

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K12473

研究課題名(和文) アクティブスマートセンサを用いた大型構造物のガイド波検査

研究課題名(英文) Guided wave inspection for large structures using active smart sensors

研究代表者

林 高弘 (Hayashi, Takahiro)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30324479

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：これまで研究代表者らは、配管やタンクのような薄板状材料に対し遠隔からのレーザー照射により弾性波を励振して、その励振点を走査することにより内部に発生した損傷を画像化する技術を検討してきた。本研究では、その画像化手法に用いる受信センサとして、シリコンマイク、アンプ、バッテリーを内蔵したスマートセンサを開発した。このスマートセンサにBluetoothトランスミッターを装着することで、非接触での計測により薄板裏面にある損傷の画像化が可能となることが示された。さらに、6m程度の遠距離での計測による損傷画像化や6チャンネルを利用した損傷画像化の鮮明化に成功しており、今後の応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：The principal investigator had been investigating the imaging technique for plate-like structures such as pipes and tanks in which elastic waves are generated by laser from a distance. This study developed a receiving device for the imaging technique comprising silicone microphones, amplifiers, and a battery. By connecting a Bluetooth transmitter to the microphone unit, the defect imaging was successfully executed by non-contact measurements. Moreover, imaging by remote measurements from a distance of 6 m and image enhancement using six microphones were also successfully confirmed. These are promising results for further applications.

研究分野：材料力学

キーワード：非破壊検査 非接触 ガイド波

1. 研究開始当初の背景

橋梁やコンクリート構造物といった社会インフラや航空機や船舶といった大型輸送機器に対し、健全性をモニターしその安全運用、長寿命化を図る取組みが進んでいる。現在、研究が進められている構造診断用のスマートセンサは、運用時に受けるひずみや衝撃を受動的（パッシブ）にセンシングし、その情報を無線や有線で伝送する。このパッシブセンシングでは、歪みや弾性波を常時モニタリングし、特異な状態が観測されたときにイベントとして記録するという方法が用いられることが多い。そのため、健全性を評価する上で必要な情報が得られているとは限らないのが現状である。

また、危険と予測される特定箇所の精密な検査は、運用停止時の定期検査として行われ、その手段としてアクティブセンシングである超音波パルスエコー法が広く利用されている。しかし、この手法は探触子を当てた直下のみを検査できる極めて非効率的な手法であり、構造物のごく一部に限定的に利用されている。

その中で、研究代表者らは、薄板状構造を効率良く検査できる手法として、構造に沿って伝搬する超音波モードであるガイド波を用いた非破壊検査手法に関する研究を行ってきた。この手法では、配管のような薄板状材料に沿ってガイド波を伝搬させるため、長距離の一括検査が可能となり、配管検査の効率化が大きく促進された。しかし、このガイド波を計測するためには、離れた場所にあるガイド波の送信装置と受信装置をケーブルで接続する必要があり、大型構造物の評価において受信センサを遠方に配置する場合には、そのケーブルが実用上の問題となっていた。

そこで研究代表者らは、レーザを用いて遠隔からガイド波を励振し、別のレーザによりガイド波を受信するという手法により、薄板材料内の損傷が画像化できることを示した。しかし、ガイド波の受信にレーザを用いる手法は、屋外の検査現場においては環境振動などの影響を大きく受けるという課題があり、実用まで距離があった。

2. 研究の目的

本研究では、受信デバイスにシリコンマイクロフォンを、伝送デバイスに Bluetooth を用いることで上述の課題を解決する計測システムを構築し、損傷画像化実験に適用することにより、その性能を確認することを目的としている。これは、研究代表者が開発した損傷画像化手法では、これまでの超音波検査では用いられてこなかった低周波数帯域が適用できるようになったことを利用している。

