

渦電流探傷試験による コーティング上からのきず形状評価

職業能力開発総合大学校 小坂 大吾

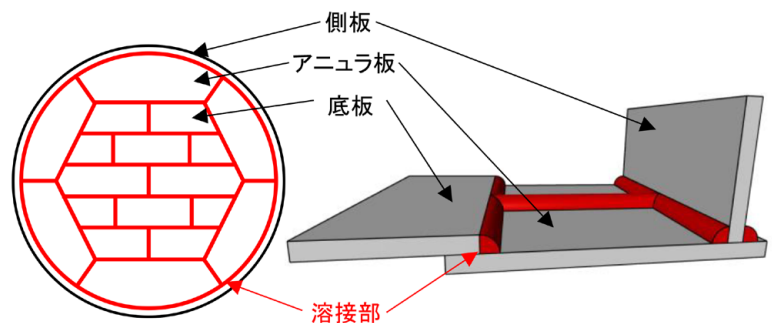
1. はじめに

我が国では石油資源の安定供給を確保するため、図1(a)に示すような多くの溶接鋼板製タンクが石油貯蔵用に使用されている。タンクへの石油の積み下ろしの繰り返しにより、図1(b)に示すタンク溶接部に疲労きずが生じる可能性があり、事故の発生を防ぐため消防法に基づき定期的なきず検査が行われている。一方で、耐腐食性能の向上を目的にタンクにはコーティングが施されており、きず検査に一般的に用いられている磁粉探傷検査 (MT) を適用する際には検査面のコーティングを取り除く必要がある。その結果、除去したコーティングが産業廃棄物となること、及び検査期間が長期化 (健全なコーティング除去時間、検査時間、及びコーティング再塗装時間) することから、タンク所有者の負担軽減と安全性の両立が求められている。消防危第93号^[1]では「新技術による検査方法の原理」の中でコーティング上からの検査手法として超音波探傷試験や渦電流探傷試験 (ECT) が挙げられているが、本稿執筆時点では多くのタンクの検査ではMTが適用されている。消防危第93号から20年超を経過したことで、現時点でのこれらの非破壊検査技術のコーティング上からきず検出性能を確認するために、危険物保安技術協会では日本非破壊検査工業会と協力し調査を行ってきた^[2-3]。

本稿では、鋼製石油タンクのきず検査においてMTを渦電流探傷試験 (ECT) に置き換えることを目的に、既存のECT装置の性能やきず長さ及び深さを評価するため、これまで行ってきた調査^[3]・発表^[4]の一部と、関係する規格やその他の文献を紹介する。最初にMTとECTの原理とコーティングの厚さの影響、及びECTにおけるきず形状等の影響を有限要素法によるシミュレーションを用いて解説する。次にECTにおけるきず長さ及び深さを評価する手法について提案し、最後に今後の課題について説明する。



(a)タンク外観



(b)タンク底板 検査部

図1 タンクの検査部

2. MT及びECTの原理とコーティングの厚さの影響

本章では、磁気ベクトルポテンシャル法に基づく三次元非線形有限要素法シミュレーションを用いてMTとECTの原理とコーティングの厚さの影響を説明する。非磁性及び非導電性のコーティング材を空気層により模擬した。本稿では問題を単純化するため、きず形状を矩形きずに限定し、溶接のない鋼板を試験体として使用した。有限要素法ソフトウェアには、固体力学、流体力学、及び電磁気学などの解析に広く用いられているSchöberlらが開発した「Netgen/NGSolve」^[5]を用いた。このソフトウェアはオープンソースソフトウェアであるが、様々な分野で広く使われている^[6-7]。シミュレーション条件と材料のBH曲線を表1と図2に示す。

表1 シミュレーション条件

項目	詳細
導電率	試験体: 3.66×10^6 S/m
起磁力	MT: 1750 A, 50 Hz ECT: 11.7 A, 100 kHz
走査ピッチ	ECT: 0.2 mm
試験体形状	MT: $200 \times 200 \times 5$ mm ECT: $100 \times 100 \times 3$ mm
きず形状	矩形

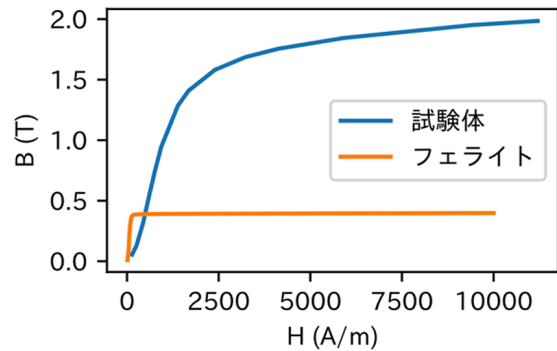


図2 BH 曲線

2.1. MT

MTは強磁性体の表面近傍のきず検出に広く使われている。強磁性体を磁化すると図3(a)に示すようにきず幅より広い範囲に漏洩磁束が生じる。そこに磁粉を流すことで漏洩磁束に磁粉がトラップされ、きず幅が拡大された磁粉模様が生じる。磁粉模様の長さは表面開口部のきず長さに対応し、検査における補修の判断には、磁粉模様の長さを推定きず長さとして活用している。きず長さを定規と目視で測定した磁粉模様の長さから容易に評価できること、深さ0.1mm程度の表面近傍きずの検出において高感度な手法であることが、MTが広く活用されている要因であると思われる。一方で、MTにおいてきず深さを定量的に評価することは著者が知る限りでは行われていない。なぜなら、磁粉模様の幅や高さをレーザー変位計で測定することは可能であるが^[8]、磁粉模様は試験面の傾きや温度など様々なパラメータの影響を受け、タンク底板などの環境ではそれらを一定にすることができず、きず深さの影響だけを取り出すことが困難であるためである。

