

高繰り返しファイバレーザを用いた バースト波励起の数値実験

林 高弘

京都大学 大学院工学研究科

キーワード: レーザ超音波, 高繰り返しパルスレーザ, 連成 EFIT 法

Takahiro Hayashi

Kyoto University, Graduate school of Engineering

Key Words : laser ultrasonics, high repetition fiber laser, coupled EFIT

1. はじめに

レーザを用いて超音波を励起, 検出するレーザ超音波法は, 非接触で固体材料内部を評価できる手段として研究・開発が進められている. 一般的に, 超音波の励起には, パルスレーザが用いられ, 対象物に瞬間的な熱ひずみやアブレーションを起こすことで, パルス状の広帯域波を発生させることができる. しかし, その発生原理からパルス状の波形以外を励起することは難しく, 超音波探触子の場合のように周波数制御されたバースト波やチャープ波を利用できていない.

著者らは, 近年レーザ加工分野で利用が進んでいるファイバレーザが高繰り返しパルスにより金属加工を行うことに着目し, この高繰り返しパルスを用いて周波数制御された超音波の励起手法を提案している. 本報では, 数値計算によりその可能性を検討した研究成果¹⁾を紹介する.

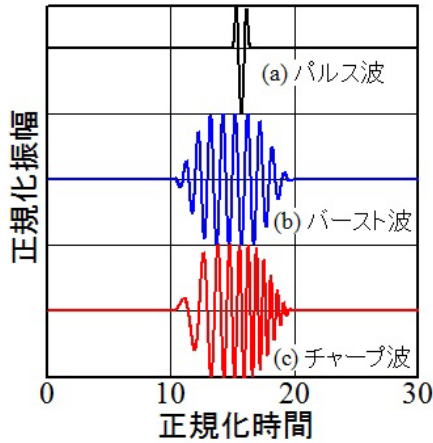
2. 超音波非破壊評価に用いられる波形

超音波を用いた材料の非破壊評価手法では, 瞬間的な電気パルスを超音波探触子に与えることにより得られるパルス波が広く利用されている (図 1 (a)). パルス波は時間・空間的に波形の占有部分が短いため, 時間・空間分解能に優れているという特長を持つ. しかしながら, このような広帯域の波形は周辺環境より拾うランダムノイズと同様の傾向を示すため, 検出されるパルス波形が小さくなると, ノイズに埋もれやすくなってしまう. その際, 信号レベルを向上させる最も簡単な方法

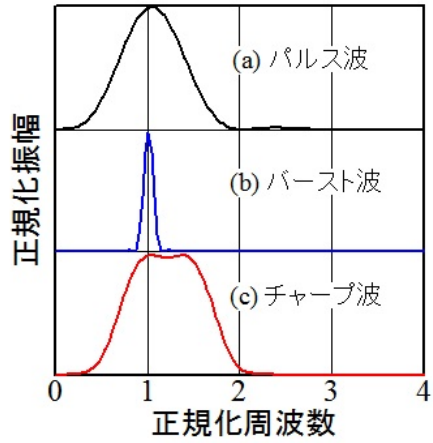
は, 超音波探触子への印加電圧を上昇させることであるが, 当然, 超音波パルスや探触子における機器的な制約がある.

そこで, 複数のパルスが連続して連なるバースト波 (図 1 (b)) が利用されることも多くなっている. バースト波は, パルス波に比べ時間・空間分解能に劣るもののランダムノイズにも埋もれにくく, 複数のパルスにより構成されるため最大電圧を抑えながら全体のエネルギーレベルを高くすることができるという特長を持つ.

さらに, この両者の特長を生かしたものに, チャープ波を用いたパルス圧縮技術がある. チャープ波は時間に応じて周波数が変化する図 1 (c) のような波形であり, 複数のパルスにより構成され, エネルギーレベルを高くすることができる上, 広帯域であるという特長を持つ. 受信されるチャープ波形のままでは, 時間・空間分解能はバースト波と変わらないが, その波形に相関処理を施すことによりパルス状の波形に圧縮することが可能である. これにより, バースト波同様のエネルギーレベルに加え, パルス波のような時間・空間分解能を維持することができる.