3. 研究の方法

本研究では受信デバイスを音響マイクに

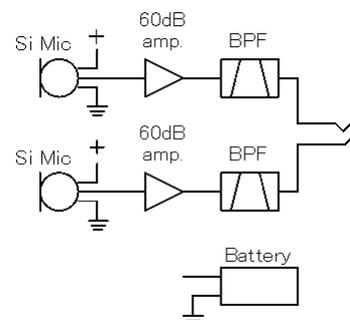
し、空中に漏えいする音波を受信することで非接触での損傷画像化を行った。ここでは、その作成したマイクユニットについて示す。

(1) マイクユニットの構成

検査対象から漏えいする微弱な音波を測定し、複数の低周波数帯の音波を利用するため、広帯域で高感度な MEMS タイプのシリコンマイクを採用した。シリコンマイクには信号増幅用のアンプを取り付け、これらを駆動するための電源としてリチウムイオンバッテリーおよびバッテリー駆動回路を装着したマイクユニットを作成した。図 1 にこのマイクユニットの正面画像と機能回路図を示す。シリコンマイクには 10 kHz から 65 kHz を周波数帯域に持つ Knowles Acoustics SPM0404UD5 を用いた。さらに、60 dB のアンプと 1.6 kHz から 106 kHz のバンドパスフィルタを取り付けた。また、3.5 mm ステレオミニジャックとリチウムイオンバッテリー、バッテリー駆動回路を取り付け図 1(b) に示す機能を持つ 2 チャンネル分の波形を受信可能なマイクユニットを作成した。これによってコネクタに FM トランスミッターや Bluetooth トランスミッターを接続することでケーブルレスの受信デバイスとした。



(a) 正面画像



(b) 機能回路図

図 1 作成したマイクユニット

(2) マイクユニットの受信特性とレーザ散乱光由来のノイズ対策

はじめに作成したマイクユニットの受信性能を評価するため、レーザにより薄板中に励振された弾性波が空中に漏えいした音波をマイクユニットで測定する基礎実験を行った。特に、音波は伝搬距離が延びるに伴い大きく減衰するため、距離による受信特性について検討した。実験で用いた装置の概要図を図 2 に示す。薄板とファイバレーザの距離

を 3 mm 薄板とマイクユニットの距離を 10 mm, 500 mm として受信した. 薄板には 10 kHz の狭帯域バースト波を 10 ms 励振し, 音波信号を測定した. レーザ照射開始時刻を 0 とし 30 ms までの時間波形とその周波数スペクトルを図 3 に示す. 図 3(a) の受信された波形を見ると 10 mm の場合と, 500 mm の場合で全く異なる波形が確認された. 図 3(b) では 500 mm の周波数スペクトルピーク値が非常に大きな値を示したため, 10 mm でのスペクトル値を 40 倍にして表示している. 10 mm の場合は明瞭な時間波形は見られないが, 10 kHz の位置に明確な周波数スペクトルピークが確認できた. 一方, 500 mm の場合は, レーザ照射時間 0 ms から 10 ms に振幅の大きな明瞭な波形が見られる. 空中を伝搬してきた音波を測定すると伝搬してきた距離に応じて波形は遅れて受信されるため, これは音波を測定しているのではないと考えられる. センサ部分にはシリコンマイクを用いており, 薄膜部分は単結晶シリコンからできている. これは単結晶シリコン型太陽光電池などに用いられる構造と同様であり, この薄膜部分に光が照射されると光起電効果によって電流が発生する仕組みとなっている. つまり, 0 ms から 10 ms で受信した信号は, 励振用のレーザー光の散乱光がシリコンマイクに当たることにより発生した電気信号を表しているものである. この波形には薄板内部の情報は含まれておらず, 損傷画像化へ利用することは期待できない. そのため, マイクユニットを薄板表面からの反射光が当たらないようにして, 漏えいする音波のみを測定する必要がある.

