

ISSN 0452-2982
UDC 620.168.3
620.174.24
620.179.17

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-630

SiC/A1複合材の曲げ破壊によるAE

祖父江 靖 ・ 小河 昭 紀

1990年11月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

SiC/Al 複合材の曲げ破壊による AE*

祖父江 靖*¹ 小河 昭紀*¹

Acoustic Emission on Flexural Fracture Test of SiC/Al Composites*

Yasushi SOFUE*¹ and Akinori OGAWA*¹

ABSTRACT

Fracture behaviour of SiC/Al composites was investigated using three point flexural tests with acoustic emission (A.E.) measurement.

Flexural tests were conducted for four types of plies specimens (0° unidirectional, 90° unidirectional, $0^\circ/90^\circ$ ply and $\pm 45^\circ$ ply) of the composite materials and specimen of 6061 Aluminum alloy.

The A.E. amplitude was above 98 dB for the fibre breakage of the 0° unidirectional ply and $0^\circ/90^\circ$ ply specimen, while 90° unidirectional ply and $\pm 45^\circ$ ply specimen produced an A.E. amplitude in the range of below 72 dB for the interlaminar and interface fracture mode.

Key words: Composite, Fiber reinforced metal, Silicon carbide fiber, 6061 Aluminum alloy, Flexural test, Acoustic emission

概 要

本報告は、SiC 繊維の積層方向が異なる SiC/Al 複合材料試験片を用いて曲げ破壊試験を行い、破壊過程で生じるアコースティック・エミッション (AE) を調べた結果を述べたものである。試験片は、 0° 方向強化試験片、 90° 方向強化試験片、 $0^\circ/90^\circ$ 積層試験片、 $\pm 45^\circ$ 積層試験片の 4 種類である。試験片の形状は長さ 110mm、横 15mm、厚さ 3.4mm である。曲げ破壊試験は、支点間距離 L と試験片厚さ H の比 $L/H=25$ の条件で三点曲げ試験を行った。AE 計測では、AE の発生位置および振幅分布を調べ、異なる試験片の AE 特性の違いについて検討した。その結果、繊維を 0° および 90° のように一方向に強化した複合材料よりも $0^\circ/90^\circ$ および $\pm 45^\circ$ のように直交した積層の複合材料の方が AE の発生頻度が高く、広範囲から AE が発生することがわかった。また、 0° 方向強化試験片では繊維破壊の特徴である 98dB 以上の高い振幅が生じ、 90° 方向強化試験片ではマトリックス破壊およびマトリックスと繊維との界面剥離によって生じる 72dB 以下の低い振幅が生じるなど破壊の特徴と AE 振幅の関連がわかった。

* 平成 2 年 11 月 27 日 受付 (Received 27 November 1990)

*¹ 原動機部 (Aeroengine Division)

1. 緒 言

比強度、比剛性が高く、耐熱性がある SiC/Al 複合材料は航空用エンジン部材に適用できる材料として注目され、実用化のための研究開発が進められている。新素材の適用に際しては、耐衝撃性や曲げ及び引張の破壊強度を確認すると共に破壊過程の究明が信頼性を向上させるために必要である。破壊過程を調べる技術としては、材料の塑性変形や微少なき裂が生じるときに発生する弾性波を検出し、評価する非破壊試験の方法である AE 法が用いられる。本報告では、SiC 繊維の積層方向が異なる SiC/Al 複合材料を用いて三点曲げ破壊試験を行い、曲げ破壊過程で生じる AE を計測し、積層方法の異なる場合の AE 特性(発生挙動、発生位置、振幅)、変形挙動、破壊状況等の違いを調べた。また、予備試験としてマトリックス材料の6061アルミニウム試験片を用いて三点曲げ試験を行い、試験片と支点及び圧子の接触によって生じる AE ノイズの有無、塑性変形時に生じる AE 特性等について検討した。これらの結果について報告する。

2. 試験片

試験片は、SiC 繊維の配列方向が異なる 0° 方向強化試験片、 90° 方向強化試験片、 $0^\circ/90^\circ$ 積層試験片、 $\pm 45^\circ$ 積層試験片の4種類の複合材料試験片及びマトリックス材料の6061アルミニウム試験片の合計5種類である。なお、試験片の 0° 方向は長さ方向であり、 90° 方向は幅方向である。複合材料試験片製作のための試料は、化学蒸着(CVD)

法で製造した直径 $142\mu\text{m}$ の SiC 繊維を強化繊維とするグリーンテープ20枚と厚さ $46\mu\text{m}$ の6061アルミニウム箔20枚を交互に積層し、ホットプレス法で縦149mm、横149mm、厚さ約3.4mmの平板に成形したものである。複合材料の繊維含有率 Vf は47%である。なお、厚さは積層方法の違いによって僅かな差異がある。試験片の形状は成形した平板から長さ110mm、横15mmの短冊型に放電ワイヤーカットで切出した。6061アルミニウム試験片は、市販の6061アルミニウム丸棒から製作した。表1に試験片の種類と曲げ強さの試験結果を示す。

3. 試験方法

インストロン1185型万能試験機を用いて、三点曲げ破壊試験を行った。図1に三点曲げ破壊試験の概要図、図2に試験状況を示す。三点曲げ試験は、支点間距離 L と試験片厚さ H の比 $L/H=25$ の条件で行った。ノギスで計測した支点間距離及び厚さの実測値を表1に示す。なお、圧子直径 10ϕ mm、支点直径 5ϕ mm である。三点曲げ試験では、たわみ 0.2mm 増加するごとに試験機を停止し、AE、荷重、ひずみ、たわみ、クロスヘッド変位等を計測した。AEは、AE計測装置(Dunegan Endevco 3000)を用いてAEの発生挙動、発生位置、振幅分布等を計測した。AEの増幅度は、前置増幅器40dB、AE計測装置内の主増幅器40dBの総合利得80dBである。前置増幅器には、ノイズ除去のため100KHz~1MHzのバンドパスフィルターが付いている。AEセンサーは、AEの発生位置をAE波の到達時間差から計測するため、試

表1 試験片の種類と三点曲げ試験結果

試験片の種類	強化方向(積層方法)	試験片厚さ	支点間距離	最大たわみ	曲げ破壊強さおよび耐力	破壊状況
6061アルミニウム試験片		3.35 mm	84 mm	8.00 mm	529 MPa	塑性変形
0° 方向強化試験片	0° 方向 (0°) ₁₀	3.45 mm	86 mm	4.33 mm	2299 MPa	き裂
90° 方向強化試験片	90° 方向 (0°) ₁₀	3.45 mm	86 mm	1.16 mm	162 MPa	き裂
$0^\circ/90^\circ$ 積層試験片	$0^\circ/90^\circ$ 方向 ($0^\circ/90^\circ$) ₁₀	3.45 mm	86 mm	4.15 mm	1273 MPa	き裂
$\pm 45^\circ$ 積層試験片	$\pm 45^\circ$ 方向 ($45^\circ/-45^\circ$) ₁₀	3.55 mm	89 mm	8.05 mm	295 MPa	せん断破壊

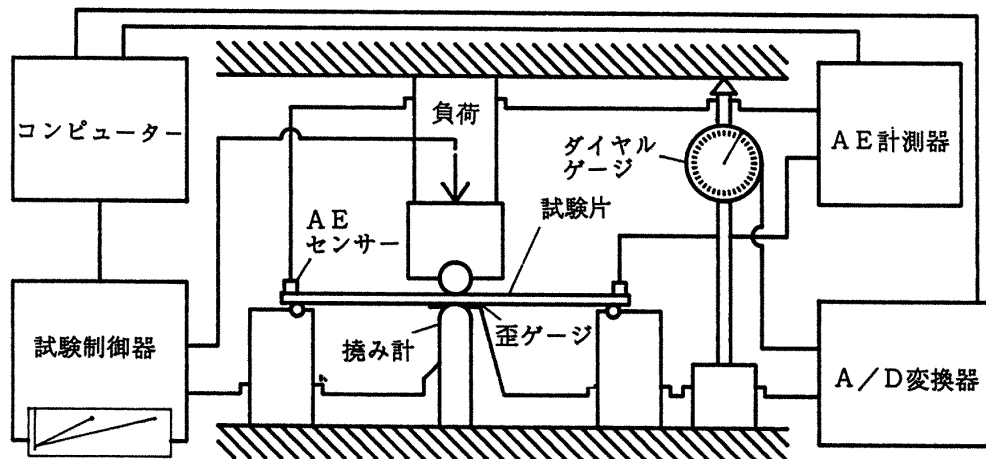


図1 三点曲げ破壊試験の概要

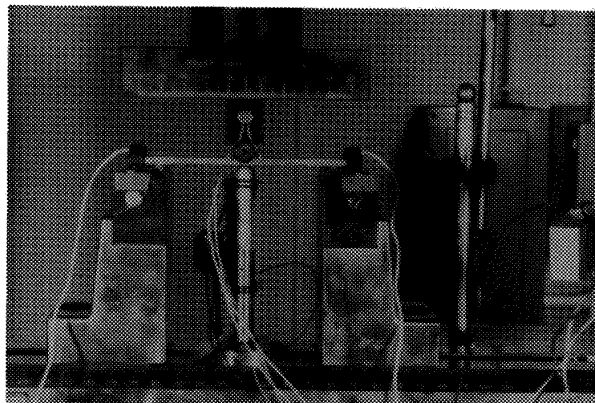
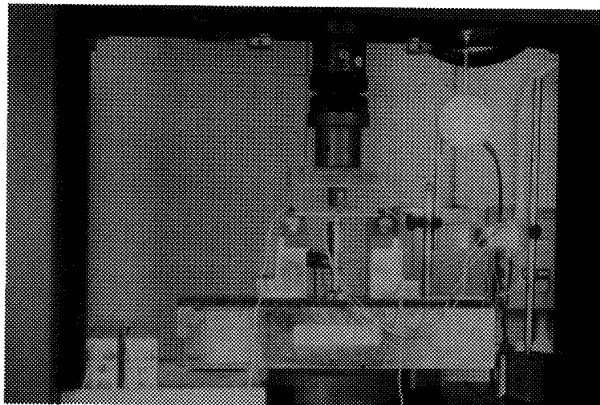


