

高精度赤外線サーモグラフィを活用した 各種測定技術（温度・応力・疲労・亀裂）とその応用

Various Measurement Technologies (Temperature/Stress/Fatigue/Crack) with the Highly Precise Infrared Thermography and Its Application

西名 慶晃 NISHINA Yoshiaki JFE スチール スチール研究所 機械研究部 主任研究員（課長）
今西 大輔 IMANISHI Daisuke JFE スチール スチール研究所 機械研究部
渋谷 清 SHIBUYA Kiyoshi JFE テクノリサーチ 計測システム事業部 非破壊検査技術部長

要旨

微小な温度変化を高精度赤外線サーモグラフィで検知することにより、鋼構造物や機械部品などの欠陥を効率的に診断する技術開発に取り組んでいる。熱弾性発熱法を応用した亀裂診断技術や応力測定法、超音波励起法を応用した亀裂診断技術、周期加熱法を応用した内部欠陥診断技術の高度化に取り組み、鉄鋼設備の効率的な劣化診断を実現するとともに、測定事業へも展開している。

Abstract:

Effective diagnostic technology of defects such as steel structures and machine parts has been developed by detecting a minute temperature change using highly precise infrared thermography, including the application of athermal elasticity heat generation method to crack diagnosis and stress measurement. Also JFE Steel Group applied a supersonic wave excitation method to the crack diagnosis and we achieved various effective deterioration diagnoses in iron and steel manufacturing facilities. Some selected technologies have been currently applied to measurement business of JFE Steel Group.

1. はじめに

JFE スチールグループでは、効率的な診断技術の確立を目的とした取り組みのひとつとして、高精度赤外線サーモグラフィを活用した各種測定技術の開発に取り組んでいる。赤外線サーモグラフィは、赤外線素子や測定機器の高性能化や信号処理法の進歩により、非定常の微小な温度変化を高速で精度良く計測可能となった。従来の温度測定だけでなく、応力や亀裂診断などの非破壊検査まで、広範囲に活用できる強力な診断・測定ツールへと変化し、さまざまな応用事例が報告されている¹⁾。

本稿では、赤外線サーモグラフィを活用した各種測定技術とその応用例として、熱弾性発熱法、超音波励起法、周期加熱法の3つの手法に関する原理、および製鉄所の設備劣化診断効率化のための開発・応用例と、測定事業における開発・応用例について紹介する。

2. 熱弾性発熱法を応用した亀裂診断と応力測定

2.1 熱弾性発熱法¹⁾の原理

気体を断熱膨張させれば、気体温度は低下し、逆に断熱圧縮すれば温度は上昇する。固体でも、急激に応力が作用する場合に、同様の現象が起こることが知られており、一般的に熱弾性効果と呼ばれる。金属など均質材料の熱弾性効果による発熱量は(1)式で表される^{2,3)}。

$$\Delta T = -K \cdot T \cdot \Delta \sigma \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 $\Delta \sigma$ は対象物の主応力和変動、 T は絶対温度、 K は熱弾性係数である。熱弾性係数は、各材料によって固有の値であり、軟鋼の場合、 $K=3.5 \times 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$ である。

上記式(1)の熱弾性効果を用いた亀裂診断と応力測定は、測定対象物に応力変動が発生した時の微小な温度変動を高精度赤外線サーモグラフィ（温度分解能 0.02 K）で計測して、(1)式に基づいて応力値に換算する。測定対象物に亀裂が存在する場合は、亀裂先端部に応力集中が発生し、温度特異部として亀裂を検出することが可能となる。次節で、

測定精度の向上を目的として適用した信号処理法である、自己相関ロックイン処理法について紹介する。

2.2 自己相関ロックイン処理法の基本原理^{1,4)}

従来のロックイン処理法と、本稿で適用した自己相関ロックイン処理法のモデル概要図を **図 1** に示す。従来のロックイン処理法は、試験機から荷重信号などの参照信号を試験機器から得て、赤外線サーモグラフィで計測した時系列温度変動から、参照信号と同一周波数の信号を取り出し、 S/N 比（信号対雑音比）を改善する信号処理法である。しかし、実機設備では、ランダムな応力が作用し、さらに荷重信号を参照信号として得ることができない場合も多く、適用困難である。一方、自己相関ロックイン処理法は、参照信号として赤外線画像内のある参照領域の温度変動を利用する。前節で述べたように、応力変動（荷重変動）と温度変動は、線形の相関があるため、これらの変動周波数は等しい。そのため、実機設備のように荷重信号が得られない場合も、赤外線画像内の温度変動を参照信号として利用すれば、ロックイン処理と同様の S/N 比改善効果を得ることが可能である。

