サーモグラフィック NDT による
複合材料の欠陥・損傷計測*阪上 隆英^{*1}, 小倉 敬二^{*1}, 山中 秀介^{*2}Development of Thermographic NDT for Delaminated Defects
in Fiber Reinforced Plastics

Takahide SAKAGAMI, Keiji OGURA and Shuusuke YAMANAKA

Thermographic NDT is developed for the inspection of the delaminated defects embedded in fiber reinforced plastic samples. The location and shape of the defects are identified from the surface temperature distribution appear on the sample by the heat insulation effect of the defects, when the sample is under heating and/or cooling. The resolution is examined for the artificial delaminated defects both in CFRP and GFRP samples, when the conventional infrared radiation heating is adopted. Experimental results show that the radiation heating is not effective for the accurate defect inspection of the CFRP sample due to its high thermal conductivity. The Joule effect heating, on the other hand, is found to be effective for the similar sample. Two methods of the Joule effect heating, a direct current application and an induction heating, are investigated. The induction heating thermographic NDT is degraded in the resolution of the defects, compared with the direct current thermographic NDT, because of the inhomogeneity in the induced current field. This can be improved by the use of an image processing technique in the analysis of the thermal images. Further the present thermographic NDT technique is applied for the inspection of the GFRP sample with the actual delaminated damage under cyclic straining. The possible detection of the subsurface damage is discussed.

Key Words: Nondestructive Testing, Infrared Thermography, Insulation Method, Radiation Heating, Joule Effect Heating, Image Processing, Delaminated Defect, CFRP, GFRP

1. 緒 言

最近, 機械構造物の軽量化・高機能化を目的として, これらの部材には複合材料が多用されてきており, その用途も二次構造部材から一次構造部材へと拡張される傾向にある。このため, 複合材料に発生するさまざまな欠陥および損傷に対する非破壊検査法を確立し, 複合材料を用いた機械構造物の信頼性を確保することが必須となっている。

しかるに, 複合材料の欠陥・損傷形態は多様かつ複雑であるため, 既存の非破壊検査手法をそのまま用いただけでは, 必ずしも十分な検査を行うことができない。また一方では, 複合材料の使用割合が増加している機械構造物を保守管理する現場において, 広範囲にわたる検査領域中の欠陥および損傷を, 迅速かつ的確に検査する必要性が指摘されている。このような背景から, 複合材料中の欠陥・損傷を的確に評価できる, 新しい非破壊計測手法の開発に対する要求が高まっている。

熱的負荷を与えた時の温度分布情報に基づく非破壊

検査手法については, ハニカム構造材の着霜によるはく離検査, あるいは液晶による温度変化検出による手法などが従来から試みられてきた⁽¹⁾。しかしながら, 温度分布の計測精度の問題から高感度な欠陥検出は不可能であり, 限定された使用に留まっていた。

最近の赤外線センサおよび信号処理機能の進歩に伴い, サンプル表面の温度分布を高速かつ高精度に計測できる赤外線映像装置(赤外線サーモグラフィ)が開発され一般にも普及してきた。このため, 赤外線サーモグラフィを用いた温度分布計測に基づく非破壊検査手法, すなわちサーモグラフィック NDT が, 複合材料のはく離欠陥・損傷に対する効果的な非破壊検査法の一つとして注目を集めている。

例えば, Reynolds ら⁽²⁾は, 光照射によりサンプルを加熱した時の温度分布計測に基づくパルスビデオサーモグラフィにより, 接合不良等の欠陥検出を行っている。McLaughlin, Jr. ら⁽³⁾は, 赤外線ヒータを用いた外部加熱時の欠陥検出に関する実験的および数値解析的検討を行っている。また, 伊藤ら⁽⁴⁾は, ランプ加熱によるセラミックス被膜材の界面欠陥検出を行っている。

著者らは前報⁽⁵⁾において, 電流負荷時のき裂先端の特異電流場に起因する特異温度場検出に基づく特異温

* 原稿受付 平成5年3月1日。

^{*1} 正員, 大阪大学基礎工学部(〒560 豊中市待兼山町1-1)。^{*2} 正員, 三井東圧化学(株)(〒247 横浜市長区笠間町1190)。

度場法, およびジュール加熱時に熱拡散が欠陥により妨げられることによる温度場変化を検出する断熱温度場法の二つのサーモグラフィック NDT を提案した. 特異温度場法の適用例としては, 金属材料中の二次元き裂および三次元表面き裂を精度よく検出できることを示した. また, 断熱温度場法については, ジュール加熱時の複合材料中の人工はく離欠陥検出に関して, 簡単な数値解析的および実験的検討を行った.

