その場 SEM 観察における CFRP 積層材の き裂進展挙動と AE 特性*

自 念 榮 一^{*1}, 倪 慶 清^{*1}, 李 紅 衛^{*2}

Behavior of Crack Propagation and AE in CFRP Laminates under In Situ SEM

Eiichi JINEN, Qing-Qing NI and Hong-Wei LI

The fracture behavior and crack propagation process of carbon fiber reinforced laminate composites are examined by in situ SEM, and acoustic emission (AE) signals are measured simultaneously. As a result, the fractures of matrix, fiber-matrix interface and bridge fiber give rise to AE signals, and the patterns of AE event count rate are found to depend strongly on the fiber orientation in a laminate. The direction of crack propagation is along the fiber orientation even for cross laminates and crack propagation is terminated by the reinforced fibers. The amplitude of the AE signal is low at the period of initial crack occurrence, but becomes high and the number of AE events increases rapidly as the crack propagates. This means that microfractures in the material increase during crack propagation. This result can also be confirmed by the results of an AE power spectrum analysis. Furthermore, by matching AE signals to the fractographs, it is found that AE activity is weak and has a low amplitude in the region of a flat fracture surface, while it is strong and has a high amplitude in the rough surface region, especially for a unidirectional material A.

Key Words: In Situ SEM, Acoustic Emission, CFRP Laminate, Fractography, Power Spectrum

1. 緒 言

AE 法による繊維強化複合材料の破壊機構の解明⁽¹⁾⁽²⁾は、材料の損傷評価⁽³⁾、破壊過程でみられる微視的破壊因子の同定⁽⁴⁾や破壊力学的パラメータと AE パラメータとの対応⁽⁵⁾、種々の環境下における材料特性の変化⁽⁶⁾など多方面から検討された結果が数多く報告されている。破壊過程の要因を AE 法で検討する場合、信号から得られる情報と AE 発生との対応関係を明らかにし、正確な意味付けを与えることが必要である。その意味で複合材の破壊過程のその場観察による知見⁽⁷⁾は装置の容量や測定条件に制約があるとは言え、破壊現象を正確に理解する上で有益なものと言えよう。このような観点から先にその場観察に AE 法を適用できるようにした SEM 装置により、構造の最も簡単なモデル材の引張破壊過程でみられる繊維・母材界面のはく離、繊維の切断といった微視的な現象と AE 事象との対応をパワースペクトルの周波数解析から確認し、この結果を短繊維分散形並びに一方

向 CFRTP の切欠材の破壊過程の検討に適用した結果を報告した⁽⁸⁾。その場 SEM による微視的観察に AE 法を併用することで材料の破壊様相と AE パラメータがリアルタイムで対応でき、従来の AE 法を用いた研究より材料の破壊挙動をより明確にすることができる。本報ではその研究の一環として積層材の破壊過程を AE 事象から検討する際必要な知見を得るためモデル CFRP 積層材による小形 CT 試片を用い、その場 SEM 観察によりき裂進展の過程を初期き裂の発生・進展・成長拡大・最終破壊の各段階に分離し、各段階におけるき裂進展の様相と繊維配向との対応関係、各段階で計測される AE 事象とその特性を明らかにし、また試片の破面観察から破面形成過程と AE 特性との関連を考察し、き裂進展特性並びに破壊機構を検討した結果を報告する。

2. 実験方法および試料

2.1 実験方法 その場観察のために SEM(日立 S-510 形)内に引張装置(日立 HH-TS 200 形、最大負荷 200 kgf)を装着し、同時に AE 計測が 2 ch. で行えるようにアクセサリ取付用予備キャップをハーメチックシール端子付キャップと取り替えた。引張荷重信号は荷重センサの負荷-出力電圧の直線的な関係より求

* 1995 年 3 月 21 日 日本機械学会関西支部第 70 期定時総会講演会において講演、原稿受付 1995 年 4 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)。

