

「AE 計測技術の基礎－その 1」 ハードから計測条件の設定まで

中村 英之^{*1}

Nakamura Hideyuki

当社では、アコースティック・エミッション（以下、AE と称す）に関する事業を開始し十数年が経ち、現在は AE 計測を通常業務として実施している。本稿では、これから AE 計測や AE 装置販売に携る人を対象として、AE 事業導入の経緯から AE 計測の原理、装置の概要と仕組み、各種設定値の意味、データ採取のアルゴリズム、AE データの意味など、AE 計測、および装置に関する基礎知識を紹介する。

キーワード：キーワード：AE、AE 計測、AE パラメータ、波形データ、位置標定、Vallen、AMSY

1. はじめに

当社が、AE 計測事業に本格的に参入したのは、1999 年から 4 年間続いた一般財団法人エンジニアリング振興協会より委託された、タンク AE 計測に関する研究プロジェクトに参画したことに端を発する（それ以前に米国の AE 装置メーカー AE Technology 社の代理店となったが、販売実績のないまま同社が解散し、社内に AE 技術が育つことはなかった）。

当社は、1999 年当初、米国の AE 装置メーカー Physical Acoustic 社製の装置を導入し、研究プロジェクトを進めたが、このプロジェクトにおける海外技術調査で 2001 年にドイツ・Vallen 社を訪問したことが縁となり、2005 年にそれまで日本での販売拠点がなかった Vallen 社の代理店となり、AE 装置販売事業を開始した。

当社が AE 計測事業に参入した当初は、ゼロからの出発であり、試行錯誤の連続であったが、幸

いにも技術調査等を通じ、国内外の数多くの研究者・技術者から助言や指導を得ることができ、今日に至ることができた。現在は、当たり前のように実施している AE 計測についても、センサの取り付け方法から計測条件の設定、評価の仕方まで、長い時間を掛けて積み上げた技術の上にあることを理解しなければならない。

本稿は「AE 計測技術の基礎－その 1」と題し、次号以降にわたり AE 計測を行ううえで必要となる基礎的な知識を、数回に分けて紹介する予定である。これから AE 計測や AE 装置販売に携る読者の参考になれば幸いである。

2. AE とは何か？

AE は、直訳すると「音の放出」となるが、本来の意味は、材料に応力を加えたときに材料に蓄積されたひずみエネルギーが、変形や破壊に伴い開放される過程で、その一部が超音波領域の弾性波として放出される現象である⁽¹⁾。簡単に表せば、

*1：検査事業部 部長 博士（工学）

木の枝をへし折ろうと力を加えるとメリメリと音がする。このメリメリにあたる超音波を発する現象を AE といい、その弾性波を AE 波と呼ぶ。

なお、AE 試験では、AE 波を計測し、その発生頻度、波形特徴などから、材料の強度や健全性を評価するほか、AE 波の到達時間差から、損傷位置の標定も行う。

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の評価を行ったり、材料上で擬似的に発生させた AE 波の伝播挙動から損傷範囲や程度を評価したり、電気化学的な反応や生体反応に伴う AE 波を検出して、適用対象の評価が行われている⁽²⁾。このように、現在では、本来の AE 事象とは異なるものの、対象物を伝播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。

3. AE 測定原理と計測系の概念

図 1 に AE 試験 (AT) と超音波探傷試験 (UT) の比較を示す。超音波試験では、探触子から超音波を発信し、きずから反射するエコーを検出し、きずの有無、大きさ、位置などの情報を得て健全性を評価する。一方、最も基本的な AE 試験では、材料に AE センサを取り付け、材料に応力を加えることによりきずが発生または進展することで生じる AE 波を検出し、きずの有無、位置などの情報を得て評価に役立てる。ここで「最も基本的な AE 試験」としたのは、近年、多様な評価方法が

開発され必ずしも、きずの発生や進展に伴う AE 波を必要としない評価方法もあるためである。

図 2 に AE 計測装置の構成を示す。一般的に用いられる圧電素子による AE センサは、超音波探傷試験における垂直探触子と同様の構造を持ち、円筒形のケースの中に各周波数特性に合致した圧電素子が組み込まれている。なお、特定の共振周波数を有しない広帯域型センサは圧電素子の後部に共振を抑えるダンパーを組み込んだものである。

