The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	レーザ・シリコンマイクロフォンを用いた薄板内損傷の非接触画像化
Author(s)	前田, 篤弥; 林, 高弘
Citation	超音波techno. 2018, 30(3), p. 60-65
Version Type	AM
URL	https://hdl.handle.net/11094/88622
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

レーザ・シリコンマイクロフォンを用いた薄板内損傷の非接触画像化

前田　篤弥，林　高弘

京都大学　大学院工学研究科

キーワード:　非破壊検査，レーザ弾性波源走査法，音響マイク，非接触計測

Atsuya Maeda, Takahiro Hayashi
Kyoto University, Graduate school of Engineering

Key Words : Non-destructive testing, Scanning Laser Source technique, Acoustic microphone, Non-contact testing

1. 緒言

社会インフラやプラントなどの大型構造物の適切な維持管理には定期的な検査が必要であり，構造内部の欠陥を定量的に評価できる非破壊検査が重要になっている[1)-3)]．超音波パルスエコー法は信頼性の高い手法であるが，検査対象との接触を要する．また，検査可能範囲は接触探触子直下のみであるため，大型構造物の検査には膨大な時間とコストを要する．そこで一度に長距離伝播が可能なガイド波のエコー信号で損傷を評価する検査方法が注目され，特にパイプや鉄道レールの高効率検査に対する多くの成果が発表されている[4)-6)]. しかし, ガイド波検査を実行する場合, ガイド波を長距離伝搬させるためには低周波数帯域の利用が必要となる半面，低周波数帯域の利用により所望のサイズの損傷からのエコー信号が得られないことがあり，長距離検査と損傷検出を両立できないことがあるというジレンマがあった[7),8)].

そのガイド波検査における課題を解決する手法として，Hayashi らはレーザ弾性波源走査法による薄板状構造の損傷画像化技術の検討を進めてきた[9),10)]．レーザ弾性波源走査法では，レーザ照射によって薄板に屈曲振動を励振し，照射点を走査して各点の振幅や周波数スペクトルピークをマッピングすることで薄板裏面の損傷を画像として取得する．これまでの研究では幅 2 mm 程度のスリット状傷に対して，数 kHz の周波数帯域を利用して画像化が可能であることが示されており，従来の超音波パルスエコー法とは異なる低周波数帯域の利用が可能となっている．そのため，これまでの超音波探傷では用いられることのなかった空中超音波センサや圧電振動子，レーザドップラー振動計(LDV)などを受信デバイスとして利用可能になった． LDV を用いると完全非接触かつ遠方での計測が可能であり，より広い適用範囲が期待できる．しかし，LDV は対象材料表面からの反射・散乱光を受光する必要があり，パイプのような傾きのある対象物や，屋外の構造物のような表面性状が一様でない対象物の振動を安定的に計測することは容易ではない．さらに，複数の受信点での同時計測を考えると，計測システムのコストや計測準備時の調整の難しさなどの実用上の問題がある．

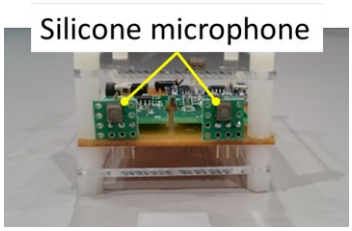
そこで著者らは，受信デバイスにシリコンマイクロフォンを用いることで上述の課題を解決する計測システムを構築してきた[11)]．本報では，その研究結果を紹介する．

2. シリコンマイクロフォンによる漏えい弾性波の受信

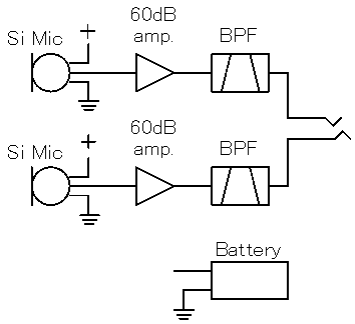
2.1 マイクユニットについて

本報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う．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．そして，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なる．



(a) 正面画像



(b) 機能回路図

図 1　作成したマイクユニット

2.2 マイクユニットの距離による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 m，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 [12),13)]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．

