

溶接・非破壊検査技術センター

技術レビュー

Vol.16 2020

研究報告

欠陥検出評価技術に関する研究

溶接継手の健全性確保に関する研究

技術基準・規格化関連調査

研究トピックス

遠隔での溶接部外観検査を想定した
計測技術の調査

JAPEIC
JAPAN POWER ENGINEERING AND INSPECTION CORPORATION

一般財団法人 発電設備技術検査協会

巻頭言	コロナ禍が加速するデータ駆動型NDEへの期待 2 東北大学特任教授 高木 敏行
ご挨拶 4 理事長 濱谷 正忠
トピックス	NDEシンポジウム2019を開催しました 5
研究報告	欠陥検出評価技術に関する研究
	周波数応答解析による二層積層部材の厚さ評価 6 溶接・非破壊検査技術センター 程 衛英
	POD分析における信頼限界の計算方法 13 溶接・非破壊検査技術センター 山本 敏弘
	溶接継手の健全性確保に関する研究
	NaCl溶液中におけるステンレス鋼溶接部の不働態化挙動に関する検討 23 溶接・非破壊検査技術センター 鈴木 良治 芝浦工業大学 工学部 齋藤 洋介, 野田 和彦
	技術基準・規格化関連調査
	火技解釈における特定継手接続箇所への放射線透過試験要求に関する定量的な検討 27 規格基準室 佐藤 長光
	火力発電設備の全面減肉評価における国内外の簡便な手法の紹介と必要最小肉厚値の計算例 31 規格基準室 小嶋 敏雄
	核燃料再処理施設の使用前溶接事業者検査(溶接)に係る運用事例 ... 37 規格基準室 長谷川 忠之
研究トピックス	遠隔での溶接部外観検査を想定した計測技術の調査 40 溶接・非破壊検査技術センター 水野 亮二, 村上 功治, 古川 敬
成 果	出願特許一覧 45 学協会誌等への論文・解説発表 46 学協会等への口頭発表 50 論文等表彰 55
編集後記	

コロナ禍が加速する データ駆動型NDEへの期待



東北大学
研究推進・支援機構
知の創出センター

高木 敏行

新型コロナの患者数が報告されて、数値の増減が気になっている毎日です。第二波もいずれおさまりそうですが、インフルエンザの季節が来ることで、ダブルで感染が広がることを心配しなくてはなりません。2020年2月までは、頻繁に海外へ出かけたり、海外からの多くのお客さんと会っていたことが遠い昔のように感じられます。

新型コロナ禍の第一の悲劇は、もちろん多くの患者や死者が出たことです。さらに、第二の悲劇は、接触を避けるために、経済活動や研究・教育活動が停滞したことです。この悲劇に対して、どう立ち向かうのか、レジリエンス力が試されています。感染についてはそんなに遠くない未来で定常的になると思われそうですが、経済活動や研究・教育活動がどのような形になるかについて見通せないところです。昨年までの状態と同じ様式の社会の状態には戻らないだろうと考えています。

生活様式の面でみると、仕事の仕方が大きく変化しました。毎日のようにオンラインで会議やセミナーをしています。大学ではオンライン講義が行われています。先生方もオンライン講義に慣れてうまくってきたのと、コンテンツを多く作ることができたということで今後の教育に生かされるものと思います。海外の大学ではオンライン講義のやり方がまずくて学生が訴えた話も聞いています。オンライン講義は手を抜くことができません。

新型コロナの感染が始まる前にデータ駆動型社会への変化が始まっています。欧米では、サイバーフィジカルシステムを導入した第4次産業革命Industry 4.0が2011年に提案されて、実際に運用されています。これによって生産性が上昇し、海外の工場を自国に戻すきっかけになっていると聞いています。また、日本においてもデジタル革新によって社会の様式を変化させるSociety 5.0の概念が2016年に発表されています。いずれも、ICT, IoT, ビッグデータ, AIなどがキーワードであり、最近では、企業、大学、役所においてもDX推進が進められています。

研究開発の現場では、データ駆動科学を用いた新しい方法論が使われ始めています。例えば、材料科学の分野ではデータの追加に伴って確率が更新されていくベイズ統計、複雑な原子構造や顕微鏡画像を定量化し、隠れた秩序やパラメータを非経験的に抽出する取り組みや、機械学習とロボティクスを組み合わせるとハイスループットな物質合成や評価などが試みられています¹⁾。デジタルラボラトリーでは、ヒト、ロボット、AIが協働して実験を実施していくため、人と人との接触が減り感染のリスクが低くなります。このように、データ活用に軸足を置く新たな実験研究の方法論の検討が加速度的に進められているものと思います。

非破壊評価技術に目を向けると、欧米ではIndustry 4.0に対応したデータ活用に重点

を置くNDE 4.0の検討が進められています。NDE 4.0では、Industry 4.0と同じ文脈でNDEが記述されており、Inter-connected cyber-physicalがキャッチフレーズになっています。特に、ドイツでは、ドイツ非破壊検査協会(DGZfP)において、NDE 4.0を推進するための委員会が設置され委員長のBernd Valeske教授 (Fraunhofer IZFP) のもとで、IIoT(Industrial Internet of Things)、Human-computer interaction、Training、Additive manufacturingについて検討が進んでいます。米国においても、米国非破壊検査協会(ASNT)が同様の委員会を発足させNDE 4.0に関連する技術の規格化についても議論を進めているようです。このあたりの状況については、ASNTの発行するMaterials Evaluation の特集号²⁾に詳細が述べられています。COVID-19が、このNDE 4.0への加速の引き金になっていると記述されています。

NDE 4.0でのキーワードは、Big data、Informatization、Digitalization、Networks、Artificial intelligence、Machine learning、Quantum technology、Data market などです。NDE 4.0に係わる日本の状況はどうなっているかという点、個々の研究は精力的に行われていますが、全体を体系的につなげるような概念の議論が無いように感じています。また、NDE 4.0を活用するためには、有効なビッグデータが必要ですが、データの取得や利用に関しても下記のような課題があることが指摘されています³⁾。

- 1) 多くのデータが取得されているが、データ間の連携の方法やデータの処理の方法が不明である。アナログなデータ多くあり、デジタル化が必要である。
- 2) 取得したデータを機関を超えて共有することに対する危惧があり、知的財産情報やノウハウが流出する可能性があると考えられている。
- 3) IoT化やビッグデータ活用のメリットが不明である。何から初めて良いかわからない。

これらの課題については、大学や一企業では解決することが難しいと考えられます。学協会や発電設備技術検査協会のような中立的な機関が中心となって、欧米のNDE4.0への動きと協調しながら、概念の構築や技術開発を進めていく必要があると感じています。そうしなければ、NDE4.0に関連した技術の実用化ができたとしても、その規格化では後れをとってしまうこととなります。新型コロナ禍で残念ながら、研究交流や技術交流するいろいろな行事が中止になりましたが、オンライン会議やオンラインセミナーのおかげで、リアル空間とバーチャル空間の融合にも慣れてきました。今後、デジタルツイン、ビッグデータ解析、深層学習、データ同化、量子コンピューティングなどが活用されたデータ駆動型の非破壊検査技術が開発されていくことを期待しています。

参考文献

- 1) http://www.tfc.tohoku.ac.jp/online_event/2020dsw/02/、材料科学へのデータ科学的なアプローチ、知の創出センター、東北大学
- 2) Technical Focus NDE 4.0, Materials Evaluation, Vol. 40, No. 7, July 2020.
- 3) 高木敏行、発電プラントや送電設備におけるIoT化とビッグデータの活用、保全学、Vol. 19, No.3, 2020年10月, p. 6.

ご挨拶

一般財団法人 発電設備技術検査協会
理事長

濱谷 正忠



2019年度における協会、溶接・非破壊検査技術センター（NDEセンター）の研究活動と成果を技術レビュー Vol.16として取りまとめましたのでご覧いただきたいと思います。

当協会は、1970年の創立され、今年50周年の節目を迎えました。

以来、火力原子力等発電設備の品質の維持・向上及びこれらに係る技術の進歩、発展を図り、人命及び財産の安全の確保に寄与するとともに、電気事業及び電機工業の健全な発展に資する事を目的として努力してまいりました。今後とも、顧客の皆様が直面する多様な課題について丁寧な対応に努め、審査、検査、認証、規格基準、非破壊検査・研修・講習の業務分野や、規格基準における自主調査、試験研究における自主調査研究で、更に一層確実・的確に業務を遂行してゆく所存です。

「技術が支える安全と信頼」を基本理念とし、エネルギーを取り巻く環境が、内外で大きく変化している時代の流れの中で、新たなフロンティアにも対応できる実力をつけ、技術品質が高く、設置者・メーカー・国から頼りにされ、安定した経営基盤を持つ発電技検の実現に向け組織を挙げて顧客の皆様が直面する多様な課題に、丁寧に対応してまいりたいと思います。

試験研究における自主研究では、NDEセンターにおいて、①超音波探傷シミュレーション／可視化技術、②フェーズドアレイ法、ガイド波などの超音波探傷技術、③電磁気シミュレーション／探傷技術、④残留応力・塑性ひずみ評価技術、⑤耐熱鋼余寿命予測技術などのセンターが保有しているコア技術をより一層深化させ、現場ニーズに適合できるように研究活動に取り組んできました。また、新たなコア技術として、非線形超音波計測技術、高感度磁気計測技術、電磁超音波探触子のシミュレーション技術及び非破壊試験データの信頼性評価技術の研究活動に取り組んでいます。

NDEセンターは、自主調査研究にて、保有するコア技術に一層の深みと独自性を追求し、その成果をもとにした研究提案を通じて、皆さまの直面する課題解決に貢献するとともに、現場での実機適用評価、火力原子力等発電分野や船舶など、社会インフラ全般における非破壊評価技術の提案など、新しい分野にも積極的に取り組んでいく所存です。

規格基準における自主調査では、米国機械学会（ASME）規格の改正動向調査をはじめ、欧州など国外の関連技術情報を含めて、いち早く入手し、技術情報の検討結果を規格・基準などへ反映してきました。今後も自主調査活動を継続し、わが国における溶接などに関する規格基準の作成維持に貢献してまいります。

当協会は、発電分野におけるベストエネルギーミックスの実現に向けて、一層の研さんを積み、技術力に基づく高品質の業務を皆様に提供してまいります。皆様の一層のご指導、ご理解を賜りますようお願い申し上げます。

NDEシンポジウム2019を開催しました

当協会は2019年12月2日、東京都港区のAP浜松町で「NDEシンポジウム2019－構造健全性と非破壊評価－“非破壊試験・計測へのICT/AIの活用”」を開催しました。

基調講演では、愛媛大学大学院理工学研究科 中畑和之教授より「データ同化による非破壊検査の新たな展開」と題して、超音波計測のシミュレーションを活用し、データ同化や人工知能を駆使して実測が難しい未知量推定を試みている最新の研究成果と今後の展望について講演をしていただきました。

招待講演では、徳島大学大学院社会産業理工学研究部 西野秀郎教授より「AIを援用したガイド波計

測による配管減肉定量の試み」と題して、配管等の減肉に対して長い距離を効率的に検査できる可能性はあるものの、減肉の定量が困難なガイド波計測に対し、AIを用いた減肉定量化の研究と、学習データの収集にシミュレーションを活用する最新の研究動向を講演していただきました。

当協会からは溶接・非破壊試験に関する試験研究・研修の取り組と「データ活用等による火力発電所の事業運営効率化」、「電磁相互作用を考慮したEMATによる超音波送受信のシミュレーション」及び「超音波探傷シミュレーション解析の活用事例」の調査研究の成果を報告いたしました。



周波数応答解析による二層積層部材の厚さ評価

Spectral Analysis of ECT Signals to Determine Conductive Two-Layered Stack's Thicknesses

溶接・非破壊検査技術センター 程 衛英

The swept-frequency eddy current measurements of layered structures analyzed in terms of reflection coefficients showed that the relativity of the two layers' conductivity affects the signal significantly. The impedance signals have the similar spectral properties as the reflection coefficients. By taking derivative with respect to log scaled frequency, we are able to find characteristics features to determine the upper and lower layers' thicknesses respectively, even without knowing exactly the conductivities of each layer.

Keywords Swept-frequency eddy current testing, multi-layered structure, thickness, impedance signal, spectral analysis

1 はじめに

積層部材の性能は各層の厚さに依存しており、それらの厚さ測定やモニタリングは構造物の性能維持や安全確保に不可欠である。産業界には、非接触・安価、且つ再現性と利便性が優れている各層の厚さ測定可能な測定・評価法が求められる。

現有の渦電流式や電磁式の電磁気式厚み計を用いて板厚を求める場合、いずれも母材金属の導電率を事前に把握しておかなければならないという制約がある。しかも、被検体の導電率は製造メーカーの違いによってばらつき、経年劣化によって変化する、測定結果の信頼性が必ずしも高いとは言えない。従って、被検部材の導電率に依存しない、単層または積層の各層の厚さを測定・評価できる電磁気法が望まれる。

先行研究では、[1, 2] 周波数掃引渦電流試験法 (Swept-Frequency Eddy Current Testing, SFECT) における導電率に依存しない単層導電性板の厚さ測定・評価法を構築した。よって、検査箇所の子質の把握や電磁気特性 (特に正確な導電率) の把握が不要で、

現場で使い勝手のよいマスターカーブの作成方法と、該マスターカーブを用いた単層導電性板又は導電性板上の非導電性被膜の厚さ測定・評価ができた。

二層積層部材において、上下層の子質が異なり、電磁気特性も異なることがある。部材の上から積層を検査する場合、下層への電磁場は上層に遮蔽され、また、下層からの信号は上層に通させざるを得ない、更に、層間の‘干渉’も避けられないため、二層それぞれの厚さの評価は単層より困難である。ここでは、先行研究で行った周波数掃引とインピーダンス正規化を行う上、対周波数差分を行い、その差分により特徴量を抽出し、低周波と高周波帯域毎における特徴量の分析によって上層・下層の厚さを正確かつ簡単に測定・評価できる方法を提案した。

2 SFECT測定及び周波数応答解析

2.1 SFECT 測定信号及び反射係数

Fig. 1 は自己誘導・自己検出の空心コイルを用いて積層部材における渦電流測定の概念図である。空

心コイル（内、外半径 r_1 , r_2 , 高さ H ）が積層上に置かれ、全域が N 個の領域にモデリングされる（領域 1：プローブが置かれる空気領域，領域 N ：積層下の空気領域，領域 2～ $N-1$ ： $N-2$ 個の積層）。領域 1 にある励磁コイルが発生した電磁場は各層に伝搬しながら反射される。多重伝搬・反射後、一部の電磁場は再び領域 1 に戻り、検出コイルに検出される。この渦電流試験で得られたインピーダンス変化は下記の式で計算される

$$(1) \quad \Delta Z(\omega) = j2\pi\omega\mu_0 n_{cd}^2 \int_0^\infty S(\lambda_0)\Gamma(\lambda_0)d\lambda_0,$$

ここで、 μ_0 は自由空間（空気）の透磁率， ω は角周波数， n_{cd} はコイルの巻き数である。 $S(\lambda_0)$ はコイルの構造や寸法及びセットアップで決められる形状関数であり， $\Gamma(\lambda_0)$ は被検体の電磁気特性や幾何寸法を反映する反射係数である。 λ_0 は Bessel 関数の積分パラメータである。式 (1) に示すように、インピーダンス変化は形状関数と反射関数の Convolution であり、周波数によって変化する。よって、 $\Gamma(\lambda_0)$ の解析は信号解析の鍵になる。

解析領域の第 i と第 $i+1$ 領域のインターフェースでの反射係数は下記の式で求められる。

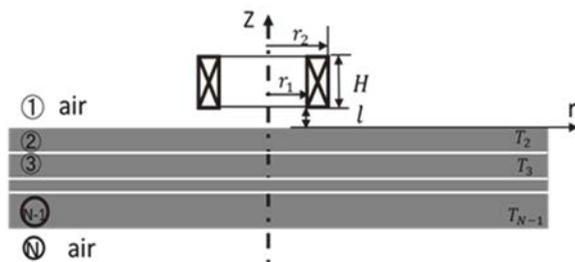


Fig. 1 ECT of a multi-layered structure

$$\Gamma_{i,i+1} = \frac{\mu_{i+1}k_{iz} - \mu_i k_{i+1,z}}{\mu_{i+1}k_{iz} + \mu_i k_{i+1,z}} \quad (2)$$

ここで、 μ は透磁率， $k = \sqrt{\lambda_0^2 + j\omega\mu\sigma}$ ， σ は導電率である。また、第 i とその以下すべての空間を含む領域間の反射を表す総合反射係数は

$$\tilde{\Gamma}_{i,i+1} = \frac{\Gamma_{i,i+1} + \tilde{\Gamma}_{i+1,i+2}e^{-2k_{i+1}T_i}}{1 + \Gamma_{i,i+1}\tilde{\Gamma}_{i+1,i+2}e^{-2k_{i+1}T_i}} \quad (3)$$

である。プローブが第 1 領域に置かれているため、 $\tilde{\Gamma}_{1,2}$ は式 (1) 中の反射係数 $\Gamma(\lambda_0)$ に等価する。最も下の空気領域 N と仮の $N+1$ 領域の間に反射が存在しないため、 $\tilde{\Gamma}_{N,N+1} = 0$ である。再帰的順次に $\tilde{\Gamma}_{i,i+1}$ が計算され、最終的に $\tilde{\Gamma}_{1,2}$ が求められる。反射係数

を分析することによって、渦電流測定信号の挙動がより本質的に捉えらる。以下では、簡単な構造体から複雑の構造体の順に、総合反射係数を分析する。

(1) 半無限大導体

全域が空気（領域 1）と導体（領域 2）にモデリングされ、 $\tilde{\Gamma}_{1,2} = \Gamma_{1,2}$ 。また領域 1 に $\sigma_1 = 0$, $\mu_1 = \mu_0$ のため、 $k_1 = \lambda_0$ 。よって、 $\tilde{\Gamma}_{1,2} = \frac{\mu_2\lambda_0 - \mu_0 k_2}{\mu_2\lambda_0 + \mu_0 k_2}$ 。導体が非磁性であるため、 $\mu_2 = \mu_0$ 。

$$\tilde{\Gamma}_{1,2} = \frac{\lambda_0 - k_2}{\lambda_0 + k_2} = \frac{-j\omega\mu_0\sigma_2}{(\lambda_0 + k_2)^2} \quad (4)$$

式 (4) の負号は‘反射’が‘入射’と逆向きであることを表す。

(2) 単層導電性板

領域 1 と 3 は空気，領域 2 は厚さ T_2 の導電性板であり、総合反射係数は

$$\tilde{\Gamma}_{1,2} = \frac{\Gamma_{1,2} + \tilde{\Gamma}_{2,3}e^{-2k_2T_2}}{1 + \Gamma_{1,2}\tilde{\Gamma}_{2,3}e^{-2k_2T_2}} \quad (5)$$

である。ここで、 $\Gamma_{1,2}$ は半無限大導体の反射係数である。また、 $\tilde{\Gamma}_{2,3} = \Gamma_{2,3} = -\Gamma_{1,2}$ のため、(5) 式は

$$\tilde{\Gamma}_{1,2} = \frac{\Gamma_{1,2} - \Gamma_{1,2}e^{-2k_2T_2}}{1 - \Gamma_{1,2}^2 e^{-2k_2T_2}} \quad (6)$$

に書き換える。分母にある $|\Gamma_{1,2}^2 e^{-2k_2T_2}|$ は 1 より小さく、 $|\Gamma_{1,2}^2 e^{-2k_2T_2}| \ll 1$ の場合、Taylor 展開により、 $\tilde{\mathbf{R}}_{1,2} = \mathbf{R}_{1,2}(1 - e^{-2k_2T_2})(1 + \mathbf{R}_{1,2}^2 e^{-2k_2T_2} + \mathbf{R}_{1,2}^4 e^{-4k_2T_2} + \dots)$
 $= \mathbf{R}_{1,2} - \mathbf{R}_{1,2}e^{-2k_2T_2} + \mathbf{R}_{1,2}^3 e^{-2k_2T_2} - \mathbf{R}_{1,2}^3 e^{-4k_2T_2} + \dots$
 すなわち、単層導電性板の反射係数は同材質の半無限大導電体の反射係数の修正である。およその修正量は

$$\Delta\tilde{\mathbf{R}}_{1,2} = \tilde{\mathbf{R}}_{1,2} - \mathbf{R}_{1,2} \cong -\mathbf{R}_{1,2}(1 - \mathbf{R}_{1,2}^2)e^{-2k_2T} \quad (7)$$

である。したがって、修正量 $\Delta\tilde{\mathbf{R}}_{1,2}$ は厚さ T と材質によって変化しており、対数スケールの $\Delta\tilde{\mathbf{R}}_{1,2}$ は T の線形関数である。

(3) 二層積層

二層積層の総合反射係数 $\tilde{\Gamma}_{1,2}$ が単層と同じの式 (5) で求められるが、 $\Gamma_{2,3}$ および $\tilde{\Gamma}_{3,4}$ が単層とは異なり、以下の式より求められる、

$$\tilde{\Gamma}_{2,3} = \frac{\Gamma_{2,3} + \tilde{\Gamma}_{3,4}e^{-2k_3T_3}}{1 + \Gamma_{2,3}\tilde{\Gamma}_{3,4}e^{-2k_3T_3}} \cong (\Gamma_{2,3} + \tilde{\Gamma}_{3,4}e^{-2k_3T_3})(1 - \Gamma_{2,3}\tilde{\Gamma}_{3,4}e^{-2k_3T_3}) \quad (8)$$

ここで、下層と空気領域間の反射係数

$$\tilde{\Gamma}_{34} = \Gamma_{34} = \frac{\mu_4 k_3 - \mu_3 k_4}{\mu_4 k_3 + \mu_3 k_4} = \frac{\mu_0 k_3 - \mu_3 \lambda_0}{\mu_0 k_3 + \mu_3 \lambda_0} \quad (9)$$

の値は正であるが、上下層の間の反射係数

$$\Gamma_{2,3} = \frac{\mu_3 k_2 - \mu_2 k_3}{\mu_3 k_2 + \mu_2 k_3} = \frac{\mu_3^2 k_2^2 - \mu_2^2 k_3^2}{(\mu_3 k_2 + \mu_2 k_3)^2} \quad (10)$$

の符号は上下層の導電率の大小関係によって変わる。上層の導電率は下層のより高い場合、 $(\sigma_2 - \sigma_3) > 0$, $\Gamma_{2,3} > 0$ 。一方、上層の伝導率が下層より低い場合、 $(\sigma_2 - \sigma_3) < 0$, $\Gamma_{2,3} < 0$ 。したがって、 $(\sigma_2 - \sigma_3) > 0$ において $\tilde{\Gamma}_{2,3} > 0$ であるが、 $(\sigma_2 - \sigma_3) < 0$ の場合、 $\tilde{\Gamma}_{2,3}$ は $\Gamma_{2,3}$ と $\Gamma_{3,4} e^{-2k_3 T_3}$ の大小関係で決められる： $|\Gamma_{2,3}| > |\tilde{\Gamma}_{3,4} e^{-2k_3 T_3}|$ の場合、 $\tilde{\Gamma}_{2,3} < 0$ ；逆に、 $|\Gamma_{2,3}| < |\tilde{\Gamma}_{3,4} e^{-2k_3 T_3}|$ の場合、 $\tilde{\Gamma}_{2,3} > 0$ である。

二層積層部材と上層部材で作られる半無限大導体の反射係数の差は

$$\Delta \tilde{\Gamma}_{1,2} = \tilde{\Gamma}_{1,2} - \Gamma_{1,2} = \frac{\Gamma_{1,2} + \tilde{\Gamma}_{2,3} e^{-2k_2 T_2}}{1 + \Gamma_{1,2} \tilde{\Gamma}_{2,3} e^{-2k_2 T_2}} - \Gamma_{1,2} \cong (1 - \Gamma_{1,2}^2) \tilde{\Gamma}_{2,3} e^{-2k_2 T_2} (1 - \Gamma_{1,2} \tilde{\Gamma}_{2,3} e^{-2k_2 T_2}) \quad (11)$$

である。ここで、 $(1 - \Gamma_{1,2}^2)$ と $(1 - \Gamma_{1,2} \tilde{\Gamma}_{2,3} e^{-2k_2 T_2})$ の実数部は 0 より大きい、 $\Delta \tilde{\Gamma}_{1,2}$ の符号は $\tilde{\Gamma}_{2,3}$ 、すなわち、上下層の導電率の大きさで決められる。また、上層の厚さ T_2 は式 (11) に直接に現れるが、下層の厚さ T_3 は $\tilde{\Gamma}_{2,3}$ に含まれており、式 (11) に直接現れない。二層構造物の信号挙動は複雑であり、上下層の導電率の大小関係によって大きく変わる。