材料中を伝播する AE 波は、AE センサに到達するとセンサ内の圧電素子により電圧信号に変換、出力される。センサの出力は $10^{-6}\text{V} \sim 10^{-1}\text{V}$ と微弱であるため、プリアンプで増幅した後に、AE 計測装置に入力される。入力した電圧信号は、AE 計測装置の AE 基板上で A/D 変換され、AE パラメータ信号の抽出、波形の保存がされる。

ここで AE パラメータとは、AE 波形の特徴を数値データとして抽出したものであり、例えば波形の最大振幅値や波形持続時間などであり、複数個のセンサを用いた計測では、パラメータに示された信号到達時間から音源位置標定計算を行うことも可能である。一方、波形データは、時間と電圧の情報を有するサンプルの集合体として保存される。各々のデータの詳細については次章で説明する。

なお、当社が販売する AE 装置「AMSY」の場合、プリアンプの駆動電源は、信号ラインを通じ DC28V が供給されるが、これは同一ラインでも AE 信号が交流であるため直流との切り分けが可能のためである。

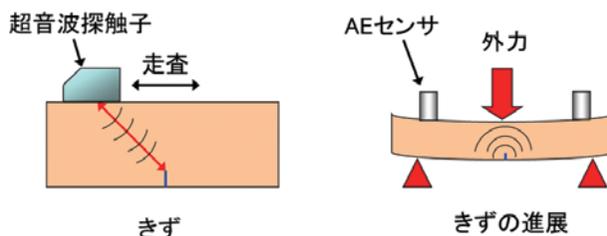


図 1 UT と AT の比較

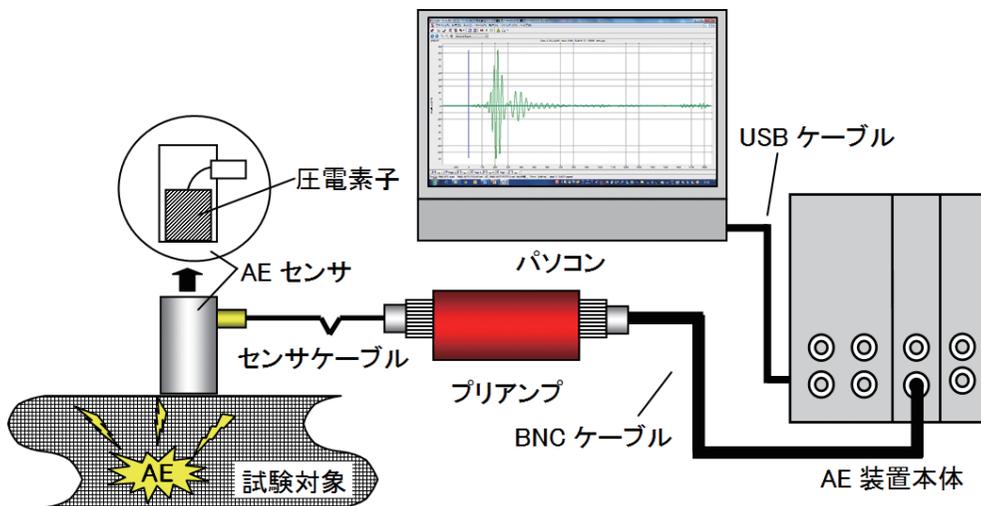


図2 AE計測系の概念

4. AE計測装置ハードウェア

図3から図5に当社が販売し、計測に使用している旧型および新型のAE計測システムの外観写真を示す。旧型のAMSY-5に搭載されたAE基板ASIPPは、2種類のハード式周波数フィルタを有し、この2種類の周波数フィルタのいずれかを選択可能であり、AE信号入力端子は一つのみであった（基板上に見える二つの端子は一つが入力でもう一つは出力端子である）。したがって旧型AE基板を搭載するAMSY-5は、チャンネル数に応じた枚数のAE基板を必要とした。新型基板ASIP2-Aは、二つの入力端子を有し、周波数フィルタがデジタル式に変わり、500種類以上の組み合わせでフィルタを設定することが可能となった。さらに新型AMSY-6では、AE基板はASIP2-Aのままであるが、それまでパソコンとの接続にPCIインターフェイス基板を介していたものが、USBにてダイレクトに接続可能となり、PCIスロットを必要としなくなったほか、AEデータ取り込み速度も格段に向上した。なお、AE試験では、AE波とともに試験荷重や、ひずみなどのデータも同時に計測し、それらの試験条件とAEとの相関を

