

最近の技術から

レーザー超音波材料評価法

斎藤 鉄哉・山脇 寿

金属材料技術研究所 T153 東京都目黒区中目黒 2-3-12

1. はじめに

パルスレーザー光の照射により非接触で材料内部にパルス的弹性波を発生伝播させ、さらに、その弹性波をレーザーによって非接触で検出するのが、ここで言うレーザー超音波である。超音波パルスの反射、減衰、音速変化などの情報を、非接触で検出できれば、新たな材料評価法としての応用が考えられる。ここでは、レーザー超音波の基礎技術と応用について紹介する。

2. レーザーによる超音波発生

固体材料表面へのパルスレーザー照射によって材料に生じる弹性波は、従来の圧電素子のとは大きく異なる。レーザー照射により材料中には綫波、横波、表面波が同時に発生する。その弹性波パルスの発生の要因は、材料に損傷を与えない弱い光強度では熱応力が主となる。光エネルギーの一部は材料表層に吸収されるが、材料内への熱の拡散は弹性波発生の時間に比べ緩慢である。その結果、加熱領域は表面に限られるため、表面に対し平行方向に生じる応力が超音波の主な発生源となる。これに対し、光強度が高く表面の溶融蒸発を伴う場合には表面物質の気化に伴う圧力により法線方向の応力も生じる。この場合、圧力の作用時間が光エネルギーとともに増加し、超音波の波形変化をもたらす。数mJのエネルギーのレーザー照射により生じる振動変位はきわめて小さいことが実験的に報告されているが、材料表面の油膜の存在によって大きくなる現象がある。ビーム径や光強度を変えることにより超音波の指向性、波形、振幅を変えられるなどの特徴をもつ¹⁾。

3. レーザーによる超音波受信

遠隔からの材料検査を目的とした場合、レーザー光の干渉を用いる方法がレーザー超音波の非接触受信法の中心となる。干渉法は、従来より、ホモダイン法とヘテロダイン法²⁾があるが、最近では、共焦点ファブリ・ペロー干渉法³⁾が注目されている。

ホモダイン法では、単一波長のレーザー光を参照用と試料照射用に分け、試料からの反射光と参照光との干渉光の強度変化から試料表面の変位波形を検出するが、二つの光波の位相差を90°に保つための制御機構を必要とし、動く試料に対し実用的でない。これに対し、まずレーザーを試料に照射し、その反射光を2分し光検出器への到達時間をずらして干渉させ超音波の振動速度波形を得る、時間差干渉法（速度干渉法）では干渉計内の光路が変化しないため移動試料に対しても適用可能である。

ヘテロダイン干渉法は、一定の光周波数差をもつ二つのレーザー光の一方を試料に反射させ、ドップラー効果による干渉光のビート周波数の変化を検出することにより超音波振動を検出する方法で、試料の表面状態により反射光量が変化しても感度が変化しない特徴をもつ。以上の方法では、いずれも良好な干渉光を得るために光路面の合致が難しく、スペックルパターンの発生等による干渉信号の減少が大きい。

