

赤外線サーモグラフィによる非破壊検査技術

Infrared Thermography for Nondestructive Testing

1. はじめに

赤外線カメラによる非破壊検査は、建築基準法第12条「定期報告制度」の改正（2008年）により、外壁の定期検査に採用されるなど、社会インフラの維持・保全への応用が進んでいる。また、日本非破壊検査協会による「赤外線サーモグラフィ非破壊試験技術者認証試験」が開始（2012年）され、注目度が高まっている。

JFE テクノリサーチでは、高感度・高速な測定が可能な高性能赤外線カメラ（温度分解能: 20 mK 以下, 撮影速度: 383 Hz, 測定画素を絞った最大撮影速度: 20 000 Hz）で微小な温度変化を検知して、建築・土木構造物や機械部品、溶接部などの内部欠陥の検出や応力分布を測定する技術の開発に取り組んでいる¹⁻³⁾。近年、複合材料のはく離、き裂、ボイドの欠陥検出などに用途が拡大するとともに、検出精度も厳格化して従来技術では対応できなくなってきた。そのため、新たな赤外線カメラを用いたアクティブサーモグラフィ法（アクティブ法）として、温度波法、超音波加振法、電圧印加法といった加熱方法にロックイン方式などによる信号解析技術を組み合わせることにより高性能化を進めている。

本稿では、当社で開発した赤外線カメラを用いた温度波法による非破壊検査と応力測定を中心に紹介する。

2. 非破壊検査

アクティブ法は被測定対象に積極的に温度負荷を与えて欠陥を検出する手法である。アクティブ法のうち温度波法および電圧印加法をもちいた非破壊検査技術を紹介する。

2.1. 温度波法

温度波法は、**図1**に示すように、被測定体にキセノンフラッシュランプなどの加熱用ランプを照射して、赤外線カメラで測定し欠陥部（はく離、ボイドなど）を検出する方法である。加熱用ランプから熱（温度波）を与えると、被測定体を通過する時に健全部と欠陥部で熱拡散率に差がある場合、温度差および透過時間の時間差（位相差）が生じる。この温度差および位相差を二次元表示して欠陥部を可視化する。欠陥検出のための信号処理技術としてロックイン方式などを用いる。ロックイン方式は温度変動の時系列データから負荷（加熱ランプや荷重など）の周期と同一の周期の温度変

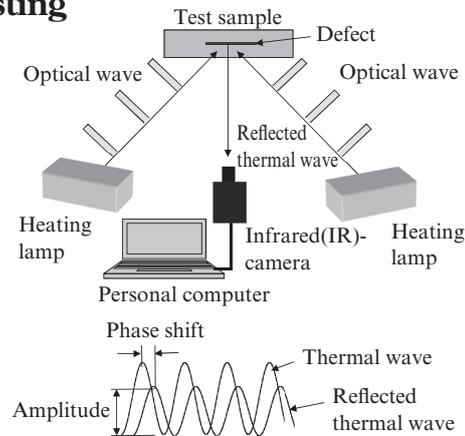


図1 温度波法の測定概略図

Fig. 1 Schematic illustration of thermal wave technique

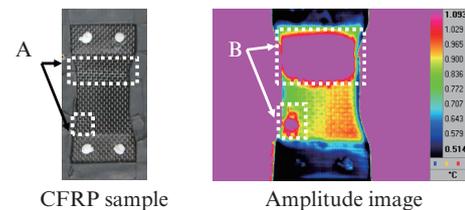


図2 温度波法を用いたCFRPサンプルのはく離の検出
Fig. 2 Detection of exfoliations for carbon fiber reinforced plastic (CFRP) sample using thermal wave technique

動のみを抽出することにより、S/Nを向上させる信号処理方式である。**図2**にキセノンフラッシュランプで疲労試験後のCFRP（Carbon fiber reinforced plastic）サンプルを加熱してはく離箇所を特定した例を示す。温度波法の測定結果では、外観で確認できるはく離範囲（A）より、広範囲にはく離があることがわかる（B）。

温度波法による熱浸透深さ μ は、加熱用ランプの周波数 f を用いて、(1)式で与えられる⁴⁾。

$$\mu = \sqrt{a/\pi f} \dots\dots\dots (1)$$

a : 熱拡散率

よって、加熱用ランプの周波数を変更することで、欠陥の二次元的な位置だけでなく表面からの深さ方向の情報を得ることができる。**図3**に加熱用ランプの周波数を変更して、人工欠陥（減肉）を有するCFRPサンプルを測定した例を示す。人工欠陥はサンプル測定面の裏側にある。図3 (a) $f=1$ Hzでは表面近傍の繊維の分布が可視化でき、(b) $f=0.1$ Hzでは裏面の欠陥（減肉）の分布が得られる。