図2 三点曲げ試験状況

試験片の両端にグリースを介して2個接着しビニールテープを巻きつけて固定した。なお、AEセンサーの直径は 5ϕ mm、共振周波数は500KHzの特性のものを用いた。試験片と圧子及び支点の接触によるAEノイズを除去するため、試験片と圧子及び支点の間にポリエチレンシートを介して接触させた。荷重は万能試験機のチャート紙上に記録した。ひずみの計測では、試験片の圧子直下の引張側にゲージ長さ2mmの3軸ロゼットひずみゲージを接着し、 0° 方向、 45° 方向、 90° 方向のひずみを計測し、試験片の変形挙動を調べた。たわみは、圧子直下でひずみゲージに接触しない位置にたわみ計を設置し、万能試験機のチャート紙上に記録した。クロスヘッド変位は、クロスヘッド上にダイヤルゲージを設置し、万能試験機の上部フレームとクロスヘッド間の変位量を計測した。クロスヘッドスピードは $0.5\text{mm}/\text{min}$ である。なお、 90° 方向強化試験片は2枚、その他の試験片は3

枚ずつ試験を行ったが、同様な結果を示したので1枚の試験結果だけを表示した。

4. AE計測の方法

AE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じる弾性波である。AEには、連続型と突発型がある。複合材料の破壊には、マトリックスの破壊、繊維の破壊、マトリックスと繊維の界面剝離、積層間の層間剝離等が考えられるが、複合材料の破壊によって生じるAE波形には突発型が多い。図3に複合材料の曲げ試験で発生したAE波形の一例を示す。AE波の事象は、しきい値を越えた波が検出された後、しきい値を越えなくなった後一定時間の不検出時間(本計測では3msec)を経過した場合この波形を1事象とする。AEの発生挙動は、負荷開始から曲げ破壊または最大曲げ変形時までに生じるAE

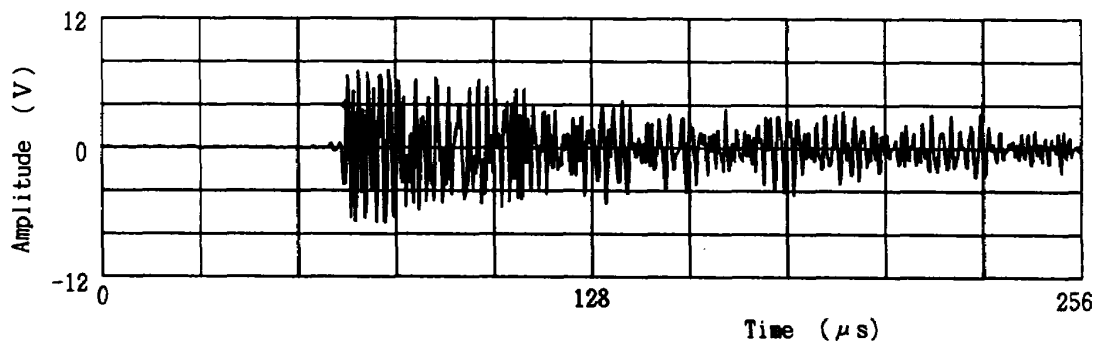


図3 AE波形の一例

事象の発生数とたわみ及び荷重または曲げ応力の関係で示した。AE発生位置はAEセンサー間を0~100に分割した発生位置と各位置の発生頻度の分布を示したものである。なお、0は左側のAEセンサー設置位置、100は右側のAEセンサー設置位置である。AE振幅は1事象中の最大振幅をこの事象の振幅値とする。振幅分布は、AE振幅の発生分布を示したもので、前置増幅器の出力電圧が $100\mu\text{V}$ のとき、0dB、10Vのとき100dBとするdB表示で示す。なお、しきい値は出力電圧10mVに相当する40dBに設定した。本報告では位置標定と振幅分布は、各試験片のAE特性の比較のため、たわみの最大値までを4分割して、25%負荷、50%負荷、75%負荷、100%負荷の4段階に分けて示した。

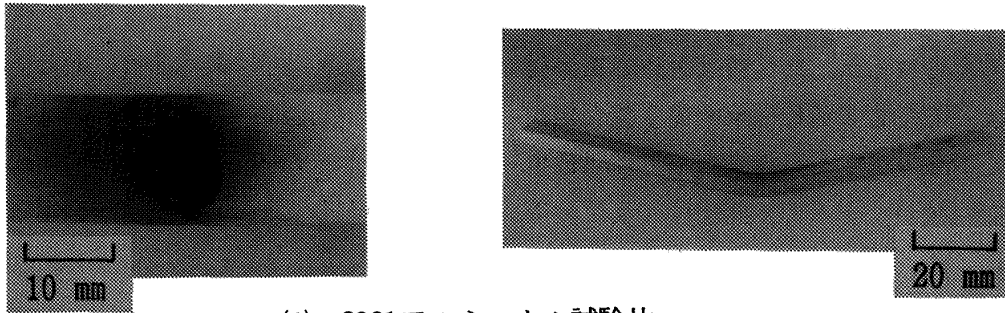
5. 試験結果

図4に各試験片の破壊及び変形状況を示す。各試験片の左は圧子直下の引張側の破壊状況、右は長手方向の変形を横から見た写真である。(1)は6061アルミニウム試験片のたわみ8mmまで負荷した後の変形状況である。圧子点付近で大きな塑性変形が生じた。(2)は 0° 方向強化試験片のたわみ4.33mmまで負荷した後の破壊変形状況である。圧子直下の引張側の幅方向にき裂が生じたが、圧子直下の同じ位置で繊維が破壊しないためジグザグ状の亀裂が生じた。(3)は 90° 方向強化試験片のたわみ1.16mm負荷後の破壊変形状況である。この試験片は繊維が幅方向に配列されているため、繊維とマトリックスの界面が応力集中部になり、後述するように著しく低い応力でき裂が生じて破

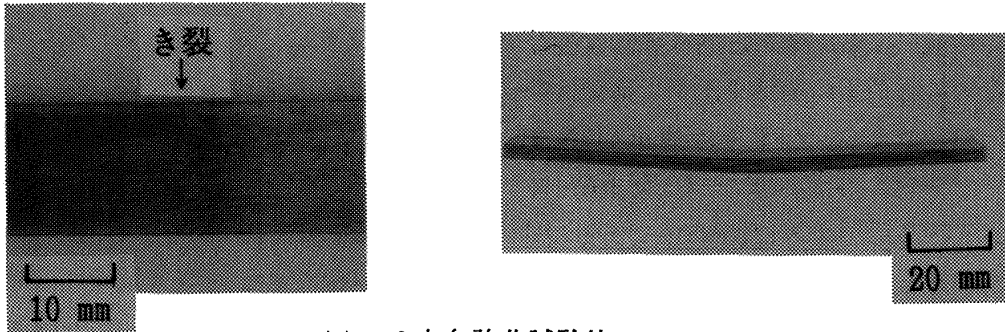
壊した。き裂は圧子直下の引張側の幅方向に繊維配列方向に沿って直線状に生じた。(4)は $0^\circ/90^\circ$ 積層試験片のたわみ4.15mm負荷後の破壊変形状況である。圧子直下の引張側の幅方向にき裂が生じたが、 90° 方向繊維の影響で幅方向に直線状に亀裂が生じると 0° 方向繊維の破壊が必ずしも圧子直下の同じ位置で生じないため、不連続な直線状のき裂が生じた。(5)は $\pm 45^\circ$ 積層試験片のたわみ8.05mm負荷後の変形状況である。圧子付近は、6061アルミニウムの場合と同様に亀裂は生じない。なお、圧子付近の引張側は、幅方向に凹状のくら形状の変形になった。

5.1 6061アルミニウム試験片の試験結果

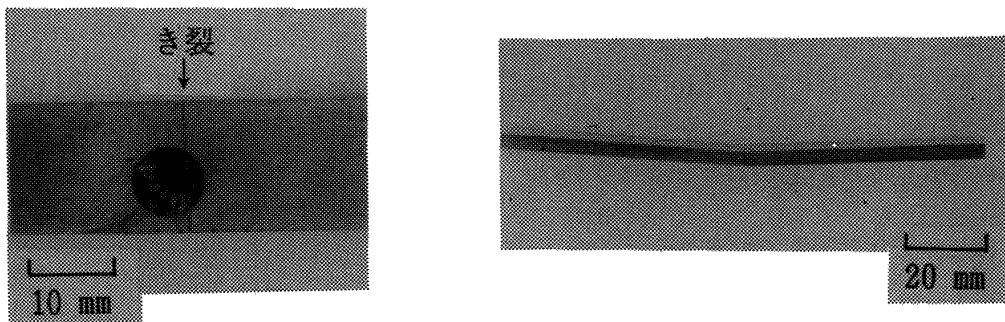
この試験片は、たわみ8mmまでの試験を行った。その結果、圧子付近で大きな塑性変形が生じた。なお、金属の曲げ試験は、一般に曲げ強さを求めるために行うのではなく、塑性加工時の加工性を調べる目的で行われる。この試験片は複合材料と同じ熱処理をしていないが、本試験ではマトリックス材料の塑性変形によって生じるAE特性、試験片と圧子及び支点との接触部にAEノイズが発生するか否か等を調べる目的で曲げ試験を行った。図5に荷重とたわみ及びAE発生挙動の関係を示す。横軸は荷重、縦軸はたわみ及びAE事象総数である。荷重699Nにおけるたわみは8mm、AE事象総数は22個である。たわみは、荷重447Nまでは、荷重に比例するが、これを越えると塑性変形し、たわみの増加率が高くなった。AEは負荷の前半と塑性変形域で僅かに生じた。AE事象は図9の(a)、(b)で示すように中央部で発生してお



