

NAL TR-1030

ISSN 0389-4010

UDC 620.171.2

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1030

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 (第2報)
(AE波形とそのパワースペクトルからの検討)

祖父江 靖 ・ 小河 昭 紀

1989年6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(第2報) (AE波形とそのパワースペクトルからの検討)

祖父江 靖** 小河 昭紀**

ABSTRACT

The failure modes (such as fibre breakage, matrix damage and delamination) of Boron reinforced aluminum composite materials were studied at NAL through power spectrum analysis of AE waves.

Tensile tests were conducted for four types of specimens of composite materials (unidirectional, $0^\circ/90^\circ$ ply, boron fiber and shear lag test pieces), and for two types of specimens of 6061 aluminum alloy (tensile and shear test pieces).

The results are summarized as follows:

- (1) Fiber breakage mainly relates to the AE wave characteristics in the low frequency range from 100 to 200 kHz.
- (2) Matrix damage and delamination mainly relates to the AE wave characteristics in the high frequency range from 400 kHz to 1MHz.
- (3) The tensile and shear fracture of 6061 aluminum alloys relates to the AE wave characteristics in higher frequency ranges.

1. 緒 言

繊維強化複合材料は繊維配列の組合せが任意に行なえるため、用途に応じて最適化が可能な設計できる材料として注目されている。繊維強化複合材料の破壊機構は、繊維の破断、マトリックスの破壊、繊維とマトリックスの界面の剥離、積層間の層間剥離など均質材料に比較し複雑である。また、積層方法によって破壊様式が異なることも考えられる。これら複雑な破壊過程をアコースティックエミッション(以後AEと略す)を用いて計測し、AE発生要因の差異をAE波形のパワースペクトルから検討することが行なわれている。^{(1), (2)}しかし、繊維強化金属系複合材料の場合、公表されるデータが少ない。

繊維強化金属系複合材料は比強度、比剛性が高く、耐熱性、耐磨耗性、耐腐食性が良いため宇宙・航空用部材として用いられるようになってきた。複合材料を構造部材として用いる場合、複合材料固有の破壊の挙動を明らかにする事が信頼性を確立するうえで重要である。繊維強化金属系複合材料の強化繊維には炭素、ボロン、炭化けい素、アルミナ等があり、マトリックスにはアルミニウム合金、チタン合金等が用いられる。これらの組合せのうち著者らはボロン繊維強化6061アルミニウム合金複合材料の破壊に関する研究をAEを用いて行った。

前報では、⁽³⁾繊維を荷重方向に配列した一方向強化試験片、中間層に繊維を荷重方向と直角に配列した $0^\circ/90^\circ$ 積層試験片、一方向強化材の両面に溝を付けて層間剥離を調べる両面溝付試験片、一方向強化試験片の中央部のマトリックスを塩酸で溶解し繊維を露出させたもので繊維破壊の特性を調べる

* 平成元年6月6日受付

** 原動機部

繊維試験片など4種類の引張試験片を用いて破壊までのAE計測を行ない位置標定、カウント数分布、振幅分布等について比較検討し破壊様式の特徴を調べた。また、応力に対するAE発生挙動についても調べた。

本報では、破壊によって生じるAE発生要因の差異をAE波形およびそのパワースペクトルから検討するため、6061アルミニウム合金試験片と上述4種類の複合材料試験片を用いて引張による破壊強度試験を行った。負荷過程で生じる代表的なAE波形とそのパワースペクトルを調べ繊維破壊、マトリックス破壊等その発生要因との関連について検討した。また、各試験片の伸びに対する応力およびAE発生挙動の関係、破壊までに生じたAE振幅分布等から各試験片の特徴を調べた。

2. 試験片および試験方法

図1に複合材料試験片の寸法形状を示す。一方向強化試験片と $0^\circ/90^\circ$ 積層試験片の上面図は、同

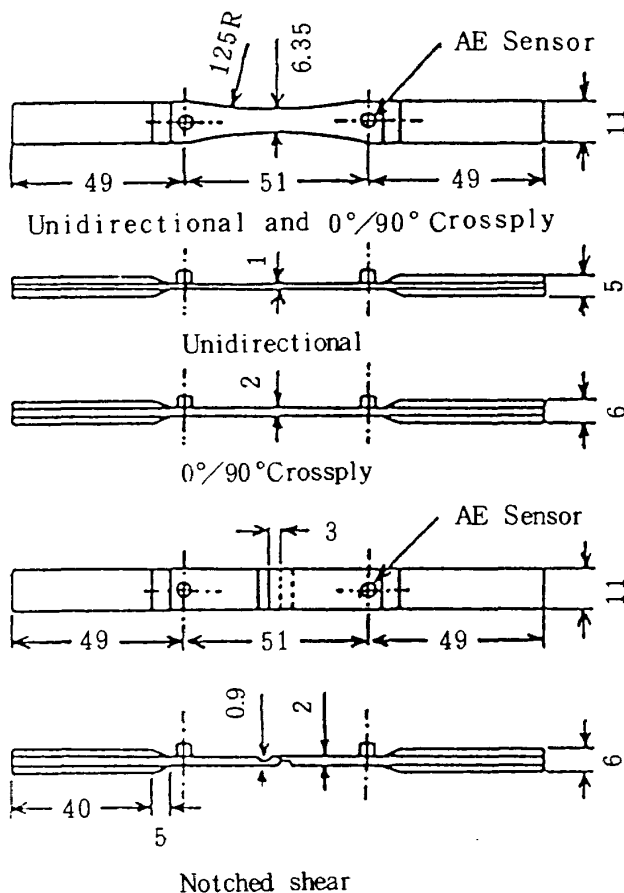


図1 ボロン/アルミニウム合金複合材料試験片の寸法形状

じ形状であるため一個だけ示した。なお、側面図は試験片の厚さが異なるため上に一方向強化試験片、下に $0^\circ/90^\circ$ 積層試験片と別々に示した。 $0^\circ/90^\circ$ 積層試験片の下の図はボロン/AI両面溝付試験片の上面図と側面図である。また、ボロン繊維試験片は図には示さなかったが一方向強化試験片の中央部のAI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。複合材料試験片は以上4種類を用いた。複合材料試験片はボロン繊維グリーンテープと6061アルミニウム合金箔を積層しホットプレスしたものである。(詳細は前報参照)

本試験では、複合材料の他にマトリックスだけのAE特性を調べようとしたが、製造方法や熱処理が上記複合材料試験片のマトリックスと同じ製造条件の材料が入手できなかったため、マトリックスと類似材料の市販の6061アルミニウム合金丸棒から引張試験片および引張負荷によりせん断破壊が生じるようにしたせん断試験片を製作し、この材料のAE特性を調べた。図2に6061アルミニウム合金試験片の寸法形状を示す。図の上部は引張試験片、下部はせん断試験片である。6061アルミニウム合金試験片は以上2種類を用いた。試験は各種類ごとに2個ずつ行ったが、同じ種類の試験片は同様な結果を示した。