波形



周波数スペクトル

図1 パルス、バースト、チャープ波形の例とそれらの周波数スペクトル

3. ファイバレーザによるバースト波励起の数値実験

レーザによるバースト波励起を検討するため、熱弾性効果を連成した動弾性有限積分法 (coupled EFIT)²⁾を用い、材料中の波動伝搬および温度上昇について数値実験を行った。ここでは、板厚 0.1mm のアルミニウム平板に対し、レーザ照射による熱弾性効果によって発生するラム波 A0 モードについて検討した結果を示す。

用いた支配方程式は、均質な等方線形熱弾性体を対象として、運動方程式

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}, \quad (1)$$

デュアメル - ノイマンの関係

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial t} = \lambda \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij} + \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \beta \frac{\partial T}{\partial t} \delta_{ij} \quad (2)$$

連成熱伝導方程式

$$\rho c_v \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial h_i}{\partial x_i} - \beta T_0 \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + Q, \quad (3)$$

フーリエの法則

$$h_i = -K \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (4)$$

である。ここで、 v_i 、 σ_{ij} 、 T 、 h_i は、速度、応力、温度、熱流束を表し、計算によって得られる変数である。材料固有の定数は、 λ 、 μ がラーメ定数、 ρ が密度、 β が熱弾性定数、 c_v が比熱、 K が熱伝導率である。また、 T_0 は初期温度であり、材料中に供給する熱量 Q は文献 1) - 4)を参考に以下の形の関数を利用した。

$$Q(x, y, t) = \sum_{n=1}^N Q_n(x, y, t) \quad (5)$$

$$Q_n(x, y, t) = \frac{2q_0}{\sqrt{\pi}d_0c_0t_0} \exp\left(-\frac{t-T_n}{t_0}\right) \exp\left(-\frac{y}{c_0}\right) \exp\left(-\frac{4(x-X_n)^2}{d_0^2}\right)$$

ここで、 N はレーザ照射点数であり、 Q_n は n 回目の照射による供給熱量である。また、 T_n 、 X_n は n 回目の照射における時間遅れおよび薄板長手方向の移動距離である。 d_0 、 c_0 、 t_0 は照射レーザの幅、浸透深さ、時間減衰率を示す。パラメータ q_0 は単一のレーザ照射における単位長さあたりの全熱量を示す。このとき、 T_n 、 X_n は時間間隔 Δt と空間間隔 Δx により、以下のようにかける。

$$T_n = (n-1)\Delta t, \quad X_n = (n-1)\Delta x \quad (6)$$

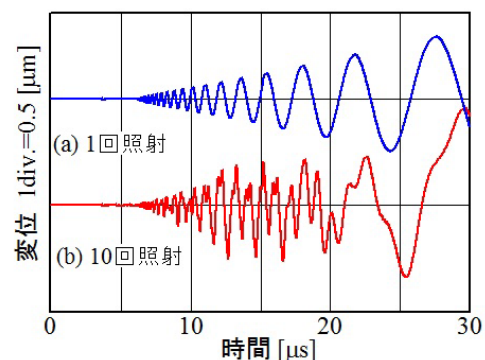
数値計算に用いたこれらのパラメータは以下の通り、表 1 にまとめた。

表 1 数値実験に利用したパラメータ

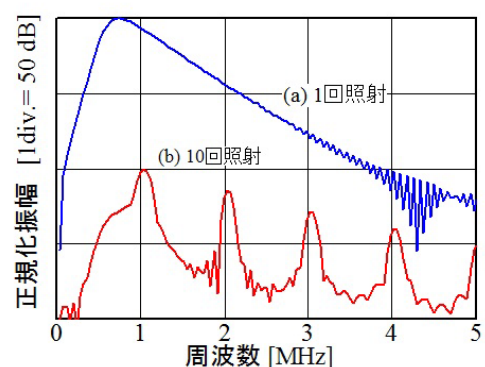
対象物の材料特性および幾何特性 (アルミニウム合)	領域サイズ	密度 ρ
	100mm x 0.1mm	2700 kg/m ³
	縦波音速 c_L	縦波音速 c_T
	6400 m/s	3200 m/s
	$\lambda + 2\mu = \rho c_L^2$, $\mu = \rho c_T^2$	
	比熱 c_v	熱弾性定数 β
	900 J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹	5.6×10^3 K ⁻¹

