

© 1992 ISIJ

論 文

# シンクロトロン放射光を用いた X 線 CT による金属基複合材料の内部繊維観察

田中義久\*・増田千利\*<sup>2</sup>・宇佐美勝久\*<sup>3</sup>・平野辰巳\*<sup>3</sup>  
今井良雄\*・塩田一路\*<sup>2</sup>・古林英一\*<sup>2</sup>・岩崎 博\*<sup>4</sup>

## Observation of Inner Fibers in Metal Matrix Composites by X-ray Computed Tomography Using Synchrotron Radiation

Yoshihisa TANAKA, Chitoshi MASUDA, Katsuhisa USAMI, Tatsumi HIRANO,  
Yoshio IMAI, Ichiro SHIOTA, Eiichi FURUBAYASHI and Hiroshi IWASAKI

### Synopsis :

Direct observation of the reinforcing fibers was attempted by X-ray Computed Tomography (CT) using synchrotron radiation in the Photon Factory of the National Laboratory for High Energy Physics (KEK) in Tsukuba. The energies were selected 21 and 29 keV for aluminium and aluminium alloys matrix composites and titanium alloy matrix composite on the basis of the X-ray absorption coefficients of the included elements in composites, respectively. The inner fibers and debonding parts of the interface between fiber and matrix were clearly found for SiC/Al composite. In the case of SiC/Al and SiC/A6061 aluminium composite the core carbon fibers of 30  $\mu\text{m}$  in diameter were also observed. It is considered that the resolution of X-ray CT scanner used in this study was about 10  $\mu\text{m}$ . The 3-dimensional images were reconstructed from several cross sectional CT images. It is point out that the 3-dimensional images visually displayed inner structures are very useful to examine the fracture process of the fibers contained in the metal matrix composite.

**Key words :** nondestructive evaluation; X-ray CT; metal matrix composites; debonding; reinforced fibers.

## 1. 緒 言

複合材料中には繊維とマトリックスとの間の界面剥離、マトリックス材の未浸入部としてのポイド、場合によっては介在物、硬化不良部等が存在する。この他衝撃損傷やき裂等が内部に存在することがある。これらの各種欠陥や損傷の評価のために超音波探傷法が利用されていた。しかしその適用例の報告もあまり多くない。最近複合材料の内部解析に超音波顕微鏡を適用した例<sup>1)</sup>が報告されるようになってきたが、まだ少ないのが現状である。

複合材料の場合、強化繊維とマトリックスの界面剥離、繊維の破断、破断繊維の端部における応力集中やき裂の成長過程を非破壊的な手法により定量的に計測することが重要となる。これは複合材料の製造プロセスの最適化に役立つのみならず、これまで行われている計算機によ

るシミュレーション解析に必要な境界条件を実験に基づいて設定できることになり、より精度よく行えることになると考えられる。

ここでは上記の目的のために、従来工学や医療の分野で既に利用されているコンピュータトモグラフィ（CT）技術を用いて、金属基複合材料中の強化繊維や界面剥離等を観察するための基礎的研究を行った。CT技術としては超音波、X線あるいは磁気を利用したものがあるが、ここではX線を用いたCT技術を利用した。これに関しては強力X線装置を用いて、鉄鉱石の断面元素分布解析に応用した研究<sup>2)</sup>がある。それによると分解能が約250  $\mu\text{m}$ といわれており、複合材料の強化繊維として使用されているBやSiC繊維の最大径約140  $\mu\text{m}$ に達しない。このため少なくとも分解能が140  $\mu\text{m}$ 以下の装置が必要となる。著者の一部<sup>3,4)</sup>はシンクロトロン放射光（SR）を利用したX線CT技術を開発し、

平成元年9月本会講演大会にて発表 平成3年5月27日受付 (Received May 27, 1991)

\* 金属材料技術研究所 (National Research Institute for Metals)

\*<sup>2</sup> 金属材料技術研究所 工博 (National Research Institute for Metals, 2-3-12 Nakameguro Meguro-ku, Tokyo 153)

\*<sup>3</sup> (株)日立製作所日立研究所 (Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.)

\*<sup>4</sup> 高エネルギー物理学研究所 理博 (Photon Factory of the National Laboratory for High Energy Physics)

分解能が約 10  $\mu\text{m}$  であることを確かめた。

本研究では SR を利用した X 線 CT 装置を用いて、実用的な金属基複合材料の内部観察を行うための X 線のエネルギー条件, SR の X 線を単色化するためのモノクロメーター選択, アルミ合金, チタン合金基複合材料の試験片寸法等に関する基礎的検討の他, 結果として得られる断層像を基に 3 次元画像構築を試み, 内部欠陥等の定量的評価法の検討を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 X 線 CT 観察に用いた複合材料

内部観察のために用意した FRM は Table 1 に示す 4 種類である。今回はまず内部に含まれる強化繊維の観察が目的であるために, 繊維の本数があらかじめわかっているものを用意した。さらに材料の X 線吸収係数から明瞭な濃淡画像が得られるための条件を検討した 4 章の検討結果を基に試験片寸法を決めた。

