

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26282094

研究課題名(和文)大型構造物の非接触損傷画像化モニタリングシステムの開発

研究課題名(英文)Development of monitoring system for large structures by non-contact defect imaging technique

研究代表者

林 高弘(Hayashi, Takahiro)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30324479

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：レーザー弾性波源走査法を用いた薄板状材料内の損傷画像化を検討した。レーザー弾性波源走査法では、薄板表面上に弾性波励振用のレーザー光を走査し、ある固定した位置でその弾性波を受信する。本研究では、弾性波励振用のレーザー光としてファイバレーザーを用い、その高繰り返しパルス出力を外部信号により変調することで狭帯域のバースト波を励振し、周波数領域で信号レベルを改善した。また、複数の周波数による画像を平均化することで、損傷画像が鮮明になることを理論的および実験的に示した。これらの機能を有する実験システムにより、枝分かれ管のような複雑な薄板材料に対しても、6 m離れた位置から内部減肉を画像化することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：This study investigated defect imaging in plate-like structures using scanning laser source (SLS) technique, in which laser pulse for generating elastic wave is rastered over a plate and the elastic wave is detected at a fixed point on it. In this study, irradiating laser pulses at high repetition rate by fiber laser and modulating them enabled to generate narrowband burst elastic waves and improved signal level in frequency range. Moreover, it was theoretically and experimentally confirmed that averaging images at multiple frequencies provides clearer defect images. Using the experimental system with these functions, images of an inner wall-thinning were obtained for such a complex plate-like structures as a branched pipe by the measurements from 6 meters away.

研究分野：材料力学

キーワード：非破壊検査 非接触 レーザ超音波 ガイド波

### 1. 研究開始当初の背景

超音波を用いた非破壊評価技術は、材料内部を評価できる手段として広く利用されている。しかし、検査対象中に超音波を入射し、その応答信号を得るためには、超音波センサを被検査対象物に接触させるか、水などの媒体を用いる必要があり、このことが適用範囲を制限していた。その中で、レーザ超音波法は、超音波の送受信にレーザを用い非接触で材料評価ができる手法として 1980 年代より世界中で研究が進められてきた。

超音波の励振は、パルスレーザの照射による瞬間的な熱歪みやアブレーションの作用により比較的容易に行うことができる。一方で超音波の受信は、照射したレーザ光の反射・散乱光を受光する必要があるため、振動の多い屋外や工場内での計測、粗面での計測などへの適用には多くの課題があった。

そこで、研究代表者らは、超音波の励振にレーザを、受信には材料表面に固定した接触型センサを用いるというレーザ弾性波源走査法で薄板裏面の損傷の画像化に成功した。この手法では、超音波の受信にレーザを用いないため、前述の課題が解決されている。この技術は、当初、自動車部品の非破壊評価を目的として開発を進めたものであるが、遠隔からのレーザ照射により超音波励振が可能な非接触非破壊評価技術であるため、昨今、社会問題となっているプラント内配管や橋梁などの社会インフラの検査にも適用できる。

しかし現状では、レーザによって励振される超音波のエネルギーが小さく、大型の構造物内では微弱な超音波波形しか得られないという課題があった。

### 2. 研究の目的

本研究では、レーザ弾性波源走査法を配管などの大型構造物に適用できるようにすることを目的として、「(1) 大型構造物に対し画像を取得するのに十分なレベルの弾性波を発生させることのできるレーザ弾性波励振システムの開発」。その実験システムを用いた「(2) 損傷画像化実験による本手法の適用可能性の検討」の 2 項目を実施した。

### 3. 研究の方法

(1) 大型構造物に対し画像を取得するのに十分なレベルの弾性波を発生させることのできるレーザ弾性波励振システムの開発

レーザ照射により発生した弾性波を配管のような大型構造物中に数十 cm ~ 数十 m 程度伝搬させる場合、金属材料の加工に利用する出力レベルのレーザ光を使用する必要がある。一般的なレーザ超音波法では、Q-Switched Nd: YAG レーザなどを用いて、非常に大きなワンショットのレーザパルス照射し、広帯域のパルス波を発生させ、その応答波形を受信することで、材料の非破壊評価を行っている。しかし、過度なレーザ出力

