



## 目次

<b>巻頭言</b>	● ハイマン・G・リッコーバーのパラダイム	1
	京都大学名誉教授 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所長 三島嘉一郎	
<b>ご挨拶</b>	● 理事長 佐々木宜彦	2
<b>トピックス</b>	● NDEシンポジウム2011を開催	3
<b>研究報告</b>	● 欠陥検出評価技術に関する研究	
	SUS溶接金属へのフェーズドアレイUT適用に関する考察	4
	古川 敬, 上山芳教	
	ねじりモードガイド波によるエルボ通過後の欠陥反射のシミュレーション	9
	古川 敬, 西野秀郎 (徳島大学)	
	パルス渦電流試験法による保温材付き炭素鋼配管の減肉評価の実験検討	15
	程 衛英, 山本敏弘	
	高温定点継続監視3D-SAFT UT技術の開発 (高温用マトリックスアレイ探触子の試作)	20
	古村一朗, 古川 敬	
	● 溶接継手の健全性確保に関する研究	
	ショットピーニングが施された異材溶接継手における圧縮残留応力の持続性	25
	西川 聡, 菖蒲敬久(日本原子力研究開発機構), 鈴木賢治(新潟大学)	
	● 技術基準・規格化に関する調査研究	
	高温高圧用の伝熱管の最小厚さの規定の技術背景について	30
	吉田和夫, 大石勇一	
	発電技検の確性試験について	40
	亀山雅司	
	非破壊試験で要求される各種視力と小数視力	44
	佐藤長光	
<b>成果</b>	● 出願特許一覧	49
	● 学協会誌等への論文発表	50
	● 学協会等への口頭発表	54
	● 論文等表彰	58

## ハイマン・G・リッコーバーのパラダイム

3年ほど前、私の所属する原子力安全システム研究所に、我々の材料劣化研究を指導しているロジャー・W・ステール先生が来られ、「ハイマン・G・リッコーバーのパラダイム」という題目で講演された。その講演を聞いた私は、リッコーバーのような人達がいたから米国の原子力開発が成功したのではないかと、思った。

ハイマン・G・リッコーバー提督は、1954年に進水した世界初の原子力潜水艦ノーチラス号の開発を推進した米国原子力海軍の父といわれる、彼は、原子力は危険なものであるが、人々の生活を向上させる大きな力を持っており、安全に利用でき、信頼できると考えた。そして、安全で信頼できる原子力利用への唯一の道は、設計、建設、利用に従事する有能なエンジニアが、細部にわたり最高レベルの工学的注意を払って総力を挙げて取り組むことであり、問題を解決せずに問題とともに生きようとする誘惑に打ち勝たねばならない、と述べている。その彼の掲げた原子力技術開発の原則は以下のようなものである。

- ・ 技術的課題とコスト、スケジュールの問題は、それぞれを明確にし、分けて取り扱うべきであり、コストやスケジュールの問題は、安全でない、誤った技術的決定を正当化するものではない。
- ・ 深刻になる前に問題を見つけるためには、傾向の分析が不可欠である。
- ・ 系統・機器は、必要とされ、あるいは想定されるすべての静的・動的使用条件の範囲に適合するように設計・試験しなければならない。
- ・ 既存の設計は、広範囲の解析や試験、経験に裏付けられたものであるもので、たとえ小さな変更であっても、それにより元の設計の根拠が損なわれることのないよう、慎重に検討しなければならない。
- ・ システムは、失敗の影響を最小限にするように、冗長性や独立性を持たせた設計とすること。
- ・ 設計上のマージンは、計算の不確かさや製作誤差、あるいは予期しない運転条件をも含めたものでなければならない。

これらの原則の多くは、今では原子炉の安全設計の基本要件にもなっているが、原子力開発の初期に既にこのような考えに至っていたのである。品質管理においてもリッコーバーは徹底していた。あるとき、完成間近の原子力潜水艦の検査で、配管材料が仕様と異なる箇所が見つかり、同種の配管を調べてみると他にもそのような箇所があり、彼は、工程の遅れを懸念する周囲の反対を押し切って、それらの配管を全て取り替えさせ、品質管理の大切さを教えた。米国海軍では、このような安全原則を徹底して守り、これまで原子炉事故はゼロであるという。そして、米国海軍は米国原子力界へのプロフェッショナルな人材供給源にもなっている。

東京電力福島第一原子力発電所の事故を受け、改めてリッコーバーの安全原則を読み返してみると、我々は、いつの間にか、このような原則を忘れていたのではないかと思う。それとも、身につけていなかったのか。日本人はもの作りが得意と言われるが、作ったものの利用において抜かりはなかったか。もの作りでは境界がはっきりしているが、作ったものの利用では境界が有るようで無く、ありえないと思うことが現実になることもある。そのようなときにも破局を招かないためには、安全原則を徹底して守ることが大切だと思う。

稼働中の発電設備ではトラブルの多くが容器・配管等の溶接部で発生している。溶接部の健全性に関する研究、検査・評価等を含む業務に従事する発電設備技術検査協会には、原則を忠実に守り、公正で厳格かつ実効性のある検査・評価を行うとともに、発電設備の品質の維持・向上のために、さらに研鑽を積んでいただくことを期待したい。

京都大学 名誉教授  
 (株)原子力安全システム研究所  
 技術システム研究所長  
 三島 嘉一郎



2011年度における協会、溶接・非破壊検査技術センター（NDEセンター）の研究活動と成果を技術レビュー Vol. 8として取りまとめましたので御高覧頂きたいと思っております。

昨今、福島第一原子力事故を契機に、我が国のエネルギー政策のあり方、とりわけ、原子力政策の方向について、まさに国論を二分する形で議論が行われています。

私自身は、日本のエネルギー資源供給の現実、国際エネルギー情勢、経済合理性のあるエネルギー価格の実現、地球温暖化防止のための二酸化炭素排出の抑制、再生可能エネルギーへの過度な期待など、現実社会を直視すれば、日本にとって原子力はエネルギー選択の一つとして有力であり、その重要性はいささかも変わらないとの強い思いを持っております。福島事故の教訓を生かし、原子力安全技術のシステムトータルとしての整合性、一層の統合、総合化の視点から捉え、世界に貢献していくことこそ、日本の生きる道であり、世界から求められていると信じています。

NDEセンターでは、2011年度の活動目標として、「信頼の回復」を掲げて、センターが保有しているコア技術を一層深化させ、現場ニーズに適合できるような視点から研究活動に取り組んできました。すなわち、超音波可視化技術、超音波シミュレーション技術、フェーズドアレイ法、3 DUT法、ガイド波などの超音波探傷技術、過電流シミュレーション技術、過電流探傷技術、残留応力評価技術、溶接部析出予測技術、耐熱鋼寿命予測技術、溶接部検査eラーニング教材などがNDEセンターのコア技術です。

新しい原子力安全規制組織が発足することになりましたが、安全規制に必要な研究開発にどのように取り組んで行くか、その方針はNDEセンターの今後の事業活動におおきな影響をもたらすものと覚悟を新たにしています。また、高経年化プラントの運転期間制限、JNESの原子力規制委員会事務局である原子力規制庁への統合などもどのように進展していくかも大きな関心事です。これまでJNESからの研究資金がNDEセンターの研究基盤を支えてきましたが、ここ最近の状況は、大幅に減少し2012年度は1億円程度となり、数年前に比べて数分の一以下となってきました。現下の情勢を考えれば、この傾向に大きな変化はないものと覚悟せざるを得ません。

このような情勢認識の中で、NDEセンターは今後、保有するコア技術に一層の深みと独自性を追求しつつ、提案活動を通じて受託事業の受注確保に努めると共に、現場での実機適用評価、廃棄物処理分野、火力分野や土木、建築分野での検査探傷技術の提案など、新たな受注分野にも積極的に取り組んでいかなければならないと決意を新たにしているところです。

関係各位の一層のご指導、ご理解を賜りますようお願い申し上げます。

理事長  
佐々木宜彦





## NDEシンポジウム2011を開催



講演される兼本教授



講演される庄司教授



満席となった会場の様子

当協会は、平成23年11月14日(月)に東京大学山上会館大会議室において、昨年度に引き続きNDEシンポジウム2011を開催しました。

本シンポジウムはテーマを「構造健全性と非破壊評価」と題し、原子力発電設備の安全性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狙いで企画したものです。

当協会の佐々木理事より開会の挨拶が行われた後、基調講演として、東北大学 庄司哲雄教授より「プロアクティブ材料経年劣化評価と非破壊評価技術への期待」と題して材料の経年劣化事象の予測と非破壊検査技術の果たすべき役割について、会津大学 兼本茂教授より「非破壊高度化のための信号処理の役割」と題して信号処理が非破壊検査技術の高精度化、高機能化に果たす役割についてご講演いただきました。

セッション1：構造健全性評価では、(財)電力中央研究所 新井氏より「健全性評価関連 SCC 研究の現状と課題」、(独)日本原子力研究開発機構 鬼沢氏より「確率的破壊力学に基づく健全性評価」、(株)日本製鋼所 塚田氏より「軽水炉圧力容器用材料の変遷とその製造技術 健全性、溶接性、検査性の観点から」、についてそれぞれ発表が行われました。

セッション2：非破壊検査では、(独)原子力安全基盤機構 坂本氏より「ステンレス鋼の非破壊検査に関する研究」、(株)テブコシステムズ 町田氏より「構造信頼性確保のための欠陥検出性能要求」、三菱重工業(株) 佐々木氏より「配管溶接部への放射線透過試験(RT)におけるCR(Computed Radiography)技術の実機適用性検討」について発表が行われました。

また、当協会より、セッション1,2でSCC及びECTに関する2件の研究成果の発表を行いました。

3.11 福島事故の影響で原子力を取り巻く環境は厳しいものがあり平成23年度は開催を見合わせることも考えましたが、継続して開催することで原子力の安全性への信頼回復につながればとの思いで、開催しました。皆様のご協力で会場は構造健全性評価/非破壊評価に関する研究者/技術者等約100名の方で満席状態となり、活発な意見交換を行うことができました。ご協力に心より感謝申し上げます。

# SUS溶接金属へのフェーズドアレイUT 適用に関する考察

## A Study of Phased Array UT for Austenitic Stainless Steel Weld Metal

溶接・非破壊検査技術センター 古川 敬, 上山 芳教

Phased array UT technique has been applied to various applications. It provides us with a multiple angle beam testing and real-time side view imaging of defects with sectorial scans. We can recognize positions of the defects directly using B-scan or S-scan images. B-scan or S-scan images are reconstructed from multiple A-scans, however, even if sound velocity of materials has anisotropy. In this study, we applied the phased array UT to austenitic stainless steel weld metals which has heavy anisotropy. We compared the experimental results and FEM simulation results for estimating the influence of anisotropy. A simple calculation using slowness curve were applied to predict of actual refraction angle (direction of energy flow).

**Keywords:** : Phased array, Austenitic stainless steel weld metal, Beam skewing, Slowness curve

### 1.....はじめに

超音波探傷試験においてフェーズドアレイ法を用いた超音波探傷試験（以下フェーズドアレイUTと呼ぶ）法が広く適用されようとしてきている。フェーズドアレイUT法で、複数の角度で超音波を入射でき、傾いたきずや形状が複雑なきずに対する検出性向上が期待できることや、探傷結果を画像化して表示できることなどの特長がある。特に、探傷結果を画像化できるという特長は、反射源の位置の確認や複数の反射源の位置関係が直感的に把握できるようになるため、探傷結果を解釈する上で有効な支援ツールである。ただし、これは試験対象部位が均質で等方な材料であることが前提条件であることに留意しておく必要がある。音響異方性を有する材料では、音速が伝搬方向に依存して変化することに加えて実際に超音波が伝搬する方向も変化するため<sup>1)~3)</sup>、フェーズドアレイUT法において異方性を考慮せずに探傷結果を表示した場合には、画像上の反射源位置と実際の反射源位置とで差異を生じることが考えられる。フェーズドアレイUT法のなかでもセクタ走査では異なる方向に超音波を送信するため、画像

上の指示位置の誤差が角度によって大きくなる場合があると考えられる。既報では代表的な音響異方性材料として、組織を一方向にそろえて成長させたオーステナイト系ステンレス鋼溶接金属および制御圧延鋼板の2種類の材料に対して、セクタ走査によるフェーズドアレイ法を適用し画像上の反射源位置と実際の反射源位置との差異の程度を調査した<sup>4)</sup>。その結果、制御圧延鋼板試験体に対しては、JIS Z 3060:2002に基づく補正の妥当性を確認したものの、オーステナイト系ステンレス鋼溶接金属に対する補正方法は今後の課題とした。

本報では、オーステナイト系ステンレス鋼溶接金属に対するフェーズドアレイUT法において、シミュレーション解析を用いた探傷結果の再現により反射源位置の差異の原因が音響異方性であることを確認し、簡易的な屈折角の予測方法を考察した。

### 2.....解析モデルおよび解析条件

図1は本研究で用いた試験体のマクロ組織写真と金属組織の成長方向の分析結果である。この試験体は、柱状晶の成長方向を一方向にそろえるように施工

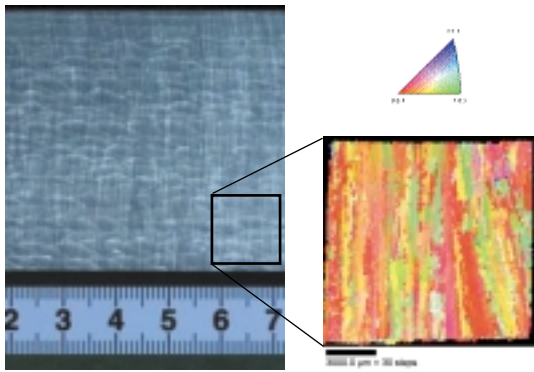
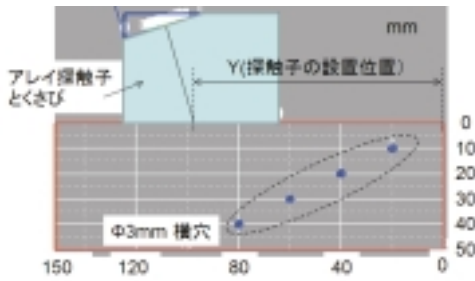
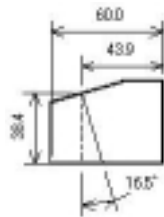


図1 オーステナイト系ステンレス鋼溶接金属試験体のマクロ組織写真とEBSD分析による逆極点図

して製作したものであり、ウェルドオーバーレイ工法の組織やステンレス鋼鋳鋼の組織を模擬したものである。試験体には、画像上の反射源位置と実際の反射源位置との誤差が確認できるように口径3mmの横穴を設けた。図2にこの試験体の解析モデルを示す。既報で測定した試験体と同じ寸法、形状、横穴の位置を設定した。主要な解析条件を表1に示す。



(a) 全体形状



(b) くさびの拡大図

図2 解析モデルの概要

表1 シミュレーション解析の設定値

くさびの設定値	表2の参照
くさびの音速(縦波)	2,330 m/s
くさびの密度	1.18 x10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>
SUS溶接金属の弾性定数	C <sub>11</sub> =263 GPa, C <sub>33</sub> =216 GPa, C <sub>12</sub> =98 GPa, C <sub>13</sub> =145 GPa C <sub>23</sub> =129 GPa
密度	7.9x10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>
振り角設定の音速	5,750 m/s
超音波ビームの振り角/角度のステップ	0度~70度 / 1度

表2 フェーズドアレイ探傷器の設定値

試験体の音速	5,750 m/s
くさびの音速	2,330 m/s
くさびの高さ	38.4 mm
くさびの角度	16.5 度
くさびと試験体の位置の基準	43.9 mm
振動の種類	縦波
超音波ビームの振り角 / 角度のステップ	- 10度 ~ 70度 / 1度

SUS溶接金属の弾性定数は、文献<sup>5)</sup>を基に音速の実測データを考慮して設定した。表2は既報において測定したフェーズドアレイUT法の条件である。シミュレーション解析で既報の探傷結果の再現を試みた。解析コードは市販の三次元有限要素コード(伊藤忠テクノソリューションズ社製 ComWAVE Ver. 4)を用いた。

### 3..... 測定結果とシミュレーション解析結果の比較

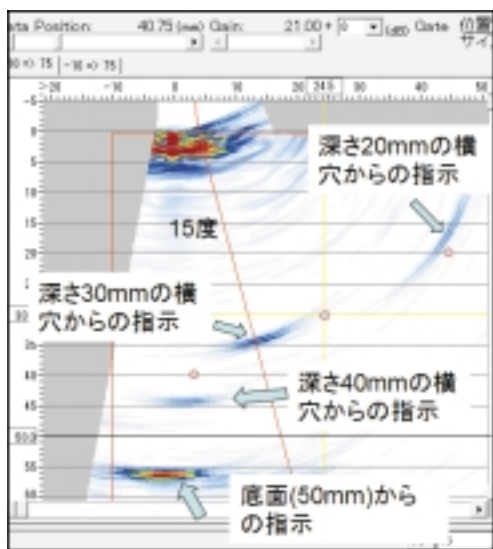
#### 3.1 測定結果

図3はオーステナイト系ステンレス鋼溶接金属試験体に対し、縦波を用いたセクタ走査で測定した時のBスキャン画像であり、図中の印は実際の横穴の位置を、矢印で示した位置は画像上での指示位置である。図(a)は探触子の位置(Y)は73mmの結果であり、これは深さ30mmの横穴に対して屈折角15度の設定値の振幅が最大となる条件である。この条件において、深さ20mmの横穴からの指示は実際の横穴の位置に対応しているが、深さ30mmおよび40mmの横穴からの指示は実際の位置に比べ深い位置であった。図(b)は94mmの結果であり、これは深さ30mmの横穴に対して屈折角45度の設定値の振幅が最大となる条件である。この条件において、深さ30mmの横穴からの指示は実際の横穴の位置の近くにあったが、深さ40mmの横穴からの指示は実際の位置に比べ深い位置であった。

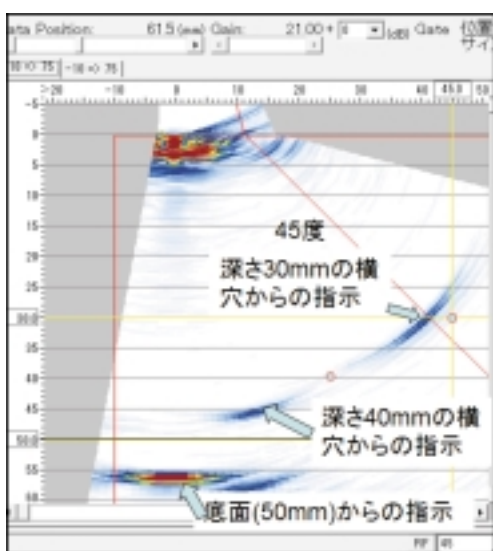
#### 3.2 シミュレーション解析結果

図4は図3(a)の測定結果をシミュレーション解析で再現したBスコープ画像の表示結果であり、図4(a)はオーステナイト系ステンレス鋼溶接金属の物性値を設定して解析した再現結果を、図4(b)は母材の物性値で解析した比較用の等方体モデルにおける



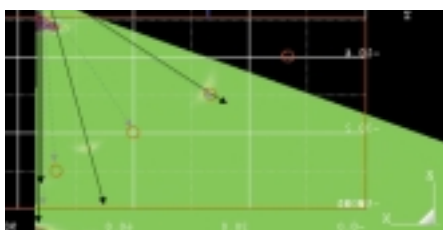


(a) 探触子位置(Y)73mm

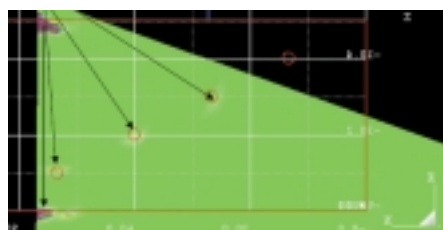


(b) 探触子位置(Y)94mm

図3 フェーズドアレイUT法による測定結果

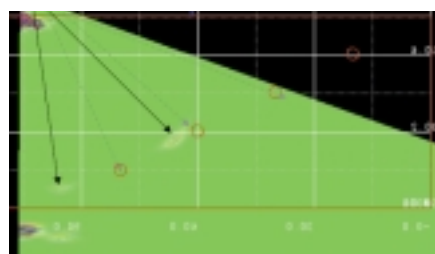


(a) SUS溶接金属モデル

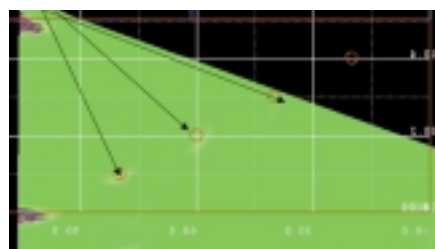


(b) 母材(等方体)モデル

図4 探触子位置(Y)73mmにおけるシミュレーション解析結果



(a) SUS溶接金属モデル



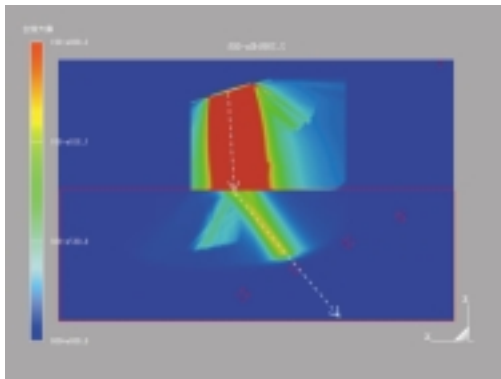
(b) 母材(等方体)モデル

図5 探触子位置(Y)94mmにおけるシミュレーション解析結果

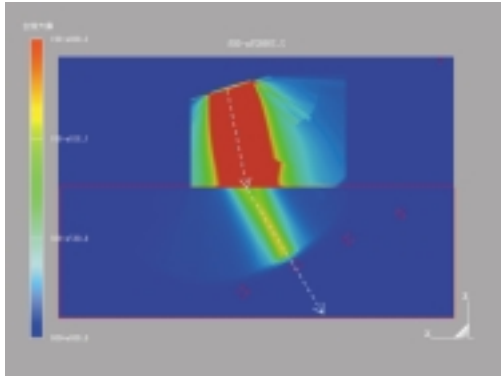
結果である。図中に示した黒の実線の矢印は指示が得られたビーム方向を示す。図4(a)の指示の位置は図3(a)とほぼ同じ結果であり、測定結果を再現していることが確認できる。また図4(b)に示す等方体モデルでは、各指示は設定した横穴の位置に対応しており、図4(a)の指示位置の差異の原因は音響異方性の影響であることが確認された。同様に、図3(b)の測定条件を再現したシミュレーション解析結果を図5に示す。オーステナイト系ステンレス鋼溶接金属の物性値を設定して解析した図5(a)では測定結果を再現しており、また図5(b)に示した等方体モデルでは各指示は設定した横穴の位置に対応する結果であった。この結果からも、図4(b)の指示位置の差異の原因は音響異方性の影響であることが確認された。

図6は深さ30mmの横穴に対して最大エコー高さが得られた条件において、超音波ビームが伝搬する様子のシミュレーション解析を表示したものである。図6(a)ではオーステナイト系ステンレス鋼溶接金属の物性値を設定し、図6(b)では母材(等方体モデル)の物性値を設定した結果である。両者ともに超音波ビームは約30度の方向に伝搬しているが、設定した屈折角は各々15度および30度であった。この結果からも、指示位置の差異の原因は音響異方性の影響であることが確認された。

ここで、各深さの横穴からのエコー高さが最大となる条件における屈折角を「超音波ビームの方向」



(a) SUS溶接金属モデル (設定屈折角15度)



(b) 母材 (等方体) モデル (設定屈折角30度)

図6 探触子位置(Y)73mmにおける超音波ビームのシミュレーション解析結果

と呼ぶこととする。次に、超音波ビームの方向の簡易的な推定方法を示し、補正方法を考察する。

#### 4.....簡易的な補正方法に関する考察

既往の研究<sup>6)~8)</sup>において、音響異方性を有する材料における探傷屈折角の推定方法が提案されており、ここでは裏垣らの方法<sup>7)</sup>を用いた方法を考察する。詳細な説明は割愛するが、この裏垣らの方法では、3方向(0度、45度、90度)の音速を基に速度分布の曲線を推定して超音波ビームの伝搬方向を算出する手法を提案している<sup>7)</sup>。それに基づき、屈折角に対するグラフに対する推定した超音波ビームの伝搬方向を図7に示す。設定した0度、45度、90度の音速は各々5200m/s、6100m/s、5700m/sである。

表3は、オーステナイト系ステンレス鋼溶接金属に対するフェーズドアレイUT法の測定結果およびシミュレーション解析結果から求めた「超音波ビームの方向」と、等方体モデルの解析結果から求めた「超音波ビームの方向」の比較、さらに図7を基

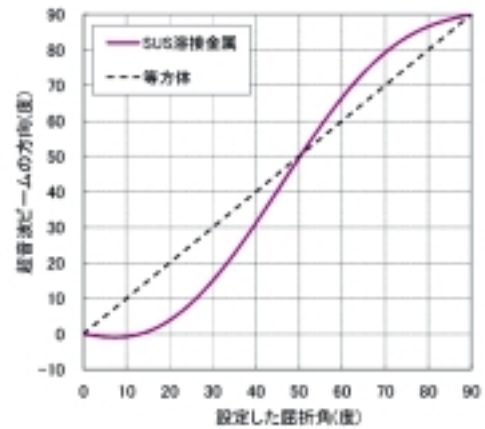


図7 超音波ビーム方向の推定結果

表3 超音波ビーム方向の比較

	「超音波ビームの方向」(°)				
	4	25	30	48	57
等方体	4	25	30	48	57
シミュレーション解析結果	0	8	15	45	57
測定結果	2	8	15	45	60
推定結果	-1	9	15	44	62

に推定した結果も示す。等方体モデルにおける超音波ビームの方向は、設定した屈折角を意味しており、この表では、溶接金属内では実際に超音波ビームが伝搬する方向は設定した屈折角と異なる場合があること、その方向を簡易的な方法で推定できことを示している。オーステナイト系鋼溶接金属の探傷において、この様に設定した屈折角から実際の超音波ビームの方向を推定して補正する方法が考えられる。

#### 4.....まとめ

オーステナイト系ステンレス鋼溶接金属試験体に対して、セクタ走査によるフェーズドアレイUT法を適用した際に、画像上の指示と実際の反射源位置の差異の程度やその原因を、数値シミュレーションを活用して分析した。そして、実際に超音波ビームが伝搬する方向(超音波ビームの方向)を簡易的に算出する方法の適用性を確認した。今後、実際の探傷事例が蓄積されることで、補正の必要性や方法などの議論が行われるものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) M. J. P. Musgrave (大森 訳): 結晶音響学, 内田老鶴圃新社, pp.65-156 (1978)
- 2) B. A. Auld: Acoustical fields and waves in



- solids, 2nd edition volume I, KRIEGER, pp.135-264(1990)
- 3) 伊庭：音響異方性を有する鋼溶接部の超音波斜角探傷法，鉄と鋼 73(6)，pp.616-628 (1987)
  - 4) 古川，南，杉林，古村：音響異方性材料へのフェーズドアレイUT法の適用，発電技検技術レビュー 7，pp.13-17 (2011)
  - 5) J. A. Ogilvy: Ultrasonic beam profiles and beam propagation in an austenitic weld using a theoretical ray tracing model, Ultrasonics, 24(11), pp.337-347 (1986)
  - 6) 廣瀬，裏垣，松本，小林，西本：音響異方性を有する材料中における超音波の伝搬特性，非破壊検査 39(2)，pp.74-79 (1990)
  - 7) 裏垣，廣瀬，安永：アルミニウム合金板における音響異方性と超音波斜角探傷試験に及ぼす影響，軽金属溶接 29(2)，pp.12-19 (1991)
  - 8) 羽田野，吉島：音響異方性を有する圧延鋼板におけるフェルマーの原理による探傷屈折角の算定，日本音響学会誌 64(7)，pp.389-396 (2008)



古川 敬



上山芳教

# ねじりモードガイド波による エルボ通過後の欠陥反射のシミュレーション

Simulation of the torsional mode guided wave reflection beyond elbow

溶接・非破壊検査技術センター 古川 敬  
徳島大学 西野秀郎

A study of the reflection of the torsional mode guided wave from circumferential defects beyond elbow was carried out using a large scale of three-dimensional FEM code. We are trying to utilize the predicted displacement field to optimize the measurement condition or estimation of defect detectability. A displacement field of torsional guided waves in elbow and piping beyond elbow was computed to predict a reflection coefficient. Simulation results of the reflection coefficient of circumferential defect were compared with the displacement field.

