



溶接・非破壊検査技術センター

技術レビュー

Vol.4 2008

(財)発電設備技術検査協会

目次

巻頭言	● 安全とリスクマネジメント 1 横浜国立大学教授 小林英男
ご挨拶	● 理事長 佐々木宜彦 2
トピックス	● 日本保全学会学術講演会第1回産学共同セッション銅賞を受賞 3 ● 溶接学会平成19年度溶接冶金研究委員会優秀研究賞を受賞 ● 日本非破壊検査協会平成19年度学術奨励賞を受賞
研究報告	● 欠陥検出評価技術に関する研究 横波及び縦波入射によるき裂周りの超音波の可視化 5 関野晃一, 古川 敬, 古村一朗 清水紘治(関東学院大学) 超音波探傷を支援するシミュレーション解析技術の活用事例 10 古村一朗, 古川 敬 鎌田 徹, 南 安彦(関西電力) パルスECTによる肉厚及び導電率測定シミュレーション 17 程 衛英, 古村一朗 放射光CTイメージングによるステンレス鋼中SCCき裂の観察 22 中東重雄, 古村一朗 山本厚之, 大西陽子, 藤尾和樹, 角谷英剛, 藤尾和樹, 寺澤倫孝(兵庫県立大学) 梶原堅太郎(高輝度光科学研究センター)
	● 溶接継手の健全性確保に関する研究 圧縮残留応力付与部の熱時効による応力緩和挙動 28 西川 聡, 中田志津雄, 堀井行彦, 古村一朗, 山口篤憲 長期間使用した改良9Cr-1Mo鋼溶接金属の電気化学計測を用いたじん性評価 33 西川 聡, 大北 茂, 堀井行彦
	● 技術基準・規格化に関する調査研究 PD研修の内容とその実績について 38 米山弘志, 杉林卓也 米国ボイラー規格の設計マージン規定について 42 吉田和夫, 大石勇一
成果	● 出願特許一覧 49 ● 学協会誌等への論文発表 50 ● 学協会等への口頭発表 53 ● 論文等表彰 59

安全とリスクマネジメント

わが国では、法規制によって安全が確保されてきた長い歴史があり、欧米企業のようなリスクマネジメントはなじまないとされてきた。明治維新の時代に産業社会として後進国だったわが国が、欧米の先進国に追い付くために、安全の確保を法規制に頼ったことは必然性があった。そして、法規制は成功を収め、産業社会への速やかな変革をもたらした。しかし、太平洋戦争という国家・社会体制の変革を経験しながら、法規制による安全の確保を継続し、それから脱し切れなかったことが、国と社会の一大失策となった。そもそも法規制は必要最低レベルであって、社会への見せしめとして法規制にすら背く極悪人を処罰するためにある。これには、大多数の善人は自主的により高度なレベルの安全の確保を目指すはずという前提がある。しかるに、善人の集団である企業はこれを逆手に取り、儲けに直結しない安全の確保への自主的な取組みを怠ってきた。この付けと、法規制の硬直化と肥大化の弊害が相乗して、事故などの形で一挙に顕在化しているのが、わが国の現状である。

そして、法規制は必要最低レベルという国の建前と、法規制は必要十分レベルという企業の本音の間の大きなギャップを取除き、また法規制の硬直化と肥大化に伴う合理性と経済性の欠如を解消するためにも、国は規制緩和を断行するに至った。その結果、企業は自己責任を全うするために、リスクマネジメントを導入せざるを得ない状況となった。

法規制にもメリットはある。大企業と中小企業の区別なく、業界内で同一基準が適用されるから、企業のワーク軽減となっていた。わが国でリスクマネジメントを適用するための課題は、従来の法規制のメリットを活かすシステムを構築することにある。具体的な提案を図1に示す。規制緩和によって、従来の強制規格の技術基準（省令、告示など）は性能（機能）規定化され、今後は民間の技術規格がこれに代わることになる。技術規格とこれを補完する経験のデータベースを社会的に共有するシステムを構築すれば、各企業は従来の法規制のメリットを活かしたリスクマネジメントの適用が可能となる。企業の役割は、自分のために自分の規格をつくること（自主規格）と、成功と失敗を含めた経験を社会的に情報公開すること（データベース）である。

技術規格と経験のデータベースの作成には、従来の法規制に代わって、学協会が社会的に共有するための指導的役割を果たすべきである。これによって技術規格と経験のデータベースの中立性、公正性、公開性と透明性が維持され、学協会所属の研究者による技術的支援、高度化と合理性の追求が可能となる。発電設備技術検査協会にこのような観点からの技術開発とデータベース構築を期待したい。

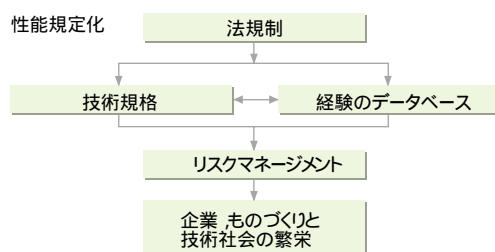


図1 技術規格、経験のデータベースとリスクマネジメントの組合せ

横浜国立大学
教授 小林英男



ご挨拶

技術レビュー Vol. 4 を取りまとめましたのでご高覧いただきたいと存じます。Vol. 4 は 2007 年度において、協会が独自に実施した試験研究活動成果である論文報告を取りまとめたものです。

お陰様で 2007 年度中、当協会研究者の最近発表した論文のうち 3 件が学協会の表彰を受賞しました。当協会の研究活動成果が高く評価されたことをうれしく思っております。

第一は、日本保全学会学術講演会第一回産学協同セッションでの銅賞受賞です。関西電力と共同発表したものです。実機の超音波探傷結果から、超音波シミュレーション解析により欠陥かどうかの評価を可能にする技術です。欠陥エコーの識別は経験とノウハウが大きく影響する作業ですが、協会がこれまで培ってきた超音波シミュレーション評価技術が実機の検査に活用され、現場適用への道筋がつけられたものとして、将来への発展が大いに期待される技術です。

第二は、溶接学会における優秀研究賞の受賞です。

クリープ特性に優れており、火力プラントに使われている改良 9Cr-1Mo 鋼について、韌性回復法及び簡便な韌性評価手法を提案した論文です。本賞は、溶接冶金分野において優れた研究発表を行った若手研究者に与えられるものであり、伝統ある溶接学会の委員会で受賞したことは大変栄誉であると考えています。

第三は、日本非破壊検査協会の奨励賞です。

SCC のき裂先端で超音波がどのように伝播するかは十分解明されておられません。このため、協会が保有する光弾性可視化技術を応用して、き裂を付与したガラス試験片の先端近傍で超音波が反射、透過する様子を取りまとめた論文です。耐熱ガラスに熱応力でき裂を発生させる技術も当協会でも保有する技術です。本研究で得られた基礎データは、今後、き裂先端部の UT シミュレーションの精度向上を図る上で有効に活用されることを期待しています。

その他、ピーニング後の圧縮残留応力がいつまでにどの程度残っているかを把握することは、現場においてニーズの高いテーマの一つです。当協会が発表した、圧縮残留応力付与部の熱時効による応力緩和挙動は注目された研究成果でした。なお解明されるべき課題もあり、実機をベースにして今後共同研究などにより引き続き研究を進めていくことができると考えております。

今後とも、火力、原子力発電所において、新しい保全技術や検査技術が適用導入されていくと考えます。当協会は、電力分野における溶接管理技術、非破壊検査技術分野において先導的役割を果たしていくことを目指しております。

すなわち、当協会の試験研究活動が、現場のニーズを把握し、あるいは現場のニーズを先取りするものであり、研究成果が現場に適用、適用され、つながるものとして具体的実績をさらに積み重ねて、電力安全確保に貢献していきたいと考えております。

関係各位の一層のご指導、ご理解を賜りたくよろしくお願いたします。



理事長
佐々木宜彦

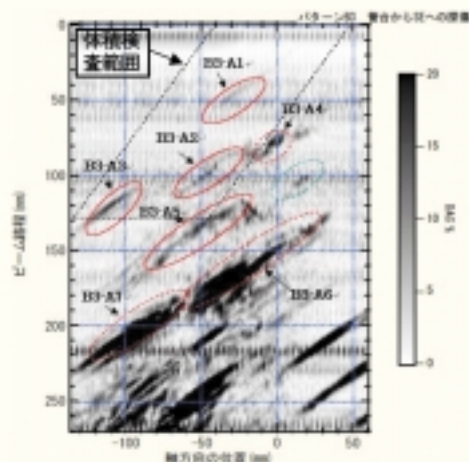
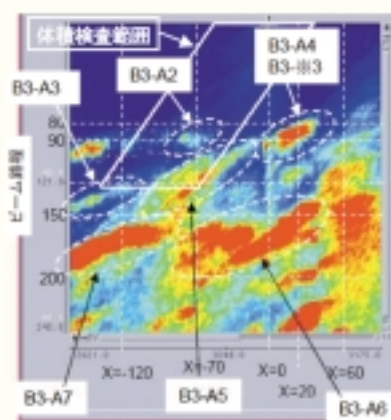
日本保全学会学術講演会 第1回産学協同セッション 銅賞を受賞

当センターの古村一朗研究グループ長（現主席）と古川敬研究員及び関西電力㈱の南安彦課長と鎌田徹副長（現高経年化対策GM）とが、第4回日本保全学会学術講演会（平成19年7月3日、4日：福井大学）の第1回産学協同セッションにおいて「超音波探傷シミュレーションソフトウェアの検証とその活用事例」を発表し、銅賞を受賞しました。

これまで長年開発を進めてきた当センターの超音波探傷シミュレーション解析技術は、国内外で高い評価を受けており、超音波探傷技術に関する規格基準化や事故調査に関する第三者評価に大いに貢献してきました。今回受賞した論文は、超音波探傷シミュレーションソフトウェアの妥当性を光弾性法による超音波可視化によって検証するとともに、実機探傷結果の事前確認へ活用した事例を紹介したものです。光弾性法による超音波可視化技術も当センターで開発を進めている技術であり、「超音波の見える化」により超音波探傷性能の向上に努めた研究成果の一端を紹介したものです。

産学協同セッションは、『研究者が提案する研究成果を商品とみなし、企業や国などを購買者と位置づけ、研究成果を売買する市場を保全学会が提供するという市場原理に近い新しい試み』であり、第4回日本保全学会学術講演会で初めて開催されたセッションです。

第1回の試みに対して16件の応募がありました。当センターは、超音波探傷シミュレーション技術を「実機探傷で得られるエコー群が、欠陥かどうかの評価を可能にする技術」として紹介し、ひろく実機探傷に活用してもらえることを願って発表したわけですが、「非常に完成度の高い技術である」として評価され、銅賞を授与されたものです。



超音波探傷試験結果（左図）とシミュレーション解析結果（右図）

今後とも、引き続き超音波探傷シミュレーション解析技術の高度化に向けた研究に邁進しますが、この技術の実機探傷への活用等を宜しくお願いいたします。

なお、本受賞に関連する論文は、本誌研究報告「超音波探傷を支援するシミュレーション解析技術の活用事例」をご覧ください。



古川研究員（左）と古村主席（右）

溶接学会平成19年度 溶接冶金研究委員会優秀研究賞を受賞

当センター西川聡研究員が、社団法人溶接学会の溶接冶金研究委員会において優秀研究賞を受賞しました。

優秀研究賞は、平成19年度の溶接冶金研究委員会において優秀な研究発表を行った若手研究者に与えられるもので、西川研究員は、平成20年2月1日の第191回溶接冶金研究委員会で発表した「改良9Cr-1Mo鋼溶接金属の靱性影響因子と電気化学計測を用いた簡易評価方法の提案」が優秀であり今後の発展性が高いとして、表彰されたものです。

授賞式は、平成20年5月14日社団法人溶接学会会議室で開催され、西川研究員には賞状と記念の盾が授与されました。

また本受賞に関連する論文は、本誌の研究報告「長期間使用した改良9Cr-1Mo鋼溶接金属の電気化学計測を用いたじん性評価」をご覧ください。



西川研究員



優秀研究賞の盾

日本非破壊検査協会平成19年度 学術奨励賞を受賞

当センター関野晃一研究員と古川敬研究員が、社団法人日本非破壊検査協会の平成19年度学術奨励賞を受賞しました。

学術奨励賞は、社団法人日本非破壊検査協会の奨励賞規則に基づく選考により授与されるもので、平成19年の第14回超音波による非破壊評価シンポジウム（平成19年1月きゅりあん小ホール）において発表した「ガラス板に付与したき裂近傍における超音波の可視化」が非破壊検査技術の向上に寄与するところ大であると認められ、さらにこの研究の推進を奨励したいとして表彰されたものです。

授賞式は、平成20年5月21日アルカディア市谷で開催された平成20年度総会で開催され、両研究員には賞状と記念のメダルが授与されました。

また本受賞に関連する論文は、本誌の研究報告「横波及び縦波入射によるき裂周りの超音波の可視化」をご覧ください。



学術奨励賞のメダル



関野研究員（左）と古川研究員（右）

横波および縦波入射によるき裂周りの超音波の可視化

Visualization of Ultrasonic Wave Motion around Crack by Shear Wave and Longitudinal wave

溶接・非破壊検査技術センター 関野 晃一, 古川 敬
 古村 一朗
 関東学院大学 清水 紘治

In the ultrasonic testing, the diffracted ultrasonic wave in the vicinity of the crack tip is widely used for the depth sizing of crack. It is necessary to clarify the behavior of the ultrasonic wave around the crack in order to improve the accuracy of crack depth sizing. The photo-elastic visualization technique of ultrasound has been applied for such a purpose, and it has been shown that a part of the wave is reflected near the crack tip, and that a part of the wave goes through the crack surface near the crack tip in the case of longitudinal wave. Then, it seems that such penetration of the longitudinal wave through the crack surface near the crack tip has been caused by the contact of crack surface by the displacement by longitudinal wave.

In this study, the observation of both longitudinal and shear wave propagation in cracked glass specimen by photo-elastic visualization system and interferometric technique has been carried out, in order to make more clear the cause of penetration of ultrasonic wave through the crack surface.

Keywords: : Ultrasonic Visualization, Crack tip, Crack Opening Displacement, Optical Interferometry Technique, Photoelastic

1.....緒 言

発電プラントや化学プラントでは、非破壊試験によりき裂の有無や寸法を検査し、溶接部の健全性を確保している。その方法の一つとして超音波探傷試験が用いられており、超音波探傷試験におけるき裂寸法の測定方法としては、主として端部エコー法が適用されている。端部エコー法はき裂の上下端で回折した超音波の伝搬時間からき裂の上下端位置を測定¹⁾するため、き裂先端近傍における超音波の挙動を把握することが重要であり、この挙動を観察することは、き裂の寸法測定の精度向上を計る有効な方法である。

き裂先端近傍の超音波挙動を調べた従来の研究としては、疲労き裂を付与した試験片に荷重を加え、き裂先端で回折した信号（波形情報）から、き裂周りの超音波の挙動と応力拡大係数から求めたき裂開

口変位の関係を調べた研究などが行われている²⁾。また、超音波の挙動を直接観察する手法としては、鋼材の音速に近いガラス試験片にスリットを付与し、スリット周りの超音波の挙動について調べた研究等がある^{3),4)}。

著者らは、これまでにスリットに代わり、き裂を付与した試験片を用いて、き裂周りの超音波の可視化を行ってきた。試験片は従来の研究と同様に、超音波の音速が鋼材に近いガラス板を用いて、き裂に縦波を入射したときの超音波の挙動を観察し、き裂先端において、超音波の一部はき裂面で反射し、一部は透過することを観察した⁵⁾。超音波が透過した原因としては、き裂に入射した縦波がき裂を接触させる方向に振動しているため、狭い隙間のき裂先端において縦波が透過したものと推測した。

本研究では、これまでの研究成果を踏まえ、き裂先端近傍で超音波が透過する原因を更に明確にする

ために、従来の縦波のほかに、き裂を接触させる方向にほとんど振動しない横波も用いて調べた。

2.....光干渉法

ガラスに付与したき裂の開口量（すき間）を計る手法としては、光干渉法を用いた^{6),7)}。光干渉法は図1に示すように、白色光の光源からの光をビームスプリッタに通し、試験片のき裂に入射すると、図1(b)に示すようにき裂面Aとき裂面Bで反射した光によって干渉縞が生じる。この干渉縞はき裂の隙間が入射した光の半波長のときに生じるため、入射した光の波長 λ とき裂開口量 d の関係は

$$d = \frac{\lambda}{2} N \quad (1)$$

である。ここでNは干渉縞の縞次数である。

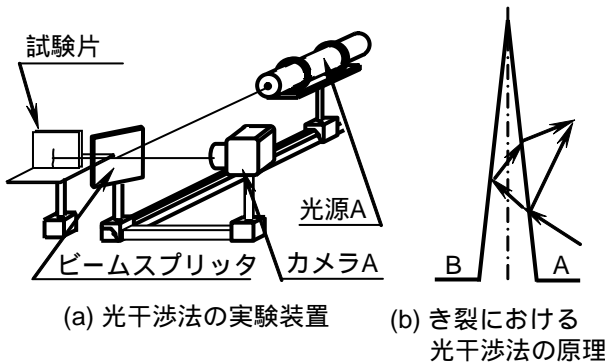


図1 光干渉法の実験装置と干渉縞の発生原理

3.....超音波可視法

き裂先端近傍の超音波挙動を調べる方法としては、図2に示す光弾性法による超音波可視化装置^{3),4)}を用い、発光時間の短いストロボライトで試験片中を伝搬する超音波を静止画として観察した。この実験装置では伝搬途中の超音波は明るい縞模様として観察され、その明るさ（輝度）が応力に比例した画像として得られる。超音波の入射は図3に示すように行った。即ち、縦波の場合は試験片の側面に設置した垂直探触子から入射した超音波を用い、横波の場合はSH波探触子を試験片の正面（紙面）に設置し、縦波がき裂に入射した位置と同じ位置に横波が入射するようにした。SH波を用いたのは、通常の斜角探傷が試験片上面に探触子を設置して、この試験片

のき裂を探傷する場合のSV波の入射を模擬したものである。用いた垂直探触子の周波数および振動子寸法は2 MHz・10mmであり、SH波探触子は2MHz・10×10mmである。

4.....試験片

試験片の形状を図4に示す。材質は、ほうけい酸ガラス（ショット社のテンパックスフロート）を用いた。テンパックスフロートの縦波の音速は約5470m/s、横波の音速は約3400m/sであった。試験片の中央には、熱応力で約80mmのき裂を付与した⁸⁾。超音波を入射する試験片の側面S_Aは鏡面仕上げとした。

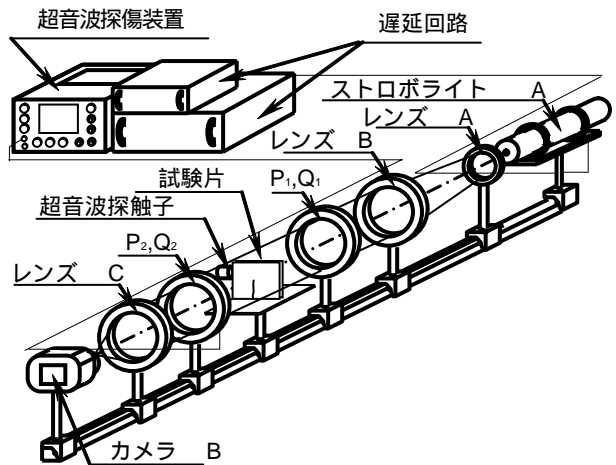


図2 超音波可視化の実験装置

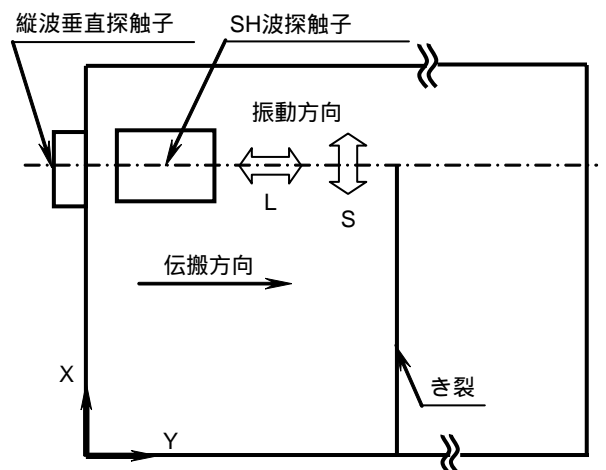


図3 探触子の設置方法

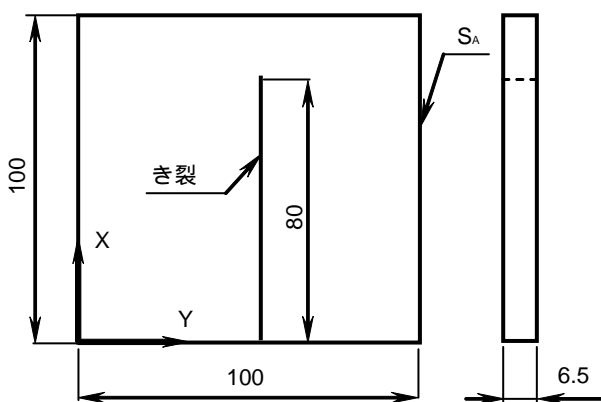


図4 試験片形状 (単位: mm)

5.....実験結果

(1) 光干渉法によるき裂開口量の計測

図5に干渉縞の一例を示す。試験片に付与したき裂の寸法は光干渉法で計測した結果、77mmであり、付与直後は目視できていた。き裂の付与は熱応力を利用してしているため、付与した直後の試験片は高温であり、試験片の温度が低下するとともに、光干渉法で干渉縞が観察できなくなるほどき裂が閉じた。実験時はき裂の寸法が変化しない状態(常温)で行い、き裂の開口部から先端までの寸法は約57mmであった。実験時のき裂先端から約20mmは干渉縞が観察できず、き裂が接触している可能性があると考えられ、本研究のき裂先端は図に示すように光干渉法で干渉縞が観察できる位置とした。き裂の開口部付近約20mmの範囲(図5中のAの部分)はき裂面の凹

凸が大きいため、部分的に干渉縞が得られなかった。図中Bの範囲は光干渉法で観察したき裂先端で、き裂が部分的に接触した範囲であり、この範囲はき裂先端から約3mmであった。

(2) き裂開口部から20mmにおける超音波の挙動

図6および図7はき裂開口部から20mmの位置に、それぞれ横波と縦波を入射したときの超音波の可視化像であり、図中の白色の縞が伝搬中の超音波の波面を示している。図7(a)で複数生じている波面は、試験片の板厚が比較的薄いために、試験片の表裏(紙面に平行)で生じた遅れエコーである。

図(a)は各々き裂に入射する直前の波面であり、図(b)はき裂に入射した後の超音波の波面、すなわち、この場合は超音波がき裂面で反射した状態を示している。入射前後の可視化像の輝度はほぼ同じ値であった。

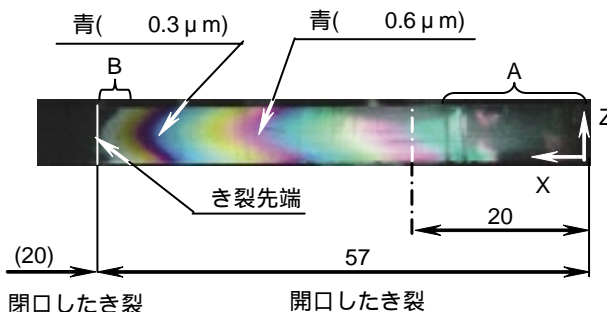
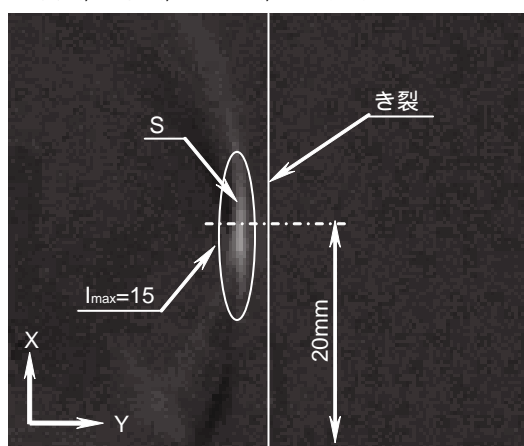


図5 ガラスに付与したき裂の干渉縞の一例

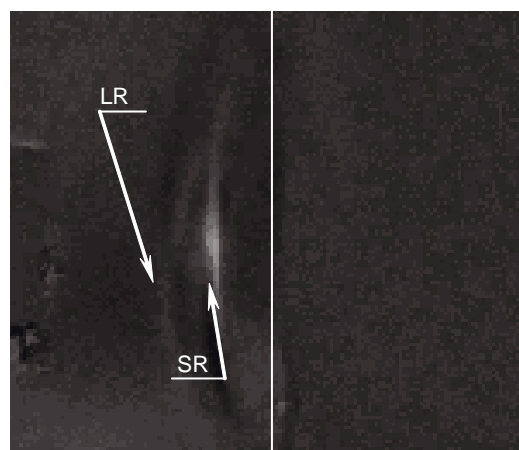
(3) き裂先端近傍における超音波の挙動

図8および図9はき裂先端(x=57mm)の位置に、

S: 横波, L: 縦波, T: 透過波, R: 反射波



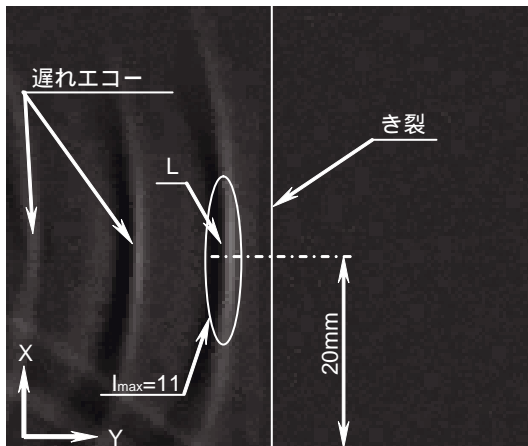
(a) き裂に入射する前の可視化像



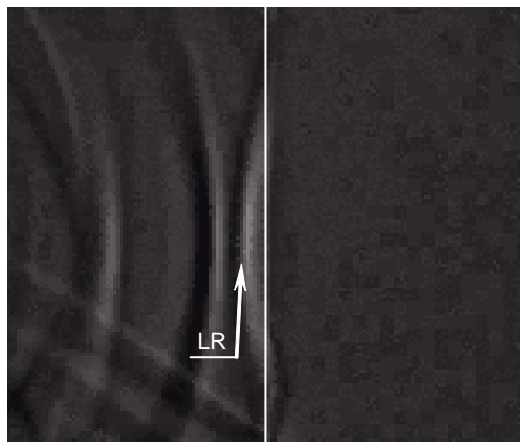
(b) き裂に入射した後の可視化像

図6 き裂開口端における超音波の挙動 (横波入射)

