



溶接・非破壊検査技術センター

技術レビュー

Vol.5 2009

(財)発電設備技術検査協会

目次

巻頭言	● システム工学から考えてみたこと 1 東京大学名誉教授 野本敏治
ご挨拶	● 理事長 佐々木宜彦 2
トピックス	● NDEシンポジウム2008を開催 3 ● NDE国際会議を横浜で開催
研究報告	● 欠陥検出評価技術に関する研究 大規模FEMを用いたガイド波の伝搬シミュレーション 5 古川 敬, 古村一朗 松尾卓磨, 長 秀雄(青山学院大学) 交流磁化およびBarkhausenノイズ測定による炭素鋼の 13 塑性ひずみおよび残留応力の評価 程 衛英, 古村一朗, 南 康雄, 西川 聡 斜角探傷法によるき裂周りの超音波の可視化 19 関野晃一, 古川 敬, 古村一朗 清水紘治(関東学院大学) 放射光CTによるステンレス鋼応力腐食割れき裂の3次元観察 25 中東重雄, 長谷川忠之, 古村一朗 藤城智之, 山本厚之, 寺澤倫孝(兵庫県立大学) 梶原堅太郎(SPring-8/JASRI) ● 溶接継手の健全性確保に関する研究 高温高圧純水環境下のNi基600合金用被覆アーク溶接金属の応力腐食割れ形態 ... 32 西川 聡, 堀井行彦 池内建二(大阪大学接合科学研究所) 溶接始末端部の残留応力に関する基礎的検討 40 長谷川忠之, 西川 聡 中性子回折によるステンレス鋼配管周溶接部の残留応力測定 44 水野亮二 小川和夫(原子力安全基盤機構) ● 技術基準・規格化に関する調査研究 溶接施工法確認試験の試験板の厚さと認証される厚さについて 48 —米国ASME溶接規格の現状と対比して— 吉田和夫, 高橋正夫, 中井裕丈, 大石勇一
成果	● 出願特許一覧 53 ● 学協会誌等への論文発表 54 ● 学協会等への口頭発表 57 ● 論文等表彰 63

システム工学から考えてみたこと

吉川弘之先生が東大総長をしていた頃、「学問はその領域を細分化することによって著しい進歩を遂げてきた。」と述べていた。歴史的に見ると、ギリシャ時代には哲学だけが学問であり、物理学の誕生にはその後千年を越す年月を要した。その物理学から工学が独立するのも多年がかかった。細分化された学問領域では、若い研究者が短年月で過去の業績を修得して次の世代の新しい研究に進捗することが可能である。その結果が学問の進化を支えてきた。

しかし「現代の邪悪を解決するには、学問は再び統合化されるべきである。」とも述べている。個々の学問の進歩には学問領域の細分化が有効であるが、私どもが目的としているのは人類の幸福であることを考えると、細分化された学問分野の進歩だけでは必ずしも人類を幸福に導くものではないからである。

私は大学在職中の前半は構造工学や溶接工学など比較的明確な目標を有する狭い領域を研究してきたが、後半は「システム工学」に関する研究を実施する機会があった。私にとってのシステム工学は「何を研究目標にするか」も検討課題になるほど比較的漠然とした広い分野であった。そこで私は「統合化技術」を研究対象とした。なおここで「システム」とは、「目的とする機能を発揮するために、複数の機能要素を有機的に結合したもの」と定義されると考えている。

さて多くの大規模産業はその目的とする機能を発揮するために、工学の複数の基盤技術を駆使して、有機的なシステムを構築している。原子力や火力発電はその代表産業の一つであるが、具体的に原子力発電産業では、電気工学はもとより原子力工学、機械工学、材料工学や土木工学、建築学などあらゆる基盤工学に支えられている。このように多くの分野やその分野からの人々によって支えられている総合産業であるから、個々の分野の成果が重要視されるのは当然であるが、更に個々の分野の有機的な結合の成果も大変に重要である。

ある造船所の設計部長さんがその部下の方々に「あなたはスペシャリストですか？それともジェネラリストですか？」と質問した時、多くの方が「自分はスペシャリスト」であると答えたそうです。

総合工学では個々の分野のスペシャル技術も重要ですが、個々の技術の有機的な結合こそより重要であると考えられます。

そこで 発電設備技術検査協会にかかわる皆さまには ご自分の専門技術の研鑽は勿論のこと、他の方々の専門分野との関係などを十分に理解できるような広い分野に興味を持っていただきたいと思います。

東京大学名誉教授
野本敏治



ご挨拶

2008年度において、協会が独自に実施した試験研究成果等を取りまとめた技術レビュー Vol.5 をご覧いただきたいと存じます。

2008年度には、従来 NDE センター（溶接・非破壊検査技術センター）内で実施しておりました技術基準規格関連調査業務を本部に移し、新たに規格基準室として独立した組織として整備することとしました。

規格基準案策定業務は、行政や事業者のニーズを的確かつ迅速に把握、反映していくことが肝要であり、NDE センターのみならず協会の各事業部門との連携効果も期待したいとの思いで決断した次第です。

2007～2009年度中期経営計画において、NDE センターの経済的自立化と協会内各部門との連携強化を掲げておりましたが、どうすれば研究部門においても収支均衡を図れるかについて一定の方針や方向がつかめたように思います。一方で、今後諸般の情勢変化も考えられることから、研究資金源の多様化を図っていくことも重要であります。

このような観点から、小規模でも特定の分野で卓越した先導的研究成果をあげていくことにより、協会の顧客の皆様様の現場ニーズにマッチした受委託業務を拡大していきたいとの強い思いをもっております。

『NDE センターは、NDE に関する COE (Center of Excellence) を目指そう』が協会内の合言葉です。一方、研究成果を協会の顧客の皆様様に的確に発信するとともに、研究活動内容を知って理解していただくことが何より大切なことだと思っています。そのような考えから、平成 20 年 12 月 1 日「溶接構造物の信頼性向上に向けて」と題し、協会主催で NDE シンポジウム 2008 を開催しました。協会としては初めての試みでした。

原子力安全・保安院、原子力安全基盤機構、電力、メーカーの皆さんと連携し、それぞれタイムリーなテーマを選定していただき発表していただきました。お蔭様で定員を超える参加者があり内容も好評をいただきました。

NDE センターからの発表では、「フェーズドアレイ UT の ISI への適用性検討」は多くの方から興味を示され、現場で役立つ実用的なテーマに関心が高いことを改めて痛感した次第です。また、「ピーニング部の圧縮残留応力の残存度評価」についても、予想を超える反響がありました。これまでも問題提起の努力はしてきましたが、やはりこのようなシンポジウムの中で、聞いていただきたい立場の方に聞いていただくことがポイントであり、今後、NDE センターの研究成果を活用していただく上で大変参考になりました。この NDE シンポジウムについては、関係各位のニーズ把握にも努めながら工夫をこらして 2009 年度も引き続き実施したいと準備しているところです。

また、2009 年 5 月には横浜において第 7 回 NDE 国際会議が開催されました。当協会と日本保全学会が受け入れ主催機関として準備を進め、滞りなく成功裡に終了することができました。関係各位のご協力の賜物と感謝申し上げます。この国際会議でも深化した NDE 手法や NDE の実機への適用などの発表に関心が高かったようですが、こうした専門家の国際的な技術交流を通じて NDE 技術がさらに発展していく上で、当協会がいささか貢献できたことを誇りに思っております。

なお、「光学的ひずみ測定法の非破壊検査法への応用について」が若手研究者を対象とした神奈川県非破壊試験技術交流会の奨励賞を受賞したことも大変うれしい出来事でした。

レビューをご一読いただき、ご意見、ご指摘などいただければ幸いです。



理事長
佐々木宜彦

NDEシンポジウム2008を開催



ほぼ満席となった会場の状況



佐々木理事長の挨拶



講演をされる宮先生



講演をされる小林先生



講演をされる前川統括
安全審査官(当時)

当協会は、平成20年12月1日に東京大学山上会館大会議室において、当協会初めての試みであるNDEシンポジウム2008を開催いたしました。

本シンポジウムはテーマを「溶接構造物の信頼性向上に向けて」と題し、原子力設備の安全を維持するうえで溶接継手部の健全性を確保するため、構造健全性を評価する分野ときずの有無や材質変化を非破壊評価(NDE)する分野の研究者/技術者の緊密な連携が必要不可欠とのことを趣旨として企画したものです。会場は原子力設備の構造健全性評価/非破壊評価に関する研究者/技術者等100名を超える方々で満席状態となり、活発な意見交換を行うことができました。

当協会理事長の佐々木より開会の挨拶が行われた後、基調講演として東京大学名誉教授 宮 健三先生より「保全学会・原子力論点評価会議における「原子力の保全論理」」、横浜国立大学教授 小林英男先生より「構造健全性評価と超音波探傷試験技術の高度化」さらに原子力安全・保安院統括安全審査官(当時)前川之則殿より「新しい保全システムと検査の実施」の原子力の保全に関する貴重なご講演をいただきました。

また、(独)原子力安全基盤機構河野殿、大高殿より検査技術に係るJNESプロジェクトの概要、及びその成果と規格基準への反映について、日本原子力発電(株)堂崎殿より「クラス1機器溶接継手における体積試験範囲適正化の検討」、東京電力(株)西山殿より「柏崎刈羽原子力発電所3号機 原子炉再循環系配管の健全性評価の概要」、関西電力(株)平野殿より「600系ニッケル基金溶接部のPWSCC補修対策」の発表が行われました。その他当協会からは溶接構造物の非破壊評価技術、溶接構造物の健全性評価・補修技術等6件の技術報告が行われました。

NDE国際会議を横浜で開催



オープニングセレモニーの様子



宮健三組織委員会委員長の挨拶

当協会及び日本保全学会は、平成21年5月12～14日に横浜ロイヤルパークホテルにおいて第7回NDE国際会議を開催いたしました。

このNDE国際会議は、機器の構造健全性評価にNDEがどれだけ寄与できるかという観点を主眼にして、深化したNDE手法やNDEの実機への適用およびNDEの性能評価等についての議論を行うと共に、専門家の国際的な技術交流を通じてNDEの発展に貢献するものです。世界各国の原子力機器及び压力容器の非破壊評価に関する専門家が一堂に会して最新の技術動向について議論する場となっており、新しい非破壊技術や、計算モデルの実証、実機への適用事例などが報告されました。

5月12日のオープニングセレモニーでは日本組織委員会委員長の宮健三日本保全学会会長が挨拶され、運営委員会委員長の当協会NDEセンター所長山口篤憲が歓迎の言葉を述べました。会議には欧州、北米、アジア各国より260名を超える研究者等が参加し、160件に及ぶ研究発表等が各セッションに分かれ三日間にわたり行われ、活発な議論が交わされました。

さらに専門家同士の国際的な技術交流も行われると共に、世界各国の原子力関連のメーカー等による各種検査機器等の展示会も同会場にて同時開催されました。



壇上の国際組織委員会委員



検査機器等展示会の様子

大規模FEMを用いたガイド波の伝搬シミュレーション

Numerical simulation of guided wave propagation using large scale FEM code

溶接・非破壊検査技術センター 古川 敬, 古村一朗
青山学院大学 松尾卓磨, 長 秀雄

Ultrasonic guided waves are being widely applied to the long range inspection of piping. The interpretation of the guided wave ultrasonic testing data is challenging because guided waves contain many wave modes with different sound velocities. In order to understand the beam path of each guided wave mode, one of the key issue is to visualize ultrasonic wave propagation. JAPEIC NDE Center has applied the experimental ultrasonic wave visualization technique and the numerical simulation technique of bulk wave propagation to the interpretation of UT data, the analysis of suitable UT condition and the education/training of UT. This paper describes the numerical simulation results of guided wave propagation in pipes by using a large scale three-dimensional FEM code, which can analyze over one billion elements and can use parallel computing system. Procedure of modeling for guided wave generation and the comparison between simulation and experiment are described.

Keywords: : Ultrasonic Testing(UT), Guided Wave, Piping, Wave Propagation, FEM, Parallel computing

1.....はじめに

近年注目されている超音波探傷方法の一つに“ガイド波”探傷がある。ガイド波を用いた探傷の特徴としては広範囲を一括して探傷できる可能性を有するため、基礎的な研究から応用研究まで盛んに行われ、プラントの保守検査等へ適用されつつある^{1),2)}。しかし、ガイド波には複数の種類の伝搬モード(モードとは振動の種類を指す)が存在することに加え、それらが速度分散を持っていることから、反射波の伝搬時間から反射源位置を特定することが難しいなどの課題が多いのが現状である。ガイド波探傷におけるこれらの課題を解決する方法としては、実験面での検討に加え分散曲線や振動分布などの理論的な解析を活用する方法³⁾、および数値解析やシミュレーション技術を用いる方法が挙げられる。

具体的には、比較的単純な断面形状の場合は理論解析から算出された分散曲線をもとに発生するガイド波のモードを予測し、エコーの経路を推定してい

る。複雑な断面形状を有する場合は数値解析等により分散曲線を算出し、発生するガイド波のモードを予測している。より詳細な解析として半解析的有限要素法⁴⁾が活用され、ガイド波の伝搬挙動が明らかになりつつある。しかし、現時点では実際の探傷を模擬する様な複雑な解析は難しく、例えば送受信センサの配置の影響、溶接部やフランジの存在、エルボ部の背と腹の肉厚の違い、配管サポートの存在、内部流体の有無等といった、より複雑な境界条件の下での解析は困難である。

このような複雑な条件でのシミュレーション解析を行うには条件設定に対する自由度が高い有限要素法(FEM)が適していると考えられる。FEMによる複雑な境界条件のシミュレーション解析例には、オーステナイト系鋼溶接部の不均一な異方性や溶接部の形状、き裂の形状などをモデル化し、斜角探傷におけるエコーの発生源の特定などの探傷結果の解釈支援に活用した事例^{5),6),7)}などがある。しかし、ガイド波の探傷シミュレーション解析へFEMを適用す

る場合には、ガイド波の発生・受信のモデル構築に加え、ガイド波の伝搬距離が数m以上になるため大規模な解析になることや解析時間が多くなることといった解析技術の問題を解決する必要がある。

本研究は、将来の複雑な解析に対応することを想定し、ガイド波の伝搬解析にFEMの適用を試みたものであり、解析規模や解析時間は並列計算により克服することにした。ここでは、第一段階としてガイド波のなかでも管の軸方向に伝搬する円筒波を対象としてガイド波（円筒波）の送受信モデルを検討し、直管部を対象として解析した結果を示す。

2.....解析モデル及び解析条件

本研究では、第一段階としてガイド波の伝搬状況を確認することを主目的とし、超音波の送信はセンサすなわち送信部で発生する振動を初期変位として与え、受信は受信位置で変位の時間変化を出力する方法によりモデル化した。解析コードは三次元FEMコード（伊藤忠テクノソリューションズ社製

ComWAVE2.1）を用いた。解析モデルの概要を図1及び図2に示す。図1は動作確認のために用いたモデル（モデル1）であり、同一材質、形状（外径5mm、肉厚1mm）において3種類の異なる中心周波数の条件で解析し、分散曲線と比較して解析結果の妥当性を確認した。図2は実験⁸⁾と同じ材質（SUS304）、形状（外径34mm、肉厚3.2mm）でモデル化したものである（モデル2）。実験と同様に中心周波数200kHzで送信し、実験と同じ位置に受信部を設置し、解析で得られた波形と実験結果とを比較した。モデル1、2ともにLモード¹⁾（管が軸対称に振動するモード）を励起する解析とするため、図3に示す様に送信ユニットを円周状に等間隔で配置した送信部で、半径方向に同時に振動させ初期変位を与えた。これは、実験でガイド波の送信に用いたMFC（Micro Fiber Composite）センサ⁸⁾で発生する振動をモデル化したものである。送信波形を図4から図6に、主な解析条件を表1に示す。

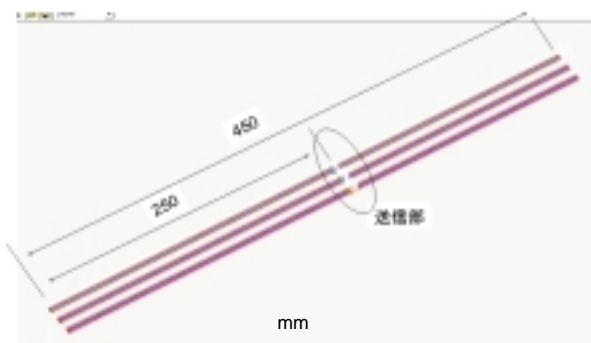


図1 解析モデル1の概要

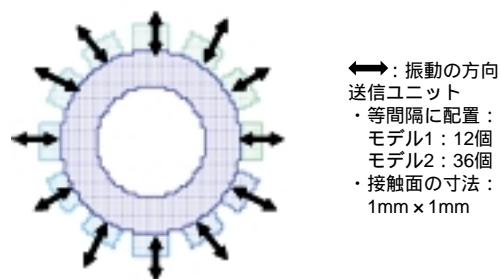


図3 送信部のモデル

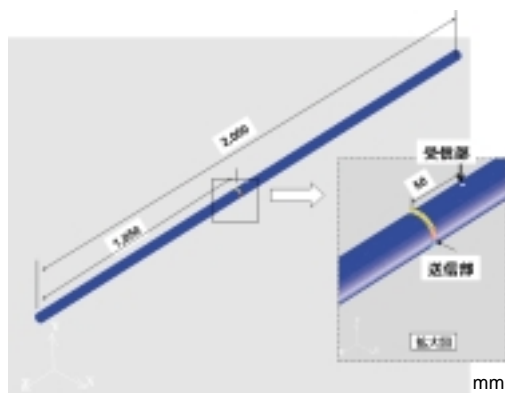


図2 解析モデル2の概要

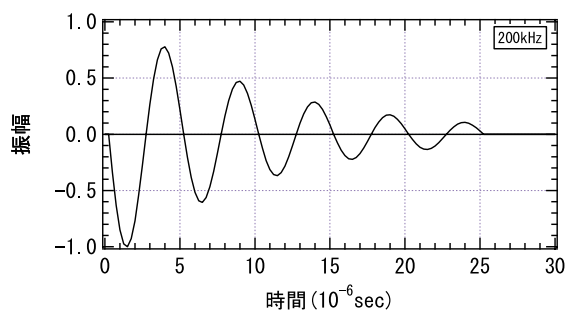


図4 中心周波数200kHzの送信波形

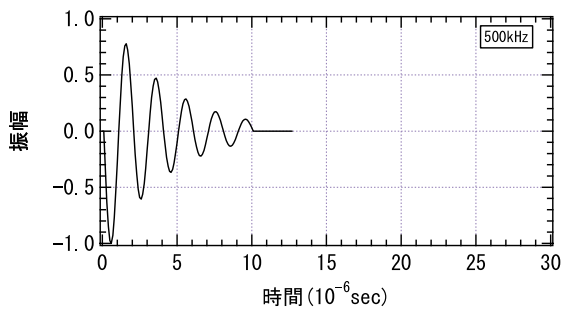


図5 中心周波数500kHzの送信波形

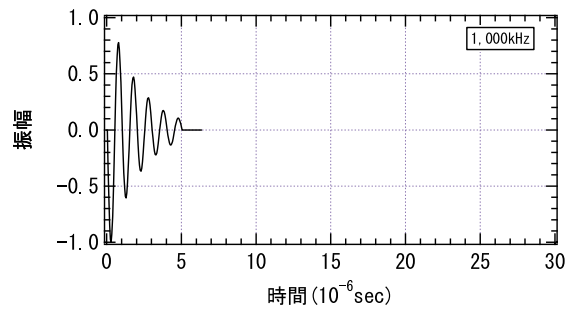


図6 中心周波数1MHzの送信波形

表1 主な解析条件

	モデル1	モデル2
材質 (縦波, 横波音速)	アルミニウム合金 母材 ($V_l=6.0\text{km/sec.}$, $V_s=3.04\text{km/sec}$)	SUS304 母材 ($V_l=5.7\text{km/sec.}$, $V_s=3.1\text{km/sec}$)
寸法, 形状	外径 5mm, 肉厚 1mm、直管	外径 34mm, 肉厚 3.2mm, 直管
送信波の周波数	200kHz, 500kHz, 1MHz	200kHz
要素寸法	0.1mm × 0.1mm × 0.1mm	0.2mm × 0.2mm × 0.2mm
要素数 / 並列数	約 1 億要素 / 4 並列	約 3.3 億要素 / 32 並列

3.....解析結果及び検証

3.1 モデル1

図7はモデル1に対して3種類の周波数で解析した結果であり、変位の振幅を色合いで表すとともに各要素の変形も拡大して表示した図である。詳細に表示するため、軸方向は送信部から50mm付近の領域を拡大して表示した。図の左から中心周波数200kHz、500kHz及び1MHzでの解析結果である。図8はLモードのガイド波の分散曲線である。

中心周波数200kHzでは、ほぼ1種類の波動が伝搬しており、波面の伝搬時間から算出した音速は約5km/秒であった。これは図8に示した分散曲線からL(0,1)モードであると考えられる。中心周波数500kHzでは、約3km/秒の振動とそれよりも遅い速度の振動が存在しており、分散曲線から各々の振動モードはL(0,2)及びL(0,1)モードであると考えられる。中心周波数1MHzでは、2種類の波動が伝搬しており、波面の伝搬時間から算出した音速は各々約5km/秒、約3km/秒であった。これらは、分散曲線よりL(0,2)モード及びL(0,1)モードと考えられる。

図9は代表的な波動の断面における振動(変形)の様子を表示したものである。管の変形と板厚の変形がわかる様に、外面および内面の断面を模式的に赤色点線で示した。図(a)は周波数200kHzのL(0,1)モードと考えられる波動であり、管の変形は軸方向に

対称な振動であるが板厚の変形は非対称(内面と外面の振動方向が同じ)であった。このような振動の状況より、この波動はL(0,1)モードであると判断できる。また、波動の伝搬方向と緑色矢印で示した振動方向は、ほぼ平行であり、バルク波で言うところの縦波と同様な波動であった。図(b)は周波数1MHzのL(0,2)モードと考えられる波動の振動である。この波動は管の変形は軸方向に対称な振動であり、板厚の変形も対称(内面と外面の振動方向が逆)であった。このような振動から、この波動はL(0,2)モードであると判断できる。また、波動の伝搬方向と振動方向は、ほぼ平行でありバルク波で言うところの縦波と同様な波動であった。図(c)は周波数1MHzのL(0,1)モードと考えられる波動の振動である。この波動は管の変形は軸方向に対称な振動であるが板厚の変形は非対称(内面と外面の振動方向が同じ)であった。このような振動の状況から、この波動はL(0,1)モードであると判断できる。また、波動の伝搬方向と振動方向は、ほぼ直交しており、バルク波で言うところの横波と同様な波動であった。バルク波では超音波の伝搬方向と振動の方向の関係で縦波や横波と言ったモードを定義しているのに対し、ガイド波では管の振動と板厚の振動の組合せでモードを定義しており同じ呼称のモードであっても、縦波の様な波動であったり横波の様な波動であったりする様子を示して

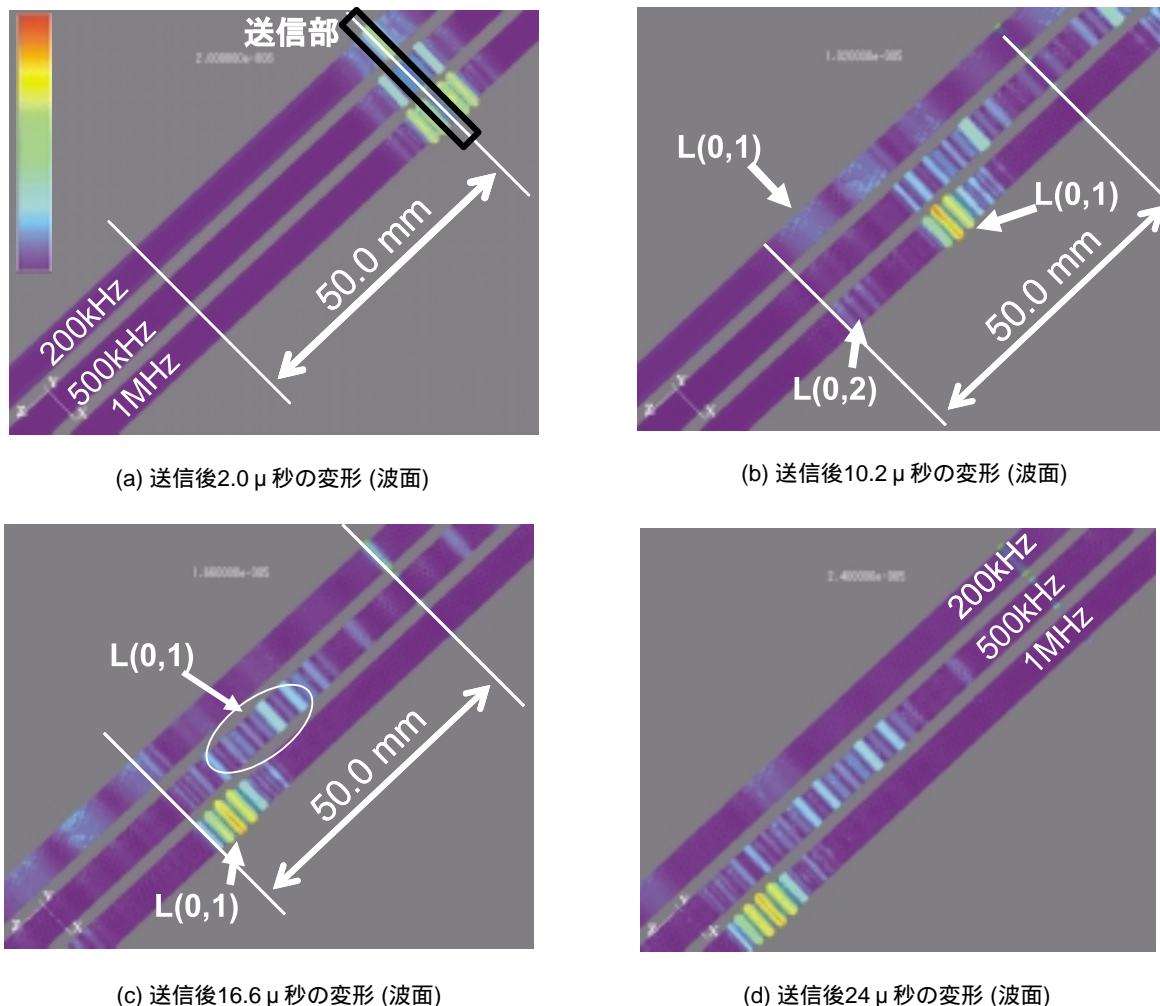


図7 モデル1における解析結果

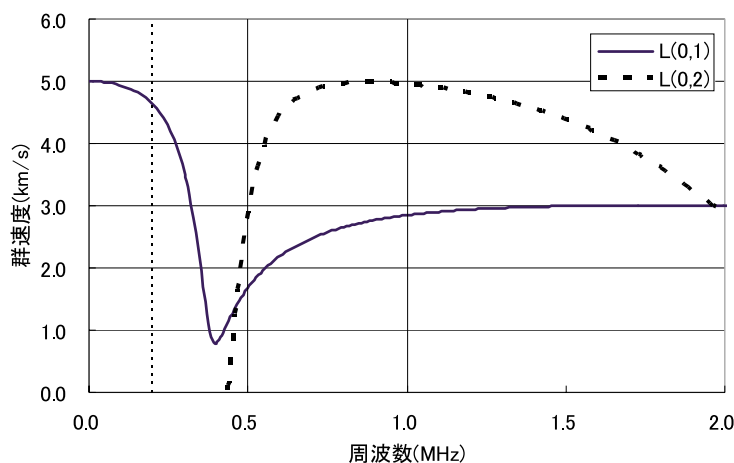


図8 Lモードの分散曲線 (モデル1:外径5mm, 肉厚1mm)

