

溶接・非破壊検査技術センター

# 技術レビュー

Vol.15 2019

研究報告

欠陥検出評価技術に関する研究  
技術基準・規格化関連調査

研究トピックス

超音波探傷試験のシミュレーション解析技術の紹介  
電気化学的な計測データによる材料評価技術

研修事業紹介

JIS Z 2305:2013に対応した実技研修の紹介

**JAPEIC**  
JAPAN POWER ENGINEERING AND INSPECTION CORPORATION

一般財団法人 発電設備技術検査協会



## 技術レビュー

Vol.15 2019

<b>巻頭言</b>	<b>理工系DNAが呼び込む不思議な出会いと発電技検への奉職</b> …………… 2 理事長 濱谷 正忠
<b>トピックス</b>	NDEシンポジウム2018を開催しました…………… 4 火力発電所の事業運営効率化に関するNEDOの公募調査を受託…………… 4
<b>研究報告</b>	欠陥検出評価技術に関する研究……………
	<b>空隙厚変化に影響されない二層構造物の厚さ評価</b> …………… 5 溶接・非破壊検査技術センター 程 衛英
	<b>POD分析に使用するデータが前提とする仮定</b> …………… 11 溶接・非破壊検査技術センター 山本 敏弘
	技術基準・規格化関連調査……………
	<b>JIS Z 3110による溶接部への放射線透過試験のきずの分類と判定基準</b> …………… 21 規格基準室 佐藤 長光
	<b>ASME Section Iにおける設計計算式の改正動向</b> …………… 38 規格基準室 大石 勇一
	<b>火力発電設備の設計・製造・建設における国内規格と海外規格の比較</b> …………… 44 規格基準室 小嶋 敏雄
	<b>「発電用火力設備の技術基準の解釈」に関する最近の改正について ～フレキシブルメタルホースの規定の取り入れ～</b> …………… 49 規格基準室 長谷川 忠之
<b>研究トピックス</b>	<b>超音波探傷試験のシミュレーション解析技術の紹介 ～試験・検査の“設計”に向けて～</b> …………… 53 溶接・非破壊検査技術センター 古川 敬
	<b>電気化学的な計測データによる材料評価技術</b> …………… 59 溶接・非破壊検査技術センター 鈴木 良治
<b>研修事業紹介</b>	<b>JIS Z 2305:2013に対応した実技研修の紹介</b> …………… 62 研修センター 松田 誠司、村上 功治、牧原 善次、平澤 泰治、小林 輝男
<b>成果</b>	出願特許一覧…………… 67 学協会誌等への論文・解説発表…………… 68 学協会等への口頭発表…………… 71 論文等表彰…………… 75
<b>編集後記</b>	

## 理工系DNAが呼び込む不思議な 出会いと発電技検への奉職



理事長

濱谷 正忠

小学生の頃、時々、小型の電気製品や模型などをばらばらに分解しては元に戻したりするいわゆる「理工系少年」であった。部品を組み立てる際に、セロテープ、接着剤、はんだなどをいろいろと使ってはみたものの、しばしば剥がれたり、壊れたりして、うまく行かなかった。このような経験を通して、物の接合については、材質に合わせてやり方を変え、しかも接合面をできるだけ広くとらなければならないことや、接合面の強度は見かけからはなかなかわからないことも子供なりに学びつつ、試行錯誤を繰り返したものだ(弊会でいえば、金属溶接部における堅固性のあり方や非破壊的検査方法に相当する)。

その後、中学、高校と進学しても、理科好きは変わらなかったが、理工系を目指し教養学部に入学した(奇しくも、弊会の前身組織はその2年前に発足)。そして、2年生の時、トイレトペーパーや砂糖などの日用品が全く市場から消えてしまうという、いわゆる「第1次オイルショック」が勃発した(1973年秋)。エネルギーのあり方次第で、経済や社会の根幹が大きく揺らいだことに強い衝撃を覚えた。この強烈な体験が、その後の「エネルギー問題に対する強い関心や積極的に取り組もうとするモチベーション」の醸成や、後述の大臣官房総合エネルギー対策本部の在籍時に抱いた「エネルギー供給の多様化・リスク分散の重要性」に係る強い問題意識につながっている。その時、工学部電気工学科への進学が既に決まっていたのだが、その選択に間違いはなかったと確信し、電気工学という切り口からエネルギー問題に深く関わることができるのではないかと思った(弊会において非破壊検査に用いられるX線などの電磁波や検査データを測定するセンサー・器具も電気工学と深く関係する)。

また、電気工学科の3年生に進学した時、新進気鋭の茅陽一先生(当時は東京大学の助教授、現在は地球環境産業技術研究機構の理事長)に出会い、先生の考え方に少なからず感化された。先生は当時、システム工学的アプローチから、「資源・エネルギーの有限性」を憂慮され、早期の対策実施を強く訴えていた(いわゆる「ローマクラブ運動」)。この考え方が、その後持ち続けている「省エネルギー・省資源」や「エネルギーの安定供給」、「地球環境問題」等を解決するための「エネルギーベストミックスの構築」の必要性に係る強い信念につながっている(弊会の事業活動は「エネルギーの安定供給」に貢献している)。

そして、4年生の時、井上力氏(当時、資源エネルギー庁官房審議官、発電技検の第3代理事長)による特別講義を聴講した際、「役所では個人でやれないことも政策の立案・



## トピックス①

# NDEシンポジウム2018を開催しました

当協会は2018年12月4日、東京都文京区の東京大学山上会館大会議室で「NDEシンポジウム2018～構造健全性と非破壊評価～」を開催しました。

基調講演では、東北大学流体科学研究所 高木敏行教授より「CFRP構造物の保全と電磁非破壊評価技術」と題して、風力発電設備をはじめ航空宇宙や自動車分野等に広く活用されてきている炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の非破壊検査・評価技術確立に向けた最新の研究成果と、国内外の研究体制、研究動向について紹介がありました。

招待講演では、株式会社IHIの稲垣宏一氏より、信頼性評価における非破壊試験のデータとして活用されるPOD（Probability of Detection: 欠陥検出確率）曲線と、POD Assessmentについて航空機エンジン部品を例に紹介をしていただきました。また、東京ガス株式会社の伊藤一博氏より、ガスパイプラインの円周溶接部非破壊試験において、ECA（Engineering Critical Assessment: 想定される荷重条件から安全性

を担保される許容欠陥寸法を決める考え方）による許容欠陥寸法と高速な探傷が可能な新しい超音波探傷試験技術の導入事例が紹介されました。石油化学業界の事例として、三菱ケミカル株式会社の三浦到氏より、最新のデジタル放射線透過試験技術と中性子透過試験の技術を現場のプラントの維持管理へ適用するため、ロボット技術を活用した事例を紹介していただきました。

当協会からは試験研究と研修の業務を各々報告いたしました。本シンポジウムは、発電設備の安全と信頼性を維持し安定的に運転していくために必要不可欠な溶接継手部を含めた構造物の健全性の確保について、構造健全性を評価する分野ときずの有無や材質変化を非破壊評価（NDE）する分野の研究者・技術者の緊密な連携が、構造健全性をより一層確かなものに高めていくという趣旨に基づいて企画しており、今後も継続的に開催いたします。

## トピックス②

# 火力発電所の事業運営効率化に関するNEDOの公募調査を受託

当協会は、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が公募した「IoTを活用した新産業モデル創出基盤整備事業／データの活用等による火力発電所の事業運営の効率化に関する調査」に応募し、採択されました。調査は2018年度に実施しました。

これまで火力発電事業では、電力会社及び現場の作業員の長年の経験を基に、きめ細かな運転管理・事業運営を行ってきました。しかし、近年、電力自由化の中でコスト、新電力の参入、再生可能エネルギーの拡大等の競争的環境に置かれており、火力発電には、より効率的・効果的な運営が求められています。このような中で、IoTやAI（人工知能）などの技術を利用したセンシングデータ取得、データ分析、予測技術の高度化等により、火力発電所の効率的な運営が期待されているとともに、わが国の電力関連産業の国際競争力の向上にもつながると考えられています。

しかし、現状を見ると、火力発電所における運転管理や運転ノウハウは暗黙知となっており、ベテラン技術者のリタイア等により、今後は困難な状況を迎えることが予想されます。また、ノウハウ流出や取得したデータやAIによる生成物の帰属が不明確で

ある等の懸念から、電力会社、プラントメーカー、ITベンダー間が連携して、データの活用方法について検討することはほとんどありませんでした。

本調査では、データの活用等を通じた火力発電所の事業運営の効率化・高度化を進めるため、以下の項目を実施しました。

- ・データ活用に関する発電所共通のニーズ、IoT導入により期待される効果、国内外における導入事例、国際的に事業展開する欧米メーカーを巡る状況など、火力発電所の事業運営効率化に向けたデータ活用の基本的考え方の調査・整理
- ・火力発電分野におけるデータ活用に向けた手法の体系的整理や、データ活用等の進め方の提案
- ・火力発電事業におけるデータ活用の導入によって得られる経済的なメリットと、その導入が社会に及ぼす効果や、データ活用に関する国際標準化の動向など、データ活用に関する活用促進に関する方策の調査

調査結果は新エネルギー・産業技術総合開発機構のホームページで公開されています。（[https://www.nedo.go.jp/library/ZZIT\\_00008.html](https://www.nedo.go.jp/library/ZZIT_00008.html)）

# 空隙厚変化に影響されない二層構造物の厚さ評価

## Characterization of An Air Gap Separated Two Layer Structure by Swept-Frequency Eddy Current Testing

溶接・非破壊検査技術センター 程 衛英

The electromagnetic non-destructive testing signals of a multilayered structure are function of the layer-wise dimension and the electromagnetic properties. The signals of the to-be-characterized layer should be ‘extracted’ from the composite signals. This paper proposes of separating signals of different layers by frequency band, and characterizing the layer of interest by using the correspondent signals. An analytical solution derived in terms of transmission and reflection of electromagnetic waves was used to simulate swept-frequency eddy current testing of a multilayered structure. A couple of characteristic parameters were extracted from the analysis of the signals and the differences of the signal series in the frequency series. It was found that the thicknesses of the top and lower layers can be determined respectively by using high frequency and low frequency signals. The differences of signals in the frequency series are insensitive to the variation of air gap between the two conductive layers. The maximum difference of resistance in the frequency series can be used to characterize the lower layer regardless the change of conductivity and air gap.

### Keywords

*Swept-frequency eddy current testing, multi-layered structure, frequency band, thickness, transmission and reflection*

### 1 はじめに

多層構造物の性能は各層の厚さに大きく依存しており、各層の厚さ測定やモニタリングは構造物の性能や安全確保に不可欠なことである。多層構造中の直接アクセスしにくい層の厚さ測定には非接触な方法が望まれる。非接触・安価・再現性と利便性に優れた電磁気測定法は各層の厚さ測定の有力な候補である。

電磁場が特定の層に留まらないため、電磁気測定で得られる信号は全ての層の総合効果である。ある層の厚さを特定するために、ほかの層の影響を取り除き、対象層のみの信号を取り出す信号分離は問題解決の鍵になる。また、電磁場が伝搬しながら減衰していくため、測定条件によって、電磁場が特定の層に届かず、その層の厚さを測れないこともあり得る。測定の限界を見極め、測定条件を適切に設定する工夫が必要である。

先行研究におけるパルス渦電流法による保温材付き配管の肉厚評価において<sup>[1]</sup>、保護シートと配管の

信号を時間領域上に分離可能であることを示した。また、対数スケールのパルス渦電流測定信号の減衰率はほぼ配管厚さの線形関数であり、保温材の厚さ、または検査用プローブと配管間の距離による影響は少ない。減衰率は配管の電磁気特性（導電率と透磁率）によって変化する。配管の厚さを同定するために、配管の電磁気特性を把握する必要がある。実機構造物の電磁気特性の把握は困難である。[2]では、非磁性導電性板の渦電流測定信号、すなわち、検出コイルのインピーダンス変化が導電率 $\sigma$ と角周波数 $\omega$ の積である $\omega\sigma$ の関数であることを示した。同じ厚さの板において、同じ $\omega\sigma$ は同じインピーダンス信号に対応する。また、周波数掃引によって導電率が異なる試験片にも等価な $\omega\sigma$ を実現可能である。よって、導電率に依存しない単層の非磁性導電板の板厚評価法を確立した。

本研究の対象は面積が十分大きい非磁性導電性板で作られた空隙がある2層構造物である。2層の材質は同じであるが、導電率は不明である。また、空隙の厚さも一定範囲内にばらついている。導電率と

空隙厚さの2種類の不確定な要素のある2層構造物の各層の厚さ評価が本研究の課題である。

本研究は周波数掃引渦電流試験 (SFECT: Swept-Frequency Eddy Current Testing) および周波数応答特性解析を用いて、導電率と空隙の厚さに依存しない二層非磁性導電性板の厚さ評価法を構築する。

## 2 多層構造物のSFECT測定信号

### 2.1 物理モデル

Fig. 1 に多層構造物における電磁気法測定のご概念図を示す。空心リング状コイル (内, 外半径  $r_1$ ,  $r_2$ , 高さ  $H$ ) が多層構造物の上に置かれ, SFECT 測定を行う。全域を  $N$  個の領域に分ける。計測用プローブが領域 1 に置かれ, 領域 2 ~  $N-1$  は  $N-2$  層の構造物であり, 領域  $N$  は構造物下の空気である。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。自己誘導型・自己検出型プローブを使用する場合, 検出信号, すなわちコイルのインピーダンス変化は下の式で計算できる。

$$\Delta Z(\omega) = \Delta R + j\omega \Delta L$$

$$= j2\pi\omega\mu_0 n_{cd}^2 \int_0^\infty \frac{\chi^2(\lambda_0 r_1, \lambda_0 r_2)}{\lambda_0^6} (e^{-\lambda_0 l} - e^{-\lambda_0(l+H)})^2 R(\lambda_0) d\lambda_0 \quad (1)$$

ここで,  $\omega$  は角周波数,  $\mu_0$  は自由空間の透磁率,  $n_{cd}$  はコイルの巻き数密度,  $\lambda_0$  は積分用ベセル関数の変数,  $R(\lambda_0)$  は構造物のみに関係する反射係数である。

### 2.2 多層構造物における反射係数 $R(\lambda_0)$

式 1 に示すように, インピーダンス信号は反射係数から求められる。過去の研究では, 各層の間のイ

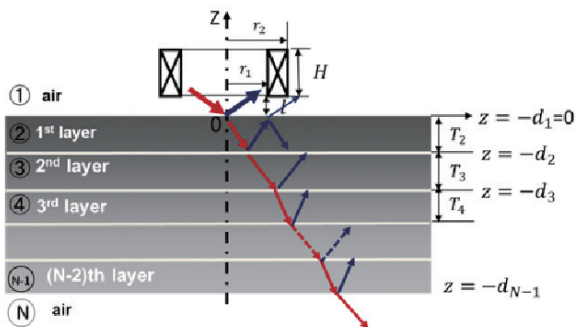


Fig1 Planar modeling of multilayered structure and the multi-transmission and reflection of waves.

ンターフェース条件に基づいた Cheng's matrix 法を用いて反射係数  $R(\lambda_0)$  を求めた。この反射係数は全ての層の寄与によるものであるため, 各層による寄与の分離は困難である。本研究のような各層の寄与を別々に分析したい研究には適切ではない。そのため, ここでは伝搬と反射による反射係数計算法を導入した。

以下の仮定に基づいて伝搬と反射による反射係数を導出する。Fig. 1 に示すように, 電磁波は  $-z$  方向に伝搬する。領域 1 と領域 2 のインターフェースの  $z$  座標は  $z = 0$ , 領域  $i$  と  $i+1$  のインターフェースの座標は  $z = -d_i$  である。よって, 領域  $i$  の厚さは  $d_i - d_{i-1}$  である。各層の電磁気特性は線形, 均一, 等方であり, 領域  $i$  における導電率, 透磁率をそれぞれ  $\sigma_i$  と  $\mu_i$  で記述する。領域  $i$  と  $i+1$  の間における伝搬と反射係数はそれぞれ

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

と

$$R_{i,i+1} = \frac{\mu_{i+1}k_{i,z} - \mu_i k_{i+1,z}}{\mu_{i+1}k_{i,z} + \mu_i k_{i+1,z}} \quad (3)$$

である。最終的に得られた総合反射係数は

$$\tilde{R}_{i,i+1} = \frac{R_{i,i+1} + \tilde{R}_{i+1,i+2} e^{-2k_{i+1,z}(d_{i+1}-d_i)}}{1 + R_{i,i+1} \tilde{R}_{i+1,i+2} e^{-2k_{i+1,z}(d_{i+1}-d_i)}} \quad (4)$$

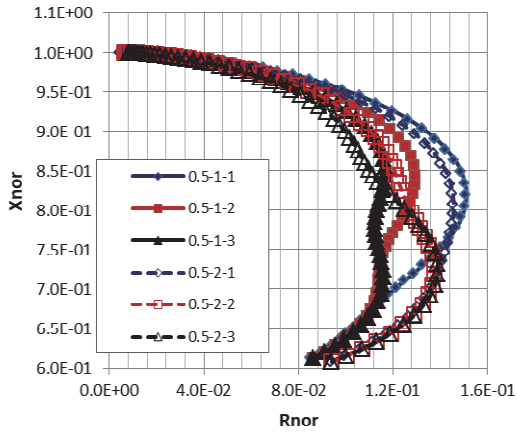
である。ここで,  $k_{i,z} = (\lambda_0^2 + j\omega\mu_i\sigma_i)^{1/2}$  である。多重反射と多重伝搬後に電磁波が領域 1 にあるピックアップセンサーに収集されるため,  $\tilde{R}_{1,2}$  は式 (1) の  $R(\lambda_0)$  に相当する。

構造物下の空気領域  $N$  と仮の  $N+1$  領域の間に反射が存在しないため,  $\tilde{R}_{N,N+1} = 0$  である。 $\tilde{R}_{1,2}$  は回帰的な計算によって求められる。

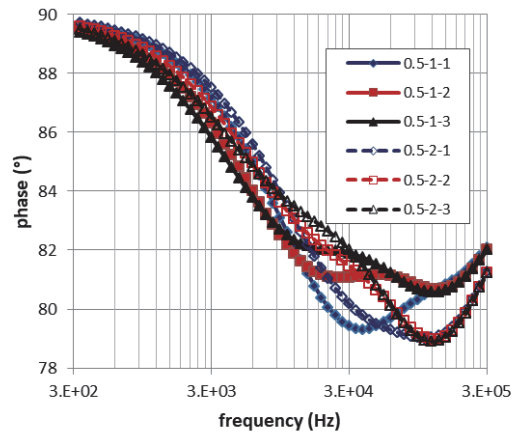
### 2.3 多層構造物の SFECT 信号

Fig. 1 の記述に従って, 空隙で分離される二層構造物を 5 領域でモデリングする: 領域 1 と 5 は構造物上下の空気, 領域 2 と 4 は二枚の面積が十分大きい板, 領域 3 は板の間の空隙である。本研究では, 下記の二層構造物を対象にシミュレーション及び分析を行う。上の層の厚さ, すなわち  $T_2$  はそれぞれ 0.5mm, 1.0mm, 2.0mm であり, 下の層の厚さ, すなわち  $T_4$  はそれぞれ 1.0mm, 2.0mm, 3.0mm である。空気層厚さ  $T_3$  はそれぞれ 1.0mm, 2.0mm

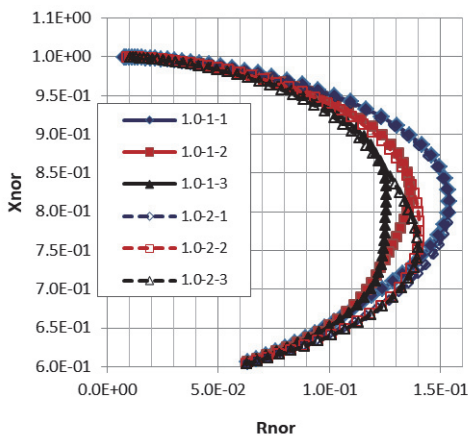




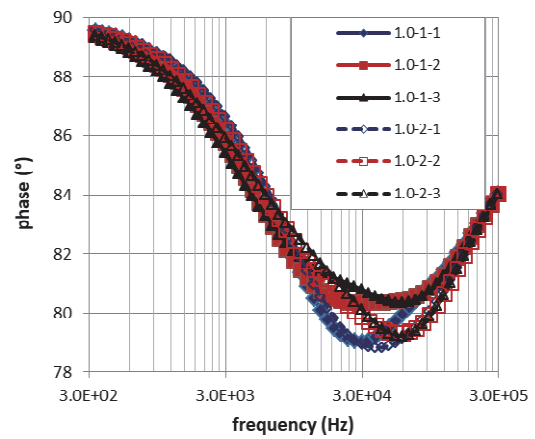
(a)  $T_2 = 0.5\text{mm}$



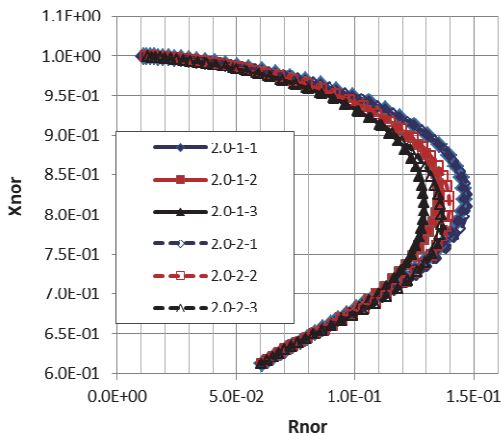
(a)  $T_2 = 0.5\text{mm}$



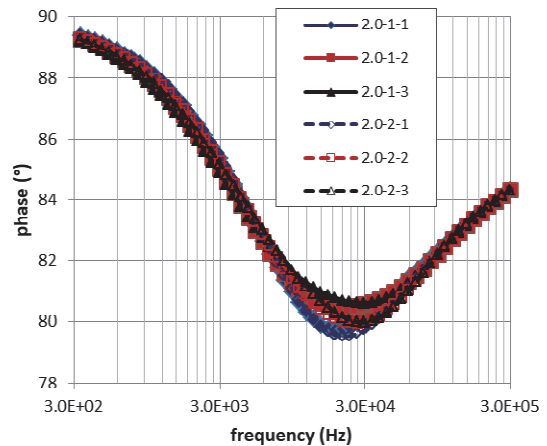
(b)  $T_2 = 1.0\text{mm}$



(b)  $T_2 = 1.0\text{mm}$



(c)  $T_2 = 2.0\text{mm}$



(c)  $T_2 = 2.0\text{mm}$

Fig.2 Simulation of SFECT: Normalized impedance

Fig.3 Phase of normalized impedance

である。二層ともに非磁性金属で作られ、導電率はともに  $1.45\text{MS/m}$  である。

2.2 節に導出した総合反射係数を用いて上記の二層構造物の SFECT 測定信号を計算する。測定用プローブコイルの内外半径はそれぞれ  $8\text{mm}$  と  $10\text{mm}$  であり、高さは  $2\text{mm}$ 、コイルと上層の間隔、すな

わちリフトオフは  $0.5\text{mm}$  である。コイルに  $300\text{Hz}$  から  $300\text{kHz}$  まで掃引する正弦波電流が流れる。なお、対数スケール周波数は  $60$  等間隔で離散化された。[2] と本文の式 (1) (4) を用いてコイル自身のインピーダンス  $Z_0(\omega)$  と試験体がある場合のインピーダンス  $Z(\omega)$  を計算した。正規化インピーダン

ス  $Z_{nor}$  は下記の式で求められる：

$$Z_{nor}(\omega) = R_{nor} + jX_{nor} = \frac{Z(\omega)}{Z_0(\omega)} = \frac{\Delta Z(\omega) + Z_0(\omega)}{Z_0(\omega)}, \quad (5)$$

計算された正規化インピーダンス  $Z_{nor}(\omega)$  を Fig.2 にプロットした。Legend に各層の厚さを T2-T3-T4 の順で表示する。Figs. 2 (a),(b),(c) において上層の厚さはそれぞれ 0.5mm, 1.0mm, 2.0mm であり、空隙厚と下層の厚さは指定範囲内に変動する。Fig.2 に下記のことを示した：同じ上層厚である構造物の信号が高周波数領域に同じインピーダンス曲線に収束する。また、上層が厚いほどより低周波に収束する。

更に、各正規化インピーダンス信号の位相を算出し、周波数変化に伴う位相変化を Fig.3 にプロットした。 $Z_{nor}(\omega)$  と同様に、同じ上層厚さである構造物の  $Z_{nor}(\omega)$  の位相も高周波領域に同位相曲線に収束する。上層が薄いほどより高周波に収束する。よって、上層厚さを高周波領域の信号で推定できると考えられる。

ここで、高周波領域正規化インピーダンス信号の位相と上層厚さの関係を描いて見る。データ処理の観点により、複数の同性質信号の合計の信頼性は一個の信号より高いため、ここでは、最高周波数領域

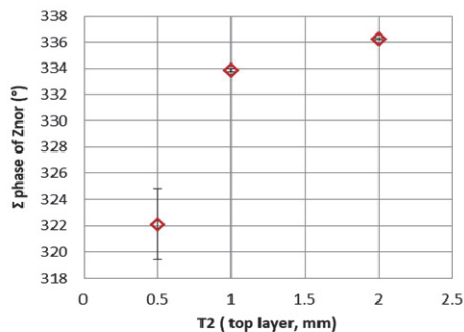


Fig.4 The sum of phase of high frequency signals and the thickness of the top layer

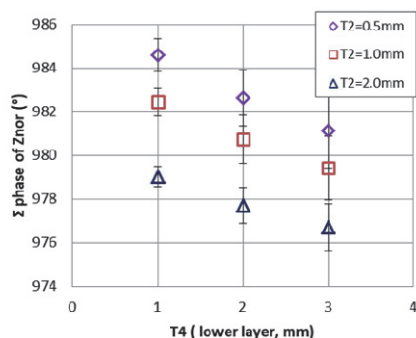


Fig.5 The sum of phase of low frequency signals and the thickness of the lower layer

の4個の信号の位相の合計を特徴パラメータにする。

Fig. 4 に上層厚さ  $T_2$  の変化による特徴パラメータ変化を示す。 $T_2$  が大きくなるにつれ、位相の合計も大きくなるが、線形的な増大ではない。また、 $T_2$  が小さい (0.5mm) 場合のばらつきは大きい。これは Fig. 4(a) にも明らかに示したことである。 $T_2=0.5\text{mm}$  の構造体の信号は高周波の 300kHz でもまだ完全に収束しない。周波数をさらに上げることによって、 $T_2=0.5\text{mm}$  の構造体の信号は完全に収束する。一方、 $T_2=1\text{mm}$  と  $T_2=2\text{mm}$  の構造体の信号分離が困難になることも考えられる。すなわち、事前に把握した情報に従って適切な周波数を設定することは重要である。

周波数を引き下げることによって、電磁波は下の層に伝搬し、下の層の厚さが低周波信号で同定できると考えられる。ここでは各厚さ条件において最も低い 10 個の周波数の正規化インピーダンスの位相の合計を取り、下層厚さと位相合計の関係を Fig. 5 まとめる。下の層が厚くなるにつれ、位相合計値は小さくなるが、上層厚さ・空隙厚さなどによって、位相がばらついており、分散は大きい。従って、単純な低周波インピーダンス信号による下層厚さの同定は困難と考えられる。

### 3 対周波数の差分による下層の厚さ評価

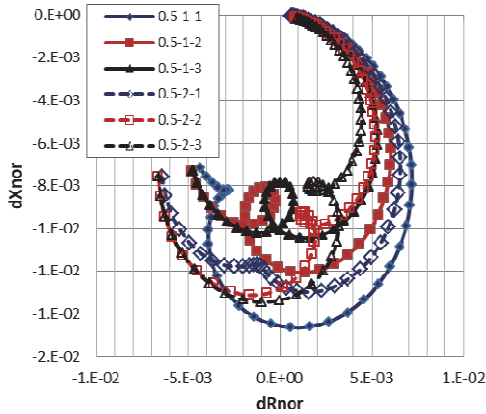
領域 1 に配置された励磁コイルが発生した電磁場は上の層と空隙を通過して下の層に伝搬していく。従って、低周波信号に上層と空隙の情報が含まれている。これらの情報を除かない限り、低周波信号による下層厚さの同定は困難である。

[1] にパルス渦電流測定信号が時間領域で 'decouple' される可能を示した。対数スケールの測定信号の減衰率は保温層厚さによって変化せず、ほぼ配管厚さの線形関数である。なお、時間領域と周波数領域信号には以下の関係がある

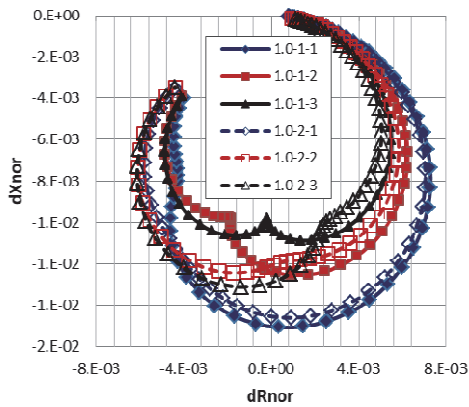
$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \quad (6)$$

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{i\omega t} dt \quad (7)$$

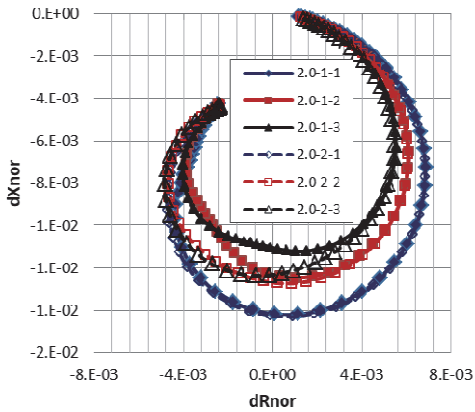
以上のことにヒントを受け、ここでは、周波数領域における信号の変化、すなわち対数周波数の微分をとる。なお、周波数は対数スケール上同間隔のため、対数周波数の微分は隣接する周波数シリーズ



(a)  $T_2 = 0.5 \text{ mm}$

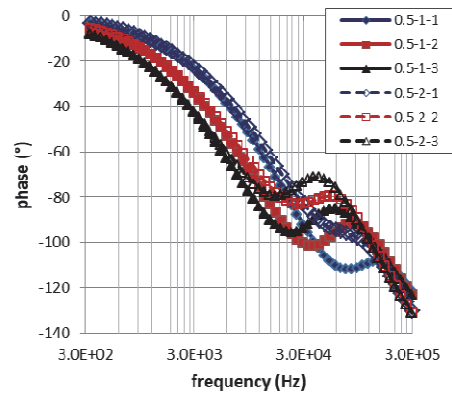


(b)  $T_2 = 1.0 \text{ mm}$

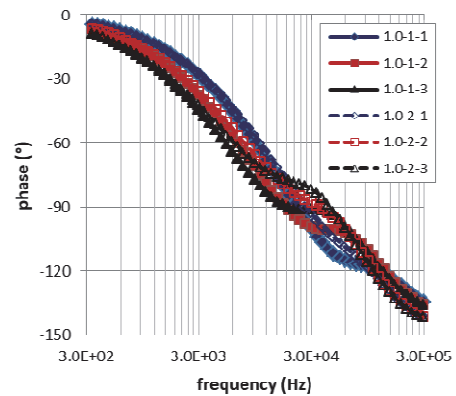


(c)  $T_2 = 2.0 \text{ mm}$

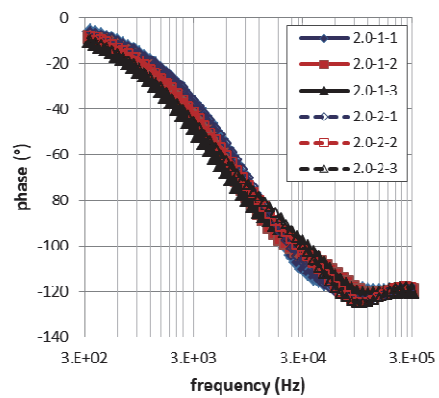
Fig.6  $\Delta Z_{nor}$  signals



(a)  $T_2 = 0.5 \text{ mm}$



(b)  $T_2 = 1.0 \text{ mm}$



(c)  $T_2 = 2.0 \text{ mm}$

Fig.7 Phase of  $\Delta Z_{nor}$

信号の差に等価である。

$$\Delta Z_{nor}|_i = Z_{nor}|_{f_{i+1}} - Z_{nor}|_{f_i} \quad (i=1, M) \quad (8)$$

ここで、 $M+1$  は全周波数領域の離散数である。

式 (8) に従って、Fig. 2 に示す  $Z_{nor}$  により  $\Delta Z_{nor}$  を求めて、Fig. 6 にプロットする。Fig. 6 に以下のことを示した。同じ上層厚さと空隙の構造の  $\Delta Z_{nor}$  は高周波領域に同曲線に収束する。また、上層が厚

い ( $T_2=2\text{mm}$ ) 場合、空隙の厚さが  $1\text{mm}$  から  $2\text{mm}$  に変動しても、低周波領域の  $\Delta Z_{nor}$  信号はほぼ同じカーブに乗っている。すなわち、低周波領域の  $\Delta Z_{nor}$  に空隙厚さの変動による影響は小さい。

算出した各  $\Delta Z_{nor}$  の位相を Fig. 7 にプロットした。また、最も低い 10 周波数の  $\Delta Z_{nor}$  の位相の合計を取って、位相合計と下層厚さの関係を Fig. 8 にまとめた。同じ  $T_2$  である二層構造物において、下層厚  $T_4$  が大

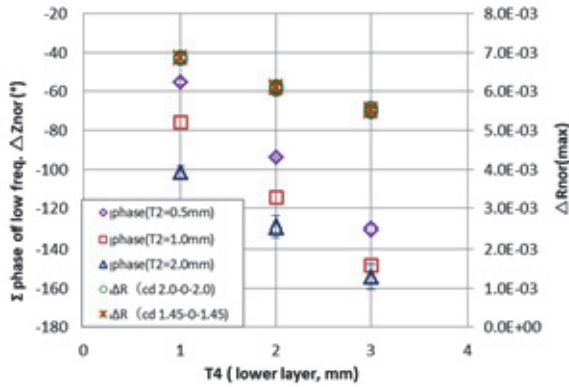


Fig.8 Characteristic features taken from  $\Delta Z_{nor}$  and the thickness of the lower layer.

