

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-927

AE法によるボロン繊維強化アルミニウム
複合材料の破壊様式の研究

祖父江 靖 ・ 小河 昭 紀

1987年3月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

AE法によるボロン繊維強化アルミニウム* 複合材料の破壊様式の研究

祖父江 靖** 小河 昭 紀**

Fracture Mode Research of Boron Aluminum Composite Materials by Acoustic Emission (AE)

Yasushi SOFUE and Akinori OGAWA

ABSTRACT

Acoustic Emission Characteristics were investigated for various failure modes (such as fibre breakage, matrix crazing and delamination) of Boron reinforced Aluminum Composite materials.

Tensile Tests were conducted on four types of specimens (unidirectional, 0°/90° ply, boron fibre and shear lag test pieces).

The results show that the A.E. Characteristics (count rate, amplitude distribution and location) differ with the failure mode.

The A.E. amplitude was above 90 dB for the fibre breakage of the unidirectional ply test piece but below 90 dB for the transverse one of cross ply, which fractured at a low level load, while the shear lag test pieces produce an acoustic emission amplitude in the range of 40 ~ 60 dB under delamination fracture mode.

1. 緒 言

航空、宇宙材料として比強度、比剛性に優れた複合材料が注目されている。繊維強化樹脂系複合材料 (FRP) は既に航空機の機体の一部に使用され構造部材としても使用され始めている。これに対し繊維強化金属系複合材料 (FRM) は耐熱性および耐環境性が優れているため構造部材およびエンジン部材として有望視されているが生産効率が高く信頼性のある製造方法が確立されていないため実用例は少ない。しかしながら実用化のための研究開発は盛んに進められている。このような先進複合材料の実用化には強度評価試験や破壊過程の研究が重要な課題になる。繊維強化複合材料の破壊過程には繊維破壊、マトリ

ックス破壊、繊維とマトリックスの界面剝離、層間剝離、繊維の引抜けなど多様な破壊様式がある。近年、このような複雑な破壊様式の挙動を評価する手段として材料の降伏やき裂の発生など破壊現象を検出するアコースティックエミッション (AE) が用いられるようになってきた。FRPではAE振幅分布の変化状況から破壊挙動を検討した研究報告^{1)~4)}は比較的多い。しかし、FRMの場合⁵⁾公表された報告は少ない。我々はFRMの破壊様式に関する以下の研究を行った。

本報告は、ボロン繊維強化アルミニウム複合材料を用いて破壊様式が異なるAE特性について検討したものである。AE計測は6種類の引張試験片を用い引張荷重によって低負荷から破壊するまでのAE発生挙動 (事象数、発生位置、振幅分布、カウント数等) と破壊様式の関連について調べた。

* 昭和62年2月13日受付

** 原動機部

2. 試験片

試験片は一方向強化試験片，繊維試験片， $0^\circ/90^\circ$ 積層試験片，両面溝付試験片(a)，両面溝付試験片(b)，両面溝付試験片(c)の6種類である。図1に試験片の寸法形状を示す。なお，一方向強化試験片は 0° 繊維層の破壊，繊維試験片は繊維破壊， $0^\circ/90^\circ$ 積層試験

片は 90° 繊維層の破壊，両面溝付試験片(a)・(b)・(c)は層間剝離など破壊様式の違いによるAE特性を明らかにする目的で各試験片を製作した。図中の(A)，(B)はAEセンサーの取り付け位置を示したものであり，後述するAEの発生位置を示す位置標定において，(A)は0位置，(B)は100位置に対応する。ボロン繊維強化アルミニウム複合材料は，タングステン芯

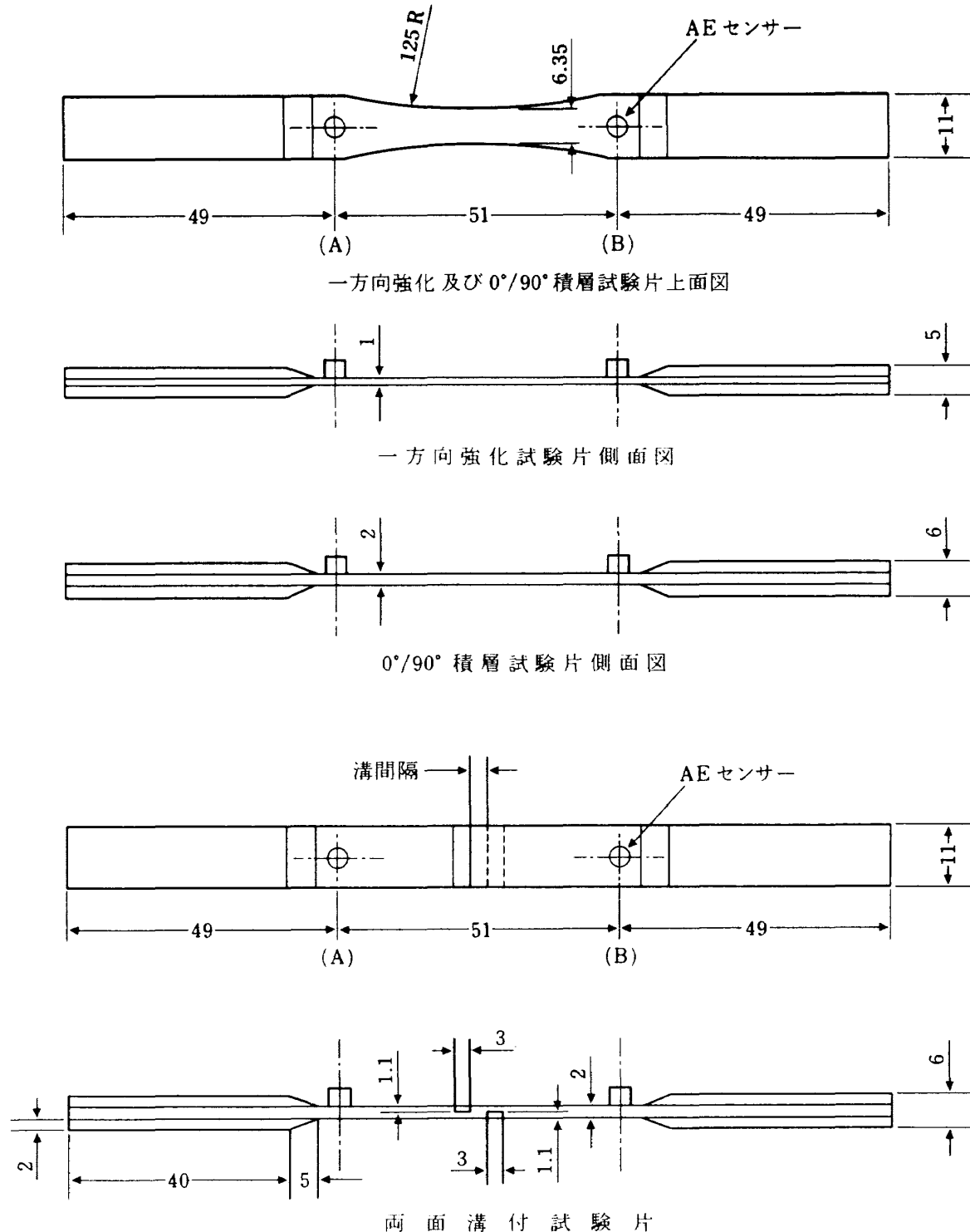


図1 試験片の寸法形状

表 1 試験片の特徴と引張破壊荷重, 引張破壊応力及び破壊状況

名 称	特 徴	破壊荷重	破壊応力	破壊状況
一方向強化試験片	0°方向にボロン繊維 6層積層	9.9 kN	1565 MPa	引張破断
繊維試験片	0°方向強化試験片のマトリックスを塩酸で溶解	5.3 kN	1673 MPa	引張破断
0°/90°積層試験片	ボロン繊維0°に3層/90°に6層/0°に3層を積層	9.8 kN	772 MPa	引張破断
両面溝付試験片(a)	0°方向にボロン繊維12層積層, 溝間隔 3mm	3.2 kN	319 MPa	層間剝離
両面溝付試験片(b)	0°方向にボロン繊維12層積層, 溝間隔 6mm	5.4 kN	541 MPa	引張破断
両面溝付試験片(c)	0°方向にボロン繊維12層積層, 溝間隔 4mm	4.3 kN	430 MPa	剝離と破断

(直径約 10 μm) の周りにボロンを蒸着したボロン繊維 (直径 140 μm) を強化材としてアルミニウムのマトリックスと複合したものである。試験片を採取した供試材は, 6061 アルミニウム箔の上にボロン繊維を一方向に引き揃え有機接着剤で固定したボロン繊維グリーンテープ (繊維直径 140 μm, 繊維配列ピッチ 188 μm) と 6061 アルミニウム箔 (厚さ約 46 μm) を上下に重ね合わせたものを積層してホットプレスしたものである。試験片は縦 149, 横 149 の所定の積層と厚さの供試材板を製作し, これを放電ワイヤー加工によって図 1 の形状に切出したものである。繊維容積率 V_f は 0.50 である。溝付き試験片の溝はダイヤモンド砥石で加工した。試験片の把持部はチャックの食込みによる破壊が生じないようにタブを接着した。繊維試験片のタブは FRP を用いた。その他の試験片のタブはアルミニウムを用いた。表 1 に各試験片の積層条件の特徴と引張破壊荷重, 引張破壊応力, 破壊状況を示す。繊維配列の方向は引張荷重方向を 0° とする。

3. 試験方法

容量 2 ton の万能試験機を用いて試験片に引張荷重を加え, 破壊までに発生する AE の計測を行って破壊様式が異なる場合の AE 特性の違いを調べた。図 2 に引張試験における計測系の概要を示す。AE 計測装置は Dunegan Endevco 3000 を用いた。増幅度はプリアンプ 40 dB, メインアンプ 45 dB の総合利得 85 dB で行った。AE センサーは直径約 3.6 mm の Dunegan Model S 9225 (120 KHz ~ 970 KHz) を図 1 に示す試験片の位置にグリスを介して 2 個接着しビニールテープで巻付けて固定した。AE 計測に際しては, 負荷過程の途中で必要に応じて負荷の増加を

