

解説

フォトサーマル振動の非破壊光計測への応用

羽根 一博

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

(1989年11月2日受理)

Applications of the Photothermal Vibration
to Nondestructive Optical Sensing

Kazuhiro HANE

Department of Electronic-Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-01

1. はじめに

物質に光を照射すると蛍光を放出したり、光化学反応を起こしたりするが、それらに使われない吸収されたエネルギーはおもに熱となる。熱による温度の上昇により、体積の膨張、圧力の変化、屈折率の変化や熱の再輻射などが生じる。光照射により生じるこのような効果は、光熱 (photothermal) 効果と呼ばれる。また、光照射により音波の発生する現象は光音響 (photoacoustic) 効果と呼ばれる。一般には音波の発生は光熱効果により二次的に発生する場合が多い。これらの効果を利用する光音響法、光熱法は高感度な分光法と非破壊検査法として注目され、広い分野に利用されている。それらの全体に関してはこれまでの解説や文献を利用していただきたい¹⁻⁵⁾。ここでは光熱効果により生じる機械振動とその応用について述べる。

固体中の音波は弾性波であるので光音響効果では、ミクロな機械運動が生じている。しかしながら、試料の形状や固定法により、そのような微視的な機械運動でなく比較的大きな試料全体の機械振動 (振幅ナノメートル～マイクロメートル) が生じる場合がある。このような光照射により生じる機械振動は、非破壊的に発生するものとして、熱弾性曲げ効果による場合が多い¹⁾。

周囲を固定した円形平板試料の熱拡散率の測定において熱弾性曲げによる振動 (drum 効果) が発生することが報告された⁶⁾。そして音響信号の発生に対する熱弾性曲げ振動の影響が理論的、実験的に研究された⁷⁾。この

振動は、膜状、板状や梁状の試料において、試料面の一部が固定されている場合に顕著に発生する。振動の大きさは試料の固定方法、試料の形状に依存する。そこでこの現象を逆に利用して接着や固定状態などの非接触検査が行えることが明らかになってきた。これまでにラミネート構造の接着^{8,9)}、IC ピンのハンダ接続¹⁰⁾、板状試料の内部欠陥^{11,12)}などの検査法が提案された。また、照射レーザーの変調周波数が試料の構造による機械的な共振条件と一致する場合、比較的大きな振動が発生する。共振周波数も試料の構造、固定法、外部から加わる応力などに依存する。そこで共振周波数の変化よりそれらの検査が行える^{9,13,14)}。

一方、この効果により非接触に振動を発生させることができるので、振動の新しい駆動源として利用できることが明らかになってきた。最近、半導体リソグラフィ技術を用いて微小な機械構造を作成しセンサーに利用したり、微小な駆動部分を作成するマイクロメカニズムが注目されている^{15,16)}。近年、微細加工により作成した微小振動子の振動励起に光熱効果を利用した新しい光学式センサーがいくつか報告され¹⁷⁻²⁰⁾、この効果のセンサーへの応用も期待されている。ここでは上に述べたような光熱効果により発生する機械振動をフォトサーマル振動と呼ぶこととして、その発生と応用例について紹介する。

2. レーザー照射による曲げモーメント

強度変調された励起ビームを図1に示すような板状試料の表面に一樣に照射すると、光吸収により固体表面に

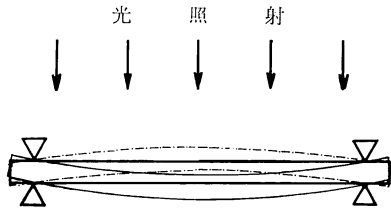


図1 熱弾性曲げ効果による振動

熱が発生する。周期的なレーザー照射に対して固体表面の温度変化は熱波 (thermal-wave) となって固体内部に伝播していく。温度分布が試料の厚さ方向に不均一になるので曲げモーメントが発生する。試料が薄い場合、熱膨張による厚さ方向や長さ方向の伸びに比較し、曲げによる変形が顕著になる。このとき、曲げモーメントがフォトサーマル振動の駆動力と考えることができる。Thermal-wave による曲げモーメントの発生を簡単なモデルにおいて見ておくことにする。ここでは曲げモーメントによる振動は周波数が低く試料の慣性が無視できる準静的な場合を取り扱う。また定性的な結果を得るために表面だけでの光の吸収を仮定した一次元モデル^{11,21)}を用いる。