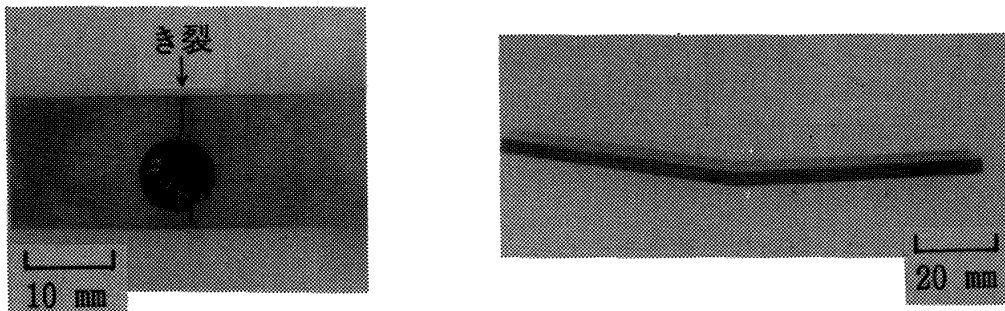
(1) 6061アルミニウム試験片



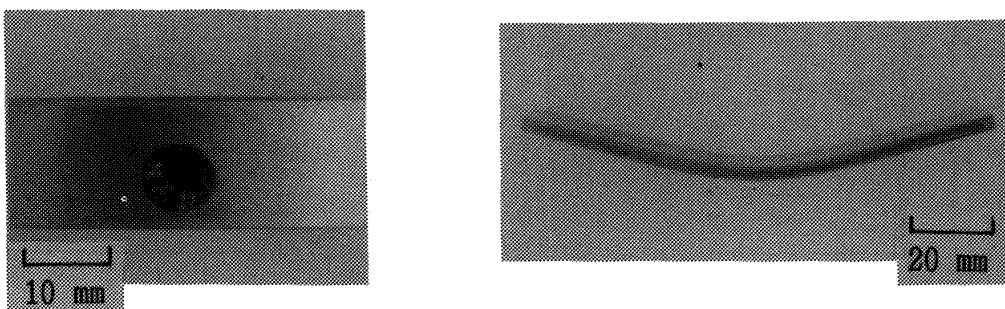
(2) 0°方向強化試験片



(3) 90°方向強化試験片



(4) 0°/90°積層試験片



(5) ±45°積層試験片

図4 試験片の破壊および変形状況

り、負荷前半の AE は試験片と圧子との接触によるノイズと考えられるが、発生数は後述の複合材料の破壊によって生じる AE 事象の発生数と比較すると著しく少ない。なお、両支点部では AE 事象が発生していない。従って、試験片と支点の接触による AE ノイズは生じないと考えられる。また、6061 アルミニウムの高負荷で生じる AE 事象は、塑性変形のため生じたと考えられるが、試験片と圧子との接触によるノイズと同様著しく少ない。図 6 にひずみと荷重の関係を示す。横軸はひずみ、縦軸は荷重である。ひずみは荷重 447 N まで比例する。0° 方向のひずみゲージは荷重 674 N で破断した。この時のひずみは 35600 μ である。図 7 にたわみと荷重及び AE 発生挙動の関係を示す。横軸はたわみ、縦軸は荷重及び AE 事象総数である。図 8 にたわみとひずみの関係を示す。横軸はたわみ、縦軸はひずみである。0° 方向および 45° 方向のひずみゲージは、たわみ 4.8 mm で断線した為、最大たわみまで表示できなかった。図 9 は AE 事象の発生位置と発生頻度の関係を示した位置

標定の結果である。横軸は発生位置、縦軸は発生頻度である。(a) は最大曲げたわみの 25% 負荷、(b) は 50% 負荷、(c) は 75% 負荷、(d) は 100% 負荷の場合である。AE 事象は圧子直下付近で生じたが、発生数は僅かである。両支点部付近からの AE 事象は生じていない。図 10 は AE の振幅分布を示したものである。横軸は dB 表示の振幅値、縦軸は AE 発生頻度である。AE は 40 dB ~ 65 dB で比較的低い振幅である。従って、マトリックス材料の塑性変形によって生じる AE は少なく、発生する AE の振幅は比較的低い振幅であると考えられる。なお、前報¹⁾の 6061 アルミニウムと 0° 方向強化試験片及び 0°/90° 積層試験片の引張破壊試験結果によると、6061 アルミニウム試験片の最小断面積に比べ 9% の最小断面積である 0° 方向強化試験片の場合、AE 事象の発生数は約 4.2 倍である。また、試験片の最小断面積が 18% である 0°/90° 積層試験片の場合、AE 事象の発生数は約 104 倍である。6061 アルミニウム試験片の引張破壊によって生じた振幅は、最終破断で 90 dB 程度の AE が僅かに生

