

## 水中における溶接金属部表面の微小亀裂検査

### レーザー光と超音波で見えない亀裂を可視化する

レーザーを用いた新しい超音波励起・受信技術により、今まで難しかった、水中の溶接金属部にある肉眼では見えない微小開口亀裂の形状を、2次元的に可視化することに成功しました。

この技術は、原子炉内機器、海中パイプライン、メガフロートなど、水中に設置された溶接構造物に対する感度の高い非破壊検査手法として、今後、幅広く適用していくことができると考えています。

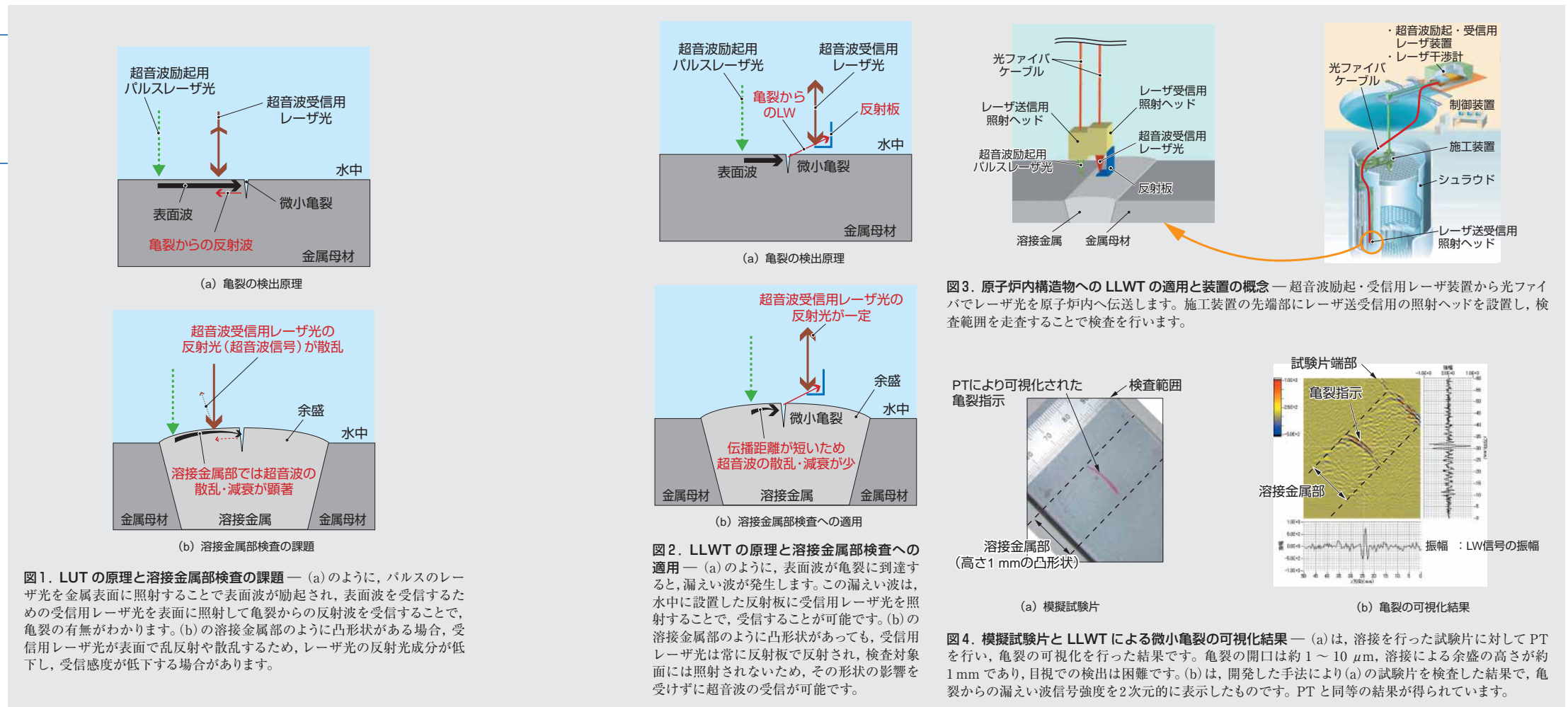


図1. LUTの原理と溶接金属部検査の課題 — (a)のように、パルスのレーザー光を金属表面に照射することで表面波が励起され、表面波を受信するための受信レーザー光を表面に照射して亀裂からの反射波を受信することで、亀裂の有無がわかります。(b)の溶接金属部のように凸形状がある場合、受信レーザー光が表面で乱反射や散乱するため、レーザー光の反射光成分が低下し、受信感度が低下する場合があります。

図2. LLWTの原理と溶接金属部検査への適用 — (a)のように、表面波が亀裂に到達すると、漏えい波が発生します。この漏えい波は、水中に設置した反射板に受信レーザー光を照射することで、受信することが可能です。(b)の溶接金属部のように凸形状があっても、受信レーザー光は常に反射板で反射され、検査対象面には照射されないため、その形状の影響を受けずに超音波の受信が可能です。

