総 説 REVIEW

アコースティック・エミッションの岩の力学への応用*

小 林 昭 一**

Applications of Acoustic Emission to Rock Mechanics

by

Shoichi KOBAYASHI

(Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto)

1 はじめに

ガラスとかセラミックスにひびが入ったり、こわれたりするときには、音が聴えることはよく経験することである。このように、固体が破壊するときには、それがたとえ非常に微小なものであっても、弾性エネルギーが急激に解放されるので、それに伴う過渡的な波動が生じ、伝ばする。場合によっては、上の例のように音が聴えることにもなる。このように、破壊過程に伴って発生する（弾性）応力波は、一般に、アコースティック・エミッション¹⁾ (acoustic emission, 略して AE) と呼ばれている。

破壊過程に発生するこのような波動は、地震、鉱山、金属などの分野で別々に研究されていた経緯もあって、分野によって、microseismic wave, seismoacoustic wave, elastic shock, elastic pulse, rock noise, subaudible noise, stress-wave-emission などと種々の名称でよばれていたが、現在では、ほぼ acoustic emission という呼称に統一されているようである。

AE の発生状況は、一般には転位の集積によるクラック生成、双晶とかすべり、あるいは潜在欠陥からのぜい性的なクラックの発生とその成長、伝ば、さらにそれらに伴う内部構造変化など、固体材料の変形とか破壊に関係したあらゆる内在的因子に左右され、また同時に、荷重、ひずみ、それらの時間変化率、温度などといった外的条件にも大きな影響を受けると考えられる。言い換えれば、AE は材料の変形破壊過程の時々刻々のあらゆる情報を内蔵しているわけである。これを逆に利用すれば、AE の諸特性を調べることで、材料が、現在変形破壊過程のどこに位置しているかを推定できる筈である。このような考え方に基づいて、AE を材料試験とか構造物の非破壊検査などに適

用する技術は、しばしば AE 法とよばれている。

AE 法は、変形とか破壊機構の解明など材料科学分野において、新しい測定手段を提供するとともに、地盤構造物を含めて、構造物やその部分の各種の検査や健全度の推定、稼動時の監視など工学的応用に関しても、また地すべりとか地震の予知など理学的応用に関しても、有力な手段となり得ることが期待されている。とは言うものの、AE は個々の対象物によっても複雑な特性を示すので、AE を充分活用するためには、それらに関する豊富な基礎資料が必要である。

現在では、AE 計測システムの開発、改良はもちろんのこと、基礎資料を蓄積するために非常に広範な分野にわたって、基礎から応用までを含んだ活発な研究が行われている。それらを総括することはとうてい不可能であろう。

本報文では、岩ないし岩質材料およびそれより成る系（岩盤、地盤構造物、コンクリート構造物など）に関連するものだけに限って、AE 研究の現状を概観してみたい。以下では、まず AE 計測法を検討し、次いで AE の材料試験、模型実験および現地への適用例について略述しよう。

2 AE の特性と AE の計測

2.1 AE 法の歴史

AE の存在そのものは古くから知られていた。冒頭に例をあげたガラスとかセラミックスの破壊音は誰でも知っている。しかしながら、AE 現象（破壊など AE を生じる現象）が、電気的な検出器や測定器を用いて科学的に計測されるようになったのは、比較的最近になってからである。

岩の力学の分野では、鉱山での落盤とか山はねの予知に関連して、1940年代の初頭に米国の鉱山局で、Obert & Duvall²⁾ が研究を始めたのが最初のようにある。ソ連でも、1950年代に、Vinogradov³⁾ とか Kon-

* 原稿受理 昭和52年6月30日

** 正 会 員 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

stantinova⁴⁾などが、地震および炭鉱での山はねに関連して、AEの研究を行っている。その後も、鉱山分野での研究が活発に行われている。

コンクリートなどのAEに関しては、Rüsch⁵⁾(1959年)、少し遅れて横道⁶⁾(1964年)などの研究が、また、地震に関連しては、茂木⁷⁾(1962年)、その後Scholz⁸⁾(1968年)などの研究があげられよう。

ちなみに、金属関係では、1950年頃、ドイツでKiser⁹⁾らが主として、多結晶金属材料の引張試験に伴うAEについて研究したのが最初といわれている。Kaiserはこの試験結果より、供試体に再負荷する際には、最大履歴応力に達するまでAEは殆んど発生しないというAEの非可逆性を明らかにしている。

