



長い導波体を利用した軸方向伝搬ガイド波による パイプ検査システム

Study of an ultrasonic inspection system by a guide wave traveling to axis direction of a pipe using a long waveguide

福岡工業大学

村山 理一

Riichi MURAYAMA

Member

Various energy plants use a large number of important equipment and structural members that are continuously operated in a high temperature range exceeding 500 °C. Monitoring and evaluating their remaining life is an important issue that is directly linked to plant safety and economic efficiency. Non-destructive inspection plays an important role in non-destructively evaluating the soundness of structures and the materials that compose them. Therefore, we have developed a non-destructive inspection system for a high-temperature pipe that uses a long waveguide so that the sensor unit can be implemented in a room temperature environment and uses guided waves propagating in the axial direction. This paper refers to the structure of an electromagnetic acoustic transducer for a Lamb wave and an SH-plate wave attached on a long waveguide, the configuration method of the waveguide, and the detection results of any scratches.

Keywords: Nondestructive inspection, Guide wave, Heat exchange pipe, Long waveguide, High temperature

1. 緒言

各種のエネルギープラントでは500°Cを超える高温域で連続運転される重要機器や構造部材が多数用いられており、それらの健全性や余寿命をモニタリング・評価することは、プラントの安全と経済性に直結する重要な課題となっている。特に国内火力発電所において、累積運転時間が10万時間を超える割合は年々増加の一途を辿っており、損傷の発生が懸念される。その中で非破壊検査は、構造物やそれを構成する材料の健全性を非破壊的に評価するという重要な役割を担っている。

火力・原子力発電所のタービン建屋内の蒸気配管はエルボ一部、溶接部での腐食による減肉が大きいことが予測されている。既に何度か減肉が進み開口した例があり、死亡事故につながっている緊急性の高い重要ニーズである。しかしながら、高温環境に耐えるセンサが無いため、検討は定期検査中の常温環境下に留まっているのが現状である[1], [2]。また、高温環境に適用可能なレーザー超音波法が存在するが、使用するための制約条件も高く、導入コストも高すぎて限られた場所に限

られる[3]。近年、500°C程度の高温配管に適用できるゾルゲル複合体を用いた超音波センサも開発されているが、測定部位(10mm×10mm程度)ごとに取り付ける必要があり、ニーズを満たすために膨大な数のセンサをパイプ表面に取り付けなければならない問題点が指摘されている[4]。またセンサと駆動装置間をつなぐケーブルも高温での常時使用は困難で長期的な操業中の健全性評価・モニタリングは困難である。これらの先行研究の中で高温環境下に適用できないがパイプ軸方向に伝搬する超音波の一種であるガイド波は3~10mの範囲を一度に検査できており、高温環境下で適用できれば、高温構造物モニタリングの突破口になる[5], [6]。高温構造物にたいする超音波センサの耐熱性解決のために長い導波体を用いた超音波による常温環境下での非破壊検査が検討されている[7]。筆者も長い鋼製の小径丸棒を導波体として利用した非破壊検査方法を研究・開発し、高温炉壁の厚さ測定が可能であることを確認した[8]。また、超音波が伝搬している長い導波体をパイプ周方向に巻き付けることでパイプ軸方向に伝搬するガイド波を送受信可能であることも確認した。当初は超音波源としてラム波を用い、長方形導波体でTモードガイド波、L形状導波体でTモードガイド波を送受信できることを確認した[9]。

連絡先:村山理一, 〒811-0295 福岡市東区和白東3-30-1, 福岡工業大学
E-mail: murayama@fit.ac.jp

次に長方形導波体のみを用い超音波源としてラム波でTモードガイド波, SH板波でLモードガイド波が送受信できることを確認した[10]. ただし, SH板波 EMAT による受信信号にはラム波による受信信号が混在していた. そこでラム波/SH板波 EMAT の改善を実施した後, 改めてパイプへの巻き付け方法, 信号処理方法を改善することでパイプ軸方向伝搬ガイド波の送受信及び疵検査が可能であることを確認した.

2. 検査システムの基本概念

本検査システムの基本概念を図 1 に示す. 長方形形状の長くて薄い短冊状の鋼板(導波体)端は高温パイプの周方向にぐるりと巻き付けた後, 拘束治具を導波体全周上に覆うように取り付け, 拘束治具を周方向に締め付けることで導波体鉛直方向に均等に押しつけ圧を加えた後, 反対端に取りつけた超音波センサから超音波を送受信する. その結果, 導波体のパイプ巻き付け部で発生する超音波伝搬・振動によってパイプ軸方向に伝播するガイド波を発生させる. すでに解析及び実験結果より導波体長は 50cm 以上あれば, 導波体他端部で常温が保たれるが[8], 信号ケーブルや超音波センサを駆動するための電子回路も高温環境に弱く, 常温環境が望ましいことを考えると, 導波体は 10m 以上の長さが必要である.

