OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	レーザ弾性波源走査法を用いた複雑薄板構造の画像化検査
Author(s)	林, 高弘; 中尾, 章吾
Citation	非破壊検査. 2019, 68(9), p. 459-464
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/84514
rights	© 2019 一般社団法人日本非破壊検査協会
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

解説

非接触超音波材料評価

レーザ弾性波源走査法を用いた複雑薄板構造の画像化検査

大阪大学　林　高弘　　京都大学（現　有人宇宙システム（株））　中尾　章吾

Imaging of Complex Plate-like Structures Using a Scanning Laser Source Technique

Osaka University　Takahiro HAYASHI
Kyoto University (Currently Japan Manned Space Systems Corporation)　Shogo NAKAO

キーワード　レーザ超音波，ガイド波，画像化，非接触，薄板

1．　はじめに

固体材料表面に強力なレーザパルスを照射すると，レーザ照射点の瞬間的な熱ひずみやアブレーションの作用によって弾性波が発生する。その弾性波は材料中を伝搬し，再度表面に現れた波動はレーザ干渉振動計により検出することができる。一般に，ns オーダの持続時間のレーザパルスを照射して，MHz オーダの周波数帯域を持つ超音波を伝搬させて固体材料の評価に用いることから，この非接触非破壊材料評価手法は，レーザ超音波法と呼ばれ[1)－5)]，非接触で材料評価を可能とする手法として広く研究・開発が進められている。（一社）日本非破壊検査協会においても，1996 年にレーザ超音波法に関する研究委員会が発足し，現在まで基礎研究から実用化研究まで多くの成果が発表されてきた[6)－15)]。

その中で，超音波の励振は，Q-switch 技術によって出力されるジャイアントパルスを適切なレーザ径で対象表面に当てれば比較的容易に実現できる。そのため，曲面や斜面，粗面などでも励振が可能であり，高速走査しながら多点で励振することもできる。一方，超音波の受信は，材料表面に照射したレーザの散乱光を受光して実現されることから，面の向きや粗さといった対象物の表面状態に大きく影響を受ける。現在では，レーザを用いた様々な非接触振動計測手法が開発されており，ごくわずかな散乱光でも干渉計測を実現するとともに，粗面でも計測できる装置が一般的になってきた[16)－18)]。

それでも様々な環境の検査現場に適用する際には，散乱光の受光を必要とするレーザ干渉による超音波の検出の難しさから利用をあきらめざるを得ない場面も多い。

その中で，超音波の受信を固定点で行い，励振点のみを走査することで，計測安定性を向上させた手法も開発されている。受信デバイスとして超音波トランスデューサを用いても良い場合には信号レベルが飛躍的に向上し，レーザ干渉による場合には散乱光の捉えやすい点を選んで計測すればよいという利点がある。例えば，Northwestern 大学のグループは，表面きずを高感度で検出できる技術として利用しており[19)－21)]，高坪ら[22), 23)]は，この計測技術から得られる波形から，材料表面を伝搬する超音波アニメーションを構成し，その伝搬状態の乱れから欠陥検出ができる技術を開発した。

著者らもこれらの先行技術を参考に，平板やパイプといった薄板状材料に現れる減肉やき裂を画像として取得できる技術を開発してきた[24)－34)]。本稿では，そのレーザ計測による損傷画像化手法に関し，複雑形状の対象物への適用，画像化分解能に関する検討，拡散場を利用した画像の鮮明化に関する最近の研究結果について紹介する[27), 31)－33)]。

2．　薄板構造内の画像化の原理[24), 27), 31)]

レーザ超音波法を薄板材料へ適用した研究は数多く見つけることができ，その多くは，計測の容易さから面外方向振動（屈曲振動）を利用している[4)－6)]。特に低周波数帯域においては，面外変位が大きく現れ，この発生する面外振動エネルギは，レーザ照射位置の板厚や剛性に依存し，それがレーザ弾性波源走査法による画像化手法の基本原理となる。

2.1　はりの曲げ変形との類似性による説明

はじめに直感的に理解しやすい説明としてはりの曲げ変形を取り上げる。ただし，直感的な解釈を優先するため，あらゆる箇所に正確性・厳密性を欠くことにはご注意いただきたい。**図 1** のようにレーザを薄板表面に瞬間的に照射すると，レーザ出力が大きい場合には表面のアブレーションにより表面垂直方向の瞬間的な力が作用することが知られている。また，レーザ出力が小さい場合には，表面の瞬間的な熱ひずみによる面内方向の応力が発生する。これら瞬間的な面外垂直応力，面内応力は，いずれも薄板を屈曲させる曲げモーメントとして作用し，面外方向の変位成分が支配的な屈曲振動を発生させる。

