105 Acoustic Emission 法 (AE 法) と振動法の融合化による回転機器の診断

Diagnosis of rotation machines by data fusion of acoustic emission and vibration method.

日笠 久和 (旭エンジニアリング) 今中 拓一 (旭エンジニアリング)
古江 敏彦 (九州電力) ○前田 守彦 (非破壊検査)

Hisakazu HIGASA, TAsahi engineering Co., Ltd., 1-8, Kohnan 4-chome, Minato-ku, Tokyo

akuichi IMANAKA,

Toshihiko FURUE, Kyushu Electric Power Co., Inc., 2-1-47, Shiobaru, Minami-ku, Fukuoka

Morihiro MAEDA, Non-Destructive Inspection Co., Ltd. 1-18-14, Kitahorie, Nishi-ku, Osaka

Key word: Acoustic emission, Oscillation, Diagnosis

1. 初めに

状態監視の手法である Acoustic Emission (以下 AE) 法と振動を組み合わせ、マルチ・センシングすることによって、より信頼性の高い状態監視が可能になると考えられる。即ち、各々の信号が発生するメカニズムは、AE 信号では塑性変形、亀裂の発生・進展、エロージョン、摩耗、物質同士の衝突、流体の漏洩等、振動現象では機器構成部位のアンバランス、ミスアライメント、外力等環境の変動による共振により発生する。従って、例えば、繰り返し応力が作用する回転機器などでは、AE 信号は系全体の劣化・損傷に対して直接的原因となる亀裂等の発生やその進展過程に対して、また、振動は局所的損傷の結果、系全体の異常に対して敏感に対応すると考えられる。換言すれば、機器の損傷または劣化の始まりのインディケーションとして AE 法が、さらに損傷が進行して機器の実質上の使用限界を指示する手法として振動法が特徴付けられる。こう言った観点から、本報では AE 法および振動法について、各々の特徴と融合化による設備診断技術の向上について概観する。

2. AE の特徴

AE とは、物質が応力下での変形や破壊等、動的過程の中で発生する音響パルスに対する表現である。

1) AE トランスデューサによる歪みの検出限界

圧電素子内の応力 σ によって発生する電界の強さ T は、電圧出力係数 g_{33} の定義から

$$T = g_{33} \cdot \sigma \quad (\text{V/m}) \quad \dots (1)$$

で表される。圧電素子の弾性定数を E_x 、圧電素子の厚みおよび表面の変位を各々 ℓ 、 δ とすると(1)式は、

$$T = g_{33} \cdot E_x \cdot \left(\frac{\delta}{\ell} \right) \quad (\text{V/m}) \quad \dots (2)$$

となる。従って圧電素子の両端に発生した電圧 V は、

$$V = T \cdot \ell = g_{33} \cdot E_x \cdot \delta \quad (\text{V}) \quad \dots (3)$$

によって表す事ができる。一例として PZT 圧電素子の代表的な値、 $g_{33} = 24.4 \times 10^{-3} \text{ V} \cdot \text{m/N}$ を、弾性定数 $E_x = 58.5 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ を(3)式に代入すると、通常検知可能な電圧の限界 10^{-5} V であることから、変位の検出限界は $0.70 \times 10^{-14} \text{ m}$ 程度となる。これは長さ 1 cm の試験片の場合、 7.0×10^{-13} の歪みに相当する。市販のトランスデューサの校正曲線によると、多くの場合 $1 \mu \text{ bar}$ 当たり 1 V より約 80 dB 低い電圧を発生する。上記の場合と同様に電圧の検出限界を 10^{-5} V

とすると、被計測体として鋼の場合を例にとると、弾性率が $2.1 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ 程度であるから 5×10^{-13} の歪みに相当しこれも同程度の値となる。この値は AE として検出される特徴的な歪み量のオーダーを示すと共に、AE 発生機構を考察する際の手掛かりとなる。

2) 測定量の持つ意味 (AE パルスの特徴)

