

「AE 計測技術・実用編—その3」 データ解析手法と留意点

中村 英之^{*1}

Nakamura Hideyuki

AE 計測におけるデータには、波形特徴を数値データとして抽出した AE パラメータと波形データがある。これについては、IIC REVIEW No.56「AE 計測技術の基礎—その1」で述べた。

本稿では、CFRP 試験片の引張試験データを一例として、同一データに対する周波数解析による評価と AE パラメータ解析による評価などを比較し、データ解析における着眼点および周波数帯域やセンサでデータを分別して観察することの意味を解説する。

キーワード：Acoustic Emission (AE)、AE 計測、周波数解析、AE パラメータ解析、CFRP

1. はじめに

AE 計測における解析は、波形の特徴を数値データとして抽出した AE パラメータ解析と、波形の形状や周波数分布に基づく波形解析がある。AE パラメータは、波形データに比べデータ量が二桁小さいため、波形の取り込みが間に合わないほど高速で生じる破壊でも AE を個別に分別して計測することが可能であり、リアルタイムでの結果表示やワイヤレスでのデータ転送にも有効である。一方、波形データによる解析では、波形の形状そのもののほか FFT 解析を施すことで周波数分布や重心周波数、ピーク周波数などの AE 源の特徴につながる詳細情報を得ることが可能である。しかし、データ量が重く取り扱いに時間を要するほか、計算に時間を要し、リアルタイムでの結果表示にタイムラグが生じる場合がある。

AE 解析では、それぞれのデータの特徴を理解

したうえで、一つの指標だけに着目するのではなく多方面からデータを観察し、試験の目的とする有意信号の抽出や予兆の検知などにつながる信号の変化を見いだすことが重要である。

2. 重心周波数とピーク周波数の比較

重心周波数とピーク周波数については、前号 (No.62) で解説した。重心周波数は、周波数スペクトル分布図 (FFT 解析結果) の全面積を等分する (それを境に低周波側と高周波側の面積が等しくなる) 周波数であり、AE 波に含まれる周波数分布の傾向を示す数値である。一方のピーク周波数は、周波数スペクトルにおいて最大振幅を示し、共振に影響する AE 波の「音色」とも言える波形を代表する数値である。

一例として CFRP 試験片 (図 1) に対する引張試験の AE データを、重心周波数とピーク周波数で表したものを図 2 に示す。なお試験片は、材料型

*1：研究開発センター 博士 (工学) 日本非破壊検査協会理事、日本非破壊検査工業会理事

式 P3252S-20、0/45/-45/90 度 16ply の疑似等方材である。また AE 計測には、Vallen 社製計測システム AMSY-5 と富士セラミックス社製 AE センサ AE144A を用いた。試験は、静的荷重による試験片が破断に至るまでの引張試験である。また、**図 2** に示すデータは、生データに対し後処理で 20 ~ 140kHz のバンドパスフィルタ処理を施したものであり、Ch1 と Ch2 の二つのセンサで取得したデータを合わせ表示している。

図 2 は、(a) (b) とも検出された AE 波形の重心周波数またはピーク周波数をプロットで示している。さらにプロットが集中する帯域を段階的に表示するために、クラスター処理（あらかじめ設定した枠内に入るプロット数で集中度合いを示す処理）を施し、2 秒 × 2kHz の枠内のプロット数に応じ、5 個以上水色、15 個以上黄色、25 個以上赤色の枠で囲い表示している。

図 2 (a) では、引張荷重の増加とともに赤色で囲む集中度合いの高い帯域が上昇し、150 秒近傍で最も高くなるが、180 秒近傍を過ぎたあたりから低下が始まり 200 秒を過ぎると 25 個以上の集中を示す赤枠が無くなり、220 秒を超えたところで

破断に至り、荷重の上昇とともに上昇する重心周波数が破断前に低下するというこれまでの報告と同様の結果である⁽¹⁾。

一方、**図 2 (b)** では、60 ~ 70kHz、95kHz 近傍、105kHz 近傍、115kHz 近傍、130kHz 近傍のそれぞれの帯域に分かれてプロットが集中するグループがあることが確認された。これらのグループの中で最も低い周波数帯域のグループでは、試験開始直後から AE 集中箇所が現れ試験片の破断直前まで続いている。一方、ほかの高い周波数帯域のグループは、荷重の増加とともに、現れては消滅し、最も周波数の高いグループは破断に至る 30 秒前の 190 秒近傍で集中箇所が消滅しているのがわかる。

