Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-07-08

電磁超音波探触子を用いたガイド波検査システムの開発とその高度化に関する研究

古澤，彰憲

(Degree)
博士（工学）

(Date of Degree)
2016-03-25

(Date of Publication)
2017-03-01

(Resource Type)
doctoral thesis

(Report Number)
甲第6648号

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006648

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。

（別紙様式３）

論文内容の要旨

氏　　名　古澤　彰憲

専　　攻　システム科学専攻

論文題目（外国語の場合は，その和訳を併記すること。）

電磁超音波探触子を用いたガイド波検査システムの開発とその高度化に関する研究

指導教員　小島　史男

（注）２，０００字～４，０００字でまとめること。

原子力発電所，製鉄所，各種化学プラント内配管をはじめ公道の照明柱やガードレール支柱に至るまで配管構造物の高経年化に伴う劣化，減肉事象が社会問題となっている．原子力発電所においては，2004年８月の関西電力美浜原発の配管破断事故を受け原子力安全保安院（現在の原子力規制委員会）が日本機会学会に配管減肉の管理規程策定の要請を行い，2005年から各種発電プラントにおける配管減肉管理規定が策定された．製鉄所および化学プラントにおいては，各社独自に策定した保全指針に則って保全業務に当たっており，公道の照明中に関しては平成25年６月の道路法の改正により５年に一度の目視点検が義務化された。配管構造物の高経年化に伴う劣化事象は，それ自体が事故や災害の原因となるだけでなく，検査，予防に必要な人的，時間的コストが大きく，今後さらなる社会問題として顕在化することは明らかである．

現在の配管構造物の検査方法は主に超音波検査法（以下，UT）を用いて行われている．UTでは検査対象となる配管表面にカップラントと呼ばれるジェルを塗布し，その上に超音波プローブを押し付けその点における配管肉厚を測定するものである．UTを用いた配管減肉管理方法は，有資格者による手作業となるため検査に時間が必要である，プラントの停止が必要となる，足場の設置など付帯作業が必要である，カップラント塗布のため保護カバーや塗料の除去が必要である，検査結果の一意性がない，などの課題がある．

超音波ガイド波検査法（以下，GWT）は，UTの持つこれらの課題を解決する新たな検査方法として期待されている．GWは配管構造物の長手方向に長距離にわたって伝播する超音波のことであり，数十メートルの範囲を一度に検査可能である．装置を設置すれば取り外しの必要がなく，稼働中のプラントであっても遠方から検査可能であって，検査結果に一意性があり，UTの課題を解決可能であると考えられる．

GWTは日本非破壊検査協会通則（以下，NDIS）にて規定されているが，その内容を要約するとPZT素子または磁歪素子（以下，MsS）を用いたシステムを使用し，探傷方法にはTime of Flight（以下ToF）を用いるとされている．PZT素子およびMsS素子はGWTを現場適用する際にそれぞれ課題があり，PZTは高度な制御が可能であるものの装置が高価，カップラントおよび設置のための専用の治具が必要になる．MsSは安価で丈夫であるが高度なGWの制御には向かない．ToFを用いた探傷方法は，配管の欠陥部位を大まかにスクリーニングするには有効であるものの，傷の形状や深さなどそれ以上の情報を得ることが難しく，実際の配管減肉の検出，測定には十分でないと言える．GWTの現場適用を進めるためにはこれらの課題の解決が必要である．

本研究では，GWTを現場適用可能とするためのシステムの開発と実際の配管減肉を検査可能とするため検査方法の高度化を行う．最初に，構築するGWTシステムの評価及び検査方法の高度化のため，３次元円柱座標系におけるガイド波検査シミュレータを開発する．ガイド波検査シミュレータはFinite Difference Time Domain（以下，FDTD法）を用いて構築する．FDTD法は陽解法であるため高速に計算可能で省メモリであり，コードの実装が容易である．自由曲面を階段近似によって実現可能であって，数値計算精度にかかわる自由境界条件の先行研究が豊富である．構築したシミュレータの精度の確認は，配管を伝播するガイド波の解析解を用いて行う．配管を伝播する各種振動形態（以下，モード）のガイド波の群速度分散曲線を導出し，シミュレーションで得たそれぞれのモードの群速度と比較する．ガイド波非破壊検査に一般に使用されるT(0,1)モード，L(0, 1)モード，L(0,2)モードガイド波の群速度を比較し，シミュレータの精度を確認する．

２つ目に，現場適用性の高いGWTシステムを構築する．現場適用性の高いGWTシステムは，安価で丈夫，ガイド波の制御性が高いことである．システム構築にあたって使用した素子は電磁超音波探触子（以下，EMAT）である．EMATはPZT素子のような制御性を保持しつつMsS素子のように安価で丈夫な素子である．加えてカップラントが不要で設置に治具

