

## 弾性波を利用する非破壊的応力測定に関する研究

### － 曲げ応力の評価 －

森 康 彦 (機械工学科)

#### 1. はじめに

経年構造部材には、使用中に経年的に変動する負荷応力に伴う残留応力や、実載荷応力などが重畳しており、構造物の安全性評価や寿命予測などを行うためには、構造物に作用している実応力を非破壊的に把握することが重要である。これに関して、音弾性と呼ばれる弾性波の音速が応力によって変化する現象を応用する測定法が、新しい有効な方法として注目されている。この方法による単純引張や圧縮応力の測定についてはかなり研究されているが、実際の構造物で重要な問題となる曲げ応力に関しては、あまり研究がなされていない。そこで、本研究では、高力アルミニウム合金をモデル材として、その試験片に曲げ荷重を荷した際に生じる曲げ応力と、それを除荷した後に残る残留応力の、透過弾性波と漏洩レーリー波の音弾性を利用した応力測定法について検討した。

#### 2. 応力測定の原理

##### 2.1 横波および縦波

本研究では曲げ応力を扱うわけであるが、音弾性の理論が確立されている2軸応力場について、応力測定の原理を示しておく。

いま、図1に示す2軸応力状態にある弾性体において、弾性波を厚さ方向に伝搬させるとき、主応力 $\sigma_1$ と $\sigma_2$ 方向に偏向した二つの横波の音速をそれぞれ $V_{S1}$ 、 $V_{S2}$ とすると、材料の直交異方性の軸と主応力方向が一致する場合には、主応力差と横波の音速の間に式(1)の関係が成り立ち、 $B$ を音響複屈折と呼んでいる。

$$B = \frac{V_{S1} - V_{S2}}{(V_{S1} + V_{S2})/2} = B_0 + C_A(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (1)$$

ただし、 $B_0 = \frac{V_{S10} - V_{S20}}{(V_{S10} + V_{S20})/2}$ 、 $V_{S10}$ 、 $V_{S20}$ ：無負荷時の横波音速、 $C_A$ ：複屈折音弾性定数

すなわち、音響複屈折は主応力差に比例し、二つの横波音速の変化を測定することにより、主応力差を知ることができる。なお、 $C_A$ は、材料に固有な定数である。

また、縦波の速度 $V_L$ と横波の平均速度の比と応力の関係は、 $C_R$ を材料に固有な定数として、

$$R = \frac{V_L}{(V_{S1} + V_{S2})/2} = R_0 + C_R(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2)$$

ただし、 $R_0 = \frac{V_{L0}}{(V_{S10} + V_{S20})/2}$ 、 $V_{L0}$ ：無負荷時の縦波音速、 $C_R$ ：音弾性定数

で与えられ、これを音速比 $R$ と呼び、この関係から主応力和が求められる。

したがって、式(1)と式(2)より、 $B_0$ と $R_0$ が分かっている材料では、主応力 $\sigma_1$ と $\sigma_2$ を分離して求めることができることになる。

##### 2.2 漏洩レーリー波

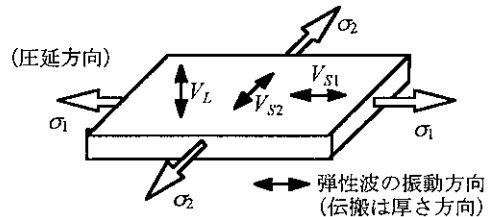


図1 2軸応力 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ と、それぞれの方向に偏向させた横波 $V_{S1}$ 、 $V_{S2}$ および縦波 $V_L$ の関係

平面で境された弾性体の表面を伝わる波であるレーリー波は、弾性体の表面が水などの液体と接している場合には、液体中にエネルギーの一部を漏洩しながら伝搬する。この液体中に漏洩したエネルギーによる弾性波(縦波)を漏洩レーリー波という。