本報では, 断熱温度場法によるサーモグラフィック NDT を, 積層構造を有する複合材料のはく離欠陥および損傷の評価に適用した結果を示す. 加熱方法としては, GFRP(ガラス繊維強化プラスチック)および CFRP(炭素繊維強化プラスチック)に対して, 赤外線輻射加熱を用いた. さらに, 導電性複合材料である CFRP に対しては, 直接通電および誘導電流によるジュール加熱の検討を行った. また本実験では, 赤外線サーモグラフィによる欠陥検査システムにエンジニアリングワークステーション(EWS)を付加し, 断熱温度場の計測データに種々の画像処理を施すことにより, はく離欠陥・損傷計測の高分解能・高精度化を試みた.

図 1 断熱温度場法によるサーモグラフィック NDT

図 2 サーモグラフィック NDT 計測システム

2. サーモグラフィック NDT

2・1 断熱温度場法 はく離欠陥を含む材料に熱負荷を与えたとき, はく離欠陥が熱拡散を遮る位置および向きに存在すれば, はく離欠陥近傍の材料表面には, 図 1 に示すような局所的な温度変化領域が生じる. この位置, 形状および寸法は, はく離欠陥のそれらを反映したものであるため, 赤外線サーモグラフィを用いて温度変化領域を詳細に計測することにより, はく離欠陥の位置, 形状および寸法を同定することが可能である. この手法は, はく離欠陥の断熱効果による温度場変化に基づいているため, 断熱温度場法と呼ぶことにする.

断熱温度場法において, 欠陥検出の分解能および精度を向上させるためには, はく離欠陥検出に効果的な温度場を形成できる加熱あるいは冷却方法の検討が重要である. 加熱および冷却に必要な条件としては, (1)欠陥部分における温度変化領域の検出を容易にするため, サンプルを均質に加熱・冷却できること, (2)はく離欠陥による温度変化領域を正確に計測するため, 熱拡散の影響が最小限に抑えられる時間内^{**1}にサンプルを急速加熱・冷却できること, などが挙げられる.

さらに, 欠陥での断熱効果による温度差が大きくなるように, 欠陥を横切る方向の熱の流れを大きくするため, 物体が内部から加熱され, 内部から表面への熱流が起こる内部加熱手法が望ましい.

本実験では, まず GFRP および CFRP に対する加熱方法として, これまでにもサーモグラフィック NDT において使用が試みられている赤外線輻射加熱の検討を行った. 次に, CFRP に対しては, 輻射形の加熱方法よりも効果的な方法として, CFRP の導電性に着目した直接通電および誘導電流によるジュール加熱の検討を行った.

2・2 計測装置 本研究で用いたサーモグラフィック NDT の装置構成を図 2 に示す. 赤外線サーモグラフィは, 日本アビオニクス TVS-2000 である. この装置は, 検出波長帯域 3~5 μm の InSb 赤外線センサ

^{**1} いま, 熱拡散の影響が最小限に抑えられる時間 t_0 を, 材料の熱拡散性を表す熱拡散距離 $d = \sqrt{at_0}$ (a は熱拡散率) が, 欠陥寸法およびサンプル厚さ等の代表寸法 l に比べて十分に小さくなるという条件で考えると,

$$t_0 \ll l^2/a$$

となる. a の値として, GFRP の場合 0.5 mm^2/s , CFRP の場合 10 mm^2/s , l の値として例えば 5 mm を代入すると t_0 は,

$$t_0 \ll 2.5 \text{ s} \quad (\text{CFRP の場合})$$

$$t_0 \ll 100 \text{ s} \quad (\text{GFRP の場合})$$

となる.