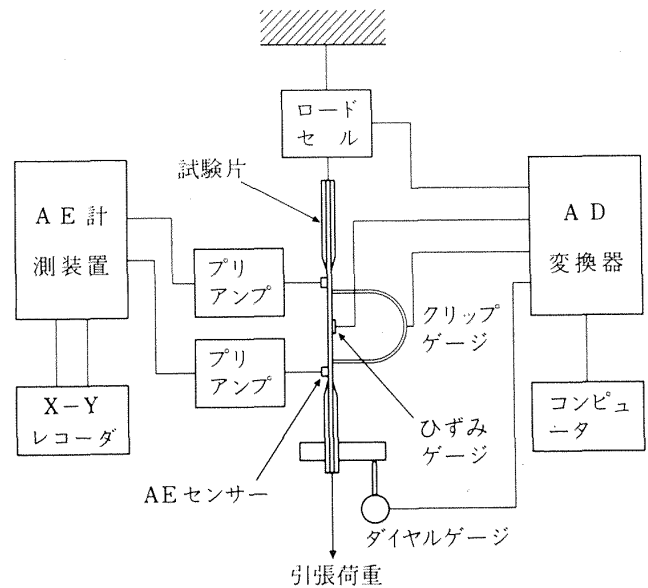


図 2 計測系の概要

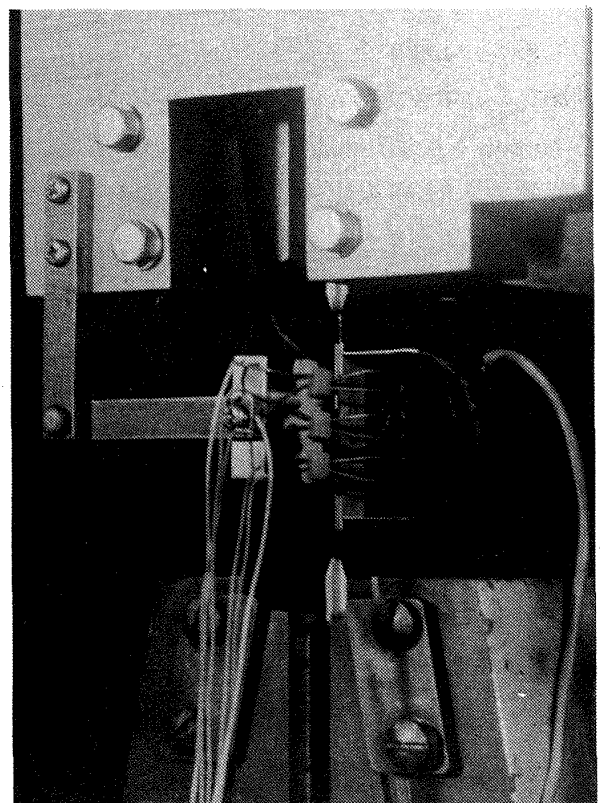


図 3 引張試験状況

停止し、発生した AE を XY レコーダで記録した。

試験片には、標点間距離 41mm のクリップゲージと試験片中央部に三軸ロゼットひずみゲージを接着し、伸びとひずみを計測した。引張試験の負荷過程における伸びとひずみのデータは AD 変換器を介してコンピュータで図示させ試験片に曲げが生じているか否かをモニターした。図 3 に引張試験状況を示す。引張破壊した試験片の破面を走査電顕で観察し、破壊状況の特徴と AE 特性の関連について検討した。なお、試験は同じ種類の試験片について 2 枚ずつ行ったが試験結果は同種の傾向を示したので 1 枚の結果のみ示した。

4. AE 計測

AE 波は材料に外力を加えたとき蓄積されたひずみエネルギーが材料内部の転位や微小な破壊となって解放されるとき生ずる弾性波である⁶⁾。AE 波には連続型 AE と突発型 AE があり、連続型 AE は突発型 AE が連続して発生している状態である⁷⁾と考えられている。複合材料に於ける AE 波は繊維の破壊、マトリックスの破壊、繊維とマトリックスの界面剝離、層間剝離、繊維の引抜け等なんらかの内部破壊によって発生し、突発型 AE であることが多い⁸⁾と言われている。図 4 は AE 波の計測について示したものである。1 回の突発型 AE の発生を 1 事象として計測する。本装置の AE 計測では dead time の設定を 3msec とした。dead time 以下の短時間に連続して突発型 AE が発生する場合には複数の事象であっても一個の事象と誤認するから計測された事象数は実際に発生した事象数より少ない可能性がある。AE の発生位置は 2 個の AE センサーの AE 到達時間差から標定し、位置標定はセンサー間を 100 分割した AE の発生分布として示す。振幅は各事象の最大振幅値であり、プリアンプの出力電圧が 100 μ V_{p-p} のとき 0dB、10 V_{p-p} のとき 100dB とする dB 表示で示す。しきい値はプリアンプの出力電圧 5.6 mV_{p-p} に相当する 35dB に設定した。なお、低振幅事象と高振幅事象とでは破壊様式に違いがある⁴⁾と考えられるため、累積事象数から 80dB 以上の事象(以後、高振幅の事象と記す)を抽出した挙動についても累積事象数の挙動と併せ示した。カウント数は、

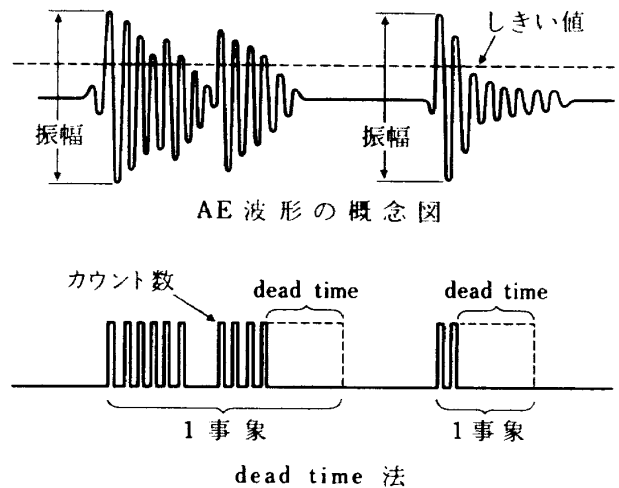


図 4 AE 波計測の説明図

1 事象内のしきい値を越えた AE 波の波の数である (図 4 参照)。カウント数の表示は、カウント数分布と累積カウント数について示した。カウント数分布は発生した事象について同じカウント数ごとに示した事象数の分布である。累積カウント数は破壊するまでに発生する全カウント数である。AE 計測では負荷過程と累積事象数、80dB 以上の累積事象数、累積カウント数の発生挙動の関係を併せ示すことによって破壊様式の違いによる AE 発生挙動の特徴について検討した。また、低負荷から破壊までの位置標定、振幅分布、100 カウント以上のカウント数分布の発生パターンを示し、破壊様式の違いによる AE 特性の変化状況について検討した。

5. 試験結果と考察

表 1 に各試験片の破壊応力を示したが、高い順に並べると繊維試験片、一方向強化試験片、0°/90°積層試験片、両面溝付試験片(b)・(c)・(a)である。

繊維試験片の破壊応力は 1673MPa である。この試験片の繊維露出長さは約 45mm であるが、長さ 40mm のボロン単繊維の破壊応力は約 4200MPa という報告がある⁹⁾。従って、繊維試験片の破壊応力は単繊維に比較し著しく低い。これは、マトリックスが無い繊維束の場合、局部的に高負荷が生じ、引張荷重が均等に負荷されないためと考えられる。