^{*2} 京都工芸繊維大学大学院。

めた。一方、負荷増加に伴う小形 CT 試験片の開口量の測定は、引張装置の試験片取付金具間に挟んだクリップゲージにより行いその出力を SEM 外部へ導き、簡便的な COD 量として荷重信号とともに X-Y レコーダに入力し荷重との対応関係を求めた。差動形前置増幅器に接続する AE センサ [富士セラミックス、M 65 ($\phi 6 \times t 6$), 周波数帯域: 50 kHz $\sim$ 1.5 MHz 間で約 23 dB 変化] は 17 mm の間隔で試験片の切欠きを中心とする対称の位置に真空グリスを塗布のうえセンサ保持金具により取付けた。AE 信号は総合利得 60 dB まで増幅し、しきい値電圧 0.3 mVop に設定し、信号を弁別し、従来の計測方式⁽⁴⁾で行った。

試験片への負荷は SEM 外部より引張装置の回転ノブ(ストローク 0.1 mm/1 回転)を手動でできるだけ一定の速度となるように行い、伸長開始と同時に AE 計測系の計測を開始し、記録の同期を広帯域アナログレコーダ(ソニーマグネスケール FMR-1219)により行い、AE の発生時刻、同事象数および AE 諸パラメータとき裂の発生・進展の観察結果と照合できるようにした。試験片の画像は SEM 本体のモニタ以外にその信号をイメージプロセッサ(日立 EP-2000)の大形モニタに表示し、き裂進展の様相の観察と同時に随時その画像を収録し、イメージプリンタ(日立 EP-P2)で再生した。またき裂長さはイメージプロセッサ付属測長機能で行った。

試験片の内部損傷状態はオリオンパス UH-Pulse 200 により 50 MHz、ゲート幅 100 ns、作動距離 20 mm、音響レンズ開口角 28°で行った。

2・2 実験試料 試料はプリプレグシート(東レ P3051 30, 使用繊維・樹脂: トレカ T300・エポキシ)4 枚を繊維配向が各層で直交あるいは平行に重ねて成形した。成形条件は 118°C、圧力 0.3 $\sim$ 0.5 MPa で 2 時

間硬化し、140°C で 2 時間無加圧条件下に放置し、後室温まで徐冷した。試験片は、繊維配向が荷重方向に対して表 1 に示す条件で図 1 の形状に加工し、その先端にさらに 0.1 mm のダイヤモンドブレードで細いノッチを注意深く入れ、SEM 観察によるき裂進展挙動を明確にするために試験片表面をエメリーとバフ研磨し、ほぼ厚さ 1.1 mm に仕上げた。蒸留水による超音波(40 kHz)洗浄を行い、乾燥後金蒸着を施して使用した。各試験片の繊維重量混入率は約 64% でその呼称を表 1 に示す。

3. 実験結果および考察

3・1 荷重-COD(簡便的)関係 各試験片の結果を図 2 に示す。ここでの COD 量は簡便的なもので、その理由はクリップゲージの取付スペースが SEM 内で取れず、小形 CT 試験片の取付金具間にクリップゲージを取付けて求めた。したがって、通常き裂先端における COD より小さく評価する。これによると材料の単調増加負荷条件下における変形挙動はき裂の進展にかかわる繊維配向との関係で顕著に変化することを示している。一方向に積層した A, B 材の場合、変形に対する負荷が低レベルで小さい変形量で破断にいたるが、交互に積層した C, D 材では高レベルの負荷と大変形に耐える挙動を示している。また B 材の曲線の滑らかさに対して C, D 材のそれは、小規模な階段状の部分に変形過程の随所に見られ、き裂の進展に伴う負荷の一時的な停留と考えられ、き裂の進展挙動の特性を示唆しているものと考えられる。