温度波法はCFRPなどの複合材のはく離、ボイドなどの

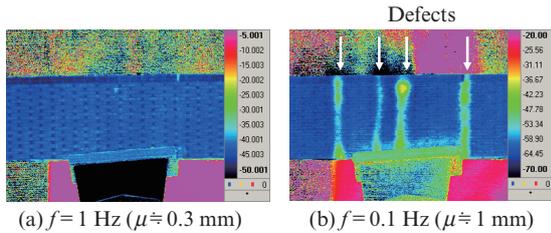


図3 温度波法による位相差画像の周波数依存

Fig. 3 Frequency dependent of phase image by thermal wave technique

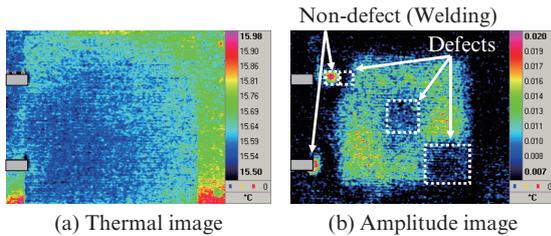


図4 電圧印加法によるリチウムイオン電池の欠陥検出

Fig. 4 Detection of defects for Lithium-Ion battery applied voltage

欠陥検出に有効であり三次元的な位置情報を得られる。

2.2 電圧印加法

電圧印加法は被測定対象に周期的に電圧を印加し、赤外線カメラで測定し、被測定対象の欠陥部（配線の高抵抗部など）を検出する方法である。図4に電圧印加法でリチウムイオン二次電池の欠陥を検出した例を示す。電極面の欠陥のため充電できない箇所があると、欠陥部の温度変化（温度差）が健全部より小さくなる。アルミラミネートで梱包された電池に周期的に充電し、赤外線カメラで測定してロックイン方式で解析した。図4(a)の温度画像では、熱伝導による熱の伝搬がノイズとなり、はっきりとした温度差がなく欠陥部が検出できない。図4(b)に示すロックイン方式による温度差画像では、S/Nが向上し、欠陥部と健全部で微小な温度差（ $<0.02^{\circ}\text{C}$ ）の違いが見られる。

電圧印加法は二次電池や電子部品の発熱解析や欠陥検出に有効である。

3. 応力測定

物質が断熱的に弾性変形する際に温度変化を生じる熱弾性効果を利用して応力を測定する。熱弾性効果より、金属など均質材料では、主応力の変動幅 $\Delta\sigma$ は(2)式で表される¹⁾。

$$\Delta\sigma = -\Delta T / (kT) \dots \dots \dots (2)$$

ΔT : 対象物の温度変化, T : 絶対温度,

k : 熱弾性係数

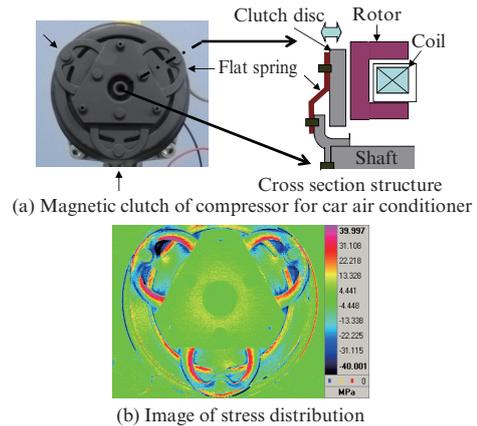


図5 カーエアコン用コンプレッサの応力測定

Fig. 5 Stress measurement of compressor for car air conditioner

よって、熱弾性係数 k がわかれば、 ΔT を測定することで応力を算出できる。 k は材料によって固有の値である。たとえば、炭素鋼の場合、1 MPa の応力を炭素鋼に加えた場合の温度変化は、約 1 mK と微小であるが、ロックイン方式を用いることで、1 MPa の分解能で応力測定が可能となる。

図5はカーエアコン用コンプレッサのマグネットクラッチの測定例である。マグネットクラッチを動作させると板バネ部品に曲げ応力がかかる。測定結果図5(b)より、板バネ部品が3個あり均等に配置されているが、実際の応力は均等ではなく応力集中が起こっていることがわかる。

応力測定は複雑な製品の応力分布を可視化でき、その結果は製品設計時のCAE(Computer aided engineering)の結果や入力データの検証などに応用することが可能である。

4. おわりに

高性能赤外線カメラを用いた非破壊検査および応力測定について、温度波法を中心に紹介した。

JFE テクノリサーチでは、高性能赤外線カメラを用いた測定受託、開発支援、およびシステム開発を行なっている。今後もお客様の新たなニーズに答えるべく、新しいアプリケーション分野への展開を図っていく予定である。

参考文献

- 1) 西名慶晃, 今西大輔, 渋谷清. JFE 技報. 2011, no. 27, p. 9-14.
- 2) 二村智昭, 藤本幸二, 渋谷清. 映像情報 Industrial. 2012-10.
- 3) 渋谷清, 二村智昭. 溶接学会誌. 2012, vol. 81, no. 7, p. 25-28.
- 4) Maldague, X.; Galmiche, F.; Ziadi, A. Advances in pulsed phase thermography. Infrared Phys. Technol. 2002, vol. 43, no. 3, p. 175-181.

〈問い合わせ先〉

JFE テクノリサーチ 営業本部
 TEL : 0120-643-777
 ホームページ : <http://www.jfe-tec.co.jp>