

平成 27 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2014

課題番号：26630339

研究課題名(和文) 材料の初期損傷と閉じたき裂の計測評価を遠隔から行える非線形レーザー超音波法

研究課題名(英文) Nonlinear laser ultrasonic testing for remote testing of initial material damage and closed cracks

研究代表者

山中 一司 (YAMANAKA, Kazushi)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00292227

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：材料・構造物の安全と安心のため、閉じたき裂を評価できる非線形超音波法が期待されているが、レーザー超音波法による遠隔からの非線形超音波法は実現していない。そこで、一定出力のレーザーパルスを繰り返し照射して、被験体上の複数点で受信したレーザー干渉計波形のフィルタ出力を用いて、シフト加算を行って映像を形成し、異なるレーザーエネルギーの映像の差分を取る非線形レーザー超音波法を開発した。研究代表者らの減衰2重節点モデルを用いて、実験のパラメータを用いるシミュレーションを行って、10MPaの閉口応力で閉じた縦き裂を近接して配置されたボイドから識別して検出できることを示し、開発法の有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)：For the safety of materials and structures, nonlinear ultrasound testing are highly demanded that enables evaluation of closed cracks. Though laser ultrasound (LU) using pulsed laser generation of ultrasound enabling remote testing is useful, nonlinear testing by LU has not been realized.

Therefore, we developed a novel nonlinear LU method in this study where a laser pulse of finite energy is irradiated on the tested object, and image is formed by shift and summation of waveforms detected at different positions. Then we obtain difference of image intensities formed for different laser energy, and evaluate nonlinear response at closed cracks. Then we verified the developed method by performing a damped double node (DDN) model simulation using parameters used in a real LU in-process testing equipment, where a closed crack with 10 MPa closure stress was located near a void. It was shown that the effect of void can be successfully suppressed by the developed method.

研究分野：超音波

キーワード：超音波 レーザ 表面波 非線形

### 1. 研究開始当初の背景

材料・構造物の安全と安心のため、閉じたき裂（閉口き裂）を評価できる非線形超音波法が期待されている[例えば 1]。一方、遠隔からの非破壊検査にはパルスレーザで発生した超音波を用いるレーザ超音波法が有用である[2]。しかし、レーザ超音波による非線形超音波は実現していない。しかし、閉口き裂の遠隔からのプロセス中の非破壊検査の必要性は高く、この技術開発が強く望まれている。

一方、レーザを照射することで発生する衝撃波の引張応力を利用して薄膜の剥離応力を評価するレーザスポレーション法[3]も開発されており、レーザにより閉口き裂を開口させて非線形超音波により検出できる可能性もある。にもかかわらず、ボイドなどの閉口き裂以外の欠陥からの散乱波[2]が閉口き裂からの散乱波に重なって、もともと微弱な後者を検出困難にするという問題があった。

### 2. 研究の目的

非線形超音波におけるこれまでの蓄積[1]を活かして、閉口き裂の非線形散乱波をボイドなどの散乱波の妨害を克服して、検出する方法を考案することにより、閉口き裂の遠隔からのプロセス中の非破壊検査を可能にする非線形レーザ超音波法を定式化して、実証することを目的とする。

### 3. 研究の方法

ボイドなどの線形散乱波は入射波の振幅に比例するが、閉口き裂の非線形散乱波は入射波の振幅が一定の閾値を越えた場合に初めて発生する。そこでこの特性に着目して線形散乱による妨害を克服するため、異なるレーザエネルギーの入射に対する応答の差分を取ることを特徴とする新しい非線形レーザ超音波法を定式化し、シミュレーションと実験により得られる情報を総合して、その可能性を検証する。

### 4. 研究成果

#### (1)振幅差分法の定式化

最初に定式化を行った。すなわち、一定エネルギーのレーザパルスを繰り返し照射して、被験体上の複数点で受信したレーザ干渉計波形のフィルタ出力を用いて、シフト加算を行って映像を形成する。次に送信レーザのパルスエネルギーを  $a$  倍した場合の映像から元の映像の  $a$  倍を引くことで、線形応答の映像を消去し、き裂の開閉振動による非線形超音波映像を作成する。