FRM の基地材料としては X 線吸収係数が小さく, しかも実用材料であるアルミ合金 (純アルミ, A6N01, A6061), チタン合金 (Ti-6Al-4V) の 2 種類を選んだ。さらに同様の考えから強化繊維としてはボロン繊維 (B), 炭化珪素繊維 (SiC) を選んだ。これらの強化繊維は芯線として炭素 (C) を用いたものである。特に B 繊維の場合には芯線としてタングステン線を用いた繊維が一般的であるが, X 線吸収係数が大きいためここでは用いなかった。アルミ合金を基地材料とした FRM については繊維の種類, 繊維の本数を変えてある。

試料 No. 1 は B/A6N01 FRM で板厚中央に B 繊維が 6~7 本並んだものである。これは繊維の配列が基本的な場合の例として用いた。試料 No. 2, 3 は SiC/純 Al, SiC/A6061 FRM で, No. 2 は以下の 3 次元構築に際して No. 1 より複雑な例として用いた。No. 3 は実用的な FRM の例として用いた。試料 No. 4 はアルミ合金基 FRM の他にチタン合金基 FRM の代表的な例として用いたもので, SiC/Ti-6Al-4V 複合材料で約 1 mm 角材である。本検討に用いた試験片の寸法, 繊維径, 製造方法などをまとめて Table 1 に示してある。

Table 1. Specimens and observation conditions of composites used this study.

No.	Materials	Specimen size (mm)	Diameter of fiber ( $\mu\text{m}$ )	Fabrication	Energy
1	B/6N01	2.4×1.0	80(C)*	Hot press	21 keV
2	SiC/Al	1.8×0.4	140(C)*	Hot press	21 keV
3	SiC/A6061	1.7×1.0	140(C)*	Hot press	21 keV
4	SiC/Ti-6Al-4V	1.0×0.9	140(C)*	Hot press	29 keV

\* (C) :  $\phi 30 \mu\text{m}$  carbon core

### 2.2 X 線 CT 画像撮影条件

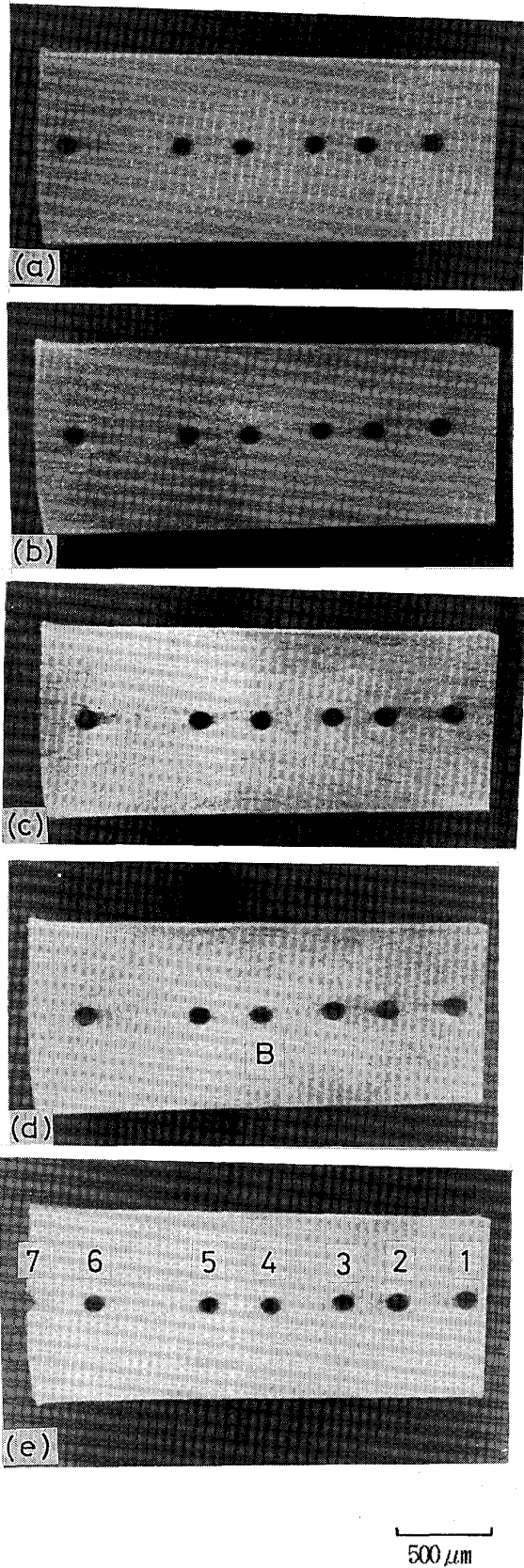
X 線 CT 装置は SR からの X 線をシリコンのモノクロメーターで単色化し, シート状の X 線を試料に入射し, 透過 X 線を X 線撮像管で検出する。これを各 1 度ごと総計 180 度まで繰り返し計測し, 各角度に対し得られた X 線透過強度から, コンピューターを用いて断層画像を構築する。その手法は医療用 X 線 CT 装置で行われているものと同じである。本装置では Si (111), Si (400) のモノクロメーターが使用可能であり, 前者では 7~20 keV, 後者では 20~35 keV のエネルギー範囲の単色 X 線が得られる。

