The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	薄板構造中のガイド波とその拡散場を利用した損傷画像化技術
Author(s)	林, 高弘
Citation	材料. 2020, 69(8), p. 593-598
Version Type	AM
URL	https://hdl.handle.net/11094/84517
rights	© 2020 公益社団法人日本材料学会
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

解　説

薄板構造中のガイド波と その拡散場を利用した損傷画像化技術

林　高弘*

Defect Imaging Technique Using Guided Waves and their Diffuse Fields in a Plate-Like Structure

by

Takahiro HAYASHI*

Key words: Guided waves, Plate inspection, Defect imaging, Diffuse field

1　緒　　言

薄板構造に対し，その厚みと同程度以上の波長となるような低周波の超音波（弾性波）を励振すると，薄板に沿って伝搬する波動が観測される．これはガイド波と呼ばれ，非破壊検査・評価の分野では，その長距離伝搬特性に着目して応用が進められてきた [1)-4)]．例えば，製鋼業界では，圧延鋼板中にガイド波を伝搬させて内部の介在物やき裂などを検査している．タイヤの中に斜め傾けた探触子を埋め込んだタイヤ探触子を用いて，流れていく鋼板の中へのガイド波伝搬を可能としており，自動探傷が実現されている [2)]．また，配管の長手方向に伝搬するガイド波を用いた非破壊検査装置も実用化されている [3),4)]．数 m～数十 m の配管を一度にスクリーニングできる技術で，高所の配管や埋設配管などアクセスしにくい場所の検査に適している．

しかし，これらの方法は，パルス状または数サイクル程度の短いバースト波をガイド波として伝搬させ，損傷部からの反射波を得るというパルスエコー法により検査が実行されており，反射波が得られるほど傷が大きくないといけないという問題がある．具体的にはガイド波配管検査装置の場合，広がった腐食状損傷は検出できるが直径数 mm 程度のピンホールの場合，貫通していても検出は難しい．

そこで，著者らはレーザ照射によって発生させた低周波の弾性波がレーザ照射位置の損傷度合いによって，その振動エネルギを変化させるというガイド波の特性に着目し，損傷を画像化する手法（レーザ弾性波源走査法）について研究してきた．この手法は，用いる弾性波の波長が損傷検出能力に直接的には影響しないため，これまでのガイド波検査では使われてこなかった低周波数帯域の利用や微細損傷の検出が期待できる．

本報では，このレーザ弾性波源走査法による損傷画像化に関し，その原理と分解能に関する基礎検討結果を示した後，励振用レーザの変調による発生弾性波の波形制御方法，拡散場を用いた損傷画像の鮮明化手法について紹介する．また，これらの技術を用いて，枝分かれ管のような複雑構造に適用した例を示し，最後に微細損傷への適用可能性について検討した結果を紹介する．

2　レーザ弾性波源走査法による損傷画像化の原理と平板を用いた基礎実験

2･1　画像化の原理と分解能

レーザ加工などで用いられる Nd: YAG レーザや CO_2 レーザを金属材料表面に照射すると，出力が低い場合には熱弾性効果によって，もう少し出力を上げるとアブレーションによって表面が局所的に加振される．薄板の場合には，その加振力により曲げモーメントが発生し，薄板全体を屈曲させて伝搬するガイド波であるラム波 A0 モードが発生する [5)]．この屈曲振動モードは，レーザ照射位置における薄板の局所的な曲げ剛性が大きい場合には小さく，曲げ剛性が小さい場合には大きく現れる．つまり，レーザ照射位置に減肉などがある場合には曲がりやすいため振動が大きく現れ，健全な場合には振動が小さくなる（図１）．励振用のレーザ光を走査しながら，ある１点で波形を受信すると，レーザ照射点が損傷部上にある場合には，検出波形が大きく現れ，その振幅やフーリエスペクトルピークなどによりプロットすると薄板内の損傷が画像として取得できる．

