

卒業論文要旨

FRP 繊維の機械特性が繊維破断 AE に与える影響

システム工学群

先端機械・航空材料工学研究室 1210013 石原 功一

1. 緒言

CFRP は、強度や軽量性に優れているため航空機器からスポーツ用品まで幅広く使用されている。しかし、CFRP は目視できない内部損傷が生じる欠点がある。一般的に複合材料の破壊形態は、母材の割れ、繊維樹脂間の剥離、繊維破断などがあり、破壊がどのように進展するかを把握することが重要である。そのような微視的な破壊形態を非破壊で検出する方法の一つとして、AE(Acoustic Emission)法がある。^{1,2)}AE とはひずみエネルギーが破壊に伴って弾性波として放出される現象である。CFRP の損傷形態の違いにより、AE の周波数や持続時間などの特性が異なることはよく知られている。^{3,4)}よって、AE 特性から、損傷の生じた回数だけでなく、生じる損傷モードの特定を期待できる。しかしながら、特に繊維破断による高周波 AE の持続時間は短く、FFT 解析による周波数の同定は不正確であった。

本研究では、カーボンまたはガラス単繊維を埋め込んだ試験片の引張試験を行い、繊維破断と付随して起こるマトリクスクラックによる AE を測定し、Wavelet 解析⁵⁾を行ってモードの特定を行う手法の確立を目的とした。またそれを用いて繊維の種類が AE 特性に与える影響を調べた。

Table.1 Relationship between Damage modes and AE frequency for of CFRP and GFRP in literatures^{3,4)}

破壊形態	周波数[kHz]	
	CFRP	GFRP
試験片・治具摩擦	50以下	30~80
樹脂割れ	50~100	30~80
繊維樹脂界面剥離	150~250	260付近
引き抜き・繊維破断	270~390	390付近
層間剥離摩擦・引き抜き	500	-

2. 実験方法

本研究ではカーボンまたはガラス単繊維強化 FRP を作製した。炭素繊維は、PAN 系東レ T700ASC、エポキシ樹脂は主剤 ARALDITE LY5052 と硬化剤 ARADUR5052CH (配合比 100:38) を使用し、図 1 に示す試験片を製作した。樹脂の硬化時間は、常温で 24 時間、80°C で 2 時間とした。また試験片の厚さは 1mm と 2mm を用意した。

図 2 に、本研究で行うフラグメンテーション試験の概要を示す。試験には油圧サーボ式疲労試験機を使用し、引張速度は変位制御 (0.2mm/min) で行った。試験片表面には AE センサとひずみゲージを接着させた。

試験では、本研究室で構成した AE 計測システム (ディスクリミネータ AE9922 とプリアンプ、広帯域 AE センサ 900M-WB (NF 回路ブロック)) を用いて AE を測定した。ディスクリミネータからの TTL トリガ信号を用いて、AE が検出された場合のみ波形の記録を行った。記録波形の時間分解能は 0.1μs, 時間幅は 1ms であった。さらにビデオマイクロスコー

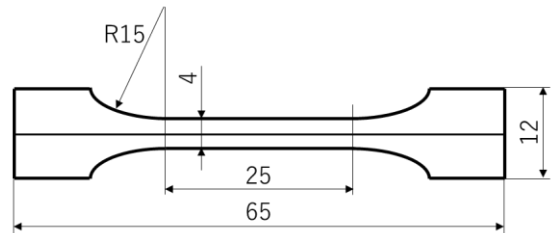


Fig.1 Dimension of the specimen for fragmentation test

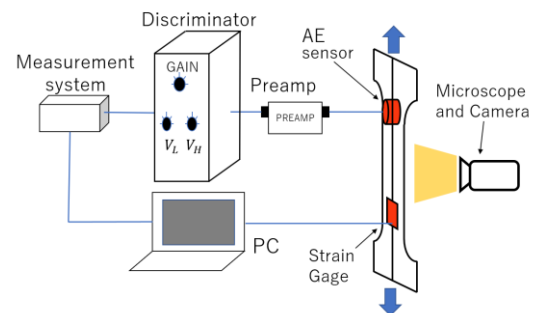
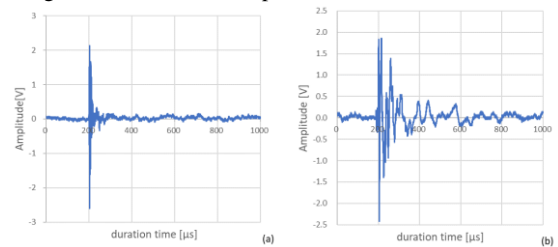
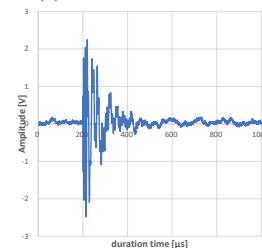


