

解説

LU2013 I －先進超音波計測－

レーザ超音波可視化技術の開発と欠陥検出への応用
－レーザ超音波スコープによる微細欠陥の検出－

高坪 純治 王 波 劉 小軍
鈴木 修一 王 曉東 つくばテクノロジー（株）

一般社団法人 日本非破壊検査協会

レーザ超音波可視化技術の開発と欠陥検出への応用 -レーザ超音波スコープによる微細欠陥の検出-

つくばテクノロジー(株) 高坪 純治 王 波 劉 小軍
鈴木 修一 王 晓東

Development of a Laser Ultrasonic Visualization Technology and Its Application to Nondestructive Inspection of Defects

Tsukuba Technology Co., Ltd. Junji TAKATSUBO, Bo WANG, Xiaojun LIU
Shuichi SUZUKI and Xiao-Dong WANG

キーワード 非破壊検査、超音波探傷、レーザ、可視化、欠陥、非接触

1. はじめに

電子部品や自動車部品に内在する欠陥形状の許容大きさが年々微小化の傾向を示しているが、従来の非破壊検査装置では小型部品に内在する微細な欠陥をその場で効率的に検査することは容易でなく、部品の信頼性保証、品質向上を図る上で大きな課題となっている。また、パルスエコー超音波探傷法に代表される現行の検査法は次のような課題を抱えている。

- 1) 曲面部や段差部、狭い部、溶接部など、複雑形状部の検査が難しい。
- 2) 検査に時間がかかる。
- 3) 測定された信号波形や静止画像から欠陥を判定するのに専門性を要する。

我々は、経済産業省の支援を受けながら、上記課題を解決するためのレーザ超音波可視化検査技術の開発に取り組んでいる。レーザ超音波可視化技術は、検査体表面をレーザ走査して超音

波伝搬映像を計測する技術¹⁾⁻⁴⁾であり、レーザスポット径サブmm、パルス幅数nsのパルスレーザを使用することで、超音波受信の時空間分解能を上げることができるので、欠陥検出分解能を向上させることができる。また、ガルバノミラを利用した高速走査が可能であることから、複雑形状物体の検査を迅速に行うことができる。さらに、その場で超音波の動画映像を観察できるので、検査を専門としない人でも欠陥を容易に検出できる。本稿では、当該技術の原理、優位性、応用例について報告する。

2. 可視化装置の構成

微細欠陥検出用超音波可視化検査装置（ここではレーザ超音波スコープと呼ぶ）の構成を図1に示す。パルスレーザ①を検査体表面に照射すると、時間的に急峻な熱ひずみの発生により、非常に微弱であるが超音波が励起される。パソコン

