

超音波による塑性変形領域の画像検出法の検討*

轟 章^{*1}, 小林 英 男^{*1}
荒 居 善 雄^{*2}, 小林 卓^{*3}Study of Image Detection of Plastic Deformation Area
with Acoustic MethodAkira TODOROKI, Hideo KOBAYASHI,
Yoshio ARAI and Taku KOBAYASHI

Detecting plastic deformation area at crack tips of FRM is very important for understanding the mechanism of reinforcing matrix by fibers. Few method, however, are proposed to detect the plastic deformation inside the FRM. Recently, a scanning acoustic microscope has developed and this gives us chance to detect the plastic deformation area. In this study, several acoustic methods including a scanning acoustic microscope were examined to detect the image of it. As results, acoustic velocity change as a function of plastic strain of aluminum alloy was obtained and the change was discussed with a dislocation vibration model. The images with 50 MHz acoustic lens and 200 MHz acoustic lens were obtained and investigated in detail.

Key Words: Acoustic, Image Analysis, Plastic Deformation, Scanning Acoustic Microscope

1. 結 言

FRM マトリックス内部のき裂先端の塑性変形の形状は、FRM の強化メカニズムの解明に重要な要因の一つである。また、FRM 構造物内部の塑性変形が検出できれば、内部損傷の非破壊評価が可能であり、内部の塑性変形検出法の確立が望まれている。金属材料の塑性変形検出法としては、腐食法、モアレ法などがあるが、特定材料、前処理が必要であったり、表面上の大変形の検出に限定されており、新検出法が望まれている。非破壊検査法の中で超音波法は、材料の制限がなく、従来から多用されている。金属材料が塑性変形する場合、塑性変形は原子のすべりであるので巨視的弾性率は変化しないが、材料内部には転位などの次階が累積され、超音波速度の変化として検出できることがすでに報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。そこで、本研究では、均一および不均一に塑性変形させた材料を用いて従来の超音波探触子による広域音速測定と超音波探査映像装

置、超音波顕微鏡による局所音速測定を実施し、超音波音速変化を利用した塑性変形の画像検出を試みた。具体的には、アルミニウム合金製平板試験片に引張荷重を負荷し、塑性変形させ、その前後で超音波速度を実測することで、塑性変形と超音波速度の変化の関係を実験的に得た後、同一材料のき裂材の引張りおよび弾塑性曲げ試験を行い、その塑性変形画像を検出した。

2. 実 験 方 法

実験には厚さ 6 mm のアルミニウム合金 6061-T6 板材を用いた。力学的性質を表 1 に示す。本材料の結晶粒径はほぼ 100 μm である。この平板から引張試験片を圧延方位と引張方位が一致するように作成した。この試験片を図 1 に示す。この試験片を油圧サーボ試験機で引張荷重を負荷して塑性変形させ、その前後での超音波音速を測定し、塑性変形による超音波速度の変化を実測した。なお、超音波音速測定時の試験片表面は鏡面研磨(1 μm 研磨材)に統一した。超音波速度の変化の実測は、5 MHz 探触子を用いたシングア라운드法、50 MHz 超音波レンズを用いた超音波探査映像装置、200 MHz 超音波レンズを用いた超音波顕微鏡の三種の試験装置を用いた。シングア라운드法では、背面の第一反射波と第二反射波のシングアラウ

* 平成 4 年 9 月 2 日 材料力学部門講演会において講演、原稿受付 平成 5 年 6 月 15 日

*¹ 正員、東京工業大学工学部 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

*² 正員、埼玉大学工学部 (〒331 浦和市下大久保 255)。

*³ トヨタ自動車(株) (〒471 豊田市トヨタ町 1)。

ンド周期の差から、板厚一往復の伝ば時間が直接得られるため、板厚の2倍をこの時間で除して超音波速度を求めた。探査映像装置では、背面第一反射波と第二反射波の時間差をオシロスコープで読取り、シングアウンド法と同様に超音波速度を求めた。超音波顕微鏡では $v(z)$ 曲線法を用いて、超音波速度を求めた⁽³⁾。

引張試験は荷重速度 0.5 mm/min で実施した。試験片には中央部に塑性ひずみゲージを貼り付け、除荷後のひずみから荷重した塑性ひずみを実測した。試験片には、1.0, 2.0, 4.1, 5.9% の塑性ひずみをそれぞれ荷重した。試験後に表面の凹凸を除去し、鏡面仕上げを実施した後、超音波速度を実測した。

