

研究会成果報告-19

円周ガイド波による 配管減肉検出技術研究会の成果

Interim Report on Research Group of Pipe Inspections and Evaluations Using Circumferential Ultrasonic Guided Waves

徳島大学大学院
理工学研究部
教授 **西野秀郎**
Hideo Nishino

新日鐵住金(株)
設備・保全技術センター機械技術部
主幹 **鹿子慎太郎**
Shintaro Kanoko

(株)シーエックスアール
管理部技術サービス室 **池田 隆**
Takashi Ikeda

日鉄住金物流(株)
技術本部設備技術部
担当部長 **四阿佳昭**
Yoshiaki Shia

(株)日立パワーソリューションズ
コンサルティングエンジニアリング本部
技師 **浅見研一**
Kenichi Asami

(一財)発電設備技術検査協会
溶接・非破壊検査技術センター
所長 **古川 敬**
Takashi Furukawa

JFEスチール(株)
スチール研究所
主任研究員 **四辻淳一**
Junichi Yotsuji

はじめに

鉄鋼業界とガイド波という、一つの重要な文献が真っ先に頭に浮かぶ。1986年の川崎製鉄技報である¹⁾。当該文献の表題は「板波超音波探傷の最適条件の検討とその応用」である。板波とは板材を伝搬するガイド波のことであり、鋼板の検査技術として実用されてきた技術であることは、述べるまでもないであろう。当該文献は、板波の理論とその実験的検証を詳細に記載したものである。32年前の文献であるが、全く色あせていない。現在の高速なPCで理論計算できる環境に比べ、マイコン(文献中に記載)を使った理論計算など、行間から苦勞がしのばれる。もし読んでいなければ、本解説など投げ捨てて、当該文献を読むことを強くお勧めする。緒言中に書かれた「板波」を「ガイド波」に置き換えれば、そのままガイド波の解説文として全く通用する。本誌の解説であれば、はじめに書いておきたかった。

さてガイド波という用語は、2005年前後より自然と使われるようになったと理解している。これはNEDO事業において、配管を伝搬するガイド波を利用した探傷装置が日本に輸入された時期の少々後である。私がガイド波の研究をはじめた当初の1999年には、私とその周辺では英語のGuided waveをそのまま使っていたが、ともあれ日本での普及にも適したガイド波という用語が市民権を得た。ともかくガイド波は、

配管を効率よく検査できる方法として産業界からは強く期待された技術であって、用語もおのずと浸透していった。2009年にはJIS Z2300:2009非破壊検査用語にて正式に規定された²⁾。私も原案作成には関与した。以下引用する。

ガイド波:細長い材料中を長手方向に伝搬する超音波。(注記:配管中を長手方向に伝搬する超音波について使われることが多い。広義には、板波、ラム波、表面波、レイリー波などもガイド波に含まれる。振動の様子が異なる多数のモードが存在し、それぞれのモードで位相速度及び群速度が周波数によって異なる)

本用語は、配管を伝搬するガイド波を用いた探傷法の期待を背負って規定された。その後2010年には、ガイド波を用いた探傷方法を規定した非破壊検査協会規格NDIS 2427^{3,4)}が規定されている。ガイド波を励起検出する2つの世界標準方式である磁歪方式と圧電方式を用いた方式の詳細が示されている。

JIS規格にもあるように、ガイド波といえば、一般には配管の管軸長手方向に伝搬する超音波のことである。ただし、広義には板波を含め種々存在する。本解説記事の背景となる研究会Ⅱで取り扱っているガイド波は、いわゆる一般的なガイド波(以下、管軸ガイド波)ではない。円周ガイド波である。配管の検査に利用するガイド波には違いはないが、管軸ガイド波の伝搬方向は、管軸方向であるのに対し、円周ガイド波