2.3 熱弾性発熱法を応用した亀裂診断例^{5,6)}

本節では、製鉄所の設備診断効率向上を目的として、熱弾性発熱法を応用した亀裂診断の開発・応用例を紹介する。最初に、実機クレーン桁を部分的に切断した試験体を用いて、熱弾性発熱法の検証と、亀裂検出に必要な最小応力を調べた。試験の概略図を **図 2** に示す。試験体の三角リブの止端溶接部に疲労亀裂が導入されている。この試験体に、周波数 2 Hz の正弦波波形で、応力振幅 100 MPa から 10 MPa まで、振動しながら減衰していく応力波形を負荷した。赤外線サーモグラフィ計測は、測定対象から 15.3 m の距離で行い、焦点距離 200 mm の望遠レンズを用いた。試験体にひずみゲージを取り付けて作用応力を計測した。

図 3 に 100 MPa、50 MPa、20 MPa、10 MPa の応力振幅における応力分布画像を示す。本実験結果より、20 MPa 以上の応力で、亀裂部（**図 3** 中の実線で囲んだエリア）において、亀裂先端が高温部（白色の部分）として検出できる

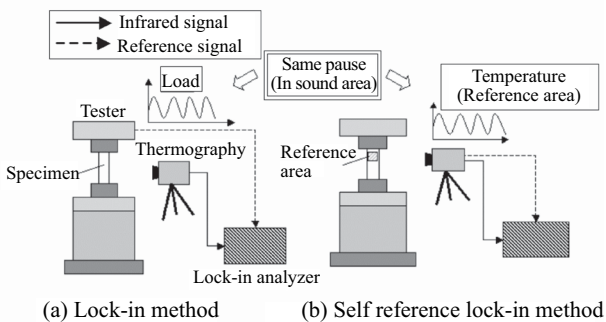


図 1 信号処理法モデル概要図

Fig. 1 Schematic illustration of signal processing method

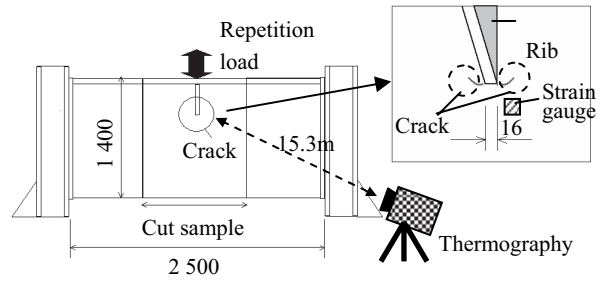


図 2 試験概略図(実験室における亀裂検知試験)

Fig. 2 Schematic illustration of the test in the laboratory (Offline test)

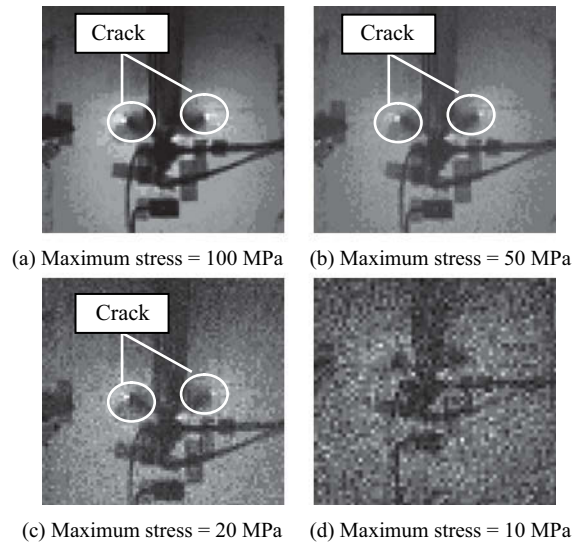


図 3 作用応力と亀裂発熱の関係

Fig. 3 Infrared image around cracks in various stress applied (100, 50, 20, and 10 MPa)

ことを検証した。次に、応力振幅と温度上昇の相関をとり熱弾性効果の検証を行った結果を **図 4** に示す。実線が (1) 式で示される熱弾性効果の理論解である。応力と温度上昇のプロットは、ほぼ、理論解直線の上に乗る、温度上昇が精度よく応力に換算できることが分かる。

