横波の位相スペクトルを用いる音弾性応力測定*

井上博文^{*1}, 福永 馨^{*2}, 岩清水 幸夫^{*3}

Acoustoelastic Stress Measurement Using Phase Spectra of Transverse Waves

Hirohumi INOUE, Kaoru HUKUNAGA and Yukio IWASHIMIZU

In this study, analysis of phase spectra of ultrasonic transverse waves is shown to be a reliable new method of acoustoelastic stress measurement. At first, phase spectra of birefringenced transverse waves were theoretically analyzed, and the difference in phase spectra corresponding to two mutually orthogonal transducer directions was introduced. Then, a method of curve fitting to this difference was used in order to determine the polarization directions and velocity difference of transverse waves. From this, it was confirmed that no particular transducer directions were required for this determination. Finally, this method was applied to stress analysis of a V-notched specimen subjected to four point bending, and the normal stress difference and shear stress were determined along several lines of the specimen.

Key Words: Acoustoelasticity, Stress Measurement, Phase Spectrum, Ultrasonic Waves, Transverse Waves, Bending Stress

1. 緒 言

超音波を用いる音弾性応力測定法^{(1)~(3)}は、超音波がほとんどの固体材料中を伝ばすることや伝ば方向と波のモードを変えた測定が可能であることなどから、残留応力の非破壊的測定や、負荷状態のみを利用する応力のその場測定に適した方法と考えられ、多くの研究が行われてきている。そして最近では、超音波顕微鏡や電磁超音波トランスデューサによる新たな測定が行われ⁽⁴⁾⁽⁵⁾、また対象とする材料も高分子材料、複合材料、セラミックスなどに広がってきている^{(6)~(8)}。このような音弾性測定では、超音波の伝ば速度(音速)や偏り方向などが応力によって変化する現象を利用する。そのため応力による音速変化を高精度で測定する必要があり、これには、シングアラウンド法、パルスエコーオーバーラップ法、波形をデジタル処理するデジタルゼロクロス法や相互相関法などが用いられている⁽¹⁾。純モードの波に適用するこれらの方法以外では、複屈折した横波に適用するスペクトル法があげら

れる^{(9)~(11)}。

これは、波形の振幅スペクトルにおいて振幅が零となる周波数成分を測定し、横波の偏り方向と偏った2横波の音速差を求める方法である。この測定では、同じ条件で偏った2横波を同時に伝ばさせるので、温度変動やトランスデューサと試料との密着状態の影響が比較的小さく、また偏り方向の測定が比較的容易である。このためスペクトル法は一般的な応力分布の測定に適しているが、対象とする周波数成分が反射波の有効周波数帯域から外れる場合の測定に問題が残されている。

この問題も含めて従来のスペクトル法を補完するためには位相スペクトルの利用が有望と考えられるが、音弾性測定に位相スペクトルを用いる研究はまだほとんど行われていない。そのため本研究では、複屈折した横波の位相スペクトルについて詳しく検討し、これをもとにVノッチ試験片の曲げ応力分布の測定を行って、位相スペクトルを利用する音弾性測定が有効な方法になり得ることを明らかにした。

2. 横波の音弾性則と位相スペクトル

2.1 複屈折音弾性則⁽¹⁾ 弱い直交異方性を有する金属圧延板を考え、異方性の主軸方向である圧延方

* 原稿受付 1996 年 10 月 24 日。

^{*1} (株)クボタ(☎590 堺市石津北町64)。^{*2} 住友金属工業(株)(☎314 鹿嶋市大字光3)。^{*3} 正員、立命館大学理工学部(☎525 草津市野路東1-1-1)。

向, 圧延幅方向, 厚さ方向に X_1, X_2, X_3 軸をとる. この異方性によって X_3 方向に伝ばする横波は X_1, X_2 方向に偏った2波に分かれるので(音響複屈折), これらの音速をそれぞれ V_{10}, V_{20} として,

$$V_0 = \frac{(V_{10} + V_{20})}{2}, \quad B_0 = \frac{(V_{10} - V_{20})}{V_0} \quad \dots\dots\dots (1)$$

とおく. B_0 は組織異方性である.