V_f = 0.50 の一方向強化試験片の破壊応力は 1565MPa である。この結果は、マトリックスと繊維束の界面接着が良好であれば繊維の引張強度が高くなる

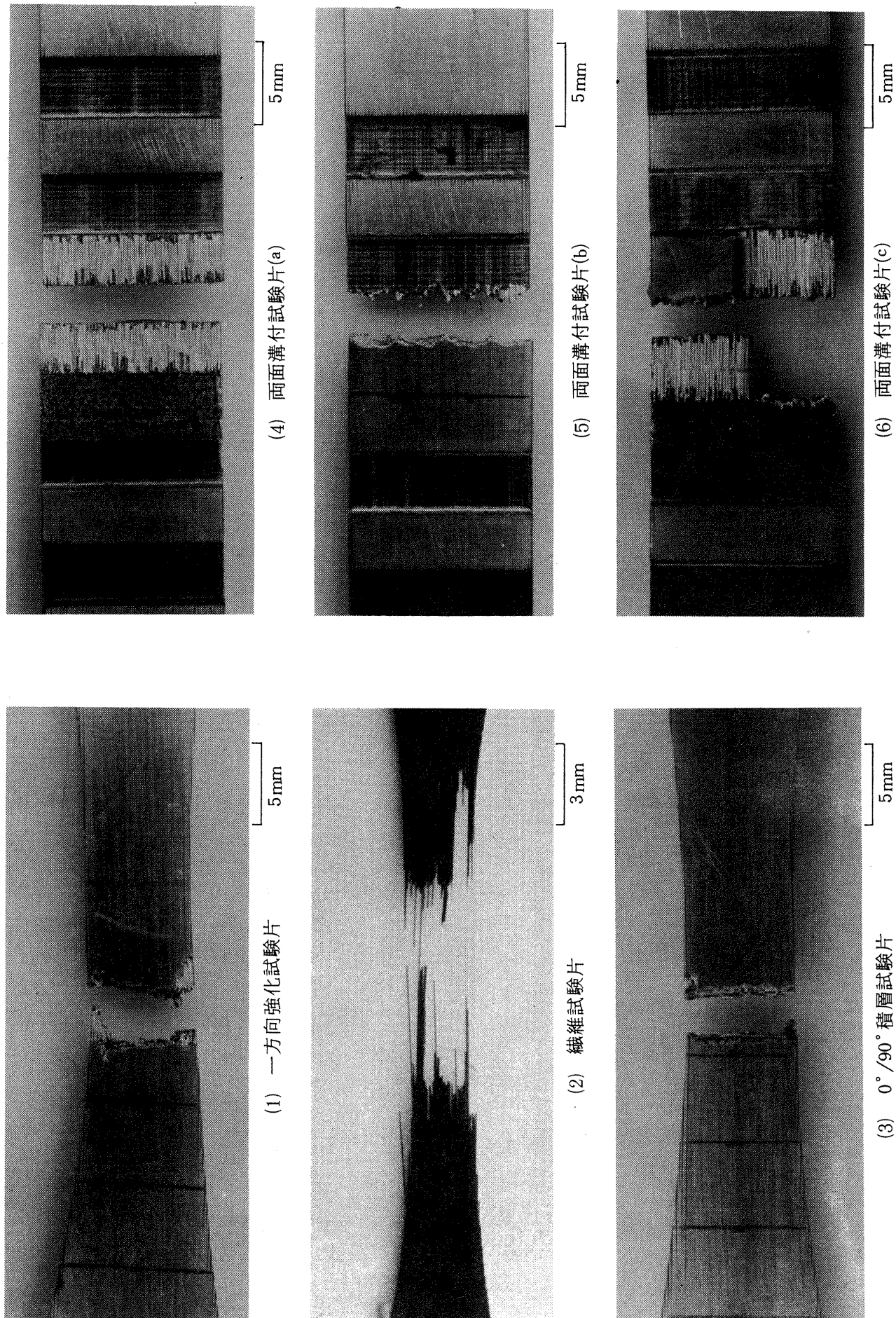
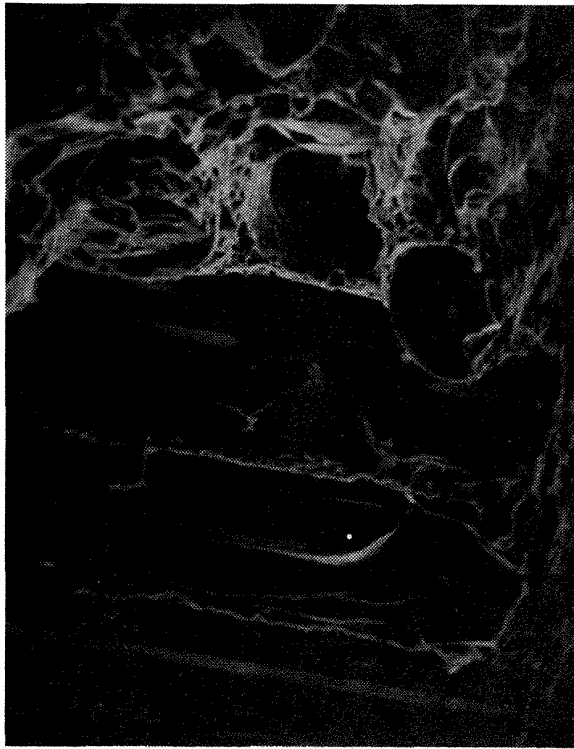
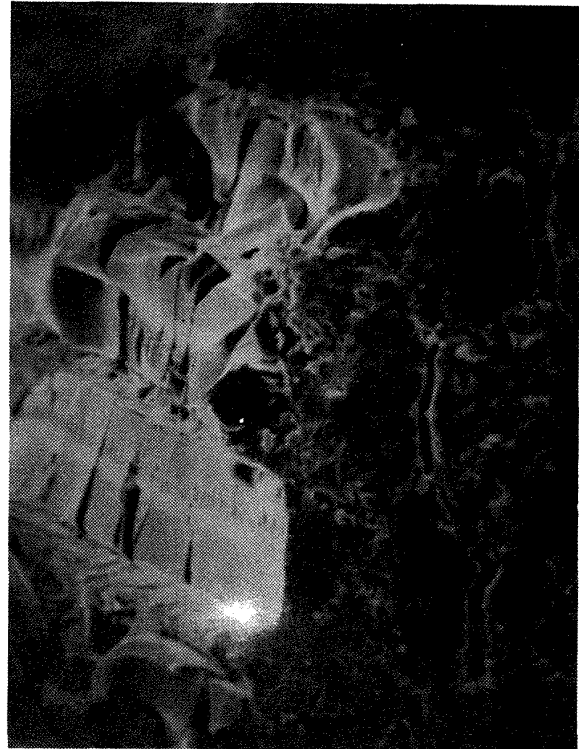


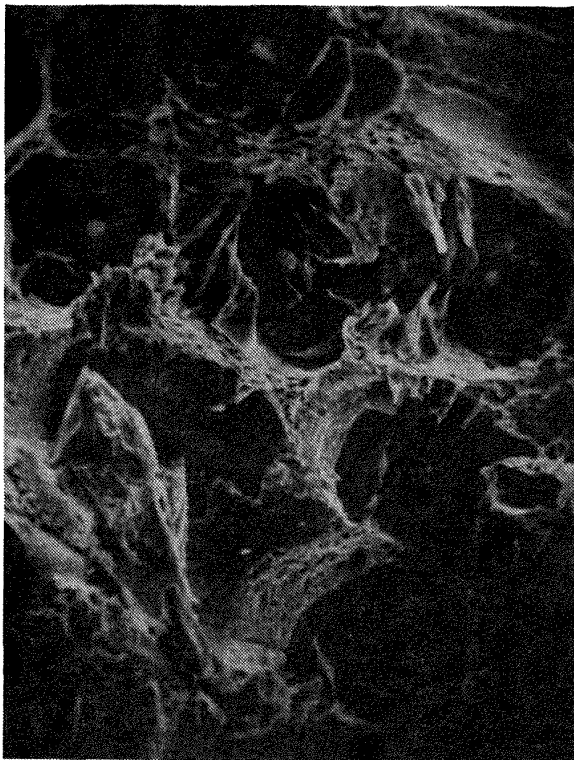
図5 試験片の破壊状況



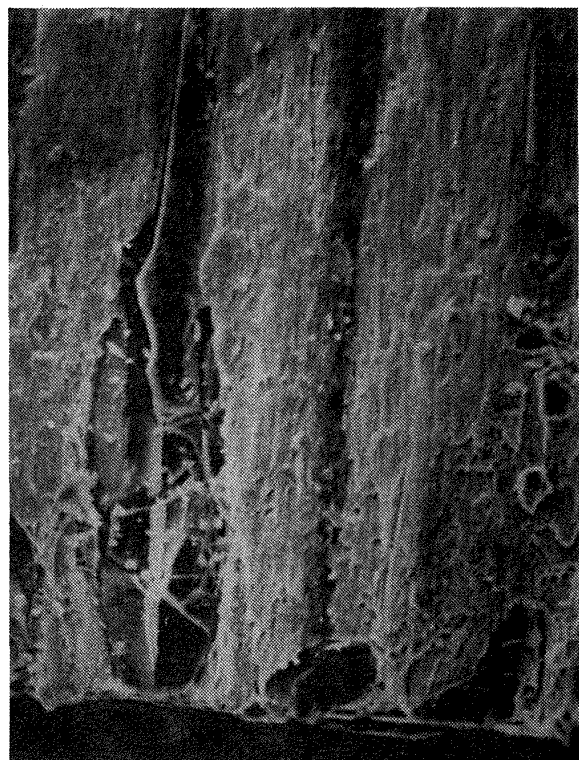
(3) 0°/90°積層試験片



(4) 0°/90°積層試験片の側面



(1) 一方向強化試験片



(2) 両面溝付試験片(a)

図 6 破断面の走査電顕写真

ことを示している。

積層条件 $[0_3^{\circ}/90_3^{\circ}]_s$ の $0^{\circ}/90^{\circ}$ 積層試験片の破壊応力は 772MPa である。この値は、一方向強化試験片の約 1/2 であり、 90° 繊維層は引張荷重を分担していないと考えられる。

両面溝付試験片(b)の破壊応力は 541MPa である。この値は、一方向強化試験片の約 1/3 であり、溝による応力集中の影響で低下したと考えられる。

両面溝付試験片(c)の破壊応力は 430MPa である。この試験片の破壊は両面溝付試験片(a)・(b)が混在した破壊状況であり、破壊応力は両者の中間値を示した。

両面溝付試験片(a)は層間剝離であり、層間剝離のせん断応力は 95.6MPa である。

次に、各試験片の AE 特性について述べる。

5.1 一方向強化試験片

図 5 の(1)に破壊状況の写真、図 6 の(1)に破断面の走査電顕写真を示す。破断面の一部に繊維とマトリックスの界面剝離はあるが繊維の長い引き抜けはない。従って、界面の接着は良好であり、複合状況は良い。この試験片は表 1 に示したように高い引張強度を有している。

図 7 に引張応力と伸び及びひずみの関係を示す。これらの挙動は引張応力に比例した増加傾向を示した。なお、ひずみは 1460MPa の高い応力を越えると急に低下した。これは、ひずみゲージに剝離が生じたためと考えられる。

図 8 に引張応力と累積事象数、80 dB 以上の累積事象数、累積カウント数の発生挙動の関係を示す。縦軸は累積事象数、80 dB 以上の累積事象数、累積カウント数、横軸は引張応力である。破壊応力の約 15% の低負荷から AE が発生するが累積事象数の発生挙動は穏やかな逓増傾向である。累積カウント数の発生挙動は中負荷以上で多くなり、それ迄の増加率の約 2 倍になる。また、高振幅の事象は低負荷では生じないが中負荷以上で発生率が高くなる。従って、中負荷以下と中負荷以上では AE 発生過程に違いがあると考えられる。一方向強化試験片の場合負荷の増加に伴って繊維破壊の発生率が高くなると考えられるため高振幅の事象は繊維破壊によって生

