

# プロジェクト 1

## 弾性波を用いた樹脂板の環境劣化の評価

森 康彦、小幡義彦（機械工学科）

### 1. まえがき

経年材料における問題、すなわち劣化損傷は、環境の化学的あるいは物理的作用により、時間を経て材料としての品質に低下をきたす「材質劣化」と、その材質劣化あるいは材料の置かれた環境と応力のもとで経年的に誘発される割れなどの「劣化による損傷」をあげることができる。この二つは必ずしも明瞭に区別しえないが、いずれにしても割れを誘発あるいは加速する現象といえる。

本研究では、複合材料の樹脂にも使用されるフェノール樹脂、アクリル樹脂、ポリエステル樹脂を対象にして、促進暴露試験方法を用いて環境負荷を付与した試料について、曲げ試験を行うとともに、その材質劣化の超音波およびAE法による弾性波を用いた非破壊的な評価法を検討した。一方、劣化による損傷に関しては、靱性の評価が重要である。き裂に対する材料の抵抗は弾塑性破壊靱性で表わされるが、試験法は複数の試験片が必要となるなど複雑である。そこで本研究では、AE法を用いた単一試験片による弾塑性破壊靱性の決定法を、検討した。

### 2. 実験方法

#### 2.1 供試材と暴露試験

供試材は、新神戸電機製フェノール樹脂（PL-PEM）と、三菱樹脂製アクリル樹脂およびポリエステル樹脂（PET-G）のそれぞれ厚さ3mmないし4mmの板材である。なお、フェノール樹脂板とポリエステル樹脂板は、紙基材の積層板である。

これを、150mm×70mmの板に裁断して暴露試験に供した。促進暴露試験は、屋外暴露試験に近い条件を再現するため、次の三つの工程から成る複合サイクル促進暴露試験を行った。すなわち、

① キセノンランプ式耐候性試験：100時間

（紫外線量 0.3 MJ/m<sup>2</sup>、水噴霧量 2.4 l）

② 塩水噴霧試験：24時間

（塩水濃度 5%、噴霧量 63 ml）

③ 恒温恒湿乾燥：44時間

（温度 23℃、湿度 50%）

以上の合計 168時間（1週間）の工程を1サイクルとして、0（未暴露）、4、8、12、16の各サイクルごとに供試板をサンプリングした。なお、暴露1サイクルは、自然環境の2.4ヶ月に相当する。

#### 2.2 暴露試験片の超音波特性試験

暴露したサンプリング板について、試料の厚さ方向に伝搬するそれぞれ 2.25MHz の横波と縦波の超音波の音速をシングア라운드式音速測定装置を用いて測定した。なお、音速は、試料表面の3箇所測定し、また、測定時の温度を一定にするため水温 20℃の水槽の中で行った。

#### 2.3 曲げ試験とAE計測

サンプリング板から、長さ 140mm、幅 10mm、厚さ 4mm（または 3mm）の平板試験片を加工した。曲げ試験は、Fig. 1 に示すように荷重点間距離 36mm、支点間距離 108mm の四点曲げ荷重試験とし、負荷速度 0.5mm/min、室温・大気中で試験片が破壊するまで行った。試験ではひずみゲージにより、応力-ひずみ曲線を記録した。AE計測は、試験片の左右端面にAEセンサ

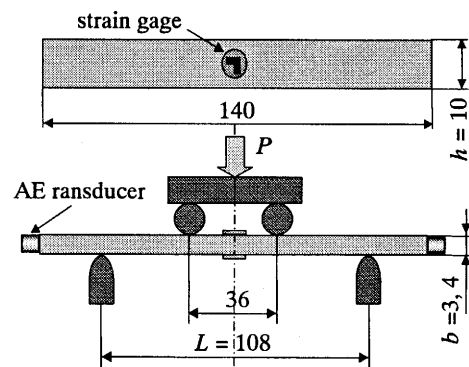


Fig. 1 Experimental setup for bending test.