**Keywords:** : Guided Wave, Elbow, Piping, Wave Propagation, Three dimensional FEM, Reflection

## 1.....はじめに

配管の軸方向に伝搬する円筒ガイド波を用いて、広範囲を一括して探傷する方法や遠隔から探傷する方法等が適用されつつあり<sup>1)-2)</sup>、直管部に対してはパルス反射法による探傷方法の規格が制定されている<sup>3)</sup>。しかし、曲がり管や分岐管の様な複雑な形状を有する部位に対しては、まだ課題が多い状況と言える。エルボ部においては、周波数に依存して振幅分布に偏りを生じることが、実験ならびにシミュレーション等で明らかにされつつあり<sup>2), 4), 5)</sup>、欠陥の発生が想定される位置に応じて、適正な計測条件を選定することや計測条件における欠陥検出性を把握するために、シミュレーション解析の活用が期待されている<sup>6)</sup>。

既往の研究<sup>6)</sup>では、数値シミュレーションを用いて、伝搬するガイド波の最大振幅値を予測した結果と、実験で模擬減肉から反射波を計測して評価した減肉の検出性との間の対応関係が調査されている。具体的には、外径50mm、アルミニウム管に対して、エルボ部ならびにエルボ越えの直管部において最大振幅値分布が高いところでは減肉の検出性が高く、

振幅値分布が低いところでは減肉の検出性が低い結果であることが示されている。

本報では、他の寸法や材質への適用性を確認するために、呼び径100Aの鋼管モデルに対して解析を行った。

## 2.....解析モデル及び解析条件

図1に直管2本と90°エルボからなる解析モデルの形状を示す。直管部の寸法は2本とも外径114mm肉厚4.5mmであり、エルボ部は90°ロングエルボで

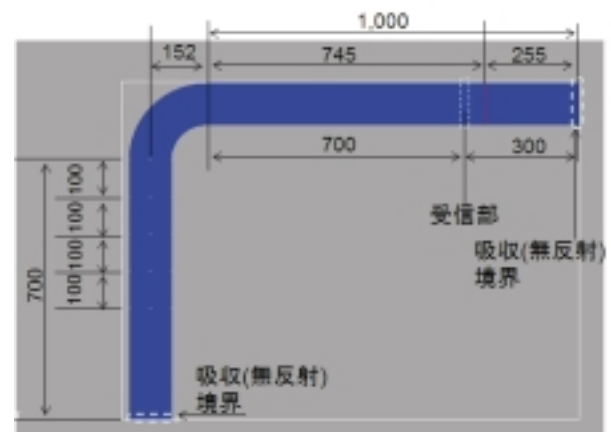


図1 解析モデル

ある。エルボ部はトラスを組み合わせ簡易的に全て同じ厚さでモデル化した。送信部はエルボの端から745mm離れた位置に設定し、受信部は送信部よりエルボ側へ45mm離れた位置に設定した（受信部はエルボ端から700mm）。このモデルのエルボ越えの直管部に欠陥を設定し、欠陥からの反射波を解析するが、その欠陥位置は、エルボの端及び端から100mm刻みで400mmまで変えて設定した。欠陥モデルの設定例を図2に示す。図2はエルボ端からの距離100mmに設定した1/4周の部分欠陥モデルの例であり、エルボの側面の延長線上の設置位置を90°配置と呼ぶこととする。また、エルボの腹側の延長線上に配置した場合を0°、背側の延長線上に配置した場合を180°と呼ぶこととする。エルボ端からの各距離において、各々円周上に3カ所部分欠陥モデルを設定して各反射波を解析した。欠陥モデルの寸法は、深さ1mm、幅（軸方向の長さ）24mmの溝状とした。図3は、送信部のモデルの拡大図である。円周方向に初期変位を与えてねじりモードを送信させた。初期変位の波形（送信波形）は中心周波数36kHz、2.5波のトーンバースト波である。受信部のモデルは、任意の位置のFEM要素の変位を時系列で出力するモデルとしており、ここでは既報<sup>6)</sup>と同

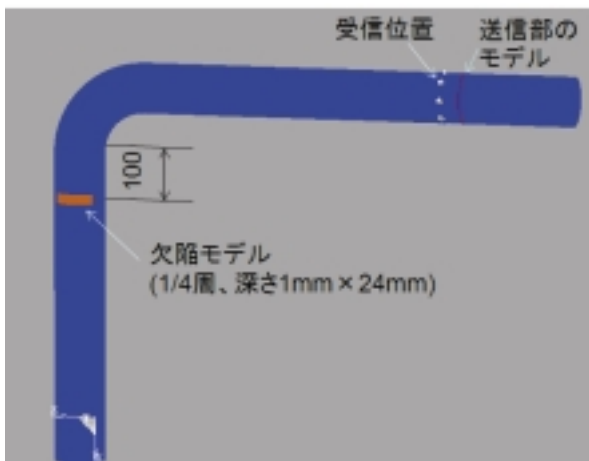


図2 欠陥モデルの設定例

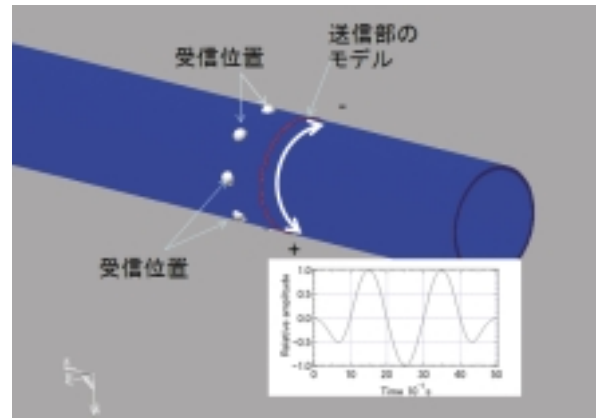


図3 送受信モデルと送信波形

様に外面に等間隔で8箇所配置した。これら8箇所の周方向の変位を全て合成し、ねじりモードの基本モード（ $T(0, 1)$ ）を優先的に受信するモデルとした。

解析コードは三次元有限要素コード（伊藤忠テクノソリューションズ社製 ComWAVE Ver. 4）を用い、解析条件の概要を表1に示す。

### 3.....解析結果

#### 3.1 エルボ通過後の伝搬状況と欠陥検出性の予測

図4は、無欠陥モデルにおいてエルボ部およびエルボ通過後の波面の伝搬状況の解析結果であり、ガイド波の送信後から図中に示した伝搬時間における表面の変位の絶対値を色合いで示したものである。各々エルボの背側からの視野と側面からの視野を並べて示す。図(a), (b)に示す様に、直管部を伝搬するガイド波の波面は軸対象な形状をしており、振幅も円周上ほぼ均一に分布をしているが、エルボ部では図(c), (d)に示す様に特定の部分の振幅が大きくなる様子が確認できる。今回の条件ではエルボの背側に局在していた。エルボ通過後の50 μs毎の波面を各々(e)から(h)に示す。振幅が大きくなる位置が伝搬時間によって背側や腹側に変動する様子や、波面の形状が軸対象になっていないことが確認できる。

表1 主な解析条件

項目	条件
材質（縦波，横波音速，密度）	鋼（ $V_l=5.9\text{km/sec.}$ , $V_s=3.23\text{km/sec.}$ , $\rho=7.9 \times 10^3\text{kg/m}^3$ ）
口径，肉厚	呼び径 100A（外径 114mm），肉厚 4.5mm
欠陥の位置（エルボ出口端）	0 mm, 100 mm, 200 mm, 300 mm, 400 mm
欠陥の寸法	深さ 1mm, 幅 24 mm, 長さ 1/4 周
送信波の周波数，種類	中心周波数 36kHz, トーンバースト 5 波
総要素数 / 要素寸法	全要素数 約 10 億要素, 実要素数 約 2 千 4 百万要素 / 0.5mm x 0.5mm x 0.5mm



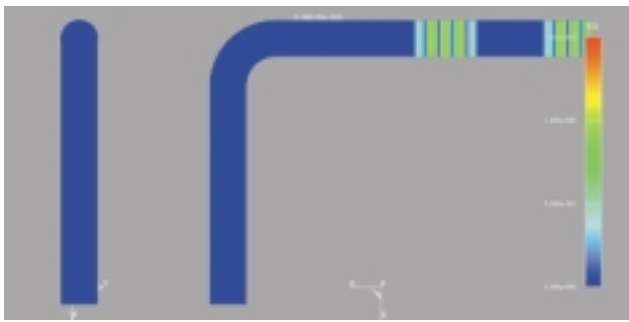
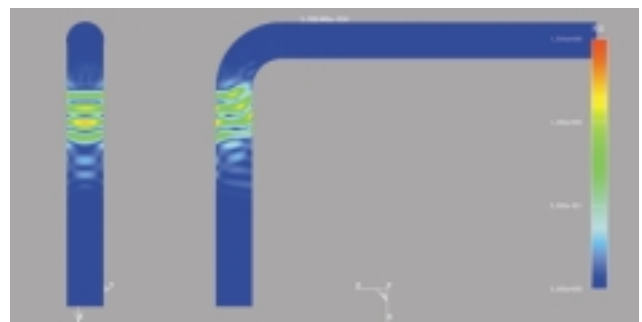
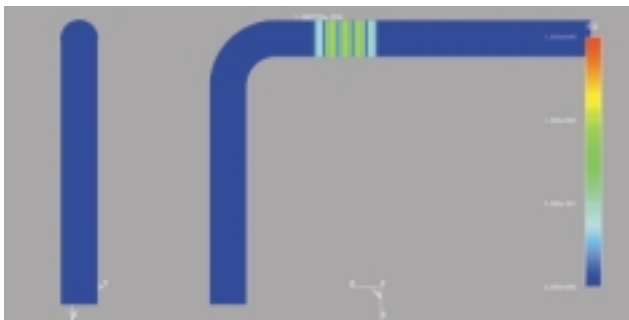
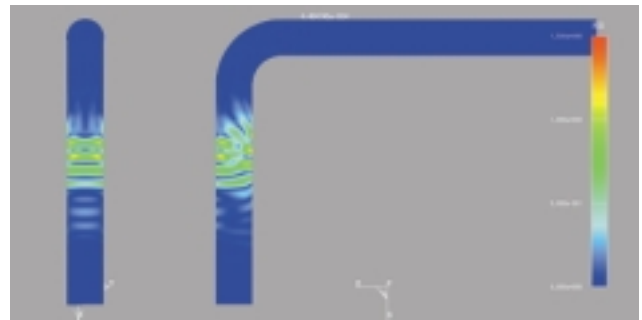
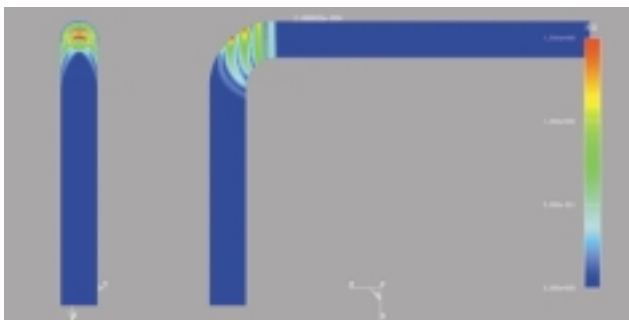
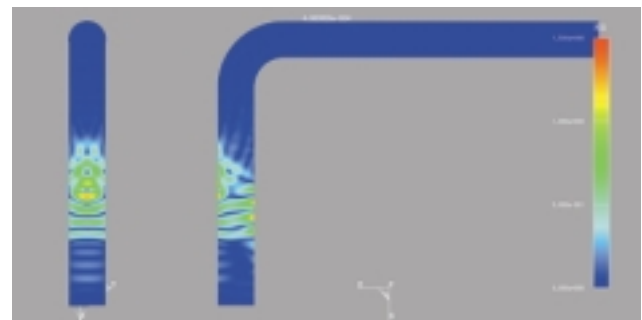
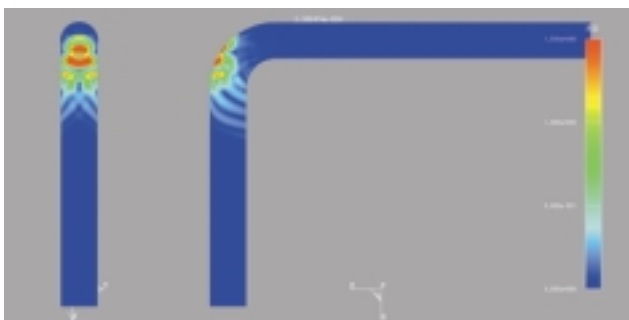
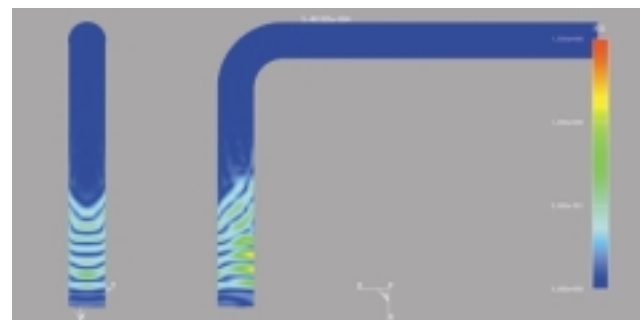
(a) 送信後 100  $\mu$  秒の波面(e) 送信後 400  $\mu$  秒の波面(b) 送信後 200  $\mu$  秒の波面(f) 送信後 450  $\mu$  秒の波面(c) 送信後 300  $\mu$  秒の波面(g) 送信後 500  $\mu$  秒の波面(d) 送信後 340  $\mu$  秒の波面(h) 送信後 550  $\mu$  秒の波面

図4 ガイド波の伝搬状況(無欠陥モデル)

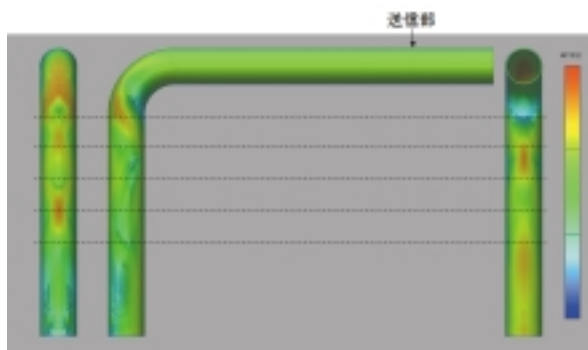


図5 変位の最大振幅分布図

この結果より、エルボ部およびエルボ通過後の領域における欠陥検出性は、欠陥の位置により大きく異なることが予想される。図4では、各位置における振幅の大小関係を時系列で把握できるものの、各

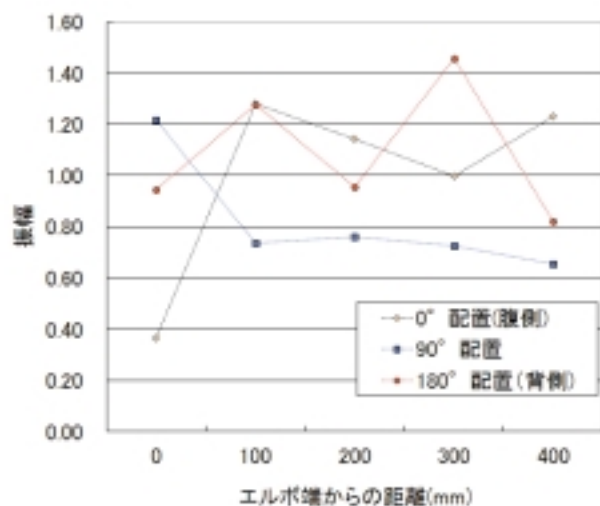
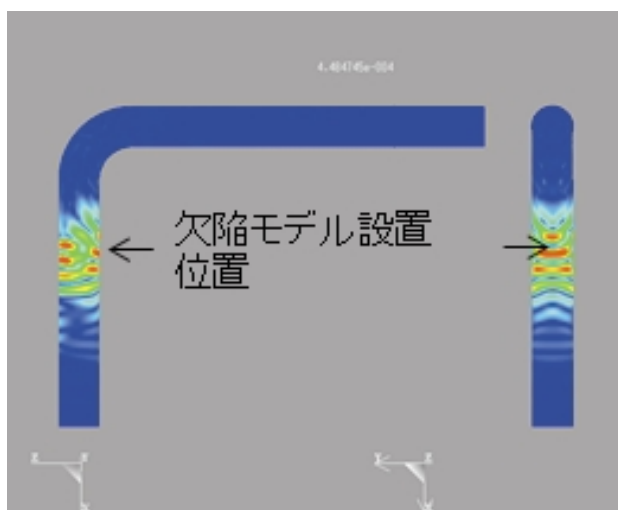


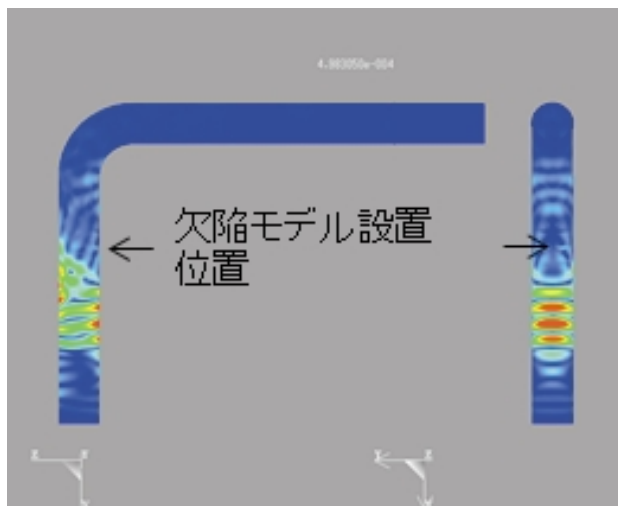
図6 エルボ端からの距離と変位の最大振幅値



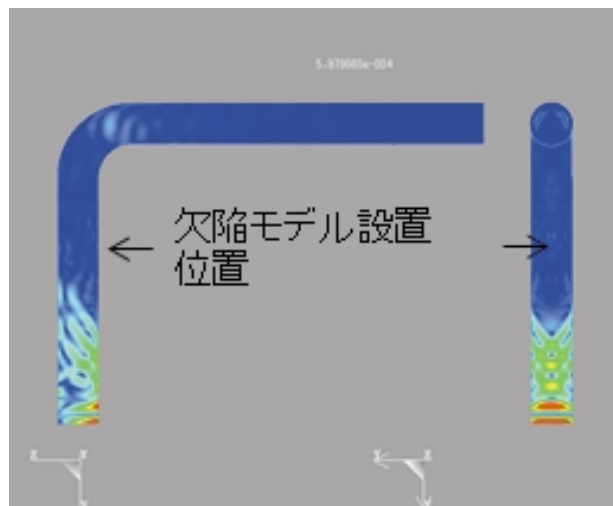
(a) 送信後 450 μ 秒の波面



(c) 送信後 550 μ 秒の波面



(b) 送信後 500 μ 秒の波面



(d) 送信後 650 μ 秒の波面

図7 欠陥モデル(0°配置)からの反射波の振幅

位置の振幅分布を把握するためには時間の情報が妨害となっている。そこで、各位置の振幅分布を把握するため、解析した全ての時系列データの振幅値から位置毎に最大振幅値を抽出して表示する方法を試みた。その結果を図5に示す。エルボの背側と腹側で振幅値が各々大ならびに小になるといった位置毎の振幅分布が表示されている。図6は、欠陥モデルを設定した位置における最大振幅値を示した結果である。横軸はエルボ端からの軸方向の距離（エルボ端からの位置）であり縦軸は変位の最大振幅値である。図5の色合いの通り、エルボの腹側では振幅値が小さいものの、エルボ端から100mm程度以上伝搬すると振幅は位置によって変動するものの送信波の振幅（1, 0）と同程度になった。エルボの背側でもエルボ端から100mm程度以上伝搬すると、ほぼ送信波の振幅程度になるが、背側と腹側で振幅の大小関係が位置によって逆になる結果となった。

ここで、この振幅分布と欠陥検出性に関連があるのであれば、解析結果から欠陥検出性が予測できる

のではないかと考えられる。そこで、設定した部分欠陥の中央部の最大変位を抽出し、その大小関係と欠陥検出性とを比較した。

### 3.2 エルボ越えの欠陥からの反射および反射率の解析

各位置に設定した欠陥モデルからの反射波を解析した。図7および図8は、エルボ端から200mm離れた直管部において1/4周部分欠陥モデルを各々0°配置および180°配置で設定した条件での解析結果であり、欠陥モデルで反射する波面の伝搬状況を示した図である。0°配置モデルでは側面とエルボの腹側からの視野を、180°配置モデルでは側面とエルボの背側からの視野を示す。ともに、欠陥モデルで反射した超音波はエルボの方向へ戻る様子が確認できる。

これらの様に欠陥モデルで反射した超音波の受信波形の最大振幅値を図9に示す。これは欠陥からの反射率を示したものであり、図の横軸はエルボ端からの軸方向の距離（エルボ端からの位置）であり縦

