



溶接・非破壊検査技術センター

技術レビュー

Vol.3 2007

(財)発電設備技術検査協会

目次

巻頭言	● 溶接・非破壊検査技術の技術拠点を目指して 1 理事長 佐々木宜彦
トピックス	● 経済産業省の新規公募研究を受託 2 ● NDI協会の新進賞を受賞
研究報告	● 欠陥検出評価技術に関する研究
	き裂深さ測定精度評価のための真とする深さの測定方法 3 古川 敬, 古村一朗, 米山弘志, 山口篤憲
	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 9 古村一朗, 古川 敬, 関野晃一
	光弾性法を用いたき裂部の周辺の超音波可視化 15 関野晃一, 古川 敬, 古村一朗 清水紘治(関東学院大学)
	渦電流探傷による分岐欠陥の深さ評価 20 程 衛英, 古村一朗
	● 材料劣化評価技術に関する研究
	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 26 西川 聡, 堀井行彦, 長谷川忠之, 古村一朗
	放射光CTイメージングによるNi基金溶接金属中SCCのき裂検出 31 中東重雄, 古村一朗 山本厚之, 大西陽子, 藤尾和樹, 角谷英剛, 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)
	● 技術基準・規格化に関する調査研究
	欧州EN13445圧力容器規格における疲労設計規定の開発に関して 39 吉田和夫, 大石勇一
	高Crフェライト系鋼の許容引張応力の見直し改訂の技術的背景 43 中井裕丈, 福田 南, 吉田和夫
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 60

溶接・非破壊検査技術の技術拠点を目指して

技術レビューも発刊3年目となりました。このVol.3は、2006年度に実施した協会独自の調査研究活動成果として論文発表したものを、分野別にとりまとめたものであります。Vol.3では、欠陥検出評価技術として、超音波探傷試験の測定精度信頼性の向上のための評価方法を一層進展させたこと、超音波探傷のシミュレーションソフト開発にさらに取り組んだことや、渦電流探傷法を用いての新しい応用分野の開拓に取り組んだことなどを紹介しています。

協会の試験研究活動も、鶴見試験センターとして発足してから今年で20年になります。この間、火力・原子力設備に係る溶接・非破壊検査技術分野で先駆的な調査研究活動を積み上げてきたことについて、一定の評価がなされてきたと自負しております。溶接・非破壊検査技術センターの業務は、協会の法定業務など現業部門と車の両輪をなす重要な役割を担っていると認識しています。協会の技術センターは、発電設備に係る溶接管理、非破壊検査技術、及びこれらの評価技術に絞り込んで、その技術的拠点になることを目指したいと考えています。

2007年から新たにスタートする中期経営計画では、このような観点から現在、具体的なアクションプランを策定し、実行していこうとしております。

協会をとり巻く環境は大きく変化し、調査研究部門といえども収支バランスが成り立つことが、経営としての要件となっております。今後協会の技術センターは、大学の研究所や企業の研究所とは異なる存在基盤をどのように確立していくかが鍵ではないかと考えています。

具体的には例えば、維持基準導入後の新しい溶接施工法の採用に伴う検査評価技術、状態監視保全の流れに対応しての新しい検査・評価技術はいかにあるべきか、などの具体的ニーズを把握して、どのように対処・解決していくべきかを提示していく役割が求められるのではないかと考えています。協会の限られた資金と人材ではありますが、現場のニーズを十分に把握し、最大効果が発揮できるような技術センターの業務運営を目指していきたいと考えています。

また、協会の技術センターの研究成果を応用して頂くため、評価の場の設営や、成果をもっとPRしていく方策についても、一層積極的に取り組んでいこうと考えています。

本技術レビューを御覧頂いた上での御意見、御質問、御指導を賜れば幸いです。



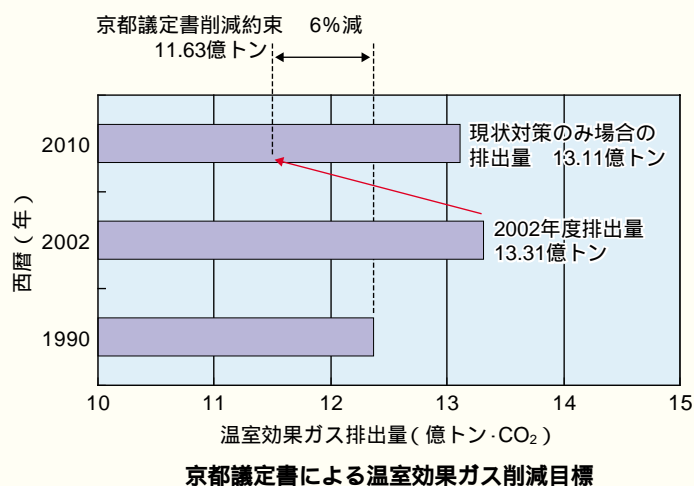
理事長
佐々木宜彦

経済産業省の新規公募研究を受託

経済産業省原子力安全・保安院が平成18年度の新規調査研究の企画競争として公募した「火力関係設備効率化技術調査」を当センターが受託し、調査事業を開始しました。

本事業は、総発電容量の40%を占める火力発電の二酸化炭素排出量抑制のため発電効率の向上が不可欠とし、この高効率化のために従来の設備より高温、高圧の条件下で使用される新材料や新技術に対する保安確保のための詳細な調査等を行うことを目的としています。

本事業は平成18年度から22年度まで予定されていますが、当センターは平成18年度事業として、高温高圧条件下で使用される新材料について、材料特性に関するデータ収集、分析、当該材料の溶接部に係る技術、検査・補修等に関する調査等の保安上必要な事項に関して調査を行い、技術基準へ新たに整備すべき事項等を学識者による検討委員会を設置して公正・中立に検討いたしました。



NDI協会の新進賞を受賞

当センター関野晃一研究員が、社団法人日本非破壊検査協会の平成18年度秋季講演大会において新進賞を受賞しました。

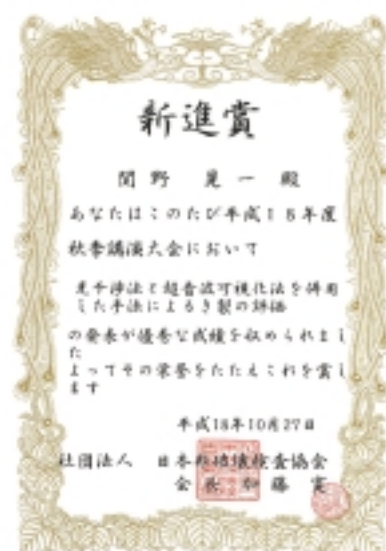
新進賞は、30歳以下の登壇者に対してその発表が優秀であった者に与えられるもので、関野研究員は同大会で発表した「光干渉法と超音波可視化法を併用した手法によるき裂の評価」が優秀であったと評価されたものです。

本大会は、平成18年10月26日名古屋国際会議場で開催されたもので、本賞は関野研究員の発表の他2件が受賞されました。なお、当センターでは、平成13年の受賞に続き2回目となります。

なお、本受賞に関連する論文は、本誌研究報告「光弾性法を用いたき裂部の周辺の超音波可視化」をご覧ください。



研究に取り組む関野研究員



き裂深さ測定精度評価のための 真とする深さの測定方法

True crack depth determination for evaluation of crack depth
sizing accuracy

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

Crack depth sizing technique is utilized for structural integrity assessment. In order to ensure the reliability of crack depth sizing accuracy, the determination of true crack depth is one of the most important processes. In this paper, many ultrasonic testing approaches (longitudinal and/or shear wave angle beam technique and Phased array UT) were applied for true crack depth determination. A computer simulation system based on a large scale FEM code was applied to interpretation of the UT data. Compared with the actual crack depth which was measured by cross section observation, root mean square error was approximately 1mm.

Keywords: Crack depth sizing, Stress corrosion cracking, Ultrasonic testing, Phased array

1.....背景・目的

超音波探傷試験によるオーステナイト系ステンレス鋼配管突合せ溶接部のき裂深さ測定は難易度が高い技術の一つである。このため、国内外で技量認証制度（PD制度）が運用されるとともに、き裂深さ測定精度（技量）向上及び維持のための研修・訓練が行われている。ここで、き裂深さ測定精度の信頼性という観点においては、測定精度を評価する際の比較データすなわち「正解」の信頼度が重要になる。本報では、非破壊的に測定した「正解」（以下、「真とする深さ」と呼ぶ）の測定方法を検討した結果を示す。

2.....真とする深さの測定方法の検討

真とする深さを測定する方法として、基本的には超音波探傷試験による方法を採用した。真とする深さ測定においては、実機の配管と違い被曝や探傷姿勢等の制約が無い場合、配管の内・外面の両面から、そしてき裂の両側から探傷した。また、き裂深さの把握に繋がると考えられる情報として、き裂の開口状況を直接観察し、き裂が複雑に分岐していそうか

どうかをある程度推定することや、PT（浸透探傷試験）の浸透液のにじみ具合などから深さの情報を得た。

さらに、き裂の開口部を直接観察し開口部と裏波との位置関係や裏波の形を把握した。これは、超音波探傷結果を評価する時の情報になることに加え、後述する超音波探傷シミュレーション解析において溶接部の形状や欠陥の位置を入力する時のデータとして用いた。

2.1 超音波探傷試験方法の概要

き裂深さ測定に適用する超音波探傷試験方法は改良UT法²⁾とし、自動探傷法による横波及び縦波斜角法³⁾やフェーズドアレイ法³⁾を適用した。本報で適用した方法は、外面から探傷した横波斜角法では公称周波数5MHzで屈折角45度、縦波斜角法では公称周波数3MHz及び5MHzで屈折角45度、そして内面からの探傷では、公称周波数2MHzのフェーズドアレイ法により屈折角60度と70度の縦波で探傷した。き裂深さ測定の原理には、端部エコー法³⁾を用いた。

端部エコー法によるき裂深さ測定に先立ち、欠陥の深さの概略を把握する予備判定を行った。これは、JEAG4207で規定されているモード変換波法³⁾に加

え、超音波探傷画像上の広がりから深さの概略を把握する方法を適用した。

さらに、探傷結果から深さを評価する際に、超音波探傷シミュレーション解析結果を活用し端部エコーの識別や先端部の特定を行った。以下に適用した方法のうち、代表的な手法の概要を示す。

2.1.1 焦点型縦波端部エコー法

縦波による焦点型端部エコー法は、横波に比べてオーステナイト系鋼溶接金属内を通過しやすいという縦波の特長を利用し、溶接金属内に進んだき裂であっても先端部を的確に捉えようとするものである。また、き裂先端部付近に焦点を合わせて超音波を集束することで、き裂先端部に強い超音波が当たり端部エコーのSN比向上が期待できる。図1は、

オーステナイト系鋼溶接部の金属組織をモデル化し、縦波による焦点型端部エコー法をシミュレーション解析した結果の例である。欠陥の先端部を溶接金属内としたモデルであるが、縦波（図中で白色のグラデーションで示す）は、図1(a)に示す様に溶接金属内を伝搬し、焦点を設定した欠陥の先端部に当たり、図1(b)に示す様に欠陥の先端部で端部エコーが発生している。

2.1.2 モード変換波法

モード変換波法は、配管内面で2次クリーピング波とともに発生した縦波を利用する方法であり、図2にその原理を示す。図中に白点線で示した矢印は縦波の経路を、黒点線の矢印は横波の経路を示す。配管内面で発生した縦波は、き裂が深い場合には図2(a)に示す様に、き裂で反射してエコーが得られるものの、浅い場合には図2(b)に示す様に、き裂に当たらないのでエコーが得られない。このエコーのパターンによりき裂深さの概略を把握する方法である。き裂が浅いのか深いのかを予備的に把握することで、集束深さの設定等の探傷条件選択や、端部エコーの誤認識防止に効果に活用した。

2.1.3 UT画像を用いた予備判定

超音波自動探傷で測定した探傷結果を画像表示した時に、断面表示した画像では欠陥の指示の板厚方向への広がりを示すことがある。これは、経験上欠陥の深さ（板厚方向の寸法）に対応していることから、欠陥の概略の深さを把握することができると考えられる。図3は縦波斜角法による探傷結果をBスコープ表示した画像上の指示の板厚方向（縦方向）への広がり方から深さを予備判定した例である。図(a)は板厚22mmの試験体での探傷結果の例であり、き裂深さは4mm程度（開口部及び先端部の深さ位置が各々22mm，18mm程度）と予備判定した。図(b)は板厚18mmの試験体の探傷結果の例であり、き裂深さを8mm程度と予備判定したものである。

なお、後述する切断調査でき裂を実測した結果、ほぼ予備判定通りの深さであった。

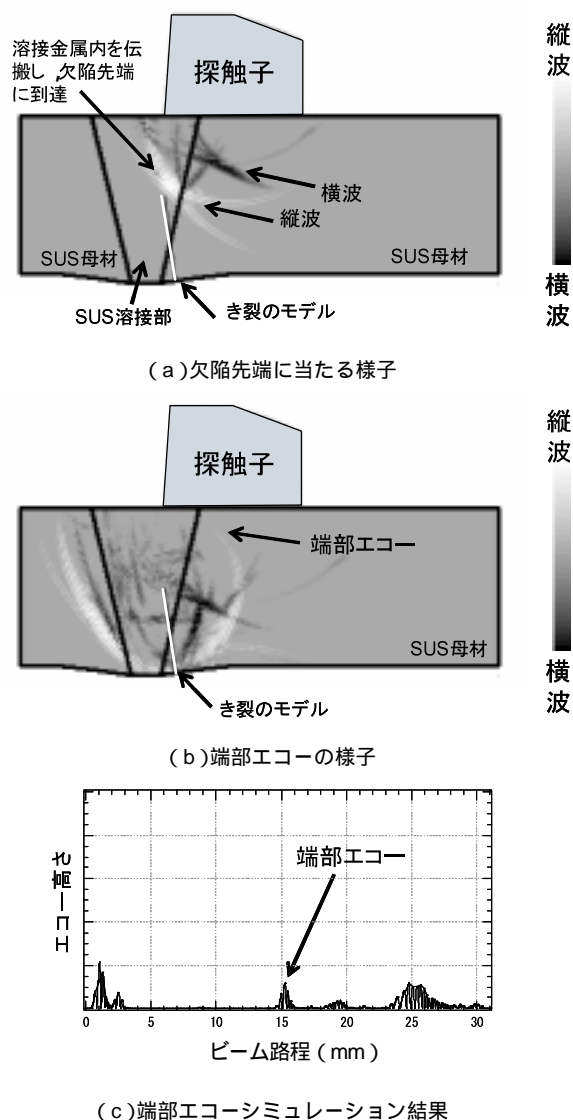


図1 シミュレーション解析による焦点型縦波端部エコー法の概要

2.2 シミュレーション解析による深さ評価支援

端部エコー法による深さ測定において、端部エコーの識別やき裂先端部の特定が難しい場合が多い。そこで、超音波探傷シミュレーション解析を端部エコーの識別に活用した。シミュレーション解析の入力データは、溶接部の形状や裏波の形、き裂開口部の位置及び予備判定結果に基づく深さ等である。

シミュレーション結果を活用した深さ評価方法を

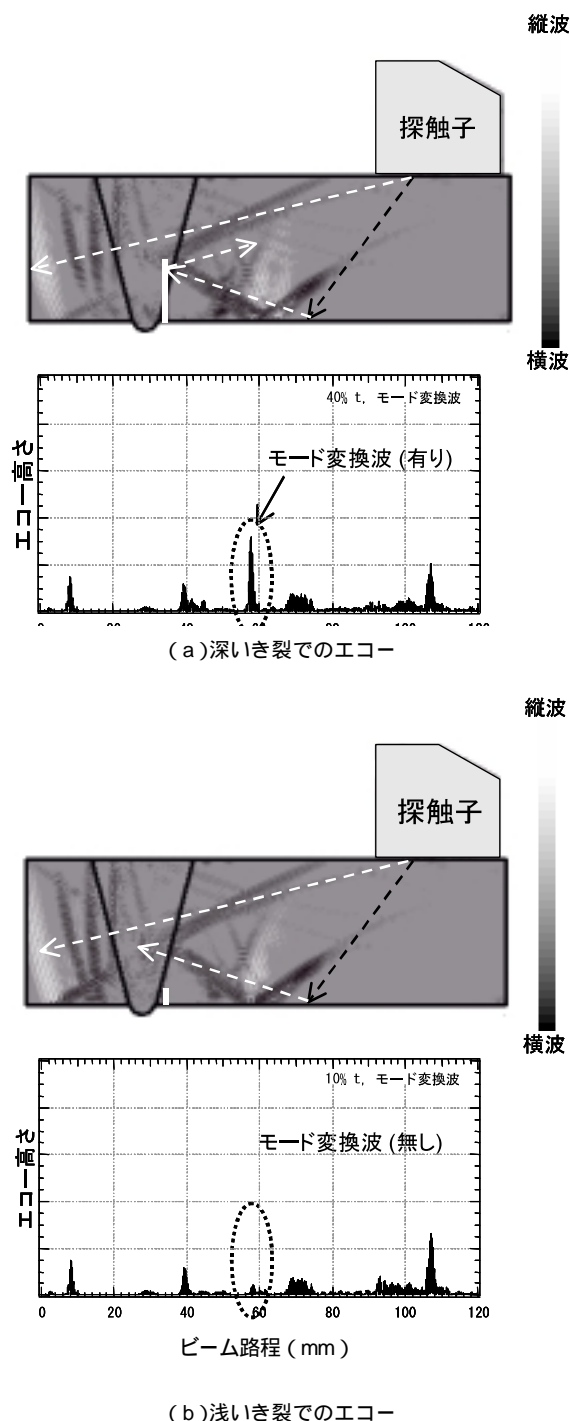
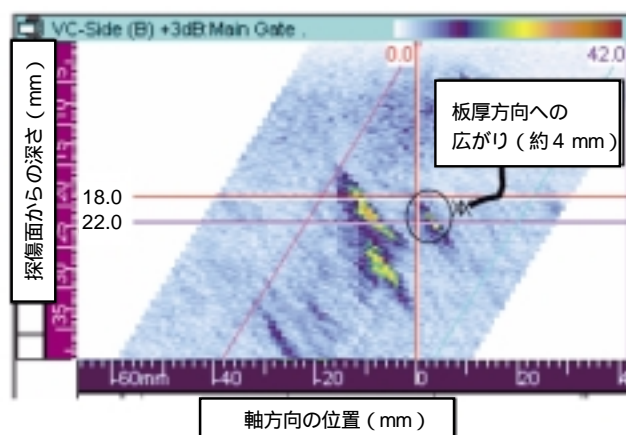


図2 シミュレーション解析によるモード変換波法によるき裂深さの予備判定の概要

有効に活用した例を図4及び図5に示す。図4は板厚20.5mmの試験体の探傷結果であり、図4(a)には横波斜角法の、図4(b)には縦波斜角法におけるBスコープ画像を示す。このき裂では、モード変換波法の結果では振幅は小さいもののモード変換波が出現するあたりのビーム路程にエコーが認められていた。図4(a)中にAと示した矢印のエコーは探傷面から深さ14mmにあり、これを端部エコーと仮定し、端部エコー法によりき裂深さを測定すると6.5mmとなりモード変換波法による予備判定結果と良く対応している。しかし、図中のAが端部エコーではないと仮定すると、探傷画像上の縦方向の広がりhと記した範囲になり、この範囲より深さを予備判定すると4mm程度以下となる。縦波斜角法による探傷結果では図4(b)に示す様に探傷面から深さ14mm近辺に端部エコーらしいエコーは無く、画像の広がりから予備判定した結果は約4mm程度であった。また、内面から水浸法で探傷した結果でも表



(a) 画像上の指示の広がり方から予備判定した結果浅い(4mm程度)と判定したき裂

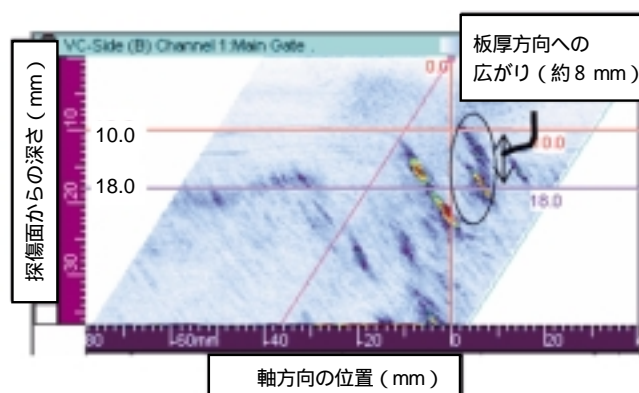
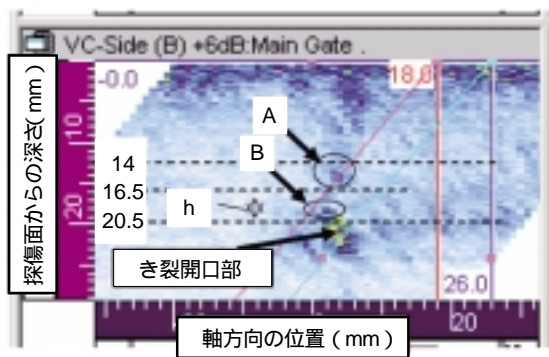
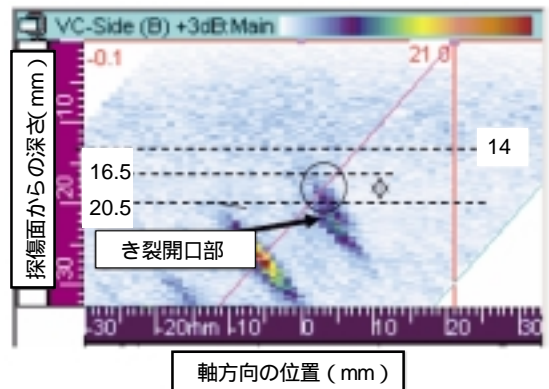


図3 超音波探傷画像上の指示の広がり方からき裂深さを予備判定した例



(a)横波斜角法による探傷画像の例



(b)3MHz縦波斜角法による探傷画像の例

図4 探傷画像の一例

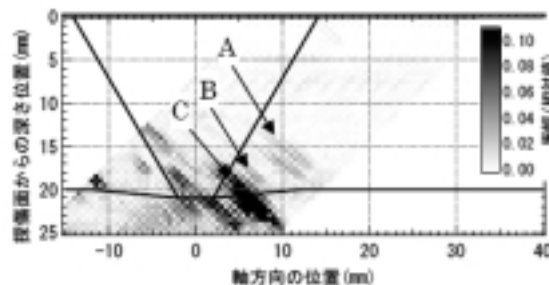


図5 き裂深さ2mmにおけるシミュレーション解析結果 (横波斜角法の解析)

面不感帯内の浅いき裂と考えられた図4(a)中にAと記した矢印で示したエコーは端部エコーとは考え難く、判断に迷った。

そこで、き裂深さやき裂の傾きを変えてシミュレーション解析を行った。その結果の例として深さ2mmのき裂でのシミュレーション解析結果を図5に示す。図5は自動探傷と同様に、探触子の位置を変えて解析して得られたシミュレーションによる波形をBスコープ画像表示したものである。これは周波数5MHzの横波探触子を模擬した解析結果であり、図4に示した探傷条件と対応するものである。図5中のC、Bで示した矢印部分が各々コーナーエコー

