

平成21年4月15日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560104

研究課題名（和文） 配管の疲労損傷度評価用超音波非破壊検査ロボットの開発

研究課題名（英文） Development of ultrasonic nondestructive inspection robot for damage degree of a pipe

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

研究成果の概要：

超音波非破壊検査ロボットに組み込まれるLモード型、Tモード型超音波センサの内、特に低感度であったTモード型を高感度化させた。次にT、Lモードセンサを組み込んだ非破壊検査ロボットで得た、疵による距離減衰係数と信号強度から各種疵の種類と大きさを判定するロジックを提案することができた。また非線形評価指数の信頼度が向上し、疲労試験片の疲労度（余寿命）を特定できる非線形評価指数の増加現象を検出できた。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：（1）非破壊検査（2）管波（3）ガイド波（4）非破壊検査ロボット

（5）非線形超音波

1. 研究開始当初の背景

原子力発電所の熱鋼管配管、燃料用パイプラインやガス幹線において亀裂の発生及び進展は安全性や燃料輸送効率の両面からあってはならない事態である。しかし、従来の非破壊検査方法では、余寿命レベル10%未満のマイクロメータ以上の大きさの欠陥しか検出できず、余寿命診断という考え方は成り立たなかった。また使用するセンサは実質的

にセンサ直下部のみが有効検出範囲であった。すなわち全長検査には、1点1点、センサを移動させる必要があり、経済性、有効性を考えると、実用性がなかった。

これらの課題に対して近年、固体材料への非線形超音波法の適用が盛んに行われるようになり、日本でも川嶋や山中・三原らが先駆的な研究を実施し、超音波振幅(nm程度)と亀裂の開口幅が同等以上であれば特異的に高調

波成分や分周波成分が強調されることを見いだした。また、定量的評価のための理論的なアプローチも琵琶や伊藤等によって実施されている。

但しその実験方法については、いずれも接触媒質（液体）が必要な圧電振動子型超音波センサを用いているため、固体材料に比べ圧倒的に大きな非線形応答が発生する液体の影響のため再現性・信頼性に大きな課題が残っていた。

それに対して申請者は接触媒質不要な複合モード型ガイド波用非線形電磁超音波センサを開発し、簡便で再現性の高い超音波と微小疵の間の非線形応答現象の検出に成功した。

また超音波センサが1点1点の探傷が必要であるという課題に対して、20年程前から、パイプ軸方向に大きな減衰もなく伝搬するガイド波（管波）を使った検査手法が検討されてきた。この管波を使った検査は英国の非破壊検査研究機関が最も進んでおり商品化もされ、日本にも10年ほど前に紹介され、実用化の可否が検討されたが、使用する管波（Lモード）の距離減衰が予想以上に大きいという課題があった。そこで日本の検査・研究機関で米国の研究機関と共同して比較的距離減衰の小さな管波（Tモード）を使った検査装置が開発され、管に直接センサを接着剤で貼り付ける（完全固定）タイプではあるが十分な検出感度が得られた。しかし固定型では管波の超音波距離減衰の影響は無視できず、疵深さ・疵種類等の検査に必要な情報が不十分であり、実用化は困難な状況である。

2. 研究の目的

原子力発電所の熱交換配管や燃料（ガス、石油等）用パイプラインの余寿命診断が可能な超音波非破壊検査ロボットを開発する。開発する非破壊検査ロボットは、パイプライン上を軸方向に走行することでmm単位の疵からnm単位の疵までの分布を評価することを目的としたものである。

一般にmm単位以上の疵はすでにパイプが破壊されていることを意味しており、即時交換或いは補修の必要がある。また μm 単位の疵は、余寿命が10%未満であることを意味している。それに対してnm単位の疵はその大きさと分布状況により余寿命は0~90%と広い範囲にわたっている。

したがって開発する検査ロボットが完成すれば、即時交換、補修、何年後かの再検査等の指針を与えることになりパイプラインの安全性の向上及び燃料漏洩、事故等を未然に防ぐことで、限りある資源の効率的な利用