図3. 原子炉内構造物へのLLWTの適用と装置の概念 — 超音波励起・受信レーザー装置から光ファイバでレーザー光を原子炉内へ伝送します。施工装置の先端部にレーザー送信用の照射ヘッドを設置し、検査範囲を走査することで検査を行います。

図4. 模擬試験片とLLWTによる微小亀裂の可視化結果 — (a)は、溶接を行った試験片に対してPTを行い、亀裂の可視化を行った結果です。亀裂の開口は約1～10 $\mu$ m、溶接による余盛の高さが約1mmであり、目視での検出は困難です。(b)は、開発した手法により(a)の試験片を検査した結果で、亀裂からの漏えい波信号強度を2次元的に表示したものです。PTと同等の結果が得られています。

#### 水中溶接後の非破壊検査技術

近年、原子力プラントの炉内構造物及び、メガフロートや海中パイプラインなどの海洋構造物に対して、水中で溶接を行う技術が開発されています。多くの場合、溶接をした際に、溶接部に亀裂が発生していないことを非破壊検査で確認することが求められます。

水中での非破壊検査には超音波探傷法(UT: Ultrasonic Testing)が広く使用されていますが、溶接金属部は平面でなく、余盛(よもり)と呼ばれる凸形状を持つことや、超音波の散乱・減衰が顕著であることから、表面の開口が微小な亀裂を水中で検出し、その形状を可視化することは難しいのが現状です。

現在使用されている超音波探傷法のうち、レーザー超音波探傷法(LUT: Laser-Ultrasonic Testing)は、ごく浅い亀裂の検出やその深さの高精度計測が可能で、原子炉内機器の検査に適用が開始されています。LUTはレーザー光を検査対象面に照射し、超音波を励起してそれを受信する技術(図1(a))で、レーザー光を微小な点状に集光できることから、高い空間分解能を持っています。一般的に超音波を励起受信する面積が小さいほど空間分解能が高くなります。しかし、検査対象面に伝播(でんぱ)する超音波を、検査対象面に直接照射した受信レーザー光の反射光で受信するため、表面形状の影響を受ける場合があります。

#### 溶接金属部への適用性向上

LUTの超音波受信手法を改良し、検査対象面の形状の影響を受けにくい計測手法として“レーザー漏えい波探傷法”(LLWT: Laser Leaky Waves Testing)を開発しました。

図2(a)に示すように、パルスレーザー光を検査対象面に照射すると、その表面に超音波の一種である表面波が発生します。ここで、表面波の伝播経路上に亀裂が存在する場合、亀裂に到達した表面波の一部は漏えい波(LW: Leaky Wave)に変換され、水中に漏えいします。LWは水中において、ほとんど散乱・減衰せずに伝播することが可能です。このため、LWが伝わる水中に反射板を設置して受信レーザー

光を照射することで、LWを水の密度変化として高感度に受信することができます。この方法により、検査対象面の状態や、溶接金属部における超音波の散乱・減衰の影響を受けにくい亀裂検出が可能になります。

この技術の適用の一例として、原子炉内構造物の溶接金属部の検査にLLWTを適用する場合の概念を図3に示します。複雑で狭い部位を検査するために、小型化した照射ヘッドを検査部位に送り込み、光ファイバでレーザー光を伝送する構成となっています。

#### 微小亀裂の可視化結果

溶接金属上の余盛部(高さ約1mmの凸形状)に微小亀裂を模擬的に形成した試験片を図4(a)に示します。微

小亀裂の開口幅は約1～10 $\mu$ mで、目視での検出は困難です。まず、大気中でこの試験片に浸透探傷試験(PT: Liquid Penetrant Testing)を行いました。PTとは、見やすい色の付いた浸透液を金属表面に塗布し、毛細管現象を利用して亀裂にしみこませて可視化する手法です。目視では検出困難な開口幅が数 $\mu$ mの微小亀裂も可視化できる、高感度な検査手法として知られています。しかし、液体を用いるため、水中での使用は原理的に難しいという課題があります。

この試験片に対して、図4(a)に示す検査範囲をLLWTで検査しました。その結果を図4(b)に示します。亀裂の位置及び形状は、PTと同等の検査結果が得られています。これにより、

新しく開発したLLWTは、溶接金属部にある微小亀裂の検出と形状の可視化が、水中でもPTと同様に実現できることがわかりました。

#### 今後の展望

LLWTの適用先として、水中溶接技術と組み合わせた溶接後の非破壊検査が挙げられます。現在、この実現に向けた適用化技術の開発を進めています。今後は、実用化を目指すとともに、原子力プラント以外の分野へ適用範囲を広げていく予定です。

三浦 崇広

電力システム社  
電力・社会システム技術開発センター  
計測・検査技術開発部