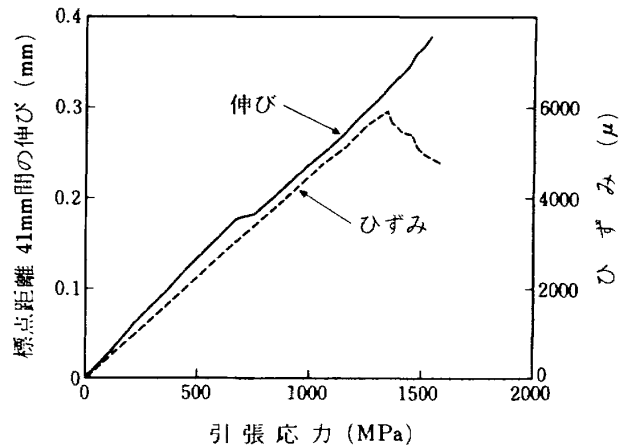


図 7 一方向強化試験片の伸び・ひずみ

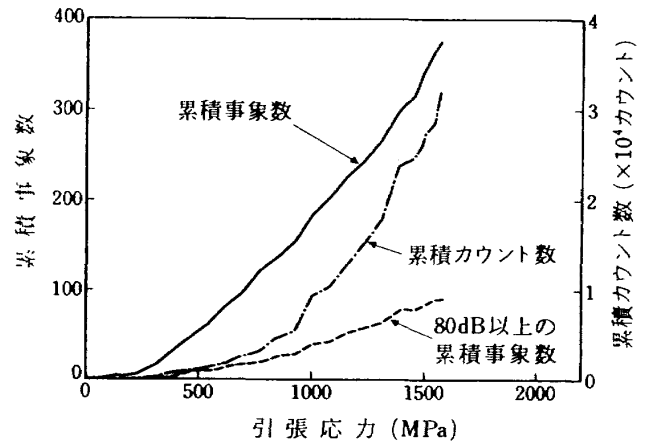


図 8 一方向強化試験片の AE 発生挙動

じたと考えられる。中負荷以下では低振幅の事象が多いからマトリックスと繊維間の損傷など繊維破壊以外の破壊が主要な発生因子と考えられる。

図 9 は低負荷から破壊までの位置標定、振幅分布、100 カウント以上のカウント数分布の発生パターンを示したものである。位置標定の横軸はセンサー間を 100 分割した発生位置であり、縦軸は所定の位置から生じた事象数である。振幅分布の横軸は振幅値、縦軸は各振幅値における発生事象数である。カウント数分布の横軸はカウント数であり、縦軸は発生事象数である。低負荷で発生する AE は中央部付近から生じた。この事象の振幅は 35 dB ~ 50 dB 程度の低振幅が多い。なお、100 カウント以上の事象はない。従って、低負荷で生じた繊維破壊以外の損傷によると考えられる AE は、低振幅が多くカウント数も低い。AE の発生域は負荷の増加に伴って周囲に拡大するが、中央部の AE は発生頻度が高く中央部が高

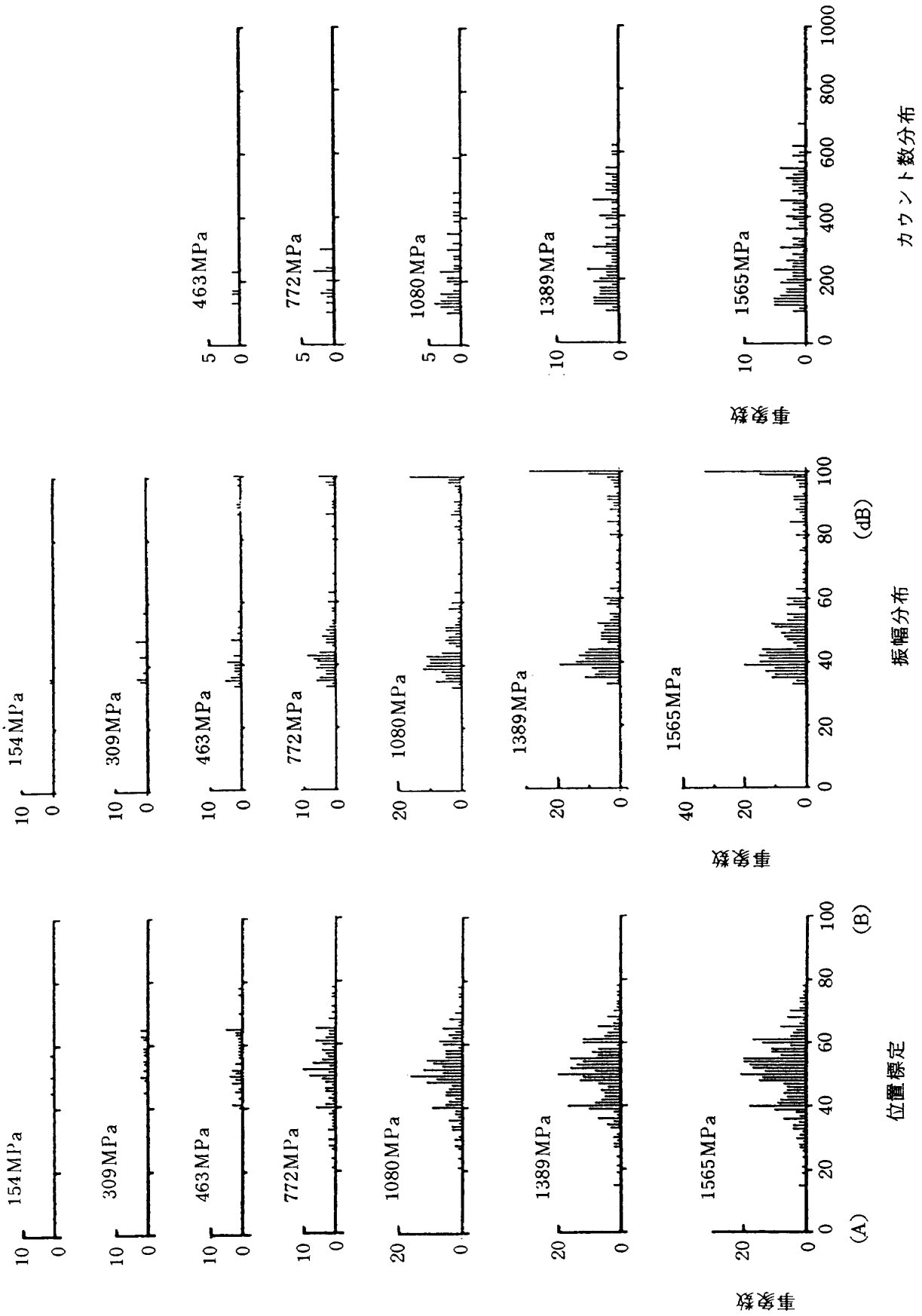


図9 一方向強化試験片のAE特性

い山状の分布になる。中負荷では高振幅の事象が発生している。特に100dBの事象は高負荷になるに従って増加し、繊維破壊によるものと考えられる。また、カウント数分布も高負荷になると高いカウントの事象が多くなり、繊維破壊による事象はカウント数が高いと考えられる。引張破断までの振幅分布では繊維破壊以外の損傷によると考えられる35dB～60dBまでの低振幅の事象と繊維破壊と考えられる高振幅の事象が併存した分布となった。

5.2 繊維試験片

繊維試験片は、一方向強化試験片の中央部分長さ約40mm間のアルミニウムマトリックスを塩酸で溶解して、繊維を露出させたものである。

図5の(2)に破壊状況を示す。繊維露出部の広範囲に繊維破断が生じている。なお、中央寄りの2箇所特に多くの繊維破断部がある。

図10に引張応力と伸びの関係を示す。負荷の初期と負荷過程の途中に折れ曲がりが生じたが、概観的には直線的であり伸びは負荷に比例していると考えられる。

図11に引張応力と累積事象数、80dB以上の累積事象数、累積カウント数の発生挙動の関係を示す。累積事象数は低負荷では発生率が高い。中負荷では発生率が低く最終破断付近で高くなる。累積カウント数は低負荷では発生率が低いが中負荷以上で高くなり、最終破断付近では更に高くなる。80dB以上の事象は高負荷にならないと発生しない。従って、低負荷の事象と中負荷以上の事象では発生要因に違いがあると考えられる。この試験片は、マトリックスを塩酸で溶解し繊維が露出しているため低負荷で発生するAEは繊維相互の擦れによるノイズであると考えられる。

図12に低負荷から破壊までの位置標定、振幅分布、100カウント以上のカウント数分布の発生パターンの変化を示す。低負荷のAEは位置標定で示すように広範囲から発生しており、その事象の振幅は振幅分布によると40dB付近である。従って、繊維の擦れによる振幅は低いと考えられる。中負荷以上になると高振幅の事象が僅かに発生し、繊維破壊が生じたことを示している。破壊までの位置標定で示

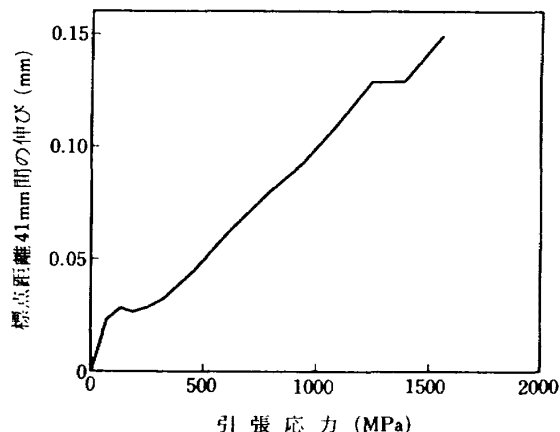


図10 繊維試験片の伸び

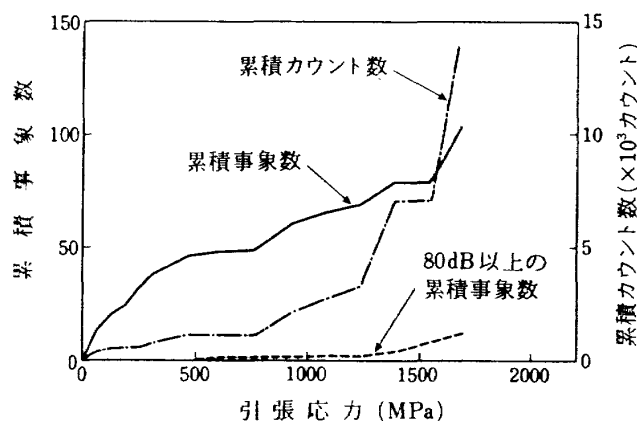


図11 繊維試験片のAE発生挙動

すように事象は広範囲で発生するが中央寄りの二箇所特に発生数の多い部位がある。これは、図5の(2)の破壊状況と一致する。100dBの繊維破壊と考えられる事象は高負荷でないと発生しない。この試験片の繊維数は、一方向強化試験片とほぼ等しいが100dBの事象数は少ない。これは、繊維が最終破断間際まで多数存在し、破断のとき一度に多数の繊維が破壊したため複数の事象を弁別できないためであると考えられる。なお、破壊までのカウント数分布で1000カウントの事象が多いのは複数の事象を1事象と誤認したからであると考えられる。

