

熱弾性応力解析法

---新しい応力測定法の特徴と応用---

1. はじめに

構造物を設計するとき、部材中の力（内力）の状態がある条件を満足すると部材は破損すると考え、これを回避できるように材質、寸法を決定します。部材の負担の大きさは単位面積あたりに作用する力（応力）で考えます。最も簡単な破損の条件は垂直応力あるいはせん断応力がある限界値を越えたとき材料の破損が起こると考えています。ところが、部材中にある面を想定すると、その面に作用している内力は必ずしも面に垂直とは限りません。したがって、どの面に作用する垂直応力、せん断応力が最大になるかを知ることが設計上重要です。

垂直応力が最大となる面については、弾性力学で次の事実が証明されています。固体中の任意の点に作用する応力に対して「ある特定の面に作用する垂直応力だけが最大値あるいは最小値を示し、その面は互いに直交する」。立体に対しては3つ、また、平板に対しては2つからなる一組の面が唯一存在し、それを主応力面、それぞれに作用する応力を主応力と呼んでいます。また、主応力面にはせん断応力は存在しません。

ところで、実験的に材料や構造物の応力・ひずみ状態を解析する方法としてひずみゲージ法や光弾性法がよく知られています。両者はポイント情報あるいは面情報を与える点で対照的です。ひずみゲージ法は実構造物の上で測定したい点を選択して、それぞれの点における応力を計測する手法です。直接的には構造部材上の各点のひずみを測定し、応力に換算します。主応力や主軸方向についても簡単な計算で決定することができますが、2次元的な面分布を計測するにはきわめて大きな労力が必要です。

一方、応力の分布情報を提供できる手法に模型光弾性法（3次元凍結光弾性法を含む）や光弾性皮膜法などの光弾性法があります。光弾性法では複雑な形の製品について表面のみならず、内部の応力情報が一度に得られ、応力集中部位の位置と、その応力値を精度よく検出することができるのが特徴です。樹脂モデルが必要、樹脂厚や樹脂膜厚が測定感度に影響するなど、実構造物の解析に制約や課題が残りますが、機械やそのパーツ類の設計強度の確認やトラブル対策においては、その全体の応力状態を概観し、その上で問題となる箇所をさらに詳細に評価する上で有力な解析法です。

近年、熱弾性応力解析法（TSA）が実用化されつつあります。TSAは機械やその部品に発生する応力分布を短時間に直接かつ容易・迅速に測定できる新しい実験解析手法で、その全体および局所の詳細の情報をモデルの作成なしに、かつ、ひずみゲージ法と同程度の分解能で計測できることを特徴としています。これまで、おもに金属材料や一部のプラスチックを中心に用いられてきましたが、近年、複合材料に対しても適用され、材料や実構造物の損傷や破壊の検出など興味ある試みがなされています。

ここでは、実構造物の応力解析手法としてのTSA原理を紹介するとともにCFRPを中心に複合材料の損傷解析への適用例について紹介します。

2. 熱弾性応力解析法（TSA）の原理と測定方法

2.1 測定原理

断熱状態にある気体を圧縮すると発熱し、膨張させると吸熱する現象は熱弾性効果としてよく知られています。同様に、固体の場合も、断熱的に弾性変形が生じるとき、固体内部には熱弾性効果にもとづく微小な温度変化が生じます。金属材料など均質な材料の熱弾性効果

は

$$\Delta T = -T (\Delta \sigma_x + \Delta \sigma_y) \alpha / \rho C \sigma = -KT \Delta \sigma \quad (1)$$

で表され、温度変動 ΔT は主応力和の変動 $\Delta \sigma$ に比例します。ここで、 T は材料の絶対温度、 K は熱弾性係数で、 α を材料の線膨張係数、 ρ をその密度、 $C \sigma$ を応力一定のもとでの比熱として、 $K = \alpha / \rho C \sigma$ で与えられる材料定数です。したがって、作用応力の変動によって被測定物表面に生じる温度変化 ΔT の分布を計測することにより全表面にわたる応力データ ($\Delta \sigma = \Delta \sigma_x + \Delta \sigma_y$) を評価することができます。これを熱弾性応力解析法 (TSA) といいます。

2.2 測定方法

主な材料の熱弾性係数およびその応力感度、ひずみ感度を表 1 に示します。表 1 から推察されますようにこの温度変動はきわめて微小です。通常、測定しようとする温度場そのものを乱さないように非接触で測定されます。検出方法には温度分解能が高く、応答の速い赤外線サーモグラフィが用いられます。そのため、TSAを赤外線応力測定法ともいいます。

