

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：37112

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420032

研究課題名(和文) 超音波長距離伝送体を用いた高温・高放射能構造物の非破壊検査システムの開発

研究課題名(英文) Study of nondestructive inspection system for a high temperature and radiation structure using a long waveguide

研究代表者

村山 理一 (MURAYAMA, RIICHI)

福岡工業大学・工学部・教授

研究者番号：20330946

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：常温・非放射線下に超音波センサや駆動装置を常設し高温構造物や高放射線を発する構造物のオンラインモニタリングを実現する検査システムの開発を目的とする。そこで100m以上遠方から構造物に超音波の基本モードである縦波・横波及び表面波を長距離伝送体と音響ホーンを用いて送受信することで、高温あるいは高放射線を発する構造物の厚さや構造物中の傷、表面傷を非破壊的に測定・検査する技術を開発した。次に、これらの研究過程で本技術を高温パイプの検査に用いることが有効であることが明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Nondestructive inspection of a high temperature structure is required to guarantee its safety. However, there are not any useful sensors for a high-temperature structure. Some of them can't work at high temperature over 500℃. Another one is too expensive to use it. Therefore, the sensing system which can transmit and receive an ultrasonic wave traveling long distance by using a long waveguide has been studied. It means that an ultrasonic sensor could be driven at atmospheric temperature. We could finally confirm that a guided ultrasonic wave generated by a trial electromagnetic acoustic transducer (EMAT) with Ni-thin sheet on the surface of the pipe can travel more than 10m using a thin bar with a 2mm - diameter as a wave guide. Next, we tried to transmit and receive a guided wave into a pipe using the developed system. It is indicated that a special shaped waveguide on the pipe is useful.

研究分野：非破壊評価

キーワード：非破壊検査 ガイド波 高温 構造物 導波体 電磁超音波センサ

1. 研究開始当初の背景

構造物の健全性を非破壊的に検査する非破壊検査法において高温や放射線被爆で人間が近づけない構造物の検査が望まれている。しかし現状は、例えばレーザ超音波法は加圧水型原子炉一炉底検査法として実用化しているが、高価で高度な設置技術が必要である。高温構造物用超音波センサとして薄膜積層型超音波センサも開発されているが、上限が約500℃で、信号ケーブル等の高温対策、耐放射線対策が不可欠となる。そこで新たな検査方法として、超音波長距離伝送体を利用した検査方法を開発する。

2. 研究の目的

申請研究は、常温・非放射線下に超音波センサや駆動装置を常設することで、高温構造物や高放射線を発する構造物のオンラインモニタリングを実現するための検査システムを開発することを目的とする。

安全・安心の社会実現のため高温・高放射線構造物の非破壊検査は強く望まれているが、そのために使用する超音波センサは50℃以上の温度では長期・安定的に稼働しない。また高放射線下ではその寿命が短くなり、そのような環境下で人が長時間・快適に作業することも不可能である。

そこで図1のように、100m以上遠方から構造物に超音波の基本モードである縦波・横波及び表面波を長距離伝送体と音響ホーンを用いて送受信することで、高温あるいは高放射線を発する構造物の厚さや構造物中の傷、表面傷を非破壊的に測定・検査する技術を開発する。

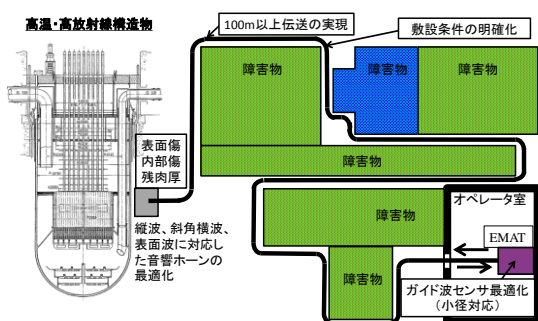


図1 研究構想図

3. 研究の方法

現有する技術を実用化する場合、大きく3つの課題が存在し、それぞれを明らかにする。

1点目は超音波伝送距離である。現在確認された10mという距離は決して十分な距離ではなく、考えられる大多数の構造物を対象とする場合、運転室と非検査体の間の距離は数百m程に及ぶ可能性がある。そこで本申請ではセンサ部の基本構造及び駆動条件について見直すことでこの技術を更に発展させ、伝

