

板継ぎ溶接部における非破壊検査システムの 自動化に向けた検討

STUDY ON AUTOMATION OF NONDESTRUCTIVE INSPECTION FOR BUTT WELDED JOINTS

佐藤 悠樹* 長谷川 智** 岡田 幸児*** 中本 啓介*
Yuki Sato Satoshi Hasegawa Koji Okada Keisuke Nakamoto

鋼構造物の板継ぎ溶接部の非破壊検査には、超音波探傷試験 (UT)、放射線透過試験 (RT) があり、UT には手動による超音波探傷 (MUT) の他、TOFD 法、フェーズドアレイ超音波法 (PAUT 法) など各種検査手法がある。TOFD 法や PAUT 法は豊富なデータが得られ、検査の自動化・効率化が期待できるものの、鋼構造物の検査に適用するためには個別の検証が必要である。本研究は、大型鋼構造物の製造における生産性向上を図るため、TOFD 法および PAUT 法を併用し、非破壊検査の自動化に向けた適用性を検証することを目的としている。ここでは、板継ぎ溶接部に意図的に溶接欠陥を発生させた試験体を製作し、従来の MUT の結果と比較した。その結果、TOFD 法および PAUT 法を併用することで効率よくきずを検出することができ、MUT と同様にきずの位置を検出できることを確認した。

キーワード：TOFD 法、PAUT 法、MUT、板継ぎ溶接、内部きず

1. はじめに

近年の少子高齢化にともなう土木分野の技術者不足により、業界全体の省人化、作業の効率化が求められている。鋼構造の分野においても、限られた時間と人材の中で、高品質・低コストの製品を製造する仕組みを構築することが急務である。筆者らは、大型鋼構造物の製造における生産性向上を図るため、板継ぎ溶接部における非破壊検査システムの自動化に取り組んでいる。従来の製作工程では、板継ぎ溶接が完了すると、有資格者が非破壊検査法である MUT で実施し、検査が完了するまでの間、次工程の作業が停滞するものとなっている。手作業による溶接欠陥の探傷作業を機械により自動化することで、待ち時間を削減し、製造ラインの効率化が期待できる。

本稿では、基礎的な検討として TOFD 法および PAUT 法により、意図的に溶接欠陥を発生させた試験体を用いて、MUT と比較検証した。

2. 非破壊検査の手法と基準

各種非破壊検査手法の特徴を表-1 に示す。従来手法である UT には、手動で探傷を行う MUT と、自動で探傷を行う AUT に分類される。どちらの手法も、探触子を溶接線に対して垂直に細かく動かしながら、溶接線に平行に走査する必要がある。MUT は、複雑な構造や狭隘な箇所でも検査が可能である一方、技術者の技能に依存するため、信頼性の高い探傷技術が求められる。

PAUT 法は、複数の振動素子をもつ探触子を用いることで、一つの探触子から複数の超音波ビームを電子制御で生成することから、従来の MUT のように探触子を前後に動かさずとも、溶接線方向に様々な入射角度で入射することが可能であるため、効率よく探傷することができる。また、様々な角度のエコーを解析することで、溶接内部の断面を画像化することができ、視覚的にイメージしやすい²⁾。しかし、きず端部の検出感度が低いため、健全部との境界が判別しにくく、また画像からきずを判断する技術が必要となる他、走査治具や移動量等を計測するエンコーダを利用する必要があるなど、複雑な装置や設備の構築が必要となる。

TOFD 法は、超音波を発信する探触子とそれを受信する探触子を溶接部を挟んで向かい合わせに設置し、超音波によるきず端部の回折波を利用することで、きずの位置やきずの上端、下端を精度よく探傷することができる³⁾。しかし、鋼材の表面および裏面近くが探傷しにくいこと、きずの奥行方向 (溶接線と直交する方向) の分布が不明であること、PAUT と同様にシステムの構築が必要である。

