

アレイ渦電流によるクラッド鋼合せ材厚さ測定

Thickness measurement of cladding material by eddy current testing array

産業プラントの保守検査におけるクラッド鋼合せ材厚さ測定の実用化

(株)ウィズソル 松山 雅幸

1. はじめに

産業プラントに設置されている反応槽は、強度部材である炭素鋼または低合金鋼に、耐食性を有する合せ材を冶金的に接合させたクラッド鋼が用いられることがある。合せ材はステンレス鋼、チタンなどの高耐食性材料であるが、腐食性が高い内容液に晒され腐食が生じたり、反応液が攪拌されてエロージョンが生じることがある。

合せ材に生じた減肉が進展すると、合せ材が消失して炭素鋼が露出する。炭素鋼に反応液が接液すると短期間のうちに貫通に至るおそれがある。そのため、定期的に反応槽を開放して反応槽の内面（合せ材）側から合せ材厚さを精度良く測定し、残肉厚を広範囲に調べる必要がある。

当社ではEddyfi社製のアレイ渦電流探傷器MIZ-21Cとアレイ上置コイルを組み合わせたECA（Eddy Current Testing Array）により、クラッド鋼合せ材厚さを面測定する方法の開発に取り組んだ。

本稿では、現場適用事例を交えて概要を紹介する。

2. 電磁式膜厚計による合せ材厚さ測定

クラッド鋼合せ材厚さ測定では、主に電磁式膜厚計が活用され、一般的には超音波法は用いられない。クラッド鋼は合せ材と炭素鋼が冶金的に接合され、両者の音響インピーダンスの差は小さい。そのため通常の超音波法では、合せ材と炭素鋼の境界面からは反射エコーが得られないためである。

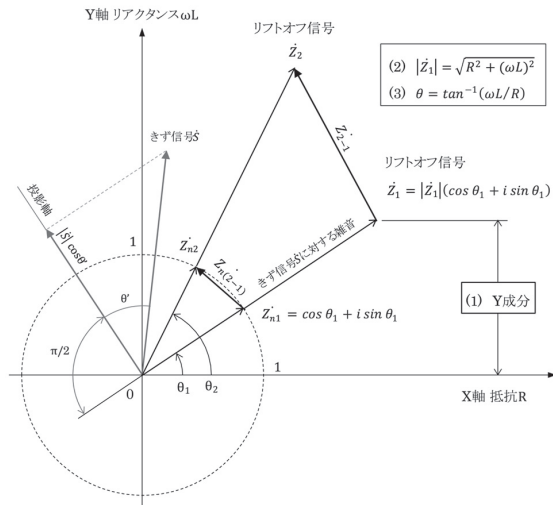
電磁式膜厚計はプローブと炭素鋼表面との距離に応じた磁束密度の変化を検出して厚さに換算している。つまり、合せ材厚さの測定値はプローブから炭素鋼表面までの距離であり、これはECAにおいても同様である。

ある産業プラントの開放検査において、電磁式膜厚計を用いて定点厚さ測定を行い管理していたが、定点以外の位置で減肉が進展した事例があった。そのため細かいピッチで広範囲を測定する必要が生じ、新たな測定方法が待たれていた。

3. ECAによる合せ材厚さ測定

3.1 きず探傷と合せ材厚さ測定の違い

ECAによる合せ材厚さ測定では、アレイ上置コイルに生じるリフトオフ（＝合せ材厚さ）を連続的に測定する。



第1図 インピーダンス平面

第1図に示すインピーダンス平面を用いて、きず信号とリフトオフ信号の違いを考える。

きず探傷においては、リフトオフは雑音であり位相調整により抑制する必要がある。同期検波回路の出力は、きず信号 \dot{S} の $\cos \theta$ による投影である $|\dot{S}| \cos \theta$ に比例する。そのため、投影軸とリフトオフ雑音との位相差が $\pi/2$ のとき $\cos \theta = 0$ となりリフトオフ雑音がきず信号 \dot{S} の出力に影響を及ぼさない。

