

石油タンク底板溶接部のコーティング上からの 非破壊検査技術の検討

藤原 貢 * 戸部 訓子 ** 荒川 敬弘 ***
Fujiwara Mitsugu *Tobe Satoko* *Arakawa Takahiro*
 土田 智彦 **** 岩田 克己 ****
Tsuchida Tomohiko *Iwata Katsuki*

当社は、平成 21 年度に独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構が公募した「平成 21 年度タンク開放検査の合理化に関する研究（コーティング上からの溶接線検査）」に応募し、タンク底板溶接部のコーティング上からの超音波探傷試験及び一様渦流プローブを用いた渦流探傷試験の検討を開始し、長さ 4mm を超えるきずを十分に検出できることを確認した。

キーワード：タンク底板溶接部、コーティング、クリーピング、フェーズドアレー、一様渦流プローブ

1. はじめに

昭和 48 年 10 月に勃発した第四次中東戦争の影響を受け、我が国も第一次オイルショックに見舞われ、総需要抑制策が取られた結果国内消費が低迷し、大型公共事業も凍結され、素材産業等の構造不況業種が縮小された。トイレットペーパーや洗剤等の原油価格とは直接関係のない物資の買占騒動などの社会現象も生じ、国民生活が大きな影響を受けた。このことは、輸入に依存している石油の安定供給が必要不可欠であることを再認識させ、これを契機に我が国でも石油備蓄に本格的に取り組むことになった。民間備蓄事業は昭和 47 年度に開始され、国家備蓄事業は昭和 53 年より実施されており、2010 年 2 月現在では、国家備

蓄として 114 日分、民間備蓄と併せて 200 日分の国内消費量の石油が備蓄されている⁽¹⁾。

一方、これらの大量の石油を備蓄するためには容器が必要であり、大型の石油タンクが、洋上タンク方式や地下岩盤タンク方式を含めて 10 基地に多数建造されている。これらの地上タンクは直径 80m、重油貯蔵量 10 万 kl を超える巨大建造物であり、安全・安心に対する細心の対策が施されている。例えば、万一の石油流出に対する防護壁の設置は当然ながら、長期間の備蓄期間におけるタンク腐食に対する防護のために、タンク底板表面には全面にわたって分厚くて頑丈なコーティングが施され、また、定期的な開放検査が義務付けられ、わずかな経年損傷に対しても十分な対応ができる体制が整えられている。

* 検査事業部 技術部 NDEグループ 部長
 ** 検査事業部 技術部 NDEグループ
 *** フェロー 工学博士 横浜国立大学安心・安全の科学研究教育センター客員教授
 **** (独) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 石油備蓄部

しかしながら、タンク底板の溶接部の検査においては、分厚く頑丈に施されたコーティングを除去して溶接部表面を顕在化させた後に磁粉探傷試験が行われている。これは、国家備蓄タンクの建造が始まった頃の検査技術としては、部分的には厚さ 1mm を超える可能性のある分厚いコーティングの上から高精度に検査する方法が確立していなかったためである。検査技術も著しい進歩を遂げた今日において、検査の合理化や、コーティングの除去並びに再塗装のための環境負荷低減の目的で、コーティングを除去することなくコーティング上からの信頼性の高い検査技術が強く望まれてきている。

この目的に対して、超音波探傷試験並びに渦流探傷試験についてコーティング上からの検査技術開発に取り組み、超音波探傷試験ではフェーズドアレー探傷を用いることにより、渦流探傷試験では一様渦流プローブを用いた渦流探傷試験を用いることにより、微小きずをコーティング上から十分に検出できることを確認している。

2. プロジェクトの概要

平成 21 年度に委託を受けた研究では、コーティング上からのきずを検出する非破壊検査方法を検討し、また、人工ノッチ及び自然欠陥を有する溶接部標準試験片の製作及び突合せ溶接線検査システムの概念設計を行った。非破壊検査方法の検討では、平成 12 年消防庁通達・消防危 93 号の技術的根拠になった検討委員会である、平成 10 年度、平成 11 年度「新技術を活用した石油タンクの検査・判定方法に関する研究委員会」で推奨されている、クリーピング波を用いた超音波探傷方法と渦流探傷法及び交流電磁場探傷試験法で確認されたような試験片表面に平行で一様な電流を誘導する一様渦流プローブを用いた渦流探傷試験方法を検討し、さらに近年注目されているフェーズドア