溶接構造物の内部きずを検査する際には、MUT や RT 等の非破壊検査法が広く用いられており、それぞれ ISO や JIS の規格も整備されている。一方で、PAUT 法や TOFD 法は MUT や RT に比べて、豊富なデータが得られるため、検査の自動化・効率化が期待されるが、ISO や JIS を含め、国内の規格や基準の整備が進んでおらず、鋼構造物の検査に適用するには個別の検証が必要である。

* 技術開発本部 技術研究部 ** 鋼構造生産本部 富津工場 洋上風車タワー部
*** 鋼構造生産本部 富津工場 鉄構生産戦略部

表-1 各種非破壊検査手法の特徴^{2),3)}

	MUT	AUT	PAUT	TOFD
探傷方法	<ul style="list-style-type: none"> ・手動 ・溶接線に対し、垂直に細かく動かしながら溶接線に対し、平行に走査 ・反射した超音波により表示されるエコー高さから、内部きずを判断 	<ul style="list-style-type: none"> ・自動 ・溶接線に対し、垂直に細かく動かしながら溶接線に対し、平行に走査 ・反射した超音波により表示される数値データおよび、画像から内部きずを判断 	<ul style="list-style-type: none"> ・自動 ・溶接線に対し、平行に走査 ・複数の振動子で構成された探触子により広範囲に超音波を照射 ・反射した超音波により表示される画像から内部きずを判断 	<ul style="list-style-type: none"> ・自動 ・溶接線に対し、平行に走査 ・送信用と受信用を対向させ、1セットで使用 ・超音波が内部きずの上下端に当たった際の回折波の伝搬時間の差により、表示される画像から内部きずを判別
検査結果の記録方法	数値を手動で記録	数値（きずの位置、サイズ）と画像を自動で記録	画像を自動で記録	画像を自動で記録
探傷イメージ				
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・内部きず及び位置（板厚方向、幅方向、溶接方向）を検出できる。 ・超音波に対して、直交するきずは検出しやすい。 ・超音波に対して、平行するきずや球状のきずは検出しにくい。 			<ul style="list-style-type: none"> ・きずの方向に依存せず、きずの上下端（高さ）の検出精度がよい。 ・きずの長さが判別しやすい。 ・板の表面、裏面に0~3mm程度の不感帯が存在する。 ・側面からの投影図となるため、きずの奥行方向は不明。

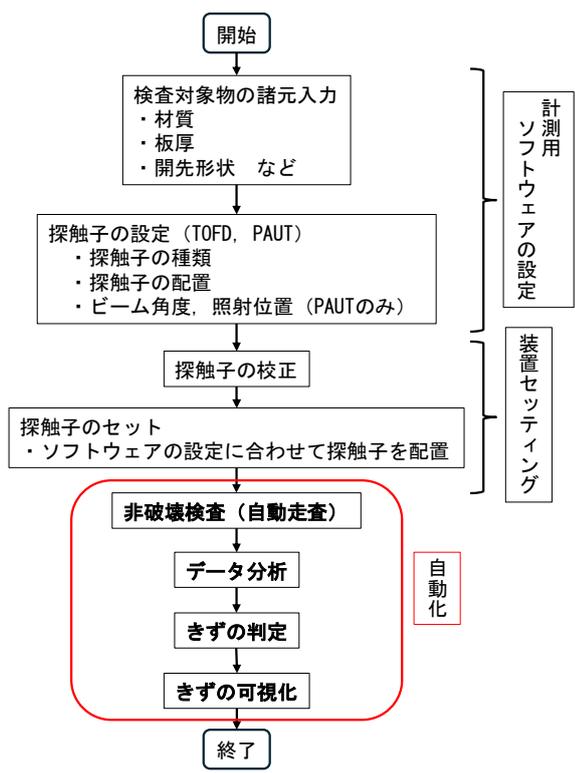


図-1 本システムの非破壊検査フロー

3. 検査手法確立のための検証実験

鋼構造の分野では、橋梁の鋼床版に発生する疲労き裂への PAUT 法の適用例⁴⁾はあるが、板継ぎ溶接部の非破壊検査法として TOFD 法や PAUT 法を用いた検証事例が少ない。そこで、TOFD 法および PAUT 法の併用により、従来手法では不可能であった一方向走査のみできずの深さや長さの判別、さらには、きずの画像化を同時に行い、探傷作業の自動化への適用性を検討した。

