

超音波顕微鏡を用いた応力計測法

Stress Measuring Technique by a Scanning Acoustic Microscope

仙波卓弥*・谷 泰弘*・佐藤壽芳*

Takuya SEMBA, Yasuhiro TANI and Hisayoshi SATO

1. はじめに

材料内部に生じる応力の分布を高精度に測定しうる非破壊検査法の開発は、機械部品や構造部材の品質を判定することにとどまらず、稼働時におけるそれらの安全性を確保するうえで極めて重要である。このような観点より開発された種々の応力計測法¹⁾のなかでも、横波の音響複屈折効果²⁾を利用した超音波法³⁾によれば、一般工業用材料に生じる応力を測定することが可能であるとされている。

しかし方位分解能の関係上、極めて微小な領域に分布する、いわゆる微視的応力の測定は困難であった。この微視的応力の測定を可能なものとする一つ的手段に、音響レンズにより平面超音波を集束しその方位分解能を高めた、超音波顕微鏡 (Scanning Acoustic Microscope : 略して SAM) を挙げる事ができる。しかしこの SAM に関する研究は、近年やっと主体が画像観察から工業計測へ移行し始めたばかりでもあり、今のところこの応力計測に成功した例はないようである。

以上の背景より、SAM による応力計測の可能性を検討したところ、材料非線形性を有すると同時に音響インピーダンスが低い材料に対しては、変形に伴う縦弾性係数の変化を、音圧反射強度の差として検出しようのものであることが推定された。そこで上記の条件を満たす材料として、光弾塑性材料でもあるポリカーボネートを使用し、有孔薄膜の円孔周縁部における音圧反射強度の二次元分布を測定した。その結果薄膜に生じる応力、とくに主応力に対応した音圧反射強度分布の得られていることが判明したので報告する。

2. 測定原理

図1に示すように、液体中に支持された厚さ d の薄膜表面に、液体中より連続平面超音波が入射角 θ_w で斜入射する場合を想定する。このとき物体中の任意の点に生じる変位 (u, w) は、

$$\begin{aligned} u &= \partial\phi/\partial x - \partial\psi/\partial z \\ w &= \partial\phi/\partial z + \partial\psi/\partial x \end{aligned} \quad (1)$$

と表される⁴⁾。ここで ϕ は縦波を表すスカラーポテンシ

ヤル、 ψ は横波を表すベクトルポテンシャルである。また物体中の任意の点に生じる応力 (σ_{zz}, σ_{xz}) は、ラメ定数を、 λ, μ とすると、

$$\begin{aligned} \sigma_{zz} &= (\lambda + 2\mu)\partial^2\phi/\partial z^2 + \lambda\partial^2\psi/\partial x^2 \\ &\quad + 2\mu\partial^2\psi/\partial x\partial z \\ \sigma_{xz} &= \mu(2\partial^2\phi/\partial x\partial z + \partial^2\psi/\partial x^2 \\ &\quad - \partial^2\psi/\partial z^2) \end{aligned} \quad (2)$$

と表される⁵⁾。一方薄膜の表裏においては共に、

$$\sigma'_{zz} = \sigma''_{zz}, \sigma'_{xz} = 0, w^f = w^s \quad (3)$$

等の境界条件が成り立つ。なお肩添字 f は液体、 s は薄膜を意味する。したがって、式(1)、(2)、の関係を表(3)に代入し、複素多元連立方程式を解くことにより、既知の入射振幅 ϕ^i に対する反射振幅 ϕ^r の比、いわゆる音圧反射率 R を知ることが可能となる。いま説明の簡単化のため、半無限の固体表面に液体中より連続超音波が垂直入射する場合を想定し、 $\theta_w = 0, d = \infty$ とすると R は、

$$R = \phi^r/\phi^i = (Z_s - Z_f)/(Z_s + Z_f) \quad (5)$$

と表される。ここで Z_i ($i = s, f$) は縦波音速と密度との積であり、音響インピーダンス⁶⁾と呼ばれる。

式(5)の関係を各種の物体に対し求めた結果を、図2に○印で示す。縦軸は R 、横軸は Z_s 、図中に実線で示した曲線は式(5)の関係を表す。一方図2に破線で示した曲線は、式(5)において Z_s を $0.95Z_s$ 、すなわち縦弾性係数を仮想的に 10% 減少させた場合に得られる音圧反

