

FRP 損傷評価に求められる AE 計測システムの性能

中村 英之^{*1} 塩谷 源二^{*2} 木村 将人^{*3}
Nakamura Hideyuki Shioya Genji Kimura Masato

アコースティック・エミッション試験（以下 AE 試験と称す）は、損傷過程で材料自身から発する超音波領域の弾性波をリアルタイムで検出する。これより、損傷過程が複雑な強化プラスチック（FRP）の評価に適しており、米国では 1980 年代には規格化がなされ、FRP 製品の評価に用いられている⁽¹⁾。日本国内でも、FRP の利用の広がりとともに安全が求められる構造物の強度や健全性評価において AE 試験の適用が進んでいる。

本稿では、FRP の損傷評価に有効と思われる AE 計測システムの機能を紹介するとともに、装置導入時に考慮すべき仕様を紹介する。

キーワード：FRP、損傷評価、アコースティック・エミッション (AE)、AMSY-6

1. はじめに

AE 試験は、1960 年代に新しい試験技術として、多くの大学、研究機関、産業界で研究がなされたものの、ノイズと信号の分別が難しく、多くは実用化に至らず、衰退した経緯がある⁽¹⁾。近年、情報機器の性能向上に伴い AE 計測システムの性能が向上したことで、新たなセンシング技術や評価技術の研究が進み、現在では、自動車、航空宇宙、土木、石油化学などさまざまな産業分野で利用されている。

特に AE 試験は、材料に負荷が加わる時に材料自身から発する超音波領域の弾性波を検出する特性から、金属材料と比較して損傷過程が複雑な FRP の材料評価に適しており、規格化がなされ、FRP の評価への適用の広がりが見られる。

しかしながら、FRP の評価では、樹脂や繊維の

種類や重ね方など材料に多くのバリエーションを有することから、共通の評価方法をすべての材料に適用することは難しく、材料の特性に合致した評価方法を選択する必要がある。このため AE 試験を適用するうえで、AE 計測システムの仕様や評価指標とその特徴を理解したうえで、計測システムや試験方法を選択することが重要になる。

本稿では、AE 計測の概要と主な評価指標を説明したうえで FRP の損傷評価への AE 適用において考慮すべき AE 計測システムの性能と機能を紹介する。

2. AE 試験の概要

AE は、試験対象に応力が加わる時に、材料中に蓄積されたひずみエネルギーの一部が変形や破壊に伴い音 (Acoustic) として放出 (Emission) される現象である。なお AE 試験では、計測対象とする

*1：研究開発センター 技師長 博士(工学)

*2：計測事業部 計測技術部 福浦グループ 調査役

*3：計測事業部 計測技術部 福浦グループ

音は可聴音ではなく、周波数が数 kHz から数千 kHz の超音波領域の弾性波であり、この弾性波を試験体上に取付けた AE センサで検出して材料評価を行う。なお AE 試験ではこの弾性波を AE 波または AE 信号と呼ぶ。

AE 試験の概念として引張試験による AE 試験の一例を図 1 に示す。一般的な AE 試験では、何らかの方法で試験対象に応力を加え、加える応力に応じて試験対象から放出される AE 波を検出し、その波形特徴から試験対象の強度や健全性を評価するほか、複数のセンサを用いる試験では各センサへの AE 波到達時間から AE 発生源の位置を標定する。荷重方法は、図 1 では引張試験の例を示すが、曲げ荷重や耐圧試験など試験対象に合わせた方法となる。

さらに最近では、AE 試験の適用技術の研究が進み、破面のこすれで発生する二次的な AE 波を検出して損傷程度を評価する方法、材料上で擬似的に発生させた AE 波の伝搬挙動から損傷範囲や程度を評価する方法、電気化学的な反応や生体反応に伴う AE 波を検出し適用対象を評価する方法などが開発されている。このように、現在では、本来の AE 事象とは異なるものの、対象物を伝搬する超音波領域の弾性波を検出し何らかの評価に用いることを広義として AE 試験と位置付けている。

汎用の AE 計測システムを用いた AE 計測では、図 2 に示すような一連の AE 波を Hit と称し、波形データとして収録するとともに、AE 波の特徴を数値化した AE パラメータが収録される。波形データは、一つの波形のデータ量が数 kB となる