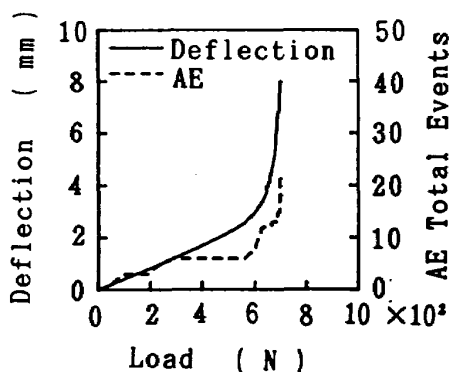


図 5 アルミニウム合金試験片の荷重とたわみ及び AE 挙動の関係

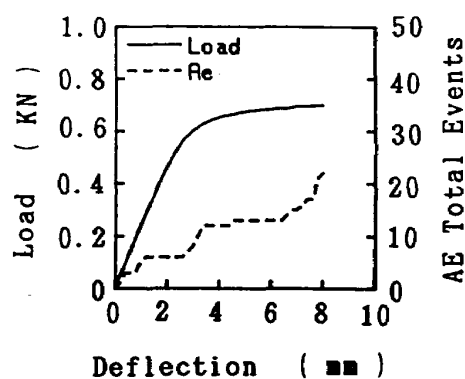


図 7 アルミニウム合金試験片のたわみと荷重及び AE 挙動の関係

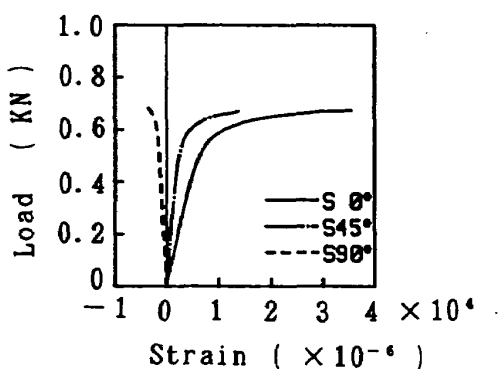


図 6 アルミニウム合金試験片のひずみと荷重の関係

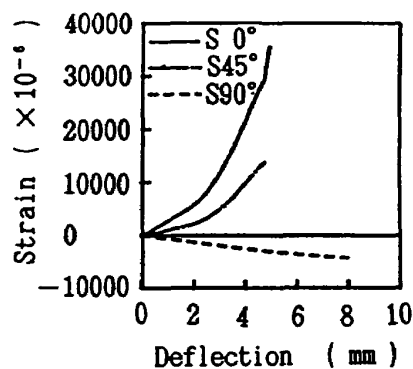


図 8 アルミニウム合金試験片のたわみとひずみの関係

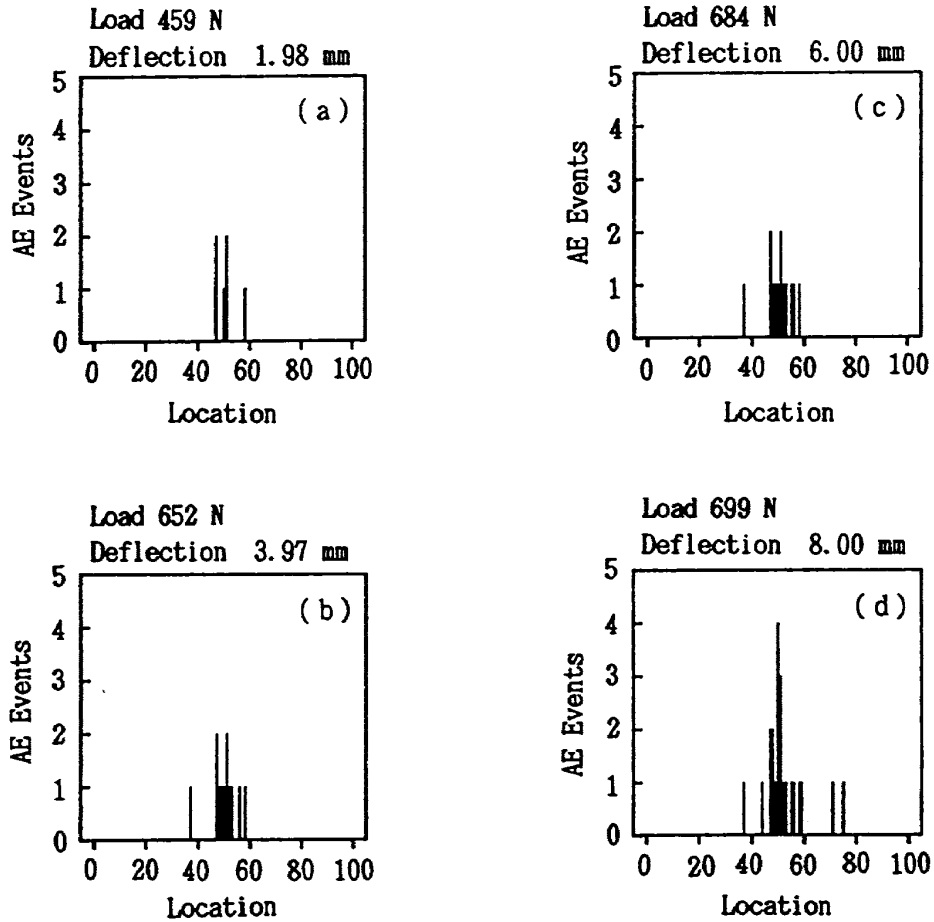


図9 アルミニウム合金試験片の AE 発生位置

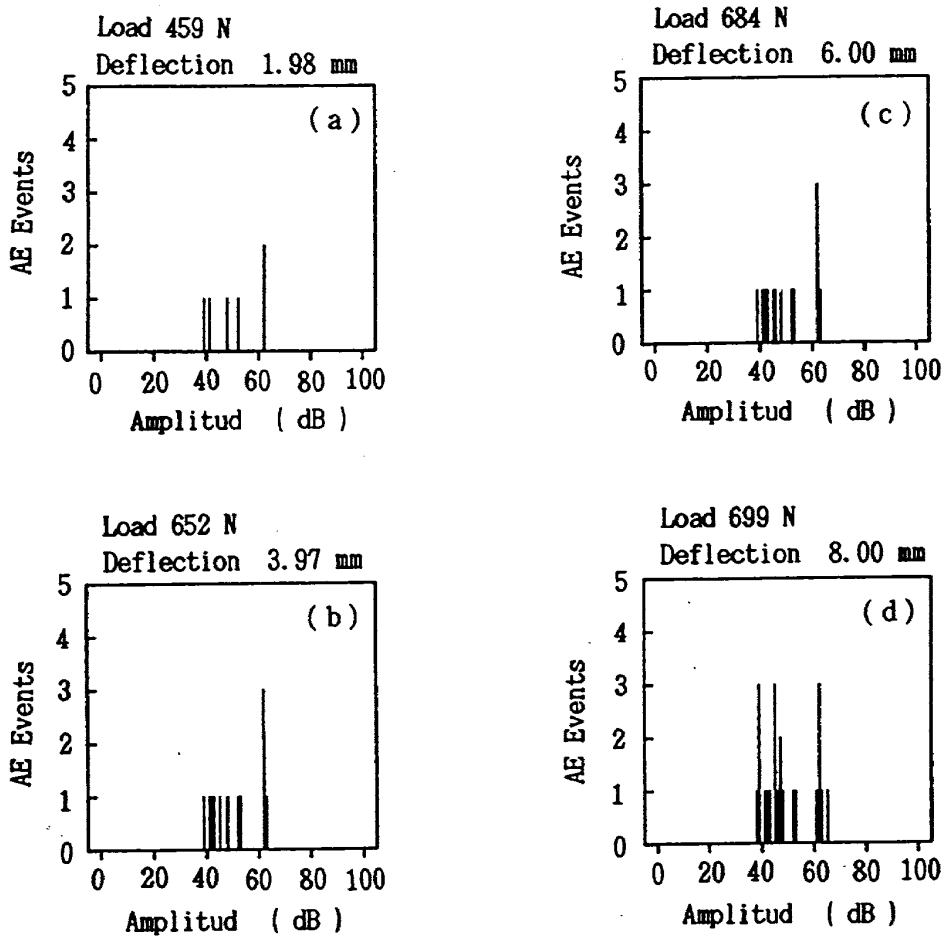


図10 アルミニウム合金試験片の AE の振幅分布

じるが、大部分は70dB以下の振幅である。このように、6061アルミニウムの破壊による AE 発生は複合材料の破壊によって生じる AE 事象に比べて著しく少なく、AE 振幅は70dB以下の振幅が大部分であることが明らかになっている。

5.2 0° 方向強化試験片の試験結果

図11に曲げ応力とたわみ及び AE 発生挙動の関係を示す。横軸は曲げ応力，縦軸はたわみ及び AE 事象総数である。曲げ破壊強さは2300MPa，最大たわみは4.3mm，AE 事象総数は2800個である。6061アルミニウム試験片と比較すると AE 事象の発生数は約127倍である。圧子および支点部のノイズによる AE の発生は，6061アルミニウム試験片で調べたように少ないと考えられるため，この試験片の AE の大部分は，繊維の破壊，マトリックス破壊，繊維とマトリックスの界面剝離で生じたと考えられる。曲げ応力とたわみの関係は，破壊までほぼ比例して増加した。曲げ応力と AE の発生挙動の関係は，応力の増加に伴って AE 事

象の発生率が高くなる逓増傾向を示した。なお，曲げ破壊強さは $\sigma=(3WL)/(2BH^2)$ の式から求めた。 σ は曲げ破壊強さ，Wは破壊荷重，Lは支点間距離，Bは試験片の幅，Hは試験片の厚さである。図12にひずみと曲げ応力の関係を示す。ひずみは曲げ応力にはほぼ比例して増加した。45°方向および90°方向のひずみの屈折点は，き裂による急変形のため生じたと考えられる。なお，0°方向のゲージはき裂と共に破断したため測定が中断した。図13にたわみと曲げ応力及び AE 発生挙動の関係を示す。たわみと AE 発生との関係は，たわみの増加に伴って AE 事象の発生率が高くなる逓増傾向を示した。図14にたわみとひずみの関係を示す。たわみとひずみは比例している。図15に AE の位置標定を示す。AE 事象は，負荷の初期から圧子直下付近の42~56の位置から多量に発生した。発生域は，負荷の増加に伴って広がる傾向があるが，比較的狭い範囲である。破壊時では35~69迄の範囲になった。図16に AE の振幅分布を示す。AE 振幅は，低負荷では40dB~100dB の広範囲に分