例えば，縦弾性係数 E，弾性 2 次モーメント I のはりに曲げモーメント M を負荷した場合，はりのたわみ（変位）w は M に比例し，E と I の積に反比例する。

$$w \propto M/(EI) \qquad \cdots\cdots (1)$$

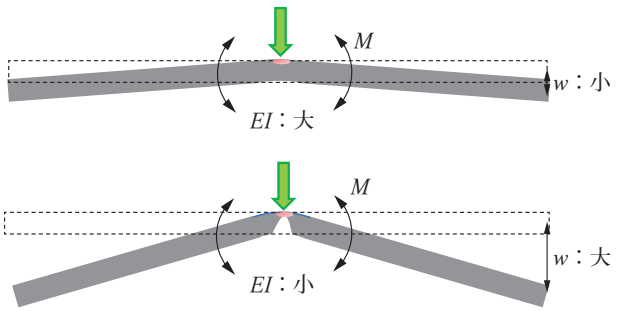


図 1　損傷の有無によるはりの曲げ変形の違い

これは，世界中すべての機械系の学生が材料力学の授業の中で習う。E と I の積は曲げ剛性とも呼ばれ，はりの曲がりにくさを示す量であり，EI が大きいほど同じ大きさの曲げモーメントを与えても曲がりにくい（変位が小さい）ことを表している。矩形断面の高さを h とすると断面 2 次モーメント 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。(実際には，局所的な曲げモーメントを外部から負荷している状況なので，そのままは当てはまらない。)

つまり，レーザ照射点に外部から曲げモーメント M が与えられる場合，そのレーザ照射点近傍の曲げ剛性 EI が大きいほど変位が小さくなり，EI が小さいほど変位が大きいことを意味している。言い換えれば，レーザ照射点が減肉などにより薄くなっている（曲がりやすくなっている）場合，大きな変位の振動が発生し，逆に健全部で板厚が厚い場合には振動が小さくなる(図 1)。そのため,等間隔で励振点を走査しながら，励振用のレーザを発射した場合，その励振点近傍に損傷を受けて曲がりやすくなっている箇所があると，大きな振動が発生する。本画像化手法では，この振動エネルギの違いを平板上のある固定位置において検出して，励振箇所に対するマップ図を作成することにより損傷や接着部の画像を得ている。

2.2　平板中に発生するラム波による説明

上述の説明は，単にレーザ照射による静的な曲げモーメントが，はりに負荷された場合の変位量を曲げ剛性と関連付けたにすぎない。そのため，この画像化手法における分解能や損傷深さの検出限界は，適用する上で最大の関心事であるにもかかわらず，上述の説明からでは推測することすらできない。

これらを正しく説明するためには，平板中の屈曲振動を動的な問題（ガイド波の伝搬）として捉える必要がある。このとき前節の式（1）で表される屈曲振動はラム波 A0 モードに対応する。レーザ光を材料表面に照射した場合には，この伝搬モードである A0 モード以外に，A1 モードなどの非伝搬モード（エバネッセントモード）も同時に発生している。ここでは，A1 モードのカットオフ周波数よりもずっと低い周波数帯域を考えており，A1 モードは純虚数の波数を持つ非伝搬モードである。この非伝搬モードは，**図 2** に示すように，励振源から離れるにつれて指数関数的に減衰する性質があり，エネルギを搬送しない。一方，伝搬モードが損傷に到達すると反射波が発生する。この反射波にも，A0 モードや S0 モードといった伝搬モードの成分以外に，A1 モードや S1 モードなどの高次の非伝搬モードが含まれている。

伝搬モードについては，レーザ照射位置から遠ざかる入射波と損傷位置から遠ざかって伝搬する反射波は，直交性を有するためカップリングすることはなく，それぞれ独立したモードとして逆方向に伝搬する。ところが，非伝搬モードでは，レーザ照射位置から遠ざかるにつれて減少するモードと，反射体から遠ざかるにつれて減少するモードがカップリングすることがある。このとき，カップリングによって伝搬モードである A0 モードが発生するので，減衰モードのカップリングが振動エネルギを生み出しているように振舞う[27), 31)]。

