

レーザ超音波映像化探傷法による配管検査

(独)産業技術総合研究所 高坪 純治 つくばテクノロジー(株) 王 波

Nondestructive Pipe Inspection Using Laser Ultrasonic Visualizing Method

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology Junji TAKATSUBO
Tsukuba Technology Co., Ltd. Bo WANG

キーワード 非破壊検査, 超音波, レーザ, 可視化, 配管, き裂, 腐食

1. はじめに

発電プラント、工業プラントは配管のかたまりだと言われるほど膨大な量の配管があり、経年劣化によって発生するひび割れや腐食の検査をいかに効率的に行うかが課題になっている。配管検査には簡便な手法として超音波探傷法が広く用いられているが、検査に時間が掛かる要因として、次の5つを挙げることができる。(1) 溶接継手部や湾曲部等の複雑形状部の検査が難しい。(2) 傷エコーの判定に高度な専門性を要求される。(3) 斜めのひび割れを検出するのが難しい(探触子の場所と方向を変えながら検査しなければならない)。(4) 足場を作らなければならない。(5) 保温材を剥がさなければならない。現在、著者らが開発中のレーザ超音波映像化探傷法^{1)~5)}は、超音波励起用のパルスレーザを検査体表面で走査させて検査面を伝わる超音波の動画映像を測定し、傷からの波紋状のエコーの有無で傷の存在を判定しようという新しい検査の手法であり、上記(1)~(3)の課題を解決する有望な手法だと考えられる。また、将来的に受信センサーも非接触になれば、遠隔操作も可能になり、上記課題(4)の足場作りの減少にもつながる。

本研究では、レーザ超音波映像化探傷法の配管検査への適

用性を検討するために、鋼管試験体の内面にスリット傷や腐食を模擬した球面溝およびSCC(応力腐食割れ)を導入し、傷エコーの可視化を試みた。その結果、いずれの傷エコーも短時間で映像化することができ、配管のひび割れや腐食を検出するための効率的で分かり易い探傷法になり得ることが示唆された。

2. 超音波伝搬映像化システム

レーザ超音波映像化システムのポンチ絵を図1に示す。検査体表面に出力エネルギー1mJ、パルス幅10ns程度のレーザを照射すると、微弱な熱歪超音波が励起される。超音波励起点を2軸ミラーを利用して高速走査し、レーザ発振と同期させて固定点に取り付けた受信センサで伝搬信号を検出する。検出信号をPCに収録し、超音波伝搬の相反定理を利用して、受信点から発振される超音波の伝搬映像を再構成する。この映像化方法^{6),7)}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、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に計測できる。

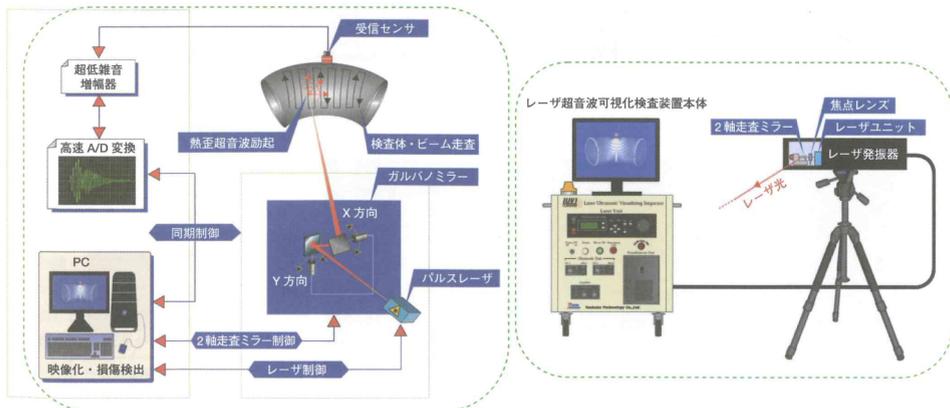


図1 レーザ超音波可視化システムのスケッチ図

3. 信号処理による傷エコーの強調

配管を伝わる超音波は短パルス状に伝わる場合はごくまれで、多くの場合、長い波束を有する減衰振動型の波形になる。このため、傷エコー（後退波）が存在しても、進行波の長い波束の中に隠されてしまうことがある。このような場合、近接2点間の進行波を同期させて差分をとることにより、進行波を消去して後退波を強調することができる⁸⁾。図2に、同期差分信号処理の効果を示す。(a) 図に示すようなアルミ管の内面に長さ10mmで深さがそれぞれ2mmおよび1mmのスリット傷（幅0.2mm）を導入し、端部上面に取り付けた

