



溶接・非破壊検査技術センター

技術レビュー

Vol.2 2006

(財)発電設備技術検査協会

## 目次

<b>巻頭言</b>	● 原子力雑感 .....	1
	東京大学名誉教授 宮 健三	
<b>トピックス</b>	● PD研修センターを開設 .....	2
<b>研究報告</b>	● 溶接継手の健全性確保に関する研究	
	残留応力解析における入熱モデルの検討および物性値の影響調査 .....	3
	中田志津雄,西川 聡,長谷川忠之,堀井行彦, 村川英一(大阪大学)	
	Ni基合金の溶接金属組織と超音波探傷による欠陥検出性の関係 .....	8
	西川 聡,古川 敬,古村一朗,堀井行彦	
	● 欠陥検出評価技術に関する研究	
	PD(技量認証)規格の判定基準の妥当性評価 .....	14
	古川 敬,古村一朗,米山弘志,山口篤憲	
	渦電流探傷によるき裂面の部分接触を伴う応力腐食割れの深さサイジング .....	19
	程 衛英,古村一朗,志波光晴,兼本 茂(現 会津大学)	
	渦流探傷法における表面欠陥識別と形状認識の高精度化 .....	27
	程 衛英,古村一朗,志波光晴,兼本 茂(現 会津大学)	
	● 材料劣化評価技術に関する研究	
	電磁気的手法による压力容器鋼(SQV2A)の照射脆化度評価 .....	34
	中東重雄,程 衛英,志波光晴,古村一朗 高橋則雄(岡山大学),藤原耕二(岡山大学)	
	● 技術基準・規格化関連調査関係	
	ASME Sec.VIII Div.1 Appendix 32に規定された 局所的な薄肉域の許容の規定について .....	41
	吉田和夫,大石勇一	
<b>成果</b>	● 出願特許一覧 .....	46
	● 学協会誌等への論文発表 .....	47
	● 学協会等への口頭発表 .....	49
	● 論文等表彰 .....	58

## 原子力雑感

東電問題以来4年が経過した。4年前を振り返ってみると現状とは隔世の感がする。何が変わり何が変わらなかったのだろうか。

まず、米国に遅れること約20年、平成15年10月、法改正によって健全性評価制度が導入され、「維持規格」が規制に活用されるようになった。これに関連してPD制度が確立され、当協会の溶接・非破壊検査技術センターは大変重要な役割を果たすようになった。しかしながら、この評価制度は現在十分に活用されているとは言えない。住民の安心が十分に得られないというのが主たる理由である。この不安の解消に資するため、我が国に検査技術の向上に役立つ施設と機関が存在することが必須である。協会はもっと成果を世にアピールしてよい。原子力発電所の運転は、構造物に傷があればそれが無害であっても省令により許されていなかった。有害な傷と無害な傷を科学的に判別するためには、傷に関するデータを精度良く測定する技量が不可欠である。この意味で当協会の役割は大きく、その重要性は世間でもっと広く理解されるべきである。そうでないのは大変残念である。

技術者は俗に言ってPRが下手である。技術者の社会的地位が高くないのは、自己主張のまずさが原因しているのだと思う。何か萎縮しているような印象がしてならない。当協会の技術者・研究者を見ていてもそう感ずる。彼らが正当な主張を躊躇する理由は何だろうか。

理由の一つは、システムを見る姿勢に欠けるからではないだろうか。常に全体と部分を見る2つの目が必要なのに、己の専門性から脱却できずシステム（全体）を見るということをなかなかしようとしめない。システムを見るとは、体系を考えることであったり、組織に内在するルールを他組織と比べて認識することであったり、ひいては己の専門性を単なる発見とか論文作成だけに閉じ込めて置かないで、分野を構築する位の構想を持つ事ではないだろうか。発展的な未来像を描き実現に向けて努力することが肝要であろう。協会がシステムの構想をすることでどれだけ発展するか、見てみたい。

(平成18年11月)



東京大学名誉教授  
宮 健三

## PD研修センターを開設

平成18年2月1日付けで、当協会、溶接・非破壊検査技術センターにPD研修センターが付設され、同月28日にPD認証機関の承認を受けPD研修事業を開始いたしました。

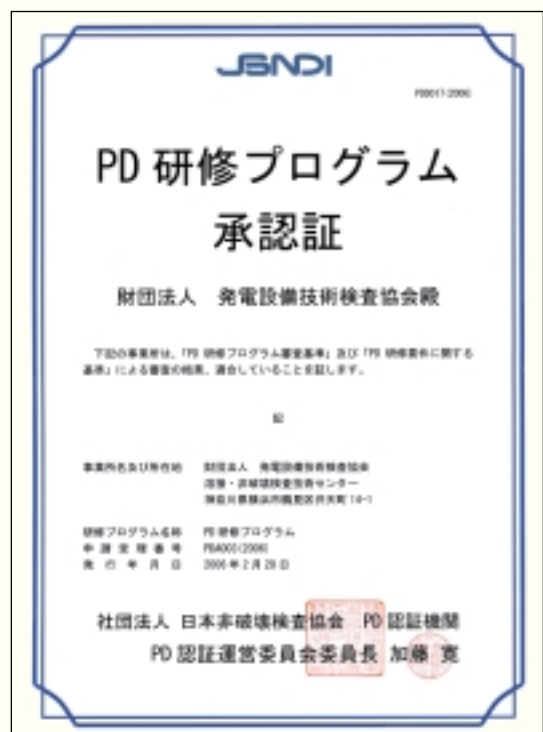
PDとは、電気事業法の改正により、原子力発電所の機器に欠陥が生じた場合は、その大きさを測定して機器の健全性を評価することが義務付けられ、この中でも、ステンレス鋼配管溶接部に生じるき裂、特に応力腐食割れ（SCC）の深さ測定は高度の技量を必要とすることから、超音波探傷試験技術者と探傷装置及び手順書を一括した超音波探傷試験システムの性能実証（Performance Demonstration, PD）に関する認証を行なう制度をいい、平成17年度末より開始されたものです。

この認証制度では、PD資格試験として、実機を模擬した配管に実機で生じると同じようなSCCを付与した試験体を用いて、ブラインド試験によりSCC深さを測定する試験を実施し、試験に合格した技術者はPD技術者として認証されます。また30日以内に認証を必要とされる再受検希望者はPD研修が義務付けられております。さらにPD技術者は技量維持のために毎年の更新時にはPD研修が義務付けられております。

当協会PD研修センターでは、SCC深さ測定に関する豊富な経験と高い技量を有する講師陣が、PD認証機関より承認された質の高いPD研修プログラムにより、各種サイズの実機を模擬したSCC付与試験体を用いて更新時及び再試験用のPD研修を行い、PD認証制度に貢献するとともに、超音波探傷試験技術者の技量の維持・向上を支援しております。



SCC深さ測定に取り組む研修の状況



PD認証機関よりの承認証



SCC欠陥付与研修用試験体

# 残留応力解析における入熱モデルの 検討および物性値の影響調査

(Study on Heat Input Model and Influences of Material Properties on Welding Residual Stress)

溶接・非破壊検査技術センター 中田志津雄, 西川 聡, 長谷川忠之, 堀井 行彦  
大阪大学 接合化学研究所 村川 英一

First, basic FEM heat input models for temperature analysis were studied by conducting bead on plate tests and temperature analysis using ABAQUS code. Results show that heat input models can be estimated by using welding conditions and the test results obtained in this report, without conducting additional temperature measurement tests. Second, influences of heat input model shapes and material properties on welding residual stress in pipe girth weld were investigated by using ABAQUS code. Results show that temperatures will be affected by differences of heat input models but the stresses are not affected. Investigating the influences on residual stresses by the differences of material properties, it is concluded that the as-welded property results are conservative values and the stress released property results are close values to the measured stresses.

**Keywords:** Residual Stress, FEM Analysis, Heat Input Model, Material Properties

## 1.....背景・目的

FEMを用いた溶接時の残留応力解析を行う場合、一般的には、溶接条件を変える毎に供試体を用いて溶接時の温度分布・履歴を測定し、その結果と合うような入熱モデル形状を定める手法が採られている。しかし、溶接条件と入熱モデル形状の関係を明らかにしておけば、溶接条件を変えた場合に、温度分布・履歴測定を行わずに入熱モデルを定めることができると考えられる。そこで、先ず、溶接条件が入熱モデル形状へ及ぼす影響検討（残留応力解析用の入熱モデルの検討）を実施した。

次に、溶接のような移動熱源による3次元問題を2次元解析でシミュレーションする場合、溶接入熱は一般的に三角形<sup>1)3)</sup>あるいは台形<sup>2)</sup>形状にモデル化されるが、そのモデル上の違いが最終的な残留応力に及ぼす影響を検証した例は殆どない。そこで、円筒×開先周継手に対し、入熱モデルによる残留応力への影響を検証した。

また、解析に用いる材料物性値を材料試験により求める場合、例えば応力-ひずみ関係は、解析対象に

相当するように製作した継手溶接金属部から試験片を採取し、引張試験により求めることが一般的である。それは多パス溶接のままの状態であり、解析上の初期値として用いることは、高めの残留応力を与えると予測される。高めの残留応力は応力腐食割れの観点から保守側評価となるが、その影響を確認しておくことが望ましい。そこで、溶接金属の材料物性値の違いが残留応力へ及ぼす影響を円筒×開先周継手にて検証した。

## 2.....方法

### 2.1 残留応力解析用の入熱モデルの検討

溶接時の温度分布・履歴を得るため、SUS304平板（380mm×500mm×25mm）にビードオン溶接（溶接材料：Y308L）を行う過程で温度測定を行った。溶接はGTAWとし、Table1に示す条件1～3で実施した。一方、FEM解析はABAQUSを使用した。解析で用いる入熱モデル形状は三角形モデル<sup>1)</sup>とし、解析を行う際の入熱範囲と実際の溶接部の溶け込み面積を合わせ、各条件で溶接した際の温度履歴・分布と合うような入熱量と入熱時間を検討した。

Table1 Welding Condition of GTAW

	EC (A)	(V)	v (cm/min)	HI (kJ/mm)	Note
1	150	11.5	9	1	Base
2	225	11.5	14	1	Note 1
3	225	11.5	9	1.7	Note 2

EC: Electric current

V: Voltage

HI: Heat input

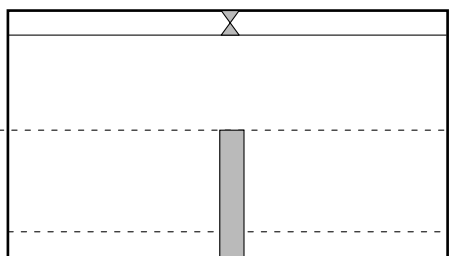
Note1: High current, high velocity

Note2: High current, high heat input

## 2.2 入熱モデル形状が溶接残留応力に及ぼす影響調査

円筒X開先周継手の2次元FEM解析において、複数の入熱モデルを用い、最終的に得られる残留応力の結果を比較した。

解析対象は、ステンレス鋼周継手 (Fig.1) で、溶接条件を Table 2 に示す。解析には、ABAQUSコードを使用した。解析における溶接パス順番を Fig.2 に示す。



O.D	350mm
Total length	400mm
Thickness	25mm

Fig1 Pipe Girth Weld<sup>5)</sup>

Table2 Welding Condition<sup>5)</sup>

Welding condition	Welding method	GTAW
	Velocity	9cm/min
	Heat input	1 kJ/mm

入熱量が一定で、入熱モデルを Fig.3 に示すような三角形および2種類の台形とした場合それぞれについて、温度解析および残留応力解析を実施した。ここで、三角形における ramp time は、長谷川、西川ら<sup>3)</sup>のビードオンプレート溶接時温度履歴測定及び温度解析結果を用いて提案された入熱モデル推定

方法を用い、溶接速度、入熱量、溶融池の大きさを考慮して設定した。

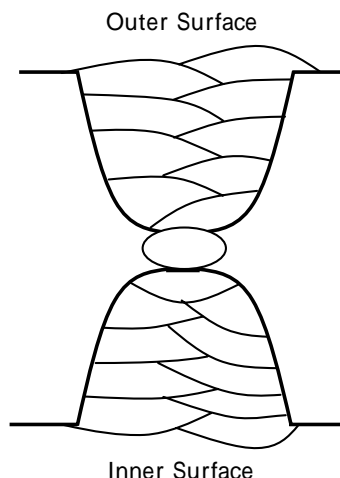


Fig2 Welding Process<sup>5)</sup>

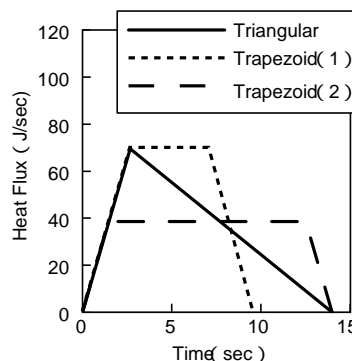


Fig.3 Numerical Model of Heat Flux Input<sup>5)</sup>

## 2.3 溶接金属の材料物性値の違いが残留応力へ及ぼす影響調査

解析に用いる物性値の違いが残留応力解析結果へ及ぼす影響を確認するため、溶接後SR処理をした溶接金属のデータおよび溶接ままのデータを取得し、円筒X開先周継手試験体の残留応力解析を行い、実測結果と比較し検討した。

### 2.3.1 検討対象

対象は、ステンレス鋼円筒X開先周継手 (Fig.1) で、形状および溶接条件は Table 2 に示す条件と同じである。溶接パスの順番は Fig.4 に示すように内外交互溶接とした。

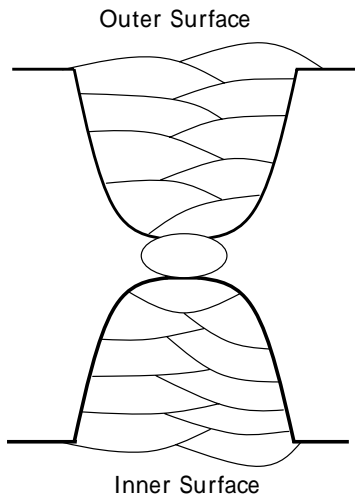


Fig.4 Welding Process<sup>5)</sup>

### 2.3.2 残留応力測定

Table 1 に示す条件を用いてステンレス鋼円筒 X 開先周継手を製作し、ひずみゲージを用いて溶接金属中央断面の残留応力を測定した。

### 2.3.3 応力-ひずみ関係

Table 2 の溶接条件を用いて、物性値測定用として片側開先の平板突合せ継手を製作し、溶接のままおよび溶接後 SR 処理 (900 × 1 時間) した溶接金属の物性値 (2 直線近似による降伏点  $\sigma_y$  および加工硬化係数  $H'$ ) を引張試験により取得した。結果を Fig.5 に示す。

### 2.3.4 残留応力解析

ABAQUS コードを用いて残留応力解析を実施した。使用した FEM モデルを Fig.6 に示す。

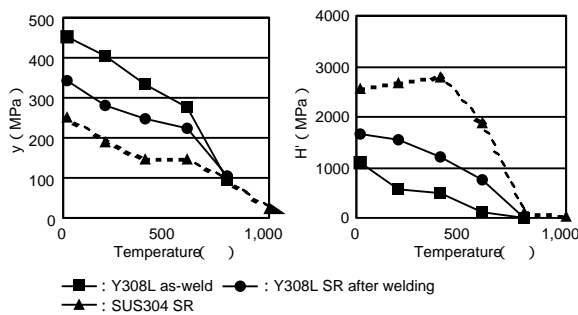


Fig.5 Temperature dependent material properties<sup>5)</sup>

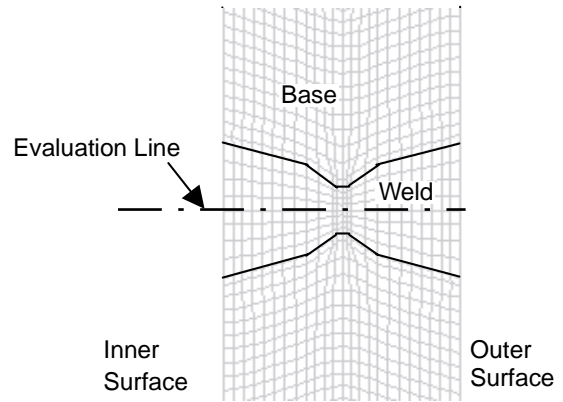


Fig.6 FEM Model<sup>5)</sup>

## 3.....結果

### 3.1 残留応力解析用の入熱モデルの検討

測定と解析が良く一致する最適な入熱モデル形状を Fig.7 に点線で示す。また、Fig.7 の入熱モデル形状を適用した熱伝導解析結果の一例として、条件 2 の温度履歴・分布の例を Fig.8 に示す。

この結果から、試験を行った範囲では Fig.9 に示すように、合計時間  $t$  は変えず、入熱量ピーク時間  $t_1$  および  $t_1$  から入熱量が 0 になるまでの時間  $t_2$  の配分を変えること、または、 $t_1$  は変えず  $t_2$  を変えることにより、実測によらず解析に重要な入熱モデル形状を推定できることが確認できた。以上の結果は、物性値の異なる材料でも同様の傾向であった。

上記の考え方に基づく熱伝導解析結果を適用した残留応力解析の一例として、条件 1 と条件 3 の場合の比較を Fig.10 に示す。表面の応力分布に関し、溶接線方向応力は入熱量が大きくなると、降伏点付近の高い応力が、溶接中心から更に離れた範囲にまで及ぶ。このことから、溶接条件を変えた応力解析を行うためには、その条件に応じた入熱モデル形状を用いる必要があることが判る。

溶接条件が入熱モデル形状へ及ぼす影響について検討した結果、溶接条件を変えた場合のモデル形状を推定できる可能性が見出された。

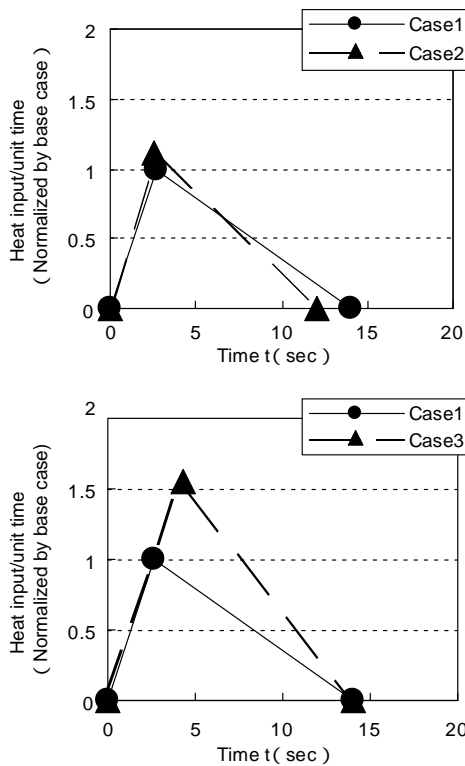


Fig.7 Heat input model for different welding conditions

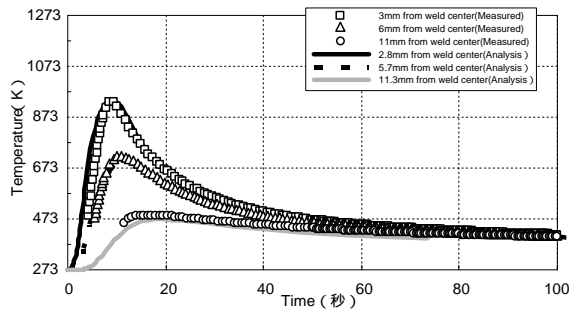


Fig.8 Comparison of Temperature (for Case 2)

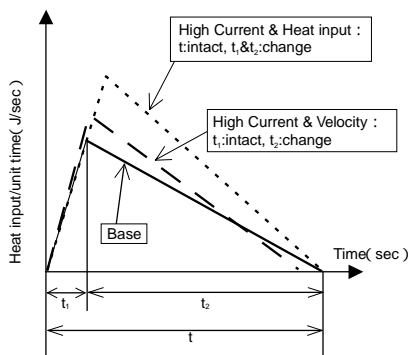


Fig.9 Method of Model Estimation

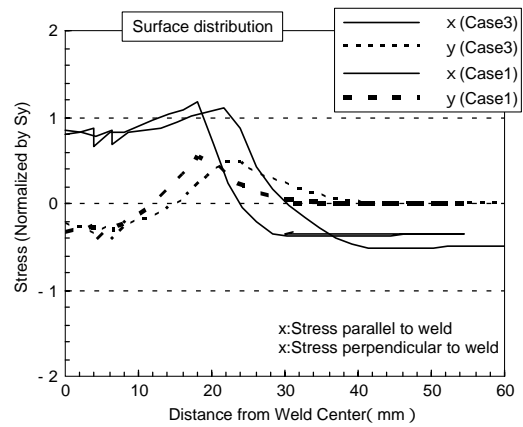


Fig.10 Comparison of Residual Stress analysis (Case1&Case3)

今後は板厚が異なる場合の温度分布・履歴および残留応力へ及ぼす影響を調査する必要がある。

### 3.2 入熱モデル形状が溶接残留応力に及ぼす影響調査

入熱モデル形状が温度履歴に及ぼす影響について結果は省略するが、台形(1)の最高温度は三角形と比べて高くなり、台形(2)の最高温度発生時間は遅くなる傾向となった。

三角形、台形(1)、台形(2)による残留応力解析結果の一例として、溶接部中央内部の応力分布をFig.11に示す。周方向応力において、絶対値の低い円筒内面側に僅かの差が認められるものの、全体的な応力分布は殆ど変わらなかった。

入熱モデル形状が残留応力に及ぼす影響を調査した結果、周方向応力の絶対値の低い円筒内面側に僅かの差が認められるものの、全体的な応力分布は殆ど変わらないことが判明した。よって、入熱モデル上の違いが最終的な残留応力に及ぼす影響は小さいと考えられる。

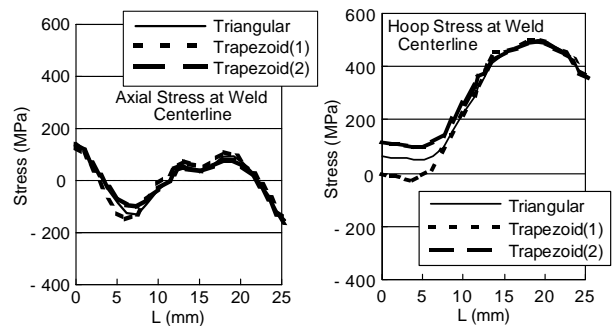


Fig.11 Residual Stress Analysis Results<sup>5)</sup>

### 3.3 溶接金属の材料物性値の違いが残留応力へ及ぼす影響調査

解析により得られた溶接部中央の周方向応力分布を、実験結果の比較とともに Fig.11 に示す。B. Brickstad ら<sup>4)</sup> は、片側開先周継手の解析を行い、軸方向応力に比べ周方向応力の方が物性値に対して敏感に変化する結果を報告しており、本解析での結果は省略するが、同様の傾向を示した。Fig.11 の結果から、溶接後 SR 処理をした溶接金属の物性値を用いることにより、実験結果に近い解析結果となることが確認できた。

溶接金属の物性値の違いが残留応力へ及ぼす影響について調査した結果、溶接のままおよび溶接後 SR 処理をした物性値を用いた解析結果は残留応力の実測値と比較して若干高めの結果となること、溶接後 SR 処理をした物性値を使用した場合の実測値により近い結果が得られることが判明した。

これにより、溶接金属に溶接のままの物性値を使用する従来の考え方でも保守性があることを確認できた。

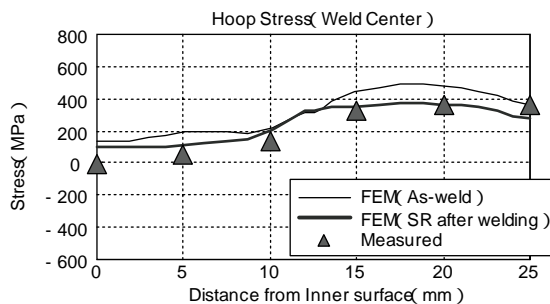


Fig12 FEM analysis & measured results<sup>5)</sup>

### 4.....あとがき

本研究は、“残留応力解析用の入熱モデルの検討”の成果<sup>3)</sup>及びその成果を用い、(独)原子力安全基盤機構よりの請負事業(経済産業省交付金事業「複雑形状部機器配管健全性実証事業」の一部)の中で“入熱モデル形状が溶接残留応力に及ぼす影響調査”と“溶接金属の材料物性値の違いが残留応力へ及ぼす影響調査”を実施した結果<sup>5)</sup>をまとめたものである。

### 参考文献

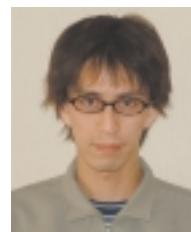
- 1) B. Brickstad, L. Josefson, A Parametric Study of Residual Stresses in Multi-Pass Butt-Welded Stainless Steel Pipes, SAQ/FoU-Report 96/01, SAQ KONTROLL AB.
- 2) Y. Shim, Z. Feng, et al., Determination of Residual Stresses in Thick-Section Weldments, Welding Research Supplement, October 1992, pp. 305s-312s.
- 3) 長谷川, 西川, 中田, 堀井, 村川, FEM 解析における入熱モデル形状の検討, 溶接学会 平成 17 年度秋季全国大会 講演番号 349.
- 4) B. Brickstad, L. Josefson, A Parametric Study of Residual Stresses in Multi-Pass Butt-Welded Stainless Steel Pipes, SAQ /FoU-Report 96/01, SAQ KONTROLL AB, Stockholm 4.
- 5) 小川, 中田, 西川, 長谷川, 村川, 円筒突合せ継手の溶接残留応力に及ぼす入熱モデルおよび物性値の影響, JSME M & M 2005 材料力学シンポジウム, 講演番号 431



中田志津雄



西川 聡



長谷川忠之



堀井行彦



# Ni 基合金の溶接金属組織と超音波探傷による 欠陥検出性の関係

(The Influence on Weld Metal Structures on Flaw Detectability  
by Ultrasonic Test in Nickel Base Alloy Welds)

溶接・非破壊検査技術センター 西川 聡  
古川 敬  
古村 一朗  
堀井 行彦

Ultrasonic Test (UT) method is the most appropriate method in many kinds of non-destructive test methods because of capabilities for detection and depth sizing of flaw. But it is generally said that the flaw detection in nickel base alloy welds is more difficult than that in ferritic steel welds because of dispersion and attenuation of the ultrasonic wave. Therefore, influences of welding conditions on flaw detectability and signal and noise ratio (SN ratio) of UT in nickel base alloy welds were investigated. Tested weld joints were prepared with multi-pass by gas tungsten arc method. Specimens having a slit electrical discharge machining in weld metal or in heat affected zone were tested by a longitudinal wave of 5 MHz in frequency and 45 degree in incident angle. Obtained results are as follows. Welded joints having columnar structures with the same growth direction showed high SN ratio that means good flaw detectability. Effective welding conditions, which make the columnar structure to be the same growth direction, were confirmed by the application of weaving or magnetic stirring. Same growth direction in columnar structure means same angle between the columnar structure growth direction and the ultrasonic wave propagating direction. Then, ultrasonic wave has almost same velocity in the weld metal, and the acoustic impedance will not be varied. High SN ratio may be caused by above phenomena.

