

# DPO法による音速測定の一例

## Velocity Measurement by Double Pulse Echo Overlap Technique

小堀 修身  
Osami KOBORI

### 1. はじめに

固体中を伝播する弾性波の音速を高精度で測定して内部応力や多結晶材料の集合組織の主因である弾性異方性や結晶の方位分布などを評価する研究が行われている。これには縦波や横波の他に表面SH波やレーリー波なども使用されている。伝播速度の測定にはシングア라운드法、パルスエコーオーバーラップ法、パルス重量法、位相干渉法と呼ばれる測定法が利用されている。筆者は主に伝播時間をnsec程度で測定するシングア라운드音速測定装置を利用して実験をおこなってきた。これは固体中に入射したパルスの反射波の1つを取り出して次の発信パルスのトリガー信号とする方法でパルスが同一閉回路をまわる。2つのパルスの受信周期を測定するとその差から伝播時間が高精度で得られる。これとは別にパルスエコーオーバーラップ法と呼ばれる、2つのパルスを重ね合わせて周波数の違いから音速を測定する手法がある。ここでは2つのパースト波を用いる。このうち一方は試料中を伝播し背面で反射する波、他方は試料表面で反射する波を取り出してオーバーラップさせる方法（Double Pulse Echo Overlap法（D.P.O.と略記）で音速を測定する。2つの波の位相差をなくするように周波数を調整するとき、周波数変化が音速と伝播距離の変化の和として得られる。この装置を借用して計測する機会を得たので、その実験結果を報告すると共にこの手法による音速測定の検討を行った。

ここでははじめにアルミ丸棒から垂直に切り出した試料について切断面の音速分布の測定結果をもとにして、音速と応力の関係（音弾性関係）を利用して棒の内部に発生している初期残留応力について調べた。次にこの計測法の応用として、音速（周波数）変化を板厚の変化としてとらえ、表面からでは見えない背面の形状評価をおこなった。材料の背面につけた深さ数ミリの小穴や5ミリのベアリングをおいた状態にして、板の表面からスキャンして各点の周波数変化を測定して、小穴やベアリングの形状が正確に評価されるかの検討を試みた。

### 2. 実験装置と測定原理

試料中を伝播する音波の位相 $\phi$ は周波数 $f$ 、時間 $t$ として $\phi = 2\pi ft$ で表されるのを、音速 $V$ と伝播距離 $d$ で表示すれば、

$$\phi = 2\pi ft = 2\pi f \frac{d}{V} \quad (1)$$

である。その対数微分は

$$\frac{\Delta\phi}{\phi} = \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta d}{d} - \frac{\Delta V}{V} \quad (2)$$

---

\* 平成11年10月原稿受理  
大阪産業大学工学部



実験にはトランスデューサを励振させるために長さや時間の可変な2つのトーンバースト波（A、Bとする）を使用する（Fig. 1）。水中で試料に向かって送信された波は試料表面で反射する波と伝播距離dの背面で反射する波があり、これがオシロスコープに観察される。2つの波A、Bの遅れ時間（delaytime）を調節するとAの試料背面反射波とBの試料前面反射波が同時にトランスデューサに戻ってくる。この2つの波をオーバーラップさせるが2つのうちAだけが試料中を通過してくる。従って式(1)、(2)による位相は試料厚さの2倍となる。

Fig. 1 は本実験に使用したシステムのブロック線図を示す。トランスデューサがスキャンによってその位置を変え試料中を伝わる波の位相が少しずれたとき、位相のロック回路によって周波数を変化させて位相の変化  $\Delta\phi$  をゼロに保持するようなシステムである。パルス発振時間遅れと長さが調整可能な2つのトーンバースト波を発生させて、これを2つの正弦波（A、B）に分割する（Power Splitter）。これと同期して作動する高速スイッチで設定時間間隔のパルスを作り出す。A、Bの合成出力はパルス間の幅と遅れ時間が可能である。

この波がトランスデューサを介して試料に向かって発信される。ブラウン管上で観察しながら2つの波をオーバーラップさせて、この信号をトランジスタスイッチを介してCゲートに取り出す。

オーバーラップするパルスは正弦波形でその変位は

$$A(t) = A \cos(\omega t + \phi_1), \quad B(t) = B \cos(\omega t + \phi_2) \cos \Omega t \quad (7)$$