測定した超音波の周波数とモードは、5 MHz 縦波、横波、50 MHz 縦波、200 MHz 表面波である。横波は、引張方位 (0°) とそれに直角方向 (90°) の二種の偏向方向で表面波は点収束レンズを用いたため、各方位の表面波伝ば速度の平均値を実測した(図2参照)。

き裂材は、両側き裂引張試験片 ($a/w=0.29$, ここで

a : き裂長さ, $2W$: 試験片幅) を用いた(図3参照)。超音波速度を実測後、所定荷重 ($\sigma_a/\sigma_y=0.66$ ここで σ_a : 荷重応力, σ_y : 降伏応力) まで引張試験と同方法で荷重し、再研磨後超音波速度を実測した。探査映像装置では、0.4, 0.6 mm 間隔でき裂先端周囲の超音波速度を測定した。超音波顕微鏡では、き裂線上のリガメント部分の超音波速度を 0.2 mm 間隔で測定した。

曲げ試験片は、長さ 190×厚さ 30×高さ 3 mm の長方形断面で、長スパン 120 mm, 短スパン 20 mm の四点曲げ試験を実施した(図4参照)。試験後に再研磨し、厚さ方向 (z 方向) 超音波速度の高さ方向分布 (y 方向) を 0.1 mm 間隔で測定した。超音波速度測定用試験片は四点曲げ内スパン内であるので、曲げ試験時には長さ方向 (x 方向) に変形が同じであるため、結晶粒の方位の影響を少なくすることを目的として測定時にレンズを 0.5 mm x 方向にスキャンさせながら $v(z)$ 曲線を測定し、超音波速度を求めた。なお、超音波速度は各位置で 5 回平均した(図5参照)。また、スキャン幅を 2 mm に拡大し、142 μm 試験片側にデフォーカスして塑性変形領域を画像観察した。