図 2 (a) (b) の比較では、(b) の最も高い周波数グループの集中箇所の消滅と (a) における重心周波数の低下が起こるタイミングが一致することが確認できる。以上の状況から、重心周波数が低下する現象は、高いピーク周波数を有する AE 波が検出されなくなった結果であることが推定できる。

以上のように重心周波数が変化するという現象もピーク周波数で観察することで同時間帯にどのような周波数特性を有する AE 波が検出されてい

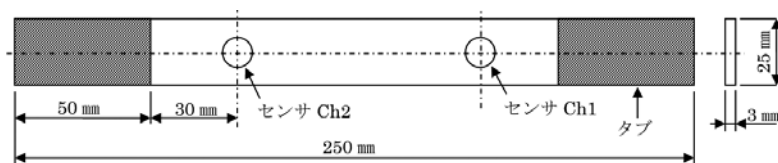
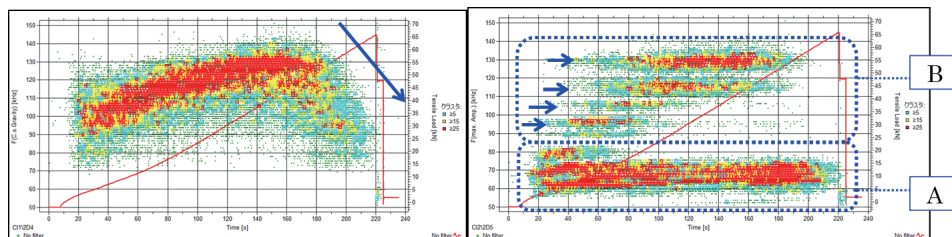


図 1 試験片とセンサ取り付け位置



(a) 重心周波数の場合

(b) ピーク周波数の場合

図 2 周波数解析によるデータ表示

るかを確認することができる。

なお、図2(b)に見られる高い周波数帯域のグループが現れては消滅する現象は、CFRPの破壊プロセスの変化に応じて発生するAEによるものと推定されるが、実際の破壊現象と周波数の関係の検証については、今後の課題とする。

3. ほかのAEパラメータによる比較

3.1 最大振幅値による比較

本項では、図2(b)における周波数85kHz以下の低いピーク周波数のAEデータをAグループ、85kHzを超える高いピーク周波数のAEデータをBグループとして、二つのグループに分別し、各々を各種AEパラメータの時間的推移を比較する。

図3に最大振幅値による比較を示す。Aグループでは、試験開始20秒後の早い段階から60dBを超える高い振幅値のAEが検出され、試験中盤は60dBを超えるAE波の数は減少するが、終盤の180秒過ぎから再び60dBを超えるAEが計測された後に破断に至った。

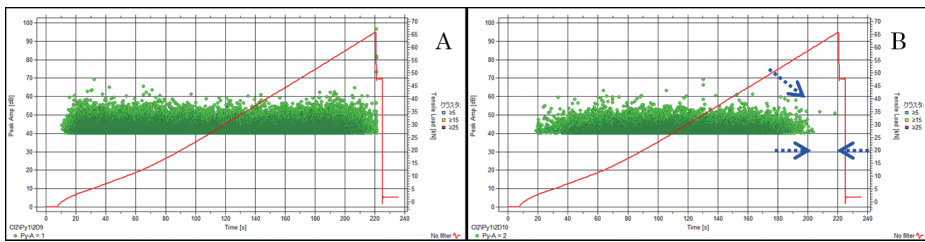
一方、Bグループでは、試験開始後徐々に振幅値が高まり、60秒経過後には60dBを超える高い振幅値のAEが計測されるが、180秒を経過すると振幅値は下がり始め破断20秒前の200秒を過ぎるとしきい値40dBを超えるAE波はほとんど検出されなくなった。