解析に用いることがある。このため、一般的なAE計測装置は、外部の計測器からの信号（外部パラメータと呼ぶ）を入力する端子を有する。AMSY-5の写真に見える左の上下4列の端子、およびAMSY-6における左4端子は外部パラメータ入力端子である。

旧型装置では、出力端子を有すると述べたが、AE計測は、入力端子（以下チャンネル／Chと



図3 旧型AMSY-5 (ASIPP基板)
(AEデータ取り込み速度 30,000hits/sec 以上)

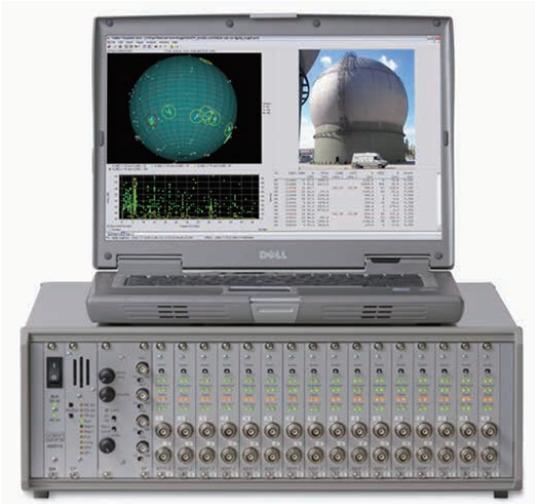


図4 旧型 AMSY-5 (ASIP2-A 基板)
(デジタル周波数フィルタ搭載)

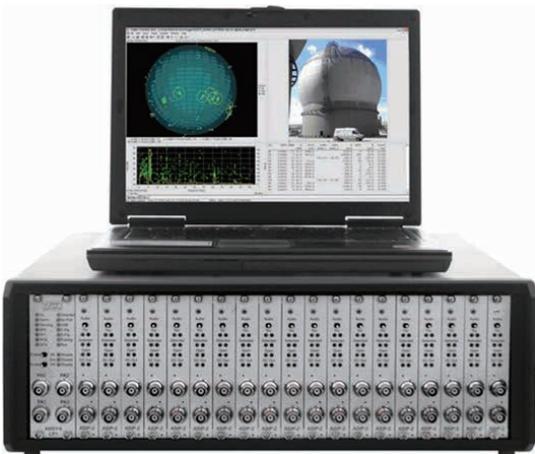


図5 新型 AMSY-6
(AE データ取り込み速度 100,000hits/sec 以上)

称す) ごとに、しきい値や周波数フィルタなどのデータ取り込み条件を設定する。例えば、同一センサからの信号を異なる取り込み条件で計測するような場合は、出力端子から取り出した信号を別の Ch に入力することで計測が可能となる。このような出力端子を持たない新型の場合には、装置入力前に信号ラインを分岐し、片方のラインにコンデンサーを内蔵した、DC ブロッカーという器具を組み込むことで交流である AE 信号のみを、

別の Ch に入力することが可能となる。

なお、Vallen 社製 AE 装置では、AE 基板ごとに波形を一時保存するメモリーを搭載しているため、波形の取りこぼしが少なく、高速データ採取を可能にしている。しかし、カタログに示すデータ取り込み速度は、AE の発生タイミングと収録タイミングを同期させた、理想条件における速度であり、AE の発生タイミングが不規則となる実際の計測現場での値ではないことを理解しなければならない。

図 6 にセンサ、プリアンプなどの付属品の一例を示す。AE センサは、大別すると特定の感度帯域で高い感度を有する共振型と、感度は劣るが広い周波数帯域に感度帯域を有する広帯域型の二つがあり、検出対象とする AE 波の周波数に応じ、選択される。なお、共振型センサと称しても Vallen 社で取り扱うセンサは比較的周波数帯域が広く設計されており、例えば 150kHz の共振型センサである VS150-M は、80kHz から 450kHz の範囲に感度帯域を有している。

最も一般に使用される 150kHz 近傍のセンサには、プリアンプ内蔵型センサが用意されている。

通常、センサとプリアンプはセンサケーブルで接続するがセンサケーブルは電磁ノイズに対しアンテナの役割を果たすことがあるため、できるだけ短くする方が望ましい。これはセンサ・プリアンプ間でノイズが入る場合、このノイズもプリアンプで増幅され、有意信号の検出を妨げることがあるためである。この観点から開発されたプリアンプ内蔵型センサは、センサケースにプリアンプを内蔵することにより、センサ・プリアンプ間のケーブル長が十数 mm と短く、ケーシングでシールドされることにより、電磁ノイズの影響を受けにくい。