は検査対象表面の損傷を引き起こすことがあり、塗膜や防錆処理がはがれることを嫌う構造物表面への適用には限界があった。そこで本研究においては、近年レーザ加工で広く使用されるようになってきたファイバレーザの出力に変調をかけることで、変調信号に対応した弾性波を発生させる技術を開発した。

(2) 損傷画像化実験による本手法の適用可能性の検討

このレーザ出力技術と、レーザ走査用のガルバノミラー、信号受信用のレーザドップラー振動計、AD 変換器、それらを制御するソフトウェアを備えた実験システムを開発し、損傷画像化の基礎実験を行った。図 1 は、そのシステムの概要図と写真である。すべての機器はパソコンで制御され、実験パラメータの変更から損傷画像の出力まで行えるようになっている。本手法では、受信位置を固定して計測するため、高速での安定した計測が可能となった。

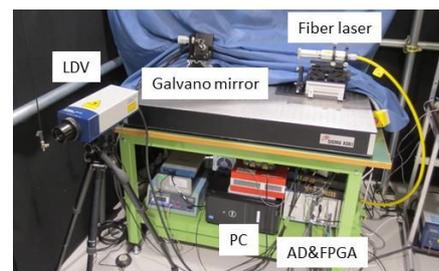
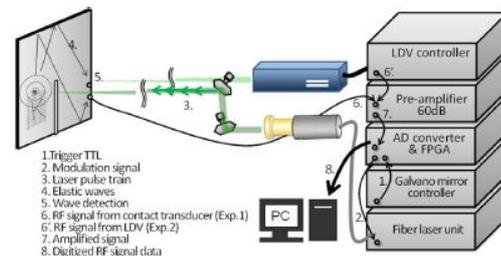


図 1 開発した実験システムの概要図と写真

### 4. 研究成果

(1) 大型構造物に対し画像を取得するのに十分なレベルの弾性波を発生させることのできるレーザ弾性波励振システムの開発

図 2 は用いた変調信号とレーザパルス出力を模式的に示した図である。変調信号により、ファイバレーザからの出力が変調されることで、レーザ光が間欠的に出力し、レーザ照射の熱弾性効果により発生する弾性波を制御した。図 3 は、500mm x 500mm x 3mm のアルミニウム合金薄板の中央にレーザ照射し、その裏面に接着した圧電素子により受信した波形とその周波数スペクトルである。変調信号は 3kHz ~ 10kHz の矩形波とした。図中の数字が変調信号の周波数であり、それぞれの波形およびスペクトルより変調信号に対応した弾性波が適切に得られていることが分かる。

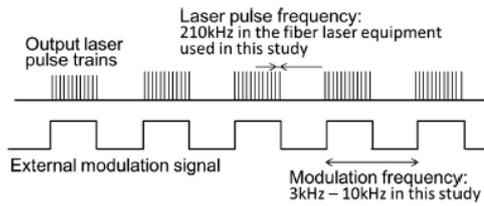
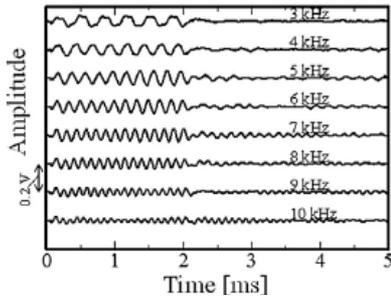
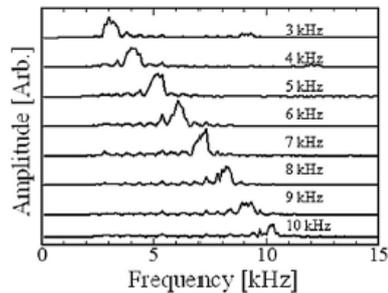