5.3 0°/90°積層試験片

図5の(3)に破壊状況の写真、図6の(3)に走査電顕による破断面、図6の(4)に走査電顕による斜め側面からの破断面を示す。図6の(3)の左側は90°方向繊維層、右側は0°方向繊維層である。90°方向繊維の破面は平滑状であり、タングステン芯が見える。な

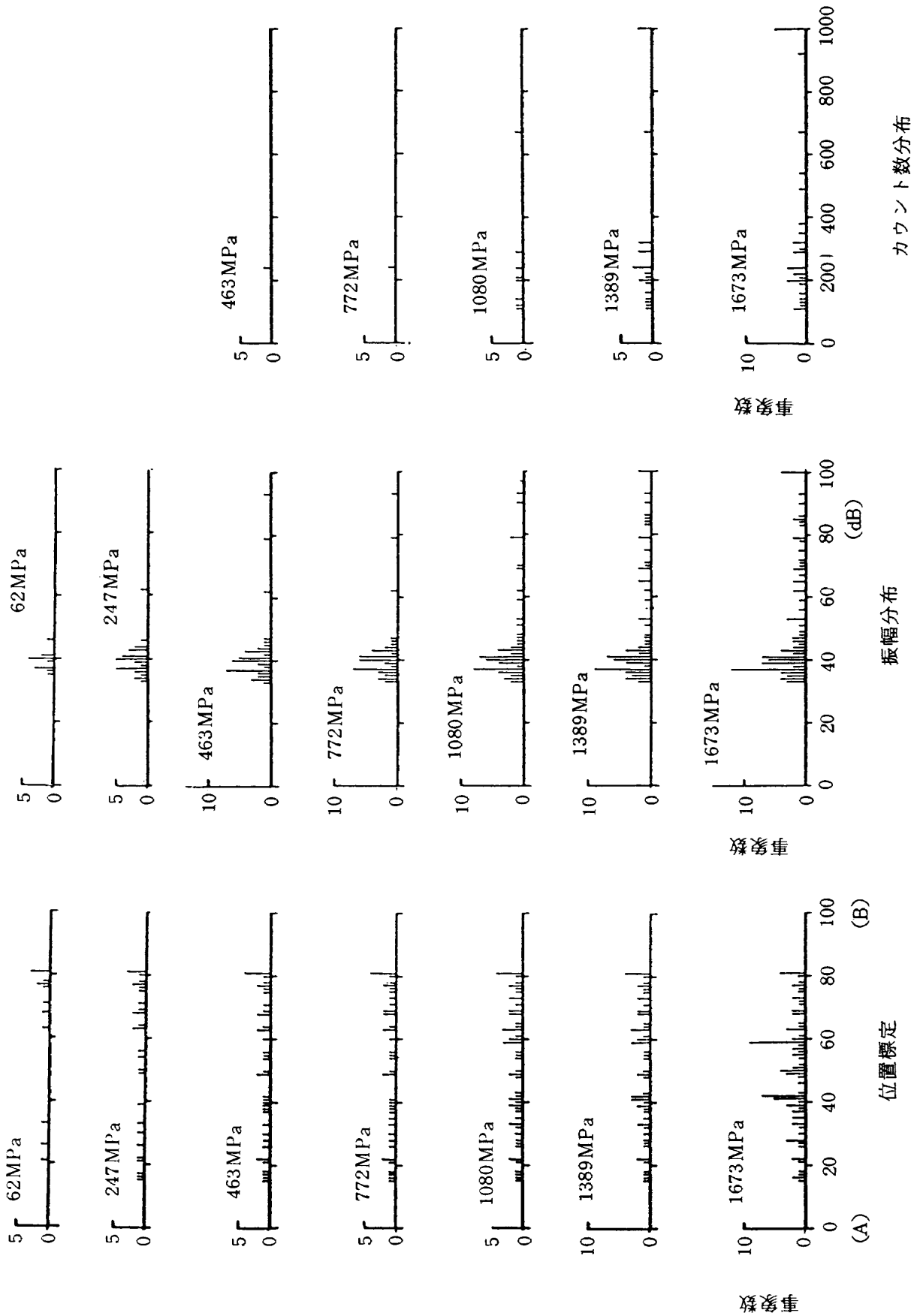


図 12 繊維試験片の AE 特性

お、90°方向繊維には繊維軸の直角方向に多数のき裂がある。0°方向繊維層の破面は一方向強化試験片の場合と同じである。図6の(4)の右側端は0°方向繊維層であるがこれ以外の大部分は90°方向繊維層である。90°方向繊維の側面には繊維中心部付近から生じたと考えられる荷重方向に直交した縦割れ状のき裂がある。このき裂の発生域がかなり広範囲にあることを走査電顕で確かめた。これに対し、0°方向繊維層の側面には外見的な損傷は見当たらない。このように側面観察の結果0°方向繊維層に比べ90°方向繊維層の損傷は著しく多いことがわかった。従って、AEの発生は0°方向繊維層より90°方向繊維層からの方が多いと考えられる。

図13に引張応力と伸び及びひずみの関係を示す。両者とも負荷に比例した挙動を示した。

図14に引張応力と累積事象数、80dB以上の累積事象数、累積カウント数の関係を示す。繊維破壊と考えられる高振幅の事象が低負荷から生じている。その挙動は負荷比例的傾向であり、負荷増加に伴って一定の割合で繊維破壊が生じていると考えられる。また、累積事象数、累積カウント数、の挙動も負荷比例的傾向である。これは低負荷から高負荷まで破壊様式の状況がほぼ同じであるためと考えられる。一方向強化試験片の場合で調べたように0°方向繊維層は低負荷では繊維破壊が生じないため低負荷で生ずる高振幅の事象は、90°方向繊維層の繊維破壊であると考えられる。従って、ボロン繊維は軸方向の引張負荷に高い強度を有するが、周方向の引張負荷には弱いと考えられる。この試験片の事象数は他の試験片に比べ著しく多い。この原因は、図6の(4)で示したように90°方向繊維層の破壊が著しく多いためである。従って、このAE特性は90°方向繊維層の破壊の特徴を示していると考えられる。

図15に低負荷から破壊までの位置標定、振幅分布、100カウント以上のカウント数分布等の発生パターンの変化を示す。低負荷でのAEは試験片中央部から発生する。発生域は負荷の増加に伴って拡大する。中負荷以上になると中央付近よりやや離れた周囲の発生頻度が高くなり、最終破壊までの分布では35と64の位置にピークがある二つの山を形成した。振幅分布によると低負荷で80dB以上の事象が

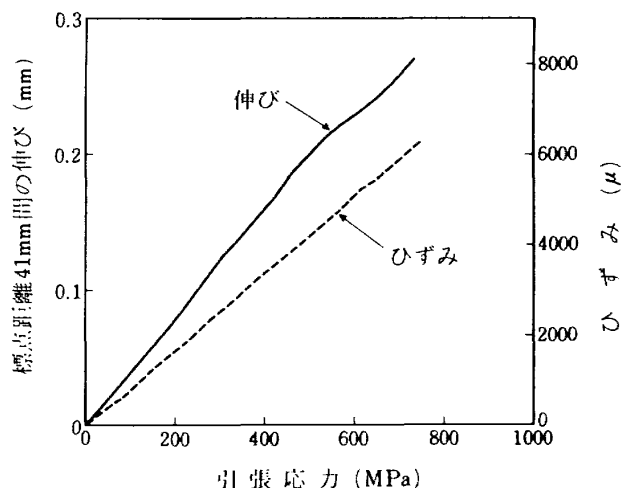


図13 0°/90°積層試験片の伸び・ひずみ

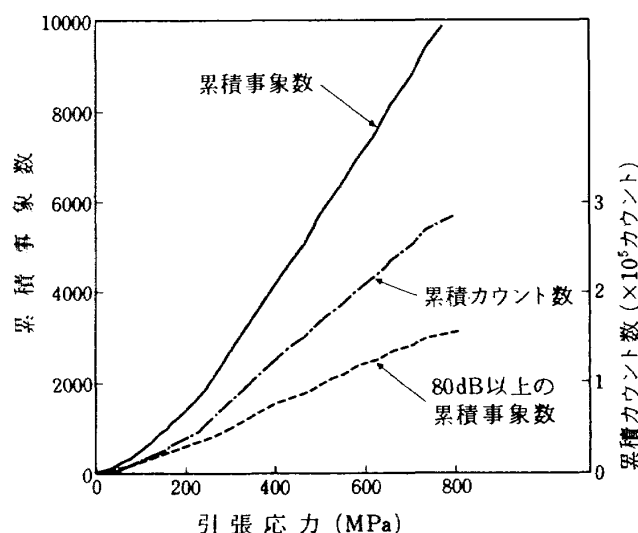


図14 0°/90°積層試験片のAE発生挙動

多数生じている。中負荷以上では広範囲の振幅域で多数の事象が生じているが80dBをピークとした60dB～98dBの山と99dB以上の高いピークがある。これらの高振幅の事象は90°方向繊維の破壊によるものと考えられる。なお、一方向強化試験片の0°方向繊維破壊は100dBの事象の発生率が高い。従って、90°方向繊維破壊は前者に比べると低い振幅が多い。

5.4 両面溝付試験片(a)

この試験片の溝間隔は3mmである。図5の(4)に試験片の破壊状況、図6の(2)に破面の走査電顕写真を示す。破面の大部分は層間剝離であるが溝際に繊維破壊がある。この繊維破壊は溝際の応力集中によって生じたと考えられる。従って、AEの発生は層