**Keywords:** : Nickel base alloy weld, Ultrasonic test, SN ratio, Columnar structure growth direction, Weaving, Magnetic stirring

## 1..... 背景・目的

原子力プラントの事故・故障は、オーステナイト系ステンレス鋼やニッケル基合金の溶接部に生じる応力腐食割れ(SCC)や、繰り返し温度変化による熱疲労割れによるものが多い。割れの検出性について、現在普及している非破壊検査方法の中では超音波探傷試験(UT)が最も適用性が高いと言われている。それは、他の検査方法と比較して、割れの検出性や割れ深さの寸法測定精度に優れるためである。しかし、オーステナイト系ステンレス鋼やニッケル基合金の溶接部に対する UT では、溶接金属中の超音波の散乱や減衰が大きいことに加え、溶接金属の音速異方性により超音波が屈曲する<sup>[1][2]</sup>。このような理由から、オーステナイト系ステンレス鋼やニッケル基合金の溶接部に発生した欠陥は、母材部に発生した欠陥と比較して検出

性が劣るとされてきた。実際に原子力プラントで確認されている SCC を例に挙げると、オーステナイト系ステンレス鋼の溶接継手では、溶融線から数 mm 離れた溶接熱影響部 (HAZ) で主に SCC が発生している<sup>[3]</sup>。そのため、母材のみの超音波の透過で欠陥検出が可能となる場合がある。一方、ニッケル基合金の溶接継手では主に溶接金属で SCC が発生している<sup>[4]</sup>。したがって、ニッケル基合金の溶接継手では、溶接金属中に超音波を入射することが不可欠となることから、オーステナイト系ステンレス鋼の溶接継手と比較して欠陥検出がより困難になることが予想される。

これまで、溶接金属の組織制御の点から、超音波の透過性の向上や曲がりの低減を検討する研究が行われている<sup>[1][2][5]</sup>。UT における欠陥検出性は、欠陥エコーと溶接金属から発生する散乱波のようなノイズエコーとの比 (SN 比) が重要な因子と

なる。しかし、これまでに SN 比に着目し、金属組織との関係について検討した研究はほとんど行われていなかった。そこで本研究では、ニッケル合金の溶接金属組織と SN 比の関係について調査を行い、UT による欠陥検出に優れた溶接金属組織の必要条件について検討を行った。

## 2. 方法

### 2.1 評価試験片の作製

#### 2.1.1 欠陥検出性評価用試験片の作製

原子力プラントにおけるニッケル合金溶接材料の適用箇所の中から、本研究では単純な突合せ継手である①ニッケル合金—ニッケル合金溶接部、②ニッケル合金—オーステナイト系ステンレス鋼溶接部について検討を行った。

Table 1 に溶接条件を示す。溶接は TIG 溶接で行い、溶接入熱は約 1 kJ/mm とした。溶接材料はニッケル合金ワイヤ (JIS Z3334 YNiCr-3) を用いた。溶接時はウィービングを行ったが、一部の継手は全てのパスをウィービング無しで積層を行った。

Table 2 Welding condition for tested joint

Type	Base metal	Weld metal	Groove angle $\alpha$ (°)	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (mm/s)	Position	Weaving width (mm)	Wire feeding speed (g/s)
I	NCF600	YNiCr-3	30, 60	100~150	10.0~11.0	1.0~1.5	flat	0~4	0.063~0.095
II	SUS304								

継手の初層側を研削して板厚を 15 mm とし、Fig.1 に示す試験片を製作した。欠陥として、間隙 0.3 mm、高さ 2 mm、溶接線方向に 12 mm の人工欠陥 (EDM スリット) を付与した。スリット位置は、Fig.1 (a) に示すように、初層側の溶融線から 3 mm 離れた HAZ と初層側の溶接金属中央部の 2 箇所とし、各々のスリットが超音波探傷時に影響を及ぼさないよう、溶接線方向に互いに逆方向から付与した。

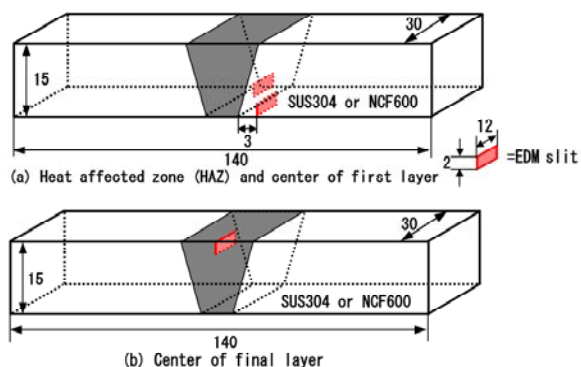


Fig.1 Two types specimens with EDM slits for evaluation of flaw detectability

Fig.1 (b) に示すように、溶接金属の最終層中央にもスリットを付与し、溶接長の約半分は無欠陥部とした。

#### 2.1.2 音速計測用試験片の作製

オーステナイト系ステンレス鋼やニッケル合金の溶接金属では、超音波伝搬方向が柱状晶の成長方向に対して異なると超音波の音速が変化する、いわゆる音速異方性が存在することは広く知られている<sup>6)</sup>。そのため、今回用いた材料の音速異方性を実測した。溶接入熱を約 1.0, 2.4, 5.4 kJ/mm の 3 水準に変化させた試験片を作製した。Fig.2 に試験片の採取方法を示す。開先加工を行った SUS304 板に積層し、母材の希釈の影響を避けるため、最終層近傍より  $\theta$  を変化させた試験片を採取した。そして、試験片採取後に  $\theta$  を実測により求めた。

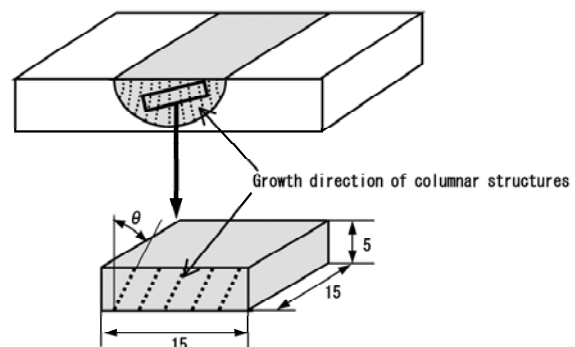


Fig.2 Processing procedure of specimens applied to acoustic velocity measurement

## 2.2 超音波特性評価方法

### 2.2.1 SN 比の計測

超音波探傷による欠陥検出性を調査するため、SN 比を計測した。超音波探傷の模式図を Fig.3 に示す。初層側の面を内面、最終層側の面を外面と定義し、内面から最終層溶接金属中央部に付与したスリットを探傷する内面探傷、外面から初層溶接金属中央部と HAZ に付与したスリットを探傷する外面探傷の 2 種類を実施した。探触子は縦波 5 MHz、入射角 45° を用いた。また、図中に示すように、入射方向に超音波が直進すると仮定して、溶接金属中の通過距離  $L$  を求めた。

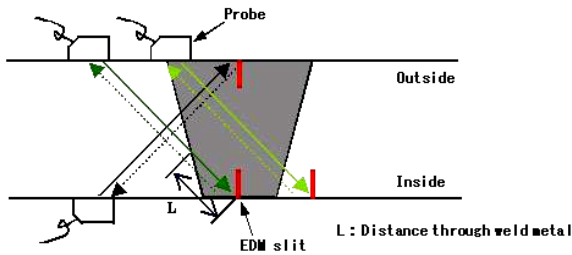


Fig.3 Schematic illustration of UT procedure

超音波探傷は自動 UT 装置を用いた。4つの試験片を計測した結果例を Fig.4 に示す。ある感度で欠陥エコーが検出され、さらに感度を増すと、無欠陥部において欠陥エコー以外のノイズエコーが検出される。そして、欠陥エコーの最大音圧とノイズエコーの最大音圧より、次式に定義するエコー高さ比と SN 比を求めた。

$$SN \text{ 比} = p_1 \text{ max} / N \text{ max} \quad (1)$$

ここで、 $p_1 \text{ max}$  は溶接部に付与したスリットの最大エコー高さであり、 $N \text{ max}$  は無欠陥部からの最大ノイズである。SN 比が高いほどノイズと欠陥エコーの識別が容易で、欠陥検出性に優れていると言える。

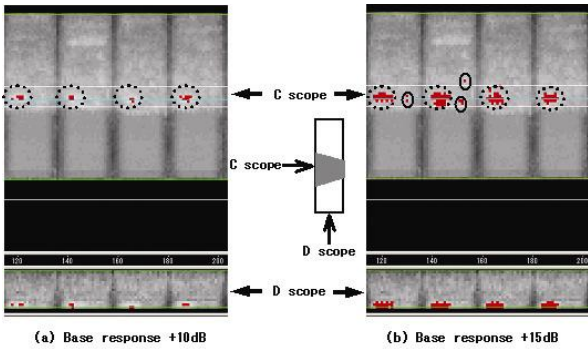


Fig.4 Example of measurement results (continuous line area show the flaw echo, dashed line area show the noise)

### 2.2.2 音速測定

2.1.2項で作製した試験片に縦波5 MHzの垂直探触子を用いて、JIS Z2353 に準拠して音速を測定した。

## 3. .... 結果

### 3.1 ウィービングがSN比に及ぼす影響

Fig.5 に溶接時のウィービング有無の継手における内面探傷時の溶接金属通過距離 L と SN 比の関係を示す。通過距離が長くなるにしたがい、SN

比は減少し、欠陥検出性が劣る。継手型式IIではウィービングを行うことで、同一溶接金属通過距離でも SN 比が2倍近くに上昇し、欠陥検出性が向上した。

Fig.6 に継手型式IIの組織観察結果を示す。ウィービングを行った継手は柱状晶の成長方向が板厚方向に一方向に揃う傾向がある。このように、溶接時にウィービングを行うことで柱状晶の成長方向が揃うのは、次の理由によると考えられる。

Fig.7 の溶接時の溶融池形状を表した模式図より、ウィービングは溶融池の幅を広げる効果があることから、溶融池の底の形状がウィービングを行わない場合より平坦となる。柱状晶の成長方向は溶融線から垂直方向に成長するため、柱状晶は板厚方向に成長する。そのため、溶接時にウィービングを行った継手は、行わない継手と比較して柱状晶の成長方向が板厚方向に揃うと考えられる。

Fig.8 は、Fig.7 の開先角度  $30^\circ$  の継手について、1パス毎の溶融線を明記している。ウィービングを行うことで、溶融線の湾曲の度合いが少なくなる傾向が見られる。これは、Fig.7 の妥当性を示している。

### 3.3 SN比が向上する理由

次に柱状晶の成長方向が一方向に揃うことで、SN比が上昇する理由を考察する。SN比に影響を与える因子として、超音波が溶接金属中を伝搬するときの柱状晶の成長方向が異なる境界部における超音波の反射率が考えられる。反射率が大きい場合、発生するノイズエコーは高く、その分欠陥エコーは小さくなり、SN比は下がることが想定される。超音波の入射側を物質1、通過側を

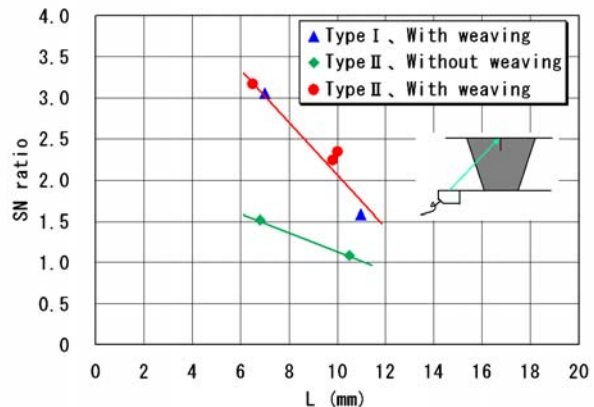


Fig.5 Effect of weaving on SN ratio in the case of type and □ specimens (inside inspection)

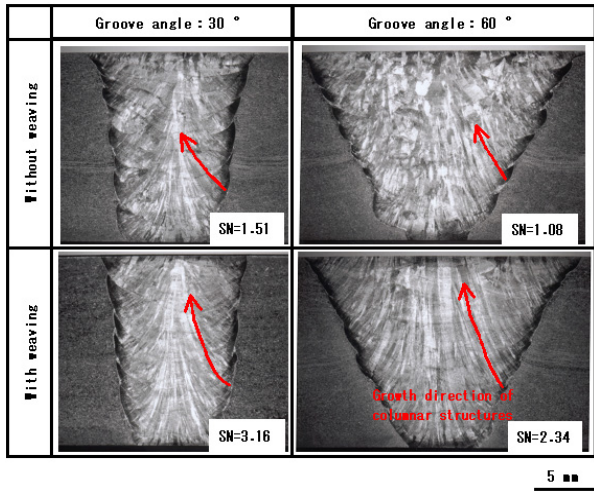


Fig.6 Macrostructure of transverse cross section in case of with and without weaving in type I specimens (inside inspection)

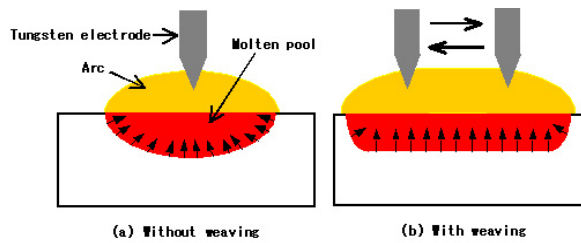


Fig.7 Schematic illustration of molten pool configuration in the case of (a) with and (b) without weaving

物質 2 とし，異なる物質 1 および 2 の境界面における超音波の反射率は (2) 式で表わされる<sup>7)</sup>。

$$R = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1) \quad (2)$$

ただし， $Z_1 = \rho_1 v_1$ ， $Z_2 = \rho_2 v_2$

R は境界面での音圧の反射率， $Z_1$ ， $Z_2$  は物質 1，2 の音響インピーダンス， $\rho_1$ ， $\rho_2$  は物質 1，2 の密度， $v_1$ ， $v_2$  は物質 1，2 の音速を示している。境界面での超音波の反射率は， $Z_1$  と  $Z_2$  の差が小さいほど低くなる。ここで，溶接金属中の超音波の伝搬を考えると，密度が一定となるため，音速の変化に着目する必要がある。Fig.9 に縦波 5 MHz における超音波の入射方向と柱状晶の成長方向のなす角  $\theta$  に対する音速を示す。溶接入熱の影響をほとんど受けずに，音速は  $\theta = 45^\circ$  が最も速く， $\theta = 0^\circ$ ， $90^\circ$  で遅くなる傾向を示した。柱状晶の成長方向が一方に揃うと  $\theta$  はほぼ一定となるため，超音波の伝搬方向に対する音速の変化は少なくなり，(2) 式に示す音響インピーダンスの差  $Z_2 - Z_1$  は小さくなる。したがって，反射率 R が小さくなることから，柱状晶の成長方向が一方に揃う継手は SN 比が高くなると考えられる。

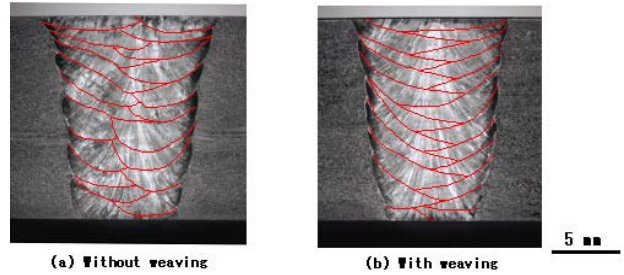


Fig.8 Macrographs of transverse cross section in type welds

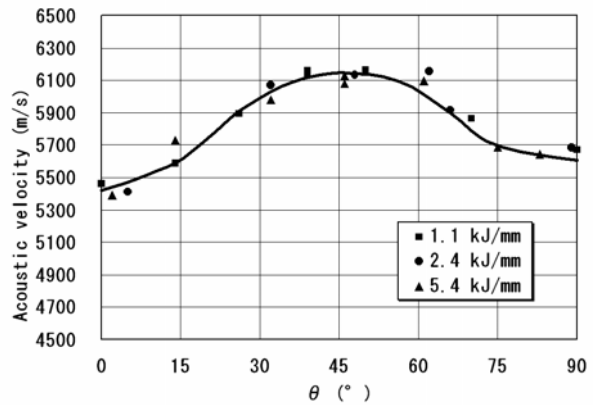


Fig.9 Relationship between  $\theta$  and acoustic velocity

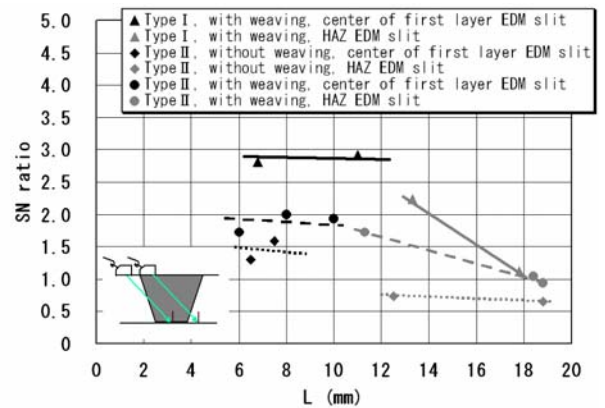


Fig.10 Effect of weaving on SN ratio from outside inspection in the case of type I and specimens

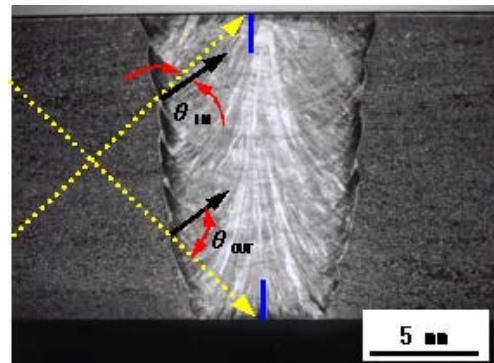


Fig.11 Definition of  $\theta_{IN}$  and  $\theta_{OUT}$

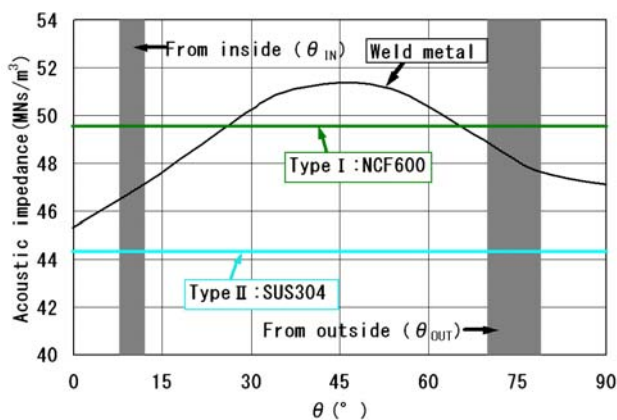


Fig.12 Acoustic impedance of weld metal, NCF600 and SUS304 in the case of inside and outside inspection

### 3.4 欠陥位置がSN比に及ぼす影響

Fig.10 にウィービング有無の継手における外面探傷の溶接金属通過距離とSN比の関係を示す。Fig.5 の内面探傷と同様に溶接時にウィービングを行った継手はSN比が上昇し、ウィービングの効果が認められた。しかし、Fig.5 ではウィービングを行った継手型式I、IIは、溶接金属の通過距離に対してほぼ同じSN比であったのに対し、Fig.10 に示す初層中央部とHAZに付与したEDMスリットの探傷では、通過距離に対して同一にはならなかった。この理由は、次に示すように超音波が母材から溶接金属に入射する時の溶融線近傍での音響インピーダンスの変化の相違が影響していると考えられる。Fig.11 に示すように、超音波の入射方向と柱状晶の成長方向との角度差は、内面探傷時を $\theta_{IN}$ 、外面探傷時を $\theta_{OUT}$ と定義すると、探傷した全ての継手で $\theta_{IN}=7\sim 12^\circ$ 、 $\theta_{OUT}=70\sim 79^\circ$ であった。Fig.12 に超音波の入射方向と柱状晶の成長方向のなす角 $\theta$ に対する溶接金属の音響インピーダンスの変化を、継手型式I、IIの各々の母材であるNCF600とSUS304の音響インピーダンスとともに示す。溶接金属の音響インピーダンスは、内面探傷ではNCF600とSUS304のほぼ中間に位置するが、外面探傷ではNCF600の音響インピーダンスに近くなる。したがって、反射率Rは(2)式に示したように音響インピーダンスの差に起因するため、内面探傷では母材に関係なくRが同じとなる。そのため、継手型式IとIIでは、溶接金属の通過距離に対するSN比がほぼ同

じになったものと考えられる。一方、外面探傷では継手型式Iの方が継手型式IIより母材と溶接金属の音響インピーダンスの差が小さいため、反射率Rも小さくなり、継手型式Iの方がIIよりSN比が高くなったと考えられる。

### 4.... 成果の活用/実績

今後、柱状晶の成長方向が揃った溶接金属のSCC特性についても評価を行い、これで問題が無ければ、欠陥検出性に優れたニッケル基合金の溶接条件として、本研究で適用した条件を推奨することができる。耐SCC性に問題があるようであれば、溶接金属中の化学成分等の観点から、さらに詳細な検討が必要となる。

## 参考文献

- [1] Y. Horii, T. Furukawa, S. Nishikawa, H. Yoneyama and N. Uesugi: Study on Improvement of Weld Metal Structures Suitable for Ultrasonic Testing of Austenitic Stainless Steels , Seventh International Welding Symposium (2001) 725-730.
- [2] S. Nishikawa, T. Furukawa, H. Yoneyama and Y. Horii: Ultrasonic Propagation and Weld Metal Structure of Austenitic Stainless Steel Welded Joints, Preprints of The National Meeting of J.W.S., 78, (2001) 116-117. (In Japanese)
- [3] S. Suzuki, K. Takamori, K. Kumagai, S. Ooki, T. Fukuda, H. Yamashita and T. Futami: Evaluation of SCC Morphology on L-grade Stainless Steel in BWRs, Japan High Pressure Institute, 42-4 (2004) 12-22. (In Japanese)
- [4] T. Aoki, S. Higuchi, H. Kobayashi and S. Shimizu: Evaluation on Ultrasonic Examination Methods applied to Ni-base Alloy Weld including Crack due to Stress Corrosion Cracking found in BWR Reactor Internal, Maintenance, 4-2, (2005) 37-44. (In Japanese)
- [5] T. Arakawa and Y. Tomisawa, The Improvement of Ultrasonic Characteristics in Weld Metal of Austenitic Stainless Steel Using Magnetic Stirring Method , 9<sup>th</sup> International Conference On Nondestructive Evaluation In The Nuclear Industry, (1988) 211-214.
- [6] K. Kimura: 各種成品及び溶接構造物の超音波探傷試験, 日本非破壊検査協会(1989) 20-22.
- [7] J. Krautkrämer, H. Krautkrämer: 超音波試験技術—理論と実際—(邦訳), 日本能率協会(1980) 21.



# PD(技量認証)規格の判定基準の妥当性評価

## Evaluation of Acceptance criteria of Japanese PD code

溶接・非破壊検査技術センター 古川 敬  
古村 一朗  
米山 弘志  
山口 篤憲

This paper describes reliability of crack depth sizing accuracy on ultrasonic testing method. Acceptance criteria of the Japanese Performance Demonstration Code (NDIS 0603 Appendix) are evaluated by applying the statistical data technique. When the personnel who passed the PD tests measures the crack depth, the probability that the crack depth sizing error becomes  $\geq 4.4\text{mm}$  or less is estimated with less than 5%.

**Keywords:** Performance Demonstration, Stress Corrosion Cracking, Depth Sizing, Statistics

### 1..... 背景・目的

オーステナイト系ステンレス鋼配管突合せ溶接部のき裂深さサイジング技量に関して、(社)日本非破壊検査協会規格 NDIS0603「超音波探傷試験システムの性能実証における技術者の資格及び認証」附属書(規定)「軽水型原子力発電所用機器に対するPD資格試験」<sup>1)</sup>(以下、NDIS0603と記す)が制定され、国内でもき裂深さサイジングの技量の指標(測定誤差の判定基準)が示された。一方で、発電用原子力設備の低炭素ステンレス鋼管における健全性評価においては、2005年7月時点ではUTで測定したき裂深さに4.4mmを加算する補正をしており<sup>2)</sup>、オーステナイト系ステンレス鋼管のき裂深さ測定において、健全性評価上確保すべき誤差は $\leq 4.4\text{mm}$ 以内と考えられる。ここで、NDIS0603の判定基準が、健全性評価のために求められる水準を満足しているかどうかを把握することは、UTによるき裂深さ測定技術の信頼性を確保するためだけでなく、UT技術者の技量向上の目標を定めるためにも重要なことである。

著者らは、UT技術者の技量向上を図る上での目標を示す方法を検討する目的で、NDIS0603の判定基準がオーステナイト系ステンレス鋼管の健全性の

ために求められる水準に達しているかを評価した<sup>3)</sup>。その中では「ある統計的な誤差を有する集団がPDに合格した上でき裂の深さを測定したときに、誤差が $\geq 4.4\text{mm}$ を超える確率」を計算し、健全性評価のために求められる水準に達しているかどうかを調査した。そして、UT技術者の技量向上の動機付けとなる様に、「ある統計的な誤差を有する集団がPDに合格した上でき裂の深さを測定したときに、誤差が $\geq 4.4\text{mm}$ を超える確率」を教育訓練の目標として示す方法についての検討を行った。本報ではその内容について紹介する。

### 2..... 検討方法

検討に当たり、まずUTによるき裂深さサイジング誤差がどのような分布を示すのかを調査した。次に、誤差の分布が正規性を有することを確認した上で、統計的な手法によりNDIS0603の判定基準が健全性評価のために求められる水準に達しているのかを調査した。ここでは、ある統計的な誤差を有する集団がPDに合格した上でき裂深さを測定したときに、誤差が $\geq 4.4\text{mm}$ を超える確率を計算した。これはPDの試験に合格した上でき裂深さを測定するという過

程を考慮し、次に示す手順で計算した。まず誤差の平均値と標準偏差をパラメータとして、ある統計的な誤差を有する集団がき裂深さを測定した時に、誤差が  $-4.4\text{mm}$  を超える確率( )を計算した。また、その集団がPDを受験した時に合格する確率(  $P$  )を計算し、ある統計的な誤差を有する集団がPDに合格した上でき裂深さを測定したときに、誤差が  $-4.4\text{mm}$  を超える確率として、 と  $P$  の積(  $\times P$  )を用いて健全性評価のための水準に達しているか調査した。

ここで の計算においては、ある誤差平均(  $\mu$  )と標準偏差( )を有する正規分布(  $N(\mu, )$  )において  $-$  から  $-4.4$  までの積分として算出した。また、合格率  $P$  は、ある誤差平均(  $\mu$  )と標準偏差( )を有する正規分布(  $N(\mu, )$  )から、ランダムに10個の数値を250通り抽出し、250通りの中からPD判定基準に照らし合わせて合格/不合格を判定して合格率  $P$  とした。

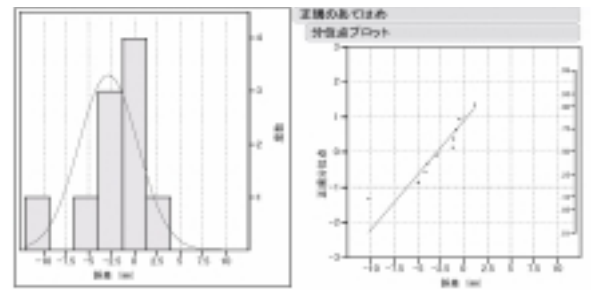
### 3..... 検討結果

#### 3.1 正規性の検討

超音波探傷試験によるき裂深さサイジング誤差の分布については、原子炉再循環系配管等の検査への改良超音波探傷試験の適用についての報告書<sup>4)</sup>の中で正規分布となることが確認されている。この報告書のデータは十分な経験と技量を有する技術者が測定した結果であり、き裂深さサイジングの経験等が少ない技術者の測定誤差がどのような分布をするのかは確認されていない。そこで、経験の少ない技術者の深さ測定誤差分布が正規性を有するかどうかを調査した。この調査では、(財)発電設備技術検査協会が実施している教育訓練<sup>5)</sup>において、教育訓練の成果の確認として実施しているブラインド(き裂深さを開示しない方法)によるき裂深さ測定の結果を用いた。図1に示すように、おおむね正規分布をしていることが確認された<sup>3)</sup>。