3・2 荷重-変位曲線と AE 発生パターン 単調増加負荷条件下における各材の AE 発生パターンを図 3 に示す。これによると各材の積層構成の相違による差異が AE 信号の活性度を示す AE 事象率の様相に明確に反映されていることがわかる。A 材では低負荷で

Table 1 Specimen names

Specimen	A	B	C	D
Fiber Orientation	[90°] ₄	[0°] ₄	[90°/0°] ₂	[45°/-45°] ₂

Fig. 1 The geometry of a specimen

Fig. 2 The curve of load and expedient COD

容易に変形する領域は大きく、その間の AE 事象は不活発であるが、試験片破断近傍で AE 事象の発生は活発になる。切欠方向に対して繊維が直角に配向する B 材では、当然破断時の負荷レベルは上昇するが、き裂進展の初期段階から繊維切断あるいは繊維方向に沿う繊維・母材間のはく離過程を伴うことが考えられ、AE 事象は負荷の初期から活発にみられ、変形の最終段階へ近づくと A 材と逆に AE 活性度はやや低下する傾向がみられる。

一方、C 材および D 材では変形に要する負荷は A、B 材と比較して格段に大きく、大変形の破壊過程を示している。AE の発生状況を比較すると、より大きい負荷-変位関係を示す D 材が C 材より活発であり、とくに大変形時に差異は大きい。しかし低負荷レベルのき裂進展の初期段階でのそれは D 材より C 材が活発であることがわかる。

3・3 き裂の進展挙動と AE 特性 上述のように荷重-簡便的な COD 量並びに変位関係で見られた各材の結果は、負荷の増大によるき裂進展挙動と密接に関係することは明らかである。き裂の進展は繊維の切断、母材の微小な破壊、繊維・母材界面のはく離といった微視的な現象を伴うもので、その内容が AE 事象の発生に反映されるものと考えられる。そこで、各材のき裂進展の様相と AE 事象と対応させて検討する。

各材のき裂進展の様相とこの間に観察される AE 事象との対応を検討するため、き裂進展挙動の大きい変化を破壊過程の区分の目安とした。すなわち無負荷の状態から SEM 観察下で始めて確認できる初期き裂の発生までの期間、その成長段階、き裂進展経路の変化あるいは副き裂の発生が観察される中期段階、拡大成長したき裂が破壊に至る最終段階である。ただし、一方向材である A、B 両材は第三段階から破壊に至って

いる。ここに各段階における負荷量、簡便的 COD 量、き裂長さ等のパラメータを表 2 に示す。以後各段階で観察された AE 事象の振幅分布並びに各事象のパワースペクトルを時間経過順に配列し結果を検討する。

A 材のき裂の各段階の様相を図 4 に示す。試験片は各層とも同一方向に成形し、負荷方向は繊維配向と直角であるため、き裂進展は予想どおり繊維配向と一致し、初期き裂の発生の負荷レベルが低い。いったん初期き裂が形成されるとその進展はわずかな負荷の増大で急速に進展する。図 4 の A-2 はこの状態を示す。A-3 段階ではき裂は継続的に同一方向に成長し続けるのではなく、初期段階から成長してきたき裂の先端近傍で他の部位から新しいき裂が以前のき裂と平行な位置関係で発生し進展し始める。しかもこのき裂の成長は急速であるが、A-2 段階で観察されていたき裂の進展は停留する模様である。初期段階で発生したき裂と A-3 段階で新たに成長したき裂とのつなぎ目に架橋繊維の存在が予想される形態やジグザグ状の破壊が確認できる。以上のように複数のき裂の出現、き裂の肥大化を含む破壊規模の拡大から繊維の切断、繊維・母材界面のはく離といった破壊の素要因に対応する AE 事象は多様な内容となり、また発生は活発化するものと考えられる。この段階からき裂進展の最終段階への移行は、負荷のわずかな増加でみられるため A-4 段階の SEM 撮影の機会を失っている。