周波数 f で強度変調された照射光の固体表面での吸収による熱源を $Q e^{2\pi i f t}$ とおくと、一次元の熱方程式の一般解は

$$T(z) = A e^{-qz} + B e^{qz} \quad (1)$$

で与えられ、 z 方向と $-z$ 方向に伝播する thermal-wave の合成により与えられる²²⁾。

ここで

$$q = (1+i) \frac{1}{\mu} = (1+i) \sqrt{\pi f \rho C / \kappa} \quad (2)$$

μ は熱拡散距離、 κ , ρ , C はそれぞれ試料の熱伝導率、密度、熱容量を表す。境界条件を満足するように定数 A , B を決めると板状試料内部の温度分布は

$$T_1(z) = \frac{(Z_0 + Z_1) e^{q_1(h-z)} - (Z_0 - Z_1) e^{-q_1(h-z)}}{(Z_0 + Z_1)^2 e^{2q_1 h} - (Z_0 - Z_1)^2 e^{-2q_1 h}} \quad (3)$$

ここで Z_1 , Z_0 は試料の内部および外部 (空気) のサーマルウェーブインピーダンスで $Z_1 = \kappa_1 q_1$ である。添字 0, 1 はそれぞれ試料の内外部を表す。

Parkus の定義によるモーメント (温度モーメント M_t)²³⁾ 用いると曲げモーメントは

$$M_t = \frac{3}{2h^3} \int_{-h}^h T_1(z) z dz \quad (4)$$

により与えられる。試料の厚さは $2h$ で表されている。

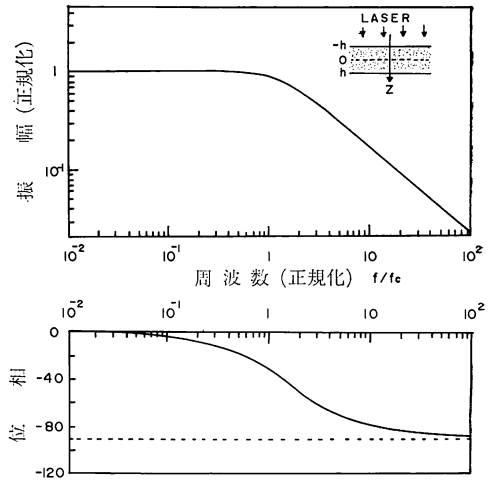


図2 曲げモーメントの周波数依存性

ここで発生する曲げによる変位は近似的には曲げモーメントに比例すると考えられる。(3)式を(4)式に代入し積分を行って

$$M_t = \frac{[-(Z_0 + Z_1) \{ (1 + q_1 h) - (1 - q_1 h) e^{2q_1 h} \} + (Z_0 - Z_1) \{ (1 - q_1 h) - (1 + q_1 h) e^{-2q_1 h} \}]}{q_1^2 h^3 \{ (Z_0 + Z_1)^2 e^{2q_1 h} - (Z_0 - Z_1)^2 e^{-2q_1 h} \}} Q \quad (5)$$

ここで試料が空気中にあるとすると $Z_0 \ll Z_1$ である。この条件で温度モーメント M_t の振幅 $|M_t|$ と位相 $\arg M_t$ の周波数特性を計算すると図2のようになる。図2の横軸は特性周波数 f_c で規格化された周波数である。特性周波数 f_c は次式で定義される。

$$f_c = \kappa_1 / (4h^2 \rho_1 C_1) \quad (6)$$

この特性周波数を用いると M_t の振幅の規格化周波数 (f/f_c) 依存性は試料の厚さや熱的定数に依存しないものとなる。図2に示すように M_t は一次遅れの周波数応答を示す。 f が f_c より小さい間、振幅は平坦な直線状で励起レーザーの変調に追従している。このとき板の裏と表の温度差は、ほぼ一定となり、曲げ変位は飽和している。 f が f_c を越すと f に反比例して振幅は低下する。平坦な直線部分での振幅の値は $Q/2\kappa_1$ により与えられる。この周波数特性より板厚 ($2h$) や熱拡散率 ($\kappa/\rho C$) の測定も可能である⁷⁾。円周支持の円板の場合、詳しい取扱いが文献7) に述べられている。上の理論的考察では準静的な取扱いなので試料の慣性を考えていない。したがって振動の特性をより詳細に説明するには動的な考察も必要である。