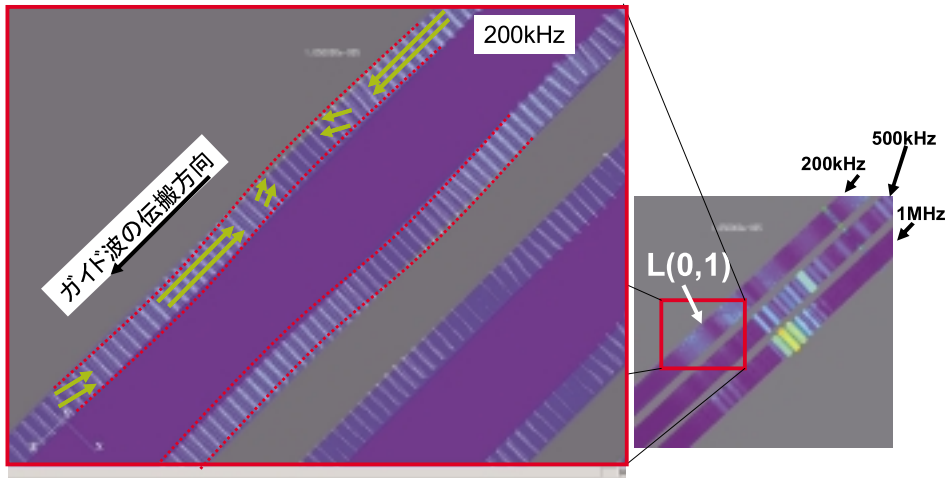
いる。

以上の結果から FEM 解析で得られたガイド波の伝搬状況は、理論解析 (分散曲線) で予測された結果と良く一致しており、ガイド波の送信モデルおよ

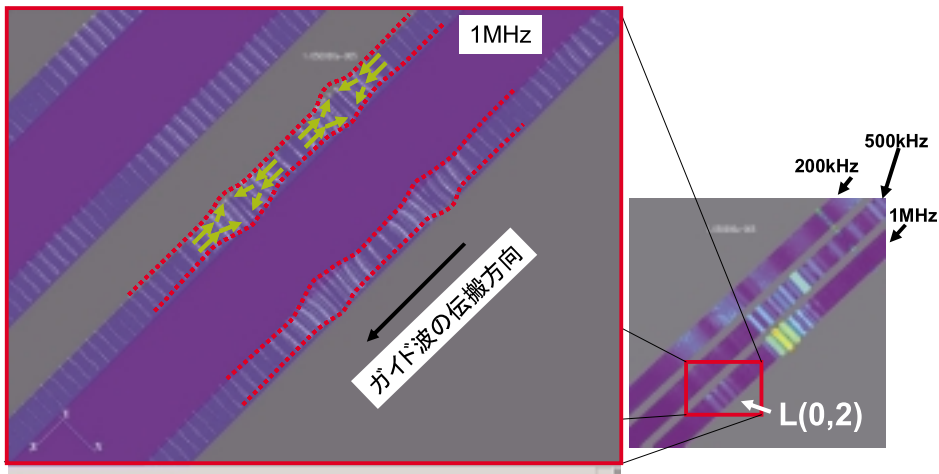
び解析手法の妥当性が確認されたと考えられる。

3.2 モデル2

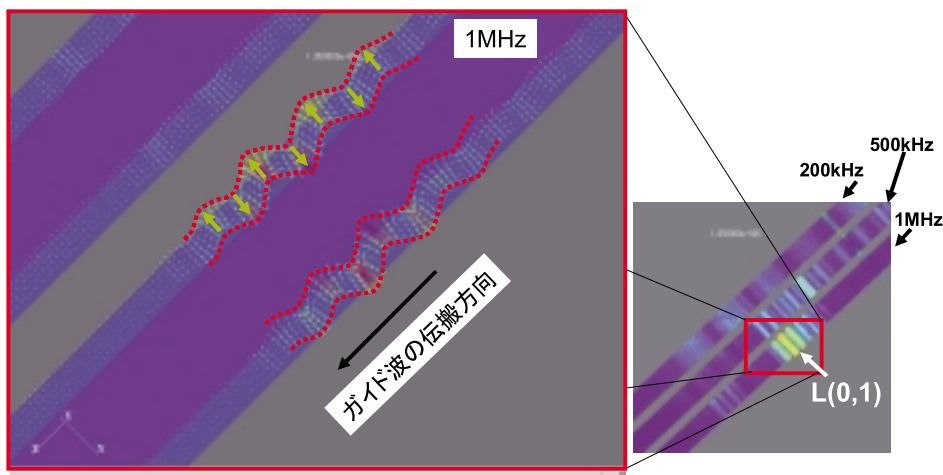
次に、モデル2で解析した結果を示す。図10に



(a) 周波数200kHz L (0,1) モードの伝搬状況



(b) 周波数1MHz L (0,2) モードの伝搬状況

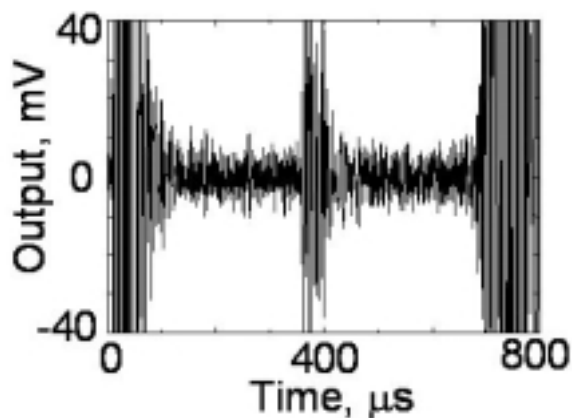


(c) 周波数1MHz L (0,1) モードの伝搬状況

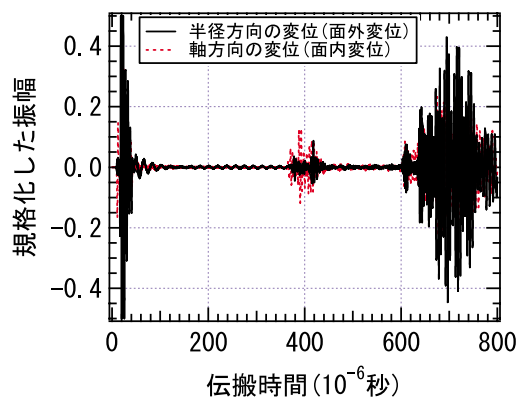
図9 モデル1における代表波面の伝搬状況

は、実際の測定で得られた波形とシミュレーション解析から得られた波形を比較して示す。図(a)は実験結果を、図(b)はシミュレーション解析結果である。現

時点での解析ではノイズをモデル化していないことや受信部のモデルが検討途中であるため、振幅の絶対値を直接比較することは困難であるが、波形の出

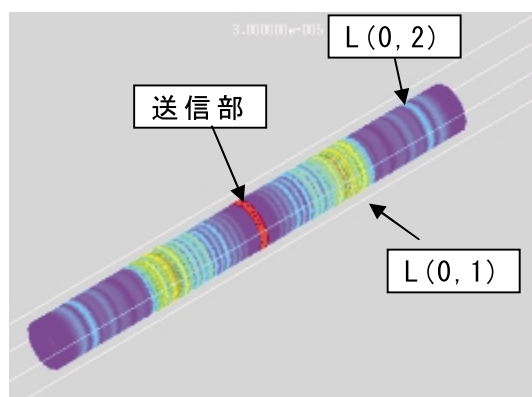


(a) 実験で得られた受信波形⁸⁾

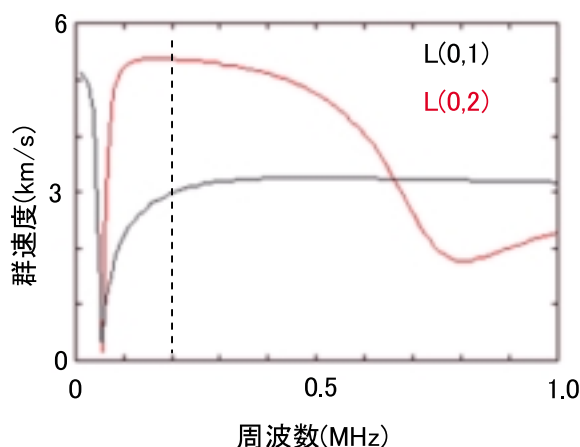


(b) シミュレーション解析による波形

図10 受信波形の比較



(a) 送信後20 μ秒の波面



(b) Lモードの分散曲線
(モデル2：外径34mm,肉厚3.2mm)

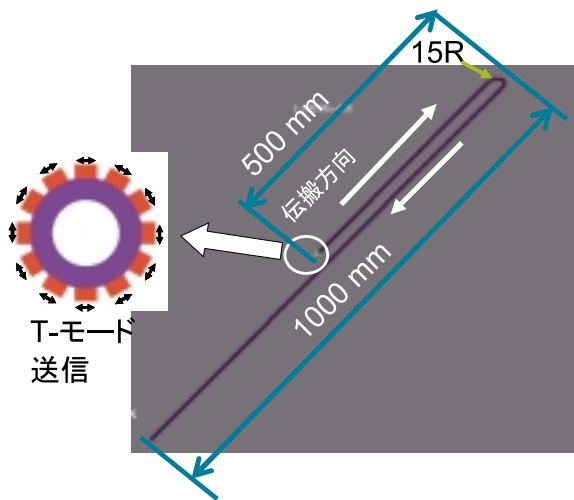
図11 モデル2におけるFEM解析結果および分散曲線

現時間を比較すると両者ともに約400 μ秒付近と700 μ秒付近に受信波が出現しており、シミュレーション解析は実験結果をよく再現していると言える。図11には、送信部付近における超音波の伝搬状況を拡大して表示した結果と分散曲線を示す。図(a)から板厚の変形が対称に振動し音速が速いL(0,2)モードが伝搬し、続いて板厚の変形が非対称に振動するL(0,1)モードが伝搬している様子が確認できる。この条件では、L(0,2)モードは縦波の様な軸方向の振動であり、L(0,1)モードは横波の様な振動であった。また、波面の伝搬状況より図10において約400 μ秒付近の波形は、L(0,2)モードが両端で反射した波形が重なったものであり、約700 μ秒付近の波形はL(0,1)モードが両端で反射した波形であることが確認され

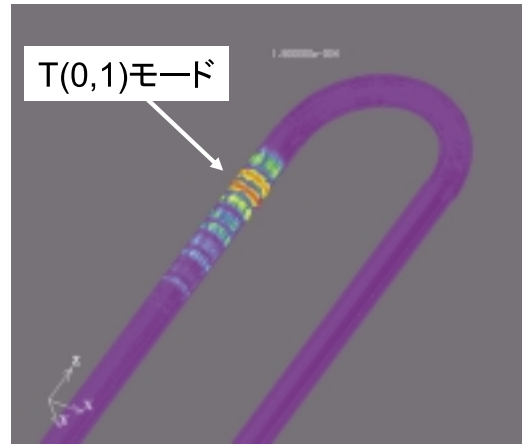
た。これらの結果は、図(b)に示した分散曲線から予測される結果と同じであり、解析結果の妥当性が確認された。

4.....曲管に対する試解析

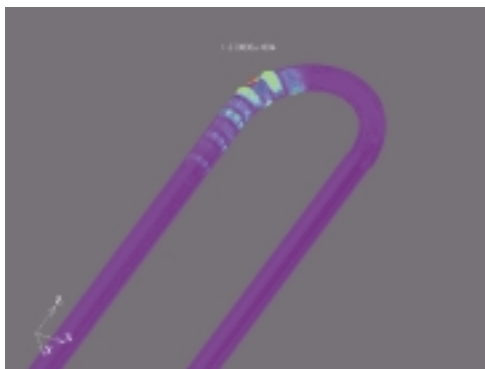
上記の検討結果より三次元FEM解析を用いてガイド波の伝搬シミュレーション解析が可能であることが確認されたものと考え、ガイド波探傷において探傷結果の解釈が難しい部位の一つである曲管部の伝搬解析を行った。解析モデルはR15mmの曲管部を有する外径5mm、厚さ1mmの管とし、図12(a)に示す様に円周方向に様に振動を与えTモード¹⁾(管がねじれて振動するモード)を発生させる条件



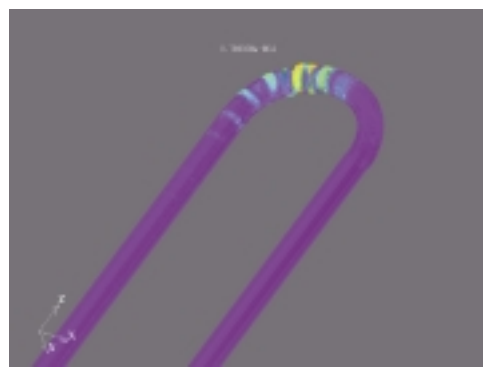
(a) 解析モデルの概要



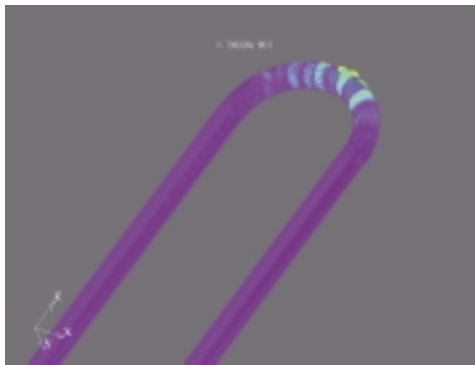
(b) 直管部の伝搬状況



(c) 送信後167 μ秒の波面



(d) 送信後171 μ秒の波面



(e) 送信後175 μ秒の波面



(f) 送信後179 μ秒の波面

図12 曲管部を含むモデルにおけるTモードの伝搬状況の解析結果

で解析した。管の材質はアルミニウム合金、周波数は500kHzとした。図(b)は送信から160 μ秒後の波面であり曲管部へ入射する直前である。図(c)から(f)は167 μ秒後から4 μ秒刻みで波面を表示した結果であり、曲管の腹側の強度が小さく背側の強度が大きくなっていることが確認できる。この解析結果から、曲管部では腹側の欠陥は検出しにくいと背側の

欠陥は比較的検出しやすいのではないかと推定される。今後、エルボ等を含めた他の形状に対しても詳細な解析を行う予定である。

5.....まとめ

ガイド波の伝搬シミュレーションにおいて、任意

の形状の解析モデルや自由度の高い境界条件の設定に対応するため、大規模解析に対応した三次元 FEM コードと並列計算機を用いた解析を行った。今後、送受信部のモデルを高度化するとともに、曲管部の詳細な解析、内部流体が存在したモデル、フランジやサポート付き配管モデル等への適用を図る予定である。

参考文献

- 1) 川嶋編：特集 ガイド波による探傷，非破壊検査 Vol. 52, No. 12, pp. 653-682, 2003
- 2) 西野編：特集 ガイド波による探傷 II，非破壊検査 Vol. 54, No. 11, pp. 585-611, 2005
- 3) 林，村瀬：ガイド波非破壊検査における分散曲線と振動分布の役割について，第 15 回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, pp.69-74, 2008
- 4) 林：ガイド波伝搬の数値シミュレーション，非破壊検査 Vol. 52, No. 12, pp. 662-666, 2003
- 5) 古川，古村，米山，山口：超音波探傷試験によるき裂深さ測定精度の評価，平成 18 年度火力原子力発電大会論文集 CD-ROM，pp. 58-63, 2006
- 6) 古村，古川，鎌田，南：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，平成 19 年度 第 4 回保全学会学術講演会予稿集, pp. 245-248, 2007
- 7) 古川，古村，鎌田，南：超音波伝搬シミュレーション解析を用いた超音波探傷の支援技術，平成 20 年度火力原子力発電大会論文集 CD-ROM，pp. 123-126，2008
- 8) 松尾，長，竹本：光ファイバ AE システムとガイド波検査法を用いた配管腐食減肉量の評価，材料試験技術 Vol. 52, No. 3, pp. 154-161, 2007



古川 敬



古村一朗

交流磁化およびBarkhausenノイズ測定による炭素鋼の塑性ひずみおよび残留応力の評価

AC Magnetization and Barkhausen Noise Measurements for the Evaluation of Plastic Strain and Residual Stress of Carbon Steels

溶接・非破壊検査技術センター 程 衛英, 古村一朗
南 康雄, 西川 聡

AC magnetization measurements and Barkhausen noise measurements are carried out on plastically deformed carbon steels. The correlation between characteristic parameters of electromagnetic measurements and parameters to evaluate the mechanical deformation, i.e. plastic strain and residual stress, has been investigated. The measurements show that the ratio of the fundamental component of output signal to that of input signal of AC magnetization measurement decreases monotonously with plastic strain. The higher harmonic factors are affected by residual stresses. The Barkhausen noise is dominantly affected by residual stress.

Keywords: : Plastic deformation, residual stress, AC magnetization measurement, Barkhausen noise measurement, Carbon steel

1.....緒 言

機械や構造物では、部材を構成する材料が降伏点以上の荷重を受けると塑性変形が生じ、荷重が除荷された後も塑性ひずみが残存するとともに残留応力が発生する場合がある。このような塑性ひずみや残留応力は構造物が受けた損傷のひとつであり、き裂等欠陥の発生に一歩近づいた状態であると言える。よって、構造物の安全性を確保するため、塑性ひずみ及び残留応力を適切に評価する必要がある。過去の研究により炭素鋼の電磁気特性は塑性ひずみや残留応力、金属組織変化などに敏感に影響されることが確認されている。本研究では、電磁気的な手法により炭素鋼構造物の塑性ひずみや残留応力を非破壊的に計測する手法の適用性を評価する。

塑性ひずみや残留応力計測の現場における実用性などを考慮して、本研究では交流磁化法及びBarkhausenノイズ測定法の二種類の電磁気測定法を採用した。研究の流れとしては、塑性変形を付与した試験片の作製、塑性ひずみ分布及び残留応力の解析、交流磁化法及びBarkhausenノイズ測定

法による電磁気測定、データ分析の四ステップである。すなわち、電磁気測定データから特徴量を抽出し、残留応力及び塑性ひずみと電磁気特徴量の相関を調べ、交流磁化法及びBarkhausenノイズ法の塑性ひずみと残留応力計測への適用性を調べた。

2.....塑性変形付与試験片の作製

塑性変形により塑性ひずみが生じる際には、場合によっては残留応力も生ずる。他方、切断や切削などの加工プロセスでも残留応力が発生する。これらの金属加工に起因する残留応力の分布は殆ど未知で、ここでは初期応力と呼ぶこととする。従って、塑性変形を受けた材料には、初期応力、塑性ひずみ及びそれに伴う残留応力が存在していると言える。

残留応力の分布は塑性変形の付与方法により異なる。本研究では、引張り及び曲げ試験で塑性変形試験片を作製した。引張り試験片は‘TS’と名付け、材質はSS400である。Fig. 1にTS試験片の形状・寸法を示す。試験片厚さは5mm、長さは270mmである。初期応力の電磁気測定への影響を調べるため、

‘TS’試験片をTS-HTとTS-NHTの2組に分けた。TS-HTは引張り試験前に残留応力除去熱処理を行なった試験片であり、出来上がった理想状態のTS-HT試験片には塑性ひずみと塑性変形に伴う残留応力のみが存在する。一方、TS-NHT試験片は残留応力除去熱処理を行なわなかったまま塑性変形を付与した試験片であり、TS-NHT試験片には塑性ひずみと塑性変形に伴う残留応力と初期応力の全てが共存している。両方の各試験片に0.3%、0.5%、1%、3%および5%の5レベルの塑性変形を付与した。

曲げ試験により塑性変形を付与した試験片は‘BD’と名付けた。試験片の形状・寸法及び塑性変形の付与方法をFig. 2に示す。厚さ10mm、長さ200mm、幅30mmのSM490A鋼試験片の中央に荷重を加え、スパン150mmの3点曲げ試験を行った。荷重点の反対側にひずみゲージをはり、塑性ひずみが5%になるまで荷重をかけ、試験片を変形させた。曲げ荷重の除荷後、試験片のA/B面をひっくり返し、見かけ上、試験片が平坦になるまで荷重をかけて曲げ戻した。2本のBD試験片のうち、BD1は以上のような塑性変形を付与した試験片であり、BD2は塑性変形を付与しなかった参照試験片である。

塑性変形に伴う塑性ひずみ及び残留応力の分布を構造解析コードABAQUSで解析した。二次元有限要素法解析の結果、以下のことが分かった：

- 1) TS試験片長手中央60mm範囲内の塑性ひずみはほぼ均一で、塑性変形に伴う残留応力は無視できるほど小さい。
- 2) TS試験片両面の塑性ひずみ及び残留応力の分布はほぼ同じ。
- 3) BD1試験片の塑性ひずみ及び残留応力は試験片長さ方向に分布している。長手中央の80mm範囲内において残留応力は著しく大きく、それ以外の範囲は無視できるほど小さい。
- 4) 曲げ試験片の両面における塑性ひずみ及び残留応力の分布は異なる。

従って、熱処理で初期応力を除去したTS-HT試験片の長手中央部は理想的に残留応力が無い状態であり、塑性ひずみだけが各電磁気特性変化の要因と考えられる。熱処理していないTS-NHT試験片の長手中央60mmの範囲には塑性ひずみと初期応力が存在し、BD1試験片には初期応力、塑性ひずみ及び残留

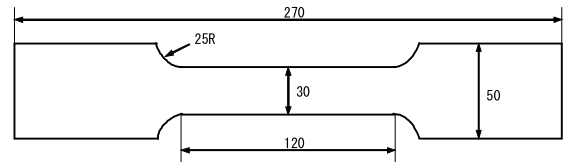


Fig. 1 Shape and dimension of TS sample.

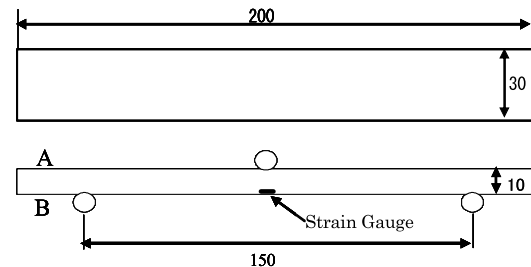


Fig. 2 Shape and dimension of a BD sample and the three-point force loading.

応力ともに存在している。

3.....交流磁化測定

本研究に用いた自己誘導差動検出交流磁化測定プローブをFig. 3に示す。E1とE2は同一の励磁コイルで、同じ周波数 f のsin波で励磁されており、P1とP2は同一のピックアップ・コイルである。P1及びP2端子で測定された信号の差が出力(すなわち $V_{out}=V_{p1}-V_{p2}$)として計測される。

被検体の電磁気特性の非線形性により、出力信号は基本波 f と基本波の整数倍である周波数 fn 成分を含んでいる。材料の電磁気特性を評価するため、以下の二つのパラメータを定義した：

1) 入力と出力の基本波成分の比R

このパラメータは入力および出力間の線形性を示し、試験片の導電率及び比透磁率の線形性を反映している。

2) 出力の高調波成分と基本波成分の比 HD_n (n は高調波の次数)

下記の式で示される HD_n であり、この量は被検体の電磁気特性の非線形性を反映している。

$$HD_n = 20 \times \log_{10} \left(\frac{|V_{out_fn}|}{|V_{out_f}|} \right)$$

本研究に使われた励磁電圧の周波数は6800Hzで、振幅は調整可能である。

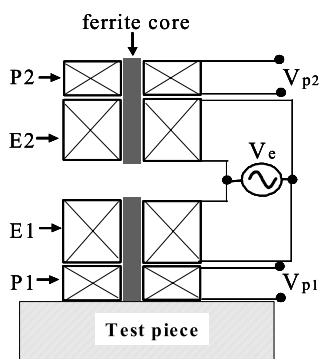
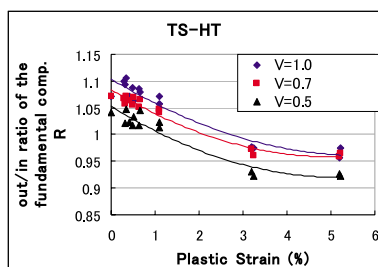
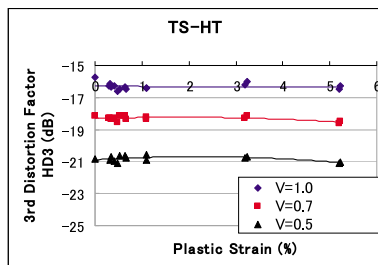


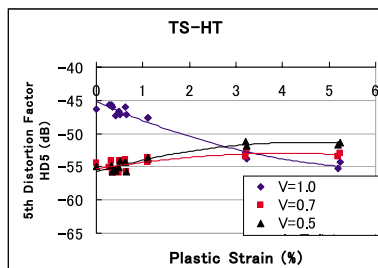
Fig. 3 Probe utilized in AC magnetization measurement.



(a) R value



(b) 3rd harmonic distortion factor



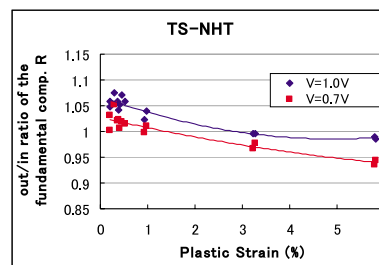
(c) 5th harmonic distortion factor

Fig. 4 Characteristic parameters of AC magnetization vs. plastic strain of TS-HT sample.