以上の実験室における試験で得られた結果を基に、補修

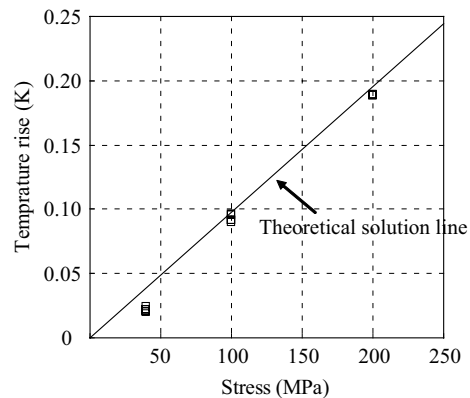


図 4 作用応力と温度上昇の関係

Fig. 4 Relationship between stresses measured by strain gauge and temperature rise

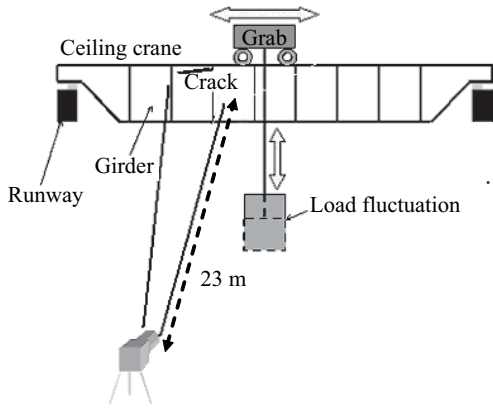
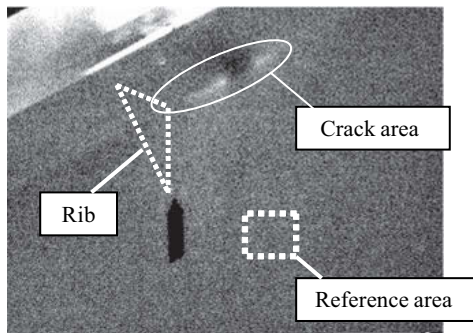


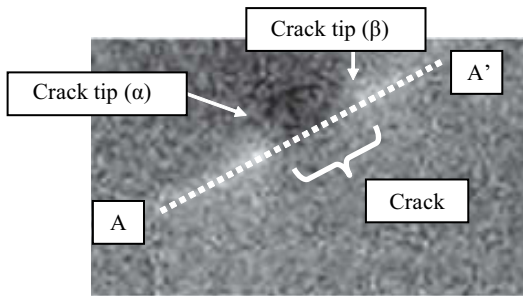
図5 試験概略図(ボックス桁ガーダー)

Fig. 5 Schematic illustration of online test (Box beam girder of overhead crane system)

予定の天井クレーン中のボックス桁ガーダーに本手法を適用し、遠隔亀裂診断試験を行った。試験概要図を図5に示す。ガーダー上には、荷吊りのためのクラブトロッリが備えられており、横行可能である。クラブトロッリ車輪部に、クラブトロッリ自重と吊り荷（定格荷重の80%）を合計した荷重負荷が作用している。クラブトロッリを数回横行させて、ガーダーへの作用応力を変動させて、その応力変動を地上に設置した赤外線サーモグラフィで計測した。計測面と地上に設置した赤外線サーモグラフィ間の距離は約23 mであった。赤外線サーモグラフィで計測した応力分布画像の全体図



(a) Image of stress distribute in box beam girder



(b) Expanded image of crack area shown in (a)

図6 温度分布画像(ボックス桁ガーダー)

Fig. 6 Image of stress distribute in box beam girder of overhead crane system (No signal processing)

を図6(a)に、亀裂部の拡大図を図6(b)に示す。図6(a)中の、三角リブの右側（実線で囲んだエリア）において、亀裂への応力集中が要因と見られる高い応力部位（白色の部分）が検出されている。また、図6(b)に示されている亀裂部における応力ラインプロファイルを図7に示す。亀裂先端(α)および亀裂先端(β)の部分で、応力が急激に立ち上がっており、亀裂への応力集中が、明瞭に計測されている。一方、亀裂両端の間の応力はほぼゼロとみなせ、圧縮、引張りのどちらの応力も作用していない。これは、亀裂先端以外の亀裂開口部は、力学的に拘束されておらず、応力は作用しないためである。