Fig.2 Dimension of the specimen for fragmentation test



(a) fiber break

(b) matrix crack



(c) fiber brake and matrix crack

Fig.3 AE signals from damage initiation in single-fiber reinforced specimen

プを用いた偏光観察により、目視による繊維破断の発生と進展のモニタリングを行い、ビデオ録画した。

3. 実験結果および考察

3.1 カーボン繊維

3.1.1 AE 波形

過去の研究から、繊維破断ではパルス状の高周波 AE が、マトリクスクラックや引き抜きでは繊維破断より低く、持続時間の長い AE が生じることが分かっている。本研究でも、そのような2種類の特徴的な AE が得られた。その結果を図3に示す。図3(a)は繊維破断より生じたと考えられる AE で、3周期程度の持続しかなく、高周波であることが図より分かる。図3(b)は図3(a)よりも周期、持続時間が長く、マトリクスクラックによるものと思われる。一方で図3(c)は高周波のパルス信号のあと、周期、持続時間が長い信号が続いており、

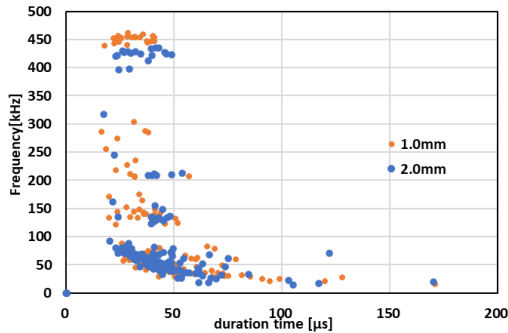


Fig.4 Relation between frequency by FFT and duration time (carbon fiber)

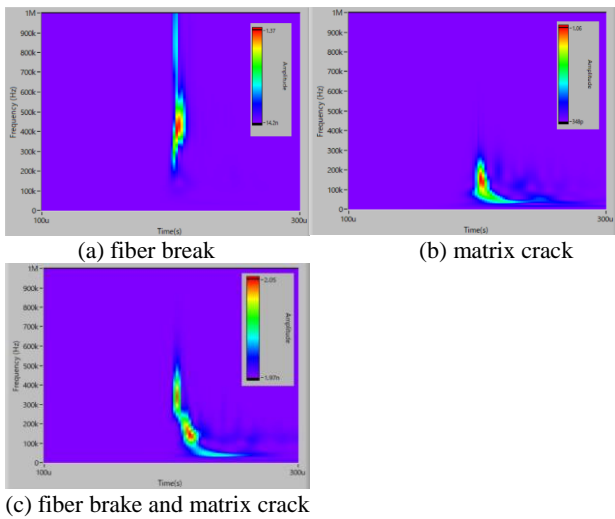


Fig.5 Wavelet diagram of AE signals from damage initiation in single-fiber reinforced specimen (carbon fiber)

これは繊維破断とマトリクスクラックがほぼ同時に生じたものと考えられる。

3.1.2 周波数特性と持続時間

最大振幅の60%と90%を最小・最大しきい値とし、その長さを持続時間とした。またその区間の信号を取り出してFFT解析を行い、周波数を計算した。測定したすべての信号の周波数と持続時間の関係を、厚み1mm, 2mmの試験片についてそれぞれ図4に示す。図より、厚みに関係なく同様の結果となることがわかった。

さらに、持続時間が40μs程度の信号が、400-450Hz、150-300Hz、100Hz以下の周波数を持つ信号のグループが存在するが、150-450Hzの信号の持続時間はほぼ同じ程度であり、100Hz以下の信号はより長い持続時間を持つものも多かった。この結果は、繊維破断とマトリクスクラックが混在した

