

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、樹脂割れ・界面はく離・繊維破断の3つの損傷モードに着目し時間周波数解析を行った。また位置評定などによりAcoustic Emission (AE) 信号発生箇所を特定したうえでCFRP内部において実際に生じている損傷を観察し、AE信号の時間周波数解析結果との相関について考察した。その結果、樹脂割れ、繊維破断、界面剥離の各損傷モードの信号を特定できた。さらにニューラルネットワークを用いた判別モデルを作成し、損傷モードの判別を行った。

キーワード：AE法，時間周波数解析，クラスタリング，ニューラルネットワーク

1 はじめに

炭素繊維強化複合材料：Carbon Fiber Reinforced-Plastic (以下CFRP) 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、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い。このため、構造材料としての信頼性、安全性に課題がある。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する。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及び破壊が懸念されてい

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把握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視されている。

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、Acoustic Emission (AE) 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。しかしながら、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、本研究では

*¹ 電気・電子技術・戦略プロジェクト担当*² 材料技術担当

損傷モード分類を行うために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 試験方法

2.1 クロスプライ積層板引張試験

2.1.1 試験片作製

CFRPプリプレグシート（東レ製、T700S/#2592）を用い積層して試験片を作成した。積層構成はクロスプライで、 $[0_2/90_4]_S$ とした。CFRP積層板は、130℃、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）タブをエポキシ系接着剤により取り付けた（図1）。

2.1.2 位置評定試験

AE信号発生位置を把握し、AE信号発生時に試験片内部で発生している代表的現象を把握するため、AE信号発生位置の位置評定を行った、まず位置評定を行うため、PLB法によるAE信号を発生させ、CFRP材料内部を伝播するAE信号の縦波の伝播速度を計測した。伝播速度からAE信号発生箇所の位置評定を行った。

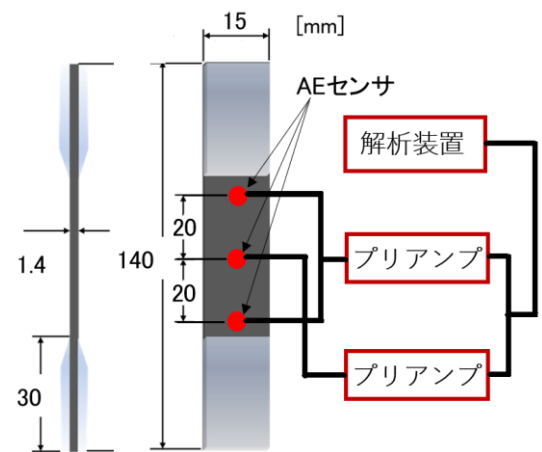


図1 引張試験 試験片概要図

2.1.3 試験方法

引張試験の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（図 1）。

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800mV、AE計測プログラムによる測定周波数を20 kHz～1200 kHzとした。

2.1.4 内部損傷状況の把握

引張試験の試験中に発生したAE信号について位置評定を行い、試験を中断して試験片を取り出し、AE信号発生箇所について内部損傷状況の観察を行った。内部損傷観察には電子顕微鏡（日立ハイテクノロジー製 SU3500）を用いた。

2.1.5 時間周波数解析結果と損傷状況の相関

前節で実施したAE信号発生箇所における内部損傷状況の観察結果と、その発生したAE信号の時間周波数解析結果について相関を検討した。時間周波数解析手法はWavelet変換法を用いた。

2.2 炭素繊維単体試験

引張試験時の内部損傷状況と AE 信号の時間周波数解析結果から、炭素繊維の繊維破断の AE 信号を特定するため、炭素繊維に対し、引張試験を実施した。

2.2.1 炭素繊維単体試験方法

炭素繊維12000本を帯状に構成したカーボンファイバー長繊維（T700SC 東レ製）を使用した。

引張試験の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 45mm 離れた位置に AE センサを取り付けた（図 2）。

