

一寄稿一 渦電流アレイ (ECA) 技術の原理と適用事例紹介

1. はじめに

近年、プラントなどの配管や機器の老朽化が進行する中で、これらの健全性を維持するための特に非破壊検査の重要性が高まっている。従来、鋼構造物の溶接部などの表面検査には磁粉探傷試験（以下MTと示す）および浸透探傷試験（以下PTと示す）が広く用いられてきた。しかし、これらの手法は検査液や溶剤を使用することから、検査対象物の表面への影響が避けられない。この問題は、特に食品工場や製薬工場など、高度な衛生管理が求められる分野において深刻であり、微細な残留物であっても製品品質や安全性に重大な影響を及ぼす恐れがある。そのため、これらの分野では化学薬品を使用しないケミカルフリーな検査手法の導入が長年にわたり求められてきた。

こうした背景を踏まえ、次世代の非破壊検査技術として Eddy Current Array（以下ECAと示す）が注目されている。ECAは、多数のセンサーを配列したアレイプローブにより、一度に広範囲の表面を高感度で検査することが可能であり、検査時間の短縮、作業負担の軽減および安全性の向上に大きく寄与する。また、探傷剤を一切使用しないケミカルフリーな検査手法であることから、食品工場や製薬工場といった衛生管理が厳格な環境においても、有用性が期待されている。

本稿では、2項～4項にECA技術に関する基礎知識、5項～7項に適用事例を紹介する。

2. ECAの原理

渦電流探傷試験においては、きずの方向に対して渦電流が直交するようにコイルを配置することが、きずの検出精度を高める上で重要である。この原理を応用したアレイコイルは、1つのプローブ内に16個×2列に配列された複数のコイルで構成されている測定原理を図1に示す。各コイルはプログラム制御により励磁および受信のタイミングや組み合わせを切り替えることが可能であり、これにより広範囲の検査を一度に実施できる。さらに、きずの方向に依存せず全方向に対して高精度かつ効率的なきず検出が可能となっている。

3. 装置概要

3.1 渦電流探傷器

表1に装置の仕様を、図2に装置構成の外観を示す。

図2のようにECAは測定器本体とアレイプローブで構成される。バッテリー駆動で軽量の測定器であり、現場での携帯性に優れた小型の装置である。

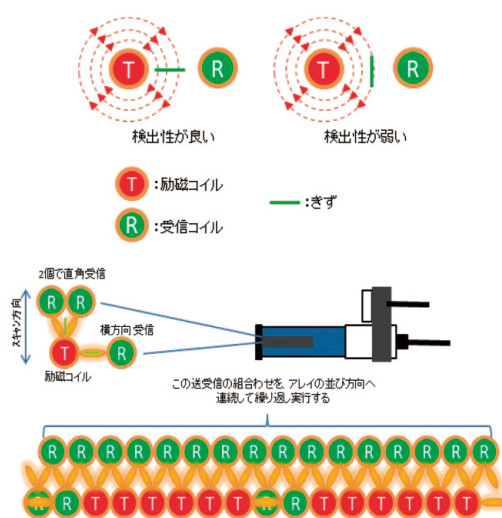


図1 ECAの測定原理

表1 装置仕様

探傷器	MIZ21-C
寸法	267×122×38mm
重量	1.2kg
駆動時間	最大10時間
データ容量	128GB



図2 装置構成の外観

3.2 アレイプローブ

アレイプローブはフレキシブルな構造を有しており、対象物の形状に応じた適用が可能である。特に、溶接部検査に特化したSurf-X Weld, およびタービンブレードのような複雑形状に対応可能なSurf-X Filmが設計されている。表2にプローブ特性を図3にアレイプローブの外観を示す。

4. 装置の調整方法

ECAは軸方向（スキャン方向）チャンネルと横方向チャンネルで構成されている。エンコーダを併用することで、両チャンネルにおけるきず検出位置のずれを補正した合成チャンネルを生成する。装置の調整では、この合成チャンネルがきずの方向性に依存せず、あらゆる方向のきずを同一感度で検出できるように調整を行う。以下に調整方法を示す。

軸方向チャンネルと横方向チャンネルそれぞれの基準きずを走査し感度と位相を調整する。次に、合成チャンネルで基準きずを斜め45°で走査して所定の感度と位相に調整する。図4～図6に各チャンネルのプローブ走査方法を示し、図7に合成チャンネルの探傷画面を示す。

この調整により、一度のプローブ走査で、あらゆる方向のきずを同一の感度で検出できる。

表2 プローブ特性

プローブ名	Surf-X Weld	Surf-X Film
型式	SURFXW-S01	SURFXT-S0020
周波数レンジ	50-2800kHz	1-4MHz
走査有効幅	43mm	48mm
最小曲げ半径	12.7mm	1.3mm