を接着して検出した。

## 2.4 破壊靱性試験とAE計測

サンプリング板から、長さ 40mm、高さ( $W$ ) 10mm、厚さ( $B$ ) 4mm (または 3mm) の平板に加工した。これに、深さ 4.5mm の切欠きを付けた片側切欠き試験片とし、さらに、切欠き底に鋭いナイフの刃先で予き裂を導入した。なお、暴露試験で環境暴露を受けた面は、試験片の一方の表面だけである。

破壊靱性試験は、荷重点間距離 10mm、支点間距離 30mm の四点曲げ荷重方式として、負荷速度 0.5mm/min、室温・大気中で行った。AE計測は、試験片の左右両側面に AE センサを接着して検出した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 曲げ試験

荷重( $P$ )と試験片のたわみ( $\delta$ )の関係は、Fig.2 に一例を示すが、試験した全ての樹脂試験片で、たわみの増加に対して荷重は単調に増加する曲線を示し、最大荷重で試験片は破断した。なお、たわみ  $\delta$  は、曲げ試験においてひずみゲージで計測されたひずみ  $\varepsilon$  から、次式により求めた。

$$\delta = \frac{23}{108} \cdot \frac{\varepsilon L^2}{h} \quad (1)$$

ここで  $L$  と  $h$  は試験片の幅と支点間距離である (Fig.1 参照)。

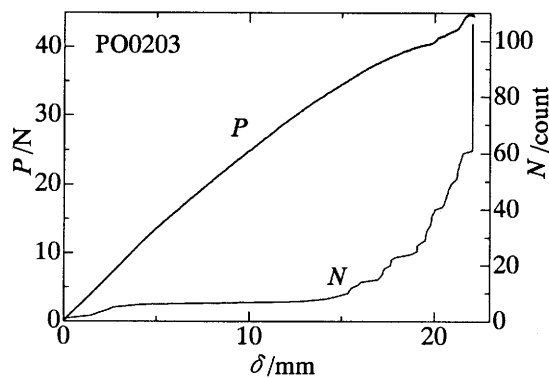


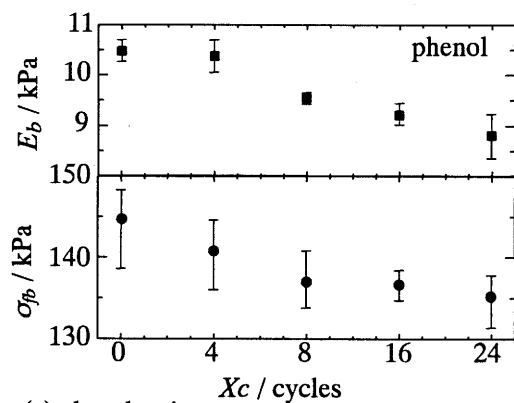
Fig.2 Plots of bending load,  $P$ , and AE event count,  $N$ , as a function of deflection,  $\delta$ . (polyester,  $X_c=16$ )

Fig.3 に、曲げ強さ  $\sigma_B$  と曲げ弾性率  $E_b$  の暴露時間  $X_c$  による変化を試験した 3 つの樹脂について、それぞれ示す。なおここで、曲げ弾性率  $E_b$  は、各暴露試験片の  $P-\delta$  線図 (Fig.2) の初

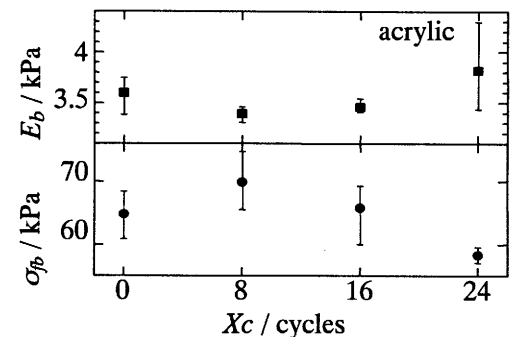
期勾配から、次式の関係 (JIS K 7055: ガラス繊維強化プラスチックの曲げ試験方法) を用いて求めている。