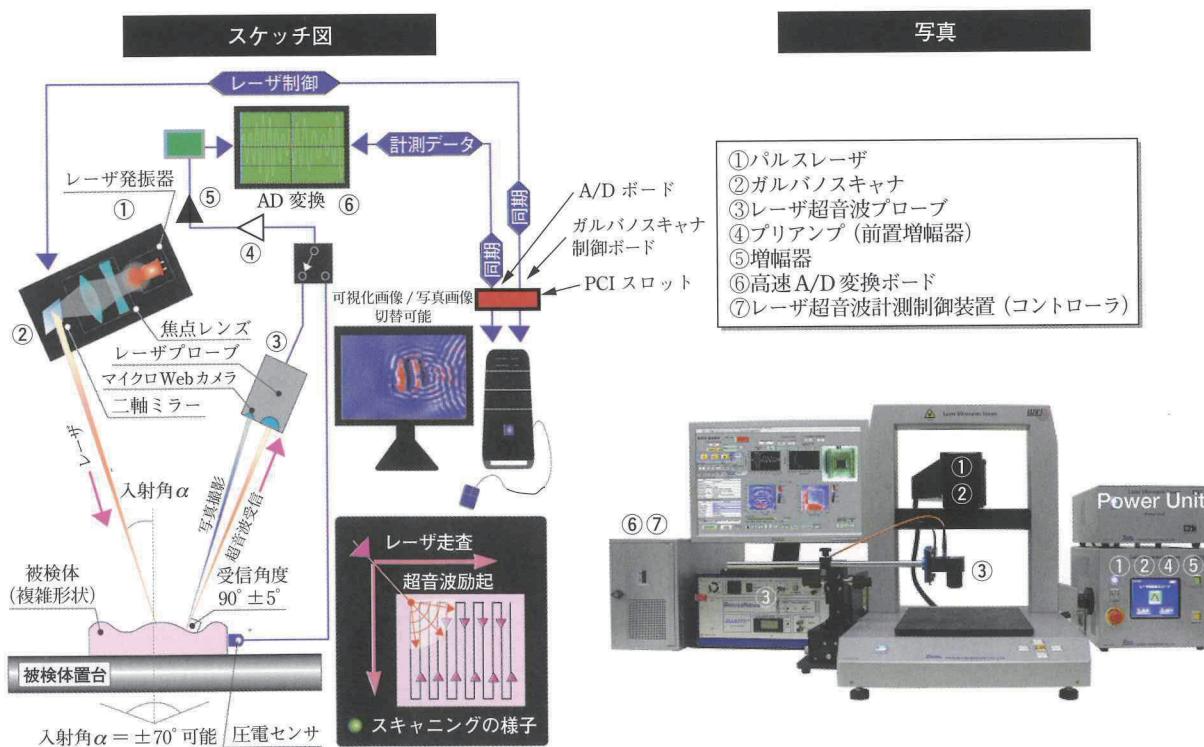


図1 レーザ超音波スコープの構成図

⑦でレーザ発振器①とガルバノスキャナ②および高速A/D変換ボード⑥を同期制御し、レーザビームを検査体表面上で格子状に高速走査させながら、固定点に取り付けた圧電センサ、または、レーザ超音波プローブ③で超音波伝搬波形を検出し、プリアンプ④、増幅器⑤、高速A/D変換器⑥を通して、パソコン⑦のハードディスクに収録する。収録した超音波信号は、レーザ励起点から受信センサに向かう複数の波であるが、超音波伝搬の相反性を利用して再構成することにより、受信センサ位置から発振される超音波の動画映像を計測することができる。この可視化方法は、励起側のレーザを走査しているので、レーザの照射角度や焦点距離を一定に保持する必要がなく、ガルバノスキャナによる高速回転走査を利用すれば三次元任意形状物体を伝わる超音波の伝搬映像を短時間で計測できる。

レーザ装置の主な仕様は下記の通りである。

- ・波長：1064 nm (YAG)
- ・パルス幅：2ns
- ・レーザ出力：最大 2mJ
- ・レーザ走査速度（角度指令応答）：最大 2kHz
- ・走査視野角：2軸 60°

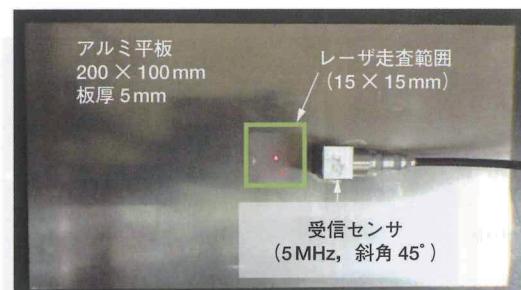
非常に高感度な増幅系を組んでいるので、上記のような小出力レーザでS/Nの良い超音波が受信でき、CFRP（炭素繊維強化プラスチック）のように熱に弱い試験体でも表面を傷つけることなく超音波伝搬映像を計測することができる。検査体の内部や裏面に欠陥が存在すれば、検査体表面に、池に石を投げ入れたときに生ずるような波紋が現れるので、検査に熟練していない人でも欠陥を容易に検出できる。

3. 微細欠陥検出性能

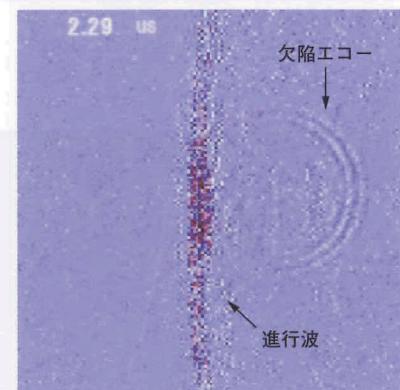
超音波探傷試験による傷の検出限界寸法は、通常、使用する超音波の波長程度⁵⁾と言われている。もし、それが正しければ100μmの欠陥を検出するには100μmの波長の超音波が必要になり、音速3000m/sの表面波では、周波数30MHzの超音波が必要になる。しかし、レーザ超音波スコープでは5MHzの受信センサを使用して100μmサイズの欠陥エコーを可視化できている。欠陥検出限界寸法は波長だけで決まるのではなく、計測系の背景雑音の量や、超音波送受信点の面積などにも依存する。当該装置で欠陥検出性能が向上したのは、高感度・低雑音の電気計測系を構築したことや、レーザによる超音波の点励起によって空間分解能が向上したためだと考えられる。