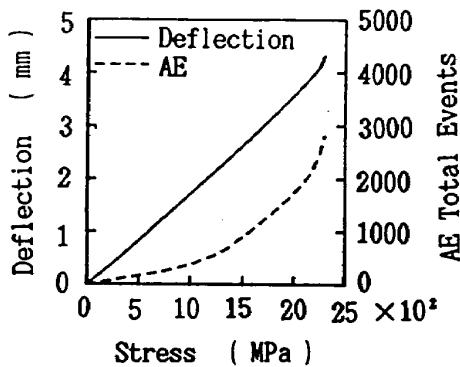


図11 0° 方向強化複合材試験片の曲げ応力とたわみ及び AE 挙動の関係

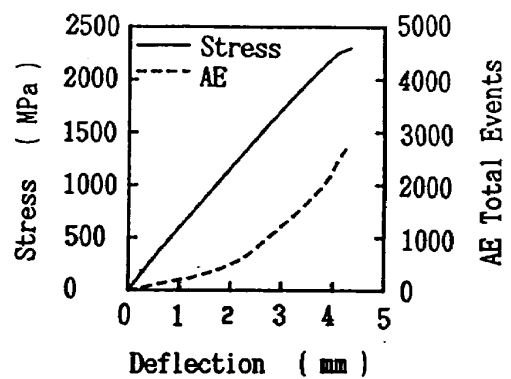


図13 0° 方向強化複合材試験片のたわみと曲げ応力及び AE 挙動の関係

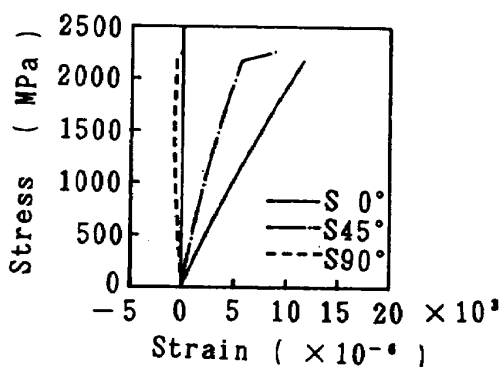


図12 0° 方向強化複合材試験片のひずみと曲げ応力の関係

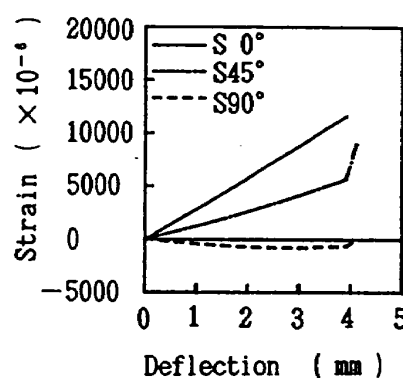


図14 0° 方向強化複合材試験片のたわみとひずみの関係

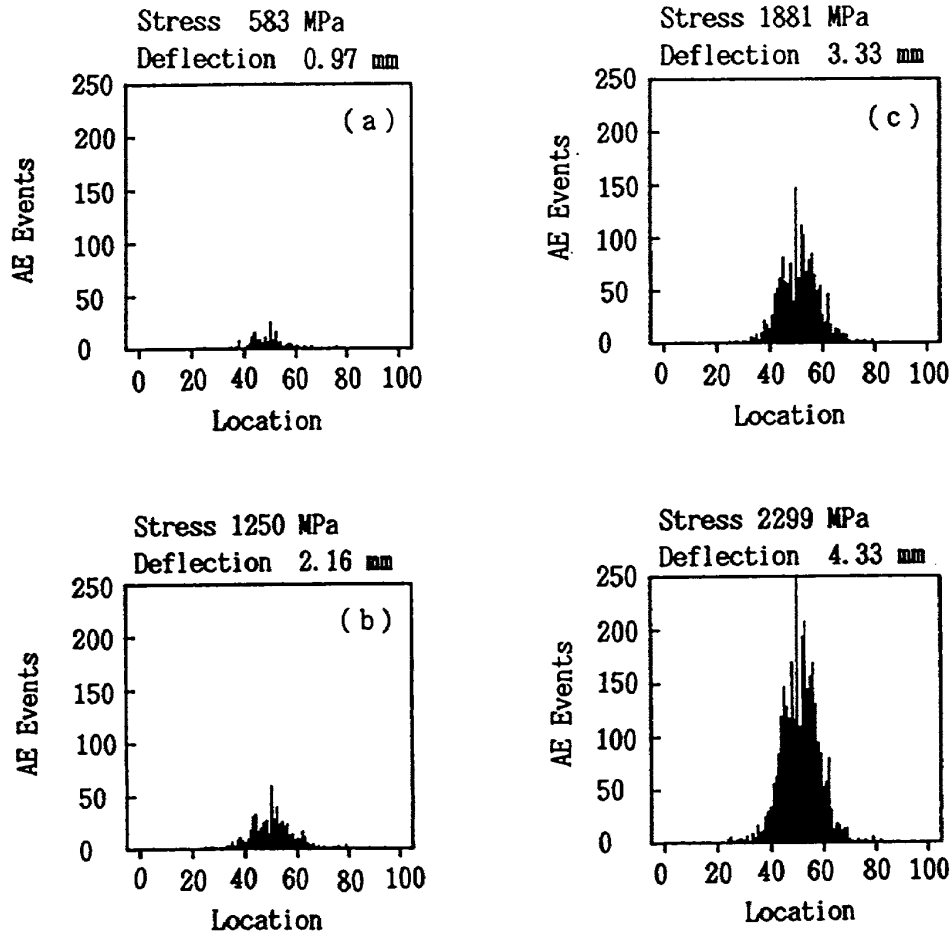


図15 0°方向強化複合材試験片のAE発生位置

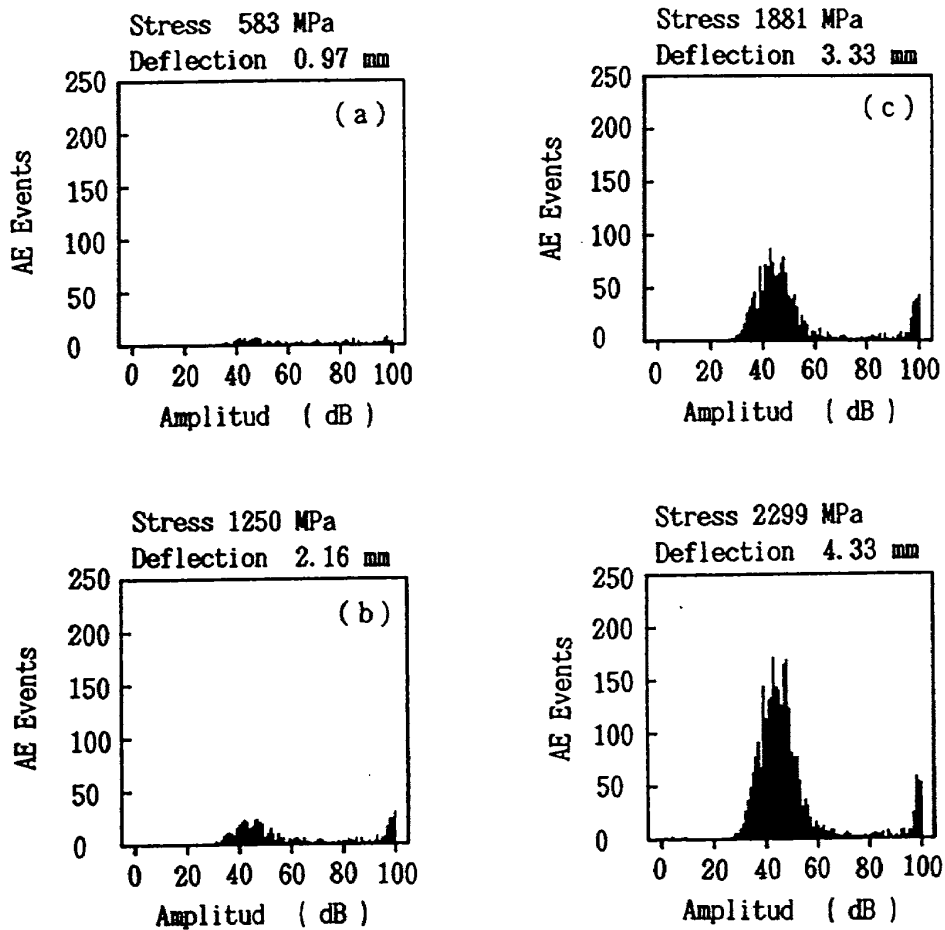


図16 0°方向強化複合材試験片のAEの振幅分布

布するが発生数の差は少ない。負荷の増加に伴って40~62dB までの低い振幅域と97~100dB迄の高い振幅域の発生率が高くなった。なお、後述の90°方向強化試験片の試験結果で示すように、マトリックス破壊およびマトリックスと繊維の界面剝離が破壊要因であると考えられる場合には97dB以上の高い振幅が少ない。従って、この試験片で生じた97dB以上の高い振幅のAEは繊維破壊によって生じたと考えられる。

5.3 90°方向強化試験片の試験結果

この試験片は、曲げにより圧子直下の引張側で繊維方向に沿って直線状のき裂が生じた。図17に曲げ応力とたわみ及びAE発生挙動の関係を示す。曲げ破壊強さは162MPa、最大たわみは1.1mm、AE事象総数は1200個である。この試験片の曲げ破壊強さは、0°方向強化試験片の場合と比較すると約7%で著しく低い。この破壊要因は、マトリックスと繊維の界面の応力集中の影響で界面剝離およびマトリックス破壊が生じて破壊したと考え

られる。このように低い曲げ応力で破壊したことから、90°方向に繊維が配列している90°繊維層の界面剝離は著しく低い負荷で生じると考えられる。曲げ応力とたわみの関係は、曲げ応力の増加に伴って、たわみの増加率が高くなる逓増傾向を示した。AE事象の発生挙動は、曲げ応力の増加に伴って発生率が高くなる逓増傾向を示した。図18にひずみと曲げ応力の関係を示す。ひずみは曲げ応力の増加に伴って増加率が高くなる逓増傾向を示した。図19にたわみと曲げ応力及びAE発生挙動の関係を示す。AE事象の発生はたわみ0.4~1.0mmまで比例的に増加した。図20にたわみとひずみの関係を示す。ひずみはたわみに対して逓増傾向を示した。なお、ひずみ測定は、たわみ1.0mmでき裂が発生したため0°方向および45°方向のひずみゲージが断線し、計測が中断した。図21にAE事象の位置標定を示す。0°方向強化試験片と同様圧子付近のAE事象が多いが、き裂が圧子側に向かって垂直に進展しており、負荷の増加に伴って圧子付近のAE事象が著しく多くなった。