S: 横波, L: 縦波, T: 透過波, R: 反射波



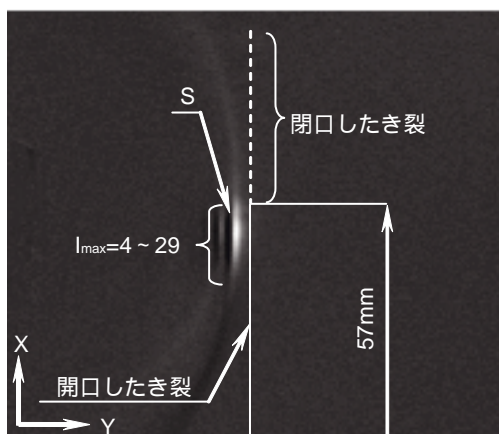
(a) き裂に入射する前の可視化像



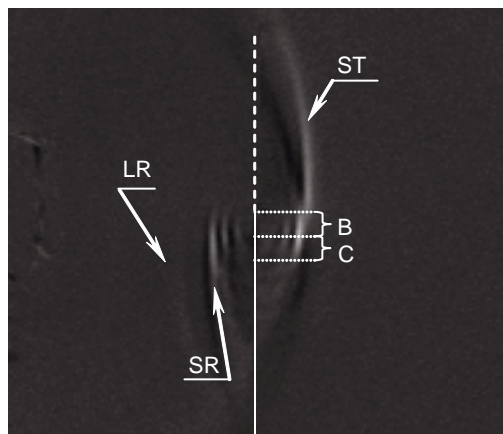
(b) き裂に入射した後の可視化像

図7 き裂開口端における超音波の挙動(縦波入射)

S: 横波, L: 縦波, T: 透過波, R: 反射波



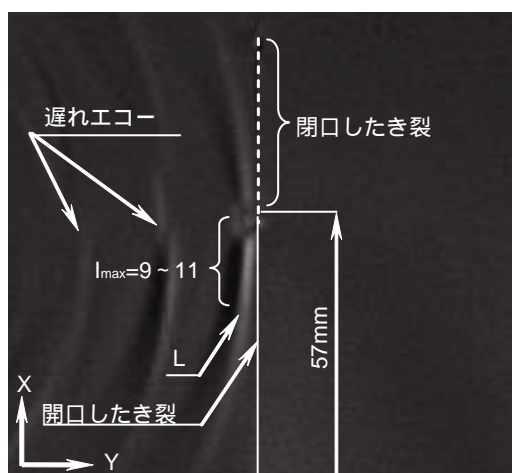
(a) き裂に入射する前の可視化像



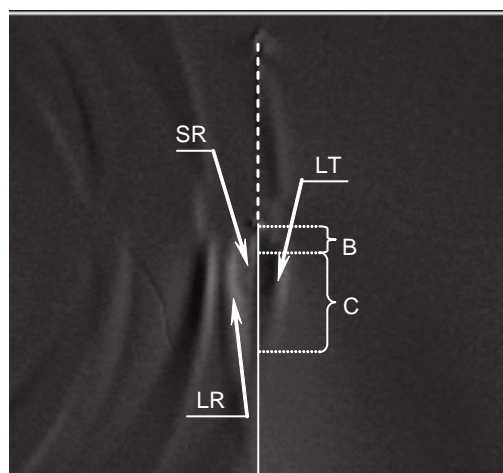
(b) き裂に入射した後の可視化像

図8 き裂先端における超音波の挙動(横波入射)

S: 横波, L: 縦波, T: 透過波, R: 反射波



(a) き裂に入射する前の可視化像



(b) き裂に入射した後の可視化像

図9 き裂先端における超音波の挙動(縦波入射)

それぞれ横波と縦波を入射したときの可視化像である。図(a)は各々き裂に入射する直前の波面であり、図(b)はき裂に入射した後の波面、すなわち、この場合はき裂面で一部が反射し、一部が透過している状態を示している。き裂に入射した横波と縦波は共に図中のBとCの部分で透過しているが、図中Bの部分は図5のき裂が接触している範囲であり、Cの部分はき裂が開口しているにもかかわらず超音波が透過した範囲である。透過した超音波の範囲は可視化像の輝度Sと画像上のノイズNの比が $S/N=2$ 以上の範囲として計測した。Cの範囲は縦波入射で約9mmであり、縦波は横波に比べ3倍程度広い範囲で透過していることが分かった。き裂で反射した超音波の輝度は超音波が透過した分、減少していた。

縦波と横波の、超音波が透過した範囲が異なった原因の一つとしては、縦波では、き裂を接触させる方向に超音波が振動しているため、縦波は広い範囲で透過したと考えられる。また、横波においてもき裂を透過した超音波が観察されたが、これは、き裂の表面粗さに起因する超音波の透過やき裂先端で回折した超音波である事が考えられ、今後詳細な検討を行なって明らかにしておく。

6.....結 言

き裂先端近傍での超音波の伝搬挙動、すなわち、超音波の透過と反射の現象を明らかにするために、き裂を有するガラス試験片に縦波および横波を入射し、超音波可視化法による試験を行った結果、以下の結果が明らかになった。

- (1) き裂開口部では縦波および横波は共に反射し、き裂先端では縦波および横波共に一部反射し、一部透過した。
- (2) 縦波は横波の3倍程度広い範囲で超音波が透過することが観察され、その要因の一つは縦波の振動方向にあると言える。

参考文献

- 1) 日本規格協会：JIS Z 3060-2002鋼溶接部の超音波探傷試験方法 付属書8 きずの指示高さの測定方法(2002)
- 2) T. Mihara, S. Nomura, M. Akino and K. Yamanaka: Relationship between Crack Opening Behavior and Crack Tip Scattering and Diffraction of Longitudinal Waves, Material evaluation, 62 (9), pp. 943-947, (2004),
- 3) 伊達和博, 伊東義晃, 島田平八: 光弾性を用いた固体内弾性波の観察, 非破壊検査, 33 (7), pp. 513-519 (1984)
- 4) 伊達和博, 島田平八, 佐竹秀喜, 伊藤義晃: ストロボ光源を用いた超音波パルス伝搬挙動の観察, 非破壊検査, (35) 9, pp. 573-581, (1986)
- 5) 関野晃一, 古川敬, 古村一朗, 清水紘治: ガラス板に付与したき裂近傍における超音波の可視化, 第14回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, pp. 71-74, (2007)
- 6) Max Born and Emil Wolf: Principles of Optics, (1999) p. 318 CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS
- 7) Sommer, E.: An Optical Method for Determining the Crack-Tip Stress Intensity Factor, Engineering Fracture Mechanics, 1 (4), pp. 705-718, (1970)
- 8) 関野晃一, 清水紘治: 種々の形状を有する自然き裂の耐熱ガラス板への付与とその開口変位の光干渉法による評価, 実験力学, 8 (1), pp. 59-64, (2008)



関野晃一



古川 敬



古村一朗

超音波探傷を支援する シミュレーション解析技術の活用事例

Applications of ultrasonic wave propagation analysis
for the assistance to UT inspection

溶接・非破壊検査技術センター 古村一朗, 古川 敬
関西電力 株式会社 鎌田 徹, 南 安彦

The simulation of ultrasonic wave propagation is a very useful technique for analyzing the suitable inspection conditions, and for evaluating the inspection results by understanding the wave propagation phenomena in the objective structure for inspection. The analysis code for UT wave propagation simulation have been checked and confirmed by the photo-elastic visualization system whether the simulation results was corresponding to the experimental data such as the wave propagation phenomena and the detected waveform or not. In this paper, several examples of application of wave propagation analysis to the simulation of UT inspection are described.

Keywords: Ultrasonic wave propagation, Simulation analysis, Verification, Application for UT inspection

1.....緒 言

超音波探傷における超音波の伝播状況をシミュレーションする技術は、最適な探傷条件の策定や、試験対象部位内での超音波の伝搬や反射の様子を時系列で把握し、探傷結果の解釈を支援する技術の一つとして大変有効な技術である。代表的な超音波の伝播解析法には、有限要素法や差分法による数値解析やレイトレース法のような近似解析などがあり¹⁾²⁾、著者らも有限要素法による大規模超音波探傷シミュレーションシステムを開発し³⁾、各種超音波探傷試験結果の評価に活用してきた⁴⁾。最近では、安価かつ高性能な計算機が普及するに伴って、超音波探傷のためのシミュレーションコードが市販されるようになり^{5),6),7)}、かつては長時間の計算時間が必要であった超音波探傷シミュレーションは現実的な技術になってきている。

本報告では、超音波伝播シミュレーションを探傷条件の最適化や探傷結果の予測、および実際の探傷で得られた探傷画像に示されるエコー源の推定や、探傷技術の規格化を念頭においた校正方法や校正用

試験片の設計への注意事項など、シミュレーション技術の種々の活用事例について述べる。

2.....超音波探傷のシミュレーション技術

超音波探傷シミュレーションを活用する上では、解析結果の精度や有効性を検証しておくことが不可欠であり、超音波が伝搬する様子を光弾性法により可視化する実験結果と、実験と同じ条件で解いた時系列のシミュレーション結果の比較検証を行なった。

既報⁸⁾において既に述べたが、本研究で用いたシミュレーションコードは、著者らが独自に開発してきた二次元有限要素コード³⁾(以下FEM1と記す)及びCTCソリューションズ社製の有限要素コードComWave⁵⁾(以下FEM2と記す)である。両コードを用いて同一のモデルを同様な条件で解析し、さらに光弾性法による超音波可視化装置を用いた観察を行い、両者における超音波伝播・反射・回折の状況の比較を行なった。詳細は既報⁸⁾を参照願うとして、解析モデルは、近年、原子力配管溶接部の探傷に用

いられるようになった2次クリーピング波法の超音波伝播状況を解析するモデルであり、探触子は光弾性可視化法の実験でも用いる縦波斜角70度探触子をモデル化している。

図1に探触子から発生した超音波の波面の解析結果と可視化実験の観察結果を示す。図1の(a)から(c)は各々FEM1、FEM2及び光弾性可視化の結果で、振動子を励振後約12μ秒後の音圧又は変位を示している。FEM1、FEM2及び実験結果ともに振幅と色合いの対応付けは同一ではないが、波面の形の違いに着目して評価すると縦波や横波の主波面、および図中から示した微弱な波面についても同様の結果であり、超音波シミュレーション技術が十分

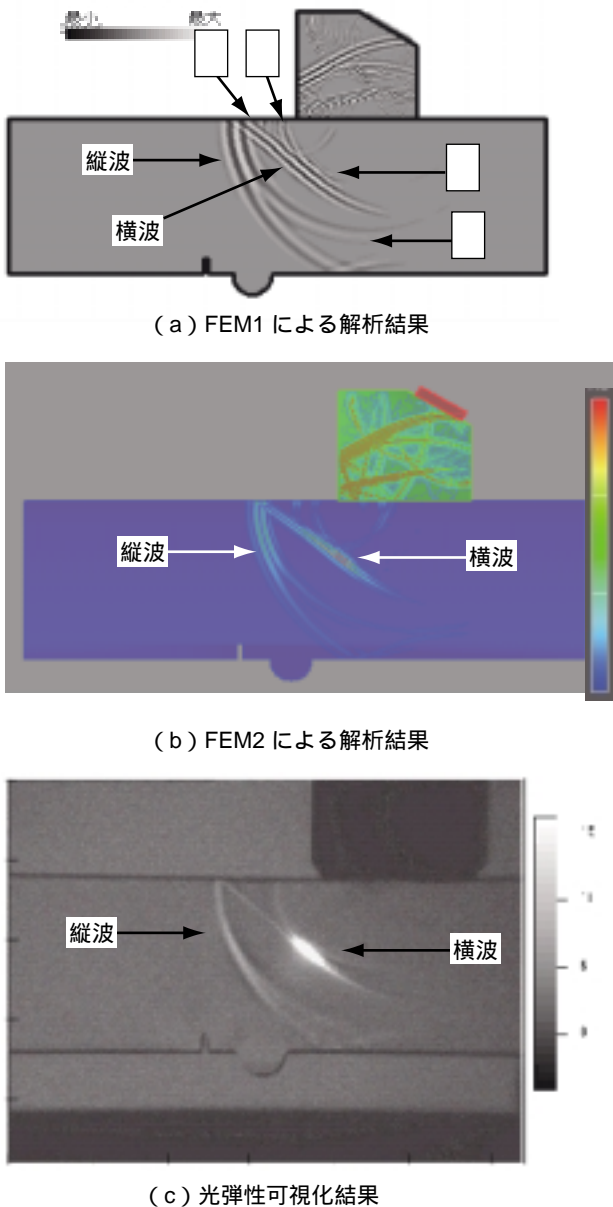


図1 超音波伝播解析結果と超音波可視化像の対応 (送波後約12μ秒の超音波の波面)

な精度を有していることが明らかになった。

3.....超音波探傷シミュレーションの活用事例

3.1 2次クリーピング波法の有効性確認

平成14年に生じたBWRプラントのPLR配管におけるSCC損傷事例に端を発して使われるようになった、いわゆる改良UT法の一つに2次クリーピング波法がある。公開で行われた確性試験の結果が反映されたNISA文書やその後のJEAG4207-2004超音波探傷指針では、溶接部に疑わしいエコーが認められた場合は2次クリーピング波法により確認することとなっている。

2次クリーピング波法は図2に模式的に示すように、通常の横波斜角探触子を用いた場合に観察される、欠陥エコーと誤認識されやすい溶接部の裏波からのエコーが観察されないために、欠陥エコーと裏波エコーの識別性に優れていると言われている。表1は国プロ(UTS-Pj)で行なわれた2次クリーピング

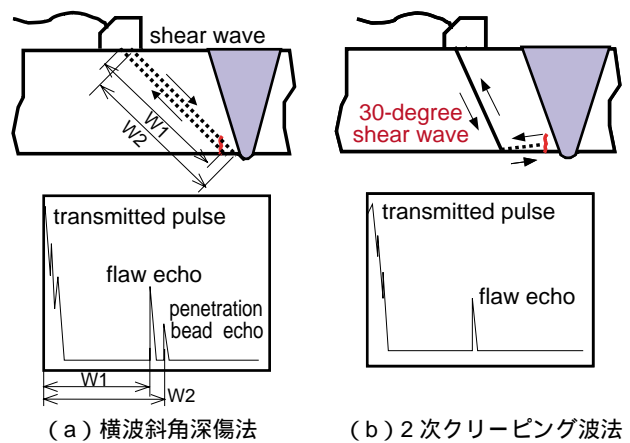


図2 横波斜角深傷法と2次クリーピング波法の比較

表1 2次クリーピング波法の効果

チーム	探傷領域	コールした欠陥数	
		斜角探傷 (45°+60°)の場合	(45°+60°)+ 2次クリーピング波の場合
A	欠陥領域	9	9
	無欠陥領域	7	0
B	欠陥領域	9	9
	無欠陥領域	2	0
C	欠陥領域	10	10
	無欠陥領域	0	0
D	欠陥領域	10	10
	無欠陥領域	3	0
E	欠陥領域	9	9
	無欠陥領域	2	0
総誤検出数		14	0

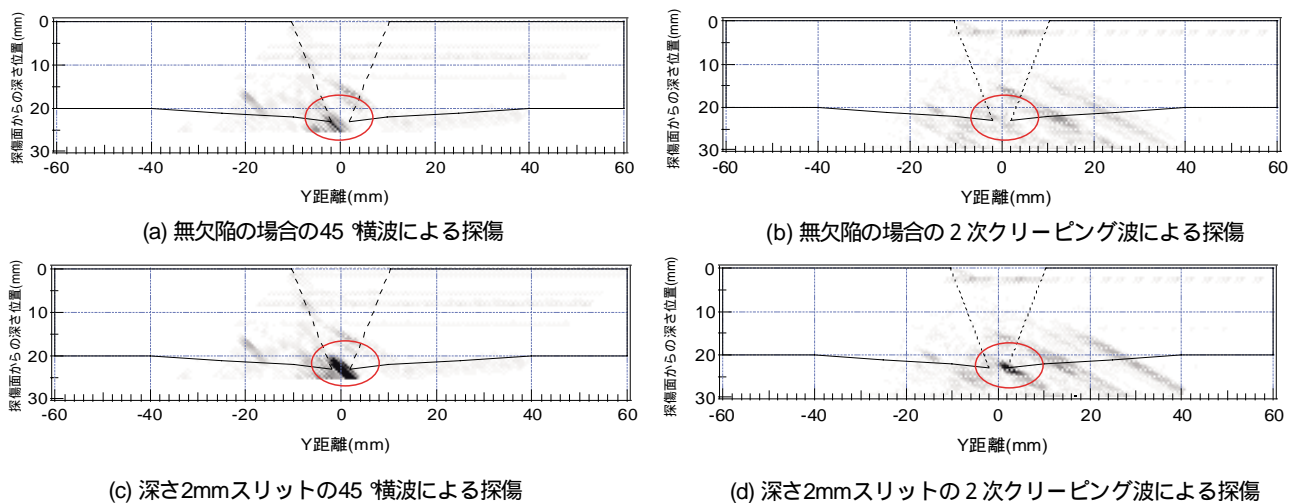


図3 欠陥と裏波の識別に対する2次クリーピング波法の有効性を示すシミュレーション解析結果のBスコープ像

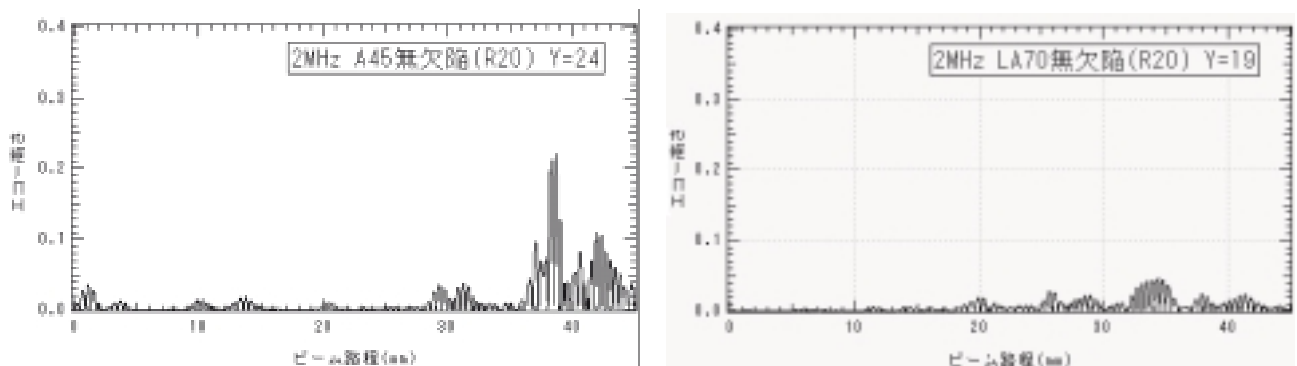


図4 裏波が存在する場合の45°斜角深傷と2次クリーピング波深傷の深傷波形

グ波法を用いた場合の効果を調べた試験結果を示しており、横波斜角探傷だけでは5チーム中の4チームが無欠陥領域で欠陥の存在をコール（誤検出・誤認識）しているのに対して、2次クリーピング波法を追加して適用すると、全て誤検出が改善されていることが分かる。

図3は裏波エコーの識別に対する2次クリーピング波法の有効性に関する解析結果を示している。図3(a)は半径2mmの半円形の裏波が存在し、かつ欠陥が無いモデルを横波45°斜角探傷した場合の解析事例をBスコープ表示したもので、欠陥は無いのに明瞭なエコーが裏波部に認められる。また図3(b)は、このモデルを2次クリーピングで探傷した場合のBスコープであり、裏波が存在しても紛らわしいエコーが観察されないことが明らかで、2次クリーピング波法の有効性を示している。図3(c)および図3(d)

は裏波と深さ2mmの欠陥（スリット）が存在する場合に、それぞれに横波45°斜角探傷と2次クリーピング波での探傷を実施した場合のBスコープであり、欠陥が存在すれば、いずれの条件でも欠陥エコーは明瞭に観察されることが分かる。なお、図4(a)及び(b)は、それぞれ図3(a)及び(b)に対応するエコーが現れるプローブ位置でのAスコープ（解析結果）を示したものである。以上の結果から、裏波と欠陥の識別に2次クリーピング波法が有効であることがシミュレーション解析からも確認することができた。

3.2 実機探傷結果の事前推定・確認への活用

実機探傷においては、探傷部位の構造設計図を基本として探傷条件や探触子走査位置などを検討するが、同じ構造を有する試験体を用いて、あらかじめ

無欠陥の状態および人工欠陥が存在する状態で、どのようなエコーが計測されるかを確認するのが一般的である。

図5はそのような目的で実施したPWRプラントの管台異材継手部試験体の内面からの探傷状況を示すもので、このような試験体を用いて探傷試験を実施するとともに、シミュレーション解析を実施した。図5に示すシミュレーション解析モデルには低合金鋼の管台とステンレス鋼の配管を繋ぐ低合金鋼側のニッケル基合金バタリングと溶接金属および管台側内面のオーバーレイを設定しており、バタリングと溶接金属とオーバーレイには実機試験体と同等の組織異方性を設定してある。

この試験体を探傷して得られたBスコープ像を図6に示す。無欠陥であるにもかかわらず、白線で示した体積検査範囲の内部およびその範囲を超える領域に多数のエコー群が計測されており、この結果からだけでは、それぞれのエコーが何処から帰ってきて、何を意味しているかを判断するのは容易ではない事が分かる。

これらのエコー群の発生場所や要因を調べるために、既に図5に示した同一形状・材料構成のモデルに対してシミュレーション解析を実施した。得られたBスコープ像を図7に示す。図6及び図7には対応するエコー群にインデックスを付けて示してあるが、両者は非常に良く対応している事が分かる。さらにシミュレーション技術の特徴である超音波伝播状況の観察により、得られたエコー群の発生位置やどのような経路で探触子に戻ってくるかについて調査した。例えば図8(a)は図6および図7の(B3-A5)エコー群について調べたもので、探触子から出た縦波(赤色で表示)が裏面の溶接部中央近傍に入射する直前の状態を表し、また図8(b)は図8(a)で示した縦波が、裏面の溶接部中央付近で横波(青色で表示)にモード変換して探触子の方向に戻り、探触子に到達する直前の状態を示している。

これらの図8(a)および(b)に示した超音波の伝播状況は、実際には連続した動画として表わすようにしているため、これらの動画を詳細に観察することにより、Bスコープ上に描かれるエコー群が何処で発生し、どのような経路で戻ってきて受信されるのかを、解明することが可能である。即ち、Bスコープ上に

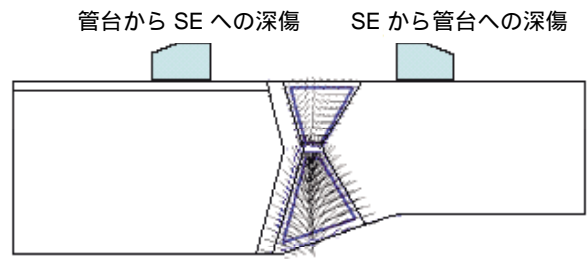


図5 異材継手部の試験体形状および解析モデル

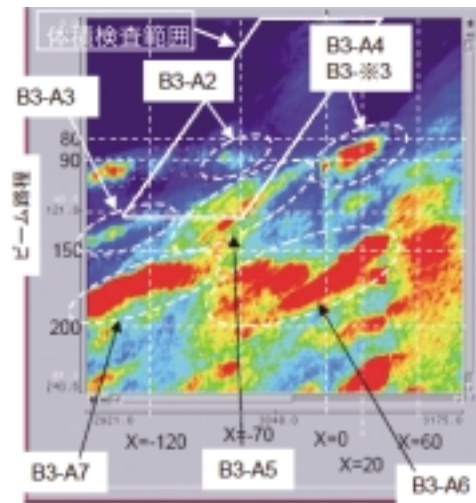


図6 異材継手試験体の深傷試験結果

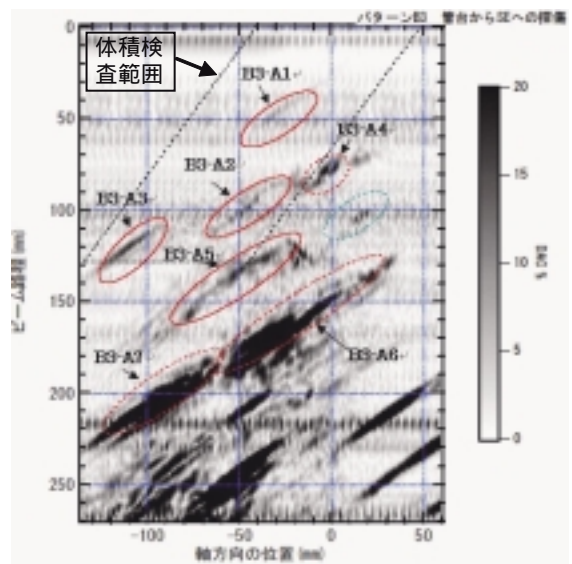
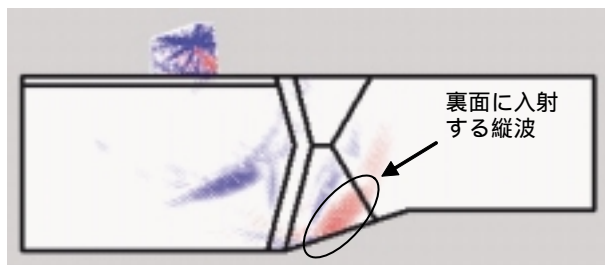
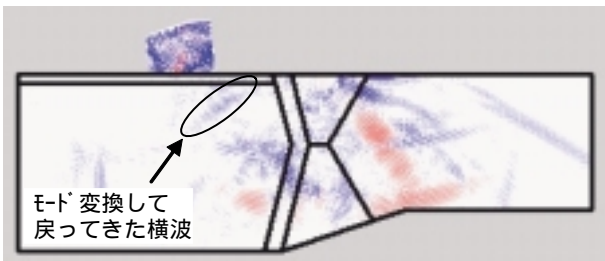


