行われている。合否は基本的に当該の JIS 規格 (JIS Z 3060) に準じて判定される。

表4 船舶と圧力容器での試験方法, 判定基準等の比較 (超音波探傷試験)

分野	対象継手	検査する割合・数	試験方法 (ISO, JIS の 例)	合否判定基準
船舶	突合せ溶接 (ただし, NK 承認等 の条件付きで RT の代 替として実施可能)	船の長さ, 部材, 溶接方 向により検査点数を決 める. (検査要領 M 編 M8 表 M8.1.1-1)	ISO 11666	ISO 11666 に基づき判定 する. (M 編表 M8.6)
圧力容器	突合せ両側溶接, 突合せ 片側溶接 (裏当て付) の うち, RT が困難な箇所, または最終的に閉鎖す る継手	溶接継手の種類によ り, 100% (全長検査) ま たは 20% (抽出検査)	JIS Z 3060	JISZ3060 の 1 類, 2 類に 分類 (検出レベルに応じ て領域寸法に基づき判 定). あるいは, 別途の規 定に応じて判定.

表5は, 表3および表4に方法を記載した非破壊検査で不合格箇所があった場合の対応をまとめたものである。船舶, 圧力容器それぞれで対応が定められている。最初の検査での不合格箇所近傍あるいは条件に近い溶接部を再検査し, そこにでも不合格箇所が認められた場合には検査対象範囲が拡大され, 場合により全長検査が求められることとなる。

表5 非破壊検査の再試験方法 (不合格の場合の対応方法) の比較

分野	不合格の場合の再試験方法	
船舶	<p>【板部材の場合】 不合格となったものと同一の溶接継手線の中から更に2つの箇所を非破壊検査し, その判定結果に応じて以下の通りに対応する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・再検査箇所がいずれも合格の場合: 最初の試験での不合格箇所を M 編 2.2.2-3 に規定される補修要領に従って補修する。 ・再検査箇所が 1 ヶ所以上不合格の場合: 検査範囲を当該溶接継手全長に拡大して非破壊検査を行う。この全長検査で不合格箇所が見つかった場合は, 当該不合格箇所を補修する。 <p>【桁部材または骨部材の場合】 不合格となったものと同一ブロック内から不合格箇所と同一の溶接施工法が適用された継手から 2 つの継手を非破壊検査し, その判定結果に応じて以下の通り対応する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・再検査箇所がいずれも合格の場合: 最初の試験での不合格箇所を M 編 2.2.2-3 に規定される補修要領に従って補修する。 ・再検査箇所が 1 ヶ所以上不合格の場合: 検査範囲を当該継手全長に拡大して非破壊検査を行う。この全長検査で不合格箇所が見つかった場合は, 当該不合格箇所を補修する。 <p>【自動溶接部の場合】 不合格となったものと同一の溶接継手線内の全長 (板部材の場合) または溶接継手全数 (桁部材, 骨部材の場合) について非破壊検査を行う。不合格箇所は補修する。</p>	
圧力容器	100% (全長検査) の場合	不合格箇所を補修 (再溶接) し, 再試験。
	20% (抽出検査) の場合	<p>不合格箇所に隣接する 2 ヶ所を試験し, その判定結果に応じて以下の通り対応する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・2 ヶ所とも合格の場合: 最初の試験で不合格だった箇所の欠陥を除去し再溶接する。再溶接部を検査する。 ・1 ヶ所以上不合格の場合: 溶接を完全にやり直す。あるいは 100% (全長) 検査での再試験を行う。再試験での不合格箇所はすべて欠陥除去 → 再溶接 → 試験。

2.2 斜角探傷法

前節で紹介した溶接部の非破壊検査に関する各種の基準や規格では、超音波探傷試験の方法として図1に示す斜角探傷法が想定されている。斜角探傷法に用いる探触子（超音波を送受信するセンサー）は所定の屈折角で斜め方向に超音波を発信する。この屈折角は探触子ごとに固有の値（一定値）であり、深さ方向にきずを探すためには図1の様に探触子を前後に動かす（走査させる）必要がある（例えば、図1の状態より浅い位置のきずを検査するためには、探触子を溶接部に近づけていく）。走査は検査者が手で探触子を前後に動かして行われるのが一般的である。探触子を走査させて超音波エコーの強い箇所を探し、きずの有無を判定する。超音波エコーが強いほど重大なきずであると判定される。また、強いエコーを検出した場所（探触子の位置）と溶接部の幾何学的関係から、図1の様に「きずまでの深さ」や「きずまでの水平距離」などの情報が得られる。

斜角探傷法は使用する機器構成がシンプルなため可搬性に優れ、計測対象箇所に制限が少ないといった利点がある。一方で、斜角探傷法から得られるデータは探触子を置いた位置での超音波エコーのみであり、適切にエコーを計測するための計測手技や計測したエコーの解釈などの妥当性は計測者の技能によって担保される（例えば、日本非破壊検査協会による非破壊検査技術者の資格認証を受けた計測者が行った計測であることを示し、結果の信頼性を保証している）。

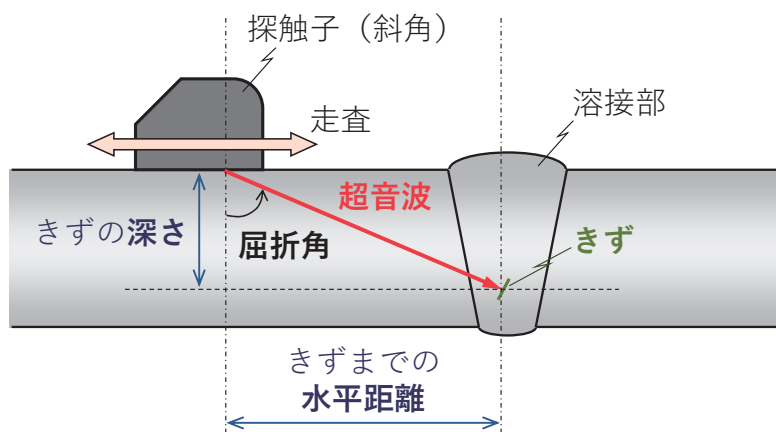


図1 斜角探傷法の概要

2.3 フェーズドアレイ超音波法と TOFD 法

前節で述べた斜角探傷法に対して、より豊富な情報が得られる超音波探傷法が開発されている。代表的なものとしてフェーズドアレイ超音波法（Phased Array Ultrasonic Testing. 以下では、PAUT法と表記する）²⁾や TOFD法がある。本節ではこうした高度な超音波計測法の概要を説明する。

PAUT法（図2）では、多数の超音波送受信素子をもつ探触子を用いる。この多数の送受信素子を制御（位相の異なる超音波同士での打消しなど）し、特定の屈折角で超音波を発することができる。この「特定の屈折角」の超音波を様々な屈折角で送信することで、探触子の位置を変えずにある程度の範囲（図2の「スキャン範囲」）を一括して探傷できる。このため、斜角探傷法のような（検査者の手技による）走査が不要となる。またさまざまな屈折角での反射エコーを解析することで溶接線内部のきずの分布を断面表示することができる（単なるエコーの強弱ではなく画像として断面表示ができる）。

TOFD法は Time Of Flight Diffraction 法の略で、伝播時間（time of flight）と回折（diffraction）の関係を利用する方法である。TOFD法では（前述の斜角探傷法や PAUT法とは異なり）超音波の発信と受信をそれぞれ専用の探触子で行う。伝播時間は発信探触子から放たれた超音波が受信探触子に到達するまでにかかる時間である。伝播時間は超音波の伝播経路によって変化するため、内部にきずがあった場合には異常な伝播時間のエコーとして検出される。図3には4通りの伝播経路を記している。伝播経路①は材料表面の直下を伝播する超音波で、経路が最も短いため伝播時間も最短となる。伝播経路④は材料底面からの反射波であり、経路が最も長くなるため伝播時間は最長となる。伝播経路②はきずの上端部での回折を経て伝播する波の経路である。また、伝播経路③はき