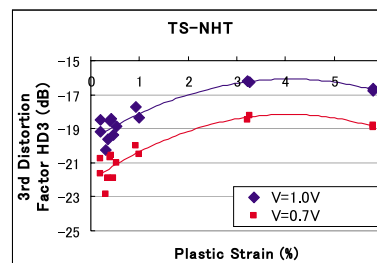
3.1 引張り試験で塑性変形を付与した試験片の交流磁化測定

過去の磁気履歴の影響を除去するため、各試験片は電磁気測定前に消磁作業を行った。

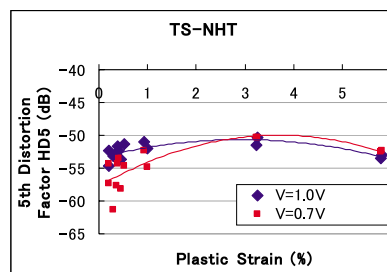
有限要素法解析で塑性ひずみがほぼ均一であった試験片長手方向中央60mm範囲内を、10mmピッチ



(a) R value



(b) 3rd harmonic distortion factor



(c) 5th harmonic distortion factor

Fig. 5 Characteristic parameters of AC magnetization vs. plastic strain of TS-NHT sample.

で交流磁化測定を行った。測定データのばらつきを考慮して、各測定条件及び測定点毎に3回の測定を行い、その平均を測定値として記録した。

Fig. 4及びFig. 5にTS-HT及びTS-NHT試験片の交流磁化測定特徴量と塑性ひずみ量の関係を示す。

これらの結果から以下のことが分かる：

- 1) Fig. 4(a)及びFig. 5(a)に示すように、TS-HT及びTS-NHT試験片の出力及び入力信号の基本波成分の比率Rは塑性ひずみの増加とともに減少する。この減少は非線形で、塑性ひずみが高いほど、減少幅は小さい。さらに、初期応力と塑性ひずみが共存するTS-NHT試験片のRの減少幅は塑性ひずみしか存在しないTS-HT試験片より小さい。
- 2) Fig. 4(b)及びFig. 5(b)に示すように、第3高調波比の値と塑性ひずみの関係は、TS-HT試験片

においては第3高調波比の塑性ひずみによる変化は観察されなかった。一方、TS-NHT 試験片においては、第3高調波比は塑性ひずみ量により変化しているが、これは、むしろ初期応力の影響と推定される。

3) Fig. 4(c)及びFig. 5(c)に示すように、第5高調波比と塑性ひずみの関係は、TS-HT 試験片においては、第5高調波比は塑性ひずみの変化に伴って単調に変化した。励磁電圧が1Vの場合、第5高調波比は塑性ひずみの増加により単調減少しているが、励磁電圧を0.7V及び0.5Vに設定すると、単調増加になる。初期応力が残ったTS-NHT 試験片では、第5高調波比と塑性ひずみの関係は単調ではない。

有限要素法解析で明らかになったように引張り試験片長手中央の60mm範囲内は塑性ひずみに伴う残留応力が無視できるほど小さいため、TS-HT 試験片の交流磁化測定信号の特徴量は塑性ひずみ量のみに関連づけられると考えられる。一方、TS-NHTの測定信号は塑性ひずみと初期応力に影響される。以上の分析から、

- 1) パラメータRは主に塑性ひずみに影響される、
- 2) 第3高調波比は塑性ひずみに不敏感である、
- 3) 第5高調波比は塑性ひずみ変化により単調変化する、

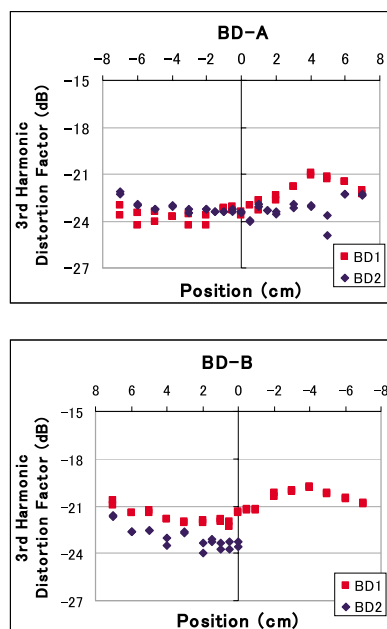


Fig. 6 3rd harmonic distortion factor of virgin samples.

ということが分かる。したがって、パラメータRと第5高調波比は塑性ひずみ評価に適切であるが、第3高調波比は、むしろ残留応力の影響が大きいと考えられる。

3.2 曲げ試験で塑性ひずみを付与した試験片の交流磁化測定

塑性ひずみを付与する前後のBD1試験片及び比較試験片BD2に交流磁化測定を行った。

曲げ試験片BDの塑性ひずみ及び残留応力が表面と裏面で異なるため、各試験片の両面ともに電磁気測定を行う必要がある。試験片長手中心点座標をX=0として、測定はX = -7cm, -6cm, -5cm, -4cm, -3cm, -2cm, -1.5cm, -1cm, -0.5cm, 0, 0.5cm, 1cm, 1.5cm, 2cm, 3cm, 4cm, 5cm, 6cm, 7cmの各点で行った。各測定条件で測定点毎に3回の測定を行った。

Fig. 6に参考試験片BD2及び塑性ひずみ付与前のBD1試験片の第三高調波比HD3を示す。試験片BD1とBD2、及び各試験片のA面とB面の測定結果の差異から、受け取り材の初期応力のばらつきが大きいと分かった。

Fig. 7に塑性ひずみ付与後のBD1の電磁気測定パ

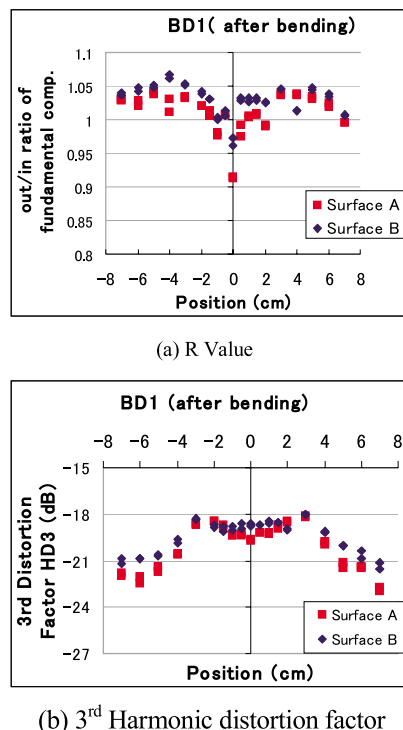


Fig. 7 R and 3rd harmonic distortion factor of three-point bending test sample BD1.

ラメーターRと第三高調波比HD3の試験片長手方向分布を示す。HD3及びRの測定点毎の変化は有限要素法解析で得られた塑性ひずみ及び残留応力分布と対応しており以下のことが言える：

- 1) 特徴パラメーターRは長手方向中央80mmの範囲内で測定点ごとに変化しており、中間点に対して対称である。
- 2) 長手方向中心点で塑性ひずみが最大であるが、Rは最小であり、中心位置から離れるに従い漸増する。これはFig. 4(a)に示したTS-HT試験片のRが塑性ひずみの増大とともに低下することと一致している。
- 3) 中心位置から離れるに従いHD3は漸減する。残留応力及び塑性ひずみが高い長手方向中央の40mm範囲内のHD3は他の部分より約2dB高い。

Fig. 7に示されたのは励磁電圧1.0Vで得られた結果であるが、励磁電圧0.5Vおよび1.2Vの時も類似の結果が得られた。

BD1試験片のこれらのパラメーターの変化は、塑性変形に伴う塑性ひずみ、残余応力および初期応力が複合した影響を示していると考えられる。

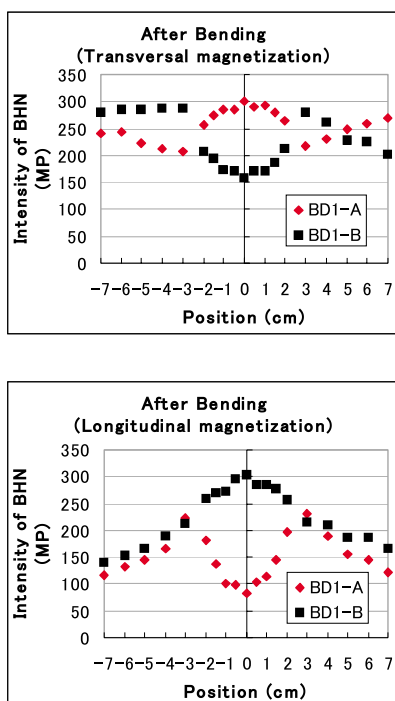


Fig. 8 Intensity of BHN of the after three-point bending test sample BD1. (MP is a term of BHN parameter defined for STRESSCAN 500C)

4.....Barkhausenノイズ測定

Barkhausenノイズ(BHN)信号の強さは金属組織及び弾性応力の存在とその分布に影響される。磁気弾性相互作用原理によれば、炭素鋼のような正の磁気異方性をもつ材料では、磁気弾性作用の結果、引張り応力ではBHN強度は増加し、圧縮応力では、BHNの強度は減少する。

本研究では、商用の測定装置STRESSCAN 500C⁴⁾(センサS1-138、公称深さを0.07mmと設定している)を用いて、各試験片において交流磁化法と同じ測定ポイントでBarkhausenノイズ測定を行った。測定は試験片の長手及び幅方向にそれぞれ磁化して行った。

4.1 引張り試験で塑性ひずみを付与した試験片のBarkhausenノイズ測定

熱処理で初期応力を除去したTS-HT試験片で測定したBHN強度と塑性ひずみの間には単調な関係が観察され、以下のことが分かった：

- 1) 試験片の長手方向に磁化される場合、BHN強度は塑性ひずみの増加により単調に減少する。
- 2) 試験片の幅方向に励磁されると、BHN強度は塑性ひずみの増加とともに増加する。
- 3) しかし、初期応力がある状態のTS-NHT試験片では、このような単調な関係が認められなかった。

また、BHN強度は、塑性ひずみによる測定信号の変化の範囲を超えるほど、ばらつきが大きく、この傾向は塑性ひずみレベルが低いほど大きかった。この結果から、BHN信号強度を用いて塑性変形レベルを評価することは困難であると判断される。

4.2 曲げ試験で塑性ひずみを付与した試験片のBarkhausenノイズ測定

塑性ひずみを付与する前後のBD1試験片及び参照試験片BD2のBarkhausenノイズ測定を行った。

有限要素法解析から分かるように、3点曲げ試験後試験片両面の長手及び幅方向にそれぞれ引っ張り及び圧縮の残留応力が発生する。残留応力の幅方向成分の値は長手方向成分の約1/3であったが、これはFig. 8に示した曲げ試験後のBD1のBHN強度の分

布と一致している。さらに、試験片を幅方向に磁化した時のBHNの強度は、長手方向に磁化した時のBHNの強度とは残留応力の程度に対して増/減が逆の傾向であり、試験片の表裏面に関しても増/減が逆に変化していた。

以上に述べた引張り及び曲げ試験片のBarkhausenノイズ測定結果から、BHN信号強度は残留応力に著しく影響されることが分かった。

5.....結論

本研究で行った引張り及び曲げ試験で塑性ひずみを付与された試験片の交流磁化及びBarkhausenノイズの測定結果から以下のことが分かった。即ち、塑性ひずみおよび残留応力ともに炭素鋼の電磁気特性に影響しているが、BHN信号強度は比較的残留応力に大きく影響され、一方、交流磁化信号の入力信号と出力信号の基本波振幅比率Rは塑性ひずみに大きく影響される。

従って、塑性ひずみや残留応力などの測定したい物理量に応じて適切な測定法及び評価量を選択する

事が重要である。

参考文献

- 1) Stegemann D., Reimche W., Heutling B., Krysz A., Feiste K.L., Characterization of mechanical-technological steel properties by non linear harmonics analysis within the production line, Nondestructive Characterization of Materials IX, CP497, 1999, pp. 196-201
- 2) Cheng W., Shiwa M., Komura I., Gotoh Y., Takahashi N., Finite element analysis for the evaluation of post-weld heat treatment of 9Cr-1Mo welds, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 24, 2005, pp. 1204-1211.
- 3) Ito Y., Application of Barkhausen noise to material evaluation, Review of R & D in Toyota Central Research Institution,, Vol. 27, No. 4, 1992 (in Japanese).
- 4) STRESSCAN 500C System, Operating Instructions.



程 衛英



古村 一朗



南 康雄



西川 聡

斜角探傷法によるき裂周りの超音波の可視化

Visualization of Ultrasonic Wave Motion around the Crack by Angle Beam Technique

溶接・非破壊検査技術センター 関野晃一, 古川 敬
古村一朗
清水紘治
関東学院大学

Ultrasonic testing is widely used for the maintenance of power plants. Ultrasonic waves are reflected or diffracted at defects, so defects are detected and sized by measuring the beam path length or amplitude of the echo. In order to improve the accuracy of defect detection or sizing, it is important to know how the ultrasonic wave diffracts or reflects around a defect.

In this study, the behavior of the ultrasonic wave motion around the crack tip by angle beam technique is directly observed by applying photoelasticity. A heat resistant glass was employed for the visualization of ultrasonic wave. The ultrasound velocity of heat resistant glass is close to ultrasound velocity of steel. A natural crack is produced at the center of specimen by applying thermal stress. The crack opening dimension is measured by optical interferometric technique. The ultrasonic wave motion is investigated at around the crack tip by the visualized photoelastic pattern of ultrasonic. In certain condition, the ultrasonic wave was transmitted through the gap of crack face. The ultrasonic wave motion that was reflected and diffracted at upper or lower tip of crack was observed.

Keywords: : Ultrasonic Testing, Visualization of Ultrasonic Wave, Crack Opening Dimension, Optical Interferometric Technique, Crack Tip, Crack Depth Sizing

1.....緒 言

超音波探傷法によるきず高さ測定方法の一つとして、端部エコー法が利用されている。端部エコー法では、例えば埋没した面状欠陥の上端と下端で回折した超音波の伝搬時間から端部の深さ位置を計測し、上端と下端の深さ位置の差分をきず指示高さとして求めることが出来る¹⁾。きず高さ測定精度の向上策を検討する上で、きずの端部で回折した超音波の挙動を把握することが重要であり、これまでに多くの研究が行われてきている^{2),3)}。超音波の挙動を把握する方法の一つとして、超音波が伝搬する様子を直接観察することが有効であると考えられ、光弾性法透過法が利用されている。例えば、機械加工によって付与した欠陥で、超音波が反射および回折する様子が観察されている³⁾。この研究で用いられている欠陥は切欠き(ノッチ)であったが、ノッチと

疲労き裂やSCCなどでは超音波の応答が異なる事が知られているため、著者らは自然き裂を用いた観察を行ってきた。き裂周りの超音波の様子を観察する目的で、き裂をガラス板に付与し、き裂周りの超音波の様子を観察してきた。これまでにき裂に対して垂直に超音波を入射した場合の超音波の挙動を観察した結果について報告を行っている^{4),5)}。

本報告では、これまでの報告の続報として、き裂に対し斜めに横波を入射したときの超音波の挙動を直接観察し、き裂先端部への入射方向(上端あるいは下端)と回折波の振幅を調べた結果を示す。

2.....き裂開口幅の計測

き裂開口幅の計測では光干渉法の原理を利用した⁶⁾。図1に光干渉法の原理を示す。図1(a)は光干渉法の光学系である。本研究では光源Sから白色光を

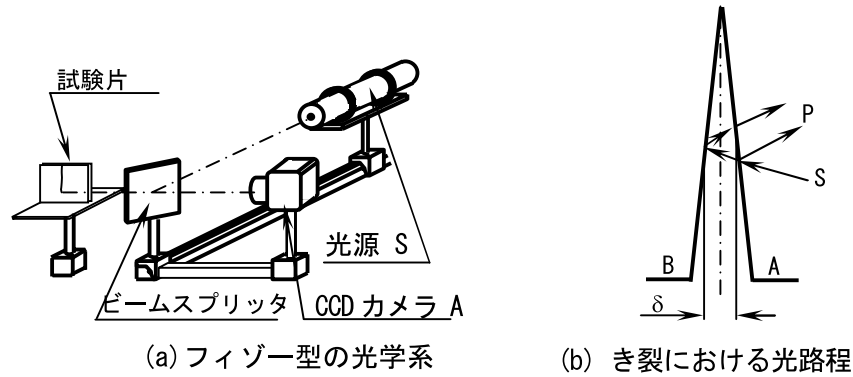


図1 光干渉法の原理

ビームスプリッタを通し、試験片に照射した。光干渉法では光源に単色光を用い現れる縞の次数を数えて隙間の測定を行なうことが多いが、光源に白色光を用いると、光弾性法の色比較法⁷⁾と同様にカラーの干涉縞が得られ、1次の縞が現れる隙間以下の詳細なき裂開口幅の計測が行える⁸⁾。図1(b)は干涉縞を生じさせるき裂における光路の模式図である。き裂に入射した光は、面Aと面Bで反射し、干涉縞Pが発生する。この干涉縞の色合いに対応した光の波長からき裂開口幅が求められる。き裂に入射したとの関係は

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

である。ここで、Nは縞次数である。

3.....超音波の可視化法の実験装置と実験方法

図2は光弾性法の光学系を利用した超音波可視化装置の模式図である。光源には発光時間の短いスト

ロボライトを用い、超音波探傷装置と同期し、物体中を伝搬する超音波が静止画で観察できる³⁾。任意の位置における超音波の可視化像を得るには、図中の遅延回路で、ストロボライトに遅延時間を与えた。用いた探触子は中心周波数5MHz、振動子寸法は直径10mm、屈折角は鋼材の屈折角で45°；集束距離7-48mmの斜角探触子である。探触子の位置を図3に示した。探触子は、図中の開口面側または反開口面側に設置した。本研究では開口面または反開口面から超音波を入射したときの探傷器感度を比較するため、き裂先端で回折した超音波のエコー高さをCRT画面上で80%に調節し探傷波形を収録した。

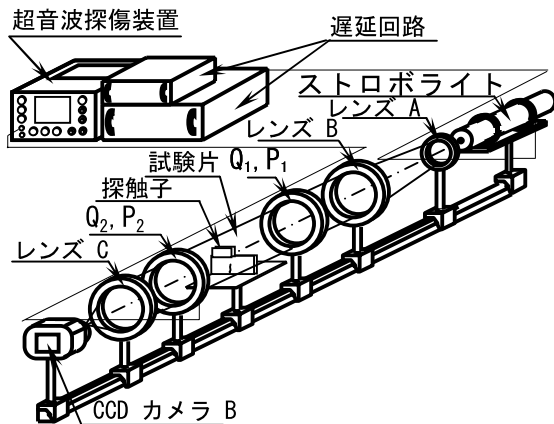


図2 光弾性法による超音波の可視可装置

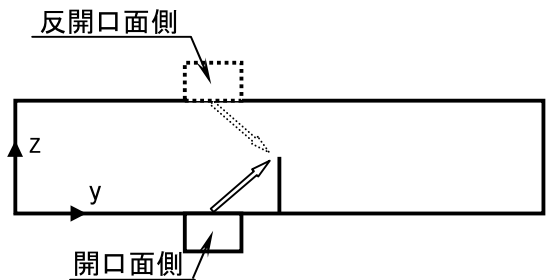


図3 探触子位置

4.....試験片

図4にき裂を付与した試験片の形状寸法および荷重荷方法を示す。試験片の材質はショット社のテンパックスフロート（ほうけい酸ガラス）を用いた。テンパックスフロートの縦波音速は5470m/sで、横波音速は3400m/sである。光干渉法ではき裂面に垂直な方向から光を照射するため、試験片の側面S_Aを

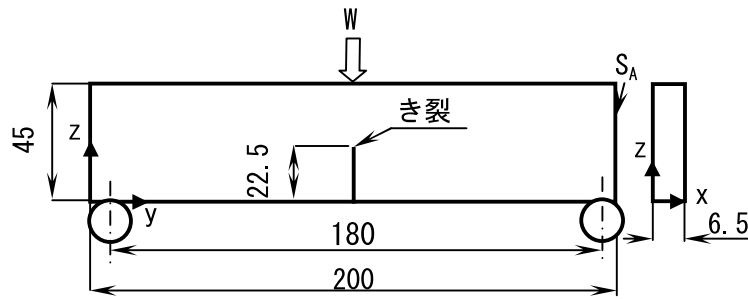


図4 試験片の形状 (単位: mm)

鏡面仕上げとした。試験片の中央付近には、熱応力の原理を利用し、約22mmのき裂を付与した。熱応力でき裂を付与した直後は、き裂を目視できたが、試験片の温度が常温まで低下すると、目視または光干渉法で観察できないほど、き裂が閉口した。閉口したき裂を再開口およびき裂開口幅を保持するため、図3に示すように試験片に三点曲げ荷重Wを加えた。荷重Wはき裂が進展しないように、ガラスの破壊じん性 ($K_{Ic}=0.69\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) の約45% ($W=39.2\text{N}$) とした。

5.....実験結果

(1) 光干渉法によるき裂開口幅の計測

図5は干渉縞の一例である。本図からき裂先端は、x方向(板厚方向)に対し平行であった。図5中の C_L - C_L 線に沿ったき裂高さを画像上で計測すると、開口端から22.5mmであった。

図6は C_L - C_L 線上の赤色の干渉縞からき裂開口幅を

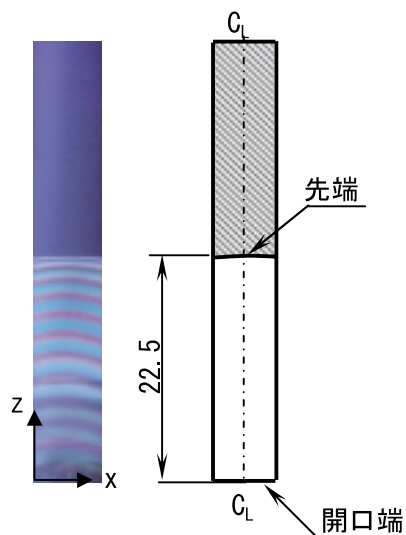


図5 干渉縞の一例

求めた結果である。図中のプロット点は式(1)に波長 $\lambda=546.1\text{nm}$ を代入してき裂開口幅を求めたものである。本図から光干渉法で計測できる最も小さい計測値である半波長(273nm)のき裂開口幅となる位置はき裂先端から約0.4mmであった。

(2) 開口面からの入射(き裂下端への入射)

図7は開口面から超音波を入射したときの探傷波形である。波形の横軸は超音波の伝搬時間、縦軸はCRT画面上のエコー高さである。図中のAのエコーはき裂先端で回折した横波である。き裂高さはJIS Z 3060-2002に従って計測した。その結果、きずの指示高さは22.1mmであった。き裂先端からの回折波の振幅を80%にあわせたとときの探傷器感度は33.5dBであった。

このような探傷波形が得られるときの超音波の挙動を光弾性法で観察した結果を図8に示す。図8(a)はき裂に入射する前の超音波の可視化像である。図中の白色の部分が可視化した超音波の波面である。この超音波は矢印Tの方向に伝搬している。図8(b)

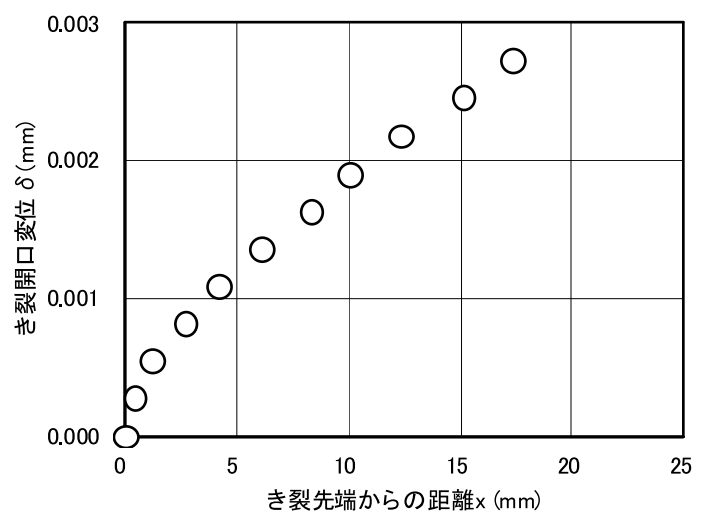


図6 き裂開口幅とき裂先端からの距離の関係

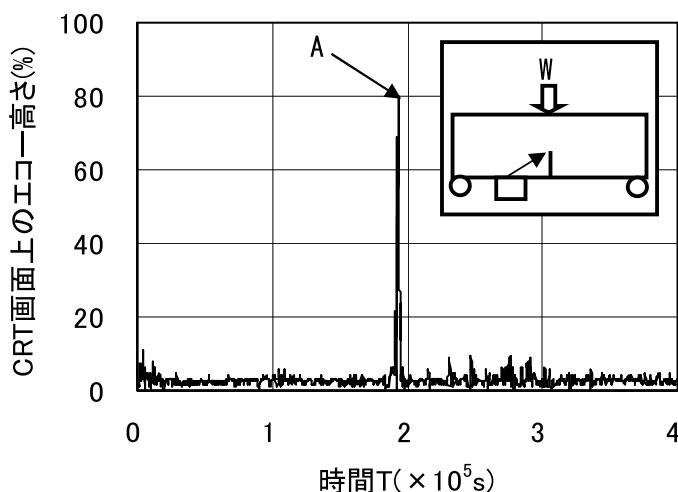


図7 探傷波形（開口面）

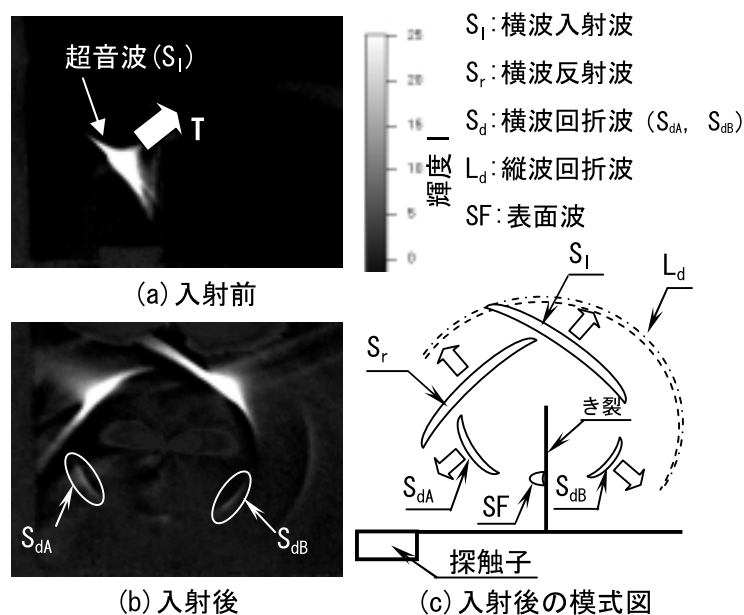


図8 き裂周りの超音波の可視化像（開口面）

はき裂に入射したあとの超音波の可視化像である。き裂に入射した超音波はき裂先端で回折しき裂面で反射している。き裂周りにおける代表的な波面を図8(c)に示した。き裂周りにおいては、入射した超音波 S_1 、き裂面で反射した横波 S_r 、き裂先端で回折した横波 S_{dA} 、 S_{dB} 、モード変換し回折した縦波 L_d を観察することが出来た。この中で、探触子に向かって伝搬した波面は S_{dA} であるため、図7の探傷波形のAのエコーは、 S_{dA} の波面を検出したと考えられる。また、図中の S_{dB} の波面はき裂を回り込んだ回折波である。図8(b)の画像では観察しにくいだが、き裂面

