光ファイバSFCモデル材の破壊挙動と AE 特性*

自 念 榮 一^{*1}, 倪 慶 清^{*1}

Fracture Behavior and Acoustic Emission of Optical Fiber SFC Material

Eiichi JINEN and Qing-Qing NI

The fracture behavior and interfacial properties of single fiber composites (SFC) containing a single optical fiber are examined by acoustic emission and a polarized microscope in a monotonous tensile and bending test. As a result, in both tests, initial and main AE events occur in an earlier loading region, and near the peak loading point, respectively. Fiber fragment length can be expressed by Weibull distribution. However, the differences in these two tests are clearly seen in AE activity patterns, amplitude distributions, power spectra, and fiber fragment distributions. The shape parameter of a Weibull distribution in the bending test is 5.7, which is about twice as large as that in the tensile test. This means a smaller dispersion of fiber fragment length in the bending test than in the tensile one. A transition of failure modes due to tensile, compressive, or shear stresses or a combination of these is found by changing the fiber position along the thickness direction of a specimen in the bending test. Variance of AE characteristics and fracture behavior at a fiber breakage can also be observed for different fiber positions.

Key Words: Acoustic Emission, Composite Material, Tensile Properties, Bending, Fractography, Optical Measurement

1. 緒 言

光通信用ガラスファイバは情報化時代を迎えた今日、社会を支える神経繊維の機能をもつ素材としてますます広範囲にまた高集積度に利用されている。最近では信号の伝送だけでなく、応力場中におかれたとき繊維に生じるひずみと通過光線の位相変化との関係に注目し、伝送光線の位相検波から逆に応力場を計測するスマート材料としての利用が注目され⁽¹⁾⁽²⁾、航空機構造部材にガラス繊維を埋め込み、リアルタイムで部材の安全性を監視するシステムの実用化も試みられている⁽³⁾。いずれの場合も光ファイバは高分子材料で被覆された状態で使用されることから繊維1本を含む複合材料の形態となる。そこで、繊維強化複合材料の強化機構や界面状態を議論する際取り上げられる単繊維によるモデル試片(SFC)の場合と同様な検討が課題となる^{(4)~(6)}。すなわち、光ファイバを含む高分子材料の破壊の様相が、母材のそれとどのように変化するかを求め、光ファイバをスマート材料として使用する際参考となる部材の破壊について基礎的な事項を検討す

る。光通信ガラスファイバ1本を熱硬化性樹脂で埋め込んだモデル試片の偏光顕微鏡下の引張試験ならびに三点曲げによる破壊過程で見られる繊維・母材界面のはく離および繊維の切断現象など破壊の様相を観察し、同時に観測されるAE事象の諸パラメータとを照合し、繊維・母材界面の微視的破壊現象の引張りおよび曲げ変形過程における差異を比較検討した結果を報告する。

2. 実験試料および方法

2・1 実験試料 引張・曲げ試片ともエポキシ樹脂(広栄化学工業キャスカン KR 675)中に表面処理剤を施さない光通信用ケーブル中のファイバ1本(三菱電線製 $\phi 25 \mu\text{m}$)を埋め込み作成した。引張試片は主剤：硬化剤を100：35の割合で混合し、あらかじめ60℃で10分間真空脱泡した樹脂を離形フィルムを張り試片の厚さに相当する枠取りを施したガラス板に流し込み、オープンに入れ60℃で1時間放置後、100℃に昇温し、8時間加熱後自然冷却させて成形した。試片は短冊形にダイヤモンドカッターで切断後図1(a)に示す形状にフライス盤で切削面ができるだけ滑らかになるように注意深く加工した。平行部はAEセンサの取付けを考慮した寸法でつかみ部を20mmとしている。試

* 原稿受付 1995年6月19日。

*¹ 正員、京都工芸繊維大学工学部 (〒606 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)。

片は加工後吸湿しないようにシリカゲルを乾燥剤とするデシケータ内に保管した。曲げ試片は、ファイバを成形試片の表面から 0.1 mm ならびに 1.5 mm となるように無張力に近い状態で形枠に張り、この形枠を離形フィルムを張った 2 枚のガラス板で万力に挟み、樹脂を流し込み成形した。試片は図 1(b) に示す硬質プラスチックの曲げ試験方法の規格 (JIS K 7203 198) に準ずる形状に加工し、デシケータ内に保管して使用した。