3.2 Hit数/秒による比較

図4は、AE活動度を示すHit数/秒の時間的推移を示す。Aグループのデータは、試験開始直後からHit数が増加し、40秒(7kN)経過時には300Hitsに達するが、その後、Hit数が減少し、110秒(27kN)近傍を境に再び増加に転じ180秒(51kN)を経過すると再び減少し破断に至っている。

一方Bグループでは、試験開始後徐々にHit数が増加するが110秒(27kN)で最高値となるのを境に減少に転じ破断に至る20秒前(57kN)にはほとんど検出されなくなることが確認できる。

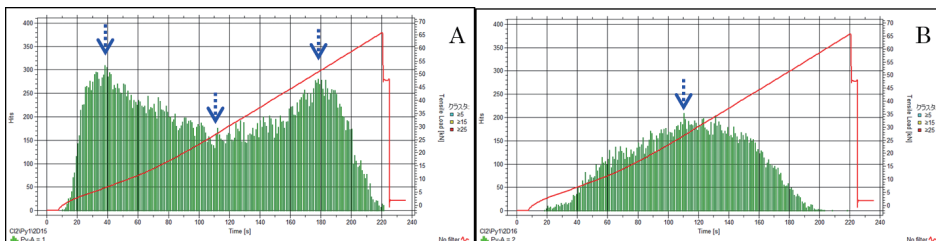
以上のように、図4では、試験開始後40秒(7kN)、110秒(27kN)、180秒(51kN)にターニングポイント



(a) Aグループ（低周波）の場合

(b) Bグループ（高周波）の場合

図3 最大振幅値による比較



(a) Aグループ（低周波）の場合

(b) Bグループ（高周波）の場合

図4 Hit数/秒による比較

トが存在することが確認された。これらのターニングポイントは、材料内部で起きている破壊現象の変化に応じたものと推定するが、本稿では事象の紹介にとどめる。

3.3 エネルギーおよび積算エネルギーによる比較

次にエネルギーを指標として AB 両グループの比較を図 5 に示す。上図は AE 波のエネルギー(波形の積分値)をプロット表示したものであり、下図は毎秒あたりのエネルギー積算値を示している。エネルギーの推移を観察すると A グループでは、試験開始後の早い段階から 1000(eu)を超える高いエネルギーの AE 波が計測され 100 秒を過ぎると 1000(eu)を超えるものはなくなるが、破断前の 180 秒から破断に至る間で再び高いエネルギーが計測された。一方、B グループでは、試験開始から徐々にエネルギーとその積算値が高まり、110 秒近傍で減少に転じ 130 秒近傍で高いエネルギーが計測されるものの、積算エネルギーは徐々に低下し破断 20 秒前でゼロに近い値となる。

以上に示すように、低いピーク周波数を有する

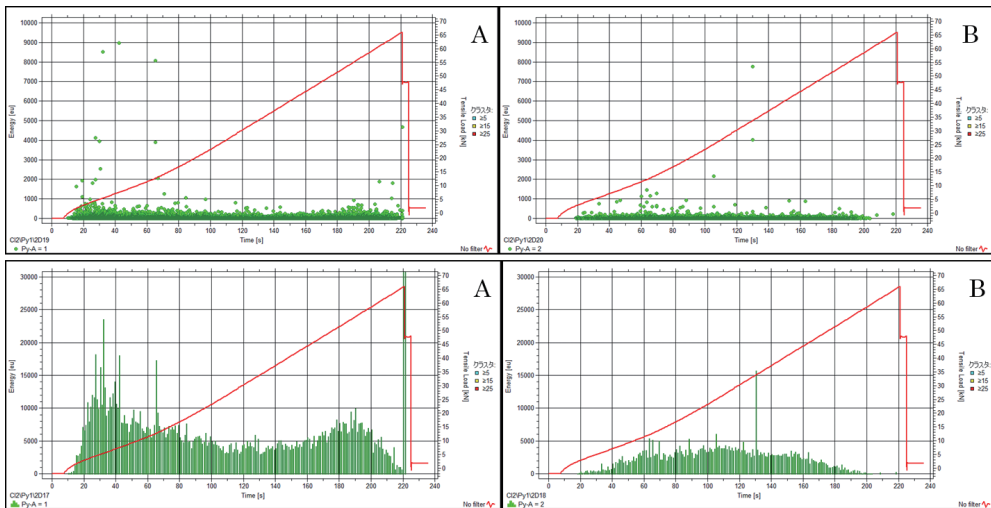
A グループでは、破断前に比較的高いエネルギーの AE が計測されるものの積算エネルギーは減少し、B グループでは、積算エネルギーが徐々に低下し破断前にゼロに近づくことが確認された。

