

音波と光干渉を用いた表層欠陥の可視化技術

超音波光探傷装置MAIVIS™(MIV-X)*

児玉 賢治^{*,†}

Visualizing Technology that Utilizes Sonic Waves and Light Interference to Detect Surface Layer Defects*

Kenji KODAMA^{*,†}

1. はじめに

近年、多くの産業分野における製造・整備・保守の現場では競争力を確保するため、より高いレベルの品質管理や生産性の向上が求められている。また、表面改質分野においても多様かつ高度な要求に応えるために新たな素材や加工技術が開発されている。それらに対応する新たな検査方法も必要とされ、とりわけ非破壊での検査ニーズが大きい。

本稿では、試料の表面付近（以下、表層）の欠陥を検知するのに適し、音波の励振とレーザの干渉光とを組み合わせた新しい非破壊検査技術（音波光干渉イメージング技術、以下は本技術）について解説する。また、本技術を実装した当社の超音波光探傷装置（MIV-X）¹⁾を用いた皮膜欠陥に関する観察事例についても紹介する。

2. 音波光干渉イメージング技術の概要

2.1 概要

試料に連続した音波振動による外的負荷を加え、試料表面

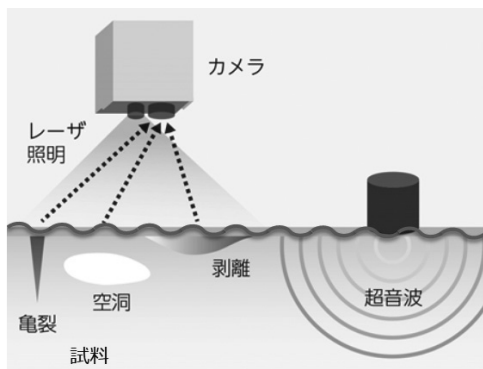


Fig.1 Concept diagram of defect detection by visualization of ultrasonic vibration.

を伝搬する音波による微小な面外変形の状況をレーザ照明と特殊カメラを用いて光学的に可視化し、音波の伝搬が、表層の亀裂、剥離、空洞などの箇所に変化する様子を観察することにより欠陥を検知する (Fig.1)。

2.2 特長

2.2.1 多様な形態の表層欠陥を可視化

試料表面の微小な面外変形を光学的に可視化する特殊カメラを用いて、カメラ視野内の広域を一括して計測することができる。表層欠陥の形態による欠陥箇所での音波の伝搬状況を Fig.2 に示す。

(a) 露出した母材亀裂：

亀裂箇所では音波の伝搬に不連続が生じる。

(b) 皮膜下の母材亀裂：

皮膜表面に露出していない隠れた亀裂欠陥の場合も、(a)と同様に、内部に母材亀裂がある箇所では音波の伝搬に不連続が生じる。

(c) 接合不良、表面付近の層間剥離など：

塗膜や溶射皮膜などの浮いた箇所では、表面の音波の伝搬は正常箇所と比べ、振幅大及び波長短と変化が生じる。薄板部材間の接合不良、ハニカムサンドイッチ構造部材や建築物などのタイルの接着剥離、CFRPの層間剥離の場合も同様である。

表面に対する光学的な観察のため、試料内部の音響インピーダンスやX線透過率などの材料特性を考慮することなく計測できる点も特長である。

2.2.2 計測結果のデータ化が可能

計測結果を画像データとして記録できるため、検査結果の妥当性を後で検証することが可能になり信頼性向上に寄与で

*原稿受付日 2024年6月10日

*原稿受理日 2024年6月25日

*株式会社島津製作所 分析計測事業部 試験機ビジネスユニット (〒604-8511 京都市中京区西ノ京桑原町1)

* Testing Machines Business Unit, Shimadzu Corporation. (1, Nishinokyo Kuwabara-cho, Nakagyo-ku, Kyoto 604-8511, Japan)