ファイバ切断による AE 信号は、2 ch. の圧電形広帯域センサ (富士セラミックス, M 65, 100 kHz ~ 1 MHz で約 30 dB 変化) で検出し、AE 計測装置 (島津 SAE 1000 A) のプリアンプで 40 dB 増幅し、10 kHz ~ 1 MHz を上下限とするフィルタを通し、再度メインアンプで合計 60 dB まで増幅した。信号はしきい値電圧 0.2 mV_{r-p} で識別した。AE 計測装置からのアナログ信号を広帯域レコーダ (ソニーマグネスケール FMR 1219, 1 MHz) に記録し、コンピュータ処理波形解析装置 (アナログ社 DATA 6000) によりパワースペクトルの周波数解析を行った。微視的観察は必要に応じ偏光顕微鏡で繊維の切断様相や破断箇所の繊維・母材界面のはく離の様相を観察した。

2・2 実験方法 本実験は標準状態の恒温恒湿 (20 ± 2°C, 60 ± 5% RH) 室中で行った。

2・2・1 引張試験 偏光顕微鏡のステージ上にロードセルを取付けた引張装置⁷⁾を取付け、試片の両端をチャックで固定し、手動でハンドルを回転させ徐々に引張荷重を増加させる。その間に生じるファイバの切断は AE 信号の検出で判定し⁽⁵⁾⁽⁶⁾、切断時前後に切断点付近から発生成長する繊維・母材界面のはく離など微視的变化を偏光顕微鏡で観察撮影する。

2・2・2 曲げ試験 三点曲げ試験はコンピュータ計測制御試験機 (島津オートグラフ DCS 10 T 形) を

用い、クロスヘッド速度 2 mm/分、スパン距離 80 mm の条件で行った。荷重点から 25 mm 隔った位置に取付けた 2 ch. の圧電形センサ (富士セラミックス S 20 DS A, 1 MHz まで約 40 dB 変動) で検出した。検出信号は合計 80 dB まで増幅し、計測信号はしきい値電圧 0.05 mV_{r-p} に設定し識別した。検出信号は A/D 変換後 16 bit パーソナルコンピュータでデータ処理するとともに AE 事象の発生率と試片の荷重 変位関係との対応を求めた。一方、AE 計測装置からのアナログ信号を処理しパワースペクトルを周波数解析した。破断後の試片観察は引張試験と同様に偏光顕微鏡で行った。

3. 実験結果および考察

3・1 引張試験

3・1・1 応力 ひずみ曲線 試片の力学特性ならびに繊維・母材界面の状況を検討するため応力 ひずみ曲線を求めた。その結果を図 2 に示す。ひずみは 0.5% 付近まではほぼ直線的な傾向を示しているが、それ以降の領域では非線形的となる。その後 3% 付近まで破壊に至らず大変形に耐えている。界面強度の向上を目的とした表面処理剤のガラス繊維に対する効果は、未処理繊維とエポキシ樹脂による SFC 材との比較で表面処理の有効性を示す結果を得ているが⁽⁴⁾、本実験で利用した繊維はその種の処理は行っておらず、このため応力 ひずみ線図に顕著な非線形が出現したものと考えられる。

3・1・2 AE 発生パターンと振幅分布 試片が負荷過程で示す微視的破壊は、繊維・母材界面の接着状態に強く依存し、その状況によって界面のはく離の進行あるいは繊維の切断といった破壊様相が変化する。荷重 変位関係との関連で AE 発生パターンを検討することはこのような繊維・母材界面状況を知る上で有効な事柄である⁽⁴⁾。荷重 変位関係と AE 事象の発生率

Fig. 1 The geometry of specimens

Fig. 2 The stress strain curve

および振幅分布の結果を図3に示す。ファイバの切断に伴う AE 事象は、試片の変形が延性的な挙動を示す領域で初めて発生し、変形過程の後期段階で多発する傾向が認められる。AE 事象は繊維の切断に対応している⁽⁵⁾⁽⁶⁾ことから供試試片の繊維・母材界面は比較的良好と考えられる。一方、破壊過程で観察された AE 事象の振幅分布は、繊維直径が一般の強化材用の繊維の場合より大きいことからかなり高振幅であり、かつ狭い分布領域に集中している。

3・1・3 AE 事象の周波数解析 AE 波の振幅は、センサの取付位置、試片とセンサ間の信号伝達効率などに左右されるため振幅分布から破壊要因を検討することには限界がある。単繊維による複合材の繊維の切断、繊維・母材界面のはく離、母材の破壊と言った破壊過程の微視的な要因を AE 事象の周波数解析によって同定することは従前の引張負荷下の研究で示している^{(4)~(6)}。ここではその結果を適用する。