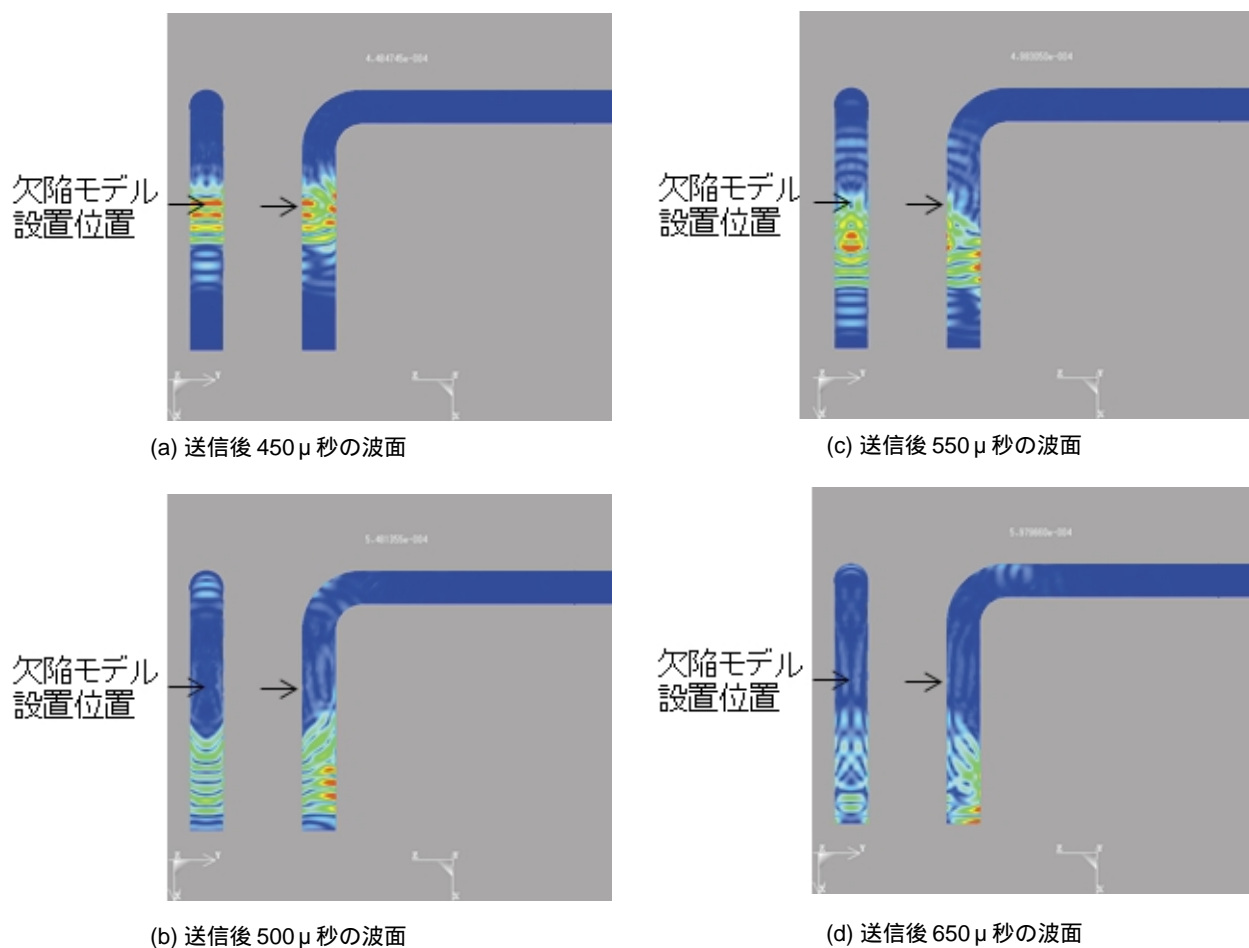


図8 欠陥モデル（180°配置）からの反射波の振幅



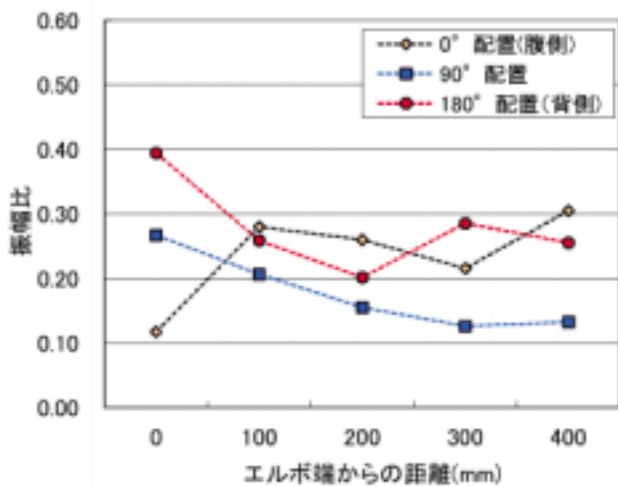


図9 欠陥モデルからの反射波の振幅

軸は受信波の最大振幅値である。最大振幅値は、エルボ手前の直管部に設置した全周欠陥（深さ1mm × 長さ24mm）からの振幅との比で表示した。90°配置においては、エルボ端からの距離に応じて振幅が低くなる傾向であったが、0°配置ならびに180°配置では距離による振幅値の変化が図5および図6に示す様に変動する結果であった。ただし、エルボ端から0mmの180°配置では図6に示す変位の最大値は低いものの、欠陥反射率は大きい結果であった。この原因の詳細な分析は今後の課題とするが、図6では特定の点（FEM要素1つ分）のデータであるため、欠陥モデルの寸法（広がり）の影響が考慮されていないためと考えられる。

#### 4.....まとめ

本研究では、エルボ部及びエルボ通過後の直管部におけるガイド波の振幅値の分布をシミュレーション解析し、欠陥検出性の予測あるいは計測条件の探索等に活用する方法を検討している。今後、実験結果との比較を行い、シミュレーション解析で予測した振幅値分布と検出感度との相関性を検証する予定である。

#### 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) 日本非破壊検査協会規格 NDIS2427, “ガイド波を用いたパルス反射法による配管の探傷試験方法通則”，2010. 5. 12制定
- 4) 小松，田中，吉田，西野：管軸方向に漸増した減肉欠陥のガイド波による検出感度，第17回超音波による非破壊評価シンポジウム，pp.41-42, 2010年1月
- 5) 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
- 6) 古川，西野：ねじりモードガイド波によるエルボ部の減肉の最適計測手法，日本保全学会第9回学術講演要旨集，2012年7月
- 7) 古川，古村，松尾，長：大規模FEM解析によるガイド波伝搬のシミュレーション，発電設備技術検査協会技術レビュー Vol. 5, pp.5-12, 2009
- 8) 古川，古村：エルボ部におけるねじりモードガイド波伝搬の数値シミュレーション，非破壊検査協会平成22年度春季大会講演概要集，pp.71-72, 2010年5月
- 8) 田中，増田，吉田，西野：エルボ管におけるT(0,1)モードガイド波の高次モード変換，第17回超音波による非破壊評価シンポジウム，pp.43-44, 2010年1月
- 9) 古川，古村，西野：ガイド波探傷の大規模FEMシミュレーション解析，発電設備技術検査協会技術レビュー Vol.6, pp.5-12, 2010
- 10) A. Demma, P. Cawley, and M. Lowe: The reflection of the fundamental torsional mode from cracks and notches in pipes, J.A.S.A. Vol. 114, No. 2, pp.611-625 (2003)



古川 敬

# パルス渦電流試験法による保温材付き炭素鋼配管の減肉評価の実験検討

## Pulsed Eddy Current Measurement of Carbon Steel Plates' Thickness

溶接・非破壊検査技術センター 程 衛英, 山本敏弘

A pulsed eddy current testing system was constructed in laboratory. High resolution AMR (Anisotropic Magneto-Resistive) sensors were used as the magnetic field detector and various countermeasures had been taken to reduce noise. Pulsed eddy current testing signals of carbon steel plates with various thicknesses were successfully taken through thin aluminum sheet and simulated insulator. This result implies that it is practically possible to apply pulsed eddy current method to measure carbon steel pipes' wall thinning.

**Keywords:** : pulsed eddy current testing, magnetic field measurement, AMR sensor, wall thinning

### 1.....はじめに

発電プラントや化学プラント, パイプ輸送など工業・インフラ部門において多くの配管が使用されており, その減肉現象はこれらプラントの運用・管理において重要な課題の一つである<sup>1)</sup>。通常, このような配管は炭素鋼系材料で作られることが多く, その外面は保温材で覆われ, 更に保温材の外側は外装板金で保護されている。保温材の厚さは配管の口径及び保温要求によって, 数十mmから数百mmの範囲であり, 外装板金はほぼ1mm以下の薄板である。配管肉厚のモニタリング及び定期的な検査・評価は配管減肉がもたらす予期せぬトラブルなどによる経済損失を防ぐために不可欠であり, 保温材と外装板金を外さず, 配管外側から適用できる簡便な検査手法が望まれている。

渦電流試験法は非接触かつ高速で金属構造物を検査可能であり, 保温材と外装板金を外さずに検査できる可能性を有しており, 配管減肉検査の有効な候補の一つとして研究されている。筆者らは, パルス渦電流試験法の i) 周波数帯域幅が広い, ii) 強い励磁が可能, iii) 配管肉厚方向各層の情報が時間に伴って変化する信号に現れる などの特徴<sup>2) - 5)</sup>に注目して, パルス渦電流試験法による保温材付

き配管の減肉検査・評価法を研究開発している。

昨年度は, パルス渦電流試験法による多層構造の板厚評価の数値解析解を導出して, シミュレーションを用いてパルス渦電流試験法による保温材付き炭素鋼配管の肉厚評価の基礎検討を行うことにより, その実現可能性及び評価用パラメータを検討した<sup>6) - 8)</sup>。その結果

- 励磁電流が遮断された直後, 渦電流は外装板金に集中しており, この時点のパルス渦電流試験信号は外装板金の特性(電磁気特性や厚さ)に深く関係している。
- 励磁電流が遮断されて一定時間が経過後, 渦電流は配管に浸透しており, パルス渦電流試験信号はほぼ配管の特性(電磁気特性や厚さ)のみに左右される。
- 対数スケールのパルス渦電流試験信号はほぼ経過時間の線形関数である。
- 同一の肉厚の配管における渦電流試験信号の減衰率はほぼ一定であり, また, 配管の肉厚が薄いほど減衰率は大きい。
- 事前に減衰率と配管肉厚の関係を表すマスターカーブを作れば, 同じ条件で測定したパルス渦電流試験信号から配管肉厚を推定可能と考えら

れる。

以上のシミュレーション結果を踏まえ、今年度は、パルス渦電流試験法による保温材付き配管の肉厚評価を行うための測定装置を試作し、実測可能性を検討した。

## 2.....パルス渦電流試験装置の作製

パルス渦電流試験システムを Fig. 1 に示す。このシステムは三つの部分（励磁部，検出部，データ収録部）で構成される。

### 2.1 励磁部

励磁部は励磁コイルに印加するパルス電流を発生部と試験体に渦電流を誘導する励磁コイルで構成される。

今回の実験は実験室内での検討とし、NF社のファンクションジェネレータWF1946を用いてパルス信号を発生させ、このパルス信号をNF社製のバイポーラ電源（Bipolar DC Power Supply）BP4610で増幅することによって励磁用パルス電流を発生させた。パルスの周期、デューティ比などはWF1946内のプログラムで制御可能であり、また、BP4610は電流を10Aまで増幅可能である。

増幅されたパルス電流は励磁コイルに印加され、被検体に渦電流を誘導する。理想的な励磁コイルは、強磁界を作れる一方でフットプリントは小さく、コイルインダクタンスも小さい。このような理想的な励磁コイルを得るために、シミュレーションは欠かせない手段である。Fig. 2において‘Inner’と示し

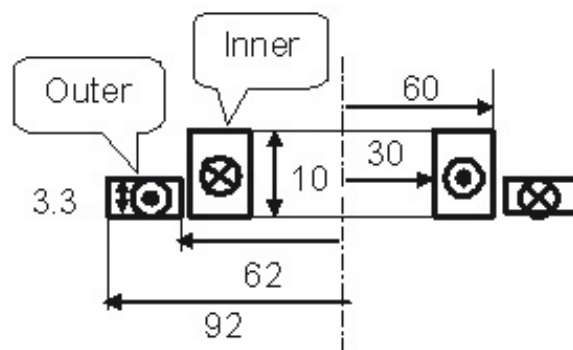


Fig. 2 Double-coil excitation coil.

たコイル（内径60mm，外径120mm，厚さ10mmのリング状コイル）に周波数10Hz，300ATの正弦波電流を流した場合，0.5mm厚のアルミ板（導電率38MS/m，比透磁率1）と39.5mm厚の保温材（導電率0，比透磁率1）で覆われた10mm厚の炭素鋼板（導電率4.3MS/m，比透磁率500）の厚さ方向断面において渦電流分布を Fig. 3 (a) に示す。炭素鋼板表面の渦電流密度は、励磁コイル外周の真下付近で最大となり、その振幅値はおよそ14160A/m<sup>2</sup>である。表面渦電流密度が最大渦電流密度の30%以上である領域をフットプリント領域と設定した場合、コイル‘Inner’のフットプリント半径はおよそ156mmである。

次に、コイル‘Inner’の外側に、コイル‘Inner’と同心のコイル‘Outer’（内径124mm，外径184mm，厚さ3.3mm）を設置して、‘Inner’と逆向



(a) eddy current induced by single coil.



(b) eddy current induced by double-coil.

Fig. 3 Eddy current distribution on the cross section of a carbon steel plate.

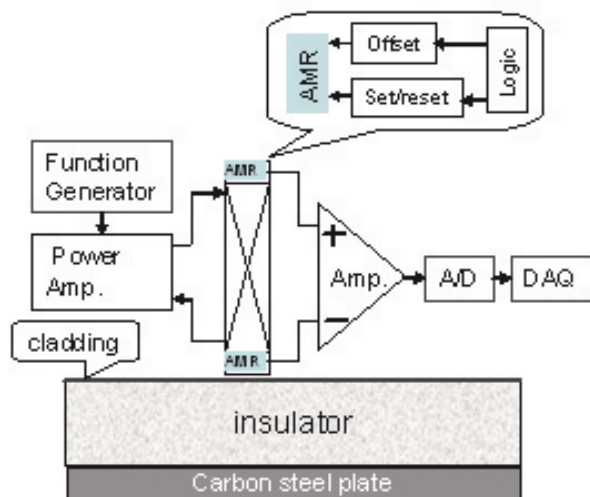


Fig. 1 Pulsed eddy current testing system.



きの99ATの電流を流す(コイル‘Inner’と‘Outer’を合わせて‘Double-coil’励磁コイルと呼ぶことにする)。この‘Double-coil’励磁コイルを用いた場合、同上の炭素鋼板の厚さ断面の渦電流分布をFig. 3 (b)に示す。この場合、炭素鋼板の表面において渦電流密度の最大値はコイル‘Inner’のみを用いた場合の約半分の7972A/m<sup>2</sup>であり、フットプリントの半径もコイル‘Inner’のみで励磁する場合の約半分の82mmに縮小した。即ち、Double-coilを用いることによって、印加磁界、または渦電流が弱くなる一方、フットプリントは小さくなる。

シミュレーション解析の結果を基に、より適切な励磁コイル構成を選ぶことにより必要な計測信号レベルと空間分解能を得ることができる。

## 2.2 磁界検出部

先行研究<sup>6)~8)</sup>で示されたように、励磁電流が遮断された後に外装板金と配管壁に減衰していく渦電流が生じた磁場信号はほぼ直流であり、また、その強度は極めて小さい。さらに、配管の厚さを求めるために使用する信号の減衰率は、対数スケールにした信号値のある一定時間内の変化量により定義するため、一定範囲内の磁界信号を測定する必要がある<sup>6)~8)</sup>。このような磁界信号の特徴と測定の要求に応じて、適切な磁界センサを用いて測定回路を構築した。

渦電流試験で磁界検出に通常使用されるサーチコイルの出力信号(電圧)はコイルを貫く磁束量の時間変化率に比例するため、低周波信号の検出感度は低く、低周波で減衰していくパルス渦電流信号の測定には適用しにくいと考えられる。超伝導量子干渉素子(SQUID: Superconducting Quantum Interference Device)、巨大磁気抵抗素子(GMR: Giant Magneto-Resistance)、異方性磁気抵抗素子(AMR: Anisotropic Magneto-Resistive)など、数

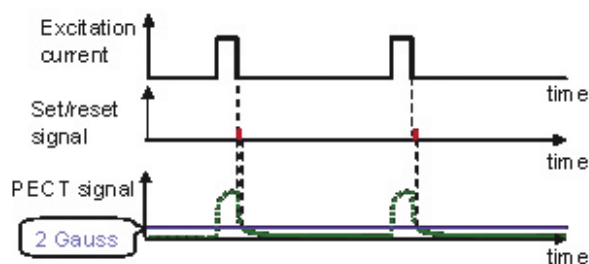


Fig. 4 Timing of excitation current, set/reset signal, and the measured PECT signal.

種類の低周波及び高感度磁気センサの特徴及びコストパフォーマンスを総合的に考慮した結果、Honeywell社製AMRセンサHMC1001をパルス渦電流試験法による配管肉厚測定の磁界検出素子として選んだ。このAMRセンサの磁界線形応答範囲は-2~+2Gaussであり、磁気分解能は約27 $\mu$ Gauss、検出感度は3.2mV/V/Gauss、適用周波数は直流から5MHzまでである<sup>9)</sup>。

減衰していく渦電流が生じる磁界をHMC1001により検出するために補助回路を加えており、Fig. 1にこれらのセット/リセット回路、オフセット回路、ロジック回路及び増幅回路を明示している。AMRセンサの一つの特徴は、強磁界がかけられた後に検出感度が低下することである。低下したAMRセンサの測定感度を回復させるために、チップ内にセット/リセット・ストラップが設けられている。セット/リセット・ストラップにセット/リセット電流を流すことによってAMRセンサの磁界測定感度を回復させることができる。Fig. 1に示す試験構成でパルス渦電流試験を行う場合、励磁コイルに流れるパルス電流が生じる強い励磁磁場が励磁コイルの中心軸上に配置したAMRセンサの測定感度を低下させることは十分ありえる。パルス励磁電流が遮断された直後にAMRセンサのセット/リセット・ストラップにセット/リセット電流を流すことによって、センサの感度を回復させる。励磁パルス及びセット/リセットをかけるタイミングは補助ロジック回路でコントロールされる。この流れをFig.4に示す。ちなみに、今回の実験で計測したのはセット/リセットをかけた後の2Gauss以下の減衰信号である。

センサは常に地磁気(約0.5Gauss)や測定箇所付近の磁性材料などにより生じる外部オフセットノイズの影響を受けており、この環境の中で数十 $\mu$ Gaussレベルの微小磁界を測定するのは困難である。このようなオフセットノイズは、AMRセンサのチップ内のオフセット・ストラップを利用して除去する。オフセット補助回路はオフセット・ストラップを機能するための回路である。回路を動作させることによって、外部オフセットノイズが除去され、磁気遮蔽のない環境で数十 $\mu$ Gaussレベルの磁界を測定可能にする。

地磁気と同じように、電源による50Hz(または

60Hz)のハムノイズは環境中常に存在する。低磁界測定において、これはやや大きなノイズである。この対策として考えたのは差分によるハムノイズ除去である。励磁コイルの中心軸の上下に2個のAMRセンサを配置して、この2個のセンサが検知した信号の差分をとることによってハムノイズを除去する。

また、SN比を高めるため、センサ付近にプリアンプを設置して、センサとプリアンプを一枚の基板に集約させた。励磁コイルの中心軸の上下にAMRセンサ基板を一枚ずつ配置した。

### 2.3 データ収集

2個のセンサの差動信号を増幅させ、National Instrument社のNI PXI-5922でA/D変換し、NI-Scopeソフトフロントパネルで記録した。

### 2.4 信号処理によるノイズ低減

磁気遮蔽ルームを必要せず、極めて小さく且つ変化する磁界を測定するために、上記のさまざまなノイズ低減策をとった。ただし、場合によって、ノイズはまだ‘大きく’残る可能性がある。上記のハードウェアにおける工夫以外に、ソフトウェアから、即ち、信号処理によるノイズ軽減も行った。

Fig. 5の青い線が示したのは収集した差分後の信号  $sr(t)$  である。信号に50Hzの約0.001V変動幅のノイズが乗っている。こちらはヒルベルト変換(Hilbert Transform)と相互相関法を用いてこのノイズを低減する。

信号  $sr(t)$  が実数をとるものとし、そのヒルベルト変換  $s(t)$  を解析信号とする。 $s(t)$  は実数部  $sr$  (元信号) と虚数部  $si$  を持っており、 $si$  は元信号  $sr$

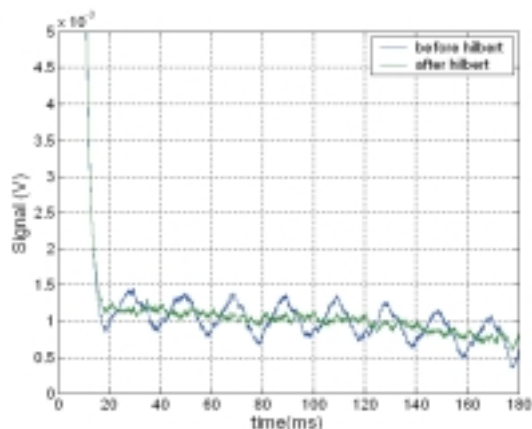


Fig. 5 Signals before and after noise reduction.

を90°位相シフトしたものである。

$$s(t) = H(sr) = sr(t) + i \cdot si(t) \quad (1)$$

ここで、 $i$ は虚数単位である。

また、50Hzの参考信号は  $r(t) = e^{i2\pi ft}$  で計算する。ここで、周波数  $f$ は50である。 $s(t)$  と50Hzの参考信号の相互相関は式(2)で求め、ノイズを除去した信号は式(3)で計算する。ここで  $\bar{r}(t)$  は  $r(t)$  の複素共役、 $E$ は平均することを示す。

$$a = E(s(t) \cdot \bar{r}(t)) \quad (2)$$

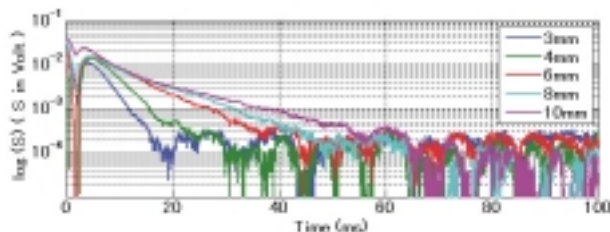
$$\hat{s} = \text{Re}(s(t) - a \cdot r(t)) \quad (3)$$

Fig. 5に緑線で示したのは、以上の方法でノイズ削減した信号  $\hat{s}(t)$  である。ヒルベルト変換と相互相関法によって、50Hzのノイズを低減できた。

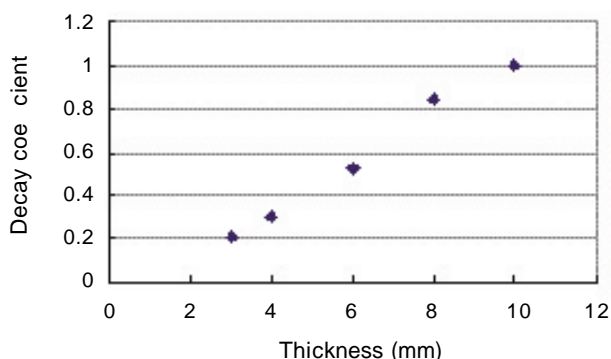
### 3.....パルス渦電流法による炭素鋼板厚測定

本研究の第一段階では、大きさ100 mm × 100 mm、板厚3 mm、4 mm、6 mm、8 mm、10 mmのSB410鋼板によって異なる配管肉厚を模擬して測定実験を行った。使用した励磁コイルの内外径及び厚さはそれぞれ24 mm、64 mmと15 mm、巻き数は273回である。励磁電流は6.2 × 273 AT (Ampere-Turn)、励磁パルス周期は200 ms、デューティ比は10%である。保温材はアクリルブロック、外装板金は0.5 mm厚のアルミ板で模擬した。Fig. 6(a)は80 mm厚のアクリルブロックを用いた場合で、各板厚のSB410鋼板に対する対数スケールの測定信号である。横軸のtime=0は励磁電流を遮断した時間とした。励磁電流の遮断後、信号が急激に減衰する。電流が遮断されて一定時間が経過後の減衰していく信号の対数値  $\log(S)$ はほぼ時間に関する線形関数である。この信号から計算された減衰係数と板厚の関係をFig.6(b)に示す。なお、これらの値は全て10 mm厚のSB410鋼板の減衰係数を1として校正した。このグラフを用いて、同じ測定条件において得られた測定信号から同じ材質の鋼板の肉厚が推定可能と考えられる。

ここでは、高感度AMRセンサを用いて、パルス渦電流試験法による保温材付炭素鋼配管の減肉測定の基礎検討を行った。優れた低周波帯域の磁界検出能力及びさまざまな高度な機能を持つAMRセンサはパルス渦電流試験法による配管肉厚測定に適する



a) Logarithmic scaled pulsed eddy current testing signal of carbon steel plates, covered by 0.5mm Aluminum thin plate, the simulated insulator is 80 mm in thickness.



b) Decay coefficient of carbon steel plates as function of plate thickness, obtained from the signal in (a), calibrated by the coefficient of 10 mm thick plate.

Fig. 6 Pulsed eddy current testing signal of carbon steel plates, measured by a system using AMR sensors.