の伝搬方向は、円周方向である。円周ガイド波は曲率を有する円弧状の板を伝わる板波のことである。

2 研究会のあゆみと目的

本解説記事の背景となる本協会の研究会Ⅱの目的は、円周ガイド波を用いて大口径副生ガス配管の欠陥を効率的に検出する方法の基礎確立から、プロトタイプ装置の設計製作と実機適応性の評価である。研究会Ⅱとして3期に渡って実施させていただき、研究成果⁵⁻¹⁵⁾を得ている。

平成24年度から平成25年度の第1期「円周ガイド波による配管減肉検出技術」は、実験室レベルでの検討と理論解析を実施した。ここでは円周ガイド波の欠陥検出性を実験室レベルで検証することを大きな目的として実施した。そのため、実験系を本来サイズの1/10程度とし、4000Aの配管を直径400 mmの配管にスケールダウンし、利用する円周ガイド波の波長も1/10程度に短く、周波数を10倍にした実験を行った。ここでは十分な感度で欠陥検出可能であることを示し、検出性能の合理的な意味づけとして欠陥反射の数学モデルなどを提案している⁸⁾。

平成26年度から平成28年度の第2期「円周ガイド波による配管減肉検出技術Ⅱ」では、実機切り出し配管を用いて実機対応の装置で実欠陥検出性能評価を行い、検出可能性を見出している。ここでは主に実機切り出し配管2種を利用し、円周ガイド波を用いることで、実機での実減肉の検出性を評価し、円周ガイド波の実用可能性を示すことができている¹¹⁻¹⁴⁾。実験による検証に加え、実欠陥の大規模シミュレーションを実施し、円周ガイド波の実現可能性の合理的な評価を行っている。実機で得られた上記の成果は、これまでの集大成と考えている。第5章において詳細を示す。

第2期の肯定的な結果を受けて、現在活動中である平成30年度から平成31年度の第3期「配管減肉スクリーニング検査への円周ガイド波適用性評価」では、実機対応のプロトタイプ装置を設計製作し、実際に適用し評価を行う予定であり、

2018年9月現在進行中である。また、円周ガイド波法などにAIによる減肉評価手法¹⁷⁾を組み込む方策も模索する予定である。

3 本研究の期待される成果

本章では円周ガイド波を用いた副生ガス配管減肉検査法開発の背景と期待される効果を示す。図1にCガス配管に主に発生するダスト堆積による通気差腐食の発生位置を図示する。ダストの堆積部と非堆積部の界面部である4時～5時方向と7～8時方向に軸方向に線状に発生することが解っている。当て板による補修が可能な、肉厚比50%以下の減肉深さの欠陥を円周ガイド波で検出することが目的である。図2に円周ガイド波の伝搬方向と欠陥位置を模式的に示した。円周ガイド波は、管軸方向に直線状に発生する想定欠陥に対し、垂直に伝搬入射することから高い検出感度も期待される。円周ガイド波は、円周方向に周回伝搬するため、4時～5時方向と7～8時方向にある想定欠陥以外の欠陥検出も期待できる。点計測である従来の超音波板厚計測に比べ、円周ガイド波では面で検査範囲を捉えるため、大幅に高い効率で検査可能である。例えば、4000A配管を周方向100 mmピッチで点計測すると119点で、300 mm幅の検査には357点の計測が必要である。一方ガイド波では、右回りと左回りの円周ガイド波を5つの異なる周波数で計測した場合でも10回の測定で済む。机上の比較ではあるが、約35倍の効率化が見込める。

4 ガイド波解説

ガイド波の検査手法としての最大の利点は長距離伝搬であり、検査範囲が広いことである。一方で、厄介な特徴としてガイド波には多モード性と速度分散性がある。本章では、上記2つの特徴を板波を中心に理論計算結果^{18,19)}を用いて解説