図7 異材継手試験体のシミュレーション解析結果

描かれるその他のエコー群、たとえば(B3-A1)～(B3-A4)についても詳細な観察を行なうことにより図9に示す経路で受信されていることが明らかとなった。ここで(B3-A1)～(B3-A4)エコー群は、被検体の形状や探触子の位置・超音波の入射方向が

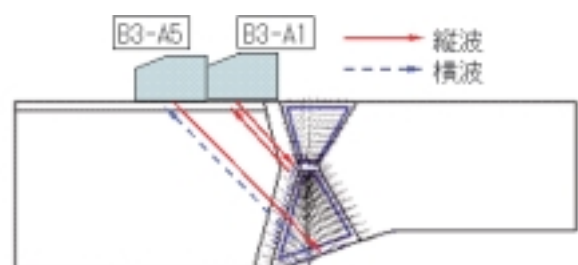


(a) 縦波が裏面に入射する直線の状況

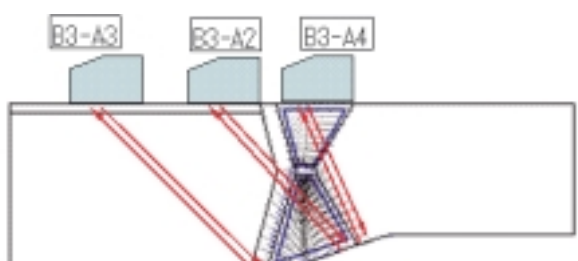


(b) モード変換して探触子に戻る直前の横波

図8 超音波伝播状況の詳細な観察例



(a) (B3-A5) および (B3-A1) エコー群の受信経路



(b) (B3-A2) および (B3-A4) エコー群の受信経路

図9 エコー群の発生位置・反射経路の観察結果

ら考えると、被検体が均質材であれば反射してくるはずの無い経路からのエコーであり、溶接部の組織不均質の影響で得られたエコーであることが分かる。

以上に述べたように、実機の探傷に先立って同一形状・材料構成の試験体で行なう探傷試験とともに、シミュレーション解析を行なうことは、無欠陥状態および欠陥を想定した状態における探傷結果を的確に推定することが可能になり、超音波探傷の信頼性向上に非常に有効であると言える。

3.3 超音波探傷の規格基準化を支援する活用

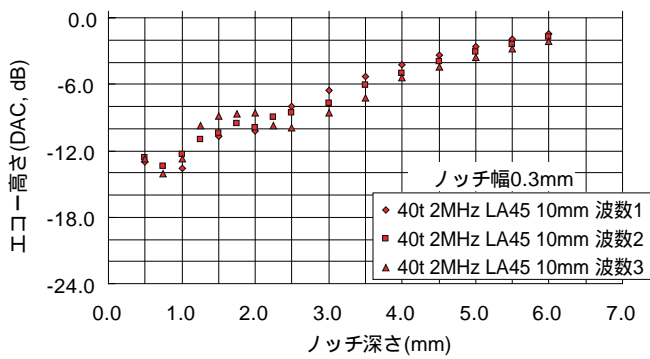
超音波探傷において探傷感度の設定は、欠陥の検出性にかかわる重要事項であり、その方法は、従来の探傷方法に関しては、現在の規格に定められているが、近年、用いられるようになった探傷方法に関しては、注意を要する点がある。このような点の規格基準化には、十分なデータを準備することが必要であるが、超音波伝播シミュレーション解析は、探傷条件や探傷の対象を容易に変えて実施できるため、試験片や探触子等を多数製作ことなくバックデータを提供することが可能なため、有効に活用することができる。ここでは規格基準化への対応を考慮した2件の活用事例について述べる。

縦波斜角探傷の基準感度校におけるノッチ幅の影響

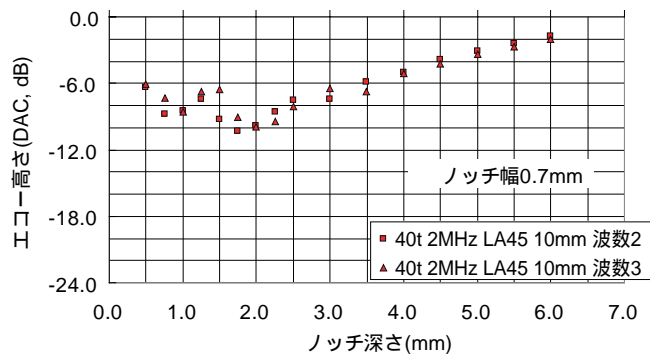
超音波探傷試験における基準感度の校正方法としては横穴やノッチを校正用反射体として用いた方法が規定されている。縦波斜角法を用いて、裏面（探傷面の反対側の面）に開口した面状欠陥を検出対象とする場合は、縦波が裏面開口欠陥で反射する際に縦波から横波へ振動モードが変わるモード変換が生ずる。このモード変換に伴う反射損失も考慮した校正法としては横穴ではなくノッチを用いるのが有効であると考えられる。しかし、縦波斜角法によるノッチの探傷では、探傷条件によってはノッチ高さが大きくなってもエコー高さが変わらない事や、逆にノッチ高さが小さい方がエコー高さが大きくなるなど、説明がしにくい現象があった。

そこで、ノッチを用いた縦波斜角探傷の基準感度校正方法の検討に資するため、ノッチ幅とノッチ高さを変えてシミュレーションを行い、エコー高さとの関連を理論的に調査した。

図10はその結果の一例を示すもので、(a)に示す2MHz縦波45°斜角探傷、ノッチ幅0.3mmの場合は欠陥深さが深くなるにつれてノッチからのエコー振幅値が大きくなっているが、(b)に示したノッチ幅0.7mmの場合は、ノッチ深さ1.5mm～2.0近傍で信号振幅値が極小となる。従って、校正用試験体の製作にはノッチ幅も適正な値を規定しなければならな



(a) EDM ノッチ幅：0.3mm



(b) EDM ノッチ幅：0.7mm

図10 ノッチを用いた縦波 40°斜角深傷の感度設定におよぼすノッチ深さとノッチ幅の影響

いことが分かる。更に詳細なデータは出典⁹⁾を参照されたい。なお、このような特異な傾向は横波斜角法や縦波斜角法でも4MHzの場合には観察されていない。

フェーズドアレイ法における探傷角度の影響

フェーズドアレイ法は、平成14年に顕在化したBWRプラント再循環系配管溶接部のSCC問題以降、原子力プラントの供用期間中検査（ISI）に適用される超音波探傷規格の改訂に盛り込まれ、重要な対象部位の探傷へ頻繁に用いられるようになった。

フェーズドアレイ法のISIにおける主な検出対象欠陥はSCC等の板厚方向に進展した面状欠陥であり、また、通常、フェーズドアレイ法では縦波が用いられるが、ノッチを用いたセクター走査における基準感度の設定では、超音波の入射角による探傷感度の変化に注意しなければならない。

図10は縦波斜角探傷の超音波入射角がノッチからのエコー高さの変化に及ぼす影響をシミュレーション解析で調べたもので¹⁰⁾、超音波入射角が50°以上で

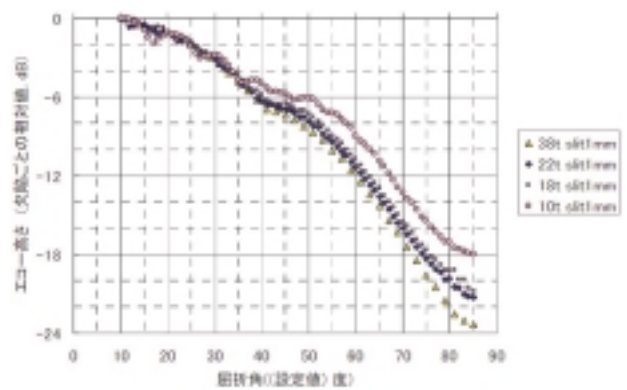


図11 フェーズドアレイ法における超音波入射角と検出感度の関係

はエコー高さの低下の傾向が大きくなることが分かる。この結果から、セクター走査方式のフェーズドアレイ法でSCC等面状欠陥の検出を行なう場合は、探傷結果を評価する超音波入射角の近傍で探傷感度の設定を行なう必要がある事が述べられている。

4.....結 言

以上に述べたように超音波の伝播状況を詳細に観察することが可能となるシミュレーション解析は、最適探傷条件の策定や探傷結果の推定と評価など、超音波探傷を支援する非常に有効なツールである。今後は教育用のツールとしても活用してゆきたい。

参考文献

- 1) 特集 超音波NDTのための最近のシミュレーションI, II, 非破壊検査 Vol. 48 No. 4及びNo. 5 (1998), P. 234
- 2) 特集 超音波検査のための最近のシミュレーション技術, 超音波TECHNO Vol. 13 No. 2 (2001), P. 1
- 3) 古村, 池上, 三原田, 上杉: 超音波探傷シミュレーション大規模コードの開発, 超音波TECHNO Vol. 13, No. 2 (2001), P. 10
- 4) 古川, 古村 他: 原子炉再循環系配管のSCC深さサイジング技術, 保全学, Vol. 3 No. 3 (2004), P. 51
- 5) <http://www.engineering-eye.com/ComWAVE/>
- 6) <http://www.cyberlogic.org/> 又は <http://www.isl.com/>

- 7) <http://www-civa.cea.fr/> 又は <http://www.sonix.jp/>
- 8) 古村, 古川: 光弾性可視化法による超音波探傷シミュレーションソフトウェアの検証, 発電設備技術検査協会 技術レビュー Vol. 3 (2007)
- 9) 古川, 古村: ノッチを用いた斜角UT法の基準

- 感度校正に関する検討, 保全学会第4回学術講演会予稿集(2007), P. xx
- 10) JNES-SSレポート(JNES-SS-0620): 低炭素ステンレス鋼の非破壊検査技術, 独立行政法人 原子力安全基盤機構 規格基準部, 2007年3月



古村一朗



古川 敬

パルスECTによる肉厚及び導電率測定シミュレーション

Simulation of the Transient Eddy Current Measurement for the Characterization of Depth and Conductivity of a Plate

溶接・非破壊検査技術センター 程 衛英, 古村一朗

A transient eddy current measurement method is presented to determine the thickness and conductivity of a conductive plate. The conductive plate is induced by an air-cored coil, the magnetic flux density along the axis measured and the various signals corresponding to plates with different thickness and conductivity are calculated using a 3D transient eddy current simulator. Characteristic features are obtained from the transient response. A similarity-based modeling method is utilized in this study to estimate the thickness and conductivity of the conductive plate.

Keywords: conductivity measurement, eddy current testing, impulse response, thickness measurement

1.....緒言

渦電流探傷とは、交流電流を流した励磁コイルを金属に近接させ、金属内部に誘起された渦電流の変化を鎖交磁束量の変化として検出して、探傷を行う方法である。その励磁電流は単一周波数、或いは、多重周波数の連続的な正弦波である。渦電流の導体内部への浸透は、励磁周波数、被検体の導電率及び透磁率の平方根に反比例する浸透深さで左右される。すなわち、励磁周波数が高いほど、或いは、被検体の導電率及び透磁率が高いほど、浸透深さが浅くなる。深い欠陥、或いは、高導電率、高透磁率の材料を検査対象とする場合、渦電流を材料内部深く浸透する手法を開発する必要がある。

そこで、パルスECT法が研究されている^{1,2)}。パルスECTは渦電流探傷の1つであるが、図1(a)に示されるパルス状の励磁電流を用いているため、パルスECTと呼ばれている。その励磁方式は式1に記述される。

$$K(t) = \begin{cases} I_0 & 0 < t \leq t_0 \\ 0 & t_0 < t < T \end{cases} \quad (1)$$

パルス電流の周期はTであり、励磁電流は t_0 で切断され、試験体内部に渦電流が誘起される。励磁電流を切断された以降、渦電流は減衰しながら、被検体内部に浸透していく。

パルスECTで誘起される渦電流の周波数帯域は広く、試験体の深くまで浸透できるため、近年、様々な非破壊検査および非破壊評価分野、たとえば、欠陥の検出、コーティング厚さおよび被検体厚さの測定、導電率の測定などに注目されているが、パルス

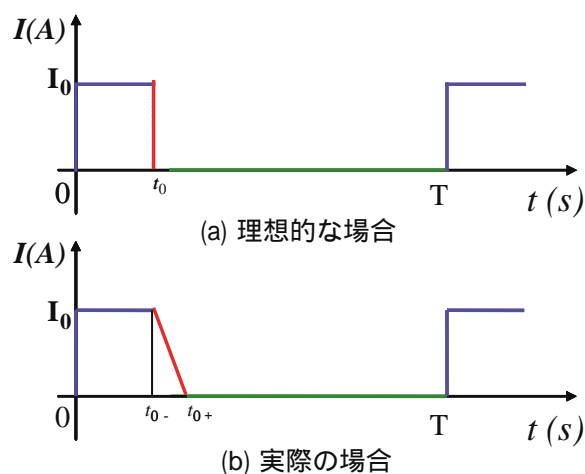


図1 パルスECT法の励磁電流

ECT法の原理の理解や信号の解析方法の検討、および欠陥の同定などを行うためには、パルスECTの測定方法の開発のほかに、定量的な解析・シミュレーションが必要である^{3,4)}。

2.....3次元電磁気解析によるパルスECTのシミュレーション

2.1 シミュレーションの定式化

パルスECT法をシミュレーションするために、電磁気過渡解析を行う。

図1(a)には、瞬間的に電流を切断できる理想的なパルスECTの励磁電流を示しているが、現実には電流の切断には時間がかかり、電流の切断は t_{0-} から始まり、 t_{0+} まで続くため、切断時間は図1(b)に示すように $t = t_{0+} - t_{0-}$ である。切断中、電流を I_0 から0まで線形的に減衰して、減衰率を α と仮定すると、励磁電流は以下のように記述できる：

$$i(t) = \begin{cases} I_0 & 0 < t \leq t_{0-} \\ I_0(1 - \alpha(t - t_{0-})) & t_{0-} < t \leq t_{0+} \\ 0 & t_{0+} < t < T \end{cases} \quad (2)$$

式(2)に表示している励磁コイルに流す電流の1周期内の变化、すなわち以下に述べるように、直流電流、切断過程、0電流の三段階に応じて、パルスECTをシミュレーションする過渡解析も三段階に分けて行う。

- step 1 ($0 < t < t_{0-}$): static解析を行う。励磁コイルに直流電流が流れ、被検体内渦電流は誘起されていない。
- step 2 ($t_{0-} < t < t_{0+}$): step 1の解をstep 2の t_{0-} 時点の初期条件として、過渡解析を行う。励磁コイルに流す電流は I_0 から0まで減衰し、被検体内部に渦電流が誘起される。渦電流の大きさは被検体の導電率及び励磁電流の切断率に関係する。電流の切断が速く、切断時間 $t = t_{0+} - t_{0-}$ が短いほど、渦電流密度は大きくなり、被検体表面に集中する。
- step 3 ($t_{0+} < t < T$): step 2の解をstep 3の t_{0+} 時点の初期条件として、過渡解析を行う。この段階では、励磁コイルの電流は完全に切断され、0になっている。Step 2に誘起された渦電流は被検体内部に浸透しながら、減衰している。その減衰は被検体の導電率、透磁率及び被検体

の厚さに関係する。

3次元有限要素法を用いて電磁気数値解析を行った。過渡解析の時間stepの微分はGrank-nicolson法で定式化した⁵⁾。

2.2 被検体の厚み及び導電率を測定するためのパルスECTシミュレーション

パルスECTにより誘起される渦電流の減衰が被検体の導電率や透磁率及び被検体の厚さに関係することを利用して、被検体の厚さ及び導電率測定を行うための解析を行った。

測定に用いるプローブ及びプローブと被検体の配置を図2に示す。励磁コイルは内径 D_1 、外径 D_2 、厚さ w の空芯コイルである。励磁コイルのリフトオフ、即ち、励磁コイルと被検体表面の間隔を l とする。 Z_u と Z_l は軸方向一次差動式グラジオメータを使って測定を行う場合の軸方向の信号測定点の位置である。シミュレーションでは、位置 Z_u と Z_l との磁束密度をそれぞれ計算して、この二つの計算値の差、すなわち、 $B_z = B_{zu} - B_{zl}$ を測定信号とした。以後、この B_z を B_z として記載することとする。解析に用いる各パラメータを表1にまとめて表示した。

被検体表面は励磁コイルに比べ十分大きく、コイルは被検体中央に位置すると仮定して、被検体厚さ及び導電率に注目して解析を行った。被検体の厚さを5, 7, 8, 9, 10, 15, 及び20mm、導電率を0.5, 0.7, 0.9, 1.0, 1.1, 及び1.5 MS/mと仮定した場合に於いてパルスECT信号を解析で得られた。

図3に、励磁電流の切断時点から時間と共に変化する信号 B_z を示した。被検体の厚みはそれぞれ5, 8, 10及び20mmであり、導電率は0.5, 0.7, 0.9, 1.0, 1.1及び1.5 MS/mである。また、時間の単位は秒であり、磁束密度の単位はTestaである。信号 B_z は励

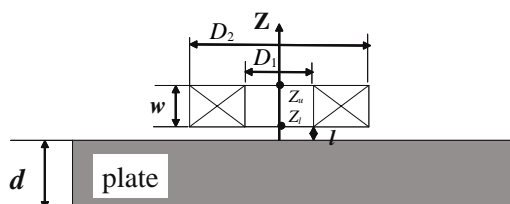


図2 パルスECT測定のプローブ及び被検体の配置

磁電流の切断時点 t_{0-} から上昇して、電流が完全に切断される時点 t_{0+} で最大値になり、それ以後、減衰する。厚さが同じで導電率が異なるケースの計算信号を比較して見ると、導電率が低いほど、減衰が速いと分かる。更に、導電率が同じで厚さが異なるケースの信号の比較から、被検体が薄い場合の信号の減衰は厚い板の場合より速いことが分かる。

シミュレーション解析から分かったパルス ECT 信号の特徴を以下に列記する。

信号の減衰は被検体の厚さ及び導電率に影響され、厚さの影響と導電率の影響は類似している。被検体が薄いほど、また導電率が低いほど、信号の減衰は速い。

3.....被検体の厚さ及び導電率の推定

3.1 信号特徴量の抽出

パルス ECT 信号から被検体の厚さ及び導電率を推定するために、 B_z 信号の特徴量の検討を行なった。信号の時間変化曲線から、'直接的な' 特徴量を見いだすために、ここでは、三つの '直接的な' 特徴量を検討した。

(a) 励磁電流が完全に切断される時点 t_{0+} の信号 B_z (BZT)

一般に電流の減衰率は大きい、即ち t は小さいため、電流の切断過程に誘導される渦電流は被検体の厚さより遥かに薄い表面層に集中している。したがって、時刻 t_{0+} の信号 B_z は被検体の厚さ

よりも導電率に影響される。厚さ及び導電率が異なる被検体に対するパルス ECT の時刻 t_{0+} の信号 B_z を抽出して、図4の上段左側に BZT としてコンター図を示した。(以降のコンター図はすべて厚さを 5, 8, 10, 15, 20mm, 導電率を 0.5, 0.7, 0.9, 1.0, 1.1, 及び 1.5 MS/m と仮定した計算結果から得られたものである)

異なる厚さ、同じ導電率を有する被検体の時刻 t_{0+} の信号 B_z はほぼ同じである。したがって、時刻 t_{0+} の信号 B_z は導電率を反映する特徴量ではあるが、導電率を 0.5 MS/m から 1.5 MS/m まで変化させた場合の信号は 0.000136 T から 0.000144 T までしか変化していない。この変化量は実際の導電率推定にはあまりにも小さい。

(b) Step 3 の減衰過程に、特定の信号値になるまでに要する時間 $t(B_{z1}) (t(B_{z1}) > t_{0+})$

図4の上段中央のコンター図は B_z が $1. \times 10^{-6}$ T になるまでの時間 $t(B_{z1}) (t(B_{z1}) > t_{0+})$ を示している。コンター図は導電率の上昇及び被検体厚さの増加に伴って、 B_{z1} になるまでの時間が長くなることを示している。

(c) ある特定時刻 $t_2 (t_2 > t_{0+})$ の信号値 $B_z(t_2)$

$t_2 = 1. \times 10^{-4}$ 秒の信号 B_z の対数値を図4の上段右側のコンター図に示した。

上に示した '直接的な' 特徴量のほかに、 B_z の時間変化曲線から得られる '非直接的な' 特徴量についても検討した。即ち図3に示した結果から、信号 B_z と時間 t の関係をいずれも対数で表わした曲線は 2 次曲線で近似できることが分かるため、 y と x をそれぞれ $\log_{10}(B_z)$ 及び $\log_{10}(t)$ と表示すると、以下の 2 次関数による近似ができる、

$$y = c_1 x^2 + c_2 x + c_3 \quad (6)$$

ここで、 $c_i (i=1, 2, 3)$ は 2 次近似曲線の係数である。この様にして求めた c_1 及び c_2 のコンター図を図4の下段左側と下段中央にそれぞれ示す。

また、信号 B_z の時間 t に伴う波形に FFT 解析を行い、FFT 変換係数の第 1 次係数を $fftC_0$ と表わして、そのコンター図を図4の下段右側に示した。

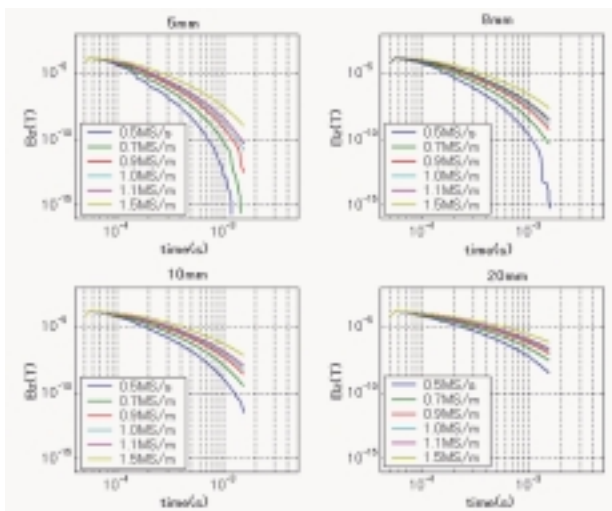


図3 異なる厚さ及び導電率の被検体におけるパルス ECT 信号の時間に伴う変化

3.2 被検体厚さ及び導電率の推定

図4に示した‘直接的な’及び‘非直接的な’特徴量のコンター図は、被検体厚さ及び導電率を簡単な特徴パラメータでモデリングすることは困難であることを示している。

他方、非パラメータ化アプローチは、様々なパラメータでのモデリングが困難なケースに有効であることが文献に示されている^{6,7)}。そこで本研究では非パラメータ化アプローチの一種であるSBM法(similarity-based method)を用いて、パルスECT信号の特徴量から被検体の厚さ及び導電率を推定することを試みた。

SBM法を利用するためには、データベースを構築して、学習させる必要がある。学習させるデータセットの入力は多次元特徴量とそれに対応する被検体厚さと導電率である。すなわち、データセットは入力特徴量セット X_{tr} と出力マトリクス Y_{tr} で構築される：

$$X_{tr} = [t(B_{z1})_i, B_z(t_2)_i, C_{1i}, C_{2i}, C_{3i}, fftC_{0i}],$$

$$Y_{tr} = [d_i, \quad]$$

($i = 1, N$) (7)

ここで、 $t(B_{z1})_i$ 、 $B_z(t_2)_i$ 、 C_{1i} 、 C_{2i} 、 C_{3i} 、 $fftC_{0i}$ はそれぞれ3.1節に説明した直接的及び非直接的な特徴量であり、 d_i 、 \quad は被検体の厚さ及び導電率である。Nは学習データセットに含まれるケース数である。本研究の学習データセットは前節のシミュレーション結果を用いて構築しているため、5段階の厚さ及び6

種類の導電率を併せて、計30ケースがある。

X_{est} は計測信号から得られた特徴量セット、 Y_{est} は X_{est} に対応する被検体の厚さ及び導電率である。 Y_{est} は以下のSBM計算式で X_{est} から推定値できる。

$$Y_{est} = Y_{tr} \cdot w \tag{8}$$

ここで、 w は重み関数であり、以下の様に表せる。

$$w = \frac{\hat{W}}{\hat{W}}$$

$$\hat{W} = (X_{tr}^T + X_{tr})^{-1} * (X_{tr} + X_{est}) = MI^{-1} * A$$

符号+は類似計算であることを表す。

二つのデータセットUとVの類似度は以下の式で計算できる。

$$U + V = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{h^2} e^{-\frac{(U-V)^2}{2h^2}} \tag{9}$$

以上のSBMアプローチを用いて、あるパルスECTのシミュレーション信号から、それに対応する被検体の厚さ及び導電率を推定した。図5は、その推定結果と真値の対応関係を示したものであり、横軸と縦軸はそれぞれ真値及び推定値を表わす。導電率は1.0MS/m、板厚さはそれぞれ7、9、及び11mmであり、推定値と真値がほぼ一致していることが分かる。