図2に100μmサイズの欠陥エコーの可視化例を示す。板厚5mmのアルミ平板の裏面中央に放電加工により一辺が100μmの立方状欠陥を導入し、試験片表面をレーザ走査して欠陥エコーを可視化した。使用した受信センサは周波数5MHzの斜角45°超音波探触子である。可視化画像は同期差分処理⁶⁾により進行波を消去した画像になっている。板厚5mmの裏面欠陥に対しては、現状では、100μmオーダの欠陥検出が限界である。

板厚が薄ければ、さらに微細な欠陥を検出できる。図3は、板厚0.2mmの炭素鋼(S45C)の裏面に直径20μm、深さ100μmの円柱状欠陥を導出して、欠陥エコーを可視化した例である。この欠陥エコーは5MHzの超音波探触子では検出できなかったが、公称周波数15MHzの斜角90°探触子と7.5MHzのハイパスフィルタを使用し、かつ、同一点を5回ずつレーザ照射して平均化計測することによって可視化できた。そのときの代表的な受信波形とその周波数パワースペクトルを図4に示

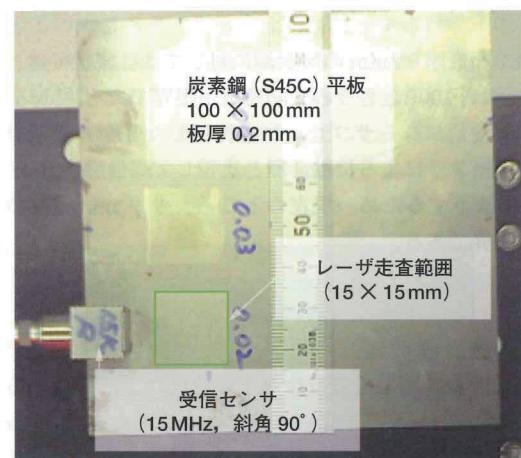


(a) 試験片

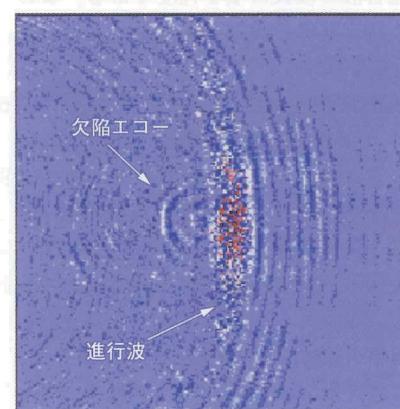


(b) 超音波伝搬画像

図2 100μm サイズの欠陥エコーの可視化例
(寸法100μmの立方状裏面欠陥)



