熱弾性解析の高解像化による炭素繊維複合材料の内部損傷評価†

上野谷 敏 之* 藤 井 透**

Nondestructive Damage Characterization of Carbon Fiber Composites through Improved Thermoelastic Technique

by

Toshiyuki UENOYA* and Toru FUJII**

The development and validation of thermoelastic damage analysis (TDA) is described to characterize damage in carbon fiber (CF) fabric composites. CF composites are suddenly ruptured without appearing obvious decrease in modulus with load increase, whereas often used as structural materials. We need to detect and estimate early damage, to monitor the damage progress, and to predict residual life of the materials. The TDA can greatly enhance conventional thermoelastic stress analysis (TSA) image of composites including early damage, which illustrates stress image having stress changes due to damage initiation/progression and also is very noisy due to the microscopic heterogeneity and weave construction of composite materials. The advantage of the TDA is demonstrated with evaluation of the damage in the plain-weave CF/plain epoxy composites and the toughened one with rubber-modified epoxy under fatigue loading as well as cyclic stepwise loading. The TDA images from the composites remarkably depended on the matrices in the composites. The TDA results compared well with those obtained using different NDT-techniques: scanning acoustic microscopy, acoustic emission technique, and edge replica technique. The TDA offered valid damage information in features and amount of stress release and ability to determine quantitative estimation of fatigue damage was also discussed.

Key words: Thermography, Thermoelastic analysis, Fatigue damage, Fiber reinforced plastics, Carbon fiber fabric composites, Non-destructive inspection, Damage evaluation

1 は じ め に

繊維強化プラスチックは比強度、比剛性に優れる材料で、その特性を生かした適切な用途への適用が試みられてきた。近年、炭素繊維強化複合材料 (CFRP) はその材料的な進歩、とりわけ、じん性の大幅改善により航空機の一次構造材として適用されるに至り、従来からの課題であった複合材料の欠陥・損傷の非破壊的評価法の開発・確立は火急の課題となっている。

近年、赤外線サーモグラフィによる損傷、き裂の検出の試みが盛んに行われている。非接触、非破壊で、かつ2次元的情報が得られるため、きわめて魅力的ではあるが、これらの方法では、き裂などによる温度分布の不連続性を強調するため物体の加熱/冷却方法や材料の熱拡散特性を十分に考慮する必要がある。¹⁾ 一方、同様に赤外線温度計測をベースとする熱弾性応力解析 (TSA)²⁾ は材料の熱弾性効果にもとづく応力解析手法で、材料や構造物を低レベルの負荷で加振することにより測定対象物に熱弾性効果 (温度変化) を発現させ、外力に同期した温度変化のみを赤外線検出器を用いて非接触で精度よく測定し、応力情報を得る手法であり、被測定物の加熱冷却を必要としない。また、同手法は2次元的な応力情報の

みならず進展した損傷情報をも提供できる^{3)~5)} ため、新しい実験手法として期待されている。しかしながら、TSAによる複合材料の損傷解析では次の問題点が指摘されてきた。

- (1) 本質的に複合材料の TSA イメージはきわめてノイズであり、これらのノイズを実験的に取り除く方法がないため、損傷情報を明瞭に抽出できない。
- (2) ある程度進展した大きな損傷は検出できるが、初期損傷の検出が難しい。
- (3) 損傷領域など損傷の定量評価に難点がある。

著者らはこれまでに、これらを改善するため、TSA イメージのポスト処理を工夫することを提案してきた。^{6), 7)} 本報告では、一次構造用複合材への適用の可能性がもつとも高い CFRP を取り上げ、構造材料としてもよく用いられる織物強化複合材について、これまでの結果を踏まえ、TSA イメージから損傷イメージを抽出する新しい解析手法 (TDA, thermoelastic damage analysis) を導入し、それを形態、レベルの異なる損傷 (ここでは、高負荷・短期クリープおよび疲労による損傷) に適用した結果を示し、高解像化された損傷イメージ (TDA イメージ) の特徴を明らかにする。また、その2次元的内部損傷の定量化情報としての可能性を検討する。

† 原稿受理 平成 11 年 8 月 17 日 Received Aug. 17, 1999

* 正 会 員 大阪府立産業技術総合研究所 〒594-1157 和泉市あゆみ野, Tech. Res. Inst. of Osaka Pref., Ayumino, Izumi, 594-1157

** 正 会 員 同志社大学工学部機械工学科 〒610-0394 京田辺市多々羅都谷, Dept of Mech. Eng., Doshisha Univ., Kyo-tanabe, 610-0394

2 直交異方性材料の熱弾性応力解析 (TSA)

