超音波顕微鏡による金属基複合材料(MMC)の 損傷評価に及ぼす影響因子の検討†

田 中 義 久* 増 田 千 利**
宮 坂 千 晶*** 内 野 文 雄***

Effect of Several Factors Evaluation of Damage for Metal Matrix Composites by Scanning Acoustic Microscope

by

Yoshihisa TANAKA*, Chitoshi MASUDA**, Chiaki MIYASAKA***
and Fumio UCHINO***

Metal matrix composites (MMC) and aluminum alloy were examined by a scanning acoustic microscope (SAM) using leaky Rayleigh wave to discuss the analysis of deformation behaviour around reinforcing fibers of MMC. The plastic zone size observed was nearly equivalent to the one calculated under the plane stress condition for A6N01 aluminum alloy and the difference in Rayleigh wave velocity was about 2% between the plastic zone near a fatigue crack tip and the elastic zone. The deformation part at the tip of notch occurred preferentially in the SiC whisker poor zone for SiC_w/A7075 composite. It is suggested that fatigue cracks initiate and propagate at the whisker poor zone for this composite. The microstructure such as segregation of elements or precipitates can be analyzed by using the velocity of leaky Rayleigh waves. It is suggested that the microstructure and plastic zone may be separately identified in MMC.

Key words : Scanning acoustic microscope, Metal matrix composite, Plastic zone, Element mapping, Rayleigh wave

1 緒 言

構造材料として実用化されつつある金属基複合材料(MMC)の破壊挙動は非常に複雑である。これまでW/Cu系のMMCの引張強度に関しては、Kelly-Tyson¹⁾の複合則が成立するといわれている。しかしB/Al²⁾やSiC/Ti合金基MMC等では界面反応や試験中の強化繊維の破断過程等により、複合則から予測される強度を下回ることが多いといわれている。MMCの破壊条件を定量的に検討するためには、繊維の破壊、破壊した繊維の端部での応力集中の程度、き裂の発生、成長挙動など破壊過程を非破壊的に解析することが重要となる。特に複合材料の場合には材料内部の破壊挙動を明らかにすることが重要である。現在、内部観察法としては医療などに利用されているX線CTや超音波CTがあるが分解能が低く、直径140 μ m程度のB、SiC等のための強化繊維でも観察できない。

超音波顕微鏡(SAM)は超音波の透過、反射性が物質の弾性的性質によって異なることを利用して、物質内部の欠陥、き裂、表面コーティングのはく離等の

観察が可能である。特に、50 MHz~数 GHzにおよぶ高周波数の超音波を音響レンズにより微小領域に集束し、 μ mオーダーの高分解能で観察できる。また、V-D_z曲線から弾性表面波速度を測定することにより、応力分布の解析などができる可能性がある⁴⁾。SAMの複合材料への応用例としては多層CFRPのはく離の検出等が報告されているが、MMCの損傷評価に関する報告はほとんどない。

著者らは先に、ウスカ強化複合材料の疲労特性について検討した結果、疲労強度が基地材料に比べ著しく向上することを明らかにしたが^{7,8)}、その強化機構を解明するには、き裂先端部における塑性変形挙動を調べることが重要であることがわかった。

ここではSAMを用いてウスカ強化金属基複合材料の損傷評価の可能性を明らかにすることを目的とし、マトリックス材における変形域の評価と、超音波画像コントラストと組織との関係を基にウスカ強化材の損傷部の観察についての基礎的検討を行った。また、SAMは材料内部を観察できることが特徴であり、一

† 原稿受理 平成3年9月5日 Received Sep. 5, 1991

* 金属材料技術研究所損傷機構研究部 〒153 東京都目黒区中目黒, National Res. Inst. for Metals, Meguro-ku, Tokyo, 153

** 正 会 員 金属材料技術研究所損傷機構研究部 〒153 東京都目黒区中目黒, National Res. Inst. for Metals, Meguro-ku, Tokyo, 153

*** 正 会 員 オリンパス光学工業(株) 〒192 八王子市石川町, Olympus Optical Co. Ltd., Ishikawa-cho, Hachioji, 192

部の MMC について内部観察を行い, SAM の有用性の検討を行った。

2 実験方法

2・1 供試材

本報で使用した材料は4種類で, そのうち MMC は代表的なもの3種類を選んだ。この内訳は MMC の損傷評価用として SiC ウィスカ強化 MMC (SiC_w/A7075), 変形域を調べるために代表的なマトリックス材のアルミ合金 (A6N01), 超音波画像コントラストの因子を調べるために SiC 粒子分散強化 MMC (SiC_p/A357) をそれぞれ用いた。また, 内部観察用としてはあらかじめ不連続部を付した繊維をアルミ合金箔に挟んで高温に保持後ホットプレスにより作成した長繊維 (ボロン繊維) 強化アルミ合金基 MMC (B/6N01) を用いた。