及び端部エコーである。図5ではAと記した矢印部分に探傷面からの深さ位置が15mm程度にエコーが確認された。シミュレーション解析結果より伝搬経路を調査した結果、き裂へ当たった横波が反射する際に縦波にモード変換して探触子へ戻った経路と推定された。このシミュレーション解析結果も考慮して図4(a)のAと記した矢印のエコーは端部エコーでは無いと判断した。そこで、図4(a)にBと示した矢印のエコーを端部エコーと判断し、端部エコー法でき裂深さを測定した。その結果き裂の深さを4.5mm(横波)、3.9mm(3MHz縦波)、4.3mm(5MHz縦波)と評価した。

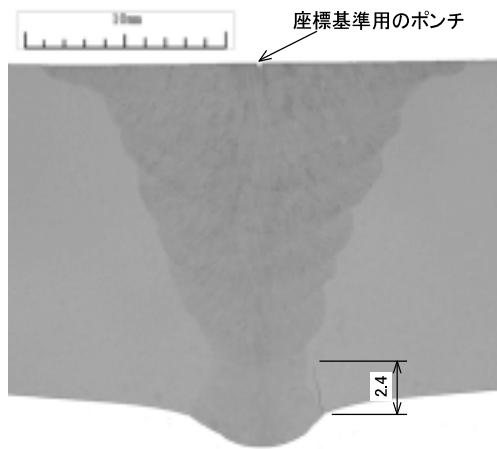
なお、後述する切断調査でき裂深さを実測した結果、深さは3.4mmであり、図4(a)にAと記したエコーはき裂の先端部では無かった。

3.....真とする深さ評価手順の検証

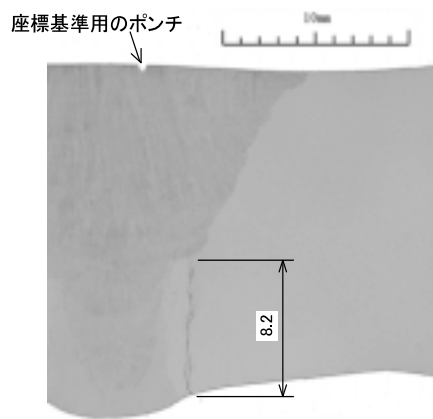
前項までに検討した内容の妥当性を検証するため、オーステナイト系ステンレス鋼のき裂(SCC)10個について前述の方法・手順で測定し、横波/縦波端部エコー法及びフェーズドアレイ法の手法ごとに深さを評価した。深さの評価では、適用した手法ごとにき裂深さを評価した。ただし、き裂の先端部が溶接金属内に入っていると推定したき裂では横波斜角法の深さを評価しなかった。

10個全てのき裂深さを評価した後に、切断調査を行い、UTで測定したき裂深さと切断調査で実測したき裂深さを比較して精度を検証した。代表的なき裂の切断結果(断面写真)を図6に示す。各々、図(a)に示す様に、き裂が溶接熱影響部に存在するものや図(b)に示す様にき裂の先端部が溶接金属に達しているもの及び図(c)に示す様に溶接金属内に深く進展したき裂であった。

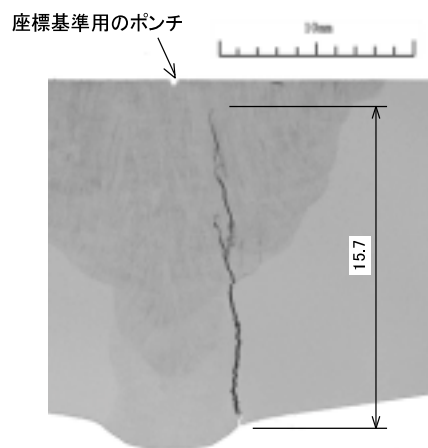
結果を図7に示す。ここで、深さが約15mmの二つのき裂は切断調査の結果、図(c)に示す様にき裂深さの半分程度が、溶接金属内に入っていた。深さが8.2mmのき裂は先端が溶接金属と溶接熱影響部の境界付近にあり、他のき裂の先端部は溶接熱影響部内に存在していた。図7は、一つのき裂に対して複数の手法/条件で測定した結果を全て記載したものであり、極端な過大評価あるいは過小



(a)溶接熱影響部のき裂(深さ2.4mm)



(b)先端が溶接部に達したき裂(深さ8.2mm)



(c)溶接金属内に深く進展したき裂(深さ15.7mm)

図6 代表的なき裂の切断結果(断面写真)

評価は無いことが確認された。

最後に、一つのき裂に対して複数の手法/条件で測定した結果から、き裂の深さの代表値を評価する方法を検討した。この方法には、測定値の最大をとる方法、平均値をとる方法、あるいは、き

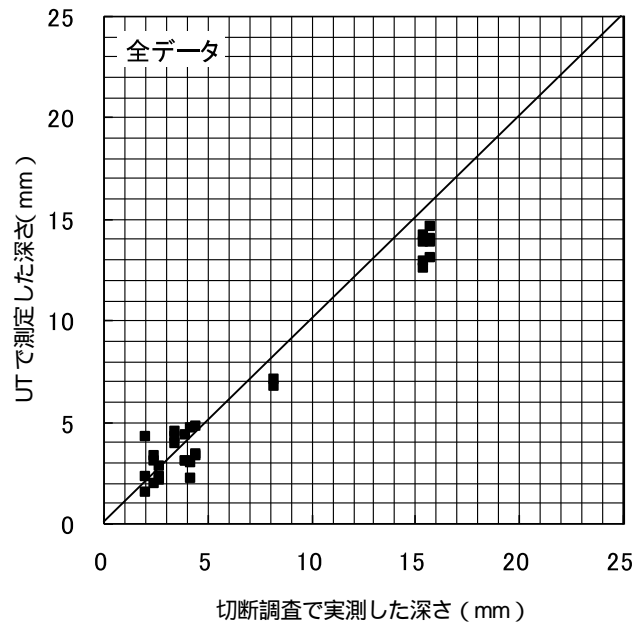
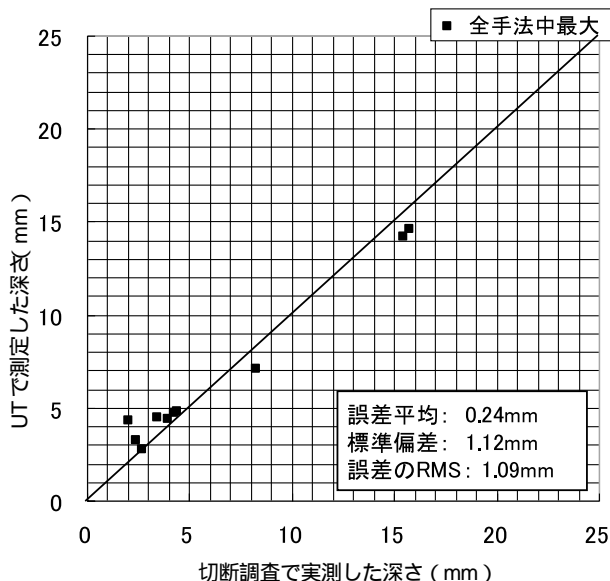


図7 き裂深さ測定結果

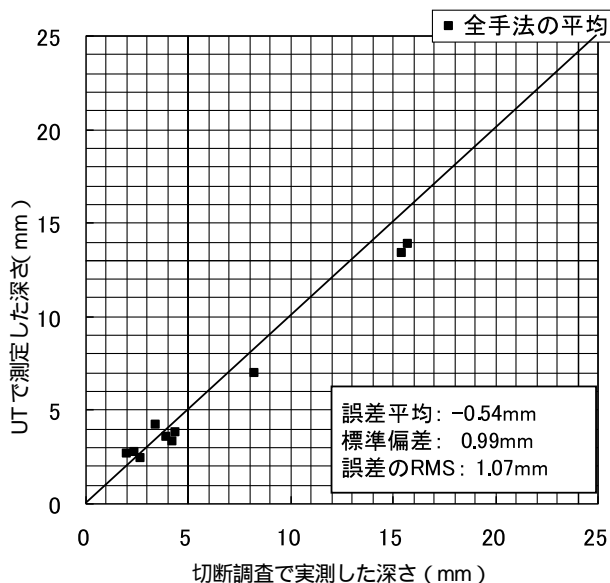
裂深さに応じて例えば浅いき裂であれば横波での測定値を選択し深いき裂であれば縦波の測定値を選択する方法などが考えられる。ここでは、最大値を選択する方法と平均値を選択する方法について、深さ測定精度を比較した。その結果を図8に示す。今回のデータは、一つのき裂に対して個々の手法間での差異が小さいため、最大値を選択する方法と平均値を選択する方法とでは、同等の測定精度であった。

4.....真とする深さ評価方法のまとめ

き裂開口部や裏波の詳細な調査や、この調査結果に基づくシミュレーション解析を活用した端部エコーの識別支援など、試験体の測定に特有な項目はあるものの、複数の方向や複数の探傷面から、横波や縦波斜角法による測定やフェーズドアレイ法により複数のデータを測定し、それらの最大値や平均値とるなど、総合的にき裂深さを評価することで「真とする深さ」の測定精度は、誤差のRMS (Root Mean Square; 2乗平均の平方根) が1mm程度で測定可能であることが確認された。



(a)適用した複数手法間の最大値を選択



(b)適用した複数手法間の平均値を選択

図8 き裂深さ代表値の総合判断方法検討結果

参考文献

- 1 (株)日本非破壊検査協会規格 “NDIS0603 超音波探傷試験システムの性能実証における技術者の資格及び認証”, 平成17年5月18日 制定 (発行 平成17年6月20日)
- 2 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会 原子力発電設備の健全性評価等に関する小委員会 (第8回) 資料8-2 (財)発電設備技術検査協会「超音波探傷試験による再循環系配管サイジング精度向上に関する確性試験について」, 2003年6月
- 3 社 日本電気協会 電気技術指針 軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷指針 JEAG4207-2004



古川 敬



古村一朗



米山弘志



山口篤憲

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

Verification of UT simulation

Software by the photo-elastic visualization system

溶接・非破壊検査技術センター 古村 一郎，古川 敬
関野 晃一

The simulation software for analyzing the ultrasonic wave propagation have been verified from the point of view of wave propagation behaviour and calculated waveform by the experimental results of photo-elastic visualization system and the detected waveform in usual UT examination equipment. The longitudinal angle beam probe was used for the simulation analysis and the photo-elastic experiment. The many aspects had a good agreement between the simulation analysis and the experimental results in the following view points; the main longitudinal wave propagation, the extent in the direction of main longitudinal wave, the generation of mode converted head wave, the extent of shear wave, the beam path length of obtained defect echo. It has been verified that the simulation software used in this experiment have sufficient accuracy for analyzing the ultrasonic wave propagation behaviour.

Keywords: : Computer Simulation, F.E.M., Ultrasonic Visualization, Wave propagation, Wave front, Waveform

1.....はじめに

超音波探傷における最適な探傷条件の探索や，試験体対象部位内での超音波の伝搬を把握して探傷結果の解釈を支援する技術の一つとして，超音波探傷シミュレーション法は有効な技術である。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¹⁾，各種超音波探傷試験結果の評価に活用してきた²⁾。代表的な超音波の伝搬解析法には，有限要素法や差分法による数値解析やレイトレス法のような近似解析などがあり^{3), 4)}，最近では，超音波探傷のためのシミュレーションコードが販売されるようになった^{5), 6), 7)}。さらに半導体技術の進歩による計算機の高性能かつ低価格化により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が，超音波探傷シミュレーションを活用してゆく上では，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る。この検証は，実際の探傷波形と比較することも有効であるが，シミュレーションの特徴は，超音波が伝搬する様子を把握できる

ことでもあるため，超音波が伝搬する様子を観察する実験結果と比較し検証することが有効であると考えられる。

本報告では，実験的に超音波が伝搬する様子を光弾性法により可視化し，実験と同じ条件で解いたシミュレーションの結果と，シミュレーションの特徴である超音波が伝搬する様子の観察と言う観点で比較した検証結果について述べる。

2.....シミュレーションコード，解析モデル及び解析条件

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¹⁾(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た。解析モデルを図1に示す。探触子の設置位置は，スリットの開口部と入射点間の距離が27mmに相当する位置である。図1(b)に示した探触

子の形状は、後述する実験で用いた探触子（縦波斜角70度/2次クレーピング波法用）を模擬してモデル化したものである。

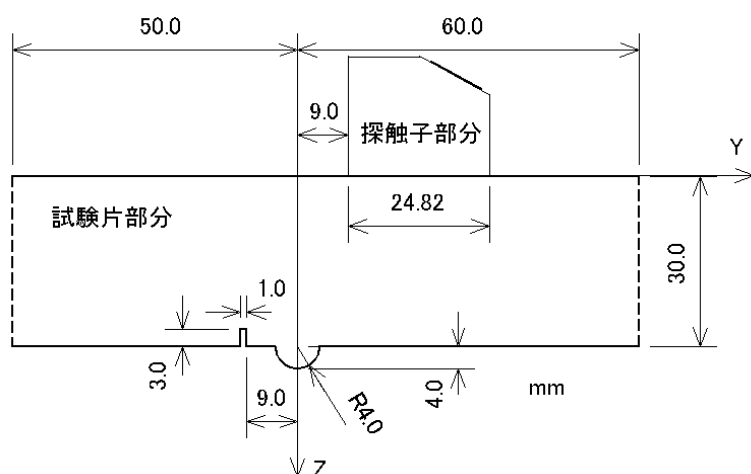
表1に主要な解析条件を示す。共通の項目として要素の寸法を50 μm、時間ステップは約7ナノ秒、送信方法は図1(b)に示した振動子の要素すべてに対して法線方向に変位を与え、受信波形は時間ステップ毎に振動子とくさびの境界面の要素すべての変位を積分した値とした。また、振動子とくさび及びくさびと試験片の境界は固体同士が接して応力、変位共に連続となるようにし、試験片の左右両面（図1(a)の点線部分）及びくさびの上、左右面（図1(b)の点線部分）は無反射境界とした。

ただしFEM1が二次元解析であるのに対しFEM2が三次元解析であるため、FEM2では奥行き方向の要素数を2とした上で変位を拘束して、二次元解析

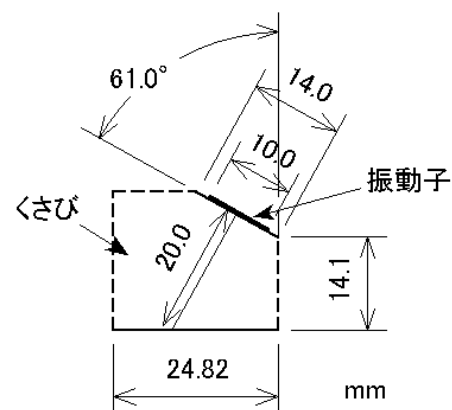
と同等の条件とした。また、FEM1では試験片と探触子部分のみ要素を分割しているが、FEM2では試験片と探触子を含んだ直方体の領域（横110mm × 縦55mm × 奥行0.1mm）全体を要素分割しているおり、要素数が異なっている。

3.....光弾性可視化法による実験方法

実験に用いた試験片は図2に示すように、光弾性超音波可視化法⁹⁾を適用するため、鋼材の音速に近く透明で光弾性効果の高い耐熱ガラスとし、形状を図1(a)の試験片部分の寸法に加工した。ただし、長さ(Y方向の長さ)は300mmとし、奥行き方向の寸法(厚さ)は20mmとした。また、用いた光弾性超音波可視化システムの構成を図3に示す。探触子は2MHz縦波70度斜角探触子（クラウトク



(a) 解析モデル（試験片形状及び探触子位置）



(b) 探触子の解析モデル

図1 解析モデルの模式図

表1 主要な解析条件

	FEM1	FEM2
ソルバーの種類	二次元有限要素法 陽解法	三次元有限要素法 陽解法
要素の形状	正方形	立方体
要素の寸法	48 μm	50 μm
解析時間ステップ	6.77ナノ秒	7.0ナノ秒
ステップ数	6649	6430
伝搬時間	45 μ秒	
試験片の材質, 弾性定数, 密度	耐熱ガラス =23.06GPa, μ=24.1GPa, =2240kg/m ³	
くさびの材質, 弾性定数, 密度	アクリル =5.81GPa, μ=1.3GPa, =1180kg/m ³	

, μはラメの定数, は密度を示す。

レーマ社製 WSY70-2) を用い、クラウトレーマ社製 USIP-12 で超音波を送受信した。接触媒質はグリセリンペーストを用いた。

探触子の設置位置は、スリットの開口部と入射点間との距離を 27mm とした。そして超音波可視化法を用いて探触子から発生した超音波の波面や、スリット状のきずや裏面の R 部で超音波が反射する様子を観察した。可視化結果は光弾性画像合成法の原理⁸⁾で画像処理しており超音波の音圧(最大せん断応力)が表示できるものである。

なお、光弾性可視化法で超音波を観察した場合には横波の方が縦波に比べて 2 倍の感度を有しているため、シミュレーション解析結果と波面の形状や音圧を比較する場合には留意しておく必要がある。

4.....シミュレーション解析結果と実験結果の比較

探触子から発生した超音波の波面の解析結果と観察結果を図 4 に示す。図 4 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

励信後約 12 μ 秒の音圧又は変位を示す。各図の右側は微弱で見えにくい波面に補助線を入れて示したものである。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及び横波の波面、そして右側の図中に から と示した微弱な波面についても同様の結果であった。具体的には、 は縦波が広い角度に広がって伝搬していることと波面が 2 つ現れているかを比較し、及び は横波の広がりぐあいを比較した。 の波面は縦波からモード変換した横波であり、直接発生した横波に続いている。この波面の形状や伝搬状況を比較した。

なお、図 4(c)では縦波の輝度が小さいため、一見すると横波に比べて音圧が低いように見えるが、これは前述の通り光弾性法では縦波と横波に感度の違いが生じるためである。

次に、振動子を励信後約 25 μ 秒における音圧又は変位を図 5 に示す。図 5 の(a)から(c)は各々 FEM1, FEM2 及び光弾性可視化の結果を示す。これらの図には、探触子から発生した横波が裏面で反射する様子や反射の際に縦波にモード変換する様子、さらに



図2 光弾性超音波可視化法に用いた試験片

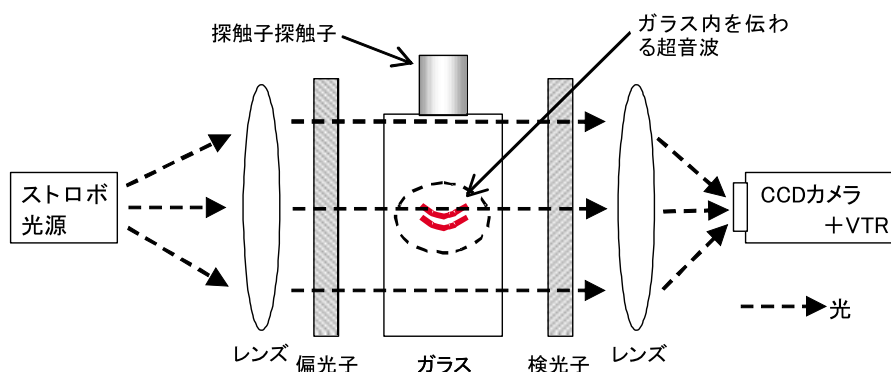
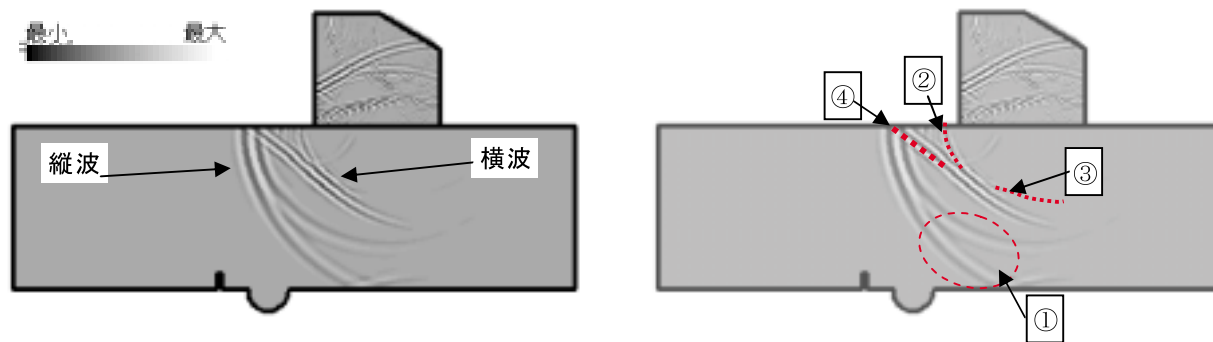
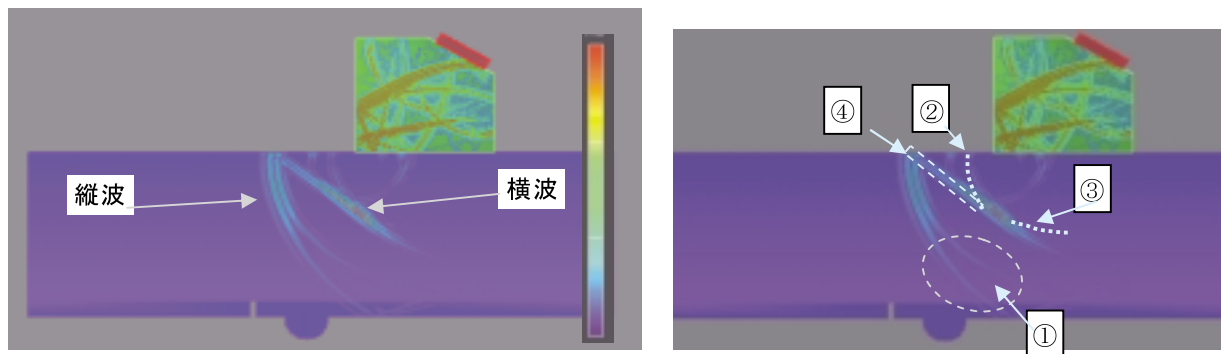


