

複合材料の損傷評価のための高精度サーモグラフィックNDTの開発

Development of the High-Resolution Thermographic NDT for Fiber Reinforced Plastics

代表研究者 大阪大学工学部 助教授

阪上 隆 英

Assoc. Prof., Faculty of Engineering, Osaka University

Takahide SAKAGAMI

The thermographic NDT, which is a technique in NDT based on the surface temperature distribution in heated solids, was applied for the inspection of locally damaged CFRP plate samples under the contact loading followed by cyclic bending. A singular method and an insulation method were both examined. The singular method, in which the heat concentration at flaw tips was detected under electric current application, was found to be sensitive to the failure, fracture or break in carbon fibers. On the other hand, the insulation method, in which the stain in the surface temperature distribution was detected under surface heating by hot air stream, was found to be successfully applicable to the inspection of the subsurface delamination damage in CFRP. The detected damage by the thermographic NDT was compared with those measured by a scanning acoustic microscope.

研究目的

近年、複合材料をはじめとする高機能な新材料が開発され、金属材料にかわり多くの機械構造物に使用されている。このような新材料による構造物の安全を確保するためには、材料中に存在する欠陥あるいは供用中に発生する衝撃や疲労による損傷を、高精度に非破壊検出・計測することが必要不可欠である。しかるに、新材料に発生する欠陥損傷の形態は、これまでの金属材料と異なり多様かつ複雑であり、欠陥損傷の高精度評価のための非破壊検査技術は発展途上にあるのが現状である。

研究代表者らはこれまでに、新材料の中でも特に機械構造物に需要の多い、繊維強化プラスチック (FRP) に存在する重要な欠陥損傷形態である、層間はく離を対象とした新しいNDT手法として、サーモグラフィックNDTを開発・検討してきた。サーモグラフィックNDTは、サンプルに加熱・冷却による熱負荷を与えた時のサンプル表面の温度分布を赤外線サーモグラフィを用いて計測し、欠陥損傷の存在により特徴的に変化した温度分布をもとに欠陥損傷を検出・

計測する方法である。この手法は、表面下のはく離欠陥損傷に対して特に検出感度が高く、しかも画像センシング手法であるため広範囲を短時間に検査でき、欠陥損傷形態を直感的に把握できるという特色を有している。

本研究は、これまでに開発したサーモグラフィックNDTをベースに、サーモグラフィックNDTを高分解能・高精度化し、複合材料の多様な欠陥損傷形態にも対応した高度なNDTシステムを開発することを目的とする。

研究経過

サーモグラフィックNDTに関する研究は、平成元年度から始められ、以後複合材料をはじめとする先進材料の欠陥損傷をその場計測できるNDT手法の開発を主な目標として研究が進み、着実に研究成果を挙げてきた。主な研究成果としては、(1)通電時のき裂先端での特異温度場検出に基づくき裂状欠陥の検出・計測手法の開発、および特異温度場法による二次元き裂・三次元表面き裂の検出、(2)欠陥による断熱効果に基づく断熱温度場法の検討、および断熱温度

場法による複合材料中の人工はく離欠陥の検出・計測，(3)拡大光学系を付加したサーモグラフィによる温度分布計測に基づく微小欠陥損傷の検出等が挙げられる。

研究成果

本研究では，サーモグラフィックNDTによる実損傷の計測およびサーモグラフィックNDTの高精度化を中心課題とした。得られた研究成果としては，以下のものが挙げられる。

(1)CFRPに圧縮荷重を負荷することにより生じた，繊維破断損傷および層間はく離損傷を高精度に検出・計測することができた。

(2)赤外線透過材料による高効率接触冷却手法の開発により，はく離損傷計測の高分解能・高精度化を可能にした。

(3)赤外線サーモグラフィおよび赤外線透過材料を用いた接触面の温度分布計測を，トライボロジ計測に応用した。

ここでは紙数の制限により，(1)について研究成果の詳細を記述する。

CFRPの実損傷計測への適用

圧縮荷重の負荷により，炭素繊維強化プラスチック（CFRP）に発生した損傷を，サーモグラフィックNDTにより検出・計測した。

1. 計測対象 平織り炭素繊維クロス12層を，マトリックスにビニルエステル樹脂を用いて積層・成型したCFRP試験片に，圧縮荷重による損傷を導入した。導入方法としては，まず内径55mmの円筒台座に試験片を載せ，円筒の中心部に上方から直径25mmの鋼球を押し付けることにより初期損傷を発生させ，次に4点曲げにより，初期損傷発生部に繰り返し圧縮荷重を負荷し，損傷を進展させた。鋼球による圧縮負荷においては，変位速度を1mm/s，最大圧縮荷重を3.43kNとした。4点曲げにおいては，最大荷重振幅を2.8kNとし，周波数0.98Hzで760回繰返し荷重を負荷した。