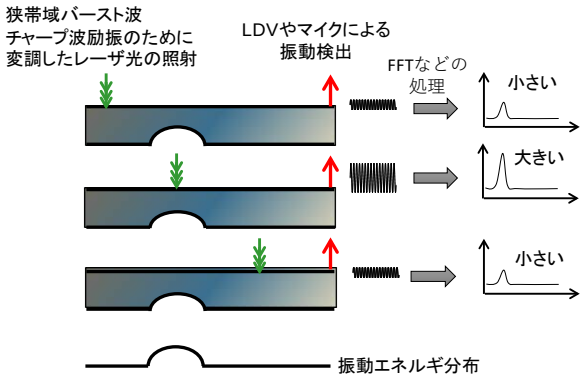


図１　レーザ弾性波源走査法による損傷画像化の原理

上述の曲げ剛性による説明は，静的な平板の曲げ変形からのアプローチであるが，厳密には動的なガイド波（ラム波）の挙動として理解する必要がある．その場合，屈曲振動のラム波 A0 モードだけでなく，伝搬しないエ

†　原稿受理　令和 2 年　3　月 2　日　Received Mar. 2, 2020　©2020 The Society of Materials Science, Japan

*　正 会 員　大阪大学大学院工学研究科　〒565-0871 吹田市山田丘,
Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University , Yamadaoka, Suita,565-0871

バネッセントモードの A1 モードもこの画像化の分解能に大きな影響を与えることが，理論的にも実験的にも示されている [5]．図２は，レーザ弾性波源走査法による画像化の分解能に関して検討した際の試験平板と実験結果の図である．500mm×500mm，板厚 3mm のアルミニウム合金平板の裏面に図に示すようなノッチを導入し，表面にレーザ照射して，その画像を取得したものである．用いた周波数は 8 kHz であり，その際のラム波 A0 モードの波長はおよそ 59mm であった．それに対し，5mm のノッチ間隔でも分解しているのが分かる．つまり，用いた伝搬モードの波長よりもずっと高い分解能を有していると言える．この分解能は，レーザ照射点のビーム径とエバネッセントモードの支配領域に依存し，後者は波長の 1/10 程度であることが示されている [5]．この性質を利用すると，これまで非破壊検査では使われてこなかった非常に低い周波数の利用と，これまで検出が困難であった非常に微細な損傷の検出の可能性が期待できる．

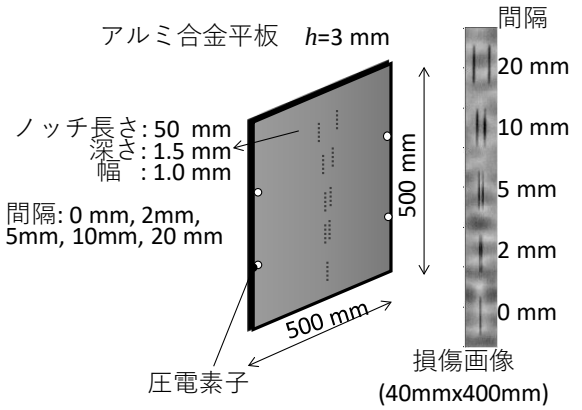


図２　レーザ弾性波源走査法による画像化の分解能に関する検討 [5]

2･2　レーザ変調による励振弾性波の制御

一般にレーザを用いて超音波を発生させる場合，パルス状のレーザ光を材料表面に当てて，広帯域パルス波を用いることが多い．パルスレーザにより発生させやすいという理由以外にも，広帯域のため情報量が多く，パルスエコー法を用いる場合には時間-空間分解能に優れるという理由もある．しかし，ノイズが大きい場合には，信号がノイズに埋もれやすく，計測が不可能になることもある．

そこで，著者は，近年レーザ加工に使われるようになってきたファイバーレーザを用いて，発生する弾性波の波形を制御して，長い持続時間のバースト波や周波数を変化させたチャープ波を薄板中に励振する技術により，レーザ弾性波源走査法による信号レベルの向上を図った．図３は，励振弾性波形の制御方法を説明した図である．ファイバーレーザ装置の多くは，高繰り返しのパルスや連続波を出力し，それを外部信号によって変調できるようになっている．図３(a)のように，　変調信号に従ってレーザ光が出力され，発生する弾性波もその周期に追従する．我々の実験ではレーザ光の ON-OFF を制御するだけなので，発生する弾性波には３次高調波も大きく含まれたが，バンドパスフィルタを用いれば，ある目的の周波数のみが支配的な波形が得られた．変調信号をチャープ波のような周波数が変動する波形に替えて，持続時間の長い広帯域波を励振することも可能である．