第1図において、きず信号 \dot{S} とリフトオフ雑音との位相差が小さい場合は、 $|\dot{S}| \cos \theta'$ が小さくなるためSN比が低い。この場合、試験周波数などを調整して、きず信号 \dot{S} とリフトオ

フ雑音との位相差を大きくすればSN比が向上する。

一方、合せ材厚さ測定においては、リフトオフは信号として扱う。リフトオフ信号は、コイルと炭素鋼との電磁氣的結合度と密接に関係している。合せ材厚さ測定におけるインピーダンス変化の観測対象は、Y成分、大きさ $|\dot{Z}| (= \sqrt{R^2 + (\omega L)^2})$ 、および位相角 $\theta (= \tan^{-1}(\omega L/R))$ の三つである。測定条件の設定においては、これらの観測対象の変化が大きくなり測定分解能が高くなるよう工夫する。きず探傷と合せ材厚さ測定の違いを第1表に纏める。

3.2 インピーダンス変化の観測

探傷器に表示されるカラーマッピングの色調は、Y成分に対応する。そのため、測定結果をリアルタイムで知るためには、インピーダンス変化のグラフがY方向に大きくなるように位相角を調整すればよい。 $|\dot{Z}|$ および位相角 θ を観測対象とする場合は、測定結果はリアルタイムでは得られず、PCによるデータ処理が必要である。

第1図においてリフトオフ信号の変化を考える。

あるリフトオフでブリッジバランスを取り試験片でリフトオフを変化させたとき、リフトオフ信号 \dot{Z}_1, \dot{Z}_2 が得られたとする。これらは位相角 θ_1, θ_2 を用いて、

第1表 アレイ上置コイルによる「きず探傷」と「合せ材厚さ測定」の違い

比較項目	きず探傷	合せ材厚さ測定
評価	位相角および振幅により、きず深さと大きさを評価する。	\dot{Z} のY成分、 $ \dot{Z} $ 、位相角 θ により合せ材厚さを評価する。
表面きず	信号(検出対象)	測定対象ではない。
リフトオフ	雑音(低減する必要がある。)	信号(測定対象)
SN比	きず信号と雑音との位相角などにより決まる。	インピーダンス平面には表されない。
試験周波数	浸透深さ、特性周波数により算出する。	一般的な算出方法はない。本稿では $ \dot{Z} $ に着目し検討する。
位相角	貫通穴などの基準きずの信号により設定する。	試験周波数および測定厚さ範囲に応じて設定する。
感度	基準きずの信号が規定の大きさになるよう調整する。	対比試験片の信号を調整する。
コイル走査速度	きず検出能と関係がある。	測定値に影響は及ぼさない。

$$\dot{Z}_1 = |\dot{Z}_1| (\cos \theta_1 + i \sin \theta_1)$$

$$\dot{Z}_2 = |\dot{Z}_2| (\cos \theta_2 + i \sin \theta_2)$$

と表される。

Y成分の変化を ΔY_{2-1} とすると、

$$\Delta Y_{2-1} = |\dot{Z}_2| \sin \theta_2 - |\dot{Z}_1| \sin \theta_1 \quad \dots(1)$$

である。

次に $|\dot{Z}|$ の変化を $|\dot{Z}_{2-1}|$ とすると、

$$\begin{aligned} |\dot{Z}_{2-1}| &= |\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1| \\ &= |(|\dot{Z}_2| \cos \theta_2 - |\dot{Z}_1| \cos \theta_1) + i(|\dot{Z}_2| \sin \theta_2 - |\dot{Z}_1| \sin \theta_1)| \\ &= \sqrt{|\dot{Z}_1|^2 + |\dot{Z}_2|^2 - 2|\dot{Z}_1||\dot{Z}_2| \cos(\theta_2 - \theta_1)} \quad \dots(2) \end{aligned}$$