図2に示すように、線収束型超音波センサの焦点が試料内部(座標 $-z$ )にあるとき、センサから放射された縦波の一部は、試料にレーリー波の臨界角で入射してレーリー波にモード変換し、水中にエネルギーの一部を漏洩しながら表面を伝搬する。その結果、水中に漏洩した縦波のうち、センサの曲率面に垂直なビームが漏洩レーリー波として受信される。また、経路 EOE を通る試料に垂直に入射・反射した波も表面反射波として受信される。これらの受信波形を図3に示す。センサのデフォーカス量 $z$ を変えると、その間の漏洩レーリー波の到達時間差 $\Delta t_R$ は $z$ に比例し、漏洩レーリー波の伝搬速度 $V_R$ は式(3)で求められる。ただし、 $V_W$ は水中を伝搬する縦波の音速である。

$$V_R = V_W \left[ 1 - \frac{1}{4} \frac{V_W^2}{(\Delta z / \Delta t_R)} \right]^{-1/2} \quad (3)$$

漏洩レーリー波と応力との関係を理論的に与えるには未だ至っていないが、その音速が応力によって変化することが実験的に認められるならば、レーリー波の1波長程度の浸透深さで材料の表面近傍に生じる応力を測定できることになる。

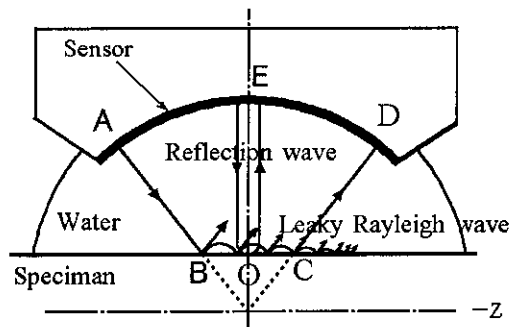


図2 弾性波のモード変換と漏洩レーリー波

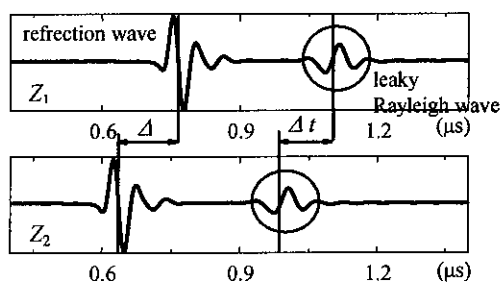


図3 典型的な受信信号波形

### 3. 試験の方法

#### 3.1 供試材

供試材は、実際の構造物には圧延材が多く用いられること、音弾性の基本的試験には音弾性定数が多いことが望ましいことから、試料には音弾性定数が多いことが知られている Al-Zn-Mg 系合金 (JIS 7075) の圧延材とした。厚さ 8mm の圧延板から、幅を 40mm、圧延方向に沿って長さを 200mm にとった試験片を機械加工し、表面を #2000 の研磨紙で仕上げた後、加工による残留応力を除去するため、また、この材料の所定の機械的性質を得るために、743K×1h・水冷、393K×24h・空冷の熱処理を施した。

#### 3.2 曲げ試験と音速測定

曲げ試験は、音速測定面を一様な応力状態にするため、荷重点間距離 40mm、支点間距離 120mm の四点曲げ方式とした。

横波および縦波の超音波センサは、曲げ試験の際に引張応力を受ける側の試験片表面で、一様なひずみが得られる場所に、接触媒質(日合アセチレン社製ソニーコート-SH)を介して圧着した。横波の偏向方向は、試験片の圧延方向と、それに直角な方向の二通りとした。これらの横波と縦波の音速測定には、シングア라운드式音速測定装置(超音波工業社製 UVM-2型)を用いた。

使用した漏洩レーリー波測定装置は、PVDF 線収束型超音波センサ、センサ 4 軸移動台、パルサールシーバ (Panametrics 5900)、デジタルオシロスコープ (Tektronix TDS3052)、パーソナルコンピュータで構成される。センサは中心周波数 29.7MHz、有効径 2×7mm、焦点距離 5.0mm である。

