

# 変調レーザによる積層造形と超音波波形解析による 造形体の欠陥発生モニタリング

大阪大学 大学院工学研究科 機械工学専攻

教授 林 高弘

(2021年度 一般研究開発助成 AF-2021218-B3)

キーワード：超音波、3次元積層造形、欠陥検出

## 1. 研究の目的と背景

### 1・1 金属3次元積層造形の課題

金属3次元積層造形法は、これまでの加工技術では不可能だった複雑な形状の部材を、コンピュータで設計して即座に作成することができ、金型も不要であることから、主に小ロットの試作品を中心に利用されている。さらに、航空機や自動車の構造強度を担保する1次部材やエンジン、タービン、トランスマッショングといった複雑な形状かつ強度が要求される部品にも応用展開が期待されており、既にいくつかの適用事例が出現している。

しかし、金属積層造形には、加工時間や製作可能サイズ、初期コストやランニングコスト、品質評価などの課題があり、開発が先行している欧米や中国のメーカーできさえ、主要工業部材への本格適用が進んでいないのが現状である。加工時間やコストなどは、市場規模の拡大とともに解決されうる課題であるものの、品質評価には技術的な革新が求められている<sup>1-11)</sup>。逆に、品質評価の技術課題さえクリアできれば、適用対象が爆発的に増大するものと期待できる。

### 1・2 金属3次元積層造形体の品質向上の取り組み

レーザパウダーベッド方式の金属3次元積層造形では、直径50 μm程度の金属粉末をレーザ光によって焼結・溶融し、積層造形していく。この際金属粉末は、アブレーションにより原子やプラズマ、スパッタとして飛散し、造形体中に異物として混入することがある。また、局所的な未溶融部が形成されたり、使用した粉末中にポロシティが内在していたりするなど、造形体の強度低下についての種々の要因（ここではすべて欠陥と呼ぶ）が確認されている。これに対し、最近では高速度カメラや赤外線カメラを用いた焼結・溶融現象の解明が進んでおり、欠陥の現れにくく最適な造形条件が追及されるようになって、その品質は大きく向上してきている。しかし、粉末素材や造形環境の微妙な変化による欠陥の発生は避けられず、欠陥検出技術、材料評価技術の開発が不可避となっている。

### 1・3 非破壊検査技術の現状

金属材料の内部欠陥を非破壊で検出する手段は主にX線か超音波の2つである。このうちX線を使った手法は、マイクロX線CT(Computed tomography)が広く用いられるようになっており、金属中のサブミリオーダーの欠陥が画像として検出できる非常に有効な手段である。一方で、X線が透過できる比較的小さな（たとえば5cm角程度）の

部材を対象としており、X線の出力が高い最近の装置であっても、ユーザが求めるサイズの部材と検査可能なサイズに依然ギャップがある。

超音波を用いる方法では、水浸法と呼ばれる手法が古くから固体材料内の欠陥検出に利用されている。この方法では、水に金属材料を浸した状態で超音波センサを走査し、金属材料内部の欠陥を画像として検出する方法である。対象物の表面が平面でないといけないという制限があるため、一般に3次元積層造形体への適用は進んでいない。

### 1・4 報告者らのこれまでの研究と本研究の目的

報告者らはこれまで、変調させたレーザ光による超音波の励振技術とそれを利用した非接触による工業材料内の欠陥画像化技術を研究・開発してきた<sup>12,13)</sup>。レーザ照射により発生する超音波の音源を走査する計測手法であることから、レーザ弾性波源走査法と呼んでおり、この計測手法により収集された多数の波形から欠陥の画像が取得できる。

図1には、本手法を配管のような大型構造物に適用した事例と航空機ボディの炭素繊維複合材料に現れる剥離を模擬した小型試験体へ適用した事例を示した。レーザにより励振される超音波振動の特性と、材料内を拡散する音場を利用するという全く新しい材料評価原理を利用していいるため、対象物の表面直下の欠陥に対し、①対象物が複雑形状であっても画像化が可能、②非接触による計測が可能、③低周波を利用しても高分解能な画像取得が可能といった優れた特徴を有している。