エバネッセントモードはレーザ照射源および反射源から指数関数的に減少する形態を有することから，レーザ照射位置が反射源から離れている場合には，このエバネッセントモードのカップリングはほとんど起こらない。しかし，レーザ照射位置が反射源の近傍にある場合には，このカップリングの影響が顕著に表れ，エネルギの上昇として観測される。このエバネッセントモードのカップリングによるエネルギ上昇が起こる範囲は，エバネッセントモードが存在する支配空間に依存する。

この支配空間について考察するため，**図 3** に A1，S1，A2 モードの波数の虚部を示した[31)]。対象平板は，後の実験に用いる厚さ 3mm のアルミニウム合金試験体である。また，合わせて A0 モードの波数も黒の実線でプロットした。これらのモードの振幅が 1/2 になる距離を支配長さ $x_{1/2}$ と定義すると，支配長さ $x_{1/2}$ が最も長いのは,最も小さい虚数部を持つ A1 モードであり，

$$e^{-\mathrm{Im}(k_{A1})x_{1/2A1}} = 1/2 \qquad \cdots\cdots (2)$$

より A1 モードの支配長さは

$$x_{1/2A1} = \ln 2/\mathrm{Im}(k_{A1}) \qquad \cdots\cdots (3)$$

と求められる。ここで，低周波数帯域において，A0 モードの波数 k_{A0} と A1 モードの波数の虚部 $\mathrm{Im}(k_{A1})$ が

$$k_{A0} \approx \mathrm{Im}(k_{A1}) \qquad \cdots\cdots (4)$$

と近似可能であることを利用すると（図 3 参照），式（3）は

$$x_{1/2A1} = \ln 2/k_{A0} = (\ln 2/2\pi)\lambda_{A0} \approx 0.11\lambda_{A0} \qquad \cdots\cdots (5)$$

と書くことができる。ここで，λ_{A0} は A0 モードの波長である。

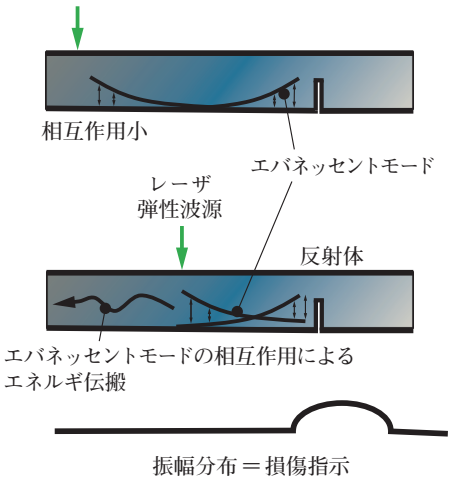


図 2　損傷近傍にレーザを照射した場合の振動エネルギ増大の原理

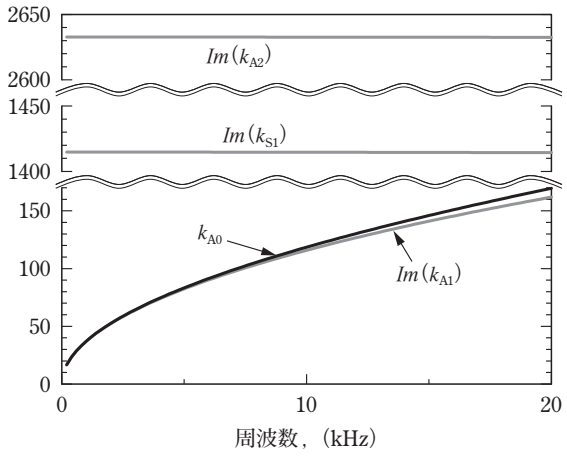


図 3　厚さ 3mm のアルミニウム合金平板に対する A1, S1, A2 モードの波数の虚部と A0 モードの波数

つまり，A1 モードの支配長さは，A0 モードの波長の約 0.11 倍であり，A1 モードのカップリングによるエネルギ増大は波長よりもずっと小さい領域で起こることが予想できる。

このことを実験的に確認するため，**図 4** に示すような厚さ 3.0mm のアルミニウム合金平板の裏面に，深さ 1.5mm の直線ノッチを彫った試験体に対して，損傷画像を取得した[22),27)]。ノッチは，上から 20mm，10mm，5mm，2mm の距離だけ離して 2 本並べてあり，一番下は 1 本である。図 4 の画像化結果を見ると，5mm の隙間の場合は，2 本のノッチが分離できているが，2mm の場合には分離して見えないことが分かる。用いた周波数は 8kHz であり，その場合の A0 モードの波長は約 59mm となっていることから，分解能は発生している A0 モードの波長よりもずっと小さく，前述の予測が妥当であることが分かる。