振幅差分法の原理を図 1 に示す。例えば、本モデルで得られる小振幅像(a)は、ボイドからの応答  $r_D$ 、底面からの応答  $r_B$  が得られ、

き裂からの応答  $r_C$  は得られない。一方、大振幅像(b)ではき裂の開閉挙動が起こるため  $r_D$ 、 $r_B$  および  $r_C$  が得られる。このとき、 $r_D$  と  $r_B$  は線形応答であるから、小振幅像と大振幅像の振幅比を  $a$  とした場合、その強度は

$$(b) = a \times (a) \quad (1)$$

で与えられる。一方、 $r_C$  の応答強度は入射波振幅と非線形な関係となるため、その式は成り立たない。そこで、

$$(c) = (b) - a \times (a) \quad (2)$$

で得られる(c)を差分像とする。この結果、差分像(c)においては線形関係にある  $r_D$  および  $r_B$  は消失し、 $r_C$  のみが得られる。ここで差分像を得る際には差分で得られた正の成分のみを表示することで、選択性の高いき裂応答が得られることが知られているため、本研究でもその手法を用いた。

これらの結果より、振幅差分法を用いることで閉じたき裂の検出およびボイドとの識別が可能である。

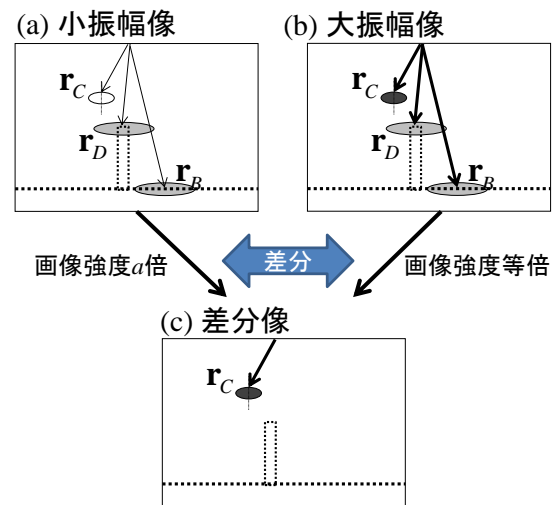


図 1 振幅差分法の原理

#### (2)振幅差分法のシミュレーション

次に、研究代表者らが提案した減衰 2 重節点モデル[4]を用いて、10 MPa の閉口応力で閉じた縦き裂とボイドを近接して配置して、シミュレーションを行った。

シミュレーション条件を Table 1 に示す。

ここで、 $v_L$  は材料中の縦波音速、 $\Delta x$  は  $x$  軸方向の節点間隔、 $\Delta z$  は  $z$  軸方向の節点間隔、 $\Delta t$  は時間刻み、 $C_{44}/C_{11}$  は材料のポアソン比、 $\rho_0$  は材料の密度、 $f_i$  は入射波周波数、 $a$  は入射波振幅である。この時、音速

や密度は CrMoV 鋼の物性に準拠し、縦波音速は文献[2]の実験に合わせて 300°C 以上で測定した値を用いた。また、入射波は 1 サイクルとし、振幅はレーザを用いて大振幅超音波を励起させるレーザスポレーション[3]の報告を参考として、音源から超音波が 1 mm 伝搬した時の変位振幅がピーク-ピークで 100 nm となる値を用いた。

レーザのパルス当たりのエネルギーはレーザスポレーションの文献[3]では 50 mJ だったが、100 mJ を用いるシステムでボイド検出が推定以上の S/N で可能であった[2]ため、このエネルギーではき裂を開口させることが可能と判断できる。