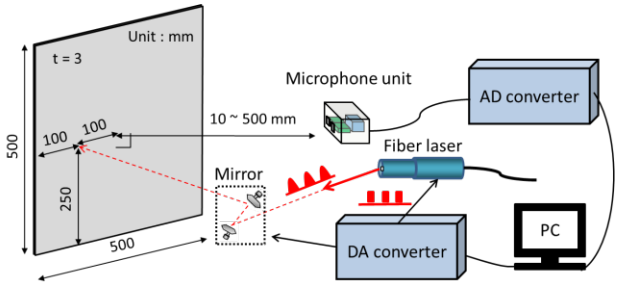
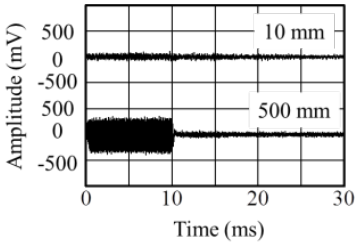
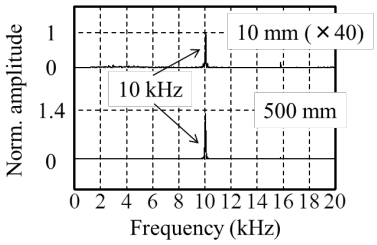


図 2　マイクユニット特性把握に用いた実験装置概要



(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

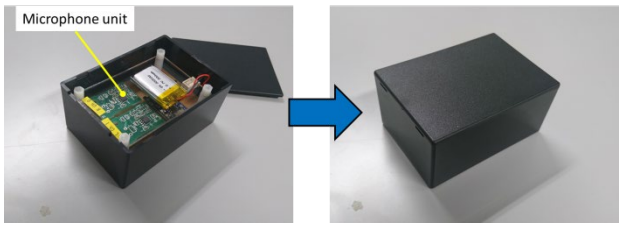
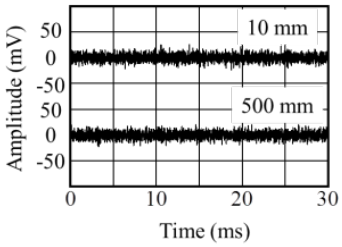
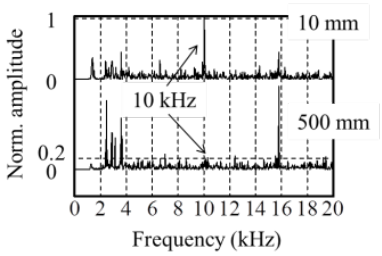


図 4　マイクユニットの遮光



(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

3. 薄板の損傷画像化実験

3.1 シリコンマイクによる非接触損傷画像化

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．文献 9)ではこの試験体を用いて，直接到達波が届かないような複雑な形状の薄板に対しても，損傷画像が取得できることを示した．そのため，中央の下から 250mm の位置まで貫通ノッチが伸びている．

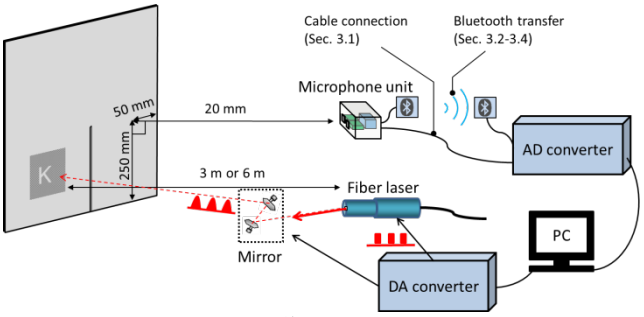


図 6　薄板の非接触損傷画像化の実験装置概要図

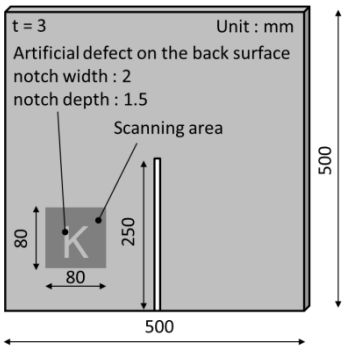


図 7　用いた試験体

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 3.3 節で示す．

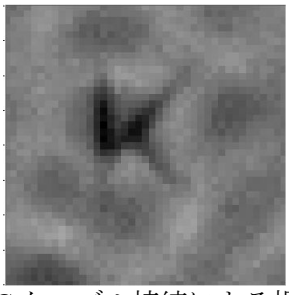


図 8　BNC ケーブル接続による損傷画像

3.2 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 つ取り付けてあ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おり，無線転送での遠隔計測が可能であることがわかる．