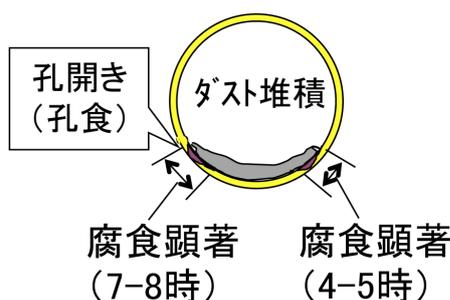


図1 ダスト堆積による通気差腐食

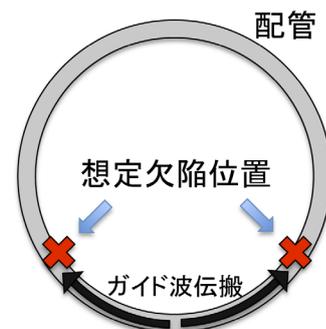


図2 通気差腐食を想定した円周ガイド波の適用イメージ

する。板を伝搬するガイド波である板波は、SH板波とLamb波に大別される。図3に示すようにSH板波は、波動振動が板材表面に平行な板波である。Lamb波は波動振動が板材表面に垂直な板波である。配管の検査では、SH板波を利用することが圧倒的が多い。これは、内部流体の影響が原理的には無いことが最大の理由である。

図4 (a) と (b) に板厚と周波数の積に対するSH板波とLamb波の群速度の関係である速度分散曲線を示す。多数の曲線が多モードを示している。それぞれ振動の様式が異なる別々のモードである。周波数や板厚の増加と共にモードの数は増加する。複数のモードが存在する領域で、欠陥や溶接線、エルボなどが存在すると、相互にモード変換が起こり伝搬挙

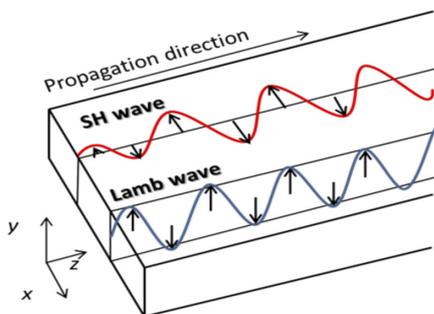


図3 SH板波とLamb波の振動方向の模式図

動の複雑化が避けられないため、SH板波ではSH₀モードが存在する低域(図4 (a) の0 - 1.5 MHz mmの領域)のみを、Lamb波ではS₀モードとA₀モードのみが存在する低域(図4 (b) の0 - 1.5 MHz mmの領域)のみが実用的には多く用いられている。またそれぞれのモードは周波数や板厚の変化に対して音速が変化する速度分散性を有している。従来の超音波探傷では、継続時間の短い広帯域パルス波を用いて時間分解能を向上させて、欠陥位置の正確な同定を行なっている。広い周波数成分から成る広帯域パルス波は、速度分散性があると伝搬と共に時間パルス幅が増大し(文字通り分散する)時間分解能は低下する。従って、実用的には速度分散性が低いモードや領域を用いることが行われている¹⁸⁻²⁰⁾。SH板波の最低次モードであるSH₀モードは非分散であり、上記時間分解能の点ですぐれている。さらに図4 (a) に示すように低域において単一モードであり、モード変換もなく最も利用しやすい板波のモードである。ただしSH板波は、板材表面に対して平行に振動成分を持つので、板材面に垂直な振動成分を有するLamb波に比べて励起検出には工夫が必要になる。

図5 (a) と (b) には、肉厚と外径の比が1/20のパイプ(100A schedule 40で約1/19)の円周方向に伝搬する円周SH板波と円周Lamb波の速度分散曲線を示した¹⁸⁻²⁰⁾。図4に示す板の場合と比較すると細部が異なっているが概略はよく似ていることが確認できる。肉厚と外径の比が1/10より大きくなる