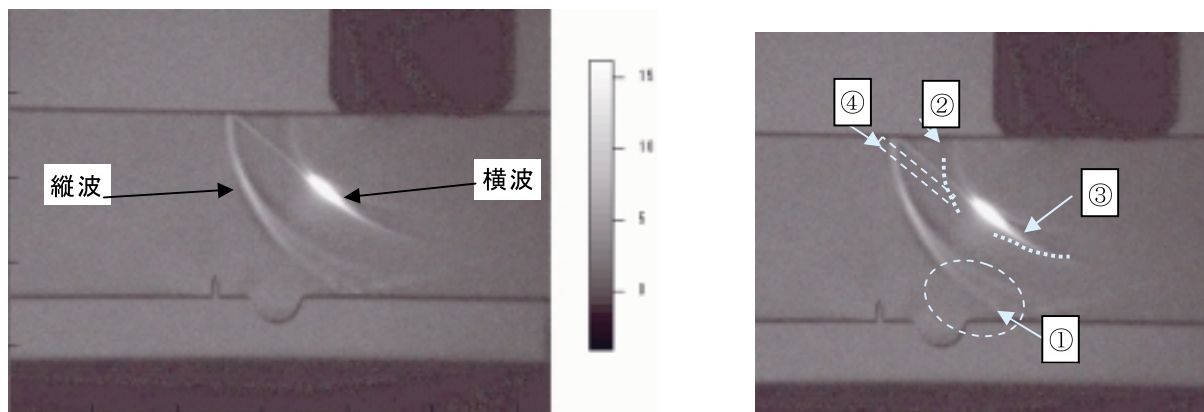
図3 光弾性超音波可視化システムの構成



(a) FEM1による解析結果



(b) FEM2による解析結果

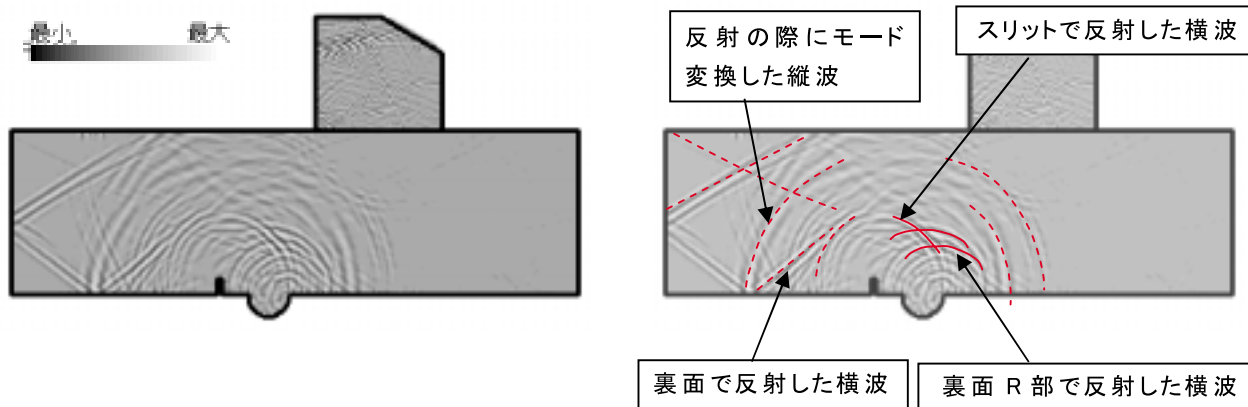


(c) 光弾性可視化結果

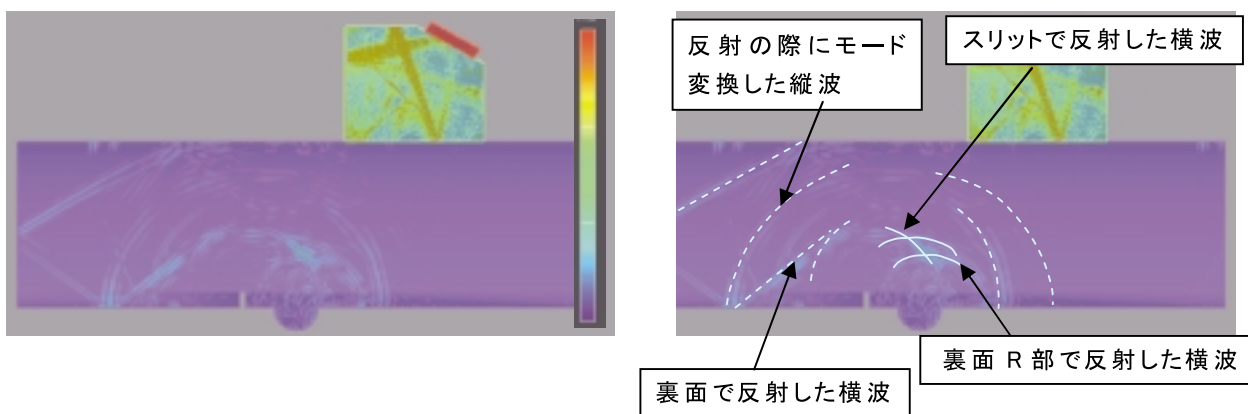
図4 励信後約12 μ秒後の超音波の波面

スリット状のきずと裏面のR部で反射した横波及びモード変換した縦波が確認できる。波面が複雑なため、個々の波面の伝搬経路を示すことは省略するが、図の右側に実線の補助線を示した波面はスリット及び裏面のR部で反射した横波である。その他の代表的な波面に点線で補助線を加えて示しているが、両

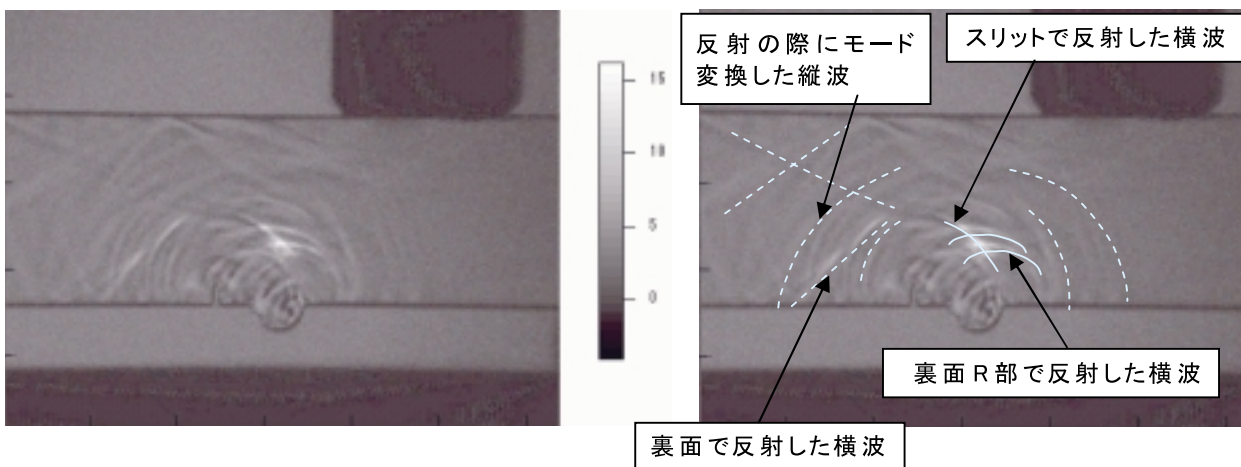
解析結果は光弾性可視化結果と比較し、微弱な波面まで一致していた。探傷波形は、実験及び解析ともにエコーのピーム路程が約41 μ秒で同じであった。



(a) FEM1 による解析結果



(b) FEM2 による解析結果



(c) 光弾性可視化結果

図5 励信後約25μ秒後の超音波の波面

5.....シミュレーションコードの評価

シミュレーション解析結果の概要と実験結果と比較した評価結果を表2に示す。解析精度は波面及び波形ともに実験結果とよく一致しており、超音波探傷のシミュレーション法として有効であると評価した。解析時間や計算機資源については、両コードで次元や要素の設定方法に差異があるため直接の比較は困難であり参考として示したものである。通常のパソコンクラスでも実験と同等な解析が行えることがわかった。

6.....まとめ

超音波の可視化技術を用いて、2種類の超音波探傷のシミュレーション解析コードの精度を検証したところ、いずれのシミュレーション解析コードによる解析結果も、超音波の伝播状況に関して可視化法の結果と精度良く一致することが明らかになり、さらに欠陥からの探傷波形や、そのビーム路程も実験と良く一致していた。

以上の結果を踏まえ、今後も超音波探傷シミュレ

ーションを実機探傷の前の事前検討や、それらの結果を用いた訓練などに積極的に活用してゆきたい。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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
- 5) ComWave: <http://www.engineering-eye.com/ComWAVE/index.html>
- 6) Wave2000Pro: <http://www.cyberlogic.org/>又は <http://www.i-sl.com/>
- 7) CIVA: <http://www-civa.cea.fr/>又は <http://www.sonix.jp/>
- 8) 伊達, 島田: 固体内超音波の光弾性可視化法による定量評価, 非破壊検査, Vol.36 No.9(1987), p.605

表2 評価結果

	FEM1 (二次元解析)	FEM2 (三次元解析)
解析精度(波面)	光弾性可視化結果と同等	光弾性可視化結果と同等
解析精度(波形)	実験の探傷波形と比較し, エコーのビーム路程が同等	実験の探傷波形と比較し, エコーのビーム路程が同等
解析領域	横110mm×縦55mmの試験体及び探触子部分 (解析対象部分以外は要素無し)	横110mm×縦55mm×奥行0.1mmの直方体部分 (解析対象外の空間にも要素有り)
総要素数	167万要素	503万要素
メモリ	107MByte	431MByte
解析時間	1CPU	20分
	2CPU	2時間20分
	8CPU	45分
	16CPU	30分

計算機のCPU: AMD Opteron 2.8GHz, OS: 1及び2CPUはWindows, 8及び16CPUはLinux



古村 一朗



古川 敬



関野 晃一

光弾性法を用いたき裂部の周辺の超音波可視化

Visualization of Ultrasonic Wave Motion Around Crack by Photoelastic Technique

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

Behavior of the ultrasonic wave around a crack inserted to a glass plate is presented in this paper. Two kind of cracks were inserted by impact load and thermal stress, respectively. The ultrasonic wave motion was observed by photoelastic method for ultrasonic visualization. Moreover, the crack opening displacement was measured by optical interferometry technique and the relationship between ultrasonic wave motion and crack opening displacement was investigated.

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

1.....緒 言

超音波探傷法の精度向上にはき裂先端を検出する必要がある。しかし、狭いき裂開口量の欠陥を超音波が透過することが生じ、き裂の寸法を計測する上で問題となる。

このような問題については疲労き裂を金属材料に付与した試験片を用いて、き裂先端で発生する回折波からき裂部の透過および反射する超音波の挙動を調査した研究¹⁾やニュートンリング観察用の平凸レンズを用いて、微小な隙間の反射エコーを調査した研究²⁾³⁾がおこなわれている。平凸レンズを用いた研究では、狭い隙間で発生する高調波を調査した研究⁴⁾がおこなわれている。このように超音波エコーや高調波から狭い隙間の超音波挙動を把握するアプローチは各研究機関でおこなわれている。また、超音波の挙動を直接観察する手法の一つである光弾性法による超音波の可視化⁵⁾では、スリットを入れたガラス試験片を用いて、スリット先端で反射する超音波の挙動を観察した研究がおこなわれている。しかし、き裂についてはガラス板へのき裂の付与が難しいことやき裂開口量を計測することが難しいこと

から、まだ検討の余地が残されている。

本研究はき裂を入れたガラス試験片に光弾性法を適用してき裂周りの超音波の挙動を観察した。試験片は金属材料の音速に近いガラス板を用いた。ガラスの試験片には、衝撃荷重および熱応力でき裂を入れた。狭いき裂開口量とするためには、四点曲げ荷重を加えき裂開口量を調節し、き裂部で超音波が反射および透過する様子を観察した。さらに狭いき裂開口量の計測には、光干渉法で計測し、超音波の可視化と同時にき裂開口量を計測した結果を示す。

2.....光干渉法の原理⁶⁾

Fig.1 に示すように光干渉法は隙間が存在する透明な材料に光 S が入射すると、面 A と面 B で反射した光が干渉し、干渉縞が発生する。この干渉縞から隙間を計測する手法である。干渉縞の縞次数 N と隙間の関係は

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

である。ここで、 λ は隙間に入射した光の波長である。

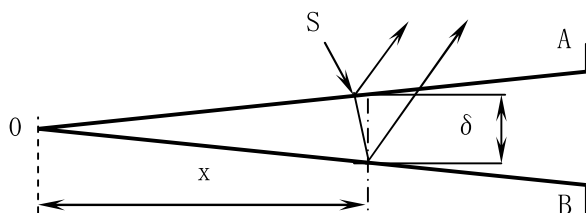


Fig.1 Principle of optical interferometric technique

3.....試験片

用いた試験片の形状をFig.2に示す。材質は光弾性感度を有するショット社のテンパックスフロートを用いた。試験片の端Aは鏡面加工を施した。試験片の中央には熱応力および衝撃荷重でき裂を入れた。熱応力のき裂は、ガラス切りで引掻ききずを付与し、きずを付与した面を加熱した後、冷却することでき裂を入れた。熱応力で入れたき裂は、き裂面が平滑であるが、試験片の温度によってき裂開口量が変化した。一方、衝撃荷重によるき裂の付与はガラス板にハンマで荷重を加え、き裂を入れた。衝撃荷重でき裂を付与した試験片は、き裂面に凹凸が存在するため、熱応力でき裂を入れた試験片に比べ、温度によるき裂開口量の変化が少なかった。

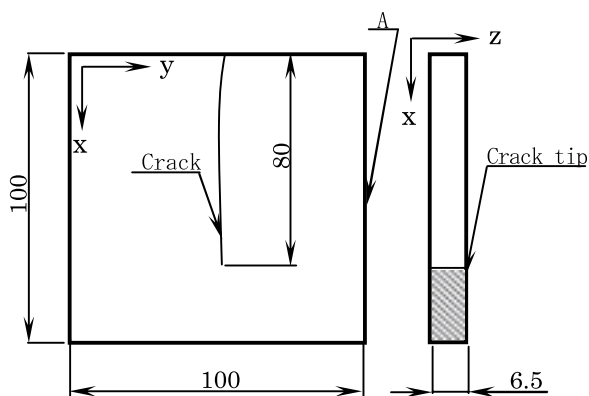


Fig.2 Shape of specimen

4.....実験装置

Fig.3に本研究で用いた実験装置を示す。試験片には四点曲げ荷重を加えき裂開口量を一定とした。この試験片の側面に接触触媒を塗布し、振動子寸法5×5mmの探触子を設置した。用いた探触子は周波数5MHz、超音波の振幅はき裂面に到達する直前

(伝搬距離約50mm)で0.012～0.024μmである。

超音波の挙動を観察するには、光弾性法の実験装置を用いた。一般的な光弾性法の実験装置は、光源に白熱灯または水銀灯を用いるが光弾性法による超音波を可視化するために発光時間の短いストロボライトを用いた。このストロボライトと超音波探傷装置を同期することで物体中を伝播する超音波を静止画として得た。

き裂開口量の計測には、光干渉法を用いて計測をおこなった。光干渉法は光源に白色光を用いた。白色光は複数の波長を有するため、カラーの干渉縞が得られ、単色光を用いた場合に比べ詳細なき裂開口量を計測した。白色光源からの光はビームスプリッタを通し、試験片のき裂部に照射した。き裂部で生じた干渉縞をCCDカメラAで撮影した。

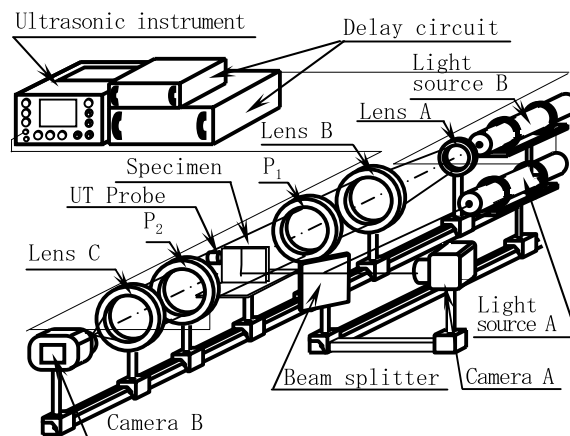


Fig.3 Experimental apparatus

5.....実験結果および考察

(1) 衝撃荷重でき裂を付与した試験片

Fig.4は光干渉法で観察した干渉縞を示す。本図より、カラーの干渉縞が得られていることがわかる。干渉色は主に白、黄、青の干渉縞を観察した。白、黄、赤、青の干渉縞の波長は、それぞれ0.2、0.4、0.5、0.6μmである⁷⁾。また、干渉縞は局部的に黒い縞が観察できるが、これはき裂面に凹凸が存在しているためと考えられる。

Fig.5はき裂先端からの距離とき裂開口量の関係を示す。図中の印は光干渉法で計測した実験点を示し、破線は実験点を外挿した。

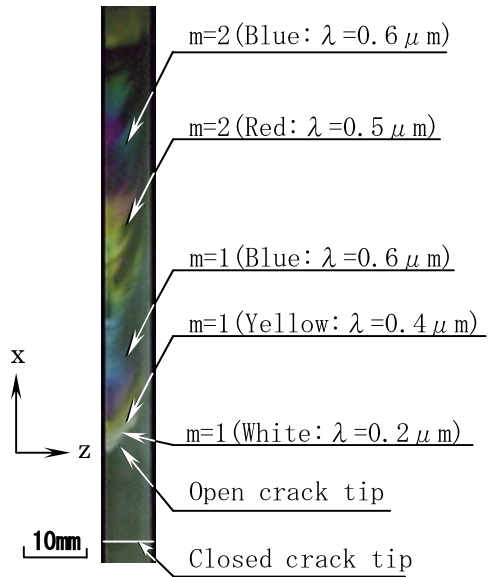


Fig.4 Example interferometric fringe pattern

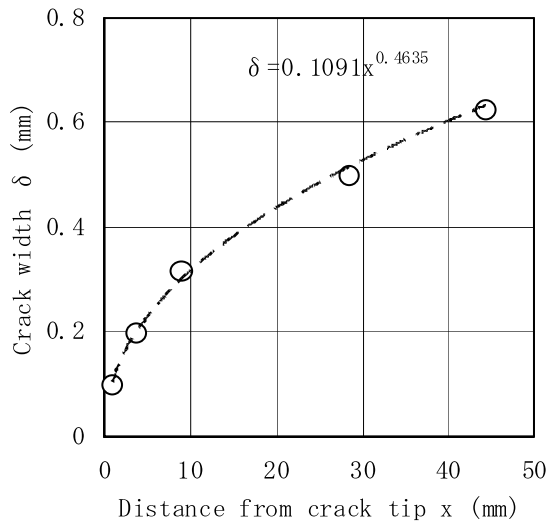


Fig.5 Relationship between δ and x

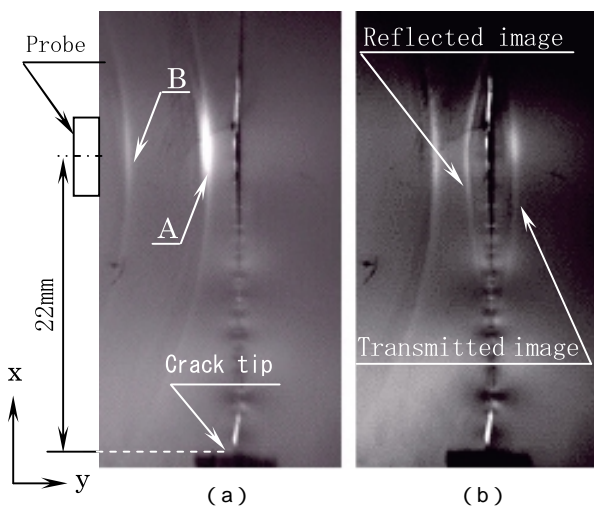


Fig.6 Examples of image of visualized ultrasonic wave and interferometric fringe pattern

Fig.6は衝撃荷重でき裂を入れた試験片のき裂先端 ($x=0\text{mm}$) に探触子を設置し, 超音波の挙動を観察した。Fig.6(a)はき裂部に超音波が入射する直前の光弾性縞を示している。超音波による光弾性縞は図中AとBで観察できる。これは, 振動子の大きさ ($5 \times 5\text{mm}$) に対し, 試験片の板厚 ($t=6.5\text{mm}$) が小さいため, 遅れエコーが生じた。Fig.6(b)はき裂部に超音波が入射し, き裂先端からの距離 $x=9\text{mm}$ の位置で透過および反射した超音波を観察した。 $x=9\text{mm}$ のき裂開口量はFig.5より, 約 $0.3 \mu\text{m}$ であった。しかし, 先行の研究では開口量が $0.005 \sim 0.01 \mu\text{m}$ で超音波が透過すると報告^{1), 3)} されている。今回の測定

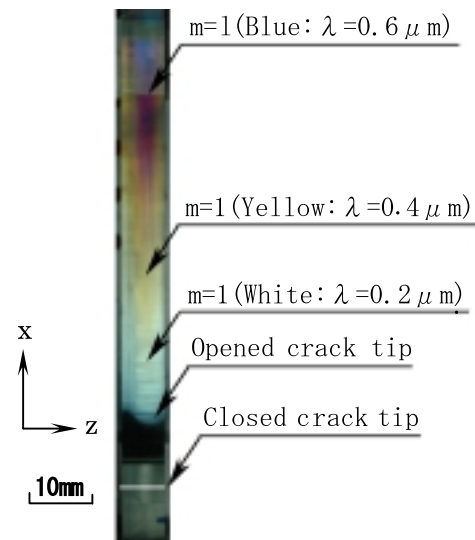


Fig.7 Interferometric fringe pattern (By thermal stress)

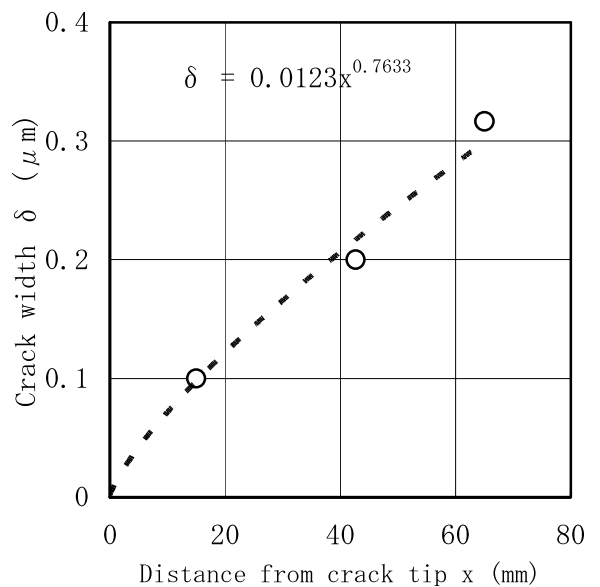


Fig.8 Relationship between δ and x

結果は先行の研究に比べ約30～60倍の差がある。これはき裂面に凹凸が存在し、部分的にき裂面が接触しているため、超音波がき裂部を透過したと考えられる。

(2) 熱応力でき裂を付与した試験片

Fig.7は熱応力でき裂を入れた試験片の干涉縞を示す。き裂面は衝撃荷重でき裂を入れた試験片に比べ、平滑であることがわかる。干涉縞の色合いは白、黄、青の3色が観察でき、それぞれの波長は0.2, 0.4, 0.6 μm である。この干涉縞の干涉色と縞次数を用いて、Eq.(1)からき裂開口量を求めた。Fig.8は熱応力で入れた試験片のき裂先端からの距離とき裂開口量の関係を示す。図中の印は光干渉法で計測したき裂開口量を示し、破線は実験点を外挿した。