図2 用いた変調信号とレーザーパルス出力の模式図



(a) 波形



(b) 周波数スペクトル  
図3 発生した弾性波とその周波数スペクトル

(2) 損傷画像化実験による本手法の適用可能性の検討

図4に示すような500mm×500mm×3mmのアルミニウム合金試験平板を用いて損傷画像化実験を行った。平板の裏面に深さ1.5mm、幅2.0mmの溝状のKという文字の人工傷がつけられており、その表面上の100mm×100mmの領域に1mmステップでレーザー照射することで、その人工傷の画像を取得した。振動の受信位置は平板の右端の固定点である。本損傷画像化技術は、原理的に弾性波の伝搬パスに依存せず、弾性波の励振源と受信点との直線のパスが存在しなくても、損傷画像化が可能である。ここでは、そのことを示すため、試験平板中央に切れ込みを入れている。

図5は、そのときに得られた損傷画像である。(a)-(c)はそれぞれ変調信号として7kHz、9kHz、11kHzの周波数を用いたときに、各レーザー照射点に対して得られた波形の周波数スペクトルピークを濃淡でプロットした図である。いずれもKの文字が現れており、損傷画像化が可能であることが示された。しかし、Kの文字以外の部分にも、振幅が大きいことを示す濃い領域がある。これは、薄板全

体の共振を示すスプリアス像であり、本手法が、狭帯域のバースト波を用いることから出現する像である。本研究では、このスプリアス像が周波数によって全く異なるパターンを有することに注目し、様々な周波数の画像の平均をとることで、スプリアス像が低減できることを示した。図5(d)は(a)-(c)の平均をとった図である。(a)-(c)で見られたスプリアス像が大幅に低減していることが分かる。このとき、図6上に示すような単一周波数の変調信号を利用して個々に画像を取得した後に平均化すると3倍の計測時間を費やす。そこで、図6下に示しような3周波数が連結したような変調信号を用い、3つの周波数帯域での周波数スペクトルピークの分布を同時に取得して、その分布の平均を取得した。