である。ここにA、Bは振幅、 $\phi_1$ 、 $\phi_2$ は伝播による位相の遅れ、 $\Omega$ はBパルスの低周波信号である。オーバーラップする信号の2乗和は

$$\begin{aligned} O^2(t) &= [A(t) + B(t)]^2 \\ &= A^2 \cos^2(\omega t + \phi_1) + B^2 \cos^2(\omega t + \phi_2) \cos^2 \Omega t \\ &\quad + AB \cos \Omega t \{ \cos(\phi_1 - \phi_2) + \cos(2\omega t + \phi_1 + \phi_2) \} \end{aligned} \quad (8)$$

ロックイン増幅器は基準信号の成分を持つ  $O^2(t)$  の振幅と一致する。位相差を決定するのはこの増幅器の基準周波数の低周波マーカー信号であり、式(8)の第3項の

$$AB \cos(\phi_1 - \phi_2) \cos \Omega t \quad (9)$$

に相当する。この出力は  $\cos(\phi_1 - \phi_2)$  に比例するのでトランスデューサのスキャンによって位相差が生じる。位相差を生じさせないためには搬送周波数を変えてこの出力信号を0となるように保持する。そのためにロックイン増幅器の出力信号を積分し回路の出力信号でファンクションジェネレータの周波数変調部を駆動するか又はマニュアル操作を行う。こうして得られる搬送周波数は常に位相0となるロック回路を構成しその値はカウンタに表示される。これを“ゼロ周波数”と呼んでいる。

実際の音速Vを求めるには厚さの変化が既知（変化なし）であれば2つのゼロ周波数を考える。式(9)においてnとn+k番目のゼロ周波数を

$f_n$ 、 $f_{n+k}$ として位相差は

$$\begin{aligned} \Delta\phi_n &= (2n+1)\pi/2, \quad n=0, 2, 4, 6, 8, \\ \Delta\phi_{n+k} &= \{2(n+k)+1\}\pi/2, \quad k \neq n, \quad k=0, 2, 4, 6, 8, \end{aligned} \quad (10)$$

である。一方  $\Delta\phi_n, \Delta\phi_{n+k}$  は式(1)より

$$\Delta\phi_n = 2\pi f_n \frac{d}{V}, \quad \Delta\phi_{n+k} = 2\pi f_{n+k} \frac{d}{V} \quad (11)$$

式(11)を式(10)に代入し  $n$  を消去すると

$$V = \frac{2d}{k} (f_{n+k} - f_n) \quad (12)$$

さらに、隣り合う2つの周波数  $f_{n+k} - f_n$  を考えるときは  $k = 2$  である。したがって音速  $V$  に注目すると隣り合う2つの波の周波数の差  $f_{n+k} - f_n = \Delta f$  と厚さ  $h$  を伝播するときの距離  $d$  を考えると音速  $V$  は

$$V = 2h\Delta f \quad (13)$$

で得られる。

### 3. 丸棒の初期残留応力

丸棒の成型時に生じる残留応力の測定を試みた。丸棒の横断面上では半径方向応力  $\sigma_r$  と円周方向応力  $\sigma_\theta$  の2次元応力状態が仮定できる。音弾性則は式(4)から

$$\frac{\Delta V}{V_0} = C(\sigma_r + \sigma_\theta) \quad (14)$$

また弾性釣り合い式(15)も成り立つ

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (15)$$

さらに棒の半径  $R$  に沿って釣り合いの条件

$$\int_0^R \sigma_\theta dr = 0 \quad (16)$$

を考慮すれば2つの応力を決定できる。

供試材は直径40mmのアルミ丸棒から切り出した厚さ5mmの円板である。使用したトランスデューサーは直径3mm共振周波数12.5MHzの水浸用非焦点型（パナメトリクス）である。水中に位置決めされたトランスデューサーはステッピングモーターを使って2次元的に0.1mmの精度で移動できる。実験では水中で保持した円板の中心部付近20mm四方の各点を1mm毎にスキャンした。各点の周波数変化  $\Delta f/f$  をもととして同じ値の  $\Delta f/f$  を連ねてできあがる等高線をFig. 2に示した（図中の縦軸、横軸の数値はトランスデューサーのスキャン距離（mm）で円板の中心はこの図の中央にあたる）。中心部が粗く、外周部は密であるが期待したような同心円状にはなっていない。この図の水平軸上で中心から半径方向に外周付近までの各点の周波数変化の分布（Fig. 3）を用いて応力の分離を行った結果をFig. 4に示す。半径応力  $\sigma_r$  は小さく、円周応力  $\sigma_\theta$  は大きな変化を示す。