圧延板が応力を受け, 厚さ X_3 方向が一つの主応力方向と一致している状態では, この方向に伝ばする横波の偏り方向と音速が応力によって変化する. このとき, 偏り方向の応力による回転角を ψ とし(図1), X_1, X_2 軸と角 ψ をなす方向に偏った横波の音速を V_1, V_2 とする. 平均音速 V と音響異方性 B を

$$V = \frac{(V_1 + V_2)}{2}, \quad B = \frac{(V_1 - V_2)}{V} \quad \dots\dots\dots (2)$$

とおけば, 横波の複屈折音弾性則が次式で表される.

$$\tan 2\psi = \frac{2C_A\sigma_{12}}{B_0 + C_A(\sigma_{11} - \sigma_{22})} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$B = [\{B_0 + C_A(\sigma_{11} - \sigma_{22})\}^2 + (2C_A\sigma_{12})^2]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで C_A は音弾性定数であり, $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12}$ は異方性主軸 X_1, X_2 に関する応力成分である.

式(3), (4)より, B_0, B, ψ を測定して垂直応力成分差とせん断応力成分を求める関係が次式となる.

$$\sigma_{11} - \sigma_{22} = \frac{1}{C_A}(B \cos 2\psi - B_0) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\sigma_{12} = \frac{1}{2C_A}B \sin 2\psi \quad \dots\dots\dots (6)$$

したがって, 異方性の主軸方向が既知の場合には, 応力状態で測定される B, ψ のみから σ_{12} が得られる.

2.2 横波の位相スペクトル 応力を受けた圧延板の $X_3=0$ 面に異方性主軸 X_1 と角 χ をなす方向(図1)の面内変位 $u_0(t)$ (t : 時間)を与え, これによって X_3 方向に伝ばする横波平面波の同じ方向(角 χ 方向)の変位を $u(t; z, \chi)$ とする. z は伝ば距離である. $u(t; z, \chi)$ は

Fig. 1 Important directions

$$u(t; z, \chi) = u_0\left(t - \frac{z}{V_1}\right)\cos^2\chi + u_0\left(t - \frac{z}{V_2}\right)\sin^2\chi \quad \dots\dots\dots (7)$$

で与えられるから, $u_0(t)$ と $u(t; z, \chi)$ のフーリエ変換を

$$u_0^*(\omega) = U_0(\omega)\exp\{i\Phi_0(\omega)\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$u^*(\omega; z, \chi) = U(\omega; z, \chi)\exp\{i\Phi(\omega; z, \chi)\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

と表せば次式が成り立つ(i : 虚数単位, ω : 角周波数).

$$U(\omega; z, \chi) = U_0(\omega)\{1 - \sin^2 2\chi \sin^2(bz\omega)\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\Phi(\omega; z, \chi) = \Phi_0(\omega) - az\omega + \tan^{-1}\{\tan(bz\omega)\cos 2\chi\} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここで

$$a = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{V_1} + \frac{1}{V_2}\right) = \frac{1}{V} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$b = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2}\right) = \frac{B}{2V_0} \quad \dots\dots\dots (13)$$

であり, これらの右辺では B の二次以上を省略した. $U_0(\omega), \Phi_0(\omega)$ が入射波 $u_0(t)$ の振幅スペクトル, 位相スペクトルであり, $U(\omega; z, \chi), \Phi(\omega; z, \chi)$ が $u(t; z, \chi)$ の振幅スペクトル, 位相スペクトルである.

2.3 位相スペクトル差 以後, 応力評価式(5), (6)に必要な B_0, B, ψ を求めるために位相スペクトルの利用を検討するが, これには入射振動方向 χ が $\pi/2$ だけ異なる二つの場合に対する式(11)の差

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}(\omega; z, \chi) &= \Phi(\omega; z, \chi) - \Phi\left(\omega; z, \chi + \frac{\pi}{2}\right) \\ &= 2 \tan^{-1}\{\tan(bz\omega)\cos 2\chi\} \quad \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