送距離を100mまで延長することが可能であることを明らかにする。

2点目は構造物の安全性を保証する場合、残肉厚、表面疵、内部疵の評価が不可欠である。その為に必要な超音波モードは垂直縦波、表面波、斜角横波である。垂直縦波と表面波を構造物に送受信する基本的技術は開発済みであり、その技術を基に、内部疵を検査する変換治具(音響ホーン)を開発し、その後、改めて3つの超音波モードを送受信する音響ホーンの最適化を図り、残肉厚については5~約200mmの厚さを0.1mm精度で測定できること、表面疵については、表皮下10mm迄に存在する疵を含めて数mm単位の大きさの疵を検出する。内部疵については5~約200mmの厚さ範囲で、5mm径以上のブローホール、0.1mm幅以上の亀裂を検出できることを明らかにする。

3点目は実際に長距離伝送体を構造物近傍で施工する場合、湿度や雰囲気温度等の周囲条件、湾曲化等の施工条件が様々に組み合わせるため、各条件の影響を定量的に評価し、超音波長距離伝送体の施工条件を明らかにする。

4. 研究成果

① 超音波伝送体の長距離化

長さ0.5[m], 導波体直径0.5[mm]~3[mm], 駆動周波数100[KHz]~500[KHz]の条件でEMATを用い最も伝搬距離が長い条件を検討した。実験システムとしては導波体端部に設置した送信コイルに静磁場を負荷し、パルサーによって高周波のパルス波を印加して発生した棒波を導波体中に伝播させる。導波体端面で反射した超音波を受信EMATで受信し、信号をアンプで増幅し、周波数フィルタリングしたものをオシロスコープで測定し、PCで解析を行う。実験結果から導波体径及び駆動周波数毎の減衰係数を測定し、最大伝搬距離を測定した。その結果、導波体直径2[mm]の時の信号強度及び減衰係数を駆動周波数ごとと比較し駆動周波数200[KHz]、直径2[mm]で最も伝搬距離が長い80mという結果を得た。

限界伝搬距離をさらに伸ばすことを目指し、Ni貼付型棒波センサ(以後Niセンサと呼ぶ)について検討した。駆動原理図を図2に示す。Niセンサはニッケルが鋼より強い磁歪振動を得られることを利用した磁歪センサである。ニッケルを導波体表面に接着し、ニッケル及び導波体に磁場を負荷しコイルに高周波電流を流すとニッケルが磁歪振動しEMAT以上に強い超音波を導波体中に送受信できる可能性があると考えた。導波体にNiを貼付する方法としては、電解Niメッキ、Ni箔を検討した。その結果、厚さ0.05[mm]のNi箔をエポキシ系接着剤で接着したものが最

も信号強度が高いことが判明した。

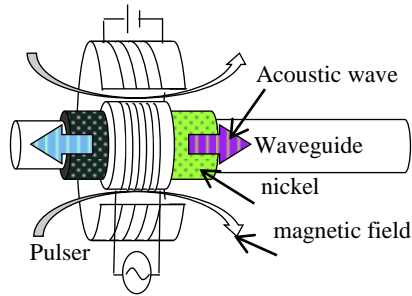


図2 Ni 貼付型棒波センサ

そこでEMATの実験方法と同じ長さ0.5[m], 導波体径2[mm], 駆動周波数200[kHz]の最適条件で実験を行い EMAT と比較を行った. 伝搬距離1[m]に相当する端面からの第1反射波から Ni センサは EMAT 以上の信号強度を得られていたが, 端面での反射を繰り返すたびに Ni センサの方が大きく減衰しており, 伝搬距離に換算して6[m]以上では EMAT による反射信号の強度の方が大きくなった. 原因は導波体と Ni 箔部の接着に用いる接着剤による減衰が大きいためであることが考えられた. そこで導波体径2[mm]長さ0.5, 1, 2, 10[m]の導波体を用意し, 長さ毎の導波体端面からの第1反射波の反射信号を検出し信号強度を比較した. これにより Ni 箔接着部での減衰を考慮せず限界伝搬距離を算出可能となった. 図3に導波体長さ毎の EMAT 及び Ni センサの信号強度を比較したものを示す. 限界伝搬距離を求めた結果, Ni センサは180m程度伝搬可能ということが判明した.