このようなき裂進展の各段階で観測された AE 事象の振幅分布並びにパワースペクトルを時間経過順に表示した結果を各々図 5 および図 6 に示す。き裂進展過

Fig. 3 AE event count rate for each material

Table 2 Parameters at each stage of crack propagation

Specimen	Stage No.	Load(N)	Expedient COD(μm)	Crack length(μm)
A	A-0	0.0	0	0
	A-1	6.3	64	271
	A-2	7.1	72	451
	A-3	7.4	86	2530
	A-4	9.9	101	—
B	B-0	0.0	0	0
	B-1	65.5	180	118
	B-2	78.8	202	118
	B-3	82.5	210	—
C	C-0	0.0	0	0
	C-1	10.5	52	83
	C-2	29.2	80	298
	C-3	80.2	120	525
	C-4	446.0	460	1310
D	D-0	0.0	0	0
	D-1	17.2	100	186
	D-2	74.7	190	356
	D-3	165.0	260	895
	D-4	769.0	840	1370

程における振幅分布の変化は、初期き裂の発生から最終段階へ移行するに従い、低振幅の事象を主成分とする特性から広範囲の振幅分布をもつ特性に移行する。一方、AE 事象の活性度は A-1 段階では活発であるが、その成長段階 A-2 では AE 事象は極端に少なくなり、複数のき裂が出現する段階では再び活発になり、破壊に至る最終段階では AE 活性度はピークに移る。これらの事象の内容を図 6 から検討すると A-1 段階では 100 kHz 以下の母材の破壊、少数の 200 kHz 付近の繊維・母材間のはく離現象に対応する周波数ピーク、400 kHz 付近の繊維の切断に対応する⁽⁴⁾⁽⁸⁾ 周波数

ピークが認められる。初期き裂の成長段階では観測される AE 事象数は少なく、不活発であるが繊維の切断に対応する周波数ピークは継続して出現している。A-3 から A-4 段階に移ると母材の破壊および繊維の切断に対応するピークがそれぞれ顕著に見られるようになり、特に 400 kHz 付近のピークは時間の経過によって高エネルギーレベルのものとなることから、き裂進展に伴う繊維の切断の規模の拡大を示していると考え

Fig. 4 Crack propagating behavior of material A

Fig. 5 AE amplitude distribution during crack propagation of material A

Fig. 6 AE power spectrum in material A

えられる。

B 材の各段階の様相を図 7 に示す。繊維配向と負荷方向が一致する本材では、初期き裂の発生に必要な負荷は表 2 に示すとおり A 材と比較してほぼ 1 けた大きく、破壊時の負荷も同程度の規模である。き裂の進展は繊維の配向方向に沿っており、また非常に緩慢であるが、既に高負荷の状態である。このことは本材の増合、B-2 段階で発見した初期き裂の成長を観察し続けていたが、SEM 焦点領域外の部分で他のき裂の発生と成長があり、B-3 段階への移行と試験片の破壊は表 2 に示すとおりわずかな負荷の増大で短時間で急速に発生しており、そのき裂の切欠部分への成長進展によって生じていることが図 7 の B-3 から確認できる。このような形式の破壊過程は B 材特有のものである。これは既に施した切欠きの先端からき裂が成長するためには多数の繊維の切断が必要であり、試験片開口量

Fig. 7 Crack propagating behavior of material B

Fig. 8 AE amplitude distribution during crack propagation of material B

の増大からき裂先端を中心とする曲げ応力が生じその結果繊維・母材間にモード II 的な形式による破壊が切欠部のモード I 的な形式による破壊より先行するためと考えられる。