プリアンプは、ゲイン可変型と固定型の二つのタイプがある。Vallen 製 AE 装置による計測では、

ゲイン 34dB (利得 50 倍) のものが最も多く使用される。これは、AMSY シリーズの入力電圧範囲が $\pm 5V$ であるため、センサ出力 0.1V が 50 倍に増幅され、AE 装置の入力限界である 5V に達することによるものである。ちなみに PAC 社製 AE 装置 DISP の場合は、入力電圧が $\pm 10V$ であるためゲイン 40dB (利得 100 倍) のプリアンプが多用される。なお、ゲイン固定型のプリアンプは、購入時にそのゲインを指定することになる。

また Vallen 社製プリアンプには、いずれのタイプもハードの周波数フィルタを内蔵しており、購入時に周波数帯域を指定するが、使用時には、プリアンプ上面に記される周波数帯域を確認し、計測仕様に合致していることを確認しなければならない。

ゲイン可変型プリアンプ AEP3N は、より高感度の計測を行う場合や、感度を低くした計測を行う場合を考慮して設計されており、34dB、37dB、40dB、43dB、46dB、および 49dB の可変ゲインを

加え、内蔵する $-34dB$ のアッテネートスイッチを操作することで 0dB から 49dB の範囲で 12 段階のゲインを設定することが可能である。

センサの取り付けには、マグネットホルダやクランプなどを用い機械的にセンサを固定する方法と、接着剤を用い固定する方法がある。機械的に取り付ける場合には、接触媒質としてセンサの感度面にシリコングリス等を用いる。AE 試験では、超音波探傷試験のようにセンサを走査する必要がないため、長時間の保持、試験後の除去、周囲への拡散防止などを考慮し比較的粘性の高いグリスが使用される。また、接着剤によりセンサを固定する場合には、測定対象に適用可能なものの中から、比較的接着強度の高いものを選択するが、硬化速度の速いエポキシ系接着剤が一般的に使用される。

なお、接着剤を適用する場合には、試験後にセンサを取り外すときにセンサや対象物を壊さないよう、センサの感度面にあらかじめシリコングリ



図 6 AE 計測装置付属品

スを薄く延ばすように塗布した後に多めの接着剤を適用する。センサを対象物に押し付けることにより接着剤はセンサからはみ出し、このはみ出した接着剤がセンサの側面のみを固定するため、取り外しは容易であり、破損も少なくなる。

プリアンプから AE 装置までの間を接続する BNC ケーブルは、計測現場の配置により余裕のある長さのものを用いるが、ケーブルのインピーダンスは AE 装置のインピーダンスと合わせ 50Ω のものを用いる。なお、PAC 社製 AE 装置 DISP では、装置のインピーダンス 100Ω であるため、使用するケーブルも 100Ω となる。

5. AE 計測条件の設定

図 7 に AMSY による AE 計測の入り口となる Vallen コントロールパネルを示す。この AE 計測システムでは、データ採取ソフト Acquisition、データを表示し解析するソフト Visual AE、波形解析ソフト Visual TR、波形自動識別ソフト Visual Class などがそれぞれ独立して存在し、それぞれがリンクして作動する。本稿では AE 計測の基礎として、データ採取ソフト Acquisition での計測条件の設定について述べる。

コントロールパネル上の Acquisition を開くと、図 8 に示す設定メニューが立ち上がる。計測条件の設定は Step1 から Step4 の順に進むが、その内容を以下に述べる。

図 9 に Step1 の設定メニューを示す。ここでは、計測に使用するハードウェアの設定を行う。このメニューでは、計測に使用するプリアンプの型式とゲインなどを選択する。また DC ブロッカーにより分岐した AE 信号など、プリアンプの電源供給を必要としない場合は、このメニューで DC 電源を OFF にする。