表 1 供試材 (6061-T6) 力学的性質

Material	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)
A6061-T6	279	296

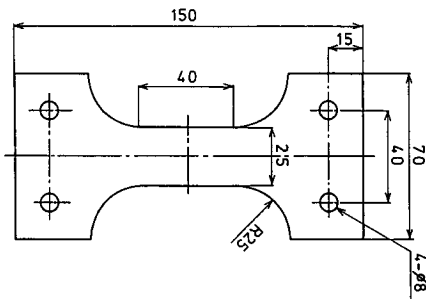


図 1 引張試験片形状・寸法

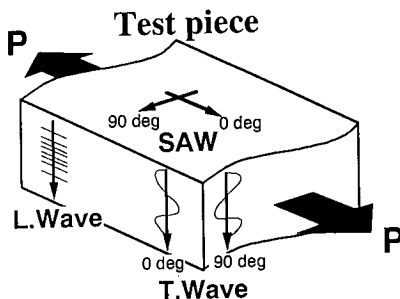


図 2 超音波速度の測定方位

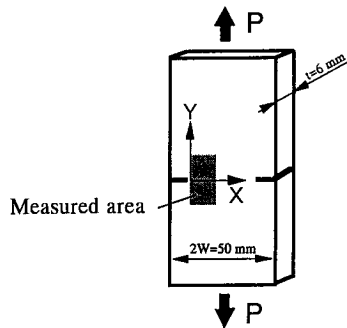


図 3 き裂試験片形状・寸法

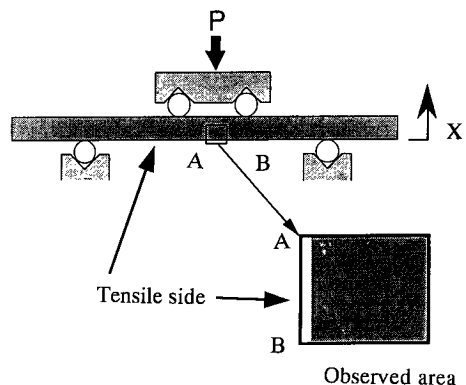


図 4 四点曲げ試験試験方法

3. 結果と考察

5 MHz 縦波および横波, 50 MHz 縦波の実測結果を図6に示す。図中横軸は荷重した塑性ひずみ量, 縦軸は超音波速度変化である。超音波速度変化は各試験片の荷重前の値を規準にして求めた。図中右端に各測定手法における標準偏差の平均値を実線および破線で示した。この標準偏差は5 MHz 縦波, 横波ではそれぞれ $\pm 0.17, 0.07\%$ であり, 50 MHz 縦波では $\pm 0.26\%$ である。5 MHz 縦波では, ひずみ増加に伴い超音波速度は減少するが, その傾向はしだいに弱くなり, 6%程度のひずみで一定値(-0.8%)に漸近する。また, 5 MHz 横波では, 超音波速度の変化傾向に偏方向の差は認められない。横波の超音波速度は, ひずみが1%程度まで急減し, その後縦波と同様に -0.8% に漸近する。縦波と横波のモードの差異にもかかわらず, 両者の超音波速度変化に差が少ないことから, 本実験で用いた材料では, 塑性変形による材料内部の変化は圧縮とせん断の両変形モードに同じ影響を及ぼしていると推察される。

50 MHz 縦波の変化率は5 MHz に比較して小さいが, 塑性ひずみの小さい領域で超音波速度が急減し, ひずみ増加に伴い一定値(-0.2%)に漸近する傾向は同一である。しかし, 漸近する一定値が異なり, 塑性変

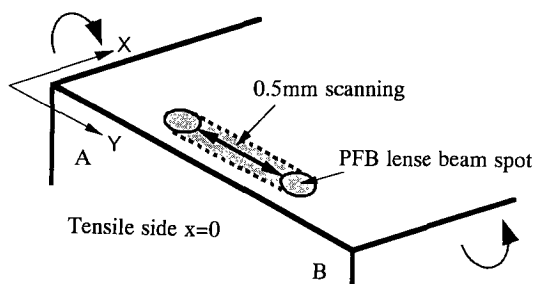


図5 曲げ試験片超音波速度測定方位

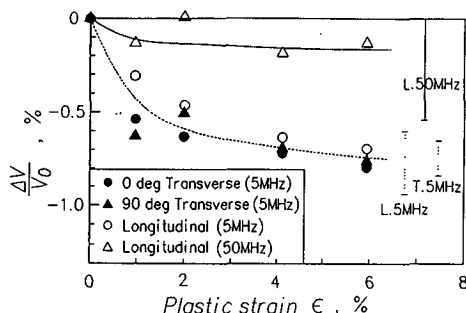


図6 内部伝ば超音波音速の塑性ひずみによる変化

形による超音波速度変化は周波数依存性を有している」と判断される。

200 MHz 表面波の超音波速度変化の実測結果を図7に示す。超音波顕微鏡を用いた表面波速度の測定においては, 超音波ビーム径に対応した領域を表面波が伝ばする。本研究における超音波ビーム径に対して, 結晶粒径がやや大きく, 荷重前状態でも試験片による差が大きいため, 塑性ひずみ零の規準値として4本の試験片の平均値を用いた。超音波顕微鏡の $v(z)$ 曲線法による測定の標準偏差は $\pm 0.48\%$ であり, 縦波, 横波と比較して大きい。これは, 超音波顕微鏡の機械的精度と材料の大きな結晶粒径に起因している。つまり, 機械的なデフォーカス距離 Z の測定精度による誤差と, 結晶粒径が大きいために, 測定領域中に含まれる結晶粒数が少なく, 測定位置により異方性が異なることに起因する誤差が大きくなるためである。このように実測値は誤差が大きいため, 定量的比較はできないが, 表面波速度はその伝ば方位に無関係に塑性ひずみの増大に伴い増加する傾向にある。これは, 内部伝ばする縦波, 横波の場合と著しく異なる点であり, 表面と内部で, 塑性変形が超音波速度に及ぼす影響が異なることを意味している。

塑性変形による超音波速度の変化のメカニズムとしては, 転位の増加による内部摩擦の変化⁽⁴⁾と, 結晶粒の回転による異方性的変化⁽⁵⁾が考えられる。しかし, 横波の結果(図6参照)で方位による差がないこと, 縦波において周波数依存性があること, 表面波と内部伝ばでひずみ増加に対する変化が異なることなどから, 少なくとも本研究で用いた材料では, 後者の原因は考えにくく, 転位の増加に起因するものと推察される。そこで, Granato-Luckeの転位振動モデルを用いて, 図6, 7の現象を考察する。