B 材の各段階で観測された AE 事象の振幅分布並びにそれらの事象のパワースペクトルの周波数解析結果を各々図 8、および図 9 に示す。振幅分布の推移はちょうど A 材と逆の変化傾向を示し、B-1 段階で低振幅の領域にピークが存在し、振幅の増大とともに事象数が減少する。しかし初期き裂の形成後は AE 事象の発生は不活発となり、B-3 段階では高振幅の事象が出現するものの事象数は極端に減少する。これらの事象の内容は図 9 によると B-1 段階では母材の破壊と繊維の切断に対応する事象が主流であり、大きい振幅の事象は繊維の切断によるものと考えられる。しかし B-3 段階では少数の事象数ではあるが、B-1 でみられた低・高振幅域に明確に分離できる傾向は消失し、多様な事象が混在するものとなる。しかしながら図 7 でみられた切欠部以外の部分からのき裂の成長による事象が混入していることが当然考えられ、AE データへの寄与は存在するが、詳細な検討は今後の課題である。

C 材の各段階の様相を図 10 に示す。C 材の構造的特徴は上述の 2 材と異なり各層で繊維配向が直交している。このため大変形と高負荷に耐え、使用した引張装置のストローク量 (5 mm) を超過するため試験片破壊付近の様相は観察できず、負荷途中で試験を中断した。初期き裂は切欠底から試験片表面層の繊維配向に沿って発生し、その時点の負荷は B 材と比較して低レベルとはいえ A 材よりかなり高い。このき裂の進展は

Fig. 9 AE power spectrum in material B

負荷の増大に従い順調に進行し C-3 段階に移る。C-4 ではいままで成長してきたき裂の先端近傍の他の部分から副き裂が発生成長し始める。副き裂の発生により初期き裂の進展は停留し、逆に副き裂が停留していたき裂に接近し、平行な進展方向で部分的に重なる状態に至る。このとき両き裂のわずかな間にき裂進展方向と直角な方向にき裂が発生し、き裂は連結拡大していく模様である。

C 材の各段階における AE 事象の振幅分布並びにパワースペクトルの周波数解析の結果をそれぞれ図 11 および図 12 に示す。き裂進展が緩慢であることから AE は C-2 段階まで少数の低振幅の事象であり、C-3、C-4 段階では事象数は急増し、低振幅にピークを持ちかつ高振幅の事象を含む広範囲な分布となる。周波数解析については C-2 段階以降の初期き裂の成長過程

から高負荷状態まで一貫して 100 kHz 付近の母材の破壊に対応するピークが共通してみられる点が上述の A, B 材と異なる点である。副き裂の発生とき裂の肥大化がみられる C-3 段階以降でこの帯域に高いピークを示し、顕著な破壊現象を示唆している。一方、繊維破断に対応する 400 kHz 付近のピークは初期き裂の形成段階から一貫して出現しており、き裂の肥大化とともにそのピークは高くなり、この傾向は C-4 段階でより大振幅の事象となり、事象数の増大と併せて破壊

Fig. 10 Crack propagating behavior of material C

Fig. 11 AE amplitude distribution during crack propagation of material C

Fig. 12 AE power spectrum in material C

のスケールの急激な拡大がうかがえる。

D 材について図は省略するが、初期き裂の発生は繊維配向に沿っており、その時点の負荷は必しも高くない。しかし、それ以降の各段階におけるき裂進展はかなり活発であることは表 2 に示すき裂長さの測定結果に示されている。すなわち初期き裂の成長は、負荷の増大によっても継続せず、ある大きさまで成長するとき裂先端方向の延長線上から少しはずれた位置で新たな副き裂が発生し成長する過程が認められる。この傾向は負荷の増大とともにより顕著となることは C 材と同様であるが、その規模は C 材より著しく同時に複数箇所で副き裂が発生し多くは繊維配向に沿って進展する。したがってき裂進展方向の変化やき裂の内層への深化部分で架橋繊維束並びに母材が大きい規模で破壊するものと考えられる。D 4 段階では切欠部で初期き裂の進展方向と逆方向にも巨視き裂が突然発生し、切欠部の寸法が大きくなり、試験片の変形量の増大の要因となっている。