その後、AEの研究は技術的にはあまり進展しなかったが、1960年代に入ると宇宙開発とか原子炉関係での非破壊検査ないしは安全管理のモニターなどの要請が高まり、開発研究が活発に行われるようになった。同時に、計測システムおよび計測法の改良が進み、次第に微小でかつ高い周波数のAE現象の計測が可能となってきた。1960年代の末からAEの適用分野は急激に拡大し、現在ではいろいろな分野で、材料科学研究の手段として、計測をより精密化し、定量化する努力が払われている一方、大規模構造物の非破壊検査とか常時監視のための最適計測システムが模索されている。

最近の数年間のAE関連の研究のうち、岩の力学関係は、Hardy¹⁰⁾の論文を参照されたい。また、金属関係を中心とした研究は、文献1)、11)、12)を見られたい。

2・2 AEの諸特性

AEは、大は地震から小は砂粒とか結晶の破壊まで殆んどあらゆる規模で生じ、また材料的には、金属、岩石、コンクリートなどはもちろん、木材、プラスチックなど殆んどの固体材料に発生する。

AEの特性は、材料およびその破壊過程を反映し、また検出器(後述)の影響も受けるので、一概には言えないけれども、普通我々が計測の対象としている範囲では、周波数は、数Hz～数MHz、検出電圧は、数 μ V～数Vと考えてよい。なお、検出電圧の下限値は、周辺雑音で決まることが多い。

一つのAE現象が発生すると、材料の表面に取りつけたAE検出器(2・3・1参照)には、その現象に対応したAE信号が検出される。AE信号波形は、かりにAE現象は材料内のただ一点で生じたとしても、縦波、横波はもちろん、表面波、さらには境界での種々の多重反射波などに、さらに材料の内部構造に基づく消散とか、幾何学的な原因による散乱などが重なりあうので、非常に複雑となる。また、AE信号は検出器

の周波数応答特性とか装着の影響も受けるので、記録されたAE信号から絶対的な評価をすることは容易ではない。

材料の破壊過程では、時々刻々と変化する内部構造の変化に伴って、種々の場所から種々の時間間隔でAE現象が生じ、それに対応したAE信号が検出されることになる。したがって、AE信号には、次のような情報が含まれている。

- (1) 単位時間(単位応力、ないし単位ひずみ)当りのAE発生頻度と振幅の分布、周波数の分布など。
- (2) 個々のAE信号波形としての特徴；波動の種類、振幅、周波数、エネルギーなど。
- (3) 複数個の検出器を用いる場合；AE信号の到達時間差および順序、個々の検出器より得られる(1)、(2)の情報。

これらAEの種々のパラメータと材料の変形破壊過程および構造物の破壊、あるいは健全度との関係は、最も興味のあるところであり、従来から数多くの研究が行われている。これらのうち、岩の力学に関連したものの一部は3項で述べる。なお、金属関係の動向については、前掲の文献1)11)12)を参照されたい。

2・3 AEの計測

2・3・1 原理 AEは、原理的にはFig.1に示すような簡単な装置で検出される。供試体内で発生した応力波は、供試体内を伝ばして表面にいたり、検出器により電気信号(電圧、電流)に変換される。この信号は、前置増幅器で増幅され、フィルターを通過後、さらに主増幅器で増幅される。このようにして得られたAE信号は、種々の処理機器に送られる。

Fig. 1. Block diagram of acoustic emission monitoring.

2・3・2 検出器 AEの検出器としては、できるだけ広い周波数域に於て一様な応答を示し、かつ高感度であることが望ましい。種々の検出器が市販されているけれども、数Hz～数MHzの広い周波数域にわたって、一様な検出感度を得ることは困難である。比較的低い周波数域、数Hz～数百Hzでは、ジョフソンのようなものが、また数Hz～20kHz程度までは、圧電素子を用いた加速度計を用いることができる。また、半導体ゲージも検出感度は落るが、200kHz程度までは比較的一様な特性のようである。¹³⁾しかし、材

