

強化プラスチック

REINFORCED PLASTICS

VOL.64
NO.9
2018

超音波・振動関連特集

JRPS

9

— 超音波・振動関連特集 —

レーザー超音波可視化非破壊検査装置

— 超音波伝搬をその場で即座に可視化し、欠陥検出を容易に —

高坪 純治*, 王 波*, 劉 小軍*, 鈴木 修一*, 齊藤 典生*

1. はじめに

現在、最も広く普及している超音波探傷法はレーダーの原理を利用したパルスエコー法である。この方法は、受信波形の中に隠された傷エコーを探し出す、いわば検査の専門家による「聴く検査」であるが、もし超音波が伝わる様子を目に視えるようにできれば、専門でない人にも分かりやすい「視る検査」になり、傷の誤認や見逃しの低減につながる。

超音波の伝搬を可視化する方法として最もポピュラーな方法は光弾性可視化法であるが、ガラスのような透明物体にしか適用できないという欠点がある。また、レーザードップラー振動計を走査しながら検査体の表面振動変位を計測して可視化する方法もあるが、レーザービームを検査体表面に垂直に当て、かつ焦点距離を一定に保ったまま走査しなければならないという制限があるため、現場での計測は実質的に不可能である。

当社が開発したレーザー超音波可視化検査技術^{1)~8)}は、逆転の発想によるもので、受信側のレーザーではなく発振側のレーザーを走査して超音波伝搬映像を計測するというものである。発振側のレーザーには入射角や焦点距離にほとんど制限がないため、どのような複雑形状物体でも高速で超音波伝搬映像を計測できる。検査体の内部や裏面に欠陥があれば、計測した超音波伝搬映像の中に、池から水が湧き上がるような波紋が現れるので、欠陥を容易に見つけ出すことができる。

レーザー超音波可視化検査法が優位性を発揮する検査分野として、工業プラント配管や航空機エンジンブレード、ロケット燃焼器のような広い曲面形状物体の検査、自動車エンジンブロックやミッションケースなどの狭あい部や凹凸部の検査、原子力発電

*つくばテクノロジー(株)

所など放射線環境下での検査、溶接時など高温下での検査、トンネルや鋼橋のような高所の検査などを挙げることができる。材料の種類は特に選ばず、金属、樹脂、セラミック、複合材料など、振動する媒体であれば適用できる。炭素繊維複合材料(CFRP)など熱に弱い材料でも、高感度探触子を使って、検査体を傷つけずに検査することができる。特に最近、輸送機器の燃費改善や排ガス規制対策のため機器・材料部材の軽量化が喫緊の課題になっている。このため、比重の小さいCFRPやアルミなどの異種材料を接合する技術の開発が盛んに行われているが、まだその接合面を評価する検査手法は確立されていない。レーザー超音波可視化検査装置LUVI(Laser Ultrasonic Visualizing Inspector)は、これらの接着・接合面の良否を効率的に判定できる新しい検査装置として期待されている。本稿では、主に接着・接着不良の検出に焦点を当て、その検査事例を紹介する。

2. 可視化原理

本可視化法の特徴は、超音波の受信側ではなく、発振側を走査して超音波伝搬映像を計測する点にある。これは超音波伝搬の相反性(送受信の方向を逆にしても受信波形が変化しないこと)が成立することを前提にしている。例えば、図1上図に示すように、欠陥(曲率半径20mm、深さ4mmの球面溝)を挟んで斜角探触子Aと垂直探触子Bを配置して超音波の送受信を行ったとき、超音波パルサーからAに信号を送ってBで受信した波形と、逆にBに信号を送ってAで受信した波形は図1下図に示すようにほぼ一致する。したがって、超音波の入射方向や欠陥の有無に関わらず、送受信の方向を入れ替えてもその計測系は等価だと見なすことができる。同様に、レーザーで熱励起超音波を発生させてPZT探触子で受信した計測系と、逆に、PZT探触子で超音波を発生させ、レーザー発振と同じ