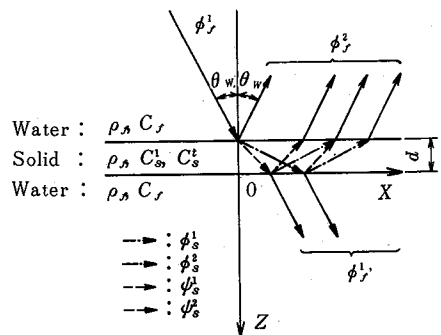


図1 固液界面における超音波の反射・屈折

* 東京大学生産技術研究所 第2部

射率の減少割合 ΔR を図示したものである。この破線で示した結果によれば、 Z_0 の変化に基づく音圧反射率の減少割合は、 Z_0 が低い材料ほど顕著であることが明らかである。

この結果は材料非線形性を有すると同時に音響インピーダンスが低い材料に対しては、変形に伴う縦弾性係数の変化を音圧反射率の差として検知することが可能であるということを示唆している。上記の条件を満たす材料として、本研究では光弾塑性材料でもあるポリカーボネートを使用し、変形に伴う音圧反射強度の変化を SAM により測定した。

3. 音圧反射強度の推定

測定に用いた反射型超音波顕微鏡 (HSAM-1000; 日立(株)製)の基本構成を、ブロック線図にて図3に示す。同図に示したとおり、SAMは超音波の送受波を行うセンサ部、RFパルスの送受波・検波を行う電気制御部、試料の二次元走査を行う機械制御部、機械走査に同期したラスタ走査を行う画像制御部ならびに超音波画像の表示部とから構成される。また機械走査やラスタ走査の制御、

および計測データの読み取りや画像処理等のソフト処理は、SAMの外部に設置されたデスクトップコンピュータ (HP 9216 S) により行われる。

図3に示した SAM において、試料を水平方向に二次元走査させず、音響レンズの焦点位置を鉛直方向 (Z 軸方向) に移動させると、正焦点の近傍においては、図4に実線で示す出力電圧 V と Z との関係を得る。縦軸はオフセットからの出力電圧、横軸は基準点からの移動量を表す。同図に示した曲線は $V(Z)$ 曲線と呼ばれ、試料表面からの反射波と音響レンズ/水界面からの反射波との干渉により生じるものであることが明らかにされている⁷⁾。そこで実線のように得られた結果を局所最小二乗法により平滑化し、 $V(Z)$ を試料表面からの反射波 $V_1(Z)$ と、音響レンズ/水界面からの反射波 $V_2(Z)$ とに分離する。このように分離された反射波のうち、 $V_1(Z)$ の極大値は式(5)に示した音圧反射強度 ϕ^2 に対応する。

4. 測定結果

4.1 試料の材料特性

実験に用いた、ポリカーボネートフィルム (厚さ 0.5 mm) の応力-ひずみ特性を図5に示す。縦軸は引張応力 σ_x 、横軸は引張ひずみ ϵ_x を表す。図中に実線で示した曲線は、 $\Delta\epsilon_x$ を 1% とし、各変形段階にて十分に応力緩和を行った後、再負荷を繰り返した場合に得られた材料特性である。また同図に一点鎖線で示した曲線は、緩和後の応力を図示したものである。一方図中に○印で示した曲線は、再負荷に要する変形抵抗、いわゆる縦弾性係数の変化を示したものである。このように再負荷に要する縦弾性係数は、変形の増加に伴い非線形に減少する。