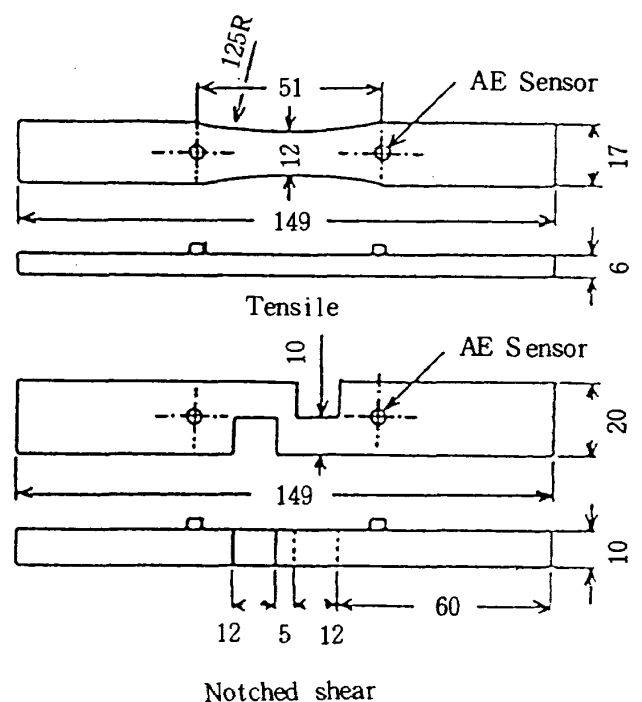


図2 6061アルミニウム合金試験片の寸法形状

図3に計測系の概要を示す。引張試験はインストロン1185型万能試験機を用いクロスヘッドスピード0.05mm/secで行った。この時発生するAEを前報と同じAEセンサ(Dunegan Model S9225)を用いてAE計測装置(Dunegan 3000)で計測した。また、モニター用出力端子からのAE波形を波形解析器(デジタイジングオシロスコープ YHP・5183 T/U)に入力し、AE波形のパワースペクトルを計測した。試験片の伸びは標点間距離25mm

のクリップゲージを用い $\delta = \frac{L}{25} \times 100$ の式から求めた。但し、 δ は百分比で示した伸び、Lは伸び計の変位である。なお、繊維試験片は伸び計を取り付けることができなかつたため後述の方法によって行った。

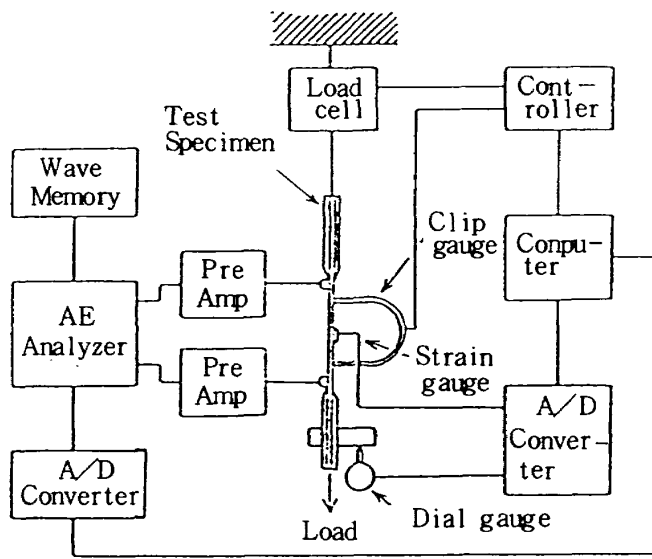


図3 計測系の概要

3. 試験結果と考察

3.1 6061アルミニウム合金試験片

図4には引張試験片について、また図5には引張によるせん断試験片についての伸びと応力、伸びとAE発生挙動の関係を示す。AE事象の発生挙動は、応力状態によって違いがある。せん断試験片のAE発生挙動は、最大応力値付近で多くなる傾向がある。