この条件をシミュレーションモデル座標に変換した概念図を図 2 に示す。ここで図中の数値は当該オブジェクトの  $x$  座標範囲とし、節点として表している。 $z$  座標の節点数は図中左に示した。なお、 $x$  軸は開先中心を原点としているため、 $x$  軸節点の値も原点からの点数として表記した。音源は、送信レーザ照射スポット径と同範囲とし、開先はモデル上部から下部へ向かって伸びるスリット（上部スリット）の最下面に配置した。受信素子は  $x$  軸正方向の母材表面とした。欠陥であるボイドは下端部から上部へ向かって伸びる下部スリットで模擬し、1.6 mm の幅をもたせた。これらの条件を用いて、シミュレーションを行った。

Table 1 シミュレーション条件

項目	数値
縦波音速 $V_L$	5800 m/s
計算範囲	1500×1500
節点間隔 $\Delta x$ $\Delta z$	100 $\mu$ m
計算時間刻み $\Delta t$	10 ns
ポアソン比 $C_{44}/C_{11}$	0.3
密度 $\rho_0$	$7.78 \times 10^3$ kg/m <sup>3</sup>
入射波周波数 $f_i$	2 MHz
サイクル数	1 サイクル (Gaussian Window)
入射波振幅 $a$	100 nm

閉じたき裂を導入した溶接試験片のレーザ超音波検査のシミュレーションモデルを図 2 に示す。溶接が残り深さ 30 mm まで進展したとして、先端部の深さ 50 mm、母材と溶接部の境界面に 2 溶接層分（深さ 5 mm）の割れ、深さ 55 mm にボイドが存在する場合を想定した。破線で囲まれた範囲は、開口合成法で映像化する範囲で 40 mm 存在する場合の 0.2 mm ピッチとした。き裂閉口応力は 10 MPa を想定した。き裂が閉じている場合、小振幅の超音波に対してはき裂面が密着して連続面のように振る舞うため、応答が得られない。一方、き裂の閉口応力を上回る大振幅超音波をき裂面に入射

すると、き裂が開閉挙動を起こし、応答が得られる非線形現象が発生することが知られている。本解析では、入射は振幅を 50 nm、100 nm の 2 通りの設定とした。

### (3)シミュレーション結果

シミュレーション結果のスナップショットを、図 3 に示す。これは大振幅である入射波振幅 100 nm の時の結果である。小振幅時はき裂において何の応答も得られず、ボイドでのみ散乱されていたのに対し、大振幅時はボイドでのみ散乱と同時に、き裂においても超音波が散乱されている様子が観察された。