斜角探触子から発振される超音波を映像化した。(b) 図は測定したままの映像であり、この映像からはスリット傷エコーを見分けることは難しいが、(c) 図に示す信号処理後の映像では、傷エコーがくっきりと強調されている。

4. 配管溶接継ぎ手部の SCC エコーの映像化

高温高压炉水下で作製された原子力配管溶接部 SCC 試験体 (SUS304, 600A) を用いて SCC エコーの映像化を試みた。図3 (a) に短冊状試験体を示す。経験的に、板厚5mm以下の鋼管

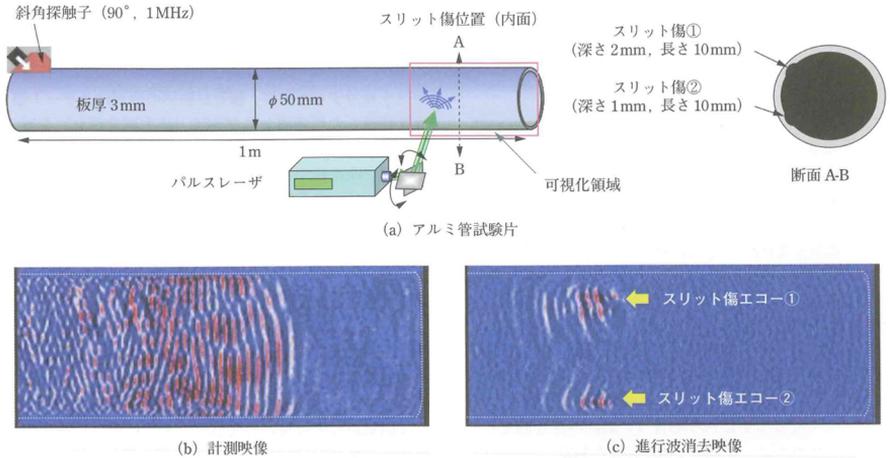
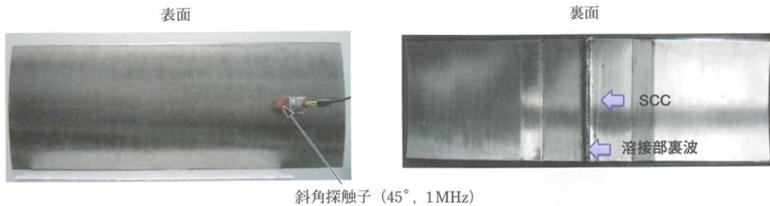
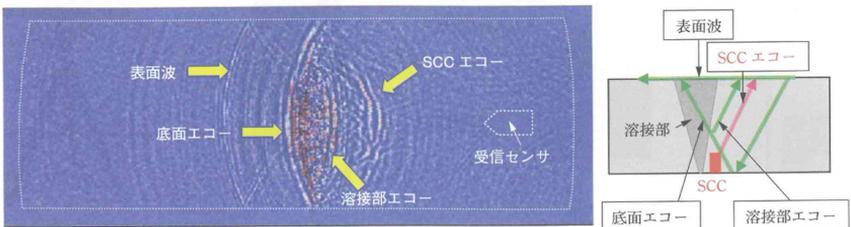


図2 計測映像と進行波消去映像の比較（内面にスリット傷を有するアルミ管を伝わる超音波映像）

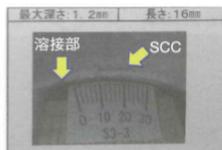
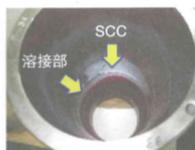
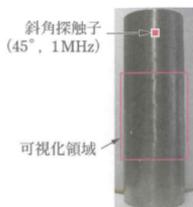


(a) SCC 試験片 (SUS304 600A: ϕ 610mm \times 400 \times 40)



(b) 表面を伝わる超音波映像

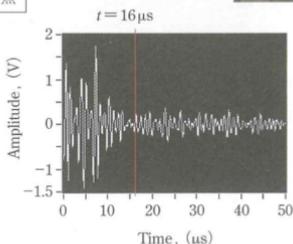
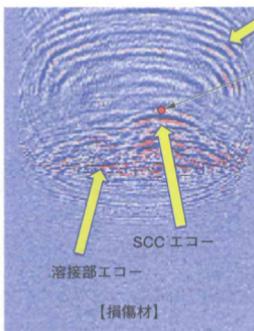
図3 SUS304 ステンレス鋼管 (600A 短冊状試験片) 溶接継ぎ手部の SCC エコーの可視化