である。

式(1)、式(2)から、 ΔY_{2-1} および $|\dot{Z}_{2-1}|$ は $|\dot{Z}|$ の寄与が高いことが分かる。 $|\dot{Z}|$ は探傷器の感度で調整できるため、観測対象がY成分および $|\dot{Z}|$ である場合は測定分解能が向上できる。

次に位相角を観測対象とする場合を考える。第1図において、 \dot{Z}_1 の位相角は探傷器の設定感度および試験周波数によらず単位円上の Z_{n1} と等しい。このとき式(1)において、 $|\dot{Z}_1| = |\dot{Z}_2| = 1$ であるから単位円におけるリフトオフ信号の変化 $|Z_{n(2-1)}|$ は式(2)より、

$$|Z_{n(2-1)}| = \sqrt{2(1 - \cos(\theta_2 - \theta_1))} \leq 2 \quad \dots(3)$$

となる。

式(3)から、位相角の変化は最大値が2(=単位円の直径)であることが確認できる。

観測対象ごとの特徴は第2表に纏める。

3.3 コイル特性の検討

合せ材厚さ測定におけるコイルの特性を調べるため、SUS304および炭素鋼の試験片を用いてリフトオフ信号のインピーダンス変化を実測する。

リフトオフは0.5mmピッチで0~3.0mmとする。試験周波数は、コイルの仕様により段階的に設定する。各試験周波数において、リフトオフが3.0mmでブリッジバランスを取り、位相角はリフトオフが2.0mmのときX成分が0となるよう調整し、全ての試験周波数において感度は共通とする。

第2図(a)に、実測したインピーダンス変化のグラフを示す。

初めに試験周波数について検討する。試験周波数が1~5kHzのとき、リフトオフが小さくなるにつれインピーダンス変化のグラフはY方向に単調に大きくなり、10kHz以上では変化は単調ではない。従って位相角を調整せずY成分を観測する場合は試験周波数は10kHzより低い方が都合がよい。

インピーダンス変化のグラフは、5kHzまでは徐々に大きくなり、10~20kHzで最大、30kHz以上では徐々に小さくなる。また、リフトオフが等しい点を破線で結ぶと、破線とY軸で囲まれた領域のサイズは電磁氣的結合度と関係があると考えられる。

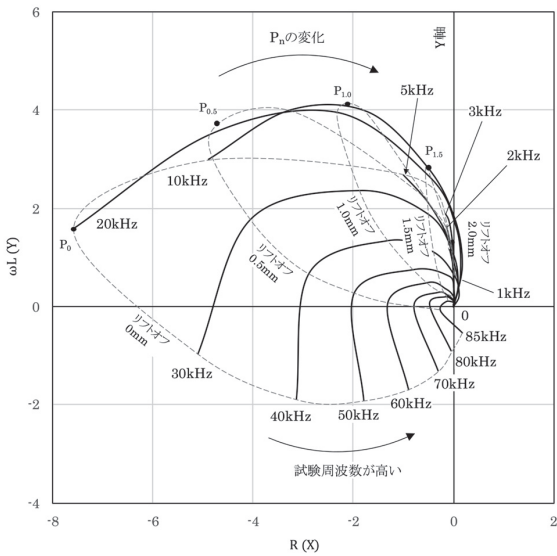
そこで、この領域のサイズを $|\dot{Z}|$ を用いて近似的に定量化すると、試験周波数と $|\dot{Z}|$ との関係は第2図(b)のようになる。第2図(b)から、