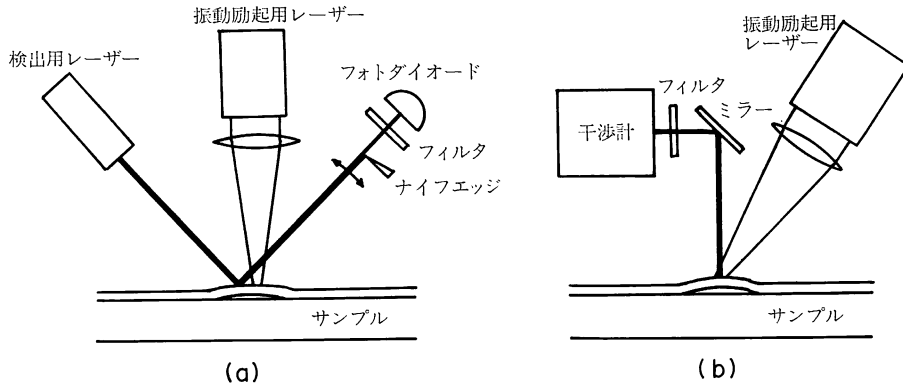


図3 レーザー検出法
(a) ナイフエッジ法, (b) 干渉計の利用

3. レーザー検出法

光学的な変位検出法として代表的なものは図3(a)に示す“ナイフエッジ法”あるいは“光てこ”として知られる光の偏向を利用するものと干渉法(図3(b))である²⁴⁾。ナイフエッジ法では試料表面が振動により傾くとレーザービームの反射光のスポットが移動し光量変化を与える。検出レーザーの照射点から検出器までの距離は1~2m程度である。ナイフエッジの代わりに2素子や4素子の分割フォトダイオード位置センサーが用いられる場合も多い。ナイフエッジ法は構造が簡単で広い周波数帯域での検出が可能である。検出感度の校正は、検出器を取り付けたステージを微小移動させて、光量変化の測定より容易に行える。試料が粗面である場合は反射光がスペckルとなるので、感度が低下する。レーザー照射が周期的である場合には信号検出にロックインアンプを用いた同期検出法が一般に用いられる。

干渉計としてはホモダインとヘテロダイン型のものが用いられる。ホモダインの場合、二光束干渉計の干渉光強度は二光束の光路差の増加に対して波長 λ を周期として正弦波状に変化する。波長よりずっと小さな光路差変化に対して干渉光強度の変化が最大になるのは二光束の光路差が $(2n+1)\lambda/4$ (n : 整数) になる場合である。そこでホモダイン法による微小振動測定においては、光路差を上述の条件に常に保持するようにミラーを圧電素子に取り付けて制御が行われる。ヘテロダインの場合、干渉計の一方の光束の周波数をシフトさせてビート信号を得る。変位と速度の高帯域の検出が可能である。フィルタやFM復調法など電気的信号処理法が用いられるので外乱振動などの影響を受けず高感度の測定を行える。

干渉計の場合、粗面であっても光の收拾効率を高く取れるように工夫すれば感度の低下はある程度抑えられる。

4. 応用

4.1 接着, 固定状態の検査

フォトサーマル振動を用いる非破壊検査法と音波やthermal-waveの反射や透過の伝播特性を利用する方法との違いは、後者が欠陥によるインピーダンス変化を測定するのに対して、前者の場合は機械的な接着強度を検出できることである。フォトサーマル効果による振動の応用として最初に提案されたのはラミネート構造のはがれの検査である^{8,9,25)}。これは層状材料のはがれた部分が等価的に周囲固定の板に対応し、熱弾性曲げ効果により大きな変位や振動が生じることを利用したものである。