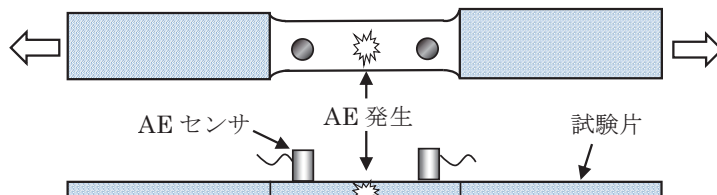


図 1 引張試験での AE 適用例

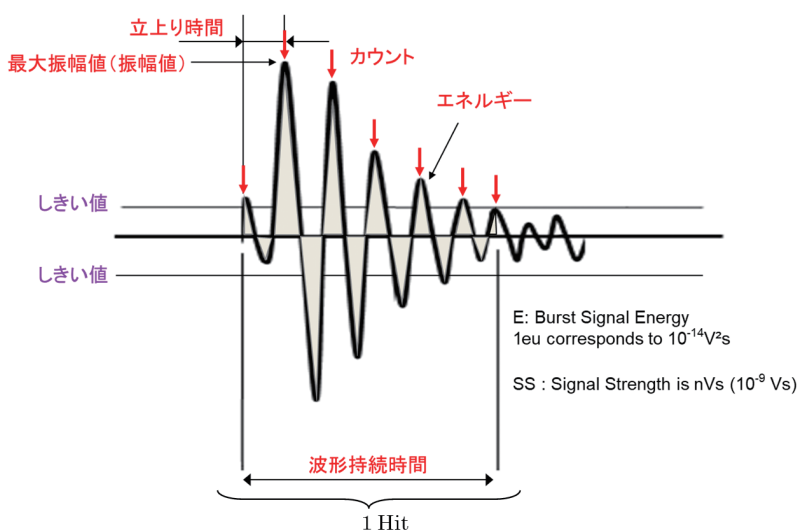


図 2 1Hit に含まれる主な AE パラメータ

ことから、AE 発生頻度が高い場合は、データ転送が間に合わず、取りこぼしが生じる場合がある。一方、AE パラメータは、波形と比べデータ量が少ないため、毎数千 Hit の AE が発生する場合でも、取りこぼしの少ない計測が可能となる。この毎秒あたりに収録可能な Hit 数や波形データ量は、AE 計測システムの性能を表す指標となる。

以下に主な AE パラメータを説明する。

(1) Hit 数

図2に示すような一つの AE 波を 1Hit と呼び、センサで受信した AE 波の数を表す。単位時間あたりの Hit 数は試験時の AE 活動度の指標となる。

(2) 最大振幅値 (dB)

AE 波の最大電圧を示し、瞬間的に生じる破壊の大きさに対応する指標となる。最大振幅値 (dB) = $20 \log (\text{最大振幅 } V/V_{\text{Ref}})$ であり、ここで $V_{\text{Ref}} = 1\mu\text{V}$ である。一般的な AE 試験では、最大振幅値をしきい値として一定強度以上の AE 波を計測する。

(3) エネルギー

エネルギーは AE 波における電圧の二乗積分値で、破壊規模の指標となる。電圧 V 、時間 S とし、1 エネルギーユニット (eu) = $10^{-14}V^2S$ となる。

(4) 波形持続時間

AE 波がしきい値を超えてからしきい値を超える波が無くなるまでの時間である。

(5) カウント数

波形持続時間中にしきい値を超える波の数である。なお、カウント数を波形持続時間で除した値が平均周波数となる。

3. FRP の評価に求められる AE 計測装置の基本性能

FRP は他の材料と比較すると AE が発生しやすい材料であり、損傷発生時には 1 秒間に数百を超える AE 波が発生する場合がある。このため、FRP

の損傷評価に用いる AE 計測システムには、毎秒あたりに収録可能な Hit 数や TR データ (波形データ) で表すデータ採取速度等に高い性能が必要となる。

当社が販売するドイツ・Vallen 社製 AE 計測システム AMSY-6 を図3に示し、その特徴を以下に紹介する。



図3 AE 計測システム AMSY-6

(1) AE 計測システムの特徴

- ①高速データ採取：TR データを 10MB / 秒以上、100,000Hits / 秒以上 (理想条件時)
- ②高分解能：サンプリング速度 40MHz ダイナミックレンジ 18bit
- ③高感度：AD 変換処理時のフィルタリングによるシステムノイズの低減を実現
- ④波形一時保存メモリ：1GB / チャンネルまで選択可能
- ⑤高度なフィルタ機能：500 通りの周波数フィルタの設定可能 (アドバンスタイプ AE 基板)
- ⑥波形自動識別機能：あらかじめ波形パターンを学習させることで、自動で波形を識別する機能 (オプション)