CT 像は X 線に対する線吸収係数の 2 次元分布像として得られ, S/N がよく, しかもコントラストの高い画像として得られるためには, 試料に対する X 線の透過強度が大きく, しかも物質ごとの線吸収係数差が大きいことが望ましい。これは使用する X 線のエネルギーとして前者はできるだけ高いエネルギーが, 後者はできるだけ低いエネルギーが望ましいことを意味している。4.1 節における本実験に用いた試料に対する X 線透過率に関する検討結果をもとに, 結晶モノクロメーターは Si (400) を用い, 使用 X 線のエネルギーはアルミ基 FRM には 21 keV, チタン基 FRM には 29 keV とした。なお画像の S/N 比をあげるために各角度において 10~20 回の積算露光及び上下方向に 5~10 ラインの加算を行った。また試料に対して約 100  $\mu\text{m}$  間隔で 5~10 断層の撮影を行った。

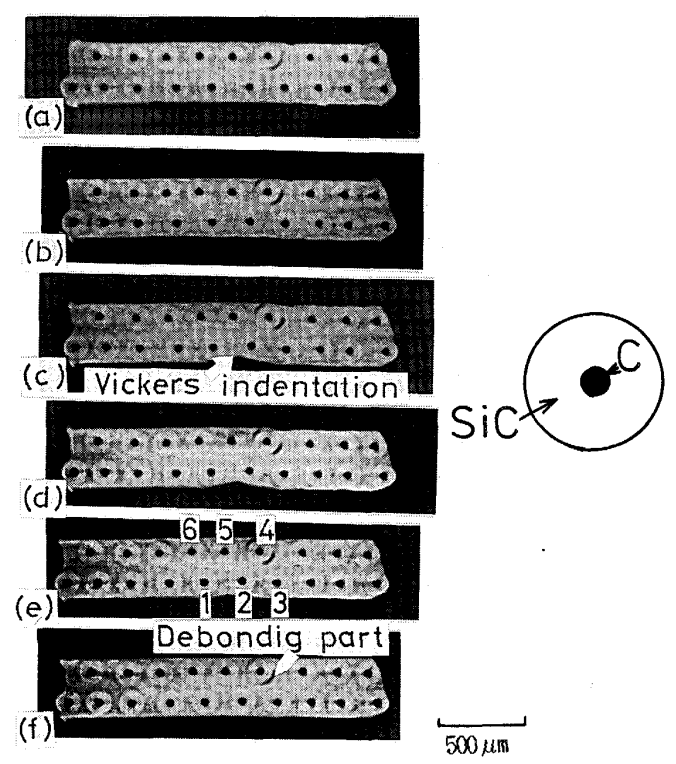
## 3. 複合材料の内部繊維観察結果

### 3.1 アルミ合金基複合材料

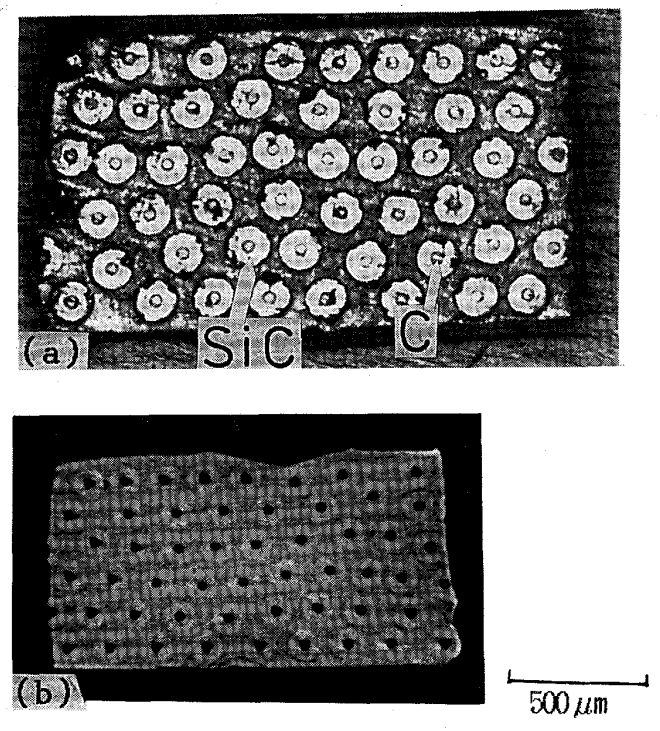
複合材料に含まれる各種の強化繊維を X 線 CT 装置により観察した例を以下に示す。いずれも線吸収係数が大きい領域ほど明るく, 小さい領域ほど黒くなるように表示してある。Photo. 1 は B/A6N01 FRM の場合で, 写真中で黒く円状に見えるのが B 繊維である。B 繊維の線吸収係数は基地材料のそれに比べ小さいために黒く見える。灰色に見えるのが基地部である。Photo. 1(a)~(d)では B 繊維が 6 本板厚中央に一直列に並んでいるのに対し, Photo. 1(e)では 7 本観察され, 第 7 番目の B 繊維が同写真中の (a) から (d) までの断面では観察されないことから, 第 7 番目の B 繊維は Photo. 1(d) と (e) の間にしか入っていないことになる。詳細にみると各番号の B 繊維は Photo. 1(a)~(e) の写真中で少しずつ右側にずれていくことがわかる。これから B 繊維が FRM 中で試料側面に対して, 傾いて埋め込まれていることを表す。



(a)  $Z = 0 \mu\text{m}$  (b)  $Z = 82 \mu\text{m}$  (c)  $Z = 164 \mu\text{m}$  (d)  $Z = 246 \mu\text{m}$   
 (e)  $Z = 328 \mu\text{m}$  ( $Z$  is a virtual distance)  
 Photo. 1. Monochromatic X-ray CT images for B/A6N01 aluminium matrix composite.