次に、赤外線サーモグラフィで計測した時系列の応力変動を図8に示す。3回クラブトロッリが計測部分上を通過しており、健全部(図6の参照部)は、30 MPaから80 MPa程度の応力が作用していることが分かる。FEM(有限要素法)解析で、本試験条件である80%積載時の応力は、30~60 MPaと計算されており、精度よく応力を計測できている。一方、亀裂先端は、応力集中により、100 MPaから180 MPaの大きな応力が作用している。亀裂先端の応力曲線は、1パス当たり2回のピークが検出されている。これは、2つあるクラブトロッリの車輪が亀裂先端上を通過した瞬間で、応力は最大となっている。

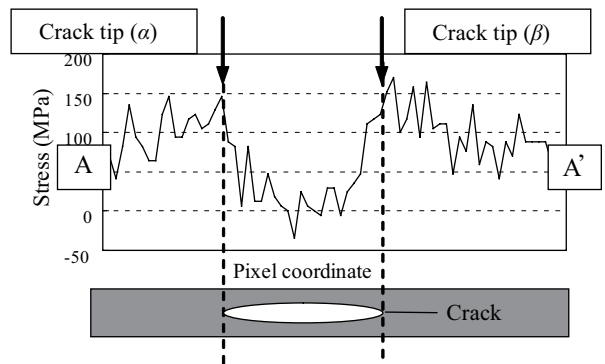


図7 亀裂部の応力ラインプロファイル

Fig. 7 Stress line-profile in line A-A' shown in Fig. 6 (b)

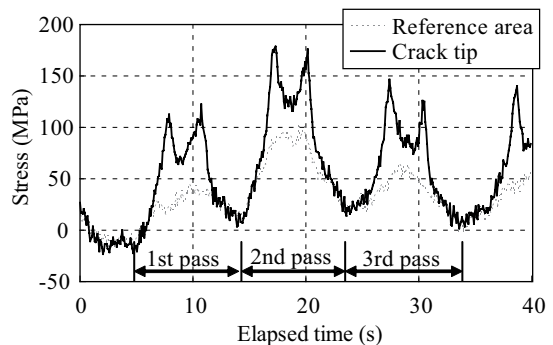


図8 健全部(参照部)と亀裂先端の応力変動比較

Fig. 8 Comparison of Stress change between crack tip and sound area ("Reference area" shown in Fig. 6 (a))

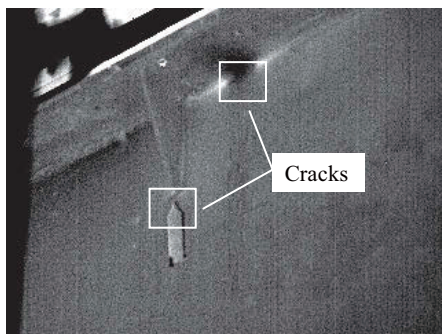


図9 画像処理後応力分布(自己相関ロックイン処理後)
Fig. 9 Image of stress distribute after signal processing (Self reference lock-in method)

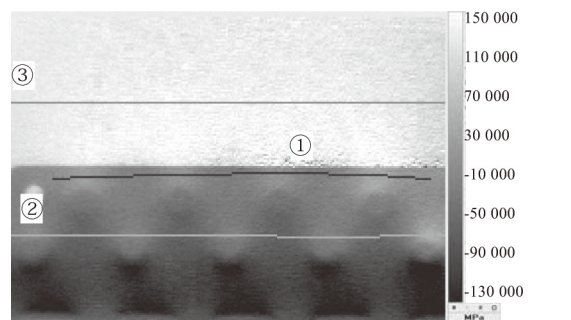
以上のとおり、2次元データから亀裂長さ、時系列変動データから応力変動を得ることが可能である。

図9に、2.2節の自己相関ロックイン処理法を用いてS/N比の改善を行った結果を示す。参照信号は、図6(a)参照部の応力変動を用いた。S/N比が顕著に向上し、三角リブ先端の亀裂先端発熱も検出することが可能であった。