金板)	熱伝導率 K $160 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	基準温度 T_0 300 K
時間・空間 要素分割	時間分割 1 ns	空間分割 0.01 mm
	時間繰り返し ステップ数 10000 (10 μs まで)	空間分割数 10000 x 10
単一線音 源パラメ ータ	線音源の幅 d_0 200 μm	立ち上がり時 間 t_0 10 ns
	全入力エネルギー q_0 1.69 J/m	
照射繰り 返しパラ メータ	繰り返し周波数 ($=1/\Delta t$) 1 MHz	繰り返し時間 間隔 Δt 1 μs
	照射間隔 Δx 0 (同一点照射時) 40 μm (走査時)	

まず、照射回数 $N=1$ の場合と $N=10$, $\Delta t=1\mu\text{s}$ ($\Delta x=0$) として 1MHz のバースト波を発生させる場合の波形を比較した。図 2 はレーザ照射位置から 20mm 離れた位置における面外方向変位とその周波数スペクトルである。1 回照射の場合には、広帯域の波形が励起されており、様々な周期の波形が連続的に変化している様子が分かる。これは A0 モードの速度分散に従うものであり、高周波数ほど群速度、位相速度が速いモードが測定されていることを示している。一方、10 回のレーザパルスで 1MHz の繰り返し周波数 ($\Delta t=1\mu\text{s}$) で照射した(b)の場合には、1MHz の成分とその高調波成分により構成されていることが分かる。1 回照射時に支配的であった低周波の成分が抑制され、1MHz のバースト波が大きく現れている。ここでは、超音波探触子から発生するバースト波のように正弦波状の波形が現れるわけではないが、概ね周波数制御は可能であることが示された。



面外方向変位



周波数スペクトル

図 2 レーザ照射位置から 20mm 地点における面外方向変位とその周波数スペクトル

4. レーザ走査による温度上昇の抑制

レーザを用いた超音波の励起では、レーザ照射点がごく小さいため、発生するひずみエネルギー量が小さいという問題がある。その問題を解決する最も簡単な方法は、レーザ出力を上げることであるが、大きなレーザエネルギーの照射は、対象物表面の損傷を引き起こす。たとえば、図 3 に 1 パルス当たりの単位長さあたりの入力熱量 $q_0 = 1.69 \text{ J/m}$ とした場合のレーザ照射点の温度上昇を示す。照射回数 1 回のものについては、10 回の場合と同じ入力熱量とするため、1 回の照射に 10 倍の熱量を入力するものとした。このとき、(a) 1 回照射、(b) 10 回照射いずれも 600 K を超える温度上昇となっており、対象物であるアルミニウム合金の融点を超える可能性があることを示している。すなわち、レーザ照射によって対象材料が損傷を起こすことを意味している。

このような場合に、複数のパルスを用いたバースト波励起法では、レーザ照射点を微小距離だけ移動させながら複数のパルスを照射することにより、表面の温度上昇を抑制し、損傷を回避することが可能である。

図4は10個のレーザパルスを走査しながら照射した場合の模式図である。走査間隔 Δx は、この時発生するラム波 A0 モードの波長よりも十分小さい距離になるよう $40\text{ }\mu\text{m}$ とした。図3(c)はそのときの5番目のレーザ照射点における温度上昇を示す。温度上昇は抑制されており、表面に損傷が起こりにくくなっていることが分かる。

図5は、走査をしない場合と、走査した場合に第1照射点から20mm離れた位置(図4において右側)における波形とその周波数スペクトルの比較である。走査をしているものの、超音波伝搬に対しては微小距離であるため、波形にはほとんど影響を及ぼしていないことが分かる。ただし、周波数スペクトルとみると、走査した場合にはわずかに高周波側にシフトしている。これは、受信位置方向に走査したことによるドップラーシフトを示したものである。