2. 特異温度場法による損傷計測

2.1 特異温度場法 き裂状欠陥を含む導電体に通電した時，き裂状欠陥が電流流線と平行でない場合には，き裂先端に形成される特異電流

場により，き裂先端において顕著な発熱集中が見られる。特異温度場法は，このようなき裂先端における発熱集中を検出することによりき裂状欠陥を検出する手法である。CFRPの場合においても，導電性を有する炭素繊維層に直接あるいは電磁誘導により電流を負荷することにより，炭素繊維に発生したき裂状欠陥および損傷を検出できるものと考えられる。

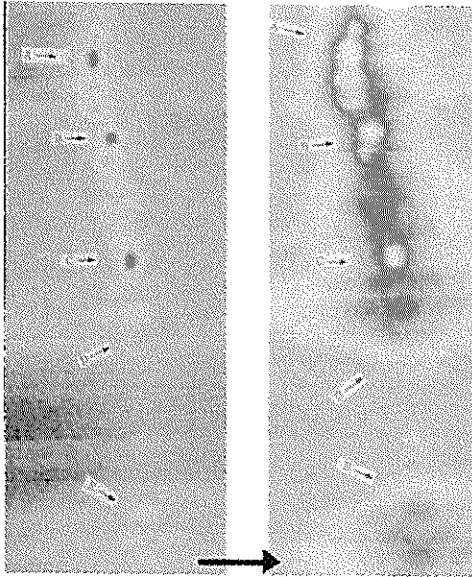
2.2 計測結果 鋼球の押し付けによる圧縮荷重を負荷した側から第1層目の炭素繊維クロスに，9Aの直流電流を直接通電法により負荷した時の，試験片表面温度の分布を赤外線サーモグラフィを用いて計測した。

電流を負荷してから3秒後および8秒後に得られた，試験片表面の温度分布画像を図1に示す。図中には電流負荷方向を矢印で示した。図よりわかるように，温度分布画像には損傷による抵抗変化に起因する局所的な温度上昇部が見られ，これらは時間の経過とともに拡大している。

画像中に見られる顕著な発熱集中部を点Aから点Eとして，各部における炭素繊維の損傷状態を推測する。まず，点Dおよび点Eにおいては扇形の発熱集中が見られるとともに，DE間においては温度上昇がほとんど起こっていないことがわかる。このような温度分布は，前報において報告した中央き裂平板の温度分布と類似しており，DE間で電流が遮断され電流がこの部分を迂回して流れたために，点Dおよび点Eにおいて発熱集中が起こったことを示している。したがってこの場合，DE間にき裂状の繊維破断が生じていると推測することが妥当である。

これに対し点A，点Bおよび点Cにおいては，局所的な発熱集中が観察されているが，その傾向はDE間のようなき裂状繊維破断のものと異なり，発熱集中部間の低温領域が見られない。これらの部分では，完全なき裂状繊維破断には至らないが電気抵抗を局所的に増大させる損傷が生じているものと考えられる。

温度分布画像から推測した炭素繊維の損傷形態が正しいものであるかどうかを確かめるため，すべての試験を終了した後，CFRP試験片



(a) 電流負荷から3秒後 (b) 電流負荷から8秒後

図1 電流負荷直後のCFRP表面の温度分布画像

を燃焼させて樹脂を除去することにより、炭素繊維の損傷状態を調べた。その結果、DE間には長さ14mmのき裂状の繊維破断損傷が生じていたことがわかった。また、点Aから点Cにおいては、炭素繊維には完全な破断は見られなかったが、炭素繊維の束が圧縮荷重を受けて折れた跡が見られ、これが局所的に電気抵抗を増大させていた可能性があることがわかった。これらの結果は、温度分布画像から推測した損傷形態と符合しており、特異温度場法サーモグラフィックNDTにより、炭素繊維に発生した損傷状態を同定できることが明らかとなった。

3. 断熱温度場法による損傷計測

3.1 断熱温度場法 サンプルに熱負荷を与えた時、熱流の中に欠陥が存在すれば、欠陥部分の断熱効果により熱移動が妨げられるため、欠陥付近の材料表面には局所的な温度変化領域が生じる。この位置および形状は、内部の欠陥を反映したものであるため、温度変化領域の計測をもとに欠陥の位置および形状を同定することができる。断熱温度場法は、複合材料の層間はく離欠陥の計測に特に有用であるため、本実験においても圧縮荷重の負荷により生じた層間はく離損傷が断熱温度場法により計測可能であるかどうかを検討した。

