

弾性波による材質評価に関する研究(その1)

— フェノール樹脂の耐候性強度の評価 —

森 康彦 (機械工学科)、小幡義彦 (機械工学科)

1. はじめに

機械や構造物という姿で材料を扱うときには、安全性ということが基本的に重要であり、種々の使用環境下における材料としての信頼性や耐久性を把握しておく必要がある。この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¹⁾。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。劣化損傷の評価には、材料試験など機械的な破壊試験が行われるのが一般であるが、近年、非破壊的な評価法の確立に期待がよせられている。

そこで、本研究では、フェノール樹脂の耐候性強度の評価を対象にとりあげ、弾性波とAE法による非破壊的な評価法を検討するものである。

ここで、フェノール樹脂は、近年、不飽和ポリエステルFRPと同様な各種成形方法により、大型、複雑形状のFRP製品の製造が可能になり、不飽和ポリエステルFRPでは達成できない耐熱性や難燃性などを要求される各種構造物への展開が期待されている材料である²⁾。

本研究では、経年的な実際の屋外暴露の条件を比較的短期間で模擬することが可能な促進暴露試験方法³⁾を用い、フェノール樹脂に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

要となり、また、試験結果の判定基準が厳密であるなど、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⁴⁾を、検討した。

2. 実験方法

2.1 供試材と暴露試験

供試材は、市販のフェノール樹脂(PL-PEM、新神戸電機㈱製)の厚さ4mmの板材である。これを、縦150mm、横70mmの板に裁断して暴露試験に供した。促進暴露試験は、実際の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0.3MJ/m²、水噴霧量2.4l)、②塩水噴霧試験:24時間(塩水濃度5%、塩水噴霧量63ml)、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⁵⁾。

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と、伝搬距離による減衰を測定した。超音波探触子と試料表面との密着には専用接触媒体を用い、音速測定装置には、シングアラウンド式音速測定装置を用いた。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

暴露したサンプリング板から、長さ140mm、幅10mm、厚さ4mmの平板試験片を加工し、曲げ試験

に供した。曲げ試験は、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。試験片の荷重点側表面と、暴露面であるその裏面の中心に、ひずみゲージを接着し、応力-ひずみ曲線を記録した。

AE 計測は、AE 発生源位置の推定を行うために、試験片の左右端面に AE センサを接着して検出した。検出された AE 信号は、発生時刻とその時の荷重レベル、ひずみとともに記録した。

2.4 破壊靱性試験と AE 計測

暴露したサンプリング板から、長さ 40mm、高さ (W)10mm、厚さ 4mm の平板に加工した。これに、Fig.1 に示すように、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て、破壊靱性試験に供した。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、AE 発生源位置の推定を行うために、Fig.1 に示す試験片の左右両側面に AE センサを接着して検出した。

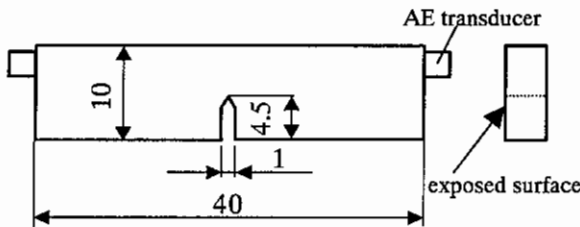


Fig.1 Shape and size of specimen used.

3. 実験結果と考察

3.1 曲げ試験

Fig.2 に、未暴露試験片の荷重 P とたわみ δ の関係を示す。ここで、たわみはひずみゲージによって計測したひずみから、式(1)により求めた。他の暴露した試験片の P - δ 線図も同様の傾向を示した。

$$d = \frac{23}{108} \cdot \frac{e l^2}{h} \quad (1)$$

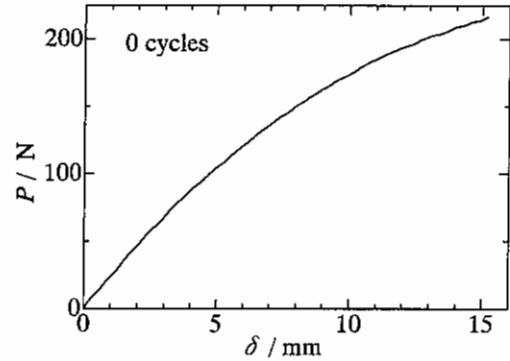


Fig.2 Relation between bending load and deflection.