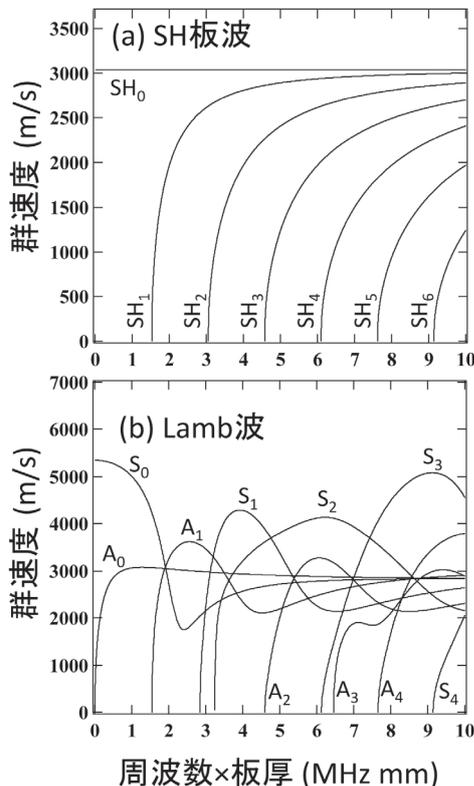


図4 鋼板を伝搬する板波の速度分散関係

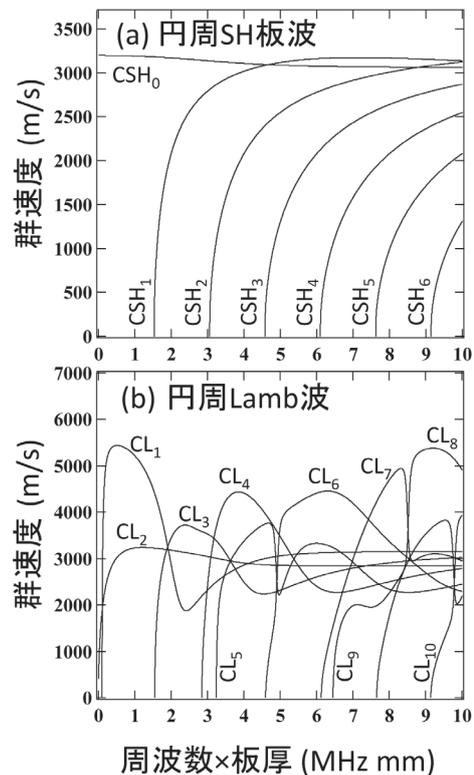


図5 t/d=1/20の配管を円周方向に伝搬する板波の速度分散関係

と平板との差異が無視できなくなることが確認できている。一方で、副生ガス配管ではほとんどの場合1/100以下であり、板材と配管円周方向で伝搬挙動に大差はない。従来から良く知られているSH板波とLamb波の理論挙動を用いることが可能である。

5 ガイド波による実機欠陥の検出と検証

研究会の第2期においては、主に実機の切り出し配管を用いた円周ガイド波の検出実験を行っている。ここでは、管軸ガイド波において実機適用が既になされているガイド波励起方法である磁歪方式と圧電方式の両方⁵⁾を、円周ガイド波に適用させて得た種々の結果について示す。図6に示す圧電方式のガイド波探触子⁶⁾は、振動子に電圧を印加することでガイド波振動を励起する仕組みとなっている。探触子と試験体表面の接触部は、接触媒質を用いないドライカップリング方式であり、音を伝達させるために押し付け荷重をかけている。図7に示す磁歪方式のセンサー⁷⁾は、変動磁場を印加すると振動を起こす磁歪材料(Ni薄板)を配管に貼り付け、その上に励振磁場を与えるためのコイルを置いた構造である。コ

イルに交流電流を流すことで、磁歪材料が振動し、ガイド波を励起する。センサーは軽量かつコンパクトで、狭あい部の設置可能性にも優れている。また、貼り付けた振動材料をそのままにしておくことで、モニタリング用途も可能となっている。上記2方式は、ガイド波の励起検出方法として世界的に事実上標準方式(de fact Standard)として広く知られた方法である。

