

平成 21 年 5 月 25 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2006 - 2008

課題番号：18560697

研究課題名（和文）超音波ガイド波の複雑構造部における伝搬挙動解明に関する基礎的研究

研究課題名（英文） Fundamental research of propagation phenomena of ultrasonic guided waves at complex piping structures

研究代表者 西野 秀郎(NISHINO HIDEO)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・准教授

50316890

研究成果の概要：近年、原子力発電所など高経年化が進む設備が急増し、それらの健全な稼働のために有望な検査技術が求められている。本研究では、配管を効率よく検査する方法として注目されている超音波ガイド波に注目し、配管の複雑形状部においても適用可能にするための基礎的研究を実施した。配管の軸方向に伝搬する軸方向ガイド波と、周方向に伝搬する周方向ガイド波を研究対象とし、軸方向ガイド波では、(1)効率的励起法の提案と検証、(2)群速度計測による減肉測定法の提案と検証、(3)エルボパイプでの伝搬挙動の解明を実施した。また周方向ガイド波では、(4)伝搬モードの選択的励起方法の確立、(5)伝搬モード解析の実施、(6)詳細計測への周方向ガイド波利用の提案を実施した。それぞれにおいて成果を得て、雑誌論文 6 件を発表している。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	1,500,000	0	1,500,000
2007 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	600,000	4,100,000

研究分野：機械工学、機械材料・材料加工分野・超音波非破壊検査

科研費の分科・細目：材料工学，材料加工・処理

キーワード：超音波，非破壊検査，材料評価

1. 研究開始当初の背景

大型構造物の運用には、安全性確保のための信頼性の高い検査技術が欠かせない。評価の信頼性向上には詳細なる従来法による全数検査に勝るものは無いが、検査箇所の大さから、とても現実的ではない。評価の信頼性を担保した上で効率的な検査技術の構築が不可欠である。本申請研究では、効率的な検査手法としてのガイド波に注目している。ガイド波は、パイプの 5 メートル程度の範囲を一度に計測できる優れた方法で、申請者が日本において先駆的に研究を進めているも

のである。一方で、国内外においてガイド波を用いた探傷法の大きな課題の 1 つは、複雑部のガイド波の伝搬挙動の解明である。具体的には、エルボ部、フランジ部を対象とするガイド波の伝搬挙動解明研究と最適な方法の提案研究の実施が、エロージョン・コロージョン部位、スラッジの堆積や錆びコブ等、経年劣化による変質の検査の高度化推進に必須であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ガイド波を用いて配管の複雑形状部における伝搬挙動の一端を明ら

かにし、さらに伝搬挙動を基礎とした新しい検査手法の提案を行うことにある。実験的にガイド波を励起する有効な方法を提案し、かつ理論とシミュレーションによる後ろ盾を与えることを目的としている。具体的には、エルボ管でのガイド波の挙動解明や、減肉計測手法の提案、複雑形状部ではS/Nが低下することを勘案した励起効率の向上法を提案できた。また、複雑系上部での詳細な計測に最適と思われる配管の円周方向に伝搬する周ガイド波による計測方法の提案を行っている。

3. 研究の方法

研究は、大きく軸方向伝搬のガイド波と、周方向伝搬のガイド波について行った。

(1) 軸方向伝搬ガイド波の研究手法

①エルボ管でのガイド波伝搬挙動観察

レーザー超音波法を用いて、エルボパイプに広帯域のガイド波を励起し、エルボ部を伝搬するガイド波の伝搬挙動の観察を行った。Fig. 1に実験に用いた外径5mmで肉厚1mmのステンレスパイプの群速度分散曲線を示すが、これら多くのモードがどのように変化するかを実験的に観察している。

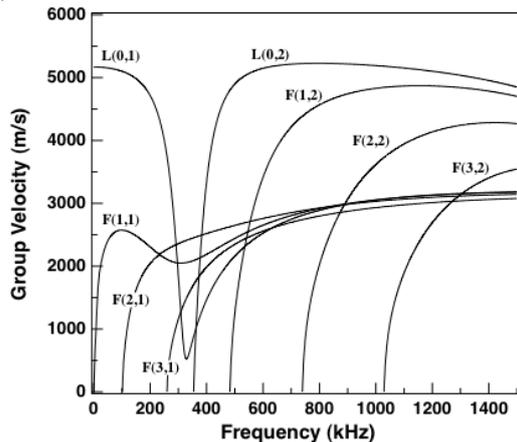


Fig. 1 Group velocity dispersion of 5 mm outer diameter 1 mm thick stainless steel pipe.