次にMTにおけるコーティング厚さの影響について説明する。コーティングそのものは漏洩磁束に影響を与えないが、図3(a)に示すようにコーティングが厚くなるほど漏洩磁束にトラップされる磁粉が減少する。この状況をシミュレーションによって確認する。検出性能を担保するには磁化条件が重要であるが、詳細については文献 [9] を参照されたい。ここでは試験体表面がおおよそ1Tになるよう起磁力を調整した。図4(a)にMTのシミュレーションモデルを示す。きずの真上、かつ磁束がきずを直交する方向に磁化器を配置した。きず形状は長さ4mm、深さ1.5mm、幅2 μ mである。MTのシミュレーション結果を図5に示す。図5(a)はきず近傍の磁束密度分布を示している。白塗りの部分はカラーバーで設定された最大磁束密度を超えていることを示している。きず近傍の空気領域にきず幅以上の漏洩磁束が生じていることが確認できる。図5(b)はコーティング表面の漏洩磁束を磁束密度で示している。コーティング厚さ0.1mmのときの漏洩磁束の幅は0.2mmであり、これはきず幅2 μ mの100倍であった。これは磁粉模様の幅がきず幅より拡大されることを意味する。コーティング厚さ0.1mmのときの磁束密度の最大値は4.8mT、1.0mmのときは0.2mTであった。タンクのコーティング厚さは0.5~2mm程度と言われているので、MT適用時にはコーティングの剥離が必須であることを示している。一方で、消防危第93号^[1]では「新技術による検査方法の原理」として漏洩磁束探傷^[10]が挙げられている。この手法は漏洩磁束をホール素子やMIセンサなどの磁気センサを用いて出力を電氣的に得ることができ、コーティング厚さに相当するリフトオフ2mmにおいて、人工きず（長さ5mm、深さ1mm、幅0.15mm）の検出を実現している報告がある^[11]。