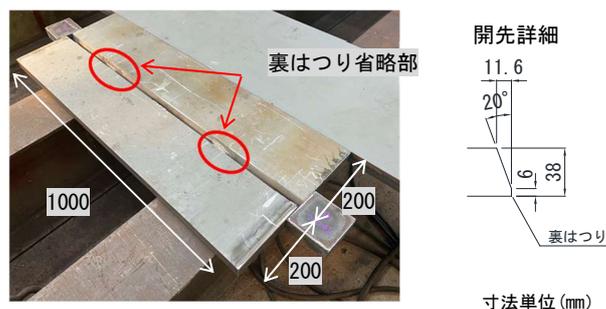


図-2 試験体概要図

TOFD 法および PAUT 法を併用した本システムの非破壊検査のフローを図-1 に示す。まず、計測用ソフトウェアにて検査対象物の諸元および、探触子の各種設定を行う。つぎに、検査対象物の板厚に応じて探触子の校正を行い、校正した探触子をソフトウェアの設定に合わせて自動走査可能なカートに設置する。その後、非破壊検査（探傷作業）からデータ分析、きずの有無の判定、さらには、検査対象物にきず位置を可視化（マーキング）するまでを自動化することで、非破壊検査の作業効率を向上させる。一連の作業を自動化することにより、作業者の熟練度によらずに一定品質の検査も可能となる。

検証には意図的に溶接欠陥を発生させた板継ぎ溶接試験体を用いて探傷を行い、同一試験体で UT 技術者による MUT もを行い、結果を比較した。

3.1 試験体

試験体概要図を図-2 に示す。試験体は幅 200mm、長さ 1000mm、板厚 38mm の鋼板 2 枚を用いて板継ぎ溶接（完全溶け込み溶接）を行った。開先形状は、片側 20° の V 形開先とした。また、溶接欠陥を内包させるため、溶接線の一部 50mm の範囲（2 箇所）で裏はつりを省略し、未溶着部を残した。

