

映像情報

www.eizojoho.co.jp

Industrial

2016

7

特集

非破壊検査の最新動向

—見えない欠陥を解き明かす—

▶ **連載** 視覚技術で、新しい未来を拓け! —視覚機能としての照明技術 マシンビジョンライティング
第7回 — 物体光の明るさとその特性 / 増村茂樹

▶ **企業IMPRESSION** 放送システム レビュー

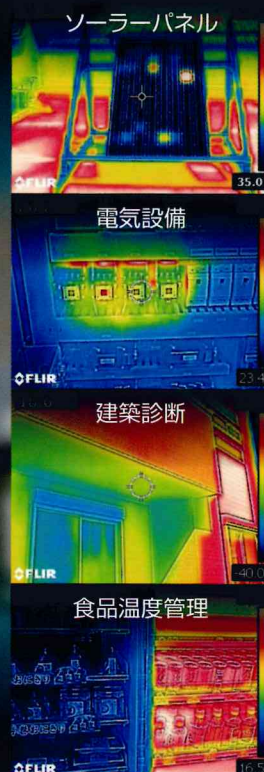
携帯型赤外線サーモグラフィカメラ



いつでもどこでも目に見えない
問題箇所の発見に役立つ

FLIR C2

メーカー希望小売価格 **99,800円** (税別) より



www.flir.jp/C2

FLIR

The World's Sixth Sense®

レーザー超音波可視化検査装置^{*1}および 乾電池駆動可能な配管用小型X線検査装置^{*2} における非破壊検査への応用

つくばテクノロジー株式会社／
齊藤典生^{*1,2}、王 波^{*1,2}、高坪純一^{*1}、劉 小軍^{*1,2}、鈴木修一^{*1,2}

われわれは産業技術総合研究所の技術移転ベンチャーとして、産業インフラ、社会インフラ用の新しい非破壊検査装置を研究開発している。本稿では、非破壊検査への応用のため開発を行っているレーザー超音波可視化検査装置、および乾電池駆動可能な配管用小型X線検査装置について紹介する。

レーザー利用の超音波伝搬可視化検査装置は、検査体表面をレーザー走査して熱励起超音波を発生させることにより、超音波伝搬の動画映像を可視化することができる。本手法は、①複雑形状物体を伝わる超音波を非破壊で可視化できる、②遠隔から高速で対象物の超音波伝搬の様子を可視化できる、という特長を有している。本装置は、非破壊欠陥検査への導入が進んでいる。

X線装置は、小型・省電力・長寿命の冷陰極X線管を搭載した単3乾電池1本で駆動可能な手のひらサイズの小型X線発生装置を開発し、各種検査装置へ応用している。本稿では、その冷陰極X線管を搭載した、現場で配管を検査できる配管用小型X線検査装置について紹介する。

1

レーザー超音波可視化検査装置と その非破壊検査への応用

レーザー超音波とは、レーザー光を用いて振動媒体に対する超音波の発生や検出を非接触で行う技術である¹⁾。遠隔から非接触で超音波の送受信が可能であり、高温部や高所にある検査体や、水や油等の接触媒体を嫌う検査体など、従来検査が困難であった部材への適用が可能になることから、航空機、自動車、工業プラント、エレクトロニクスなどの先端産業分野における新しい検査技術として期待を集めている。

弊社で開発したレーザー超音波可視化検査装置は、検査体表面をレーザー走査することにより超音波の伝搬を動画映像として可視化する装置である²⁾。物体の内部や裏面に欠陥があると、あたかも水面から泉が湧き上がるような波紋が観察され

るので、検査を専門としない人にもわかりやすく、また、レーザーによる非接触走査なので、これまで検査できなかったような複雑形状の物体でも効率的に検査することができる。本稿では、当該可視化技術の欠陥検出性能と非破壊検査への応用例を紹介する。

2

レーザー超音波可視化検査装置 (LUVI)

レーザー超音波可視化検査装置 (LUVI: Laser Ultrasonic Visualizing Inspector) の構成図を図1に示す。その仕組みはパソコンでレーザーとガルバノミラーおよび高速A/D変換器とを同期制御し、パルスレーザー(最大出力: 2mJ、パルス幅: 2ns)を検査対象物表面に格子状に高速走査(最速2kHz)させる。すると、熱ひずみによる微弱な超音波が