3.4 AE パラメータによる比較のまとめ

AE 計測では、材料の破壊の進展に応じた AE パラメータの変化を見出すことが重要である。

一般的に、AE 試験では、材料中の減衰率が高まると検知する AE 波の振幅値は低下し、結果としてしきい値を超える AE の数 (Hit 数) は低下する。また、応力の上昇に伴う材料の破壊(または粒子の滑り)が進むと蓄積されるひずみエネルギーの増加とともに検出される AE のエネルギーや検出数は上昇するが、材料が分断され AE 源となるひずみエネルギーの蓄積がなくなると AE 事象の発生が減少する。材料試験における AE 計測では、これら減衰率の増加と AE 事象の減少の両者が同時に起こることも考えられる。

AE 試験では、AE の振幅値やエネルギーの変化や Hit 数の増減も健全性評価の指標や最終破断の予



(a) A グループ (低周波) の場合

(b) B グループ (高周波) の場合

図 5 エネルギーおよび積算エネルギーによる比較 (上図: 波形ごとのエネルギー、下図: 毎秒あたりのエネルギー積算値)

兆として用いている。

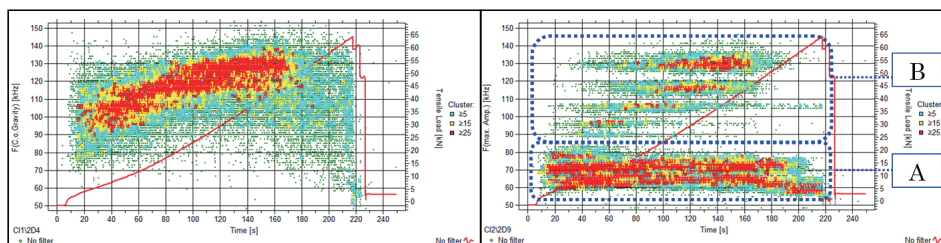
4. ほかの試験片データによる比較

AE 計測では、同一の材質・形状の試験片に対し、同じ条件で試験を実施しても結果が一致しない場合がある。その原因は、破壊が起こる位置や破断に至るまでの過程の違い、また AE 波がセンサに到達するまでの伝播状況の違いなどさまざま

な要因が考えられる。

一例として、3章と同様の試験を材質と形状が同じほかの試験片に対し実施した結果を図6に示す。図6(a)では、図2と比較すると重心周波数の低下は認められるものの顕著に現れていないことが確認できる。