を表面波SFが伝搬しているのが観察される。これらの結果はノッチで観察された代表的な波面³⁾と同様であった。

(3) 反開口面からの入射(き裂下端への入射)

図9は反開口面から超音波を入射したときの探傷波形である。図中のAがき裂先端で回折した超音波である。探傷面からき裂先端の深さ位置は23.2mm、試験片の板厚は45.0mmであるため、き裂の指示高さは21.8mmである。き裂先端からの回折波の振幅を80%にあわせたときの探傷器感度は45dBであった。

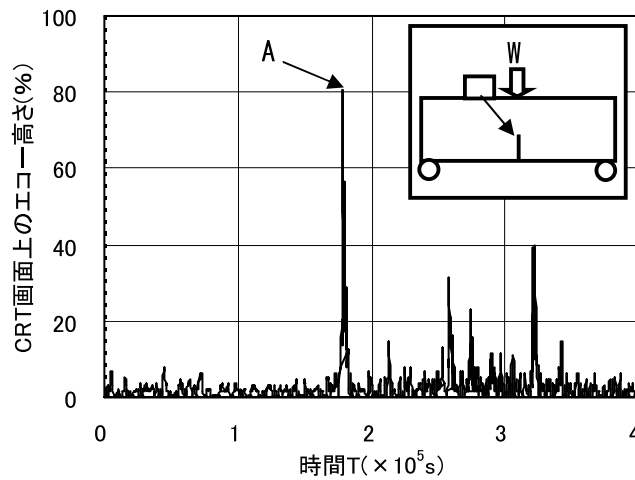


図9 探傷波形（反開口面）

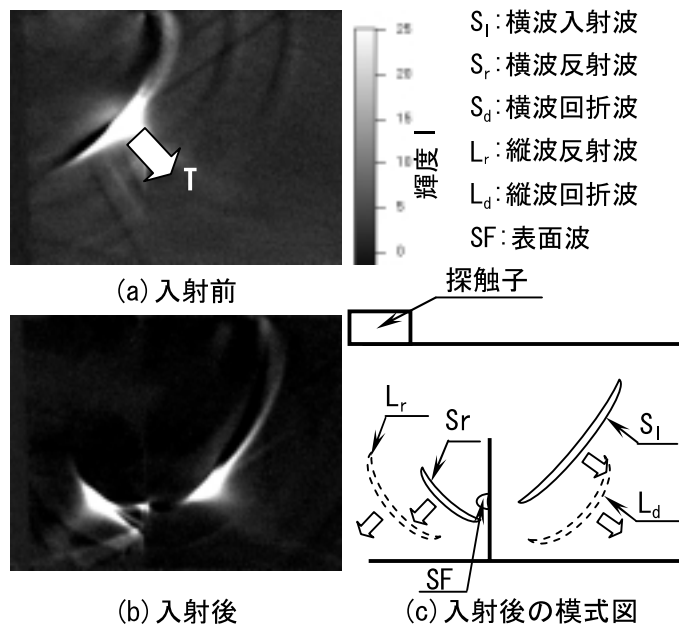


図10 き裂周りの超音波の可視化像（反開口面）

このような探傷波形が得られるときのき裂先端における超音波の挙動を図10に示す。図10(a)はき裂先端に入射する前の超音波で、図中の矢印Tの方向に超音波が伝搬している。図10(b)はき裂に入射した後の超音波の可視化像であり、き裂面での反射波とき裂先端でモード変換し、き裂面を伝搬する表面波が観察できる。き裂に入射後の超音波の波面の模式図を図10(c)に示す。き裂周りの超音波は、反射した横波 S_r とモード変換した縦波 L_r であった。前項で述べた開口面側からの入射ではき裂先端の回折波を観察できたが、反開口面側からの入射ではき裂先端

の回折波を観察できなかった。開口面側からの入射ではCRT上80%の端部エコーを得る探傷器感度が33.5dBであったが、反開口面側からの入射では45dBであり、開口面と反開口面で約12dBの感度差であった。このき裂下端からの回折波の振幅の方がき裂上端からの回折波よりも大きいという結果は、疲労き裂に対して行なわれた実験結果²⁾と同様の傾向であった。

6.....結 言

開口面および反開口面からき裂先端に向かって横波を入射し、き裂周りの超音波の挙動を直接観察した結果、以下に示すことが分かった。

- (1) き裂に対する超音波の入射方向が異なると、即ちき裂下端部エコーの場合とき裂上端部エコーの場合では、き裂先端近傍で反射および回折する超音波の強さは異なる。
- (2) き裂先端における超音波の挙動は、伊達等により報告されている研究³⁾で観察されたノッチ先端の反射および回折の超音波挙動とは同様の傾向であった。

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) 伊達和博，島田平八，津島 聡：弾性波の反射・回折におよぼすき裂先端の開き量について，非破壊検査，33(9)，pp.666-673，(1984)
- 3) 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)，pp.513-519，(1984)

- 4) 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)
- 5) 関野晃一，古川 敬，古村一朗，清水紘治：横波入射によるき裂周りの超音波の挙動，第15回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集，pp. 153-156, (2008)
- 6) Sommer, E.: An Optical Method for Determining the Crack-Tip Stress Intensity Factor, Engineering Fracture Mechanics, 1(4), pp. 705-718, (1970)
- 7) Kobayashi, A. S.: Handbook on Experimental Mechanics, Society for Experimental Mechanics, p. 213, (1993)
- 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き裂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

放射光CTによる ステンレス鋼応力腐食割れき裂の3次元観察

Observation of Cracks caused by Stress Corrosion Cracking 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，長谷川忠之
古村一朗
兵庫県立大学 藤城智之，山本厚之
寺澤倫孝
SPring 8 / JASRI 梶原堅太郎

The aim of this paper is to demonstrated the applicability of γ -ray computer tomography (CT) to the 3-dimensional (3D) imaging of minute cracks produced in austenitic stainless steel (SUS304) caused by Stress Corrosion Cracking (SCC). The CT imaging experiments were performed at beam BL19B2 of SPring-8. The γ -ray energy was adjusted to 37KeV using a Si double-crystal monochromator. In summary, clear images of fine cracks in austenitic stainless steel due to SCC were successfully obtained by synchrotron radiation CT imaging.

Keywords: Synchrotron radiation, CT Imaging, Stainless steel, SCC, SPring-8, Ultrasonic testing,

1.....緒 言

溶接構造物の欠陥検査に多く用いられる超音波探傷試験 (Ultrasonic Testing : UT) の測定精度は、欠陥当該部の切断試験等により評価しているが、応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking : SCC) のように欠陥 (き裂) が3次元的に生じている場合、切断試験のような2次元面による評価では大きな誤差が生じる懸念がある。一方、UTの適正探傷条件の事前検討やエコー信号の解析支援、UT測定法の教育、訓練のツールとして用いるためUT計算機シミュレーション (UTシミュレーション) の開発が精力的に進められている¹⁻⁴⁾。このUTシミュレーション開発では、鋼中欠陥 (き裂) の3次元形状とその分布に関する情報が重要かつ、不可欠である。筆者らはこれまで大型放射光施設 SPring 8 の放射光を用い、CTイメージング法によりNi基合金溶接金属部のSCCやステンレス鋼母材部に生じた粒内型応力腐食割れ (TGSCC) や粒界型応力腐食割れ (IGSCC) の3次元形状やその分布状態について調べてきた⁵⁻¹¹⁾。放射光は、一般的に多く用いられているCrやMoをターゲットとしたX線管球を用いたX

線発生装置のX線に比べ 10^8 倍以上の輝度が得られ、またビームを細く絞ることが可能で、高い空間分解能を得ることができ、さらに高い指向性を有することから、従来のX線撮影における吸収コントラストとともに屈折コントラストの利用も可能となり、より高分解能のイメージング像を得ることができるとい多くのメリットがある。

本報では前報¹²⁻¹³⁾に引続き、実用鉄鋼材料として多く用いられているステンレス鋼のSCCで、最近原子力発電プラントで見られた溶接熱影響部 (HAZ) から溶接金属内に進展した割れについて、SPring 8の放射光を用いCTイメージング法により観察した結果について報告する。

2.....実験方法

2.1 試験片の作製

用いた供試材は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 鋼である。応力集中が生じ易いようなワインカップ状の溶接を行い、高温高圧純水中にて引張応力を付加し加速試験によってSCCを付与した。SCC付与後、割れを含む約3mm×3mm、長さ約20mmの柱状試験片を切出し、直径約2mmの丸棒状

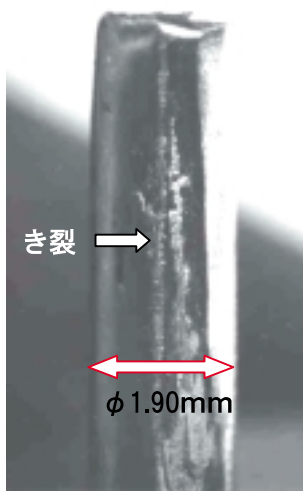


図1 測定用丸棒試験片外観

試験片に仕上げた。丸棒状試験片の外観を図1に示す。

2.2 測定装置と測定条件

測定は、兵庫県播磨科学学園都市にある大型放射光施設SPring 8の産業用ビームラインBL19B2の第1ハッチを用いて行った。放射光のエネルギーは37KeVである。図2に用いた測定装置の外観およびその構成図を示す。放射光（SR光）は、Si（111）の2結晶分光器を通り、試料を透過後、ズームング

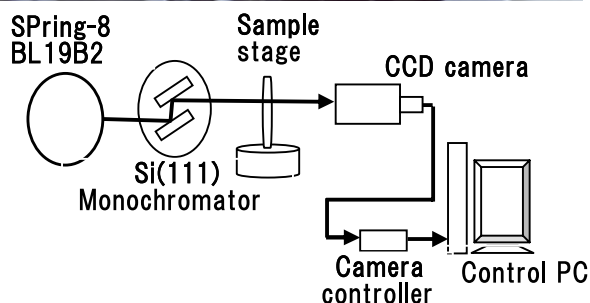
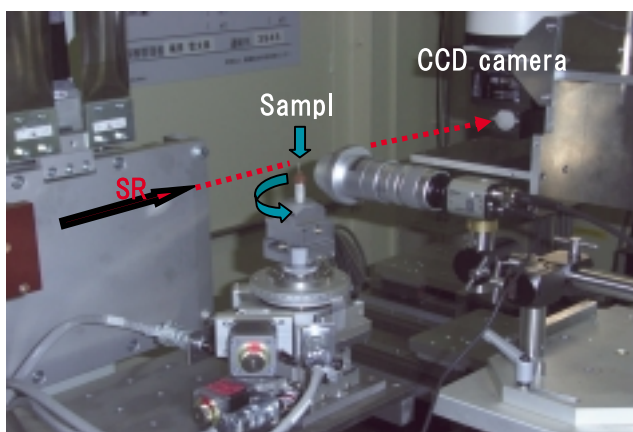


図2 CTイメージング測定装置の外観と構成図

管内の光電面上で結像され、光電子に変換される。光電子は蛍光面で可視光に変換され、CCDカメラで受光され、画像として制御用コンピュータに記録される。得られる像に大きく影響を及ぼすカメラ長（ベンディングマグネット（線源）からCCDカメラまでの距離）は、これまでの試験結果より300mmとした。ビームの照射範囲は2.7mm x 2.7mmである。透過像撮影は、試料を0°から180°まで0.2°ピッチで回転させ、1.2秒/frameの条件で撮影した。使用したCCDカメラの画素数は、4000 x 2600、実効ピクセルサイズは約2.9 μmである。撮影後の画像再構成アルゴリズムは、Filtered Back Projection法（解析コード：Image-J）を用いて行った。表1に主な測定条件を示す。

表1 測定条件

SR Energy	37keV
Slit size	12 x 10 mm
Camera length (mm)	100, 200, 300
CCD pixel number	4000 x 2600
Pixel size	~ 2.9 μ m
Photographing pitch and angle	0.2° pitch, 0° ~ 180°
Exposure time	1.2 sec/Frame
3 Dimension Projection	Filtered back Projection method

3..... 結果

図3には、光学顕微鏡による断面マイクロ組織観察結果を示す。この図では負荷した引張応力方向は紙面に対し左右の方向となる。その結果割れは下方に

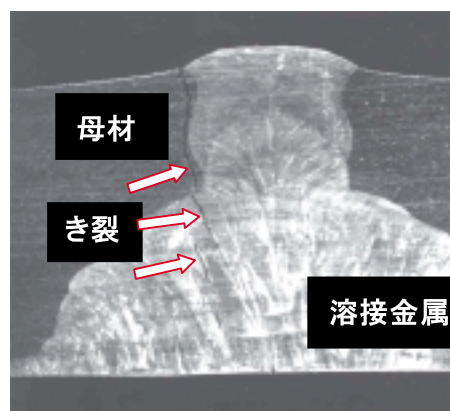


図3 光学顕微鏡によるステンレス鋼SUS304のSCCき裂

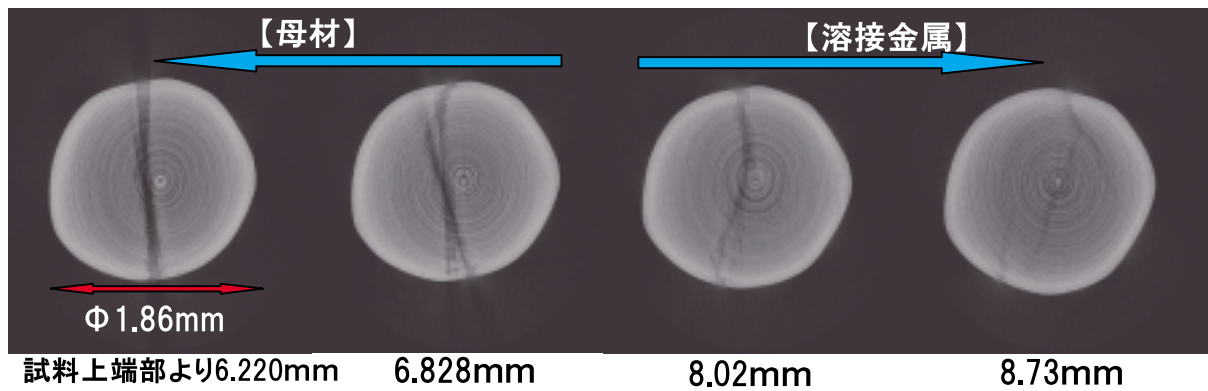


図4 SUS304 鋼中 SCC き裂の CT イメージングによる横断面構成像

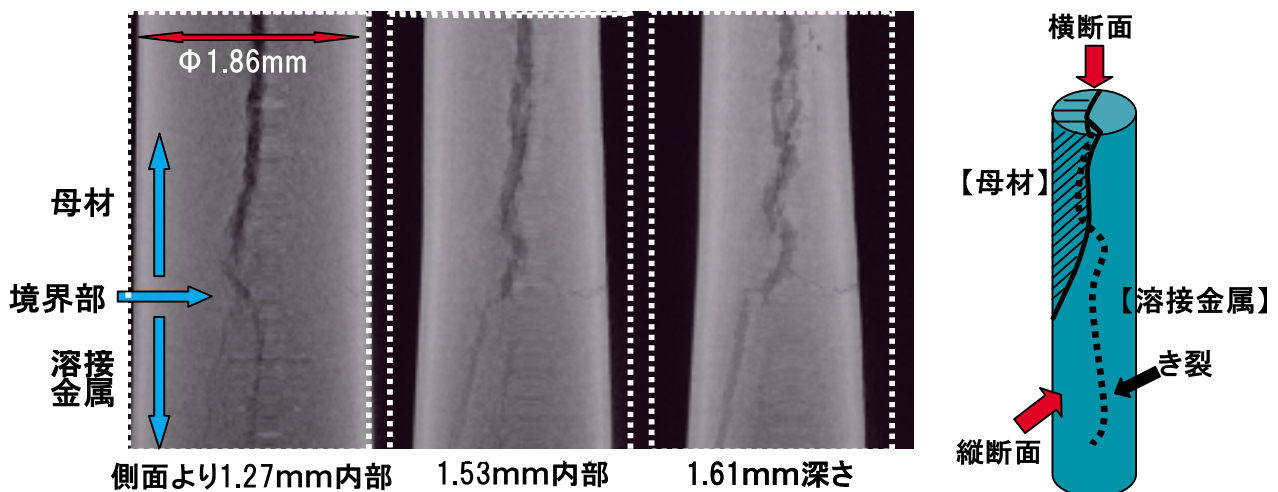


図5 SUS304 鋼中 SCC き裂の CT イメージングによる縦断面構成像

進展する。割れは表面溶接金属ごく近傍の溶接熱影響部（HAZ）に発生し、溶接金属に沿って進み、途中より溶接金属内に侵入している。この侵入部は、溶接金属形状がくびれており、残留応力が集中する部位と考えられる。これまで報告されているステンレス鋼のSCC事例では、このような場合、溶接金属部へは進入せず、溶接金属に沿って母材部を進展するか、滞留するかいずれかであった。しかし最近原子力発電プラントにおいてこのような溶接金属内に進展したSCC事例が見出されたことから溶接金属の形状とそれに伴って生じる残留応力および負荷引張応力を制御し、このような形態を有するSCC試料を作製した。また溶接金属内にはいくつかの割れが散見され、それらの割れはミクロ組織観察ではデンドライト組織の境界部に見られた。したがってこのような割れは、鋭敏化した粒界に沿って引張応力の大きい方向に進展し、溶接金属内に侵入した後は凝固

時に不純物などが偏析し易く、かつ脆弱部位であるデンドライト組織の境界部に沿って進展したと考えられる。

図4には、放射光CTイメージング法によって得られた横断面構成像、図5には同じく縦断面構成像、図6にはそれら構成像より3次元に再構成した3次元再構成像をそれぞれ示す。母材部での割れは小さな分岐は見られるが、全体としては単調に進展している。溶接金属内に入ると複雑に分岐し、進展している。このような進展挙動は、光学顕微鏡観察結果からも予測される結果である。また複雑に分岐した溶接金属内の割れは、光学顕微鏡観察結果でデンドライト組織の境界に沿って進展した割れである。3次元再構成像（図6）結果ではそのき裂面は、滑らかな面状をしていることがわかった。さらに本試料における母材部のSCCき裂幅は、溶接金属内のき裂幅より広いことがわかった。

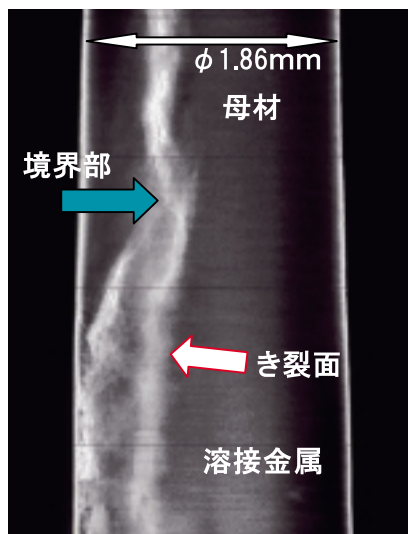


図6 SCCき裂の3次元再構成像

図7には、筆者らがこれまでに観察したステンレス鋼SUS316Lの母材に生じた典型的なIGSCCき裂例についての光学顕微鏡によるマイクロ組織とCTイメージング法による横断面、縦断面構成図および3次

元再構成像の結果を示す¹³⁾。このIGSCC試料では、表面発生起点よりき裂は複雑に分岐しながら進展し、途中大きく逆Y字状に分岐した後、擦れながら進展している。また3次元再構成像によるき裂幅は場所により不均一であることがわかる。また図8には、同じくTGSCCの結果を示す¹³⁾。このTGSCC試料では、途中横から生じたき裂と合体しているが、光学顕微鏡によるマイクロ組織観察結果に示すようにき裂はほとんど直線的、かつ単調に進展している。このような進展挙動は、CTイメージング法による構成像や3次元再構成像の結果においても裏付けられている。またき裂幅はIGSCCのように不均一ではなく、ほぼ一定幅の面状で進展していることがわかる。これらの結果は、TGSCCはマイクロ組織の影響をほとんど受けないことを示唆していると考えられる。

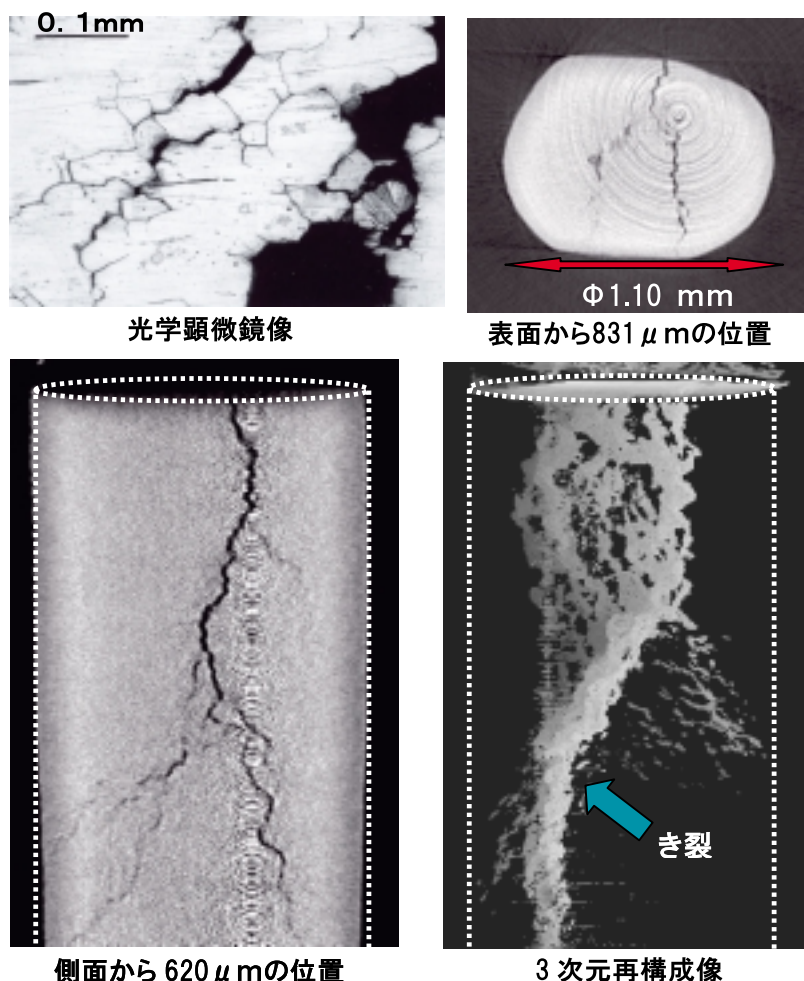


図7 ステンレス鋼 SUS316L 中の IGSCC き裂

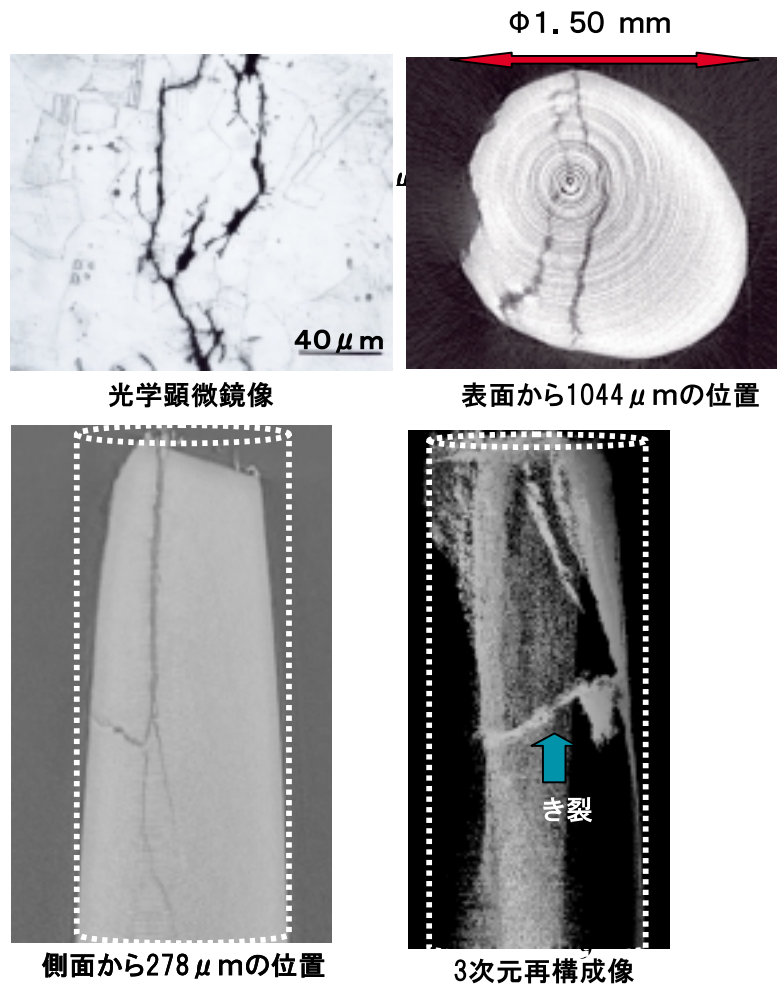


図8 ステンレス鋼 SUS316L 中の TGSCC き裂

4..... 検 討

4.1 SCCき裂の像解像度

本測定条件によるCTイメージング法のSCCき裂の判別可能なき裂幅について検討を行った。得られたSCCき裂の横断面および縦断面構成像をそれぞれ200%に拡大し、1/10mm精度のスケールによりき裂幅の測定を行った。その結果、放射光のエネルギーが37keV、カメラ長が300mm、CCDカメラの実効ピクセルサイズが約2.9 μmの条件では、IGSCCき裂は約3.2 μm ~ 4.0 μm、TGSCCき裂は4.0 μm ~ 6.8 μmのき裂幅まで測定可能であった。CTイメージング法では、X線吸収率差の大きい場合には吸収法、小さい生体試料のような場合には位相法が、また半導体のような完全性の高い単結晶中のひずみ観察等には回折法などが用いられることが知られている。放射光のように平行性に優れている場合、その特徴を活かし屈曲コントラスト法と併用される場合がある。屈曲コントラスト法は、X線の屈曲率が1より

