The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	変調したレーザー光照射による弾性波制御と非接触損傷画像化への適用
Author(s)	林, 高弘
Citation	光アライアンス. 2020, 31(4), p. 40-44
Version Type	AM
URL	https://hdl.handle.net/11094/84803
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

変調したレーザ光照射による弾性波制御と非接触損傷画像化への適用

大阪大学　大学院工学研究科　機械工学専攻　林高弘
hayashi@mech.eng.osaka-u.ac.jp

１．はじめに

パルスレーザを金属材料などの表面に照射すると，瞬間的に熱ひずみが生じ弾性波（超音波）が発生する．さらにレーザの出力を増大させると，表面にアブレーションが生じ金属原子やプラズマが飛散し，その反力として材料中には弾性波が発生する．このように発生する弾性波を材料の非破壊検査・評価に利用する手法はレーザ超音波法と呼ばれ，非接触での損傷検出や材料評価が可能である手段として広く利用されるようになってきた[(1), (2)]．最近では，医療分野でもフォトアコースティックスという分野が確立され，血管像や乳がん，脳，甲状腺などのイメージングへの応用研究が進んでいる．

一般に，弾性波を発生させるためには大きなパルス出力が必要であるため， Q-switch の YAG レーザや CO_2 レーザなど，主にレーザ加工分野への応用展開が進んだものを使用してきた．しかし，これらのレーザ装置はパルス出力であるため，発生する弾性波の周波数制御や波形制御が不可能であり，発生する弾性波はパルス状の広帯域波に限られていた．

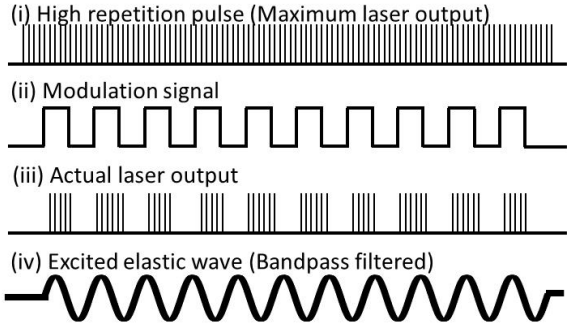
近年，広くレーザ加工の分野で利用されるようになってきたファイバレーザにおいては，レーザ出力の ON-OFF や振幅変調を外部信号によって実現できるようになってきており，加工品質の向上を図っている．これを弾性波の励振に利用すると，長い持続時間のバースト波やチャープ波といった任意の波形を作り出すことが可能となる[(3)]．本報では，変調したレーザによる弾性波制御手法について簡単に述べた後，薄板状材料に対する損傷画像化技術への応用について，著者らが行ってきた研究成果を紹介する．

２．レーザ光の変調による弾性波の制御

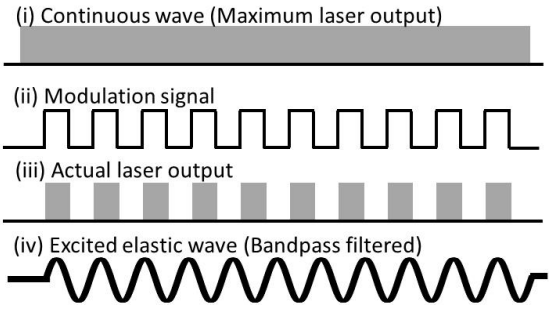
図１は，我々の研究で用いたレーザ光の変調手法である．(a)は高繰り返しパルス出力が可能な SPI 社製レーザに変調信号を与えたときの変調信号と得られる弾性波の模式図である．(i)は，変調信号がない場合のレーザ出力であり，我々の研究では主に繰り返しパルス周波数 580kHz を使用した．用いたレーザ装置の最大出力が 50 W であるので，580 kHz の繰り返し周波数の場合には，1 パルスは約 86 μJ である[(3)]．これに外部信号によって(ii)のような変調をかけると，(iii)のようなレーザの出力が得られる．この場合，レーザ照射されている時間のみレーザ照射点が熱膨張を起こし，レーザが出力されていない時間に元に戻ろうとするという繰り返しひずみが生じ，(iv)のような弾性波が発生する．実際には，ＤＣ成分や高調波成分なども含まれるが，バンドパスフィルタをかけると，概ね変調周波数に対応する周波数の波形が得られる．