パイプ中に発生する傷の形状が周方向と軸方向に大別されると考え, パイプ中に発生させる軸方向ガイド波について軸方向に主振動成分を持つ低周波領域の L モードと周方向に主振動成分を持つ T モードを送受信することを試みる. 当初は, 導波体のパイプに巻き付けている部分の形状を変えることで送受信するガイド波の種類を選別するこ

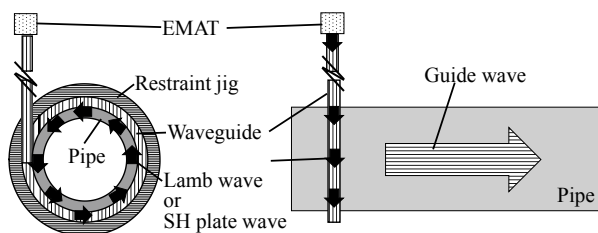


Fig.1 Basic concept of the inspection system

とを試みた. すなわち, 振動方向が伝搬方向と一致する L モードでは, 導波体巻き付け部の超音波振動方向がパイプ長手方向に, また, 振動方向が伝搬方向と直行する T モードでは導波体巻き付け部の超音波振動方向がパイプ周方向になることを考えた. この考え方を実現するために超音波源としては, 振動方向が超音波進行方向と一致するラム波を用い, T モードの場合は長い短冊状の導波体をそのまま周方向に巻き付けることで, 振動方向はパイプ長手方向になるようにした. L モードの場合は, 導波体中を伝搬するラム波を一旦, 直角方向に曲げ, この曲げた後の部分をパイプ周方向に巻き付けることで, パイプ巻き付け部の導波体振動方向がパイプ長手方向にすることを試みた[10].しかし, この場合は送受信したいガイド波モード毎に, 別の形状の導波体を巻き付けることになり実用的ではないと考えた. そこで同一形状, すなわち短冊状のストレートな導波体で, 他端部の超音波センサからの発生する超音波モードを切り替えることで L モード, Tモードを選択的に送受信することを試みた. 図 2(a)がその概念図で, Lモードガイド波を送受信するために導波体中に SH 板波を, Tモードガイド波を送受信するために導波体中にラム波を送受信することを考えた. なお図 2(b)にガイド波の群速度と駆動周波数の関係を示すが, 今回の実験で使用した周波数はラム波では 200kHz, SH 板波では 333kHz であり, Lモードは群速度約 5,000m/s, Tモードは約 3,000m/s となり伝搬時間位置で区別し易く, 他モードの発生もほとんど見られない周波数領域となっている[11].

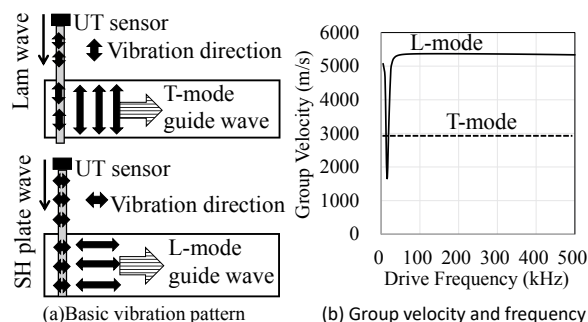


Fig.2 Basic vibration pattern of a guide wave traveling to axis direction into a pipe and frequency dependence of group velocity (L-mode, T-mode)

3. 導波体用ラム波, SH板波—電磁超音波探触子の基本構造

導波体中に発生させるラム波, SH板波用超音波探触子として電磁超音波探触子

(Electromagnetic Acoustic Transducer=EMAT)を試作した. 理由は, 細くて薄い短冊状の導波体にラム波やSH板波を単独に発生することが容易で接触媒質不要の為, 長期間のモニタリングを前提にした場合, 安定して正しい評価が可能であると考えた. EMATは駆動原理としてローレンツ力を用いるものと, 被検査材(本研究では導波体)が強磁性材料の場合に, その磁歪減少を利用するものがあるが, 磁歪効果を利用する構造とした. 理由は, ローレンツ型の場合, ラム波用EMATの磁石構造とSH板波用EMATの磁石構造が全く異なるためである[12], [13].

3.1 ラム波用 EMAT

図3(a)に示すように導波体の長手方向に設置された楕形コイルと, 導波体長手方向に静磁場を与える一対の磁石(Magnet1)からなる. 導波体長手方向に与えられる静磁場と, くし形コイルに印加する高周波電流によって発生する動磁場が同じく導波体長手方向となることから, 重畳された複合磁場は, 導波体長手方向に振動することになる. この振動に応じて, 磁歪効果により強磁性体(鋼)は伸び縮みする. この伸び縮みが振動方向と伝搬方向が一致するラム波の発生源となる. なお, この磁歪現象は, 静磁場の大きさで, 変化の大きさが変わることが知られており, 鋼の場合 50mT~100mTが, 最大の磁歪振動が得られる領域となる. 受信については, 電磁誘導コイル部に到達したラム波の振動と, 静磁場との相互作用による電磁誘導現象により発生する誘起起電力を電磁誘導コイルでピックアップする原理となる.