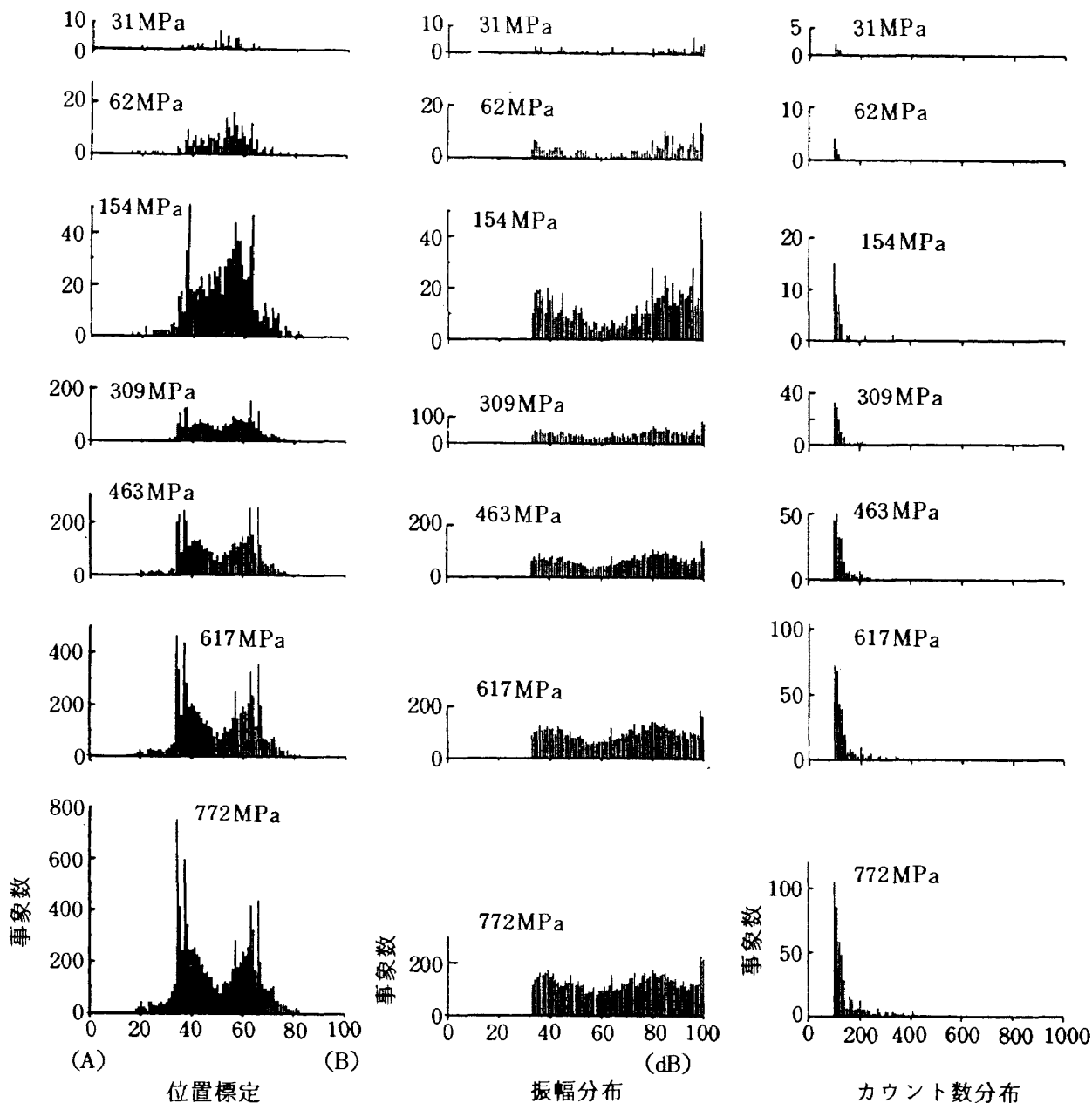


図 15 0°/90°積層試験片のAE特性

間剝離と繊維破壊によって生じたと考えられる。

図 16 に引張応力と伸び及びひずみの関係を示す。これらの挙動は前述の試験片の場合と異なり負荷の増加に伴って増加率が高くなった。これは、この試験片の溝部が厚さの中心に対して対称でないため、負荷の増加に伴って曲げが生じたためと考えられる。

図 17 に引張応力と累積事象数、80dB 以上の累積事象数、累積カウント数の発生挙動を示す。繊維破壊と考えられる 80dB 以上の累積事象数の挙動は負荷比例的であり、累積事象数に比べ著しく少ない。これに対し累積事象数と累積カウント数の挙動は負

荷の増加に伴って急激に増加し指数級数的増加傾向を示す。この挙動は層間剝離の進展状況を示していると考えられる。

図 18 に低負荷から破壊までの位置標定、振幅分布、100 カウント以上のカウント数分布を示す。AE の発生は低負荷から高負荷まで層間剝離の生じた試験片中央部付近からの事象が多い。従って、AE の大部分は層間剝離部から生じていると考えられる。振幅分布によると低負荷でも高振幅の事象が生じている。これは溝際の応力集中によって繊維が破壊しているためと考えられる。中負荷以上では 35dB ~ 65

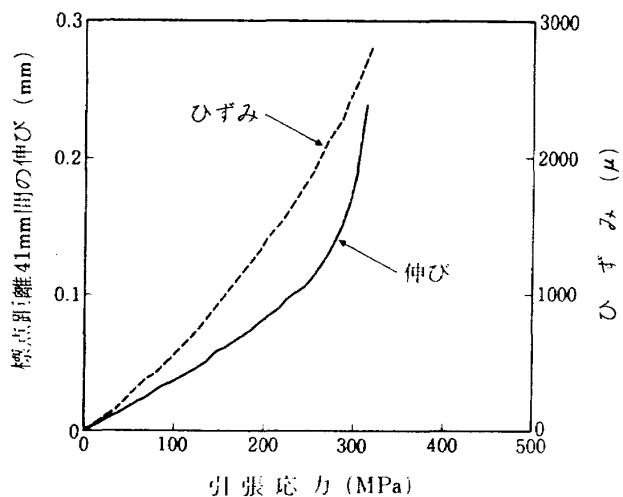


図 16 両面溝付試験片(a)の伸び・ひずみ

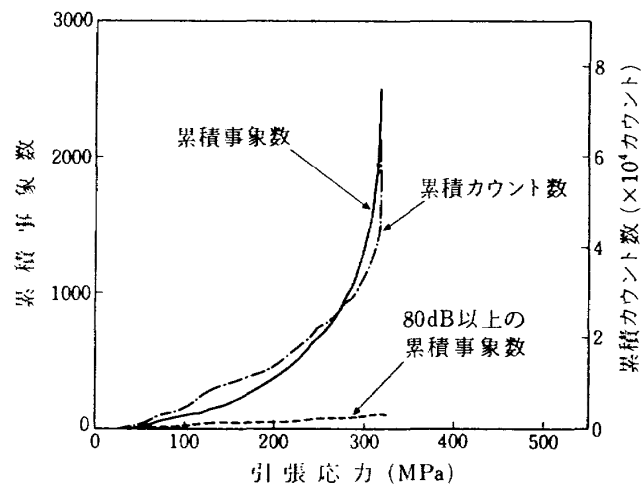


図 17 両面溝付試験片(a)のAE発生挙動

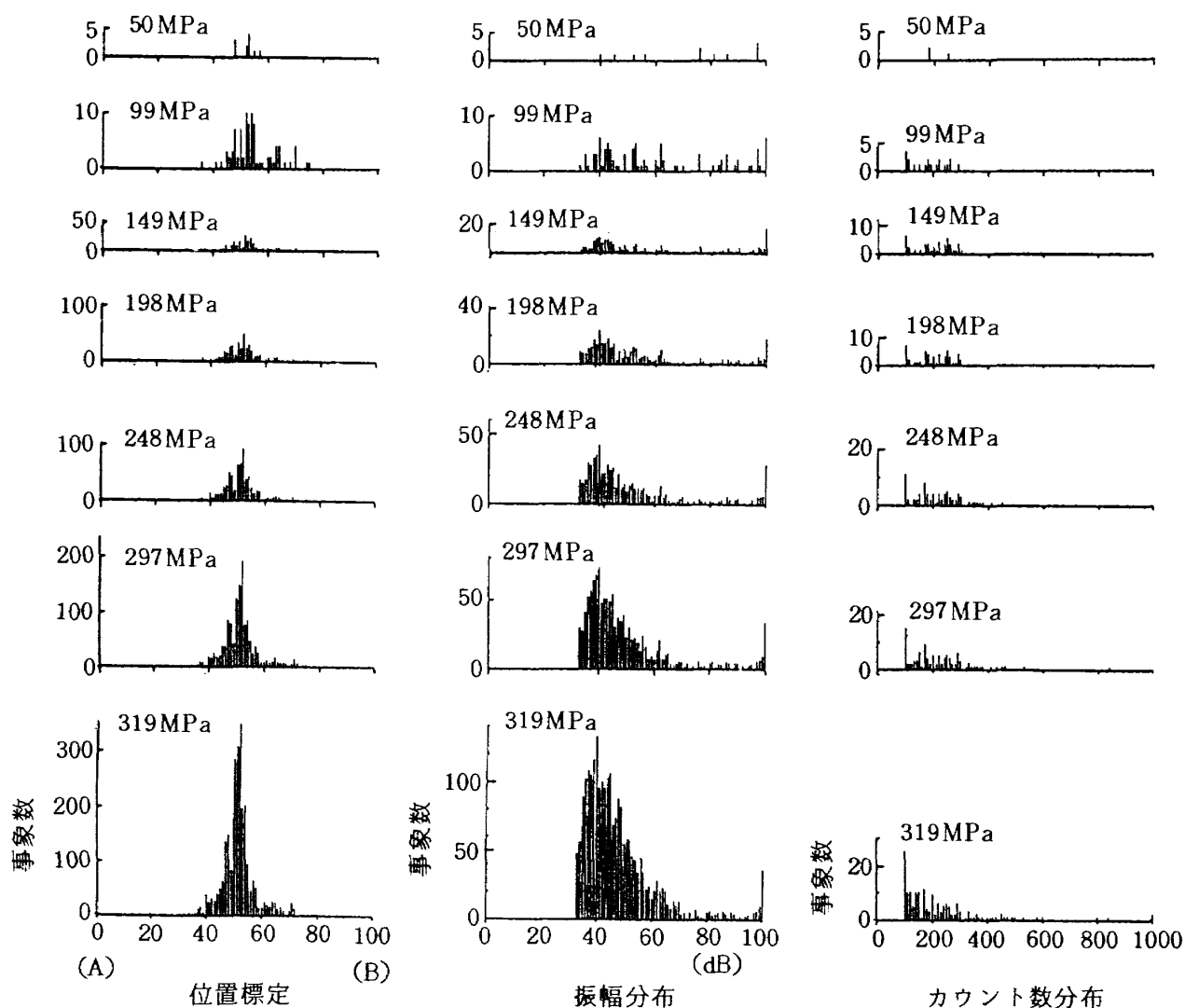


図 18 両面溝付試験片(a)のAE特性

dBの低振幅の事象の発生率が高く、高負荷では高振幅の事象に比べ低振幅の事象が著しく多い。また、位置標定で示すように負荷の増加に伴って中央部のAEが急増している。従って、高負荷の低振幅の事象は層間剝離によるものと考えられる。