以下では、式 (2), (3) を用いて再帰計算により上記の二パターンの導電率大小関係の二層積層の総合反射係数 $\tilde{\Gamma}_{1,2}$ を解析・分析する。なお、解析には外径 20 mm, 内径 16 mm, 高さ 3 mm, 内部リフトオフ 0.5 mm の 85Turn の空芯コイルを使う。また、周波数を 20Hz ~ 300kHz 範囲内掃引すると仮定する。上記範囲内対数スケールにおける 60 等間隔での離散周波数点において反射係数を計算する。

積層は A 部材 (導電率 $\sigma_A=10\text{MS/m}$), B 部材 (導



Fig. 2. Two-layered stack

電率 $\sigma_B=2\text{MS/m}$) で構成される。Fig. 2 における上層・下層の厚さを符号 T_U , T_D で表し、二層部材の全体の厚さは $(T_U + T_D)$ となる。Figs 3, 4 には、それぞれの厚さ T_U , T_D を符号 A, B の数で表し、且つ左から部材の積層順を表す。1 文字は 1mm を表す。例えば、AA であれば A 部材が単層で 2mm, AAB であれば、二層部材で上層が 2mm の A 部材、下層が 1mm の B 部材を示す。上記 AA は、1mm の A 部材が 2 枚積層している場合も考えられるが、この AA は同じ導電率であるから二層と識別できず、「2mm の単層 A 部材」と認識される。

(a) (上層部材の導電率 > 下層部材の導電率) の場合

二層積層の上層部は A 部材、下層部は B 部材である。

先行研究には特定のコイルの形状関数がある λ_0 に最大になることを示した。ここでは、本研究に使われたコイルの形状関数が最大になる $\lambda_0=176.66(1/\text{m})$ で $\tilde{\Gamma}_{1,2}$ を抽出する。Fig. 3 にはその虚数部 $\text{Im}(\tilde{\Gamma}_{1,2})$ を示す。単層の A 部材および A 部材半無限大導体の $\text{Im}(\tilde{\Gamma}_{1,2})$ も同じ図にプロットした。理論分析の通り、全ての $\text{Im}(\tilde{\Gamma}_{1,2})$ は負数である。上層の導電率は下層の 5 倍にもあるため、 $\tilde{\Gamma}_{1,2}$ はほぼ上層に支配され、 $\tilde{\Gamma}_{1,2}$ 曲線は上層の T_U 毎にグルーピングされ、グループは T_U の順に並ぶ。各グループ中の $\tilde{\Gamma}_{1,2}$ は下層の厚さ T_D の順に並んでいる。よって、上層厚 T_U を決まってから下層厚 T_D を推定する順で上下層の厚さを評価することが考えられる。

ところで、上層の導電率が下層より大きくなるほど、また、上層が厚くなるほど、信号が更に上層に

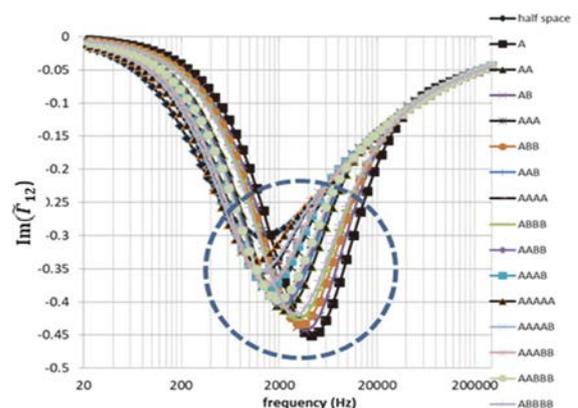


Fig. 3 $\text{Im}(\tilde{\Gamma}_{1,2})$ of $(T_A + T_B)$ stacks

支配され、下層の厚さの変化による信号変化が小さく、下層の厚さ推定は困難になる。より明確に下層信号を取り出す信号処理法が必要である。

(b) (上層部材の導電率<下層部材の導電率) の場合

上下層はそれぞれB部材とA部材で構成される。Fig. 4にこのような積層部材の $\tilde{\Gamma}_{1,2}$ の虚数部 $\text{Im}(\tilde{\Gamma}_{1,2})$ を示す。半無限空間B部材及び単層B部材の $\text{Im}(\tilde{\Gamma}_{1,2})$ も同図に示す。Fig. 3とは異なり、 $\text{Im}(\tilde{\Gamma}_{1,2})$ は必ずしも上層厚さ T_U 毎でグルーピングされていない。厚さを評価するために、厚さの順に並べるパラメータ曲線が求められる。

以上のA, B部材で構成された積層の解析・分析により、厚さ変化、特に下層の厚さ変化に高感度、また、(上層部材の導電率 > 下層部材の導電率) の場合でも積層厚の順に並べる信号を抽出する方法が必要と考えられる。

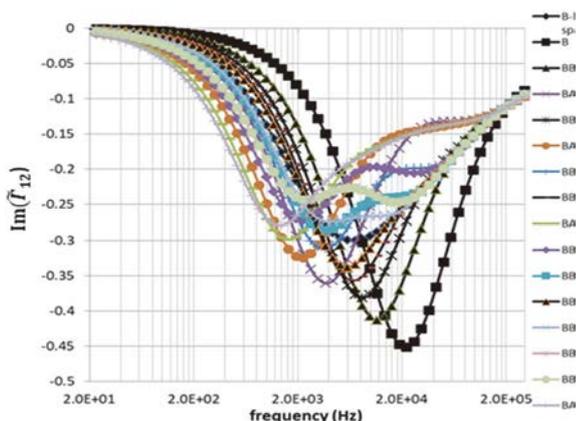


Fig. 4 $\text{Im}(\tilde{\Gamma}_{1,2})$ of (T_B+T_A) stacks

2-2 反射係数の周波数差分

微分演算は‘変化’を見出す手段の一つである。ある関数 Z の対 $\Omega(\Omega=\log(\omega))$ の微分($\frac{dZ}{d\Omega}=\omega\frac{dZ}{d\omega}$)は単位 Ω における Z の変化を表す。 ω にかけられることによって、 $\frac{dZ}{d\Omega}$ は $\frac{dZ}{d\omega}$ より高周波領域の微小変化を見だしやすと考えられる。また、 $Z(\omega)=|Z|e^{j\omega} = R(\omega)+jX(\omega)$ の場合、 $\frac{dZ}{d\omega}=j\omega Z$ 。すなわち、 Z の実数部の変化は $\frac{dZ}{d\Omega}$ の虚数部に現れ、 Z の虚数部の変化は $\frac{dZ}{d\Omega}$ の実数部に現れる。

本研究における掃引周波数が対数スケール等間隔で設定されているため、周波数掃引測定信号シリーズの差分は対 $\log(\omega)$ の微分に等価している。ここでは、(2.1)で計算された $\tilde{\Gamma}_{1,2}$ に周波数差分を行い、

その結果を分析する。なお、 $\tilde{\Gamma}_{1,2}$ の周波数シリーズの差分を $d_f(\tilde{\Gamma}_{1,2})$ で記述する。

(1) (上層部材の導電率>下層部材の導電率) の場合

Fig. 5にA部材の上層の厚さ $T_U=1\text{mm}$ と $T_U=2\text{mm}$ の二層積層の $d_f(\tilde{\Gamma}_{1,2})$ 実数部と虚数部を示す。虚数部 $\text{Im}(d_f(\tilde{\Gamma}_{1,2}))$ は上層の厚さ T_U の順に並び、また、同 T_U の二層積層の $\text{Im}(d_f(\tilde{\Gamma}_{1,2}))$ は下層の厚さ T_D の順に並んでいる。

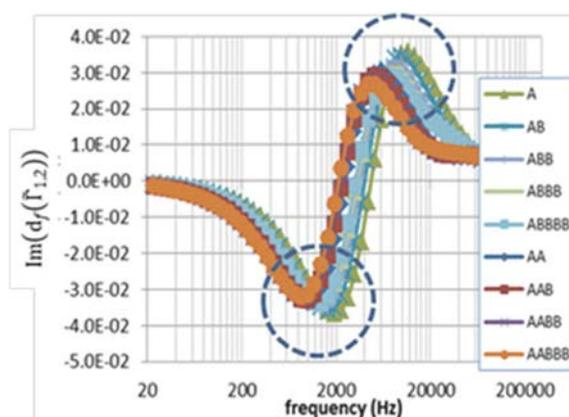


Fig. 5 $\text{Im}(d_f(\tilde{\Gamma}_{1,2}))$ of (T_A+T_B) stacks

(2) (上層部材の導電率<下層部材の導電率) の場合

Fig. 6にB部材の上層厚さ $T_U=2\text{mm}, 3\text{mm}$ の二層積層の反射係数の周波数差分の虚数部 $\text{Im}(d_f(\tilde{\Gamma}_{1,2}))$ を示す。周波数掃引範囲内いくつかの局部極値が現れる。同じ T_U の二層積層部材における高周波領域に現れる $\text{Im}(d_f(\tilde{\Gamma}_{1,2}))$ の最大値はほぼ同じである。また、低周波領域に現れる $\text{Im}(d_f(\tilde{\Gamma}_{1,2}))$ の最小値は下層厚 T_D によって順次に変化する。これらの高・低周波数領域に現れる極値は上下層の厚さ評価に適用可能と考えられる。

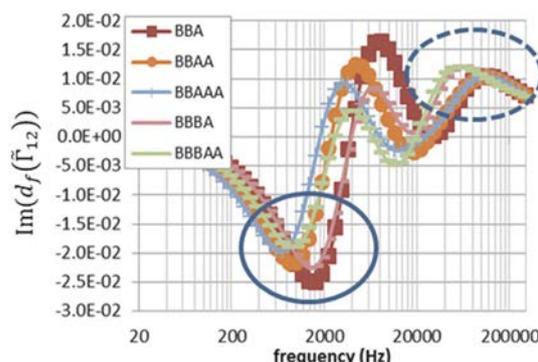


Fig. 6 $\text{Im}(d_f(\tilde{\Gamma}_{1,2}))$ of (T_B+T_A) stacks

3 二層積層の掃引渦電流測定試験及びインピーダンス信号の周波数応答解析

インピーダンス信号が形状関数と反射係数の Convolution であるため、反射係数に似ている周波数特性を持っていると考えられる。ここでは、掃引渦電流測定により二層積層部材のインピーダンス信号を取得し、その周波数特性を分析する。

試験用の二層積層は導電率が順に低くなる Aluminum 板、Aluminum 合金 (Al5052) 板、SUS304 板で構成される。Table 1 にはその上下層の構成を示す。測定用コイルの寸法は解析に使われたものと同じである。コイルを周波数掃引機能が持つ LCR メータに繋がり、掃引渦電流試験でインピーダンスを測定する。なお、周波数を 30Hz ~ 300 k Hz 掃引すると設定し、対数スケール 300 等間隔離散化された周波数で信号をセンシングする。

Table 1

Lower		Aluminum(mm)			Al5052 (mm)		
		0.5	1	2	3	4	5
SUS304 (mm)	0.5	○	○	○	○	○	○
	1	○	○	○	○	○	○
	2	○	○	○	○	○	○
	3	○	○	○	○	○	○
	4	○	○	○	○	○	○
5	○	○	○	○	○	○	

まず、周波数掃引により、コイルの自己インピーダンス $Z_0(\omega)$ を測定する。LCR メータは直列モードに設定され、 $Z_0(\omega)$ を測定すると同時に等価抵抗と等価リアクタンスも測定される。 $Z_0(\omega)=R_0(\omega)+jX_0(\omega)$ 、それから、コイルを Table 1 に所記各二層積層上に設置して、各離散周波数におけるインピーダンスおよびその等価抵抗と等価リアクタンスをセンシングする。

$$Z(\omega)=R_s(\omega)+jX_s(\omega)$$

ここで、等価抵抗 R_s はコイルの巻き線による抵抗 R_{dc} と渦電流による抵抗変化の合計である、 $R_s(\omega)=R_{dc}+R(\omega)$ 。

コイルの自己リアクタンス X_0 を用いて、上記二層積層測定インピーダンスを正規化する

$$Z_{nor}(\omega) = R_{nor}(\omega) + jX_{nor}(\omega) = \frac{R_s(\omega)-R_{dc}}{X_0(\omega)} + j\frac{X_s(\omega)}{X_0(\omega)} \quad (12)$$

更に、下記の式 (13) より、正規化インピーダンス

の周波数差分を行う

$$d_f(Z_{nor})|_i = Z_{nor}|_{i+1} - Z_{nor}|_i = (d_f(R_{nor}) + jd_f(X_{nor}))|_i, \quad (i=1, N-1) \quad (13)$$

ここで、N は離散化した掃引周波数の数である。

これからは上下層の導電性の二パターンにおいて、正規化インピーダンスの周波数特性を分析する。

(1) (上層部材の導電率 > 下層部材の導電率) の場合

SUS304 板の上に Aluminum あるいは Al5052 合金板を敷き、(上層部材の導電率 > 下層部材の導電率) の二層積層を作成した。これらの積層の周波数掃引インピーダンスを測り、式 (12)、(13) によりインピーダンス正規化およびインピーダンス差分を行う。

Fig. 7 に正規化インピーダンス周波数差分のリサージ波形を示す。上層の Aluminum あるいは Al5052 合金の導電率は下層の SUS304 より 10 倍ほど大きいので、信号がほぼ上層に支配され、下層の検出が非常に困難であることを示した。○中の数値は上層の厚さを示す。反射係数と同じように、測定信号は上層の厚さにグルーピングされ、上層が厚くなるほど、下層の厚さ変化による信号変化は小さい。

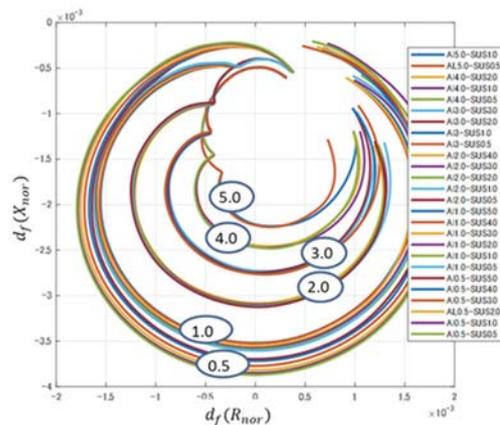


Fig.7 $d_f(Z_{nor})$ of (T_A+T_B) stacks

(2) (上層部材の導電率 < 下層部材の導電率) の場合

(1) の SUS304 板を Aluminum あるいは Al5052 合金板と位置入れ替え、(上層部材の導電率 < 下層部材の導電率) の二層積層部材を構成する。

Fig. 8 に示す正規化インピーダンス周波数差分のリサージ波形が非常に複雑であり、信号と各層厚の関係は明瞭ではない。

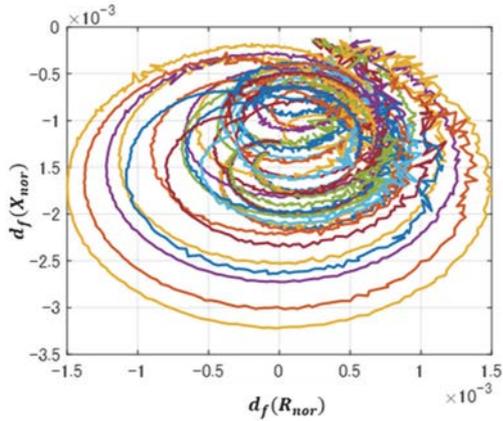


Fig.8 $d_f(Z_{nor})$ of (T_B+T_A) stacks

ここでは、対周波数差分の虚数部に着目し、 $d_f(X_{nor})$ を周波数解析する。Fig. 9 は上層が 3.0mm 厚さ SUS304 である二層積層の正規化インピーダンスの周波数差分の Spectral である。高周波領域に現れた $d_f(X_{nor})$ は上層厚で決められ、低周波数領域の最小値は下層の厚さに対応している。Fig.10 は Table 1 に示した二層積層の極値のまとめである。従って、高周波領域に現れた $d_f(X_{nor})$ の最小値により上層厚さを推定した上、低周波領域に現れた $d_f(X_{nor})$ の最小値より下層厚さが推定可能である。

また、Aluminum と Al5052 の導電率違いにもかかわらず、Aluminum また Al5052 が同じ上層や下層としている場合、特徴量は厚さの順になっている。すなわち、これらの特徴量は導電率に依存しない。これらの厚さ同定法は上下層の導電率の大小関係を把握する必要があるが、それぞれの正確な導電率の値の把握は不要である。

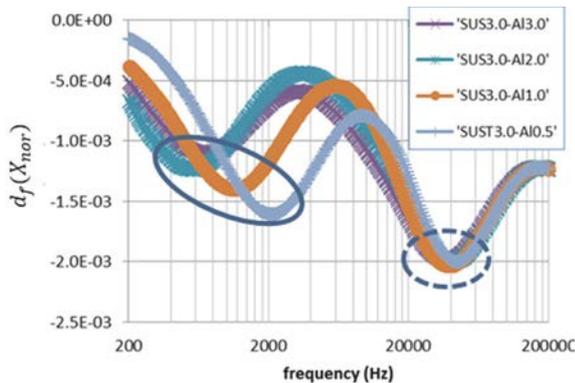
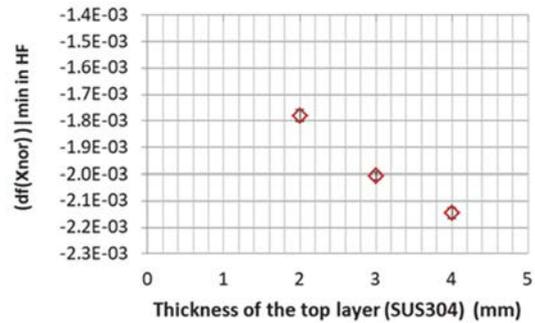


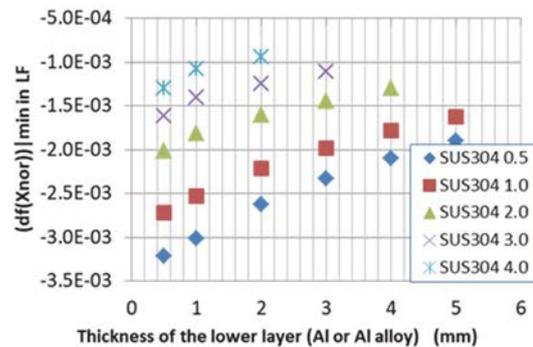
Fig.9 Spectral of $d_f(Z_{nor})$ when the top layer is 3mm thick SUS304.

4 結言

反射係数における周波数解析によって、渦電流測定信号の本質を捉えた。周波数掃引渦電流試験法で得られた正規化インピーダンス及び周波数シリーズの信号差の周波数応答解析によって、二層積層の厚さ同定を検討した。上下層部材の導電率の大小関係によって、同定用特徴量とアプローチは異なる。上層部材の導電率は下層部材より大きい場合、正規化抵抗や抵抗の周波数差分の極値により、上層厚・下層厚の順でそれぞれの厚さが推定可能である。上層部材の導電率が下層部材より小さい場合、正規化インピーダンスの対数スケール周波数差分より厚さ同定用特徴量が抽出できた：上層厚さは差分信号の高周波領域における極値で同定可能であり、下層厚さは低周波領域に現れる極値より同定可能である。これらの特徴量は導電率に依存しない。



(a) Minimal of $d_f X_{nor}$ in high frequency range and the top layer thickness.



(a) change of the minimum value of $d_f(X_{nor})$ with the lower layer thickness

Fig.10 Characteristic features and the thicknesses of the two layers.

参考文献

- [1] Weiyang Cheng, “Thickness Measurement of Metal Plates Using Swept-Frequency Eddy Current Testing and Impedance Normalization”, IEEE SENSORS JOURNAL, 17, 14 (2017), 4558-4569.
- [2] Weiyang Cheng, Hidetoshi Hashizume : “Determination of Layers’ Thicknesses by Spectral Analysis of Swept-Frequency Measurement Signals”, IEEE SENSORS JOURNAL, 20, 15 (2020), 8643-8655



程 衛英

POD分析における信頼限界の計算方法

Calculation of confidence bounds for POD analysis

溶接・非破壊検査技術センター 山本 敏弘

Probability of detection (POD) analysis is a statistical tool to quantify the defect detection performance of nondestructive evaluation (NDE) methods. This paper exposit a method to calculate confidence bounds of a POD curve and explains the characteristics of these confidence bounds.

Keywords *Probability of detection, POD, nondestructive evaluation, NDE, confidence bound*

1 はじめに

欠陥検出確率 (probability of detection, POD) 分析とは非破壊評価 (NDE) 手法の欠陥検出性能を統計的手法によって分析するものであり、これを利用して欠陥検出性能の評価・比較を定量的に行うことが可能となる^[1-3]。また、確率論的破壊力学 (PFM) 解析において、破損確率や破損頻度を予測するときに POD 分析の概念を用いて検査で検出された亀裂が補修で取り除かれる過程をモデル化することができる^[4,5]。PFM 解析で利用される POD 曲線には非常に簡略化されたモデルが使用されることが多いが、このようなモデルの妥当性を確認するために簡略化された POD 曲線と本稿で扱う形式の POD 曲線の比較分析を行うことは有用であると考える。

これまでに本誌の研究報告^[6,7]において POD 分析の基礎的な事柄について解説してきた。ここでは、これらの研究報告では触れられなかった POD 分析において重要な概念である信頼限界 (confidence

bound) について論ずる。

2 POD分析について

POD 分析では NDE 手法の欠陥検出確率が欠陥サイズを変数とする関数として表せると仮定して欠陥検出確率の分析を行う。このとき、欠陥の高さ、長さまたは面積などの中から状況に応じて適したものを“欠陥サイズ”として選ぶ。欠陥サイズを a とすると欠陥検出確率は関数 $POD(a)$ で表せる。また、横軸を欠陥サイズ a 、縦軸を欠陥検出確率 $POD(a)$ として描かれるグラフを POD 曲線と呼ぶ。

研究報告^[7]では、NDE 手法の検査結果から POD 曲線を導く上で、検査結果の情報を与える形式には大きく分けて Hit/Miss データ型と \hat{a} vs a データ型の 2 種類があることを説明した。Hit/Miss データ型は検査による各欠陥の検出の成否を表すもので、欠陥が検出されたときは 1、検出されなかったときは 0 とする。このデータ型が示すのは対象の欠陥が検出できたか、できなかったかの結果であるので、

使用する NDE 手法や判定基準に関わらず欠陥検出の成否の結論のみがデータとなる。その一方で、 \hat{a} vs a データ型は各欠陥から得られた信号応答を表すもので、検査で得られた信号指示に関する数値（信号強度など）をデータとする。超音波探傷試験 (UT) を例にすると、Hit/Miss データ型では欠陥が検出できたか、できなかったかを 1 または 0 で示し、 \hat{a} vs a データ型では欠陥による反射波の最大振幅などを記録値とする。

Hit/Miss データ型の検査結果から POD 曲線を求めるためには、図 1 で表されるように、サイズの異なる複数の欠陥に対する検出の成否の情報から欠陥サイズに対する欠陥検出確率の傾向を捉えることになるので、この傾向を適切に推定するためには多くの欠陥の検査結果が必要となる。 \hat{a} vs a データ型の検査結果から POD 曲線を求める場合、欠陥サイズ a と NDE 手法の信号応答 \hat{a} との間に図 2 のような相関があることを仮定しており、検査結果から導かれる回帰モデルのパラメータ（この場合は傾きと切片）やデータの分散および設定した判定しきい値 \hat{a}_{dec} から図 3 のような POD 曲線を得る。判定しきい値 \hat{a}_{dec} は欠陥検出の判断基準を与えるもので、信号応答 \hat{a} が判定しきい値 \hat{a}_{dec} を超えたとき欠陥が存在すると判断する。図 2 の例では欠陥サイズ a の対数と信号応答 \hat{a} の対数の間に線形相関があると言え、検査結果から回帰分析的に線形関係を表す式の傾きと切片を求める。このように、 \hat{a} vs a データ型を使用する場合は Hit/Miss データ型を使用する場合と比べてより多くの条件を仮定しており、線形関係の式を推定するのに必要な欠陥サイズ a と信号応答 \hat{a} の組合せデータは比較的少なくて済む傾向がある。文献^[8]では、POD 曲線を求めるために Hit/Miss データ型では最低 60 個の欠陥に対する検査結果が必要で、 \hat{a} vs a データ型では最低 30 個の欠陥に対する検査結果が必要であるとしている。また、米国国防省ハンドブック^[9]では、NDE 手法により欠陥の有無を確認する箇所を Hit/Miss データ型で最低 60 箇所、 \hat{a} vs a データ型で最低 40 箇所とした検査結果を使用することを推奨している。