ずの下端部での回折を経て伝播する波の経路である。伝播経路②, ③はきずが無ければ生じない波の伝播経路であり, 伝播経路①と伝播経路④以外の伝播時間のエコー(伝播時間が伝播経路①より長く, 伝播経路④より短い伝播時間のエコー)が検出された場合に内部にきずがある可能性がある。TOFD 法には PAUT 法に比べてきずの位置やサイズの計測精度が高い利点がある。

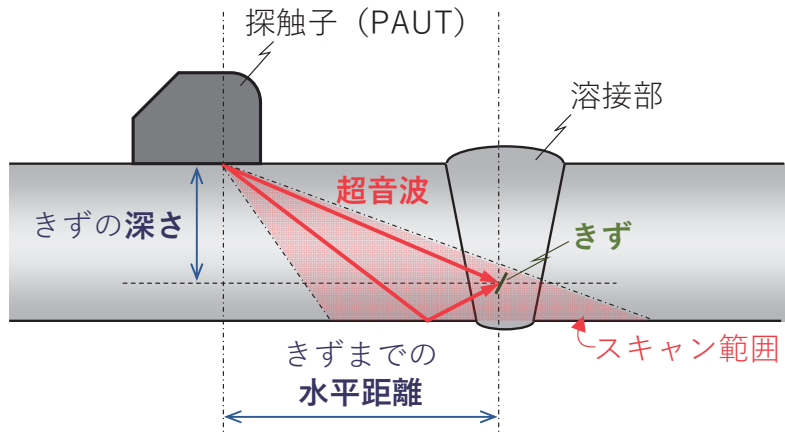


図2 フェーズドアレイ超音波 (PAUT) 法の概要

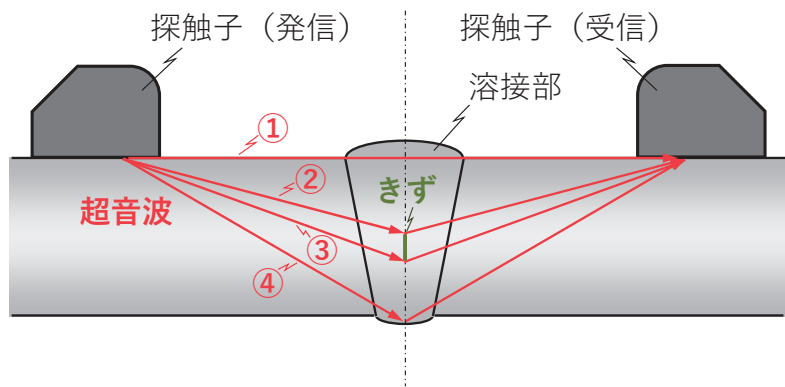


図3 TOFD 法の概要

PAUT 法や TOFD 法は, JIS 化はされていないものの(一社)日本電気協会の一部規定等で規定されており, ASME(米国機械学会)でも条件付きで適用可能とされていることから, これまでも造船現場で利用することは可能であった。

最近では IACS (International Association of Classification Societies: 国際船級協会連合)でも高度な非破壊検査技術として PAUT 法, TOFD 法等を対象とした IACS 統一規則が制定された (UR W34, 適用日は 2021 年 7 月 1 日)。ただし, この UR W34 には実施要領に関する規定はないことから, PAUT 法について具体的な探傷要領をまとめた「フェーズドアレイ超音波探傷試験による非破壊検査ガイドライン」が日本海事協会から発行されている。

以上のことから, 今後は造船でも PAUT 法等の高度な非破壊検査技術の利用が進められていく状況にあると考える。

3. 溶接部の非破壊検査実験

前章で記述した PAUT 法や TOFD 法は従来超音波法(斜角 UT)に比べて豊富なデータが得られる。また斜角 UT では必要な溶接線に対して垂直方向の走査が不要で, RT に比べて装置の小型化が容易なためロボット化もし

やすい。これらの特長から、溶接部の自動検査には PAUT 法や TOFD 法などの高度な非破壊検査技術が適していると考えられる。これらの高度な超音波検査技術の造船業への適用性を検討するため、非破壊検査実験を実施した。まず意図的に溶接欠陥を発生させた溶接試験体を作成した。次いで従来法（放射線透過探傷，斜角探傷法による超音波探傷試験）による非破壊検査を専門業者に依頼して実施した。最後に PAUT 法と TOFD 法による非破壊検査を実施した。

3.1 溶接試験体の作成

非破壊検査実験用に溶接試験体を作成した。試験体の概要を図 4 に示す。試験体は鋼製（日本海事協会認定の KD40 対応）であり、150 mm×300 mm、板厚 18 mm の鋼材 2 枚を突合せ溶接して図 4 の寸法の試験体をつくる。その際、溶接線内に意図的に各種の溶接欠陥（内部欠陥）を発生させた。これらの溶接欠陥を従来法（RT，斜角 UT）と高度な超音波検査手法（PAUT 法，TOFD 法）それぞれで検査する。発生させた溶接欠陥の種類を表 6 に示す。これらの欠陥を有する No. 2, No. 3-1, No. 3-2, No. 3-3, No. 4, No. 5, No. 6 の 7 種類の試験体を評価対象とした。なお，試験体 No. 1 は欠陥なしのものであり，非破壊検査では何も検出されなかったため評価対象とはせず以降の評価結果でも示さない。

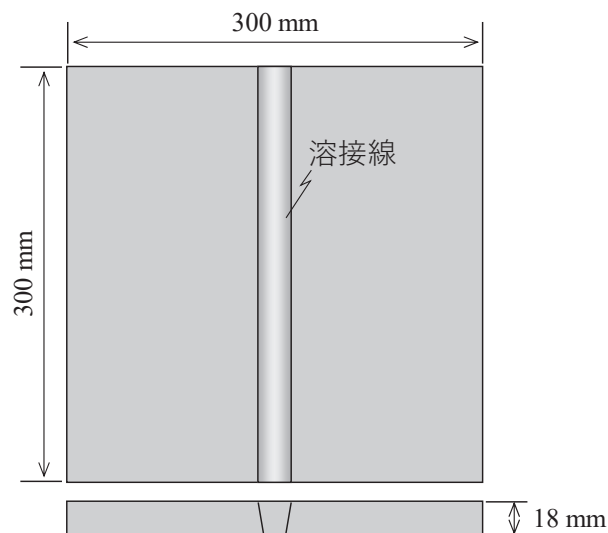


図 4 溶接試験体の概要

表 6 各試験体の溶接欠陥

試験体 No.	発生させた溶接欠陥
2	ブローホール
3-1	ポロシティ，ブローホール
3-2	割れ，ブローホール
3-3	割れ，ブローホール
4	溶込み不良
5	融合不良
6	スラグ巻き込み，ブローホール

3.2 従来法 (RT, 斜角 UT) による非破壊検査

作成した試験体を対象に、造船現場で行われている放射線透過試験 (RT) および斜角探傷試験 (斜角 UT) による非破壊検査を実施した。普段から造船所内で非破壊検査業務を請け負っている専門業者に依頼し、通常通りの方法で RT および斜角 UT による非破壊検査を行った。RT による非破壊試験結果は、報告書 (きずの種類や位置などを記載) と X 線画像 (撮影後の X 線フィルム) で納品される。また、斜角 UT では報告書 (超音波エコーの強い箇所の位置や深さなどを記載) で納品される。

3.3 フェーズドアレイ超音波法と TOFD 法による非破壊検査

作成した試験体を対象に、PAUT 法と TOFD 法による非破壊検査を実施した。効率的な検査法の検討を念頭に、PAUT および TOFD の探触子を搭載した自走式ロボットによる非破壊検査を試行した。図 5 が実施した非破壊検査の概要である。Olympus 製のロボット「Steer ROVER」を用いた。Steer ROVER の駆動部前方には PAUT 探触子 (2 個) と TOFD 探触子 (発信および受信を各 1 個) を、それぞれ溶接線の左右に配置した。PAUT 探触子は 1 個のみで探傷が可能だが、溶接線を右側から探傷した場合と左側から探傷した場合では得られるエコーが異なるため、溶接部のきずの見逃しを回避するため左右に探触子を配置した。作成した試験体を一列に並べ、その上を Steer ROVER で走行しながら溶接部の非破壊検査を行った。走行速度は 30 mm/sec 程度とした。超音波の伝播を良好にするため、試験体表面と探触子の間に水道水を供給しながら探傷を行った。なお、図 5 上部の概要図では 7 枚の試験体を描いているが、実際には評価対象外の No.1 の試験体も並べていたため、図 5 下部の画像には 8 枚の試験体が映っている。