そこで, シリコンマイク部分にレーザー反射光が当たらないようにし, 空中に漏えいする音波のみを測定するため, マイクユニットを不透明なプラスチックケースに収納することで遮光を行った(図 4). プラスチックケースに収納した状態で集録した波形を図 5 に示す. 図 5(a) は距離ごとの時間波形であり, 信号レベルが小さいため, 明瞭な時間波形は見られない. 図 5(b) はそれぞれの時間波形の周波数スペクトルを示しており, ケースに収納したことで信号レベルが低下し, 時間波形では確認できないが, 周波数スペクトルでは距離が 10 mm の場合に 10 kHz の明瞭なピークが確認できた. 15.8 kHz 周辺にもピークが確認できるが, これは実験システム固有のノイズである. 距離が 500 mm の場合にはピークが現れていないが, これは音波が薄板からマイクユニットまでの空中を伝搬していく中で減衰したためである.

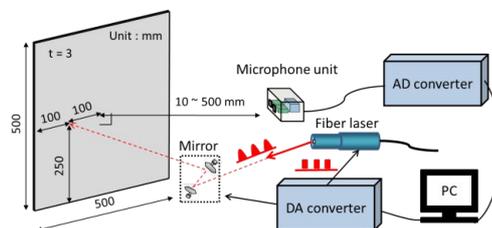
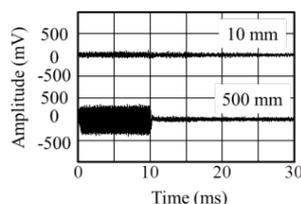
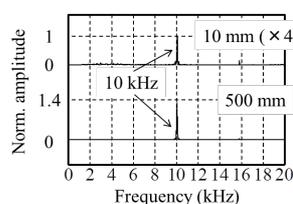


図 2 マイクユニット特性把握に用いた実験装置概要



(a) 時間波形



(b) 周波数スペクトル

図 3 遮光していないマイクユニットで取得した波形と周波数スペクトル

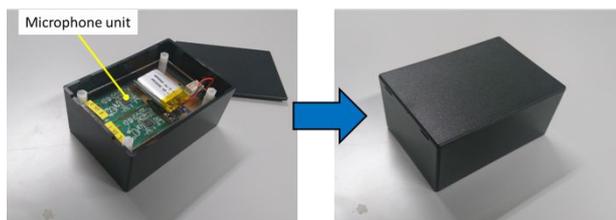
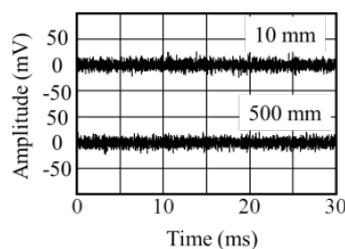
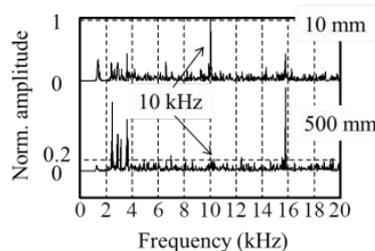


図 4 マイクユニットの遮光



(a) 時間波形



(b) 周波数スペクトル

図 5 遮光したマイクユニットで取得した波形と周波数スペクトル

4. 研究成果

(1) 製作したマイクユニットによる非接触損傷画像化

製作したマイクユニットを受信デバイスとすることで薄板から漏えいする音波を測定できることを示した。ここでは図6に示すような実験装置を用いて、損傷を持つ試験体に対して実際に損傷画像化実験を行う。図7に示すように試験体として、500 mm × 500 mm × 3 mm のアルミニウム合金板裏面に、幅2 mm、深さ1.5 mm のノッチによる“K”を損傷として彫ったものを用いた。損傷画像を取得するレーザ照射領域は損傷部分を含む80 mm × 80 mm とした。薄板右端から50 mm、下端から250 mm の位置から薄板とマイクユニットの距離を20 mm としている。本画像化が複雑な試験体でも利用できることを示すため、ここでは、中央の下から250mm の位置まで貫通ノッチを伸ばした。