と損傷イメージの高解像化 (TDA)

2・1 直交異方性材料の熱弾性応力解析 (TSA)

均質等方性体においては固体を断熱的に変形させる応力振幅に比例した温度変化 (熱弾性効果) が発現する。²⁾ 一方, 直交異方性材料における熱弾性効果 dT^* は;

$$dT^* = -T(\alpha_L d\sigma_L + \alpha_T d\sigma_T) / \rho C_\sigma \quad (1)$$

で表される。^{3), 8)} ここで, T は測定環境温度 (絶対温度), α_L と α_T は繊維方向およびそれと直角な方向の線膨張係数, $d\sigma_L$ と $d\sigma_T$ は同じくそれぞれの方向に作用する応力振幅, ρ は物体の密度, C_σ は応力一定のもとにおける比熱である。直交異方性体の熱弾性効果はその対称軸方向の応力変化の線形和に比例するため, 応力の分離が容易でなく, 一般に定量的に扱うことは困難である。しかしながら, CFRP では $|\alpha_T| \gg |\alpha_L|$ の関係^{*1}があるため, 第一項は無視でき,

$$dT^* = -T \alpha_T d\sigma_T / \rho C_\sigma = -T K_T d\sigma_T \quad (2)$$

で近似され, 横方向繊維束の熱弾性効果を計測することができる。^{3), 9)} ここに, $K_T = \alpha_T / \rho C_\sigma$ は繊維方向と直角な方向の熱弾性係数である。したがって, CFRP では横繊維束に作用する応力を正確に評価できることになる^{3), 9)} (Fig. 1, 詳細 4 章)。

2・2 熱弾性イメージの高解像化と損傷解析 (TDA)

負荷後の熱弾性イメージ $[T^*(L)]$ はその負荷レベルと材料の破壊特性に応じて材料内部に発生する損傷を反映した情報を提供する。しかしながら, 不均質な材料, たとえば織物複合材料などについては, 損傷に起因した熱弾性イメージ $[T^*(L)]_F$ の上に複雑な材料の構造的不均一イメージが重ね合わせられる (Fig. 3(b))。その全体のイメージ $[T^*(L)]$ は複雑で, そこから損傷情報を抽出することはきわめて難しい。また, これを実験的に取り除く方法もない。したがって, $[T^*(L)]$ から直ちに損傷の進展挙動に関する十分な情報を得ることは期待できない。

一方, 織物複合材料に加えられる荷重は負荷方向の繊維束 (縦糸あるいは経糸束) によりほとんど負担されるため, 微小損傷段階にある試料の剛性低下はきわめて小さい。すなわち, 材料構造に起因したイメージは損傷の前後においてほとんど変化しないことが予想される。そこで, 材料中の損傷の熱弾性イメージを高解像化するためには, 試験前の TSA イメージと負荷後のイメージ間の変化だけを抽出する:

- (1) 損傷進展に伴う剛性低下に起因した変形を補正し,
- (2) 負荷前後の TSA イメージ間の变化, すなわち負荷による影響のみからなる情報を求める

ことが考えられる。ここでは, (1) は試料の変形を一樣変形と見なし, 線形な形態補正をし ($[T^*(L)]_0$), (2) は 2 つの TSA イメージを同一測定条件, 同一視野で測定して,

$$[\Delta T^*] = [T^*(0)] - [T^*(L)]_0 \doteq -[T^*(L)]_F \quad (3)$$

のポスト処理をする。ここで, $[T^*(0)]$ は材料の初期状態

における熱弾性イメージを, $[\Delta T^*]$ は負荷前後の TSA イメージ間の变化を示す。また, 右辺の負の符号は $[T^*(0)]$ や $[T^*(L)]_0$ とは応力反転した像が得られることを示す。したがって $[T^*(L)]_F$ の負の成分は応力増加を, 正の成分は応力緩和を示し, 正の成分は損傷の形態イメージのみを示す。そこで, 以下では本手法を熱弾性損傷解析 (TDA), また, 得られるイメージを TDA イメージと呼ぶ。その特徴については 4・2 節で詳しく述べる。

3 実験材料と方法

本実験には 14 枚積層の平織り炭素繊維織物 (東レ, T300-B) / エポキシ (Ep828) 複合材料と, 比較のためゴム変成エポキシ材を使用した。経 / 緯糸束の密度はともに 13 ストランド / 25mm で, 厚さ 2.7mm, 繊維体積含有率 65% である。試料は経糸方向と平行に切り出した短冊片で, 幅 25mm, 長さ 200mm, 中央に直径 5mm の穴を有し, 両端には Al タブを高じん性エポキシ系接着剤で接着した。