曲げ試験における音速測定は、予め試験しておいた試験片ゲージ部の応力-ひずみ曲線の直線領域内で、荷重を段階的に負荷していく過程で次のように行った。所定の荷重増分ごとに、荷重を保持した状態で縦波と横波の音速を測定し、その後、荷重を取り除いた状態で縦波と横波の音速をしてから、試験片を試験機から外して漏洩レーリー波の測定を行った。また、横波と縦波の音速の計算に必要な弾性波の伝搬経路長、すなわち、試験片の厚さは、音速を測定する都度、1/1000mm の精度のマイクロメータで測定した。

### 3.3 音速の温度依存性

音速は温度依存性が大きいので、その温度補正曲線を予め求めておいた。その結果を表1に20°Cを基準としたときの音速変化率で示す。添字の  $L$  は縦波、 $S$  は横波、 $R$  は漏洩レーリー波を表し、それぞれ数字の1と2は偏向方向を表す。そこで以下の試験結果は、各モードの音速を20°Cの場合に換算した値で示す。

表1 各モードの20°C温度補正係数  
(適用温度範囲: 10°C~23°C)

mode	conversion factor (m/s/°C)
$V_L$	-2.5357
$V_{S1}$	-1.6038
$V_{S2}$	-1.1965
$V_{R1}$	-1.0100
$V_{R2}$	-1.0100

## 4. 試験の結果と考察

### 4.1 透過弾性波

図4に、試験片に曲げ荷重を負荷したままの状態では測定した、試験片の圧延方向に偏向させた横波の音速  $V_{S1}$ 、それと垂直な方向に偏向させた横波の音速  $V_{S2}$  と、縦波の音速  $V_L$  の、曲げ応力に対する変化を示す。ここで、図中の三つのシンボルマークは、3つの試験片について試験した結果のプロットである。

この結果、縦波および横波の各弾性波モードの音速は、曲げ応力との間に相関があり、いずれも図中に示した最小2乗近似直線によく整理される曲げ応力による音弾性効果が認められることが明らかである。また、偏向方向が互いに垂直な2つの横波の音速は異なり、材料の組織異方性による音響復屈折の効果も認められる。なお、図4の結果において、三つの試験片の間で音速が異なるのは、超音波センサの試験片への取り付けに際して、接触媒質によるセンサと試料の接触状態、例えば接触媒質の厚みや、試料表面の平行度の差によるものと思われる。しかし、三つの試験片の音速変化の応力に対する勾配は、ほぼ同じであるといえる。そこで、このように各弾性波モードの音速と応力との関係が直線で与えられたので、式(1)と式(2)に準じて音響復屈折と音速比を求めてみたところ、それらと曲げ応力との関係は、それぞれ  $B_b$  と  $R_b$  と表わすとして、

$$B_b = 7.08 \times 10^{-3} + (-4.54 \times 10^{-6}) \sigma \quad (4)$$

$$R_b = 2.03 \times 10^{-3} + (5.26 \times 10^{-5}) \sigma \quad (5)$$

と整理できた。ただし、 $\sigma$ は曲げ試験の際にロードセルで計測される曲げ応力である。

この結果は、すなわち、試験片の板厚方向に引張から圧縮に連続的に変化する応力分布がある曲げの応力場を、図1の2軸応力状態で単純には表すことはできないが、ロードセルで計測されたグロスな曲げ応力に対し、この場合の音響復屈折と音速比は、式(1)と式(2)と同じ形式の関係で与えられることを示している。そして、必要なモードの音速を測定することにより、式(4)あるいは式(5)の関係から曲げ応力を評価することができることになる。式(4)あるいは式(5)を用いることの利点は、式(1)と式(2)から分るように、音響復屈折と音速比は、いずれも弾性波の伝搬時間だけの計測から与えられるので、試料の厚さを知る必要がなく、高い精度が得られることである。