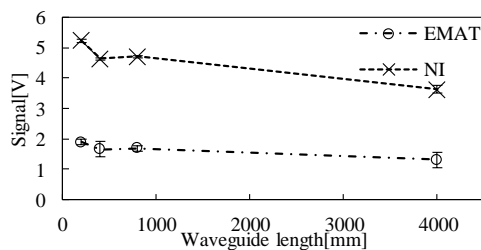


図3 EMAT および Ni センサの伝搬距離

② 構造物への超音波入射効率の改善

前述のように導波体径は2[mm]に, 駆動周波数は200[kHz]に決定された. しかしそのまま導波体と被検査材を音響的につなぐと指向角の問題があるため, 超音波が送受信できないという問題があった. そこで音響ホーンを用いることによりそれらの問題を解決した. 製作した音響ホーンは底面直径20[mm], 高さ29.5[mm]である. この音響ホーンを用いることにより, 超音波を効率よく送受信可能になった.

しかし, ラム波を発生させる場合は斜角方向に縦波超音波を入射する必要がある. 製作した音響ホーンは円錐状であり, 板材に対し

て斜めに接触させることはできない. そこで斜めに入射可能な治具を製作する必要があった. 図4に音響ホーンおよびモード変換治具の概要を示す. 入射角はスネルの法則に基づき決定した.

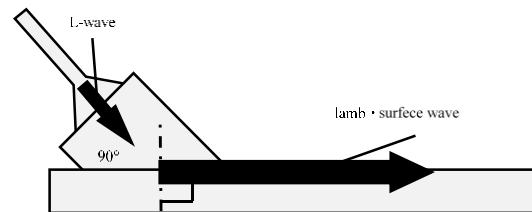


図4 超音波モード変換用音響ホーン

しかし, スネルの法則に基づく鋼製の音響ホーンから鋼板に縦波(5900m/s)を入射する場合, 板波(3000m/s)を発生させることは不可能となる. そこで導波体中を伝搬してきた縦波を音響ホーン中で横波(3200m/s)にモード変換させ, 横波を鋼板に入射することにより板波を発生させることが可能とした. そのために図5に示す2段モード変換治具付音響ホーンを製作した. モード変換する角度はスネルの法則により決定される. また, 音響ホーンの材質を鋼より遅い材質にすることにより, 板波が発生できる角度に限りなく近づけることができ, 板波を効率よく発生させることが可能になった.

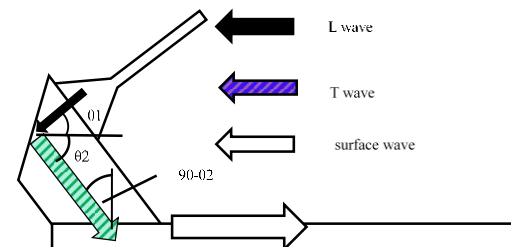


図5 二段型音響変換ホーン

③ 総合評価試験

開発したシステムの検出能を確認するために図6に示す実験システムで確認試験を実施した. 駆動周波数0.2[MHz], 全長1000[mm], 導波体の直径はΦ2.0[mm]である. 構造物に対して60°の入射角で入射した. 導波体端面部に音響ホーンおよび表面波モード変換治具を設置した. 厚さ30mm, 200mm平方のS50C材に直径10mm, 深さ2mm~貫通キズを施し, キズからの反射検出実験を行った.