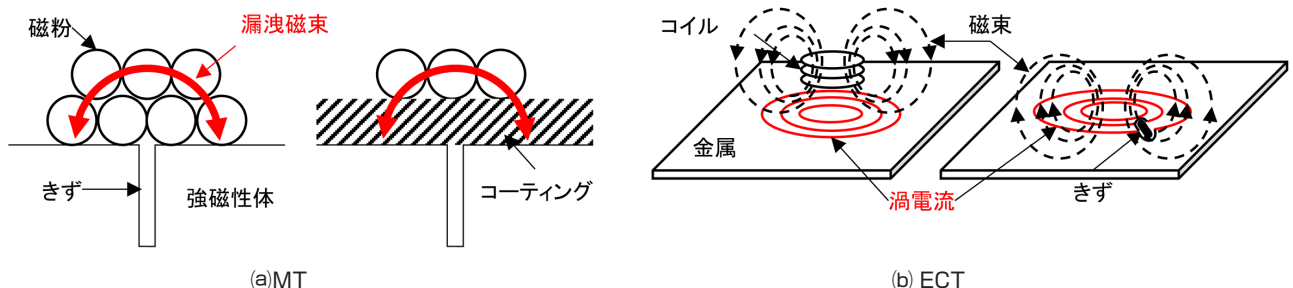


図3 MT及びECTの原理

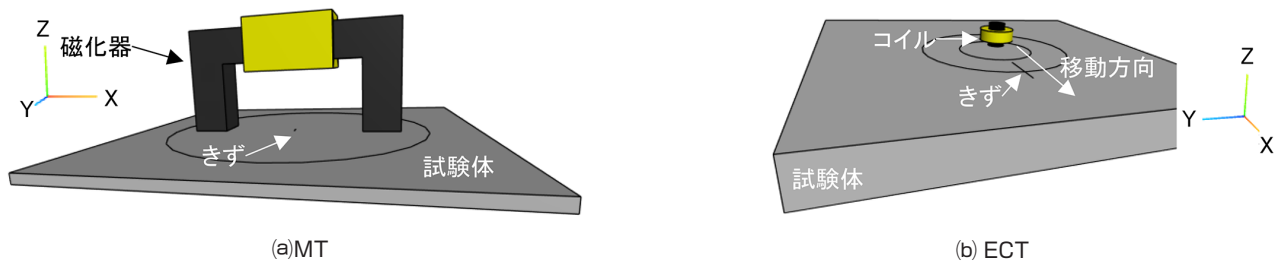


図4 シミュレーションモデル

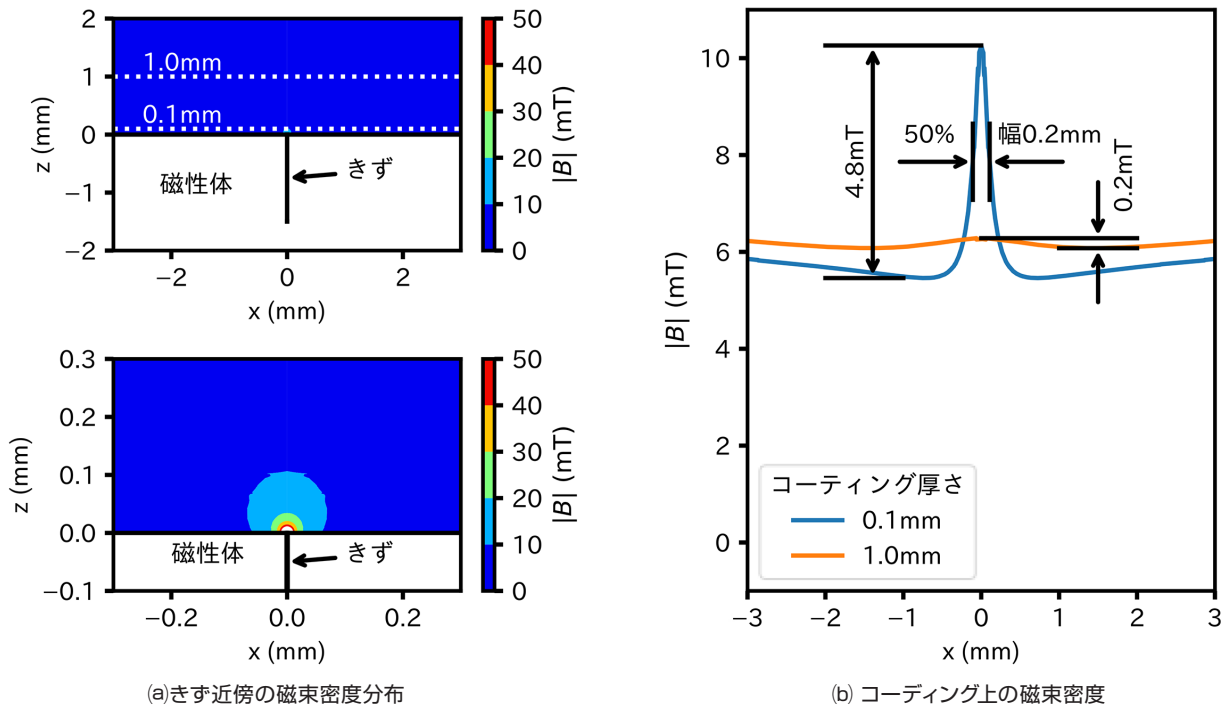


図5 MTにおけるコーティング厚さの影響 (シミュレーション, きず形状:長さ4mm, 深さ1.5mm, 幅2 μ m)

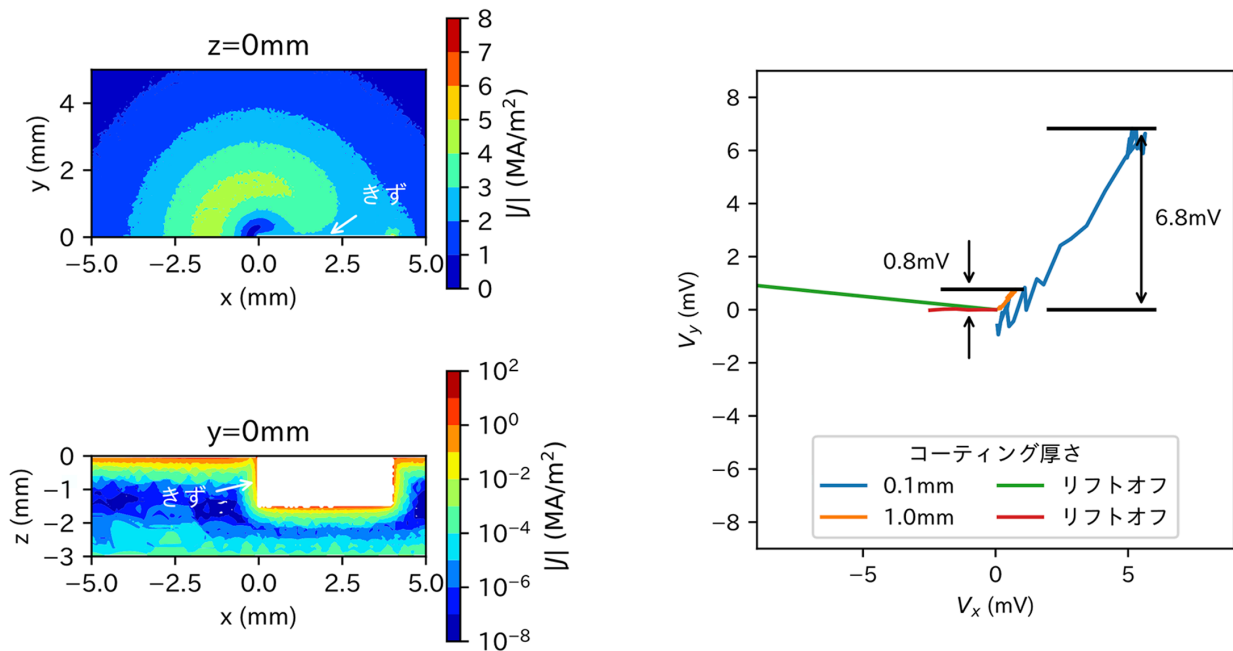
2.2. ECT

ECTは金属等の導電体の表面近傍のきずを検出することができる電磁誘導を用いた非破壊検査手法の一つである。図3(b)に示すように、コイルが発生させる一次磁界が金属表面に電磁誘導によって渦電流を生じさせる。一般にきずの材質は空気であり電流を流さない。したがってきずは渦電流の流れを阻害することから、渦電流による二次磁界はきずの影響を受ける。これはコイルのインピーダンスの変化として検出することができる。したがって、交流電流を印可したコイルで試験体表面を走査することにより、きずを検出することができる。MTの出力は磁粉模様であるため、磁粉の位置が安定するまでの時間が必要で検査結果を記録するために磁化器とは別にカメラ等を用意する必要があるが、ECTの出力は電気信号として得られることから、検査時間が短く、かつ検査結果の記録が容易である。またMTや漏洩磁束探傷は強磁性体にしか適用できないが、ECTはオーステナイト系ステンレスやアルミ、銅などの非磁性体に適用できる。むしろ、強磁性体における透磁率のムラを起源とするECT検出信号に生じる雑音(磁気雑音とも言う)が、非磁性体には存在しないため、ECTは非磁性体へ広く適用されている。

ECTの原理について、シミュレーションによって確認する。図4(b)にシミュレーションモデルを示す。ここではECTの基本的なプローブであるフェライトコアを用いた外径3mmのパンケーキ型のコイルを用いた。ECTのシミュレーション結果を図6に示す。図6(a)は試験体表面及び断面の渦電流密度を示している。x=0mm, y=0mmにコイルが位置しており、きずはX軸上のx=0mmからx=4mmに存在している。きず形状はMTのシミュレーションで用いたモデルと同じ、長さ