第2表 評価に用いるデータの特徴

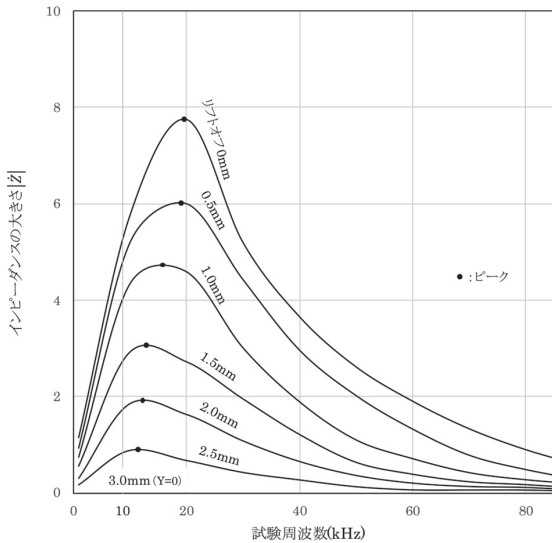
観測対象(インピーダンス \dot{Z})	特長	欠点
Y成分	測定中にリアルタイムで残肉厚分布が分かる。	測定厚さ範囲に応じてY成分が大きくなるよう位相角を調整する必要がある。
大きさ $ \dot{Z} $	測定厚さ範囲ごとに位相角を調整する必要がある。	測定中にリアルタイムで結果が分からない。
位相角 θ	感度調整が不要である。 測定厚さ範囲ごとに位相角を調整する必要がある。	リフトオフが大きいとき分解能が低下、改善が困難。 測定中にリアルタイムで結果が分からない。

各リフトオフにおいて $|Z|$ が最大となる試験周波数は、10~20kHzであり、このとき最も測定分解能が高い。

次に測定分解能について考える。第2図(a)において各領域の頂点を P_n ($n=0\sim 2.0$) とする。リフトオフが大きくなるにつれ頂点 P_n はY軸に近づく。このとき線分 OP_n がY軸となす角度の



(a) インピーダンス変化



(b) 試験周波数による $|Z|$ の変化
第2図 使用するコイルの特性

変化は、しだいに小さくなる。また、第2図(b)ではリフトオフが大きくなるにつれ $|Z|$ は小さくなる。以上から、全ての観測対象においてリフトオフが大きくなるにつれ測定分解能は低下することが確認できる。

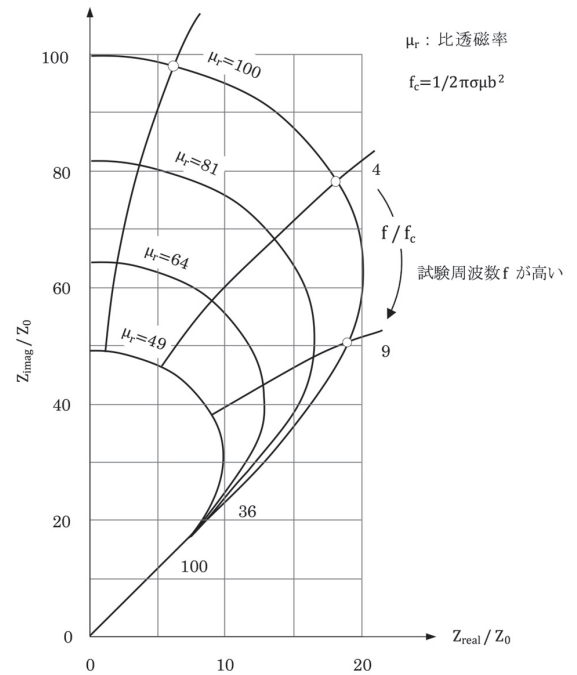
3.4 コイル特性と

正規化インピーダンス平面の対応

第3図は強磁性の導体を含む無限長ソレノイドコイルの正規化インピーダンス⁽¹⁾である。電磁氣的結合度が高くなるにつれ、インピーダンス変化のグラフは大きくなる。また、試験周波数が高くなるにつれ、グラフの動作点は下方へ進む。

第2図(a)(b)に示す実測結果と第3図のインピーダンス平面を比較すると次のことが分かる。

- ① 第2図(a)(b)では、リフトオフが小さくなるにつれ $|Z|$ が大きくなっている。これは、第3図において電磁氣的結合度が高いほどインピーダンス変化のグラフの形状が



第3図 強磁性の導体を含む無限ソレノイドコイルの正規化インピーダンス

大きいことと一致する。

- ② 第2図(a)(b)において、 $|\dot{Z}|$ は10~20kHzで最大となり、試験周波数が高くなるにつれ減少する。第3図では、試験周波数が高くなるにつれてグラフの動作点が下方へ向かっており同じ傾向を示している。