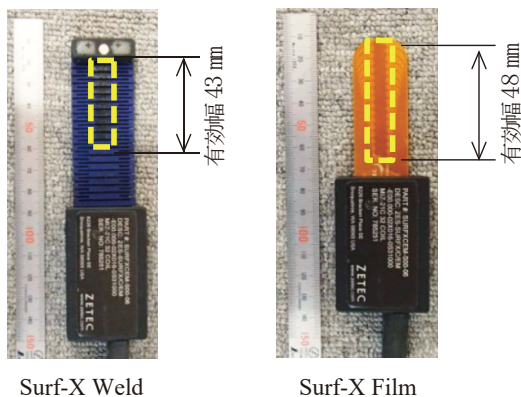


図3 アレイプローブ

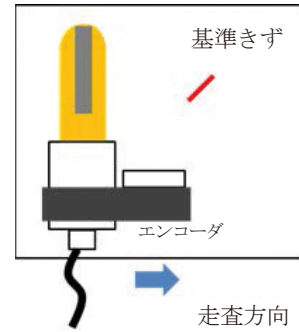


図4 プローブ走査方法（軸方向）

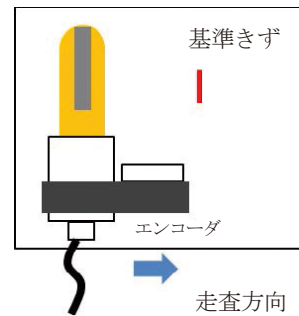


図5 プローブ走査方法（横方向）

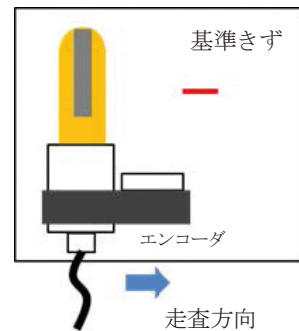


図6 プローブ走査方法（合成）

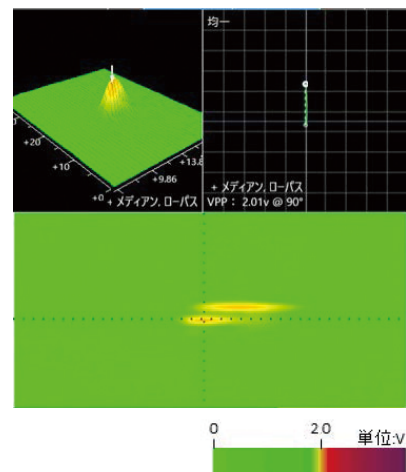


図7 探傷画面（合成）

5. 事例紹介①（ステンレス鋼溶接部人工きず）

5.1 目的

グラインダーによって余盛を除去したSUS溶接部の表面に、平底穴およびノッチ加工を施した試験片を作製し、きずの検出性能の確認を行った。

5.2 試験片

試験片加工図およびそれぞれのきず寸法を図8に示す。

人工きずは、溶接部、熱影響部並びに、母材部にそれぞれ加工を施している。

5.3 試験装置および試験条件

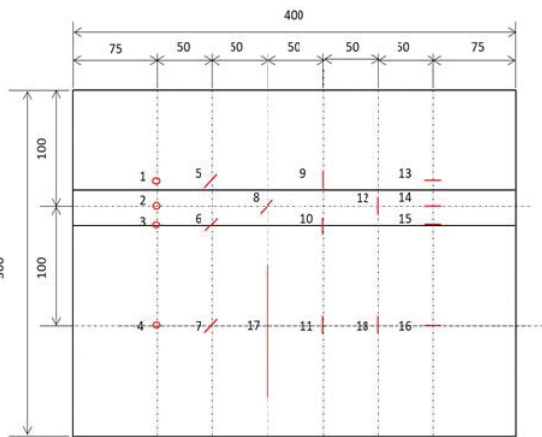
探傷時のノイズ除去のため今回はフィルタを使用。表3に試験装置および試験条件を示す。

5.4 試験結果

図9に母材きずNo.18の校正波形、図10に溶接熱影響部の探傷結果を示す。

5.3項の試験条件で測定することで、試験片に加工された様々な形状の人工きずが全て明瞭に検出可能であることが確認された。

試験片に加工した人工きずの寸法には、ASME規格に準拠した値を採用しているため、本検査手法はASME規格を適用する検査にも対応可能である。



きずNo	形状	寸法	深さ
1~4	平底穴	φ1.5	1.0
5~8	ノッチ45°	φ1.5×W0.25	1.0
9~12	ノッチ0°	φ1.5×W0.25	1.0
13~16	ノッチ90°	φ1.5×W0.25	1.0
17	ノッチ0°	φ85×W0.25	1.0
18	ノッチ0°	φ1.5×W0.25	0.5