材料の機械的試験には二つの負荷モードを採用した。一つは繰返しステップ荷重¹⁰⁾で, そのピーク荷重 (P_i) を $0.3\sigma_B$ (σ_B : 有孔試験片における静的破断強さ) から開始し, 一定の割合 ($0.1\sigma_B$ ピッチ) で毎ステップ荷重ごとに増加させた。 P_i の保持時間を 10min 一定とし, いわゆる高負荷・短時間クリープを目的とした。いま一つは引張—引張疲労負荷で, 最大応力が約 $0.7\sigma_B$, 応力比 $R = 0.01$, 繰返し周波数 10Hz とした。同負荷条件のもとではそれぞれの材料について 10^6 回以上の寿命が確認された。ここでは, その損傷の初期過程に焦点をあて観察した。

熱弾性イメージはすべての試験の前と繰返しステップ荷重試験では各ステップ荷重を除荷するごとに, また, 疲労試験では適当なタイミングで計測を行い, 所定の負荷が終了した時点で超音波計測を行った。TSA には日本電子 (株) 製の JTG-8010^{*2} を使用した。その基本仕様を Table I に示す。画像信号を高精細化するため, 拡大レンズによる詳細観察を行った。その場合, 画素に対応す

Table I. Main specification of JTG-8010.

Temperature measurement range	-5~5 K
Temperature resolution	0.001 K
Measurable frequency	0.3~90 Hz
Horizontal resolution	Over 300 lines (1.7 mrad)
Number of display dot	Horizontal 512×Vertical 480
Data memory	512×480×32 bit
Measure wavelength	8~13 μm
Infrared detector	HgCdTe
Correction of distortion	Parallel-movement, Rotation, Magnification / Reduction

*2 本装置は応力分布像を測定するにあたり, サンプルに負荷される繰返し負荷の位相と同期をとりながら, 応力変化に伴う温度変化を積算計測するもので, 負荷の高レベル位相と低レベル位相でそれぞれ温度画像を測定し, 両者の差分信号を求めるものである。

*1 たとえば, 東レ T300/#2500 については $\alpha_L = -0.4 \times 10^{-6}/K$, $\alpha_T = 30 \times 10^{-6}/K$ であり, その比の絶対値は 75 である。

る試料面上の瞬時視野径は0.14mmである。また、試料表面は黒体塗料を薄く塗布し、熱弾性信号に重畳するノイズをできるだけ押さえるようにした。一連の試験ではTDAポストプロセッシングのため一定負荷条件（一様な軸方向応力 $\sigma_0 = 48.4\text{MPa}$, 10Hz）の下でイメージの測定を行った。熱弾性イメージ計測の詳細については文献^{5), 6)}を参照されたい。

損傷の超音波観察には日立建機(株)製 HSAM210 を使用し、15MHz および 25MHz, 20mm 焦点の探触子を用いパルス波モードでエコー強度の測定を行い、損傷の2次元情報を検討した。

4 ステップ荷重による損傷への適用

4・1 織物複合材料の TSA イメージ

ここでは、2次元パターンとしての定量性を実験的に確保することを検討する。

Fig. 1 は平織り強化複合材料に見られる熱弾性効果の一例を示す。試料表面のパターンは熱弾性効果が著しい部位とそうでない部位が交互に展開されている。そのモザイク模様の繰返し寸法は強化布の織り構造のピッチ(25/13mm)に一致し、高い引張応力を示す部分は横繊維束が試料表面に現れる部分に対応している。これらの特徴はマトリックスの変性、未変性によらない。図中、適当に選定された横繊維束1～4の部位を見ると、そのいずれにおいてもエリア内で熱弾性効果は一様でなく、織りの影響を反映しているのが認められる。4つのエリアの加振周波数に対する平均的熱弾性応答を Fig. 2 に示

Fig. 1. Thermoelastic effect ("black-and-white" (B/W) version) in plain-weave carbon fabric/epoxy laminate specimen. (Load applied vertically.)

Fig. 2. Thermoelastic effect response, from weft regions of 1～4 shown in Fig. 1, versus frequency of loading.