4mm、深さ1.5mm、幅 $2\mu\text{m}$ である。試験体にきずが存在しない場合、渦電流は試験体表面に渦のように円状に生じるが、図6(a)の上図に示す試験体表面の渦電流分布からは、きずによって渦電流が影響を受けていることが確認できる。また下図に示す試験体断面の渦電流分布からは、渦電流は試験体表面に生じていることが確認できる。きずに沿ってきず長さ及び深さ方向に渦電流が生じていることから、ECTの検出信号はきず長さ及び深さの影響を受けることが予想される。渦電流の絶対値は深さ方向に指数的に減少し、約1/3になる深さのことを「表皮深さ」と呼び、鋼材の場合100kHzでは数 μm ～十 μm である。表皮深さを越えて深さ1.5mmに渦電流が生じているのは表面開口きずであることが大きい。開口していない場合、つまり表皮深さより深部にきずが存在している場合は、渦電流がきずまで到達しないためECTではそのきずを検出することは困難であるし、開口きずであっても同様の理由できずが深くなるほどきず深さの定量的な評価は困難になる。したがって、ターゲットとするきずの深さ等によって表皮深さを決定することが重要である。

次にECTにおけるコーティング厚さの影響について説明する。図6(b)はECTの検出信号を示している。ECTの検出信号は一般に複素数として得られ、X軸を V_x 、Y軸を V_y として表現される複素平面で表すことができる。このことからECTの出力は複素平面の原点からの距離（振幅）と位相が評価値となる。プローブを試験体から垂直に遠ざけたときの検出信号の変化をリフトオフ信号と呼ぶ。図6(b)はコーティング厚さ1mmにおいてきずのない位置の検出信号を(0,0)とし、コーティング厚さ1mmからプローブを0.05mm垂直に遠ざけた時のリフトオフ信号（図6(b)赤線）がX軸のマイナス方向になるように位相を回転させて表示している。これにより、 V_y に着目することでコーティングの厚さの変化による検出信号（リフトオフ信号）ときず信号を分別して評価することができる。このように位相情報に着目してECTの溶接部への適用に関する規格としてISO 17643:2015 [12]が存在する。図6(b)から、コーティング厚さ0.1mmのときの検出信号 V_y の最大値は7.3mV、1.0mmのときは0.8mVであった。コーティング厚さによって出力（検出信号）が減少するのはMTと同様であるが、ECTは出力が電気信号であるため増幅することが可能である点がMTと異なる。ECT探傷器は位相敏感検波を用いたロックインアンプと同等の機能が実装されており、 μV レベルの電圧を検出することができるため、0.8mVを検出することは困難ではない。一方で、検出信号はコーティング厚さの影響を受けることから、コーティング厚さの測定値を用いてきず形状の推定値を補正する必要がある。コーティング厚さの変動の影響の軽減は、コーティング上からのECTを適用するための課題の一つと言える。例えば、積極的にECTの検出信号の V_x を活用しコーティング厚さを測定して、きず形状推定結果に対するリフトオフ変動の影響を軽減することが期待できる。



(a)きず近傍の電流密度分布
(コーティング厚さ1mm、きず中心位置2mm)

(b) 検出信号

図6 ECTにおけるコーティング厚さの影響 (シミュレーション、きず形状:長さ4mm、深さ1.5mm、幅 $2\mu\text{m}$)

3. きず形状と溶接ビードがECTの検出信号に与える影響

3.1. きず形状

2.2で説明したように、コイルで試験体表面を走査することできずを検出することができる。きず長さ及び深さがECTの検出信号に与える影響はJIS Z 2316-3:2014^[13]において、「一定応答の最小スリット長さ」及び「一定応答の最小スリット深さ」として検出可能な最小きずが定義されている。一方で、文献[13]のもとになったISO 15548-2:2013で定義されている、二枚の平板の側面を突き合わせることできず幅の影響を評価する手法は文献[13]に含まれていない。ISOのJIS化にあたり、この手法が疲労きずのようなきず幅が極めて小さいきずを模擬する手法として適切なものか議論された結果であると推測している。ECTでは人工きずの加工法として放電加工をよく用いる。これは機械加工によってきず周辺に応力が加わることで実際のきずより過大評価されるため、模擬きずとしては不適切であるためである。一方で、放電加工で実現可能なきず幅は、現時点では0.15~0.2mm程度といわれており、疲労きずのきず幅より明らかに広い。そこで、文献[3]及び[4]において、きず幅、長さ及び深さがECT検出信号に与える影響についてシミュレーションを用いて調査した結果を紹介する。シミュレーション条件は2.2と同じである。

図7(a)に長さ4.0mm、深さ1.5mm、幅2 μ m~1mmのきずの検出信号を示す。きず幅が0.5mm以下になると、きず幅による V_y への影響はほとんど見られなくなることが確認できる。これは、直径数mmのコイルでは V_y から0.5mmと2 μ mのきず幅を区別することが困難であることを示している。逆説的にきず幅0.5mmで疲労きずを模擬することは適切であることを示している。以降のすべての実験では、4章で用いる試験体の製作を容易にするため、きず幅を0.5mmに設定した。図7(b)は、深さ1.5mm、長さの異なるきずの検出信号を示している。きずの長さが大きいほど、 V_y 成分は大きくなる。コイルの直径より明らかに長い8mmのきず長さで検出信号の最大値が検出されたコイルの位置はきず中心であった。しかし、きず長さがそれより短い場合には、検出信号が最大値を検出したコイル位置はきず中心ではなかった。このように、きず長さの異なるきず信号は必ずしも類似しているわけではなく、検出信号はきず形状によって複雑な軌跡を描くことが確認された。図7(c)は、きず長さが4mmで、深さが異なるきずの検出信号を示している。きずの長さが同じでも、きずが深くなるほど V_y 成分が大きくなっている。したがって、 V_y 成分だけでは、きずの長さや深さを分離することはできない。これを解決するために、逆問題解析^[14]やニューラルネットワーク^[15]を用いたきず形状推定法が提案されている。これらはMTによる目視でのきず長さ評価とは異なり、複雑な後処理を必要とする。逆問題解析を用いた手法は、有限要素法のような順問題(きず形状からECT検出信号を得る)を解くシミュレーションと計測されたECT検出信号を比較し、その差が小さくなるように順問題で設定するきず形状を修正することを繰り返し、差が十分小さくなった時の順問題で設定したきず形状を推定値とするものである。図7のきず長さ4mmの結果を得るのに必要な時間はおおよそ1.5日であった。逆問題解析できず形状を推定するにはこれを複数回繰り返す必要があり、相当な時間を必要とする。ニューラルネットワークを用いた手法は、計測した教師きず形状のECT検出信号の特徴(振幅、位相、二次元走査画像等)を複数入力(多いほど良い)、そのきず形状(長さ、深さ等)を出力とするニューラルネットワークを事前に作成し(学習)、被評価きずのECT検出信号の特徴をそのニューラルネットワークに入力し、得られた出力を推定値とするものである。こちらの推定値は瞬時に得られるが、多くの場合、電卓で計算するには困難な程度の計算量でありコンピュータが必須である。タンクの所有者がこのような複雑な後処理を許容するかどうかはコストに依存する。これらのきず形状評価手法は原子力プラントにおける応力腐食割れ等による設備の余寿命評価に活用されているが、溶接線検査においてこれを活用しているタンクはないと思われる。複雑な後処理を必要としないきず形状評価手法の実現は、MTをECTで置き換える上での課題の一つと言える。この課題に対する提案は4章で述べる。