Fig.9は探触子をき裂先端($x=0\text{mm}$)に設置したときの光弾性縞を示す。Fig.9(a)は超音波がき裂部に入射する前の画像である。衝撃荷重でき裂を入れた試験片と同様に遅れエコーが生じている。Fig.9(b)は超音波がき裂部に入射した後の光弾性縞である。本図より透過した超音波と反射した超音波を観察し

た。このような挙動はき裂先端からの距離 $x<8.7\text{mm}$ であった。き裂開口量はFig.8より、約0～0.06 μm であった。き裂開口量と超音波の振幅は同じオーダーであった。

Fig.10は探触子をき裂先端から $x=30\text{mm}$ の位置に設置したときの光弾性縞を示す。Fig.10(a)は超音波がき裂部に入射する前の画像である。Fig.10(b)はき裂部に入射した後の光弾性縞である。本図より $x=30\text{mm}$ は超音波がき裂部で反射した。このときのき裂開口量はFig.8より0.16 μm であった。

6.....結 言

衝撃荷重で入れたき裂と熱応力で入れたき裂の試験片を用いて、き裂部の超音波挙動を光弾性による超音波の可視化法で観察し、き裂開口量の計測を光干渉法で計測した。衝撃荷重でき裂を入れた試験片はき裂開口量が約0.3 μm でき裂部を超音波が透過したが、熱応力でき裂を入れた試験片では、0～0.06 μm で超音波が透過した。超音波がき裂部を透過す

δ : Crack opening displacement

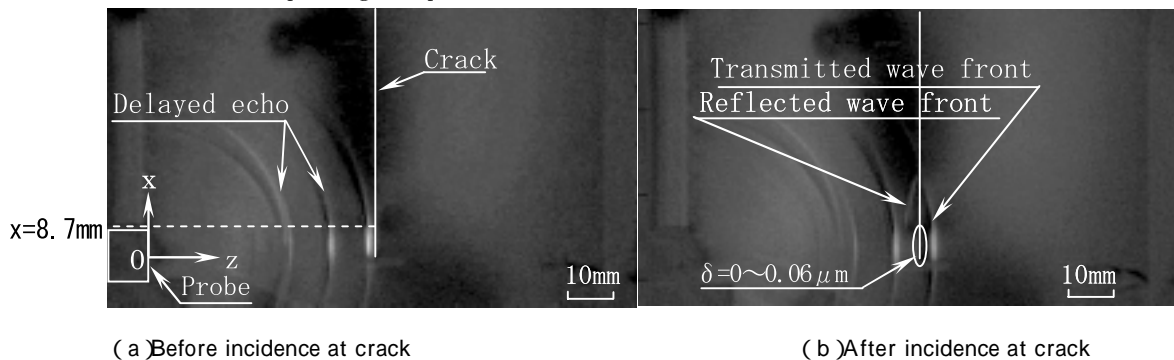


Fig.9 Visualization of ultrasonic wave motion($x=0\text{mm}$)

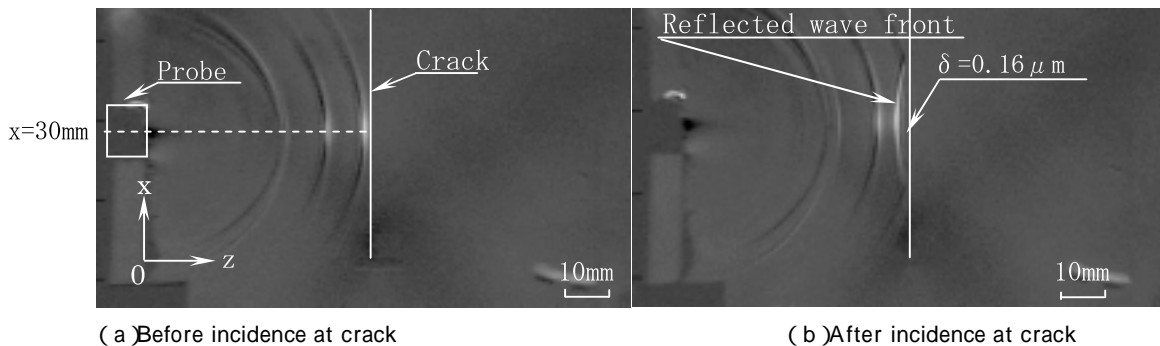


Fig.10 Visualization of ultrasonic wave motion($x=30\text{mm}$)

る要因については、き裂部の表面粗さおよび超音波の振幅が影響すると考えられるため、今後より詳細に調査をおこなう。

参考文献

- 1) T. Mihara et. al.: Relationship between Crack Opening Behavior and Crack Tip Scattering and Diffraction of Longitudinal Waves, Material evaluation,(2004) pp. 943-947
- 2) 伊達和博, 宇田川義夫, 渡辺隆, 坂代一郎: 超音波によるはく離検出の評価, 日本非破壊検査協会 第2分科会資料No.21336,(1991) pp. 38-43
- 3) 佐藤温子, 小倉幸夫, 石川潔: 超高解像度超音波映像装置による欠陥評価, 日本非破壊検査協会 超音波による非破壊評価シンポジウム講演概要集, (1995), pp. 125-131
- 4) 川嶋紘一郎, 山田龍三, 日比野剛士, 坂真澄: ニュートリング用凸レンズを用いた微細隙間の高調波測定, 日本非破壊検査協会 第12回超音波による非破壊評価シンポジウム講演概要集(2005), pp. 77-82
- 5) 伊達和博, 伊藤義晃, 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),(1984), pp. 513-519
- 6) Max Born and Emil Wolf: Principles of Optics, (1999) P. 318 CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS
- 7) A. S Kobayashi: Handbook on Experimental Mechanics, Society for Experimental Mechanics, p.213(1993)



関野晃一



古川 敬



古村一朗

渦電流探傷による分岐欠陥の深さ評価

Numerical Evaluation of the Depth of Branched Cracks Using Eddy Current Testing Signals

溶接・非破壊検査技術センター 程 衛英, 古村一朗

Numerical simulation shows that eddy current testing (ECT) signal of a branched crack is much larger than that of a same deep, single crack. To avoid the over estimation of the depth of a branched-off crack, a depth sizing index, which is designed to have maximum sensitivity to crack depth, is constructed based on an optimization approach, and the depths of branched-off cracks are estimated using this index. This depth sizing approach is numerically and experimentally validated.

Keywords: : Cracks, Depth sizing, Eddy current testing, Optimization methods.

1.....はじめに

渦流探傷試験(ECT)は、導電性を有する構造物の非破壊的検査手法として、広く使用されつつあり^{1)~3)}、最近では欠陥深さサイジング研究も進んでいる。これまでの欠陥深さサイジングの研究は、試験片表面に放電加工により垂直に単一のノッチ状の欠陥を入れて行われることが多く、この場合、ノッチは‘理想的’な欠陥であり、その欠陥面は完全に離れており導電性は持っていない。しかしながら、実機プラントの損傷事例などで報告されている欠陥の形態は、非常に複雑であることが知られており、特に応力腐食割れ(SCC)の場合の欠陥プロフィールは非常に複雑である。Fig.1に典型的なSCCの断面写真を示す。この場合は、複数の割れが深さ方向に直進的に進展する粒内型応力腐食割れ(TGSCC)である。また割れは、途中、き裂面が部分的に接触していると考えられることから、放電加工ノッチの様な理想的欠陥としてのモデル化は、適用できないため、この様な場合に対しては様々な新たなモデルが提案されている。例えば、欠陥内部の部分接触を部分的に導電率を設定してモデリングする方法、複数近接欠

陥を複数近接並行欠陥として近似する方法などがあり、これら欠陥モデルに基づいて欠陥長さおよび欠陥深さを推定している^{1)~3)}。

ECTでは、ECT信号 z は欠陥プロフィール p の関数であるため($z = f(p)$)、複数の小さな割れで欠陥を構成する場合に p は個々の割れのパラメータを含んでいる。分岐した各割れの深さを逆問題で解く場合、割れの深さと位置、長さおよび他のパラメータを一緒に決定しなければならない^{3),4)}。Chengら³⁾は、分岐欠陥の割れ数を事前に決めて、割れの位置と深さを逆問題解析により推定している。このアプローチは限られた割れ数の場合には適用可能かもしれないが、Fig.1に示すような複雑な欠陥に対して

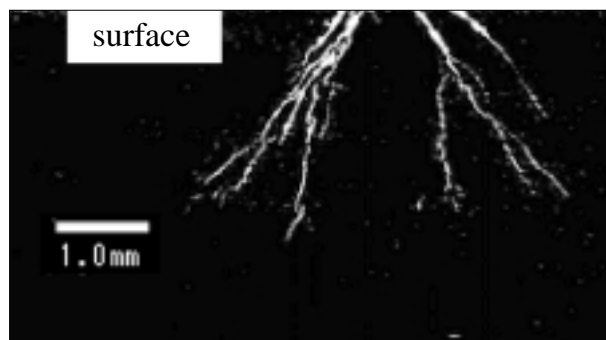


Fig. 1 Microscopic picture of a SCC (cross section)

は適用できない。一方、供用期間中の原子力プラントの健全性を評価する維持規格によれば⁵⁾、複数の近接欠陥は近接の程度等の条件によっては一つの合体した欠陥として評価する。この合体欠陥の深さと長さは、その複数欠陥の最大深さと最大長さで定義されることから、非破壊検査としては複数近接欠陥の個々の深さ及び長さを評価できるにこしたことはないが、少なくとも上記の最大深さと最大長さを測定できることが必要となる。

複雑形状欠陥の深さサイジングの第一歩として、分岐欠陥の深さサイジングを行うため、本研究では分岐欠陥の深さサイジング・アプローチ法を提案した。具体的には、深さサイジングを行うため、欠陥最大深さに一番の感度を持つ欠陥深さサイジング指数を構築して、この指数を用いて欠陥深さを推定するという方法である。ここでは、このアプローチ法について解析的および実験的に確認した結果について報告する。

2.....分岐欠陥のECT 信号

2.1 ECT 信号の数値解析

最近数十年間の電磁界シミュレーション技術の進歩により、高い精度を備えたECT 信号を計算することが可能になった。本研究では、まず、辺要素有限要素法(Edge-FEM)およびReduced磁気ベクトルポテンシャル方法⁶⁾を備えた有限要素法コードを用いて、シミュレーションにより欠陥の深さ方向の傾き、分岐などのECT 信号へ与える影響を数値的に調査した。解析コードの支配方程式を次に表示する:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} + j \omega \mathbf{A} = \mathbf{J}_s \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \frac{1}{\mu_0} \nabla \mathbf{A} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_0} \nabla \mathbf{A} = \mathbf{J}_s \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{A} はベクトルポテンシャル、 μ と μ_0 はそれぞれ比透磁率と導電率、 μ_0 は空気の比透磁率、 \mathbf{J}_s は励磁コイル中の電流密度である。Reduced磁気ベクトルポテンシャル方法は、全体の分析領域について欠陥を持つ導体および空気に分けて、励磁コイルによるフィールド効果をBiot-Savartの法則を用いて表わす。これにより、励磁コイルを分割する必要がなくなり、励磁コイルの移動が常に伴うECTにとっては大きな利点となる。ECT 信号はBiot-Savartの法

則を用いて計算する。

Fig.2では、分岐欠陥を 形に分岐した欠陥としてモデリングした。2本の欠陥は試験片表面上 $X=0$ で分岐し、角度 θ_1 及び θ_2 で進展してゆく。垂直深さをそれぞれ d_1 と d_2 で表わす。維持規格により、この欠陥の深さは $\max(d_1, d_2)$ である。一方、Fig.2の任意の片方の欠陥を一つの傾き欠陥として扱っている。試験片表面に垂直する欠陥の傾き角度は0度である。

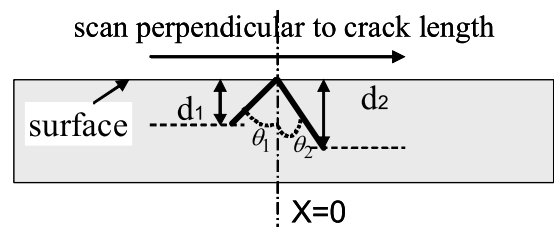


Fig. 2 Configuration of a branched-off crack(cross section).

Fig.3には、厚み8mmのインコネル試験片に付与された長さ40mm、深さ $d_1 = 2\text{mm}$ 、 $d_2 = 4\text{mm}$ 傾き角度 $\theta_1 = 30^\circ$ 、 $\theta_2 = 30^\circ$ 、欠陥開口幅0.2mmの分岐欠陥のECT 数値計算信号を示す。インコネルの導電率は $9.7 \times 10^5 \text{ S/m}$ である。解析に用いたプローブは差分型のプラスポイントプローブである。プローブは欠陥長さ方向に直交で欠陥長さの中心を通過するように $X = -8\text{mm}$ から $X = 8\text{mm}$ まで走査した。走査ピッチを0.5mmとした。プローブのリフトオフは0.5mmとした。

測定は多重周波数ECTシステム(R/D TechによるMultiScan MS5800)によって行った。リフトオフ変化の影響を抑えるため、プローブをスプリングで押さえて走査した。校正された測定信号をFig.3に

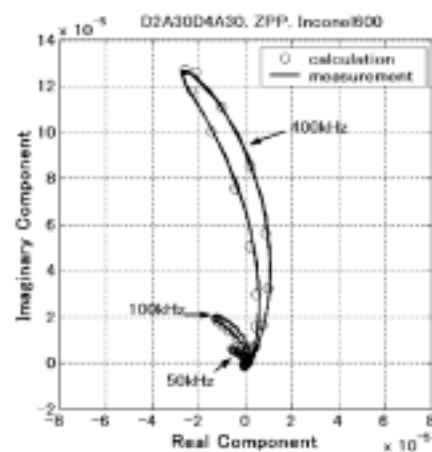


Fig. 3 Comparison of calculation and measurement ECT signals.

示す。Fig.3に示すように計算と測定信号との良い一致により：

1. 辺要素有限要素法 Edge-FEM コードの有効性が証明され、数値計算により測定データの不足を補給することが可能であることが証明された。
2. 数値解析手法による欠陥深さサイジングの可能性が得られた。

2.2 ECT信号の特徴量抽出

まず、100個の分岐欠陥を仮定して、プローブを欠陥に直交走査する時のECT信号を計算した。欠陥に付与した試験体は8mm厚のインコネル600板とした。用いたプローブの深さサイジング能力⁷⁾を考慮の上、欠陥の垂直深さを1 - 7mmとした。一方、切断試験結果より、枝分かれ欠陥の傾き角度は概ね40度以下であるため、欠陥の傾き角度を0 - 40度とした。即ち、二本の傾き欠陥の間の角度は80度以下である。各欠陥の長さ及び開口幅はそれぞれ40mm及び0.2mmとした。したがって本研究におけるECT信号に影響を及ぼす恐れのある要因は、各枝分かれの傾き角度および深さである。

Fig.4は、3mm、4mmおよび5mm深さ欠陥のECT信号のLissajousプロットを示す。図中の表示‘DxAxx’の‘D’および‘A’は、各枝分かれ欠陥の垂直深さおよび傾き角度を示す。例えば、D3A0は垂直深さ3mm、傾き角度0、すなわち表面に垂直な単一欠陥であることを示す。またD3A40-D3A40は、それぞれ垂直深さ3mm、左右対称に40度傾く二本の分岐枝を持つ欠陥を示す。これらの2個の欠陥のECT信号は欠陥の幅中心に関して対称であるため、 $X = -8\text{mm}$ から $X = 0\text{mm}$ までの走査と $X = 0\text{mm}$ から $X = 8\text{mm}$ まで走査の信号は対称となり、Lissajousプロットは単一のカーブになる。しかしながら、欠陥D3A40、D3A20-D4A30およびD5A20-D2A40は、欠陥がX方向に非対称でないためにECT信号も非対称となり、Lissajousプロットは閉ループとなる。

欠陥D3A40-D3A40とD3A40は同じ3mm深さであるが、二本の枝分かれを持つD3A40-D3A40のECT信号は単一欠陥D3A40の信号よりはるかに大きい。一方、解析結果によれば、欠陥D3A40-D3A40(最大深さ $d=3\text{mm}$)、D3A20-D4A30(最大深さ $d=5\text{mm}$)、およびD5A20-D2A40(最大深さ $d=5\text{mm}$)は異なる

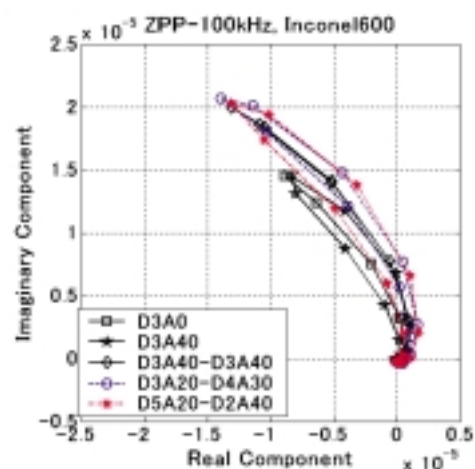


Fig. 4 Lissajous plots of calculated ECT signals

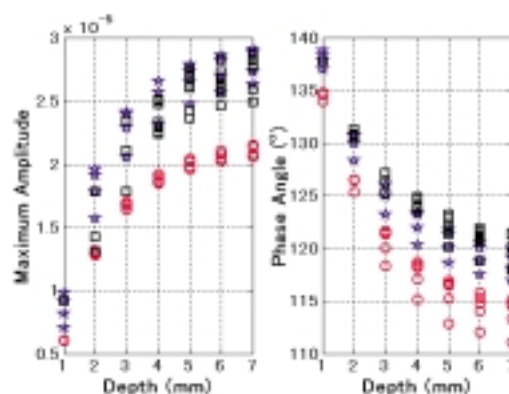


Fig.5 Characteristic parameters (amplitude and phase angle at the maximum amplitude point) of simulated ECT signals of the 100 assumed cracks.

深さにもかかわらず、ECT信号の最大振幅および対応する位相角(励磁周波数100kHz)はほとんど同じである。したがって、ECT信号の波形から単一欠陥か分岐欠陥かの決定は不可能である。ある励磁周波数のECT信号の最大振幅および位相角だけでは、深さサイジングに十分ではないと考えられる。

ECT信号は、励磁周波数 f およびサンプリング位置 x とともに変化するため、(4)のようなベクトルで表すことができる。

$$\mathbf{Z} = [z_{am}^{fk}(x_l), z_{ph}^{fk}(x_l)]^T \quad (4)$$

ここで、添字の am と ph は信号の振幅と位相角を示す。 k と l は周波数およびサンプリング位置の指標である。この100個の欠陥のECT信号から、それぞれの最大振幅とその点の位相角度を抽出し、Fig.5に示す。シンボル‘o’、‘☆’および‘□’はそれぞれ単一欠陥、対称な2本分岐欠陥、及び非対称の2本分

岐欠陥の特徴量（最大振幅及び位相角度）を表す。深さ1mm及び2mm欠陥の最大振幅及び位相角度ははっきり区別できるが、深さ2mm, 3mm, 4mm, 5mm, 6mm, 及び7mm欠陥の特徴パラメータのオーバーラップが観察された。分岐欠陥のECT信号は各枝分かれの影響により、同じ深さの単一欠陥の信号より大きい。したがって、単一欠陥のモデルに基づいて欠陥深さを推定する場合、過大評価の傾向が生じる。

従って、実機損傷で見られるような複雑形状欠陥の深さを推定するためには、分岐欠陥かどうか、及び分岐の数を不明な状態で適切に欠陥深さを推定できるアプローチを構築する必要がある。

3.....深さサイジング・インデックスの構築

欠陥の垂直深さ d は欠陥サイジングにもっとも重要なパラメータである。この垂直深さを他の欠陥パラメータと分離して表すと、ECT信号 z は $z = f(d, \bar{p})$ で表示される。ここで、 \bar{p} は欠陥深さ d 以外の欠陥パラメータの合計を表す。

欠陥深さサイジングの精度を改善できる方法として多重周波数ECT信号を利用する方法が実証されている²⁾。これに基づいて、本研究では、100kHzおよび400kHz周波数ECT信号の振幅および位相角を用いて、深さサイジング・インデックスを構築する。式(4)は式(5)のように表わされる。

$$z = [z_{am}^{f_{100kHz}}, z_{ph}^{f_{100kHz}}, z_{am}^{f_{400kHz}}, z_{ph}^{f_{400kHz}}]^T \quad (5)$$

深さサイジング・インデックス S はECT信号の線形結合によって定義され、 $S = cTZ$ である。ここで、 c はサイジング・インデックスを構築する係数である。サイジング・インデックス S に欠陥深さに対して高い感度を持たせるため、

$$\partial S(d, \bar{p}) / \partial d = \max \quad (6)$$

欠陥のECT信号の最大振幅は欠陥深さに対して指数的に変化することを考慮して、式(7)により指数関数を用いて近似する、

$$d_{est} = a_0 + a_1 e^{-S} + a_2 S e^{-S} \quad (7)$$

ここで、 d_{est} は推定の欠陥深さである。 a_0 , a_1 , また a_2

はフィッティング係数である。最適サイジング・インデックス係数 c は下記の目的関数の最小化により求める。

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_{true}^i - d_{est}^i)^2 \quad (8)$$

なお、式(8)の最小化は、以下の条件の下に行う。

- 1) 同じ深さ欠陥のサイジング・インデックス S の変化を最小にすること。
- 2) 異なる深さ欠陥のサイジング・インデックス S の平均値の差を最大にすること。

式(8)中の N は最適係数を探すに用いるケース数で、 d_{true} は実際の欠陥深さである。

4.....分岐欠陥の深さ推定

4.1 欠陥深さの数値推定

3項で述べた深さサイジング・アプローチを数値シミュレーションにより確認する。

全 N 個の欠陥から、順次的に1個の欠陥を取り出し、残る $N-1$ 個欠陥を用いて係数を探して、その取り出す欠陥の深さを推定する。すなわち、全 N 個の欠陥のうち1個は確認用とし、残された $N-1$ 個欠陥をトレーニングのために使用する。確認用欠陥の深さは $N-1$ 個欠陥のトレーニングで得られた係数を使用して推定する。

測定ノイズとして、2項で得られた100個想定欠陥のシミュレーションによるECT信号に5%の白色雑音を加えた。Fig.6は、100kHzおよび400kHzのECT信号を使用した場合の想定欠陥の推定深さを示す。縦軸及び横軸はそれぞれ推定深さ及び実際の深さを表示する。Fig.6(a)は、ECT信号の最大振幅ポイントでの振幅および位相角を使用することにより得られたサイジング結果である。1~7mm深さ欠陥の最大の評価エラーは、それぞれ0.2, 0.5, 0.5, 1.0, 0.8, 0.7および1.2mmである。Fig.6(b)は、最大振幅の半分になるポイントでの位相角を評価パラメータに加えた時の深さサイジング値である。1~7mm深さ欠陥の推定値の最大評価エラーは、それぞれ0.1, 0.3, 0.4, 0.4, 0.5, 0.8および1.1mmである。これにより、深さサイジング精度は、最大振幅の半分になるポイントでの位相情報を加えることにより改善されていることが分かる。

Table 1
DEPTH SIZING OF SIMULATED CRACKS
USING MEASUREMENT SIGNALS

Crack	True Depth (mm)	Estimated Depth (mm)
D2A0	2	1.7
D2A15	2	1.8
D2A30	2	1.7
D4A15	4	3.2
D4A30	4	4.0
D4A45	4	3.8
D6A0	6	6.2
D6A15	6	6.4
D6A30	6	4.6
D6A0-D2A30	6	7.0
D2A30-D4A30	4	3.0
D4A15-D4A45	4	4.0
D4A15-D6A30	6	5.2

4.2 深さサイジング・アプローチの実験による確認

8mm厚さのインコネル600板に13個の放電加工によるノッチを付与した試験体について測定した。欠陥はそれぞれ深さ2,4および6mm, 長さは40mm, 欠陥幅は0.2mmである。Table 1に各欠陥の深さ及び傾き角度を表示する。測定信号は2項に記載したプローブ及び探傷装置で収集した。

Fig.6(b)の深さサイジング結果で得られた最適化された係数を, 今回の測定した欠陥への深さサイジングに利用した。測定信号により推定された欠陥深さをTable 1に示す。その結果, 2mm, 4mm及び6mm分岐欠陥の最大評価エラーはそれぞれ0.3mm, 1mmおよび1.4mmである。実験雑音などを考慮すると, この深さサイジング結果は妥当と考えられる。これにより, この深さサイジング・アプローチの有効性については, 実験的にも確認されたと考える。

5.....結論

本研究では最適化インデックスを構築し, EDMで設けた分岐欠陥の深さサイジングを行った。その結果, このアプローチは, 数値的および実験的にも確認された。

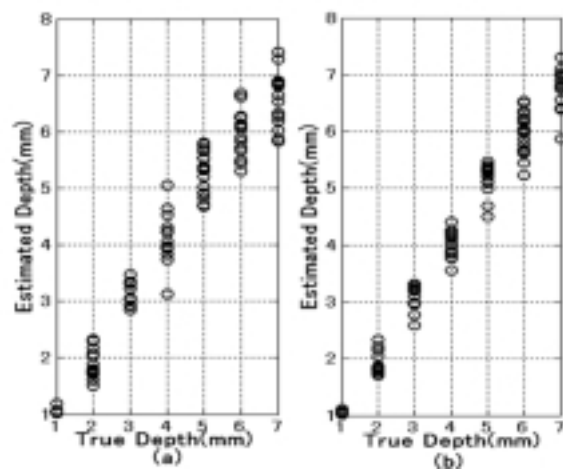


Fig. 6 Estimated crack depths of the 100 assumed cracks.