図6に引張試験、図7にせん断試験によって破断までに生じたAEの振幅分布を示す。なお、振幅分布の振幅はAE事象の最大振幅値を示したものであ

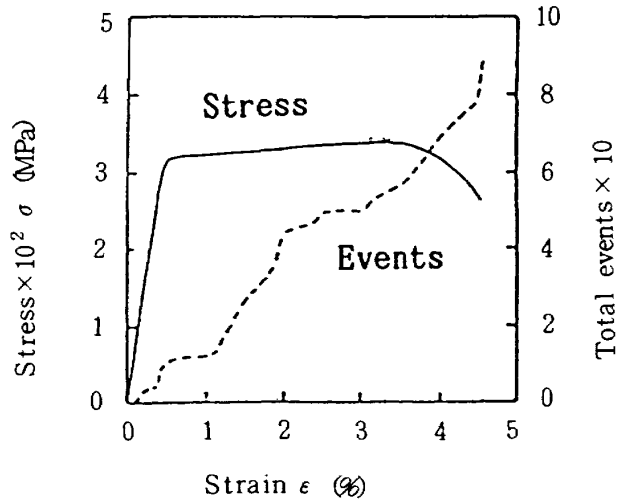


図4 6061A I 合金引張試験片のAE挙動

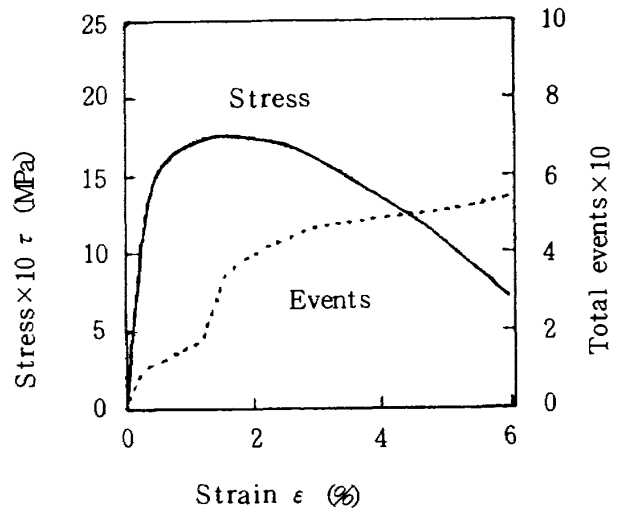


図5 6061 A I 合金せん断試験片のAE挙動

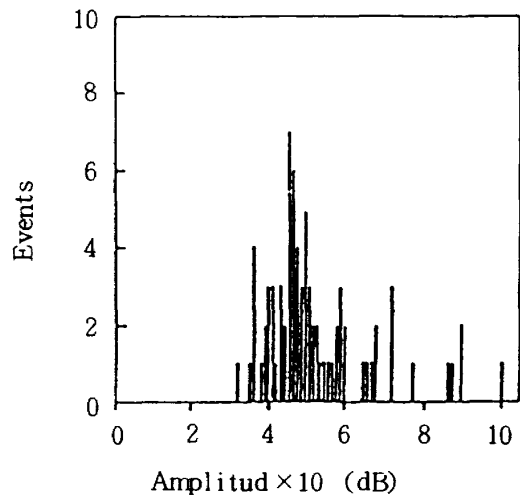


図6 6061A I 合金引張試験片のAE振幅分布特性

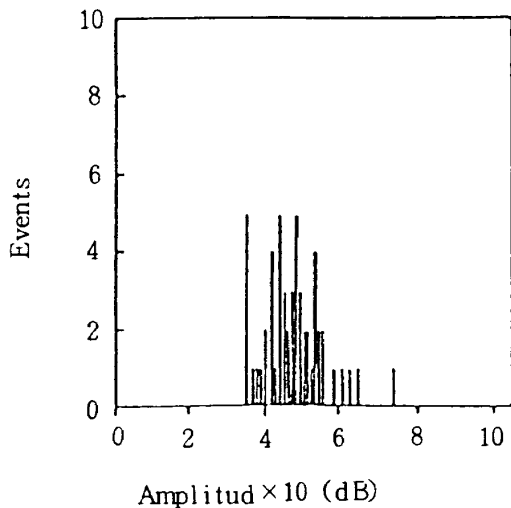


図7 6061 Al 合金せん断試験片の AE 振幅分布特性

る。引張試験の場合、図8の(b)のAE波形で示すように最大応力値付近で86 dB 以上の高い振幅のAEが生じることもあるが、引張、せん断共に大部分は60dB以下の低振幅のAEである。

図8の(a),(b),(c)に引張試験における代表的なAE波形とそのパワースペクトルを示す。(a)は最大応力値の約77%負荷時、(b)は最大応力値付近、(c)は最大応力値を越えた後約16%に低下した所で生じたAEである。(a)と(c)では波形の継続時間と減衰時間は短い、(b)の波形では継続時間と減衰時間は長い。最大応力値付近で生じたAE波形の振幅と継続時間は、負荷増加過程および最大応力値を越えた後で生じるAE波形の振幅と継続時間より大きくなる傾向があり、解放エネルギーが高いことを示している。(a)のパワースペクトルは660 KHzに最大のピークがあり、15 dB程度の凹凸はあるが200 KHzから1 MHzまでピークがある。(b)では400 KHzに最大のピークがあり、10 dB程度の凹凸があるが350~925 KHzまでピークがある。(c)では770 KHzに最大のピークがあり、510, 940 KHzでもピークがある。このように(a),(b),(c)とも高い周波数域までピークがある。

図9の(a),(b)にせん断試験における代表的なAE波形とそのパワースペクトルを示す。(a)は最大せん断応力値の97%負荷、(b)は最大せん断応力値を越えた後約55%に低下した所で生じたAEである。せん断破壊過程で生じるAE波形はすべ

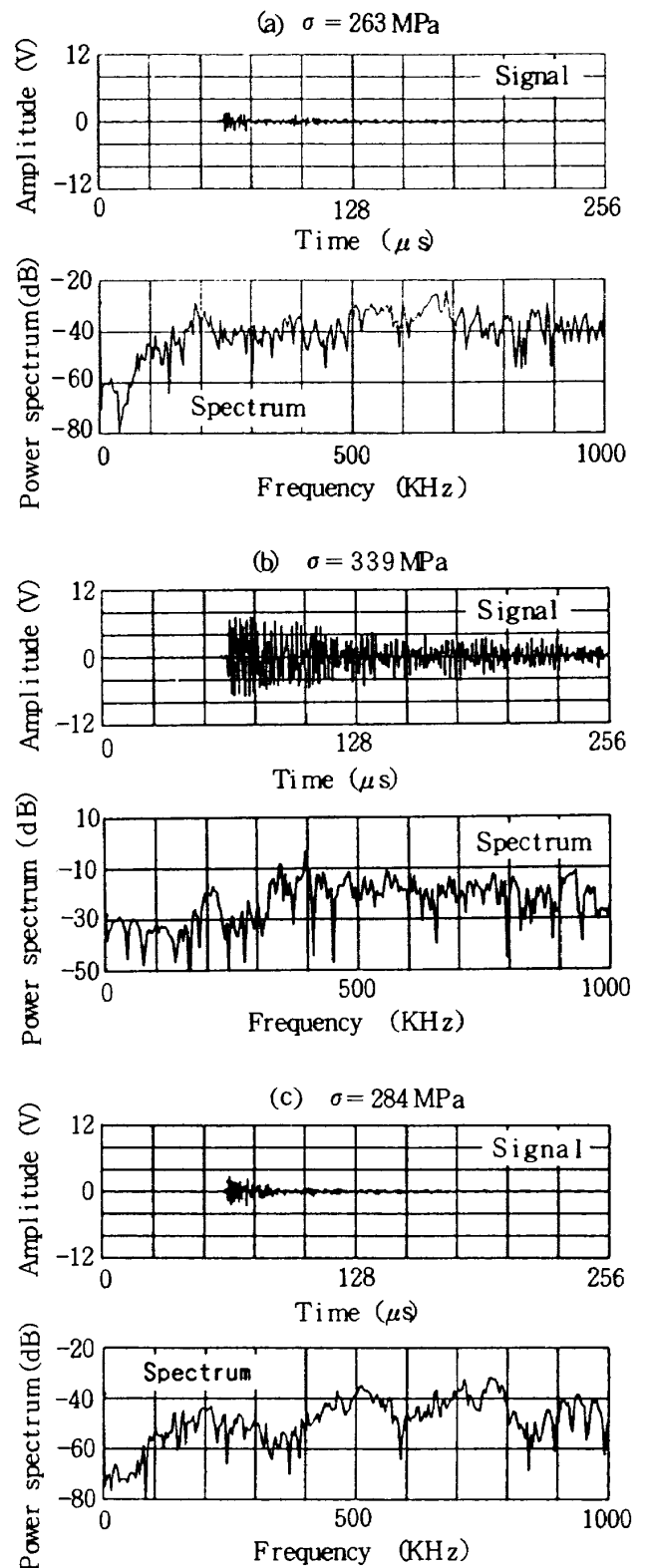


図8 6061 Al 合金引張試験片の AE 波形とパワースペクトル

て減衰時間の長い波形だけが生じた。(a)では460 KHzに最大のピークがあり、190, 690, 980 KHzでもピークがある。(b)では520 KHzで最大のピークがあり、180, 740 KHzでもピークがある。