弾性波を発生させるためには，必ずしも高繰り返しのレーザパルスが必要というわけでは

なく，図 1(b)のように連続波に変調をかけて弾性波を励振することも可能である．著者らは文献(4)において，Fujikura 社製連続波のファイバレーザ装置を用いて損傷画像を取得した．



(a) 高繰り返しレーザ使用の場合



(b) 連続波レーザ使用の場合

図１　レーザの出力能力，変調信号，実際の出力光および発生する弾性波の模式図

さらに高周波の弾性波制御を行う場合には，図１(a)で示した高繰り返しレーザのパルス出力の出力間隔を外部信号によって制御することで，MHz 帯域の波形を制御することも可能である．たとえば，図 1(a)の(i)では 580kHz で繰り返すレーザパルスを例に示したが，(ii)の変調信号に対応する低周波振動以外に，580kHz の高周波が発生している．そのため，(ii)の変調信号をなくし，(i)のパルス間隔を外部信号によって制御することで，高周波の発生が可能となる．

３．狭帯域バースト波による損傷画像化[(3), (4)]

変調信号を図 1(ii)のような同一の間隔の矩形波とすると，その周波数に対応する狭帯域の弾性波を発生させることができる．実際には，矩形波に近いレーザ出力があるので（図１(iii)），ON-OFF に対応する周波数だけでなく，その三次高調波なども大きく出ている．これまでの，Q-switched YAG レーザなどに比べ，1 パルス当たりのエネルギが小さいので，表面に損傷を与えずに大きなエネルギの弾性波を発生させることができるという利点もある．

図２は，用いた実験システムと試験平板の模式図である．試験平板は厚さ 3ｍｍのアルミニウム合金であり，裏に人工傷として K の文字が彫られている．レーザ照射により発生した弾性波は，ガイド波として薄板内を伝搬し，平板壁面で反射を繰り返す．このときの振動を左端の点においてレーザドップラー振動計を用いて計測した．ここでは計測システムと試験平板間の距離は 3m程度としたが，10m 程度でも同様のシステムで計測可能である．弾性波励振用のレーザ光をガルバノミラーにより走査し，多点での励振源に対する波形を処理することで，図３のような画像を得た．この画像は，得られた波形をフーリエ変換した周波数スペクトルのピーク値を強度分布にしたものである．この損傷画像化手法は，損傷がある位置にレーザを照射した場合には，発生する弾性波の強度が大きくなり，損傷のない位置では小さくなるというガイド波の性質を利用したものである．

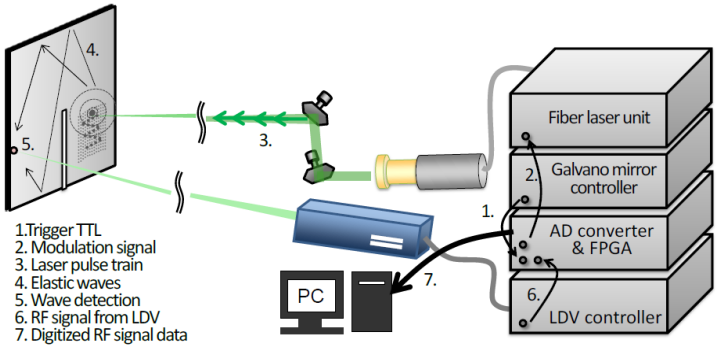
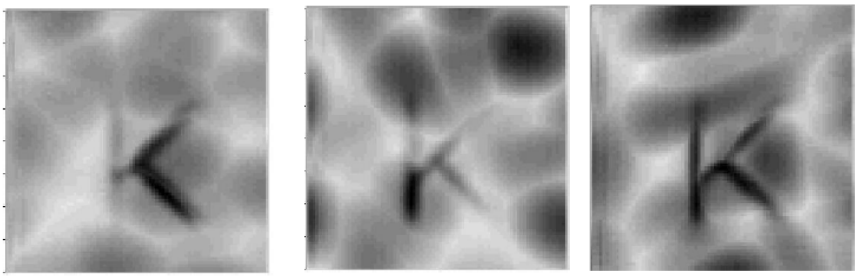