図4の欠陥部分の模式図を用いて測定原理を説明する。励起用レーザーの照射により層状試料の表面に熱が生じ、曲げモーメントが発生する。接着による機械強度が不十分な場合、曲げモーメントによる曲げ変形が生じ、変位(ω)を生じる(図4(a))。接着が十分な場合

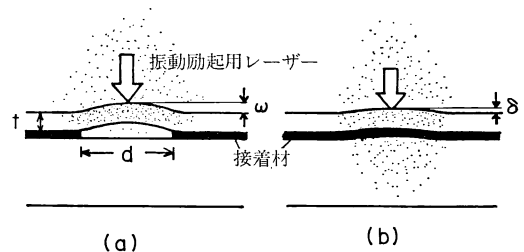


図4 はがれの検査の模式図
(a) はがれ部分, (b) 接着部分

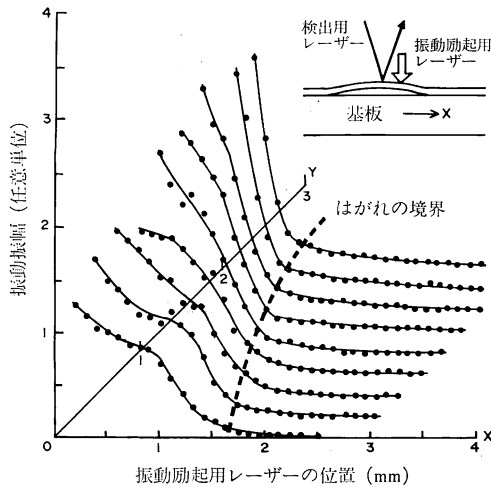


図 5 はがれ部分の検出結果

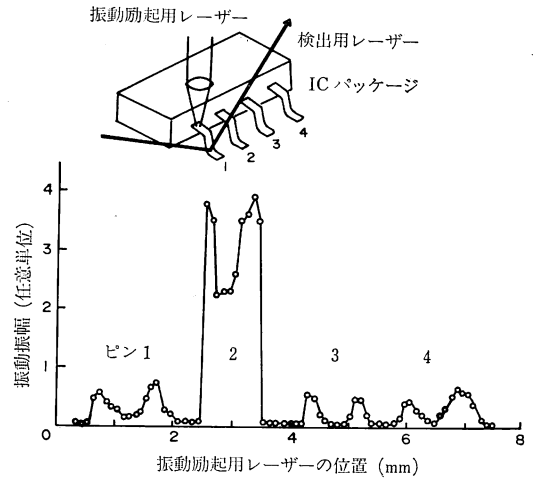


図 6 IC ピンのハンダ付け検査結果¹⁰⁾

には、厚さ方向の熱膨張による変位 (δ) が生じるが (図 4 (b)), その変位は曲げ変形 (ω) に対して大きっぱに見積って、はがれた層の厚さを (t), はがれ部分の大きさを d とすると $(t/d)^2$ 程度である²⁵⁾。したがって問題となるような大きさのはがれに対しては、はがれの部分で大きい変位 (ω) が生じる。励起用レーザーと検出用レーザーのビームが同じ位置に照射されている場合、干渉計により検出される光路差には表面の変位だけでなく気体中への thermal-wave の拡散により生じた屈折率変化による光路差が含まれる。その影響は、はがれない部分での熱膨張による変位 (δ) の 10% 以下であると推定されている²⁵⁾。

図 5 に模擬検査としてガラス板 (厚さ 1 mm) にアルミ箔 (厚さ 15 μm) を接着し、はがれた部分の境界を調べた結果を示す。図は信号振幅の三次元表示である。変位の検出はナイフエッジ法を用いている。検出用レーザーを固定し、励起用レーザー (25 mW, 830 nm, 2 kHz) をはがれの境界部分で走査し、ロックインアンプで検出した。境界部分 (図中の点線付近) で信号が大きく立ち上がりアルミ箔に曲げ振動が発生している。また接着の十分な部分では信号がほぼ 0 となっている。

別の応用として IC パッケージのピンのハンダ接続不良の非接触検査法が提案されている^{10, 26)}。IC パッケージとプリント基板のハンダづけの検査にはレーザーの反射光変化を利用した方法や画像処理を用いた形状検査が利用されている。しかし、ハンダ接続の機械的強度の評価は困難であるので、触診による手作業に依存する場合も多い。図 6 にフォトサーマル振動を利用した検査原理を示す。IC パッケージのピンの根元部分に励起用レ