を用い, $\bar{\Phi}$ を χ での位相スペクトル差と呼ぶことにする. 図2に b, χ による $\bar{\Phi}$ の変化を示す. 反射法に

Fig. 2 Phase difference $\bar{\Phi}$

よる測定では、入射振動方向 χ がトランスデューサ振動方向となる。平均音速 $V=3150$ m/s の材料では、 $b=0.1 \times 10^{-6}$ s/m が約 2 m/s の音速差にあたる。 $\Phi-\omega$ 曲線は、 b とともにその傾きが増大し、 χ が零から増加するにつれて直線からうねりの大きな曲線に変化する。 χ と $\pi/2-\chi$ とでは正負が逆の曲線となり、 $\chi=\pi/2$ で $\chi=0$ と傾きが逆の直線になる。

3. 偏り方向と音速差の測定

3・1 実験方法 実験では、無負荷のアルミニウム合金 A 5052 (厚さ 12 mm, 平均音速 $V_0=3150$ m/s) を用いて、まず位相スペクトル差の関係(14)から得られる偏り方向と音速差について検討した。この実験のブロック線図を図 3 に示す。超音波横波の送受に用いたトランスデューサは共振振動数が 5 MHz でエレメント径 0.5 in の V155 (Panametrics) であり、接触媒質にはソニコート SH (日合アセチレン) を使用した。超音波用のパルサ MP215, レシーバ MR 101, ゲート MG701 (いずれも Metrotek) を使用して測定する反射波形をボックスカーインテグレータ BX-531 (NF 回路設計) に取り込んだ。

図 4 には、10 ns 間隔で 512 点のサンプリングを 64 回行った平均の波形を示す。このような波形データをパーソナルコンピュータで FFT 解析して位相スペクトル $-\pi < \Phi(\omega; z, \chi) < \pi$ を求め、 2π の不連続が繰返されているこの結果を連続な $\Phi(\omega; z, \chi)$ に修正した。

Fig. 3 Experimental setup

Fig. 4 Wave form of the 2nd echo

トランスデューサの回転角の測定には分解能 0.1° のロータリエンコーダを使用し、振動方向の表示にはこの読取り値 χ' を用いた。また偏り方向の表示にも $\chi'=0$ で定まる試料基準方向から偏り方向までの角度 $\phi'=\chi'-\chi$ を用いた。なお、測定ではこの試料基準方向が無負荷試料の圧延方向にほぼ一致するようにトランスデューサの支持を調整した。したがって、 $\phi'=\phi$ であり、また無負荷状態では $\chi'=\chi$ である。

3・2 測定結果 図 5 に、無負荷試料の同一点でトランスデューサを 5.0° 間隔で回転させ、反射回数 $n=2$ の反射波の位相スペクトル差を測定した結果を示した。図中の実線は、各 χ' の測定結果に対して、 b, χ を未定パラメータとした式(14)を最小二乗法であてはめた結果である。図 6 には、あてはめの結果の χ から求めた偏り方向 $\phi'=\chi'-\chi$ を示した。図 6 の横軸は $\chi'_0=\chi'-m\pi/2$ ($m=0, 1, 2, 3$) である。 χ' が $\pi/12+m\pi/2 \sim 5\pi/12+m\pi/2$ ($m=0, 1, 2, 3$) では、 ϕ' は $\pm 1^\circ$ 程度以内で落ち着いた値になっている。しかし

Fig. 5 Variations of phase difference with transducer direction

Fig. 6 Polarization direction obtained from phase difference

ながら $\chi' = m\pi/2$ 付近では χ' による位相スペクトル差の違いがわずかであり、得られた ψ' に大きなばらつきが生じている。図中の破線は平均値 $\psi' = -0.4^\circ$ を示しており、これが基準方向 $\chi' = 0$ と偏り方向である圧延方向とのずれにあたる。あてはめで得られた b から音速差 $V_1 - V_2$ を求めた結果も同様の傾向にあるが、ばらつきが小さくおさまる χ' の範囲は $\chi' = \pi/4 + m\pi/2$ 付近に限られている。このように、位相スペクトル差の関係(14)は偏り方向と音速差の測定に利用可能と考えられるが、トランスデューサ振動方向 χ' を任意にとった測定だけでは、今のところまだ結果の信頼性に問題がある。

