OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	レーザ弾性波源走査法による損傷画像化技術
Author(s)	林, 高弘
Citation	日本音響学会誌. 2021, 77(6), p. 374-381
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/89907
rights	© 2021 日本音響学会
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

日本音響学会誌 77 巻 6 号（2021），pp. 374–381

解説

レーザ弾性波源走査法による損傷画像化技術*

林　高弘（大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻）**

1. はじめに

固体材料の表面を非破壊的に検査・評価する手段は，光学カメラや赤外線カメラを用いる方法，材料中の磁場や渦電流を捉える方法，浸透液などを利用して表面傷を見易くする方法など無数にあるが，材料内部の検査・評価となると限定され，放射線か超音波が候補となる。中でも超音波は，放射線に比べ人体への影響がほとんどないため，導入し易い非破壊検査の手法として広く利用されている。

固体材料中に超音波を入射するためには，超音波トランスデューサを材料表面に接触させる接触法が一般的に用いられる。その際，超音波トランスデューサと材料表面との間には，超音波エネルギーを効率よく入射するためのジェル状の音響カップリング剤を塗布する必要がある。超音波計測のためのこのような前処理は，非常に手間がかかり，検査効率を低下させるだけでなく，検査の自動化を妨げる要因となっている。

そこで，非接触で超音波の入射及び受信を可能とする方法の一つとしてレーザ超音波法の研究・開発が進められている。レーザ超音波法では一般に，瞬間的に大きなエネルギーを持つレーザパルスを材料表面に照射してパルス状の超音波を発生させ，材料中を通った後に表面に現れる超音波振動をレーザ振動計により非接触で計測する。このとき，超音波の励振と検出は異なるレーザ光を用いて行われ，レーザ装置の進化と共にそれぞれ新しい手法が開発されている。

本稿では，遠隔からのレーザ照射によって薄板状材料内の損傷を画像化する技術について紹介する。この画像化手法は，薄板中を伝搬するガイド波や材料中に拡散した弾性波の特性，レーザ変調により波形を制御する振動励振手法など，複数の新技術の組み合わせによるものであり，以下ではそれぞれの技術について概説する。

2. レーザ弾性波源走査法による損傷画像化の原理

レーザ光を薄板状材料に照射すると，照射点の瞬間的な温度上昇により屈曲振動が発生する。この屈曲振動はラム波の A0 モードとも言える。このとき，損傷のない健全な部位にレーザが照射されると，屈曲振動は比較的小さく現れ，反対に損傷位置にレーザが照射されると，大きな振動が現れる。そのため，振動励振用のレーザ光を薄板表面に走査しながら，ある固定点で屈曲振動を計測すると，図–1 の下に示したような分布図が得られる。2 次元的に走査すると，裏面の損傷が画像になって得られる。この弾性波を発生させるレーザ光を走査しながら波形を計測する手法はレーザ弾性波源走査法（Scanning laser source technique）と呼ばれており，表面傷の高感度検出 [1, 2] などに利用されている。

このような屈曲振動における特性は，静的なはりの曲げにより直感的に理解することができる。すなわち，縦弾性係数 E，断面 2 次モーメント I のはりに対し，レーザ光を照射したことで M の曲げモーメントがかかっていると考えた場合，はりのたわみ w は曲げモーメントに比例し，E と I の積に反比例する。

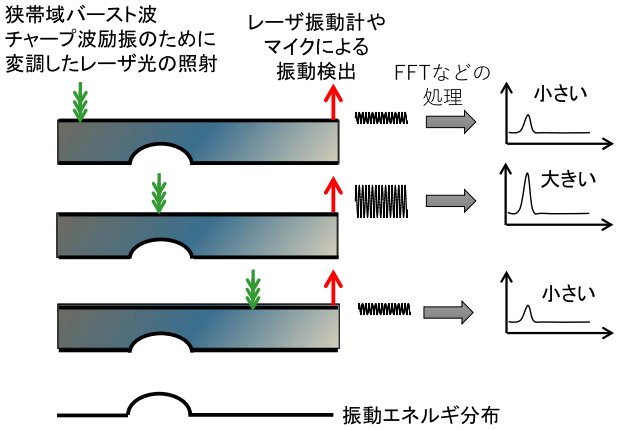
$$w \propto M/EI \tag{1}$$

EI は曲げ剛性と呼ばれ，曲がりにくさを示す量であり，レーザ照射により同じ曲げモーメントを与えたとしても EI が大きいほどはりのたわみ w

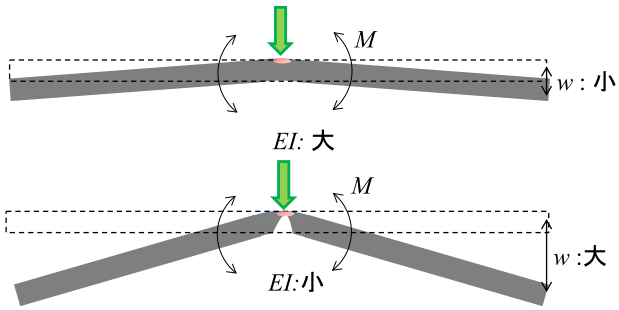
* Defect imaging with a scanning laser source technique.