AMSY-6 は、毎秒 100,000Hits を超える AE パラメータデータの採取性能 (発生と受信が同期する

理想条件時)を有し、また各 AE 基板に TR データを一時保存するメモリを搭載することで、毎秒 10MB 以上の波形収録機能を有する。これより、FRP 損傷時のように短時間に多くの AE が発生する状況でも、取りこぼしの少ない AE 計測を可能としている。

FRP の損傷は、樹脂のマイクロクラック発生、層間剥離、繊維の断裂などの現象が段階的に混ざり合いながら進展し、最終破断に至るが、このような破壊現象に応じ検出される AE 波の特徴も変化すると考えられる。AE 試験では、検出される AE 波の特徴や指標の変化を検知し材料中で起きている破壊の形態や程度を推定・評価するが、AE パラメータのほか、周波数の変化も有力な指標となるため、周波数解析に必要な波形データの収録も重要である。

この波形データの収録能力は、毎秒あたりに記録可能なデータ量で示されるが、波形を一時保存するメモリ容量でも判断することが可能である。AMSY-6 の場合は、AE 基板に搭載するメモリはオプションとなっており 16MB、512MB、2GB を選択可能である。なお、AMSY-6 の AE 基板は 1 枚に 2 チャンネルの入力端子を有することから、1 チャンネル当たりのメモリ数はその半分の 8MB、256MB、1GB となる。AE 計測システムの波形データ収録性能を比較する場合、1 チャンネル当たりの波形用メモリの容量を比べるとおおよその性能差が確

認できる。

(2) 解析ソフトの特徴

AE データの解析では、最初に各種パラメータの時間履歴や相関などを確認し、データの変化や偏りを見極めることで有意信号とノイズを識別する。これらの識別で、有意信号を抽出し、評価に役立っているのが一般的である。したがって、解析ソフトには、AE パラメータや波形データ、荷重や圧力などの外部入力データを一元的に扱え、データを選別抽出する機能が必要となる。

図 4 に AE パラメータデータと波形データの一例を示す。左図は、エネルギーの時間履歴を示し、各々のプロットが AE 波に対応する。

右図は、波形データを示すが、AMSY-6 の解析ソフトでは、これらの図はリンクしており、エネルギーのプロットをクリックするとその波形が表示される。このようにデータがリンクしているため何時、どの位置で、どのような AE が発生したかを瞬時に確認することが可能となる。

図 5 は、AMSY-6 のフィルタ設定メニューの一例である。この解析ソフトは、AE パラメータ (Hits Result) や波形解析データ (TR-Feature Results) などの AE データのほか外部入力データ (Parametric Results) などさまざまな条件でフィルタを作成し、ノイズの除去や有意信号の抽出する機能を有している。