と確認できた。

## 6.....終わりに

高磁気分解能のAMRセンサを用いて、パルス渦電流試験法の実験装置を構築し、パルス渦電流試験法による保温材付き炭素鋼の板厚評価の実現可能性を確認できた。これからは、作業現場に適用できる装置を作製する予定である。

## 参考文献

- 1) 経済産業省原子力安全・保安院：高経年化対策強化基盤整備事業 - 配管減肉，  
[http://nisapl.mhl.go.jp/html/04\\_research/04\\_09\\_pipe.html](http://nisapl.mhl.go.jp/html/04_research/04_09_pipe.html)
- 2) C. Mulligan, C. Lee, Y. Danon, Characterization of magnetron Sputtered Coatings by Pulsed Eddy Current Techniques, Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 24, pp. 1721-1728, (2005)
- 3) M. A. Robert, R. Scottini, Pulsed Eddy Current in Corrosion Detection, NDT-net, Vol 7, No. 10, October 2002
- 4) R. A. Smith, D. Edgar, Progress towards a larger-area Transient Eddy-Current Solution for Second-Layer Wing Corrosion, Joint FAA/DoD/NASA Aging Aircraft Conference
- 5) R. A. Smith, Capabilities and limitations of transient eddy-currents in multi-layered aircraft skins, Proc NDT2000, Brit. INST NDT, pp.211-216 (2000)
- 6) 程衛英, 古村一朗, 渦電流探傷法による配管減肉評価のシミュレーション, 保全学会第7回講演会論文集, pp.308 - 313, (2010)
- 7) W. Cheng, I. Komura, Simulation for the Assessment of Wall Thinning Using Eddy Current Method, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 30, pp. 372-379, 2010
- 8) 程衛英, 渦電流試験法による減肉評価における電磁気解析技術の活用, 非破壊検査, 60(10), 579-584, (2011)
- 9) Honeywell, 1- and 2-Axis Magnetic Sensors, [http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Missiles-Munitions/HMC\\_1001-1002-1021-1022\\_Data\\_Sheet.pdf](http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/Missiles-Munitions/HMC_1001-1002-1021-1022_Data_Sheet.pdf), accessed on Sep. 12, 2011



程 衛英



山本敏弘

# 高温定点継続監視3D-SAFT UT技術の開発 (高温用マトリックスアレイ探触子の試作)

Development of high temperature matrix array probe for 3D-SAFT UT technique  
which is applied to continuous monitoring

溶接・非破壊検査技術センター 古村一朗、古川 敬

Stress Corrosion Cracking(SCC) phenomena in the nickel alloy weld have been increased in Japan and in worldwide. It is well known that the detection and depth sizing of SCC by UT is difficult in this portion. New UT technique which uses three dimensional synthetic aperture focusing technique (3D-SAFT) has been developed and applied to Ni alloy dissimilar metal weld (DMW) which had EDM notches and SCCs. It was verified that the 3D-SAFT UT technique has the superior capability about the imaging of the shape of SCC in particular region without probe scanning. Therefore, such capability has the possibility for continuous monitoring of SCC's extension at the fixed position on the component in high temperature environment.

In order to utilize such capability of 3D-SAFT UT, the fundamental development of high temperature matrix array probe and its experiment and evaluation have been carried out.

**Keywords:** : Ni alloy weld, SCC, Ultrasonic examination, 3D-SAFT UT, Shape of SCC, Imaging, Continuous monitoring, High temperature, Matrix array probe

## 1.....緒 言

原子力発電プラントにおいて、ニッケル基合金溶接部の損傷事例は増加しており、国内の例を挙げれば、この10年間に、1999年の敦賀1号シュラウドサポートにおけるSCCの発生[1]以降、2008年の大飯3号機原子炉容器出口管台のセーフエンド異材継手の場合[2]等までに、多数のSCCが検出されている。上記の蒸気発生器入口管台や原子炉容器出口管台のセーフエンド異材溶接継手部の場合は、機器の構造上、内面からの検査が出来るが、構造上、外面からの超音波探傷試験の実施が必須である機器もあり、超音波探傷に対する期待は大きい。しかしながら、この部位に発生するSCCの超音波探傷による検出や深さサイジングは、超音波の伝播特性や反射特性に対する組織やSCC破面性状の影響が大きく、大変難しい部位である事は良く知られている。

この部位における超音波探傷特性を改善するために、前報<sup>3),4)</sup>に述べた開口合成信号処理を用いた3

次元超音波探傷技術(3D-SAFT UT)の開発を行い、本手法がNi基合金溶接部における欠陥検出性・深さ測定率・深さサイジング精度に優れた特性を示す事が明らかになった。とりわけ特徴的な特性としては、3D-SAFT UTに用いるマトリックスアレイ探触子がカバーする範囲内においては探触子を機械的走査する事なしにSCCの形状を映像化できる事であり、もしSCCが検出された後に次回定検までのき裂を残した継続運転が必要になった場合に、定点監視技術として活用できる可能性が有る。

本報告では3D-SAFT UT法の原理と、探触子走査をせず得られるSCCの画像化の例を再度紹介するとともに、この特徴を生かし定点継続監視を可能とするために行った高温用マトリックスアレイ探触子の基礎技術開発について述べる。



## 2..... 3D-SAFT UT法の原理と SCCの画像化例

図1に3D-SAFT UT法の原理を示す。マトリクス状に配置した多数の超音波振動子の中から1個の振動子を用いて超音波を送信し、残りの全ての(又は任意の)振動子で欠陥等から反射してくる超音波を受信し、この動作を送信に用いる振動子を、順次、切り替えて行ない、得られた全ての受信信号を用いて開口合成信号処理を行って3次元の探傷画像(欠陥像)を得る。従って、3D-SAFT UT法は欠陥等の反射源を種々の方向から見た事に相当する欠陥像を、探触子を機械的に走査する事なしに得ることができる。更にその信号処理の過程で、欠陥や形状不連続の様に超音波の反射指向性が特定の方向に強い反射源からは、そのままのデータが得られ、溶接部の組織に起因する材料ノイズ源のような超音波の入射・反射方向に関してランダム性の高い反射源からの信号は打ち消しあって目立たなくなり、SN比が向上した探傷画像が得られる事となる。

この様に、探触子の走査なしに得られた探傷画像の例を図2に示す。同図は外径188mm、肉厚29.6mmの安全弁管台試験体に付与された深さ約16mmの軸方向欠陥の探傷画像を示したもので、溶接金属内だけを選択的に進展しているSCCの形状が明瞭に描かれている。この結果より、本手法は定点継続監視に適用できる可能性を有している事が分る。

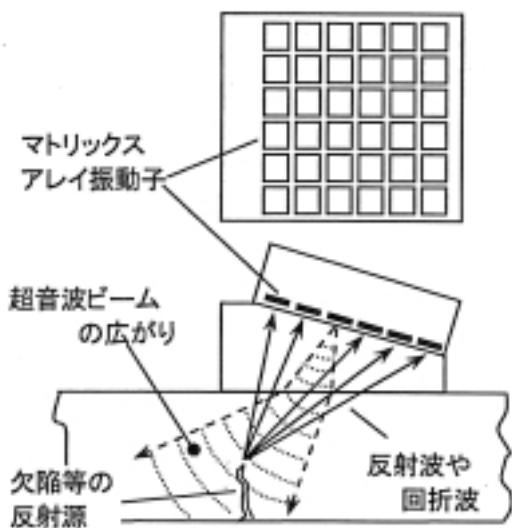


図1 3D-SAFT UT法の原理

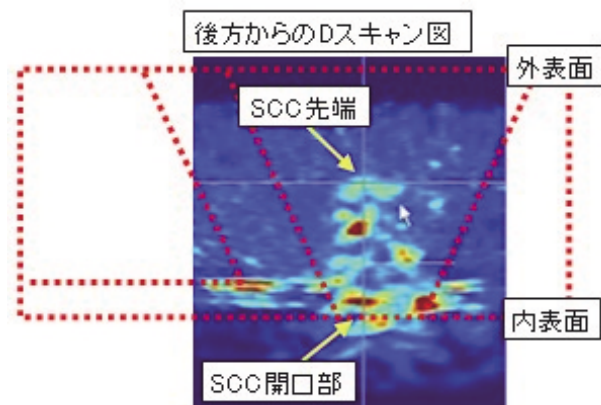


図2 安全弁管台試験体の軸方向SCC探傷結果

## 3..... 定点継続監視のための 高温探傷基礎技術開発

### 3.1 高温用マトリックスアレイ振動子の開発試作

以上に述べたように3D-SAFT UT法は探触子を走査しなくても一定範囲の探傷画像が得られることから、定点継続監視への適用可能性が示された。但し、定点継続監視へ適用する場合は実機プラントの高温環境下で用いることができる高温用マトリックスアレイ探触子が必要となる。その実現性を見極めるために高温用マトリックスアレイ探触子の開発試作を行って、その特性を評価した。

まず、高温用マトリックスアレイ振動子の試作を、1振動子から4振動子、64振動子へと順次増やして行い、振動子の製造方法の検証を行った。図3(a)および(b)は実施した約8種類の製造方法(接合方法)の中から2例を示すもので、同図(a)は遅延材に振動子を接着した後に振動子と遅延材をカッティングする方法であり、同図(b)は目的とする寸法の遅延材に振動子を接着後にそれらを集合させて製作する方式である。この様にして製作した4振動子の探触子を用い図4に示すようにシミュレーション解析と光弾

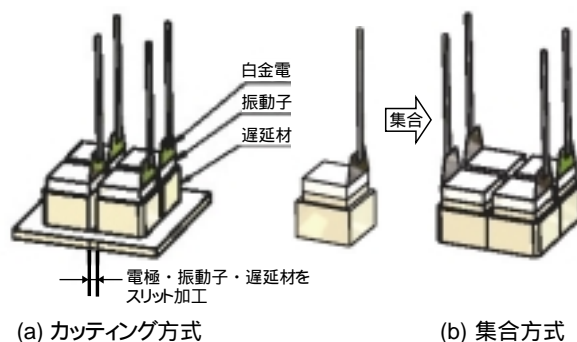
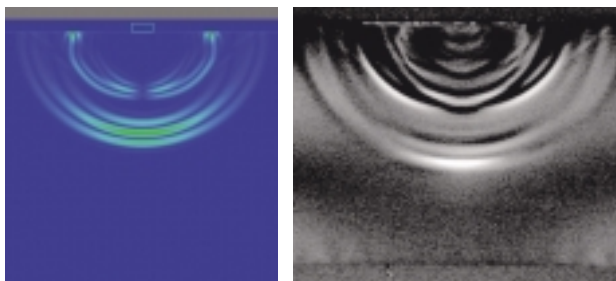
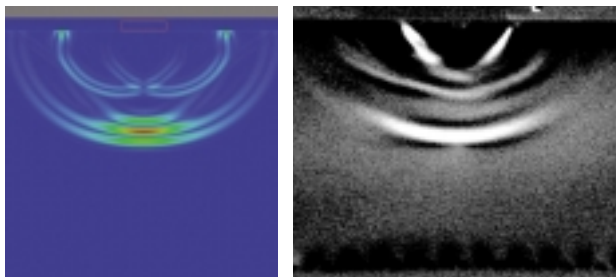


図3 高温用マトリックスアレイ探触子の製作方法



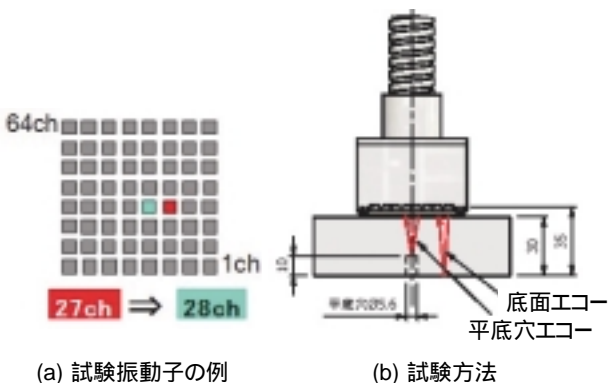
(a) 常温用 2.4×2.4mm 振動子の音場



(b) 高温用 5×5mm 振動子の音場

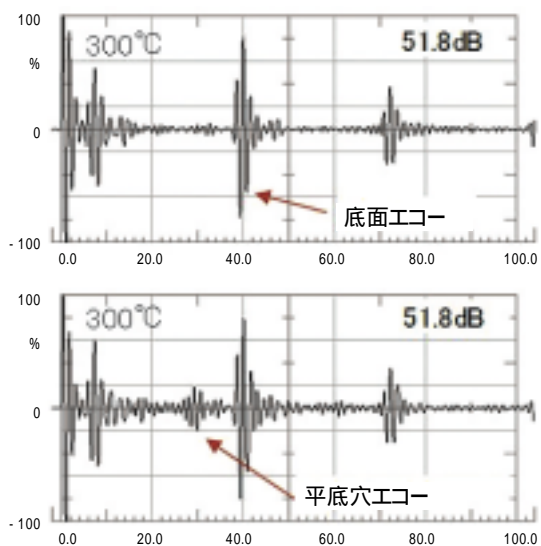
図4 マトリックスアレイ探触子の音場確認

性可視化試験により一振動子の音場をもとめ、開口合成法の適用に必要な球面波が得られているか確認



(a) 試験振動子の例

(b) 試験方法



(b) 300 °C における探傷波形

図5 高温用 64ch マトリックスアレイ振動子の波形確認

しつつ開発試作を進めた。その結果、最終的に 5mm 振動子をカッティング方式で製作する事とし、 $8 \times 8 = 64\text{ch}$ のマトリクスアレイ探触子を製作する事とした。なお、振動子は厚さ 1.48mm、公称周波数 2MHz のニオブ酸リチウム振動子である。

この様にして製造方法の試行を繰り返した後に製作した高温用マトリクスアレイ探触子の各振動子の探傷波形を 300 °C の電気炉中においた平底穴試験

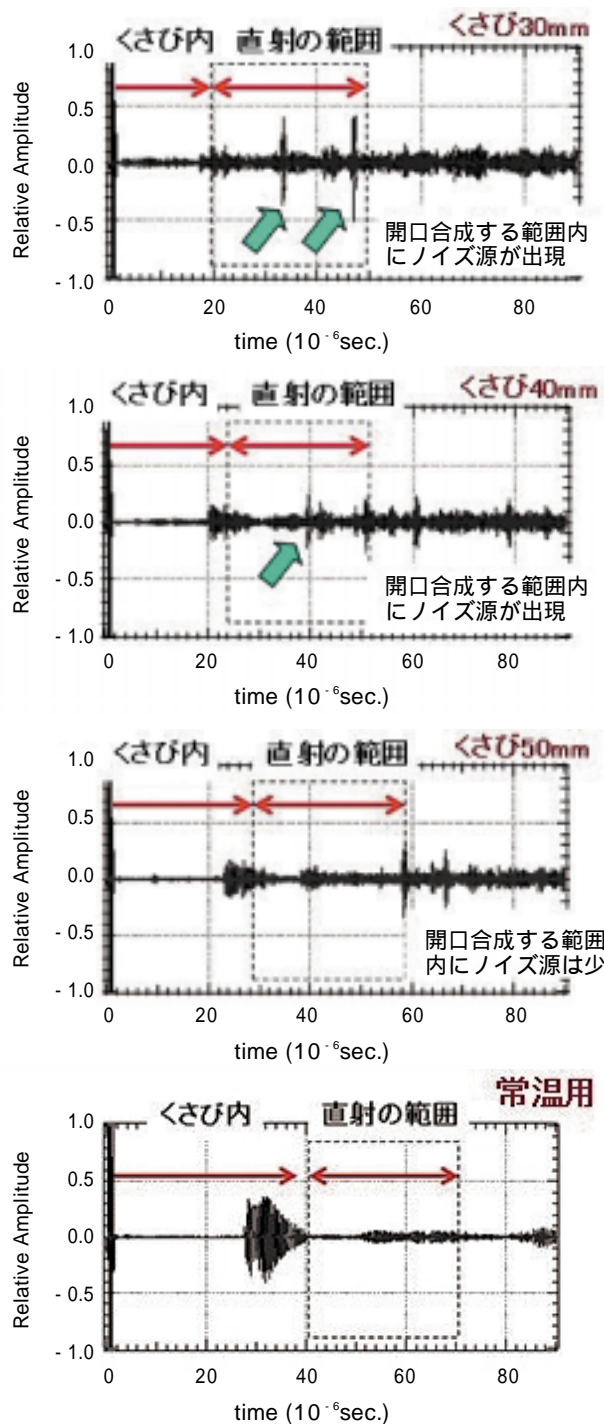


図6 超音波伝播解析による高温用金属シューの長さの検討 (a) ~ (c) : 高温用金属シュー (d) : 常温用樹脂製シュー

片を用いて確認した。図5はその一例を示しており、平底穴が無い部分と平底穴が真下に有る部分の違いから平底穴が良好に検出できることが分かる。

### 3.2 高温マトリックスアレイ探触子用シューの検討

次に、高温用斜角マトリックスアレイ探触子を構成するシューの最適な長さの検討を超音波伝播シミュレーション解析により行った。なお、振動子の接合安定性等の観点から今回はチタンをシュー材として用いた。図6は金属シューの長さを30mm, 40mm, 50mmと変化させた場合、およびに常温用マトリックスアレイ探触子の樹脂製シューの場合に、アレイの中央の振動子で得られる探傷波形を求めたもので、欠陥に対して直射の状態の探傷で得られる探傷画像の範囲内にノイズエコーが出現しないための金属シューの長さは50mm以上であることが分かる。

### 3.3 高温マトリックスアレイ探触子の試作と評価

以上の検討により定めた諸寸法を用いて、45°斜角探傷用の高温用マトリックスアレイ探触子の試作を行い、探傷特性の確認を行った。図7は8×8=64chの振動子とチタン製金属シューを接合し高温用ケーブルを取り付けた構造試作探触子による横穴試

験片の探傷状況（常温）とBスキャン断面図を示す。一部にシュー内反射が原因と思われる妨害エコーが有るものの、横穴は正しく画像化されている事が分かる。

また図8は高温用ケーブルをフレキシブル金属ケースに収めた300°の高温雰囲気中で使用可能な45°斜角マトリックスアレイ探触子を用いて、SCCを付与した試験片を200°に加熱した状態で探傷している状況と探傷結果のBスキャン断面図を示すもので、SCCが画像化されている事が分かる。但し、欠陥画像の精度や分解能に関しては常温探触子ほどの結果が得られておらず、今後の改良課題である。

## 4..... まとめ

3D-SAFT UT法は、探触子を機械的に走査しなくても一定範囲の探傷画像（欠陥像）が得られることから、原理的には定点継続監視へ適用できる可能性がある事が示された。

この観点から高温連続監視に用いる3D-SAFT UT用のマトリックスアレイ探触子の開発試作を行い、300°までの高温環境下でSCCの継続監視の可能性が得られるとともに、課題の抽出を行う事ができた。

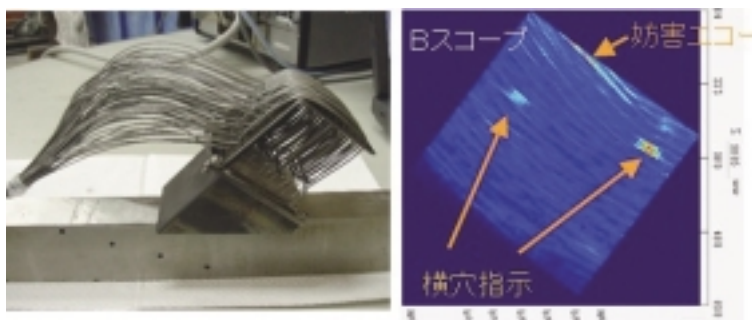


図7 振動子構造試作高温探触子による横穴の探傷結果（常温）

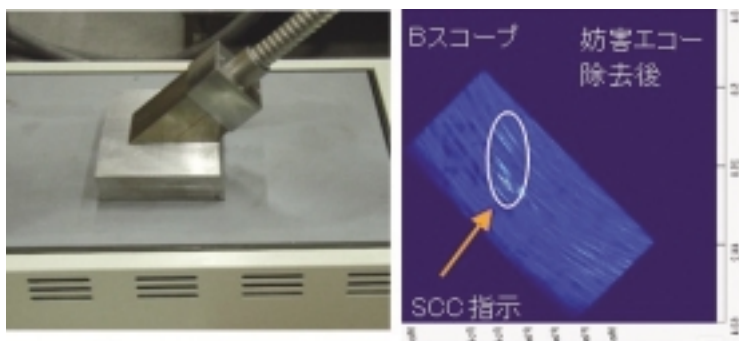


図8 試作した定点継続監視用 高温用マトリックスアレイ探触子によるSCC付与試験体の探傷結果（200°）



なお、本研究は経済産業省 原子力・安全保安院から(株)原子力安全システム研究所が委託された「経年劣化事象の進展予測・評価手法の確立等」の一環として実施したものである。

#### 参考文献

- 1) 日本原子力発電株式会社プレスリリース：“敦賀発電所1号機のシュラウドサポート部損傷の調査状況について”，平成11年12月10日
- 2) 関西電力株式会社プレスリリース：“大飯発電所3号機の定期検査状況について（原子炉容器Aグループ出口管台溶接部で確認された傷について）”，平成20年5月26日
- 3) 古村一朗, 古川 敬：“開口合成3次元超音波探傷法によるNi基合金溶接部SCCの探傷特性”，発電設備技術検査協会 技術レビュー，Vol. 6, pp.13-19 (2010)
- 4) 古村一朗, 古川敬：“開口合成3次元超音波探傷法によるNi基合金溶接部SCCの探傷特性”，平成23年度 火力原子力発電大会論文集，pp.141-149 (2011) [CD-ROM]



古村一朗



古川 敬



# ショットピーニングが施された異材溶接継手における 圧縮残留応力の持続性

Sustainability of compressive residual stress in dissimilar welded joints by shot peening

溶接・非破壊検査技術センター 西川 聡  
日本原子力研究開発機構 菅蒲敬久  
新潟大学 鈴木賢治

Stress improvement processes are countermeasures against the stress corrosion cracking in nuclear power plant components. It is necessary to confirm whether the compressive residual stress exerted by stress improvement processes can be sustained under operation environment. In order to evaluate the stability of the compressive residual stress during operation conditions of nuclear power plant, residual stress are measured on the surface of the dissimilar welded joints; heated up 593 K, keep 2 hrs, and cooling down to RT, 10 times repeatedly. As the result, it was confirmed that compressive residual stress was sustained on the surface of the dissimilar weld of austenite stainless steel (SUS316L) and nickel base alloy (NCF600 and alloy82) under thermal cycles.

