

平成 22 年 6 月 22 日現在

研究種目：基盤研究 B  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19360054  
 研究課題名（和文） レーザー法による超音波伝播映像のその場計測技術の開発と非破壊検査への応用

研究課題名（英文） Development of a Laser Ultrasonic Method for Onsite Visualization of Ultrasonic Propagations and Its Application to Nondestructive Inspection

## 研究代表者

高坪 純治 (TAKATSUBO JUNJI)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・主幹研究員

研究者番号：30357363

研究成果の概要（和文）：パルスレーザーを利用して熱励起超音波を発生させ、その励起点を検査体上で走査させることによって、超音波の伝播挙動を動画映像としてその場で計測できる実用的手法を開発した。本手法を用いて、工業プラント配管やロケット燃焼器のプロトタイプ試験体の欠陥検査に適用した結果、内部き裂から放射状に広がる散乱エコーを鮮明に映像化することができ、実構造部材を非破壊的に検査するための有効な手法であることが確認された。

研究成果の概要（英文）：A generation laser scanning method for onsite visualization of ultrasonic propagations was developed. We applied this method to nondestructive inspection of defects of prototype specimens of industrial plant pipes and a rocket combustion chamber. From the measured dynamic images, we could observe the defect echoes as they scatter radially on the surface of the specimen. These results indicate that this method can be effective for nondestructive inspection of structures and materials.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2008年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2009年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：超音波非破壊検査

科研費の分科・細目：機械工学 ・ 機械材料・材料力学

キーワード：非破壊検査、超音波、レーザー、可視化、欠陥、き裂

## 1. 研究開始当初の背景

超音波を利用した非破壊検査法は、安価で簡便な手法として広く普及しているが、産業プラントにおけるたび重なる事故の発生に見られるように、現状の超音波探傷の検査レベルは、必ずしも十分なものではなく、欠陥

を見逃したり、誤認したりすることもある。その大きな原因は、観測される超音波信号の解釈が難しいことにある。超音波の伝播特性は、使用する探触子の種類や接着状態、取り付け位置および被検体の材質、形状によって変化し、特に複雑形状部では、反射波、回折

波、モード変換波が干渉しながら進んで行くため、検査の専門家でも、どれが欠陥エコーなのかを短時間で正確に識別することは難しい。もし、超音波が伝わる様子を映像として目で観察しながら検査することができれば、欠陥エコーの識別が容易となり、欠陥の見逃しや誤認の防止につながる。また、波動伝播機構の解明や新規超音波現象の探索など学術分野での貢献も大きい。

## 2. 研究の目的

本研究では、超音波可視化探傷法という、超音波伝播映像を観察しながら探傷できる新しい非破壊検査の手法を開発する。これにより、検査に専門的スキルを必要とする従来型の超音波探傷法を非熟練者でも測定可能なわかりやすい検査法にし、一般構造物の損傷監視ツールとしての活用を図る。

## 3. 研究の方法

開発した超音波伝播可視化システムのスケッチ図を図1に示す。パルスレーザー照射点を2軸ミラーを使って検査体上で走査しながら、熱歪み超音波を発生させる。その伝播波形を固定点に取り付けた受信探触子で検出し、パソコンに収録する。超音波伝播の相反性を利用して収録波形列を再構成し、受信点から発振される超音波の動画映像をモニター画面に表示する。この可視化方法は、励起側のレーザーを走査しているため、レーザーの照射角度や焦点距離を一定に保持する必要がなく、三次元任意形状物体を伝わる超音波の伝播映像を短時間に計測できる。使用したレーザーの波長は1064nm (YAG)、パルス幅は約2ns、最大出力エネルギー1mJ、可視化視野角 $\pm 25^\circ$  (二軸)である。

本可視化技術を利用した検査法の特長として、(1)映像で見るので欠陥エコーの識別

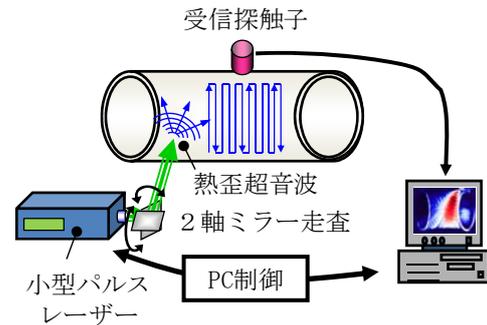


図1 開発した超音波伝播可視化システム

が容易、(2)非接触走査なので複雑構造物にも容易に適用可能、(3)広い領域を短時間で検査可能、などの点を挙げることができる。上記可視化システムを用いて、プラント配管の内面き裂やロケット燃焼器の冷却溝に発生する微視き裂の非破壊検出法を検討した。