** Takahiro Hayashi (Graduate School of Engineering, Osaka University, Suita, 565–0871) e-mail: hayashi@mech.eng.osaka-u.ac.jp

[doi:10.20697/jasj.77.6_374]



図–1　損傷画像化の原理概要



図–2　損傷の有無によるはりの曲げ変形

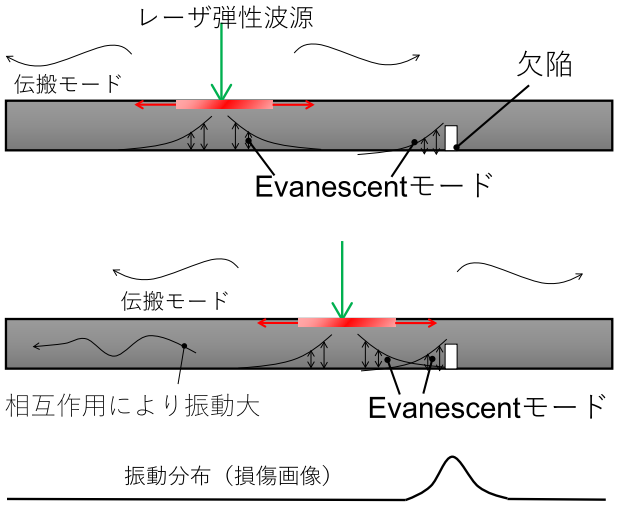
は小さいことが分かる。はりが高さ（厚さ）h の矩形断面の場合には，I は h の 3 乗に比例するので，変位 w は h の 3 乗に反比例することが分かる。すなわち，レーザ照射によりモーメントを与える位置が健全であれば，たわみが小さく，損傷による減肉部であれば，たわみが大きくなると言える。

3. エバネッセントモードの利用による高分解能化

上述は，工学系の大学生の多くが学ぶ材料力学に関連づけた説明であるが，厳密には超音波の屈曲振動という動的現象を考える必要がある。そこで，文献 [3, 4] では薄板中のラム波のモード解析により損傷位置での振幅変化について論じた。任意位置の面外変位は無限個のラム波モードの和として，

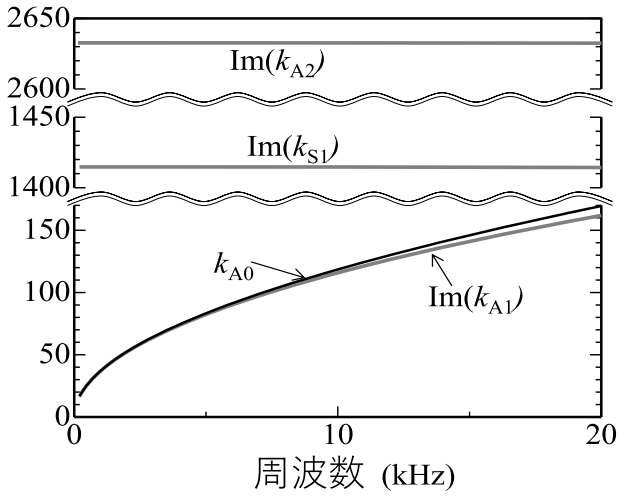
$$u(x,y) = \sum_{m=0}^{+\infty} A_m f_m(y) e^{ik_m x} \qquad (2)$$

と表される。ここで A_m は m 番目のモードの振幅を表し，$f_m(y)$ は板厚 (y) 方向分布，k_m は伝搬 (x) 方向の波数を表す。低周波の場合，A0 モードと S0 モードのみが伝搬モードであり，伝搬モードの波数が実数となり，他のモードの波数は純虚数や複素数となる。また，高次のモードほど板厚方向分布が複雑であり，波数の虚部 $\mathrm{Im}(k_m)$ の値が大きい。レーザ照射によって生じる波動場は，式 (2) にように A0，S0 などの伝搬モードと非伝搬の高次モードから構成され，波数が複素数の高次モードはその x 方向分布が $e^{-i\mathrm{Re}(k_m)x}e^{-\mathrm{Im}(k_m)x}$ のように表されるため，レーザ照射点近傍にのみ分布しているエバネッセントモードである。同様に，損傷位置からの反射波も反対方向に伝搬する低次の伝搬モードと，損傷位置から $-x$ 方向に向かって減退するエバネッセントモードから構成される。このとき，モードの直交性より伝搬モードは進行波と後退波でカップリングすることなく独立に伝搬するが，エバネッセントモードは，レーザ照射点から発生する $+x$ 向きのモードと，損傷位置で発生する $-x$ 向きのモードがカップリングする。このとき，これら二つのエバネッセントモードが十分小さい状態（図–3 上）にはエネルギーを発生させることがないが，両者が無視できない場合（図–3 中），振動エネルギーを発生させる。エバネッセントモードは指数関数的に減少するモードなので，レーザ照射位置と損傷位置が十分小さい場合にのみ振動エネルギーを発生させると言え，この振動エネルギーの増大を捉えることで，損傷画像が取得できるのである（図–3 下）。