が必要なく，GWT システムの現場適用性を高めるために効果的な素子であることから採用した．EAMT を用いることで，現場適用に必要な安価で丈夫なシステム構成とする．

構築したシステムは EMAT，プリアンプ，パルサレーシバおよびフィルタとオシロスコープからなり，検査対象は 配管材質として一般的な炭素鋼とする． 本システムにおける EMAT は，ガイド波送信用としては直列に８つリング状につないだものを使用し，受信用としては８つ並列につないだものを使用する．それぞれの EMAT は配管円周方向に対して等間隔に設置し，T(0, 1)モード，L(0, 1)モード，L(0, 2)モードガイド波の送受信が可能であるかを実験およびシミュレーションする．EMAT の配置方法によって T モード，L モードガイド波の送受信が容易に切り替えられることを実験およびシミュレーションを通じて確認し，非破壊検査に有効な T モード，L モード両方の送受信が可能であることを確認する．

３つ目に，本システムがガイド波の送受信を適切に行えているかおよび基本的な欠陥を検出可能であるかを実験及びシミュレーションを通じて確認する．配管内部に減肉を模した人工欠陥を設け，その検出を同システムで可能であるかを検証した．T(0, 1)モード，L(0, 2)モードガイド波を用いて人工欠陥検出実験およびシミュレーションを行い，減肉深さと検出強度に関して検証する．

最期にガイド波検査法の高度化を行う．高度化にあたっては，逆問題解析法に基づいた信号解析を行い，現実の配管減肉を模した，局所的に発生した配管減肉の形状を推定する．逆問題解析は次のような手順で行う．局所的に発生した配管減肉の形状を複数の形状パラメータを用いて近似し，それぞれのパラメータにおける減肉検出信号をガイド波シミュレータを用いて事前に準備する．準備したそれぞれの減肉検出信号に対して Proper Orthogonal Decomposition （以下，POD）法を用いて次元削減し，データベースを作成する．作成したデータベースを用いて任意の形状パラメータに対応する減肉検出波形を再構築し，実験で得られた検出データともっとも近しい波形を返す場合の減肉形状パラメータを導出する．本逆解析

法を用いた局所配管減肉形状推定実験をシミュレーションを通じて行い，同手法が有効であるかを検証する．

本論文の成果を要約すると以下のようになる．EMAT を用いて現場適用性の高いガイド波検査システムを構築し，同システムが非破壊検査に有用な T モード，L モードのガイド波の送受信が可能であること，そのモードの選択が容易に出来ること，配管減肉の検出が可能であることを実験およびシミュレーションを通じて確認した．逆問題解析法を用いて現実の配管減肉を模した，局所的な配管減肉の形状推定法を開発し，その有効性検証を行った．

（別紙１）　　論文審査の結果の要旨

氏名	古澤　彰憲		
論文題目	電磁超音波探触子を用いたガイド波検査システムの開発とその高度化に関する研究		
審査委員	区　分	職　名	氏　　名
	主　査	教　　授	小　島　　史　男
	副　査	教　　授	有　木　　康　雄
	副　査	教　　授	的　場　　修
	副　査	准　教　授	小　林　　太
	副　査		

要　　旨

本論文は第１章を緒論、第７章を結論として全７章で構成されておりこれまで従事してきた各研究内容について論じている。

第１章は、緒論であり本研究の背景と目的について述べている。１節では「配管構造物の劣化事象」、「現行の配管構造物の検査・管理方法」、「高速、安全、安価な配管検査システム・検査方法開発の重要性」について述べている。２節で本研究の対象である、超音波ガイド波非破壊検査法とその関連技術について先行研究の調査結果について述べ、ガイド波非破壊検査法の実用性向上のために要求される要件について考察している。

第２章は、本研究の対象とする配管を伝播する超音波ガイド波の位相速度分散曲線、群速度分散曲線、Wave Structure について述べている。１節は緒言である。２節は配管を伝播するガイド波の振動形態（モード）について概要を延べている。３節では円柱座標系におけるナビエの式から分散曲線、Wave Structure 導出のための特性方程式導出方法について述べている。４節では、非破壊検査に有用なねじりモード（T モード）および長手モード（L モード）ガイド波の位相速度分散曲線、群速度分散曲線、Wave Structure について４次までの計算例を示している。

第３章は、時間領域差分法（FDTD 法）を用いた３次元ガイド波シミュレータについて述べている。１節は緒言である。２節では、円柱座標系におけるフックの法則、運動方程式、自由境界条件から支配方程式の導出方法について述べている。３節では２節で導出した支配方程式から数値計算アルゴリズムの導出を行っている。ガイド波非破壊検査をシミュレーションするにあたり欠陥部位の設定方法と欠陥部位における自由境界条件の取り扱いについて考察し、簡便に自由曲面を設定するための数値計算スキームについて考察している。また自由境界上の節点の配置方法と精度について考察している。４節では、構築したシミュレータの精度検証を行っている。配管に対して理想的に T モードガイド波、L モードガイド波を励起させ、その群速度を２章で求めた解析的な群速度と比較、考察している。