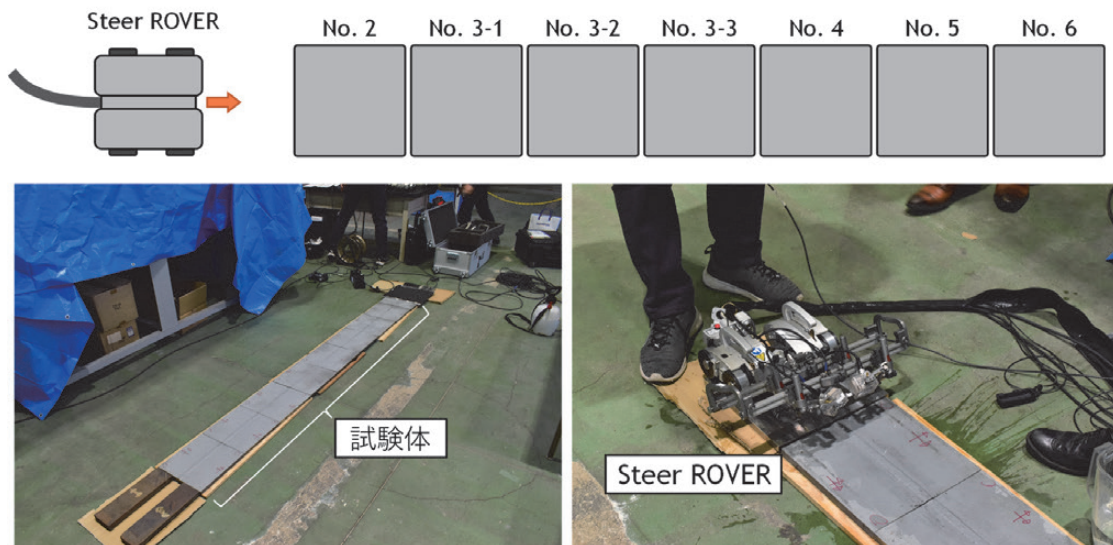


図 5 ロボットによる溶接部の超音波計測

4. 非破壊検査結果の考察

実施した非破壊検査の結果を比較検討した。それぞれの非破壊検査手法が長所・短所をもつ。

4.1 従来法による非破壊検査の結果

4.1.1 放射線透過試験 (RT) の結果

放射線透過試験 (RT) の結果を図 6 - 図 12 に示す。計測結果として納品された X 線フィルムを画像データ化し、報告書に記載された傷の種類を追記したものである。RT は試験体表面に垂直な方向から実施し、RT 結果は溶接線を上面から見下ろした画像となっている。RT の大きな利点は内部のきずの種類や位置、形状などが一目瞭

然となることである。超音波による方法はX線画像よりも情報量が少ないエコーを基に判断するため（PAUT法やTOFD法ではきずの位置の画像化などは可能であるものの）RT結果の様な明瞭さは得られない。

一方で、計測機器は（超音波式に比べて）大型であり計測時には周囲への人の立ち入りが制限される等、計測作業の簡便さの点からは超音波式に劣る。このため、RTで溶接部の検査を長い距離にわたって行うことは超音波に比べて難点が多いと思われる。

