

溶接・非破壊検査技術センター

# 技術レビュー

Vol.13 2017

研究報告

欠陥検出評価技術に関する研究  
溶接継手の健全性確保に関する研究  
技術基準・規格化関連調査

研修・講習事業紹介

研修・講習事業への取り組み

**JAPEIC**  
JAPAN POWER ENGINEERING AND INSPECTION CORPORATION

一般財団法人 発電設備技術検査協会

<b>巻頭言</b>	<b>設備保全の効用の「見える化」で魅力のある研究領域へ</b> ..... 2 東北大学教授 内一 哲哉
<b>ご挨拶</b>	..... 4 理事長 藤富 正晴
<b>トピックス</b>	NDEシンポジウム2016を開催しました ..... 5 「漏洩磁束法における評価方法」の特許登録 ..... 5 世界初!ショットピーニングを実用レベルで解析可能なシステムを開発 —溶接継手の信頼性向上のために— ..... 6
<b>研究報告</b>	<b>欠陥検出評価技術に関する研究</b>
	<b>強磁性体における欠陥検出・評価の電磁気シミュレーション</b> ..... 7 程 衛英
	<b>POD分析を利用した非破壊試験の信頼性評価について</b> ..... 14 直本 保, 山本 敏弘
	<b>超音波フェーズドアレイ法の探傷条件設計における 超音波探傷シミュレーションの活用</b> ..... 23 上山 芳教, 古川 敬
	<b>溶接継手の健全性確保に関する研究</b>
	<b>ショットピーニングで付与した圧縮残留応力の持続性を予測するための FEM解析手法の開発</b> ..... 29 西川 聡, 古川 敬 ほか
	<b>技術基準・規格化関連調査</b>
	<b>火技解釈におけるマンホールカバーの最小厚さに関する検討</b> ..... 35 佐藤 長光, 鹿島 光一
	<b>ASME Section I におけるPWHTの免除条件の改正動向</b> ..... 40 大石 勇一
	<b>火技解釈の規定の捉え方について</b> ..... 45 長谷川 忠之
<b>研修・講習 事業紹介</b>	<b>研修・講習事業への取り組み</b> ..... 49 牧原 善次
<b>成 果</b>	(1)出願特許一覧 ..... 55 (2)学協会誌等への論文発表 ..... 56 (3)学協会等への口頭発表 ..... 59 (4)論文等表彰 ..... 63

## 魅力のある研究領域へ 設備保全の効用の「見える化」で



東北大学教授

内一 哲哉

大学において、設備保全や非破壊検査について研究を行っていることから、どのようにしたらこの研究領域が若い人たちにとって魅力的に見えるのか、考えさせられることがしばしばある。ロボットや航空、宇宙といった華々しい分野に比べて、どうしても地味である。材料劣化、破壊力学、非破壊検査に関する研究は、世の中の様々なプラントやインフラストラクチャーの安全・安心に関わる重要なものであると訴えても、ピンとこない。技術開発によって得られる効用という技術の光の部分に直接関係するものではなく、事故やトラブルといった技術の影の部分なるべく小さくする取り組みだからであろうか。すなわち、消極的なイメージと技術の効用の分りにくさという2つの問題がある。

吉川弘之氏が現代社会において我々が直面する科学技術の影の部分、即ち環境、貧富、安全、健康などの困難な問題を解決するために、「領域性と視点の限定によって構築された現在の学問」から「領域を否定し、どの視点も取り入れることが可能な新たな学問分野の構築」を提唱されたのは、20年以上も前のことである。また、従来の演繹を基盤とする学問ではなく、アブダクション、即ち帰納的な手法を基盤とする学問の必要性も謳われた。確かに設備保全の分野をみれば、材料劣化、破壊力学、非破壊検査、安全工学、信頼性工学などの様々な領域の視点を総合することが重要である。例えば、我々が取り組んでいる非破壊検査の分野をみれば、小さな亀裂の検出確率を懸命に向上させ、サイジングの精度を高めるために日々努力をしているが、いったいそれが設備保全の中でどれほどの価値があるのか分からないのである。おそらく他の分野でも状況は同様であろう。この問題の解決のためには関連する他の研究分野との連携が必要である。また、膨大な保全記録、検査データから保全計画の意思決定に反映させるための帰納的な手法も課題である。まさに、研究領域の融合とアブダクションを基盤とする手法が必要なのである。

設備保全に関連する様々な分野の研究者や産業界の方々が連携し、新しい研究領域を開拓することが必要であるが、そのためには冒頭に述べた魅力や夢といったモチベーションを共有することが必要である。それは保全を構成する各研究領域の進展が、設備保全という全体においてどれだけ効用をもたらすかということが、従事する関係者や一般社会に分かりやすく見えないといけない。「見える化」である。一方昨今、モノのインターネット(IoT)、ビッグデータ解析、人工知能(AI)などの技術が注目されている。またこれらの技術を製造業に適用して高度化するインダストリー 4.0などの動きや、サイバー空間に製品やプラントなどの実世界と同じモデル(デジタルツイン)を構

築するCyber Physical System (CPS)なども提唱されている。航空機エンジンやガスタービンの保守において、デジタルツインは既に実用化されているとのことだが、このCPSという概念は新しい設備保全の学問領域を切り開くツールとしても重要ではないだろうか。即ち、保全に関連する研究分野が融合し、そこから知識を抽出するプラットフォームとして機能しないだろうか。デジタルツインの中で材料劣化、損傷に関連するモデルを組み込んだシミュレーションが実行され、それがオンラインモニタリングや定期検査のデータにより更新され、モデルの精度が増していく。そしてシステムの破損確率やリスクが「見える化」する。

人工知能はかつてブームを迎えその後90年代以降に停滞した。また、サイバー空間において実世界のシミュレーションを行う統合環境に関する構想も90年代よりいくつも提唱されてきた。いずれも、理論や構想にとどまっていた。今あらためて注目されているのは、計算機的能力向上やインターネットなどのインフラの整備が整い、実用化の機が熟したからであろう。人工物の安全のための学問領域の創成も20年以上前に構想されたが、今IoT、AI、CPSをはじめとする技術の波によって、いよいよ具体化する時代を迎えている。設備保全の効用が「見える化」し、夢をもたらず研究領域として社会に認識されるのではないか。そのためには、設備保全に関連する様々な分野の研究者の連携とともに、産業界と学界の連携も非常に重要である。発電技検の溶接・非破壊検査技術センターでは、非破壊検査から材料強度、破壊力学に至るまでの設備保全に関する研究を産業界とともにやっている。新しい設備保全に関する研究領域を開拓するための核となることを期待したい。



## ご挨拶

一般財団法人 発電設備技術検査協会  
理事長

藤富 正晴



2016年度における協会、溶接・非破壊検査技術センター（NDEセンター）の研究活動と成果を技術レビュー Vol.13として取りまとめましたのでご高覧いただきたいと思います。

当協会は、1970年の創立以来、発電設備の品質の維持・向上及びこれらに係る技術の進歩、発展を図り、人命及び財産の安全の確保に寄与するとともに、電気事業及び電機工業の健全な発展に資する事を目的として努力してまいりました。今後とも、顧客の皆様が直面する多様な課題について丁寧な対応に努め、審査、検査、認証、規格基準、非破壊検査・研修・講習の業務分野や、規格基準における自主調査、試験研究における自主調査研究で、更に一層確実・的確に業務を遂行してゆく所存です。

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

試験研究における自主研究では、NDEセンターにおいて、①超音波探傷シミュレーション／可視化技術、②フェーズドアレイ法、ガイド波などの超音波探傷技術、③電磁気シミュレーション／探傷技術、④残留応力・塑性ひずみ評価技術、⑤耐熱鋼余寿命予測技術、⑥非破壊検査e-ラーニング教材などのセンターが保有しているコア技術をより一層深化させ、現場ニーズに適合できるように研究活動に取り組んできました。また、新たなコア技術として、非線形超音波計測技術、高感度磁気計測技術、電磁超音波探触子のシミュレーション技術及び非破壊試験データの信頼性評価技術の研究活動に取り組んでいます。

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

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

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

## NDEシンポジウム2016を開催しました。

平成28年11月18日（金）

東京大学  
山上会館大会議室

当協会は、平成28年11月18日（金）に東京大学山上会館大会議室において、NDEシンポジウム2016を開催しました。

本シンポジウムはテーマを「構造健全性と非破壊評価」と題し、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は、溶接継手部を含めた構造物の健全性を確保することが必要不可欠であり、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実なものに高めていくことが重要という趣旨に基づいて企画したものです。

当協会理事長の藤富より開会の挨拶が行われた後、基調講演として大阪大学大学院マテリアル生産科学専攻の望月正人教授より「プロセスメカニクスから非破壊評価、そして保全の高度化への展望」と題して、ものづくりの基盤技術である溶接プロセスにおける溶接残留応力の解析、実測技術を紹介いただき、保全の高度化に向けた展望についてご講演いただきました。

招待講演として、電力中央研究所軽水炉保全特別研究チームの太田丈児チームリーダーより「軽水炉の保全研究への取組みと非破壊検査への期待」と題して、電力中央研究所における保全研究への取組みの紹介と、評価研究へ活用できる非破壊検査手法の



講演される望月教授



シンポジウム会場の様子

開発に関する期待についてご講演いただきました。

一般公演では、三菱重工業株式会社の鶴田孝義氏より「原子力発電所の40年超え運転に向けた特別点検について－非破壊検査技術の紹介－」、株式会社IHIの畠中宏明氏より「火力発電ボイラ蒸気配管を対象とした超音波探傷技術」についてご講演いただきました。

当協会から「超音波探傷試験技術者の探傷技量に及ぼす教育・訓練の有効性に関する検討」及び「改良9Cr-1Mo鋼溶接継手のクリープ強度に及ぼすPWHT条件の影響」について2件の技術報告をいたしました。

## 「漏洩磁束法における評価方法」の特許登録

平成29年5月26日に「漏洩磁束法における評価方法」が特許第6146828号として登録されました。

本方法は、低磁化漏洩磁束法により強磁性体材料（鉄鋼材料）に対する減肉や材質変化を評価する方法です。「低磁界・低磁束密度領域」での材料の磁気特性に着目し「初期漏洩抵抗率」と呼ぶ新たな検出パラメータを用いて、初期漏洩抵抗率と減肉（板

厚）や材質変化とのマスターカーブを作成し、評価する方法です。

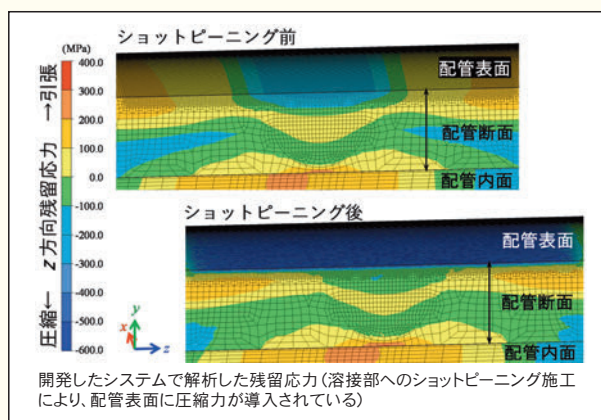
従来の漏洩磁束法では、検査対象部位を強力に磁化させる必要があるため探傷装置が大型になり、また検査後の消磁などの後処理が必要など、可搬性や簡便さに課題がありましたが、本方法では、装置の小型化・軽量化により現場で効率的に評価できます。

# 世界初！ショットピーニングを実用レベルで 解析可能なシステムを開発 —溶接継手の信頼性向上のために—

公立大学法人大阪府立大学大学院工学研究科航空宇宙海洋系専攻海洋システム工学分野、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構物質科学研究センター、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の共同研究グループは、原子炉構造物の溶接部における応力腐食割れを抑制するための表面改質技術のひとつである「ショットピーニング」工法によって発生する圧縮力（＝圧縮残留応力）を、実用レベルで解析するシステムの開発に成功しました。

## ■本研究成果のポイント■

- ・多数のショット粒の衝突による圧縮残留応力の発生過程を実用レベルで解析するシステムを開発
- ・本解析手法を用いて、実機構造物に熱応力や地震荷重などの外力が作用した場合の圧縮残留応力の持続性も評価可能
- ・実機を模擬した円筒多層溶接試験体の残留応力をX線回折によって計測し、解析システムの妥当性を確認



原子炉溶接部の長期安全性を確保するためには、部材に加わる引張力と腐食環境とが同時に作用して発生する“割れ”である応力腐食割れを防止することが重要であり、その防止策のひとつとして、「ショットピーニング工法」（以下「SP」：Shot peening）が用いられています。SPは、部材表層に圧縮残留応力を導入することで割れの発生を抑えています。これまで、SPによって導入される圧縮残留応力や、そのプラント稼働期間中における持続性を予測する手法はありませんでした。そのため、SPの施工条件の決定やSP施工後の耐力腐食割れ性の評価のためには、多量の実験を行う必要がありました。

本研究グループは、超大規模超高速非線形構造解

析手法である「理想化陽解法有限要素解析手法」にSPの力学モデルを組み込むことで、SPによって導入される圧縮残留応力とその持続性を実用レベルで予測できる解析システムの開発に初めて成功しました。本研究成果は、原子炉溶接部における応力腐食割れ発生リスクの低減に有効であり、また、波及効果として、SPが適用されている船舶や橋梁などの溶接構造物や自動車の機械部品などの開発期間短縮や強度信頼性向上への貢献が期待されます。

本研究は、文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」により実施された「原子力発電機器における応力改善工法の長期安全性評価のための基盤技術開発」の成果の一部です。



# 強磁性体における欠陥検出・評価の 電磁気シミュレーション

Electromagnetic Nondestructive Evaluation of Defects in Ferromagnetic Structures

溶接・非破壊検査技術センター 程 衛英

The electromagnetic nondestructive evaluation of cracks in ferromagnetic structures was investigated in terms of the changes of eddy current stream and magnetic flux flow. Numerical simulation showed that both the changes result in detectable signals. The amplitude and phase angle of signals comply with different variation patterns in terms of the orientation and location of cracks, the applied frequencies, and etc. When a back-side crack is detected under the configurations of perpendicular to and parallel to the eddy current streams, respectively, the phase difference of signals of the two configurations is a linear function of crack depth. The phase difference can be used to estimate the depth of a back-side crack.

**Keywords** *Ferromagnetic, crack, detection, evaluation, electromagnetic, numerical simulation*

## 1 はじめに

渦電流探傷 (ECT: Eddy Current Testing), 交流電磁場測定法 (ACFM: Alternating Current Field Measurement), 漏洩磁束法 (MFL: Magnetic Flux Leakage) はよく使われている電磁気非破壊検査・評価法である<sup>[1, 2]</sup>。渦電流探傷 (ECT) と交流電磁場測定法 (ACFM) は, 試験体に交流磁界を印加して渦電流を発生させ, 検出センサが表面や表層欠陥による渦電流の乱れを検出することによって, 欠陥を検出する探傷方法である。渦電流の発生と乱れは ECT と ACFM 探傷法の基本現象である。電磁誘導によって発生する渦電流が浸透深さ ( $=\sqrt{1/(\pi f \sigma \mu)}$ ,  $f$ : 励磁周波数,  $\sigma$ : 導電率,  $\mu$ : 透磁率) に制限されるため, ECT は高透磁率・高導電率の強磁性体深部および裏面損傷の検査に適用困難である。また, 磁気特性のばらつきによる磁気ノイズが欠陥による信号より大きくなる可能性もあり, 強磁性体における欠陥の識別やサイジングは一層難しくなる。よって, ECT は非磁性体の表面や表層欠陥しか適用できない

と認識されている。ACFM は, 磁気センサを用いて一定範囲内に流れている一様渦電流の乱れを検出することによって欠陥を検出する電磁気検査方法である。ACFM は非磁性や磁性体における表面開口欠陥の検出に使われている。漏洩磁束法では, 永久磁石や直流または交流電磁石を用いて強磁性試験体に磁界を印加し, 欠陥などの不連続部から漏れる磁束を検出することによって強磁性体における欠陥を検出する方法である。交流 MFL を実施する場合, 励磁磁界が変化しており, 試験体に渦電流が誘導される。

従って, ECT や ACFM, 交流 MFL の何れを用いて欠陥検査を行う際, 被検体に渦電流が流れている。渦電流の流れが欠陥の長手方向に直交する場合, 渦電流が大きく乱られ, 渦電流探傷信号は最も大きい。渦電流の流れが欠陥の長手方向と一致している場合, 渦電流の流れがほとんど妨げられず, 渦電流の乱れによる信号はほとんど現れない。一方, 強磁性体において, 欠陥が磁束と直交しているため, 欠陥の開口部上方に磁束が漏れる。この漏洩磁束の検知によって, 欠陥は検出可能である。よって, 強磁性



体の場合、渦電流効果と磁束漏洩効果の何れにも欠陥検出に利用可能と考えられる。さらに、欠陥の長手方向と励磁コイルの配置による渦電流や磁束の流れによって、渦電流の乱れと磁束漏洩は同時に現れることもあり得る。このような場合に、渦電流の乱れのみに着目する ECT や ACFM、また、磁束漏洩のみに着目する MFL と異なる現象が現れ、両方を含む探傷信号にはこれらの探傷手法で得られる信号と異なる特徴があると考えられる。

渦電流効果と漏洩磁束効果を同時に作用する欠陥信号が複雑になる一方、より多くの情報が含まれ、欠陥識別や欠陥サイジングに活用できると考えられる。本研究では、強磁性体における欠陥検査における基本現象や信号挙動を理解するために、まず、高周波励磁や低周波励磁における強磁性体の表面欠陥検査をシミュレーションし、それらの信号を分析した。それから、低周波励磁による裏面欠陥検査をシミュレーションし、渦電流や漏洩磁束が引き起こす信号を分析した上、裏面欠陥サイジングに適す特徴量を採り出した。

## 2 電磁場の分布および乱れ

正弦波交流電流を用いて電磁非破壊検査を行う場合、支配方程式は以下の通りである。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{d\mathbf{B}}{dt} = -i\omega\mu\mathbf{H} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma\mathbf{E} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (4)$$

ここで、 $\mu$ 、 $\sigma$  はそれぞれ透磁率と導電率であり、 $\omega$  は角周波数、 $i = \sqrt{-1}$  である。

式 (1) ~ (4) より以下の方程式が得られる。

$$\nabla^2 \mathbf{H} = i\omega\mu\sigma\mathbf{H} \quad (5)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = i\omega\mu\sigma\mathbf{E} \quad (6)$$

Cartesian 座標系において、 $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  である。Fig.1 に示すように、試験片表面を X-Y 面、表面に垂直な方向を Z 方向に設定される。磁場  $\mathbf{H}$  や電場  $\mathbf{E}$  の試験片内 (Z 方向) への浸透が X-Y 方向への拡散より十分小さい場合、 $\nabla^2 \approx \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  である。従って、方程式 (5) と (6) は以下のように書き直せる。

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2} = i\omega\mu\sigma\mathbf{H} \quad \text{且つ} \quad \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} = -i\omega\mu\sigma\mathbf{E} \quad (7)$$

$k^2 = i\omega\mu\sigma$ 、 $k = a + i\beta$  ( $a = \beta = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$ ) に表記しておく、式 (7) の解は以下の通りである。

$$\mathbf{E} \approx E_0 e^{kz} = E_0 e^{(a+i\beta)z} \quad (8)$$

$$\mathbf{H} \approx H_0 e^{kz} = H_0 e^{(a+i\beta)z} \quad (9)$$

ここで、 $E_0$  と  $H_0$  はそれぞれ試験片表面の電界強度と磁界強度である。電界強度と磁界強度は位相遅延しながら指数関数で減衰して試験片中へ拡散する。

一様な渦電流が Y 方向に流れる場合、 $J = J_y = \sigma E$ 、 $E = E_y$ 、また、 $\frac{\partial E_y}{\partial x} = 0$  である。式 (1) により、

$$H_x = \frac{1}{i\omega\mu} \frac{\partial E_y}{\partial z}, \quad H_z = -\frac{1}{i\omega\mu} \frac{\partial E_y}{\partial x} = 0.$$

すなわち、 $H = H_x$ 。

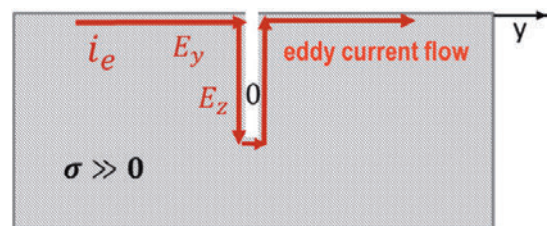
$$\mathbf{E} \approx E_y = E_{y0} e^{kz} \quad (10)$$

$$\mathbf{H} \approx H_x = H_{x0} e^{kz} = \frac{k}{i\omega\mu} E_{y0} e^{kz} = e^{(\frac{\pi}{4})i} \sqrt{\frac{\sigma}{\omega\mu}} E_{y0} e^{kz} \quad (11)$$

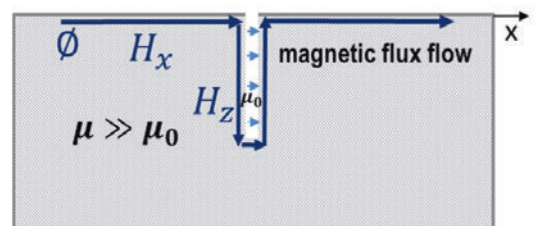
式 (11) に、半無限大空間において、磁界強度  $\mathbf{H}$  が電界強度  $\mathbf{E}$  より  $45^\circ$  遅れ、また、磁界  $\mathbf{H}$  と電界  $\mathbf{E}$  の比は  $\sqrt{\frac{\sigma}{\omega\mu}}$  であることを示す。無論、半無限大空間ではない場合、遅延角度と比の値は変わる。

長手 X 方向の欠陥が Y 方向に流れる渦電流と直交しているため、渦電流は大きく乱れる。渦電流は十分長い直交欠陥によって、欠陥の底面へ回り込み、欠陥の側面に  $J = J_z$  である。欠陥の存在による渦電流密度の変化が小さいため、 $J_{y|crack\ free} = J_{y|cracking}$  である。電流の連続性 ( $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ ) により、 $J_{y|cracking} = J_{z|side\ face}$  である。

$E = J/\sigma$  であるため、渦電流密度の変化は電場強度



(a) change of eddy current flow/electric field



(b) change of magnetic flux flow/magnetic field

Fig.1 Change of electric and magnetic fields when cracks are perpendicular to and parallel to the eddy current flow, respectively.

の変化と等価である。従って、

$$E_z|_{side\ face} = E_y|_{cracking} = E_y|_{crack\ free}$$

渦電流に直交な欠陥による電界強度と渦電流の流れの変化は Fig.1 (a) に表す。欠陥内の磁界強度は以下の式で計算される。

$$H_y = \frac{\partial E_z}{\partial y} = 0, \quad H_x = \frac{1}{i\omega\mu} \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (12)$$

式 (12) に、欠陥があっても、磁界強度が変化しないことを示した。すなわち、欠陥が渦電流と直交する場合、欠陥信号は電界変化によるものである。

幅狭い欠陥の長手方向が渦電流と平行している場合、渦電流の流れはほぼ変化しない。非磁性の試験体において、欠陥内と試験体の透磁率がともに  $\mu_0$  であるため、渦電流や磁束の流れがともに変化せず、欠陥による信号はほとんどない。強磁性体において、欠陥内の透磁率  $\mu_0$  が試験体の透磁率より大幅小さいため、磁束の大部は欠陥の側面に沿って流れるようになる（なお、わずかの一部は欠陥中に流れる）。磁束が連続、すなわち、 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$  のため、 $H_x \approx H_z|_{side\ face}$  である。Fig.1 (b) に欠陥が渦電流に平行している場合磁束の流れを示す。強磁性試験体において、渦電流に平行している欠陥は欠陥上方に漏れる磁束の検知によって検出可能である。

渦電流の浸透は励磁周波数、試験体の導電率、透磁率などによって変わる。高周波励磁の場合、渦電流と磁界が薄い表面層に集中しており、電界と磁界も欠陥表面に集中している。一方、低周波励磁の場合、渦電流と磁束は試験体中より広い領域に浸透しており、渦電流と磁束の乱れもより広い範囲に発生する。よって、欠陥信号の特徴が異なると考えられる。

### 3 強磁性における表面欠陥検査のシミュレーション

本研究の目的はアクセスにくいインフラ鋼構造物に発生した欠陥の検出・評価である。電磁気手法の欠陥検出性を検討するために、大型の Double-D コイルプローブ (Fig.2) を用いてプローブから遠く離れた欠陥を検出することをシミュレーションした。

Double-D 型コイルは対称に 2 個並び互いに逆方向きの電流が流れる D 字型のコイルで構成される。両励磁コイルは平均直径 120mm、径方向幅 4mm、高さ 10mm の半円である。2 個の D 字コイルの間 (D 字の直線部分間) の距離は 80mm である。各励磁コイルの巻き数は 100 回巻である。隣りあう D 字の直線部分に同じ向ききの 100mA RMS の交流電流を流し、試験体の上に配置すると、両コイル間の下方に同じ向き (D 字の直線方向) の渦電流が発生する。超伝導 SQUID センサを用いて磁束変化を検出することを想定し、超伝導線で巻かれた検出コイルが両 D 型励磁コイルの間の中心上方に設置されると仮定した。超伝導線コイルの平均直径は 52.5mm、径方向幅は 5mm、高さは 11mm、巻き数は 50 回巻である。検出コイルの中心は励磁コイルの中心と同じ高さであり、向き (検出コイルの法線方向) はそれぞれ Fig.2 の座標系の X 方向と Z 方向で、X 方向と Z 方向の磁束を検出する。以降、X 方向の磁束を検出するピックアップコイルを 'px'、Z 方向の磁束を検出するピックアップコイルを 'pz' と表記する。超伝導コイルは冷却する必要がある。その冷却材容器の厚みと 'px' コイルのサイズを考え、励磁コイルの底面が試験片より 35 mm 上に設置されると仮

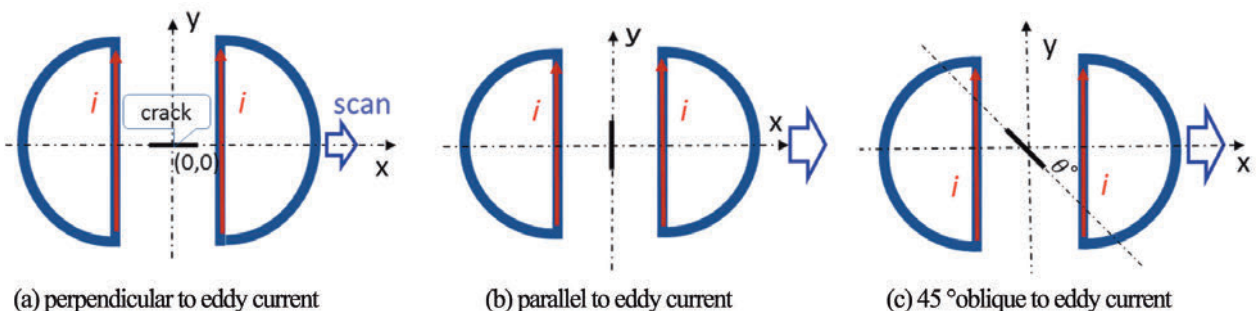


Fig. 2 Configuration of the double-D excitation coil and the crack

定した。プローブが空气中に配置されるとき、X方向磁束を検出する‘px’コイルとZ方向磁束を検出する‘pz’コイルを通る磁束はともに0であるため、プローブが試験体上に配置されたとき検出コイルが検出した信号は全て試験体によるものである。即ち、このプローブは‘self-nulling’の仕組みになっている。