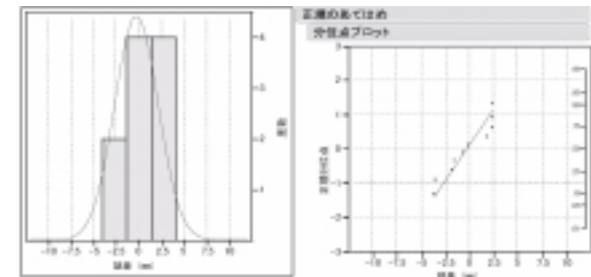
#### 3.2 判定基準の評価

統計的な手法により、判定基準が健全性評価のための水準に達しているかを評価するため、まず誤差の平均値(  $\mu$  )と標準偏差( )をパラメータとして、その誤差平均と標準偏差を有する集団が、誤差  $-4.4\text{mm}$  を超える確率( )を計算した。具体的には、



正規分布にあてはめ  
分散度プロット (正規確率紙)

(a) PD不合格相当のき裂深さ測定誤差分布



正規分布にあてはめ  
分散度プロット (正規確率紙)

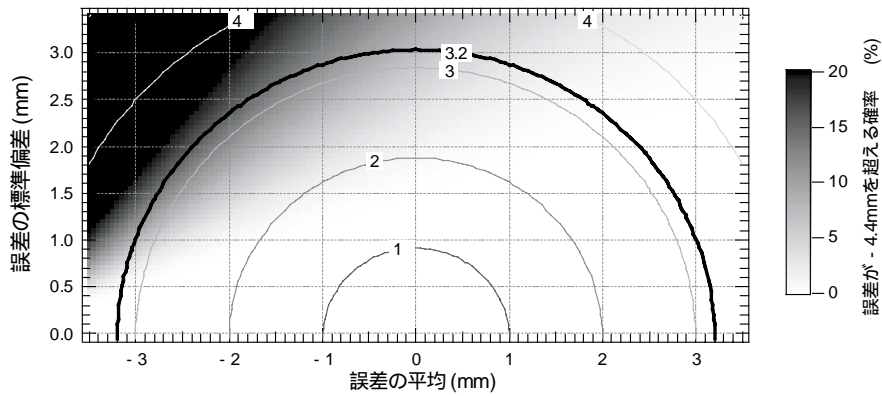
(b) PD合格相当のき裂深さ測定誤差分布

図1 誤差分布の正規性の調査結果

マイクロソフト社エクセル2000の関数( NORMDIST )を用いて、誤差平均(  $\mu$  )と標準偏差( )を各々変えて を計算した。その結果を図2にグレイスケールで示す。図の横軸と縦軸は各々誤差の平均値と標準偏差である。また、図中の半円状の線はサンプル数(  $n$  )が10個における誤差のRMS( RMSE )を計算したものであり、各半円状の線に示した数値は誤差のRMSである。誤差平均がマイナスかつ標準偏差が大きくなるほど は大きくなった。誤差のRMSが後述する  $3.2\text{mm}$  以下の範囲であっても は最大で15%であった。

次に、正規分布に従う乱数を用いてPD合格率(  $P$  )を推定した。具体的には誤差平均(  $\mu$  )と標準偏差( )を有する正規分布(  $N(\mu, )$  )から、ランダムに10個の数値を250通り抽出し、NDIS0603の判定基準(誤差が  $4.4\text{mm}$  を超えて下回らない、かつ、誤差のRMSが  $3.2\text{mm}$  以下)に基づき合格率(  $P$  )を推定した。具体的には、ある誤差平均(  $\mu_1$  )と標準偏差(  $\sigma_1$  )を有する正規分布(  $N(\mu_1, \sigma_1)$  )から10個の乱数を抽出し、これをUTの測定誤差と見なした。そして、この10個の数値について判定基準に基づき合格/不合格を判定した。この判定を250通り行い、250通りの中から合格と判定した数を算出して、ある誤差平均(  $\mu_1$  )と標準偏差(  $\sigma_1$  )における合格率(  $P_1$  )と





( 内の数値はサンプル数10個での誤差のRMSを示す )

図2 サンプル数10個での誤差のRMSと誤差が - 4.4mm を超える確率<sup>3)</sup>

表1 乱数を用いた計算の例<sup>3)</sup>

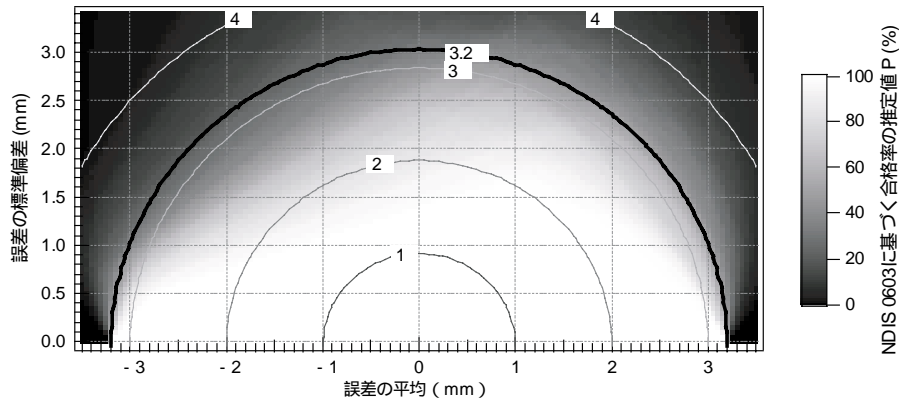
		250通り(1 ~ 250)					
		1	2	3	4	5	250
誤差平均( $\mu$ , 設定値 ) :	- 2.10( mm )	- 0.97	- 4.30	- 6.21	1.66	- 5.34	- 2.09
標準偏差( $\sigma$ , 設定値 ) :	2.20( mm )	- 0.58	- 3.27	- 4.13	- 3.33	- 2.82	- 2.52
N:	250	- 1.56	- 3.61	3.13	- 1.41	- 0.29	- 3.12
		- 2.52	- 1.73	- 1.58	- 3.73	- 2.53	- 1.23
		- 4.30	- 1.48	- 2.82	- 4.17	- 0.92	- 2.28
		- 0.75	2.05	- 0.68	- 0.82	- 4.58	- 0.96
		- 1.48	- 2.44	- 2.14	- 1.94	0.82	1.24
		- 4.18	- 5.41	- 3.27	- 4.08	- 3.01	- 0.92
		0.19	- 1.84	0.40	- 0.89	- 4.73	- 2.16
		- 0.31	- 3.77	- 4.25	- 2.74	0.19	- 0.99
RMSE<=3.2	割合 0.47 度数 118	- 1.646	- 2.581	- 2.154	- 2.145	- 2.321	- 1.502
- 4.4mmしきい値	割合 0.20 度数 49	標準偏差 1.557	2.050	2.654	1.842	2.188	1.225
合格率( $P_i$ )	割合 0.19 度数 48	RMSE 2.325	3.367	3.531	2.893	3.272	1.981
		最小値 - 4.300	- 5.407	- 6.206	- 4.169	- 5.341	- 3.123
		合否	x	x		x	

した。表1には、例として誤差平均が - 2.1mm、誤差の標準偏差を2.2mmと設定した時の計算結果の抜粋を示す。マイクロソフト社エクセル2000の分析ツールを用いて10個の乱数を250通り抽出したもののうち、例として1から5通りと250通り目の数値についてNDIS0603の判定基準に基づき合格/不合格を判定した結果を示す。この設定では250通りのうち48通りが合格と判定され、この誤差平均と標準偏差では合格率が0.19と計算された。

図3は、誤差平均(  $\mu$  )と標準偏差(  $\sigma$  )を各々変えて計算した合格率(  $P$  )の分布を示す。図の横軸と縦軸は各々誤差の平均値と標準偏差であり、NDIS0603の判定基準に基づき推定した合格率(  $P$  )をグレースケールで示す。図中の半円状の線は、サンプル数10個での誤差のRMSを計算したものでRMSの数値とともに示す。合格率の推定値は、誤差平均0を中心

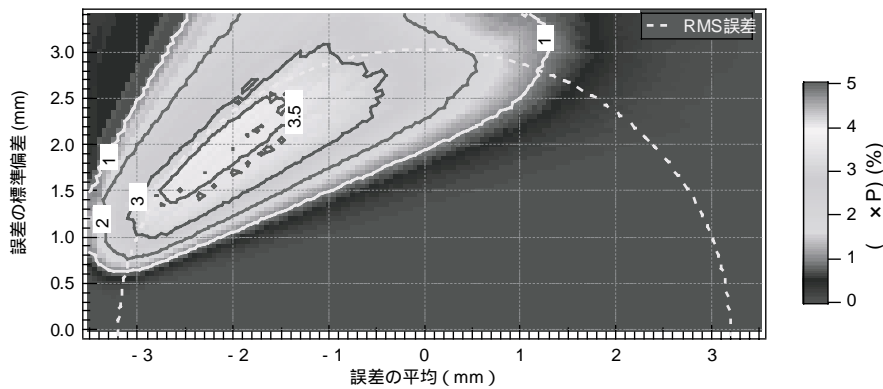
とした左右対称ではなく誤差平均がマイナスとなる領域で合格率の推定値が下がっている。これはNDIS0603の判定基準の「誤差が4.4mmを超えて下回ってはならない」という項目によるものであり、この領域は、図2に示した が5%から15%程度の範囲にほぼ対応している。

PDの判定基準が健全性評価のために求められる測定水準に達しているかを評価するために、「ある統計的な誤差を持つ集団がPDに合格した上でSCCを測定して誤差が - 4.4 mmを超える確率」を導入した。これは、「ある統計的な誤差を持つ集団がPDに合格する確率(  $P$  )」と「ある統計的な誤差を持つ集団SCCを測定して誤差が - 4.4 mmを超える確率(  $P_i$  )」の結合確率と考えられる。各々は独立事象であることから、  $P$  と  $P_i$  の積を算出しPDの判定基準が健全性評価のために求められる測定水準に達しているか



( 内の数値はサンプル数10個での誤差のRMSを示す )

図3 乱数を用いてNDIS0603の判定基準に基づき推定した合格率<sup>3)</sup>



( 点線上の 内の数値はサンプル数10個での誤差のRMSを、実線上の 内の数値は  $\times P$ を示す )

図4 ある誤差を有する集団がPDに合格した上でSCCを測定したときに誤差 - 4.4mmを超える確率 (  $\times P$  ) の推定値<sup>3)</sup>

を評価する指標とした。図4に  $\times P$ の推定値を示す。図の横軸と縦軸は各々誤差の平均値と標準偏差であり、算出した  $\times P$ を色合いと等高線で示す。また、図中には、サンプル数10における誤差のRMSが3.2mmとなる線も合わせて点線で示す。図4より、 $\times P$ の最大値は3.75%であった。図4の計算においては、乱数を発生させる種(ランダムシード)を1と設定して計算したものである。乱数の発生条件を変えるため、ランダムシードを2及び3と設定して同様に計算を行ったが、いずれの結果においても、 $\times P$ は最大でも5%未満であった。

これらの計算結果よりNDIS0603の判定基準は、95%の信頼度でオーステナイト系ステンレス鋼管の健全性評価のために求められる水準に達しているものと考えられる。

#### 4.....まとめ

UT技術者の技量向上を図る上での目標を示す方法を検討する目的で、NDIS0603の判定基準がオーステナイト系ステンレス鋼管の健全性評価のために求められる水準に達しているかを評価した。その結果、「ある誤差を有する集団がPDに合格してSCCを測定した時に、誤差が - 4.4mmを超える確率」は最大でも5%未満であり、95%の信頼度でNDIS0603の判定基準がオーステナイト系ステンレス鋼管の健全性評価のために求められている水準を満たしていると考えられる。

#### 5.....成果の活用

本検討内容は、原子力安全・保安院の技術評価書<sup>6)</sup>で判定基準の妥当性を評価する際に参考文献として引用された。

なお、本文中で「2005年7月時点ではUTで測定したき裂深さに4.4mmを加算する補正をしており<sup>2)</sup>」と記述した内容については、平成18年3月23日に国の指示文書<sup>7)</sup>が改定され、PD認証がされている場合は測定深さ初期値として進展評価をすることとなった。

#### 参考文献

- 1) 社日本非破壊検査協会規格 NDIS0603 超音波探傷試験システムの性能実証における技術者の資格及び認証, 平成17年5月18日 制定(発行平成17年6月20日)
- 2) 経済産業省 原子力安全・保安院, 平成16・09・08原院第1号 発電用原子力発電設備における破壊を引き起こすき裂その他の欠陥の解釈について (NISA-322c-04-4, NISA-163c-04-3), 平成16年9月22日
- 3) 古川敬, 古村一朗, 米山弘志, 山口篤憲, 超音波探傷試験によるき裂深さサイジングにおける教育訓練目標の指標について, 保全学, 4-3(2005) pp. 50-55
- 4) 経済産業省 原子力安全・保安院, 原子炉再循環系配管等の検査への改良超音波探傷試験の適用についての報告書, 平成16年8月
- 5) 米山弘志, 杉林卓也, 山口篤憲, 超音波探傷試験による疲労き裂と応力腐食割れの検出及び深さ測定に関する教育訓練の効果, 平成16年度火力原子力発電大会論文集, 2004, pp. 311-316
- 6) 原子力安全・保安院, 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 日本非破壊検査協会規格「超音波探傷試験システムの性能実証における技術者の資格及び認証」(NDIS0603: 2005)に関する技術評価書(案), 平成17年9月27日
- 7) 経済産業省 原子力安全・保安院, 平成18・03・20原院第2号 発電用原子力発電設備における破壊を引き起こすき裂その他の欠陥の解釈について (NISA-322c-06-1, NISA-163c-06-2), 平成18年3月23日



古川 敬



古村一朗



米山弘志



山口 篤憲

# 渦電流探傷によるき裂面の部分接触を伴う 応力腐食割れの深さサイジング

## Depth Sizing of Partial-Contact Stress Corrosion Cracks from ECT Signals

溶接・非破壊検査技術センター 程 衛英  
古村 一朗  
志波 光晴  
兼本 茂 (現 会津大学)

A partial-contact stress corrosion crack (SCC) is electrically modeled as a crack region with non-zero conductivity in eddy current testing (ECT). This partial-contact effect is excluded by an optimally designed crack-conductivity-insensitive depth characterization signal function (DCSF), and consequently the master curves obtained from electric-discharge machining (EDM) notches can be utilized directly in the depth sizing of SCCs. Furthermore, a crack conductivity independent artificial neural network (ANN) is constructed so that the entire depth profile can be reconstructed regardless of the crack conductivity. These two approaches are numerically validated and applied to the characterization of SCCs in SUS304 from measurement ECT signals. The average depth of each SCC is fast estimated from the DCSF, and the detailed depth profile is reconstructed from ANN. The ECT depth-sizing results show reasonable agreement with UT-TOFD measurement.

**Keywords:** Eddy current testing; Stress corrosion crack; Depth sizing; artificial neural network; Crack profile

### 1.....背景・目的

近年、原子力発電プラント(BWR)の炉内構造物や再循環系配管および压力容器貫通部などに応力腐食割れ(SCC)が相次いで報告されており、SCCの寸法や性状の把握は、原子力プラントの安全性評価や「維持規格」に対応する欠陥許容運転を科学的に行うには、極めて重要な課題である。

原子力プラントの供用期間中検査(ISI)における検査手法としては、一般に超音波探傷法(UT法)が用いられ、欠陥検出や長さ・深さサイジング法に関する基準が制定されており、また平成15年のPLR配管SCC問題により、その改善がなされてきた。一方、渦流探傷法(ECT法)は、従来は蒸気発生器電熱管の探傷にのみに用いられていたと言っても過言ではなかったが、近年、その他の原子力プラント構造物の検査にもUT法では検査しにくい部位の検査やUT法を補完する意味でECT法を適用するための開発が、多数、行われている<sup>1-5)</sup>。

ECT法は、本来、表面近傍の検出に適した手法であり、研究開発の多くは、これを欠陥長さサイジングや深さサイジングに適用するためのものであるが、SCCは人工的なノッチや疲労き裂と比べ、き裂の開口幅が狭く、分岐や曲がりなど複雑な形状をしており、それ故、き裂面の部分接触が想定され、さらに複数のき裂が近接して存在することもある、などの特徴があるため、その検出とサイジングは一般の疲労き裂などより困難である事が分かってきた。

本研究では、上記のSCCの特徴のうち、SCCのき裂面の部分接触に着目し、ECT法による部分接触き裂の深さサイジングについて検討した。即ち、人工ノッチのようにき裂面を導電率=0とするのではなく、き裂面の部分接触を周囲の金属材料と比較して極く僅かな欠陥導電率を設定(以下、欠陥導電率と表す)してモデリングする事とした。

本研究の流れでは、まず、シミュレーションより欠陥導電率によるECT信号への影響を調べ、その

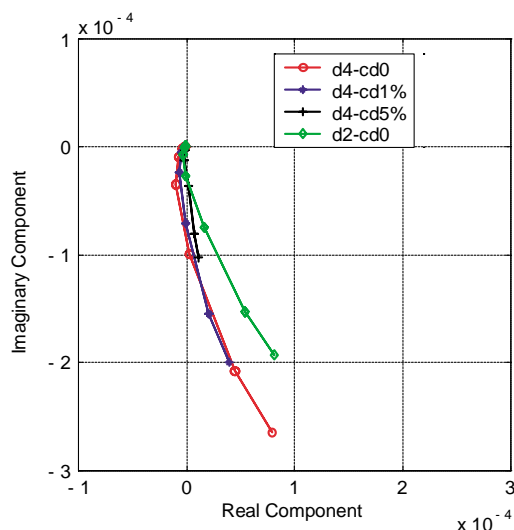


Fig.1 Comparison of ECT signals of cracks with different depths and conductivities

結果に、数学最適化手法を適用して、欠陥導電率の影響が小さくなる深さサイジングの指標関数を導入し、欠陥の深さを推定した。更に、欠陥の詳細な形状を得るため、ニューラルネットワーク(ANN)を構築し、SCC形状を再構成した。また、この二つの手法によるSCCの深さサイジング結果を、超音波TOFO法による測定結果と比較・評価した。

## 2.....欠陥内の導電率の影響

欠陥面の接触による部分通電の影響を調べるため、SUS304母材に深さ4mm、長さ20mm、開口幅0.2mmの矩形スリットを入れた際のECT信号を電磁界解析で評価した。Fig.1は、周波数100kHz、外径4.5mmのクロスコイル型プローブを欠陥直交方向へ走査した際のリサージュ波形を示したものである。欠陥面の接触の程度は欠陥導電率の大きさで表した。Fig.1には、深さ4mmのスリットで、導電率を母材の0%、1%、及び5%と仮定した場合と、深さ2mmのスリットで、導電率を0%とした場合の4通りを示している。図からわかるように、深さ4mm、導電率0%を基準にすると、1%の導電率を仮定した場合の振幅値は、深さ2mmの欠陥と同じ程度に小さくなってしまい、振幅値からは識別できないが、リサージュの位相に着目すると両者が識別できる。この事は、ECT計測信号の特徴を適切に抽出することで、欠陥深さのみに敏感な深さサイジング指標を

得ることができる可能性を示唆している。

## 3.....深さサイジング指標の導出及び検証

ECT計測信号は、プローブの走査位置 $x$ 、探傷周波数 $f$ に依存したベクトルとして下記のように表される。

$$y = [y_{am}^{f_k}(x_i), y_{ph}^{f_k}(x_i)]^T \quad (1)$$

ここで、サフィックスの $am$ と $ph$ は、ECT信号の振幅と位相を、 $f_k$ は、 $k$ 番目の探傷周波数を、 $x_i$ は、 $i$ 番目の走査位置を意味する。

き裂幅が一定で、プローブ寸法より十分長い一様深さの欠陥は、欠陥パラメータ $p = (d, \sigma)$ (深さ $d$ 、導電率 $\sigma$ )でモデリングでき、ECT計測信号 $y$ は、欠陥パラメータの関数として次のように表現できる。

$$y = f(p) \quad (2)$$

一方、ECT計測信号から欠陥性状を求めると言う事は、 $p = f^{-1}(y)$ を解き、欠陥深さや欠陥導電率を求める事であるが、構造物の安全性評価で最も注目されるのは欠陥深さであることが多く、欠陥導電率はあくまでもモデリングのために導入したパラメータであり、これを求めたい訳ではない。ここで、現在、一般的に良く使われているマスターカーブに基づいた深さサイジング法について考えてみると、この方法は深さが異なるスリット(欠陥導電率0)のECT信号の振幅及び位相からマスターカーブを作り、そのマスターカーブから欠陥深さを推定する方法であるが、もし、欠陥導電率の影響を関係式から除去できれば、欠陥導電率0のスリットから得られたマスターカーブをき裂面の接触がある欠陥の深さ推定にも適用できることになり、実用的な方法となり得る。

以上の考えを踏まえて、下記の線形結合による深さサイジング指標を構築した。

$$S = c^T y \quad (3)$$

ここで、 $y$ は式(1)で表すECT計測信号、 $c$ は $y$ と同じ次元の未知係数である。計測信号 $y$ は、欠陥深さ $d$ と導電率 $\sigma$ に依存して変化するので、これを陽に表した下記のような条件を $S$ が満たすときに、 $S$ を深さサイジング指標(Depth Characteristic Signal Function, DCSF)と呼ぶことにする。

$$\frac{\partial S(c, y(d, \dots))}{\partial d} = \max \quad (4)$$

$$\frac{\partial S(c, y(d, \dots))}{\partial c} = \min$$

これを満たす係数  $c$  は、 $w_1, w_2$  を経験的に定める重み係数として、下記評価関数を最大にする値として求めることができる。

$$c_{opt} = \underset{c}{\operatorname{argmax}} \left[ w_1 \times \max_{d, \dots} \left( \left| \frac{\partial S(c, y(d, \dots))}{\partial d} \right| \right) - w_2 \times \max_{d, \dots} \left( \left| \frac{\partial S(c, y(d, \dots))}{\partial c} \right| \right) \right] \quad (5)$$

この深さサイジング指標  $S$  が求まれば、欠陥深さと  $S$  の校正曲線を事前に作っておくことで、計測データから、導電率の影響を最小にした一様な深さサイジングができることになる。

このとき、式(2)の ECT 信号  $y$  がパラメータ  $p$  にどのように依存するかを求めるのが問題になるが、校正用試験片を用いて実験的に導電率を模擬するのは困難であるため、ここでは、電磁気シミュレーションによる  $y$  の深さ  $d$  と導電率への依存性を求める。更に、限られたシミュレーションケースで  $y$  の深さ  $d$  と導電率への依存性を表すために、多項式フィッティングで計測信号を次式(6)の如く近似して表すこととした。

$$y(d_i) = x_1 \times d + x_2 \times d^2 + x_3 \times d \times \sigma + x_4 \times d \times \sigma^2 + x_5 \times \sigma \quad (6)$$

ここで、 $x_1 \sim x_5$  はフィッティング係数である。

提案手法の有効性を確認するため、まず電磁界シミュレーションによる ECT 信号から検証する。Fig.2 には節2と同じクロスコイル型プローブにおける長さ 22mm、 $d=1 \sim 7$ mm、 $\sigma=0 \sim 2\%$  (母材導電率を基準) の矩形欠陥に対するの計算信号の振幅と位相を示している。添字の  $H$  と  $L$  は、探傷周波数 400kHz と 50kHz を示している。

$y = \{y_{am}^{f_H}, y_{am}^{f_L}, y_{ph}^{f_H}, y_{ph}^{f_L}\}$  を用いて、式(4)(5)から深さサイジング固有関数の係数  $c$  を求めた。その結果は、 $c = \{0.68, -0.69, -0.12, 0.24\}^T$ 、または、

$$S = 0.68 \times y_{am}^{f_H} - 0.69 \times y_{am}^{f_L} - 0.12 \times y_{ph}^{f_H} + 0.24 \times y_{ph}^{f_L} \quad (7)$$

となった。

この深さサイジング指数  $S$  の深さ  $d$  と導電率への依存性を等高線表示したものが Fig.3 であり、式(4)に示すように、 $S$  の導電率への感度は最小 (即ち図中で  $S$  の値であるカラー指標は横軸の導電率に依存

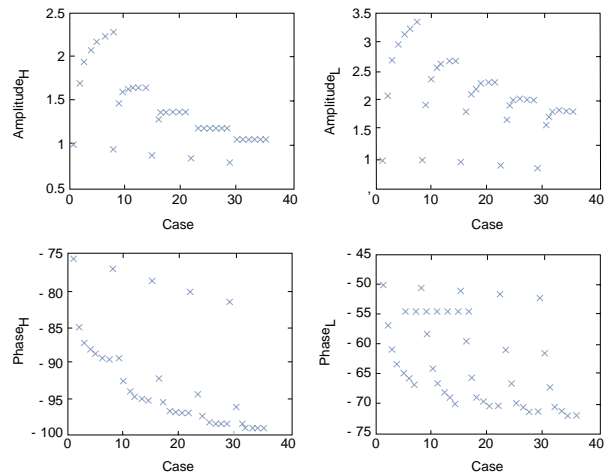


Fig.2 Amplitude and Phase of the high and low frequency signals with respect to different cases.

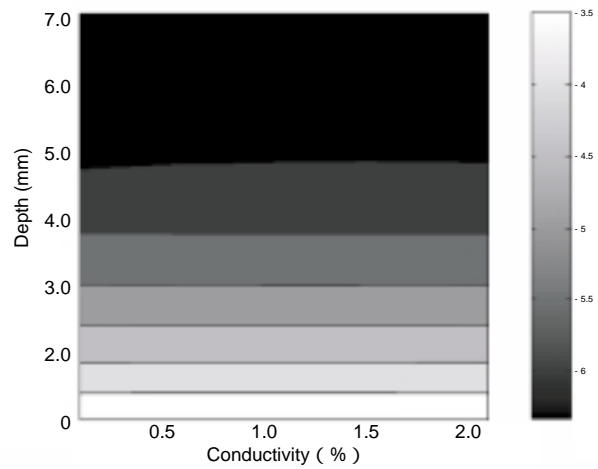


Fig.3 Contour plot of optimized depth sizing index  $S = 0.68 * y_{am}^{f_H} - 0.69 * y_{am}^{f_L} - 0.12 * y_{ph}^{f_H} + 0.24 * y_{ph}^{f_L}$

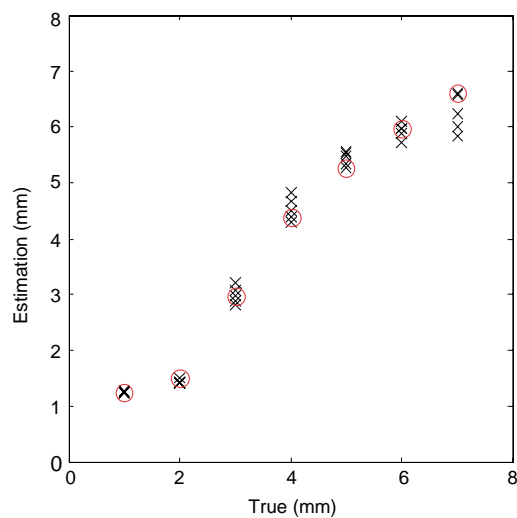


Fig.4 Estimation of depth using second polynomial fitting of optimized depth sizing index. (2% white noise is added.)