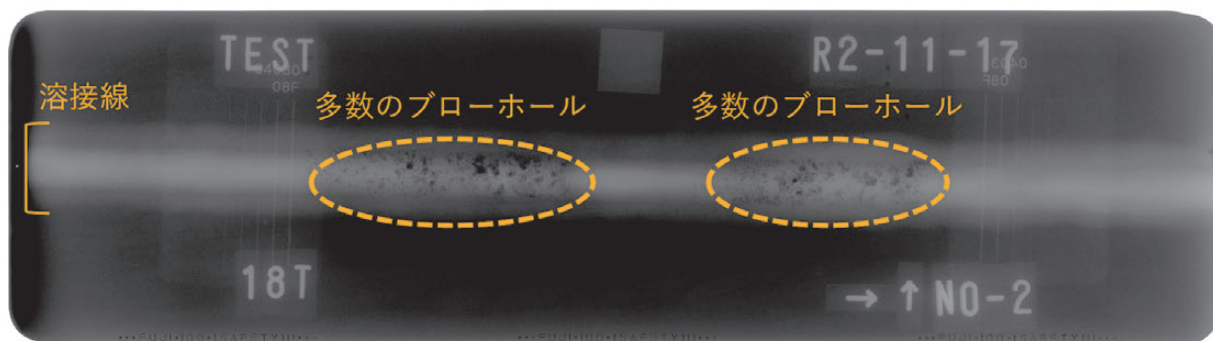


図6 放射線透過試験の結果（試験片 No. 2）

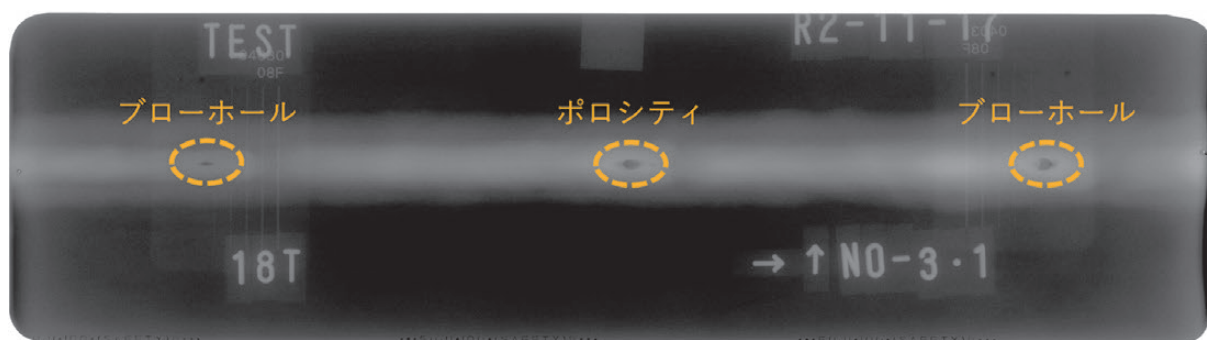


図7 放射線透過試験の結果（試験片 No. 3-1）

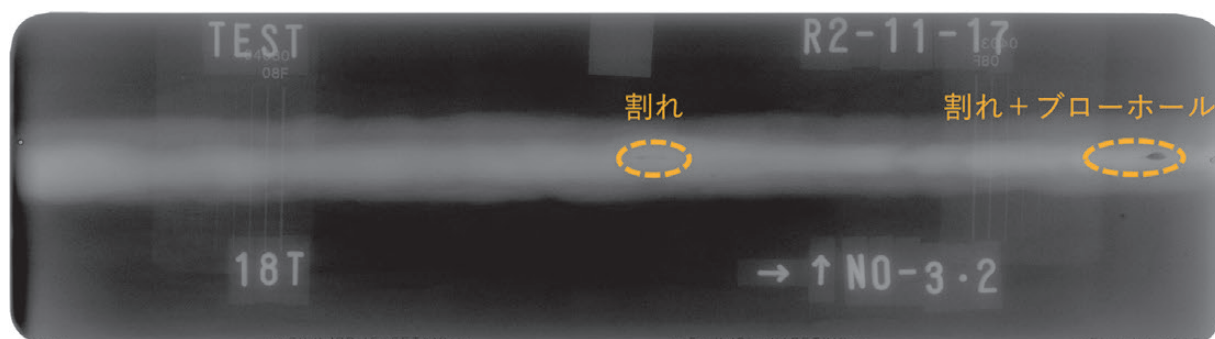


図8 放射線透過試験の結果（試験片 No. 3-2）

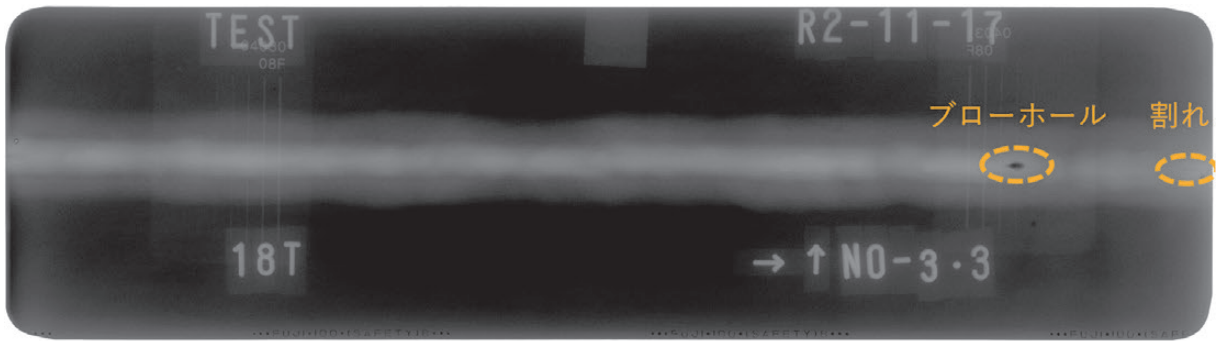


図9 放射線透過試験の結果 (試験片 No. 3-3)

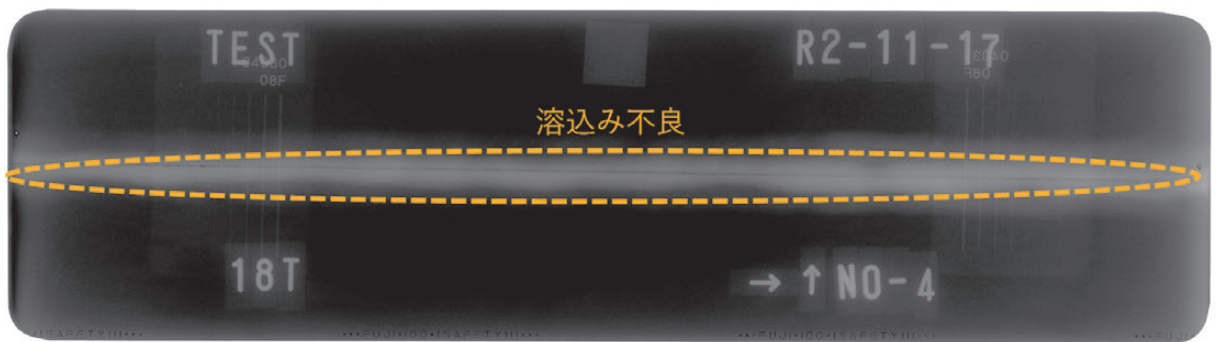


図10 放射線透過試験の結果 (試験片 No. 4)

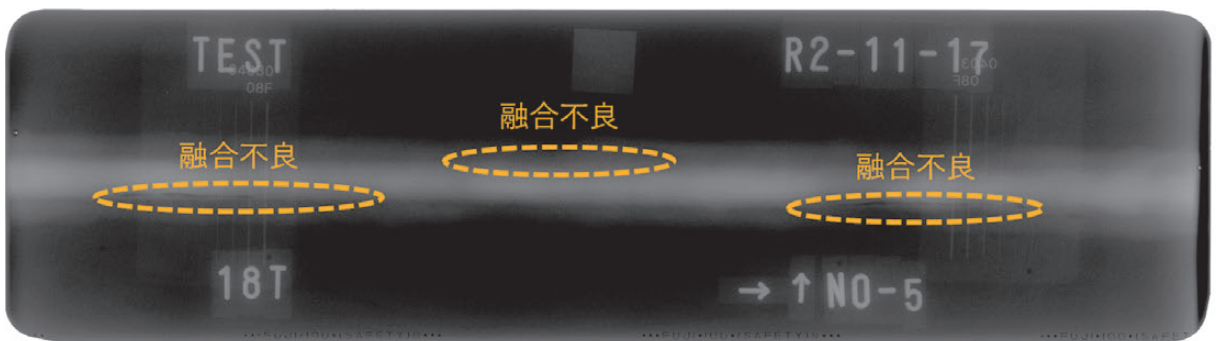


図11 放射線透過試験の結果 (試験片 No. 5)

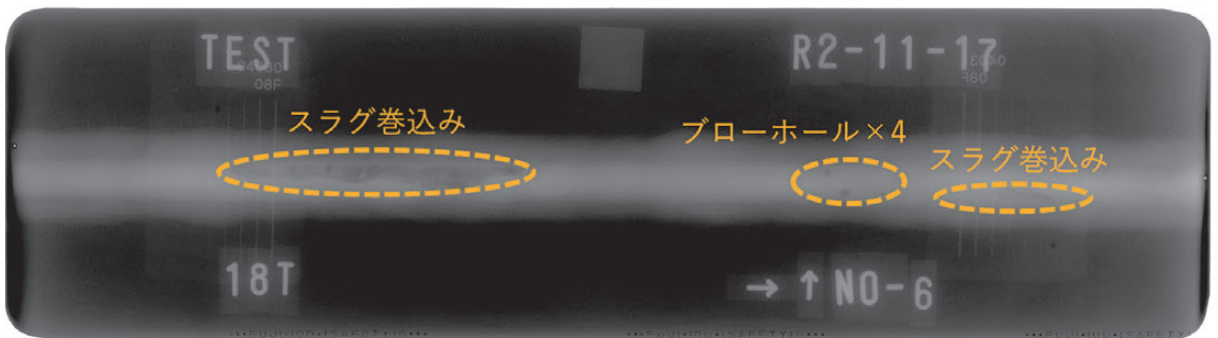


図12 放射線透過試験の結果 (試験片 No. 6)

4.1.2 斜角探傷法（斜角 UT）の結果

斜角探傷法の結果を図 13 - 図 19 に示す。計測結果として納品された報告書に記載されたエコーの強い箇所的位置やエコー高さなどを図示したものである。各図は試験体を上方から見た図で、溶接部の赤い線はエコーが強い範囲を示している。強いエコーの範囲は線の長さで、強いエコーの箇所の位置は線の位置で示している（エコー範囲の中心位置の試験体左端からの距離も示している）。また、赤色文字のローマ数字（II, III, IV）はエコーの強さを示すものであり、数字が大きいほど強いエコーであることを表している（数字が大きいほど明確なきずであることを意味する）。また、赤色文字で記した d の数値はエコーの反射源の深さを表している（溶接線の表面ではなく試験体表面からの深さである）。斜角 UT の結果を RT の結果（図 6 - 図 12）と比較すると、きずの種類の間定までには至らないものの、主要なきずはエコーの強い範囲としてとらえられており RT と同等の結果が得られていることが判る。斜角 UT の利点としては計測機器が比較的小型であり、人が手で容易に持ち運びできる等の可搬性に優れる点や RT では得られないきずの深さの情報が得られる点などが挙げられる。一方で、計測結果は基本的に超音波エコーの強度変化のみであり、RT で得られる X 線画像ほど明瞭な結果ではない。エコーの解釈等は計測者の技能による部分も多い。