転位振動モデルでは, 両端がピン止めされた転位が超音波の伝ば時に振動し, そのためにエネルギーが吸収されて, 超音波に対する微視的弾性率が変化すると

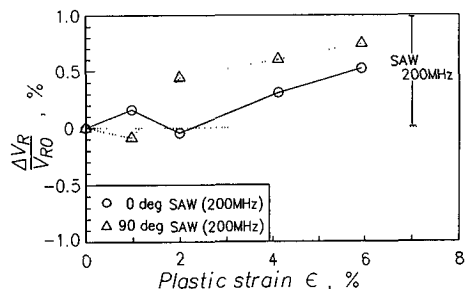


図7 表面伝ば超音波音速の塑性ひずみによる変化

考える。長さ L のピン止めされた転位では、速度変化は次式で表される⁽³⁾⁽⁴⁾。

$$\frac{\Delta v}{v_0} = -\frac{\Lambda \Delta_0 L^2}{2\pi} \frac{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} \frac{d}{\omega_0}\right)^2} \dots (1)$$

ここで、 Λ は可動転位の総長さであり、 v_0 、 Δ_0 、 ω_0 はそれぞれ次式となる。

$$v_0 = \sqrt{G/\rho} \dots (2)$$

G : 横弾性係数, ρ : 密度

$$\Delta_0 = 8Gb^2/\pi^3 C \dots (3)$$

b : パーガースペクトル, C : 転位の張力

$$d = B/A \dots (4)$$

B : 転位単位長さにも働く摩擦, A : 転位有効質量

$$\omega_0 = \pi/L \sqrt{C/A} \dots (5)$$

式(1)の物性値に、 L 、 A は文献(2)の2Sアルミニウムによる減衰能測定から得られたデータを初期値として用い、転位弦有効質量 A 、張力 C は文献(3)に示されている、アルミニウムと同じ面心立方格子の銅のデータを用いて解析した。これは文献(3)によって容易にデータが入手可能であるためだが、 A 、 C に銅のデータを用いたことによって d/ω_0 、 ω/ω_0 の定量的意味は低下するが以下の議論では d/ω_0 、 ω/ω_0 のオーダーを検討することが目的であるので、アルミニウムの代わりに結晶中のすべり方位がほぼ同じ銅のデータを用いてもその影響は無視できると判断される。各周波数での ω/ω_0 の値は、5 MHz の場合、 3.37×10^{-3} 、50 MHz の場合、 3.37×10^{-2} 、200 MHz の場合、 1.35×10^{-1} である。 d/ω_0 の値をパラメータとして描いた超音波速度変化を図8に示す。図中横軸は規格化された超音波周波数、縦軸は規格化された超音波速度変化である。塑性ひずみの増加に伴い、ピン止めされた転位密度が増加し、転位長さが減少するため、 ω_0 が増加するので、塑性ひずみの増加に伴って、 ω/ω_0 と d/ω_0 は減少する。実測した結果は、塑性ひずみ増加に伴い、音