Table1 Composition of the estimation and true crack depth

true (mm)	average (mm)	Stdev (mm)
1	1.3	0.01
2	1.5	0.04
3	3	0.16
4	4.5	0.22
5	5.4	0.13
6	5.9	0.14
7	6.2	0.34

しない)であり、深さへの感度は最大になったことが分かる。このSと導電率 $\sigma$ 、深さ1~7mmのデータを用いてフィッティングで、下記のSと深さに関する2次校正曲線を作成した。

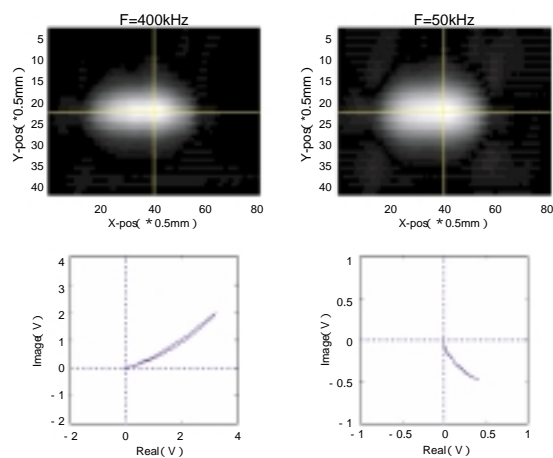
$$d_{pred} = x_1 \times S \times S + x_2 \times S + x_3 \quad (8)$$

$x_1 \sim x_3$ はフィッティング係数である。更に、深さ $d=1 \sim 7\text{mm}$ 、導電率 $\sigma = 0 \sim 2\%$ の全データに対し、シミュレーション信号値の2%の大きさのノイズを加えたデータからSを算出、(8)式に代入し、深さ推定値 $d_{pred}$ を算出した。その結果をFig.4に示すが、( $\sigma$ は導電率0、 $x$ は導電率0ではないSよりの推定深さ)導電率の異なる計測値が含まれているにもかかわらず、良い深さ推定値が得られていることがわかる。この推定結果の平均値と分散をTable. 1にまとめたが、推定誤差は1mm以下であり、本提案の手法の有効性を示すデータとなっている。

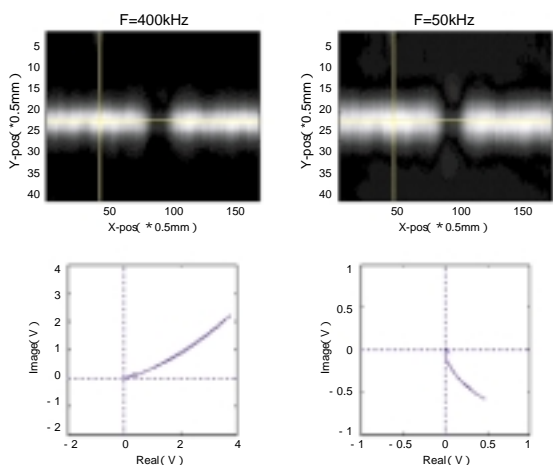
次に、本手法のSCCの深さサイジングへの適用性を検討する。SUS304試験片TP1~3にそれぞれ人工SCCを付与し、第2節で述べたクロスコイル型プローブを用いて、0.5mmピッチ間隔で2次元走査し探傷データを収集した。Fig.5(a)-(c)には、400kHzと50kHzの探傷周波数でのTP1~3の計測結果を示す。ここで、Cスコープ図のクロスヘアカーソルは、ECT信号の最大振幅位置を示しており、その最大位置で、Y方向(欠陥直交方向)にスキャンした際のリサージュ図をあわせて示している。

実際の試験片で導電率まで模擬した欠陥を作成することは困難であるので、深さサイジング指標そのものは、解析コードを用いて作成した7式を用いる。

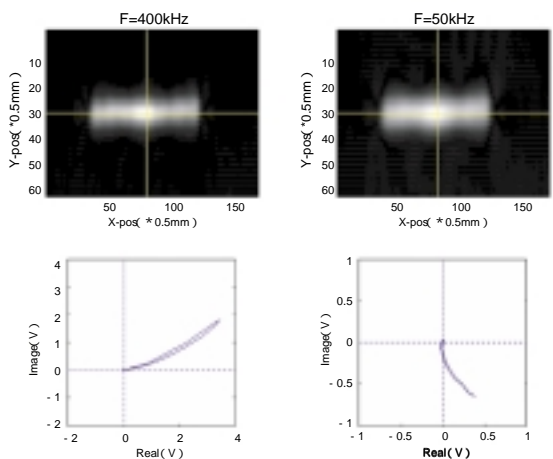
計測データと解析データをあわせるため、SUS304試験片に入れた深さ3mm、長さ15mm、開口幅0.2mmの矩形EDMスリットを校正試験片として、振幅と位相の校正係数を得た。ここで得た計測データは全てその校正係数を用いて換算した。最大位置



(a) TP1 (40X20mm scan area)



(b) TP2 (80X30mm scan area)



(c) TP3 (80x30mm scan area)

Fig.5 C-scan images and Lissajous along Y-direction of SCCs, measuring at 400kHz and 50 kHz.

の振幅と位相を7式に代入して深さサイジング指標を求め、さらに、(8)式から深さの推定を行った結果を、Table.2に表示した。

4.....ニューラルネットワークによる欠陥形状再構成及び検証

第3節に提案した深さサイジング指標法は、き裂長さ方向の深さの変化が少ない欠陥のサイジングに効率的であるが、き裂の詳細な形状は得られない。実際のき裂は、き裂長さが比較的に小さく、き裂長さの信号への影響を無視できない場合もあり、このような場合には深さサイジング指標法による深さ推定は過小評価になる可能性が有る。この様な場合に対処するため、ここでは、ニューラルネットワークを用いて、欠陥形状を構成する方法を提案する。

ニューラルネットワークは一つのベクトル関数からほかのベクトル関数へのマッピングとも言え、すなわち、

$$y_i = f(x_i); x_i \in R^m, y_i \in R^n \quad (i=1, n) \tag{9}$$

ここで、 $x_i \sim y_i$ はインプットとアウトプットであり、 $f$ はn個のインプットとアウトプットペアで構築された学習用データベースであり、事前にシミュレーション及び実験データから構築できる。ECT信号から欠陥性状を推定する場合、式(9)のインプットとアウトプットはそれぞれ探傷信号と欠陥性状である。この探傷信号と欠陥性状間に存在するマッピングをニューラルネットワークに学習させ、学習終了後、未知信号に対するネットワークの応答より欠陥形状の再構成を行うことができる。

本研究では、再構成する欠陥は平板状の表面欠陥に限るとし、まずEDM欠陥に対する解析として、欠陥は幅0.2mm、長さ30mm、深さ10mmの領域に収まると仮定し、この領域を30×10の微小要素に分割して、欠陥と非欠陥要素をそれぞれ1と-1で表した。破壊試験などの従来知見から、SCC開口面付近では、ほぼ完全にき裂面は離れており、深くなるほど、部分接触の可能性が高くなるのが分かっているため、この知識に基づいて、データベースを構築する際、表面一層目の要素を導電率0、深くいる要素の欠陥導電率を徐徐大きくなるよう、各欠陥要素に母材の0から5%までの導電率をランダムに付与した。

また、文献<sup>6,7)</sup>に示すように、単一周波数信号だ

Table.2 Comparison of crack depth estimated using different methods (unit: mm).

	DCSF	ANN	TOPD
EDM	3	3	-
TP1	1.6	3	3.8
TP2	2.0	3	3.3
TP3	5.7	8	6.2

けを用いて欠陥性状を推定するより、多周波数の信号を用いた方がよりいい結果が得られることや、シミュレーションデータに一定のノイズを加えると、より実際の測定に近く、サイジングにもより安定になるが分かっているため<sup>8)</sup>、本研究では5%のノイズを加えた50kHzおよび400kHz信号を用いて、データベースを構築した。さらに、信号の相関を抑えるため、各信号に対して、主成分分析(PCA)を行った。

電磁場の減衰のため、ECTプローブが影響を及ぼす範囲は限られている<sup>4)</sup>。プローブのこの特徴に基づいて、文献<sup>9)</sup>に提案したshift aperture法をデータベース構築に取り入れた。この手法より、ネットワークを小型化して、逆問題の不適切性を抑え、さらに、限られてたシミュレーションデータからより多くのインプットとアウトプットペアが出来、学習データの全問題空間に対するcover rateを上げることができる。また、この手法により、限られた長さの欠陥で作られたデータベースで任意長さの欠陥の再構成をできることになる。

以上の破壊試験による欠陥導電率の仮定、ノイズを加えた二周波数信号の活用、主成分分析、shift aperture法等などを取り入れ、事前に用意した100個の準ランダムに作製した表面欠陥とそれに対応するシミュレーションECT信号からデータベースを構築した。なお、欠陥導電率は信号に影響を与えるが、今回は欠陥の深さだけに注目したため、最終的なアウトプットは欠陥形状プロフィールだけである。

この100個の表面欠陥中、任意の90個を学習データとして選び、5個を確証用として、最後の5個を検証用として、ニューラルネットワークによる学習及び欠陥形状再構成を行った。

Fig.6は、信号校正用の長さ15mm、深さ3mmのEDMスリットのニューラルネットワークによる再構成結果である。図の中各要素は1mm×1mmである。白と黒はそれぞれ欠陥と非欠陥を表す。上述のよう



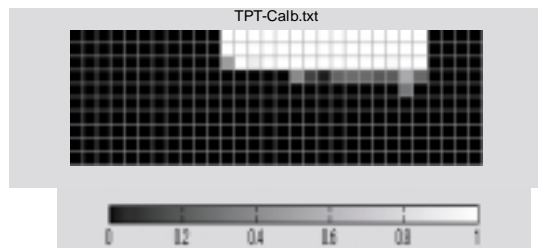


Fig.6 Depth profile of the EDM notch used for calibration, reconstructed by ANN. (each grid is 1mm × 1mm, black: unflawed region; white: crack element).

に、再構成結果は欠陥と非欠陥をそれぞれ1と-1で表し、欠陥導電率はアウトプットしていない。しかし、ニューラルネットワークの掛け算、引き算により、アウトプットが-1と1の間の値になる可能性もあり、図に示される様にグレーの要素もある。カラーバーに示した値は、要素が1になる確率と考えられる。Fig.6の第4,5層のグレー要素の値はほぼ0.4以下であるため、再構成欠陥は15(L)mm × 3mm(D)と推定できる。

Fig.7には、Fig.5に示したECT計測信号を用いて、ニューラルネットワークより再構成したTP1～TP3のSCCの形状を示す。TP1のSCCは平均的には深さ約2mmであり、最深部はおよそ3mmである。TP2では、約8mm間隔の二つの欠陥があり、深さはそれぞれおよそ3mmとなった。また、TP3にあるSCCの最大深さはおよそ8mmとなった。

## 5.....TOFOによるSCC深さサイジング

ここで使用した試験片は、まだ切断調査を行っていないため、10MHzの縦波超音波を用いて、TOFD (Time of Flight Diffraction) 法による計測を行って、その相互比較から結果の妥当性を判断することにした。Fig.8には、TOFDのサイジング結果である。

TOFD法、深さサイジング指標法及びニューラルネットワーク法による推定深さをTable2にまとめた。深さサイジング指標法では、一様な深さを推定できるが、欠陥深さは一様ではなく、また、欠陥が十分長くない場合、欠陥を浅めに評価する傾向が見られる。この傾向はTable2の結果にも表われている。TP1のSCCに対し、DCSFで推定した1.6mmに対し、ANNとTOFDの推定深さはそれぞれ3mmと3.8mmである。TP2のSCCの、この3手法による推定深さはそれぞれ2.0mm, 3mm, 3.3mmである。TP3の

SCCの3手法による推定深さはそれぞれ5.7mm, 8mm, 及び6.2mmである。TP1とTP2の場合、ANNとTOFD手法の推定深さが良く一致しているが、TP3のSCCに対しては2mmの差がある。深さサイジングの精度については、今後、切断調査を行って評価を行う。

## 6.....結 言

本論文では、ECT法による深さサイジングを体系的に行う方法論を提案した。ECT計測信号の挙動は、欠陥形状と物性が分かっている場合は電磁界解析によってかなり正確に予測できることが分かっており、電磁界解析に基づいた逆問題解析が広く取り組まれている。しかしながら、SCCのような複雑な自然欠陥を想定した場合、その形状や内部での部分導通という正確には予測できない問題があり、導電率の分布に関するある種の仮定を設けた推定が行われているのが現状である<sup>10,11)</sup>。従って、電磁界解析によって、導電率や欠陥形状に影響されない深さサイジング指標を見つけ、或いは、欠陥導電率を陰的に表現するニューラルネットワークを構築して、それに基づいて実SCCの深さサイジング及び欠陥形状再構成を行うという方法は、実用的な観点から有効な方法であると考えられる。

本論文では、この考え方にそって、まず、電磁界解析でいろいろな欠陥形状と導電率によるECT信号を計算し、そこから、深さのみに依存する深さサイジング指標を求めた。さらに、この指標を実データにそのまま適用することで、深さサイジングを行った。さらに、欠陥形状を求めるため、電磁気シミュレーションよりニューラルネットワークを構築し、人工SCCの形状再構成を行った。

いずれにしても、本論文により提案する手法は、試験片の切断評価を行っていないので最終評価とはいえないが、TOFD法と比べても2mm程度の誤差に収まっており、実際のSCCの深さサイジングでも実用に耐える手法であることが期待できる。なお、現状では限られた範囲での検証しか行っていないが、今後、様々な試験データと解析によって、その実用性を確かめてゆきたい。

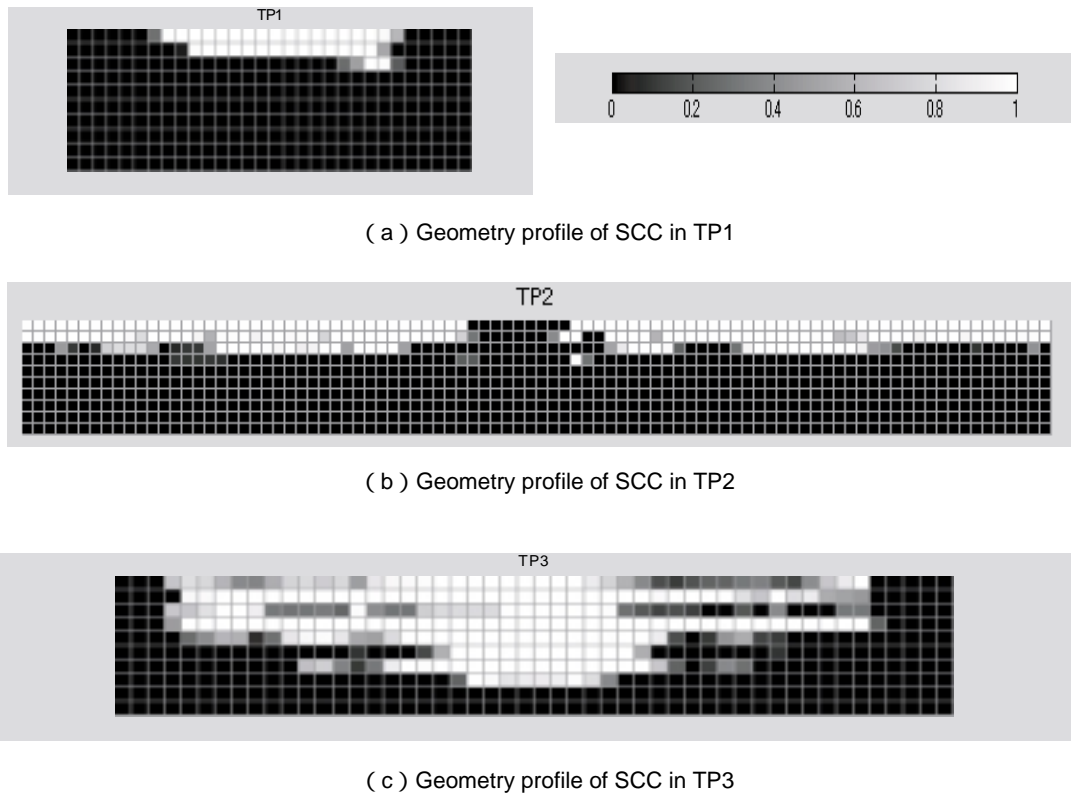


Fig.7 Depth profiles of SCCs reconstructed by ANN approach.

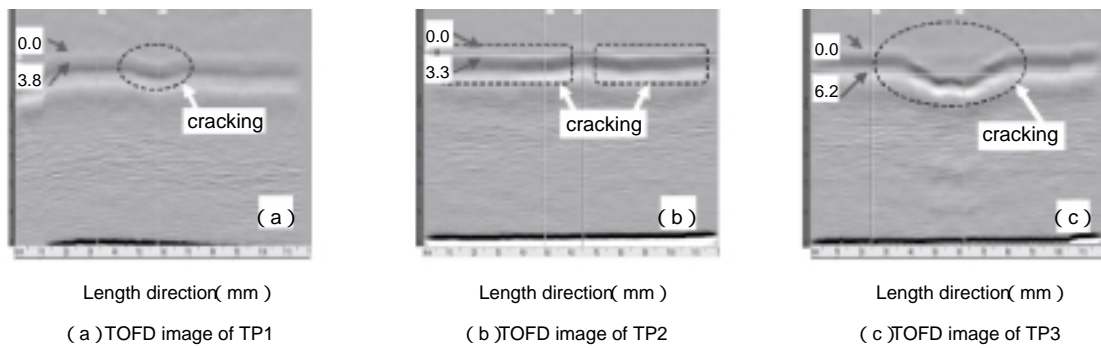


Fig.8 TOFD-Dscan images taken by 10MHz ultrasonic wave along crack longitudinal direction. (probe distance=30mm)

参考文献

- 1) 高木敏行, 遠藤久, “厚肉構造物のための渦電流探傷技術”, 非破壊検査, Vol. 53, No. 10, 2004, pp. 602-607.
- 2) 小島史男, “渦電流探傷シミュレータと逆問題解析”, 非破壊検査, Vol. 53, No. 10, 2004, pp. 596-601
- 3) ラディスラブ ヤノーセック, 陳振茂, 遊佐訓考, 宮健三, “肉材に渦電流探傷法を適用するための新しい励磁手法の提唱”, 非破壊検査, Vol. 54, No. 4, 2005, pp. 206-211.
- 4) W. Cheng, I. Komura and M. Shiwa, S. Kanemoto, “Eddy Current Examination of Fatigue Cracks in Inconel Welds”, to be appeared on Journal of Pressure Vessel Technology.
- 5) W. Cheng and K. Miya, “Reconstruction of Parallel Cracks by ECT”, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics Vol. 14, 2001/2002, pp.495-502.
- 6) W.Cheng, S.Kanemoto, I. Komura, M. Shiwa, “Depth Sizing of Partial-contact Stress Corrosion Cracks from ECT Signals”, NDT&E International, Vol. 39, 2006, pp. 374-383.
- 7) 兼本茂, 程衛英, 志波光晴, 古村一朗, 部分接触 SCCの渦電流探傷による新しい深さサイジング法, to be appeared in 保全学.
- 8) Neural network FAQ. Periodic posting to the usenet newgroup comp. ai. neural-nets. URL: ftp://ftp.sas.sam/pub/neural/FAQ.html
- 9) Popa RC and Miya K, Approximate inverse mapping in ECT, based on aperture shifting and neural network regression. Journal of Nondestructive Evaluation, 1998; 17(4): 209-221.
- 10) N. Yusa, Z. Chen, K. Miya, T. Uchimoto and T. Takagi, “Large-scale parallel computation for the reconstruction of natural stress corrosion cracks from eddy current testing signals”, NDT&E International, Vol. 36, 2003, pp. 449-459.
- 11) 小島史男, 池田拓也, “渦電流探傷法における階層型自然き裂モデルによるき裂診断解析法”, 日本保全学会, 第2回学術講演会要旨集, 2005, pp. 81-82.



程 衛英



古村 一朗



志波 光晴



兼本 茂

# 渦流探傷法における表面欠陥識別と形状認識の高精度化

Improvement of Surface Defect Detection and Its Shape Recognition by Eddy Current Technique

溶接・非破壊検査技術センター 程 衛英  
古村 一朗  
志波 光晴  
兼本 茂 (現 会津大学)

The purpose of this study is to propose new signal processing methods for discriminating the surface defect from the base line signals caused by weld etc. and restoring the surface shapes of flaws from eddy current testing (ECT) signals. A linear discriminant analysis method is applied to ECT signals embedded in multi-dimensional state space to identify flaw signals from background noises in prior. A new concept of equivalent point spread function is introduced, and the real flaw shape is restored by utilizing a deconvolution filter based on Richardson-Lucy algorithm. An EDM notch covered by large welding noises is identified and the length of this notch is obtained from flaw shape restoration. Furthermore, this method is applied to the surface shape restoration of stress corrosion cracks (SCC) and the surface shape of a complicated SCC is restored.

**Keywords:** Eddy Current Test, SCC, Linear Discriminant Analysis, Deconvolution Filter, Point Spread Function, Line Spread Function

## 1.....緒言

渦電流探傷試験法 (ECT, Eddy Current Testing) は、金属材料表面の微細なきずを高感度で検出する手法として、鉄鋼製品の製造工程での検査、火力・原子力発電プラントでの熱交換器伝熱管検査、航空機の保守検査など広く用いられている<sup>1-3)</sup>。

ECT 検査を行う場合、きずの有無は探傷プローブを材料表面に沿って走査して得られるプローブコイルのインピーダンス (抵抗成分  $x$  とリアクタンス成分  $y$  で構成される) を  $X$ - $Y$  平面上で表示した軌跡のパターン (リサーチ) や、 $x$  振幅・ $y$  振幅・それら全振幅値などをプローブ走査の2次元空間位置に対応させたCスコープ画像より、周囲とは異なる指示模様の出現により判断される。ここで問題となるのは、きず信号とノイズの識別手法である。現状、Cスコープ図からは識別し難い場合、リサーチ図からきず信号の有無を判断しているが<sup>4)</sup>、この認識は熟練した検査員の判断に頼っているのが実状であ

り、きず信号の自動識別はECTの課題の一つである。

もうひとつの問題は、探傷プローブの空間応答特性の広がりにより、前記Cスコープ画像がぼやけることである。この画像のぼけを補正して、欠陥表面形状を復元するのは、典型的な逆問題として画像処理分野で広く研究されており、多くのデコンボリューション手法<sup>5-9)</sup>が提案されている。しかしながら、ECTにおける探傷プローブの空間応答特性は、カメラ画像と異なる本質的な問題点がある。これは、探傷プローブの空間応答特性が、探傷コイルの磁界の拡散特性と、きずの有無による渦電流発生特性を総合したものになっていることである。このため、きずの形状や方向に依存して空間応答特性を定義する必要がある。すなわち、通常、空間内の点状欠陥への応答特性として定義される点応答関数 (Point Spread Function, PSF) は、ECTの分野では必ず適切ではない。デコンボリューション手法をECT表面形状復元に適用するため、ECTの特徴を考慮し

た等価的な点応答関数 (Equivalent Point Spread Function, EPSF) の導出が必要である。

本研究では, 上記のノイズを含む信号の中からのきず信号の定量的識別法と, きずの形状復元の高精度化を, 信号処理手法により解決する新たな方法の開発を行った。

## 2.....きず信号の統計的識別方法

ECTにおいて, 探傷プローブの平面走査で得られる信号は, 走査位置を(i, j)とすると,

$$Z(i, j) = [z_x(i, j), z_y(i, j)] \quad (1)$$

というx振幅とy振幅からなる2次元ベクトルで表現できる。既に述べたように, きず信号の判定は, 経験的には, インピーダンス平面図上の軌跡で行っていることから, この2次元ベクトルを, 走査位置ごとの軌跡パターンに拡張すると,

$$Z(i, j) = [z_x(i+n, j+m), z_y(i+n, j+m)] \quad (2)$$

$(n = -N \sim +N, m = -M \sim +M)$

という,  $2 \times (2N+1) \times (2M+1)$ 次元の多次元特徴空間が構成できる。すなわち, きず信号の判定に用いる軌跡パターンは, この多次元特徴空間の点として表現できることになる。ここで,  $N>0, M=0$ にとると, i方向の軌跡が得られるし,  $M>0, N=0$ にとると, j方向の軌跡が得られる。従来のCスコープ表示は, この多次元空間の代表値として, y振幅  $z_y(i, j)$  や全振幅  $\sqrt{z_x(i, j)^2 + z_y(i, j)^2}$  を画像表示していることになる。

一方, より適切なきず信号の識別には, 多次元特徴空間のデータを, 目的にあった部分空間に射影して表示することが望ましい。このための方法として, パターン認識で広く用いられているフィッシャーの線形判別法を導入する。フィッシャーの線形判別法は, 多変量解析分野の基本技法で, 二つのクラスに属する特徴空間のパターンを, 各クラス内の変動とクラス間の変動の比率を最大にするという基準に基づいて最適に識別する方法である<sup>10)</sup>。二つのクラスは, きず信号部とそれ以外のノイズであるが, これを,

1) きず信号部

$$S: \{Z(i, j) | (i, j) \text{ 欠陥部}\}$$

2) ノイズ信号部

$$N: \{Z(i, j) | (i, j) \text{ 欠陥部以外のノイズ部}\}$$

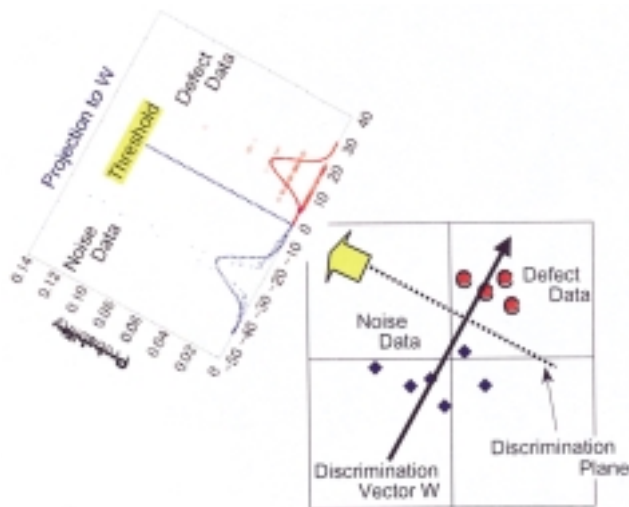


Fig.1 Schematic illustration of the data classification and discrimination.