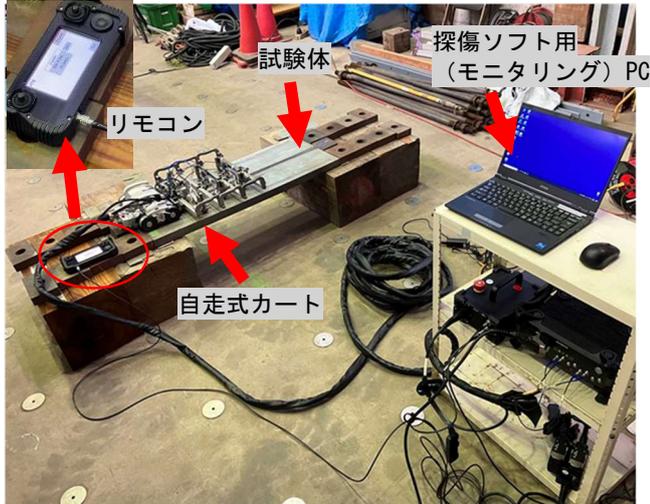


写真-1 探傷装置全容

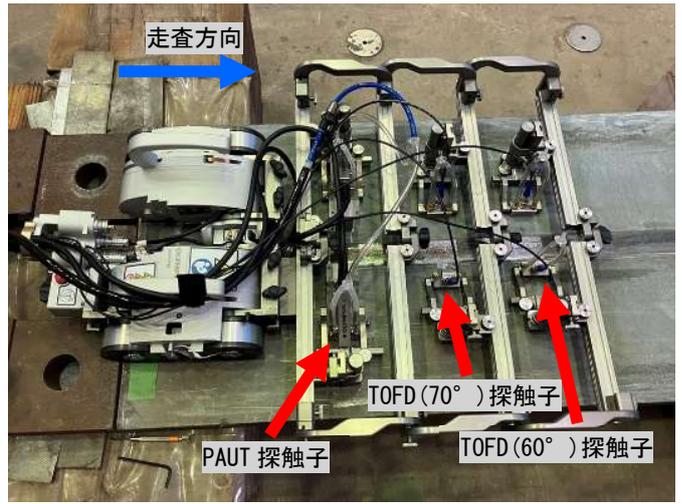


写真-2 自走式カート

3.2 探傷

探傷に用いた装置 (OLYMPUS 社製 FOCUS PX) を写真-1 に示す。本装置は、TOFD 法と PAUT 法の両方の探触子を写真-2 に示す自走式カートに設置し、カートを溶接線に沿ってリモコン操作により移動させることで、探傷データを同時に取得可能である。PAUT 法はきずに対するエコーの入射角が探傷結果に及ぼす影響を考慮し、溶接線の左右両側に探触子を配置した。TOFD 法の探触子は入射角 60° と 70° の2種類を使用し、板厚全体をカバーできるようにした。なお、探傷開始前には、所定の校正プレートを用いて探触子の感度調整を実施している。探傷時は超音波の伝播を良好にするため、触媒として水道水を試験体表面に供給しながら探傷を行った。そして、同一試験体を用いて MUT も実施した。

各種探触子の配置概要および断面イメージを図-3に、UT 技術者による探傷状況を写真-4に示す。

3.3 結果

探傷結果を図-4に示す。下段は TOFD 法の結果、上段扇形の図はセクタスキャンと呼ばれる PAUT 法の結果 (左は左側プローブ、右は右側プローブ) を示している。ただし、PAUT の結果は探触子をきず A の位置に置いたときのセクタスキャン像で、図中の黒破線は、エコーの反射回数に応じて、直射から 2 回反射までの開先形状を表示している。なお、探傷データは写真-2 に示す青矢印の方向に向かって走査し、取得したものである。TOFD 法の結果はエコー強度をグレースケールで表示しており、色が白いほど強いエコーを示す。上下の白線は表面と底面のエコーであり、その間に挟まれた領域にエコーがあればきずと判断される。探傷の結果、長さ約 35mm (きず A) と約 10mm (きず B) のきずを検出した。

つぎに、PAUT 法の結果は、エコー強度をカラーマップで示しており、エコーが強いほど暖色系で示される。きず A 付近に強いエコーが検出されたため、きずと判断される。また、黒線は開先形状を示しており、きずは開先内にあることがわか

