稼働時の配管装置診断技術

# アコースティックエミッションによる設備診断

＊西本重人

## 1. はじめに

配管設備は、家庭用のガス配管から、原子力発電所、化学プラントのような大型設備まで、さまざまな設備に使用されている。配管設備は、よく人間の血管に例えられるが、内部媒体の漏洩は、設備の稼動に大きく影響するばかりでなく、漏洩した流体の損失や環境の汚染などを考えると、その影響は非常に大きい。配管の漏洩原因として、ほとんどが接続部の不良や腐食に起因すると報告されており、設備を安全に運用するために、配管設備の健全性評価技術の開発が望まれている。しかし、接続部不良が原因で発生する漏洩の検知などについては、ガス検知器や超音波検知法などが実用化されているが、配管の本体の腐食やき裂の評価技術については、内部腐食や配管支持部の腐食などのように直接アクセスが困難な場所に生じることが多く、さらに配管は広範囲に敷設されていることから、有効な評価手段がないのが現状である。

本報では、設備診断手法として最近注目を浴びるようになってきたアコースティックエミッション（AE）をとりあげ、その原理と実施例について紹介し、配管の健全性評価における AE の有用性について解説する。

## 2. AE の基礎知識 [1)]

AE は、き裂や摩耗の進行により発生することはよく知られているが、AE はそれだけでなく腐食、漏洩、放電などでも発生する。本項では、AE の発生原因としてもっとも基本となるき裂と摩耗をとりあげ、AE の発生原因と基本的な評価方法について解説する。

### 2.1 AE とは

材料にき裂が進行すると、結晶間が広がり、あるいはズレが生じて、その周囲に応力の変化が発生する。この応力の変化は、材料中を波のように次々に伝搬していくが、この応力の波（弾性波）をアコースティックエミッション（AE）と呼ぶ。身近な例では、地震も AE の一種で、地面の下で断層にき裂が進み、あるいは断層にずれが発生すると、地面の上の私達はゆれとして感じる。このゆれが AE である。逆に、表面に地震計の役目をはたす AE センサを取り付けて地震波を検出し、その波の特徴を評価することにより、内部の欠陥の動きを把握することができる。

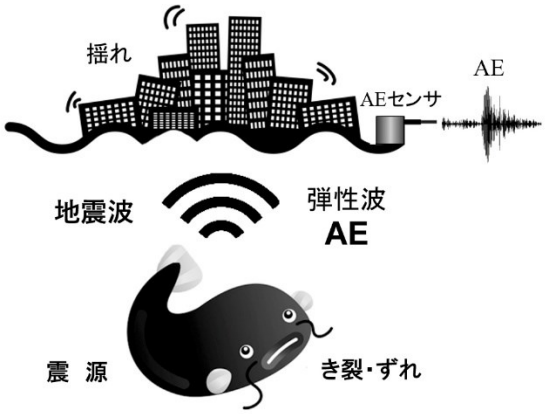
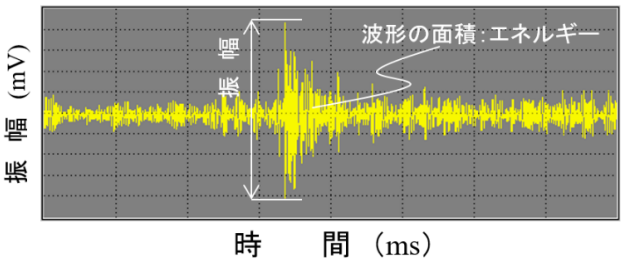



図 1　AE の発生原理

### 2.2 き裂進行時に発生する AE の特徴

上述のように AE はき裂により発生する応力波（弾性波）であるので、き裂進行の挙動と、発生した AE の挙動には相関がある。き裂が進行すると、図 2 に示すような立ち上がりが鋭く、その後に減衰する AE が発生する。この波形形状を、一般的に突発信号と定義されているが、この AE は、き裂が1個進行すると1個発生し、すなわち、き裂の進行する数と、AEの発生数に相関がある。同様に、AE の波形の大きさ、これを振幅と定義するが、この振幅はき裂が 1 回に進展する長さと相関がある。また、波形の面積、これをエネルギーと定義するが、このエネルギーはき裂の面積と相関がある。さらに、発生した AE の音色、すなわち周波数成分は材料によって決定される。例えば、コンクリートは 60kHz 近傍の周波数成分を有し、金属では 100kHz～200kHz 近傍の周波数成分、セラミックスでは 300kHz 近傍の周波数成分をもつ AE が発生する。