レー探傷法を用いた超音波探傷試験方法も検討している。

コーティング厚さがきずの検出性に及ぼす影響と最適検査手法を検討したうえで、底板突合せ溶接線およびアニュラ板と側板との隅肉溶接線を模擬した試験片の溶接部に施した各種人工ノッチの検出性確認試験を行い、消防危 93 号に示されている補修を行わなくても差し支えない長さ 4mm を超えるきずの検出性を確認している。

突合せ溶接線検査システムの概念設計では、実際の国家備蓄タンクの底部溶接線をコーティング上より検査するための検査システムに要求される項目、並びに効率よく確実に検査を行うための溶接線倣いシステムなどに関して調査し、検査システムの“概念設計”を行った。

なお、引き続き公募された平成 22 年度の研究にも応募して委託を受けた研究開発において、人工ノッチの検出性に続き自然欠陥の検出性の確認を行うとともに、突合せ溶接線検査システムを試作し、実機タンクに適用可能な検査システムの構築を目指して開発を進めている。

3. コーティングがきずの検出性に及ぼす影響の検討

コーティングがきずの検出性に及ぼす影響としては、コーティングによる伝達損失の影響の他にも、コーティング厚さの不規則さに伴う影響が考えられる。溶接変形の生じている部分や試験片表面に窪みのある部分に、タンク底板に使用されているような厚いコーティングを施した場合に、コーティングの表裏面に傾斜が生じることが考えられ、これによって超音波の試験片への入射角が変化することが予測される。特にクリーピング探触子は縦波臨界角の特殊な幾何条件で製作されており、クリーピング波の発生に影響を及ぼすことも懸念された。

図1は、表裏面に種々の傾斜角を持たせたアクリル板を用いて、コーティングの不規則さを模擬して行った試験方法と結果を示している。試験はクリーピング探触子（5K15 × 7LAD90 - N）を送信用に用い、試験片の端面（図では上面）に受信用の垂直探触子（先端を1mm φにした遅延材付きの集束探触子：PPIPS-20-3-P-20R）を用いて端面上を直線走査して最大エコー高さが得られる位置とそのときの超音波伝搬時間を測定した。

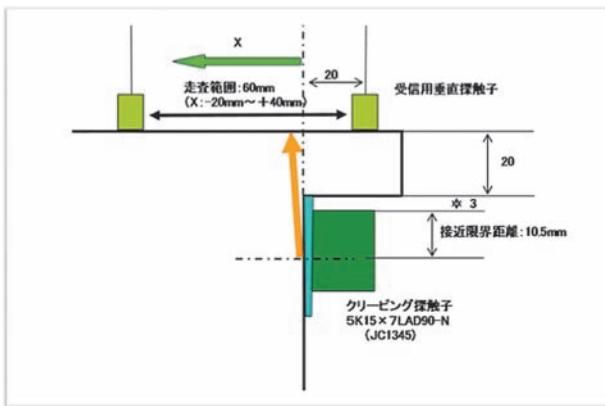
アクリル板の傾斜角が-3度から+3度弱（探触子が前下がりとなる角度を+で表示）の範囲は、クリーピング探触子を設置した面と同じレベルの位置の0mm近傍で最大エコー高さが示されており、クリーピング波が伝搬している領域と考えられる。一方、アクリル板の傾斜角が-3度以下になると、むしろ横波斜角探傷の傾向が強くなり、3度を超えると縦波斜角探傷の傾向が大きくなることわかる。

コーティングを模擬した表裏面に傾斜角を持つアクリル板を介して、長さ4mm（深さ1.5mm）の放電加工ノッチのエコー高さを評価した結果でも、試験片への入射角が2度小さくなる傾斜角2度で最もエコー高さとSN比が大きくなり、アク