上述のように \hat{a} vs a データ型は Hit/Miss データ型より少ないデータ数で信頼性の高い POD 曲線を得ることができるが、その一方でより

多くの条件を課しているために融通が利かない面もある。 \hat{a} vs a データ型では信号応答 \hat{a} が判定しきい値 \hat{a}_{dec} を超えたときに欠陥が存在すると判断するため、欠陥であると判定する基準が信号応答の値で定められている必要がある。例えば、UT で欠陥検出を行う場合、信号指示の振幅だけでなく、信号指示が得られた場所や他の信号指示との相対位置などを加味して判断するのであれば、信号応答の値のみで判定を行うことを前提とする \hat{a} vs a データ型を使用するのはその他の情報が POD 曲線に反映されないという点で不適切であると言える。ある手順に従って欠陥を検出し、そのときの信号応答を記録するという検査結果の集め方を考えた場合、欠陥を見逃し

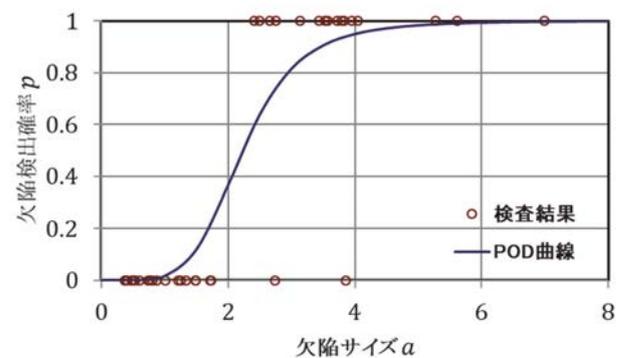


図1 Hit/Missデータ型のPOD曲線のイメージ

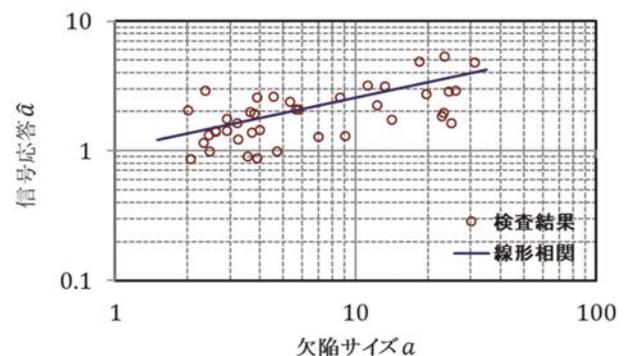


図2 \hat{a} vs a データ型のデータ例

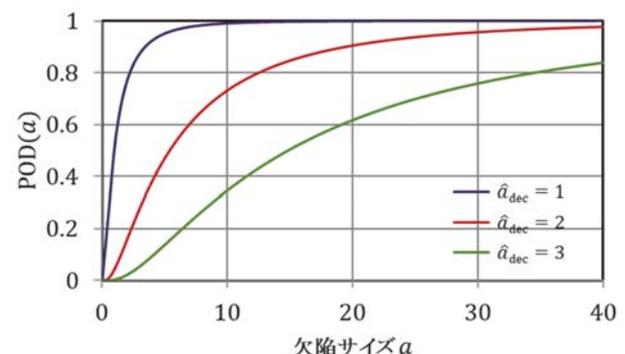


図3 \hat{a} vs a データ型によるPOD曲線の例

てその欠陥に対応する信号応答が得られないということが起こり得る。一般的には、 \hat{a} vs a データ型では信号応答が定まっていないデータは扱えない。信号応答が得られなかったデータを除けば POD 分析を行えるが、欠陥検出確率の評価において欠陥を見逃したという情報を省くことが適切であるとは認められない。よって、POD 曲線の導出に \hat{a} vs a データ型を用いるのは、決められた点で信号応答を記録し、純粋に信号応答の値で欠陥の有無が判断できる場合に限るのが妥当であると考えられる。文献^[10]は原子力発電プラントを対象とした POD 分析に関する報告書であるが、上述した内容と同様の理由で Hit/Miss データ型のみを扱っている。

Hit/Miss データ型は欠陥検出の成否という最終的な結果のみを示すので、過程が見えない分、検査結果が同等の検査条件・検出基準により得られたものであるか注意が必要であるが、様々な要因を考慮した過程がデータ自体に含まれていると考えることができ、汎用性が高いと言える。そのため、以下では Hit/Miss データ型についてのみ扱う。

3 信頼区間とは

統計的推定において推定値の信頼性を評価するとき、真値が分かっているならば推定値の誤差を確認することができるが、推定を行う多くの場合では真値は未知であり、推定値の誤差を知ることができない。区間推定は、真値がある値からある値の間にあると推定するもので、その確率を示すことで推定の信頼度を表すことができる。

区間推定の典型的な問題は、母集団から抽出した標本から母集団の平均を推定するものである。この区間推定を考える上で中心極限定理を利用する。中心極限定理は、平均 μ 、分散 σ^2 に従う母集団からサンプルサイズ n の標本を抽出したとき、標本の平均 \bar{x} の分布は n が大きくなるにつれて平均 μ 、分散 σ^2/n の正規分布に近づくというもので、 n が十分大きいとき標本平均 \bar{x} の分布は正規分布で近似できる。この性質を利用すれば、標本平均 \bar{x} がある範囲の値になる確率を算出することができ、また、標本平均 \bar{x} を標準化すれば標準正規分布表を参照するだけで計算せずにこの確率が得られる。標準化した標本平均 \bar{x}

が 95% の確率で取り得る値の範囲は、標準正規分布表から読み取ることにより

$$-1.96 < \frac{\bar{x} - \mu}{\sqrt{\sigma^2/n}} < 1.96$$

となる。これを式変形して母平均の範囲を表すと

$$\bar{x} - 1.96 \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}} < \mu < \bar{x} + 1.96 \sqrt{\frac{\sigma^2}{n}} \quad (1)$$

と書ける。この不等式は、この範囲に真値 μ が収まるような推定値 \bar{x} が得られる確率が 95% であることを意味する。このような範囲を信頼区間 (confidence interval) と呼び、特にこの場合、母平均 μ の 95% 信頼区間と呼ぶ。また、信頼区間の両端を信頼限界と呼ぶ。

ここで注意しなければならないのは、式 (1) の信頼限界に母分散 σ^2 が含まれていることである。母集団に関して平均は未知であるが、分散だけは既知であるという状況は現実において想定しづらい。よって、実用上は、母分散の代わりに標本の不偏分散を使用し、標準正規分布の代わりに t 分布を利用する方法がある^[11]。

区間推定を伝統的な頻度論の考え方で捉えるのであれば、真値は未知でも定まっているものと見なすので、信頼区間が示されれば、たとえ真偽が確認できないとしても、その信頼区間に真値が含まれているか、いないかのどちらかであり、「この信頼区間に 90% の確率で真値が含まれている」というような表現はしない (観測者が分からないだけで事実はそのどちらかである。“シュレディンガーの猫” のような考え方はしない)。頻度論の考え方としては、母集団から何度も繰り返し標本を抽出して信頼区間を

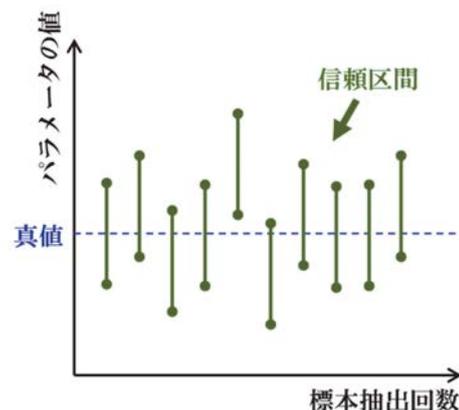


図4 繰り返し抽出した標本から得た信頼区間

計算したとき、これらの信頼区間の内 90% に真値が含まれると捉える (図 4)。

4 二項分布を利用した信頼限界の求め方

POD 分析に使用するデータは、様々な異なるサイズの欠陥から得られた値で構成される。また、ここで考えている欠陥検出確率は欠陥サイズ a ごとに値を持つ関数 $POD(a)$ であり、異なる欠陥サイズのデータから欠陥サイズごとに欠陥検出確率やその信頼限界を求めなければならない。これに対処する方法の一つは、手間ではあるが、欠陥サイズごとに個別に欠陥検出確率の推定値と信頼限界を求めるものである。これには異なる欠陥サイズごとにそれなりの数のデータを用意する必要がある。欠陥サイズごとに欠陥検出確率を推定するときに、Hit/Miss データ型は 0 または 1 のみを取り得ることから二項分布を利用して信頼限界を求めることが考えられた^[12,13]。以下では、この手法について説明する。

確率・統計において、起こり得る結果が“成功”と“失敗”などの 2 通りのみで、成功の確率を一定として互いに独立して繰り返される試行をベルヌーイ試行と呼ぶ。Hit/Miss データ型のデータはベルヌーイ試行の結果と言える。いま、 n 回のベルヌーイ試行において各試行での成功の確率を p とし、 n 回の試行の中での成功の回数を確率変数 X とする確率分布を考えたとき、成功回数 X が k となる確率は、二項分布

$$P(X = k) = \binom{n}{k} p^k (1 - p)^{n-k} \quad (2)$$

で与えられる。ただし、

$$\binom{n}{k} = {}_n C_k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

であり、これを二項係数と呼ぶ。

3 節で例に挙げたような上限と下限がある信頼区間を両側信頼区間と呼び、その一方で、上限または下限の一方のみがある信頼区間を片側信頼区間と呼ぶ。ここでは、文献^[12,13]にならって下限のみがある片側信頼区間を使用することとし、上記の p を欠陥検出確率として二項分布を利用した 95% 信頼区間の求め方について説明する。

Hit/Miss データ型の検査結果において n 個の欠陥

のうち m 個の欠陥の検出に成功しているとき、未知である欠陥検出確率 p の推定量として検出された欠陥数の割合

$$\hat{p} = \frac{m}{n}$$

を使用する (\hat{p} は p を近似する値であると見なす)。同様の検査条件の検査結果 (検出される欠陥の数にはばらつきがある) を繰り返し集め、それぞれの検査結果から \hat{p} の値を計算したとすると、これらの \hat{p} の値の平均値は繰り返しを増やすごとに真値 p に収束する (不偏推定量の性質)。

ここで、ある検査結果から得られた推定量 \hat{p} の値が

$$\hat{p}_s = \frac{m}{n}$$

であるとし (つまり、検出された欠陥の数が m 個)、これを欠陥検出確率 p の推定値とする (式は同じだが、 \hat{p} は定義であり、 \hat{p}_s は検査結果から得られた具体的な値である)。そして、推定値 \hat{p}_s に基づく欠陥検出確率 p の片側信頼区間の下限を p_L とする。欠陥検出確率 p が p_L であるときに検出された欠陥数の割合を \hat{p}_L とすると、 \hat{p}_L が k/n となる確率は、式 (2) と同様に

$$P_L(X = k) = \binom{n}{k} p_L^k (1 - p_L)^{n-k}$$

で与えられる。このとき、 $\hat{p}_L < \hat{p}_s$ (つまり、 $k < m$) となる確率が 95% であるとする、 $\hat{p}_L \geq \hat{p}_s$ ($k \geq m$) となる確率が 5% であることになり、 α を 0.05 とおくとこの条件は

$$\alpha = \sum_{k=m}^n P_L(X = k) \quad (3)$$

と表せる。推定値 \hat{p}_s を得るのに使用した検査結果と同様の検査条件の検査結果を (理論上、無限回) 繰り返し集め、検査結果ごとに推定量 \hat{p} の値 \hat{p}_s を計算し、それぞれの \hat{p}_s に基づいて式 (3) を満たす p_L を導けば、これらの p_L のうちの 95% が $p_L < p$ を満たすと言える。さらに、上記のうち任意の検査結果から得られた p_L に対して 95% の信頼度で $p_L < p$ となる。これにより、 p_L は真値 p の 95% 片側信頼区間の下限であると言える。ここでは、信頼区間の信頼度が 95% の場合を考えたが、 α の値を変えれば信頼度 $1 - \alpha$ の信頼限界を計算できる (慣習的に真値が信頼区間から外れる割合の方を α とおく)。

以下では、この考え方をを使った具体例を紹介する。いま、ある検査結果において61個の欠陥のうち59個の欠陥が検出されており、

$$\hat{p}_s = \frac{59}{61}$$

とおく。これを欠陥検出確率の推定値としたときに下側信頼限界が90%となるような片側信頼区間の信頼度 $1 - \alpha$ を求めるとすると、 n を61、 m を59、 p_L を0.9として式(3)の右辺を計算することにより

$$P_L(X=59) + P_L(X=60) + P_L(X=61) \approx 0.049$$

を得るので、信頼度はおおむね95%である(安全側に見積もるために信頼度の端数は切り捨てる)。よって、検査結果から欠陥検出確率を59/61(約96.7%)と推定したときの95%信頼区間の下限は90%であると言える。

POD分析において、95%信頼区間の下限が90%となる欠陥サイズは $a_{90/95}$ と表記されて慣習的にNDE手法の欠陥検出性能を評価する目安として使われており、応用上、95%信頼区間の下限を90%にするために検出すべき欠陥数の割合を知ることが必要になる場合がある。ここでは、天下的に検出された欠陥数の割合を与えたが、実際には、下側信頼限界 p_L を設定して n と m をある程度の範囲で変化させながら式(3)の右辺を計算し、所望の信頼度が得られる n と m の組合せを探す。表1は、この方法により導き出された95%信頼区間の下限が90%となる欠陥数の割合の例である。この節の冒頭で述べたように、この方法で得られる下側信頼限界は、ある欠陥サイズに限定した欠陥検出確率の推定に対するものであり、使用する検査結果も同じ欠陥サイズのものである必要がある。

表1 95%信頼区間の下限が90%となる例

欠陥の総数	検出された数
29	29
46	45
61	59

5 POD曲線の信頼帯の求め方

4節では、ある欠陥サイズに限定した欠陥検出確率の推定値とその信頼限界を求める方法を紹介したが、表1の例で使用している検査結果の欠陥数は最

低でも29個であり、仮に10種類の欠陥サイズで推定値と信頼限界を求めるのであれば、欠陥サイズごとに29個の欠陥に対する検査結果が必要であり、総数としては290個が必要となる。対象とする欠陥サイズが限定されているのであればともかく、この方法を使用してPOD曲線の信頼限界を求めるのは非現実的である。ここでは、POD曲線に対して欠陥サイズの範囲全体で信頼限界を求めるために文献[14]で示された考え方を利用する場合について説明する。このように曲線の範囲内にあるすべての点の上側信頼限界と下側信頼限界を描くものを信頼帯(confidence band)と呼ぶ。

以下では、文献[7]で解説したHit/Missデータ型の検査結果から得られるPOD曲線を対象として議論する。このPOD曲線はロジスティック回帰分布により得られるもので、その曲線の式は対数ロジスティック分布の累積分布関数

$$\text{POD}(a) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{\ln a - \mu}{\sqrt{3}\sigma/\pi}\right)} \quad (4)$$

で表せる。検査結果は欠陥サイズと欠陥検出の成否(0または1)の組合せとして与えられるので、これらを欠陥サイズ a に対する欠陥検出確率の実現値とし、最尤法によりこれらの検査結果が再現される可能性が最も高くなる μ と σ を求める。未知数 μ と σ は対数ロジスティック分布の平均と標準偏差にあたるものである。また、実現値とは確率的に値が決まる変数についてある試行で実際に得られた値であり、ここでは欠陥検出確率 $\text{POD}(a)$ について検査結果により実例として示された値である(欠陥ごとの検出確率を検査結果から実績としてそれぞれ数値にするので100%か0%の2択である)。

POD曲線の信頼帯の求め方については、文献[14]で対数正規分布を例にした信頼帯の求め方が紹介されており、これを利用することを考える。文献[6]で述べたように、対数ロジスティック分布と対数正規分布は非常によく似た分布であり、平均と分散が同一であればこれらの分布関数で描かれる曲線はおおむね一致する。文献[14]に示された信頼帯を求める手法の導出は少々複雑であるため、ここではその細部には触れずに概要だけを説明する。

正規分布の累積分布関数は

$$F(x) = \Phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right) = \Phi(\xi) \quad (5)$$

で与えられる。ただし、 μ と σ はそれぞれ平均と標準偏差であり、 ξ は変数 x を標準化したもので

$$\xi = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

とし、 Φ は標準正規分布の累積分布関数

$$\Phi(\xi) = \int_{-\infty}^{\xi} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (6)$$

である。累積分布関数 $F(x)$ の値がある確率 p になるときの x を正規分布の p 分位数と呼び、これは

$$x_p = \mu + \sigma\Phi^{-1}(p) \quad (7)$$

と書ける。いま μ と σ は未知であり、標本データ（検査結果）から最尤推定によりそれぞれの推定値 $\hat{\mu}$ と $\hat{\sigma}$ が得られたとする。このとき、 $F(x)$ の推定値は

$$\hat{F}(x) = \Phi\left(\frac{x - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}\right)$$

となる。推定値 $\hat{F}(x)$ の信頼限界を求めるには、まず、 $\hat{\mu}$ と $\hat{\sigma}$ がある信頼度で取り得る値の範囲を求め、この範囲に対応する $\hat{F}(x)$ の値の範囲を調べる。しかし、これを直接求めるのは難しいため、式(7)に示した p 分位数が取り得る値の範囲について先に考える。

推定値 $\hat{\mu}$ および $\hat{\sigma}$ を使った分位数 x_p の推定値は、式(7)より

$$\hat{x}_p = \hat{\mu} + \xi_p \hat{\sigma} \quad (8)$$

と書ける。ただし、 ξ_p は標準正規分布の p 分位数

$$\xi_p = \Phi^{-1}(p) \quad (9)$$

であり、 Φ は式(6)で与えられる既知の関数であるから ξ_p は p により値が決まる。パラメータ $(\hat{\mu}, \hat{\sigma})$ がある信頼度で取り得る値の範囲を平面上に描くと図5のように楕円状になることが分かっており、この範囲を信頼領域 (confidence region) R とする。パラメータ $(\hat{\mu}, \hat{\sigma})$ が領域 R に属するときの \hat{x}_p の範囲が \hat{x}_p の信頼区間となる。式(8)は領域 R に対して傾きが $-1/\xi_p$ の直線の式と見なせ、また、このとき $(\hat{x}_p, 0)$ はこの直線と横軸の交点となる。 \hat{x}_p の範囲を考えたとき、 p を固定すれば式(8)の直線の傾き $-1/\xi_p$ が固定されるので、 \hat{x}_p がその上限または下限となるのは式(8)が領域 R の接線になるとき

である。このようにして得られる \hat{x}_p の上側信頼限界および下側信頼限界をそれぞれ \hat{x}_p^U および \hat{x}_p^L とおく。

式の導出を省くが、上側信頼限界 \hat{x}_p^U および下側信頼限界 \hat{x}_p^L は

$$\begin{aligned} \hat{x}_p^U &= \hat{x}_p + \frac{\hat{\sigma}b}{N - \xi_p}, \\ \hat{x}_p^L &= \hat{x}_p - \frac{\hat{\sigma}b}{N + \xi_p} \end{aligned} \quad (10)$$

で得られる。ただし、

$$b = 2 + \xi_p^2$$

および

$$N = \sqrt{\frac{2nb}{\gamma} - 2}$$

であり、さらに、 n は標本データの個数であり、 γ は与えられた n および信頼度 $1 - \alpha$ に対して信頼領域 R の境界を示すパラメータである。パラメータ γ は、反復計算により数値的に求める必要があるが、対象とする累積分布関数 $F(x)$ の μ と σ に依存しないので一度計算すれば再利用できる。文献[14]で示された γ の値の一部を表2に記載する。また、このような表を使わなくても、自由度2のカイ二乗分布の累積分布関数を $F_\chi(x;2)$ とすると

$$F_\chi(x;2) \leq 1 - \alpha$$

を満たす最大の x により γ を近似することができる。表2の最下段にカイ二乗分布による近似値を示す。すべての n に対してこの値を近似値として使用するが、表からも分かるように n が大きくなるほど近似の誤差は小さくなる。

式(10)は信頼限界を \hat{x}_p の範囲で与える式であるので、これを当初の目標である $\hat{F}(x)$ の範囲の式に変形する。式(10)は p によって x の範囲を定めており、これをその逆にするために式(10)の左辺を変数 x に置き換え、両辺から $\hat{\mu}$ を引き、両辺を $\hat{\sigma}$ で割って式(8)を利用すると

$$\xi = \xi_p \pm \frac{b}{N \mp \xi_p} \quad (11)$$

と変形できる。ただし、

$$\xi = \frac{x - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}$$

であり、これは標準化された変数 ξ の推定値である。さらに、式(11)を左辺が ξ_p になるように変形すると(b と N は ξ_p を含んでおり、この式変形はやや複雑)

$$\xi_p = \hat{\xi} \pm h \tag{12}$$

となる。ここで

$$h = \sqrt{\frac{\gamma}{n} \left(1 + \frac{\hat{\xi}^2}{2}\right)}$$

である。また、式(9)と式(12)から

$$p = \Phi(\hat{\xi} \pm h) \tag{13}$$

が成り立つ。元の式(10)は図5に示した \hat{x}_p が上側信頼限界 x_p^U または下側信頼限界 x_p^L となる条件を満たしているため、式(13)の p はそれぞれ推定値 $\hat{F}(x)$ の上側信頼限界 $\hat{F}^U(x)$ および下側信頼限界 $\hat{F}^L(x)$ となり、

$$\hat{F}^U(x) = \Phi(\hat{\xi} + h), \tag{14}$$

$$\hat{F}^L(x) = \Phi(\hat{\xi} - h)$$

と書ける。

式(10)および式(14)は正規分布の累積分布関数に対して信頼限界を与えるものであるから、これら

表2 正規分布に対する γ の値

n	$1 - \alpha$		
	0.90	0.95	0.99
20	4.693	6.089	9.334
25	4.675	6.069	9.310
30	4.664	6.056	9.294
35	4.655	6.047	9.282
40	4.649	6.040	9.274
50	4.640	6.031	9.262
60	4.634	6.024	9.253
80	4.627	6.016	9.244
100	4.623	6.011	9.238
近似	4.605	5.911	9.210

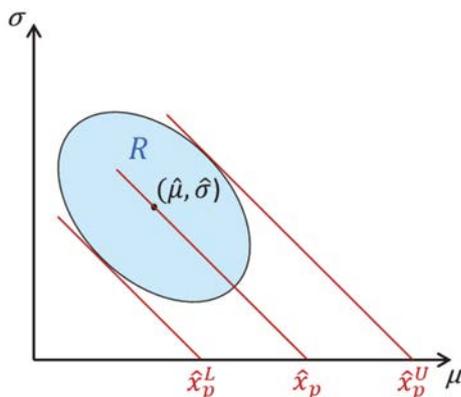


図5 平均および標準偏差の信頼領域

を対数正規分布の累積分布関数に対するものに修正する。対数正規分布の累積分布関数は

$$F_l(v) = \Phi\left(\frac{\ln v - \mu}{\sigma}\right) \tag{15}$$

である。これを式(5)と比較して

$$x = \ln v$$

とおくと、対数正規分布の p 分位数の推定値は

$$\hat{v}_p = \exp(\hat{x}_p)$$

と書ける。よって、 \hat{v}_p の上側信頼限界 \hat{v}_p^U および下側信頼限界 \hat{v}_p^L は

$$\hat{v}_p^U = \exp(\hat{x}_p^U),$$

$$\hat{v}_p^L = \exp(\hat{x}_p^L)$$

で得られる。また、同様に、 $F_l(v)$ の推定値 $\hat{F}_l(v)$ の上側信頼限界 $\hat{F}_l^U(v)$ および下側信頼限界 $\hat{F}_l^L(v)$ は

$$\hat{F}_l^U(v) = \Phi(\hat{\xi} + h), \tag{16}$$

$$\hat{F}_l^L(v) = \Phi(\hat{\xi} - h)$$

と書ける。ただし、ここでは

$$\hat{\xi} = \frac{\ln v - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}$$