＊株式会社 SETLa（セトラ）

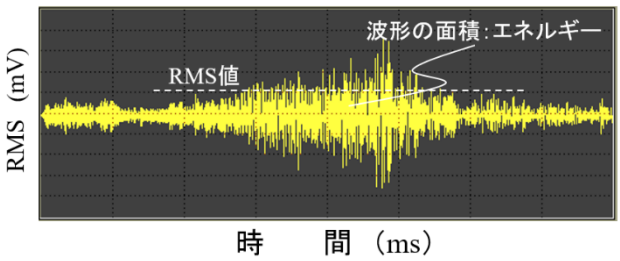



●波形形状:突発型
●発生数:き裂の進展数
●振 幅:き裂の進展距離
●エネルギー:進展したき裂の面積
●周波数:材料により決定

図 2 き裂進展時に発生する AE の特徴

### 2.3 摩耗進行時に発生する AE の特徴

摩耗は、き裂の集まりと考えると、き裂と同様に AE が発生する。摩耗はき裂の集まりなので、摩耗が進行する時にはき裂による AE が多数発生して重なり合い、連続した AE 波形として観察される。この場合、RMS(実効値)は摩擦し合う両面の摩擦係数と相関があり、エネルギーは摩耗量と相関がある。また、配管では、内部流体は配管内面に接触して移動する。この接触部は微小な摩擦現象と考えると、RMSは流量に比例する。

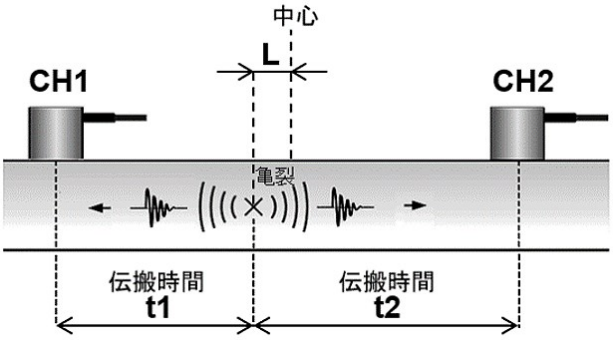



●波形形状:連続型
●RMS 値:摩擦係数
●エネルギー:摩耗量
●周波数:材料により決定

図 3 摩耗進行時に発生する AE の特徴

### 2.4 位置標定

AE センサを 2 個設置すると、き裂の進行により発生した AE は材料中を伝搬して、それぞれの AE センサに到達する。この時、き裂の発生位置からの距離により AE が AE センサに到達するのに要する時間に時間差(t2-t1)が生じる。この時間差を利用して、図 4 に示す式から AE の発生位置を特定することができる。AE センサ 2 個では直線、3 個以上で平面、6 個以上だと 3 次元の位置を特定することができる。




中心からの距離 $L=\frac{1}{2}(t2-t1)\times C$

ここで C=AE の伝搬速度

図 4 AE 発生位置の標定

## 3. 配管のき裂進行と進行位置の評価

一般的な配管では、き裂の進行は超音波探傷や蛍光探傷で検査することができる。しかし、配管全面を検査するには、多大な時間を要する。さらに、保温材に覆われた配管や、特に 2 重配管においては、内部配管にき裂が進行すると外部からアクセスすることは不可能であるので、内管のき裂進展を判断することはできない。本項では、配管のき裂進行を AE で評価する方法について解説する。

### 3.1 き裂評価方法

配管のき裂進展を評価するといっても、基本的には材料に生じるき裂進展であるので、同じ評価ができる。き裂進展時には、き裂の面積は AE のエネルギーと相関があることを 2 項で説明した。したがって配管にき裂が進行すると、き裂発生位置で AE のエネルギーが増加すると考えられる。また、配管にき裂が発生していない場合には、AE は配管全面で同じように発生していると考えられ、AE のエネルギーは均等に分布していると考えられる。しかし、き裂が発生すると、その部分だけエネルギーの高い AE が発生することになるので、き裂の進行位置で AE のエネルギーが高くなる。上記より、配管のき裂進展を評価するには、AE センサを配管上に 2 ヶ所設置し、位置標定を実施して、もっともエネル

ギー値の高いAEの発生位置を求めれば、配管のき裂進展とその位置を評価することができる。

### 3.2 き裂評価の実施例

図 5 に AE センサの設置状況を示す。AE センサは配管に直接接触させる必要があるので、この例では AE センサ設置位置の保温材を除去し、AE センサを接触させている。AE センサは上述のように、AE の発生位置を求める必要があるので、2 ヶ所に取り付けている。