信号が多いためであると考えられる。これより、本試験については、持続時間は損傷モードの特定には有効でないと考えられる。

3.1.3 Wavelet 変換による解析

3.2節の解析方法は従来から行われている手法であるが、繊維破断とマトリクスクラックが同時に起こるモードの場合は、マトリクスクラックのAEに繊維破断の特性が埋もれてしまうため、この手法では持続時間はあまり適さない。そこで本研究では、Wavelet変換を用いて周波数-時間データを取得し、そこから繊維破断の周波数範囲に注目することで、繊維破断の検出を試みる。

検出されたAE信号(図3(a)-(c))についてウェーブレット解析した結果を図5(a)-(c)に示す。縦軸周波数成分、横軸時間を表しており、波形の振幅が色で表示されている。図より、ウェーブレット変換データから周波数範囲で破壊モードを分離できることがわかる。

そこで、250kHz以上のAE高周波成分を取り出し、そのピーク周波数を求めた結果を、横軸を付加ひずみとして図6に示す。図より、ほとんどの周波数は380-450kHzの範囲に収まっており、また厚みは周波数にあまり影響を与えないことがわかる。またひずみを見ると0.03-0.05で多数の高周波AEが生じることがわかった。

このAEが破断によることを明確に示すために、目視観察による累積破断数と350kHz高周波AEのカウント数を縦軸に、横軸に測定時間としたグラフを図7に示す。図より、高周波AEのカウント数と目視観察による累積破断の傾向が非常によく一致していることがわかる。以上から、Wavelet変換により高周波成分を取り出すことで、繊維破断のみを分離してカウントすることが可能であることがわかった。また、高周波AEの中でも300kHz以下のAEは、過去の研究結果も考慮すると、界面剥離によるものと思われる。

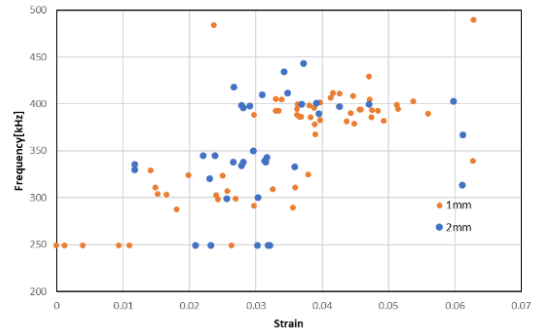


Fig.6 Relationship between frequency of high-frequency AE signal and strain (carbon fiber)

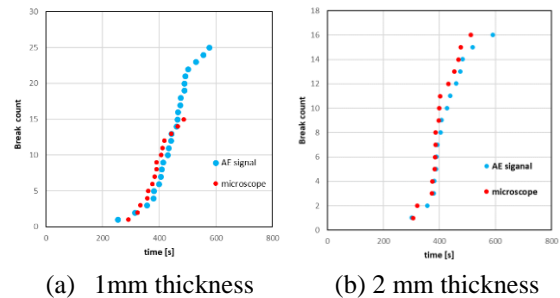


Fig.7 Relation between count measured by AE sensor and visual inspection and strain (carbon fiber)

3.2 ガラス繊維

3.2.1 FFTによるピーク周波数と最大振幅

図8に、炭素繊維とガラス繊維のピーク周波数と最大振幅の関係を示す。図より、特に高周波のガラス繊維の最大振幅分布は、炭素繊維（～5.5V）よりも小さい範囲（～3V）に収

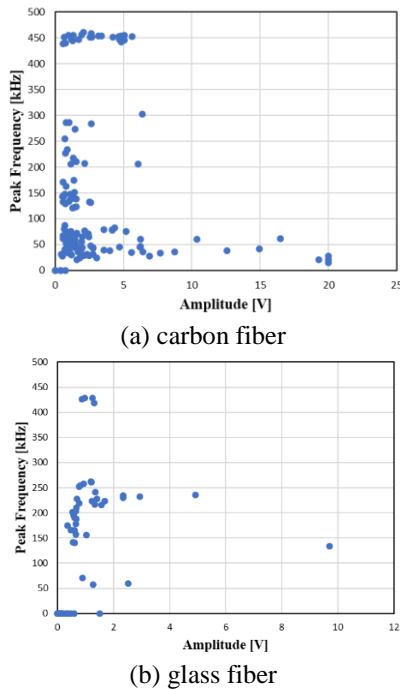


Fig.8 Relation between frequency by FFT and maximum amplitude

まることが明らかとなった。これは同じひずみでもガラス繊維の剛性が低いために、繊維破断によって解放されるひずみエネルギーが炭素繊維と比べて低くなるためだと考えられる。