## 4. 研究成果

### (1)工業標準化

外部委員9名からなる規格化検討委員会を構成して「励起用レーザー走査による超音波伝搬の映像化方法」の規格原案を作成し、日本工業標準調査会 (JISC) に標準仕様書 (TS) として提案した。本提案は、工業標準調査会鉄鋼技術専門委員会で承認され、TSZ0028 として2010年5月20日に公開された。

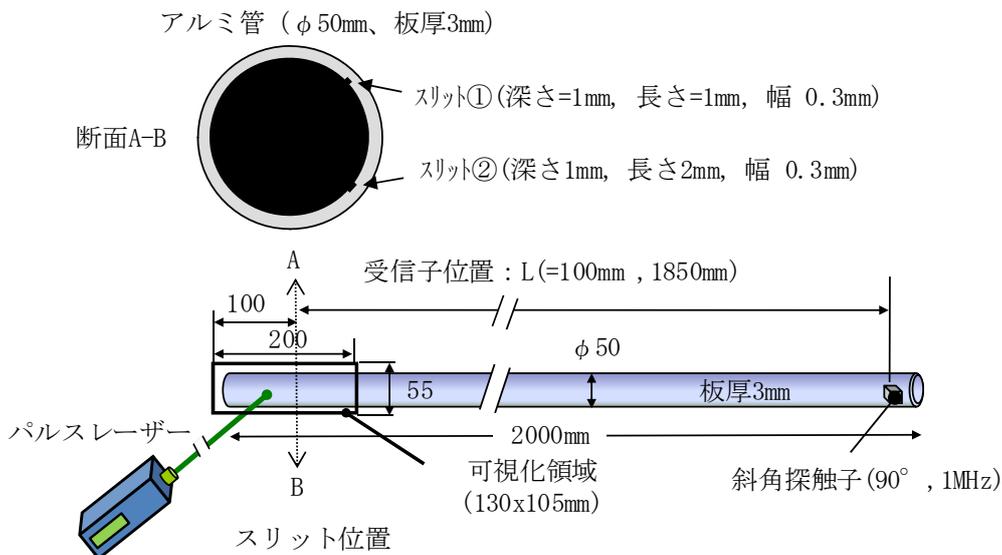


図2 内面にスリット傷を有するアルミニウム管

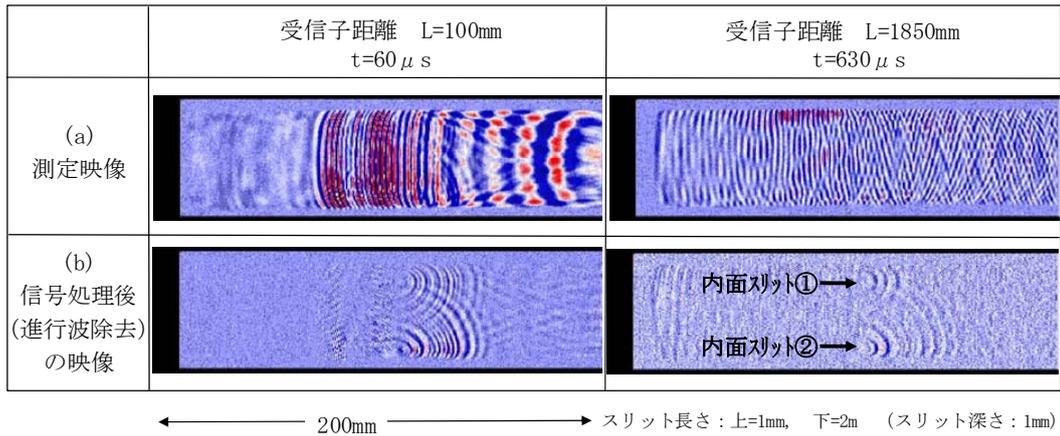


図3 内面にスリット傷を有するアルミニウム管を伝わる超音波の可視化  
(進行波除去信号処理の効果)

### (2) 製品化

産総研ベンチャーつくばテクノロジー(株)を立ち上げ(2007年11月)、超音波の伝わる状況を動画映像としてその場で観察しながら探傷できる超音波可視化検査装置を製品化した。現在、重工メーカーに1台納品し、外国の検査会社から2台を受注している。