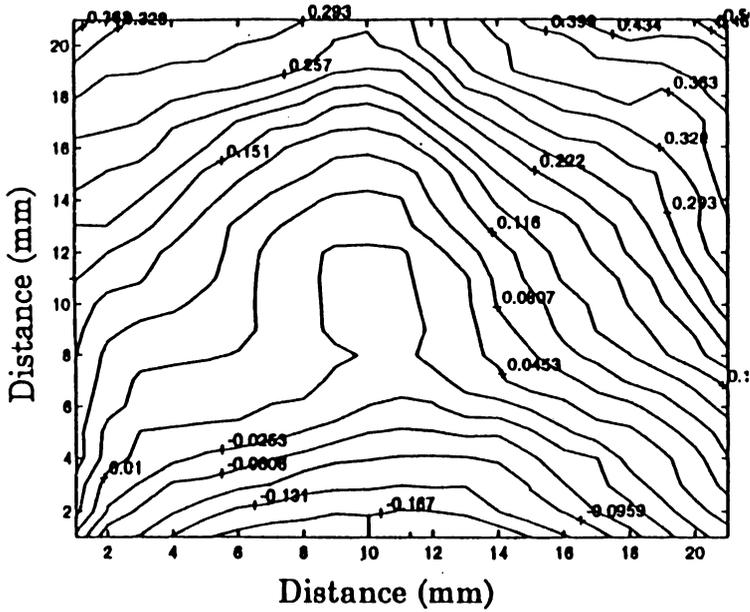


Fig. 2 周波数変化の等高線

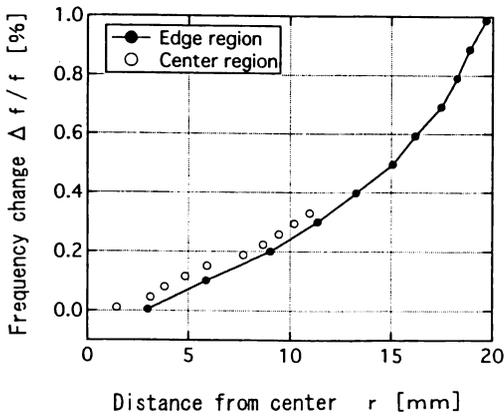


Fig. 3 X軸上の周波数変化

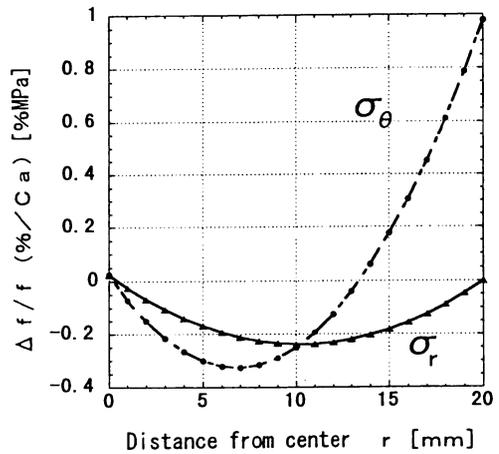


Fig. 4 応力の分離

#### 4. 形状の評価

トランスデューサーの2次元的なスキャン範囲から実験的に測定される周波数変化を厚さ(伝播距離)の変化と考えて背面の形状(状態)を立体的に評価しようとした。Fig. 5 (a)は直径3mm深さ2mmの小穴をもつアルミ板材について背面から20mm×20mmの範囲をスキャンした結果を示す。この図から小穴の位置が推定できるがサイズについては判定できない(図中の奥行きY方向の12mm以降は試料からはずれた部分である)。さらに穴のサ

イズを得るために中央部のみを測定した (Fig. 5 (b)) が図から判定される穴の直径は実際よりもおよそ 1 mm 程度大きい。また立体形状の例として背面に直径 5 mm のボールベアリングを接着してスキャンしたときの 3 次元表示 (Fig. 6 (a)) と X 軸方向からの 2 次元的变化 (Fig. 6 (b)) を示す。ただし Fig. 6 (b) はボールの Y 軸投影範囲をすべて X 軸上に描いたもので座標の原点は移動してある。ボールの球形が判定されず煙突状に見えており、基部の幅の部分がボールの直径 (5 mm) に相当している。

## 5. まとめ

Double Pulse Echo Overlap 法を利用したこの測定では音速変化率が周波数と音波の伝播距離変化率の和として得られる。測定対象の厚さが一定のときは音速変化が応力と容易に関係づけられる。またスキャン範囲を広くして間隔を細かくとることが可能で応力場全体の解析に有効となるが、任意点の音速値 (初期音速) はこの測定には含まれていない。この測定ではトランスデューサーと試料の距離 (水距離) を気にせずに 2 つのバースト波をオーバーラップさせることが容易である。この実験に利用したトランスデューサーは 12.5 MHz の非焦点型で、試料厚さ 2 mm 以上に対する実験ではオーバーラップも容易でいずれも良好な結果を得た。