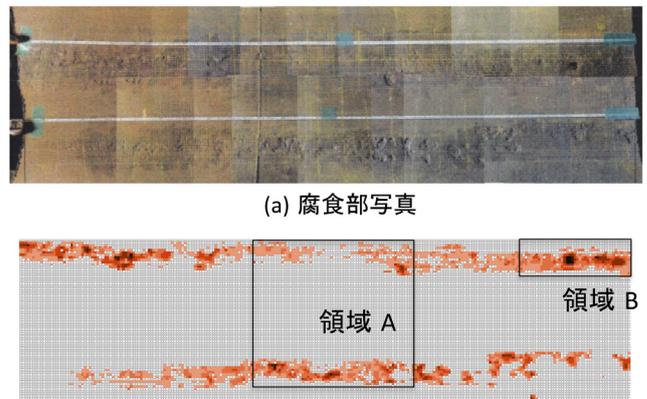
以下実際に計測した事例に関して示していく。図8(a)に、一例として切り出し鋼配管(外径1400 mm、肉厚6 mm、長さ約2000 mm)の内部に出来た腐食写真を示した。横方向が管軸方向で、縦方向は円周方向を示す。配管内部に出来た欠陥深さは、10 mm × 10 mmのメッシュ上でデプスゲージで0.1 mmの精度で計測し、減肉深さ分布を得ている⁶⁾。図8(b)に欠陥深さ分布を濃淡で示した。より黒いほど深い減肉を示す。管軸方向である横方向に概ね2本の細長い減肉分布が確認できる。これは図1で示した4時~5時方向と7~8時方向に軸方向に線状に発生する減肉に対応している。図8(b)中①で示した領域Aの拡大図を図9に示す。図9の中央真上



図6 圧電式ガイド波励起検出装置部



図7 磁歪式ガイド波励起検出装置部



(b) 腐食による減肉深さ分布

図8 実機にできた通気差腐食

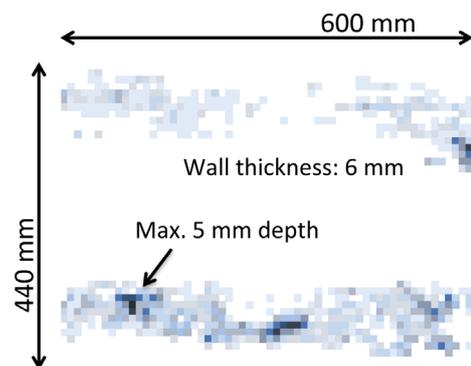


図9 実機にできた通気差腐食による減肉分布拡大図(図8の領域Aに対応する)

領域に設置した磁歪式センサを用いて検出したRF時間波形を図10 (a) に示した。周波数は36 kHzで2サイクルのトーンバースト波を用いている。伝搬時間0.7 msと0.95 ms付近に振幅の大きな2つの波束が確認できる。それぞれ図8上方と下方の減肉群での反射波である。図10 (b) には、FEM数値シミュレーション (伊藤忠テクノソリューションズのComWave™、以下FEM) を用いて得られたRF時間波形を示した。数値化された減肉分布を用いて計算した結果である。実験で得られたRF時間波形とよく一致していることが確認できた^{10,16)}。図11には、FEMで得られた減肉部での挙動を示

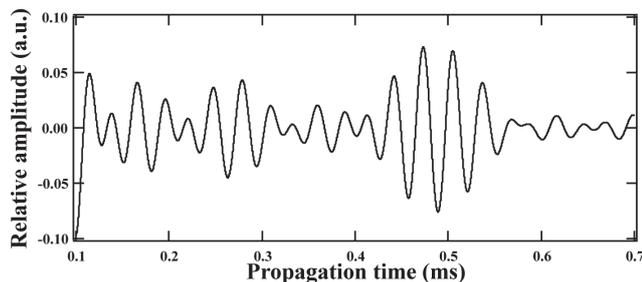
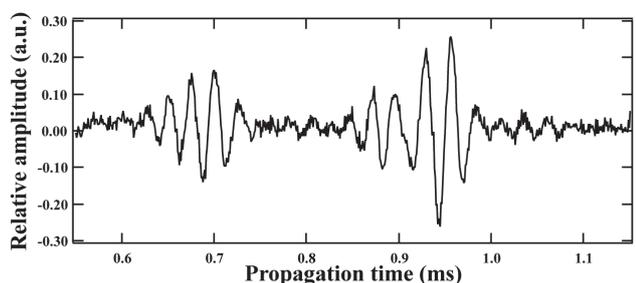