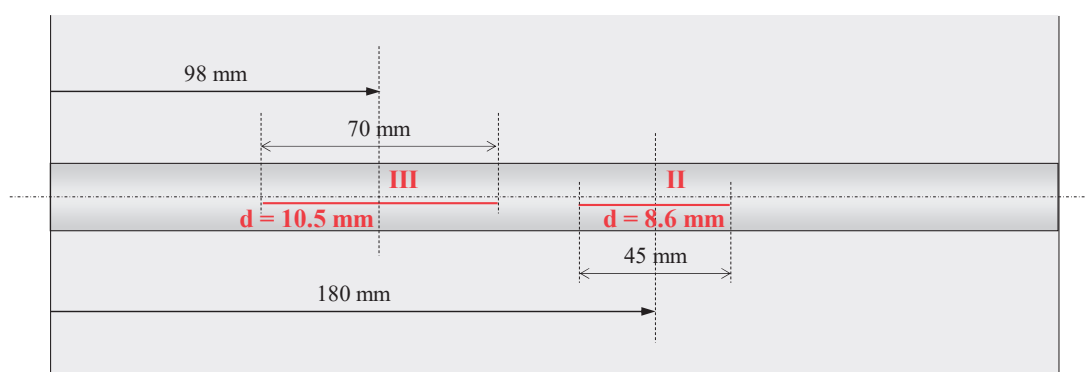


図 13 斜角探傷法の結果（試験片 No. 2）

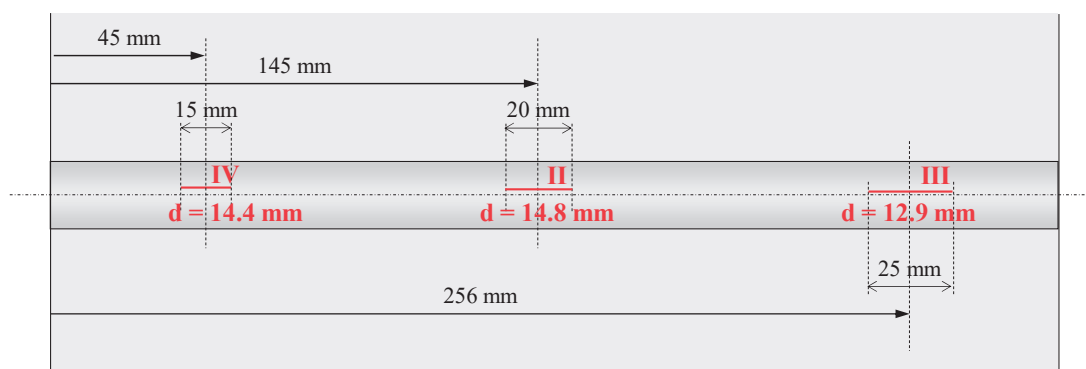


図 14 斜角探傷法の結果（試験片 No. 3-1）

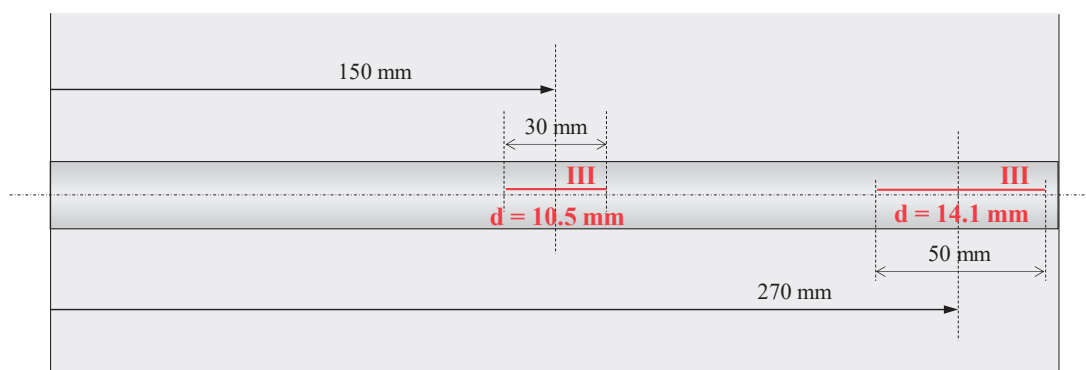


図 15 斜角探傷法の結果（試験片 No. 3-2）

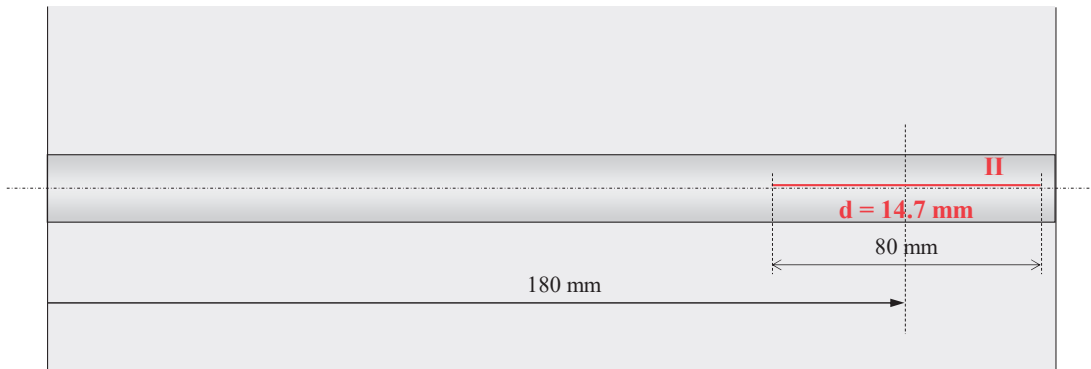


図 16 斜角探傷法の結果 (試験片 No. 3-3)

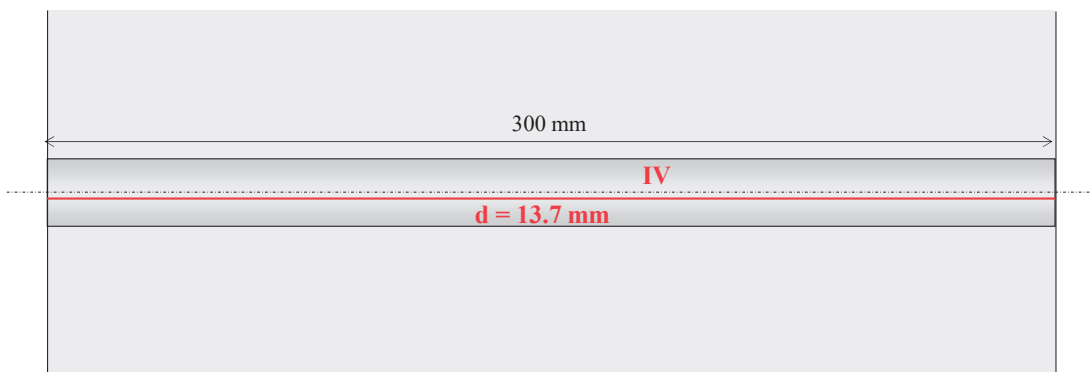


図 17 斜角探傷法の結果 (試験片 No. 4)

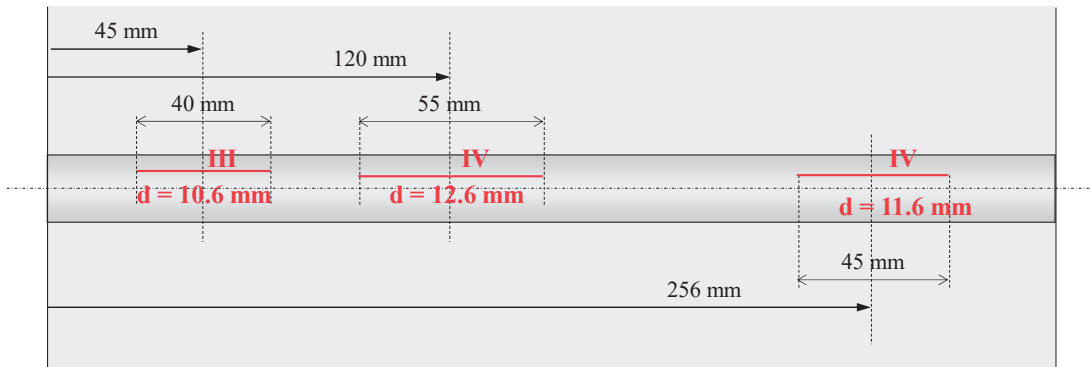


図 18 斜角探傷法の結果 (試験片 No. 5)