4.2 音圧反射強度と材料特性との関係

上記の材料に対し測定した、音圧反射強度と引張ひず

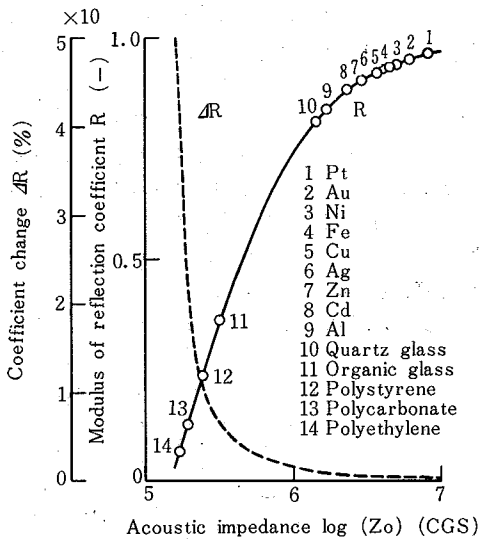


図2 音響インピーダンスと音圧反射率との関係

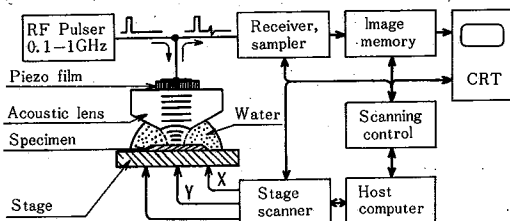


図3 反射型超音波顕微鏡の基本構成

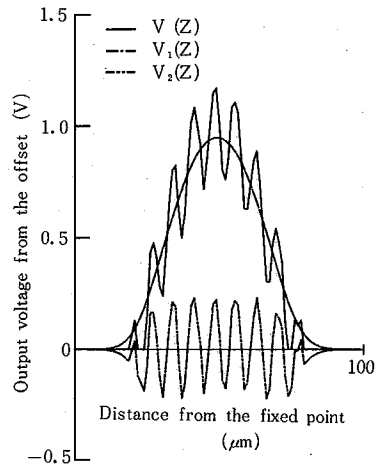


図4 正焦点近傍における $V(Z)$ 曲線の一例

研究速報

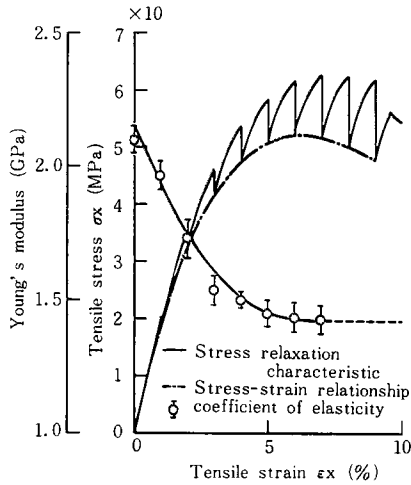


図5 ポリカーボネートフィルムの材料特性

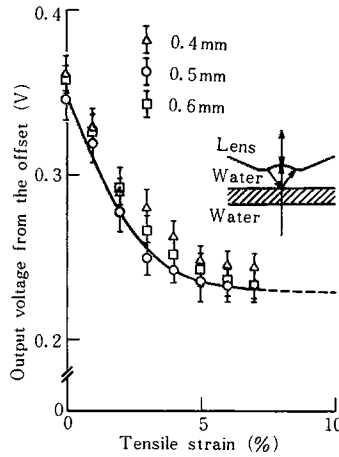


図6 音圧反射強度と引張りずみとの関係

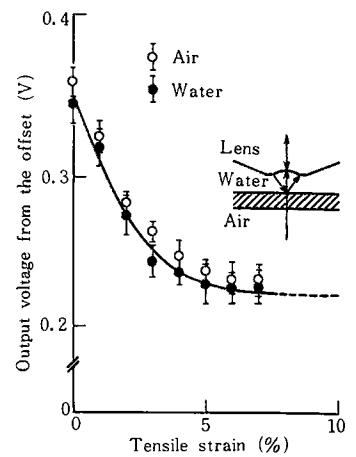


図7 音圧反射強度に及ぼす境界条件の影響

みとの関係を図6に○印で示す。縦軸はオフセットからの出力電圧、横軸は引張りずみを表す。同図に示した結果によれば、変形の増加に伴う音圧反射強度の減少割合は、図5に示した縦弾性係数のそれと極めて良く一致したものであることがわかる。なお使用周波数は120 MHz、試料は20±1°Cに温度調節された水槽中に浸漬されている。