次に Step2 では、データフィルの命名と、計測条件を参照フォルダから呼び出すなどの作業を行

う。Step3 では、最も重要な計測パラメータの設定を行うがその意味を理解したうえで最適な条件を設定することが肝要である。

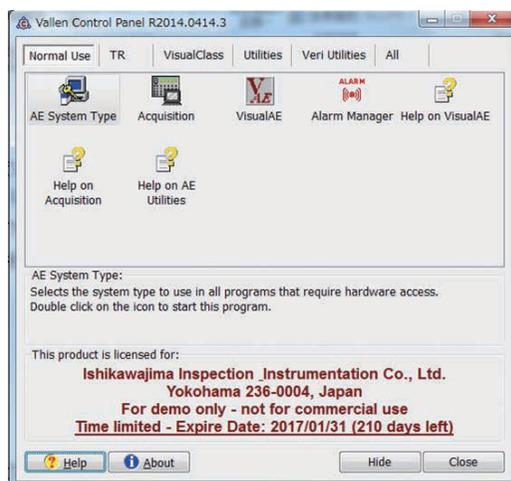


図 7 AMSY コントロールパネル

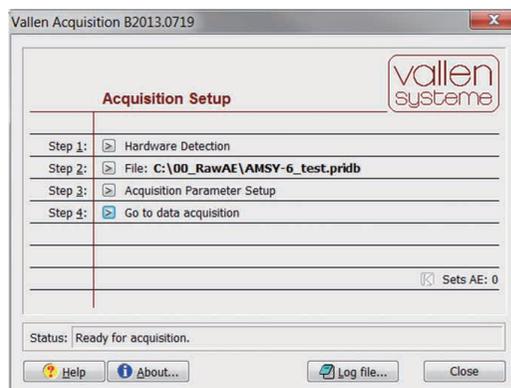


図 8 Acquisition 設定メニュー

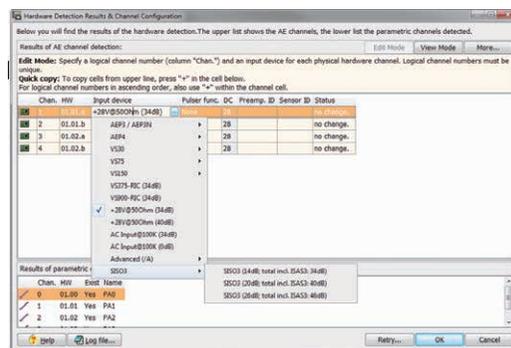


図 9 Step1 ハードウェア設定メニュー

(1) 全 Ch 共通事項

図 10 に全 Ch 共通事項の設定メニューを示す。ここでは、AE パラメータデータおよび TR データ（波形）の測定条件を設定する。3 章で AE パラメータと波形データの違いを述べたが、両者のデータはそれぞれ異なる条件にて計測され異なるファイルに記録される。AE パラメータデータは、パラメータを抽出するためのサンプリングレートの設定のみであるが、TR データは、サンプリングレートに加え、サンプル数および、データ採取パターンを設定を行う。

通常の測定では、AE パラメータデータは一つの AE 波（Hit と称す）が入力しその AE 波が終わるまで測定が続くが、波形データはあらかじめ設定したサンプル数を記録すると、AE 波の継続の有無に関係なく記録を終了する。これはデータ量の違いとコンピュータの性能によるものであり、AE パラメータデータは一つの AE 信号当たり数種類のパラメータに応じた数値が書き込まれるだけであり、一つの AE 信号のデータ量は数十 byte であるが、波形データは、1 サンプル当たり 2byte のデータ量となるため、例えば 10MHz のサンプリングレート（0.1μsec ごとのサンプリング）

で 20480 サンプル（約 2msec 分）の波形を収録すると、1 波形のデータ量が約 41kbyte となる。このため、毎秒当たり数百という AE が発生する場合には、波形データ転送が間に合わなくなり、波形の取りこぼしが生じる。

波形収録条件の設定においては、サンプリングレートおよび、サンプル数は必要最低限とすることが望ましい。必要数の目安としては、周波数解析を考えた場合、一波長当たり 10 サンプル以上入ることが望ましく、検出すべき AE 波も周波数を考慮しなければならない。

なお、最新ソフトでは、「Duration adapted TR」と「Include TR data for artificial hits」というメニューが追加され、Duration（波形持続時間）が続く限り、または従属する AE 波が続く限り、AE 波を収録することが選択できるようになったが、この設定で計測すると波形長さが信号ごとに異なるため、単一ウィンドウによる重心周波数の抽出などを計算させる処理において不都合が生じたり、一つの AE 波の収録に負荷が多くなり、結果として波形の取りこぼしが増えたりすることもあるので、この機能を使用する場合には注意が必要である。