図8 試験片および人工きず寸法

表3 試験装置および試験条件

アレイプローブ	Surf-X Weld
試験片の材質	SUS304
試験片のサイズ	W300×L400
試験周波数	200kHz
感度	きずNo.18を1.2Vに設定
位相	きずNo.18を90度に設定
フィルタ	メディアン 20mm
	ローパスフィルタ 50Hz

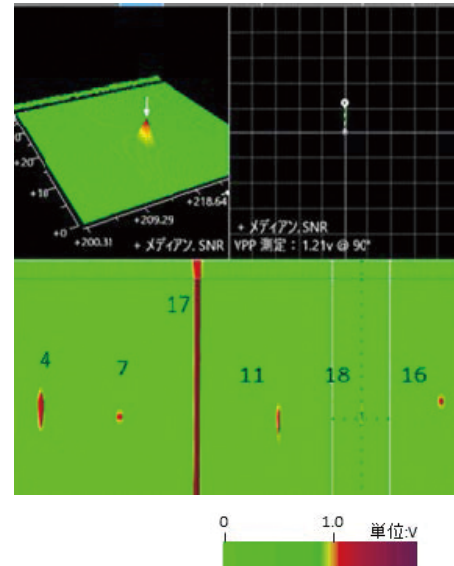


図9 母材きずNo. 18におけるECA校正波形

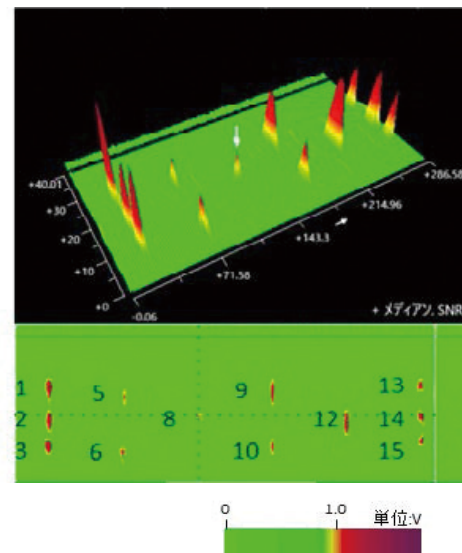


図10 溶接部および熱影響部におけるECA試験結果

6. 事例紹介②（ステンレス鋼溶接部のSCC）

6.1 目的

SUS平板突き合わせ溶接部におけるSCC（応力腐食割れ）の生じている試験片にECAを適用し、PTとの比較を実施した。

6.2 試験装置および試験条件

表4に試験装置および試験条件を示す。

6.3 試験結果

図11にECAの試験結果を、図12にPTの試験結果を示す。

表4 試験装置および試験条件

アレブプローブ	Surf-X Film
試験片の材質	SUS304
試験片のサイズ	W200×L280
試験周波数	1.0MHz
感度	L8×d0.5のスリットを2.0Vに設定
位相	L8×d0.5のスリットを90度に設定
フィルタ	メディアアン 20mm
	ローパスフィルタ 50Hz

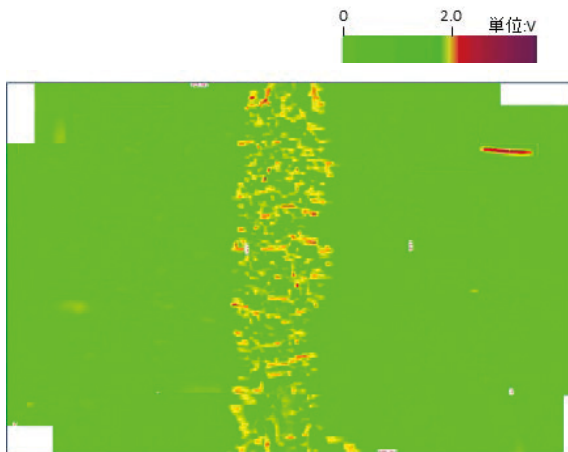


図11 ECA試験結果



図12 溶接部におけるPT試験結果

試験結果より、本検査手法は微細なSCC（応力腐食割れ）に対してもPTと同等の検出能力を有することが確認された。さらに、ECAではPTで必要とされる浸透、除去処理、現像処理などの工程を要さず適用できる。また、きず信号振幅に応じてきずの分布をカラーマップとして自動作成できるため、PTのようにスケッチによる記録を行う必要もない。これにより探傷作業全体の効率化が図られ、作業時間の大幅な短縮が見込まれる。