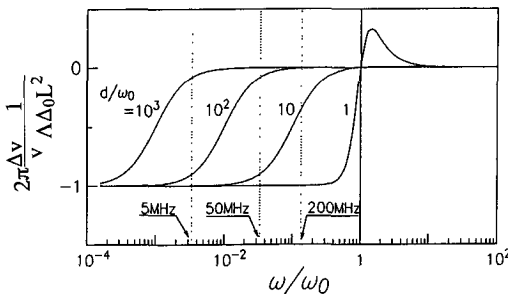


図8 転移振動モデルによる超音波速度周波数依存性

速が減少し、50 MHz の場合には5 MHz の場合より変化率が小さくなったが、これは、 $d/\omega_0 \sim 10^3$ の場合に満足される。このときの摩擦 B はおよそ 10^{-4} kg/m·s であり、文献値 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ (4)、 10^{-4} (3) と一致しており、転位振動モデルによって周波数依存性が説明可能であることがわかる。しかし、 d/ω_0 が 10^3 の場合には、200 MHz で超音波速度変化がほぼ零となり、表面波速度の増加傾向を説明できない。塑性ひずみ増加、つまり ω/ω_0 と d/ω_0 が減少した場合に、超音波速度が増加するには、負荷前で ω/ω_0 が1~10、 d/ω_0 が10以下となる必要がある。このためには、転位弦の固有振動数 ω_0 が表面波の場合、内部の場合の1/15程度でかつ d に関連する摩擦係数 B は1/5000程度になる必要があり、現実的でない。しかし、表面近傍では、転位のピン止めの影響が非常に小さく、転位張力が小さくなることなどから ω_0 が小さくなることが推察される。また、摩擦に関しては、転位振動モデルでは、摩擦力は弦の振動速度に比例すると仮定しており、超音波顕微鏡の高周波数領域ではこの影響を過大評価していると推察される。このように考えれば、転位振動モデルによって、超音波周波数が増大すると速度低下が小さくなり、高周波数の表面波速度は逆に増大するという塑性ひずみによる超音波速度変化が説明可能である。

き裂材の引張試験後の側面光学写真を図9に示す。き裂前方で直径5~6 mmの黒色部の変形領域が認められる。変形領域は変形の大きいき裂先端の直径2.5 mm程度の領域とその外側の変形の小さな領域に二分される。変形の小さい領域は表面だけの変形領域であり、試験後の鏡面研磨によって完全に除去される。探査映像装置で実測した超音波速度分布を図式化した

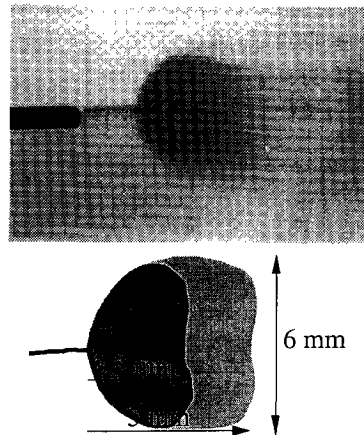


図9 き裂材引張後の表面写真

結果を図10に示す。図中、き裂先端を座標原点とし、超音波速度の減少が激しい領域を濃い色で示した。図から、き裂前方 x 方向に約2mm、 y 方向に約6mmの範囲に明確な超音波速度の減少が検出されていることがわかる。また、これは側面観察の強変形領域と寸法が一致している。この超音波速度の減少率は黒塗り領域で-0.4%程度であり、平板の均一引張試験で得られた最大減少率-0.2%よりさらにその値が大きくなっている。これは、き裂先端近傍の残留応力の影響と推察される。

超音波顕微鏡で測定したき裂先端の表面波音速分布を図11に示す。結晶方位の影響のため、縦軸は実測音速で示した。ばらつきが大きいのが、き裂先端に向かい超音波速度が漸増している。

残留応力の影響を検討するため、無限板の中央き裂のDugdaleモデルを用いて、完全除荷時の残留応力分布を推定した。ただし、Dugdaleモデルと実際の試験片の境界条件の差異に起因して計算値と実測値の塑性域寸法が異なるため、実測した塑性域寸法とDugdaleモデルの寸法の比2.5/7.0を残留応力分布にかけて補正した。弾性応力による縦波超音波速度の音弾性定数は小林が実験的に求めた文献値(4)の $(8.73 \times 10^{-2}\% / 100 \text{ MPa})$ を用いた。Dugdaleモデルの残留応

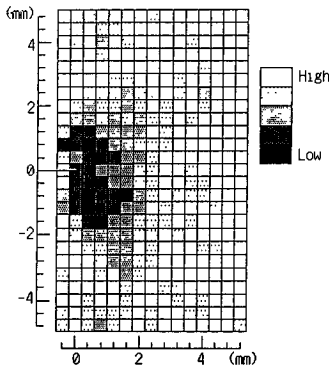


図10 き裂材引張後研磨の超音波速度分布(縦波)

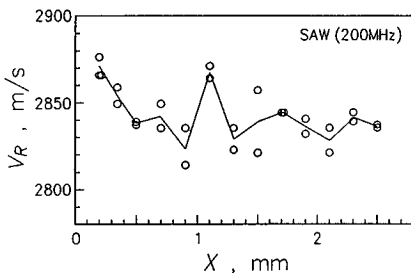


図11 き裂材引張後研磨の超音波速度分布(表面波)