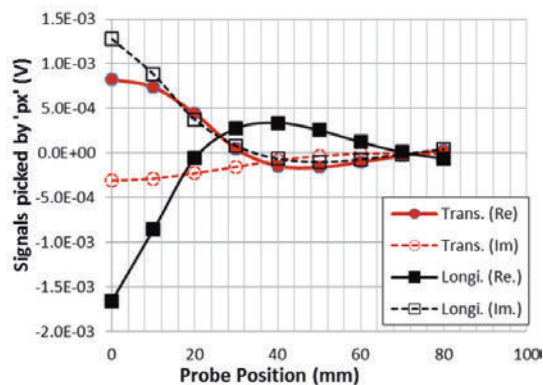
以上のプローブ（励磁コイルと検出コイルのユニット）を用いて、厚さ6mm、直径600mmの十分大きな円盤状強磁性被検体（比透磁率300、導電率4.1MS/m）の中心にある長さ50mm、幅0.4mm、深さ1mm、2mm、3mm、4mm、5mmの表面開口欠陥を検出することをシミュレーションした。

### 3.1 高周波励磁による表面欠陥検出のシミュレーション

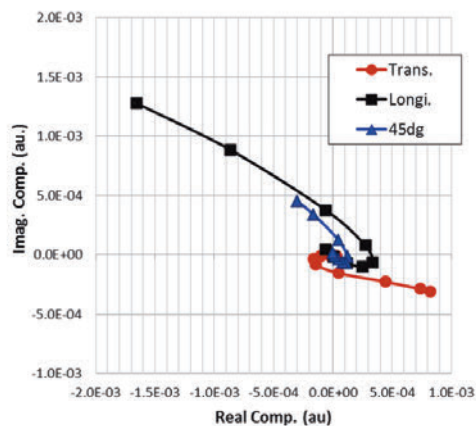
検査対象が表面欠陥であるため、通常ECTに使われる高周波(10kHz)励磁で欠陥を検査する。また、欠陥の長手方向は渦電流と磁束の何れの乱れを起こすかを定める重要な要素であるため、ここでは、欠陥がそれぞれ渦電流と直交 (Fig.2 (a) Y方向に流れる渦電流に対し欠陥長手方向はXである)、平行 (Fig.2 (b) 欠陥長手がY方向である)、45°斜め (Fig.2 (c) 欠陥長手方向はX軸と135°になる) であることを仮定し、シミュレーションを行った。

まず、深さ2mmの表面欠陥が渦電流と直交する場合 (Fig.2 (a))、プローブが欠陥中心 (X = 0, Y = 0) から欠陥長手のX方向へ10mmピッチで走査することをシミュレーションし、各走査点における‘px’および‘pz’で得られる信号を計算した。Fig.3に‘px’が検出した深さ2mmの表面欠陥による信号を示す。Fig.3 (a)には走査点ごとに变化する信号の実数と虚数成分を示す、(b)には各走査点の信号を複素数平面上に描いたLissajous波形を示す。欠陥長手方向が渦電流と直交するため、この信号は‘Trans.’と表記する。すなわち、‘Trans.’信号は渦電流の乱れによるものである。プローブが欠陥中心上 (X = 0) に配置されたとき信号は最も大きい、プローブが欠陥中心から長手方向に移動するにつれ、信号はだんだん小さくなる。次は、Fig.2 (b) に示す長手方向がY方向の欠陥に対し、同様のシミュレーション解析を行った。このとき欠陥長手方向が渦電流と平行となるため、この信号は‘Longi.’と表記する。欠陥長手方向が渦電流の流れ

と同じであり、渦電流の乱れはほとんど発生しない。一方、磁束はX方向に流れていて、磁気回路に欠陥である‘不連続’部分が現れる。よって、磁束漏れが発生する。プローブが欠陥の中心上に配置されたとき、欠陥開口部から漏れる磁束は最も大きい。プローブが欠陥中心からX方向へ離れるにつれ、漏れ磁束は小さくなる。すなわち、プローブが欠陥中心上に置かれたときの‘Longi.’信号は最も大きい (Fig.3 (a))。このときのLissajous波形を Fig.3 (b) に示す。渦電流の乱れによる‘Trans.’信号と磁束の漏れによる‘Longi.’信号はほぼ同じレベルである。すなわち、強磁性体において、渦電流に直交する欠陥と渦電流に平行する欠陥はともに検出可能である。また、Fig.3により‘Trans.’信号と‘Longi.’信号で130°程度の位相差があることがわかる。さらに、欠陥長手方向が渦電流の流れに斜め45°の場合 (Fig.2 (c)) における検査もシミュレーションした。このLissajous波形は‘45dg’と表記して‘Trans.’と‘Longi.’信号と一緒に Fig.3 (b) に示す。この



(a) Chart of signals taken by pickup coil ‘px’



(b) Lissajous of signals taken by pickup coil px

Fig.3 Detection of 2mm deep surface-breaking cracks, signals are taken by pickup coil ‘px’ at 10kHz. (au: arbitrary unit)



場合、欠陥が渦電流の流れを妨げるとともに欠陥による磁束の漏れも発生する。この二つの効果による信号は  $130^\circ$  ほどの位相差があるため、二つの効果をあわせた斜め欠陥の信号はどちらか一方の効果による信号より小さく、位相は振幅が大きい方の効果に左右される。以上のシミュレーション解析で欠陥の方向とコイル配置による信号の違いが明らかにした。

以上のシミュレーションには、強磁性体にある欠陥が渦電流と直交するときも平行するときも検出可能であることを示した。一方、欠陥が渦電流と斜め  $45^\circ$  になるときの信号が最も小さく、検出は困難である。すなわち、渦電流の流れが欠陥に直交な状態から平行な状態へプローブを回すと、信号はまず 'Trans.' から '45dg' へ変化して、最終的には  $90^\circ \sim 180^\circ$  間の位相差がある 'Longi.' 信号に変わる。欠陥は多方向により検査可能と考えられる。また、'Trans.' と 'Longi.' 信号の位相関係は、欠陥の識別に利用可能と考えられる。お互いの特徴および相関関係を用いて相互チェックすることは、強磁性体における欠陥検出・識別に有意である。

深さ 1 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm の表面欠陥においても、同様なシミュレーション解析を行った。各深さの欠陥に対する信号の特徴は深さ 2 mm 欠陥とほぼ同じである。深さの変化に伴う 'px' 信号の最大振幅、最大振幅点の位相角度の変化を Fig.4 に示す。欠陥が渦電流と直交する場合に得られた 'Trans.' 信号の振幅は欠陥深さにほぼ線形な関数である。よって、'Trans.' 走査信号の最大振幅は欠陥深さ評価に適すと考えられる。'Trans.' 信号の位相は欠陥深さによってほとんど変化しない。一方、'Longi.' 信号では欠陥が深くなるにつれ最大振幅は

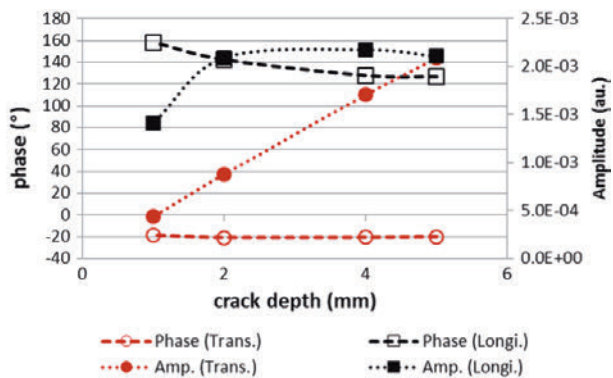


Fig.4 Change of signals' amplitude and phase angle with cracks' depth, signals were taken by pickup coil 'px' at 10kHz.

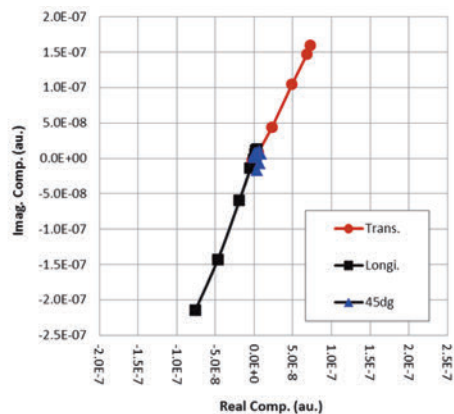
飽和してしまうが、位相は深さによって単調的に変化する。

以上のシミュレーション解析および信号の最大振幅・位相の分析により、'Trans.' 信号の振幅は欠陥深さ評価に適していて、'Trans.' 信号と 'Longi.' 信号の位相関係は、欠陥の識別に利用可能と考えられる。

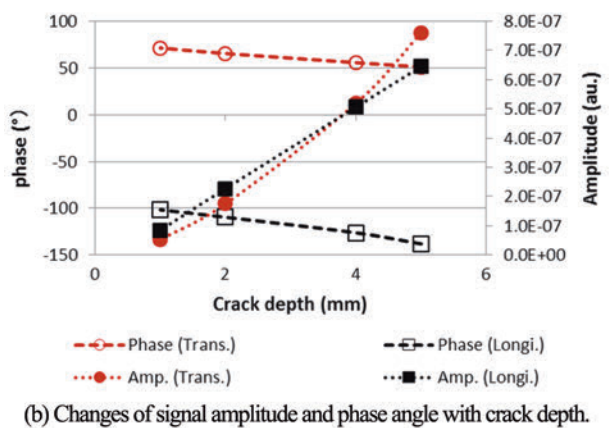
### 3.2 低周波励磁における強磁性体表面欠陥のシミュレーション

本研究の対象は裏面欠陥であるため、渦電流を被検体内により深く浸透できる低周波交流励磁が適当と考えられる。ここでは、低周波交流励磁による表面欠陥検査をシミュレーションした。

シミュレーションモデルは節 3.1 のものと同じであるが、周波数は 10kHz から 20Hz に下がった。Fig.5 (a) に 'px' コイルによる 2 mm 深さ表面欠陥の検出信号を示す。欠陥長手はそれぞれ渦電流と直交、平行、斜め  $45^\circ$  の 3 通りである。'Trans.' と 'Longi.' 信号の最大振幅はほぼ同じレベルであり、



(a) Lissajous of a 2mm deep surface-breaking crack, signals are taken by pickup coil 'px'



(b) Changes of signal amplitude and phase angle with crack depth.

Fig.5 Detection of surface-breaking cracks, signals are taken by pickup coil 'px' at 20Hz.



位相はほぼ  $180^\circ$  ずれた逆位相である。欠陥が渦電流の流れと斜め  $45^\circ$  になる場合、渦電流効果と磁束漏洩効果の信号が相殺されるため、最終的に得られた信号は 0 に近い。すなわち、 $180^\circ$  ずれの 'Trans.' と 'Longi.' を合わせた信号はほぼ 0 になる。プローブを X 軸の中心から  $0^\circ \sim 45^\circ$  回転させると、渦電流による信号はだんだん小さくなり、 $45^\circ$  の位置で信号が一番小さくなる。それから  $90^\circ$  の方向へ回すと、漏洩磁束による信号はだんだん大きくなり、 $90^\circ$  の位置で漏洩磁束による信号は最大となる。長手方向が渦電流に直交する欠陥と平行な欠陥は共に高感度で検出可能であるが、斜め  $45^\circ$  の欠陥がほぼ検出不可である。

周波数の低下によって浸透深さが深くなり、欠陥深さによる振幅変化はより線形になる (Fig.5 (b))。

#### 4 低周波励磁における強磁性体裏面欠陥検査のシミュレーション

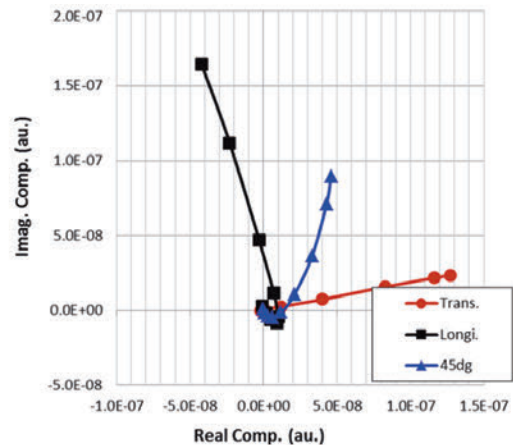
励磁周波数が 20Hz の場合、被検体厚さ 6 mm は浸透深さ (被検体の導電率を 4.1MS/m, 比透磁率を 300) のおよそ 2 倍であり、被検体裏面に流れる渦電流の密度は表面の約 13% である。節 3.1 や 3.2 のシミュレーションと同じ長さ 50mm, 幅 0.4mm の欠陥が被検体中心にあると仮定して、シミュレーションを行った。なお、欠陥は深さ 1 mm, 2 mm, 4 mm, 5 mm の裏面欠陥であり、残肉はそれぞれ 5 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm である。

Fig.6 (a) に 'px' コイルによる裏面 4 mm (残肉 2 mm) 欠陥の Lissajous 波形を示す。表面欠陥においては節 3.2 に示すシミュレーションのように、'Trans.' と 'Longi.' 信号は約  $180^\circ$  ずれた逆位相になっているが、裏面欠陥の 'Trans.' と 'Longi.' 信号の位相差は約  $90^\circ$  である。渦電流に斜め  $45^\circ$  の欠陥に対して、渦電流効果と磁束漏洩効果が全部相殺されないため、一定の振幅の信号が現れた。

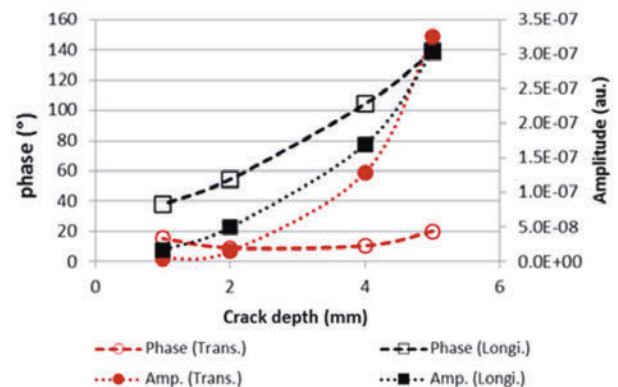
深さ 1 mm, 2 mm, 5 mm の裏面欠陥に対しても同様なシミュレーションを実施した。それらの信号の最大振幅、最大振幅点の位相を抽出し、裏面欠陥の深さによる最大振幅や最大振幅点位相の変化を Fig.6 (b) にプロットした。欠陥が深く、残肉が薄くなるにつれ、最大振幅は大きくなる。位相において、'Longi.' 信号の位相は欠陥深さに対して単調変

化しているが、'Trans.' 信号はそうではない。

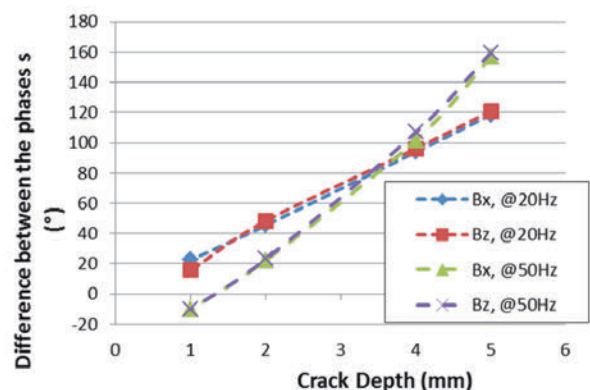
同じ欠陥に対して、渦電流が欠陥長手方向に直交と平行な場合の二つの配置において走査を行うと仮定して、'Longi.' 信号と、'Trans.' 信号の位相差を取って分析した。位相差と深さの関係を Fig.6 (c) にまとめた。'Longi.' 信号と 'Trans.' 信号の位相差が裏面欠陥の深さの線形関数であることを示した。同じ位相差をとる演算を 'pz' センサによる信号お



(a) Lissajous of a 4mm deep back-side crack, signals are taken by pickup coil 'px'



(b) Changes of signal amplitude and phase angle with crack depth.



(c) Phase difference and back-side cracks' depths. Signals are taken by pickup coils 'px' and 'pz', at 20Hz and 50Hz, respectively

Fig.6 Detection of back-side cracks at low frequency.

よび励磁周波数を 50Hz に設定した場合の信号に対しても実施した。何れの場合でも ‘Longi.’ 信号と ‘Trans.’ 信号の位相差が裏面欠陥の深さの線形関数であることを示した。この位相差のパラメータは裏面欠陥の深さサイジングに適すると考えられる。

## 5 結論

本研究では、シミュレーション解析を用いて、強磁性材における欠陥信号を分析し、欠陥の識別およびサイジングに適するパラメータを探し出した。強磁性材での欠陥検出では、渦電流効果と磁束漏洩効果がともに発生し、検出信号はこの二効果によるものである。また、この二効果による信号の位相が一定の関係を持っているため、信号の相互チェックによって欠陥を他の磁気ノイズと区別可能と考えられる。さらに、渦電流効果と磁束漏洩効果による信号の位相差は裏面欠陥深さの線形関数であり、裏面欠

陥深さサイジングに適用可能と考えられる。

## 参考文献

- [1] J. Blitz, *Electrical and Magnetic Methods of Nondestructive Testing*, (Adam Hilger, Bristol, Philadelphia and New York, 1991) , pp.89-152.
- [2] *Nondestructive Testing handbook, Vol. 5, Electromagnetic Testing*, edited by S.S. Udpa, P. O. Moore, (American Society of Nondestructive Testing, Columbus, OH, 2004) .
- [3] M. C. Lugg, “Alternating Current Field Measurement,” in *Electromagnetic Testing*, edited by S. S. Udpa, P. O. Moore (American Society of Nondestructive Testing, Columbus, OH, 2004) , pp. 257.
- [4] D. Jiles, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials* (Chapman & Hall, 1998) , pp. 44.



程 衛英

# POD分析を利用した非破壊試験の信頼性評価について

Toward reliability assessment of NDT based on the POD analysis

溶接・非破壊検査技術センター 直本 保, 山本 敏弘

POD (Probability of detection) analysis is one of effective method to evaluate the capability of NDT method. In this report, we investigated the basic concepts on POD analysis and the calculation methods of POD curve based on statistical idea by literature documentation. In addition, we carried out the POD analysis for weld discontinuities in ferritic and austenite steel plates by UT (ultrasonic testing) as an example of POD analysis.

**Keywords** *probability of detection, POD, nondestructive testing, NDT, reliability*

## 1 はじめに

構造物の健全性評価を行うためには、超音波探傷試験などの非破壊試験 (NDT) により欠陥の有無や欠陥の種類、位置、サイズ (長さ・高さ) などを把握することが必要である。NDTの結果は、その検査手法、要領書、装置、検査部位 (形状・材質など)、欠陥の種類により異なるため、適用される NDT 手法の能力、精度、信頼性を評価する必要がある。NDT 手法の能力を評価する方法の一つとして、POD (Probability of detection) 分析があり、POD 分析により NDT 手法の欠陥検出能力を客観的に分析することができ、POD 曲線を描くことにより、欠陥検出能力を視覚化することができる。POD 分析は 1960 年代後半からアメリカの NASA が中心となって研究が行われ発展し<sup>[1]</sup>、現在 NASA では NDT 手法の認証に POD 分析が適応されている<sup>[2]</sup>。また、構造物の健全性評価において、影響因子のばらつきや不確かさを考慮して定量的・合理的に健全性評価を行う確率論的破壊力学 (PFM: Probabilistic

Fracture Mechanics) において、NDT による亀裂の検出率は重要なパラメータの一つであり<sup>[3]</sup>、適用される NDT 手法の POD をモデル化 (数値化) することが必要である。

今後 NDT 試験能力の客観的評価の重要性は増すと予想されることから、今回我々は、以下の項目について文献調査等を行い、基礎的な知見の整理を行った。

- ・POD に影響を与える因子である、「欠陥検出可否」、「S / N 比」、「識別しきい値」と POD との関係 (第 2 章)。
- ・統計的手法による POD 分析 (第 3 章)。

また、POD 分析の一例として、超音波探傷試験 (UT) による炭素鋼およびステンレス鋼の溶接金属部の内部欠陥 (溶接欠陥) に対して行った POD 分析の結果を示す (第 4 章)。

## 2 NDT試験結果 (検出可否、信号強度) と PODの関係について

POD を算出するためには、欠陥の検出可否の分類

や、検出可否に影響を与える NDT の信号の強度と分布の関係を把握する必要がある。ここでは、文献 [4], [5] の内容をもとに、NDT 検査結果と POD の関係や、POD 曲線と NDT 信号の強度や分布の関係について概説する。

## 2.1 欠陥検出可否と POD

NDT による欠陥検出の検査結果は、下記に示すように 4 つに分類することができる。

True positive (TP) : 欠陥が存在し、非破壊検査によって検出された。

False positive (FP) : 欠陥が存在しないにもかかわらず、間違っ て欠陥が存在すると判断された (False Calls ともいう)。

False negative (FN) : 欠陥が存在しているにもかかわらず、非破壊検査によって検出されなかった (検出されなければならない。Miss call ともいう)。

True negative (TN) : 欠陥が存在せず、非破壊検査によって欠陥がないと判断された。

これらの検査結果の分類を表 1 にまとめる。

欠陥が存在する検査対象に対して非破壊検査を行った場合、TP と FN の総数が NDT 結果からの判定の総数となるので、欠陥検出確率 (True positive rate もしくは POD) は、

$$POD = P(TP) = \frac{n(TP)}{n(TP) + n(FN)}$$

となる (ここで、 $P(TP)$  は TP の確率、 $n(TP)$ 、 $n(FN)$  はそれぞれ TP および FN の総数を表す)。同様に、欠陥が存在しない検査対象に対して非破壊検査を行った場合、FP と TN の総数が NDT 結果か

らの判定の総数となるので、欠陥誤検出確率 (False positive rate もしくは POFA : Probability of False Alarm。欠陥が存在しないにもかかわらず、間違っ て欠陥が存在すると判断される確率) は、

$$POFA = P(FP) = \frac{n(FP)}{n(FP) + n(TN)}$$

となる。欠陥の見逃しが多いと構造物の安全性が低下することから、POD は NDT の安全性を表していると言える。逆に、欠陥の誤検出が多いと、本来必要のない修理を行うことになり余分なコストが必要になることから、POFA は NDT の経済性を表していると言える。ここで、 $POD \neq 1 - POFA$  であることに注意が必要である。つまり、POD が高い NDT 手法であっても POFA が低いとは限らないということである。高い POD と低い POFA、つまり安全性が高く、かつ経済性に優れているかどうかを評価する手法として、ROC (Receiver Operating Characteristic) 分析という評価方法もある [5]。

POD の算出方法の一例として、参考文献 [6] に紹介されている grading unit に基づいた算出法を示す。図 1 のような溶接線における非破壊検査による欠陥検出の POD と POFA について考える。評価のために溶接線を均等長さの 25 の領域 (grading unit) に分割して考えると、欠陥長さ (図中緑線) は 7 つの grading unit にわたって存在し、欠陥の存在しない領域は 18 の grading unit にわたる。非破壊検査によって図中赤線で示すように欠陥が存在すると判断されたとすると、

TP の grading unit 数 : 5

FP の grading unit 数 : 2

FN の grading unit 数 : 2

TN の grading unit 数 : 16

となるので、図 1 での非破壊検査の POD および

表1 NDT の検査結果の分類

		欠 陥		(計)
		あ り	な し	
NDT 結果	検出された	True positive (TP) (Finds)	False positive (FP) (False alarm or False calls)	TP+FP
	検出されなかった	False Negative (FN) (Misses)	True negative (TN) (True no-calls)	FN+TN
(計)		TP+FN (=100%)	FP+TN (=100%)	



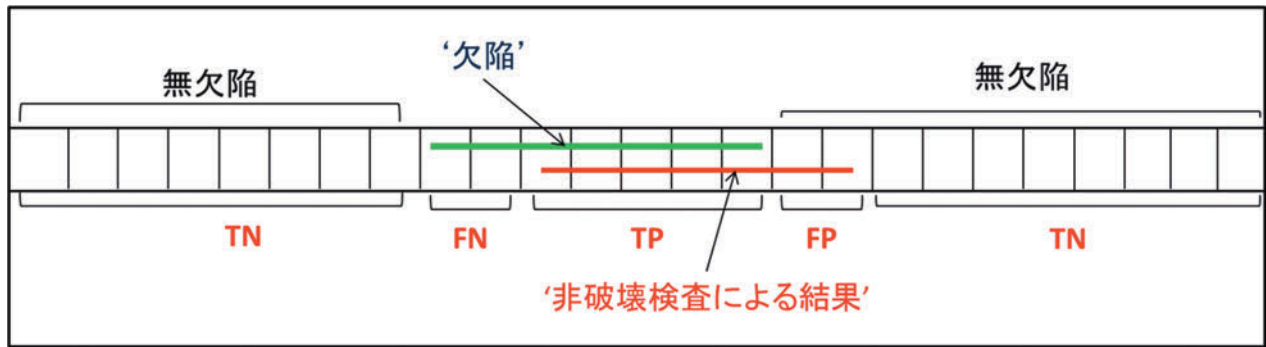


図1 溶接線における欠陥と検査結果の一例

POFA はそれぞれ以下のようになる。

$$POD = P(TP) = \frac{n(TP)}{n(TP) + n(FN)} = \frac{5}{5 + 2} = 0.71$$

$$POFA = P(FP) = \frac{n(FP)}{n(FP) + n(TN)} = \frac{2}{2 + 16} = 0.11$$

## 2.2 S / N 比と POD

図2に典型的な POD 曲線を示す。POD 曲線は理想的には検出限界の欠陥サイズ (図2の  $a_{limit}$ ) を境に POD が0から1に変化する (図2の黒線)。しかしながら、実際は図2の赤線のように欠陥サイズが増加するとともに徐々に増加していく。これは POD が欠陥サイズだけではなく、検査対象となる材料、欠陥の種類、NDT 手法の種類、キャリブレーション、検査を行う環境や検査員の技量などのヒューマンファクターの影響を受けるからである。

非破壊検査により検査を行った場合、検出すべき欠陥などの反射源からの信号とそれ以外 (形状エコー、底面エコーなど) からの信号が重ね合わさった情報が得られる。ここでは、検出すべき欠陥以外に起因する信号をノイズとする。図3は、欠陥からの信号およびノイズの強度分布と POD 曲線の関係を示している。一般的に、欠陥の大きさが小さいときは、欠陥からの信号とノイズの強度の差が小さく、欠陥からの信号とノイズを区別することが容易ではない。そのため、欠陥の大きさが小さいときには、POD が低くなる (図3 (a))。欠陥の大きさが大きくなるにしたがい、欠陥からの信号が大きくなり、ノイズとの区別がしやすくなり、POD が増加していく (図3 (b))。図3 (c) のように欠陥の大きさがある程度大きくなり、欠陥からの信号がノイズの強度よりも十分強くなり区別が容易となるため、欠陥

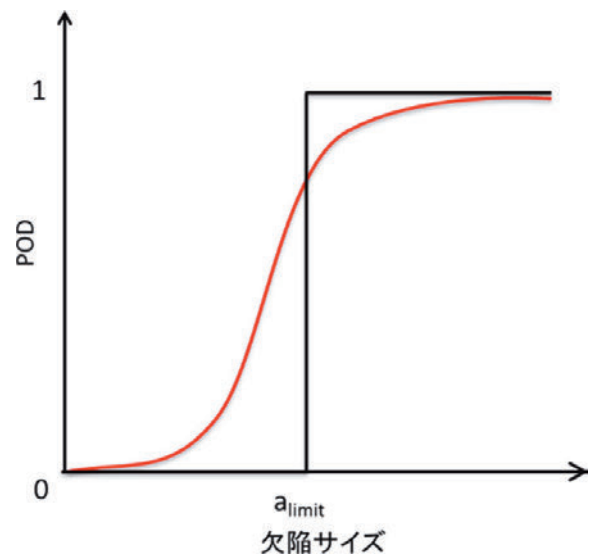


図2 POD 曲線

検出率はほぼ 100% となる (POD は 1 に近づく)。

しかし、図3 (b) のような欠陥からの信号とノイズが完全に分離できない場合、得られた信号が欠陥からの信号であると判断するしきい値である、識別しきい値の設定により、欠陥検出の結果が異なる。欠陥からの信号をできるかぎり検知するために識別しきい値を下げた場合 (図4 (a), しきい値 L), ノイズを欠陥からの信号と誤認し、誤検出 (FP) をする可能性がある。また逆に、ノイズを信号として誤検出しないようにするために識別しきい値を高く設定した場合 (図4 (c), しきい値 L'), 欠陥からの信号を見逃してしまう可能性 (FN) があり、POD が低下する。実際の非破壊検査においては、必ずしも欠陥からの信号とノイズを完全に分離できるわけではないので、高い POD を得るためには、識別しきい値の適切な設定と、欠陥からの信号とノイズの特徴をよく把握することが必要である。