SiC_w/A7075 は粉末法で, また SiC_p/A357 は casting 法で製造したもので, いずれも市販品を購入したものである。これら MMC の機械的性質を Table I に示した。なお, 前述したように B/A6N01 では MMC 本来の機械的特性を求められないのでここでは除いてある。複合材料にすることにより, 引張強度はマトリックス材に比べて向上するが, 延性は逆に減少する。これらの材料を使用するときに問題となるのは, 延性が低いこと, マトリックス材料に比べて異方性が強いことである。

2・2 損傷導入方法

Table II に疲労試験および SAM 観察条件をまとめて示した。SAM の観察に先立って疲労損傷を試験片

に与えた。A6N01 では幅 50 mm, 板厚 5 mm のコンパクト試験片を用いて疲労き裂を導入した。試験方法は約 3 mm の予き裂導入後, 電気油圧式疲労試験機 (容量 5 kN) にて, 応力比 $R=0.1$, 繰返し速度 $f=10$ Hz の条件下において, ΔK 漸増試験により $da/dn=1 \times 10^{-4}$ m/cycle までき裂を成長させた。SAM 観察位置における ΔK は $19 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ である。

SiC_w/A7075 は幅 25 mm, 板厚 4 mm の両側に約 5 mm 深さの鋭い切欠きをつけ, $R=0.1$, $f=10$ Hz, $\Delta K=7.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ にて $K_I=5 \times 10^4$ まで疲労試験を行った。なお, 応力軸方向は押しだし方向とした。

2・3 SAM 観察条件

実験に用いた SAM は反射型 (オリンパス社製, UH3) である。A6N01 では 600 MHz (パースト波) の音響レンズを使用して, マトリックス材の疲労き裂先端に形成される塑性変形域の観察を行った。そして, き裂先端近傍と塑性変形が生じていないと思われる位置において, それぞれの V-D_z 曲線を求め超音波の弾性表面波速度を測定した。音速測定は 400 MHz の音響レンズを用いた。MMC では SiC_p/A357 を用いて, 超音波画像コントラストと組織の関係を超音波の反射率, VD_z 曲線から検討を行った。以上の結果を基に SiC_w/A7075 での切欠き底の損傷評価を行った。本来 MMC では内部観察が重要となるが, 今回用いたウィスカ ($\phi 0.5 \times 20 \mu\text{m}$) あるいは粒子 (平均粒径 $25 \mu\text{m}$) は非常に細かいために高分解能レンズ ($f=800$ MHz) を使用したため, ここでは試料表面での損傷度の評価を試みている。

Table I. Mechanical properties of MMC.

Material	Heat treat	0.2 % yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Modulus (GPa)	Vickers hardness
A6N01	T6	265	282	9.0	67	102
SiC _w /A7075 (V _r =20%)	T6	665	790	1.2	120	232
SiC _p /A356 (V _r =20%)	T6	379	402	0.9	100	173

Table II. Conditions of fatigue test and SEM observation.

Material	Fatigue test			SAM* observed		
	Specimen	Stress ratio	ΔK (MPa $\sqrt{\text{m}}$)	Parts of observation	Acoustic lens (MHz)	V-D _z curve (with 400 MHz)
A6N01 (Rolled)	CT	$R=0.1$	19	Surface, Tip of crack	600	○
SiC _w /A7075 (Powder met.)	Notched	$R=0.1$	7.5	Surface, Tip of notch	800	
SiC _p /A357 (Cast)				Surface	800	○
B _r /A6N01 (Hot press)				Interior	100	

* Water at 60°C was used for coupler.