②群速度計測による肉厚推定法

研究の実施において、周波数に対する音速の関係などを理論的に理解する必要があり、本研究では理論解析が重要な位置を占めている。理論解析を進めるなかで、配管減肉で音速が増加する関係が予測された。そこで、理論的詳細を詰め、さらに検証実験を実施し、その有効性を確認した。金属パイプで、肉厚外径比が概ね1/5より小さい範囲で減肉量の評価が可能であることを示した。

③効率的ガイド波励起検出法

ガイド波が、エルボなど複雑形状部を伝搬する際には、計測には不要な高次モードへの変換を含めエネルギーロス是非常に大きい。複雑部での計測性の向上のために、この減少分を補うことができれば良い。そこで申請者は、送受信センサーの近傍にガイド波の反射体

を設けることで、励起検出効率を増加させる方法を考案した。非常に簡便で、効率は従来法に比べ最大で3倍を実現している。また、反射体を設置するだけなので、設置場所に特別の制約がない。

(2) 周方向ガイド波の研究手法

①周方向ガイド波の選択的励起法

周方向ガイド波では、数MHz程度の周波数を用いることが可能であり、かつ周方向の広い範囲で効率的な計測が可能である。複雑形状部では、ある特定の部位に欠陥が発生することが解っており、そこに特化した効率的計測手法が求められている。ここでは、周方向に伝搬するガイド波を用いることを提案し、必要なモードを選択的に励起できる方法を提案している。周ガイド波は、円周ラム波と円周SH波に分類され、その伝搬特性が異なる。伝搬特性を元に選択的に励起できることを提案し、横波センサーを用いた検証実験を行っている。励起検出特性の実験と理論を用いて明らかにしている。

②広帯域励起によるモード解析

複雑形状部の計測必須部位への適用が期待される周方向ガイド波において、前記①では必要なモードを選択的に励起できる方法を提案している。一方で、各モードを広い周波数範囲で励起検出することができなかった。ここでは、トーンバースト波の中心周波数を変化させながら励起検出することで、広い範囲で各モードを励起検出できる方法を提案し、検証した。理論的な推定と実験結果が非常に良く一致することを示した。分散関係に関する多くの知見を得ることができた。

4. 研究成果

(1) 軸方向伝搬ガイド波の研究手法

①エルボ管でのガイド波伝搬挙動観察結果

Fig. 2に曲げ角度0°から90°におけるエルボ管を透過伝搬した波形を示す。特に80μs

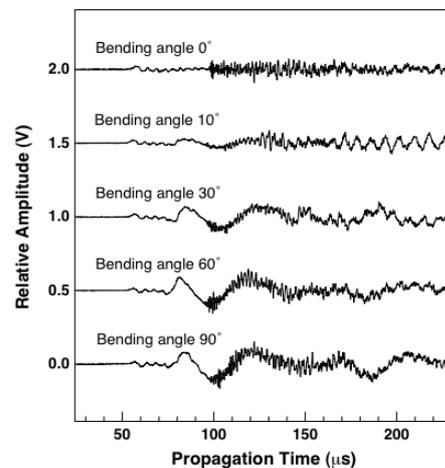


Fig. 2 Time domain signals for different bending angles.

近傍に低周波の成分が、角度の増加に従ってより大きく観察されることが確認できる。後に時間周波数解析から明確になるが、この波は、L(0,1)モードで伝搬した波が、F(1,1)モードにモード変換した波であることが分かっている。モード変換の効率が曲げ角度の増加に伴い大きくなっていることが確認できた。Fig. 3には、直管を伝搬した時間波形にwavelet変換を施し、時間周波数解析した結果を示す。L(0,1), F(1,1), F(2,1)が強く励振

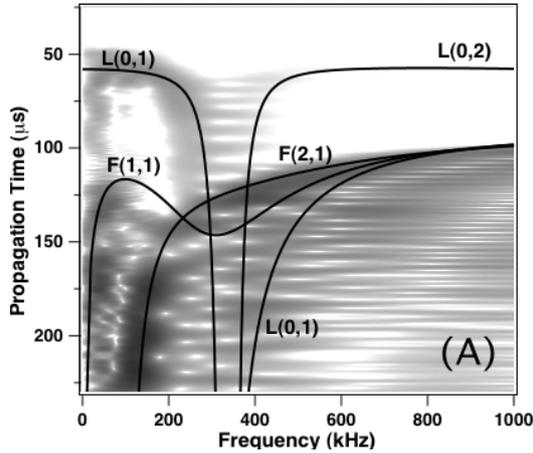


Fig. 3 Time frequency analysis of guided wave propagating along the straight pipe.

