

最近の技術から

フォトサーマル振動を利用した非破壊検査

羽根 一博・服部 秀三

名古屋大学工学部電子機械工学科 〒464-01 名古屋市千種区不老町

1. ま え が き

光音響 (photoacoustic), 光熱 (photothermal) 効果は, 種々の材料の分光的研究, 非発光過程の測定において強力な手段となっている. また光吸収に伴って発生する音波や熱波の材料中の伝播を利用することで, 試料内部の欠陥を検出できることから, 非破壊検査法として注目されている¹⁾.

試料が板状である場合, 熱弾性効果により試料の曲げ振動が発生することが見いだされた. そしてその特性と光音響信号への影響が理論的, 実験的に研究された²⁾. 光熱効果により生じる熱弾性曲げによる振動は, 試料全体の振動なので試料の支持, 固定法など機械的な構造により変化する. そこで逆にこの効果を利用することで, 接着, 固定状態など試料の機械的状态の非接触検査が行なえることが明らかになってきた. ここではその振動をフォトサーマル振動と呼ぶことにして, その発生と応用例について紹介する.

2. 熱弾性曲げ効果

固体試料の表面に周波数 f で強度変調したレーザー光を照射する. 吸収された光は熱に変わり熱波として伝播する. 熱膨張は一般には微小であるが, 熱波による不均一な温度分布のため, 試料が板状, 梁状の場合, 等質の材料であっても熱弾性曲げ効果により試料全体の曲げ振動が生じる (図 1). 直感的には, 板の大きさがその厚さよりも十分大きい場合にこの効果は顕著になる. このとき熱応力で生じる曲げモーメントが, 発生するフォトサーマル振動の駆動力と考えることができる.

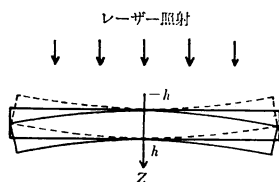


図 1 熱弾性曲げ効果による振動

板の表面が一様にレーザー光で照射されている場合, 曲げモーメント (文献 3) の温度モーメント M_t は

$$M_t = \frac{3}{2h^3} \int_{-h}^h T(x) x dx \quad (1)$$

で与えられる. $T(x)$ は板厚方向 (x) に対する温度分布, $2h$ は板厚である. 振動数が低く試料の慣性が無視できる準静的な場合, たわみは近似的に M_t に比例する. 空気中にある板状試料において, 表面での光吸収を仮定した場合, M_t の大きさは特性周波数 $f_c (= \kappa / (4h^2 \rho C))$, κ : 熱伝導率, ρ : 密度, C : 熱容量) 以下で飽和し, f_c 以上で f^{-1} で減少する^{2,4)}.

f_c の値は板の厚さ, 熱的性質の違いにより変化するので, 周波数変化を測定することで板厚や熱拡散率 $\kappa / \rho C$ を知ることもできる²⁾. レーザー光を集光した場合, 照射部分に発生する M_t の違いは試料全体の振動に反映する. 照射位置を走査し, 特定の位置で振動を検出することにより, M_t の違いによる内部構造の画像化も可能である^{4,5)}. 発生する振動は M_t に比例するほか試料形状, 固定状態に依存する. たとえば片持ち梁と両端固定梁では同じ M_t が発生していても振動の大きさは異なる. また周波数が高くなり機械共振と一致するとさらに大きな振動が発生する. 共振周波数も試料形状, 固定状態, 外部から加わる力などに依存する. そこでそれらを利用して接着, 固定状態などの機械強度の検査が行なえる.

3. 応 用

3.1 ラミネート構造のはがれ検査

この効果の応用としてラミネート構造のはがれの検査法が Cielo らにより最初に提案された^{6,7)}. 原理を図 2 に示す. 試料のはがれのある部分では, はがれた部分が周囲固定の板状試料と等価と考えられる. 接着の完全な部分にはフォトサーマル振動は生じないが, はがれた部分に振動 ($nm \sim \mu m$) が生じる. このときの振動による変位を干渉計により検出している.