とすると, この二つのクラスを識別する最適な線形判別関数(Z)は次のように与えられる。

$$g(Z(i, j)) = W^T Z(i, j) + W_0 \quad (3)$$

$$W = (S + N)^{-1} \{m_S - m_N\}$$

$$W_0 = -W^T \left( \frac{2}{N} m_S + \frac{2}{S} m_N \right) \quad (4)$$

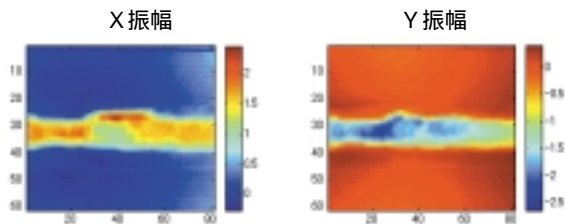
$$\frac{2}{S} = W^T S W, \quad \frac{2}{N} = W^T N W$$

ここで,  $m_S, m_N$  は各クラスの平均と分散である。また, Wは両クラスの識別のための固有軸となり, その軸への射影が判別関数値となるが, これはスカラー量であり, Cスコープのような画像表示を可能にする。

Fig.1に, 上記のデータのクラスとその識別を概念的に示す。また, 定数項  $W_0$  は, 判別関数の原点を決めるために必要であり, その決定には任意性が残るが, ここでは, 二つのクラスの分散で内分した点を選んでいる。この判別関数  $g(Z)$  を用いて下記のようにクラスの識別を行うことができる。

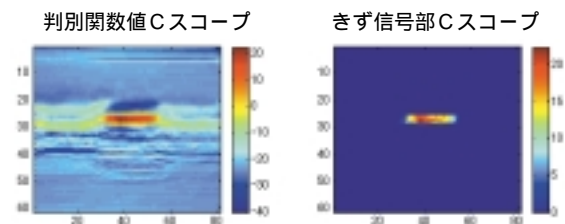
$$\begin{aligned} g(Z(i, j)) > 0: & Z(i, j) \in S \\ g(Z(i, j)) < 0: & Z(i, j) \in N \end{aligned} \quad (5)$$

上記(3~4)式で, ノイズとの識別性を直感的に表現するために,  $W_0 = -W^T m_N$  とすると, ノイズ信号の重心を原点にとることができ, 判別関数の値を信号と見ると, 検出性の目安となるS/N比を定義することもできる。統計的な観点からの検出性能は, 誤検出確率 (false alarm probability) と検出漏れ確率 (miss alarm probability) として定義すべきであるが, 経験則としてのS/N比も実用的観点からは有用



(a) Real component (b) Imaginary component

Fig.2 C-scope images of ECT signals for EDM slit located at welding boundary



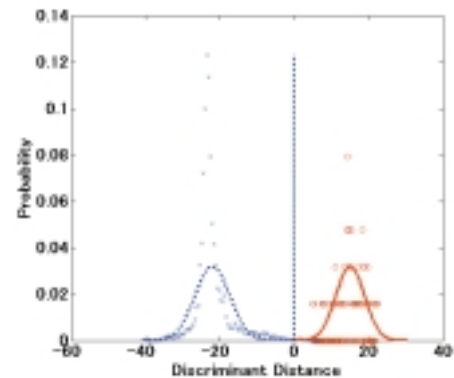
(a) Discriminant function value (b) Extracted flaw

Fig.3 C-scope images of discriminant function values and extracted flaw signal parts by  $g(Z) > 0$ .

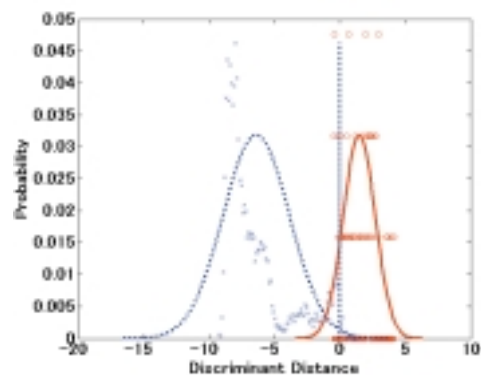
と思われる。

判別関数による方法は、きず信号部とノイズ信号部を予め教示する必要がある。これは、計測値から欠陥部を選定して教師信号として与えることも可能であるし、通常のECTで行われているように、人工EDM欠陥を付与した校正試験片のデータをきず信号として用いることでも可能である。

この検出法の検証のために、外径2.3mmのパンケーキ型プローブで(探傷周波数は400kHz)SUS304配管溶接部(板厚10mm)の境界近傍に、溶接線に平行に入れたEDMスリット(深さ2mm,長さ10mm,開口幅0.3mmの半楕円スリット)の検出を行った。走査ピッチは、0.5mmとして、水平方向(配管周方向)40mm,垂直方向(配管軸方向)30mmの領域(80×60点)のCスコープ図(x,y振幅)をFig.2に示す。バランスは母材部でとっているが、x振幅で溶接境界部にEDMスリットがあることがわかる。また、溶接部の材質変化によるノイズも明瞭に見える。インピーダンス平面での軌跡パターンは欠陥直交方向(N=0, M=5)として、22次元の特徴空間での判別を行う。このCスコープ図から、きず信号部として点線で囲った部分(i=33~52, j=26~28)を教示し、それ以外の部分をノイズ信号部として、(3)式による判別関数値を求めた。Fig.3はこの結果であり、(a)



(a) Discrimination results in 22-dimensional space (N=0, M=5)



(b) Discrimination results in 2-dimensional space (N=0, M=0)

Fig.4 Comparison of discrimination performance in different multi-dimensional state space

の判別関数値で正の領域だけを選ぶことで、(b)のような欠陥部のみの画像を得ることができる。Fig.2の大きな溶接ノイズが消えて、きず信号部のみが抽出されていることがわかる。

ここで、検出性能に関する特徴空間の次元数の影響を見るため、(N=0, M=5)という22次元の特徴空間での識別結果と、(N=0, M=0)という2次元の結果を比較する。Fig.4はこの結果で、横軸は(3)式の判別関数値 $g(Z)$ をとり、教示に用いたきず信号部(×印)とノイズ部(○印)をそれぞれのクラスで正規化したヒストグラムとして表示した。また、実線・破線で表示したのは、(4)式のそれぞれのクラスの平均値と分散値に基づいた正規分布を示している。さらに、判別境界を縦線で表している。これらの結果から、インピーダンス平面の軌跡パターンを用いることで、欠陥信号の検出性能、すなわち、周囲の溶接部信号等からの識別性能のS/Nを大きく向上でき、かつ判別分析により客観的に行うことが可能であることが分かる。

なお、本論文では、手法の有効性、特に、(2)式による多次元特徴空間への埋め込み手法の効果を確認することを目的としているので、教師信号としては、判別目的としている欠陥部のデータそのものを用いたが、実際の応用に当たっては、校正試験片のデータを教師信号にするなどの変更が必要である。また、その際に検出すべききずを想定した適切な形状（特にきずの深さ）を持った校正試験片を用いることが重要となる。

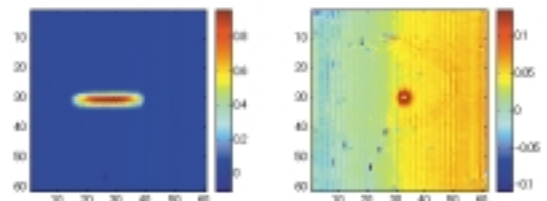
### 3.....欠陥形状の復元

#### 3.1 点応答関数(PSF)と線応答関数(LSF)

緒言で述べたように、ECTにおける探傷プローブの空間応答特性は、探傷コイルの磁界の拡散特性と、きずの有無による渦電流発生特性を総合したものになっている。この空間応答特性を評価するために、ニッケル基合金アロイ600の平板試験体(板厚10mm)に、0.2mm四角・深さ2mmの点状欠陥と、長さ10mm、幅0.2mm、深さ2mmの線状欠陥(深さ方向は矩形)を付与して、ECTの空間応答特性を計測した。使用したプローブは外径2.3mmの自己誘導標準比較型パンケーキプローブと外径4.4mmの自己誘導自己比較型クロスコイルプローブの2種類とした。探傷周波数はいずれも400kHzである。走査ピッチ0.5mmで、30mm×30mmの領域を走査した際の点欠陥と線欠陥への応答特性を比較して、x振幅のCスコープ画像をFigs.5, およびFig.6に示す。

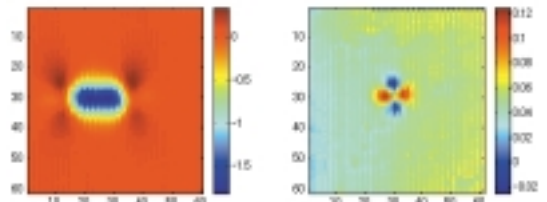
パンケーキ型プローブでは、点欠陥への応答は中心部が凹んだ火山の火口状であるのに対して、線欠陥への応答は単峰の釣鐘型形状であることがわかる。一方、クロスコイル型プローブでは、点欠陥への応答は90度ごとに位相が変わるクローバ形状の特性を示しているのに対して、線欠陥への応答は、端部ではクローバ形状の特性が少し見えるものの、中央部では、欠陥直交方向は釣鐘状の単純形状になっていることが分かる。Fig.7に欠陥平行・直交両方向の全振幅応答の断面形状を示した。これより、欠陥直交方向では、パンケーキ型プローブは、クロスコイル型プローブに比べて、高分解能(空間減衰距離が短い)応答特性を持っているのに対して、欠陥平行方向では、逆に、低分解能になっていることが分かる。

これらの結果は、線状欠陥への応答に関しては、



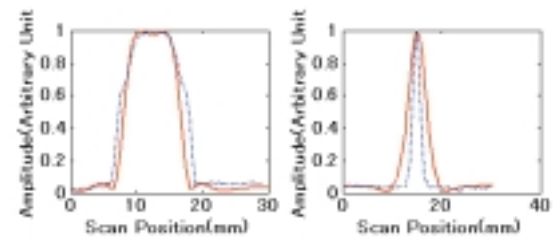
(a)Response to line flaw (b)Response to point flaw

Fig.5 Experimental results of spatial response to line and point shape flaw by Pancake probe (C-scope of real component)



(a)Response to line flaw (b)Response to point flaw

Fig.6 Experimental results of spatial response to line and point shape flaw by Cross-coil probe (C-scope of real component)



(a)Parallel scan profile (b)Perpendicular scan profile

Fig.7 Comparison of spatial response profiles of ECT signal amplitude in parallel and perpendicular scan of line shape flaw (Solid line: Cross-coil, Dotted line: Pancake)

欠陥方向に応じた減衰距離を持つ空間応答特性としてモデル化する必要があることを示している。さらに、もう一つ重要な点は、点欠陥への応答を空間積分することで線欠陥への応答が得られるわけではないことである。このような知見に基づいて、ここでは、空間応答特性の近似式として、下記のモデルを仮定する。

$$PSF(i, j) = c_1 e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{i}{R_i} \right)^2 - \left( \frac{j}{R_j} \right)^2} - c_2 e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{i}{RS_i} \right)^2 + \left( \frac{j}{RS_j} \right)^2} \quad (6)$$

$$LSF(i, j) = \int_{k=i}^{k=i+length} PSF(i-k, j) dk$$

ここで、点応答関数PSFの定義において、(i, j)は空間位置で、欠陥平行方向をiに、直交方向をjにとっている。また、 $R_i, R_j$ および $RS_i, RS_j$ は、(i, j)方向の減衰係数である。 $c_1, c_2$ は規格化定数である。

一方、線応答関数LSFは、PSFを始点から終点まで線積分した関数で定義する。本提案での特徴は、

(4)式で定義したPSFが、Figs.5, 6で示した点応答形状をそのまま模擬するものではなく、(6)式のLSFが図の線応答形状を模擬できるような形状としてPSFを定義している点である。その意味で、本論文では(6)式のPSFを、等価PSFと呼ぶことにする。

これらの減衰係数と規格化定数は、線状欠陥の計測データに合うよう求めるが、ここでは、全振幅値の2次元分布計測値と(6)式のLSF計算値が、最小2乗の意味で一致するように、非線形最適化法を用いて推定した。Figs.8, 9は、パンケーキ型、クロスコイル型それぞれのプローブで計測した線状欠陥から求めたLSFとその際の等価PSFを示したものである。図には、欠陥平行方向と直交方向のプロファイルを計測値と計算値とで比較して示してあり、ここで求めた係数の推定結果は以下の通りであった。

パンケーキ型プローブ:

$$R_1 = 1.0 \text{ mm}, R_j = 0.75 \text{ mm}, c_1 = 1, RS_i = 0.5 \text{ mm}, RS_j = 0.75 \text{ mm}, c_2 = 0.9$$

クロスコイル型プローブ:

$$R_1 = 1.0 \text{ mm}, R_j = 1.7 \text{ mm}, c_1 = 1, c_2 = 0$$

なお、ここでは、0.5mmの走査ピッチの計測データを用いており、このピッチを考慮して、mm単位の減衰係数に換算した結果を示している。

### 3.2 2欠陥表面形状復元

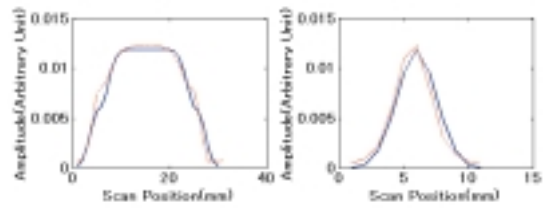
ECTにおいて、被検査対象の表面のきずの形状は、探傷プローブの空間応答特性 (PSF) に応じて、下記のような畳み込み積分 (コンボリューション) によってぼやけた形状で計測される。

$$H(i, j) = \sum_m \sum_n S(m, n) PSF(i - m, j - n) \quad (7)$$

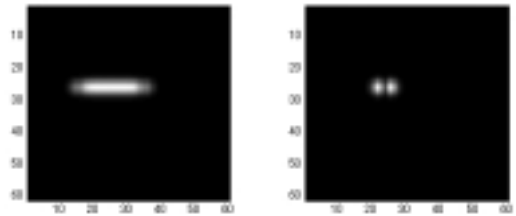
$$= S(i, j) * PSF(i, j)$$

ここで、Sは真の欠陥表面形状、Hは観測される欠陥表面形状である。観測されたHからSを復元推定する問題はデコンボリューションと呼ばれるが、これは、微分操作に相当するため、計測データに重畳したノイズに大きく影響される。本研究では、第2章で述べた判別関数による欠陥検出法を前処理として利用することで、ノイズの影響を回避し安定した復元を行うことを試みた。

本研究では、このデコンボリューション手法としてベイズの定理に基づいたRichardson-Lucy (R-L) 法を用いる。観測値  $H_{kl}$  が得られたときの欠陥形状  $S_{ij}$  の

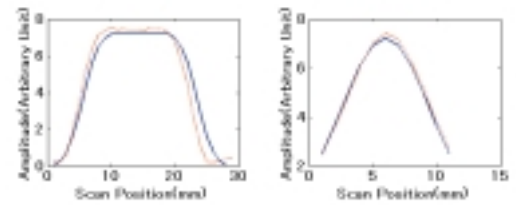


(a) Parallel scan profile (b) Perpendicular scan profile

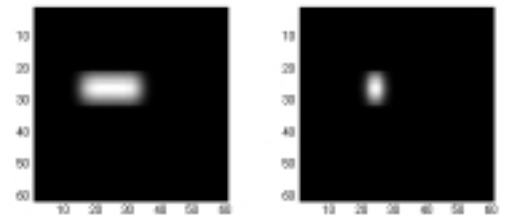


(c) C-scope of LSF (d) C-scope of equivalent PSF

Fig.8 Line Spread Function (LSF) and equivalent Point Spread Function (PSF) of Pancake probe (Solid line: calculation, Dotted line: Measurement)



(a) Parallel scan profile (b) Perpendicular scan profile



(c) C-scope of LSF (d) C-scope of equivalent PSF

Fig.9 Line Spread Function (LSF) and equivalent Point Spread Function (PSF) of cross-coil probe (Solid line: Calculation, Dotted line: Measurement)

確率  $P(S_{ij}|H_{kl})$  はベイズの定理により下記のように表される。

$$P(S_{ij}|H_{kl}) = \frac{P(H_{kl}|S_{ij})P(S_{ij})}{\sum_m P(H_{kl}|S_{mm})P(S_{mm})} \quad (8)$$

ここで、ij, klなどのサフィックスは空間位置を表す。このとき、全ての観測値を考慮した欠陥の存在確率は、下記のように求まる。

$$P(S_{ij}) = \sum_{kl} P(S_{ij}|H_{kl})P(H_{kl}) = \sum_{kl} \frac{P(H_{kl}|S_{ij})P(S_{ij})}{\sum_m P(H_{kl}|S_{mm})P(S_{mm})} P(H_{kl}) \quad (9)$$

この中の  $P(S_{ij}|H_{ij})$  は、欠陥  $S_{ij}$  の元で  $H_{ij}$  が観測される確率なので、PSFそのものになる。即ち、



$$P(H_{kl}|S_{ij}) = PSF(k - i, l - j) \quad (10)$$

R-L法は、この(9)式を次のような繰り返し法で求めるアルゴリズムである。

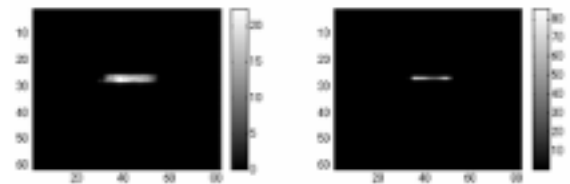
$$P_{r+1}(S_{ij}) = P_r(S_{ij}) \frac{PSF(k - i, l - j)}{PSF(k - m, l - n)P_r(S_{mm})} P(H_{kl}) \quad (11)$$

ここで、 $r$ は繰り返しの回数に対応し、初期の欠陥分布  $P_0(S_{ij})$  を与えることで、観測画像  $P(H_{kl})$  から、真の欠陥分布を求めることができる。

Fig.10(a)は、Fig.1～3で述べた判別関数を前処理として適用した欠陥検出画像である。これは、プローブの空間応答特性によりぼやけた画像となっているが、この画像に対して、(11)式のアロリズムを適用することで、Fig.10(b)のような復元画像が得られる。真の欠陥は、長さ10mm、開口幅0.2mmの線状欠陥であるので、より真値に近い画像が復元されていることが分かる。この復元形状を詳細に見るために、欠陥平行方向のプロファイルを、復元前後で比較して示したのがFig.11である。復元前の欠陥長さが約12mmであるのに対して、復元後は10mmの長さとなっており、真の値に近い長さが復元されていることが分かる。

Fig.12は、SUS304平板(板厚15mm)に付与した人工SCCについて、クロスコイル型プローブ(探傷周波数400kHz)を用いた計測結果と、デコンボリューションによる復元結果を示すものである。ここでは、これまでと同様に、0.5mm走査ピッチで、50mm×80mmの領域の走査を行って得たデータの、全振幅値のCスコープ画像と、この全振幅値のデコンボリューションによる表面形状復元結果を示した。計測結果のCスコープ画像は、線状欠陥の幅が広く見えているが、これが、(6)式の等価PSFを用いたデコンボリューションによってより鮮明な画像が得られていることが分かる。

Fig.13には、この試験片表面の写真を示す。Fig.12の復元後欠陥の長さは、この写真から得られる長さとはほぼ一致している。しかしながら、分岐部の位置については、Fig.12の復元結果とFig.13の写真は正確に一致しているわけではなく僅かにずれており、今後の残された課題である。



(a)C-scope of extracted flaw (b)Reconstructed flaw

Fig.10 Experimental results of C-scope images of reconstructed flaw shape

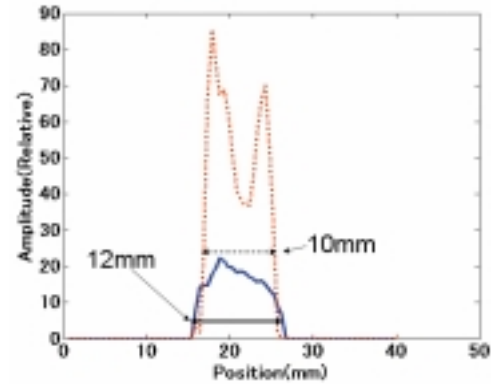


Fig.11 Shape reconstruction results of parallel scan profile of line flaw (Solid line: Original profile, Dotted line: Reconstructed profile)

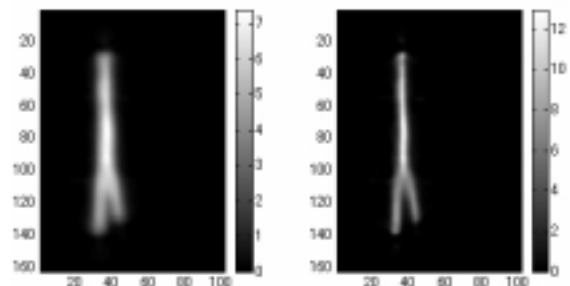


Fig.12 Reconstructed results for artificial SCC flaw shape (Left: C-scope image of original signal amplitude, Right: C-scope image of reconstructed shape)

#### 4.....結言

本論文では、ECTにおけるきず信号の検出の客観化・定量化に加えて、デコンボリューションフィルタによるきず形状の復元手法を提案し、SUS304試験体に付与したEDMスリットと人工SCCを用いて、その有効性を示した。きず信号の検出に関しては、インピーダンス平面図の軌跡パターンに相当する情報を多次元特徴空間に埋め込んで、その空間での判別分析を行うことで、きず信号を客観的な基準の元で検出できることを示した。同時に、誤検出確率、検出漏れ確率といった量で検出性能を定量化することもできる。したがって、専門家によるインピーダ

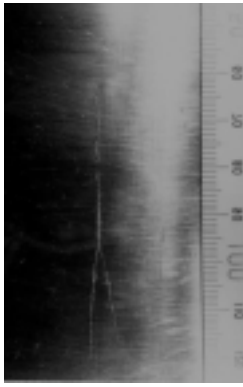
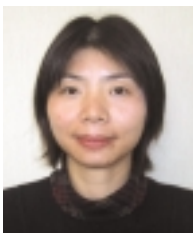


Fig.13 Surface photograph of SCC test piece (50mm x 80mm size)

ンス平面図の軌跡パターンの経験的判断によるきず信号検知を客観的基準に基づいて行うことができるため、今後の検査手法の標準化に役立てることが期待される。

さらに、ECTにおける探傷プローブの空間的な計測性能を、等価PSF、LSFという形で定量化する方法を提案した。ECTで用いられる代表的なパンケーキ型、クロスコイル型プローブについて、この等価PSFで近似する関数形状を求め、各プローブの表面形状計測性能を明らかにした。さらに、ここで求めた等価PSFと判別分析による欠陥検出技術を組み合わせることで、ノイズに強い欠陥形状復元技術を構築できることを明らかにした。計測プローブの空間応答特性によってぼかされた計測画像から元の欠陥形状を復元することは、欠陥の真の長さや形状を知ることに関与し、より正確な非破壊検査手法としての貢献が可能になる。

ECTによる欠陥検査は、簡便で実用的な方法であるが、その一方で、電磁界相互作用を用いた間接計測であるために、欠陥の有無の判定や真の欠陥形状の復元には、さまざまな知識を用いた推定が必要になる。本論文で述べた統計的信号処理手法は、専門家の知識を補って、検査の客観化、標準化に役立つ方法論として期待できる。



程 衛英



古村 一朗



志波 光晴



兼本 茂

## 引用文献

- 1) 木村新一郎, 「鉄鋼生産における渦電流探傷試験法」, 非破壊検査, 第53巻, 3号, 2004, pp.125-130.
- 2) 神村武男, 「熱交換器伝熱管の保守検査における渦電流探傷技術の変遷」, 非破壊検査, 第53巻, 3号, 2004, pp.131-135.
- 3) 岡本次郎, 「航空機における渦電流探傷法」, 非破壊検査, 第53巻, 3号, 2004, pp. 136-142.
- 4) Z. Chen, et al., “Data Processing of Corrosion Noise Polluted ECT Signals for Heat Exchanger Tubes of Cu-Ni Alloy”, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 24, Electromagnetic Nondestructive Evaluation (VIII), IOP Press, 2004, pp.128-135.
- 5) W. H. Richardson, “Bayesial-Based Iterative Method of Image Restoration”, Journal of the optical Society of America, Vol. 62, No. 1, 1972, pp. 55-59.
- 6) 小井戸純司, 山口博之, 星川洋, 「渦電流探傷試験におけるウィナーフィルタを用いたきず形状の再構成」, 第54巻, 7号, 2005, pp. 372-379.
- 7) F.Kojima, T.Takagi,T.Matsui, “Inverse methodology for eddy current testing using transmitter-receiver coil probes”, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 23, 2005, pp. 643-650.
- 8) P.Xiang, et al., “Automated analysis of rotating probe multi-frequency eddy current data from steam generator tubes”, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanic, Vol. 12, 2001, pp. 151-164.
- 9) W. Cheng, K.Miya, “Reconstruction of Parallel Cracks by ECT”, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 14, 2001/2002, pp. 495-502.

10 石井健一郎, 上田修功, 前田英作, 村瀬洋, 「パターン認識」, 1998, オーム社出版局.

# 電磁気的手法による圧力容器鋼(SQV2A)の照射脆化度評価

## Nondestructive Evaluation of Irradiation Embrittlement of SQV2A Steel by using Magnetic Method

溶接・非破壊検査技術センター 中東 重雄, 程 衛英, 志波 光晴, 古村 一郎  
岡山大学 高橋 則雄, 藤原 耕二

Irradiation brittleness of SQV2A steel was evaluated by using magnetic methods nondestructively. Thermal aging (TA) and electron beam irradiation specimens (EI) were prepared for the basic examination to evaluate aging effect and irradiation damage separately. Electro-magnetic properties and hardness of specimens were measured. The micro-structure of each specimen was observed by transmission electron microscope (TEM).

Micron-meter scale Cu precipitations were observed in the case of TA by TEM observation. On the other hand, nano-meter scale Cu precipitations and dislocation around the precipitations were observed in the case of EI. Micro-Vickers hardness of TA specimens decreased with aging temperature and time and vice versa to the EI specimen. B-H curves and higher harmonics of AC magnetization signals were sensitive to micro-structure changing of both TA and EI specimens. The intensity of the 3rd harmonics increased linearly until 100 years of an equivalent operation time of nuclear power plant at temperature 573K calculated by using Larson-Miller parameter.