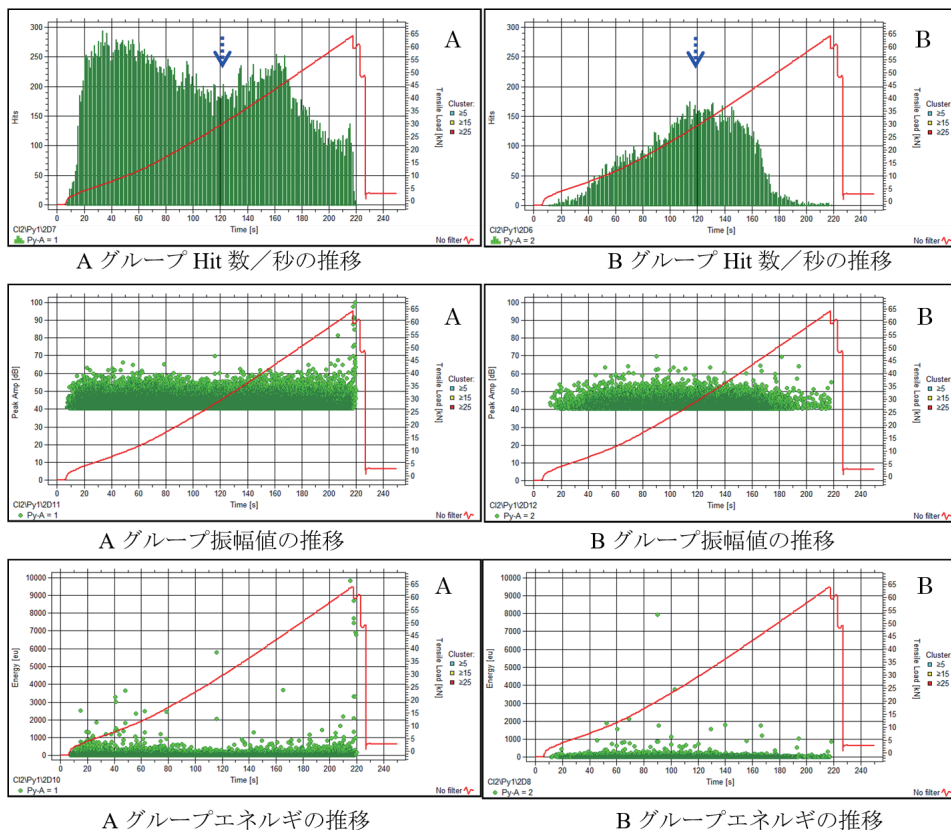
図7は、図6(b)のピーク周波数において85kHzを境に上下二つのグループA(低周波)およびB



(a) 重心周波数の場合

(b) ピーク周波数の場合

図6 ほかの試験片での周波数解析データ



A グループ Hit 数/秒の推移

B グループ Hit 数/秒の推移

A グループ振幅値の推移

B グループ振幅値の推移

A グループエネルギーの推移

B グループエネルギーの推移

図7 ほかの試験片における各種パラメータによる比較

(高周波)に分別し、グループごとのHit数、最大振幅値、エネルギーの時間的推移を示す。

図7の左図では、120秒(29kN)のターニングポイントを境にAグループ(低周波)では上昇に転じ、Bグループ(高周波)では減少に転じる傾向は図4で示したデータと一致する。しかし、Aグルー