**Keywords:** Sustainability of compressive residual stress, Shot peening, Thermal cycle, Dissimilar welded joint, Material property

## 1.....緒 言

応力腐食割れの発生を防止するため、原子炉炉内構造物ではウォータジェットピーニング法、レーザーショットピーニング法、およびショットピーニング法のような応力改善工法により、表面に圧縮残留応力を付与する場合がある。このため、運転温度に長期間保持された場合や、起動・停止に伴う熱サイクルを受けた場合に応力腐食割れの発生を防止するのに重要な圧縮残留応力が持続するか評価する必要がある。これまでに、応力改善工法で付与された圧縮残留応力は、運転温度以上の高温に長時間保持しても持続することが報告されている<sup>1)~6)</sup>。しかし、熱サイクルが繰返し付与されたときの圧縮残留応力の持続性については、これまでにほとんど検討されていない。実機は異材溶接継手が存在し、たとえば母材がオーステナイト系ステンレス鋼と低合金鋼、溶接金属にニッケル基合金を用いる箇所がある。このような継手では、昇温に伴う線膨張係数の違いで異材境界部に熱ひずみが繰返し負荷されるため、圧縮

残留応力の緩和が加速される可能性がある。そこで本研究では、ショットピーニングを施した実機溶接部を模擬した異材溶接試験体を製作し、実機運転温度の熱サイクルを付与して圧縮残留応力の持続性を調査した。

## 2.....評価試験体の製作と熱サイクル付与

母材がNCF600とSUS316L、溶接金属が82合金(YNiCr-3)から成る板厚25 mm、幅192 mm、長さ200 mmの溶接継手をTIG溶接で製作した。溶接条件は、電流100~200 A、電圧11 V、溶接速度1~1.5 mm/s、ワイヤ送給量0~0.14 g/sとした。溶接継手の余盛と初層部を研削して板厚を20 mmにした後、余盛研削面の機械加工層を電解研磨により除去し、溶接部を中心に幅65 mmの領域にTable 1に示す条件でショットピーニングを施した。Fig. 1にショットピーニングを施した試験体の外観写真を示す。そして、Fig. 1の試験体をオートクレーブ中で圧力12 MPa、溶存酸素濃度2ppb以下の脱酸素高圧純水中において、昇温・冷却速度0.015 /s以下、

Table 1 ショットピーニングの施工条件

カットワイヤ寸法	0.3 mm × 0.3mm
カットワイヤ材質	SUS304 (Hv500)
入射角度	90°
ショット時間 (65 mm × 200mm)	160s
ノズル径	7 mm
ガス圧力	5 kg/cm <sup>2</sup>

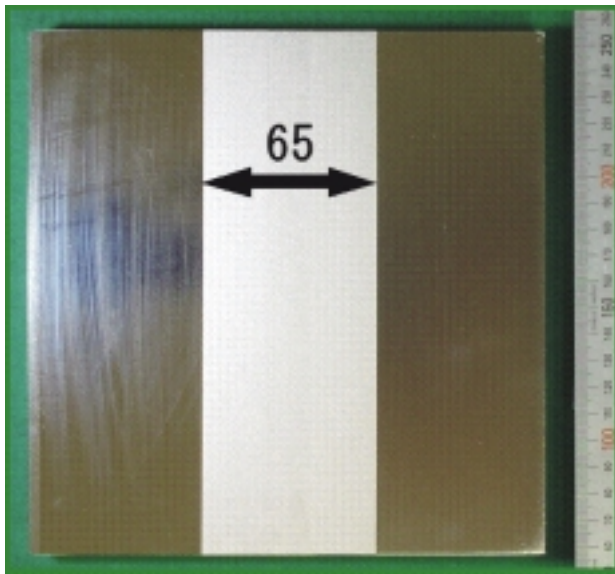


Fig.1 ショットピーニング後の試験体の外観写真

最高温度 320 で 2 hrs 保持の熱サイクルを 10 回付与した。

### 3.....残留応力測定

Table 2 に X 線回折法による残留応力測定条件を示す。Fig. 2 に示す位置の表面残留応力を測定した。また、ショットピーニング後とショットピーニング後に熱サイクルを 1 回付与した試験体について、Fig. 3 に示す大型放射光施設 SPring-8 の BL22XU ビームラインを用いて、Table 3 に示す条件で侵入深さ一定法により表面から深さ 30 μ m までの平均残留応力の詳細な分布測定を行った。

### 4.....熱サイクル付与による圧縮残留応力の持続性

Fig. 4 に溶接線方向の残留応力を示す。ショット

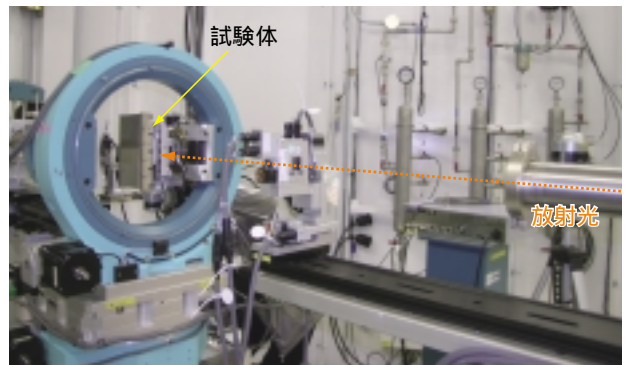


Fig.3 SPring-8 の BL22XU ビームラインの残留応力測定状況

Table 2 X 線回折法による表面残留応力測定条件

材料	SUS316L	82 合金	82 合金
特性X線 / フィルタ	Cr-K / V	Cr-K / V	Cr-K
回折面	Fe-, 220	Ni, 220	Ni, 311
回折角 (2θ)	128.4°	130.2°	153.6°
管電圧 / 管電流	40kV / 30mA		
ビームサイズ	0.5 or 2.0 mm		

Table 3 BL22XU ビームラインの残留応力測定条件

回折面	420
波長	0.1764
ビームサイズ	1.0 × 0.2 mm <sup>2</sup>

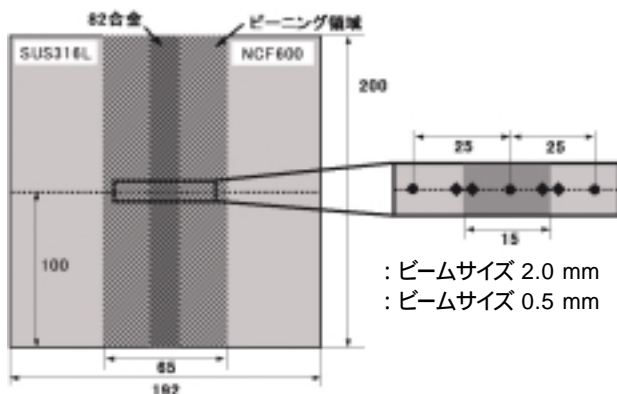


Fig.2 X 線回折法による残留応力測定位置

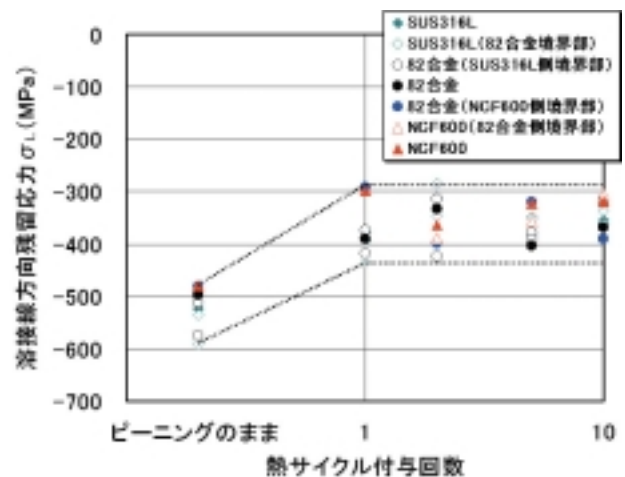


Fig.4 熱サイクル付与による溶接線方向残留応力の変化

ピーニング後の残留応力は-480 ~ -591 MPaで、熱サイクルを1回付与すると150 ~ 250 MPa程度緩和を生じるが、その後は熱サイクルを10回まで付与しても大きな変化は見られず、圧縮残留応力が持続した。Fig. 5に溶接線直交方向の残留応力を示す。Fig. 4に示した溶接線方向残留応力と同様に1回の熱サイクル付与で圧縮残留応力は緩和するが、その後10回まで大きな変化は見られなかった。したがって、1回目の熱サイクル付与で圧縮残留応力は熱的に安定になり、その後、同様の熱サイクルが複数回付与されても圧縮残留応力に大きな変化は生じないものと考えられる。1回目の熱サイクル付与で圧縮残留応力が大きく変化することから、ショットピーニング後とショットピーニング後に熱サイクルを1回付与した溶接部について、SPring-8のビームラインを用いて残留応力分布の詳細を把握した。Fig. 6に溶接線

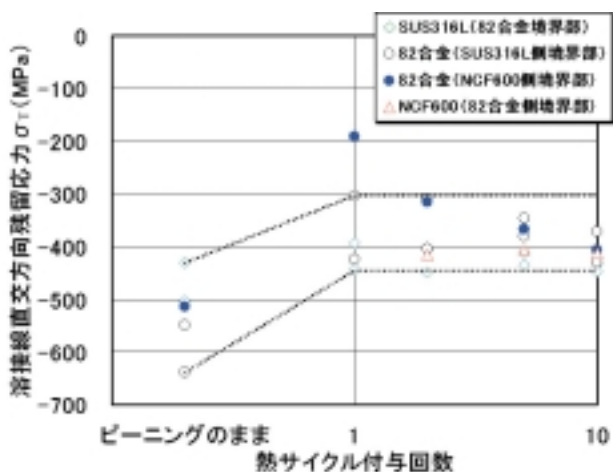


Fig.5 熱サイクル付与による溶接線直交方向残留応力の変化

方向の残留応力分布を、Fig. 7に溶接線直交方向の分布を示す。Fig. 4と5の測定値に比べて圧縮残留応力が高くなる傾向が見られ、これは表面よりも内部に高い圧縮残留応力が存在するためと考えられる。熱サイクル付与後も圧縮残留応力は持続するが、熱サイクルの付与により全体的に緩和が生じており、溶接線方向における溶融線から2 ~ 3mm離れた箇所では圧縮残留応力の低下が特に大きくなる傾向が見られた。ピーニングのままにおいて、材料や部位ごとに圧縮残留応力値に差があるため、初期の応力値と熱サイクル付与による緩和量との関係を整理した。Fig. 8に熱サイクル1回付与による圧縮残留応力の緩和量を示す。全体的に圧縮残留応力値が大きいほど緩和は大きくなる傾向が見られ、異材境界部近傍ではこの範囲より上になり、圧縮残留応力の緩和が大きくなった。

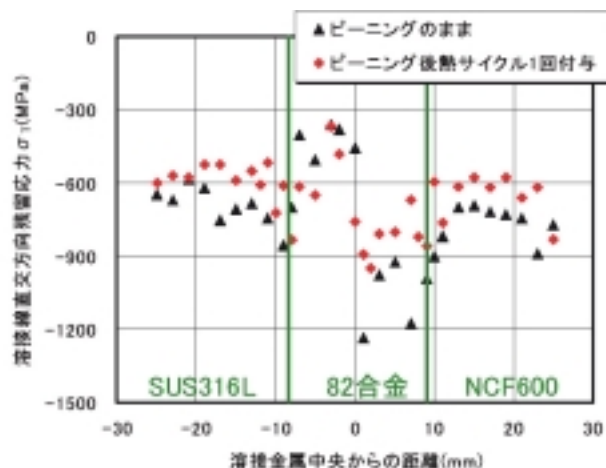


Fig.7 熱サイクル1回付与による溶接線直交方向残留応力の変化

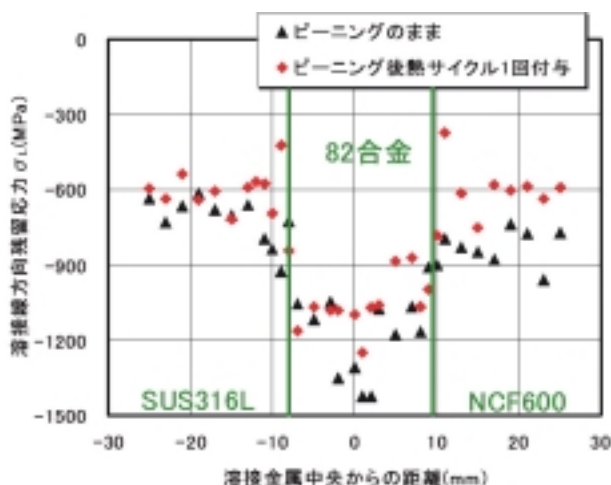


Fig.6 熱サイクル1回付与による溶接線方向残留応力の変化

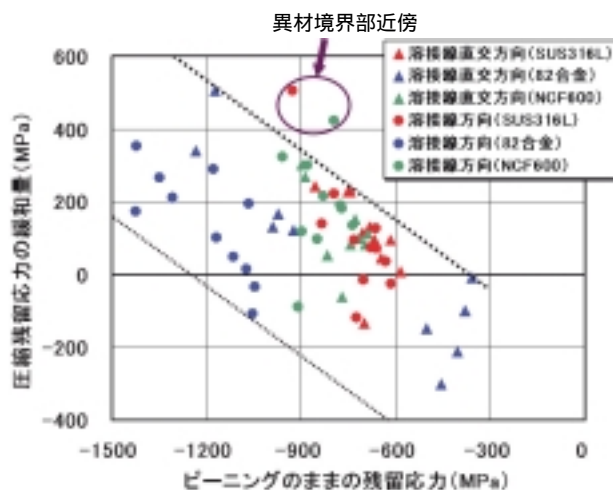


Fig.8 熱サイクル1回付与による圧縮残留応力の緩和量



5.....材料の高温物性値と圧縮残留応力の緩和との関係

実験結果より以下の二点が明らかになった。

1 回目の熱サイクルで圧縮残留応力の緩和が大きく、それ以降は大きな変化が見られない。

異材境界部では圧縮残留応力の緩和が大きくなる。

については、室温から 320 に昇温したときの降伏応力の低下が影響を及ぼすと考えられる。Fig. 9 に各材料の 400 までの 0.2% 耐力を示す。20 と 320 の降伏応力の差は 38 ~ 85 MPa であり、このように 320 で降伏応力が低下することで応力再配分が生じ、圧縮残留応力の緩和が生じたと考えられる。

については、320 における材料の線膨張係数

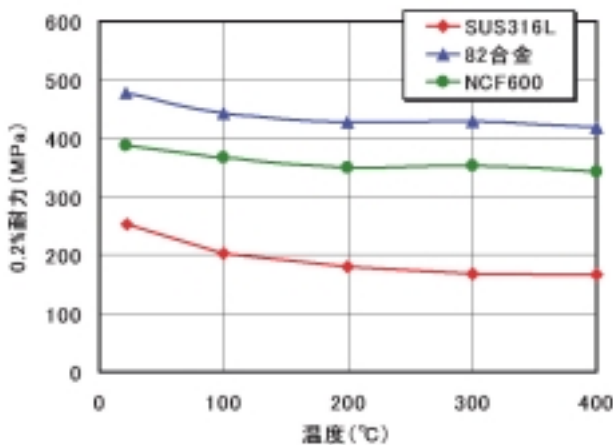


Fig. 9 SUS316L, NCF600, および 82 合金の 0.2% 耐力の変化

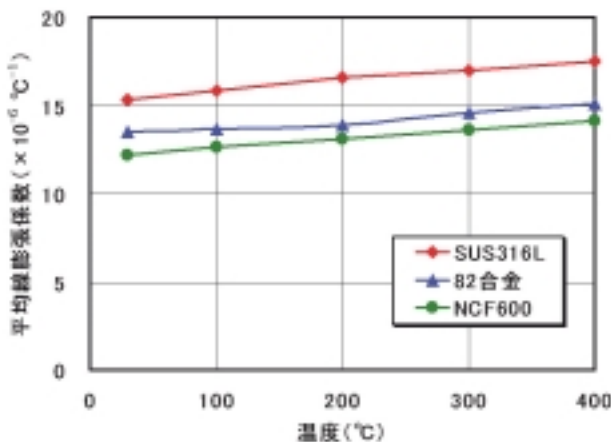


Fig. 10 SUS316L, NCF600, および 82 合金の平均線膨張係数の変化

差が影響を及ぼすと考えられる。Fig. 10 に各材料の平均線膨張係数を示す。異材境界部に生じる熱ひずみは、平均線膨張係数の差から SUS316L と 82 合金は 0.07%, NCF600 と 82 合金は 0.03% である。このように、異材境界部では に伴う応力再配分に加え、熱ひずみが付与されるため圧縮残留応力の緩和が大きくなるものと考えられる。

6.....結 言

- (1) ショットピーニングで付与した圧縮残留応力は、320 の熱サイクルを 10 回付与しても持続した。1 回目の熱サイクル付与で圧縮残留応力は 150 ~ 200 MPa 緩和し、その後 10 回まで大きな変化は見られなかった。
- (2) 異材境界部では圧縮残留応力の緩和が大きくなった。
- (3) 1 回目の熱サイクル付与により圧縮残留応力の緩和が大きくなったこと、および異材境界部で圧縮残留応力の緩和が大きくなるのは、各材料の室温から 320 に昇温したときの降伏応力の低下と線膨張係数差に伴う熱ひずみの発生に起因すると考えられる。

参考文献

- 1) 小畑稔, 久保達也, 依田正樹, 佐伯綾一, 石川達也: レーザピーニングにより形成した圧縮残留応力の緩和特性評価, M & M2009 材料力学カンファレンス CD-ROM 論文集 (2009), 343-344
- 2) 齋藤昇, 波東久光, 吉久保富士夫, 守中廉: WJP による残留応力改善効果の持続性評価, 日本材料学会第 59 期学術講演会講演論文集 (2010), 307-308
- 3) 前口貴治, 堤一也, 豊田真彦, 太田高裕, 岡部武利, 佐藤知伸: ピーニングによる応力腐食割れ防止効果に関する研究, 日本保全学会第 7 回学術講演会要旨集 (2010), 568-571
- 4) 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, 日本保全学会第 4 回学術講演会要旨集 (2007), 276-279
- 5) K. Okimura, T. Ohta, T. Konno, M. Narita and



M. Toyoda “Reliability of Water Jet Peening as Residual Stress Improvement Method for Alloy 600 PWSCC Mitigation”; Proceeding of the 16th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE16, May11-15, 2008, Orlando, Florida, USA.

- 6) 吉村敏彦, 大城戸忍, 榎本邦夫, 守中廉, 平野克彦, 黒澤孝一, 林英策: ウォータージェットピーニングによる原子炉内機器溶接部の残留応力低減, 日本材料学会第38回X線材料強度に関する検討会(2001), 2001年11月30日, 38-44



西川 聡

# 高温高圧用の伝熱管の最小厚さの規定の技術背景について

Short Note on Minimum Thickness Development for High-Pressure, High-Temperature Tubes

規格基準室 吉田和夫  
西日本支部 大石勇一

In ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. I-2008Addenda, PWT-10 and Table PWT-10, maximum allowable working pressure for tubes, were deleted. The convenient design rule, which was applied to tubes in water-tube boilers, was deleted, for ASME Sec. I committee considered that the weld strength reduction factor should be incorporated to the tube design in PG-27.1. And the similar convenient design rule defined in Table HG-315, minimum thickness of ferrous tubes, in Sec. IV had been deleted in 1998Addenda, for the external pressure design was incorporated to tube design in addition to the internal pressure design. The convenient design rule is incorporated in JIS B8201:2005, stationary steel boilers - construction, the rule are applied to many boiler constructions. On the other hand, the design standard originally referred to ASME codes, nevertheless the some rule in the present standard was independently developed. Therefore, whether the deletion of the convenient design rule in ASME codes is incorporated to the design standard or not, the discussion should be carefully carried out based on the design standard development history. In the short note, the relationship between ASME convenient design rule and the JIS standard design rule was studied, and the standard design rule was successfully verified. Finally the supplemented condition for the convenient design rule was discussed, based on the verification.

**Keywords:** : Cylindrical Shell, Tube, Minimum Thickness, Internal Pressure, External Pressure, Ferritic Steels, Design by Rule, Boiler

## 1.....まえがき

ASME ( American Society of Mechanical Engineers ) の Boiler & Pressure Vessel Code Sec. I-2008Addenda<sup>1)</sup> 規格において円筒殻の厚さ計算式に溶接継手強度低減係数 ( Weld Strength Reduction Factor ) が導入された。この溶接継手強度低減係数はSec. I, PG-27.2.2に規定の厚さ計算式中の効率 ( E ) として扱われ、長手溶接部に対してSec. I, PG-26に規定の溶接継手強度低減係数を効率 ( E ) として円筒殻の設計を行うものである。例えば、円筒殻の材料がクリープ強度強化フェライト鋼 ( Creep Strength Enhanced Ferritic Steels ) であって、長手

継手溶接後の溶接後熱処理が  $A_{c1}$  変態点 ( 共析変態の温度 ) 以下の温度である場合には、最高使用温度が 900 deg-F を超える場合には、Sec. I-2007Edition<sup>2)</sup> による設計に比して、その厚さが増大することとなる。この係数の開発は近年の高クロム鋼配管長手溶接部での Type IV き裂による蒸気漏えい事故に鑑みて行われたものであり、我が国における Gr. 122 及び Gr. 91 の損傷事例を踏まえて行われた検討結果<sup>3)</sup> も、この係数の開発の参考にされた。

この溶接継手強度低減係数に関する ASME Sec. I 規格委員会での検討の過程において、水管ボイラ ( Water-tube Boilers ) の伝熱管の最高許容使用圧力 ( Maximum Allowable Working Pressure ) を規定す

るSec. I, PWT-10及びTable PWT-10を同時に見直す必要があるのではないかと云う意見が提出され、溶接継手強度低減係数が考慮されていない伝熱管の最小厚さに係る検討が同時に開始された。その結果、伝熱管の最高許容使用圧力を規定するPWT-10及びTable PWT-10は削除され、伝熱管の厚さ計算式はPG-27.2.1に規定の式に変更された。この変更は2008Addendaで行われ、PWT-10をPG章(Power Boilersに対する総括的な要求事項を規定するSec. IのPG章)に呼び込んでいたPG-27.2.1.1が削除され、PG-27.2.1に規定の外径5 in.以下の伝熱管の厚さ計算式にもPG-26に規定化された溶接継手強度低減係数を反映する変更が行われた。

伝熱管の最高許容使用圧力の規定は、伝熱管の最小厚さに関する規定とうらはらの規定とも云え、その「伝熱管の最小厚さ」に関する事項はJIS B8201:2005「陸用鋼製ボイラ - 構造」にも規定されている。その規定であるJIS B8201:2005の「6.7.3 水管、過熱管、再熱管、エコノマイザ用鋼管などの最小厚さの制限」はJIS B8201:1954の「11.3 煙管、水管等の厚さの最小値」を起源とした規定であると同時に、ASME Boiler & Pressure Vessel Codeを源流とした規定でもある。JIS B8201:1954に規定の「煙管、水管等」とは、煙管、水管、過熱管、節炭器用鋼管とされ、対象は基本的にJIS B8201:2005の6.7.3の対象と同様である。

本小文では、ASME Sec. I規格における伝熱管の最高許容使用圧力の規定の削除に関連して、その規定の技術的背景と具体的な数値規定の計算方法を明らかにした。その上で、この規定他を源流としたJIS B8201の伝熱管の最小厚さに関する現行の規定内容の基本を明らかにし、ASME Sec. I-2008 Addendaで削除された規定に関連する事項をJIS B8201において維持することが適切であるか否か及び維持する場合の適用制限について検討したものである。

## 2.....ASME Sec. IのMAWP規定

### 2.1 ASME Sec. I, Table PWT-10のMAWP

ASME Sec. I-2007 Editionまでに規定されていたTable PWT-10の伝熱管の最高許容使用圧力(MAWP)は、同表の脚注に付されているとおり

PG-27.2.1に規定の圧力計算式((1)式参照)によって計算されたものである。小口径で厚さの薄い伝熱管に対しては0.04 in.の付け代を伝熱管の構造安定のために付して、SA192炭素鋼管の700 deg-Fにおける許容引張応力(12.4 ksi)を用いて計算されたものである。なお、計算結果は10 psiの単位で切り上げられてTable PWT-10に表示されていた。

$$P = S \left[ \frac{2t - 0.01D - 2e}{D - (t - 0.005D - e)} \right] \quad (1)$$

$P$  : 設計圧力 (psi)

$S$  : 許容引張応力 (psi)

$t$  : 厚さ (in.)

$D$  : 外径 (in.)

$e$  : 厚さ係数 ( $e = 0$ )

表1にTable PWT-10の抜粋を示すが、(1)式で構造安定の付け代(0.04 in.)を考慮するか否かで、同表に示すとおり最高許容使用圧力は大きく異なり、付け代を考慮した場合には最高許容使用圧力は小さな値となる(表1の斜数字参照)。

表1 伝熱管のMAWP (Table PWT-10 抜粋)

厚さ (in.)	外径 (in.)						
	1	1¼	1½	1¾	2	2¼	2½
0.095	2140	1900	820	680	580	500	430
0.105	-	2130	1730	1450	1240	610	540
0.120	-	-	2020	1690	1450	1280	1150

(注1) 斜数字には0.04 in. が考慮されている。

(注2) MAWPの単位はpsiである。

(注3) 2007Edition, Table PWT-10 から抜粋

伝熱管に対してTable PWT-10に示すとおり最高許容使用圧力を与える設計方法は、設計条件に対応して伝熱管毎に厚さ計算を行う設計を排して、設計を簡便化するためにASME Sec. Iに導入されたものである。Sec. I-2007 Edition, Table PWT-10の適用対象材料は、SA178 Gr. A, SA-192及びSA-226であるが、ASME Sec. II-2007 Edition<sup>4)</sup>にはSA-226は材料仕様として規定されていない。また、SA-178 Gr. A材料仕様では外径5 in.の伝熱管が製作可能であるが、ASME Sec. II, Part D, Table 1Aの注記で、ASME Sec. IではSA178 Gr. Aの適用可能な最大外径は3.5 in.に制限されている。すなわち、2007Editionに規定されていたTable PWT-10にはASME Sec. IIに規定の材料仕様等の改訂が反映されていない状態となっていた。この事実もSec. I規格委員会でのPWT-10

及び Table PWT-10の見直しの必要性の一部となっていた。

2.2 ASME Sec. I, Table P-2のMAWP

Table PWT-10はSec. Iの設計マージンが5.0から4.0に改正された後の1940 年のASME Sec. I, Table P-2に基づいて修正・作成されたものである。Table P-2は水管ボイラ (Water-tube Boilers) の伝熱管 (過熱器管を含む) の最高許容使用圧力を与えるものであった。その最高許容使用圧力の計算は次の式によって行われた。

$$P = \frac{25875(t-0.04)}{D} - 405 \quad (2)$$

(2) 式の分子の括弧内の0.04は伝熱管の構造安定のための付け代として考慮された数値 (単位: in.) である。この式は次に示す(3)式で700 deg-Fにおける材料の許容引張応力を9.0 ksiとして得られたものである。

$$P = \frac{2.875St(t-0.04)}{D} - 0.045S \quad (3)$$

700 deg-Fにおける材料の許容引張応力はSA-83 Gr. A (継目無し炭素鋼管) の700 deg-Fの許容引張応力を踏まえて設定されたものである。そして、Table P-2の適用対象はSA-83 Gr. A, SA-83 Gr. B, SA-178 Gr. A, SA-178 Gr. B及びSA-192とされた。表2に表1と対応した外径及び厚さの最高許容使用圧力を示す。

表2 伝熱管のMAWP (Table P-2 抜粋)

厚さ (in.)	外径 (in.)						
	1	1¼	1½	1¾	2	2¼	2½
0.095	860	740	550	410	310	230	170
0.105	1090	950	720	560	440	350	270
0.120	1440	1260	980	780	630	520	430

(注1) 付け代 0.04 in. が考慮されている。  
(注2) MAWPの単位はpsiである。

表1と表2を比較すると、表2では全ての伝熱管寸法において0.04 in.の付け代が考慮されているため、最高許容使用圧力は表1の値に比して小さくなる傾向が認められる。また、表2では計算に使用された材料の許容引張応力が、表1の計算に比して小さいことから、同じ0.04 in.の付け代が考慮されているケ

ースにおいても最高許容使用圧力は小さい傾向にある。図1にTable P-2を作成した計算式 ((3)式参照) の許容引張応力を12.4 ksiとして計算した最高許容使用圧力と表1の最高許容使用圧力を比較して示す。図に示されるとおり、0.04 in.の付け代が付与されている場合の最高許容使用圧力はTable P-2の計算式である(3)式の方が(1)式に比して小さな値となることが分かる。