3.2. 溶接ビード

溶接を想定した試験面の形状がECTの検出信号に与える影響について考察する。ここでは問題を簡単にするため、溶接ビードの断面を円弧で模擬した図8(a)のモデルを用いてシミュレーションを行った。ビード幅は10mm、高さは2mmとし、きずはビード中央に溶接線方向に配置した。きず形状は長さ4mm、深さ1.5mm、幅0.5mmである。

図8(b)は平板とビード部に加工したきずの検出信号を示している。平板の無欠陥部に対して溶接部(ビード)の無欠陥部では、0.6mVの検出信号の変化が見られた。ビードによる試験面の形状が検出信号に与える影響は、きず信号(0.8mV)

の75%程度であった。これは、溶接部の凹凸形状が検出信号に影響を与えることを意味する。文献 [3] の調査において既存の機器の性能調査を行ったが、溶接線の影響は無視できないことが確認された。特に溶接止端部の溶接線方向のきずは、コーティングが厚くなりやすいことから溶接線の検査に最適化された機器の必要性を示唆している。シミュレーションでは考慮していないが、溶接棒と母材、及び熱影響部の磁気特性は異なる事が想定される。試験面の形状の影響、及び磁気雑音の軽減は、MTをECTで置き換える上での課題の一つと言える。この影響を軽減するため、プラスポイントECTプローブや一様渦電流プローブが知られている [16]。

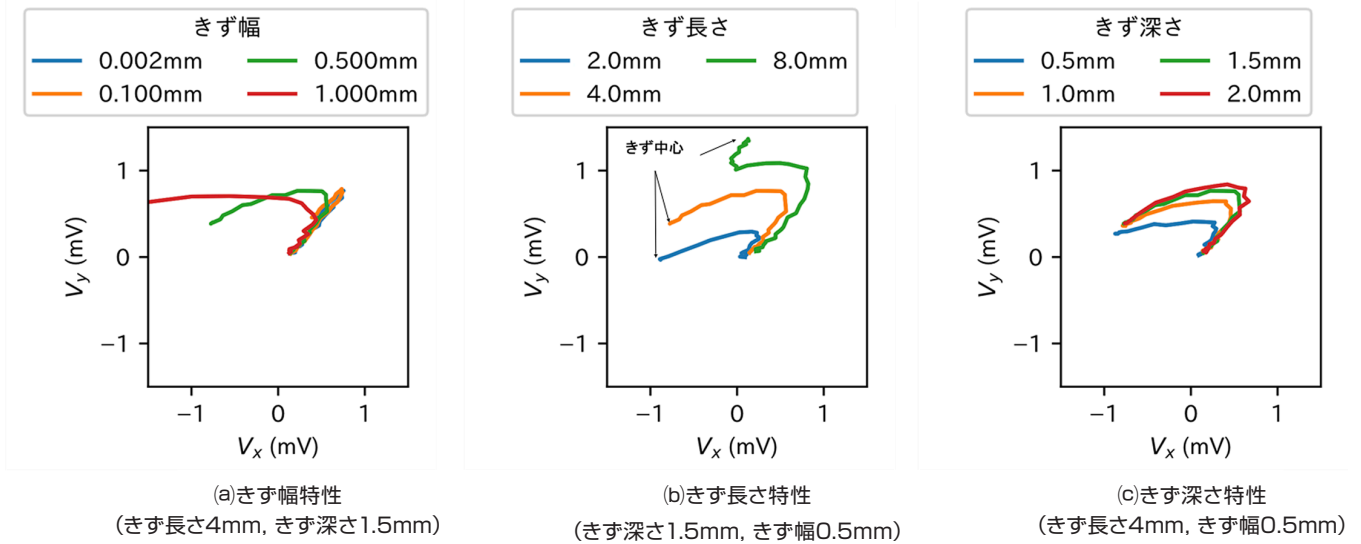


図7 ECTにおけるきず形状の影響 (シミュレーション) [4]