(a)  $Z = 0 \mu\text{m}$  (b)  $Z = 82 \mu\text{m}$  (c)  $Z = 164 \mu\text{m}$  (d)  $Z = 246 \mu\text{m}$   
 (e)  $Z = 328 \mu\text{m}$  (f)  $Z = 410 \mu\text{m}$  ( $Z$  is a virtual distance)  
 Photo. 2. Monochromatic X-ray CT images for SiC/Al composite.



(a) Cross sectional micrograph  
 (b) Monochromatic X-ray CT image  
 Photo. 3. Cross sectional micrograph and monochromatic X-ray CT image for SiC/A6061 composite.

Table 2. Reference data of X-ray mass absorption coefficient for elements in aluminum alloys or titanium alloy matrix composites used in this study.

Material	Energy	10 keV	15	20	25	30	Density $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Linear absorption coefficient at $E=20$ keV (1/cm)
	Mass absorption coefficient (cm <sup>2</sup> /g)							
B	1.38	0.47	0.31	0.24	0.21	0.21	2.54	0.79
C	2.45	0.77	0.43	0.31	0.31	0.25	2.25	0.97
Al	27.50	8.80	3.42	1.80	1.13	1.13	2.70	9.23
Si	34.50	10.60	4.40	2.33	1.46	1.46	2.42	10.65
Ti	112.00	38.00	16.40	8.40	5.00	5.00	4.50	73.80
V	126.00	42.20	18.40	9.50	5.60	5.60	5.87	108.01
SiC	24.90	7.65	3.21	1.72	1.10	1.10	3.12	10.02
Ti alloy	107.50	36.40	15.50	8.05	4.79	4.79	4.50( $\rho$ Ti)	69.75

B 繊維に直角な断面における SEM 観察によると B 繊維の直径は約 80  $\mu\text{m}$  であった。写真上から測定した B 繊維の径は約 80  $\mu\text{m}$  で良く一致している。B 繊維の芯線は C であり、B, C との線吸収係数は Table 2 からわかるように約 1.2 倍異なるが、写真のグレーレベルの調整を B 繊維とマトリックスに合わせたために、写真上ではその区別がつかないが、グレーレベルを変えると両者は区別できることを確認した。

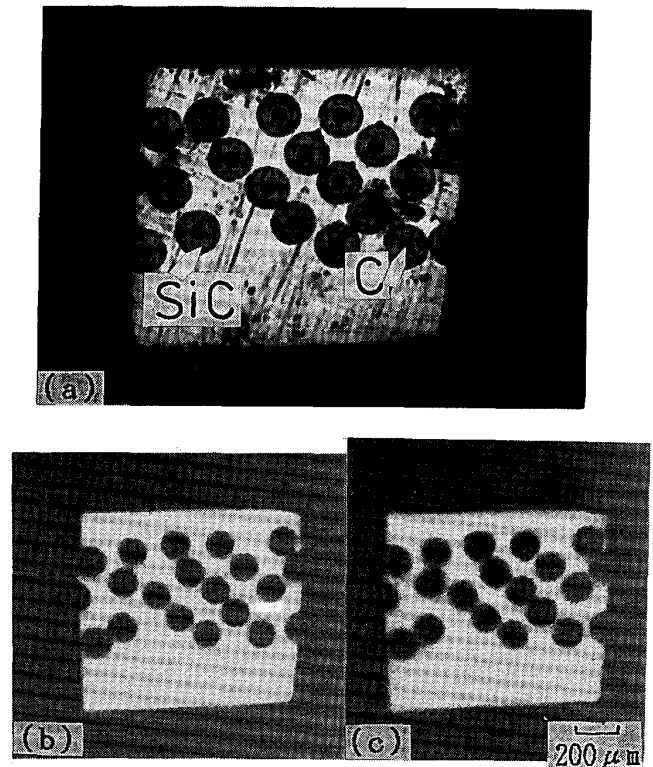
Photo. 2 は板厚 0.4 mm の SiC/Al FRM の例で試験片表面にピッカース圧痕をつけてある。SiC 及び Al の線吸収係数は Table 2 から明らかなように約 8% SiC の方が Al より大きい。このため写真上では SiC の方が明るくなる。SiC 繊維の場合にも前述したように、芯線が C であり、C の線吸収係数は SiC, Al のそれより約 10 倍小さいために、写真上では黒くみえる。写真から SiC 部の中央に直径 1.5 mm の黒く円状に見えるのが C 芯線である。C 芯線の直径は約 30  $\mu\text{m}$  であることから、Photo. 3 の結果も考慮して本装置の分解能は約 10  $\mu\text{m}$  と考えても良い。

なお写真上で上段右から 4 本目の繊維と基地との界面に矢印で示した部分に黒い特徴が認められるが、これは界面が剥離したものかあるいは材料製造中に基地材料が SiC 繊維のまわりに十分浸透しなかったために生じた欠陥と考えられる。また剥離のない SiC 繊維とマトリックス界面に SiC 繊維に比べてグレーレベルの高い円状の帯が認められる。これは約 1~2  $\mu\text{m}$  厚さの C リッチ層が SiC 繊維の表面に存在するためと考えられる。これが C リッチ層によるものとすれば、分解能はかなり良いことになる。