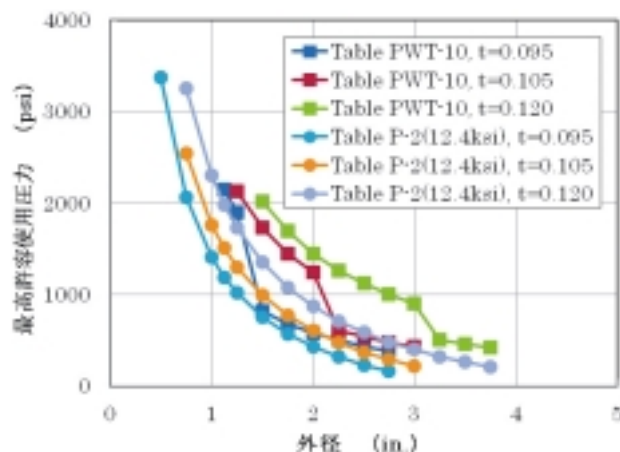


図1 表1 (Table PWT-10) 及び表2 (Table P-2) のMAWPの比較 (ただし、Table P-2のMAWPはS=12.4 ksiで計算)

Table P-2は、上述のとおり、SA-83 Gr. A継目無し鋼管の許容引張応力 (9.0 ksi) を用いて作成されたものであるが、Table P-2の適用材料である、例えば、SA-178 Gr. Aの700 deg-Fにおける許容引張応力は7.65 ksiである。すなわち、Table P-2の最高許容使用圧力をSA-178 Gr. Aに適用することは非安全である可能性があった。この場合の安全性を担保するために、許容引張応力が低い材料に対してTable P-2を適用する制限として、次の計算式で計算した圧力がTable P-2の最高許容使用圧力以上である場合に、Table P-2が適用可能とされた。

$$P = \frac{2.875St}{D} - 0.045S \quad (4)$$

(4) 式は(3)式から付け代 (0.04 in.) を除いた式である。(4) 式にSA-178 Gr. Aの許容引張応力を代入して、外径3.5 in.の伝熱管に対して圧力を計算し、Table P-2の最高許容使用圧力と比較した結果を図2に示す。

図2に示すとおり、外径3.5 in.のSA-178 Gr. A伝熱管の最高許容使用圧力は厚さが0.30 in.以下の場合に



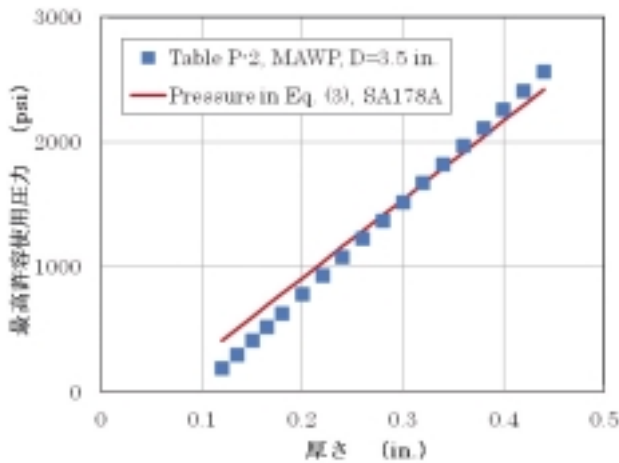


図2 SA-178 Gr. A の Table P-2 の適用制限  
(圧力 P は外径 3.5 in. に対して計算)

Table P-2 から決定できる。また、SA-83 Gr. A よりも大きな許容引張応力を有する SA-213 Gr. T5 (700 deg-F における許容引張応力 12.0 ksi) に対して最高許容使用圧力を設定するには、次の計算式で計算した圧力が Table P-2 の最高許容使用圧力以上である場合に、Table P-2 が適用可能とされた。

$$P = \frac{34500(t-0.04)}{D} - 540 \quad (5)$$

### 2.3 ASME Sec. I, Table P-4 の MAWP

1940 年の ASME Sec. I には、煙管ボイラ (Fire-tube Boilers) の伝熱管の最高許容使用圧力を与える Table P-4 も規定されていた。最高許容使用圧力は次の計算式で決定された。

$$P = \frac{14000(t-0.065)}{D} \quad (6)$$

(6) 式には付け代として 0.065 in. が考慮され、700 deg-F における許容引張応力として 7.0 ksi が考慮された。Table P-4 で最高許容使用圧力を設定する対象材料は SA-83 及び SA-178 であり、それらの 700 deg-F における許容引張応力は 6.5 ~ 9.7 ksi であり、付け代 0.065 in. を考慮した上で (6) 式によって Table P-4 の最高許容使用圧力を設定することは工学的に妥当であると判断された。表 3 に外径 1 ~ 3 in. で厚さ 0.095 ~ 0.120 in. の伝熱管の最高許容使用圧力を示す (Table P-4 抜粋)。

表 2 の水管ボイラ伝熱管の最高許容使用圧力と表 3

表 3 煙管の MAWP (Table P-4 抜粋)

厚さ (in.)	外径 (in.)						
	1	1½	1¾	2	2¼	2½	3
0.095	420	280	240	210	190	170	-
0.105	560	380	320	280	250	230	190
0.120	770	520	440	390	350	310	260

(注 1) 付け代 0.065 in. が考慮されている。  
(注 2) MAWP の単位は psi である。

の煙管ボイラ伝熱管の最高許容使用圧力を比較して図 3 に示した。伝熱管の外径が小さい場合には、同一厚さの伝熱管で比較すると、水管ボイラ伝熱管の最高許容使用圧力が大きくなる傾向がある。一方、外径が大きい場合には、同一厚さの伝熱管で比較すると、水管ボイラ伝熱管の最高許容使用圧力が小さくなる傾向がある。

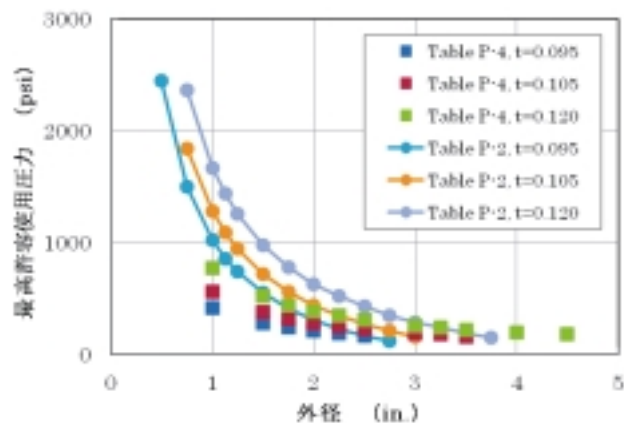


図 3 表 2 (Table P-2) の水管ボイラ伝熱管及び表 3 (Table P-4) の煙管ボイラ伝熱管の最高許容使用圧力の比較

Table P-4 の最高許容使用圧力の規定は Sec. I, Table PFT-12.1 の最高許容使用圧力の規定となり、伝熱管に内圧が作用する場合、外圧が作用する場合の両者に対する最高許容使用圧力を規定するものとなった。ただし、1988 Addenda において、ASME Sec. VIII, div. 1<sup>5)</sup> に規定されていた外圧設計の規定を PFT 章に導入したことにより、Table PFT-12.1 は削除された。

### 2.4 ASME Sec. IV, Table HG-315 の最小厚さ

最高使用圧力が 160 psi 以下の温水ボイラ又は最高使用圧力が 15 psi 以下の蒸気ボイラは ASME Sec. IV<sup>6)</sup> に従って設計・製作される。その鋼製伝熱管の最小厚さは、1940 年の Sec. IV, Table H-13 に規定されていた。表 4 に Table H-3 に規定されていた伝熱管外径と最小厚さの関係を示す。この規定は、上述の

Sec. I, Table P-4の煙管ボイラの規定と同様に，伝熱管に内圧が作用する場合にも，外圧が作用する場合にも適用されるもので，Sec. IV, Table HG-315に引継がれた。

表4 ASME Sec. IV, Table H-3の規定

外径 (in.)	最小厚さ (in.)
1 以上 2.5 未満	0.095
2.5 以上 3.25 未満	0.105
3.25 以上 4 未満	0.120
4 以上 5 未満	0.135
5	0.150

このSec. IV, Table HG-315の伝熱管の最小厚さ規定は1998Editionで削除されたが，その削除は円筒形部品（伝熱管を含む。）の設計を内圧が付与される場合の設計（HG-301）と外圧が付与される場合の設計（HG-312）に分離したためであった。この結果，Sec. IVからはASME Sec. I, Table PWT-10の様な簡便な設計は早期に排除された。

表4の最小厚さの数値の表記は，外径に対して(7)式から計算された厚さの値を，BWG No. (Birmingham Wire Gauge Number)<sup>7),8)</sup>に近い数値として表示したものである。

$$t = \frac{PD}{2S} + 0.065 \quad (7)$$

ただし， $P = 160 \text{ psi}$      $S = 6,500 \text{ psi}$

また，外径が6 in.を超える場合には，次の式から最小厚さを計算することとしていた。

$$t = 0.0251D \quad (8)$$

### 3.....JIS B8201:2005の伝熱管の最小厚さ規定

JIS B8201:2005「陸用鋼製ボイラ - 構造」の伝熱管の最小厚さの制限の規定はASME規格を源流としているものの，その規定内容には我国独自の技術的な判断が加えられていて，ASME規格に規定の内容とは異なっている。ASME Sec. I及びSec. IVで伝熱管の簡便な設計が削除されたことに関連して，JIS B8201規格における伝熱管の最小厚さの制限の規定の維持について検討するため，現行の規定の技術的背景について整理した結果を以下に示す。

### 3.1 JIS B8201:1954の伝熱管の最小厚さ

JIS B8201「陸用鋼製ボイラ - 構造」には，最高使用圧力に基づいた内圧設計を基本とした設計方法が採用されている。したがって，ASME Sec. I, Table PWT-10に規定されているような伝熱管に対する最高許容使用圧力は規定されていない。他方，Table PWT-10のように伝熱管毎に厚さ計算を行う設計を排して，設計を簡便化するための方法として，Sec. IVに導入されていたTable H-13 (Table HG-315)による方法を採用した。Table H-13に対応する伝熱管の最小厚さの規定は，JIS B8201:1954の「11.3 煙管・水管等の厚さの最小値」に規定された。この規定の伝熱管の厚さの最小値を表5に示す。この表は次の式で計算された値から作成されたものである。

$$t = \frac{PD}{2S} + 1.5 \quad (9)$$

ただし， $P = 10 \text{ kg/cm}^2$      $S = 3.5 \text{ kg/mm}^2$   
付け代 = 1.5 mm

(9)式と(7)式は同様な式であるものの，前者は最高使用温度350 を前提に定式化されたもので，後者では最高使用温度は700 deg-F (371 )を前提に定式化されたものである。また，最高使用圧力における最小厚さの計算結果が(7)式と(9)式で同様な結果となる様に，(9)式において材料の許容引張応力が3.5 kg/mm<sup>2</sup>と設定された。

表5 JIS B8201:1954, 11.3の煙管・水管等の厚さの最小値の規定

外径 (mm)	最小厚さ (mm)
64 未満	2.4
64 以上 82 未満	2.7
82 以上 101 未満	3.0
101 以上 127 未満	3.4
127 以上	3.8

表5の最小値規定と(9)式の計算結果を，横軸を外径として図4に比較して示すが，両者の相関は良い。また，上述のとおり，表5の作成の際に参照されたSec. IV, Table H-13と表5はほぼ同等な規定となっている。表5の外径127mm以上の最小厚さは外径152.4mmの計算値に基づいて設定した値であるが，図4をみると(9)式の計算値とは若干外れた結果となっている。この相違は，外径が6 in. (152.4mm)を超える場合の最小厚さの計算を，ASME Sec. IV,

Table H-13では、前述の(8)式によったためである。したがって、JIS B8201においても(8)式に  $D = 152.4\text{mm}$  を代入して、 $t = 3.8\text{mm}$  を得たものである。

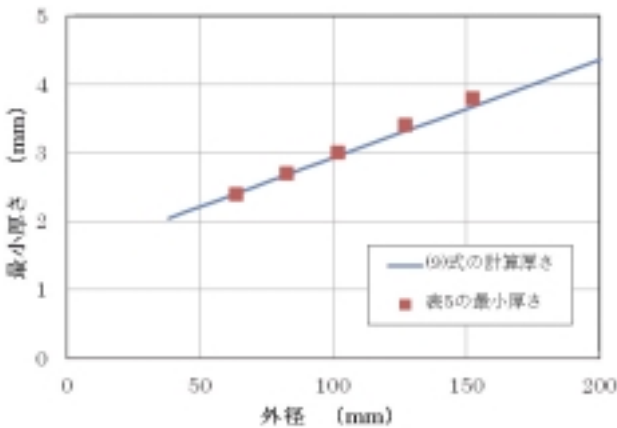


図4 表5の煙管・水管等の厚さと(9)式の計算厚さの比較

### 3.2 JIS B8201:2005の伝熱管の最小厚さ

JIS B8201:1967においてJIS B8201:1954で規定された「11.3 煙管・水管等の厚さの最小値(表11.2)」は改正され、現行のJIS B8201:2005の表6.11と同様な規定となった。表6.11は「6.7.3 水管、過熱管、再熱管、エコノマイザ管用鋼管などの最小厚さの制限」であり、その制限を表6に示す。

表6 JIS B8201:2005, 6.7.3の伝熱管などの最小厚さの制限の規定(表6.11の規定)

外径 (mm)	最小厚さ (mm)
38.1 以下	2.0
38.1 を超え 50.8 以下	2.3
50.8 を超え 76.2 以下	2.6
76.2 を超え 101.6 以下	3.2
101.6 を超え 127 以下	3.5
127 を超えるもの	4.0

JIS B8201:2005の水管、過熱管、再熱管、エコノマイザ管用鋼管などの最小厚さの計算式は次に示すものである。

$$t = \frac{PD}{2S+P} + 0.005D + C \quad (10)$$

この(10)式は、既に示した(1)式と同じ式であって、 $e = C$ と置換したものである。図5に表6の値と(9)式及び(10)式の計算値との比較を示す。この比較においては、(10)式で  $C = 1\text{mm}$  として計算した。図5に示すとおり表6の最小厚さは(9)式及び(10)式の何れの計算厚さにも整合していないことが分かる。

表7にJIS G3461:1988「ボイラ・熱交換器用炭素鋼鋼管」の寸法を抜粋して示す。表7の鋼管の厚さ寸法と表6の厚さ寸法を比較すると、両者に規定の厚さが整合していることが分かる。すなわち、表6の最小厚さは(9)式及び(10)式の計算厚さに基づいて、JIS G3461「ボイラ・熱交換器用炭素鋼鋼管」に規定の外径及び厚さを参照して設定されたことが分かる。

この考え方は、ASME Sec. I, Table PWT-10に付記されたBWG No.と類似の考え方である。BWG No.は線材や管材の直径を表示するゲージとして1884年に英国で開発されたものである。Table P-2やTable PWT-10の適用にあたっては、付記されたBWG No.を参照して伝熱管の厚さを選定し、選定した伝熱管の最高許容使用圧力をTable P-2又はTable PWT-10から決めることができる。

表8は表2に対してBWG No.を付記して示したものである。BWG No.が12の場合の伝熱管の厚さは0.109 in.であることから、表8のBWG No.が「12-」である行を参照することによって、市販のNPS2(外径2.375 in.)で厚さ0.109 in.の伝熱管はMAWP = 270まで使用可能なが分かる。因みに、BWG No. = 13の厚さは0.095 in.であり、BWG No. = 11の厚さは0.120 in.である。ASME B36.10<sup>9)</sup>に規定の鋼管の寸法によれば、鋼管の最小寸法の外径NPS1/8、厚さ0.049 in.のBWG No.は18である。また、TEMA規格<sup>10)</sup>で参照の伝熱管の厚さは全てBWG No.に対応している。この様にJIS B8201:1967における伝熱管などの最小厚さの制限の改正・変更は、伝熱管の標準厚さ寸法の日米の相違を解消するために行われたものであり、その設定も合理的であった。

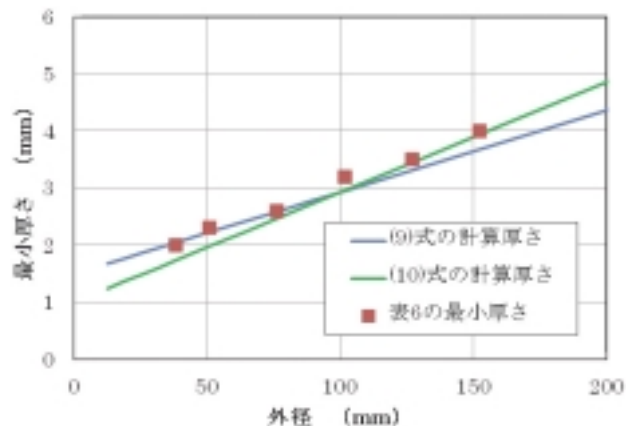


図5 表6の伝熱管の最小厚さと(9)式及び(10)式の計算厚さの比較

JIS B8201:2005には「6.7.3 水管，過熱管，再熱管，エコノマイザ管用鋼管などの最小厚さの制限」の他に「6.7.2 水管，過熱管，再熱管，エコノマイザ管用鋼管などの最小厚さ」の規定があり，当該の規定には「管をころ広げをするものの管座の長さに25 mmを加えた長さの部分の厚さが表6.10に示す値以上の場合及び管寄せ又は胴に溶接（漏止め溶接を除く。）するもの」は付け代を0 mmとすることができるとしている。

表7 ボイラ・熱交換器用炭素鋼管寸法抜粋

外径	厚さ (mm)									
	1.2	1.6	2.0	2.3	2.6	2.9	3.2	3.5	4.0	4.8
15.9										
19.0										
21.7										
25.4										
27.2										
31.8										
34.0										
38.1										
42.7										
48.6										
50.8										
54.0										
57.1										
60.3										

(注1)「JIS G3461:1988の表6」を修正表記

(注2)表中のウズミの欄はJIS B8201:2005に規定の伝熱管などの最小厚さ規定

JIS B8201:2005の表6.10を表9に転記して示す。この表に対応するTableはASME Sec. IVには規定されていない。表9 (JIS B8201:1967の表6.10)はJIS B8201:1967で新たに規定されたものであって，表8 (JIS B8201:1967の表6.11)の規定の検討と共に検討・作成されたものである。

表8 伝熱管のMAWP (Table P-2 抜粋)

厚さ (in.)	BWG No.	外径 (in.)						
		1	1¼	1½	1¾	2	2¼	2½
0.095	13	860	740	550	410	310	230	170
0.105	12-	1090	950	720	560	440	350	270
0.120	11	1440	1260	980	780	630	520	430

(注)表2にBWG No.を付記したものを。

端部にころ広げが施工される伝熱管の厚さが，表9の値以上の厚さである場合には，付け代 = 1mmが不要であるということは，表9の最小厚さを満足すれば，(10)式で  $C = \geq 1mm$  が必ず満足されることを意味する。既に示したとおり，ASME Sec. I,

Table P-2及びSec. IV, Table H-3の設定において考慮された付け代は0.065 in.であり，これらを参照して作成された表5 (JIS B8201:1954の11.3の規定)に考慮された付け代は1.5 mmであった。図6に構造安定の付け代1.5 mmを(10)式に考慮して計算した最小厚さと表9の最小厚さを比較して示す。図に示されるとおり表9に規定の厚さは(10)式の計算結果と矛盾しない。すなわち，上述のとおり，伝熱管の端部の厚さが表9の最小値を満足すれば，伝熱管の端部には適切な構造安定の付け代が考慮されることが理解できる。なお，表9においても，表7に示したJIS G3461「ボイラ・熱交換器用炭素鋼管」の厚さ寸法と整合して最小厚さを設定していることが分かる。

表9 JIS B8201:2005, 6.7.2の伝熱管など最小厚さの規定 (表6.10の規定)

外径 (mm)	最小厚さ (mm)
38.1 以下	2.3
38.1 を超え 50.8 以下	2.6
50.8 を超え 76.2 以下	2.9
76.2 を超え 101.6 以下	3.5
101.6 を超え 127 以下	4.0

#### 4.....伝熱管の設計の簡便化と課題

伝熱管の最小厚さ規定に関連したASME Sec. I, Table PWT-10が2008Addendaで削除されたことは既に示した。また，最小厚さを明記していたASME Sec. IV, Table HG-315も1998Addendaで削除されていた。これらの規定は設計の簡便化のために導入された規定であることは既に示したが，Table PWT-10の削除には，PG-26における溶接継手強度低減係数の規定化による設計の高度化の意味も含まれている。更には，ASME Sec. I-2011Addenda<sup>11)</sup>，PG-28における外圧を受ける円筒殻の設計の規定化 (PFT-50及びPFT-51に規定されていた内容をPG章に移動して規定) もあり，伝熱管の厚さの規定において，現行のJIS B8201:2005のとおり一義的に最小厚さを与える設計は，ASME Sec. IのPG-27.1の改正に係る前述のASME Sec. I規格委員会での指摘を考えると不十分な規定となる可能性がある。

JIS B8201:2005の6.7.3の規定は，既に示したとおり，煙管，水管，過熱管，再熱管，エコノマイザ管



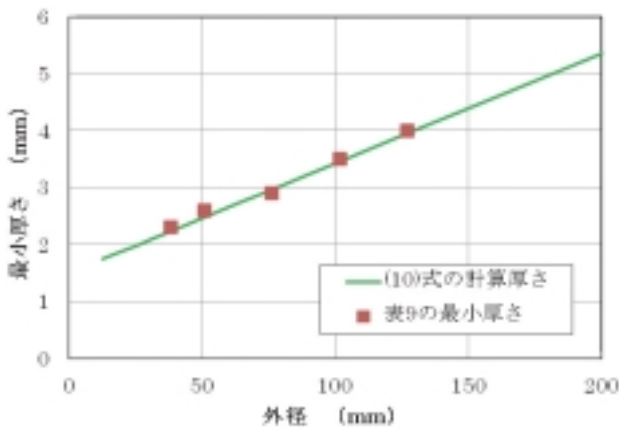


図6 表9の伝熱管の最小厚さと(10)式の計算厚さの比較

用鋼管などを対象とした規定であり、それらの伝熱管の最小厚さの制限を与えるものである。煙管を除いた伝熱管は内圧設計によって伝熱管の厚さを設計するものであって、図5に示したとおり、6.7.3 (JIS B8201:2005の表6.11)の規定は適切なものと云える。一方、外圧設計によって伝熱管の厚さを設計する場合には、Sec. I-2011Addenda, PG-28によれば、その厚さはSec. II, Part D, Fig. G及びFig. CS-1等の外圧チャート(形状曲線及び材料曲線)により設計することとなる。表6と同様な寸法のSTB340(降伏強さ175 N/mm<sup>2</sup>以上)を仮定し、370 での外圧設計を行うと、許容外部使用圧力(Allowable External Working Pressure)は表10のとおり計算(付け代=0~1.5 mmで計算)される。付け代を考慮すると、当然のことながら許容外部使用圧力は低下する。

表10 L/D 50と仮定した場合のSTB340の許容外部使用圧力の計算結果(付け代=0~1.5 mm)

寸法 (mm)		AEWP (psi)		
外径 D	厚さ t	0 mm	1 mm	1.5 mm
38.1	2.0	580	221	42
50.8	2.3	473	210	75
76.2	2.6	317	156	55
101.6	3.2	286	163	84
127	3.5	237	141	75
152.4	4.0	221	141	83

(注1) AEWP: 許容外部使用圧力 (Allowable External Working Pressure)  
 (注2) L/D: 円筒殻の長さとお径の比

円筒形部品の外圧設計は円筒殻の長さとお径の外径の比(L/D)によって許容外部使用圧力が変わる。また、(11)式及び(12)式で示されるとおり円筒殻の外径とお径の厚さの比(D/t)によっても許容外部使用圧力が変わる。したがって、伝熱管の寸

法に係わらず、外圧が付与される伝熱管に対して表10に示したとおり最高許容使用圧力を設定することは適切ではないと思われる。

(1)  $D/t \geq 10$ の場合

$$P_a = \frac{4B}{3(D/t)} \tag{11}$$

(2)  $D/t < 10$ の場合

$$P_a = \text{Min}[P_{a1}, P_{a2}] \tag{12}$$

$$P_{a1} = \left[ \frac{2.167}{D/t} - 0.0833 \right] B$$

$$P_{a2} = \frac{2S_B}{D/t} \left[ 1 - \frac{1}{D/t} \right]$$

$P$ : 許容外部使用圧力  
 $B$ : 外圧チャートで求める係数  
 $t$ : 厚さ (in.)  
 $D$ : 外径 (in.)  
 $S_B$ : 外圧に対する許容応力

ここで、表6 (JIS B8201:2005の表6.11)の最小厚さの計算条件を再確認すると、表5 (JIS B8201:1954の11.3)の最小厚さの計算条件を踏襲して、内圧10kg/cm<sup>2</sup>、材料の許容引張応力3.5kg/mm<sup>2</sup>が適用されていることが分かる。表10の外圧計算はSTB340を対象に計算したものであるため、その350の許容引張応力は72 MPaである。そして、JIS B8201:2005の設計における付け代が基本的に1 mmであるとすれば、表10から概ね10 kg/cm<sup>2</sup>の外圧に耐える最小厚さが表6 (JIS B8201:2005の表6.11)に規定されているとも云える。したがって、内圧設計に対しても、外圧設計に対しても、表6 (JIS B8201:2005の表6.11)は最高使用温度350 までの範囲で、最高使用圧力10 kg/cm<sup>2</sup>(約1 MPa)までの条件で安全に使用できる寸法であることが分かる。