わずかに小さいため試料表面や内部空孔の縁のように曲率が小さい部分では透過X線はわずかに屈曲し、X線の直進部分と干渉することにより他の部位とのコントラストが強調されることを利用する方法¹⁴⁾で、カメラ長を長くして適正条件を見出すことにより境界部がより強調された画像を得ることができる。本測定条件は、吸収法と屈曲コントラスト法の条件が同時に成立している条件と考えられるが、その詳細については十分検討できていない。

本CTイメージング法により3 μm ~ 7 μmのSCCき裂幅まで測定、確認できたことは、UTシミュレーションモデルの構築に要求されるき裂形状や分布に関する基礎データとして問題ない値であると考えられる。

4.2 UTシミュレーションモデルへの反映

放射光CTイメージング法により現在原子力発電プラントや化学プラント等で知られているオーステ

ナイト系ステンレス鋼の母材に発生するIGSCCやTGSCCおよび母材溶接熱影響部から溶接金属内に進展する新しいタイプのSCCき裂についての3次元形状やその分布状態に関する基礎的知見を得ることができ、これまで2次元のき裂情報や乱数を発生させて模擬していたき裂形状や分布状態を実測データとしてUTシミュレーションモデルに直接取り入れることが可能となり、UTシミュレーションモデルのより高精度化と高速化が期待できるようになった。しかしこれら得られたSCCき裂データは、同じSCC形態であっても多様であることが明らかとなり、今後さらに多くのき裂データを採取し、き裂のパターン化などのデータ処理を行い、効率よくUTシミュレーションモデルに取り込む手法を開発することが重要な課題であることが明らかになった。

4.3 適用対象の大型化

UTシミュレーションモデルを使用する場合、その有効性の評価や検証が重要である。検証は、UT測定した試料についてシミュレーション解析を行うとともに、非破壊により欠陥位置とサイズを確認し、それらの結果を直接比較できれば確実である。そのためにはUT測定が可能な大きい試料中の欠陥を非破壊にて検出する手法が必要である。

一方CTイメージング法は、SCCき裂の伝播経路の解明手法として有望であると考えられる。特にIGSCCのき裂進展経路については、き裂が進展する粒界は、その粒界の固有特性のほか、その粒界に相対する結晶粒の方位関係が深く関与していると考えられる。そのような3次元的な相関関係についての統計的なデータを得るためにも測定対象試料の大型化が必要である。大型化については、高エネルギー放射光によるCTイメージング法やコンプトン散乱により発生した高エネルギーの線を用いた線イメージング法の適用等が考えられる。

SPring-8放射光施設にはウイグラーを用いたより明るい波長の単白色光が得られるBL08Wビームラインがある。このビームラインでは、115keVという高エネルギーの放射光を用いることが可能であり、CTイメージング測定も可能である。この場合、板厚10mm強のステンレス鋼中の欠陥検出が期待できる。筆者らは、115keVの放射光を用いたCTイメー

ジング測定を試み、直径10mmのステンレス鋼中SCCき裂の測定に成功している¹⁵⁾。

一方、コンプトン散乱線イメージング法の適用が考えられる。コンプトン散乱線イメージング法とは、光速に近い電子にCO₂レーザやNb:YAGレーザを照射し、放出されるコンプトン散乱の線を利用してイメージング測定を行う方法である。発生するコンプトン散乱の線のエネルギーは、照射するレーザの波長に依存し、CO₂レーザ(波長10.54 μm)の場合には最高1.76MeVの線が、Nd:YAGレーザ(波長1064nm)の場合には16.7MeVの線がそれぞれ発生する。筆者らは、兵庫県立大学・高度産業科学研究所・New SUBARU放射光施設の電子線ビームラインBL01に設置されたコンプトン散乱線イメージング装置を用い、板厚50mmの人工スリット(スリット幅0.24mm,スリット最大深さ5mm)入りステンレス鋼試料について、コンプトン散乱線によるイメージング法を試みている。

5..... まとめ

原子力発電プラントにおける高温高圧純水環境中や化学プラント等においてこれまで報告されているオーステナイト系ステンレス鋼に生じる典型的なSCCであるIGSCCやTGSCC、さらには最近報告された溶接熱影響部(HAZ)から溶接金属中へと進展したSCCについて、37keVの放射光によるCTイメージング法によりその3次元形状と分布状態を調べた。その結果以下のことが明らかになった。

- (1) ステンレス鋼SUS316L母材のTGSCCおよびIGSCCき裂およびステンレス鋼SUS304の溶接熱影響部(HAZ)から溶接金属内に進展したSCCについて、いずれも鮮明なき裂の3次元形状および分布状態を観察することができた
- (2) HAZから溶接金属内に進展したSCCでは、母材部のき裂進展挙動と溶接金属内に進展したき裂挙動とは顕著に異なり、母材部のき裂は比較的単調な進展挙動を示しているのに対し、溶接金属内では複雑に分岐、屈曲し進展している
- (3) SUS316L鋼のTGSCCき裂は、ほとんど分岐せず、直線的に進展しているのに対し、IGSCCき裂は、複雑に分岐、屈曲し、擦れながら進展

している

- (4) SUS316L鋼のTGSCCとIGSCCき裂の幅は、前者の方が後者に比べ細い
- (5) IGSCCのき裂幅は、不均一であるが、TGSCCき裂幅はほぼ一様である

6..... 今後の課題

得られたオーステナイト系ステンレス鋼のSCCき裂情報は、直径約2.0mm弱の小さい試料内の情報であり、き裂の全容を見ることはできなかった。またUTシミュレーションを用いるには、その有効性と検証が重要である。検証には、UT測定した試料について解析を行い、それら結果と非破壊による欠陥位置と形状について観察できれば確実であるが、そのためにはUT測定が可能な大きな試料についてのイメージング測定が必要である。さらにシミュレーションモデルの高度化には、超音波の反射特性に大きな影響を与えると考えられるき裂面の性状や、き裂先端部の形状、き裂幅等に関する詳細な情報を得る必要があるが、現状のCTイメージング測定による構成像や再構成像の像解像度は十分とはいえない。これらの課題を解決するには、高エネルギー放射光によるCTイメージング測定法の開発や、画像解析ソフトの高速・大容量化などが望まれる。

本研究は、SPring 8 BL19B2ビームラインを利用して得られた成果である（課題番号2006B0215、課題番号2007B1941、課題番号2008A1901、課題番号2008B2078）。

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) 中東 他：平成18年度SPring 8大型先端研究施設戦略活用プログラム成果報告書（2006B），p. 204（2006B0215）
- 6) S.Nakahigashi et al：SPring 8 Research Frontiers 2007, p. 158 (2008), JASRI
- 7) 中東 他：平成19年度SPring 8重点産業利用課題成果報告書 (2007B1941), p. 191
- 8) 中東 他：平成20年度SPring 8重点産業利用課題成果報告書 (2008A1901), p. 227
- 9) 中東 他：日本原子力学会「2008年秋の大会」，Q08，高知工大
- 10) 中東 他：NDEシンポジウム2008 予稿集，(財)発電設備技術検査協会，p. 94，2008
- 11) 中東 他：日本原子力学会「2009年春の年会」，A48，東京工大
- 12) 中東 他：(財)発電技検 技術レビュー Vol. 3，発電技検，p. 31，2007
- 13) 中東 他：(財)発電技検 技術レビュー Vol. 4，発電技検，p. 22，2008
- 14) 橋本：金属材料への放射光技術の応用，配管技術，第50巻第11号，p. 33, 2008
- 15) 中東 他：原子炉材料の応力腐食割れ（SCC）の可視化，平成21年度SPring 8一般課題（2009A1259）利用報告書（投稿中）



中東重雄



長谷川忠之



古村一朗

高温高圧純水環境下のNi基600合金用被覆アーク溶接金属の応力腐食割れ形態

Stress Corrosion Cracking Morphology of Shielded Metal Arc Weld Metals for Alloy 600 in High Temperature Pressurized Pure Water

溶接・非破壊検査技術センター 西川 聡, 堀井行彦
大阪大学接合科学研究所 池内 建二

Stress corrosion cracks (SCCs) occurring in the weld metal of a type 600 Ni base alloy during the creviced bent beam (CBB) test in pressurized pure water at 561 K have been characterized on the basis of orientation maps determined from electron back scattering pattern (EBSP) in order to distinguish the intergranular (IG) SCC from the interdendritic (ID) SCC. The specimen for the CBB test was cut from shielded metal arc weld metals of the Ni base alloy deposited using welding rods with C contents ranging from 0.03% to 0.11% and Nb contents from 1.23% to 4.39%. The CBB test was carried out on specimens in the as-welded state and those subjected to a post weld heat treatment (PWHT) consisting of tempering for 72 ks at 893 K and aging for 720 ks at 673 K. It turned out that most SCCs observed in all the weld metals except for those of high Nb content (0.076% C and 4.39% Nb) subjected to the PWHT were identified as IGSCC. Cracks identified on IGSCCs in the specimen of high Nb content receiving the PWHT were more than twice as deep as those regarded as transgranular (TG) and IDSCCs. Since the fractured surface of the IGSCC presented dendritic features, it was rather difficult to distinguish the IGSCC from the IDSCC based on the fracture morphology.

Keywords: Alloy 600, Nickel base alloy weld metals, CBB test, IGSCC, IDSCC, EBSP, Misorientation angle

1.....緒言

現在、我国の電力供給のおよそ30%は原子力発電に依存しており、原子力発電プラントを安全に運転することは社会的使命となっている。しかし近年、原子炉炉内構造物の一部に用いられているニッケル基合金の600合金用被覆アーク溶接金属に応力腐食割れ(SCC)が発生し、定期検査等で発見されている¹⁾。SCCの発生箇所はステンレス鋼では溶接熱影響部となる場合が多いのに対し、ニッケル基合金では溶接金属が多い。そして、ニッケル基合金溶接金属のSCCは沸騰水型原子炉(BWR)と加圧水型原子炉(PWR)に共通して発生している。しかし、このようなニッケル基合金溶接金属のSCCは文献や報告書により表現が異なり、柱状晶粒界で発生して進展する Intergranular SCC (IGSCC) とする場合^{2), 3)}

と、デンドライト境界で発生して進展する Interdendritic SCC (IDSCC) とする場合^{4), 5)}がある。柱状晶は溶融凝固時に母材熱影響部の結晶粒からエピタキシャル成長した結晶粒であり、このときに组成的過冷等を生じると1つの柱状晶粒内にデンドライトが複数本形成される。したがって、デンドライト境界は方位差の少ない小傾角粒界となる。一方、柱状晶粒界は必ずしも小傾角粒界とはならず、凝固直後では一部のデンドライト境界と一致するが、凝固後の冷却過程において粒界エネルギーを下げるために移動を生じる場合があり、必ずしもデンドライト境界と一致するとは限らない⁶⁾。このことから、IGSCCとIDSCCは金属組織的に異なる部位で生じるSCCを意味している。しかし、ニッケル基合金溶接金属のSCC形態についてどちらが主であるか十分な検討はこれまでになされておらず、両者が混在し

て使われているのが現状である。IGSCCとIDSCCを区別することは、SCCのメカニズム研究において柱状晶粒界とデンドライト境界のどちらに着目すべきかに関し、有効な情報を提供することとなる。

そこで本研究では、高温高圧純水環境下に発生したSCCを包括する領域の結晶方位図からSCC発生部の結晶方位差を計測し、併せて破面観察を行った。そして、600合金用被覆アーク溶接金属に発生するSCCがIGSCCとIDSCCのどちらが主体かを調査した。

2.....実験方法

2.1 評価試験片の作製

製作した溶接試験体の溶接金属の化学組成を供試母材とともに表1に示す。割れ発生に影響を与えると考えられるC、Nb量を変化させた三種類の600合金用被覆アーク溶接試験体を製作した。製作した溶接継手の外観写真を図1に示す。深さ6mm、幅13mmの形状に開先加工したNCF600合金板に多パス積層による多重熱サイクルの影響を避けるため、1パスで被覆アーク溶接を行った。溶接条件は溶接棒をプラス極として、直流で電流130A、電圧25V、溶接速度1mm/sとした。製作した溶接試験体に図2に示すように620℃、20hrsの熱処理（SR）と400℃、200hrsの低温熱時効（LTA）を行った。前者の620℃のSRは、原子炉圧力容器の製造時の応力除去焼鈍中にニッケル基合金溶接金属が受ける熱履歴を

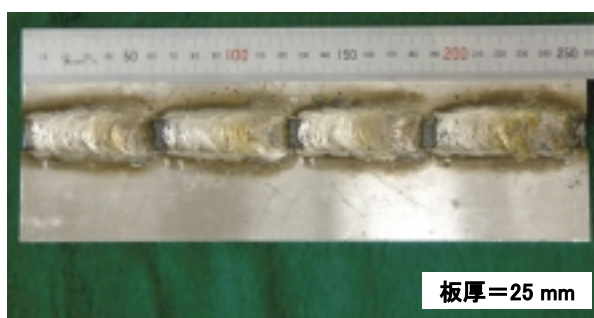


図1 製作した溶接継手

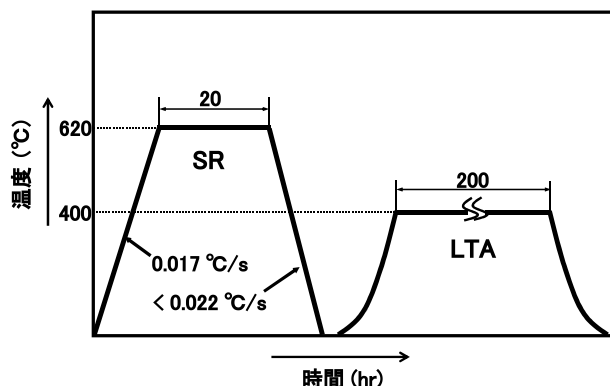


図2 熱処理（SR）及び低温熱時効（LTA）の温度履歴

模擬したもので、後者の400℃で実施したLTAは実機運転温度下での時効の加速条件である。製作した試験体の溶接始末端部を避け、ビード表面に近い位置から板厚2mm、幅10mm、長さ50mmの試験片を、溶接線垂直方向に溶接金属が中心となるよう採取した。そして、試験片のビード表面側に相当する10mm×50mmの面を#1500番まで湿式研磨後、1μmのダイヤモンドペーストで鏡面に仕上げ、この面をSCC試験面とした。

2.2 応力腐食割れ試験

SCCは隙間付き定ひずみ曲げ（Crevice Bent Beam：以下CBB）試験により発生させた。図3に試験片を治具にセットした時の模式図を示す。NCF600合金の治具を用いて、試験面に1%の曲げひずみと0.2mmの隙間が一樣に付与されるようセット

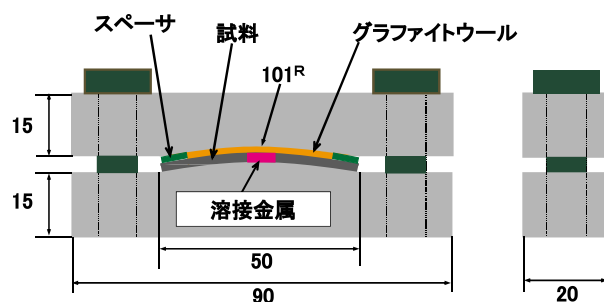


図3 CBB試験片を治具にセットした概念図

表1 溶接金属及び母材の化学成分（mass%）

材料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe	Nb	Ti
標準材	0.069	0.48	5.39	0.012	0.005	69.33	14.80	6.59	1.24	0.62
高C材	0.110	0.44	5.27	0.022	0.009	69.26	15.10	7.06	1.23	0.38
高Nb材	0.076	0.55	4.87	0.017	0.004	68.39	14.32	7.23	4.39	0.50
母材	0.120	0.36	0.28	0.005	0.008	72.89	17.37	6.93	-	0.21

した。CBB試験片数は各条件につき6枚とした。セットした治具を循環型の高圧高温水試験装置の容器に入れ、BWRの運転温度に相当する288℃で、試験圧力を8MPaとして1000hrs浸漬した。なお、容器の入口側の水質は、溶存酸素量8ppm、導電率0.1μS/cm以下の純水とした。浸漬後に幅方向中央部の断面を20μmの10%シュウ酸水溶液中で電圧1.5V、10～20sで電解腐食させて光学顕微鏡観察した。

2.3 応力腐食割れ発生部の結晶方位差の測定

2.2節で作製したSCC試験後のCBB試験片について、幅方向中央部の断面を#1500番まで湿式研磨後、1μmのダイヤモンドペーストで鏡面に仕上げた。そして、研磨による加工層を除去するため、-30℃の5%過塩素酸エタノール中で電圧20V、20sで電解研磨を行った。その後、5%の曲げひずみを付与して割れを開口させ、試験片断面のSCCを包括する領域について、Electron Back Scattering Pattern (EBSP)法により結晶方位図を求めた。なお、結晶方位測定には走査型電子顕微鏡 (SEM) に取り付けられた結晶方位解析装置 (Tex SEM Laboratory製) を用い、加速電圧を15kV、計測ステップを0.2～1μmとした。そして、割れ開口時の変形によりSCC先端部近傍は結晶方位が変化するため、変形に伴う結晶方位の変化が少ないと考えられるSCC発生部近傍、すなわち図4に示す点間の結晶方位差と割れ深さdを求めた。さらに強制破断させたCBB試験片のSCC破面をSEM観察し、EBSP測定結果で得られたSCCの形態と破面性状とを比較した。

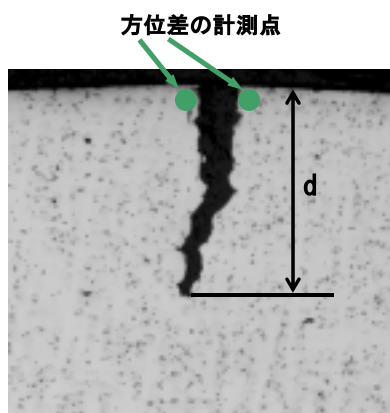


図4 SCC発生部の方位差を計測した点

2.4 硬さ計測

2.2節のCBB試験後に1%曲げひずみが付与されたままの試験片について、試験表面近傍のマイクロビッカース硬さを荷重1kgで計測した。

2.5 TEMによる微細組織観察

試験表面近傍から薄膜試料を採取して透過型電子顕微鏡 (TEM) により加速電圧200kVで溶接金属の組織観察を行い、電子線回折により析出物を同定した。

3.....実験結果及び考察

3.1 応力腐食割れ発生部の結晶方位差

図5に溶接のまま (AW) 及び熱処理と低温熱効 (SR+LTA 処理) を受けた溶接金属の組織観察結果を、図6にSR+LTA処理を受けた標準材の組織観察結果を示す。柱状晶中にデンドライトが存在するニッケル基合金溶接金属で見られる典型的な組織形態を呈しており、1つの柱状晶中に多いものでデンドライトが約20本含まれていた。したがって、デンドライト境界は柱状晶粒界と比較して圧倒的に多いと言える。なお、本研究で製作した溶接金属は主として柱状晶からなり、等軸晶やストレイ結晶などはほとんど観察されなかった。表2にEBSP測定を行ったSCCの個数を示す。標準材、高C材、高Nb材のAWとSR+LTA処理を受けた溶接金属に発生した

	AW	SR+LTA
標準材		
高C材		
高Nb材		

300 μm

図5 各溶接金属の光学顕微鏡観察結果

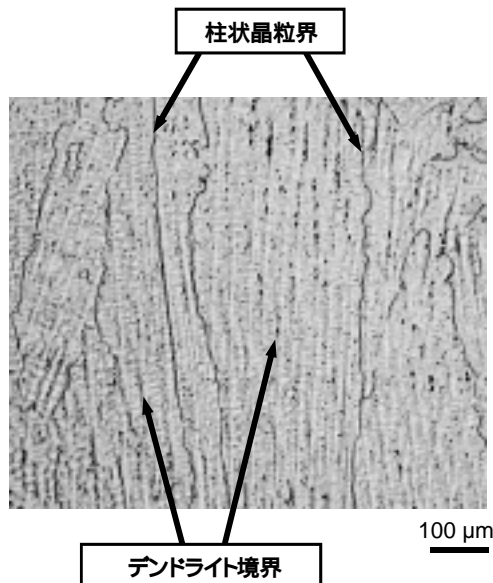


図6 SR+LTA処理を行った標準材の組織観察結果

表2 各溶接金属のSCC発生部の方位差を計測した個数

材料	AW	SR+LTA
標準材	3	6
高C材	9	2
高Nb材	20	16

SCCの内56個を測定した。図7に測定結果の例として、AWとSR+LTA処理を受けた標準材の観察面に対して垂直方向の結晶方位図を示す。割れ先端部で見られる結晶方位の乱れは、割れ開口のために5%曲げひずみを付与したときに割れ先端部で高い塑性ひずみが加わり、結晶粒が局部的に変形したために

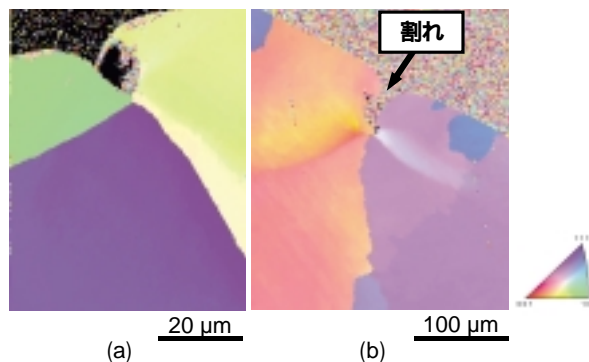


図7 標準材のSCC発生部におけるEBSP計測結果；(a) AW, (b) SR+LTA処理後

生じたと考えられる。(a)に示すAWでは方位差が47.4°の境界から、また(b)に示すSR+LTA処理を受けた場合には方位差43.0°の境界からSCCが発生しており、SR+LTA処理の有無でSCCの形態に有意な差は見られなかった。方位差が0~55°の範囲内で5°ごとのSCC個数分布を図8に示す。なお、今回行った測定では方位差が55°以上の境界で発生したSCCは見られなかった。方位差が5~10°と10~15°の境界で発生したSCCは各々1個しかないのに対し、5°未満及び15°以上の境界ではSCCの個数が多くなった。溶接金属の凝固過程においては、エピタキシャル成長による1つの柱状晶粒内から組成的過冷等が原因でデンドライトが複数本形成されるため、柱状晶内の各デンドライト間の方位差は高々数°程度であることが一般に知られている。また、15°以上の方位差を持つ結晶粒界は一般に大傾角粒

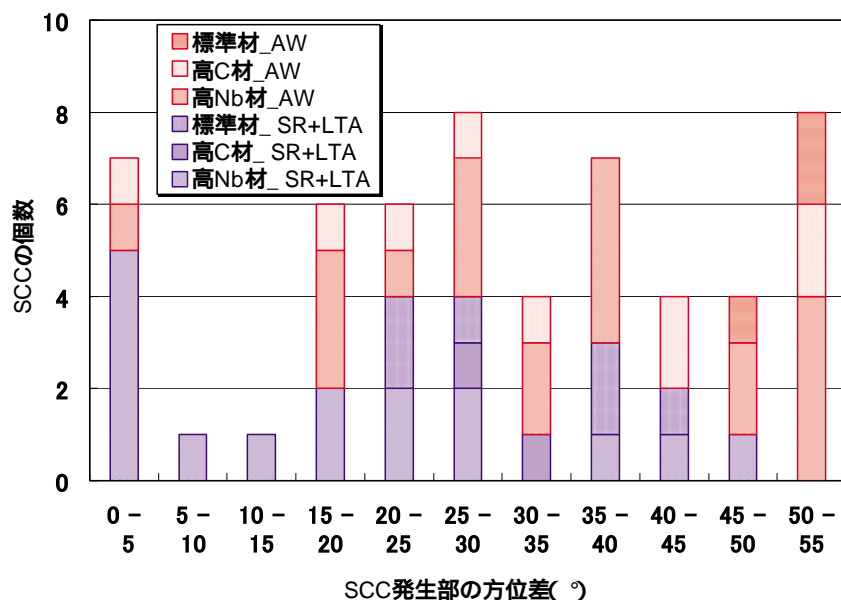


図8 各溶接金属のSCC発生部の方位差分布

界と見なされる⁷⁾。したがって、方位差が15°以上の大傾角粒界は柱状晶粒界であり、15°以上の粒界から発生するSCCはIGSCCと言える。前述のように、デンドライト境界は柱状晶粒界より圧倒的に多いにも関わらずSR+LTA処理を受けた高Nb材の一部を除き、発生するSCCの大半は柱状晶粒界を起点とするIGSCCであることが図8からわかる。すなわちSR+LTA処理の有無に関わらず、発生するSCCのほとんどはIGSCCであった。Saito⁸⁾らは14.19mass%CrのAlloy182について粒界近傍のCr濃度分布を求め、溶接のままでも9-13mass%Cr程度までCr濃度が低下しており、さらに615℃で10hrsの熱処理によって8.1mass%Crまで欠乏すると述べている。このように柱状晶粒界でSCCが発生し易いのは、Cr欠乏層の形成が一因と考えられる。また、Crawfordらは⁹⁾Ni-16Cr-9Fe合金の母材について360℃の高温水中でSCC試験を行い、方位差が15°未満の結晶粒界は大傾角ランダム粒界と比較して耐SCC性に優れていると述べている。したがって、溶接金属も同様の傾向があると考えられ、柱状晶粒界においても方位差が15°以上の部位がSCCの主な発生箇所になると思われる。戸塚らは¹⁰⁾、NCF600合金系金属の粒界性格分布を調査しており、全粒界に占める大傾角ランダム粒界の割合が母材では40%程度であるのに対し、溶接金属では90%近くまでになることを報告している。そのため、溶接金属中の大傾角ランダム粒界の割合を減らすことが、耐SCC性の向上を図る上で重要な要因になると考えられる。その方法の一つとして、別報¹¹⁾や石田らの報告¹²⁾で示されているように、溶接中のウィーピングや磁気攪拌の適用は方位差が15°未満の粒界の割合を増加させるため、耐SCC性