パワースペクトルは任意の連続関数 $f(x)$ の自己相関関数のフーリエ変換であり信号 $f(x)$ の継続時間を T_a 、周波数を f 、 f に対するパワースペクトルを $\phi(f)$ とすると、

$$\phi(f) = \frac{1}{T_a} \left| \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-i2\pi f t} dt \right|^2 \dots\dots\dots (1)$$

で表される。これは AE 信号を関数 $f(x)$ で周波数 f の周期関数 $e^{i2\pi f t}$ の級数と考えたとき、各周期関数の振幅に相当する量、すなわち AE 波形の二乗平均値の各周波数成分の構成割合を示している⁽⁸⁾。

引張過程で観測された事象のパワースペクトルの周波数解析結果を時間経過順に並べ図4に示す。いずれの事象も 100 kHz 前後および 400 kHz 付近を中心とする2系列の高エネルギーレベルのスペクトルが継続してみられる。これらの破壊過程の微視的要因は、単繊維によるモデル試片と母材のみの試片の破壊過程でみられる AE 事象のパワースペクトルを周波数解析した結果により母材の破壊およびファイバの切断にそれぞれ対応するものと考えられる⁽⁵⁾⁽⁶⁾。また破壊の初期段階ではファイバの切断に対応するスペクトルのエネルギーレベルが母材の破壊に対応する低周波数域のスペクトルより高い傾向であるが、後期段階ではこの傾向は逆転しており、破壊の規模は大きくなっていることがわかる。

3・1・4 繊維の破壊過程の観察 3・1・3項で述べた破壊過程を試片の厚さ方向の透過光により偏光顕微鏡で連続的にその場観察した結果の一例を図5に示す。無負荷状態(a)から負荷を写真の左右方向から徐々に増大して行くとファイバは長さ方向と直角な方向に切断し、破断点の繊維端にボイドが発生し始め、像の輝度が低下した部分が生じる。(b)さらに負荷を増大させても当初ボイドの大きさはあまり変化しないが、繊維・母材界面ははく離を示す高輝度領域は広がり、破断点付近を中心にしま目状模様が観察された後(c)~(e)破断した(f)。

図5の破断試片の横断面の破断様相を図6に示す。中央部に円形状で周囲と色調の異なる部分がクラックイニシエーションに相当する部分である。ファイバはこの中にあるが、その部位は確認できず母材との界面の接着は比較的良好な状態と思われる。クラックイニシ

(a) A loading curve and AE activity pattern

(b) AE amplitude distribution

Fig. 3 AE pattern and amplitude distribution

Fig. 4 A power spectrum distribution in the tensile test

エーションは単調増加負荷過程の終期で試片の破断荷重に接近した段階で生じたファイバの切断に伴いその周囲の母材が局部的に破壊して形成されたものと考えられる。巨視クラックはこの部分を中心とし試片の幅方向(写真で左右方向)に対称的に急速に広がり、平坦

Fig. 5 Polarized microscope photographs

なレンズ形状の破面と試片の伸張に伴うポアソン効果から生じるせん断力の寄与を受けた凹凸のある破面を形成している。したがって破壊の後期段階で母材の破壊規模は大きくなり、これがAE事象に反映され図4で示したパワースペクトルの周波数解析結果の後期で100 kHz前後の帯域がファイバの切断に対応する400 kHz付近のスペクトルより高レベルとなっていることと符合することが試片の破面観察からも確認できた。

3・1・5 繊維破断長さの分布 供試試片で使用したファイバは脆性材料であり、試片は高分子材料で被覆されているとは言え、繊維の力学特性や破壊挙動は試片のそれらの特性に対して大きく影響するものと考えられる。すなわち、ファイバの表面には製造工程中に生じた応力集中源で破壊開始点となるグリフィスクラック的欠陥が不規則に存在していることが考えられる。このような場合の破壊特性はワイブル分布に従うとされている⁽⁹⁾。そこで供試材の破壊過程で見られた切断繊維長さの分布を両対数方眼紙上にプロットし、この点を確認めた結果を図7に示し、図中の L と β はそれぞれワイブル分布における平均繊維破断長さと形状パラメータを示している。測点はほぼ直線上に沿っており、供試材のファイバ切断はワイブル分布に従うことがわかった。供試材の繊維・母材界面特性との関係では、繊維強化機構によると⁽¹⁰⁾ 界面のせん断強度が高いほど切断繊維長さは短くなり、測点の分布は短繊維長側へ移行する。また繊維直径との関係では界面特性が同一の場合、繊維直径と切断繊維長さとは逆比例の関係にあり、直径が25 μm の供試材の平均繊維長さは強化材として使用されるガラス繊維13 μm の場合のほぼ1.5倍であった⁽⁹⁾。