3.2 SH板波 EMAT

SH板波の場合は, 振動方向と伝搬方向が直交するため, 導波体幅方向の振動成分が必要となる. そこで図3(b)に示すように導波体の幅方向に静磁場を与える一対の磁石印加された静磁場と, ラム波と同じ形状の楕型電磁誘導コイルにより発生す

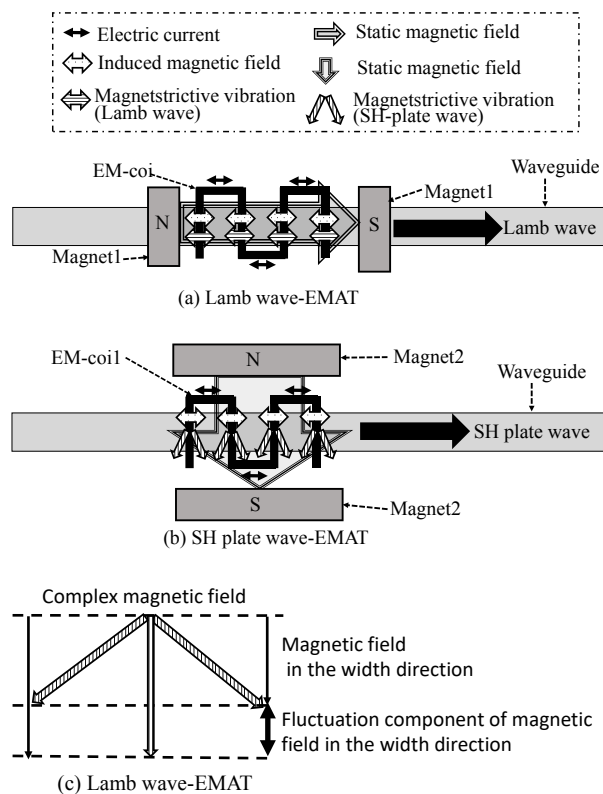


Fig.3 Drive principle of an electromagnetic acoustic sensor

る長手方向に振動する動磁場により形成される複合磁場は導波体長手方向に対して左右に振動する磁場となる. この場合, 図3(c)に示すように複合磁場の左右方向振動に伴い幅方向成分の大きさが増減する. すなわち幅方向に磁歪振動が発生しSH板波の発生源となる. 受信についてはラム波と同じ考え方である.

4. 実験方法

評価試験は, 初めに導波体単独で, ラム波用EMAT, SH板波EMATによる送受信信号がパイプ軸方向伝搬ガイド波を送受信することが可能かどうか評価した. 次にパイプ周方向に導波体を巻き付け, パイプ軸方向伝搬ガイド波の送受信信号の確認を行うことにした. 最後に, パイプに機械加工傷を入れ, 傷の評価が可能かどうか評価した.

4.1 実験装置

実験システムの概要を図4に示す. 4サイクルの正弦バースト波とし, 電力増幅器の倍率は100倍とした. 増幅器はゲインを60[dB]とし, フィルターは

HPF100[kHz], LPF500[kHz]とした。

4.2 電磁超音波探触子，導波体，試験管仕様

使用する導波体は幅 6[mm]，全長 1500[mm]，厚み 0.6[mm]である。送受信電磁誘導コイルはともに線径 0.315[mm]，巻数 6 巻きとした。電磁誘導コイルの電極間距離は 12.5[mm]とした。すなわちラム波の音速を約 5,000[m/s]と仮定し駆動周波数は 200[kHz]，SH 板波駆動の時は音速を約 3,000[m/s]と仮定し駆動周波数は 120[kHz]とした。電磁誘導コイルの電極長さは，当初は導波体の幅と同じ 6[mm]とした。使用した磁石寸法は次のように決定した。ラム波用は，バイアス磁場の方向が導波体の長手方向で，導波体上にある電磁誘導コイル電極部をカバーできるように 10[mm]幅×5[mm]長×10[mm]高とし，磁石の表面磁束密度 496[mT]であった。

SH 板波用は，磁場の方向が導波体幅方向で電磁誘導コイルの導波体長手方向の長さを全てカバーできるように 40 幅×14 長×12 高[mm]とし，表面磁束密度 427[mT]であった。磁石間距離を調整することにより，電磁誘導コイル上の平均磁束密度はラム波用では 77[mT]であり，SH 波用電磁石は 102[mT]である。

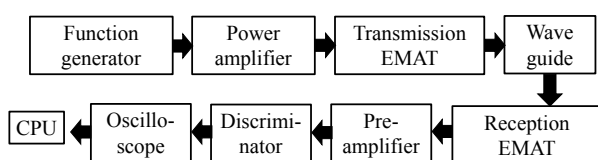
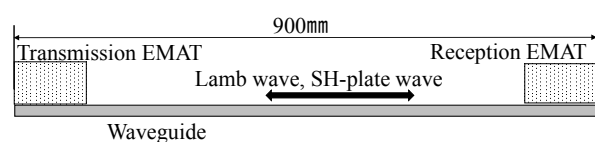


Fig.4 Experimental circuit block



(a) Experimental setup

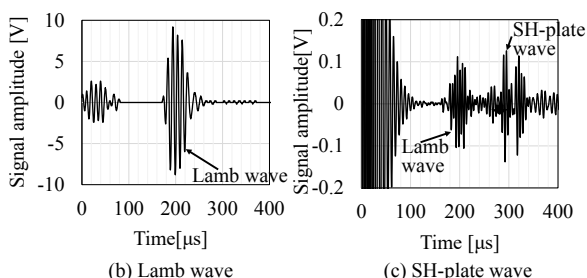


Fig.5 Received signal using only the waveguide

5. 導波体のみを用いた場合の実験結果

約 1,500mm 長の導波体を使って，図 5(a)に示すようにラム波，或いは SH 板波用送受信 EMAT を導波体上で 900mm 離して透過受信信号を確認した。ラム波については図 5(b)に示すようにラム波透過信号を単独で十分な S/N で検出することができた。しかし SH 板波については図 5(c)に示すように SH 板波による受信信号と同等以上の強度のラム波受信信号が同時に検出された。