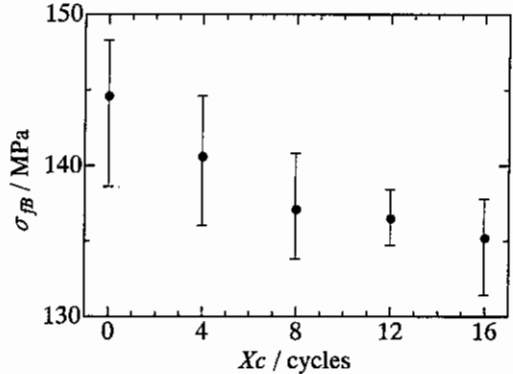


Fig.3 Relation between bending strength and exposure cycles.

Fig.3 に、曲げ強さ σ_B と暴露時間 X_c の関係を示す。曲げ強さは、暴露時間が経過するにつれて低下が見られ、未暴露に比べて 16 サイクルは曲げ強さが約 14MPa 低下している。

次に、各暴露試験片の P - δ 線図の初期勾配から曲げ弾性率 E_b を求め、これを暴露時間 X_c との関係で整理した結果を、Fig.4 に示す。ここで、曲げ弾性率の計算には式(2)を用いた。

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

この結果、曲げ弾性率は、暴露時間が経過するに

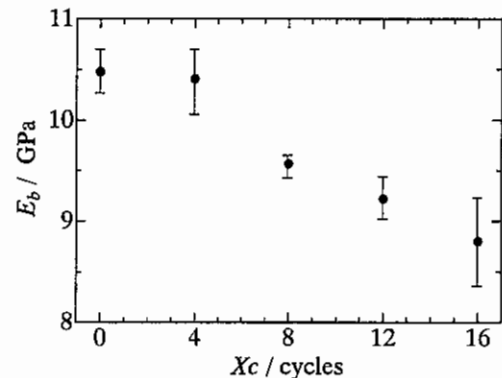


Fig.4 Relation between flexural modulus and exposure cycles.

つれて低下する傾向が見られる。

Fig.5 に、20°C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 Xc の関係を示す。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。そして、この縦波音速から曲げ弾性率を推定した結果を Fig.6 に示したが、Fig.4 とかなり良い対応が得られている。

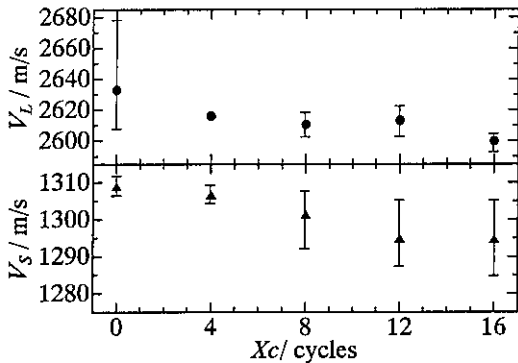


Fig.5 Relation between velocity of elastic wave and exposure cycles.

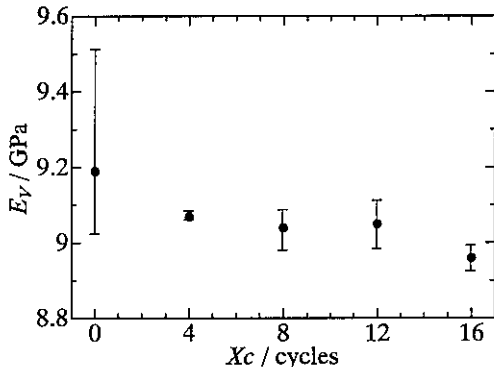


Fig.6 Relation between flexural modulus estimated by elastic wave and exposure cycles.