図２　用いた実験システム[(3), (4)]

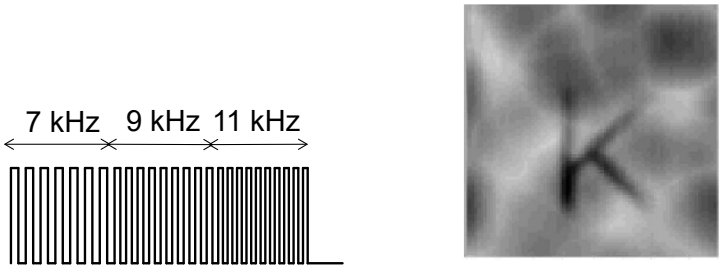
変調信号の周波数を 7kHz, 9kHz, 11kHz とした場合の画像をそれぞれ図３の(a), (b), (c)に示した．それぞれの画像は縦横方向 80mm×80mm の領域を表しており，1mm ステップでレーザ照射を行って，81×81 個の周波数スペクトルピーク値から強度分布を得た．模擬損傷 K が同じ位置に現れており，損傷画像が得られていることが分かる．一方で，損傷とは異なる模様も得られた．これは，構造内の共振による模様であり，そのパターンは周波数によって異なっている．



(a) 7 kHz　　(b) 9 kHz　　(c) 11 kHz

図３　周波数スペクトルピークの分布

そこで，図４(a)のように３つの周波数が直列に連結された変調信号を用いて，３つの周波数の波形を同時に励振した．このとき，受信波形から 3 つの周波数のスペクトルピークが得られ，それらの強度分布を得た後，平均化した図が図４(b)である．Ｋの文字は周波数によって変化しないが，共振パターンは周波数によって異なる模様となることを利用したものであり，図３の画像よりもやや鮮明な画像を取得することができた．



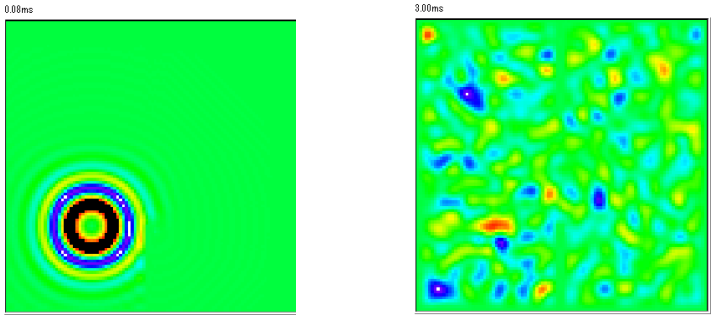
(a) 変調信号　　(b) 平均化した分布図

図４　複数の周波数変調信号を用いたときの実験結果

4. 拡散場利用による損傷画像化の鮮明化[5]

一般的な弾性波（超音波）を用いた画像化手法では，数 MHz 程度の周波数を用いて，その反射波や透過波を用いる．しかし，薄板に特化した本画像化手法では，上述のように数 kHz の周波数でも十分な分解能で損傷を画像化することができる．その反面，低周波を利用することで，壁面からの多重反射，構造内の共振が影響を及ぼし，画像を乱すことになる．

そこで，拡散した後の波動場の性質を利用して，画像を鮮明にすることを試みた[5]．図５は薄板上のある 1 点に振動を与えた場合に，加振直後に波動が広がっていく様子を表す計算結果(a)と，しばらく時間が経ち，薄板構造の壁面で多重反射を繰り返した後の波動場の様子(b)である．位相が揃って伝搬する(a)はコヒーレント場と呼ばれ，一般に超音波非破壊評価では，このコヒーレント場の波形を受信して材料を評価している．一方，(b)は拡散場と呼ばれ，多重反射の結果，概ね薄板構造全体に均一な振動エネルギ密度となっている．この拡散場のエネルギ密度は，励振源のエネルギと比例関係にあるので，ある決められた時刻の波形の振幅を比較すると，励振位置の振動エネルギを見積もることができる．励振位置を移動させて，固定した受信位置で波形計測を行った場合，その時刻の波形振幅は励振位置の振動エネルギに対応する．すなわち，振幅により強度分布を得ると，励振点に与えたエネルギが分布として得られることが分かる．本損傷画像化手法では，励振エネルギは，損傷部分で大きくなるという薄板状材料におけるガイド波の特性を利用していることから，この強度分布が損傷画像となる．