を向上させる手法として期待される。

一方で、方位差が15°未満のSCCは9個あり、その内7個がSR+LTA処理を受けた高Nb材であった。SR+LTA処理を受けた高Nb材で観察されたSCCの深さは、方位差が15°以上の境界では平均190μm(91~336μm)であるのに対し、方位差が15°未満では平均76μm(53~93μm)であった。すなわち、IGSCCの方が2倍以上の深さになると言える。方位差が15°未満のSCCの特徴を把握するため、方位差が15°未満とそれ以上の境界から発生したSCCを調査した。図9にSR+LTA処理を受けた高Nb材で方位差が47.5°の境界に発生したSCCについて、観察面に対して垂直方向の結晶方位図を光学顕微鏡写真とともに示す。一方、図10に方位差が1.5°の境界で発生したSCCを示す。結晶方位図で所々に見られる黒い斑点状の模様は、電解研磨の不均一さによる表面の凹凸等が原因で菊池線パターンを認識できなかったために生じたと思われる。図9では、割れを挟んだ結晶間の方位差が大きく異なるためIGSCCであることがわかる。図10で示すSCCは(a)に示すようにデンドライトの成長方向とほぼ一致し、デンドライト境界で進展するIDSCCの可能性が高い。ただし、この割れは深さが浅いためCBB試験後の曲げで開口できず、破面形態を観察することができないためIDSCCであるか否かを確認することはできなかった。同様な割れは方位差15°未満の割れの内5個で、全てSR+LTA処理を受けた高Nb材で観察された。このようにIDSCCの可能性のある割れは、デンドライト境界の方が柱状晶粒界と比べて圧倒的に多いにも関わらずIGSCCと比較して非常に少なかった。これら以外の方位差15°未満の4個のSCCは図

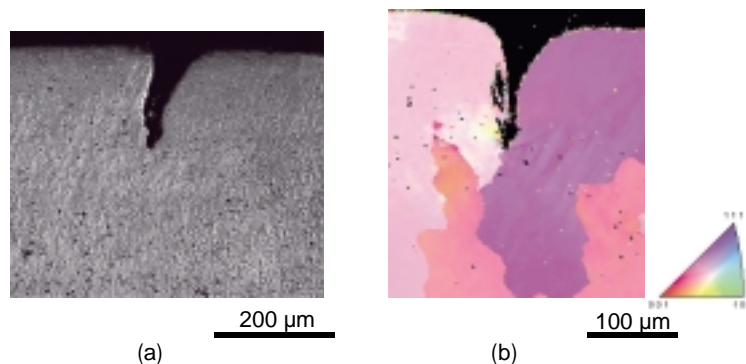


図9 SR+LTA処理を受けた高Nb材で方位差が47.5°の境界に発生したSCC;
(a) 光学顕微鏡写真, (b) 結晶方位図

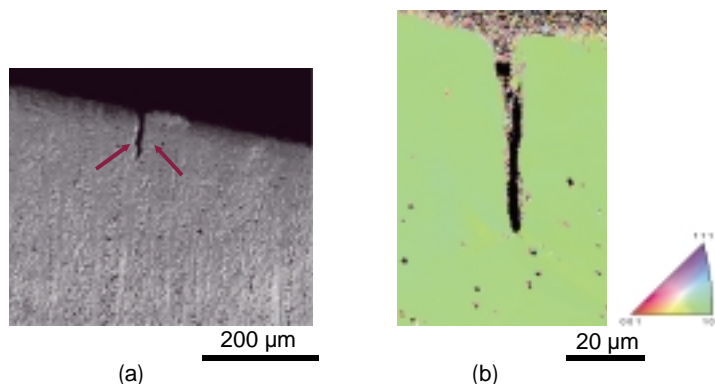


図10 SR+LTA処理を受けた高Nb材で方位差が1.5の境界に発生したSCC;
(a) 光学顕微鏡写真, (b) 結晶方位図

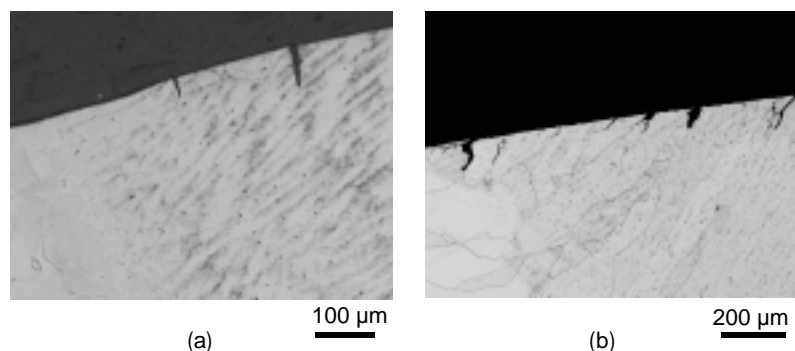


図11 SR+LTA処理を受けた溶接金属の溶解線近傍に発生したSCC;
(a) 高Nb材, (b) 標準材

11(a)に示すように熔融線近傍の溶接金属中で観察され、柱状晶やデンドライトを横切る方向に進展していた。したがって、この割れは明らかに Transgranular SCC (TGSCC) と考えられ、光学顕微鏡観察よりSR+LTA処理を受けた高Nb材で特に多く観察された。なお、図11(a)のような板厚方向に直線的に発生した割れは応力依存型であるため、SCC試験後に5%の曲げひずみを付与したときに発生した可能性がある。この点を検討するため、SR+LTA処理を受けた高Nb材をCBB試験用の治具で1%の曲げひずみを付与した後に治具から試験片を取り出し、すなわち外部応力を負荷しない状態でSCC試験環境下に1000hrs浸漬した。その後、5%の曲げひずみを付与して断面観察を行ったが、割れは全く観察されなかった。したがって、図11(a)で観察された割れはCBB試験中に発生したSCCと結論される。

熔融線近傍の溶接金属中でも、図11(b)で示すようにSR+LTA処理を受けた標準材では柱状晶粒界に沿

って割れが進展していた。そのためSR+LTA処理を受けた高Nb材でTGSCCと思われる割れが特に多く発生した理由を明らかにするため、硬さ計測を行った。図12に各溶接金属の硬さを示す。SR+LTA処理を受けた高Nb材はAWより硬くなっており、他の溶接金属と比較して最も硬い。一般的に硬さと降伏応力とは相関があることから、高Nb材ではCBB試験時に負荷した1%ひずみでは他の溶接金属と比較して負荷応力が高かったものと考えられる。この高い負荷応力がSR+LTA処理を受けた高Nb材でTGSCCと思われるSCCが生じた原因の一つと推察される。図13にSR+LTA処理を受けた高Nb材の組織観察結果を示す。実線の矢印に示すような微細な析出物が観察され、電子線回折よりこの析出物はNi₃Nb(γ'相)と同定された。高Nb材のAWではγ'相は観察されなかったことから、SR+LTA処理によりγ'相が微細析出し、それに伴う析出硬化により硬さが高くなったものと考えられる。

以上より、ニッケル基合金溶接金属に発生する

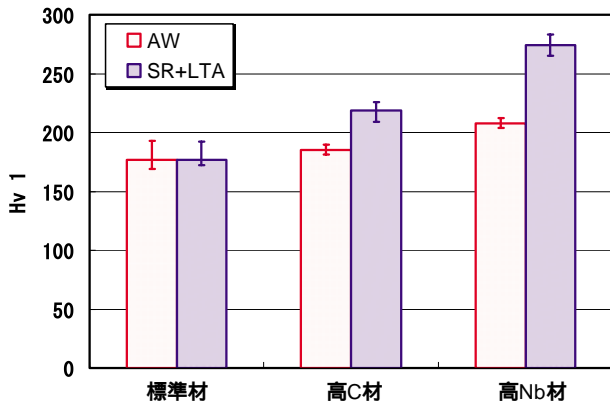


図12 CBB試験片表面近傍の各溶接金属の硬さ

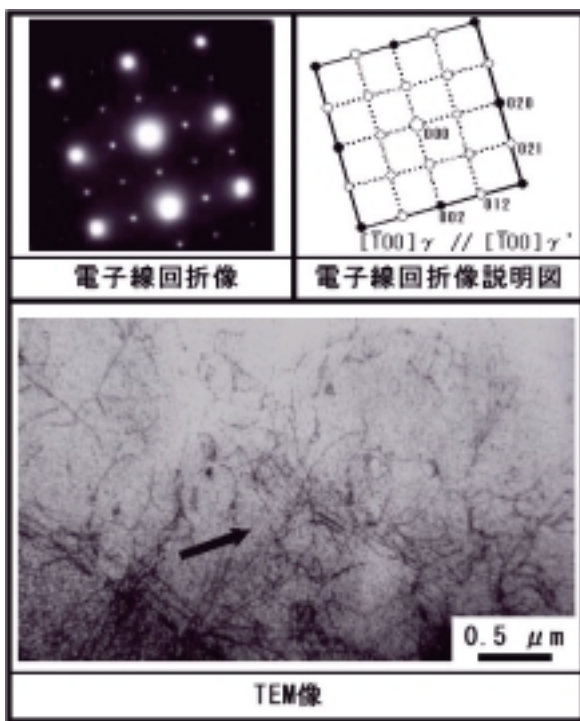


図13 SR+LTA処理を受けた高Nb材に析出したNi₃Nb(相)

SCCはIGSCCが支配的だと言える。ただし、SR+LTA処理を受けた高Nb材では、IGSCCの他にIDSCCまたはTGSCCと思われる割れも少数観察されたが、これらに比べてIGSCCの方が2倍以上の平均深さとなる。

3.2 応力腐食割れの破面形態

図14にSR+LTA処理を受けた高C材及び高Nb材の破面観察結果を示す。両溶接金属ともに、破面はデンドライト状を呈していた。SR+LTA処理を受けた高Nb材の破面は深さが100 μm以上あることから、3.1節の結果よりいずれもIGSCCの破面だと考えられる。ニッケル基合金溶接金属に発生したSCCをIDSCCとしている文献⁵⁾では、破面の形態がデンドライト状であるため、IDSCCまたはIDクラックと呼んでいる場合がある。したがって、実際はIGSCCであるが、破面形態がデンドライト状であるがためにIDSCCとしている可能性も考えられ、破面形態のみではIGSCCとIDSCCを判別することはできない。IGSCCもデンドライト状の破面形態を呈するのは、柱状晶粒界が凝固直後の位置から移動を生じてもわずかであり、デンドライト境界に近いと考えられる。

4.....結 論

本研究は、C、Nb量を変化させた600合金用被覆アーク溶接金属について、溶接のままの状態(AW)及び620の熱処理後に400で低温熱時効(SR+LTA処理)した状態で、高温高圧純水環境下(288℃, 8MPa)で応力腐食割れ(SCC)試験を行

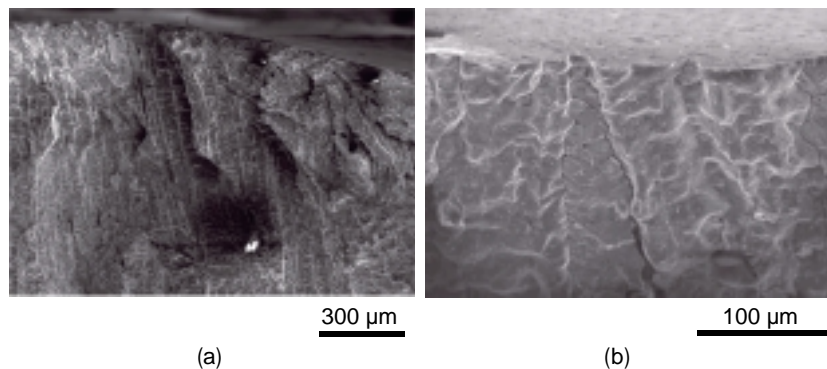


図14 各溶接金属のSCC破面観察結果; (a) 高C材, (b) 高Nb材

った。そして、3種類の溶接金属（標準材，高C材及び高Nb材）に発生したSCCについて，SCCを包括する領域の結晶方位図を求め，IGSCCとIDSCCのどちらが主体であるかを調査した。以下に得られた結果をまとめる。

- 1) AW及びSR+LTA処理を受けた溶接金属ともに，発生するSCCのほとんどはIGSCCであった。
- 2) IGSCCと思われる割れの破面はデンドライト状を呈しており，破面形態のみではIGSCCとIDSCCを判別することはできない。両者を判別するためには，SCCの断面において組織調査を行う必要がある。
- 3) SR+LTA処理を受けた高Nb材ではIGSCCの他にIDSCCまたはTGSCCと思われる割れも一部で観察されたが，これらのSCCの深さはIGSCCと比較して半分以下の深さしか持たないものである。
- 4) SR+LTA処理を受けた高Nb材でTGSCCあるいはIDSCCと思われる割れが多く発生したのは，他の溶接金属と比較して硬さが高いためと思われた。硬さが高くなるのは，SR+LTA処理中に微細なNi₃Nb（相）が析出したためと考えられる。

参考文献

- 1) 青木 孝行，服部 成雄，安齋 英哉，住本 秀樹：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.
- 2) R. A. Page：Stress Corrosion Cracking of Alloys 600 and 690 and Nos. 82 and 182 Weld Metals in High Temperature Water：Corrosion Vol. 39 No. 10 (1983) 409-421.
- 3) 山内 清，浜田 幾久，岡崎 朝彰，横野 智美：安定化パラメータのコントロールによるニッケル基溶接金属の耐粒界腐食性並びに耐粒界型応力腐食割れ性の向上，防食技術35 (1986) 605-615.
- 4) Q. J. Peng, H. Yamauchi and T. Shoji：Investigation of Dendrite-Boundary Microchemistry in Alloy 182 Using Auger Electron Spectroscopy Analysis, Metallurgical and Materials Transactions A Vol. 34A September (2003) 1891-1899.
- 5) M. Ozawa, Y. Yamamoto, M. Itow, N. Tanaka, S. Kasahara and J. Kuniya：Interdendritic crack introduction before SCC growth tests in high temperature water for nickel-based weld alloys, 2nd international conference on environmental-induced cracking of metals, Banff, Canada, 19-23 September 2004.
- 6) A. J. Ramirez and J. C. Lippold：High temperature behavior of Ni-base weld metal part 1-Insight into the mechanism for ductility dip cracking, Materials Science and Engineering A380 (2004) 245-258.
- 7) 日本金属学会：金属便覧-改訂5版-，丸善 (1990) 169-170.
- 8) N. Saito, S. Tanaka and H. Sakamoto：Effect of Corrosion Potential and Microstructure on the Stress Corrosion Cracking Susceptibility of Nickel-Base Alloys in High-Temperature Water, Corrosion Vol. 59 No. 12 (2003) 1064-1074.
- 9) D. C. Crawford and G. S. Was：The Role of Grain Boundary Misorientation in Intergranular Cracking of Ni-16Cr-9Fe in 360 Argon and High-Purity Water, Metallurgical Transactions A 23A (1992) 1195-1206.
- 10) 戸塚 信夫，寺地 巧，山田 卓陽：ニッケル基合金溶接部のSCCき裂進展に関する機構論的研究（その1），Journal of the Institute of Nuclear Safety System Vol. 13 (2006) 205-215.
- 11) 西川 聡，古川 敬，古村 一朗，堀井 行彦：Ni基合金の溶接金属組織と超音波探傷による欠陥検出性の関係，第181回溶接冶金研究委員会資料 (2005).
- 12) 石田 晃規，佐藤 裕，粉川 博之，荒川 敬弘，平野 賢治：インコネル肉盛溶接部の超音波透過性に及ぼす磁気攪拌と結晶粒組織の影響，溶接学会全国大会概要，61 (1997) 148-149.



西川 聡



堀井行彦

溶接始末端部の残留応力に関する基礎的検討

Basic study on the residual stress occurred at welding start/end

溶接・非破壊検査技術センター 長谷川忠之，西川 聡

Basic study on the residual stress occurred at welding start/end such as bead-to-bead juncture was performed by experimental measurement and FEM analysis. It was clarified that the stress fluctuation near welding start/end was larger than that of steady-state welding zone. The prediction on the residual stress distribution using three-dimensional finite element model in this study may be available since the results of the distribution analyzed by FEM are in good agreement with experimental measurement.

Keywords: : Welding start/end, Residual Stress, FEM Analysis

1.....はじめに

溶接残留応力の存在は割れの発生や進展等に影響を及ぼす要因の1つであることから，その分布や大きさを把握するために測定やFEM解析が行われており、当センターにおいてもこれまでいくつか検討を行ってきた^{1)~3)}。しかし，非定常部であるビードの継目のような溶接始末端部の残留応力については公にされたデータが少なく⁴⁾，十分な検討がなされていないと思われる。

そこで本研究では，溶接始末端部の残留応力に関する基礎的検討を行うため，SUS316の平板モデル溶接試験体を製作して溶接始末端部近傍の残留応力を測定すると共に，3次元のFEM解析を行い，測定結果と比較した。

2.....実験および解析方法

2.1 実験方法

溶接試験体の製作に当たり，初期残留応力を除去するために，900℃で1時間の焼鈍を行った板厚55mm，211mm×211mmのSUS316平板と，溶加材にY316を用いた。平板の表面中央部には図1に示す

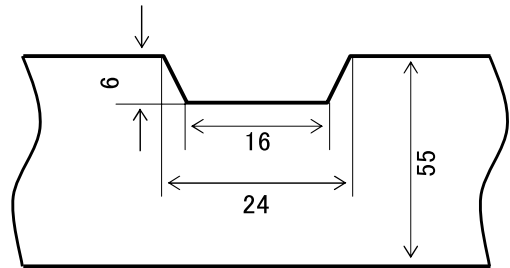


図1 開先形状

形状の開先加工を行い，表1に示す条件で溶接した。なお溶接方法はGTAWとした。

図2に溶接パス順序を示す。本研究では，溶接長

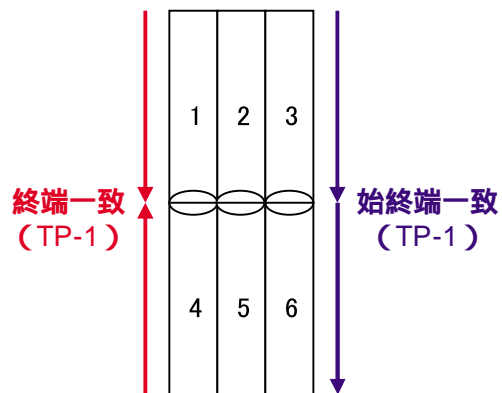


図2 パス順序（試験体表面から見た図）

表1 溶接条件表（溶接方法：GTAW）

電流	電圧	溶接速度	ワイヤー送給速度	入熱量	パス間温度
152 ~ 153A	8.2 ~ 12.8V	90 mm/min	8 g/min	0.8 ~ 1.2 kJ/mm	< 100

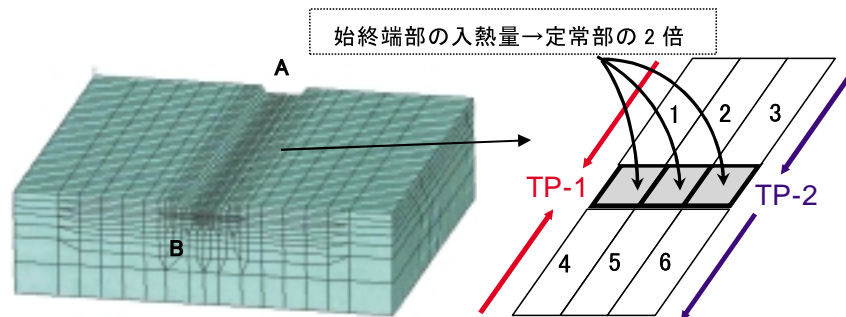


図3 有限要素モデル

表2 解析条件表

要素形態	要素数	応力-ひずみ線図	アーク効率	アニール温度
3次元5面体・6面体	14000	2直線近似	0.7	800

中央部を溶接の終端とした終端一致試験体（以下、TP-1）と、始末端とした始末端一致試験体（以下、TP-2）の2種類の試験体を製作した。なお、溶接始末端部では3秒間保持した後にトーチの移行を開始した。一方、溶接終末端部ではトーチの移行とワイヤ送給を止めて、電流80Aで3秒間保持した後に電流を停止させた。

残留応力測定はひずみゲージ法（ゲージ長：1mm）で行った。測定位置はパス1とパス4の溶接線上およびパス3とパス6の溶接線上の溶接金属表面とした。

2.2 FEM解析方法

図3にFEM解析モデルを示す。解析には(株)計算力学研究センター製の「Quick Welder」を用い、入熱1kJ/mmのGTAWを模擬した3次元解析を行った。また、要素数を14000、硬化則は等方硬化則、アニール温度を800とした。解析条件を表2に示す。

入熱方法は図中に示すように1～3パス目はA点から中央まで熱源移動を行い、4～6パス目はTP-1ではB点から中央まで、TP-2では中央からB点まで熱源移動を行った。溶接始末端部ではアークを出し

た状態でトーチを3秒間保持しているため、溶接始末端部に相当する部分の入熱は簡易的に定常部の2倍とした。

材料物性値は母材部にはSUS316、溶接金属部にはY316の多層溶接金属で採取した値を用いた。ただし、多層溶接金属では繰り返しの熱履歴を受けるため、ひずみ硬化が大きく、その結果として降伏応力が高くなると予測される。したがって、溶接金属の降伏応力はひずみ硬化分を補正した値を用いた。

図4には定常部の断面マクロ写真とこれに相当するモデルを示す。溶接後の試験体を断面観察して溶込み形状を把握し、解析において1400以上の領域が溶込みに近い形状となるように入熱を与えた。

3.....結果及び考察

図5にパス1と4の、図6にパス3と6の溶接金属表面の残留応力分布を示す。測定結果を見ると、パス1と4およびパス3と6ともに、溶接線平行方向応力は始末端部近傍の±20mmにおいて応力が100～150MPa程度の変化しているが、始末端部から離れるのに伴い応力変化は少なくなり、一定の値に収束する傾向が見られた。一方、溶接線直交方向応

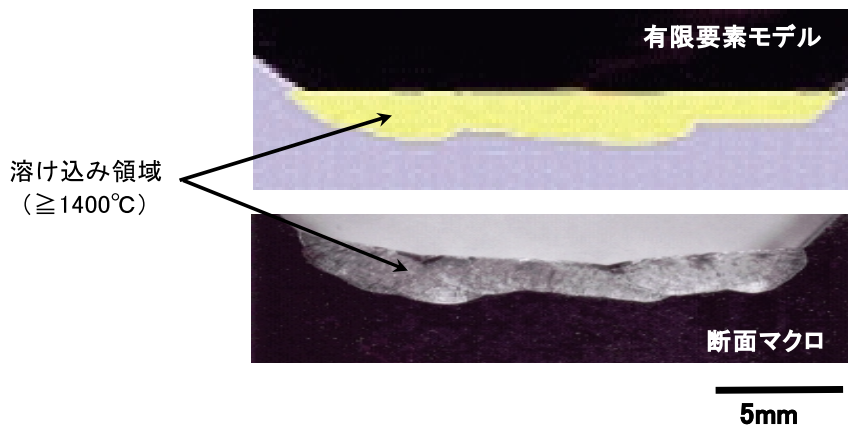


図4 溶け込み領域のモデル形状

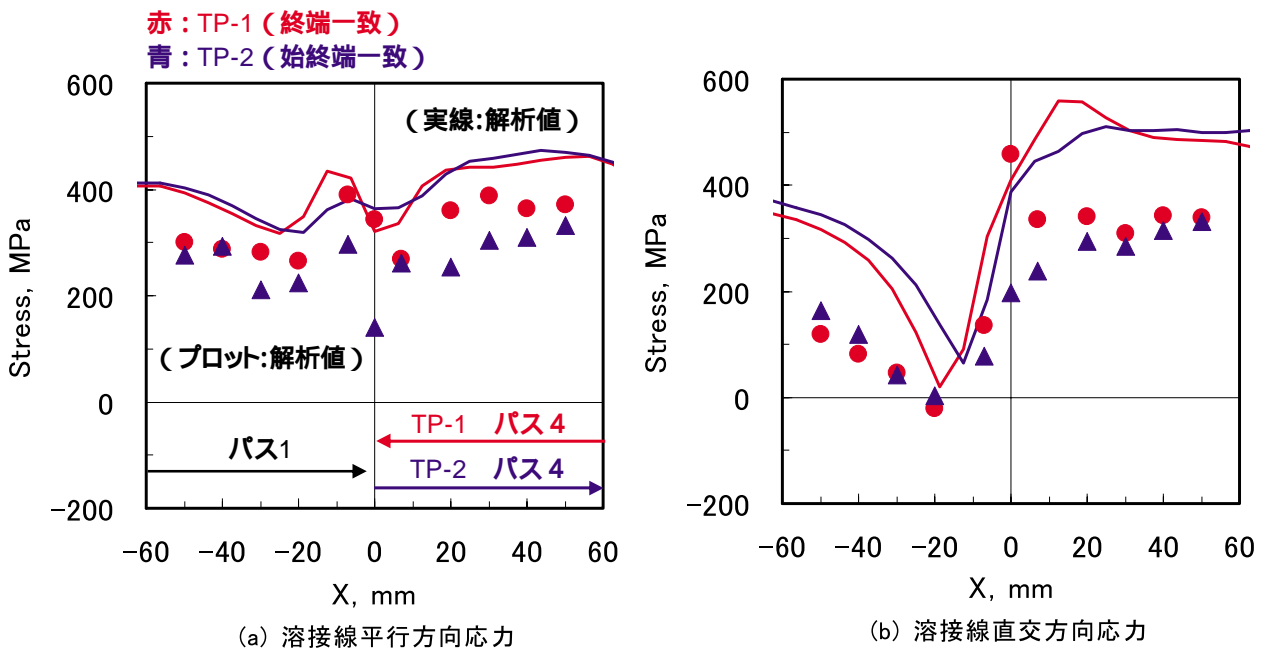


図5 パス1およびパス4の残留応力分布

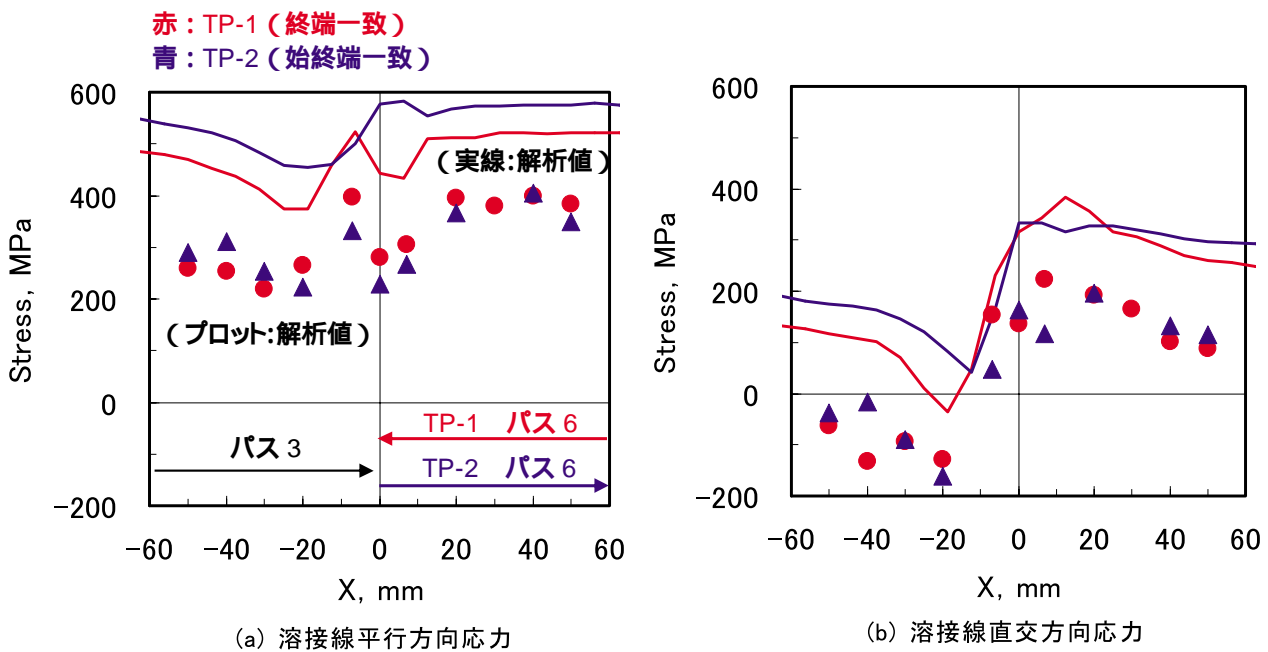


図6 パス3およびパス6の残留応力分布

力は始末端部近傍で応力変化が平行方向応力に比べて顕著であり、 $\pm 20\text{mm}$ において $300 \sim 500\text{MPa}$ 程度の変化が見られた。また、平行方向応力、直交方向応力ともに先行パス側（パス1, 3）に比べて後続パス側（パス4, 6）の方が応力は高くなる傾向を示し、特に直交方向応力について顕著であった。