である。

以上のことにより、Hit/Missデータ型の検査結果から導出した平均と標準偏差の推定値 $\hat{\mu}$ および $\hat{\sigma}$ ならびにデータ数 n が分かれば、式(16)を使ってPOD曲線の信頼限界を得ることができる。ここでは、両側信頼区間について扱ったが、片側信頼区間に対する同様の手法については文献[15]に記述されている。

ここで紹介した信頼限界を求める手法は、数値計算や近似を含んでおり、あくまで一つの選択肢であって絶対的な解法ではない。文献[9]で使用されているソフトウェアでは、最尤推定により $(\hat{\mu}, \hat{\sigma})$ の最尤推定値を求める繰り返し計算の中で算出される $(\hat{\mu}, \hat{\sigma})$ の各値に対する尤度に着目し、これらの尤度からそれぞれ対応する信頼度を算定し、指定された信頼度の $(\hat{\mu}, \hat{\sigma})$ の範囲を得ることでPOD曲線の信頼限界を導出する手法が使用されている。この手法ではより正確な信頼限界が得られ、また、対数ロジスティック分布に対しても同様に適用することができる。これについては文献[10,16]にももう少し詳しい説明がある。

6 実例

ここでは、5節で説明した信頼限界を求める手法を使った実例を紹介する。図1は、Hit/Missデータ型の検査結果とそこから得られたPOD曲線に見立てたものであるが、実際には、式(4)において μ を $4/5$ かつ σ を $\pi/5\sqrt{3}$ としたものを真のPOD曲線と仮定し、以下の手順で検査結果の具体例となるデータを生成したものである。まず、対数を取ったときに一様分布するようにした0から8の範囲の擬似乱数により無作為に40個の欠陥サイズを決めた。このとき、POD曲線はある欠陥サイズの欠陥に対する欠陥検出確率を示すものであるからこれにより40個の欠陥の検出確率を算出し、0から1の範囲の一様擬似乱数がそれぞれの検出確率を超えたときにその欠陥が検出されたことにした。このような手順によりPOD曲線からHit/Missデータ型の検査結果を模擬したデータを生成することができる。以下では、このHit/Missデータ型のデータからPOD曲線を推定してその95%信頼限界を求め、元になった真のPOD曲線と比較した例を紹介する。

いま、真のPOD曲線は対数ロジスティック分布の累積分布関数で与えられているが、5節で説明した手法では対数正規分布の累積分布関数である式(15)を使用してPOD曲線を推定し、その95%信頼限界を求める。文献[9]で使用されているmh1823 PODソフトウェアでは、上記の両方の累積分布関数を使用してPOD曲線を推定することができる。ロジスティック関数の逆関数をロジット (logit) 関数と呼び、標準正規分布の累積分布関数の逆関数をプロビット (probit) 関数と呼ぶことから、これらの累積分布関数を使用することをそれぞれlogitまたはprobitをリンク関数に言う(欠陥サイズについて対数を取るか取らないか、つまり、対数を取った分布にするかしないかはこれとは独立して選択できる)。図6と図7は、それぞれlogitおよびprobitをリンク関数として図1のHit/Missデータ型のデータからmh1823 PODソフトウェアを使って得られたPOD曲線である。どちらの場合もおおむね同じ結果が得られているのが分かる。

式(16)を使うにあたって平均と標準偏差の推定値 $\hat{\mu}$ および $\hat{\sigma}$ が必要であり、新たに最尤推定を行う代

わりに図7の結果($\hat{\mu}$ が0.8687かつ $\hat{\sigma}$ が0.2974)を流用した。図8は、これらの推定値を使って式(16)により信頼限界を計算した結果である。図8の推定されたPOD曲線は、図7と同じ式とパラメータを使用しているため図7のPOD曲線と同一である。図8の信頼帯は図7と比べてやや狭くなっており、mh1823 PODソフトウェアで採用されている手法と比較すると式(16)では信頼帯が狭くなることが分かっている。そのため、図7の結果では $a_{90/95}$ が約5.2であるのに対して、図8の結果では約4.3となり、式(16)を使用するとNDE手法がより小さい欠陥を安定的に検出できるという結論になり、NDE手法の欠陥検出性能をやや過大評価する傾向があると言

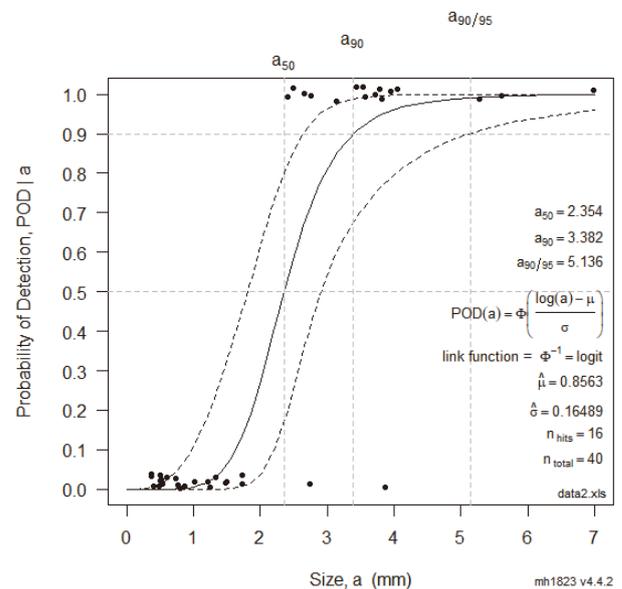


図6 mh1823 PODソフトウェアによるPOD曲線 (logit)

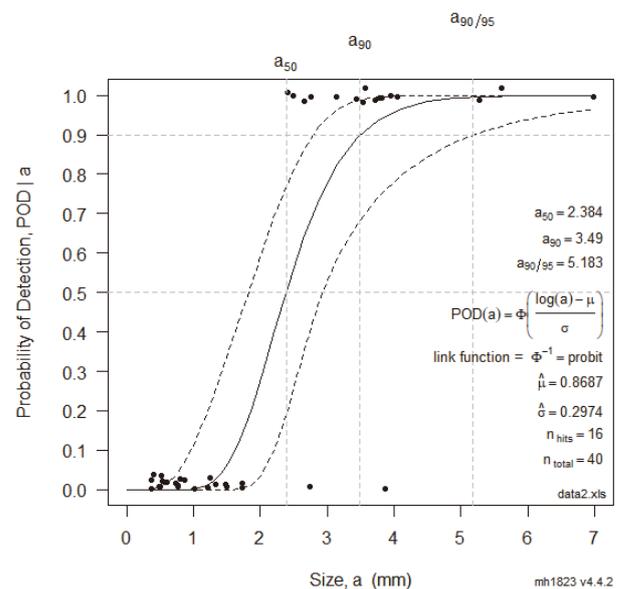


図7 mh1823 PODソフトウェアによるPOD曲線 (probit)

える。95%信頼限界は、それらに囲まれた領域に95%の信頼度で真のPOD曲線が含まれることを意味する。図8では真のPOD曲線が信頼限界の間に収まっているのが確認できる。推定されたPOD曲線や信頼限界と真のPOD曲線との関係は、推定されたPOD曲線のもとになった標本としての検査結果に大きく依存し、この標本の取り方によっては真のPOD曲線が信頼限界の間に収まらないこともある。数個の結果をもって一般化することはできないと注意した上で、上記のような数値実験をすることで標本の取り方によってPOD曲線や信頼限界の精度がどう変わるかの傾向を掴むことができる。また、図9は、標本数が増えたときに推定されたPOD曲線の精度がどのように変わるかを確かめるために図8と同様の条件で欠陥数を1000にしたときの結果である。この場合、推定されたPOD曲線は真のPOD曲線とほぼ一致しており、標本数を増やすことで推定されたPOD曲線は真のPOD曲線に収束することが確認できる。これはPOD曲線の推定方法の妥当性を確認するために行ったもので、実用上は推定されたPOD曲線の下側信頼限界を使用することで誤差を許容しており、ここまで誤差の小さい推定を行う必要はない。

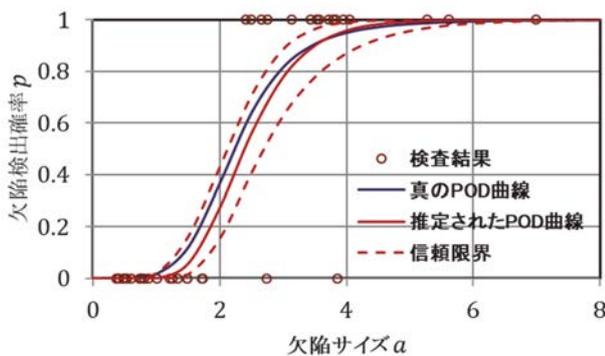


図8 推定されたPOD曲線 ($n=40$)

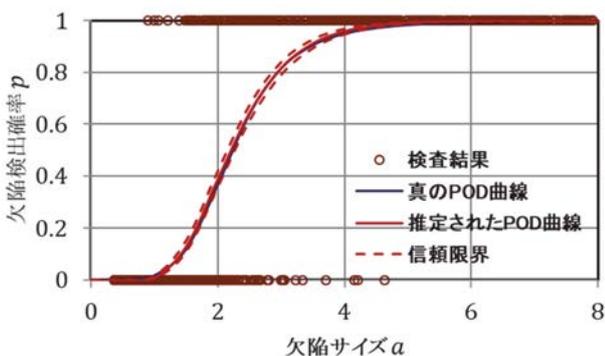


図9 推定されたPOD曲線 ($n=1000$)

7 まとめ

本稿では、POD分析における信頼限界の求め方について解説した。現在は、POD曲線の信頼限界を得る方法として最尤推定の過程で得られる尤度から特定の信頼度となるパラメータの範囲をデータから直接求める手法が利用されており、ここで紹介した手法よりこちらの方がより正確に信頼限界が計算できるとされている^[9,16]。また、本稿で挙げた例では、文献[14]で導出された式をそのまま使ったため、POD曲線の推定に対数正規分布の累積分布関数を利用したが、文献[10]では、ロジスティック分布の累積分布関数の方が一般的には安定した結果が得られるとしており、こちらを利用することを推奨している。よって、本稿で紹介した手法は、実際のPOD分析に使用するものとして最適とは言えないかもしれないが、信頼限界に関する基本的な考え方は他と共通しており、POD分析において重要な概念である信頼限界の理解を助けることを目的に信頼限界を導く一つの確立した手法として紹介した。文献[9]で使用されているソフトウェアでも文献[14]の手法によって得られるパラメータの信頼領域が参考として表示される。

POD分析の実用においては、保守的に評価するためにPOD曲線の下側信頼限界を基準として利用することが一般的である。特に、95%信頼区間の下限の欠陥検出確率が90%になる欠陥サイズを $a_{90/95}$ と表記し、この数値は慣習的にNDE手法の欠陥検出性能を評価する基準として利用されている。例えば、米国航空宇宙局(NASA)規格[17]では、破壊危険部品に適用されるNDE手法に対して規定されたサイズの亀裂を95%信頼区間の下限が90%の欠陥検出確率で検出できることを求めている。

具体的な式の利用方法を示すために簡易な数値計算例を紹介したが、このような数値計算を行うことにより標本の数や取り方と推定されるPOD曲線の精度の関係を確認することができる。これらの結果から一般的な傾向を予想するためには相当数の計算結果を分析する必要があるが、現実には“真のPOD曲線”は知ることができないため、POD分析の妥当性を確認する方法としてこういった数値実験は有用であると考えられる。

参考文献

- [1] 戸部訓子, 高橋秀治, 藤原貢, 吉川和夫, 田北雅彦, 細谷昌厚, “フィールド検査に適した Mobile EDDy の紹介と POD 解析”, *IIC REVIEW/2013/10*, No.50, pp.46-51, 2013.
- [2] 植松充良, 下向貴仁, 久瀬善治, 竹本浩, 小林誠治, 田中章悟, “複合材の最新非破壊検査技術”, *三菱重工技報*, Vol.54, No.4, pp.24-28, 2017.
- [3] 牧野一成, “鉄道車軸の車輪はめ合いの有無によるきず検出確率への影響”, *鉄道総研報告*, Vol.33, No.10, pp.17-22, 2019.
- [4] 勝山仁哉, 眞崎浩一, 宮本裕平, 李銀生, 原子炉圧力容器用確率論的破壊力学解析コード PASCAL4 の使用手引き及び解析手法, JAEA-Data/Code2017-015, 日本原子力研究開発機構, 2018.
- [5] 吉村忍, 関東康祐, *リスク活用のための確率論的破壊力学技術—基礎と応用—*, 一般社団法人日本溶接協会, 2020.
- [6] 直本保, 山本敏弘, “POD 分析を利用した非破壊試験の信頼性評価について”, *溶接・非破壊検査技術センター技術レビュー*, Vol.13, pp.14-22, 2017.
- [7] 山本敏弘, “POD 分析に使用するデータが前提とする仮定”, *溶接・非破壊検査技術センター技術レビュー*, Vol.15, pp.11-20, 2019.
- [8] A. P. Berens, “NDE reliability data analysis,” J. R. Davis (Ed.), *Nondestructive Evaluation and Quality Control*, ASM Handbook Vol. 17, ASM International, pp. 689-701, 1989.
- [9] Department of Defense, *Nondestructive evaluation system reliability assessment*, MIL-HDBK-1823A, Department of Defense, 2009.
- [10] EC JRC Institute for Energy, *Influence of sample size and other factors on Hit/Miss probability of detection curves*, ENIQ Report No. 47, European Union, 2012.
- [11] 豊田秀樹, *回帰分析入門 —R で学ぶ最新データ解析*, 東京図書, 2012.
- [12] B. G. W. Yee, F. H. Chang, J. C. Couchman, G. H. Lemon, and P. F. Packman, *Assessment of NDE reliability data*, NASA CR-134991, National Aeronautics and Space Administration, 1976.
- [13] W. D. Rummel, “Recommended practice for a demonstration of nondestructive evaluation (NDE) reliability on aircraft production parts,” *Materials Evaluation*, Vol. 40, No. 9, pp. 922-932, 1982.
- [14] R. C. H. Cheng and T. C. Iles, “Confidence bands for cumulative distribution functions of continuous random variables,” *Technometrics*, Vol. 25, No. 1, pp. 77-86, 1983.
- [15] R. C. H. Cheng and T. C. Iles, “One-sided confidence bands for cumulative distribution functions,” *Technometrics*, Vol. 30, No. 2, pp. 155-159, 1988.
- [16] EC JRC Institute for Energy, *Probability of detection curves: statistical best-practices*, ENIQ Report No. 41, European Union, 2010.
- [17] National Aeronautics and Space Administration, *Nondestructive evaluation requirements for fracture-critical metallic components*, NASA STD-5009A, National Aeronautics and Space Administration, 2018.



山本敏弘

NaCl溶液中におけるステンレス鋼溶接部の不働態化挙動に関する検討

Passivation behavior of stainless steel weld in NaCl solution

溶接・非破壊検査技術センター 鈴木 良治
芝浦工業大学 工学部 齋藤 陽介
芝浦工業大学 工学部 野田 和彦

Passivation behavior of stainless steel weld was investigated by polarization curves measurement. The type 304 and 304L stainless steels were used for sample materials. Preparation of weld specimens was performed by Tungsten-Inert-Gas welding methods without filler metal. According to the result of polarization curve measurement, the current density increase observed on type 304 stainless steel weld specimens. However, the base materials specimens was kept passive state. The results were similar also in type 304L stainless steels. Therefore, the stainless steel weld exhibits a passivation behavior different from that of the base materials.

Keywords Type 304 stainless steel weld, passivation behavior, polarization curves, localized corrosion

1 緒言

ステンレス鋼は、表面に生成する薄い酸化皮膜（不働態皮膜）が下地金属を保護するため優れた耐食性を示し、発電設備に代表される大型構造物において利用される。しかし、使用される環境条件（塩化物イオンの存在等）によっては、局所的な不働態皮膜の破壊が起こり、急激に腐食¹⁻³⁾する。ステンレス鋼溶接部を想定した場合、複雑かつ不均一な金属組織を形成⁴⁾しているため、その不働態化能に部分的な差異を生じさせている可能性がある。実構造物の腐食事例報告^{5, 6)}においても、ステンレス鋼溶接部では局所的な腐食損傷を呈していることから、溶接施工はステンレス鋼の優れた耐食性を劣化させる要因の一つとなることが懸念される。

現在までに、ステンレス鋼溶接部の腐食に対しては、溶接冶金学に基づいた研究⁷⁻¹³⁾が精力的に行われており、施工技術の開発・改善¹⁴⁾がなされることによって、耐食性の低下は抑制されている。しかしながら、その耐食性に関する調査は、浸漬試験の

結果から評価されることが多く、電気化学的な観点^{15, 16)}からは充分に行われていない。腐食現象が電気化学反応であること¹⁷⁻²¹⁾を念頭に置くと、電気化学計測データの拡充・蓄積も必要²²⁾であり、ステンレス鋼溶接部の健全性を確保する上では重要な要素の一つになると考える。

そこで本研究では、電気化学計測を用いてNaCl溶液中におけるステンレス鋼溶接部の不働態化挙動に関する調査・検討を行い、基礎的な知見を得ることを目的とした。

2 実験方法

2.1 溶接試験体作製

2.1.1 供試材

表1に供試材の化学組成を示す。供試材としてステンレス鋼 SUS304 および炭素量の異なる2種類の SUS304L を用いた。耐水研磨紙 #400 によって研磨後、溶接を行った。

2. 1. 2 溶接条件

表2に溶接条件を示す。溶接試験体の作製においてはTIG溶接法によるノンフィラー溶接（溶加材の添加なし）を実施した。溶接入熱は、約1.6~1.7kJ/mmであった。図1にSUS304溶接試験体の外観を示す。

2. 2 電気化学計測

電気化学計測においては、動電位法による分極曲線測定を行い、電流-電位曲線（分極曲線）を求めた。測定された電流値は、試料測定面の表面積で割り付け、電流密度に換算した。なお、本報告における分極曲線の表示は、電流密度を縦軸（対数表示）、電位を横軸とした。

2. 2. 1 試料

表3に試料一覧を示す。試料には、2.1で作製した溶接試験体より縦10mm、横50mm（溶接ビードの中心部より25mmずつとなるように計50mm）の長さとなるように切断した「溶接試料」、溶接を行っていない供試材より縦10mm、横10mmとなるように切断した「母材試料」を用意した。不均一な金属組織を有する「溶接試料」を、受入材である均一性・均質性の高い「母材試料」と比較した。これらの試料の測定面は、耐水研磨紙#1500で研磨された。また、研磨による測定面の調整を一切行わない「溶接まま試料」を用意し、表面性状の影響についても調査した。試料の測定面以外は、エポキシ樹脂によって被覆された。また、分極曲線測定前にエタノール中で超音波洗浄を行った。

2. 2. 2 分極曲線測定条件

図2に測定系の模式図を示す。分極曲線測定に用いた3電極式電気化学セルは、2.2.1で作製した試料を作用極、銀/塩化銀/飽和KCl電極（Ag/AgCl/KCl sat.）を参照極、Ptを対極で構成されており、それぞれの電極は、ポテンシostatに接続されている。溶液は0.5mol/L NaCl溶液であり、室温、大気開放条件下で測定を実施した。浸漬電位は1800s後の電位とし、浸漬電位から1000mVまで分極した。また電位掃引速度は1mV/sに設定した。

表1 供試材の化学組成(mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS304	0.05	0.52	0.93	0.033	0.004	8.09	18.16
SUS304L	0.021	0.36	0.92	0.034	0.002	9.11	18.23
SUS304L	0.009	0.59	1.37	0.033	0.001	9.21	18.27

表2 溶接条件

溶接法	TIG溶接(自動機使用)
溶接姿勢	下向
極性	DCEN
シールドガス	100%Ar
ガス流量(l/min)	10
溶接電流(A)	245
溶接電圧(V)	13~14
溶接速度(mm/min)	120
溶加材	なし
試験板の拘束	なし

表3 試料一覧

	表面性状	寸法	測定面模式図
溶接試料	研磨(#1500)	縦: 10mm 横: 50mm	
母材試料	研磨(#1500)	縦: 10mm 横: 10mm	
溶接まま試料	研磨なし	縦: 10mm 横: 50mm	



図1 SUS304溶接試験体の外観

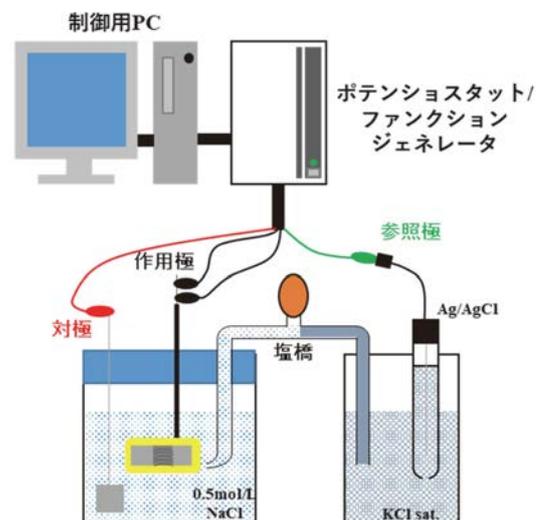


図2 測定系の模式図

3 実験結果および考察

図3に0.5mol/L NaCl溶液中における溶接試料、母材試料および溶接まま試料の分極曲線を示す。図3中における(a)はSUS304, (b)はSUS304L(0.021%C), (c)はSUS304L(0.009%C)の結果である。図3(a)におけるSUS304「溶接試料」および「母材試料」の分極曲線において、分極開始直後より電流密度の停滞する領域が観測され、さらに電位を掃引したところ、急激な電流密度の増大が確認された。電流密度の停滞する電位領域では、不動態化を示しているが、貴な電位に分極されると不動態皮膜の破壊が起こり、急速に腐食(局部腐食)していると考えられる。両試料の不動態化している電位領域内の電流密度(不動態保持電流密度)に着目する。「溶接試料」においては、「母材試料」よりも高い不動態保持電流密度を示した。よって「溶接試料」の不動態皮膜安定性は、「母材試料」よりもわずかながらに低いと考えられる。次に、局部腐食の発生・成長に伴う急激な電流密度の増大を観測した電位(局部腐食発生電位)を比較する。「溶接試料」の局部腐食発生電位は、150mV付近であった。しかし、「母材試料」では350mV付近を示しており、「溶接試料」の耐局部腐食性は「母材試料」よりも劣ると考えられる。図3(b)のSUS304L(0.021%C), 図3(c)のSUS304L(0.009%C)における「溶接試料」および「母材試料」の分極曲線についても、同様の傾向が認められた。「溶接試料」と「母材試料」の分極曲線上に現れた差異について考察する。SUS304については、炭素を0.05%含有しており、溶接熱の影響で鋭敏化組織を形成し、不動態化挙動に影響を与えている可能性がある。しかしながら、炭素含有量の異なる2種類のSUS304L「溶接試料」の分極曲線が「母材試料」と一致することはなかったため、鋭敏化組織のみが影響を及ぼしているとは考えにくい。本研究で用いた「溶接試料」は、溶接金属部、熱影響部および母材部がマクロ的に混在するよう切出されており、「母材試料」のような均一・均質性は持ち合わせていない。そのため、ステンレス鋼SUS304およびSUS304L「溶接試料」の不動態化挙動は、鋭敏化組織の存在のみならず、金属組織のマクロ的な不均一・不均質性も影響を及ぼして