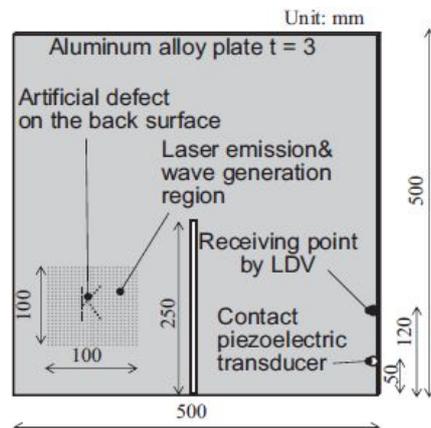


図4 用いた試験平板

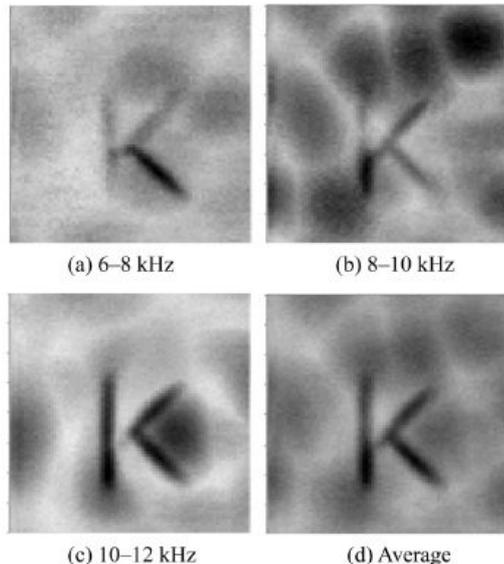


図5 様々な周波数に対する画像化結果

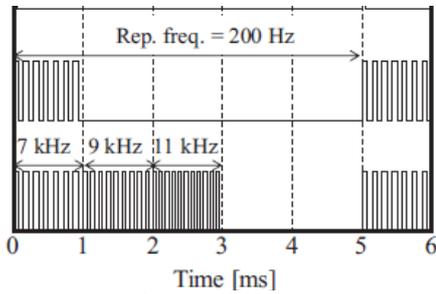


図6 単一周波数の変調信号と複数の周波数を連結した変調信号

次に、この損傷画像化を高速で行ったときの影響について検討した。損傷画像化にかかる時間は、走査点数×走査時間間隔で決定されるため、損傷画像化を高速で行うためには、走査点数を少なくするか、走査時間間隔を短くする（すなわちレーザー照射の走査スピードを上げる）必要がある。走査時間間隔を短くすることを考えると、 $(走査時間間隔) < (それぞれの周波数の変調信号の持続時間) \times (用いた変調周波数の数)$  にならなくてはならない。そのように制限した変調信号を用いて、同様の画像化を行ったところ、図7のような画像が得られた。(a)-(c)はそれぞれ繰り返しレーザー照射周波数を 600Hz, 1000Hz, 2000Hz とし、その際の計測時間は約 11 秒, 6.6 秒, 3.3 秒であった。それぞれ、3つの周波数帯域に対する画像の平均をとった図5(d)に対応している。繰り返し周波数を挙げるに従って、損傷画像は乱れていることが分かる。これは、変調信号の持続時間が短くなることによる信号レベルの低下と、前のステップでのレーザー照射による残響信号の影響によるものである。

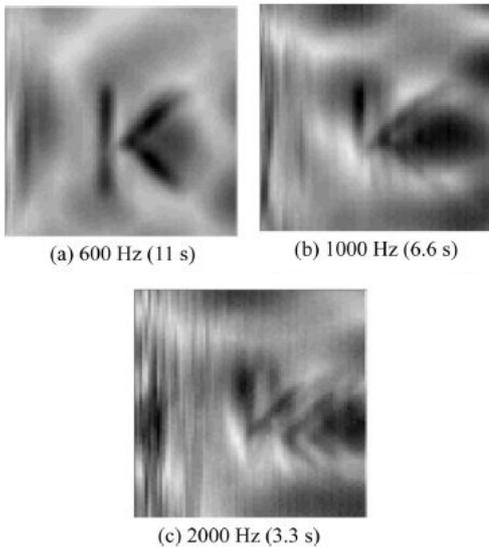


図7 画像に対する高速化の影響

最後に、複雑な形状での損傷画像化の例として、図8に示すような枝分かれ配管中の模擬損傷を画像化した例を図9に示す。(a)-(c)はそれぞれ受信位置をパイプの上端、左端、

