赤外線サーモグラフィによる構造物の 非破壊検査*

阪上 隆 英**

Nondestructive Testing of Structural Materials by Infrared Thermography*

by SAKAGAMI Takahide**

キーワード 非破壊検査, 赤外線サーモグラフィ, 温度場計測, き裂, 剥離, コンクリート, 複合材料

1. はじめに

赤外線サーモグラフィは物体から放射される赤外線強度をもとに、物体表面の温度分布を画像計測する装置である。近年、赤外線サーモグラフィの性能が向上し、高い分解能・精度での温度分布計測が可能になった。また、非冷却赤外線センサの使用による、装置の小型化、低価格化も進んでいる。このようなサーモグラフィの高性能化と普及を背景に、赤外線サーモグラフィによる物体表面温度計測に基づく非破壊試験技術は進歩を続けるとともに、現場にも普及してきている。本講座では、赤外線サーモグラフィによる物体表面温度計測に基づく非破壊試験技術すなわち赤外線サーモグラフィ法について解説する。また、赤外線サーモグラフィ法に関する最近の動向および適用事例を紹介する。

2. 赤外線サーモグラフィ法

赤外線サーモグラフィ法を計測原理から分類すれば、熱負荷を与えた時の欠陥による断熱温度場を検出する方法、および欠陥自体の自己発熱（吸熱）による温度場を検出する方法に分けられる。

(1) 断熱温度場検出法

被測定物に外部から熱負荷が与えられた時、欠陥による断熱効果により熱拡散が妨げられた結果、被測定物表面に現れる局所的な温度変化領域を検出する方法が断熱温度場検出法である。断熱温度場検出法における欠陥形態、熱移動と温度場変化を表す模式図を図1に示す。図1(a)のような、被測定物内部の剥離欠陥に対しては、面外方向の熱移動が用いられる。熱移動が表面から内部に向かう場合には、欠陥付近の被測定物表面には高温領域が

現れ、反対に熱移動が内部から表面に向かう場合には、被測定物表面には低温領域が現れる。被測定物表面に生じた温度変化領域の形状は、内部に存在する欠陥形状を反映したものとなるため、温度変化領域の形状をもとに、欠陥の形状を推定することができる。さらに、熱負荷後の温度変化に関する時系列情報をもとに、欠陥の深さ方向の位置を同定できる。次に、図1(b)のような、被測定物表面に開口するき裂を考える。このようなひび割れに対しては、被測定物にき裂と交差する方向すなわち面内方向の熱移動を生じさせる。この時、き裂の断熱効果によりき裂面間には温度差が生じるため、これを赤外線サーモグラフィで検出することによりき裂の検出が可能となる。

被測定物に熱負荷を与えるための加熱・冷却方法については、様々な方法がある。断熱温度場検出法による高精度な欠陥検出を行うためには、(1) 欠陥による温度場変化が明瞭となる均質な熱負荷、(2) 断熱温度場が顕著に現れるような高効率な熱負荷、(3) 被測定物の熱拡散性に応じた最適な熱負荷速度の選定、などが要求される。

例えば、コンクリート構造物等では、日照や外気温変

図1 断熱温度場検出に基づく赤外線サーモグラフィ法

*原稿受付 平成15年4月7日

** 大阪大学大学院 Osaka University

化により構造物に発生する熱移動がよく用いられる。コンクリート構造物をアクティブ加熱する場合には、灯油焚ヒータやハロゲンランプヒータが用いられる。コンクリート構造物への熱負荷は加熱だけでなく、冷却もしばしば用いられる。水やアルコール混合液を構造物に散布した時の気化熱による冷却により、構造物に加熱時と逆方向の熱移動を生じさせる。熱拡散性の高い炭素繊維複合材料や金属材料に対しては、欠陥の存在により生じた断熱温度場が熱拡散によって消失しないように、急速な熱負荷を与えた直後の短時間の温度場を高速に計測する必要がある。そこで、フラッシュランプ等によるパルス状の熱負荷を与える方法が用いられている。

(2) 欠陥自体の自己発熱温度場検出法

欠陥自身が発熱（吸熱）源となっている場合、あるいは外的負荷を与えることにより欠陥部位で発熱を起こさせた場合に、被測定物の温度変化に基づき欠陥を検出する方法である。この手法では欠陥部において顕著な温度変化が得られるため、一般に欠陥検出感度が高い。

欠陥自身が発熱（吸熱）源となっている場合の欠陥検出法が効果的に用いられた例としては、航空機構造における水浸入部の検出がある。航空機の機体は飛行中低温にさらされるため、浸入した水が氷結する。着陸後機体は徐々に暖められるが、氷結した部位はしばらくの間低温を保ち、温度分布画像において水が浸入した欠陥部位は局所的低温部として検出される。