測定結果で見られたこれらの傾向は解析においても同様に見られた。したがって、本モデルを用いて平板試験体溶接始末端部の応力分布を予測できると考えられる。しかし、残留応力は解析値の方が測定値より高くなる傾向が見られた。

これは、解析で等方硬化則を用いたことによりひずみ硬化が蓄積され、残留応力が高められたことが考えられる。また、解析に用いた溶接金属の初期降伏応力が、補正を行ってはいないものの、熱ひずみのない溶接金属と比較して高くなっている可能性が考えられる。

4.....おわりに

平板モデル溶接試験体を用いて、溶接始末端部の残留応力について検討を行った。その結果、始末端部近傍は定常部に比べて応力の変化が大きくなることが分かった。また、応力分布は測定と解析で比較的良く一致する結果が得られた。そのため、本モデルを用いることで溶接始末端部の応力分布を予測できると考えられる。

今後は熱ひずみを除去した溶接金属の初期降伏応力を用いたFEM解析を実施する。また、今回が解析において溶接始末端部の入熱量を2倍としたが、入熱量を変えた場合の応力分布についても検討する予定である。

参考文献

- 1) 長谷川忠之, 西川聡, 中田志津雄, 堀井行彦, 村川英一: FEM解析における入熱モデル形状の検討(溶接変形(III)) 溶接学会全国大会講演概要第77集(2005) 294-295
- 2) 小川和夫, 中田志津雄, 西川聡, 長谷川忠之, 村川英一: 円筒突合せ継手の溶接残留応力に及ぼす入熱モデルおよび物性値の影響(OS3-7 SCC・残留応力, OS3エネルギー構造機器の健全性評価と信頼性の高度化 3) 日本機械学会 材料力学部門講演会講演論文集 Vol. 2005, P317-318 (2005)
- 3) 小川和夫, 中田志津雄, 西川聡, 村川英一: 差込み継手の溶接変形・残留応力の検討(その2: 溶接残留応力の検討), 溶接学会全国大会講演概要 第81集(2007) 12-13
- 4) 例えば, P. Dong and F. W. Brust, "Welding Residual Stresses and Effects on Fracture in Pressure Vessel and Piping Components :A Millennium Review and Beyond", Journal of Pressure Vessel Technology, AUGUST 2000, Vol. 122, P329



長谷川忠之



西川 聡

中性子回折によるステンレス鋼 配管周溶接部の残留応力測定

Residual stress measurement for girth-welded type304 pipes by neutron diffraction

溶接・非破壊検査技術センター 水野亮二
原子力安全基盤機構 小川和夫

Two types of girth-welded pipe were fabricated, using type 304 austenitic stainless steel, with dimensions of 305mm outer diameter, 25mm wall thickness and 500mm length. Each of these pipes was made by welding two pipe sections together. Multi pass weld layers were deposited into the groove between the two pipe sections. Weld passes were made until filler material either fully or half filled the grooves in the first and second pipes respectively.

Profiles of the residual stress distribution around the welds were obtained from strain measurements made by neutron diffraction. The objective was to determine the residual stress field in the heat affected zone (HAZ) adjacent to the weld root. Concurrently, in order to determine the effect of multi weld passes on cyclic strain history, the residual stresses were analyzed using a 2D axially-symmetric finite element model (FEM) for comparison with the experimental measurements.

The measured results showed that the hoop stresses in the HAZ and at the weld root for the half filled pipe were tensile, but those of the full filled pipe were compressive. The HAZ/weld root axial stresses of the half filled and full filled pipes were compressive (~ 100MPa). The axial stresses of the full filled pipe were similar to those of the half filled pipe, but peak compressive stresses were found in the HAZ i.e. offset ~ 2.5 mm from the weld centre line.

The experimental residual stresses for the axial direction agreed qualitatively with FEM predictions for the fully filled pipe; however, FEM predicted higher residual stresses in the tensile direction than those obtained from neutron diffraction for the fully filled pipe. FEM predicted a more conservative residual stress field for SCC than was found by experiment.

Keywords: : Residual Stress, Neutron diffraction, FEM Analysis

1.....はじめに

溶接残留応力は原子力発電設備における応力腐食割れの発生要因の一つである。溶接構造物の残留応力を評価する上で、溶接パスの積層過程における残留応力の変化を考慮することも有効であると考えられる。しかしながら、溶接過程の積層途中における残留応力測定データはほとんど見当たらない。本研究では、V開先の半分まで積層した試験体（半層試験体）と最後まで積層した試験体（全層試験体）を作製し残留応力測定を実施した。残留応力測定は中

性子回折法により行った。また、比較のために有限要素法により残留応力解析を行った。なお、本研究は、経済産業省交付金事業「複雑形状部機器配管健全性実証（IAF: Integrity Assessment of Flawed Components with Structural Discontinuity）」の一部として実施したものである。

2.....溶接試験体作製

Fig. 1 に示すように長さ500mm、直径305mm、厚さ25mmのSUS304配管を用いて周溶接試験体を作

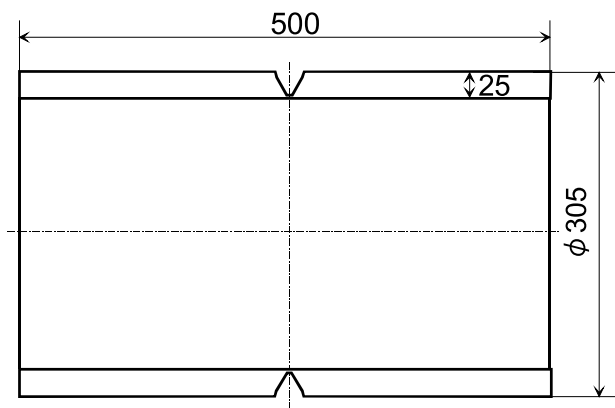


Fig. 1 Shape of welded pipe.

製した。開先形状はFig. 2に示すようにV開先とし配管長手方向の中心に加工した。TIG溶接法によりTable 1に示す溶接条件で溶接を行った。Fig. 3に半層及び全層試験体の積層図及び断面マクロ写真を示

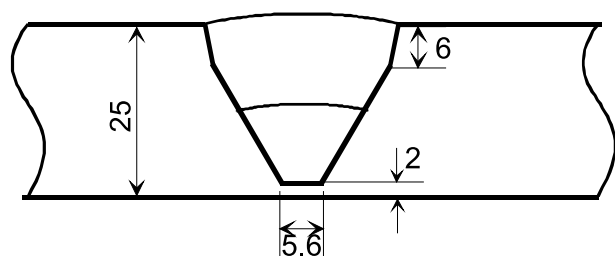


Fig. 2 Shape of V groove.

Table 1 GTAWelding conditions

電流	電圧	溶接速度	ワイヤ送給速度
130-170A*	10V	9cm/min	50-80cm/min*

*初層のみ 130A、50cm/min

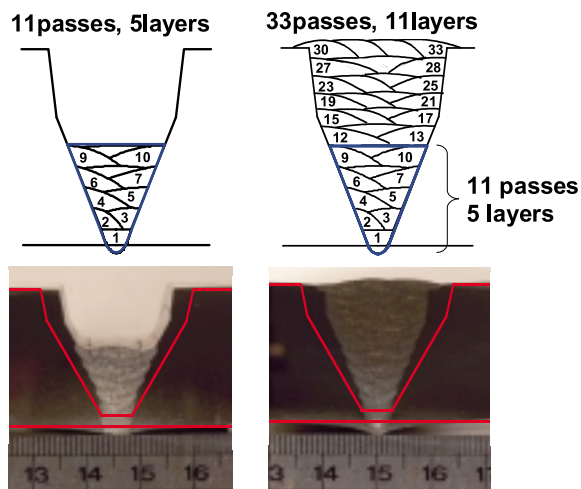


Fig. 3 Lamination of weld layer.

す。半層試験体は5層, 11パス溶接を行い, 板厚の1/2まで積層した。全層溶接試験体は11層, 33パス溶接を行い, 完全な溶接部を作製した。板厚の1/2までは半層試験体と同様の積層溶接を行った。

3.....残留応力測定及び解析

溶接部及び溶接部近傍の残留応力を中性子回折法により測定した。測定は英国のラザフォード-アプルトン研究所のISISに設置されているENGIN-Xを用いて実施した。残留応力測定を実施する前にFig. 4に示すように中性子線が材料中を通過する距離を低減するための穴を加工した。Fig. 5に示すように穴

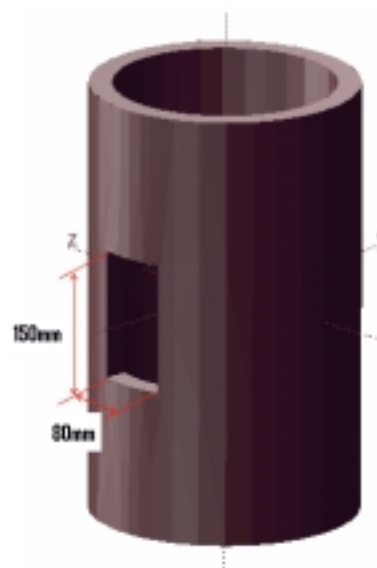


Fig. 4 Access hole for neutron beam.

Weld start and stop

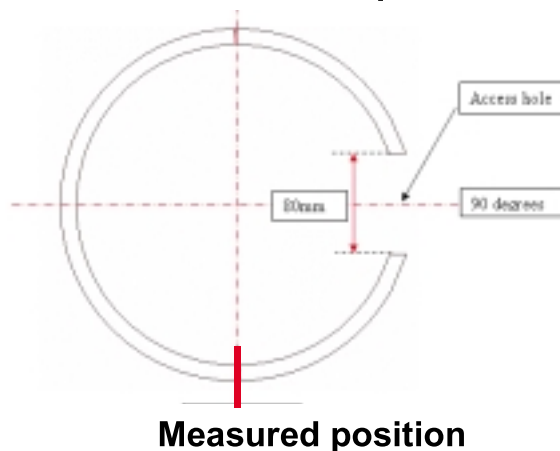


Fig. 5 Position of measurement and access hole.

の位置は残留応力測定位置に対して周方向に90°離れた位置である。穴加工時に応力測定位置近傍の表面のひずみ変化をひずみゲージにより測定を行った。穴加工により解放されるひずみは 72×10^{-6} 以下であった。また、アクセスホールより切り出した部材を用いて応力フリーの格子間隔 d_0 を測定した。 d_0 を測定するための試験片は部材を $3 \times 3 \times 3\text{mm}^3$ の立方体に切断し応力を解放した試験片を8個組み合わせさせて立方体にして作製した。

Fig. 6に溶接部及び溶接部近傍の残留応力測定位置を示す。溶接部の内面側の残留応力は $3 \times 3 \times 3\text{mm}^3$ のゲージ体積で測定を行い、その他の位置は $4 \times 4 \times 4\text{mm}^3$ のゲージ体積で測定を行った。

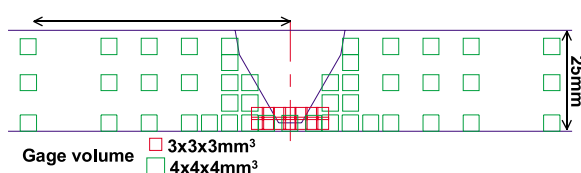


Fig. 6 Measured positions by neutron diffraction.

有限要素法による残留応力解析はABAQUSを用いて2次元軸対称モデルで行った。Fig. 7に溶接部近傍のFEMモデルのメッシュを示す。溶着金属部の形状は断面マクロ形状により決定した。加工硬化則は等方硬化則とし、アニール温度は800とした。母材部及び溶接金属部の物性値は温度依存性の物性値を用いた。入熱は各溶接パスに与えた。

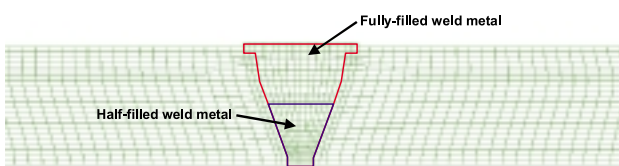


Fig. 7 FE mesh of weld part.

4.....測定及び解析結果

Fig. 8に内表面側の残留応力の軸方向分布の測定結果と解析結果を比較した図を示す。測定において溶接熱影響部近傍の周方向応力は、半層試験体(HFP)では引張応力であり全層試験体(FFP)では圧縮応力に変化しているが、軸方向応力は圧縮応力のままであった。測定した周方向応力の応力分布

の傾向は相対的に解析結果と一致しており、半層から全層への応力の変化の傾向も同様であり、解析結果は半層から全層への応力変化の傾向をほぼ予測していた。軸方向応力の応力分布は、溶接中心から30mm以上離れた領域では測定と解析はほぼ一致するが、溶接熱影響部近傍では一致しなかった。

Fig. 9に内表面近傍の溶接部の詳細な残留応力測定結果及び解析結果を示す。周方向応力の測定結果では半層試験体では引張応力であるが、全層試験体では圧縮応力になっている。半層と全層試験体の周方向応力の差は、測定と解析で同程度であり変化の傾向は同様であった。軸方向応力の応力分布は測定では半層から全層への応力変化はほとんどなかったが、解析結果では引張側に応力が高くなっていた。溶接中心部($x=0$)の測定結果はこの傾向と一致していた。

Fig. 10及びFig. 11に板厚中心及び外表面の残留応力の軸方向分布の測定結果と解析結果を示す。板厚中央部の測定結果では、半層と全層試験体の応力の差はほとんどなく、外表面の測定結果では、周方向

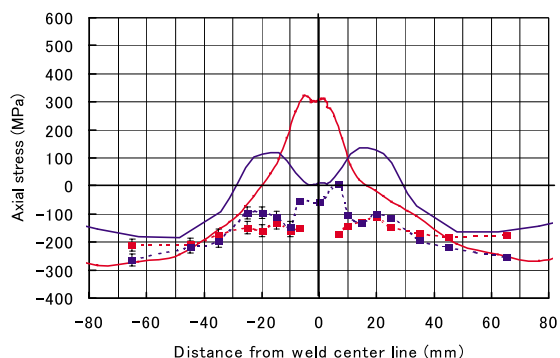
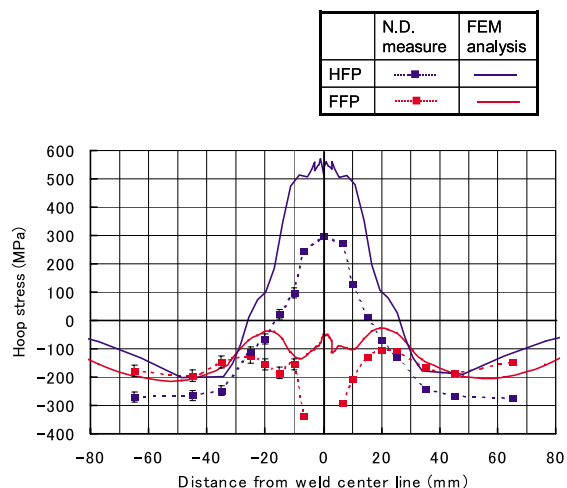


Fig. 8 Stress distribution of inner surface.

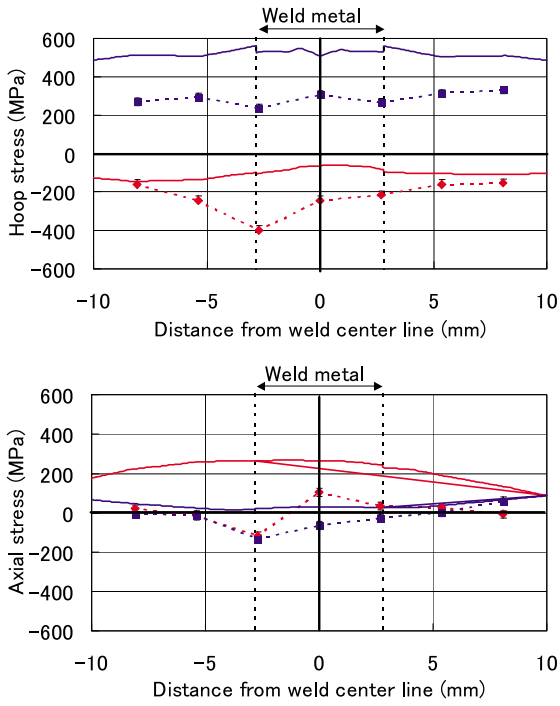


Fig. 9 Stress distribution of HAZ and weld metal at inner surface.

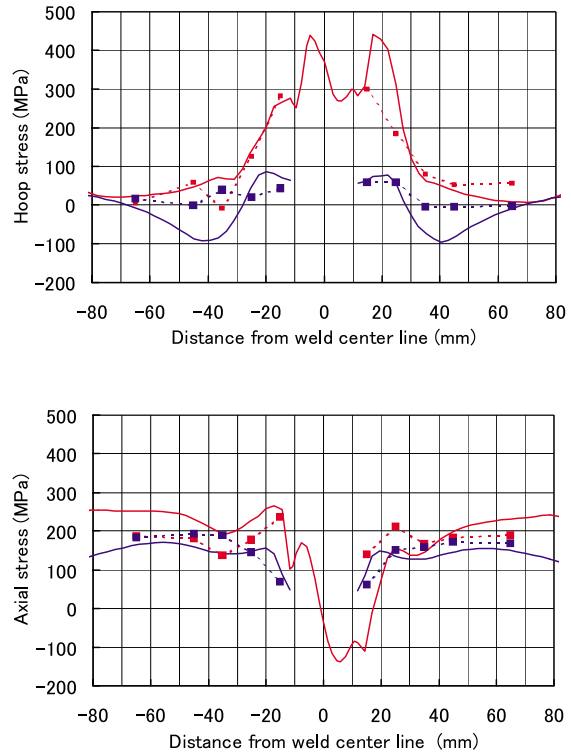


Fig. 11 Stress distribution of outer surface.

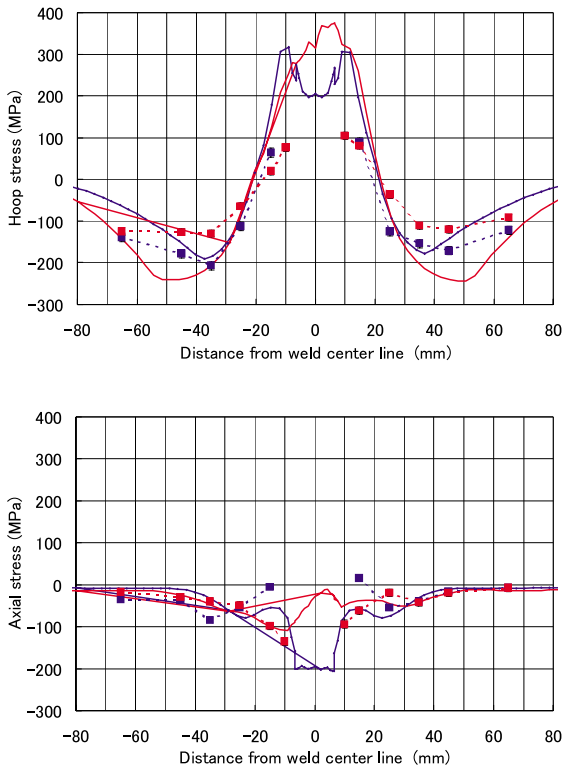


Fig. 10 Stress distribution of mid thickness of pipes.

応力は半層試験体に比べて全層試験体の方が引張応力は大きくなっていった。板厚中心及び外表面の周及び軸方向応力分布は測定と解析においてよく一致しており、解析結果は半層から全層への応力変化をよ

く予測していた。

5.....まとめ

V形開先配管周溶接継手を模擬した多層盛溶接試験体の残留応力分布を中性子回折法により測定し、溶接積層途中の残留応力測定データを得た。また、測定結果をFEM解析結果と比較し、以下の結果を得た。

測定結果と解析結果は板厚中心、外表面側ではよく一致したが、内表面側では解析結果の方が高い応力を示した。しかしながら、応力分布の傾向及び半層試験体から全層試験体への応力変化の傾向は一致していた。本研究では軸対称モデル、等方硬化則の条件で解析を行ったため、残留応力の評価はSCCに対して全体的に保守側の評価であった。



水野亮二

溶接施工法確認試験の試験板の厚さと 認証される厚さについて 米国ASME溶接規格の現状と対比して

Short Note on Thickness Qualified by Procedure Qualification Test Records

規格基準室 吉田和夫，高橋正夫
中井裕文
西日本支部 大石勇一

The purpose of the welding procedure specification and procedure qualification record is to determine which the weldment proposed for construction is capable of having the required properties for its intended application. The procedure qualification test is to establish the properties of the weldment and not the skill of the personnel performing the welding. Each processes which is evaluated by the welding qualification code is listed separately with welding variables. The welding procedure specification is generally to list all welding variables for each process. When the pressure vessel of 7.9 mm in thickness is manufactured, the plate thickness of the qualification test will be 7.9 mm most simply, and the plate material will be usually similar to the pressure vessel material, for example A516 gr. 70. On the other hand, when the pressure vessel will be manufactured by using A516 gr. 60, no requalification of the procedure will generally be required. Moreover, when the thickness of the pressure vessel will be 9.5 mm, no requalification of the procedure will generally be required. In this note, based on the effect of the plate thickness to the characterization of the weld heat affected zone, the thickness range qualified the procedure qualification test record was discussed, and the qualified thickness range differences between the domestic code and ASME code were compared.