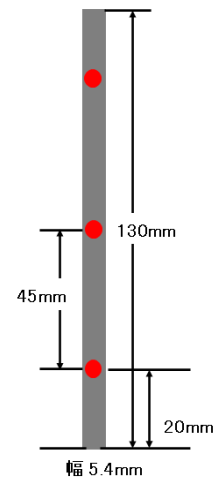


図2 炭素繊維試験片図

AE センサおよび AE の計測システムの計測条件は、CFRP クロスプライ積層板引張試験時と同様とした。

2.2.2 炭素繊維単体試験 時間周波数解析

炭素繊維の繊維破断時に発生したと考えられる AE 信号について検討した。時間周波数解析手法は Wavelet 変換法を用いた。

2.3 DCB 試験

界面剥離・繊維破断・樹脂割れの信号を把握するため、DCB (Double Cantilever Beam) 試験を実施した。

2.3.1 試験片作製

東レ製 CFRP プリプレグシート (T700S/#2592) を用い積層して試験片を作成した。積層構成は、図 3 に示すように $[0^\circ]_{24}$ とした。CFRP プリプレグシートを 12 層重ねたところで、厚さ $25\mu\text{m}$ のポリイミドフィルムを図 3 のように挿入し、さらに 12 層重ね合わせた。重ね合わせた 24 層の CFRP プリプレグシートに対し、 130°C 、90 min、0.2 MPa の条件でホットプレスし、全長 130 mm、幅 20 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。

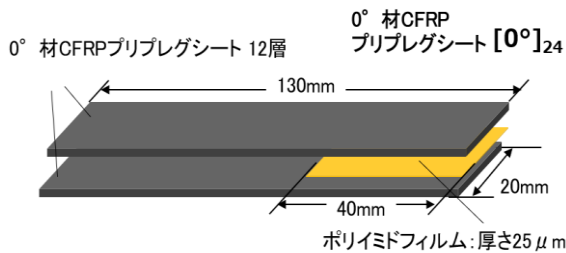


図 3 DCB 試験 試験片概要図

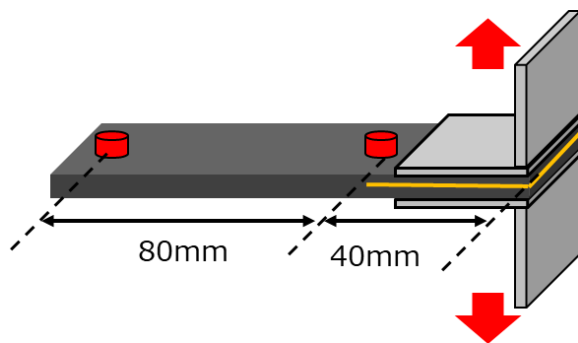


図 4 DCB 試験 試験状況

2.3.2 試験方法

本試験の準備として、図 4 に示すように、蝶番型治具 2 個をポリイミドフィルム挿入部分に対

し、エポキシ系接着剤で接着させた。次に、この蝶番治具を万能試験機つかみ具に固定し、鉛直方向にクロスヘッド速度 $1\text{mm}/\text{min}$ の引張荷重を与えた。また、図 4 に示す位置に AE センサを取り付け、AE 信号を計測した。AE センサおよび AE の計測システムの計測条件は、CFRP クロスプライ積層板引張試験時と同様とした。

2.3.3 時間周波数解析とクラスタリング

DCB 試験で測定した AE 信号について時間周波数解析および解析結果のクラスタリングを行った。時間周波数解析においてはこれまでの試験と同様、Wavelet 変換法を用いた。また、この時間周波数解析結果に対し、機械学習によるクラスタリング手法 k-means++ 法を用いて、クラスタリングをおこない、時間周波数解析で画像化した AE 信号を分類した。クラス数についてはシルエット分析法を用いて 3 クラス分類が適切であると決定し、クラスタリングを実施した。

2.3.4 位置評定

DCB 試験実施に発生した AE 信号に対し、位置評定も行い、試験経過とともに試験片のどの位置で AE 信号が多く発生しているかについて調べた。DCB 試験の場合においては試験終了まで位置評定を行った。