励起される。その超音波伝搬信号を対象物に取り付けた圧電受信センサ(最大8個)、または非接触で受信可能なレーザープローブを用いて検出し、超低雑音増幅器を通して信号を増幅し、高速A/D

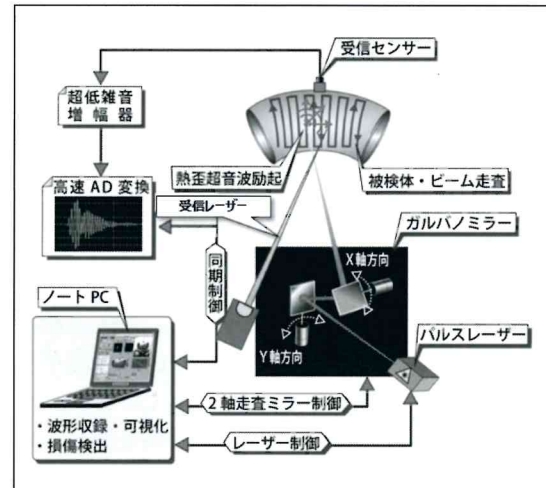


図1 レーザー超音波可視化検査装置(LUVI)の構成図

変換器により、パソコンのハードディスクに記録する。このレーザー照射点から受信センサに向かう複数の超音波伝搬信号を超音波伝搬の相反性より再構成することで、受信センサ部から発振される超音波の動画映像として計測できる。この独自の可視化技術は、励起側のレーザーを高速走査するので、レーザーの照射角度や焦点距離を一定にしなくても、対象物を伝わる超音波の伝搬映像を高速に計測できる。

3 レーザー超音波可視化検査装置の種類

レーザー超音波可視化検査装置(LUVI)には、受信センサが接触する接触型(図2)と、受信センサが非接触の非接触型(図3)とがある。

ここで、接触型の方が信号が大きくなるが、対象物が高温や高電圧などの場合には、非接触型の方が有用となる。以下にLUVIの特長を示す。



図2 接触型LUVI



図3 非接触型LUVI

- ① 動画映像で見るので専門家でなくても分かりやすい。
- ② 非接触走査なので複雑形状物体(曲面、凹凸)でも検査が容易。
- ③ ミラーによる高速走査なので広い範囲を迅速に検査可能。
- ④ 非接触検査なので、危険箇所(放射能、高温、高所)の検査に有効。
- ⑤ 検査報告書を数秒で自動作成可能。
- ⑥ ウェブカメラ画像を動画映像にスーパーインポーズして表示可能。
- ⑦ 測定画像に表示された異常箇所はその表面にガイド光で指示し、リアルタイムに欠陥位置を確認可能。
- ⑧ 過去の計測条件(レーザー走査等条件)を読み出して再現可能。

LUVIは原子力発電用配管、自動車ミッションケース、LSIパッケージ、高電圧碍子、自動車ホイール、ロケット燃焼器、CFRP/GFRP部材、鉄道車軸、リチウムイオン電池など様々な対象物の欠陥検査に利用が進められている。