す。低い加振周波数域では熱弾性効果の発現が低く、また、各エリア間で±数%のばらつきが見られるが、断熱変形条件が満足される加振周波数 (f_0) 帯域に接近するとともに、熱弾性効果が十分に発現し、±3%以下のばらつきに低減する傾向が認められる。このばらつきに大きく影響しているのは2番のエリアで、 f_0 以上の加振周波数に対してもこのエリアだけが平均値からずれており、個々のエリアにおける応力伝達への寄与がわずかに異なることを示唆している。おそらく製織時に生じるわずかな張力の違いや成形時の取扱いやその過程で生じる繊維束形状の変動などに起因した織りの影響と考えられるが、詳細については明らかでない。それぞれのエリア内のばらつきは0.008～0.015Kと装置の温度分解能に比べて10倍程大きく、特に糸幅方向に温度変化が大きい (Fig. 1)。同様な繰返し観察されるため縦/横繊維束の互いの交差による影響が忠実に現れたと考えられる。しかしながら、TDAにおいては画像間の演算を伴う。それぞれの画像データの再現性をよくし、それらの変動の影響をできるだけ回避するため、適度なスムージング処理を生データに施すことが有効であろうと考えられる。

Fig. 3 (a) に負荷を受けていない健全な試料の円孔部における典型的な応力イメージ $[T^*(0)]$ の一例を示す。横繊維束部のみを選択的にイメージすると、^{※3}円孔による応力集中が認められるが、等方性材料の場合と異なり、その応力分布には試料中心軸に関する対称性は見られない。あきらかにサンプルの織り構造と円孔の相対位置関係を反映している。

TSAを複合材料に適用したこれまでの研究では、 $[T^*(L)]$ から直ちに損傷評価することが試みられ、表面き裂あるいはかなり進展した層間はく離などの損傷をある程度評価できることが示されている。^{3), 4), 11)} ステップ荷重 ($P_i = 0.88P_B$) を負荷された試料の応力イメージ $[T^*(L)]$ を調べた。Fig. 3 (b) のイメージはその結果を示し、全体的には Fig. 3 (a) とほとんど同じパターンを示す。詳細に見ると、Fig. 3 (a) にくらべ円孔左側周縁の応力集中部のピーク値が減少し、また、右側でも応力集中域が小さくなるという弱い変化が観察できる。しかしながら、その範囲が織り構造の単位形状よりも狭く、また、変化量も小さいため、直交積層材の層間はく離^{4), 11)}のように顕著な変化は認められない。

本実験では一連の応力イメージの測定を同一試料条件・加振条件の下で行ったため、ステップ荷重の負荷前と後に観察されるイメージの変化は損傷の発生・進展によると考えられる。CFRPでは繊維方向の強度は直角方向の強度に比べ極めて高く、通常、初期損傷としては荷重方向と強化繊維方向が異なる、いわゆる off-axis 層や off-axis 繊維束 (典型的には90°層あるいは横繊維束) 内に横き裂 (transverse cracks) が発生する。一方、著者の一人はガラス繊維織り布強化積層板の高負荷・短期クリ

※3 織物強化複合材の応力画像の解釈にあたっては、横繊維束部と縦繊維束部 (熱弾性効果の強い高応力部と弱い低応力部) に分けて観察する必要がある。

Fig. 3. Stress images (B/W version) of a plain-woven carbon-fabric/unmodified epoxy laminate specimen subjected to a series of stepwise tensile loading (a cyclic creep test) ; (a) before test, (b) after loaded up to $\sigma_i = 0.88\sigma_B$; σ_B is the fracture strength of the specimen with a center hole notch. (Load applied vertically.)

ープをAEでモニタし、クリープ現象に微視的な損傷現象が寄与していることを示している。^{10), 12)}したがって、ここでも、同様な損傷挙動に起因した応力再配分現象を伴うことが十分考えられる。Fig. 3(b)の結果は短時間クリープで発生する損傷は局所化されているとともに、後述べる疲労損傷に比べると、かなり高い負荷レベルまでその応力解放量が小さいことを示している。

4・2 TDA イメージ

Fig. 4は繰返しステップ荷重試験のTDAイメージを示す。同図(a)はFig. 3の結果から求められた。Fig. 4のいずれのイメージにおいてもFig. 3のような露な織り構造パターンは見られず、ハイライトで浮かび上がった明瞭なイメージ(損傷像)が観察される。Fig. 4(a)の横方向にのびる損傷は繊維束寸法よりも細く、損傷が繊維束内部においても一様ではなく、局所に集中している様子を示している。また、縦方向にのびる損傷は横繊維束の一部に発生した損傷が縦方向につながるように見えるもので、いずれの形態の損傷も横繊維束内に発生する損傷分布を示している。このように高い負荷が加えられたにも関わらず局所的な損傷しか検出されないのは平織り材では縦繊維束の荷重分担率が高い上、炭素繊維の繊維方向の剛性が非常に高いため横繊維束内部のき裂の進展が抑制されることによると考えられる。