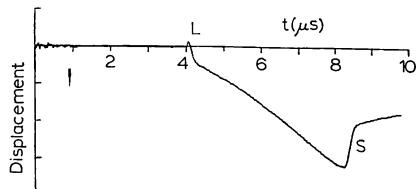


図1 パルスレーザー照射によりアルミ試料の裏面に生じた垂直変位波形
Lは綫波、Sは横波を示す¹⁾。

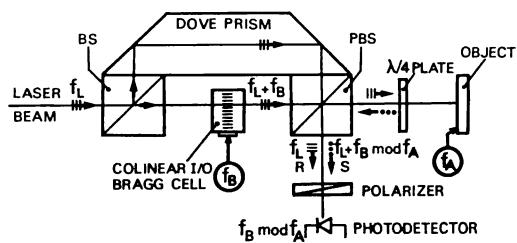
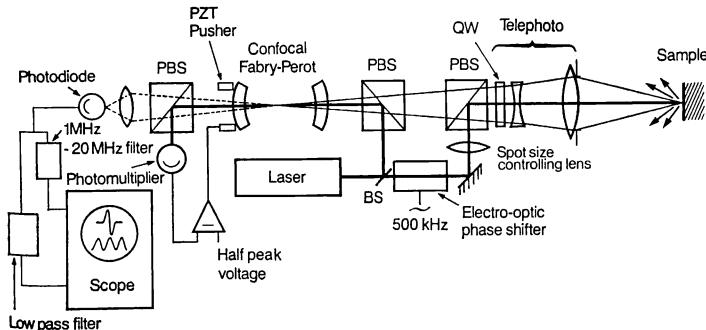
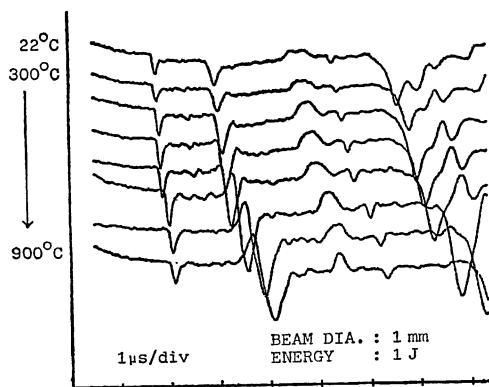


図2 小型化したヘテロダイン干渉計の光学系構成例²⁾

図 3 超音波受信用共焦点ファブリ・ペロー干渉計の構成図³⁾図 4 ステンレス鋼試料の温度上昇によるレーザー超音波の波形変化
700°C 近辺で波形変化がある⁶⁾.

これに対し共焦点ファブリ・ペロー干渉法は、わずかな透過率をもつ二つの凹面鏡を共焦点位置に対向させ、狭帯域光バンドパスフィルターとし、試料反射光のドッブラー効果による光周波数変化を透過光強度変化として検出する方法で、二光波干渉と異なり試料からの散乱光量を有効に利用でき、振動速度に近似した波形が得られる。

受信方法により超音波の変位あるいは速度波形のいづれかが得られるが、検出周波数が広帯域である変位波形に対し、速度波形では試料の低周波振動の影響を受けにくい。振動検出感度は圧電素子に比べ低く、その限界は光検出器のショット雑音で決まるが、現在、パルス波形の場合 1 Å 程度、正弦波振動の場合、同期検波等により約 10^{-4} Å が得られている。しかし、レーザーによる受信は、粗い表面や被膜試料、微小領域、各種材質に適用でき、広帯域で超音波振動に影響を与えるずに測定可能であるなど多くの特徴をもつ。

4. 非接触法による材料評価

非接触材料評価法としての一つの目標は、非破壊検査の一つである超音波探傷法の完全非接触化である。これにより検査対象の拡大、検査の高速化、微小欠陥検出等が期待される。レーザーによる表面波を用いた表層検査や高温材の厚さ測定の実験等が報告されている⁴⁾。

もう一つの狙いは材料内部の物性測定である。超音波減衰や音速を用いる方法は材料の組織変化を知る手段として研究されているが、レーザー超音波の周波数成分は GHz に及び、しかも広帯域の信号検出が可能であるなど、より多くの情報を得ることが可能となると期待される。炉内で加熱した材料の弾性率の温度依存性や焼結金属の組織変化を、音速測定により調べた例がある⁵⁾。

レーザー超音波の応用は、送受信の技術開発の進展に待つところが大きいが、現在の超音波の利用分野を考えれば将来に期待するところは大きいと考えられる。

文 献

- 1) D. A. Hutchins: "Mechanisms of pulsed photoacoustic generation," Can. J. Phys., 64 (1986) 1247-1264.
- 2) D. Royer and E. Dieulesaint: "Optical probing of the mechanical impulse response of a transducer," Appl. Phys. Lett., 49 (1986) 1056-1058.
- 3) J.-P. Monchalin: "Optical detection of ultrasound at a distance using a confocal Fabry-Pérot interferometer," Appl. Phys. Lett., 47 (1985) 14-16.
- 4) P. Cielo and C. K. Jen: "Laser generation of convergent acoustic waves and applications to materials evaluation," Proc. IEEE Ultrason. Symp., (1968) pp. 515-526.
- 5) L. Piché, B. Champagne and J.-P. Monchalin: "Laser ultrasonics measurement of elastic constants of composites," Mater. Eval., 45 (1987) 74-79.
- 6) 山脇 寿, 斎藤鉄哉: 非破壊検査, 35 (1986) 636-637.

(1988年6月8日受理)