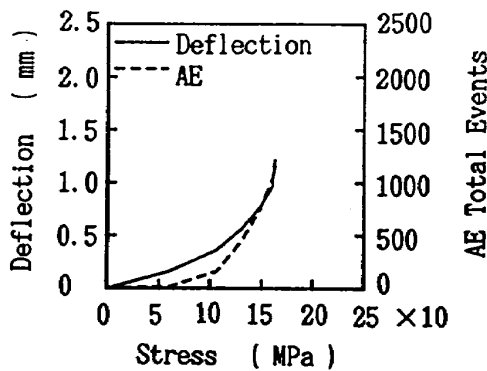


図17 90°方向強化複合材試験片の曲げ応力とたわみ及びAE挙動の関係

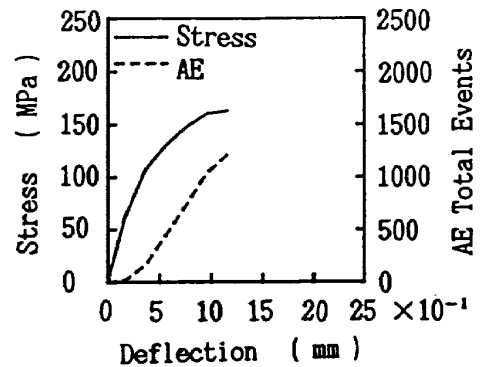


図19 90°方向強化複合材試験片のたわみと曲げ応力及びAE挙動の関係

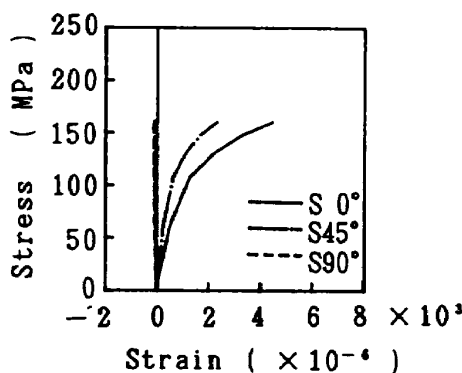


図18 90°方向強化複合材試験片のひずみと曲げ応力の関係

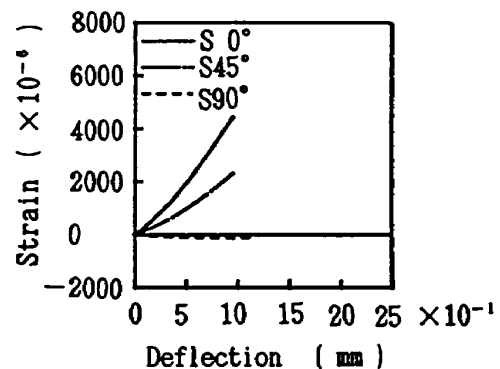


図20 90°方向強化複合材試験片のたわみとひずみの関係

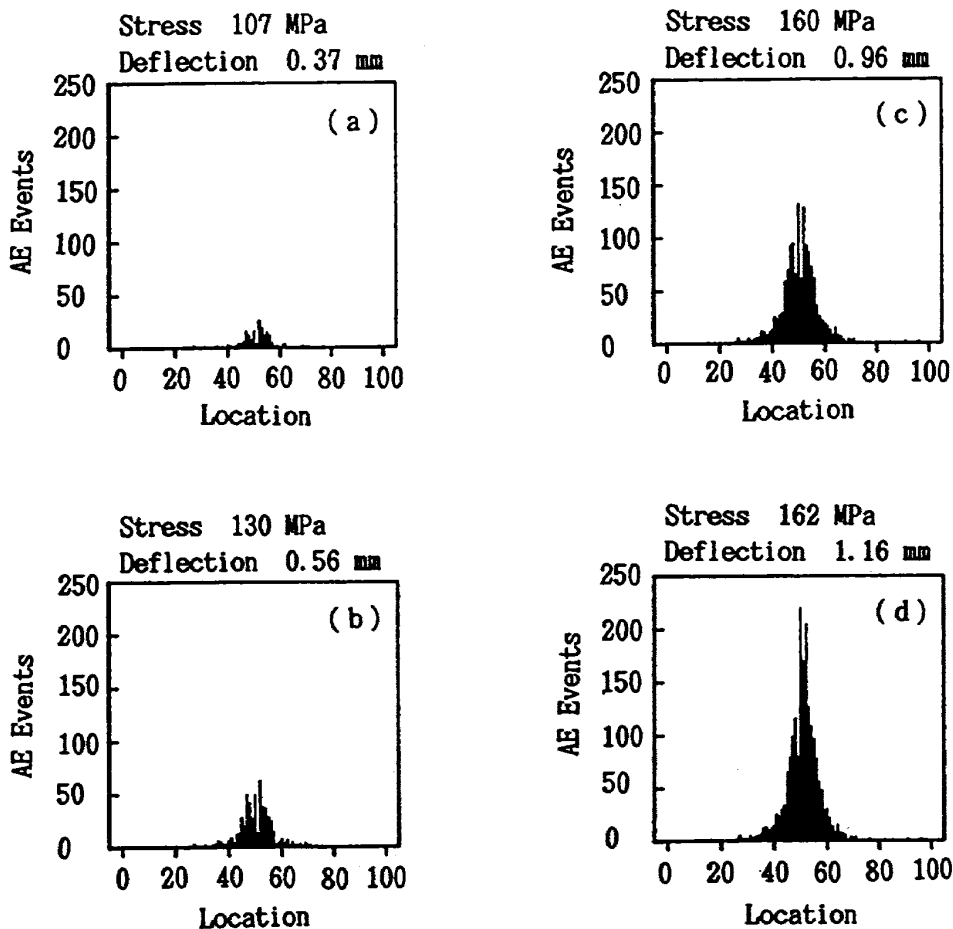


図21 90°方向強化複合材試験片のAE発生位置

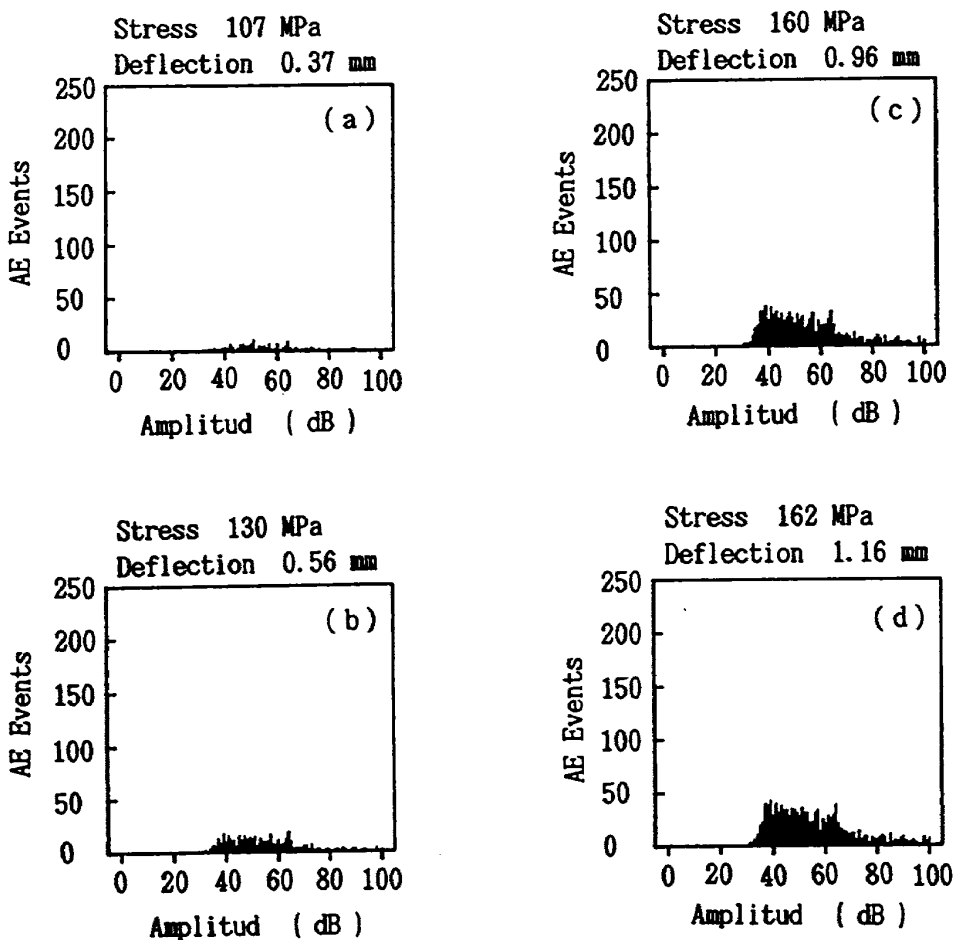


図22 90°方向強化複合材試験片のAEの振幅分布

図22に AE の振幅分布を示す。低負荷では比較的低い振幅の40~73dBの分布であるが、負荷の増加に伴って73dB以上の高い振幅も生じる。しかし、97dB以上のAEは少ない。この材料は0°方向強化試験片の曲げ破壊強さに比較すると約7%の著しく低い負荷で破壊することからマトリックス破壊およびマトリックスと繊維の界面剝離が大部分であり、繊維破壊は少ないと考えられる。

5.4 0°/90°積層試験片の試験結果

この試験片は、0°方向繊維と90°方向繊維が交互に積層した複合材料であるから、主要な破壊要因は、0°方向強化試験片と90°方向強化試験片の破壊が混在したマトリックス破壊、0°繊維層の繊維破壊、90°繊維層の繊維とマトリックスの界面剝離等が生じたと考えられる。図23に曲げ応力とたわみ及びAE発生挙動の関係を示す。曲げ破壊強さは1270MPa、最大たわみは4.2mm、AE事象総数は10300個である。曲げ応力とたわみの関係は破壊までほぼ比例して増加した。AE事象の発

生数は、0°方向強化試験片の約3.6倍である。この試験片の0°方向繊維層は0°方向強化試験片の1/2であり、AE事象の発生数が繊維層の厚さに比例すると仮定すると0°方向繊維層からは0°方向強化試験片で生じたAEの1/2の約1400個のAE事象が発生することになる。本試験片では10300個のAE事象が発生したから、90°繊維層からは0°繊維層の7.4倍のAE事象が発生したことになり、90°繊維層の破壊によって生じるAE事象は0°繊維層の破壊の場合に比べ著しく多いと考えられる。AEの発生挙動は700MPa付近で増加率が変化した。図24にひずみと曲げ応力、図25にたわみと曲げ応力及びAE発生挙動の関係を示す。AEの発生挙動は、たわみ1.5mm付近で増加率が変化するが、たわみに対してほぼ比例して増加した。図26にたわみとひずみの関係を示す。ひずみはたわみにほぼ比例している。図27にAE事象の発生位置を示す。AEは負荷の初期から広範囲で多数