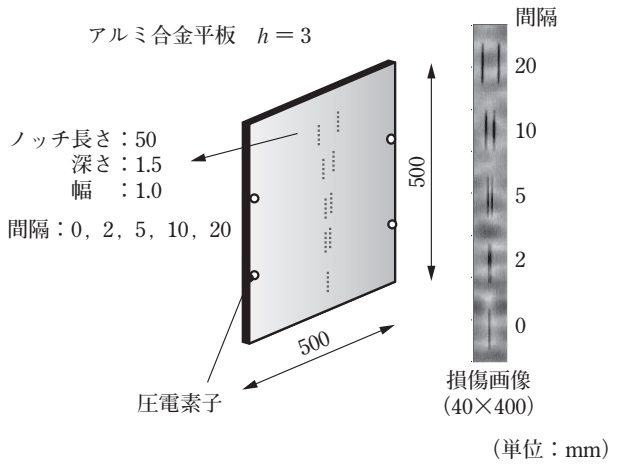


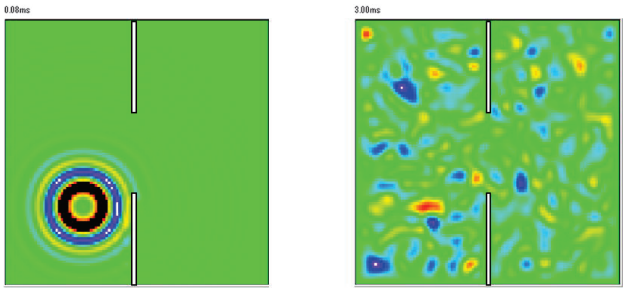
図 4　用いた試験平板と損傷画像化結果

3．拡散場を用いた複雑構造の画像化[33)]

これまで，レーザを照射位置近傍に損傷などの曲がりやすい箇所が存在すると，レーザ照射により屈曲振動（ラム波 A0 モード）の振動エネルギが大きく発生することを述べた。しかし，振動の受信位置において受信される波形には，励振点からの距離に応じて振幅が減少する直接波の他，壁面からの反射波が重畳している場合もあり，計測された波形の振幅がそのまま発生した振動エネルギに対応するとは限らない。

そこで，著者らのグループでは文献 33）の中で，拡散場の概念を導入することによって振動エネルギと受信波形との関係を明らかにし，より鮮明な画像が得られる条件を示した。

拡散場とは，振動を与えて領域内を多重反射・拡散した後に，領域全体の振動エネルギ密度がほぼ一様になった状態をいう。**図 5** は，ある薄板に対し，レーザなどにより局所的な振動を与えた場合に対する波動伝搬の様子の数値計算結果であり，面外方向の変位を現した図である。図 5 (a) では，入射直後のため，面外振動が同心円状に伝搬している様子が分かる。振動は広がるにつれて，すなわち入射位置から遠ざかるにつれて，振幅が減少する。一般に超音波パルスエコー法のような非破壊検査手法では，このような入射直後に入射位置から直接到達する波形もしくは数回反射した波形を用いて，伝搬経路内の材料評価を行っている。一方，入射後，平板の壁面で多重反射をした結果，しばらくたった後には図 5 (b)



(a) 入射直後のコヒーレント場　(b) 入射後しばらくたった後の拡散場

図 5　コヒーレント場と拡散場

のようにランダムな波動場となる。これを拡散場と呼んでおり，振動エネルギ密度は，平板のあらゆる位置においておおむね一様になることが知られている。

拡散後に一様となった振動エネルギ密度は，加振位置における励振エネルギに比例しているので，領域内のどの位置で振動を検出しても，その大きさ（たとえば振幅）は励振エネルギに比例した量となっている。

逆に，励振源を移動させ，受信位置を固定した場合も，励振源における励振エネルギが一定であれば，どの位置で励振されても受信位置において検出される拡散後の振動エネルギは一定となる。また，レーザ照射位置における損傷の存在により励振エネルギに変化がある場合には，その変化に対応する受信波形の変化を検出することになる。