Photo. 3 は同じく SiC/A6061 複合材料であるが、繊維の含有率が約 50% で、しかも試料が 1 mm 厚のものである。本試料にもピッカース圧痕をつけてある。この場合には含まれる SiC 繊維の数が約 53 本と実際の複合材料に近いものである。Photo. 2 の例と同様に内部繊維が良く観察可能である。また矢印で示すように繊維間

に剥離状の特徴が認められる。以上の結果からアルミ合金を基地材料にした B, SiC 繊維強化 FRM の内部繊維の観察には主として X 線エネルギーは 21 keV で行った例を示したが、かなり良く観察が可能であることが明らかとなった。

なお本検討では露光の繰返し積算及び数ラインの加算等の撮影条件を検討したが、露光の積算数は鮮明な断層像を得るに要する時間に関連する。また数ラインを加算することは、画像の垂直方向の精度に関連してくるとともに、撮影時間にも関連する。このために各条件で検討したが、すでに写真で示したようなかなり鮮明な画像を



(a) Cross sectional micrograph  
(b) Monochromatic X-ray CT images

Photo. 4. Cross sectional micrograph and monochromatic X-ray CT image for SiC/Ti-6Al-4V composite.

得る条件としては、露光の繰返し積算回数を 10~20 回、加算ラインとしては最大 10 ラインとした。

この他時間により CT 装置の軸芯のずれがでてくるのが問題である。このために測定開始前後において軸芯の検定を行った。ここでは軸芯は CRT 上で 1 画素以内すなわち 6 μm 以下とした。

### 3.2 チタン合金基複合材料

Photo. 4 は SiC/Ti-6Al-4V 複合材料の例である。チタン合金の場合にはアルミ合金に比べ線吸収係数が大きいために、X 線のエネルギーを 29 keV で観察を行った。その結果内部の繊維が明瞭に観察できることが写真から明らかである。なお SiC とチタン合金との線吸収係数は使用したエネルギーで 6 倍異なり、SiC 繊維は写真上で黒く認められる。SiC 繊維の直径は約 140 μm である。この場合には繊維内部の芯線である C は SiC と区別できない。今回繊維と基地材料との区別を第一に考えたために、画像のグレーレベルを両者に併せたことによる。なお C と SiC の区別は Photo. 2,3 と同様可能であることは確認した。

## 4. X 線吸収係数と複合材料の形状との関係

### 4.1 X 線吸収係数と複合材料の形状との関連

FRM の X 線透過率を計算するためのモデルを Fig. 1 に示す。平板のマトリックス中に 2 本の強化繊維が含まれる単純化した試験片を考える。とりあえず繊維は最大直径を厚さとする板材を考えた。ここで試験片厚さを  $t_0$ 、繊維の最大厚さを  $t_f$ 、基地材料の最小厚さを  $t_m$  とする。試料の X 線透過率 ( $I/I_0$ ) は式(1)で表せる。

$$I/I_0 = \exp(-\mu t) \dots\dots\dots (1)$$

$$\mu t = (\mu/\rho) \rho t$$

$$(\mu/\rho) = \sum C_i (\mu/\rho)_i$$

ここで  $I$ 、 $I_0$ 、 $\mu$ 、 $\rho$ 、 $C_i$  はそれぞれ透過 X 線強度、初期 X 線強度、X 線の線吸収係数、密度、元素  $i$  の重量割合 (%) である。

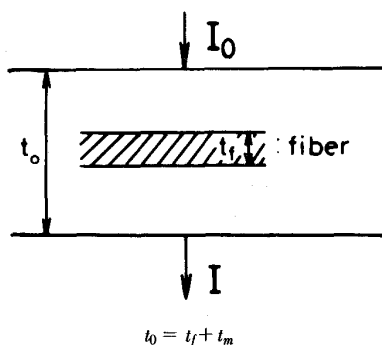
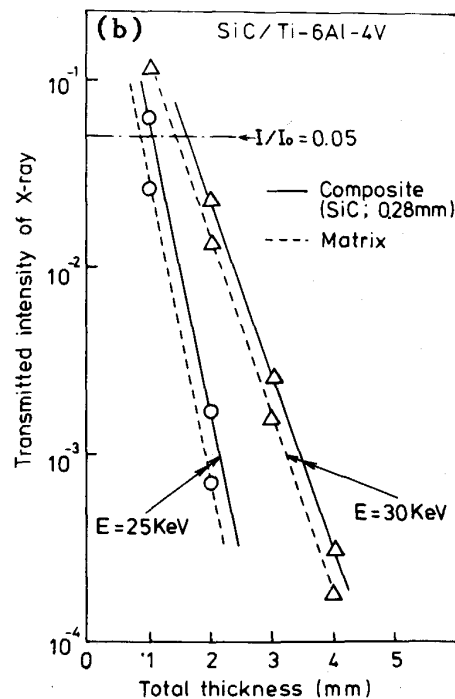
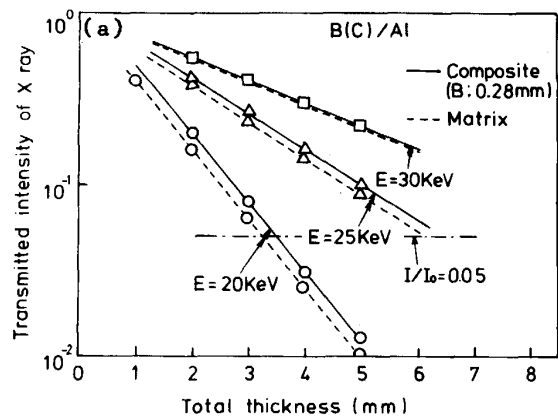


Fig. 1. Model for the calculation of the transmitted intensity of X-rays in the composite.