を搭載しており、温度分解能 0.1°C 、計測速度 1 画面あたり 1/30 秒での温度分布計測が可能である。さらにリアルタイムレコーダの接続により、300 画面までの温度分布データを数値的に記録することが可能である。

本実験では、小さな寸法のはく離欠陥・損傷の計測あるいははく離形状の詳細な計測を行うために、赤外線サーモグラフィに近接拡大レンズを取付けた。近接拡大レンズは、シリコンでできており、レンズ使用時のサーモグラフィの視野は $25\text{ mm} \times 17\text{ mm}$ 、分解能は $250\text{ }\mu\text{m}$ である。

ジュール加熱を行うための電流負荷方法としては、直接通電および高周波電流による電磁誘導を用いた。直接通電加熱の場合には、試験片の両端部に板状の電極を圧着し、直流安定化電源より電流を供給した。高周波誘導加熱装置としては、信号発生器からの高周波交流信号を高速電力増幅器を用いて増幅し、図 2 に示したような渦巻形平面コイルに供給し、それにより生じた磁界によりサンプルに誘導電流を負荷した。誘導加熱法は、非破壊、非接触で電流を負荷できるため、実構造部材に対するジュール加熱手法として有用であると考えられる。

赤外線輻射加熱装置として用いた赤外線ヒータは、ニクロム線ヒータ (350 W) 上に遠赤外線放射セラミックスをコーティングした鋼板を取付けたものである。

さらに、本実験では、サーモグラフィック NDT システムにエンジニアリングワークステーションを付加することにより、赤外線サーモグラフィによる温度分布計測データの画像処理、および加熱・計測装置の制御を行った。

3. 赤外線輻射加熱による 人工はく離欠陥の計測

はく離欠陥計測に対する、断熱温度場法によるサーモグラフィック NDT の有用性を確かめるため、GFRP および CFRP サンプルに人工的に導入した層間のはく離欠陥を、赤外線輻射加熱時の温度分布をもとに計測する実験を行った。

3.1 検出可能な欠陥寸法の検討 さまざまな形状および寸法の人工はく離欠陥を導入した GFRP および CFRP サンプルを用いて、どの程度小さな寸法の人工はく離欠陥まで検出が可能であるかを検討した。

3.1.1 計測対象 実験に用いた GFRP サンプルは、平織りガラス繊維クロス (GF クロス) を 6 層、10 層および 14 層積層させたものであり、マトリックスにはビニルエステル樹脂を用いている。サンプルの形状は短冊状で、寸法は $50\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ である。

GFRP サンプルの厚さは、6 層、10 層および 14 層積層材について、それぞれ 1.8 mm 、 2.5 mm および 3.3 mm である。

人工はく離欠陥については、サンプルの積層成型時に GF クロスの 1 層目と 2 層目の間に、厚さ $25\text{ }\mu\text{m}$ のポリイミドおよびテフロンフィルムを重ねて挟むことにより、サンプルに導入した^{**2}。人工はく離欠陥の形状および寸法は、5, 10, 20 mm 角の正形状、および 5, 10, 20 mm 幅の帯状とした。

一方 CFRP サンプルは、平織り炭素繊維クロス (CF クロス) を、マトリックスにビニルエステル樹脂を用いて 10 層積層させたものである。サンプルの形状は GFRP と同様に短冊状で、寸法は $55\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ 、サンプルの厚さは 2.5 mm である。

前述の GFRP サンプルと同様に、積層成型時に CF クロスの 1 層目と 2 層目の間に、厚さ $25\text{ }\mu\text{m}$ のポリイミドフィルムを 2 枚重ねて挟むことにより、人工はく離欠陥を導入した。人工欠陥の形状・寸法は、GFRP サンプルと同じ 5, 10, 20 mm 角の正形状、および 5, 10, 20 mm 幅の帯状とした。

3.1.2 計測結果 赤外線ヒータ上にサンプルを置き、サンプルの裏面を 5 秒間加熱することにより、表面温度を $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 程度上昇させた後、赤外線照射を中断し、自然冷却による冷却を開始した。CFRP および GFRP とともに、サンプルの加熱を止めた直後に、人工はく離欠陥の真上部分に、はく離欠陥による断熱の影響と思われる局所的低温領域が最も顕著に現れた。

実験の結果、GFRP サンプルに対しては、対象としたすべてについて、温度分布画像に現れた温度差 1°C 程度の局所的低温領域をもとに、欠陥の検出が可能であった。さらに、欠陥形状についても、低温領域の形状が比較的鮮明に現れたため、これをもとに欠陥形状を正確に計測することが可能であった。計測結果の中から、10 mm 角の正形状人工はく離欠陥を有する 10 層積層 GFRP サンプルに対して得られた温度分布画像を図 3 に示す。温度分布画像に現れた局所的低温領域の形状は、導入された人工はく離欠陥のものとよく一致していることがわかる。