注意深く観察すると、Fig. 4(c), (d)に見られるように低い荷重レベル $P_i/P_B = 0.6$ で損傷イメージが観察される。このイメージで見られる最大の温度変化 $[\Delta T^*]_{max}$ は高々 $-0.006K$ 、その大半損傷の領域の ΔT^* は $-0.004K$ 程度であり、熱弾性的に検出できる限界に近い軽微な損傷に相当すると言えよう。

また、これらのイメージは各部位の輝度分布を付帯している。式(2)から明らかのように輝度は応力解放量($\Delta\sigma$)と等価で、内部損傷発生による応力再配分の変化量を示す。したがって、TSAにくらべTDAイメージの特徴として、

- (1) 複合材料の構造に起因したノイズを含まない、き

Fig. 4. TDA images (B/W version) showing no weave construction pattern from woven fabric composite specimens : (a), (c) unmodified and (b), (d) rubber-modified materials experienced different loads ; (a), (b) $\sigma_i = 0.9\sigma_B$ (c), (d) $\sigma_i = 0.6\sigma_B$. (Load applied vertically.)

わめてS/Nの高い、鮮明で、精細な損傷像を提供する。

- (2) 複合材料の織構造レベルの損傷解析が可能である。
- (3) 損傷の程度を損傷発生部位における応力解放への寄与として評価できる。また、
- (4) 損傷エリアの定量評価ができる。

を上げることができる。

ここで、TDAで得られる損傷像は実損傷像に対して若干の広がりを伴う。⁴⁾その主要な要因は応力分布を介して間接的に損傷を観察していることによる。さらに、赤外線画素径(瞬時視野径)と損傷エッジの相対位置関係から生ずるエッジ効果にも起因する。その結果、応力分布の変化領域(損傷領域)の周辺にはそれらによるわずかな弱い影響域が付帯する。しかしながら、TDAイメージ(応力分布)上のこの広がりが損傷の程度(損傷レベル)の評価に与える影響はほとんどない。

5 内部損傷の観察と検討

ここでは、超音波顕微鏡による損傷観察、AEによる負荷試験中の損傷挙動のモニタリングを行い、TDAイメージの検討を行う。

5・1 超音波顕微鏡による観察とTDAイメージ

CFRPでは超音波により層間はく離のような内部損傷が検出できることが報告されている。¹⁵⁾Fig. 5は破断荷重の90%程度の荷重を負荷された後の試料を超音波顕微鏡(SAM, 探触子; 25MHz)で観察した典型的な例を示す。中央に位置する円孔の周りには反射強度の低い、織り構造に起因した反射エコーがほぼ全面にわたって観察され

*4 この様子は直交積層材中の90°層にトランスバースき裂が発生したときの90°層に作用する軸方向応力分布の結果¹³⁾から確認できる。また、元木¹⁴⁾は同様な解析を行い、それに加えて、初期損傷状態ではき裂発生により系全体のひずみエネルギーがわずかに減少するため、き裂周辺においてその弱い影響が見られることを示している。き裂発生に伴う周辺の応力分布はき裂の特異性を除けばひずみエネルギーの分布と同様に考えることができる。

Fig. 5. SAM images from fabric composite specimens experienced the load of about $0.9\sigma_B$: (a) unmodified and (b) rubber-modified materials. (Load applied vertically.)

る。一方、円孔周縁には円孔の加工時に導入されたと推察される小さなき裂様のエコーは見られるが、負荷により発生/進展したと推定される損傷からのエコーはほとんど見られない。超音波の反射が検出されるためには明らかな音響インピーダンスの異なる界面が存在し、かつ、超音波のビーム径に対してある程度の割合を占める比較的なめらかな面が存在することが必要である。この例の場合、少なくとも、超音波的には明瞭な損傷は存在しないと推定される。

5・2 AE モニタリングと TDA イメージ

繰返しクリープ試験における AE の発生位置を解析して損傷域を検討した。Fig. 6 は $\sigma_i = 0.9\sigma_B$ のステップ荷重が完了するまでに発生した AE の結果を示し、それぞれは Fig. 4(a), (b) の試料と同一のものである。ここで、円孔の中心は横軸の 50mm に位置する。発生事象数については未変性材の方が約 2 倍程度多いものの、いずれの材料についても円孔切欠き周縁に AE イベントが集中している様子が認められる。損傷寸法はイベント数の集中度に対するしきい値により異なるが、10～30events/mm とするとゴム変性材、未変性材でそれぞれ 6～10mm、13～15mm と推定される。これに対応する TDA イメージ (Fig. 4) では、損傷像は負荷方向にそれぞれ 7～10、12～14mm 長さに分布し AE の推定結果とよく一致している。一方、AE の集中度：事象密度あるいはエネルギー密度、の分布は 7 章で述べる損傷の severity の長手方向

Fig. 6. AE location distributions during a cyclic creep test (the maximum stress level of $0.9\sigma_B$). (Load applied horizontally.)