Fig.7 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。なお、曲げ試験において AE の発生開始は、暴露時

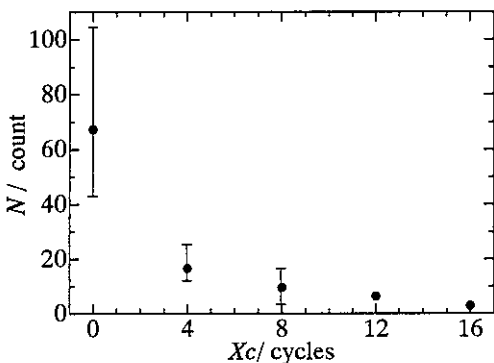


Fig.7 Relation between AE count and exposure cycles.

間を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。

3.2 破壊靱性試験

Fig.8 に、時間 t に対する荷重 P と AE 事象数 N の関係として、暴露 16 サイクルについて示す。AE 事象は荷重点間距離内のき裂経路上の AE を取り出してある。荷重の試験時間に対する変化は単調に増加し、最大荷重で試験片は破断した。それに伴い発生する AE は Fig.8 のような変化をいずれも示したが、暴露サイクルが大きくなるほど、AE の発生開始は試験片の破壊近くなる傾向が見られた。

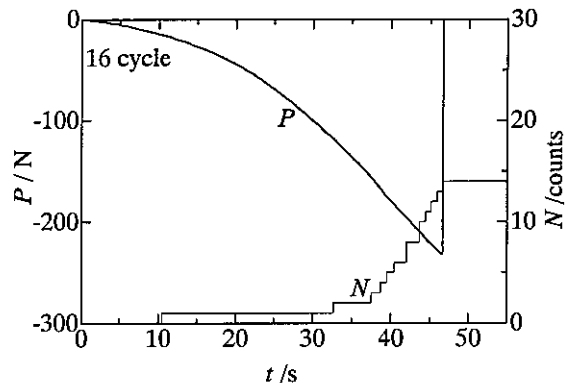


Fig.8 AE activity and load as a function of elapsed time.

弾塑性破壊靱性 J 積分は、式(3)で与えられる。

$$J = \frac{A}{Bb} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (3)$$

ここで、 A は荷重-き裂開口変位曲線下の面積である。本実験では、き裂開口変位を測定することができなかったため、 A を荷重-時間曲線下の面積とし、みかけの J 積分であるとして J_{app} と表示して、試験のき裂進展に対する抵抗力を評価した。

き裂進展開始に相当する J_{in} の AE からの決定は、次のように行った。Fig.9 に示すように、AE 累積事象数の変化を対数目盛りでとった J_{app} に対して整理し、AE が連続的に増加する曲線に外挿した直線 a との交点の J_{app} の値を J_{in} に対応する値として J_{AEI} とした。Fig.9 で J_{app} を対数目盛で表示したのは経験によるものであって物理的意味はない。AE の検出は計測時のしきい値に依存するので、それによって AE が発生し始める J_{app} の値は変化する。そこで、Fig.9 のように対数目盛でプロットすると、AE が明らかに増加す

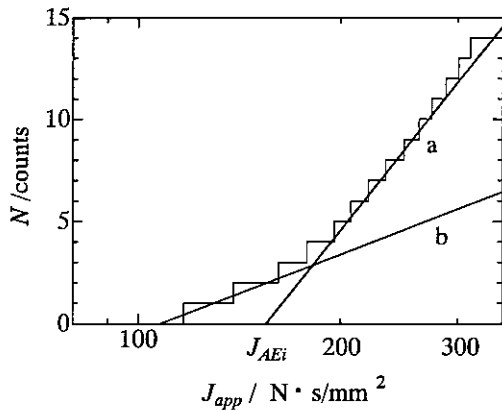


Fig.9 Relation between AE activity and J_{app} .