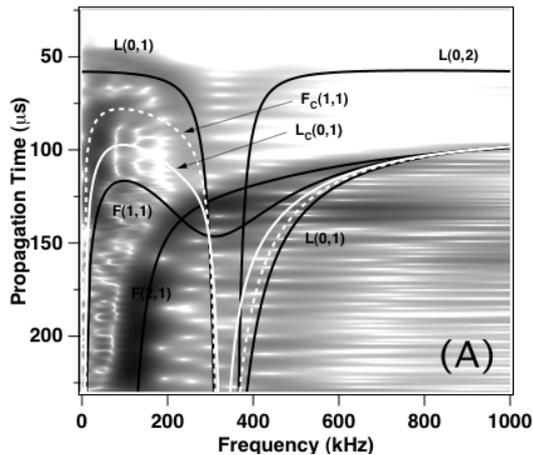


Fig. 4 Time frequency analysis of guided wave propagating along the 90° bended pipe.

されていることが確認できる。Fig. 4には、90°エルボを透過伝搬した時間波形の時間周波数解析結果を示す。白の実線と点線で、F(1,1)からL(0,1)へのモード変換波と、L(0,1)からF(1,1)へのモード変換波の理論値を示す。F(1,1)へのモード変換波が明瞭に確認できており、応用計測のための重要な知見を得ることができた。この結果よりエルボ部でのモードの派生を定量的に得ることができている。結果は、Ultrasonicsに掲載済みである。

②群速度計測による肉厚推定法

Fig. 5に肉厚外径比 t/d の違いによる群速度

分散曲線を示す。実線はL(0,1)モードを示し、点線はL(0,2)モードを示す。各分数は、肉厚外径比を示している。ここで2つのモードの最大音速値を見てみる。L(0,1)モードは、 t/d

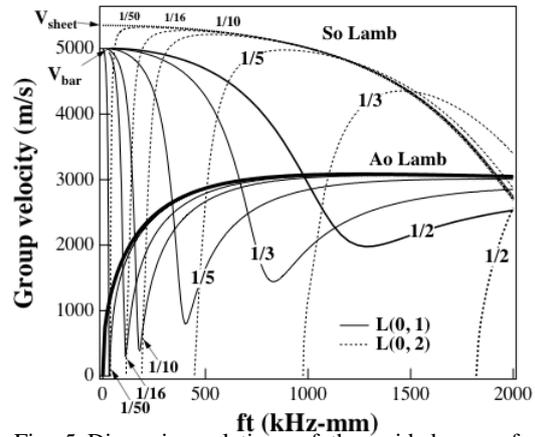


Fig. 5 Dispersion relations of the guided wave for different thickness/diameter.

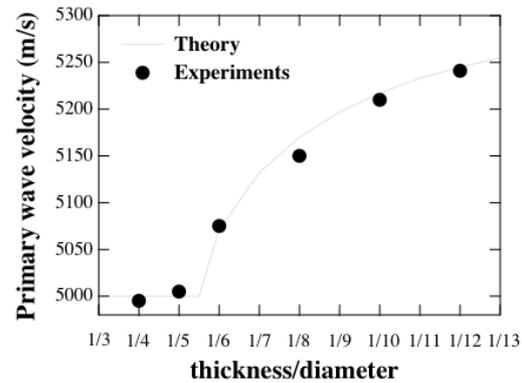


Fig. 6 Primary wave velocity as a function of thickness/diameter of pipes.