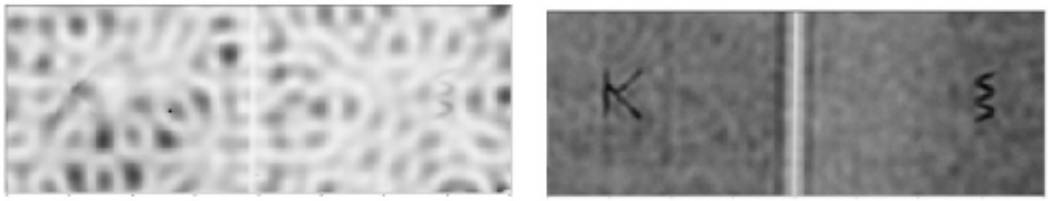


(a)コヒーレント場　　(b) 拡散場

図 5 コヒーレント場と拡散場

アコースティックエミッションの分野では，拡散場による計測技術がすでに使われており，過去の文献（6）-(10）では，拡散場が適切に形成される条件の一つとして広帯域波の利用が挙げられている．仮に狭帯域の場合には，構造内の共振が顕著となり，拡散しないためである．そこで，図 6 に変調信号として 20 kHz の狭帯域バースト波を利用した場合の画像と 10-40 kHz の周波数範囲のチャープ波を用いた場合の画像を示す．それぞれ，0-5 ms 間に変調信号を与え，20 ms-40 ms 間の収録信号の包絡線の積分値によって強度分布を作成した．用いた試験平板の裏面には，右にジグザグ模様が，左にＫという文字が彫られており，それら全体を含む領域にレーザ光を走査して画像を取得した．

狭帯域バースト波を利用した(a)では，共振模様の影響が大きいため，損傷画像がほとんど確認できないのに対し，広帯域チャープ波を利用した(b)では共振模様が大きく低減したため，損傷画像を鮮明に得ることができた．すなわち，拡散場を適切に利用したことで，レーザ照射位置の弾性波の励振エネルギの強度を適切に画像として得たといえる．



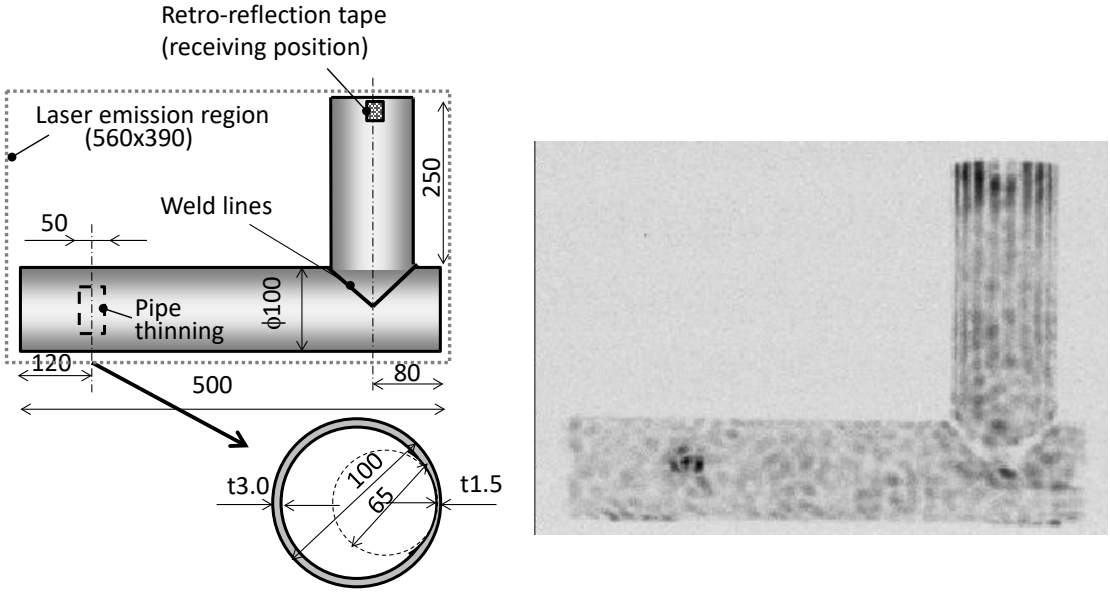
(a) 20kHz，狭帯域波利用　　(b) 10-40kHz，広帯域チャープ波利用