ザーを集光すると、ピンにフォトサーマル振動が発生する。この振動をピンの先に照射した別のレーザーにより検出する。ここで IC のピンは一種の梁として考えることができる。ハンダ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。したがって接続不良の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。図 6 のグラフは実験結果を示している。励起用のレーザーをピンの長さ方向と直角に走査したとき、接続されていないピン (2) は接続の完全な場合 (1, 3, 4) に比較して約 10 倍の振動振幅が得られた¹⁰⁾。それぞれの信号に二つの山がみられるのはピンのエッジ部分での 3 次元的な thermal-wave の伝播による効果と考えられる。

4.2 板状試料の画像化

他の光音響法と同様にフォトサーマル振動を検出することで板状試料の欠陥の画像化が行える^{11, 12)}。レーザーを集光し板状の試料に照射すると照射点に曲げモーメントが発生する。板の内部に欠陥があると thermal-wave の分布が変化し曲げモーメントを変え、振動の振幅や位相に変化を与える。検出用レーザーで試料全体の振動を検出し、励起用レーザーを走査して画像化を行う。空間分解能は光音響法と同様に熱拡散距離程度となる。画像の解釈は、等価的に試料表面の温度を検出する熱輻射法²⁷⁾や熱ピストン効果による光音響法²⁸⁾と比較していくぶん複雑である。定性的には (4) 式で示される温度モーメントとレーザー光の照射場所による振動の励起効率 (励起関数) の積に比例すると考えられる。他の方法と比較すると、一般的には表面より比較的深い位置にある欠陥に敏感であるが表層部のものに対してはいくぶん感度が

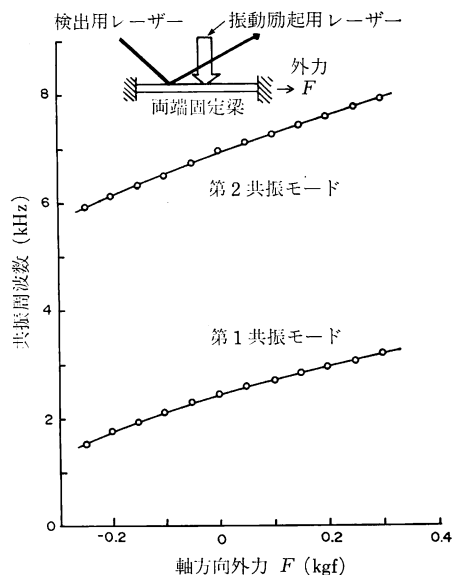


図7 梁に加わる外力の検出 (共振周波数の外力依存性)

低いと考えられる。

4.3 共振を利用した張力や形状の検出

励起レーザーの変調周波数が機械構造の共振周波数と一致すると比較的大きな振動が励起されたり、パルスレーザーの照射後に共振振動が励起される場合がある (この場合周波数特性は図2と異なる)。パルスレーザー照射後に発生する共振振動成分を用いて平底状の穴の大きさや層状試料のはがれ部分の大きさの推定法が提案されている^{9,13)}。

また共振振動の周波数変化の測定から両端固定の梁に加わる軸方向の張力の検出法が提案された¹⁴⁾。図7に基礎実験の概略図と結果を示す。梁 (厚さ 0.1 mm, 幅 1.5 mm, 長さ 20 mm のクロムでコーティングしたホウケイ酸ガラス) の長手方向に圧縮あるいは引張り力を加えた状態で励起用レーザー (25 mW, 830 nm) によりフォトサーマル振動を発生させる。発生した振動を検出用レーザーにより検出する。外力を変えると梁の共振周波数が変化する。共振周波数を測定することにより梁に加わる外力を非接触に検出できる。図7に外力に対する梁の第1および第2共振周波数の測定値の変化を示す。

4.4 振動型センサーの振動励起

近年、半導体リソグラフィ加工技術を用いて作成した大きさ数十 μm ~ 数百 μm の微小な梁構造においてもフォトサーマル振動が発生させられることが示された。振動は共振振動であるが 100 kHz 越え、照射エネルギーが