D 材の振幅分布の各段階間の推移は、D 1 および D 2 段階で低振幅領域の事象が主体であるが、D 2 段階で事象数の増大が認められる。D 3 以降では高振幅の事象も出現し、D 4 ではさらにこの傾向が顕著となる。一方、周波数解析の結果では 400 kHz 付近の繊維の切断に対応する周波数ピークが D 1 段階にみられ、母材の破壊に対応する 100 kHz 付近のピークは少数である。しかし、D 2 段階の終期ではこの周波数領域

でも高いピークが散見されるようになり、D 3 段階ではこの傾向がさらに顕著となり、400 kHz 付近により高い周波数ピークが多く認められるようになる。しかしながら D 4 段階ではこの傾向は逆転し、圧倒的に繊維の破壊に起因する内容となる。

3・4 C, D 材内層のき裂進展様相 プリプレグ各層が直交・斜交した積層構造である C 材および D 材は、すべてが同一方向に積層した A, B 両材と比較してき裂進展の様相は非常に緩慢であり、大変形高負荷に耐え、高載荷能力を保持する。このことはき裂進展にかかわる繊維の寄与の差異によるものと考えられる。したがって、破壊過程を試験片表面からの観察のみならず、内層におけるき裂進展の様相を検討する必要がある。

まず切欠先端部に注目し、負荷試験で最終破壊にいたらず中断した試験片の SAM 観察を行った。無負荷条件の面像観察では処女材と比較して明確な差異が確認できなかったため、ハンドバイスで C, D 材をそれぞれ約 350 N と 1 000 N を負荷した状態で SAM 観察した。その結果を図 13 に示す。C 材では切欠先端にき

Fig. 13 SAM observation of material C and D

Fig. 14 Crack propagation in an inner ply for material C

Fig. 15 Fractographs of each material

裂の形成による空白域が切欠方向に認められる。一方、D 材では切欠先端から交さず繊維方向に沿った逆 V 字形の明確なブリブ間の層間はく離領域の存在が確認できた。

これらは積層構造に関連する損傷様相を示すものであるが、各層内のき裂進展様相は明確に確認できなかった。そこで表面層をエメリーで取り去り、二層めのき裂の進展を SEM 撮影した後、同様の手順で第三層のき裂進展様相を調べた。C 材の第二層の結果を図 14 に示す。いずれの場合も表面層で生じるき裂とほぼ同程度の大きさのき裂が各層においても繊維配向に沿って生じていることが明らかである。このことは D 材でも同じ結果であることを確認した。

3・5 SEM による破面観察 3・3 節での検討は SEM による試験片表面でのき裂進展の様相との関連から行ったが、AE 事象は試験片内部での破壊による寄与も含まれるものと考えられる。そこで、各材の破壊過程の各段階で生じたき裂進展の結果、形成された破面の様相と観測された AE 事象の特性との対応を検討する。

A 材の初期き裂の発生、同成長、副き裂の発生を含む拡大の各段階における破面様相および他の各材の初期き裂発生領域の破面様相を図 15 に示す。A 材の A-1 では局所的な繊維切断の痕跡が散見されるが破壊の規模は小さく、初期き裂の形成には少数とはいえ繊維の切断を伴う模様である。A-2 段階では繊維の切断箇所は少なくなり、繊維・母材間の界面破壊が平坦な破面様相からうかがえる。AE 事象の発生は不活発な状態となることが考えられる。しかしながら、き裂が拡大する A-3 段階では破壊規模は拡大し、多数の繊維がまとまってはく離し、架橋繊維となりブリッジを形成している模様が確認できる。したがって、A-3 段階の終期に接近すると負荷の増大によって架橋繊維束の切断を含む部分的な破壊が随所に発生し、この結果大振幅の AE 事象を含む振幅分布となり、また AE 事象数も増加するものと考えられる。このことは各段階の振幅分布を示す図 5 の結果とパワースペクトルの周波数解析の結果を示す図 6 と符合するものである。