料試験とか小規模の模型実験などで主として対象となる周波数域数 Hz～数 MHz に対しては、定量的に評価された検出器はない。普通には、チタン酸ジルコン酸鉛磁器圧電素子 (PZT-5) を、そのまま直接供試体に接着するか、あるいは適当に裏打ちしたものを用いているようである。PZT-5 は、電気出力が大きく、かつインピーダンスも低くて好都合である。

金属関係では、共振周波数周辺の感度の最もよい部分を利用していることも多いが、波形に関する情報が必要な場合には、感度は落ちるけれども、求める周波数域より高い共振周波数の検出器を用いて、比較的特性の平坦な部分を利用することが望ましい。

高い周波数域での検出器の検定方法が確立されていないので、どのデータも信頼性は高くないが、一応の目安を得るということで、検出器の周波数特性の例を Fig.2 に示した。なお、AE 信号の検出波形は、検出器の装着方法と波動伝ばとの関連などによっても異なることに注意されたい。

Fig. 2. Responses of piezoelectric transducers to a "white noise" source¹⁴⁾.

2・3・3 増幅器とフィルター AE 信号としては、一般には、なるだけ微弱なものまでも検出することが望ましい。実際には、周辺雑音に妨げられて、数 μV 程度のものが普通の検出器で取り出せる限界である。この AE 信号は、前置増幅器で 20～40 dB (10～100 倍) 程度増幅され、さらに主増幅器で 40～60 dB (100～1000 倍) 程度増幅されて、記録される。前置増幅器は入力インピーダンスを高くし、出力インピーダンスを低く (普通 50 Ω) して、誘導雑音の混入を避けているのが普通である。また、増幅器は、大振幅の AE に対しても飽和しないように、ダイナミック・レンジを大きく取ることが必要である。

AE 計測に於ては、必要とする周波数域以外の環境雑音はできるだけ除去することが望ましい。接地を良くすることは当然のこととして、その他適切にフィルターを用いて、限られた周波数域での計測を余儀なくされることもある。フィルターは、普通は主増幅器の

Fig. 3. Acoustic emission signals. The same signal is recorded with different frequency bands.

前に用いられる。なお、フィルターの使用により、AE 波形は相当変化することに注意されたい。Fig.3 は、周一の AE 現象をフィルターを変えて再生記録したものである。

2・3・4 AE 信号の処理とその関連機器 AE 信号は、上記のような機器で容易に検出される。問題は、このようにして検出した AE 信号をどのような形で処理して、実際の現象の解釈に役立てるかにある。要は、2・2 で列挙した AE 情報を如何によく、合理的に取り出し、処理するかということである。以下に、処理の方法とそれに応じて必要となる機器をいくつかあげてみよう。

(1) AE 発生頻度、振幅分布、周波数分布

単位時間当りの AE 発生頻度とそれらを累積した発生総数は、現在最も広く用いられているパラメータである。この処理には、Fig.4 に示すようないくつかの方式がある。

Fig. 4. Types of counting acoustic emission events.

リング・ダウン方式(a)は、あるしきい値を越える回数をすべて計数するので、一現象に対して計数値が増え、信号波形が大きく、かつ減度が遅い程、また高周波成分の多い程、計数値が大きくなる。

事象ごとの計数法では、あるしきい値を越える信号が入ると、1パルスを発生させて、その後一定の不感時間を設定する方式(b)と、あるしきい値を越える信号を包絡線検波して一事象として計数する方式(c)とがある。これらの処理に関しては、発生頻度計数用のカウンタが用いられる。

振幅-頻度分布を求めることは、材料の内部構造の変化を推定する上で、また地震に関連した特性として、非常に重要視されている。このためには、方式(b)あるいは(c)により、しきい値を何段にも設定できる多チャンネル波高分析器が必要である。

なお、信号を検波した後、積分することにより、平均電圧、または実効値電圧として、平均振幅の時間的分布を求めることもある。また、周波数の分析には、スペクトル・アナライザが用いられる。

(2) 波動の判別, 波形, 波形解析

AE 波形の観測には、ストレージ型オシロスコープあるいはデジタル波形記憶装置(トランジェント・レコーダ, ウェブ・メモリなど)が用いられる。これらより波形を観測することにより、縦波, 横波, あるいは表面波, その他の多重反射波などを判別することができる。特に, AE 信号の最初の部分は破壊のエネルギーと破壊の場所に直接関係する情報をもった重要な部分である。波形記録においては、この部分が充分の精度で得られるようにしなければならない。波形解析には、上記の機器とスペクトル・アナライザなどが用いられる。