力分布とそれを考慮した超音波速度分布を図12に示す。図中黒塗り印が実測結果から残留応力の影響を差し引いた結果である。超音波速度に及ぼす残留応力の影響は、き裂遠方では超音波速度の増加、き裂近傍では減少であり、最大変化率はほぼ-0.2%となる。この結果から、塑性ひずみによる超音波速度減少の小さい50 MHzでは、残留応力による音速変化が実測超音波速度に大きく影響を及ぼしていることがわかる。

曲げ試験で実測した荷重-荷重点変位関係を図13に示す。得られた結果から、弾完全塑性体と仮定して、残留応力を推定したところ、圧縮の最大残留応力が $-0.32\sigma_y$ 、引張りの最大残留応力が $0.21\sigma_y$ であり、超音波速度の弾性応力による変化率は前述の値を用いると0.1~0.06%となった。超音波顕微鏡で測定した超音波速度の測定結果を図14に示す。図中ばらつきが大きいのが、複数の測定値の平均値を代表値とする

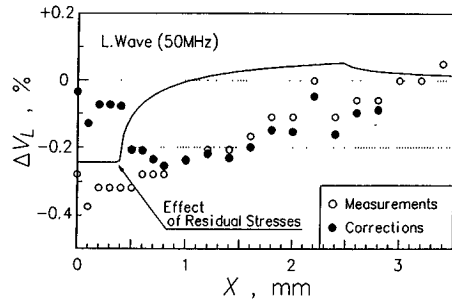


図12 残留応力補正後の超音波速度分布(縦波)

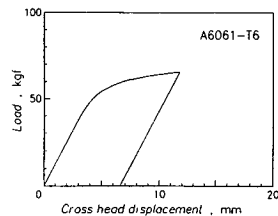


図13 曲げ試験時の荷重-荷重点変位

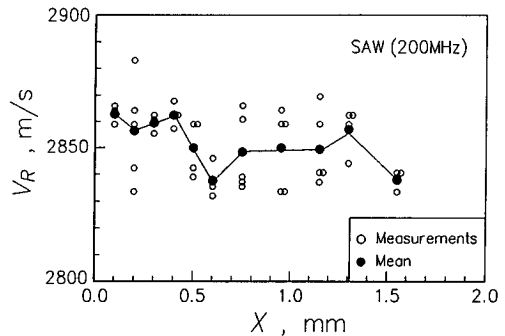


図14 曲げ試験後研磨の超音波速度分布(表面波)

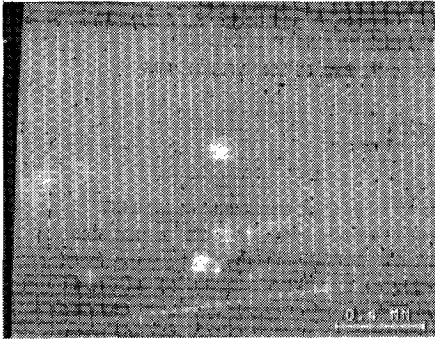
端部から 0.5 mm までの範囲で超音波速度が増加している。超音波速度の増加率は 0.85% であり、残留応力による超音波速度の変化がこの値より十分小さいことから残留応力の影響は小さいと判断される。超音波顕微鏡による画像観察の結果を図 15(a)~(c) に示す。表面観察した結果 [図 15(a)]、図中左部の試験片端部の凹凸は認められない。100 μm のデフォーカスから得た x - z 画像 [図 15(b)] では、超音波顕微鏡出力 v が画像上で明暗のしまで得られる。このしまの直

線性から、凹凸の影響がないことがわかる。同じ位置で、142 μm デフォーカスした画像の結果 [図 15(c)] では、端部から 0.5 mm の領域で塑性域と思われるやや暗い画像部分が得られている。これが、0.85% の超音波速度の増加によるものであることを確認するため、200 MHz レンズで実測した塑性変形前の実測 $v(z)$ 曲線と塑性ひずみによる超音波音速変化に起因する Δz 変化だけ考慮 (縮小) した $v(z)$ 曲線を比較して描いた図を作成した。これを図 16 に示す。この図から、 $z = -142 \mu\text{m}$ 近傍では、超音波音速増加に伴い暗いコントラストが得られることがわかる。したがって、図 15(c) のコントラストの差は塑性変形による超音波速度変化が原因であると判断できる。