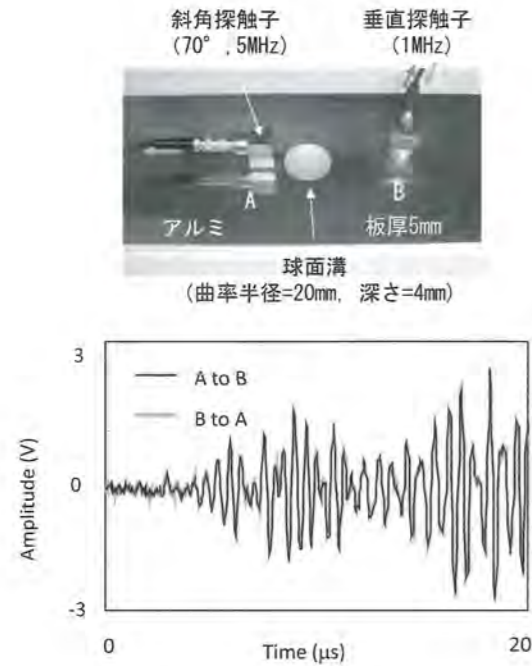


図1 超音波伝搬の相反性

特性を有する受信プローブで受信した計測系は等価だと考えることができる。つまり、レーザーで超音波発振点を走査させ、固定点に取り付けたPZT探触子で受信する計測系は、固定点のPZT探触子で発振した超音波を、レーザープローブを走査しながら受信する計測系と等価だと考えることができるので、各レーザー走査点での受信振幅を輝度変調しながら時系列的に画像表示すれば固定点のPZT探触子から発振した超音波の動画映像を取得することができる。

3. 可視化システム

可視化システムの構成図とレーザー超音波可視化検査装置LUVIをそれぞれ図2および図3に示す。パルスレーザーから周期的に発振されたレーザー光を被検体表面で高速走査させる。レーザーのエネルギーは、被検体表面を傷つけないよう2mJ以下にしている。各走査点では急激な熱ひずみによって超音波が発生し、その伝搬波形を固定点に取り付けた超音波探触子で検出する。非接触受信のときは超音波探触子の代わりにレーザープローブ（レーザードップラー振動計）を用いる。検出波形はA/D変換されてパソコンに記録される。記録された波形列を再構成して固定点の超音波探触子から発振された超音波の伝搬映像をパソコン画面上に動画表示する。動画映像の他にも最大振

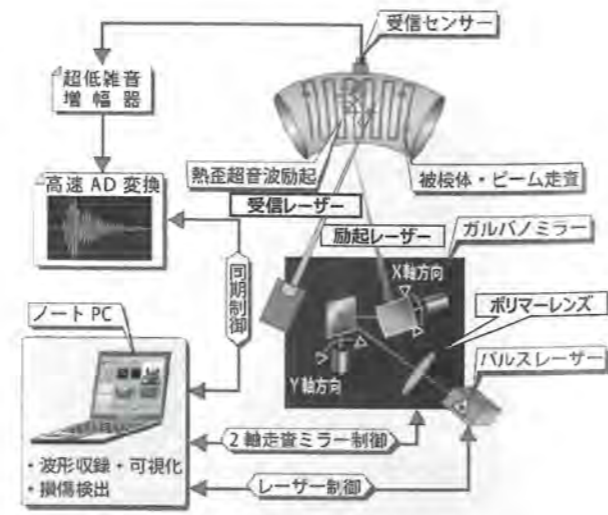


図2 可視化システムの構成図



図3 レーザー超音波可視化検査装置 (LUVI)

幅画像やBスコープ画像など様々な解析画像を表示することができる。ガルバノミラーと高速アジタイザを利用した同期システムにより、レーザー走査速度は最大8,000照射点/秒を達成している。例えば、標準的な200×200走査点の計測を走査速度4,000照射点/秒で行えば、わずか10秒のレーザー走査で動画映像を取得できる。

4. 可視化例

4.1 CFRPコーナー部の層間剥離

近年、航空機産業、自動車産業で急速に用途を拡大しつつあるCFRPであるが、まだ検査手法は確立されていない。その中でも特に検査が難しいとされているコーナー部の層間剥離の検出にLUVIを適用した例を紹介する。使用した試験片は層間剥離を模擬してテフロンシートを埋め込んだ図4に示すCFRP試験片である。コーナー部に寸法5mm角および10mm角のCFRPを、深さを変えて合計6枚埋め込んである。