一方, MMC の内部観察は 100 MHz のパルス送信モードを用いた。これは, 材料内部の反射信号のみを時間ゲートにより取り出すことによって, より高い S/N 比で内部観察が可能となるためである。なお, 本実験ではカプラーとして 60°C の水を使用した。また, 試料はすべて 1 μm のダイヤモンドペーストで表面仕上げを行ってある。

2・4 V-D_z 曲線

V-D_z 曲線は音響レンズと試料との距離(D_z)の関数として, 超音波の反射強度(dB)を測定することによって得られる曲線である。これは試料表面の反射波と弾性表面波との干渉によって生じる干渉波形であり, この波形の周期から弾性表面波速度を求めることができる。実際には, 400 MHz (パースト波)の音響レンズを使用してレンズの2次元(X-Y方向)の走査を止め, D_z方向移動ステップ0.8 μm 間隔に走査し, 512点のデータから V-D_z 曲線を求めた。そして, 得られた曲線からデジタルフィルタ後, ウィンド関数を導入しトレンド除去を行いFFT解析により周期を求め表面弾性波速度を計算した。本実験での精度および再現性はスライドガラスで得られたデータを解析した結果 -0.2~0.4% であった。

3 実験結果および考察

3・1 マトリックス材の変形域の検討

長繊維強化 MMC の引張破壊では, マトリックス材から生じたせん断応力を介して強化繊維に荷重が伝達され繊維の破壊を引き起こすとされている。マトリッ

クス材が強化材に比べ剛性が低い場合には強化材周辺あるいは破断繊維端部近傍において変形域が生じる。ここではマトリックス材での変形域の検討を得られる超音波画像から検討を行った。

Fig. 1(a) は A6N01 アルミ合金の疲労き裂先端部の試料表面を SAM により観察した結果を示す。横方向は繰返し応力方向で圧延方向でもある。き裂周辺に黒く認められる部分は, き裂進展により生じた表面変形によるコントラストと考えられ, 特に, 矢印で示した部分の中央にもき裂が認められることから, 主き裂進展方向が大きく分岐し表面変形が大きくなったものと思われる。写真上で左上の黒い直線は研磨によるキズであり, 中央下の黒い点はボイドである。表面に対し 18 μm 内部の観察を Fig. 1(b) に示すが, 内部では結晶方位が異なることによる粒界が認められる。そして, き裂周辺また先端部に表面観察では認められなかったコントラストの差を生じている。すなわち, 疲労き裂の周囲あるいは先端部には塑性域が形成され, それが, き裂の開閉口に大きく影響を及ぼすことが知られている。このことから, 写真上で観察されるコントラストの差は, 塑性域に関連した可能性が高い。A 部で示した領域は比較的塑性域が少なく, 矢印で示したところのき裂がモードⅡあるいはモードⅢのすべりによって, 急速に成長したため不連続になったと考えられる。

同様に, き裂先端部を拡大したものを Fig. 2(a), (b) に示す。(a) の表面では矢印で示すサブクラックが観察され, (b) の内部と併せると, 粒界にき裂が発生し

(a) Acoustic image at specimen surface.
(b) Acoustic image at a depth of 18 μm from surface.

Fig. 1. Acoustic images of A6N01 ($f=600$ MHz).

(a) Acoustic image at specimen surface.
(b) Acoustic image at a depth of 18 μm from surface.

Fig. 2. Acoustic images of A6N01 ($f=600$ MHz).

ていることがわかる. また, き裂の周辺に干渉じまが観察されており, しま間隔と V-D_z 曲線の解析を合わせて検討することにより, き裂の定量解析が可能である⁴⁾. 一方, き裂先端の塑性域を Von Mises の組合せ荷重下のモード I において試験片表面で平面応力とすると, 次式を使ってき裂進展方向 (X 方向) の塑性域を計算することができる.

$$\omega = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_{I \max}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (1)$$

ここで ω は塑性域寸法, $K_{I \max}$ は応力拡大係数, σ_{ys} は静的降伏応力である. なお, $K_{I \max} = \Delta K(1-R)$ とした. 式 (1) により静的塑性域を計算すると 1 mm となる. 応力軸方向 (Y 方向) の変形域を単純に X 方向の 1.2 倍とすると, 超音波で観察されている塑性域は約 40% 程度である. これに対し, 繰返し塑性域を $\sigma_{yc} = 2\sigma_{ys}$ に置き換えると, その寸法は X 方向で 0.25 mm, Y 方向で 0.3 mm となり観察された塑性域に近い. また, Fig. 1 (b) の B で示した白めの粒界状の部分は結晶方位と主応力方向とが一致することにより塑性変形した可能性がある. 左右比対象に観察されているが, これはき裂が表面と内部で進展方向が異なり不均質荷重が作用したものと思われる. この部分は静的塑性域であると思われるが, 低サイクル挙動を求めているためあくまでも定性的である.