この原因について検討した結果を図 6 に示す。図 6(a)が試作 SH 板波用 EMAT の当初の配置である。まず磁石の長手方向長さ (40mm) は電磁誘導コイルの長手方向長さ (40mm) とほぼ同一でかつ，導波体の幅に対して倍以上の磁極間間隔 (15mm) にしたため，電磁石の長手方向両端部には導波体幅方向に対して斜め方向磁場成分が発生している。また電磁誘導コイル有効部は導波体幅と同一にしたため，導波体両幅部が曲線形状になっていた。

駆動原理で言及したように，導波体に直交する電磁誘導コイル電極部に対して平行な静磁場のみが SH 板波の駆動に有効である。逆に導波体幅方向に対して斜め方向の静磁場は，導波体長手方向に磁場成分を持つことになり，この磁場はラム波の駆動源となる。また電磁誘導コイル側から見て，導波体幅方向以外の向きに電極が有れば，斜め方向に動磁場が発生することになり，静磁場との複合磁場成分は長手方向に成分を持つと考えた。そこで図 6(b)で示すように，80mm 幅×15mm 長×5mm 高，表面磁束密度 228(mT)の磁石を用いることで磁極の長手方向幅を電磁誘導コイル長手方向幅の倍とし，磁極間間隔も導波体幅と同一の 6mm に短縮した。次に図 6(b)に示すように電磁誘導コイルの導波体幅方向電極長を導波体幅の 2 倍の 12mm とし，導波体上には電磁誘導コイルの電極部のみが設置されるようにした。図 7 は，EMAT の外観写真

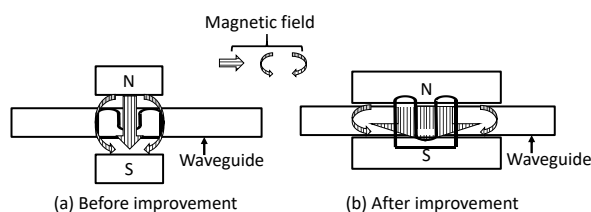


Fig.6 Improvement of SH-plate EMAT

である。図 7(a)は SH 板波 EMAT の改善前で、電磁誘導コイルの幅方向電極長さは導波体幅と同じで角部は丸みをおびている。また永久磁石も電磁誘導コイルの導波体方向の長さと同じで、かつ一対磁石間隔も導波体幅に対して大きくなっていた。図 7(b)は改善後で、磁石に隠れているが、電磁誘

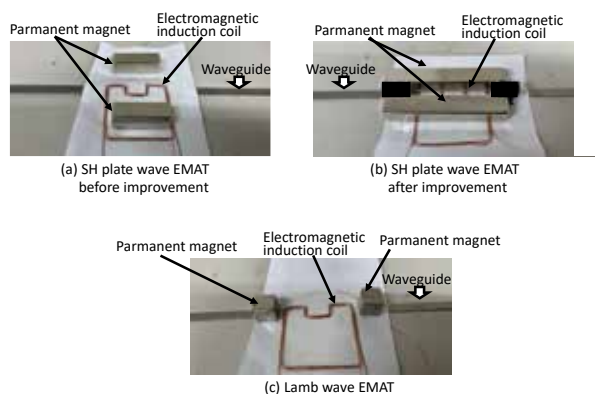


Fig.7 Overview of SH-plate wave, Lamb wave EMAT

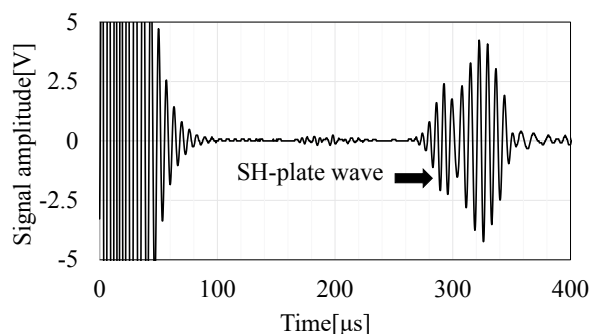


Fig.8 Received signal after improvement of SH-plate EMAT

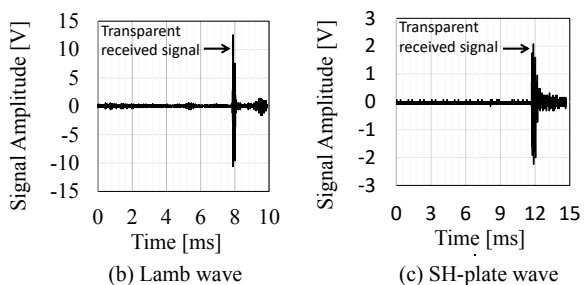
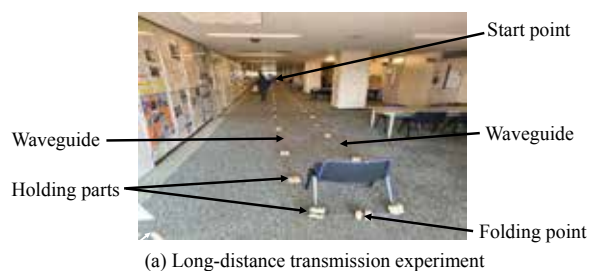