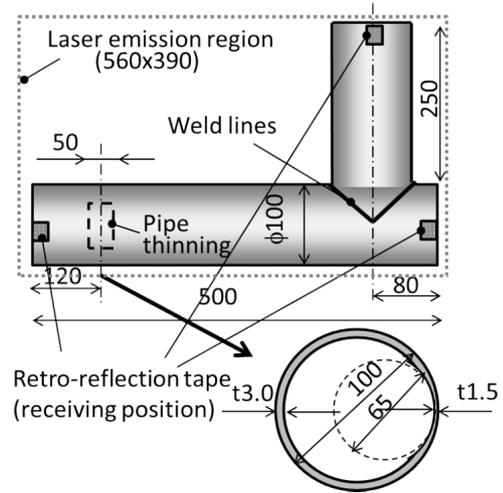


図8 使用した枝分かれ試験パイプ

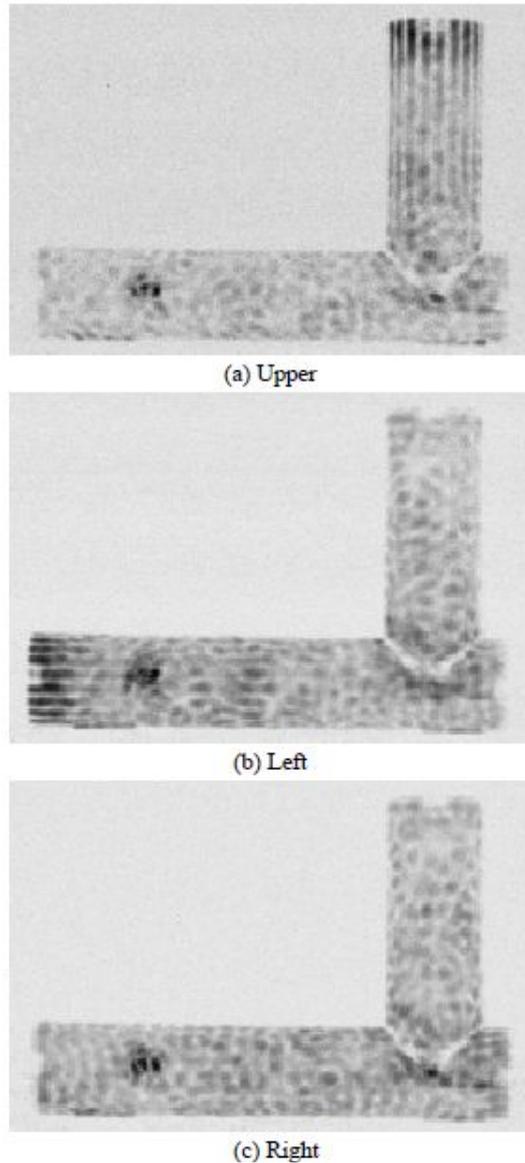


図9 枝分かれ管に対する画像化結果

右端にした場合の結果を示している。いずれも、模擬損傷位置（左下）に損傷を示す黒い領域が現れており、このような複雑な構造であっても適切に損傷画像化が可能であることが示された。特に、上端で受信した場合には、損傷位置と受信位置との間に溶接部が存在し、弾性波の伝搬が部分的に遮られているが、それでも良い結果が得られており、今後の実用化が期待できる結果といえる。

#### <引用文献>

T. Hayashi, K. Ishihara, Ultrasonics, Vol.77,2017, 47-53.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 6 件)

T. Hayashi, D. Inoue, AIP conference proceedings 1650, 査読無, 695, 2015  
DOI: 10.1063/1.4914670

T. Hayashi, D. Inoue, AIP conference proceedings 1706, 査読無, 03003, 2016  
DOI: 10.1063/1.4940475

T. Hayashi, Applied Physics Letters, 査読有, Vol. 108, 2016, 081901  
DOI: 10.1063/1.4942599

T. Hayashi, M. Fukuyama, J. Acoust. Soc. Am., 査読有, Vol.140, 2016, 2427-2436  
DOI: 10.1121/1.4964275

T. Hayashi, NDT E Int., 査読有, Vol. 85, 2017, 53-62  
DOI: 10.1016/j.ndteint.2016.10.009

T. Hayashi, K. Ishihara, Ultrasonics, 査読有, Vol.77,2017, 47-53.  
DOI: 10.1016/j.ultras.2017.01.016

[学会発表](計 12 件)

Numerical analysis of leaky Lamb wave propagation using a semi-analytical finite element method, T. Hayashi, D. Inoue, Review of progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2014

Simulation of leaky Lamb wave propagation with a semi-analytical finite element method, T. Hayashi, D. Inoue, The 35th symposium on Ultrasonic electronics, 2014

Guided wave propagation in metallic and resin plates loaded with water on single surface, T. Hayashi, D. Inoue, The 36th symposium on Ultrasonic electronics, 2015

レーザ弾性波源走査法による遠隔からの損傷画像化, 林高弘, 福山美咲, 石原剣, 平成 27 年度第 2 回超音波による非接触非破壊計測・先進評価技術研究会, 2015

半解析的有限要素法による漏えいラム波の過渡応答解析, 林高弘, 井上大輔, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 2015

Generation of narrow band elastic wave with a fiber laser and its applications to the scanning laser source technique, T. Hayashi, K. Ishihara, International conference on advanced technology in experimental mechanics, 2015

Fast non-contact defect imaging with scanning laser source technique, T. Hayashi, M. Fukuyama, K. Ishihara, 19th World conference on non-destructive testing, 2016

Remote imaging of plate-like structures with E-camera, T. Hayashi, 8th International conference on acoustic emission, 2016

薄板構造の非接触高速画像化, 林高弘, 福山美咲, 日本機械学会 2016 年度年次大会, 2016

薄板材料に対する高速遠隔損傷画像化技術, 林高弘, 平成 28 年度第 1 回 超音波による非接触材料評価研究会, 2016

薄板構造の遠隔損傷画像化, 林高弘, 日本非破壊検査協会秋季講演大会, 2016

薄板構造の非接触損傷画像化診断, 林高弘, 日本機械学会第 15 回評価・診断に関するシンポジウム, 2016

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

林高弘 (HAYASHI, Takahiro)  
京都大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 30324479