に大きく寄与し、資産の保全及び大きな経済効果を上げることができる。

本研究では試作ロボットの評価までを実施し、研究終了後に非破壊検査メーカと共同研究でパイロットプラントを使ったフィールドにおける実証試験を行うことを予定している。

3. 研究の方法

これまでの研究開発でLモード管波の基本構造は決定させていた。また非線形超音波用電磁超音波センサの基本構造も確定させた。さらにLモード管波、Tモード管波に対応するS0モード板波とSH0モード板波を同時に利用することがナノクラック検査に有効であることも確認した。そこでTモード、Lモード管波用電磁超音波センサを同時に組み込んだ超音波非破壊検査ロボットを試作し、基本性能を評価する。

この中でLモード管波センサについては十分な感度を有する事を確認済みであるが、Tモード管波センサについては、疵探傷を行うには不十分な感度であった。そこでTモード管波センサについて、構成する電磁石、センサコイルの形状、諸仕様を見直す。そして十分な感度が得られたことを確認した後、両モードセンサを組み込んだ非破壊検査ロボットの開発に取り組む。基本的には、既に開発済みのLモード管波非破壊検査ロボットとTモード管波検査ロボットの複合体であるため、大きな不安要素はないが、全体が大きくならないように組み込み技術を検討する。特に開発センサは超音波センサとは言え、本体は電磁波を送受信するアンテナであるため、電磁波のシールド技術を十分に活用する。移動機構についても、全体のバランスが悪く軸方向移動中に検査ロボット自体が周方向に回転する場合もあり、周方向の重さ分布を調整できる機構またタイヤ部での吸着（永久磁石内蔵型）機構など考慮する。

基本性能評価として、まずは静止時の基本データ（管端面反射信号強度、疵信号強度、音速評価等）収集データを行う。次に移動実験を行い、静止実験と基本データが同一になる（高調波成分も含む）ことを確認する。本来開発センサ（電磁超音波センサ）は、この点で極めて優れた性能を持つセンサであるが、高調波センサという視点で同様のことが言えるか確認する。

また評価試験のなかで、検査ロボットは事実上2つのセンサを駆動する必要があり、2

つの駆動措置間の機器性能差により、検査結果に影響を与えることが考えられる。そこで駆動装置単体での性能差、駆動装置とセンサの組み合わせ方による性能差を詳細にデータ収集し、性能差が出ない駆動条件を確立する。

開発した検査ロボットを使い、各種評価試験体を用いて各種疵の評価アルゴリズムを確立する。

また評価試験を順調に実施するために、ナノクラックの大きさ、分布状況の観点から余寿命が0%~100%と想定することが出来る疲労試験(S/N線図を事前に実験的に取得し、それから疲労試験回数を決定)を実施した試験片を準備し、評価試験を実施する。これらの評価試験を通して、構造物の余寿命評価に必要な構造物の非破壊評価装置として必要な種々の性能(評価結果の再現性、表面性状の影響、探傷不能部位の有無等)について評価、改善をおこない、管波を用いた管の非破壊試験方法の確立を図る。

4. 研究成果

図1にLモード管波、Tモード管波の振動・伝搬パターンを図1に示す。Tモードは管周方向に振動しながら管軸方向に伝搬する超音波である。したがって、管周方向に振動する力を発生させる必要がある。Lモードは管軸方向に振動しながら管軸方向に伝搬する超音波である。したがって、管軸方向に振動する力を発生させる必要がある。

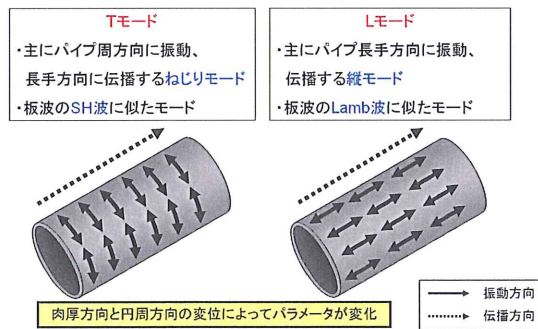


図1 Lモード管波、Tモード管波の振動・伝搬パターン

そこで、種々の検討の結果、図2に示す、Lモード用、Tモード用電磁石を製作した。特にTモード用超音波センサについては、当初は図3(a)に示すタイプであったが、より試作電磁石の特性を生かす構造として図3(b)に示す構造を適用した。