分布によく対応していた。

また、AE 信号の立ち上がりこう配¹⁶⁾より損傷メカニズムを解析した結果、いずれの材料についても繊維/樹脂界面のはく離あるいは局所層間のはく離と推定される事象が終始、支配的であった。¹⁷⁾一方、TDA (Fig. 4) では負荷方向に進展している損傷と未変性材で特徴的な水平方向 (負荷と直角方向) に細くのびる損傷像が明瞭に認められるが、この情報のみからでは損傷様式を特定することはできない。しかしながら、次の章で述べるような織物複合材料の破壊過程の知識を考慮すると、これらは横繊維束内部の、いわゆる横き裂 (繊維/樹脂界面のはく離と樹脂割れから形成される) あるいは縦/横繊維束界面の局所層間のはく離と推定される。

6 繰返し荷重による損傷の検出

6・1 TDA による初期疲労損傷のモニタリング

中・長寿命域の疲労損傷を含む試料の TSA は Fig. 3 (a), (b) に比べると明らかにモザイク模様が乱され、その乱れた領域は超音波による損傷イメージとよく一致し、TSA イメージ上で材料構造の規則性が乱される領域はおおむね損傷エリアとして扱うことができた。^{6), 7)}ここでは、疲労初期に発生する損傷の形態を解析し、疲労の進展との関係を調べる。

織物複合材料の疲労過程で発生・成長する損傷は繊維束単位程度の小さな損傷である。疲労試験で観察される TDA イメージを解析することにより、初期損傷の成長過程を詳細に調べた。その結果を Fig. 7 に示す。図中、いずれのイメージにおいても中央部に円孔が位置している。得られた TDA イメージ (Fig. 7(d)～(i)) では織り構造の

Fig. 7. Evolution of thermoelastic images (B/W version) from specimens subjected to different fatigue loadings; the top TSA and the middle TDA images from an unmodified specimen and the bottom TDA from a modified one. (Load applied vertically.)

影響は皆無に近く、損傷の発生部位がハイライト部として明瞭にクローズアップされている。ここでも、4・2節で述べたTDAの特徴と同様の特徴が認められる。また、ここに示す段階では、繰返し回数の増加とともに損傷が進展する様子は未変性材において顕著である。そこで、未変成材について繰返しクリープ試験と疲労試験で発生する損傷 (Fig. 4(a) と Fig. 7(f)) の程度を ΔT^*_{max} 比で比較すると、 $-0.025/-0.095 \approx 1/4$ であり、最大応力解放量としては疲労荷重による損傷の方が4倍程度大きい。疲労負荷の荷重レベルがクリープ荷重の80%であるにも関わらず、疲労損傷は20kc程度のごく初期の段階でクリープ損傷に比べすでにかなり進展した損傷状態にあると推定される。このことは複合材料の疲労損傷が損傷の進展と損傷による応力集中の緩和を繰り返しながら成長していくことを示唆している。

また、変性材と未変性材の損傷進展に大きく二つの違いが見られる。一つは変性材の損傷開始時期が未変性材にくらべ遅い。二つめは変性材では損傷が円孔の縁に沿うように荷重方向に成長しており、一方、未変性材では2kc程度のごく初期から荷重方向と直角な方向に損傷が進展していることである。これらの相違点と同様の傾向は中・長寿命疲労試料のSAMイメージの結果でも観察されたが^{6), 7)} ここではより一層明瞭に認められる。とりわけ後者の結果は疲労寿命と深く関係する重要な事象で、マトリックスのゴム変性化による疲労強度の改善¹⁸⁾を裏付ける挙動として理解される。と同時に、本手法が複合材料の初期損傷のモニタリングに有効であることを示す。