この結果から、パルスECT信号の特徴量選定の適

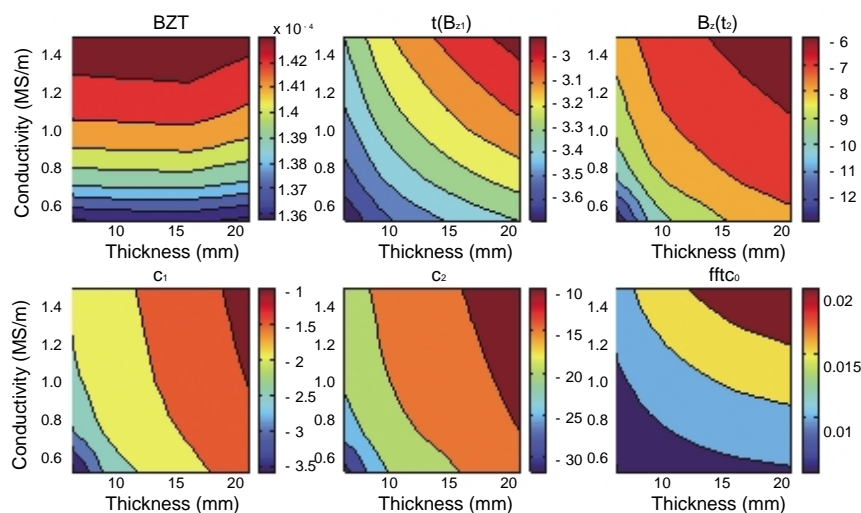


図4 各特徴量のコンター表示

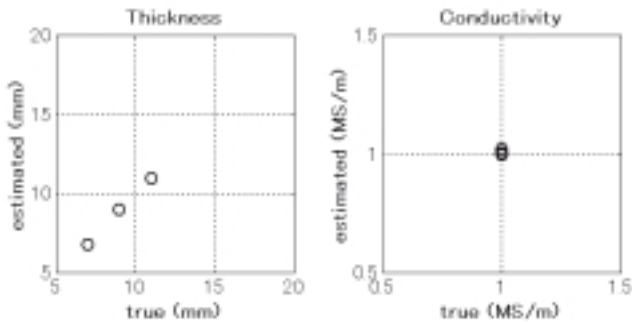


図5 SBM法による被検体厚さ及び導電率の推定結果

切性が示され、またSBM法が被検体厚さ及び導電率推定へ適用可能であることが示された。

4.....結言

本研究では、パルスECT法の過渡現象のシミュレーションを3次元有限要素法を用いて行い、時間とともに変化するパルスECT信号を求めることができた。更に、その信号から特徴量を抽出して、SBM法と組み合わせて、被検体の厚さと導電率を同定した。同定結果と真値の対応関係から、導電率推定が可能であること、および通常の定常電流で励磁するECT法では困難な比較的厚い被検体の厚さ測定へのパルスECT法の適用性が示された。今後、このシミュレーション解析とともに実験的な取り組みも行い、従来のECT法では困難な比較的深い領域の欠陥検査にも取り組んでゆく予定である。

参考文献

- 1) S. K. Burke, G. R. Hugo, and D. J. Harrison, "Transient eddy-current NDE for hidden corrosion in multilayer structure," *Review of Progress in Quantitative nondestructive evaluation*, vol 17, pp. 307-314, 1998.
- 2) C. C. Tai, J. H. Rose and J. C. Moulder, "Thickness and conductivity of metallic layers from pulsed eddy-current measurements," *Rev. Sci. Instrument.* 67(11), pp. 3965-3972, November 1996.
- 3) J. Bowler, "Pulsed eddy-current response to a conducting half-space," *IEEE Trans. Mag*, Vol. 33, pp. 2258-2264, May 1997.
- 4) S. K. Burke, G. R. Hugo, and J. C. Moulder, "Short-time behavior in pulsed eddy-current nondestructive evaluation," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, vol 18, pp. 485-492, 1999.
- 5) 五十嵐一, 亀有昭久, 加川幸雄, 西口磯春, A.ボサビ, *新しい計算電磁気学 基礎と数理*, (株)培風館, 2003.
- 6) S. Wegerich, "Condition based monitoring using nonparametric similarity based modeling," *Proceeding of the 3rd conference of Japan Society of Maintenance*, pp. 308-313, 2006.
- 7) S. Kanemoto, W. Cheng, I. Komura, "Depth sizing of complex shape cracks using ECT signals," presented on the 13th Intl. Symposium on Applied Electromagnetic and Mechanics, East Lansing, MI, USA, 2007.



程 衛英



古村一朗

放射光CTイメージングによる ステンレス鋼中SCCき裂の観察

Detection of Cracks due to SCC in Austenitic Stainless Steels by
Synchrotron Radiation CT Imaging

溶接・非破壊検査技術センター 中東 重雄, 古村 一朗
兵庫県立大学 山本 厚之, 大西 陽子
角谷 英剛, 藤尾 和樹
寺澤 倫孝
(財)高輝度光科学研究センター 梶原堅太郎

For the inspection of cracking in structural components, ultrasonic testing (UT) is recognized as an important and usual technique. However, it is generally not easy to detect the defects and obtain correct information on cracks in the welding metal by UT. The accuracy of crack size and depth data obtained by UT are sometimes evaluated by other methods such as a cross-sectioning examination. As the cracks due to SCC are complex with a 3-dimensional (3D) distribution, the numerical data obtained by 2-dimensional (2D) technique such as the cross-sectioning method may result in error. In this study, we aimed to demonstrate the applicability of X-ray computer tomography (CT) with refractive contrast of the 3D imaging of minute cracks produced in austenitic stainless steel caused by SCC. The 3D images are successfully reconstructed by the X-ray CT technique using highly parallelized brilliant X-rays from SPring-8. Accurate crack size and depth data were obtained.

Keywords: Synchrotron radiation, CT Imaging, Austenitic stainless steel, IGSCC, TGSCC, Ultra sonic testing, SPring-8

1.....はじめに

原子力発電プラントをはじめ多くの産業分野における非破壊検査技術, 特に超音波探傷試験 (Ultrasonic Testing: UT) は, 設備の健全性評価の基礎となる主要な技術の一つである。UTは検査対象部位に超音波を送信し, 内部にき裂等の欠陥が存在するとそこで超音波が反射し, エコーとして検知できることを利用し, 欠陥の有無や寸法を検出, 評価している。しかしニッケル基合金やステンレス鋼溶接部の欠陥検査では, 溶接組織や音速変化の影響等を受けエコーの発生源の特定が困難となったり, 得られた信号の解析が困難になったりする。そこでエコー発生源の推定や探傷信号の解析支援およびUT測定の研修や教育を目的に「UTシミュレーション」の開発が進められている^{1)~4)}。この「UTシミュレーション」の開発では, 材料の物性値をはじめ, 鋼中

き裂の形状や分布状態, き裂幅等に関する情報が入力データとして重要, かつ不可欠である。特により高精度化および高度化には, き裂の形状や分布状態に関する詳細な実データが必須である。

鋼中き裂の3次元の形状や分布について調べる手法として最近, 放射光 (Synchrotron Radiation: SR光) によるCTイメージング (X-Ray Computed Tomography) 法の発展が著しい。SR光を用いたCTイメージングは, これまでアルミニウム合金や炭素鋼の疲労き裂形状やき裂進展挙動の研究に用いられているが^{5), 6)}, き裂の形状が複雑で, かつ3次元的に分布し, しかもき裂幅が狭い (細い) SCCのようなき裂の測定に適用した例はこれまで皆無である。

そこで本研究では, 「UTシミュレーション」のより高度化を目的に, オーステナイト系ステンレス鋼に見られる代表的なSCCである粒界型応力腐食割れ

(IGSCC) および粒内型応力腐食割れ (TGSCC) き裂について、そのき裂の形状および3次元分布状態等について大型放射光施設 SPring-8 の放射光を用い、CTイメージング法により調べた。

2..... 試験方法

2.1 供試材

供試材は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L で、その化学組成 (mass %) は、0.0015C-12.39Ni-2.12Mo-16.28Cr-Fe である。TGSCC は $MgCl_2$ 溶液にて、IGSCC は NaOH 溶液中にてそれぞれ付与した。

2.2 測定用試験片の作製法

測定用試験片は、SCC を付与した SUS316L 鋼ブロック試片より約 $2mm \times 2mm$ 、長さ約 20mm の角状試片を切り出し、エメリー紙により研磨し、平均直径約 0.7 ~ 1.5mm の測定用丸棒試験片を作製した。作製した丸棒試験片の一例を、Fig. 1 に示す。

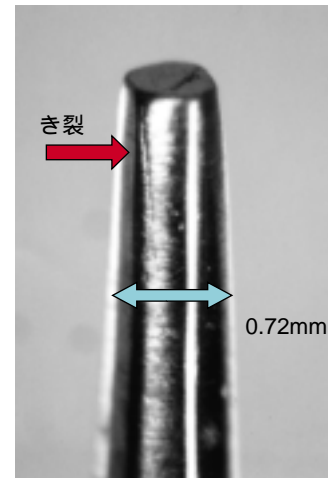


Fig. 1 測定用丸棒試験片外観

2.3 CTイメージング測定法

CTイメージング測定は、SPring-8放射光施設の産業利用ポート BL19B2 を用いた。測定に用いたSR光のエネルギーは 37keV である。このエネルギーは、ポートに設置されたCTイメージング測定装置で使用できる最大のエネルギーである。このエネルギー

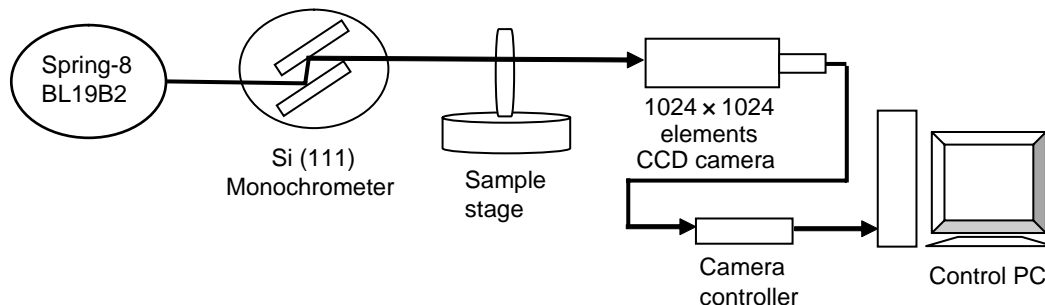
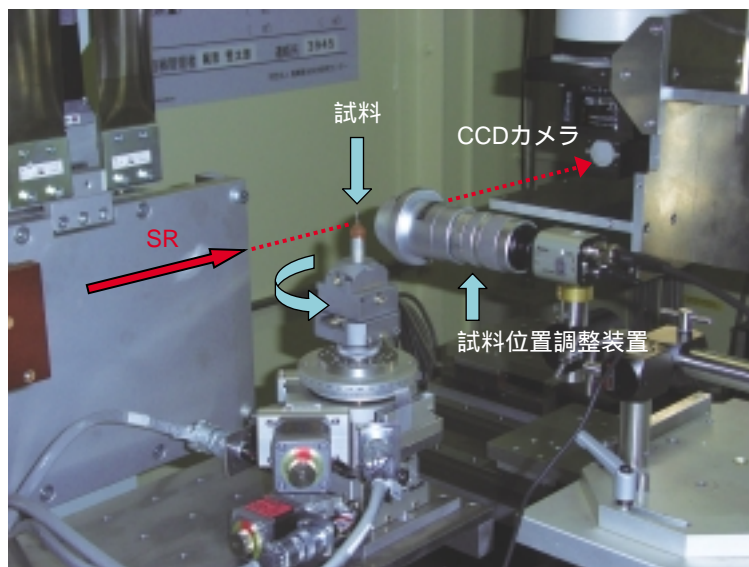


Fig. 2 CTイメージング測定装置 (SPring-8 BL19B2 H-3)

の場合、ステンレス鋼の透過能は、計算では約0.5mmとなる。測定に用いたCTイメージング測定装置の構成および外観をFig. 2に示す。SR光はSiの(111)面を利用した2結晶分光器を通り、試料を透過した後、蛍光板で可視光に変換されCCDカメラで測定、記録される。測定はBL19B2ハッチ1を使用した。この場合光源(ベンディングマグネット)からCCDカメラまでは約80mである。照射視野は2.7mm×2.7mm、X線透過像を受像するCCDカメラの画素数は4000×2600画素で、実効ピクセルサイズは約2.6μmである。また像の画質に大きな影響を及ぼすカメラ長(試料とCCDカメラとの距離)は、100mm、200mmおよび300mmと変化させて測定を行った。測定手順は、丸棒試験片をサンプルステージ上の固定し、0°~180°まで0.2°ピッチで回転させ、X線透過像を撮影した。撮影条件は、ビーム強度を考慮し、1.2秒/1フレームで撮影した。得られたX線透過像は、Filtered Back Projection法にて横断面

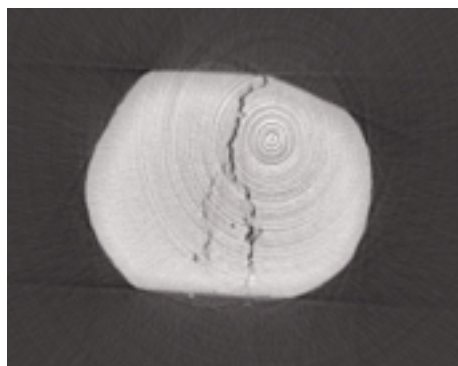
像および縦断面像を構築し、さらにそれら画像より3次元像を再構築した。測定条件を前回測定したNi基合金溶接金属中のSCCき裂の場合と比較してTable 1に示す。

3..... 結果と検討

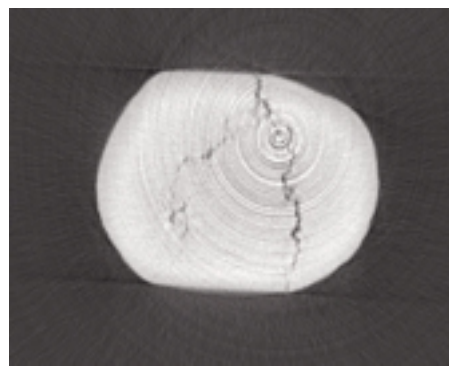
Fig. 3およびFig. 4には、SUS316L鋼中のIGSCCき裂の結果の一例を示す。カメラ長はもっとも画質

Table 1 CTイメージング測定条件

	Ni基合金 SCC	SUS-SCC
ビームライン	BL19B2	
使用ハッチ	ハッチ3	ハッチ1
SR光エネルギー	37 keV	
ビーム照射範囲	12 × 10mm	2.7 × 2.7mm
カメラ長	410,800mm	100 ~ 300mm
ピクセル数	1024 × 1024	4000 × 2600
実効ピクセルサイズ	約 12 μm	約 2.6 μm
撮影条件	0 - 180 回転	
撮影ピッチ	0.5 °	0.2 °
露出時間	3 秒	1.2 秒
像構成法	Filtered Back Projection 法	

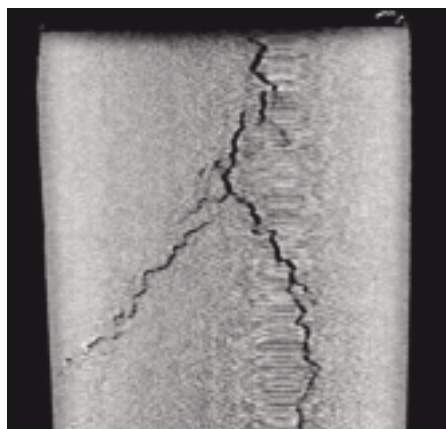


IG-2-C0250, d=668 μm

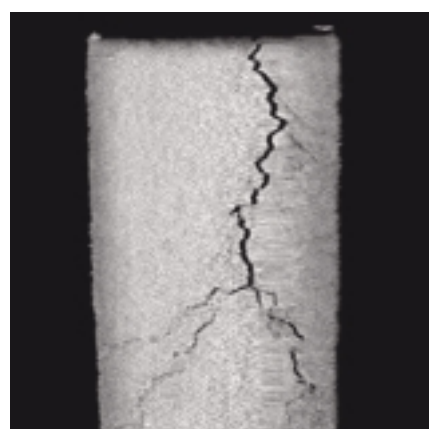


IG-2-C0341, d=911 μm

Fig.3 SUS316L鋼中IGSCCき裂の横断面構築像



IG-2-C165/360, d=413 μm



IG-2-C289/360, d=723 μm

Fig.4 SUS316L鋼中IGSCCき裂の縦断面構築像

が鮮明であった300mmの場合の構築像を示す。試料の平均直径は、約 $\phi=1.5\text{mm}$ である。Fig. 3は、試料の上部（き裂表面）から任意の深さ位置でスライスした面でのき裂の様子（横断面構築像という）、Fig. 4は、試料の側面から試料を縦にスライスした面でのき裂の様子である（縦断面構築像という）。各写真に添字の数字dは、鋼中での各深さ位置を示す。鋼中内のIGSCCき裂は、深さによって現出したり消滅したり、また太くなったり、細くなったりして複雑に分岐をしながら進展している様子が鮮明に観察できる。

またFig. 5およびFig. 6には、SUS316L鋼中のTGSCCき裂の結果の一例を示す。この場合もカメラ長は300mmである。Fig. 5は各深さ位置での横断面構築像、Fig. 6は縦断面構築像である。TGSCCき裂の場合、IGSCCき裂のように複雑なき裂の分岐や進展は見られず、比較的単調である。またIGSCCき

裂とTGSCCき裂の幅を比較すると、これら試料の場合ではTGSCCの方が狭い（細い）。

Fig. 7およびFig. 8には、光学顕微鏡にて観察したSUS316L鋼中のIGSCC（Fig. 7）およびTGSCC（Fig. 8）き裂を示す。IGSCCき裂は、粒界に沿って複雑に進展していることからCTイメージングで観察されたき裂は、粒界に沿ってき裂が進展したものであると言える。またTGSCCき裂の場合、き裂は粒内を貫通しており、比較的直線的である。CTイメージングによって得られた縦断面構築像もき裂は複雑な分岐はせず、単調なき裂像であることからCTイメージングによるき裂像は、粒内を単調に進展する粒内割れの様子を示した像であると言える。

得られたSUS316L鋼中のSCCき裂に対する再構築像の像解像度を測定した。測定は、得られた構築像を62倍に拡大し、そのき裂コントラストをマイクロメータ（読取0.01mm）にて測定した。その結果を

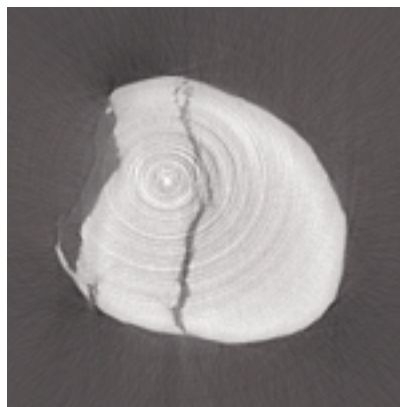
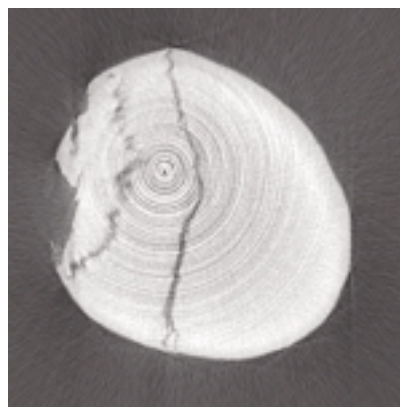
TG-3-2-R0100, d=261 μm TG-3-2-R0277, d=723 μm

Fig.5 SUS316L鋼中のTGSCCき裂の横断面構築

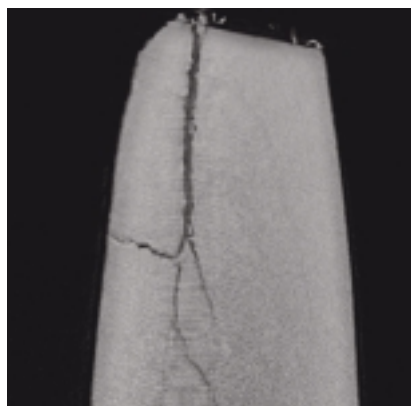
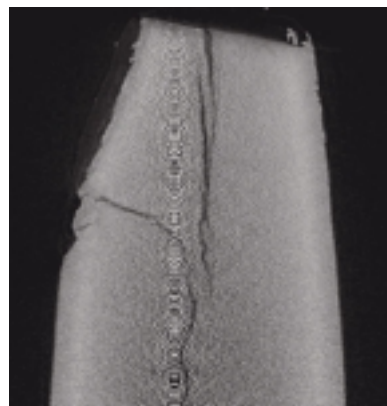
TG-3-2-R105/567, d=278 μm TG-3-2-R285/567, d=754 μm

Fig.6 SUS316L鋼中のTGSCCき裂の縦断面構築

Table 2に示す。IGSCCき裂の場合，横断面構築像では約 $3.2\ \mu\text{m}$ ，TGSCCき裂の場合のそれでは約 $3.5\ \mu\text{m}$ となり， $3\sim 4\ \mu\text{m}$ 程度のき裂幅のものであれば本測定条件では判別できそうである。ちなみにNi

基合金溶接金属中のSCCの場合は約 $5\sim 25\ \mu\text{m}$ であった。

今回得られたSUS316L鋼中のSCCき裂については，前回測定したNi基合金溶接金属中のSCCき裂⁷⁾

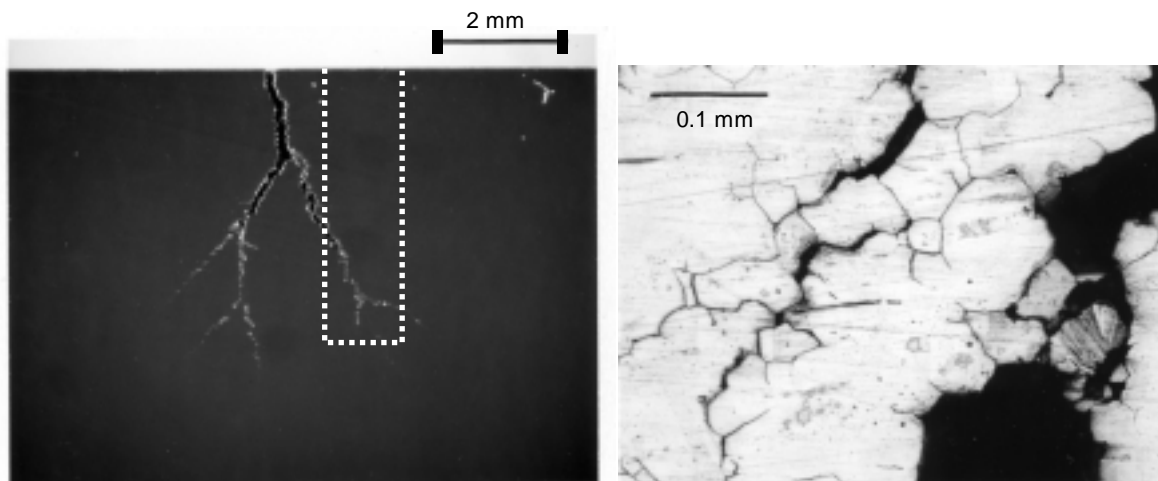


Fig. 7 SUS316L鋼の粒界型応力腐食割れ (IGSCC) 試料 (光学顕微鏡写真)

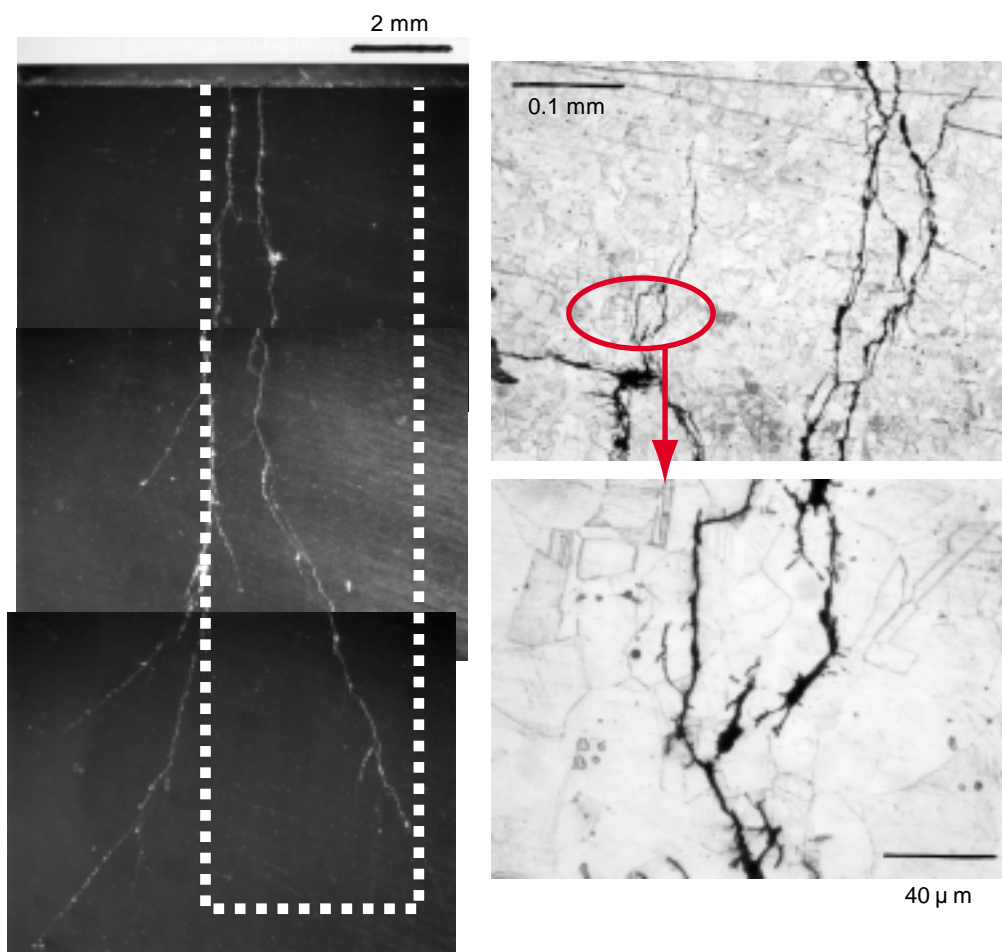


Fig. 8 SUS316L鋼の粒内型応力腐食割れ (TGSCC) 試料 (光学顕微鏡写真)