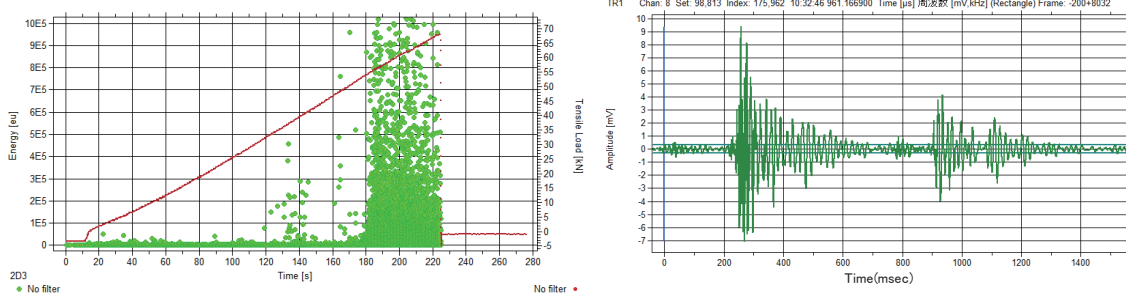


図 4 CFRP 引張試験 AE データの一例

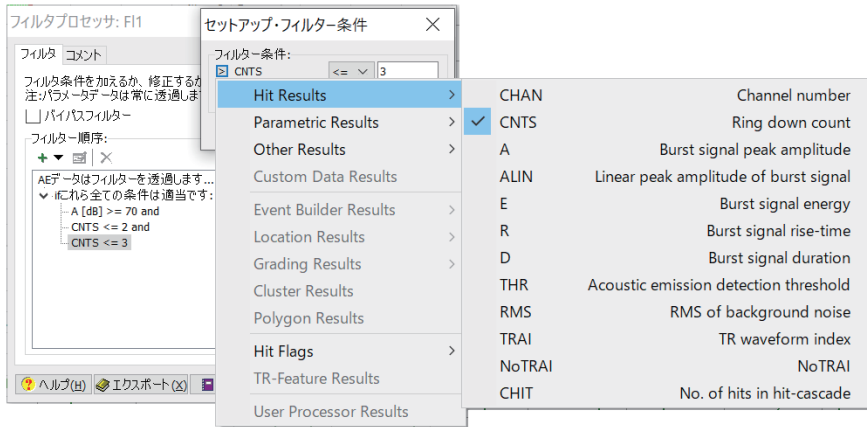


図5 フィルタ設定メニュー

4. 最新の AE 計測システムの機能

(1) 3次元位置標定機能

AE 試験では、AE 波が複数のセンサに到達する時間差から AE 発生源の位置を標定することが可能である。

FRP の場合は、音速の異方性により標定精度が低下する場合があるが、損傷部の偏りなどおおよその位置を確認するには有効である。図6は、CFRP 製圧力容器の耐圧試験時における AE 発生源の3次元位置標定の一例を示す⁽²⁾。

AMSY-6 は、図6の右図に示すような標準モデルが装備され、容易に3次元位置標定を行うことが可能である。

(2) 波形自動認識機能

AE 波は、発生原因により異なる特徴を示し、形状や周波数の違いで識別することが可能な場合がある。手作業による解析では、明らかに異なる波形を示す波形でも数が数千、数万になると多大な時間と労力を必要とする。AMSY-6 は、あらかじめ計測した有意信号やノイズの波形を用い学習させることで AE 波を自動で識別するための波形自動認識機能を有している。この機能では、図7の左図に示すようにサンプルとなる波形を時間で区分し、各々の時間帯における周波数解析結果から波形の持つ特徴を抽出し、学習のために与えたサンプル波形が最も明確に分別できる条件を自動的に探す。この機能を使った AE 計測では、学習で