SCC :
深さ 1.2mm,
長さ 16mm

PT image

(a) SCC 試験片 (SUS316 150A : $\phi 165\text{mm} \times 500 \times 14\text{t}$)



(c) A点の検出信号

(b) 超音波伝搬映像 (進行波消去後, $t = 16\mu\text{s}$ の伝搬画像)

図4 ステンレス管 (SUS316, 600A) 溶接部 SCC エコーの可視化 (健全材と損傷材の比較)

では、斜角 90° の探触子を使用した場合に高い強度の内面傷エコーを検出できるが、本試験体のような厚板材では、斜角 45° の探触子を使用して、試験体内部に向けて超音波を入射した方が欠陥エコーの検出性能が高くなる。試験体中央の溶接部から 120mm 離れた場所に斜角探触子 (45° , 1MHz) を配置し、試験体表面を伝わる超音波を映像化した。図 3 (b) に可視化映像を示すように、底面エコー (進行波) が表面に現れるのとほぼ同時に、溶接部エコー (後退波) と SCC エコーも観察される。

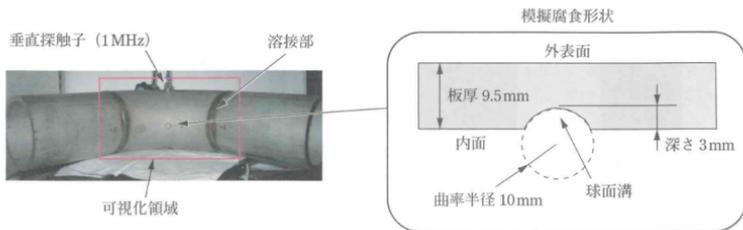
また、図 4 は、SCC 円管試験体 (SUS316, 150A) の SCC エコーの映像化を試みたものである。(a) 図に示すように、管中央の溶接部近傍に、深さ 1.2mm、長さ 16mm (UT, PT 探傷結果) の SCC 裂けが導入されている。(b) 図に SCC が無い場合とある場合の超音波可視化映像を比較して示す。SCC がある場合には、溶接エコーの先 (上部) に SCC エコーが観察されている。参考までに、A 点における観測波形を (c) 図に示す。(b) 図の可視化映像は、計測時刻 $16\mu\text{s}$ のときの画像であり、その時刻に SCC エコーが A 点に到達していることから、(c) 図における時刻 $16\mu\text{s}$ (波形グラフの赤の縦線) の波が SCC エコーに対応する。(c) 図の信号波形から SCC エコーを識別するにはかなり高度な専門性を要求されるが、(b) 図の可視化映像では SCC エコーを視覚的に捕らえられるので、識別が容易になる。

5. エルボ管、チーズ管の模擬腐食エコーの映像化

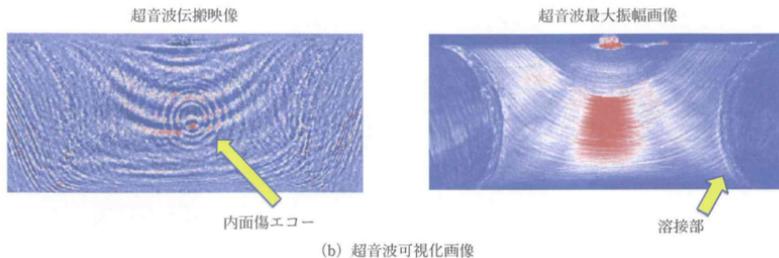
次に、ステンレス鋼エルボ管およびチーズ管を用いて、模擬

腐食エコーの映像化を試みた。まず、図 5 (a) に示すようなステンレス製エルボ管の内面に、深さ 3mm、曲率半径 10mm の球面溝を導入し、エルボ部上面に取り付けた垂直探触子 (1MHz) からの超音波伝搬映像を測定した。その伝搬映像と最大振幅画像を図 5 (b) に示す。探触子に、斜角 90° センサ、斜角 45° センサ、垂直センサ (いずれも周波数 1MHz) を使用して、測定映像を比較してみたが、傷エコーを検出し易い順に、斜角 45° センサ、垂直センサ、斜角 90° センサであった。しかし、垂直探触子は、斜角探触子に比べて湾曲部に取り付けやすく、また、超音波の伝搬方向に指向性がなく同心円状に広がって行くので広い領域を検査しやすいという特長を有していることから、ここでは実用性を重視して垂直探触子を使用して可視化した。図 5 (b) に示す伝搬映像には模擬腐食からのエコーがはっきりと映し出されている。また、図 5 (c) 右図に最大振幅画像を示すように、本探傷法では、試験体の形状や溶接部も画像として記録されるので、試験体と傷の位置関係を確認するのも容易である。