第2図(a)(b)は現場適用を前提とした測定結果であり、実用上のコイル特性を表している。電磁氣的結合度と試験周波数の関係に着目し、コイル特性と正規化インピーダンス平面を対比することは、本測定方法を高度化する手がかりとなる。他のコイルにおいても、同様の試験を実施すれば試験周波数の検討材料が得られる。

これらの検討結果をもとに現場検証を行った結果、選定した試験周波数は概ね問題ないが、コイルと測定面との接触状態が測定データに影響を及ぼすためコイルを安定的に保持する必要があることが分かった。これをリフトオフ信号に対する雑音としてインピーダンス平面に表すことは、SN比を向上させるために有効であり今後の課題とする。現場適用においては、試験周波数はインピーダンス変化の検討結果に実際の測定状況を加味して適切に設定している。

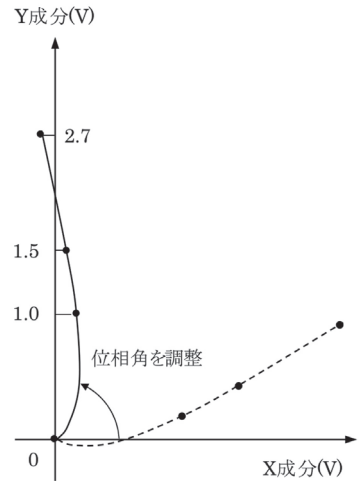
3.5 位相角の設定

位相角の検討は、Y成分を観測対象とする場合に必須である。

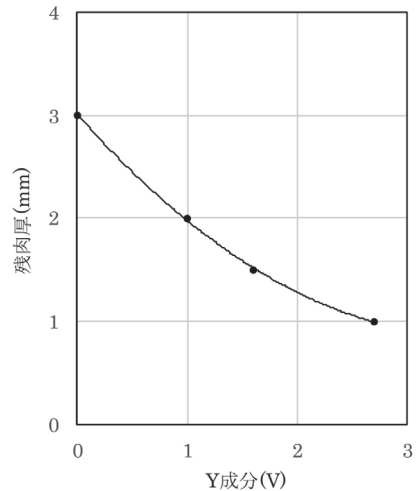
SUS304および炭素鋼の試験片を用いて、リフトオフ信号を1.0~3.0mmまで段階的に測定したとき、第4図(a)に破線で示すようなインピーダンス変化のグラフが得られたとする。これがY方向に大きくなるよう位相角を調整すると、実線のようになる。このとき、 \dot{Z} のY成分とリフトオフとの関係は第4図(b)に示す校正曲線として得られる。