(3) AE 信号の到達順序, 時間差, 破壊源の標定

数個の検出器から同一の AE 現象を検出すると、各検出器に波動の伝ば時間差を伴った AE 信号が検出される (Fig. 15 参照)。多チャンネルの同時記録より、この波動の到達時間差を求め、計算によって破壊源の標定を行うことができる。記録された AE 信号は複雑であるので、このためにはできるだけ初動を用いるようにすることが望ましい。初動の方向にも注意すると、破壊の機構に関連した情報が得られる。

破壊源の標定によって 2 次元の物体では最低 3 チャンネル, 3 次元の物体では最低 4 チャンネルの同時波形記録が必要である。装置としては、多チャンネルのデジタル波形記憶装置が便利である。

なお、この他の記録機器として、デジタル・プリンターとか、ペンレコーダーが用いられる。比較的周波数の低い AE 現象の記録には、高周波用のデータ・レコーダーなどが使用できる。高い周波数に対しては、

デジタル波形記憶装置を介して、データ・レコーダーに記憶することもある。さらに、前者のデジタル出力を磁気テープなどに収録すれば、計算機処理には便利であろう。

なお、最近では、目的によって、AE 信号の検出から処理までの一連の機器を組込んだ多チャンネル AE 計測システムも開発使用されている。

例として、信号処理のための機器のブロック・ダイヤグラムを Fig. 5 に示す。なお、岩の力学関係で従来用いられてきた AE 計測システム (殆んどが可聴域) については、参考文献15) も参照されたい。

Fig. 5. Processing system of acoustic emission signals.

AE 計測には、なお未解決の問題が多い。特に検出器の感度, S/N 比, 検出周波数域などは目的に応じて検討しなければならない。また計測結果の解釈に関しても、その結果が対象物の寸法, 形状, 材料の均一性, ぜい性度, 異方性, 強度, 履歴, 材料内部の減衰特性など、さらに検出器の装着などによっても影響されることを念頭において、充分な配慮が必要であろう。

3 AE の岩の力学への適用

3.1 AE の主要パラメータ

AE 計測は、地震, 岩盤, 構造物, 材料試験などあらゆる規模で、非常に広範囲な分野にわたって適用できることが期待される。その理由は、2.2 で述べたように、AE 信号に内蔵されている情報は、規模の大小に関係なく得られるものだからである。一般には、得られた信号はいくつかの主要パラメータに関して処理されており、それらについて、材料および系の破壊過程とに対応して詳細な研究が行われている。それらを一応分類して示せば、次のようになる。

(1) AE の発生頻度, (2) AE の発生総数, (3) カイザー効果とその応用, (4) AE の振幅とその総数, (5) AE の周波数分析, (6) AE のエネルギー, (7) AE による破壊源の探査

これらのパラメータは、元来は別々に取扱うべき性質のものではないかもしれないが、処理の関係上別々に上げられているのが現状である。これらのうちのいずれか一つで、あるいは 2, 3 の簡単なパラメータ

を用いて、材料と系系の破壊過程を正確に推定できれば、非常に好都合であろう。

3・2 AE の岩の力学への適用例

岩の力学へ AE を適用した例は、最近急激に増えている。それらを大別すると、材料試験に適用したもの、模型実験に適用したもの、および現地ないし野外計測的なものに分けることができる。以下では、これらの幾つかについて説明する。もちろん、これらの例は、膨大な研究のはんの一部分を取上げたに過ぎないことをお断りしておきたい。詳しいことは、前掲の文献 10) 11) 15) 中に含まれている個々の文献ならびに以下に掲げる文献を見て頂きたい。

(1) 材料試験

(i) 荷重-AE 頻度関係

一軸圧縮試験での荷重-ひずみ-AE 頻度の関係は最も詳しく調べられている。一例を Fig. 6 に示す。図より、破壊荷重の約 60%，また横ひずみが急激に増加しはじめた部分、すなわち巨視的な破壊開始点より AE 頻度が急増し、荷重増加とともに指数的に増大することが分る。また、検出周波数が低ければ、AE 頻度は少なくなるが、全体の傾向は一致していることに注意されたい。

Fig. 6. Relationship between acoustic emission, strain and load for granite¹⁶⁾.