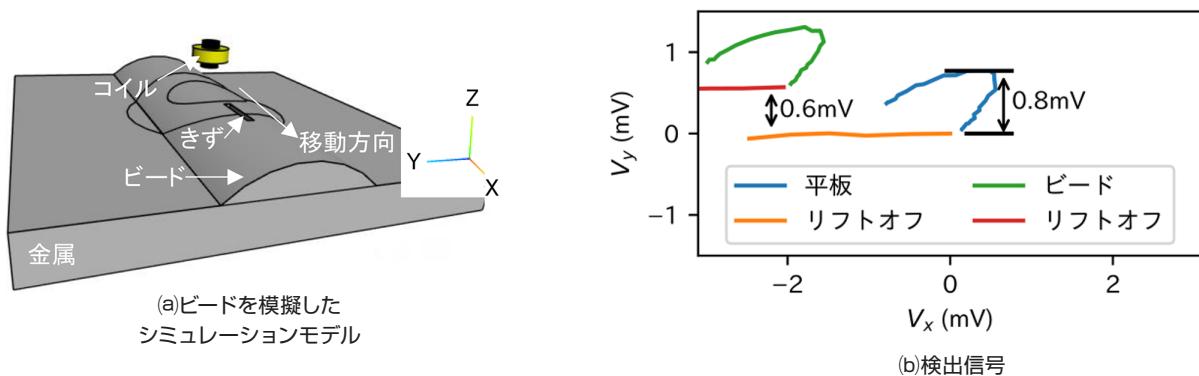


図8 ECTにおけるビードの影響 (シミュレーション, きず形状:長さ4mm, 深さ1.5mm, 幅 0.5mm)

4. きず長さ・深さ推定

本章では、文献 [4] において発表した複雑な後処理を必要としないきず形状評価手法について説明する。本手法の特徴は、ECT検出信号の最大値と文献 [13] で定義された「応答幅」を用いて、きず長さや深さを評価できることである。提案手法の適用例を放電加工で製作した矩形きずに応用した。提案手法では複数の基準きずが必要であり、ここでは幅 0.5mm、長さ3mm、4mm、5mm、深さ1mm、1.5mm、2mmの九つの基準きずを用い、補修判定きず (最大許容きず) の形状は幅0.5mm、長さ4mm、深さ1.5mmとした。表2と図9に計測条件と計測装置を示す。ECTプローブの形状は図2に示すものと同様である。実験はXYZテーブルを用いてプローブを移動させながら試験体表面を走査することで行った。プローブは、データ収集システム (DAQ) 内の発振器によって駆動された。長さ4mm、深さ1.5mmのきずは、プローブのコイルに約0.03%のインピーダンス変化をもたらした。このわずかな変化をブリッジ回路で取り出し、120kHz

の帯域幅の40dBのプリアンプで増幅し、DAQの100MS/sのアナログ・デジタル変換器で記録した。一般に、きずによるプローブのインピーダンス変化はロックインアンプを用いて測定される。ここでは、コンピュータ上にソフトウェアで実装したロックインアンプを用いてインピーダンスの変化を測定した。

表2 計測条件

項目	詳細
ECTプローブ	ACTUNI AT-129
DAQ	Digilent Analog Discovery 3
プリアンプ	Analog Devices AD620, 40 dB
励磁電圧	2 Vpp, 100 kHz
試験体材質	SM400A
走査ピッチ	0.1 mm
リフトオフ (コーティング厚さ)	1 mm

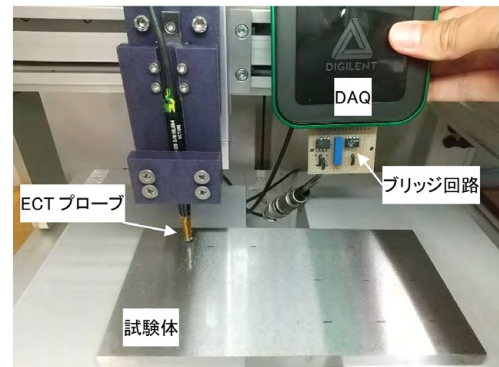


図9 計測装置

図10は、補修判定きずの計測結果を示している。図10(a)は V_y 成分の二次元スキャン結果を示し、ECTにおけるきず信号は、きず近傍に正負両方のピークが連続する複雑な特徴を持っていることが確認できる。図10(b)と(c)は、図10(a)のきず直上の検出信号を示している。これらの数値は、シミュレーションから得られた図7に示された結果と傾向が一致しており、計算結果の信憑性を立証している。ここで、応答幅の定義について説明する。応答幅とは、走査方向の長さを横軸、検出信号の振幅を縦軸とした場合の最大振幅の-6dBの間の長さである。図10(c)の両矢印で示された、きず信号の最大値の-6dBの位置間の距離が応答幅である。

図11は、提案手法によるきず形状の推定過程と推定結果を示している。図11(a)は九つの基準きずの最大値を示している。シミュレーションで得られた図7で示したように、計測実験においても最大値はきず長さとおよび深さの両方の影響を受けていることが確認できた。図11(b)は基準きずの応答幅を示す。応答幅は最大値で正規化されているため、きず深さの影響は小さいことが確認できる。図11(c)は、図11(a)と(b)から作成した最大値-応答幅平面上の基準きずと被評価きずの計測値を示している。基準きず間を線形補間して被評価きず(長さ4.5mm、深さ1.7mm)のきず形状を推定したところ、結果は長さ4.4mm、深さ1.6mmであった。さらに、別の被評価きずでも満足のいく推定結果が得られた。真の値と推定値の差は、基準きずのデータセットが多いほど小さくなることが予想される。この手法の計算量は、FEMを必要とする逆問題解析よりは少ない。しかし、線形補間という後処理を必要とする提案手法は、計算を必要としないMTよりも推定が単純ではなく、ニューラルネットワークを用いた手法に対して明確な優位性を示せていない。一方、きず形状が長さ4mm、深さ