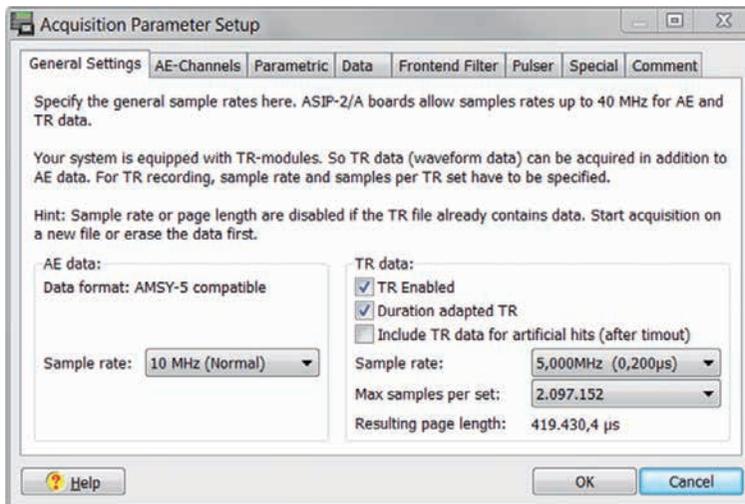


図 10 Step3 パラメータの設定（全 Ch 共通事項）

(2) AE-Ch 設定

図 11 に AE-Ch 設定メニューを示す。この設定メニューでは、計測条件を各々の Ch ごとに設定する。以下に代表的な設定値の意味と設定における注意事項を示す。

① AE enabled、TR enabled

AE データの取得の有無、波形データ (TR) の取得の有無を個別に選択する。ここでの注意は、チェックが外れると AE や波形データを一切取得しなくなるため、AE、TR のそれぞれが on になっていることを確認する。

② Threshold (しきい値)

一般的な AE 計測装置では、あらかじめ設定したしきい値を超える AE 波が入力すると計測が開始される。これは AE 計測では、周囲の機器の作動音に起因した環境ノイズのほか、AE 装置自体の電気回路で発生する暗ノイズが存在するため、これらノイズの影響を受けないよう環境ノイズを計測したうえで、ノイズレベルより 2dB から 3dB ほど高い値にしきい値を設定する。

③ Threshold to noise ratio (浮動しきい値の設定)

浮動しきい値は、ノイズレベルの変化に合わせてしきい値を変動させる機能であり、ノイズレベルに対する倍率でしきい値が決定する。したがってしきい値は、ノイズレベルの変動に合わせてその倍率に応じた値で変動する。しかしながら、波形持続時間やエネルギーなど多くの AE パラメータはしきい値を基準として計算されるため、基準となるしきい値が変動することでデータ間の互換性を失うことになる。このため通常の AE 計測では、しきい値を固定するため、ここでの入力を 0.0 とする。

④ Rearm Time と Duration Discrimination Time

図 12 に AE データ取得のアルゴリズムを示す。AE データは、しきい値を超える信号の入力により、計測されるが、一つの波形を識別す

るための条件として Duration Discrimination Time (波形持続時間識別時間: DDT) と、Rearm Time (連続信号識別時間) がある。しきい値をクロスする信号が入力するとあらかじめ設定した DDT がスタートし、DDT の時間内で信号がしきい値をクロスする度に DDT はリセットされ続け、DDT の時間内にクロスする信号がなくなると一つの AE 波は終了したと認識し、Duration (波形持続時間) が決定される。Rearm Time は、一つの AE 波の計測が終了した後に次に到来する信号が計測を終了したばかりの AE 波の反射波なのか新たな AE 波なのかを見極める時間である。Rearm Time も DDT と同様に時間内でしきい値をクロスする信号が入力する度にリセットされ、Rearm Time 終了後に到来する信号は新たな AE 波として計測される。AE 波の多くは、単一の信号ではなく反射波など多くの従属する波を持つ。したがって DDT により AE 波の計測が終了した後、Rearm Time が続く間にも信号は到来するが、これらの信号は最初に計測した AE 波に従属する信号 (Cascade Hit) として収録される (Cascade Hit の概念を図 13 に示す)。

なお、波形データ (TR) は、従来のソフトではしきい値をクロスする信号が入力すると、プレトリガー分遡った時間からあらかじめ設定したサンプル数のデータが収録されるだけであった。しかし、最新ソフトでは、上述の AE パラメータデータの終了または Cascade Hit の終了に合わせて波形を取り込むことも可能となった。

⑤ Pre-trigger sample

波形データの収録条件を示し、しきい値を超える AE 波が到達した時点から Pre-trigger sample で設定したサンプル数を遡った時点から波形の収録が始まる。