の変化が分かりやすくなる。なお、Fig.9 中のもう一つの外挿直線 b と直線 a との交点で J_{AEi} を決める方法もあるが、ここでは値の小さい方を採用した。

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.10 に示す。暴露サイクルごとに試験した二つの試験片の平均値を丸印で示してある。この結果、暴露サイクルが 8 サイクルあたりまでは、環境負荷が増すにつれ J_{AEi} は高くなるが、負荷がある以上になると J_{AEi} はほとんど変化しないという傾向がみられる。

ここで、曲げ強度の暴露サイクルによる変化 Fig.3 と、AE で評価した J_{in} に相当する J_{AEi} を示した Fig.10 を比較すると、曲げ強さは暴露サイクルが増すとともに減少していくが、減少の程度は暴露サイクルの小さいところで大きい。したがって、この結果と Fig.10 について考察した J_{AEi} の上昇傾向は一致しているといえる。すなわち、曲げ強度が低下すると、 J_{AEi} は高くなる。

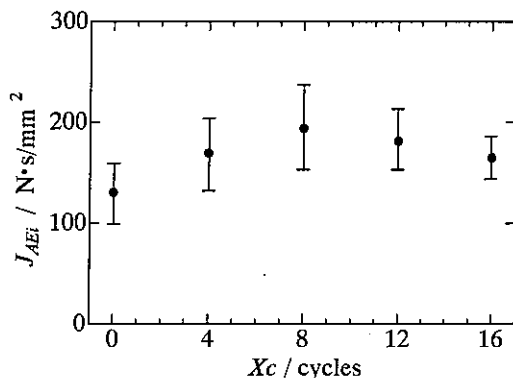


Fig.10 Relation between J_{AEi} and exposure cycles.

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、曲げ試験の結果、機械的性質については、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。

さらに、レーザー顕微鏡を用いて試料表面の観察を行ったところ、暴露によって表面の変色はあるが、クレーズや表面き裂はなく、表面粗さは暴露するほど小さいことなどが観察された。また、試料は暴露によって、最大 3% 程度の減肉があった。

したがって、これらのことから、暴露による強度の低下は、傷などの発生によるものではなく、曲げ弾性率に変化が認められることから、環境付与による材質的な変化によるものと考えられる。

そして、弾性波の音速測定から、環境負荷の付与による上述の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、破壊靱性試験の結果は、一方の表面だけが暴露された試験片であったが、弾塑性破壊靱性の試験結果には、暴露の影響が現れ、環境の付与が進むほど、靱性が高くなる傾向が認められた。さらに、AE 計測によって、き裂の発生、進展に対する材料の抵抗を評価できるといえ、弾塑性破壊靱性の単一試験法として J_{in} の決定に AE 法の有効性を示すことができた。

参考文献

- 1) 森康彦、岸輝雄、劣化損傷と非破壊評価、溶接技術、1986 年 10 月号、(1986)、pp. 24~40
- 2) 松本明博、フェノール樹脂の合成・硬化・強靱化および応用、アイピーシー、(2001)、pp.198~199
- 3) 小池迪夫、田中享二、合成高分子防水層の耐候性その 5、日本建築学会誌、No.285、(1979)、pp.15~22
- 4) 森康彦、栗林一彦、岸輝雄、AE 法による弾塑性破壊靱性試験法の確立に関する標準試験実施方法、非破壊検査、30 巻第 11 号、(1981)pp.837~841
- 5) 工藤亮、繊維強化プラスチック材の耐候性曲げ強度に関する研究、日本大学大学院博士論文、(2002)、pp.48~60

弾性波による材質評価に関する研究(その2)

—溶接部の機械的性質の評価に関する研究—

森康彦(機械工学科)、小幡義彦(機械工学科)
大久保通則(機械工学科)

1. はじめに

超音波による探傷は典型的かつ標準的な非破壊検査法の一つである。かつては、機械部品や構造物中の傷の有無という定性的な判断だけが求められたのであったが、最近の破壊力学の考え方に基づく損傷許容設計や、欠陥を許容する評価基準(維持基準)を適用するには、欠陥の位置、形状と寸法、方位などの定量的なデータを必要とする。そしてさらに、検査によって見つけれられた傷が有害か、無害であるかを判定して機械や構造物の破壊の予知あるいは寿命の予測をする、すなわち材料評価を行うには、欠陥の定量的なデータのみならず、材料そのものの性質と、欠陥をとりまく応力場の、その時の情報を、非破壊的に取得することが必要となる。