発生した AE 信号の時間周波数解析結果およびクラスタリング結果と位置評定結果の相関を調べた。

2.3.5 クラスタリング結果と損傷状況の相関

実際の試験片破面について電子顕微鏡による観察をおこない、実際の損傷状況を把握した。

また、前節で実施した、AE 信号の時間周波数解析結果・クラスタリング結果や、位置評定結果と、実際の破面観察から明らかになった損傷状況との相関について検討した。

2.4 判別モデル作成

これまでのクロスプライ積層板引張試験・炭素繊維単体試験・DCB 試験で得られた測定結果について整理し、解析結果の表示方法やクラスタリング手法などの改良を行った。そのうえで、時間周波数解析結果の画像データを Alexnet によるニ

ニューラルネットワークに学習させることにより、AE信号の時間周波数解析結果を各損傷モードに分類する判別モデルを作成した。判別結果について、その適切性を検証した。

3 結果及び考察

3.1 クロスプライ積層板引張試験結果

図5にクロスプライ積層板の引張試験結果を示す。本試験はAE信号発生時に試験を中断し、位置評定・内部損傷観察を行った。横軸には試験時間を、左の縦軸に応力、右の縦軸にAE振幅を示す。

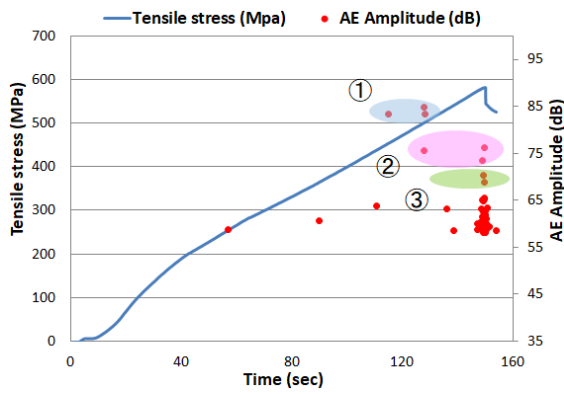


図5 クロスプライ時間—応力曲線・AE振幅

またAE信号の時間周波数解析を実施した結果を図6に示す。さらに図5の①～③で示された信号について時間周波数解析した結果が図6の①～③に対応している。

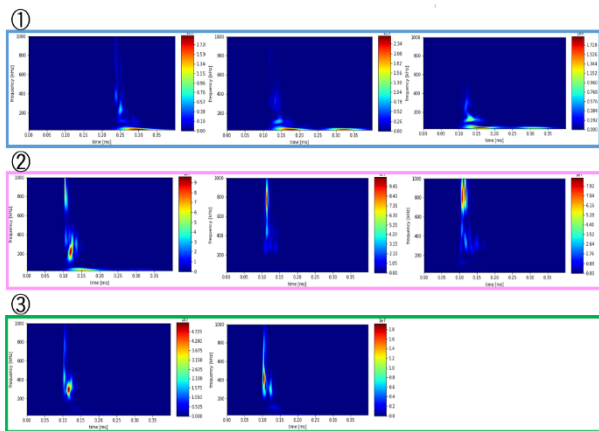


図6 AE信号の時間周波数解析結果

図6の時間周波数解析結果においては、①に示されるAE信号は周波数が100kHz以下の比較的low周波でかつ波形持続時間の長い信号が観察された。このような特徴をもつ信号は樹脂割れに起因するものと推察される(昨年度研究報告)。一

方、②に示されるAE信号は周波数が600kHz～1000kHz程度の比較的高周波でかつ、波形持続時間が短いものであった。この信号の原因を特定するため、この信号の発生した箇所について位置評定を行い、内部損傷状況の観察結果を図7に示す。

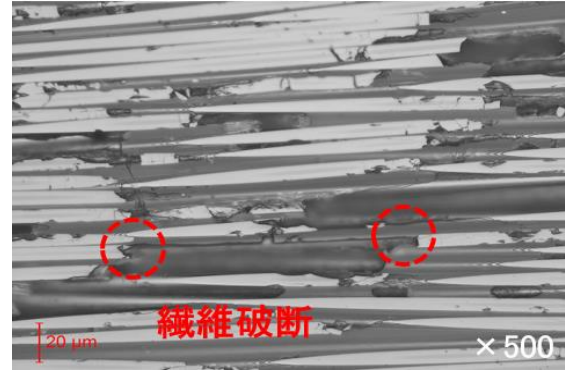


図7 内部損傷状況観察結果

内部の損傷状況観察結果では、繊維破断が多く観察された。このようなことから周波数600kHz～1000kHzの高周波数帯の波形持続時間の短いAE信号は繊維破断に起因するものではないかと推定される。