**Keywords:** Keywords : SQV2A, Irradiation embrittlement, Aging, TEM

### 1.....緒 言

現行の原子炉圧力容器鋼の照射脆化度は、監視試験片(サーベイランス試験片)を一定期間毎に取り出し、シャルピー衝撃試験により評価しているが、このような破壊試験法では現用軽水炉発電設備の供用期間延長が望まれている現状では、監視試験片の不足が懸念される。また、炉の高経年化に伴い、材料の劣化(脆化)に対し高頻度で、かつ継続的なそれら挙動の調査の必要性が要求されはじめています。

本研究では、材料の劣化挙動を非破壊的に評価する方法の開発を目的として、照射脆化等マイクロ組織変化に敏感な電磁気特性変化に注目し、これら特性変化より照射損傷度を簡便かつ、現場にて継続的に評価することが可能な照射脆化度評価手法の開発を検討する。

本研究は、3ヶ年計画で実施している。研究の特徴は、中性子照射によって原子炉(圧力)容器鋼

SQV2A(以下SQV2A鋼と称す)中に生じるマイクロ組織変化を、加速器を用いた照射損傷シミュレーション法と、熱時効によって模擬した試験片を用いて調べること、また原子炉照射(中性子照射)された同鋼を用いて試験を行い、それら結果を比較検討することである。

本研究で用いる加速器照射シミュレーション法は、試料が放射化しないことから放射線管理区域内での作業がないこと、また照射損傷を素過程に別けて詳細に調べることができ、試験条件も正確に設定できる等多くのメリットがあることから材料の照射損傷研究に多く用いられている手法である。しかし実機原子炉環境に比べ、照射損傷速度が非常に大きいことや、損傷付与領域が小さいことによる影響が考えられるなど問題点はいくつかある。しかし本研究では、中性子照射された試験片による試験を行うことから、これらシミュレーション法の問題点や課題が明らかになることも期待される。

本研究の初年度は、SQV2A 鋼に熱時効および電子線照射をそれぞれ付与した照射模擬試験片を用いた試験、次年度には、熱時効後電子線照射を行い、熱と照射の複合効果を模擬した照射模擬試験片による試験、最終年度には、中性子照射されたSQV2A 鋼による試験をそれぞれ行い、電磁気特性変化による照射脆化度評価手法の開発の技術的見通しを明らかにする。

本報では、熱時効および電子線照射したSQV2A 鋼照射模擬試験片による電磁気特性結果およびマイクロ組織変化結果について報告する。

## 2.....試験方法

原子炉圧力容器鋼は、中性子照射を受けることによってマトリックス(素地)に格子欠陥集合体等の照射損傷と、鋼中の不純物元素であるCuやNi, Mn, Si等を含むCuリッチ析出物が形成されることが知られている<sup>1)</sup>。そこでマトリックスに生じる照射損傷を電子線照射により、Cuリッチ析出物形成を熱時効によりそれぞれ模擬した照射模擬試験片を作製した。試験は、導電率、直流磁化特性(B-H特性)、交流磁化特性等の基本的な電磁気特性および硬さ測定を行った。また透過型電子顕微鏡(TEM)によりマイクロ組織観察を行い、これら電磁気特性変化や硬さとの相関を調べた。

### 2.1 供試材および試験片の製作

供試材は、JIS G3120 SQV2A 鋼鍛造材のブロックである。その化学成分は0.22C-0.21Si-0.019P-1.44Mn-0.60Ni-0.48Mo-0.16Cu-F $\alpha$ (mass%)で、1143K(870 ) $\times$ 460min.の焼入れ、992K(719 ) $\times$ 420min.の焼戻しを行った後、用いた。試験片のサイズは、10 $\times$ 30 $\times$ 1tmmである。

試験条件は、実機発電プラント80年運転相当の評価を行うことを目標とし、加速条件としてLarson - Miller法[ $T(C+\text{Log. } t)$ ; T温度, C = 8]を適用した。本研究では、加速因子としては時間のパラメータを優先し、熱時効は1000時間を最大とした。また各年度共通の標準材として、実機プラント運転温度である573K(300 )で1000時間の熱時効材を作製した。一方、本鋼は変態点を約973K付近に有するこ

とから、その近傍温度での挙動をも調べた。表1に作製した照射模擬試験片の一覧を示す。

表1 製作した照射模擬試験片一覧

温度 ( )	時間 (Hrs.)	Larson - Miller法による 573Kでの換算時間 (Hrs.)	試 験 片	
			熱時効 処 理	電子線 照 射
573K ( 300 )	1,000	1,000		
	1	619		-
	10	13,874		-
	100	309,315		-
773K ( 500 )	1000	6,909,419		-
	1	384,275		-
	10	19,174,432		-
	100	$9.6 \times 10^8$		-
973K ( 700 )	1000	$4.8 \times 10^{10}$		-
	1	384,275		-
	10	19,174,432		-
	100	$9.6 \times 10^8$		-

### 2.2 電子線照射

加速器照射シミュレーション法に用いる粒子は、軽/重イオンまたは電子線が一般的である。損傷付与深さは加速エネルギーに依存し、イオン照射では損傷付与深さは浅いが、電子線照射の場合は深い。一方、付与損傷量は前者では大きい、後者は小さい。また損傷の深さ分布は、両者とも不均一となるが、イオン照射の場合、表面近傍とピーク近傍とでは差異が電子線照射に比べ大きいなど、両者にはそれぞれ特徴があり、その特徴を十分理解し、有効利用する必要がある。

本研究の目的の一つは、照射による電磁気特性変化の検出性の確認がある。したがって損傷領域の深さは深い程よい。中性子照射の場合、本試験片サイズ(厚さ1mm)ではほぼ均一に損傷が付与され問題はないが、イオン照射の場合、試料が放射化しないという加速条件では数 $\mu$ m、電子線照射では約1.5mm程度と計算される。したがって、本試験では、試験片の厚さ方向全域に損傷を付与することができる電子線照射を選定した。用いた加速器は、原子燃料工業(株)所有のRhodotron電子加速器で、照射電子線エネルギーは5 MeVである。照射温度は< 353K(80 )で、3.5mdpaまで照射した。

### 2.3 電磁気特性、硬さおよびマイクロ組織観察

電磁気特性は、導電率、直流磁化特性および交流磁化特性についてそれぞれ行った。導電率測定は、4端子法を用い、プローブ間隔Lは11mm、電流は約5 Aである。

直流磁化特性は、励磁装置として電磁石を用い、

磁束B検出コイルは試験片の中央部3mmの領域に直巻きとし、試験片の平均的な磁束密度を測定した。磁界強さHは、試験片の中の値を測定することは困難なので、励磁方向における磁界の強さの成分をホールプローブ2個を用いて測定した。測定時の励磁周波数は、20mHzである。

交流磁化特性は、測定用プローブ径が直径3mmのフェライトコア励磁・検出同軸コイルで、2組の同軸コイルの検出コイル部が差動接続されているタイプの検出器を用いた。プローブの励磁及び検出電圧は、2ch/12bit/500ks/sでA/D変換され波形収録解析装置に記録・表示される。用いた励磁周波数は6.7kHz、励磁電圧は2Vである。

一方、硬さは、マイクロピッカース硬さ計を用い、荷重0.3kgf、保持時間15sで測定した。ミクロ組織観察は、TEMにより走査透過法(STEM)による明視野観察と走査透過電子顕微鏡[HAADF]法を用いて行った。このSTEM-HAADF法では高転位密度組織や混粒組織中の気泡や析出物を明瞭かつ、確実に捉えることができるという特徴がある。観察用薄膜試料は、原厚1mmの試験片を0.1mm~0.15mmまで湿式機械研磨により減肉し、3mmのディスクに打抜いた後ツイングジェット研磨装置を用い、過塩素酸・エタノール液を用い両面電解研磨法により仕上げた。両面電解研磨により、試料表面の疵や機械加工による加工変質層も除去される。観察に用いたTEMは、加速電圧200KVのトプコンEM-002BFである。

### 3.....結果

#### 3.1 導電率および直流磁化特性

導電率は、受取材(未照射材)に比べ熱時効材および電子線照射材ともに顕著な変化は認められなかった。直流磁化特性は、受取材と熱時効材についての初磁化曲線および比透磁率は、いずれも顕著な差異は認められなかったが、ヒステリシスループ(B-Hカーブ)は、973K(700h)×6.3×10<sup>6</sup>s(1000h)熱時効材で受取材に比べ、立上がりおよび立下りが滑らかになっていた。一方、受取材と電子線照射の初磁化曲線と比透磁率は、図3-1-1に示すように明らかに異なっている。また図3-1-2には、B<1Tの磁化領域における受取材と電子線照射材のヒステリシスループの結果を示す。この磁化領域では、両材のヒス

テリシスループに明らかな違いが見られた。

#### 3.2 交流磁化特性

交流磁化特性は、リサージュ波形、高調波強度(周波数スペクトラム)の測定を行った。受取材および熱時効材のリサージュ波形を比較すると、熱時効時間の増大に比例して増加する傾向が見られる。また、0クロス近傍の特性では、熱時効時間に比例して、0クロス時の検出電圧が低下している。また周波数スペクトラムでは、検出波形に偶数次と奇数次の高調波が見られ、熱時効により奇数次の高調波が増加していることがわかった。図3-2-1に電子線照射と受取材のリサージュ波形を示す。リサージュ波形の最大振幅に注目すると、照射材のほうが受取材よりも増加している。また、0クロス近傍の特性では、照射材の方が受取材よりも0クロス時の検出電圧が低下している。

図3-2-2には、熱時効材と電子線照射材のラーソン・ミラー・パラメータで整理した第三高調波比を示す。図中、受取材と電子線照射材は、T=293K、1hとしてLMP=2500の位置にプロットした。熱時効材の受取材と電子線照射材の受取材の第三高調波比の値が大きく異なるのは、受取材試験片加工材の違いによるものと考えられる。電子線照射材とその受取材との第三高調波比の差は1dB程度であったが、熱時効材のそれとでは6dB程度の変化が見られた。一方、熱時効温度が573K(300h)および773K(500h)のデータは、ほぼ直線関係を示したが、973K(700h)の1, 10, 100h時効の3点データは、直線関係から大きくずれている。これは変態点温度近傍のためミクロ組織が大きく変化したためと考えられ、ラーソン・ミラー・パラメータ法では整理できないことを示唆している。図3-2-3には、573K(300h)での等価運転時間で整理した第三高調波比を示す。973K(700h)の1hを除くと、876,000時間(100年)までは、ほぼ直線的に増加しており、第三高調波比で整理できることを示している。

#### 3.3 硬さ

熱時効材では、時効温度が高くなるにしたがって、また保持時間が長くなるにしたがって硬さはいずれも減少している。時効時間が長くなることによる減

少は、析出物形成より転位の回復が支配的であったと考えられる。また温度が高くなることによる硬さの減少は、転位の回復は生じているが、硬さに寄与する析出物の形成、成長がなかったことを示唆していると考えられる。一方電子線照射材では、図3-3-1に示すように、照射により硬さがHv200からHv240へと約Hv40上昇している。これは主として照射により格子欠陥等の照射損傷が生じたためと考えられるが、照射によるCuリッチ析出物の形成の可能性も考えられる。またこの硬さ上昇値は、他文献データで報告<sup>2)</sup>されている値とほぼ同じであった。

### 3.4 ミクロ組織

SQV2A鋼は、基本的にはセメントタイト、添加元素の単一炭化物、およびそれら元素を含む複合炭化物とフェライトが細かく混じり合ったベイナイト組織あるいはベイナイトとフェライトとの混合組織、それに変態に伴って導入された焼き戻し後の高密度転位組織である。

図3-4-1にSQV2A鋼の受取材のTEMによるミクロ組織観察結果を示す。組織は、粒径が数10 $\mu\text{m}$ ～数100nmの複雑な混粒組織を示している。粒内や粒界には、100nm程度の粒状の炭化物や500nm程度の棒状の炭化物が縞状に並んで多数観察される領域がある。これら炭化物の密度および成分を同定するため、HAADF法による観察およびエネルギー分散型X線分析装置(TEM/EDS)により分析を行った。その結果、数密度は $\sim 10^{13}\text{cm}^{-3}$ 、成分はMo、Ni等を含む炭化物であった。

図3-4-2には、573K(300)  $\times$  3.6  $\times 10^6\text{s}$ (1000hrs.)熱時効後のミクロ組織を示す。粒内および粒界には受取材同様、多数の析出物が観察され、その分布は縞状に偏在している。また、析出物は粒界析出が多く、大きいものは数 $\mu\text{m}$ にまで成長している。

図3-4-3には、電子線照射後のミクロ組織を示す。電子線照射は室温照射であるが、受取材や熱時効材には観察されなかった20～30nm程度の微細なコントラストが粒内に多数観察された。これらのコントラストは転位近傍に多く観察され、HAADF像では白く反射して写っていることから照射によって形成された析出物と考えられる。

## 4.....まとめと結論

熱時効および電子線照射により作製したSQV2A鋼照射模擬試験片を用い、導電率、直流磁化および交流磁化特性、また硬さおよび透過型電子顕微鏡(TEM)によるミクロ組織変化を調べ、以下の結果を得た。

- 1) 電導率は、受取材と熱時効材および電子線照射材と比較し、その変化量は小さかったが、直流磁化特性は、773K(500)の熱時効材および電子線照射材に変化が見られた
- 2) 交流磁化特性は、熱時効材および電子線照射材ともに、第三高調波比に変化が見られた。また熱時効材について、ラーソン・ミラー・パラメータを用い573K(300)での等価運転時間で整理すると、100年相当(876,000h)までは第三高調波比はほぼ直線的に増加する
- 3) 硬さは電子線照射により硬くなっている。これは照射による格子欠陥集合体や析出物形成によるものと考えられる
- 4) TEMによるミクロ組織観察の結果、受取材や熱時効材には析出物が粒内、粒界に多数観察された。電子線照射材には、それ以外に転位近傍に微細な析出物が多数観察された

圧力容器鋼(SQV2A)の照射脆化度を、非破壊的手法である電磁気特性変化より評価する手法の開発において、照射脆化の基本事象であるマトリックス損傷や析出物形成を模擬した試験片によりその基本特性および変化量を検出することができた。次年度以降、さらに熱と照射の複合効果を模擬した試験片による測定、さらには中性子照射したSQV2A鋼による測定試験を行い、照射模擬試験片との事象や結果の違いを明らかにするとともに、電磁気特性変化による照射脆化度評価手法の開発の検討をさらに進めて行く予定である。

- ・本研究は独立行政法人原子力安全基盤機構「原子力安全基盤調査研究の公募研究」として実施した。

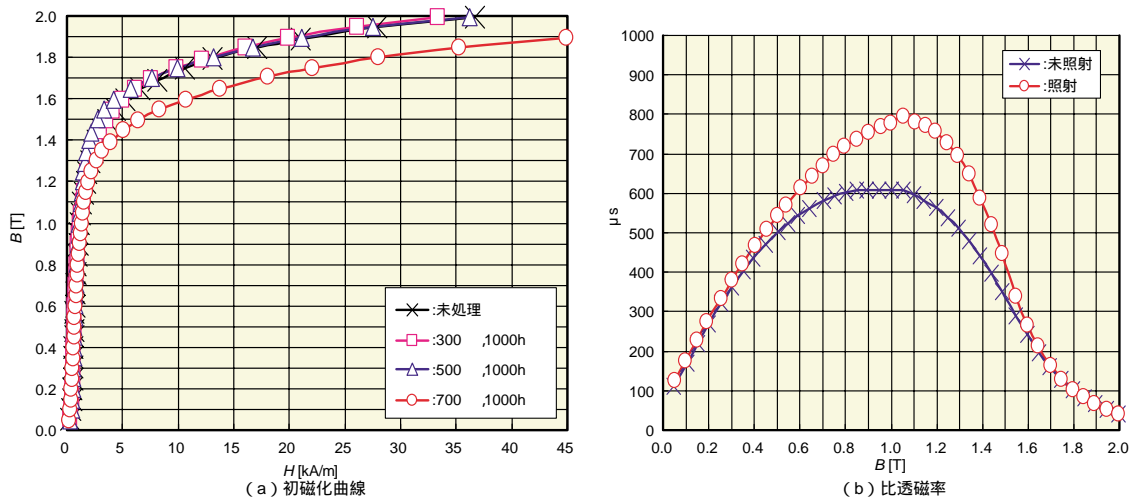


図3-1-1 未照射材と照射材の初磁化曲線(a)と比透磁率 b)

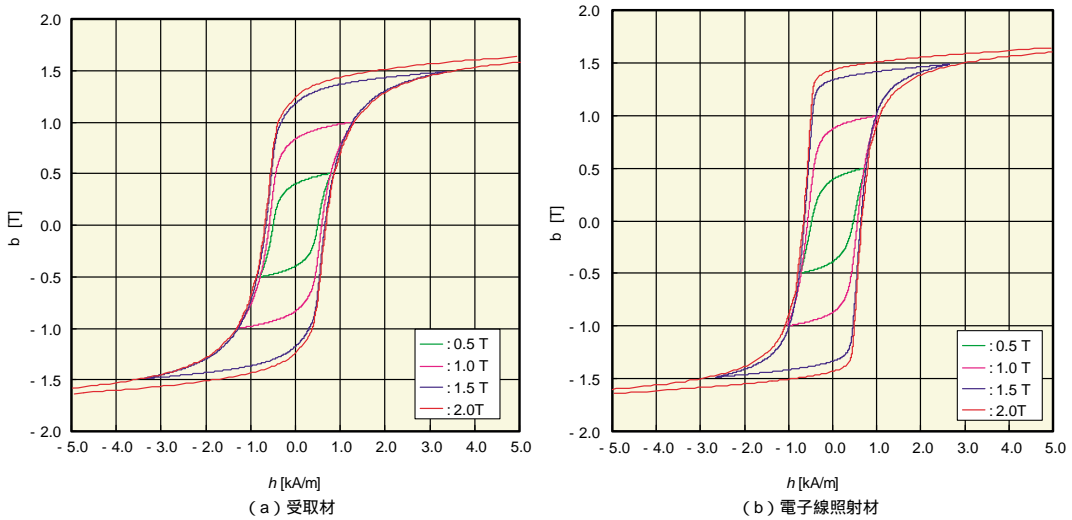


図3-1-2 受取材と電子線照射材のヒステリシスループの比較受取材と電子線照射材のヒステリシスループの比較

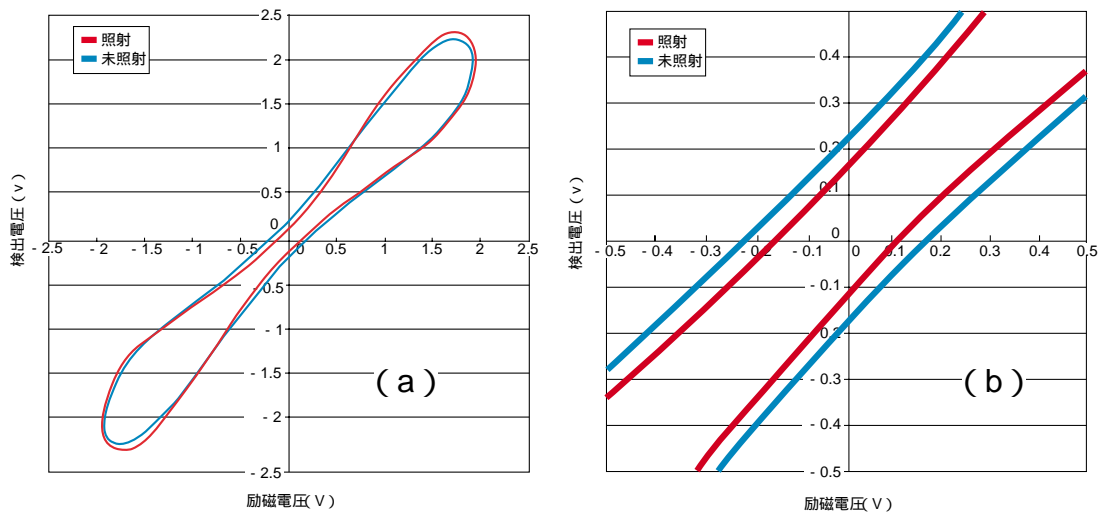


図3-2-1 照射材と未照射材のリサーチ波形

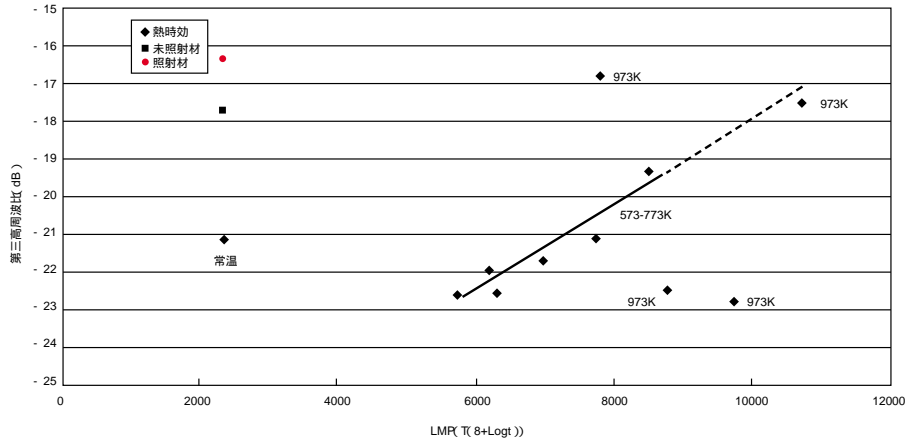


図3-2-2 熱時効材と照射材のラルソンミラーパラメータで整理した第三高調波比

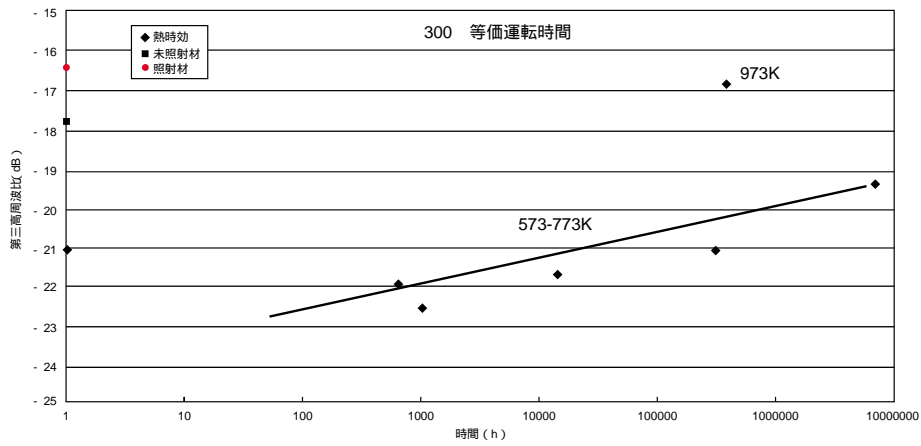


図3-2-3 573 K (300 )での等価運転時間で整理した第三高調波比

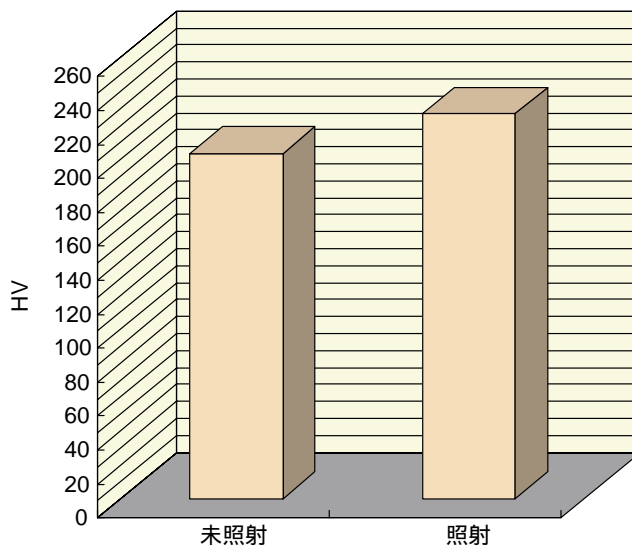


図3-3-1 照射材と未照射材の硬さの比較



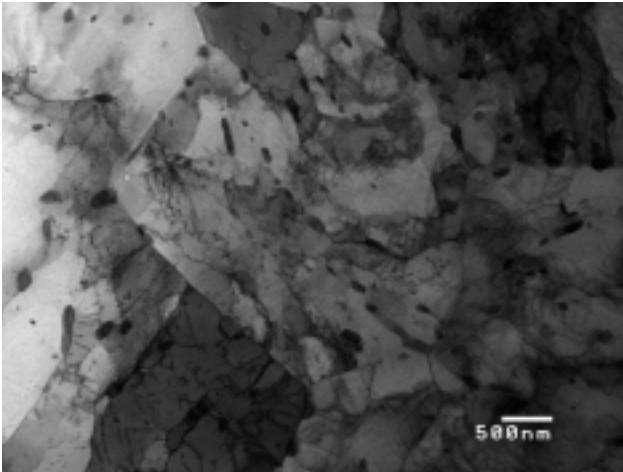


図3-4-1 受取材 (STEM 像)

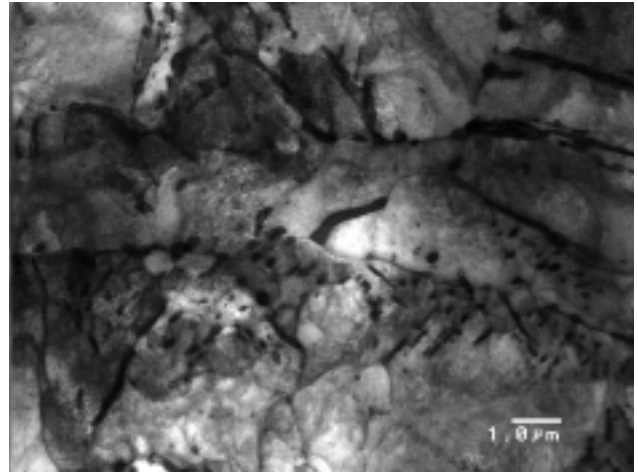


図3-4-2 573K x 1,000Hrs. (STEM 像)

### 参考文献

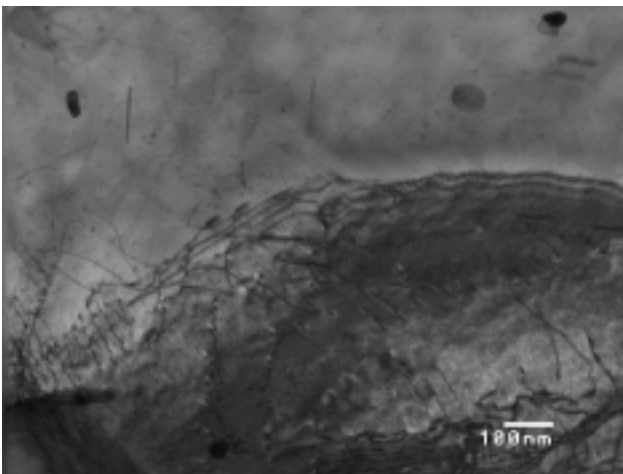


図3-4-3 電子線照射材 (STEM 像)

- 1) 福谷耕司 他, 原子炉容器鋼照射組織変化, INSS MONOGRAPHS No. 1 2001
- 2) 福谷耕司 他, 東北大学金属材料研究所研究会資料, 平成13年11月, p. 108



中東 重雄



程 衛英



志波 光晴



古村 一郎

# ASME Sec.VIII Div.1 Appendix 32に規定された局所的な薄肉域の許容の規定について

溶接・非破壊検査技術センター 吉田 和夫  
大石 勇一

Appendix 32, local thin areas in Cylindrical shells and in spherical segments of shells, was issued on ASME, American Society of Mechanical Engineers, boiler and pressure vessels code section VIII division 1 in 2003 addenda. The rule permitted acceptable local thin areas in cylindrical shells and so on under internal pressure be less than required thickness required by UG-16, UG-27 or UG-32 as applicable. The local thin areas on inside or outside of cylindrical shells or spherical segments of shells designed for internal pressure are acceptable. This note summaries the strength of the local thin area in accordance with the background papers which reported in order to evaluate the strength of pressure vessels, pipes or tanks that contain a local cylindrical section of reduced thickness and so on.