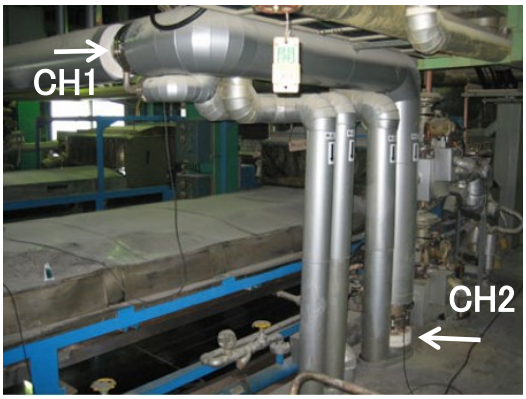



図 5 AE センサ設置位置

AE の評価結果を図 6 に示す。図 6 は AE の発生位置とその位置のエネルギーを評価した結果である。CH1 の近傍に AE のエネルギーの高い位置が存在し、き裂の進行が懸念される。検査後の配管を切断して蛍光探傷を実施した結果、AE のエネルギーの高い位置でき裂が認められた。

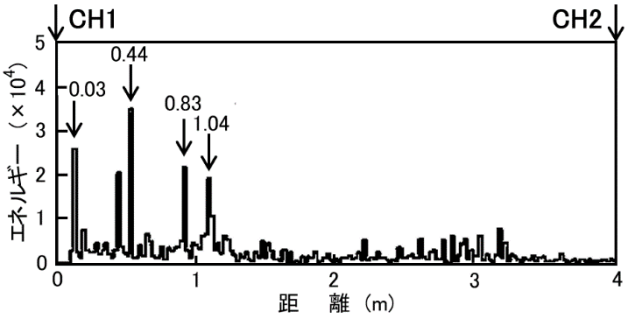



図 6 AE 発生位置

上記では、AE センサを配管に直接取り付けているが、直接取り付けれない場合には、ウェーブガイドを使用する方法がある。ウェーブガイドとは、例を図7に示すが、AE センサの検出部に図のような細いガイドを接触させて使用する。本ガイドは、本来は高温部から AE を検出するもので、AE は細いガイドを伝搬して AE センサに到達するが、熱はガイドが細いので AE センサまで届かない。このウェーブガイドを保温材の上から突き刺して配管に接触させれば、保温を外すことなく AE を計測することができる。

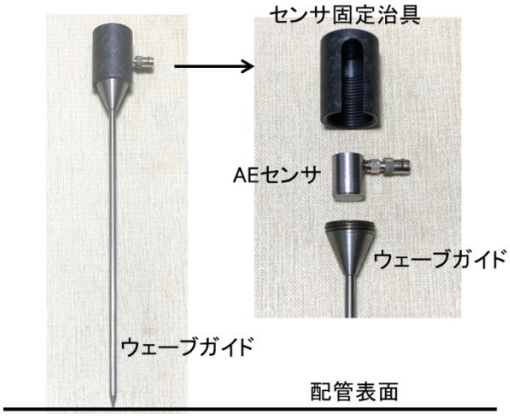



図 7 ウェーブガイド

## 4. 配管の腐食進行と進行位置の評価

腐食進行により AE が発生することは、1980 年ごろに知られるようになり、Esso や BP、ICI などの石油メーカーを中心に、主にタンクの腐食検査に利用されるようになった[2)]。本項では、AE による配管の腐食評価の方法を解説する。

### 4.1 腐食進行の評価方法

腐食進行による AE の発生原理は、正確には解明されていないが、図 8 に示すような現象が発生原因と考えられている。図 8 のように、腐食が進行すると腐食進行部でき裂の進展や化学変化が生じ、また腐食生成物の離脱などが生じて、その周囲に原子レベルで応力伝搬が生じる。これが、AE の発生原因と考えられている。図 9 に実配管で試験された、腐食進行体積と発生した AE のエネルギーの関係を示す。腐食進行量と発したエネルギーに相関が認められる。なお、データは省略するが、腐食により発生する AE の周波数成分は、き裂進行時に発生する AE とは異なり、60kHz 近傍に分布している。