既に示したとおり、ASME Sec. I, Table PWT-10やASME Sec. IV, Table HG-315の規定は削除されてしまったものの、厚さ計算を省略した上で、伝熱管の設計を行うニーズは高いと思われる。その設計ツールとして表6 (JIS B8201:2005の表6.11)は規定さ

れているが、その適用条件は不明確となっている。伝熱管の安全性を担保した上で、簡便な伝熱管設計を可能にするために、表6 (JIS B8201:2005の表6.11) をJIS B8201に今後も規定するとすれば、その適用条件を明確にする必要があると思われる。

## 5.....まとめ

ASME Sec. I-2008AddendaにおけるPWT-10及びTable PWT-10の削除に関連して、その規定の根拠と共に、伝熱管設計の簡便化の規定の削除の背景を明らかにした。ASME Sec. I規格においては伝熱管の設計においても溶接継手強度低減係数を考慮し、更には、Sec. IVにおいては内圧設計に加えて外圧設計を明確化したこともあって、伝熱管の簡便な設計方法であるSec. I, Table PWT-10やSec. IV, Table HG-315は削除された。この簡便な伝熱管設計方法はJIS B8201「陸用鋼製ボイラ - 構造」にも採用されていて、その設計による伝熱管は安全に供用されて来た実績がある。一方、JIS B8201の規定の源流はASME規格にあることから、ASME規格の改正をJIS B8201規格に反映する検討を行うことが重要である。しかしながら、その反映には十分な検討に基づく工学的判断が必要とされる。

この検討を行うために、現行のJIS B8201の規定の源流規格であるSec. I-2007Edition, Table PWT-10及びSec. IV-1997Edition, Table HG-315の規定の背景を整理した。これらの整理を踏まえた検討結果のまとめを次に示す。

- (1) JIS B8201:1954の最小厚さの制限の規定はASME Sec. IV, Table HG-315に整合して設定された合理的な規定である。
- (2) JIS B8201:1967の最小厚さの制限の規定は日米間の伝熱管の厚さ寸法の相違を踏まえて改正されたものであり、我が国の実情に合わせた合理的な規定である。
- (3) 伝熱管の最小厚さの制限の規定は伝熱管の設計の簡便化のために有効な方法である。
- (4) JIS B8201:1967の伝熱管の最小厚さの制限の規定は内圧設計及び外圧設計の両者に対応したものであるが、その適用範囲は設計温度350℃、圧力10kg/cm<sup>2</sup> (約10MPa) である。

(5) 伝熱管の最小厚さの制限の規定にあたっては、設計規定の策定の前提を踏まえて、適用制限を明確にすることが望ましい。

【追記1】本小文では、ASME規格の伝熱管の最高許容使用圧力及び最小厚さに関して検討する目的から、ASME規格に規定の単位系を用いて検討を行った。そのため、温度についてはdeg-F、応力についてはksi表示を採用した。これらの単位系の使用についてはこの様な解説小文であっても適切ではないとの指摘を受けるかも知れないが、ASME規格の規定を直接理解するため、読者の寛容さを持って許容されることを願うものである。

【追記2】本小文の表5に示したJIS B8201:1954, 11.3の煙管・水管等の厚さの最小値の規定は、発電用原子力設備規格設計・建設規格2008年版第1編軽水炉規格に規定の表PPB-3411-1, 表PPC-3411-1及び表PPD-3411-1「炭素鋼鋼管の必要最小厚さ」とほぼ同等な規定内容である。軽水炉規格に規定の最小厚さ規定も本小文に記述の拡張であることを最後に付しておく。

## 謝 辞

伝熱管の最小厚さの規定について一般社団法人日本ボイラ協会技術普及部の須藤浩人氏と有益な議論をさせて頂きました。この議論が本小文の作成に大きく寄与したことに對し深謝します。

## 参考文献

- 1) American Society of Mechanical Engineers, Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. I, Rules for Construction of Power Boilers, July, 2008.
- 2) American Society of Mechanical Engineers, Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. I, Rules for Construction of Power Boilers, July, 2007.
- 3) for example, K. Kimura, M. Tabuchi, Y. Takahashi, K. Yoshida and K. Yagi, Long-Term Creep Strength and Strength Reduction Factor for Welded Joints of ASME Grades 91, 92 and 122 Type Steels, 61st Annual Assembly and International Conf. of IIW, Graz Austria, July 2008.

- 4) American Society of Mechanical Engineers, Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. II, Materials, July, 2007.
- 5) American Society of Mechanical Engineers, Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. VIII, div. 1, Pressure Vessel, July 1986.
- 6) American Society of Mechanical Engineers, Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. IV, Heating Boilers.
- 7) Machinery's Handbook 27, New York, NY, Industrial Press, Inc., 2004.
- 8) K. V. Iserson, The origins of the gauge system for medical equipment, J Emerg Med, 5, 45, 1987.
- 9) American Society of Mechanical Engineers, B36.10, Welded and Seamless Wrought Steel Pipe, 2004.
- 10) Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association, Ninth Edition, TEMA Inc., 2007.
- 11) American Society of Mechanical Engineers, Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. I, Rules for Construction of Power Boilers, July, 2011.)



吉田和夫



大石勇一

# 発電技検の確性試験について

The viewpoint of The JAPEIC KAKUSEI examination

規格基準室 亀山雅司

The JAPEIC KAKUSEI examination of Japan Power Engineering and Inspection Corporation (JAPEIC) have been used to confirm new technology of such as material, welding of repair, structure and repair method. We can find two points for new technology. One is, of course, validity of technology. The other one is of how to explain. We have more flexibility of how to explain under functionalized regulatory standard. But more flexibility of explanation means less explanatory. The JAPEIC KAKUSEI examination have been familiar with the balance that between them give seriously influence to progress.

**Keywords:** : KAKUSEI examination, functionalized regulatory standard, flexibility of explanation, explanatory

## 1.....まえがき

発電設備技術検査協会（以下、発電技検）の確性試験では、規制対象の原子力発電設備を中心に新規技術等の技術的妥当性を確認している。原子力の技術基準は平成17年度に性能規定化され<sup>1)</sup>、技術的妥当性の説明性の自由度が増したが、自由度は説明性とトレードオフの関係にある。

スムーズに実機適用可能な技術とするには、開発の初期段階で純技術的な検討と合わせて許認可手続き時の技術基準適合の説明性を見据えておくことが重要なポイントとなる。

本件はこれらの状況を踏まえつつ、新規技術に対する発電技検の確性試験の有効性と確性試験を効率的に進めるための視点について記載する。

## 2.....確性試験の経緯

確性試験は昭和49年から開始され、以来、新規技術の妥当性を確認してきた。特に原子力発電設備の

規制対象設備の新規技術が新旧の技術基準に適合するか判断するための重要な役割を果たしてきた。

かつての技術基準は具体的な適合内容を告示等の規格に定めており、これに記載のないものは工事の都度、特殊施設認可により告示等に相当する内容を定める必要があった。

技術基準が性能規定化された後は、かつてのように規格に記載されていなくても、性能規定化された技術基準に適合していれば特殊施設認可によらない申請が可能となった（材料、構造を定めた告示501号は廃止され、現在は技術基準に適合する民間規格としてJSME機械学会 設計建設規格等がエンドースされている）。

これにより、一見、許認可申請の敷居が下がったかのように思えた。

性能規定では技術基準が要求する性能を満すための具体的な手段は制限されていない。また、申請者はそもそも性能を満たしていない技術を採用して許認可申請を行おうとは考えないから、当然、自分自身が提案する新技術は技術基準を満たしていると考



えている。

そのため、技術基準に適合していることは、以前より容易に説明可能と考えられたのである。

その結果、発電技検の確性試験に対するニーズはなくなったかのようにも考えられた。

### 3.....技術的妥当性の説明性について

先に記載したように、許認可の申請者は自らの技術が当然のごとく技術基準に合致していると考えている。しかし、それは申請者の視点で考えていることであって、外部に対して具体的に客観的に技術基準に合致していることを証明できなければならない。

技術基準が性能規定されたことにより説明手段の自由度は増している。しかし、前例にとらわれずに自由に記載すれば、聞き手にはその考え方の妥当性を理解することが難しくなる。すなわち、自由な記載は説明性の良さとトレードオフの関係にある。

性能規定化の下では両者のバランスの取り方によって、許認可を得るまでの労力と時間に影響を与えやすくなったのである。

以上を考慮すると、申請者は説明の自由度と説明性について、技術の開発段階から実機適用段階までを視野にいれ、試験の内容を組み立てることが重要になる。既に認められている規格や前例のある技術との差分で説明するのか、全くオリジナルの説明をするのかにより、説明に必要となるデータ、すなわち試験で採取するデータも異なるものになるからである。

また、技術開発によって得られる効果に対して労力や時間が見合ったものであるかという視点もある。従来技術を少し拡張する程度であれば既に認められている規格や前例のある技術との差分で説明する方法が労力が少なくてよい。逆に、従来技術から大幅に拡張するのであれば前例と異なる方法で労力と時間をかけて説明することが望ましい場合もある。

一般に、新技術は従来技術の延長にたつものが多い。例えば溶接技術の適用範囲について、より低入熱や高速度の範囲まで拡大する技術開発の場合は「機械強度や金属組織など、従来の確認項目を比較したところ相違がなく」などの説明が理解して貰い

易い。審議の主題はデータが許容値を満たしているかどうかである。一方、「外観上不具合がなければ溶接の健全性として問題がない。そこで、社内で取得したデータでは…」といった説明を採用すると、「外観上不具合がなければ溶接の健全性として問題がない。」という考え方自体が溶接の健全性の判断として妥当なのか、という議論が最初に必要になる。

もし仮に、こういった視点なしに技術的検討が進み、審議が終了してしまうと、許認可申請の段階になって「外観上不具合がなければ溶接の健全性として問題がない。」説明の妥当性を検討することになる。既に終了した試験内容に後から理由を付与するには多大な労力と時間（場合によっては手戻り）を要する。

この例は成果に比べて必要以上の労力を要しているが、実際にありがちな例である。

新技術を開発してもなかなか実用化に至らない、規制が厳しいという意見を耳にすることがあるが、開発者側に説明性という視点が足りないことが原因と感じられる場合も多いように思われる。

### 4.....発電技検の確性試験実施の意義

規制機関ではない発電技検の確性試験で技術的妥当性を検討する意義は何か。確性試験は発電技検以外の組織でも実施可能であるし、確性試験という名称も発電技検に独占されたものではない。確性試験は自主的に実施するものであり、確性試験で技術的妥当性が確認されたものに発行される証明書もあくまで発電技検の確性試験で技術的妥当性を確認した、ということを示すものであって許認可のお墨付きを与えるものではない（これらもかつて確性試験が不要と考えられた理由である）。

しかし、発電技検はこれまで長年に渡って許認可に関連した技術に関わってきている。規制権限は持たないとはいえ、その技術検討の背景を共有していることから、技術基準適合に対して上記で述べたような説明性のよい考え方ができるという特徴がある。これは発電技検の確性試験ならではの付加価値といえる。

最近では、規制の仕組み（後述）とあいまって、確性試験の依頼件数は増加の傾向にある。（平成22年度及び平成23年度で7件の審議が完了。平成24年

7月時点で2件を審議中。発電技検ホームページに掲載。) )

ただし、今後の原子力政策による影響は大きいと考えられる。

## 5.....実機適用の具体的な手順

発電技検の確性試験結果を用いた許認可を含めた実機適用までの手順を以下に整理する。

新規の技術の許認可手続きは法的に複数の手段の可能性があり、主に以下の が考えられる。

技術基準に記載がないと解釈し、特殊設計施設認可手続きをとる方法

新規技術は性能規定の範囲外であると考え、同時に性能規定の範囲外であるが技術的に妥当であることを説明する方法である。

例えば省令62号の第9条(1)イには「クラス1機器又はクラス1支持構造物が、その使用される圧力、温度、水質、放射線、荷重等の条件に対して適切な機械的強度及び化学的成分(使用中の応力等に対する適切な耐食性を含む。)を有すること。」と記載されている。こういった内容に該当せずに技術的妥当性を有するというケースはあまりないように思われる。

技術基準に適合していると解釈し、法的適合事前確認手続照会書(ノーアクションレター)により適合性を問い合わせる方法

性能規定の範囲内であると考え、技術的妥当性の説明を行う方法である。

最近ではノーアクションレターの照会にあたっては、原子力安全基盤機構(JNES)のRNP(新保全技術適合性検討作業会)で検討を行う<sup>2)</sup>。RNPの審議に当協会の確性試験結果が技術的検討結果として提供されている例が多い<sup>3)</sup>。

実例として関西電力大飯3号機原子炉容器出口管台のテンパービード溶接補修が上げられる<sup>4)</sup>。

## 6.....確性試験委員会の手続き

確性試験の対象は材料、溶接、構造、試験検査、補修方法等である。依頼者は発電技検のホームページに掲載されている書式で確性試験を申し込む。発電技検は、確性試験の依頼毎に検討内容に応じた専門分野の委員による委員会を設置し、委員会を開催

する。

委員会の実施回数は順調に進捗すれば4回程度であり、全体計画とデータ取得計画の検討、採取されたデータを用いた技術的妥当性の検討、実機条件での試験(試験結果を確認するため委員会を現地で実施することも多い)、まとめ、である。ただし、データの採取遅れ、委員会コメントの対応状況によって委員会回数が追加されることがある。

検討が完了すると委員会委員長から終了報告がなされ、発電技検は依頼者に証明書を発行する。なお、確性試験委員会を実施するための費用は依頼者の負担である。

## 7.....確性試験を効率的に進めるための視点

性能規定を満足する技術的選択肢は沢山ある。正解は一つだけではない。依頼者は、一定の技術水準が確保されていれば、提案者の事象に依ってもよいので何を優先するのか積極的に明確にすることが望ましい。例えば、早期の実機適用を優先したいというニーズや、将来の拡張性に重点を置きたいというニーズなどが考えられる。

委員会のコメント対応等の検討をしていると部分的に魅力的な選択肢に目移りすることがある。そうになると論理の一貫性を失い、議論が発散し、収束が付きにくくなる傾向にある。優先事項を求心力にして論理の一貫性を維持することが、結局は議論終結の近道になる場合が多いように思える。

次に具体的な確性試験計画を策定する。試験データは技術的妥当性を説明するためのものであるから、確性試験で実験等により取得してもよいし、過去の試験結果や文献を引用することでもよい。

一方、「過去に類似の確性試験で同じ試験を実施した」という理由では新たにデータを採取しても技術的妥当性の根拠にはならないことに留意したい。

## 8.....まとめ

性能規定化された技術基準の下では、技術的妥当性の説明の自由度が増したが、自由度は説明性とトレードオフの関係にある。

スムーズに実機適用可能な技術とするには開発の初期段階で純技術的な検討と合わせて許認可手続き時の技術基準適合性の説明性を見据えておくことが

重要なポイントとなる。

発電技検の確性試験は長年に渡って許認可に関連した技術に関わってきたことから、性能規定化された技術基準の下でも説明性のよい考え方ができるといった特徴があり、ノーアクションレター制度等で技術的妥当性を示す資料として参照されている。

確性試験を効率的に進めるには依頼者が何を優先したいのかを明確にし、論理の一貫性を保つことが効果的であると思われる。

#### 参考文献

- 1) 原子力安全基盤機構規格基準部 “ 発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令と解釈に対する解説 ” , 平成 18 年 1 月 1 日
- 2) 例えば, 原子力発電検査課, “ 新保全技術に関する検討状況 ” , 平成 22 年 11 月 16 日 ,  
[http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/genshiryoku/kensa\\_gijutsu/036\\_01\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/genshiryoku/kensa_gijutsu/036_01_00.pdf)
- 3) 一般社団法人 日本原子力技術協会, “ 補修・保全工法ガイドライン 保全技術の適用プロセス ” , JANTI-VIP-11,2010
- 4) 平野伸朗他, “ 原子力発電所における新保全技術としてのテンパービード工法の開発・適用 ” , 保全学, Vol. 19, No. 4 (2011)



亀山雅司

# 非破壊試験で要求される各種視力と小数視力

Various visual acuity demanded by nondestructive examination  
converted to decimal visual acuity

規格基準室 佐藤長光

As for visual acuity in Japanese, the decimal visual acuity is used. Various visual acuity demanded by nondestructive examination are the cortical vision. Therefore, we cannot have actually feeling of various visual acuity demanded by nondestructive examination. Various visual acuity demanded by nondestructive examination were converted into the decimal visual acuity. The converted decimal visual acuity are 1.0 or 1.3. These values have same as an averaged decimal visual acuity (1.2-1.5) on Japanese.

**Keywords:** : Visual acuity, Decimal visual acuity, Nondestructive examination, Cortical vision

## 1.....はじめに

人間の感覚と知覚に関する研究は古くから行われ、その中でも、視覚に関する研究が最も多くなされている。実生活や非破壊試験(以下、NDEという)でも多くは視覚によっているため、必要に応じて視力要求が規定されている。

日本人の実生活での視力は、最小可読閾で求めた小数視力(例:1.5)が用いられている。一方、NDEで要求される各種視力はその殆どを最小可読閾で求めた文字による字づまり視力(例:Jager Reading Card J1)が要求されている。このため、NDEで要求される各種視力について実感が持ちづらいとの声がある。そこで、NDEで要求される各種視力を小数視力に換算して示して説明した。

## 2.....視力について<sup>1)</sup>

物体の形態を知るには、次の4つの尺度がある。基本的には、最小分離閾をもって視力を表すが、最小可読閾で視力を表すことも多い。

最小視認閾

1点又は1線を認める閾値

最小分離閾

2点又は2線を識別して感じる閾値

最小可読閾

文字や図形を判別できる閾値

副尺視力

2直線の位置の違いを感じる閾値

視力には、測定距離の遠近の相違により遠方視力(例:距離5 mでの視力)と近方視力(例:距離300 mmでの視力)があるが、測定方法は同じものが用いられる。測定方法の違いにより次の8つの視力表示がされている。日本人の実生活での視力は、遠方視力と近方視力共に小数視力が用いられる。

字ひとつ視力

視標を1つ1つ見せて測定する視力を字ひとつ視力という。

字づまり視力

多数の指標が配列された通常の視力表を用いて測定する視力を字づまり視力という。

小数視力

分単位で表した最小視角の逆数を小数で表した



視力を小数視力といい、国際的な標準視力表示方式である。

#### 分数視力

分子に検査距離，分母に検査に用いた視標を視力1.0の眼の人がかろうじて見分けることができる距離で表した視力を分数視力（Snellen方式）という。分数視力は，この分数を小数になおすと小数視力の値と同じになる。

#### 対数視力

小数視力も分数視力も視角に反比例する数値であるため，視力表の視標の各段階は視力の実質的な差を表していない。すなわち，小数視力表では，0.9と1.0，0.1と0.2では共に一段階であるが，視角からみた実質的視力は前者では約10%，後者は100%の差がある。視力表の視標の段階を等間隔にするには，小数視力の対数値をとらなければならない。これを対数視力という。

#### 対比視力

白地に種々のコントラストの視標を並べた視力表を対比視力表といい，これを用いて測定された視力を対比視力という。

#### 縞視力

縞の明暗が正弦波的に移行し，縞の間隔が狭くなっていく縞模様で，かろうじて判別できた時の縞の間隔から求めた視力を縞視力という。

Modulation Transfer Function（以下，MTFという）

横軸に縞の間隔を，縦軸に縞のコントラストをとり，縞として見える点を結んだもの。通常の視力と対比視力とを合わせたようなもの。

### 3.....人間の近方視力

人間の視力は，年齢や明るさ等の影響を受け，その限界には個人差があるが，古くから測定されている。測定された結果の例を次に示す。個々の測定結果により相違はあるが，概ね平均で1.2～1.5と言うことができる。

#### 3.1 日本人の平均視力

日本人の矯正視力を含む視力は1.2～1.5といわれ<sup>2)</sup>，成人35,000人の測定結果でも1.2～1.5の人が

75.8%の割合となっている<sup>3)</sup>。6～60歳の約1,300人の測定結果でも図1に示すように就業年齢においては1.5をピークとして分布しており1.2～1.5の人が80%の割合となり平均で1.4となっている<sup>4)</sup>。加えて，19～58歳（平均年齢22.8歳）の男女40人の測定結果でも図2に示すように1.5をピークとして分布しており平均で1.4となっている<sup>5)</sup>。図2の分布は，図1の就業年齢における分布と同じ傾向になっている。

これらのことから，日本人の矯正視力を含む平均視力は1.2～1.5と言える。

ただし，測定に用いられた指標は，実生活での視力検査の指標と同様に，小数視力0.1～1.0の間は0.1間隔に指標が付与されているのに対し，これを超える指標は，1.2，1.5，2.0しか付与されていない。小数視力が1.0を超えた場合，0.1間隔では視角に大きな差が生じないためこのように付与されているが，平均小数視力を算出する目的では誤差が大きくなっ

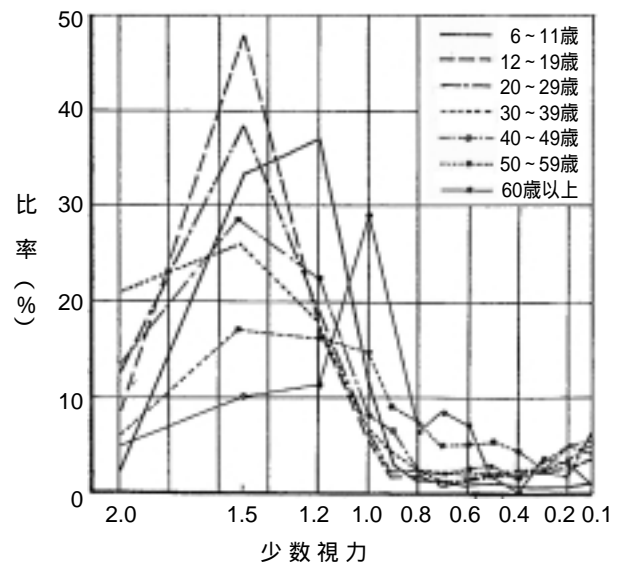


図1 日本人の視力分布

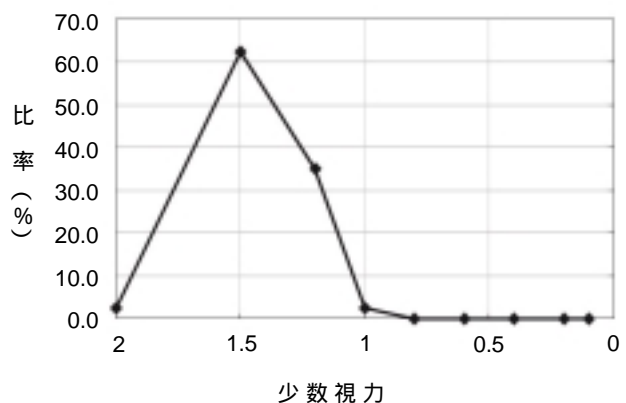


図2 被検者の視力分布

てしまう。

### 3.2 Jager Reading Card を用いた視力

放射線透過試験技術講習会に参加した187人について、J1～J10が印刷されたJager Reading Cardを用いた視力についても測定されている。J1は63%，J2は32%，J3は4%，J4は1%となっている<sup>6)</sup>。Jager Reading Cardには、J番号に相当するSnellen視力も印刷されており、これからJ番号に相当する小数視力に換算できる<sup>7)</sup>。J1は1.3に、J2は1.0に、J3は0.8に、J4は0.5になる。これらを平均すると1.2となる。ただし、Jager Reading Cardでの最高視力はJ1しか印刷されておらず、これを超える視力については確認されていない。このことから、実際は1.2よりももう少し高い平均視力があるものと推定できる。

### 3.3 ラインペア（以下、LPという）を用いた視力

図3の1.0～18.0 LP/mmのLPが付与されたNational Institute of Standards and Technology（以下、NISTという）のLPチャートを用いた28～65歳の26人の事務所環境における視力についての測定結果もある<sup>8)</sup>。図4に示すように分布はあるが、線条群中の縦横の線が識別できたと判断したLP値の平均は8.8 LP/mm、線条群中の縦横の線の本数を正確に読取れたLP値の平均は5.8 LP/mmであった。いづれも、最高LP値は、14.0 LP/mmであった。線条群中の縦横の線が識別できたと判断した最低LP値は、4.5 LP/mmであったのに対し、線条群中の縦横の線の本数を正確に読取れた最低LP値は、1.4 LP/mmと低下し、全体の分布も低LP値方向に移動