3.1 炭素繊維単体試験結果

図8に炭素繊維の単体引張試験結果、図9には、この試験で計測されたAE信号の時間周波数解析結果を示す。ここでも時間周波数解析手法はWavelet変換法を用いた。

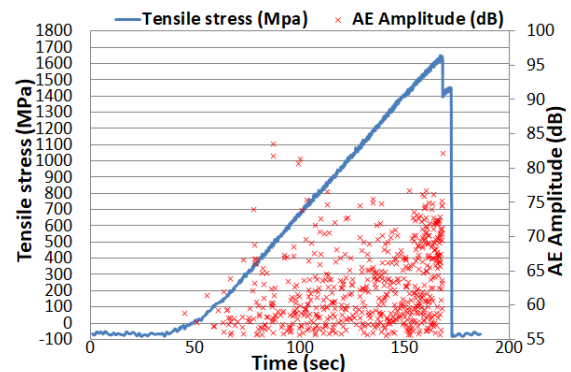


図8 炭素繊維 時間—応力曲線・AE振幅

この結果、炭素繊維単体の引張試験において周波数600kHz～1000kHzの高周波数帯の波形持続時間の短いAE信号が多く計測されたことから、これらの信号は炭素繊維に起因することが示唆された。

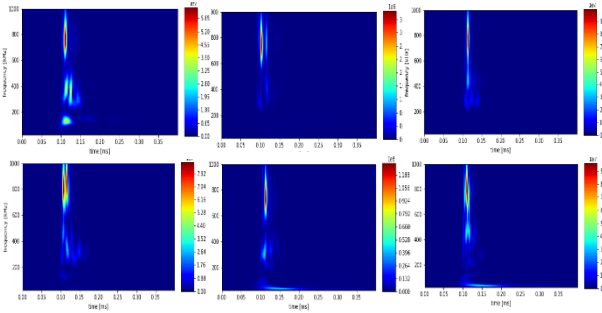


図9 炭素繊維 時間周波数解析結果

3.3 DCB 試験結果

図10にDCB試験の試験結果を示す。またこの試験実施中に試験片側面において挿入したポリイミドフィルムからき裂が進行していく様子が観察された。この試験片側面観察結果から、試験片が試験開始後412秒でき裂が発生し、その後き裂の進展していく様子が確認された。また、試験開始後812秒経過後には、上下の分裂した試験片側面に層間剥離が見られ、上下に分かれた試験片の間に剥離した繊維を観察された。

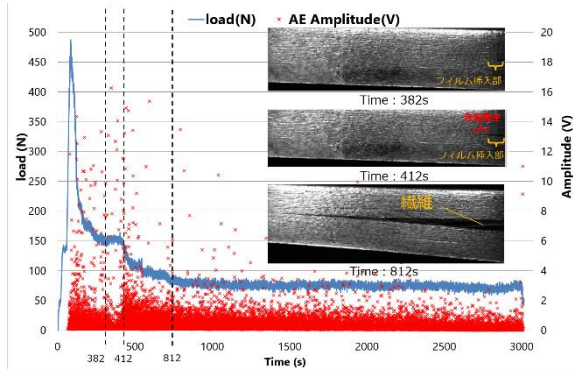


図10 DCB試験結果・断面観察結果

挿入したポリイミドフィルムと試験片間から発生したAE信号を除去するため、き裂進展した後、つまり試験開始後412秒以降のAE信号について考察するものとした。

計測されたAE信号についてWavelet変換法による時間周波数解析をおこない、その結果をk-means++法によるクラスタリングを行った。

その結果を図11に示す。

この結果、AE信号計測結果の時間周波数解析結果画像14966枚のうち、クラス1に分類されたものが3197枚、クラス2に分類されたものが5870枚、クラス3に分類されたものが5899枚となった。