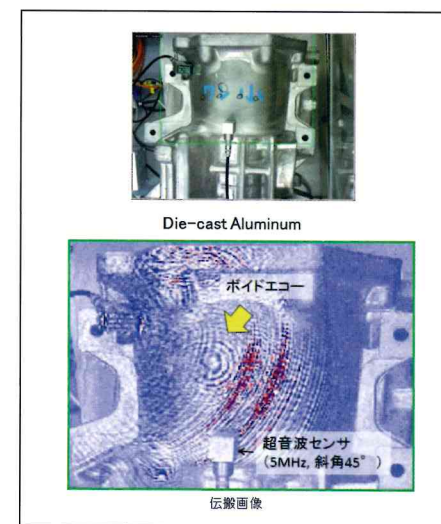


図4 自動車ミッションケースのボイドエコーの可視化例

4 非破壊検査への適用例

本章では、実構造部材の非破壊検査に適用した例を紹介する。

4.1 自動車ミッションケース

図4に自動車ミッションケース(高さ210mm、厚さ約9mm、アルミダイカスト)の内部ボイドエコーを可視化した例を示す。誌面上では静止画だが、実際の検査では動画の映像になる。ここで使用した超音波センサは周波数5MHzの斜角45°探触子である。検査体までの距離は30cm、レーザー走査ピッチは0.75mm、走査点数は230×165点、走査時間は約80秒(走査速度500Hz)である。このような凹凸部でも、LUVIを使用することで、短時間で欠陥エコーを検出することができる。ちなみに、可視化した画像は、ガルバノミラーの近くに取り付けた小型カメラで撮影した写真画像をスーパーインポーズして見やすくし、欠陥エコーを強調するため、進行波を消去する信号処理をしている。

4.2 航空機ファンブレード

図5はCFRP(炭素繊維強化複合材料)製のB777ファンブレード(長さ約1.5m)の超音波伝搬



図5 CFRPファンブレード(B777)の超音波伝搬画像例

映像を可視化した例である。超音波センサをファンブレードの裏側に取り付け、1.5m離れた所からパルスレーザーにより、ピッチ3mmでブレード表面をレーザー走査した。この時の計測時間は50秒(走査速度2kHz)であった。CFRPは超音波の減衰が大きいことから、超音波センサとしては低周波(100kHz)の垂直センサを用いている。この検査体には特に欠陥はなかったが、1個の受信センサでファンブレード全面を伝わる超音波を計測できた。

4.3 碍子(完全非接触計測)

これまでの、受信センサに接触型超音波探触子を用いて可視化計測したが、以下に非接触のレーザープローブを用いた完全非接触計測の可視化例を紹介する。

高電圧の碍子では、感電の危険があるので、探触子を碍子に直接取り付けることはできず、完全非接触の検査が求められている。そこで、図6上図に示すようなスリット傷入りの碍子で、そのスリット傷の完全非接触可視化計測を試みた。

図6下図に計測したスリット傷エコーを示す。完全非接触計測では接触計測よりも受信感度が低

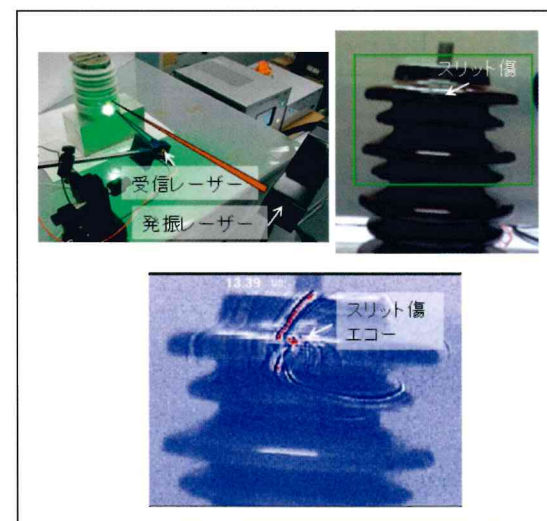


図6 亀裂を有する碍子の完全非接触超音波可視化例

下するので、同一点を5回照射して平均化を行った。この図よりレーザープローブ照射点から広がっていく超音波の進行波とスリット傷からのエコーが観察できている。

5 レーザー超音波可視化検査技術の今後

レーザー超音波可視化検査技術は、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、これまで検査の難しい部位とされてきた箇所の検査を可能とする画期的な検査手段として注目されている。現在、産業インフラ以外の社会インフラの検査として鋼橋に遠隔からレーザー光を当てて非接触で検査できる手法を研究開発している。

6 乾電池駆動可能な配管用小型X線検査装置とその非破壊検査への応用

われわれは乾電池でも駆動可能な冷陰極X線管を用いて、単3乾電池駆動X線装置、電線用小型X線検査装置を開発した³⁾。特に単3乾電池1本で実用レベルの検査ができる手のひらサイズの小型X線発生装置は今までなかった⁴⁾。

ところで、高度成長期に建設された産業プラントが老朽化し、そのプラント配管の検査はプラントの保全上、急務の課題となっている。実際の現場での配管検査としては、保温材を付けたまま検査したいというニーズがある。

われわれはそのニーズを解決するため、乾電池でも駆動可能な小型・省電力・長寿命の冷陰極X線管を搭載して、現場配管を保温材付きのまま、かつ配管と配管の隙間に置いて検査できる小型X