きくなるにつれ、低周波  $\Delta Z_{nor}$  の位相の合計は小さくなる。また、空隙変動によるばらつきは小さい。従って、高周波  $Z_{nor}$  により上層厚さを決めれば、低周波  $\Delta Z_{nor}$  により下層厚さも決められる。ある範囲内に発生する空隙厚さの変動による下層厚さ同定への影響は少ない。

導電率の変化による影響を調べるため、上記の二層構造物の導電率を 2.0MS/m に変え、上記のシミュレーションを実施した。 $\Delta Z_{nor}$  の実数部、すなわち、 $\Delta R_{nor}$  の最大値をパラメータとして抽出した。Fig. 8 に  $\Delta R_{nor}|_{max}$  と  $T_4$  の関係を示した。 $T_4$  が大きくなるにつれ、 $\Delta R_{nor}|_{max}$  はほぼ線形的に小さくなる。また、 $\Delta R_{nor}|_{max}$  はほぼ導電率に依存しない。 $\Delta R_{nor}|_{max}$  を用いて、下層の厚さを同定可能と考えられる。

#### 4 まとめ

本研究では、理論分析、シミュレーション解析を用いて、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、空隙がある二層構造物の厚さ同定を検討した。周波数バンドごとにそれぞれの層の厚さを推定可能であることを示した。上層厚さは高周波正規化インピーダンス信号により同定可能であり、下層厚さは正規化インピーダンスの対数スケール周波数微分によって推定可能である。ある範囲内の空隙厚さ変動が下層の厚さ推定に及ぼす影響は少ない。よって、周波数領域によって二層板厚評価可能である。また、同導電率の二層構造において、導電率に依存しない下層厚さの同定も可能である。

#### 参考文献

- [1] Weiyang CHENG, Pulsed Eddy Current Testing of Wall-Thinning Through Insulation and Cladding, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol.31, No. 3, 2012
- [2] Weiyang Cheng, Thickness Measurement of Metal Plates Using Swept-Frequency Eddy Current Testing and Impedance Normalization, IEEE SENSORS JOURNAL, 17, 14 (2017), 4558-4569.



程 衛英

# POD分析に使用するデータが前提とする仮定

## Assumptions on data used 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 performance of nondestructive evaluation (NDE) method. This paper elaborates the fundamentals of POD analysis and explains some points to pay attention in making a POD curve based on actual inspection results.**

**Keywords** *probability of detection, POD, nondestructive evaluation, NDE, reliability*

## 1 はじめに

欠陥検出確率 (probability of detection, POD) 分析は、非破壊評価 (NDE) 手法の性能を定量評価する方法として日本でも認知され始めている<sup>[1,2]</sup>。また、確率論的破壊力学解析において破損確率や破損頻度を導く上で、検査で検出された亀裂が補修で取り除かれることなどを考慮するために POD を利用することが考えられている<sup>[3]</sup>。

前報<sup>[4]</sup>では POD 分析を利用した NDE 手法の信頼性評価について概説した。本稿では、文献<sup>[5]</sup>に記載された POD 分析の基礎をさらに噛み砕いて解説しつつ、実際に POD 曲線を作成する上で注意しないといけない事項について論ずる。

## 2 POD分析のデータ型

POD 分析は、NDE 手法の欠陥検出確率を欠陥サイズの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ものである。ここで、“欠陥サイズ”とは、

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選ぶ。したがって、欠陥サイズを  $a$  とし、欠陥検出確率を関数  $POD(a)$  で表す。

関数  $POD(a)$  を NDE 手法の検査結果から導く上で、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。Hit/Miss データ型は欠陥に対する検査ごとの欠陥検出の可否を表すもので、検査により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、対象となる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可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、検査で得られた欠陥指示に関する数値 (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。以下では、それぞれのデータ型を使ったとき

の  $POD(a)$  の導き方について説明する。

## 2.1 Hit/Miss データ型

関数  $POD(a)$  が存在するという事は欠陥サイズ  $a$  に対して欠陥検出確率が一意に定まることを意味する。しかしながら、現実問題として、同じサイズの欠陥でも検出しやすさは必ずしも同じではないし、さらに言えば、同一の欠陥でも検査結果を得る過程のわずかな違いで検査結果に差が生じることがある。このような現実に鑑みれば、ある欠陥サイズ  $a$  に対する欠陥検出確率は、図 1 に示すような確率分布で与えられると考えるのが妥当である（“欠陥検出確率”がある値になる“確率”を表す。確率という言葉が二重になってややこしいが、整理して理解していただきたい）。図 1 の場合は、欠陥検出確率は平均で 60% 程度であるが上下にばらつきがあると読み取れる。欠陥サイズ  $a$  に応じて欠陥検出確率は変わるため、このような確率分布も異なったものになる。欠陥サイズ  $a$  ごとに欠陥検出確率の確率分布を与える確率密度関数を  $f_a(p)$  とする。これに対して、 $POD(a)$  はある欠陥サイズ  $a$  に対して単一の値を示さなければならないので、確率密度関数  $f_a(p)$  を代表する値としてその分布の平均を  $POD(a)$  とする。この関係は

$$POD(a) = \int_0^1 p f_a(p) dp$$

と表せる。

よって、 $POD(a)$  は、概念として、欠陥サイズが  $a$  である欠陥全体に対する欠陥検出確率の平均を意味することになる。これを実際の検査結果から求めることを考える。欠陥サイズが  $a$  である特定の欠陥で得られた検査結果をもととして欠陥検出確率（実際上は、複数回検査してその欠陥が検出された割合など）

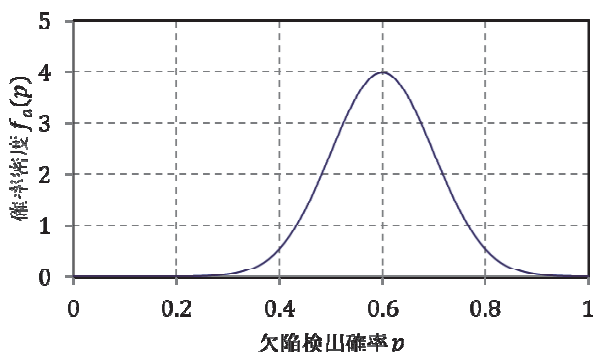


図1 欠陥検出確率が  $p$  となる確率密度  $f_a(p)$  の例

を求めても、これは欠陥サイズが  $a$  の欠陥全体の中のある一つの欠陥の欠陥検出確率であるから、図 1 のようなばらつきを持つ母集団の分布から抽出されたあくまで 1 個の標本(サンプル)ということになる。このような標本がある程度数あれば、母集団の平均を推定することができる。

関数  $POD(a)$  を求めることは、本質的には、それぞれの欠陥サイズごとに複数の標本から母集団の平均を推定することであると言える。これを額面通りに実行すると、精度良く平均を推定するためには、異なる欠陥サイズごとにある程度の標本数が必要となり、全体としては膨大な検査結果が要求されることになる。そのため、 $POD(a)$  が従うであろう条件を仮定することで必要となる検査結果の数を抑えることを考える。

欠陥サイズ  $a$  と平均欠陥検出確率である  $POD(a)$  の相関を考えたとき、おおまかには欠陥サイズが大きくなるほど平均欠陥検出確率が高くなる傾向があると想定できる。これまでに実際の検査結果からその傾向をモデル化する試みが行われており、その中で以下に示す対数オッズモデルが実際の傾向をよく表し、また、扱いやすいことが分かっている<sup>[6]</sup>。

ある事象が起こる確率を  $p$  とするときこの事象が起こらない確率は  $1 - p$  であり、これらの比  $p/(1 - p)$  をオッズ(odds)と呼び、オッズの対数をとった

$$g(p) = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right)$$

を対数オッズ (log odds) と呼ぶ。ちなみに、関数  $g(p)$  はロジット (logit) 関数と呼ばれる。ここで紹介する Hit/Miss データ型を使った  $POD$  分析では、平均欠陥検出確率である  $POD(a)$  の対数オッズと欠陥サイズ  $a$  の対数をとった  $\ln a$  が線形の相関を持つと仮定する対数オッズモデルを使用する。これを式

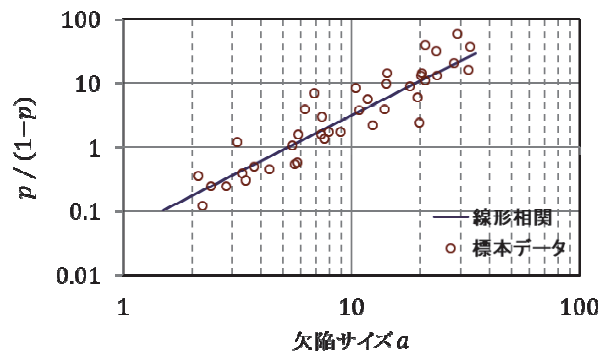


図2 対数オッズモデルのデータ例

で表すと

$$\ln\left(\frac{\text{POD}(a)}{1-\text{POD}(a)}\right) = \alpha + \beta \ln a \quad (1)$$

となる。ここで、 $a$ と $\beta$ は定数である。

図2のように横軸を欠陥サイズ $a$ 、縦軸を欠陥検出確率 $p$ のオッズとした両対数グラフでは、式(1)の関係は直線で表される。ここで、 $\text{POD}(a)$ は平均欠陥検出確率であり、検査結果から得られる欠陥検出確率 $p$ （実際には、検査回数に対する各欠陥の検出された割合など）にはばらつきが生じるため、そのオッズにもばらつきが生じる。よって、式(1)と検査結果から得られた標本データを図2のようなグラフで表すと標本データは式(1)の直線の周囲にばらつきを持って分布することになる。

式(1)を変形すると、関数 $\text{POD}(a)$ は

$$\text{POD}(a) = \frac{1}{1 + \exp\{-(\alpha + \beta \ln a)\}} \quad (2)$$

と書ける。この右辺の関数はロジスティック(logistic)関数と呼ばれる。図2のグラフにおいて、軸の目盛を通常のものにし、縦軸を欠陥検出確率 $p$ に直すと、図3のグラフが得られる。図3の曲線が式(2)に対応し、これをPOD曲線と呼ぶ。図3があるNDE手法のPOD曲線を表しているとき、欠陥サイズが10の場合は平均欠陥検出確率が76%、欠陥サイズが20の場合は平均欠陥検出確率が92%と読み取ることができる。

累積分布関数がロジスティック関数で表される確率分布をロジスティック分布と呼び、確率変数の対数がロジスティック分布に従う確率分布を対数ロジスティック分布と呼ぶ。式(2)は対数ロジスティック分布の累積分布関数の形式

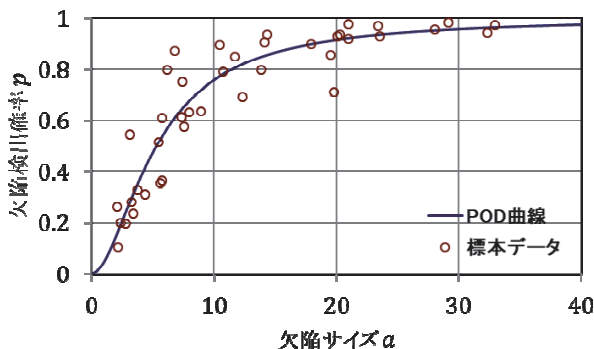


図3 対数オッズモデルによるPOD曲線の例

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

に変形できる。ただし

$$\mu = -\frac{\alpha}{\beta}, \quad \sigma = \frac{\pi}{\sqrt{3}\beta}$$

の関係が成り立つ。対数ロジスティック分布は、対数正規分布とよく似た確率分布であり、POD曲線を確率分布の累積分布関数としてとらえることもできる。

POD曲線を得るには、標本データから式(2)の定数 $a$ と $\beta$ （または式(3)の定数 $\mu$ と $\sigma$ ）を求めればよい。このとき、式(2)ではなく式(1)の関係を使い、図2のような標本データから最小二乗法で回帰直線を得ることによって $a$ と $\beta$ を求める方法が考えられる。しかし、この方法では、回帰分析を行うために標本データとしてある程度の数の欠陥に対する欠陥検出確率が必要であり、また、各々の欠陥検出確率は検査回数に対する欠陥検出の割合によって与えられるので、欠陥ごとに相当回数の検査結果が要求される（ある欠陥が一度も検出されない、または、必ず検出された場合、欠陥検出確率 $p$ が0または1となり、式(1)の対数オッズが発散してしまうという問題もある）。以下で説明する最尤法を使用する方法では、より少ない検査結果からPOD曲線を求めることができる。

最尤法は、確率と対になる概念である“尤度”を利用する。与えられた数理モデルによりある事象が起こりうる可能性を示すのが確率であるのに対し、未知のパラメータを含む数理モデルをもとに観測された事象が起こりうる可能性を表すのが尤度である。前者では数理モデルから未来を予測し、後者では観測結果から数理モデルを推定する。ここで最尤

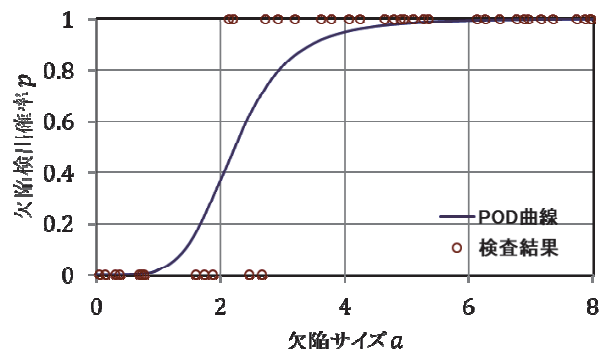


図4 Hit/Missデータ型のPOD曲線のイメージ

法に使用する Hit/Miss データ型の標本データでは、検査によりある欠陥が検出されたときに 1、検出されなかったときに 0 とする（同一の欠陥に複数回の検査を行った場合もそれぞれの検査結果を個別に 0 か 1 で表す）。

いま  $n$  個の Hit/Miss データ型の検査結果  $Z_i$  があり、それぞれが対象としている欠陥のサイズを  $a_i$  とする。欠陥検出確率が式 (3) で与えられているとき、この数理モデルで観測値  $Z_i$  と同じ結果が得られる確率は

$$L(\mu, \sigma) = \prod_{i=1}^n \text{POD}(a_i)^{Z_i} \{1 - \text{POD}(a_i)\}^{1-Z_i}$$

と表せ、これを最尤法における尤度関数と呼ぶ（ $\Sigma$  が総和を表すように  $\Pi$  は総乗を表す）。最尤法では、検査結果と同じ結果が得られる確率が最も高くなるように未知パラメータを選ぶため、尤度関数  $L(\mu, \sigma)$  を最大にする  $\mu$  および  $\sigma$  を求める。最尤法の具体的な計算手順は、純粋に数値計算技術の話なのでここでは割愛する（文献<sup>[7]</sup>は最尤法の考え方と手順を平易な言葉で説明している）。図 4 は、検査結果とそれらから得られた POD 曲線のイメージである。以上の統計分析手法をロジスティック回帰分析と呼ぶ。

ここでは、式 (1) で表される線形相関を仮定したが、現実的には、NDE 手法の性能の観点からそれ以上小さいとまず検出できないサイズ（検出限界）およびそれ以上大きいとほぼ確実に検出できるサイズが存在することが考えられる。その場合、欠陥検出確率は、検出限界以下ではおおむね 0 となり、検出がほぼ確実なサイズ以上ではおおむね 1 となる（図 5）。式 (1) の線形相関は、検出限界から検出がほぼ確実なサイズの間で欠陥検出確率が 0 から 1 へと遷

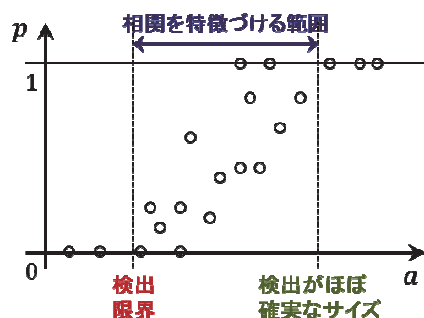


図5 相関を特徴づける範囲

移していく（Hit/Miss データ型で表すと、この間では 0 と 1 の両方が取りえて、徐々に 1 の割合が増えていく）振る舞いによって特徴づけられるので、この範囲の検査結果が十分なければ、最尤法により精度良く  $\mu$  と  $\sigma$  が求められない。よって正しい相関を反映した POD 曲線を作成するためには、あらかじめ図 5 のような欠陥サイズに対する欠陥検出確率の変化の傾向を調べて適切な欠陥サイズの範囲の検査結果を集めるか、傾向が分からなければ存在する欠陥サイズの範囲を網羅する検査結果を集める必要がある。

## 2.2 $\hat{a}$ vs $a$ データ型

$\hat{a}$  vs  $a$  データ型は、欠陥から得られる信号応答  $\hat{a}$  が欠陥サイズ  $a$  に依存するという仮定の下で、欠陥サイズ  $a$  と信号応答  $\hat{a}$  との対応を表す。ここで、信号応答とは NDE 手法によって得られる欠陥からの反応を定量化した数値であり、例えば UT の受信信号の中に現れる欠陥からの反射波の最大振幅などである。しかし、2.1 で  $\text{POD}(a)$  が表す意味を考えたときと同様に、現実問題として、同じサイズの欠陥から得られる信号応答は必ずしも同じではないし、さらに言えば、同一の欠陥でも条件のわずかな違いで信号応答に差が生じる。よって、ある欠陥サイズ  $a$  の欠陥から得られる信号応答  $\hat{a}$  は、図 6 に示すような確率分布で与えられると考えるのが妥当である。図 6 の場合は、信号応答は平均で 2 程度であるが上下にばらつきがあると読み取れる。欠陥サイズ  $\hat{a}$  に応じて信号応答は変わるため、このような確率分布も異なったものになる。欠陥サイズ  $a$  ごとに信号応答の確率分布を与える確率密度関数を  $g_a(\hat{a})$  とする。

次に、信号応答  $\hat{a}$  と欠陥検出確率  $\text{POD}(a)$  の関係について考える。ここでは、信号応答  $\hat{a}$  に対して判

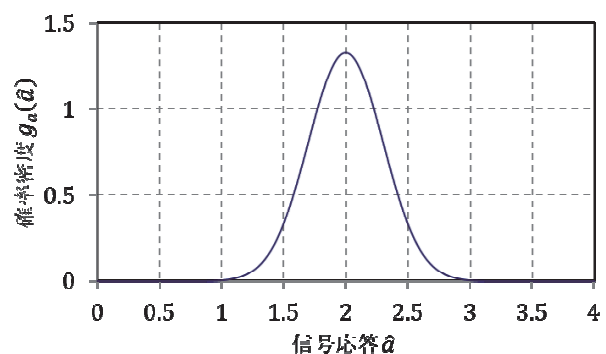


図6 信号応答が  $\hat{a}$  となる確率密度  $g_a(\hat{a})$  の例



定しきい値 (decision threshold)  $\hat{a}_{dec}$  を定め、 $\hat{a}$  が  $\hat{a}_{dec}$  を超えたとき欠陥が存在すると見なす。このとき、 $\hat{a}_{dec}$  以下の信号応答は無害なきず (有害なきずのことを欠陥と呼ぶ) による反応であると考え。別の解釈では、 $\hat{a}_{dec}$  を合格判定基準と考え、 $\hat{a}$  が  $\hat{a}_{dec}$  を超えた検査対象を不合格とすると捉えることもできる。関数  $POD(a)$  は、 $\hat{a}$  が  $\hat{a}_{dec}$  を超える確率ということになるから

$$POD(a) = \int_{\hat{a}_{dec}}^{\infty} g_a(\hat{a}) d\hat{a} \quad (4)$$

と表せる。確率密度関数  $g_a(\hat{a})$  が図6のグラフで与えられているとすると、 $\hat{a}_{dec}$  が1のとき  $POD(a)$  はほぼ100%となり、 $\hat{a}_{dec}$  が1.5のとき  $POD(a)$  はおよそ95%となり、 $\hat{a}_{dec}$  が2のとき  $POD(a)$  は50%となる。

式(4)の  $g_a(\hat{a})$  はNDE手法や検査条件などによって異なるため、標本となる検査結果から  $g_a(\hat{a})$  を推定する。以下では、2.1の  $POD(a)$  と同様に、 $g_a(\hat{a})$  が従うであろう条件を仮定することで必要となる検査結果の数を抑えることを考える。

確率密度関数  $g_a(\hat{a})$  は信号応答  $\hat{a}$  の確率分布を表すが、ここで紹介する  $\hat{a}$  vs  $a$  データ型では、 $\hat{a}$  は対数正規分布に従うと仮定する (つまり、 $g_a(\hat{a})$  は対数正規分布の確率密度関数ということになる)。このとき、 $\ln \hat{a}$  は正規分布に従うことになる。この正規分布の平均は欠陥サイズ  $a$  に依存するので  $\mu(a)$  とおくと

$$\ln \hat{a} = \mu(a) + \delta \quad (5)$$

と表せる。ここで、 $\delta$  は平均  $\mu(a)$  からの偏差であり、平均が0で標準偏差が定数  $\sigma_0$  の正規分布に従うものとする。よって、 $\ln \hat{a}$  は平均が  $\mu(a)$  で標準偏差が  $\sigma_0$  の正規分布に従うと言える。

次に、欠陥サイズ  $a$  と信号応答の対数の平均である  $\mu(a)$  の相関について考える。信号応答の種類にもよるが、一般的には欠陥サイズ  $a$  が大きくなるほど信号応答  $\hat{a}$  が大きくなる傾向があると想定できる。その場合、対数関数は単調増加関数であるから、 $a$  が大きくなるほど  $\ln \hat{a}$  およびその平均である  $\mu(a)$  が大きくなる傾向があると解釈することができる。ここでは、 $\mu(a)$  と欠陥サイズの対数  $\ln a$  が線形の相関を持つと仮定する。これを式で表すと

$$\mu(a) = \beta_0 + \beta_1 \ln a \quad (6)$$

となる。ここで、 $\beta_0$  と  $\beta_1$  は定数である。さらに、式(5)と式(6)をあわせると

$$\ln \hat{a} = \beta_0 + \beta_1 \ln a + \delta \quad (7)$$

と表せる。図7は式(7)の関係をグラフで表したものである。

式(5)および(6)を利用するため、関数  $POD(a)$  を別の形式に直す。ここで、 $P(A)$  を条件  $A$  が成り立つときの確率とすると、関数  $POD(a)$  は

$$POD(a) = P(\hat{a} > \hat{a}_{dec})$$

と表せる。また、対数関数は単調増加関数であるから

$$(8)$$

$$POD(a) = P(\ln \hat{a} > \ln \hat{a}_{dec})$$

が成り立つ。このとき、式(8)の余事象の確率は

$$1 - POD(a) = P(\ln \hat{a} \leq \ln \hat{a}_{dec}) \quad (9)$$

である。いま、 $\ln \hat{a}$  は平均が  $\mu(a)$  で標準偏差が  $\sigma_0$  の正規分布に従うため、この正規分布に従う確率変数を  $X$  とすると、式(9)は  $X$  が  $\ln \hat{a}_{dec}$  以下となる確率であり、これは正規分布の累積分布関数で与えられる。

標準正規分布 (平均が0で標準偏差が1の正規分布) に対しては、確率密度関数が

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (10)$$

で与えられ、累積分布関数は

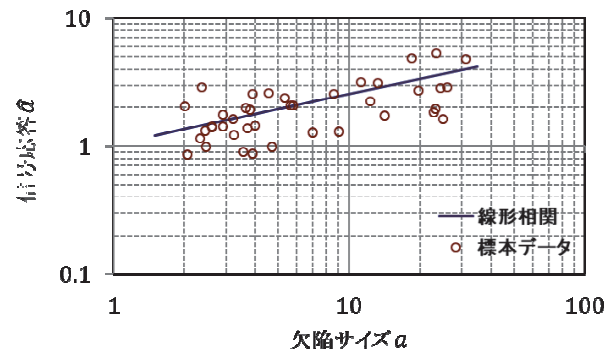


図7  $\hat{a}$  vs  $a$  データ型のデータ例

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \phi(t) dt \quad (11)$$

と表せる（この積分値は、解析的には得ることができず、数値積分で近似値を計算するしかない）。式(11)から分かるように、累積分布関数はその分布に従う確率変数が  $x$  以下となる確率を与える。このとき、一般の正規分布の確率密度関数は、式(10)の関数を使って

$$\frac{1}{\sigma} \phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (12)$$

と表せ、また、一般の正規分布の累積分布関数は、式(11)の関数を使って

$$\Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma} \phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) dt$$

と表せる。ただし、 $\mu$  と  $\sigma$  はそれぞれ正規分布の平均と標準偏差である。よって、式(9)は

$$1 - \text{POD}(a) = \Phi\left(\frac{\ln \hat{a}_{\text{dec}} - \mu(a)}{\sigma_{\delta}}\right)$$

と表せる。これに式(6)を代入して、整理すると

$$\text{POD}(a) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln \hat{a}_{\text{dec}} - \beta_0 - \beta_1 \ln a}{\sigma_{\delta}}\right)$$

が得られ、累積分布関数の性質

$$\Phi(-x) = 1 - \Phi(x)$$

を使って変形すると

$$\text{POD}(a) = \Phi\left(\frac{\ln a - (\ln \hat{a}_{\text{dec}} - \beta_0)/\beta_1}{\sigma_{\delta}/\beta_1}\right) \quad (13)$$

となる。これは、平均が  $(\ln \hat{a}_{\text{dec}} - \beta_0)/\beta_1$  で標準偏差が  $\sigma_{\delta}/\beta_1$  の対数正規分布の累積分布関数と一致する。式(13)が  $\hat{a}$  vs  $a$  データ型を使って POD 曲線を表す式であり、POD 曲線を得るには標本となる検査結果から未知パラメータ  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\sigma_{\delta}$  を導けばよい。ここでも最尤法を使ってこれらの未知パラメータを求める。

$\hat{a}$  vs  $a$  データ型の検査結果は欠陥から得られる信号応答である。いま  $n$  個の欠陥に対する検査結果があり、それぞれの欠陥のサイズが  $a_i$ 、それぞれの欠