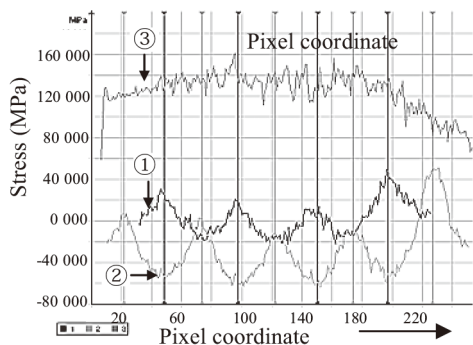
以上説明したように、荷重変動を利用した熱弾性発熱法で、クレーン構造物の遠隔亀裂診断が可能であることを検証した。今後、さらに検証を重ねる予定である。

2.4 熱弾性発熱法を応用した応力測定

本節では、測定事業における開発・応用例として、熱弾性発熱法を応用した、多段スポット溶接部の応力分布測定



(a) Stress image of spot weld



(b) Stress distribution of a spot weld

図10 応力測定結果の例

Fig. 10 Example of stress measurement result

例を紹介する。図10(a)に、スポット溶接部の応力分布画像を示す。(b)に、(a)中のライン①、②、③の応力プロフィールを示す。一段目のスポット溶接前面ではライン①に沿って引張応力の山が連なっているが、後面に配置された二段目のスポット溶接ライン②では位相が逆転した圧縮応力の山が連なっている。これは2枚の板を溶接して上下に引っ張った場合、面内の回転曲げ力が発生して、下の板表面側が主に圧縮となり、裏面側が主に引張応力を発生しているためである。一方、溶接部から離れたライン③では若干右端に偏荷重が見られるが、なだらかな均一応力が発生している。以上のように、スポット溶接間の応力分担と板間の摩擦などの複雑現象を2次元画像で観察できる。

3. 超音波励起法を用いた亀裂診断

3.1 超音波励起法の基本原理

章2で説明した熱弾性発熱法は、外部入力として検査対象物に応力を付与する必要がある。本節では、ロールのように静止状態の設備の亀裂診断法として、超音波励起法⁷⁾の開発・応用例を紹介する。本手法は、測定対象物に超音波振動を入射させることで、亀裂面に摩擦熱を発生させて、微小温度変化を赤外線サーモグラフィで計測する方法である。

3.2 実験室における亀裂検知試験結果

100 mm × 200 mmの平板に、亀裂長10 mm、深さ5 mmの人工亀裂を導入し試験片として、超音波ホーン圧下力、および、入射振幅と亀裂発熱量の関係を調べた。入射した超音波周波数は19.5 kHzである。図11に示すように、超音波ホーン圧下力を増大させると、亀裂発熱量が増加する。これは、超音波ホーンと試験片表面の密着性が改善され、超音波振動の入射ロスが減少したためと推定される。また、図12より、入射振動振幅を増加させると亀裂発熱量も増加する。これは、亀裂面の振動振幅量が増え、その結果、亀裂面の摩擦発熱が増加したためと推定される。

次に、現場適用する上で課題となるグリス汚れに対する

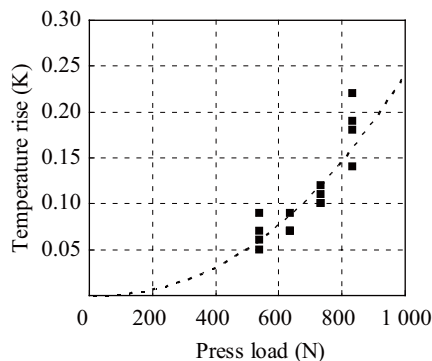


図11 超音波ホーン圧下力と亀裂発熱量の関係

Fig. 11 Relationship between press load of ultrasonic horn and temperature rise (Plate specimen)

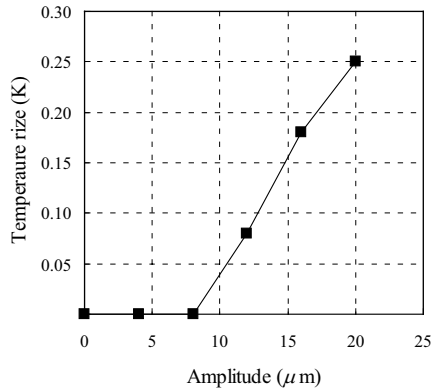
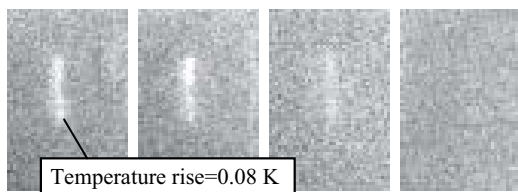