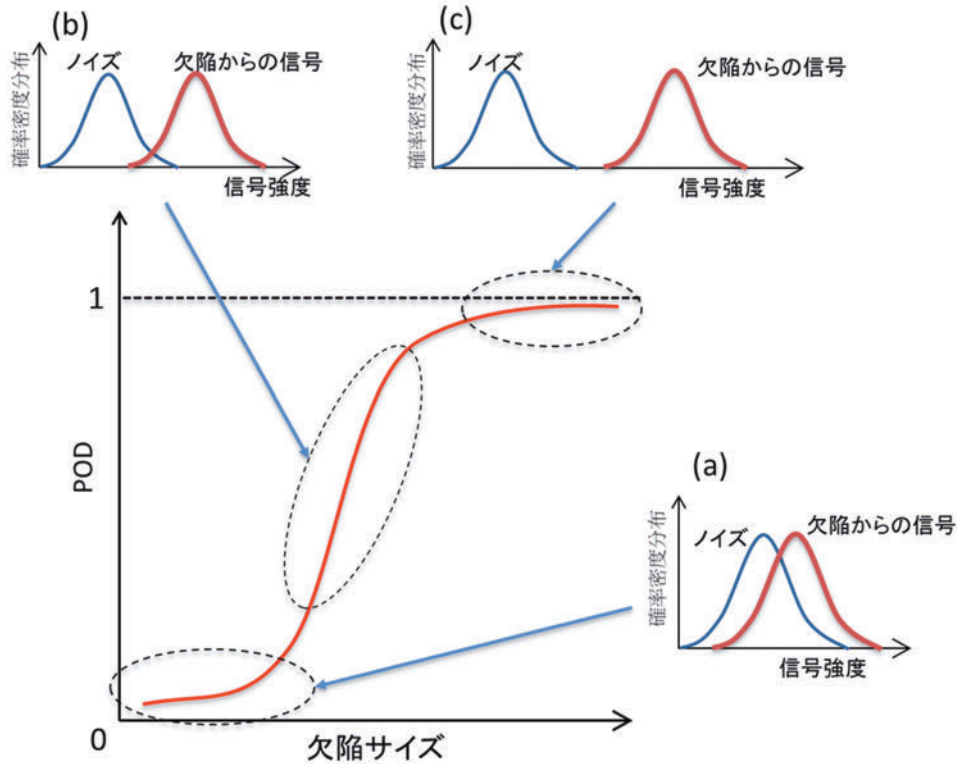


図3 POD 曲線とNDT 信号(欠陥からの信号、ノイズ)の関係

### 3 統計的手法による非破壊評価手法の欠陥検出性能の評価

統計的手法により非破壊評価手法の欠陥検出性能を評価する上で、POD を欠陥サイズの関数として表す考え方を導入し、横軸を欠陥サイズとしてこの欠陥検出確率をグラフにしたものをPOD 曲線と呼ぶ。ここでは、文献 [7] の内容をもとに、POD 曲線の考え方と導き方について概説する。

以下では、任意の欠陥に対する欠陥検出確率を考える上で、欠陥に関するパラメータの中で欠陥検出確率との相関が最も高いものとして欠陥サイズに着目している。欠陥サイズは、欠陥の高さ、長さもしくは面積の他、板厚に対する欠陥高さの割合などの中から状況に応じて適したものを選ぶ。欠陥サイズを  $a$  とし、欠陥検出確率を  $a$  の関数  $POD(a)$  と表す。

一般に、非破壊評価では検査対象に外部から刺激(超音波探傷試験では超音波の入射、渦電流探傷試験では渦電流の誘導)を与えて刺激に対する応答を解釈することで欠陥の評価を行う。ある欠陥を繰り返し検査するとき、探傷機器の設定や校正のわずかな変動で検査対象に与える刺激の大きさが変化することが考えられる。また、材料特性、欠陥形状や欠陥の向きなどの違いで同じ大きさの欠陥でも異なる

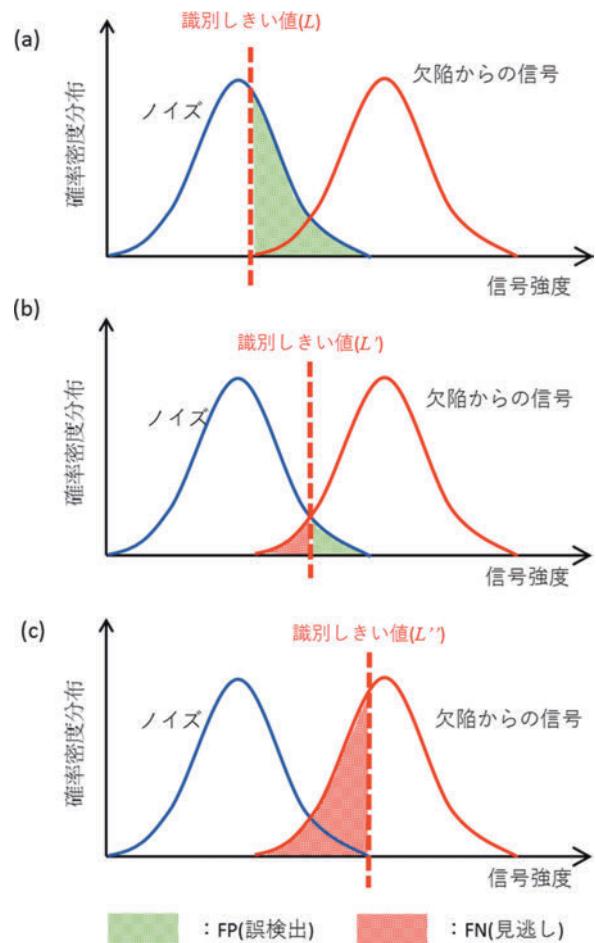


図4 識別しきい値とFP (誤検出)、FN (見逃し) の関係

大きさの応答が得られる可能性がある。さらに、同じ応答を解釈するときにも、判断する人間の能力、疲労度や精神状態で変わる注意力、検査対象へのアクセスのしやすさ、または検査現場の環境などが解釈結果に影響を与える。これらのことから、同じ大きさの欠陥でも欠陥検出確率にはばらつきが生じるため、ある欠陥サイズ  $a$  の欠陥の検出確率を定数でなく、広がりを持つ分布で表せるものとみなす。

欠陥サイズ  $a$  をある値に固定したとき、欠陥検出確率が  $p$  である欠陥の存在確率（欠陥サイズ  $a$  の欠陥の中での割合）の分布により欠陥検出確率のばらつきを表すこととし、この存在確率に関する確率密度関数  $f_a(p)$  が図 5 のようなグラフで与えられるものとする。これに対し、

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

と定義する。これは、欠陥サイズが  $a$  のときの欠陥検出確率の平均値を  $POD(a)$  と定義することを意味する（図 5 では  $POD(a) = 0.6$  となる）。

次に、欠陥サイズ  $a$  に対するこの平均欠陥検出確率  $POD(a)$  の変化について考える。欠陥サイズ  $a$  がかなり小さいときには  $POD(a)$  はほぼ 0 で、欠

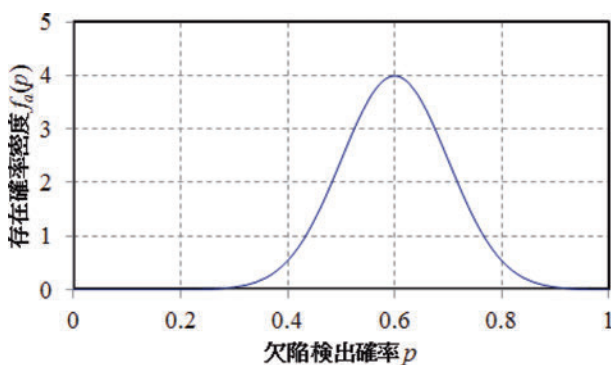


図5 欠陥検出確率が  $p$  の欠陥の存在確率密度関数  $f_a(p)$  のグラフの例

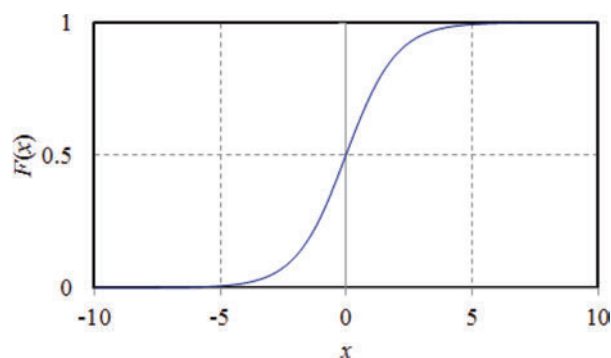


図6 ロジスティック関数のグラフ

陥サイズ  $a$  が大きくなるにつれて  $POD(a)$  は増加していき、欠陥サイズ  $a$  がある程度以上大きくなると  $POD(a)$  はほぼ 1 になるという傾向が直感的に妥当であると考えられる。このような傾向を表すのに使用する関数の一つにロジスティック (logistic) 関数

$$F(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)}$$

がある（図 6）。欠陥サイズ  $a$  に対する  $POD(a)$  をグラフにした  $POD$  曲線のモデル化において、欠陥サイズ  $a$  の対数の 1 次式  $\alpha + \beta \ln a$  ( $\alpha$  と  $\beta$  は定数) を変数とするロジスティック関数を使って

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

と表す方法がある。このとき、ロジスティック関数の特性として

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

が成り立つ。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) と呼ぶ。さらに、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) と呼び、関数  $g(p)$  はロジット (logit) 関数と呼ばれる。ロジスティック関数とロジット関数には互いに逆関数となる関係があり、式 (1) は式 (2) に変形できる。式 (2) の条件により  $POD(a)$  を表すモデルを対数オッズモデルと

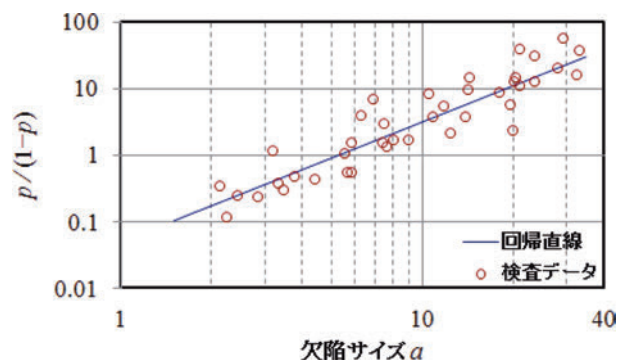


図7 対数オッズモデルのデータの例

呼ぶ。

式 (2) が表す意味を考えてみると、POD ( $a$ ) の対数オッズが  $\ln a$  の 1 次式で表せるということは、両対数グラフで欠陥サイズ  $a$  と POD ( $a$ ) の対数オッズの関係が直線で表せるということである。POD ( $a$ ) は平均欠陥検出確率であり、実際の検査で得られる欠陥検出確率  $p$  にはばらつきが生じる。検査データが式 (2) に示した対数オッズモデルに対応するとき、欠陥サイズ  $a$  と欠陥検出確率  $p$  のオッズは図 7 に見られるような相関を持ち、その関係は検査データから得られる回帰直線によく表せる。

回帰直線は中心的な分布傾向を表すので、平均欠陥検出確率である POD ( $a$ ) のオッズがこの回帰直線と与えられると考えると、図 7 の場合、式 (2) の右辺は  $-3+1.8 \ln a$  となる。このとき、式 (1) より POD 曲線と元になった検査データは図 8 のように描ける。以上のような考え方で、検査データより POD 曲線を作成できる。

ところで、累積分布関数がロジスティック関数で表されるロジスティック分布は、正規分布とよく似た確率分布である。確率変数の対数をとったものが正規分布に従うときこの確率変数が従う確率分布を対数正規分布と呼び、同様に、確率変数の対数をとったものがロジスティック分布に従うときこの確率変数が従う確率分布を対数ロジスティック分布と呼ぶ。対数正規分布の累積分布関数は

$$F_n(x) = \Phi\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)$$

で与えられる。ただし、 $\mu$  は平均、 $\sigma$  は標準偏差であり、 $\Phi$  は

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

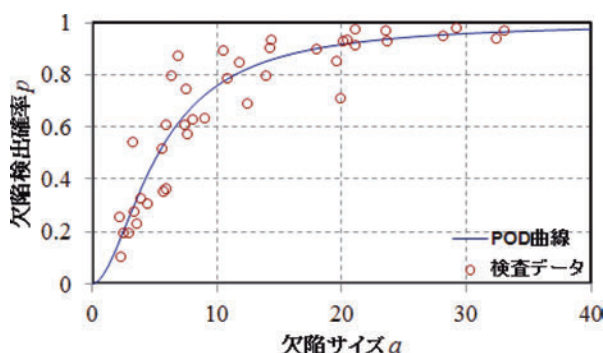


図8 POD 曲線の例

で定義される標準正規分布の累積分布関数である。

一方で、対数ロジスティック分布の累積分布関数は

$$F_l(x) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{\ln x - \mu}{s}\right)} \quad (3)$$

で与えられ、この分布の平均は  $\mu$  であり、標準偏差は  $\pi s / \sqrt{3}$  となる。図 9 のグラフは、平均を 0、標準偏差を 1 として、これらの累積分布関数を比較したものであり、グラフの概形がよく一致していることが確認できる。

式 (1) を式 (3) の累積分布関数の形にあわせると

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

と変形できる。ただし、

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

の関係が成り立つ。このように、対数オッズモデルの POD 曲線を対数正規分布と対応させてとらえることができる。

ここでは、式 (2) の関係を仮定する対数オッズモデルを取り上げたが、すべての検査データで式 (2) の傾向が見られるわけではなく、POD 分析で使用する POD のモデルは分析する検査データの欠陥サイズと欠陥検出確率の相関にあわせて選定する必要がある。また、上述の説明で使用した欠陥サイズ  $a$  は、実際はより具体的に欠陥深さや欠陥長さなどとする。このとき、検査データを分析し、モデル化に適した欠陥検出確率との相関を持つ欠陥サイズパラメータを選ぶ。

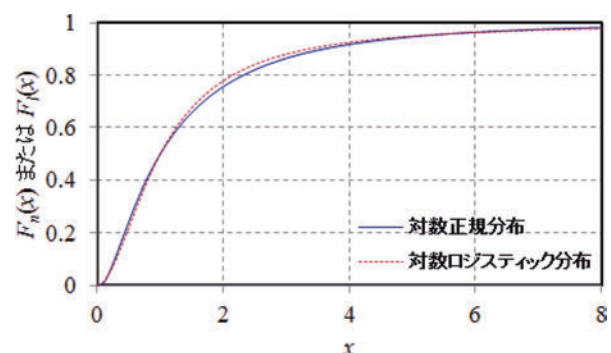


図9 累積分布関数の比較



## 4 溶接欠陥に対するUTのPOD分析

POD分析は疲労亀裂や応力腐食割れ(SCC)のNDTデータに対する多くの報告がある<sup>[8]</sup>。今回我々は、これまであまり報告されていない溶接金属内の内部欠陥に対するPOD分析を行った。分析を行ったデータは平成4年度より開始された「溶接欠陥と機械強度及び非破壊試験の関係調査(SUN)」<sup>[9]</sup>で行われた炭素鋼及びステンレス鋼材の溶接部での溶接割れ等に代表される面状の溶接欠陥を付与した試

験体より得られたデータである。SUNで使用された試験体の形状を図10に示す。UT探傷は試験体裏表において、溶接線を挟んで両方向から行われた。UT探傷から得られた結果より、POD分析を行ったグラフを図12、13に示す。グラフの縦軸は、DAC20%以上の信号強度が得られたときを「検出(POD=1)」として扱い、DAC20%より小さいときは「検出不可(POD=0)」とした。横軸は試験体の破壊試験を行い測定した板厚方向の欠陥高さ(図11における2a)である。これらのデータを用い、POD

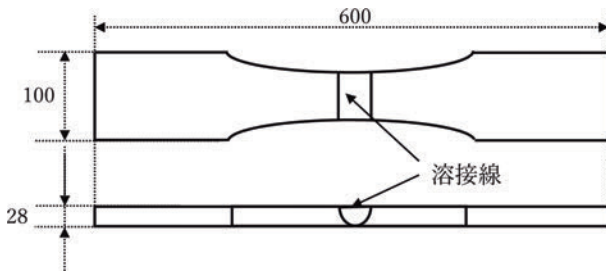


図10 SUNで使用された試験体

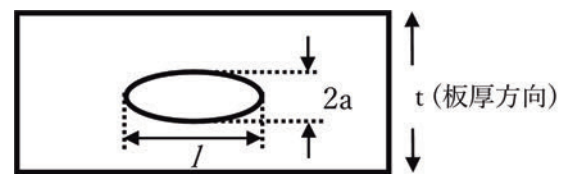


図11 面状溶接欠陥の概略図。

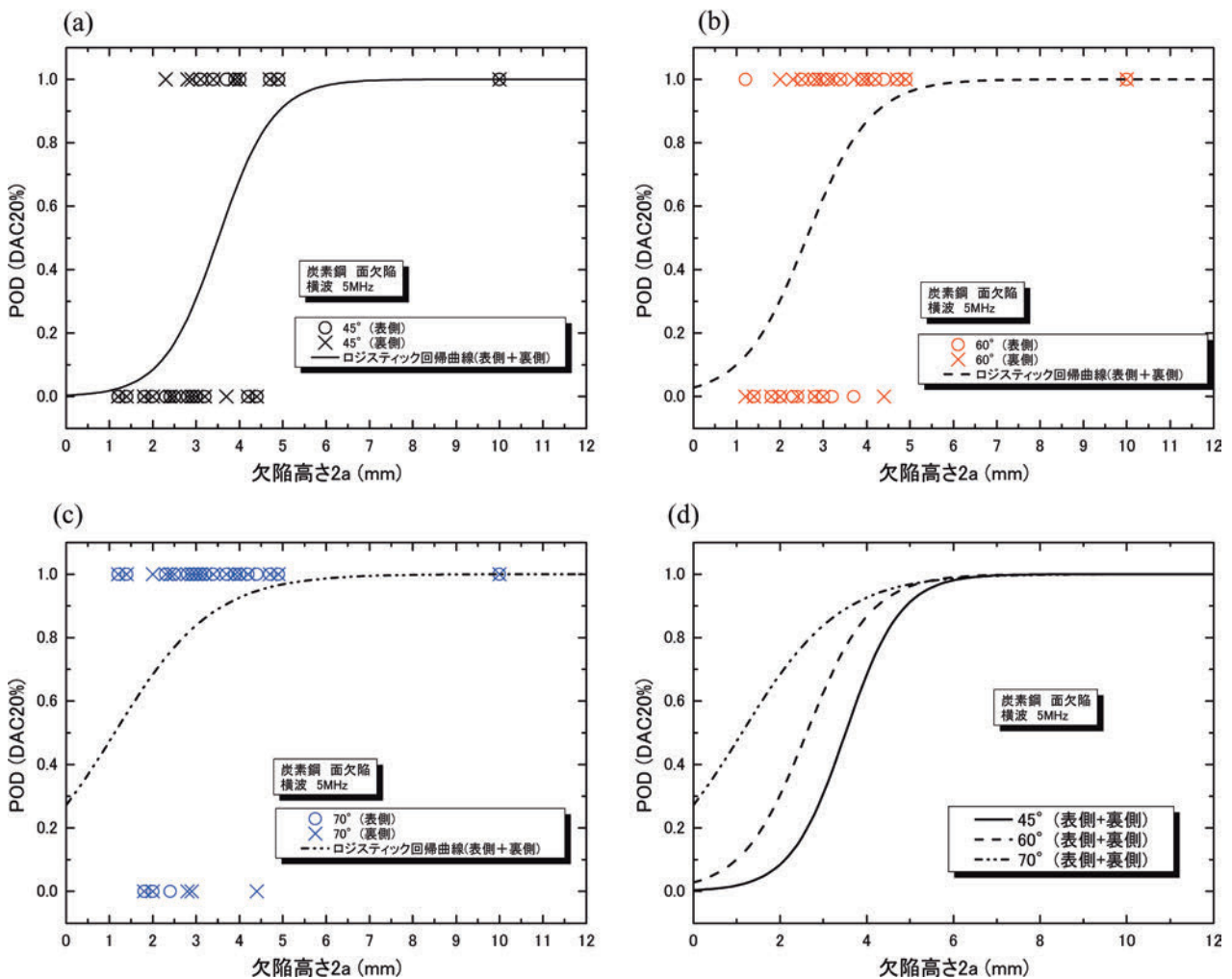


図12 炭素鋼での面状の溶接欠陥に対するUT測定結果のPOD分析(横波、5MHz)。  
(a)：屈折角45°、(b)：屈折角60°、(c)：屈折角70°、(d)：屈折角45°、60°、70°でのPOD曲線

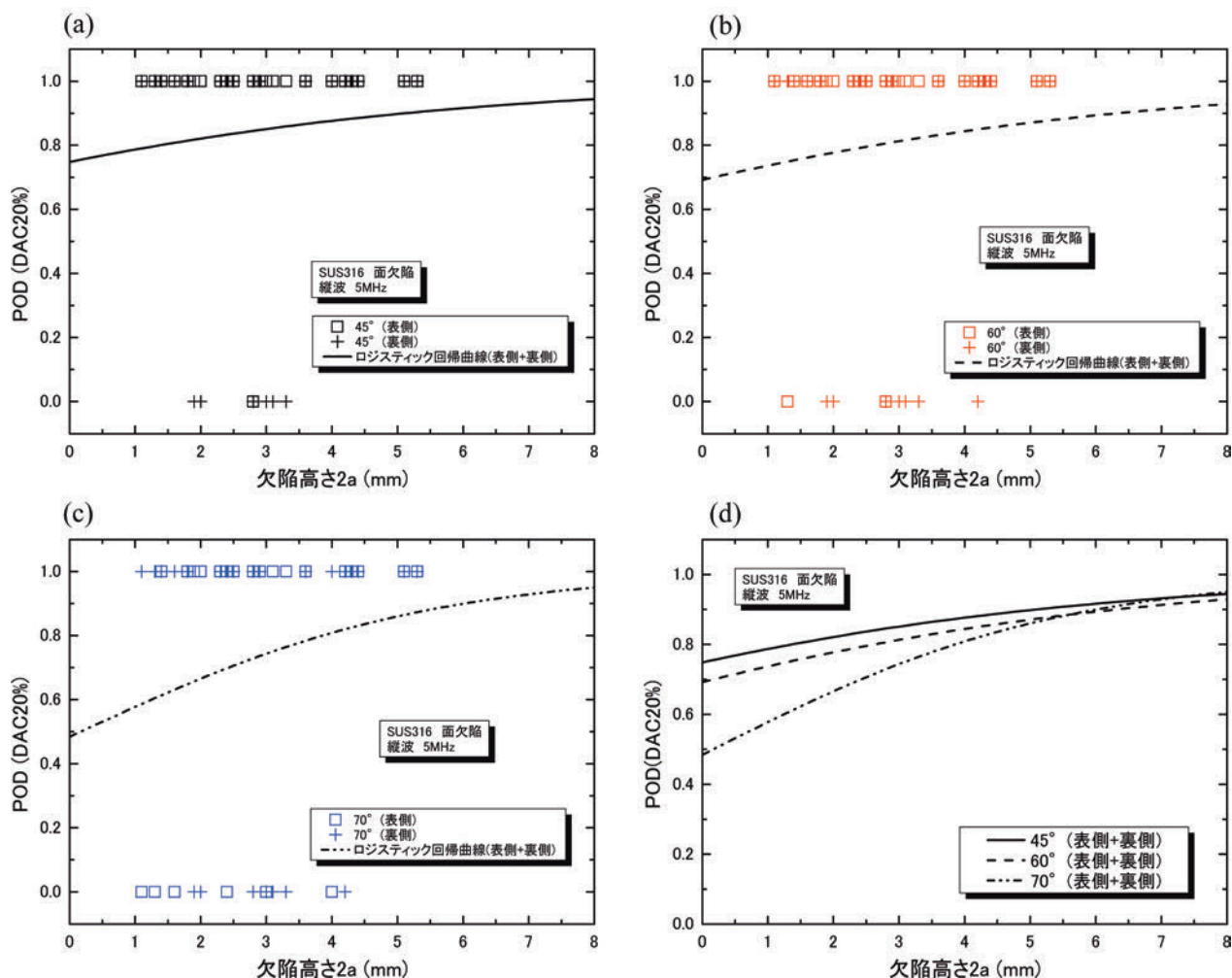


図13 ステンレス鋼での面状の溶接欠陥に対するUT測定結果のPOD分析(縦波、5MHz)。  
 (a): 屈折角45°、(b): 屈折角60°、(c): 屈折角70°、(d): 屈折角45°、60°、70°でのPOD曲線

分析を行った。POD分析手法には、主に「hit / miss法」と「 $\hat{a}$  vs  $a$ 法」があるが[10]、これらのデータを市販のソフト((株)社会情報サービス エクセル統計2015)を用いてロジスティック回帰分析を行い、POD曲線を求めた。炭素鋼における面状の溶接欠陥に対する検出確率(図12(d))は、探触子の屈折角が大きくなるにしたがい向上しているのに対し、ステンレス鋼における面状の溶接欠陥に対する検出確率(図13(d))は、探触子の屈折角が小さいほうが検出確率がよいことがわかる。炭素鋼とステンレス鋼でのPOD曲線の差の原因については現在検討中であるが、欠陥の長さ(図11における1)や板厚方向での欠陥位置の影響がその一因として考えられる。また、欠陥高さ $2a=0$ においてPODの値が0になっていない場合がある。これは、

欠陥高さが小さい場合でも多くの欠陥が検出された場合の回帰分析に起こりうる。欠陥高さ $2a=0$ 、つまり欠陥が存在しない場合のPODの値をPOFAと考える報告<sup>[7]</sup>もあるが、前述のようにPODとPOFAは必ずしも相関関係があるわけではなく、この点については今後も検討を行う必要がある。

## 5 まとめ

本稿では、NDT手法を客観的に評価することができるPOD分析手法について、基礎的な知見を得るために、文献調査を行った結果について取りまとめた。今後は、POD分析の産業界への適応例や、POD分析手法(「hit / miss法」、 $\hat{a}$  vs  $a$ 法)などの調査を進める予定である。

## 参考文献

- [1] Ward D. Rummel, Paul H. Todd, Jr., S.A. Frecska and Richard A. Rathke, "The detection of fatigue cracks by nondestructive testing methods", NASA-CR-2369, 1974.
- [2] NASA-STD-5009, "NONDESTRUCTIVE EVALUATION REQUIREMENTS FOR FRACTURE-CRITICAL METALLIC COMPONENTS"
- [3] 例えば, F. A. Simonen and M. A. Khaleel, "Effects of Flaw Sizing Errors on the Reliability of Vessels and Piping", J. Pressure Vessel Technol 120 (4), 365-373, 1998
- [4] Ward D. Rummel, Grover L. Hardy, and Thomas D. Cooper, "Applications of NDE Reliability to Systems", J. R. Davis (Ed.), Nondestructive Evaluation and Quality Control (ASM Handbook Vol. 17), ASM International, Ohio, pp. 674-688, 1989.
- [5] Ward D. Rummel, "FLAW DETECTION RELIABILITY ASSESSMENT AND ANALYSIS", Proceedings of the Army Symposium on Solid Mechanics, 1982 - Critical Mechanics Problems in Systems Design, September 1982., p1796-1776.
- [6] F. Fücsök, C. Müller, M. Scharmach, "MEASURING OF THE RELIABILITY OF NDE", The Proceedings of the 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing, »Application of Contemporary Non-Destructive Testing in engineering«, September 1-3, 2005, Portorož, Slovenia, pp. 173-180
- [7] 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.
- [8] P. G. Heasler and S. R. Doctor, "Piping Inspection Round Robin", NUREG/CR-5068, PNNL-10475, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.
- [9] 平成 11 年度 実用原子力発電施設検査技術等開発に関する事業報告書 溶接欠陥と機械強度及び非破壊試験との関係調査【総括版】平成 12 年 3 月
- [10] MIL-HDBK-1823A (2009), "Nondestructive Evaluation System Reliability Assessment"



直本 保



山本敏弘



# 超音波フェーズドアレイ法の探傷条件設計における超音波探傷シミュレーションの活用

Application of simulation tools to coordinate the conditions of phased array ultrasonic testing

溶接・非破壊検査技術センター 上山 芳教, 古川 敬

Phased array UT technique can easily control the ultrasonic beam direction or focusing points. Phased array UT technique has many advantages over the conventional UT technique. Before using the phased array method the equivalence of the phased array ultrasonic testing results and the conventional ultrasonic testing results are verified. We compared the testing results of six welding carbon steel plates measured by the two methods. In that measurement about 80 percent of the indications observed by the phased array method are provide conservative or equivalent results compared with the conventional method testing results. In this paper we report a method to improve the measurement conditions of phased array ultrasonic testing by utilizing the simulations of ultrasonic pulse propagation.