チーズ管の場合の超音波伝搬映像を図 6 に示す。図 6 (a) に示すように、チーズ管の内面に深さが 3mm と 5mm で、曲率半径が 20mm の球面溝を導入し、前面中央部に取り付けた垂直探触子 (1MHz) で超音波伝搬映像を可視化した。図 6 (b) に伝搬映像と最大振幅画像を示す。前面両サイドからの内面溝エコーがはっきりと映し出されているのは当然のこととはいえ、レーザが試験体にほぼ水平に当たる管上部頂点付近の内面溝からの傷エコーも映像化されている。



(a) 試験片 (SUS304 $\phi 140 \times 9.5t$) および欠陥

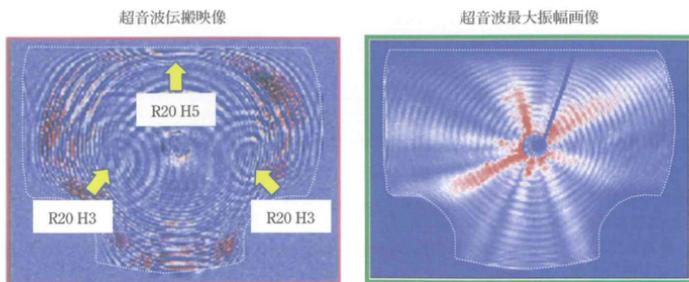


(b) 超音波可視化画像

図5 模擬腐食を有するステンレス管エルボ部を伝わる超音波の可視化



(a) チーズ管 (SUS304 100A)



(b) 超音波可視化画像

図6 複数の模擬腐食を有するステンレス製チーズ管 (SUS304) を伝わる超音波の可視化

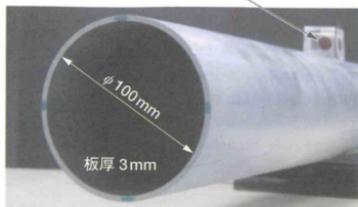
6. 計測条件が測定映像に及ぼす影響

6.1 検査体の傾斜角度

図2で使用したアルミ管を用いて、試験体（レーザ入射角）を傾けていったときに可視化映像にどのような変化が現れるかを調べた。試験体にレーザが垂直に当たる場合を傾斜角 0°

として、 45° 、 60° 、 70° 傾けたときの可視化映像を図7に比較して示す。 60° までは、傷エコーを捕らえられているが、 70° 以上になってくると照射スポット径が楕円状に長くなり、励起される超音波の振幅も急速に低下し傷エコーの検出性能が低下する。

斜角探触子 (90°, 1MHz)



試験体傾斜角

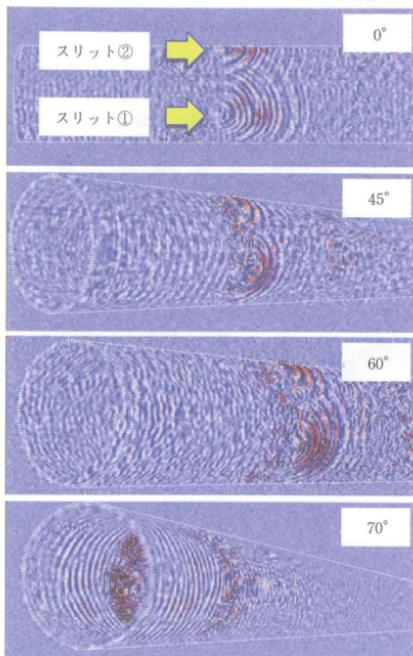


図7 試験体傾斜角度の増加に伴う超音波伝搬映像の変化 (図2のアルミ管)

6.2 レーザ走査速度 (計測時間)

つぎに、レーザ走査速度を変えたときの映像を比較して図8に示す。走査ピッチは0.8mm、走査点数は240×106点である。レーザ走査速度が速くなると、超音波励起の周期が短くなるため、残響が大きくなり受信信号のS/Nが悪化する。高速走査によるスクリーニング検査で異常が見つければ、走査速度を落として精密検査するのが効率的だと考える。スクリーニング検査時の走査速度の目安として、500Hzを推奨する (500kHzのHPF使用時)。

6.3 探触子から傷までの距離

長さ2mのアルミ管 (φ50) の内面に、長さが4mmで深さがそれぞれ1mmおよび2mmのスリット傷 (幅0.3mm) を管端から100mmの位置に導入し、スリット傷から探触子までの距離を500mm、1000mm、1900mmと変えて超音波可視化映像を計測した。図9に伝搬映像を比較して示すように、