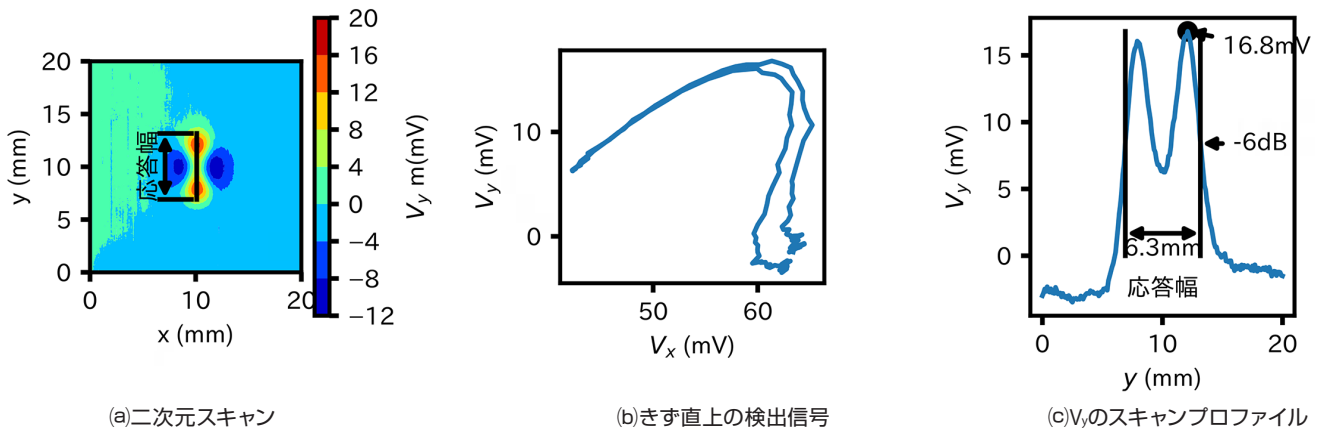


図10 計測結果(きず形状:長さ4mm, 深さ1.5mm, 幅0.5mm) [4]

1.5mmを超える場合に補修が必要と仮定すると、図11(c)の斜線で囲まれた非補修領域内に被評価きずのプロットがあるかどうかで、補修の必要性を迅速に判断することができる。つまり、逆問題解析やニューラルネットワークを用いた複雑な後処理を必要としないきず形状評価は可能である。しかし、矩形きずのような単純な条件で検証された本手法が、疲労きずのような複雑な断面形状を考慮可能な逆問題解析を用いた手法に取って代わることを示すものではない点には注意が必要である。

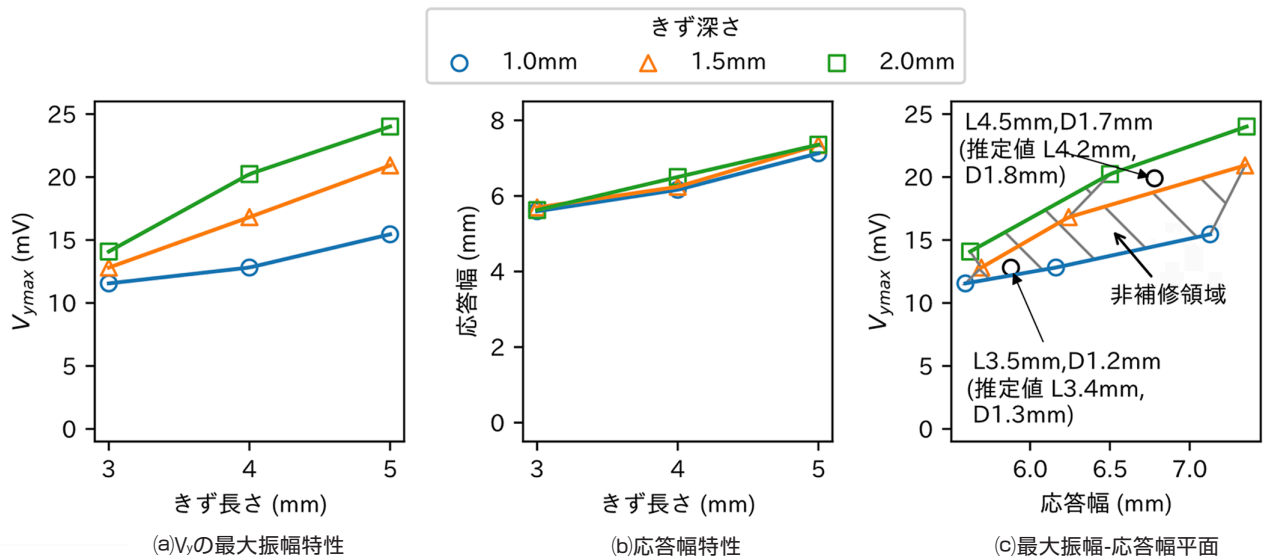


図11 きず長さ及び深さの推定結果^[4]

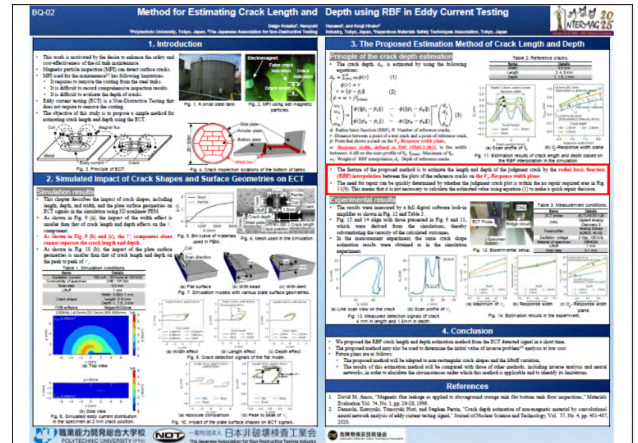
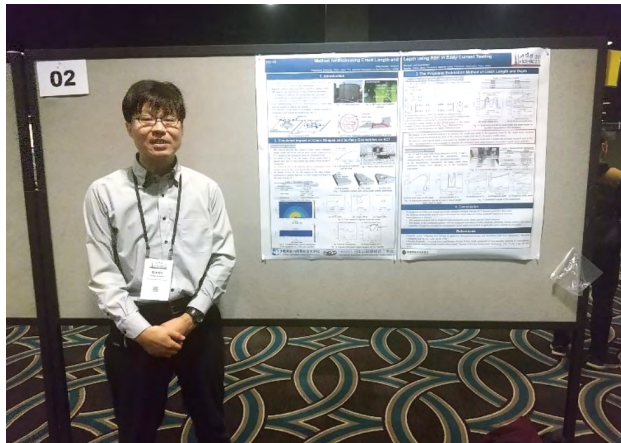
5. まとめ