## Keywords

Ultrasonic phased array technique Conventional ultrasonic technique Welded carbon steel joints Comparison of flaw indications Measurement condition designing

## 1 はじめに

超音波におけるフェーズドアレイ法では、振動子を1次元や2次元に配列して用いるアレイ探触子を利用することで、超音波の入射位置や入射角度を切り替えながら測定ができる。超音波入射位置や角度の切り替えは、各振動子の使用、不使用や、励振開始までの遅延時間を電氣的に制御することで行えるため、機械的な制御で入射位置や入射角度を切り替えるよりも高速である。従来は単素子固定角の探触子を機械的に走査して実施している探傷作業に対してフェーズドアレイ法を部分的にでも導入することで、探傷時間の削減による効率化が期待できる。また、フェーズドアレイ法では欠陥の検出性やサイジング精度の向上に着目した利用<sup>[1]</sup>も進められており、規格化も進められている<sup>[2]</sup>。

従来溶接部に対して適用されている単一または二分割の素子による固定角探触子を使用する斜角探傷(以下、「従来法」と呼ぶ)をフェーズドアレイ法に置き換える上で、両手法での探傷結果の相違や同等

性を十分に確認する必要があると考える。著者らはこれまで、フェーズドアレイ法により送信される超音波の音場が単素子固定角探触子の音場と同等とみなせるかを確認するため、超音波可視化法やFEMシミュレーションにより音場を比較し、グレーティングローブ等のフェーズドアレイ法特有の留意点はあるものの、同じ屈折角および送信の開口寸法であればフェーズドアレイ法により従来法と同様な音場が得られることを確認してきた<sup>[3-4]</sup>。したがって、フェーズドアレイ法のリニアスキャンでは、従来法と同様な音場を送信できると考えられるため、従来法と同等の探傷結果が得られるものと予測できる。一方で、フェーズドアレイ法のセクタスキャンでは探触子を前後走査しなくてもある程度の体積範囲を網羅できるものの、前後走査をしない場合には従来法と異なり、複数の異なる角度で超音波が入射されるため、従来法と同等の探傷結果が得られるかどうかを検証する必要があると考える。本研究では炭素鋼溶接部の溶接欠陥等の探傷に対するフェーズドアレイ法の適用性を調査しており、前年度は板厚や開

先角度の異なる炭素鋼平板突合せ溶接部 6 体を使用した比較検討結果を報告した<sup>[5]</sup>。前年度の報告では、一部の欠陥でフェーズドアレイ法と従来法の探傷結果に差異が生じたものや、探傷方向によって検出性が異なる場合など、探傷条件を最適化するうえでのいくつかの課題が抽出された。

本報では、前年度抽出された課題の原因分析を踏まえて、フェーズドアレイ法の探傷条件の検討や探傷結果を解釈する際に、超音波探傷シミュレーション手法を活用した結果を紹介する。

## 2 フェーズドアレイ法の探傷条件と結果の概要

フェーズドアレイ法と従来法の探傷結果の比較について前年度に報告<sup>[5]</sup>した概要は次の通りである。試験体は炭素鋼平板の突合せ溶接試験体（外形約 400 × 400mm、溶接部長さ約 400mm）であり、板厚 9mm が 1 体、板厚 12mm が 3 体、板厚 25mm が 2 体の計 6 体である。試験体の外観の例を図 1 に示す。従来法は JIS Z 3060 に基づいて横波斜角 70 度で実施した。フェーズドアレイ法の探傷条件は、ISO 13588 における “S-scan at fixed probe position

to weld” に基づき、溶接部と探触子の距離を一定間隔に保った溶接線方向の走査とセクタスキャンによる探傷とした。事前の検討により、板厚 9mm と 12mm では溶接部と探触子間の距離を 1 条件とし、25mm は 2 条件として余盛側溶接部の両側から探傷した。きずの評価方法は、従来法、フェーズドアレイ法ともにきずエコー高さの領域ときずの指示長さを測定した。

詳細な探傷結果は前年度の報告<sup>[5]</sup>に示すが、板厚 9mm と 25mm の試験体では、評価の対象としたきずの大部分のエコー高さの領域は従来法と同程度以上で、きず指示長さの差も ± 10mm 以内であった。しかし、表 1 に示す様に板厚 12mm の試験体のきずに対しては、従来法に比べてフェーズドアレイ法でのエコー高さや指示長さが低く評価される場合があった。具体例として試験体 12V2 の例を図 2 に示す。図 2 はきず指示の始点・終点を示したものであり、フェーズドアレイ法の Y30 とは探触子を設置した位置（溶接線からくさび前面までの距離を 30mm とした）である。また、L 検出レベルを超える始点・終点の範囲に加えて、H 線を超える範囲も示した。図中に赤丸を付した欠陥番号 1、2 及び 6 ではフェー

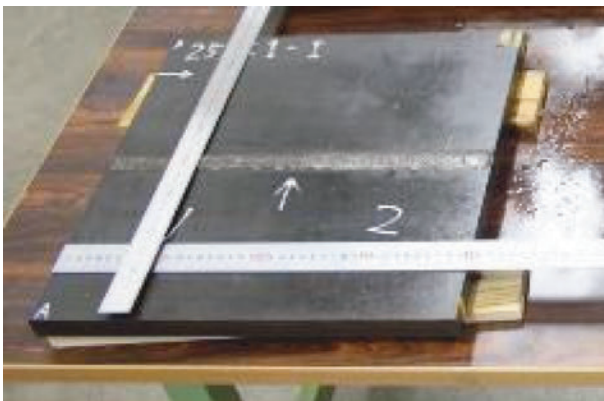


図1 試験体の外観 (板厚25mm)

表1 フェーズドアレイ法の方が評価が低くなった欠陥の位置

試験体	欠陥番号	従来法による検出位置 [mm]	
		Y	Z
12V-1 (板厚12mm)	1	0	9.9
12V-2 (板厚12mm)	1	-2.6	7.3
	2	0.7	9.2
	6	0.6	7.2
12V-3 (板厚12mm)	1	1.5	8.7
	2	-3.6	7.6

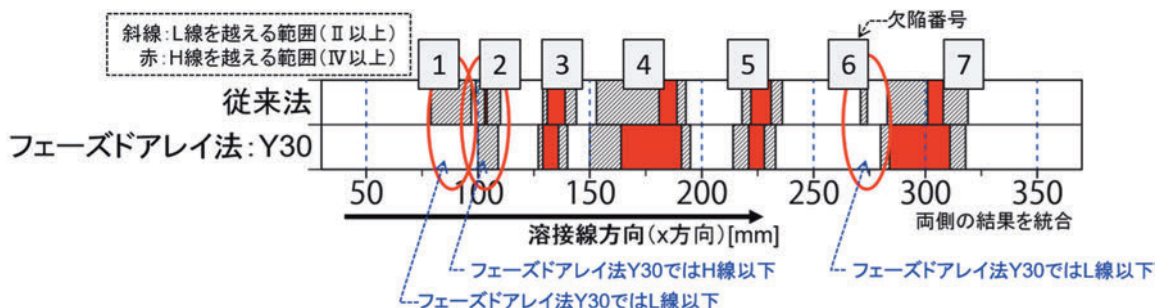


図2 従来法及びフェーズドアレイ法 (Y30) による探傷結果の比較 (12V2 試験体)

ズドアレイ法でのエコー高さの領域や指示範囲が低いものの、欠陥番号4や7の様にフェーズドアレイ法での評価の方が大きい場合もあった。次節でこれらのきずの評価結果に対する原因分析と改善策の検討結果を示す。

### 3 差異の原因分析及び探傷条件の再検討

前報<sup>[5]</sup>で行った“事前の検討”では、次の内容を考慮して探触子の位置を決めた。

- (1) 開先面の融合不良等を想定して、開先面に対してほぼ垂直に入射すること。
- (2) 溶込み不良や裏波付近から発生するきずを想定して、屈折角50度前後の波がルート部付近へ入射すること。
- (3) 直射もしくは1回反射、2回反射で(1)(2)を満足し、なおかつ試験範囲を網羅すること。

また、これらの3項目に加えて、直射、1回反射や2回反射などで、できるだけ多くの角度で超音波ビームが溶接部に入射することや、板厚の中央部付近のきずに対しては、なるべく大きい屈折角で超音波が入射するようにすることを考慮した。

これらを考慮して図3に示す作図により探触子の配置を検討し、前報では板厚12mmの試験体に対し

て探触子前面と溶接中心の距離を30mm（Y30と呼ぶ）に設定した。ここで、前述した、従来法に比べフェーズドアレイ法での評価が低くなる欠陥の検出位置（表1に示したYZ座標の位置）を図3に重ねると図中の赤丸の範囲になる。この範囲にあたる超音波ビームを詳細に分析すると、直射では当たらない、1回反射が約63～70°、2回反射が約49～56°の屈折角であった。従来法では直射あるいは2回反射で検出しており、欠陥エコー高さ領域が低くなった原因として、ルート部近傍を大きな屈折角で探傷する条件が不足していたものと考えた。そこで、図4に示す様に溶接線とくさび前面との距離を15mmとするY15の配置を追加する必要があると判断した。この追加により、図4中の赤丸の範囲に対して、直射の約67～75°、1回反射で約51～60°、2回反射で40～45°を追加することができる。

12V-2試験体に対して、Y15の配置で追加探傷した結果を図5に示す。Y30の配置だけでは低く評価された欠陥1および2に対して、Y15の配置で従来法と同等の評価結果が得られることが確認できた。一方、欠陥6に対して検出不可であったが、この指示に対しては今後さらに調査し考察する予定であ

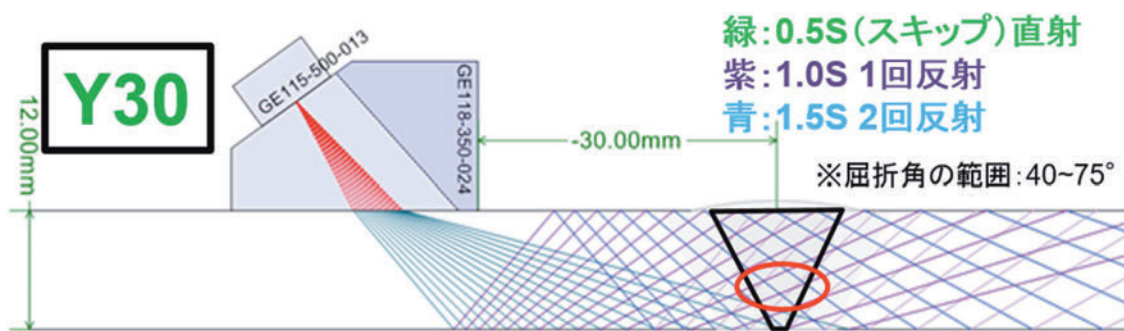


図3 アレイ探触子設置位置 (Y30)

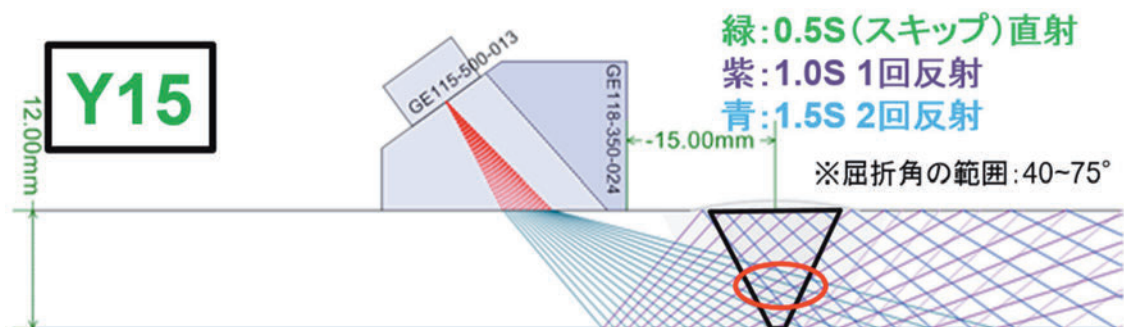


図4 アレイ探触子設置位置 (Y15)



る。図5から明らかなように、Y15の配置では、欠陥が検出不可であったり欠陥5、7及び8の評価が低かったりしており、Y15だけでは従来法と同様な探傷結果にはならず、Y30との併用が必要といえる。

昨年度の検討結果と合わせると板厚9mmの試験体では、溶接部と探触子の距離が一条で従来法と同程度の探傷結果が得られるものの、12mm以上では少なくとも二条件が必要といえる。欠陥の種類や位置が異なる場合での今後のデータ蓄積が重要となるが、板厚が10mm増すごとに溶接部と探触子の距離の条件を追加することが一つの目安になると考えられる。

#### 4 FEMシミュレーションによる探傷条件の設計に関する検討

探傷条件の設計において、きず位置に加えて複雑なきずの形状等を予測して（すなわち、きずの指向性も考慮して）入射する超音波の屈折角等をどのように決めるのかは難しい課題であり、フェーズドアレイ法では従来法以上に、経験則も活かした設計と客観的な知見の蓄積が必要と考える。FEM（有限要素法）等による超音波伝搬の詳細なシミュレシ

ョンを活用して、多様な欠陥形状や複雑な溶接部形状に対応した欠陥検出性等を確認することは、探傷条件の設計において最も効率的かつ有用な手段の一つと考えられる。

FEMシミュレーションの活用例として、実際の欠陥形状や溶接部形状を組み込んだモデルに対してシミュレーションを実施し、測定結果との比較を行った。図6に12V-2試験体の欠陥2付近を切断して観察した断面写真を示す。この断面写真から試験体の断面形状と欠陥の断面形状の輪郭を抽出し、超音波伝搬シミュレーションソフトウェア（ComWAVE、伊藤忠テクノソリューションズ）で読み込んだモデルを図7に示す。試験で使用したアレイ探触子の仕様（周波数、素子ピッチや素子配列、くさびの形状・寸法等）を合わせ、Y15とY30の条件でフェーズドアレイのセクタスキャンによるエコーのシミュレーションを行った。その結果を図8に示す。図8(a)から図8(d)は、各々A側（向かって左側）から超音波を入射したY30でのシミュレーション結果、同じくY15でのシミュレーション結果、同じくY30でのシミュレーション結果である。図8(e)

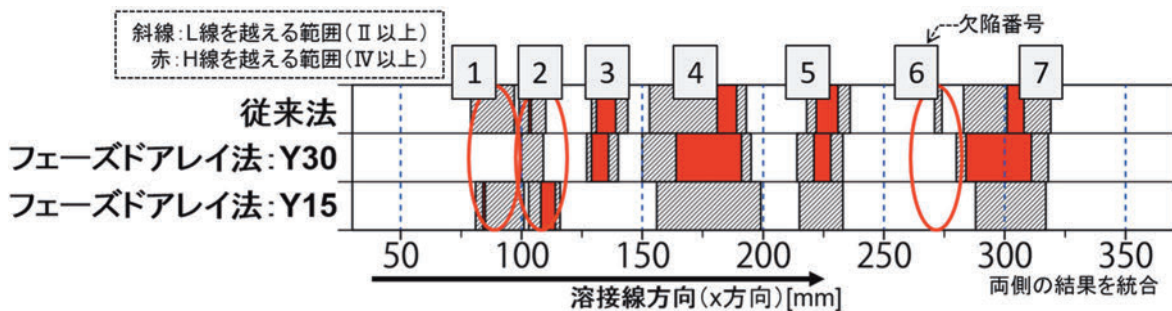


図5 従来法及びフェーズドアレイ法（Y15、Y30）による探傷結果の比較（12V2試験体）

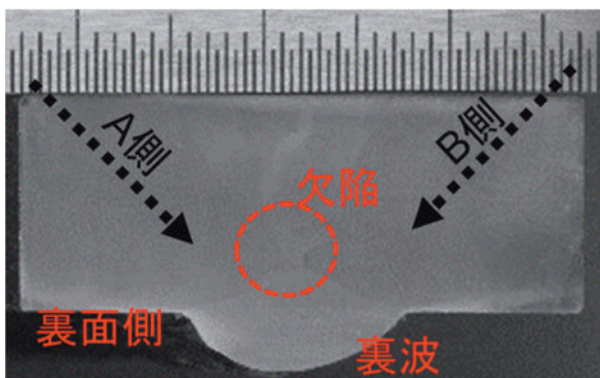


図6 欠陥断面写真（12V-2、X=103mm付近）

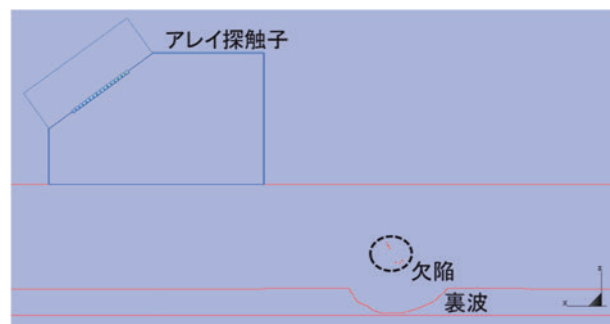


図7 断面写真から作成したシミュレーション入力モデル

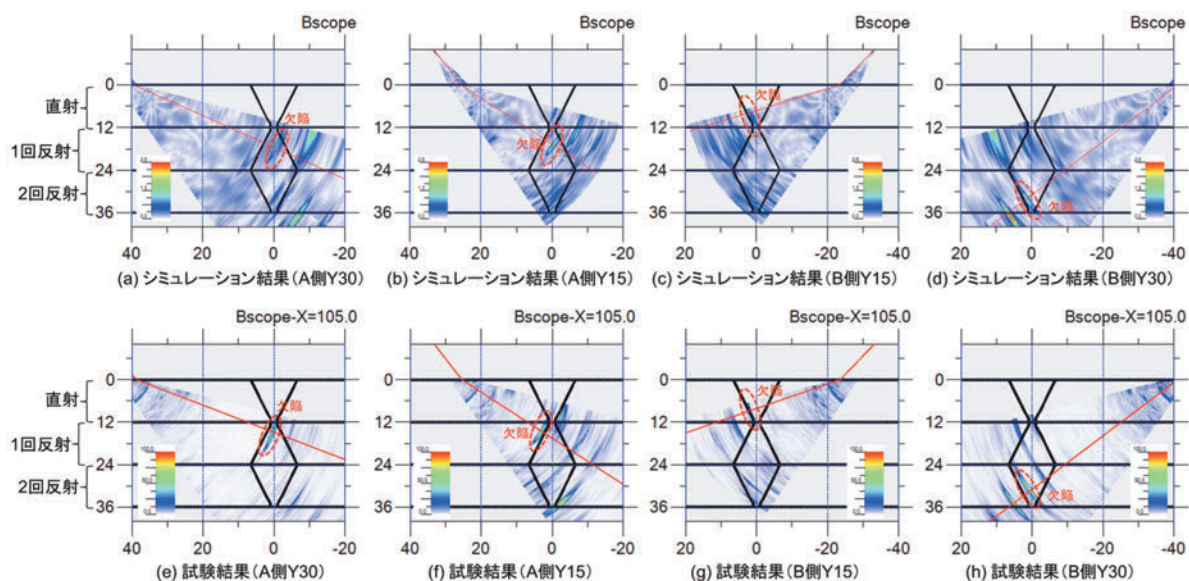


図8 12V-2 試験体X103mm 付近のセクタスキャンのシミュレーション結果

から図8(h)は各々対応した試験結果である。シミュレーション結果は試験結果をほぼ再現しており、試験結果の妥当性確認等への活用のみならず、試験条件の妥当性や試験の性能（欠陥検出性等）の把握への活用が期待できる。

ここで、試験を再現するような高精度なシミュレーション解析を実施するためには、適切な探触子モデルの構築や探傷条件を適切に設定することは重要であるが、試験体・試験対象部の形状モデルの再現が重要となる。前述のように、試験体の断面写真があれば詳細な形状をモデル化できるが、「非破壊試験」の対象部の断面形状をモデル化することは難しい。今回、一つの方法として、3D スキャナにより溶接部形状を取り込みシミュレーション用のモデルを作成した事例を紹介する。

板厚 12mm の炭素鋼試験体（12V-3 試験体）の溶接部形状を 3D スキャナ（EinScanPro, SHINING3D 社製）で測定し、シミュレーションへ入力して計算した結果と実験による結果とを比較した。3D スキャナで測定した溶接部形状を図9に示す。図9の青色部分は、3D スキャナで測定したデータに追加した Y15 の条件の探触子配置のイメージである。Y15 ではほぼ、余盛の接近限界に探触子を配置しており、計算機上で探傷上の制約等も把握できる。3D スキャナによるデータを変換して FEM シミュレーションに入力するモデルを作成し、フェーズドアレイ法のセクタスキャンと機械走査を組み合わせ測定を模

擬して計算を実施した。シミュレーション解析結果と、実際の試験体（12V-3 試験体）に対する探傷試験結果を図10に示す。ともに探傷条件は横波、屈折角 35 ~ 75 度である。図10の D スコープは Y-10 ~ 0mm の範囲を投影した。

図10(a)(b)は探傷試験結果であり、図10(c)(d)はシミュレーション解析結果である。両者の形状エコーと記した指示は、ほぼ同じ結果であるが、図10(a)に示す探傷試験結果において B スコープ内に欠陥からの指示が確認できることが相違点である。これは、シミュレーション解析では欠陥を想定せず、試験体の外形のみをモデル化しているため、欠陥からの指示が生じていないことは妥当なことである。逆に言うと、試験体外形のみのモデルでシミュレーション解析した結果と、探傷試験の結果に差異がある部分は、欠陥の可能性が高いと判断できる。さらに、シミュレーションのモデルに欠陥を設定した上で、再度シミュレーションを実施し探傷試験結果と同様な結果が得られれば、欠陥であることを確信できる。

なお、今回実施したシミュレーション解析では、3D データから断面データを切り出し、2次元空間上の計算で行っており、機械走査方向に断面を変えながら計算した。このため、探触子の幅や溶接部表面の3次元的な傾きによるエコー強度への影響など、実際の測定には影響があると考えられる要因が除かれているが、比較的良好に再現できていると言える。



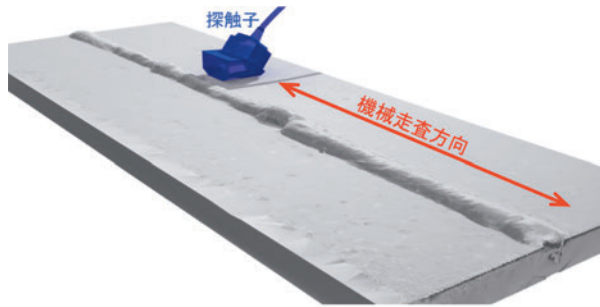


図9 3D スキャナにより取り込んだ板厚12mm 試験体の溶接部形状

## 5 まとめ

炭素鋼平板突合せ溶接部に対して実施した従来法とフェーズドアレイ法について、探傷試験結果の比較ならびにシミュレーション解析を活用した分析・考察を加えて双方の探傷結果の差異を評価した。その結果、溶接部と探触子の距離を一定にしたセクター走査による探傷でも、従来法と同様な探傷が行える可能性が確認された。ただし、板厚に応じて複数の距離で探傷を行う必要があることも確認した。今後さらなるデータ（経験）の蓄積が必要ではあるが、板厚 10mm ごとに溶接部と探触子の距離の条件を追加することが一つの目安になると考えられる。このようなフェーズドアレイ法の探傷条件を検討する上で、（簡易的なツールであっても）シミュレーションツールが有効であることも確認した。

また、高精度な FEM シミュレーションの活用方法として、今回紹介した探傷試験条件の事前の検討や探傷条件の妥当性検証に活用するだけでなく、探傷試験の訓練（いわゆる「超音波探傷シミュレータ」）等への活用を今後検討する予定である。

## 謝辞

3D スキャナによるデータは株式会社ケイズデザインラボ様に測定頂き、研究発表におけるデータの使用を御許可頂いた。ここに、厚く御礼申し上げます。

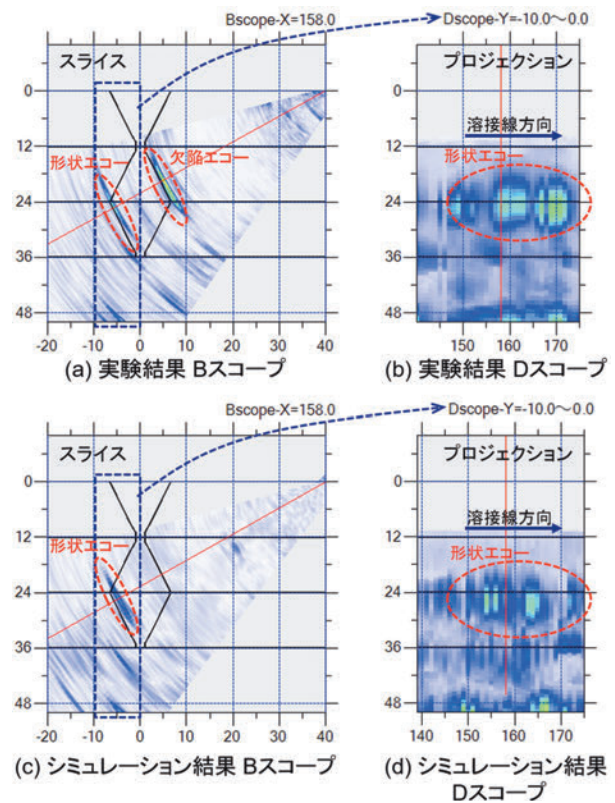
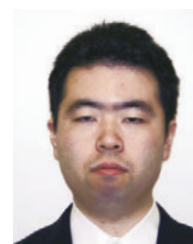


図10 3D スキャナにより取り込んだモデルによるシミュレーション結果と実験結果の比較

## 参考文献

- [1] 牧原, 最新の超音波探傷試験技術と共用期間中検査 (ISI) 基準の動向, 非破壊検査, Vol.54 No.4 (2005), pp.182-186
- [2] 三原, 超音波フェーズドアレイの基礎と広範な利用に向けて, 非破壊検査, Vol.65 No.2 (2016), pp.56-60
- [3] 古川ら, Phased Array 超音波探触子音場の数値シミュレーション, 発電設備技術検査協会 技術レビュー Vol.1 (2005), pp.14-18
- [4] 上山ら, 超音波の可視化技術を用いたフェーズドアレイ UT 法の適用性評価, 発電設備技術検査協会 技術レビュー Vol.9 (2013), pp.6-10
- [5] 上山ら, 超音波フェーズドアレイ法と従来の斜角探傷法によるきず指示の比較, 発電設備技術検査協会 技術レビュー Vol.12 (2016), pp.20-25



上山芳教



古川 敬



# ショットピーニングで付与した圧縮残留応力の持続性を予測するためのFEM解析手法の開発

Development of FEM analysis method for prediction of the sustainability of compressive residual stress by shot peening

溶接・非破壊検査技術センター 西川 聡, 古川 敬

大阪府立大学 柴原 正和, 生島 一樹, 木谷 悠二, 山田 祐介

日本原子力研究開発機構 秋田 貢一, 鈴木 裕士, 諸岡 聡

## Abstract

To prevent stress corrosion cracking and fatigue cracking in welds of nuclear power plant components, compressive residual stress induced by stress improvement process. Stress improvement process are induction heating stress improvement method, shot peening (SP) method, water jet peening method, and so on. However, it is necessary to clarify sustainability of compressive residual stress in a long time under the operating temperature or application of internal pressure or external stress.