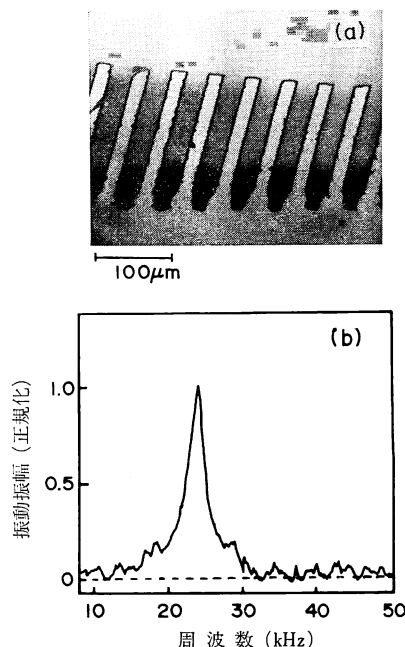


図8 酸化シリコン膜の片持ち梁のアレイ (a), 共振曲線の一例 (b)

μW 程度でも振動が励起されることもある。図8はシリコンの異方性エッチングにより作成したシリコン基板上の酸化シリコン膜 (1 μm) の片持ち梁のアレイの写真の一例と一つの梁にレーザー照射して励起された第一共振における共振曲線を示す。

このような加工により微細なブリッジ (両端固定梁) を作成しセンサーとして利用する試みが行われてきた^{15,16)}。微細な梁の振動を利用する振動型センサーは小型であり感度が高く、センサーの出力が周波数であるので信号強度のドリフトに影響されないなどの特徴があり、圧力センサー、蒸気圧センサー、力センサーやフローセンサーなどへの利用が期待されている¹⁵⁾。このセンサーの振動を励起するには圧電体や静電力を利用することが提案されてきた。近年、レーザー照射により振動を励起する方法が試みられ、新しいファイバーセンサーとして研究されている¹⁷⁻²⁰⁾。

図9には圧力センサーの原理を示す。測定の原理は4.3節に述べた方法と同じである。圧力による基板の変形でブリッジ部分に張力が加わる仕組みである。微小なブリッジ構造をリソグラフィ加工により作成し、基板の裏面にゲージ圧力を加えてブリッジの共振周波数の変化を測定する。圧力に対する共振周波数変化率としては 0.027%/millibar (共振周波数 566 kHz) が報告されて

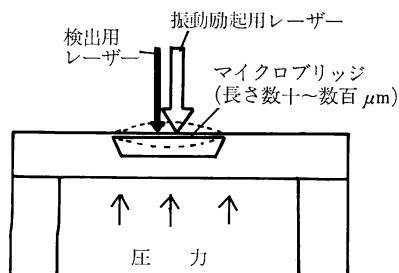


図9 レーザー励起振動子を用いた
圧力センサーの原理

いる¹⁸⁾。また、圧力をより効率よくブリッジの張力に変換できるように構造が工夫されている。

5. おわりに

光熱 (photothermal) 効果により板状や梁状構造に生じる曲げ振動の発生とその応用について報告した。振動の励起と検出はレーザービームにより行っているため測定は完全に非接触である。非破壊検査への応用として層状試料のはがれの検出、ハンダ付け検査、板状試料の画像化、梁に加わる引張り力の非接触検出について基礎的な実験結果に基づいて述べた。本検査方法の特徴は非接触に固定状態などの機械的強度が検出できることである。提案された方法の実用化のためには、今後より定量的な研究と測定の高速化が必要であると考えられる。もう一つの応用としてセンサーへの利用について述べた。微細加工により作成された振動子をレーザー照射により励起する方法では、フォトサーマル振動がアクチュエータとして用いられている。新しい光学式センサーとして今後の研究と開発を期待したい。