(a) 試験片



(b) 超音波伝搬画像

図3 直径20μm、深さ100μmの裏面欠陥エコーの可視化例

解説

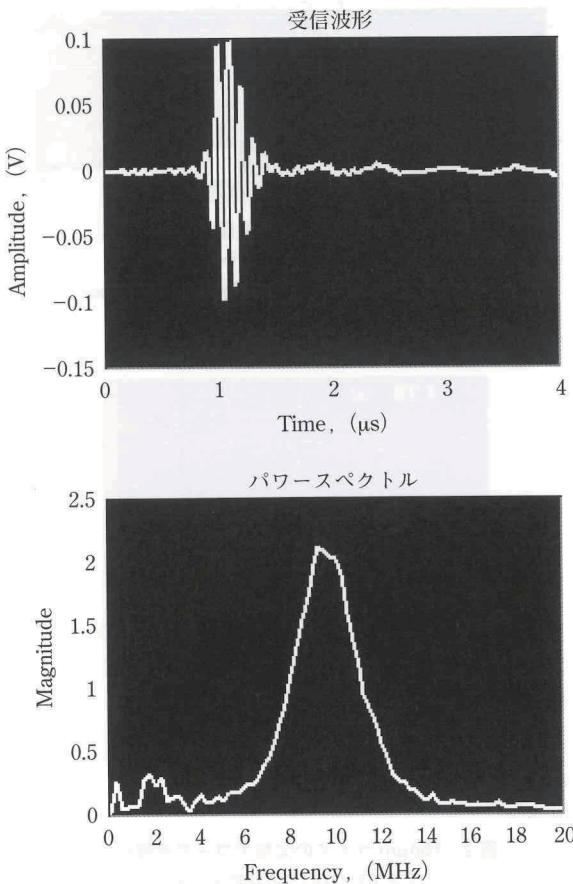


図4 代表的な受信波形とその周波数パワースペクトル

しておく。板厚0.2mmの炭素鋼に対しては、現状では、直径20μm、深さ100μm程度の欠陥検出が限界である。

なお、受信にレーザプローブを利用した完全非接触計測では、圧電センサによる接触計測と比較して受信感度が1/10～1/100に低下するため、現在のところ、サブmm程度の欠陥検出が限界である。

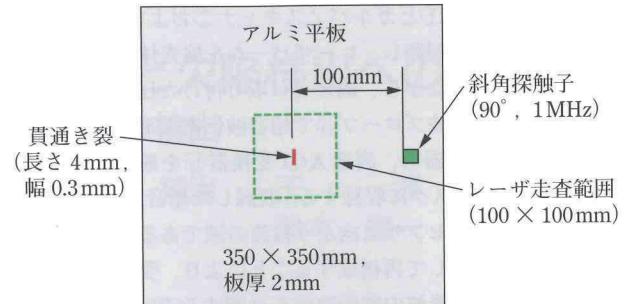
4. 高速計測性能

可視化計測時間は走査点数と走査速度によって決まる。走査点数は、計測面積と走査ピッチによって決まるが、走査ピッチを粗くすると測定映像も粗くなる。最適な走査ピッチ（できるだけ短時間の走査で鮮明な画像が得られるピッチ）は、可視化する超音波の波長の1/2程度である。なお、計測時間の短縮よりも測定映像の繊細さを優先する場合は、さらに小さな走査ピッチを採用すればよい。

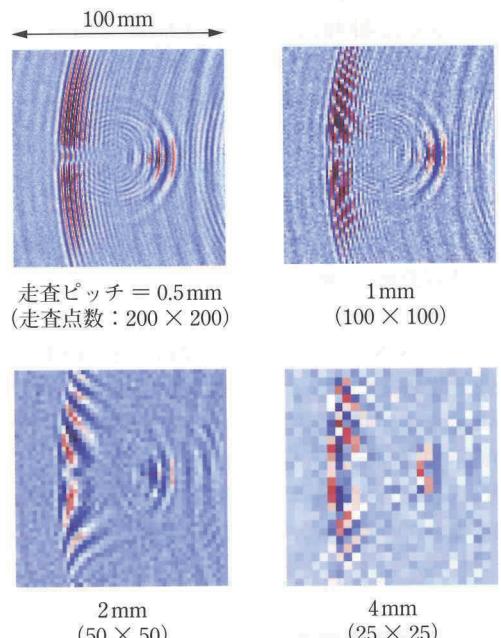
走査ピッチと測定映像の関係を調べるために、図5(a)に示すようなアルミ平板(350×350mm、板厚2mm)に貫通スリット傷(長さ4mm、幅0.3mm)を導入した試験片を用いて、走査ピッチを変えながら可視化映像を測定・比較した。その結果を図5(b)に示す。使用した受信センサは、周波数1MHzの斜角90°探触子であり、波長約3mmの表面波が可視化されている。走査ピッチが波長の半分(1.5mm)以上になると、測定画像が急速に劣化することが分かる。

また、図6は、上記試験片において、走査ピッチ一定(0.5mm)のもとで、走査速度を変えて可視化画像の変化を調べた結果である。

図6(a)に走査速度100Hzと1000Hzの場合の受信信号波



(a) スリット傷試験片



(b) 伝搬画像

図5 レーザ走査ピッチと可視化画像の関係
(波長3mmの場合)