## 1.....背景

ASME B & PV Code Sec.VIII Div.1の2003年 Addendaで Appendix 32 (Mandatory Appeidix) が追加規定され、内圧を受ける円筒殻又は殻の球形部に局所的な薄肉(計算上必要な厚さより薄い肉厚)が許容された(図1.1参照)。円筒殻又は殻の球形部の厚さは、製造時に何らかの理由で、計算上必要な厚さを下回る可能性がある。従来であれば、当該箇所を溶接で補修し、殻の厚さが計算上必要な厚さを満足するような手段を講じる必要があったが、この Appendix 規定によって強度上許される場合にあつては、局所的な薄肉域の存在が認められ、圧力容器等の製造に対する選択肢が広がった。本小文では、局所的な薄肉域の強度について調査し、Appendix 32の規定の意味について明らかにした。

## 2.....Appendix 32の規定化

Appendix 32に規定の内容は、従来Code Case 2243(円筒殻に適用) [1]及びCode Case 2310(球殻に適用) [2]に規定されていた局所的な薄肉域(Local Thin Area)を許容する規定を本文に取込んだもの

である。そして、これらのCode Caseは、ASME Sec. VIII Div. 2 AD-200に規定の局所的な減肉(Reduced Thickness)の許容に基づいて作成されたものであった。Code Caseの提案は、製造中に円筒殻又は殻の球形部に何らかの損傷が生じた場合に、その損傷域を溶接で補修することが考えられるが、その後に溶接後熱処理が要求される場合には、寸法精度の確保の面での難点が生じることもあり、局所的薄肉域

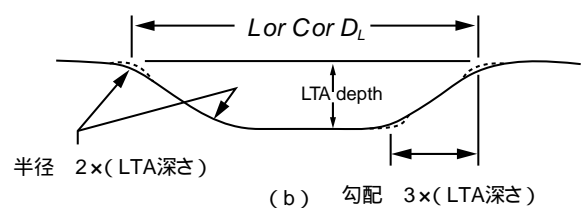
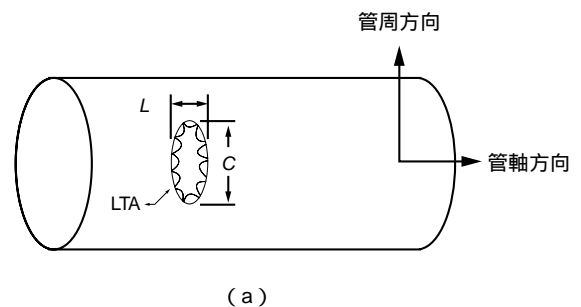


図1.1 局所的な薄肉域 (Appendix32)

の許容が製造上大きなメリットがあるからであった。

数年の議論の結果，Code Caseは各々1997年及び1999年に承認され，その後の規格取入れ要望を考慮して，2004Editionより本文に取入れられた。これらCode Caseの規定化に数年を経た理由は，Sec.VIII Div. 1の内圧設計(公式による設計)では局所的薄肉域の力学的な安全性を説明できず，局部応力に基づく設計の支援なくしては，薄肉域の安全性を説明できなかったためである。すなわち，解析による設計で強度確認した計算方法を，如何に単純に公式による設計に持ち込むかについて議論がされたためである。

### 3.....局所的な薄肉域の強度

米国で局所的な薄肉域の強度の検討が行われるようになったのは，現地での溶接で溶接部の厚さを公称厚さより減じるケースがあり，この時に，溶接部の厚さが計算上必要な厚さを下回ってしまう場合(図3.1参照)があるためであった。円筒殻に図3.1の様な薄肉部がある場合に，当該部の強度は，特に薄肉部の長さが短い場合には，断面減少ほどの低下を示さないことが一般的である。

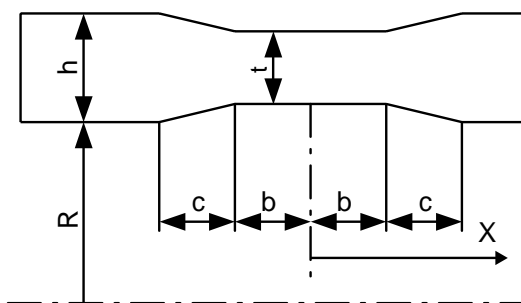


図3.1 局所的薄肉域のある円筒殻の断面

図3.1は，薄肉域(厚さt及び長さ2b)が主要な(薄肉域のない)円筒殻とは長さ $c=3(h-t)$ の遷移域で隔てられているとしたモデルである。R/h=100の円筒殻に対して弾塑性解析した結果を図3.2[3]に示すが，崩壊圧力(Pc)及び設計圧力(Pd)共に薄肉域の長さが短い場合には，長い場合の圧力よりも大きな安全性を示す。例えば，t/h=0.6の場合に薄肉域の長さがある時の崩壊圧力は薄肉域がない場合の約91%であり，単純な薄肉域の崩壊圧力より十分に安全側である。

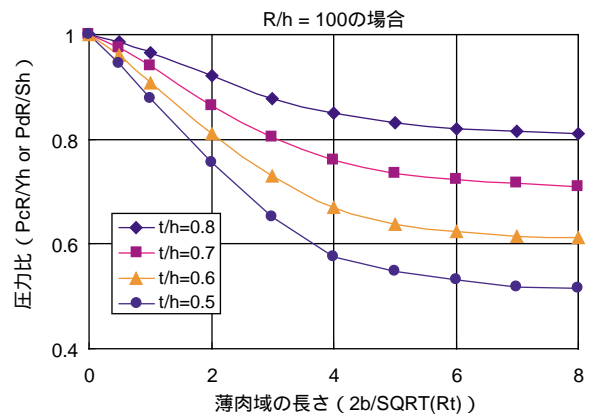


図3.2 薄肉域を含む円筒殻の崩壊圧力 [3]

図3.3 [3]に円筒殻外面側のX=0位置に生成する周方向応力の応力割増し係数(弾性解析結果)を示すが，t/h=0.6の場合に薄肉域の長さがRtである時の薄肉部の最大応力は主要な円筒殻に生じる周方向応力の約1.4倍でしかない。

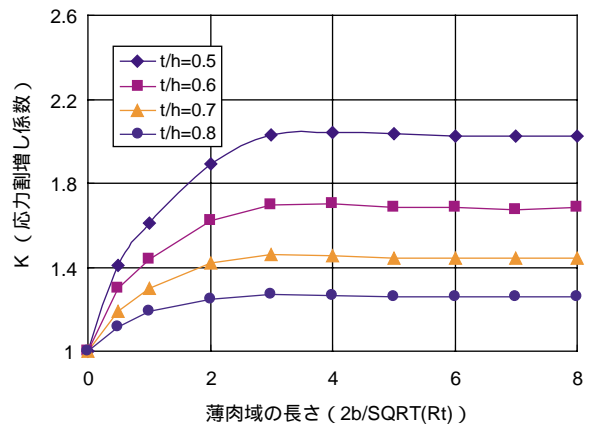


図3.3 薄肉域に生成する応力割増し係数 [3]

図3.4 [3]及び図3.5[3]に薄肉域の厚さの条件t/h=0.6，長さの条件が2b=0.5 Rtである時，周方向及び軸方向に沿った弾性応力分布(共に外面側)を各々示す。例えば図3.4の場合，周方向曲げ応力成分(Bending)は膜応力成分の約6%となる。これらの図から局所的薄肉域については，次のとおり考えることが原則とされた。

- 膜応力成分 (Ave) 1.1S
- 膜 + 曲げ応力 (Ave + Bending) 1.5S
- 薄肉域の軸方向長さ Rt

なお，この局所的薄肉域の近接に関しては，応力の重畳の防止の観点で，局所的薄肉域の開始位置

(テーパ-端)が $2.5\sqrt{R_m h}$ 以上離れることが条件となっている(AD-200参照)。ただし、 $R_m$ は円筒殻の平均半径である。

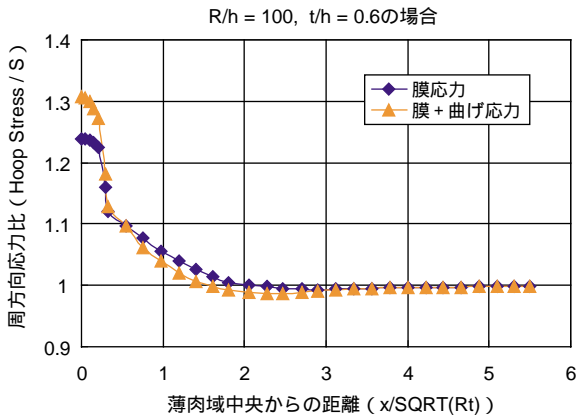


図3.4 周方向弾性応力分布 [3]

#### 4.....局所的な薄肉域の強度論の拡張

図3.1の局所的な薄肉部は円筒殻の全周に亘る薄肉域の存在を前提にしたものであった。ここでは、压力容器等に発生した局部腐食他を機械的に除去した結果生じる局所的な薄肉域の議論の拡張について示す。ここで考慮する局所的薄肉域は図3.6に示すものとする。すなわち、局所的薄肉域(厚さ =  $t_{min}$ )の長径を直径( $d$ )とした薄肉域を考える。

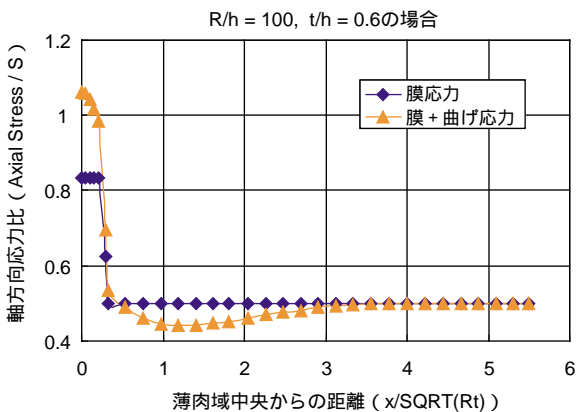


図3.5 軸方向弾性応力分布 [3]

この局所的薄肉域について、次の条件範囲で3次元弾塑性解析を行い、局所的薄肉域中心での塑性ひずみが2%となる内圧を崩壊圧力として求めた。

薄肉域の厚さ比 ( $t_{min}/t$ )

球殻 = 0.25 ~ 0.875

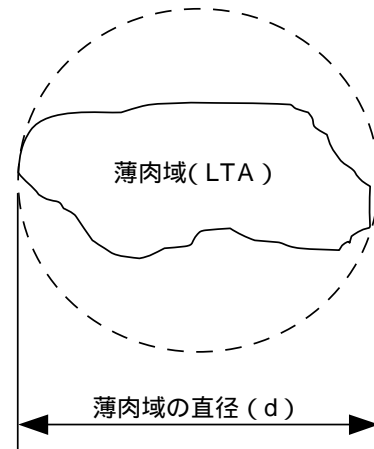


図3.6 円筒殻又は球殻の薄肉域の形状(定義)

円筒殻 = 0.25 ~ 0.75

薄肉域の直径比 ( $d/D$ ):

球殻 = 0 ~ 0.6, 円筒殻 = 0 ~ 0.95

殻の厚さ比 ( $D/t$ ): 30 ~ 150

ただし、 $D$ は殻の直径で、 $t$ は殻の厚さである。

解析された崩壊圧力を解析対象の殻の崩壊圧力で除した値をRSF (Remaining Strength Factor)として図3.7(球殻の結果 [4])及び図3.8(円筒殻の結果) [4]に示した。両者の比較から、円筒殻の薄肉域の方が、球殻の薄肉域に比して若干高い崩壊強度を有することが分かる。局所的薄肉域の崩壊強度をどの程度に設定するかは重要な事項であるが、材質の影響を無視するとすれば、殻の崩壊強度の90%とすべきとされた。薄肉域の厚さが殻の0.9倍であるとする、この解析結果では、直径が約0.6Dの局所的薄肉域が許容されることになる。

球殻の内面側に局所的薄肉域 ( $t_{min}/t = 0.5$ ,  $d/D = 0.133$ )があつて、球殻の厚さ比 ( $D/t$ ) が90の場合に、次を満足する条件で弾性解析した結果を図3.9 [4]に示す。

一次局部膜応力 1.1Sm ( $R_t$ の範囲)

一次局部膜応力 1.5Sm

一次局部膜 + 一次曲げ応力 1.5Sm

局所的薄肉域と球殻の接合部に生成する応力  
3Sm

この解析結果によれば、RSFは0.61となり、図3.7の弾塑性解析のRSF=0.79より23%小さな値となった。クリープ温度域未満の温度における実際の容器の崩壊圧力は、ステンレス鋼で材料の降伏強さか得

られる崩壊圧力の約0.67倍で、炭素鋼で約0.4倍程度となる。したがって、許容可能な局所的薄肉域は上述の直径0.6Dより大きいものになる。AD-200(a)では弾性解析で局所的薄肉域の大きさを決定する方法も記されている。

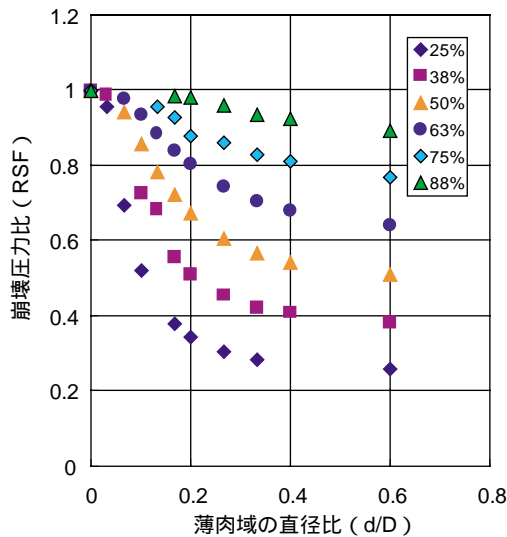


図3.7 崩壊圧力比RSF (球殻の場合) [4]

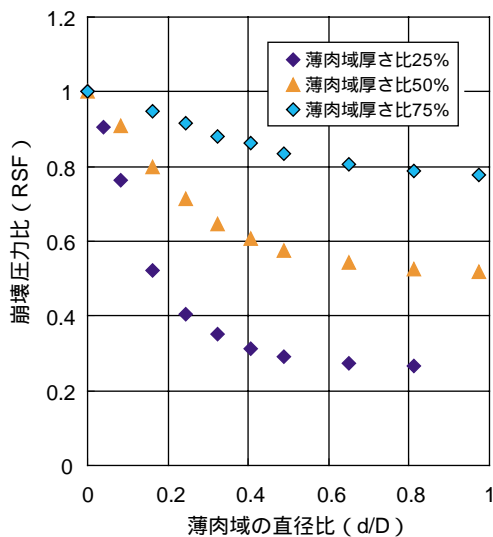


図3.8 崩壊圧力比RSF (円筒殻の場合) [4]

## 5.....Appendix 32の規定

Appendix 32では内圧を受ける円筒殻及び殻の球形部(球殻, 半球鏡板, 皿型鏡板及び半楕円形鏡板の球形部)にある局所的薄肉域の寸法を規定するものである。Appendix 32には単一及び複数の局所的薄肉域の規定があるが、ここでは単一の局所的薄肉

域の規定のみを示す。円筒殻に対しては次が規定されている。

$$t_L/t \quad 0.9$$

$$L \quad R_t$$

$$C \quad 2L$$

$$t-t_L \quad 3/16 \text{ in. (4.8mm)}$$

ただし、 $t_L$  : 局所的薄肉域の厚さ

$t$  : 計算上必要な厚さ

$L$  : 局所的薄肉域の軸方向長さ

$C$  : 局所的薄肉域の周方向長さ

また、殻の球形部に対しては次が規定されている。

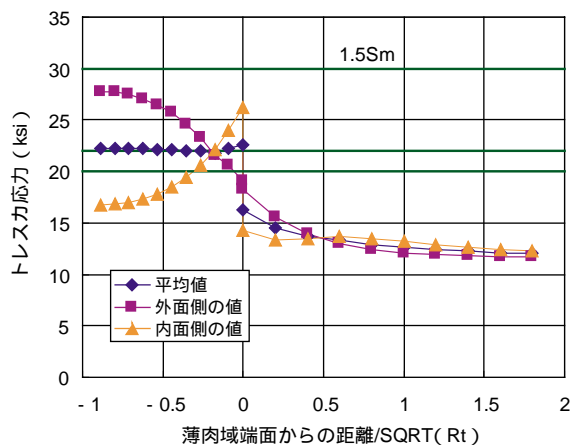


図3.9 弾性解析によるトレスカ応力 [4]

$$t_L/t \quad 0.9$$

$$D_L \quad R_t$$

$$t-t_L \quad 3/16 \text{ in. (4.8mm)}$$

ただし、 $D_L$  : 局所的薄肉部の最大長さ

円筒殻の $L$ 及び殻の球形部の $D_L$ を  $R_t$ 以下に制限するのは、軸方向に局所的薄肉域がある場合の制限による。局所的薄肉域の厚さを計算上必要な厚さの0.9倍とする理由は、球殻の3次元弾塑性解析の結果、殻の崩壊強度を90%以上として広い範囲の局所的薄肉域を得る条件を工学的に判断したものである。周方向長さの制限はAD-200の規定によれば規定の必要はないものであるが、Div.1では曲げ応力評価を行わないことから制限をおくこととした。ここで、円筒殻として $D/t = 10$ を仮定すれば、円筒殻の  $R_t$  は0.3Dを超えることはなく、局所的薄肉域の厚さを計算上必要な厚さの0.9倍としているため、殻の崩壊強度を90%以上とすることが可能なためである。

## 6.....まとめ

Appendix 32に規定された局所的薄肉域の規定をASME Sec.VIII Div.2の局所的薄肉域の許容規定の根拠文献に基づいて検討した。その結果, Appendix 32の規定は十分に安全側の推定を与えることが分かった。ところで, この規定を実際に適用する場合の制約事項としては次が挙げられる。

疲労が問題となる箇所には適用しない。

クリープ領域で使用する機器には適用しない。

## 参考文献

- [1] Case 2243, Local Thin Area in Cylindrical Shell, Section VIII, Division 1, Aug. 11, 1997.
- [2] Case 2310, Local Thin Areas in Spherical Segments of Shells, Section VIII, Division 1, May 4, 1999.
- [3] A. Kalnins and D.P. Updike, Strength of Pressure Vessels and Piping with Sections of Reduced Thickness, pp. 33-40, PVP-Vol.194, 1990.
- [4] J. R. Sims, B. F. Hantz and K. E. Kuehn, A Basis for the Fitness for Service Evaluation on the Thin Areas in Pressure Vessels and Storage Tanks, pp. 51-58, PVP-Vol. 323, 1992.



吉田 和夫



大石 勇一

# 出願特許一覧

<b>1</b>	<b>特許件名</b> 皮膚切断法による微粉末積層皮膜厚測定法	<b>発明者</b> 三好 滋
	出願番号・出願日 特願平5-271499 H5.10.29	登録番号・登録日 特許第2522635号 H8.5.31
	概要 浸透探傷試験用現像剤を塗布したときの積層皮膜の厚さを 切断法により測定する方法	
<b>2</b>	<b>特許件名</b> 膜厚指示計を用いた微粉末積層皮膜厚測定法	<b>発明者</b> 三好 滋
	出願番号・出願日 特願平5-271500 H5.10.29	登録番号・登録日 特許第2506557号 H8.5.31
	概要 浸透探傷試験用現像剤を塗布したときの積層皮膜の厚さを 膜厚指示計を用いて測定する方法	
<b>3</b>	<b>特許件名</b> 非破壊検査用標準試験体及び製造方法	<b>発明者</b> 岸上守孝 他( IHI 殿と共同出願 )
	出願番号・出願日 特願平7-217539 H7.8.25	登録番号・登録日 特許第3314849号 H14.6.7
	概要 熱間静水圧プレス又はホットプレスによる拡散接合を用いて製作した 標準欠陥を内在する非破壊検査用標準試験体及びその製造方法	
<b>4</b>	<b>特許件名</b> 交流磁化を用いた強磁性体の溶接物の溶接後熱処理評価装置	<b>発明者</b> 志波光晴 他
	出願番号・出願日 特願2000-62964号 H12.3.4	登録番号・登録日 特許第3355322号 H14.9.27
	概要 強磁性体の溶接構造物が熱処理されたかどうか及び熱処理した時の温度を 非破壊的で簡単に評価できる装置	
<b>5</b>	<b>特許件名</b> 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	<b>発明者</b> 志波光晴 他
	出願番号・出願日 特願2000-62965号 H12.3.4	登録番号・登録日 特許第3461781号 H15.8.15
	概要 特許第3355322号の装置を 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	
<b>6</b>	<b>特許件名</b> 固体内弾性波伝搬の可視化方法及び装置	<b>発明者</b> 古川 敬 他
	出願番号・出願日 特願2000-111003号 H12.4.12( 出願 ) H13.12.14( 審査請求 )	登録番号・登録日 -
	概要 超音波が固体内を伝わる様子を 目に見えるようにした( 可視化 )手法及び装置	
<b>7</b>	<b>特許件名</b> Method and Apparatus for Visualizing Elastic Wave Propagation in a Solid Substance( 米国特許出願 )	<b>発明者</b> 古川 敬 他
	出願番号・出願日 09/695,911 2000.10.26	登録番号・登録日 US6,535,828 B1 2003.3.18
	概要 超音波が固体内を伝わる様子を 目に見えるようにした( 可視化 )手法及び装置	
<b>8</b>	<b>特許件名</b> 超音波探触子の位置・首振り量の測定方法及び装置	<b>発明者</b> 古川 敬 他
	出願番号・出願日 特願2002-29015号 H14.3.1	登録番号・登録日 特許第3585467号 H16.8.13
	概要 超音波探触子の相対的な位置( または移動量 )及び探触子の首振り量を自動的に測定する方法及び装置	
<b>9</b>	<b>特許件名</b> 超音波探傷方法および超音波探傷装置	<b>発明者</b> 古川 敬 他
	出願番号・出願日 特願2002-30618号 H14.3.1	登録番号・登録日 -
	概要 超音波探傷試験で測定した波形と解析により予測した波形を比較し 欠陥からの信号のみを検出可能にした方法及び装置	
<b>10</b>	<b>特許件名</b> 非破壊高温クリープ損傷評価方法	<b>発明者</b> 志波光晴 他
	出願番号・出願日 特願2002-308126号 H14.11.14	登録番号・登録日 特許第3728286号 H17.10.7
	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クリープ損傷率を評価し 寿命時間を求める方法	
<b>11</b>	<b>特許件名</b> クリープボイドの非破壊検出方法	<b>発明者</b> 志波光晴 他
	出願番号・出願日 特願2002-308129号 H14.11.14	登録番号・登録日 特許第3803314号 H18.5.12
	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	
<b>12</b>	<b>特許件名</b> 渦電流探傷信号処理方法	<b>発明者</b> 兼本 茂 他
	出願番号・出願日 特願平18.1.6( 052059 ) H18.1.16	登録番号・登録日 ( 出願中 )
	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	

## 学協会誌等への論文発表

学協会誌名	著者	論文名称	掲載誌発行年月
INSIGHT	陳 鋼朱 山口篤憲 他	Signal processing for detection and characterization of defects from composite eddy current signals	Vol.39, No.11, p.785-789, 1997
IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS	陳 鋼朱 山口篤憲 他	A Novel Signal Processing Technique for Eddy-Current Testing of Steam Generator Tubes	Vol.34, No.3, p.642-647, May, 1998
WELDING journal	堀井行彦 桑 亮一 上杉信夫 他	Thermal Embrittlement of Simulated Heat-Affected Zone in Cast Austenitic Stainless Steels	Vol.77, No.8, p.350-360, August, 1998
Journal of Nuclear Materials	中東重雄 中村治方 上杉信夫 他	Effect of weld thermal cycle on helium bubble formation in stainless steel	Vol.258-263, p.2013-2017, 1998
	中東重雄 上杉信夫 中村治方 他	Weldability of helium-containing stainless steels using a YAG laser	Vol.258-263, p.2018-2022, 1998
火力原子力発電	陳 鋼朱 米山弘志 山口篤憲 上杉信夫	ウエーブレット解析の渦電流探傷法への適応	Vol.49, No.507, p.70-78, 1998
Journal of Pressure Vessel Technology	志波光晴 山口篤憲 佐藤正信 村尾周仁 永井正雄	Acoustic Emission Waveform Analysis From Weld Defects in Steel Ring Samples	Vol.121, p.77-83, February, 1999
圧力技術	堀井行彦 西川 聡 桑 亮一 他	鑄造2相ステンレス鋼の溶接熱影響部の熱時効脆化 第1報 溶接熱影響部の熱時効脆化挙動	Vol.39, No.3 第1報 p.2-8 第2報 p.9-15 2001
	堀井行彦 西川 聡 上杉信夫 他	鑄造2相ステンレス鋼の溶接熱影響部の熱時効脆化 第2報 溶接熱影響部の熱時効脆化の機構	
International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	陳 鋼朱	Theoretical Investigation of Change of Magnetic Property due to Creep Damage using Jiles-Atherton Magnetization Model	Vol.16, p.189-196, 2002
	程 衛英	“Finite Element Simulation of Magnetoinductive Evaluation of PWHT Temperature of Cr-Mo Steel Welded Joints”	Vol.19, p.125-130, 2004
Recent Advances in Nondestructive Evaluation Techniques for Material Science and Industries PVP2004-2836	程 衛英 古村一朗 志波光晴	Analytical and Experimental Approaches for the Sizing of Fatigue Cracks in Inconel Welds by Eddy Current Examination	PVP-Vol.484, p.191-197 2004
火力原子力発電	志波光晴 桑 亮一 他	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	Vol.55 No.8 No.830-836
保全学	古川 敬 古村一朗 他	原子炉再循環系配管のSCC深さサイジング技術	Vol.3, No.3 p.51-55 2004
平成16年度火力原子力発電大会論文集	程 衛英 古村一朗 志波光晴 他	炉内構造物検査への渦流探傷技術の摘要評価	広島大会1-2-6 (2004年10月)



学協会誌名	著者	論文名称	掲載誌発行年月
日本鉄鋼協会「鉄と鋼」 欧文誌	中東重雄 他	Effects of surface grinding hardness distribution and residual stress in low carbon Austenitic stainless steel SUS316L	Vol.44, No.10, ( 2004 )
火力原子力発電	西川 聡 堀井行彦 佐藤正信 他	配管周継手の局部後熱処理の適正施工条件について	Vol.56, No.585, p.43-52, 2005
ASME/Pressure Vessel Technology	程 衛英 古村一朗 志波光晴 兼本 茂	Eddy Current Examination of Fatigue Cracks in Inconel Welds	2006年7月受理
PROGRESS REPORT ON NEUTRON SCIENCE	水野亮二 他	中性子回折によるNCF600-SQV2Aの異材溶接継手部の 残留応力評価	JAERI-Review 2005-045, p.136, September, 2005
保全学	古川 敬 古村一朗 米山弘志 山口篤憲	超音波探傷試験による応力腐食割れ深さサイジングにおける 教育訓練目標の指標について	Vol.4 ,No.3 ,p.50-55, 2005
Review of Quantitative Nondestructive Evaluation	程 衛英 志波光晴 古村一朗 他	FINITE ELEMENT ANALYSIS FOR THE VERIFICATION OF POSTWELD HEAT TREATMENT OF 9Cr-1Mo WELDS	Vol.24, 1204-1211, 2005
保全学	兼本 茂 程 衛英 志波光晴 古村一朗	渦電流探傷における欠陥形状復元のための新しい信号 処理法の提案	Vol.5 ,No.1 , 2006年4月号
NDT&E International	程 衛英 兼本 茂 古村一朗 志波光晴	Depth sizing of partial-contact stress corrosion cracks from ECT signals	Vol.39, p.374-383, 2006
Review of Quantitative Nondestructive Evaluation	志波光晴 程 衛英 中東重雄 古村一朗 他	Nondestructive Evaluation of irradiation embrittlement of SQV2A Steel by using Magnetic Method	Vol.25, p.1163-1170, 2006
平成17年度火力原子力 発電大会論文集	水野亮二 松田福久 他	原子炉圧力容器鋼(SQV2A)のテンパーヒード溶接法に 関する研究	2005年10月 東京大会CD-ROM
Science & Technology of Welding and Joining	堀井行彦 他	Recent Development of Repair Welding Technologies in Japan	Vol.11, No.3, p.255-264 May 2006
保全学	兼本 茂 程 衛英 志波光晴 古村一朗	部分接触SCCの渦電流探傷による新しいサイジング法	Vol.5, 4, 2007年 1月号 予定
International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	程 衛英 中東重雄 志波光晴 古村一朗 他	Investigation of the Micro-structural Dependence of the Magnetic Properties of SQV2A Steel for NDE	2006年10月受理