まず、AE 法で計測される計数率の持つ意味について考察する。AE 信号について波高値解析を行う場合、その下限レベルは検出増幅器の雑音波高値に設定されるのが一般的である。従って、それは計測される AE パルスの波高値の持つ物理的な内容とは一般に無関係である。実際に観測される AE は、一定の統計的な分布則に従って発生したパルスの分布については母集団の統計的性質と結びつけて解釈する必要がある。中から任意の波高値を超える物だけを選別している訳であるから、その数や大きさの分布については母集団の統計的性質と結びつけて解釈する必要がある。

図 1 に AE 発生挙動が統計的に比較的良好に理解されている岩石について、その破壊に伴う AE パルスの波高値と頻度の関係を示す。(a)は構造が不規則な物で、この場合は、岩石の例である。(b)は構造が規則的な場合に見られる折れ曲がりを示す例で、材質は松脂である。(a)と(b)とで大きく異なっていることが分かる。

Fig. 1 Relationship between probability density and AE pulse height.

(a) rock with irregular structure
(b) resin with regular structure

塑性変形や破壊のプロセスを、その時発生する AE の計数

率と対応させようとする時、その統計的性質が明確で無い場合が多く、解釈には注意を要する。その他、例えば、実際に活動した転位による滑り帯の数（一般的には、AE 源）に比較して、計測される AE パルス数は通常 1/100～1/1000 以下と考えられるので、非常に少ない標本によって全体の推定を行うという危険や、変換器やフィルターの周波数特性による制約から、実際に発生したパルスの分布則が歪められている可能性もあることなどを考慮しなければならない。現在の処、AE パルスの解釈に関しては、その大きさの統計法則や対応する現象を物理的に意味付けることが AE 法にとって一つの課題であると考えられる。

今まで述べてきたことは、個々のパルスが弁別された突発型の AE パルスを対象にした物であるが、多数のパルスが連続して発生する場合や、一つのパルスによって試験片内（厳密には変換器や増幅回路を含めた一つの振動系として考えなければならぬ）に励起された振動が減衰してしまわないうちに次のインパルスが発生するため、個々のインパルスが弁別できずに連続型の AE として観察される。連続型の AE の場合、ランダムノイズとしての正確が強く、そのことは図 2 に示した AE パルスの確率密度関数の形からも理解できる。

Fig.2 Probability density function of AE signal

図 2 には比較のために電氣的な雑音および正弦波を連続型パルスと併せて示してある。これから分かるように、連続型 AE は完全なガウス雑音ではないがそれに近い。このような連続型の AE の場合には、ランダムノイズと考えるならばむしろ、確率密度関数や周波数スペクトラム（この場合、広帯域のトランスデューサの使用が望ましい）によって信号の性質を記述するのがよい。

3) AE 発生機構

物質に応力が作用すると、その大きさに応じた歪みエネルギー

$$U = \sigma^2 / 2E \quad \dots (4)$$

が物質中に蓄えられる。（ σ ：応力、 E ：弾性率）この歪みエネルギーは、微小亀裂の発生や、転位の増殖運動によって開放される。開放された歪みエネルギーは運動エネルギーに変換され、エネルギー開放源からエネルギー束 $u = Uv_s$

（ v_s ：音速）で物質内を伝播しエネルギーを散逸する。 u は、

$$u = \sigma^2 v_s / 2E \quad \dots (5)$$

で与えられる。このエネルギー束の大小が AE 特性として観測される。AE によるエネルギー散逸の機構を亀裂発生の場合について、以下簡単に考察する。

Griffith crack の理論によれば、厚み H の板に、長さ $2L$ の亀裂が発生した場合、それによって開放される全歪みエネルギーは

$$U = \pi \sigma^2 L^2 H / 2E - 4\gamma L H \quad \dots (6)$$

で与えられる。ここで γ は表面エネルギーである。歪みエネルギーの散逸が起こるか起こらないかは、発生した亀裂の長さが臨界値

$$2L_c = 8E\gamma / \pi \sigma^2 \quad \dots (7)$$

より大きい小さいかという条件で決まり、この臨界値より大きい場合にエネルギーの散逸が起こる。亀裂長さ L が $L > L_c$ の場合、(6)式の 2 項が無視されて、エネルギー束は $u = (dU/dt) / A$ 、 $A = 2LH$ より

$$u = (\pi \sigma^2 / 4E) v_c \quad \dots (8)$$

で与えられる。 v_c は亀裂の伝播速度である。この結果は、(4)式とその大きさにおいて等しい。また、この結果によると、亀裂の長さに依存せず亀裂表面から等しい密度エネルギーが放出される事になる。つまり、亀裂の表面全体にわたって略、等しい振幅振動が励起される事を意味している。スペクトル密度の中心はおおよそ、

$$\nu = v_s / 2L \quad \dots (9)$$

で、この場合、 $2L$ は亀裂伝播の臨界長さ L_c より大きいから、この式を用いて材料が破壊する時に発生する（または検出される）最大の振動数を求めることができる。