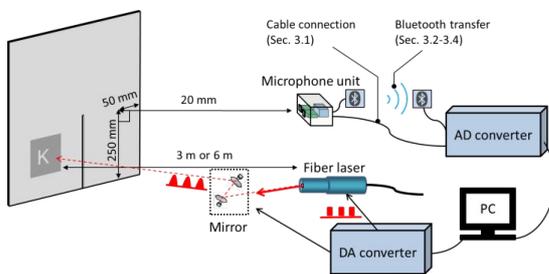


図6 画像化実験システム

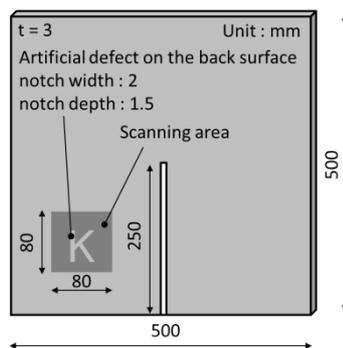


図7 用いた試験平板

薄板とレーザの距離を3 m、マイクユニットとAD変換器間はBNCケーブルで接続し損傷画像化を行った。一つのマイクユニットで2チャンネル受信であるため、図8にそれぞれのセンサで取得した平均画像を示した。不鮮明ではあるが“K”の損傷部分を画像として取得できている。つまり、空中に漏えいする信号を受信することで非接触損傷画像化が可能であることが示された。

取得した損傷画像には損傷部分以外にも濃淡が模様として現れている。これは励振した周波数や受信位置によって板内での共振などを取得して現れるスプリアス画像である。これは異なる周波数、受信位置では異なる

濃淡パターンを示すため、より多くの画像を平均化することで損傷画像の鮮明化ができ、その結果は(3)で示す。

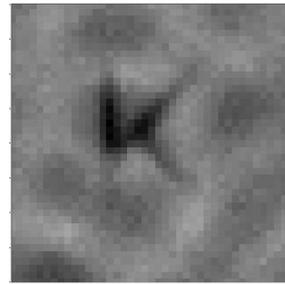


図8 BNCケーブル接続による損傷画像

(2) Bluetoothを用いた遠隔計測

検査現場での完全非接触計測は需要が高いと同時に、遠隔計測の需要も高い。しかし、マイクユニットを用いた非接触損傷画像化では、検査対象近くにマイクユニットを設置する必要があるため、ケーブルが作業の妨げになることも考えられる。

本研究では20 kHz以下の可聴音域を用いていることに着目し、これによってオーディオ用のBluetoothトランスミッターやFMトランスミッターでデータの無線転送が可能になる。Bluetoothトランスミッターは混線に強く多チャンネル化が容易であるため、マイクユニットを複数個設置することが可能になる。このため、波形データの無線転送にオーディオ用のBluetoothトランスミッター(TaoTronics社製、TT-BA07)を用いた。ケーブル接続時と同様にレーザと薄板の距離は3 m、薄板とマイクユニットの距離は20 mmとした。Bluetoothトランスミッター内部でデジタル信号処理を行うため、データ転送時に遅れが生じ、ここではその遅れが190 ms程度あったことから、レーザ照射タイミングから190 ms遅らせて波形を集録した。トランスミッター1機につき2チャンネルのデータ転送が可能なので、ここではマイクユニット1つにつき2つ取り付けられているシリコンマイクからの波形データを利用した。このとき得られた画像を図9に示した。BNCケーブル接続時(図8)と比較するとほぼ同じ損傷画像を取得できている。無線転送での遠隔計測が可能であることがわかる。

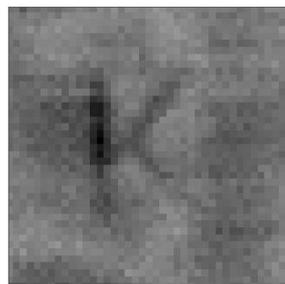


図9 無線転送システムで取得した損傷画像

(3) 多チャンネル受信画像による損傷画像の安定的鮮明化

これまででは周波数による平均化および2チャンネルによる平均化により損傷画像の鮮明化を図った。しかし、マイクユニットをプラスチックケースに収納したためにSN比(Signal to Noise Ratio)が低下し、その結果、損傷画像が不鮮明となっている。そこで損傷画像を改善するために多チャンネル受信による画像の平均化を試みた。3個のマイクユニットを試験体の近くに設置し、合計6チャンネル分の波形を受信できるようにした。損傷画像化を行い、全6チャンネルを平均化した画像が図10であり、鮮明な損傷画像を得られていることがわかる。マイクユニットの数を増やしチャンネル数を増やしていくことで、全チャンネルでの平均画像はセンサユニットごとの差異が低減され、安定的に鮮明な損傷画像を得られると考えられる。