プでは、180秒から破断に至る間で、最大振幅値やエネルギーが上昇し、破断直前にHit数がわずかに上昇するなど図4とは異なる傾向が見られる。

次に、上記データをCh1センサとCh2センサのそれぞれ個別に比較した結果を図8および図9に示す。

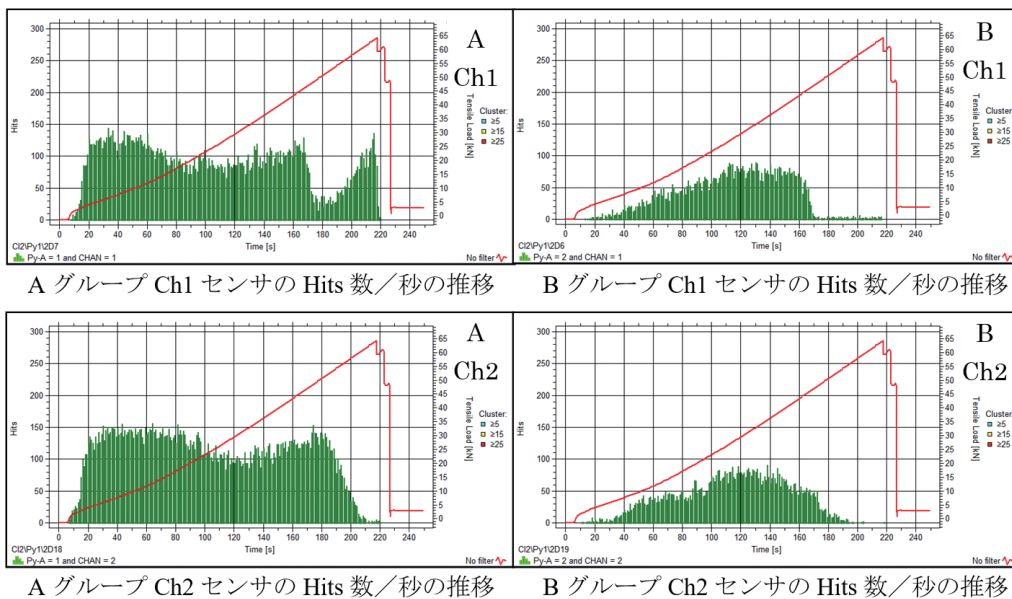


図8 Ch1、Ch2 各センサの Hit 数による比較

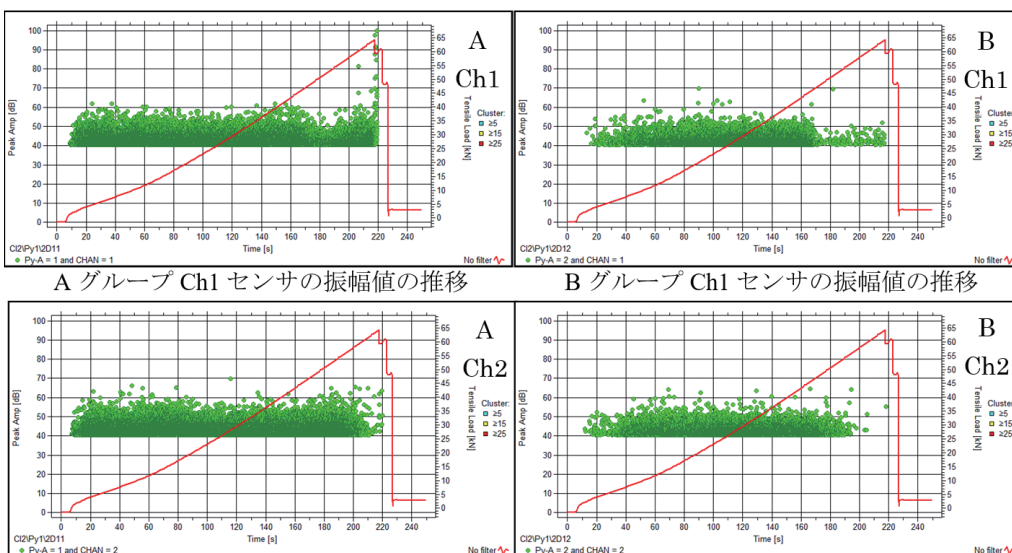


図9 Ch1、Ch2 各センサの最大振幅値による比較

図8のHit数による比較では、Ch2のデータは、3.2節に示すデータと同様の傾向が見られる。しかし、Ch1のデータでは、Aグループ(低周波)のHit数が170秒近傍で急激に低下した後上昇し、またBグループ(高周波)のHit数は170秒近傍で急激に低下したまま破断に至るなど3.2節とは異なる傾向が確認された。図9の振幅値による比較でも破断前に70dBを超える高い振幅値を有するAE波が検出された一方Ch2では、振幅値の高まりは見られなかった。

さらにCh1とCh2のデータを個別に周波数解析した結果を図10に示す。図4で示した3つのターニングポイントを有するCh2のデータでは、重心周波数の低下が顕著に見られるが、傾向が異なるCh1のデータでは、破断直前まで重心周波数が高いAE波が検出され、またCh1のピーク周波数が低い領域(Aグループ)において170秒近傍で低下する現象が見られた。

一般的にセンサ間で異なる傾向のデータを示す

原因としては、片方のセンサの接触状態が変化することが考えられ、その場合にはAE波が検出されなくなる、もしくは振幅値の低下が起こる可能性が高い。上記のケースでは、振幅値の上昇が見られることからセンサの取り付け状態の変化ではなく、試験片上の破壊が起こる位置とセンサの取り付け位置の関係に起因することが考えられる。例えば層間剥離などの破壊現象がセンサ直下に到達するようなケースでは破断直前までAEが検出され、エネルギーが増大することが予想される。

以上のようにAE計測では、センサ間でデータが異なるようなケースもあることから、複数のセンサを取り付け、センサ間でデータの差異を確認することも重要である。また耐圧試験時の予兆検知にAE計測を用いる場合には、センサごとにデータを表示させそれぞれのセンサの守備範囲におけるAE事象の変化を監視することも有効である。