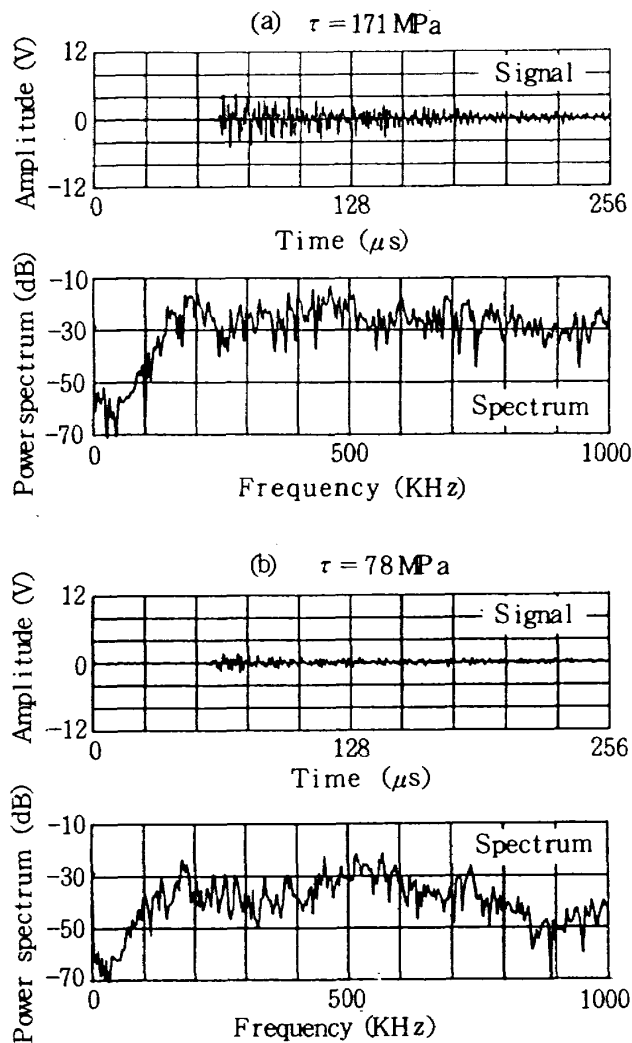


図9 6061 Al合金せん断試験片のA E波形とパワースペクトル

6061アルミニウム合金試験片の引張試験およびせん断試験で生じたA E波形の最大ピークの周波数は400~770 KHzで生じた。

A E波形の減衰状況はA E発生要因の違いによって異なると云われている。⁽⁴⁾即ち減衰時間の長い波形はき裂の発生とき裂面相互の摩擦による影響を含む摩擦型破壊、減衰時間の短い波形は微細き裂の開口により生じる開口型破壊と云われる。本試験ではせん断の場合、減衰時間の長い摩擦型破壊のA Eだけが発生している。引張の場合、減衰時間の短い開口型破壊のA E波形が生じると推測したが、最大応力値付近で生じたA Eには減衰時間の長い波形が生じる場合があった。しかし、他は減衰時間の短いA E波形が観察された。

3.2 ボロン繊維試験片

図10に伸びと応力、伸びとA E発生挙動の関係を示す。この試験片の中央部には繊維露出部が50 mmあるため標点間距離25 mmの伸び計を取り付けることができなかった。このため伸びは試験機の上部フレームと試験片を取り付けた時のクロスヘッド間の距離

720 mmを基準に、 $\delta = \frac{L}{720} \times 100$ の式から便宜的に求めた。但し、 δ は百分比で示した伸び、Lはクロスヘッドの変位量である。A E事象の発生挙動は伸びの初期では少ないが伸びの限度付近で急増する。

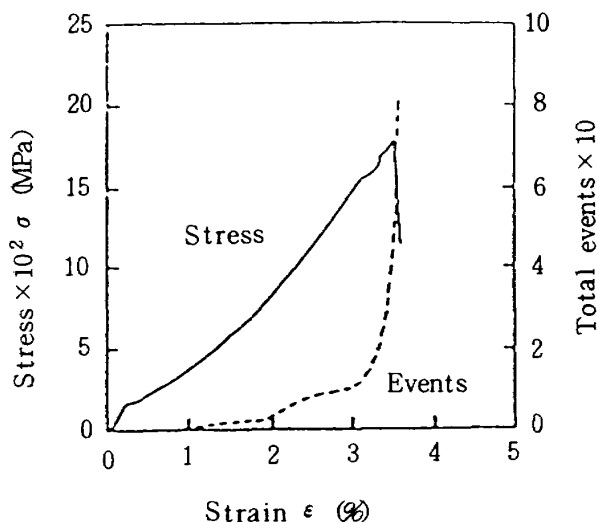


図10 ボロン繊維試験片のA E挙動

図11の(a)に最大応力値の96%負荷、(b)に最大応力値までに生じたA Eの振幅分布を示す。なお、繊維試験片の場合最終破断時に一度に多数の繊維破断や繊維相互の擦れが生じるのでA Eの振幅分布は広い範囲に生じた。最終破断前の96%負荷までの振幅分布では低い振幅、中位の振幅、高い振幅の三つの分布になったので(a)として示した。前報⁽³⁾では「高い振幅のA Eは繊維破壊、低い振幅のA Eは繊維相互の擦れによって生じる」ということを報告した。(a)の分布には、42 dB以下、67 dB~79 dB、90 dB以上の三つの振幅域がある。繊維に損傷がある場合には低いエネルギーで破断すると考えられるため、67 dB~79 dBの振幅は繊維破

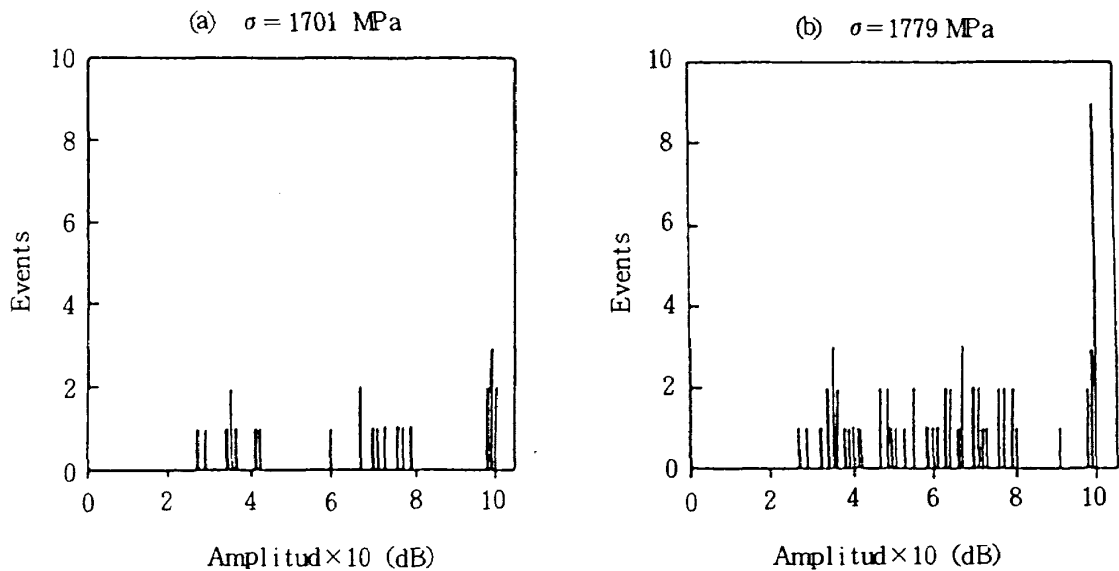


図 11 ボロン繊維試験片の A E 振幅分布特性

断の可能性がある。A E 波形とそのパワースペクトルの違いを調べることにより、破壊要因の差異をあきらかにできる。

図 12 の (a) は最大応力値の 52% 負荷で生じた A E, (b) は最大応力値の 93% 負荷で生じた A E の A E 波形とそのパワースペクトルを示す。(a) の波形は振幅が低く、継続時間と減衰時間が短い。(b) の波形は振幅が大きく継続時間と減衰時間が長い。この試験片の A E 発生要因には繊維破断と繊維相互の擦れ以外にはないため、(a) は繊維相互の擦れ、(b) は繊維破断によって生じたと考えられる。(a) のパワースペクトルは 400 KHz に最大のピークがあり、180 ~ 260, 320, 360, 470 KHz にもピークがある。(b) のパワースペクトルは 400 KHz に最大のピークがあり、その他のピーク周波数でも、(a) のパワースペクトルに類似している部分があるが 100, 125, 150 KHz の低い周波数にピークがあるのが特徴である。繊維破断が生じる場合繊維相互間の擦れが同時に生じるため (b) のパワースペクトルには両者の特徴がでると考えられる。従って、100, 125, 150 KHz の比較的低い周波数域のピークは繊維破壊によって生じると考えられる。