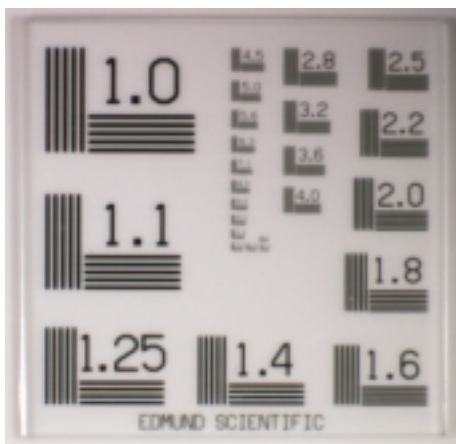


図3 NISTのLPチャート

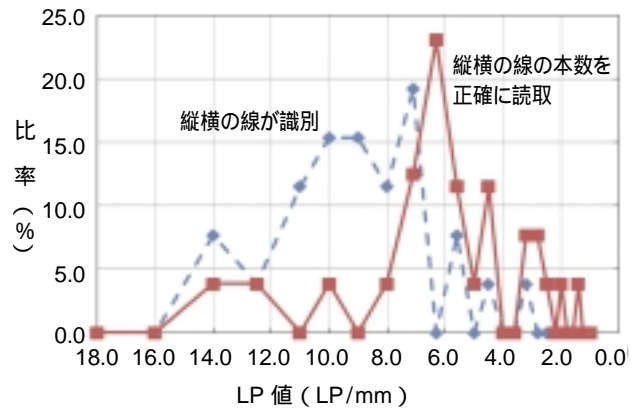


図4 LPチャート識別の分布

している。前記のLP値を観察距離300 mmで小数視力に換算すると、14.0 LP/mmは2.4に、8.8 LP/mmは1.5に、5.8 LP/mmは1.0に、4.5 LP/mmは0.8に、1.4 LP/mmは0.2になる。これらの結果は、図1及び図2と同様の傾向を示すと共に両図より高視力の測定結果も与えている。

### 3.4 MTFを用いた視力

人間の視覚系に関する特性を、光学機器の特性を評価するMTF特性を用いて表すことは図5に示すように既に行われている<sup>9)</sup>。図5から読取ったコントラスト1.0での空間周波数は、56～25サイクル/度と20～60歳への加齢に従って低下している。このMTFを小数視力に換算すると1.9～0.8になる。

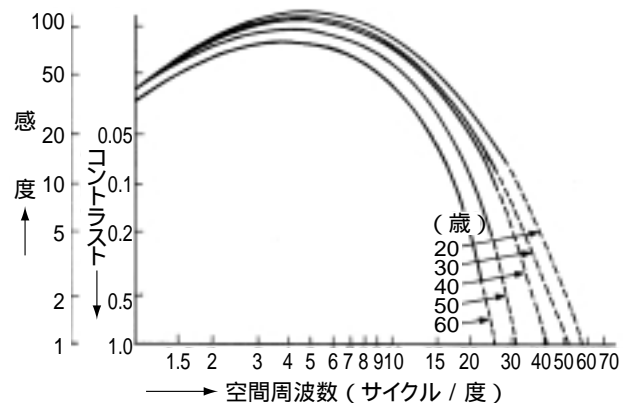


図5 視覚系のMTF

## 4.....NDEで要求される各種視力

NDEでは、表1に示すようにその殆どを最小可読閾で求めた文字を用いた視力で要求されているが、

表1 NDE で要求される視力

規格	要求視力
JIS Z 2305 <sup>10)</sup>	Times Roman N6
JIS Z 2340 <sup>11)</sup>	PT, MT : 3.6 LP/mm
NDIS 3414 <sup>12)</sup>	Jaeger number 1
NDIS 3415 <sup>13)</sup>	Jaeger number 2
JSME 設計建設規格 <sup>14)</sup>	VT : Jaeger number 1
JSME 維持規格 <sup>15)</sup>	VT1 : 600 mm 以下の距離で 0.8 mm の黒線の確認
	VT2 : 1,800 mm 以下の距離で 0.8 mm の黒線の確認
	VT3 : 1,200 mm 以下の距離で 0.8 mm の黒線の確認
	MVT-1: 0.025 mm のワイヤの 確認
ASME Sec. V <sup>16)</sup>	VT : Jaeger number 1
ASME Sec. XI <sup>17)</sup>	VT1 : Snellen 25
	VT2, 3 : Snellen 30
ISO 9712 <sup>18)</sup>	Times Roman N4.5 or Jaeger number 1

その要求程度により要求値も事になっている。少数ではあるが、LP値で要求しているものや距離と確認できる線幅やワイヤ幅で要求しているものもある。

## 5.....NDE で要求される各種視力と小数視力

NDE で要求される各種視力はその殆どを最小可読閾で求めた文字を用いた視力で要求されているが、日本人の実生活での視力は最小可読閾で求めた小数視力が用いられており、NDE で要求される各種視力について実感が持ちづらいとの声がある。このため、NDE で要求される各種視力を小数視力に換算し表2に示す。加えて、この小数視力の範囲と分単位で表した視角の関係を図6に示す。ただし、NDEにおいて距離と確認できる線幅やワイヤ幅で要求されている視力は、最小視認閾であり、その網膜上の像は瞳孔による回折等によってぼけることになり広がりを持つ半面、広がりの勾配は緩やかとなるため、この勾配を検出できる能力と関係してくる<sup>19)</sup>。加えて、

表2 NDE 要求視力の小数視力への換算

NDE 要求視力	換算小数視力
Times Roman N4.5	1.3
Jaeger number 1	
Times Roman N6	1.0
Jaeger number 2	
Snellen 25	0.8
Snellen 30	0.7
3.6 LP/mm	距離 300 mm で 0.6

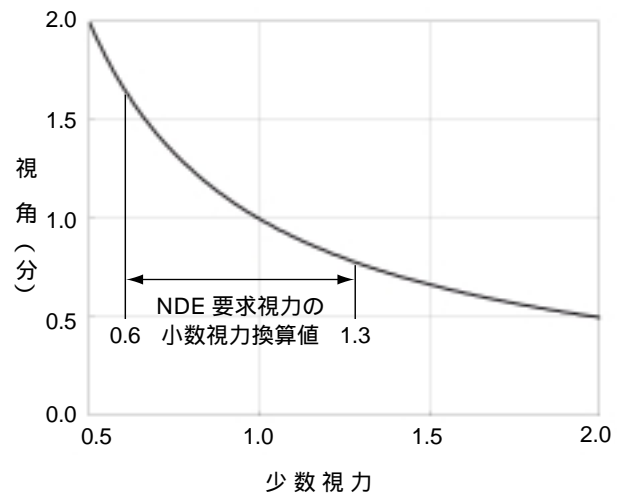


図6 NDE 要求視力の小数視力換算値と視角

線の長さとも関係してくる。一方、小数視力は、ぼけの広がりが殆どない状態で最小可読閾を求めている。この相違のため、線幅やワイヤ幅で要求されている視力を直接小数視力に換算できない。そのため、ここでは線幅やワイヤ幅で要求されている視力を小数視力に換算して示していない。

NDE で要求される各種視力の小数視力への換算値は、0.6 ~ 1.3と幅がある。JIS Z 2340が0.6を要求しているが、これは、浸透探傷試験又は磁粉探傷試験の観察時の要求であり、探傷剤によるきず幅の拡大が期待できることや想定指示模様寸法から求めた要求であり合理性がある。

目視試験や試験員への要求としては、0.7 ~ 1.3と幅がある。ASME Sec. XIのみ、0.7又は0.8を要求しているが、その他の規格では、1.0又は1.3を要求している。この要求は、日本人の矯正視力を含む平均視力(1.2 ~ 1.5)とほぼ対応した要求となっている。

## 6.....おわりに

日本人の実生活での視力は、最小可読閾で求めた小数視力が用いられている。一方、NDE で要求される各種視力はその殆どを最小可読閾で求めた文字による字づまり視力で要求されている。このため、NDE で要求される各種視力について実感が持ちづらいとの声がある。そこで、NDE で要求される各種視力を小数視力に換算して示した。一部を除いて要求は概ね、1.0又は1.3を要求しており、日本人の矯正視力を含む平均視力(1.2 ~ 1.5)とほぼ対応した要

求となっている。

NDEを行っている技術者の方が、NDEで要求される各種視力と実生活において要求されている小数視力との関連について理解され、NDEを実施する上で参考になれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 所敬, 金井淳編集, 現代の眼科学, 金原出版株式会社
- 2) 蒲山久夫, 視力から照明の質を計算する一新法, 照明学会雑誌, Vol. 46, No. 6, 1962
- 3) 指宿春夏, 眼臨9
- 4) 大江健一, 日本人の視力, 照明学会雑誌, Vol. 47, No. 4, 1963
- 5) 中根芳一, 伊藤克三, 明視照明のための標準等視力曲線に関する研究, 日本建築学会論文報告集, Vol. 229, 1975
- 6) 社団法人日本非破壊検査協会, 非破壊検査技術シリーズ, 放射線透過試験
- 7) S. L. Weatherly, Back to Basics, Testing Visual Acuity with the Jaeger Eye Chart, <http://www.asnt.org/publications/materialseval/basics/aug02basics/aug02basics.htm#boeing>
- 8) 佐藤長光, 目視観察の現状及びデジタル化の効果と課題, 平成11年度秋季大会講演概要集, 社団法人日本非破壊検査協会
- 9) 大頭仁, 行田尚義, 視覚と画像, 森北出版株式会社
- 10) JIS Z 2305 : 2001, 非破壊試験-技術者の資格及び認証
- 11) JIS Z 2340 : 2002, 目視基準ゲージを用いた浸透探傷試験及び磁粉探傷試験の目視観察条件の確認方法
- 12) NDIS 3414 : 2006, 目視試験方法
- 13) NDIS 3415 : 2006, 設備及び装置の点検方法
- 14) JSME S NC-1 : 2008, 発電用原子力設備規格, 設計・建設規格, 第 編 軽水炉規格
- 15) JSME S NA-1 : 2008, 発電用原子力設備規格, 維持規格
- 16) ASME B&PV Code Sec. V Nondestructive Examination : 2011
- 17) ASME B&PV Code Sec. XI Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components : 2011
- 18) ISO 9712 : 1999, Non-destructive testing—Qualification and certification of personal
- 19) 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック, 誠信書房



佐藤長光



## 出願特許一覧

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	特許第4664399号 H23.1.14
概要	Cr含有量が8～14wt%のラーベス相が析出する高Cr系鋼構造物でアノード分極曲線を利用してじん性を評価する方法		
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 H18.1.6	登録番号・登録日	特許第4235648号 H20.12.19
概要	検査対象物表面の金属組織内部の自然欠陥を非破壊で外部から計測するための渦電流探傷信号処理方法		
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 H14.10.23	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		
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 H14.10.23	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		
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 H14.2.6	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		
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		
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 H12.3.8	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		
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 H12.3.8	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		
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 H8.4.2
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		
特許件名	皮膜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		

## 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
Journal of Nondestructive Evaluation	程 衛英	Pulsed Eddy Current Testing of Carbon Steel Pipes `Wall-thinning Through Insulation and Cladding	Vol. 31, No.3 p215-224 2012
火力原子力発電大会論文集	古村 一朗 古川 敬	開口合成3次元超音波探傷法によるニッケル基合金溶接部 SCC探傷特性評価	福岡大会CD-ROM - 2011年10月
E-Journal of Advanced Maintenance	古川 敬 古村一朗	Simulation and visualization of guided wave propagation by large scale 3D FEM	Vol. 3, No. 3, AA36 November, 2011
Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation	程 衛英 古村一朗	Simulation for the assessment of Wall thinning Using Eddy Current Method	Vol. 30A (2011) p.372-379
E-Journal of Advanced Maintenance	古村一朗 古川 敬	Visualization Method of UT Wave Propagation Phenomena for assisting The Better Understanding of Inspection Results	Vol. 2, No. 2, NT25 August, 2010
火力原子力発電大会論文集	長谷川忠之 西川 聡	FEMを用いた溶接終端部の残留応力評価	大阪大会CD-ROM 3-4 2009年10月
Proceeding of the 7th Int. Conf. on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear Pressurized Components.	古川 敬 古村一朗	Numerical simulation of guided wave propagation using large scale FEM code	EUR 24115EN-2009 p.252-259
International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	程 衛英 古村一朗	Optimum Inducement of Eddy Current for NDE of Deep Lying Defects:an Analytical Approach	33( 2010 ) p.377-385
圧力技術	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 - ク溶接金属の応力腐食割れ感受性に及ぼす化学成分 熱処理の影響	Vol.48, No.1 p.26-39 2010
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 - ク溶接金属の応力腐食割れ感受性に及ぼすPの影響	第27巻( 2009 )第4号 p.287-296
非破壊検査	関野晃一 他	ガラス板に挿入した表面楕円き裂の光干渉法による破壊挙動の解析	第59巻( 2010 )第3号 p.138-144
E-Journal of Advanced Maintenance	古村一朗 古川 敬	Simulation technique for UT wave propagation as an effective tool for predicting the inspection results and interpreting the root cause of unexpected indications	Vol. 1, No. 1,NT1 May, 2009
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 - ク溶接金属の応力腐食割れ感受性に及ぼすC,Nbの影響	第27巻( 2009 )第3号 p.274-260
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 - ク溶接金属の応力腐食割れ感受性に及ぼすCrの影響	第27巻( 2009 )第4号 p.278-286
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
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
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	Vol.8 , .3 ,p.69-75, 2009
Advanced Materials Research	中東重雄 他	EFFECT OF COLD-ROLLING ON PRECIPITATION PHENOMENA IN 316L AUSTENITIC STAINLESS STEEL	Vo1.26-28( 2007 ) p. 1287-1290

学協会誌名	著者	論文名称	掲載誌発行年月
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
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
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
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
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
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
IEEE, Transaction on Magnetics	程 衛英 兼本 茂 古村一朗	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	Vol. 44, No. 6, June, (2008), p.1030-1033.
日本実験力学学会	関野晃一 他	Numerical Evaluation of the Depth of Branched-off Cracks using Eddy Current Testing Signals	p.59-64 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
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
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
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	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
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
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

学協会誌名	著者	論文名称	掲載誌発行年月
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
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
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
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
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
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
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	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
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
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
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
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
平成16年度 火力原子力発電大会論文集	程 衛英 古村一朗 志波光晴 他	炉内構造物検査への渦流探傷技術の摘要評価	広島大会CD-ROM1-2-6 2004年10月
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
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
火力原子力発電	志波光晴 桑 亮一 他	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



学協会誌名	著者	論文名称	掲載誌発行年月
INSIGHT	陳 綱朱 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 綱朱 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 綱朱 米山弘志 山口篤憲 上杉信夫	ウェーブレット解析の渦電流探傷法への適応	Vol.49, No.507, p.70-78, 1998
Journal of Pressure Vessel Technology	志波光晴 山口篤憲 佐藤正信 村尾周仁 永井正雄	Acoustic Emission Waveform Analysis From Weld Defects in Steel Ring Samples	Vol.121, p.77-83, February, 1999
圧力技術	堀井行彦 西川 聡 桑 亮一 他	鑄造2相ステンレス鋼の溶接熱影響部の熱時効脆化 - 第1報 溶接熱影響部の熱時効脆化挙動 -	Vol.39, No.3 第1報 p.2-8 2001
	堀井行彦 西川 聡 上杉信夫 他	鑄造2相ステンレス鋼の溶接熱影響部の熱時効脆化 - 第2報 溶接熱影響部の熱時効脆化機構 -	Vol.39, No.3 第2報 p.9-15 2001
International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	陳 綱朱	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

## 学協会等への口頭発表

### 平成23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】	平成23年度 電気学会 基礎・材料・共通部門大会	2011/9/21 東京工業大学	程 衛英	パルス渦電流試験法による減肉評価
	平成23年度 第1回非線形超音波の基礎と 応用に関する研究会	2011/8/10 徳島大学	古川 敬	現行UT法(基本波を用いたフェーズドアレイ及び固定角UT)によるき裂高さサイジング技術の現状
	平成23年度 火力原子力発電大会	2011/10/13 福岡国際会議場	古村一朗 古川 敬	開口合成3次元超音波探傷法によるニッケル基合金溶接部SCC探傷特性評価
	第2回次世代高温センサ研究会	2011/11/18 東北大学 流体科学研究所 大会議室	古村一朗	開口合成3次元UT法と高温用マトリックスアレイセンサー
【溶接】	平成23年度 溶接学会秋季全国大会	2011/9/7-9 皇學館大学	西川 聡 他	ショットピーニングが施された異材溶接継手における圧縮残留応力の持続性

### 平成22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】	QNDE2010 ( 37th Annual of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation )	2010/7/18 ~ 23 米国サンディエゴ	程 衛英 古村一朗	Simulation for the Eddy Current Method Measurement of Pipe-wall Thinning
	The 15th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation ( ENDE2010 )	2010/6/14ポーランド シュチェチン	山本敏弘 他	An ECT probe with widely spaced coils for local wall thinning in nuclear power plant
	日本保全学会 第7回学術講演会	2010/7/14.15 浜岡原子力館	程 衛英 古村一朗	渦電流探傷法による配管減肉評価のシミュレーション
			小林輝男	ステンレス鋼溶接金属を透過したUT確認試験研究成果
			古村一朗 古川 敬	超音波探傷における結果の評価 結果の推定 及び 探傷条件の最適化を支援するシミュレーション技術
	創立60周年記念 火力原子力発電大会	2010/10/14 東京フォーラム	小林輝男	ステンレス鋼溶接金属を透過したUT確認試験研究成果
	平成22年度 非破壊検査協会秋季講演大会	2010/10/27 ~ 29 沖縄県市町村自治 会館	古川 敬 古村一朗	大規模FEM解析を用いたガイド波の伝搬及び探傷 波形シミュレーション
	第8回NDE国際会議	2010/9/29 ~ 10/1 ドイツ ベルリン	古村一朗 古川 敬	Improvement of SCC depth sizing capability by 3D-SAFT UT method in Ni alloy weld
			古川 敬 古村一朗	Numerical simulation of guided wave propagation in elbow pipe and welds
	第18回超音波による非破壊評価 シンポジウム	2011/1/27 きゅりあんホール	古川 敬 南 康雄 杉林卓也 古村一朗	音響異方性を有する材料へのPhased array UTの 適用

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 「電界計測に基づく非破壊評価 応用研究会」	2011/3/11 日本非破壊検査協会	程 衛英	渦電流探傷技術への取り組みとその新展開
	日本保全学会 第7回学術講演会	2010/7/14.15 浜岡原子力館	西川 聡 大北 茂 山口篤憲 他	ニッケル基600合金用被覆アーク溶接金属の高温 高圧純水中の応力腐食割れ感受性に及ぼすCr濃度 の影響
【溶接】	平成22年度 溶接学会秋季全国大会	2010/9/7 ~ 9 日本大学工学部 (福島県郡山市)	西川 聡 大北 茂 山口篤憲 他	ニッケル基600合金用被覆アーク溶接金属の高温 高圧純水中の応力腐食割れ感受性に及ぼす C Nb濃度の影響
			西川 聡 水野亮二 大北 茂 他	残留応力解析用材料物性値の取得 - 原子炉圧力容器クラッド境界部の残留応力評価 (第1報)-
	水野亮二 西川 聡 他	低合金鋼の相変態が溶接残留応力に及ぼす影響に ついての感度解析 - 原子炉圧力容器クラッド境界部 の残留応力評価(第2報)-		
	防食腐食協会 第57回材料と環境検討会	2010/10/20 ~ 22 沖縄県市町村自治 会館	西川 聡 山口篤憲 他	ニッケル基合金溶接金属/低合金鋼境界部における 微視的残留応力評価手法の検討
溶接冶金研究委員会50周年 シンポジウム	2010/10/7 ~ 8 大阪大学	西川 聡 大北 茂 山口篤憲 他	ニッケル基600合金用被覆アーク溶接金属の高温 高圧純水中の応力腐食割れ感受性に及ぼす化学 成分 熱処理の影響	

## 平成21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】	JIMA2009 総合検査機器展 「アカデミックコーナー」	2009/4/8 ~ 10 東京ビックサイト	関野晃一	光学的応力・ひずみ測定法の非破壊検査法への 適用例
	KOREA-JAPAN JOINT WORKSHOP on Inspection and Mitigation of Dissimilar Metal Welds	2009/7/1 ~ 3 Gyeongju KyoYuk MunHwa HoeKwan, Gyeongju, Korea	古村一朗	DMW Inspection by Real Time 3D-SAFT Technique
	Short Course on Quantitative NDE for Life Extension in Power Plants	2009/7/25 ~ 26 University of Rhode Island Kingston, Rhode Island	古川 敬 古村一朗 山口篤憲	Verification of Inspection Performance of Phased Arrays under Different Inspection Parameters by an Ultrasonic Visualization Technique
	日本金属学会2009秋期 (第145回)大会	2009/9/15 ~ 17 京都大学: 吉田キャンパス	中東重雄 長谷川忠之 他	放射光CTによるステンレス鋼中のSCCき裂観察
	日本原子力学会2009秋の大会	2009/9/16 ~ 18 東北大学 青葉山キャンパス	中東重雄 長谷川忠之 他	線イメージングによるSCCき裂の観察
	「第6回SPring-8 産業利用 報告会ポスター発表」	2009/9/3 東京ステーション コンファレンス (東京丸の内)	中東重雄 長谷川忠之 他	放射光CTイメージングによるステンレス鋼応力腐食 割れ(SCC)き裂の観察
	ISME 2009 (The 14th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics)	2009/9/20 西安 中国	程 衛英 古村一朗	Optimum Inducement of Eddy Current for NDE of Deep Lying Defects

学協会名等	開催日時・場所	発表者等	発表テーマ名	
「非破壊」	第17回超音波による非破壊評価シンポジウム	2010/1/28 ~ 29 きゅりあん	古川 敬 古村一朗	エルボ管及び溶接部におけるガイド波伝搬シミュレーション
			古川 敬 古村一朗	可視化法を用いたフェーズドアレイによる集束音場の観察
	日本原子力学会 2010春の年会	2010/3/26 ~ 28 茨城大学 水戸キャンパス	中東重雄 長谷川忠之 古村一朗 山口篤憲 他	X線イメージングによるステンレス鋼中SCCき裂の観察
	兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 先端技術セミナー2010	2010/3/11 イーグレ姫路 あいめっせホール	中東重雄	ステンレス鋼中SCCのコンプトン散乱 線イメージングによる観察
	SPring-8 金属材料評価研究会 (第2回)	2010/3/1 五反田 ゆうぼうと	中東重雄	ステンレス鋼溶接部のSCCのき裂観察における高エネルギーX線利用における試験片寸法拡大の検討
平成22年度 非破壊検査協会 春季講演大会	2010/5/25 ~ 26 TFT(江東区 有明)	古川 敬 古村一朗	エルボ部におけるねじりモードガイド波伝搬の数値シミュレーション	
「溶接」	溶接学会 平成21年度秋季全国大会	2009/9/9 ~ 11 徳島大学	西川 聡 堀井行彦 他	高温高圧純水環境下の600合金用被覆アーク溶接金属の応力腐食割れ感受性に及ぼすCrの影響
	平成21年度 火力原子力発電大会	2009/10/8 大阪国際会議場	長谷川忠之 西川 聡 他	溶接始末端部の残留応力解析
	溶接構造シンポジウム2009	2009/11/17 ~ 18 大阪大学銀杏会館	水野亮二 他	中性子回折による配管周溶接部の残留応力測定
			長谷川忠之 西川 聡 他	平板試験体を用いた溶接始末端部の残留応力評価
		西川 聡 他	Ni基合金溶接金属部のCBB試験における微視的応力分布の数値解析	

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	
「非破壊」	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	



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
			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
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	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	
【溶接】	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	溶接始末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
	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	

## 論文等表彰

氏名	受賞名等	機関等・受賞日	受賞内容
西川 聡	平成21年度 溶接学会論文奨励賞	(社)溶接学会 平成22年4月21日	本賞は、溶接学会論文集に掲載された論文の中からとくに優秀な一連の論文を対象に授与されるものであり、学術上大いに貢献があったとして送られる賞である。 受賞対象研究:「高温高压純水環境下の600合金用被覆アーク溶接金属の応力腐食割れ形態」
関野晃一	第12回技術研究会 奨励賞	神奈川県非破壊試験技術交流会 平成20年6月13日	本賞は 第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」
関野晃一 古川 敬	平成19年度 学術奨励賞	(社)日本非破壊検査協会 平成20年5月21日	本賞は 研究報告の内容が非破壊検査技術の向上に寄与するところが大きいと評価された者に送られる賞である。 受賞対象研究: 「硝子板に付与したき裂近傍における超音波の可視化」
西川 聡	平成19年度 溶接冶金研究委員会 優秀研究賞	(社)溶接学会 平成20年5月14日	本賞は 溶接冶金研究委員会で発表された研究の中から、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」
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 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。
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	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。
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)	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。
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	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」
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	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。

氏名	受賞名等	機関等・受賞日	受賞内容
青野健二郎	「火力原子力発電」 掲載論文賞	(社)火力原子力発電技術協会 平成14年9月25日	論文「斜角探触子の距離振幅特性曲線と欠陥検出能力の評価」に対して受賞したものである。
志波光晴 西川 聡 米山弘志 山口篤憲	技術賞開発奨励賞	(社)日本溶接協会 平成14年5月29日	研究成果報告「交流磁化法による施工後の溶接熱処理温度評価」に対して受賞したものである。
西川 聡	平成14年度 科学技術奨励賞	(社)日本高圧力技術協会 平成14年5月24日	若手研究者に対する賞で 発表論文「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。
西川 聡	平成13年度 溶接学会 研究発表賞	(社)溶接学会 平成14年4月25日	35歳未満の若手研究者に対する賞で 発表論文「熱処理条件の非破壊的評価手法の検討 - 局部PWHT溶接部の性能評価に関する研究(第1報)」に対して与えられたものである。
青野健二郎	平成13年度 新進賞	(社)日本非破壊検査協会 平成13年5月31日 (NDI協会春季大会)	本賞は平成13年度に行なわれたNDI協会大会での発表の中から特に優れた発表を行なった若手研究者に与えられる賞である。 受賞対象論文: 「溶接金属内部欠陥とUT及びRTによる非破壊信号量との関係」