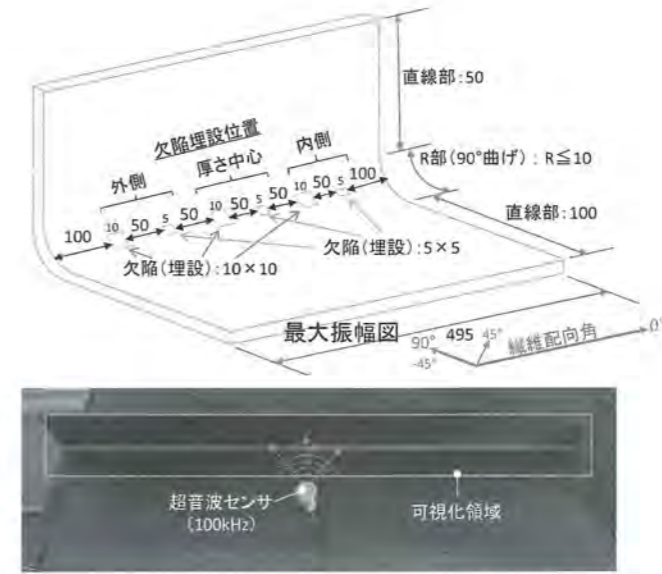


図4 コーナー部に人工剥離（テフロンシート埋め込み）を有するCFRP試験片

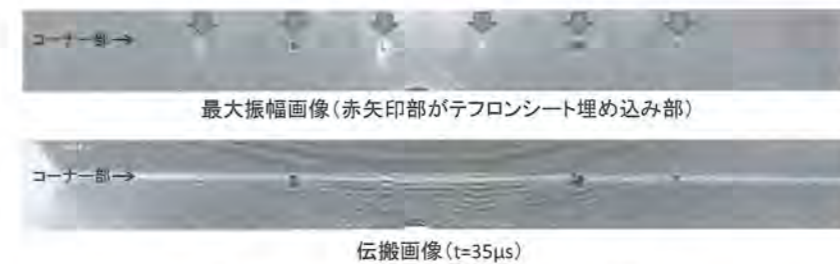


図5 CFRP試験片の最大振幅画像と伝搬画像

図5にLUVIで計測した超音波最大振幅画像と伝搬画像を示す。剥離部からはそれほど大きな超音波エコーは発生しないが、剥離部で振幅は大きく上昇し、最大振幅画像から剥離の位置と大きさを推測することができる。

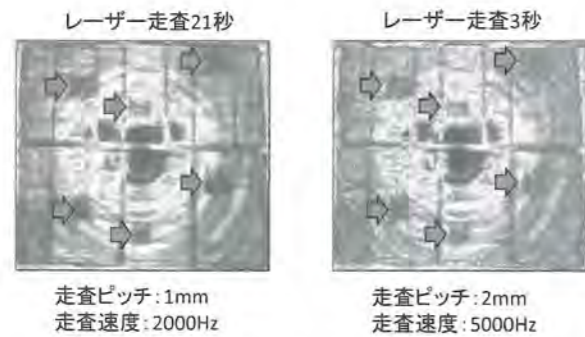
4.2 CFRP接着鋼板の接着不良

次に、CFRPと金属を接着したサンプルの接着不良を検出した例を紹介する。試験片には図6に示すように、鋼板を挟んで上下にCFRP板を接着したサンプルを用いた。表面のCFRP層間および鋼板との界面に接着不良を模擬して6枚のテープが埋め込んである。裏面のCFRP板中央に超音波センサ（中心周波数200kHz）を取り付け、鋼板およびCFRP板を透過してきた超音波を映像化した。テープを埋め込んだ部分では超音波の透過率が低下するため、図7の矢印部に示すようにテープを埋め込んだ6カ所の部分で透過映像に影のような方形の黒っぽい模様が観察されてい



図6 CFRP接着鋼板

る。図7には、わずか3秒のレーザー走査で測定した透過画像も示しているが、やや検出分解能が低下するものの、接着不良部を検出できている。



最大振幅画像(矢印部がテープ埋め込み部)

図7 CFRP接着鋼板の超音波透過画像

4.3 LSIパッケージ埋め込みチップのレイアウト検査

図8は複数のコンデンサチップを埋め込んだLSIパッケージの超音波透過画像である。周波数10MHzの超音波センサの上にLSIパッケージを置き、表面をレーザー走査して計測した最大振幅画像である。コンデンサチップが埋め込まれたところを透過した超音波は振幅が低下し、小さな長方形の影が複数観察されており、埋め込みチップのレイアウト検査に適用可能である。