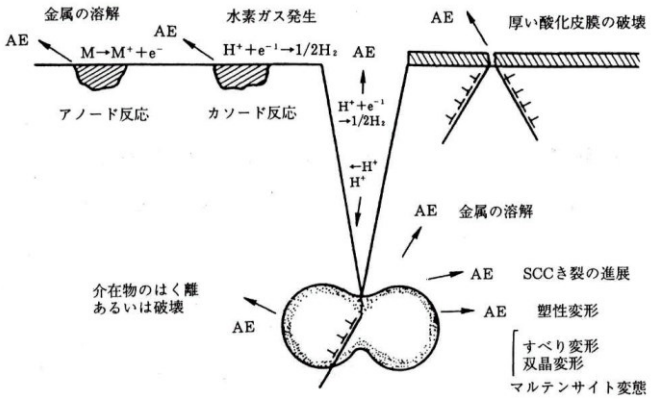



図 8 腐食による AE の発生原因

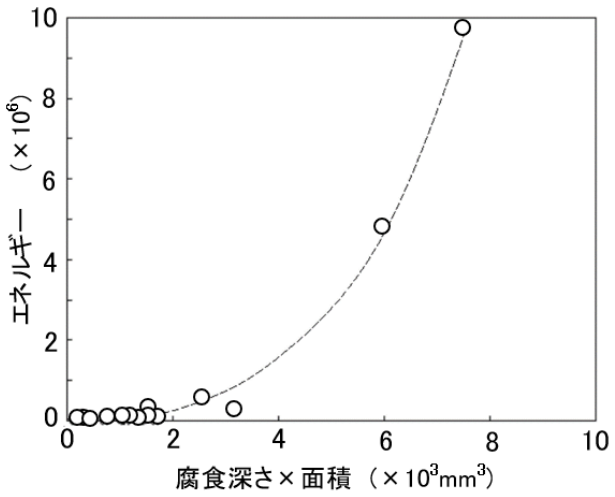



図 9　AE エネルギーと腐食体積の関係

### 4.2 腐食進行評価の実施例 [3)]

図 10 に AE センサの設置状況を示す。き裂進行の評価と同様に AE センサは 2 ヶ所に取り付けている。腐食評価では上述のように発生する AE の周波数成分は 60kHz 近傍であるので、伝搬による減衰を考慮すると、AE センサ間の距離は 10m 程度が限界である。

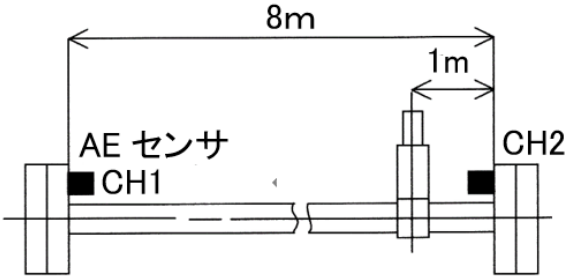



図 10　AE センサ設置位置

図 11 に評価結果を示す。CH2 の近傍に AE のエネルギーの高い位置が存在し、腐食の進行が懸念される。図 12 にエネルギーの高い位置の外観写真を示す。腐食の進行が認められる。

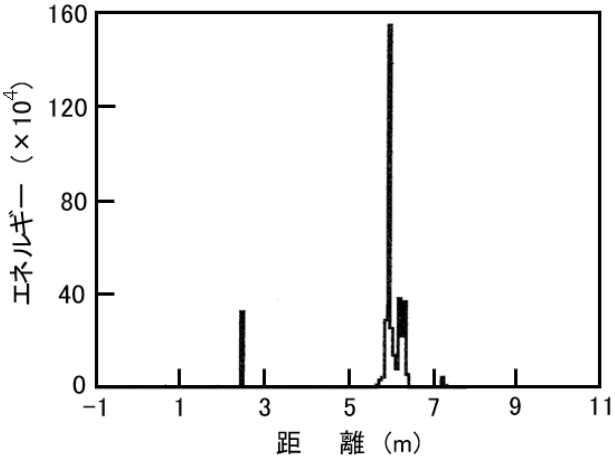



図 11　AE 発生位置

図 12　AE 発生位置の状況

本結果のように、AE により腐食進行を評価できるが、肉厚の絶対値を評価することはできない。そこで、AE による配管検査は下記のように実施する。上記のような検査を、検査対象の配管全てに実施し、エネルギーの分布を求める。その後、エネルギーの最も高い位置を解放点検して超音波肉厚計等で、実際の肉厚を検査し、補修の必要性を判断する。図 9 で示したように、腐食進行量と AE のエネルギーに相関があることから、エネルギーの大きさが減肉量と相関すると考えられる。そこで、発生したエネルギーの大きい位置から順番に肉厚検査を実施し、補修の不要な肉厚となった場合、そのエネルギー以下の配管は補修の必要はないと考えられ、解放点検は不要となる。