3・2 曲げ試験による結果 光通信ケーブルは、架線工事等で引張りのみならずかなりの曲げ変形を受ける。そこで曲げ応力場におけるファイバの破断様相をAE事象との関連から検討する。その場合試片の応力状態は板厚(4 mm)方向における部位によって変化することが考えられるので、(a)ファイバを試片の表

Fig. 6 A fractograph for a tensile specimen

面層約 0.1 mm の位置に埋め込み、これと反対側から三点曲げによる負荷を加える。(b)表面から 1.5 mm の位置にファイバを埋め込み条件(a)と同様に曲げる。(c)条件(a)と反対にファイバが埋め込まれている側から負荷し、ファイバを圧縮応力場におく3条件の変形を行った。以後これら各条件を上記の呼称で区別する。

3・2・1 荷重 たわみ曲線と AE 発生パターン

各条件下の荷重 たわみ曲線、変形過程で観測される AE 事象率(図中の棒線)の結果を図 8(a)~(c)に示す。いずれの場合もたわみ量がほぼ 8 mm 付近まで

直線的な傾向であるが、以後非線形的となり最大荷重点まで負荷は増大した後低下傾向をたどり、破断に至っている。ファイバの埋め込み位置との関係では条件(a)より(b)の場合が破断までのたわみ量が 60% 近く大きくなり、さらに条件(c)の場合は最も大きいたわみ量で破壊することから単繊維であっても曲げ変形ではファイバの位置が破壊過程に大きく影響することがわかる。

AE 発生タイミングは、いずれの場合も負荷開始直後の荷重 たわみ曲線が直線的な領域で初めて AE は発生し、大半の事象は直線的な関係から逸脱する非線形領域から発生し始める。最も活発な AE 発生は条件(a)では最大負荷付近でみられるのに対し、条件(b)、(c)では負荷は減少するもののたわみ変形が増大する段階で観測される。AE 活性度は、ファイバが圧縮側に位置する場合が最も不活発であり、同一の曲げ破壊過程でもファイバの存在する部位の応力場の種類により AE の発生状況が変化することがわかる。すなわち、1 本のファイバの存在が試片の荷重 たわみ曲線の特性を大きく変え、破壊過程におけるファイバの寄与はその位置が引張側にある場合が大きく、圧縮側にある場合は小さい。AE の発生はこのように応力場の

Fig. 7 A distribution of fiber fragment length

Fig. 8 Load deflection curves and AE activity patterns in a bending test

Fig. 9 AE amplitude distributions with different fiber positions in a bending test

Fig. 10 AE power spectrum with different fiber positions

状況を反映する。観測される AE 事象数は試片の破断後偏光顕微鏡で観察したところ繊維の切断箇所数と一致し⁽¹¹⁾、この結果は母材のみの場合では見られないことから AE 事象はファイバ切断を含む微視的破壊現象であることがわかった。

3・2・2 AE 事象の振幅分布 3・2 節で述べた試片の変形から破壊に至る過程の 3 条件の間の差異を比較するため振幅分布について検討する。各条件の結果を図 9(a)～(c)に示す。事象はいずれの場合も 200 μ V 付近までおよび 600～650 μ V の二つの事象群に分布し、事象数は後者のグループが多数を占めており、この傾向はファイバが引張応力場にある条件(a)の場合が最も明確に現れる。一方、ファイバが圧縮応力場にある場合の振幅分布は引張側にある場合より多少広がりがある傾向を示す。また振幅が 200 μ V 以下の少数の事象が(a)、(b)両条件で見られるが、これはファイバの切断以前の負荷の初期段階でみられる現象であり、引張応力場での破壊過程でみられた図 5 の結果と照合して繊維・母材界面のはく離に対応するものと思われる。

3・2・3 AE 事象の周波数解析 曲げ破壊全過程で観測した事象を発生順に配列し、この配列の最初の事象から 3 番めごとに出現する事象をサンプリングし、これを時間経過順に表示した結果を図 10(a)～(c)に示す。太いファイバの存在からいずれの場合もスペクトルのエネルギーは高く、振幅分布を示す図 9 でみられた高振幅領域に多くの事象が集中していた結果と符合する。