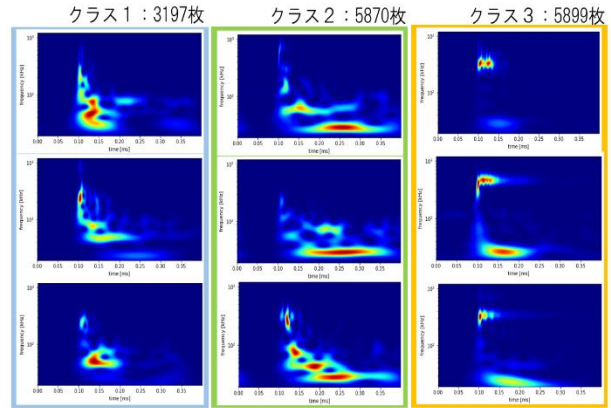


図11 DCB試験 時間周波数解析およびk-means++法によるクラスタリング結果

また、これらのクラスで分類されたAE信号の発生箇所について時系列で位置評定した結果を図12に示す。この図は、クラス1に分類されたAE信号が、試験開始直後において多く発生し、試験後半においてはほとんど発生しなかったことを示唆している。一方、クラス2およびクラス3に分類されたAE信号は、試験中継続して計測された。

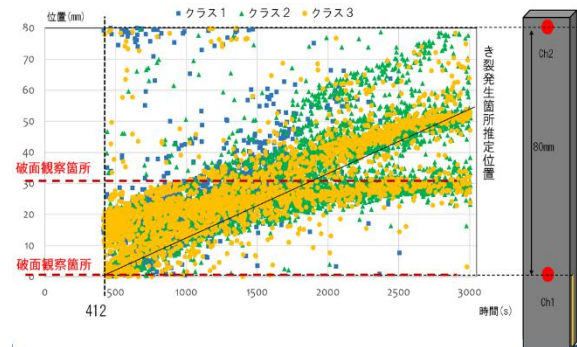


図12 DCB試験 時系列AE信号発生状況

さらに、DCB試験片の破面観察をおこない、DCB試験片のき裂表面において、どのような損傷が発生していたかについて観察した。

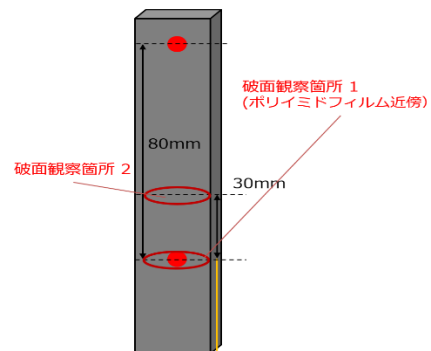
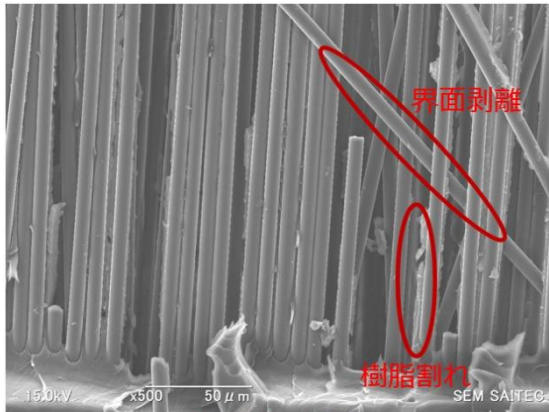
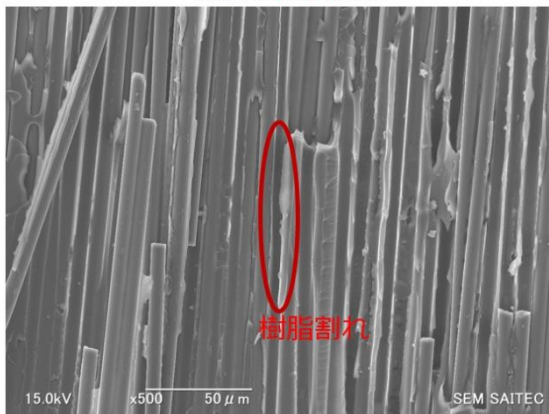