† Corresponding author, E-mail : codama@shimadzu.co.jp

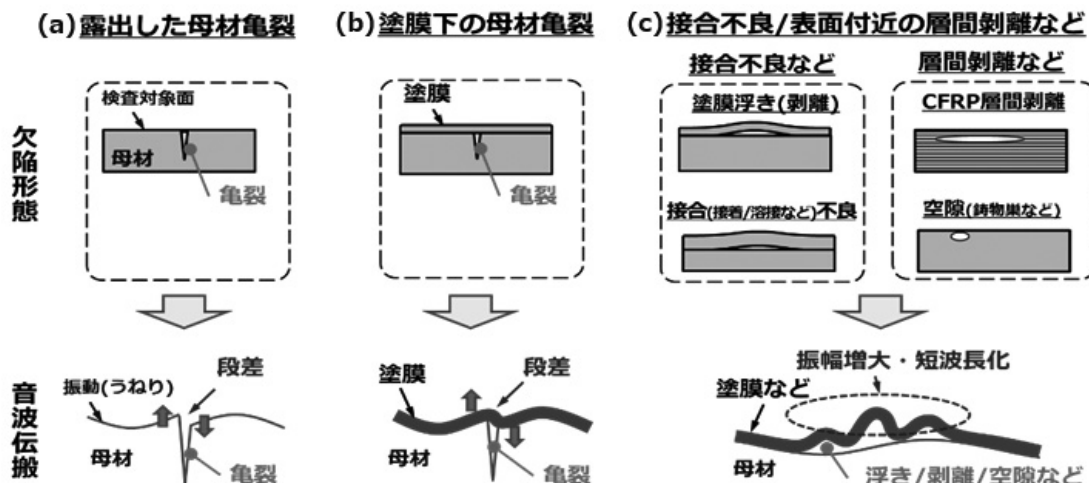


Fig.2 Acoustic wave propagation at defects.

きる。さらに劣化の経時観察や他手法評価との紐づけなどにも活用が可能となる。

2.2.3 検査作業の効率化に寄与

皮膜で覆われた試料に対し、本技術は皮膜下の欠陥を非破壊で可視化できるため、従来の浸透探傷検査や磁粉探傷検査にて必要であった皮膜除去や探傷剤塗布/除去、再塗装などの前後工程を大幅に削減することが可能となる。また、試料の水浸や遮蔽空間への設置の必要もなく、大型の試料、運用・竣工済みの現場においても使用できる可能性がある。

2.3 音波光干渉イメージング技術の原理

連続した音波振動により生じる試料表面の空間的・時間的な変化に伴う微小な面外変形の測定は、近接した2点からの反射光を干渉させて面外変形の空間分布を画像化するスペckル・シアリング干渉法とストロボスコープ技術を組み合わせる。

2.3.1 音波振動による面外変形の測定

スペckル・シアリング干渉法の光学系の基本構成を Fig.3

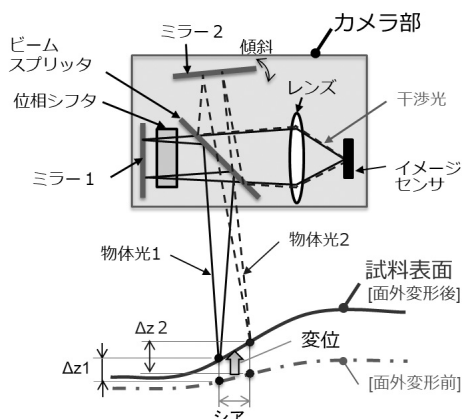


Fig.3 Optical diagram of a speckle shearing interferometer.

に示す。試料の表面(粗面)をレーザ光で照明しカメラで撮影すると、スペckルとよばれるランダムな明暗パターンの光学画像(スペckル像)を取得できる。シアリング干渉法では、カメラ内部の光学系においてビームスプリッタとミラーを用いて光路を2分割してわずかに横ずらし(シア: shear)したのちに重ね合わせることで、スペckル像の微分干渉像が得られる。さらに、2分割した光路の長さを位相シフタで相対的に変化させながら微分干渉像の各画素の輝度変動を計測することにより、各画素に投影されている表面の2点から到来する光の位相差 $\Delta\phi$ が求められる。

ここで表面に面外変形が生じると、光位相差 $\Delta\phi$ が変化する。変形前後の光位相差 $\Delta\phi_b$ 、 $\Delta\phi_a$ とレーザの波長 λ を用いて、次の関係式より、面外変形による変位のシア方向2点間での空間差分 $\Delta z_1 - \Delta z_2$ を算出することができる。

$$(\Delta z_1 - \Delta z_2) = \lambda (\Delta\phi_b - \Delta\phi_a) / 4\pi$$

このように、2分割した光路の長さを位相シフタで相対的に変化させながら微分干渉像の各画素の輝度変動を計測することにより、面外変形による変位のシア方向2点間での空間差分の二次元分布を求めることができる。