6・2 試料側面の損傷観察と損傷プロセス

平滑なサンプルが長寿命を示した時の試料側面における疲労過程をレプリカで観察した結果をもとに、期待される寿命の約90%までの損傷プロセスの特徴をFig. 8に模式図で示す。Fig. 8左列に示す未変性マトリックス材では早い時期に緯糸束に横き裂が発生する。き裂は緯糸束内を板厚方向にほぼ直線的に成長し、荷重の繰返し回数とともにその密度は増加する。横き裂が経糸束に直面する部位では局所的なはく離 (local delamination) が生じ、経糸/緯糸束界面にそって成長する。一方、ゴム変性マトリックス材 (Fig. 8右列) でも同様に初期には横き裂が生じるが、屈曲し、局所のはく離の進展は弱くその規模は小さく留まる。また、荷重の繰返しとともに横き裂のき裂密度は未変性材よりもむしろ高くなり、全体としては横き裂が支配的な損傷状態になる。切欠き部においては局部に応力集中が発生するため、平滑材の場合に比べ見かけの上ではかなり早い段階からここに述べた平滑材の損傷プロセスと同様な損傷形態を呈しながらが発生/進展すると考えられる。

Fig. 7のTDAイメージに見られる損傷進展とFig. 8の損傷過程を比べると、Fig. 7では両材について負荷の繰返しとともに縦方向に進展する損傷が観察されるが、横方向に損傷が発達するのは未変成材のみである。一方、Fig. 8の損傷プロセスでは横き裂密度はゴム変性材の方がむしろ高く、未変性材において顕著な損傷は局所層間

Fig. 8. Schematic of fatigue damage progression in fabric composite laminates.

はく離の進展である。この損傷の形態差はマトリックスの変性効果に起因するものであり、変性材料の長寿命化¹⁸⁾と密接に関係していよう。また、これらよりTDAイメージが損傷プロセス、とりわけ局所層間のはく離を忠実に敏感に反映していることがわかる。したがって、TDAイメージを適切な方法で定量評価することにより材料の損傷度あるいは健全度を示す指標が得られると考えられる。

7 損傷度の定量評価の可能性

損傷の severity の評価については、まず、損傷情報の定量評価：損傷像の形態と損傷発生に伴う応力解放量の定量評価を明らかにする必要がある。織物複合材料の横糸束に作用する応力は式 (2) で示されるように、理論的にはその定量性が確認されている。また、4章ではTDAイメージから、損傷形態に関する定量情報が得られること、さらに損傷各部位における応力開放量を評価できることを示した。

一方、積層板においては表面層以外の深層部の熱弾性効果による温度変動が材料表面の温度分布に影響することがDunn¹⁹⁾によって指摘されている。この影響は深層部に大きな発熱があり表面層で熱弾性効果が弱い場合にその影響が顕著になる。Dunnはこの現象を板厚方向への1次元熱伝導問題にモデル化してその解を導いている。しかしながら、ここで示した初期損傷の発生・進展はFig. 4やFig. 7に見られるように繊維束単位の極めて局所的な現象である。加えて、炭素繊維は顕著な熱伝導度の異方性を有し、繊維直角方向に比べ繊維方向は数倍大きな値を示す。これらを考慮すると、厚さ方向に熱伝導で表面に現れる熱流の影響は繊維束方向への拡散よりも弱くなると考えられる。また、表面層の温度変動に比べると深層部の発熱の影響は必ず位相ずれが生ずる。この位相ずれには加振周波数の影響が大きい¹⁹⁾。そのため、加振周波数や計測位相を適当に選択することにより表層を除く深層部の影響をほとんど回避することも可能と推定される。したがって、損傷の全域における応力解放量の総和Wを定量的に求めることができ、Wを損傷の severity の指標として評価できると考えられる。

織物複合材のTDAは試料表面の半分を精度よくモニ

タしているため、 W は損傷の発達が広範囲で、織り構造の単位に比べ十分大きくなるほどその精度が向上することは容易に推察できる。また、 W の評価についてはTDAイメージの検出限界およびその有意性を考慮した応力解放レベルの下限を決定する必要があるが、困難な問題ではない。

疲労過程における損傷についてはその寿命近傍で不安定な進展を開始することを仮定できる。そのときの総応力開放量を W^* とすると、 W/W^* により損傷レベル（あるいは損傷度）を定義できる。したがって、熱弾性損傷解析情報より材料の損傷を定量評価することが可能である。その評価精度の向上は熱弾性効果を精度よく測定することであり、影響因子をいかにコントロールするかに尽きる。加振周波数、表面黒体化塗装、瞬時視野径に依存したエッジ効果など測定上の留意事項や熱弾性信号の較正などいわゆる熱弾性解析共通の課題²⁾のほかに、本実験で取り上げた微小部の熱弾性効果が十分に発現する周波数域における計測が差分解法であるTDAにおいては一層重要になると考えられる。