(7)式を用いて、

$$\nu < \pi \sigma^2 v_s / 8E\gamma \quad \dots (10)$$

$E = 2 \times 10^{12} \text{ dyn/cm}^2$ 、 $v_s = 3 \times 10^5 \text{ cm/sec}$ 、 $\gamma = 1200 \text{ ergs/cm}^2$ 、鉄の破壊強度として、 $\sigma = 7 \times 10^9 \text{ dyn/cm}^2$ とすると、 $\nu < 4 \times 10^9 \text{ Hz}$ となる。

疲労等、塑性変形による転位の増殖の場合も同様に考えられる。

4) 実際の歪み検出感度の評価

実際に AE として観察される信号は、突発型の場合も連続型の場合にも広い周波数範囲にわたる複雑なスペクトルを持っており、入射音波に対する変換器の動的な応答の解析は困難である。従って、先述した静的特性を基に検討した検出感度をそのまま実際の検出感度と考えるわけにはいかない。現在の処、実際の AE に対する受波感度は NDI で決められた基準に沿って決められるが、ここでは塑性変形中の AE の測定から 1 々の AE パルスに対応する歪み量を検討した論文に基づいて歪み検出感度を評価した例を紹介する。

Fisher らは変形中に検出した AE 信号が全歪み変形と対応する。つまり全塑性変形過程に関与した転位の運動と AE 信号が一对一に対応すると仮定して、パルスの総数 N と歪み ϵ から一つのパルス当たりの歪み $\Delta \epsilon$ を評価している。即ち、

$$\Delta \epsilon = \epsilon / N \quad \dots (11)$$

Mg 単結晶を 11% 塑性変形することによって 139,000 個のパルスが検出されたことから、 $\Delta \epsilon = 8 \times 10^{-7}$ を得、また Cu 単結晶では 7.5% の塑性変形で 152,000 個のパルスが検出され $\Delta \epsilon = 5 \times 10^{-7}$ を得ている。これらの値は個々のすべりサイトの活動による歪み量としては大きすぎ、この点について Fisher らは、多数のすべりサイトが雪崩的に活動して巨視的なすべり帯を形成する機構を提案している。Fisher らのこの実験では 3～20kHz の低周波領域で測定が行われていて、突

発型の AE のみが検出されている。一方、その後の多くの実験結果によると、Cu 単結晶では主に連続型の AE が変形中に観測されている。連続型の AE は、分離不可能な振幅の小さい多数の突発型 AE が繰り返し発生したものと考えられることから、最近の測定系の能力を考慮すると AE 法の歪み検出限界は

$$10^{-7} > \Delta \varepsilon > 10^{-12}$$

の範囲であると考えられる。

5)微小変形の観測手段としての AE

応力と歪みの関係を調べる際、測定に用いるスケールによって計測手法も、材料に関して得られる情報の種類も異なるので、測定感度によって計測の立場を明確にしておく必要がある。図3は Brown による転位の動特性の研究に対する立場を分類した例である。前述した AE 法の検出感度は、この分類によるミリマイクロの領域に及ぶ。