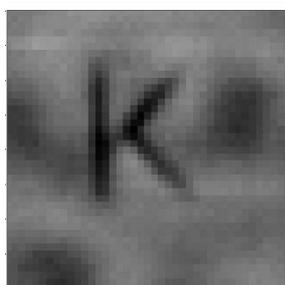


図10 6チャンネル分のセンサで取得した損傷画像

(4) 遠隔計測が損傷画像に与える影響

ここまででBluetoothによるデータ転送が有効であり、多チャンネル化によって得られた画像を平均化することで鮮明な損傷画像が取得できることが示された。次にレーザーと薄板の距離を3mから6mにして損傷画像化を行い、遠隔計測による損傷画像化への影響を検討した。前節同様に3個のマイクユニットを設置して音波の計測を行い、図11のような損傷画像を取得した。Bluetoothトランスミッターの転送可能距離の範囲内なのでデータ転送は問題なく、SN比の低下の無い結果を得た。本研究で用いたBluetoothトランスミッターは20kHz以下の周波数帯を10m以内であれば転送可能であるため、その範囲内での遠隔計測は可能である。Bluetoothによる音声データ転送は、周波数領域も拡大しており、転送可能距離も伸びているため、今後は10mを超える遠隔での計測も可能であると考える。

以上の結果のように、シリコンマイクロフォンを受信デバイスに、Bluetoothトランスミッターを伝送デバイスにすることで、薄板材料内の損傷画像化が容易に可能となるこ

とが示された。ここで作成し、性能評価したマイクユニットは、従来の受信デバイスに比べると非常に安価のため、プラントや航空機機体などに大量に配置しておくことも可能である。その意味で、今後ヘルスマニタリングへの適用、取得されたビッグデータを用いた健全性評価などにも利用可能であると期待できる。

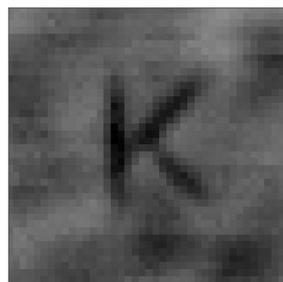


図11 6mの遠距離にある検査対象に対して取得した損傷画像

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 3 件)

Takahiro Hayashi, Rei Fujishima, Materials Transactions, 査読有, 57, 2016, 1602-1608

DOI:10.2320/matertrans.M2016204

林高弘, 藤島礼, 日本金属学会誌. 査読有, 81, 2017, 71-79

Atsuya Maeda, Takahiro Hayashi, Materials Transactions, 査読有, Vol. 59, 2017, 320-323

DOI:10.2320/matertrans.M2017326

[学会発表](計 4 件)

レーザー弾性波源走査法を用いた損傷画像化における振動受信方法について, 林高弘, 前田篤弥, 第24回超音波による非破壊評価シンポジウム, 2017

レーザー・空中超音波センサを用いた薄板裏面傷の非接触画像化, 前田篤弥, 林高弘, 先進的非破壊評価合同シンポジウム, 2017

擬似 Scholte 波を用いた水が接する平板の評価, 林高弘, 藤島礼, 先進的非破壊評価合同シンポジウム, 2017

レーザー励振 空中超音波受信による薄板の損傷画像化, 前田篤弥, 林高弘, 日本機械学会 2017 年度年次大会, 2017

6. 研究組織

(1) 研究代表者

林 高弘 (HAYASHI, Takahiro)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 30324479