$$E_b = \frac{23}{108} \cdot \frac{L^3}{bh^3} \cdot \frac{P}{\delta} \quad (2)$$

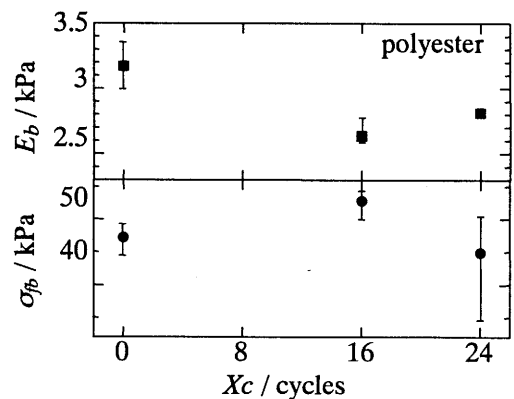
フェノール樹脂の曲げ強さは、暴露時間の経過とともに低下するのが見られる。アクリルおよびポリエステル樹脂では、暴露によって一旦曲げ強さが増すようであるが、全体的には暴露によって曲げ強さは低下する傾向があるといえる。暴露による曲げ強さの低下の度合いは、フェノール樹脂では、未暴露に比べて暴露 24 サイ



(a) phenol resin



(b) acrylic resin

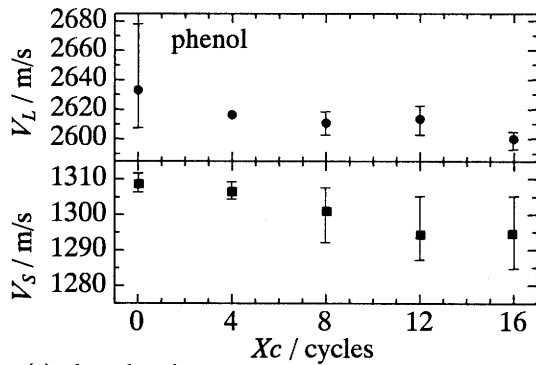


(c) polyester resin

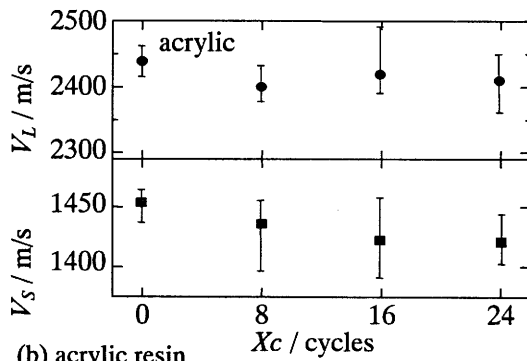
Fig.3 Plots of bending strength,  $\sigma_{fb}$ , and flexural modulus,  $E_b$ , as a function of exposure cycles,  $X_c$ .

クルでは曲げ強さが約 15MPa 低下していて、試験した他の樹脂よりも暴露の影響が大きい。なお、試料表面を走査型レーザー顕微鏡で観察した結果、フェノール樹脂で 4 サイクル、ポリエステル樹脂では 16 サイクルの暴露で、基材である紙の繊維が表面に露出しているのが観察された。

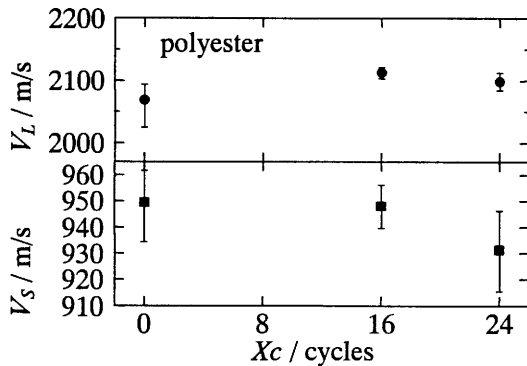
次に、Fig. 3 において、曲げ弾性率  $E_b$  の変化をみると、フェノール樹脂では、暴露による曲げ強さの低下とともに、曲げ弾性率も低下していく。一方、アクリルとポリエステル樹脂の場合では、原因はまだ不明であるが、曲げ強さが