図10 図9に示す減肉部で得られた検出波形：
(a) 磁歪式センサで検出した減肉信号
(b) FEMシミュレーターで得た減肉信号

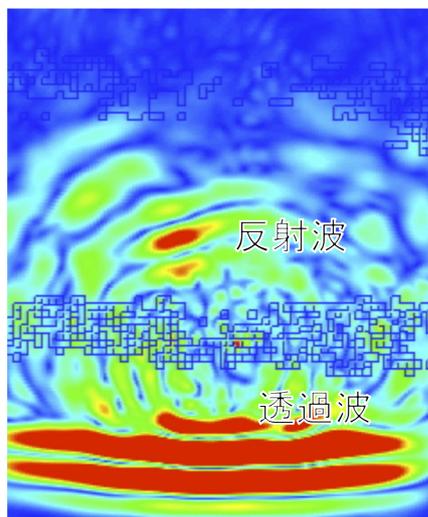


図11 FEMシミュレーションによる腐食部での反射挙動

している。紙面では伝えられないが、動画によって伝搬挙動の確認が可能である^{10,16)}。

数値化された減肉分布データが存在することで、上記に示すようにFEMで実験の再現が可能となる。加えてここでは、減肉分布データを利用し、NCフライス盤にて鋼材上に加工した減肉の検出実験結果と、同一減肉データによりFEMで計算した結果としてRF時間波形を示す^{10,16)}。減肉分布データとしては、図8 (b) の右上の四角で示した領域を用いた。図12には、得られた時間波形の周波数30 kHzの場合を示しているが、実験とシミュレーションでよく一致した結果が得られている。実機での計測は、様々な制約もあり実施が困難な場合も多く、とくに多くのデータを取得することは現実的にはなかなか困難である。FEMなどを利用して行くことは今後AIへの応用の点¹⁷⁾からも重要である。

6 まとめ

本報告では、ガイド波についての一般的な紹介から、JIS規格や非破壊検査協会規格、またガイド波の簡単な波動として

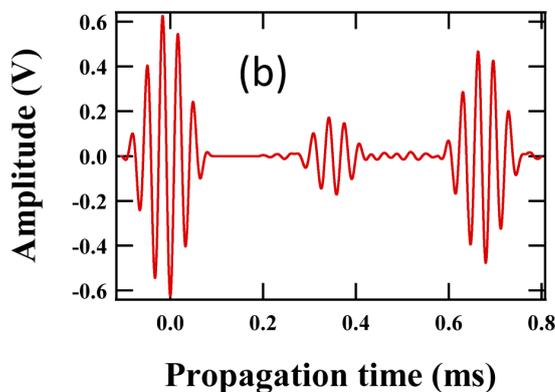
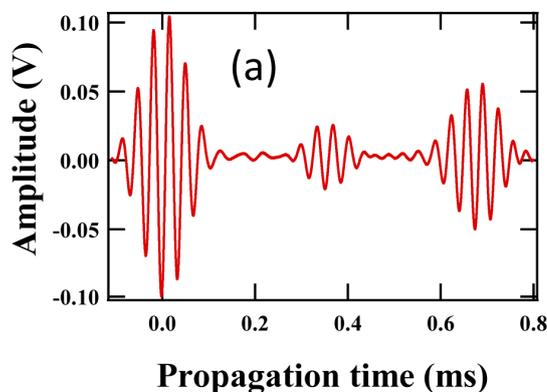


図12 図8の領域Bの減肉分布データを用いてNCフライス盤で厚さ6 mmの鋼板に加工した人工減肉を圧電式センサーで検出した結果 (a)、および同一減肉分布データを用いてFEMシミュレーションを行った結果 (b)。両者はよく一致した