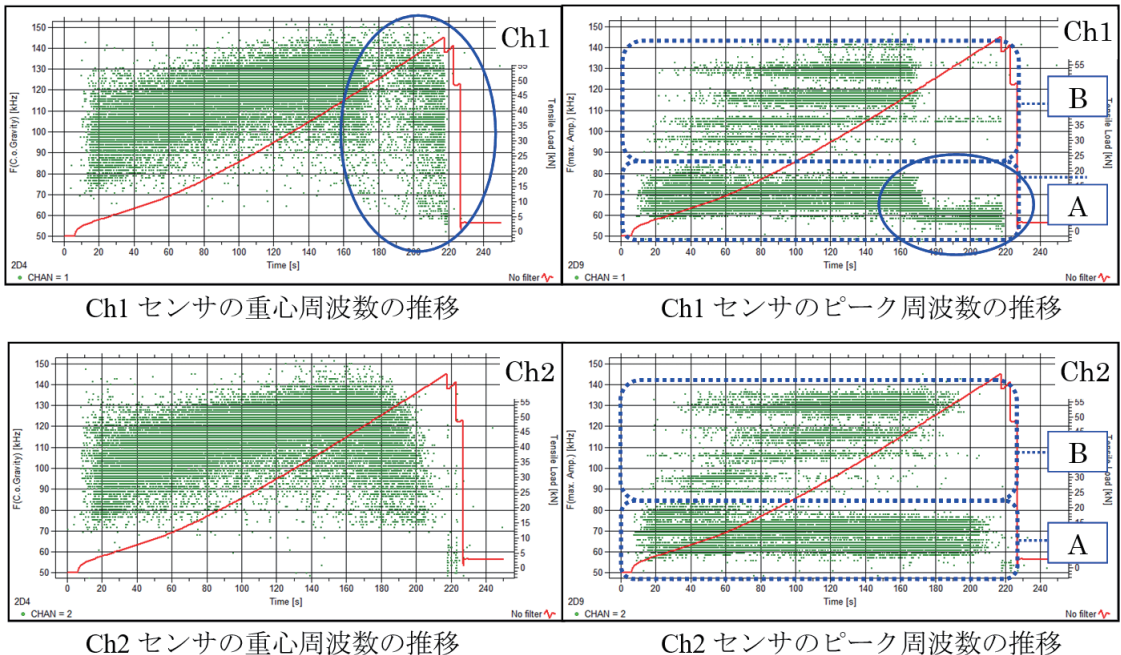


図10 Ch1、Ch2各センサの周波数解析結果の比較

5. まとめ

本稿では、CFRP 試験片の引張試験データを一例として、データ解析における着眼点と周波数帯域やセンサでデータを分別して観察することが有効であることを説明した。特にCFRPの評価では、破壊現象とセンサの位置関係でAEデータの傾向が変わる可能性があることを理解したうえで解析を行うことが重要である。

CFRP 試験片の引張試験データでは、高い周波数グループと低い周波数グループに分けることで、Hit数や毎秒積算エネルギーの低下が重心周波数の低下と同様のタイミングで生じることを確認した。

これは、処理時間を要する周波数解析に頼らなくても、あらかじめ周波数フィルタにて高周波と低周波に帯域を分別してデータを取得し、それぞれの周波数帯域におけるHit数やエネルギーを観察することで、健全性の評価や破断の予兆検知が可

能となることを示唆するものとする。

以上示したようなAEパラメータによる予兆検知は、より安価で簡便なAE計測装置を使用したモニタリングシステムやワイヤレス化への展開が期待できる⁽²⁾。

本稿では、前号(No.62)からの続編ということで、前号で記した注意すべきことは記述していない。前号未読の読者には、前号も合わせて読まれることをお願いしたい。

参考文献

- (1) 川崎拓、滝沢真実、中村英之、佐藤浩幸、飯田伊佐務:AE重心周波数を用いたCFRP材損傷評価法の検討、第19回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集(2013)、pp.77-80
- (2) 中村英之:AE遠隔モニタリングとIoTへの活用、第14回日本非破壊検査工業会技術討論会概要集(2018)、pp.15-23



研究開発センター 博士(工学)
日本非破壊検査協会理事、
日本非破壊検査工業会理事

中村 英之

TEL. 045-791-3522

FAX. 045-791-3547