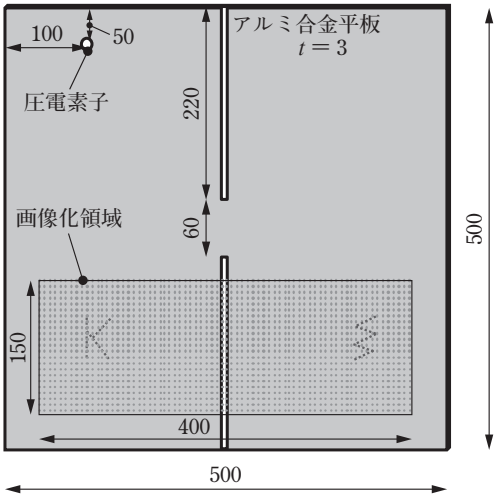
拡散場は，不規則に多重反射を繰り返した結果得られる音場であり，Room Acoustics の分野でその理論は確立されてきた。非破壊検査の分野でもアコースティック・エミッションにおいて活用されている[34)－38)]。それらの文献によると，拡散場を適切に形成するための条件として以下が挙げられている。

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，領域中に拡散しやすいこと。

後に示す例のように，あまり大きくない金属平板を対象とする場合，1 の条件は満たされ，レーザ照射によって発生させた波動場は図 5 (a) のように同心円状に伝搬するため，3 も自動的に満たされている。そこで，励振する振動の周波数帯域が及ぼす損傷画像への影響を調べるため，発生させる弾性波の形状を変えて画像化実験を行った。

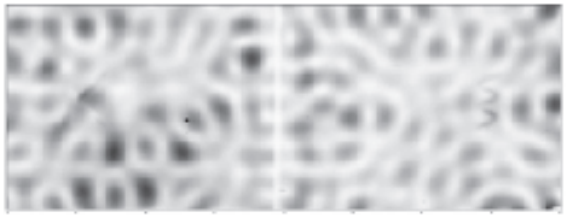
図 6 は，500mm × 500mm ×板厚 3mm のアルミニウム合金平板の中央上下に切り込みを入れたような複雑な形状の平板に対し，裏面に深さ 1.5mm の“K”の文字とジグザグの溝を模擬損傷として彫った試験体である。ハッチングしてある 150mm × 400mm の領域に 2mm ステップでレーザを照射して，76 × 201 の点で弾性波を発生させ，接着剤で平板上の一点に固定した圧電素子により波形を受信した。

弾性波を励振するためのレーザ装置は，ファイバーレーザを用い，外部信号により変調を起こすことにより励振させる弾性波の形状を制御した。ここでは，狭帯域の弾性波を発生させる例として周波数 20kHz，持続時間 5ms の外部変調信号を与えた場合と，広帯域の弾性波を発生させる例として，10kHz ～ 40kHz の範囲で遷移するチャープ波を持続時間 5ms

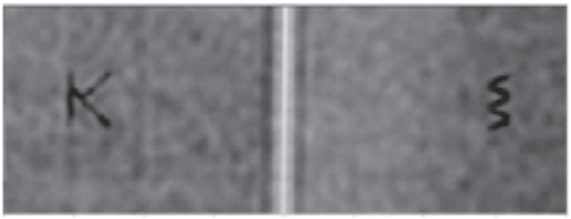


（単位：mm）

図 6　用いた試験平板



（a）20kHz，狭帯域バースト波



（b）10kHz～40kHz，広帯域チャープ波

図 7　損傷画像

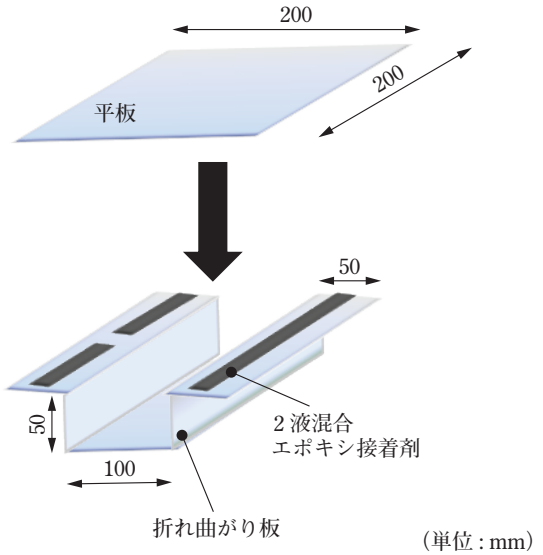
の外部変調信号として与えた場合の結果を示す。**図 7** は，圧電素子により受信された波形から，拡散場の振動エネルギに対応する値を抽出し，レーザ照射点に対応する位置に濃淡でマッピングした分布図である。具体的には，受信された波形の包絡線をレーザ照射タイミングから 20ms ～ 40ms で積分し，その値を拡散場の振動エネルギ値として用いた[33]。濃いほど振動エネルギが大きいことを示している。図 7（a）は，20kHz 狭帯域の弾性波を用いた場合の分布図であり，（b）は広帯域の弾性波を用いた場合の分布図である。狭帯域の場合は，スプリアス像が大きく損傷がほとんど判別できないが，広帯域波を用いた場合には，スプリアス像が小さくなっており，損傷画像が鮮明に得られている。このスプリアス像は，閉領域内の共振によるものであり，広帯域を使うことで共振の影響が小さくなっていることが分かる。