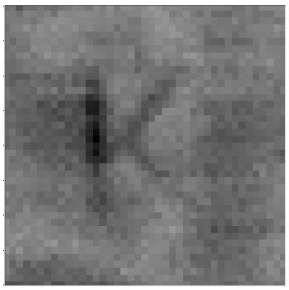


図 9　無線転送システムで取得した損傷画像

3.3 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．

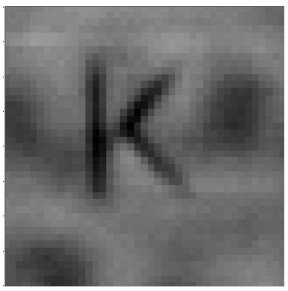


図 10　6 チャンネル分のセンサで取得した損傷画像

3.4 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．次にレーザと薄板の距離を 3 m から 6 m 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 20 kHz 以下の周波数帯を 10 m 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 10 m を超える遠隔での計測も可能であると考える．

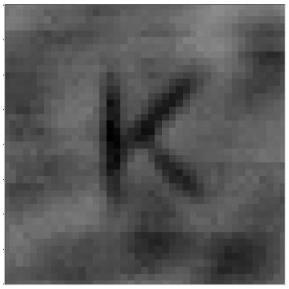


図 11　6 m の遠距離にある検査対象に対して取得した損傷画像

4. 結言

本報では，薄板状構造をレーザ励振した際に空中に漏えいする波を受信することで完全非接触計測による損傷画像化を行うことを目的として，レーザ弾性波源走査法の受信デバイスにシリコンマイクロフォン，アンプ，フィルタ，バッテリーを内蔵したマイクユニットを用いて実験的検討を行い，非接触計測による損傷画像化結果を示した．また，20 kHz 以下の周波数帯を用いていることに着目して，オーディオ用の Bluetooth トランスミッターによるデータ転送を行い，遠隔計測が可能であることを示した．さらに，マイクユニットを複数設置し，音響データを Bluetooth で転送することで，多チャンネルでの画像化が可能であり，それらの画像を平均化することでより鮮明な画像が 6 m の遠距離でも得られることを示した．

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，今後ヘルスモ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．

参考文献

1) M. Palaniappan, R. Subbaratnam, A. Baskaran and R. Chandramohan: Int. J. Press. Vessel. Pip., **73**, 33–37 (1997)

2) H. A. Kishawy and H. A. Gabbar: Int. J. Press. Vessel. Pip., **87**, 373–380 (2010)

3) L. J. Jacobs and R. W. Whitcomb: J. Nondestruct. Eval., **16**, 57–65 (1997)

4) J. L. Rose, Ultrasonic Waves in Solid Media (Cambridge University Press, New York, 1999)

5) P. Cawley, M.J.S. Lowe, D.N. Alleyne, B. Pavlakovic, P. Wilcox: Mater. Eval., **61**, 66–74 (2003)

6) P.W. Loveday: J. Nondestruct. Eval., **31**, 303–309 (2012)

7) T. Hayashi, M. Murase: J. Acoust. Soc. Am., **117**, 2134–2140 (2005)

8) T. Hayashi, M. Nagao, M. Murase: J. Solid Mech. Mater. Eng., **2**, 888–899 (2008)

9) T. Hayashi: NDT&E Int., **85**, 53-62 (2017)

10) T. Hayashi, M. Murase, T. Kitayama: Ultrasonics, **52**, 636-642 (2012)

11) A. Maeda, T. Hayashi: Mater. Trans., **59**, 320-323 (2018)

12) M. A. Green, Solar cells: operating principles, technology, and system applications, (Prentice Hall, 1982)

13) 城田靖彦: 高分子, **38**, 346-349 (1989)