Table 2 き裂の解像度の比較

	IGSCC (IG-2-C)	TGSCC (TG-3-2-R)
測定した試料		
横断面構築像	約 3.2 μm (668 μm 位置のき裂)	約 4.0 μm (261 μm 位置のき裂)
縦断面構築像	約 4.0 μm (413 μm 位置のき裂)	約 6.8 μm (271 μm 位置のき裂)

の場合と同じ37keVのSR光であるが、今回の場合、試料径が平均約 1.5mmとNi基合金の場合の平均約

0.8mmに比べ約50%程度大きい(太い)にもかかわらず、得られた構成像はSUS316L鋼の場合の方が鮮明である。これはTable 1に測定条件を示すように、SUS316L鋼の場合撮影ピッチが0.5°から0.2°ピッチと細かいこと、CCDカメラのピクセル数が1024×1024から4000×2600となり、実効ピクセルサイズが約12 μm から約2.6 μm と向上したこと、さらにカメラ長が300mmであることなどが大きく影響していると考えられる。このカメラ長は、放射光のCTイメージングではSCCのような微細なクラック観察の場合、吸収コントラストより位相コントラストを利用する方が鮮明な画質を得ることができるとの報告⁸⁾があり、今回の測定条件であるカメラ長300mmがよりベストな条件に近かったと考えられる。今後さらに種々の条件にて撮影し、実用鋼であるステンレス鋼やNi基合金溶接金属中のSCCき裂の最適撮影条件を決める予定である。

他のいくつかのIGSCCおよびTGSCC試料について得られたIGSCCき裂とTGSCCき裂を比較すると、IGSCCき裂は複雑に分岐しながら進展しているのに対し、TGSCCはほとんど分岐せず、直線的に進展している。またき裂幅は、前者は広いのに対し、後者は細いと言える。このようにCTイメージングを用いることによりき裂の性状やき裂進展挙動の違いが明確に得られることから、SCCき裂進展メカニズムの解明の重要な手法となり得ると考えられる。

4..... まとめ

オーステナイト系ステンレス鋼中に形成されたIGSCCおよびTGSCCについて37keVの放射光を用いたCTイメージングにより鋼中き裂の3次元分布を測定した。その結果、

- (1) オーステナイト系ステンレス鋼SUS316L中のIGSCCおよびTGSCCき裂の鮮明な3次元分布像がえられた
- (2) 試料サイズがNi基合金の場合の平均約0.7mmから1.5mmの大きさにまで大きくなったが、その画質はより鮮明であった
- (3) 得られた横断面構成像によるき裂コントラストの解像度は、IGSCCの場合約4 μm 、TGSCCの場合は約7 μm であった

参考文献

- 1) 古村 他：超音波 TECHNO Vol. 13, No. 2 (2001) P. 10
- 2) 古川 他：保全学, Vol. 3, No. 3 (2004) p. 51
- 3) 非破壊検査 Vol. 48, No. 4, No. 5 (1998) p. 234
- 4) 超音波 TECHNO Vol. 13 No. 2 (2001) p. 1
- 5) Khor, M. Joyce et al.: Synchrotron Microtomography of Fatigue Crack Closure, <http://www.esrf.fr/UsersAndScience/Publications/Highlights?2002/Imaging/IMA2>
- 6) 中井善一 他：放射光CTイメージングを用いた高強度鋼中の疲労き裂の検出および定量的評価, SPring-8戦略活用プログラム(2005B017) 成果報告書, p. 80, 2006, 3
- 7) 中東重雄 他：技術レビュー Vol. 3 pp. (2007)
- 8) 百生敦：“新しいX線イメージング技術とその応用”, 「高度X線イメージング材料科学の展開」 - SPring-8光源性能を活かした応用技術開発の可能性 - , 財団法人 高輝度光科学研究センター, 2008, 7, 30



中東重雄



古村一朗

圧縮残留応力付与部の熱時効による応力緩和挙動

Stress Relaxation Behavior during Thermal Aging of Compressive Residual Stress by Shot Peening

溶接・非破壊検査技術センター 西川 聡, 中田志津雄
堀井 行彦, 古村 一朗
山口 篤憲

It might be given compression stress by the peening method in the nuclear power plant components for preventing the stress corrosion cracking. However, it is not clear whether the compressive residual stress is relaxed or not during long-term operation. In this study, stress relaxation property of the compressive residual stress given by the shot peening was investigated.

Compressive residual stress of SUS304 and NCF600 was tend to decrease after 350 , 4380 hour thermal aging. It was thought that those cause were stress redistribution by temperature rising and infinitesimal deformation by creep. It is necessary to confirm how the compressive residual stress remains after long-term used during operating temperature.

Keywords: : Stress relaxation, Thermal aging, Shot peening, Creep deformation, SUS304, NCF600

1.....目的

近年、原子力発電所の炉内構造物において、ステンレス鋼やニッケル基合金の溶接部に応力腐食割れ (SCC) が発生しているのが確認されている^{1), 2)}。したがって、SCCの発生を防止するため表面に圧縮残留応力を付与する施工法が適用される場合がある³⁾。しかし、表面に付与された圧縮残留応力が実機運転環境下で長期間使用した場合に安定して残存するかは公表された文献がほとんど無く、これまでに十分な検討がされているとは言い難い。そのため、本研究ではショットピーニング法で付与した圧縮残留応力が長時間の熱時効により応力緩和が生じる可能性を調査した。その結果を踏まえ、今後の課題について検討を行った。

2.....実験方法

2.1 残留応力評価試験体の作製

材料は、市販のSUS304 (板厚25mm, 幅70mm, 長さ100mm) とNCF600 (板厚28mm, 幅70mm, 長さ100 mm) を用いた。表1に各材料の化学成分

を示す。初期残留応力を除去するため、応力除去焼鈍 (900 , 1 hour 保持後, 炉冷) を行った。70mm x 100mmの面を1 μ mのダイヤモンドスラリ-で鏡面まで研磨した後、電解研磨により表面を10 μ m程度研削して硬化層を除去した。作製した試験体を表2に示す。溶接は電解研磨面の幅中央部をノンフィラーでTIG溶接した。溶接条件は電流200 A,

表1 使用した材料の化学成分 (wt%)

材料	C	Si	Mn	Fe	S	Cr	Ni
SUS304	0.04	0.51	0.93	Bal.	0.005	18.14	8.05
NCF600	0.04	0.12	0.21	9.78	0.001	14.75	Bal.

表2 残留応力計測を行った試験体の条件

No.	材料	溶接	ショットピーニング	熱時効
1	SUS304	×	×	×
2			×	×
3		×		×
4				×
5		×		
6				
7	NCF600	×		×
8		×		

: 実施, x : 実施せず

表3 ショットピーニング条件

鋼球の材質	径	ノズル径	ガス圧	入射角
SUS304 Hv=470 ~ 530	0.3mm	7mm	5kg/cm ²	90°

電圧10～11V、溶接速度9cm/minとした。ショットピーニングは表3の条件で全面に行った。熱時効時の昇温速度は55 /hourとし、350 に保持した。なお、冷却は炉冷とした。原子力発電所の運転温度は約288～320 であるため、本研究では若干高目の温度で安全側の評価をした。あまり高温過ぎると材料特性が変化して誤った評価をする危険性があることから、350 を熱時効温度とした。

2.2 残留応力計測方法

電解研磨を用いて表面を研削し、表面から深さ0.2～0.3mm程度までの深さ方向の残留応力分布をX線回折法により求めた。表4に計測条件を示す。なお、研削による残留応力の再配分は、I.C.Noyanによる補正式⁴⁾からほとんど生じないことを確認している。溶接した試験体は図1に示すように、溶融線から2mm離れた溶接熱影響部（HAZ）を目標に溶接線方向（X方向）と溶接線垂直方向（Y方向）の二方向の残留応力を計測し、各々 x、yとした。溶接をしていない試験体は、試験面の中央部近傍で計測を行った。

表4 X線回折法による残留応力計測条件

ターゲット	クロム
フィルター	バナジウム
電圧	40 kV
電流	30 mA
コリメータ	1 mm
計測角度(2θ)	120～135°
回折面	220(2θ=128.7°)

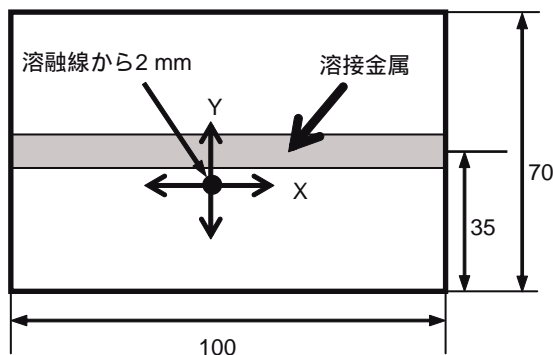


図1 溶接した試験体の残留応力計測位置

2.3 材料物性値の計測

残留応力の緩和特性を把握するため、高温引張特性を文献により調査した。また、SUS304を350 で3600 hourまでクリープ試験を行い、クリープ式を導出した。

3.....実験結果および考察法

3.1 SUS304のピーニングによる残留応力変化

図2にSUS304母材部のピーニングによる深さ方向の残留応力の変化を示す。電解研磨ままでは、残留応力はほぼ0となっており、応力除去焼鈍により残留応力は十分に除去されている。ピーニングにより表面では500 MPa程度の圧縮残留応力が付与され、深くなるのに伴い減少する傾向にあるが、0.2mm深さまでは十分に高い圧縮残留応力が付与されていた。図3にSUS304のHAZにおける溶接のままと溶接後にピーニングを行ったときの x と y の深さ方向分布を示す。溶接のままだでは、xは200～300 MPaの降伏応力相当の引張残留応力が生じてい

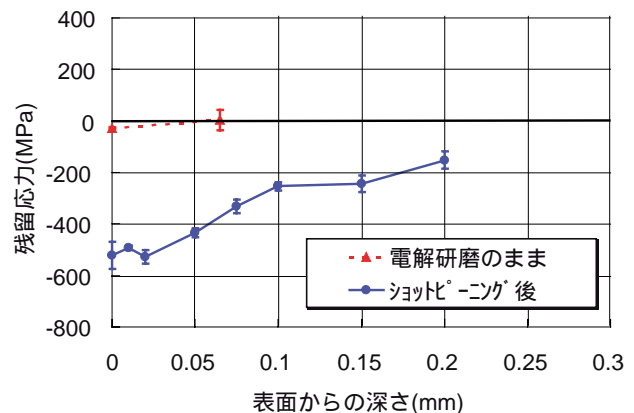


図2 SUS304ステンレス鋼の電解研磨のままと、ピーニング後の残留応力分布

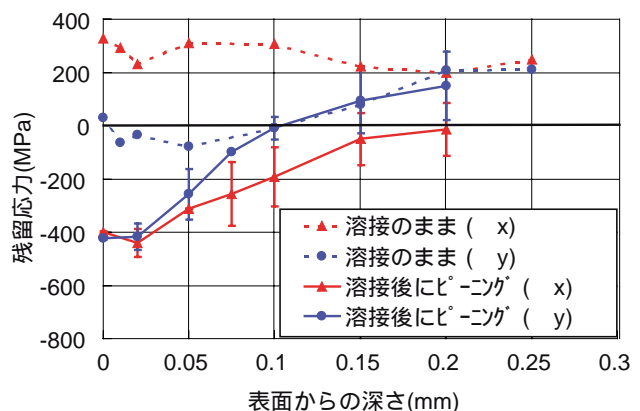


図3 SUS304の溶接のままと、溶接後にピーニングを行ったときのHAZにおける残留応力分布

るが、ショットピーニングにより表面に400 MPa程度の十分に高い圧縮残留応力が付与された。一方、 y においても、同程度の圧縮残留応力が表面に付与されていた。

3.2 SUS304の熱時効による残留応力変化

図4にSUS304母材の350 での熱時効による残留応力の変化を示す。表面の圧縮残留応力は、4380 hourの熱時効後においても降伏応力相当の十分に高い圧縮残留応力(235 MPa)が残存していたが、熱時効時間が長くなるのに伴い緩和する傾向を示した。ピーニングのままでは、深さ0.2mmまで十分な圧縮残留応力が付与されていたが、2616 hourの熱時効で0.2mmの位置ではほぼ0となり、4380 hourでは0.1mm深さでほぼ0となった。したがって、熱時効時間が長くなるのに伴い圧縮残留応力の領域は浅くなる傾向があると言える。

図5, 図6に、溶接後にピーニングを行ったSUS304のHAZについて、熱時効に伴う x , y の

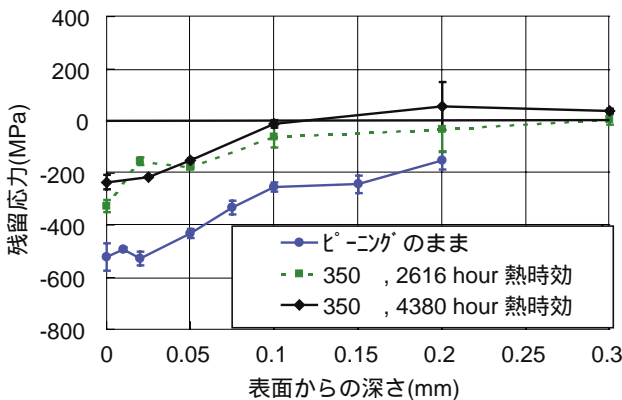


図4 ピーニングを行ったSUS304の350 熱時効による残留応力分布の変化

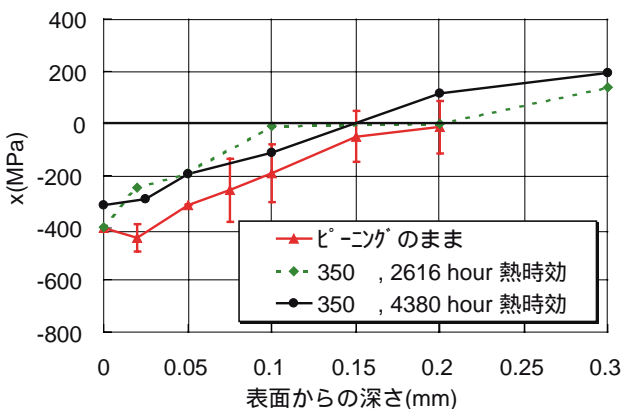


図5 ピーニングを受けたSUS304のHAZにおける350 熱時効による残留応力分布の変化 (x)

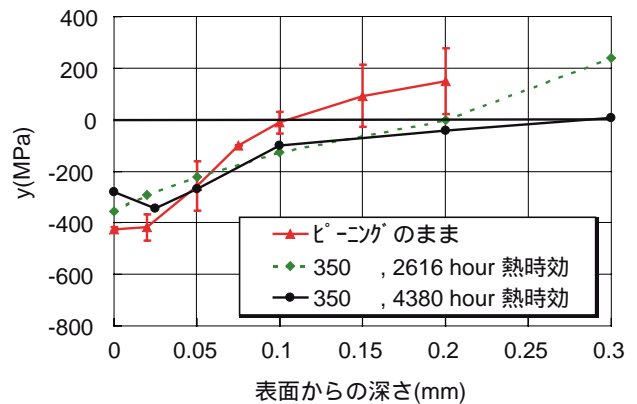


図6 ピーニングを受けたSUS304のHAZにおける350 熱時効による残留応力分布の変化 (y)

変化を示す。表面の残留応力は、4380 hourの熱時効後においても、降伏応力相当の十分に高い圧縮残留応力が残存していた($x=314$ MPa, $y=281$ MPa)が、熱時効により緩和する傾向が見られた。

3.3 NCF600の熱時効による残留応力変化

図7にNCF600の350 での熱時効による残留応力の変化を示す。ピーニングのまま及び熱時効後において、表面より深さ0.05 mmの部位が最も高い圧縮残留応力値を示した。4380 hourの熱時効においても、0.3 mm深さまで圧縮残留応力が残存し、表面は十分に高い値(187 MPa)になっていた、しかし、SUS304と同様に、熱時効により圧縮残留応力は緩和する傾向が見られた。

ニッケル基合金は溶接金属でSCCが発生する場合があることから、溶接金属の圧縮残留応力の残存度を評価する必要がある。ニッケル基合金溶接金属は、結晶粒が粗大化して結晶方位が母材より揃う傾向があるため、X線回折法による残留応力計測は困難だ

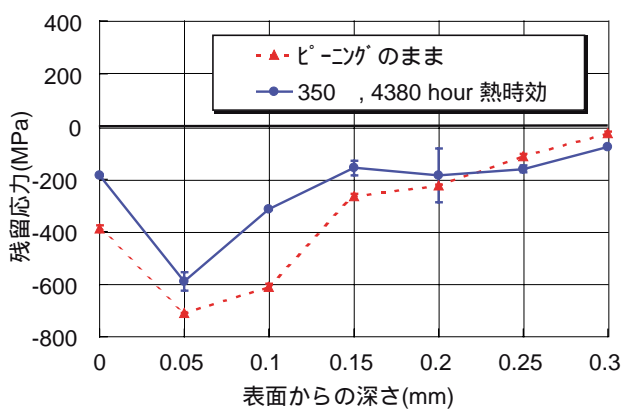


図7 ピーニングを行ったNCF600の350 熱時効による残留応力分布の変化

とされている。しかし、近年では計測を試みた例もあり⁵⁾、今後はこのような技術を用いて溶接金属の熱時効による圧縮残留応力の残存度を確認する必要がある。

3.4 残留応力が緩和する理由

SUS304 (母材部とHAZ) と NCF600 (母材部) は、350℃, 4380 hour の熱時効を受けても、十分に高い圧縮残留応力が残存したものの、絶対値は減少している。実機では本研究で実施した熱時効温度より低温度ではあるが、はるか長期間の運転が行われている。したがって、このような条件に曝されたときの圧縮残留応力の残存度を確認しておく必要がある。残留応力の緩和挙動は、以下の現象に起因するものと考えられる。

ピーニングのままから実機運転温度に昇温した時に生じる応力再配分

実機運転時に生じる微小クリープ変形

を支配する因子として、昇温時の熱ひずみや降伏応力の変化等が考えられる。小川らの行ったステンレス鋼とニッケル基合金の母材について的高温引張試験⁶⁾によると、350℃ 近傍での降伏応力は、SUS304 で室温の63%、NCF600 で90%近くに低減している。このような降伏応力の変化や熱ひずみが、応力再配分に影響を与えられられる。

350℃ における SUS304 のクリープ試験を行い、暫定的に求めたクリープ式を以下に示す。 $\dot{\epsilon}$ はクリープひずみ速度、 σ は負荷応力を示す。

$$\dot{\epsilon} = 9.849 \times 10^{-14} \times \sigma^{2.549} \quad (1)$$

このような微小なクリープ変形が生じ、残留応力の緩和が進行するものと考えられる。本式は、実機運転温度より若干高目の温度で、3600 hour 程度の短時間での試験で求めたクリープ式である。そのため、実機使用時の残留応力の残存度を評価するには、実機運転温度でさらに長時間で試験を行い、クリープ式を導出する必要がある。

上述の式(1)に起因する材料物性値が得られれば、長期間使用時の圧縮残留応力の残存度を FEM 解析により予測することができる。

4.....まとめ

ショットピーニングを受けた溶接部を含む SUS304 と NCF600 を実機運転温度より少し高目の 350℃ で熱時効し、残留応力の変化を調査した。以下に得られた結果を示す。

- (1) 4380 hour の熱時効を受けても表面では高い圧縮残留応力が残存していた。しかし、絶対値は減少しており、残留応力の緩和が生じていた。
- (2) 残留応力が緩和する要因に、実機運転温度に昇温した時に生じる応力再配分、実機運転中に生じる微小クリープ変形が考えられた。
- (3) 応力緩和が認められたことから、実機運転温度でさらに長期間使用した場合に圧縮残留応力がどの程度残存するか、確認しておく必要がある。

5.....今後の課題

圧縮残留応力の緩和について、残存度を評価することは、実機の高経年化による健全性を確認する上で必要不可欠である。本研究結果を踏まえ、今後の課題として以下が考えられる。

- (1) 実機でピーニングが適用されている SUS316L 鋼やニッケル基合金溶接金属についても、圧縮残留応力の残存度を確認しておく必要がある。
- (2) さらに長期間における熱時効、及び実機の起動・停止のような繰返し温度履歴に伴う残留応力の残存度について、試験データを蓄積する必要がある。
- (3) 長期間使用した場合の圧縮残留応力の残存度を FEM 解析により予測するため、実機運転温度の長期間でのクリープ試験データが必要である。また、ばらつきを考慮すると複数本の試験を行う必要があり、圧縮応力でのクリープ試験についても検討する必要がある。

参考文献

- 1) 鈴木 俊一ら, BWRにおける低炭素ステンレス鋼のSCC形態の評価, 圧力技術 Vol. 42 No. 4 (2004) 12-22
- 2) 青木 孝行ら, BWR環境下で長期間使用されたニッケル基合金の応力腐食割れ, 保全学 Vol. 4 No. 1 (2005) 34-41
- 3) 佐野 雄二ら, レーザピーニングによる原子炉構造物の応力腐食割れ対策, 溶接学会誌 Vol. 75 No. 7 (2006) 579-582
- 4) I.C. Noyan: Residual Stress - Measurement by Diffraction and Interpretation, Springer-Verlag, New York (1987) 206-207
- 5) 秋田 貢一ら, Ni基合金溶接金属のX線残留応力測定, 材料 Vol. 54 No.7 (2005) 710-716
- 6) 小川 和夫ら, 材料物性値およびFEM要素が溶接残留応力解析へ及ぼす影響, 溶接構造シンポジウム2006講演論文集 (2006) 705-712



西川 聡



中田志津雄



堀井行彦



古村一朗



山口篤憲

長期間使用した改良9Cr-1Mo鋼溶接金属の電気化学計測を用いたじん性評価

Electrochemical measurement for toughness evaluation on modified 9Cr-1Mo steel weld metals after long-term used

溶接・非破壊検査技術センター 西川 聡, 大北 茂
堀井 行彦

The weld metal of modified 9Cr-1Mo steels is most low toughness in its MIG weld joint. It is necessary to pay attention to the toughness of weld metal because of securing toughness of weld joint. The weld metal of precipitated Laves phase after long-term thermal aging decreased toughness. Peak of the current density (I_p) in the electrochemical measurement was appeared in the weld metals of precipitated a lot of large Laves phase. It seemed that appearance of I_p was caused by the dissolution of the Laves phase. The good correlation between toughness and I_p was observed. Therefore, it can be said that toughness of the weld metals suppose to be predict using I_p of electrochemical measurement.