実際の構造部材には、自重のほかに、加工時に導入された残留応力と、使用中に変動する負荷応力などが重畳しており、さらに、環境や経年による部材の材質の変化も考えられ、これらが構造物の強度的な安全性に大きな影響を及ぼしているといえる。また、構造物の多くは溶接構造をなしている。溶接法には用途に応じて色々な方法があるが、いずれも局所的で急激な入熱が避けられないため、溶接部とその近傍には、母材の変質や相変態、および熱変形による残留応力が発生し、材料の破壊に大きく影響をおよぼすことになる。

筆者らは、部材に働く引張、圧縮および曲げ応力と、それらによる残留応力を、弾性波の音弾性特性を用いて非破壊的に定量評価する方法をこれまで検討してきた。本研究では、チタン合金およびアルミニウム合金の電子ビーム溶接試験片について、漏洩レーリー波を用いた溶接部の局所領域の機械的性質の評価について検討した。

2. 漏洩レーリー波と測定の原理

レーリー波は、平面で境された半無限弾性体の媒質を伝わる表面波である。Fig. 1 に示すように、線収

束型超音波センサの焦点が試料内部(-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 Fig. 2 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 Δt_R は z に比例し、漏洩レーリー波の伝搬速度 V_R は式(1)で求められる。

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

ただし、 V_W は水中を伝搬する縦波の音速である。

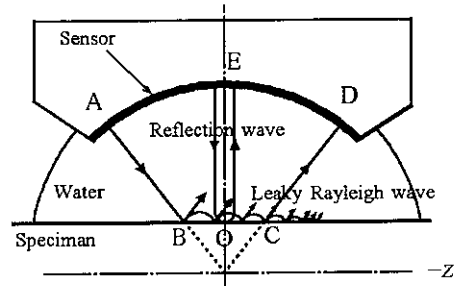


Fig.1 Propagating paths of stress wave.

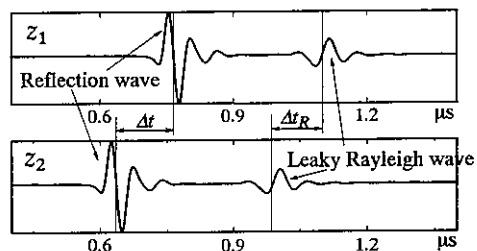


Fig.2 Typical sample of received waveforms.

3. 試験の方法

試料材は、Al-Zn-Mg-Cu 系合金 A7075 の圧延材と Ti-6Al-6V-2Sn 合金(以下、Ti-6-6-2)である。A7075 の溶接試験片は、厚さ 15 mm の板を電子ビ

ームによる直接溶接継手である。また、Ti-6-6-2の溶接試験片は、焼鈍、溶体化処理した板厚 22 mm の素材を電子ビーム溶接し、時効処理した後、厚さ 12 mm に加工した溶接継手である。電子ビーム溶接では、厚さ 0.5 mm の純チタン板をインサート材とした。

Table.1に、電子ビーム溶接の条件を示す。

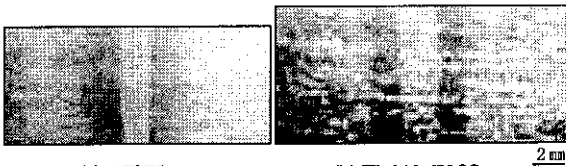
Table .1 Conditions of electron beam welding.

Parameters	A7075	Ti-6Al-6V-2Sn
Accelerating Voltage (kV)	40	50
Beam Current(mA)	150	150
Gun to Work (mm)	200	300
Welding Speed(m/s)	0.017	0.005

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、XYステージ、パルサーレーザ、デジタルオシロスコープ、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。

4. 試験の結果と考察

A7075 溶接試験片の断面と、また Ti-6-6-2 の試験片の表面で観察した溶接部のマクロ写真を Fig.3(a), (b) に示す。漏洩レーリー波の測定は、ここに観られる溶接部について、漏洩レーリー波を溶接線に垂直方向に伝搬させた場合の音速変化を測定した。



(a) A7075 (b) Ti-6Al-6V-2Sn
Fig.3 Macrostructure in welded zone.

