

機械学習によるCFRP破壊過程におけるAE波形評価方法の開発

白石知久*¹ 森田寛之*¹ 小熊広之*²

Development of AE Waveform Evaluation Method in CFRP Fracture Process by Machine Learning

SHIRAISHI Tomohisa*¹, MORITA Hiroyuki*¹, OGUMA Hiroyuki*²

抄録

CFRP破壊モードの分類のため、初期に現れる樹脂割れ・界面はく離の一つであるトランスバースクラックに着目し、時間周波数解析をおこなった。時間周波数解析の特徴的な解析結果に着目し、解析方法を改良し、k-means法によるクラスタリングを実施した。

さらに試験片断面のその場観察結果からトランスバースクラック数を推定し、クラスタリング結果と比較した。

キーワード：AE法，トランスバースクラック，時間周波数解析，Wavelet変換

1 はじめに

CFRP (Carbon Fiber Reinforced-Plastic : 炭素繊維強化複合材料) は、軽量、高強度、錆びない等の優れた特性を有していることから、近年では、航空機や自動車を代表とする輸送分野のみならず、浄化槽などの住宅設備機器など幅広い分野において利用されつつある。しかし、均質な金属材料と比較してCFRPは不均一であるため、強度のばらつきが生じやすく、信頼性、安全性が乏しいのが現状である。またCFRPは強い衝撃を受けた場合、繊維が樹脂から剥離する為、金属系の素材と比較して耐衝撃性に劣る。さらに成型不良等により内部に欠陥が生じた場合も強度が著しく低下してしまう。CFRPの適用拡大が期待される航空機体や自動車両には、外部からの衝撃等に加え、紫外線や酸性雨、塩害、塩素等の影響が複合的に加わるため、樹脂の劣化が促進されることによる強度の

低下が懸念されている。しかも目視等による外観検査では、内部欠陥の発見や劣化の進行状況の特定は困難という問題を抱えている。このようなことからCFRPの安全性、信頼性向上のため、破壊に関する研究が重要になってきている。

一般にCFRP積層板の損傷の種類として、樹脂割れ、界面はく離、層間はく離、繊維破断が知られている。特に、初期に現れる樹脂割れ・界面はく離の一つであるトランスバースクラックを把握することは、安全な設計をするうえで非常に重要な要因である。

複合材料の破壊機構の解明に関しては、AE (Acoustic Emission) 法が有効とされている。トランスバースクラックをはじめとする損傷が生じた際に発生するAE波は、破壊モードによって異なることが知られている¹⁾。これまでにAEの周波数特性を用いた破壊モード分類等が行われてきているが、研究者によって異なる見解が示され信頼性に欠けているため、統一的な分類方法が求められている²⁾。そこで損傷モード分類を行うため

*¹ 電気・電子技術・戦略プロジェクト担当

*² 材料技術担当

にAE信号の時間一周波数解析に着目した。

CFRP破壊過程におけるAE波形の評価方法の開発を目指す本研究において、本年度は、比較的特徴があるトランスバースクラックに焦点を当て、トランスバースクラックの形成過程を分類するために最適な時間一周波数解析法の選定を行うことを目指した。

2 実験方法

2.1 試験片

本研究では、東レのCFRPプリプレグシート (T700S/#2592) を用いた。積層構成はクロスプライとし、[02/904]Sを用いた。CFRP積層板は、130 °C、90 min、0.2 MPaの条件でホットプレスし、全長140 mm、幅15 mmで切り出したのち、両側面をエメリー紙で研磨後、バフ研磨を施した。最後に試験片の両端面に35 × 20 mmのGFRP (Glass Fiber Reinforced-Plastic: ガラス繊維強化複合材料) タブをエポキシ系接着剤により取り付けした。

2.2 試験方法

試験は引張試験を行った。試験条件は室温大気中にてクロスヘッド速度 1mm/min で行った。試験片中央に AE センサを取り付け、その上下20mm離れたところにAEセンサを取り付けた。AEセンサはNF回路ブロック社製 AE-900M、AEの計測システムは、PicoScope4424 および、Labview®で作成した AE 計測プログラムを用いた。AE の計測条件として、プリアンプゲインを60 dB、しきい値を600mV、測定周波数を20 kHz ~ 1200 kHz とした。