陥に対する検査で観測された信号応答が  $\hat{a}_i$  であるとする。式(5)および(6)による信号応答の数理モデルにおいて、欠陥サイズが  $a_i$  であるとする、信号応答の対数  $\ln \hat{a}_i$  は、平均が  $\mu(a_i)$  で標準偏差が  $\sigma_{\delta}$  の正規分布に従う。このとき、信号応答が  $\hat{a}_i$  になる確率密度は式(12)より

$$\frac{1}{\sigma_{\delta}} \phi\left(\frac{\ln \hat{a}_i - \mu(a_i)}{\sigma_{\delta}}\right) = \frac{1}{\sigma_{\delta}} \phi\left(\frac{\ln \hat{a}_i - (\beta_0 + \beta_1 \ln a_i)}{\sigma_{\delta}}\right) \quad (14)$$

と書ける。確率密度は、積分して確率になる数値であり確率とは異なるものであるが、確率変数が特定の値になる可能性を相対的に比較する指標になる。つまり、式(14)に示した確率密度が大きくなるほど信号応答が  $\hat{a}_i$  になる確率が高くなると言える。

このような数理モデルで検査結果と同じ結果が得られる可能性の指標は、各欠陥から得られる信号応答が  $\hat{a}_i$  になる確率密度の積

$$L(\beta_0, \beta_1, \sigma_{\delta}) = \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{\delta}} \phi\left(\frac{\ln \hat{a}_i - (\beta_0 + \beta_1 \ln a_i)}{\sigma_{\delta}}\right) \quad (15)$$

として表すことができ、これを尤度関数として尤度関数を最大にする  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\sigma_{\delta}$  を求める。2.1 と同じく、最尤法の具体的な計算手順についてはここでは説明を省く。

未知パラメータ  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\sigma_{\delta}$  が定まれば式(13)により POD 曲線が得られるが、 $\hat{a}$  vs  $a$  データ型ではパラメータとしてさらに判定しきい値  $\hat{a}_{\text{dec}}$  が存在する。判定しきい値  $\hat{a}_{\text{dec}}$  は、信号応答  $\hat{a}$  が  $\hat{a}_{\text{dec}}$  を超えたとき欠陥が存在すると見なすもので、欠陥検出の基準が信号応答の値で定められることが前提にある。よって、欠陥の有無を純粋に信号応答の値で決められないとき判定しきい値をどう扱うか、そもそも  $\hat{a}$  vs  $a$  データ型を使用できる問題なのかという議論が

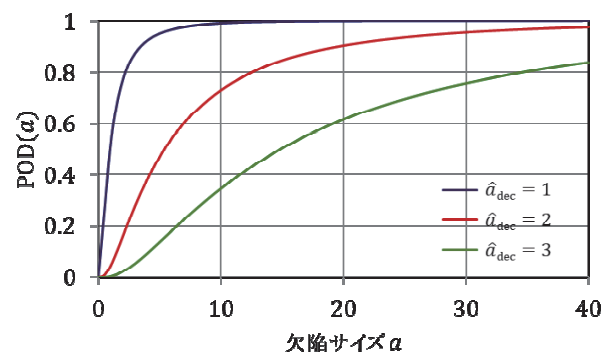


図8  $\hat{a}$  vs  $a$  データ型による POD 曲線の例

必要である。判定しきい値  $\hat{a}_{dec}$  というパラメータは、判定しきい値が決まっている試験要領の欠陥検出性能を調べるという使い方がある一方で、要求される欠陥検出性能を満たす判定しきい値を調べるという使い方もできる。図8は、図7の線形相関に対して判定しきい値  $\hat{a}_{dec}$  を1, 2, 3と変化させた場合のPOD曲線である。判定しきい値を大きくすると欠陥は検出され難くなるため、POD曲線は全体的に低い値になることが確認できる。

また、 $\hat{a}$  vs  $a$  データ型では欠陥を見逃してその信号応答が記録されないということを基本的には想定していない。検査結果に欠陥の見逃しがあり、欠陥サイズ  $a$  に対応する信号応答  $\hat{a}$  が欠損している場合はそのデータを除いてPOD分析を行うことになるが、欠陥検出確率を評価する中で“ある欠陥が検出できなかった”という情報を無視して分析を行うことには疑問がある。この問題については、いまのところ明確な対処方法は定まっていないようである。

式(15)では信号応答  $\hat{a}_i$  について式(7)で表される線形相関を仮定したが、実際には、NDE手法の性能限界、バックグラウンドノイズ、計測システムの仕様上の制約などのために信号応答に下限や上限が存在することがある。ここでは、この下限を信号記録しきい値 (recording signal threshold)  $\hat{a}_{th}$ 、上限を飽和限界 (saturation limit)  $\hat{a}_{sat}$  と呼ぶ。このとき、上述の線形相関において、信号応答が  $\hat{a}_{th}$  以下になる場合は応答信号がすべて  $\hat{a}_{th}$  となり、信号応答が  $\hat{a}_{sat}$  以上になる場合は応答信号がすべて  $\hat{a}_{sat}$  になるものとする(図9)。式(7)の線形相関が成り立つ範囲にこのような制限があるとき、範囲内のデータだけを利用するという選択もあるが、最尤法では式(15)の尤度関数を修正して範囲外のデータを活用することができる。

以下では、 $n$  個の検査結果のうち、 $r$  個の信号応答  $\hat{a}_i$  が計測可能範囲内に収まっており、 $t$  個の信号応答  $\hat{a}_j$  が下限を下回っており、 $s$  個の信号応答  $\hat{a}_k$  が上限を上回っているものとする ( $n=r+t+s$ )。信号応答が計測可能範囲に収まっており、式(6)の線形関係が成り立っている場合については、尤度は式(15)と同様に

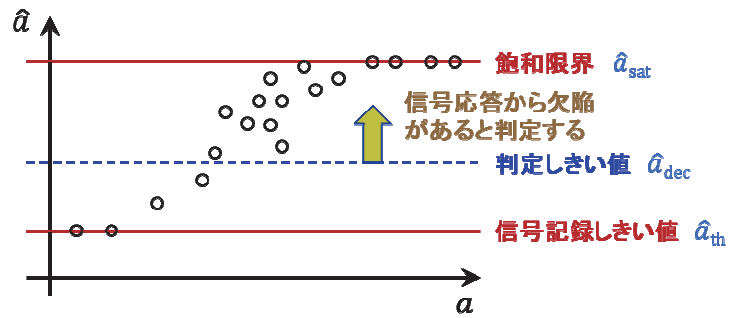


図9 信号応答  $a$  が取りえる値の範囲

$$L_R(\beta_0, \beta_1, \sigma_\delta) = \prod_{i=1}^r \frac{1}{\sigma_\delta} \phi\left(\frac{\ln \hat{a}_i - (\beta_0 + \beta_1 \ln a_i)}{\sigma_\delta}\right) \quad (16)$$

と表せる。信号応答が下限に満たない場合は、正しい信号応答の値が定められないので、式(16)のように確率変数が特定の値になる確率密度として尤度を表せない。しかし、少なくとも信号応答が下限未満であることは分かっているわけであるから、累積分布関数を使って信号応答が下限未満である確率の積

$$L_T(\beta_0, \beta_1, \sigma_\delta) = \prod_{j=1}^t \phi\left(\frac{\ln \hat{a}_{th} - (\beta_0 + \beta_1 \ln a_j)}{\sigma_\delta}\right) \quad (17)$$

を尤度とする。信号応答が上限を超えている場合は、同様に、信号応答が上限を超える確率の積

$$L_S(\beta_0, \beta_1, \sigma_\delta) = \prod_{k=1}^s \left\{ 1 - \phi\left(\frac{\ln \hat{a}_{sat} - (\beta_0 + \beta_1 \ln a_k)}{\sigma_\delta}\right) \right\} \quad (18)$$

を尤度とする。よって、 $n$  個の検査結果を使った尤度関数は式(16)から(18)の積

$$L(\beta_0, \beta_1, \sigma_\delta) = L_R(\beta_0, \beta_1, \sigma_\delta) L_T(\beta_0, \beta_1, \sigma_\delta) L_S(\beta_0, \beta_1, \sigma_\delta) \quad (19)$$

と表せ、尤度関数を最大にする  $\beta_0, \beta_1, \sigma_\delta$  を求める。

Hit/Miss データ型によるPOD分析で式(1)の線形相関を仮定したように、 $\hat{a}$  vs  $a$  データ型によるPOD分析では式(7)の線形相関を仮定している。上述の信号記録しきい値や飽和限界がある場合は、この線形相関を正しく推定するために、検査結果には計測可能範囲の信号応答のデータが十分含まれている必要がある。また、このような下限や上限を把握して尤度関数を正しく設定しなければ、線形相関が成り立つ範囲外のデータが線形相関の推定に使用され、実際の相関と大きく異なった結果が導かれてしまう可能性がある(第3節でこの例を紹介する)。

### 3 検査結果の線形相関の確認

第2節では、NDE手法の検査結果からPOD曲線を得る方法としてHit/Missデータ型を利用した方法と $\hat{a}$  vs  $a$ データ型を利用した方法について解説した。これらのデータ型を使ったPOD分析ではそれぞれ前提となる線形相関を仮定しており、使用する検査結果がHit/Missデータ型ならば式(1)を満たしている必要があり、 $\hat{a}$  vs  $a$ データ型ならば式(7)を満たしている必要がある。Hit/Missデータ型によるPOD曲線を与える式(3)や $\hat{a}$  vs  $a$ データ型によるPOD曲線を与える式(13)は上記の仮定を前提にしており、これらの仮定に反する検査結果を使ってPOD曲線を得ても欠陥検出確率について適切な推定が行えない。

POD分析が前提とする仮定を検査結果が満たしているか確認する例として、UTの数値シミュレーションを行い、得られた結果から欠陥サイズと信号応答の相関を調べた。対象としているのは信号応答であるから $\hat{a}$  vs  $a$ データ型の線形相関である式(7)を念頭に置いている。Hit/Missデータ型では欠陥に対する検査ごとの欠陥検出の可否をデータとするため、同様の調査をするにはシミュレーションの結果から欠陥検出の可否を判定しなければならず、シミュレーションで欠陥検出をどのように定義するかの議論が必要となる（信号応答が判定基準以上のとき欠

陥が検出されたと見なすなどであれば比較的単純であるが）。また、欠陥検出確率を検査回数に対する欠陥検出の割合として算出するのであれば検査回数に応じてシミュレーション回数も増大する（検査ごとのばらつきを考慮したシミュレーションが必要かもしれない）。よって、ここでは $\hat{a}$  vs  $a$ データ型に絞って話を進める。

UTシミュレーションには有限要素法（FEM）による超音波シミュレーションソフトウェアComWAVEを使用した。図10にシミュレーションの条件を図示する。板厚25mmの平板の底面に矩形スリットが入っており、平板の上面に斜角探触子を配置し、スリットのコーナー部にビーム中心軸が当たるように屈折角70°で横波を入射する。形状モデルは2次元にしており、探触子の振動子の長さは5mm、スリットの幅は0.65mmであり、スリットの高さを変化させて探触子で受信されるスリットからの反射波（欠陥指示）の最大振幅の変化を調べる。平板の材質は鋼（縦波音速5900m/s、横波音速3240m/s、密度7800kg/m<sup>3</sup>）で、斜角探触子のくさびの材質はポリスチレン（縦波音速2340m/s、横波音速1150m/s、密度1050kg/m<sup>3</sup>）である。

図11は、シミュレーションにより得られたスリット高さ（mm）と欠陥指示の最大振幅（a.u.）の関係である。スリット高さが4mmになるまではスリット高さの増加とともに最大振幅が大きくなる傾向が見られ、スリッ



図10 シミュレーションの条件

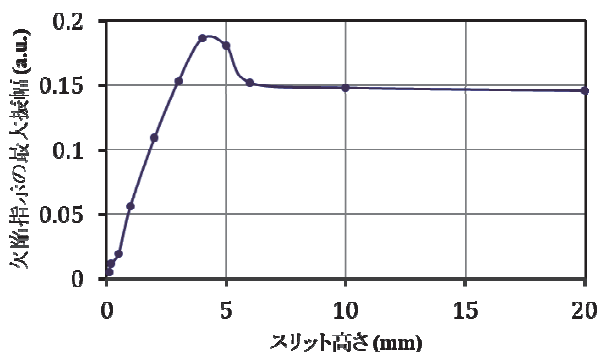


図11 スリット高さと欠陥指示の最大振幅の関係

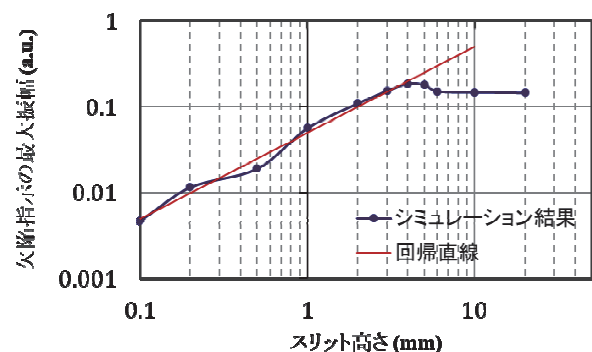


図12 スリット高さと欠陥指示の最大振幅の関係2

ト高さが4 mmを超えて増加すると最大振幅は一旦少し下がった後、ほぼ一定の値で推移している。

図10に示したようなパルス反射法では、探触子から試験体中に入射された超音波ビームが欠陥に当たって反射し、再び探触子で捉えられることで欠陥を検出する。このとき、欠陥を検出するのに有効なビーム幅は限られており、この範囲を超えてスリット高さが増加しても欠陥指示は変化しない。スリット高さがある程度以上になると欠陥指示の最大振幅が変わらなくなることはこれで説明がつく。しかし、図11のグラフでは、欠陥指示の最大振幅は最初に単調増加した後、最大値からやや減少して最終的にはほぼ一定になる。最大値から減少する理由については他の要因を探す必要がある。超音波ビームがスリットに当たったとき、スリットのコーナー部から強い波が戻ってくるが（これをコーナーエコーと呼ぶ）、スリットの上端からも波が戻ってくる（これを端部エコーと呼ぶ）。よって、有効なビーム幅の中にスリットの上端が含まれていればコーナーエコーと端部エコーが得られる一方で、スリット高さが大きくて上端が有効なビーム幅から外れていればコーナーエコーのみが得られることになる。図11のグラフにおいて、スリット高さが4 mmを超えたときに欠陥指示の最大振幅が減少に転じるのはコーナーエコーと端部エコーの干渉が主な原因であると推測される。

図11に示したシミュレーション結果をPOD分析に使用するデータとして捉え、その相関を調べてみる。ここで、欠陥サイズ $a$ をスリット高さ、信号応答 $\hat{a}$ を欠陥指示の最大振幅とする。図12は、式(7)の相関を確認するために図11を両対数グラフにしたものである。これを見ると、スリット高さの増加

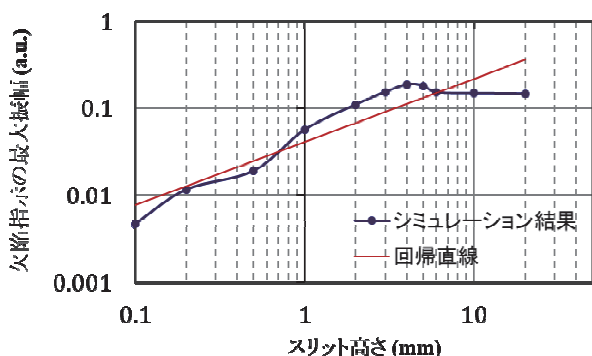


図13 誤って導かれた線形相関

とともに欠陥指示の最大振幅が大きくなる範囲においては、おおむね式(7)の関係が成り立つことが分かる。また、図12のグラフで示される関係には2.2で述べた飽和限界 $\hat{a}_{sat}$ が存在すると言え、その値を0.15程度に設定して式(19)のような尤度関数を使用する必要がある（信号記録しきい値 $\hat{a}_{th}$ にあたる下限は見られないので $L_T$ は不要である）。このとき、飽和限界を考慮せず、すべてのデータに線形相関があると仮定すると、図13のような誤った線形相関が導かれる。そして、誤った線形相関からは、誤ったPOD曲線が導かれる。

以上のように、図10に図示した条件のシミュレーション結果では、欠陥サイズ $a$ をスリット高さ、信号応答 $\hat{a}$ を欠陥指示の最大振幅とすると2.2で扱った $\hat{a}$  vs  $a$ データ型の仮定が満たされることが確認できた。これは簡単な例であるが、POD分析を行うときには使用するデータが前提としている仮定を満たしているか確認する必要がある。

## 4 まとめ

本稿では、第2節でPOD分析において使用されるHit/Missデータ型および $\hat{a}$  vs  $a$ データ型の2種類のデータ型の背景にある考え方とそれぞれが前提としている仮定について解説し、第3節でPOD分析において対象とする検査結果がこのような仮定を満たしていることの確認方法としてシミュレーション結果を利用した簡単な例を紹介した。

第2節で述べた方法に従って、検査結果を機械的に尤度関数にあてはめ、最尤法で未知パラメータを求めれば、POD曲線を得ることはできる。しかし、POD分析に使用したデータが前提としている仮定を満たしていなければ、検査結果が持つ情報を正しく反映した欠陥検出確率の特性は得られない。使用する検査結果がどのような相関を持っているか確認することが重要であることをここでもう一度強調しておく。

第3節で紹介した例のように、シミュレーションは、検査における特定のパラメータがPOD分析に適した相関を持つのかを確認する手段となりうる。ただし、パラメータの相関性ばかりに気を取られてパラメータを選択し、健全性評価の観点で重要な欠



陥サイズを POD 分析で使用しないと、得られた POD 曲線は健全性評価で役に立たないものになる。重要なパラメータに適切な相関を持たせる方法としては、対数をとったり指数をとったりなどの演算をパラメータに加えて利用する方法が考えられる。

ここで紹介した POD 曲線では、欠陥サイズが 0 に近づくと POD は 0 に近づき、欠陥サイズが大きくなると POD は 1 に近づくことを前提としている。よって、欠陥検出が著しく難しく、どんなに欠陥が大きくても検出が確実とは言えない (POD が 1 にならない) 場合などにここで紹介した POD 曲線のモデルを適用すると、検査結果を正しく反映した POD 曲線は得られない。文献 [8] ではこの問題に対応するための方法を紹介している。このように、注意しなければならない前提はデータの相関関係だけではない。

今回は、議論する内容を絞るために POD 曲線を活用する上で重要となる信頼区間について説明を省いたが、これについても別の機会に解説したい。

#### 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] 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/Code 2017-015, 日本原子力研究開発機構, 2018.
- [4] 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.
- [5] A. P. Berens, “NDE reliability data analysis,” J. R. Davis (Ed.), *Nondestructive Evaluation and Quality Control (ASM Handbook Vol. 17)*, ASM International, Ohio, pp. 689-701, 1989.
- [6] A. P. Berens and P. W. Hovey, *Evaluation of NDE reliability characterization*, AFWAL-TR-81-4160, Vol. 1, Air Force Wright Aeronautical Laboratories, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1981.
- [7] 石村貞夫, 劉晨, 石村光資郎, 入門はじめての統

計的推定と最尤法, 東京図書, 2010.

- [8] C. Annis, J. C. Aldrin, and H. A. Sabbagh, “Profile likelihood: what to do when maximum probability of detection never gets to one,” *Materials Evaluation*, Vol. 73, No. 1, pp. 96-99, 2015.



山本敏弘

# JIS Z 3110による溶接部への放射線透過試験のきずの分類と判定基準

Classification and criteria of flaw by radiographic examination to Weldment in JIS Z 3110

規格基準室 佐藤 長光

JIS Z 3110-2017 has described the methods of radiographic examination (RT) for X-ray and gamma-ray techniques with digital detectors to weldment. However, the classification of the flaw is not described. Therefore, it is necessary to examine the classification of the flaw with RT in the weld where JIS Z 3110-2017 was used and the criteria. The transition of the classification of JIS was investigated and the classification and the criteria were proposed based on the investigation result.

**Keywords** JIS Z 3110, RT, classification, criteria

## 1 はじめに

米国において放射線透過試験（以下、RT という）は有望なものと考えられ、1920（大正 9）年代の中頃から試験研究が開始され、1931（昭和 6）年に米国機械学会（以下、ASME という）のボイラ規格が溶接技術を取り入れた際の条件として RT の実施が規定された<sup>[1]</sup>。1953（昭和 28）年頃の国内のボイラ規格<sup>[2]</sup>やボイラの技術基準<sup>[3]</sup>は、ボイラの国際入札や輸入品に対応するため、ASME のボイラ規格を参照した<sup>[2, 4]</sup>。このため、基本的に溶接部には RT が要求されている。この考え方は現在でも国内のボイラ及び圧力容器の製造規格等には継承されている。国内のボイラ及び圧力容器の製造規格等では、試験方法ときずの分類を規定した RT に関する日本産業規格（以下、JIS 規格という）に条件をつけて引用している。

試験方法ときずの分類を規定した JIS 規格の制定も早く、1955（昭和 30）年には JIS Z 2341-1955<sup>[5]</sup>が制定されている。JIS Z 2341-1955 では、試験方

法ときずの分類に課題があることが明らかとなり<sup>[6]</sup>、この対策として 1968（昭和 43）年に JIS Z 2341 を廃止し、JIS Z 3104-1968<sup>[7]</sup>及び JIS Z 3105-1968<sup>[8]</sup>に分科して制定している。これらの制定・改正・廃止をまとめた系統図を図 1 に示す。図 1 では参考のため、鋳鋼品やアルミニウム铸件に対する RT の試験方法ときずの分類を規定した JIS G 0581 と JIS H 0522、アルミニウム管の円周溶接部やアルミニウムの T 形溶接部に対する RT の試験方法を規定した JIS Z 3108 と JIS Z 3109 も記載している。

図 1 での JIS 規格は、JIS Z 3110-2017<sup>[9]</sup>を除いて、フィルムを用いた試験方法ときずの分類を規定しているのに対し、JIS Z 3110-2017 では、デジタル検出器を用いた試験方法のみを規定している。

このため、JIS Z 3110-2017 を用いた溶接部の RT でのきずの分類や判定基準をどの様にするかを検討する必要がある。この検討のため、JIS 規格におけるきずの分類の変遷を調査し、調査結果に基づいてきずの分類の検討と提案を行う。その後、製造規格等での RT の判定基準を調査し、調査結果に基

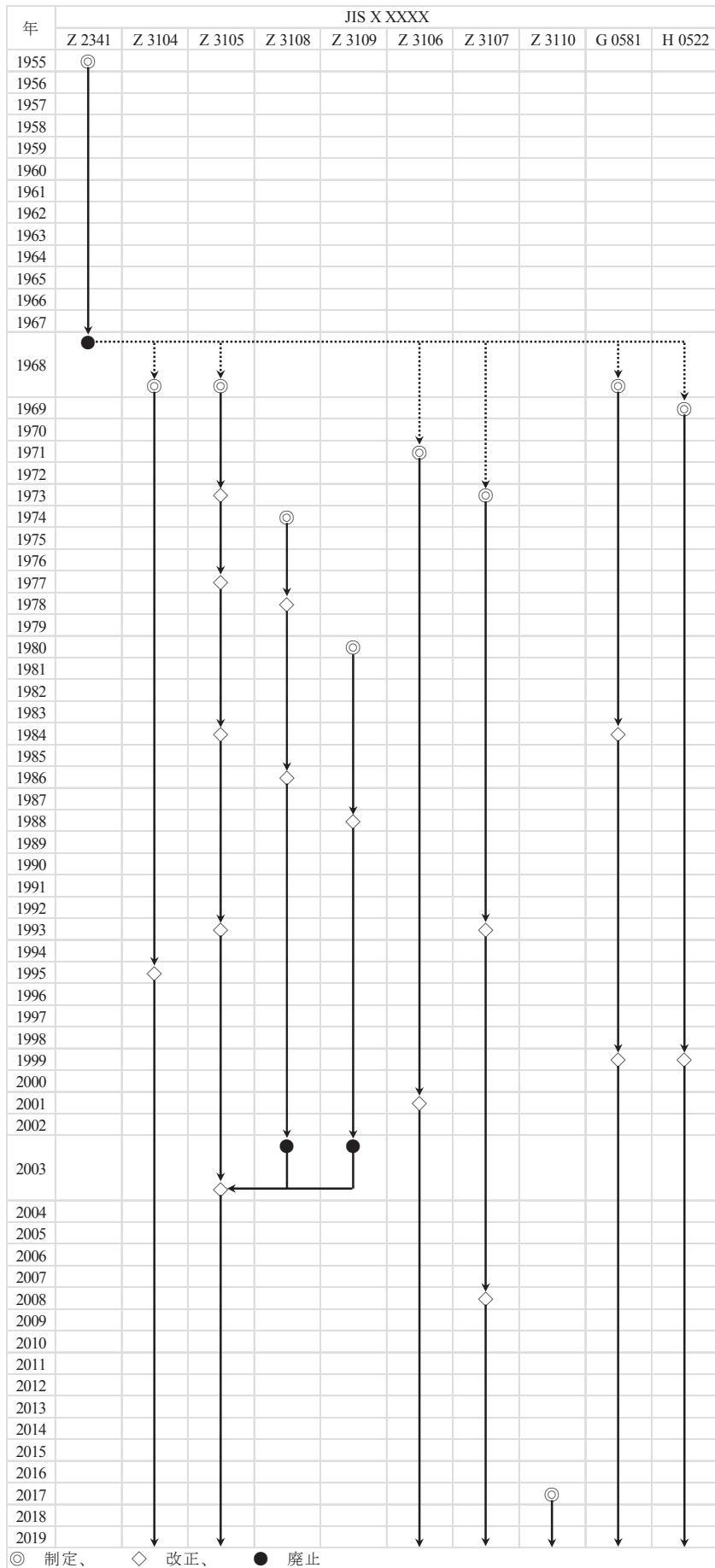


図1 JIS規格の制定・改正・廃止をまとめた系統図



づいて判定基準について検討と提案を行う。

## 2 JIS規格におけるきずの分類の変遷調査

図1のJIS規格のうち、溶接部のきずの分類が規定されているJIS Z 2341, JIS Z 3014, JIS Z 3105, JIS Z 3106及びJIS Z 3107におけるきずの分類の変遷を以下に示す。最新版でのJIS規格におけるきずの分類は、いずれも品質管理上の基準として定められている。

なお、古くは「欠陥」と呼ばれていたものは「きず」と、「等級分類」と呼ばれていたものは「分類」と変更されているが、以下では、使われていた年代に従った用語を用いている。

### (1) JIS Z 2341の概要<sup>[5]</sup>

JIS Z 2341-1995の等級分類の概要を表1に示す。欠陥の種別は求めず、統一した試験視野にある欠陥の個数により厚さに応じて1級から6級に分類することとされている。

### (2) JIS Z 3104の概要

#### ① JIS Z 3104-1968の概要<sup>[7]</sup>

JIS Z 3104-1968の等級分類の概要を表2に示す。欠陥を含む構造物の強さの低下の様相は、その欠陥の種別により異なると考えられた。丸みを帯びた欠陥は、断面積の減少が起因して強さを低下させ、細長い欠陥は応力集中が起因して強さを低下させ、割れに類する欠陥は応力集中が非常に

表1 JIS Z 2341-1955の等級分類の概要<sup>[5]</sup>

欠陥の種別	なし
試験視野	10 × 50 mmを用いる。
等級分類	厚さに応じて欠陥の個数により1級から6級に分類する。 欠陥の大きさが2 mmを超える場合は、長さに応じて係数を乗ずる。 欠陥の大きさが12 mmを超える場合及び亀裂が存在すれば、最下位の6級に分類する。

表2 JIS Z 3104-1968の等級分類の概要<sup>[7]</sup>

欠陥の種別	欠陥を次の3つの種別に分ける。 第1種：丸みを帯びた欠陥 第2種：細長い欠陥 第3種：割れ
欠陥点数及び欠陥長さ	(1) 第1種の欠陥 第1種の欠陥の試験視野は母材厚さに応じて、10 × 10 mm, 10 × 20 mm又は10 × 30 mmを用いる。 試験視野内の欠陥の長径により点数をつける。ただし、微小な欠陥は算定の対象とはしない。 (2) 第2種の欠陥 第2種の欠陥であるスラグ巻込みと溶込み不良及び融合不良とでは強さの低下に与える影響が異なることから、溶込み不良及び融合不良の場合は、係数として2を乗じて欠陥長さとする。 欠陥と欠陥の間隔も欠陥の種類により独立した欠陥とするか連続した欠陥とするかを判断する。
等級分類	(1) 第1種の欠陥 欠陥点数の総和により、1級から4級に分類する。ただし、欠陥の長径が母材の厚さの1/2を超えるときは4級にする。なお、1級については、算定の対象とはしない微小な欠陥でも、10個以上あってはならない。 条件により、試験視野を3倍に拡大し、試験視野内の欠陥点数の総和の1/3を欠陥点数とすることができる。 (2) 第2種の欠陥 欠陥の長さにより、1級から4級に分類する。ただし、1級については、溶込み不良及び融合不良は許容されない。 (3) 第3種の欠陥 4級とする。 (4) 第1種と第2種の欠陥が混在する場合 欠陥の種別毎に、それぞれ等級分類し、その内の下位の等級分類にする。共に同じ等級であれば、一つ下位の等級分類にする。ただし、1級については第1種の欠陥の許容点数の1/2及び第2種の欠陥の許容長さの1/2をそれぞれ超えた場合にのみ2級とする。

大きく、構造物の強さを著しく低下させると考え、欠陥の種別を3つに分けて、おのおの別の規定に従って等級分類することとされた。

欠陥による強さの低下の割合は、荷重の種類により大きく異なると考えられた。実験結果では、低応力破壊を生ずるような特殊な場合を除き静的荷重による強さの低下は、衝撃や疲れのような動的荷重による強さの低下よりはるかに小さいため、ここでは溶接部の等級分類に対して欠陥による疲れ強さの低下が考えられた。加えて、等級分類は等級を増しても煩雑であり、実際には使用されないことが起こり得るので、4等級に分類することとされた。

4等級に分類された内の、1級から3級に対応する構造物として次のように考えられた。なお、4級に対応する構造物は考えられていない。

1級 繰り返し荷重を受けて疲れ強さを特に考慮しなければならないもの、又は破壊によって重大な災害が起こるもので、余盛りを削除するようなもの。

2級 余盛りは削除しないが、繰り返し荷重を受けるか、あるいは強さが重要と考えられるもの。

3級 疲れ強さを考慮しなくてもよいもの。

第1種の欠陥を含む、余盛りを削除した試験片の強さの低下に関する実験結果を応力に直交する断面での欠陥率と疲れ強さとの関係にまとめると1級、2級、3級及び4級は、それぞれ欠陥率の1%以下、3%以下、6%以下及び6%を超えるものに対応するので、余盛りを削除した継手に対する各等級の疲れ強さは、無欠陥の場合の75%以上、55%以上、45%以上及び45%未満程度と考えられた。