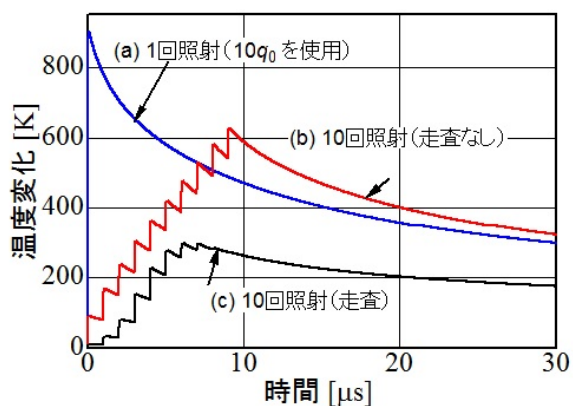


図3 レーザ照射による照射点の温度変化

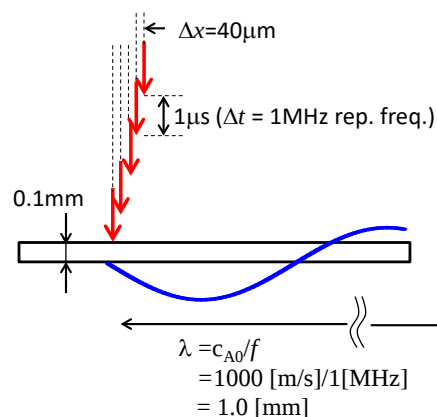
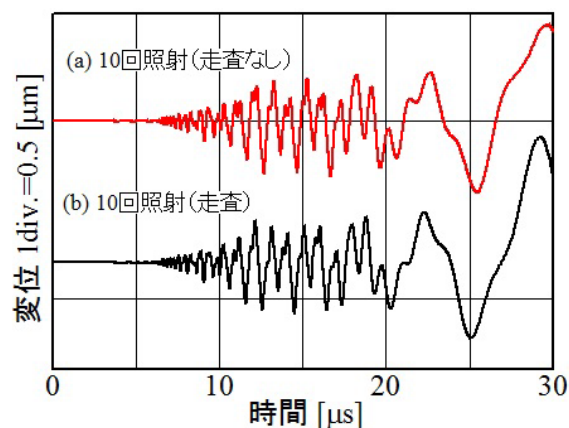
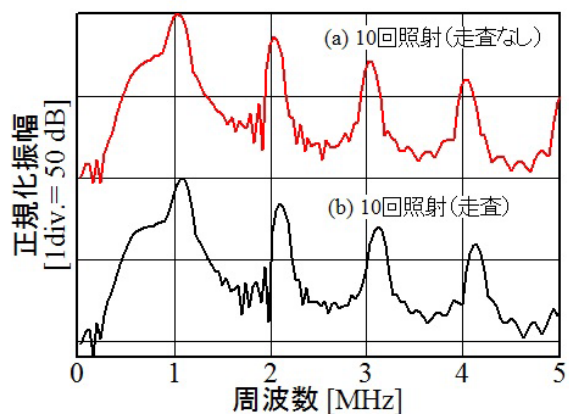


図4 レーザ走査間隔と波長の関係を示す模式図



波形



周波数スペクトル

図5 走査の有無による波形および周波数スペクトルの違い

4. おわりに

本報では、高繰り返しでのレーザパルス照射が可能なファイバレーザを超音波の発生に利用することを想定し、レーザ照射によるバースト波の発生に関する数値実験の結果を示した。

高調波の重畳が大きいものの、狭帯域の周波数スペクトルが得られ、概ね周波数制御が可能であると言える。また、高繰り返しパルスレーザ照射と走査を組み合わせることで、対象物表面の温度上昇を抑制することができることを示した。

ここでは例として1MHzという周波数を取り上げたが、さらに低周波数帯域を利用する場合には、出力されるレーザパルスに変調を掛けることにより低周波数帯域で周波数制御された波形が再現でき、今後、実験および数値計算により検証を行っていく予定である。

最後に本研究は、京都大学大学院工学研究科琵琶志朗教授、山口耕作氏の協力により行われたものであり、ここに記して謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) T. Hayashi, K. Yamaguchi and S. Biwa, J. of Physics, Conference series (2014) **520** 012024
- 2) K. Yamaguchi, S. Biwa and T. Hayashi (2013) *Proc. of ICU 2013* 518 - 9
- 3) I. Arias and J. D. Achenbach, Int. J. Solids Struct. (2003) **40** 6917 - 35
- 4) H. Sun and S. Zhang S J. Appl. Phys (2010). **108** 123101