4．接着構造およびはく離の画像化例[31), 33)]

本画像化手法は，薄板状構造のレーザ照射部近傍における曲げ剛性の違いを表示したものである。そのため，薄板状材料内の損傷だけでなく，接着領域やはく離部などを画像化することも可能である。

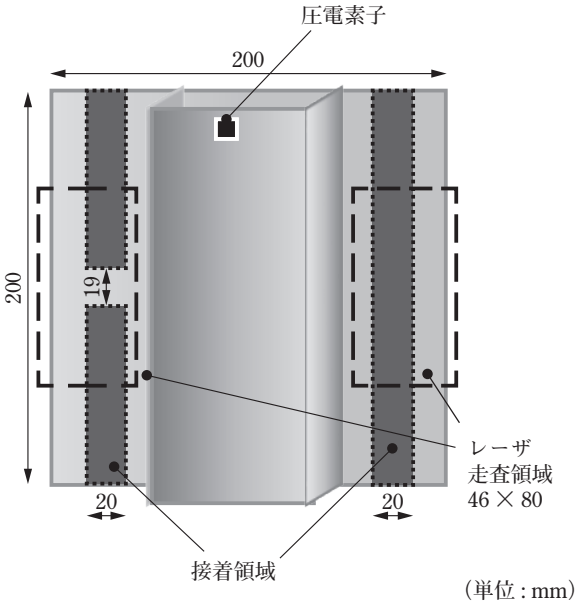
例えば，航空機や自動車などの軽量化を主目的として異種材料の利用やプラスチック系材料の利用が広がっているが，このような接合には従来のスポット溶接やレーザ溶接が利用しにくく，接着剤を利用することが増えている。接着剤による接合は外見からはその良否を全く推測することができず，接合後の適切な評価が重要となる。**図 8** は自動車などの接合構造を模擬するために作成した試験体である。平板と曲がった部材を図に示すようにエポキシ系の接着剤で接合し，その接合部を片側からレーザ照射することによって画像化した。図 8（b）の破線に囲まれた領域がレーザ照射領域であり，曲がった薄板の 1 点において振動を受信した。破線内のレーザ照射領域内に，接着部が存在し，左は接着不良部を意図的に作成し，右は正しく接着剤が塗られている構造とした。

図 9 にその時の画像を示す。図 9 左右の画像が，それぞれ図 8（b）左右の破線領域にレーザ照射した際の画像である。左の画像では，接着領域の途切れ部が表れており，正しく画



（単位：mm）

（a）接着前



（単位：mm）

（b）接着後完成図

図 8　用いた接着試験体

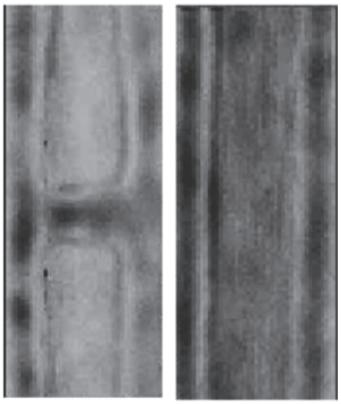


図 9　得られた接着部の画像

像が得られていることが分かる。

本手法は，接合後に片面からのレーザ照射により内部接合部の画像を取得でき，曲面であっても画像化は可能であるという特徴を有しているので，今後このような接合部の評価に広く利用できると考えている。

次に，薄板ではなく，バルク体中にはく離があるような場合の例として，**図 10** に示すような試験体を用いて実験を行った。80mm × 50mm × 20mm のアルミニウム合金ブロックの中央に直径 10mm，深さ 0.05mm の平底穴をあけ，その上から厚さ 1mm のアルミニウム合金薄板を接着して，穴部が人工的なはく離となるような試験体を作成した。**図 11** は，46.2kHz の狭帯域波を用いた場合の図であり，鮮明なはく離画像が得られていることが分かる。この周波数は一般的な超音波検査で利用される周波数帯域に比べ非常に低い周波数帯域であり，例えば，10 倍の周波数（462kHz）や 100 倍の周波数