### (3) 欠陥エコー抽出アルゴリズムの開発

通常の超音波探傷では、探触子を取り付けた位置に反射エコーが返ってこなければ欠陥を検出することができないが、本可視化探傷法では、レーザー走査領域内に反射エコーが存在すればそれを可視化できるので広域スクリーニング検査に適した方法だといえる。一方で、本手法は、反射波だけでなく進行波も可視化するため、薄板を伝わるガイド波のように、減衰が少なく速度分散性を有する波では、欠陥エコーが進行波の中に隠されてしまうことがある。そこで、ここでは、近

接3点間の検出波形を同期差分することによって、進行波を消去する信号処理方法を開発した。

上記信号処理法の効果を検証するために、図2に示すように、外径50mm、長さ2000mm、厚さ3mmのアルミニウム管の左端から100mmのところから深さ1mm、幅0.3mmで、長さがそれぞれ1mmおよび2mmの内面スリット傷を放電加工にて図の位置に導入し、スリット傷から右100mmおよび1850mmの位置に斜角探触子(90°、1MHz)を取り付けて内面スリット部表面を伝わる超音波を可視化した。走査ピッチは0.5mm、走査点数は400×110点である。図3(a)図に、L=100mmおよび1850mmの位置に取り付けた探触子で計測した超音波伝播可視化像を示す。また、(b)図に同期差分法で信号処理した伝播画像を示す。(a)図ではスリット傷エコーを確認することは難しいが、信号処理後の(b)図でははっきりとスリット傷エコーの存在を確認することができ



図4 溶接継ぎ手部に SCC き裂を有する SUS316 ステンレス鋼管試験体  
(150A: 外径 165mm, 長さ 500mm, 板厚 14mm)

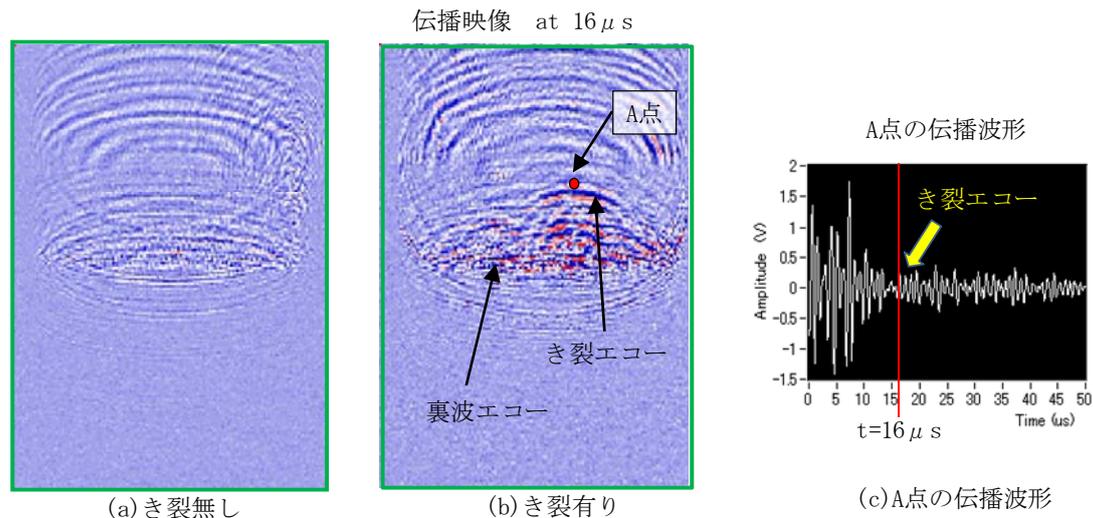


図5 SUS316 ステンレス鋼管試験体を伝わる超音波の可視化  
(SCC き裂の有無による伝播映像の違い)

る。上記信号処理法の開発により、本可視化探傷法の実用性を大幅に向上させることができた。

#### (4) 工業プラント配管の超音波可視化探傷法

原子力発電配管の SCC (応力腐食割れ) き裂検査への適用性を検討するため、図4に示すような 150A ステンレス管を用意し、溶接継ぎ手部に長さ 16mm、深さ 1.2mm の SCC き裂を導入し、斜角探触子 (45°、1MHz) を図の位置に取り付けて超音波伝播映像を計測した。図5 (a) 図および (b) 図にき裂が無い場合と有る場合の伝播画像を比較して示す。き裂が有る場合は、溶接部裏波からのエコーのほかに、明らかにき裂エコーと考えられる波が観察されている。(b) 図の A 点における受信信号を (c) 図に示すように、溶接部近傍の受信波形は複雑であり、き裂エコーを識別するには熟練を要するが、伝播映像からはき裂エコーを比較的容易に見つけ出すことができる。現在、電力会社および検査会社と共同で、原子力発電配管の効率的検査方法を検討中である。