次に、図5は、試験片に所定の曲げ応力を予負荷応力として負荷した後、それを取り除いて試験機の荷重を0にした状態で測定した横波と縦波の各モードの音速を、予負荷曲げ応力に対する変化として、先の図4と同様に整理した結果である。この結果、各モードの音速は 1/100 m/s オーダーという小さな値の範囲で

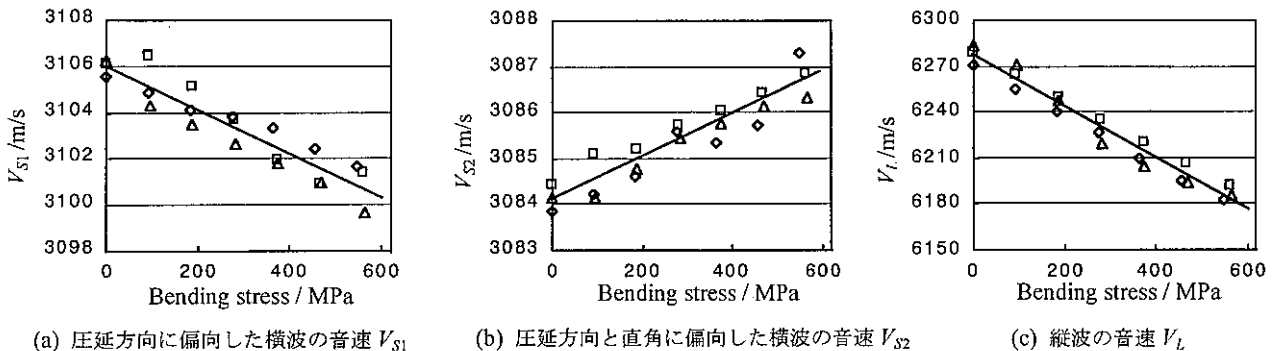


図4 試験片に荷重を負荷したままで測定した透過弾性波の音速と負荷応力の関係

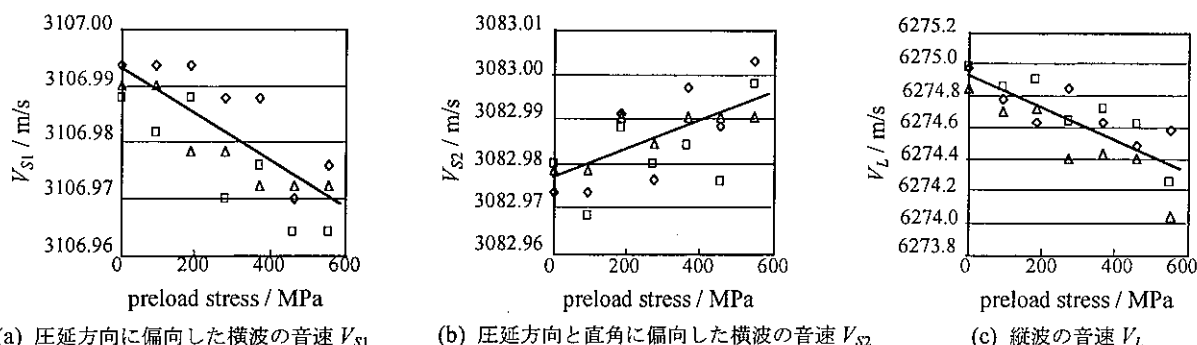


図5 荷重を取り除いて測定した透過弾性波の音速と予負荷応力の関係

らつきがあるが、予負荷曲げ応力との間に相関があることは明らかであり、また、横波の音速  $V_{S1}$  と  $V_{S2}$  との間に、音響復屈折も明瞭に観られる。これらの音速が予負荷応力に対して変化する事実は、試験片に加えた予負荷曲げ応力の一部が、試験片に残留した残留応力による音弾性効果に他ならないといえる。