第2種の欠陥について、ASME BPV Code Section IIIでは、スラグ巻込みに対する合否基準を板厚の1/3においている。したがって、これが2級相当として定められた。スラグ巻込みに関する実験結果を欠陥の長さでまとめると、2級のものは疲れ強さが50～60%に低下する。1級としてはISOの合否基準に従って板厚の1/4をとることとして定められた。3級に対しては強さよりむしろ溶接技術の点から板厚の

1/2として定められた。

## ② JIS Z 3104-1995 の概要<sup>[10]</sup>

JIS Z 3104-1995 のきずの分類の概要を表3に示す。JIS Z 3104-1968 からの主な改正箇所は次の通りで、溶接継手における有害度として直接関係付けしていた JIS Z 3104-1968 の考え方を、単にきずの内在程度に応じて分類する考え方に修正されている。

- a) 「欠陥」と「きず」が明確に使い分けられた。
- b) タングステン巻込みが第4種として種別に新しく追加された。
- c) 第1種のきず点数を求める場合、試験視野を3倍に拡大し、試験視野内のきず点数の総和の1/3をきず点数とすることができる規定が削除された。
- d) 第2種のきず長さに乗ずる係数が削除された。
- e) きず群の長さを求める方法を変更し、きずが一線上に存在してきずときずの間隔が大きい方のきず長さ以下の場合にその間隔を含めてきず長さを求めることにされた。
- f) 第1種のきずと第4種のきずは、共存きずとして新規に定義された。
- g) 総合分類の概念を新たに定義し、決定手順が明記された。

一方、JIS Z 3104-1968 での等級分類は、きずの形状で種別を分類しその程度で等級を決定していたため、定性的にはきずの有害度との関連もあり、分類作業も容易であることから、品質管理においては実用上極めて便利であると考えられた。さらに、これまで、等級分類が各種溶接構造物の品質管理基準として広く利用されてきた実績もあり、JIS Z 3104-1995 の改正で十分な根拠なく分類基準を大きく変更することは、産業界に混乱を招くと考えられたため、JIS Z 3104-1968 の分類基準は概ね踏襲されている。

## (3) JIS Z 3105 の概要

### ① JIS Z 3105-1968 の概要<sup>[8]</sup>

JIS Z 3105-1968 の等級分類の概要を表4に示す。アルミニウム溶接部について透過写真上で観察される対象となる欠陥は、主としてブローホール、タングステン巻込み、溶込み不良、融合不良

及び割れが考えられている。銅の巻込みについては、資料不足のため、この時点では等級分類の対象外とされた。

ブローホール及びタングステン巻込み等の欠陥については、大きさ、数及び分布状態により欠陥点数を求めて、等級を決定することとされた。JIS

Z 2341-1955 では、試験視野は、10 × 50 mmであったが、試験視野を広くすると欠陥点数の算定が煩雑となり、又、間違つて算定する危険もあると考えられた。このため、欠陥点数の算定が比較的容易であり、かつ正確に行えるという点から試験視野を狭くし、10 × 15 mm とされた。

表3 JIS Z 3104-1995 のきずの分類の概要<sup>[10]</sup>

きずの種別	<p>きずを次の4つの種別に分ける。</p> <p>第1種：丸みを帯びたきず</p> <p>第2種：細長いきず</p> <p>第3種：割れ</p> <p>第4種：タングステン巻込み</p>
きず点数及びきず長さ	<p>(1) 第1種及び第4種のきず 試験視野は母材厚さに応じて、10 × 10 mm, 10 × 20 mm 又は 10 × 30 mm を用いる。きずの長径により点数をつける。ただし、微小なきずは算定の対象とはしない。第4種のきず点数は第1種のきず点数の1/2とする。</p> <p>(2) 第2種のきず きず長さによる。 きずが一線上に存在し、きずときずとの間隔が大きい方のきずの長さ以下の場合、きずときずとの間隔を含めて測定した寸法をそのきず群のきず長さとする。</p>
きずの分類	<p>(1) 第1種及び第4種のきず きず点数の総和により、1類から4類に分類する。ただし、きずの長径が母材の厚さの1/2を超えるとときは4類にする。なお、1類については、算定しないきずの寸法以下の微小なきずでも、10個以上あつてはならない。</p> <p>(2) 第2種のきず きずの長さにより、1類から4類に分類する。ただし、1類と分類された場合でも、溶込み不良及び融合不良があれば2類とする。</p> <p>(3) 第3種のきず 4類とする。</p> <p>(4) 総合分類 きずの種別が1種類の場合は、その分類を総合分類とする。 きずの種別が2種類以上の場合、その内の分類番号の大きい方を総合分類とする。ただし、第1種のきず及び第4種のきずの試験視野に分類の対象として第2種のきずが混在する場合、きず点数による分類ときず長さによる分類がともに同じ分類であれば、混在する部分の分類は分類番号を一つ大きくする。このとき、1類については、第1種と第4種のきずの許容点数の1/2及び第2種のきずの許容長さの1/2をそれぞれ超えた場合のみ2類とする。</p>

表4 JIS Z 3105-1968 の等級分類の概要<sup>[8]</sup>

欠陥の種別	<p>欠陥を次の2つの種別に分ける。</p> <p>① ブローホール、タングステン巻込み等の欠陥</p> <p>② 割れ、溶込み不良及び融合不良</p>
欠陥点数	<p>(1) ブローホール、タングステン巻込み等の欠陥の点数 試験視野は、10 × 15 mm を用いる。 欠陥の長径により点数をつける。ただし、微小な欠陥は算定の対象とはしない。算定の対象とはしない微小な欠陥が密集して多数存在する場合には、その範囲を一つの大きな欠陥と見なして欠陥点数に加える。ただし、それらの存在位置が余盛の部分に限られることがあきらかであれば、欠陥点数に加えない。 タングステン巻込みの欠陥点数は、ブローホールの欠陥点数の1/2とする。</p>
等級分類	<p>(1) 欠陥点数による等級分類 欠陥点数の総和により、A級からC級に分類する。</p> <p>(2) 割れ、溶込み不良及び融合不良 C級とする。</p>

JIS Z 2341-1955 では 6 等級に分類されていたが、等級数を増しても煩雑であり、実際には使用されないことも多いと考えられ、3 等級に分類された。

アルミニウム溶接部は、余盛を削除しないのが普通であり、余盛のある溶接部に存在する欠陥が強さに及ぼす影響については明確な結論を得るまでに至らなかった。このため、溶接部を数多くの等級に分類しても実際的ではないため、欠陥の比較的少ない A 級と欠陥の比較的多い B 級の二つに大別し、B 級より欠陥の多いものを C 級とされた。

割れ、溶込み不良及び融合不良は応力集中が非常に大きく、構造物の強さを著しく低下させると考えられ、最下位の C 級とされた。

② JIS Z 3105-1973 の概要<sup>[11]</sup>

JIS Z 3105-1973 の等級分類の概要を表 5 に示す。JIS Z 3105-1968 から大きな改正はない。

③ JIS Z 3105-1977 の概要<sup>[12]</sup>

JIS Z 3105-1977 の等級分類の概要を表 6 に示す。JIS Z 3105-1977 に酸化物の巻込み及び銅の巻込みが欠陥として追加されている。

酸化物の巻込み、溶込み不良及び融合不良等の細長い欠陥は、ブローホール等の比較的丸みを持った欠陥に比べて応力集中が大きく、強さに及ぼす影響も大きくなるのが普通であるが、アルミニウム溶接部の場合、これらの線状欠陥は、静的引張強さに対しては、一般に断面積の減少率として考えられ、疲れ強さに関しては欠陥の大きさ及び存在位置の影響を受けると考えられた。板厚 25 mm の 5083/5183 溶接継手の融合不良（融

表 5 JIS Z 3105-1973 の等級分類の概要<sup>[11]</sup>

欠陥の種類	欠陥を次の 2 つの種別に分ける。 ① ブローホール、タングステン巻込み等の欠陥 ② 割れ、溶込み不良及び融合不良
欠陥点数	(1) ブローホール、タングステン巻込み等の欠陥 試験視野は、10 × 15 mm を用いる。 欠陥の長径により点数をつける。ただし、微小な欠陥は算定の対象とはしない。算定の対象とはしない微小な欠陥が密集して多数存在する場合には、その範囲を一つの大きな欠陥と見なして欠陥点数に加える。ただし、それらの存在位置が余盛の部分に限られることがあきらかであれば、欠陥点数に加えない。 タングステン巻込みの欠陥点数は、ブローホールの欠陥点数の 1/2 とする。
等級分類	(1) 欠陥点数による等級分類 欠陥点数の総和により、A 級から C 級に分類する。 (2) 割れ、溶込み不良及び融合不良 C 級とする。

表 6 JIS Z 3105-1977 の等級分類の概要<sup>[12]</sup>

欠陥の種類	欠陥を次の 2 つの種別に分ける。 ① ブローホール、タングステン巻込み及び 2.0 mm 以下の酸化物の巻込み ② 割れ、溶込み不良、融合不良、銅の巻込み及び 2.0 mm を超える酸化物の巻込み
欠陥点数	(1) ブローホール、タングステン巻込み及び 2.0 mm 以下の酸化物の巻込みの欠陥の点数 試験視野は母材厚さに応じて、10 × 10 mm、10 × 20 mm 又は 10 × 30 mm を用いる。 欠陥の長径により点数をつける。ただし、微小な欠陥は算定の対象とはしない。算定の対象とはしない微小な欠陥が密集して多数存在する場合には、その範囲を一つの大きな欠陥と見なして欠陥点数に加える。ただし、それらの存在位置が余盛の部分に限られることがあきらかであれば、欠陥点数に加えない。 タングステン巻込みの欠陥点数は、ブローホールの欠陥点数の 1/2 とする。
等級分類	(1) 欠陥点数による等級分類 欠陥点数の総和により、1 級から 4 級に分類する。 欠陥の大きさが母材の厚さの 1/3 又は 10.0 mm のいずれか小さい値を超えるときは 4 級とする。 3 級の欠陥点数が連続して試験視野の 3 倍を超えて存在する場合は 4 級とする。 (2) 割れ、溶込み不良、融合不良、銅の巻込み及び 2.0 mm を超える酸化物の巻込み 4 級とする。

合不良はほぼ板厚の中央部付近に存在する。)が引張荷重による疲れ強さに及ぼす影響が調べられた。余盛りがある場合は欠陥の長さが板厚程度までであっても疲れ強さは、無欠陥のものとはほとんど差異はなく、余盛を削除した場合は、欠陥長さの影響を受けるが、その長さが板厚の1/3程度以下であれば、無欠陥のものとはほとんど差異がないことが示されている。

従って、アルミニウム溶接部の場合も鋼溶接部に準じて、第2種の欠陥として等級分類を行うことが適切と考えられたが、この種の欠陥が比較的溶接部の表面近くに存在する場合の強さに及ぼす影響などの資料が十分そろっているとは言いがたいこと、この種の欠陥は超音波探傷試験による判定との併用が望ましいことなどを考慮して、規格化するに至っていない。

従って、この種の線状欠陥は従来どおり割れと同じ判定となり、いずれがあっても4級となるので過酷な評価を受けることになるが当時は止む負えないと考えられた。より合理的な評価を行うためにこれらの取り扱いについては、当事者間で協議することが望ましいと考えられた。ただし、この種の線状欠陥のうち比較的強さに及ぼす影響が小さい糸状の酸化物の巻込みについて、その長さがおおよそ2.0 mm以下の微小なものは、ブローホールと同じ取り扱いをすることとされた。

ミグ溶接のバーンバック等により生じた銅の巻込みは、その部分の溶接金属を脆化し、通常割れとなることが多いため、この様な部分は事前に取り除く必要があるが、十分除去されずに透過写真に現れた場合は、割れと同じく4級とされた。

JIS Z 3105-1977の改正での4等級の分類は、概ねJIS Z 3105-1973のA級を1級に、B級を2級に、C級の上位を3級に、3級より欠陥点数の多いものを4級に分類し、試験視野との関係で、それぞれの欠陥点数が定められたが、管理状態の良いアルミニウムの溶接では、欠陥は溶接全長に渡って均一に分布することは少なく、局部的に集中して発生するケースが多いことも考慮されている。

アルミニウム溶接部のブローホールは単純に断面積の減少率として考えればよく、ブローホールによる断面積の減少量が5%程度以下であれば機

械的性質への影響は小さいことが知られていた。

アルミニウムの溶接において通常管理状態にある標準的な溶接では、1級及び2級のマクロ的な欠陥面積率は1%程度と考えられ、3級の欠陥面積率は3~5%程度と考えられた。

従って、このような条件のもとで1級、2級及び3級の溶接部については、余盛の有無にかかわらず静的引張強さの低下はほとんどないと考えられた。

疲れ強さの影響については、通常管理状態にある標準的な溶接では、余盛有又はドレッシング(余盛ビード表面及び止端部を滑らか仕上げたもの)の状態での破壊はブローホールと無関係に余盛の止端部から発生し、1級、2級及び3級の間で疲れ強さの差異はほとんど無いと考えられた。一方、余盛を完全に削除した継手では、1級及び2級で疲れ強さの差異はほとんどないと考えられるが、ブローホールが比較的ビードの表面にある場合、これが疲れ強さの低下の一因になることから、ブローホールの多い3級の溶接部では1級及び2級の溶接部よりも疲れ強さが低下する確率が高いと考えられた。

JIS Z 3105-1977の改正では、1級及び2級は繰返し荷重が問題となる荷重条件及び使用条件の厳しい比較的重要な構造物を対象としており、3級については、繰返し荷重は問題とならない荷重条件及び使用条件が緩やかな構造物を対象と考えて分類されたものである。

#### ④ JIS Z 3105-1984の概要<sup>[13]</sup>

JIS Z 3105-1984の等級分類の概要を表7に示す。JIS Z 3105-1977では、大きさが2.0 mmを超える酸化物の巻込み、溶込み不良及び融合不良等の細長い欠陥は割れと同じ判定とし、何れがあっても4級とし、過酷な評価を受けていた。

そこで、アルミニウム溶接部の場合も鋼溶接部に準じて、第2種の欠陥として等級分類を行うことが適切と考えられ、JIS Z 3105-1984でのこの種の欠陥長さに応じてJIS Z 3104と同様に等級分類を行うこととされた。これにより、割れ及び銅の巻込みは、大きさによらず存在することで4級となる。

#### ⑤ JIS Z 3105-1993の概要<sup>[14]</sup>

JIS Z 3105-1993 のきずの分類の概要を表 8 に示す。JIS Z 3105-1984 からの主な改正箇所は次の通りである。

- a) 「欠陥」と「きず」が明確に使い分けられた。
- b) 溶込み不良及び融合不良のきず長さに乗ずる係数が削除された。

JIS Z 3105-1984 では、溶込み不良及び融合不良は、実測寸法に係数を乗じて「欠陥長さ」を求めていた。しかし、酸化物の巻込みは、融合不良を併発する場合がほとんどであり、きず先端の形状についても、現実には溶込み不良、融合不良及び酸化物の巻込みの先端形状を明瞭に区別できないことから、溶込み不良及び融合不良の実測寸法に係数を乗ずることは削除された。

又、溶込み不良、融合不良及び 2.0 mm を超える酸化物の巻込みが同種、異種を問わず直線状に並ん

で 2 個以上存在する場合は、きずときずとの間隔によって、独立と見なす場合と連続と見なす場合に分けられた。

この様に、きずの分類は、JIS Z 3104-1995 と同様に品質管理上の基準として定められている。

#### ⑥ JIS Z 3105-2003 の概要<sup>[15]</sup>

JIS Z 3105-2003 のきずの分類の概要を表 9 に示す。JIS Z 3105-1993 から大きな改正はない。

きずの分類は、JIS Z 3105-1993 と同様に品質管理上の基準として定められている。

### (4) JIS Z 3106 の概要

#### ① JIS Z 3106-1971 の概要<sup>[16]</sup>

JIS Z 3106-1971 の等級分類の概要を表 10 に示す。欠陥を含む構造物の強さの低下する様相は、その欠陥の種類により異なると考えられた。丸み

表 7 JIS Z 3105-1984 の等級分類の概要<sup>[13]</sup>

欠陥の種類	欠陥を次の 2 つの種別に分ける。 ① ブローホール、タングステン巻込み及び 2.0 mm 以下の酸化物の巻込み ② 割れ、溶込み不良、融合不良、銅の巻込み及び 2.0 mm を超える酸化物の巻込み
欠陥点数及び欠陥長さ	(1) ブローホール、タングステン巻込み及び 2.0 mm 以下の酸化物の巻込みの欠陥の点数 試験視野は母材厚さに応じて、10 × 10 mm、10 × 20 mm 又は 10 × 30 mm を用いる。 欠陥の長径により点数をつける。ただし、微小な欠陥は算定の対象とはしない。算定の対象とはしない微小な欠陥が密集して多数存在する場合には、その範囲を一つの大きな欠陥と見なして欠陥点数に加える。ただし、それらの存在位置が余盛の部分に限られることがあきらかであれば、欠陥点数に加えない。 タングステン巻込みの欠陥点数は、ブローホールの欠陥点数の 1/2 とする。 (2) 溶込み不良、融合不良及び 2.0 mm を超える酸化物の巻込みの長さ 溶込み不良及び融合不良は、その欠陥の最も長い寸法の 2 倍を欠陥長さとする。 酸化物の巻込みは、その欠陥の最も長い寸法を欠陥長さとする。 これらの欠陥が一列に並んで 2 個以上存在し、近接する欠陥と欠陥との間隔が大きい方の欠陥寸法を超える場合は、それぞれ独立した欠陥とするが、大きい方の欠陥寸法以下の場合、同一欠陥と見なし、間隔を含めて欠陥から欠陥までの寸法を欠陥寸法とする。
等級分類	(1) 欠陥点数による等級分類 欠陥点数の総和により、1 級から 4 級に分類する。 欠陥の大きさが母材の厚さの 1/3 を超えるときは 1 級にはしない。また、母材の厚さの 2/3 又は 10.0 mm のいずれか小さい値を超える欠陥があるときは 4 級とする。 (2) 欠陥長さによる等級分類 溶込み不良、融合不良及び 2.0 mm を超える酸化物の巻込みは、その欠陥長さにより 1 級から 4 級に分類する。 溶込み不良、融合不良及び 2.0 mm を超える酸化物の巻込みが、ブローホール、タングステン巻込み及び 2.0 mm 以下の酸化物の巻込みと混在する場合には、それぞれ等級分類し、その下位の方を等級とする。共に同じ等級であれば一つ下の等級とする。ただし、1 級については、許容される欠陥点数の 1/2 及び許容される欠陥長さの 1/2 をそれぞれ超えた場合だけ 2 級とする。 (3) 割れ及び銅の巻込み 4 級とする。 (4) 3 級の欠陥点数の連続 3 級の欠陥点数が連続して試験視野の 3 倍を超えて存在する場合は、4 級とする。

表 8 JIS Z 3105-1993 のきずの分類の概要<sup>[14]</sup>

きずの種類	<p>きずを次の 3 つの種別に分ける。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① ブローホール、タングステン巻込み及び 2.0 mm 以下の酸化物の巻込み</li> <li>② 溶込み不良、融合不良及び 2.0 mm を超える酸化物の巻込み</li> <li>③ 割れ及び銅の巻込み</li> </ul>
きず点数及びきず長さ	<p>(1) ブローホール、タングステン巻込み及び 2.0 mm 以下の酸化物の巻込みのきずの点数 試験視野は母材厚さに応じて、10 × 10 mm、10 × 20 mm 又は 10 × 30 mm を用いる。 きずの長径により点数をつける。ただし、微小なきずは算定の対象とはしない。算定の対象とはしない微小なきずが密集して多数存在する場合には、その範囲を一つの大きなきずと見なしてきず点数に加える。ただし、それらの存在位置が余盛の部分に限られることがあきらかであれば、きず点数に加えない。 タングステン巻込みのきず点数は、ブローホールのきず点数の 1/2 とする。</p> <p>(2) 溶込み不良、融合不良及び 2.0 mm を超える酸化物の巻込みの長さ 溶込み不良、融合不良及び 2.0 mm を超える酸化物の巻込みは、そのきずの最も長い寸法をきず長さとする。 これらのきずが一行に並んで 2 個以上存在し、近接するきずときずとの間隔が大きい方のきず寸法を超える場合は、それぞれ独立したきずとするが、大きい方のきず寸法以下の場合は、同一きずと見なし、間隔を含めてきずからきずまでの寸法をきず寸法とする。</p>
きずの分類	<p>(1) きず点数による分類 きず点数の総和により、1 類から 4 類に分類する。 きずの大きさが母材の厚さの 1/3 を超えるときは 1 類にはしない。また、母材の厚さの 2/3 又は 10.0 mm のいずれか小さい方を超えるきずがあるときは 4 類とする。</p> <p>(2) きず長さによる分類 溶込み不良、融合不良及び 2.0 mm を超える酸化物の巻込みは、そのきず長さにより 1 類から 4 類に分類する。 溶込み不良、融合不良及び 2.0 mm を超える酸化物の巻込みが、ブローホール、タングステン巻込み及び 2.0 mm 以下の酸化物の巻込みと混在する場合には、それぞれ分類し、その下位の方の分類とする。共に同じ類であれば一つ下の類とする。ただし、1 類については、許容されるきず点数の 1/2 及び許容されるきず長さの 1/2 をそれぞれ超えた場合だけ 2 類とする。</p> <p>(3) 割れ及び銅の巻込み 4 類とする。</p> <p>(4) 3 類のきず点数の連続 3 類のきず点数が連続して試験視野の 3 倍を超えて存在する場合は、4 類とする。</p>

表 9 JIS Z 3105-2003 のきずの分類の概要<sup>[15]</sup>

きずの種類	<p>きずを次の 3 つの種別に分ける。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>① ブローホール、タングステン巻込み及び 2.0 mm 以下の酸化物の巻込み</li> <li>② 溶込み不良、融合不良及び 2.0 mm を超える酸化物の巻込み</li> <li>③ 割れ及び銅の巻込み</li> </ul>
きず点数及びきず長さ	<p>(1) ブローホール、タングステン巻込み及び 2.0 mm 以下の酸化物の巻込みのきずの点数 試験視野は母材厚さに応じて、10 × 10 mm、10 × 20 mm 又は 10 × 30 mm を用いる。 きずの長径により点数をつける。ただし、微小なきずは算定の対象とはしない。算定の対象とはしない微小なきずが密集して多数存在する場合には、その範囲を一つの大きなきずと見なしてきず点数に加える。ただし、それらの存在位置が余盛の部分に限られることがあきらかであれば、きず点数に加えない。 タングステン巻込みのきず点数は、ブローホールのきず点数の 1/2 とする。</p> <p>(2) 溶込み不良、融合不良及び 2.0 mm を超える酸化物の巻込みの長さ 溶込み不良、融合不良及び 2.0 mm を超える酸化物の巻込みは、そのきずの最も長い寸法をきず長さとする。 これらのきずが一行に並んで 2 個以上存在し、近接するきずときずとの間隔が大きい方のきず寸法を超える場合は、それぞれ独立したきずとするが、大きい方のきず寸法以下の場合は、連続したきずと見なし、間隔を含めてきずからきずまでの寸法をきず寸法とする。</p>

きずの分類	<p>(1) きず点数による分類          きず点数の総和により、1類から4類に分類する。          きずの大きさが母材の厚さの1/3を超えるときは1類にはしない。また、母材の厚さの2/3又は10.0 mmのいずれか小さい方を超えるきずがあるときは4類とする。</p> <p>(2) きず長さによる分類          溶込み不良、融合不良及び2.0 mmを超える酸化物の巻込みは、そのきず長さにより1類から4類に分類する。          溶込み不良、融合不良及び2.0 mmを超える酸化物の巻込みが、ブローホール、タングステン巻込み及び2.0 mm以下の酸化物の巻込みと混在する場合には、それぞれ分類し、その下位の方の分類とする。共に同じ類であれば一つ下の類とする。ただし、1類については、許容されるきず点数の1/2及び許容されるきず長さの1/2をそれぞれ超えた場合だけ2類とする。</p> <p>(3) 割れ及び銅の巻込み          4類とする。</p> <p>(4) 3類のきず点数の連続          3類のきず点数が連続して試験視野の3倍を超えて存在する場合は、4類とする。</p>
-------	---

表 10 JIS Z 3106-1971 の等級分類の概要<sup>[16]</sup>

欠陥の種類	<p>欠陥を次の4つの種別に分ける。</p> <p>第1種：丸みを帯びた欠陥          第2種：細長い欠陥          第3種：割れ          第4種：タングステン巻込み</p>
欠陥点数及び欠陥長さ	<p>(1) 第1種及び第4種の欠陥          試験視野は母材厚さに応じて、10 × 10 mm、10 × 20 mm又は10 × 30 mmを用いる。          欠陥の長径により点数をつける。ただし、微小な欠陥は算定の対象とはしない。          第4種の欠陥の点数は、第1種の欠陥の点数の1/2とする。</p> <p>(2) 第2種の欠陥          溶込み不良及び融合不良の場合は、係数として2を乗じて欠陥長さとする。          欠陥が独立している場合、独立した欠陥長さを用いる。欠陥が独立しているとは、欠陥長さが最大になる欠陥とその近傍の第2種の欠陥との間隔が、スラグ巻込みでは大きい方の欠陥寸法、溶込み不良と融合不良では大きい方の欠陥の寸法の2倍を超える場合とする。          欠陥が群をなしている場合、それぞれの欠陥について欠陥長さを求め、それぞれの総和の最大となるものを欠陥長さとする。欠陥が群をなしているとは、欠陥長さが最大になる欠陥とその近傍の第2種の欠陥との間隔が、スラグ巻込みでは大きい方の欠陥寸法、溶込み不良と融合不良では大きい方の欠陥の寸法の2倍以下の場合とする。</p>
等級分類	<p>(1) 第1種及び第4種の欠陥          欠陥点数の総和により、1級から4級に分類する。ただし、欠陥の長径が母材の厚さの1/2を超えるときは4級にする。なお、1級については、算定の対象とはしない微小な欠陥でも、10個以上あってはならない。          条件により、試験視野を3倍に拡大し、試験視野内の欠陥点数の総和の1/3を欠陥点数とすることができる。</p> <p>(2) 第2種の欠陥          欠陥の長さにより、1級から4級に分類する。ただし、1級については、溶込み不良及び融合不良は許容されない。</p> <p>(3) 第3種の欠陥          4級とする。</p> <p>(4) 第1種及び第4種と第2種の欠陥が混在する場合          欠陥の種別毎に、それぞれ等級分類し、その内の下位の等級分類にする。共に同じ等級であれば、一つ下位の等級分類にする。ただし、1級については第1種及び第4種の欠陥の許容点数の1/2及び第2種の欠陥の許容長さの1/2をそれぞれ超えた場合にのみ2級とする。</p>



のある欠陥は、断面積の減少が起因して強さを低下させ、細長い欠陥は応力集中が起因して強さを低下させると考えられ、欠陥の種別を4種類に分け、おのおの別の規定に従って等級分類することとされた。

第1種の欠陥は、ブローホール、スラグ巻込み等の丸みを帯びた欠陥で、主として欠陥による断面積の減少が構造物の強さを低下させると考えられるものである。

第2種の欠陥は、細長いスラグ巻込み及びこれに類する欠陥で、主として欠陥部の応力集中が構造物の強さを低下させると考えられるものである。このほか、パイプ、融合不良、溶込み不良等も第2種の欠陥に含まれるものである。

第3種の欠陥は、各種の割れ及びこれに類する欠陥で応力集中が非常に大きく、構造物の強さを著しく低下させると考えられるものである。ここで溶込み不良のうち、割れに近いものは第3種の欠陥に含まれるものとされている。

第4種の欠陥は、タングステン巻込みである。タングステン巻込みは、構造物の強さを低下させ

るといことは考えられないが、表層部に含まれた際、使用環境によって耐食性等の点に問題があると考えられるものである。

又、第2種の欠陥の等級分類は、欠陥部の応力集中を考えた分類であるので、欠陥が2個以上存在するとき、欠陥と欠陥が近接しているならば相互の影響を考える必要があった。ここでは欠陥相互の距離により、独立した欠陥と見なすか、連続した欠陥群と見なすかが規定されている。

② JIS Z 3106-2001 の概要<sup>[17]</sup>

JIS Z 3106-2001 のきずの分類の概要を表11に示す。JIS Z 3106-1971からの主な改正箇所は次の通りで、溶接きずの有害度は、構造物の使用条件や使用環境によって異なるために、設計上要求される品質レベルを画一化された等級分類で規定することは困難であると考えられた。従って、きずの分類は、破壊に対する欠陥の許容度の基準としてではなく、むしろ溶接施工の品質管理として用いられるべきであるとの認識が広まっていた。さらに、対応国際規格のISO 1106/1/2/3及びISO 5579に等級分類を規定していないことや、

表11 JIS Z 3106-2001のきずの分類の概要<sup>[17]</sup>

きずの種別	きずを次の4つの種別に分ける。 第1種：丸みを帯びた欠陥 第2種：細長い欠陥 第3種：割れ 第4種：タングステン巻込み
きず点数及びきず長さ	(1) 第1種及び第4種のきず 試験視野は母材厚さに応じて、10×10mm、10×20mm又は10×30mmを用いる。きずの長径により点数をつける。ただし、微小な欠陥は算定の対象とはしない。第4種の欠陥の点数は、第1種の欠陥の点数の1/2とする。 (2) 第2種のきず きずの長さによる。 ただし、きずが一線上に存在し、きずときずの間隔が、いずれかのきずの長さ以下の場合、きずときずとの間隔を含めて測定した寸法をそのきず群のきず長さとする。
きずの分類	(1) 第1種及び第4種のきず きず点数の総和により、1類から4類に分類する。ただし、きずの長径が母材の厚さの1/2を超えるときは4類とする。なお、1類については、算定の対象とはしない微小な欠陥でも、試験視野に10個以上あってはならない。 (2) 第2種のきず きずの長さにより、1類から4類に分類する。ただし、1類については、溶込み不良及び融合不良は許容されない。 (3) 第3種のきず 4類とする。 (4) 第1種及び第4種と第2種のきずが混在する場合 きずの種別毎に、それぞれ分類し、その内の下位の分類にする。共に同じ分類であれば、一つ下位の分類にする。ただし、1類については第1種及び第4種のきずの許容点数の1/2及び第2種のきずの許容長さの1/2をそれぞれ超えた場合にのみ2類とする。