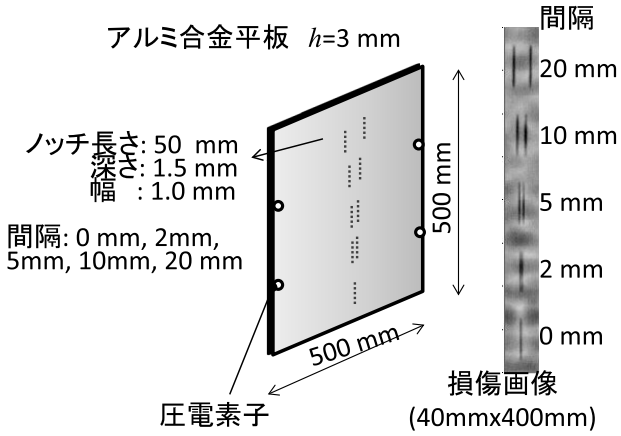


図–3　損傷近傍にレーザを照射した場合の振動エネルギー増大の原理

このことを定量的に評価するため，エバネッセントモードの支配長さについて考える。音源や反



図–4 厚さ 3 mm のアルミニウム合金平板に対する A1, S1, A2 モードの波数の虚部と A0 モードの波数 [4]



図–5 用いた試験平板と損傷画像化結果 [3]

射源で発生したエバネッセントモードの変位が半減する長さを支配長さ $x_{1/2}$ と定義する。そのとき

$$e^{-\mathrm{Im}(k_m)x_{1/2}} = 1/2 \tag{3}$$

となり，支配長さは波数の虚部で表せ，

$$x_{1/2} = \ln 2/\mathrm{Im}(k_m) \tag{4}$$

となる。図–4 は，図–5 の実験結果で用いた板厚 3 mm のアルミニウム合金平板に対し求められた A1，S1，A2 モードの波数の虚部である。このような低周波数帯域の場合には，支配長さが最も大きくなるのは，最も小さい $\mathrm{Im}(k_m)$ を持つ A1 モードである。ここで，均質一様な等方弾性平板に対し，低周波数帯域において A0 モードの実部と A1 モードの虚部は近似的に

$$k_{A0} \approx \mathrm{Im}(k_{A1}) \tag{5}$$

のように一致するという性質を持つので，式 (4) は，

$$\begin{aligned} x_{1/2} &= \ln 2/\mathrm{Im}(k_{A1}) \approx \ln 2/k_{A0} \\ &= (\ln 2/2\pi)\lambda_{A0} \approx 0.11\lambda_{A0} \end{aligned} \tag{6}$$

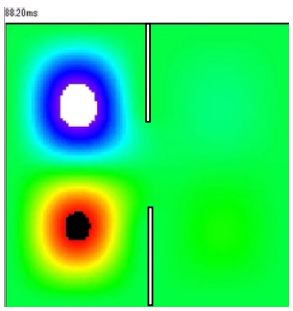
と A0 モードの波長との関係性により表される。すなわち，A0 モードの波長の 1/10 程度までエバネッセントモードの支配領域となっており，その範囲で振動エネルギーの増大が顕著に現れると予想できる。これは，伝搬モードである A0 モードの波長よりもずっと小さい範囲である。損傷からのエコー信号を受信するパルスエコー法では，その分解能は波長程度に限界を有するが，本手法では，エバネッセントモードを利用していることから，波長よりもずっと小さい分解能が期待できる。

分解能について，実験的に検証するため，図–5 に示すような厚さ 3.0 mm のアルミニウム合金試験平板を用いて裏面のノッチ傷の画像化実験を行った。ノッチはいずれも深さ 1.5 mm，幅 1 mm，長さ 50 mm であり，上から 20 mm，10 mm，5 mm，2 mm の距離だけ離して 2 本平行に並んでおり，一番下だけは 1 本である。図–5 内の画像化結果から，ノッチ間距離が 5 mm の場合には 2 本が分離して見えるのに対し，2 mm の場合には分離していないので，分解能は数 mm 程度であると言える。一方，ここで用いた周波数は 8 kHz であり，その場合の A0 モードの波長は約 59 mm となるため，分解能は波長よりもずっと小さいことが実験的に示されている。また，波長の 1/10 が 5.9 mm なので，おおよそエバネッセントモードの支配長さが分解能を表しているとも言える。

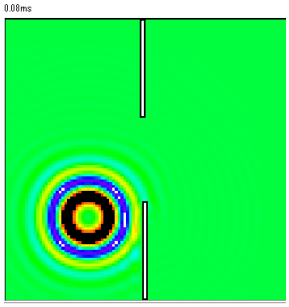
4. 拡散場の利用による複雑構造への適用

薄板中に存在する損傷や減肉によって発生する超音波エネルギーが変化するというのは，ラム波の伝搬モードとして A0 モードと S0 モードの基本モードのみが存在するような低い周波数帯域を使った場合であった。しかし，このような低周波数帯域の場合には，減衰が小さく波長が長くなるため，構造壁面からの多重反射波が計測され，波形解析を困難にしていた。そこで，著者らは構造全体に広がって均等になった後の音場（拡散場）を利用する手法を考案した [5, 6]。