さらに、2 mm 角から 20 mm までの正形状人工はく離欠陥を導入した、6 層積層 GFRP サンプルを用いて行った実験では、近接拡大レンズを装着した温度分布計測により、2 mm 角欠陥の検出、4 mm 角欠陥の形状同定まで可能であることが明らかとなった。4

^{**2} サンプルの加圧成型時に 2 枚のフィルムが接着しないように、GFRP の場合のみ異種のフィルムを重ねた。

mm 角の欠陥を有するサンプルについて得られた、拡大視野での温度分布画像を図 4 に示す。

また、図には示さないが、赤外線輻射加熱を計測面側すなわち赤外線サーモグラフィ側から行った場合には、欠陥形状を示す局所的高温領域が計測され、この場合にもはく離欠陥の同定が可能であることがわかった。

一方、10 層積層 CFRP サンプルに対しては、対象としたすべてのサンプルについて、温度分布画像から温度差 1°C 程度の低温領域を検出し、欠陥の存在を検出することができた。一例として、10 mm 角の正方形形状はく離欠陥に対して得られた温度分布画像を図 5 に示す。

欠陥形状の同定については、図 5 に示した 10 mm 角の正方形形状欠陥の場合に限り、温度分布画像から正方形形状の欠陥形状を比較的正確に同定することができた。しかしながら、他のサンプルについては、CF クロスの高い熱拡散性の影響により、時間の経過とともに低温領域の形状がすぐにぼやけてしまうため、欠陥の検出は可能であっても、GFRP サンプルのように欠陥形状の正確な同定までは困難であった。

したがって、先にも述べたように、CFRP を対象に欠陥形状の正確な同定を行うためには、熱拡散の影響

が及ばない時間内でサンプルを加熱・冷却できる方法の検討が必要であることが明らかとなった。

3・2 検出可能な欠陥深さの検討 人工はく離欠陥の深さ方向の存在位置が異なる GFRP および CFRP サンプルを用いて、どの程度の深さまでの欠陥検出が可能であるかを検討した。

3・2・1 計測対象 実験には前節において示したものと同様の、6 層、10 層および 14 層積層 GFRP サンプルおよび 10 層積層 CFRP サンプルを用いた。サンプルに導入した人工欠陥の形状・寸法は、5, 10, 20 mm 角の正方形形状とした。

深さの異なる欠陥の計測方法としては、同一サンプルを用いて、欠陥が温度計測面から 1 層目と 2 層目の間に存在する場合、およびサンプルを裏返し、裏面から 1 層目と 2 層目の間に存在する場合の計測を行った。例えば 10 層積層サンプルでは、人工はく離欠陥が温度計測面から 1 層目と 2 層目の間、および 9 層目と 10 層目の間に存在する場合の計測を行うことになる。実験方法については、前節で述べた実験の場合と同様である。

3・2・2 計測結果 GFRP および CFRP サンプルについて得られた計測結果をまとめたものを表 1 に示す。表中において、◎印は欠陥検出および形状計測が

図 3 赤外線輻射加熱による GFRP のはく離欠陥検出 (10 mm 角正方形人工欠陥)

図 5 赤外線輻射加熱による CFRP のはく離欠陥検出 (10 mm 角正方形人工欠陥)

図 4 赤外線輻射加熱による GFRP のはく離欠陥検出 (4 mm 角正方形人工欠陥)

表 1 赤外線輻射加熱時の人工はく離欠陥の検出可能深さの検討

		GFRP						CFRP	
		6ply		10ply		14ply		10ply	
Location of Delamination Defect		Between 1-2 Layers	5-6	1-2	9-10	1-2	13-14	1-2 *	9-10
Size of Defect	5×5mm Square	◎	○	◎	○	◎	×	○	×
	10×10mm Square	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	×
	20×20mm Square	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	×