図7には、振動方向 $\chi' + m\pi/2$ ($m=0, 1, 2, 3$) での位相スペクトル差を用いた結果(図5の四つのプロットに対応)の平均値と、振動方向 $-\chi' + m\pi/2$ での同様の平均値を示した。図中に●印で示したこれらの平均値をとれば、 $\chi(\equiv \chi')$ が

$$\frac{1}{12}\pi + \frac{m}{2}\pi < \chi < \frac{5}{12}\pi + \frac{m}{2}\pi \quad \dots\dots\dots (15)$$

の範囲では、音速差のばらつき幅が0.2 m/s以内になる。偏り方向についても同様の平均値をとれば、ばらつき幅は 1° 以内になる [式(15)は基準方向 $\chi' = 0$ が

Fig. 7 Averaged velocity difference

Fig. 8 Four point bending

偏り方向と異なる任意の場合にもあてはまる形である]。この状況は測定点を変えて繰返した測定においても同様であり、以後の応力測定ではこの平均操作を行って偏り方向と音速差を求めた。ただし、式(15)の範囲外の χ が得られた場合には、トランスデューサを適当な角だけ回転させてあらためて測定を行った。

4. 曲げ応力の測定

4.1 無負荷状態での測定結果 前述の測定に使用したアルミ合金の圧延板から図8の形状のVノッチを有する四点曲げ試験片を圧延方向と平行に切り出した。負荷状態での測定では、これと同一なビームとで支点のピンをはさみ、両端近くにボルトで2.3 kNの荷重を加えた。以後の測定位置の表示には図8の x, y 座標を用いる。トランスデューサ位置は測定中固定されており、試験片を手動のクロステーブルで移動させて多点測定を行った。

無負荷状態では、 x 方向に平行な3ラインと y 方向に平行な4ラインの交点で偏り方向と音速差(組織異方性)を測定した。偏り方向は $\pm 0.6^\circ$ 以内で圧延方向に一致した。音速差も図9に示すように $x=120$ mm, $y=10$ mm の点を除けばほぼ一定の値 19.54 ± 0.15 m/s になっている。外れが目立つ点は、これまでに試験片の負荷・除荷を繰返したために近傍が塑性変形している片側の支点に近い。したがってこの付近以外では、組織異方性として一定値

$$B_0 = 6.20 \times 10^{-3} \quad \dots\dots\dots (16)$$

を用いることができる。

4.2 負荷状態での測定結果 負荷状態では y 軸に平行な4ライン($x=0, 10, 20, 50$ mm)上を2.5 mm間隔で測定した。位相スペクトル差から求めた偏り方向を図10に、音速差を図11に示した。図中の破線は

Fig. 9 Initial velocity differences

無負荷時の値である。図10からわかるように、 $x=0$ mmと $x=50$ mmライン上の偏り方向は負荷によって変化していない。これは、 $x=0$ mmラインでは試験片の対称性によって、またノッチと支点の影響が小さい $x=50$ mmラインでは純曲げに近い状態が生ずるために、主応力方向が異方性主軸 x, y 方向に一致

Fig. 10 Polarization directions

Fig. 11 Velocity differences

Fig. 12 Acoustoelastic constant

していることを示している。 $x=10, 20$ mmラインではノッチによる二軸応力場によって偏り方向が回転しており、特に $x=10$ mmラインでは $+4.2^\circ \sim -8.4^\circ$ の回転が生じている。音速差はいずれのライン上でも負荷によって変化しており、ノッチの影響が小さい $x=50$ mmライン上では音速差の分布がほぼ直線的になっている。

4.3 音弾性定数と応力分布 上述のように図11の $x=50$ mmラインのデータは、純曲げによる応力 σ_{11} の分布を表している。図12ではこのデータの音速差を音響異方性 B に、座標 y をこの断面位置での曲げ応力 $\sigma_{11}=\sigma$ に書き換えた。図12の直線関係は音弾