線検査装置を開発した。ここで、その装置について紹介する。

7 単3乾電池駆動小型X線発生装置

われわれの冷陰極X線管に搭載されているカーボンナノ構造体冷陰極電子源を図7に示す。このカーボンナノ構造体冷陰極電子源を搭載した冷陰極X線管は電界電子放出により電子を放出し、ヒーターやフィラメントがなく、予熱やエージングなしで、必要な時に即座にX線を照射できる特長がある。

図8に、このカーボンナノ構造体冷陰極電子源を搭載した冷陰極X線管による手のひらサイズの

単3乾電池駆動小型X線発生装置を示す。

この装置は、装置上面に配置した独自開発の小型昇圧回路により、本体サイズW170×H178×D68mm、本体重量1.85kg、単3乾電池1本で管電圧60kVのX線を出力できる。また、小型軽量ながら単3乾電池1本で50msのパルスX線を約100ショット照射可能である。

8 配管用小型X線検査装置

8.1 小型X線源

産業プラントの現場配管は図9のような間隔で設置されていて、配管と配管の隙間が10cm程度になっている。そのため、従来のX線源ではこの

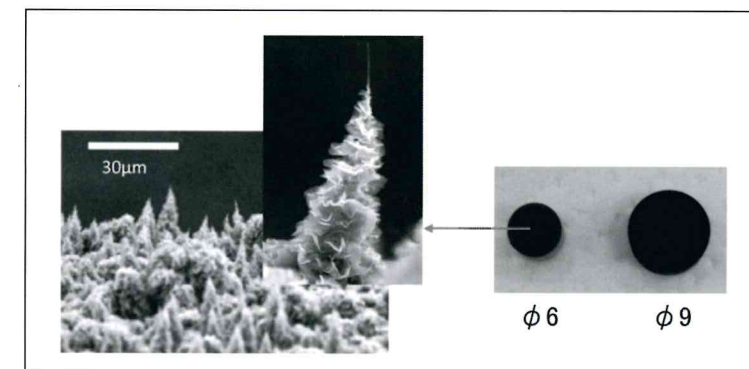


図7 カーボンナノ構造体冷陰極電子源

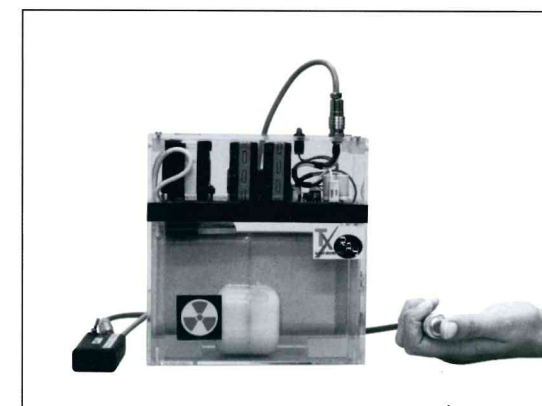


図8 手のひらサイズの単3乾電池駆動小型X線発生装置

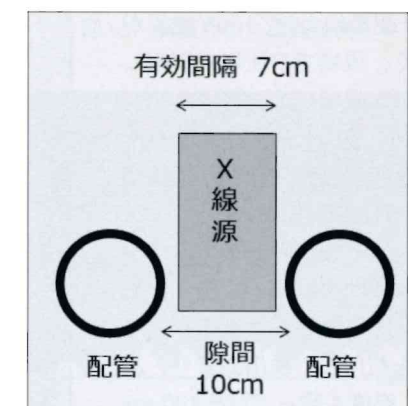


図9 産業用配管間隔



図10 小型X線装置

隙間に入れて検査することは難しかった。われわれはX線装置の有効間隔を7cmに設定し、配管と配管の隙間に入れてX線照射できる装置とした。

図10に厚さ7cmで開発した小型X線装置を示す。このX線装置は、X線管に先述の冷陰極X線管を使用し、厚さ7cm、重さ6kgと小型軽量ながら、管電圧150kV、1,000万ショットの長寿命という配管検査に耐える性能をもっている。また、産業プラントで高所や狭所にある配管を離れた所からX線検査できるよう、コントローラを用い20m離れた所からX線を照射し、検出器の画像を取得できるものとした。これにより、作業者の安全と効率的な検査を実現できる。またバッテリー駆動により、100V電源が必要なく、現場での使用に相応しい装置となっている。