3.3 一方向強化試験片

図 13 に伸びと応力、伸びと A E 発生挙動の関係を示す。A E 事象の発生挙動は伸び 0.1 % を越える

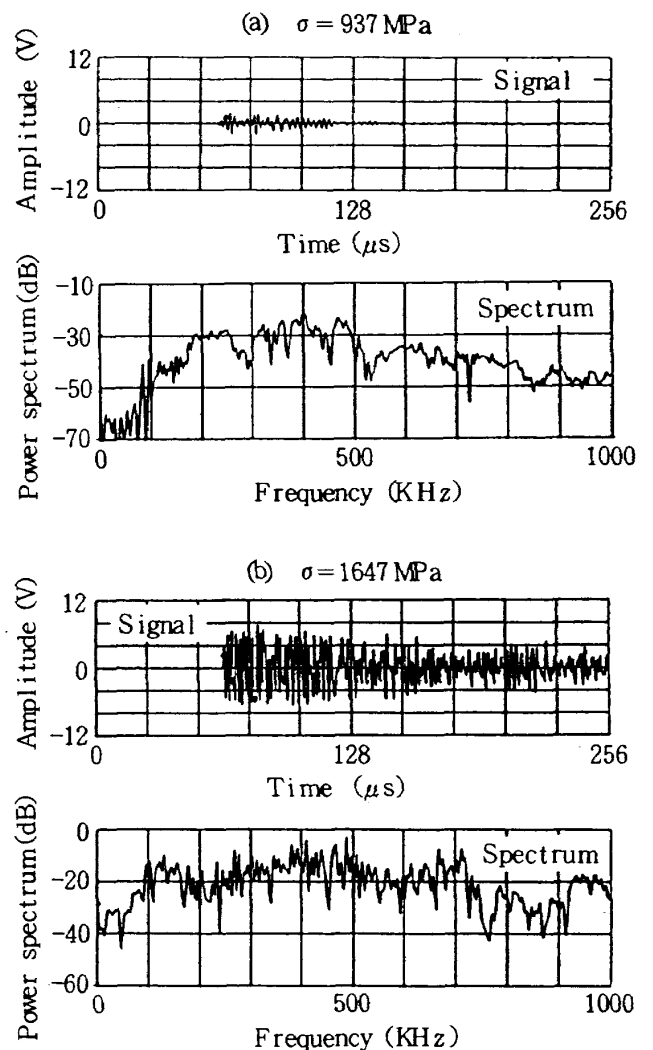


図 12 ボロン繊維試験片の A E 波形とパワースペクトル

とはほぼ伸びに比例して増加する。応力と伸びの関係では最大応力値の74%(1130 MPa)付近まではほぼ比例して伸びるが、これを越えると伸び率が高くなる。

図14に破壊までに生じた振幅分布を示す。37~54 dBと92~100 dBの2つの領域でAEの頻度が高い。前者はマトリックス破壊、後者は繊維破断による振幅と考えられる。

図15の(a),(b)に代表的なAE波形とそのパワースペクトルを示す。(a)は最大応力値の19%負荷、(b)は最大応力値の99%負荷で生じた。(a)の波形は振幅が小さく、継続時間と減衰時間が短い波形である。このような特徴は図8の(c)で示した6061アルミニウム合金の開口型破壊の波形と

類似している。また、この波形のパワースペクトルは350 KHzに最大のピークがあり、400, 430, 460, 530, 700 KHz等比較的高い周波数域にピークがある。このような特徴は図8の(c)で示した6061アルミニウム合金のパワースペクトルに類似する。従って、(a)はマトリックスの破壊によって生じたと考えられる。(b)の波形は振幅が大きく波形のパワースペクトルは100, 150, 230, 270 KHz等比較的低い周波数域にピークがある。この