本研究では、この複雑な形状でも検査が可能な非接触超音波計測手法を、金属積層造形体の欠陥検査に適用することを目的としている。

## 2. レーザ弾性波源走査法による表面直下の損傷画像化の原理

### 2・1 薄板の場合の損傷画像化

レーザ弾性波源走査法というのは、Kromineら<sup>14)</sup>の論文中に示されたScanning Laser Source Technique(SLS)を報告者が日本語に訳したものである。レーザ照射によって発生する弾性波源(Laser Source)を走査しながら固定した受信点で超音波計測を行う技術を指す。一般に、レーザによる超音波の検出は、対象物表面からの散乱光を捉えて参照光との干渉を取る必要があるため、レーザによる超音

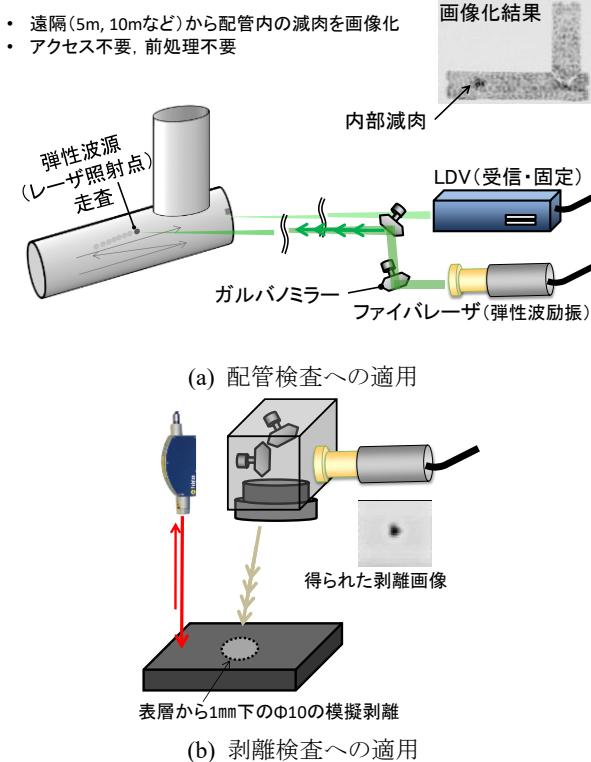


図1 レーザ弾性波源走査法による画像化の事例

波の励振に比べ、様々な困難を伴うことが多い。しかし、このレーザ弾性波源走査法では、受信に超音波トランステューサのような接触法も利用でき、安定した計測が実現される。

一方で、超音波の発生源であるレーザ照射点は、ガルバノミラーを使って高速で走査することも可能であり、対象物が曲面であってもレーザ照射点から四方に広がる超音波を多点で発生させることができる。高坪らはこの性質を利用して、パイプやドリル刃先のような複雑な形状の対象物中の波動伝搬を可視化し、内部に欠陥がある場合に特異な散乱を起こすことを利用した欠陥検出法を開発した<sup>15, 16)</sup>。

報告者らも同様の計測手法を用いて、薄板裏面の損傷や配管内の減肉、薄板の接着接合部を画像化する技術を開発した<sup>17-21)</sup>。その中で、薄板状材料では、損傷による曲げ剛性の減少によりレーザ照射した際に発生する振動エネルギーが増大することを示し、エネルギーの変化を捉えることのできる拡散場の利用が有効であることを明らかにした<sup>19)</sup>。

本研究では、薄板ではなくバルク体の表層にある欠陥を対象としている。その場合の欠陥画像化原理は薄板の場合と異なり、以下に示すような欠陥部の局所共振による。

## 2・2 欠陥部の局所共振による振動エネルギー

レーザパルスが材料表面に照射されると、そのエネルギーの一部は固体材料中を伝搬する振動に変換される。その際、図2のように表面近傍に欠陥があると、表層が膜共振を形

成し非常に大きな振動が起こる。共振のため、ある固有周波数が存在し、欠陥が表面から深さ $h$ の位置に直径 $d$ の大きさで存在している場合、周囲を固定した直径 $d$ 、厚さ $h$ の円盤が中心を腹にして面外振動する基本モードの共振周波数 $f_{LDR}$ に概ね一致する。

$$f_{LDR} = \frac{1.6h}{(d/2)^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \quad (1)$$

ここで、 $\rho$ 、 $E$ 、 $\nu$  はそれぞれ材料の密度、ヤング率、ポアソン比を表す。また、この周波数は、欠陥の局所共振を表す固有周波数として、Solodov らによって理論的、実験的に示されている<sup>22)</sup>。