円板の測定で得られた周波数変化  $\Delta f/f$  をもとに描いた同じ  $\Delta f/f$  の値を連ねてできあがる等高線は応力場の解析に有効と考えられる。このような等高線を描くと材料の弾塑性境界も判定にできるものと予想されるのでそのための基礎データを積み重ねている。またこの例のように円板の応力測定・分離には釣り合い式や対称性の考慮が有効であるが一般の場合には応力データのみのみでは未知数が多いので一義的には決められない。

応力測定とは別に、背面 (内部) に存在する溝 (小穴) や欠陥の位置の判定にこの測定法を利用したが直径 3 mm 程度のサイズを正確に判定できるかについてはさらに検討が必要である。

## 参 考 文 献

(1) G.S.Kino, D.M.Barnett, N.Grayelli, G.Herrmann, J.B.Hunter, D.B.Illic, G.C.Jonhson, R.B.King, M.P.Scott, J.C.Shyne and C.R.Steele: "Acoustic Measurements of Stress Field and Microstructure " Journal of Nondestructive Evaluation, Vol.1, No.1, 1980

(2) Richard O.Fowler "Ultrasonic Characterization of Plastic Deformation in Free Cutting Brass" The thesis of Master of Science.1995

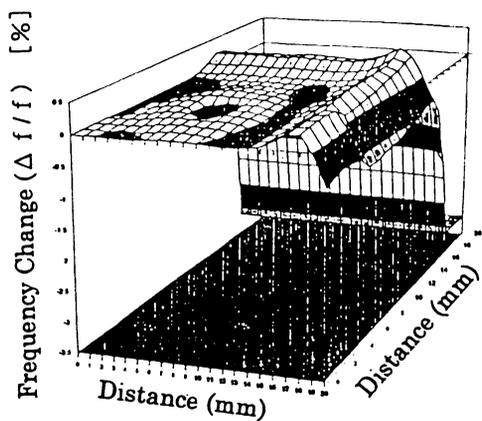


Fig.5(a) 小穴を有する試験片  
の背面からのスキャン

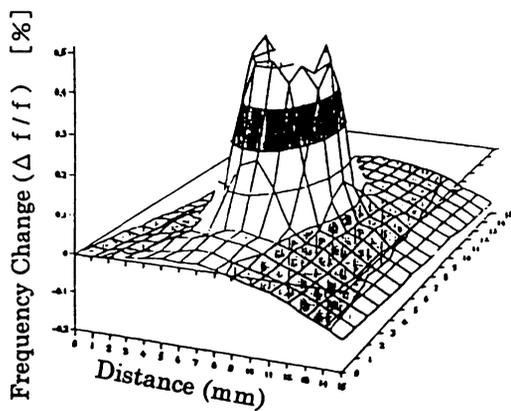


Fig.6(a) ベアリング部の背面  
からのスキャン

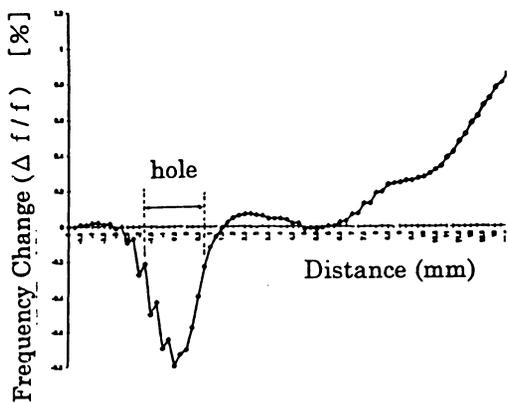


Fig.5(b) 穴の周辺 2次元表示

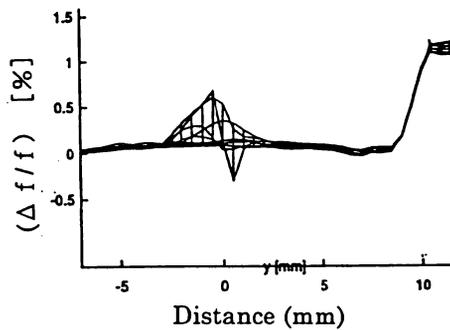


Fig.6(b) ベアリング部の  
2次元表示