外的負荷を与えることにより欠陥部位で発熱を生じさせる方法としては、通電時の特異発熱場に基づく赤外線サーモグラフィ法¹⁾がある。き裂状欠陥を含む導電体に電流を負荷した時には、き裂先端近傍には特異電流場が形成され、これによりき裂先端には発熱集中部が現れる。き裂が被検査物の表面に開口している場合には、発熱集中部が温度分布画像中に検出されるので、これをもとにき裂検出が可能である。外的負荷を与えることにより欠陥部位で発熱を生じさせる方法として、引張・圧縮変動負荷の下での被測定物の変形に伴う熱弾性温度変動も利用されている。今回の講座で詳細に解説するが、熱弾性温度変動に基づき物体表面の応力分布を計測できる赤外線応力測定装置が開発されている。この装置を用いれば、欠陥・損傷の存在により変化した応力場を検出することができる。き裂による特異応力場や複合材料の損傷の評価に用いられている。

赤外線サーモグラフィ法の特長としては、つぎのような事柄を挙げることができる。

- ・非破壊かつ非接触に遠隔からの欠陥検査が可能である。
- ・短時間に広範囲にわたる検査を行うことができる。
- ・欠陥の位置・形状が温度分布から視覚的に同定できる。
- ・サーモグラフィと加熱装置以外には、特別な検査設備・環境を必要としない。
- ・有害物質を使用しないので、人体と環境にやさしい試験法である。
- ・光学的計測法であるため、適当な広角、望遠、拡大光学系を選ぶことにより、検査対象の大きさによる制限を受けない。
- ・検査対象の材質による制限を受けない。

- ・複合材料や被膜材料等の表面下の剥離欠陥に対して特に検出感度が高い。

3. 非定常温度分布計測による赤外線サーモグラフィ法

赤外線サーモグラフィ法により欠陥の定量評価、特に深さ推定を行うためには、ある時刻の温度分布画像だけでは不十分であり、熱負荷開始後の非定常温度分布に関する計測データが必要である。ここでは、非定常温度分布を利用した赤外線サーモグラフィ法として、パルス加熱サーモグラフィ²⁾およびロックインサーモグラフィ³⁾について述べる。

3.1 パルス加熱サーモグラフィ

パルス加熱サーモグラフィは、パルス状熱負荷を被測定物に与えた直後の非定常温度分布をもとに欠陥を検出する手法である。パルス加熱によれば、高い熱流束を瞬時に被測定物に与えることが可能となるため、欠陥による温度変化が被測定物表面に顕著に現れる。この非定常温度場を、熱拡散による温度変化の消失が起こらない短い時間内に計測することにより、高精度な欠陥検出が可能となる。パルス加熱赤外線サーモグラフィ法は、主に熱拡散性の高い材料の欠陥検出に有効な手法である。

軟鋼、ステンレス鋼、アルミニウム合金、銅、セラミックスおよびグラファイトで作製された、図2のような標準試験片を用いて、パルス加熱サーモグラフィ法による欠陥検出性を調べた。結果の一部を図3に示す。熱伝導性が高いグラファイトにおいては、パルス加熱直後の短い時間内に、板表面に近い欠陥から順次検出されており、深さ5mmの欠陥まで検出が可能である。また、熱伝導性が高い材料ほど、欠陥部のコントラスト変化は早く消失してしまう。これに対し、熱伝導性が低いステンレス鋼においては、パルス加熱後欠陥が検出されるまでの時間は長くなり、検出できる欠陥深さは浅くなる。しかし、一旦現れた欠陥部位を示すコントラストは、比較的長い時間持続する。

図2 平底穴標準試験片

図3 パルス加熱サーモグラフィによる平底穴欠陥の検出

図4 パルス加熱サーモグラフィによるCFRP板の損傷検出

パルス加熱サーモグラフィでは、熱が被測定物を伝わり欠陥に到達する過程の被測定物表面の温度変動をもとに、欠陥の深さの推定が可能である。図4は、一方向板を積層したCFRP板中の衝撃損傷の計測結果である。時間経過に伴い、炭素繊維方向に広がった剥離損傷が、浅いものから反時計回りに検出されていることがわかる。

3.2 ロックインサーモグラフィ

物体に一定周期で変動する熱負荷を与えることにより、物体内部には波動状の熱移動が生じ、物体の表面温度も一定の周期・振幅で変動する。欠陥が存在すれば、変動温度分布にも欠陥の影響が現れる。このような表面温度変動を、参照信号による同期信号処理により高精度にロックイン計測し、温度変動振幅や位相遅れ情報をもとに欠陥を検出する手法がロックインサーモグラフィである。ここでは、一例として特異発熱場に基づくき裂検出例を示す。