図 6 損傷画像[5]

前節では，3 つの周波数を使って画像を鮮明にしたのに対し，ここでは無数の周波数で画像をより鮮明にしたとも考えることができる．広帯域波は，パルス波でも実現可能であるが，一般にパルス波の場合，拡散場での信号レベルが極端に小さくなることが多く，受信波形に励振源の情報が全くなく画像が得られないという問題も起こりうる．

5. 配管内損傷の画像化の例[4]

本手法は，レーザ照射によって得られる振動エネルギのみを利用して画像を取得する．そのため，曲面であっても遠隔であっても適切にレーザが対象物表面に照射され，十分な信号レベルの波形が受信できさえすれば画像を取得することが可能である．その一例として，図 7 に枝分かれ部を有するアルミニウムパイプ内の模擬損傷の画像化結果を示す．図 7(a)が用いた枝分かれ管（直径 100mm，厚さ 3mm）の模式図であり，内面の一部を最大 50 %の肉厚に減肉した．このとき得られた画像が図 7 (b)である．枝分かれ管の最上部を LDV による受信位置とし，点線の長方形領域に 5mm 間隔で弾性波発生用のレーザ光を照射して画像を得た．左下の減肉部において，振動エネルギが大きいことを示す黒い領域があり，減肉部の画像が得られている．減肉部近傍で発生した弾性波は溶接線を超えて受信位置に到達することから，一般的な超音波検査から推測すると非常に困難な計測条件であるといえる．しかし，本手法では拡散して構造内を多重反射した振動を計測しており，このような複雑な構造であっても問題なく損傷を画像化することができた．また，パイプのような曲面であっても，レーザ光のスポット径を十分小さく取ることさえできれば，弾性波の発生は可能であり，このように損傷画像が得られることが本結果により示された．



(a) 用いた枝分かれ管　　(b) 画像化結果

図 7 枝分かれ管に対する実験[4]

6．おわりに

ファイバレーザの出力に外部信号によって変調を与えることで，薄板状材料に発生する弾性波の波形を制御した．さらに，その制御波形により，狭帯域波と広帯域波を励振させ，広帯域チャープ波を用いた場合に，鮮明な画像が得られることを示した．

事例でも示したように，この計測手法は，非接触・遠隔からの計測が可能であるだけでなく，配管や自動車鋼板のような曲面に対しても適用可能であるため，今後適用範囲の拡大が期待できる．

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, J.B. Spicer, Generation of ultrasound by repetitively Q-switching a pulsed Nd:YAG laser, Appl. Opt. 27 pp. 4696–4700, 1988

(3) T. Hayashi, 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

(4) T. Hayashi, High-speed non-contact defect imaging for a plate-like structure, NDT E Int. vol.85, pp.53–62，2017

(5) T. Hayashi, Defect imaging for plate-like structures using diffuse field, J. Acoust. Soc. Am. vol. 143, EL260-EL265, 2018

(6) D. M. Egle, A stochastic model for transient acoustic emission signals, J. Acoust. Soc. Am. vol. 65, pp. 1198–1203, 1979

(7) D. M. Egle, Diffuse wave fields in solid media, J. Acoust. Soc. Am. vol. 70, pp.476–480, 1981

(8) R. L. Weaver, On diffuse waves in solid media, J. Acoust. Soc. Am. vol. 71, pp. 1608–1609, 1982

(9) R. L. Weaver, Diffuse waves in finite plates, J. Sound Vib. vol. 94, pp. 319‑335, 1984

(10) M. J. Evans and P. Cawley, Measurement and prediction of diffuse fields in structures, J. Acoust. Soc. Am. vol. 106, pp. 3348-3361, 1999