# Wavelet 変換を用いた CFRP の繊維破断 AE の特性評価

# Analysis of AE characteristic by fiber breakage of CFRP using Wavelet Transform

システム工学群

先端機械・航空材料工学研究室 1230178 山本 一球

#### 1 緒言

FRPは、高強度、高剛性、軽量性に優れているが、破壊プロセスは複雑であり、信頼性向上のためFRPのリアルタイム非破壊検査法の開発が進められている.FRPの破壊形態は主に繊維破断、界面剥離、マトリクスクラックなどがあり、このような微視的な破壊形態を非破壊で検出方法の一つにAE(Acoustic Emission)法がある.AEとは微小破壊を始めとする材料内部の動的な変形、変態、転位、破断などにより弾性波が発生する現象、またはそのようにして発生する過渡的な弾性波動である.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.近年ではWavelet解析による持続時間 - 周波数解析も多く行われている.しかし、それらの解析技術は様々なFRP構造に対して応用されているが、基本的な破壊モードによるAEのみを対象として、Wavelet解析を応用した研究はそれほど多くはない.

本研究では、カーボン繊維を埋め込んだ試験片の引張試験 を行い、繊維破断による AE の持続時間特性や周波数特性を 明らかにするため、Wavelet 解析を行った.

また,従来の研究で使用していた試験片形状とは異なる試験片形状のものを使用し,観測域を狭めることでセンサ間の 距離を狭め,より正確な AE 波形を検知した.

# 2 実験方法

本研究では、図1に示すカーボンの単繊維強化 FRP(SFC, Single fiber composite)を作製し、引張試験で生じる繊維破断 AE の測定を行った.炭素繊維には、PAN 系 CF の T-700SC とピッチ系 CF の YSH-50A を、樹脂にはエポキシ樹脂を用 いた.試験片表面に2つの AE センサを接着し、AE 信号の検 出時のみ波形の記録を行った.



Fig. 1 Dimension of SFC specimen

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. 試験は変位制御0.2mm/minで、油圧サーボ式疲労試験 機を用い、試験片表面にAEセンサとひずみゲージを接着した.

当研究室で構成した AE 計測システムを用いて, AE 信号の検出時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.



Fig.2 Dimension of the specimen for fragmentation test

#### 3 AE 解析方法

本研究では、Wavelet 変換を用いて、AE 波形から時間周波 数グラフを求めた. Mother Wavelet 関数として Morlet(Gabor) Wavelet を用いた.

$$\psi_0(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{\sigma^2 \pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2} + j\omega_0 t\right)$$
(1)

ここでは $\omega_0$ 中心周波数,  $\sigma$ はパルス幅であり, スケール化された Mother Wavelet は以下の式で表される.

$$\psi_n(\tau) = \frac{1}{\sqrt{n}} \psi\left(\frac{t-\tau}{n}\right) \tag{2}$$

整数nによってスケールされた中心周波数は $\omega = \omega_0/n$ である.

得られた代表的な時間周波数グラフを図3に示す.図より, 繊維破断 AE は,300KHz と 800kHz 付近に中心周波数成分を 含むことが分かる.本研究では,これらの周波数帯に着目し て,AE 特性の解析を行った.具体的には,中心周波数とそ れぞれの周波数成分の持続時間に着目する.

まず,時間周波数グラフを最大値で正規化する.次に,図 に示すように時間周波数グラフを550kHzの閾値で分割し, 150-550kHz(領域 A)および550-1200kHz(領域 B)の最大 ピークが生じる時間を求めた.その時間での周波数分布を取 り出した.得られた周波数分布を図4に示す.周波数分布の 最大ピークに二次曲線を当てはめて中心周波数を求めた.



Fig. 3 Time-frequency graph of AE by wavelet transform



Fig. 4 Frequency distribution of AE around peaks

さらに図5に示すように、最大ピークの周波数における時間 データを取り出し、正規化された値が0.1を超えた部分を持 続時間として計算した.



# 4 実験結果

#### 4.1 AE 波の周波数分布特性

図 6,7に,PAN 系 T-700SC とピッチ系 YSH-50A の繊維 破断時 AE の,試験片の平均ひずみに対する周波数分布を示 す.図より,すべての波形が低周波の領域 A,高周波の領域 B の 2 つの周波数を含んでいるわけではないことが分かる. 先行研究より,領域 A の周波数は繊維破断,領域 B の周波 数は界面剥離や繊維の引き抜きによって生じることが知ら れている.よって,繊維破断と共に界面剥離が生じる場合だ けでなく,繊維破断のみまたは界面剥離のみが生じる場合が 存在することが分かる.

中心周波数は、領域 A では 200-400kHz, 領域 B では 700-900kHz に分布していることが分かった. Pan 系とピッチ系で は、周波数の分布に大きな差は見られなかった. これは、繊 維の弾性率が繊維破断 AE に周波数に与える影響が小さいこ とを示している.

Ch1 と Ch2 の 2 つのセンサによる測定結果には違いがみ られることが分かった.これは周波数の値の差だけでなく, 片側のセンサのみで高周波成分が測定される場合が多く存 在した.この理由は, AE の発生位置が片側のセンサに近い 場合,高周波成分が減衰してもう一方のセンサでは検出でき ないことを意味している.

### 4.2 AE 波の持続時間特性

図 8,9 に PAN 系 T-700SC とピッチ系 YSH-50A の繊維破 断時 AE の持続時間と周波数の関係を示す.図より,高周波 成分の持続時間は,低周波成分より短い傾向を示すことが分 かった.高周波成分については,T-700SC の持続時間6~12µs であったが,YSH-50A は 2~12µsであり,YSH-50A の方が, 持続時間が短い傾向が見られた.低周波成分については,持 続時間の分布は 2~30µs と広く,高周波成分よりも持続時間 が長い場合があることが分かった.



Fig. 6 Frequency distribution of fiber-break AE of T-700SC against average strain



Fig. 7 Frequency distribution of fiber-break AE of YSH-50A against average strain



#### 5 結言

本研究では、Wavelet 変換を用いて CFRP の繊維破断 AE の 特性解析を行う手法を提案した.その結果、繊維破断 AE は 2 つの周波数成分を持つことが多く、高周波成分の持続時間 は低周波成分より短いものが多いことが分かった.また、繊 維の特性は AE 特性にあまり影響を与えないことが示された.

#### 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 研究部の狩野様,禰宜様をはじめとする皆様には,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.

# 参考文献

- (1) Ono, K. et.al, , J. Acoust. Emiss, vol.30 (2012), pp.180-220.
- (2) 鈴木 恵ほか,日本機械学会論文集(A 編), Vol.53, No.492 (1987), pp.1459-1465.
- (3) 孫 峰ほか, 材料, Vol.37, No.416 (1988), pp.517-522.
- (4) 宅間 正則ほか, 精密工学会誌, Vol.68,No.10 (2002), pp.1309-1315.
- (5) Li, Li, et. al., Vol.116 (2014), pp.286–299
- (6) "Detail of WA Analytic Wavelet Transform VI", LabView 2017 Help, National Instruments. Co. Ltd (2017).