8.2 直接変換型高精細高感度CdTe検出器

この装置の検出器としては、パルスX線源で高精細の画像を撮影できるよう、間接変換型のシンチレータを利用した検出器より、高精細で、感度も勝っている100 μ m

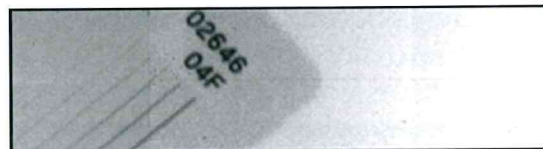


図11 CdTe検出器画像例

ピクセルピッチで8枚のCdTe素子をタイリングした直接変換型高精細高感度CdTe検出器を開発した。実際、CdTe素子によるX線検出器は、高精細かつ高感度なため手荷物検査や医療機器などへ盛んに導入されている。

開発した直接変換型CdTe検出器の性能を評価するため、小型X線装置で管電圧91kV、管電流1mA、パルス幅20msのX線をこの検出器に照射し、透過度計04Fを撮影した画像を図11に示す。この画像で一番右の0.4mmの線から一番左の0.1mmの線まで、7本すべて判別できた。したがって、検出器として配管検査に必要な分解能、感度をもっている。

9 開発した装置

われわれの開発した配管用小型X線検査装置を図12に示す。この装置はX線の漏えいについて安全のように20m離れてX線を照射できるコントローラ付きで、厚さ7cmの小型X線装置と幅5cm



図12 配管用小型X線検査装置

表1 装置の仕様

項目	仕様値	備考
管電圧	100~150kV	
管電流	最大2mA	
パルス幅	30~200ms	
X線管	冷陰極式	針葉樹型 カーボンノ構造体
X線管寿命	1000万ショット	
実効焦点サイズ	1mm	
本体サイズ	W235×D70 ×H215mm	
本体質量	6kg	
電源	リチウムイオンバッテリー	約1000ショット照射可能
動作温度	0~40℃	

の薄型CdTe検出器と、30m無線通信可能な無線・制御装置と表示用PCとから構成されている。これらにより、小型軽量、可搬型で、機動性に優れ、保温材付き配管の隙間に入れて検査できる装置となっている。本装置の主な仕様を表1に示す。

管電圧は今回の装置で配管を検査するため、冷陰極X線管および昇圧回路を改良し、150kVの出力を達成している。ここで、管電圧が150kVになったため、絶縁モールドも独自の固体モールドとし、可搬性に優れている。さらに、X線装置本体の厚さを7cmにするため、高電圧回路を小型化、高集積化して筐体に収納している。コントローラを使えば、管電圧、パルス幅、パルス数を調整して、配管の口径と肉厚により、撮影条件を変化させ、X線装置と20m離れてX線を照射できる。表示用PCは、画面上でX線照射のボタンを押すとX線が照射され、検出器のデータが取り込まれ、画像処理を施し、撮影画像をリアルタイムに表示できる。表示された画像は明るさ・コントラストの調整やズーム表示、寸法表示もできる。

10 開発した装置の保温材付き配管への応用例

X線装置本体は幅70mm、重さ6kgで、配管と配管の隙間に入れて、バッテリー駆動で、横方向にX線照射し、20m離れた所からコントローラを使って、管電圧100~150kV、パルス幅30~200msのパルスX線を照射できる。

また、実効焦点サイズが1mmで、保温材を付けたまま配管のすぐ近くでX線を照射しても高精細の画像が得られる。

開発した装置の性能評価のため、試験片を配管に貼り付けて配管を透過した試験片の撮影画像を図13に示す。この時の撮影条件は管電圧133.2kV、管電流1mA、1パルスで、材質：炭素鋼、外径34mm、片側肉厚3.4mmに試験片を貼り付けて保温材なし配管の撮影を試みた。この撮影画像を見ると、配管を透過した試験片の文字が継ぎ目なく判別でき、CdTe検出器の性能が確認できた。