Fig.9 Received signal travelled by 40m using the waveguide

導コイルの幅方向電極長さは 2 倍となり導波体上では幅方向直線部のみが配置されている。永久磁石の導波体長手方向長さも 2 倍以上となり磁石間隔は導波体幅に設定されている。図 7(c)は、ラム波用 EMAT の外観図である。バイアス磁場方向が導波体長手方向になるように、電磁誘導コイルを挟んで導波体上に設置されている。

図 8 は改善後の SH 板波 EMAT 部による受信信号波形である。ラム波による受信信号部強度（伝搬時間 $160 \mu s \sim 200 \mu s$ ）が 1/10 以下に激減し、SH 板波による受信信号強度は約 20 倍向上した。

図 9(a)は導波体を 100m 以上延長してラム波、SH 板波を送受信可能か検討した時の実験の様子である。片道 60m 強の廊下を使用し、導波帯を往復させる方法で実施した。伝搬距離を 10m~100m まで変更した結果、距離減衰係数はラム波の場合で 0.17dB/m、SH 板波の場合で 0.58dB/m となり SH 板波については、距離減衰が非常に大きかった。距離減衰が大きかった原因をラム波と比較して考えると、ラム波の場合振動方向が導波体の長手方向なので導波体の左右端と干渉するのは左右端近傍部のみである。しかも振動方向が端面と並行のため、殆ど干渉が起きないと考えられる。しかし SH 板波の場合、振動方向が左右端と垂直であり、しかも波長が約 25mm で導波体幅が 6mm の設定になっているため、発生するすべての SH 板波が左右端と干渉しており、そのため、ラム波に比べ減衰が大きくなったと考えられる。ただし伝送距離 100m まで透過受信信号を検出できた。また 40m 伝搬させた場合のラム波透過受信信号を図 9(b)、SH 板波受信信号を図 9(c)に示すが、ラム波の場合で約 8ms、SH 板波の場合で約 12ms の伝搬時間の位置に透過受信信号が検出されており、いずれも S/N が 10 以上の受信信号波形であり、10m 長の導波体使用が充分可能であることを示している。

6. 導波体をパイプ周方向に巻き付けた場合の実験結果

導波体単体による透過受信信号波形がラム波用 EMAT、SH 板波用 EMAT 共に、各々単独モードのガイド波の送受信信号を検出できた。そこで実際に導波体をパイプ周方向に巻き付け、軸方向に伝搬

するガイド波がパイプ他端で反射され、受信 EMAT で検出される信号を確認した。図 10(a)は実験配置を示しており、長さ 2m の導波体を、長さ 1m、外径 60.5mm、厚さ 3.2mm の普通鋼パイプの片端部から 50mm の位置に送信用導波体、その送信用導波体から 50mm の位置に受信用導波体を巻き付けた。図 10(b)は拘束治具を使って導波体をパイプに巻き付けている様子を示している。図 10(c)はラム波用 EMAT の場合を示している。A ルートは送信用導波体から受信用導波体に直接伝搬した場合で、伝搬時間約 $600\mu s$ の付近に検出されている。B ルートは導波体から管軸方向に発生した T モードガイド波が反対端で反射した場合で、伝搬時間 $1300\mu s$ あたりに検出されている。しかし A ルートと B ルートの検出信号の間に、多数の同等レベルの信号が検出されている。図 10(d)は SH 板波用 EMAT の場合で、同様に A ルートと B ルートの検出信号の間に、多数の同等レベルの信号が検出されている。すなわちパイプ中の傷が導波体とパイプ他端の間に有った場合、受信信号は A ルートと B ルートの検出信号の間に検出されることになり、識別は困難である。

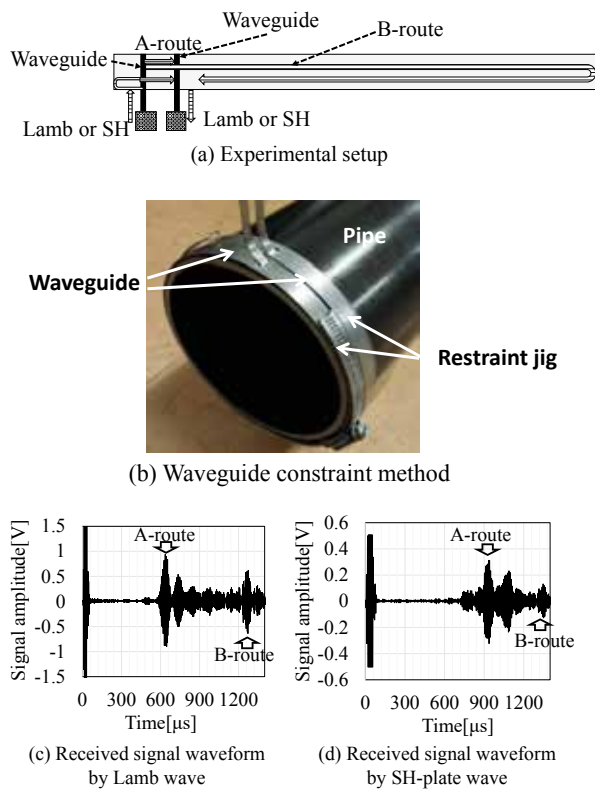


Fig.10 Received signal waveform (Lamb wave→ T-mode guide wave, SH-plate wave→ L-mode guide wave)