また、パワースペクトルは特定の周波数帯に集中し、その傾向が破壊過程で継続する系統立ったパターンでなく個々の事象に種々の周波数成分が混在している。そこで個々のスペクトルについて周波数分布の状況を調べた結果、100 kHz、250～320 kHz および 400 kHz の各周波数付近にピークをもつことがわかった。この結果は 100 kHz 付近にピークをもつ事象を除くと樹脂のみの母材試片による結果では見られず、明らかにファイバの存在によって生じた現象であり、スペクト

Fig. 11 Polarized microscope photographs at the tensile side for a bending specimen

ルは 100 kHz および 250～320 kHz 付近を中心とする位置に高いピークが存在する場合が多い。条件(a)、(b)では試片の曲げ変形時のファイバは引張応力場にあることから単繊維を含む試片(SFC)の引張破壊過程で観察される微視的現象と AE 信号のパワースペクトル周波数解析結果との対応関係を適用すると⁽⁵⁾⁽⁶⁾、100 kHz および 250～320 kHz 付近のピークはおのの母材および繊維・母材界面のはく離あるいは繊維の引抜きに伴うものと考えられる。また、400 kHz 付近の周波数ピークはファイバの切断に対応するものであり、試片の破壊過程の終期段階においてよりエネルギーレベルの高い周波数ピークが観測される模様である。一方、条件(b)については 100 kHz 付近に母材の破壊に対応する最も顕著な周波数ピークが見られ、全体として条件(a)より AE の発生は不活発である。これに対してファイバが圧縮応力場にある条件(c)は 100 kHz 付近のスペクトルがより顕著であり、反面 320 kHz 付近では顕著なスペクトルは見られず、この傾向は破壊過程の後期段階においてより明確となり、応力場の相違がパワースペクトルの周波数解析結果に反映されていることがわかる。これらの結果から図 9 で示した高振幅側により多く分布している事象は主として母材の比較的規模の大きいき裂の進展などの破壊現象に起因するものと考えられる。

3・2・4 偏光顕微鏡による破壊試片の観察 まず

ファイバを試片の引張側で板厚方向が一定の位置にし、負荷点からの距離を変化したときファイバの破壊過程の様相の変化を確かめる。条件(a)による負荷で負荷点付近とそれより15 mm離れた位置で観察されたファイバ切断の様相を図11(a), (b)にそれぞれ示す。図11(a)ではファイバの切断点が明確に認められ、その両側にかなり長い範囲にわたり界面はく離がみられる。一方、図11(b)ではファイバは変形過程にあるものの切断に至っておらず、界面のはく離もごく短い範囲にとどまっている。このように三点曲げ変形で試片に生じる応力場の種類とその状況によりファイバ・母材界面の破壊の様相が変化することがわかった。

図12は条件(b)の負荷点付近でファイバ切断の様相を示す。図11(a)と比較してファイバの板厚方向の部位が変化した場合である。低い引張応力場におけるファイバ切断の様相は、試片板厚表面付近にある場合より破壊規模は小さく、切断点の両端で短い繊維・母

Fig. 12 A polarized microscope photograph near the neutral plane for a bending specimen

Fig. 13 Polarized microscope photographs at the compressive side for a bending specimen

材界面はく離部分を形成する。また、ファイバ破断端は平坦である。

図13(a), (b)はファイバが圧縮側の表面付近にある条件(c)の場合の様相である。図13(a)はファイバが圧縮応力を受けているが、破断に至っていないことはファイバの光弾性しま模様の濃淡に変化がみられないことからうかがえる。一方、図13(b)はファイバが破断した様相であり、大きな繊維・母材のはく離破壊も見られる。しかもはく離部分の繊維・母材間のすきまの大きさが明りような輝度差の存在からうかがえる。ファイバ軸平行に沿ってみられる輝線はこのすきま部分でファイバ表面からの反射光によるものと思われる。この二つの破壊様相は繊維の方向に沿って不規則に分布しているが、破断箇所が少ない。引張側の表面付近の場合〔図11(a)〕と比べ、同様な繊維・母材間にはく離が生じているとは言え、繊維・母材および界面に作用する応力状態が異なるためはく離によるすきまと様相が大きく異なっていることがわかる。また、ファイバ破断点の破壊規模は圧縮側の場合は引張側のそれより小さいと観察される。このことはパワースペクトルの周波数解析で図10(a), (c)で引張側の条件の場合のスペクトルでは400 kHzに近い成分が認められたのに対して圧縮側にある条件下では顕著なピークは認められなかったことと符合するものである。