散乱波はこの後上方に伝搬して、受信レーザにより多数の位置で計測された。

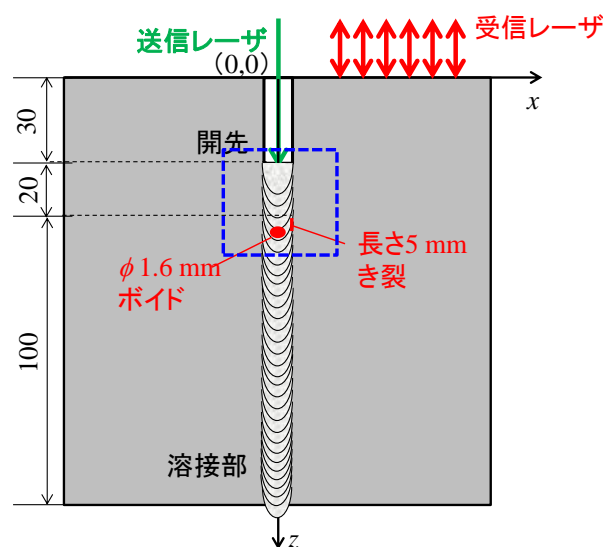


図 2 閉じたき裂を導入した溶接試験片

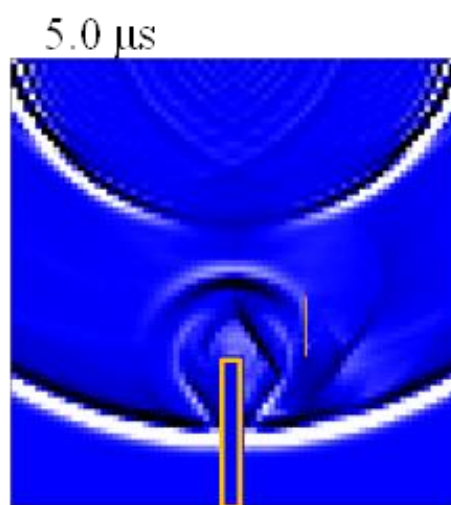


図 3 スナップショット

ここで受信レーザにより得られた波形を用いて開口合成法のアルゴリズムを用いて

映像化した結果を図4に示す。(a)は入射波振幅 50 nm 時の小振幅像、(b)は入射波振幅 100 nm 時の大振幅像である。映像化には線形成分を用いるため、1.5 MHz~2.5 MHz のバンドパス周波数フィルタを通した波形を用いた。小振幅像では、ボイドと底面以外の応答が得られなかったが、大振幅像においては、き裂の先端部分に相当する深さに指示が得られた。

しかし、き裂の映像の強度はボイドの強度より顕著に小さく、き裂とボイドの識別は困難である。またき裂の映像を確認するためには映像表示のゲインを大きくせざるを得ず、ノイズが観察された。従って、この映像だけでは、き裂の深さの過小評価や見逃しの危険がある。そこで、先に定式化した振幅差分法のアルゴリズムに従って、差分像を計算して求めた。

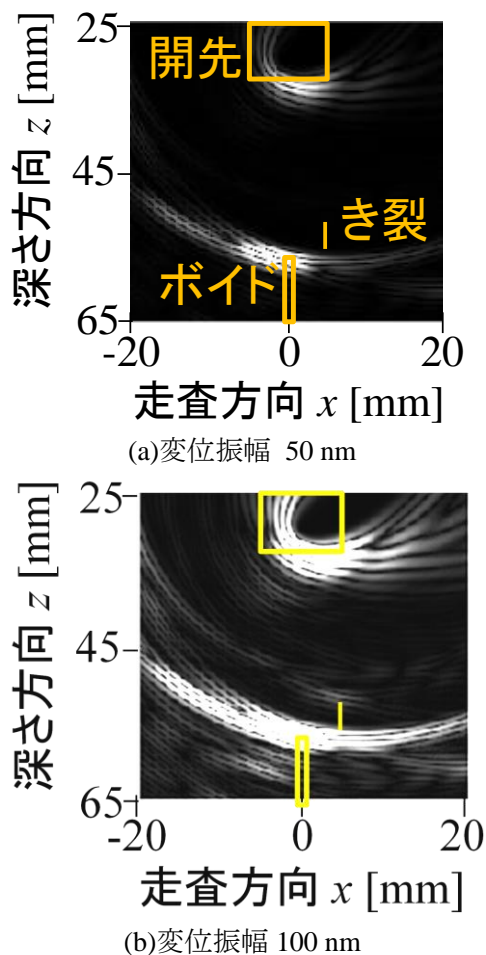


図4 閉じたき裂の映像化結果

得られた差分像を図5に示す。映像化結果からも強度信号からもき裂先端部に相当する深さ 50 mm の位置に明瞭なエコーが得られた。さらに深い位置に現れたエコーは、き裂終端部のエコーと推定される。