複合材料の透過 X 線強度を式(1)から求めると式(2)が得られる。

$$I/I_0 = \exp(-(\mu/\rho)_m \rho_m t_m) \cdot \exp(-(\mu/\rho)_f \rho_f t_f) \\ = \exp(-(\mu/\rho)_m \rho_m t_0) \cdot \exp((\mu/\rho)_m \rho_m - (\mu/\rho)_f \rho_f) t_f) \dots\dots\dots (2)$$

ここで複合材料の構成元素に対する質量吸収係数を特性 X 線のデータ表<sup>5)</sup>から読み取り、各 X 線エネルギーに対してまとめた Table 2 のデータを基に図示したものが Fig. 2 である。Fig. 2(a) は B(C)/Al 複合材料の場合で、基地材料のみ及びボロン繊維の最大径を 0.28 mm (0.08 mm の場合 3.5 層積層を想定) とした複合材料の場合に分けて示してあるが、B 繊維を含むことに



(a) For boron fiber reinforced aluminium matrix composite  
(b) For the silicon carbide fiber reinforced titanium matrix composite

Fig. 2. Relationship between transmitted intensity of X-ray to total specimen thickness of composites.

より、X 線の透過率が増加することが明らかである。また X 線エネルギー  $E$  が高くなると同一厚さに対する透過率も増すことがわかる。Fig. 2(b) は SiC(C)/Ti-6Al-4V 複合材料の場合で、B(C)/Al 複合材料の場合と同様に繊維を含むことによりマトリックス材料に比べ、X 線の透過率は増加するが、全体の透過率は B(C)/Al 複合材料に比べ同一エネルギーに対し約 1/6 に減少する。これは Al と Ti-6Al-4V チタン合金との X 線の透過率そのものが異なることに起因する。

なおここで繊維形状が円状であるのに対し、最大径を厚さとする板材で近似したが、両者の断面積比は約 20% 異なる。また B、SiC 繊維の芯線として約 30  $\mu\text{m}$  の C 繊維が含まれているが、ここでの計算にはこれは考慮していない。C 芯線と SiC 繊維との面積比は約 5% 程度になる。このため C 芯線の影響はかなり小さいと言える。C 芯線の影響を考慮すると、計算から求めた X 線の透過強度は両繊維の場合とも同一試験片長に対して計算値より小さくなる。実際には繊維を 2 層以上含む場合が多いため、透過 X 線強度はここで計算した値より大きくなることから、計算値より大きめの寸法の試験片の解析が可能と言える。

#### 4.2 3次元画像構築及び内部繊維・欠陥、き裂評価

X 線 CT により得られた数枚の断層像を基に、3次元像の構築の考え方を Fig. 3 を用いて説明する。図中には 3 枚の断層像をモデル的に示すが、それぞれ下側から断面 1, 2, 3 と呼ぶ。それぞれの断面において対象物の輪郭線に番号をつける。その後輪郭線を分割し、3次元座標をつける。断面 1, 2 の間で最近接分割点を連結することを繰り返し、立体像を構築する。1, 2 の 2 断層の座標  $(X_i, 1, Y_i, 1, Z_i, 1)$  と  $(X_i, 2, Y_i, 2, Z_i, 2)$  及び  $(X_{i+1}, 2, Y_{i+1}, 2, Z_{i+1}, 2)$  間の距

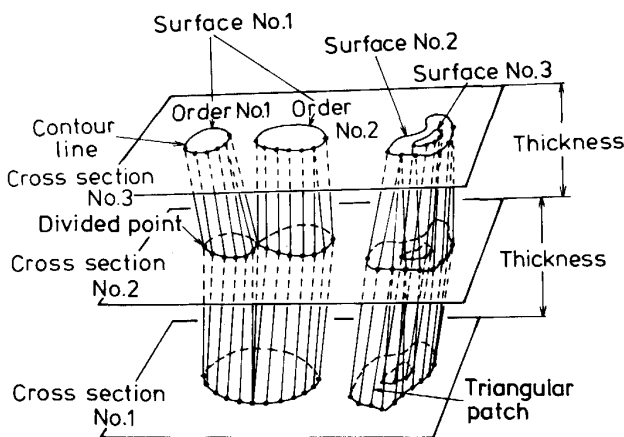


Fig. 3. 3-dimensional image construction based on the monochromatic X-ray CT images.