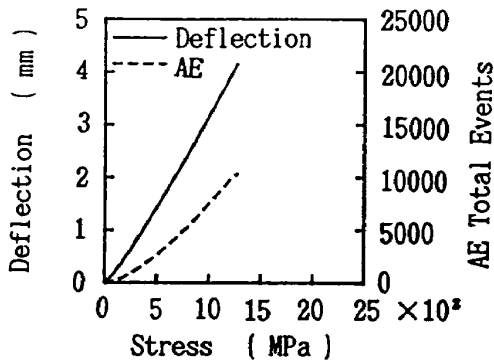


図23 0°/90°積層複合材試験片の曲げ応力とたわみ及びAE挙動の関係

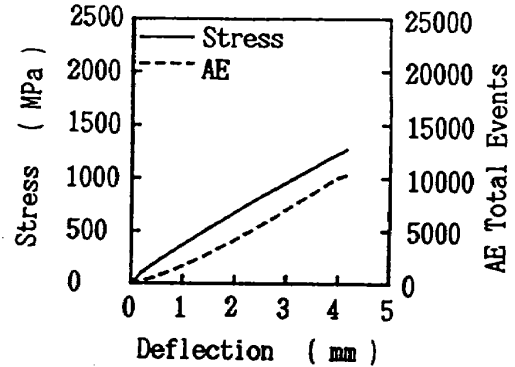


図25 0°/90°積層複合材試験片のたわみと曲げ応力及びAE挙動の関係

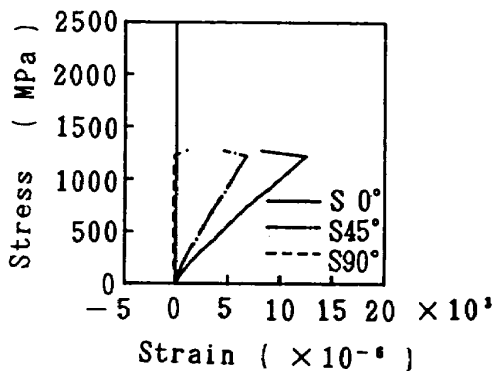


図24 0°/90°積層複合材試験片のひずみと曲げ応力の関係

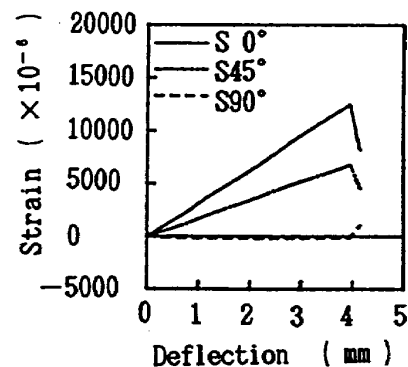


図26 0°/90°積層複合材試験片のたわみとひずみの関係

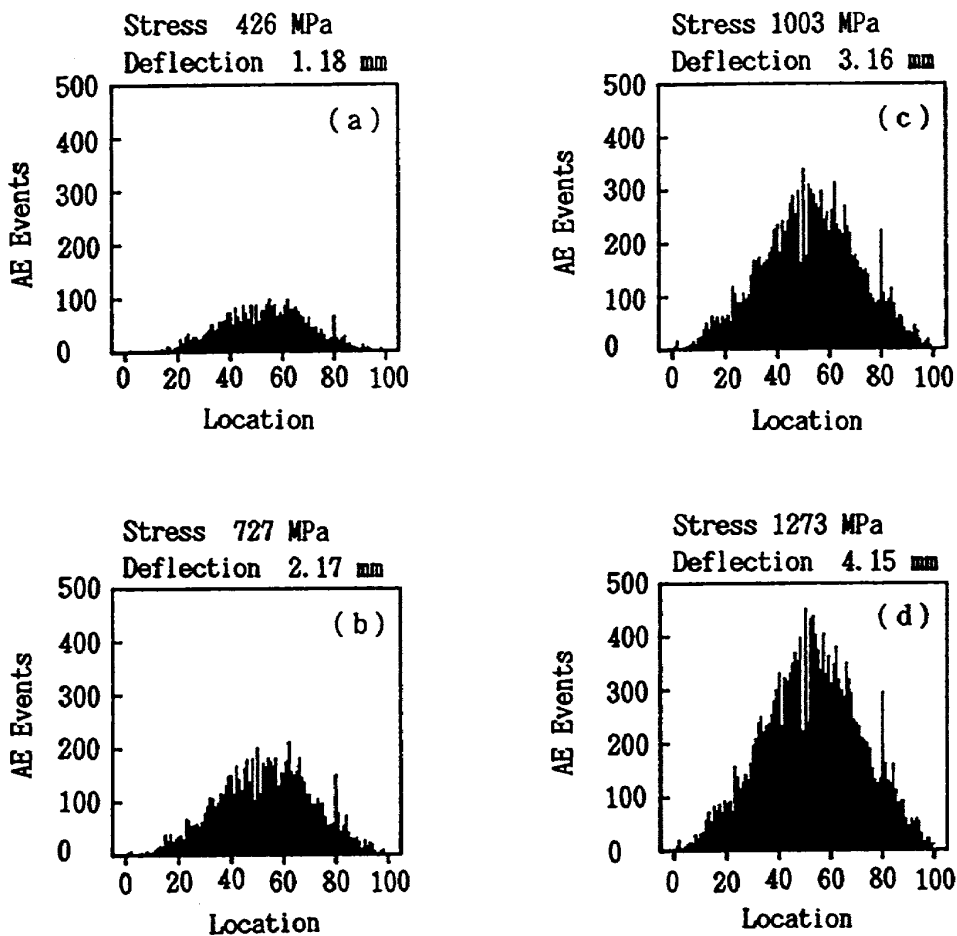


図27 0°/90°積層複合材試験片のAE発生位置

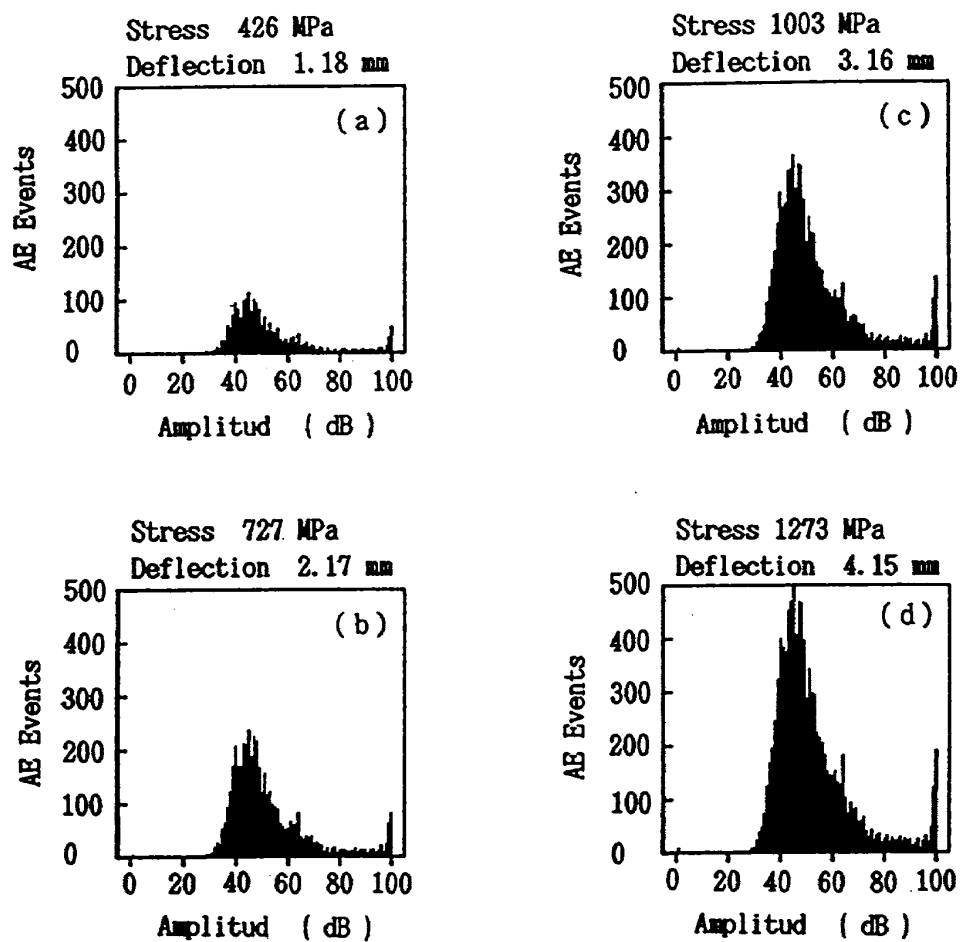


図28 0°/90°積層複合材試験片のAEの振幅分布

生じた。90°繊維層は90°方向強化試験片で示したように低い負荷でマトリックスと繊維の界面剝離が生じると考えられる。この試験片は、0°繊維層によって90°方向強化試験片の破壊応力より7.8倍の高い曲げ応力に耐えられるため、広い範囲で強度の低い90°繊維層の界面剝離が多数生じたと考えられる。また、材料の内部構造が同じであれば損傷量は応力に比例すると考えられるから、材料の損傷によって発生するAE事象は、曲げモーメント分布に相似した圧子点を頂点とする三角形の分布になったと考えられる。図28にAEの振幅分布を示す。低負荷から40~67dBの低い振幅と98~100dBの高い振幅に分布している。98~100dBの高い振幅のAEは0°方向強化試験片の場合と同様0°方向の繊維破壊であり、低い振幅のAEの大部分はマトリックスと繊維の界面剝離によって生じたと考えられる。

5.5 ±45°積層試験片の試験結果

この試験片の破壊状況は、±45°方向の繊維の

角度が減少して試験片の伸びが増加する挙動を示し、図4のように大変形するが、き裂は生じない。これは、せん断破壊によるマトリックスと繊維の界面剝離及び層間剝離が生じたためと考えられる。図29に曲げ応力とたわみ及びAE発生挙動の関係を示す。たわみ8.05mmまで曲げ試験を行った。この時の曲げ耐力は295MPa、AE事象総数は16700個である。曲げ耐力は、0°方向強化試験片の曲げ破壊強さの13%である。従って、±45°方向の繊維だけで0°方向の繊維が無い場合には著しく低い負荷でせん断破壊が生じると考えられる。AE事象の発生数は、0°/90°積層試験片の約1.6倍であり、高い発生頻度を示した。曲げ応力とたわみの関係は曲げ応力の増加に伴って増加率が高くなる逡増傾向を示した。曲げ応力とAE発生挙動の関係も応力の増加に伴ってAE事象の発生率が高くなる逡増傾向を示した。図30にひずみと曲げ応力の関係を示す。ひずみは曲げ応力の増加に伴って増加率が高くなる逡増傾向を示した。なお、圧子付近の引張側の幅方向に凹状のくらの形の変形

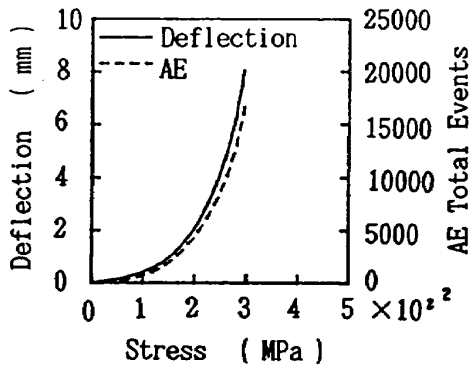


図29 ±45°積層複合材試験片の曲げ応力とたわみ及びAE挙動の関係

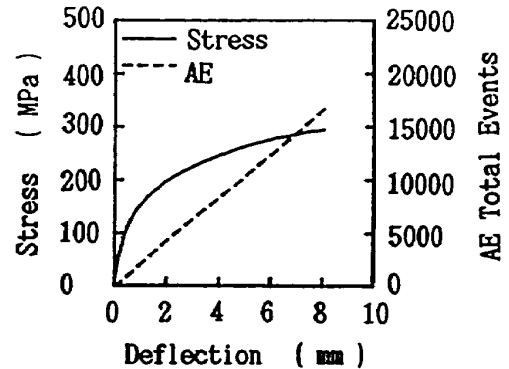


図31 ±45°積層複合材試験片のたわみと曲げ応力及びAE挙動の関係

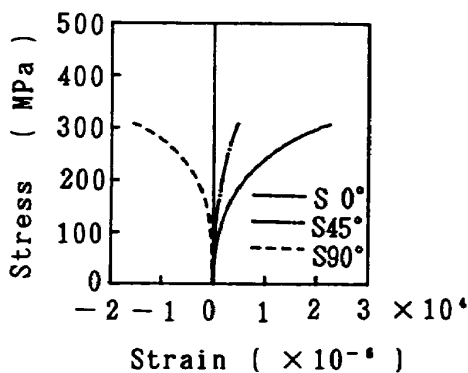


図30 ±45°積層複合材試験片のひずみと曲げ応力の関係

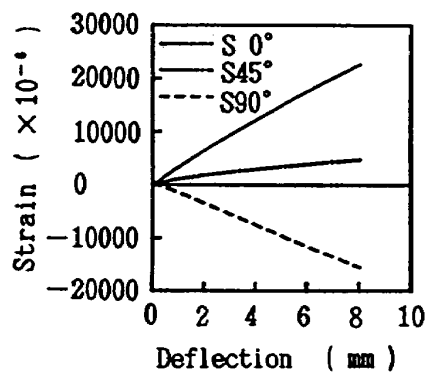


図32 ±45°積層複合材試験片のたわみとひずみの関係

が生じるため、 90° 方向ひずみは他の試験片の場合に比べ著しく大きくなった。図31にたわみと曲げ応力及び AE 発生挙動の関係を示す。AE の発生挙動はたわみにほぼ比例する傾向を示した。図32にたわみとひずみの関係を示す。ひずみはたわみにほぼ比例する傾向を示した。図33に AE 事象の発生位置を示す。AE 事象の発生域は、 $0^\circ/90^\circ$ 積層試験片の場合よりやや狭いが、 0° 方向強化試験片や 90° 方向強化試験片の場合より広い。従って、せん断破壊は試験片の中央部だけでなく広い範囲で生じたと考えられる。図34に AE の振幅分布を示す。負荷の初期から 40~72dB の低い振幅が多く発生した。50dB 以上の高い振幅の分布は、振幅が高くなるに伴って発生頻度が低くなる逓減的な分布である。負荷の増加に伴って 57dB 以下の振幅は著しく増加するが、90dB 以上の振幅は少ない。このような結果から、せん断破壊による界面剥離及び層間剥離によって生じる AE は、繊維破壊の場合に比べ比較的低い振幅であると考えられる。