In this study, in order to predict residual stress in each process of welding, SP and exposed operating temperature after SP, FEM analysis method based on the idealized explicit method was developed. Then, the validity of the developed FEM analysis method compared with the measured results was verified. As a result, it was considered that residual stress in each process of welding, SP and exposed operating temperature after SP can be predicted by using the developed FEM analysis method.

## Keywords

*Idealized explicit FEM, Shot peening, Sustainability of compressive residual stress, pipe butt-welded joint*

## 1 緒言

原子力発電プラントの炉容器等の溶接部に発生する応力腐食割れや疲労割れを予防するため、引張残留応力を圧縮残留応力に変換する応力改善工法が実機で多用されており、高周波加熱応力改善法 (IHSI)<sup>[1]</sup> や各種ピーニング工法 (レーザピーニング<sup>[2]</sup>, ウォータージェットピーニング<sup>[3]</sup>, ショットピーニング (SP), 超音波ショットピーニング等) が適用されている。しかし、実機の長期健全性を評価する上で、付与した圧縮残留応力が、実機の運転温度下における長期間保持や運転中に内圧や外圧が負荷されたときに持続するか明確にする必要がある。一般に、IHSIは肉厚の半分程度まで圧縮残留応力を付与することができる。しかし、ピーニング工法の付与深さは表面から最大1mm程度と薄いため、圧縮残留応力の緩和が容易に進行する可能性がある。そのため、ピーニング工法で付与した圧縮残留応力の長期持続性を評価する必要がある。これまでに、種々の試験によりピーニング工法で付与した圧縮残留応力の持

続性が評価されており、圧縮残留応力の持続が確認されれば、実機の長期健全性を証明するデータの一つになる。一方、持続が困難である場合は、再ピーニング等の対策を講じる必要がある。しかし、これまでの試験で圧縮残留応力の持続性を評価しているのは、溶接残留応力がほとんど存在しない小型試験片を用いたもの<sup>[4-10]</sup>で、溶接残留応力が存在する大型試験体を用いた評価は、時間やコストが多く掛かるために実施例は少ない<sup>[11, 12]</sup>。したがって、より実機に近い条件で圧縮残留応力の持続性を評価する必要がある。仮にFEM解析を用いて溶接部に付与した圧縮残留応力の持続性を予測することが可能になれば、試験に伴う多くの時間とコストを低減することができるため、原子力発電プラントの安全性確保に対して、大きく貢献できると考えられる。

そこで本研究では、溶接⇒SP⇒運転時を想定した熱負荷、の一連のプロセスにおける残留応力を予測するため、理想化陽解法を基本としたFEM解析手法を開発し、測定値と比較して開発したFEM解析手法の妥当性を検証した。

## 2 SP時の力学挙動解析システムの開発

理想化陽解法 FEM は、動的陽解法 FEM を基に溶接時の準静的な弾塑性挙動を高速に解析するために開発された手法であり、慣性力の影響は考慮されていない。一方、SP 時においては対象物に衝撃的な荷重が作用することから、動的効果は少なからずあるものと考えられる。そこで本研究では、理想化陽解法 FEM に対して動的効果を考慮するための拡張を行った。

動的効果を有する問題の非線形有限要素解析においては、式 (1) で表される運動方程式が基礎式として用いられる。

$$[M] \{\ddot{U}\}_{t+\Delta t} + [C] \{\dot{U}\}_{t+\Delta t} + \{Q\}_{t+\Delta t} = \{F\}_{t+\Delta t} \quad (1)$$

ここで、 $[M]$ 、 $[C]$  は、それぞれ質量マトリックス、減衰マトリックスであり、 $\{\ddot{U}\}_{t+\Delta t}$ 、 $\{\dot{U}\}_{t+\Delta t}$ 、 $\{Q\}_{t+\Delta t}$ 、 $\{F\}_{t+\Delta t}$  はそれぞれ、時刻  $t + \Delta t$  における加速度ベクトル、速度ベクトル、内力ベクトル、荷重ベクトルを表している。通常の場合、式 (1) に対して Newmark の  $\beta$  法を適用し、内力ベクトルの線形化を行うことで得られる次式を用いて Newton-Raphson 法の反復計算を行う。

$$^{(k)}[K_{eff}] \{\Delta U\} = ^{(k)}\{F_{eff}\} \quad (2)$$

$$^{(k)}[K_{eff}] = \left( \frac{1}{\beta \Delta t^2} [M] + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} [C] + [K] \right) \quad (3)$$

$$^{(k)}\{F_{eff}\} = \{F\}_{t+\Delta t} - [M]^{(k-1)}\{\ddot{U}\}_{t+\Delta t} - [C]^{(k-1)}\{\dot{U}\}_{t+\Delta t} - ^{(k-1)}\{Q\}_{t+\Delta t} \quad (4)$$

$$\{U\}_{t+\Delta t} = \{U\}_t + \{\Delta U\} \quad (5)$$

$$\{\dot{U}\}_{t+\Delta t} = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \{\Delta U\} + \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \{\dot{U}\}_t + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \{\ddot{U}\}_{t+\Delta t} \quad (6)$$

$$\{\ddot{U}\}_{t+\Delta t} = \frac{1}{\beta \Delta t^2} \{\Delta U\} - \frac{1}{\beta \Delta t} \{\dot{U}\}_t - \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right) \{\ddot{U}\}_t \quad (7)$$

ここで、 $[K_{eff}]$ 、 $\{F_{eff}\}$  は、それぞれ有効剛性マトリックス、有効荷重ベクトルを表している。また、各変数の左肩の  $(k)$  は反復回数を表す。

理想化陽解法の手順を適用するため、式 (2) に対して新たに仮想的な時刻  $\tau$  における慣性項、減衰項を加えた次式を考える。

$$[M_{dum}] \{\ddot{U}_{dum}\}_{\tau} + [C_{dum}] \{\dot{U}_{dum}\}_{\tau} + [K_{eff}] \{U_{dum}\}_{\tau} = \{F_{eff}\}_{\tau} \quad (8)$$

ここで、 $[M_{dum}]$ 、 $[C_{dum}]$  は、それぞれ仮想的な質量マトリックスおよび減衰マトリックスであり、 $\{\ddot{U}_{dum}\}_{\tau}$ 、 $\{\dot{U}_{dum}\}_{\tau}$ 、 $\{U_{dum}\}_{\tau}$  は、それぞれ仮想的な時刻  $\tau$  における加速度ベクトル、速度ベクトルおよび変位ベクトルである。式 (8) に対して、動的陽解法と同様に中心差分を適用し次式を得る。

$$\left( \frac{1}{\Delta \tau^2} [M_{dum}] + \frac{1}{2\Delta \tau} [C_{dum}] \right) \{U_{dum}\}_{\tau+\Delta \tau} = \{F_{eff}\}_{\tau} + [M_{dum}] \left( \frac{2}{\Delta \tau^2} \{U_{dum}\}_{\tau} - \frac{1}{\Delta \tau^2} \{U_{dum}\}_{\tau-\Delta \tau} \right) + \frac{1}{2\Delta \tau} [C_{dum}] \{U_{dum}\}_{\tau-\Delta \tau} - [K_{eff}] \{U_{dum}\}_{\tau} \quad (9)$$

式 (9) を用いて、仮想的な慣性項および減衰項の影響が無視できる程度に小さくなるまで仮想的な時間ステップを進め、その時点の  $\{U_{dum}\}$  を  $\{\Delta U\}$  に代入することで、式 (2) を用いて収束計算を行ったものと同様の解が得られる。また、式 (9) を用いて収束が得られるまで仮想的な時間ステップを進める計算を行う際に、仮想的な質量マトリックス  $[M_{dum}]$  および仮想的な減衰マトリックス  $[C_{dum}]$  に通常物理的に導出されるものを用いた場合、仮想的な時間増分にきわめて小さい値を用いる必要があり、収束に要する計算回数が増大することが予想される。ここで、式 (9) を用いた収束計算は収束解である  $\{U_{dum}\}$  を得るための仮想的なものであることから、収束性を高めるために 1 次元の振動問題における臨界減衰の考え方を基に、 $[M_{dum}]$  と  $[C_{dum}]$  を決定する<sup>[13]</sup>。

以上の定式化を用いることで、理想化陽解法の手順に基づき、動的解析を行うことができる。

SP 時の荷重は、ごく短時間にごく小さい領域に集中して作用する。本研究では、この荷重分布の履歴をモデル化し、荷重ベクトルとして与えることで SP による残留応力分布の変化を解析した。Fig. 1 にショット衝突過程の模式図を示す。同図 (a) で、最初にショットが初速  $v_1$  で衝突し、反力が生じ始める。その後、弾性変形が進行して反力が大きくなる

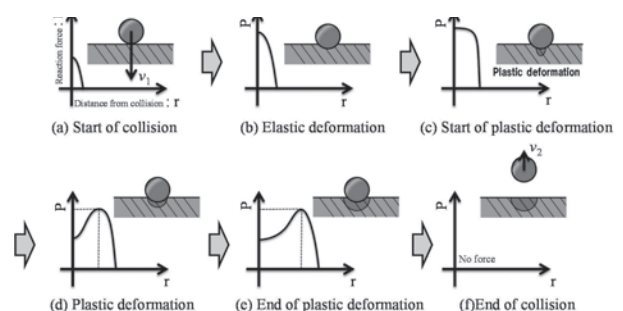


Fig.1 Schematic illustration of reactive force for each stage of shot collision.

(b)。そして、さらに衝突が進行し、衝突の中心が降伏応力に達した時点で衝突の中心から塑性変形が始まる(c)。塑性変形が始まると、その開始点である衝突の中心から荷重の増加が緩やかとなり、塑性変形が進行すると、衝突の中心より周囲の反力が大きくなる(d)。そして、ある段階で塑性変形が終了し(e)、ショットが速度 $v_2$ で跳ね返ることで衝突が終了する(f)。この衝突時の荷重分布の履歴を次式で示す衝突時の荷重の分布形状を決定する関数 $f$ と荷重の総量の履歴を決定する関数 $g$ の積でモデル化する。

$$P(\rho, \tau) = f(\rho, \tau) \cdot g(\tau) \quad (10)$$

ここで、 $P(\rho, \tau)$ ,  $f(\rho, \tau)$ ,  $g(\tau)$ , をそれぞれ荷重分布履歴関数、荷重分布関数、荷重履歴関数と定義する。また、 $\rho, \tau$ は、それぞれ次式で定義する衝突点からの正規化距離、正規化衝突時間である。

$$\rho = \frac{r}{r_0}, \tau = \frac{t}{t_0} \quad (11)$$

ここで、 $r, r_0$ はそれぞれ衝突点からの距離、ショットの半径であり、 $t, t_0$ はそれぞれショットの衝突開始からの時刻、ショットの衝突期間である。荷重分布関数の一例として、Fig. 1で模式的に示した荷重分布の傾向を再現するため、式(12)および式(13)の6次の多項式で定義する。式(12)の荷重分布関数に次式で表される係数を採用した場合、荷重分布関数はFig. 2のように定義され、Fig. 1で仮定したショット衝突時の荷重分布の傾向を再現できる。

$$f(\rho, \tau) = \frac{a(\rho, \tau)}{\int_0^1 a(\rho, \tau) 2\pi\rho d\rho} \quad (12)$$

$$a(\rho, \tau) = a_6(\rho, \tau)\rho^6 + a_4(\rho, \tau)\rho^4 + a_2(\rho, \tau)\rho^2 + a_0$$

$$a_0 = 0.655, a_2 = 4$$

$$a_4 = 10000 \left( \frac{1}{1 + \exp(-5(\tau + 0.75))} - 1 \right) \quad (13)$$

$$a_6 = 10$$

また、荷重履歴関数として、式(14)、(15)のよう

な関数形を仮定すると、その履歴はFig. 3に示すようになる。式(14)の荷重履歴関数の係数 $b$ は、衝突前後のショットの運動量の差 $m(v_2 - v_1)$ 、すなわち、ショットの衝突が対象に与える力積を用いて定義する。

$$g(\tau) = b \sin\left(\frac{\tau^2 + 2\tau}{3}\pi\right) \quad (14)$$

$$b = \frac{a(\rho, \tau)}{\tau_0 \int_0^1 \sin\left(\frac{\tau^2 + 2\tau}{3}\pi\right) d\tau} \quad (15)$$

以降、上述の荷重分布履歴の関数を等価荷重モデルと定義した。

SPにおいては、膨大な数のショットが対象物に衝突することから、時間的、空間的にランダムで、かつ対象物に膨大な回数作用する荷重分布を想定する必要がある。そこで本研究では、時間的、空間的にランダムな荷重分布を対象物に作用させる解析システムを作成した。本システムでは、ランダムなタイミングで任意の節点を選択し、その節点を衝突の中心として等価荷重モデルを使用して荷重ベクトルを算出することで、動的弾塑性解析を実施した。弾塑性解析においては、GPU並列化を考慮<sup>[14]</sup>した理想化陽解法を使用する。以上の手順を指定された時刻に達するまで繰り返すことでSPによる応力の変化を解析した。

### 3 開発したFEM解析手法の検証のための残留応力測定方法

開先加工後に900℃で応力除去焼鈍したSUS316LTP S-H オーステナイト系ステンレス鋼管(以下、SUS316L)を用いて、外径161.5mm、肉厚11.25mm、長さ195mmの円筒形状の溶接試験体を製作した。Fig. 4に開先寸法を示す。長さ中央部の周方向に開先加工を施し、試験体を回転させて全周下向き姿勢でTIG溶接した。なお、溶接条件は電流180A、電圧10V、溶接速度1.33mm/s、ワイヤ送給

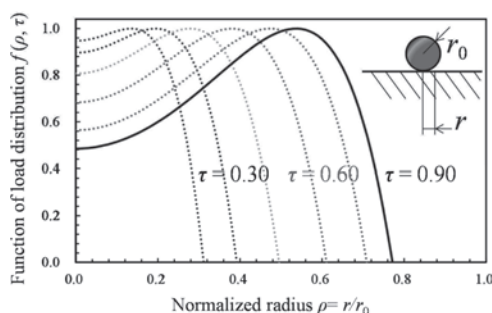


Fig.2 Function of load distribution.

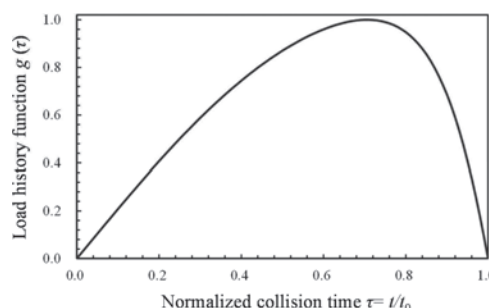


Fig.3 Load history function.



速度 0.106g/s で、10 層 10 パスで積層した。Fig. 5 に溶接試験体の外観写真を示す。溶接後、裏波と余盛を研削して外径 161.5mm、肉厚 11.25mm に仕上げた。そして、製作した溶接試験体の一部に、外表面における溶接部の幅約 50mm の範囲に SP を施した。Table 1 に SP 条件を、Fig. 6 に SP を施した溶接試験体の外観写真を示す。

実機は、起動・停止により熱サイクルが付与される。そのため、実機の運転温度に曝されたときの圧縮残留応力の変化を把握するため、溶接試験体に熱処理を施した。保持温度は、加圧水型原子炉の設計上の最高温度である 350℃で行い、Okimura らの報告<sup>[11]</sup>から、350℃では保持時間が長くなっても圧縮残留応力はほとんど緩和しない、すなわち保持中にクリープ変形はほとんど生じないことから、保持時間は 1hr とした。また、加熱・冷却速度は 120℃/hr 以下とした。

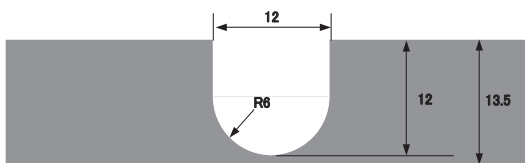


Fig. 4 Schematic illustration of groove shape.



Fig. 5 Appearance of pipe butt-welded joint.

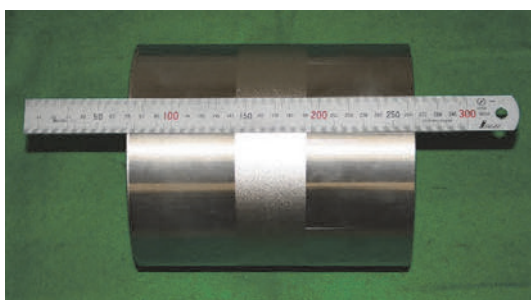


Fig. 6 Appearance of pipe butt-welded joint after SP.

また、X線回折法を用いて、各段階における表面残留応力を測定した。Table 2 に測定条件を示す。sin<sup>2</sup> ψ法を用いて測定<sup>[15]</sup>し、X線照射領域はφ1mmとした。なお、結晶粒径が大きい等の要因で、回折線の形状が乱れる場合はφ2mmで測定した。

#### 4 開発したFEM解析手法の妥当性検証

本章では、2章で開発したFEM解析手法を用いて、3章で行った溶接⇒SP⇒熱処理の一連のプロセスにおける残留応力を再現し、開発したFEM解析手法の妥当性を検証した。Fig. 7 に作製した解析モデルを示す。モデルは全て六面体要素を使用し、節点数と要素数は、それぞれ3,494,600と3,004,664である。なお、溶接は全周に渡り各パスの解析を行ったが、SPは円周方向に70°の領域で実施し、その中央部であるA-A'間の残留応力を出力した。

解析手順は、初めに溶接残留応力を理想化陽解法

Table 1 SP condition applied to SUS316L welded joint.

Equipment	Impeller method
Cut wire	SUS304 (φ0.8mm, 0.8mmL, Hv468)
Projection speed	30m/s
Rotation speed of stage	12r.p.m.
Projection time	280s
Coverage	200%

Table 2 Condition of residual stress measurement by X-rays diffraction method.

Characteristic X-ray	Mn Kα
Tube voltage (kV)	20
Tube Current (mA)	4
Diffraction	γ-Fe 311
Diffraction angle 2θ(deg)	152.2
Number of X-ray incident angle ψ	9
X-ray elastic constant E/(1+ν) (GPa)	149

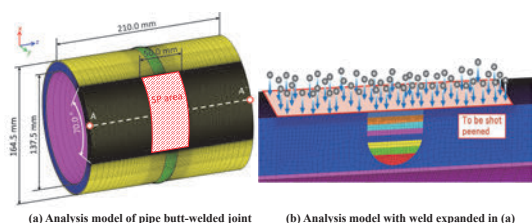


Fig. 7 FEM analysis model of SUS316L austenite stainless steel pipe butt-welded joint.

による熱弾塑性解析を用いて求める。次に、裏面（内表面）と余盛（外表面）の研削加工により除去される領域の要素を無効化し、これに伴う残留応力の再配分を再現する。そして、1章で開発した解析手法を用いてピーニングの解析を実施し、残留応力分布の改善効果を確認した後、350℃の熱処理を施した。なお、本研究ではショットの投射量を次式で定義する衝突面積率  $R_c$  として表した。

$$R_c = \frac{A \cdot N_p}{S} \quad (16)$$

ここで、 $A$ 、 $N_p$ 、 $S$ は、それぞれ一発のショットの衝突で荷重が負荷される面積、衝突回数、衝突対象領域の面積である。

Fig. 8に溶接のままにおける外表面の残留応力分布を示す。測定結果と解析結果は、ほぼ同じ分布を示し、周方向、軸方向ともに最大で200MPaの引張残留応力が生じていた。Fig. 9に  $R_c$ の増加に伴う溶接部近傍の残留応力変化を示す。溶接のままで生じた引張残留応力はSPで圧縮残留応力に変換し、周

方向、軸方向ともに-500~-600MPaの高い圧縮残留応力が付与された。また、 $R_c$ の増加に伴い、表面の圧縮残留応力は高くなる傾向を示し、 $R_c=50$ がSPで付与した圧縮残留応力に近い値になった。したがって、本研究のSP条件は、 $R_c=50$ に相当することが示唆された。Fig. 10に350℃の熱処理後の残留応力分布を示す。熱処理後も高い圧縮残留応力を持続していたが、100~200MPa圧縮残留応力が緩和した。解析結果は、測定結果とほぼ同じ値を示し、その差は150MPa未満であった。したがって、解析結果は測定結果を良好に再現できていると考えられ、開発したFEM解析手法の妥当性を明らかにすることができた。なお、本研究はSPを対象にしたが、ウォータージェットピーニングや超音波ショットピーニングについても、各工法に応じた等価荷重モデルを構築して解析することが可能だと考えられる。しかし、レーザピーニングについては、レーザによる熱的要因も加味する必要があることから、新たなモデルを構築する必要があると考えられる。

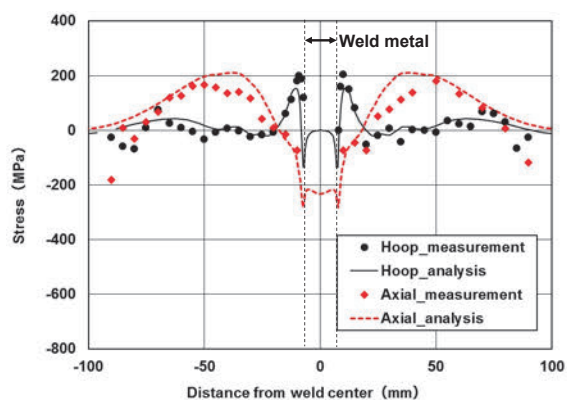


Fig. 8 Residual stress distribution of as-welded state.

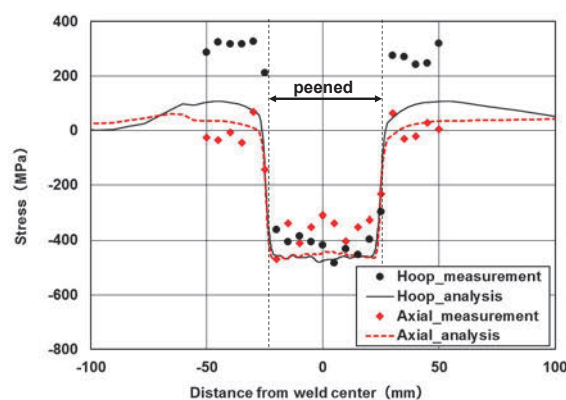
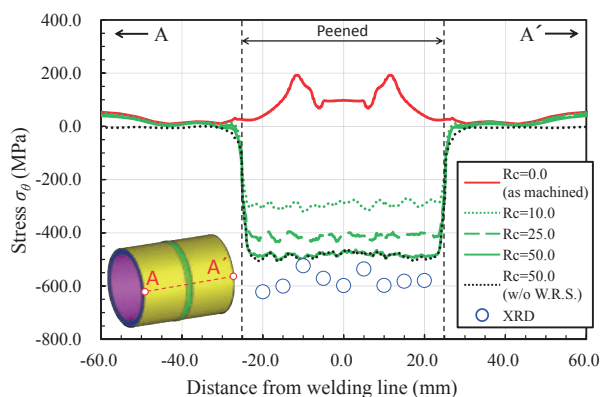
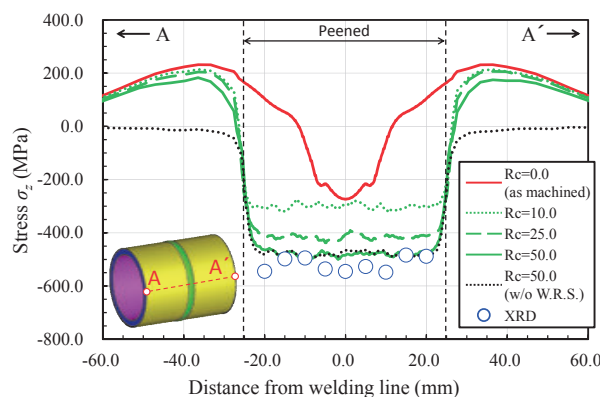


Fig. 10 Residual stress distribution after heat treatment at 350 °C in welded joint after application of SP.



(a) Hoop direction



(b) Axial direction

Fig. 9 Effect of  $R_c$  value on residual stress distribution.

## 5 結言

本研究は、溶接⇒SP⇒運転時を想定した熱負荷、の一連のプロセスにおける残留応力を予測するため、理想化陽解法を基本としたFEM解析手法を開発し、測定値と比較して開発したFEM解析手法の妥当性を検証した。結果を以下にまとめる。

- 1) 理想化陽解法を基本としたSPが解析可能なFEM解析手法を開発した。本手法は、ランダムなタイミングで任意の節点を選択し、その節点をショットの衝突の中心として等価荷重モデルを使用して荷重ベクトルを算出するものである。
- 2) SUS316Lの円筒形状の溶接試験体を対象に、溶接⇒SP⇒運転時を想定した熱負荷による残留応力変化を測定し、開発したFEM解析手法の解析結果と比較したところ、測定結果と解析結果は良好に一致した。したがって、開発したFEM解析手法を用いることで、溶接⇒SP⇒運転時を想定した熱負荷、の一連のプロセスにおける残留応力を予測できるものと考えられる。

## 参考文献

- [1] 坂田信二, 榎本邦夫, 清水翼, 佐川渉: サーマルスリーブ付ノズルの高周波加熱応力改善法の開発, 溶接学会論文集, 6-1 (1988), 64-70.
- [2] Y. Sano, M. Obata, T. Kubo, N. Mukai, M. Yoda, K. Masaki and Y. Ochi: Retardation of Crack Initiation and Growth in Austenitic Stainless Steels by Laser Peening without Protective Coating, Materials Science and Engineering, A417 (2006), 334-340.
- [3] 齋藤昇, 守中廉: ウォータージェットピーニングによる炉内機器の残留応力低減, 溶接学会誌, Vol. 74, No. 7 (2005), 469-472.
- [4] 角谷利恵, 田澤俊幸, 橋崎千尋, 齋藤利之: レーザピーニング施工面の圧縮残留応力に及ぼす外部応力負荷の影響, M & M2009 材料力学カンファレンス CD-ROM 論文集 (2009), 340-342.
- [5] 小畑稔, 久保達也, 依田正樹, 佐伯綾一, 石川達也: レーザピーニングにより形成した圧縮残留応力の緩和特性評価, M & M2009 材料力学カンファレンス CD-ROM 論文集 (2009), 343-344.
- [6] 政木清孝, 若林豊, 越智保雄, 松村隆, 佐野雄二, 久保達也: レーザピーニング処理したSUS316L鋼の高サイクル疲労挙動, M & M2004 材料力学カンファレンス講演論文集 (2004).
- [7] 吉村敏彦, 大城戸忍, 榎本邦夫, 守中廉, 平野

克彦, 黒澤孝一, 林英策: ウォータージェットピーニングによる原子炉内機器溶接部の残留応力低減, 日本材料学会第38回X線材料強度に関する検討会 (2001), 38-44.