表1 工業材料の応力感度およびひずみ感度 ($\Delta \varepsilon$)

材料	K, Pa^{-1} $\times 10^{-12}$	$\Delta \sigma, \text{MPa}$ $\Delta T = 1 \text{ mK}$ $T = 293 \text{ K}$	$\Delta \varepsilon$ $\times 10^{-6}$
鋼	3.5	1	3.5
アルミニウム	8.8	0.4	4.0
チタニウム	3.5	1	6.5
エポキシ	62	0.055	11.0
マグネシウム合金	14	0.22	---
ガラス	3.85	0.91	---

表1によれば、応力の変動 $\Delta \sigma = 10 \text{ Mpa}$ に対応する ΔT は軟鋼の場合で約 0.01 K 、アルミニウムの場合で 0.025 K です。一方、現在のサーモグラフィに使用される検出器のNETD (ノイズ等価温度差) は 0.01 K です。したがって、赤外線センサで計測された信号を用いて直ちに応力測定できるほどの分解能や精度はありません。

そこで、信号のS/Nを高めるため、被測定物に繰り返し荷重変動を加え、信号を加算平均しています。通常、この繰り返し荷重を比較的高速の周期的荷重として与え、断熱変形条件を満足するようにしつつ、荷重信号 (応力変動) に同期した温度変動のみを出力信号として抽出しています。これによりいわゆる環境温度の反射や損傷面での摩擦などによる大きな放射エネルギーの影響を受けにくく、微少な温度信号を測定できることとなります。

材料から放射される赤外線エネルギーは、被測定物の放射率が大きく影響します。表 2 に見られますように、材料間の差がかなり大きい上、表面状態により 1 桁違います。その放射率を高めるため、また、被測定面上の均一な放射率を得るため、一般に、黒色の艶消し塗料を表面に薄く、均一にスプレーで塗布する黒体化処理がされます。これにより、放射率は $0.9 \sim 0.95$ 程度に調整されます。

表2 材料の放射率

物質	放射率
鉄（研磨面）	0.06
圧延鋼板	0.56
鋳鉄（研磨面）	0.07
鋳鉄（黒皮面）	0.7~0.8
アルミニウム（フォイル）	0.04~0.09
アルミニウム（粗面）	0.28
銅（研磨面）	0.03
硬質ゴム	0.95
木	0.91

2.3 測定装置

温度分布を計測する方式には、1つの検出器で温度場を走査する方式と、多くの検出器が2次元的に配置されたアレイ検出器方式があります。後者は近年、開発がめざましい方式です。センサ間の感度補正を必要としますが、高速でデータを取り込むことができ、計測の高速化が計られるとともに、用途拡大が期待されています。前者の装置には、現在、2つのタイプの装置が市販されています。1つは各点の検出温度信号を相関計（ロックインアンプ）に入力し、参照信号である荷重信号と同一周波数の温度変化のみを選択的に増幅する方式、いま1つは繰り返し負荷の位相と同期をとりながら、定められた特定の位相で温度画像を積算計測するもので、負荷の高レベルと低レベル位相でそれぞれ測定される温度画像の差分信号を求める方式です。

装置により、装備されるセンサ、画像構成法、相関信号処理法などに違いや特徴はみられるものの、いずれの方式においても、温度レスポンスとしては0.001 Kに対応しています。したがって、表1を参照しますと、現在開発されている測定器では、アルミニウムの応力測定では0.4 MPa、鋼については1 Mpaの分解能で測定できます。また、対象材料としてはゴムを除くほとんどの固体を測定することができます。

3. 測定例

3.1 応力集中部の検出

Fig. 1はオートバイフロントフォークの応力状態を示す例です。中央の固定具にはほとんど応力が発生していないのに比べ、そのすぐ右側では320 MPa以上の応力集中が発生している様子を一望して理解することができます。