6. 結 言

繊維の配列方向が異なる SiC/A1 複合材料試験片を用いて、三点曲げ破壊試験を行った。複合材料の曲げ破壊強さは、 0° 方向の繊維の影響が大きい。Vf=47% の 0° 方向強化試験片では 2299MPa であるが、Vf が同じでも $0^\circ/90^\circ$ 積層試験片では約 55% の 1273MPa である。また、 0° 方向に繊維の無い 90° 方向強化試験片では約 7% の 162MPa、 $\pm 45^\circ$ 積層試験片では約 13% の 295MPa である。

各試験片の AE 特性を調べた結果、以下に示すようなことがわかった。

[1] AE 事象の発生数は、 0° 方向強化試験片及び 90° 方向強化試験片のように単一方向に繊維を配列した試験片と $0^\circ/90^\circ$ 積層試験片及び $\pm 45^\circ$ 積層試験片の場合のように繊維方向が直交した試験片とを比較すると後者の方が高くなる傾向がある。

[2] AE 事象の発生位置は、単一方向に繊維を配列した試験片では圧子付近に生じ、負荷の増加と共にやや拡大するが、発生域は比較的狭い。織

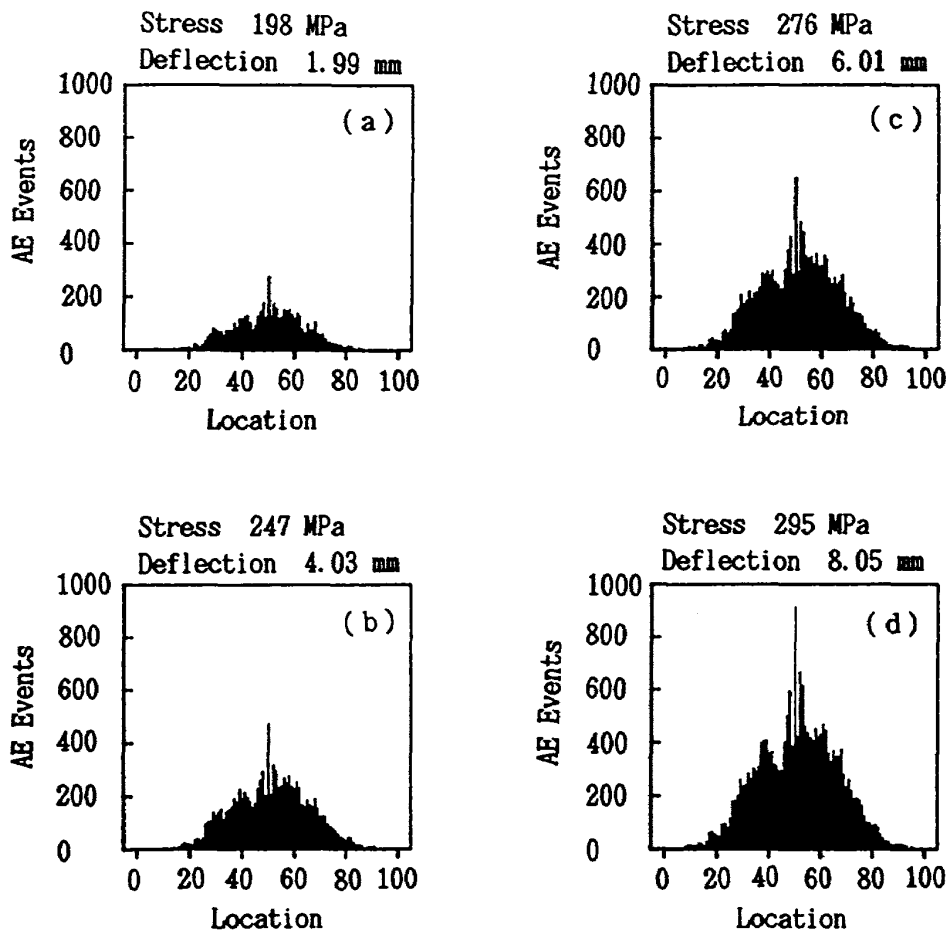


図33 $\pm 45^\circ$ 積層複合材試験片の AE 発生位置

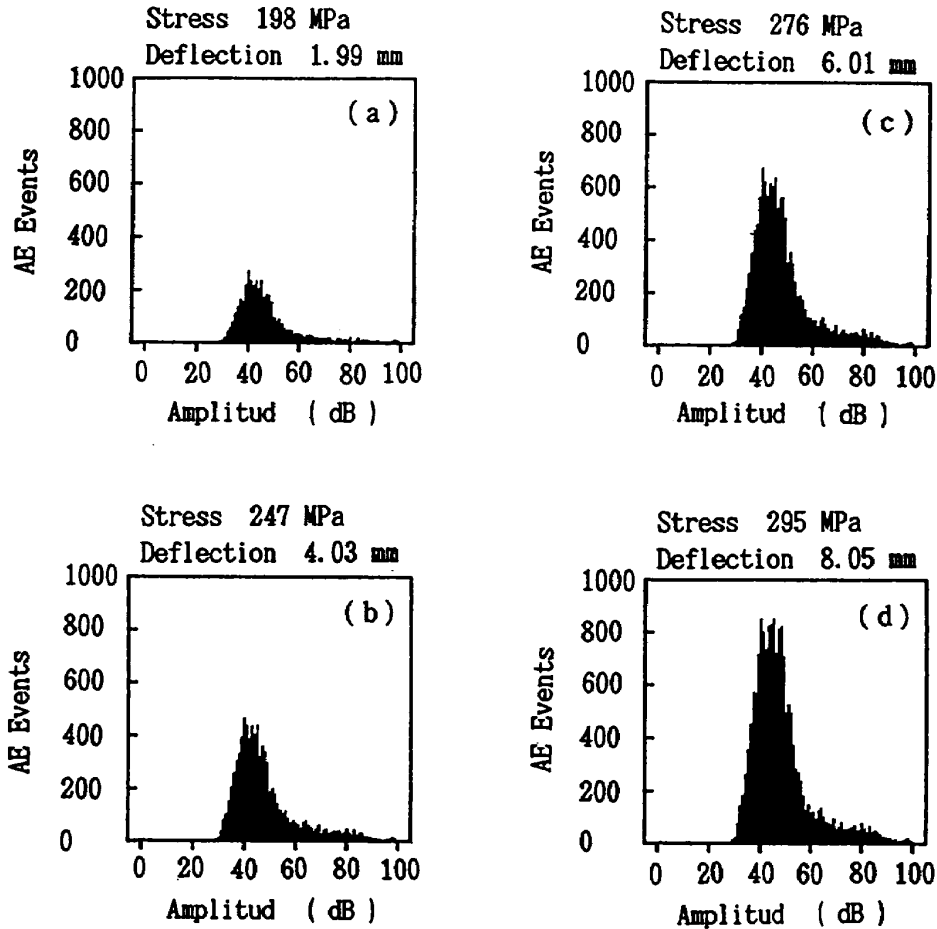


図34 ±45°積層複合材試験片のAEの振幅分布

維方向が直交した試験片の場合、繊維とマトリックスとの界面剥離によると考えられるAE事象が多量に生じ、曲げモーメント分布にほぼ相似した分布を示し、広い範囲から発生した。

[3] AEの振幅は、0°方向強化試験片と0°/90°積層試験片で示したように、0°方向に配列した繊維層がある場合、繊維の曲げ破壊によると考えられる98dB以上の高い振幅のAEが発生した。また、90°方向強化試験片、0°/90°積層試験片および±45°積層試験片で示したように繊維とマトリ

ックスとの界面剥離及び層間剥離によると考えられるAEは72dB以下の比較的低い振幅である。

文 献

- 1) 祖父江靖, 小河昭紀; 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), 航技研報告 TR-1030(平成元年6月)

既 刊 資 料

TM-620	空冷タービンにおける翼端隙間流の空力的制御に関する研究	1990年 5 月	臼井 弘, 井上 重雄 蓑田 光弘, 能瀬 弘幸
TM-621	傾斜機能材料データベースの作製	1990年 6 月	須藤 孝幸, 木皿 且人 毛呂 明夫, 新野 正之
TM-622	ころがり軸受保持器用自己潤滑性高分子複合材のすべり摩擦試験	1990年 6 月	西村 允
TM-623	0.1m×0.1m 磁力支持装置の試作	1990年 6 月	澤田 秀夫, 神田 宏 末永 尚史
TM-624	全機 ACT 風試模型の静的空力弾性解析	1990年 7 月	松下 洸, 藤井 謙司 上田 哲彦, 柳沢 三憲
TM-625	帯板構造模型の振動試験	1990年 7 月	安藤 泰勝, 峯岸 正勝 松崎 雄嗣, 熊倉 郁夫
TM-626	ACT 実験用全機弾性模型の振動試験と構造モデル化	1990年 8 月	藤井 謙司, 上田 哲彦 安藤 泰勝
TM-627	大型低速風洞用ファイバ式三次元レーザ2焦点流速計設備 Part I. その性能評価 二次元計測を中心として	1990年 9 月	高木 正平, 室田 勝一 桑野 尚明, 萱場 重男
TM-628	構造解析用プリ/ポストプロセッサシステムの開発について	1990年10月	奥村 秀人, 大竹 邦彦 峯尾 真一, 望月 治 小島 邦彦, 篠原 健司
TM-629	大型低速風洞における分散処理システムについて	1990年11月	星野 秀雄, 室田 勝一 近藤 洋史

航空宇宙技術研究所資料 630号

平成 2 年 11 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
電話三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社三興印刷
東京都新宿区西早稲田2-1-18