前述の通電時の特異発熱場に基づく赤外線サーモグラフィ法にロックイン手法を適用した。負荷する電流を周期的に変動させることにより、き裂先端近傍に周期変動する特異温度場を形成させ、これを電流変動に関する参照信号をもとにロックイン計測した場合の温度振幅 ΔT および位相 θ の分布をもとに高感度にき裂検出を行った。

(a) 振幅画像 (b) 位相画像

図5 ロックインサーモグラフィによるき裂検出

一例として、長さ10mmの貫通き裂を有する厚さ1mmのステンレス鋼試験片に、1Hzで出力が周期変動する高周波誘導電流(250kHz)を負荷した場合に得られた、 ΔT および θ の分布を図5に示す。 ΔT 分布および θ 分布画像ともに、き裂先端近傍の特異電流場に起因する、き裂先端における顕著なコントラスト変化が見られ、これをもとにき裂の位置・寸法が容易に同定できる。

4. コンクリート構造物診断への適用

建築・土木構造物への適用は、赤外線サーモグラフィ法の特徴を活かすことができる適用対象として同法が広く用いられている分野のひとつである。最近多発したコンクリート片剥落事故により、経年劣化したコンクリート構造物の効率的な診断技術の一つとして注目されている。

4.1 パッシブ検査法

日照や外気温変化により構造物に自然発生する熱移動による断熱温度場検出により、コンクリート高架橋床版下面に存在する剥離欠陥の検出を行った。さらに、検査結果を打音(たたき)検査法と比較検討した。検査員が赤外線サーモグラフィで床版下面を撮影しながら、テレビモニタの赤外線画像を評価し、剥離有りと判断した箇所を工事図面に記入した。一方、打音検査では、高所作業車に2名の検査員が乗り、ゴンドラを移動させながらテストハンマにより検査を行った。赤外線カメラにより計測された床版下面の赤外線画像を図6(a)に示す。赤外線画像において白く見える部分が高温部である。赤外線画像をもとに検査員が剥離と判断した箇所を図6(b)に示す。さらに、打音検査により確認された剥離箇所を図6(c)に示す。両図を比較すると、剥離検出結果は良く一致していることがわかる。赤外線サーモグラフィ法では、剥離欠陥部以外にも剥離と判断された箇所がいくつか存在するが、これらはすべて補修のために充填した異種材料によるものであり目視による判別が可能である。検査所要時間は、赤外線サーモグラフィ法が30分、打音検査法が120分であった。赤外線サーモグラフィ法は、さらに短縮が可能であり、赤外線サーモグラフィ法による検査を有効に活用することにより、検査所要時間を1/5以下に短縮できる。

4.2 アクティブ加熱検査法⁹⁾

トンネルなどの日照や外気温変動によるパッシブ検査法が適用できない構造物に対しては、アクティブな熱負荷が必要である。人工的に剥離欠陥を導入した供試体に

(a) 赤外線画像

(b) 赤外線サーモグラフィによる欠陥検出結果

(c) 打音による欠陥検出結果

図6 赤外線サーモグラフィ法による床版の剥離検出

(a) $T_h=5\text{min}$ (b) $T_h=15\text{min}$ (c) $T_h=40\text{min}$

図7 アクティブ加熱サーモグラフィ法による剥離欠陥検出

対して、アクティブ加熱を行った場合の供試体表面温度を、赤外線サーモグラフィを用いて測定した。剥離欠陥の寸法は、10 cm 角、15 cm 角、20 cm 角の3種類、深さは2 cm、3 cm、5 cmの3種類とした。供試体に対し熱負荷を与える方法として、加熱には灯油焚きヒータを用いた。20分間供試体表面を加熱した時の、加熱過程20分および加熱停止後1時間の供試体表面温度分布を赤外線サーモグラフィで計測した。得られた温度分布画像を図7に示す。図に表示した経過時間 T_h は、加熱開始時刻を $T_h=0$ としたものである。温度分布画像の階調表示は、白色部が高温を表している。現れた局所的高温領域の位置、形状および寸法は、人工欠陥のものと一致しており、赤外線サーモグラフィ法による良好な欠陥検出性を証明できた。15 cm 角の欠陥部および健全部の時系列温度プロフ