Fig. 1 (b) 中に示した 1, 2, 3 の位置でのレイリー波速度を計測すると, それぞれ 2959, 2927, 2914 m/s

と変化した. 塑性変形が生じていると考えられるき裂先端位置 1 と, ほとんど塑性変形が生じていないと思われる位置 3 では, 速度が約 2% 異なっている. しかし, 得られた音速は -0.2~0.4% の誤差を有している.

一般に, 音速は弾性率/密度の平方根で表すことができ, ここでは塑性変形によりマイクロなき裂, また格子欠陥が増加することにより密度が減少すると考えられ, 位置 1 において速度が速くなったものと考えた. しかし, 各位置での塑性変形量を別の方法で測定していないので, 定性的にしか判断できないが, 今後定量的な検討を行うには, D_z 方向の送りの分解能, 再現性を向上させることが重要となり, 応力とレイリー波速度との関係をあらかじめ求める必要がある. その結果を基に, 得られた画像から応力分布を推定することも可能であると考えられる.

3・2 複合材料の応力集中部の損傷挙動の検討

MMC の中で実用化に最も近いといわれているものとして, ウィスカ強化複合材料がある. そこで, ウィスカ強化複合材料の応力集中部における変形挙動を観察するために, 切欠きを導入し疲労損傷を与えた SiC_w/A7075 (含有率 20%) を用いた. Fig. 3 (a), (b), (c), (d) に SiC_w/A7075 の切欠き底の観察例を示すが, 写真上で水平方向は押しだし方向で, しかも繰返し応力負荷方向でもある.

光学顕微鏡による観察例を Fig. 3 (a) に示すが, アル

- (a) Microstructure.
- (b) Acoustic image at specimen surface.
- (c) Acoustic image at a depth of 4 μm from surface.
- (d) Acoustic image at a depth of 10 μm from surface.

Fig. 3. Optical and acoustic images of SiC_w/A7075 composite ($f=800$ MHz).

ミは白く SiC ウィスカリッチ部は黒く観察される。また SiC ウィスカは押しだし方向にバンド状になっている。超音波で観察した結果, Fig. 3(b)の表面観察では SiC ウィスカリッチ部は白く, アルミの部分は黒く観察され光学顕微鏡の場合とは逆になっている。Fig. 3(c)の表面から $4\mu\text{m}$ 内部では, 表面の場合とコントラストが反転しており白く見えているところがアルミである。Fig. 3(d)の $10\mu\text{m}$ 内部の観察では, さらにコントラストが反転しアルミは黒くウィスカリッチ部は白く見える。これらのコントラストの変化は以下 3・3 節で述べる V-D_z 曲線から説明される。

Fig. 3(d)の切欠き底に, 矢印で示した白く見える部分は, Fig. 3(a)の光学顕微鏡の結果から, ウィスカの少ないアルミの領域に白く認められている。これは, 3・1 節で述べた, アルミ合金 A6N01 材の検討の結果と同様に, 繰返し応力により比較的強度の弱いマトリックスのアルミ材が塑性変形を生じている部分であると考えた領域である。塑性変形域はウィスカのバンドを避けるように形成されていることがわかる。このことから, ウィスカ強化複合材料でのき裂の発生は, 比較的弱いマトリックス材から発生し, ウィスカはき裂の発生抵抗になると考えられる。

前節と同様に式 (1) から塑性域を計算すると $\omega=16\mu\text{m}$ となり, 観察されている塑性域より小さい。これは, き裂発生直前の切欠き部の応力集中による変形域と考えられるが, 今後の検討課題である。

3・3 複合材料の超音波画像コントラストの検討

前節では, マトリックス材における塑性変形域から MMC における塑性域と強化繊維との関係を SAM で検討できる見通しがたった。ここでは, MMC の超音波画像コントラストを超音波速度の立場から検討を加えた。用いた MMC は SiC_p/A357 (粒子含有率 20%) である。まず光学顕微鏡で観察すると Fig. 4(a)に示すように SiC 粒子は黒くあるいは灰色に, アルミは白く見える。これに対し, 表面を超音波で観察すると Fig. 4(b)に示すように, 光学顕微鏡の観察の場合とは逆に SiC は白く, アルミは黒く観察される。また, Fig. 4(c)は表面から $4\mu\text{m}$ 内部の観察例であるが, SiC 粒子とアルミのコントラストが逆転している。