参考文献

- 1) Z. Chen, K. Aoto, and K. Miya, "Reconstruction of cracks with physical closure of signals of eddy current testing", IEEE Transactions on Magnetics, 36(4): 1018-1022, 2000.
- 2) W. Cheng, S. Kanemoto, I. Komura, and M. Shiwa, "Depth sizing of partial-contact stress corrosion cracks from ECT signals", NDT&E International, 39: 374-383, 2006.
- 3) W. Cheng, K. Miya, "Reconstructio of parallel cracks by ECT", Intl. J. Appl. Electromagn. Mech., 14: 495-502, 2001/2002.
- 4) M. Rebican, N. Yusa, Z. Chen, K. Miya, T. Uchimoto, and T. Takagi, "Reconstruction of multiple cracks in an ECT round-robin test", ibid, 19: 399-404, 2004.
- 5) "Code for nuclear power generation facilities-rules on fitness-for service for nuclear power plants", JSME SNA1, 2004.
- 6) H. Fukutomi, T. Takagi, J. Tani, and G. Chen, "Consideration of ECT signals of SG tube with copper deposit", Studies in Applied Electro, agnetics and Mechanics 12: Electromagnetic Nondestructive Evaluation, IOS Press, The Netherlands, pp. 79-86, 1997.
- 7) W. Cheng, I. Komura, M. Shiwa, and S. Kanemoto, "Eddy current examination of fatigue cracks in inconel welds", J. Pressure Vessel Technology, 129: 169-174, 2007.



程 衛英



古村一朗

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

Reduction of toughness by long term thermal aging and recovery of it in modified 9Cr-1Mo steel weld metal

溶接・非破壊検査技術センター 西川 聡, 堀井 行彦
長谷川忠之, 古村 一朗

Long term aging at 600 °C reduced the toughness of weld metal for modified 9Cr-1Mo steel after PWHT (750 °C, 1.5 hour). But it was recovered by heat treatment with the same thermal cycle as PWHT. In the aging weld metal many number of Laves phase larger than 1 μm were observed by TEM investigation. However almost whole of the Laves phase were vanished from the weld metal heat-treated with the same thermal cycle as PWHT after long-term aging. Therefore, it may be said that the reduction and recovery of toughness would be caused by the Laves phase.

Keywords: : Modified 9Cr-1Mo steel, Weld metal, Laves phase, Toughness recovery

1.....緒 言

現在、火力発電所では二酸化炭素の削減および高効率化を目的として、より高温・高圧で操業する傾向がある。そのため、従来用いられてきた1.25Cr-0.5Mo, 2.25Cr-1Mo鋼ではクリープ強度が不足するため、これらよりクリープ強度が高い改良9Cr-1Mo鋼(9Cr-1Mo-Nb-V)の使用が増加している。しかし、改良9Cr-1Mo鋼の母材は、実機運転温度(539 °C)で長期間使用した場合に、Laves相の析出によりじん性が低下することが知られている¹⁾。一方、改良9Cr-1Mo鋼のMIG溶接継手では、母材より溶接金属でじん性が低くなる傾向がある²⁾。しかし、溶接金属の長期間使用時におけるじん性の変化については、あまり報告されていないのが現状である。そのため、本研究は改良9Cr-1Mo鋼の溶接金属に着目して、長時間の熱時効によるじん性の変化とその原因について調査を行った。

2.....実験方法

表1に母材、溶接材料の化学組成を示す。外径318.5mm、板厚35mmの配管突合せ継手を製作した。図1にパスの積層図を示す。予熱・パス間温度は200 ~ 300 °Cとして、1 ~ 3パス目はTIG溶接(溶接入熱0.85 ~ 2.02 kJ/mm)、それ以降のパスはMIG溶接(溶接入熱1.17 ~ 2.93 kJ/mm)で積層した。なお、評価対象は全てMIG溶接金属とした。製作した継手の溶接部を図2に示す温度履歴で、溶接後熱処理(PWHT)と実機運転温度を模擬した600 °Cの熱時効を行った。600 °C, 1年間熱時効した溶接部は、PWHTと同じ熱処理(HT)を再度付与した。そして、各段階において板厚中心からシャルピー衝撃試験片を採取して30 °Cで衝撃試験を行い、破面のSEM観察、及びノッチ部近傍から抽出レプリカ試料を採取して、TEMによる析出物の同定を行った。また、

表1 母材、溶接金属の化学成分(wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Nb	V
母材	0.11	0.24	0.46	0.008	0.001	0.97	8.81	0.07	0.19
溶接金属	0.08	0.27	1.29	0.007	0.006	0.98	8.86	0.03	0.19

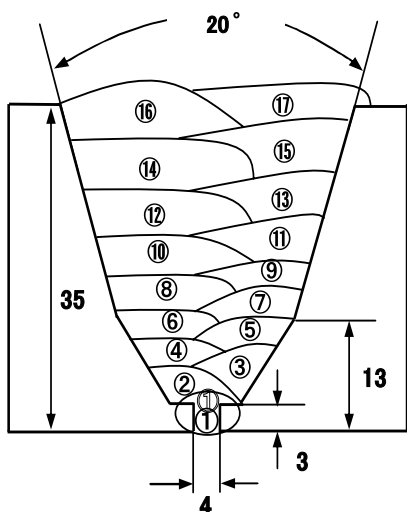


図1 製作した試験体の積層図

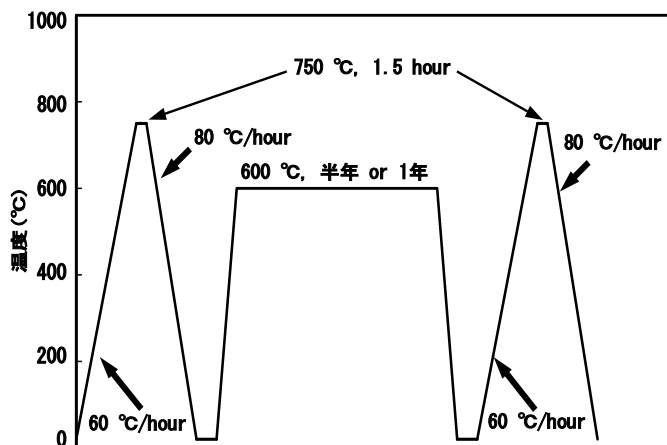


図2 溶接部に付与した温度履歴

板厚中心における溶接部のマイクロビッカース硬さを、荷重1 kgfで加圧時間15 sの条件で測定した。

3.....実験結果及び考察

3.1 溶接ままのじん性

図3に溶接ままにおける各部の衝撃値を示す。溶接金属のじん性が、母材や溶接熱影響部と比較して最も低いことから、改良9Cr-1Mo鋼の溶接継手では、溶接金属のじん性に着目する必要がある。そのため、次節以降はPWHTや熱時効を受けた溶接金属のじん性の変化について検討した。

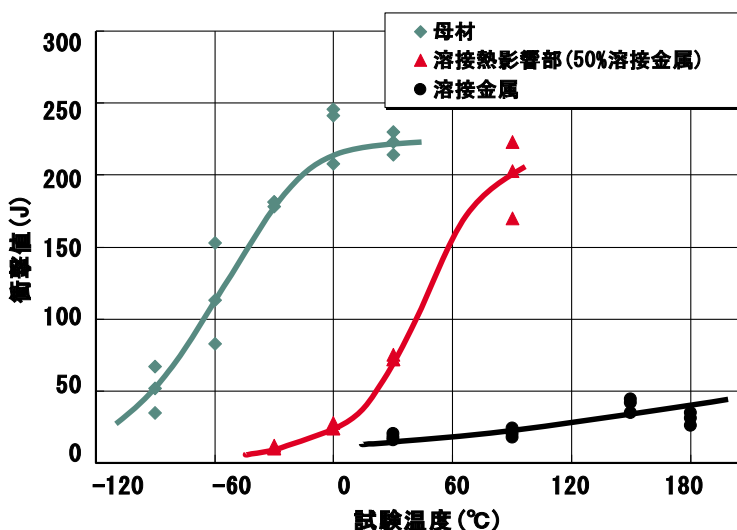


図3 溶接ままの各部の衝撃値

3.2 熱時効及びHTによるじん性と硬さ変化

図4に、各段階での溶接金属の衝撃値の変化を示す。溶接ままでは $vE_{30 AV} = 15 J$ であるが、PWHTにより $vE_{30 AV} = 134 J$ に上昇する。そして、熱時効を受けると衝撃値が半年間で $vE_{30 AV} = 62 J$ 、1年間で $vE_{30 AV} = 53 J$ となり、熱時効時間が長くなるのに伴いじん性が低下する傾向を示した。しかし、1年間熱時効後にPWHTと同じ熱処理を再度付与することで、衝撃値がPWHTままと同等の $vE_{30 AV} = 137 J$ に回復した。図5に破面観察結果を示す。PWHT+1年間熱時効材は、へき開破面を呈していた。しかし、PWHT+1年間熱時効+HT材では、PWHT

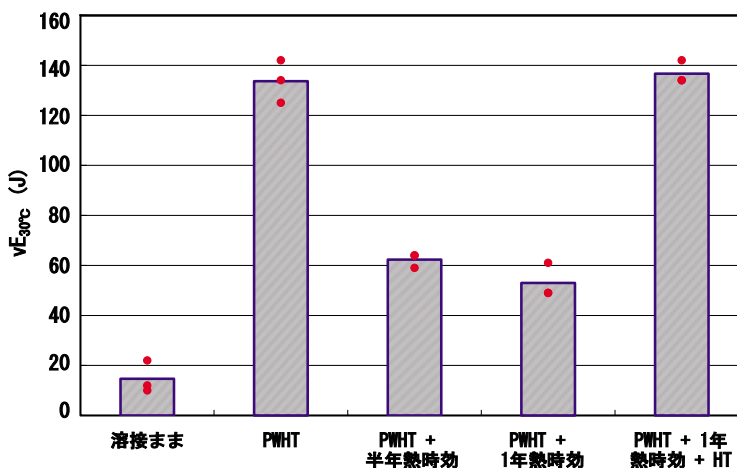


図4 PWHT，熱時効およびHTによる衝撃値の変化

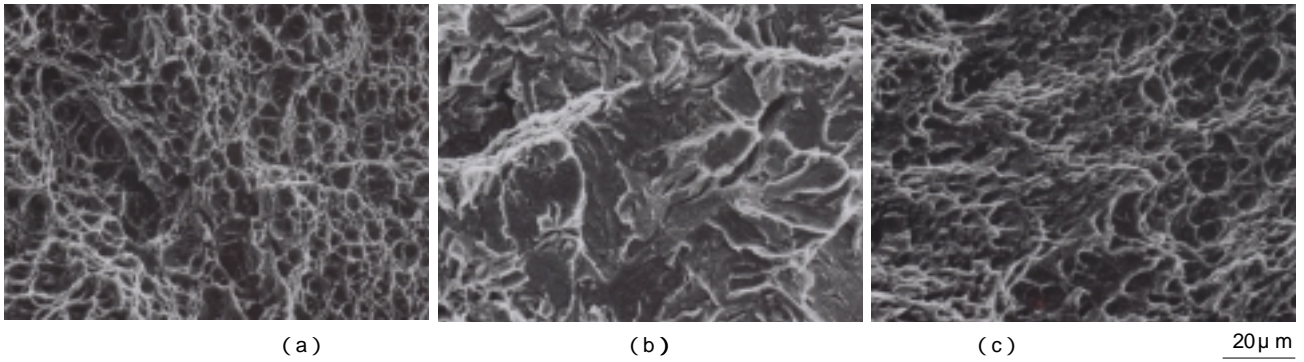


図5 シャルピー衝撃試験片の破面観察結果(a)PWHT (b)PWHT+1年熱時効 (c)PWHT+1年熱時効+HT

ま材と同じ延性破面を呈しており、衝撃値の変化と対応していた。このようなじん性の低下と回復は、9Cr-Mo系の母材では既に報告がなされている。朝倉らは、焼ならし(1050℃, 0.5 hour)後に700℃, 1 hourで焼戻しを行った8.52Cr-1.55Mo-0.05Nb-0.17V鋼母材に対して、550℃, 100 hourの熱時効を受けてじん性が低下しても、700℃, 1 hourの熱処理でじん性が回復することを報告している³⁾。また、細井らは焼ならし(1050℃, 0.5 hour)後に775℃, 1 hourで焼戻しを行った9.85Cr-2.31Mo-0.06Nb-0.12V鋼母材に対して、600℃, 1000hourの熱時効を受けてじん性が低下しても、775℃, 1 hourの熱処理でじん性が回復することを報告している⁴⁾。したがって、熱時効を受けてじん性が低下した溶接金属においても、熱処理を行うことでじん性が回復することは妥当であるといえる。

図6に溶接部の硬さ分布を示す。溶接金属の硬さはPWHTにより大幅に低下する。しかし、熱時効により硬さにほとんど変化は見られず、再びHTを加えることで平均Hv=10程度軟化した。すなわち、最初のPWHTにおけるじん性向上以外は、硬さ変化とじん性に大きな相関は認められなかった。

3.3 じん性と金属組織の関係

じん性の変化が生じる原因を明らかにするため、金属組織を調査した。図7に光学顕微鏡による組織観察結果を示

す。PWHTにより黒点に示される析出物がほぼ全面に析出するが、PWHT+1年間熱時効との間では大きな変化は見られなかった。しかし、HTを受けることで析出物が若干少なくなる傾向を示した。光学

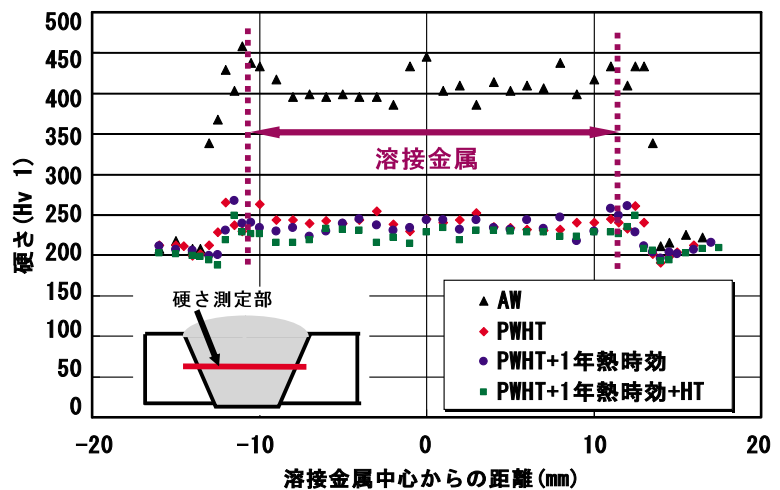


図6 溶接部の硬さ分布

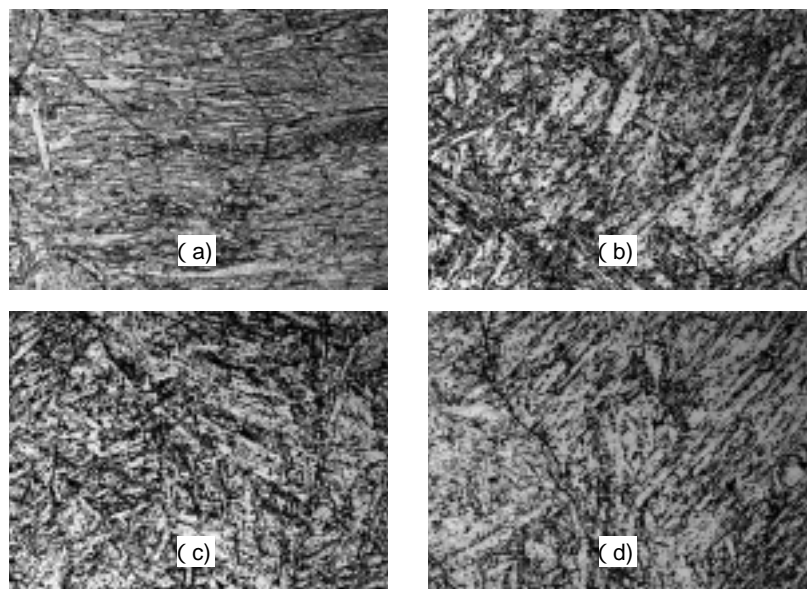
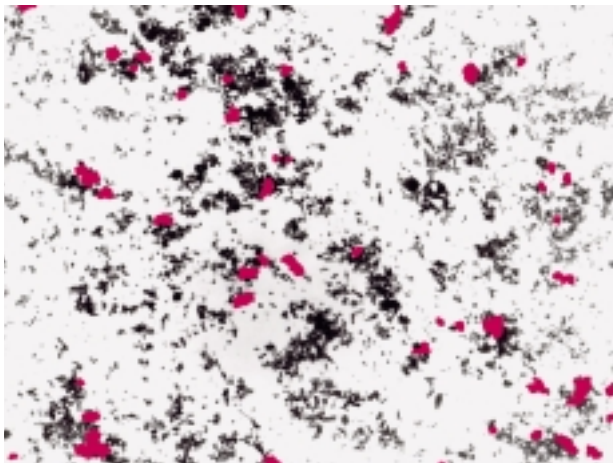


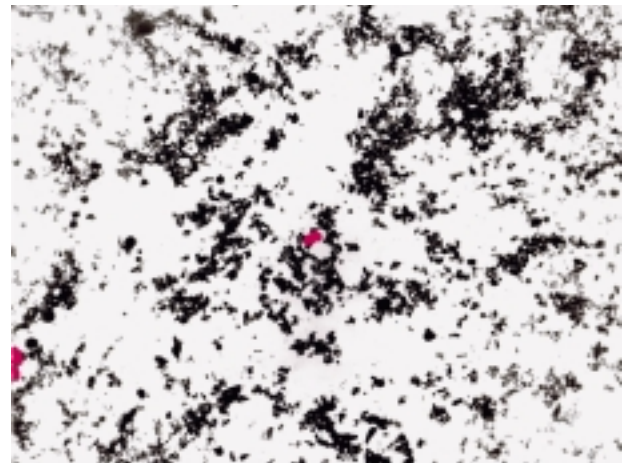
図7 溶接金属組織(a)溶接まま, (b)PWHT, (c)PWHT+1年熱時効, (d)PWHT+1年熱時効+HT

表2 各溶接金属で観察された析出物

PWHT	PWHT+1年間熱時効	PWHT+1年間熱時効+HT
M ₂₃ C ₆ MnSiO ₃ V(Cr, Nb)CN	Laves相(多量) M ₂₃ C ₆ MnSiO ₃ V(Cr, Nb)CN	Laves相(0.7 μm以下, 少量) M ₂₃ C ₆ MnSiO ₃ V(Cr, Nb)CN



(a)



(b)

2 μm

図8 各溶接金属のLaves相の分布(a)PWHT + 1年熱時効, (b)PWHT + 1年熱時効 + HT

顕微鏡観察では熱時効による顕著な組織変化が見られなかったため、TEMで析出物の形態を詳細に調査した。観察された析出物を表2に示す。PWHT+1年間熱時効とPWHT+1年間熱時効+HT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。図8にPWHT+1年間熱時効とPWHT+1年間熱時効+HTのLaves相の分布を示す。図中、赤色部がLaves相を示している。(a)に示すように、1年間の熱時効では長さが1 μm以上の粗大なLaves相が多数析出しているのが確認された。Laves相以外の析出物の多くは1 μm以下であった。一方、(b)に示すようにPWHT+1年間熱時効+HTではLaves相が認められたものの、長さが0.7 μm以下で、かつPWHT+1年間熱時効と比較して非常に少量であった。したがって、PWHTと同じ熱処理を行うことでLaves相が母相に固溶することにより、じん性が回復したと考えられる。細井らはじん性が低下した母材の熱処理による回復は、析出したLaves相の固溶によると述べており⁴⁾、溶接金属においても同様の現象が生じたと考えられる。

4.....まとめ

本研究はPWHT(750℃, 1 hour)を受けた改良9Cr-1Mo鋼MIG溶接金属に対し、実機運転温度を模擬した600℃で熱時効を行い、じん性の変化と原因について調査した。以下に得られた結果をまとめる。

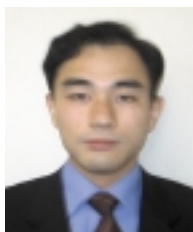
- (1) 熱時効時間が長くなるのに伴い、じん性は低下する傾向を示した。
- (2) 1年間の熱時効で、じん性が $vE_{30-AV} = 53 \text{ J}$ に低下しても、再びPWHTと同じ条件で熱処理を行うと、PWHTままと同等の $vE_{30-AV} = 137 \text{ J}$ にじん性が回復することがわかった。
- (3) 1年間の熱時効で、長さが1 μm以上の粗大なLaves相が多数析出していた。そして、再度PWHTと同じ熱処理を付与することで、ほとんどのLaves相が母相に固溶して消失した。そのため、じん性の低下と回復はLaves相の析出と固溶に起因すると考えられた。

5.....成果の活用

今後，じん性が低下した溶接金属に対して，熱処理温度を変化させて何 でLaves相が消失するか調査する。これにより，じん性回復に必要な最低限の温度が明らかとなり，現場で適用するに当たっての熱処理条件として提言することができる。

参考文献

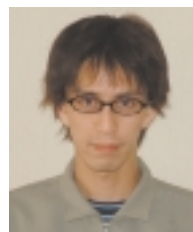
- 1) C. R. BRINKMAN, D.J. ALEXANDER and P. J. MAZIASZ: Modified 9Cr-1Mo Steel for Advanced Steam Generator Applications, ASME/IEEE Power Generation Conference, Boston, 1990
- 2) 西川聡，堀井行彦，村川英一，田中甚吉：Cr-Mo系耐熱鋼溶接部のじん性，溶接学会全国大会概要集 第73集(2003)364-365
- 3) 朝倉健太郎，河淵靖，藤田利夫：高Crフェライト系耐熱鋼の加熱脆化因子，鉄と鋼 第75年 第7(1989) 1209-1216
- 4) 細井祐三，和出昇，國光誠司，瓜田龍実：9Cr-2Mo耐熱鋼の長時間熱時効による脆化機構に関する考察，鉄と鋼 第76年 第7号(1990)1116-1123



西川 聡



堀井行彦



長谷川忠之



古村 一郎

放射光CTイメージングによる Ni基合金溶接金属中SCCのき裂検出

Direct Observation of Stress Corrosion Cracking in Ni-Base Alloy
by X-ray Imaging Synchrotron Radiation

溶接・非破壊検査技術センター 中東 重雄, 古村 一郎
兵庫県立大学 山本 厚之, 大西 陽子
藤尾 和樹, 角谷 英剛
寺澤 倫孝
高輝度光科学研究センター 梶原堅太郎

X-ray imaging experiments were conducted on Nickel-base Alloy (NCF600) with Stress Corrosion Cracking using a synchrotron radiation X-ray beam in BL19B2 of SPring-8. The X-ray beam was controlled to be monochromatic by Si double-crystals and collimated by a slit. The distance between the sample and the detector was changed from 410mm to 800mm, and the X-ray energy was 37keV. Photographs were taken by X-ray CCD camera. As a results, the hair cracks of SCC in NCF600 alloy were clearly detected by the imaging.