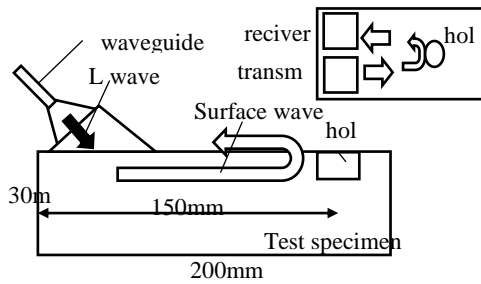


図6 実験システム

図7に実験結果を示す．実験結果から導波体を用いて表面疵の検出に成功した．また直径10[mm]，深さ2[mm]程度からキズの検出ができることが判明した．

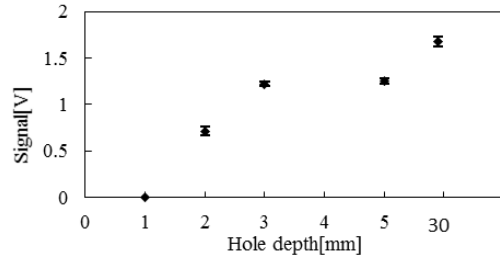


図7 表面キズ検出実験結果

④ パイプ検査への応用

申請研究の一環としてより実用化が期待できるパイプガイド波送受信システムを検討した．パイプ中にガイド波を発生させる方法としては，一般的にパイプに対してリング状に探触子を複数個設置して行った．本研究では配管に導波体を巻きつけ，導波体から配管へ円周方向および軸方向に超音波を伝搬させることによりガイド波を発生させる．従来は丸棒型の導波体を用いていたが，パイプに巻き付けるために短冊型に変更した．導波体の巻き付け方により任意のモードのガイド波を発生させることが可能となる．これにより導波体を用いてガイド波による配管検査が可能となる．図8に導波体設置方法を示す．

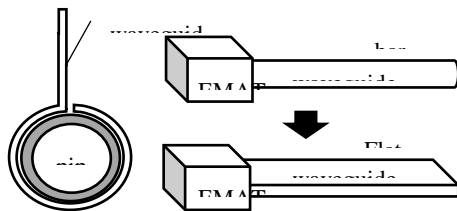


図8 導波体設置方法

ガイド波とは平板や棒状材料，境界面を長手方向に伝播する超音波モードであり，パイプ中を伝搬するガイド波ではさらに细分される．Lモードは軸方向に振動するLongitudinalモードである．Tモードは円周

方向に捻じれて伝搬するTorsionalモードである．各モードに対応する方向に振動を与える事によりガイド波を発生させることが可能である．

導波体の形状によって任意のモードのガイド波を送受信することが可能と考えた．すなわち，Tモードは配管の周方向に振動を与えることにより発生させることが可能と考えられる．そこで導波体を配管周方向に1周巻きつけ，配管に対し円周方向に超音波が振動させTモードガイド波を発生させることを試みた．これを図9に示す．また軸方向に変位するLモードを発生させるために導波体端部を2つに分割し，それを巻きつけたものを図10に示す．

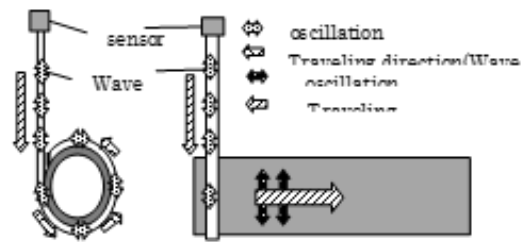


図9 T(0, 1)モードガイド波駆動概要図

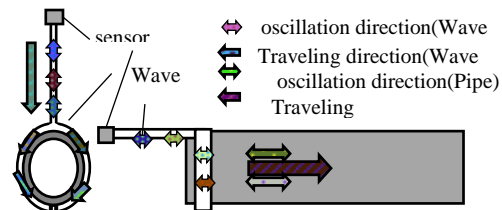


図10 L(0, 2)モードガイド波駆動概要図

実験条件は長さ1.5[m]の32A鋼管，導波体には配管との密着性を高めるため厚さ0.6[mm]，幅2[mm]の短冊形状の導波体を用いた．図11に実験概要図を示す．超音波センサには導波体反対端部にEMATを設置し200[kHz]で駆動させた．送信側の導波体の設置場所は配管左端部から13mm 受信側は右端部から26mmの場所に設置した．送信・受信側導波体をそれぞれ使用しTモード及びLモードガイド波を検出した．