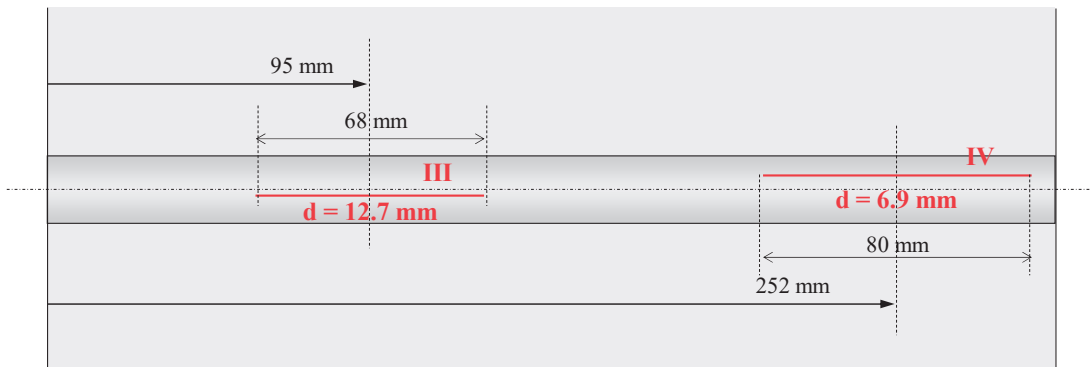


図 19 斜角探傷法の結果 (試験片 No. 6)

4.2 高度な超音波計測による非破壊検査の結果

4.2.1 フェーズドアレイ超音波（PAUT）法の結果

PAUT 法による計測結果を図 20 - 図 27 に示す。画像の横位置は溶接線方向の位置を、縦位置は超音波の照射角度をそれぞれ表しており、色はエコー強度をカラーマップで表示している(水色や青色の部分はエコーが弱く、緑色 → 黄色 → 橙色 → 赤色となるにつれてエコーが強くなることを表している)。今回は PAUT 探触子を溶接線の右側と左側にそれぞれ 1 つずつ配置して計測を行ったため、データも 2 つある。

図 20 は試験片 No. 2 の探傷結果であり、左右の探触子ともに RT や斜角 UT で検出された位置と同じ箇所に多数のエコーが表れている。図 21 は図 20 とは別の形の結果表示で、エコー情報を基に計測部の断面を表示したものである (セクタスキャンと呼ぶ)。図 21 のセクタスキャン画像の中には黒線で V 形開先を表示しており、検出されたエコーは確かに溶接部 (開先の内部) からのものであることが確かめられる。このような画像での明瞭な結果表示ができる点は従来の斜角 UT 法が持たない PAUT 法特有の利点である。図 22 - 図 27 の結果も、RT や斜角 UT と同様のきず検出結果となっている (セクタスキャン等から、斜角 UT 以上の情報が得られる)。

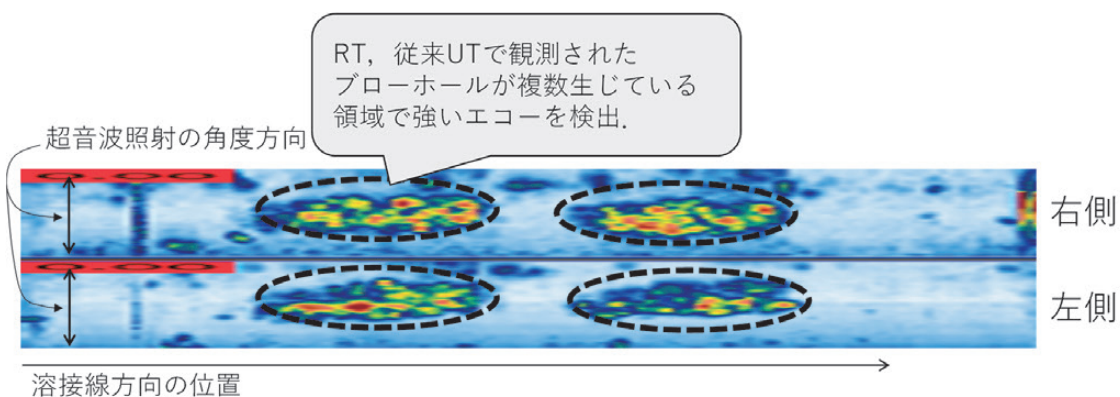


図 20 PAUT 法の結果 (試験片 No. 2)

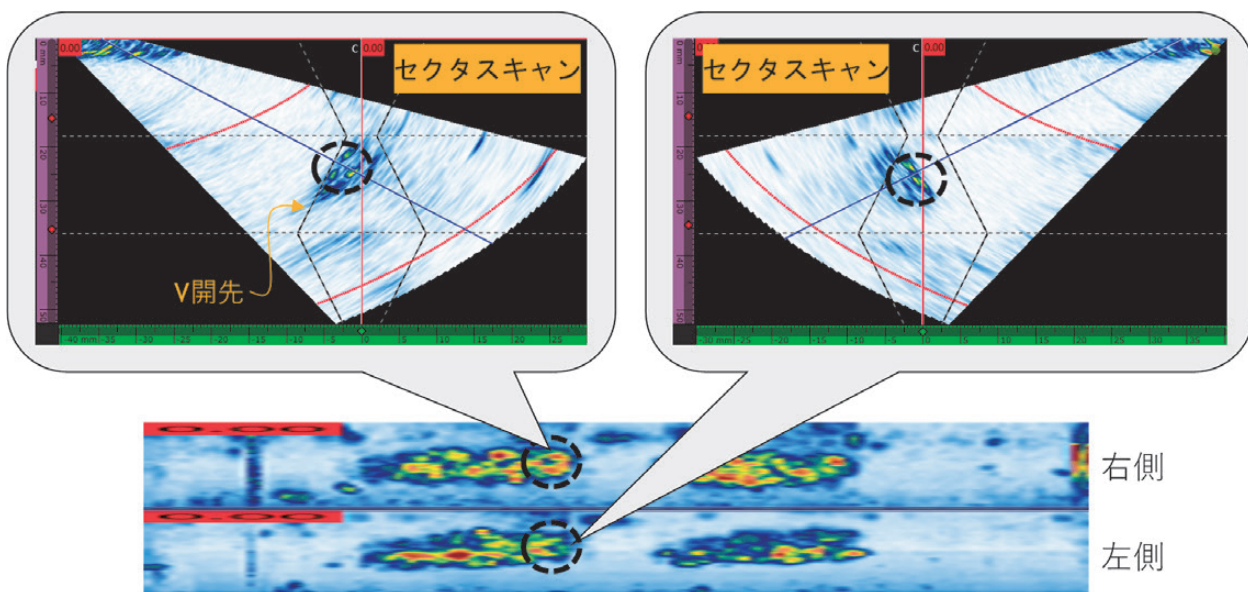


図 21 セクタスキャン画像の例 (試験片 No. 2)

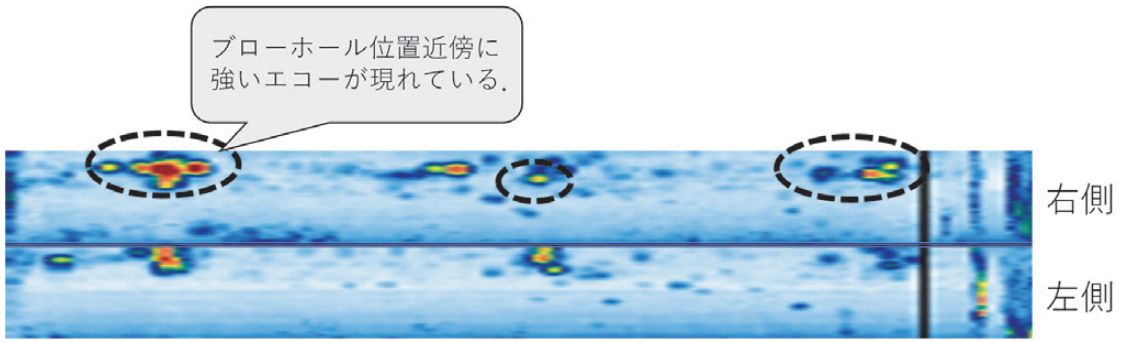


図22 PAUT 法の結果 (試験片 No. 3-1)