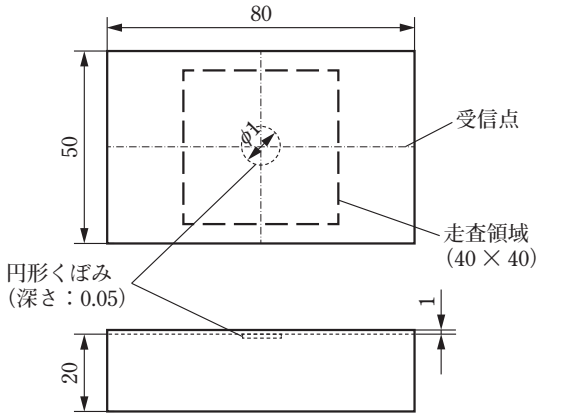


図 10　用いたはく離試験体

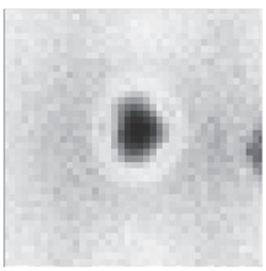


図 11　はく離部の画像

(4.62MHz) を利用することは計測上大きな問題とはならない。その際，対象物のサイズおよび深さ位置が 1/10，1/100 になっても画像化できると推定され，マイクロメートルオーダのはく離や鋳巣などを検出できるものと期待できる。

5．おわりに

本稿では，レーザ弾性波源走査法による画像化手法の原理について述べた後，分解能に関する考察，拡散場を用いた複雑形状の対象物への適用，接着構造やはく離への適用について最近の研究結果を示した。

本研究は，第一著者が名古屋工業大学在籍時の 2008 年より開始し，その後，(株) 豊田中央研究所，京都大学における様々なご支援に基づくものである。関係者の皆様には心より厚く御礼申し上げたい。また，本研究の一部は，科学研究費補助金 26282094 および 17H02052 の支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

参　考　文　献

1）C. B. Scruby and L. E. Drain：Laser Ultrasonics: Techniques and Applications, Adam Hilger, Bristol, Philadelphia, and New York, (1990)
2）J. W. Wagner, J. B. Deaton and J. B. Spicer：Generation of ultrasound by repetitively Q-switching a pulsed Nd:YAG laser, Appl. Opt., 27(22), pp.4696-4700, (1988)
3）R. Pierce, C. Ume, J. Jarzynski and G. W. Woodruff：Temporal modulation of a laser source for the generation of ultrasonic waves, Ultrasonics, 33(2), pp.133-137, (1995)
4）D. A. Hutchins, K. Lundgren and S. B. Palmer：A laser study of transient Lamb waves in thin materials, J. Acoust. Soc. Am., 85, pp.1441-1448, (1988)
5）J. B. Spicer, A. D. W. McKie and J. W. Wagner：Quantitative theory for laser ultrasonic waves in a thin plate, Appl. Phys. Lett., 57, 1882, (1990)
6）特集　レーザー超音波法の原理と応用 I，非破壊検査，49(5)，(2000)
7）特集　レーザー超音波法の原理と応用 II，非破壊検査，49(6)，(2000)
8）特集　レーザ超音波の新展開，非破壊検査，51(4)，(2002)
9）特集　最新のレーザ超音波技術 I，非破壊検査，57(1)，(2008)
10）特集　最新のレーザ超音波技術 II，非破壊検査，57(4)，(2008)
11）特集　非接触超音波法の展開，非破壊検査，58(7)，(2009)
12）特集　非接触超音波探傷の進展，非破壊検査，61(10)，(2012)
13）特集　LU2013 I －先進超音波計測－，非破壊検査，63(3)，(2014)
14）特集　LU2013 II －先進超音波計測－，非破壊検査，63(4)，(2014)
15）特集　超音波による非接触非破壊計測・先進評価技術，非破壊検査，65(12)，(2016)
16）H. Nakano, Y. Matsuda, S. Shin and S. Nagai：Optical detection of ultrasound on rough surfaces by a phase-conjugate method, Ultrasonics, 33(4), pp.261-264, (1995)
17）M. Ochiai, D. Lévesque, R. Talbot, A. Blouin, A. Fukumoto and J.-P. Monchalin：Detection and characterization of discontinuities in stainless steel by the laser ultrasonic synthetic aperture focusing technique. Materials Evaluation, 62(4), pp.450-459, (2004)
18）B. Pouet, S. Breugnot and P. Lémenceau：Robust laser-ultrasonic interferometer based on random quadrature demodulation, in: D. Thompson, D. Chimenti (Eds.), Review of Progress in