他の国内関連 JIS 規格との整合が必要であることも考慮され、等級分類結果を溶接継手における有害度として直接関係付けしていたこれまでの考え方を、単にきずの内在程度に応じて分類する考え方に修正された。

- a) 「欠陥」と「きず」が明確に使い分けられた。
- b) 第 1 種のきず点数を求める場合。試験視野を 3 倍に拡大し、試験視野内のきず点数の総和の 1/3 をきず点数とすることができる規定が削除された。
- c) 第 2 種のきず長さに乗ずる係数が削除された。
- d) きず群の長さを求める方法を変更し、きずが一線上に存在してきずときずの間隔が大きな方のきず長さ以下の場合にその間隔を含めてきず長さを求めることにされた。
- e) 第 1 種のきずと第 4 種のきずは、共存きずとして新規に定義された。又、試験視野内に第 1 種のきずと第 2 種のきずが混在するきずとしてその定義が明確化された。
- f) 総合分類の概念を新たに定義し、決定手順が明記された。

JIS Z 3106-1971 での等級分類は、きずの形状で種別を分類しその程度で等級を決定していたため、定性的にはきずの有害度との関連もあり、分類作業も容易であることから、品質管理においては実用上極めて便利であった。さらに、これまで、等級分類が各種溶接構造物の品質管理基準として広く利用されてきた実績もあり、JIS Z 3106-2001 の改正で十分な根拠なく分類基準を大きく変更することは、産

業界に混乱を招くと考えられたため、一部の不合理な点の変更にとどめ、JIS Z 3106-1971 の分類基準は概ね踏襲されている。

## (5) JIS Z 3107 の概要

### ① JIS Z 3107-1973 の概要<sup>[18]</sup>

JIS Z 3107-1973 の等級分類の概要を表 12 に示す。チタンの溶接では、酸素、窒素等のガス汚染による影響が比較的大きいが、作業基準も確立していなかったため RT で取り上げることは困難であり、規格では除外された。

このため、チタン溶接部について透過写真上で観察される欠陥は、主としてブローホール、タングステン巻込み、溶込み不良、融合不良及び割れ等が考えられた。

割れ、溶込み不良及び融合不良は応力集中が非常に大きく、構造物の強さを著しく低下させると考えられるため、最下級の 4 級とされた。

ブローホール及びタングステン巻込み等の欠陥については、大きさ、数及び分布状態により欠陥点数を求めて等級を決定することとされた。

試験視野を広くすると欠陥点数の算定が煩雑となり、又、間違っで算定する危険もあるため、欠陥点数の算定が比較的容易であり、又正確に行われるという点から試験視野を狭くし、10 × 15 mm とされた。

我が国において、耐食材料としてチタンの薄物が多く使用されていたため、微小な欠陥まで等級分類に考慮することが望ましかった。しかし、欠

表 12 JIS Z 3107-1973 の等級分類の概要<sup>[18]</sup>

欠陥の種別	欠陥を次の 2 つの種別に分ける。 ① ブローホール及びタングステン巻込み ② 割れ、溶込み不良及び融合不良
欠陥点数	(1) ブローホール及びタングステン巻込みの欠陥の点数 試験視野は、10 × 15 mm を用いる。 欠陥の長径により点数をつける。ただし、微小な欠陥は算定の対象とはしない。
等級分類	(1) 欠陥点数による等級分類 欠陥点数の総和により、1 級から 4 級に分類する。 欠陥の大きさが母材の厚さの 30% 又は 4.0 mm のいずれか小さい値を超えるときは 4 級とする。 点数の算定の対象とはしない欠陥であっても、1 級については 10 個以上、2 級については 20 個以上、3 級については 30 個以上ある場合には、一つ下位の等級とする。 (2) 割れ、溶込み不良及び融合不良 4 級とする。

陥寸法の測定の際、欠陥の大きさが微小になるにしたがって個人差が多く、等級分類結果が異なる場合もあり不合理であった。又、透過写真に現れた欠陥全てを算定することになると、撮影技術が優秀であるほど等級が下位になることがあり不合理であった。微小な欠陥が存在してもその欠陥による強さの低下は無視できると考えられ、微小な欠陥は算定の対象とはされていない。

タングステン巻込みについては、ASME PVB Code Section IIIの取り扱いが参考にされてブローホールと同じ扱いとされた。又、ASME BPV Code Section IIIでは、許容できる最大の長さを規定している。従って、これを参考にして「欠陥の大きさが母材の厚さの30%又は4.0 mmのいずれか小さい値を超えるときは4級とする」という規定が加えられた。

この様に、等級分類は、品質管理上の基準として定められている。

② JIS Z 3107-1993 の概要<sup>[19]</sup>

JIS Z 3107-1993 のきずの分類の概要を表 13 に示す。JIS Z 3107-1973 から大きな改正はない。きずの分類は、JIS Z 3107-1973 と同様に品質管理上の基準として定められている。

③ JIS Z 3107-2008 の概要<sup>[20]</sup>

JIS Z 3107-2008 のきずの分類の概要を表 14 に示す。JIS Z 3107-1993 から改正はない。きずの分類は、JIS Z 3107-1993 と同様に品質管理上の基準として定められている。

### 3 きずの分類の検討と提案

「2 JIS規格におけるきずの分類の変遷調査」で述べたように、制定当時の JIS Z 3014, JIS Z 3105

表 13 JIS Z 3107-1993 のきずの分類の概要<sup>[19]</sup>

きずの種別	きずを次の2つの種別に分ける。 ① ブローホール及びタングステン巻込み ② 割れ、溶込み不良及び融合不良
きず点数	(1) ブローホール及びタングステン巻込みの欠陥の点数 試験視野は、10 × 15 mmを用いる。 欠陥の長径により点数をつける。ただし、微小な欠陥は算定の対象とはしない。
きずの分類	(1) きず点数による分類 きず点数の総和により、1類から4類に分類する。 きずの大きさが母材の厚さの30%又は4.0 mmのいずれか小さい値を超えるときは4類とする。 点数の算定の対象とはしないきずであっても、1類については10個以上、2類については20個以上、3類については30個以上ある場合には、一つ下位の分類とする。 (2) 割れ、溶込み不良及び融合不良 4類とする。

表 14 JIS Z 3107-2008 のきずの分類の概要<sup>[20]</sup>

きずの種別	きずを次の2つの種別に分ける。 ① ブローホール及びタングステン巻込み ② 割れ、溶込み不良及び融合不良
きず点数	(1) ブローホール及びタングステン巻込みの欠陥の点数 試験視野は、10 × 15 mmを用いる。 欠陥の長径により点数をつける。ただし、微小な欠陥は算定の対象とはしない。
きずの分類	(1) きず点数による分類 きず点数の総和により、1類から4類に分類する。 きずの大きさが母材の厚さの30%又は4.0 mmのいずれか小さい値を超えるときは4類とする。 点数の算定の対象とはしないきずであっても、1類については10個以上、2類については20個以上、3類については30個以上ある場合には、一つ下位の分類とする。 (2) 割れ、溶込み不良及び融合不良 4類とする。

及び JIS Z 3106 にあっては、きずと強度の関連を基礎としてきずの分類が行われてきた。しかし、1990（平成元）年頃から、基本的考え方は、単にきずの内在程度に応じて分類する考え方に修正され、品質管理上の基準として定められている。

JIS Z 3107 については、制定同時から品質管理上の基準として定められている。

このため、JIS Z 3014, JIS Z 3105, JIS Z 3106 及び JIS Z 3107 のきずの分類は、JIS Z 3110-2017 を用いた溶接部の RT でのきずの分類に使用することができる。

JIS Z 3014, JIS Z 3105, JIS Z 3106 及び JIS Z 3107 は材質毎にきずの分類を定めているため、JIS Z 3110-2017 を用いた溶接部の RT でのきずの分類でも、鋼の溶接部は JIS Z 3014, アルミニウムの溶接部は JIS Z 3105, ステンレス等の溶接部は JIS Z 3106, チタンの溶接部は JIS Z 3107 によるきずの分類によることが適切と考える。

#### 4 製造規格等での RT の判定基準の調査

JIS 規格のきずの分類を引用して RT の判定基準を与えている製造規格等について調査した。その結果の概要を表 15 に示す。なお、原子力関係の製造規格等では、ASME 規格の判定基準を基にしつつ、その一部を JIS 規格のきずの分類に置き換えて判定基準にするという 1970（昭和 45）年からの古い判定基準の思想を踏襲しており、参考とならないため表 15 ではまとめていない。

製造規格等では、表 15 に示すように、対象の種類毎に各 JIS 規格を引用し、1 類又は 2 類の場合に合格としているのが一般的である。JIS B 8266 では、1 類のみに限定されているが、他の製造規格等では設計マージンは 3.5 又は 4 を用いるのに対し、JIS B 8266 では 3 を用いているため、より品質のよい溶接を求めているものである。又、導管の周継手については、1 類、2 類又は 3 類を判定基準としている。

表 15 製造規格等での RT の判定基準の概要<sup>[21~29]</sup>

製造規格等		対象の種類	判定基準
高圧ガス保安法 (特定設備検査規則の機能性基準の運用について <sup>[21]</sup> )		鋼材	JIS Z 3104-1995 の 1 類又は 2 類
		アルミニウム及びアルミニウム合金	JIS Z 3105-1984 の 2 級以上（1 類又は 2 類に同じ）
		ステンレス鋼, 耐食耐熱超合金, 9%ニッケル鋼等	JIS Z 3106-1971 の 2 級以上（1 類又は 2 類に同じ）
		チタン及びチタン合金	JIS Z 3107-1993 の 1 類又は 2 類
ガス事業法 (ガス工作物技術基準の解釈例 <sup>[22]</sup> )		鋼材（ステンレス鋼等は除く。）	JIS Z 3104-1995 の 1 類又は 2 類。ただし、導管の周継手は、1 類、2 類又は 3 類
		アルミニウム及びアルミニウム合金	JIS Z 3105-2003 の 1 類又は 2 類。ただし、導管の周継手は、1 類、2 類又は 3 類
		ステンレス鋼, 耐熱鋼, 耐食耐熱超合金, 9%ニッケル鋼等	JIS Z 3106-2001 の 1 類又は 2 類。ただし、導管の周継手は、1 類、2 類又は 3 類
		チタン及びチタン合金	JIS Z 3107-1993 の 1 類又は 2 類。ただし、導管の周継手は、1 類、2 類又は 3 類
ボイラー及び圧力容器安全規則	(ボイラー構造規格 <sup>[23]</sup> )	鋼材（ステンレス鋼材を除く。）	JIS Z 3104 の 1 類若しくは 2 類
		ステンレス鋼材	JIS Z 3106 の 1 類若しくは 2 類
	(圧力容器構造規格 <sup>[24]</sup> )	鋼材（ステンレス鋼材を除く。）	JIS Z 3104 の 1 類若しくは 2 類
		アルミニウム及びアルミニウム合金	JIS Z 3105 の 1 類若しくは 2 類であって、かつ、割れ若しくは鋼の巻込みがないこと
		ステンレス鋼材	JIS Z 3106 の 1 類若しくは 2 類
		チタン及びチタン合金	JIS Z 3107 の 1 類若しくは 2 類であって、かつ、割れ、溶込み不良若しくは融合不良がないこと

電気事業法 (発電用火力設備の技術基準の解釈 <sup>[25]</sup> )	鋼の溶接部	JIS Z 3104 の 1 類又は 2 類。ただし、導管の周継手は、1 類、2 類又は 3 類。 溶込み不良又は融合不良があってはならない。
	アルミニウム及びアルミニウム合金の溶接部	JIS Z 3105 の 1 類又は 2 類。 溶込み不良又は融合不良があってはならない。
	ステンレス鋼，耐熱鋼，耐食耐熱超合金並びにニッケル及びニッケル合金の溶接部	JIS Z 3106 の 1 類又は 2 類。ただし、導管の周継手は、1 類、2 類又は 3 類。 溶込み不良又は融合不良があってはならない。
	チタンの溶接部	JIS Z 3107 の 1 類又は 2 類
JIS B 8201 「陸用鋼製ボイラー構造 <sup>[26]</sup> 」	鋼材の溶接部	JIS Z 3104 の 1 類又は 2 類
	ステンレス鋼材の溶接部	JIS Z 3106 の 1 類又は 2 類
JIS B 8265 「圧力容器の構造—一般事項 <sup>[27]</sup> 」	鋼	JIS Z 3104 の 1 類又は 2 類
	アルミニウム及びアルミニウム合金	JIS Z 3105 の 1 類又は 2 類
	ステンレス鋼，耐食耐熱超合金，9%ニッケル鋼及びその他これらに類するもの	JIS Z 3106 の 1 類又は 2 類
	チタン及びチタン合金	JIS Z 3107 の 1 類又は 2 類
JIS B 8266 「圧力容器の構造—特定規格 <sup>[28]</sup> 」	鋼	JIS Z 3104 の 1 類。ただし、溶込み不良，融合不良，割れ及びこれに類するきずは不合格。
	アルミニウム及びアルミニウム合金	JIS Z 3105 の 1 類。ただし、溶込み不良，融合不良，割れ及びこれに類するきずは不合格。
	ステンレス鋼，耐食耐熱超合金，9%ニッケル鋼及びその他これらに類するもの	JIS Z 3106 の 1 類。ただし、溶込み不良，融合不良，割れ及びこれに類するきずは不合格。
	チタン及びチタン合金	JIS Z 3107 の 1 類。ただし、溶込み不良，融合不良，割れ及びこれに類するきずは不合格。
JIS B 8267 「圧力容器の設計 <sup>[29]</sup> 」	鋼	JIS Z 3104 の 1 類又は 2 類
	アルミニウム及びアルミニウム合金	JIS Z 3106 の 1 類又は 2 類
	ステンレス鋼，耐食耐熱超合金，9%ニッケル鋼及びその他これらに類するもの	JIS Z 3106 の 1 類又は 2 類
	チタン及びチタン合金	JIS Z 3107 の 1 類又は 2 類

加えて、JIS Z 3014、JIS Z 3105 及び JIS Z 3106 では、溶込み不良又は融合不良を許容しないと条件をつけているものもある。JIS Z 3014、JIS Z 3105 及び JIS Z 3106 では、これらのきずで短いものは、2 類となることがあるが、割れ同様に面状きずとなり品質管理上好ましくないとの考えで条件が付されている。又、JIS Z 3017 では、これらの条件が付けられていないのは、これらが存在する場合は、割れ同様に 4 類となるからである。

## 5 判定基準の検討と提案

「4 製造規格等での RT の判定基準の調査」を参考とすると、JIS Z 3110-2017 を用いた溶接部の RT での判定基準は、1 類又は 2 類を基本とし、導管の周継手については 1 類、2 類又は 3 類を、JIS Z 3014、JIS Z 3105 及び JIS Z 3106 では、溶込み不良又は融合不良を許容しないと条件を付けることが必要と考える。具体的な提案を表 16 に示す。導管でのアルミニウム及びチタンの溶接部は想定されないため、導管の周継手の判定基準は提案していない。

表 16 判定基準の提案

対象の種類	判定基準
鋼の溶接部	JIS Z 3104-1995 の 1 類又は 2 類。ただし、導管の周継手は、1 類、2 類又は 3 類。 溶込み不良又は融合不良があってはならない。
アルミニウム及びアルミニウム合金の溶接部	JIS Z 3105-2003 の 1 類又は 2 類。 溶込み不良又は融合不良があってはならない。
ステンレス鋼、耐熱鋼、耐食耐熱超合金並びにニッケル及びニッケル合金の溶接部	JIS Z 3106-2001 の 1 類又は 2 類。ただし、導管の周継手は、1 類、2 類又は 3 類。 溶込み不良又は融合不良があってはならない。
チタンの溶接部	JIS Z 3107-2008 の 1 類又は 2 類

チタンの溶接部で引用している JIS Z 3107 では、溶込み不良又は融合不良が存在した場合は、割れ同様に 4 類となることから条件を付ける必要はない。

JIS Z 3110-2017 による実機への RT 適用が広まれば幸いである。

## 6 おわりに

JIS Z 3110-2017 では、デジタル検出器を用いた試験方法のみを規定しており、きずの分類を規定していない。JIS Z 3110-2017 で撮影した場合のきずの分類と判定基準を検討するため、JIS 規格におけるきずの分類の変遷と製造規格等での RT の判定基準について調査し、調査結果に基づいて次の具体的な提案を行った。

- ① 鋼の溶接部では、JIS Z 3104-1995 の 1 類又は 2 類が適切と考える。ただし、導管の周継手は、1 類、2 類又は 3 類で足りると考える。加えて、溶込み不良又は融合不良があってはならないと条件を付ける必要があると考える。
- ② アルミニウム及びアルミニウム合金の溶接部では、JIS Z 3105-2003 の 1 類又は 2 類が適切と考える。加えて溶込み不良又は融合不良があってはならないと条件を付ける必要があると考える。
- ③ ステンレス鋼、耐熱鋼、耐食耐熱超合金並びにニッケル及びニッケル合金の溶接部では、JIS Z 3106-2001 の 1 類又は 2 類が適切と考える。ただし、導管の周継手は、1 類、2 類又は 3 類で足りると考える。加えて、溶込み不良又は融合不良があってはならないと条件を付ける必要があると考える。
- ④ チタンの溶接部では、JIS Z 3107-2008 の 1 類又は 2 類が適切と考える。

## 参考文献

- [1] C. Wilber, The Code : An Authorized History of The ASME Boiler and Pressure Vessel Code, The American Society of Mechanical Engineers
- [2] JIS B 8201-1954 「陸用鋼製ボイラの構造」, 財団法人日本規格協会
- [3] 発電用ボイラの技術基準 (暫定), 通商産業省公益事業局, 1953 (昭和 28) 年 12 月
- [4] 発電用火力設備の技術基準 省令・告示及び解釈〔解説〕(平成 17 年改訂版), 社団法人火力原子力発電技術協会, 2006 (平成 18) 年 8 月
- [5] JIS Z 2341-1955 「金属材料の放射線透過試験方法」, 財団法人日本規格協会
- [6] 仙田富男, 溶接部放射線透過写真の等級分類, 溶接学会誌, 第 37 巻 (1968), 第 9 号, 社団法人溶接学会
- [7] JIS Z 3104-1968 「鋼溶接部の放射線透過試験方法及び透過写真の等級分類方法」, 財団法人日本規格協会
- [8] JIS Z 3105-1968 「アルミニウム溶接部の放射線透過試験方法および透過写真の等級分類方法」, 財団法人日本規格協会
- [9] JIS Z 3110-2017 「溶接継手の放射線透過試験方法—デジタル検出器による X 線及び  $\gamma$  線撮影技術」, 一般財団法人日本規格協会
- [10] JIS Z 3104-1995 「鋼溶接継手の放射線透過試験方法」, 財団法人日本規格協会
- [11] JIS Z 3105-1973 「アルミニウム溶接部の放射線透過試験方法および透過写真の等級分類方法」, 財団法人日本規格協会
- [12] JIS Z 3105-1977 「アルミニウム溶接部の放射線透過試験方法及び透過写真の等級分類方法」,

財団法人日本規格協会

- [13] JIS Z 3105-1984「アルミニウム溶接部の放射線透過試験方法及び透過写真の等級分類方法」, 財団法人日本規格協会
- [14] JIS Z 3105-1993「アルミニウム平板突合せ溶接部の放射線透過試験方法」, 財団法人日本規格協会
- [15] JIS Z 3105-2003「アルミニウム溶接継手の放射線透過試験方法」, 財団法人日本規格協会
- [16] JIS Z 3106-1971「ステンレス鋼溶接部の放射線透過試験方法及び透過写真の等級分類方法」, 財団法人日本規格協会
- [17] JIS Z 3106-2001「ステンレス鋼溶接継手の放射線透過試験方法」, 財団法人日本規格協会
- [18] JIS Z 3107-1973「チタン溶接部の放射線透過試験方法及び透過写真の等級分類方法」, 財団法人日本規格協会
- [19] JIS Z 3107-1993「チタン溶接部の放射線透過試験方法」, 財団法人日本規格協会
- [20] JIS Z 3107-2008「チタン溶接部の放射線透過

試験方法（追補1）」, 財団法人日本規格協会

- [21] 特定設備検査規則の機能性基準の運用について, 20160920 商局第4号, 平成28年10月3日
- [22] ガス工作物技術基準の解釈例, 平成26年3月19日, 産業保安グループ
- [23] ボイラー構造規格, 厚生労働省告示第197号, 平成15年4月30日
- [24] 圧力容器構造規格, 厚生労働省告示第196号, 平成15年4月30日
- [25] 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
- [26] JIS B 8201-2013「陸用鋼製ボイラー構造」, 一般財団法人日本規格協会
- [27] JIS B 8265-2017「圧力容器の構造－一般事項」, 一般財団法人日本規格協会
- [28] JIS B 8266-2003「圧力容器の構造－特定規格」, 財団法人日本規格協会
- [29] JIS B 8267-2015「圧力容器の設計」, 一般財団法人日本規格協会



佐藤長光

# ASME Section I における 設計計算式の改正動向

The movement of the design formulas provided in ASME Section I

規格基準室 大石 勇一

**Design rules and cylindrical shell equations provided in ASME Code Section I have been revised to be simpler and more accurate considering a firm theoretical basis and the various experimental data. This paper introduces those revisions for recent 2 decades and the movement of the design formulas.**

**Keywords** *Design rules, Cylindrical Shell Equations, ASME Code Section I*

## 1 はじめに

ASME (American Society of Mechanical Engineers) が発行している規格 (Code) の Section I (Rules for Construction of Power Boilers) は、ボイラーに関する製造規格である。この規格は、管 (チューブ及びパイプ)、ドラム、管寄せ等の厚さを求めるために、基本となる式を PG-27 に、そして、その代替となる式を Appendix に与えている。

ASME 規格委員会では、実験データ及び確固とした理論に基づき、より合理的で使い易い設計規定となるように、これらの式の見直し検討が行われてきた。我が国のボイラー規格である JIS B 8201 は、最新の ASME Section I を参考にして設計ルールの見直しを行っており、その結果は「発電用火力設備の技術基準の解釈」にも反映され得る。そこで、この約 20 年の間に、ASME Section I の規格委員会 (以下、BPV I という) で行われた設計ルール及び計算式の改正状況並びに今後の動向について紹介する。

## 2 2006 Addendaにおける改正

### 2.1 新しい計算式の採り入れ検討

2000 年に入り、ボイラーの構造設計に関しては、次のような検討やプロジェクトが活発に行われるようになった。

- ・ボイラー及び圧力容器に関する EN 規格が発行され、EU 域内では PED (圧力設備指令) に整合する規格として 2002 年より適用されているが、設計のアプローチが大きく異なるため、規定内容の調査検討が開始された。
- ・ASME 規格の設計マージンが 4 から 3.5 に変更されたが、これに伴い、水圧試験における追加計算の必要性について検討が行われた。
- ・超臨界圧ボイラー部材への高合金鋼の適用に関するプロジェクトが立ち上げられた。
- ・ASME Section VIII Division 2 rewrite project (EN 規格に対抗して、圧力容器の解析による設計ルールを高度化し、刷新するためのプロジェクト) が開始された。



これらの活動に伴い、BPV Iでは設計に用いられている式の再評価が行われ、基本となる円筒胴の厚さ計算式及び設計ルールの見直し検討が開始された。検討において、比較評価された主な計算式を表1に掲げる。

検討は、2003年頃から開始され、その結果、表1の式(5)をNonmandatory Appendix A-317として採用する改正案が2004年末に可決された。改正案は、Section I 2006 Addendaに反映されが、新たな式の採用に際して、次の点が考慮されている。

- ① 採用する式は、現在の式と比較して本来のデータ（現行の式を策定するために使用された実験データ）に、より整合するものであること。
- ② 任意の定数を含まないこと。
- ③ 現在の技術に調和するものであること。
- ④ 時間依存領域（クリープ領域）と非時間依存領域（非クリープ領域）の両方で同じ設計マージンを有すること。

- ⑤ 全ての製品、形状・寸法に対して1つの式を与え、PG-27の設計規定を簡潔にすることができること。

当初は、Section Iの規定本文に掲げる式を1つに絞ると共に、その他の実績のある式についても、設計のバリエーションを広げる目的でAppendixとして与え、それらを代替として自由に使用できるようにする方向で検討が行われていた。

しかしながら、B31.1の式のようにSection Iの式との計算結果の差（ $C$ の相違による）が小さく、配管規格寸法及び付け代で吸収可能な場合は問題ないが、厚さの差が大きい式（計算例では、最大と最小でPG-27.2.2に掲げる基本式の約4割の差が生じる）をどのように扱うのが問題となり、最終的に表1の式(5)だけをAppendix A-317として追加することになった。

表1 比較検討された計算式の一覧

No.	規格	計算式	備考
(1)	ASME Section I, PG-27.2.1	$t = \frac{P \cdot D}{2S + P} + 0.005D$	チューブ ( $D \leq 125$ mm) に適用
(2)	ASME Section I, PG-27.2.2 ASME B31.1, 104.1.1	$t = \frac{P \cdot D}{2S + 0.8P} + C$	非クリープ領域 ( $y = 0.4$ ) の管、ドラム、管寄せに適用
(3)	ASME Section I, PG-27.2.2 ASME B31.1, 104.1.1	$t = \frac{P \cdot D}{2S + 1.4P} + C$	クリープ領域 ( $y = 0.7$ ) の管、ドラム、管寄せに適用
(4)	Section I Appendix A-125	$t = \left( \frac{\sqrt{\frac{S+P}{S-P}} - 1}{\sqrt{\frac{S+P}{S-P}}} \right) \cdot \frac{D}{2}$	厚さ $t$ が内径 $R$ の 1/2 超える厚肉の場合に適用 (設計温度 $\leq 374.1^\circ\text{C}$ ) Lame の式
(5)	Section I Appendix A-317 Section VIII Div. 2 rewrite Section VIII Div. 2 AD-201*	$t = \frac{D \cdot \left( 1 - e^{-\frac{P}{S}} \right)}{2} + C$	Section I 2006 Edition で追加された式 JIS B 8201 附属書 B と同じ
(6)	Section VIII Div. 2 AD-201* EN 12952 Part 3	$t = \frac{P \cdot D}{2S + P} + C$	非クリープ領域及びクリープ領域に適用。 “mean diameter” equation

(注) 1. ※は、2006 Addenda 以前の古い Section VIII Division 2 であり、2007 Edition 以降は rewrite 版となる。

2. 表に掲げる式は、継手効率  $E = 1$  としている。
3. (2)、(3)及び(6)の式は、各々、次式の  $y$  に 0.4、0.7 及び 0.5 を代入すると得られる。

$$t = \frac{P \cdot D}{2 \cdot (S + yP)} + C$$

4. Section VIII Div. 2 AD-201 は、 $P > 0.4S$  を条件として(5)式の使用を認めている。

## 2.2 A-317 として追加された式について

A-317 として追加された式 (5) は、式の採り入れ提案者の名前に因んで、BPV I では「Fishburn の式」と呼ばれている。提案の技術的根拠とされた論文<sup>[1]</sup>によると、この式は、19 世紀の初期には既に開発され、使用されていたようであるが、現代の極限解析又は参照応力理論から得られたものではない。しかし、実験データ (表 1 の式 (1) ~ (3) の策定に用いられた高温バースト試験及び単軸クリープ試験データ等) と良い相関が得られるだけでなく、 $P/S$  (応力に対する圧力の比) が小さい場合は、極限荷重解析の良好な近似値を与えることが確認されており、極限解析の非常に単純化された計算式と見なすことができるとしている。このことは、Kalnins 及び Updike らによって、トレスカの降伏条件を仮定し、内圧が作用する厚肉円筒胴の極限解析により明らかにされている。このため、式 (5) に対して降伏応力に基づく許容応力を適用すると、トレスカの基準に基づく極限荷重解となり、クリープ破断寿命に基づく許容応力を適用すると、トレスカの基準に基づく参照応力解となり得る。

式 (5) を取り入れた場合の利点は、次のとおりである。

- ① 確固とした理論に基づく基準 (トレスカの基準) を有する。
- ② 実験データとの良好な相関を示す (データとの相関性は、現行の ASME 規格で使用されている式 (1) ~ (3) よりも優れている)。
- ③ 非クリープ領域及びクリープ領域の両方に対して、同じ最小設計マージン 1.5 を有する (非クリープ領域では最小降伏応力を 1.5 で除した値、クリープ領域では平均破断応力を 1.5 で除した値)。

なお、金属材料の降伏条件を平面応力状態で実測した結果は、一般にミーゼスの降伏条件に近いとされている。このため、降伏条件が円筒胴の外面に達するときのミーゼスの条件を用いて、弾完全塑性解から得られる式も開発されている。しかし、実験データに基づいて再評価したところ、内圧が作用する円筒胴に対しては、式 (5)、すなわちトレスカの基準の式の方が、ミーゼスの基準の式よりも実験データとの相関が良好で、適当であることが BPV I におい

て報告されている。

## 3 2015 Editionにおける改正

PG-27.2.3 は、配管、ドラム及び管寄せ等の円筒形機器の厚さ計算式を規定しているが、厚さが内半径の 1/2 を超える場合は、374.1℃ 以下の範囲で A-125 の式 (表 1 の式 (4): Lamé によって 1854 年に発表された式) を使用することを要求している。一方、前出 2 項で述べたとおり、2006 Addenda において、PG-27 に規定された式 (表 1 の式 (1) 及び (2)) の代替として A-317 の式 (表 1 の式 (5)) が使用できるように改正された。A-125 及び A-317 は、共に MAWP 又は円筒胴の最小厚さを決定する計算方法を与える規定であるが、方法を 2 つも規定する必要はない。このため、2015 Edition では、この代替の厚さ計算式を A-317 に一本化する改正が行われた。すなわち、代替式としての引用を A-125 から A-317 に置き換えると共に、A-125 を完全に削除している。

A-125 の式が A-317 の式に置き換えられた主な理由 (利点) は、次のとおりであり、前出 2 項で述べた検討結果が改めて確認されたといえる。

- ① 現行の ASME Section I に与えられている式を開発するために使用された初期データに基づいて再評価を行うと、式 (5) は現行の計算式 (式 (1) ~ (3)) よりも相関性に優れる。
- ② 係数  $y$  といった任意の定数を含んでいない。
- ③ 現行の技術と調和した結果が得られる。
- ④ クリープ領域と非クリープ領域の両方において、最小設計マージン 1.5 を有する。
- ⑤ 全ての製品形状及び寸法に対して単一の計算式を適用することができるため、PG-27 の規定が簡素化される。