第5図に、インピーダンス変化と位相角との関係を示す。これを用いて、位相角を調整すると測定厚さ範囲がどのように変わるかを調べる。

SUS304と炭素鋼の試験片を用いて0~3.0mmのリフトオフ信号を測定する。



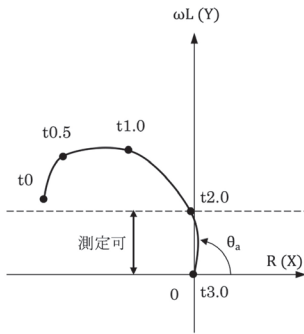
(a) リフトオフによるインピーダンス変化



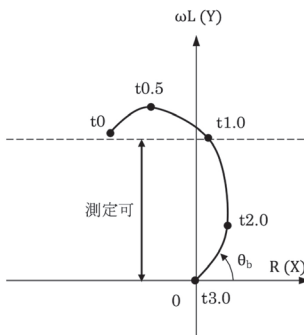
(b) \dot{Z} のY成分とリフトオフの関係

第4図 \dot{Z} のY成分による校正

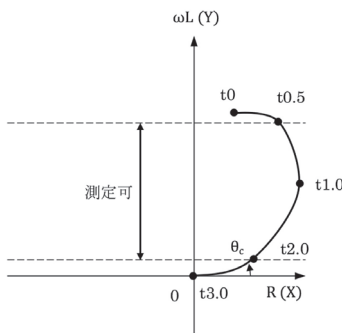
位相角が θ_a のとき、(a)に示すインピーダンス変化のグラフが得られたとする。リフトオフが0~2.0mmにおいては、グラフの変化はY方向と比較してX方向に大きいため測定分解能が低い。また、この範囲では一つのY成分に対してX成分が二つ存在し、グラフの変化が単調ではないため測定不可となる。リフトオフが2.0~3.0mmにおいては、グラフがY方向に大きいため測定できる。従って、位相角が θ_a のときは、測定厚さ範囲は2.0~3.0mmとなる。



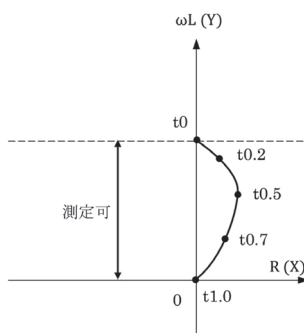
(a) 測定厚さ範囲2.0～3.0mm



(b) 測定厚さ範囲1.0～3.0mm



(c) 測定厚さ範囲0.5～2.0mm



(d) 測定厚さ範囲0～1.0mm

第5図 位相角の設定

次に、位相角を θ_b に調整すると(b)に示すグラフが得られる。リフトオフが1.0～3.0mmにおいてはグラフの変化が単調であり良好な条件で測定ができる。一方、リフトオフが0～1.0mmにおいては、グラフの変化が単調ではないため(a)と同様の理由により測定できない。

位相角を θ_c に調整すると(c)に示すグラフが得られる。このとき、リフトオフが0.5～2.0mmにおいては、グラフの変化が単調でY方向へ大きいいため測定できる。しかし、0～0.5mmおよび2.0～3.0mmにおいてはグラフの変化がY方向へ小さいため測定できない。0～0.5mmを測定するためには、校正する範囲を1.0mm以下に限定するのが良い。

1.0mmでブリッジバランスを取りリフトオフ信号を測定すると(d)に示すグラフが得られる。0～1.0mmにおいては、グラフの変化は単調でY方向に大きいいため良好な条件で測定できる。

第2図(a)に示したように、試験周波数が低い場合のグラフはY方向に単調であるため、同一の位相角において測定厚さ範囲を大きくできる。

3.6 測定の実施

コイル長手方向の測定ピッチは、コイルの配列ピッチで固定されている。走査方向の測定ピッチは、探傷器で設定するサンプリング時間とコイルの走査速度によって決まり、測定ピッチは標準で5mmとしている。リフトオフ信号の測定は、きず探傷とは異なり、コイルの走査速度が測定結果に及ぼす影響は少ない。

1回あたりの測定範囲は約100mm×1,000mmを標準としている。コイルの走査速度は標準400mm/秒であり、1回の測定は3秒以内で完了するためECAは広範囲の測定に適する。

合せ材に生じる全面減肉は、なだらかな形状であり、減肉の有無を目視で判断することは難しい。ECAはこのような全面減肉を精度よく検出できることが特長である。ピッチングなどの局所的な減肉部においては、コイルが減肉部を通過する際にコイルと測定面に隙間が生じる

ため、減肉は信号として検出できる。しかし、局所的な減肉は目視で容易に検出できるため主な検出対象とはしない。局所的な減肉は、先端径が小さいシングルコイルを用いて残肉厚を測定するか、またはデプスゲージおよびレーザ変位計により減肉深さを測定し、近傍の残肉厚との差を求めて減肉部の残肉厚とすればよい。

当社では、ECAにより広範囲の合せ材厚さの分布を把握した後、必要に応じて電磁式膜厚計を用いて測定値を詳細に確認する方法を確立している。この一連の測定は当社が2021年に特許²⁾を取得している。