図8 アクティブ加熱時の欠陥部および健全部の時系列温度変化

図10 欠陥深さ、加熱周期と位相差の関係

(a) 加熱周期 $T=10\text{min}$ (b) 加熱周期 $T=30\text{min}$

図10 ロックインデータ処理による剥離計測

ファイルを図8に示す。図より、深さ2 cm および3 cm の剥離欠陥については、加熱後20分で欠陥部と健全部の間には1°C 以上の温度差が現れていることがわかる。しかし、深さ5 cm の剥離欠陥については、加熱終了から10分程度経過した時点で、健全部との温度差が測定可能レベルに達していることがわかる。

4.3 ロックインデータ処理による剥離深さ推定⁹⁾

剥離欠陥の深さを推定するためには、熱負荷開始後からの時系列温度分布データが必要となる。ここでは、人工剥離欠陥を有するコンクリート試験体および剥離を有する実構造物の剥離診断に、前述のロックイン赤外線サーモグラフィ法を適用した結果を示す。時系列温度データを処理するための参照信号として正弦波を用い、正弦値が正の時加熱、負の時冷却を行った場合の試験体表面の温度変動をロックイン処理し、位相分布を求めた。人

工剥離欠陥を有するコンクリート試験体に対し、加熱周期 T を10分から60分まで5分きざみに設定し、剥離深さ、位相および加熱周期の関係を調べた。種々の欠陥深さおよび加熱周期に対して得られた位相差（剥離部と健全部の位相差）を図9に示す。図より、欠陥深さが大きくなるにつれて位相差は大きくなり、ある加熱周期でピークを取った後減少しさらに負の値をとることがわかる。また、位相差がピークを取る加熱周期は欠陥が深い程長くなる。次に、この関係を用いて、実際の構造物に発生した剥離の深さ推定を行った。加熱周期 T を10分および30分とした場合に得られた位相遅れ画像を図10に示す。 $T=10$ 分では位相差は剥離の輪郭部で負値を、中心部で正値をとり、 T を長くするにつれて輪郭部で位相差が負値をとる領域が内部へ拡大している。図9の関係をもとに、剥離深さを大まかに推定すると、剥離輪郭部で0~1 cm、剥離の中心付近では2~3 cm となった。計測終了後に剥離片を取り除くことにより、剥離深さを実測した結果、推定結果は実際のものとよく一致していた。

5. おわりに

本稿では、赤外線サーモグラフィによる非破壊検査技術に関する基礎的解説を行うとともに、同技術に関する最近の話題として、非定常温度分布計測に基づく赤外線サーモグラフィ法ならびに赤外線サーモグラフィ法によるコンクリート構造物診断を紹介した。

今後、さらに優れた赤外線センサが開発され、高性能な赤外線サーモグラフィがより身近な計測機器として一般化すると思われる。同時に、赤外線サーモグラフィによる非破壊検査技術が現場に広く普及すると考えられる。しかしながら、赤外線サーモグラフィ法も他の非破壊検

査法と同様に、すべての欠陥形態、材料に適用できるわけではない。被測定物の熱伝導、放射などの物理的性質、検査環境に応じた境界条件など、欠陥の検出特性に影響を及ぼす因子を十分に検討し、適用限界の見極めや検査結果の正しい評価がなされなければならない。今後の赤外線サーモグラフィ法に対する課題としては、計測方法、被測定物による適用限界、欠陥の判定、欠陥検出感度および精度の評価、さらには欠陥の定量評価手法などが規格化されることであると考えられる。同時に、赤外線サーモグラフィ法により非破壊検査を行う技術者の教育も重要な課題である。

参 考 文 献

- 1) T. Sakagami and K. Ogura: New Flaw Inspection Technique Based on Infrared Thermal Images Under Joule Effect Heating, JSME Int. J., Ser. A, 37-4 (1994), 380-388.
- 2) T. Sakagami and S. Kubo: Applications of Pulse Heating Thermography and Lock-in Thermography to Quantitative Nondestructive Evaluations, Infrared Physics and Technology, 43 (2002), 211-218.
- 3) T. Sakagami and S. Kubo: Development of a New Crack Identification Technique Based on Near Tip Singular Electrothermal Field Measured by Lock-in Infrared Thermography, JSME Int. J., Ser. A, 44-4 (2001), 528-534.
- 4) 阪上, 久保, 原, 番匠谷: アクティブ熱負荷赤外線サーモグラフィによるコンクリート構造物の非破壊検査, 実験力学, 1-1 (2001), 34-38.
- 5) T. Sakagami and S. Kubo: Development of a New Nondestructive Testing Technique for Quantitative Evaluations of Delamination Defects in Concrete Structures Based on Phase Delay Measurement Using Lock-in Thermography, Infrared Physics and Technology, 43, (2002), 311-316.