離  $l'$  は式 (3) から計算される。なお断層間隔は  $l$  とする。

$$l' = \sqrt{\{(x_i, j-x_i, k)^2 + (y_i, j-y_i, k)^2 + l^2\}} \dots\dots\dots (3)$$

2 断層上の点をずらしながら計算し、 $l'$  を最小にする点を捜し、1 断層上の点と連結する。1 が最小となる点が 2 か所以上求まる場合には、どちらかを選択する。この場合には分割の単位が誤差要因となる。形状が複雑な場合には回転方向等を考慮して連結する。このほか各断層像の位置合わせ誤差も、3次元像の構築精度に大きく影響する。なお今回の FRM の X 線 CT 断層像は芯線を考慮すると、Fig. 3 の右側のモデルに近い。

Photo. 1 に示す B/6N01 FRM の X 線 CT により得られた 5 断層像を基に、上記の考え方に従って 3次元画像を構築した。まず各断層像をマクロスタンドから画像処理装置に写真入力し、その画像を 2 値化して繊維とマトリックスとの界面を線画として記憶させる。このとき基準となる位置を決めて各断層像を取り込むが、最終的には画像処理装置に取り込んだ後で、微調整による位置合わせを行った。その後上述した手順で各断層の線画において隣あう 2 断層間を連結することを行った。このようにして得られた 3次元像を Photo. 5 に示す。

写真中に B 繊維に番号をつけてあるが、これは Photo. 1 における B 繊維の番号と一致している。また (a)~(e) の英字をつけているが、これはやはり Photo. 1 における X 線 CT 断層像の各断面番号である。これから B 繊維は右下がりの直線として認識される。なお左の 1 本は途中で切断されていることが明らかである。

Photo. 6 はこの FRM の X 線透過像を示す。写真中で黒く見える部分が FRM である。また FRM 中で番号をつけた白く右下がりの線が認められるが、それが B 繊維である。この角度は側面に対して約 45 度右下がりに傾斜している。これは Photo. 5 の立体像と良く対応している。全体に傾斜した繊維が認められると共に、7 番目の繊維はわずかに認められる。

Photo. 7 は Photo. 2 の FRM の CT 断層像を基に構築した 3次元像である。Photo. 2 中で 4 番の SiC 繊維の周囲には両サイドに剥離部が認められたため、その繊維近傍についてのみ取り出して Photo. 7 に示す。記号の付け方は Photo. 6 と同様である。各番号の繊維の中に更に小さな繊維が認められるが、これは SiC 繊維の芯線である C 繊維である。4 番の SiC 繊維の両サイドには剥離部が認められる。特にこの写真上では手前部分の剥離部は断層 (b)~(e) の間で認められる。各断層間の距離が約 82  $\mu\text{m}$  であることから、約 246  $\mu\text{m}$  の間で剥離していることになる。また 4 番目の繊維の裏側はこの

視野全体において剥離していたために、その部分は少なくとも  $410 \mu\text{m}$  以上と言える。

この他繊維の破断部観察の可能性を検討するために、あらかじめ破断した B 繊維を含むアルミ合金基 FRM (B/A5052) を作成した。その X 線 CT 断層像から 3 次元像を構築した例を Photo. 8 示す。矢印で示す部分で繊維が不連続になっていることが明らかである。また繊維の不連続部は凸凹している。これは FRM の破面でプルアウトが観察される場合に近い。

以上のことから X 線 CT による断層像を基に、内部繊維の 3 次元構築可能であること、さらに断層像だけでは判断できなかった FRM の内部構造がより詳細に

解析可能になると考えられる。また繊維に割れが存在したり、繊維とマトリックスとの界面における剥離などが存在すれば、その確認が可能になることが明らかになった。

以上の結果、装置の分解能からして約  $10 \mu\text{m}$  以上で、X 線吸収係数が約 10% 以上異なる第 2 相物質が含まれる複合材料中の内部観察が可能であること、さらに断層

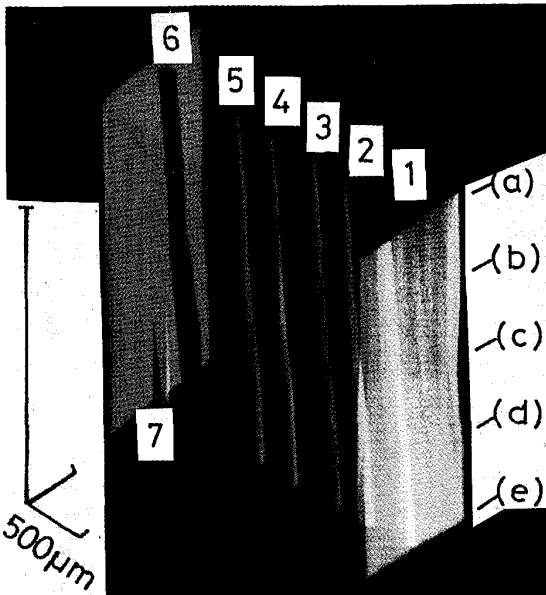


Photo. 5. 3-dimensional image reconstructed used the monochromatic X-ray CT images for B/A6N01 composite shown in Photo. 1.

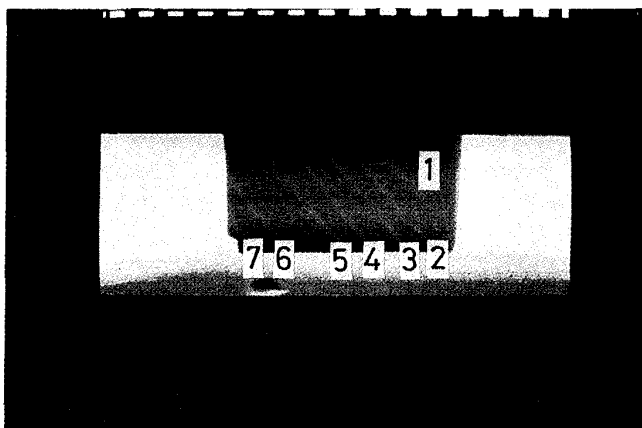


Photo. 6. Transmitted monochromatic X-ray image for B/A6N01 composite.