次に開発した装置で配管の寸法表示の例を図14に示す。この画像は配管端部のネジ山を削った所を撮影した画像である。このネジ山を削った

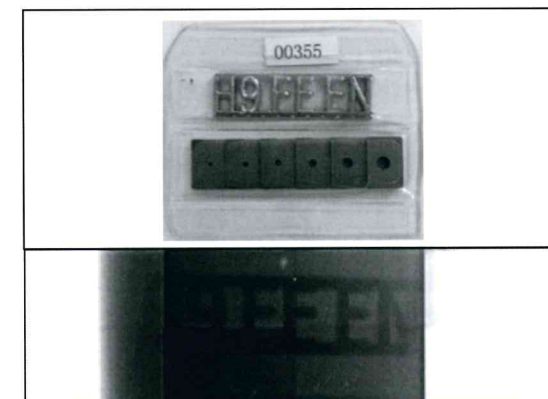


図13 試験片のX線画像例

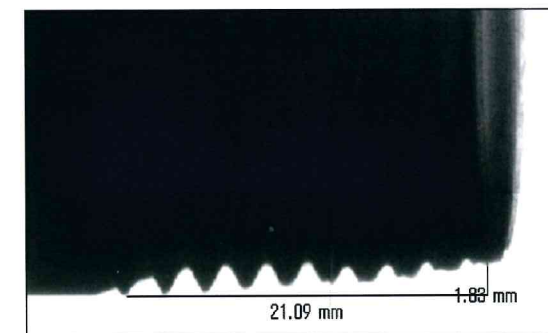


図14 配管の寸法表示例

配管の外径は34mm、肉厚6.8mm、削り深さ1.8mmであった。撮影時の条件は管電圧140kV、管電流1mA、パルス幅100ms、1パルスとした。

その結果、ネジ山を削った所の寸法を表示して、実物の値と測定値を比較すると、以下の値を示した。

【実物の値】 山長さ：21.0mm、削り深さ：1.8mm

【測定値】 山長さ：21.09mm、削り深さ：1.83mm

これらの値より、実物の値と測定値の差は、山長さで0.09mm、削り深さで0.03mmであった。これにより、配管検査時の減肉検査の可能性が確認できた。

11 小型X線装置の優位性

開発した小型X線装置は厚さ7cm、重さ6kgで横方向にX線照射し配管の隙間に入れ、バッテリーにより有線／無線で20m以上離れた所から管電圧150kVのX線を照射できる。また、実効焦点サイズが1mmで、保温材を付けたまま配管のすぐ近くでX線を照射しても高精細な画像を撮影できる。

実際、配管の撮影を行うと、寸法測定で実物の値と0.1mm以下の違いで測定でき、配管減肉検査への応用が考えられる。

これにより、2020年に開催される東京オリンピックに向けて、産業プラント配管はもちろん、それ以外の駅の配管や住居の配管など、狭くて従来の装置で検査しにくい場所でも検査が可能になる。さらに、配管検査以外にも東京オリンピック開催時のセキュリティ検査など、様々な応用が期待される。

謝辞

本開発にあたり、産業技術総合研究所 鈴木良一首席研究員、静岡大学 青木徹教授、日立パワーソリューションズ 服部行也様、三菱化学 三浦到様にご協力をいただき、感謝します。また、本開発は科学技術振興機構 A-STEP 実用化挑戦タイプ(課題番号：AS2416903K)の採択により行われたことを記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 高坪純治：励起用パルスレーザー走査法による3次元物体表面を伝わる超音波の可視化．非破壊検査 57(4)：162-168，2008
- 2) 齊藤典生、高坪純治、王波、劉小軍、鈴木修一、王曉東：レーザー超音波可視化検査技術による溶接部欠陥エコーの可視化．検査技術 20(10)：67-69，2015
- 3) 齊藤典生、王曉東、松岡一夫、王波：単3乾電池駆動X線装置による電線用小型X線検査装置．映像情報インダストリアル 46(2)：41-46，2014
- 4) 齊藤典生、王波、王曉東、安達健太郎、于大選：単3乾電池駆動小型X線装置の実用化．映像情報インダストリアル 47(2)：13-17，2015

☆つくばテクノロジー株式会社

TEL.029-852-7777

FAX.029-886-5528

<http://www.tsukubatech.co.jp/>