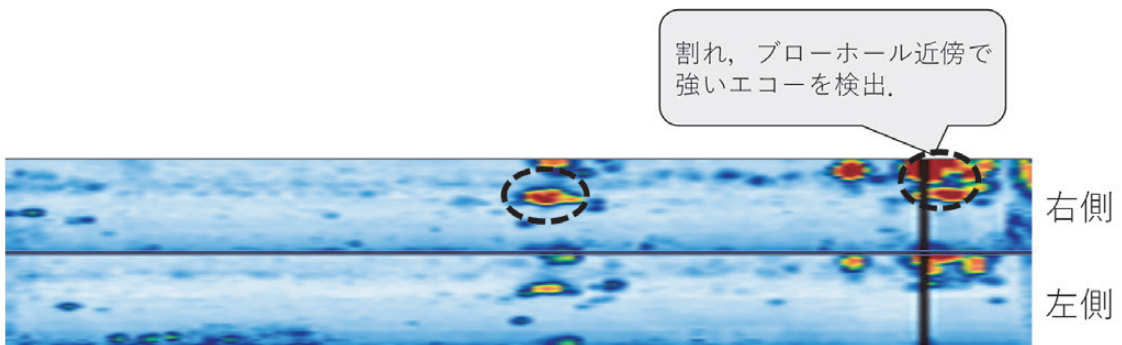


図23 PAUT 法の結果 (試験片 No. 3-2)

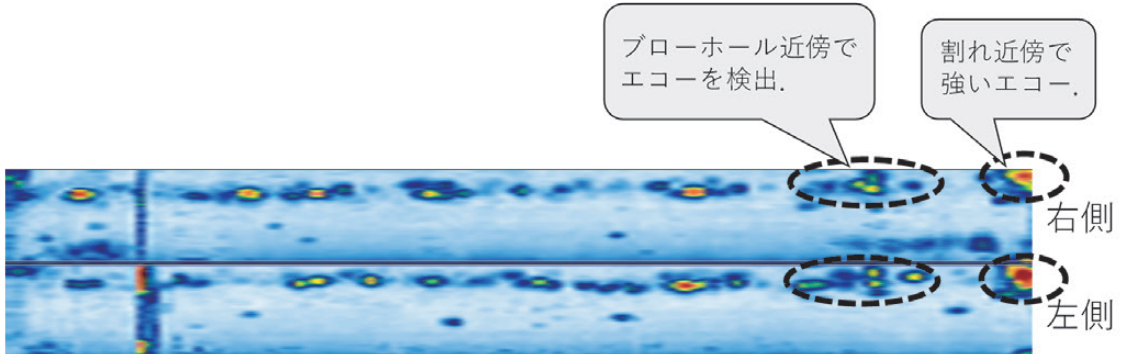


図24 PAUT 法の結果 (試験片 No. 3-3)

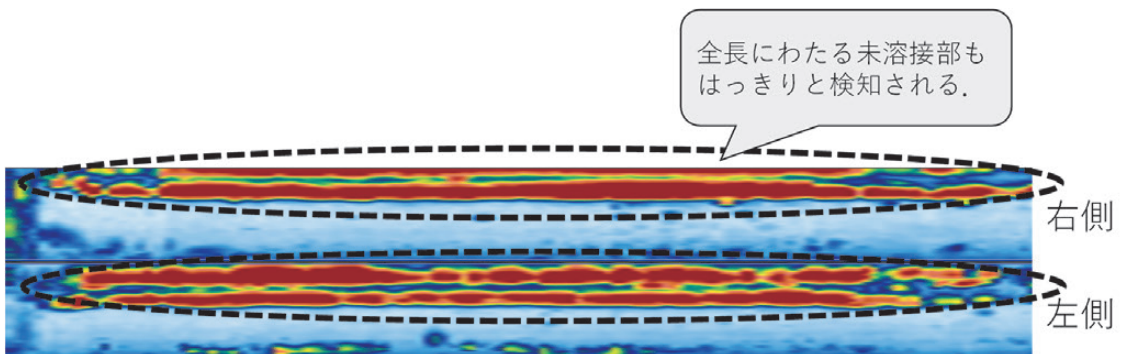


図25 PAUT 法の結果 (試験片 No. 4)

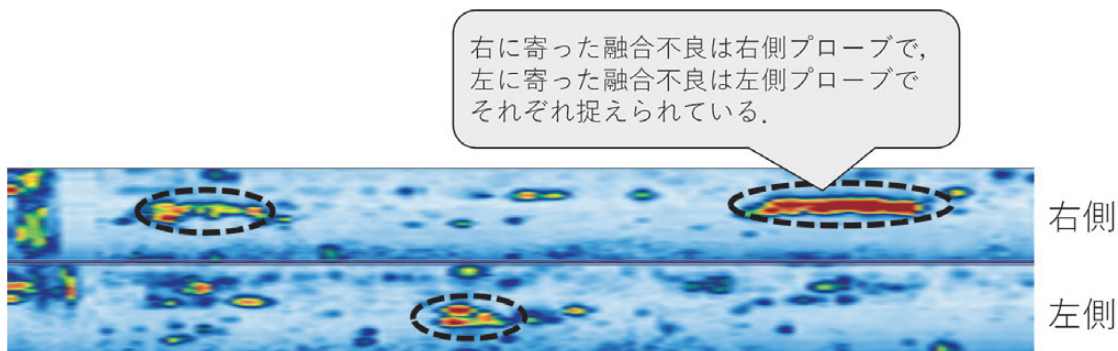


図 26 PAUT 法の結果 (試験片 No. 5)

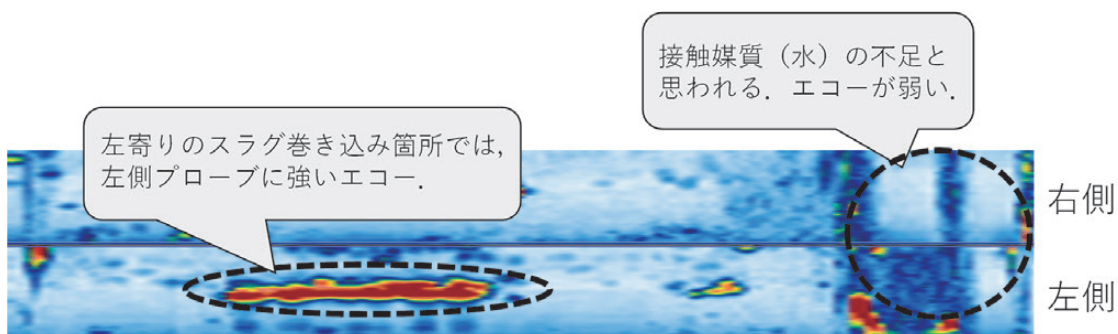


図 27 PAUT 法の結果 (試験片 No. 6)

4. 2. 2 TOFD 法の結果

TOFD 法の計測結果を図 28 – 図 34 に示す。図 28 は試験片 No.2 の TOFD 法の結果である。画像の横位置は溶接線方向の位置を、縦位置は試験体の深さ方向の位置をそれぞれ表しており、色はエコー強度をグレースケールで表示している (暗い箇所はエコーが低く、明るいほどエコーが強いことを示す)。画像の上部の白い線 (強いエコーの箇所) は表面直下を伝播するエコーを、下部の白い線は底面で反射したエコーをそれぞれ表している。この上下の白い線の上に強いエコーが生じていればきずの可能性がある。図 28 (試験片 No.2) では、RT, 斜角 UT, PAUT いずれでも明確な反応 (X 線画像または超音波エコー) があつた箇所に同様に強いエコーが表れている。図 29 – 図 34 についても RT, 斜角 UT, PAUT で検出されたきずと同じ箇所に強いエコーが表れている。TOFD 法は PAUT 法に比べてきずの位置やサイズの計測精度が高いとされており、PAUT 法と互いを補完する役割が期待できる。なお、図 34 で TOFD 結果が一部欠落しているが、これは Steer ROVER への取り付け位置は PAUT 探触子が前、TOFD 探触子が後ろであり、PAUT 探触子が No. 6 の試験体端部に達したところで計測を終了したため、一部 TOFD 法での計測が行えない領域が生じたためである。