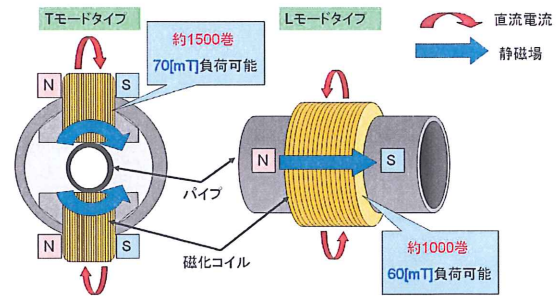


図2 Lモード管波、Tモード管波用超音波センサ用電磁石の基本構造

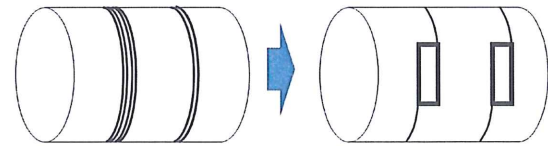


図3 試作センサコイルの形状

試作L、Tモード管波用電磁超音波センサを組み込んだ超音波非破壊検査ロボットを試作した。各種機械的な改造及び走行性能を確認した後、図3に示す実験システムを用いて、様々な仕様の貫通穴、スリットを加工し、疵評価を実施した。

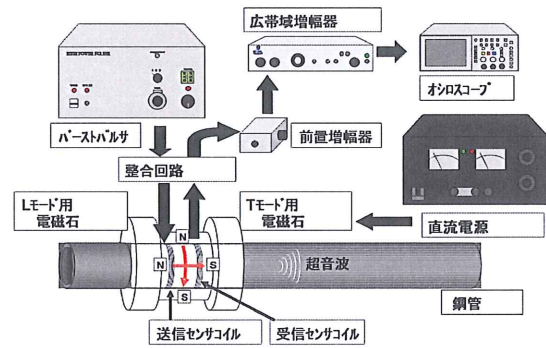


図3 試作検査ロボットによる実験システム

図4に、管中に人工欠陥を加工した試験パイプによる探傷波形例を示す。図中、Aで示す管端から反射した信号、Bで示す貫通穴から反射信号が観測できている。

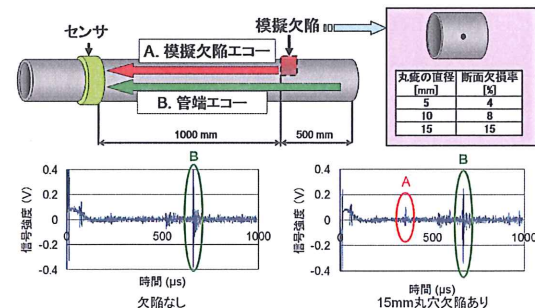


図4 超音波受信信号波形例

図5は丸い疵に相当する貫通穴と割れ疵に相当するスリットを検査した結果をまとめた図である。Tモード、Lモード及び貫通

穴とスリットにより各々、距離減衰係数と疵信号強度の相関傾向は異なっていることがわかる。すなわち、単独モードの検査では、疵種が分からないため、疵の大きさも判定できないが、両モードを用いれば、まず疵種の判定が可能となり、疵種が分かれば、どちらのモードの疵信号強度 (S/N) を用いても疵の大きさが判定できることになる。或いは、両モードの疵信号強度を用いればより精度の高い疵の大きさが推定できると考えられる。

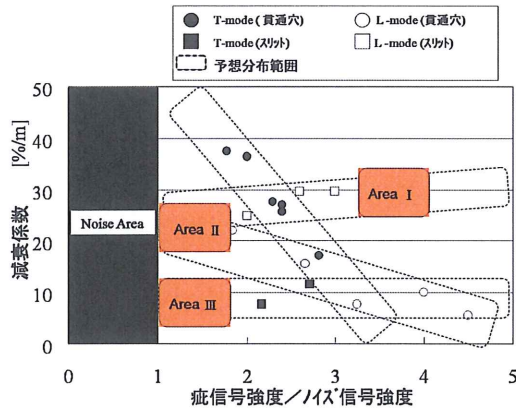


図5 L, Tモード管波による距離減衰係数及び疵信号の S/N 比測定結果

図6は図2の結果から例えば AREA I の場合ではどのような判定ロジックが出来るか、或いは AREA II と III の場合はどのような判定ロジックができるかを例として示しものである。AREA I のような場合は、Lモード単独での疵種、大きさ判定が出来るが、AREA II、III では両モードの情報が必要であることを示している。