Keywords: : Synchrotron Radiation CT-imaging Ni-base alloy SCC SPring-8

1.....目的

溶接部の内部欠陥検査等に多く用いられている非破壊検査法の一つである超音波探傷試験 (Ultra sonic Testing : UT) の測定精度は, 現状切断試験により実測し評価しているが, 応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking : SCC) のようにき裂が3次元的に生じる場合, 切断試験のような2次元測定では大きな誤差が生じる懸念がある。また複雑な枝状のき裂が途中で途切れたり, 接触したりした場合超音波はそれらの部位で反射あるいは透過し, 実際のき裂長さとは異なり大きな誤差要因となる。

一方, 超音波探傷における最適探傷条件の検討や検査対象部位の超音波伝搬経路を正確に把握し探傷結果の解析のためのサポートや超音波探傷測定技術の教育, 訓練等の教材としての超音波探傷シミュレーション法の開発¹⁾²⁾³⁾⁴⁾が進められているが, これらシミュレーション法の活用の際に解析結果の精度やその有効性について検証しておくことは重要, かつ不可欠である。このシミュレーション法の高精度化や高度化には, 材料の冶金学的な物性および特性に

関する情報はもちろん, 測定対象物中のき裂の性状や進展挙動についての正確な知見を得ることが重要であるが, これまで鋼中のき裂分布についてはAl合金や炭素鋼の疲労き裂についての報告はある⁵⁾⁶⁾が SCCのような複雑なき裂についての観察事例はない。

そこで本研究では, 原子力発電プラントで多く用いられておりUT測定検査のニーズが高いNi基合金溶接部について, その溶接金属中に生じたSCCき裂の3次元分布や性状について知見を得るため最近技術進歩の著しい放射光 (Synchrotron Radiation: SR光) を用いたCTイメージング法 (X-Ray Computer Tomography) により調べた。

2.....試験方法

2.1 供試材および測定用試験片

供試材は, Ni基合金NCF600 (15Cr-7Fe-0.15C-Ni) で, 板状の供試材に被覆アーク溶接SMAW (溶接棒NIC70AH, 140A, 26V, 13 ~ 24cm/min. 層間温度28 ~ 150) にて溶接部を作製し, SCCの発生を促進するため675 × 2Hrs. の鋭敏化処理を行なった後, テトラチオン酸カリウム溶液中に浸漬し, SCCき裂を

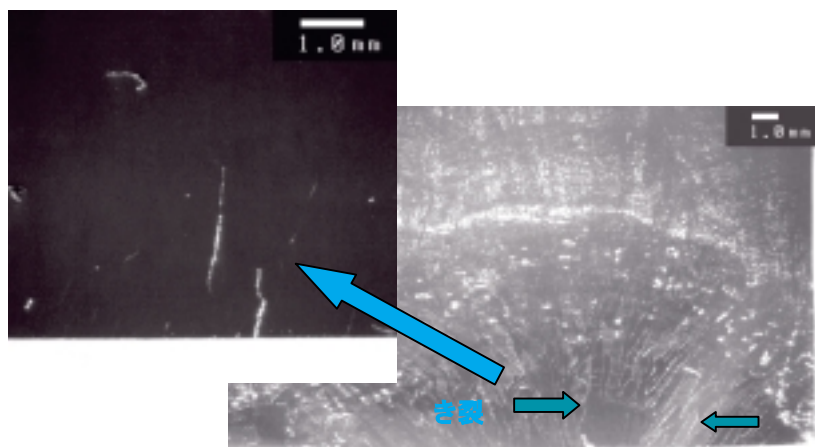


図1 Ni基合金溶接金属中に付与されたSCCき裂（光学顕微鏡写真）

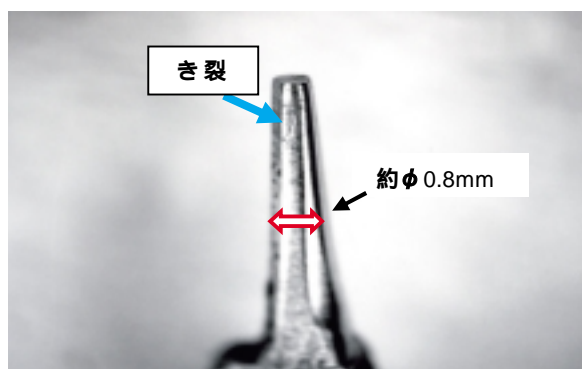


図2 測定用丸棒試験片の外観
(試料No.VF2-1)

付与した。き裂深さは、浸漬中の電位を計測しながら制御した。図1にNCF600溶接金属中に付与されたSCCき裂の光学顕微鏡による観察結果の一例を示す。

CTイメージング測定用試料は試料を回転させながら測定するため丸棒状である。測定用試料は、き裂が発生している部位より切り出した。図2に作製した測定用試料の外観を示す。採取した丸棒試験片の直径は、約 0.8mmである。このサイズは、用いる放射光(SR光)のエネルギーによって決まる。

2.2 CTイメージング測定法

SR光を用いたCTイメージング法は、X線と物質との相互作用(吸収、位相、回折)を利用し、物質中を透過したX線の強度分布(コントラスト)を測定する。測定法には、透過画像投影タイプ(非走査タイプ)と走査タイプとがある。前者は、直接拡大像が得られる、実時間観察が可能、顕微CT(Computed Tomography: CT)へと展開が可能などの特徴があるのに対し、後者は得られる情報がデジタルである

こと、試料からの様々な情報が一度に得られる、マイクロビーム光学系なので微小領域の蛍光X線分析や解析測定に応用できる等の特徴がある。しかし測定時間が長いという欠点もある⁷⁾。またX線と物質との相互作用については、吸収率の差が大きい試料では吸収効果を、生体試料のように吸収率の小さい試料の場合には位相(屈折)効果を、また完全性の高い単結晶(半導体など)中のひずみ(転位など)の観察等には回折効果の利用が適しており、これら効果は、目的に合わせて単独または併用して用いられる。

本研究では、SCCき裂の検出が主目的であることから非走査タイプイメージング法による吸収効果を選択したが、位相(屈折)効果についても検討した。測定は、大型放射光施設SPring-8の産業利用ポートBL19B2を用いた。このビームポートでは、5~100keVの広範囲のエネルギーのSR光を取り出すことができる。本試験では、低エネルギーSR光ほど吸収効果が大きく、高エネルギーSR光ほど位相(屈折)効果が大きいことから比較的低エネルギーSR

光の利用を目標とした。また100 μm 厚のFeの透過X線強度が半減するSR光エネルギーは約30keV⁸⁾であること、丸棒試料の加工技術等を考慮し、本試験では37keVのSR光を選定した。このSR光エネルギーに対するCTイメージング法の測定試料厚は、最大0.5mm程度と計算された。そこで本試験では、0.5～0.8mm範囲の丸棒測定用試料を準備した。

用いたCTイメージング測定装置の外観を図3に、また模式図を図4にそれぞれ示す。試料を透過したSR光は、2結晶分光器(Siの(111)面を利用)を通過し、蛍光板で可視光に変換され、CCDカメラで測定される。CCDカメラの画素数は1024×1024ピクセル

、実効的なピクセルサイズは約6 μm である。試料とCCDカメラとの距離すなわちカメラ長は、像の分解能に大きく影響する。吸収効果目標としてカメラ長を410mmに、位相(屈折)効果目標として800mmにそれぞれ設定し測定した。

測定は、SR光のビームサイズをコリメータで12×10mmとし、回転試料台上の丸棒試料を0.5ピッチで0～180°まで回転させ、各位置3秒間露光し撮影した。撮影後、得られたX線透過像よりFiltered Back Projection法により横断面および縦断面像を構築し、それら画像より3次元像を再構築した。表1に測定条件をまとめて示す。

表1 測定諸条件

SR光エネルギー	37 keV
コリメータサイズ	12×10mm
カメラ長	410mm, 800mm
CCD画素数	1024×1024
実効ピクセルサイズ	約6 μm
撮影角度/撮影範囲	0.5°ピッチ/0°～180°
撮影時間	3sec/各位置
3次元再構築 soft	Filtered Back Projection 法

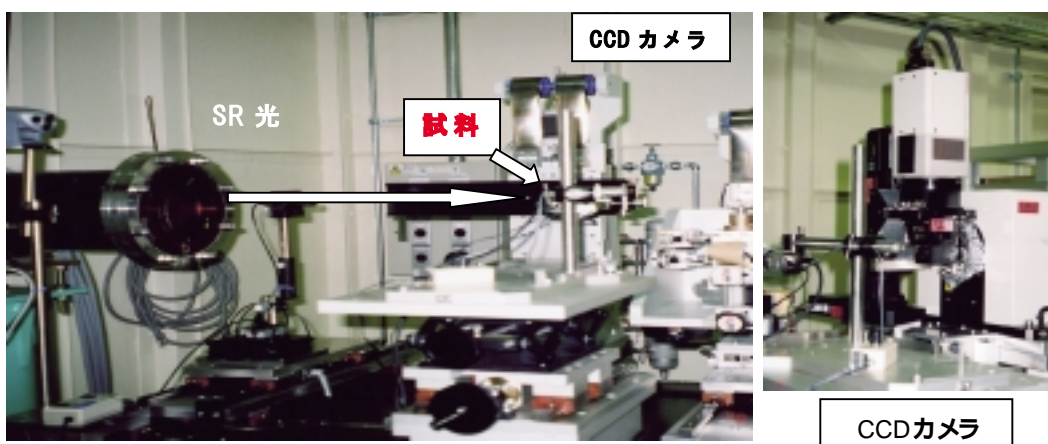


図3 CTイメージング測定装置外観

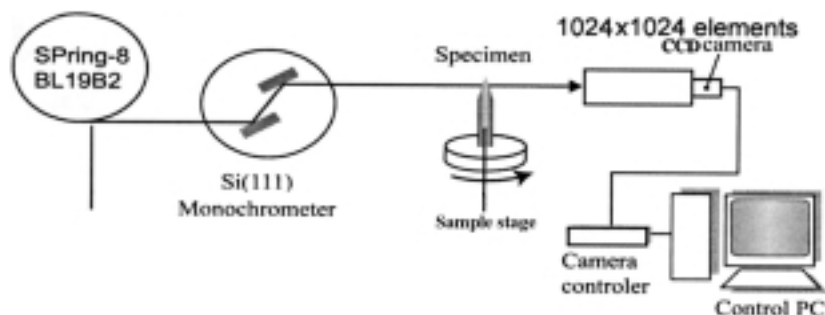


図4 装置構成図

3.....結果と検討

3.1 き裂分布について

図5には、カメラ長410mm、直径 0.69 - 0.73mmの試料 (No.VF2-2-1) を0.5 ピッチで0 ~ 180 まで回転させて撮影したX線透過像をFiltered Back Projection法により縦断面および横断面像として構築した結果を示す。き裂が鋼中を複雑に屈曲、進展している様子がはっきりとわかる。図5 および 図6 では、き裂(黒いコントラスト)が途中数箇所 で途切れているが、図5 では連続して観察されている。従ってこのき裂は、途中き裂幅が非常に小さくなり像解像度以下になったか、あるいは途切れている等が考えられる。そこで3次元再構築像により詳細に観察すると、き裂幅が非常に狭くなっていることがわかった。このように縦断面X線透過像、横

断面構築像および3次元再構築像を組合わせて解析することにより鋼中き裂の分布状態が明確にわかる。また図5の縦断面透過像よりき裂コントラストの幅を実測し、像分解能を調べた結果、縦断面X線透過像の試料上部近傍(写真上部)の微細なき裂の幅は、約10 μm、中央部のそれは約25 μmであった。

一方、図6には、別の試料(試料No. VF2-4-1)の結果を示す。き裂は、単調、かつ平坦で疲労き裂のようである。同じSCC付与条件であるがこのようにき裂分布や性状が極端に異なっていることが分かった。この原因についてはここでは議論しないが、CTイメージングによりSCCのき裂進展挙動解明にも有用な情報が得られることがわかる。

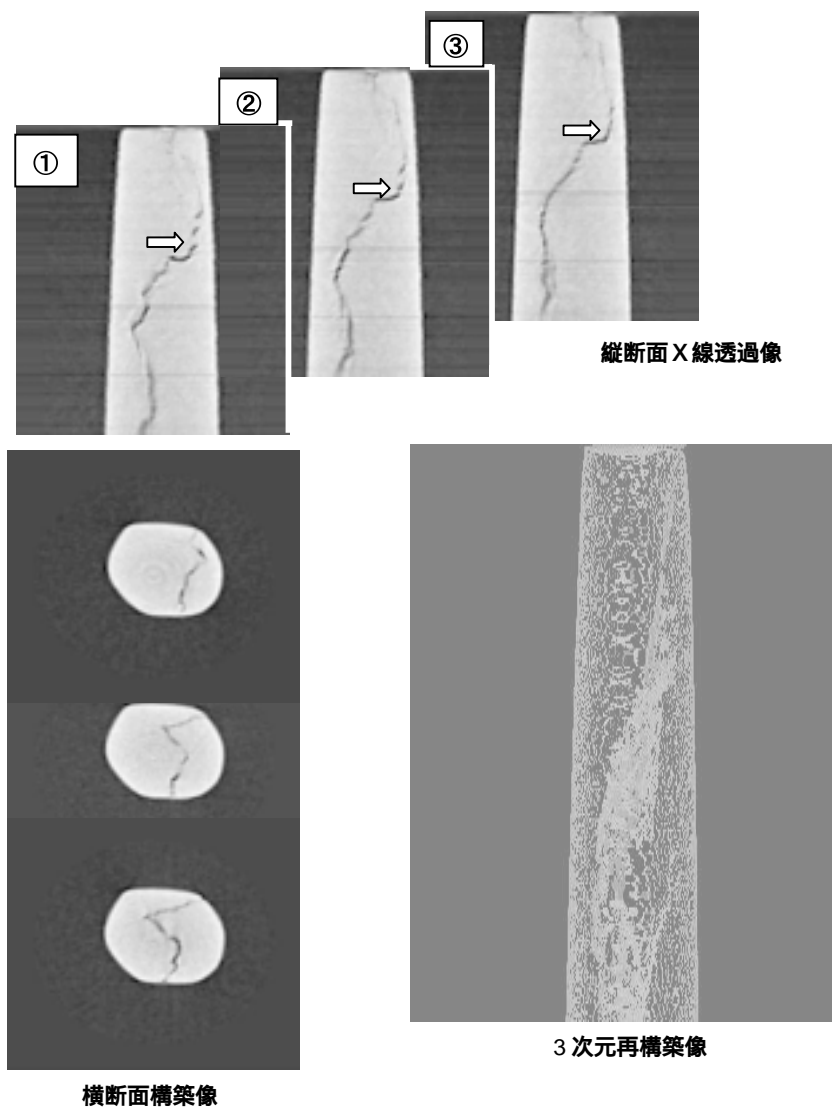


図5 NCF600合金溶接金属中のき裂分布(その1)
(試料No.VF2-2-1)

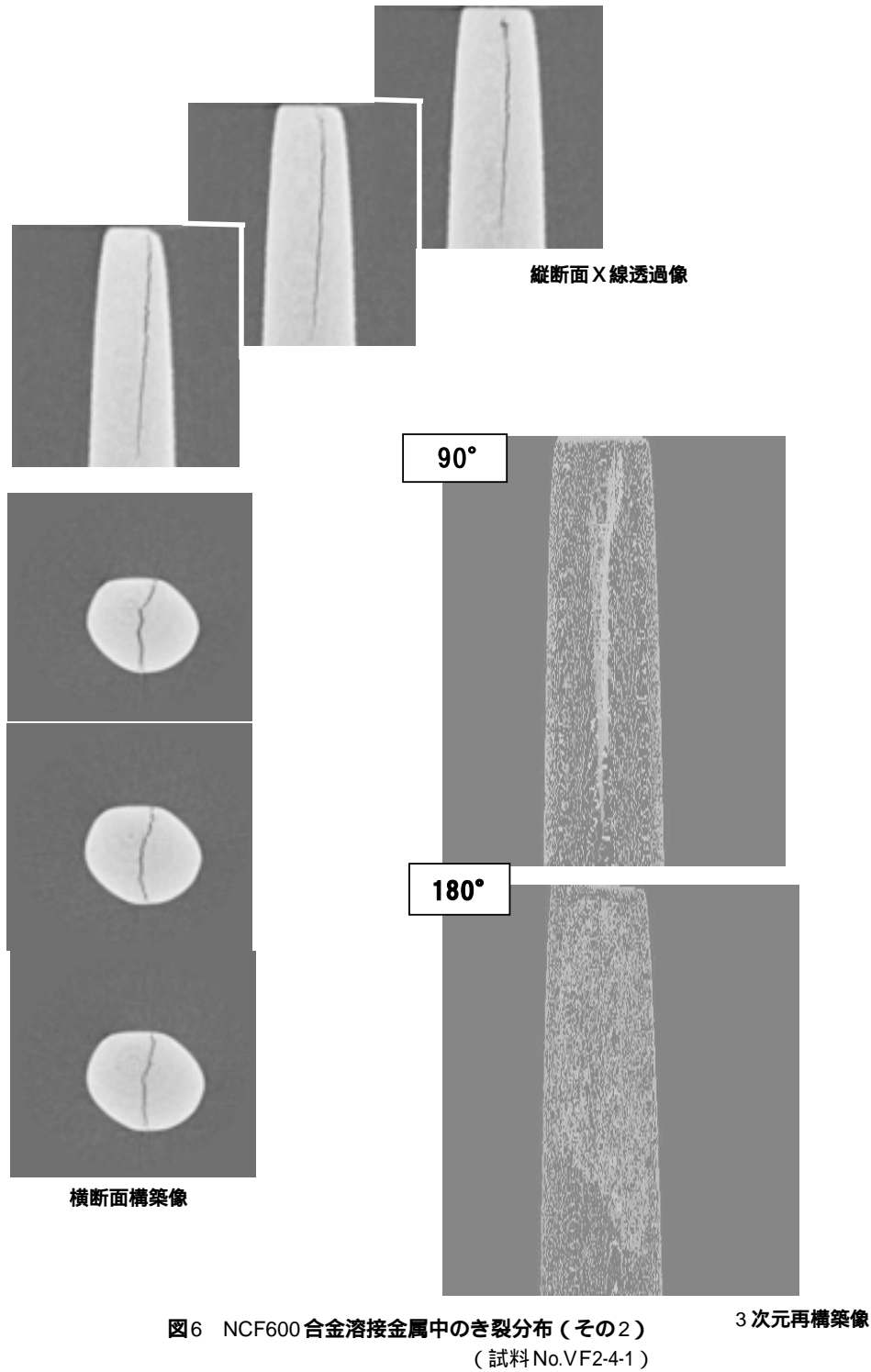


図6 NCF600合金溶接金属中のき裂分布(その2)
(試料No.VF2-4-1)

3.2 カメラ長について

X線透過像や構築像に対し吸収効果と位相(屈折)効果のいずれが効果的であるか調べるためカメラ長を410mm(吸収効果)と800mm(位相効果)でそれぞれ測定した。その結果を図7に示す。両者で顕著な差異は認められないが、得られた縦断面X透過像のき裂幅コントラストを実測すると本測定条件では410mmの方がより小さいき裂が判別できた。従って本

試験条件によるき裂測定では、カメラ長が410mm、すなわち吸収効果を利用する方が良いことが分かった。

3.3 測定深さについて

図8には、CTイメージング測定用丸棒試験片を採取する前のSCCを付与したブロック状の試験片について、き裂深度計(交流電位差法を利用、日本マテ

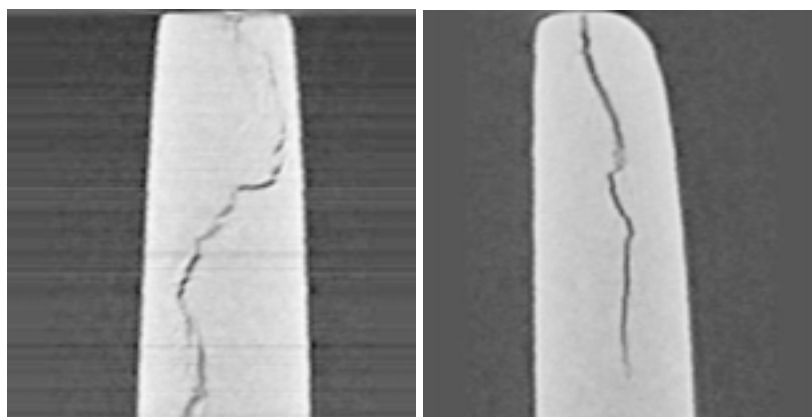


図7 カメラ長の違い (試料No.FV2-1-1、 0.73 mm)