特に上述の③は、単に現行の式と置き換えるだけで、現行の許容応力値を用いて計算することができるだけでなく、現在主流の確固たる理論に基づく設計になるため、改正案を推し進めた重要な理由となっている。

一方、A-125 の式は、厚肉側 (高圧側) で PG-27 や他の製造 Code の式による計算結果との差が大きくなる傾向にある。これは、円筒胴に作用する接線方向の応力 (フープストレス) だけを考慮しており、

法線方向の応力（せん断応力）を無視していることに起因している。また、他の式と比較して計算が複雑である。さらに、現行の規定では、PG-27.1の規定により、A-317の式を直接使用することができ、PG-27.2.3の規定による代替式としてA-125を使用することはほとんどない。このような状況を踏まえて、A-125を削除し、代替式については完全にA-317に置き換える改正案が可決された。

参考として、2013 Edition以前のSection Iには、厚さが内半径の1/2を超える場合に限りPG-27.2.2の式に替えてA-125の式を用いることが規定されていたが、BPV Iではこの点についても調査検討が行われている。PG-27.2.2に規定されている式は、1943年にBoardmanによって開発された式であり、計算機がなくても計算できるようにA-125の式を単純化したものである。A-125の式とPG-27.2.2の式による計算結果を比較すると、厚さが内半径の1/2以下、すなわち内半径 $R_i$ に対する外半径 $R_o$ の割合( $R_o/R_i$ )が1.5以下の範囲では、両者の計算結果はほぼ一致するが、この範囲を超えると徐々に差が大きくなる。これらの式がSection Iに規定された当時は、どちらの式の方が妥当か判断する方法がなかったため、厚さが内半径の1/2を超える場合について、確固とした理論に基づき保守的な結果を与えるA-125の式の方を適用するようにしたと推測される。しかし、 $R_o/R_i$ の全領域においてPG-27.2.2の式の方がA-317の式に近い計算結果が得られる（妥当と考えられる）ことから、敢えてA-125の式を用いる必要はないと判断されている。

#### 4 2019 Editionにおける改正

A-317に与えられている式は、前出2項で述べたとおり、トレスカの降伏条件による円筒胴の圧力制限に基づいている。しかし、Section I 2017 Editionの規定では、図1に示すフローのとおり、PG-27.1の規定により、厚さ又は温度の制限なしでA-317の式を使用することが可能であり、PG-27.2.2の式の代替としてA-317の式を選択する必要はない。また、A-317の式は、非クリープ領域だけでなくクリープ領域にも適用されるものとして開発された。したがって、A-317の式を使用する場合のPG-27.2.3の

温度制限は、もはや必要でないと考えられる。このため、PG-27.2.3 (374.1°C以下でA-317の代替式を適用する規定)を削除する提案が行われた。すなわち、厚肉( $t > R_i/2$ )になった場合は、温度に関係なくA-317の式を使用できるようにする考えである。改正案は可決され、2019 Editionに反映されることになった。

PG-27.2.3の厚肉円筒胴の式に対する温度制限について考察された内容をまとめると、次のとおりとなる。

- ① PG-27.2.3の規定は、 $t > R_i/2$ のとき（厚さが内径より大きくなる時）、A-317の式（JIS B 8201 附属書Bと同じ式）へ切り替えるが、A-317の式の適用を705.4°F (374.1°C)に制限している。すなわち、 $y = 0.4$ が適用される範囲である。A-317の式により予測される応力は、 $t > R_i/2$ のときPG-27.2.2より5%小さい。従来は、 $t > R_i/2$ のときA-125の式に切り替えていた。 $t = R_i/2$ のときPG-27.2.2の式とA-125の式（JIS B 8201 6.2.2(c)の式と同じ）による値は同じである。しかし、 $t > R_i/2$ になると、A-125の式はPG-27.2.2の式より大きな応力の値を与える。一方、A-317の式は、 $R_o/R_i$ の全ての範囲においてPG-27.2.2より小さい（温度に関係なく同じ傾向である）。したがって、温度制限は不要である。
- ② PG-27.2.2の式は、内径におけるフープストレスを予測するA-125の式の近似式であり、両者の計算結果はよく合っている。しかし、 $R_o/R_i$ が大きくなると次第に合わなくなる。係数 $y$ （JIS B 8201の係数 $k$ に相当する）は、クリープの影響を考慮して用いられる。
- ③ Laméの厚肉シェル理論は、せん断応力が0、加圧前の長手軸に垂直な平面が加圧後も維持されると仮定している。この理論は、A-125の式の基礎になっているが、2015 Editionで削除された。内径におけるフープストレスについて、PG-27.2.2、A-125及びA-317の計算結果を比較すると、次のとおりとなる。
  - (a) 非クリープ領域 ( $y = 0.4$ ) では、 $R_o/R_i$ が大きくなるに従って、A-125の式による $S/P$ （設計圧力に対して要求される許容応力の割合）

が他の式より大きくなる。ただし、PG-27.2.2の式は、A-317の式より大きい（保守的な） $S/P$ を与えるため、A-317をベースにすると、PG-27.2.2の式を厚肉でも使用することができると考えられる。

(b) 移行する領域 ( $y = 0.5$ ) も同様に、 $R_o/R_i$ が大きくなるに従って、A-125の式による $S/P$ が他より大きくなり、その差は、非クリープ領域 ( $y = 0.4$ )より著しくなる。A-317の式は、PG-27.2.2の式より $S/P$ が若干小さい（非保守的）。

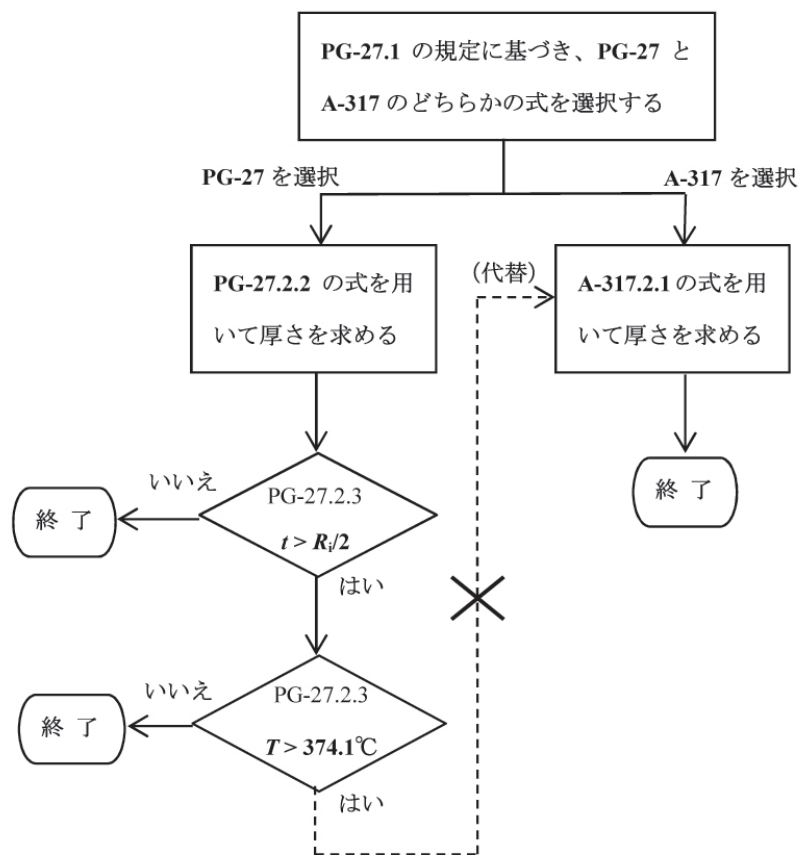
(c) クリープ領域 ( $y = 0.7$ ) では、 $R_o/R_i$ が大きくなるに従って、A-125の式による $S/P$ が他より大きくなる傾向は同じであるが、その差はさらに広がる。A-317の式は、A-125より

$S/P$ が小さいが、PG-27.2.2の式より若干大きい（保守的）。

④ A-317の式は、トレスカの基準に基づいて円筒胴における最大許容応力を求める式であり、確固とした理論に基づいている。（温度制限とは無関係である。）

## 5 その後の検討状況

前出4項で述べた改正提案が可決された後、PG-27及びA-317に規定されている計算式について、高温/高圧だけでなく、低温、薄肉及び厚肉等、すべての範囲における妥当性、保守性（又はより適正な設計マージン）の調査研究が継続して行われた。この調査研究では、厚肉のクリープ領域における解



(注) A-317.2.1の式は、A-317を選択すると無条件で使うことができるが、PG-27を選択するとPG-27.2.3の温度制限が適用される。このため、点線で示す矢印のフローは適用できない。

$t$ : 厚さ     $R_i$ : 内半径     $T$ : 設計温度

図1 Section I 2017 Editionにおける計算式の選定フロー

析作業や試験データの収集等が行われた。そして、その結果、高温における厚肉の円筒胴に対して新しい計算式を採用するか、又は現行の計算式を改正する必要があると判断された場合には、新たに改正提案を行う考えであった。しかし、A-317の計算方法を証明するための実験データは十分であり、正確であることが再確認されたため、改正は不要と判断されている。

ただし、現行のPG-27の式においては、たとえば、係数 $y$ を含む問題があり、実験データとの相関がA-317の式よりも劣ることから、将来的にはA-317とPG-27の式を入れ替えて、A-317の式を主体とする設計規定に改正される可能性がある。

## 6 おわりに

ASME Section Iの計算式に関する2000年以降の主な改正提案及び検討状況を紹介したが、注目すべき点は、計算式の策定に用いられた過去のデータを再び用いて、確固とした最新理論に基づいて検討が行われており、過去のルールや検討結果についても再評価されていることである。一方、我が国では、

改正前後の数値比較等により保守性について議論されることが多く、過去のルールの妥当性や合理性を再評価することはあまり行われていない。これは、過去のルールが法規則により絶対的な技術ベースになっていること以外に、我が国のボイラーや圧力容器の設計ルールが、ASME等の国際的に認知度の高い海外規格を参考としており、国内で採取されたデータに基づいて策定されたものではないことが主な原因と考えられる。

しかしながら、過去のルールはその当時の技術に基づいたものであり、最新技術に基づくとは必ずしも妥当性又は合理性が十分とは言えない場合がある。そして、過去のルールを再評価するためには、採取されたデータを規格基準に関する共有データとして蓄積し、将来のために残していくシステムが必要と考える。

## 参考文献

- [1] John D. Fishburn “PVP2005-71026: A Single Technically Consistent Design Formula for Thickness of Cylindrical Sections Under Internal Pressure”



大石勇一

# 火力発電設備の設計・製造・建設における 国内規格と海外規格の比較

The difference between domestic and foreign design and fabrication Codes in fossil power plant

規格基準室 小嶋 敏雄

There are many design and fabrication Codes of fossil power plant in the world. For example, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, EN Code, and Japanese Industrial Standard, et. al.

In case of a fossil power plant construction in Japan, it is also possible to apply these foreign Codes.

The problem is, whether these foreign codes have an equivalent levels to the Japanese Standards or not in the safety and technical requirements.

This paper introduces the difference of these Codes with comparison of all of the articles in Japanese Standards.

## Keywords

ASME Boiler and Pressure Vessel Code, EN Code, Japanese Code, Fossil Power Plant, Safety level, Technical basis

## 1 はじめに

国内において、火力発電用のボイラー設備等を建設する場合、一般的には、「発電用火力設備の技術基準の解釈（以下、火技解釈という。）」を適用して、機器等を製造するケースが多い。一方、火技解釈の前文には下記のような記載があり、必ずしも火技解釈に従って設計・製造する必要はない。（下線部）

本解釈は、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、以下「省令」という。）に定める技術的要件を満たすべき技術的内容を具体的に示したものである。

なお、省令に定める技術的要件を満たすべき技術的内容は、この解釈に限定されるものではなく、省令に照らして十分な保安水準の確保が達成できる技術的証拠があれば、省令に適合するものと判断するものである。

（発電用火力設備の技術基準の解釈  
平成25年5月17日版）

本書では、火技解釈で要求されている技術的要件に関して、世の中で広く用いられている海外規格と

火技解釈を比較した上で、考察を加えることを趣旨とする。

## 2 比較対象とする海外規格

ボイラー設備等を製造する上で、火技解釈と比較するために取り上げるべき代表的な海外規格としては、以下の規格がある。

米国規格

- ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section I, Rules for Construction of Power Boilers
- ASME Boiler & Pressure Vessel Code Section VIII, Rules for Construction of Pressure Vessels, Division I

欧州規格

- EN 12952, Water-tube boilers and auxiliary installations
- EN 13445, Unfired pressure vessels

ボイラー設備等の設計・製造に関しては、ボイラーに係る規格と圧力容器に係る規格を満足する必要が

あり、国内規格としては、火技解釈と JIS があるが、ここでは火技解釈と上記 4 種類の規格を対象として比較を実施する。

### 3 国内規格と海外規格との比較

ボイラー設備に係る火技解釈の第 2 条（ボイラー等の材料）から第 17 条（計測装置）、及び、第 105 条（用語の定義）から第 131 条（準用）について、技術的要件の観点から、上記の ASME 規格、及び EN 規格に、火技解釈の要求事項が規定されているか否かについて、表 3-1 にまとめている。なお、国内規格としては、技術基準を定める省令のみに規定されている技術的要件もあるため、表 3-1 では、火技解釈の上位規定である、火技省令についても合わせて記載している。

表 3-1 によれば、火技解釈における、第 109 条（溶接設備）を除くボイラー設備関連の規定に関して、いずれの海外規格にも規定されていることがわかった。海外規格に規定されていない条項（溶接設備）については、ASME 規格及び EN 規格のいずれの規格も「ボイラー設備の製造等に関する技術的要件を規定したもの」という観点からは、必ずしも必要ではない内容である。

以上より、技術的要件の観点から、国内規格と海外規格の技術的な要求事項は同等であるといえる。

次に、火技解釈前文で要求されている、保安水準について検討する。

定量的な裏付けデータを示すことはできないが、米国、欧州における、ボイラー設備等の製造・建設実績、及び近年における規格・基準に起因した事故の報告が無いことなどからも、これらの海外規格は十分な保安水準を確保していると、判断している。

### 4 海外規格を適用するにあたって

火力発電設備の製造等に関する代表的な海外規格である、ASME 規格と EN 規格について、それらの特徴について、簡単に述べる。

ASME Boiler & Pressure Vessel Code は、2019 年現在、Section I から Section XII までが発行されており、これらの中には製造コードのみなら

ず、材料、溶接、非破壊検査等に関する規格も含まれているため、火力発電設備を構成する機器の製造等を行う場合、原則として、これらの規格以外の規格を参照する必要はない。（実際には、材料や試験に関する ASTM 規格、溶接に関する AWS 規格等が有り、ASME ではこれらの規格も取り込んでいるが、ここでは触れないものとする。）

ただし、適用するに当たっては注意が必要である。例えば、Section II では、ボイラーや圧力容器に係る材料を規定しているが、Section II に記載された材料であれば、火力発電設備の全ての機器に適用できるわけではない。機器を設計・製造するために適用すべき規格が、Section I の場合、もしくは、Section VIII, Div. 1 の場合によって、使用できる材料は異なり、それぞれの材料の許容値も異なってくる。詳細については、それぞれの製造規格（Section）を参照ください。

一方、EN 規格は、規格の体系として ASME 規格とは大きく異なる。火力発電設備に関して、ASME 規格で機器を設計・製造する場合には、12 種類の Section で、42 冊のみの規格を参照すれば必要十分であるのに対して、EN 規格で設計・製造する場合には、非常に多くの規格を参照しなければならない。

例えば、材料を例に挙げると、ASME 規格では、多くの場合、ASME が認定した材料を使用することになるので、Section II の Part A ~ D の 4 冊のみ揃えれば、材料に関しては必要十分と考えられるが、EN 規格では、それぞれの材料ごとや仕様ごとに規格が作成されているので、関連する全ての規格を準備しなければ、機器の設計・製造ができない。この点については、国内の JIS 規格に体系が似ている。背景として、EN 規格は、欧州各国にあったそれぞれの規格を、欧州標準化委員会（CEN）が統合して作成したものであるため、欧州各国の思惑が働いて、このような体系にせざるを得なかったものと推察する。

具体例として、EN 13445-2 (Unfired pressure vessels - Part 2 : Material) を見てみると、最新版で読み込まれている規格は、表 4-1 の通りであり、材料関係に限ったとしても、多くの規格を揃えなければ、機器の設計・製造ができないことがわかる。

表 3-1 火技省令・火技解釈と海外規格における、技術的要件の比較 (1/2)

火技省令	火技解釈	ASME 規格		EN 規格		備 考
		Sec. I	Sec. VIII Div. I	12952	13445	
第五条 ボイラー等及びその附属設備の材料	第 2 条 ボイラー等の材料	○	○	○	○	
第六条 ボイラー等及びその附属設備の構造	第 3 条 ボイラー等の構造	○	○	○	○	
	第 4 条 材料の許容応力	○	○	○	○	
	第 5 条 水圧試験	○	○	○	○	
	第 6 条 容器の胴	○	○	○	○	
	第 7 条 長方形管寄せ	—	○	○	○	
	第 8 条 容器の鏡板	○	○	○	○	
	第 9 条 容器の平板	○	○	○	○	
	第 10 条 容器のフランジ付き皿型ふた板	—	○	—	○	
	第 11 条 容器の管板	—	○	—	○	
	第 12 条 管及び管台	○	○	○	○	
	第 13 条 フランジ	○	○	—	○	
第 14 条 丸ボイラー	○	—	* 1	—	* 1 : Shell Boiler (EN 12953) で規定	
第七条 安全弁	第 15 条 安全弁	○	○	○	* 2	* 2 : EN 764-7 で規定
第八条 給水装置	第 16 条 給水装置	○	—	○	—	
第九条 蒸気及び給水の遮断	—	○	—	○	—	
第十条 ボイラーの水抜き装置	—	○	—	○	—	
第十一条 計測装置	第 17 条 計測装置	○	—	○	—	
第七十四条 溶接部の形状等	第 105 条 用語の定義	○	○	○	○	
	第 106 条 一般要求事項	○	○	○	○	
	第 107 条 溶接施工法	○	○	○	○	
	第 108 条 判定基準	○	○	○	○	
	第 109 条 溶接設備	—	—	—	—	設備は対象外
	第 110 条 溶接士	○	○	○	○	



表 3-1 火技省令・火技解釈と海外規格における、技術的要件の比較 (2/2)

火技省令	火技解釈	ASME 規格		EN 規格		備 考
		Sec. I	Sec. VIII Div. I	12952	13445	
第七十四条 溶接部の形状等	第 111 条 判定基準	○	○	○	○	
	第 112 条 技能の認定	○	○	○	○	
	第 113 条 作業範囲	○	○	○	○	
	第 114 条 ボイラー等の溶接部の 形状	○	○	○	○	
	第 115 条 ボイラー等の溶接部の 割れ及び欠陥	○	○	○	○	
	第 116 条 ボイラー等の溶接部の 強度	○	○	○	○	
	第 117 条 溶接施工法等の確認	○	○	○	○	
	第 118 条 溶接部の設計	○	○	○	○	
	第 119 条 溶接の制限	○	○	○	○	
	第 120 条 開先面	○	○	○	○	
	第 121 条 溶接部の強度	○	○	—	○	
	第 122 条 突合せ溶接による継手 面の食違い	○	○	○	○	
	第 123 条 厚さの異なる母材の突 合せ溶接	○	○	○	○	
	第 124 条 溶接部の欠陥等	○	○	○	○	
	第 125 条 継手の仕上げ	○	○	○	○	
	第 126 条 溶接後熱処理	○	○	○	○	
	第 127 条 非破壊試験	○	○	○	○	
	第 128 条 機械試験	○	○	○	○	
	第 129 条 再試験	○	○	○	○	
	第 130 条 耐圧試験	○	○	○	○	
第 131 条 準用	○	○	○	○		

表 4-1 EN 13445-2 (Unfired pressure vessels - Part 2 : Material) 最新版に呼び込まれている EN 規格\*<sup>1</sup>

EN 764-1-2004, EN 764-2-2012, EN 764-3-2002, EN 764-4-2014
EN 1092-1-2007
EN 10028-2-2009, EN 10028-3-2009, EN 10028-4-2009, EN 10028-5-2009, EN 10028-6-2009, EN 10028-7-2007
EN 10204-2004
EN 10216-3-2013, EN 10216-4-2013
EN 10217-3-2002, EN 10217-3-2002/A1-2005, EN 10217-4-2002, EN 10217-4-2002/A1-2005, EN 10217-6-2002, EN 10217-6-2002/A1-2005
EN 10222-3-1998, EN 10222-4-1998, EN 10222-4-1998/A1-2001
EN 10269-1999, EN 10269-1999/A1-2006
EN 10273-2007
EN 10274-2000
EN 13445-1-2014, EN 13445-3-2014, EN 13445-4-2014, EN 13445-5-2014
EN 13479-2004
EN ISO 148-1-2010
EN ISO 204-2009
EN ISO 898-1-2013, EN ISO 898-2-2012
EN ISO 2566-1-1999, EN ISO 2566-2-1999
EN ISO 3506-1-2009, EN ISO 3506-2-2009
EN ISO 6892-1-2009
CEN ISO/TR 15608-2000
(全 42 件)

注記 \* 1 : 各規格のタイトルは省略。

## 5 おわりに

今後、国内の火力発電設備の製造等において、どの程度海外規格が適用されるは不明であるが、コスト的には、国内で製造するよりもむしろ海外で、例えば、ASME 規格等で製造し、パッケージで輸入した方が安価であろうことは、材料コスト、人件費の関係から容易に想像できる。

また、今回、比較対象とした海外規格に関しては、EN 12952 を除き、いずれも ISO が、ISO-16528<sup>[1]</sup> に適合する国際規格として承認した規格であり、世界中で多くの実績があることから、火技解釈とは遜色ない規格であると言える。

しかしながら、火技解釈前文に記載されている、「十分な保安水準の確保が達成できる技術的証拠」の定義が明確でなく、「何を根拠として十分な保安水準の確保が達成できているか」を証明することが難しいために、国内の火力発電設備において、海外

規格を適用して製造した設備が非常に少ないものとなっている。

世の中のであらゆる面で、グローバルな考え方が広がっている状況において、火力発電設備における規格のグローバル化も考える必要がある。

### 参考文献

- [1] ISO-16528, Boilers and pressure vessels  
ISO がボイラー及び圧力容器の規格として、承認している国際規格



小嶋敏雄

# 「発電用火力設備の技術基準の解釈」に関する最近の改正について

## ～フレキシブルメタルホースの規定の取り入れ～

Latest revise of “Kagi-Kaishaku” representing a technical requirement to thermal installations for power generation in Japan; specifying the requirements for corrugate metal hose.

規格基準室 長谷川 忠之

A partial revision of “Kagi-Kaishaku” known as a technical requirement of METI standard for thermal installations power plant for power generation in Japan was implemented in this July. In this revision, minimum requirements for corrugated metal hose were newly specified, under the new concepts (for example, application of burst test) that have not been applied so far. This review describes the main points on the requirement for specified corrugated metal hose.

**Keywords** *Kagi-Kaishaku, Corrugated Metal Hose, Burst test.*

### 1 はじめに

令和元年6月及び7月に、発電用火力設備に関する技術基準を定める省令（以下、火技省令という）及び、技術基準の解釈（以下、火技解釈という）が一部改正された。

7月の改正では、引用しているJISの年版改定や改廃の反映を始めとする見直しが行われたが、中でもフレキシブルメタルホース（以下、フレキという）に関する規定の取り入れと、最新のクリープ試験データに基づいた高クロム鋼の許容引張応力の見直しが大きなポイントとなっている。特にフレキに関しては、ベローズのように継手形状を指定するのではなく、フレキの仕様や使用条件、あるいは加圧試験の適用によって溶接部の設計を確認するという、従来の火技解釈にはない考え方に基いて規定化されている。

本稿では、新たに取り入れられたフレキの規定（以下、フレキ規定という）のポイントについて紹介する。

なお、このフレキ規定は、民間からの要望を受け、

日本電気技術規格委員会下の溶接専門部会（事務局：発電技検）で審議・検討した成果が反映されたものである。

### 2 フレキについて

#### (1) フレキの構造

火力発電分野では、発電用設備としてガスタービンが広く用いられている。ガスタービンの本体周辺には多数の燃料系統や吸排気系統があるが、これらの系統は機器の振動や熱の影響を考慮して配管設計が行われており、ベローズやフレキといった伸縮継手は、振動や熱応力対策の手段として用いられている。

フレキは、襷状の管であるベローズと固定するための継手とが一体となった管継手の一種であり、ベローズの外側にブレードと呼ばれる金属の編組を施した構造となっているのが一般的である。フレキはエルボやバンドのような固定式管継手とは異なり、屈曲や振動を吸収できるような構造となっている。

この点はベローズも同様であるが、フレキとベローズの違いは、フレキはブレードにより強度を高める構造になっている点にある。

## (2) フレキの適用例

前述のように、フレキは屈曲や振動を吸収する役割を持つため、一般的な配管のような剛の拘束では設計しにくい場所や振動の発生しやすい箇所、すなわち、ある程度の変位に対して追従する特性や裕度が求められ、また、襷状のベローズに液体を通すと滞留するため、主に気化したガスや吸気系統といった気体を通ずる箇所で用いられるのが一般的である。

表1に、ガスタービンにおけるフレキの使用条件の一例を示す。最高使用温度は最大500℃程度で最高使用圧力は数MPa程度である。一方、設置されているフレキの数については、出力が300MWクラスのガスタービンで、外径150mm以上のもので30本、外径150mm以下のもので70本以上設置されている事例がある。

## (3) 国内外の法規・規格の現状

電気事業法では、事業用電気工作物は主務省令で定める技術基準に適合し、維持されなければならないと定めており、また耐圧部分について溶接するもの又は溶接したものの輸入品は、その溶接について

主務省令で定める技術基準に適合していることを確認しなければならないとされている。

管等の場合、具体的には、一定の圧力以上で使用される外径150mm以上の管溶接継手は技術基準適合性の確認対象となる。そのため、例えば外径150mm以上のフレキが用いられる場合には技術基準、すなわち火技解釈の規定を満足する必要がある。いわゆる可とう性を有する管等について、火技解釈では管又はネックリングにベローズを取り付ける場合の溶接部の設計は規定されているが、この中にフレキは含まれていない。従って、例えば、設計が確立した既製ユニット設備等であって、図1のような溶接部の設計を有する、技術基準適合性確認の対象となるフレキが使用されている場合に、当該箇所を火技解釈の規定に従った管等に変更して使用するという必ずしも合理的とは言えない実態がこれまでは存在していた。

一方、他法規を見ると、消防法では可とう管の健全性を確認する上で必要な材料や構造に係る規定、耐久性能を要求するための水圧試験や繰返し試験等を定めた運用基準が存在し、この中でフレキについて規定されている。また、ガス事業法では、ガス工作物技術基準の解釈例で引用されている日本ガス協会発行の指針の中で、フレキの構造設計に関する要求事項が述べられている。さらに、高压ガス保安法では、性能規定化に伴う技術要件を満たす例示基準として、高压ガス保安協会や日本LPガスプラント協会が発行する規格を呼び込んでおり、これらの規格の中でフレキの構造設計に関する規定が設けられている。

これら他法規関連の基準に共通するのは、フレキの構造上要求される設計・製造基準は規定されているが、溶接部に対する要求事項は規定されていないということである。これは、フレキの溶接部の設計が設置者等に委ねられるもので、溶接部の設計に対する健全性は、フレキ全体としての構造規定や耐久性確認のための試験によっ

表1 フレキの使用条件の一例(ガスタービンの場合)

適用箇所	最高使用圧力,MPa	最高使用温度,℃
燃料ガスパージ配管	~2.5	~500
コンプレッサー用抽気系統	~0.7	~380
冷却用空気系統配管	~1.3	~450
燃料供給系統	~3.0	~60
圧縮空気抽気系統	~1.1	~400

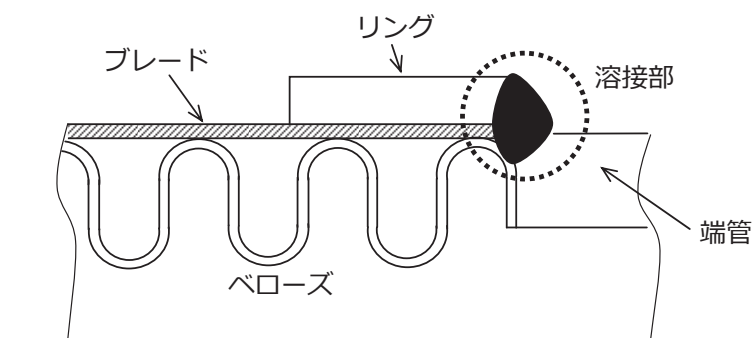


図1 フレキの溶接部の設計例

て確保するという考え方に基づくのではないかと考えられる。

溶接部に対する要求事項が規定されていないという点については、海外規格も同様である。一例を挙げると、ASME B31.3 や ISO 10380 には、要求される荷重や設計応力限界、疲労限度、漏えい試験に関する記述はあるが、溶接部の設計に関する記述はない。また、米国 NAHAD が発行する Corrugated Metal Hose の仕様に関するガイドラインである NAHAD 400 (2005) には、フレキと管との溶接部に関する記述が認められるが、この記述はフレキのベローズ部分とフィッティング部分とを接続する際の手順的な意味合いと考えられ、溶接部の図は概念図のみで詳細な記述はない。これは、先に述べた理由と同様に、溶接部の設計を含めてフレキ全体として健全性を確保するという考え方に基づくものと考えられる。

以上、国内外の法規や規格の現状を述べたが、総じて溶接部に対する要求がないことが分かる。

火技解釈は火技省令を満たす一例であるため、火技解釈に規定のない新しい技術や既存技術であっても、技術基準と保安水準が同等であると判断されれば適用することは可能となる。したがって、火技解釈に依らずとも、例えばフレキを用いることは可能であるが、保安水準との同等性、すなわち技術基準適合性を設置者自らが説明することは難しく、火技解釈の中に規定として取り入れられていた方が現実的には利便性は高まる。