#### (5) ロケット燃焼器の超音波可視化探傷法

ロケット燃焼器は、3000K の超高温燃焼ガスと 20K の極低温液体水素が厚さ 1mm の冷却溝壁を挟んで存在するという過酷な環境下にあり、燃焼サイクルを繰り返すうちに冷却溝から燃焼器内壁に向かってクラックが発生することがある。燃焼器内壁はくびれ部を有するコーン型の曲面形状であるうえ、内壁から深さ 1mm 程度のところに複数の冷却溝が配列されるという複雑構造であるため、従来の方法では検査が非常に困難であった。そこ

で、JAXA と共同でレーザー超音波可視化探傷法によるロケット燃焼器のき裂検査法を検討している。

図6に、実験に使用した燃焼器のモックアップ試験体を示す。冷却溝部には図に示すような複数のスリット傷を作製している。燃焼器内壁をパルスレーザーで非接触走査させてこれらのスリット傷の非破壊検出を試みた。図7に超音波最大振幅図を示すように、いずれのスリット傷もはっきりと存在を確認できる程度に画像化できており、また、スリット傷の長さも十分推測できるだけの画像が得られている。まだ、モックアップ試験体での検証試験をおこなったに過ぎないが、液体ロケット燃焼器の非破壊検査のための有力な探傷法になり得るものと考えている。

#### (6) 今後の展望

非破壊検査の分野においては、「聴く技術 (一次元信号)」から「見る技術 (画像)」へ、また、「接触計測」から「非接触計測」へという流れがあり、この流れに乗り遅れた計測技術は淘汰される。現在の超音波探傷法は、まだ、パルスエコー法に代表される聴く技術が主流であるが、今後も、他の検査法に淘汰されることなく生き延びていくためには、非接触・画像化計測によるわかりやすい検査技術の開発に真剣に取り組んで行かなければならない。本可視化技術はそのための有力な手法を提供するものだと考えている。

科学技術は人間の夢を実現させる手段である。少年の夢に例えて言わせてもらえば、スーパーマンのように指先からレーザー光を出して被検体に当て、そこから広がって行く超音波の伝播映像を観察することで、内部



図6 液体ロケット燃焼器模擬試験体

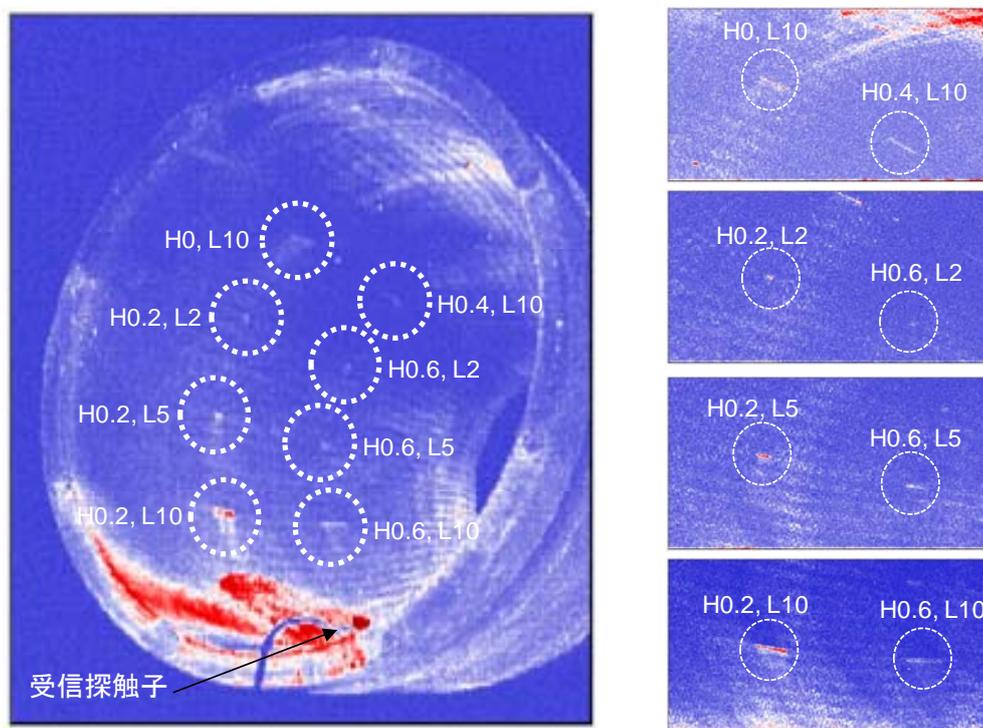


図7 液体ロケット燃焼器模擬試験体の超音波最大振幅画像

損傷の有無と規模を即座に判定できるような装置を開発したいと考えている。大橋脚やビルディングのような高所や、高温下、放射能下のように人が近づけない場所でも、遠隔からレーザー光を当てて非接触で検査できるかもしれない。これらの夢を実現するためには解決すべき課題も多いが、本技術はその夢を実現させる可能性を秘めた、今までにな