の特徴を述べた。さらに本鉄鋼協会における3期に渡る研究会Ⅱとしての活動のあゆみを述べさせていただいた。本研究会Ⅱにおける活動は、大口径である副生ガス配管の円周方向に周回伝搬する円周ガイド波を用いることで、効率的に副生ガス配管の検査を行える方法の構築にある。本報告の最後には、実機適用した例と、合理的な研究開発のためのFEMシミュレーション結果を含めた検証結果を示した。全てのデータの紹介はできないが、円周ガイド波による検出が十分に可能であることを示すことができた。また、今回は詳しく示すことができなかったが、配管の広い範囲に減肉が進むとガイド波の減衰が大きくなることが実験で確認できている。直接的に欠陥をパルスエコーで検出することが困難になる一方で、劣化の進んだ配管は減衰を確認することで判断できる。減衰の確認もパルスエコー法による減肉の評価も同じ装置で実施できることから両者を賢明に利用して減肉状態を評価することが必要である。現在は、研究会Ⅱの第3期を実施中であり、そこでは実機適用のためのプロトタイプ装置の設計と製作を行い、出来上がった装置を実機に適用して、その有効性を検証する予定である。

謝辞

本研究の遂行にあたっては、鉄鋼各社に有形無形の多数の支援をいただいております。また、研究開発にあたっては多くの助言をいただいております。ここに感謝の意を表します。また、徳島大学西野研究室の歴代の修士学生である村上侑平くん、渡辺雄太くん、小畑智くん、橋爪環樹くん、石原準也くんには、研究実務に多大に貢献している。彼ら無くして研究成果はない、謝意を表す。

参考文献

- 1) 市川文彦, 栗田邦夫, 丸山英雄, 高橋暁: 川崎製鉄技報, 18 (1986), 192.
- 2) 非破壊検査用語集, JIS Z2300: 2009
- 3) 日本非破壊検査協会規格, NDIS 2427: 2010
- 4) 西野秀郎, 林高弘: 非破壊検査, 61 (2012), 1.
- 5) 西野秀郎, 浅見研一, 池田隆, 四辻淳一, 鹿子慎太郎, 阿佳昭: CAMP-ISIJ, 28 (2015), 716, CD-ROM.
- 6) 池田隆, 四辻淳一, 松本智敏: CAMP-ISIJ, 28 (2015), 717, CD-ROM.
- 7) 浅見研一: CAMP-ISIJ, 28 (2015), 718, CD-ROM.
- 8) 村上侑平, 石川真志, 西野秀郎: CAMP-ISIJ, 28 (2015), 719, CD-ROM.
- 9) 小畑智, 西野秀郎, 石川真志: CAMP-ISIJ, 29 (2016), 237, CD-ROM.
- 10) 橋爪環樹, 石川真志, 西野秀郎, 池田隆, 浅見研一: CAMP-ISIJ, 29 (2016), 679, CD-ROM.
- 11) 浅見研一, 西野秀郎: CAMP-ISIJ, 29 (2016), 680, CD-ROM.
- 12) 池田隆, 四辻淳一: CAMP-ISIJ, 29 (2016), 681, CD-ROM.
- 13) 池田隆, 四辻淳一: CAMP-ISIJ, 30 (2017), 295, CD-ROM.
- 14) 浅見研一, 西野秀郎: CAMP-ISIJ, 30 (2017), 296, CD-ROM.
- 15) 小畑智, 渡邊雄太, 西野秀郎: 信学技報, 114 (2015), 45.
- 16) 橋爪環樹, 石川真志, 西野秀郎: 第24回超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集, (2017), 43
- 17) 橋爪環樹, 石川真志, 西野秀郎, 古川敬, 四辻淳一, 鹿子慎太郎: CAMP-ISIJ, 32 (2018) 114, CD-ROM.
- 18) 西野秀郎: 非破壊検査, 62 (2013), 29.
- 19) H. Nishino, R. Yokoyama, H. Kondo and K. Yoshida: Jpn. J. Appl. Phys., 46 (2007) 4568.
- 20) H. Nishino, R. Yokoyama, K. Ogura, H. Kondo and K. Yoshida: Jpn. J. Appl. Phys., 47 (2008), 3885.

(2018年9月25日受付)