### 3 フレキ規定のポイント

#### (1) ベローズ型ベローズに限定

ベローズ部分がスパイラル型の場合、その構造上、両端部の周方向断面の辺縁部は、ある部分では山となり別の部分では谷となる。このため、端管等と溶接した際に辺縁部全周にわたって均一な溶接が行われず、応力バランスが不均衡になることが考えられる。したがって、辺縁部が全周にわたって均等な形状となるベローズ型のベローズに限定した。

なお、襲部分の断面形状については特に要求事項はないため、U字形やオメガ形等、適用に制限はない。

#### (2) ベローズ端部のかしめ加工等の禁止

ベローズと端管を接続する際、ベローズの端部をかしめ、溶接を行うことがある。この場合、かしめによって生じたひずみが残った状態で溶接を行うことで割れが生じた事例がある。

フレキのトラブルについては、例えば 1965 年から 2015 年までの期間に発生したトラブル事例を調査した結果が高圧ガス保安協会によってまとめられているが<sup>[1]</sup>、この中にも、かしめを原因とする割れが報告されている。報告では、設計不良に分類されるトラブルは全体の 13% 程度となっているが、いずれも溶接部の設計自体の不備ではなく、系統全体としての不備、他の系統設備の損壊による二次被害等であるとされている。したがって、かしめ等の加工をせず、溶接部の設計及び使用条件が適切であれば、一般的に用いられているフレキに、割れや破損のようなトラブルは生じないと言える。

#### (3) 加圧試験の適用

フレキにおける管等との接続部の溶接部の設計に対する技術基準適合性については、KHKS 0803<sup>[2]</sup>を参考に、加圧試験によって確認することとした。KHKS 0803 では、EJMA 式又ケログ式による強度評価が適用できないフレキにあっては、一般則等の関係例示基準で規定されている加圧試験を適用できるとしており、この考え方を参考にしている。

フレキ規定では、加圧試験圧力は  $P_p=4P$  ( $P_p$ : 加圧試験圧力,  $P$ : 最高使用圧力) となっているが、 $4P$  という圧力を負荷することで発生する応力は概ね材料の持つ引張強さに相当する。

フレキは発電用設備以外にも広く一般的に用いられており、例えば、消防法関連では市販品が用いられることも多い。このためメーカーにおける製造ラインの多くが自動化されている。また、フレキは消耗品という思想の下、一定の使用期間に達したら新品に取り替えるような運用もなされる。このような状況においては、フレキを使用するたびに加圧試験によって溶接部の設計を確認することは現実的ではない。このため、いわゆる型式認定の様な考え方を採用し、フレキの設計・製造条件が同一で、かつ使用条件が同じ場合にあっては、これらの条件をワンセットに、一度加圧試験によって溶接部の設計が確

認められれば、以後、そのワンセットに対しては加圧試験が省略できるとしている。

#### (4) 加圧試験結果の検討事例

図2に加圧試験結果の一例を示す。いずれのフレキも、規定で要求される加圧試験圧力4Pではバーストしておらず、全て合格の領域に入っている。なお、図は各試験条件で3本のフレキを試験したうち、最もバースト時圧力が低いデータをプロットしている。

また、JLPA209<sup>[3]</sup>の附属書には、ベローズ径25A～40Aのフレキに対するバースト試験結果が報告されている。これによると、設計圧力の1.5倍で実施した10回の繰り返し耐圧試験によって長さ

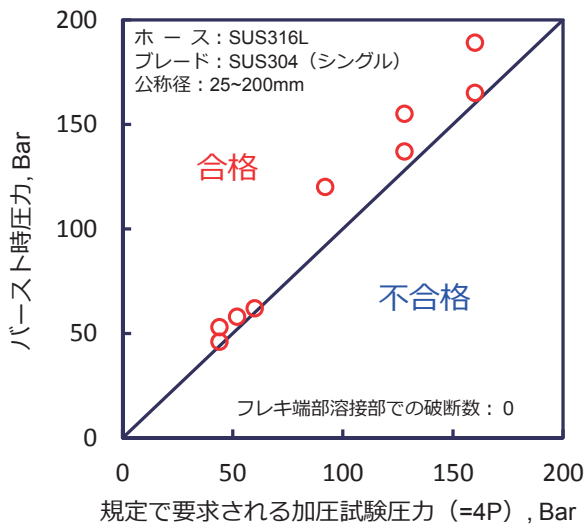


図2 加圧試験結果の一例

及び平均外径に変化は見られず、設計圧力の4倍で行った加圧試験では、新旧品を含んで試験したフレキの全数(新:全数の25%,旧:全数の75%)のうち、約13%はベローズ部分で噴破した。その他は膨出や伸び等に止まっている。管端の溶接部については伸びや膨出が認められるものの、破壊はブレード部に留まり、ベローズ部からの漏洩は認められていない。

以上、ここで述べた加圧試験の例や先述のトラブル事例を踏まえれば、現状、一般的に使用されているフレキにおける管等との接続部の溶接部は、4倍の加圧試験に耐えられる強度を有すると考えられる。

#### 4 おわりに

本稿では、7月に改正施行された火技解釈のうち、フレキ規定のポイントについて紹介した。本稿が、フレキユーザーやメーカーの業務の一助となれば幸いである。

#### 参考文献

- [1] 平成25年度経済産業省委託 高圧ガス保安対策事業(事故調査解析) 高圧ガス事故類型化調査報告書, 平成26年3月, 高圧ガス保安協会
- [2] 可とう管に関する検査基準 KHKS 0803 (2009), 高圧ガス保安協会
- [3] 金属フレキシブルホース基準 JLPA209:2010, 一般社団法人日本エルピーガスプラント協会



長谷川忠之

# 超音波探傷試験のシミュレーション解析技術の紹介 ～試験・検査の“設計”に向けて～

溶接・非破壊検査技術センター 古川 敬

## 1 はじめに

前報では、超音波探傷試験のシミュレーション解析事例の一つとして、探傷試験技術者の技量向上を支援する「超音波探傷シミュレータ」を目指し、仮想空間での訓練シミュレータ開発に向けた取組みを紹介した<sup>[1]</sup>。シミュレーション解析は、探傷試験を計算機内で再現することができるため種々の用途に活用でき、例えば探傷試験の実務に対しては、探傷条件の事前の検討（条件の絞り込み）や探傷試験結果の解釈の支援に活用できると考えられる。

ところで、昨年度発刊した発電技検技術レビュー第14巻の巻頭言では、「検査設計」という考えが示された<sup>[2]</sup>。検査設計とは、検査のしやすさを考慮した設計といった紹介であった。それ以降、「検査設計」について筆者なりに考察をしているが、検査設計という言葉には、検査方法の検討や条件の最適化という意味も含まれているのではないかと考える。超音波探傷試験（以下、「UT」と記す。）では、探傷の手順を検討・作成する際に、試験対象部位の寸法や材質、考慮すべききずの種類、きずが想定される位置、検出すべききず寸法等を考慮して、超音波の周波数、振動の種類、振動子寸法、斜角探傷の場合は屈折角等を選定することが重要であるが、従来のUT法では、先人の方々の多大な尽力により、標準化・規格化が進み適正な条件の範囲が絞り込まれている<sup>[3]</sup>。一方、比較的新しいUT法であるフェーズドアレイ法やTOFD（Time of Flight Diffraction）法では、従来の知見をある程度は活用できるものの、従来法に比べて条件選定の自由度が高いため、従来法での知見や経験を駆使しても、最適な探傷条件を探し出すまでに手間がかかることが多く、シミュレー

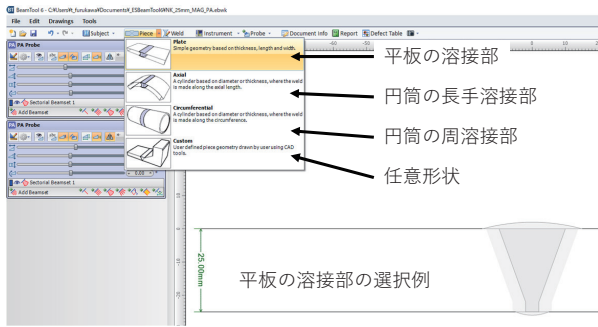
ション解析の活用が有効と考えられる。

本報では、UTの探傷試験条件の最適化の検討にシミュレーション解析を活用した事例を紹介する。

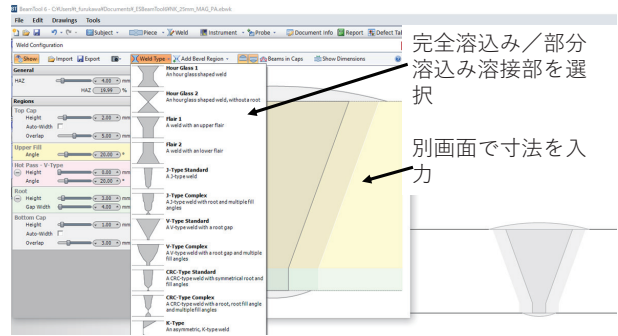
## 2 シミュレーション解析の方法

前報では探傷試験結果を再現することを目的にした解析のため、解析の厳密性を最優先し計算時間はかかるものの有限要素法を用いて解析した<sup>[1]</sup>。本報では、探傷試験条件（例えば超音波の屈折角や探触子の走査範囲の検討、フェーズドアレイ法の場合は超音波ビームの振り角や入射位置等の検討、TOFD法では探触子間距離の検討）の検討であり、短時間（できれば瞬時）の計算時間が必要と考える。そのため、解析の精度を多少犠牲にしても、瞬時に解析結果が得られることが重要となる。そこで、現時点ではぼりリアルタイムな解析が可能なレイ・トレース法を主体にした市販の解析ツール（Eclipse Scientific社製、ES BeamTool、6.0）を使用した。このツールは、試験体の形状を直線と円弧で簡易的にモデル化し、超音波ビームの反射や屈折を幾何光学近似で計算している。また、超音波の周波数と振動子寸法を考慮して超音波のビーム幅（中心の音圧に対して-3dB、-6dB、-12dB等の範囲）を表示する機能もある。

試験体や溶接部の形状・寸法は、図1に示すように複数種類のテンプレートが用意され、図面等をもとに寸法を入力して試験体の形状モデルを作成することができる。また、直線と円弧を組み合わせる任意の形状を作成することもできる。UT方法は図2に示すように、フェーズドアレイ法、TOFD法そして固定角の斜角法を選択し、選択したUT手法に応じて、使用する探触子の仕様（周波数、振動子寸法、

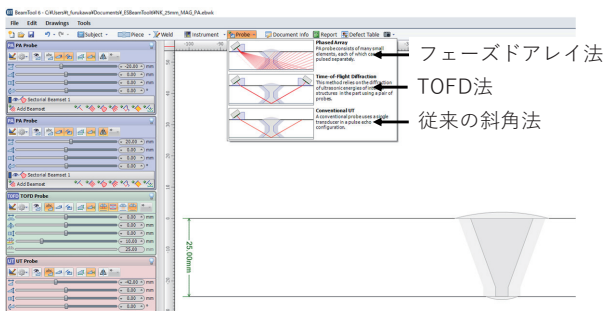


(a) 試験体形状の選択の例

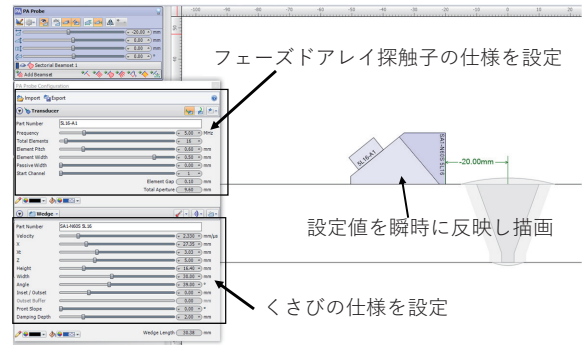


(b) 溶接形状の選択の例

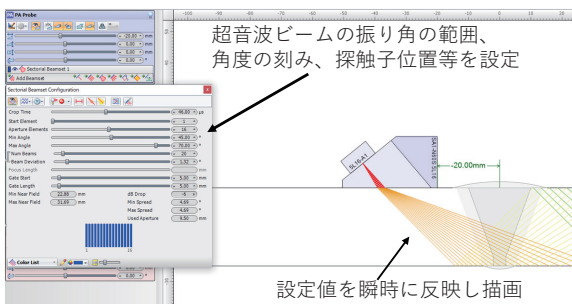
図1 試験体の選択・設定画面の例



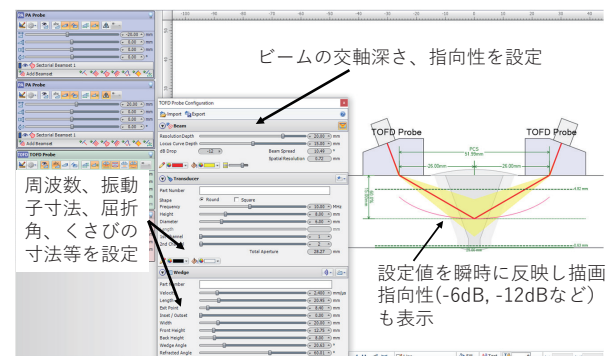
(a) UT方法の選択の例



(b) フェーズドアレイ探触子の条件設定の例



(c) フェーズドアレイ条件の設定例



(d) TOFD法の探触子及び探傷条件の設定例

図2 UT方法及びUT条件の選択・設定画面の例

アレイ探触子の場合には素子数や素子幅・素子ピッチ、くさびの形状・寸法等)を設定する。UT条件の設定は、フェーズドアレイ法の場合は超音波ビームの振り角の範囲は振り角のピッチを、TOFD法の場合はビームの交差深さを設定する。試験体の材質とくさびの材質は、使用する超音波の音速で、それぞれのモデルに設定する。これらの条件を設定すると、探触子から超音波ビームを示す「線」が描かれ解析結果が示される。それぞれの設定を変えると瞬時にモデル及び解析結果に反映され、試験対象範囲に超音波ビームがどの様に当たるかを確認することがで

きる。

### 3 探傷条件の検討例

#### 3.1 フェーズドアレイ法

フェーズドアレイ法による探傷方法は、電子走査の方法と探触子を機械的に走査する方法の組み合わせによって種々の方法がある。溶接部のUTに対して最も一般的な方法の一つに、探触子と溶接部の距離を一定に保ち溶接線方向に探触子を機械走査し、電子走査はセクター走査とする方法 (ISO13588 : 2018 (Non-destructive testing of welds --



Ultrasonic testing -- Use of automated phased array technology) の“S-scan at fixed probe position to weld (line scan)”, 以下、「セクター走査のライン走査」と呼ぶ。)がある。この方法は、探触子を置く位置によって溶接部内に超音波が伝わらない場所があったり、溶接部内の位置によって超音波が伝わる角度が異なるため、探触子を置く位置の検討が重要となる。平板突合せ溶接部と隅肉溶接部の探傷条件の検討に活用した事例を以下に示す。

(1) 平板突合せ溶接部<sup>[4]</sup>

セクター走査のライン走査では、超音波ビームの振り角の範囲と板厚によっては、探触子の位置を一カ所で溶接部内の全範囲に超音波を伝わらせることが可能な場合があり、効率的な探傷の可能性がある。ここでは、板厚 12mm の V 開先溶接部を例として、探触子位置を検討した結果を示す。図 3 に溶接部の形状の例を、図 4 には検出すべき想定きずの位置、表 1 に溶接部内のきずの位置を考慮した超音波ビームの角度の最適と考えた条件を示す。アレイ探触子とくさびは、素子ピッチ 0.5mm × 16 素子、周波数 4MHz とし、ポリスチレン製の 36° のくさびを用い、超音波ビームの振り角は 40° ~ 70° (横波) を想定した。

これらの条件をシミュレーションツールに設定し、探触子位置を変えて、溶接部内に伝わる超音波ビームの角度を把握し、最低限必要な探触子位置の種類とその位置を選定した。

図 5 は、探触子と溶接部との距離 (以下、「オフセット」と呼ぶ。) を 15mm, 20mm, 30mm 及び 40mm としたときのシミュレーション結果である。超音波ビームを示す「線」は、40° から 5° 刻みで 70° まで描かれている。詳細な説明は文献<sup>[4]</sup>に記すが、

検討の結果オフセット 20mm の一カ所で表 1 の条件をほぼ満足できることが確認された

なお、板厚 9mm の場合も探触子位置は 1 カ所で表 1 の条件を満足できるものの、板厚 25mm の場合は 1 カ所では網羅できず、少なくとも 2 カ所必要であることが確認された<sup>[4]</sup>。

(2) 隅肉溶接部<sup>[5]</sup>

次に、板厚 16mm の鋼板に薄板が隅肉溶接された継手において、溶接部内のきず (ルート部からビード内に進展するきず) 及びルート部から板厚 16mm の鋼板内の板厚方向に進展するきずを想定した検討の事例を示す。フェーズドアレイの方法は (1) と同様にセクター走査のライン走査であり、アレイ探触子は周波数 5MHz, 素子ピッチ 0.6mm × 素子数 16, ポリスチレン製の 36° のくさびを用い、超音波ビームの振り角は 40° ~ 70° (横波) を想定し、探触子位置の最適位置を検討した。

図 6 に試験対象部の形状モデルと解析結果を示す。この形状は、テンプレートには無かったため、図面をもとに直線と円弧を組み合わせて作成した。探触子の設置位置が 1 カ所で両方のきずが検出できる条件を探し出すことはできなかったが、次に示す 2 カ所で両範囲の探傷ができることが確認された。図 (a) は溶接部内のきずに対して最適と思われる条件であり、1 スキップでビード内全体に超音波が伝わる条件である。図 (b) は想定されるきずに対して 1 スキップ又は 1.5 スキップで当たる条件である。図 (b) では、きず高さが小さい場合あるいはきずの傾きによっては検出が難しい場合があると想定され、検出すべききずの寸法等の要求に応じて他の探触子位置を追加することが重要と考える。この検討において、ここに示したレイ・トレース法で絞り込んだ条件に対して、有限要素法による厳密なシミュレーション解析

表 1 溶接部内のきずの位置を考慮した超音波ビームの入射条件

領域	想定きず・性状 (溶接欠陥)	領域へ入射する角度 (適した条件の範囲)		
		0.5 スキップ	1 スキップ	1.5 スキップ
① ルート部	面状・垂直 (割れ, 溶込み不足等)	60° 前後以外	—	60° 前後以外
② 表面近傍	面状・垂直 (割れ, アンダーカット等)	—	60° 前後以外	—
③ 右開先面	面状・開先面に平行 (融合不良等)	開先面に垂直	開先面に垂直	開先面に垂直
④ 左開先面	面状・開先面に平行 (融合不良等)	開先面に垂直	開先面に垂直	開先面に垂直
⑤ 中央部	面状 (割れ), 体積 (フローホール, スラグ巻込等)	60° 以上, 複数の角度	60° 以上, 複数の角度	60° 以上, 複数の角度

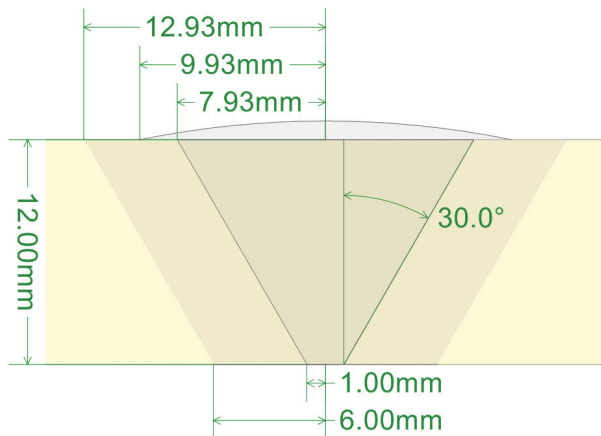


図3 溶接部の形状・寸法の例 (板厚 12mm)

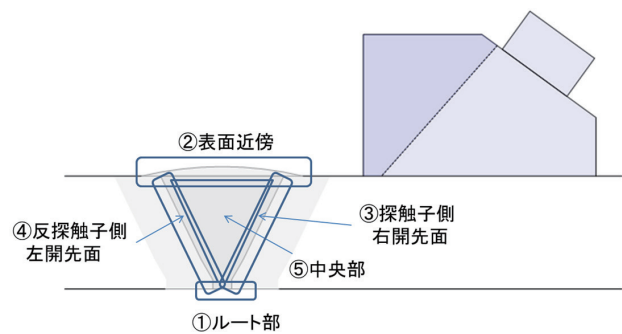
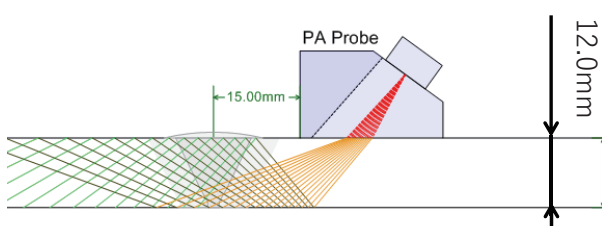
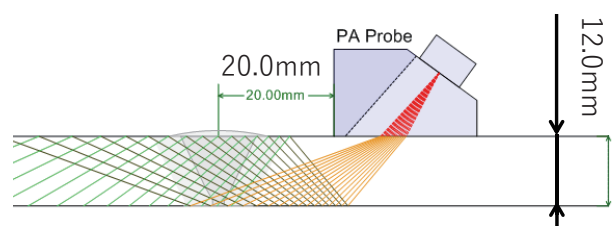


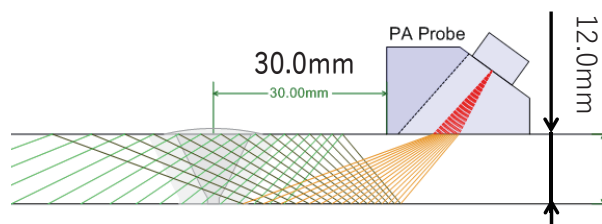
図4 きずが想定される領域



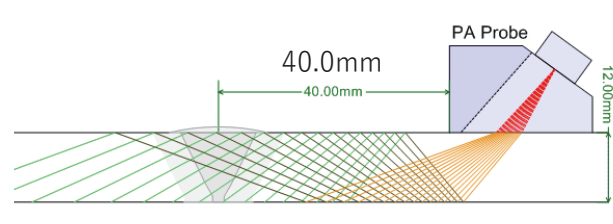
(a) オフセット 15mm



(b) オフセット 20mm

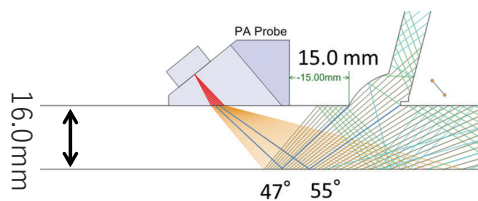


(c) オフセット 30mm

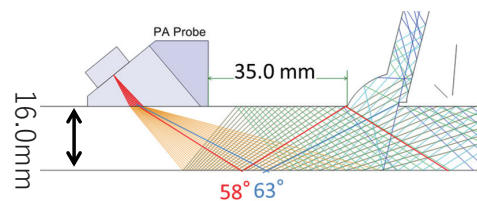


(d) オフセット 40mm

図5 平板突合せ溶接部に対する各オフセットにおける超音波ビームの状況



(a) オフセット 15mm



(b) オフセット 35mm

図6 隅肉溶接部に対する各オフセットにおける超音波ビームの状況

を行って妥当性を確認したのちに探傷試験を実施し欠陥検出性を確認した<sup>[5]</sup>。

### 3.2 TOFD法

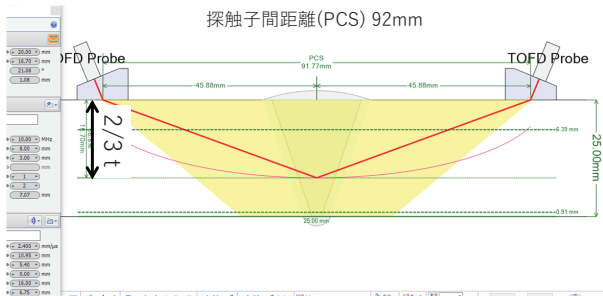
TOFD法は溶接部を挟んで縦波斜角探触子を対抗して配置し、一方の探触子で超音波を送信し、もう一方の探触子で受信する方法であり、指向性の広い超音波ビームを使うことで表面から裏面にわたり板厚全体を網羅する探傷方法と言われているものの、

板厚が厚い場合は探触子間距離を複数設定して板厚全体を網羅することが推奨されている<sup>[6]</sup>。TOFD法では、評価すべききずの寸法や位置に応じ、使用する超音波の周波数や振動子寸法等を考慮して適切な条件を選定することが重要と言える。ここでは、板厚25mmの突合せ溶接部を例として、超音波ビームの指向性を考慮してTOFD法の探傷条件を検討した事例を紹介する。

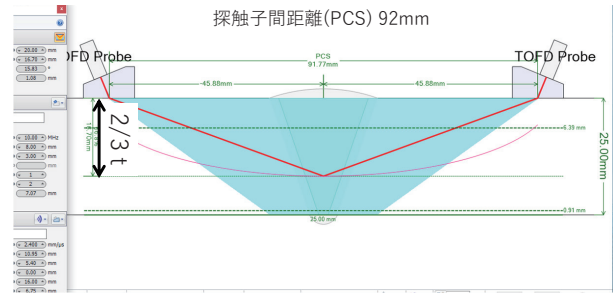
表2は、TOFD法を用いた探傷方法の規格の一つ

表 2 TOFD 法の条件

板厚 (t)	ISO <sup>[6]</sup> 推奨条件						解析条件			解析結果	
	条件数	深さ 範囲	中心 周波数	屈折角	振動子 寸法	ビーム 交差深 さ	中心 周波数	屈折角	振動子 寸法	ビーム 幅	図番号
25mm	1	0 ~ t	10 ~ 5MHz	70 ~ 60 °	2 ~ 3 mm	16.7mm (2/3 t)	10MHz	70°	3mm	-12dB -6dB	図 7
							10MHz	60°	3mm	-12dB -6dB	図 8

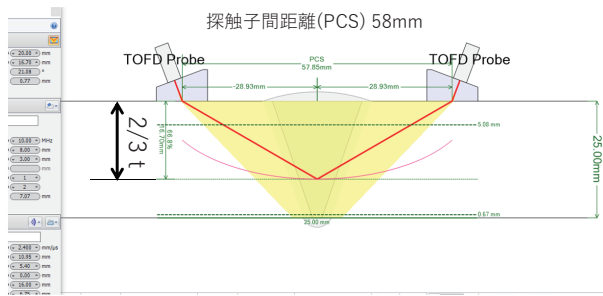


(a) 緒音波ビームの範囲：-12dB

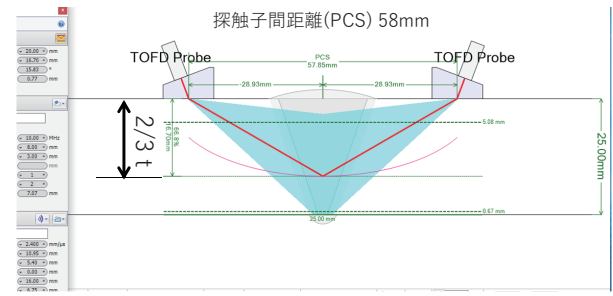


(b) 超音波ビームの範囲：-6dB

図 7 周波数 10MHz, 屈折角 70° (縦波), 探触子間距離 92mm における超音波ビームの範囲



(a) 緒音波ビームの範囲：-12dB



(b) 超音波ビームの範囲：-6dB

図 8 周波数 10MHz, 屈折角 60° (縦波), 探触子間距離 58mm における超音波ビームの範囲

である ISO 10863:2011 Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Use of time-of-flight diffraction technique (TOFD) の推奨条件 [5] と推奨条件の範囲内で選定した条件の例及びその条件での解析結果を示す。図 7 及び図 8 は、板厚 25mm における屈折角 70° と 60° の解析結果である。これらは、推奨範囲内で超音波ビームの指向性が狭い条件 (周波数 10MHz, 振動子寸法  $\phi$  3mm) であり、屈折角 70° では -12dB の範囲も -6dB の範囲でも板厚全体を網羅するものの、屈折角 60° の場合は、-6dB の範囲で表面近傍が抜けることが確認できる。探傷試験時に空間的な制約が無い場合は屈折角 70° を選定すべきだが、制約があり探触子間距離を広く取れない時などには屈折角 60° を選定する場合も考

えられる。その場合は、周波数を下げるか振動子寸法を小さくするといった対応策が考えられ、このツールを使うことで条件変更の効果が容易に検討できる。

#### 4 考察及びまとめ

本報では、シミュレーション解析を活用した探傷条件の検討・最適化の事例を紹介した。このシミュレーション解析は試験対象部の形状を直線と円弧でモデル化し、超音波ビームの伝搬状況を示す簡易的なものであるが、レベル 2 またはレベル 3 技術者が指示書や手順書を検討する際に強力なツールになると考えられる。厳密なシミュレーション解析方法を用いれば計算時間はかかるが、より詳細に探傷性能

の評価を事前に確認することもできるようになってきている<sup>[4][5]</sup>。将来は、リアルタイムに厳密な解析を行い、瞬時に探傷結果が予測できるようなシミュレーション解析方法ができることを期待するが、現時点では用途に応じた使い分けが重要と考える。

#### 参考文献

- [1] 古川, 超音波探傷試験のシミュレーション解析技術の紹介～仮想空間での訓練シミュレータ開発に向けて～, 発電技検技術レビュー 14 巻, pp.36-38 (2018)
- [2] 西野, 「検査設計」発電技検技術レビュー 巻頭言 第 14 巻, pp.2-3 (2018)
- [3] 例えば, JIS Z 3060 : 2015 鋼溶接部の超音波探傷試験方法
- [4] 上山他, フェーズドアレイ探傷計画検討におけるシミュレーションツールの活用, 非破壊検査 67 巻 2 号, pp.64-69 (2018)
- [5] 古川他, 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, 第 26 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, pp.103-110 (2019)
- [6] ISO 10863:2011 Non-destructive testing of welds – Ultrasonic testing – Use of time-of-flight diffraction technique (TOFD), p.7 (2011)



古川 敬

# 電気化学的な計測データによる 材料評価技術

溶接・非破壊検査技術センター 鈴木 良治

## 1 はじめに

電気化学測定法は、電池、めっき、腐食、防食などの開発・研究において、多様な情報をもたらす実験手法である。金属材料の腐食を調査対象とした場合、材料の耐食性および環境の腐食性に関する基本的な指標を簡便に知ることができる。また、長期間にわたる浸漬試験を行うよりも、電気化学的なパラメータ（電位や電流）を用いて解析することで迅速に耐食性評価ができるといった利点もある。