い新しい技術だと考えている。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

- ① 高坪純治、レーザー超音波可視化探傷技術の開発、検査技術、査読無し、15巻1号、(2010)、pp.24-30
- ② 高坪純治、宮内秀和、卜部啓、津田浩、

- 遠山暢之、王波、レーザー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、査読有り、75巻750号、(2009)、pp.211-218
- ③ 高坪 純治、王 波、宮内 秀和、津田 浩、遠山 暢之、ト部 啓、Visualization of ultrasonic waves scattered from rear defects by using a laser-based imaging technique、Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation、査読無し、28-B、(2009)、pp.666-673
- ④ 高坪純治、励起用パルスレーザー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、査読無し、57巻4号、(2008)、pp.162-168
- ⑤ 高坪純治、レーザー法による超音波伝播の映像化、検査技術、査読無し、第12巻、(2007)、pp.17-23  
〔学会発表〕(計10件)
- ① 高坪純治、津田浩、宮内秀和、森谷信一、安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術シンポジウム、2010年3月18日、つくば市
- ② 高坪純治、映像化超音波探傷法による配管内面き裂の効率的検出方法に関する研究、セキュリティ技術研究会、2010年2月3日、東京
- ③ 高坪純治、森谷信一、超音波伝播動画映像のその場測定技術の開発とき裂検査への応用、第25回宇宙構造・材料シンポジウム、2009年12月4日、東京
- ④ 宮内秀和、津田浩、高坪純治、超音波ガイドFBG光ファイバセンサによる超音波伝搬の可視化解析、電気学会産業計測制御研究会、2009年12月2日、東京
- ⑤ 高坪 純治、遠山 暢之、佐藤英一、森谷信一、佐藤明良、レーザー超音波可視化探傷法の宇宙機器検査への適用性、安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術シンポジウム、2009年3月24日、つくば市
- ⑥ 高坪 純治、王 波、宮内 秀和、津田 浩、遠山 暢之、ト部 啓、Laser Ultrasonic Technique for Visualizing Ultrasonic Waves Propagating on a 3-D Object、17th World Conference on Nondestructive Testing、2008年10月27日、上海(中国)
- ⑦ 高坪純治、王 波、宮内 秀和、津田 浩、遠山暢之、ト部啓、Visualization of ultrasonic waves scattered from rear defects by using a laser-based imaging technique、35th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation、2008年7月24日、シカゴ(米国)
- ⑧ 高坪純治、宮内秀和、津田浩、遠山暢之、ト部啓、王波、Generation Laser Scanning Method for Visualizing Ultrasonic Waves Propagating on a 3-D Object、1st International Symposium on Laser Ultrasonics、2008年7月17日、モントリオール(カナダ)
- ⑨ 高坪純治、宮内秀和、遠山暢之、ト部啓、津田浩、王波、超音波伝搬の高速映像化システムの開発、日本非破壊検査協会平成19年度秋期大会講演会、2007年10月19日、札幌市
- ⑩ 高坪純治、宮内秀和、遠山暢之、岡部秀彦、王波、萩巣敏充、励起用レーザー走査法による超音波伝搬の可視化とCFRP構造のはく離検出への応用、界面の健全性評価技術に関するワークショップ、2007年8月31日、東京
- 〔その他〕  
工業標準化
- ① 励起用レーザー走査による超音波伝搬の映像化方法、日本工業標準調査会標準仕様書(TS)、2010年5月20日公開  
(<http://www.jisc.go.jp/app/TPS/TPS00020.html>)
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
高坪 純治 (TAKATSUBO JUNJI)  
独立行政法人産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・主幹研究員  
研究者番号：30357363
- (2) 研究分担者  
津田 浩 (TSUDA HIROSHI)  
独立行政法人産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門構造体診断技術研究グループ・グループ長  
研究者番号：30262108  
遠山 暢之 (TOYAMA NOBUYUKI)  
独立行政法人産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門構造体診断技術研究グループ・主任研究員  
研究者番号：60344165  
宮内 秀和 (MIYAUCHI HIDEKAZU)  
独立行政法人産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門構造体診断技術研究グループ・主任研究員  
研究者番号：80174126