2.3.2 ストロボスコープによる繰り返し現象の観察

音波振動と同期して繰り返し瞬間点灯するストロボスコープ技術を用いることでレーザ照明による試料表面の近接2点からの反射干渉光の光位相変化を測定する。ここで、位相シフタによる複数の光位相、及び異なる複数の音位相の時刻において測定を繰り返すことで、位相時刻の変化に伴う各点の変位を求めることができる。

2.3.3 音波伝搬の可視化

当社の超音波光探傷装置(MIV-X)では、各位相時刻における変位量を輝度に換算し、表面の微小な変位の空間(二次元)分布をグレースケールで画像化(以下、音場画像)する(=

空間的変化の可視化)。さらに、位相時刻ごとのグレースケール画像を用い動画画像を構成することで、音波振動による試料表面の変位を可視化する (=時間的変化の可視化)。この可視化像から、振動状態が空間的・時間的に不連続な箇所を観測することで、欠陥部を検知することが可能となる。

また、音波伝搬の不連続 (音場変状) 箇所を画像処理により抽出し、試料の映像画像 (カメラ画像) と重畳させたオーバーレイ画像を作成する機能を備える。

2.4 JISの制定

本技術を幅広い産業分野における新たな非破壊評価手法として活用を促すことで、各種現場での作業の効率化、経費節減などに繋げることが期待できることから、2024年2月に分析通則としてJISが制定された²⁾。

3. 観察事例

3.1 使用装置

皮膜欠陥に関する観察に使用した当社の超音波光探傷装置 (MIV-X) の外観を Fig.4 に、仕様を Table 1 に示す。装置は、カメラユニット、制御ユニット、振動子ユニット、ノート PC などから構成される。撮影画像の解像度の制約から検知可能な欠陥の最小サイズは撮像範囲の大きさによって変化する。また、近接観察向けに光学ズームセットをオプションとして準備している。なお、レーザ光はクラス1であり、使用において特別な安全対策の措置は不要である。

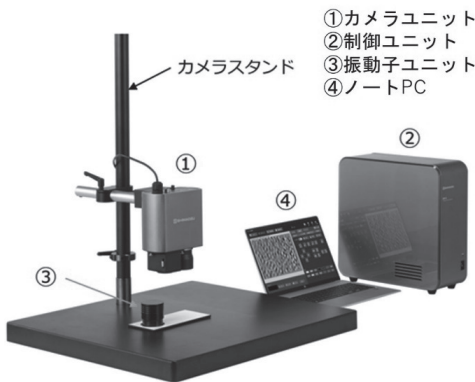


Fig.4 System configuration of the MIV-X.

Table 1 Main specifications of the MIV-X

| 項目 | 仕様 |
|--------|---|
| 試料母材 | 金属、セラミックス、複合材など |
| 検知サイズ | 撮像範囲のおよそ 1/100* 例えば、撮影距離 250mm で約 φ1mm * |
| 撮影距離 | 250 ~ 1000mm 光学ズームセット使用時 50 ~ 200mm |
| 撮像範囲 | 100x150 mm (撮影距離 250 mm) 200x300 mm (撮影距離 500 mm) 400x600 mm (撮影距離 1000 mm) 光学ズームセット使用時 28 x 42 mm (撮影距離 50 mm) |
| 測定時間 | 25 秒以下* |
| 加振周波数 | 20k ~ 400kHz |
| レーザ安全性 | JIS C 6802, クラス 1 |

*代表値であり観察対象や撮影条件により異なる

3.2 皮膜下の母材亀裂

母材に模擬亀裂を設け、表面に塗装を模擬したフィルムを貼付した鋼板試料を Fig.5 に示す。鋼板は外径 150 mm、板厚 20 mm であり、厚さ 100 μm のポリエステルフィルムを貼付した。模擬亀裂は長さ約 11 mm、幅は最大部約 60 μm、深さ約 3 mm である。

観察結果 (a 音場画像, b オーバーレイ画像) を Fig.6 に示す。亀裂部で明瞭に音場変状を確認でき、フィルム (塗装模擬) 下の欠陥部位を可視化できている。

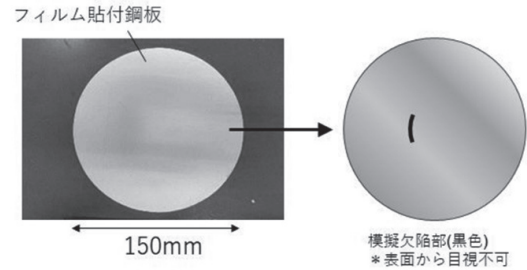


Fig.5 Steel plate sample with prepared crack.