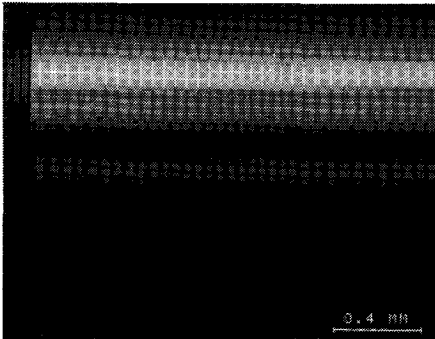
以上のことから、画像上で塑性ひずみが検出可能であることがわかる。しかし、図 16 から明らかなように、塑性変形による超音波速度の変化は小さく、 $z = -142 \mu\text{m}$ のデフォーカスにおける $v(z)$ 曲線の z 軸上のずれは数 μm 程度であり、表面の凹凸が数 μm 以上あると表面の凹凸による $v(z)$ のずれのほうが大きくなってしまふことが容易に想像できる。つまり、表面の凹凸が数 μm 以上ある場合には、塑性ひずみの画像上での検出は困難となる。本研究では FRM は直接には取扱っていないが、本研究で得られた結果から FRM のき裂先端の塑性変形領域観察に本研究の手法を適用することを想定すると、FRM では、繊維とマトリックスの硬さが著しく異なるため、凹凸を数 μm にとどめることは困難であるので、表面研磨に細心の注意を必要がある。ただし、塑性変形には表面凹凸を必ず伴うので、 x - z 画像でその凹凸を調査すれば、表面に限定される塑性変形領域は非常に容易に測定可能である。

4. 結 論

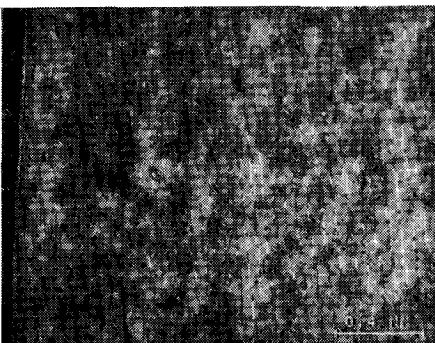
以上、超音波音速変化を利用した塑性変形検出のた



(a) 表面画像



(b) 表面凹凸の調査 (x - z 画像)



(c) デフォーカス画像 ($z = -142 \mu\text{m}$)

図 15 曲げ試験片画像観察結果

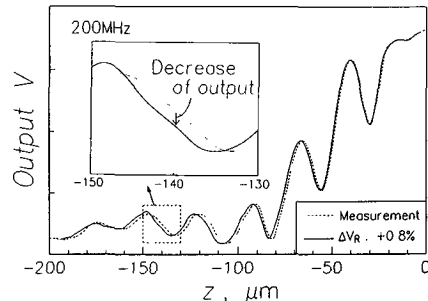


図 16 超音波速度変化の画像コントラストへの影響

めの基礎研究として、アルミニウム合金 6061 を用いて、周波数の異なる縦波、横波、表面波で、超音波速度と塑性ひずみの影響を実測し、塑性ひずみ分布の検出の評価を行った。得られた結果を要約すると以下のとおりである。

(1) 本研究の材料では、内部伝ばの超音波速度は塑性ひずみの増加に伴い急激に減少し、一定値に漸近する。この変化率は周波数が大きいほど小さい。表面超音波速度は、塑性ひずみの増大に伴い増加する。

(2) 周波数依存性および内部伝ばと表面伝ばの差異は、転位振動モデルによって説明可能である。

(3) き裂先端や弾塑性曲げなどの塑性ひずみ分布がある場合、超音波速度変化を利用して、塑性ひずみを検出可能であることを示した。超音波顕微鏡では、

塑性ひずみを画像のコントラストとして検出可能である。

(4) 超音波顕微鏡で内部塑性ひずみを画像のコントラストとして検出するには、数 μm の凹凸を研磨で除去する必要がある。

文 献

- (1) 田中・ほか 3 名, 材料, 41-466(1992), 1061.
- (2) 干潟, 金属の塑性変形と超音波減衰の関係について, 機械試験所報告, 第 39 号, (1960).
- (3) 御子柴・生嶋編, 「超音波スペクトルコピー [応用編]」, (1990), 147, 培風館.
- (4) Granato, A. and Lucke, K., *J. Appl. Phys.*, 27-6(1956), 583.
- (5) 小林, 機論, 58-554, A(1992), 1985.