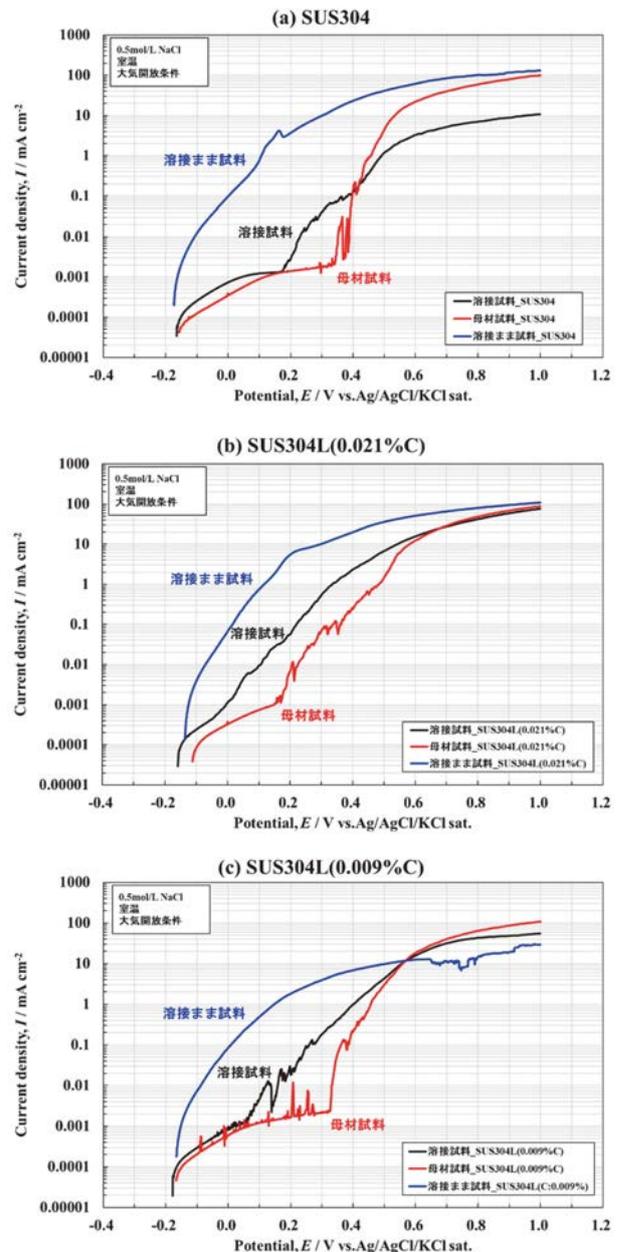


図3 0.5mol/L NaCl溶液中における溶接試料、母材試料および溶接まま試料の分極曲線
(a) SUS304, (b) SUS304L(0.021%C), (c) SUS304L(0.009%C)

おり、「母材試料」とは異なる結果になったと考えられる。以上より、塩化物イオン存在下におけるステンレス鋼SUS304およびSUS304L溶接部では、母材部とは異なる不動態化能を示し、その耐局部腐食性には差異が存在すると推察された。

一方、図3(a)におけるSUS304「溶接まま試料」の分極曲線においては、電位の掃引を開始した直後(分極開始直後)から急激な電流値の増加が観測され、その後も分極を継続し電位掃引範囲の最終電位である1000mVに到達するまで電流値の停滞が観測されることはなかった。このような分極挙動が、

図3 (b) および図3 (c) のSUS304L「溶接まま試料」においても確認された。分極曲線上に不働態領域が現れず、いわゆる活性溶解型の挙動を示したことは、表面が平滑に研磨された「溶接試料」とは大きく異なる結果となった。ステンレス鋼溶接部における表面性状は、分極挙動に影響を及ぼすことが示唆された。なお、「溶接まま試料」において活性溶解型の挙動を示す理由は、表面に存在する溶接スケールが関与しているものと考えられ、従来から指摘されているステンレス鋼の溶接スケールによる耐食性劣化の問題²³⁾と深く関係していると思われるが、詳細な解析については今後の課題としたい。

4 結言

0.5mol/L NaCl 溶液中における分極曲線測定を行い、ステンレス鋼 SUS304 および SUS304L 溶接部の不働態化挙動を調査・検討した結果、以下の知見を得た。

- 1) 「溶接試料」の分極曲線に不働態領域の存在を確認した。しかし、「母材試料」よりも不働態を示す電位範囲が狭く、不働態保持電流密度についても高い値を示した。不均一かつ不均質性の高い溶接部組織は、塩化物イオン存在下における不働態化挙動に影響を及ぼし、耐局部腐食性に差異を生じさせると考えられた。
- 2) 「溶接まま試料」の分極曲線においては、不働態領域の存在を確認することができなかった。この結果は、表面が研磨された「溶接試料」とは大きく異なっていた。よって、溶接部の腐食反応性は、表面状態により変化することが示唆された。

参考文献

- [1] 久松敬弘；日本金属学会会報, 20, pp. 3-11 (1981)
- [2] 梶村治彦；材料, 60, pp. 862-867 (2011)
- [3] 武藤泉, 千葉亜耶, 菅原優, 原信義；ふえらむ, 17, pp. 487-492 (2012)
- [4] 溶接学会溶接冶金研究委員会編；溶接部組織写真集, pp. 258-260 (黒木出版社, 1984)
- [5] プラント材溶接部腐食合同研究委員会編；溶接部の腐食トラブル事例と要因解析・対策の基礎, pp.103-122 (溶接学会, 2019)
- [6] 高谷泰之；溶接学会誌, 77, pp. 646-649 (2008)
- [7] 上崎孝一, 紅露孝哉, 稲田貞役, 益本功；溶接学会誌, 43, pp. 702-713 (1974)
- [8] 井川博, 新成夫, 中尾嘉邦, 西本和俊；溶接学会誌, 44, pp. 679-686 (1975)
- [9] 渡辺竹春, 斎田保, 菅原健, 井上章吾, 川内守夫；溶接学会誌, 45, pp.186-195 (1976)
- [10] 井川博, 中尾嘉邦, 西本和俊, 井上倫人；溶接学会誌, 47, pp.147-153 (1978)
- [11] 井川博, 中尾嘉邦, 西本和俊, 井上倫人；溶接学会誌, 47, pp.252-259 (1978)
- [12] 森裕章, 西本和俊, 中尾嘉邦；溶接学会論文集, 14, pp.352-358 (1996)
- [13] 西本和俊, 小川和博；溶接学会誌, 68, pp.144-153 (1999)
- [14] 溶接学会・日本溶接協会編；新版改訂 溶接・接合技術入門, pp. 124-137 (産報出版, 2019)
- [15] 柴田敏夫, 春名匠, 藤本慎司；防食技術, 39, pp. 303-308 (1990)
- [16] 河野崇史, 石井知洋, 梶山浩志, 木村光男, 伏見公志；材料と環境, 64, pp. 552-557 (2015)
- [17] 藤本慎司；材料と環境, 66, pp.317-325 (2017)
- [18] 西方篤；材料と環境, 66, pp.341-345 (2017)
- [19] 多田英司, 西方篤；化学と教育, 65, pp.612-615 (2017)
- [20] 春名匠；材料と環境, 67, pp.2-8 (2018)
- [21] 野田和彦, 斉藤知；材料と環境, 67, pp.9-16 (2018)
- [22] 鈴木良治；溶接・非破壊検査技術センター 技術レビュー, 15, pp. 59-61 (2019)
- [23] 幸英明；材料と環境, 40, pp.567-568 (1991)



鈴木良治

火技解釈における特定継手接続箇所への放射線透過試験要求に関する定量的な検討

Quantitative study on radiographic examination requirement to Cross-shaped butt weldment in Kagikaisyaku

規格基準室 佐藤 長光

The Kagikaisyaku requires radiographic examination at Cross-shaped butt weldment. This requirement was stipulated in the technical standard for boilers for power generation in 1958, and it has reached the present after some changes. This regulation uses ASME BPV Code Section VIII Division 1 as a reference, but since the technical basis is old and no specific one can be found, the basis will be study quantitatively.

Keywords radiographic examination, Cross-shaped butt weldment, Kagikaisyaku

1 はじめに

発電用火力設備の技術基準の解釈（以下、火技解釈という）は、特定継手接続箇所放射線透過試験（以下、RTという）を要求している。この要求は、1958（昭和33）年の発電用ボイラ技術基準^[1]から規定され、多少の変遷をたどって現在に至っている。1958（昭和33）年の発電用ボイラ技術基準から、米国機械学会（以下、ASMEという）のボイラー圧力容器規格（以下、BPV Codeという）の圧力容器規格（以下、Section VIIIという）も参考にしたことが知られており、ASME BPV Code Section VIII Division 1^[2]のUW-9(d)に同様の規定が存在する。

出典がASME BPV Code Section VIIIの規定であり、その規定の技術的根拠も古く、具体的なものが見いだせないため、規定根拠について定量的に検討する。

2 火技解釈の特定継手接続箇所へのRT要求

火技解釈の特定継手接続箇所へのRT要求の規定^[3]を表1に示す。例えば、表1中の図Aの様に、それぞれの長手継手等の中心間の距離 L が母材の厚さの5倍未満である場合は、長手継手等と周継手の交差点から100 mm以内にある長手継手等及び周継手の溶接部はRTが要求される。

上述の様に、この規定は、1958（昭和33）年の発電用ボイラ技術基準で規定された。当時の規定は、周継手を溶接する胴の長手継手等を母材厚さの5倍以上離さなければならない。ただし溶接後熱処理（以下、PWHTという）を行いかつ溶接線につきその交差点からそれぞれの長さ100 mm以上の範囲に渡ってRTを行う場合の交差点間距離は、母材厚さの5倍未満とすることができるとした長手継手等の位置への溶接設計要求として規定されていた。

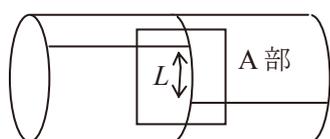
1965（昭和40）年の電気工作物の溶接に関する技術基準を定める省令^[4]で、PWHTの要否に関係なく、溶接設計要求からRT要求の規定となり、現

表1 特定継手接続箇所へのRT 要求

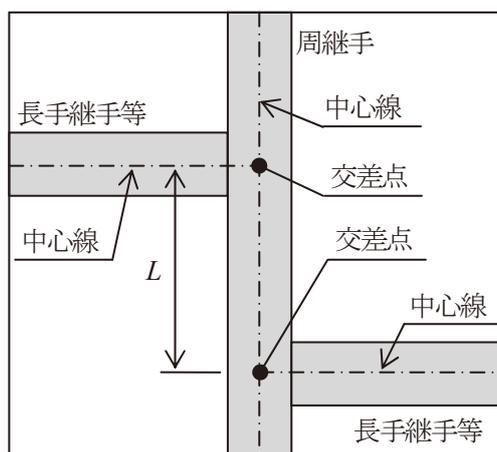
長手継手及び球形の部分の継手（以下、「長手継手等」という。）を有する母材相互を取り付ける周継手と当該長手継手等とが接する箇所又は周継手を有する母材相互を取り付ける長手継手等と当該周継手とが接する箇所であって、それぞれ次のイ又はロに掲げるもの（以下、「特定継手接続箇所」という。）（長手継手等又は周継手でRTが要求されるものは除く。）

イ それぞれの長手継手等の中心間の距離 L （図A）が厚い方の母材の厚さの5倍未満である場合における長手継手等と周継手の交差点から100mm以内にある長手継手等及び周継手の溶接部

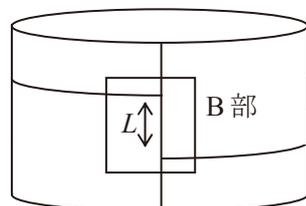
ロ それぞれの周継手の中心間の距離 L （図B）が厚い方の母材の厚さの5倍未満である場合における長手継手等と周継手の交差点から100mm以内にある長手継手等及び周継手の溶接部



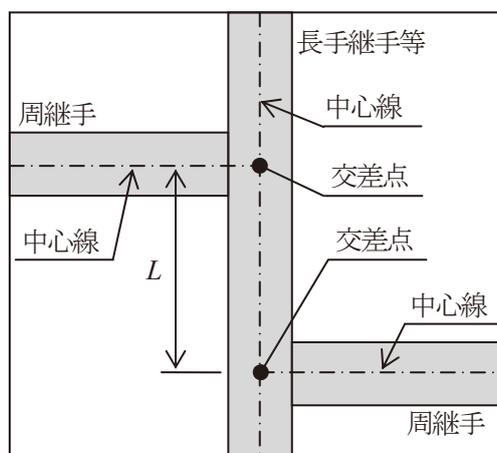
図A 長手継手等の中心間の距離



A部拡大



図B 周継手の中心間の距離



B部拡大

表2 ASME BPV Code Section VIII-1における計算（単位：mm）

外径 ($D = 2R + t$)	厚さ (t)	$L = 2.5(Rt)^{1/2}$	$5t$	備考
380	38	202	190	

R ：軸対称殻の平均半径 t ：軸対称殻の母材厚さ

在に至っている。

なお、1965（昭和40）年の電気工作物の溶接に関する技術基準を定める省令から発電用原子力設備用に分科した溶接規格^[5]においても同様のRT要求の規定が存在する。

3 根拠についての定量的な検討

1965（昭和40）年以前の特定継手接続箇所へのRT要求は、PWHT要求とも関連していたことから、溶接残留応力を基にしたと考え、荷重又は変位の減

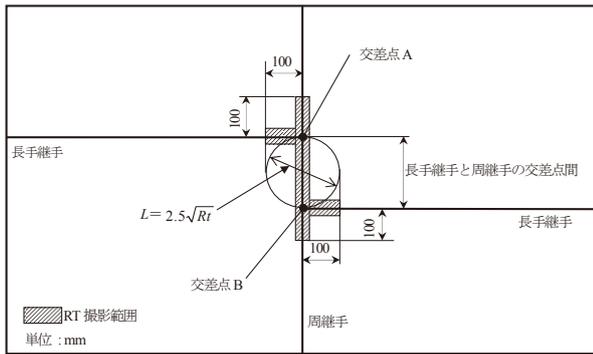


図1 軸対称殻の展開概念図(交差点が最も離れている場合)

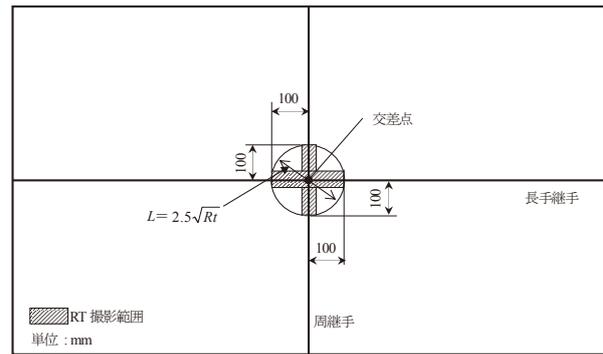


図2 軸対称殻の展開概念図(交差点が最も接近している(交差点は一か所しかない)場合)

衰に基づいて定量的な検討を行った。

文献^[6]に基づいた軸対称殻においてある点に負荷された荷重又は変位が減衰したと見なせる工学的な距離 L は、次式で表される^[7]。この範囲内で発生する複数の荷重又は変位が相互に影響を及ぼすことになる^[7]。

$$L = 2.5 \sqrt{Rt}$$

ここで、 R ：軸対称殻の平均半径

t ：軸対称殻の母材厚さ

ここでの検討対象となる構造物は、薄肉軸対称殻であるため、 $t/D \leq 0.1$ とする。ここで、 t は母材厚さ、 D は外径とする。

最大母材厚さの薄肉軸対称殻 ($t/D = 0.1$) とし式に代入すれば L は $5.3t$ となる。この値を工学的判断で整理し $5t$ としたものと考える。

このため、荷重又は変位が負荷されたとみなす交差点 A と交差点 B との距離が母材の厚さの 5 倍未満であれば、RT が要求されているものとする。

具体的な特定継手接続箇所への RT 要求の出自は、ASME BPV Code Section VIII-1 UW-9 (d) に存在する。この Subsection における通常部での RT が要求されない (UW-11) 母材の最大厚さは 38 mm であり、上述の $t/D = 0.1$ でのこの厚さに基づいた薄肉軸対称殻の最小外径は 380 mm となる。外径 380 mm、母材厚さ 38 mm での L 及び $5t$ の値を表 2 に示す。 L 及び $5t$ の値は約 200 mm となり、この範囲に他の荷重又は変位が負荷されたとみなす交差点がある場合に、RT を要求したものとする。

ただし荷重又は変位が負荷されたとみなす交差点

は二か所ある為、 L 及び $5t$ の値の約 1/2 である 100 mm を半径とした範囲について RT 撮影を要求すれば、さきの RT 要求の考えは満たされる。図 1 及び図 2 に RT 撮影範囲を含んだ軸対称殻の展開概念図を示す。図 1 は RT を要求する場合の交差点が最も離れている場合を示し、図 2 は、交差点が最も接近している (交差点は一か所しかない) 場合を示している。図 1 も図 2 も交差点から 100 mm の範囲は RT が要求される。これらより、図 1 での交差点 A と交差点 B の範囲も RT が要求される。なお、図 2 は L を直径とする範囲と RT 要求とが同一となる例であり、理解しやすい。

4 おわりに

特定継手接続箇所への RT 要求について、荷重又は変位の減衰に基づいて定量的な検討を行った。

荷重又は変位が減衰したと見なせる工学的な距離 L は母材厚さ t の 5 倍と計算でき、この値未満の場合の構造健全性を確認するため RT を要求したものとする。

また、荷重又は変位が負荷されたとみなす交差点は二か所ある為、 L 及び $5t$ の値の 1/2 である 100 mm を半径とした範囲について RT 撮影を要求したものとする。

このような考えが、特定継手接続箇所への RT 要求の定量的な根拠として考えられる。

参考文献

- [1] 発電用ボイラ技術基準, 昭和 33 年 8 月 30 日, 社団法人火力発電技術協会

- [2] ASME B&PV Code Section VIII Division 1 2019, Rules for Construction of Pressure Vessels
- [3] 発電用火力設備の技術基準の解釈, 20130507 商局第2号, 平成25年5月17日, 令和元年7月4日からの施行版
- [4] 発電用火力技術基準, 昭和40年7月30日, 社団法人火力発電技術協会
- [5] 発電用原子力設備規格 溶接規格, JSME S NB1-2018, 一般社団法人日本機械学会
- [6] S. Timoshenko et al., Theory of Plates and Shells, McGRAW-HILL KOGAKUSHA, LTD, pp. 468-474
- [7] 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 第I編 軽水炉規格, JSME S NC1-2018, 一般社団法人日本機械学会, pp. I-解説 4-77



佐藤長光

火力発電設備の全面減肉評価における国内外の簡便な手法の紹介と必要最小肉厚値の計算例

The calculation example of the minimum required wall thickness by the simplified wall thinning evaluation method of pressure vessels & pipings in fossil power plants

規格基準室 小嶋 敏雄

The evaluation method for pressure vessel wall thinning management of operating fossil power plants in Japan is overly conservative.

Reasonable evaluation is possible by using "API 579-1/ASME FFS-1 Fitness-For-Service" which is generally used in the US. By using API 579-1/ASME FFS-1, it is possible to extend the operation continuation period without repairing or replacing work. In this document, we will introduce the methods for evaluating metal thinning both in Japan and US, and calculate the minimum required wall thickness using a specific example of the phenomenon of total metal thinning to compare the results of both evaluations.

Keywords *API 579-1/ASME FFS-1, pressure vessel wall thinning management, general metal loss, minimum required wall thickness, fossil power plant*

1 はじめに

国内の火力発電設備においては、定検時に、容器及び配管の肉厚計測が実施されており、肉厚計測値から減肉量及び減肉速度の算出、さらに運転寿命予測が行われている。

また、国内の火力発電設備を対象とした維持規格は存在しないが、運転中の主要な劣化事象である減肉事象に限れば、「日本機械学会 発電用設備規格 配管減肉管理に関する規格 (JSME S CA-1-2016)」がある。特に火力発電設備の配管減肉管理に対しては、前述の規格の具体的な要求事項を具現化したものである、「日本機械学会 発電用火力設備規格 火力設備配管減肉管理技術規格 (JSME S TB-1-2016) (以下、火力配管減肉管理規格という)」があり、減肉事象に対する対処方法を提示しているが、減肉評価方法については、「発電用火力設備に関する技術基準を定める省令 (平成9年通商産業省令第51号)」に従った、必要最小肉厚の確保が要求されている。これは、供用中であっても、建設時と同等の設計マー

ジンを持つことを要求されていることに等しい。

しかしながら、省令による評価では、より保守的な評価となる傾向があるため、ランニングコスト低減の考え方からは、より現実的な評価方法が望まれている。

一方、米国では、火力発電設備や石油精製設備の維持管理に「API 579-1/ASME FFS-1 Fitness-For-Service (以下、ASME FFS という。)」が用いられている。ASME FFS では、減肉事象を含む供用プラントに生じる種々の劣化事象に対して、それぞれレベル1からレベル3の3段階の評価方法が提供されていて、レベル1評価及びレベル2評価は計算式による評価手法であり、レベル3評価は応力解析による評価手法である。なお、レベル1評価、及びレベル2評価では、計測値に基づいて簡易的に評価できるようになっている。

本稿では、国内での減肉評価方法、及び米国での減肉評価方法をそれぞれ簡単に紹介するとともに、具体的な減肉事象の例を用いて必要最小肉厚を算出し、両評価結果の比較検討を行っている。

2 国内火力発電設備における減肉管理

2.1 火力配管減肉管理規格による減肉管理

国内の火力発電設備設置者は、「火力配管減肉管理規格」に適合した配管減肉管理指針を策定し、運用している。具体的には「発電用火力設備に関する技術基準を定める省令（平成9年通商産業省令第51号）」で要求されている、必要最小肉厚をベースに管理している。なお、必要最小肉厚の計算方法については、「発電用火力設備の技術基準の解釈（以下、火技解釈という。）」に記載されており、「火技解釈」の中で、「日本産業規格 陸用鋼製ボイラーの構造（JIS B 8201）」が引用されている。具体的な計算方法を次項に記す。

2.2 JIS B 8201 による肉厚計算式

JIS B 8201 による必要最小肉厚計算式としては、下記に示すように、外径を基準とする式と内径を基準とする式の2種類がある。

外径を基準とする場合

$$t = \frac{PD_o}{2 \sigma_a \eta + 2 \kappa P} + a1$$

内径を基準とする場合

$$t = \frac{PD_i}{2 \sigma_a \eta - 2P(1 - \kappa)} + a1$$

- t : 円筒部の最小肉厚 (mm)
 - P : 最高使用圧力 (MPa)
 - Do : t を計算する部分の外径 (mm)
 - Di : t を計算する部分の内径 (mm)
 - σ_a : 材料の許容引張応力 (N/mm²)
 - η : 長手継手の効率又はリガメント効率
 - a1 : 腐食代 (mm)
- JIS B 8201 では「付け代」であるが、理解を容易にするため「腐食代」と定義した。
- κ : 係数（フェライト鋼で設計温度が480℃以下の場合、0.4）

3 米国における減肉管理

3.1 ASME FFS とは

ASME FFS は、数年に一度、改訂版が発行されており、最新版は2016年版である。ASME FFS は、Part1 から Part14 まで、表 3.1 に示すような14のPartから構成されている。各種の欠陥及び損傷事象に対する対処方法については、Part3 から Part14 において紹介されており、各 Part では、レベル1 からレベル3 の3段階の評価方法が提供されている。

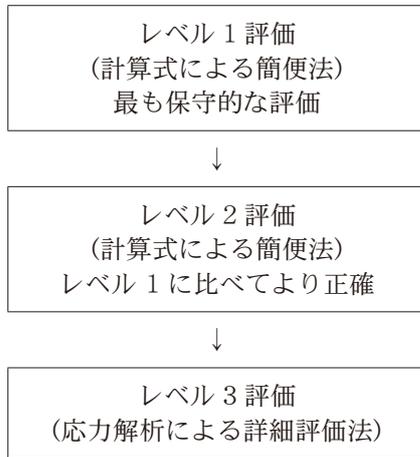
また、Example Problem Manual (API 579-2/ASME FFS-2) と呼ばれる例題集も発行されていて、具体的な計測データを基にした評価の方法を学ぶことができるようになっている。

表 3-1 欠陥及び損傷評価手順の概要

欠陥及び損傷の種類	API 579-1/ASME FFS-1 における該当パート	評価方法
概要	Part 1	—
評価手順	Part 2	—
脆性破壊 Brittle Fracture	Part 3	脆性抵抗値の評価
全面減肉 General Metal Loss	Part 4	肉厚計測値による評価
局部減肉 Local Metal Loss	Part 5	肉厚計測値による評価
孔食 Pitting Corrosion	Part 6	孔食深さによる評価
水素割れ Bristers and HIC/ SOHIC Damage	Part 7	ブリストア分布等の評価
溶接部の食い違い Weld Misalignment and Shell Distorsions	Part 8	応力評価
き裂状欠陥 Crack-Like Flaws	Part 9	き裂進展評価
クリープ損傷 High Temperature Operation and Creep	Part 10	クリープ評価
火災損傷 Fire Damage	Part 11	材料の劣化評価
へこみ等 Dent, Gouge, and Dent Gouge Combinations	Part 12	へこみ深さ、数の評価
ラミネーション Laminations	Part 13	目視による評価
疲労損傷 Fatigue	Part 14	疲労評価