Keywords: : modified 9Cr-1Mo steel, Toughness, Laves phase, Electrochemical measurement, Peak of current density

1.....目 的

改良9Cr-1Mo鋼は耐クリープ特性に優れた材料であるため、超々臨界圧プラントのスーパーヒータや主蒸気系配管等に広く用いられている。前報では、改良9Cr-1Mo鋼のMIG溶接金属についてじん性の低下と回復を把握し、金属組織的要因を調査した¹⁾。その結果、運転温度近傍である600℃の長期間の熱時効でLaves相が析出してじん性が低下するが、その後の750℃の熱処理でLaves相が母相に固溶して、じん性が熱時効前と同等に回復することがわかった。したがって、このようなじん性の低下と回復に起因するLaves相の析出量を非破壊的に簡易評価することができれば、実機の経年化対策上有効な手法となる。

Cr系鋼の材質劣化評価について、電気化学計測を用いた報告がある²⁾³⁾ことから、本研究では電気化学計測を用いた精度の良いじん性の簡易評価手法を検討した。

2.....実験方法

2.1 溶接継手の製作と熱処理

表1に母材と溶接材料の化学成分を示す。Nb, Vを含む改良9Cr-1Mo鋼を用いた。板厚35mm, 外径318.5mm, 長さ1000mmの突合せ溶接継手を製作した。図1に溶接金属の積層図を示す。予熱・パス間温度は200～300℃として、3パス目まではTIG溶接(溶接入熱0.85～2.02 kJ/mm), それ以降のパスはAr-5%CO₂をシールドガスに用いたMIG溶接(溶接入熱1.17～2.93 kJ/mm)とした。なお、溶接金属の評価はMIG溶接金属部とした。図2に示すように750℃, 1.5 hourでの溶接後熱処理(PWHT)と実機運転温度を模擬した600℃の熱時効を行った。そして、熱時効による材質劣化を回復させる目的で、1年の熱時効後にPWHTと同じ熱処理(HT)を付与した。

表1 材料の化学成分 (mass%)

材料	C	Si	Mn	Cr	Mo	Nb	V
母材	0.11	0.24	0.46	8.81	0.97	0.07	0.19
溶接ワイヤ	0.08	0.27	1.29	8.86	0.98	0.03	0.19

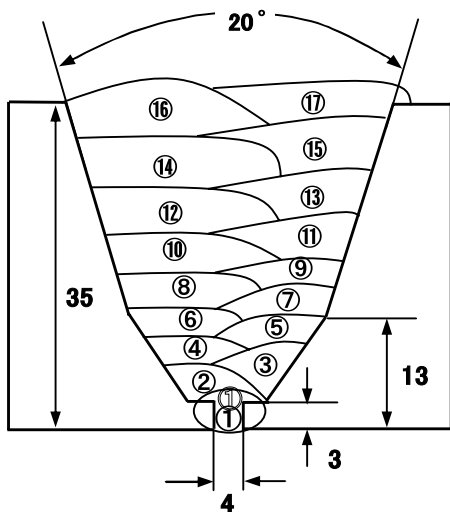


図1 製作した溶接継手の積層図

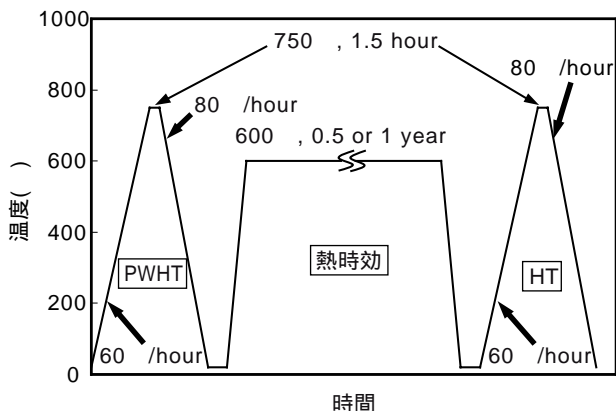


図2 溶接金属の温度履歴

2.2 シャルピー衝撃試験

図2で示した熱処理と熱時効を受けた溶接金属について2mmV ノッチシャルピー衝撃試験片を作製し、30 で衝撃試験を行った。なお、衝撃試験片の採取位置は板厚中央として、ビード幅中央がノッチ部となるように採取した。

2.3 電気化学計測

2.1節で製作した溶接金属の最終パス、すなわち17パス目より、ビード表面を評価面として電気化学計測試験片を作製した。最終パスより採取した試験片に銅線をはんだ付けし、評価面のみが露出するようにアクリル樹脂で埋め込みを行い、試料電極とした。試料は1 μmまでのダイヤモンドペーストまで湿式研磨して、計測時の隙間腐食を防止するため、計測面の周囲をパラフィンにより被覆した後、万能投影機を用いて計測面積を測定した。

電解液は5% H_2SO_4 水溶液を用いた。500mlの水溶液を 30 ± 1 で25ml/sの流量で1 hour以上 Ar脱気を行い、試験溶液とした。飽和カロメル電極を照合電極として、自然電位からアノード方向に電位掃引速度1.67 mV/sで0.5 V vs SCEまで掃引させ、得られた電流値を計測面積で除して電流密度とした。なお、計測中は電解槽の上部から Arを流し続け、試験溶液は毎回交換した。

2.4 金属組織観察

衝撃試験片の破面近傍から薄膜試料と抽出レプリカを作製し、加速電圧200kVの透過型電子顕微鏡(TEM)で組織観察を行い、EDS分析と電子線回折により析出物を同定した。また、電界放出型走査電子顕微鏡(FE-SEM)で電気化学計測試験片表面を観察して、析出物をEDX分析により調査した。そして、TEM観察におけるEDS分析結果を参考にして析出物を推定した。

3.....実験結果および考察

3.1 溶接継手の衝撃吸収エネルギー

図3に熱処理と熱時効による溶接金属の衝撃吸収エネルギーの変化を示す。溶接のままでは $vE_{30} \text{ AV}=15 \text{ J}$ であるが、PWHTにより $vE_{30} \text{ AV}=134 \text{ J}$ に上昇する。そして、熱時効を受けると衝撃吸収エネルギーが半年後で $vE_{30} \text{ AV}=62 \text{ J}$ 、1年後で $vE_{30} \text{ AV}=53 \text{ J}$ となり、熱時効時間が長くなるのに伴いじん性は低下する傾向を示した。しかし、1年の熱時効後にPWHTと同じ熱処理(HT)を付与することで、衝撃吸収エネルギーがPWHTのままと同部

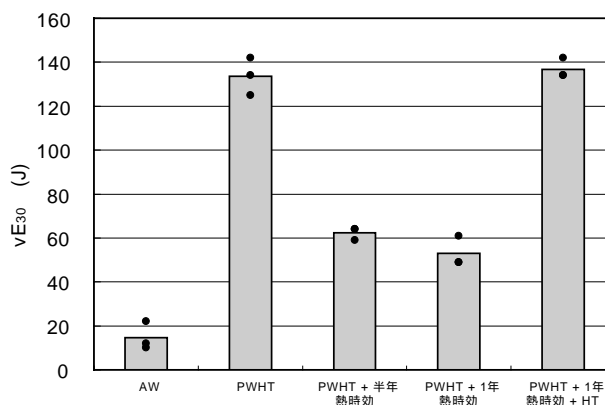


図3 溶接金属のPWHT,熱時効,HTによる衝撃吸収エネルギーの変化

等の vE_{30} $AV=137$ Jに回復した。

3.2 衝撃吸収エネルギーと析出物の関係

表 2 に TEM で観察された析出物を示す。PWHT+1年熱時効材とPWHT+1年熱時効+HT材において、母材でじん性低下の一因とされる Laves 相の析出が認められた。ただし、PWHT+1年熱時効材では $700 \mu m^2$ 当り 47 個の数密度で、長さが $1 \mu m$ 以上の粗大な Laves 相が多く析出していたのに対し、PWHT+1年熱時効+HT材で観察された Laves 相は、長さが $0.7 \mu m$ 以下で、かつ $700 \mu m^2$ 当り 3 個しか観察されず、PWHT+1年熱時効材と比較して寸法及び数密度ともに小さくなっていた。したがって、PWHTと同じ熱処理を受けることで析出していたほ

表 2 TEM 観察で同定された溶接金属中の析出物

PWHT	PWHT+1年熱時効	PWHT+1年熱時効+HT
MnSiO ₃	Laves phase MnSiO ₃	Laves phase MnSiO ₃
M ₂₃ C ₆	M ₂₃ C ₆	M ₂₃ C ₆
V(Cr,Nb)CN	V(Cr,Nb)CN	V(Cr,Nb)CN

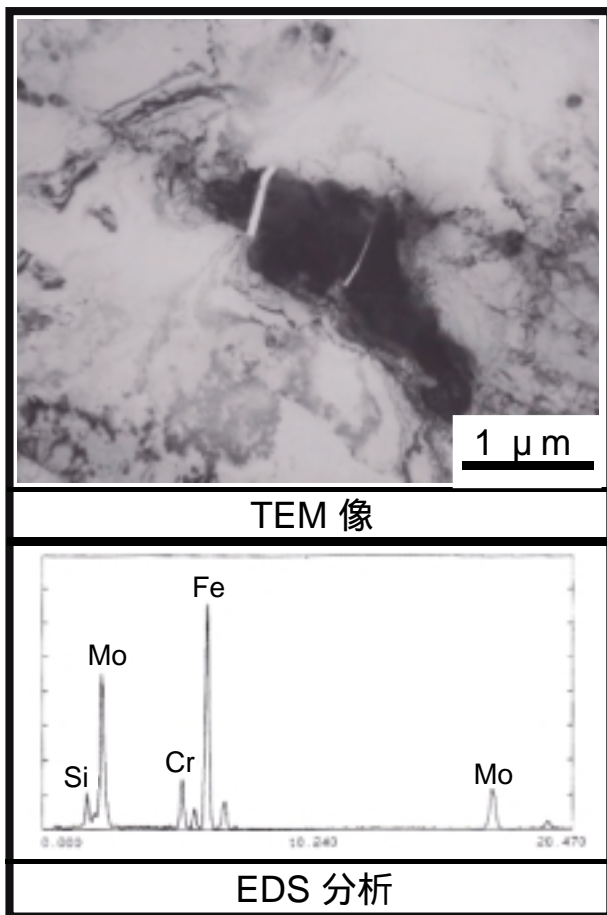


図 4 PWHT+1年熱時効材で観察されたき裂が生じた Laves 相

とんどの Laves 相が母相に固溶するため、じん性が回復したと考えられる。

図 4 に PWHT+1年熱時効材の衝撃試験片破面近傍で観察された Laves 相を示す。粗大化した Laves 相には、き裂を生じたものが観察された。駒崎らは²⁾ W 強化型 9%Cr 鋼の母材で、低温引張試験後の試験片を観察しており、長さが $1 \mu m$ 程度に粗大化した Laves 相が割れているのを確認している。このように、粗大化した Laves 相は母相や他の析出物と比較して割れ易く脆いため、衝撃吸収エネルギーが低下したものと考えられる。

3.3 Laves 相の析出によるアノード分極時の電流密度の変化

3.2 節より、改良 9Cr-1Mo 鋼の溶接金属が熱時効によりじん性が低下するのは、 $1 \mu m$ 以上に粗大化した Laves 相の析出によると言える。したがって、Laves 相の析出を非破壊的に簡易評価できれば、じん性を評価できる可能性がある。実機で簡易評価を適用する場合は最終層を用いることが想定されるため、最終パスから評価試験片を作製した。なお、FE-SEM 観察より、Laves 相の寸法や数密度は最終パスとシャルピー衝撃試験片を採取した板厚中心部ではほぼ同じであることを確認している。

図 5 に PWHT 後に熱時効や HT を行った最終パス溶接金属の電気化学計測結果を示す。自然電位は条件によらずほぼ同じとなり、 -0.52 V vs SCE であった。自然電位からアノード方向に電位を掃引させると、 0.2 V vs SCE 近傍までの電流密度の挙動はほぼ同じであるが、それよりアノード側の電位では、熱時効や HT の有無で電流密度の挙動に変化が生じた。Laves 相が多数析出していた PWHT+1年熱時効材では電流密度のピークが生じ、Laves 相が観察されなかった PWHT 材、及び Laves 相が少量の PWHT+1年熱時効+HT 材では明瞭な電流密度のピークが認められなかった。したがって、 0.2 V vs SCE 以上で見られた電流密度のピークは、Laves 相の溶解で生じたと考えられるため、PWHT+1年熱時効材を電流密度のピークが見られた 0.35 V vs SCE の定電位に 3.6 ks 保持した後に表面観察を行い、Laves 相の溶解が生じているか確認した。図 6 に PWHT+1年熱時効材の定電位保持後の表面観察結果を示す。所々に黒

点で示される1 μ m以上の寸法の穴が観察された。視野中の残存析出物についてEDX分析を行った結果、M₂₃C₆と思われるCrのピークが高い析出物が観察されたが、図4のEDS分析に示したMoのピークがCrより高い析出物は観察されなかった。したがって、観察された穴はLaves相が溶解した痕跡だと考えられる。今回行った電気化学計測において0.2 V vs SCE以上で生じた電流密度のピークはLaves相が溶解したことによると考えられることから、本手法によりLaves相の析出量を評価できるものと考えられる。駒崎らは²⁾ W強化型9Cr鋼について1N-KOH水溶液を用いて電気化学計測を行い、得られたピーク電流密度よりLaves相とM₂₃C₆を定量評価できることを報告している。しかし、ピーク電流密度にはM₂₃C₆の溶解も含まれるため、例えばM₂₃C₆の析出量が材料の化学成分や熱処理条件等の違いで異なる場

合はLaves相の析出量を評価することが困難となる。しかし、本溶液条件ではLaves相が溶解してM₂₃C₆は残存していることを確認しており、Laves相の析出量をより高精度に検出評価できるものと考えられる。一般に水溶液中における酸化還元反応は、水素イオン濃度(pH)と電位に影響されることが多い。駒崎らが用いている溶液は強塩基溶液で、本研究は強酸溶液を用いているために、両溶液でpHが大きく異なる。このことがM₂₃C₆の溶解が両溶液で異なった理由だと思われる。

3.4 電気化学計測によるじん性評価の提案

図5に示した0.2 V vs SCE以上の領域で生じた電流密度のピーク値I_pと衝撃吸収エネルギーの関係を図7に示す。なお、ピークを生じない場合は0とした。I_pの増加で衝撃吸収エネルギーは低下する傾向を示し、両者に相関が見られた。したがって、予め求めたI_pと衝撃吸収エネルギーの関係が、じん性を評価する上での特性曲線と位置付けることができる。そのため、例えば同溶接金属を有する改良9Cr-1Mo鋼の構造物において、溶接金属のI_pが0.15 mA/cm²となった場合は、本特性曲線を参照することでvE₃₀がおよそ70 Jだと推定できる。

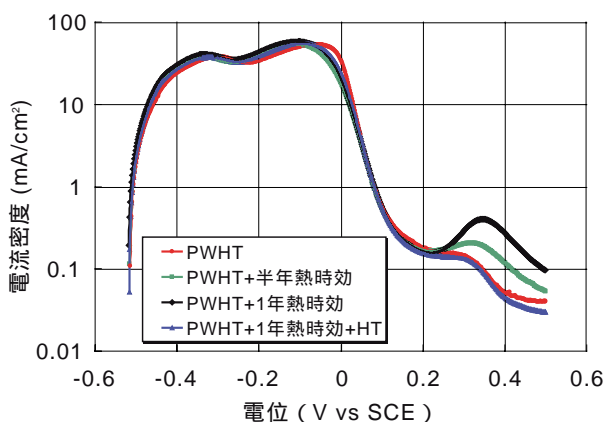


図5 溶接金属のアノード分極曲線(5% H₂SO₄)

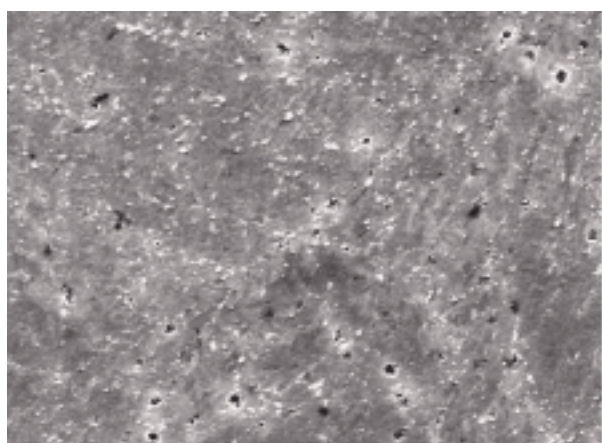


図6 PWHT+1年熱時効材を0.35 V vs SCEに1 hour保持した後のSEM観察結果(5% H₂SO₄)

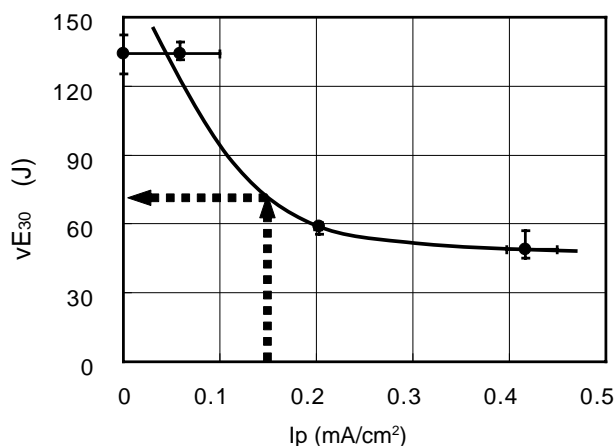


図7 I_p と 30 での衝撃吸収エネルギーの関係

4.....まとめ

本研究はPWHT (750 , 1.5 hour) を受けた改良9Cr-1Mo鋼 MIG 溶接金属に対して、実機運転温度を模擬した600 での熱時効、及び熱時効後にPWHTと同じ熱処理を行い、5% H₂SO₄水溶液を用いた電気化学計測を適用して、じん性の簡易評価方法につい

て検討を行った。以下に得られた結果をまとめる。

- (1) 熱時効時間の増加に伴いじん性は低下し、1年の熱時効で衝撃吸収エネルギーは $vE_{30AV}=53\text{ J}$ になった。しかし、再びPWHTと同じ条件で熱処理を行うと、PWHTのままと同等の $vE_{30AV}=137\text{ J}$ に回復した。1年熱時効材は長さが $1\text{ }\mu\text{ m}$ 以上の粗大なLaves相が多数析出していたが、回復材ではほとんどのLaves相が消失していた。そのため、Laves相の析出と消失が衝撃吸収エネルギーの低下と回復の一因だと考えられた。
- (2) 熱時効材は0.2 V vs SCE以上の電位で電流密度のピークが生じたが、PWHTのままや熱時効後にPWHTと同じ熱処理を行ったものでは電流密度の明瞭なピークは生じなかった。電流密度のピークはLaves相の溶解によると考えられることから、Laves相の析出を本電気化学計測で簡易評価できるものと思われる。
- (3) 電流密度のピーク値 (I_p) と衝撃吸収エネルギーとは相関が見られた。そのため、予め I_p と衝撃吸収エネルギーの特性曲線を求めておき、長期間使用された本溶接金属の I_p を特性曲線に当てはめることで、衝撃吸収エネルギーを推定することができる。

参考文献

- 1) 西川 聡, 堀井 行彦, 長谷川 忠之, 古村 一郎: 改良9Cr-1Mo鋼溶接金属の長時間熱時効によるじん性低下と回復, 技術レビュー Vol. 3 (2007) 26-30
- 2) 駒崎 慎一, 岸 繁男, 庄子 哲雄, 千葉 秀樹, 鈴木 康史: W強化型9%Crフェライト系耐熱鋼の熱時効ぜい化と電気化学的手法によるその評価, 材料 Vol. 49, No. 8 (2000) 919-926
- 3) 大和 丈浩, 斎藤 潔, 小早川 紘一, 佐藤 祐一: 経年劣化した低合金鋼の2,4-ジニトロ安息香酸溶液中におけるアノード分極挙動, 電気化学 Vol. 59 No. 11 (1991) 958-960



西川 聡



大北 茂



堀井行彦

PD研修の内容とその実績について

Results of PD training at the PD Training Center in JAPEIC

溶接・非破壊検査技術センター 米山 弘志，杉林 卓也

The 1st PD qualification examination in Japan started on March 6, 2006. The PD training center has two functions in the PD system. One is training for the personnel who could not pass at the first examination and would like to take re-examination within 30 days. The other is annual training for license renewal. This paper presents how the PD training has been performed in Japan Power Engineering and Inspection Corporation (JAPEIC).

Keywords: Performance Demonstration, Ultrasonic Testing, SCC, Defect Sizing

1.....まえがき

平成18年3月から、NDIS0603：2005「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」の附属書によるPD資格試験が開始された。当協会は、NDIS0603によるPD研修機関として活動すべく準備を始め、同年2月にNDEセンターにPD研修センターを付設した。さらに、PD認証機関発行の「PD研修プログラム審査基準」及び「PD研修要件に関する基準」の要求事項に合致した再試験用及び更新用のPD研修プログラムを作成し、PD認証機関の承認を受けて活動を開始した。

同年3月から、PD資格試験不合格者が30日以内に再受験する場合に受講が義務付けられている再試験用PD研修を開始し、さらに平成19年3月からは、PD認証更新のためのPD研修が開始された。今回は、当協会が実施するPD研修内容の紹介とともに、これまでに実施した再試験用PD研修及び更新用PD研修の成果について報告する。

2.....PD研修の種類

本協会が実施しているPD研修の種類を以下に示す。

2.1 再試験用PD研修

NDIS0603附属書によるPD資格試験に不合格となった後、30日未満で再試験を受けようとする超音波探傷技術者（UT技術者）が、再試験申請前に受講するPD研修であり、PD資格試験合格を目的としている。したがって、受講者の測定値がPD資格試験合格基準の範囲内に収まることを研修の成果目標としている。

2.2 更新用PD研修

NDIS0603附属書により認証されたPD技術者が、PD認証取得後のき裂高さ測定に関わる技量維持の確認のために行われ、かつ更新申請までに受講が義務付けられているPD研修であり、PD資格試験合格基準内でのSCC深さ測定技術に関する技量の維持確認を目的としている。

なお、成果目標である「PD資格試験合格基準の範囲内」は、両研修ともにPD資格試験より若干厳しく、最大誤差が $\pm 3.2\text{mm}$ 以内としている。

3.....再試験用PD研修の内容及び結果

3.1 再試験用PD研修内容

受講者は、PD資格試験の受験時と同じ手順書及び超音波探傷装置を持参し、図1に示す研修実施方法により研修を受ける。使用するPD研修用試験体は、公称150A肉厚10mm，350A肉厚25mm，600A

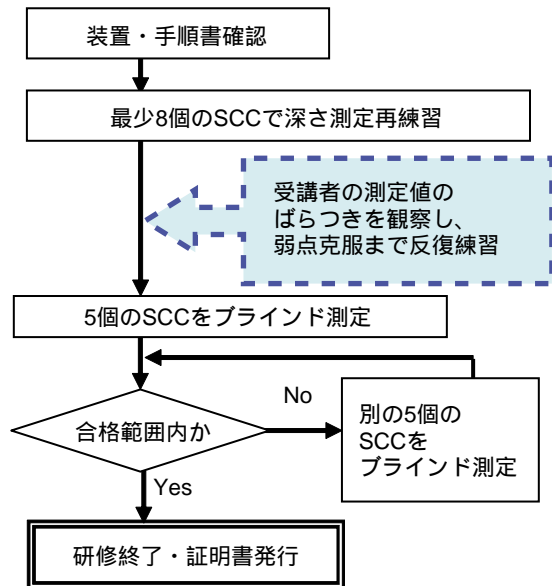


図1 再試験PD研修の進め方

肉厚 35mm の 3 種類であり，実習時と技量確認時（ブラインド）で使用する SCC は別のものとし，その数および SCC 深さは，次の表 1 に示す配分としている。

なお，研修時間は，実習 16 時間（2 日間），ブラインドによる技量確認を 16 時間（2 日間）とするが，PD 資格試験の合格基準内に収まることが確認された場合には，32 時間より少ない時間でもよい。

3.2 再試験用 PD 研修結果

これまでに当協会の再試験用 PD 研修を受講した 6 名の，研修開始時及び研修終了時における RMSE（Root Mean Square Error）を 図 2 に示す。図中，RMSE が 3.2mm を超えた範囲は PD 資格試験不合格範囲である。また，真とする深さに対する測定値の過大評価及び過小評価について，研修開始時及び研修終了時の最大誤差として 図 3 に示す。図中，最大誤差が - 4.4mm を超えた範囲及び + 10mm を超えた範囲は，PD 資格試験不合格範囲である。

研修開始時の RMSE 及び最大誤差は，受講生によりそれぞれ特徴がある。研修は，まず SCC 深さ測定の実習から開始される。ここでは，SCC 深さが大，中，小の試験体を最低 1 個ずつ混在させて出題し，受講生の測定値のばらつき具合を観察することにより，実習のやり方をおおまかに以下のように区別する。

図 4 のばらつき領域図において，領域 A の

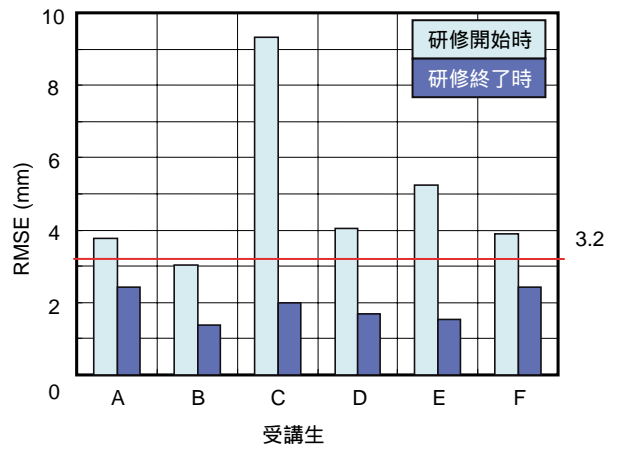


図2 再試験用PD研修の開始時と終了時における RMSE の比較

表 1 再試験用 PD 研修に用いる SCC 深さの種類と個数

SCC 深さ h (配管公称肉厚%)	実習時の 最小個数	技量確認時の 最小個数
$0 < h \leq 30\%$	2 個	1 個
$30 < h \leq 60\%$	2 個	1 個
$60 < h < 100\%$	2 個	1 個
深い SCC (15mm 以上)	1 個	1 個
SCC 先端が溶接金属内	1 個	1 個

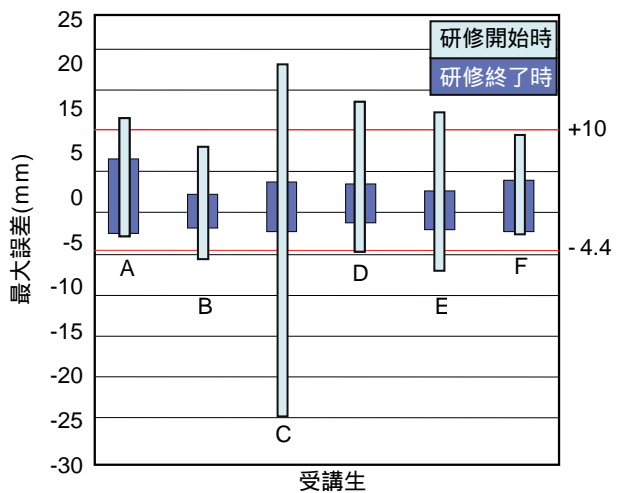


図3 再試験用PD研修の開始時と終了時の最大誤差の比較

+10mm を超える部分及び領域 B の - 4.4mm を超える部分に測定値が多く見られる受講生は，技量が不十分であるため，SCC 深さが大，中，小の試験体を追加し，多くの試験体での実習により技量の向上を図る。

図 4 のばらつき領域図において，領域 A にはあるが，ほとんどのばらつきが +10mm 以下の部分にある受講生は，き裂先端のエコーと溶接金属内ノイズ（林状エコー）あるいは母材・溶接部境界面エコーとの識別が不得意と判断され

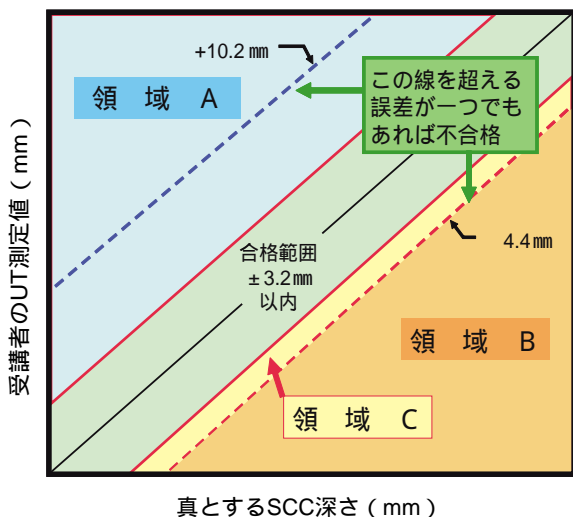


図4 受講生のSCC深さ測定値のばらつき領域

る。SCCは熱影響部（HAZ）で発生し、SUS304では溶接部境界近傍に到達した時点で主に溶接部境界に沿ってHAZを進展していき、SUS316では溶接部境界に到達した時点で主に溶接金属内に進展していく傾向がある。試験体のSCCは溶接金属内に進展しているかHAZを進展しているか不明なため、このような誤差を生じると考えられる。したがって、このような受講生には、深いSCC及び溶接金属内に進展したSCCの試験体を中心に実習してもらおう。