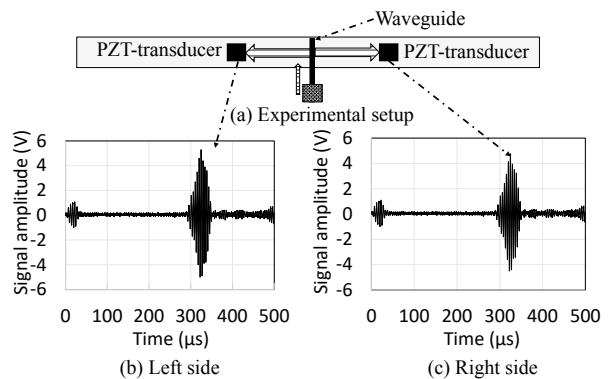


Fig.11 Received signal from both side of the waveguide using a PZT transducer as a reception sensor

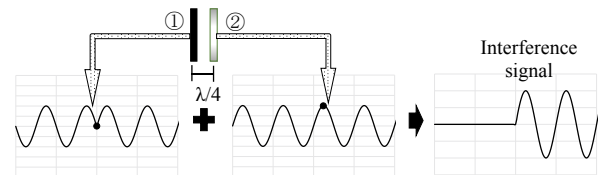


Fig.12 How to generate one-way propagating guide wave

この原因について検討した結果、本手法の場合、送信用導波体のパイプ巻き付け部左右軸方向に有意差が無く、パイプ軸方向の左右にガイド波が発生すると考えられ、その結果パイプ反対端からの反射信号が同時に検出されていると考えられる。実際に図 11(a)に示すように、PZT 型表面波探触子を用いて、導波体左右での透過信号を検出した。図 11(b)が左側に伝搬した場合で、図 11(c)は右側に伝搬した場合である。ほぼ同等の透過信号が検出されている。

1 方向に伝搬するガイド波を発生させるために、図 12 に示すように 2 本の送信用導波体を用いることにした。すなわち、2 本の導波体間隔を発生させるガイド波の $1/4$ 波長分ずらした。そして反対端に設置する EMAT について、導波体①に設置された EMAT と導波体②に設置された EMAT を駆動する電気パルスの位相を 90 度ずらす条件で駆動した。実際に計算した結果を図 12 に示しているが、干渉の結果導波体①の左側では信号が相殺されて振幅が 0 となり、導波体②の右側では、信号が足し合わされて振幅が 2 倍となる。ただし、この計算結果は、導波体①、②に幅が無い場合で実際には導波体は 6mm 幅であるので計算結果とは異なると考

えられる。

図 13 は、2 本の導波体を使った結果で、導波体①と②の距離は、約 6mm に設置した。遅延時間はラム波-Tモードの場合は初期値として $1\mu s$ 、SH板波-Lモードの場合は $1.92\mu s$ とし、駆動装置の遅延時間制御機能を使って、左側に伝搬する透過信号が最も小さく、右側に伝搬する透過信号が最も大きくなるように初期設定から微調整を実施した。その結果、左側伝播信号強度は約 1/8、右側伝搬信号強度は約 2 倍となり、目的の効果が得られた。

図 14 は、1 方向伝搬ガイド波を使った場合で図 10 と比較すると、A ルートと B ルート間のノイズ信号を低減できた。この状態で、傷検出が可能かどうか検討した。

図 15 は、軸方向或いは周方向にスクラッチ傷を機械的に加工した試験パイプ例である。図 15(a)は軸方向傷を示しており、周方向 5mm 幅、軸方向

50mm 長さ、1.0mm 深さとなっており、深さ 2.0mm の軸方向ノッチ傷を別のパイプに加工している。図 15(b)は周方向全周に加工したノッチ傷を示しており、軸方向 5mm 幅、1.5mm 深さとなっており、深さ 0.5mm の周方向ノッチ傷を別のパイプに加工している。図 16 は試験結果で、送信導波体から射出されたガイド波が直接、受信導波棒で検出された A 信号と管端で反射された B 信号の間にスクラッチ傷からの反射による C 信号が検出されている。図 17 は、試験結果をまとめたもので、周方向のスクラッチ傷に対しては、L モードガイド波による受信信号が 3 倍大きく検出されている。軸方向スクラッチ傷に対しては T モードガイド波による受信信号が、約 50%大きく検出されている。