レーザ走査速度 (走査時間)

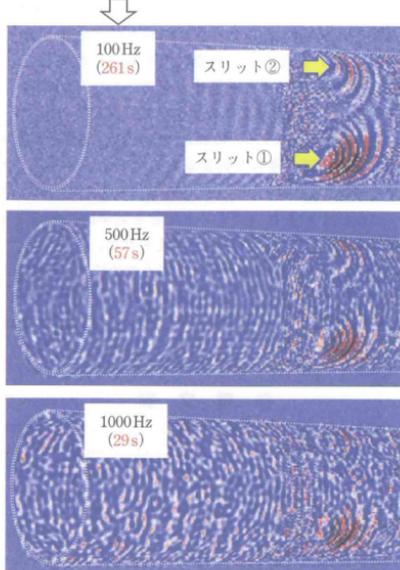


図8 レーザ走査速度の増加に伴う超音波伝搬映像の変化 (図2のアルミ管)

超音波伝搬距離

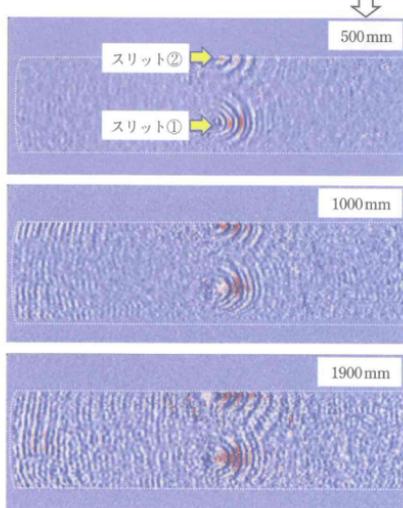


図9 超音波伝搬距離 (探触子から欠陥までの距離) の増加に伴う超音波伝搬映像の変化 (図2のアルミ管)

超音波伝搬距離が長くなると速度分散によって波束が長くなり、また減衰も大きくなるので、傷エコーの検出性能は低下するが2m程度の距離であれば、寸法がミリオーダーの裏面傷であれば十分に検出できる。

7. おわりに

検査体表面をレーザー走査することにより超音波伝搬映像を観察しながら欠陥検査できる新しい検査の手法を紹介した。本手法は、(1) 複雑形状の検査体でも容易に映像化できる、(2) 広い範囲を短時間で映像化できる、(3) 超音波の伝搬挙動をその場で動画映像として観察できるので、傷エコーを識別し易い、(4) 試験体の輪郭と欠陥の位置関係を画像として記録できる、等の優れた特長を有している。本手法を用いて配管検査への適用性を検討した結果、き裂や腐食溝を検知できる可能性が示され、プラント配管を効率的に検査するための有効な手段になり得るものと考えられた。

資源を節約し、地球環境を守っていくためにも、発電プラント、工業プラントを安全に長く使用することは重要であり、本映像化探傷法が、そのために少しでも貢献できれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) J. Takatsubo, B. Wang, H. Tsuda and N. Toyama : Generation Laser Scanning Method for the Visualization of Ultrasounds Propagating on a 3-D Object with an Arbitrary Shape, J. Solid

Mechanics and Materials Engineering, 1(12), pp.1405-1411, (2007)

- 2) J. Lee, J. Takatsubo, N. Toyama and D. Kang : Health Monitoring of Complex Curved Structures using an Ultrasonic Wavefield Propagation Imaging System, Measurement Science & Technology, 18(12), pp.3816-3824, (2007)
- 3) S. Yashiro, J. Takatsubo and N. Toyama : An NDT Technique for Composite Structures using Visualized Lamb-wave Propagation, Composites Science and Technology, 67(15-16), pp.3202-3208, (2007)
- 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, 57(4), pp.162-168, (2008)
- 5) 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, 15(1), pp.24-30, (2010)
- 6) 高坪純治, 津田 浩, 遠山暢之：超音波伝搬の映像化方法および装置, 特許登録番号 第 4595117 号, (2010)
- 7) 日本工業標準調査会, 標準仕様書, 励起用レーザー走査による超音波伝搬の映像化方法, JISC TS Z0028, (2010)
- 8) 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像の画像化, 日本機械学会論文集, 75(750), pp.211-218, (2009)



高坪 純治 (独)産業技術総合研究所
(305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第二)
計測フロンティア研究部門 主幹研究員
レーザー超音波可視化探傷技術に関する研究に従事



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 中央第二、2-1D-125 室) 代表取締役社長
レーザー超音波可視化非破壊検査装置の研究開発に従事