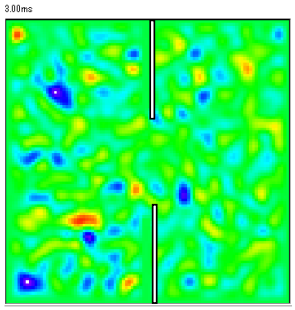
一般に，超音波を用いた材料評価では，(a) 構造全体や一部を共振させて，その共振周波数や Q 値により共振箇所の材料特性を評価する方法，(b) 位相の揃った伝搬波形を送受信するコヒーレント場のエコー波形や到達速度により伝搬経路上の材料を評価する手法，の二つが広く利用されている。



(a) 構造内の共振音場



(b) 入射直後のコヒーレント場



(c) 入射後しばらく経った後の拡散場

図–6 材料評価に利用される音場

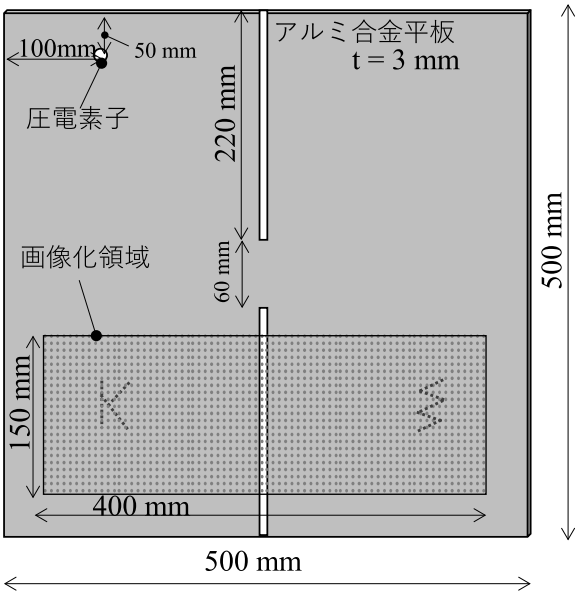
しかし，拡散場はいずれでもなく両者の中間の性質を有している。図–6 は後で用いる中央に貫通溝のあるアルミニウム平板試験体のある 1 点に面外振動を入射したときの面外方向変位分布を表したものである。(a) が構造の左側で共振している共振音場を表し，減衰のない構造の場合には，同じ位置で定在波が振動し続ける。(b) は位相の揃ったパルス状の波束が伝搬しており，パルスエコー法など非破壊検査に広く利用されるコヒーレント場である。(c) はパルス入射後に上下左右の壁面や中央溝で多重反射を繰り返し，構造内でランダムに分布した結果，その振動エネルギー密度が概ね一様になった状態であり，これを拡散場と呼んでいる。この拡散場の振動エネルギー密度は，入射波の振動エネルギーに比例し，また構造内のどの位置で計測しても入射波の振動エネルギーに対応する振動が得られる。

前章で述べたとおり，レーザ弾性波源走査法による画像化では，損傷位置にレーザを照射すると，発生する屈曲振動エネルギーが増大する。レーザ照射点を走査して，各走査位置で屈曲振動を発生させ，ある固定位置で波形を受信する図–1 のような計測手法を考えると，拡散場を形成した後のある時刻における受信信号の振幅は，レーザ照射位置で発生した振動エネルギーに比例する。すなわち，拡散場形成後の受信信号の振幅を 2 次元プロットすると，損傷画像が得られることになる。

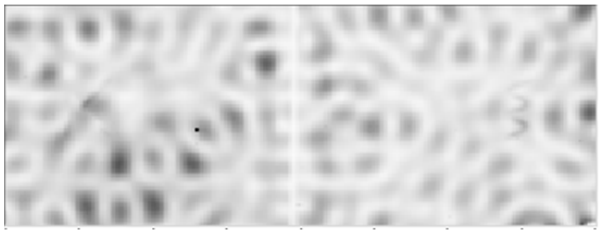
拡散場は，不規則に多重反射を繰り返した結果得られる音場であり，Room Acoustics の分野でその理論は確立されてきた。非破壊検査の分野でもアコースティック・エミッションにおいて活用されている [7–11]。それらの過去の研究では，拡散場を適切に形成するための条件として以下が挙げられている。

1. 減衰の小さな閉領域であり，多重反射を繰り返すことができること。
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，領域中に拡散し易いこと。