又、もう一つの理由として、過小評価による不合格を恐れて、測定値を大きく読むことがあげられる。これについては、この研修で多くの試験体により経験を積むことで解消可能と考える。

ほとんどのばらつきが図4の領域B（- 4.4mm 超え）の部分にある受講生は、SCCが母材から溶接金属に入る箇所や屈折・枝分かれ箇所において、比較的高いエコー高さが得られることから、このエコーを端部エコーと誤認して短く読んでしまうと思われる。

又、疲労き裂に比べてSCCのエコー高さは低いことや、試験体によっては若干減衰が大きいことにもかわらず全て5MHz・同感度で測定する場合もある。このような受講生には、中程度の深さのSCC及び溶接金属内に進展したSCCの試験体と減衰が無視できない試験体を中心に実習してもらおう。

図4の領域Cに多くの測定値が集まる受講生は、

SCCが疲労き裂のような単純な半楕円状のき裂ではないことを再認識してもらい、単に最大エコー高さ位置だけの端部エコーを求めるのではなく、左右走査と若干の首振り走査を加えて、慎重に端部エコーの最大値を探す練習をしてもらう。

以上述べた実習を進め、測定値の最大誤差が ± 3.2 以内に収まれば、次に5本セットのブラインド測定を実施する。再試験PD研修は、とにかく数多くの試験体を測定することにより、自分の弱点を認識し修正することが必要と考え、実施している。

前述のように、これまでに当協会の再試験用PD研修を受講した6名の、研修開始時及び研修終了時におけるRMSE（Root Mean Square Error）と最大誤差を図2及び図3に示したが、研修終了時には、受講生全員の技量がPD試験の合格基準内に収まっており、著しい技量向上が見られた。これは、受講生の技量を見るために、実習時に1つずつ深さ測定値の誤差をチェックし、合格範囲に入るまで繰り返し（やり直し）測定を行うことで、技量向上が図れたためと考えている。なお、全員が3日目で技量確認を終えたが、測定経験を積むために最終日まで研修を続けた。この成果を持って再受験合格を疑わずに送り出したが、PDセンターの発表によれば、残念ながら全員というわけには行かなかった。この原

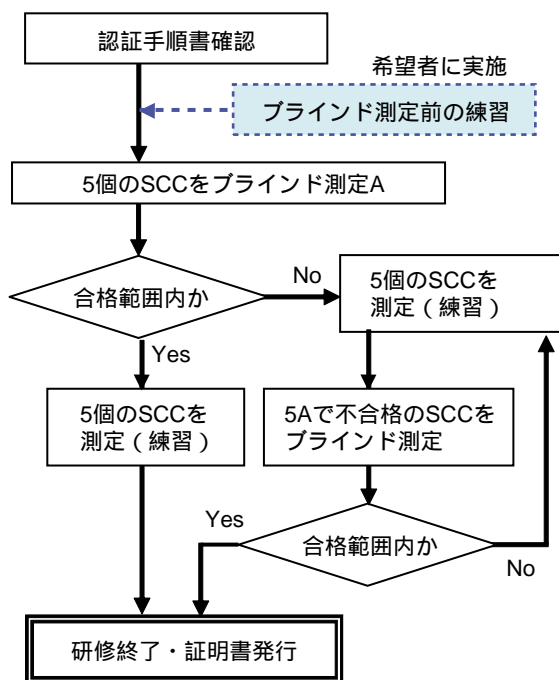


図5 更新用PD研修の進め方

表2 更新試験用PD研修に用いる SCC 深さの種類と個数

SCC 深さ h (配管公称肉厚%)	実習時の 最小個数	技量確認時 の最小個数
$0 < h \leq 30\%$	1個	1個
$30 < h \leq 60\%$	1個	1個
$60 < h < 100\%$	2個	1個
深い SCC (15mm 以上)	1個	1個
SCC 先端が溶接金属内	1個	1個

困として、クリティカルミスコール(- 4.4mm 超え)が考えられ、更なる対策が今後必要である。

4.....更新用PD研修

4.1 更新用PD研修の内容

更新用PD研修は、PD認証技術者の技量維持確認のために、1年毎の更新時に受講が義務付けられた研修である。したがって、受講者の測定値がPD資格試験合格基準の範囲内に収まることを研修の成果目標としている。

受講者は、PD認証を受けた手順書及び超音波探傷装置で研修を受ける。更新用PD研修で使用する試験体の種類及びSCC深さ分布を表2に示す。研修時間は原則24時間であり、5個のブラインド測定値及び5個以上の練習における測定値がPD資格試験の合格基準内に収まった時点で終了し、PD研修センターは技量維持確認を証明する研修証明書を発行する。なお、受講生の希望により、ブラインド測定に先立ち、練習から始めることもできる。更新用PD研修の進め方を図5に示す。

4.2 更新用PD研修結果

これまで8名のPD認証者が更新研修を受講したが、7名が練習を5本以上行った後に1回目のブラインド測定を行った。その結果、図6に示すように、8名中3名が1回目で合格基準内に収まらず、RMSEが3.2mmを超えた人は2名、最大誤差が - 4.4mmを超えた人は3名であった。しかしながら、3名とも再度の練習後、2回目でPD資格試験合格範囲に収まった。このことから、PD認証者であっても、日ごとの訓練が必要であること、実際のSCCと同等のき裂を用いた深さ測定訓練が重要であることを改めて認

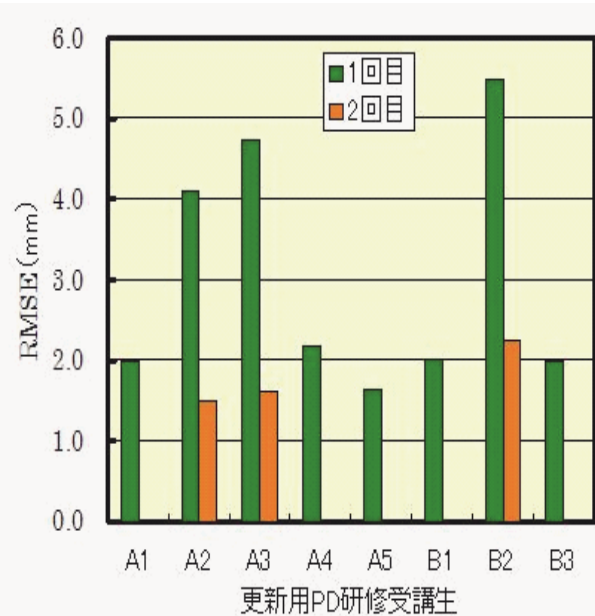


図6 更新用PD研修の結果

識した。

5.....まとめ

再試験用PD研修の受講により、技量は明確に向上したものの、受講者の再試験合格率が100%とはならず、技術の習得がそう容易では無いことが判明した。今後は、これまで以上に受講者の技量に応じた、測定精度向上のための訓練を行う必要があると考える。

また、PD資格取得後も、SCCと同等のき裂を用いた深さ測定練習が必要であることが再認識された。

今後は、現在実施している再試験用及び更新用PD研修だけではなく、初心者や不慣れな人を対象とした研修、試験直前練習、装置や手順書の妥当性確認コースなど、多くの練習・訓練のための研修コースを充実させ、き裂の深さ測定の精度向上及びPD制度への貢献を図っていく。



米山弘志



杉林卓也

米国ボイラー規格の設計マージン規定について

Short Note on the Design Margin of ASME Power Boiler Code

規格基準室 吉田 和夫
西日本支部 大石 勇一

ASME boiler code of 1914 edition was published in 1915, and many editions were, hereafter, issued and the code developed into the Boiler and Pressure Vessel Code which includes the construction code for the nuclear power component at present. According to the introductory of the boiler code of 1914 edition, the reason why the boiler code was set forth in ASME are, (1) Many human lives were lost by the serious accidents of the boilers installed in the States., (2) Boilers needed the construction code which defined the safety rules, that is, materials, design, fabrication, examination, test, installation and stamp. The contents of the boiler code were based on the Massachusetts rule of 1909 amendment. The boiler rule regulated in the Commonwealth of Massachusetts which was an industrial accumulation area was constituted in the viewpoint which prevents the failure of rivet-boilers in service, and took the design margin to a rivet into consideration. The establishment of the design margin and the degree of the margin are matters which are based on prevention of the failure modes expected and damage by the mode, and they are the so-called fundamentals of a design rule. In this short note, the progress concerning the design margin of the boiler code is reviewed, and the design margin which is to the foundations of code engineering is examined.

Keywords: : Design Margin, Ductile Fracture, Brittle Fracture, Graphitization, Creep Damage, Internal Pressure Design, Maximum Allowable Working Pressure, Allowable Tensile Stress, Design Rule

1.....まえがき

米国 ASME ボイラー規格 (Boiler Code) は 1915 年に 1914 Edition (1914 年版) が発行されて以降, 数多くの Edition を重ね, 現在では発電用原子力設備機器の設計建設規格を含む Boiler and Pressure Vessel Code に発展した。1914 年版のボイラー規格の序文によれば, 米国内に設置されたボイラーの重大 (破壊) 事故によって, 多くの人命が失われ, これら事故を克服した条件の下で, 動力用ボイラーを建設・据付する必要性に迫られたことが, ボイラー規格を制定した理由であるとのこと。制定されたボイラー規格の規定内容は, 1907 年に制定されたマサチューセッツ州ボイラー規則の 1909 年アmend版に概ね基づいたものであった。工業集積地域であったマサチューセッツ州で制定されたボイラー規則は,

リベットボイラーの運転中の破壊を防止する観点で作成され, リベットに対する設計マージンを考慮するものであった。設計マージンの導入及び設計マージンの大きさの設定は, 予想される損傷モード及びそのモードによる損傷の防止に基づくものであり, 設計規則の基本に係る事項である。本小文では, 米国発電用ボイラーの設計マージンの設定に係る経過をレビューし, 規格開発の基本となる設計マージンについて検討するものである。本小文で, 設計マージンと称するものは, ASME ボイラー規格 1914 年版で云う「Factor of Safety」であり, ボイラー及び圧力容器に関する国際性能規定規格である ISO 規格 (ISO16528) で規定の「Design Margin」と同義のものである。

2.....ボイラー破裂事故を契機として

2.1 ボイラー破裂事故と法規制定

世界初のボイラー破裂事故として記録のものは、1815年の英国での事例であり、ボイラー蒸気圧力が50 psiを超えてから発生したものであった。この事故を契機として、英米にボイラー事故調査委員会が設置され、特に米国フィラデルフィア市議会はペンシルベニア州議会に対し、ボイラー強度試験、安全弁設置、月例検査を主体とした法律の制定を提案した。しかしながら、当時においては特別な規制が制定されるには至らなかった。英米でボイラー検査に関して最も先行した事例は、蒸気船検査であった。この検査が実施されたものの、米国で蒸気船検査法(Steamboat Act)が制定されたのは1852年であった。ボイラー破裂法(Boiler Explosion Act)に関しては、英国で1982年に制定されたものの、米国ではマサチューセッツ州での制定の1908年まで待たねばならなかった。

2.2 ボイラー破裂事故の分析結果

1880年において米国に設置されたボイラー総数は72,304基であり、同年におけるボイラー破裂事故件数は159件であった。破裂事故率の大小は問題ではなく、これらの事故が多くの人命を奪ったことが問題であった。1885年のボイラー破裂事故155件の内訳を表1に示す²⁾が、産業用動力ボイラーで事故が多発したことが分かる。1879年から1930年の間のボイラー破裂事故件数の推移を図1に示す²⁾が、この破裂事故の増加は、図2に示すとおり1870年以降のボイラー蒸気圧力の上昇に対応するものであることが分かる。これらのボイラー破裂事故多発への対応として、米国ボイラー製造者協会(ABMA)が1889年に設立されたと同時に、各州でのボイラー検査の拡大によるボイラー安全性の向上があったため、1900年前後をピークとしたボイラー破裂事故件数は徐々に低下した。しかしながら、ボイラー破裂事故件数の確実な低下は、ボイラー規則、ASMEボイラー規格の制定まで待たねばならなかった。

2.3 ASMEボイラー規格1914年版の制定

1914年版は全114頁(別に、索引28頁)の規格として制定された。規格は2部構成であり、Part 1は

新設ボイラー規格であり、Part 2は既設ボイラー規格であった。また、1914年版規格には20頁の付録(Appendix)が含まれ、リベット継手の効率の計算方法、安全弁の容量、標準フランジ継手の寸法及び溶融プラグの要求他が規定された。Part 1はSec. 1及びSec. 2から構成され、前者は動力用ボイラー、後者は低圧加熱ボイラーを各々規定した。このSec. 1が現行のSec. I規格に発展し、Sec. 2が現行のSec. IV規格に発展した。

ボイラー規格の発行後、1815年6月にボイラー規格委員会が開催され、コードスタンプの方法他に結論が出された。加えて、規格 Interpretation の方法が議論され、その回答に対してCase番号を付すことを決定し、10件のCaseが審議された。また、1916年に纏められたボイラー規格に対する公衆意見及び1917年9月までに発行された172件のCaseをボイラー規格に反映する必要から、1918年に最初の改訂版が発行された。1918年版に引続くボイラー規格の改訂は1924年まで待たなければならなかったが、規格の適時的な改訂のニーズから、1923年に規格委員会は定期的な規格Editionの発行を決定した。

表1 米国内ボイラー破裂事故件数(1885年)

件数	詳細
33	製材所(ノコギリ動力)
20	鉱山、油井、炭鉱
18	蒸留業
16	蒸気船
16	巻上げ機、農業用ボイラー
10	蒸気機関車
10	圧延機、製鉄機械
10	製粉機械、エレベーター
3	製紙機械
1	繊維機械
18	その他

3.....ボイラー規格の設計マージン

3.1 ボイラー破裂事故と法規

1914年版のボイラー規格は内圧による設計を規定して(設計荷重として内圧を考慮)、損傷モードを延性的な破壊としていた。延性的な破壊を防止するために、引張強さに対する設計マージンを5とした。設計マージンを5とした理由は、蒸気機関車ボイラーの破裂事故件数と静置型動力ボイラーの破裂事故件数の比較から、動力ボイラーでは前者より

も大きな設計マージンを設定する必要があると判断したためである。当時の蒸気機関車ボイラーの設計マージンは4であったことから、動力用ボイラーの設計マージンは5とされた。設計マージンに関連する記述として、1914年版の緒言には次が指摘されている。

- (a) 動力用ボイラー製造メーカーは広範にわたり、十分な技術的管理下でボイラー製造がされる保証がない。
- (b) 蒸気機関車ボイラーの運転者に比して、動力用ボイラーの運転者の技術的能力が高い保証がない。
- (c) 動力用ボイラーの設計条件が適切に決定された上で、それが製作される保証がない。
- (d) 蒸気機関車ボイラーには法定月例検査があるが、動力用ボイラーには規定がない。

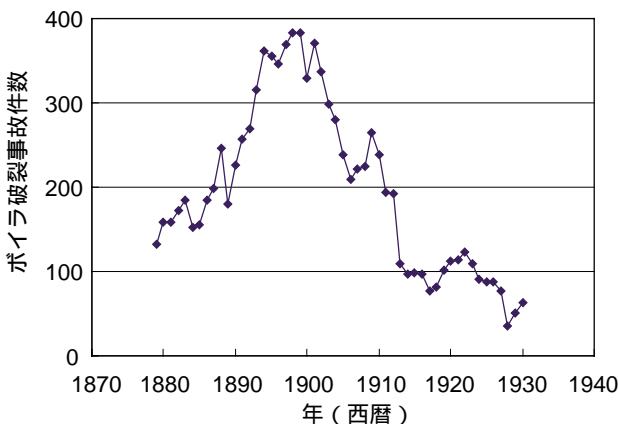


図1 米国内ボイラー破裂事故件数推移

具体的な設計では、ボイラー構成機器のMAWP (最高許容運転圧力) が設計マージン5に基づいて計算され、内径規準でドラム他の厚さが計算された。ボイラー機器の最終試験として耐圧試験が規定され、耐圧試験時においても延性的な破壊の防止が考慮されて、試験圧力はMAWPの2倍とされた。この係数2は、ボイラー機器に使用される鋼材の降伏比が0.5であることを考慮して設定された。

試験時に円筒殻に生成する膜応力 (h) は次式のとおり示すことができる。

$$h = \frac{2PR}{t} \quad (1)$$

ただし、P=MAWP

R：円筒殻の平均半径

t：円筒殻の厚さ

円筒殻が設計マージン5で発生する応力の最大値で設計されているとすれば、(1)式は次のとおり示すことができる。

$$h = 2S \quad (2)$$

ただし、S：許容引張応力

また、鋼材の降伏比0.5を考慮すれば、(2)式は次のとおり示すことができる。

$$h = 2 \frac{Su}{5} = \frac{4}{5} Sy \quad (3)$$

ただし、Su：引張強さ

Sy：降伏強さ

(3)式によれば、試験時に円筒殻に発生する膜応力は降伏強さの80%であり、発生応力が最大でも円筒殻が塑性変形することはない。

ボイラー規格には、溶接の適用は認められていなかったことから、この塑性変形防止は、リベット継手及び鍛接継手に適用された。

3.2 ボイラー規格1931年版

1921年に蒸気機関車用ボイラー規格が、Part 1, Sec. IIIとして発行された。この規格の新設ボイラーに対する設計マージンは、白熱した議論の後、4.5に設定され、従来の設計マージン4から大きい側に変更された。

この設計マージンの議論は動力用ボイラー規格の設計マージンに関する議論に飛び火することはなかった。1931年版ボイラー規格の大きな変更は、溶接をボイラー本体に本格的に適用可能とした点である。そして、溶接後の応力除去 (Stress Relieving) が規定されたことである。すなわち、ボイラー規格に損傷モードとして脆性破壊が追加されたわけである。応力除去温度は1,100 deg-F (595) 以上で、保持温度は1 in.当たり1時間以上とされた。

溶接部からの脆性破壊の防止に関しては、設計マージンを数値設定することはせず、脆性破壊発生の危険のある溶接部には基本的に応力除去を施工するが義務付けられた。脆性破壊防止に関して、ASME B&PV規格が設計マージン的な要素を取り込んだのは、第2次世界大戦中の戦時標準商船の脆性破壊事故を経てからであった。

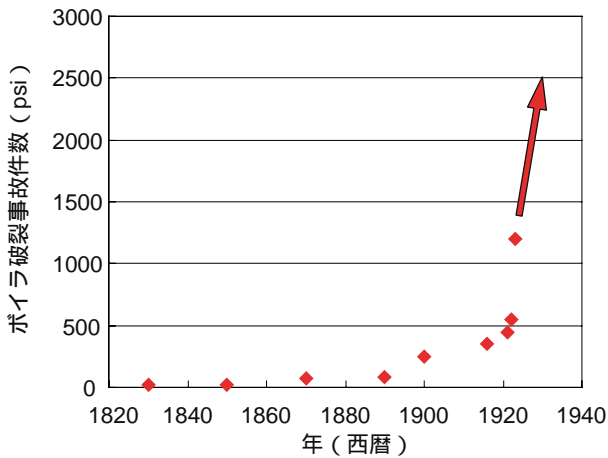


図2 米国ボイラー最高使用圧力推移

3.3 戦時ボイラー規格

1942年にCase 968が発行され、設計マージン4の適用が認められた。このCaseの検討は、戦時における鋼材物資の保護・節約を目的にボイラーメーカーから提案されたためであり、溶接技術の大幅な向上があって、ボイラー構造物の信頼性が向上が図られたために実現したものであった。設計マージン4の適用には様々な制約あったが、700 deg-F (371)までの温度でSec. I, Table P-7に規定の蒸気管の許容引張応力を1.25倍して適用可能とし、ボイラー本体の許容引張応力に関しては、750 deg-F (399)までの温度でSec. I, Table P-5に規定の値を1.25倍して適用することを許容した。同時に、火無し压力容器の設計マージンに関するCase 978も発行された。これらのCaseは、National Emergency Caseと称された。

設計マージン4の許容時に耐圧試験圧力の低減を行わなかったことから、1943年に試験圧力をMAWPの2倍から1.5倍に低減することが認められた。(3)式と同様な検討を行えば、設計マージン4のボイラー円筒殻に試験に発生する応力の最大値は次のとおり示される。

$$h = 1.5 \frac{Su}{4} = \frac{3}{4} Sy \quad (4)$$

試験時に円筒殻に発生する膜応力を従前と同様にするならば、試験圧力はMAWPの1.6倍となるが、1.5倍の係数は試験時の延性破壊を防止する観点及び分かり易い数値として工学的な判断で設定されたものである。なお、設計マージン4で、試験圧力をMAWPの2倍とすると、試験時に円筒殻に発生する

最大の応力は降伏強さに達し、機器に塑性変形が生じる可能性があった。

戦時標準はボイラー規格に限らず、ASTM規格材料の戦時規格にまで及んだ。1年を超える議論の結果、経済性の向上の観点で、戦時規格（例えば、Case 981の16種類の材料規格）がボイラー製造に使用可能となった。その他、フランジ、管継手等の材料の戦時規格（American War Standard）も許容され、戦時標準・戦時規格は、米国ボイラー産業にも拡大した。

設計マージン4のCaseを規格本体に編入する検討は1943年に開始され、溶接技術の向上の結果を踏まえて、溶接継手効率を90%から95%に増大させ、設計マージン4の許容引張応力で厚さを計算した場合に、0.1 in.の厚さを付加した条件（厚さが0.5 in.を超える機器）の代替ボイラー規格として1944年Addendaが発行された。

一方、压力容器規格のCase 978は大戦後廃止され、設計マージンは5に戻されてしまったが、1950年の規格委員会に設計マージン4で設計した压力容器の優れた運転実績が報告され、設計マージンを5から4に再修正する議論が行なわれた。多数の議論の結果、設計マージン4が認められ、1951年Addendaで採用された。

4.....脆性破壊及び黒鉛化

4.1 戦時標準商船の脆性破壊事故の反映

第2次世界大戦中に建造された戦時標準船は約5,000隻（1万トン級溶接製商船）で、1942年以降、船体に損傷を生じた商船は約1,200隻にも及び、約230隻は沈没又は使用不能な状態に陥った。1930年代に溶接構造物の適用が拡大した結果、脆性破壊が顕在化し始めたものである。既に示したとおり、動力用ボイラーでは脆性破壊防止のため、溶接部に応力除去を要求していた。

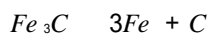
これらの商船の破壊の多くは、大型ハッチのコーナー溶接部で生成したものであるが、船体で生じた破壊は大規模な事故の原因となった。これら破壊事例調査報告³⁾によれば、脆性き裂が発生した鋼板の中の90%の鋼板のシャルピー吸収エネルギーは10 ft-lbs以下であった。同時に、脆性破壊き裂が停止した鋼板の中の70%の鋼板のシャルピー吸収エネルギー

は15 ft-lbs以上であった。この調査結果はSec. VIIIに反映され、脆性破壊の規準として15 ft-lbsが採用された。15 ft-lbs規準は、1950年代に開発された落重試験によるNDT（Nil-ductility Transition：無延性遷移）温度における鋼材のシャルピー吸収エネルギーに相当し、NDT温度以上で使用することで、溶接構造物に脆性破壊が生じることはないとされた⁴⁾。

動力用ボイラーでは、溶接部には基本的に応力除去が施工され、耐圧試験時の水温を70 deg-F（21 ）以上とすることで、高温での運転中を含めて脆性破壊が生じることはないとする設計が採用された。ただし、最低水温規定の導入は1940年版まで待たねばならなかった。

4.2 黒鉛化による破壊

1930年代におけるボイラーの高温化に伴い、蒸気管他にモリブデン鋼（低合金鋼）が適用されるケースが多くなった。1935年に低合金鋼に黒鉛化が生じ、強度低下の可能性が示唆⁵⁾されたが実プラント損傷モードとして捉えることはされなかった。しかしながら、1943年1月に米国Springdale発電所の外径12 in.のモリブデン鋼蒸気管溶接部に周方向破断が発生・人命を奪う事故に拡大し、その原因が黒鉛化によるものと報告⁶⁾されて以降、黒鉛化は研究対象からボイラー設備機器の損傷モードとして注目を浴びた。この配管は935 deg-F（502 ）で、約5.5年しか運転に供されていないものであった。損傷調査の結果、黒鉛化は高温で次のとおり炭化物が分解し、結晶粒界に炭素が析出し、鋼の強度が低下することが原因で配管破断が生じたものと推定された。



この反応による黒鉛化は熱活性化過程であって、温度が850 deg-F（454 ）未満では黒鉛化が問題にはならないことが分かった。また、Crの合金化が鋼中炭素の安定化に寄与し、0.5%を超えるCrを含む鋼では黒鉛化が問題とならないことが明らかにされた。

ボイラー鋼材の黒鉛化の防止については、問題の顕在化に伴い直ぐに対処され、ボイラー規格では750 deg-F（399 ）を超える温度では、炭素鋼及びモリブデン鋼の黒鉛化に注意すべきとの注記書きが追加された。この損傷モード（黒鉛化）による破壊

の防止に対しても設計マージンを考慮するというよりは、脆性破壊の防止と同様に、黒鉛化による損傷を発生させない対応がなされた。なお、現行ASME B&PV規格での黒鉛化の防止に関する注意書きは、黒鉛化に関する調査が終了した後に、その成果が反映されたものであり、上述の温度条件とは異なるものとなっている。