また, MHz 帯域のような高周波数帯を励振する場合には，この高繰り返しパルスを外部トリガ信号によって制御することができる．図３(b)は，外部トリガ信号によってファイバーレーザからレーザ光が出力され，それによって数百 kHz～MHz 帯域の超音波が発生する様子を示した図である．外部トリガ信号によって弾性波の周波数を変更することができるので，この周波数帯域であっても長い持続時間のバースト波やチャープ波を励振することができる．

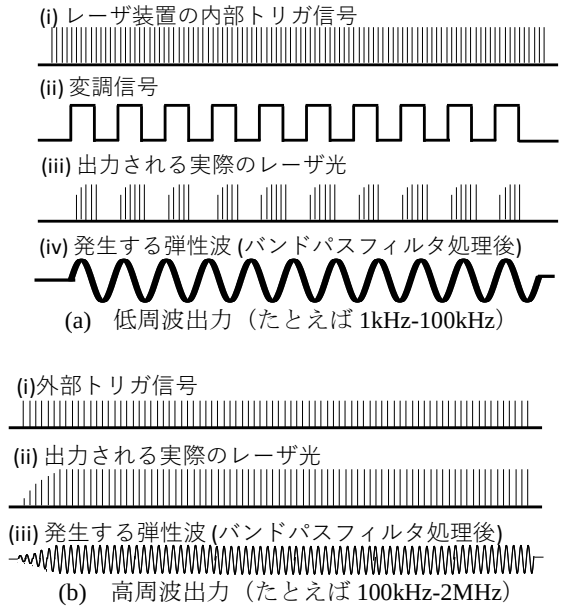
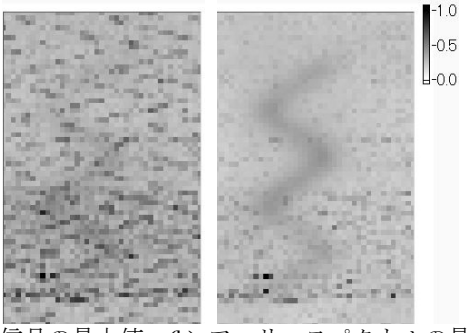


図３　ファイバーレーザの出力変調による弾性波の制御

図４は変調により周波数 6 kHz，持続時間 2 ms の振動を与えたときに得られた人工傷の画像である [6]．(a)が受信された信号の最大値を用いた場合の画像であり，(b)がそのフーリエスペクトルの最大値を用いた場合の画像である．いずれも厚さ 6mm のアルミニウム合金平板に幅 2mm，深さ 3mm の溝をジグザグ状に彫った人工傷に対し, 64×40 mm^2 の範囲で画像取得を試みたものである．それぞれ受信波形の最大振幅およびフーリエスペクトルの最大値により正規化した 0～1 の値により，最大値を黒として濃淡をプロットした．長い持続時間のバースト波を用いたことにより，RF 信号のレベルではノイズに埋もれ，画像にするのが難しいような場合でも，フーリエスペクトルでの信号レベルは増大し，人工傷の画

像が鮮明に現れることが分かる．

レーザ照射による弾性波の発生技術では，レーザの出力を増大させるほど信号レベルが上昇するが，出力が大きすぎるとレーザ照射点に傷がついてしまう．そのため，このように最大出力を低減しながら，高い SN 比を保つ手法が必要となる．



(a) RF 信号の最大値　(b) フーリエスペクトルの最大値

図４　変調信号の利用による画像の鮮明化を示す例 [6]