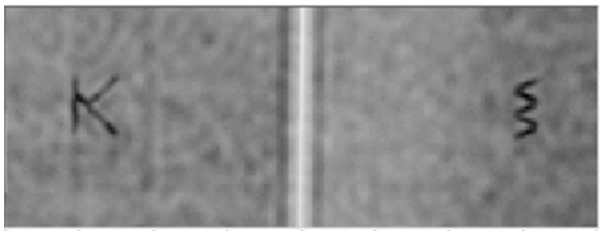
つまり，構造内をランダムに反射して音場が広がり易いことが必要条件である。後に示す例のような金属平板や金属パイプは 1 の条件を満たす対象物であり，弾性波の励振の際に点音源となるレーザを用いる本手法も 3 の条件を満たすため，拡散場の形成に適した手法であると言える。そこで残る条件 2（周波数帯域）の影響を検討するため，図–7 に示すような実験を行った。図–7(a) は裏面に人工傷を彫った厚み 3 mm のアルミニウム合金試験平板であり，複雑な形状でも損傷画像が得られることを示すために，平板中央に貫通溝を彫ってある。図内に示すような損傷領域を含む範囲にレーザを走査し，発生した弾性波を左上の圧電素子により受信した。高繰り返しのレーザを変調させることによって，変調に応じた弾性波を励振させた（計測系の詳細は次節に示す）。図–7(b)(c) は，受信信号の絶対値をある時間範囲で積分して得た拡散場の振動エネルギー平均値を強度分布としてプロットしたものである。(b) が 20 kHz バースト波を励振させた場合，(c) が 10–100 kHz のチャープ波を励振させた場合になっている。(b) では，20 kHz 近傍の共振パターンが大きく影響を与え，画像を劣化させていることが分かる。一方，広帯域波を用いた場合 (c) では，非常に鮮明な画像が得られた。特に，右側領域は，受信の圧電素子からの直接到達波がほとんどない領域であり，この結果は材料全体の音場の拡散により鮮明な画像が得られたことを示している。



(a) 用いた試験平板



(b) 損傷画像　20kHz 狭帯域バースト波



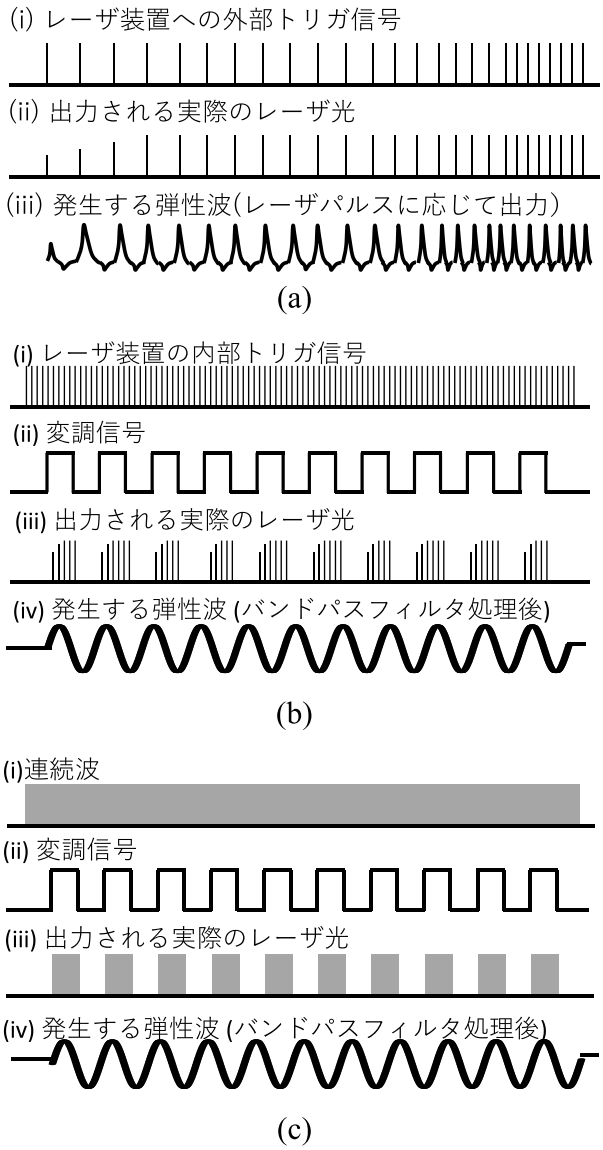
(c) 10－40kHz 広帯域チャープ波

図–7　拡散場を用いた損傷画像化実験 [5]

5. 実験システム

本損傷画像化技術では，上述した低周波における損傷周りでのラム波の挙動，拡散場の利用以外に実験システムにもユニークな工夫が施されている。

一般にレーザ超音波法では，Q-switch を掛けた YAG や CO_2 レーザの大きなパルスを対象物表面に照射して励振されるパルス波を利用する。パルス波は，広帯域なので情報量が多く，高い空間・時間分解能を有する。一方で，ノイズに埋もれ易いという欠点もあるため，超音波を用いた非破壊評価では，数十サイクル程度のバースト波や時間変化と共に周波数が変化するチャープ波なども利