第４章では、電磁超音波探触子（EMAT）を用いたガイド波検査システムを提案している。１節は緒言である。２節では試作した EMAT ガイド波検査システムの概要について述べている。２つの磁石を用いた水平 SH 波型 EMAT の超音波励起力の方向から非破壊検査に有効な T モード、L モードガイド波の送受信のための素子配置方法、S/N 向上のための EMAT 接続方法に、使用した EMAT や機器の詳細について述べている。３節では試作したガイド波検査システムにおける、T モード、L モードガイド波の送受信実験を行い、その実験結果について考察している。最初に、実験に供された配管試験体配管を伝播するガイド波の群速度分散曲線を導出し、発生しうるモードとそれぞれの伝播速度について考察している。次に、伝播経路について考察し、受信信号における波束の伝播速度、シミュレーション実験における波形プロファイルとの比較結果について考察している。４節は結言である。

第５章は、４章で試作したガイド波検査システムを用いた、配管減肉検出実験について述べている。一節は緒言である。配管減肉検出実験に供された配管試験体の寸法、実験方法について述べている。配管減肉は配管内部に人工的に全周のノッチを設けたものを使用している。２節において T モードガイド波を用いた、減肉深さの異なる２種類の配管減肉検出実験を行っている。実験波形とシミュレーション波形の比較、群速度分散曲線から得た伝播速度から波形の解析を行い、その結果について考察している。３節では L モードガイド波を用いた２節で用いたものと同様の配管試験体に対して配管減肉検出実験を行っている。実験波形と減肉有り、無しのシミュレーション波形との比較、群速度分散曲線から得た伝播速度を用いて検出波形の解析を行い、その結果について考察している。４節は結言である。

第６章は、逆問題解析法を用いた局所的な配管減肉の形状推定法について述べている。１節は緒言である。２－１節では、局所的な配管減肉の形状推定問題の定式化を行っている。局所的な配管減肉を形状パラメータベクトルを用いて近似する方法を提案し、使用すべきガイド波のモード、ガイド波送受信位置について考察している。２－２節は、Proper Othogonal Decomposition(POD)法を用いて、配管減肉検査信号の、次元削減モデル（検出信号データベース）の構築方法について述べ、同モデルを用いた検出信号から局所的な配管減肉形状の逆解析法について提案している。３節では、２－１節で構築した次元削減モデルの精度検証数値実験と模擬部分減肉検出信号を用いた同手法の精度検証および結果の考察を行っている。４節

氏名	古澤　彰憲

は結言である。
第７章は結論であり、本論文内容を総括する。

本論文の大きな特長は、これまでに平板、配管の肉厚検査を中心に使用されてきた電磁超音波探触子（EMAT）を用いて超音波ガイド波検査システムを構築し、EMAT の検査可能部位がその素子の直下肉厚だけでなく、 被検査物の長手方向に拡張している点が挙げられる。EMAT を「点」での検査から「面」での検査へ応用することで同素子の持つ可能性を広げている。次に、「現場適用」を念頭にシステムの開発を行っている点が挙げられる。「現場適用」性とは安価、丈夫、システム自体の保全が容易であること、同システムの設置導入工事が容易であることが挙げられるが、EMAT を用いた本システムは EMAT 自体の持つ特性と合わせて、「現場適用性」を十分に保持していると考えられる。さらに、これまで欠陥スクリーニング法としての使用が主であったガイド波検査法の、欠陥形状推定への適用可能性を示している。本研究内容は、超音波ガイド波検査法の実現可能性を、検査システムおよび検査方法の２つの観点から高め、広く社会の安全・安心に貢献する研究である。