による分散曲線の変化は見られるが、最大音速は、DC成分における5000m/sで、 t/d による依存性は無い。一方でL(0,2)モードでは、 t/d の減少にともなって最大音速が上昇することが確認できる。 $t/d=1/5$ の時に、L(0,2)モードの最大音速がL(0,1)のそれに等しくなる。すなわち肉厚外径比が1/5以下では、全体として最大音速が上昇する。これはすなわち、減肉により音速が上昇することを示している。この特徴を利用すれば、減肉の計測が可能である。Fig. 6に肉厚外径比による最大音速の関係を示した。●が実験値を示し、実線は理論値である。実験値と理論値が非常に良く一致することが確認できる。ノッチや亀裂状の欠陥の計測には、多くの研究成果が報告されているが、ここで示すような広範囲に薄く成長した減肉欠陥の計測方法は見当たらない。本方法はこれまでにない有望な方法であると考えている。結果は音響学会誌に掲載済みである。

③効率的ガイド波励起検出法

Fig. 7に送信効率を向上させるために反射体

を設置した配置図を示す。送信センサーからは、左右にガイド波が励起される。このときに従来までは、右伝搬波は信号処理などにより消去していた。本方法では、送信子右に反

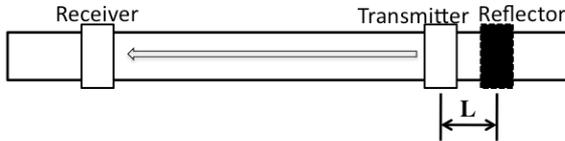


Fig. 7 schematic illustration of a pipe, transmitter, receiver and reflector.

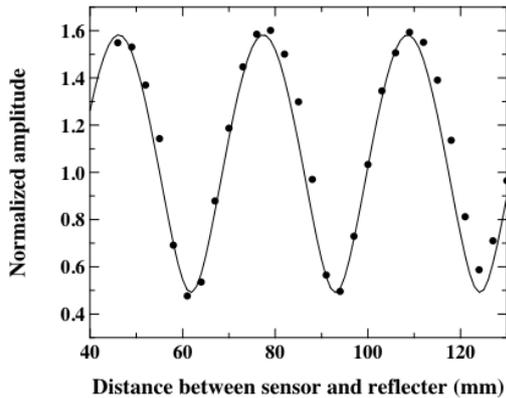


Fig. 8 Normalized amplitude as a function of distance between the transmitter and reflector. The line and dots indicate theory and experiments.

射体を設けることで右伝搬波を反射させ、左伝搬波に重ね合わせることで振幅を増幅させることを考案した。反射体と送信子あるいは受信子の距離は、圧電型センサーの場合で $(2n+1)\lambda/4$ (λ は波長)、磁歪型センサーの場合で $n\lambda/4$ に設定すればよいことを励起原理から推定し、実験的に確認している。Fig. 8に圧電センサーの場合における反射体と送信子の距離と得られる信号振幅値を示した。振幅値は、反射体がない時が1になるように正規化している。この図は、送信効率だけを示すが、受信効率をあわせると2.6倍程度の向上が確認できている。本来の目的である複雑部への適用を含め、広く応用できる原理を確立できた。

(2)周方向ガイド波の研究結果

①周方向ガイド波の選択的励起法

周ガイド波は、円周ラム波と円周SHに分類される。円周ラム波はその振動変位に周方向の振動変位を有し、円周SHは軸方向変位のみを有している。そこで、横振動を発生する横波センサーを用いて選択的に励起することを提案した。すなわち、横波センサーの振動方向を周方向にすれば円周ラム波が励起され、軸方向にすれば円周SH波が励起される。また振動方向を任意の角度に設定すれば、両者が励起される。Fig. 9に上から周方向に設置した場合、 45° の角度に設置した場

合、軸方向に設置した場合に得られる波形を示した。周方向設置では、円周ラム波が励起検出され、その音速は5410m/s(理論値5374m/s)であった。軸方向設置では、円周SH波が励起検出され、その音速は、3255m/s(理論値3180m/s)であった。両者同時の励起検出も可能であることもFig. 9より確認できる。本内容は、理論解析を詳細に実施しておりAcoustical Science and Technology誌とJJAP誌に掲載済みである。