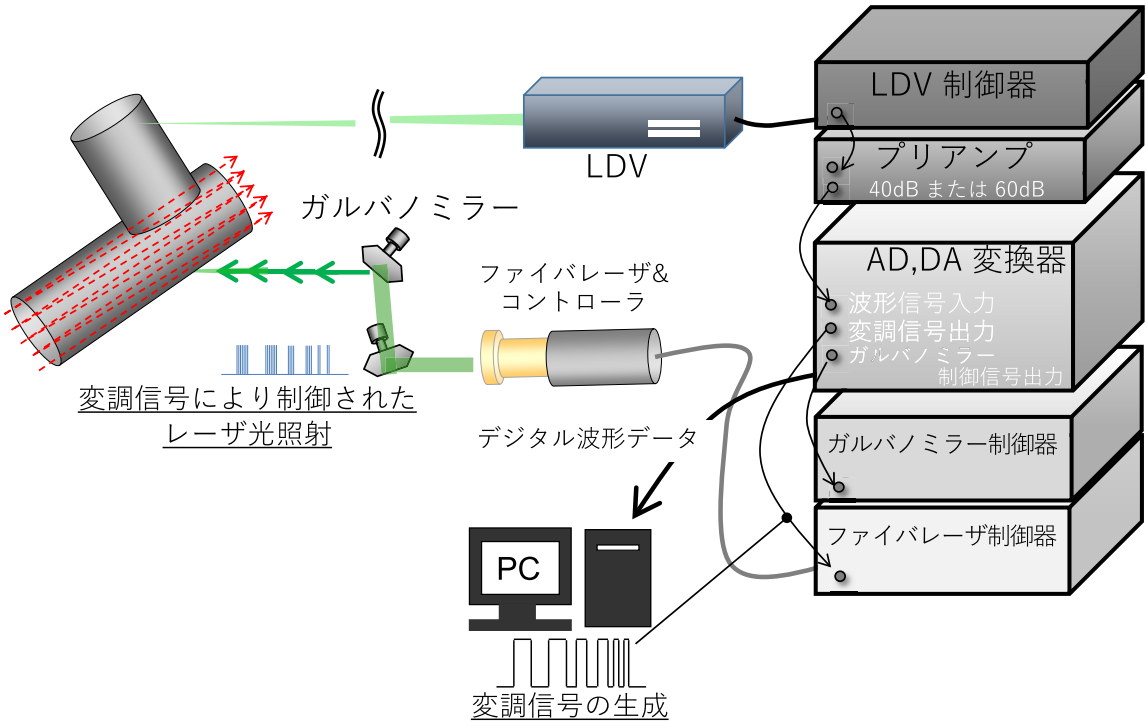


図–8　レーザ変調による弾性波の励振方法 [12]

用される。しかし，レーザを用いた超音波・弾性波の励振では，これまで Q-switch を用いてパルス出力をしていたため，波形を制御することは非常に困難であった。

そこで，著者らはファイバレーザの出力に変調を掛けることで，弾性波を励振する技術を検討してきた [12]。ファイバレーザは主にレーザ加工の分野で利用が進んできた高出力レーザ装置であり，加工品質を改善するため，レーザ出力に様々な変調を掛けられる装置が多く販売されている。この変調可能周波数は kHz 帯域であり，超音波非破壊検査にとっては低すぎる周波数であるが，本画像化技術では，kHz オーダの低周波数帯域を利用できるため，これら市販されているファイバレーザ装置の利用が可能であった。

図–8 は，変調信号と出力レーザ及び発生する弾



図–9　実験システムの一例

性波を模式的に表した図である。出力形式により三つのパターンで弾性波を制御することができる。一つは，高繰り返しのレーザパルスのパルス出力を外部トリガ信号より任意時間位置に出現させて制御する方法（図–8(a)）。もう一つが，(b) のように，高繰り返しのレーザパルスの出力を外部変調信号により制御する方法，三つ目が (c) のように連続波を外部変調信号により制御する方法である。いずれも外部信号に完全に追随させてレーザを出力できない上，材料表面のレーザ照射による局所的な熱ひずみやアブレーションといった複雑な原理により弾性波が発生するので，圧電素子に電圧を印加して振動を制御するようにはきれいな弾性波を発生させることはできない。しかし変調信号の周波数に対応する周波数成分を卓越して励振する程度のことは十分に可能である。

図–5 や図–7 で得られた結果は，このように周波数制御を行ったバースト波やチャープ波を用いて得られた結果である。

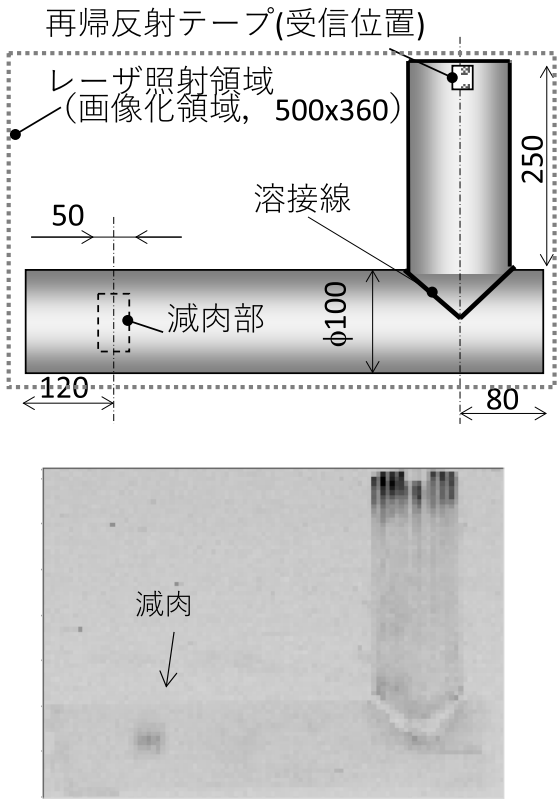
図–9 は，上述のようにレーザ光出力機能を持った損傷画像化を行うための実験システムである。