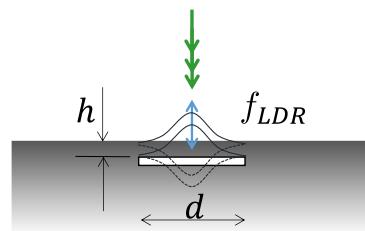


図2 表層欠陥における膜共振<sup>12)</sup>

レーザが材料表面に照射された場合、広帯域のパルス波が発生するが、図2のような欠陥部にレーザが当たると、その帯域内の $f_{LDR}$ の周波数で大きく振動する。逆に欠陥のない箇所にレーザが照射されると、単にパルス波が材料内を往復するのみであり、振動は小さい。太鼓の中央の膜を叩くと大きな音が出るが、太鼓の隅を叩くと単に木が衝突した小さな音しか出ないことを想像すると理解しやすいかもしれない（実際には太鼓の膜振動は空洞内で音を增幅させている）。

式(1)によると、この共振周波数は欠陥サイズ $d$ の<sup>2</sup>乗に反比例し、欠陥深さ $h$ に比例して高くなる。すなわち、欠陥が小さく深くなるほど、その検出には高周波数帯域を利用する必要があるということを意味する。図3は、対象材料をインコネルとし、欠陥深さ $h = 0.25$  mmとした場合の欠陥サイズ $d$ と共振周波数 $f_{LDR}$ の関係を示したものである。実線は式(1)で与えられる曲線であるが、欠陥サイズが小さくなるにつれ、膜振動という前提条件から外れるため、実際の共振周波数と乖離する。そのため、ここでは有限要素法の固有振動解析によってある大きさの対象物中の深さ $h$ の位置に直径 $d$ の剥離状の欠陥がある場合に、欠陥部分の局所共振の周波数を探査した<sup>12)</sup>。図3中の中破線がその周波数に対応し、図中下にはその周波数における共振パターン（表面の面外方向振動分布）を示した。この条件において、サブミリオーダーの欠陥に対し、数 MHz の共振周波数で振動することが分かる。すなわち、これまで超音波計測を行ってきた周波数帯域を用いてサブミリオーダーの欠陥が検出できることが示されている。

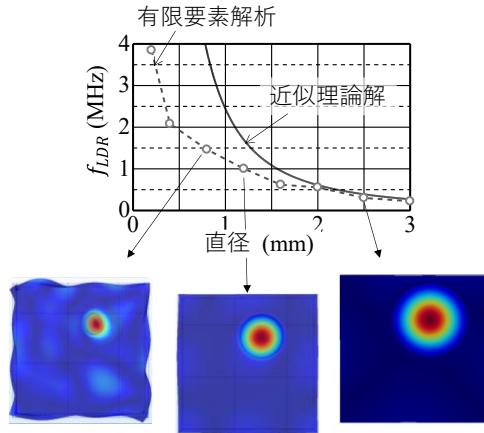


図3 欠陥サイズと共振周波数の関係<sup>12)</sup>

### 2・3 高繰り返しパルスによるSN比の改善

前節で示された共振周波数は、レーザ超音波法でよく用いられる周波数帯域の範囲内であるが、様々な形状の欠陥が存在する可能性を考えると、広帯域のパルス波を励振しなくてはならない。

しかし、報告者らが開発したレーザ弾性波源走査法を用いた損傷画像化手法では、1パルスのレーザ照射では入射されるエネルギーが小さく、画像化が困難になるという問題があった。この画像化手法は、レーザ照射点において発生する超音波のエネルギー強度をレーザ照射点ごとに計測し、分布画像として取得したものであり、その振動エネルギーは、構造全体に拡散した後の振動エネルギー場を用いて計測している<sup>12, 13, 19)</sup>。そのため、受信位置によらず、また対象物の形状によらずに、この手法による損傷画像化が可能であるものの、対象物全体に拡散した後の超音波振動を検出しなければいけないため、自ずと信号レベルは小さくなってしまうのである。

そこで、報告者らはファイバレーザから高繰り返しのレーザパルスを出力できることに着目し、このレーザ光により発生する高繰り返しの超音波パルス波を利用してSN比を改善した。