ECTにおけるコーティング厚さの影響、及びきず形状の推定を、有限要素法を用いたシミュレーション及び計測実験により定量的に説明した。MTと異なり、ECTはコーティング上からの適用、及びきず長さ及び深さを評価できる可能性を示した。一方で、複雑な後処理を必要としないきず形状評価手法の実現は、MTをECTで置き換える上での課題の一つと言える。この課題については、ECTの検出信号の最大振幅とJISで定義された応答幅を用いるきず形状推定法を提案し、計測実験でその有用性を示した。提案手法は、逆問題解析の初期値決定にも低コストで利用できる可能性がある。一方、今回の実験では、リフトオフのばらつきや矩形以外のきず形状などの要因は考慮されていない。この方法を実用化するためには、これらの要因の影響を緩和し、考慮するための方法論が必要である。また、シミュレーションから溶接線の影響は無視できないことが確認された。溶接線の検査に最適化された機器が望まれる。試験面の形状の影響、及び磁気雑音の軽減は、MTをECTで置き換える上での課題の一つと言える。

以上のようにコーティング上からの溶接線検査において、ECTは決して万能ではなく、本稿で示したコーティング厚さ及び溶接形状の影響は避けられない課題である。一方で、これらの課題を解決できる可能性のある技術について文献を交えて説明した。検査手法をMTからECTに置き換えることで得られるメリット（きず深さの評価、廃棄物の軽減、及び検査期間の短縮）は大きく、タンクの安全性を棄損することなく、タンク所有者、検査技術者、及び監督省庁が協力してこれらの課題を乗り越えて、我が国のエネルギー安保に貢献できることを期待して本稿の結びとする。

5. 謝辞

本稿で示した知見の一部は、危険物保安技術協会と日本非破壊検査工業会が行った「渦電流試験によるコーティング上からの溶接線検査の適用に向けた調査研究」^[3]で得られたものである。また、本内容の一部は、以下の写真に示すように世界最大規模の磁気系学会の一つであるThe 2025 Joint MMM-Intermag Conferenceにおいて発表^[4]した。危険物保安技術協会の平野様、日本非破壊工業会の塙様、日本非破壊工業会ETワーキンググループ各位のご尽力に深く感謝申し上げます。



参考文献

[1] 消防庁, “消防危第93号 特定屋外貯蔵タンクの内部点検等の検査方法に関する運用について”, 2000/8/24.

[2] 危険物保安技術協会, “コーティング上からの溶接線検査に関わる検討委員会報告書”,
https://www.khk-syoubou.or.jp/pdf/guide/research/17_2022-03-phased%20array.pdf, 2022/3, (閲覧日2025/2/19).

[3] 危険物保安技術協会, “(令和5年度)渦電流試験によるコーティング上からの溶接線検査の適用に向けた調査研究報告書”,
https://www.khk-syoubou.or.jp/pdf/guide/research/20_2024-03-et.pdf, (閲覧日2025/2/19).

[4] Daigo Kosaka, Haruyuki Hanawa and Kouji Hirano, "Method for Estimating Crack Length and Depth using Radial Basis," The 2025 Joint MMM-Intermag Conference, in press.

[5] F.Bachinger, U.Langer, and J.Schöberl, "Efficient solvers for nonlinear time-periodic eddy current problems," Comput. Visual Sci., Vol. 9, pp. 197-207, 2000.

[6] REININGER, Alexander, et al, Efficient Simulation Model of a Circular Piezoelectric Actuator with TDNNS Elements in Netgen/NGSolve. In: ACTUATOR; International Conference and Exhibition on New Actuator Systems and Applications 2021. VDE. pp. 1-3, 2021.

[7] M. Šimić, D. Ambruš and V. Bilas, "Inversion-Based Magnetic Polarizability Tensor Measurement from Time-Domain EMI Data," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 72, pp. 1-11, 2023.

[8] 福岡克弘, 川越一平, “磁粉探傷試験におけるき裂の定量的評価に向けた付着磁粉の動画像計測と漏洩磁束密度の評価”, 日本AEM学会誌, Vol. 22, No. 2, pp. 176-182, 2014.

[9] 橋本光男, 小坂大吾, “磁粉探傷試験における電磁現象”, 非破壊検査, Vol. 71, No. 11, pp. 490-495, 2023.

[10] JIS Z 2319:2018 漏えい(洩)磁束探傷試験方法

[11] 小倉夏樹, 佐藤康元, 北山綱次, “MIセンサを利用した小型漏洩磁束探傷プローブの開発”, 非破壊検査, Vol. 63, No. 2, pp. 89-95, 2014.

[12] ISO 17643:2015 Non-destructive testing of welds - Eddy current testing of welds by complex-plane analysis.

[13] JIS Z 2316-3:2014 非破壊試験-渦電流試験- 第3部:プローブの特性及び検証

[14] Zhenmao Chen, Ladislav Janousek, Noritaka Yusa and Kenzo Miya, "A nondestructive strategy for the distinction of natural fatigue and stress corrosion cracks based on signals from eddy current testing," The Journal of Pressure Vessel Technology, pp. 719-728, 2007.

[15] Demachi, Kazuyuki, Tomoyuki Hori, and Stephen Perrin, "Crack depth estimation of non-magnetic material by convolutional neural network analysis of eddy current testing signal," Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 57, No. 4, pp. 401-407, 2020.

[16] Gao, P., Wang, C., Li, Y., and Cong, Z, "Electromagnetic and eddy current NDT in weld inspection: A review," Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, Vol. 57, No. 6, pp. 337-345, 2015.