◎ → Detectable, Defect Shape Identified
○ → Detectable
× → Not Detectable

可能であったもの、○印は欠陥検出のみ可能であったもの、×印は欠陥検出も不可能であったものを示している。

実験結果より、GFRP サンプルについては、9-10 層間の 5 mm 角人工欠陥、13-14 層間の 10 mm 角人工欠陥まで検出が可能であることが明らかとなった。これに比べて CFRP の場合には、9-10 層間に存在する人工欠陥については、対象としたサンプルについてはすべて検出さえも不可能であった。この原因については、欠陥部の断熱温度場が表面に伝達される過程で、炭素繊維の高い熱拡散性による CF クロス層内での熱拡散により、断熱温度場が消失したためであると考えられる。

4. ジュール加熱による CFRP のはく離欠陥検出

前章で述べた赤外線輻射加熱による欠陥検出に関する検討を通じて、CFRP のような高い熱拡散性を有するサンプルに対し、断熱温度場法によるサーモグラフィック NDT を適用する際には、熱拡散の影響が及ばない時間内でサンプルを急速加熱できる方法の検討が必要であることが明らかとなった。そこで、CFRP に対する急速加熱方法として、電流負荷によるジュール加熱を検討した。

4・1 計測対象 実験に用いた CFRP サンプルは、先に示した赤外線輻射加熱の実験で用いたものと同じである。本実験で用いたサンプルは、直接通電によるジュール加熱を行う際に給電端子を圧着できるように、サンプル端部のマトリックスをあらかじめ除去して積層および加圧成型を行ったものである。

4・2 直接通電加熱によるはく離欠陥検出 対象とした CFRP サンプルに 50 A の直流電流を直接通電することにより、ジュール加熱を行った。通電開始直後から CFRP サンプルはジュール熱により加熱され、約 1 秒程度の間にサンプル表面で 20~30°C 程度の温度上昇を得ることができた。このときの温度分布を、赤外線サーモグラフィで計測した結果、均質に加熱された温度場の中に、はく離欠陥による断熱の影響である局所的低温領域が顕著に現れた。

低温領域の周囲との温度差は、加熱開始後の経過時間および欠陥の寸法により異なるが、対象としたすべてのサンプルについて、赤外線サーモグラフィにより十分検出可能な 1°C~2°C 程度の温度差を確保することができた。また、低温領域の形状についても、赤外線輻射加熱の場合と比較して、はるかに鮮明なものが得られ、導入した人工はく離欠陥の形状とよく一致し

た。

実験結果の一例として、10 mm 角の正形状はく離欠陥を有するサンプルについて得られた、通電開始から 1 秒経過時の温度分布画像を図 6 (a) に示す。

さらに本実験では、温度分布データのノイズ軽減およびはく離形状の同定を目的とした画像処理を行った。赤外線サーモグラフィにより計測した 1 画面当たり 256×100 画素、各画素 256 階調の温度分布データを、一旦リアルタイムレコーダに記録した後、EWS に転送し画像処理を行った。

まず、ノイズ軽減のための温度分布データの時間的平均化処理および空間的平滑化処理、局所的低温領域の強調化処理による温度分布データの前処理を行った。次に、はく離欠陥形状の同定を行う画像処理を行った。前報において示した数値解析結果⁽⁶⁾によれば、はく離欠陥の輪郭を同定するためには、温度の位置による変化率すなわち温度勾配が極値をとる点を結べばよいことがわかった。そこで、前処理後の温度分布データから温度勾配の分布を計算し、さらに二値化・細線化による極値抽出により、はく離欠陥の輪郭を求めた。図 6 (a) に示した温度分布データを画像処理した結果得られた、はく離欠陥の形状・寸法を図 6 (b) に示す。画面の縦横比が異なるため若干横長になり、また細部においてはノイズの影響で輪郭の形状に乱れが生じているが、得られた欠陥の形状・寸法は実際のものと同様一致していることがわかった。

本報で示した実験結果は、自然冷却により試験片を冷却した場合のものであるが、表面に送風を行い熱伝達係数を高くすることにより、欠陥部分での温度差はより大きくなり、欠陥検出分解能および精度は向上するものと考えられ、CFRP のように高い熱拡散性を有する材料に適していると考えられる⁽⁶⁾。さらに著者らは、赤外線透過低温体を接触させることによりサンプルを急速かつ均質に冷却し、このときの表面温度を赤外線透過低温体越しにサーモグラフィ計測する新しい手法の提案を行っているが、紙面の制限から詳細は別報⁽⁷⁾に譲る。