(a) phenol resin



(b) acrylic resin



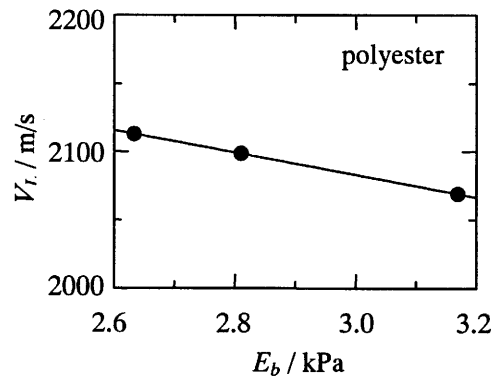
(c) polyester resin

Fig.4 Plots of the velocity of elastic waves as a function of exposure cycles.  $V_L$  and  $V_S$  denotes the velocity of longitudinal and transverse wave, respectively.

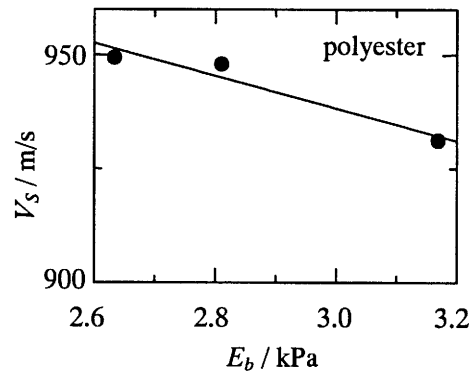
低下すると曲げ弾性率が高くなるという結果がみられる。

次に、弾性波の音速の測定結果について述べる。Fig. 4 に、20℃で測定した弾性波の縦波速度  $V_L$ 、横波速度  $V_S$ と暴露時間  $X_c$ の関係を整理した結果を、試験した3つの樹脂について示す。全体的傾向として縦波、横波速度とも暴露時間が経過するにつれて、低下していく。

このように、弾性波の速度が暴露時間に依存する結果が得られたので、曲げ弾性率との関係を弾性波の速度を整理してみた。Fig. 5 にポリエステル樹脂の結果を示したが、両者の関係は直線によく近似できる。他の樹脂についても、これと同様に曲げ弾性率と弾性波の速度との間にはよい相関関係が得られ、Table 1 に示される関係がそれぞれの樹脂について得られた。表中の  $R$  は直線近似における相関係数である。この結果、アクリル樹脂の横波速度については相関が低いですが、他については、高い相関係数が得られ、弾性波の速度の測定から曲げ弾性率を十分に非破壊的に評価できるといえる。



(a) longitudinal wave



(b) transverse wave

Fig.5 Relation between flexural modulus and velocity of elastic wave.

Table 1 Relation between elastic wave velocity and flexural modulus.

phenol	$V_L = 11.835E_b + 2506.4$	$(R=0.86)$
	$V_S = 7.055 E_b + 1235.3$	$(R=0.94)$
acrylic	$V_L = 258.02E_b + 1527.1$	$(R=0.94)$
	$V_S = 87.56 E_b + 1138.6$	$(R=0.21)$
polyester	$V_L = -83.33 E_b + 2333.2$	$(R=1.0)$
	$V_S = -35.19 E_b + 1044.1$	$(R=0.97)$

次に、Fig. 6 は、曲げ試験で計測された全 AE 事象数  $N$  と暴露時間  $Xc$  の関係を示した一例である。AE 事象数は暴露時間が経過するにつれて減少する傾向が見られる。また、曲げ試験において AE の発生開始は、暴露時間が経過するにつれて試験片の破壊に近くなることが観察された。これらの結果は、暴露によって材質的に脆

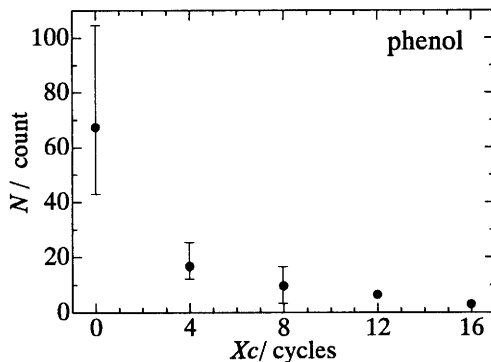


Fig.6 Plot of total AE event count detected during bending test as a function of exposure cycles.