2･3　拡散場を用いた画像の鮮明化

数 kHz の振動を数 ms 間加振し続けると，構造の境界面において反射やモード変換が起こり，試験平板全体に振動が広がった状態になる．たとえば，図５は，平板上のある１点に振動を与えたときの変位分布を表しており，(a)は加振直後，(b)は加振して 3 ms 経過し，壁面で多重反射を繰り返した後の様子である．試験平板は後の実験に利用したアルミニウム合金平板を模擬している．(a)はコヒーレント場と呼ばれ，波面が揃って伝搬しており，　伝搬経路が分かっている状態である．一般に超音波の非破壊検査では，この状態における波を計測している．一方，(b)では，壁面からの多重反射によって乱雑に平板表面に振動エネルギが広がっている状態で，ある点で波形を観測しても伝搬経路は分からない．この状態を拡散場と呼んでいる．試験平板全体において振動エネルギがおおむね一様となっている上，拡散後のある時刻の振動エネルギに注目すると，加振点において入射した振動エネルギに比例する．つまり，拡散後はどの点で計測しても入射点での加振エネルギに比例した振動が計測できるということを意味している．本報で紹介している画像化技術では，音源となるレーザ照射位置は走査されており，受信位置は固定されている．2.1 節で示したようにレーザ照射位置の損傷度合いによって発生する振動エネルギが変化するため，拡散した後の振動をある固定位置で受信することで，励振源におけるエネルギ変化，すなわち損傷度合いが受信波形の振幅変化として得られることになる．

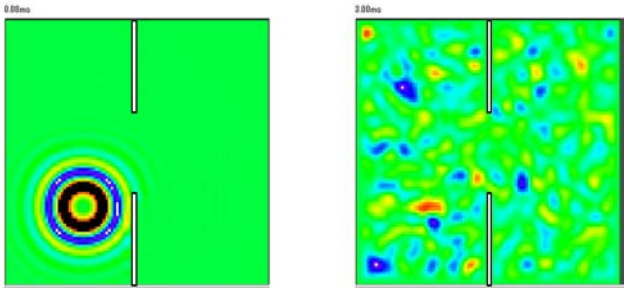
拡散後にできるだけ一様な振動エネルギを分布させるためには，

１．減衰が小さな閉領域であり，多重反射を繰り返すこと．

２．広帯域であり，ある特定の共振モードが卓越して起こらないこと．

３．励振源の指向性が小さく，領域中に拡散しやすいこと．

などの条件が必要であることが知られている [7)-10)]．　１は金属材料であれば，おおむね成立するが，減衰の大きな樹脂や木材，コンクリートなどには適用が難しいことを意味している．３は，本技術のようにレーザで点音源として弾性波を励振する場合には自動的に満たされる条件である．



(a)　80 μs　　(b) 3 ms

図５　コヒーレント場と拡散場

２の周波数帯域に関しては，平板裏面の損傷を帯域の異なる波形を用いて画像にすることで以下のように検討した [7)]．図６は，用いたアルミニウム合金試験平板である．板厚 3mm に対し，裏面に深さ 1.5mm の K の文字とジグザグ模様が彫ってある．平板の中央には貫通した溝が端面から上下に延びており，中央部分でのみ左右の領域がつながった状態にしている．これは，単に正方形の四角い平板ではなく，複雑な構造であっても画像化が可能であることを示すためのものである．レーザ光を裏面傷のある領域の表面（図中，点領域）に照射することで，その領域の画像を取得した．左の領域上部に圧電素子を貼付して振動を受信した．

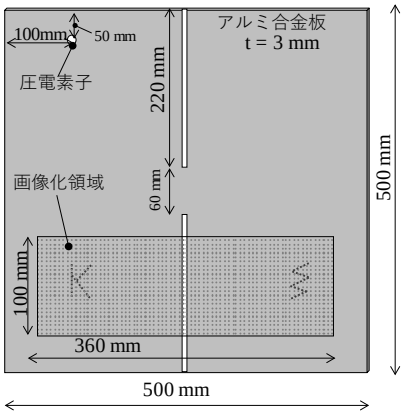
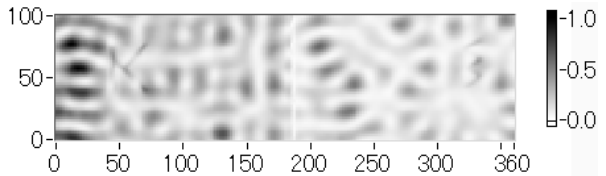