Fig. 13 Normal stress differences

Fig. 14 Shear stresses

性則(4)で $\sigma_{11} = \sigma$, $\sigma_{22} = \sigma_{12} = 0$ とした単軸応力の音弾性則

$$B = B_0 + C_A \sigma \cdots \cdots (17)$$

を表しており、これより、組織異方性 $B_0 = 6.17 \times 10^{-3}$ と音弾性定数

$$C_A = -3.29 \times 10^{-5} [\text{MPa}] \cdots \cdots (18)$$

を得る。 B_0 は無負荷時の測定結果(16)と一致している。

図13, 14には、式(5), (6)に図10, 11の結果を用いて求めた垂直応力成分差 $\sigma_{11} - \sigma_{22}$ とせん断応力成分 σ_{12} を示した。いずれも実線で示したFEM解析の結果とよく一致しており、分布の曲り部に見られるFEM結果との違いは5 MPa 前後にとどまっている。

5. 考察と結論

今回は3・2節で述べたように、音速差と偏り方向の測定値として、各点でトランスデューサ方向を変化させて求めた8個のデータの平均値を用いた。8個のデータのばらつきは、偏り方向で $\pm 0.5^\circ$ 、音速差で ± 0.1 m/s であったが、カプラントを塗布し直す測定を繰返した結果から、今回の測定誤差を $\pm 1^\circ$ 以内、 ± 0.2 m/s 以内と判断した。これらの誤差は、負荷による偏り方向と音速差の変化 $-10 \sim +5^\circ$, $-5 \sim +5$ m/s に対して比較的大きいが、応力では ± 2 MPa 以内にあたる。また、一様として取扱った組織異方性のばらつきの影響も ± 2 MPa 以内と考えられるから、図13, 14でFEM結果との間に見られる5 MPa 前後のずれには、トランスデューサ径が大きいことによる場所的分解能の不足も影響していると思われる。

図14のせん断応力 σ_{12} は、負荷状態での測定値のみを式(6)に代入して得られたものであり、非破壊的な測定結果である。また、用いた曲げ試験片の組織異方性 B_0 が場所によらずほぼ一定であることがあらかじ

めわかっていれば、負荷状態で求めた図12の $B-y$ 直線から B_0 を求めることにより、垂直応力差 $\sigma_{11} - \sigma_{22}$ も非破壊的に測定される。したがってこの場合には、せん断差積分法⁽¹¹⁾を適用して各応力成分を非破壊的に求めることが可能となる。

本研究では、横波の位相スペクトルを用いて偏り方向と音速差を測定する音弾性法について検討した。その結果、トランスデューサの振動方向を任意の直交2方向とし、両方向での位相スペクトルの差を最小二乗近似する方法が有効であることを確かめた。ただし現状では、安定した結果を得るための平均操作に工夫が必要であり、また、最小二乗近似結果をみてトランスデューサ振動方向の適・不適〔式(15)]を判断しなければならないが、今後このような制限を緩和すれば、反射波の選択とトランスデューサ振動方向の設定に制限の少ない測定法が可能になると考えられる。

文 献

- (1) 福岡秀和・ほか4名編、音弾性、(1994)、1-152、日本非破壊検査協会。
- (2) 福岡秀和・戸田裕己・平尾雅彦、音弾性の基礎と応用、(1993)、1-105、オーム社。
- (3) 岩清水幸夫(河田幸三監修)、応力・ひずみ測定・評価技術、(1992)、第2章、第13節、303-331、総合技術センター。
- (4) 成田敏夫・石川達雄、日本金属学会誌、55-1 (1991)、67-71。
- (5) 荻博次・平尾雅彦、非破壊検査、45-7 (1996)、526-530。
- (6) 前田敬一・松本英治・柴田俊忍、日本非破壊検査協会音弾性材料評価研究会講演論文集、No. 1 (1993-10)、28-33。
- (7) Degtyar, A. D., Huang, W. and Rokhlin, S. I., *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 15 (1996), 1669-1676, Plenum.
- (8) 荒居善雄・土田栄一郎・金田充、日本非破壊検査協会音弾性研究会講演論文集、No. 7 (1991-10)、55-61。
- (9) Blinka, J. and Sachse, W., *Exp. Mech.*, 16 (1976), 448-452。
- (10) 村尾正夫・岩清水幸夫、材料、34-387 (1985)、1472-1477。
- (11) 谷口弘晃・岩清水幸夫、機論、63-610, A(1997)、123-128。