例えば、図13に示すようなID 2900mm×H 9354mmのSUS304製貯槽タンクに対してECAを適用した場合、円周および長手継手溶接部の計55mを内部より検査した際に要する検査期間はおおよそ2日間となる。また、PT溶剤等を使用しないため、施行後の内部洗浄処理も簡易となり、全体工程の短縮も図ることができる。

7. 事例紹介③（炭素鋼溶接部への適用）

7.1 目的

JSNDI認証試験におけるMTレベル1の実技試験対策用試験片を用いて、鋼溶接部におけるECAによるきずの検出状況を確認した。

7.2 試験片

図14に対比試験片の形状と仕様およびきずの寸法を示す。図15にMT実技試験対策用試験片（以下、試験体と示す）を示す。試験体は溶接部をグラインダーで波形状が無くなる程度にフラッシングされた、余盛高さ約2mmのものを使用した。

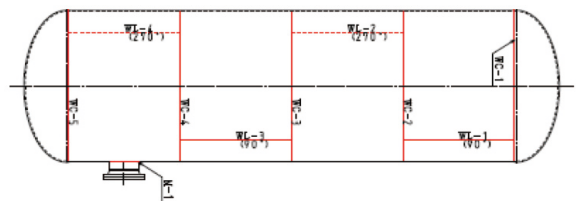


図13 SUS304製貯槽タンク

①	材質	SS400
②	板厚	5.0 mm
	スリット幅	0.3 mm
	①	L8×d1.0
	②	L8×d0.5

図14 対比試験片およびきず寸法

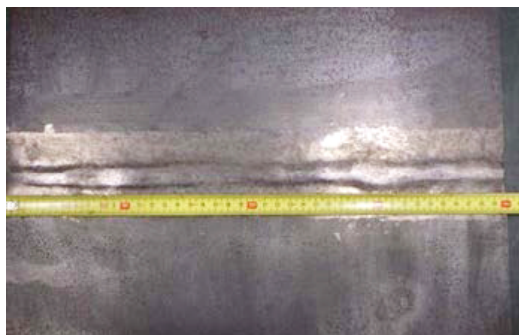


図15 試験体

7.3 試験装置および試験条件

表5に試験装置および試験条件を示す。

7.4 試験結果

図16、図17にECAとMTの試験結果（模範解答）を示す。

試験体に加工されたきず①～⑥について、いずれも検出が可能であることを確認した。きず⑤および⑥の間に位置する☆印で示された信号に関しては、探傷結果および表面観察により、きずではなく表面形状（凹み）に起因するものであることを確認した。ECAでは、きず以外にも溶接部の表面形状の影響によって信号が検出される。そのため、表面状況を注意深く観察し、ECA探傷結果と比較する必要がある。

8. まとめ

ECA技術は、従来のPTおよびMTに代替可能な有効な非破壊検査手法であり、非磁性、磁性体における表面および表面近傍のきずに対して高い検出性能を有する。検査結果は2次元および3次元カラーマッピングにより可視化され、きずの位置・分布を定量的に把握することが可能であるため、検査の信頼性向上および判定の客観性確保に寄与する。

さらに、本技術は非接触であり、検査液や溶剤などの化学薬品を使用しないため、検査後の洗浄工程や廃液処理が不要となる。この特性により、作業工程の簡素化、検査時間の短縮、並びに環境負荷の低減が実現可能である。

今後は、ECA技術の適用範囲の拡大および標準化の推進を通じて、非破壊検査分野における次世代探傷技術としての普及が期待される。

安部 知徳（東亜非破壊検査㈱ 技術部）

表5 試験装置および試験条件

アレイプローブ	Surf-X Weld
試験片の材質	SS400
試験片のサイズ	W300×L400
試験周波数	200kHz
感度	L8×d0.5のスリットを2.0Vに設定
位相	L8×d0.5のスリットを90度に設定
フィルタ	メディアン 20mm
	ローパスフィルタ 50Hz

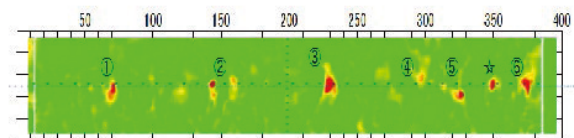


図16 ECA試験結果



図17 MT試験結果

参考文献

- 1) 日本非破壊検査協会：渦電流探傷試験I (2023)
- 2) 日本非破壊検査協会：渦電流探傷試験II (2016)
- 3) JIS Z 2316-1：2014 非破壊試験－渦電流試験－第1部：一般通則