この音圧反射強度の減少は、主として図5に示した縦弾性係数の変化に基づくものと推定される。しかし、薄膜を伝播する経路における超音波の減衰が無視しえないものであるとすれば、変形に伴う膜厚の変化や薄膜裏面の境界条件の相違は、音圧反射強度に影響を及ぼしているものと考えられる。そこで、上記のパラメータを考慮した同様の実験を行い、薄膜裏面からの反射波の影響について検定した。

膜厚を0.6, 0.4 mmと変化させた場合に得られた、音圧反射強度と引張りずみとの関係を、図6にそれぞれ△, □印で示す。またフィルム厚さを0.5 mmとし、薄膜裏面を空気とした場合に得られた結果を図7に●印で示した。比較のため、フィルム厚さを0.5 mmとし、薄膜を完全に水没させた場合に得られる結果を、いずれも○印で示している。

このように、フィルムの厚さの相違に基づく背面反射の影響は、測定される音圧反射強度に有意な影響を及ぼすものではない。したがって図6において○印のように得られた音圧反射強度の変化は、主として図5に示した縦弾性係数の変化に依存したものであると考えられる。

4.3 音圧反射強度と主応力との関係

以上のように得られた結果は、ポリカーボネートの試

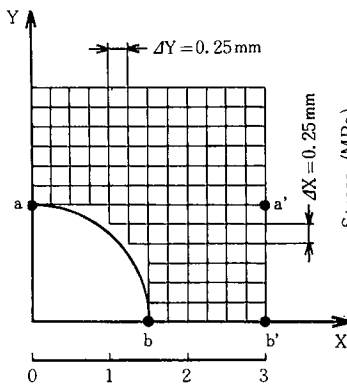


図8 円孔と走査点との位置関係

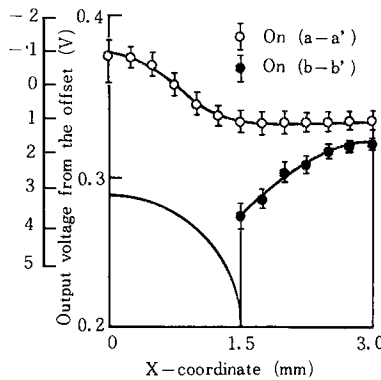


図9 音圧反射強度のx軸方向変化

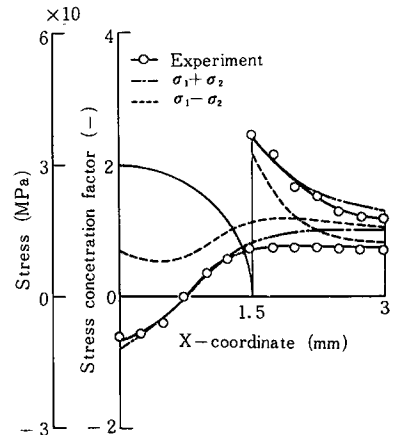
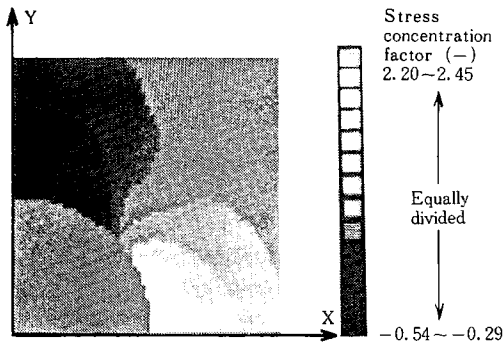
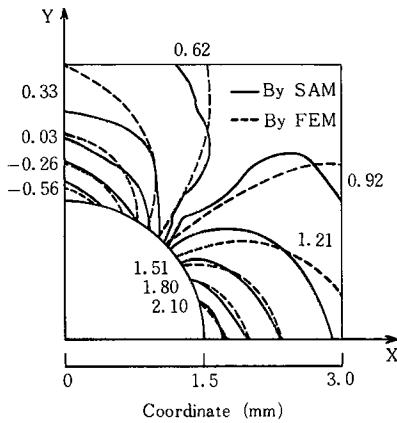