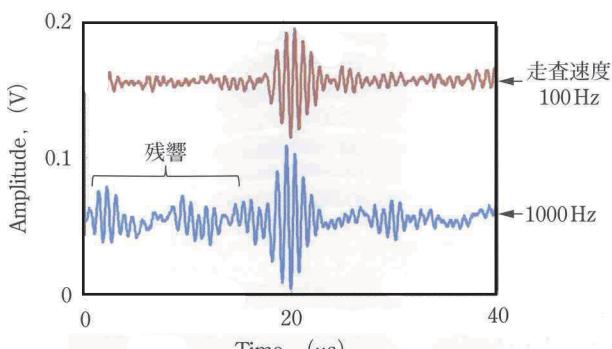
形を比較して示すように、走査速度が速くなると、超音波が減衰し終わらぬうちに次の超音波が励起されるのでその残響がノイズとなって受信波形に加算される。図6(b)の画像が走査速度の増加とともにまだら模様の背景画像になってきているのはそのためである。一般的な金属材料では、500～1000Hzの走査速度をお奨めする。CFRPのように減衰の速い材料では2000～3000Hzの走査速度でも、残響の少ない伝搬映像が測定されている。なお、測定時に高周波数ハイパスフィルタ(通常500kHz以上)を利用して低周波の超音波をカットすれば、受信超音波の減衰が速くなるので、走査速度も速くできる。

5. 可視化例

ここでは、いくつかの可視化事例を紹介する。

5.1 溶接部の微小ドリル穴エコーの可視化

溶接部は探傷の難しい部位であることはよく知られている。それは、溶接界面や余盛りなどから多くの疑似エコーが発生するためである。ここでは、図7に示す溶接試験片(380×280mm、厚さ10mm、材質SM490)の溶接部裏面に直径0.3mm、0.5mm、1.0mm、1.2mm、深さ5mmのドリル穴を溶接線に沿って10mm間隔で導入し、これらの欠陥からのエコーを試験片



(a) A点の受信波形

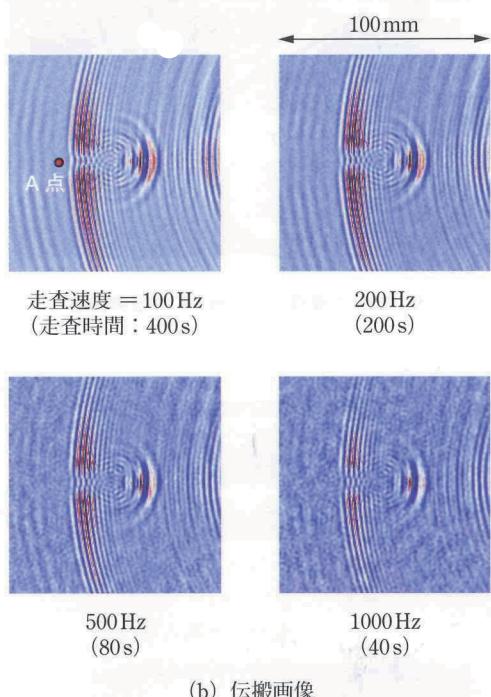
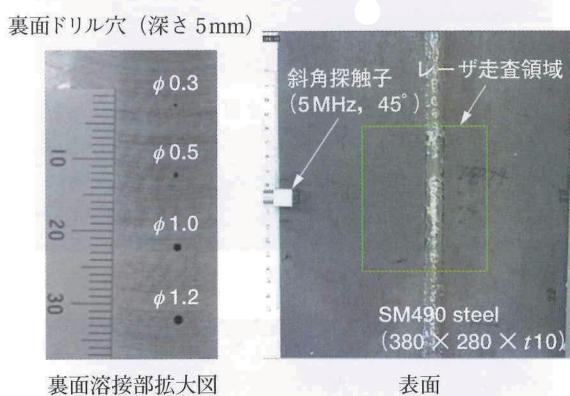
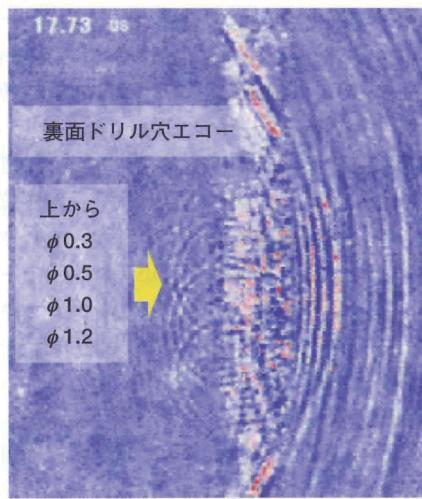
図6 レーザ走査速度と可視化画像の関係
(走査ピッチ 0.5 mm の場合)