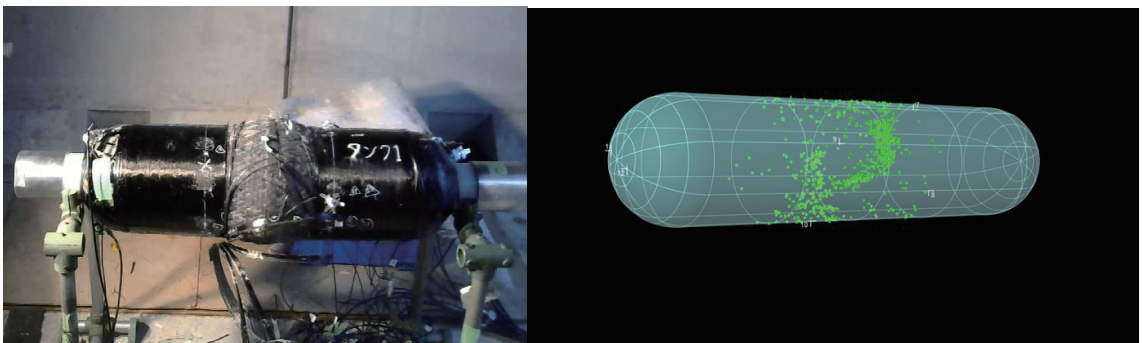


図6 圧力容器の3次元位置標定例

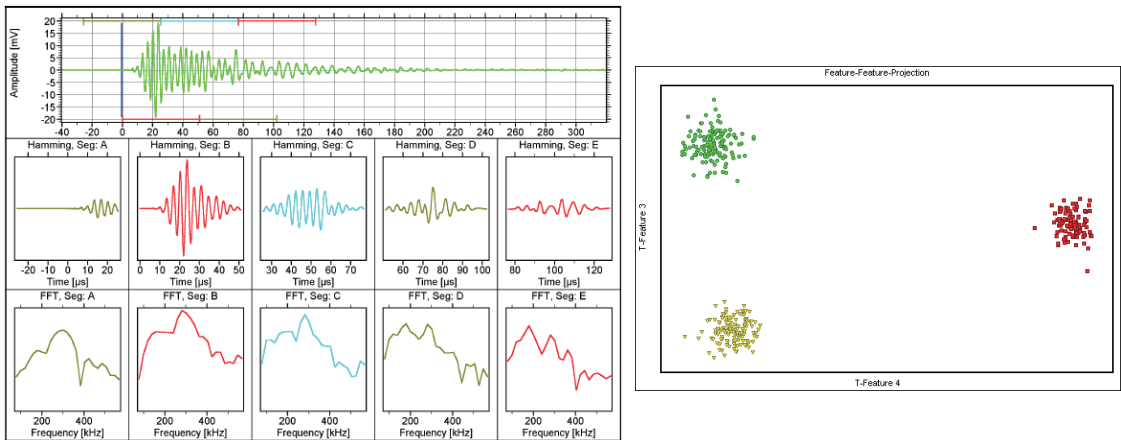


図7 波形自動識別設定時の学習画面

得られた分別条件を計測される波形データに適用することで、どのグループに属する波形かをリアルタイムまたはポスト処理にて分別する⁽³⁾。

図7の右図のプロットは、教師データに用いた三種類の波形に対応し、各々の波形が特徴を表す指標 (T-Feature3 × T-Feature4) のマッピング上で三つに分別される例を示す (指標の詳細は非公開)。

(3) 疲労試験のサポート機能

図8は、疲労試験におけるAEデータの一例であり、最大振幅値を丸プロットで示し、荷重の変化を破線で示す。図では、荷重の変化に応じAE波が計測される様子が確認できる。

AMSY-6は、荷重に対応する電圧をAE計測システムに入力することにより、荷重の増減を計測するほか、電圧の上昇・下降を検知することでサイクル数をカウントするとともに载荷と除荷を区別する機能を有する。また試験機の作動に伴うノイズの発生が多い疲労試験では、荷重が最大値に近づくタイミングのみAEデータを記録することも可能である。

これらの機能を使うことで、データ量の軽減を図り、サイクル数に応じたAEデータの解析が可能となる。

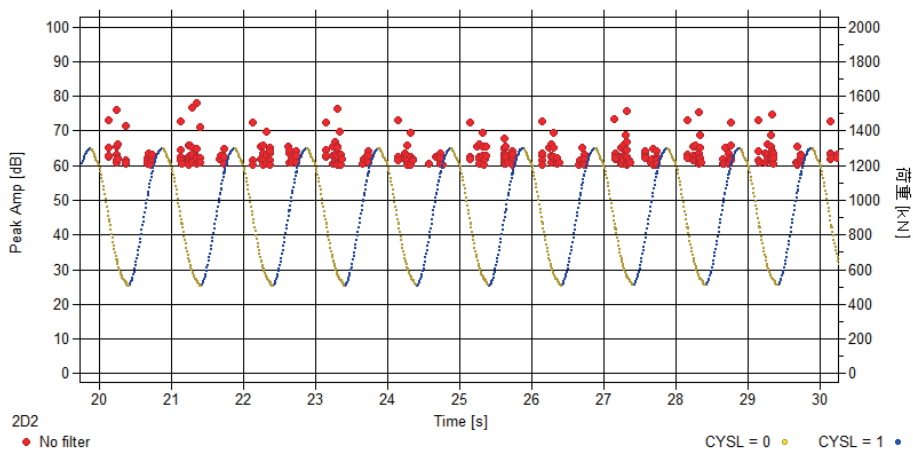


図8 疲労試験におけるAEデータ例

5. まとめ

FRPのAE試験では、材料の構造が複雑なため損傷に起因する有意信号以外にもさまざまなAE波がノイズとして検出され、ノイズに埋もれ有意信号の傾向がわからなくなる場合がある。損傷評価を正しく行うためには、ノイズを除去・低減したうえで、有意信号の変化や傾向を見極めることが重要である。このため、FRP損傷評価を目的とするAE計測システムには、ノイズを除去・低減し、有意信号を抽出するための多彩な機能が必要となる。本稿では、FRP損傷評価に有効と思われるAE計測システムの仕様と機能の一部を紹介した。今後のFRPの損傷評価や強度評価において、AE計測技術の活用を検討するうえでの一助となれば幸いである。

参考文献

- (1) 一般社団法人日本非破壊検査協会：アコースティック・エミッション、1990、pp.1-2
- (2) 福本伸太郎、西土隆幸、荒川敬弘、大森真実、大森征一：CFRP製タンクの水中伝播波による損傷位置標定、IIC REVIEW、No.58、2017/10、pp.34-41
- (3) Vallen Systeme社：Vallen Visual Classカタログ



研究開発センター
技師長
博士(工学)
中村 英之

TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547



計測事業部 計測技術部
福浦グループ
調査役
塩谷 源二

TEL. 045-791-3518
FAX. 045-791-3541



計測事業部 計測技術部
福浦グループ
木村 将人

TEL. 045-791-3518
FAX. 045-791-3541