Keywords: : Welding Procedure, Procedure Qualification, Test Plate, Plate Thickness, Thickness Qualified, Welding Variables, ASME, HAZ, Hardness

1.....まえがき

溶接施工法は、溶接方法の区分に応じて確認項目 (Welding Variables) の要素の区分毎に試験板が製作された上で確認される。その確認試験板から機械試験片が採取され、機械試験の判定基準に適合する場合に溶接施工法は認証されることになる。この溶接施工法の確認試験に使用する試験板の厚さは、その溶接施工法を適用して実構造物の溶接を行うことを想定して選択される。例えば、厚さ7.9mmのA516 Gr.65炭素鋼製の圧力容器を製作するのであれば、溶接施工法確認試験に使用する試験板の厚さは、最も単純には7.9mmとされ、試験板の材質は通常は

実構造物と同材質のものとされるであろう。一方、実構造物の材質がA516 Gr.60であり、A516 Gr.65で溶接施工法認証されている方法と母材の区分だけが異なる溶接方法を適用する場合に、新たに溶接施工法の確認試験が必要かと云うと不要と考えるのが常識的である。また、圧力容器の厚さが9.5mmであった場合に、7.9mmで認証された溶接施工法とは別に新たな確認試験が必要かと云うと、この場合にも不要と考えるのが常識的である。この試験板の厚さの相違に関して『常識的』と云う意味について、本小文において考え、溶接施工法確認試験の試験板の厚さと試験で認証される厚さの範囲について検討した。

2.....『常識的』な試験板の厚さ

試験板の厚さ7.9mmと9.5mmの相違に関して『常識的』と云う意味は次のとおり説明することができる。

- (a) 溶接熱影響部に期待される性能の観点で、溶接熱影響部には母材と同等以上の機械的性質が必要とされる。
- (b) この機械的性質とは引張特性、延性及び靱性である。したがって、溶接施工法確認試験では、継手引張、曲げ試験及び必要に応じて衝撃試験が要求される。
- (c) 溶接熱影響部の機械的性質に影響を与える因子は、溶接方法が同一であるとすれば、予熱の有無、溶接入熱、パス間温度である。(溶接後熱処理は溶接熱影響部の機械的性質に大きな影響を与える因子であるが、ここで議論の対象としている母材の厚さが薄いことから、溶接後熱処理については考慮の範囲外としている。)
- (d) これらの相違が試験板溶接部の最高加熱温度、冷却速度に影響を与える。
- (e) 試験板の厚さが7.9mmから9.5mmに変わったとしても、最高加熱温度が大きく変わることはなく、冷却速度が大きく変化するとは思われない。したがって、溶接施工法確認試験は、厚さが7.9mmの場合で試験しても9.5mmを許容できる。

3.....『常識的』な厚さの熱的な検討

ここでは、溶接アーク熱源を移動熱源と考える。移動する溶接熱源に近い位置の最高加熱温度は次のとおり与えることができる^{1), 2)}。

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi e}} \frac{Q}{c\rho h} \left(\frac{1}{\theta_m - \theta_0} - \frac{1}{\theta_f - \theta_0} \right)$$

$$h < m \sqrt{\frac{Q}{c\rho(\theta_m - \theta_0)}} \text{ の場合} \quad (1)$$

$$y = \frac{1}{\sqrt{\pi e}} \sqrt{\frac{Q}{c\rho}} \left(\frac{1}{\sqrt{\theta_m - \theta_0}} - \frac{1}{\sqrt{\theta_f - \theta_0}} \right)$$

$$h > m \sqrt{\frac{Q}{c\rho(\theta_m - \theta_0)}} \text{ の場合} \quad (2)$$

ただし、 y ：溶融線からの距離

Q ：正味の溶接入熱

c ：比熱， ρ ：密度

h ：試験板の厚さ

m ：最高加熱温度

θ_0 ：パス間温度， θ_f ：融点

m ：定数

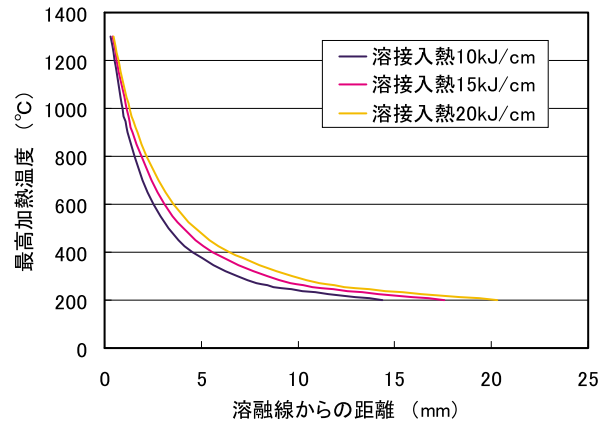


図1 溶接時の最高加熱温度プロフィール

上記(1)及び(2)式で分かるように、最高加熱温度は試験板の厚さが薄い場合には、試験板の厚さに反比例し、試験板の厚さが厚い場合には、厚さに無関係となる。炭素鋼を溶接入熱10～20kJ/cmで溶接（アーク効率を50%と仮定）した場合を想定し、最高加熱温度（最高到達温度）を溶融線からの距離でプロットした結果を図1示す。なお、試験板の厚さが約7mmを超える場合には最高加熱温度に試験板の厚さは無関係となる（上記の(1)及び(2)式の条件式で、(2)式が適用されるため。）ことから、計算式は上述の(2)式で計算した。図1によれば、溶接入熱10～20kJ/cmの範囲では、溶接部の加熱温度プロフィールに大きな相違はないといえる。溶接熱影響部の性質に大きな影響を及ぼす冷却速度（CR）は次のとおり与えられる^{1), 2)}。

$$CR = 2\pi k \left(\frac{c\rho h}{Q} \right)^2 (\theta - \theta_0)^3$$

移動線熱源の場合 (3)

$$CR = 4\pi k \left(\frac{c\rho}{Q} \right) (\theta - \theta_0)^2$$

移動点熱源の場合 (4)

ただし、 k ：熱拡散率

これらの式から溶接入熱が小さく厚さが厚くなるほど冷却速度は大きくなる事が分かる。しかしながら、溶接入熱が一定の場合には、厚さが十分厚くなると冷却速度は厚さに無関係になることから、上記(3)及び(4)式の冷却速度を等値することによって、冷却速度が厚さに無関係になる臨界厚さ (h_c) を次のとおり求めることができる。

$$h_c = \sqrt{\frac{Q}{c\rho(\theta_m - \theta_0)}} \quad (5)$$

溶接熱影響部の硬さ・組織を支配する臨界冷却条件として熱影響部が800 から500 まで冷却するのに必要な時間や、熱影響部の温度が540 (1000deg-F) を通過する冷却速度が採用されている。このことから、(5)式に540 を代入して臨界厚さに及ぼす溶接入熱の影響を示すと図2を得ることができる。厚さが7.9mm及び9.5mmの場合共に通常の溶接入熱の範囲であれば、臨界厚さ以下となる。したがって、上記の(3)式によって熱影響部の温度が540 を通過する場合の冷却速度に及ぼす厚さの影響を計算し、その結果を図3に示した。AWS D1.1

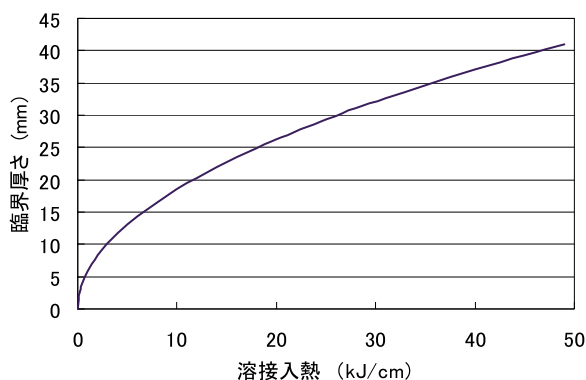


図2 臨界厚さに及ぼす溶接入熱の影響

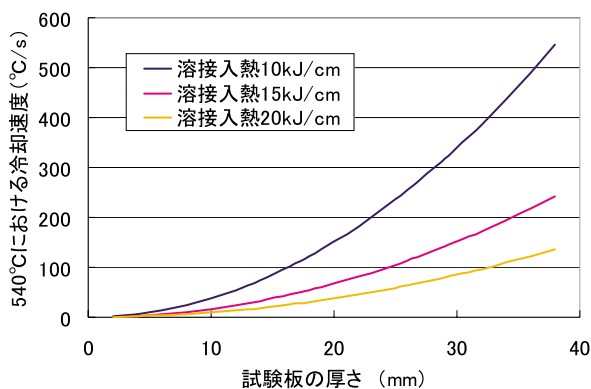


図3 540 における冷却速度に及ぼす試験板厚さ及び溶接入熱の影響

附属書 I³⁾によれば、350HV 以下の場合には、溶接熱影響部に割れを生じることはないとしている。炭素当量0.35%の場合に溶接熱影響部の硬さが350HVとなる540 を通過する場合の冷却速度は、AWS D1.1 附属書 Iによれば、約125 /sである。図3によれば、冷却速度が125 /sとなる試験板の厚さは、溶接入熱が15 ~ 20kJ/cmの場合には厚さが27.3 ~ 36.4mm程度となる。

溶接熱影響部の最高硬さに及ぼす冷却速度と炭素当量の影響を整理した結果^{4), 6)}によれば、軟鋼 (Ceq=0.31%炭素鋼) の溶接熱影響部のピッカース硬さが300HVを越すのは、540 を通過する場合の冷却速度が概ね80 /sを超える場合である。図3によれば、540 を通過する場合の冷却速度が概ね80 /sとなるのは、溶接入熱が15 ~ 20kJ/cmの場合には厚さが22 ~ 29mmを超える程度と推定される。すなわち、このような場合には溶接熱影響部に数%から十数%のマartenサイト組織が生じる可能性が示唆される。このことは突合せ溶接部の厚さが19mm以下の炭素鋼 (母材区分P-1) を溶接する場合には、溶接後熱処理が免除される ASME Sec. I, PW-39⁷⁾の規定 (火技解釈別表第23の規定と同じ) と概ね良い相関を示すといえる。

4.....認証される厚さ

溶接施工法試験板の厚さと認証される厚さの関係は ASME Sec. IX⁸⁾ では様々の規定があるが、基本的な考え方は Table QW-451 に与えられる。Table QW-451 の要約を表1に示す。この表においても厚さ19.1mm (3/4 in.) はある種の意味を持っている。試験板の厚さが1.6mm (1/16 in.) から9.5mm (3/8 in.) の場合に認証される厚さの最大値は19.1mm (3/4 in.) となる。すなわち、溶接後熱処理が不要な

表1 ASME Sec. IX, QW-451 の要約

試験板厚さ (T, in)	認証される厚さ (t, in) の範囲
T < 1/16	T t 2T
1/16 T 3/8	1/16 t 2T
3/8 T 3/2	3/16 t 2T
3/2 T 6	3/16 t 8
6 < T	3/16 t 1.33T

溶接施工法の試験を厚さ9.5mmの試験板を用いて試験することができるという意味である。当然の如く Table QW-451は炭素鋼 (P-1) のためだけに規定されたものではなく、低合金鋼 (P-3他) にも適用されるので、低合金鋼 (P-3) について厚さ19.1mmが取り分け大きな意味を持つものではない。ASME Sec. I, PW-39の規定によれば、P-3低合金鋼 (C 0.25%) 突合せ溶接では厚さ15.9mm (5/8 in.) 以下で溶接後熱処理が免除される。

Table QW-451の規定 (SMAW, SAW, GTAW, GMAW等への適用規定) と火技解釈第107条の規定を対照 (別表第11の1.イの規定のみを対照) して、試験板の厚さと認証される厚さの範囲を比較した結果を図4に示した。ASME Table QW-451の規定と火技解釈の規定の大きな相違点は次のとおりである。

- (a) 認証される厚さの最小厚さ規定がASME規格にはあるが、火技解釈にはない。
- (b) 試験板の厚さ1.5 in. (38.1mm) までの認証される最大厚さは、両者共に試験板の厚さの2倍であるが、厚さが1.5 in.を超えて6 in. (152.4mm) までの場合には、ASMEでは認証される最大厚さは8 in. (203.2mm) である。
- (c) 火技解釈では、試験板の厚さに係わらず認証される最大厚さは、試験板の厚さの2倍である。
- (d) ASMEでは、試験板の厚さが6 in.を超える場合には、認証される最大厚さは、試験板の厚さの1.33倍である。

発電用ボイラ技術基準に溶接の施工方法 (導入当時には、「施行方法」である。) が導入された当時のASME Sec. IXでは、試験板の厚さが3/8 in. (9.5mm)

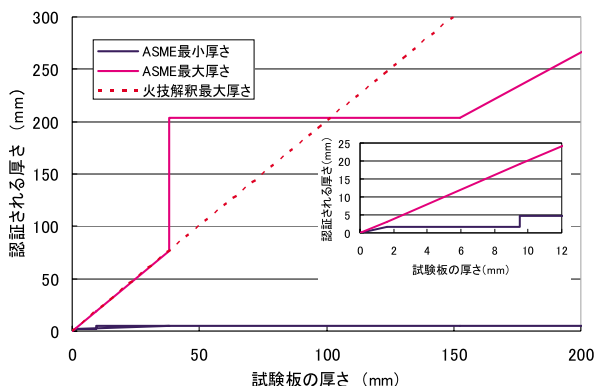


図4 試験板の厚さと認証される厚さの関係

の場合に3/4 in. (19.1mm) までの厚さの溶接が可能で、試験板の厚さが3/8 in.から1 in.の場合に3/4 in.を超える厚さ (最大厚さ規定なし) の溶接が可能とされていた。この考え方を踏まえて、認証される厚さの最大値を試験板の厚さの2倍とする基本的な考え方がASME Sec. IXに導入された。他方、溶接部の厚肉化と共に溶接施工法の省略の要請が高まり、1981年に試験板の厚さが1.5 in.を超える場合には、溶接方法がSMAW, SAW, GMAW及びGTAWの場合に限り、8 in.まで溶接可能とされた。

試験板の厚さ1.5 in.の意味については、(5)式の臨界厚さから考えることができる。溶接アーク効率を50%とすれば、(5)式から臨界厚さが1.5 in. (38.1mm) となる溶接入熱は約42 kJ/cmと計算することができる (図2参照)。サブマージ溶接の溶接入熱が40 kJ/cmを超える場合がないとは限らないが、試験板の厚さが1.5 in.を超えるならば、熱影響部の冷却速度は溶接方法に依存しなくなる。当時のASME Sec. IXの判断の規準については不明であるが、試験板の厚さ1.5 in.を超える場合の認証される厚さについては説明性があると考えられる。

試験板の厚さが6 in.を超える場合の認証厚さが試験板の厚さの1.33倍の規定については、厚い材料の調達の観点で不利になり、Sec. IX, QW-2024(b)で示されるような異材継手における厚い試験板の免除規定 (母材がオーステナイト系ステンレス鋼、ニッケル合金、チタン合金又はジルコニウム合金の場合の免除規定) が適用されない。この試験板の厚さが6 in.を超える場合の規定は、想定母材が靱性要求のあるものとされており、厚い母材の溶接熱影響部の靱性を確認するためのものとされている。

認証される最小厚さの規定がASME Sec. IXに導入されていることの是非については議論を待たないものである。従来の試験板の厚さが3/8 in. (9.5mm) で確認されていた溶接条件と同じ条件で、1mm程度の厚さの材料を溶接することはないことから、火技解釈でも厚さの薄い範囲についてはASME Sec. IXを参照し、かつ、現実の状況を踏まえて再検討を行う必要があるとされている。

5.....まとめ

ASME Sec. IX, Table QW-451の溶接施工法で認証される厚さについて火技解釈と対照したが、火技解釈の認証厚さは上述の規定だけではない。また、ASME Sec. IXには更に多くの規定がある。ASME Sec. IXの規定の中で、火技解釈には規定のない事項の一部を次に示す。

- (1) ガス溶接 (OFW) の認証される最大厚さは試験板の厚さ。(QW-403.2)
- (2) SMAW, SAW, GMAW, GTAW, PAW, EGWで衝撃試験要求のある場合に、認証される最小厚さは試験板の厚さ又は5/8 in.(15.9mm)のいずれか小さい方の厚さ。ただし、試験板の厚さが1/4 in.(6.4mm)未満の場合は、試験板の厚さの0.5倍の厚さ。試験板が変態点以上の温度で熱処理又は固溶化熱処理される場合は除外される。(QW-403.6)
- (3) SMAW, SAW, GMAW, ESW, EGWで、溶接パスの厚さが1/2 in.を超える場合には、認証される最大厚さは試験板の1.1倍の厚さ。(QW-403.9)
- (4) 短絡移行のGMAWで、試験板の厚さが1/2 in.未満の場合には、認証される最大厚さは試験板の1.1倍の厚さ。(QW-403.10)
- (5) P-7, P-8及びP-45以外の鉄鋼で、試験板が変態点以上の温度で熱処理される場合には、認証される最大厚さは試験板の厚さの1.1倍の厚さ。(QW-407.2)

一方、火技解釈別表第11の1.口では、認証される最大厚さが試験板の厚さとなる場合が規定されていて、1.ハでは、ESW(エレクトロスラグ溶接)又はEGW(エレクトロガス溶接)の場合には認証される厚さの範囲は、試験板の厚さの0.9倍から1倍の厚さ

と規定されている。ASME Sec. IXの溶接の確認項目と火技解釈の確認項目は異なり、確認項目の要素の区分も異なっていることから、溶接施工法試験によって認証される厚さの範囲が異なるのは当然かも知れない。しかしながら、両者の元々の考え方が同じであったことから、現時点での溶接技術を踏まえて、認証される厚さの範囲について再検討することも必要と思われる。

【追記】この小文のin./mmの単位換算は、ASME Sec. I, A-393 Soft Conversion Factorsによった。単位換算した表記は、少数第2位を四捨五入した結果である。

参考文献

- 1) C.M. Adams, Cooling Rates and Peak Temperatures in Fusion Welding, Welding J., 37, 210s, 1958.
- 2) Z. Paley, J. N. Lynch and C. M. Adams, Heat Flow in Welding Heavy Steel Plates, Welding J., 43, 71s, 1964.
- 3) AWS D1.1, Structural Welding Code - Steel, 2008, American Welding Society.
- 4) 木原博, 鈴木春義, 金谷文善, 鋼の溶接硬化に関する研究, 溶接学会誌, 26, 83, 1957.
- 5) 木原博, 鈴木春義, 金谷文善, 鋼の溶接硬化に関する研究, 溶接学会誌, 26, 442, 1957.
- 6) 木原博, 鈴木春義, 金谷文善, 鋼の溶接硬化に関する研究, 溶接学会誌, 27, 36, 1958.
- 7) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. I, Power Boilers, 2007, American Society of Mechanical Engineers.
- 8) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. IX, Welding and Brazing Qualifications, 2007, American Society of Mechanical Engineers.



吉田和夫



高橋正夫



中井裕丈



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膜厚測定法	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膜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膜厚測定法	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膜の厚さを膜厚指示計を用いて測定する方法		
3	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		
4	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		
5	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		
6	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		
7	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		
8	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		
9	特許件名	渦電流探傷信号処理方法	発明者	兼本 茂他
	出願番号・出願日	特願2006-027648号 H18.1.16	登録番号・登録日	特許第4235648号 H20.12.9
	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		
10	特許件名	高Cr系鋼構造物のじん性評価方法	発明者	西川 聡他
	出願番号・出願日	特願2008-198193号 H20.7.31	登録番号・登録日	(出願中)
	概要	Cr含有量が8~14wt%のラーベス相が析出する高Cr系鋼構造物でアノード分極曲線を利用してじん性を評価する方法		

学協会誌等への論文発表

学協会誌名	著者	論文名称	掲載誌発行年月
INSIGHT	陳 鋼朱 山口篤憲 他	Signal processing for detection and characterization of defects from composite eddy current signals	Vol.39, No.11, p.785-789, 1997
IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS	陳 鋼朱 山口篤憲 他	A Novel Signal Processing Technique for Eddy-Current Testing of Steam Generator Tubes	Vol.34, No.3, p.642-647, May, 1998
WELDING journal	堀井行彦 桑 亮一 上杉信夫 他	Thermal Embrittlement of Simulated Heat-Affected Zone in Cast Austenitic Stainless Steels	Vol.77, No.8, p.350-360, August, 1998
Journal of Nuclear Materials	中東重雄 中村治方 上杉信夫 他	Effect of weld thermal cycle on helium bubble formation in stainless steel	Vol.258-263, p.2013-2017, 1998
	中東重雄 上杉信夫 中村治方 他	Weldability of helium-containing stainless steels using a YAG laser	Vol.258-263, p.2018-2022, 1998
火力原子力発電	陳 鋼朱 米山弘志 山口篤憲 上杉信夫	ウエーブレット解析の渦電流探傷法への適応	Vol.49, No.507, p.70-78, 1998
Journal of Pressure Vessel Technology	志波光晴 山口篤憲 佐藤正信 村尾周仁 永井正雄	Acoustic Emission Waveform Analysis From Weld Defects in Steel Ring Samples	Vol.121, p.77-83, February, 1999
圧力技術	堀井行彦 西川 聡 桑 亮一 他	鑄造2相ステンレス鋼の溶接熱影響部の熱時効脆化 - 第1報 溶接熱影響部の熱時効脆化挙動 -	Vol.39, No.3 第1報 p.2-8 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
保全学	中東重雄 程 衛英 古村一朗 山口篤憲 他	原子炉圧力容器鋼の照射による組織変化と磁気構造変化	Vol.7 ,No.3 ,p.47-55, 2008
溶接学会論文集	西川 聡 大北 茂 堀井行彦	長時間熱時効された改良9Cr-1Mo鋼溶接金属のじん性回復と電気化学計測による評価	第26巻(2008)第3号 p. 220-226
溶接学会論文集	西川 聡 堀井行彦 他	高温高圧純水環境下の600合金用被覆アーク溶接金属の応力腐食割れ形態	第27巻(2009)第1号 p. 67-72
平成20年度 火力原子力発電大会論文集	西川 聡 大北 茂 堀井行彦	長期間使用した改良9Cr-1Mo鋼溶接部のじん性評価方法	仙台大会CD-ROM 3-3 2008年10月
平成20年度 火力原子力発電大会論文集	古川 敬 古村一朗 他	超音波伝搬シミュレーション解析を用いた超音波探傷の支援技術	仙台大会CD-ROM 3-5 2008年10月
Advanced Materials Research	中東重雄 他	EFFECT OF COLD-ROLLING ON PRECIPITATION PHENOMENA IN 316L AUSTENITIC STAINLESS STEEL	Vol.26-28(2007) p. 1287-1290
保全学	中東重雄 古村一朗 山口篤憲 他	放射光による原子炉材料のSCCき裂観察	投稿中
IEEE Trans. Magnetics	程 衛英 古村一朗	Simulation of Transient Eddy-Current Measurement for the Characterization of Depth and Conductivity of a Conductive Plate	Vol. 44, No. 11, November, 2008, p. 3281-3284
Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XII)	程 衛英 古村一朗	Ac Magnetization and Barkhausen Noise Measurement for the Characterization of Degradation of Ferromagnetic Steels	ISO Press, 2009 p. 215-223

学協会等への口頭発表

平成20年度

学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名
The 13th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation	2008/6/11 Seoul, Korean	程 衛英	Ac Magnetization and Barkhausen Noise Measurement for the Characterization of Degradation of Ferromagnetic Steels
神奈川県非破壊試験技術交流会 第13回技術研究会	2008/6/13 KGU関内メディア センター	関野晃一 古川 敬 古村一朗	振動モードの異なる超音波のき裂先端近傍の挙動
日本原子力学会 2008年秋の大会	2008/9/4-6 高知工科大	中東重雄 他	放射線CTによる鋼中SCCき裂の観察
日本保全学会 第5回学術講演会	2008/7/10-12 水戸市民会館	古川 敬 古村一朗	超音波の可視化技術を用いたフェーズドアレイUT 条件の評価
		程 衛英 古村一朗	パルスECTによる肉厚及び導電率測定シミュレーション
平成20年度 火力原子力発電大会	2008/10/22-23 仙台サンプラザ	古川 敬 古村一朗 他	超音波伝搬シミュレーション解析を用いた超音波探傷 の支援技術
溶接学会 第8回国際溶接シンポジウム	2008/11/16-18 国立京都国際会館	関野晃一 古川 敬 古村一朗 他	Visualaization of ultrasonic Wave around the crack by photoelasticity
日本非破壊検査協会 平成20年度秋季講演大会	2008/11/5-7 東北歴史博物館	古川 敬 古村一朗	現行の規格に準拠しすぎず検出へのPhased array UTの適用
		古川 敬	擬似SCC探傷研究委員会の活動概要と作成した 試験体 擬似SCC探傷研究委員会でのSCC試験体の 探傷結果
日本非破壊検査協会 第16回超音波による 非破壊評価シンポジウム	2009/1/29 ~ 1/30 東工大:デジタル 多目的ホール	古川 敬 古村一朗	大規模FEM解析によるガイド波の伝搬経路 シミュレーション
日本原子力学会 2009春の年会	2009/3/23 ~ 3/25 東工大・ 大岡山キャンパス	中東重雄 長谷川忠之 古村一朗 山口篤憲	放射光CTによるステンレス鋼中のSCCき裂観察
		古川 敬 古村一朗	原子力機器の超音波探傷への大規模シミュレーション の適用
日本保全学会 第5回学術講演会産学協同 セッション	2008/7/10-12 水戸市民会館	西川 聡 大北 茂 山口篤憲	長期間使用した9Cr-1Mo系鋼構造物の電気化学計測 を用いたじん性評価
溶接学会 平成20年度秋季全国大会	2008/9/10-12 北九州国際会議場 (小倉)	長谷川忠之 西川 聡 中田志津雄 他	溶接始終端部の残留応力に関する基礎的検討
第193回溶接冶金研究委員会	2008/8/26 大阪市立大学 文化交流センター	西川 聡 堀井行彦 他	高温高圧純水環境下の600合金系溶接金属の応力 腐食割れに及ぼすCr,Pの影響
平成20年度 火力原子力発電大会	2008/10/22-23 仙台サンプラザ	西川 聡 大北 茂 堀井行彦	長期間使用した改良9Cr-1Mo鋼溶接部のじん性評価 方法

「非破壊」

「溶接」

学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名	
「溶接」	溶接学会 第8回国際溶接シンポジウム	2008/11/16-18 国立京都国際会館	西川 聡 堀井行彦 他	Stress Corrosion Cracking Morphology of the Alloy 600 Type Shielded Metal Arc Weld Metals in Pressurized Hot-Water
			水野亮二 他	Residual stress measurement using neutron diffraction for girth-welded type 304 pipes with weld metal deposited up to half and full pipe thickness
	溶接学会 平成21年度春季全国大会	2009/4/22 ~ 4/24 アルカディア市ヶ谷	長谷川忠之 西川 聡 他	溶接始末端部の残留応力解析
			水野亮二 他	配管周溶接始末端部の残留応力に関する基礎的検討

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」	日本非破壊検査協会 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 メレパルク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 Photo-elastic Visualization System.

学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名	
【非破壊】	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 Characterization 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
	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 兼本 茂 程 衛英 古村一朗	Electromagnetic Characterization of PWHT of 9Cr-Mo Weldment 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 X 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	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.
	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】	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
	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

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」
西川 聡	平成13年度 溶接学会 研究発表賞	(社)溶接学会 平成14年4月25日	35歳未満の若手研究者に対する賞で発表論文「熱処理条件の非破壊的評価手法の検討-局部PWHT溶接部の性能評価に関する研究(第1報)」に対して与えられたものである。
西川 聡	平成14年度 科学技術奨励賞	(社)日本高圧力技術協会 平成14年5月24日	若手研究者に対する賞で発表論文「鍛造2相ステンレス鋼の溶接熱影響部の熱時効評価 第1・2報」に対して与えられたものである。
志波光晴 西川 聡 米山弘志 山口篤憲	技術賞開発奨励賞	(社)日本溶接協会 平成14年5月29日	研究成果報告「交流磁化法による施工後の溶接熱処理温度評価」に対して受賞したものである。
青野健二郎	「火力原子力発電」 掲載論文賞	(社)火力原子力発電技術協会 平成14年9月25日	論文「斜角探触子の距離振幅特性曲線と欠陥検出能力の評価」に対して受賞したものである。
水野亮二	平成15年度 木原奨励賞	(財)溶接接合工学振興会 平成16年5月13日	本賞は毎年1回溶接接合工学の分野における新進気鋭の原則として35歳以下の研究者・技術者に授与されるもので(財)溶接接合工学振興会会員・関連団体及び理事会の推薦によるものである。 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。
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」
古村一朗 古川 敬	平成19年度 第4回学術講演会 第1回産学協同 セッション 銅賞	NPO法人日本保全学会 平成19年7月3日	産学協同セッションは『研究者が提案する研究成果を商品とみなし企業や国などを購買者と位置づけ研究成果を売買する市場を保全学会が提供するという市場原理に近い新しい試み』として初めて開催されたものである。当センターは超音波探傷シミュレーション技術を「実機探傷で得られるエコー群が欠陥かどうかの評価を可能にする技術」として発表し非常に完成度の高い技術として銅賞を授与されたものである。
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の中から、優秀で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」
関野晃一	第12回技術研究会 奨励賞	神奈川県非破壊試験技術交流会 平成20年6月13日	本賞は 第11・12回技術研究会で発表された研究の中から 優れた発表を行いその努力が非破壊検査技術の向上に寄与するところ大と評価された若手研究者に送られる賞である。 受賞対象研究: 「光学的ひずみ測定法の非破壊検査法への応用について」



溶接・非破壊検査技術センター 技術レビュー Vol.5 2009 (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。