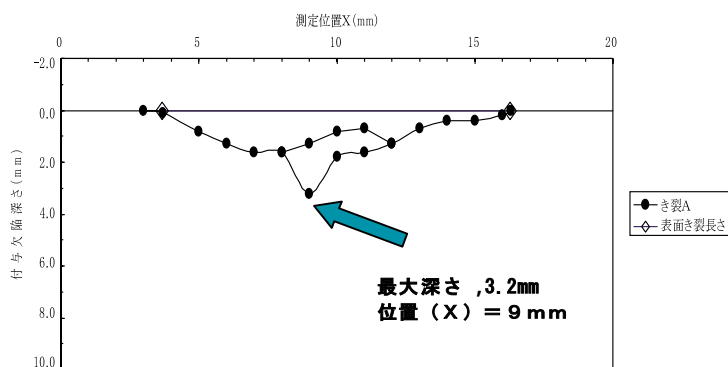


図8 交流電位差法によるNi基合金溶接金属中のSCCき裂プロフィール

表2 各方法によって得られた深さの比較

試料番号	交流電位差法	切断試験	CT イメージング法 (X線透過像)
VF2-2-1	3.2 mm	1.2 mm	1.6 mm
VF2-4-1	1.6 mm	0.7 mm	0.9 mm

ツク株 製RGM4015) を用いて測定したき裂深さプロフィールの結果を示す。最も深いき裂位置は、 $X = 9\text{mm}$ の位置で、深さは 3.2mm である。途中き裂プロフィールが2つに分かれているが、これは表面にき裂が2本観察されたことによる。測定用丸棒試験片は $X = 9\text{mm}$ の位置 (試料No. VF2-2-1) と $X = 13\text{mm}$ の位置 (試料No. VF2-4-1) よりそれぞれ採取した。その位置の深さ深度計による深さは、前者が 3.2mm 、後者が 1.6mm であった。

表2には、き裂深度計および切断試験による深さ測定結果とCTイメージング法の縦断面X線透過像より求めた深さ結果を比較して示す。いずれの試料も切断試験結果とCTイメージング法による結果と

は顕著な差異はないが、CTイメージング法による結果の方が長い。これはSCCのき裂が3次元的に進展しているため、切断試験のような2次元面測定では「き裂の回りこみ」が生じ、短く測定されたためと考えられる。またき裂深度計による結果は、切断試験やCTイメージング法の結果とは大きくことなっている。したがって、使用する場合は十分注意する必要がある。

3.4 割れ性状について

縦断面X線透過像と横断面構築像より再構築した3次元像を動画にて回転させながら観察すると、図5の場合、き裂は擦れながら進展していることが分か

る。またき裂はある幅を有しており、その幅は場所により異なり、所どころ接触あるいは途切れていることが分かる。Ni基合金溶接金属中のSCCき裂が帯状になって進展している様子がはじめて明らかになった。今後、さらにX線透過像の撮影技術、3次元再構築画像処理技術が向上すればき裂の性状に関するより多くの知見が得られると期待される。また最近CTイメージング法の回折像からの金属結晶粒界像の再構築像技術が開発されつつある。これら技術を融合させることによりき裂進展に関するより詳細な情報が得られ、シミュレーションモデルへの反映が期待される。

4.....まとめ

Ni基合金NCF600の溶接金属中にSCCを付与した0.69 - 0.73mmの丸棒試料を用い、SPring-8の37keVの放射光を用いてCTイメージング法により鋼中のき裂分布や深さ測定を行なった結果、

約0.8mmの丸棒鋼中の複雑なSCCき裂についてはじめて鮮明なX線透過像および3次元再構築像を得た

縦断面X線透過像の像分解能は、き裂幅の測定より10~25 μ mであった。またカメラ長は、800mmより410mmの方が鮮明で位相(屈折)効果は小さかった

本Ni基合金溶接金属中のSCCき裂は、ある幅を有し、回転しながら進展していた。またき裂の幅は異なり、途切れたり接触したりしている箇所が観察された。一方、疲労き裂のように単調で平坦なき裂も観察された

参考文献

- 1)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
- 2)古川,古村,他:原子炉差異循環系配管のSCC深さサイジング技術,保全学,Vol. 3, No. 3(2004),p. 51
- 3)特集 超音波NDTのための最近のシミュレーション,非破壊検査Vol.48, No. 4およびNo. 5(1998), p. 234
- 4)特集 超音波NDT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
- 5)Khor, M. Joyce, T. Connolley, H. Toda, I. Sinclair, E. Maire and J. Y. Buffere: Synchrotron Microtomography of Fatigue Crack Closure, <http://www.esrf.fr/UsersAndScience/Publications/Highlights?2002/Imaging/IMA2>
- 6)中井善一,田中拓,宮下卓也,尾角英毅,塩澤大輝,森影康: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)梶原聖太郎:放射光によるイメージング技術の基礎,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」p. 9, JASRI, 2007, 7, 20 東京イノベーションセンター
- 8)安田秀幸:金属材料の相変態過程のその場観察,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」p. 23, JASRI, 2007, 7, 20 東京イノベーションセンター

謝辞

本研究は、平成18年度先端大型研究施設戦略活用プログラム2006 B 緊急実施型課題利用(JASRI)として実施した。



中東重雄



古村一朗

欧州EN13445圧力容器規格における 疲労設計規定の開発に関して

Short Note on the Development of the Fatigue Design Rule in EN13445

溶接・非破壊検査技術センター 吉田 和夫
西日本支部原子力グループ 大石 勇一

In Europe, it is still fresh in our memory that PED (Pressure Equipment Directive, 97/23/EC) was stipulated on May 1997, and come into force on May 2002. Corresponding to a series of the regulatory activities, the European draft standard for construction of unfired pressure vessels was published as prEN13445 in 1999, and the fatigue design rule was also specified in the standard. For the purpose of rooting the application of the fatigue design rule to pressure equipment construction in Europe on May 2002 and afterwards, the investigating survey about field fatigue failures, fatigue research and development, design fatigue curves and fatigue design procedure was conducted, and the survey results were reflected to the modification and circulation of the draft design rule. This note shows the result which was summarized about the view of the fatigue design regulation to pressure equipments, based on the result of the questionnaires which were distributed to European pressure equipment companies in 2000 to 2001 by the European pressure equipment research council.

Keywords: : Pressure Equipment, Pressure Vessel, Boiler, Fatigue Design Rule, EN Standard, ASME Code.

1.....まえがき

欧州において、圧力設備指令(Pressure Equipment Directive, 97/23/EC)が制定(1997年5月)され、それが強制施行(2002年5月)されたことは未だ記憶に新しい事実である。この一連の動きに対応して、欧州圧力容器設計規格案は1999年にprEN13445¹⁾として発行され、この規格に疲労設計方法も規定された。2002年5月以降に、この疲労設計規定が圧力容器の設計製作に的確に適用され、欧州にこの規定を根付かせる目的から、疲労破壊事例、疲労破壊関連研究、設計疲労線図及び疲労設計法に関する調査が行われた。本報告は、欧州圧力設備研究評議会が上記の目的のために、2000～2001年に欧州域内で実施したアンケート調査結果に基づき、欧州製造メーカー等の圧力容器に対する疲労設計規定に関する当時の考え方²⁾について纏めた結果を示すものである。

欧州圧力設備研究評議会(European Pressure

Equipment Research Council)が実施したアンケート³⁾は次の二種類の方法で、欧州域内の圧力設備機器製造関連事業者に配布された。

(a) 欧州共同研究センター(JRC)がJRCのメールアドレスに従って送付

(b) 本調査共同事業体の構成員が(a)のリストに追加して関係者に送付

アンケートは次の6種類の質問の他に、破壊事例報告フォーム及び研究開発概要フォームから構成され、質問には回答選択肢を与えて、アンケートの実施意図に合う成果が得られるものとされた。

(a) アンケート回答機関の概要

(b) 疲労評価の実施例

(c) 適用した疲労評価方法

(d) 運転中設備機器の疲労損傷例

(e) 疲労関連研究開発及び今後の優先事項

(f) その他特記事項

アンケートは約950の欧州域内の圧力設備機器関係機関に送付され、回答は14ヶ国から113件(回答

率：約12%) 得られた。回答の約55%は圧力設備機器製造の欧州大国であるフランス、ドイツ及びイギリスから得られたものであり、スウェーデン及びベルギーの回答を含めると約80%にも及んだ(イタリアからの回答率が低かったことから、アンケート調査の有効性が問われはしたが、調査結果は的確なものとして判断された)。これらの回答の約半分は圧力設備機器の製造メーカーから得られたものであり、エンジニアリング会社からも多くの回答を得ることができた。以下にアンケート調査結果の概要を示すが、調査の結果として、疲労設計規定の適用及び広範な理解には、次の事項が重要であるとの認識が明らかとなった。

- (a) 公式の解析ソフトウェアの公表・販売
- (b) 解析トレーニングコースの開催
- (c) prEN13445規格の文書の改良(理解し易い疲労設計規定への改訂)

2..... アンケート調査結果の概要

2.1 疲労設計の実績

設計・製造した圧力設備機器に対する疲労設計の実績を図1に示す。図示のとおり、全体の約半数で0~10%しか疲労設計が行なわれてなく、100%疲労設計が行なわれたケースは全体の10%以下であった。これは、多くの圧力設備機器が疲労設計なしで使用されていることを示すと同時に、設計規格が疲労設計を必要とする特定の条件を明示していないことによると思われる。また、疲労設計の実施の有無は製造メーカーの人的規模には無関係で、圧力設備機器使用者側のニーズに応じて実施されていた。すなわち、圧力設備機器に対する疲労評価の実施は、エンドユーザーの要求によって大きく異なり、電力会社が最大の疲労設計ユーザーであり、次は石

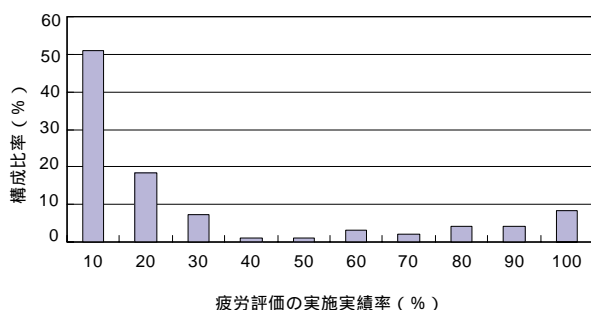


図1 圧力設備機器への疲労設計の適用実績

油化学会社である事実が浮かび上がった。

2.2 疲労評価の方法

疲労評価を実施した圧力設備機器に適用された疲労評価方法についての回答を図2に示すが、ASME規格⁴⁾が最も適用(20%以上)され、独国AD規格⁵⁾、⁶⁾、英国PD5500⁷⁾規格及び仏国CODAP規格⁸⁾がASME規格の他に使用された方法であった。この調査とは別に、どの規格を実設計に最も適用したいかとの質問の回答では、PD5500規格が41%を記録し、ASME規格は18%でしかなかった。この回答は、欧州の圧力設備機器製造関係事業者がPD5500疲労設計に精通していることを示し、ASME疲労設計法の適用が使用者側の要求であることを示す。

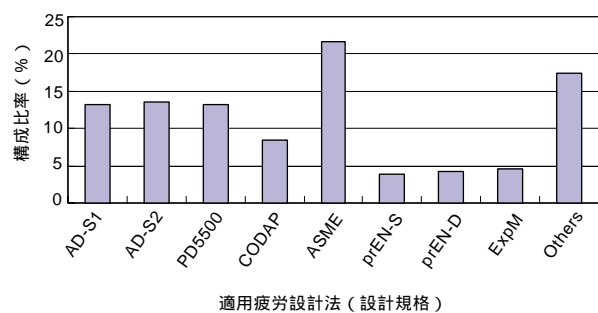


図2 圧力設備機器へ適用された疲労設計法

- AD-S1: AD規格簡易疲労解析
- AD-S2: AD規格詳細疲労解析
- prEN-S: EN規格簡易疲労解析
- prEN-D: EN規格詳細疲労解析
- ExpM: 実験的疲労解析

2.3 疲労設計の概略

圧力設備機器製造メーカー等が採用している疲労設計法に関連して、設計荷重、設計詳細及び材料に関する質問に次の回答が得られた。

(1) 疲労荷重

圧力設備機器に考慮した疲労設計は、高サイクル疲労(繰返し数1万回以上)が多数を占め、低サイクル疲労(繰返し数1万回以下)より16%も高い回答であった。このことは、圧力設備機器に生じる熱応力による疲労が重要であって、prEN13445で規定の評価において、簡易評価よりも詳細評価が重要であることを示すものである。

(2) 疲労設計の対象部

疲労設計評価の対象部として溶接部との回答が多

かった。溶接部以外の回答は、ろう付け部、管台部及び穴部であった。また、形状的応力集中部の取扱いが今後の課題であるという回答もあった。

(3) 疲労設計の対象材料

広く圧力設備機器に適用されている炭素鋼及びステンレス鋼に対する疲労設計の適用例が大部分であった。回答数は少なかったが異材継手の疲労が対象になっていて、今後の疲労評価方法の開発の重要な因子になる。

2.4 疲労設計を行う上での困難さ

圧力設備機器に対する疲労設計の実施実績が十分ではないことがアンケート実施前から予測されたため、この設計評価を行う上での主な障壁（困難さ）について回答を求めた。回答を得るために6種類の障壁（困難さ）を示し、その障壁の高さを回答機関の人的規模で3種類に分類して示した（図3参照）。小さな機関（従業員50名以下）では、解析ソフトウェアの不足、設計規則の複雑さ、熟練した設計者の不足等、全ての項目が障壁となっていた。中規模の機関（従業員50～500名）でも、同様に全ての項目が障壁となっていた。一方、大規模の機関（従業員500名以上）では、荷重の推定が最大の障壁となっていた。このことは、大規模の機関において、解析ソフトウェア及び解析技術者の確保に大きな費用を割いていることと一致する。その他の回答には、溶接部の疲労データの開発、溶接部の形状の考慮の方法、疲労設計方法の不明確さ、クリープ域での疲労評価の欠如等の障壁の指摘があり、疲労設計法の開発に考慮すべき事項が明らかとなった。

2.5 疲労設計ソフトウェア

疲労設計には、通常、解析ソフトウェアが必要とされるが、疲労評価に適用のソフトウェアに関する回答は、45%からしか得られなかった。疲労設計に適用された解析ソフトウェアの41%はANSISであり、ABAQUSが13%であり、その他のソフトウェアは社内作成のプログラムを含め多種に及んだ。

3.....まとめにかえて

2002年5月のPED強制施行を前に、欧州産業界は圧力容器の設計に疲労設計を規定することに消極的ではなく、疲労破壊を防止するために、統一的な設計方法（解析ソフトウェアを含む）及びその適用方法の明確化を求めた。そして、疲労破壊防止に関する研究開発として、欧州として次を取り上げる必要があると表明した。

- (a) 保守的過ぎない簡易疲労設計法の開発
- (b) 簡易疲労設計法の適用範囲の拡大
- (c) 疲労限データの積極的な収集
- (d) 有限要素解析方法の指針の開発・発行
- (e) 疲労設計免除範囲の拡大、他

このアンケート結果は、我が国において発電用火力設備機器に対して疲労設計の規定が必要となった場合に、その規定の作成段階で参考となると思われる。また、この小論が発電用火力設備機器の疲労損傷の防止に何らかの役に立てば幸いです。

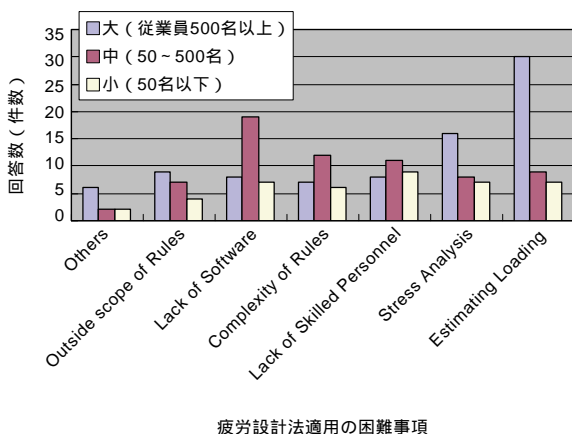


図3 疲労設計の障壁（困難さ）の原因

参考文献

- 1) European Committee of Standardization, EN 13445, Unfired Pressure Vessels, 2002.
- 2) F. Lobinger, personnel communication, March 2006.
- 3) The Questionnaire, entitled “Industrial Practices for Design to Avoid Fatigue in Pressure Equipments,” October 2000.
- 4) ASME B and PV Code, Section VIII, Rule for Construction of Pressure Vessels, Division 2, July 1998.
- 5) AD2000 Merkblätter, S1, Vereinfachte Berechnung auf Wechselbeanspruchung.
- 6) AD2000 Merkblätter, S2, Berechnung auf Wechselbeanspruchung.
- 7) PD5500, Specification for Unfired Fusion Welded Pressure Vessels.
- 8) CODAP, Code de Construction des Appareils a Pression.



吉田和夫



大石勇一

高Crフェライト系鋼の許容引張応力の 見直し改訂の技術的背景

Technical Background on Revised Regulatory of Allowable Tensile Stresses of Creep Strength Enhanced Ferritic Steels

溶接・非破壊検査技術センター 中井 裕丈，福田 南
吉田 和夫

A steam leak incident in high temperature reheat pipe weld in a thermal power station occurred on June 2005. According to the failure analysis, the leak was caused by type IV cracking in fine grain heat affected zone of tempered martensitic steels. As a result of reviewing the creep strength data and evaluating the long-term creep life, the allowable tensile strength values of creep strength enhanced steels, that is, modified 9Cr-1Mo steel etc., were revised on both December 2005 and August 2007. This note shows the technical background about the change of the allowable tensile strength values, that is, creep data acquisition, analysis procedure and so on.

Keywords: Creep strength enhanced ferritic steel, Allowable tensile stress, Type IV cracking, long-term creep life, Creep rupture strength

1.....まえがき

平成17年12月14日付けのNISA文書「発電用火力設備の技術基準の解釈について」¹⁾において、発電用火力設備の技術基準の解釈（以下、火技解釈という。）の別表第1に規定の発電用ステンレス鋼鍛鋼品（火SUSF410J3）他の材料（表1参照）の600、625及び650における許容引張応力が、例えば、火SUSF410J3の650の許容引張応力の値は45N/mm²から27N/mm²に大きく下方修正された。加えて、平成19年7月10日付けのNISA文書「発電用火力設備の技術基準の解釈に一部改正及び電気事業法施行規則に基づく溶接事業者検査（火力設備）の解釈の制定について」²⁾においても同様に、例えば、火SFVAF29の650の許容引張応力の値は47N/mm²から30N/mm²に下方修正され、従来規定の675の許容引張応力（30N/mm²）が削除される等、発電用材料規格材料の高温域の許容引張応力が改正された（表2参照）。

本小文は、SHC委員会調査報告書の内容の一部としてASME-PVP会議他に報告された内容等^{3),4)}に基

づいて、許容引張応力の改正の技術的背景について触れたものである。

表1 火SUS410J3 他の材料の許容引張応力¹⁾
(平成17年12月14日改正版)

鋼種	許容引張応力 (N/mm ²)			
	温度 (°C)	600	625	650
火 SUS410J3 火 SUS410J3TP 火 SUSF410J3	旧	85	65	45
	新	68	46	27
火 SUS410J3TB	旧	83	61	42
	新	66	46	27
火 SUS410J3DTB	旧	72	53	33
	新	52	25	16

注) 旧：平成17年12月14日以前
新：平成17年12月14日以降

2.....高強度フェライト系耐熱鋼と 許容引張応力の見直し

一連の許容引張応力の改正は、平成15年6月に超々臨界圧火力発電所の高温再熱蒸気管（最高使用

表2 火STPA29他の材料の許容引張応力²⁾
(平成19年7月10日改正版)

鋼種	許容引張応力 (N/mm ²)						
	温度 (°C)	550	575	600	625	650	
火 STPA29 火 SFVAF29	旧	107	101	86	65	47	
	新	107	101	78	56	30	
火 STBA29	旧	107	101	91	69	48	
	新	107	101	76	55	30	
火 SUS410J2TB	旧	99	88	69	51	34	
	新	99	73	50	35	24	
火 STPA24J1 火 SFVAF22AJ1 火 SCMV4J1	旧	85	70	54	35	—	
	新	84	70	54	35	—	
火 STBA24J1	旧	90	71	53	34	—	
	新	87	71	53	34	—	
火 SCMV28 火 STPA28 火 SFVAF28	76 mm 以下	旧	94	83	66	45	29
		新	94	81	63	45	29
	76 mm 超え	旧	94	82	62	45	29
		新	94	81	62	45	29
火 STBA28	旧	94	83	66	45	29	
	新	94	83	62	44	29	

注) 旧:平成19年8月1日以前
新:平成19年8月1日以降

温度595)で発生した蒸気漏えい事故に端を発生したものであった。この蒸気漏えい部材の損傷解析結果によれば、蒸気漏えいは、高Crフェライト系鋼(焼戻しマルテンサイト系鋼)の溶接熱影響部(細粒域)に生じたType IVクラックによるクリープ破壊に因るものであり、当該溶接熱影響部のクリープ破断強度が母材に比して著しく低下することが原因と推測された。発電ボイラー用の高強度フェライト系耐熱鋼の開発の考え方⁵⁾は、高温における強化機構として、固溶強化及び高温安定性の高い炭窒化物の微細析出による析出強化の他に、焼戻しマルテンサイトの微細なラス組織及び高転位密度を利用してフェライト系鋼の高温強度を高めることにあり、改良9Cr-1Mo鋼(火SFVAF28他)が開発された。

さらに、火SFVAF29や火SUSF403J3では、Moに代えてWを約2%まで添加すると共に、微量成分の最適化を行って、改良9Cr-1Mo鋼を超える高温強度を有するものとして開発されものである。この蒸気漏えい事故は、これら高Crフェライト系鋼の長時間クリープ強度低下の可能性を示唆するものとなった。