Quantitative Nondestructive Evaluation, 820, pp.233-239,（2006）
19）A. K. Kromine, P. A. Fomitchov, S. Krishnaswamy and J. D. Achenbach：Mater. Eval., 58, pp.173-177,（2000）
20）P. A. Fomitchov, A. K. Kromine, Y. Sohn, S. Krishnaswamy and J. D. Achenbach：Ultrasonic imaging of small surface-breaking defects using scanning laser source technique, in: D. Thompson, D. Chimenti (Eds.), Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 615, pp.356-362,（2002）
21）Y. Sohn and S. Krishnaswamy：Interaction of a scanning laser-generated ultrasonic line source with a surface-breaking flaw, J. Acoust. Soc. Am., 115(1), pp.172-181,（2004）
22）高坪純治，王　　波，津田　浩，遠山暢之：発振レーザ走査法による三次元任意形状物体を伝わる超音波の可視化，日本機械学会論文集，A, 72(718), pp.945-950,（2006）
23）J. Takatsubo, B. Wang, H. Tsuda and N. Tooyama：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(12), pp.1405-1411,（2007）
24）T. Hayashi, M. Murase and M. N. Salim：Rapid thickness measurements using guided waves from a scanning laser source., J. Acoust. Soc. Am., 126, pp.1101-1106,（2009）
25）T. Hayashi, M. Murase, N. Ogura and T. Kitayama：Imaging defects in a plate with full non-contact scanning laser source technique, Mater. Trans., 55, pp.1045-1050,（2014）
26）T. Hayashi：Imaging defects in a plate with complex geometries, Appl. Phys. Lett., 108, 081901,（2016）
27）T. Hayashi, M. Fukuyama and K. Ishihara：Vibration energy analysis of a plate for defect imaging with a scanning laser source technique, J. Acoust. Soc. Am., 140(4), pp.2427-2436,（2016）
28）林　高弘：レーザ弾性波源走査法を用いた薄板材料の損傷画像化，非破壊検査，65(12), pp.611-615,（2016）
29）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, pp.47-53,（2017）
30）T. Hayashi：Non-contact imaging of pipe thinning using elastic guided waves generated and detected by lasers, Int. J. Press. Vessel. Pip., 153, pp.26-31,（2017）
31）T. Hayashi and S. Nakao：Energy analyses for the imaging technique of bonded regions and delaminations in a thin plate, Mater. Trans., 58, pp.1264-1273,（2017）
32）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）
33）T. Hayashi：Defect imaging for plate-like structures using diffuse field, J. Acoust. Soc. Am., 143, EL260-EL265,（2018）
34）D. M. Egle：A stochastic model for transient acoustic emission signals, J. Acoust. Soc. Am., 65, pp.1198-1203,（1979）
35）D. M. Egle：Diffuse wave fields in solid media, J. Acoust. Soc. Am., 70, pp.476-480,（1981）
36）R. L. Weaver：On diffuse waves in solid media, J. Acoust. Soc. Am., 71, pp.1608-1609,（1982）
37）R. L. Weaver：Diffuse waves in finite plates, J. Sound Vib., 94, pp.319-335,（1984）
38）M. J. Evans and P. Cawley：Measurement and prediction of diffuse fields in structures, J. Acoust. Soc. Am., 106, pp.3348-3361,（1999）

林　　高弘　大阪大学（565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1）　大学院工学研究科　機械工学専攻　教授
1997 年より工業技術院資源環境技術総合研究所（現産総研），名古屋工業大学，（株）豊田中央研究所，京都大学にて，超音波非破壊評価技術の研究・開発に携わる。現在は大阪大学にて，ガイド波を用いた非破壊評価，レーザ走査による損傷画像化に関する研究に従事

中尾　章吾　京都大学（615-8530 京都市西京区京都大学桂）　大学院工学研究科　航空宇宙工学専攻（現　有人宇宙システム（株））
2016 年から 2019 年まで京都大学機能構造力学研究室にて，レーザを用いた超音波非破壊検査の研究に携わる。現在は有人宇宙システム（株）にて，人工衛星等の安全評価の技術支援業務に従事