図10 計測された応力と数値解析より求めた応力との比較



(a) 測定結果



(b) 測定結果と解析結果との比較

図 11 円孔周縁部における応力の分布

料表面に不均一な応力の分布が形成されているような場合、応力レベルに対応した音圧反射強度の分布を得ることが可能であることを意味する。そこで試料面内で不均一な応力の分布を得ることができるとして、円孔の応力集中問題を取り上げ、円孔近傍での不均一な応力分布を計測した。なお円孔と走査点との位置関係は図 8 に示すとおりであり、計測・演算処理時間の短縮化のため走査の間隔 $\Delta x \cdot \Delta y$ は共に 0.25 mm としている。

図 8 に示した試料最少断面部 (b-b')、ならびに円孔直上部 (a-a') における音圧反射強度の x 軸方向変化を求めると、図 9 に示す結果を得る。縦軸は図 6 のそれと同様オフセットからの出力電圧、横軸は x 座標値を表す。またこの出力電圧は、図 6 に○印で示した音圧反射強度と引張ひずみとの関係、ならびに図 5 に一点鎖線で示した応力とひずみとの関係を用い、応力に変換することが可能である。

そこで図 9 のように得られた出力電圧を応力に変換しさらにこの応力を試料最小断面部での一様応力で無次元

化すると、図 10 に示す結果を得る。比較のため有限要素解析により得られた主応力差の分布、主応力差の分布も同図に付記している。これらの結果によれば、SAM により得られた応力の分布は、主応力差のそれに対応したものであることが伺える。その検証の意味において、円孔周縁部における二次元の応力分布を計測した。

図 11 (a) に示した結果は、円孔周縁部において測定される音圧反射強度を応力集中度に変換したものである。なお同図に示した結果は、応力の最高ならびに最低値の間を 12 分割し、画像表示したものである。またこのように得られた応力集中度の分布は、図 11 (b) に示したとおり、数値解析により得られる主応力差の分布に極めて良く一致したものであることを確認している。このように定量的には現時点において必ずしも満足のいく測定精度は得られていないが、定性的には薄膜に生じる応力、とくに主応力差の分布を測定し得ていることが明らかである。

5. 結 言

工業計測、とくに微視的応力の定量計測に対する反射型超音波顕微鏡の適用範囲を明確にする意味で、本論文では SAM を用いた応力計測の原理と、測定結果の一例を示した。その結果

- (1) 材料非線形性を有すると同時に音響インピーダンスが低い材料に対しては、変形に伴う縦弾性係数の変化を、音圧反射強度の差として検出しようものであることが、音響弾性理論を用いた数値解析により推定された。
- (2) 上記の条件を満たす試料として、光弾性材料でもあるポリカーボネートを使用し、円孔周縁における音圧反射強度の分布を測定した。その結果、主応力差に対応した音圧反射強度分布の得られていることが判明した。
- (3) したがって高分子材料のような、比較的音響インピーダンスの低い材料の応力測定には、本論文の手法を直ちに適用することが可能である。

等の結論を得た。なお本論文の手法は一般に表面保護や防錆等の目的で金属材料表面に塗布・接着されている高分子薄膜や塗料に対し、適用することが可能である。

(1985 年 8 月 13 日受理)

参 考 文 献

- 1) 藤芳, 非破壊検査, 33-6 (1984), 426
- 2) Tokuoka, T. and Iwashimizu, Y., Int. J. Solids Struct., 4 (1968), 383
- 3) 福岡, 機論 A, 49-440 (1983), 403
- 4) 山本, 超音波基礎工学, (1981), 39, 日刊工業
- 5) Chimenti, D. E., Nayfeh, A. H. and Butler, D. L., J. Appl. Phys., 53-1 (1982), 170
- 6) 実吉・菊池・熊本, 超音波技術便覧, (1980), 13, 日刊工業
- 7) 石川・神田・片倉, 第 21 回半導体専門講習会稿集(1983), 171