8 お わ り に

複合材料の強化材構造に起因したノイズを含まない高いS/NのTSAイメージを得るため、ポスト・イメージ処理からなる高解像化手法（TDA）を導入し、炭素繊維織物強化複合材料の高負荷・短時間クリープの損傷および初期疲労損傷の解析に適用した。その結果、いずれの負荷形態についても織り構造レベルで評価可能な、極めて高品位な損傷情報が得られた。TDAイメージは(1) 損傷の大きさや形態を鮮明かつ精細に示すのみならず、(2) 横糸束の損傷に起因して発生する応力解放量を正確に提供するため、(3) 各部位における損傷のseverity $W(r)$ が推定可能である。また、(4) その総和 W を基準に材料の損傷レベルが定量評価可能であると考えられた。

また、TDAによる疲労損傷解析ではマトリックス樹脂の変性効果を損傷の開始時期や進展速度・形態の相違として把握でき、さらにレプリカ法を援用することによりそれらが損傷メカニズムの違いとして推定できた。したがって、複合材料損傷の非破壊・定量モニタリング手法として熱弾性解析の可能性が期待される。現在、著者らはTDA情報から損傷を定量評価するパラメータや疲労損傷度の評価などを検討し、その有効性を確認しつつある。²⁰⁾ これについては別報で報告したい。

ここではTDAを織物複合材料に適用した結果を示したが、いわゆる、TSAイメージの高解像化手法としては一般的に高剛性な不均質材におけるS/N改善に対しても

同様に有効であると考えられる。

本研究の一部は文部省の補助による同志社大学大学院RCASTの支援を受けた。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 阪上隆英, 小倉敬二, 非破壊検査, **45**, 788 (1996).
- 2) B. J. Rauch and R. E. Rowlands, "Handbook on Experimental Mechanics", ed. A. S. Kobayashi, 2nd Ed., Chap.14 (1993) VCH Publishers, New York.
- 3) 影山和郎, 植木 潔, 強化プラスチック, **34**, 169 (1988).
- 4) C. E. Bakis, R. A. Simonds, L. W. Vick and W. W. Stinchcomb, "Composite Materials: Testing and Design (9th vol.)", Ed. S. P. Garbo, ASTM STP **1059**, 349 (1990).
- 5) 上野谷敏之, 増喜彰久, 藤井 透, 日本非破壊検査協会第1回サーモグラフィによる非破壊評価技術シンポジウム論文集, p.29 (1995).
- 6) T. Uenoya and T. Fujii, "Deformation & Fracture of Composites -4", Proc. DFC-4, Inst. of Materials, 439 (1997).
- 7) T. Uenoya and T. Fujii, Key Engineering Materials, **137**, 139 (1998).
- 8) R. T. Potter and L. J. Greaves, Proc. SPIE, **817**, 134 (1987).
- 9) 杉本 直, 石川隆司, 日本複合材料学会誌, **23**, 7 (1997).
- 10) T. Uenoya, "Advances in Composite Materials", eds. T. Fukuda et al., 81 (1994) Elsevier Applied Science.
- 11) P. P. Camanho, D. Van Heimeirijck, A. T. Marques and P. T. de Castro, Proc. ECCM-7, vol. 2, Inst. of Materials, 195 (1996).
- 12) 上野谷敏之, 材料, **46**, 360 (1997).
- 13) I. M. Daniel, Experimental Mechanics, **39**, 1 (1999).
- 14) たとえば, 元木信弥, 安田 哲, 福田武人, 日本機械学会論文集, A-63, 2326 (1997).
- 15) たとえば, M. Beghini, L. Bertini and E. Vitale, Composite Structures, **17**, 257 (1991).
- 16) T. Uenoya, J. Acoustic Emission, **13**, s95 (1995).
- 17) T. Uenoya, presented in Int. Acoustic Emission Conf. (IAEC), AEWG, (1998); Proc. 1st Asian and Australasian Conf. on Compos. Mats. (ACCM-I), vol. 1, Japan Soc. Mat. Sci., 417-1 (1998).
- 18) M. Higashino, K. Takemura and T. Fujii, J. Composite Structures, **32**, 357 (1995).
- 19) S. A. Dunn, Trans. ASME Ser. E (J. Appl. Mech.), **59**, 552 (1992).
- 20) 上野谷敏之, 藤井 透, 日本非破壊検査協会第2回サーモグラフィによる非破壊評価技術シンポジウム講演論文集, p.122 (1998).