Fig.3 Scale of strain sensitivity in stress-strain experiments

変形を与えた結晶に見られるすべり線の観察結果によると面心立方金属の場合、容易すべり領域におけるすべりステップの高さは約 12 個の転位が抜け出した程度に対応し、すべり線長さは 600~1000 μm 程度である。また、転位の平均自由行程 x は 100 μm 程度である。一本のすべり帯の中での運動転位の平均長さを $n\text{cm}$ 、その平均の運動距離を $l\text{cm}$ とすると、その転位線によるせん断歪み $\Delta\gamma$ は、

$$\Delta\gamma = \frac{(nlb/A)}{h} = \frac{nlb}{V} \quad \dots (12)$$

で与えられる。ここで、 A はすべり面に平行な結晶の断面積、 b はバーガースベクトルの大きさ、 h はすべり面に垂直方向にとった結晶の長さ、 V は体積である。 $V=1\text{cm}^3$ として上述の観測結果の数値を用いて $\Delta\gamma$ を計算すると、 4×10^{-10} となり、この値は先程検討した検出限界と同程度である。

AE 法のもう一つの際だった特徴は、時空間における分解能が高い ($10^{-5} \sim 10^{-7}\text{sec}$ 程度) ことである。一例として、転位の運動を例にとり検討してみる。すべりサイト一個の活動を分離して検出するために必要な時間分解能 j (sec) として平均自由行程 x ($\sim 25\mu\text{m}$; 結晶粒径の 1/2 程度) を転位が通過するのに要する時間を検討すると Cu 単結晶の降伏点の転位の運動速度 v は 10^3cm/sec 程度であるから、

$$j \leq \frac{x}{v} \sim 2.5 \times 10^{-6} \text{ (sec)}$$

となり AE 法は十分な分解能を有している。更に、個の時間分解能に併せて、複数のセンサより正確な位置標定が出来る。即ち、AE 法はその検出感度および時空間分解能のいずれから見てもミリマイクロ領域の現象を検出する手段としてのポテンシャルが高い。この特徴が変形や破壊の微視的過程を調べる手段として、AE 法に本質的な重要性を与えていると言える。

3. 設備診断技術

構造物および設備の健全性を評価する場合、外部から何らかのストレスを付加し、それに対する応答から評価するアクティブな手法、超音波探傷等はこれに相当する。この他に、構造物や設備自体が発信する信号を受信して健全性や損傷の

発生を評価するパッシブな手法がある。このパッシブな手法に上述した AE 法の他に振動法がある。振動法は回転体の診断手法として古くから用いられてきている技術であり、現在でも回転体の評価法として最も一般的な手法として広く応用されている。AE 法も特に低速回転軸受けの損傷診断が可能であることから、回転体の診断法としては最近になって注目され始めた。

1)振動の基本

振動には「変位、速度、加速度」の三つの基本量がある。この三つの基本量は振幅 a と振動数 f で表される。変位は振動数 (周波数) に無関係であるが、速度は比例、加速度は二乗に比例する。これを通常の機械振動に当てはめて図示すると図4のような周波数特性を示す。即ち、変位は 10Hz 以下の振動に対して、10Hz~1kHz では速度が、又、1kHz 以上では加速度が計測に適している。

Fig.4 Frequency dependence of amplitudes of displacement, velocity and acceleration for vibration.

2)振動ピックアップの検出感度

振動ピックアップの検出限界を 1mmG_{0p} 、振動加速度 A を $A=A_0\sin(\omega t)$ とすると、変位 D は $D=(A_0/\omega^2)\sin(\omega t)$ となり、周波数に対する変位の検出限界を計算すると、図5が得られる。図5において、10kHz 以上はピックアップの共振特性のため不正確である。また、50kHz 以上は感度が低い。上述した AE センサに比べて 3 桁程度感度が低い。

Fig.5 Sensitivity limit of vibration pickup

3)回転機器の振動の原因と振動現象

回転機器には各種の振動が発生する。例えば、図6に模式的に示したターボ機械および駆動モータは約 8 種類の構造に分類され、それぞれに対して表1のように振動が発生する。これらの振動は、種々の発生機構によって分類され、これらは強制振動および共振とに分けて論じられる。

振動系に外力が加わり振動することを強制振動、その外力を強制力という。また、強制力の振動数と系の固有振動数が一致した時が共振である。これには例えば回転軸の中心と重心の不一致に起因するアンバランスやミスアライメント等がある。これらの強制力は回転数と同期またはその整数倍若しくは整数分の1の振動数を持っているが、これが回転軸の固有振動数と一致したときに共振を起こす。

Fig.6 The portions of vibration generating in rotating machine.