これらの超音波像の明暗が逆転する現象は次のように解釈できる。まず, 表面における明暗は, 基地材料と SiC 粒子との超音波の反射率の違いに起因して生じる。超音波の反射率 Pr は式 (2) で表される。

$$Pr = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad (2)$$

ここで, Z_1 , Z_2 はそれぞれ媒体としての水および物質の音響インピーダンス (密度×音速) である。 Pr

(a) Microstructure.
(b) Acoustic image at specimen surface.
(c) Acoustic image at a depth of $4\mu\text{m}$ from surface.

Fig. 4. Optical and acoustic images of SiC_p/A357 composite ($f=800\text{ MHz}$).

はアルミ合金と SiC でそれぞれ 0.68, 0.86 となり, SiC の方が大きいために SiC の方が白く見える。なお, アルミ, SiC の密度 (g/cm^3) および音速 (m/s) はそれぞれ 2.70 および 2900, 3.12 および 6500 とした。

一方, 内部に超音波の焦点を移動した場合には Fig. 5 に示すような V-D_z 曲線が得られる。V および D_z はそれぞれ反射超音波の出力 (dB) および垂直方向の焦点移動距離 (μm) で, 試料表面に焦点がある場合を $D_z=0$ とし, 負の方向は試料をレンズに近づけた場合である。なお, これは 400 MHz の音響レンズを用いて, 本試料のマトリックス材であるアルミと, SiC 粒子に超音波集束ビームをあて計測したものである。図中太線と細線は SiC, Al の場合を表す。図からわかるように $D_z=0\mu\text{m}$ で最大の出力を示した後, ある周期で増減しながら全体に減少する。この傾向は物質の音速と周波数により出力および周期は変わる。これ

Fig. 5. V-D_z curves for Al matrix and SiC particle.

から D_z の位置に対して Al, SiC の超音波像でもコントラストは変化することがわかる。

一般に超音波の周波数が高い方が V-D_z 曲線上的平均ピーク間隔 (ΔD_z) は小さくなる。なお ΔD_z は式 (3) で表される。

$$\Delta D_z = C_R^2 / (f C_0) \quad (3)$$

ここで C_R, C₀ はそれぞれ物質のレイリー波速度および水の音速, f は超音波の周波数を表す。Al のレイリー波速度および H₂O の音速は約 2900 および 1500 m/s であるために, f = 400 MHz では Al の場合 ΔD_z は約 14 μm である。これは Fig. 5 の Al のそれに近い。SiC のレイリー波速度は測定されていないので, 逆に式 (2) から求めると約 3500 m/s となる。この場合 ΔD_z = 20 μm とした。これは SiC の横波の速度 6500 m/s に比べかなり小さい。式 (3) から f = 800 MHz における ΔD_z を計算すると, Al, SiC それぞれ約 7 および 13 μm となり, Fig. 4 (c) の 4 μm 深さでの Al と SiC のコントラストの逆転とほぼ一致している。同様に Fig. 3 で観察されたウィスカ強化複合材料についてのコントラストの変化も説明できる。しかし, 異種物質から構成される MMC の場合, 基地材料と強化材の境界での超音波の散乱, あるいは強化繊維の形状, 大きさ, 含有率等によりコントラストが変化する可能性があり, 今後の検討課題である。

一方, Fig. 4 (b) の矢印で示した粒界状のものは試料全体に認められており, 製造時による元素の偏析と考えられることから, EPMA による面分析を行った。その結果を Fig. 6 に示す。分析箇所は偏析物を中心として行ったもので同一箇所ではないが, Si の偏析物が認められている。Si の密度と音速を 2.42, 4200 と

Fig. 6. Microstructure and element mapping of the specimen surface by EPMA for SiC_p/A357 composite.