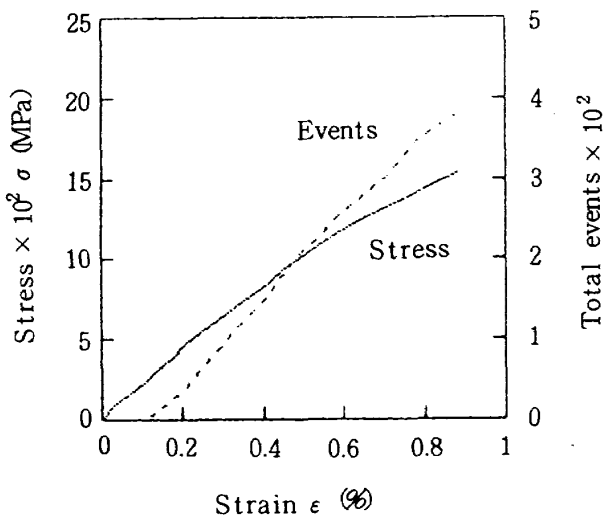


図13 一方向強化試験片のAE挙動

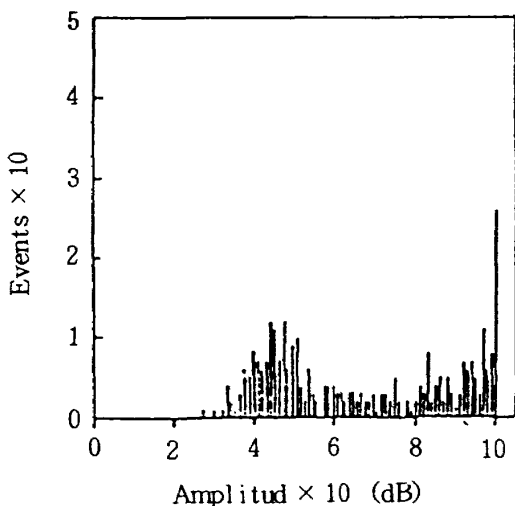


図14 一方向強化試験片のAE振幅分布特性

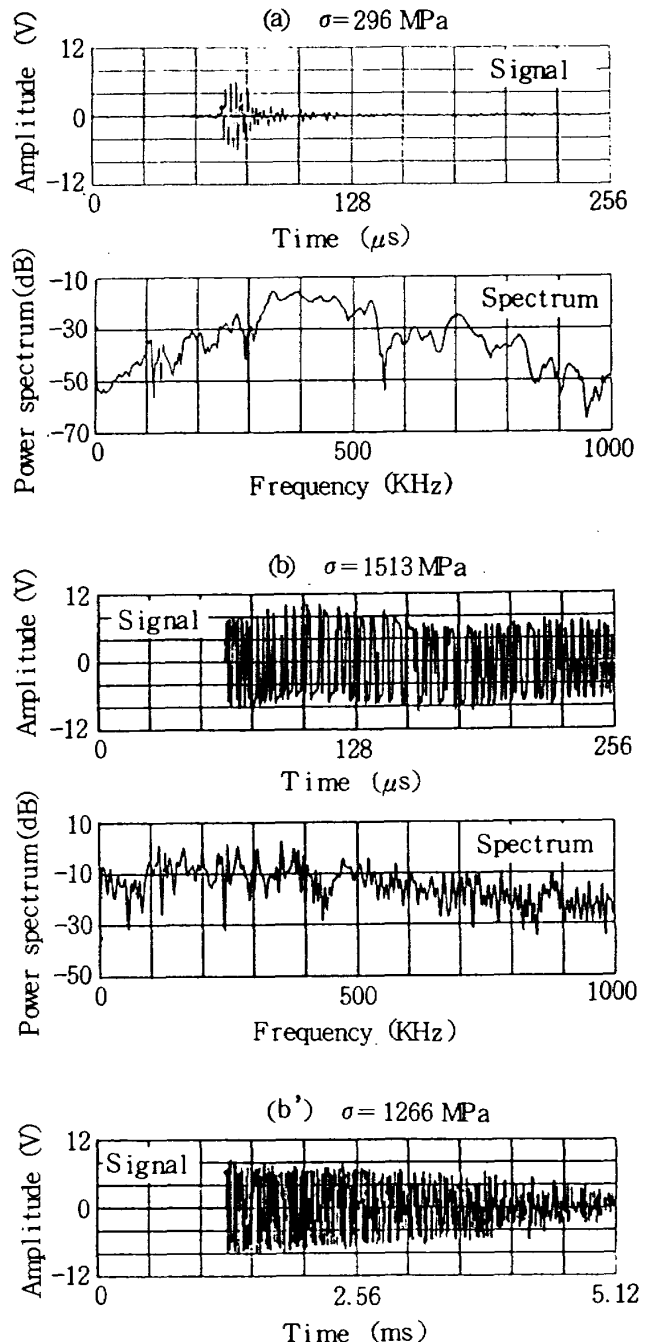


図15 一方向強化試験片のAE波形とパワースペクトル

ような特徴は、図 12 (b) で示した繊維試験片の場合で生じた繊維破壊に類似しており、(b)は繊維の破断によって生じたと考えられる。なお、この波形は発生から 192 μ sec 過ぎても減衰部が現れない解放エネルギーの大きな波形であり、繊維試験片の場合における繊維破断の特徴と異なっている。(b)と同様な波形で表示時間を長くした(b')は最大応力値の 83 % 負荷で生じた波形であり継続時間は 3.83 msec 以上ある。複合材料の繊維破断の場合、界面剥離およびマトリックスと繊維間の摩擦が同時に生じると考えられる。(b)の波形は、6061アルミニウムの摩擦型破壊の AE 波形と類似しており、マトリックスと繊維間の摩擦が影響していると考えられる。

3.4 ボロン/AI 両面溝付試験片

図 16 に伸びと応力、伸びと AE 発生挙動の関係を示す。最大せん断応力値の 73% 負荷 (60 MPa)、伸び 0.33% までは応力と伸びはほぼ比例するが、これ以上の応力になると伸びの増加が著しい。AE 事象の挙動は伸び 0.4% を越えるとそれまでの AE 発生率の約 2.4 倍になり、伸びと事象数の関係はほぼ比例している。

図 17 に破壊までに生じた AE の振幅分布を示す。61 dB 以下の振幅が多く 80 dB 以上の大振幅の AE は少ない。前報で示したように大振幅の AE は溝際の応力集中の影響による繊維破壊によるものと考えられる。破壊の状況は繊維破面にタングステン

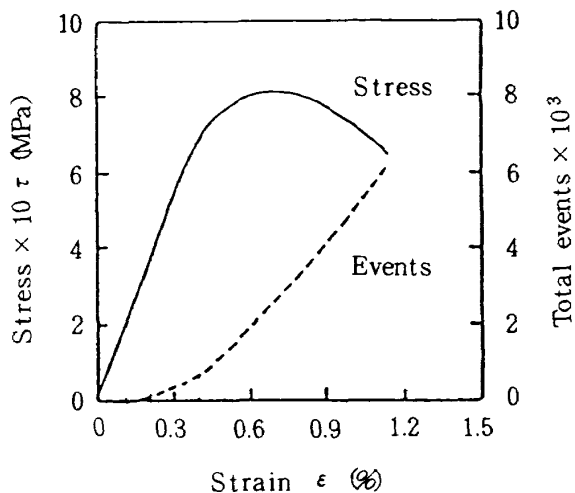


図 16 ボロン/AI 両面溝付試験片の AE 挙動

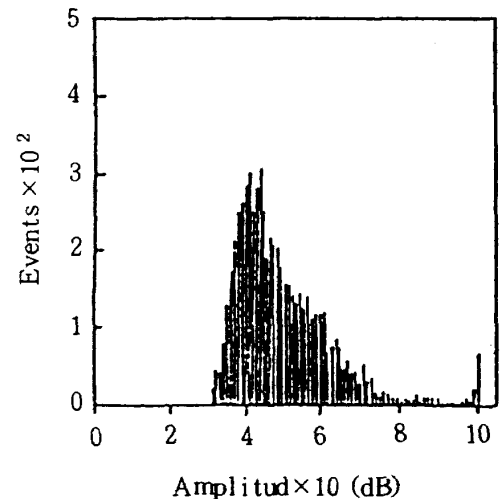


図 17 ボロン/AI 両面溝付試験片の AE 振幅分布特性

芯線が見える縦割れの破壊であり、繊維の破断は見当らない。61 dB 以下の低振幅の AE は層間剥離によって生じたものと考えられる。

図 18 の (a), (b) に代表的な AE 波形とそのパワースペクトルを示す。(a) は最大応力値の 60% 負荷、(b) は最大応力値付近で生じた。この試験片の AE 波形には一方向強化試験片で生じた図 15 の (b) のタイプは出てこなかった。

引張破壊強度試験で生じる AE 波形は、低負荷から (a) と同じ振幅の大きい波形が生じるが (b) の波形の頻度に比べると著しく少ない。また、パワースペクトルは、繊維破壊の特徴と考えられる 160, 230 KHz の低い周波数域に最大のピークがあり、高い周波数域にはレベルの高いピークはない。従って、(a) の波形は繊維の縦割れによって生じたと考えられる。(b) の波形は振幅が小さく減衰時間が短い波形であり、図 8 の (c) に示した 6061 アルミニウム合金の開口型破壊に類似している。また、パワースペクトルは、200 KHz に最大のピークがあるが、660, 740 KHz, 1 MHz 等高い周波数域にピークがある。従って、(b) の波形はマトリックスの破壊による層間剥離によって生じたと考えられる。6061 アルミニウム合金のせん断試験片の場合、減衰時間の長い摩擦型破壊の波形が生じた。繊維強化複合材料の層間剥離の場合マトリックスのせん断破壊であるが、摩擦型破壊の波形は生じなかった。