化が進行していることを示唆している。

### 3.2 破壊靱性試験

弾塑性破壊靱性  $J_{in}$  を AE で決定するために、破壊靱性試験の AE 計測を行ったのであるが、アクリルとポリエステル樹脂では  $J_{in}$  を評価するに十分な AE が観察できなかった。そこで、フェノール樹脂の結果だけをここに示す。

Fig.7 は、累積 AE 事象数の見かけの  $J$  積分  $J_{app}$  に対する変化を示したものである。ここで、見かけの  $J$  積分は、 $J$  積分の計算における長さ  $a$  のき裂進展に要したエネルギー（荷重-き裂開口変位曲線下の面積）を、荷重-時間曲線下の面積で代えた値である。

き裂進展開始に相当する  $J_{in}$  の AE からの決定は、Fig.7 に示すように、AE 累積事象数の変化の 2 直線近似における直線 a の外挿点とした。

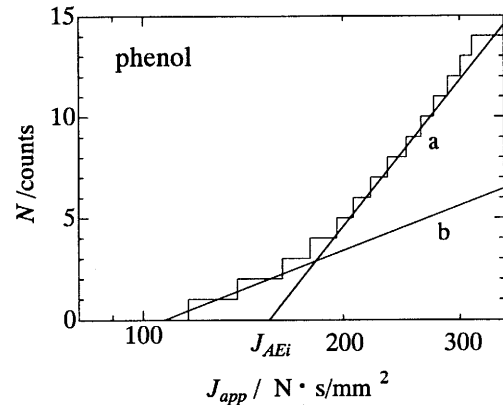


Fig.7 Relation between AE activity and  $J$ -integral (apparent),  $J_{app}$ .

こうして求めた  $J_{AEi}$  を暴露サイクルに対して整理した結果を、Fig.8 に示す。この結果は、曲げ強さの変化を示した Fig. 3(a) とよく対応しており、曲げ強度が低下すると、 $J_{AEi}$  は高くなる。

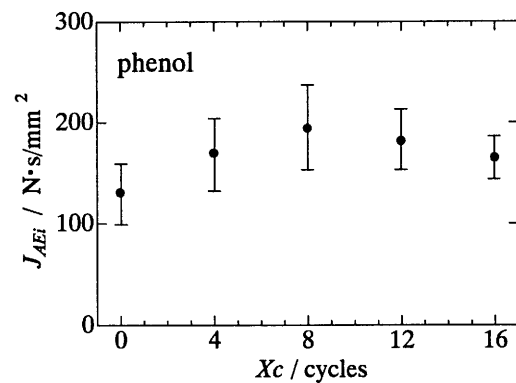


Fig.8 Plot of apparent  $J$ -integral,  $J_{AEi}$ , estimated by AE activity as a function of exposure cycles.

### 4. まとめ

以上の実験事実をまとめると、以下のように結論できる。

- (1) 材質劣化とその評価について： 暴露時間が増すと、曲げ強さ、曲げ弾性率が低下する。これに対応して、弾性波の速度、AE 発生数も減少する。また、弾性波の音速測定から、環境負荷の付与による曲げ強さと曲げ弾性率の非破壊的評価が可能である。
- (2) 劣化による損傷とその評価について： 片方の表面だけが暴露された試験片であったが、弾塑性破壊靱性には暴露の影響が現れ、AE 計測によって進展に対する材料の抵抗を評価できるといえる。弾塑性破壊靱性の単一試験法としての  $J_{in}$  の決定に AE 法の有効性を示すことができた。