次に、破断試片の破面の例を図14に示す。条件(a)による負荷でファイバは試片の引張側にある。しま目模様はファイバ近傍とその外周部とは明確に異なっており、ファイバの存在から母材中に強化領域が形成され、曲げ変形で生じた応力場の様相がこの領域で変化したものと考えられる。破壊はファイバのごく表面層のはく離を発端としているものと考えられるが、最終破壊に至るき裂の急速な伝播により形成された破面は、ファイバによる強化領域の周辺部でその様相を大きく変えている。

3・2・5 繊維破断長さの分布 条件(a)による曲げ破壊過程で切断したファイバ長さの分布データを両

Fig. 14 A fractograph at the tensile side for a bending specimen

Fig. 15 A fiber fragment length distribution at the tensile side for a bending specimen

対数方眼紙にプロットした結果を図15に示す。測点はほぼ直線上に乗り、引張過程でみられた結果と同様にワイブル分布の特性をもつことがわかる。引張過程との比較は測点の分布を示す形状パラメータ β は引張りで2.8付近に対し、曲げ過程では5.7とほぼ2倍の大きさとなり、破壊形式の差異が切断ファイバの長さの分布に反映することがわかった。

4. 結 言

光通信で用いるガラスファイバ($\phi 25\mu\text{m}$)を含むSFC薄板の引張ならびに板材の三点曲げによる変形過程でみられる繊維・母材界面はく離、母材の破壊、繊維の切断と言った微視的な破壊の様相を引張りについては偏光顕微鏡下で連続的に観察し、曲げについては破断試片の状況を調べ、それぞれの破壊過程で観測されるAE事象との対応ならびに破断試片の破面観察から破壊機構を比較検討し、次の結論を得た。

(1) 最初に発生するAEは引張・曲げ変形過程とも荷重変位曲線の初期段階から観測されるものの群発するのは後半段階から始まる。AE活性度は曲げ変形過程より引張りの条件下が高い。

(2) 両変形過程ともAE事象の振幅分布は高振幅域に集中しており、強化材用繊維($\phi 13\mu\text{m}$)の場合よ

り太いファイバの切断では微視的破壊の規模が振幅分布に反映する。

(3) AE事象のパワースペクトルの周波数解析結果は両変形過程間に明確な差異がみられ、引張過程では母材の破壊、繊維・母材の界面はく離、ファイバの切断と言った微視的破壊に伴うスペクトルが分離してみられたが、曲げ過程ではこれらが不明確となる。

(4) ファイバの切断長さの分布は両変形過程ともワイブル分布に従うが、形状パラメータは曲げ過程が引張りのその約2倍となる。

(5) 曲げ変形過程では試片中のファイバの位置により破壊様相に変化を来し、引張側にある場合が圧縮側にある場合より、また負荷点近傍にある場合が離れた場合より、AE発生は活発となり、応力場の状況が反映されることがわかり、その結果は試片の破面観察の結果とも対応する。

本研究を行うにあたり、光ファイバを提供いただいた三菱電線工業(株)伊丹製作所の黒岩孝雄氏、計測器の借用を快諾されたオムロン阿蘇(株)の奥田泰行氏、実験に協力された学部生の村上啓司、安田貴憲両君に深謝します。

文 献

- (1) 福田武人・ほか2名, 材料, **42** 474(1993), 269-275.
- (2) Hofer, B., *Composites*, **18**(1987), 309-316.
- (3) Glossop, N. D. W., ほか6名, *Composites*, **21**(1990), 71-80.
- (4) 倪慶清・自念榮一, 機講論, No. 940-30(1994-8), 80-82.
- (5) 倪慶清・自念榮一, 材料, **42** 476(1993), 561-567.
- (6) 自念榮一・倪慶清・仲村篤史, 機論, **60** 571, A(1994), 705-711.
- (7) 倪慶清・自念榮一, 機論, **62** 593, A(1996), 89-96.
- (8) 大津政康, アコースティックエミッションの特性と理論, (1988), 54, 森北出版.
- (9) 横堀武夫, 材料強度学, 第2版(1974), 214, 岩波書店.
- (10) Netravali, A. N., ほか3名, *J. Mater. Sci.*, **26**, (1991), 6631-6638.
- (11) Kimpara, I., ほか3名, *Proc. 9th Int. Acoustic Emission Symposium*, (1988), 732-740, Kobe, Japan.