3.2 はんだ付け検査

図 3 は IC パッケージとプリント回路板のはんだ付け

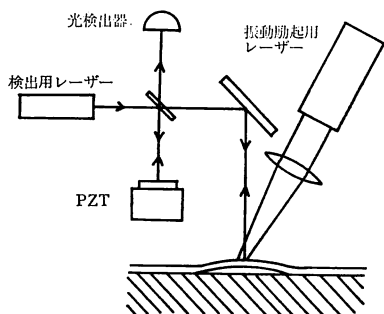


図2 層状材料のはがれの検査

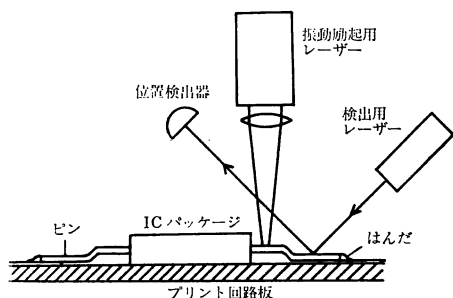


図3 はんだ付け強度の検査

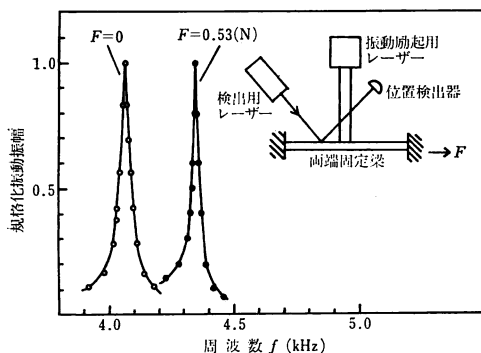


図4 梁に加わる外力の検査

の検査法の提案図である⁹⁾。パッケージのピンの根元部分に強度変調したレーザー光を照射する。ピンに発生するフォトサーマル振動をピンの先に照射した別のレーザーの反射ビームの偏向を利用して測定する。この場合ICのピンは一種の梁と考えることができる。はんだ付けが完全な場合は両端固定の梁と見なせ、ピンの端が接続されていない場合は片持ち梁の構造となる。したがってピンに生じる振動振幅は固定されたピンに比較して増加する。基礎的な実験で約10倍の振動の違いが得られている。目視では難しい接着強度検査において触診に変わる自動化技術として利用できる可能性がある。

3.3 梁に加わる力の検出

フォトサーマル振動は試料に加わる外力によって変化する。そこで逆に振動の変化から外力(F)の検出が行なえる。両端固定の小さな梁に外部から梁の長手方向に加わる力の検出が行なわれた⁹⁾。図4に光学系の概略図と外力がある場合($F=0.53\text{ N}$)とない場合($F=0$)の共振曲線の測定結果を示す。レーザー照射により梁に共振を発生させる。その振動数を別のレーザーで検出する。梁に外部から力が加わると共振周波数の値が変化する。変化量より梁に加わっている外力を検出できる。測定は完全に非接触であるので、歪ゲージが取り付けられない小さな機械構造や高温などの特殊な環境での力の検出に応用できると思われる。

4. おわりに

提案された方法の特徴は、接着や固定の機械的強度を非接触に検査できることである。実用的に利用されるためにはS/N、検査時間、定量的評価などについての今後の研究が必要である。これらの測定原理が機械構造の新しい評価法として応用されることを期待している。

文 献

- 1) A. C. Tam: "Application of photoacoustic sensing techniques," *Rev. Mod. Phys.*, **58** (1986) 381-431.
- 2) G. Rousset, F. Lepoutre and L. Bertrand: "Influence of thermoelastic bending on photoacoustic experiments related to measurements of thermal diffusivity of metals," *J. Appl. Phys.*, **54** (1983) 2383-2391.
- 3) H. Parkus: *Thermoelasticity* (Springer-Verlag, New York, 1976) chap. 4.
- 4) K. Hane, T. Kanie and S. Hattori: "Photothermoelastic probing for a clamped plate sample," *Appl. Opt.*, **27** (1988) 386-392.
- 5) K. Hane, T. Kanie and S. Hattori: "Photothermoelastic imaging at a flexural resonance frequency of a clamped plate sample," *J. Appl. Phys.*, **64** (1988) 2229-2232.
- 6) G. Rousset, L. Bertrand and P. Cielo: "A pulsed thermoelastic analysis of photothermal surface displacements in layered materials," *J. Appl. Phys.*, **57** (1985) 4396-4405.
- 7) P. Cielo, X. Maldague, G. Rousset and C. K. Jen: "Thermoelastic inspection of layered materials: Dynamic analysis," *Mater. Eval.*, **43** (1985) 1111-1116.
- 8) K. Hane and S. Hattori: "Photothermoelastic inspection of soldered connections," *Appl. Opt.*, **27** (1988) 3965-3967.
- 9) K. Hane and S. Hattori: "Noncontact tension sensing by photothermoelastic effect," *Opt. Lett.*, **13** (1988) 550-552.

(1988年8月31日受理)