5.5 両面溝付試験片(b)

この試験片の溝間隔は6mmである。図5の(5)に試験片の破壊状況を示す。破壊は溝際で生じており、溝際の応力集中の影響で引張破断したと考えられる。

図19に引張応力と伸び及びひずみの関係を示す。伸びは負荷の増加に伴って増加率が変化した。従って、この試験片の場合にも両面溝付試験片(a)と同じ理由で曲げが生じたと考えられる。ひずみは中負荷以上で増加率が鈍化し、高負荷ではやや低下した。また、破断間際には急上昇した。このような不規則な挙動はひずみゲージが剝離したためであると考えられる。

図20に引張応力と累積事象数、80dB以上の累積事象数、累積カウント数の発生挙動の関係を示す。低負荷で、溝際の応力集中の影響による繊維破壊と考えられる高振幅の事象が生じた。80dB以上の累積事象数の挙動は負荷比例的であるから低負荷から高負荷まで繊維破壊の発生率はほぼ同じであると考えられる。また、累積事象数の挙動は中負荷以上で増加率が高くなるが累積カウント数の場合はそれほど高くない。このような高負荷での累積事象数の増加は繊維破壊以外の破壊割合が多くなったためと考えられる。同じ一方向強化複合材料の一方向強化試験片の場合は低負荷では繊維破壊以外の損傷が主であり、低負荷では繊維破壊が生じない。これに対し溝際の応力集中が影響する場合には低負荷から繊維破壊が生じる。このように同じ一方向強化複合材料でも溝がある場合と無い場合では、AEの発生挙動に著しい違いが生じる。

図21に低負荷から破壊までの位置標定、振幅分布、100カウント以上のカウント数分布の発生パターンの変化を示す。AE発生は低負荷でも溝による応力集中のため中央部付近の二箇所にAE発生頻度の高い部位がある。負荷の増加に伴って発生域は広がる傾向にあるが、中央部付近の溝際と思われる部

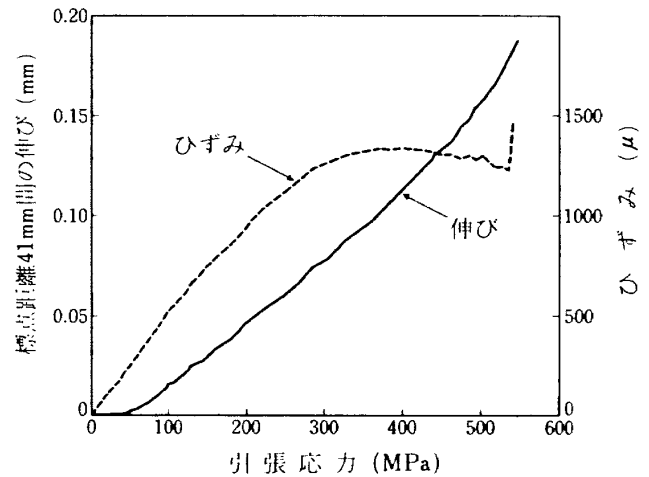


図19 両面溝付試験片(b)の伸び・ひずみ

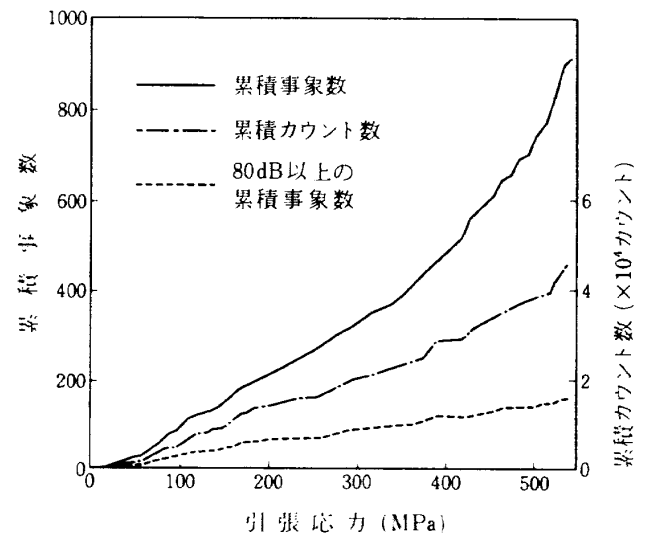


図20 両面溝付試験片(b)のAE発生挙動

位から生ずる事象数は他の部位から生ずる事象数に比べ著しく多い。振幅分布では低負荷から繊維破壊による100dBの事象が生じている。なお、最終破断までにおける振幅分布は35dB～60dBの低振幅と99dB以上の高振幅とから成り、一方向強化試験片の場合と同様低振幅と高振幅が併存した分布を示した。また、カウント数分布も繊維破壊のため低負荷から100カウント以上の事象が生じた。この試験片は、溝際から生ずる事象数が多いため応力集中が影響する場合のAE特性を示していると考えられる。

5.6 両面溝付試験片(c)