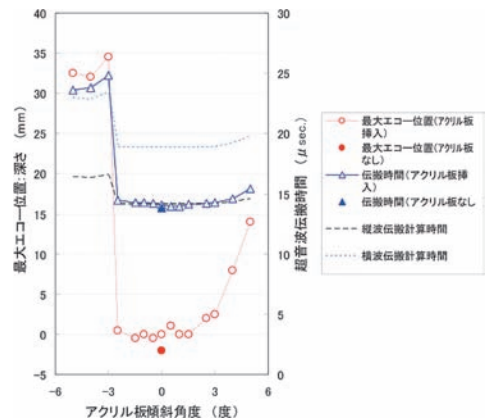
リル板の傾斜角が変化すると急激にエコー高さは低下してSN比も低下することが確認され、±1.5度変化するとノッチの検出性にも大きな影響を及ぼすことがわかった。

一方、超音波の屈折角に影響するアクリルの縦波音速2720m/sec.は、3社の塗材メーカーのビニルエステル樹脂ガラスフレイクコーティングを用いて実測したコーティングの縦波音速2370～2560m/sec.と大きな違いがないことを確認している。これより、くぼみや溶接変形などの生じた部分に厚いコーティングを施した場合に、コーティングの表裏面に傾斜角が生じて、クリーピング波の発生に重大な影響が生じ、きずの検出性に影響するといえる。一方、フェーズドアレー探傷で超音波ビームの屈折角を順次変化させるセクタスキャンを行えば、超音波ビームの振り角の範囲を調整することによりコーティング厚さの不規則の影響を補うことができるといえる。

一方、厚いコーティング部を超音波が伝達するので超音波の損失が生じることも予測され、予めこの損失量を把握し、探傷においてはこの損失量を考慮した探傷が必要である。この目的で、図2に示すコーティングの厚みを種々変えた試験片を



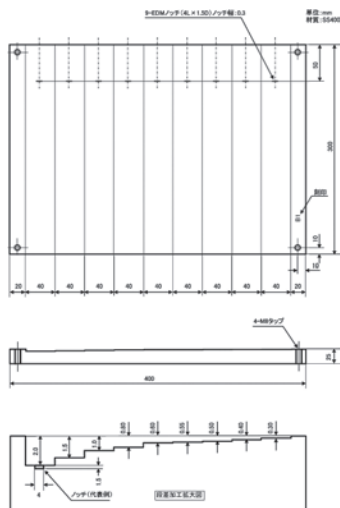
(a) 試験方法



(b) 試験結果

図1 コーティングの不規則さを模擬した傾斜を持つアクリル板を介したクリーピング探傷における伝搬経路の検討

作製した。予め段差を付けた試験片を加工し、表面がほぼ平らなコーティング面とすることによりコーティングの厚みを約 $300\ \mu\text{m}$ から約 2mm までの変化を持たせている。また、各コーティング厚さの異なる部分に長さ 4mm 、深さ 1.5mm の同形状の放電加工ノッチを加工した。コーティングの種類は、国家備蓄タンクに一般に使用されているビニルエステル樹脂ガラスフレックとした。なお、メーカーのそれぞれ異なる塗材を用いて3体の試験片を製作した。