3.2 ASME FFS による減肉評価

ASME FFS による減肉評価では、「定量的なデータ」である、肉厚計測値をベースに評価を行うために、客観的な判断が可能となる。評価の流れとしては、下記の通りである。



ASME FFS-1 による減肉評価を適用した場合、下記のような対応となる。

- ・レベル 1 からレベル 3 のいずれかのレベルで合格基準を満足した場合、その時点で評価は終了し、運転継続が可能となる。
- ・レベル 1 からレベル 3 のいずれかのレベルで合格基準を満足しない場合、運転条件変更+再評価で合格基準を満足した場合には、変更した運転条件下でのみ、運転継続が可能となる。
- ・レベル 1 からレベル 3 のいずれかのレベルで合格基準を満足しない場合、かつ、運転条件変更を実施しない場合には、補修等を実施することになる。

主として内圧のみが負荷するような圧力容器等において、肉厚計測による肉厚分布が得られた場合、下記の評価方法を使用して、当該減肉部が全面減肉状態と考えて評価することになる。

- ①肉厚最小値を使用した評価方法（最も保守的な評価方法、レベル 1 評価）
肉厚平均値として、肉厚最小値を用いて行う評価
- ②平均肉厚値を使用した評価方法（レベル 2 評価）
肉厚平均値そのものを用いて行う評価
- ③応力解析による評価方法（レベル 3 評価）

なお、上記①から③の評価を実施し、合格基準を満足しないような場合には、全面減肉状態とは考えずに、局部減肉状態と考えて、別途、評価を行うことも可能であるが、本書では触れないものとする。

4 減肉評価方法の比較 (Example Problem Manualを使用した全面減肉評価の例)

本章では、Example Problem Manual に記載された、下記の例題に示す具体的な肉厚計測データを用いて、国内及び米国での減肉評価方法を実際に行い、必要最小肉厚値の算出を実施し、運転継続の可否を判断する。

例題：下記に示す熱交換器の円筒胴内面に生じた腐食に対して、運転継続の可否を判断しなさい。
(ASME Sec. VIII, Div. 1, 1989 にて製造)

機器データ	
材質	SA-516 Grade 60,1989 ($\sigma_a = 96.196 \text{ N/mm}^2$)
最高使用圧力 (P)	3.85 MPa @380°C
容器内径 (Di)	484 mm
公称肉厚 (tnom)	16 mm
将来腐食代 (a1)	2 mm
溶接継手効率 (η)	1.0

計測データ	
計測位置	肉厚計測値 t (mm)
1	13
2	12
3	11
4	13
5	10
6	12
7	11
8	12
9	13
10	13
11	11
12	12
13	12
14	13
15	13

←最小値 (tmin)

4.1 火技解釈 (JIS B 8201) による肉厚計算 (外径を基準とする場合)

$$t = \frac{PD_o}{2 \sigma_a \eta + 2 \kappa P} + a_1$$

$$= \frac{3.85 \times (484 + 16 \times 2)}{2 \times 96.196 \times 1 + 2 \times 0.4 \times 3.85} + 2$$

$$= 12.16 \text{ mm}$$

必要最小肉厚を満足していない。

4.2 火技解釈 (JIS B 8201) による肉厚計算 (内径を基準とする場合)

$$t = \frac{PD_i}{2 \sigma_a \eta - 2P(1 - \kappa)} + a_1$$

$$= \frac{3.85 \times 484}{2 \times 96.196 \times 1 - 2 \times 3.85 \times (1 - 0.4)} + 2$$

$$= 11.92 \text{ mm}$$

必要最小肉厚を満足していない。

4.3 ASME FFS による肉厚計算 (レベル 1)

ASME FFS 2007 年版, Part4 の表 4.4 を使用して、内圧が負荷される場合のレベル 1 評価を実施する。

$$t_{am} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N trd, i = 12.0667$$

$$S = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (trd, i - t)^2 = 12.9333$$

$$COV = \frac{1}{t_{am}} \left(\frac{S}{N-1} \right)^{0.5} = 0.08$$

変動係数 (COV) は、8 (%)

STEP - 2 平均肉厚の算出

COV = 8 (%) < 10 (%) より、肉厚分布における平均肉厚 (tam), 及び平均減肉量 (LOSS) は、下記の通り。

$$t_{am} = 12.0667 \text{ mm}$$

$$LOSS = t_{nom} - t_{am} = 16 - 12.0667$$

$$= 3.9333 \text{ mm}$$

STEP - 1 変動係数 (COV) の算出

計測位置	肉厚計測値 trd, i (mm)	平均肉厚値との差異 trd, i - tam	(平均肉厚値との差異) ² (trd, i - tam) ²
1	13	0.9333	0.8711
2	12	- 0.0667	0.0044
3	11	- 1.0667	1.1378
4	13	0.9333	0.8711
5	10	- 2.0667	4.2711
6	12	- 0.0667	0.0044
7	11	- 1.0667	1.1378
8	12	- 0.0667	0.0044
9	13	0.9333	0.8711
10	13	0.9333	0.8711
11	11	- 1.0667	1.1378
12	12	- 0.0667	0.0044
13	12	- 0.0667	0.0044
14	13	0.9333	0.8711
15	13	0.9333	0.8711
$t_{am} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N trd, i = 12.0667$		$S = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (trd, i - t)^2 = 12.9333$	
$COV = \frac{1}{t_{am}} \left(\frac{S}{N-1} \right)^{0.5} = 0.08$			

STEP - 3 必要最小肉厚の算出

将来的な腐食量を考慮した最終的な胴の内半径を R とすると、必要最終肉厚は下記ようになる。

$$t_{min}^c = \frac{PR}{(\sigma_a \eta - 0.6P)}$$

$$= \frac{3.85(242 + 2 + 3.9333)}{96.196(1.0) - 0.6(3.85)}$$

$$= 10.1670\text{mm} : \text{円周方向必要最小肉厚値}$$

$$t_{min}^l = \frac{PR}{(2\sigma_a \eta + 0.4P)}$$

$$= \frac{3.85(242 + 2 + 3.9333)}{2(96.196)(1.0) + 0.4(3.85)}$$

$$= 4.9221\text{mm} : \text{長手方向必要最小肉厚値}$$

$$t_{min} = \max(t_{min}^c, t_{min}^l)$$

$$= \max(10.1670, 4.9221)$$

$$= 10.1670\text{mm} : \text{必要最小肉厚値}$$

STEP - 4 継続運転可否の決定

機器の継続運転が容認できるか否か決定する。
ASME FFS 2007 年版, Part4 の表 4.4 を使用して、
レベル 1 評価を実施する。

$$(tam - a1 = 10.0667\text{mm})$$

$$\geq (t_{min} = 10.1670\text{mm}) \Rightarrow \text{正しくない}$$

一方、平均肉厚 (tam) に基づく最大許容運転圧力 MAWP は、当該クライテリアにおいて、設計圧力と比較される。

$$t = tam - a1 = 10.0667\text{mm}$$

$$MAWP = \frac{\sigma_a \eta t}{R + a1 + LOSS + 0.6t}$$

$$= \frac{(96.196)(1)(10.0667)}{(242 + 2 + 3.9333) + (0.6)(10.0667)}$$

$$= 3.813 \text{ MPa}$$

$$3.813\text{Mpa (MAWP)} \geq 3.85\text{Mpa (設計圧力)}$$

$$\Rightarrow \text{正しくない}$$

レベル 1 評価クライテリアを満足していない。

4.4 ASME FFS による肉厚計算 (レベル 2)

ASME FFS 2007 年版, Part4 の表 4.4 を使用して、
内圧が負荷される場合のレベル 2 評価を実施する。

ここで、RSFa は許容残強度係数であり、一般的には、0.9 である。

$$(tam - a1 = 10.0667\text{mm}) \geq (RSFa \times t_{min})$$

$$= (0.9) (10.1670) = 9.1503\text{mm} \Rightarrow \text{正しい}$$

$$9.1503\text{mm} : \text{必要最小肉厚値}$$

一方、平均肉厚 (tam) に基づく最大許容運転圧力 MAWP は、当該クライテリアにおいて、設計圧力と比較される。

$$t = \frac{(tam - a1)}{RSFa} = \frac{10.0667}{0.9} = 11.1852 \text{ mm}$$

$$MAWP = \frac{\sigma_a \eta t}{R + a1 + LOSS + 0.6t}$$

$$= \frac{(96.196)(1)(11.1852)}{(242 + 2 + 3.9333) + (0.6)(11.1852)}$$

$$= 4.225 \text{ MPa}$$

$$4.225\text{Mpa (MAWP)} \geq 3.85\text{Mpa (設計圧力)}$$

$$\Rightarrow \text{正しい}$$

最小計測肉厚クライテリアをチェックする。

$$(t_{min} - a1 = 8.1670\text{mm}) \geq \max(0.5t_{min})$$

$$= 5.0835, t_{lim})$$

$$t_{lim} = \max(0.2t_{nom} = (0.2) (16)$$

$$= 3.200, 2.500) = 3.200\text{mm}$$

$$8.1670\text{mm} \geq (\max [5.0835, 3.200] = 5.0835\text{mm})$$

$$\Rightarrow \text{正しい}$$

最小計測肉厚クライテリアを満足している。

内圧負荷に対するレベル 2 評価クライテリアを満足している。

5 おわりに

4 章より、必要最小肉厚値の計算結果をまとめると、表 5.1 のようになる。

表 5-1 各計算手法による必要最小肉厚値

評価方法	必要最小肉厚値	運転継続
火技解釈 (外径基準)	12.16 mm	不可
火技解釈 (内径基準)	11.92 mm	不可
ASME FFS (レベル 1)	10.17 mm	不可
ASME FFS (レベル 2)	9.15 mm	可

定検時に実施する火力発電設備の容器、配管等の肉厚計測結果に対する減肉評価方法として、ASME FFS を用いることにより、必要最小肉厚の値を低減することができる。

以上のように、米国で用いられている、ASME FFS の評価方法を用いることにより、運転継続期間を延長することが可能となり、ランニングコストの低減につなげることが可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 日本機械学会 発電用設備規格 配管減肉管理に関する規格 (JSME S CA-1-2016)
- 2) 日本機械学会 発電用火力設備規格 火力設備配管減肉管理技術規格 (JSME S TB-1-2016)
- 3) 日本産業規格 陸用鋼製ボイラーの構造 (JIS B 8201-2013)
- 4) Fitness-For-Service, API 579-1/ASME FFS-1, June 5, 2007
- 5) Fitness-For-Service, API 579-1/ASME FFS-1, June, 2016
- 6) Fitness-For-Service Example Problem Manual, API 579-2/ASME FFS-2, August 11, 2009
- 7) 小島郁夫, 菊池務, 田原隆康, 圧力機器の供用適正評価技術 第一報 供用適正評価の概要と減肉評価 (圧力技術 第 44 巻第 4 号)



小嶋敏雄

核燃料再処理施設の使用前溶接事業者検査 (溶接)に係る運用事例

New guideline on the pre-service inspection of weldment for the nuclear fuel reprocessing facility under new regulation

規格基準室 長谷川 忠之

With the revision of “Act on the Regulation of Nuclear Source Material, Nuclear Fuel Material and Reactors” in April 2020, the inspection regulation on weldment for the nuclear fuel reprocessing facility has shifted to new one. In this report, the author will introduce a guideline created by the private sector's voluntary activities for the purpose of utilizing it under new inspection regulation.

Keywords Nuclear Fuel Reprocessing Facility, Guideline

1 はじめに

2020（令和2）年4月の原子炉等規制法の改正施行に伴い、核燃料再処理施設の溶接に係る検査は事業者が主体となって実施する新たな制度へ移行した。さらに、7月29日に開催された第18回原子力規制委員会において、日本原燃株式会社の再処理事業所における再処理の事業の変更について審議され、変更が許可された^[1]。このため、今後は事業者が主体となって溶接部の検査を行い、事業者が行った検査内容を原子力規制庁が原子力規制検査において確認することとなる。

従前の規制制度では、技術基準を運用する際の理解を統一する目的で、(財)原子力安全技術センター（現（公財）、以下、原安センター）が発行した運用事例^[2]（以下、旧運用事例）を参考に検査が行われていたが、新規制度の議論の過程では、新規の施行と同時に新たな運用事例が発出又は発行される予定はなかったことから、新規制度の下で適切に現場対応を行うための具体的なガイドラインのよう

なものが必要になると想定された。

そこで、当協会内に独立した民間の第三者としての技術検討委員会を設置し、新規制度の下での技術基準に対応した新たな運用事例（以下、新運用事例という）を検討するとともに、その内容を事例集としてとりまとめた。本報では、新運用事例の検討概要と具体的内容のいくつかを紹介する。

2 検討概要と基本コンセプト

(1) 検討概要

技術検討委員会の構成を図1に示す。技術検討委員会は学識経験者を委員とし、核燃料再処理施設を設置する事業者、溶接施工に関係する製造事業者及び溶接部の検査等に関係する事業者をオブザーバーとした。委員会の審議検討に際しては、オブザーバーからの意見も積極的に求めた。

設置事業者が検査を実施するに当たり、具体的な要求事項が記載された規制文書は『再処理施設の技術基準に関する規則』（以下、再処理規則という）

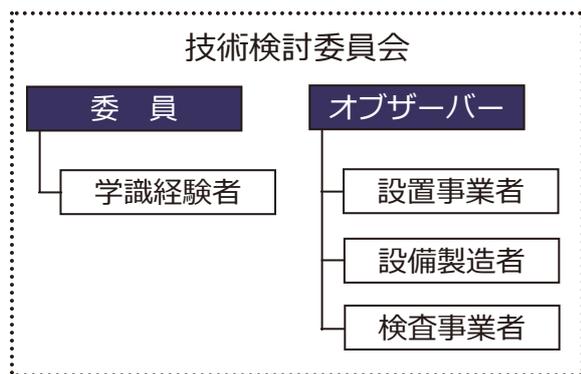


図1 技術検討委員会の実施体制

及び『再処理施設の技術基準に関する規則の解釈』（以下、再処理解釈という）であるが、新規制制度の下で適用される再処理規則及び再処理解釈が、新運用事例の検討時には正式に発出されていなかった。このため、2019（令和元）年9月から10月にかけて原子力規制委員会によって行われた意見募集^[3]で公開された再処理規則案及び再処理解釈案に基づいて新運用事例の内容を検討した。

(2) 基本コンセプト

技術検討委員会での審議検討に当たり、初めに、新運用事例としてまとめる際の基本となる考え方を設定した。

まず、新運用事例を使用する対象者は、設置事業者及び製造事業者とした。対象者の中には設置事業者及び製造事業者から依頼された関係者も含んでいる。したがって、設備やその溶接に対して、ある程度の知識や経験を有する者を念頭に置いている。

また、新運用事例としてまとめる対象範囲については、製造時の仮付溶接、本溶接及び手直し溶接とし、供用後の補修溶接については除くこととした。

さらに、対象者が技術基準適合性を判断する際の一助にできるよう、再処理規則案及び再処理解釈案で与えられている要求事項の基本的な考え方や技術的根拠を可能な限り示すこととした。ここで、再処理規則案及び再処理解釈案は従前の要求事項を多く引き継いでおり、また、旧運用事例には新規制制度へ移行後も引き続き有益と考えられる情報が多く含まれているとともに、これらの知見を残すことで過去の経緯を将来にわたって伝承することが可能となる。そこで、要求事項としてJSME 発電用原子力設備規格 溶接規格の2012年版(2013年追補を含む、

以下、JSME 溶接規格)等の規格が読み込まれ、これに従うことになる運用事例の内容に関してはできるだけ簡素な記載にする一方、要求事項の基本的な考え方や技術的根拠は解説や参考として紙面の多くを費やし内容の充実を図った。

加えて、公知性に配慮し、新運用事例としてまとめたものは広く一般が閲覧できるよう、発電技検のウェブサイトで公開するとともに、国立国会図書館への収蔵を目的に納本申請を行った。

3 新運用事例の具体例

表1に新運用事例の目次構成を示す。検査の要否、対象範囲や区分の考え方、設計等に関する章と、溶接の施工方法や溶接士に関する章の2章で構成され、各章でさらに項目を細分化した。以下、新運用事例の具体例を示す。

(1) 放射線透過試験における材厚の取り方

放射線透過試験（以下、RT）における材厚の取り方を明確にするとともに、その背景にある考え方や過去の経緯を解説・参考として加えた。

(2) 再処理第4種機器の継手接続箇所

再処理第4種機器では、“継手接続箇所から100mm以内の溶接部”には放射線透過試験（以下、RT）が要求されているが、この“継手接続箇所”とは具体的にどの様な継手か、また、具体的にはどの

表1 新運用事例の目次構成

第I章 使用前事業者検査（溶接）
(1) 検査の対象・範囲
(2) 継手に対する検査の要否
(3) 材料確認・ミルシート
(4) 非破壊試験・機械試験
(5) 耐圧・漏えい試験、仕上り検査
(6) 輸入品の使用前事業者検査（溶接）
(7) その他
第II章 溶接の方法・溶接施工法・溶接士
(1) 溶接部の設計
(2) 溶接施工法
(3) 溶接士技能
(4) 溶接士技能の有効期限

範囲を RT 撮影すればよいのかを明確にした。

(3) 溶接継手の非破壊試験を行う時期

溶接後に溶接継手を機械加工によって切削して厚さが薄くなる場合、事業者の検査で要求されている非破壊試験はどのタイミングで行うことが適切かを明示するとともに、その基本的な考え方を解説にまとめた。

(4) 耐圧試験

再処理規則案及び同解釈案では、軽水炉の場合と同様に JSME 溶接規格を引用しているため、JSME 溶接規格の該当条項を明確にするとともに、その技術的背景を解説や参考として詳細に記載し、旧運用事例に比べて大幅に充実させた。

4 おわりに

本報では、核燃料再処理施設に係る新運用事例について紹介した。再処理規則及び同解釈は新運用事例の検討終了と相前後して正式に公布されたが、意

見募集時の案と概ね変わらないため、本報で紹介した新運用事例がそのまま活用することができる。また、前述のとおり、公知性を踏まえて事例集を発電技検のウェブサイト上で公開しており、本報で紹介した以外の新運用事例の内容も見ることができるため、関心のある方はご一読いただければ幸いである。

なお、新運用事例の作成にあたり、委員及びオプザーバーに活発に議論いただくとともに、(公財)原子力安全技術センターより有益な情報を提供いただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- [1] 原子力規制委員会 URL : https://www.nsr.go.jp/disclosure/law_new/REP/180000052.html (2020年7月30日閲覧)
- [2] 『再処理施設の溶接検査に関する運用事例集』, 平成7年3月, 財団法人 原子力安全技術センター 溶接検査部
- [3] 新たな検査制度(原子力規制検査)の実施に向けた法令類の整備(第二段階)に対する意見募集について(基準規則及びその解釈), 案件番号198019115, 意見募集期間:2019年9月26日~2019年10月25日, 原子力規制委員会



長谷川忠之

遠隔での溶接部外観検査を想定した計測技術の調査

溶接・非破壊検査技術センター

水野 亮二, 村上 功治, 古川 敬

1 はじめに

発電設備の溶接事業者検査では、外観検査により溶接部に機器の健全性に影響を及ぼす有害な欠陥がないことを確認している^{[1][2]}。溶接部の外観検査では、一例として隅肉溶接部の脚長さやのど厚、余盛高さの寸法が適切かどうか溶接ゲージを用いて直接計測し確認している。昨今、コロナ禍において現地での外観検査の立会いが困難となり、Webカメラ等を活用した遠隔での立会いのニーズが高まっている。しかしながら、遠隔での外観検査では立会い者が直接溶接ゲージを用いて計測することはできない。

遠隔によりWebカメラ等による溶接ゲージの読み取りが困難で時間を要する場合があります。遠隔で溶接部の寸法を簡便に計測でき寸法を確認できる技術が望まれている。そこで、遠隔での外観検査を想定し、既往の計測技術の適用性を調査した。

2 既往技術の調査

立会検査を想定し、溶接ゲージと同程度の情報が得られる技術、すなわち溶接部の外観形状や寸法をリアルタイムで測定できる技術を調査した。第1表に代表的な技術とその主な仕様を示す。第1表中の名称、特徴は、各々筆者らの呼称及び見解である。

今回は、取り扱いの簡便さと計測精度・分解能を考慮し、ラインスキャンを活用した計測技術の適用性を確認することとした。

3 計測方法

計測装置はラインスキャンを用いた市販品、(株)コムビック製3D Handy Scanner LC-GEAR(以下、3Dスキャナ)を用いた^[8]。本装置は、レーザ光を用いて非接触で簡便に溶接ビードの形状を計測することができる。

第1表 代表的な形状計測技術

名 称	特 徴	参考文献／計測技術の情報
3D スキャン (パターン投影／ToF等)	表面の形状を計測できる。測定の分解能は0.1mm以下(パターン投影)から1～3mm程度(ToF)と用途に応じて種類が豊富で活用先が多岐にわたる。	(3), (4), (5), (6)
ラインスキャン (光切断)	断面の形状を0.1mm以下の分解能で、ほぼリアルタイムで測定ができる。インラインやロボット搭載で使用されることが多いが、溶接部に特化した可搬式の機器も発表されている。	(7), (8)
深度計測 (デプスセンサ)	主にゲームや拡張現実(AR)において物体認識や動作認識のセンサに活用されている。鉄筋施工検査装置への活用も発表されている。測定の分解能は1mm～数mm程度と考えられる。	(9), (10)

第1図に示す(a) SUS 溶接試験体の隅肉溶接部(フランジ-パイプの溶接部)及び(b)樹脂製隅肉溶接レプリカ(平板-平板の溶接模擬部)の隅肉溶接部の脚長の計測を行った。SUS 溶接試験体では隅肉溶接部5か所、樹脂製隅肉溶接レプリカでは異なる溶接部5種類の隅肉溶接部の脚長を用いて計測を行った。計測は、各箇所において5回計測を行った。また、それぞれ同一箇所において溶接ゲージ(目盛り1mm刻み)での計測も行った。また、SUS 溶接試験体は金属光沢があるので、パイプ部でのレーザ光の散乱を抑えるためにPT 現像剤を塗布したものを計測した。

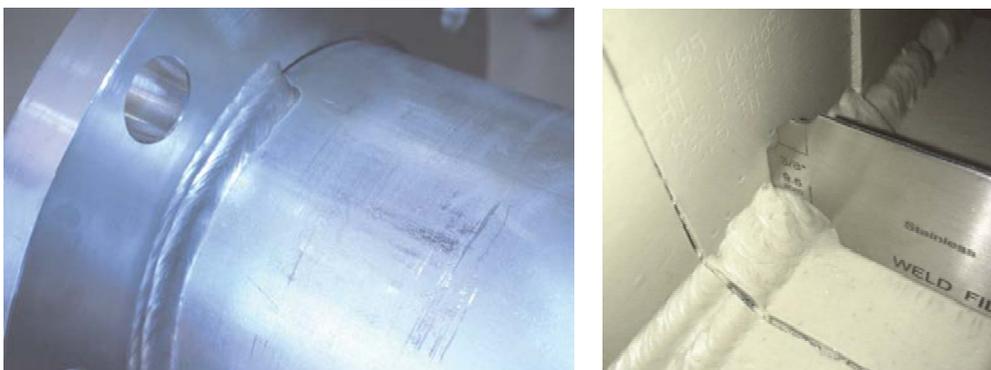
また、炭素鋼突合せ溶接試験体4体を用いて余盛高さの計測も隅肉溶接部の脚長と同様に行った。

4 計測結果

a. SUS溶接試験体の隅肉溶接部(フランジとパイプの溶接部)の脚長の計測結果

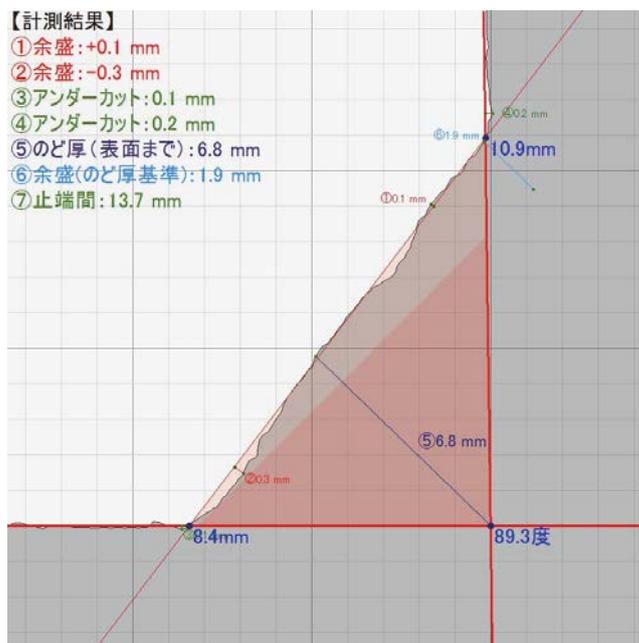
計測結果の一例を第2図に示す。第2図の様に脚長等の計測結果が表示される。計測結果は数値で表示されるため容易に寸法を確認することができる。