図13 破面観察箇所1および2



破面観察箇所 1



破面観察箇所 2

図 14 破面観察結果

図 14 に破面観察結果を示す。ポリイミドフィルム周辺では界面剥離と樹脂割れが多く観察されていたが、き裂進展が進むにつれて破面内に樹脂割れが多く観察された。一方、DCB 試験片破面を目視で観察したところ様に樹脂が試験片から外れ切断されている様子が観察された。この結果は樹脂割れと繊維破断は試験終了まで多く発生したことを示唆している。そこで樹脂割れ、繊維破断がクラス 2 またはクラス 3 と推定されるが、これまでの炭素繊維単体試験等の結果から高周波域に強信号をもつクラス 3 が繊維破断であると推定される。この結果、クラス 1 でクラスタリングされた損傷は界面剥離、クラス 2 でクラスタリングされた損傷は樹脂割れ、クラス 3 でクラスタリングされた損傷は繊維破断と推定することができた。

3.4 判別モデル作成

クロスプライ積層板の引張試験による AE 信号計測結果について、時間周波数解析を実施し、解析結果の画像を得た。この画像に対し、これまで

明らかにしてきた界面剥離、繊維破断、樹脂割れの 3 つの各損傷モードに加え、複合的な損傷の発生を考慮に入れた計 4 クラスによるクラスタリングを実施した。図 15 にクラスタリングを実施した様子を示す。クラス 1 は繊維破断、クラス 3 は樹脂割れ、クラス 4 は界面剥離と推定できる。

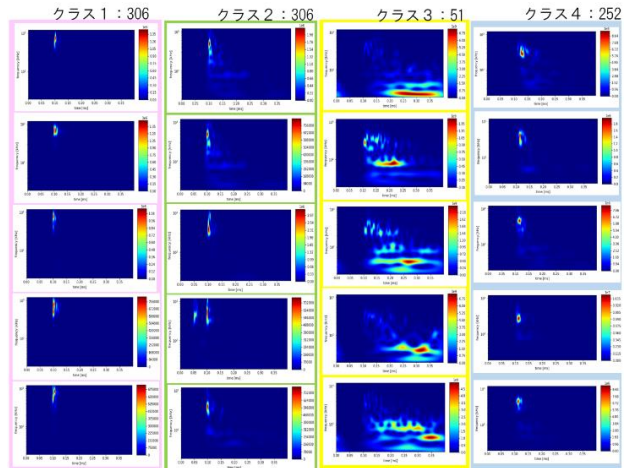


図 15 クロスプライ積層板引張試験

4 クラス クラスタリング結果

そしてこのクラスタリング結果をニューラルネットワークに学習させ、判別モデルを作成した。ニューラルネットワークには既存の AlexNet を使用した。作成した判別モデルに対し、まったく別のクロスプライ積層板による引張試験結果について、正しく分類するか否かについて検証を行った。図 16 に判別モデルによる判別結果を示す。この結果、この判別モデルで正しく損傷モードを判別できた正答率は 96.2% となり。損傷の分類を正しく実施することが可能となった。

	img_0	img_1	img_2	img_3
img_0	54			1
img_1		51		3
img_2		1	9	
img_3	2			62
	img_0	img_1	img_2	img_3

予測されたクラス

図 16 クロスプライ積層板引張試験

判別モデルによる判別結果

4 まとめ

CFRP 破壊モードの分類のため、樹脂割れ・界面はく離・繊維破断の3つの損傷モードに着目し Wavelet 変換法による時間周波数解析を行った。また位置評定などにより AE 信号発生箇所を計算し、推定したしたうえで CFRP 内部において実際に生じている損傷を観察し。AE 信号の時間周波数解析結果との相関について考察した。その結果、樹脂割れ、繊維破断、界面剥離の各損傷モードの信号を推定することが可能となった。さらにニューラルネットワークを用いた判別モデルを作成し、損傷モードの判別を行った。正答率9割以上で損傷モードを分類することが可能となった。

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、日本機械学会関東支部総会・講演会講演論文集 23rd OS0801-0123 2017