そこで、この残留応力を式(4)と式(5)の関係から求め、これを予負荷応力に対して整理して図6に示す。この結果、試験した予負荷曲げ応力の範囲で、音響復屈折  $B_b$  から求めた残留応力(図a)は予負荷応力の約0.5%、また、音速比  $R_b$  によるその値(図b)は約0.6%と評価された。残留応力を他の方法で測定していないが、一般論として、残留応力をほぼ妥当に評価しているものと考えられる。

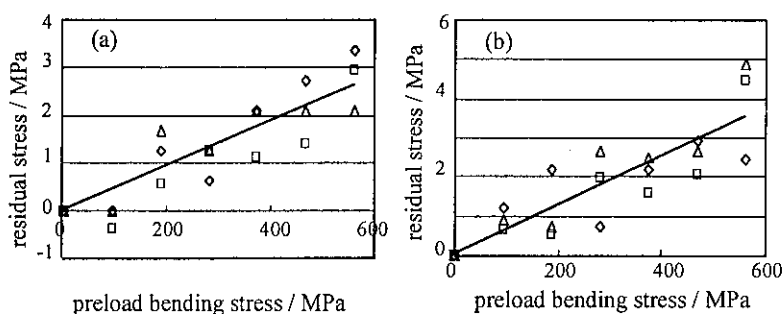


図6 音響復屈折(a)と音速比(b)から求めた残留応力と予負荷応力の関係

#### 4.2 漏洩レーリー波

試験片に所定の応力を負荷した後、この応力を取り除いた試験片の裏表で漏洩レーリー波の音速を測定した。伝搬方向が試験片の圧延方向の音速を  $V_{R1}$ 、それと直角方向の音速を  $V_{R2}$  として、予負荷応力に対する音速の変化を図7(a), (b)に示す。図中、予負荷応力の正の側で試験片の引張応力が作用する面、負の側で圧縮応力が作用する面の音速を表わしている。この結果、 $V_{R1}$ 、 $V_{R2}$  ともに予負荷曲げ応力が増加すると、引張応力が作用する面の音速は低下し、圧縮応力が作用する面の音速は増加することが明らかである。音速が直線的に変化する範囲の上限となる予負荷応力の約500MPaは、ほぼ試験片の降伏点に相当する。この音速が変化する事実は、予負荷曲げ応力によって、試験片表面近傍に圧縮あるいは引張の残留応力が生じ、それによる音弾性効果によることに他ならないといえる。また、圧延方向に伝搬するレーリー波の音速  $V_{R1}$ の方が、それと垂直方向の伝搬速度  $V_{R2}$ よりも速く、音響復屈折が生じている。漏洩レーリー波の音弾性効果を理論的に示すまでは至っていないが、漏洩レーリー波による応力測定の有効性が実験的に示されたといえる。

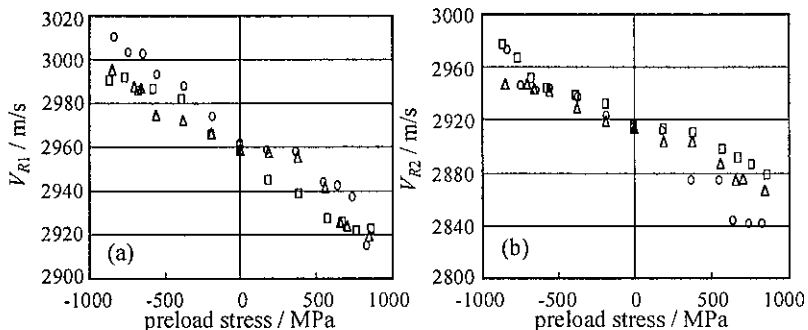


図7 漏洩レーリー波の偏向方向の異なる二つの音速と予負荷応力の関係

#### 5. まとめ

透過弾性波の各モードの伝搬速度は、曲げ試験において荷重検出器による測定から得られる曲げ応力と線形の関係にあり、これによってグロスな曲げ応力を評価できる。漏洩レーリー波の伝搬速度は、試験片表面の引張あるいは圧縮残留応力に依存し、表面残留応力の評価が可能である。