2.3 時間一周波数解析方法

計測された AE 波形について、Wavelet 変換および Hilbert-Huang 変換を用いて時間一周波数解析を行った。これらの時間一周波数解析方法は、時間的特性を損なうことなく変換できるため、時系列的変化を伴う解析に有用である。

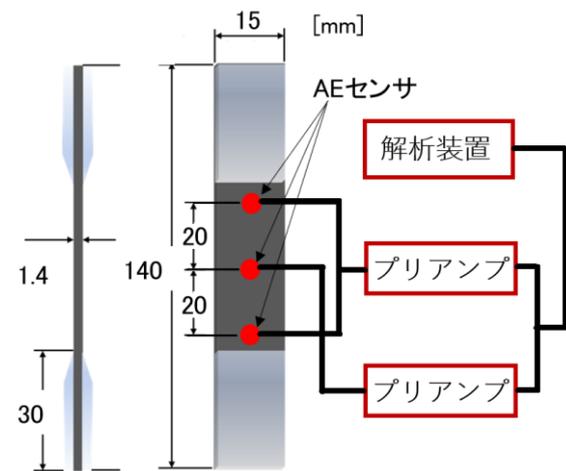


図1 試験片概要図

3 結果及び考察

3.1 引張試験結果

図2に引張試験結果を示す。横軸には試験時間を、左の縦軸に応力、右の縦軸にAE振幅および累積AEエネルギーを示す。また、試験中のその場観察により観測されたトランスバースクラックを図3に示す。トランスバースクラック発生数については、観察領域内で観察されたトランスバースクラックの数を計測し、試験片全体で発生しているトランスバースクラックの数を推定した。

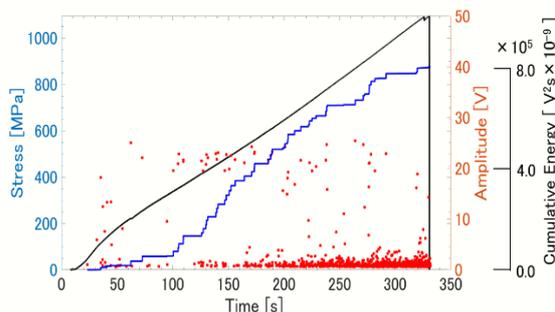


図2 時間—応力・AE線図

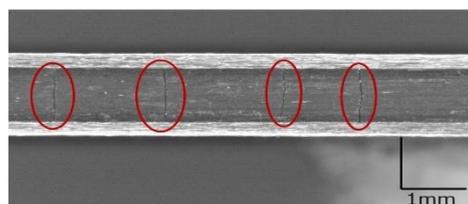
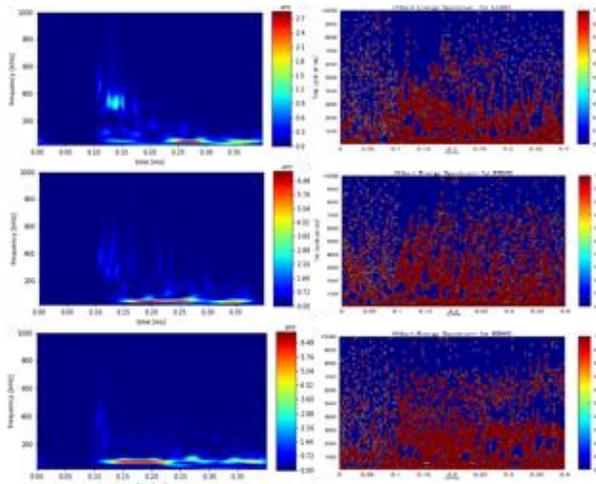


図3 トランスバースクラック観察結果



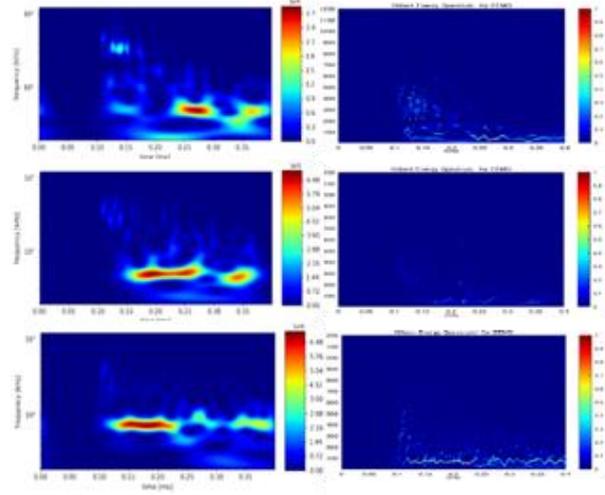
(a) (b)