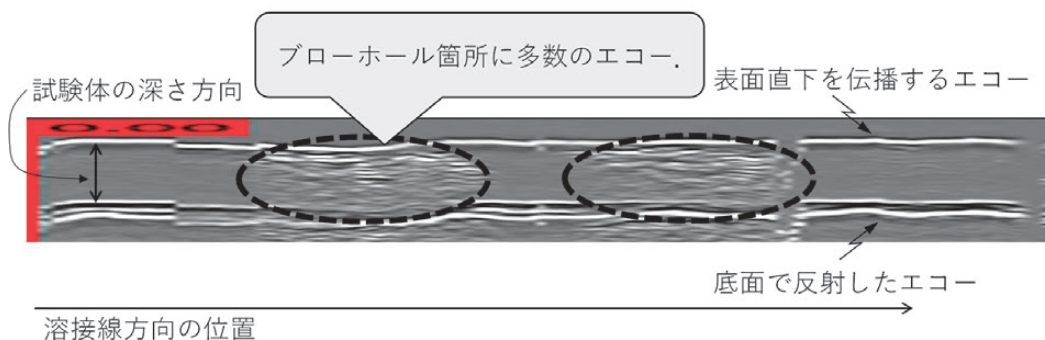


図 28 TOFD 法の結果 (試験片 No. 2)

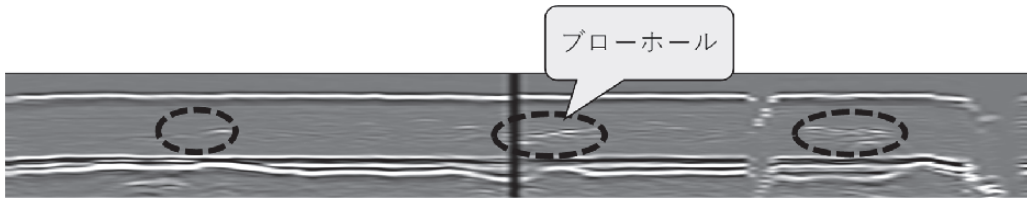


図29 TOFD法の結果 (試験片 No. 3-1)

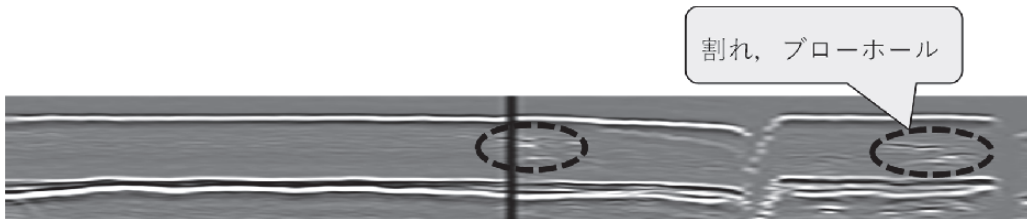


図30 TOFD法の結果 (試験片 No. 3-2)

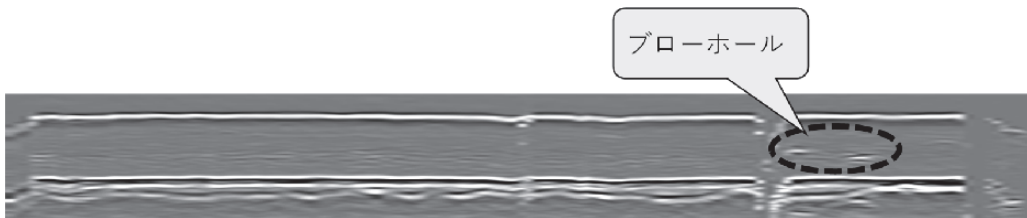


図31 TOFD法の結果 (試験片 No. 3-3)

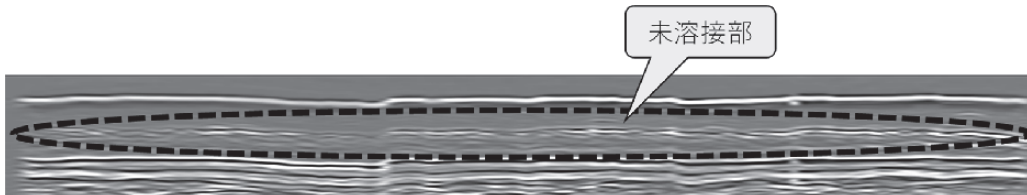


図32 TOFD法の結果 (試験片 No. 4)

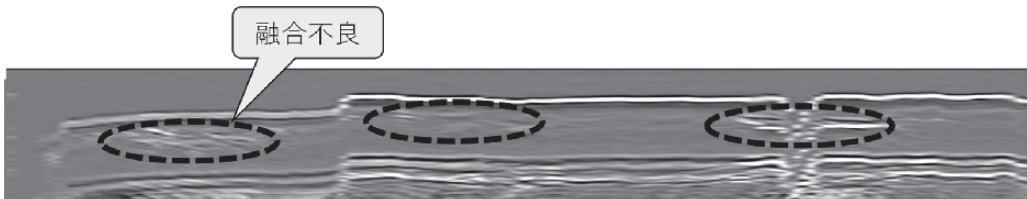


図33 TOFD法の結果 (試験片 No. 5)

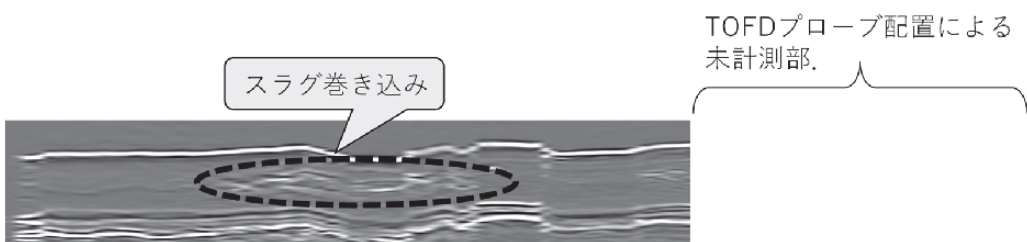


図34 TOFD法の結果 (試験片 No. 6)

5. まとめ

溶接部の非破壊検査の自動化を念頭に、フェーズドアレイ超音波法や TOFD 法といった高度な超音波計測手法の造船工程への適用可能性を検討した。これらの高度な超音波計測手法は、従来の RT と比較すると装置が小型でかつ広範囲の計測が容易に行える利点がある。また、従来の斜角 UT と比べると溶接線に垂直な方向の走査が不要となるため、短時間で広い範囲が計測できる利点がある。このため、高度な超音波計測手法を用いることで従来法（放射線透過試験，斜角探傷法による超音波探傷試験）よりも短時間に広範囲の検査が行える可能性が示唆された。また、探傷結果自体も従来の斜角探傷法に比べて多くの情報を含んでおり、結果の検出や同定に有利であることがわかった。ロボットに探触子を搭載し、移動しながらの計測であっても従来法と同等の探傷（きずの検出）結果が得られており、検査の効率化も期待できる。

現場適用に向けた課題としては、以下の項目が挙げられる。

- 従来の超音波計測法（斜角探傷法）に比べると機器構成が複雑でセットアップ作業に多少の時間を要する。
- 計測時の超音波プローブのがたつき。溶接試験体が完全な平面ではなかったこと等から、ロボット移動時にがたつきが生じ超音波計測のノイズとなった。
- 探傷結果の解釈。フェーズドアレイ超音波法や TOFD 法は従来の斜角探傷法に比べて豊富な情報が得られるため、様々な方法で計測結果を可視化できる。一方で、探傷結果のグラフから欠陥検出を行うには超音波探傷に関する知識は必要となる。

現場での効率的な非破壊検査のためには、上記の課題を解決することにより非破壊検査の自動化を実現することが理想的である。

謝 辞

溶接試験片の作成にご協力いただいたジャパンマリンユナイテッド株式会社横浜事業所の菅野博義氏，片田朋岐氏，針谷高典氏ならびにロボットによる非破壊検査を実施いただいたオリンパス株式会社の関係各位に謝意を表す。

References

- 1) Class NK, Rules for the survey and construction of steel ships Part M welding, (2021).
- 2) Mihara, T. :Ultrasonic Phased Array Techniques for Industrial Applications, Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.69, No. 8 (2020), pp.569-574. (in Japanese)