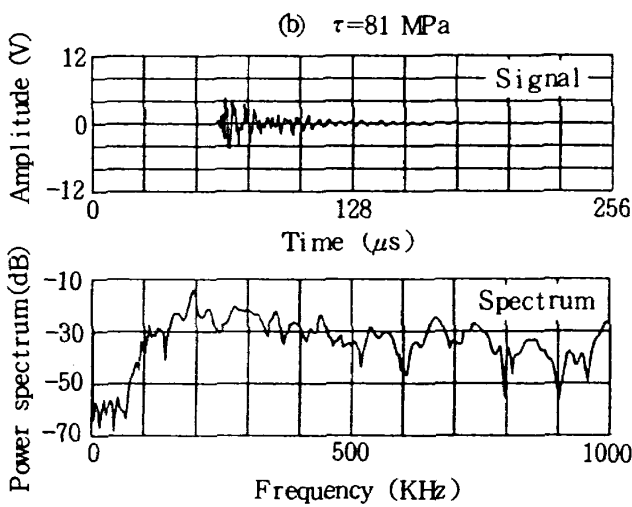
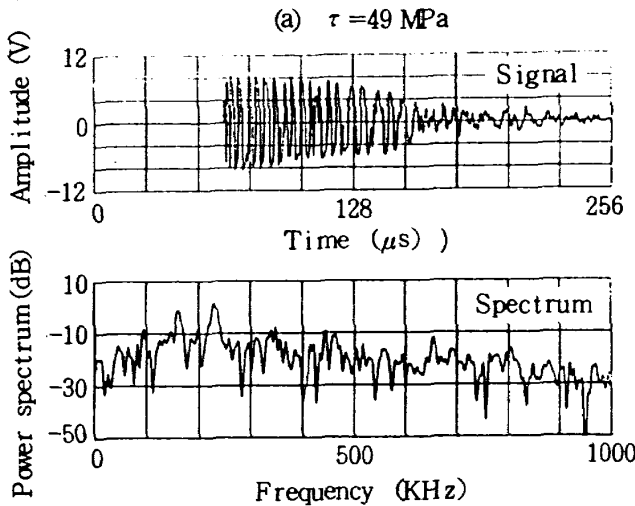


図18 ボロン/Al両面溝付試験片のAE波形とパワースペクトル

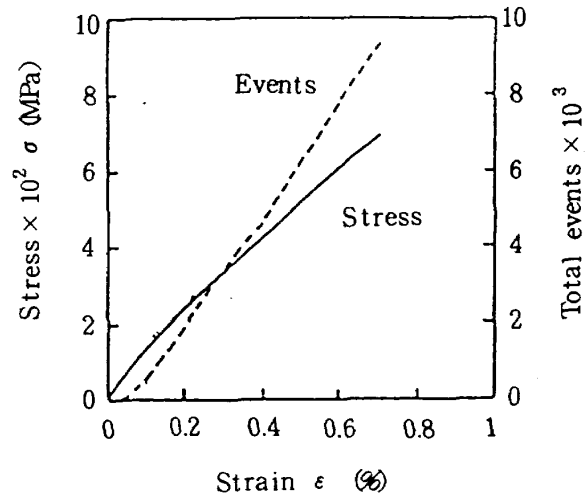


図19 0°/90°積層試験片のAE挙動

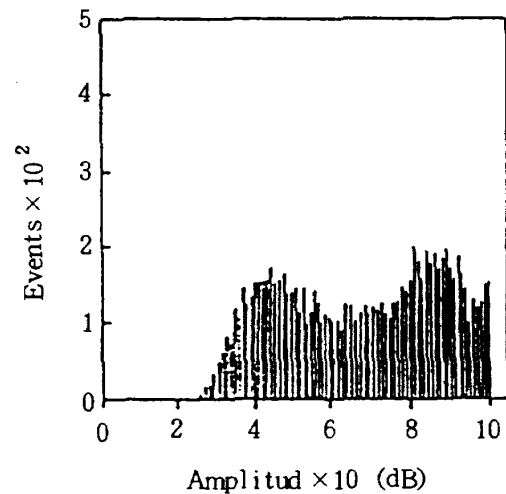


図20 0°/90°積層試験片のAE振幅分布特性

3.5 0°/90°積層試験片

図19に伸びと応力、伸びとAE発生挙動の関係を示す。伸びと応力の関係は伸び0.2%を越えると増加率は比例し、AE事象の挙動も伸び1%を越えると比例する。これらの傾向は一方向強化試験片の場合と同様である。

図20に破壊までに生じた振幅分布を示す。この試験片の特徴は振幅が76~94dBのAE事象が多いことであり、発生要因は90°繊維層にあると考えられる。すなわち90°繊維層の繊維破壊の状況は前報で示したようにタングステン芯線が見える縦割れの破壊だからである。

図21の(a),(b),(c)に代表的なAE波形とそのパワースペクトルを示す。(a)は最大応力値の34%負荷、(b)は最大応力値の66%負荷、(c)

は最大応力値付近で生じた。(a)の波形は図18の(b)の波形と同様継続時間が短く、減衰時間も短い波形である。また、パワースペクトルは510, 730 KHz, 1 MHz 等高い周波数域にピークがある。これらの特徴から(a)の波形はマトリックスの破壊によって生じたと考えられる。(b)の波形は一方向強化試験片の図15の(b)の波形と同様大振幅で継続時間の長い波形である。また、パワースペクトルは125 KHzに最大のピークがあり、160, 250, 315, 350 KHz 等比較的低い周波数域にピークがある。これらの特徴から(b)の波形は繊維の破断によって生じたと考えられる。(c)の波形はボロン/A1両面溝付試験片の図18の(a)の波形と同様である。また、パワースペクトルは125, 220, 260, 310

