

熱弾性解析による構造物の応力・損傷分布測定 No.98047

キーワード：応力測定、損傷分布、熱弾性解析、サーモグラフィ

はじめに

実験的に応力を解析する手法としてストレインゲージ法がよく知られている。本手法は選択された点を計測するもので、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ある。しかしながら、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ことがしばしば必要になる。2次元応力解析法としてはよく知られた光弾性法があるが、樹脂によるモデルの作製、樹脂厚や樹脂膜厚による感度への影響など、実体の解析に制約や課題が残る。

ここで取り上げる熱弾性解析法は実製品に発生する応力分布の全体の様子およびその局所の詳細のパターンを直接かつ容易・迅速に測定できる新しい実験解析手法である。さらに、その適用を工夫することにより、材料や実構造物の損傷や破壊の様子を調べることができる。

均質材料の熱弾性効果と応力解析法

固体が断熱的に弾性変形するとき、固体内部には熱弾性効果により微小な温度変化 dT が発生する。熱弾性応力解析 (TSA) は繰り返し負荷の下でこの温度変化を検出・積算し、熱力学の原理により応力に対応付けて評価するものである。たとえば、測定環境温度 T 下にある均質・等方性材料の表面 (平面応力状態) における温度変化量 dT は K を熱弾性係数として

$$dT = -KT (ds_1 + ds_2) = -KTdJ \quad (1)$$

で示され、物体に作用する主応力和* ($J = s_1 + s_2$) の変化分 dJ に比例する。TSA はこの dT を物体の全表面にわたり走査・計測することにより応力の変化量 (dJ) の2次元分布を提供することができる。近年、計測装置の開発とともに金属材料を中心に応力解析の一手法と

して適用されてきた。通常、赤外線デバイスをを用いて温度計測することから赤外線応力解析法とも呼ばれている。(*主応力和; 任意の点における最大、最小の応力の和)

現在開発されている測定器では、最接近時には0.5mm程度のスポットについて $-5 \sim 5$ の温度変化を0.001の応答感度で、応力的には材料をアルミニウムとした場合、 $-2000 \sim 2000$ N/mm²、 0.4 N/mm²で測定できる。対象材料としては理想的なゴムを除くほとんどの固体に適用可能である。

Fig.1はオートバイのフロントフォークの応力状態の例を示す。段付き部に発生した応力集中の状況を一見して理解することができる。

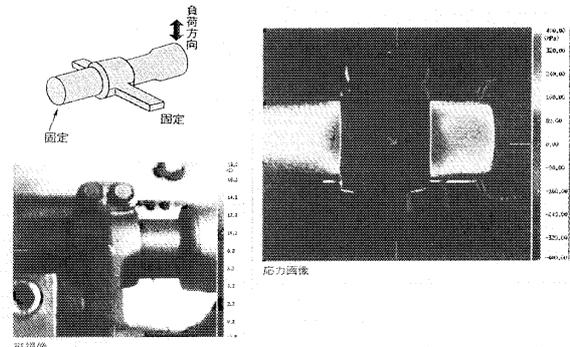


Fig.1 オートバイフロントフォークの曲げ荷重による応力分布 (日本電子(株)提供)

不均質・直交異方性材料への適用

一方、直交異方性材料における熱弾性効果 dT は材料の対称軸方向の応力の変化の線形和に比例する;

$$dT = -T(K_L ds_L + K_T ds_T) \quad (2)$$

ここで、 K_L と K_T は繊維方向およびそれと直角な方向の熱弾性係数、 ds_L と ds_T は同じくそれぞれの方向に作用する応力振幅である。しかしながら、構造用材料に最適な炭素繊維強化複合材料(CFRP)では K_L K_T の関係があるため、第一項を無視すると、

$$dT = -TK_T ds_T \quad (3)$$

で近似でき、CFRP において重要な横方向繊維束の応力を計測することができる。

Fig.2 は平織物強化複合材料の熱弾性効果を調べた結果の一例で、円孔切り欠き付きの場合を示している。織物の構造を反映して格子模様を呈した応力分布が全面を覆い、その上に円孔周縁の応力集中が重畳している。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を示している。この分布で明らかのように、応力は円孔縁で減少するのが認められる。これは TSA が理想的な点における応力の計測ではなく、有限な面積を有する被測定部の平均応力(温度)を測定していることによる。

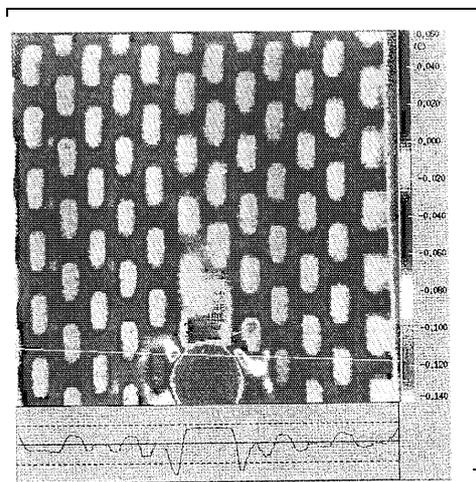


Fig.2 円孔を有する炭素繊維複合材料の応力パターン

損傷解析への応用

製品の損傷を解析し、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、また、それぞれの損傷段階において部材がどれだけの荷重支持能を維持しているかを検討することが重要である。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、外力の作用前後に計測される応力イメージ($[T(O)]$ 、 $[T(L)]$)の変化($[DT]$:TDAイメージ)で、

$$[DT] = [T(O)] - [T(L)] \quad (4)$$

作成者 評価技術部 材料評価グループ 上野谷敏之 Phone:0725-51-2704

発行日 1999年1月19日

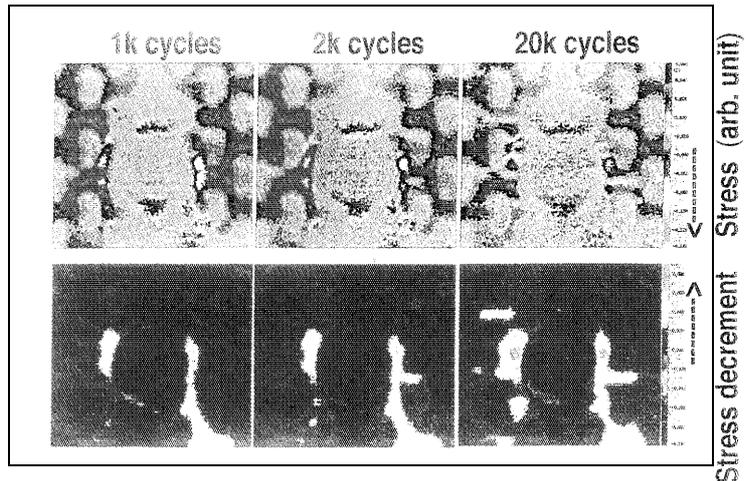


Fig. 3 引張繰り返し荷重を受ける円孔付きCFRP板の損傷進展

で得られる。これは、(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に無関係である。(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ので、かなりの大変形にも適用できると考えられる。

Fig.3はFig.2と同種の複合材料の円孔周縁部に発生した損傷を示す。ここで上段は損傷を含むTSAイメージを、また下段はそれぞれに対応するTDAイメージを示す。TDAイメージのハイライト部は横糸束部に発生しており、損傷成長が織り構造に起因した応力は完全に消失している。

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りつつある。熱弾性解析法によれば被測定物全体の応力分布が一目で分かるため、製品レベルにおける応力パターンの測定は製品の設計・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ある。ここに紹介した熱弾性解析法では応力の分離がまだ完全になされていないが、その手法についてはすでに提案されている。