図4は、一つのパルス波 $g(t)$ をフーリエ変換した場合の周波数スペクトル $|G(f)|$ とそのパルス波を時間間隔 $T_0$ で繰り返したパルス列 $h(t)$ の周波数スペクトル $|H(f)|$ の比較である。 $|H(f)|$ は周波数間隔 $f_0 (= 1/T_0)$ ごとにピークが現れる図4(b)のような形状をしており、その包絡線はパルス一つ分の周波数スペクトル $|G(f)|$ の $N$ 倍( $N$ はパルス数)となっている。つまり、 $N$ 個の高繰り返しパルスを用いることにより、信号レベルを周波数領域において $N$ 倍に増大させることができることを意味している。ただし、この手法は、計測時間が長くなることから、対象物壁面からの無数の反射波を受信することがあり、パルス波の伝搬経路が分かっていないといけない一般的なレーザ超音波による非破壊検査には不向きである。本画像化技術では、対象物壁面からの繰り返し反射波(拡散場)を利用することから、むしろ好都合な信号処理技術となっている。

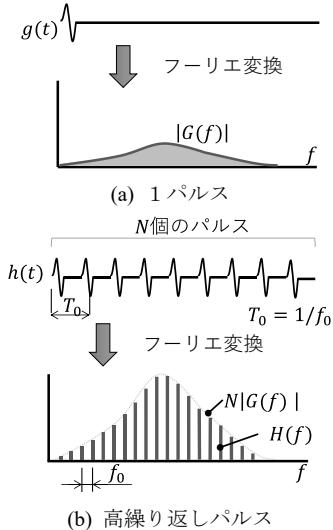


図4 超音波パルスの周波数スペクトル<sup>12)</sup>

### 3. 高繰り返しパルスレーザによる超音波計測結果

レーザ弾性波源走査法による損傷画像化の実験を行う前に、前節で示した高繰り返しパルスで得られる超音波波形について予備実験の結果を示す。図5は、ここで用いた実験装置の概要図である。レーザ装置(G4 50 W HS-S、SPI Laser、最大50 W、1 MHz 繰り返し、1062 nm)から出射した高繰り返しレーザパルスはコリメータにより直径約5 mmの平行光になり、ガルバノミラー、f-θレンズを通って、試験体表面において実測値で直径約40 μmとなるように集光されている。

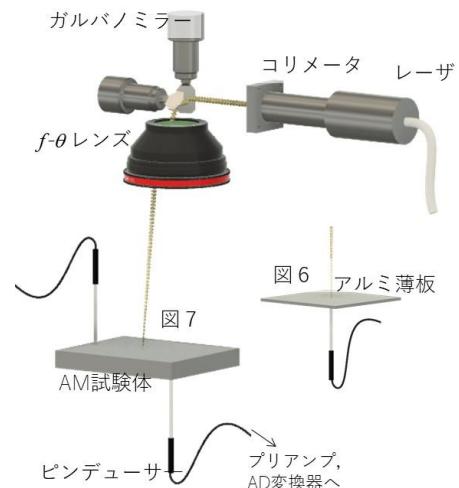
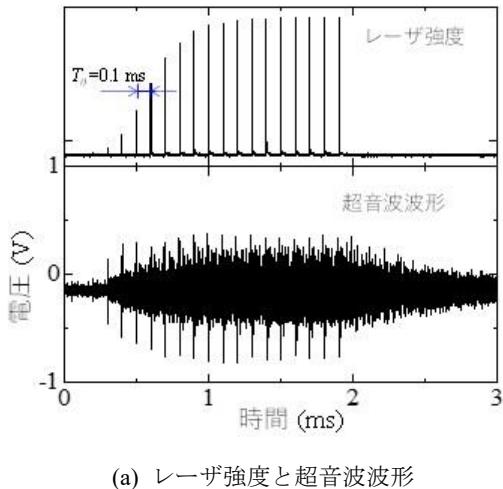


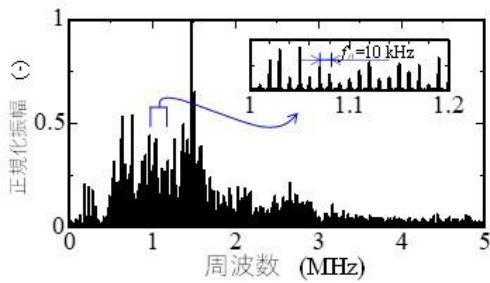
図5 実験装置の概要図<sup>12)</sup>

図6(a)は40 mm×40 mm×3 mmのアルミ薄板の中央にレーザを照射した際に、その裏面においてピン型の超音波トランズデューサ(VP-1093、Valpey Fisher、直径2.3 mm、公称中心周波数1.2 MHz)により超音波計測したときの超音波波形とフォトディテクタによる光強度を示したものであり、(b)はその超音波波形の周波数スペクトルである。