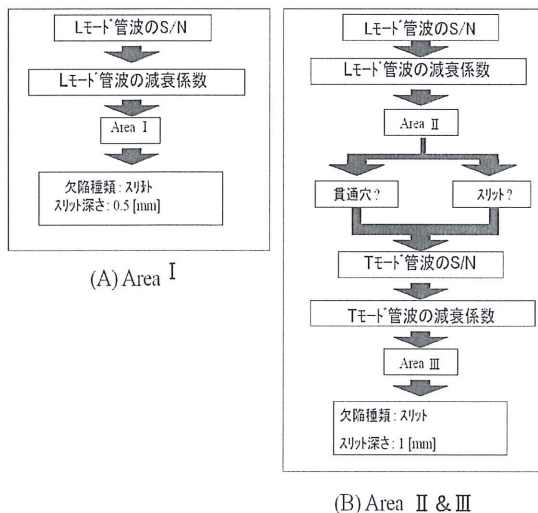


図6 図5を用いた疵種判定ロジック
今回の試験では、余寿命を定量的に変えた試験管を準備することはできなかったため、薄板で余寿命の異なった疲労試験片 (破断疲

勞回数に対して、疲労回数を段階的に変えた試験片) を製作し、試験管上に貼り付ける事により余寿命評価を実施した。図7はLモードを用いた場合(薄板ではS0モードに相当)、図8はTモードを用いた場合(薄板ではSH0モードに相当)である。Lモードでは、余寿命99%以下になることを検知できる結果となっている。またTモードの場合は、余寿命95%以下を検知できる結果となっている。

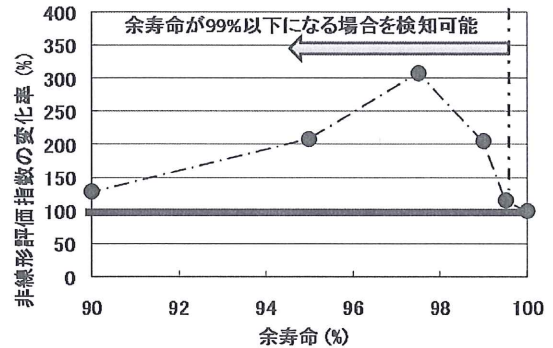


図7 Lモードによる疲労試験片余寿命評価結果

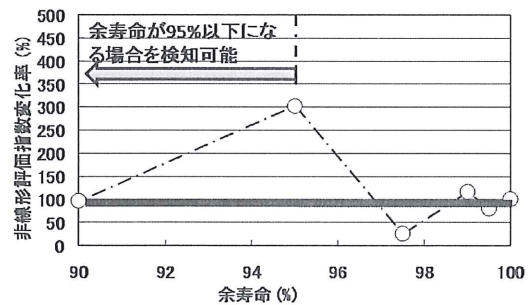


図8 Tモードによる疲労試験片余寿命評価結果

まとめるとTモード、Lモード管波用電磁超音波センサを同時に組み込んだ超音波非破壊検査ロボットを高性能化すると共に検出能確認、高調波成分検出による余寿命評価の定量化を進めた。まず超音波非破壊検査ロボットの高性能化については、感度不足であったTモード用電磁超音波センサについて、電磁超音波センサを構成する電磁石の形状を見直すことにより磁化力を2倍にすることができた。また同じくセンサコイルの形状を正形状にし、独立に2個配置することで、電磁石の磁化力を最大限利用できる構造とした。その結果、超音波受信信号強度を3倍増加させることができ、欠陥の定量的評価が可能になった。次に欠陥評価試験結果の結果、Tモード管波とLモード管波を単独で使用して検査した場合、欠陥の種類がわからず、したがって欠陥の大きさも判定できないという結果になった。逆に非破壊検査ロボット化で初めて可能になっ