図7 溶接欠陥試験片

表面側で検出できるかどうかを調べた。使用したセンサは周波数 5MHz の斜角 45° 探触子である。図8にドリル穴エコーの可視化画像を示す。溶接部の左側にうっすらと円弧状の欠陥エコーが4つ観察されている。これらのエコーは上から、 $\phi 0.3\text{mm}$, 0.5mm , 1.0mm , 1.2mm の裏面ドリル穴からのエコーである。このように、伝搬映像で観察すれば溶接部の疑

図8 溶接部の欠陥エコーの可視化例
(上から $\phi 0.3$, $\phi 0.5$, $\phi 1.0$, $\phi 1.2\text{mm}$ の裏面ドリル穴エコー)

解説

似エコーと欠陥エコーを識別できる可能性が高くなる。なお、図8はウェブカメラで撮影した写真画像（図7の緑の矩形枠で囲った部分の切り出し画像）を伝搬画像の背景にスーパーインポーズした画像であり、かつ、同期差分による進行波除去処理も行っている。

5.2 LSIパッケージの埋め込みコンデンサ配列の可視化

レーザ超音波スコープでは、通常、検査体表面に斜角センサを取り付け、超音波が検査体表面を伝わって行く様子を可視化するのであるが、場合によっては、垂直探触子の上に試験体を載せ、試験体を透過した超音波が試験体表面に現れる様子を可視化することもできる。例えば図9上図に示すように、周波数 2MHz の垂直探触子の上に LSIパッケージを載せてレーザ走査すれば、超音波が LSIパッケージを透過して表

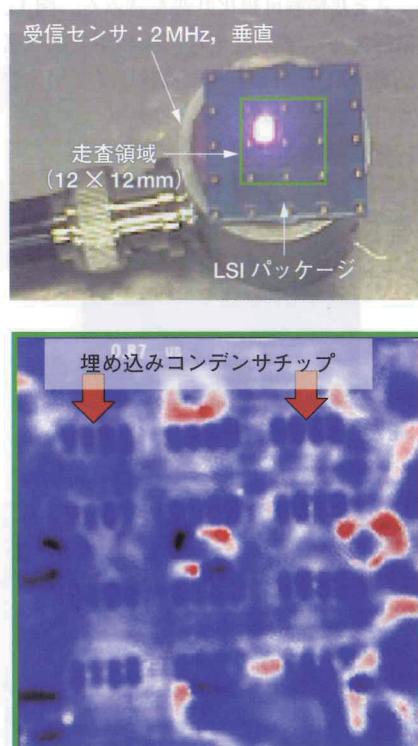


図9 LSIパッケージに埋め込まれたコンデンサチップの可視化例

面に現れる様子を可視化することができる。超音波がLSIパッケージ表面に出てきた瞬間の超音波伝搬画像を図9下図に示す。このLSIパッケージの内部にはコンデンサチップが複数個埋め込まれており、その配列の様子が、4個ずつの青黒い影のセットとなって観察されている。超音波Cスキャン装置を利用すれば、もっと精細なコンデンサチップ配列画像を測定できるが、本装置では、検査体を水浸させることなく、空气中で超音波センサの上に置くだけで簡便・迅速に（数十秒）測定できるというメリットがある。ただし、超音波センサと検査体との間に水等のカプラントを使用して受信感度を高めないと、小さな欠陥の検出は難しい。

5.3 超音波モータ用銅リングの振動モード測定

超音波可視化技術は、超音波の過渡的な伝搬を可視化する技術であるが、数十kHz程度の低周波数の共振型超音波センサを用いてバンドパスフィルタを掛けながら可視化計測すれば、振動モード（定在波）を観察することもできる。

図10の上図に、超音波モータに使用される銅リングの試験片を示す。この試験片の上に共振型超音波センサを取り付け、10kHzおよび50kHzの周波数バンドパスフィルタを用いて可視化計測を行った。可視化画像の一例を図10下図に示す。使用した超音波の中心周波数に応じた振動モードが観察されている。これを動画で観察すると、赤と青の模様が円周方向にぐるぐると回って行く様子が観察された。このように、超音波可視化技術は、過渡的な超音波の伝搬を可視化するだけではなく、定在波的な振動モードの観察にも有効である。なお、レーザ振動計を用いた振動モードの解析⁷⁾は広く行われているが、本手法ではわずか数分で計測できるというメリットを有している。