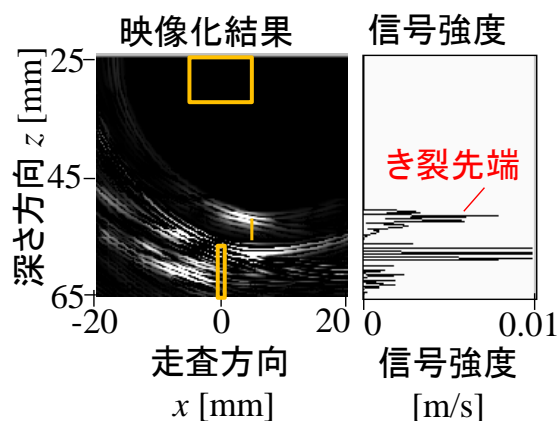


図5 振幅差分法の映像化結果

この結果より、振幅差分法を用いることで閉じたき裂の検出およびボイドとの識別が可能であることがわかった。

以上により、音源から 1 mm 伝搬した時の変位振幅が 100 nm と設定した結果、振幅差分法によりき裂をボイドの映像と独立に映像化できた。

(4) シミュレーションと実験結果[2]に基づく非線形レーザー超音波の実現可能性の判定

送信レーザーのパルスエネルギーが 100 mJ のレーザー超音波装置を用いて、シミュレーションと同じプロセスで推定した通りの信号対雑音比で、ボイドの映像化を行うことができています[2]。一方、パルスエネルギーが 50 mJ 以上あれば、100 MPa 程度の応力が必要な薄膜の剥離が可能である[3]。従って本装置のパルスエネルギーはこの2倍あるため、シミュレーションと同様にき裂を開口して映像化できると判定される。

以上の理論解析及び実験の情報に基づき、材料の初期損傷と閉じたき裂の計測評価を遠隔から行える非線形レーザー超音波法の可能性が検証でき、本研究の目的が達成された。

参考文献

[1] 山中ら;非破壊検査 56(2007) 280.  
 [2] Setsu Yamamoto 他; Defect Detection in Thick Weld Structure Using Welding In-Process Laser Ultrasonic Testing System, Materials Transactions, 55(7), (2014) pp.998-1002.  
 [3] 荒井等;計算数理工学論文集、9(2009) No. 05-091211.]  
 [4] 山中ら : Applied Physics Express, 4, (2011),076601

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 8 件)

- ① Koji Takahashi, Kentaro Jinno, Yoshikazu Ohara, Kazushi Yamanaka, Evaluation of Crack Closure Stress by Analyses of Ultrasonic Phased Array Images during the Global Heating and Local Cooling, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 53,2014,07KC20-1-7. DOI: 10.7567/JJAP.53.07KC20.
- ② Kentaro Jinno, Azusa Sugawara, Yoshikazu Ohara, Kazushi Yamanaka, Analysis on Nonlinear Ultrasonic Images of Vertical Closed Cracks by Damped Double Node Model, Materials Transactions, 査読有,55-7,2014, pp1017-1023. DOI: 10.2320/matertrans.I-M2014812.
- ③ Yoshikazu Ohara, Koji Takahashi, Kentaro Jinno, Kazushi Yamanaka, High-Selectivity Ultrasonic Imaging of Closed Cracks Using Global Preheating and Local Cooling, Materials Transactions, 査読有, 55-7,2014, pp1003-1010. DOI: 10.2320/matertrans.I-M2014810

[学会発表] (計 4 件)

- ① Azusa Sugawara, Kentaro Jinno, Yoshikazu Ohara, Kazushi Yamanaka, Closed-Crack Imaging and Scattering Behavior Analysis Using Confocal Subharmonic Phased Array, The 35th Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2014), 2014 年 12 月 3 日, 明治大学 (東京都)
- ② Yoshikazu Ohara, Koji Takahashi, Kentaro Jinno, Kazushi Yamanaka, Estimation of Crack Closure Stress from Ultrasonic Phased Array Images during Global Preheating and Local Cooling (GPLC), 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT), 2014 年 10 月 6 日, Prague Congress Center (チェコ共和国)
- ③ Akihiro Ohuchi, Hiroshi Yorifuji, Kentaro Jinno, Azusa Sugawara, Yoshikazu Ohara, Kazushi Yamanaka, Development of Subharmonic Phased Array Using Surface Acoustic Wave for Measurement of Closed Crack Length, 41st Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation (QNDE), 2014 年 7 月 20 日~25 日, Boise Center(アメリカ合衆国)

[その他]  
ホームページ等  
山中研究室ホームページ 研究成果  
[http://www.material.tohoku.ac.jp/~hyoka/database\\_year\\_j.html](http://www.material.tohoku.ac.jp/~hyoka/database_year_j.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山中 一司 (YAMANAKA, Kazushi)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：00292227

### (2) 研究分担者

小原 良和 (OHARA, Yoshikazu)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：90520875