本研究により得られた主な結果と成果を示す。
「３次元ガイド波検査シミュレータの構築」では、精度、高速性、省メモリ性を併せ持ったガイド波検査シミュレータの開発を目的に、電磁気および地震の伝播解析分野で一般的に使用されていた時間領域差分法（FDTD）法を用いたシミュレータの構築を行っている。超音波ガイド波はその検査領域の広大さと比較して波長が短く、FEM では容易に計算することが出来なかったが、FDTD 法を用いることで計算時間と使用メモリ量を大幅に削減し、欠陥部位などの自由曲面における簡便な自由境界の設定法を、地震伝播解析分野における研究内容を導入することで解決し、パーソナルコンピュータで実用的な時間で計算可能なシミュレータを開発した。同シミュレータの精度についてはガイド波の伝播速度の解析解を用いて評価し、「実用的な」ガイド波検査シミュレータを開発出来た。
「EMAT を用いたガイド波検査システムの開発」では、現場適用性の高いガイド波検査システムの開発を目的として、EMAT を送受信素子として使用し、非破壊検査に有用な T モード、L モードガイド波の送受信が可能なガイド波検査システムを構築した。EMAT は磁石が２つの水平 SH 型 EMAT を用いてその超音波励起力の方向を円周方向、長手方向にすることにより T モードガイド波、L モードガイド波の励起、受信を行い、それぞれの受信波形を先に開発したシミュレータ波形との比較、超音波伝播速度を解析解より導出した群速度分散曲線の速度と比較し、同システムが T(0,1)モード、L(0,1)モード、L(0,2)モードガイド波の送受信が可能であること確認した。T(0,1)モードガイド波、L モードガイド波の励起は、EMAT の向きを変更するだけで容易に選択可能であり、現場適用性の高い、丈夫、安価、設置が容易で非破壊検査に有効な T、L モード両方の送受信が可能な超音波ガイド波非破壊検査システムの提案が出来た。
「EMAT ガイド波システムによる減肉検査」では開発した EMAT ガイド波検査システムを用いて、実際に配管減肉を検出することを目的とする。一般的に使用される SS４００炭素鋼配管を対象にして、配管内部に設けたノッチ型の全周減肉を対象として、開発したシステムにてその減肉の有無および検出感度について調査検討した。減肉検査実験では、T(0,1)モードガイド波、L(0,2)モードガイド波を用いて、配管減肉率 10%および 50%の配管減肉検出実験を行った。それぞれのモードで減肉検出波形は、減肉の有る場合、ない場合のシミュレーション波形との比較、群速度分散曲線より導出した理論的な検出信号位置の解析と併せて波形の解析を行い、T(0,1)モード、L(0,2)モードガイド波いずれのモードでも減肉の検出が可能であることを確認した。T(0,1)モードガイド波では、減肉検出信号の強度は、励起信号強度を１として、10%減肉の場合で 0.085、50%減肉の場合で 0.27 であった。L(0,2)モードガイド波では、検出信号強度は 10%減肉の場合で 0.18、50%減肉の場合で 0.41 であって、T(0,1)モードガイド波と比較して検出信号強度が強いという結果を得た。その一方 T(0,1)モードガイド波では全周減肉の両端からの検出信号ピークを視認することが可能であって、L(0,2)モードガイド波より分解能が高い結果を得た。開発した EMAT ガイド波検査システムにおいて、T モード、L モードいずれのモードでも配管減肉の検出が可能であって、状況によってガイド波のモードを変更し、適切な検査を行うことが可能であることを確認出来た。
「逆解析法による配管減肉形状推定」では、実際の配管減肉を模した局所的な部分減肉を、ガイド波を用いてその形状推定し、ガイド波の検査対象領域をスクリーニング技術から拡張することを目的として、逆問題解析法を応用した減肉形状復元アルゴリズムを提案している。最初に、実際の配管減肉は、長手方向に徐々に肉厚が薄くなる楕円形であって、円周方向には肉厚に偏りのある形状をしているが、この形状を４つの形状パラメータで近似する方法を提案している。次に、T モードガイド波と円周方向に等間隔に設置された複数のガイド波受信センサによる信号から、形状パラメータベクトルの各成分の値を推定する問題として減肉形状復元問題を定義し、逆解析アルゴリズムに使用する Proper Orthogonal Decomposition （POD）法を用いた次元削減ガイド波検出波形モデルの導出を行っている。先に開発したガイド波シミュレータを用いて、複数の形状パラメータベクトルに対応する減肉検出信号を用いて POD 次元削減モデルを構築し、同様にシミュレータを用いて準備した模擬実測データ（次元削減モデル構築に使用しなかったパラメータの減肉検出シミュレーション波形）に対して同アルゴリズムを適用し、減肉検出波形の復元と減肉形状パラメー

氏名	古澤　彰憲

タの推定実験を行っている。減肉形状パラメータの推定値は良く一致しており、もっとも誤差の大きかった減肉長手方向長さについても実験例では 11[mm]に収まっており、現行の配管減肉管理規程からみても十分な精度で推定出来ていると言え、有効な局所的な配管減肉形状推定法の提案を行っている。

以上のように、本研究は計測シミュレーション工学および非破壊検査工学においてガイド波検査システムについて提案し、研究を推進したものであり，その結果、新たな検査システムの優位性と有用性について重要な知見を得たものとして価値ある集積である。提出された論文はシステム情報学研究科学位論文評価基準を満たしており，学位申請者の古澤彰憲は，博士（工学）の学位を得る資格があると認める。