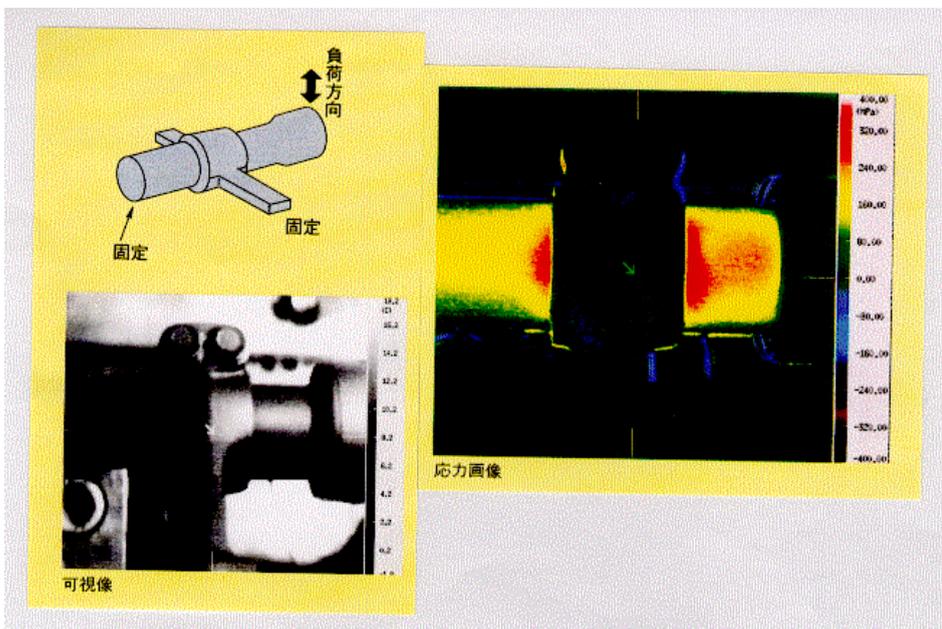


Fig. 1 オートバイフロントフォークの曲げ荷重による応力分布

ここでは、応力集中が発生している箇所と応力のない部位が隣接しているため、応力画像の上では、それらの間に応力が急変する帯状の部分が見られます。これは赤外線視野と被測定物との幾何学的な関係により発生するエッジ効果です。その結果、応力集中の度合いを小さく評価してしまいます。その誤差は赤外線の瞬時スポット径が大きくなるに従って、また、集中度が大きくなるに従って大きくなります。しかしながら、非破壊的に応力集中係数を評価できることを考えますと、その誤差を適切に考慮すれば、TSAによる推定は実用上有効になります。

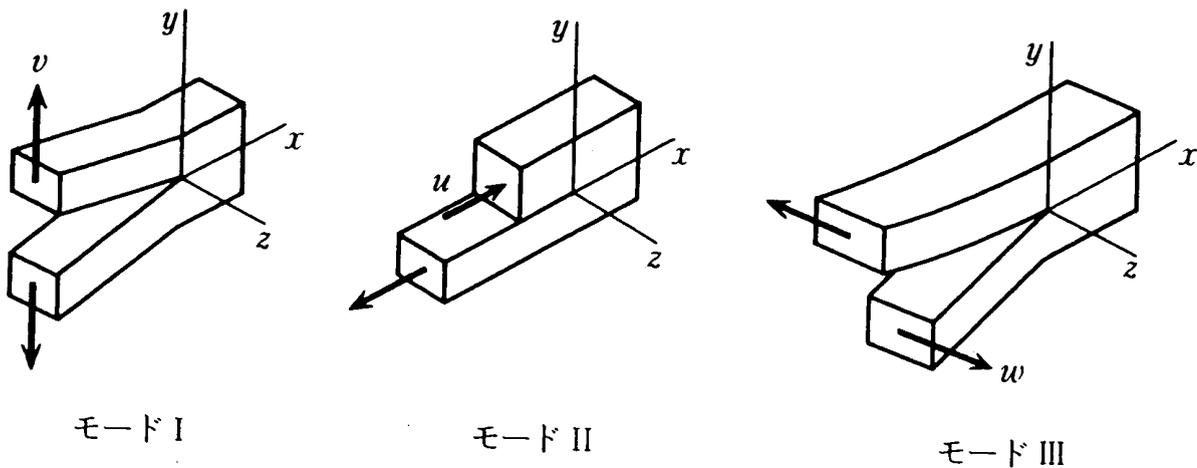


Fig. 2 基本的な3つの変形様式

3.2 応力拡大係数の評価

き裂が材料中に存在するような場合、主応力や最大せん断応力などでは強度評価ができません。き裂を含む応力場の強さを示すパラメータである応力拡大係数による評価が必要になります。

き裂先端近傍の応力場は基本的な三つの型に分類できます。それぞれはFig. 2に示す3つの変形モードに対応しています。ここでは、代表的なモード I, およびモード II との混合モードへの適用を考えてみましょう。最初に、き裂面が互いに離れるような y 方向に変形するモード I については、r をき裂先端からの距離として応力拡大係数の増分形は、

$$\Delta K_I = (\Delta \sigma_x + \Delta \sigma_y) \sqrt{\pi r} / \sqrt{2} \quad (2)$$