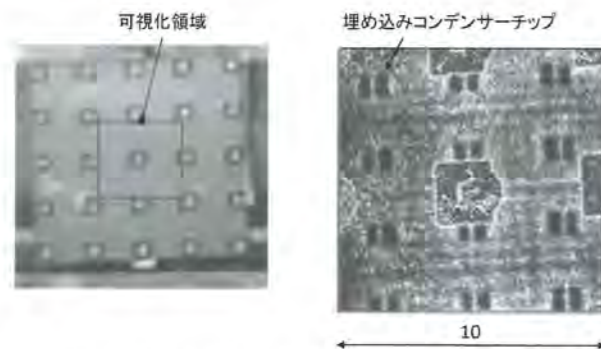


図8 LSIパッケージの埋め込みコンデンサチップ

4.4 事務機器のプラスチックボタンの接着不良

図9はプラスチック製スイッチボタン付け根の疲労亀裂の検出に適用した例である。周波数1MHzの超音波センサの上に検査物を載せ、超音波透過映像を測定した。4本の突起のうち図にNGと記載した1本だけ付け根に疲労亀裂が発生している。超音波は亀裂で遮断されてその上に上がっていかないので、最大振幅画像でNGの突起だけが黒っぽく映っており、接着不良の突起を検出可能である。



図9 事務機器スイッチボタン付け根の接着不良

4.5 大きな検査体 (CFRP製航空機ファンブレード)

図10はボーイング777型機のファンブレードを伝わる超音波を可視化した例である。軽量化のため、CFRPとアルミ合金で作製されている。本サンプルには欠陥は存在しないが、このようなCFRPの広い検査体(長さ1.5m)でも裏面に1個の超音波センサ(100kHz)を取り付けるだけで超音波伝搬映像をわずか50秒のレーザー走査時間で計測することができる。



図10 B777ファンブレード (CFRP/アルミ合金)

4.6 小さな検査体 (ダイヤモンド工具)

逆に図11は小さな検査体(軸付き砥石)に適用した例を示す。ロウ付け部はわずかφ1.5mmの直径であるが、超音波透過映像の最大振幅画像でロウ付けの接着良否を判定できることが分かる。



図11 工具ろう付け部接着不良

5. おわりに

非破壊検査とは、物を壊さずに内部の欠陥を見つけ出す検査技術のことで、対象とする欠陥は、亀裂や空洞が一般的であった。ところが、ここ数年、CFRPや異種材料接合部材の開発が盛んになるにつれ、接着・接合面の検査ニーズが急速に増加し、当社に依頼されるサンプル試験でもその半数近くが接着・接合面の検査となっている。そこで、本稿では接着・接合面の検査に焦点を当て、レーザー超音波可視化検査装置による検査事例を紹介した。従来の超音波探傷装置は、超音波センサを当てた局所領域の深さ方向の検査に有効であるが、広い面の検査に時間がかかり、かつ、曲面部や凹凸部、狭い部の検査が苦手である等の弱点を有している。これに対して、レーザー超音波可視化検査

装置は、それほど厚くない物体の面方向の検査を得意とし、また、これまで不可能であった複雑形状物体や小さな物体の検査も可能であるという利点を有している。自動車・航空産業で新しい接着・接合技術の開発が盛んに行われている中、本装置がその接着・接合面の効率的検査手法として少しでも貢献できればと考えている。

参考文献

- 1) 高坪純治, 非破壊検査, 62-1, 35 (2013)
- 2) 齊藤典生, 高坪純治, 王波, 劉小軍, 鈴木修一, 王曉東, 検査技術, 20-10, 67 (2015)
- 3) 齊藤典生, 高坪純治, 王波, 劉小軍, 鈴木修一, 21-11, 62 (2016)
- 4) 齊藤典生, 高坪純治, 王波, 劉小軍, 鈴木修一, 検査技術, 22-2, 16 (2017)
- 5) 齊藤典生, 高坪純治, 王波, 劉小軍, 鈴木修一, 超音波テクノ, 29-4, 81 (2017)
- 6) 齊藤典生, 高坪純治, 王波, 劉小軍, 鈴木修一, 強化プラスチック, 68-8, 27 (2017)
- 7) Bo Wang, Junji Takatsubo, Norio Saito, Xiaojun Liu and Shuichi Suzuki, Synthesiology, 10-2, 75 (2018)
- 8) 齊藤典生, 高坪純治, 王波, 劉小軍, 鈴木修一, 超音波テクノ, 30-3, 85 (2018)