レーザ光は $T_0 = 0.1$  ms の間隔で、2.0 ms 間照射しており、(a)の上図の光強度図において、最初の 1.0 ms 程度は徐々に出力が大きくなり、その後一定の強度で光パルスを出力していることが確認できる。(a)の下図の超音波波形を見ると、その光パルスの照射タイミングと一致する超音波パルスが確認されているとともに、その間に比較的小さな波形が現れているのが分かる。これは、レーザ照射点で発生したラム波が試験体壁面で繰り返し反射して超音波トランステューサで検出された波形である。周波数スペクトル(b)は、発生した超音波の周波数帯域以外に、使用する超音波トランステューサの周波数帯域や構造全体の共振周波数にも依存した周波数分布を形成している。(b)図中に示されている拡大図から分かるように、この周波数スペクトルは $f_0 = 1/T_0 = 10$  kHz の間隔の離散ピークで形成されており、図 6 に示した通りの信号が得られている。ここでは、 $N=20$  回程度の繰り返し数による増大だけでなく、試験体壁面からの反射波も受信されるため、その分得られる周波数スペクトルが増大し、SN 比の改善に役立っている。



(a) レーザ強度と超音波波形



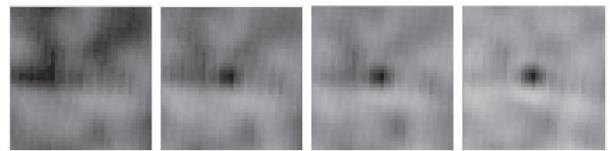
(b) 超音波波形の周波数スペクトル

図 6 出力されたレーザと薄板裏面での計測結果<sup>12)</sup>

#### 4. 金属積層造形試験体による実験結果

次に、内部に人工欠陥を含んだ金属積層造形試験体に対し、ガルバノミラーを使ってレーザ照射点を走査したときに、試験体表面（図 5 の上面）に超音波トランステューサを接触させて波形を受信し、振動エネルギー分布を取得した。

振動エネルギーとして、収録波形の 2 乗和を採用している。試験体は、内部に人工欠陥を含んだ金属三次元積層造形であり、100 mm×100 mm×10 mm のインコネル角材である。人工欠陥は、中央の表面から 0.25 mm の深さに直径 0.8 mm、高さ 1.0 mm の円筒形の未溶融部とした。レーザ照射領域は、その欠陥部を中心として 4.0 mm×4.0 mm に設定し、その領域の画像を取得した。図 7 は収録した波形に様々なカットオフ周波数のローパスフィルタを掛けて得たときのエネルギー分布であり、1.0 MHz 以下の周波数帯域(a)では欠陥画像が取得できていないことが分かる。また、(b)1.2 MHz のフィルタに対してまたはそれ以上の周波数帯域に対しては欠陥画像が現れていることから、この欠陥の共振周波数が 1.0 MHz から 1.2 MHz の間にあることが分かる。この結果は、図 3 の数値計算において求めた共振周波数によく一致し、本欠陥画像化技術が欠陥部における共振周波数を利用していることが示された。



(a) 1.0 MHz (b) 1.2 MHz (c) 1.4 MHz (d) 1.6 MHz  
図 7 様々なカットオフ周波数のローパスフィルタによる損傷画像<sup>12)</sup>

#### 5.まとめ

本報では、レーザ弾性波源走査法を用いた表層近傍にある欠陥の画像化について研究成果を報告した。特に、高繰り返しレーザパルス照射により発生する超音波を利用することで、信号レベルが向上し、表層近傍の微細な欠陥が画像化できる点について、詳細に検討した。この結果を基に、金属 3 次元積層造形体への展開を図っていきたい。

#### 謝 辞

本研究の一部は、公益財団法人天田財団の 2021 年度一般研究開発助成(AF-2021218-B3)の支援を受けて実施したものであり、ここに記して深く感謝の意を表する。