4・3 高周波誘導加熱によるはく離欠陥検出 前述の CFRP サンプルのうち、10 mm 幅の帯状人工はく離欠陥を有する CFRP サンプルを用いて実験を行った。実験に使用した加熱コイルは、線径 0.5 mm のエナメル線を 44 回巻くことにより直径 50 mm の渦巻形平面コイルにしたものである。コイルに負荷した高周波電流の周波数は 500 kHz、電流値は 2.1 A である。

平面渦巻形コイルに通電を開始してから 2 秒後に、

赤外線サーモグラフィで計測した試験片表面の温度分布画像を図7(a)に示す。図より、渦巻形平面コイルを用いて誘導加熱を行ったときには、加熱による温度場自体がリング状の不均質なものとなっていることがわかる。加熱コイルとほぼ同じ直径に加熱されたリング状の領域の中では、帯状の人工はく離欠陥が含まれている部分において、やや温度低下が見られるものの、不均質な温度場のため、欠陥部分に対応する顕著な低温領域の検出は困難である。そこで、欠陥の存在しない部分に対して同様の条件で誘導加熱を行った際の温度場を計測し、EWSを用いて欠陥材の温度場と無欠

陥材の温度場を引算処理することにより、渦巻形平面コイルを用いた誘導加熱による加熱の不均質性の影響を取り除いた。

図7(a)に示した温度分布画像、および無欠陥部分の参照温度分布画像をもとに画像処理を行った。直接通電加熱の場合と同様に平均化、平滑化処理を行うことによりノイズ除去を行った後、温度分布の引算処理を施し、さらに温度分布の強調処理を施した。一連の画像処理の結果、図7(b)に示すような欠陥部位に対応した、温度差約0.5℃程度の帯状の温度変化領域のみを抽出でき、これをもとに欠陥位置・形状の同定を

(a) 直接通電加熱時の温度分布画像

(b) 画像処理による欠陥形状同定

図6 直接通電加熱によるCFRPのはく離欠陥計測(10mm角正方形人工欠陥)

(a) 高周波誘導加熱時の温度分布画像

(b) 画像処理による欠陥形状同定

図7 高周波誘導加熱によるCFRPのはく離欠陥計測(10mm幅帯状人工欠陥)

(a) 赤外線輻射加熱時の温度分布画像

(b) 画像処理による損傷形状同定

図8 赤外線輻射加熱によるGFRPの実はく離損傷計測

行うことが可能であることが明らかとなった。

しかしながら、実験を行った範囲内では、高周波誘導加熱による欠陥の検出精度は、先に述べた直接通電加熱の場合と比較して劣っている。この原因としては、誘導加熱による不均質温度場においては、CFクロス層内のリング状加熱部から低温部への面内の熱拡散が主となるため、面外方向への熱拡散が小さくなり、欠陥による断熱の影響がサンプル表面に顕著に現れなかったためであると考えられる。したがって、局部的には均質とみなすことができる加熱領域中に含まれるような、小さな欠陥評価に対しては本手法は有効であると思われる。

大きなサンプルあるいは実構造物のより大きな欠陥検出に対して本手法を適用するときには、白鳥ら⁽⁸⁾も試みているように、加熱コイルをEWSで制御しながら計測領域全体を走査し、計測対象の加熱を行うような操作が検査領域中のはく離欠陥の位置および形状同定に有効であろうと考えられる。

なお著者らは、別に複数個のコイルを用いた誘導加熱によるインテリジェントNDT法を提案している。この手法によれば、各コイルに負荷する電流の大きさ・位相を最適化することにより、積層材の各層に流れる誘導電流さらには温度分布を制御することが可能である。詳細は別報⁽⁹⁾に譲るが、数値シミュレーション結果によれば、この手法を用いることにより、はく離欠陥が存在する層を正確に同定できることが明らかとなっている。

5. GFRP 中の実損傷の計測

5.1 計測対象 GFRP サンプルに曲げ荷重を繰り返して負荷することにより、実際に発生したはく離損傷の計測を行った。実験に用いたGFRPサンプルは、先に述べた人工欠陥サンプルと同様に、平織りガラス繊維クロスを6層積層させた寸法50 mm×150 mmの短冊状サンプルである。

GFRP サンプルに繰り返して曲げ荷重を負荷したところ、サンプル固定のために用いた座金の周囲に損傷が発生した。損傷は、GFクロスとレジンの間のはく離損傷である。このような実損傷について、サーモグラフィックNDTによる形状・寸法計測を行った。