## 5. 配管の漏洩と漏洩位置の評価

配管の漏洩は、設備としてもっとも発生してはいけない重大な損傷である。漏洩が発生すると、漏洩部で流体の流出により応力の変化が発生し、これを一種の AE として検出することにより、漏洩を評価することができる。本稿では AE による配管の腐食評価の方法を解説する。

### 5.1 配管の漏洩の評価方法

家庭用ガス配管に漏洩が発生した場合に発生した AE の波形を図 13 に示す。漏洩量は、石鹸水を塗布して泡の発生する程度の漏洩である。突発型の AE の発生が認められる。この場合、漏洩量が少なく、瞬間的に漏洩が発生していると思われ、発生する波形は漏洩している時間が短いので、持続時間の短い突発型の波形を示している。漏洩量が多くなると AE の発生も連続し、その波形は連続型となる。図 14 に発生したAEの周波数成分を示すが、20kHz～60kHz に特徴を有する。

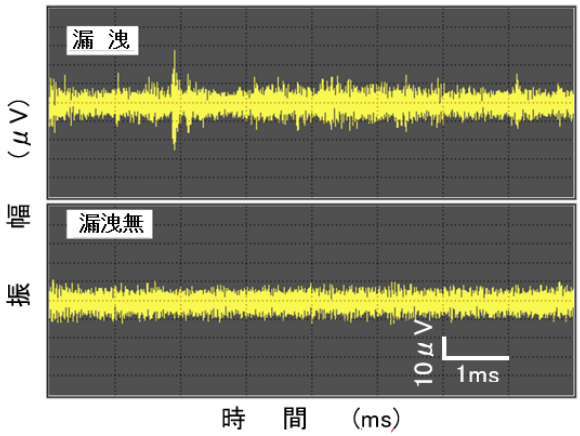



図 13 漏洩時の AE 信号

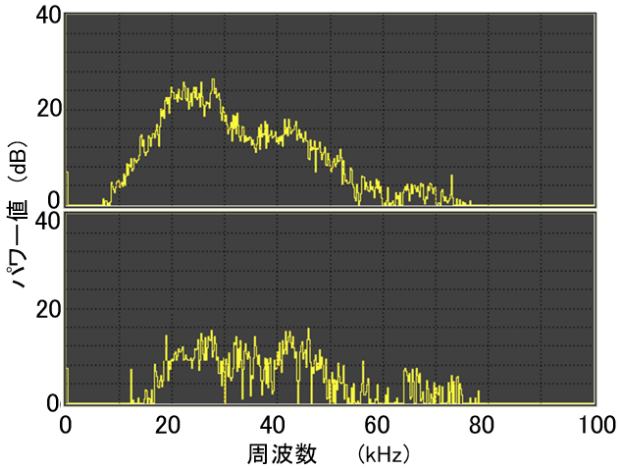



図 14 漏洩時の AE の周波数成分

図 15 に漏洩量と AE の振幅の関係を示す。漏洩量と振幅に相関が認められる。ただし、本関係より、AE により漏洩量を計測できるように判断できるが、実用面では AE は伝搬する時に減衰し、また伝搬経路が複雑であるので、漏洩量の絶対値を評価できるのは条件が整った時だけで、通常は難しい。

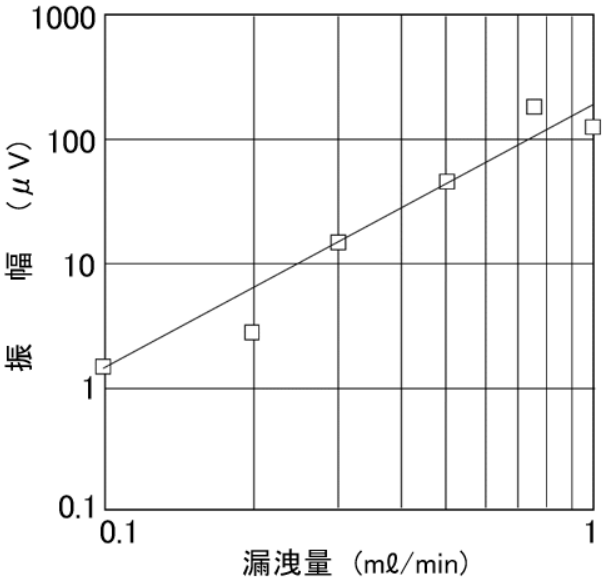



図 15 漏洩量と振幅の関係

## 5.2 配管漏洩評価の実施例

図 16 に計測対象と AE センサ設置位置を示す。計測対象は、実漏洩配管を切断して取り出したもので、使用時と同じ水圧をかけている。

図 17 に AE の発生位置とその位置のエネルギー値を評価した結果を示す。複数位置で AE のエネルギーの高い位置が認められる。図 18 に、AE のエネルギーの高かった位置と、漏洩位置（丸印）を示す。AE のエネルギーが高い位置と漏洩部が一致している。