5.4 完全非接触計測による碍子のき裂エコーの可視化

高圧碍子では、感電の恐れがあるため、探触子を碍子に直接取り付けることは危険であり、完全非接触での検査が望まれる。そこで、図11に示すような実き裂入りの碍子を用意し、き裂エコーの完全非接触可視化計測を試みた。図12に最大振幅画像と伝搬画像を示す。完全非接触計測では受信感度が低下するため、同一点を5回レーザ照射して平均化計測を行つ

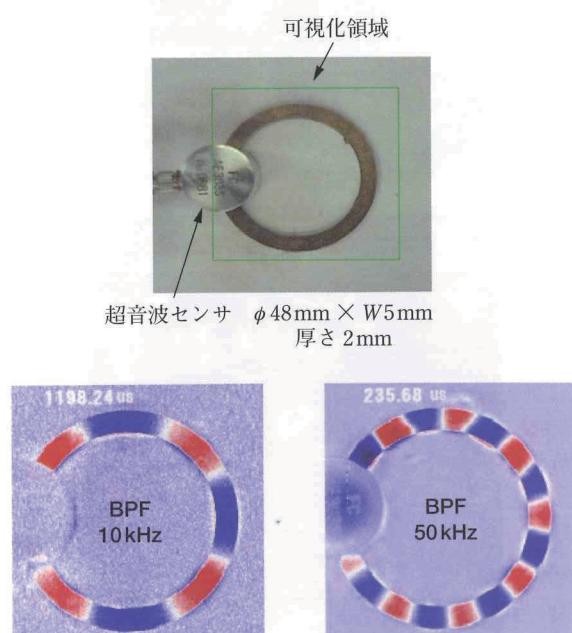


図10 超音波モータ用銅リング試験片の振動モードの可視化

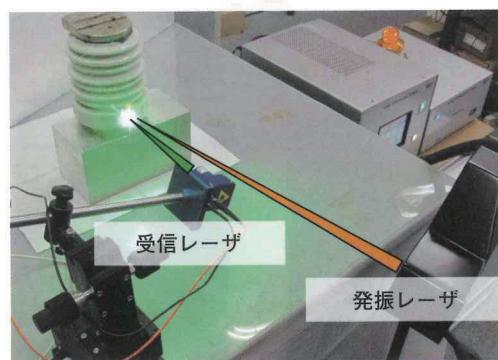
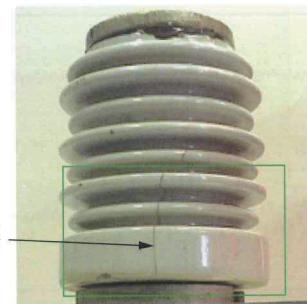
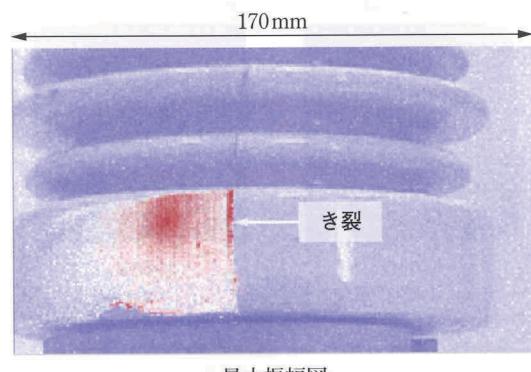
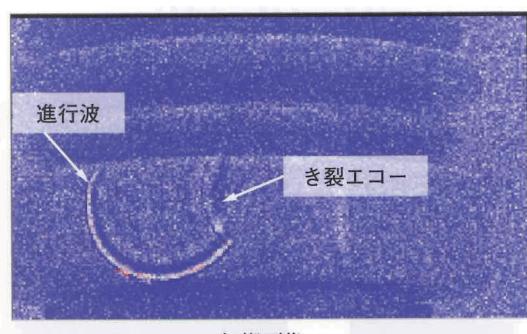