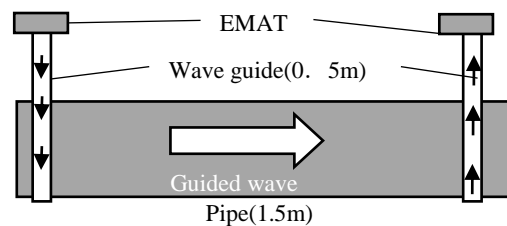


図11 実験概要図

各導波体を用いて信号強度を比較した結果、1周巻型の時最もT(0,1)モードの信号が強かった。L(0,2)モードではPerpendicular型導波体が最も高い信号強度を得られた。

パイプ(全長1500[mm], 外径42.7[mm], 管厚3.5[mm])の左端部にTモード用導波体, Lモード用導波体を設置し, 配管端部から750[mm]に付けたキズ(貫通穴, 全周ノッチ)及び右端部からの反射信号の検出確認を行った。図12実験概要図を示す。図13に貫通穴, 全周ノッチ疵の信号強度を示す。Tモードでは貫通穴φ10[mm]までの疵をS/N比2.83, Lモードでは貫通穴φ15[mm]までの疵をS/N比2で検出できた。

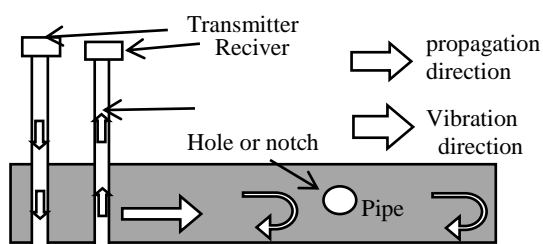


図12 実験概要図

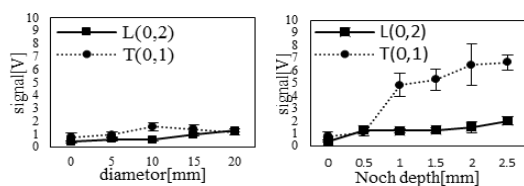


図13 実験結果

T, Lモード導波体で疵信号を検出することができた。しかし, キズ検査に不要な導波体内での反射信号が検出されてしまった。よって, 反射信号を低減させるために導波体のセンサ側の端部に音響緩衝材として厚さ0.3[mm]の鉛板を巻き付けた。導波体端部に鉛を巻き付けることで, 導波体内での反射信号を大きく低減することができた、その結果、より一層傷信号を明確化できることを確認した。

⑤ まとめ

EMATの駆動周波数及び導波体径を検討した結果, 駆動周波数200[KHz], 導波体径φ2[mm]が最も伝搬距離が長いことが判明した。またEMATとNi箔貼付型棒波センサを比較検討した結果, NiセンサはEMAT以上の信号強度を得られることが判明し, より長距離伝搬可能ということ明らかにした。これらを用いて構造物表面に発生したキズを検出するために, 音響ホーンを用いて検出実験を行った結果, 直径10[mm], 深さ2[mm]のキズを検出

できた。また今回は新たに導波体を用いたパイプガイド波発生方法を検討した。導波体の巻き付け方により任意のモードのガイド波を発生させることが可能ということが判明した。T(0,1)モードガイド波ではOne-turn型, L(0,2)ではT字型が最も良かった。これらを用いてガイド波によるパイプ傷検出が可能であることを明らかにした。また導波体内部での反射信号を, ダンパー材を用いることにより低減できることを明らかにした。

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4件)

- ① A New Guide Wave Inspection System Using Three Polarized Transverse Wave EMATs without Any Couplant
Journal of Sensor Technology, 2016, Vol.6, 110-121, Riichi Murayama
査読あり
- ② Mode Conversion Behavior of Guided Wave in a Pipe Inspection System Based on a Long Waveguide,
Sensors 2016, 16(10), 1737(p14);
doi:10.3390/s16101737
Feiran Sun, Zhenguo Sun, Qiang Chen, Riichi Murayama, Hideo Nishino
査読あり
- ③ Pipe Inspection System by Guide Wave Using a Long Distance Waveguide,
Modern mechanical Engineering, Vol.5, No.4, 139-149, (2015),
Riichi Murayama, Kenshi Matsumoto, Kenji Ushitani, Makiko Kobayashi
査読あり
- ④ Ultrasonic Inspection System using a Long Waveguide with an Acoustic Horn for High-Temperature Structure,
Journal of sensor & technology, Vol.4, No.4, 8p, (2014),
Riichi Murayama, Masayuki Kobayashi, Kenshi Matsumoto, Makiko Kobayashi
査読あり