5.....クリープの影響

鋼材の高温での強度低下の傾向が明らかになり、高温挙動を調査するためのASME-ASTM共同委員会が1925年に組織された。共同委員会の成果の一部として、高温で材料の強度が減少する報告書⁷⁾が1930年に規格委員会に報告された。この報告ではドラム穴の応力集中箇所での疲労破壊、板厚方向の応力の影響及びクリープの影響について強調された。また、鋼材のクリープ曲線が規格委員会に提出され、許容引張応力をクリープ強度に2/3を乗じた値と設計マージン5で設定した値のいずれか小さい値とすべきとの提案他がされた。1931年版で高温での強度低下の影響を考慮して、700 deg-F以上の温度の許容引張応力の低減が行われたが、この低減は高温強度の低下の影響を反映したものであって、クリープの影響を考慮したものではなかった。クリープの影響を許容引張応力に考慮することが緊急の課題になり、ついに1933年版に数年来の検討成果が反映された。これと時期を同じくして、クリープ試験方法の標準化が進み始めた。

鋼材の高温での許容引張応力表の見直し案が1936年に規格委員会に報告された。この見直し案は設計マージン（引張強さに対して5、降伏強さに対して2.5）を考慮して設定した許容引張応力に、10万時間で1%のクリープが生じる応力の80%を考慮して設定されたものであった。この許容引張応力表について白熱した議論が行なわれたが、結局は許容応力表としての採用は見送られた。1938年に共同委員会は848頁にも及ぶ報告書を完成し、鋼材のクリープ試験データ、クリープ曲線、写真等を報告した。これらのデータに基づいた許容応力表の改定案が作成され、幾多の修正の後に当時としては、クリープの影響が的確に考慮されたものとされた。ASME-ASTM

共同委員会は第2次世界大戦中にも引続き検討を行い、高温許容引張応力の設定方法の基盤を作成するに至った。

ところで、MAWPの設定のためにLame式が採用されたのは、1940年版からである。この式の導入は、MAWPの計算の適正化を目的に行われたものであるが、ボイラー規格に関して言えば、高温化に伴い破裂試験結果との不整合が大きいことが明らかとなった⁸⁾。すなわち、厚さが過度に保守的に計算されることによる厚肉部材の熱応力的な面での不利を解消し、配管破壊試験結果と整合を図るため、修正Lame式を導入すると共に、1956W年版で温度補正係数(y値)^{9),10)}が導入された。

6.....ボイラー規格 1999年 Addenda 版

1999年版のASMEボイラー規格で設計マージンが4から3.5に変更された。この変更の根拠は、従来の設計マージン4で設計された機器の運転実績が良好であること、各種の損傷モードへの影響がないこと¹¹⁾、過去の改善により規格の安全性が向上していること他とされている¹²⁾。ただし、この根拠は、Sec. VIII 圧力容器に対してのものであり、Sec. I 動力用ボイラーに対するものではなかった。しかしながら、ボイラー規格の設計マージンは圧力容器の設計マージンと同時に変更された。圧力容器に想定される損傷モードとして考慮されたものは次に示すとおりである。

- (a) 延性破壊
- (b) 脆性破壊
- (c) 疲労
- (d) ラチェティング
- (e) 弾性不安定
- (f) 塑性不安定
- (g) クリープ破壊
- (h) クリープ座屈

圧力容器規格で想定される損傷モードについては、設計マージンを4から3.5に変更する以前は殆ど議論の対象にもなっていなかった。圧力容器規格の開発は、想定される荷重に対する公式による設計を規定することにより、結果として損傷の防止が図られるとされていた。しかしながら、公式による設計で設計マ

ージンを3.5に変更することは、特定していなかった損傷の発現に繋がる可能性があったことから、上述の損傷モードに関する検討が行われた。上述の損傷モードの中のクリープ座屈に関しては、次のとおり損傷の防止が検討されている。

【クリープ座屈の防止】

座屈に関する設計(座屈に関する設計マージンは3である。)の適用温度限界は、非クリープ温度域であり、現行規格ではクリープ座屈の防止は考慮されていない。しかしながら、規定の外圧チャートの一部にクリープ温度域の曲線が与えられていることから、この損傷の防止に関して、今後の検討課題とすることとする。

設計マージンを4に変更した1940年代からの規格の改善についても検討し、損傷防止に対応した規格になっていることを確認の上、設計マージンの変更が行われた。

7.....まとめ

米国発電用ボイラー規格の設計マージンに関して、ボイラー規格1914年版の考え方及びその後の変化について、駆け足で、概略をレビューした。設計マージンとは、ISO16528に示されるとおり材料の機械的性質やその他の性質に対して設定されるものであるが、この小文では損傷モードによる損傷の防止の観点での設計マージンとは如何なるものか考えてみた。設計マージンを規格で数値規定することが困難な場合には、損傷が生じないように規格で要求を付すこと必要があることが、米国発電用ボイラー規格の設計マージンについて考えることを通じて分かった。この小文では100年前の規格開発の過程を記述しているが、表現に正確さを欠いている箇所があるかも知れない。読者の方々の知識を補足して戴き、内容をご理解戴ければ幸いである。また、誤りについてご指摘を戴けることを、この場を借りてお願い申し上げます。

参考文献

- 1) ISO16528, Boilers and Pressure Vessels, Part 1: Performance Requirements, 2007.
- 2) Data from Hartford Steam Boiler Inspection and Insurance Company, 1931.
- 3) M.L. Williams and G. A. Ellinger, Investigation of Structural Failures of Welded Ships, *Welding Journal, Welding Research Supplement*, 52, 498, 1953.
- 4) P.P. Puzak, E. W. Eschbacher and W. S. Pellini, Initiation and Propagation of Brittle Fracture in Structural Steels, *Welding Journal, Welding Research Supplement*, 51, 561, 1952.
- 5) A. B. Kinzel and R. W. Moore, Graphite in Low-Carbon Steel, *Trans. A.I.M.E.*, 116, 318, 1935.
- 6) R. W. Emerson, Graphitization of Steel Piping, *Trans. ASME*, 66, 5, 1944.
- 7) D. S. Jacobus, Working Stresses for Steel at High Temperature, presented at ASME Annual Meeting, Dec., 1929.
- 8) W. J. Buxton and W. R. Burrows, Formula for Pipe Thickness, *Trans. ASME*, 73, 575, 1951.
- 9) A. W. Rankin, Task Force Correspondence, November 13, 1951.
- 10) L. F. Kooistra, R. V. Blaser and J. T. Tucker, High Temperature Stress-Rupture Testing of Tubular Specimens, *Trans. ASME*, 74, 783, 1952.
- 11) Subgroup on Design Analysis, Summary of the Design Analysis Factors Inherent in the Established Failure Modes of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code, February 1989.
- 12) E. Upitis and K. Mokhtarian, Evaluation of Design Margins for Section VIII, Div. 1 and 2 of ASME Boiler and Pressure Vessel Code, WRC Bulletin 435, September 1998.



吉田和夫



大石勇一

出願特許一覧

1	特許件名	皮膚切断法による微粉末積層皮膚厚測定法	発明者	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膚の厚さを切断法により測定する方法		
2	特許件名	膜厚指示計を用いた微粉末積層皮膚厚測定法	発明者	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膚の厚さを膜厚指示計を用いて測定する方法		
3	特許件名	非破壊検査用標準試験体及び製造方法	発明者	岸上守孝 他(IHI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		
4	特許件名	交流磁化を用いた強磁性体の溶接物の溶接後熱処理評価装置	発明者	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		
5	特許件名	交流磁化を用いた強磁性体構造物のクリープ損傷評価方法及び装置	発明者	志波光晴 他
	出願番号・出願日	特願2000-62965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		
6	特許件名	固体内弾性波伝搬の可視化方法及び装置	発明者	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		
7	特許件名	Method and Apparatus for Visualizing Elastic Wave Propagation in a Solid Substance(米国特許出願)	発明者	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		
8	特許件名	超音波探触子の位置・首振り量の測定方法及び装置	発明者	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		
9	特許件名	超音波探傷方法および超音波探傷装置	発明者	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		
10	特許件名	非破壊高温クリープ損傷評価方法	発明者	志波光晴 他
	出願番号・出願日	特願2002-308126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、余寿命時間を求める方法		
11	特許件名	クリープボイドの非破壊検出方法	発明者	志波光晴 他
	出願番号・出願日	特願2002-308129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		
12	特許件名	渦電流探傷信号処理方法	発明者	兼本 茂 他
	出願番号・出願日	特願平18.1.6(052059) H18.1.16	登録番号・登録日	特開2007-183231 H19.7.19(公開中)
	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	ウェ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 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機構 -	Vol.39, No.3 第2報 p.9-15 2001
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.575, p.26-32, 2004
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
Journal of Synchrotron Radiation	中東重雄 他	High temperature and high pressure in-situ SCC device for SR diffraction Experiments and application for an austenitic stainless steel	Vol.13, p.13-18 ,2006
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概要評価	広島大会CD-ROM1-2-6 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
Journal of 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	Vol. 129, p.169-174 February 2007
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, p.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 ,p.63-70 , 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	東京大会CD-ROM3-2 2005年10月
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, No.4, p.51-58, 2007年1月号
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	Vol.125, p.145-149, 2007
Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics 28 Electromagnetic Nondestructive Evaluation (X)	程 衛英 古村一朗 兼本 茂	Identification of Defects from ECT Signals Using Linear Discriminant Function	No.28, p.251-258, 2007
平成18年度 火力原子力発電大会論文集	大石勇一 吉田和夫 他	発電用火力設備に関する外国規格の適用調査 (その3: 構造関係)	名古屋大会CD-ROM 8-1, 2006年10月

学協会誌名	著者	論文名称	掲載誌発行年月
溶接学会論文集	西川 聡 古川 敬 古村一朗 堀井行彦	ニッケル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	第25巻(2007)第1号 p.179-186
平成18年度 火力原子力発電大会論文集	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測定精度の評価	名古屋大会CD-ROM 3-4, 2006年10月
平成19年度 火力原子力発電大会論文集	米山弘志 杉林卓也	PD研修とその実績	高松大会CD-ROM 3-4, 2007年10月
平成19年度先端大型研究施設 戦略活用プログラム成果報告書 (Spring-8戦略活用プログラム 2007B)	中東重雄 他	放射光CTによるステンレス鋼中SCCき裂の検出とサイジング	p.191-194 2008年3月
SPring-8 Research Frontiers 2007	中東重雄 他	Detection of Cracks due to SCC in Ni-base Alloys by Synchrotron Radiation CT Imaging	p.158-159 2008年7月
日本実験力学学会	関野晃一 他	種々の形状を有する自然き裂の耐熱ガラス板への付与とそのき裂開口変位の光干渉法による評価	p.59-64 2008年3月
IEEE, Transaction on Magnetics	程 衛英 兼本 茂 古村一朗	Numerical Evaluation of the Depth of Branched-off Cracks using Eddy Current Testing Signals	Vol. 44, No. 6, June, (2008), p.1030-1033.
Int. J. Nuclear Knowledge Management	兼本 茂 程 衛英 古村一朗	Intelligent system supporting defect identification and sizing using eddy current testing signals in nuclear power plants	Vol.2, No. 4, 2007, p.396-408

学協会等への口頭発表

平成19年度

学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名
非破壊検査協会 平成19年度春季講演大会	2007/5/22 アルカディア市ヶ谷	米山弘志	PD研修とその実績について
神奈川県非破壊試験技術交流会 第12回技術研究会	2007/6/8 KGU関内メディア センター	関野晃一 古川 敬 古村一朗 他	光学的応力・ひずみ測定法の非破壊検査法への応用 について
日本実験力学学会年次大会	2007/8/6 埼玉大学	関野晃一	プローブによるき裂発生検出特性について
日本保全学会 第4回学術講演会	2007/7/2 福井大学 (文京キャンパス)	古川 敬 古村一朗	ノッチを用いた斜角UT法の基準感度校正に関する 検討
		古村一朗 古川 敬	超音波探傷シミュレーションソフトウェアの検証とその 活用事例
SPring-8 ワークショップ「放射光による金属 組織観察技術の現状」	2007/7/20 キャンパス イノベーションセンター (東京地区)	中東重雄 他	き裂の非破壊検査とイメージング観察
CTC ComWave リリース記念セミナー	2007/6/27 伊藤忠テクノソリューションズ(株) 東京本社	古川 敬 古村一朗	原子力機器の超音波探傷への数値シミュレーションの 適用
第4回 SPring8 産業利用報告会	2007/9/11-9/12 総評会館	中東重雄 他	放射光CTイメージングによるNi基合金中の応力腐食 割れ(SCC)き裂検出
第21回放射光学会年会・合同 シンポジウム	2008/1/12-14 立命館大学びわこ 草津キャンパス	中東重雄 古村一朗 山口篤憲 他	放射光CTによるNi基合金溶接金属中応力腐食割れ の3原則
Spring-8利用推進協議会 Spring-8疲労損傷評価研究会	2008/1/25 メルパルクOSAKA	中東重雄 他	放射光CTによるNi基合金溶接金属中応力腐食割れ (SCC)き裂の検出
日本原子力学会2008年春の年会	2008/3/26-28 大阪大学 吹田キャンパス	中東重雄 古村一朗 古川 敬 他	放射光CTによるステンレス鋼中SCCき裂の検出とサイ ジング
日本非破壊検査協会 第15回超音波による非破壊評価 シンポジウム	2008/1/23-24 きゅりあん 小ホール	関野晃一 古川 敬 古村一朗 他	横波入射によるき裂周りの超音波の挙動
第6回NDE国際会議の Proceeding	2007/10/8-10 ハンガリー(ブタペスト)	古村一朗 古川 敬	Verification of the Simulation Code for Analyzing UT Wave Propagation Using Poro-elastic Visuali- zation System.
INTEMAG' 2008 (The International Magnetics Conference)	2008/5/4-8 スペイン(マドリッド)	程 衛英 古村一朗	Eddy Current Measurement for the Characteriza- tion of Depth and Conductivity of a Conductive Plate
日本鉄鋼協会春季大会	2008/3/27 武蔵工大 世田谷キャンパス	程 衛英 中東重雄 古村一朗	電磁気手法による金属材料による劣化診断 SQV2A 低合金鋼の照射損傷について
日本非破壊検査協会 学術セミナー	2008/4/23 東工大	古川 敬 古村一朗	超音波探傷検査技術の動向

「非破壊」

学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名	
【非破壊】	International Symposium on Research for Aging Management of Light Water Reactors and Its Future Trend	2007/10/22-10/23 福井国際交流会館	古村一朗 古川 敬	Recent Progress of UT Inspection Technique on Piping Weld and the Role of Wave Propagation Modeling
	16th International conference on the Computation of Electromagnetic Fields (Aachen, Germany)	2007/6/24-28 ドイツ(アーヘン)	程 衛英 古村一朗 他	Numerical Evaluation of the Depth of Branched-off Cracks using Eddy Current Testing Signals
	13th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics (Michigan, USA)	2007/9/9-12 米国 (ミシガン州立大学)	程 衛英 古村一朗	Electromagnetic Characterization of PWHT of 9Cr-Mo Weldment
			兼本 茂 程 衛英 古村一朗	Depth Sizing of Complex Shape Cracks using ECT Signals
日本保全学会「材料劣化診断技術に関する調査研究」及び「非破壊検査技術調査研究」分科会合同会合	2007/11/29 (東京理科大学)	程 衛英 他	電磁気手法による金属材料の塑性変形の検出に関する試行試験	
【溶接】	日本保全学会 第4回学術講演会	2007/7/3 福井大学 (文京キャンパス)	西川 聡 中田志津雄 堀井行彦 古村一朗 山口篤憲	圧縮残留応力付与部の熱時効による応力緩和挙動
	平成19年度 溶接学会 秋季全国大会	2007/9/19 信州大学	中田志津雄 西川 聡 他	差込み継手の溶接変形・残留応力の検討 (その1)(その2)
	大阪大学接合科学研究所 共同研究成果発表会	2007/11/29 大阪大学 接合科学研究所	西川 聡 堀井行彦 他	ニッケル基合金溶接金属の高温高圧純水環境下の応力腐食割れ
	第191回溶接冶金研究委員会	2008/1/31-2/1 科学技術館	西川 聡 堀井行彦	改良9Cr-1Mo鋼溶接金属の靱性影響因子と電気化学計測を用いた簡易評価方法の提案
【規格・基準】	Eighth International Conference on Creep and Fatigue at Elevated Temperatures	007/7/22 米国(サンアントニオ)	吉田和夫 中井裕丈 福田 南	Regulatory Review Results on Design Allowable Stress values of Creep Strength Enhanced Ferritic Steels
	5th International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants	2007/10/4 Marco Island Marriott Resort, Golf Club, and Spa	吉田和夫 佐藤長光	Study of Performance Requirements and Construction Rule for 700 degree-C Class Advanced USC Plant
	火力原子力発電大会	2007/10/18 サンポートホール高松	米山弘志 杉林卓也	PD研修の内容及び成果報告
	日本保全学会第1回検査・評価・保全に関する連携講演会	2008/1/16 東京大学	米山弘志 杉林卓也	PD研修の内容及び成果について

平成18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」	ENDE'2006 (The 11 th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation)	2006/6/14 岩手大学	程 衛英 兼本 茂 志波光晴 古村一朗 他	Identification of Defects from ECT Signals using Linear Discriminant Function
	第5回NDE国際会議 (San Diego)	2006/5/10米国	山口篤憲 他	Present Status of Start of Performance Demonstration System in Japan
			程 衛英 兼本 茂 古村一朗 志波光晴	SCC Depth Sizing and Crack profile Reconstruction by ECT Inverse Analysis
			西川 聡 古川 敬 古村一朗 堀井行彦	The influence of welding condition on flaw detectability by ultrasonic test in Ni base alloy welds.
	日本保全学会 第3回学術講演会	2006/7/6東北大学	程 衛英 古村一朗	Numerical Evaluation of ECT Signals of Cracks with Inclination
			兼本 茂 程 衛英 古村一朗	複雑形状欠陥の渦電流探傷による新しいサイジング法
	日本非破壊検査協会 平成18年度 秋季講演大会	2006/10/26 名古屋国際会議場	関野晃一 古川 敬 古村一朗 他	光干渉法と超音波可視化法を併用した手法によるき裂の評価
	日本非破壊検査協会 第38回 応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム	2007/1/11 東京都城南地域中小企業振興センター	関野晃一 古川 敬 古村一朗 他	熱応力によるガラス板への事前き裂の付与方法に関する研究
	第10回 表面探傷シンポジウム	2007/1/26 東京都城南地域中小企業振興センター	程 衛英 兼本 茂 古村一朗	渦電流探傷による分岐欠陥の深さ評価
	日本非破壊検査協会 第14回超音波による非破壊評価シンポジウム	2007/1/30 東京 (きゅうりあんホール)	関野晃一 古川 敬 古村一朗 他	ガラス板に付与したき裂近傍における超音波の可視化
古川 敬 古村一朗			超音波探傷訓練シミュレータ	
古村一朗 関野晃一 古川 敬 他			超音波可視化法を用いたシミュレーションソフトウェアの検証	
平成18年度 火力原子力発電大会	2006/10/19 名古屋市公会堂	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測定精度の評価	
日本保全学会 第3回学術講演会	2006/7/6 東北大学	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き裂深さサイジングの信頼性に関する検討	
「材料」	日本金属学会 2006年秋期大会	2006/9/16 新潟大学	中東重雄 他	高温・高圧水中でのSUS316L鋼のその場応力測定 (ポスター発表)
				原子炉用ステンレス鋼SUS316Lの低温長時間時効

学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名
【材料】	日本原子力学会 2007年春の年会	2007/3/27 名古屋大学	中東重雄 他 放射光CTイメージングによるNi基合金中SCCき裂検出
	The 9th Int.Conf.on Synchrotron Radiation Instrumentation	2006/5/28 韓国(DXCO Center DAEGU KOREA)	中東重雄 他 In-situ Stress Measurements on SUS316L Stainless Steel in High Temperature Water Simulated Boiling Water Reactor
	日本金属学会 2007年春期大会	2007/3/27 千葉工業大学	中東重雄 他 原子炉用ステンレス鋼SUS316Lの長時間時効に おける析出物の観察 放射光CTイメージングによるNi基合金の応力腐食 割れき裂検出
【溶接】	平成18年度 溶接学会 春季全国大会	2006/4/12 東京ビックサイト	西川 聡 古村一朗 堀井行彦 他 Nb, Cが耐SCC性に与える影響 - ニッケル基合金溶接金属の高温高圧純水環境下 におけるSCC挙動(第1報)- SCCの進展経路と波面形態 - ニッケル基合金溶接金属の高温高圧純水環境下 におけるSCC挙動(第2報)-
	平成18年度 溶接学会 秋季全国大会	2006/9/20 北海道大学	西川 聡 長谷川忠之 古村一朗 堀井行彦 改良9Cr-1Mo鋼溶接金属の長時間熱時効による じん性低下と回復
	溶接構造シンポジウム2006	2006/11/13 大阪大学	中田志津雄 西川 聡 堀井行彦 他 材料物性値等の残留応力解析への影響
	第187回 溶接冶金研究委員会	2007/2/8 東京(科学技術館)	西川 聡 堀井行彦 他 ニッケル基合金被服アーク溶接金属の高温高圧純水 環境下の応力腐食割れに関する研究
	関西原子力懇談会 (原子力構造物の高経年化に関 わる維持基準の高度化に関する 調査委員会)	2007/3/2 大阪(関電会館)	西川 聡 ニッケル基合金の溶接金属に発生するSCCの形態 とUTによる欠陥検出性
【規格・基準】	平成18年度 火力原子力発電大会	2006/10/19 名古屋市公会堂	大石勇一 吉田和夫 他 発電用火力設備に関する外国規格の適用調査 (その3:構造関係)

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】	日本保全学会 第4回「非破壊 検査技術研究調査」分科会	2005/5/26 東京(日本保全学会)	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

学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名
【非破壊】	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 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
			古川 敬 古村一朗 米山弘志 山口篤憲 NDIS0603付属書の判定基準の評価
【材料】	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	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
	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
【溶接】	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
	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 原子力圧力容器鋼(SQV2A)のテンパーピード溶接法 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)	長谷川忠之 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
	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)のテンパーピード溶接法 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 材料力学カンファレンス	2005/11/4 福岡(九州大学)	中田志津雄 西川 聡 長谷川忠之 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
5th International Workshop on Integrity of Nuclear Components	2004/4/21 京都	古川 敬 他	SCC Experience and NDE Technologies on Recirculation Pipings 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 程 衛英 古村一朗 志波光晴	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 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
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	高温高压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
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の高温高压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压水中その場観察
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
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

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)	本賞は平成13年度に行なわれたNDI協会大会での発表の中から特に優れた発表を行なった若手研究者に与えられる賞である。 受賞対象論文: 「溶接金属内部欠陥とUT及びRTによる非破壊信号量との関係」 (H13年度春季大会で発表)
西川 聡	研究発表賞	(社)溶接学会 平成14年4月25日	35歳未満の若手研究者に対する賞で発表論文「熱処理条件の非破壊的評価手法の検討-局部PWHT溶接部の性能評価に関する研究(第1報)」に対して与えられたものである。
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「鋳造2相ステンレス鋼の溶接熱影響部の熱時効評価 第1・2報」に対して与えられたものである。
志波光晴 西川 聡 米山弘志 山口篤憲	技術賞開発奨励賞	(社)溶接学会 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	本賞は毎年1回溶接接合工学の分野における新進気鋭の原則として35歳以下の研究者・技術者に授与されるもので、(財)溶接接合工学振興会会員・関連団体及び理事会の推薦によるものである。 今回原子炉圧力容器等原子力プラント溶接部の品質保証溶接施工法に係る研究開発に関する論文・学会発表等に対して受賞したものである。
桑 亮一 志波光晴	優秀論文賞	(社)火力原子力発電技術協会 平成17年10月12日	優秀論文表彰は平成17年度に会誌「火力原子力発電」に掲載された論文の中から優秀であった論文に対して授与されるもので「高Cr鋼の交流磁化法によるクリープ損傷評価技術の開発」が対象となった。
関野晃一	平成18年度新進賞	(社)日本非破壊検査協会 平成18年10月27日 (NDI協会秋季大会)	本賞は平成18年度に行なわれたNDI協会大会での発表の中から特に優れた発表を行なった若手研究者に送られる賞である。 受賞対象論文: 「光干渉法と超音波可視化法を併用した手法によるき裂の評価」(H18年度秋季大会で発表)
古村一朗 古川 敬	平成19年度 第4回学術講演会 第1回産学共同 セッション 銅賞	NPO法人日本保全学会 平成19年7月3日	産学共同セッションは『研究者が提案する研究成果を商品とみなし企業や国などを購買者と位置づけ研究成果を売買する市場を保全学会が提供するという市場原理に近い新しい試み』として初めて開催されたものである。当センターは超音波探傷シミュレーション技術を「実機探傷で得られるエコー群が欠陥かどうかの評価を可能にする技術」として発表し非常に完成度の高い技術として銅賞を授与されたものである。
大北 茂	溶接学術振興賞	(社)溶接学会 平成20年4月9日	本賞は溶接学会会員として永年にわたり優れた学術業績を積み重ね所属支部の活性化にその識見を発揮し溶接の学術振興に大きく貢献した者として贈呈されたものである。

氏名	受賞名等	機関等・受賞日	受賞内容
西川 聡	平成19年度 溶接冶金研究委員会 優秀研究賞	(社)溶接学会 平成20年5月14日	本賞は 溶接冶金研究委員会で発表された研究が優秀であり 今後の発展性が高いと評価された者に送られる賞である。 受賞対象研究: 「改良9Cr-1Mo鋼溶接金属の靱性影響因子と電気化学計測を用いた簡易評価方法の提案」
関野晃一 古川 敬	平成19年度 学術奨励賞	(社)日本非破壊検査協会 平成20年5月21日	本賞は 研究報告の内容が非破壊検査技術の向上に寄与するところが大きいと評価された者に送られる賞である。 受賞対象研究: 「硝子板に付与したき裂近傍における超音波の可視化」



溶接・非破壊検査技術センター 技術レビュー Vol.4 2008 (非売品)

発行編集人 ……●…… 山本 孝(溶接・非破壊検査技術センター管理グループ長)
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。