図4 トランスバースクラックに対応したAE波形の時間—周波数解析結果

(a) Wavelet変換, (b) Hilbert-Huang変換

図2より、比較的大きい振幅のAE信号と比較的小さい振幅のAE信号が検出された。以前の研究成果より、低周波数かつ振幅の大きいAE信号はトランスバースクラックに対応していることが明らかにされている³⁾。

ここで、試験中に図3に示すトランスバースクラックが発生したときに計測されたAE波形をWavelet変換およびHilbert-Huang変換を用いて変換した図をそれぞれ3つずつ図4に示す。これらの図より、両手法とも低周波数帯に強い信号が検出された。しかし、図4(a)に示すWavelet変換による解析結果では全体的にWavelet強度が低く、局所的に高い値を示しており、画像分類(クラスタリング)には適していないと考え、周波数軸を対数表示して解析を行った。一方、図4(b)に示すHilbert-Huang変換による解析結果では、全体的に信号強度が高く、こちらも画像分類(クラスタリング)には適していないと考え、信号強度の最大値を1として正規化を行い、解析を行った。図4を解析しなおしたものを図5に示す。これにより、図5(a)のWavelet変換の対数表示については、信号強度の高い低周波領域が明瞭に表示できた。さらに図5(b)のHilbert-Huang変換の正規化



(a) (b)

図5 トランスバースクラックに対応したAE波形の時間—周波数解析結果

(a) Wavelet変換(対数表示), (b) Hilbert-Huang変換(正規化)

表1 k-means法によるクラスタリング結果

クラスタリングに用いた時間—周波数解析法	クラス タ1	クラス タ2
Wavelet変換	50枚	310枚
Hilbert-Huang変換	58枚	208枚
Wavelet変換(対数表示)	51枚	863枚
Hilbert-Huang変換(正規化)	47枚	867枚

表示においては、局所的な強度の傾向がより明瞭に表示できるようになった。

3.2 クラスタリング結果

図2に示す引張試験中に計測された波形は、全部で914個あった。それらに対してWavelet変換(周波数線形表示および対数表示)、Hilbert-Huang変換(正規化の有無)を行って得られた解析結果を画像としてk-means法を適用した。

k-means法を適用するにあたり、図4に示すような周波数軸の線形表示したWavelet変換結果およびHilbert-Huang変換結果はクラスタ数を2としたクラスタリングを2度行った。これは1度目のクラスタリングで分類されたWavelet変換結果

360 枚、Hilbert-Huang 変換結果 266 枚に対して 2 度目のクラスタリングを実行したものである。図 5 に示した周波数軸を対数表示した Wavelet 変換および信号強度で正規化した Hilbert-Huang 変換もクラスタ数を 2 としてクラスタリングを 1 度のみ行った。これらの結果を表 1 に示す。

クラスタリング結果より、すべての方式において 45~60 個のクラスタとそれ以外のクラスタに分けることができた。クラスタリングされた結果、表 1 のクラスタ 1 に含まれる解析結果は、図 4・5 に示すようなトランスバースクラックを示す解析結果と同じであった。ここで、試験片側面に生じたトランスバースクラック数は約 40 本との推定であり、すべての方法において良好な結果が得られたと思われる。しかし、図 4 の解析結果を用いた場合は、クラスタリングを 2 度行わなければならない、今回提案した図 5 の解析結果の方がよりクラスタリングに適していることが明らかとなった。

4 まとめ

トランスバースクラックに対応した AE 波形の時間一周波数解析結果について、k-means 法によるクラス分類を実施した。また試験片側面の観察結果からトランスバースクラック発生数を推定し、クラス分類結果と比較した。その結果、本研究で提案した時間一周波数解析に加え、対数表示や正規化などの処理を施すことで、クラスタリングに適した結果が得られることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 駒井謙治朗, 箕島弘二, 渋谷豊茂, 日本機械学会論文集 (A 編), 56 巻 528 号, p72-79, 1990
- 2) R. Gutkin, C.J. Green, S. Vangrattanachai, S.T. Pinho, P. Robinson, P.T. Curtis Mechanical Systems and Signal Processing 25 (2011) 1393–1407
- 3) 畠山貴史, 坂井建宣, 蔭山健介, 日本機械学