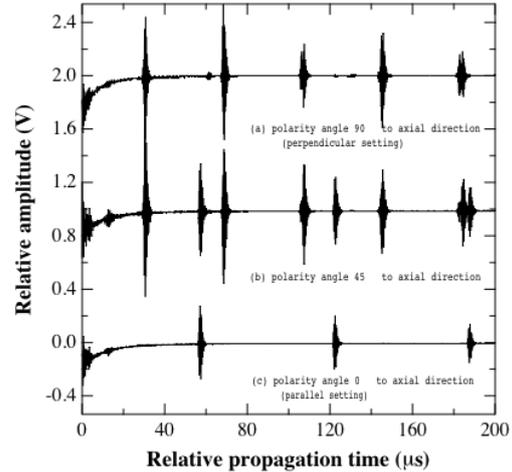


Fig. 9 Time domain signals of the circumferential guided waves for (a) the C-Lamb wave generation, (b) the C-lamb and the C-SH waves generations and (c) the C-SH wave generation.

②広帯域励起によるモード解析

広帯域励起検出の一例として、広帯域励起した円周SH波の時間周波数関係をFig. 10に示す。実線は理論値で、実験値と良く一致していることが確認できる。本成果は、JJAP誌に掲載済みである。

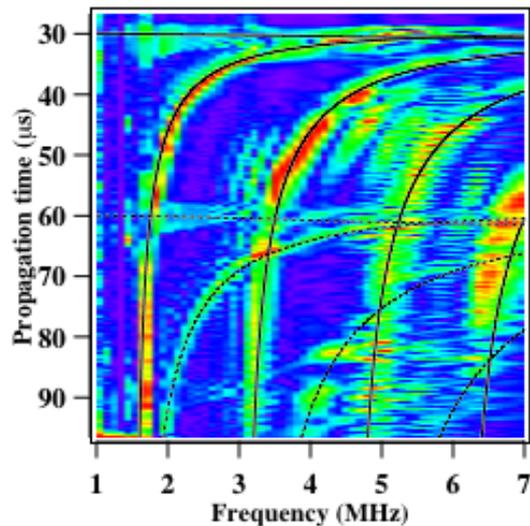


Fig. 10 Results of the time-frequency analysis of the circumferential guided waves generated by tone-burst signals having different center-frequencies for wide band frequency generation and detection.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- [1] Hideo Nishino, Kenichi Yoshida, Cho Hideo and Takemoto Mikio, "Propagation phenomena of wideband guided waves in a bended pipe", *Ultrasonics* 44 (2006) 1139-1143. Reviewed.
- [2] 西野 秀郎, 吉田 憲一, 長 秀雄, 竹本 幹男"パイプを伝搬するGuided waveの速度分散関係を利用した肉厚外径比の推定法とレーザー超音波法を用いた検証", *日本音響学会誌*, 63 (2007) 13-20. 査読あり
- [3] Hideo Nishino and Kenichi Yoshida, "Simple method of generating for circumferential shear horizontal waves in a pipe and their mode identifications", *Acoustical Science and Technology*, 27 (2006) 389-392. Reviewed.
- [4] Hideo Nishino, Yokoyama Ryuji, Kondo Hironori and Kenichi Yoshida, "Generations of circumferential guided waves using a bulk shear wave sensor and their mode identifications", *Japanese Journal of Applied Physics*, 46 (2007) 4568-4576. Reviewed.
- [5] Hideo Nishino, Yokoyama Ryuichi, Ogura Keiji, Kondo Hironori and Kenichi Yoshida, "Tone-burst generation of circumferential guided waves by a bulk shear wave sensor and their wide-range frequency analyses", *Japanese Journal of Applied Physics*, 47 (2008) 3885-3893. Reviewed.
- [6] Hideo Nishino, Yasuhiro Tanaka, Yasuhisa Kato and Kenichi Yoshida, "Efficient generation and detection of a guided wave in a pipe using guided wave reflectors", *J. Solid Mech. and Mater. Engr.* 3 (2009) 267-277. Reviewed.