AD, DA 変換器（ここでは，NI 社製 USB-6343, 6351 などを利用）において，ファイバレーザ装置の出力を制御する変調信号を生成すると共に，ガルバノミラーの角度を制御する電圧値も出力する。同時に，レーザドップラ振動計からの波形信号を，ディジタル化してパソコンへ送る。パソコン内に送られた波形は，ソフトウェアフィルタや FFT などの処理を NI 社 LabVIEW 内で施し，ガルバノミラー角度による位置情報と統合して 2 次元データにマッピングし，損傷画像を取得する。波形を受信するデバイスはレーザドップラ振動計を用いる必要はなく，図–7 の結果のように接着したセンサからの信号を受信しても良いし，音響マイクロホンなども利用できる [13]。

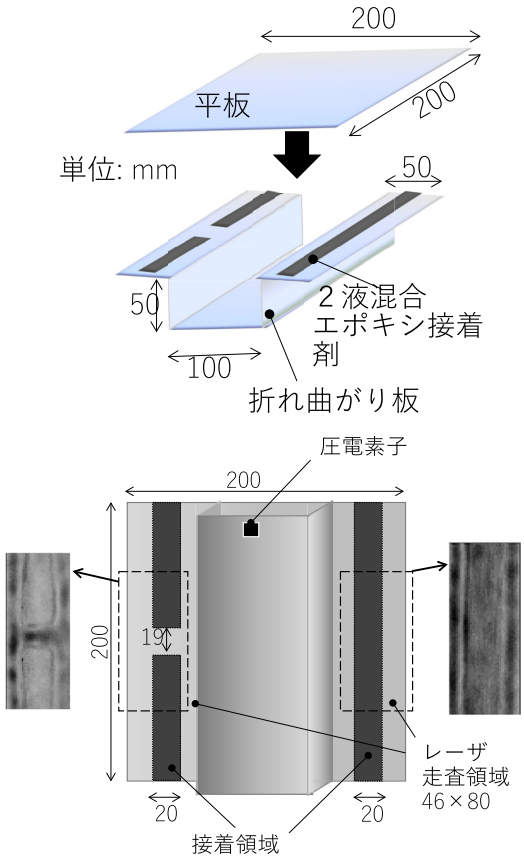
6. 適 用 事 例

上述の測定方法及び実験システムを利用すると，様々な薄板状の対象物で内部欠陥の画像化が可能となる。その適用事例を著者の過去の研究結果から以下に示す。

図–10 は，2–3 m 程度離れた距離から枝分かれ管を模擬した試験パイプ内の模擬損傷を画像化した結果である [14]。振動の受信はレーザドップラ振動計を用い（図–9），試験パイプの上端で受信した。図–10 に示したような 500 mm × 360 mm の範囲に対し 5 mm ピッチでレーザ照射し，弾性波を発生させた。減肉は左下の領域の内壁に最も薄いところで厚みの約 50%になるように作成した。10–40 kHz のチャープ波を用いた結果が下図であ



図–10　枝分かれ管の画像化結果 [14]



図–11　薄板接着部の画像化結果 [15]

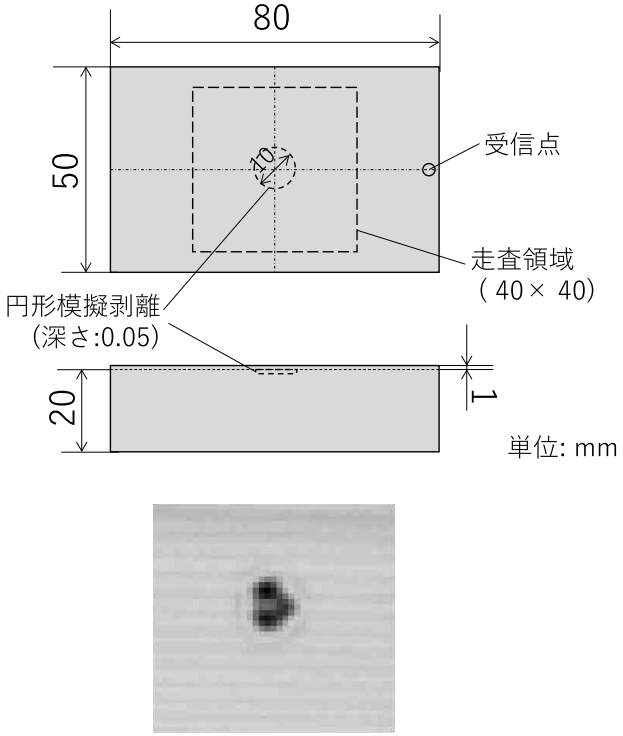
る。減肉部が画像として示されていることが分かる。この計測は，振動を負荷するレーザ照射点が曲面であり，励振点から受信点までの距離が遠い上，間に溶接線がある中で行われており，このような枝分かれ管は通常の超音波検査を考えると非常に複雑な構造となっている。それでも，3 m ほどの遠隔からの計測で損傷画像を取得できている。また，受信点近傍に縦縞模様が現れているが，これは受信点のパイプ端部を円周方向に周回するガイド波が共振してできた模様である。