で表現できます。この右辺は主応力変動の和ですから、式 (1) で明らかなように ΔT を測定することにより容易に ΔK_I を決定できます。

次に、モード I とき裂面が x 軸方向にすべるモードIIからなる混合モードでは、

$$\Delta \sigma_x + \Delta \sigma_y = \{ \Delta K_I \cos(\theta/2) - \Delta K_{II} \sin(\theta/2) \} \sqrt{2} / \sqrt{\pi r} \quad (3)$$

で表すことができます。ここで、 ΔK_{I+II} , θ を式(4)のように定義しますと、式(3)は式(5)に書き換えることができます。

$$\Delta K_\theta = \Delta K_I \cos(\theta/2) - \Delta K_{II} \sin(\theta/2) \quad (4)$$

$$\Delta K_\theta = (\Delta \sigma_x + \Delta \sigma_y) \sqrt{\pi r} / \sqrt{2} \quad (5)$$

したがって、2つの異なる方向 q から実験的に2つの ΔK_θ を求め、これらを式(4)に代入し、連立方程式を解くことにより、 ΔK_I , ΔK_{II} を分離して求めることができます。評価結果は赤外線計測の空間分解能とも関係しますが、数値解析結果に比べ 数~10%程度の誤差で得られます。

4. 繊維強化プラスチックへの適用 $\Delta \sigma \rho \alpha \theta \varepsilon$

繊維強化プラスチックのような材料は繊維方向とその直角方向では物理的な特性が極端に異なります。このような材料のもっとも基本である一方向強化材は直交異方性材料として扱うことができます。その熱弾性効果 dT は繊維方向およびそれと直角方向をそれぞれL, Tで示しますと、

$$dT = -T(K_L d\sigma_L + K_T d\sigma_T) \quad (6)$$

ここで、 K_L と K_T は熱弾性係数、 $d\sigma$ は応力振幅を示します。一方、構造用材料に最適な炭素繊維強化複合材料 (CFRP) では $K_L \ll K_T$ の関係があるため、第一項は無視でき、

$$dT = -T K_T d\sigma_T \quad (7)$$

で近似できます。したがって、CFRPの損傷において重要な繊維束と直角な横方向の応力を計測することができます。

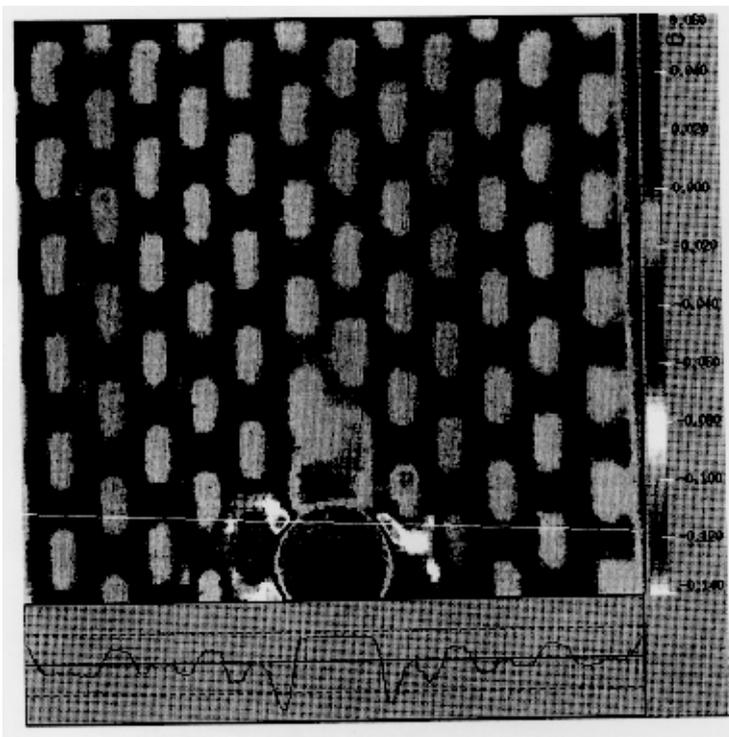


Fig. 3 円孔を有する炭素繊維複合材料の応力パターン

4.1 応力画像の特徴

Fig. 3は円孔切り欠きのある平織物繊維強化複合材料に見られる熱弾性効果の一例です。円孔から離れたところでは織物の構造を反映し、規則的な格子模様に応力分布が見られますが、円孔の近傍ではその模様の上に円孔による明瞭な応力集中が重畳しているのが見られます。図の下部の曲線は白線上の応力分布(任意スケール)を示し、ここでは、下向きが引張り応力です。この場合にも、エッジ効果により、円孔の縁で応力の減少が認められます。これはTSAが理想的な点における応力の計測ではなく、有限な面積部分の平均応力を測定していること、および縁では断熱条件が満たされないことなどによります。