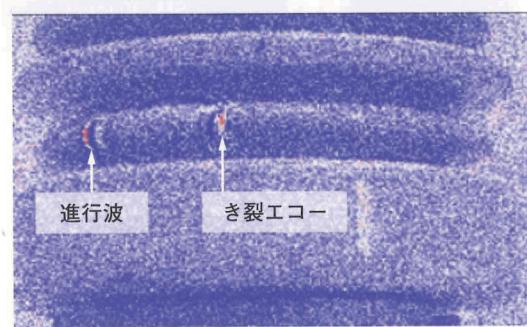
図11 レーザプローブ受信による碍子の完全非接触可視化試験



最大振幅図



伝搬画像-1



伝搬画像-2

図12 碾子のき裂エコーの可視化

た。それほど鮮明な画像ではないが、レーザプローブ照射点から広がっていく超音波の進行波とき裂からのエコーが観察できている。

6. おわりに

レーザ超音波可視化探傷技術は、欠陥エコーを動画映像で観察できるので検査を専門としない人にも分かり易い、複雑形状物体の検査が容易、面の検査が速い、等の特徴を有した新しい検査の手法である。一次元の超音波信号波形が空間的に繋がって画像になり、さらにその時間変化を追ったものが動画映像であることから、その映像の中には信号波形とは比較できないほど膨大な量の欠陥情報が含まれていると考えられる。動画映像の中に隠された欠陥情報を抽出して、欠陥を定量的に評価する手法の開発や欠陥の自動認識等が今後の課題として残される。

参考文献

- 高坪純治：励起用パルスレーザ走査法による三次元物体表面を伝わる超音波の可視化、非破壊検査, 57(4), pp.162-168, (2008)
- 日本工業標準仕様書：励起用レーザ走査による超音波伝搬の映像化方法, TS Z0028, (2010)
- 高坪純治、津田 浩、遠山暢之、森谷信一、升岡 正：ロケット燃焼器のレーザ超音波映像化探傷技術、非破壊検査, 59(10), pp.504-509, (2010)
- 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(1), pp.35-39, (2013)
- 石井勇五郎：新版 非破壊検査工学、産報出版, p.266, (1993)
- 高坪純治、宮内秀和、卜部 啓、津田 浩、遠山暢之、王 波：レーザ超音波同期差分法による裏面スリット散乱波の画像化、日本機械学会論文集, 75(750), pp.211-218, (2009)
- S. Vanlanduita, B. Cauberghe, P. Guillaumea and P. Verboven : Automatic vibration mode tracking using a scanning laser Doppler vibrometer, Optics and Lasers in Engineering, 42(3), pp.315-326, (2004)

解説



高坪 純治 つくばテクノロジー(株)
(305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 産総研
中央第二 2-1E314) 取締役 CTO
(独)産業技術総合研究所(旧工業技術院)にて
30年以上にわたり、アコースティック・エミッション、超音波探傷、レーザ超音波可視化技術に関する研究に従事。2011年より産研技術移転ベンチャーであるつくばテクノロジー(株)にてレーザ超音波可視化検査装置の開発・製品化に従事
URL: <http://www.tsukubatech.co.jp/>



王 波 つくばテクノロジー(株)
(305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 産総研
中央第二 2-1E314) 代表取締役社長
1986年(中国)西安電子科技大学修士修了。
助手、講師として、レーダーシステム及び信号処理を研究。1993年筑波大学に留学、CTとMRIの画像処理研究、1999年から通信総合研究所と(独)産業技術総合研究所にて、3D画像処理と非破壊検査技術に関する研究。
2005年つくばテクノロジー(株)を設立し、
レーザ超音波可視化などの検査装置の開発・
製品化に従事



劉 小軍 つくばテクノロジー(株)
(305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 産総研
中央第二 2-1E314) 取締役
1992年中国より来日留学、1999年筑波大学社会工学研究科博士号取得、物材機構(NIMS)と産研(AIST)にて14年間数理計算、数値シミュレーションに関する研究に従事。2008年以降、当会社にてレーザ超音波可視化検査装置のソフトウェア開発に従事



鈴木 修一 つくばテクノロジー(株)
(305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 産総研
中央第二 2-1E314) 計測事業部長
計測機器メーカーの計測開発部に20年間勤務。
計測機器のハードウェアおよびソフトウェア開発業務に従事。2012年より産研技術移転ベンチャーであるつくばテクノロジー(株)にてレーザ超音波可視化検査装置の製品化に従事



王 晓東 つくばテクノロジー(株)
(305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 産総研
中央第二 2-1E314) 主任研究員
東京大学電子工学博士の学位取得後、旭化成(株)情報技術研究所にて5年にわたりパターン認識と信号処理技術に関する研究開発を行う。2013年より産研技術移転ベンチャーであるつくばテクノロジー(株)にてX線非破壊検査装置およびレーザ超音波可視化検査装置の開発・製品化に従事