図６　用いた試験平板 [7)]

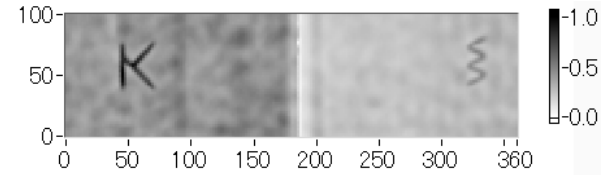
初めに，周波数 20 kHz，持続時間 5ms の矩形バースト波を変調信号として用いた場合に得られた画像を図７(a)に示す．それぞれのレーザ照射点に対する波形の包絡線を取得して積分した値により濃淡を示している．薄く裏面傷である K とジグザグ模様が見えるものの，共振パ

ターンが大きく現れて鮮明ではない．

次に，10kHz～40kHz に時間に応じて変化するチャープ波を変調信号として利用した場合の，波形の包絡線積分値により濃淡をプロットした画像を図 7(b)に示す．広帯域波を利用したため，共振パターンが消え非常に鮮明な画像が得られた．左右で全体の濃度が異なるのは，圧電素子が左面に貼付されているためである．つまり，時間経過後も左右のエネルギ分布は一様にならず，圧電素子のある左面にエネルギが閉じ込められて，受信振幅が大きくなったためである．



(a)　20kHz の狭帯域バースト波を用いた場合)



(b) 広帯域波を用いた場合

図 7　周波数帯域による損傷画像の違い [7]

3　枝分かれ管による結果 [11]

次に，より複雑な形状の対象物として，図８，９に示すような枝分かれ管を考える．ここでは，パイプの上端に再帰反射テープを貼りつけて，その位置でレーザドップラー振動計（LDV）により波形を受信した．LDV の利用による信号レベルの低下を補うため，変調信号の持続時間を 10ms とした．ファイバーレーザ装置，ガルバノミラー, LDV などの実験システムと試験パイプはおよそ 2.6m 離している（図８）．ただしこれまで数多く行った実験の中には，5m 程度離して行ったものもあり，同様の結果が得られている．

図 9 (a)が肉厚 3mm の試験パイプであり, 左下の内側に最小肉厚 1.5mm となるように模擬減肉部を設けた．レーザ照射領域は構造全体をカバーする 500mm×360mm とし，5mm ステップでレーザ照射を行った．入射波として 10-40kHz のチャープ波を用いた．減肉位置に大きな振動を示す濃い領域が現れており，このような複雑な構造であっても本手法により減肉の画像化が可能であることが示された．パイプ上部に縦線が現れたが，これは円周方向に共振するモードが卓越して現れたことを示している．このような共振パターンを低減させるためにも，さらに広帯域での励振が必要であると考えられる．

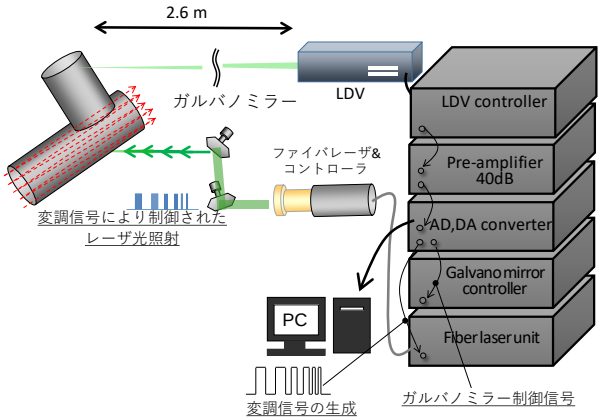
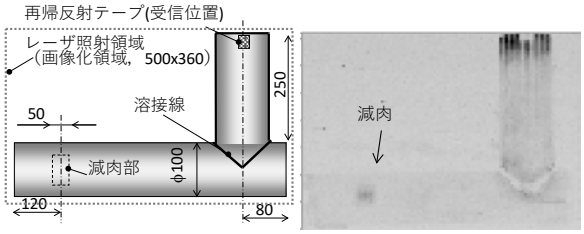


図８　用いた実験システム [11]