(a) コーティングを施す前の試験片形状

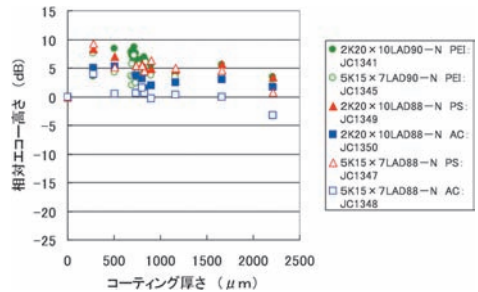


(b) コーティングを施した試験片の外観

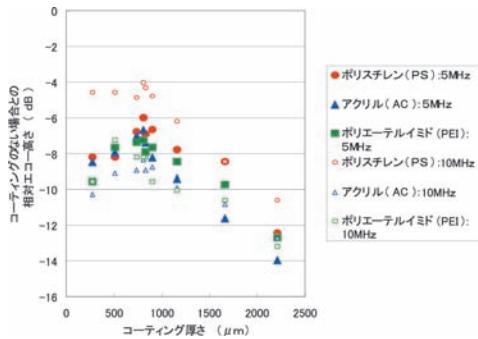
図2 厚さの異なるコーティングを施した試験片の概要

図3は、各コーティング厚さのコーティング下に設けた同一形状のノッチ（長さ 4mm 、深さ

1.5mm ）に対して、クリーピング探傷とセクタスキャンを用いたフェーズドアレー探傷を行い、最大エコー高さを比較した結果を示している。コーティングを超音波が伝達するときの損失量は、探触子のくさびの音響インピーダンスに影響を受けることが予測される。このために、音響インピーダンスの異なるくさび素材のアクリル樹脂（AC: 音響インピーダンス $3.21 \times 10^6\text{kg/m}^2\text{s}$ ）、ポリエーテルイミド樹脂（PEI: 音響インピーダンス $3.12 \times 10^6\text{kg/m}^2\text{s}$ ）とポリスチレン樹脂（PS: 音響インピーダンス $2.46 \times 10^6\text{kg/m}^2\text{s}$ ）を用いて比較している。



(a) クリーピング探傷



(b) フェーズドアレー探傷

図3 コーティング上からのクリーピング探傷及びフェーズドアレー探傷によるノッチ検出性に及ぼすコーティング厚さの影響

クリーピング探傷では、縦波臨界角で作製したクリーピング探触子の他に、コーティングを模擬した傾斜を持つアクリル板の試験で、屈折角が2

度小さくなるアクリル板でエコー高さが増大したことより縦波屈折角 88 度で製作したクリーピング探触子を用いて試験している。公称周波数は 2MHz と 5MHz を用いた。フェーズドアレー探傷では、公称屈折角 45 度のくさびを用いて ± 10 度のセクタスキャン（横波屈折角 35 度～ 55 度）を行い、同時にフォーカシングを行った。

クリーピング探傷では、コーティングのないコーティング厚さ 0mm のときのエコー高さに比べて、コーティングのある面でエコー高さが低下がなく、むしろエコー高さが改善する傾向も見られ、伝達損失にコーティングはほとんど影響を及ぼさないことがわかる。一方、フェーズドアレー探傷では、コーティングが厚くなるにつれてエコー高さが低下し、感度補正が必要なことがわかる。また、くさびの素材にポリスチレン樹脂（PS）を用いる方が、クリーピング探傷及びフェーズドアレー探傷の場合共にノッチのエコー高さは高く安定している。ポリスチレン樹脂（PS）をくさびに用いたフェーズドアレー探傷では、予め 10dB の感度補正を行うことで、コーティング厚さが 2mm であっても、きずを過小評価することなく探傷できることがわかる。

図 4 は、フェーズドアレー探傷を行ったときの放電加工ノッチの探傷画像を各コーティング厚さで比較した結果を示している。図中には電磁膜厚計で計測したコーティング厚さを示しているが、コーティング厚さが約 1mm 以下の場合には探傷画像に大きな変化は見られずに安定してノッチを検出しており、コーティング厚さ 2mm においてもなお十分な SN 比でノッチを検出できるのがわかる。

一様渦流プローブを用いた渦流探傷法での検討結果の例を図 5 に示している。長さ 4mm で各種深さの放電加工ノッチにシートをかぶせてコーティングを模擬して試験した結果である。交流磁

場検査装置を用いた A プローブでは、深さ 0.5mm のノッチが疑似コーティング厚さ約 500 μm 以上で、また深さ 1.0mm のノッチでは疑似コーティング厚さ約 1500 μm 以上で検出が困難になったが、渦流探傷装置を用いた K プローブ、I プローブでは、厚さ約 2mm の疑似コーティング厚さまですべてのノッチの検出が可能であった。

また、各種コーティング厚さを持つ試験片での結果では、深さ 1.5mm のノッチの検出はすべてのプローブで可能ではあったが、試験データの再現性の観点で K プローブ、I プローブが優れていると考えられた。これより本研究目的に対しては、K プローブ、I プローブの方が適していると考えられた。