- [8] 齋藤昇, 波東久光, 吉久保富士夫, 守中廉: WJPによる残留応力改善効果の持続性評価, 日本材料学会第59期学術講演会講演論文集 (2010), 307-308.
- [9] 佐川渉, 吉久保富士夫, 守中康, 菅野明弘, 波東久光, 齋藤昇: ウォータージェットピーニング(WJP)技術のBWR炉内構造物への適用, 保全学, Vol.7, No.4 (2009), 69-76.
- [10] 前口貴治, 堤一也, 豊田真彦, 太田高裕, 岡部武利, 佐藤知伸: ピーニングによる応力腐食割れ防止効果に関する研究, 日本保全学会第7回学術講演会要旨集 (2010), 568-571.
- [11] K. Okimura, T. Ohta, T. Konno, M. Narita and M. Toyoda: Reliability of Water Jet Peening as Residual Stress Improvement Method for Alloy 600 PWSCC Mitigation, Proceeding of the 16<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Engineering, ICONE16, May11-15, 2008, Orlando, Florida, USA.
- [12] 西川聡, 大北茂, 山口篤憲: 応力改善工法で付与される圧縮残留応力の持続性, 保全学, Vol.11, No.4 (2013), 69-76.
- [13] K. Ikushima and M. Shibahara: Large-scale non-linear analysis of residual stresses in multi-pass welded pipe welds by idealized explicit FEM, Welding in the World, Vol.59 (2015), 839-850.
- [14] M. Jebahi, A. Gakwaya, J. Levesque, O. Mechri and K. Ba: Robust methodology to simulate real shot peening process using discrete-continuum coupling method, International Journal of Mechanical Science, Vol.107 (2016), 21-33.
- [15] 日本材料学会 X線材料強度部門委員会: X線応力測定法標準 (2002年版) - 鉄鋼編 - (JSMS-SD-5-02).



西川 聡



古川 敬



# 火技解釈におけるマンホールカバーの 最小厚さに関する検討

Investigation of minimum required thickness of manhole cover in the Kagikaishaku

規格基準室 佐藤 長光, 鹿島 光一

The Kagikaishaku quotes a lot of paragraphs in the JIS B 8201. Design margin (DM) of the JIS B 8201 is 4 while DM of the Kagikaishaku is 3.5. Therefore, the paragraph in the JIS B 8201 which the Kagikaishaku quoted was investigated. The investigation criteria were assumed to be described to ASME Section I or ASME Section VIII-1. Neither “Rectangular header”, “Shell boiler” nor “Minimum required thickness of manhole cover” were described to ASME Section I or ASME Section VIII-1. Application of three items to DM3.5 was investigated. As a result, three items confirmed the Kagikaishaku was able to be quoted. This paper is described to the outline of the investigation result of minimum thickness of a manhole cover.

**Keywords** Kagikaishaku, JIS B 8201, design margin, minimum required thickness of manhole cover

## 1 はじめに

発電用火力設備の技術基準の解釈（以下、火技解釈という）は、JIS B 8201<sup>[1]</sup>の多くのパラグラフを引用している。許容引張応力は、引張強さで代表される機械的性質に対して予想される損傷モードの設計裕度である設計マージン（以下、DM という）に基づいている。火技解釈のDMは3.5であるのに対しJIS B 8201のDMは4である。

このため、火技解釈が引用しているJIS B 8201のパラグラフについてDM 3.5で適用できるか確認した。確認した際の判定基準は、DM 3.5である米国機械学会のボイラーコード（以下、ASME Section I という）または圧力容器コード（以下、ASME Section VIII-1 という）に同様の規定があることとした。

確認した結果、次の3項目については、ASME Section IまたはASME Section VIII-1に同様の規定がなかった。

①長方形管寄せ

②一部の丸ボイラーの規定内容

③マンホールカバーの最小厚さ

長方形管寄せについては、内圧により発生する引張応力と曲げ応力の合成応力から最小厚さを求めるものであり<sup>[2]</sup>、穴のある側面での最小厚さと穴のない側面での最小厚さを求めている<sup>[3]</sup>。これらにより、DM 3.5で適用できることを個別確認した。なお、これらの最小厚さの求め方を規定している式の前身は、ドイツの式を改良したものであったが、実状に適しないため大いに研究され、理論的研究と経験から定められており、ASME Section IまたはASME Section VIII-1にはない独特のものである<sup>[4]</sup>。

一部の丸ボイラーの規定内容については、許容引張応力に基づいた最小厚さ計算等はなく、最高使用圧力と形状等のみで最小厚さが決まる。このため、DMとは関係なく適用できることを個別確認した。

マンホールカバーの最小厚さについては、Ensslin（エンスラン）の式及びこれに基づいた山中の式<sup>[5, 6]</sup>によっている<sup>[7-10]</sup>が、Ensslinの式に関する原論文が入手困難であるため、これにかわり、材料力学を

ベースとした Timoshenko の式<sup>[11]</sup>を用いて材料力学的観点からその理論的根拠について調査した。これより、マンホールカバーの最小厚さの計算式が DM 3.5 で適用可能な式であるのか否かについて確認を行うと共に、DM の相違がマンホールカバーの最小厚さに及ぼす影響について検討した。本報では、その概要を報告する。

## 2 マンホールカバーの最小厚さの規定

マンホールに用いる楕円の平鋼板製カバー(図1)で、周辺が自由支持されているものの最小厚さ( $t$ )は式(1)によって求めることが火技解釈第9条第1項第四号が引用している JIS B 8201 の「6.7.8 マンホールカバーの最小厚さ a)」において規定されている。

$$t = \frac{5B}{c} \sqrt{\frac{P}{\sigma_a}} + \alpha_1 \quad (1)$$

ここで、 $B$ は、穴の短径 (mm)

$c$ は、短径( $B$ )と長径( $A$ )の比での係数で図2による。ただし、 $B/A = 1$ のときは9.0とする。

$P$ は、最高使用圧力 (MPa)

$\sigma_a$ は、許容引張応力 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )

$\alpha_1$ は、付け代で、1 mm 以上とする。

なお、図2については、文献等<sup>[1, 5, 6]</sup>に基づいて作図している。

気密を保つため、楕円板の平鋼板製カバーを容器の内側に取り付ける。内側に取り付けることにより、内圧がカバーに働いて気密を助けることになる。なお、図1では、マンホールカバーを取り付ける、クロスバー、ボルトナット及びパッキン等については省略している。

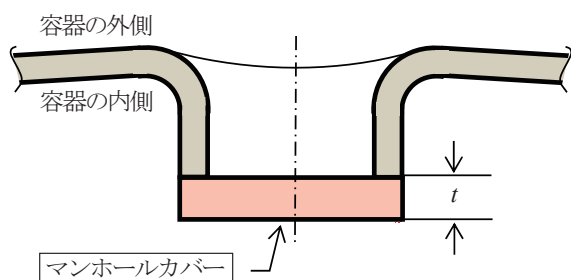


図1 マンホール及びカバーの断面イメージ

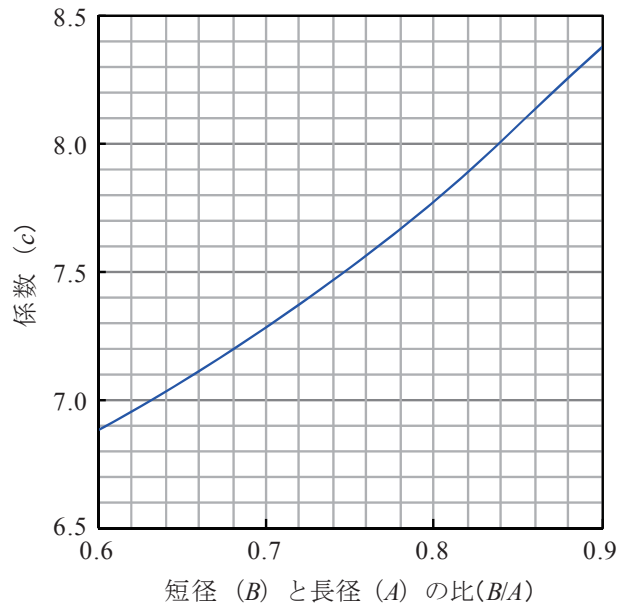


図2 JIS B 8201 の短径と長径の比での係数

## 3 マンホールカバーの最小厚さの根拠

Ensslin の式に関する原論文が入手困難であったため、材料力学に基づいた DM 3.5 への適用確認を行った。

まず、マンホールカバーを、図3に示す均一連続分布荷重を受ける周辺が自由支持されている楕円板でモデル化する。材料力学における板曲げの理論から、曲げモーメントの最大値( $M_{max}$ )及び最大曲げ応力( $\sigma_{max}$ )は、楕円板の中心において生じ、Timoshenko の文献<sup>[11]</sup>より式(2)及び式(3)で与えられる。なお、Timoshenko の文献<sup>[11]</sup>では、Galerkin 他の研究成果として次式等を引用しているが、以下では、これを Timoshenko 文献の式あるいは値とする。

$$M_{max} = \beta_1 b^2 q \quad (2)$$

$$\sigma_{max} = 6 \frac{M_{max}}{t^2} = 6 \beta_1 \left(\frac{b}{t}\right)^2 q = \beta_2 \left(\frac{b}{t}\right)^2 q \quad (3)$$

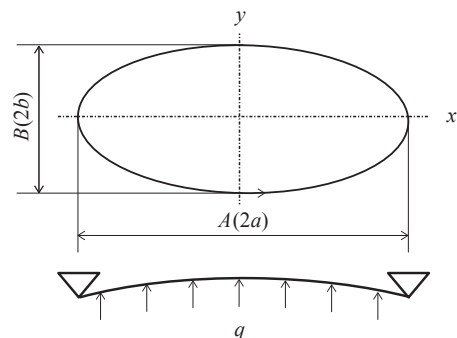


図3 均一連続分布荷重を受ける周辺自由支持の楕円板

表1 短径 (b) と長径 (a) の比での応力係数 (β<sub>1</sub>) 及び係数 (c<sub>1</sub>) (ポアソン比0.3)

a/b	5	4	3	2	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1
b/a	0.20	0.25	0.33	0.50	0.67	0.71	0.77	0.83	0.91	1.00
β <sub>1</sub>	0.480	0.465	0.433	0.379	0.321	0.303	0.282	0.261	0.235	0.206
c <sub>1</sub>	0.589	0.599	0.620	0.663	0.721	0.742	0.769	0.799	0.842	0.899

ここで、β<sub>1</sub> または β<sub>2</sub> は、応力係数で β<sub>1</sub> = β<sub>2</sub>  
 t は、楕円板の厚さ  
 a は、楕円板の長径 A の 1/2  
 b は、楕円板の短径 B の 1/2  
 q は、楕円板への均一連続分布荷重。

ポアソン比 (ν) が 0.3 の場合、応力係数 (β<sub>1</sub>) は各種の長径と短径の比 (a/b) に対する数値結果として、表 1 のように与えられている<sup>[11]</sup>。ここで β<sub>2</sub> = 6β<sub>1</sub> = (1/c<sub>1</sub>)<sup>2</sup> と置き換え、a/b または b/a に対する係数 (c<sub>1</sub>) の値についても表 1 に示す。

さらに、Young の文献<sup>[12]</sup> によれば、式 (3) の応力係数 (β<sub>2</sub>) は式 (4) で与えられる。ただし、有効範囲は 0.2 < b/a < 1.0 である。

$$\beta_2 = 2.816 + 1.581\nu - (1.691 + 1.206\nu) \left( \frac{b}{a} \right) \quad (4)$$

ここで、ν は、ポアソン比  
 b/a は、短径と長径の比

短径と長径の比 (b/a) が 0.6 から 0.9 での係数 (c<sub>1</sub>) との関係を図 4 に示す。同図で●印は表 1 に示した Timoshenko 文献の値<sup>[11]</sup> を、実線は式 (4) より得

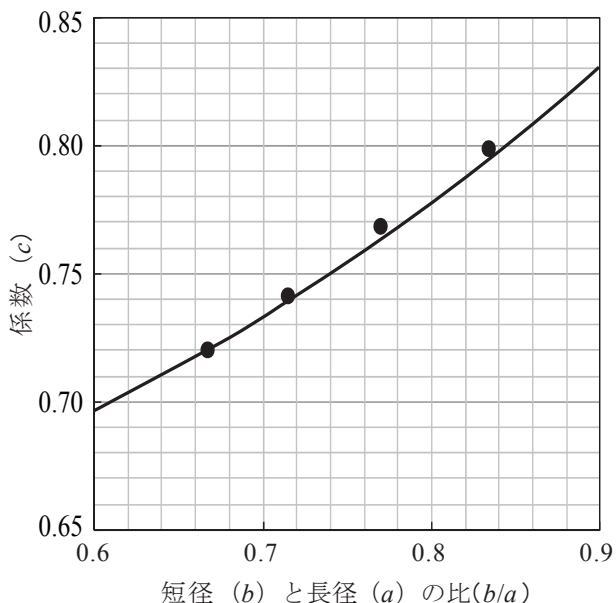


図4 Timoshenko 文献での短径と長径の比での係数

られる結果である。

これより、式 (4) は Timoshenko 文献の値<sup>[11]</sup> に対して良好な近似式であることがわかる。

楕円板の厚さ (t) は、式 (3) 及び β<sub>2</sub> = (1/c<sub>1</sub>)<sup>2</sup> から式 (5) で与えられる。

$$t = \frac{b}{c_1} \sqrt{\frac{q}{\sigma_{max}}} \quad (5)$$

ここで、b は、楕円板の短径 B の 1/2

c<sub>1</sub> は、短径 B の 1/2 (b) と長径 A の 1/2 (a) の比での係数で図 4 による。

q は、楕円板への均一連続分布荷重

σ<sub>max</sub> は、最大曲げ応力

式 (5) の分母と分子に 10 を乗じ、楕円板への均一連続分布荷重 (q) を最高使用圧力 (P) に、最大曲げ応力 (σ<sub>max</sub>) を許容引張応力 (σ<sub>a</sub>) に変えれば、式 (6) が得られる。

$$t = \frac{10b}{10c_1} \sqrt{\frac{P}{\sigma_a}} = \frac{5B}{c} \sqrt{\frac{P}{\sigma_a}} \quad (6)$$

ここで、b は、楕円板の短径 B の 1/2 (mm)

c<sub>1</sub> は、短径 B の 1/2 (b) と長径 A の 1/2 (a) の比での係数で図 4 による。

P は、最高使用圧力 (MPa)

σ<sub>a</sub> は、許容引張応力 (N/mm<sup>2</sup>)

c は、10c<sub>1</sub>

式 (6) は式 (1) の付け代 (α<sub>1</sub>) を除いて一致し、図 4 の縦軸 (係数 (c<sub>1</sub>)) を 10 倍すれば、図 2 の縦軸 (係数 (c)) とほぼ一致する。

なお、それぞれの式中の係数である c と 10c<sub>1</sub> は概ね一致した値を示しているが、図 2 と図 4 を詳細に見れば差異が認められる (特に B/A = b/a = 0.6 の近辺)。楕円板は円板と異なり境界条件の扱いが複雑であるため、上記の c や 10c<sub>1</sub> を理論的に求めるこ



表2 短径と長径の各比での係数の比較

係数と差及び 差の比率	短径と長径の比 (B/Aまたはb/a)				
	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
c	6.88	7.28	7.77	8.38	9.00
10c <sub>1</sub>	6.97	7.35	7.79	8.33	8.99
差(10c <sub>1</sub> -c)	0.09	0.07	0.02	-0.05	-0.01
差の比率(%)	1.3	1.0	0.3	-0.6	-0.1

とはできない。そのため、数値解析を用いたものと考えられるが、用いた解析法によっては結果に差異が生じる可能性がある。図2と図4の短径と長径の比 (B/A または b/a) が 0.6, 0.7, 0.8 及び 0.9 での係数 (c 及び 10c<sub>1</sub>) の値と両者の差の比率について表2に示す。ここでは、短径と長径の比が 1.0 での係数 (c 及び 10c<sub>1</sub>) の値と両者の差の比率もあわせて示している。差の比率は、最大でも 1.3% である。

同様の比較をマンホールカバーの最小厚さ (t) について行った。短径と長径の各比 (B/A または b/a) が 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 及び 1.0 での図2及び図4の係数 (c 及び 10c<sub>1</sub>) を用いて、最高使用圧力 (P) が 5 MPa, 最高使用温度が 200℃, 短径 (B) が 340 mm, 許容引張応力 (σ<sub>a</sub>) が 118 N/mm<sup>2</sup> での SB410 を例とした式 (1) と式 (6) に基づいたマンホールカバーの最小厚さ (t) を求めた結果を図5及び表3に示す。ただし、付け代 (α<sub>1</sub>) については考慮していない。差の比率は、最大でも -1.3% である。

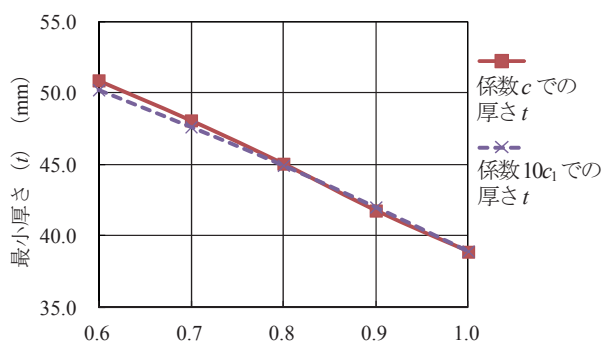


図5 マンホールカバーの最小厚さの比較

表3 マンホールカバーの最小厚さの比較 (mm)

係数での最小厚 さ(t)と差及び差 の比率	短径と長径の比 (B/Aまたはb/a)				
	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
(1) 係数 c を用 いた場合の t	50.86	48.07	45.04	41.76	38.88
(2) 係数 10c <sub>1</sub> を用 いた場合の t	50.21	47.61	44.92	42.01	38.93
差 ((2)-(1))	-0.65	-0.46	-0.12	0.25	0.05
差の比率 (%)	-1.3	-1.0	-0.3	0.6	0.1

以上の結果から、JIS B 8201 の式と材料力学による計算式 (Timoshenko 文献の式) とは工学的には等価であることがわかる。

ここで、Timoshenko 文献の式は特定の DM に対応した式ではなく一般的な計算式である。そのため、式 (6) の許容引張応力 (σ<sub>a</sub>) としては、任意の DM に基づいた値を用いることができる。JIS B 8201 の式も Timoshenko 文献式と同等であり、特定の DM に対応した式ではないことから、DM を 3.5 とした火技解釈で適用できることを確認した。

#### 4 DMの相違による最小厚さに及ぼす影響の計算例

ここでは、JIS B 8201 の式を用いて異なる DM に対するマンホールカバーの最小厚さ (t) を計算し、DM の相違の影響について考える。最高使用圧力 (P) が 5 MPa, 最高使用温度が 250℃ 以下の短径 (B) が 340 mm, B/A = 0.82 (c = 7.90) の SB410 を例とした各 DM (4 または 3.5) に基づく許容引張応力 (σ<sub>a</sub>) を用いたマンホールカバーの最小厚さ (t) を図6に示す。

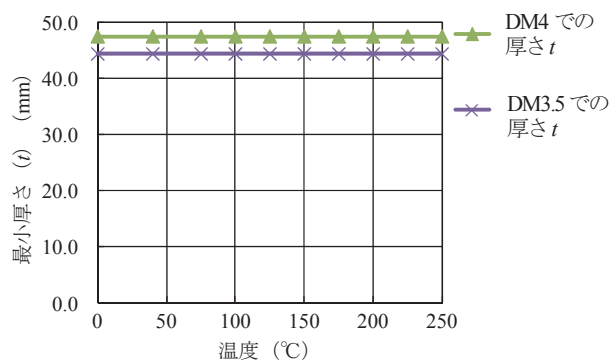


図6 DMに基づく許容引張応力を用いたマンホールカバーの最小厚さ

250℃ 以下では、DM 4 の許容引張応力 (103 N/mm<sup>2</sup>) を用いたマンホールカバーの最小厚さ (t) は 47.41 mm に、DM 3.5 の許容引張応力 (118 N/mm<sup>2</sup>) を用いたマンホールカバーの最小厚さ (t) は 44.30 mm になり、6.6% 減ずることができる。

#### 5 まとめ

JIS B 8201 におけるマンホールカバーの最小厚さの計算式に関し、次の結果を得た。

- (1) JIS B 8201 のマンホールカバーの最小厚さの計算式は、付け代を除き、均一連続分布荷重を受ける周辺が自由支持されている楕円板の厚さに関する Timochenko 文献の材料力学計算式と工学的には等価である。
- (2) 材料力学計算式は、特定の DM を対象とした式ではない。従って、JIS B 8201 の式についても特定の DM を対象とした式でないため、同式を用いて DM 3.5 に対するマンホールカバーの最小厚さを計算することができる。
- (3) なお一例として、250℃以下の SB410 のマンホールカバーでは、DM 3.5 に対する最小厚さは DM 4 に対する最小厚さに対し、約 7% 削減することが可能となる。
- 以上により、火技解釈第 9 条第 1 項第四号が引用している JIS B 8201 の「6.7.8 マンホールカバーの最小厚さ a)」において規定されている式は、DM 3.5 にも適用可能であることを確認した。

#### 参考文献

- [1] JIS B 8201-2013 「陸用鋼製ボイラー構造」
- [2] ボイラー・圧力容器構造規格の解説，社団法人日本ボイラ協会，平成 8 年 4 月 25 日，改訂第 1 版
- [3] 発電用火力技術基準解説，社団法人火力発電技術協会，昭和 42 年 5 月 25 日
- [4] JIS B 8201-1960 「陸用鋼製蒸気ボイラーの構造」解説，財団法人日本規格協会，昭和 35 年 4 月 20 日
- [5] 山中秀男，汽罐の設計，昭和 12 年 12 月 10 日，工業圖書株式会社
- [6] 山中秀男，ボイラーの設計，昭和 44 年 8 月 10 日，改新第 12 刷，産業図書株式会社
- [7] 野原石松，圧力容器，昭和 45 年 6 月 10 日，共立出版株式会社
- [8] JIS B 8201-1967 「陸用鋼製蒸気ボイラーの構造」，財団法人日本規格協会，昭和 42 年 8 月 1 日
- [9] JIS B 8201-1977 「陸用鋼製蒸気ボイラーの構造」，財団法人日本規格協会，昭和 53 年 7 月 20 日
- [10] JIS B 8201-2005 「陸用鋼製蒸気ボイラー構造」，財団法人日本規格協会，平成 17 年 4 月 1 日
- [11] S. Timoshenko, Theory of Plates and Shells, 1940
- [12] W. C. Young, Roark's Formulas for Stress & Strain, 1989



佐藤長光



鹿島光一

# ASME Section I における PWHTの免除条件の改正動向

Revision to PWHT Exemptions of ASME Section I

規格基準室 大石 勇一

Postweld Heat Treatment (PWHT) is the important process to recover the mechanical properties and reduce residual stress of weld. However, it can affect manufacturing cost and elongate manufacturing process. Therefore, ASME B&PV Committee on Power Boilers has been examined to develop more appropriate exempt conditions from PWHT. As a result of discussion, new exempt conditions for P-1 Gr. 1 base metals were provided in the Section I 2017 Edition to exclude thickness limitation.

**Keywords** PWHT, exempt conditions, P-1, ASME Section I

## 1 はじめに

溶接後熱処理（以下、「PWHT」と略す）は、溶接部の材質改善や残留応力の低減等を目的として行われるが、コストがかかるだけでなく、製造工程が長くなる。また、施工ミス、誤った熱処理条件の適用等により、逆に部材が劣化する恐れもある。このため、ASME (American Society of Mechanical Engineers: 米国機械学会) の規格委員会においては、新たな知見に基づき PWHT の免除規定の見直しが適宜行われている。たとえば、ASME Section I (Rules for Construction of Power Boilers) における大幅な改正は、2009 Addenda において行われており、母材区分 P-1 (炭素鋼) に対して CE (炭素当量) を導入することにより、免除される母材の厚さを 3/4 in. (19mm) 以下から 1 1/4 in. (38mm) 以下に拡大している。

その後も PWHT の免除条件に関する調査研究が継続して行われており、2011 年に発表された EPRI (Electric Power Research Institute) の技術レポー

ト<sup>[1]</sup>に基づいて、更なる改正案が提案された。改正案は、既に承認されており、ASME Section I の場合、2017 Edition に反映された。このため、EPRI の技術レポートの概要及び Section I の改正内容について紹介する。

## 2 試験の内容

母材区分 P-1 (炭素鋼) の溶接部に対する PWHT の免除条件は、溶接を行う部材 (母材) の種類や溶接部の厚さによって制限されており、Section I 2015 Edition の場合、溶接厚さが 38mm を超えると PWHT が必須要求になる。この規定は、長年の間、PWHT の有無に起因するトラブルを防いできた実績があるが、P-1 の溶接部に対しては、これまで過度に保守的な条件であるという意見が度々上がっていた。また、厚い母材の溶接部に対する PWHT の免除条件が、最新の技術的根拠に基づいて拡大されると、大型構造物の製造、改造、補修等が容易になり得る。このため、EPRI がスポンサーとなり、PWHT の免除条件における厚さ制限を見直すための



調査研究が“Welding and Repair Technology Center”により行われてきた。

報告されている試験の内容は、以下のとおりである。

### (1) 試験の概要

2005～2008年頃に行われた調査研究では、様々な材料の溶接部について、溶接のまま (as-weld) の状態で機械的性質の調査研究が行われてきた。19mmから38mmまでの母材厚さについて試験を行ったところ、焼入れ性の低い鋼材についてマルチパス溶接を行うと、その溶接入熱によりHAZ (Heat Affected Zone: 溶接熱影響部) の硬さが十分に低減されることが確認された。ここで、「19mm」は当時のSection IにおいてPWHTが免除される最大厚さであり、「38mm」はSection VIII等において免除される最大厚さである。この結果に基づき、Section Iは、2009 Addendaにおいて免除条件の厚さ制限を38mmに拡大している。また、この改正を技術的にサポートする試験として、ジョミニー試験、硬さ試験 (マイクロビッカース)、衝撃試験、曲げ試験、低サイクル疲労試験が行われたが、母材区分P-3、P-4、P-5A等の合金鋼の溶接部については、その高い焼入れ性によりHAZの硬さを十分に低減できるという結果が得られなかったため、規定の見直しは行われていない。

その後、2009年には38mm (現行のPWHTの免除条件の上限の厚さ) のP-1材を用いて、幅広い範囲の溶接入熱で溶接を行い、マルチパスの焼戻し効果の確認が行われた。焼戻し効果の確認には、溶接のままの状態での硬さ試験、衝撃試験、曲げ試験が行われている。さらに、2010年には、厚さ50mmの炭素鋼板に大きな溶接入熱を加えて、同様の試験 (衝撃試験を除く) が実施された。以前の調査研究で確認された焼戻し効果は、比較的小入熱の条件で行われたマルチパス溶接によるものであることから、2009～2010年の調査研究では、焼戻し効果が有効になる実用的な限界を探る目的で、溶接入熱の範囲を大きく変えて溶接を行い、溶接部の機械的性質に有意な差があるかどうか調査を行っている。

### (2) 試験材

試験材として用いられた母材は、以前に行われた

調査研究からの一貫性を考慮して、次の材料が用いられている。

① 2009年の調査研究:

SA-516 Gr. 70 (P-1 Gr. 2: SGV480相当), 厚さ38mm

② 2010年の調査研究:

SA-515 Gr. 70 (P-1 Gr. 2: SB480相当), 厚さ50mm

CEに関しては、2005～2008年の調査研究において意図的に高い値のもの (CE = 0.42～0.48, C: 0.18～0.26%) が用いられた。2009～2010年の調査研究では、同じ仕様 (溶鋼番号は異なる) の材料が用いられたが、仕様のばらつきの範囲内でCEが0.42～0.43と若干低いものになった。このため、意図的に高いCEの材料 (CE = 0.64～0.65, C: 0.33～0.28%) も用いられている。