すると, 超音波での Si の反射率は 0.74 で, Fig. 4 (b) に示した矢印の部分はアルミに比べ白く, SiC に比べ黒く見えていることから Si の偏析物と考えられる。Fig. 4 (c) では, 粒子を連ねるように粒界がうっすらと観察されている。これは casting material であり, 凝固時に SiC が粒界に偏析したことによると考えられる。

以上のように, 音響インピーダンスが異なる物質からなる複合材料では, 強化材の分散, 偏析状態を定量的に分析可能であると思われる。さらに, 他の分析結果と組み合わせて解析することが重要となる。

3・4 複合材料の内部観察

MMC 損傷を解析するためには, 内部繊維の破壊プロセスを調べることも重要となる。このため, 超音波パルス信号を用い, 周波数 100 MHz の音響レンズを使用して, B/A6N01 を観察した例を Fig. 7 (a), (b) に示す。この写真上で上下は繊維の長手方向である。Fig. 7 (a) は試料表面部の観察例で, 右側上下方向に幅約 50 μm の直線上の像が認められるのが, 表面に顔を出した B 繊維で, 観察に先立って試料表面をダイヤモンドペーストで研磨した際に出現したものである。

Fig. 7 (b) は表面から 150 μm 内部を観察した例であるが, Fig. 7 (a) で表面に顔を出している繊維に対応した部分では, 繊維の直径が大きくなっているのが観察されている。その両側にも繊維が認められる。特に, 左端の繊維は破断しており, その様相が観察できる。A で示した繊維の径は写真上でその径が異なっており, 上の方が細くなっている。これは繊維が面内で傾斜し

(a) Surface image.

(b) Image at a depth of 150 μm from surface.Fig. 7. Acoustic images of B₁/A6N01 composite ($f=100$ MHz).

ているためと考えられる。これらの観察から、応力が負荷されたときの界面はく離、繊維の割れ等による損傷挙動の解析が可能であると思われる。

4 結 論

超音波顕微鏡を用いてマトリックス材の変形域の評価、表面近傍における超音波の速度変化と画像のコントラストとの関係、内部繊維の観察を行い、MMCの損傷程度、その機構について基礎的検討を試みた結果、以下の結論が得られた。

(1) 複合材料の基地材料として使用される A6N01 合金の疲労き裂先端部の観察結果、塑性変形域が観察され、表面で平面応力として計算された塑性域は繰返し塑性域に近かった。き裂先端部と塑性変形の生じていないと思われる位置での音速の変化は約 2% であった。このことにより、応力と速度との関係をあらかじめ求めておくことにより、変形域での定量解析が

可能であることが示された。

(2) ウィスカ強化複合材料 SiC_w/A7075 を用いて、疲労損傷を与えた切欠き部における塑性変形挙動を調べた結果、基地材料に塑性変形が限定されていることが明らかとなり、き裂の発生は比較的弱いマトリックス材から発生し、ウィスカはき裂の発生および低速度での、き裂の成長抵抗になると考えられた。

(3) 複合材料の塑性変形域に及ぼす組織の影響について、超音波表面速度の立場から検討した結果、粒子分散強化複合材料 SiC_p/A357 を用いて、マトリックス材と強化材の V-D_z 曲線を求めることにより、超音波画像のコントラストの変化の説明が可能となった。また、粒子の分散および偏析状態が定量的に分析可能であることが示された。

(4) パルス超音波を用い、繊維強化複合材料 B/A6N01 の内部観察を行った結果、繊維の破断、割れ、はく離等の観察が可能であることが示された。

(平成 2 年 7 月 26 日 第 27 回 X 線材料強度に関するシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) A. Kelly and W. R. Tyson, "High Strength Materials", p. 578. (1965) John Wiley & Sons
- 2) J. M. Hedgepeth and P. V. Dyke, J. Composite Mater., 1, 189 (1967).
- 3) 荒木孝雄, 広瀬明夫, 松広克之, 湖東雅弘, 富田晋也, 第 7 回フラクトグラフィシンポジウム前刷集, p. 17 (1990).
- 4) 山中一司, 機械技研報告, 141, 1 (1987).
- 5) 酒井 貢, 非破壊検査, 5, 39 (1990).
- 6) 駒井謙治郎, 箕島弘二, 木下 定, 小川浩基, 黒田彰夫, 材料, 39, 438 (1990).
- 7) 増田千利, 田中義久, 鉄と鋼, 75, 1753 (1989).
- 8) 増田千利, 田中義久, 山本元弘, 深沢 稔, 日本複合材料学会誌, 17, 66 (1991).
- 9) 内野文雄, 館岡 斉, 機械の研究, 35, 997 (1983).
- 10) W. Parman and H. L. Bertoni, Electron Lett., 34, 179 (1979).