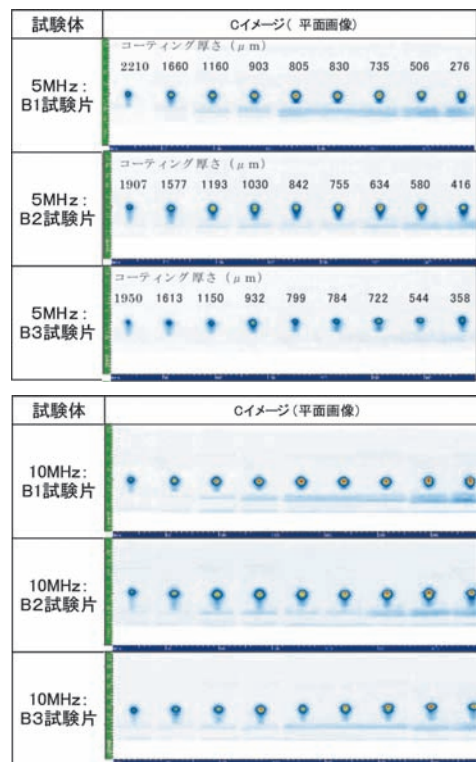
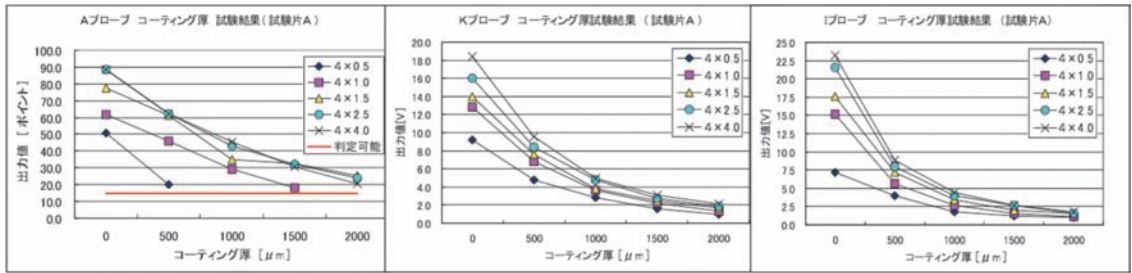


図 4 各種コーティング厚さにおけるノッチのフェーズドアレー探傷画像の比較（くさび素材：ポリスチレン樹脂、公称屈折角 45 度くさび）



(a) Aプローブ (交流磁場測定装置) (b) Kプローブ (渦流探傷装置) (c) Iプローブ (渦流探傷装置)

図5 コーティングを模擬して人工ノッチにシートを被せたときのノッチ検出性に及ぼす疑似コーティング厚さの影響

4. 人工ノッチ付溶接試験片での検出性検証試験

突合せ溶接試験片及び隅肉溶接試験片ともに3体製作し、1体には600 μm 厚さのコーティングを、また1体には1000 μm 厚さのコーティングを施している。また、残りの1体には止端部近傍にグラインダーでくぼみを設けた後に600 μm のコーティングを行っている。

突合せ溶接試験片は厚さ12mmの平板を手溶接で突合せ溶接し、溶接止端部及び溶接金属内の溶接幅の中央位置及び1/3の位置に長さで3mmから6mm、深さで1mmから2mmの放電加工ノッチを1体につき11ノッチを施している。隅肉溶接試験片では板厚22mmのアニュラ板と板厚36mmの側板を隅肉溶接し、アニュラ板側止端部、側板側止端部及び溶接幅の1/3及び2/3に当たる位置に、長さ3mmから6mm、長さで1mmから2mmのノッチを1体につき12ノッチ作製している。

クリーピング探傷では、探触子先端を止端部に接する位置で左右走査する場合と、止端部から5mm離れた位置で左右走査する場合を試験している。また、探触子には縦波屈折角で製作したクリーピング探触子(5K15 \times 7LAD90-N)の他に、コーティング上からは縦波屈折角88度の方の検出性が優れているとの結果より、縦波屈折角88