[学会発表] (計14件)

- ① A pipe evaluation by a guide wave using a long rectangle shaped-waveguide
The 12th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components 2016.10.4, トロント(カナダ)
Riichi Murayama, Kenshi Matsumoto and Kenji Ushitani,
- ② A Pipe Inspection System by a Guidewave Using a Long Distance Waveguide
2015 Review of Progress in Quantitative NDE, 2015.7.29, ミネアポリス(アメリカ)
Riichi Murayama, Kenshi Matsumoto, and Kenji Ushitani

- ③ Transmission System of Guide-Wave For A Pipe Using A Long Distance Wave Guide The 13th Asian Conference on Experimental Mechanics (ACEM) , 2014.11.15, シンガポール(シンガポール) K. Matumoto, R. Murayam, K. Ushitani
- ④ 短冊形導波体を用いたパイプ中へのガイド波送受信方法の検討
日本機械学会 2016 年度年会, 2016. 9. 13 九州大学伊都キャンパス (福岡) 村山 理一, 石田 光輝, Sun Feirun, 西野 秀朗
- ⑤ 長距離導波体を使ったパイプ中を伝わるガイド波の送受信システムの検討
日本非破壊検査協会九州支部研究発表会、2016. 4. 15 九州機械工業振興会 (北九州) 村山理一
- ⑥ 周方向伝搬ガイド波を使ったパイプ検査システムの開発
第 23 回 超音波による非破壊評価シンポジウム
2016. 1. 28 非破壊検査協会本部 (東京) タンティサウッドウイワット、村山理一 當間勝己、小辻泰誠、吉次智成
- ⑦ 音響伝送体を用いたパイプ中を伝播するガイド波送受信方法についての基礎検討
平成 27 年度 非破壊検査協会秋季講演大会、
2015. 10. 15 北海道立道民活動センター (札幌)
村山理一、松本賢士
- ⑧ 周方向伝播ガイド波を使ったパイプの残肉測定装置の開発
日本機械学会 2015 年度年会、J0420102、2015. 9. 15 北海道大学 (札幌)
タンティサウッド ウイワット、村山理一、當間勝己、小辻泰成、吉次智成
- ⑨ 電磁超音波センサを使ったパイプ中を伝わるガイド波の送受信システム
日本非破壊検査協会九州支部研究発表会、2015. 4. 10, 九州機械工業振興会 (北九州), 村山理一
- ⑩ 音響伝送体をもちいたパイプ中ガイド波発生方法の基礎検討
超音波による非破壊評価シンポジウム、p61-62、
2015. 1. 29, 非破壊検査協会本部 (東京) 松本賢士、牛谷健悟、村山理一
- ⑪ 偏波横波型電磁超音波探触子を利用したパイプーガイド波送受信システムの開発とガイド波の特性評価
第 23 回MAGDAコンファレンス、
2014. 12. 4, サンポートホテル高松 (高松),

- 村山理一、今井健介、園田尚人
- ⑫ 偏波横波用電磁超音波センサを使ったパイプ中を伝わる 3 種類のガイド波の送受信と検出能評価
日本非破壊検査協会秋季大会、pp. 9-10, 2014. 10. 28, 名古屋国際会議場 (名古屋) 村山理一
- ⑬ 高温構造物検査のための長距離超音波伝送体を用いた検査システムの検討
日本機械学会年会、
2014. 9. 8, 東京電機大学 (東京) , 松本賢士, 中島一吉, 立山将太, 村山理一
- ⑭ 長距離伝送体を用いた高温構造物非破壊検査システムの開発
日本非破壊検査協会九州支部研究発表会、2014. 4. 13, 九州機械工業振興会 (北九州), 村山理一

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等
研究者ホームページ
<http://www.fit.ac.jp/~murayama/>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
村山 理一 (MURAYAMA, Riichi)
福岡工業大学・工学部・教授
研究者番号：20330946
- (2) 研究分担者
無し
- (3) 連携研究者
無し