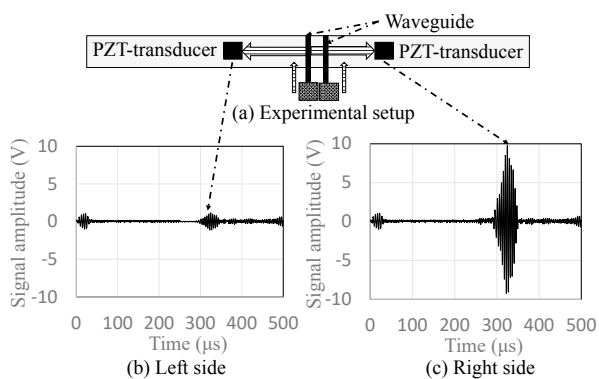


Fig.13 Received signal by one-way propagating guide wave

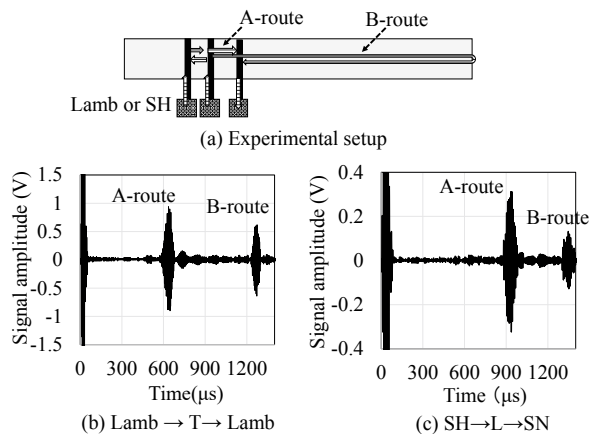


Fig.14 Scratch signal detection signal by unidirectional propagation guide wave

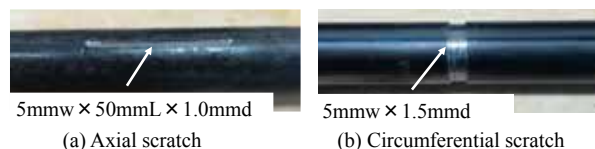


Fig.15 Overview of machining scratches

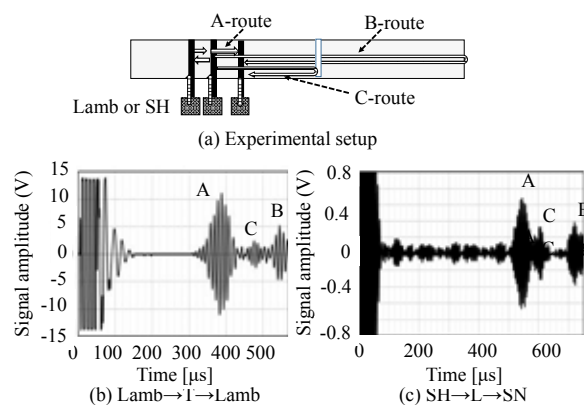


Fig.16 Reflected received signal from a scratch

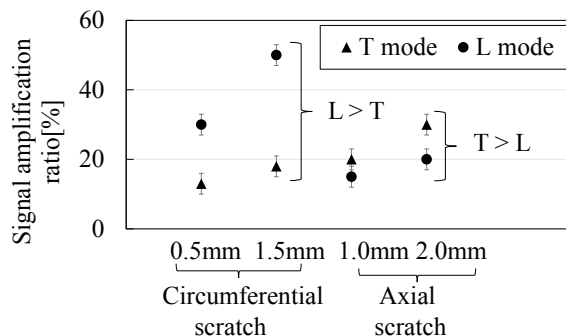


Fig.17 Summary of scratch defects detection result

7. 高温実験

パイプに 2m 長の導波体を巻き付けた状態でホットプレートを利用して昇温実験を実施した。図 18 は昇温時の各部位の温度を非接触温度計で測定した結果である。ホットプレート表面は 500°C まで昇温した。その時のパイプを固定したマウントは、昇温後 30 分経過した時点では 490°C まで昇温した。実際の導波体巻き付け部のパイプ表面温度は 370°C まで上昇した。ただし導波体反対側のセンサ設置部は、常温の約 22°C を維持し続けた。その時の受信信号波形を図 19 に示す。温度に対する音速の影響については、ガイド波と縦波、横波では若干異なると考えられるが、一般に炭素鋼の音速は温度上昇約 50°C 毎に約 1% 低下すると言われている。この値を仮に用いた場合、今回の温度変化範囲（約 25°C～約 400°C）では 7.5% の音速変化に相当し、伝播時間換算では 30～40 μs の増加となる。この点を考慮すると、常温時と、同等の受信波形が得られている。

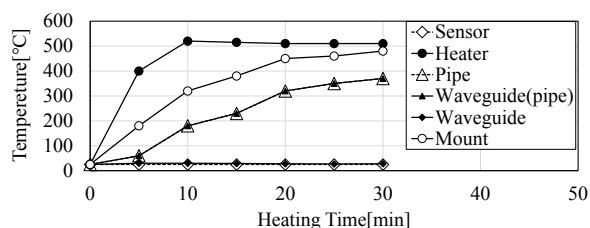


Fig.18 Temperature tendency at various position of a inspection system while heating a pipe