5.2 計測結果 本実験では、寸法の小さな実損傷を詳細に計測するため、近接拡大レンズを使用した。前節までに述べた人工欠陥計測の場合と同様の方法でGFRPサンプルを加熱し、表面温度の計測を行った。温度分布の計測結果を図8(a)に示す。図より温度分布画像には、はく離損傷の影響により生じたと考

えられる低温領域が顕著に現れていることがわかる。また、その範囲は目視により同定が可能な表面に現れている損傷部位以外にも広がっていることがわかった。実際の損傷形状に関しては、超音波法など他のNDT手法による詳細な計測が必要であるが、本実験により目視では計測が困難なはく離損傷をサーモグラフィックNDTにより計測できる可能性があることがわかった。

さらに前述のCFRP試験片の場合と同様に、図8(a)に示したサーモ画像のデータをEWSを用いて処理することにより、損傷の輪郭抽出を行った。画像処理結果を図8(b)に示す。図より、温度勾配計算に基づく画像処理によるはく離の輪郭同定は、複雑な形状を有する実損傷に対しても適用可能であることが明らかとなった。

6. 結 言

断熱温度場法によるサーモグラフィックNDTを、積層構造を有する複合材料のはく離欠陥および損傷の評価に適用した。本実験の結果、次のことが明らかとなった。

(1) 赤外線輻射加熱時の温度分布からGFRPおよびCFRPサンプルの人工はく離欠陥の検出および形状同定を行った。熱拡散性の比較的低いGFRPサンプルについては、小寸法欠陥あるいは深い層に存在する欠陥まで検出および形状同定が可能であった。CFRPの場合には浅い層に存在する欠陥の検出は可能であったが、高い熱拡散性の影響により、欠陥形状の正確な同定、深い層に存在する欠陥の検出は困難であった。

(2) CFRPサンプルに対し、直接通電および誘導電流によるジュール加熱を行ったときの温度分布から、人工はく離欠陥の検出および形状同定を行った。直接通電加熱は、CFRPサンプルの急速・均質加熱に有効であり、顕著に現れた断熱温度場をもとに欠陥の検出および形状同定を行うことが可能であった。誘導加熱を行った場合にも、ワークステーションを用いたデータ処理により不均質温度場の影響を除去することにより、欠陥計測が可能であった。

(3) 実際に発生したはく離損傷を有するGFRPサンプルに対し、赤外線輻射加熱を行ったときの温度分布から、損傷形状の計測を行うことが可能であった。さらに、ワークステーションを用いた温度分布データの画像処理により、はく離損傷の形状同定が可能であった。

本研究の遂行にあたり、文部省科学研究費試験研究

(B)(2), 奨励研究(A), ならびに(財)三菱財団自然科学研究助成, (財)カシオ科学振興財団による援助を受けた。また, 実験において大阪大学大学院学生・大澤澄人君(現:堀場製作所), 多賀之高君(現:川崎重工業), ならびに学部学生・八木俊樹君(現:全日空)の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) Bray, D. E. and McBride, D.(編), *Nondestructive Testing Techniques*, (1992), 639, Wiley.
- (2) Reynolds, W. N. and Wells, G. M., *British J. NDT*, **26** (1984), 40.
- (3) McLaughlin, Jr., P. V., Mirchandani, M. G. and Ciekurs, P. V., *Trans. ASME, J. Eng. Mater. Technol.*, **109** (1987), 146.
- (4) 伊藤・斉藤・柏谷・大石・金子, 日本材料学会第5回破壊力学シンポジウム講演論文集, (1989-9), 26.
- (5) 阪上・小倉, 機講論, No. 900-50 (1990-8), 19: 機論, **58-555, A** (1992), 214.
- (6) Ogura, K. and Sakagami, T., *Proc. of the Joint ASME-JSME Advances in Electronic Packaging*, EEP-2 (1992), 909.
- (7) 小倉・阪上・山中・木島, 第4回新素材及びその製品の非破壊評価シンポジウム講演論文集, (1993-1), 59.
- (8) 白鳥・桑嶋・高橋, 機論, **58-556, A** (1992), 2274.
- (9) 小倉・阪上・岡部, 機講論, No. 920-72 (1992-9), 643.