⑥ Calculated gain

AEシステムは、入力した信号の増幅率を自動検知できないため、実際に使用するプリアンプのゲインを入力する。なお、計測条件によっては信号ラインの電圧降下などを考慮し実際のゲインより低めに設定する場合もある。

⑦ Digital Filter 設定

周波数フィルタの設定。検出すべきAE波の周波数に応じ High-Pass および Low-Pass のそれぞれの値を選択する。なお、選択にあたっては使用するセンサの感度帯域、プリアンプに内蔵する周波数フィルタを考慮する必要がある。

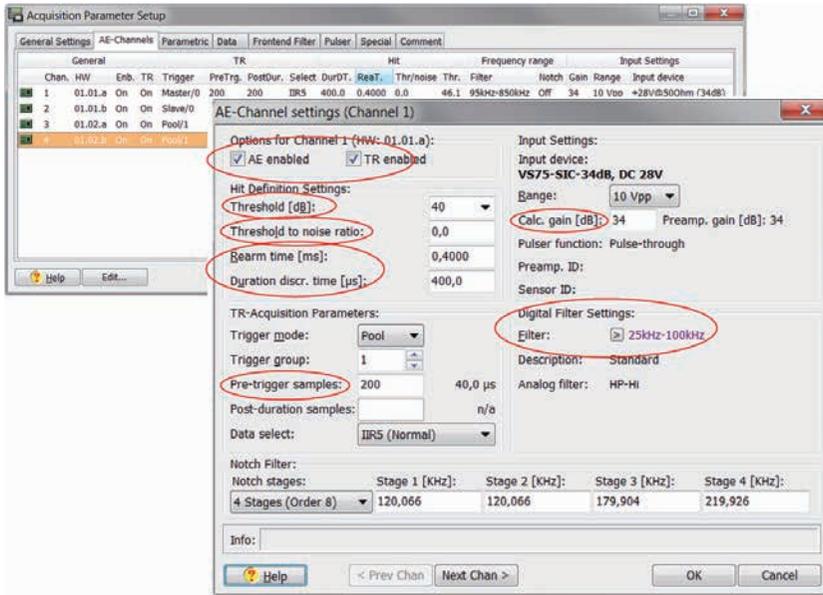


図 11 Step3 AE-Ch 設定

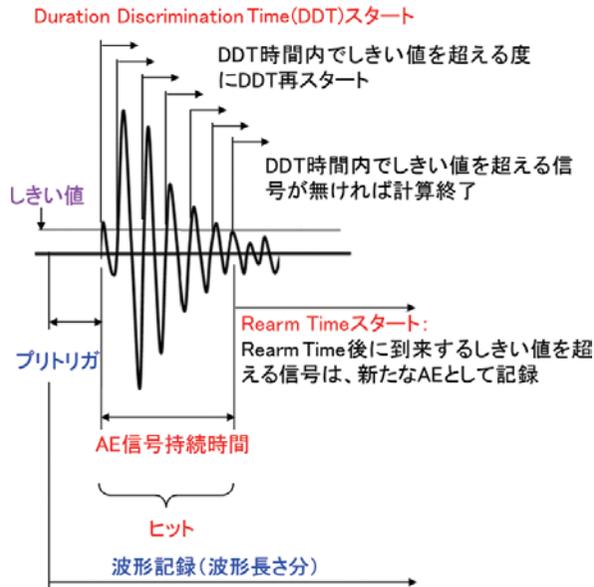


図 12 AE データ取得条件

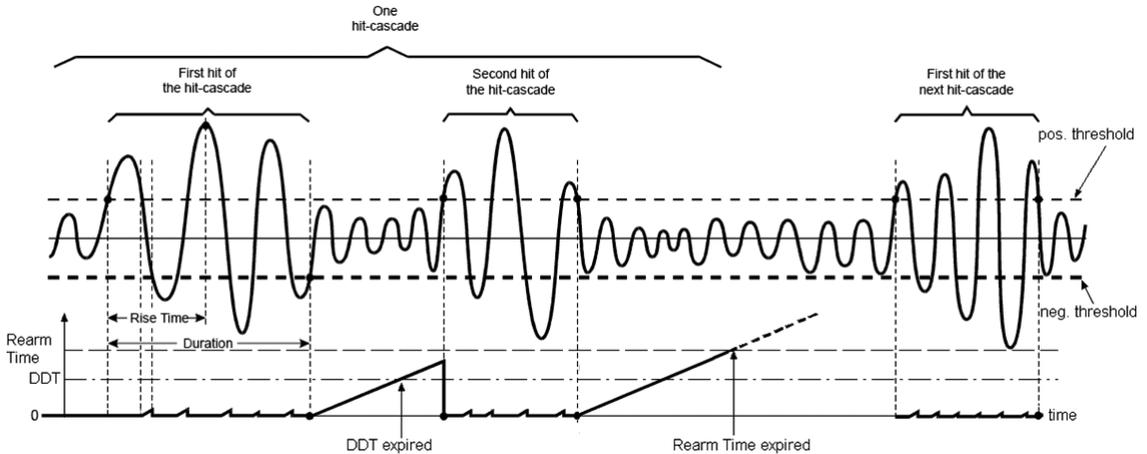


図 13 DDT、Rearm Time、および Cascade Hit の概念

6. AE パラメータ

AE データは、AE 波形の特徴を数値データとして抽出したものであることは前述したが、その代表的なものを図 14、および以下に示す⁽³⁾。

①Hit 数

AE 信号の数、図 13 に示す一塊の AE 波を 1Hit と数える。単位時間当たりの Hit 数は AE 活動度の目安となる。

②最大振幅値 (Maximum Amplitude)

AE 波の最大振幅値 (電圧) を dB 表示したものである。AE 計測では、AE 波の強度はリファレンス電圧 (Vref) を 1 μ V としたセンサ出力電圧との比として、 $\text{dB}=20\log(V/V_{\text{ref}})$ で示される。

例えば、センサ出力が 100 μ V の場合は 40dB、1mV の場合は 60dB となる。

③立ち上がり時間 (Rise Time)

AE 波がしきい値を超えてから最大振幅値に到達するまでの時間。AE 波の突発性の目安となり材料の破壊形態を示す指標の一つ。

④カウント数 (Counts)

AE 信号がしきい値を超える回数。

⑤波形持続時間 (Duration)