度で製作したクリーピング探触子(5K15 \times 7LAD88-N)も試験に用いている。

溶接止端部に設けたノッチに対しては、浅いノッチの一部で検出の困難なものも見られたものの概ね良好であったが、溶接金属内に設けたノッチの検出性は悪くなることが確認された。ノッチまでの距離が長くなることによるクリーピング波の減衰と、余盛内にノッチがあるため探傷面からノッチの位置が高くなり、浅いノッチに対してはクリーピング波が到達しにくくなることが要因として考えられた。

一方、屈折角35度～55度のセクタスキャンによるフェーズドアレー探傷(5MHz:フォーカシングを併用)によれば、隅肉溶接試験片の溶接金属内に設けた長さ3mm、深さ1mmのノッチに対して検出困難となったが、これを除いてすべての場合にノッチを検出できることを確認している。また、手溶接で製作した突合せ溶接試験片で、ノッチ位置が溶接ビードの影になり、指示が小さくなる場合も、溶接部をまたいで反対側から探傷することにより明確な指示の得られることも確認している。図6に突合せ溶接試験片のフェーズドアレー探傷の探傷画像の例を示している。

一方、Kプローブ及びIプローブを用いた一様渦流プローブを用いた渦流探傷法でも、長さ3mm、深さ1mmのノッチで指示波形は確認でき

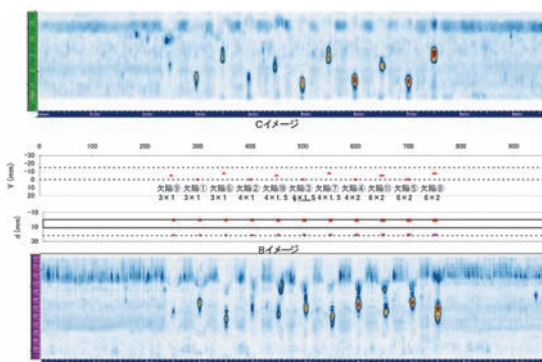


図6 突合せ溶接試験体のフェーズドアレー探傷結果の例

るものの出力信号が低く判定が困難となるものも見られたが、特に本研究の目的である長さ4mmを超える人工ノッチに対しては十分に検出が可能であることを確認できている。

5. まとめ

本研究において、国家備蓄タンク底板に用いられているコーティングがきずの検出性に及ぼす影響を検討するとともに、フェーズドアレー探傷を用いた超音波探傷法及び一様渦流プローブを用いた渦流探傷法の両者ともに本研究の目的である長さ4.0mmを超えるきずを十分に検出できる手法を

確立できた。今後は引き続き自然欠陥に対するコーティング上からの検出性の確認を続け、併せて突合せ溶接用検査装置を試作してコーティング上からの“きず”の検査システムの試作を進めている。

謝 辞

本研究は平成21年度に独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構殿からの委託を受けて実施したものであり、研究の推進にあたり、関根和喜先生を主査とする研究プロジェクト評価委員会を設けて研究の評価とご指導を賜った。関根和喜先生並びに各委員の山田實先生、阪上隆英先生、河野和間先生、石井正義先生、小島隆先生に深い謝意を表します。また、研究プロジェクト推進会議委員の(株)カシワバラ・コーポレーション 木村保久氏、ジャパンプローブ(株) 高橋修氏にも貴重な助言を賜っており、感謝します。

参考資料

- 1) http://www.jogmec.go.jp/jogmec_activities/stockpiling_oil/ 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構ホームページ (2010年8月)

検査事業部 技術部 NDEグループ 部長

藤原 貢

TEL. 045-791-3523

FAX. 045-791-3547

フェロー 工学博士

横浜国立大学安心・安全の科学研究教育センター客員教授

荒川 敬弘

TEL. 045-791-3522

FAX. 045-791-3547

(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構

石油備蓄部

土田 智彦

TEL. 044-520-9068

FAX. 044-520-8965

検査事業部 技術部 NDEグループ

戸部 訓子

TEL. 045-791-3523

FAX. 045-791-3547

(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構

石油備蓄部

岩田 克己

TEL. 044-520-9304

FAX. 044-520-8966