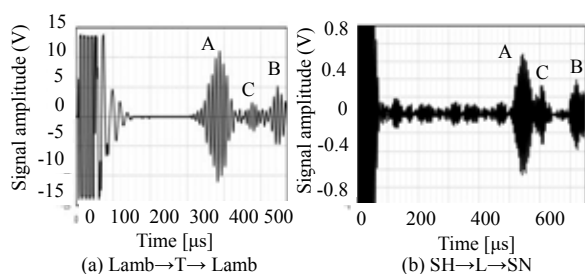


Fig.19 Received signal when the test pipe and the waveguide was heated at 370°C

8. 結言

高温構造物への適用を目標として、短冊状の薄鋼板を利用した導波体の利用を検討した。すなわち導波体片端部に超音波センサを設置し、他端部を高温パイプ周方向に巻き付けることで、センサ部は常温状態で高温パイプの非破壊検査を実施するシステムを考案した。傷には方向性が有ることを考慮し、パイプ軸方向に伝搬し、軸方向に振動する L モードガイド波と周方向に振動する T モードガイド波を利用することとした。そのためにセンサ部では SH 板波とラム波を原理的に交互に送受信する電磁超音波センサを考案した。ただし SH 板波用電磁超音波センサによる受信信号波形にはラム波成分も混在していた。そこで導波体長手方向に垂直な方向のみの静磁場と平行な方向の動磁場のみを利用できる構造に改善する事で、他モードガイド波の混在を除去できた。次にパイプ軸方向を L モード或いは T モードガイド波として伝搬し導波体に戻ってきた受信信号を確認したところ、検査の妨げとなるノイズ信号が多く検出された。原因は原理上、導波体のパイプ巻き付け部両軸方向にガイド波が発生するため、送受信導波体間の多重反射信号が、傷からの反射信号の前方に検出されていると考えた。そこで送信用として 2 本の送信用導波体を用いて位相干渉により軸方向 1 方向にのみ伝搬するガイド波を実現した。その結果、ノイズ信号が低減し周方向、軸方向スクラッチ傷からの反射信号を検出することができた。L モード、T モードガイド波による加工傷からの反射信号を比較し、軸方向傷に対しては T モード、周方向傷にたいしては L モードが有効であることを確認した。また実際にパイプを 370°C まで昇温して傷検出実験をおこなった。センサ部は常温のまま検査可能であることを確認した。ただし、発電所等の供用中熱交換器では少なくとも 20% 程度の部分的な減肉を安定的に評価する必要があると言われている。現状は全周に加工された深さ約 20% のノッチを検出できた段階で十分な検出感度には到達しておらず、導波体の形状、押しつけ方法も含めて改善策を検討していく。

参考文献

- [1] 浜田晴一, 小川泰視, 黒木雅彦, 飯田英男, 早川学, 黒岩智樹: “火力発電所高温配管設備のき裂モニタリング技術の開発”, 日本機械学会 M&M 材料力学カンファレンス, pp174-175 (2004)
- [2] 岩本啓一, 青木清隆, 清水正嗣: “火力発電ボイラの非破壊検査”, 日本造船学会誌, Vol. 872, pp. 165-168 (2003)
- [3] 落合誠, 三浦篤広, 山本智: “レーザ超音波探傷技術の開発と 原子炉内保全への適用”, 東芝レビュー, Vol. 61, pp. 44-47 (2006)
- [4] M. Kobayashi: “Mn-Doped $\text{CaBi}_{4i_4}\text{O}_{15}/\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ ”, Ultrasonic Transducers for Continuous Monitoring at Elevated Temperatures”, Sensors, Vol.17, 2740(p8)(2017)
- [5] 卯西裕之, 石川昌己, 大谷靖弘: “ガイド波を用いた配管腐食検査技術”, NKK 技法, Vol.177, pp.38-42(2002)
- [6] 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”, 超音波 techno, Vol.22, pp.20-24(2010)
- [7] B. R. Tittmann: “A novel technique with a magnetostrictive transducer for in situ length monitoring of a distant specimen”, Ultrasonic Nondestructive Evaluation for Material Science and Industries, Vol.456, pp.73-78(2003)
- [8] 村山 理一, 小林 真之, 小林 牧子, 任 正魁: “導波体を利用した遠距離超音波伝送システムの研究”, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.78, pp.116-124(2012)
- [9] R. Murayama, K. Matsumoto, K. Ushitani, M. Kobayashi: “Pipe Inspection System by Guide Wave Using a Long Distance”, Waveguide, Modern mechanical Engineering, Vol.5, pp.139-149(2015)
- [10] F. Sun, Z. Sun, Q. Chen, R. Murayama, H. Nishino: “Mode Conversion Behavior of Guided Wave in a Pipe Inspection System Based on a Long Waveguide”, Sensors, Vol. 16, 1737(p17) (2016)
- [11] 西野秀郎: “非破壊計測のためのガイド波の基礎と展望”, 非破壊検査, Vol. 52, pp. 654-661 (2003)
- [12] R. B. Thompson: “A Model for the Electromagnetic Generation and Detection of Rayleigh and Lamb Wave”, IEEE Transaction on SONICS AND ULTRASONICS, Vol.20, pp.340-346 (1973)
- [13] M. Hirao, H. Ogi H: “EMATS for Science and Industry”, Kluwer Academic Publishers, pp.13-80(2003)

(2022年1月25日受理, 2022年5月24日採択)