AE 波が持続する時間。カウント数を持続時

間で除した値は平均周波数となる。

⑥エネルギー (Energy)

AE 計測では、AE 波の積分値をエネルギーと称する。破壊の規模に応じ発生する AE 波のエネルギーも変化を示す傾向はあるが、AE におけるエネルギーは、あくまでセンサに到達した信号から算出されるものであり、破壊の程度などを評価する場合には、AE 発生源からセンサまでの伝播過程における減衰などを考慮しなければならない。

なお、図 14 に示すようにエネルギーを求める計算式は幾つかあり (E または SS) データの比較に注意を要する。

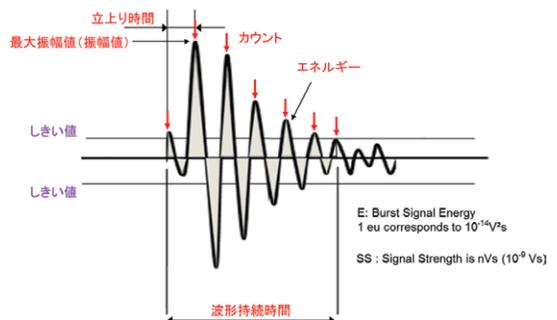


図 14 代表的な AE パラメータ

7. まとめ

本稿では、当社が AE 事業を始めた経緯、AE 事象(AE とは何か)、AE 計測原理と計測系の概念、取り扱う AE 装置の機能、AE 計測条件の設定、代表的な AE パラメータについて説明した。AE 計測では、データを採取した後、データに含まれるノイズと有意信号を分別し、信頼性の高い試験結果を導くことが重要となる。これらデータ採取後の解析に要する基礎項目については次号以降に述べることとする。

なお、AE 事業を開始した経緯については 1 章に述べたが、これは今後世代交代が進む中で、当時の記憶が薄れてゆくことを憂い冒頭に記したものである。タンク AE 計測に関するプロジェクトの開始から Vallen 社との代理店契約の締結、そして現在に至るまで、当社の AE 事業導入および発展に荒川敬弘フェローの多大なご尽力があったことをここに記す。

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・エミッション試験Ⅰ、pp.5-6、2006
- (2) 一般社団法人日本非破壊検査協会：アコースティック・エミッション試験Ⅱ、pp.129-134、2008
- (3) 一般社団法人日本非破壊検査協会：アコースティック・エミッション試験Ⅰ、pp.14-19、2008



検査事業部
部長
博士 (工学)
中村 英之

TEL. 045-791-3523
FAX. 045-791-3547