Table 1 Vibration modes and their sources showed in Fig.6

振動原因	振動現象
①質量不釣り合い	不釣り合い振動
②幾何学的不釣り合い	
③流体的励振力	流体振動
④転がり軸受の特徴	転がり軸受の振動
⑤電磁的励振力	電磁振動
⑥油膜軸受特性	ふれまわり
⑦シール動特性	
⑧ロータ内部摩擦	外乱応答
⑨地震または他機からの振動伝播	

4) 振動と破壊の関係

なぜ振動を測定するのか？それは機器の故障を防止することに他ならない。振動変位を測定することは、振動歪みを測定することと同義で、この歪みを制御することによって疲労破壊を制御することが出来る。この点に振動計測の工業的な意義がある。

4. 転がり軸受診断における AE と加速度の関係

以下、回転機器の診断を中心に議論を進める。

1) AE と加速度の発生機構の違い

先述したように、AE は応力が付加された物体中に蓄積された弾性歪みエネルギーが、塑性変形や亀裂の発生に伴って開放された弾性波として定義される。一方、振動計測に用いられる加速度は、振動現象を計測するための一つのパラメータに過ぎず、振動振幅が物理量として本質的である。

AE と振動の違いを理解するためには、振動振幅と周波数に着目すればわかりやすい。例えば、軸受の共振周波数として 5kHz、加速度として 1G (9.8m/sec²) を検出した場合、この振動が正弦波として縦共振していると見なして変位振幅を求めると、 1.8×10^{-9} m となる。一方、金属の破壊に伴う AE は、例えば、250kHz の周波数での振動振幅は 3×10^{-12} m 程度 (60dBV のセンサで検出する場合 5mV の出力) である。

従って、この例で言えば、周波数で二桁、振幅で三桁の差がある。この違いはそれぞれの現象の発生機構に起因する。

AE 信号は、上述したように亀裂の発生等、時定数の小さい局所的且つ突発的な変位をその源として発生する。一方、振動現象の内、同様な突発的な変位を考えたとき、それらの変位が相対的な関数で表されるとすると、両者の違いは変位時間または変形時間 (変位/変位速度) および変位振幅または変形振幅の相違として現れる。加速度の場合、圧電型加速度ピックアップの動作原理から、計測可能な変位は AE に比べて十分大きい振幅のものになる。この点で振動計測において重要になるのは、系に現れる共振現象である。即ち、構造物では形状と物質定数によって決まる固有振動数があり、その振動数が構造物に付与されると振動が著しく増幅される。この共振特性により、付加される振動変位の周波数帯域が広帯域であれば、系の固有振動数に一致する成分が増幅され、系全体が共振振動する。この振動数は一般に低い周波数である。

AE と振動の違いは、検出する変位振幅およびその振動数にある。それは振動変位源の違いでありその規模の大きさの違いである。即ち、設備や構造物の劣化・損傷による異常振動が微小亀裂等、ミクロな損傷プロセスの延長上にあることを考えると、AE 信号は系全体の異常現象の前駆段階を捉えていると言えることが出来る。このように AE と振動では検知する内容を異にするが、それらは相補的であることが重要で、損傷の進行過程において、各々の感度、周波数帯域において評価対象および判定基準を異にする。従って、AE 法と振動法を組み合わせることによって、損傷過程を全体的に評価できることになる。

2) AE 法と振動法による転がり軸受け診断

図 7 は単列深溝玉軸受けに対して、回転数 2250rpm、荷重 0.65C (C: 動定格荷重) の条件で連続負荷試験を行い、AE と振動を同時計測した結果である。図に示すように、振動加速度は AE と比べて遅れて変化し始める。早期検出の観点からは AE 法が優れている。

Fig.7 AE activity and acceleration obtained during continuous loading test on single-row ball bearing.

然しながら、図 8、これは揺動軸受けについての結果であるが、これによると剥離発生時の AE 振幅は損傷の進展に伴って最初増加を示すが途中で飽和しており、このように AE は損傷が進行した状態の評価に対しては、必ずしも損傷状態を反映しない場合がある。

また、潤滑不良に対しては、損傷を誘発する潤滑油不足による油膜の低下に伴う金属接触面が生じたことを AE 法では

検知できたが、加速度には変化が認められなかった。これは軸受け面に大きな面荒れ、剥離等が生じないと加速度に変化が現れないためである。

Fig.8 AE amplitude against loading time obtained with looper driving bearing.