[学会発表] (計 18 件)

- [1] 加藤 泰久, 浜田 光, 吉田 憲一, 西野 秀郎 : パイプを伝搬するガイド波の送受信効率向上に関する検討, *日本機械学会年次大会講演論文集*, Vol.1, 305-306 頁, 2006 年 9 月.
- [2] 西野 秀郎, 吉田 憲一 : 円周方向に伝搬するガイド波モードの選択的励起, *日本機械学会年次大会講演論文集*, Vol.1, 303-304 頁, 2006 年 9 月.
- [3] 西野 秀郎, 横山 隆一, 吉田 憲一 : パイプの円周方向に伝搬するSH波とLamb波のバルク横波センサーを用いた励起, *超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム*, 417-418 頁, 2006 年 10 月.
- [4] 加藤 泰久, 吉田 憲一, 西野 秀郎 : 反射体を利用したガイド波の効率的励起方法に関する検討, *秋季大会講演論文集*, 163-164 頁, 2006 年 10 月.
- [5] 近藤 浩徳, 吉田 憲一, 西野 秀郎 : 反

射体を用いたガイド波の効率的励起検出方法, *超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集*, 2007 年 1 月.

- [6] 横山 隆一, 吉田 憲一, 西野 秀郎 : トーンバーストによる円周方向ガイド波の励起と時間周波数解析, *超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集*, 2007 年 1 月.
- [7] 近藤 浩徳, 加藤 泰久, 吉田 憲一, 西野 秀郎 : MsSセンサーによるガイド波の効率的送受信に関する研究, *中国四国支部第 45 期総会講演会講演論文集*, 111-112 頁, 2007 年 3 月.
- [8] 横山 隆一, 吉田 憲一, 西野 秀郎 : 円周方向ガイド波の励起と時間周波数解析, *中国四国支部第 45 期総会講演会講演論文集*, 119-120 頁, 2007 年 3 月.
- [9] 加藤 泰久, 近藤 浩徳, 吉田 憲一, 西野 秀郎 : パイプを伝搬するガイド波の反射体を利用した効率的励起検出に関する検討, *中国四国支部第 45 期総会講演会講演論文集*, 111-112 頁, 2007 年 3 月.
- [10] 西野 秀郎, 近藤 浩徳, 吉田 憲一 : 配管を伝搬するガイド波の効率的励起検出法, *日本保全学会第 4 回学術講演会*, 2007 年 7 月.
- [11] 近藤 浩徳, 加藤 泰久, 吉田 憲一, 西野 秀郎 : 磁歪センサーと反射体を用いた実用的なセンサー配置におけるガイド波の効率的励起検出法, *日本機械学会 2007 年度年次大会*, 2007 年 9 月.
- [12] 西野 秀郎, 横山 隆一, 吉田 憲一 : パイプの円周方向に伝搬するガイド波の広帯域励起, *第 15 回機械材料・材料加工技術講演会M&P2007*, 417-418 頁, 2007 年 11 月.
- [13] 近藤浩徳, 吉田憲一, 西野秀郎 : 磁歪センサーと反射体におけるガイド波の反射と透過に関する検討: *機械学会年次大会 2008 講演論文集* 1 p335
- [14] 小倉圭二, 近藤浩徳, 吉田憲一, 西野秀郎 : 反射体を利用したガイド波励起検出法による欠陥検出性能の評価: *機械学会年次大会 2008 講演論文集* 1 p337
- [15] 近藤浩徳, 小倉圭二, 田中康浩, 吉田憲一, 西野秀郎 : 反射体を用いたガイド波の高効率励起法に関する基礎的検討 (磁歪センサー部と反射体におけるガイド波の反射率と透過率に関する考察): *非破壊検査協会平成 20 年度春季大会講演論文集* p155
- [16] 西野秀郎, 小倉圭二, 吉田憲一 : 反射体を利用した高効率ガイド波励起検出法による欠陥の検出: *2008 年超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム*
- [17] 小倉圭二, 吉田憲一, 西野秀郎 : 反射体を用いたガイド波の高効率励起検出法による欠陥検出性能の検証, *第 16 回超音波による非破壊評価シンポジウム* 2009, 1 月
- [18] 増田修一, 近藤浩徳, 吉田憲一, 西野秀郎 : 反射体を用いたガイド波の高効率励起

法のメカニズムの基礎的検討～磁歪センサ
と反射体におけるガイド波の反射率と透過
率の評価～、第 16 回超音波による非破壊評
価シンポジウム 2009, 1 月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西野 秀郎, (NISHINO HIDEO) 徳島大学大学院
ソシオテクノサイエンス研究部・准教授,
50316890

(2) 研究分担者

吉田 憲一, (NISHINO HIDEO) 徳島大学大学
院ソシオテクノサイエンス研究部・教授,
50200986