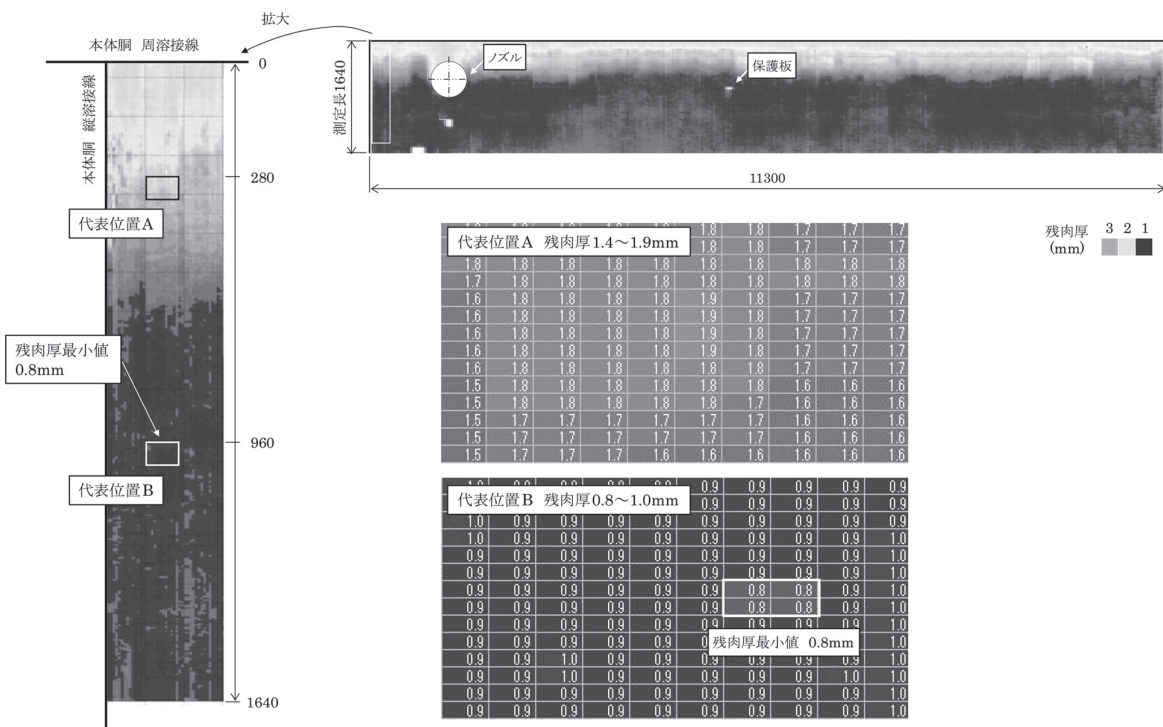
本稿では、測定対象をクラッド鋼合せ材厚さに限定しているが、炭素鋼等の強磁性体が非導電性材料（ガラス、FRP、塗膜など）で覆われている場合は、同様にして非導電性材料の厚さが測定できるため適用場面は多岐にわたる。

4. 現場適用事例

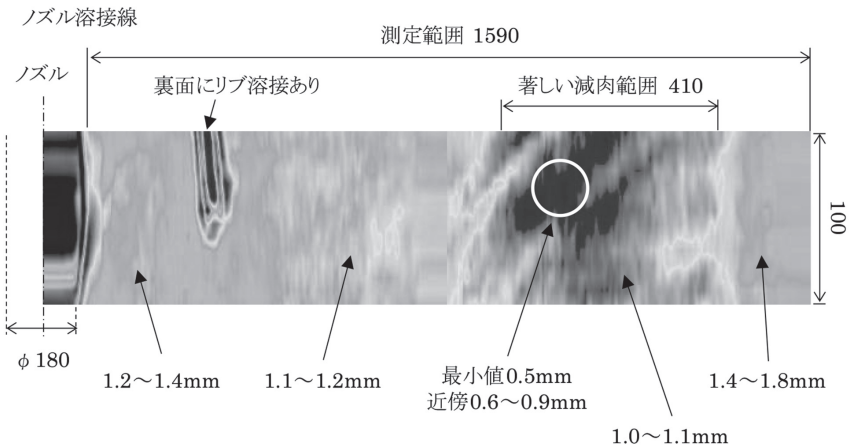
現場で合せ材厚さを面測定した事例を紹介する。対象は縦型反応槽（内径φ3,600、クラッド鋼合せ材SUS316L、公称厚さ3.0mm）である。反応槽の外周部は炭素鋼のジャケットで覆われ、さらに保温材が施工されている。