これらのことを総合して、転がり軸受け診断において AE と振動を併用計測した場合の応答感度の損傷進行度依存性を模式的に記述したものが図 9 である。横軸は時間に置き換えることも可能である。転がり軸受けの損傷の早期検知および余寿命の定量的評価を実施するためには AE と振動の応答立ち上がり点（検出限界による）の物理的解釈、計測値の絶対的評価など今後研究開発していく必要がある。

Fig.9 Change in AE activity and acceleration during operation

5. 結言にかえて

一損傷様式と AE 信号の対応：スペクトロスコピー法一

実際の状態監視においては、計測値から正常状態か異常状態かの判別および計測値が正常値と異なる兆候を示した場合、何処に、どの様な損傷が、どの様な原因で発生したかを定量的に評価する逆問題的アプローチが重要である。

その初等的手法として、従来、振動法および AE 法で行われている精密診断（周波数解析）がある。振動振幅に異常値が現れた場合について述べると、先ずその振動の周波数が高周波領域のものか低周波領域のものかの判別がなされる。低周波領域（速度モード）であるなら、回転周期との同期性からアンバランス、ミスアライメント等の診断が下される。一方、高周波領域（加速度モード）であれば、軸受けの諸元から決まる周期性と損傷に起因する周波数とを比較して、軸受けの損傷診断がなされる。これは単純な例ではあるが、信号の周波数スペクトルから対象となる事象を弁別しており、一種のスペクトロスコピー法と言える。

以下、AE 信号について、波形特徴量と軸受けの損傷モー

ドとを対応付けた試みから AE 法の診断技術としてのポテンシャルについて説明する。

AE 信号の波形特徴量としては、時間領域での最大振幅、立ち上がり時間、持続時間、リングダウンカウント等がある。また、波形形状を表す代表的パラメータに、周波数領域における 1 次モーメントがある。これらの波形特徴量を用いて潤滑不良、異物混入による損傷を評価した結果を 2D 損傷マップとして図 10 に示す。図では 1 次モーメントの代わりに新たに定義したリングダウンカウントを持続時間で除した平均周波数を、横軸の最大振幅に対してプロットしている。なお、計測範囲内で 1 次モーメントと平均周波数の間に線形の相関関係のあることを確認している。

Fig.10 Characteristics of AE obtained during operation which depend on the kinds of damages

図に記載した軸受け状態は、正常状態、潤滑不良状態、潤滑油不足状態、焼き付き状態および異物混入状態の 4 種類である。プロットされたデータは図の左下から右上へと、正常状態から損傷モードとその程度に応じて分布している。左下の領域 I は、平均周波数、最大振幅とも低い領域であるが、個々にプロットされたデータは正常時、潤滑油充填率 70% 以上および異物混入初期状態での AE 信号によるものである。領域 II は、潤滑油充填率 60% 以下、焼き付き初期状態および異物混入による損傷が進行した状態を示している。領域 III は、領域 II と平均周波数は変わらないが最大振幅は高い。ここでは異物混入による損傷が更に進行した状態、焼き付きによる損傷が進行した状態での AE 信号の特徴がプロットされている。領域 IV は、領域 III と重複している部分もあるが、異物混入による損傷が著しく進行した状態がプロットされている。焼き付き損傷の最終段階では、顕著な金属音が発生した。軸受け表面は光沢を失い、金属接触が生じていたことを示していた。また、異物混入による損傷では、アンギュラー軸受け内輪に特に顕著な波状の摩耗痕が見られ、異常摩耗が生じた様子が確認された。

以上の結果は、損傷モード毎に特徴的な AE が発生していることを示すと共に、検出した AE 信号の特徴から損傷モードを特定する逆問題的アプローチが可能であることを示している。また、ここで用いた AE 信号の特徴量は、AE 計測に不可避免的に現れるしきい値問題に影響され難いパラメータであり、汎用的評価基準が作成できる可能性を示唆している。

(参考文献省略)