3.2.2 wavelet 解析によるピーク周波数 (200kHz 以上)

図9に、ガラス繊維FRPの試験片について、wavelet 解析によって得られたピーク周波数 (200kHz 以上)と負荷ひずみの関係を示す。図より、ひずみ 0.03 より高周波 AE が現れ始め、0.07 で収束していることが分かる。目視観察結果(図5.1)からは、ひずみ 0.04 から繊維破断がはじまったので、それ依存の信号には界面剥離が含まれていると推測される。それを考慮すると、界面剥離による AE 信号は 300kHz 以下、300kHz 以上に繊維破断の信号が多く含まれるのではないかと推測される。

この結果を図6の炭素繊維FRPの結果と比較する。界面剥離によるAEの周波数範囲は、CFRPとGFRPでは同様に300kHz以下と考えられる。より大きい周波数のAEについては、CFRPでは350-400kHzに分布するが、GFRPでは310-400kHzに分布しており、分布の中心はCFRPでは380kHz付近、GFRPでは350kHz付近とやや周波数が低下しているように見える。ただし試験片ごとの差異もあるため、より詳細には周波数分布をヒストグラム解析などで定量化する必要があるだろう。

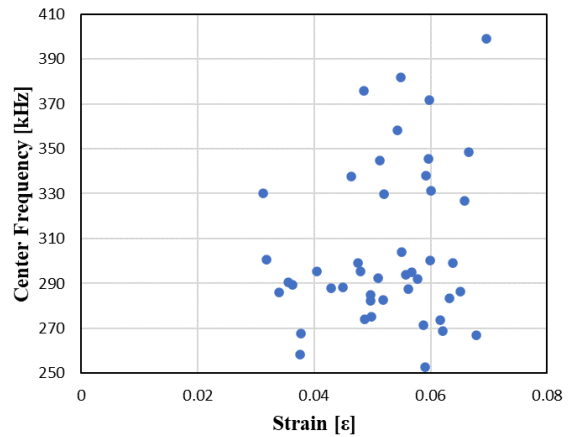


Fig.9 Relationship between frequency of high-frequency AE signal and strain (glass fiber)

4. 結言

本研究では、Wavelet 変換を用いて高周波 AE 信号を分離して AE 特性を解析する手法を提案した。その手法を単繊維強化 FRP (SFC: Single Fiber Composite) の引張試験 (フラグメンテーション) 試験に用いて、炭素繊維およびガラス繊維の破断による AE 特性を詳細に調べた。その結果以下の知見を得た。

- (1) SFC の引張試験で生じる AE の損傷モード、特に繊維破断と界面剥離の精密な特定には、従来の AE 特性パラメータはあまり有効ではない。これは繊維破断と界面剥離の AE 特性が似ているものがあるためである。
- (2) Wavelet 変換を用いた解析結果から、繊維の種類によらず、界面剥離は 300kHz 付近まで分布し、繊維破断は 300kHz ~400kHz に分布することが分かった。
- (3) 300kHz 付近の高い周波数の界面剥離 AE は、Wavelet 変換を用いた解析により繊維破断と分離が可能であることが示唆された。
- (4) ガラス繊維の AE 振幅は炭素繊維より小さいことが分かった。
- (5) ガラス繊維の繊維破断 AE 周波数は、炭素繊維よりやや低くなることが示唆された。

謝辞

日本製鉄株式会社、技術開発本部先端技術研究所新材料研究部の皆様、研究のサポートおよび材料を提供していただき感謝いたします。

文献

- (1) (社)日本非破壊検査協会, 編集委員長水谷義弘, “アコースティック・エミッション試験 II”
- (2) 仲佐 博裕, “アコースティック・エミッションの理論と実際”, p11-p60
- (3) 鈴木 恵, 中西 博, 岩本 正治, 自念 栄一, 前川 善一郎, 森 旭, 孫 峰, AE 法による CFRP の破壊機構に関する研究, 日本機械学会論文集 (A 編), 53(492) (1987), 1459-1465
- (4) 孫 峰, 鈴木 恵, 中西 博, 岩本 正治, 自念 栄一, モデル GFRP 材の破壊機構と AE 特性の関係, 材料, 37(416), 517-522 (1988)
- (5) 戸田浩, 章忠, 川畑洋昭, “最新ウェブレット実践講座 入門と応用 信号処理の基礎から最新理論まで”