この試験片の溝間隔は4mmである。図5の(6)に試験片の破壊状況を示す。破壊は試験片幅11mmの内54%が層間剝離、46%が引張破断である。これ

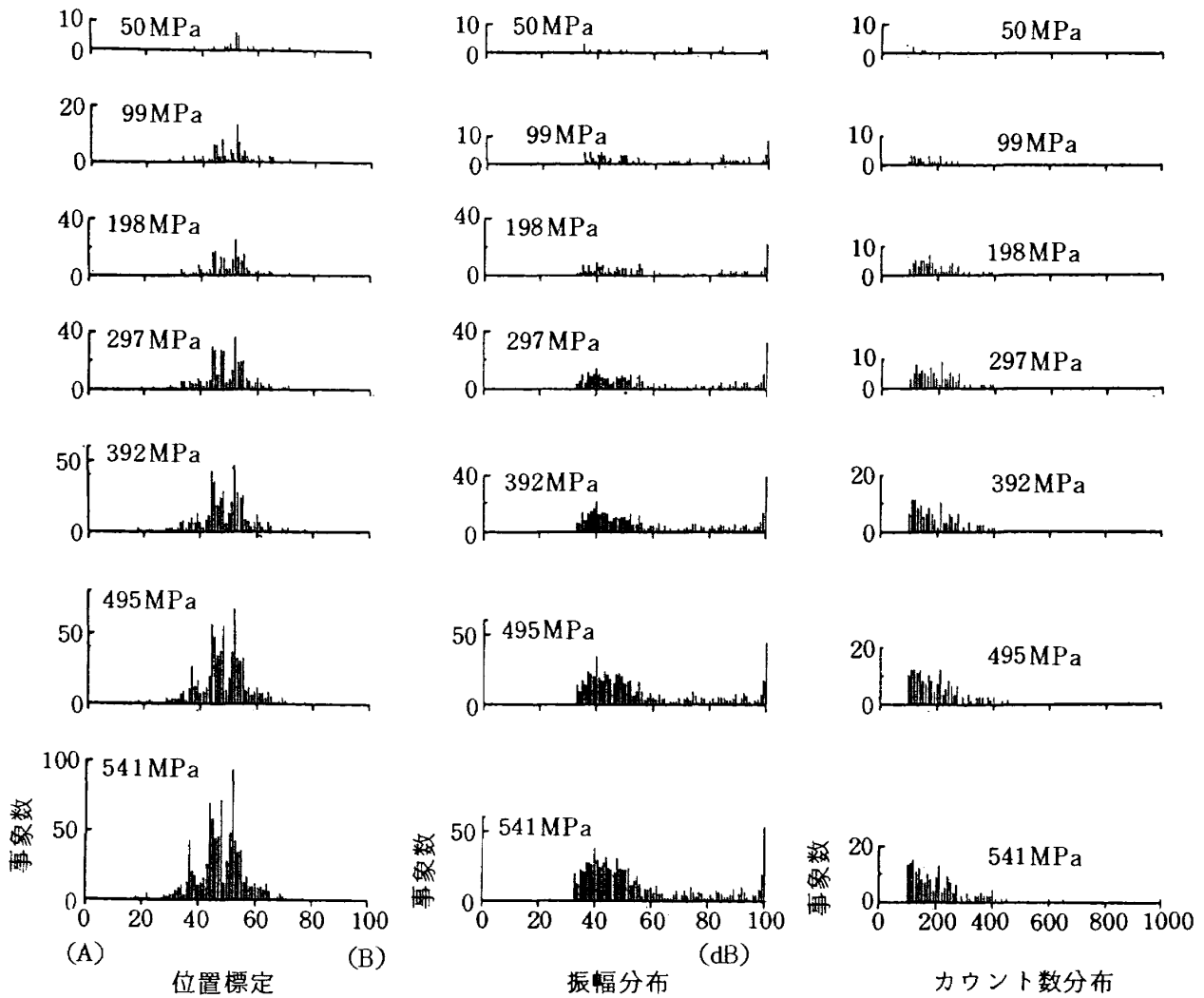


図 21 両面溝付試験片(b)のAE特性

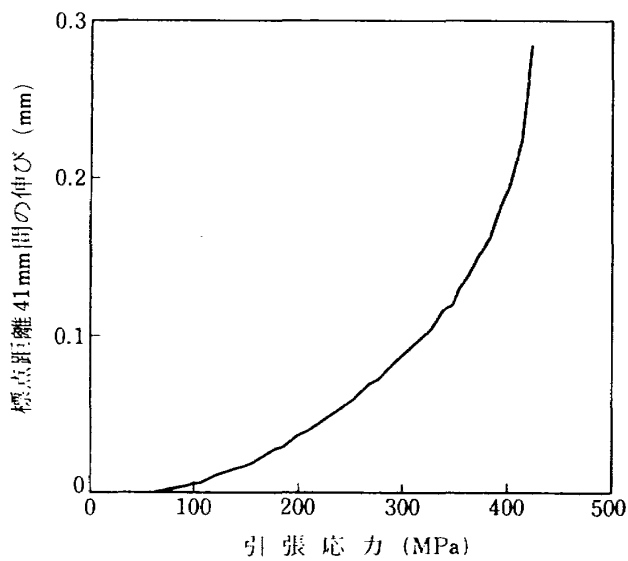


図 22 両面溝付試験片(c)の伸び

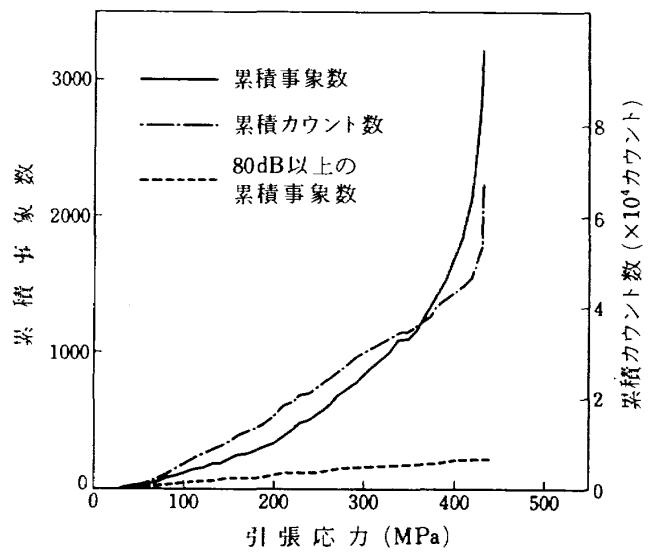


図 23 両面溝付試験片(c)のAE発生挙動

は、両面溝付試験片(a)・(b)の破壊が混在した破壊状況である。

図 22 に引張応力と伸びの関係を示す。負荷の増加に伴って増加率が高くなっており、両面溝付試験片(a)と同じ理由で曲げが生じたと考えられる。

図 23 に引張応力と累積事象数、80 dB 以上の累積事象数、累積カウント数の発生挙動の関係を示す。累積事象数の挙動は負荷に対し指数級数的増加傾向

を示しており、AEの発生は層間剝離による影響が大きいと考えられる。累積カウント数は高負荷まで負荷比例的に増加しており、両面溝付試験片(b)と同様な挙動を示したが破壊間際には両面溝付試験片(a)と同様急上昇した。なお、両面溝付試験片(a)と同様高振幅の事象数は累積事象数に比較して著しく少ない。

図 24 に低負荷から破壊までの位置標定、振幅分

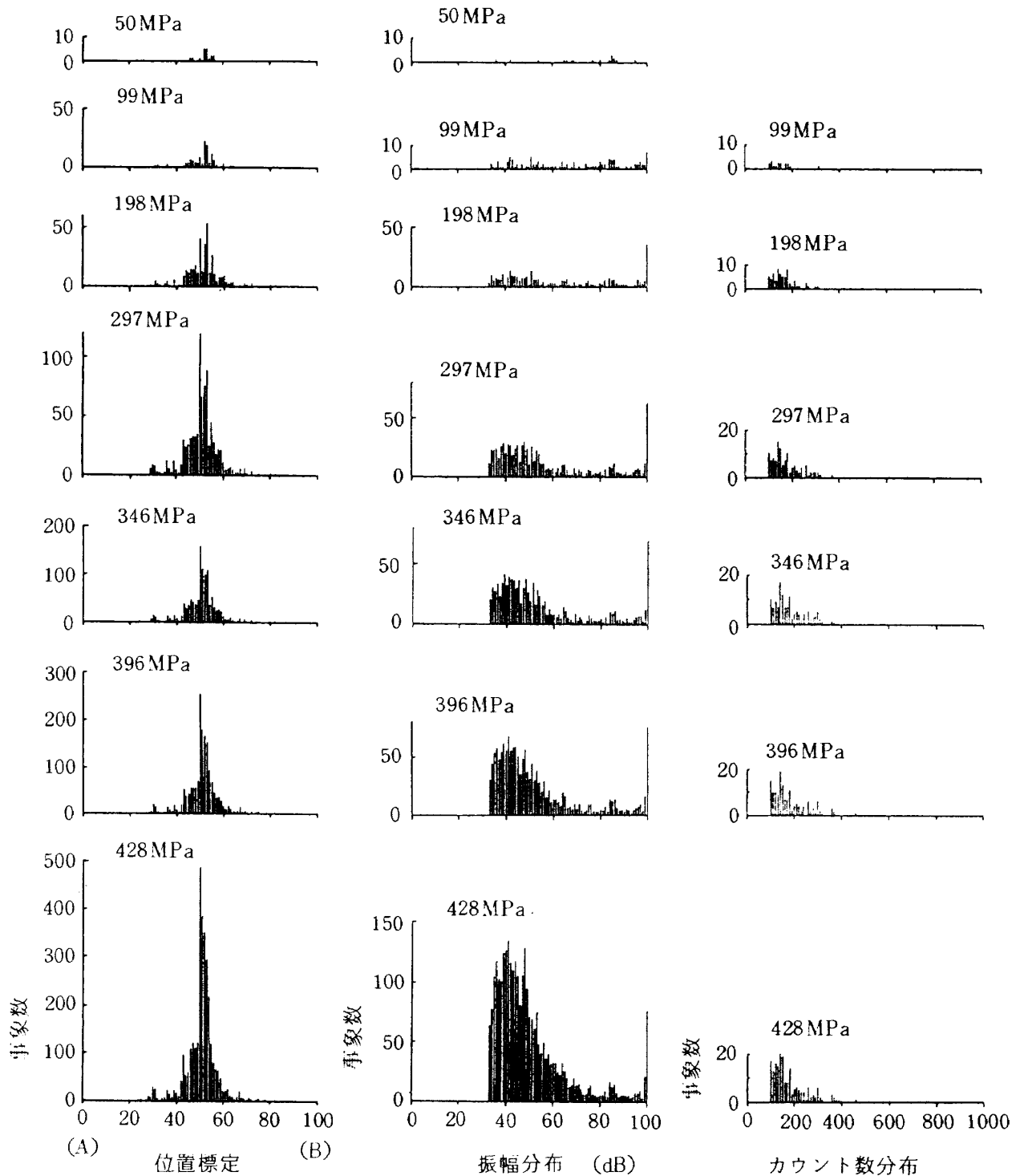


図 24 両面溝付試験片(c)の AE 特性

布, 100 カウント以上のカウント数分布の発生パターンの変化を示す。低負荷で発生した事象は溝際から生じた。この事象は比較的高振幅が多い。従って, 応力集中の影響で繊維破壊が生じたと考えられる。中負荷以上では層間剝離が生じた中央部付近の事象が多い。この場合の振幅は, 低振幅の発生割合が多くなった。破断までの振幅分布では両面溝付試験片(a)と同様層間剝離による低振幅の事象が多い分布を示した。

6. 結 言

6 種類の引張試験片を用い破断までのAE計測を行った結果, 破壊様式の違いによって以下のような特徴を明らかにした。

- (1) 一方向強化試験片の結果から繊維破壊は 80dB 以上の高振幅が多い。
- (2) 繊維試験片の場合, 大部分の繊維は最終破断間際から破壊し, 負荷過程での繊維破壊は少ない。このため破断時の多数の事象を弁別することが困難であり, 計測できる事象数は著しく少ない。
- (3) $0^{\circ}/90^{\circ}$ 積層試験片の 90° 繊維層の AE 発生頻度は他の試験片に比べ著しく高い。 90° 繊維層の繊維は低負荷で縦割れ状の亀裂が生じた。この場合の振幅は一方向強化試験片の繊維破壊より低振幅の事象が多い。
- (4) 両面溝付試験片(a)の結果から層間剝離は 40 dB ~ 60 dB 程度の低振幅である。なお, 層間剝離はマトリックスの破壊であるからマトリックスのせん断破壊も低振幅であると考えられる。
- (5) 両面溝付試験片(b)のように溝際の応力集中の影響で破壊する場合には低負荷から繊維破壊によると考えられる高振幅の事象が生じた。
- (6) 両面溝付試験片(c)の破壊は上記の両面溝付試験片(a)・(b)の破壊様式が混在した状況であり, AE 特性も二者の特徴を併せもつ挙動を示した。

最後に, 本研究の実験及びデータ解析にあたって協力を得た東海大学専修生, 森 久氏(現勝ブリヂストン)に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 林 洋一, 角田義秋, 中井暎一; 炭素繊維複合材料 (CFRP) 桁/リブ要素模型試験におけるアコースティック・エミッション計測, 航技研報告 TR-707 (昭和57)
- 2) D. Valentin, Ph. Bonniau and A. R. Bunsell; Failure mechanism discrimination in carbon fibereinforced epoxy composites, Composites, Vol.14, No.4 (1983), pp.345-351.
- 3) D. Valentin; A critical analysis of amplitude histograms obtained during acoustic emission tests on unidirectional composites with an epoxy a PSP matrix, Composites, Vol.16, No.3 (1985), pp.225-230.
- 4) 湯山茂徳; FRPにおけるAE法の応用, 強化プラスチック, 31巻9号(昭和60) pp.433-438.
- 5) 砥棉真一, 山田銃一; 炭化ケイ素繊維強化Al合金の破壊挙動, 日本金属学会誌, 50巻3号(昭和61) pp.336-341.
- 6) 尾上守夫; AE計測法, 材料科学, 13巻1・2号(昭和51) pp.38-45.
- 7) 中村正久, 福沢 康, N. W. Rigshall; 個体の破壊とアコースティック・エミッション, 材料科学, 20巻1号(昭和58) pp.2-11.
- 8) 金原 勲; AEによる複合材料の破壊過程の解析, 材料科学, 13巻1・2号(昭和51) pp.9-14.
- 9) 森田幹郎, 竹田博光, 有馬逸男; ボロンフィラメントの強さ, 日本金属学会誌, 36巻12号(昭和47) pp.1213-1217.

航空宇宙技術研究所報告 927号

昭和62年3月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182

印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川 2 - 27 - 12