文 献

- 1) A. C. Tam: "Application of photoacoustic sensing techniques," *Rev. Mod. Phys.*, **58** (1986) 381-431.
- 2) 沢田嗣郎 (編): 光音響分光法とその応用—PAS (学会出版センター, 東京, 1982).
- 3) 杉谷嘉則: "光音響分光法," *光学*, **14** (1985) 108-116.
- 4) 小島誠治: "光音響顕微鏡," *光学*, **17** (1988) 520-521.
- 5) 御子柴宣夫, 中村弘通, 坪内和夫: "光音響法の応用," *応用物理*, **54** (1985) 483-487.
- 6) P. Charpentier, F. Lepoutre and L. Bertrand: "Photoacoustic measurements of thermal diffusivity: description of the "drum effect,"" *J. Appl. Phys.*, **58** (1982) 608-614.
- 7) G. Rousset, F. Lepoutre and L. Bertrand: "Influence of the thermoelastic bending on photoacoustic experiments related to measurements of thermal diffusivity of metals," *J. Appl. Phys.*, **54** (1983) 2383-2391.
- 8) 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.
- 9) P. Cielo, X. Madaque, G. Rousset and C. K. Jen: "Thermoelastic inspection of layered materials: Dynamic analysis," *Mater. Eval.*, **43** (1985) 1111-1116.
- 10) K. Hane and S. Hattori: "Photothermoelastic inspection of soldered connections," *Appl. Opt.*, **27** (1988) 3965-3967.
- 11) K. Hane, T. Kanie and S. Hattori: "Photothermoelastic probing for a clamped plate sample," *Appl. Opt.*, **27** (1988) 386-392.
- 12) 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.
- 13) R. A. Crosbie, R. J. Dewhurst and S. B. Palmer: "Flexural resonance measurements of clamped and partially clamped disk excited by nanosecond laser pulses," *J. Appl. Phys.*, **59** (1986) 1843-1848.
- 14) K. Hane and S. Hattori: "Noncontact tension sensing by photothermoelastic effect," *Opt. Lett.*, **13** (1988) 550-552.
- 15) 特集 "動くシリコン, Si マイクロマシニング技術", *日経エレクトロニクス*, No. 480 (1989. 8. 21) 125-155.
- 16) J. C. Greenwood and D. W. Satchell: "Miniature silicon resonant pressure sensor," *IEEE Proc. Part D*, **135** (1988) 369-372.
- 17) R. E. Jones, J. M. Naden and R. C. Neat: "Optical-fibre sensors using micromachined silicon resonant element," *IEEE Proc. Part D*, **135** (1988) 353-358.
- 18) K. E. B. Thornton, D. Uttamchandani and B. Culshaw: "Novel optically excited resonant pressure sensor," *Electron. Lett.*, **24** (1988) 573-574.
- 19) M. V. Audres, K. W. H. Foulds and M. J. Judor: "Optical activation of a silicon vibrating sensor," *Electron. Lett.*, **22** (1986) 1097-1099.
- 20) N. A. D. Stokes, R. M. A. Fatah and S. Venkatesh: "Self-excited vibrations of optical microresonators," *Electron. Lett.*, **24** (1988) 777-778.
- 21) K. Hane and S. Hattori: "Photothermal bending of a layered sample in a plate form," *Appl. Opt.*, **29** (1990) in printing.
- 22) J. Opsal and A. Rosencwaig: "Thermal-wave depth profiling: Theory," *J. Appl. Phys.*, **53** (1983) 4240-4246.
- 23) H. Parkus: *Thermoelasticity* (Springer-Verlag, New York, 1976) Chap. 4.
- 24) J. Monchalin: "Optical detection of ultrasound," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr., Freq. Contr.* **UF33** (1986) 485-499.
- 25) P. Cielo, G. Rousset and L. Bertrand: "Photoacoustic and photothermal evaluation of stratified materials," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 1327-1334.
- 26) K. Hane and S. Hattori: "Application of photothermoelastic effect to noncontact inspection of soldered connections," *SPIE Proc.*, **954** (1988) 593-598.
- 27) H. Ermert, F. H. Dacol, R. L. Melcher and T. Baumann: "Noncontact thermal-wave imaging of sub-surface structure with infrared detection," *Appl. Phys. Lett.*, **44** (1984) 1136-1138.
- 28) A. Rosencwaig and A. Gersho: "Theory of photoacoustic effect with solids," *J. Appl. Phys.*, **47** (1976) 64-69.