測定面は曲率を有しているが、コイルは柔軟性があり曲面に追従するため、測定作業には支障はない。

探傷器に収録したデータは、当社が開発したPCアプリで解析すると、第6図のようなカラーマッピングが得られる。特長は、測定結果が画像化されビジュアル的に分かりやすいことである。また、全ての画素が残肉厚の数値データを持っているため、残肉厚の断面グラフを表示したり、指定した範囲の平均値を求め経年変化



第6図 数値処理した残肉厚分布（縦型反応槽の本体胴）



第7図 探傷器に表示される残肉厚分布（縦型反応槽のボトム側の鏡板）

を調べたり、残肉厚分布を詳細に観察するため色調を変化させるなど、顧客ニーズに応じて様々なアウトプットが可能である。

残肉厚の経年変化を詳細に把握するためには、定期的な全面測定が有効である。前回と比較して減肉の進展が認められなければ、当板や肉盛補修をせずに経過観察するという判断ができる。そのため、補修範囲を最小限に留め本来の運転性能が維持できる。

次に、測定データを集録せずに減肉部を効率的に検出した事例を紹介する。対象は縦型反応槽におけるボトム側の鏡板である。第7図は測定中に探傷器に表示されるカラーマッピングである。この事例では、限られた時間内に測定を完了させるため、数値データは保存せず測定作業に専念し、測定中に閾値（＝残肉厚1.0mm）を下回る減肉部が検出されたら、その位置を実機にマーキングする方法を採用した。マーキング位置から数点を抜き取り、測定値は電磁式膜厚計で確認した。この方法では、探傷器に全ての数値データを保存する場合と比較して、現場作業時間は約1/4に短縮できた。探傷器にリアルタイム表示されるカラーマッピングを確認しながら測定し、閾値を下回る範囲が迅速に特定された事例である。

いずれの現場においても、ECAによる測定

結果は、従来から実績がある電磁式膜厚計による測定結果と概ね一致しており、測定方法の妥当性は確認された。

5. おわりに

本稿では、合せ材厚さの面測定の実用化に向けた検討内容、およびECAと電磁式膜厚計を組み合わせた現場適用事例を紹介した。

ECAによるリフトオフ測定は、原理が単純でアウトプットが分かりやすいため、渦電流探傷の識者は容易に着想できるが、プラント設備の保守検査における適用事例は少ない。

本測定方法の開発においては、顧客からクラッド鋼の試験片を提供頂いて基礎試験を行い、プラント設備の開放期間中に貴重な時間を頂戴して現場検証を重ね、実用化に至ることができた。

様々な協力が得られることに感謝し、今後も顧客ニーズに応える検査技術の確立に取り組む所存である。

<参考文献>

- (1) (一社)日本非破壊検査協会編：渦電流探傷試験Ⅱ、p.64 (2016) を引用し加筆。
- (2) (株)ウィズソル：肉厚測定方法、特許第6994282号 (2021)

【筆者紹介】

松山 雅幸

(株)ウイズソル 開発ソリューション部 主管技師

<主なる業務歴および資格>

各種プラント設備に用いる非破壊検査機器の開発改良
および現場適用に従事、2021年より現職。

NDIS 0602非破壊検査総合管理技術者。

<会社の主な事業内容>

1961年創業、社員446名。ブランドビジョン「守る」を
ともにのもと、非破壊検査および熱処理技術サービスを
提供している。安全安心な社会の維持発展に貢献するこ
とを使命とする。