図 16 試験体（実漏洩配管）

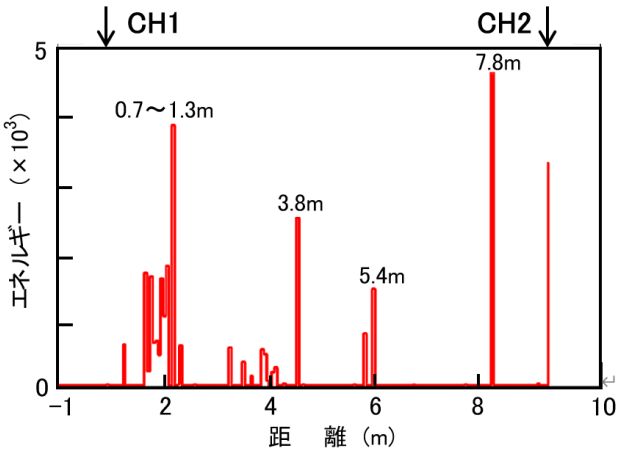



図 17 AE 検査結果

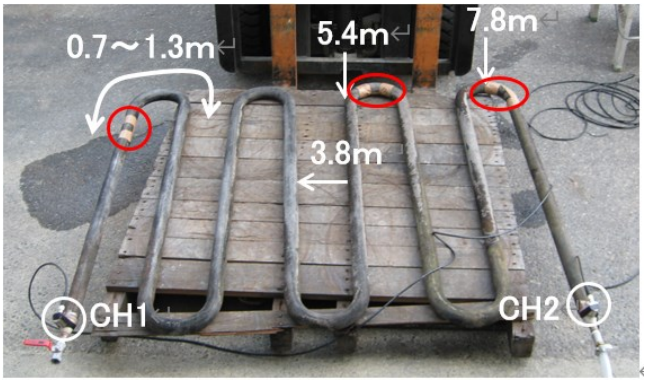



図 18 AE 発生位置と漏洩位置

## 6. 配管の閉塞の評価

配管内部に内容物が付着して大きくなると、閉塞を生じて生産に影響をおよぼす。また、閉塞による配管内の圧力上昇により、設備そのものにも影響をおよぼす場合がある。閉塞の検出方法としては、一般的には圧力を計測する方法や、ポンプの電流を評価する方法などが行われているが、閉塞量が大きくならないと検出できず、早期に検出する技術が望まれている。本項では、AE を用いた閉塞の評価方法について解説する。

### 6.1 閉塞によるAEの発生原理

配管を通過する流体は、配管の内部を擦って通過するので、配管の内面では内容物と配管内面で摩擦が生じている。この摩擦力により配管内面は微小な摩耗を生じ、2.3 項で示したように、摩耗による AE が発生する。また、配管内面に付着が発生すると、この付着物の脱落はき裂の進行と考えられるので、脱落によっても AE が発生する。さらに、付着物が大きくなると、付着物は流体の移動に対して障害物となり、付着物を内部流体が通過する時に流体の流れが乱されて乱流を生じる。この乱流は、高周波の応力波を発生し、一種の AE が発生する。

### 6.2 配管の閉塞評価の実施例

図 19 に、配管に内容物が付着した時の付着物の高さと発生した AE のエネルギーの関係を示す。AEセンサは、付着が生じやすい部分の近傍に取り付けた。付着物の高さとAEのエネルギーに相関が認められ、発生する AE のエネルギーを評価することにより、配管の閉塞を検知できることが分かる。