ここで使用されているCEは、EPRIによって提唱されたものであり、次式で表わされる。

$$CE = C + (Mn + Si) / 6 + (Cr + Mo + V) / 5 + (Ni + Cu) / 15$$

上述の式は、係数にSiを含む点がIIWの提唱する式とは異なり、より保守的であると言える。ASME Section Iは、上述のEPRIが提唱する式を採用し、 $CE \leq 0.45$ となる炭素鋼を低焼入れ性の鋼材として扱っている。

### (3) 溶接条件

2005～2008年の調査研究では、溶接方法として全て被覆アーク溶接 (SMAW) が用いられた。このため、2009～2010年の調査研究においても、溶接方法としてSMAWが用いられた。しかし、溶接入熱のHAZに与える影響を確認するのが目的であるため、より大きな入熱のフラックス入りワイヤアーク溶接 (FCAW)、さらには大入熱のサブマージアーク溶接 (SAW) が用いられた。試験に適用された溶接入熱の範囲は、11.1～159.4kJ/in. (437～6276J/mm) である。

溶接は、全てストリンガービードで行われている。

テンパービード溶接の場合、HAZに対する焼戻し効果を管理する目的で溶接パスを置く位置を管理するが、この試験の場合は管理しておらず、あくまでも通常の施工方法で焼戻し効果がどの程度あるのかを確認する試験が行われた。

開先形状に関しては、厚さ 38mm の試験材の場合、衝撃試験の精度を高める目的で片側だけベベル角度を設けたレ形開先が用いられた。しかし、厚さ 50mm の試験材については、衝撃試験を行わないため、通常の V 形開先を用いている。

参考として、溶接に用いられた溶接材料の規格は、次のとおりである。

SMAW : E7018

FCAW : E71T - 1M

SAW : F7A2-EM12K (Wire-Flux)

### 3 試験結果の概要

ASME では、溶接部の健全を判断する指標として靱性、引張強さ、延性等が用いられるため、硬さ試験、衝撃試験、引張試験及び曲げ試験が行われた。EPRI の技術レポートにおいて報告されている試験結果は、次のとおりである。

#### (1) 硬さ試験

硬さ試験は、溶接融合線（ボンドライン）に沿って HAZ の硬さを測定している。測定結果は、平均値が 200 ~ 263HV0.5、ピーク値が 217 ~ 303HV0.5 であった。また、硬さのピーク値は、溶接部の表層、中間層及びルート部のいずれの部位でも測定されており、特定の部位で現れる訳ではないことが確認されている。また、ピーク値 303HV は、厚さ 19mm の試験材で測定されており、必ず厚いものが高硬さになっている訳ではないことが確認された。

溶接のままの状態での測定した硬さの値（平均値またはピーク値）は変化に富み、測定した部位の組織に依存する。硬さの変動幅は、パスの厚さ（溶着厚さ）が厚くなるにしたがって大きくなるように見えるが、250HV0.5 を超えることはほとんどなく、ルートパス付近では、厚さ 38mm の試験材においても全て 250HV0.5 以下になった。

#### (2) 衝撃試験

衝撃試験の結果は、全てのケースにおいて母材よりも良好な結果が得られている。

2005 ~ 2008 年の調査研究では、溶接金属が調査の対象外であったため、HAZ 及び母材についてのみ衝撃試験が行われた。しかし、2009 年の調査研究では、溶接金属についても試験が行われており、母材と同等以上の吸収エネルギーであることが確認されている。

#### (3) 引張試験

溶接のまま（as-weld）の状態での引張試験を行ったが、継手引張強度が母材よりも低い値になる例は見られなかった。この結果、溶接のままであっても、溶接部は母材と同等以上の強度を有すると結論付けている。

#### (4) 曲げ試験

溶接部が適度な延性を有すること、及び溶接部の健全性を確認する目的で側曲げ試験が行われた。試験の結果は、全てにおいて判定基準を満足しており、異常は報告されていない。

### 4 試験結果による考察

溶接部が健全かどうかを判断するために、靱性、引張強さ、延性等が指標として用いられており、2005 年から行われてきた試験の結果は、いずれについても良好であった。健全性を評価するための試験は、硬さ試験に重点が置かれているが、衝撃試験も行われており、特に厚い試験材の HAZ について優れた靱性を有することが確認された。

平均硬さに関しては、厚さ 16mm（現行の全ての Code において PWHT が免除される厚さ）の試験材の値と比較して有意な差が見られなかった。このことから、厚い P-1 溶接物に対して、テンパービード溶接を適用しなくても、マルチパス溶接を行えば、全てについて HAZ の硬化を抑制することができると判断されている。

なお、試験は 50mm までの厚さについて行われたが、P-1 材の場合、厚い母材の「溶接のまま」の溶接部は、PWHT が免除される厚さの「溶接のまま」の溶接部と比較して、機械的性質における有意な差

は見られなかった。このことから、50mmはPWHTを免除厚さの上限になることを示しておらず、さらに厚い材料を溶接したとしても、同様の機械的性質が得られる（50mmを超える厚さでもPWHTを免除できる）と結論付けている。

## 5 ASME Section Iの改正案

EPRIの技術レポートは、多パス溶接を行った場合の焼戻し効果に着目したものであり、母材区分がP-1ならば、テンパービード溶接のような厳密な入熱管理及び積層管理を行わなくても、十分な焼戻し効果が得られ、PWHTを免除することができるとしている。このレポートに基づき、ASME B31.1 (Power Piping) 及び B31.3 (Process Piping) は、P-1溶接部に対するPWHTの免除条件を大幅に改正しており、2016 Editionに反映している。この関係で、Section I 及び Section VIII Division 1 においても

PWHTの免除条件の見直し検討が行われた。

Section Iにおいて提案された改正案は次のとおりであり、昨年の8月に承認されて2017 Editionに反映された。

- ① P-1 Gr. 1 溶接部に対するPWHTの免除条件を新たに設ける。
- ② P-1 Gr. 1 の溶接部は、 $CE \leq 0.45$  であって、溶接厚さが38mm以下の場合にはPWHTを必須要求としない。しかし、溶接厚さが38mmを超える場合は、250°F (120°C) 以上の予熱を必須とする。
- ③ 現行のP-1溶接部に対する免除条件 (General Note (a)) は、P-1 Gr. 2 及び3に適用する条件に変更する。

ここで、グループ (Gr.) 番号とは、同じ溶接性 (同じP-No.) の母材について、壊靱の相違により設けられた区分であり、材料仕様に規定された引張強さが70ksi (485MPa) 未満の炭素鋼は、一般にP-1

表1 PWHTの免除条件の比較

Code 表番号	母材区分	PWHTの免除条件
Section I (2017 Edition) Table PW-39-1	P-1 Gr. 1	次の条件を満足する場合、PWHTは要求されない。(エレクトロスラグ溶接を除く) (1) $CE \leq 0.45$ (2) 溶接厚さ $\leq 1.5$ in. (38mm) (3) 溶接厚さ $> 1.5$ in. (38mm) であって、250°F (120°C) 以上の予熱を行う。
Section VIII Division 1 Table UCS-56-1 (改正案: 2019 Editionに 反映される予定)	P-1 Gr. 1, 2, 3	次の(1)または(2)のいずれかに適合する場合、PWHTは要求されない。 (1) 次の(a)及び(b)の条件を満足する場合 (a) 溶接厚さ $> 3/16$ in. (5mm) であって、多層溶接を行うか、または $\pm 10\%$ の入熱管理と共にシングルパスで確認された溶接施工法を適用する。 (b) 溶接厚さ $> 1$ in. (25mm) であって、200°F (95°C) 以上の予熱を行い、溶接作業中は温度を維持する。 (2) 欄外の(注)参照
B31.1 2016 Edition Table 132.2	P-1 (全てのGr. No.)	次の条件を満足する場合、溶接のタイプに関係なくPWHTは要求されない。 (1) 溶接厚さ $> 3/16$ in. (5mm) であって、多層溶接を行う。溶接施工要領が、溶接入熱 $\pm 10\%$ 及びシングルパスで確認されている場合は、1層またはシングルパスでも良い。 (2) 溶接厚さ $> 1$ in. (25mm) であって、溶接前に200°F (95°C) 以上の予熱を行う。
B31.3 2017 Edition Table 331.1.3	同上	同上

(注) UW-2の規定により、全ての厚さについてPWHTが要求される溶接継手については、次のいずれかの条件を満足する場合は、PWHTが免除される。

- (a) 開先寸法が1/2in. (13mm) 以下であって、すみ肉ののど厚が1/2in. (13mm) 以下の管台を取付ける溶接継手。ただし、継手はリガメント(胴や鏡板の厚さを増すもの)を構成せず、仕上げた穴の内径が2in. (50mm) 以下であり、かつ、200°F (95°C) 以上の予熱を行う。
- (b) 開先寸法が1/2in. (13mm) 以下であって、すみ肉ののど厚が1/2in. (13mm) 以下のチューブと管板の溶接部。ただし、チューブの外径が2in. (50mm) 以下であり、管板の炭素含有量が0.22%を超える場合は、200°F (95°C) 以上の予熱を行う。
- (c) 開先寸法が1/2in. (13mm) 以下、またはすみ肉ののど厚が1/2in. (13mm) 以下の非耐圧部材を耐圧部材に取付ける溶接部。ただし、耐圧部材の厚さが1 1/4in. (32mm) を超える場合は、200°F (95°C) 以上の予熱を行う。
- (d) 耐圧部材に行うスタッド溶接。ただし、耐圧部材の厚さが1 1/4in. (32mm) を超える場合は、200°F (95°C) 以上の予熱を行う。
- (e) クラッド溶接(耐腐食オーバーレイ溶接)または耐食ライニング材を取付ける溶接。ただし、耐圧部材の厚さが1/4in. (32mm) を超える場合は、200°F (95°C) 以上の予熱を行うと共に、1層目の溶接中は予熱温度を維持する。



Gr. 1 に区分されている。

PWHT の免除条件について、Section I と関連する Code の規定を対比する形式で表 1 に掲げる。ただし、Section VIII Division 1 については、承認された改正案の内容を掲げており、2019 Edition に反映される予定である。同じ技術レポートに基づいて検討したにもかかわらず、必ずしも同じ免除条件にはなっていない。たとえば、Section I は、厚さ制限を削除した免除条件の適用を P-1 Gr. 1 に限定しているが、Section VIII, B31.1 及び B31.3 は Gr. 1 に限定していない。これは、各製造 Code によって設計要求が異なることに起因すると考えられる。

Section I の場合、母材及び溶接部に対する靱性要求がないため、衝撃試験に対する判定基準も設けられていない。このため、溶接部の健全性の判断には、基本的に硬さ試験の結果が重要視される。一方、他の製造 Code には靱性要求があるため、溶接部の健全性を判断する指標として、衝撃試験の結果を用いることが可能である。このため、Section VIII, B31.1 及び B31.3 では、P-1 Gr. 2 (SA-515 Gr. 70 及び SA-516 Gr. 70) の試験データにより P-1 Gr. 1 ~ 3 をカバーできると判断されたが、Section I では、保守的に焼入れ性の劣る P-1 Gr. 1 に限定された。しかし、更なるデータが得られた場合は、P-1 Gr. 2 及び 3 についても PWHT の免除条件の見直しが行われると考えられる。

## 6 おわりに

PWHT の免除条件に関する改正の経緯と共に、ASME Section I 2017 Edition に反映された改正案を紹介したが、このような大幅な見直しは過去にも行われており、「1. はじめに」で述べたように 2009 Edition において CE を導入し、免除可能な厚さの上限を他の Code と同じ 38mm に整合させている。今回の改正では、多パス溶接による焼戻し効果を考慮し、PWHT の免除条件に含まれる厚さの制限（ただし、母材区分が P-1 Gr. 1 であって、 $CE \leq 0.45$  の場合に限る）を削除したことが特徴であり、同時に他の Code との整合化も図られている。そして、その妥当性については、次の 3 つがポイントとして挙げられる。

- ① PWHT を免除できる厚さ（16mm）と免除できない厚さの溶接部について、溶接のままの状態で機械的性質を比較した結果、有意な差が見られず、いずれも良好であった。
- ② 試験データは、現行の 38mm が免除厚さの上限となる傾向を示しておらず、さらに厚い 50mm においても有意な変化は見られなかった（厚さによる機械的性質の差が見られなかった）。
- ③ 小入熱（急冷され易い）と大入熱の溶接部の比較を行ったが、多パス溶接を行った場合は有意な差が見られなかった。

我が国では、上述の ASME のような改正を行うと「基準の緩和」と見なす傾向にあるが、ASME においては「最新の技術的知見に基づく規定の最適化」という観点で議論が行われる。ASME は、定量的に明確な判断基準を示すことが困難な場合は、その時点での技術的知見、経験等に基づいて規定を策定するが、不確定要素を考慮して、かなり余裕を見込んだ判断基準（場合によっては Code Case）を与えることが多い。そして、その後得られた試験データ、新しい知見等に基づいて、適宜見直しを行い、より合理的な基準になるよう改正するというアプローチを採用しており、これが改正の多い理由の 1 つでもある。

日本の場合、ASME を参考にしたものであっても、過去の規定を絶対視する傾向にある。しかし、上述した規定化のアプローチを考えると、過去の規定はその当時の技術的知見に基づいたエンジニアリングジャッジメントであり、絶対的なものではないといえる。そして、この ASME の規定化のアプローチは、不確定要素の多い技術（特に新しい技術）を技術基準に採り入れる場合の手法として、我が国においても参考になると考える。

## 参考文献

- [1] EPRI Project Manager: D. Couch, "PWHT Exemption Thickness test Results, Final Report, Aug. 2011 (EPRI Technical Report No. 1022883)"



大石 勇一

# 火技解釈の規定の捉え方について

Kagi-Kaishaku-How the rules are perceived?

規格基準室 長谷川 忠之

A person who installs Electric Facilities obligates conforming requirements to technical standards provided in Electricity Business Act for their facilities in Japan. “Kagi-Kaishaku” is an actual example for the technical requirement to thermal power generation for Electric Facilities.

Although it is known that the rules of Kagi-Kaishaku have provided referring to ASME B&PV Code, the knowledge as a technical basis obtained by discussion and consideration for the rules have been lost. The author and his colleagues have independently investigated the technical basis for Kagi-Kaishaku. In this review, the author explains how the rules should be perceived by the knowledge or deducing obtained in our investigation.

## Keywords *Kagi-Kaishaku*

### 1 はじめに

『発電用火力設備の技術基準の解釈』（以下、火技解釈という）の源流の1つは昭和30年前後の技術基準にまで遡る。当時はボイラーに関してのみ規定されていたが、現在では、ボイラーを始めとする9つの設備とその溶接に対する要求が定められた構成となっている。火技解釈は米国機械学会規格（以下、ASME規格という）を参考に規定されている部分が多いが、個々の条項に関する技術的背景の大半は失われている。

このような背景の下、発電技検は、民間規格作成機関として、日本電気技術規格委員会機構に設置された日本電気技術規格委員会の下で溶接専門部会（以下、WSという）において、火技解釈第10章溶接部の改正要請活動を行っている。

本小文では、WSやその他の調査活動を通じて得られた火技解釈の規定の技術的背景に関する知見や推察を紹介し、規定本文の捉え方や用いられている用語の意味について考えてみたい。

### 2 火技解釈の位置づけ<sup>[1]</sup>

電気事業法では、電気工作物が人体に危害を及ぼすことや物件の損壊を防止するとともに、安定的に電気を供給するため、『発電用火力設備の技術基準を定める省令』（以下、火技省令という）を定め、発電用火力設備の設置者（以下、設置者という）に対して、火技省令に則って運用することを求めている。

火技省令は技術的要件を定めた基準ではあるが具体的な記載ではない。このため、具体的な技術的要件の例示として、国は火技解釈を予め公表している。

その一方、火技解釈があくまで例示であることを踏まえ、火技省令と同等以上の保安水準が満たす技術的根拠のある事項については、火技省令に適合するものと判断するとしており、保安水準を確保する方法は火技解釈の技術的内容に限定されるものではないとしている。しかし、火技省令に対する同等性の証明が設置者の側に求められることに加え、火技解釈が工事計画の認可や検査における、行政手続法に基づく大臣処分の審査基準となっていることと相

まって、現実的には、火技解釈の規定内容が設置者の技術基準適合性の判断基準となっている。

### 3 規定・用語の捉え方

#### (1) 母材の区分

ASME 規格の Section IX では、溶接施工法の認証に要する試験数を減らすため、化学成分や機械的性質、溶接性の類似性等を考慮して母材を区分している。これを一般的には母材の P 番号（以下、P-No. という）といわれているが、別表第 9 の母材の区分は、この考え方を参考に作成されている。

表 1 に P-No. に関する別表第 9 と ASME 規格との比較を示す。P-No. が 1 から 10 番台は鉄鋼系の材料が割り当てられ、以下、20 番台がアルミ及びアルミ合金、30 番台が銅及び銅合金と続いている。

火技解釈の区分は ASME 規格の区分と一致しているが、ASME 規格には、例えば P-10 や P-41 といったように火技解釈にはない区分が存在する。また、区分によっては、P-No. はさらにグループ番号 (Gr.) によって細分化される。例えば、モリブデン鋼の区分である P-3 は火技解釈及び ASME 規格のいずれも Gr.1 から Gr.3 に細分化されている。

ここで、同等とみなせる材料であっても火技解釈と ASME 規格では区分が異なるものもあることに注意が必要である。例えば、火 SCMV28 に代表される高クロム系耐熱鋼は火技解釈では P-5 Gr.2 に区分されるが、同等の ASME 規格材である Grade 91 系材は P-15 Gr.E に区分され、さらに溶接後熱処理（以下、PWHT という）の条件も異なっている。また、グループ番号についても火技解釈と ASME では違いがあり、炭素鋼の区分である P-1 は ASME 規格ではグループ分けされているが、火技解釈ではグループ

分けはなされていない。なお、JIS B 8285『压力容器の溶接施工方法の確認試験』は火技解釈に比べて ASME 規格に近い母材区分となっており、JIS B 8267 は JIS B 8285 の母材区分を採用している。

母材の区分においてポイントとなるのは、溶接施工法との関係において意味を持つということである。すなわち、溶接施工法の観点からは同一の区分に分類されるが、材料特性としては厳密には同一とはならないということである。この点について、次の例から考えてみる。

JIS G 3106 の SM570 や JIS G 3115 の SPV490 は火技解釈では P-1 に区分される。これらの材料は P-1 の中でも強度が高い材料に分類され、ASME 規格では P-1 Gr.3 と区分される（JIS B 8285 も同じ区分）。これらの材料を溶接した場合、PWHT の温度条件は別表第 21 より、595℃以上 700℃以下の要求が科せられるが、この温度範囲の下限温度以上に保持することが困難な場合にあっては、下限温度との温度差に応じた係数を保持時間に掛けて PWHT を行えばよいことが別表第 22 で規定されている。P-1 の場合は PWHT 下限温度との差が最大 120℃まで認められているため、規定上は 500℃を大幅に下回る温度での PWHT が可能となる。しかし、SM570 や SPV490 のような高強度材の場合、PWHT 温度が低すぎると焼き戻し脆化が生じる懸念がある。したがって、規定上は可能とする PWHT 条件であっても、材料特性上、このような条件は SM570 や SPV490 の PWHT において適用すべきでないと考えられる。また、原子力分野で大きな問題とされてきた応力腐食割れ（以下、SCC という）に関していうと、初期のプラントには SUS304 が採用されていたが、SCC の問題を受け、SUS316 や SUS316L に変更された

表1 母材のP-No.の比較

火技解釈	母材の種類	ASME Section IX
1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11	Steel & Steel alloys	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, <i>10, 11, 15</i>
21, 22, 23, 25	Al & Al Alloys	21, 22, 23, 25, 26
31, 32, 34, 35	Cu & Cu Alloys	31, 32, 33, 34, 35
42, 43, 45	Ni & Ni Alloys	<i>41, 42, 43, 44,</i> <i>45, 46, 49</i>
51, 52	Ti & Ti Alloys	51, 52, 53
—	Zr & Zr Alloys	<i>61, 62</i>

斜体字：火技解釈に規定のない P-No.



経緯がある。これは、SUS316 や SUS316L の耐食性が SUS304 より相対的に優れているからであるが、これらの材料はいずれも P-8 (ASME 規格では P-8 Gr.1) に分類され、施工法上は同じ母材区分となる。母材区分と材料特性がイコールとはならない一例である。

### (2) 相当材について

別表第 1 (その 2) には、ASME 規格で規定された材料が一覧表の形でまとめられている。これは、火技解釈において ASME 規格材を適用することを認めていることを示しているが、表中では、対応する“相当 JIS 材”として、JIS の規格番号及び種類の記号が指定された ASME 規格材が存在する。

ここでいう“相当 JIS 材”とは、ASME 規格材が JIS で規定された要求事項と同等またはそれ以上の要求を行っている読み取る必要がある。したがって、JIS 側に要求があって ASME 規格側に要求がない場合、JIS 側の要求を満たさなければ、その ASME 規格材を適用することはできない。

例えば、ASME SA662 Gr.A の JIS 相当材は JIS G 3115 (2010) の SPV235 と規定されているが、SPV235 は規格要求として衝撃特性を規定している一方、SA662 Gr.A は ASME の規定上、“Nonmandatory”とされている。したがって、火技解釈において SA662 Gr.A を適用する場合には、衝撃特性の確認が必須要求となる。

### (3) 損傷モードについて

損傷モードとは、機器や設備がどのような物理的要因で損傷や破壊に至るかを指した形態のことをいう。例えば、機械的性質を要因とするものであれば、脆性破壊や延性破壊が、環境要因としては腐食や摩耗が挙げられる。ボイラー及び圧力容器の ISO 規格である ISO16528-1 “Boilers and pressure vessels—Part 1:Performance requirements” では、延性破壊を始めとする 13 の要因が損傷モードとして定義されている。表 2 に 13 の損傷モードの概要を示す。

火技解釈の規定には損傷モードという用語は用いられていないが、ISO16528-1 で定義された損傷モードのうち脆性破壊、延性破壊、過大変形、クリープ及びクリープに起因する過大変形の 5 つが考慮され

ていると考えられる。このため、火技解釈の規定は内圧設計を基本としており、外圧によるものや、クリープを除く長時間のものや疲労に代表される繰り返しによるものについては、設置者側の設計に委ねられる事項と解釈される。

### (4) “最低使用温度”について

“最低使用温度”という用語は、これまでは第 154 条、第 162 条、別表第 1 及び別表第 2 で用いられてきた。しかし、近年の改正において、JIS B 8267 (2008) 附属書 R に従って最低使用温度が最低設計金属温度を満足することを確認するという要求が第 55 条に追加され、併せて関連する別表においても用いられるようになった。以前の別表第 1 及び別表第 2 では、表中に“最低使用温度”という用語は用いられず、40℃以下の許容応力値は高温側と同じように、温度ごとに数値を与える体裁でまとめられていた。

しかし、平成 12 年～14 年頃の改正において編集上の修正が行われ、40℃以下の許容応力については“～40℃”と一括りにされた。その際、個々の材料で 40℃以下の許容応力値が変わらなかったため、許容応力値が与えられている最低の温度を“最低使用温度”と表現し、“～40℃”と一括りにすることと

表 2 ISO16528-1 で定義された損傷モード (網掛は火技解釈で考慮しているモード)

区分*	損傷モード
A	脆性破壊
	延性破壊
	接合部からの漏洩や他の機能喪失を生ずる過大変形
	弾性または弾塑性不安定(座屈)
B	クリープ破断
	クリープによる過大変形
	クリープ座屈
	エロージョン・コロージョン 環境助長割れ
C	進行性塑性変形
	繰り返し塑性
	疲労破壊
	環境助長割れ

\*A:短時間で生ずる損傷モード  
 B:長時間で生ずる損傷モード  
 C:繰り返しにより生ずる損傷モード

組み合わせて従来からの規定を意図する表現に改めたと推察される。よって、別表第1及び別表第2で用いられている“最低使用温度”とは、あくまでも“許容応力が与えられている最低の温度”と理解すべきであると考えられる。一方、第154条や第162条、あるいは新たに追加された第55条の要求では、“最低使用温度”とは、母材や溶接継手のじん性を確認するという意味合いで用いられている。したがって、同じ“最低使用温度”という用語を用いていても、意味合いが異なるという点に注意が必要である。この点について、次のような例を考えてみる。

火技解釈第2条はボイラー等の材料について規定されているが、同条第2項では別表第1及び別表第2に記載されている材料は「安全な化学的成分でありかつ機械的強度を有するもの」として認められている。ここで、「安全な化学的成分でありかつ機械的強度を有する材料」とは、「溶接性、引張強さ、延性、靱性及び硬度等に優れた材料」のこととされている。したがって、“別表第1に掲げられているSM490Aは、最低使用温度である0℃においてじん性を満足する”という解釈も規定上は成立するものと考えられる。

しかし、例えば、清水ら<sup>[2]</sup>が実施したシャルピー衝撃試験の結果から、0℃におけるSM490Aの吸収エネルギー $E_0$ はおよそ19J、脆性破面率50%の遷移温度 $T_{tr}$ は39℃程度と予想されるような場合もある。同系統の材料であるSM490Bが0℃の吸収エネルギーとして27Jが要求されていることを考慮すると、この場合のSM490Aは脆性破壊の発生がやや懸念されとも考えられる。なお、清水らはSM490Aと同時にSS400についてもシャルピー衝撃試験を実施しており、SS400の $E_0$ 及び $T_{tr}$ はそれぞれ350Jと-45℃程度であった。

先述のとおり、“最低使用温度”とは低温における構造物の衝撃特性を確保する観点から捉えるべき用語であるため、“火技解釈に規定されているから使えるまたは規定されていないから使えない”といった議論にのみ終始してしまうと、規定が本来意図した技術的視点を見失うことになる。

火技解釈が、規制として要求する最低限の技術的事項を定め、かつ火技省令の保安水準を満たす一例であるとすれば、逆に設置者（製造者を含む）が十

分に技術的内容を理解している前提の下で成立する、あるいは暗に十分な理解を要求している規定であるとも考えられる。

#### 4 終わりに

かつての技術基準は火技省令や告示に具体的事項が定められていたが、現在はその内容が火技解釈に落とし込まれ、火技省令や告示は性能規定化された。火技解釈の規定がかつての火技省令や告示と同じ記述で残っている箇所もあるが、設置者責任という電気事業法の基本的スタンスの下では規定の持つ意味合いやその捉え方は変化していると捉えるべきである。

近年、一体型の炭素鋼鍛造フランジを規格の要求どおりに製造したにもかかわらず、脆性破壊が生じてしまった事例が海外で確認されており、この問題を重要視した当該規格の作成団体では、個別のタスクチームを編成して検討を開始している。これは、規格で全てを担保することに対するある種の限界を示す証左とも考えられ、規定の裏付けとなる技術的背景をユーザー側も積極的に理解することを促すような事例と見るべきであろう。

設置者責任という、電気事業法特有の考え方の下、全ての規定を技術的根拠に立脚して理解することは極めて困難であるが、まずは、手近なところからでも理解に努めるようにすることが肝要である。

#### 参考文献

- [1] 長谷川忠之，“「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”，溶接・非破壊検査技術センター 技術レビュー，一般財団法人 発電設備技術検査協会，2016，pp36-40
- [2] 清水俊介，新井佑一郎，小中孔明，半貫敏夫，秋山宏，“鋼構造柱梁接合部の延性破壊—脆性破壊に関する実験的研究 V ノッチ引張試験による延性破壊保証温度”，平成21年度 日本大学理工学部 学術講演会予稿集，pp233-234



長谷川忠之

# 研修・講習事業への取り組み

研修センター 牧原 善次

## 1 はじめに

発電設備は健全（安全）であり続けることが求められている。健全であり続けるためには“物（機器）”の良し悪しの状態を的確に判断できるスキルの高い“者（人）”が継続的に従事することが不可欠である。人は、いずれ世代交代の時期を迎え、このとき、円滑に技術伝承を行わなければならない。国内では、様々な分野で後継者不足が深刻な問題となっている。発電分野も同様である。このため、多くの企業は強い危機感の下、教育・訓練に関わる専属の部署を設けて“者（次世代技術者）”の確保と育成に力を注いでいる。育成にあたっては、体系的な研修プログラムを構築し、その内容ごとに知識・経験の豊富な“者（講師）”が教育する。しかし、一般に講師は実務でも重用されているため、過度な負担が生