第3図に SUS 溶接試験体(金属光沢あり)の脚長の測定結果を示す。計測は、レーザ光の散乱により計測結果が正しく求められない場合もあった。第3図の計測結果は、正しく計測出来た結果を示している。第4図に SUS 溶接試験体(金属光沢なし)の脚長測定結果を示す。SUS 溶接試験体(金属光沢なし)の計測では、SUS 溶接試験体(金属光沢あり)



(a) SUS 溶接試験体 (b) 樹脂製溶接レプリカ

第1図 溶接試験体及びレプリカ



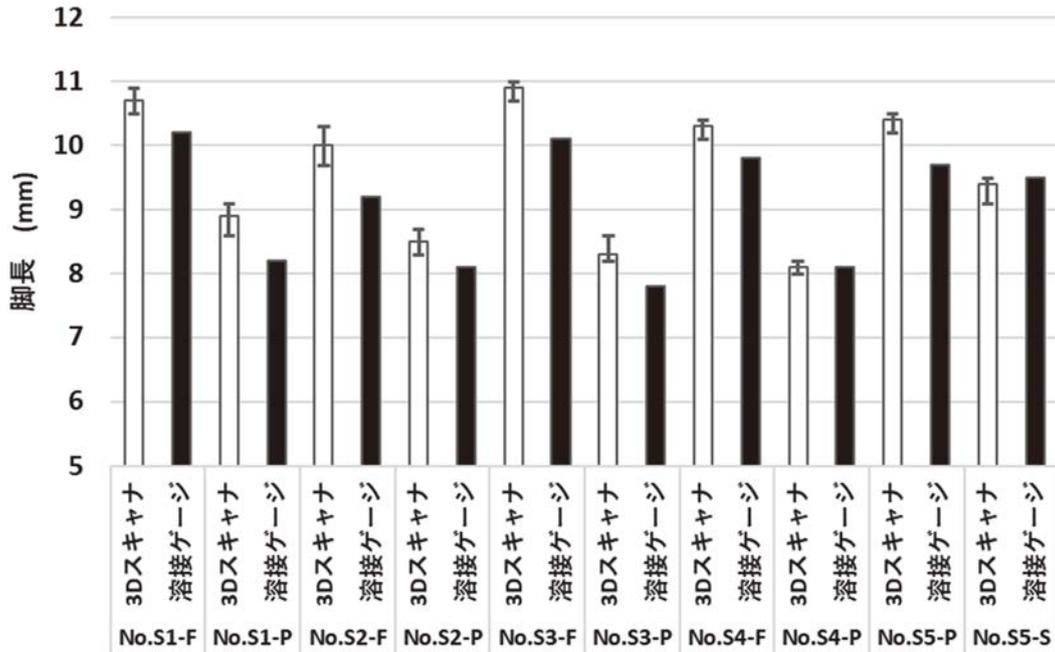
第2図 計測結果の一例

の様に計測結果が正しく求められない場合はなく、ほぼ正しく計測することができた。正しく計測できた場合、金属光沢ありと金属光沢なしでは計測結果は0.1mm以下の差であり、計測結果は同様であった。また、各計測部位における計測結果のバラツキは両方とも±0.3mm程度あり差はなかった。溶接ゲージとの比較では、3Dスキャナでの計測の方が、脚長が長い傾向があり、最大で+0.9mmの差があっ

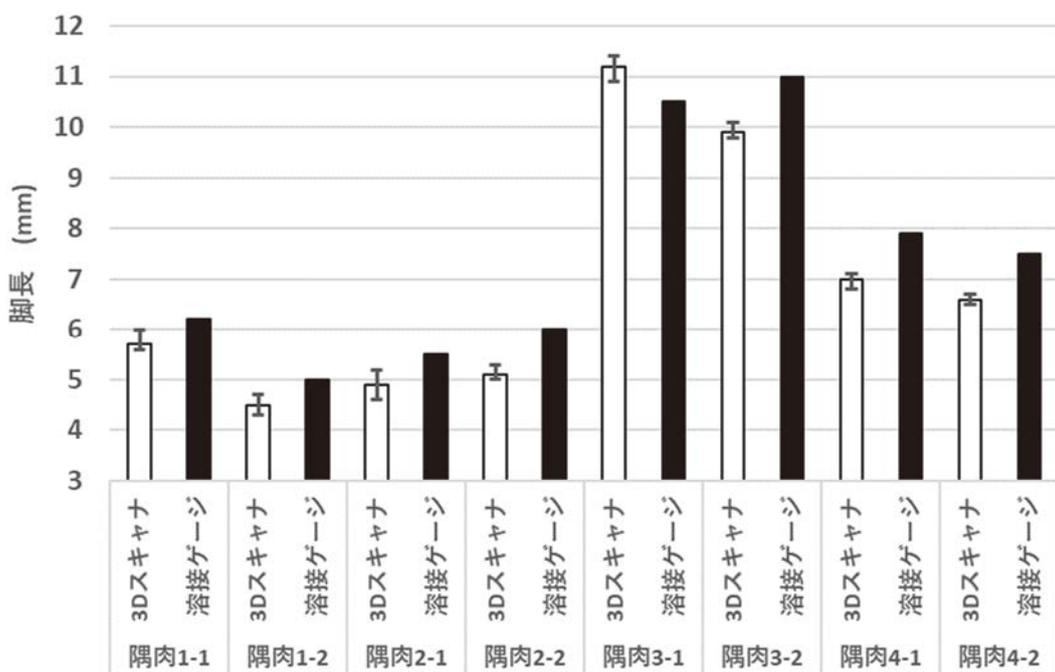
た。

b. 樹脂製隅肉溶接レプリカの脚長の計測結果

第5図に樹脂製隅肉溶接レプリカの脚長の計測結果を示す。樹脂製隅肉溶接レプリカでの計測結果は、SUS溶接試験体の計測結果のバラツキと同等(±0.3mm)であった。溶接ゲージとの比較では、3Dスキャナでの計測の方が短い傾向があり、最大で-



第3図 SUS溶接試験体（金属光沢あり）の脚長計測結果



第4図 SUS溶接試験体（金属光沢なし）の脚長計測結果

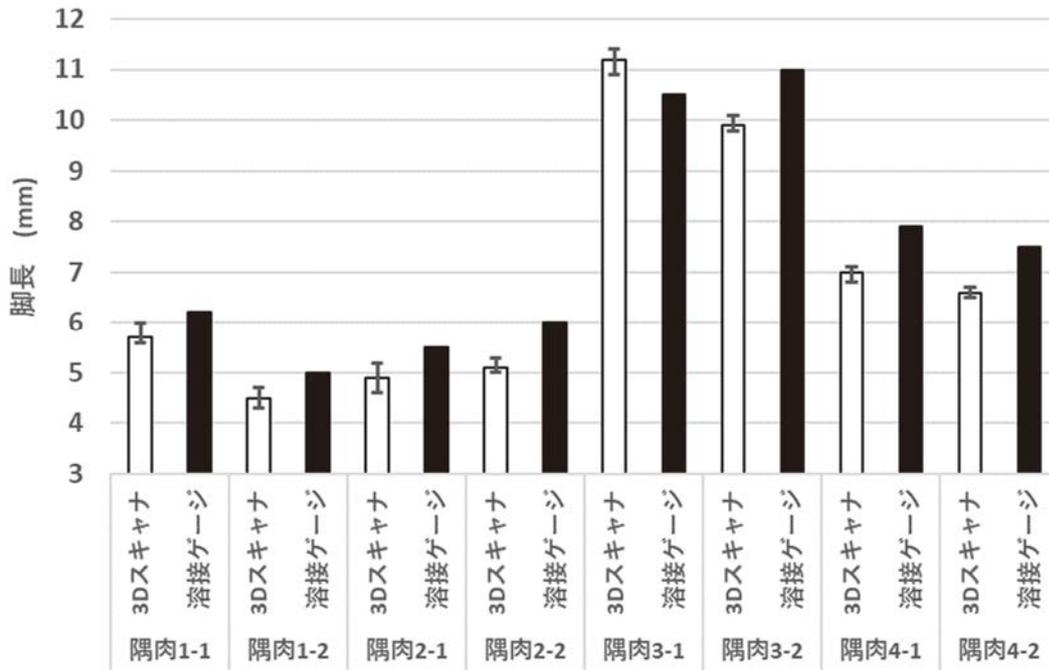
1.1mm あった。

c. 炭素鋼突合せ溶接試験体の余盛高さ計測結果

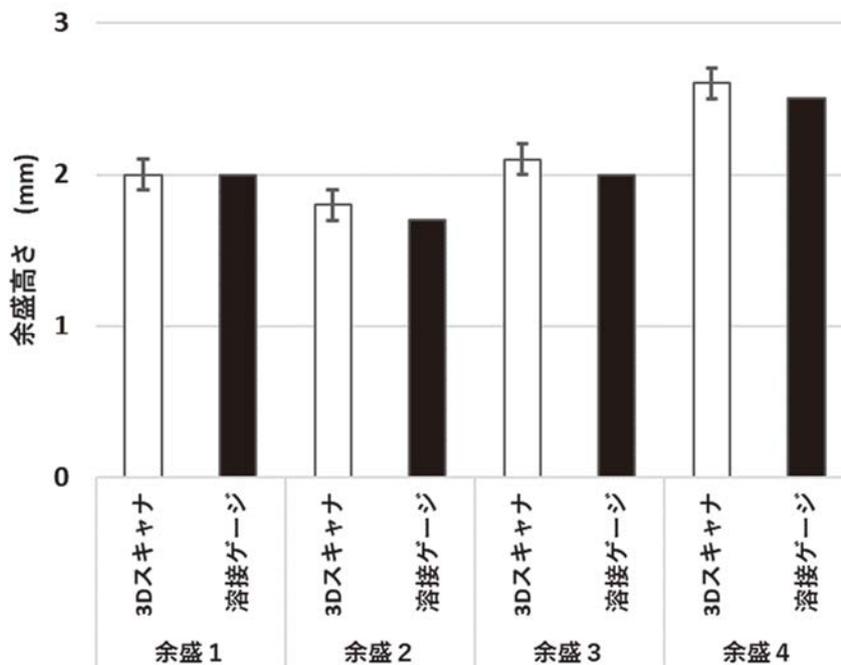
第6図に炭素鋼突合せ溶接試験体の余盛高さの計測結果を示す。余盛高さの計測結果は、± 0.1mm 程度のバラツキであり、溶接ゲージとの測定結果との差も± 0.1mm 程度であった。

5 おわりに

遠隔での外観検査を想定し、非接触で簡便に溶接部の寸法が計測できる3Dスキャナの適用性を調査した結果、3Dスキャナの計測結果は、溶接ゲージでの計測結果と比較して、最大で± 1mm 程度の差があった。外観検査の寸法確認では、現状では溶接ゲージでの計測寸法が正となるため、最終的には溶



第5図 樹脂製隅肉溶接レプリカの脚長計測結果



第6図 炭素鋼製突合せ溶接試験体の余盛高さ計測結果

接ゲージでの計測が必要となると考えられるが、本計測技術は、非接触で簡便に寸法確認ができるため本計測技術をスクリーニングに活用し、疑義が生じる場合は溶接ゲージにより確認するなど溶接ゲージと併用して運用することが考えられる。また、今後、検査に用いる場合は装置の校正方法や計測結果の妥当性等の検証が重要と考える。

謝 辞

本調査を行うにあたり計測装置 (3D Handy Scanner LC-GEAR) のデモ品を (株) コムビック殿から借用した。この場をお借りしてお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 例えば 原子力規制委員会：実用発電用原子炉及び附属施設の技術基準に関する規則の解釈 (平成 25 年 6 月 19 日原規技発第 1306194 号)
- [2] 例えば 日本機械学会：発電用原子力設備規格

設計・建設規格 (SNC-1)

- [3] 新村：“三次元計測の溶接部検査への適用”，検査技術，Vol.20, No.10. (2015)，p.62
- [4] 今井：“3D レーザースキャナ技術のメンテナンス現場適用”，検査技術，Vol.23, No.7. (2018)，p.53
- [5] 柴田：“現場使用に優れたハンドヘルド型 3D スキャナーについて”，検査技術，Vol.23, No.7. (2018)，p.58
- [6] 村中他：“自動車業界における 3 次元測定とレーザースキャン技術”，検査技術，Vol.23, No.7. (2018)，p.67
- [7] 大岡：“ポータブル隙間・段差測定器を用いた検査工程における適用事例”，検査技術，Vol.24, No.1. (2019)，p.37
- [8] 松村：“非接触計測技術による溶接ビード形状・寸法計測装置の紹介”，検査技術，Vol.26, No.1. (2021)，p.43
- [9] <https://structure.io/structure-core> (2021 年 1 月閲覧)
- [10] <https://www.mitsuiipr.com/news/2020/1210-2/> (2021 年 1 月閲覧)



水野亮二



村上功治



古川 敬

出願特許一覧

1	特許件名	漏洩磁束法における評価方法	発明者	程 衛英 上山芳教 他
	出願番号-出願日	特願2015-246074 2015/12/17	登録番号-登録日	特許第6146828号 2017/5/26
	概要	低磁化漏洩磁束法により強磁性体（鉄鋼材料）の減肉や材質変化を非破壊で評価する方法		
2	特許件名	高Cr系鋼構造物のじん性評価方法	発明者	西川 聡 他
	出願番号-出願日	特願2008-198193 2008/7/31	登録番号-登録日	特許第4664399号 2011/1/14
	概要	Cr含有量が8～14wt%のラーベス相が析出する高Cr系鋼構造物で、アノード分極曲線を利用してじん性を評価する方法		
3	特許件名	渦電流探傷信号処理方法	発明者	兼本 茂 他
	出願番号-出願日	特願2006-027648 2006/1/6	登録番号-登録日	特許第4235648号 2008/12/19
	概要	検査対象物表面の金属組織内部の自然欠陥を非破壊で外部から計測するための渦電流探傷信号処理方法		
4	特許件名	クリープボイドの非破壊検出方法	発明者	志波光晴 他
	出願番号-出願日	特願2002-308129 2002/10/23	登録番号-登録日	特許第3803314号 2006/5/12
	概要	供用中のボイラなどの高温機器において、交流磁化測定により、簡便かつ非破壊的に現地においてクリープボイドを検出する方法		
5	特許件名	非破壊高温クリープ損傷評価方法	発明者	志波光晴 他
	出願番号-出願日	特願2002-308126 2002/10/23	登録番号-登録日	特許第3728286号 2005/12/21
	概要	供用中のボイラなどの高温機器において、非破壊的に測定された物理量を用いて、クリープ損傷率を評価し、余寿命時間を求める方法		
6	特許件名	交流磁化を用いた強磁性体構造物のクリープ損傷評価方法及び装置	発明者	志波光晴 他
	出願番号-出願日	特願2000-62965 2000/3/8	登録番号-登録日	特許第3461781号 2003/8/15
	概要	特許第3355322号装置を、強磁性体金属材料及び溶接構造物のクリープ損傷評価に適用		
7	特許件名	交流磁化を用いた強磁性体の溶接物の溶接後熱処理評価装置および方法	発明者	志波光晴 他
	出願番号-出願日	特願2000-62964 2000/3/8	登録番号-登録日	特許第3355322号 2002/9/27
	概要	強磁性体の溶接構造物が熱処理されたかどうか及び熱処理した時の温度を非破壊的で簡単に評価できる装置		

学協会誌等への論文・解説発表

学協会誌名	掲載誌発行年月	著 者	論文名称
AIP Advance	11(1), 015133 (2021)	程 衛英 橋爪秀利	Frequency properties of a flexible printed circuit coil and inductive measurement of conductivity
IEEE Access	Vol.8, 2020	程 衛英	Frequency properties of an air-cored coil and application to conductivity measurement
RUMPES	Vol.34, No.4, 2020, p.6-10	平澤泰治	UT技術者の探傷技量に及ぼす訓練の有効性
溶接学会誌	Vol.89, No.4, 2020, p.258-264	古川 敬	非破壊検査における最新のデジタル化動向
超音波テクノ	2020年5・6月号	古川 敬 上山芳教	鋼溶接部の超音波探傷試験条件の最適化へのシミュレーション解析の活用
IEEE Sensors Journal	Vol.20, No.15, 2020, pp.8643-8655	程 衛英 橋爪秀利	Determination of Layers' Thicknesses by Spectral Analysis of Swept-Frequency Measurement Signals
保全学	Vol.19, No.2, 2020, p.57	牧原善次	NDI技術のやさしい解説-4回目(最終回)-
保全学	Vol.19, No.1, 2020, p.41	牧原善次	NDI技術のやさしい解説-3回目-
保全学	Vol.18, No.4, 2020, p.42	牧原善次	NDI技術のやさしい解説-2回目-
保全学	Vol.18, No.3, 2019, p.26	牧原善次	NDI技術のやさしい解説-1回目-
溶接技術	Vol.67, No.10, 2019, p.34	古川 敬	仮想空間での超音波探傷訓練シミュレータ開発に向けて
検査技術	Vol.24, No.4, p.14	平澤泰治 松田誠司 牧原善次	超音波探傷試験技術者に対する訓練の有効性検討
非破壊検査	第68巻第2号 (2019) p.69	古川 敬	超音波探傷訓練ツールへのシミュレーション解析技術の活用
AIP Advance	9, 035009 (2019)	程 衛英 橋爪秀利	Characterization of multilayered structures by swept-frequency eddy current testing
International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	Vol.59, 2018, p.1169-1178	程 衛英	Swept-frequency eddy current testing to characterize a nonmagnetic metallic plate and a nonconductive coating over it
Japanese Journal of Applied Physics	Vol.57, No.7S1, 07LC02	西野 秀郎 古川 敬 他	Attenuation characteristics of the leaky T(0,1) mode guided wave propagating in piping coated with anti-corrosion grease
Proceedings of the 12th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components	4-6 October, 2016, Dubrovnik, CROATIA	山本敏弘 浦山良一 古川 敬 内一哲哉 古村一朗 高木敏行	Validation of FEM simulation of EMATs for versatile EMAT configurations
火力原子力発電	第69巻6号(2018)	西川 聡 古川 敬 他	ショットピーニングで付与した圧縮残留応力の長期持続性を予測するためのFEM解析手法の開発
非破壊検査	第67巻2号(2018) p.6	上山芳教 古川 敬	フェーズドアレイ法探傷計画検討におけるシミュレーションツールの活用

超音波テクノ	2018年1-2月号, p.19	平澤泰治 小林輝男 牧原善次 南 康雄	UT技術者の探傷技量に及ぼす訓練の有効性
検査技術	2017. 11. Vol. 22, - No.11, p. 9	山本敏弘 古川 敬 西野秀郎	ガイド波試験による配管検査におけるエルボでの欠陥検出感度の特性分析
非破壊検査	第66巻11号(2017) p.538	程 衛英	低磁化強度漏洩磁束法による強磁性体板厚評価
IEEE Sensors Journal	Vol.17, No.14, July 2017, pp.4558-4569	程 衛英	Thickness Measurement of Metal Plates Using Swept-Frequency Eddy Current Testing and Impedance Normalization
超音波テクノ	2017年5-6月号	山本敏弘	有限要素法シミュレーションによるEMATが発生する超音波の伝搬の可視化
超音波テクノ	2017年5-6月号	上山芳教 古川 敬	圧電フィルムによる超音波可視化技術の改良
日本金属学会誌	Vol. 81(2017) No. 6, p. 301-307	山本敏弘 古川 敬 西野秀郎	配管エルボ部の欠陥検出におけるガイド波試験の欠陥検出感度の周波数依存性
非破壊検査	Vol. 66, No. 4	平澤泰治	フェーズドアレイUT技術による水中超音波検査
非破壊検査	Vol. 66, No. 2	平澤泰治 小林輝男 牧原善次 南 康雄	超音波探傷技術者の探傷技量に及ぼす教育・訓練の効果
火力原子力発電大会論文集	平成28年度火力原子力発電大会論文集 CD-ROM	山本敏弘 古川 敬 西野秀郎	ガイド波試験による配管エルボ探傷での欠陥位置と欠陥検出感度の関係
保全学	Vol. 15, No. 3	古村一朗	非破壊検査に関する国際協力プロジェクト PINC 及び PARENT の概要
Proceeding of the 43rd ANNUAL REVIEW OF PROGRESS IN QUANTITATIVE NONDESTRUCTIVE EVALUATION	VOLUME 36, Feb., 2017	程 衛英	Electromagnetic Nondestructive Evaluation of Defects in Ferromagnetic Structures
Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XIX)	Vol. 41, pp. 126-133, IOS Press 2016	程 衛英 上山芳教 塚田啓二	Magnetic Flux Leakage Testing for Defect Characterization
IEEE Sensors Journal	Vol. 16, No. 14, July 2016, pp. 5548-5556	程 衛英	Non-destructive Testing of Back-side Local Wall-thinning by Means of Low Strength Magnetization and Highly Sensitive Magneto-Impedance Sensors
Journal of Nondestructive Evaluation	Vol. 35, Issue 2, June 2016	程 衛英	Magnetic Flux Leakage Testing of Reverse Side Wall-Thinning by Using Very Low Strength Magnetization
火力原子力発電大会論文集	平成27年度火力原子力発電大会論文集 CD-ROM	上山芳教 古川 敬	圧電フィルムによる超音波可視化技術の改良
Proceedings of the 11th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components	19-21 May 2015, Jeju, KOREA	山本敏弘 古川 敬 西野秀郎	Influence of the dimensions of an elbow on defect sensitivity of guided wave testing at elbow part
		上山芳教 古川 敬	Experimental Visualization of Ultrasonic Pulse Waves Using Piezoelectric Films
超音波テクノ	2016. 3-4, Vol. 28, No. 2, p.1-4	平澤泰治 東海林一	フェーズドアレイUTによる異種金属溶接部の欠陥深さ測定

超音波テクノ	2016.3-4, Vol.28, No.2, p.25-28	古川 敬	超音波探傷試験の訓練用シミュレーター
非破壊検査	第65巻 (2016) 2号 P.61-64	古川 敬	超音波伝搬の可視化
Material transactions	Vol. 57(2016) No. 3 p.397-403	山本敏弘 古川 敬 西野秀郎	Frequency Dependence of the Defect Sensitivity of Guided Wave Testing for Efficient Defect Detection at Pipe Elbows
保全学	Vol.15, No.1, 2016, p.77-91	平澤泰治 小林輝男 牧原善次 南 康雄	ステンレス鋼配管突合せ溶接継手の超音波探傷試験員に対する教育・訓練の有効性に関する検討
E-Journal of Advanced Maintenance	Vol.7 No.2 (August, 2015) pp.179-188	程 衛英	Equivalent current models and the analysis of directional ECT signals
E-Journal of Advanced Maintenance	Vol.7 No.2 (August, 2015) pp.189-198	西川 聡	Sustainability of compressive residual stress by stress improvement processes
検査技術	2015.7, p.54-60	程 衛英	パルス渦電流試験法による局部減肉の検査・評価
非破壊検査	第64巻 (2015) 7号 P.153-159	程 衛英	渦電流の乱れと磁束分布に着目した電磁誘導試験
Journal of Applied physics	117,17D143(2015)	程 衛英	Modeling and analysis by harmonic balance method
溶接学会論文集	第33巻 (2015) 第2号 p.153-159	西川 聡 大井浩一 高橋 誠 古川 敬	ニッケル基600合金用被覆アーク溶接金属の耐粒界腐食性に及ぼすショットピーニングと熱時効処理の影響
平成26年度 火力原子力発電大会論文集 CD-ROM	pp.40-45, 2015年3月	程 衛英 比翼 賢 古川 敬 加古晃弘 池堂和仁	パルス渦電流試験法による保温材上からの配管減肉評価
Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation	Vol.34, Mar,2015	西野秀郎 石井誠吾 古川 敬	Resonant Phenomena of Circumferential SH Waves Converted from T(0,1) Mode Guided Waves at Non-Axisymmetric Defects
International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	Vol.45, No.1-4, pp. 179-184, 2014	程 衛英	Pulse eddy current characterization of local wall-thinning
Proceedings of the 10th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components	pp. 902-909, European Union (2014)	山本敏弘 古川 敬 浦山良一 内一哲哉 高木敏行	Property study on EMATs with visualization of ultrasonic propagation
Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XVII)	pp.304-311, IOS Press(2014)	山本敏弘 浦山良一 古川 敬 内一哲哉 古村一朗 高木敏行	Visualization of ultrasonic propagation for EMATs by scanning the side surface of the specimen with a piezoelectric transducer
40th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation	Vol. 33A	山本敏弘 古川 敬 西野 郎	Efficient defect detections of elbow pipes using propagation characteristics of guided waves
Journal of Nuclear Science and Technology	Volume 51, pages 832-844 Apr 2014	青木孝行 高木敏行 古村一朗 古川 敬 遊佐訓孝 浦山良一	Study of a methodology of identifying important research problems by the PIRT process