Fig. 4 に、溶接部中心からの距離に対する漏洩レーリー波の速度の変化を、A7075 と Ti-6-6-2 について示す。速度分布にばらつきがあるが、測定部位による速度には有意な差があるといえる。すなわち、母材部の音速は、A7075 で約 2860 m/s、Ti-6-6-2 で約 2900 m/s であり、両試料とも、溶接部中心に近付くほど、速度が低下している。また、その速度が低下していく経路にある熱影響部では、速度が部分的に増していることが観察される。漏洩レーリー波を測定した後、その測定部について、硬さ分布をマイクロピッカース試験機を用いて測定した。その結果を Fig.5 に示す。両試料とも、溶着部の中心で硬さが低く、熱影響部で高い値を示している。

次に、Fig.4 と Fig.5 の比較から明らかなように、漏

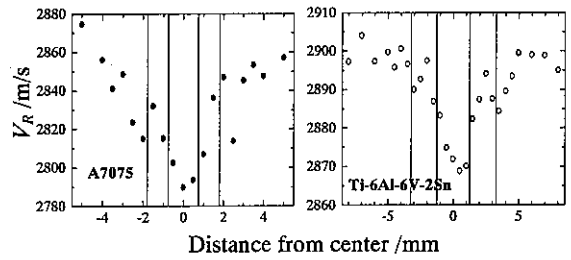


Fig.4 Distribution of Leaky Rayleigh wave velocity.

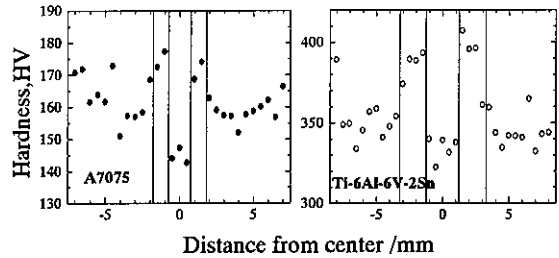


Fig.5 Distribution of hardness across weld zone.

洩レーリー波の速度と硬さの分布との間には相関があり、漏洩レーリー波は硬さの分布を表わしているといえる。しかしながら、Ti-6-6-2 合金の硬さ分布にみられるように、溶着部の硬さは母材とそれほど差がない。したがって、溶着部の漏洩レーリー波速度の低下は、A7075 についても、応力による音弾性効果が主たる原因ではなく、金属組織的要因によるものと思われる。一方、熱影響部とその外側の硬さと漏洩レーリー波の速度との関係は、それぞれ以下のように整理することができた。

$$\text{A7075: } V_R = -1.318\text{HV} + 3048 \text{ (m/s)} \quad (2)$$

$$\text{Ti-6-6-2: } V_R = -0.191\text{HV} + 2960 \text{ (m/s)} \quad (3)$$

すなわち、母材から熱影響部にかけての漏洩レーリー波の速度変化は、残留応力と考えられる内部応力の音弾性効果に起因していると考えられる。なお、式(2)、(3)において、HVの係数が A7075 の方が大きいのは、その音弾性定数が Ti-6-6-2 より大きいことを意味している。

5. まとめ

電子ビーム溶接部の漏洩レーリー波の音速を測定し、硬さ試験の結果とを比較考察した結果は、以下のようによまとめられる。(1)漏洩レーリー波の速度分布は、硬さ分布のプロファイルをよく表す。(2)溶着部の漏洩レーリー波の速度は硬さと無関係で、金属組織的要因によるものと思われる。(4)熱影響部の漏洩レーリー波の速度は、硬さとの関係で整理でき、速度の変化は残留応力による音弾性効果に起因していると考えられる。

参考文献 略