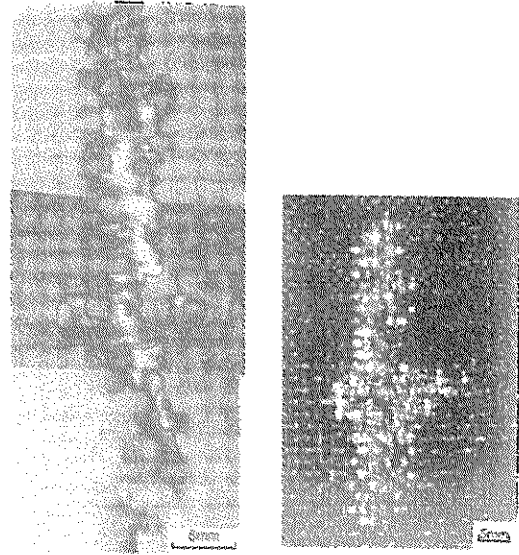


図2 赤外線サーモ画像によるはく離損傷計測結果

図3 超音波顕微鏡によるはく離損傷計測結果

4.2 計測結果 本実験では熱風の送風により、試験片を表層部から急速加熱する方法を用いた。ドライヤーの熱風を試験片表面に送風しながら、試験片表面の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2に示す。

熱風を送風することにより試験片を表面から加熱する場合には、加熱が継続されている間においては試験片に生じる熱流は表面から内部に向かうものとなる。このため、はく離損傷が存在すれば、はく離損傷の直上部の試験片表面には、高温領域が観察される。図2に示した温度分布画像では、はく離損傷の影響により生じたと思われる高温領域が白い部分として表示されている。図2より、鋼球による圧縮荷重を与えた部分においては、十字型のはく離損傷が生じていること、また繰り返し曲げ荷重の負荷により、試験片を横切る方向にはく離損傷が進展していることがわかった。

CFRP試験片の同じ部分を、超音波探査映像装置を用いて計測した結果を図3に示す。図3において白く見える領域がはく離損傷である。また、はく離損傷は最も表層の炭素繊維クロスと樹脂のはく離損傷であることがわかった。この結果を図2に示したサーモグラフィックNDTに

よるはく離損傷形状の計測結果と比較すれば、はく離損傷の形状は両者でほぼ一致しており、サーモグラフィックNDTにより表面直下に存在するはく離損傷の形状を精度良く計測できることが明らかとなった。

今後の課題と発展

本研究では表面直下に存在するはく離損傷を対象に計測を行ったが、実際にははく離損傷は深い層にも存在する。サーモグラフィックNDTにより、深い層に存在するはく離損傷を表面直下のはく離損傷から分離して検出するためには、パルス状加熱を行った後の損傷部における熱応答がはく離損傷の深さにより異なることを利用した、サーマルウエーブ手法を用いれば良いと考えられる。さらに、熱応答に関する非定常温度分布の連続データを、逆問題解析処理することにより、欠陥および損傷の定量的計測を行うサーマルウエーブCT法の開発にも現在着手している。

また、赤外線サーモグラフィおよび赤外線透過材料を用いた接触面の温度分布計測手法も、摩擦・摩耗などのトライボロジ計測に有用であることが明らかとなってきており、この方面の研究もさらに発展させたいと考えている。

謝 辞

最後に、本研究に対しご援助いただいた、財団法人日産科学振興財団に対し厚く御礼申し上げます。

発表論文リスト

(1) Takahide SAKAGAMI and Keiji OGURA: "Thermographic NDT Based on Transient Temperature Field Under Joule Effect Heating", SPIE Proceedings Series Vol. 2245, 1994, pp.120-130.

(2) 小倉敬二, 阪上隆英, 荒川順平: ニューラルネット援用サーモグラフィックNDTによるはく離欠陥同定, 日本機械学会講演論文集, No.940-30, 1994, pp.53-55.

(3) 小倉敬二, 三好良夫, 阪上隆英, 大堂洋一郎: 可視光および赤外光透明材料を用いたすべり接触摩耗状態の計測, 日本機械学会講演論文集, No.940-30, 1994, pp.229-231.

(4) 阪上隆英, 小倉敬二: 赤外線映像装置による非破壊・非接触材料評価, 日本機械学会講演論文集, No.940-34, 1994, pp.18-25.

(5) 阪上隆英, 小倉敬二ほか: 熱弾性赤外線の透過計測に基づく接触応力分布の可視化, 日本機械学会講演論文集, No.940-37(Vol.B), 1994, pp.314-315.

(6) 阪上隆英, 小倉敬二ほか: 赤外線CCDサーモグラフィを用いたすべり接触摩耗温度の実時間計測, 日本機械学会講演論文集, No.954-1, 1995, pp.165-167.

(7) Takahide SAKAGAMI, Keiji OGURA and Masahiro SHODA: "Thermal Sensing and Imaging of the Dry Sliding Contact Surface Using IR Thermo-Microscope", SPIE Proceedings Series Volume 2473, 1995, pp.263-272.

(8) 阪上隆英, 小倉敬二: 赤外線画像による材料内部欠陥の検出, 精密工学会誌, 61-5, 1995, pp.630-635.

(9) 阪上隆英, 小倉敬二ほか: サーモグラフィックNDTによるCFRPの損傷計測, 日本機械学会講演論文集, No.95-2(Vol.A), 1995, pp.201-202.

(10) Takahide SAKAGAMI and Keiji OGURA: "Applications of Infrared Thermography in Contact Mechanics", Proc. of Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics, 1995, (In-Press).