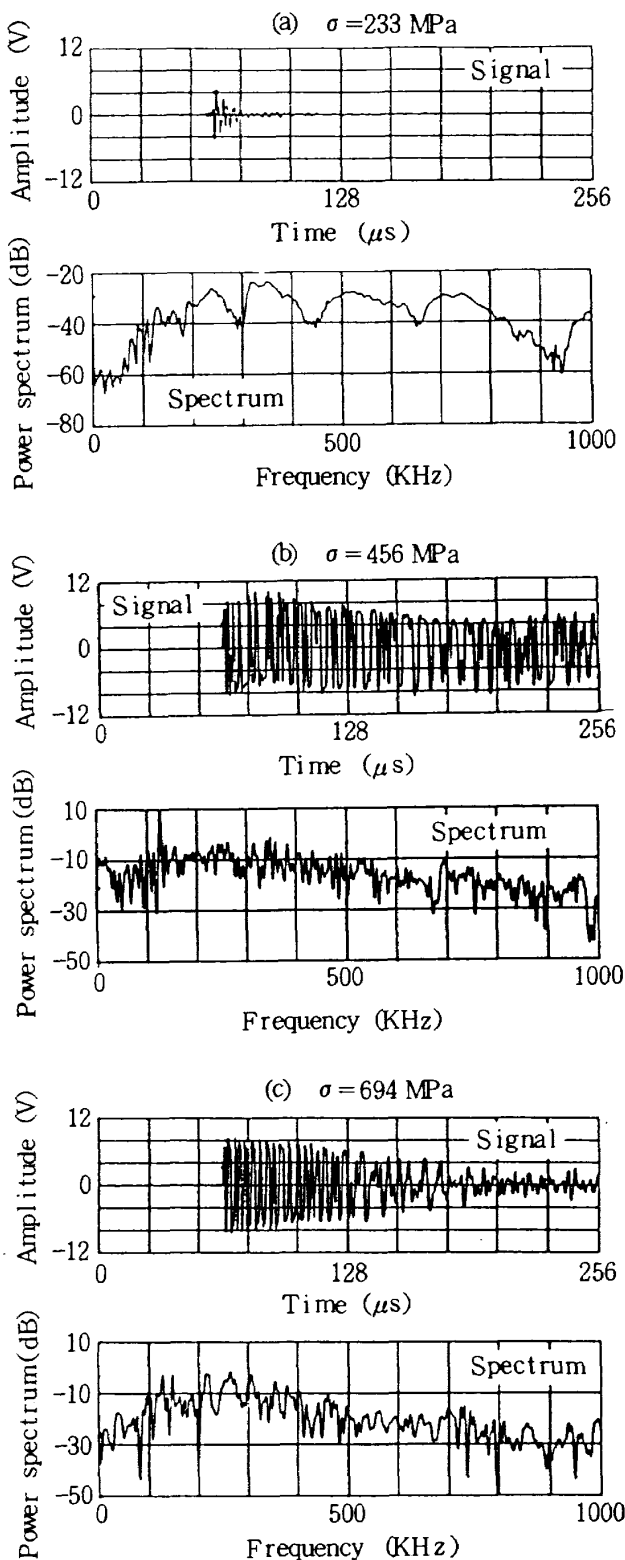


図 21 $0^\circ/90^\circ$ 積層試験片の AE 波形とパワースペクトル

KHz 等比較的低い周波数域にピークがあり、高い周波数域にはない。これらの特徴から(c)の波形は繊維の縦割れによって生じたと考えられる。

4. 結 言

引張試験の破壊過程で生ずる AE を計測し、AE 波形およびパワースペクトルを調べて発生要因との関連について検討した。その結果、次のことが明らかになった。

1. 6061 アルミニウム合金の AE は引張によって生ずる波形とせん断によって生ずる波形では異なる。引張の場合、最大応力値付近では振幅が大きく減衰時間の長い波形が生じる場合もあるが、その他の負荷領域では振幅が小さく減衰時間が短い。せん断の場合の波形は振幅が小さく減衰時間が長い。なお、6061 アルミニウム合金のパワースペクトルは 400 ~ 900 KHz の高い周波数域にピークがある。
2. 複合材料のボロン繊維の破壊には繊維破断と繊維の縦割れの二種類ある。前者の波形にはマトリックスと繊維間の摩擦が影響するため継続時間は 3.84 msec 以上ある場合があり、後者は 192 μsec 程度である。
3. マトリックスの 6061A1 の破壊による波形の継続時間は 64 μsec 以下であり、繊維破壊の場合より著しく短い。
4. ボロン繊維破壊のパワースペクトルは繊維破断、繊維の縦割れとも 100 ~ 400 KHz の比較的低い周波数域にピークがある。特に 100 ~ 200 KHz の範囲内に高いピークがあることが特徴である。
5. マトリックス破壊のパワースペクトルは、図 15 の (a)、図 18 の (b)、図 21 の (a) で示すように 400 KHz ~ 1 MHz の比較的高周波数域にピークがあることが特徴である。

参 考 文 献

- (1) 鈴木恵, 他 5 名: AE 法によるクラス A-SMC の破壊機構に関する研究, 「材料」1987年 3 月, 第 36 巻, 第 402 号, P 229
- (2) 孫峰, 他 4 名: モデル GFRP 材の破壊機構と AE 特性の関係, 「材料」1988年, 5 月, 第 37 巻, 第 416 号, P 517

- (3) 祖父江靖, 小河昭紀: A E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, TR-927, 1987年3月
- (4) 池田浩治, 他6名: A E信号を用いたコーティング層の評価, 新素材及びその製品の非破壊評価シンポジウム論文集, 1988年12月
- (5) 祖父江靖, 小河昭紀, 森 久: A E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, 日本機械学会論文集第488号, P 697

既 刊 報 告

TR-1020	LE-7用液酸ポンプの試作研究 Investigation of Fluid Dynamic Performance of LE-7 Liquid Oxygen Pump	1989年4月 山田 仁, 渡辺義明, 吉田 誠, 長谷川敏, 上條謙二郎
TR-1021T	DECAY OF SECONDARY FLOW AND THE ASSOCIATED LOSS VARIATION DOWNS-TREAM OF AN ANNULAR TURBINE STATOR CASCADE	1989年 Atsumasa YAMAMOTO, Hiroyuki NOUSE
TR-1022	高圧低温ロケットポンプの効率測定 Efficiency Measurement of High Pressure Cryogenic Rocket Pumps	1989年5月 渡辺義明, 長谷川敏, 上條謙二郎
TR-1023	高効率ガスタービンの研究開発 Research and Development of Advanced Gas Turbine	1989年5月 越沼 威
TR-1024	リニアセンサを用いたプッシュブルーム走査型放射計の特性 Characteristics of Pushbroom Scanning Type Radiometer Utilizing Linear Sensors	1989年6月 本間幸造, 中 正夫, 興石 肇
TR-1025	風上差分法による鈍頭物体まわりの超音速流れの解析 A Numerical Calculation of Hypersonic Flow Around Blunt Bodies Using Upwind Difference Scheme	1989年7月 和田安弘, 小川 哲, 新井紀夫
TR-1026	地上走行, 離陸滑走時の機体への着氷に関する一考察 An analytical study on the Freezing of slushes over the holizontorl tail of a turbobrrp aircraft in the ground taxi and take-off run	1989年8月 高澤金吾, 伊藤婦美子
TR-1027T	Numerical Simulation of Hypersonic Flow around a Space Plane Ⅲ Analysis of Aerothermodynamic Heating	1989年8月 Yukimitsu YAMAMOTO
TR-1028	HOPE の極超音速空力数値シミュレーション Numerical Simulation of Hypersonic Viscous Flow for the Design of H-II Orbiting Plane (HOPE)	1989年8月 山本行光
TR-1029T	Probabilistic Approach to the Certification for Fatigue Durability of Composite Structures	1989年8月 下河利行

航空宇宙技術研究報告1030号

平成元年6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7-44-1
電話 三鷹(0422)47-5911(大代表) 〒182
印刷所 株式会社実業公報社
東京都千代田区九段南4-2-12

Printed in Japan