図 12 入射振動振幅と亀裂発熱量の関係

Fig. 12 Relationship between amplitude of ultrasonic horn and temperature rise (Plate specimen)



(a) No Grease (b) $t=10 \mu\text{m}$ (c) $t=415 \mu\text{m}$ (d) $t=500 \mu\text{m}$

図 13 亀裂検出能に対するグリス影響（亀裂長 10 mm，深さ 5 mm）

Fig. 13 Affection of grease in crack detectability (Crack length = 10 mm, Depth = 5 mm)

亀裂検出能への影響評価を行った。試験片に、さまざまな膜厚の機械用グリスを塗布し検出試験を行った。図 13 に結果を示す。グリスを塗布しない場合の亀裂発熱は 0.08℃である。グリス厚みが平均 500 μm 以上で亀裂検出不可能であったが、グリスを拭き取ればグリス厚みは 10 μm 以下となり、亀裂検出が可能であることを検証した。

3.3 テーブルロールネック部での亀裂検出実証試験

本手法を用いて、補修予定のテーブルロールネック部の疲労亀裂検出試験を行った。試験の概要図を図 14 に示す。本ロールは段付部 2ヶ所に亀裂が入っており、超音波加振機と段付部の亀裂との距離は、亀裂 A で 500 mm，亀裂 B で 630 mm であった。また、亀裂サイズは、長さ 68～76 mm，深さ 25～32 mm であった。最初に、超音波加振機（加振周波数：19.5 kHz）をロール胴部（φ500 mm）に設置し、亀裂 A，亀裂 B の温度変動を赤外線サーモグラフィで計測した。段付部下側に入っている亀裂を測定するために、赤外線線を 90% 以上反射するアルミニウム反射板を用いた。図 15 に自己相関ロックイン処理後の、赤外線画像結果を示す。参照信号としては、超音波ホーンと超音波振動入射部を使用した。

図 15 を見ると亀裂部が高温部（白色の部分）として検出できている。また、直接赤外線サーモグラフィで計測できな

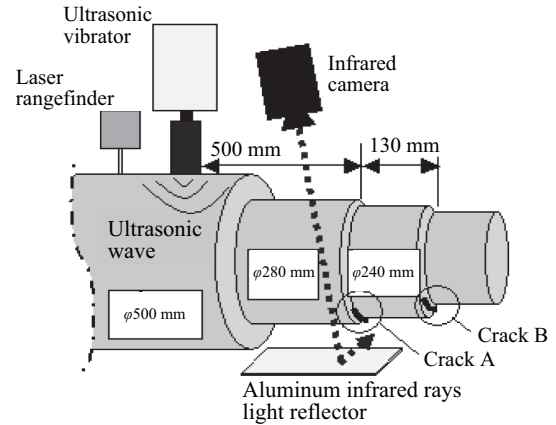


図 14 テーブルロール亀裂検知の概略図

Fig. 14 Schematic illustration of defecting cracks in table roll

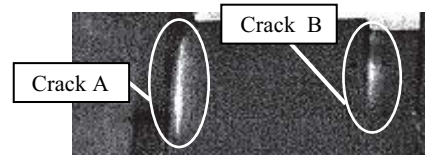


図 15 テーブルロールネック部の赤外線画像（自己相関ロックイン処理後）

Fig. 15 Infrared image in table roller neck part (Self reference lock-in method)

い部位もアルミニウム反射ミラーを適用することにより亀裂検査可能である。一度の測定範囲は、ロールネック部周り 100° であるので、ロールを 3 回転することで、全周測定が可能である。1 回当たりの検査範囲が従来法と比較して広いので、ローラ 1 本当たりの測定時間を、大幅に短縮化することが可能となった。

この超音波励起法は、JFE スチールの工場において実用化を開始しており、当初の目標である検査効率向上に寄与している。また、従来法では測定が困難であった部位の亀裂検査も可能であるので、疲労破壊による設備トラブルの発生抑止に貢献している。