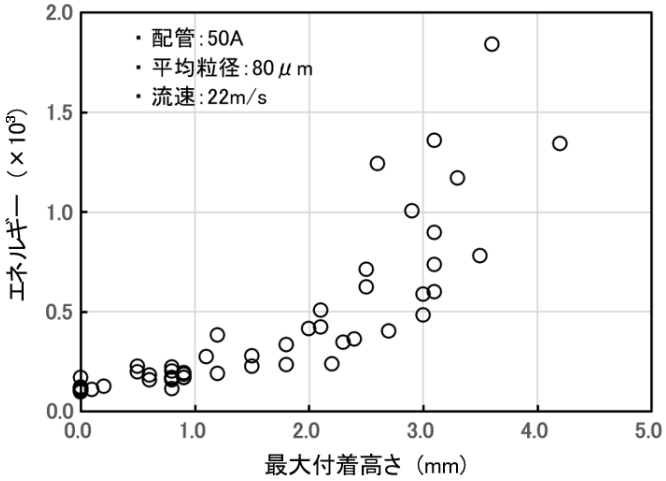



図 19 付着物の高さと AE のエネルギーの関係

上記では、AE センサは配管の付着が生じやすい部分に取り付けると説明したが、聴診器をあてるように AE センサを移動しながら AE を計測し、エネルギーの高い部分があればその部分に付着が大きいと判断するような方法も可能である。

なお、AE のエネルギーは流速、通過する粒子の径によっても変化するので、AE を計測する時は、常に同じ条件である必要がある。逆に言えば、粒子径や流速の評価にも使用することができる。

## 7. AE 検査装置

AE を評価するのに使用する AE 計測装置や AE センサは、従来は操作が複雑で高価であったが、ここ数年、価格も大幅に低下し、操作も簡単になって身近に使用できるようになってきた。本項では、配管検査に使用できる AE 検査装置を紹介する。

### 7.1 AE 検査装置

AE による配管検査に必要な検査機能としては、上記の実施例のように AE の振幅とエネルギーの評価が可能な機器となる。また、AE の発生位置を求める必要がある場合には、CH 数は最低 2CH が必要である。検査によく使用される AE 計測装置を図 20 に示す。本装置は 2CH のハンディ―タイプの AE 計測装置で、装置の液晶画面で結果をリアルタイムに観察することができる。本章で紹介した実施例は、ほぼ全て本装置で計測されている。

図 20 2CH AE 検査装置

正常な配管の AE データをあらかじめ求めておけば、比較法で損傷を評価することも可能である。さらに、欠陥の位置の評価が不要であれば、1CH でも評価できる。図 21 に簡易検査でよく使用される AE 計測装置を示す。本装置は、少しユニークな特徴を持っている。AE の処理部は先端の AE センサ部に組み込まれ、データ

はタブレットや携帯電話などの携帯端末で観察することができる。

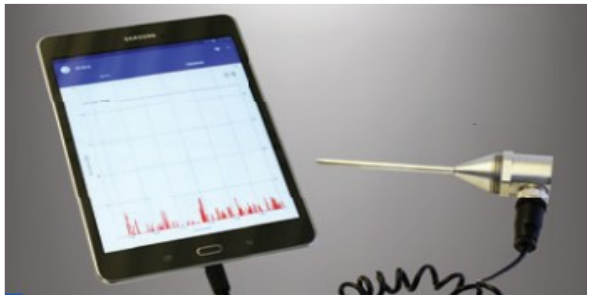


図 21 1CH AE 検査装置

重要な配管に関しては、例えばリアクターやボイラーなどでは常時監視したい場合がある。そのような場合には、設置型の AE 装置が必要となる。図 22、図 23 に設置型の AE 計測装置例を示す。本装置は、AE を計測して SD カードや内部記憶装置にデータを保存することが可能で、LAN や RS232C などのインターフェースを装備していて、外部にデータを転送することができる。また、アラームなどの外部出力機能を有している。図 23 の装置は、Wifi または LAN 接続により、タブレットなどの携帯端末のブラウザでデータを観察することができる。価格は、従来は設置型のAE装置は数百万円していたが、現在では、本体だけなら 50 万円以下の製品も提供されている。

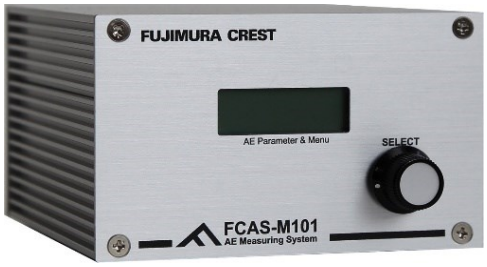



図 22 設置型 AE 計測装置

図 23 設置型 AE 計測装置

## 7.2 AE センサ

AE はその発生原因により、発生するAEの周波数成分が異なる。そこで、使用するAEセンサは、検査対象で評価する周波数帯域にもっとも近い共振点を持つセンサを選択する必要がある。例えば、き裂の場合には 150kHz、腐食では 60kHz、漏洩では 30kHz に共振点のある AE センサを選択するのが有効である。図 24 に、配管検査によく使用されるAEセンサ例を示す。AE センサの形状は、一般的には直径が 20mm 程度で、小型のセンサでは 5mm程度のものも供給されている。