た移動測定により評価できる疵信号の距離減衰係数が両モード及び欠陥の種類により大きく異なる事が確認できた。そこで両モード組み合わせ使用により複数・複種類の疵からの反射超音波信号大きさ・距離減衰係数の相関図を作成し、各種疵の種類と大きさを判定するロジックを提案することができた。また、このように十分な信号強度が得られるようになった結果、微小傷に対して、信号強度のふらつきが大きく、非線形評価指数の安定的な評価につながっていなかったが昨年度までの結果に対して、信号強度が充分安定し、非線形評価指数の信頼度が向上した。その結果、特定回数繰り返し応力を加えた疲労試験片で、顕著な非線形評価指数の増加が検出された。

今後は、繰り返し応力を加えた試験パイプによる評価を実施することで開発ロボットの有効性が更に証明できると期待できる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Yusuke Okawa, Riichi Murayama, Hideaki Morooka, and Yusuke Yamashita, Development of a Movable Inspection Sensor for a Pipe Using an Electromagnetic Acoustic Transducer, Jpn. J. Appl. Phys. Ultrasonic Electronics, 掲載決定, (2009), 査読有り
- ② Riichi MURAYAMA, Kazumi AYAKA, Kohei YAMAUCHI and Kazuki YOSHIDA, Harmonic Frequency Components Detection by a Guide Wave type Electromagnetic Acoustic Transducers [EMATs], Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering Special Issue on Advanced Technology of Experimental Mechanics, 2, pp437-444, (2008), 査読有り
- ③ R. Murayama, K. Ayaka, Evaluation of Fatigue Specimens Using EMATs for Nonlinear Ultrasonic Wave Detection, Journal of Nondestructive Evaluation, 26, 115-122, (2007), 査読有り

[学会発表] (計 8 件)

- ① 村山理一
管波用電磁超音波センサ搭載型非破壊検査ロボットの開発
日本実験力学学会 2007 年度年会
(2007. 8. 6)
埼玉大学 東京プラザ

- ② Riichi Murayama, Ayaka Kazumi
Evaluation of Fatigue Specimens Using EMATs For Nonlinear Ultrasonic Wave Detection
IEEE Ultrasonic Symposium (2007. 10. 30)
Newyork (Hilton Hotel)
- ③ 大川裕介、村山理一、川浪大典、市川大輔、渡辺幸一
Tモード管波用電磁超音波センサの開発
日本機械学会 第 15 回機械材料・材料加工技術講演会 (2007. 11. 18)
長岡技術科学大学
- ④ 大川裕介、村山理一、川浪大典、市川大輔、渡辺幸一
Tモード管波用電磁超音波センサの開発
第 6 回評価・診断に関するシンポジウム (2007. 12. 6)
豊橋商工会議所ビル
- ⑤ 村山理一
超音波による薄板疲労試験片の損傷度評価の検討
日本非破壊検査協会九州支部平成 20 年度研究発表会 (2008. 4. 18)
九州機械工業振興会
- ⑥ 大川悠助、村山理一、市川大輔、渡辺幸一
電磁超音波探触子を用いた移動型配管探傷センサの開発
日本機械学会 M&M2008 材料力学カンファレンス (2008. 9. 17)
立命館大学
- ⑦ Riichi Murayama, Yusuke Okawa, Yuuta Ito, Tomoaki Nagai, Kazumi Ayaka
Damage degree evaluation of Iron and Nickel thin fatigue specimens using EMAT for an S0-LamB wave and an SH0-plate Wave
3rd International Conference on Material and Processing (ICM&P 2008) (2008. 10. 8)
Illinois (North Western University)
- ⑧ 大川悠助、村山理一、諸岡秀昭、山下雄介
電磁超音波探触子を用いた移動型配管探傷センサの開発
超音波の基礎と応用に関するシンポジウム (USE2008) (2008. 11. 12)
仙台シルバーセンター

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