4. 周期加熱法を応用した内部欠陥診断

本章では、測定事業における開発・応用例として、周期加熱法を応用した内部欠陥診断例を紹介する。本手法は、加熱用ランプなどにより周期的に検出体を加熱する方法である。内部の割れ（欠陥）や材質の不均一は熱拡散率に差を生じさせ、結果として部品内を通過する温度波の透過時間に差を生じる（図 16）。これを高精度赤外線サーモグラフィによって測定し、熱拡散方程式から導き出された算出(2)式を用いて熱拡散率の 2次元画像分布を作成することで欠陥の箇所を表示する。ここで、 a ：熱拡散率、 f ：加熱周波数、 d ：板厚、 $\Delta\theta$ ：位相差、 λ ：熱伝導率、 C_p ：定圧比熱、

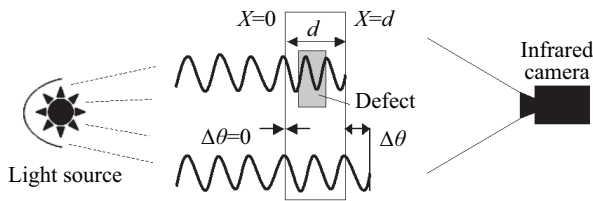


図 16 周期加熱法の測定原

Fig. 16 Measurement principle of thermo-wave method

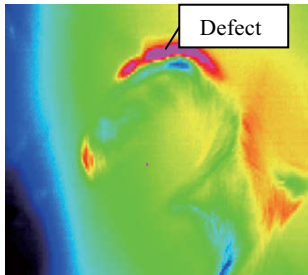


図 17 プラスチックフィルム内の欠陥例

Fig. 17 Example of the defect in plastic film

ρ : 密度である。原理は温度波法 (ISO 22007-3) で、欠陥検出だけでなく、レーザーフラッシュ法では測定できない大型実部品の熱拡散率や熱伝導率の分布測定にも用いることが可能である。

$$a = \pi \cdot f \cdot \left(\frac{d}{\Delta\theta + \frac{\pi}{4}} \right)^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$\lambda = a \cdot C_p \cdot \rho \dots\dots\dots (3)$$

2次電池，燃料電池，太陽電池などの電池に用いられる材料は，機械的，化学的，熱的負荷により劣化を生じるが，熱物性的変化として検出できる。図 17 に，周期加熱法によりプラスチックフィルムの内部欠陥を診断した事例を示す。劣化により熱拡散率が極端に低下した箇所（赤色部）が観察される。

5. おわりに

本稿では，効率的な劣化診断技術の確立という観点から，赤外線サーモグラフィを活用した各種測定技術に関する開発・応用例を紹介した。JFE スチールの各製鉄所では，これらの開発技術を組み合わせて有効活用することにより，設備劣化度の定量的な評価による適切な更新を行い，設備の安定稼動を図っている。また，JFE テクノリサーチでは，高精度赤外線サーモグラフィを用いた測定受託，開発支援，およびシステム開発品の販売（商品名：Thermo-Tec）を行っており，お客様から高いご評価を頂いている。

参考文献

- 1) 阪上隆英. “赤外線サーモグラフィによる非破壊評価に関する最近の話題”. 非破壊検査. 2002, vol. 51, no. 6, p. 321-327.
- 2) Wu, Datong; Salerno, Antonio. “Phase Sensitive Modulation Thermography and its Application for NDE.” Proceedings of SPIE. vol. 3056, p. 176-183.
- 3) Xavier, P. V. Maldague. “Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing.”
- 4) Lesniak, Jon R.; Boyce, Brad R. “Thermo-elastic measurement under random loading.” Proc. of the SEM Spring Conf. On Experimental and Applied Mechanics and Experimental/Numerical Mechanics in Electronic Packaging III . Soc. for Exp. Mech. 504-507, 1998-06.
- 5) 阪上隆英, 崎野良比呂, 西村隆, 久保司郎, 石野和成, 栗原康行. “自己相関ロックインサーモグラフィによる鋼構造の疲労き裂検出”. 土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集. 2005, p. 123-124.
- 6) 阪上隆英, 西村隆, 久保司郎, 野良比呂, 石野和成. “自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による疲労き裂の遠隔非破壊検査技術の開発 (第 1 報 溶接試験片を用いた基礎的検討)”. 日本機械学会論文集 (A 編). 2006-12, vol. 72, no. 724, p. 1860-1867.
- 7) 川嶋紘一郎, 村瀬守正, 鋤柄直, 玉山千雅, 奥村毅, 安井誠. “サーモソニック法による表面閉口き裂の広領域検出”. 機会学会 材料力学部門講演会講演論文. 2004, p. 93-94.



西名 慶晃



今西 大輔



渋谷 清