図 24 AE センサ

## 7.3 AE センサの校正

AE センサは使用に伴う劣化は少ないが、AE センサの感度は検査結果に大きな影響をおよぼすので、定期的な校正が推奨されている。AE センサの校正方法として、現在は絶対感度校正法と相対感度校正法の 2 種類が使用されている。ただし、相対感度法はあくまでも参考データ取得のための方法で、販売されている AE センサは絶対感度校正法の音圧法で校正されている。

表1AE センサの感度校正（絶対感度校正法）

| | | |
|---|---|---|
| 一次校正法 | CEN ISO/TR 13115:2011<br>相互更生法（NDIS 2109） | **日本非破壊検査協会規格(NDIS)**<br>3個のAEセンサを大きな金属のブロックに取り付け、3個のAEセンサ相互に送受信して校正する |
| | ISO12713<br>（ASTME1106） | **米国 NIST**<br>鋼ブロック上でガラスキャピラリーを破壊させ、標準検出器と AE センサで同時に波形を取り込み、そのデータから校正する |
| 二次校正法 | CEN ISO/TR 13115:2011<br>音圧法（NDIS 2109） | **販売されている AE センサの校正法**<br>相互校正法により送信波電圧感度を求めたAEセンサを送信波として鋼のブロックに設置。校正対象のAEセンサで受信し、受波電圧感度を評価 |

絶対感度校正法は専用の検査機器が必要なため、メーカーに検査を依頼することになる。日々の点検では、このような校正を行うのは困難であるので、簡易的な方法が行われている。その一つの方法が、シャープペンシル圧折法である[4)]。図 25 に示すように、AE センサを通常の計測状態に取り付け、その近傍でシャープ

ペンシルの芯を圧折する。シャープペンシルの芯は径が一定で品質が安定しているので、圧折時に発生する AE の振幅が一定となり、これを基準信号として AE センサの出力を計測し、AE センサの感度を検証する。

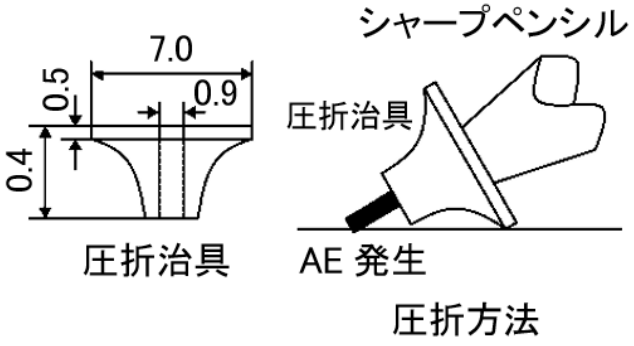



図 25 AE センサの校正

## 8. おわりに

AE を用いた配管の検査は、AE の振幅やエネルギーなど簡単なパラメータを評価するだけで行うことができる。また、従来は計測装置や AE センサが高価であったので、なかなか普及が進まなかったが、最近の IoT の普及に伴ってその価格は大幅に低下し、同時に操作性もよくなっているので、急速に使用範囲が広がっている。しかし、AE検査はその知名度がまだまだ低く、普及が遅れているのは事実である。今後、たくさんの方々が AE を使用し、配管診断の切り札としてさらなる発展と普及が進むことを期待する。

## 引用・参考文献

1) 尾上守夫、山口楠雄、仲佐博裕、佐野謙一、磯野英二、渡辺哲夫：アコースティクエミッションの基礎と応用、コロナ社（1976）
2) 湯山茂徳：アコースティクエミッション（AE）法による腐食損傷評価、防食技術、35、3、pp.163-170(1986)
3) 西本重人　他：機械システムの状態監視と診断技術、日本機械学会、コロナ社（2021）
4) Mizutani,Y. et. Al.:Practical Acoustic Emission Testing,Springer,(2016),72-73.

【筆者紹介】
氏名　西本重人
所属　株式会社 SETLa（セトラ）
TEL.　06(4302)5286
Email.　nishimoto@setlabo.com