#### 参考文献

- Thompson, I. Maskery, R.K. Leach, X-ray computed tomography for additive manufacturing: A review, Meas. Sci. Technol. 27 (7) (2016) 072001
- M. Grasso, B.M. Colosimo, Process defects and in situ monitoring methods in metal powder bed fusion: A review, Meas. Sci. Technol. 28 (4) (2017) 044005
- M. Hirsch, R. Patel, W. Li, G. Guan, R.K. Leach, S.D. Sharples, A.T. Clare, Assessing the

- capability of in-situ nondestructive analysis during layer based additive manufacture, *Addit. Manuf.* 13 (2017) 135–142
- 4) T. Sol, S. Hayun, D. Noiman, E. Tiferet, O. Yeheskel, O. Tevet, Nondestructive ultrasonic evaluation of additively manufactured AlSi10Mg samples, *Addit. Manuf.* 22 (2018) 700–707
  - 5) C. Gobert, E.W. Reutzel, J. Petrich, A.R. Nassar, S. Phoha, Application of supervised machine learning for defect detection during metallic powder bed fusion additive manufacturing using high resolution imaging, *Addit. Manuf.* 21 (2018) 517–528
  - 6) R. Patel, M. Hirsch, P. Dryburgh, D. Pieris, S. Achamfu–Yeboah, R. Smith, R. Light, S. Sharples, A. Clare, M. Clark, Imaging material texture of as-deposited selective laser melted parts using spatially resolved acoustic spectroscopy, *Appl. Sci.* 8 (10) (2018) 1991
  - 7) D. Cerniglia, N. Montinaro, Defect Detection in Additively Manufactured Components: Laser Ultrasound and Laser Thermography Comparison, *Procedia Struct. Integr.* 8 (2018) 154–162
  - 8) N. Montinaro, D. Cerniglia, G. Pitarresi, Defect detection in additively manufactured titanium prosthesis by flying laser scanning thermography, *Procedia Struct. Integr.* 12 (2018) 165–172
  - 9) C. Mandache, Overview of non-destructive evaluation techniques for metal-based additive manufacturing, *Mater. Sci. Technol.* (United Kingdom) 35 (9) (2019) 1007–1015
  - 10) F. Honarvar, A. Varvani–Farahani, A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation, material characterization, and process control, *Ultrasonics* 108 (2020) 106227
  - 11) F. Simonetti, I.L. Satow, A.J. Brath, K.C. Wells, J. Porter, B. Hayes, K. Davis, Cryo-Ultrasonic NDE: Ice-Cold Ultrasonic Waves for the Detection of Damage in Complex-Shaped Engineering Components, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 65 (4) (2018) 638–64720)
  - 12) T. Hayashi, N. Mori, T. Ueno, Non-contact imaging of subsurface defects using a scanning laser source, *Ultrasonics* 119 (2022) 106560
  - 13) 林高弘, レーザ弹性波源走査法による表面直下にある微小欠陥の検出. 非破壊検査, 72, 2 (2023) 53–57
  - 14) A. K. Kromine, P. A. Fomitchov, S. Krishnaswamy and J. D. Achenbach: Mater. Eval. vol. 58, (2000) 173–177
  - 15) 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編. 72 (2006) 945–950.
  - 16) 高坪純治, レーザ超音波可視化探傷技術の開発, 非破壊検査, 62 (2013) 35–39
  - 17) T. Hayashi, Non-contact imaging of pipe thinning using elastic guided waves generated and detected by lasers, *Int. J. Press. Vessel. Pip.* 153 (2017) 26–31
  - 18) T. Hayashi, High-speed non-contact defect imaging for a plate-like structure, *NDT E Int.*, vol. 85, (2017) 53–62
  - 19) T. Hayashi, Defect imaging for plate-like structures using diffuse field, *J. Acoust. Soc. Am.* 143 (2018) EL260–EL265
  - 20) A. Maeda and T. Hayashi, Defect imaging from a remote distance by using scanning Laser source technique with acoustic microphones, *Mater. Trans.*, vol. 59, no. 2, pp. 320–323 (2017)
  - 21) S. Nakao, T. Hayashi, Adhesive bond imaging by noncontact measurements with single-sided access, *J. Nondestruct. Eval. Diagnostics Progn. Eng. Syst.* Vol. 1 (2018) 3–7
  - 22) I. Solodov, J. Bai, G. Busse, Resonant ultrasound spectroscopy of defects: Case study of flat-bottomed holes, *J. Appl. Phys.* 113 (2013) 223512