じている。また、講師の都合と研修の開催日程の調整が難しいことも多々発生する。当協会は、発電設備の安全に携わってきた豊富な知識、経験を基にして平成16（2004）年から官庁、企業の人材育成に係る支援を目的に研修サービスの提供を始めた。ここでは、現在、当協会が提供している研修・講習の紹介、材料・溶接・非破壊検査技術研修を例にした研修の充実化に向けた取り組みを紹介する。

## 2 研修・講習の紹介

国現在、当協会では、①事業者検査／安全管理審査、②材料／溶接／非破壊検査技術、③学術講習の3つの研修・講習を展開している。

### 2.1 事業者検査／安全管理審査に関する講習

設置者、溶接工場などの検査関連業務に従事する人の育成支援として、表1で示す合同講習会を開催

表1 事業者検査／安全管理審査に関する講習

1. 溶接事業者検査関係者向け合同講習会
1-1. 火力基礎 目的：溶接事業者検査に従事する要員に対する必要な力量の習得 内容：①溶接事業者検査関係法令について、②あらかじめの確認、溶接事業者検査、③溶接事業者検査の工程と方法について、④溶接入門、⑤検出事項・不適合事例、⑥材料、開先、耐圧、外観検査の実技講習（オプション）
1-2. 火力実践 目的：設計審査の手法の習得 内容：①法体系について、②技術基準について、③設計審査の手法について④検査記録のチェック方法について、⑤演習
2. 使用前自主検査及び定期事業者検査関係者向け講習（火力） 目的：使用前自主検査及び定期事業者検査に関する「審査基準」、「技術基準」並び「検査の方法の解釈」等の考え方 内容：①審査実施要領の概要（制度の変更点等）、②発電用火力設備の技術基準の解釈③使用前自主検査及び定期事業者検査の方法の解釈、④検出事項事例
3. 溶接事業者検査の実施状況の確認に関する使用前／定期安全管理審査（火力） 目的：溶接事業者検査の実施状況に係る審査の考え方 内容：①審査実施要領の概要（制度の変更点等）、②民間製品認証制度を活用した場合としない場合の安全管理審査（溶接事業者検査記録（総括表）等関連）



している。また、企業の要望に沿った研修プログラムで指定する日時、場所に講師を派遣する個別・講師派遣形式の講習を行っている。

## 2.2 材料／溶接／非破壊検査技術研修

### (1) 非破壊検査技術（資格取得研修）

非破壊検査に直接携わる人は、必ず資格が要求される。資格取得を目指す人（新規及び再認証）の支援として、表 2 で示す JIS Z 2305:2013 “非破壊試験－技術者の資格及び認証” に対応したレベル 2 実技試験対策研修を定期的に開催している。本研修は、非破壊試験技術者のうち実務で主戦力となるレベル 2 技術者の輩出を通じて、産業界における検査員の確保を目的としている。

### (2) 非破壊検査技術（一般定期研修）

前述 (1) の他に、発電設備の検査（特に原子力設備）でニーズが高く、また当協会が最も得意とする超音波探傷試験の研修を定期的に開催している。その研修内容を表 3 に示す。研修は、実践に即した人材を基礎から育成することを主旨に、入門編と応用編に分けて、それぞれ実習を多く取り入れたプログラムとしている。

### (3) 個別・講師派遣形式での提供

定期研修の他に、官庁及び企業からの要望に応じた研修プログラムで指定する日時、場所に講師及び研修機材を派遣する個別・講師派遣研修を開催している。この研修は研修依頼元の要望に応じることから、研修プログラム、研修期間は多様である。表 4 にこれまでに当協会が行った研修の構成例を示す。

## 2.3 学術講習

平成 16（2004）年度に開講した発電設備の規格・基準の現状把握と今後の動向に関する講座を引継ぎ、平成 26（2014）年度に学術講習に改めたものである。火力技術セミナーと原子力技術セミナーの 2 コースを開講、それぞれに著名な先生をお招きした特別講演を取り入れながら発電設備に係る技術者の交流の場を提供している。表 5 に平成 29（2017）年度の火力技術セミナーの講演プログラムを示す。

## 3 研修・講習の取り組み

研修・講習は、研修依頼元及び受講者のニーズに合ったものでなければならない。したがって、提供した研修・講習について満足していただけたか否かを常に確認し、研修の継続及び充実化に向けた改善に取り組むことが大切である。研修の満足度は、研修中の雰囲気（質疑の有無、受講者の取り組む姿勢、講師と受講者相互のコミュニケーションなど）、理解度確認結果、受講者の意見（アンケート集計）及び講師が感じる手応えなどから知ることができる。当協会では、図 1 の体制で研修・講習を開催しており、それぞれの実施部署での研修・講習実績の集約・分析結果、協会一体で定期的に行う研修・講習実施責任者会議での検討結果などを通じて PDCA を回し、満足してもらえる研修・講習を目指している。

以下、溶接・非破壊検査技術センター（NDEC）が担当する材料・溶接・非破壊検査技術研修に関し、質の高い研修の提供に向けて取り組んでいる内容を

表 2 JIS Z 2305:2013 対応のレベル 2 実技試験対策研修

種目	研修期間	研修内容
浸透探傷試験（PT） レベル 2	2 日	実技指導及び指示書作成にあたっての要点指導 (1) 溶剤除去性染色浸透探傷試験・速乾式現像法 (2) 水洗性蛍光浸透探傷試験・湿式現像法 (3) 後乳化性蛍光浸透探傷試験・乾式現像法
磁気探傷試験（MT） レベル 2	2 日	実技指導及び指示書作成にあたっての要点指導 (1) 極間法, (2) 電流貫通法 (3) コイル法
超音波探傷試験（UT） レベル 2	3 日	実技指導（G タイプ, R タイプ探傷器操作手順含） (1) 垂直探傷（板材） (2) 斜角探傷（T 継手）, (3) 斜角探傷（曲面材）
放射線透過試験（RT） レベル 2	2 日	(1) 指示書作成 (2) 撮影要領（アルミ管, アルミ合金鋳物） (3) 試験結果の記録 (4) きずの像の分類（JIS Z 3104, Z 3105, G 0581） (5) きずの解釈（溶接きず, 鋳物きず）

表 3 非破壊検査技術（一般定期研修）

<p>1. 超音波による厚さ測定実技コース（1日）</p> <p>目的：鋼材の厚さ測定の原理，装置校正方法，測定手法の習得                  内容：①講義（厚さ計の原理，使用方法，JIS Z 2355 概要）                  ②実技-1（厚さ計の取扱い，厚さ計の性能測定）                  ③実技-2（1回測定法，2回測定法，連続測定法，多点測定法，精密測定法）                  ④実技-3（塗膜上からの測定，異材質の厚さ測定）</p>
<p>2. 超音波探傷試験きず検出実技コース</p> <p>2-1. 一般コース（2日）</p> <p>目的：JIS Z 3060 に従った斜角探傷による鋼溶接部のきず検出手順の習得                  内容：①講義（きず検出に影響する因子，JIS Z 3060 概要）                  ②実技-1（JIS Z 3060 に従った超音波探傷装置の調整）                  ③実技-2（鋼溶接部平板（人工きず，疲労亀裂）を用いた斜角探傷試験）                  ④実技-3（炭素鋼配管溶接部（人工きず，疲労亀裂）を用いた斜角探傷試験）</p> <p>2-2. 原子力基礎コース（2日）</p> <p>目的：原子力設備を対象とした超音波探傷試験の基本操作の習得                  内容：①講義（損傷検出における UT の役割，JEAC 4207 主要解説，UT フロー）                  ②実技-1（JEAC 4207 に従った超音波探傷装置の調整）                  ③実技-2（JEAC 4207 に従った炭素鋼配管溶接部（人工きず，疲労亀裂）の探傷）                  ④実技-3（取得した探傷データに基づく解析・評価）</p> <p>2-3. 原子力応用コース（2日）</p> <p>目的：オーステナイト系ステンレス鋼溶接部を対象とした超音波探傷試験技術の習得                  内容：①講義-1（オーステナイト系ステンレス鋼の超音波特性，応力腐食割れの特徴）                  ②講義-2（JEAC 4207 に従った応力腐食割れ（SCC）検出手順）                  ③実技-1（JEAC 4207 に従った超音波探傷装置の調整，ステンレス鋼への換算）                  ④実技-2（ステンレス鋼溶接部（人工きず，疲労亀裂，SCC）の探傷）                  ⑤実技-3（2次クリーピング波法，縦波斜角探傷による SCC 検出手順）</p>
<p>3. 超音波探傷試験欠陥寸法測定実技コース</p> <p>3-1. 一般コース（2日）</p> <p>目的：JIS Z 3060 に従った斜角探傷による鋼溶接部のきず検出手順の習得                  内容：①講義-1（きず高さ測定の役割，きず高さ測定に関連した国内規格の概要）                  ②講義-2（端部エコー法，TOFD 法，フェーズドアレイ技術の原理，測定手順）                  ③実技-1（横波端部エコー法による炭素鋼人工きず，疲労亀裂の高さ測定）                  ④実技-3（フェーズドアレイ技術による炭素鋼人工きず，疲労亀裂の高さ測定）</p> <p>3-2. 原子力コース（2日）</p> <p>目的：JEAC 4207 に準拠した SCC の高さ測定手順の習得                  内容：①講義-1（オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の SCC のメカニズムと特徴）                  ②講義-2（JEAC 4207 による亀裂高さ測定方法（改良 UT 手法））                  ③実技-1（改良 UT 手法によるオーステナイト系ステンレス鋼人工きず高さ測定）                  ④実技-2（改良 UT 手法によるオーステナイト系ステンレス鋼疲労亀裂高さ測定）                  ⑤実技-3（改良 UT 手法によるオーステナイト系ステンレス鋼 SCC 高さ測定）                  改良 UT 手法：モード変換波法，横波／縦波端部エコー法，フェーズドアレイ技術を組合せた亀裂高さ測定をいう。</p>

表 4 個別・講師派遣形式の溶接・非破壊検査技術研修の例

<p>ケース 1：材料・溶接に関わる研修（期間：2日～3日）</p> <p>(1) 講義（金属材料，溶接施工法，損傷）                  (2) 実習（金相実習（レーザ顕微鏡，SEM 観察，硬度計））</p>
<p>ケース 2：材料・溶接と非破壊検査技術を組合せた入門研修（期間：3～5日）</p> <p>(1) 講義（金属材料，溶接の基礎，発生するきず，損傷）                  (2) 講義及び実習-1（表面検査技術（PT，MT，ET））                  (3) 講義及び実習-2（体積検査技術（UT，RT））</p>
<p>ケース 3：材料・溶接と非破壊検査技術を組合せた応用研修（2～3日）</p> <p>(1) 講義（実機損傷事例，防止策，適用される規格の概要）                  (2) 講義及び実習-1（表面検査技術（PT，MT）の不適合事例，記録審査要点及び演習）                  (3) 講義及び実習-2（体積検査技術（UT，RT）の不適合事例，記録審査要点及び演習）                  (4) 講義及び演習（維持規格による健全性評価）</p>
<p>その他研修（1～3日）</p> <p>(1) 超音波探傷試験に関する知見紹介（実証事業成果，確性試験成果，技術変遷など）                  (2) フェーズドアレイ技術による SCC 検出，寸法測定（炉内構造物，異種金属継手）                  (3) 超音波探傷によるステンレス鋼溶接部の製造検査と維持検査                  (4) 自動超音波探傷の実習及び出力図の解読                  (5) 渦電流探傷試験学科講習</p>

紹介する。

### (1) 依頼元とのコミュニケーション

ニーズに合った研修を行うためには、依頼元とのコミュニケーションが最も大切である。NDECでは、個別・講師派遣形式の研修において可能な限り研修前と研修後に依頼元を訪問することに心掛けている。研修ニーズは、電子メール、電話などで依頼元の要望を確かめることもできるが、訪問して直接要望を聞き取り、協議することが最も確実である。また、研修満足度の確認のために、研修終了後、依頼元を訪れ、いわゆる“反省会”と称して研修の課題、不満であった点、次回への要望などを直接聞き取り、具体的な改善につなげていくこととしている。

### (2) 研修プログラム

依頼元との打合せで確認した要望（目的・到達目標、研修内容とレベル、日程（期間）、前回実績に基づく改善事項など）を反映した研修プログラムを提案し、承認を得たものに従って研修を行う。研修プログラムについては、研修の流れがスムーズであること、時間配分が適切であること（ゆとりのない詰め込んだスケジュールになっていないこと）、講義と実習の配分が適切であることなどを配慮する。特に非破壊検査技術研修は、講義で述べた内容を実習により理解を深めていただくことに力を注いだプログラムに心掛けている。また、最後に小テストを

通じて理解度を確認することとしている。

### (3) 研修教材

#### ① 研修テキスト

研修テキストは章立てを明確にして、見易く、分かり易く、実務でも活用していただくことを念頭に講師間で構成、表現等を協議して作成している。また、技術的記述の誤り、誤記のないことを相互チェックしてテキストの品質を高めるように努めている。この他、最新の技術動向、規格・基準類の改訂動向について遅滞なく対応すること、受講者から受けた質問でテキストに反映すべき事項があれば次回の研修テキストに追加することなどにも心掛けている。

#### ② 研修機材（検査装置、試験体など）

非破壊検査技術研修は実習を通じて理解していただく。このためには受講者全員が研修機材に触れ、学んで（体験して）いただく必要がある。さらに理解を深めるために、疲労亀裂、応力腐食割れを付与した試験体あるいは溶接欠陥を撮影した透過写真サンプルなどを実習に取り入れ、可能な限り実機模擬体験をしていただくこととしている。現在、受講者6名（最大12名）に対応できる実習用研修機材を所有し、また、非破壊試験の資格取得研修においては、多方面から情報を取得して実際の資格試験で使用される機材とほぼ同じ

表5 2017年度火力技術セミナープログラム

1. 特別講演	火力発電用タービンの現状と高温部品の経年劣化・損傷および寿命評価技術	講師：愛媛大学教授	吉岡 洋明 氏
2. 特別講演	火力プラントの損傷情報にもとづくリスクベース保守管理技術	講師：名城大学教授	藤山 一成 氏
3. 材料の規定に見る火技解釈の読み方・捉え方	講師：一般財団法人 発電設備技術検査協会 規格基準室	長谷川 忠之 氏	
4. 溶接施工法の確認項目に係る技術動向	講師：一般財団法人 発電設備技術検査協会 規格基準室	大石 勇一 氏	

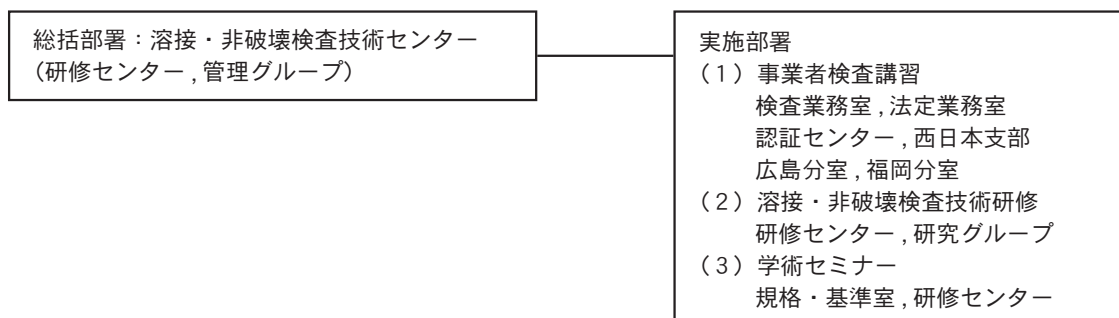


図1 研修・講習体制



ものを用意，提供している。

③理解度確認用教材（小テスト）

研修最後に小テストを行う。小テストは受講者の理解度を確認する他，講師の教え方が適切であったか否か，反省すべき点はないかなどを確認を目的としている。小テストは，研修到達目標に応じて基礎問題，指示書作成問題（記述式），記録審査問題（不適合箇所の抽出，評価の間違い探しなど）などを用意，提供している。

（４）講師の心構え

研修において受講者の理解度は，講師の教え方（指導方法）に依るところが大きい。講師の教え方には一長一短あり，筆者も研修後，反省の連続である。講師は少しでも受講者に理解を深め，満足していただくことが使命であることから，次のようなことに心掛けている。

- ①研修に先立ち，目的，到達目標，理解していただきたい事柄を述べる。
- ②聞き取り易い音量で，はっきりと話す。説明はメリハリをつける。
- ③正面に立ち，受講者に顔を向けて話す。また，受講者全員に目配りをする。
- ④受講者の集中力を配慮し，適宜休憩をとる（1時間程度ごと）。
- ⑤受講者の目線（レベル）に合せ，分かり易い表現（業界用語は解説）とする。
- ⑥章の区切りで質問を受け，可能な限り即答して解説を加える。即答できないものは調べて，必ず回答する。また，質問し易いように誘導する。
- ⑦理論一辺倒ではなく，経験談（過去の失敗例，成功例）などを交える。
- ⑧実習は，時間にゆとりを持ち，進行の遅い受講者にストレスを与えない。

⑨実習中は常に巡回し，全員に均等に指導して疑問が残らないようにする。

⑩研修終了にあたり，簡潔にまとめ（要点）を述べる。

（５）講師と受講者のコミュニケーション

受講者の多くは，研修中に質問を発することが少ない。その要因の一つとして，質問内容が幼稚過ぎるのではないか（講師あるいは他の受講者に馬鹿にされるのではないか）といった思い，どのように表現すれば質問の意図が講師に伝わるのかといった思いなどがあげられる。質問をし易い環境を作り，研修を活性化するためには，受講者と講師のコミュニケーションが大切である。名札を用意（定期研修）する，あるいは名簿を確認（個別・派遣研修）して，なるべく名前（姓）で呼び，研修の合間，昼休みなどに会話を交わして，良好な関係作りに心掛けると，受講者も馴れて発言し易くなる。合間に交わした質疑の多くは受講者全員に伝えるべき事柄が多い。この質疑を研修再開後に受講者全員に伝えることで理解を深めることに役立ち，また，研修の活性化をもたらす。

（６）アンケート集約と分析

当協会では，受講者にアンケートに協力していただき，アンケート集計，分析を通じて改善事項の抽出に努めている。なるべく忌憚のない意見を寄せていただくため，無記名記入を依頼している。アンケート結果は概ね良好なことが多いが，講師の手応えを勘案すると少し割り引いて考えなければならないケースもある。このような場合は，小数意見あるいは無回答等に注意を払うことにしている。例えば，図2の例で示すように教材，講師の説明，質問への講師の対応を見ると80%の受講者がほぼ満足した回答であるのに対して，20%が“普通”と回答している。研修を提供する側にとって“普通”の回答は関心が

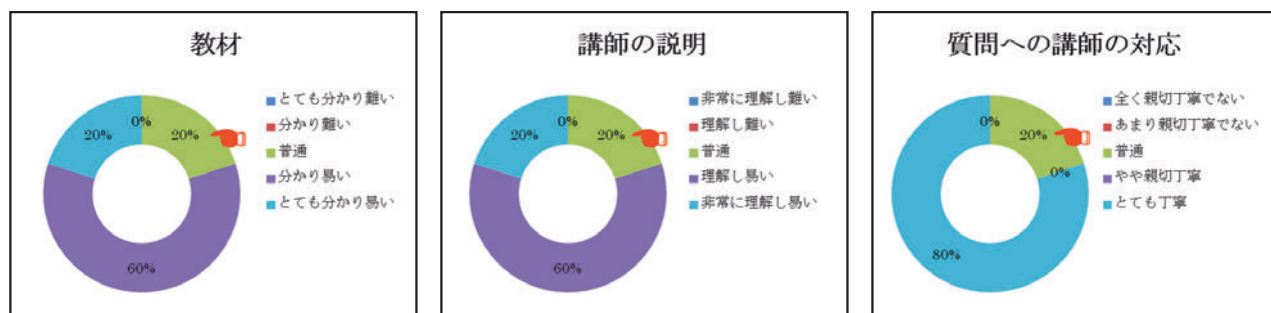


図2 非破壊検査技術研修のアンケート集計の例

なかったと受け止め、不満よりも深刻に受け止める。特にこの20%は同じ受講者達と推定されることから、このようなケースが生じた場合は、何が問題であったか講師が集まって協議、推定して次回への改善につなげていくこととしている。

#### (7) 研修後のフォロー

当協会では、研修経験を実務に役立ててもらうため、受講者に講師の連絡先（名刺など）を教えて、研修後の質問及び実務上の相談を受け付けるなど、研修後のフォローに心掛けている。これまで幾つか

の質問、相談を受け、回答又はアドバイスなどを行ってきており、今後も継続していく。

## 4 まとめ

今回、充実した研修の提供に向けた当協会の取り組みについて、材料・溶接・非破壊検査技術研修を例にして紹介した。まだまだ取り組み不足の面もあるが、これからも時代のニーズに合せ、より充実した研修を官庁、企業の皆様に提供できるように努めていく。



牧原善次

## 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			



## 学協会誌等への論文発表

学協会誌名	掲載誌発行年月	著 者	論文名称
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	古村一郎	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及び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
E-Journal of Advanced Maintenance	Vol. 3, No. 3,AA36 November,2011	古川 敬 古村一朗	Simulation and visualization of guided wave propagation by large scale 3D FEM
火力原子力発電大会論文集	福岡大会CD-ROM 2011年10月	古村一朗 古川 敬	開口合成3次元超音波探傷法によるニッケル基合金溶接部SCC探傷特性評価
非破壊検査	Vol.60, No.10, pp579-584, 2011	程 衛英	渦電流試験法による減肉評価における電磁気解析技術の活用
Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation	Vol.30A(2011) p.372-379	程 衛英	Simulation for the assessment of Wall thinning Using Eddy Current Method
E-Journal of Advanced Maintenance	Vol. 2, No. 2,NT25 August,2010	古村一朗 古川 敬	Visualization Method of UT Wave Propagation Phenomena for assisting The Better Understanding of Inspection Results
火力原子力発電大会論文集	大阪大会CD-ROM 3-4 2009年10月	長谷川忠之 西川 聡	FEMを用いた溶接終端部の残留応力評価
Proceeding of the 7th Int. Conf. on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear Pressurized Components.	EUR 24115EN- 2009 p.252-259	古川 敬 古村一朗	Numerical simulation of guided wave propagation using large scale FEM code
International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	33(2010) p.377-385	程 衛英 古村一朗	Optimum Inducement of Eddy Current for NDE of Deep Lying Defects : an Analytical Approach
圧力技術	Vol.48, No.1 p.26-39 2010	西川 聡 堀井行彦 他	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感受性に及ぼす化学成分、熱処理の影響
溶接学会論文集	第27巻 (2009) 第4号 p.287-296	西川 聡 堀井行彦 他	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感受性に及ぼすPの影響
非破壊検査	第59巻 (2010) 第3号 p.138-144	関野晃一 他	ガラス板に挿入した表面楕円き裂の光干渉法による破壊挙動の解析



# 学協会等への口頭発表

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

非破壊	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

## 平成26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AEM学会 「電磁力関連のダイナミクス」 シンポジウム	2014/5/21-23 アイーナ岩手県民情報 交流センター	程 衛英 上山芳教 古川 敬 三原 毅	パルス渦電流試験法による鋳鉄配管の減肉評価
	(一社)日本非破壊検査協会 H26春季講演大会	2014/6/3-4 アルカディア市ヶ谷	水野亮二 古川 敬	UTシミュレーションにおけるオーステナイト系溶接金属の柱状晶組織のモデル化及びその妥当性検証
	第48回 X線材料強度に関するシンポジウム	2014/7/24-25 エル・おおさか(大阪府 立労働センター)	水野亮二 佐々木敏彦	X線回折による塑性ひずみ測定技術の開発
			佐々木敏彦 宮崎利行 古川 敬 三原 毅	MnK $\alpha$ 線および二次元検出器によるオーステナイト系材料のX線応力測定
	神奈川県非破壊試験技術交流会 研究発表会	2014/6/9 関東学院大学(関内)	水野亮二 古川 敬	UTシミュレーションにおけるオーステナイト系溶接金属の柱状晶組織のモデル化及びその適用性検証
	平成26年度 保守検査ミニシンポジウム	2014/7/4 大田区産業プラザ(Pio)	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
八光オートメーション(株)	2014/5/30 八光オートメーション (株)(福岡)	程 衛英	パルス渦電流試験法および減肉評価	



非破壊	Ni合金異材継手のISIとメンテナンスに関するワークショップ (International Workshop on In-service Inspection and Maintenance of Aged Ni-based Dissimilar Metal Weld(DMW)Components in NPPs)	2014/6/2 KINS(韓国 太田市)	古村一朗 古川 敬	Data Base for NDT-related National Project(Outcome of APN/Accumulation & Preparation of Nondestructive Inspection Data for Nuclear Power Plants)
	日本保全学会 第11回 学術講演会	2014/7/24-25 八戸工業大学	古川 敬 水野亮二 上山芳教	超音波探傷訓練へのシミュレーション解析技術の適用
	平成26年度 火力原子力発電大会	2014/10/23 名古屋国際会議場	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計測
	日本原子力学会 第13回 材料部会夏期セミナー	2014/8/5 山形県山形市蔵王温泉 ホテル樹林	古川 敬 程 衛英	超音波・電磁気による非破壊検査技術
	59th Annual Magnetism & Magnetic Materials Conference	2014/11/5-9 Hawai, USA	程 衛英 齋藤兆古	Modeling and Analysis of Hysteresis by Harmonic Balance Method
	ICMST-KOBE 2014	2014/11/2-5 神戸大学	山本敏弘 上山芳教 古川 敬 古村一朗	Evaluation of the Capability to Estimate a Crack Profile by 3D SAFT UT
	(一社)日本非破壊検査協会 秋季講演大会	2014/10/28-29 名古屋国際会議場	三原 毅 古川 敬 長 秀雄	疑似SCC探傷研究委員会活動報告1および疑似SCC探傷研究委員会活動報告2
	(一社)日本非破壊検査協会 平成26年度 第2回 超音波部門講演会	2014/10/2-3 茨城空港	上山芳教 水野亮二 古川 敬	超音波探傷訓練へのシミュレーション解析技術の適用
溶接	溶接冶金研究委員会	2014/5/23 鐵鋼会館(大阪)	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
	日本保全学会第 11回 学術講演会	2014/7/24-25 八戸工業大学	西川 聡 生島 一樹 柴原正和	理想化陽解法FEMを用いた実機多パス溶接継手の残留応力解析

## 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：「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で「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「鑄造2相ステンレス鋼の溶接熱影響部の熱時効評価—第1・2報—」に対して与えられたものである。
西川 聡	平成13年度 溶接学会 研究発表賞	(社)溶接学会 平成14年4月25日	35歳未満の若手研究者に対する賞で、発表論文「熱処理条件の非破壊的評価手法の検討—局部PWHT溶接部の性能評価に関する研究(第1報)」に対して与えられたものである。
青野健二郎	平成13年度 新進賞	(社)日本非破壊検査協会 平成13年5月31日 (NDI協会春季大会)	本賞は、平成13年度に行なわれたNDI協会大会での発表の中から、特に優れた発表を行なった若手研究者に与えられる賞である。 受賞対象論文：「溶接金属内部欠陥とUT及びRTによる非破壊信号量との関係」



## 技術レビュー・編集後記

---

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

本技術レビューには7件の研究・調査報告を掲載し、非破壊検査技術や溶接部の健全性評価技術に関する研究、規格基準に関する調査と充実した内容と自負しております。また、溶接・非破壊検査技術研修や事業者検査に関する講習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、今後とも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.13 2017 (非売品)

---

発行日 2017年12月1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.13 2017



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