4.2 損傷解析への応用

製品のトラブルを調査し、対策をとるにあたり、その初期損傷がどの応力レベルで発生し、どのように発達するかを知ること、また、それぞれの損傷段階において部材が維持している荷重支持能力を検討することが課題です。熱弾性法による損傷解析(TDA)では損傷の発生部位やその形状に関する情報を正確に把握するため、次の式(8)に示す外力の負荷前後に計測されるイメージ([T(0)], [T(L)])間の変化情報を求めることが有用です。損傷に関するイメージ(-[T]_F : TDAイメージ)は

$$-[T]_F = [DT] = [T(0)] - [T(L)] \quad (8)$$

で得られ、その特徴としては、(1) 複合材料などに見られる材料的な不均質に起因した熱弾性イメージが除去される。(2) 損傷発生やその進展のみに対応した鮮明な損傷分布情報を提供する。(3) 応力緩和に関する情報を示し、その度合いは損傷レベルを示す。また、(4) 増分型の情報であることよりかなりの大変形にも適用できるなどがあります。

Fig. 4はFig. 3で取り上げたものと同種の複合材料の円孔周縁部に発生した損傷が繰り返し負荷とともに進展する様子を示しています。ハイライトで観察される損傷は横糸束を優先的に成長している様子を示しています。しかしながら、Fig. 3で見られる織り構造に起因した応力パターンは完全に消失しており、損傷分布を正確に評価できます。

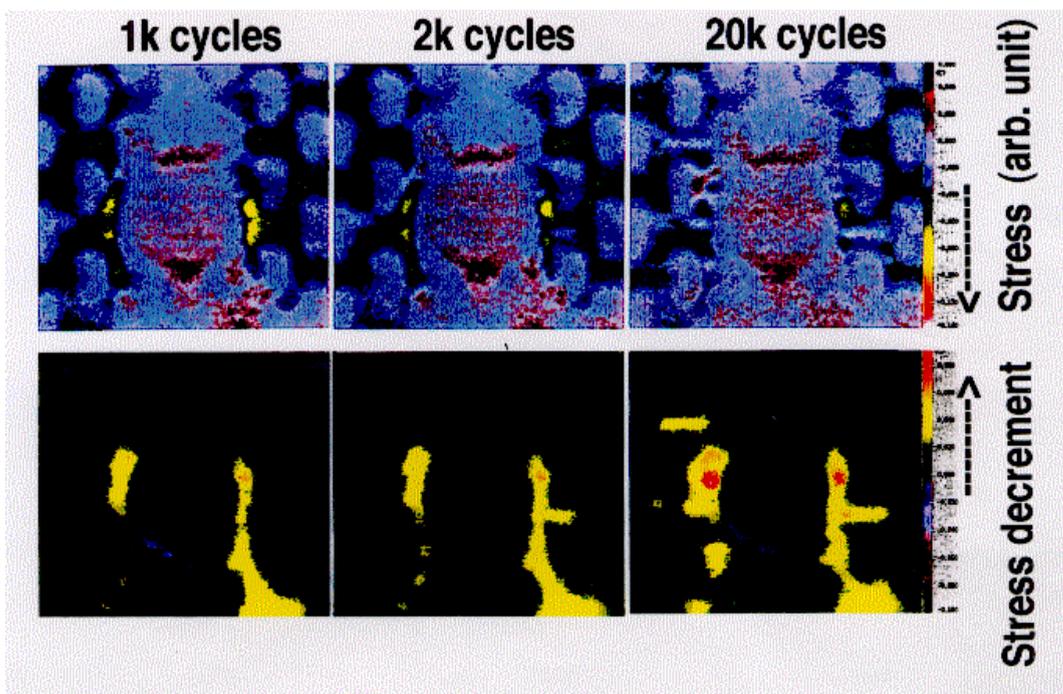


Fig. 4 引張繰り返し荷重を受ける円孔付きCFRP板の損傷進展

5. おわりに

近年、企業においてはPL法との関係で製品の安全性の確保は従来にも増して重要な課題となっています。熱弾性解析法は製品そのものを対象として被測定物の全面にわたる応力分布が評価できるため、そのデータは直示的であり、説得力があります。また、製品の設計・開発、最適形状の決定の補助ツールとして、また、しばしば問題になる製品の危険箇所の予測や安全性の確認のため、きわめて有用です。現在のところ、熱弾性解析法では応力の分離がまだ完全になされていませんが、その手法についてはすでに提案されております。

(評価技術部・材料評価グループ・上野谷敏之)