この画像化技術は薄板の局所的な曲げ剛性を画像にしたと考えられるため，上述のようなノッチ状欠陥や減肉以外にも，接着部の画像化も行うことができる。図–11 は自動車の車体の接着部を模擬して作成した折れ曲がり板と平板の接着部を本手法により画像化した結果である [15]。このような接着部は広い平板中に存在するというよりは，このように折れ曲がった先の末端で接着していることが多く，検査したい箇所と受信点とを同一平面上に設定できないこともある。ここでは，折れ曲がり板の凸部の端で振動を受信し，接着領域に振動励振用のレーザを照射して画像を取得した。左右の画像は，30–40 kHz の範囲のチャープ波を用いた場合の結果である。左の接着部は意図的に隙間を与えた場合であり，右が正しく接着されている様子を示している。いずれも適切に画像が取得できていることが分かる。ただし，これが接着強度に対応しているかどうかは今後検討が必要である。

また，本画像化手法は上述のような構造物でなくても，小さな部品中のマイクロボイドのような内部損傷も検出できると考えている。図–12 では，その前段階の実験として，バルク体中の表層近傍にある模擬欠陥を検出したものである。損傷箇所を共振する周波数が存在し，その周波数を含む帯域の振動を励振すると，非常に鮮明な損傷画像が得られた。また，その局所共振周波数を含まない周波数であっても，構造全体の共振周波数を複数含むような周波数帯域に設定すると，図–12 のような損傷画像が得られることが理論的に示され，実験的に検証されている [6]。

7. おわりに

本稿では著者らが進めてきた損傷画像化技術について，その原理，計測方法，実験結果などを紹介



図–12 バルク体中の表層近傍欠陥の画像化結果 [6]

した。本手法は，もともとガイド波の配管検査の研究を行っていた延長で進められた技術であったため，対象物が配管のような大型構造物が中心であった。しかし，これまでの超音波非破壊検査技術にはない特徴や利点があるので，視点を変えれば面白い適用先があるのではないかと考えている。

文　献

[1] A. K. Kromine, P. A. Fomitchov, S. Krishnaswamy and J. D. Achenbach, "Laser ultrasonic detection of surface breaking discontinuities: Scanning laser source technique," *Mater. Eval.*, 58, 173–177 (2000).
[2] J. Takatsubo, B. Wang, H. Tsuda and N. Toyama, "Generation laser scanning method for the visualization of ultrasounds propagating on a 3-D object with an arbitrary shape," *J. Solid Mech. Mater. Eng.*, 1, 1405–1411 (2007).
[3] T. Hayashi and M. Fukuyama, "Vibration energy analysis of a plate for defect imaging with a scanning laser source technique," *J. Acoust. Soc. Am.*, 140, 2427–2436 (2016).
[4] T. Hayashi and S. Nakao, "Energy analyses for the imaging technique of bonded regions and delaminations in a thin plate," *Mater. Trans.*, 58, 1264–1273 (2017).
[5] T. Hayashi, "Defect imaging for plate-like structures using diffuse field," *J. Acoust. Soc. Am.*, 143, EL260–EL265 (2018).
[6] S. Nakao and T. Hayashi, "Non-contact imaging for delamination using diffuse field concept," *Jpn. Soc. Appl. Phys.*, 58, SGGB07 (2019).
[7] D. M. Egle, "A stochastic model for transient acoustic emission signals," *J. Acoust. Soc. Am.*, 65, 1198–1203 (1979).
[8] D. M. Egle, "Diffuse wave fields in solid media," *J. Acoust. Soc. Am.*, 70, 476–480 (1981).
[9] R. L. Weaver, "On diffuse waves in solid media," *J. Acoust. Soc. Am.*, 71, 1608–1609 (1982).
[10] R. L. Weaver, "Diffuse waves in finite plates," *J. Sound Vib.*, 94, 319–335 (1984).
[11] M. J. Evans and P. Cawley, "Measurement and prediction of diffuse fields in structures," *J. Acoust. Soc. Am.*, 106, 3348–3361 (1999).
[12] 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*, 77, 47–53 (2017).
[13] A. Maeda and T. Hayashi, "Defect imaging from a remote distance by using scanning laser source technique with acoustic microphones," *Mater. Trans.*, 59, 320–323 (2017).
[14] T. Hayashi, "Non-contact imaging of pipe thinning using elastic guided waves generated and detected by lasers," *Int. J. Pres. Ves. Pip.*, 153, 26–31 (2017).
[15] S. Nakao and T. Hayashi, "Adhesive bond imaging by noncontact measurements with single-sided access," *J. Nondestruct. Eval. Diagnostics Progn. Eng. Syst.*, 1, pp. 3–7 (2018).