現場適用の観点から、簡易的に経年劣化した材料の健全性を診断する技術として電気化学測定を適用する提案がなされており、劣化度により変化する材料の電気化学特性を利用し、定量的な評価が実現できると報告<sup>1)2)</sup>されている。当センターにおいても、これらの利点に着目し、改良 9Cr-1Mo 鋼の溶接金属部における劣化度を評価する手法<sup>3)</sup>として調査を行った事例があり、さらなる電気化学測定技術の応

用範囲拡大に向けた検討を行う余地が残されている。

本報告では、電気化学測定による材料評価技術に関しての再確認を行いつつ、溶接継手部の耐環境安定性を電気化学的に評価する取組みについて紹介する。

## 2 分極曲線測定による材料評価技術

前述した電気化学的な計測データにより材料の劣化度を推定した報告<sup>1)2)3)</sup>では、動電位法による分極曲線測定から評価がなされており、ここでは簡単にその測定法と評価技術について説明を試みる。

動電位分極曲線測定法は、電位を走査（掃引）し、流れる電流を測定する方法である。図 1 に示すように測定系は、3 電極式電気化学セル、ポテンシostat、ファンクションジェネレータ、データロガーより構成される。

3 電極式電気化学セルは、「作用電極」「参照電極」「対電極」と呼ばれる 3 種類の電極から構成される。

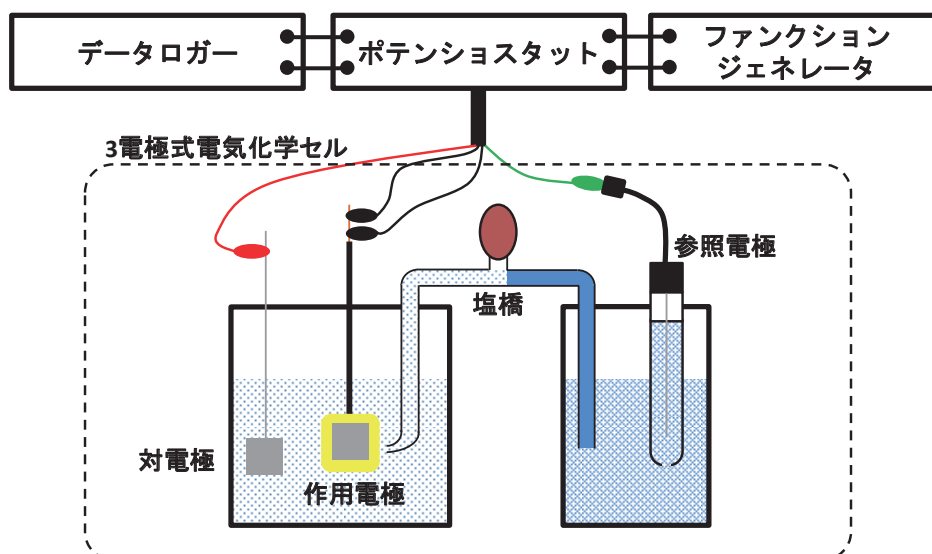


図 1 測定系の一例

評価対象となる材料を「作用電極」とし、「参照電極」は作用電極の電位を設定するために基準となる電極、「対電極」は作用電極上で起こる反応と対になる反応を起こす場として必要な電極である。一般的に、参照電極は Ag/AgCl 電極、対電極には Pt 電極を用いることが多い。

分極曲線測定を行う上では、参照電極に対する作用電極の電位を制御する装置としてポテンシostatが必要であり、この装置をファンクションジェネレータと接続することによって、作用電極の電位は任意の波形通りに走査（掃引）されることになる。一方で、ポテンシostatは電位および電流の測定を行う機能が備わっており、接続されたデータロガーにおいて「電位（参照電極と作用電極の電位差）」と「電流（作用電極と対電極の間を流れる電流）」の測定値が記録される。図2に、測定される電位および電流値の概念図を示す。

測定結果を横軸に電位、縦軸を電流としてプロットすると電位-電流曲線、すなわち「分極曲線」となる。図3は、塩化物イオン存在下における炭素鋼 SM490 とステンレス鋼 SUS304 の分極曲線の一例である。図3中における分極曲線 (a) 部に着目する。この電位の値は浸漬電位と呼ばれ、試料を溶液に浸漬した状態で示す値である。炭素鋼 SM490 の浸漬電位は、ステンレス鋼 SUS304 よりも低い電位を示

すことがわかる。浸漬電位の値は、耐食性の優劣を表す指標の一つではあるが、この結果のみで評価することはできない。炭素鋼 SM490 の電位を分極（浸漬電位の値よりも高い電位に掃引）すると、腐食が進行する（イオン化が促進される）ため電流値の増大が確認される。一方、ステンレス鋼 SUS304 は、電位を掃引しても 0.3V 付近までは極めて低い電流値を維持した領域が観測される（図3中 (b) 部）。この電位領域は不動態領域と呼ばれ、ステンレス鋼のような不動態化する金属材料で観測される。その後、確認される急激な電流値の増大は（図3中 (c) 部）、溶液中に存在する塩化物イオンの影響により発生し

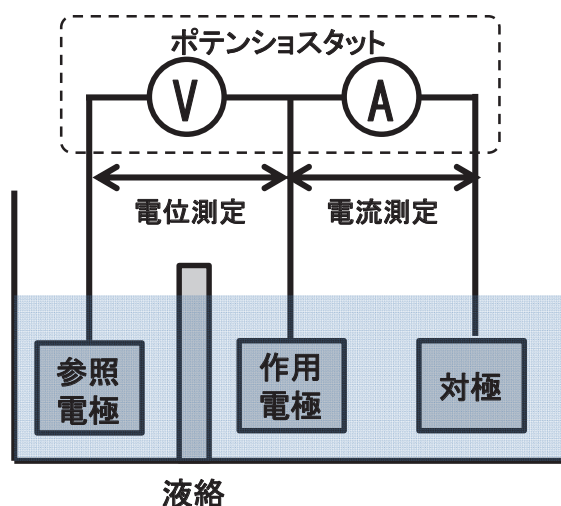


図2 測定される電位および電流値の概念図

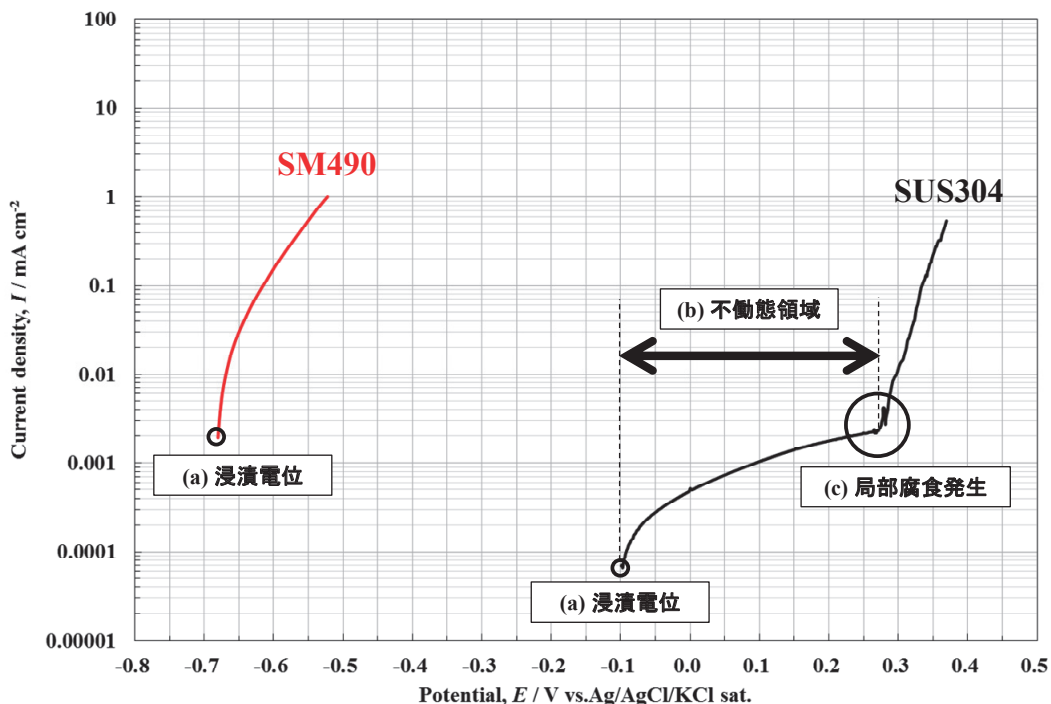


図3 塩化物イオン存在下における炭素鋼 SM490 とステンレス鋼 SUS304 の分極曲線の一例

た局部腐食に起因したものである。

分極曲線測定を行うことによって、材料の耐食性に関する基本的な指標を取得することができる。また、環境側（溶液環境）の腐食性についても検討することが可能<sup>4)</sup>な材料評価技術である。

### 3 溶接部の耐環境安定性に関する電気化学的評価

発電設備に代表される大型構造物には、数多くの継手部が存在する。溶接施工された継手部（溶接部）は、熱の影響により母材とは異なる腐食反応性を示す可能性がある。腐食が局部的に成長する形態を示した場合、材料が破損に至るまでの期間を予測しにくい。また、高効率なプラント運用により生じる新たな環境条件が、これまでに経験のない腐食損傷を発生させる可能性がある。溶接構造物の健全性について腐食の観点から考える上では、多種多様な腐食因子（材料因子・環境因子）を系統的に整理し、溶接継手部における耐環境安定性を電気化学的に評価することが必要となる。当センターでこれまで蓄積してきた溶接管理技術や溶接部の非破壊評価技術に加えて、今後は溶接継手部の健全性確保に貢献する取組みのひとつとして溶接部の腐食に対する電気化学的な知見を拡充させる予定である。

### 4 おわりに

近年、材料の腐食を電気化学的にセンシングする研究・開発<sup>4),5),6)</sup>が活発になされている。将来的にはこれらのセンシング技術が利用されることで、腐食損傷トラブルを未然に防ぐモニタリングシステム構築<sup>7)</sup>へと発展する気運が高まっている。実環境におけるモニタリングデータから正確な腐食を理解するために、基礎的な電気化学計測データの必要性は今後ますます高くなると予想される。このような観点からも、腐食に関する基礎的な知見として電気化学的なデータを蓄積する重要性があると言える。引き続き当センターにおいては、電気化学測定による材料評価技術の発展を模索しながら、技術力の向上、さらには応用範囲拡大につながる研究開発を進めていきたい。

#### 参考文献

1) 梅村文夫：ステンレス鋼の鋭敏化度の非破壊的

診断技術，溶接学会誌，56(7)，1987，pp411-416

- 2) 駒崎慎一，岸繁男，庄子哲雄，千葉秀樹，鈴木康史：W強化型9%Crフェライト系耐熱鋼の熱時効ぜい化と電気化学的手法によるその評価，材料，49(8)，2000，919-926
- 3) 西川聡，大北茂，堀井行彦：長時間使用した改良9Cr-1Mo鋼溶接金属の電気化学計測を用いたじん性評価，溶接・非破壊検査技術センター技術レビュー，4，2008，pp33-37
- 4) 野田和彦，斉藤知：II．腐食の電気化学測定法の基礎 — 分極曲線（電流-電位曲線）—，材料と環境，67，2018，pp9-16
- 5) 元田慎一：III．腐食の電気化学測定法の応用 — ACM型腐食センサー—，材料と環境，67，2018，pp150-155
- 6) 押川渡：IV．各種環境での電気化学測定 — ACMセンサー—，材料と環境，67，2018，pp273-279
- 7) 片山英樹：IV．各種環境での電気化学測定 — 大気腐食II（電気化学インピーダンス法）—，材料と環境，67，2018，pp280-286
- 8) 黒田卓也，西田秀志，尾崎智博，樋上智彦，赤井亮太：社会インフラへのモニタリング技術の活用(1) 現場適用性の高いモニタリングシステムの実現と実証について，OMRON TECHNICS，51，2019，pp120-127



鈴木良治

# JIS Z 2305:2013に対応した 実技研修の紹介

研修センター 松田 誠司, 村上 功治, 牧原 善次, 平澤 泰治, 小林 輝男

## 1 はじめに

当協会では、従来より発電プラントの検査に携わる職員に対し、検査能力の下地の一つとなる非破壊試験技術の習得・向上を目指して、長年にわたり研修を実施してきた。

また、2004年（平成16年）度からは、外部（官庁、企業等）の保全及び検査に関わる人材の育成支援に積極的に取り組むべく、材料、溶接及び非破壊試験技術等の研修を開始した。このうち、非破壊試験技術に関する資格取得に係る研修については、JIS Z 2305 “非破壊試験－技術者の資格及び認証”が2013年に改正され、再認証試験に実技試験が導入されるなど実技能力の確認に重点が置かれることとなったため、2015年度から順次、実技試験の内容を中心とした研修を開設し、内外の受験希望者に提供してきた。当協会の研修は、可能な限り試験直前での開催と受講者への手厚いフォローアップを特長としている。以下、当協会が開催している“JIS Z 2305:2013 対応のレベル2 実技試験対策研修”を中心とした非破壊検査技術者資格取得のための研修について紹介する。

## 2 非破壊試験技術者の資格試験

### 2.1 非破壊試験技術者の資格試験の概要

非破壊試験技術は、製品を壊すことなく直接または間接的にきずの有無などの状態を調査する技術であり、品質管理手法の一つとして発電プラント、化学プラント、鉄道、航空機、船舶、橋梁などの構造物の健全性評価に幅広く活用されている。

また、非破壊試験技術の信頼性が機器の信頼性（安全性）に直結するといっても過言ではない一方で、

非破壊試験の結果及び評価（合否判定）は、それぞれに応じた試験手順、試験機材及び試験技術者の技量によって変わることがあり、とくに試験技術者の技量に左右されやすい。したがって、非破壊試験技術者の技術レベルを一定とするために、日本産業規格 JIS Z 2305 “非破壊試験－技術者の資格及び認証”により技術認証が行われている。この資格試験において対象となっている非破壊試験技術を表1に示す。当協会ではこのうち放射線透過試験（RT）、超音波探傷試験（UT）、磁気探傷試験（MT）及び浸透探傷試験（PT）について研修を実施している。

表1 JIS Z 2305 “非破壊試験－技術者の資格及び認証”に基づく資格一覧

※限定資格は省略

資格名称	略称
(1) 放射線透過試験 Radiographic testing	RT
(2) 超音波探傷試験 Ultrasonic testing	UT
(3) 磁気探傷試験 Magnetic testing	MT
(4) 浸透探傷試験 Penetrant testing	PT
(5) 渦電流探傷試験 Eddy Current testing	ET
(6) ひずみゲージ試験 Strain Gauge testing	ST
(7) 赤外線サーモグラフィ試験 Infrared Thermographic testing	TT
(8) 漏れ試験 Leak testing	LT

### 2.2 JIS Z 2305:2013による資格試験（実技試験）の内容

JIS Z 2305:2013に基づき行われている新規及び再認証レベル2の実技試験の内容を表2に示す。いずれの手法も指示書の作成と2～3種類の試験体に対する探傷により試験が構成されている。



表2 レベル2実技試験（新規及び再認証試験）の内容<sup>1,2)</sup>

手法	試験内容
RT	①RT 指示書の作成 ②実技 i) RT 機器システム（X線発生装置、恒温現像槽、X線フィルム及び現像剤等の管理を含む）の確認及び準備 ii) 2体の試験体の撮影及び写真処理 iii) 3枚の透過写真のきずの像の分類 iv) 24枚の透過写真の解釈 v) 試験結果の記録、合否判定及び報告 正味試験時間：165分
UT	①UT 指示書の作成 ②実技 i) UT 機器システム（試験機器の調整・管理含む）の確認及び準備 ii) 3体の試験体の探傷 iii) 試験結果の記録、合否判定及び報告 正味試験時間：160分
MT	①MT 指示書の作成 ②実技 i) MT 機器システムの確認及び準備 ii) 3体の試験体の探傷 iii) 試験結果の記録、合否判定及び報告 正味試験時間：110分
PT	①PT 指示書の作成 ②実技 i) PT 機器システム（探傷感度、探傷剤管理含む）の確認及び準備 ii) 3体の試験体の探傷 iii) 試験結果の記録、合否判定及び報告 正味試験時間：120分

3 当協会が開催する各種レベル2実技研修の紹介

3.1 対象とする非破壊試験手法と研修期間

当協会では JIS Z 2305:2013 のレベル2 実技研修として実施している非破壊試験手法、標準的な研修期間及び1回あたりの定員を表3に示す。

表3 当協会で開催している JIS Z 2305:2013 のレベル2 実技研修と期間、定員

非破壊試験手法	対象		標準研修期間	定員 (1回あたり)
	レベル	試験区分		
RT	2	新規	2日間	6名
		再認証		
UT	2	新規	3日間	6名 <sup>注)</sup>
		再認証		
MT	2	新規	2日間	6名
		再認証		
PT	2	新規	2日間	6名
		再認証		

注) Rタイプ：3名、Gタイプ3名

各手法とも、1回あたりの定員は最大6名としており、少人数に対してきめ細かい指導を行うことを特長としている。研修日程については可能な限り試

験日に近い日程で、各回とも2回程度開催しており、6名を越える受講者にも対応するとともに、当協会が設定した受講日以外で受講したい、(再試験受験者などで)標準的な研修期間より短い日数で受講したいという個別の要望に対しても可能な限り希望に沿うようフレキシブルな対応をとっている。

また、講習終了後から受験の期間まで受講者の希望に応じてフォローアップを行っている。



(a) UTレベル2（実技注意点の説明の例）



(b) PTレベル2（実技反復訓練の例）

図1 講習風景の例

3.2 各種レベル2実技研修の概要

JIS Z 2305:2013 によるレベル2 実技試験（新規試験、再認証試験）に向けて当協会が提供する研修内容及び研修設備の概要を以下に示す。

(1) 放射線透過試験（RT）

2018年秋期に開設したRT実技研修の内容及び設備概要を表4及び図2に示す。

表4 RT実技研修内容及び設備の概要

項目	内容		備考
研修内容	(1) 指示書問題, 撮影条件の導出方法 (2) 試験体の撮影及び写真処理 (3) 透過写真のきずの像の分類 (4) 透過写真の解釈		試験体の撮影, 写真処理(現像他)は実習
機材 ・探傷 ・現像 ・観察 ・評価	X線発生装置	250kV	図2参照
	フィルム	IX50, 80, 100	
	増感紙	金属箔(鉛)	
	透過度計(針金)	一般形, 帯形	
	階調計		
	現像設備	タンク現像装置	
	濃度計 観察器		
	分類ゲージ	JS Z 3104 他	
試験体	(1) 管試験体 (2) 鋳物試験体	アルミ製	
教材	透過写真集		きずの分類, 解釈に用いる教材



図2 RTレベル2実技研修用機材の例

放射線透過試験 (RT) の講習では, 過去の受験者の声を参考にして, 他の非破壊試験手法と比べても, 記述式の指示書問題に関する講習に重点を置いている。与えられた題意から撮影条件を導出するための考え方と手順について, 一つひとつ丁寧に解説し, 単なる解法のみならず背景にある考え方に関する理解を促進し, 習得することに注力している。また, 撮影・写真処理の実技においても露出条件の算

出, 装置・試験体の取り扱い方など誤り易い点を強調した解説を行っている。

### (3) 超音波探傷試験 (UT)

UT実技研修の内容及び設備概要を表5及び図3に示す。

表5 UT実技研修内容及び設備の概要

項目	内容		備考
研修内容	(1) 垂直法(装置の調整を含む) (2) 斜角法(装置の調整を含む)		資格試験で出題が想定される形状の試験体を用いた実技訓練が可能 <sup>3)</sup>
探傷装置	超音波探傷器	Rタイプ Gタイプ	実際の資格試験で使用されている探傷装置と同じ仕様
	垂直探触子	5Z20N	
	斜角探触子	5Z10 × 10A70	
試験片	標準試験片 (STB)	STB-N1	—
		STB-A1	—
		STB-A2,A3	—
	対比試験片 (RB)	横穴対比試験片	—
接触媒質	マシン油, グリセリンペースト		—
附属品	探傷ケーブル		—
試験体	図3参照		適宜試験の状況に応じて拡充する。



図3 UTレベル2実技研修用機材(探傷器, 試験体等)の例

超音波探傷試験 (UT) の講習では, 通常1日半程度掛けて垂直法, 及び斜角法の探傷を, 探傷器の取り扱いから一つひとつ丁寧に指導している。これにより, 探傷器に初めて触れる受験者, あるいは前回アナログ探傷器を用いて資格を取得した再認証受験者でも, 試験に必要な一連の操作を無理なく習得できるようにしている。一通りの操作を習得したのち, 時間計測を行いながら本番さながらの反復訓練を行い, できるだけ長時間装置に触れてもらうことで, 合格に必要な力量の習得に努めている。

さらに, 希望者には指示書問題の演習を行い, 考

え方のポイントを解説している。

### (3) 磁気探傷試験 (MT)

MT 実技研修の内容及び主な設備概要を表 6 及び図 4 に示す。

表 6 MT 実技研修内容及び設備の概要

項目	内容		備考
研修内容	(1) 極間法 (2) コイル法 (3) 電流貫通法		資格試験で出題が想定される形状の試験体を用いた実技訓練が可能 <sup>3)</sup>
探傷装置	磁粉探傷試験装置 (定置式) 極間式磁粉探傷器		実際の資格試験で使用されている探傷装置とほぼ同じ仕様
	ブラックライト		
探傷剤	磁粉	湿式黒色磁粉	—
		蛍光磁粉	—
		乾式黒色磁粉	—
	分散剤		—
標準試験片	A 形標準試験片 (A1-30/100) C 形標準試験片 (C1)		—
附属品	照度計, 紫外線強度計, 方向コンパス他		—
試験体	図 4 参照		適宜, 試験の状況に応じて拡充する。

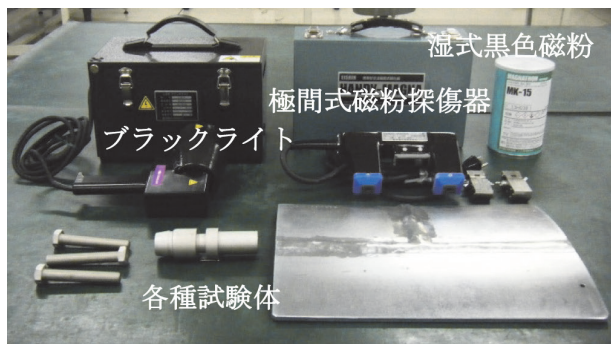
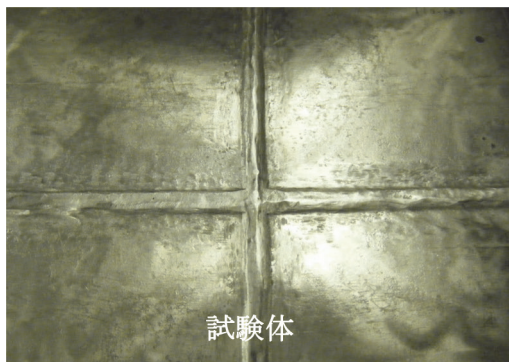


図 4 MT レベル 2 実技研修用機材 (探傷器, 試験体等) の例

磁気探傷試験 (MT) の講習では, 極間法, 電流貫

通法及びコイル法の探傷を, 磁化条件の求め方から, 磁粉の適用方法, 装置の取り扱いに至るまで一つひとつ丁寧に指導している。特に, 定置式の磁化装置に触れる機会の少ない受講者には, 繰り返し装置を用いて訓練させることにより操作に対する自信をつけさせるようにしている。

一通りの操作を習得したのち, 時間計測を行いながら本番さながらの反復訓練を行い, できるだけ長時間装置に触れてもらうことで, 合格に必要な力量の習得に努めている。

また, 3 手法のうち不得手とを感じるものがある場合には, 受講者の希望に応じて集中的に練習できるようにしている。

さらに, 探傷条件書及び指示書 (記述式) の作成指導, 要点の解説にも力を注ぎ, 試験全体にわたって合格に必要な力量の習得に努めている。

### (4) 浸透探傷試験 (PT)

PT 実技研修の内容及び主な設備概要を表 7 及び図 5 に示す。

表 7 PT 実技研修内容及び設備の概要

項目	内容		備考
研修内容	(1) 溶剤除去性染色浸透探傷試験 (2) 水洗性蛍光浸透探傷試験 (3) 後乳化性蛍光浸透探傷試験他		資格試験で出題が想定される形状の試験体を用いた実技訓練が可能 <sup>3)</sup>
探傷装置	水洗性浸透探傷試験装置 (据置き)		実際の資格試験で使用されている探傷装置とほぼ同じ仕様
	ブラックライト		
探傷剤	浸透液	蛍光浸透液	—
		蛍光浸透液 (水洗性)	—
		染色浸透液	—
	除去剤	水	—
		有機溶剤除去剤	—
		乳化剤 (水性)	—
	現像剤	湿式現像剤	—
		速乾式現像剤 乾式現像剤	—
対比試験片	タイプ 1, タイプ 3		—
附属品	温度計, 照度計, 紫外線強度計他		—
試験体	図 5 参照		適宜, 試験の状況に応じて拡充する。

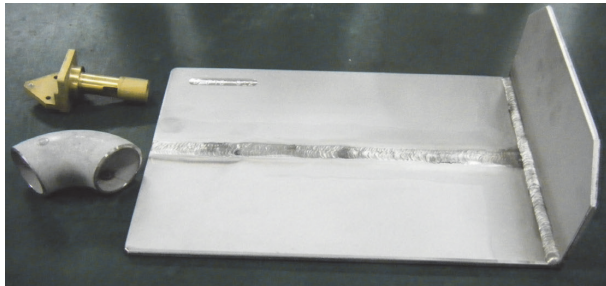
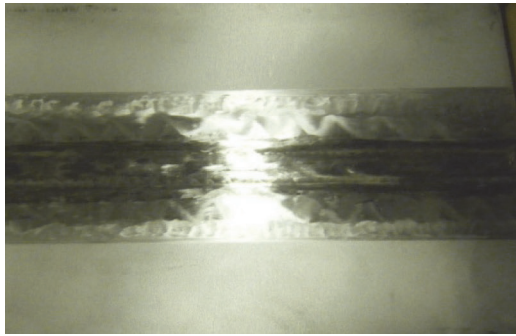


図5 PTレベル2実技研修用試験体の例

浸透探傷試験（PT）の講習では、溶剤除去性染色浸透探傷法・速乾式現像法、水洗性蛍光浸透探傷・湿式現像法及び後乳化性蛍光浸透探傷・乾式現像法の探傷を、各工程（前処理、浸透処理、除去/洗浄処理、現像処理等々）における手順や注意点から装置の取り扱いに至るまで一つひとつ丁寧に指導している。特に、水洗性蛍光浸透探傷試験や後乳化性蛍光探傷試験の経験が少ない受講者には、繰り返し訓練させることにより試験手順の確実な習得を図っている。

一通りの操作を習得したのち、時間計測を行いながら本番さながらの反復訓練を行い、時間内に作業を完了するために必要な力量の習得に努めている。

また、3手法のうち不得手と感ずるものがある場合には、受講者の希望に応じて集中的に練習できるようにしている。

さらに、探傷条件書及び指示書（記述式）の作成指導、要点の解説にも力を注ぎ、試験全体にわたって合格に必要な力量の習得に努めている。

#### 4 今後の展開

今後は、現在実施している4手法（RT、UT、MT、PT）のレベル2実技試験対策研修コースを受験時期に対応して計画通りに開催し定着化を図っていく。また、レベル1実技試験対策研修、ETレベル2実技試験対策研修等、技術者を目指す人のニー

ズに沿った研修の充実化を目指していく。その他に、技量維持のためのリフレッシュ（復習）研修、スキルアップ研修、受験申請に必要な訓練（講義、実習）レベル3再認証支援としての実技能力証明等の実施についても検討している。

また、ISO/TS 25108:2018 Non-Destructive Testing – NDT Personnel training organizationへの対応も現在進めているところである。

#### 5 まとめ

当協会では実施している非破壊試験技術者の資格取得、資格継続を支援する“JIS Z 2305:2013対応のレベル2実技試験対策研修”について述べた。

工業製品の健全性維持は、安心した社会生活を続けるために大切であり、その意味で非破壊試験は極めて重要な役割を担っている。一方で、非破壊試験の信頼性は人的要因により左右され易く、とくに試験技術者における実技面での高い技量の習得及び維持が不可欠である。このため、当協会では資格取得及び継続を目指す技術者に提供する研修を開催してきた。今後は、資格取得及び継続後もさらなる技量向上及び技量維持（技量低下の防止）を図り現場で重用される技術者を目指していただくための研修を提供できるように努めていく。これまでに述べた内容の詳細をお知りになりたい場合は、是非当協会ホームページ

[http://www.japeic.or.jp/gyoumu/yousetsu\\_kensyu/gyoumuichiran/yousetuhihakai.htm](http://www.japeic.or.jp/gyoumu/yousetsu_kensyu/gyoumuichiran/yousetuhihakai.htm) をご覧いただきたい。

#### 参考文献

- 1) (一社)日本非破壊検査協会 認証事業本部  
「JIS Z 2305:2013 認証制度のご案内」 JSNDI GA1 Rev.20190701
- 2) (一社)日本非破壊検査協会 認証事業本部  
「資格試験のレベルと試験内容（新規試験、再認証試験）と参考文献」 JSNDI GA2 Rev.20190701
- 3) (一社)日本非破壊検査協会 認証事業本部  
「JIS Z 2305:2013 実技試験で使用する試験体について」のお知らせ（第4報） JSNDI 2014.11.5

## 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に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
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
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 anticorrosion 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カプロジェクト 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

## 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
	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

非破壊	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 高本敏行	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 メルバルク京都	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
	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応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 古村一朗 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 $\alpha$ 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
	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
溶接	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 濟州島 ロッテホテル	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	

非破壊	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
	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	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
			程 衛英 上山芳教 塚田啓二	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	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
			山本敏弘 古川 敬 他	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 International 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	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
			齊藤直樹 西川 聡 野田和彦	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合金溶接部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。回原子炉圧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「鍛造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。

本技術レビューには、2件の非破壊検査技術に関する研究、4件の規格基準に関する調査、また、研究トピックス、非破壊検査技術研修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.15 2019 (非売品)

---

発行日 2019年11月27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.15 2019



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