平成25年度 火力原子力発電大会論文集	平成25年度 火力原子力発電 大会論文集 (CD-ROM)	水野 亮二	原子炉容器鋼テンパービード補修溶接部の低温割れ性及びじん性
月刊 検査技術	2013年7月号	西川 聡	ショットピーニングを施した異材溶接継手における圧縮残留応力の持続性
超音波テクノ誌	2013年5-6月誌 Vol. 25, No. 3, P.45-48	古川 敬 他	ねじりモードガイド波によるエルボ部の減肉計測手法の新展開
火力原子力発電大会論文集	火力原子力発電 大会論文集 (CD-ROM)	西川 聡 大北 茂 山口篤憲	ショットピーニングで異材溶接部に付与した圧縮残留応力の長期安定性
非破壊検査	第61巻 (2012) 9号 P.468-474	程 衛英	高性能磁気センサによる損傷検出・評価
Proceedings of the 9th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components	EUR 25752EN- 2012 P.336-342	程 衛英 古村一朗	Pulsed Eddy Current Testing of Carbon Steel Pipes`Wall-thinning
日本保全学会誌	保 全 学 Vol.11, No.4, P.69-76	西川 聡 大北 茂 山口篤憲	応力改善法で付与される圧縮残留応力の持続性
Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XIV)	pp.241-248, IOS Press(2011)	山本敏弘 内一哲哉 高木敏行	An ECT probe with widely spaced coils for local wall thinning in nuclear power plants
Journal of Nondestructive Evaluation	Vol.31, No.3 p215-224 2012	程 衛英	Pulsed Eddy Current Testing of Carbon Steel Pipes`Wall-thinning Through Insulation and Cladding

学協会等への口頭発表

令和元年度

	学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名
非破壊	日本保全学会 第16回学術講演会	2019/7/25-26 リンクステーションホール青森	山本敏弘 他	超音波可視化技術および数値解析を用いた焦点型電磁超音波探触子の評価
	日本保全学会 第16回学術講演会	019/7/25-26 リンクステーションホール青森	山本敏弘 他	EMATによる超音波の送受信に関する電磁相互作用を考慮したFEMシミュレーション
	The 46th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation	2019/7/14-18 Portland, USA	程 衛英 橋爪 秀利	Eddy current measurement of layers thicknesses beased on reflection coefficient's spectrum analysis
	NONDESTRUCTIVE EVALUATION IN NUCLEAR 2019	2019/6/25-27 Chalotte, USA	山本敏弘 直本 保 他	Program for Investigation of NDE by International Collabaration (PIONIC) : Introduction, Status, and Future Plans
	NONDESTRUCTIVE EVALUATION IN NUCLEAR 2019	2019/6/25-27 Chalotte, USA	山本敏弘 浦山良一 古川 敬 高木敏行	Validation of FEM simulation for transmission and reception of ultrasonic waves with an EMAT
	NONDESTRUCTIVE EVALUATION IN NUCLEAR 2019	2019/6/25-27 Chalotte, USA	直本 保 上山芳教 古川 敬	Prototype of UT training simulator using wave propagation simulation by FEM
	第27回超音波による非破壊評価シンポジウム	2020/1/28 東京都立産業技術研究センター	山本敏弘	EMATによる線音源の指向性分析のためのシミュレーション
その他	2019年度火力原子力発電大会	2019/10/17 アクロス福岡	直本 保	データ活用等による火力発電所の事業運営効率化

平成30年度

	学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名
非破壊	日本保全学会第15回学術講演会	2018/7/10-12 福岡国際会議場	平澤泰治 松田誠司 牧原善次	超音波探傷試験技術者に対するUTシミュレータ訓練の適用性検討
	平成30年度非破壊検査総合シンポジウム	2018/6/7 日本非破壊検査協会	古川 敬	超音波探傷試験の信頼性
	日本鉄鋼協会 第176回秋季講演大会	2018/9/19-21 東北大学	西野秀郎 古川敬 他	AIを援用したガイド波による減肉深さ推定の検討
	平成30年度火力原子力発電大会	2018/10/25 大阪府立国際会議場	平澤泰治 松田誠司 牧原善次	超音波探傷試験技術者に対する探傷技量訓練の有効性検討
	日本非破壊検査協会 平成30年度第2回超音波部門講演会	2018/10/26 機械振興会館	直本 保 上山芳教 古川 敬	シミュレーション解析を活用した鋼溶接部UT訓練シミュレータの試作
	2019 Joint MMM-Intermag Conference	2019/1/14-18 Washington DC, USA	程 衛英 遊佐訓孝 橋爪秀利	Swept-Frequency Eddy Current Testing to Characterize the Layer of Interest in a Multilayered Structure
	非破壊検査協会 第26回超音波による非破壊評価シンポジウム	2019/1/30-31 東京都立産業技術研究センター	古川 敬 山本敏弘 他	フェーズドアレイ超音波探傷法による鋼床版Uリブ溶接部の疲労き裂検出

非破壊	NONDESTRUCTIVE EVALUATION IN NUCLEAR	2019/6/25-27 Chalotte, USA	山本敏弘 浦山良一 古川敬 高木敏行	Validation of FEM simulation for transmission and reception of ultrasonic waves with an EMAT
	NONDESTRUCTIVE EVALUATION IN NUCLEAR	2019/6/25-27 Chalotte, USA	直本 保 上山芳教 古川 敬	Prototype of UT training simulator using wave propagation simulation by FEM

平成29年度

	学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名
非破壊	日本非破壊検査協会東北支部 支部会・講演会	2017/4/21 PARM CITY131	古川 敬	超音波及び電磁気探傷試験におけるシミュレーション技術の活用
	日本保全学会第14回学術講演会	2017/8/2-4 ひめぎんホール	程 衛英	周波数掃引渦電流試験および周波数応答特性解析による金属板厚評価
	日本保全学会第14回学術講演会	2017/8/2-4 ひめぎんホール	直本 保 上山芳教 古川 敬	SUS配管溶接部における柱状晶組織からのUT信号シミュレーション
	The 20th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM-2017)	Chamonix Mont-Blanc, France	程 衛英	Swept-frequency Eddy Current Testing to Measure a Metal Plate's Thickness and Conductivity
	Fourteenth International Conference on Flow Dynamics	2017/10/5-6 仙台	山本敏弘 浦山良一 内一哲哉 高木敏行	FEM simulation method for electromagnetic ultrasonic testing and its application
	日本非破壊検査平成29年度秋季講演大会	2017/10/5-6 福岡国際会議場	山本敏弘 浦山良一 内一哲哉 高木敏行	電磁超音波探触子の最適化に活用するためのFEMシミュレーション方法の妥当性確認
	日本非破壊検査協会 第23回 超音波による非破壊評価シンポジウム	2018/1/25-26 東京都立産業技術研究センター	上山芳教 古川 敬	フェーズドアレイ法探傷計画検討におけるシミュレーションツールの活用
	日本非破壊検査協会 第23回 超音波による非破壊評価シンポジウム	2018/1/25-26 東京都立産業技術研究センター	山本敏弘 古川 敬 他	配管エルボにおけるガイド波試験の欠陥検出感度の周波数および寸法依存性
	電気学会 磁気センサ調査専門委員会	2018/3/6 東京	程 衛英	高感度磁気センサを用いた非破壊検査について
	日本非破壊検査協会 第21回表面探傷シンポジウム	2018/3/26 メルパルク京都	程 衛英	周波数掃引渦電流試験による金属板およびコーティングの厚さ測定・評価
溶接	日本保全学会第14回学術講演会	2017/8/2-4 ひめぎんホール	西川 聡 古川 敬 他	熱サイクル及び応力不可による残留応力変化-応力改善工法で付与した圧縮残留応力の持続性評価(第2報)-
	溶接学会平成29年度秋季全国大会	2017/9/11-13 九州工業大学	西川 聡 他	再現HAZ材を用いた改良9Cr-1Mo鋼溶接部のクリープ特性に関する基礎的検討
	平成29年度火力原子力発電大会	2017/10/12 仙台国際センター	西川 聡 古川 敬 他	ショットピーニングで付与した圧縮残留応力の長期持続性を予測するためのFEM解析手法の開発
	日本溶接協会平成29年度第1回特殊材料溶接研究委員会	2017/6/7 日本溶接協会溶接会館	西川 聡	異材溶接継手の力学的特性

成 果 学協会等への口頭発表

溶接	溶接冶金研究委員会	2018/1/29 大阪大学 東京プラン チ	西川 聡 高橋 誠	改良 9Cr-1Mo 鋼溶接部の PWHT 条件がクリープ破断強度に及ぼす影響
	日本鉄鋼協会 材料の組織と特性部会	2018/1/26 大阪市立大学 梅田サ テライト	西川 聡	ニッケル基 600 号館溶接金属の高温純水中における耐力腐食割れ性の向上について

平成28年度

	学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名
非破壊	JSNDI 超音波部門講演会	2016/5/12 松江テルサ	水野亮二 西川 聡 古川 敬	超音波探傷訓練ツールへ向けたシミュレーション解析における欠陥モデルの検討
	43th Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation	2016/7/16-22 アトランタ、米国	程 衛英	Electromagnetic Nondestructive Evaluation of Defects in Ferromagnetic Samples
	保全学会第 13 回学術講演会	2016/7/25-27 神奈川県立 かながわ労働プラザ	程 衛英	交流励起プローブによる強磁性体の欠陥検出
			古川 敬 上山芳教	フェーズドアレイ UT による溶接部探傷試験条件の最適化
			水野亮二 西川 聡 古川 敬	超音波探傷訓練ツールへ向けたシミュレーション解析における欠陥モデルの検討
平澤泰治 小林輝男 牧原善次 南 康雄	超音波探傷試験技術者に対する教育・訓練の有効性検討			
非破壊	7th International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications	2016/9/18-20 西安、中国	程 衛英 塚田啓二	Electromagnetic Testing of Wall-thinning in Ferromagnetic Structures
	11th International Conference on Non Destructive Evaluation	2016/10/4-6 ドゥブロヴニク、 クロアチア	山本敏弘 浦山良一 古川 敬 内一哲哉 古村一郎 高木敏行	Validation of FEM simulation of EMATs for versatile EMAT configurations
	平成 28 年度 JSNDI 秋季講演大会	2016/10/6-7 ハーネル仙台	上山芳教 古川 敬	炭素鋼溶接部における超音波フェーズドアレイ法の欠陥検出性
	平成 28 年度火力原子力発電大会	2016/10/27 サンポートホール高松	山本敏弘 古川 敬 西野秀郎	ガイド波試験による配管エルボ探傷での欠陥位置と欠陥検出感度の関係
	超音波ソリューションセミナー「IoTを生かす高機能・高精度な超音波シミュレータへの挑戦」	2017/1/25 CTC 霞が関オフィス	古川 敬	超音波探傷試験の条件検討・検証、結果の解釈へのシミュレーション技術の活用
溶接	Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength 2016	2016/9/19-22 富山国際会議場	水野亮二 西川 聡 古川 敬 他	X-ray residual stress measurement of weld heat-affected zone in austenitic stainless steel weld by cos α method
	Visual-JW 2016	2016/10/17-18 ホテル阪急万博公園	西川 聡 大井浩一 高橋 誠	Influence of shot peening and thermal aging treatment on resistance to intergranular corrosion in shielded metal arc weld metal for type 600 nickel base alloy

溶接	International Conference on Maintenance Science and Technology 2016	2016/11/1-4 深セン、中国	西川 聡 大井浩一 高橋 誠	Influence of stress improvement process and thermal aging treatment on resistance to intergranular corrosion in shielded metal arc weld metal for type 600 nickel base alloy
	第54回高温強度シンポジウム	2016/12/8-9 愛媛大学 皆南加記念ホール	西川 聡 齊藤直樹 高橋 誠	改良 9Cr-1 Mo 鋼溶接継手のクリープ強度に及ぼす PWHT 条件の影響
	原子力構造物の高経年化に関わる維持技術の高度化に関する調査委員会	2017/2/8 大阪科学技術センター	西川 聡	異材溶接継手の力学的特性について（溶接、PWHT、応力改善について）

平成27年度

	学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名
非破壊	11th International Conference on Non Destructive Evaluation	2015/5/19-21 韓国 済州島 ロッセホテル	山本敏弘 古川 敬 西野秀郎	Influence of the dimensions of an elbow on defect sensitivity of guided wave testing at elbow part
			上山芳教 古川 敬	Experimental Visualization of Ultrasonic Pulse Waves Using Piezoelectric Films
	日本非破壊検査協会 平成27年度 第1回 超音波部門講演会	2015/5/26-27 かごしま空港ホテル	古川 敬 上山芳教 水野亮二	超音波探傷訓練ツールへ向けたシミュレーション解析における異材継手組織のモデル化
	日本非破壊検査協会 平成27年度非破壊検査総合シンポジウム	2015/6/2 JSNDI 亀戸センター	古川 敬	超音波伝播の映像化
	CAE POWER 2015	2015/6/23 東京カンファレンスセンター・品川	水野亮二 上山芳教 古川 敬	柱状晶組織を有する溶接部の超音波探傷シミュレーションとその活用
	日本保全学会 第12回 学術講演会	2015/7/14-15 日立シビックセンター	古川 敬 上山芳教 水野亮二	凝固シミュレーション技術を活用した異材継手部の超音波探傷シミュレーション
	第48回 X線材料強度に関するシンポジウム	2015/7/16-17 エル・おおさか(大阪府立労働センター)	水野亮二 西川 聡 古川 敬 佐々木敏彦 三原 毅	X線回折による塑性ひずみ測定技術の開発-第2報-
	第7回 非破壊評価総合展 非破壊評価技術セミナー	2015/7/23 東京ビッグサイト	牧原善次	発電設備に適用される非破壊検査とその役割
	The 20th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE2015)	2015/9/21-23 東北大学	山本敏弘 浦山良一 古川 敬 内一哲哉 古村一朗 高木敏行	Numerical simulation of wave generation by differently-configured EMATs
			程 衛英 上山芳教 塚田啓二	Magnetic Flux Leakage Testing of Backside Wall-Thinning
平成27年度 火力原子力発電大会	2015/10/8-9 東京国際フォーラム	上山芳教 古川 敬	圧電フィルムによる超音波可視化技術の改良	

非破壊	日本非破壊検査協会 秋季講演大会	2015/10/15-16 北海道立道民活動センター	上山芳教 古川 敬 程 衛英 上山芳教 塚田啓二	フェーズドアレイ法と従来法による溶接部の超音波探傷 試験結果の比較 低励磁強度漏洩磁束法による裏面減肉評価
	28th International Symposium on Superconductivity (ISS2015)	2015/11/16-18 Tower Hall Funabori	古川 敬 程 衛英 他	Outline of JST-SIP Project
	第14回 評価・診断に関するシンポジウム	2015/11/24-25 福井県国際交流会館	古川 敬 山本敏弘 他	ハイパワーガイド波を活用した埋設配管探傷技術の開発
	日本非破壊検査協会 第23回 超音波による非破壊評価 シンポジウム	2016/1/2/-29 JSNDI 亀戸センター	古川 敬 上山芳教 山本敏弘 古川 敬 他	フェーズドアレイUTを用いた溶接部探傷における試験 条件の最適化 ガイド波によるノッチ状減肉の長さや深さと角度による 検出感度
	日本保全学会国際活動推進小委員会	2015/2/13 保全学会	古村一朗	非破壊検査に関する国際協力プロジェクト PINC及び PARENTの概要
溶接	The 23rd Internaitonal Conference on Nuclear Engineering (ICONE23)	2015/5/17-21 幕張メッセ	水野亮二	Evaluation of cold cracking and mechanical properties of temper bead weld using welding material of Ni-based alloy for low alloy steel
	平成27年度 溶接学会秋季全国大会	2015/9/2-4 北海道科学大学	西川 聡 高橋 誠 伊藤和博 齊藤直樹 西川 聡 野田和彦	高温純水中に発生するSUS316L系溶接金属の応力腐食割 れ形態 改良9Cr-1Mo鋼溶接部のクリープ強度に及ぼす溶接後 熱処理の影響

論文等表彰

氏名	受賞名等	機関等・受賞日	受賞内容
水野亮二 上山芳教	平成27年度 学術奨励賞	(一社)日本非破壊検査協会 平成28年6月7日	本賞は、研究報告の内容が非破壊検査技術の向上に寄与するところが大きいと評価された者に送られる賞である。 受賞対象研究：「超音波探傷訓練用シミュレーター」
西川 聡 大北 茂 山口篤憲	平成26年度 論文賞	(一社)日本保全学会 平成26年5月26日	論文賞表彰論文は、保全学誌に掲載された論文から「新規性」、「応用上の有用性」、「内容の完成度」の視点で評価して優秀論文として選定された賞である。 受賞対象論文：「応力改善工法で付与される圧縮残留応力の持続性」
古村一朗 古川 敬	平成24年度 論文賞	(一社)火力原子力発電協会 平成24年10月3～4日	論文賞表彰論文は、会誌「火力原子力発電」平成23年1月号から12月号及び平成23年度火力原子力発電大会論文集に掲載された論文から優秀論文として選出された賞である。 受賞対象論文：「開口合成3次元超音波探傷法によるNi基金溶接部SCCの探傷特性評価」
西川 聡	平成21年度 溶接学会論文奨励賞	(社)溶接学会 平成22年4月21日	本賞は、溶接学会論文集に掲載された論文の中からとくに優秀な一連の論文を対象に授与されるものであり、学術上大いに貢献があったとして送られる賞である。 受賞対象研究：「高温高圧純水環境下の600合金用被覆アーク溶接金属の応力腐食割れ形態」
関野晃一	第12回技術研究会 奨励賞	神奈川県非破壊試験技術交流会 平成20年6月13日	本賞は、第12回技術研究会において優れた発表を行いその努力が非破壊検査技術の向上に寄与するところ大と評価された者に送られる賞である。 受賞対象研究：「光学的ひずみ測定法の非破壊検査法への応用について」
関野晃一 古川 敬	平成19年度 学術奨励賞	(社)日本非破壊検査協会 平成20年5月21日	本賞は、研究報告の内容が非破壊検査技術の向上に寄与するところが大きいと評価された者に送られる賞である。 受賞対象研究：「硝子板に付与したき裂近傍における超音波の可視化」
西川 聡	平成19年度 溶接冶金研究委員会 優秀研究賞	(社)溶接学会 平成20年5月14日	本賞は、溶接冶金研究委員会で発表された研究が優秀であり、今後の発展性が高いと評価された者に送られる賞である。 受賞対象研究：「改良9Cr-1Mo鋼溶接金属の靱性影響因子と電気化学計測を用いた簡易評価方法の提案」
大北 茂	溶接学術振興賞	(社)溶接学会 平成20年4月9日	本賞は、溶接学会会員として永年にわたり優れた学術業績を積み、所属支部の活性化にその識見を発揮し溶接の学術振興に大きく貢献した者として贈呈されたものである。
古村一朗 古川 敬	平成19年度第4回学術講演会 第1回産学協同セッション銅賞	NPO法人日本保全学会 平成19年7月3日	産学協同セッションは、『研究者が提案する研究成果を商品とみなし、企業や国などを購買者と位置づけ、研究成果を売買する市場を保全学会が提供するという市場原理に近い新しい試み』として初めて開催されたものである。当センターは、超音波探傷シミュレーション技術を「実機探傷で得られるエコー群が、欠陥かどうかの評価を可能にする技術」として発表し、非常に完成度の高い技術として銅賞を授与されたものである。
関野晃一	平成18年度 新進賞	(社)日本非破壊検査協会 平成18年10月27日 (NDI協会秋季大会)	本賞は、平成18年度に行なわれたNDI協会大会での発表の中から、特に優れた発表を行なった若手研究者に送られる賞である。 受賞対象論文：「光干渉法と超音波可視化法を併用した手法によるき裂の評価」

成 果 論文等表彰

象 亮一 志波光晴	優秀論文賞	(社)火力原子力発電技術協会 平成17年10月12日	優秀論文表彰は、平成17年度に会誌「火力原子力発電」に掲載された論文の中から、優秀であった論文に対して授与されるもので「高Cr鋼の交流磁化法によるクリープ損傷評価技術の開発」が対象となった。
水野亮二	平成15年度 木原奨励賞	(財)溶接接合工学振興会 平成16年5月13日	本賞は、毎年1回、溶接接合工学の分野における新進気鋭の原則として35歳以下の研究者、技術者に授与されるもので、(財)溶接接合工学振興会会員、関連団体及び理事会の推薦によるものである。回原子炉压力容器等原子力プラント溶接部の品質保証溶接施工法に係る研究開発に関する論文、学会発表等に対して受賞したものである。
青野健二郎	「火力原子力発電」掲載論文賞	(社)火力原子力発電技術協会 平成14年9月25日	論文「斜角探触子の距離振幅特性曲線と欠陥検出能力の評価」に対して受賞したものである。
志波光晴 西川 聡 米山弘志 山口篤憲	技術賞 開発奨励賞	(社)日本溶接協会 平成14年5月29日	研究成果報告「交流磁化法による施工後の溶接熱処理温度評価」に対して受賞したものである。
西川 聡	平成14年度 科学技術 奨励賞	(社)日本高圧力技術協会 平成14年5月24日	若手研究者に対する賞で、発表論文「鑄造2相ステンレス鋼の溶接熱影響部の熱時効評価—第1・2報—」に対して与えられたものである。
西川 聡	平成13年度 溶接学会 研究発表賞	(社)溶接学会 平成14年4月25日	35歳未満の若手研究者に対する賞で、発表論文「熱処理条件の非破壊的評価手法の検討—局部PWHT溶接部の性能評価に関する研究(第1報)」に対して与えられたものである。
青野健二郎	平成13年度 新進賞	(社)日本非破壊検査協会 平成13年5月31日 (NDI協会春季大会)	本賞は、平成13年度に行なわれたNDI協会大会での発表の中から、特に優れた発表を行なった若手研究者に与えられる賞である。 受賞対象論文：「溶接金属内部欠陥とUT及びRTによる非破壊信号量との関係」

技術レビュー・編集後記

今年も「技術レビュー」を無事発行することができました。これもひとえに、ご協力をいただいた皆様のお陰です。この場を借りて御礼申し上げます。

今年は、新型コロナウイルス感染症により日々の生活様式が大きく変わり、多くの方が行動を自粛する状況が続いています。一日も早く事態が収束することを願っています。

本技術レビューには、3件の非破壊検査技術に関する研究、3件の規格基準に関する調査、また、研究トピックスの紹介もしております。皆様のお役に少しでも立ちますよう切に願っております。

当センターでは、溶接・非破壊検査技術及び非破壊検査研修をより一層向上・充実させて参りますので、今後も変わらぬご指導ご鞭撻のほど、よろしくお願い申し上げます。

技術レビューのバックナンバーは、当協会のホームページ (<http://www.japeic.or.jp/>) で公開しております。ご高覧いただければ幸いです。

溶接・非破壊検査技術センター 技術レビュー Vol.16 2020 (非売品)

発行日 2021年3月22日
発行編集人 水野 亮二 (溶接・非破壊検査技術センター管理グループ)
発行所 一般財団法人発電設備技術検査協会 溶接・非破壊検査技術センター
〒230-0044 横浜市鶴見区弁天町14-1
TEL(045)511-2751 FAX(045)511-2750
編集・協力 電気新聞メディア事業局

印刷 日本印刷株式会社

《無断転載を禁じます》

本誌は古紙再生紙を使用しています。

技術レビュー

Vol.16 2020



一般財団法人 発電設備技術検査協会
溶接・非破壊検査技術センター

〒230-0044 横浜市鶴見区弁天町 14-1
TEL 045-511-2751 FAX 045-511-2750