一方、B 材では積層した繊維は同一表面で切断せず、破面はモザイク状の様相を示し、繊維の切断は部分的であるが、切断箇所が多い。この結果 AE 特性は小振幅の多数の事象が観測され、周波数解析の結果では繊維の切断に対応するものと考えられる。この結果は図 8 および図 9 と符合する。また C および D 材の初期き裂の発生段階の破面は比較的平坦に見られるが、C 材では母材の破面にうろこ状の部分が多くみられるのに

対して D 材では層間はく離の様相を示しており、初期き裂の形成時の切欠先端に働くせん断力の作用方向と繊維配向との関係に起因する現象⁹⁾と考えられる。これらの破面観察からは小規模な繊維の切断や母材の破壊があるものの全体として小振幅の事象が散発的に発生することが考えられ、これは AE 事象による検討結果と一致するものである。

A 材以外のき裂進展段階以降の写真は省略するが、いずれも破壊過程の進行に伴い、繊維の切断や母材の破壊によるはく離現象の規模は次第に大きくなり、き裂の拡大によって破壊様相は繊維束の破断点からのすり抜け、局所的に集中した繊維束の切断など繊維の破壊を主体とするものとなり、積層構成とき裂進展挙動に対応したものとなる。したがって、AE 事象は小振幅のみならず大振幅の事象を多く含む特性へ移行し、400 kHz 付近の周波数ピークを含む突出したパワースペクトル分布を形成することとなり、AE 事象の結果と符合することがわかった。

4. 結 言

モデル CFRP 積層材による小形 CT 試験片の単調増加負荷条件下における破壊過程を初期き裂の発生、その進展および成長拡大といったき裂進展の様相をその場観察し、同時に得られる AE 信号との対応から破壊過程と AE 特性との関連から検討し次の結果を得た。

(1) AE 発生パターンは積層材の繊維配向に強く依存する。

(2) 初期き裂の発生・成長に伴い AE 事象は小振幅を主体とするものから高振幅の事象が多くなり振幅分布の領域が拡大し、AE 事象数も増大する。またパワースペクトルの周波数解析では繊維破断によるエネルギーレベルは増大し、繊維の架橋領域の切断による寄与が大きくなる。

(3) いずれの試験片に対してもき裂は各層の繊維配向に沿って進展する。

(4) き裂進展によって形成される破面の様相が平坦な場合、AE の発生は不活発であり、凹凸の激しい破面では活発となり、高振幅の事象が多く観測される。

本研究を行うに当たり試料を提供いただいた東レ(株)複合材料研究所の京野氏、トレカ事業第一部販売課の浦上・斎藤両氏、ソニーデータレコードの借用を快諾されたオムロン阿蘇(株)の奥田氏、SAM 観察でお世話になったオリンパス光学工業(株)の高橋・中村両氏および一部の実験で協力された学部生の村井隆之

君に深謝する。

文 献

- (1) 駒井謙治郎・ほか2名, 機論, **56**-528, A (1990), 1792-1799.
- (2) 芳我攻・ほか3名, 材料, **39** 445 (1990), 1450-1456.
- (3) 自念榮一・平井幹也, 機論, **58** 553, A (1992), 1581-1587.
- (4) Suzuki, M., ほか5名, *Japan U. S. CCM* III, (1986), 631-638, Tokyo.
- (5) 倪慶清・自念榮一, 材料, **42**-474 (1993), 255-261.
- (6) 自念榮一・ほか2名, 機論, **60** 580, A (1994), 2702-2709.
- (7) Sun, Y. Q., ほか2名, *ICCM/9*, **5** (1993), 834-841.
- (8) 自念榮一・倪慶清, 機論, **60** 576, A (1994), 1761-1767.
- (9) Selzer, R. and Krey, J., *J. Mater. Sci.*, **29** (1994), 2951-2956.