火技解釈の別表第1に規定の許容引張応力は、同解釈第4条に規定の方法に基づいて設定されたものではあるが、許容引張応力の設定に使用された10万時間クリープ破断強度は10万時間クリープ試験の結果ではなく、より短い時間のクリープ試験結果による外挿値である。物質・材料研究機構(旧金属材料技術研究所)では、1966年以来、クリープデータプロジェクトを継続しており、高Crフェライト系鋼に関しても数万時間のクリープ試験データが採取されつつあった。前述の蒸気漏えい事故が発生する以前から既に長時間クリープ強度を改善した高Crフェライト系鋼においては、短時間域と長時間域とで応力-クリープ破断寿命の関係に折れ曲がりが生じるため、従来の予測法で長時間クリープ強度を予測した場合、過大評価をする問題点が指摘されていた⁶⁾。金属材料技術研究所(現、物質・材料研究機構)クリープデータプロジェクトで採取した改良9Cr-1Mo鋼のクリープ試験データ⁷⁾に修正法⁸⁾のクリープ構成式を適用して長時間クリープ強度を予測した報告⁹⁾によれば、約1万時間を超えた長時間では応力-破断時間曲線の勾配が増大し、破断曲線に折れ曲がりが生じると解析され、実際のクリープ破断寿命は短時間クリープデータから予測した寿命に比して短寿命側にシフトすることが示唆されていた。応力-破断時間曲線に折れ曲がりが生じる原因の検討結果¹⁰⁾によれば、クリープ変形中に材料の金属組織が変化して強度低下(すなわち、材質劣化)が生じるが、高応力-短時間と低応力-長時間では材質劣化機構に相違が認められることが明らかにされている。改良9Cr-1Mo鋼に代表される高強度の高Crフェライト系鋼は焼ならし、焼戻しが施され、転位密度が高く、微細な焼戻しマルテンサイト組織で提供・使用される。高温クリープ試験を行うと、マルテンサイトラスやサブグレインの粗大化及び転位密度の減少を示す金属組織の回復が認められ、クリープ時間

の増長に伴い回復が進行する傾向が認められる。この回復は、旧オーステナイト境界に沿って著しく進行し、また、結晶粒内での回復の程度は小さく、回復が極めて不均一に生じることが分かってきた。

上述に鑑みて、焼戻しマルテンサイト組織を有する材料（火SCMV28他）及びベイナイト組織で細粒溶接熱影響部の回復による軟化が認められる材料（火SCMV4J1他）を対象として、長時間クリープデータを収集し、それらに各種の長時間クリープ強度予測方法を適用した上で、最適と思われるクリープ寿命推定方法を求めることが必要と判断された。同時に、1000時間に0.01%のクリープを生じる応力の平均値（0.01%/1,000hrsのクリープ速度を生じる応力の平均値）を併せて、火技解釈第4条に規定の方法で許容引張応力とすべき値を求め、これらの値と平成15年時点の火技解釈に規定の許容引張応力と比較した上で、改正案の検討を行うことが、保安確保の観点で必要と考えられた。この検討は、経済産業省原子力安全・保安院からの請負事業として財団法人発電設備技術検査協会に設置された高クロム鋼の長時間クリープ強度低下に関する技術基準適合性調査委員会（以下、SHC委員会という。）で、平成16年度及び平成17年度に行われた^{11),12)}。

3.....データ収集

SHC委員会では、国内の研究機関、材料製造者、機器製造者、電力会社等から類似鋼種を含めて調査対象材料のクリープ試験データを収集した。試験データセットとしては、材料化学成分、寸法、試験温度、試験応力及び破断時間に加えて、試験材に与えた付加的な条件（曲げ加工、熱処理等）も収集した。改良9Cr-1Mo鋼（火SCMV28他）に関して言えば、収集したデータの中の88ヒート、1,296データがクリープ強度推定に使用された。また、火SCMV4J1他（2.25Cr-1.6W鋼）に関しては、クリープ破断寿命に及ぼすクリープ試験中の酸化減肉の影響に関するデータの収集も行った。

4.....データ解析方法

長時間クリープ強度を推定する方法は、クリープ

破断データに基づくものと、クリープ変形データに基づくものの2種類に大別される。SHC委員会では、クリープ破断データに基づくものを採用することとし、また、直接法¹⁵⁾ではなくTTP法（時間温度パラメータ法）による解析を採用した。TTP法は長時間クリープ強度予測に広く用いられている外挿方法であり、金属材料技術研究所クリープデータシートにも採用されているものである。この方法によれば、時間と温度パラメータを用いて温度の違いを補償することにより、異なる試験温度の短時間クリープ試験データを用いて長時間クリープ強度を予測可能である。温度の相違を補償する手法として、多くのTTP法が提案されているが、SHC委員会では、クリープ強度解析に広く採用されているLarson-Miller法¹⁶⁾を採用した。なお、Larson-Miller法の採用に先立ち、改良9Cr-1Mo鋼及びGr.122系鋼（火SUS410J3他）のデータを、Larson-Miller法、Manson-Haferd法¹⁷⁾及びORNL評価式¹⁸⁾を用いて解析比較した。その結果、ORNL評価式では、応力-破断時間曲線に折れ曲がりが生じる場合に、折れ曲がりを経験することが出来ず、この場合に長時間クリープ強度を過大評価する懸念がある。一方、Larson-Miller法及びManson-Haferd法による解析結果では、両者の10万時間クリープ破断強度推定結果はほぼ同等であった。これらの結果を踏まえ、データ解析が比較的容易なLarson-Miller法を採用することとした。

Larson-Miller法のパラメータは、応力の対数の累乗項の和として表現されるが、データ回帰精度に及ぼす次数の影響を評価する必要がある。このため、回帰次数を1次から5次として、Gr.122系鋼（火SUS410J3他）のクリープ強度データを解析した。この結果、10万時間クリープ破断強度の予測値に及ぼす回帰次数の影響は小さく、2次回帰でほぼ適正な推定が可能と判断された。一方、二相鋼である火SUS410J3DTBについては、2次回帰式を用いると、応力とクリープ破断時間の関係が下に凸の曲線になり、10万時間クリープ破断強度の予測が適正でなくなることから、この材料に関してのみ、Larson-Miller法のパラメータを1次式とした。

上述のとおり、対象の材料には高温長時間で組織の不均一回復が生じることから、クリープ強度データの解析では、応力-破断時間曲線に折れ曲がりを経験

考慮する必要があった。短時間領域と長時間領域の境界については、折れ曲がりが生じる応力レベルが焼戻しマルテンサイト転位組織を破壊する応力（塑性変形を引き起こす応力）に関連し、その応力は概ね材料の各温度における降伏強さの半分に相当するとの報告⁹⁾があり、これを適用することで折れ曲がりを適正に評価できるか検討した。火SUS410J3のクリープ破断データを0.2%耐力の1/2を境界とする短時間領域と長時間領域とに分けて解析した結果を、領域分割せずに一括解析した結果と比較して図1に示す。0.2%耐力の1/2を境界とする領域分割した結果は、長時間クリープ破断応力を適正に表現でき、一括解析による推定の過大評価を排することができることが分かった。火SUS410J3以外の材料でも基本的にこの領域分割法が適用できたが、二相（焼戻しマルテンサイト相+フェライト相）鋼である火SUS410J3DTBについては、この領域分割法の適用は適正ではなく、0.2%耐力の1/2よりも低い応力で折れ曲がり認められた。したがって、火SUS410J3DTBについてのみ、折れ曲がり認められた応力で領域分割を行って解析した。

5.....データ解析の結果と許容引張応力の推定

許容引張応力の設定は、同条の規定に従って行われるが、この設定に先立って、第4条第1項第二号のクリープ温度域での許容引張応力の設定基準に定義付けを行った。具体的には、1,000時間に0.01%のクリープを生じる応力とは、1,000時間当りに0.01%のクリープひずみが生ずる応力（クリープ速度が0.01%/1,000hとなる応力）と定義した。10万時間でクリープラプチャーを生ずる応力とは、上述の長時間クリープ強度を推定する方法で採用したLarson-Miller法パラメータを応力の2次で回帰した式で推定した10万時間クリープ破断応力とした。平均値とは、Larson-Miller法による回帰における50%破断確率値とし、最小値とは、5%破断確率値とした。破断確率は、クリープ破断寿命が正規分布に従うとして推定したものである。

10万時間クリープ破断強度と0.01%/1,000hクリープ速度のいずれかが許容引張応力を決める支配因子となるか検討するために、次のいずれのクリープ

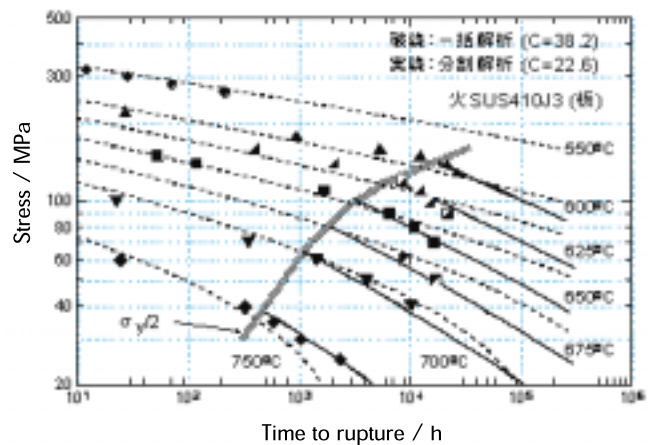


図1 火SUS410J3のクリープ破断データ³⁾

破断時間が長寿側になるか比較検討した。

- (a) 10万時間クリープ破断強度の0.67倍の応力に対応するクリープ破断時間
- (b) 0.01%/1,000hクリープ速度に対応するクリープ破断時間

火SUS410J3系鋼に関して比較した結果、上記の(a)では50万~70万時間となり、また、(b)では5万~15万時間であった。すなわち、10万時間クリープ破断強度の0.67倍の応力の方が、0.01%/1,000hクリープ速度を生ずる応力よりも小さいことが分かった。したがって、許容引張応力の設定の支配因子となる10万時間クリープ破断強度に着目して、クリープデータ整理を行うこととした。

6.....クリープ破断データ解析例

Gr.92鋼（火SFVAF29他）に関して収集したクリープ破断データは、29ヒート、689データであった。これらのデータのうち700 を超える高温のクリープ試験データ30点（1万時間以下の短時間破断データ）を除き、破断データと同等以上の試験時間を経過している未破断データ5点を加えた664点を解析に使用した。

領域分割のために必要な0.2%耐力は、ひずみ速度が $5 \times 10^{-5}/s$ の引張試験から得られたデータに温度依存性を考慮して決定した。火SFVAF29及び火STPA29のクリープ破断データを解析した結果を図2に示す。これらの材料の最長クリープ破断時間は7万時間強であり、TTP法による長時間クリープ予測の推定精度が3倍程度を限界¹⁹⁾とすれば、外挿信頼

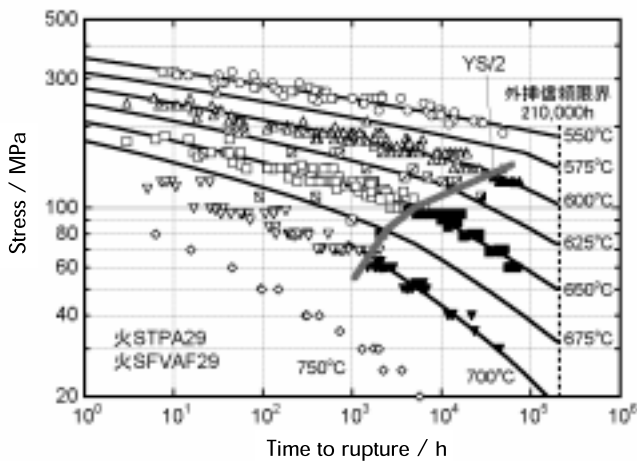


図2 火SFVAF29及び火STPA29のクリーブ破断データ¹³⁾

限界は21万時間となる。図中のLarson-Miller法2次回帰式は次に示すとおりである。

(a)短時間領域 ($C=36.37$)

$$LMP = 20333.7 + 24905.0 \log \sigma - 8271.38 (\log t)^2$$

(a)長時間領域 ($C=24.84$)

$$LMP = 29951.9 + 1688.9.0 \log \sigma - 1734.26 (\log t)^2$$

この解析結果から求めた575～675の10万時間クリーブ破断応力の平均値及び最小値並びに許容引張応力の設定のための整理結果を表3に示す。これらの結果から、火技解釈に規定の600以上の温度域の許容引張応力を引き上げる必要があると判断された。また、675の許容引張応力の削除は、この材料の溶接後熱処理温度は火技解釈別表第21によれば680～760 (ASME B31.1では1,300～1,400 deg-F

(704～760))であり、675での長期の供用は材料の回復の傾向から現実的ではないと同時に、675での許容引張応力は小さいことから適用性が低いと判断されたためである。

7.....あとがき

データ収集の対象とした材料 (Gr.122系鋼：火SUS410J3他,改良9Cr-1Mo鋼：火SFVAF28他,Gr.92系鋼：火SFVAF29他,Gr.23系鋼：火SFVAF22AJ1他,火SUS410J2TB)について、クリーブ破断データを収集し、クリーブ温度域においてLarson-Miller法2次回帰 (火SUS410J3DTBの長寿命側のみは1次回帰)を行った。この解析結果を踏まえて、火技解釈第4条の許容引張応力の設定方法を用いて許容引張応力の値を推定した。この結果、いずれの材料においても平成16年時点の火技解釈別表第1に規定の許容引張応力の一部の値が非安全側に設定されていることが認められた。この結果は、SHC委員会の調査報告書として取り纏められ、原子力安全・保安院に提出された。この調査報告書の内容に基づいて、まえがきに示したとおり、火技解釈の別表第1の一部の許容引張応力の値が改正された。本小文は、この改正の技術的背景の一部を示したものであるが、全てを示したものではない。本小文だけで改正の内容を判断することは適正ではないことを最後に付させて戴きます。

表3 火SFVAF29及び火STPA29の10⁵hクリーブ破断応力評価結果²⁾

温度, °C		575	600	625	650	675
評価結果	10 ⁵ h 破断応力 (平均) (N/mm ²)	156.76	115.97	83.47	57.92	38.14
	10 ⁵ h 破断応力 (最小) (N/mm ²)	146.61	107.61	76.69	52.50	33.88
	平均値 x 0.67 (N/mm ²)	105.03	77.70	55.92	38.81	25.55
	最小値 x 0.80 (N/mm ²)	117.29	86.09	61.35	42.00	27.10
改正前の許容引張応力, (N/mm ²)		101	86	65	47	30
評価結果, (N/mm ²)		105.03	77.70	55.92	38.81	25.55

参考文献

- 1) 経済産業省原子力安全・保安院NISA-234c-05-8「発電用火力設備の技術基準の解釈について」,平成17年12月14日
- 2) 経済産業省原子力安全・保安院NISA-234a-07-1「発電用火力設備の技術基準の解釈に一部改正及び電気事業法施行規則に基づく溶接事業者検査(火力設備)の解釈の制定について」,平成19年7月10日
- 3) K. Kimura, PVP2005-71039, July 2005, Denver, CO, USA.
- 4) K. Kimura, K. Sawada, H. Kushima, Y. Toda, CREEP2007-26406, July 2007, San Antonio, TX, USA.
- 5) 例えば, F. Masuyama, ISIJ International, 41, p. 612, 2001
- 6) V. Fodyna, Z. Kubon, A. Jakobova and V. Vodarek, Microstructural Development and Stability in High Chromium Ferritic Power Plant Steels, ed. A. Strang and D. J. Gooch, The Institute of Materials, London, p. 73, 1997.
- 7) 金属材料技術研究所クリープデータ, No. 43, 1996.
- 8) 丸山公一, 原田千里, 及川洪, 材料, 34, p.1289, 1985.
- 9) 木村一弘, 高Crフェライト系耐熱鋼のクリープ強度予測法, 検査技術, p. 1, No. 12, 2002.
- 10) 丸島秀昭, 木村一弘, 阿部富士雄, 鉄と鋼, 85, p. 841, 1999.
- 11) 平成16年度高クロム鋼の長時間クリープ強度低下に関する技術基準適合性調査報告書, 財団法人発電設備技術検査協会, 平成17年3月
- 12) 平成17年度高クロム鋼の長時間クリープ強度低下に関する技術基準適合性調査報告書, 財団法人発電設備技術検査協会, 平成18年3月
- 13) K. Kimura, PVP2006-ICPVT11-93294, July 2006, Vancouver, BC, Canada
- 14) K. Yoshida, H. Nakai and M. Fukuda, CREEP2007-26512, July 2007, San Antonio, TX, USA.
- 15) 横井信, 門馬義男, 鉄と鋼, 63, p. 831, 1979.
- 16) F. R. Larson and J. Miller, Trans. ASME, 74, p. 765, 1952.
- 17) S.S. Manson and A. M. Haferd, NACE, TN2890, 1952.
- 18) C.R.Brinkman, D. J. Alexander, P. J. Maziasz, Modified 9Cr-1Mo Steel for Advanced steam Generator Applications, presented at the Jt. ASME/IEEE joint power generation conference; 21-25 Oct 1990; Boston, MA (USA); DOE Project; Technical Paper 90-JPGC/NE-8
- 19) 藤田利夫, 門馬義男, 松崎昭博, 木原重光, 志賀正男, 笠原晃明, ISO6303に準拠したクリープ破断データ外挿法の手引き(第1版), 日本鉄鋼協会, 1983.



中井裕丈



福田 南



吉田和夫

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熟処理評価装置	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熟処理されたかどうか及び熟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(出願中)	
	概要	検査対象物表面の金属組織内部の自然欠陥を非破壊で外部から計測するための渦電流探傷信号処理方法		

学協会誌等への論文発表

学協会誌名	著者	論文名称	掲載誌発行年月
INSIGHT	陳 鋼朱 山口篤憲 他	Signal processing for detection and characterization of defects from composite eddy current signals	Vol.39, No.11, p.785-789, 1997
IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS	陳 鋼朱 山口篤憲 他	A Novel Signal Processing Technique for Eddy-Current Testing of Steam Generator Tubes	Vol.34, No.3, p.642-647, May, 1998
WELDING journal	堀井行彦 桑 亮一 上杉信夫 他	Thermal Embrittlement of Simulated Heat-Affected Zone in Cast Austenitic Stainless Steels	Vol.77, No.8, p.350-360, August, 1998
Journal of Nuclear Materials	中東重雄 中村治方 上杉信夫 他	Effect of weld thermal cycle on helium bubble formation in stainless steel	Vol.258-263, p.2013-2017, 1998
	中東重雄 上杉信夫 中村治方 他	Weldability of helium-containing stainless steels using a YAG laser	Vol.258-263, p.2018-2022, 1998
火力原子力発電	陳 鋼朱 米山弘志 山口篤憲 上杉信夫	ウ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年
平成16年度火力原子力発電大会論文集	程 衛英 古村一朗 志波光晴 他	炉内構造物検査への渦流探傷技術の摘要評価	広島大会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, 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

学協会等への口頭発表

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	
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	2006/5/10米国 (San Diego)	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.	
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	
「非破壊」	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

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

学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名	
「溶接」	平成17年度 火力原子力発電大会	2005/10/13 東京(東京フォーラム)	水野亮二 松田福久 他	原子炉圧力容器鋼(SQV2A)のテンパーヒード溶接法に関する研究
	ボイラー・タービン主任技術者会 (関東・東北産業保安監督部管内)	2005/10/21 東京(椿山荘)	堀井行彦 他	ごみ焼却炉ボイラー伝熱管の溶射による防食試験結果
	日本機械学会M&M2005 材料力学カンファランス	2005/11/4 福岡(九州大学)	中田志津雄 西川 聡 長谷川忠之 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	
「非破壊」	5th International Workshop on Integrity of Nuclear Components	2004/4/21 京都	古川 敬 他	SCC Experience and NDE Technologies on Recirculation Piping in BWRs
	非破壊検査協会 超音波分科会	2004/6/24 仙台	古川 敬 古村一朗	欠陥深さ予備測定に関するシミュレーション解析
	日本保全学会 第1回学術講演会	2004/7/9 東京(東京大学)	志波光晴 他	交流磁化プローブを用いた鋳鉄構造物の材料評価
	ASME PVP Conference	2004/7/25-29 米国(San Diego)	程 衛英 古村一朗 志波光晴	Analytical and Experimental Approaches for the Sizing of Fatigue Cracks in Inconel Welds by Eddy Current Examination
	QNDE 2004	2004/7/25-30 米国(Colorado)	程 衛英 志波光晴 古村一朗 他	FINITE ELEMENT ANALYSIS FOR THE VERIFICATION OF POSTWELD HEAT TREATMENT OF 9Cr-1Mo WELDS
	日本機械学会 2004年次大会	2004/9/6 札幌(北海道大学)	志波光晴 程 衛英 桑 亮一 堀井行彦	交流磁化を用いた溶接構造物の非破壊による健全性評価方法の開発
	平成16年度 火力原子力発電大会	2004/10/27 広島(厚生年金会館)	米山弘志	超音波探傷試験による疲労き裂とIGSCCの検出及び深さ測定に関する教育訓練の効果について
			程 衛英 古村一朗 志波光晴	炉内構造物検査への渦流探傷技術の適用性評価
	第4回NDE国際会議	2004/12/6 イギリス	志波光晴 程 衛英 桑 亮一 堀井行彦	Development of Structural Integrity Evaluation Technique for Weldments by AC Magnetic Method
	非破壊検査協会 超音波シンポジウム	2005/1/27 東京 (アルカディア市ヶ谷)	古川 敬 山田晶宏 古村一朗	Phased array 超音波探触子音場の数値シミュレーション
JNES規格基準部セミナー 「応力腐食割れき裂進展評価と検出技術」	2005/1/31 東京(自転車会館)	古川 敬	Ni基合金溶接金属における欠陥検出及びサイジング特性	
「材料」	腐食防食協会 第51回材料と環境討論会	2004/9/8 名古屋 (大同工業大学)	中東重雄 他	高温高圧水中における強加工316Lステンレス鋼応力腐食割れのSSRTによる評価
	熱処理学会平成16年秋季 (第59回)講演大会	2004/12/7 大阪(関西大学)	中東重雄 他	加工熱処理した極低炭素ステンレス鋼の残留応力評価と析出物
	日本鉄鋼協会「中性子および放射光散乱を用いる鉄鋼材料の研究フォーラム」	2004/7/20 兵庫(先端科学技術センター)	中東重雄 他	冷間加工を施したオーステナイト系ステンレス鋼の組織および残留応力

学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名	
【材料】	第18回日本放射光学会年会・放射光化学合同シンポジウム	2005/1/7 佐賀(サンメッセ鳥栖)	中東重雄 他	放射光を利用したステンレス鋼SUS316Lの高温高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
【溶接】	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

平成15年度

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

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

平成14年度

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

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

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)日本溶接学会 平成14年4月25日	35歳未満の若手研究者に対する賞で、発表論文「熱処理条件の非破壊的評価手法の検討 - 局部PWHT溶接部の性能評価に関する研究(第1報)」に対して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「鍛造2相ステンレス鋼の溶接熱影響部の熱時効評価 第1・2報」に対して与えられたものである。
志波光晴 他	技術賞開発奨励賞	(社)日本溶接学会 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。 今回原子炉压力容器等原子力プラント溶接部の品質保証溶接施工法に係る研究開発に関する論文、学会発表等に対して受賞したものである。
糸 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)



溶接・非破壊検査技術センター 技術レビュー Vol.3 2007 (非売品)

発行編集人 ……●…… 山本 孝(溶接・非破壊検査技術センター業務グループ長)
発行所 ……●…… 財団法人発電設備技術検査協会 溶接・非破壊検査技術センター
〒230-0044横浜市鶴見区弁天町14-1
TEL(045)511-2751 FAX(045)511-2750
編集・協力 ……●…… 電気新聞メディア事業局

印刷 (株)新晃社

《無断転載を禁じます》

本誌は古紙再生紙を使用しています。