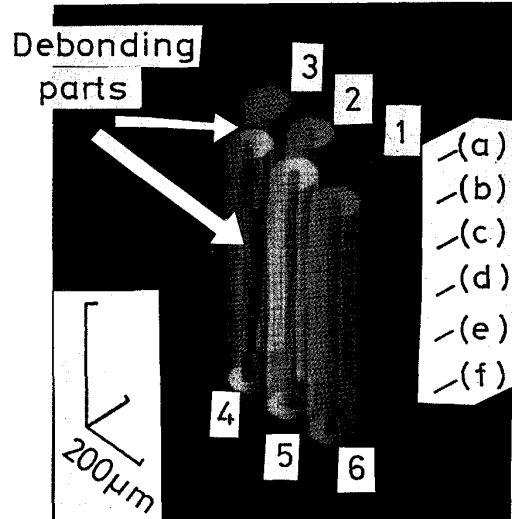


Photo. 7. 3-dimensional image reconstructed used the monochromatic X-ray CT image for SiC/Al composite.

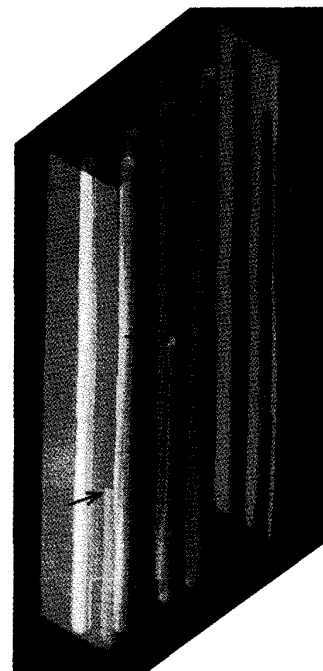


Photo. 8. 3-dimensional image reconstructed by using the monochromatic X-ray CT image for B/A5052 composite.

像を基に立体構築することにより、欠陥などの 3 次元形状などが定量的に計測可能であると言える。加算したライン数すなわち加算寸法があまり大きいと欠陥寸法以上となり、見つけることはできなくなる。このため加算ラインを可能な範囲で変化させて計測しないと、欠陥がないとは言い切れない。

## 5. 結 論

シンクロトロン放射光を利用した X 線 CT によりアルミニウム及びチタン基とした繊維強化複合材料に含まれる内部の強化繊維を観察するための条件について検討した。得られた結果をまとめると以下のとおりである。

1) アルミニウム及びチタン基複合材料の構成材料に関する X 線吸収係数を基に、SiC 繊維で 2 層、B 繊維で 3.5 層含む複合材料の吸収係数を求めた結果、両合金マトリックスとする複合材料ともに、エネルギーの上昇と共に、試験片の最大長さは大きくなる。しかし同一エネルギーに対し前者の方が後者に比べて試験片の最大長さは大きいことがわかった。

2) 芯線をカーボンとするボロン繊維(B(C))及び炭化珪素繊維(SiC(C))により強化した純アルミ、6N01 合金及び 6061 アルミ合金複合材料の場合には、21 keV のエネルギーにおいて、複合材料に含まれる内部繊維が明瞭に観察できた。一方 SiC(C)繊維強化 Ti-6Al-4V チタン合金複合材料の場合には 29 keV のエネルギーにおいて内部繊維が観察された。

3) SiC(C)繊維強化アルミ複合材料の場合には繊維の芯線である直径 $\phi 30 \mu\text{m}$ のカーボン繊維がその外側の SiC と明瞭に区別できた。この結果今回用いた X 線 CT 装置の分解能は約  $10 \mu\text{m}$  と考えることができる。また繊維とマトリックスとの界面における剥離が観察できた。

4) X 線 CT 断層像から 3 次元構築した場合複合材料中の繊維の傾斜、繊維とマトリックス界面剥離の位置や剥離部の長さが定量的に評価可能であることが明らかになった。

5) あらかじめ破断した繊維を含む FRM の 3 次元解析の結果、繊維の不連続部が観察されたことから、引張試験中の FRM 内部の破断繊維観察すなわちその場観察が可能であると考えられた。

## 文 献

- 1) 田中義久, 増田千利, 宮坂千晶, 内野文雄: 材料, 印刷中
- 2) I. TAGUTI and H. HAMADA: *Analytical Science*, 1 (1985), p. 119
- 3) T. HIRANO, S. EGUCHI and K. USAMI: *Jpn. J. Appl. Phys.*, 28 (1989), p. 135
- 4) Y. SUZUKI, K. USAMI, K. SAKAMOTO, H. KOZAKA, T. HIRANO, H. SHIONO and H. KOHNO: *Jpn. J. Appl. Phys.*, 27 (1988), p. 461
- 5) K. ENDO: *X-ray Analysis Data Sheets, Translated in Japanese* (1982), p. 91 [Japan-Russian Information Co. Ltd.]