(a)　用いた試験パイプ　　(b) 実験結果

図９　枝分かれ管に対する実験結果 [11]

ここでは，10kHz - 40kHz の帯域を用いたが，さらに低周波でも画像化は可能であり，その場合，LDV のような高価な装置を使わなくても，音響マイクによって受信が可能である．文献 12)では，スマートフォンなどに利用される MEMS マイクを試験体の近くに置いて，漏洩した音波を受信することで，画像化を可能にしている．音波信号は Bluetooth で送信しているので，マイクユニットを対象物の近くに置くだけで，遠隔計測が可能となる．LDV では配管が揺動していたり，表面状態が悪い場合には計測できないという欠点があるが，このマイクユニットを使うと安定した計測が可能になる．

4　バルク体中の表面直下はく離の検出

前出の例は，低周波数帯域を利用して大型構造物の損傷を検出するというものであった．この手法は，伝搬するガイド波の波長よりも損傷が小さい場合にも画像化可能な手法であるので，数 MHz 帯域の超音波であっても微細な損傷や介在物を検出できる可能性があると考えている．ここでは，その検証のために，バルク体の表面直下にあるはく離検出の実験を行った実験結果を紹介する．

用いたアルミニウム合金試験体を図１０に示す．80×50×20mm^3 のアルミブロックの中央に直径 10mm，深さ 0.05mm の平底穴を機械加工により開け，上から厚さ 1mm のアルミ薄板を接着することで，中央に直径 10mm の模擬的なはく離部分を作成した．そのはく離部分を含む 40×40mm^2 の領域にレーザを照射して，波形包絡線の積分値により濃淡を表示した．

図１１は様々な周波数帯域において得られた画像である．図中に示した周波数帯域のチャープ波を励振し，その波形の包絡線積分値を取得している．用いる周波数によって大きく画像の質が異なることが分かる．文献13)では，この試験体の共振周波数を求め，得られた画像を解析した．この試験体の最低次数の共振周波数は14.3kHz であり，(a)はこの共振周波数よりも小さい周波数帯域を用いた場合の画像である．文献 13)の理論解析においても，振動エネルギ変化が得られないことが示されており，(a)はそれを裏付ける結果となっている．また，その理論解析では，試験体の共振周波数を多く含むような広帯域波を利用することで，より良好な画像が得られることが示されており，(b)-(f)はそのことを証明する実験結果となっている．

この結果に対し周波数を 1000 倍にし，数十 MHz の周波数帯域を用いることを考える．このときサイズを 1/1000 にすると同様の現象が得られるので，深さ 1μm，直径 10μm 程度の損傷は容易に検出できることが推測される．試験体の全体のサイズが小さくなることから，レーザの出力は小さくても計測可能な振動振幅を起こすことが可能であり，市場にあるレーザ装置を使ってμmオーダーの微細傷を検出できると考えている．

5　結　　言

レーザ弾性波源走査法により薄板状材料の損傷を画像化する手法について，その原理および平板での基礎実験結果について述べ，複雑な形状の枝分かれ管内の減肉や表層近くの剥離検出への適用事例を紹介した．

本手法は，複雑な形状の対象物でも非接触で画像として内部状態を取得することが可能であることから，配管検査以外にも，これまで検査が困難であった部品や接着部などの新しい検査法として広く適用されることが期待できる．