## 学協会等への口頭発表

平成17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】	保全学会 第4回「非破壊検査技術研究調査」分科会	2005/5/26 東京(保全学会)	山口篤憲	PD認証制度の動向について
	QNDE 2005	2005/7/31 米国( Bowdoin College, Brunswick )	志波光晴 程 衛英 中東重雄 古村一朗 他	Nondestructive Evaluation of irradiation brittleness of SQV2A Steel by using Magnetic Method
	平成17年度 東北大学原子力安全セミナー	2005/8/5 仙台(東北大学)	古村一朗	高経年化対策技術 V 非破壊検査技術
	日本原子力学会2005 秋の大会	2005/9/13 八戸(八戸工業大学)	中東重雄 程 衛英 志波光晴 古村一朗 他	照射によるSQV2A鋼の組織と磁気特性変化
	電力中央研究所 PDワークショップ	2005/10/20 東京 (電力中央研究所)	米山弘志	欠陥サイジングにおける訓練の必要性
	溶接非破壊検査協会 超音波分科会 第13回 超音波による 非破壊評価シンポジウム	2006/1/24 東京 (きゅうりあんホール)	米山弘志  古川 敬 古村一朗 米山弘志 山口篤憲  古川 敬 古村一朗 他	原子力発電プラントのSUS配管溶接継手に対するUTシステムのPD認証  NDIS0603付属書の判定基準の評価  原子炉再循環系配管のSCC深さサイジング技術
【材料】	腐食防食協会 2005年度春期講演大会 材料と環境2005	2005/5/28 東京(慶應義塾大学)	中東重雄 他	放射光で求めた原子炉用SUS316L鋼の局部応力分布
	日本保全学会 第2回学術講演会	2005/7/8 京都(京都大学 百周年時計台記念館)	中東重雄 他	SUS316鋼の表面残留応力に及ぼす機械加工の影響
	腐食防食協会 第52回 材料と環境討論会および 岡本剛先生生誕100年記念 国際シンポジウム(秋季大会)	2005/9/14 札幌(北海道大学)	中東重雄 他	SUS316L鋼の高温高圧水中応力腐食割れに及ぼす冷間加工と溶存酸素の効果のSSRTによる検討
【溶接】	第180回溶接冶金研究委員会	2005/5/10 東京(溶接学会)	水野亮二 松田福久 他	原子力压力容器鋼(SQV2A)のテンパーヒード溶接法に関する研究
	日本保全学会 第2回学術講演会	2005/7/8 京都(京都大学 百周年時計台記念館)	西川 聡 古川 敬 堀井行彦 古村一朗	Ni基合金溶接部の溶接条件が超音波探傷の欠陥検出に与える影響
	第181回溶接冶金研究委員会	2005/9/5 大阪(大阪大学)	西川 聡 古川 敬 堀井行彦 古村一朗	Ni基合金の溶接金属組織と超音波探傷による欠陥検出性の関係
	溶接学会 平成17年度秋季全国大会	2005/9/20 福井(福井大学)	長谷川忠行 西川 聡 中田志津雄 堀井行彦 他	FEM解析における入熱モデル形状の検討

学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名	
【溶接】	平成17年度 火力原子力発電大会	2005/10/13 東京(東京フォーラム)	水野亮二 松田福久 他	原子炉圧力容器鋼(SQV2A)のテンパーヒード溶接法に関する研究
	ボイラー・タービン主任技術者会 (関東・東北産業保安監督部管内)	2005/10/21 東京(椿山荘)	堀井行彦 他	ごみ焼却炉ボイラー伝熱管の溶射による 防食試験結果
	日本機械学会M&M2005 材料力学カンファランス	2005/11/4 福岡(九州大学)	中田志津雄 西川 聡 長谷川忠行 他	入熱モデル形状、物性値が残留応力解析結果へ 与える影響

平成16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】	5th International Workshop on Integrity of Nuclear Components	2004/4/21 京都	古川 敬 他	SCC Experience and NDE Technologies on Recirculation Piping in BWRs
	非破壊検査協会 超音波分科会	2004/6/24 仙台	古川 敬 古村一朗	欠陥深さ予備測定に関するシミュレーション解析
	日本保全学会 第1回学術講演会	2004/7/9 東京(東京大学)	志波光晴 他	交流磁化プローブを用いた鋳鉄構造物の材料評価
	ASME PVP Conference	2004/7/25-29 米国( San Diego )	程 衛英 古村一朗 志波光晴	Analytical and Experimental Approaches for the Sizing of Fatigue Cracks in Inconel Welds by Eddy Current Examination
	QNDE 2004	2004/7/25-30 米国( Colorado )	程 衛英 志波光晴 古村一朗 他	FINITE ELEMENT ANALYSIS FOR THE VERIFICATION OF POSTWELD HEAT TREATMENT OF 9Cr-1Mo WELDS
	日本機械学会 2004年次大会	2004/9/6 札幌(北海道大学)	志波光晴 程 衛英 桑 亮一 堀井行彦	交流磁化を用いた溶接構造物の非破壊による 健全性評価方法の開発
	平成16年度 火力原子力発電大会	2004/10/27 広島(厚生年金会館)	米山弘志	超音波探傷試験による疲労き裂とIGSCCの検出 及び深さ測定に関する教育訓練の効果について
			程 衛英 古村一朗 志波光晴	炉内構造物検査への渦流探傷技術の適用性評価
	第4回NDE国際会議	2004/12/6 イギリス	志波光晴 程 衛英 桑 亮一 堀井行彦	Development of Structural Integrity Evaluation Technique for Weldments by AC Magnetic Method
	非破壊検査協会 超音波シンポジウム	2005/1/27 東京 (アルカディア市ヶ谷)	古川 敬 山田晶宏 古村一朗	Phased array 超音波探触子音場の 数値シミュレーション
JNES規格基準部セミナー 「応力腐食割れき裂進展評価と 検出技術」	2005/1/31 東京(自転車会館)	古川 敬	Ni基合金溶接金属における欠陥検出及び サイジング特性	
【材料】	腐食防食協会 第51回材料と環境討論会	2004/9/8 名古屋 (大同工業大学)	中東重雄 他	高温高圧水中における強加工316Lステンレス鋼 応力腐食割れのSSRTによる評価
	熱処理学会平成16年秋季 (第59回)講演大会	2004/12/7 大阪(関西大学)	中東重雄 他	加工熱処理した極低炭素ステンレス鋼の 残留応力評価と析出物
	日本鉄鋼協会「中性子および 放射光散乱を用いる鉄鋼材料の 研究フォーラム」	2004/7/20 兵庫(先端科学技術 センター)	中東重雄 他	冷間加工を施したオーステナイト系ステンレス鋼の 組織および残留応力

学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名
【材料】	第18回日本放射光学会年会・放射光化学合同シンポジウム	2005/1/7 佐賀(サンメッセ鳥栖)	中東重雄 他 放射光を利用したステンレス鋼SUS316Lの高温高圧水中その場応力測定
	日本原子力学会2005年春の年会	2005/3/29 横浜(横浜国大)	中東重雄 他 放射光を用いたステンレス鋼の高温高圧水中その場観察
	平成16年度火力原子力発電大会	2004/10/28 広島(厚生年金会館)	西川 聡 堀井行彦 他 Cr-Mo系耐熱鋼管の局部溶接後熱処理施工条件の適正化について
【溶接】	第30回MPAセミナー	2004/10/6 ドイツ・シュツットガルト	松田福久 水野亮二 他 Appropriate Welding Conditions of Temper Bead Weld Repair for SQV2A Pressure Vessel Steel

## 平成15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】	ISEM2003, Paris	2003/5/12-14 Paris, France	程 衛英 志波光晴 陳 鋼珠 米山弘志 他 Finite Element Simulation of Magneto inductive Evaluation of PWHT Temperature of Cr-Mo Steel Welded Joints
	eNDE2003, Paris	2003/5/15-16 Paris, France	志波光晴 程 衛英 桑 亮一 米山弘志 Non-destructive Detection of Creep Void Using AC Magnetic Method
	平成15年度非破壊検査協会春季大会	2003/5/27-28 東京 (アルカディア市谷)	志波光晴 程 衛英 桑 亮一 米山弘志 交流磁化時の波形解析による低合金鋼のクリープ損傷の非破壊評価
			志波光晴 程 衛英 米山弘志 他 インコネル溶接金属の渦電流と超音波探傷による欠陥検出・評価
	(社)日本非破壊検査協会超音波分科会	2003/7/16 北海道	古川 敬 改良UT手法による欠陥高さサイジング試験の紹介(超音波探傷試験による再循環系配管サイジング(寸法測定)精度向上に関する確認試験について)
	QNDE2003,	2003/7/27-8/1 Green Bay	志波光晴 程 衛英 桑 亮一 Creep Void Detection for Low Alloy Steel Using AC Magnetic Method
	平成15年度火力原子力発電秋季大会	2003/10/15-17 福岡	古川 敬 西川 聡 堀井行彦 オーステナイト系鋼溶接部の超音波探傷結果の評価手法
			石上秀之、 小池高雄 (中部電力) 志波 光晴 桑 亮一 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
	平成15年度NDI秋季大会	2003/11/8 東京	志波光晴 他 「円柱グラファイトノズルスロット素材の全没水浸型超音波自動探傷法による全方位欠陥の体積検査方法」規格について
	第5回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム(日本学術会議)	2003/11/26-28 東京(六本木)	古川 敬 志波光晴 他 等方性グラファイトの超音波可視化法による伝搬特性評価
第14回AEコンファランス	2003/11/18-19 熊本(熊本大学)	志波光晴 他 「JIS Z 2342-2002圧力容器の耐圧試験等におけるAE試験方法及び試験結果の等級分類方法」におけるAE試験方法	

学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名	
【非破壊】	第11回超音波による非破壊評価シンポジウム	2004/1/26-27 東京 (きゅうりあんホール)	米山弘志	NDIS 2424 オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の超音波探傷試験方法
	(社)日本非破壊検査協会 表面分科会・渦流探傷研究会	2004/1/23 横浜(鶴見)	志波光晴 程 衛英 桑 亮一 米山弘志	交流磁化法による材料評価
	日本金属学会 平成15年度春季大会	2004/3/30 東京(東京工業大学)	志波光晴 他	「グラファイト素材の超音波自動探傷方法」規格化
	(社)日本溶接協会 「原子力発電設備の非破壊検査技術と認証システム」シンポジウム	2004/2/5 東京(化学会館)	古村一朗	超音波探傷試験の最新技術動向
	第13回MAGDA	2004/3/26 仙台(東北大学)	志波光晴 程 衛英 西川 聡 堀井行彦 他	Ni合金の熱処理における電磁気基礎特性
【材料】	日本金属学会 平成15年度春季大会	2004/3/30 東京(東京工業大学)	中東重雄 他	低合金鋼中のヘリウムバブル挙動

平成14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】	The 8th International Workshop on Electromagnetics Nondestructive Evaluation	2002/6/ 12-14 Saarbrücken, Germany	志波光晴 陳 鋼珠 堀井行彦 米山弘志	“ Evaluation of PWHT Temperature for Cr-Mo Steel Welded Joint by AC Magnetic Signal Analysis ”
	平成14年度火力原子力発電大会	2002/10/25 26 札幌(北海道 厚生年金会館)	古川 敬 西川 聡 青野健二郎 米山弘志 他	超音波の可視化と簡易シミュレーションによる超音波探傷試験の支援技術
	(財)溶接接合工学振興会 平成14年度セミナー	2002/10/22 東京(ゆうぼうと)	中田志津雄 三原田八水 青野健二郎 米山弘志 他	原子力発電設備溶接部の製造時検査方法-溶接欠陥と機械強度及び非破壊試験との関係(SGF-SUNの成果)
	平成14年度 宇宙構造・材料シンポジウム	2002/11/8 東京 (宇宙科学研究所)	古川 敬 志波光晴	グラファイトノズルスロット材料の超音波伝播特性評価
			志波光晴 古川 敬 他	グラファイトノズルスロット材料の超音波反射源の評価
			志波光晴 他	パルス反射・全方位垂直探傷・全没水浸法によるグラファイトノズルスロットの超音波自動探傷方法(規格)
	The First International Workshop on Hierarchical Life Cycle Evaluation of Complex Systems	2002/12/5 Tohoku University Japan	志波光晴 程 衛英 桑 亮一	“ Evaluation of creep damage by AC Magnetic Signal Analysis ”
	日本金属学会2003年春季大会	2003/3/27-29 千葉(千葉大学)	志波光晴 古川 敬 他	固体ロケットモータノズルスロット用グラファイトの超音波伝搬特性
			志波光晴 他	固体ロケットモータノズルスロット用グラファイトのアレイ型超音波探傷システム

学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名
〔非破壊〕 第12回MAGMAコンファレンス	2003/3/27 28 大分(大分大学)	程 衛英 志波光晴 古川 敬 他	超音波と渦電流探傷によるインコネル溶接金属の欠陥検出評価
〔材料〕 日本電子顕微鏡学会	2002/5/14-16 大阪 (国際交流センター)	中東重雄 他	「EDSマッピングによる照射された鉄合金中のナノクラスタの同定」
日本金属学会2003年春季大会 [溶接]	2003/3/27-29 千葉(千葉大学)	山田晶宏 中東重雄 他	「圧力容器鋼に注入したヘリウムの挙動」
〔溶接〕 日本溶接学会秋季全国大会	2002/10/3-5 高山 (高山市民文化会館)	西川 聡 堀井行彦 他	Cr-Mo系耐熱鋼溶接部の残留応力 - パイプ突き合わせ継手に対する局部溶接後熱処理(第5報)
		陸 皓 西川 聡 堀井行彦	円周局部加熱を受けるパイプの応力履歴に及ぼす材料特性の影響 - パイプ突き合わせ継手に対する局部溶接後熱処理(第6報)

## 平成13年度

学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名
International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (ISEM-TOKYO)	2001/5/ 14-16 東京 (都市センターホール)	陳 鋼珠 杉林卓也 志波光晴 米山弘志	Investigation of Subsurface Flaw Detectability of Magnetic Flux Leakage Testing
原子力発電安全月間記念講演会	2001/5/23 東京(JEMAホール)	三原田八水	原子力発電設備溶接部の製造時検査方法
The 3rd Asian Symposium on Applied Electromagnetics (ASAEM-2001)	2001/5/ 28-30 Hangzhou, China	陳 鋼珠 志波光晴 米山弘志	Theoretical study of effect of creep damage on magnetic property
日本非破壊検査協会 平成13年度春季大会	2001/5/30,31 東京 (アルカディア市ヶ谷)	古川 敬 米山弘志 三原田八水 石田仁志	超音波探傷シミュレーションのための3次元レイトレース法解析コードの開発
〔非破壊〕 The 8th Japanese-German Joint Seminar on Structural Integrity and NDE in Power Engineering (日独セミナー)	2001/5/ 31 東京 (東大 山上会館)	志波光晴 陳 鋼珠 堀井行彦 米山弘志	Non-destructive Evaluation for PWHT Temperature of Low Alloy Steel Welded Joints by Using AC Magnetic Method
		古川 敬 米山弘志 堀井行彦 他	A New System for visualization of propagating ultrasonic Pulse wave in austenitic stainless steel welds
		中田志津雄 青野健二郎 古川 敬 他	Research on Standards Unified for Non-Destructive Inspection of Welded Components(SUN)
13回AE総合コンファレンス	2001/10/2,3 北九州 (九州工業大学)	志波光晴 他	JIS-Z 2342:1991「圧力容器の耐圧試験時のアコースティック・エミッション試験方法」改正原案について
3rd International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components	2001/11/ 14-16 Seville Spain	志波光晴 陳 鋼珠 堀井行彦 米山弘志	EVALUATION OF PWHT TEMPERATURE FOR LOW ALLOY STEEL GIRTH WELD BY USING AC MAGNETIC PROBE METHOD
第9回超音波による非破壊評価シンポジウム	2002/1/30 31 東京 (きゅりあん小ホール)	陳 鋼珠 杉林卓也 米山弘志	“ Enhancement of Signal-To-Noise Ratio of UT Signals from Stainless Steel Welds Signals by Using Wavelet Transform ”
〔材料〕 82nd American Welding Society (AWS) Convention	2001/6/6 Cleveland, Ohio, USA	山田晶宏 齋藤利之 中東重雄 他	Analysis and Proof of Hot Strain Behavior during Welding

学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名	
【材料】	機械学会M&M2001材料力学部門講演会	2001/8/1-3 北見(北見工大)	山田晶宏 齋藤利之 中東重雄 他	溶接施工中の溶融部近傍におけるひずみ挙動
	29th Nuclear Safety Research Conference	2001/10/ 22-24 Washington D.C., USA	山口篤憲	Aging Evaluation of Cables in Japan
	環太平洋先端材料国際会議	2001/12/ 11-15 Hawaii, USA	中東重雄 他	Radiation Effect on Corrosion Susceptibility of Heat Affected Zone in Weld Stainless Steels
	日本金属学会2002年春期大会	2002/3/28-30 東京(東京理科大)	中東重雄 他	TEMによる照射された低合金モデル鋼中の微小クラスタの評価
【溶接】	火力原子力発電大会	2001/9/19,20 大阪 (大阪国際会議場)	堀井行彦	炭素鋼配管の局部PWHT時の有効加熱範囲について
	溶接学会秋期大会	2001/10/10-12 盛岡 (ホテル東日本盛岡)	西川 聡 志波光晴 堀井行彦 米山弘志	熱処理条件の非破壊評価手法の検討-局部PWHT溶接部の性能評価に関する研究(第1報)-
			西川 聡 古川 敬 米山弘志 堀井行彦	オーステナイト系SUS溶接継手の超音波伝搬特性と組織-オーステナイト系溶接継手の超音波特性に関する研究(第1報)-
	溶接学会第7回国際シンポジウム	2001/11/20-22 神戸 (神戸国際会議場)	堀井行彦 古川 敬 西川 聡 米山弘志 他	Study on Improvement of Weld Metal Structures Suitable for Ultrasonic Testing of Austenitic Stainless Steels

平成12年度

学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名
【非破壊】	日本非破壊検査協会 平成12年度春季大会	米山弘志 妹尾 誠 三原田八水 上杉信夫	同形状・同寸法の放電加工ノッチと疲労クラックにおけるエコー高さの比較
		古川敬 米山弘志 堀井行彦	オーステナイト系SUS溶接部の超音波伝搬の特性と溶接条件等の関係-超音波探傷性能の改善に関する基礎研究(第2報)-
	2nd International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components	米山弘志 妹尾 誠 三原田八水 上杉信夫	Comparison of Echo Height between Fatigue Crack and EDM Notch
		志波光晴 山口篤憲 米山弘志 他	Evaluation of Creep Damage and PWHT Temperature of Low Alloy Steel Using AC Magnetic Method
	古川敬 米山弘志 堀井行彦 他	Measurement of Ultrasonic Wave Propagation in Austenitic Stainless Steel Welds-(1)	
21世紀に向けた材料研究に関する第10回池谷コンファレンス	2000/6/26-30 軽井沢 (軽井沢プリンス)	志波光晴 堀井行彦 桑 亮一 米山弘志 他	EVALUATION OF POST WELD HEAT TREATMENT TEMPERATURE OF LOW ALLOY STEEL WELD JOINTS USING AC MAGNETIC METHOD
日本非破壊検査協会 平成12年度秋季大会	2000/11/8-10 仙台(仙台市 戦災復興記念館)	米山弘志 妹尾 誠 杉林卓也 他	TOFD法によるノズルコーナの探傷試験

学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名	
「非破壊」		中田志津雄 青野健二郎 米山弘志 中東重雄 他	溶接欠陥の機械強度及び非破壊試験との関係調査(その1)	
		青野健二郎 古川 敬 米山弘志 中田志津雄	溶接金属内部欠陥とUTおよびRTによる非破壊信号量との関係(溶接欠陥の機械強度及び非破壊試験との関係調査(その2))	
	8回超音波による非破壊評価シンポジウム	2001/1/22,23 東京 (きゅりあんホール)	志波光晴 米山弘志	NDIS 2113に基づく斜角探触子のビーム特性評価
			陳 鋼珠 杉林卓也 米山弘志	ウェーブレット解析を用いたSUS溶接部UT信号のSN比改善(3)
		古川 敬 青野健二郎 米山弘志	金属単結晶内の超音波伝搬の可視化	
「溶接」	Fifth International Conference on Engineering Structural Integrity	2000/9/19-21 Cambridge, England	中田志津雄 三原田八水 中東重雄 他	“ FATIGUE STRENGTH OF WELDED JOINT INCLUDING THE WELD DEFECT IN THE WELD METAL ”
	溶接学会 平成12年度秋季全国大会	2000/9/28-30 高知(高知大)	桑 亮一 佐藤正信 他	「内圧クリープ試験によるMod.9Cr-1Mo鋼溶接継手部のクリープ損傷評価」
	PVRC年次大会	2001/1/19-22 San Diego, USA	堀井行彦	“ JAPEIC Project on local PWHT ”

平成11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」	The 7th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-7)	1999/4/19-23 Tokyo(京王プラザ)	山口篤憲 河野克巳 杉林卓也 松坂 矯	DEVELOPMENT OF NONDESTRUCTIVE DEGRADATION EVALUATION TECHNIQUE FOR NUCLEAR POWER PLANT
	ASME Code Committee	1999/5/16-22 Greensboro, USA	山口篤憲 河野克巳 杉林卓也 松坂 矯	Development of Nondestructive Degradation Evaluation Technique for Nuclear Power Plant Structure
	A Workshop on Nondestructive Characterization of Embrittlement in Reactor Pressure Vessel Steels	1999/7/21-23 Boulder USA	山口篤憲	Evaluation of Irradiated Pressure Vessel Steel by Non-destructive Methods
	日本機械学会 1999年度年次大会	1999/7/27-29 東京(慶応大)	中田志津雄 三原田八水 中東重雄 他	溶接金属内に面状欠陥を有する溶接継手の疲労強度評価
	平成11年度 火力原子力発電大会	1999/10/6-8 仙台(仙台プラザ)	青野健二郎 古川 敬 米山弘志 他	斜角探触子の距離振幅特性曲線(DAC)と欠陥検出能力の研究
	日本非破壊検査協会 平成11年度秋季大会	1999/10/27-29 札幌(札幌サンプラザ)	古川 敬 米山弘志 堀井行彦 他	オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の超音波伝搬の測定-超音波探傷性能改善に関する基礎研究(第一報)
	第12回アコースティック・エミッション総合コンファレンス	1999/11/18-19 東京(東京都立大)	志波光晴 米山弘志	波形解析による耐圧試験中の溶接欠陥からのき裂進展及び漏洩時のAE特性



学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名	
「非破壊」	第7回超音波による 非破壊評価シンポジウム 2000/1/27,28 東京(飯田橋 レインボーホール)	古川 敬 米山弘志 他	二探触子法を用いた固体内超音波の直接可視化法	
		陳 鋼珠 米山弘志	超音波信号のウェーブレット解析による 欠陥エコーの検出	
		青野健二郎 古川 敬 米山弘志 他	斜角UTによる溶接金属内部面状欠陥の検出性 及びサイジング精度	
		妹尾 誠 米山弘志 他	炭素鋼における人工ノッチと疲労き裂の 超音波エコー特性の比較	
「材料」	日本原子力学会 1999年秋の大会	1999/9/10-12 新潟(新潟工大)	中東重雄 他	He含有ステンレス鋼へのYAGレーザー溶接の 適用性検討
	日本原子力学会 2000年春の大会	2000/3/28-30 愛媛(愛媛大)	中東重雄 他	改良型陽電子消滅法による原子炉圧力容器鋼の 劣化評価
	日本金属学会 2000年春期大会	2000/3/29-31 神奈川(横浜国大)	中東重雄 他	中性子照射した溶接304鋼の熱影響部の析出挙動
			中東重雄 上杉信夫 他	SUS304鋼の損傷組織に及ぼすHe同時注入効果
「溶接」	ASME Pressure Vessel and Piping Conference	1999/8/ 1- 5 Boston USA	堀井行彦 (村川助教授代読)	Influence of Heating Condition on Temperature Distribution During Local PWHT
	Pressure Vessel Research Council Meeting	1999/10/ 18, 19 Huston USA	堀井行彦	Verification Test of FEM Analysis on optimum heating width for local PWHT (Carbon Steel Pipes, STPT480) (Phase Mod.9 Cr-1Mo Steel Pipe, T91)
	溶接学会 平成11年度秋季全国大会	1999/11/10-12 沖縄(琉球大)	堀井行彦 佐藤正信 陸 皓 他	熱処理中の温度分布の実測及び推定 パイプ突合せ継手に対する局部後熱処理 -第3報-
	溶接構造シンポジウム99	1999/12/1,2 大阪(大阪大)	堀井行彦 佐藤正信	配管局部PWHT時の温度分布及び残留応力について

平成10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」	日本機械学会 第75期通常総会講演会	1998/3/31-4/3 東京(東京工大)	山口篤憲 志波光晴 米山弘志	磁気光学素子を用いた表面微小欠陥の 検出と定量化
	日本非破壊検査協会 平成10年度春季大会	1998/5/26,27 東京 (アルカディア市ヶ谷)	河野克巳 杉林卓也 松坂 矯	渦電流法による原子力プラント材料の 非破壊劣化評価
			河野克巳 杉林卓也 松坂矯	超音波減衰係数及び後方散乱強度測定による 原子力プラント材料の非破壊劣化検出技術
	1st International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components	1998/10/ 20-22 Amsterdam Netherland	米山弘志 青野健二郎 中田志津雄 井桁正巳	A study of capability of flaw detection and accuracy of flaw sizing using ultrasonic testing (The 1st report)
日本非破壊検査協会 平成10年度秋季大会	1998/11/11,12 名古屋 (名古屋国際会議場)	杉林卓也 米山弘志	TOFD法による炭素鋼及びステンレス鋼内人工きずの サイジング	
		志波光晴 米山弘志 他	耐圧試験時に漏洩を生じる溶接欠陥を導入した 圧力容器のAE特性	

学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名	
【非破壊】		青野健二郎 米山弘志 中田志津雄 井桁正巳	斜角UTによる溶接金属内部欠陥の サイジング精度に関する実験(第1報)	
	第6回超音波による非破壊評価 シンポジウム	1999/1/21,22 東京(工学院大)	妹尾誠 三原田八水 河野克巳	TOFD法及び端部エコー法による人工きずの サイジング
			志波光晴 米山弘志	使用中の斜角探触子の寸法測定精度評価方法
			古川敬 陳 鋼珠 米山弘志 上杉信夫	ウェーブレット解析を用いた超音波信号の SN比改善(1)
【材料】	日本金属学会1998年秋期大会	1998/9/28-30 愛媛(愛媛大)	中東重雄 上杉信夫 他	SUS304鋼の溶接部における照射損傷組織
	日本金属学会1999年春期大会	1999/3/29-31 東京(東京工大)	中東重雄 他	Fe-Cuモデル合金の陽電子捕縛微小析出物と硬化
【溶接】	MPA Seminar	1998 /10/ 8,9 Stuttgart Germany	堀井行彦 佐藤正信 他	Research on Suitable Heating conditions during Local PWHT (Report )

## 論文等表彰

氏名	受賞名等	機関等・受賞日	受賞内容
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)	この新進賞は、平成13年度に行なわれたNDI協会各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: 「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」(H13年度秋季大会で発表)
西川 聡	研究発表賞	(社)日本溶接学会 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)」に対して受賞したものである。
西川 聡	科学技術奨励賞	(社)日本高圧力技術協会 平成14年5月24日	若手研究者に対する賞で、発表論文「鍛造2相ステンレス鋼の溶接熱影響部の熱時効評価 第1・2報」に対して受賞したものである。
志波光晴他	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。
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	掲載論文「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。
水野亮二	木原奨励賞	(財)溶接接合工学振興会 平成16年5月13日	木原奨励賞は、(財)溶接接合工学振興会の事業の一つとして毎年1回、溶接接合工学の分野における新進気鋭の研究者、技術者に授与されるもので、受賞候補者は原則として35歳以下であり(財)溶接接合工学振興会会員、会社及び理事会が認める関連団体並びにその理事会の推薦により与えられるものである。今回評価を受けた水野研究員の主な研究テーマ等は、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関する研究開発として 応力腐食割れ発生防止適正溶接条件の監視技術 テンパーヒード溶接工法による圧力容器の適正補修条件の確立 その他学会発表等6件



---

**溶接・非破壊検査技術センター 技術レビュー Vol.2 2006 (非売品)**

---

発行編集人 ……●…… 山本 孝(溶接・非破壊検査技術センター業務グループ長)  
発行所 ……●…… 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 (株)新晃社

**《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。