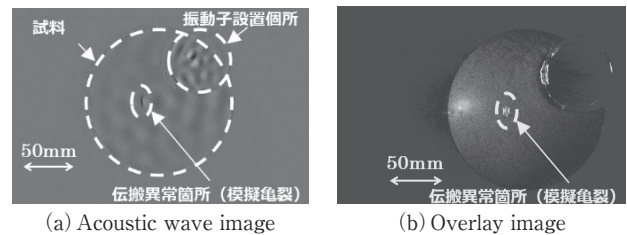


Fig.6 Crack detection images of steel plate sample.

3.3 溶射皮膜の剥離

アルミ製の基材板に、アルミ・ポリエステル・ケイ素を含有するパウダーをプラズマ溶射した試料を Fig.7 に示す。基材板は長辺 100 mm、短辺 75 mm であり、溶射材の付着を防ぐペーストを MIV の文字型に塗布し、文字がほぼ目視できなくなるまで溶射皮膜を施工した。平均膜厚は 0.257 mm であった。

観察結果を Fig.8 に示すとおり、MIV の文字をかたどった音場変状が確認できた。くわえて、X線 CT 装置による断面の観察結果を Fig.9 に示す。音場変状箇所において皮膜と基材間に空間が確認でき、音場変状と剥離箇所の相関が取れた。

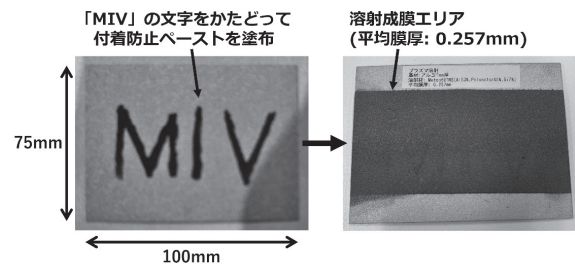


Fig.7 Aluminum plate sample with simulated peeling of thermal spray coating.

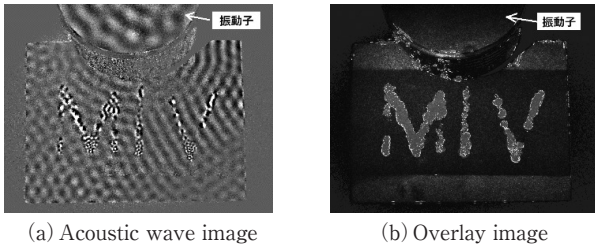


Fig.8 Peeled-off detection images of plasma sprayed aluminum.

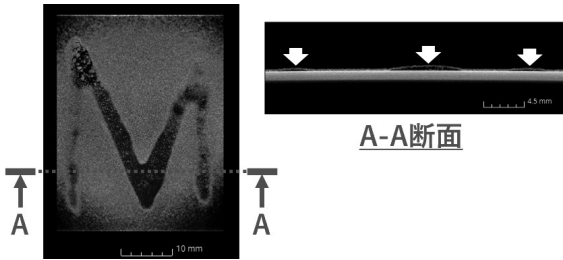


Fig.9 X-ray CT cross-sectional image of the coating peeling area at three vertical lines of the letter M.

本技術は試料のサイズに制約がなく短時間に溶射皮膜の剥離箇所を検知できる。

4. まとめ

本稿で紹介した音波光干渉イメージング技術は、従来手法では困難な検査を補完する可能性を有した新しい非破壊検査技術になりえると考えている。表層部分の検査に特化しており、とりわけ溶射加工面は良好なレーザーの反射光が得られ観察対象として適している。これまでに、サーメット溶射した部品の出荷検査や、セラミック溶射の加工条件探索などにも採用された実績がある。さらに音波光干渉イメージングの分析手法はJISとして制定されたことも踏まえ、幅広い分野での適用に向けた取り組みを進めている。

文献

- 1) 堀川浩司, 岡本弘文, 田中隆, 杉本賢, 三品尚登, 早川昌志, 畠堀貴秀, 吉田康紀: 超音波と光を利用した表層欠陥を可視化する非破壊検査装置 超音波光探傷装置MAIVIS™ MIV-500の開発, 島津評論, 75, pp.95-102 (2021)
- 2) JIS Z2411:2024:音波光干渉イメージング分析通則 (2024).