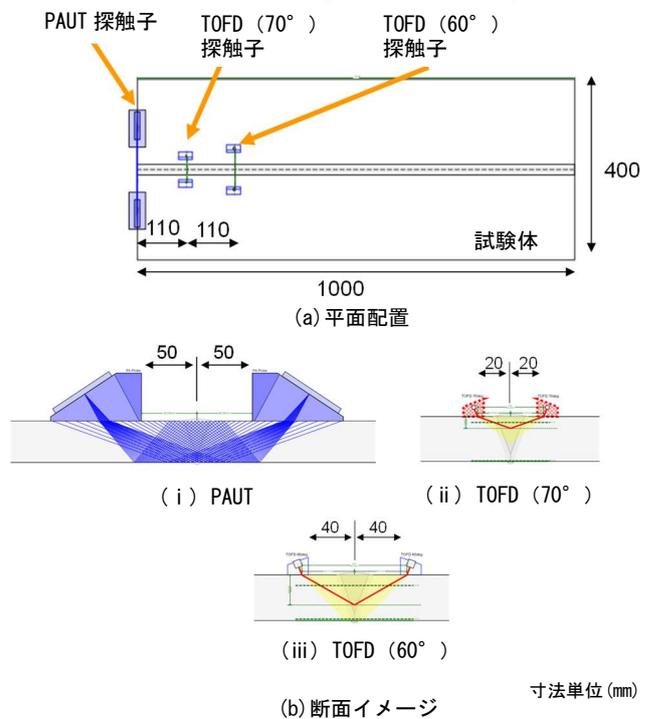


図-3 各種探触子の平面配置概要および断面イメージ

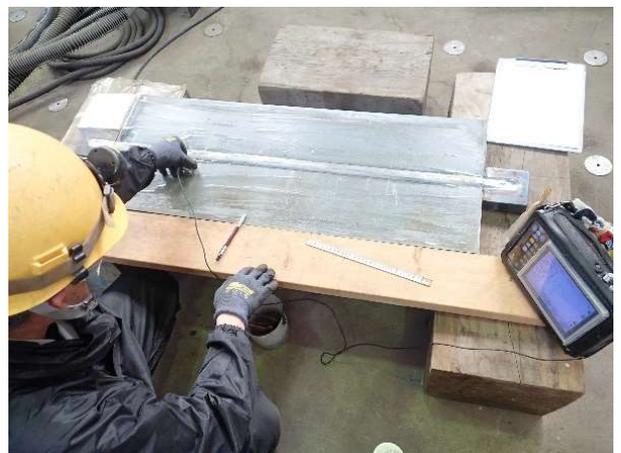


写真-4 MUTによる探傷状況

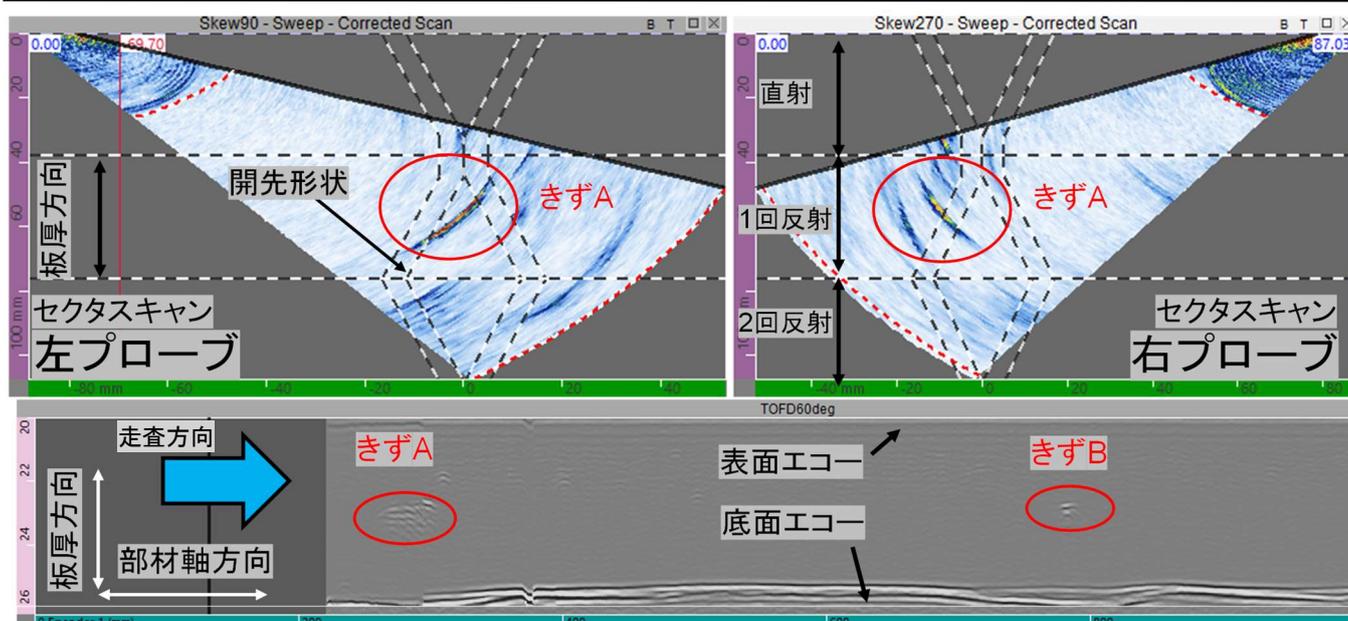


図-4 TOFD法（下段）およびPAUT法（上段）による探傷結果

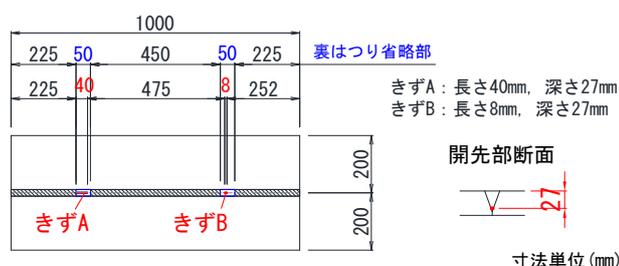


図-5 MUTによる探傷結果概要図

る。左右でエコーの強さが異なるのは、きずの向きによる超音波の反射の違いによるものと考えられる。PAUT法でも2箇所のみずを検出したため、TOFD法とPAUT法で同一のみずを検出したと考えられる。

MUTの結果概要図を図-5に示す。TOFD法およびPAUT法で検出したきずA、B付近に、板表面から27mmの深さに位置する、長さ40mmと8mmのみずを検出した。なお、きずA、Bはともに裏はつり省略部に発生していた。

以上より、今回探傷した試験体条件において、TOFD法およびPAUT法ともに従来のMUTと同様にきずの位置を検出できている。

4. おわりに

本稿では、大型鋼構造部材の板継ぎ溶接部における非破壊検査の自動化に向けた基礎検討として、TOFD法およびPAUT法を併用した鋼板の板継ぎ溶接部の探傷結果をMUTと比較した。TOFD法では、きずの長さが判別できる一方で、きずの奥行方向（溶接線に直角する方向）の分布が不明であり、板表面のみずは検出しにくいことが確認された。一方、PAUT法では、開先に対するきずの位置関係は確認できるものの、きずの長さは判別しにくいことが確認された。これにより、両手

法を併用することで、精度と効率の向上が期待されることが示唆された。また、検査量の多い大型構造物に対しても、本システムを活用することで、安定的な探傷が可能になると考えられる。ただし、収集されるデータの膨大さから生じる、きずの判定の難しさが課題として挙げられる。今後は、AIを活用したきずの画像判定システムの構築に向け、試験体に内包するきずの種類や寸法などを変化させた検証や、実構造物で検証を進める。これによりデータの蓄積を図り、非破壊検査の自動化による生産性向上を目指す。

謝辞

本検討は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術開発機構（略称：NEDO）によるグリーンイノベーション基金事業の補助を受けて実施しました。

参考文献

- 1) 社団法人溶接学会：溶接工学の基礎，1982.1
- 2) 古舘岳実，池ヶ谷靖：建築，土木におけるフェーズドアレイUT法，非破壊検査第67巻2号（2018），pp.76-82，2018.2
- 3) 福島盛弘ら：TOFD法による溶接部の非破壊検査，溶接学会誌，第81巻（2012）第4号，pp.239-243，2012.3
- 4) 齋藤豪：鋼床版半自動フェーズドアレイ超音波探傷試験（鋼床版PSAUT）の実用化検討，令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会，I-58，2020.9