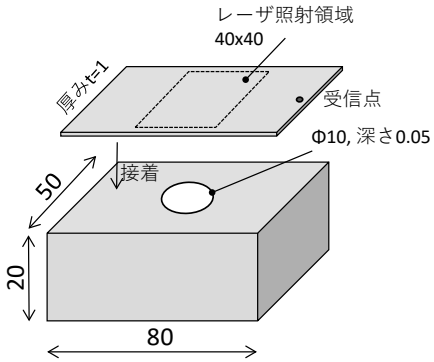
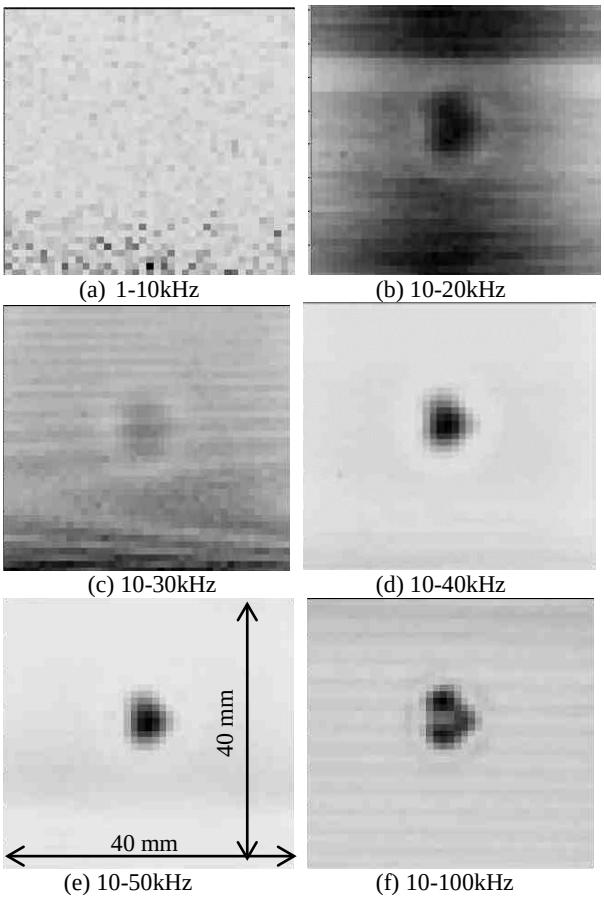


図１０　用いたはく離試験体



(a) 1-10kHz　(b) 10-20kHz　(c) 10-30kHz　(d) 10-40kHz　(e) 10-50kHz　(f) 10-100kHz

図１１　周波数帯域による剥離画像の比較 13)

Copyright (2019) The Japan Society of Applied Physics

参考文献

1) 特集　ガイド波による探傷, 非破壊検査, Vol. 52, No. 12 (2003)
2) 山本英爾, “超音波探傷の最近の動向,” 電気製鋼, Vol. 41, No. 3, pp. 161–166 (1970).
3) P. Cawley and D. N. Alleyne, “The use of Lamb wave for the long range inspection of large structures,” Ultrasonics, Vol. 34, pp. 287-290 (1996)
4) D. N. Alleyne and P. Cawley, “Long range propagation of Lamb waves in chemical plant pipework,” Materials Evaluation, Vol. 55, pp.504-508 (1997)
5) T. Hayashi and M. Fukuyama, “Vibration energy analysis of a plate for defect imaging with a scanning laser source technique,” The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 140, No. 4, pp. 2427–2436 (2016).
6) T. Hayashi and K. Ishihara, “Generation of narrowband elastic waves with a fiber laser and its application to the imaging of defects in a plate,” Ultrasonics, Vol. 77, pp. 47–53 (2017).
7) T. Hayashi, “Defect imaging for plate-like structures using diffuse field,” The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 143, no. 4, pp. EL260–EL265, (2018).

8) D. M. Egle, “A stochastic model for transient acoustic emission signals,” The Journal of the Acoustical Society of America, 65, pp.1198-1203 (1979).
9) R. L. Weaver, “On diffuse waves in solid media,” The Journal of the Acoustical Society of America, 71, pp.1608-1609 (1982).
10) M. J. Evans and P. Cawley, “Measurement and prediction of diffuse fields in structures,” The Journal of the Acoustical Society of America, 106, pp.3348-3361 (1999).
11) T. Hayashi, “Non-contact imaging of pipe thinning using elastic guided waves generated and detected by lasers,” International Journal of Pressure Vessels and Piping Vol. 153, pp. 26–31, (2017).
12) A. Maeda and T. Hayashi, “Defect imaging from a remote distance by using scanning laser source technique with acoustic microphones,” Materials Transactions, Vol. 59, No. 2, pp. 320–323, (2017).
13) S. Nakao and T. Hayashi, “Non-contact imaging for delamination using diffuse field concept,” Japanese Journal of Applied Physics, vol. 58, p. SGGB07 (2019).