一軸繰返し荷重の下での AE 頻度の特性を Fig. 7 に示す。これより、カイザー効果 (AE の非可逆性) が、明確に認められる。ただし、破壊荷重に近づくにつれて、次第にその効果は失われて行くことに注意されたい。

Fig. 8 には、二軸圧縮試験での荷重-AE 頻度の関係を示した。荷重方向と AE 頻度との関係に注意され

Fig. 7. Relationship between acoustic emission, strain and load under repeatedly increasing load for a cement mortar¹⁷⁾.

Fig. 8. Relationship between acoustic emission and load in biaxial compression for a cement mortar¹⁸⁾.

たい。図は、AE が供試体内のクラック・システムに依存することを示唆している。これより、カイザー効果は、荷重方向をも含めた荷重履歴効果ということができよう。

(ii) クリープ-AE 頻度関係

Fig. 9 に一定荷重下での時間-AE 頻度-ひずみ関係を示す。ひずみがジャンプするところで、AE が急激に発生することに注意されたい。これは、AE の発生機構が内部構造の変化に係ることを示唆している。また、Fig. 10 にクリープ時の時間-AE 頻度関係を示す。破壊荷重に近づくにつれて、単位時間当りの AE 頻度は大きくなり、その発生頻度は時間の経過とともに減少することが分る。この傾向は、クリープ曲線と同じである。

(iii) AE の周波数特性

一軸圧縮試験における AE の周波数特性の例を Fig. 11 に示す。応力レベルが高くなると、若干高い周波数が生じてくるようである。

(iv) AE 振幅-頻度関係

Fig. 12 に AE 振幅とその発生頻度との関係を示す。地震では、頻度を N 、振幅を a とすると、 $\log N = \alpha -$

Fig. 9. Acoustic emission rate during creep for a granite¹⁹⁾. Fig. 10. Change of acoustic emission rate in time for creep of a concrete²⁰⁾. Fig. 11. Frequency versus average amplitude at different stress interval²¹⁾. Fig. 12. Amplitude versus frequency for Westerly granite under uniaxial compression⁹⁾. Fig. 13. Variation of b-value with uniaxial compressive stress level⁹⁾.

$b \log a$ (Gutenberg-Richter 式) という関係が成立するといわれている。ここに a , b はパラメータである。境界条件のより複雑な材料試験において、この関係式が成立するかどうかは興味のあるところである。荷重と b との関係は、Fig. 13 のようになるという報告もある。

(v) AE のエネルギー

Fig. 14 に引張荷重と全 AE エネルギーとの関係の例

を示した。一般に、引張強度の高い材料程、全 AE エネルギーは高くなるようである。

(vi) 破壊源の標定

一軸圧縮試験による AE 信号の例を Fig. 15 に示す。波動の到達時間差に注意されたい。このようなデータ

Fig. 14. Accumulated acoustic emission energy versus applied load²²⁾.

Fig. 15. Acoustic emission signals showing arrival time difference.

より算出した破壊源の位置を Fig. 16 に示す。破壊源は供試体中にほぼ一様に分布していることがわかる。なお、この計測による標定誤差は、既知点からのパル

Fig. 16. Source locations in a uniaxially compressed light-weight concrete specimen²³⁾.

Fig. 17. Successive development of acoustic emission sources in a bending of a granite beam²⁴⁾.

ス波を用いて、10 mm 以内であることが確められている。Fig. 17 には、はりの曲げ破壊過程に伴う破壊源の変遷の様子を示した。最終破壊は、破壊源の集積した断面に生じていることがわかる。

(2) 模型実験

(i) 鉄筋コンクリートはり模型

模型実験に AE を適用した例として、Fig. 18 にコンクリートはり模型 (10×10×40 cm, D10 mm) の曲げ試験での荷重-AE 頻度の関係を示す。カイザー効果が良く認められる。

(ii) 鉄筋コンクリート T 型橋脚模型

T 型橋脚模型のねじり試験での荷重-AE 頻度の関係を Fig. 19 に示す。図より、AE は荷重が 6^t 程度から少し発生し始め、 $8 \sim 9^t$ で急激に増加していることがわかる。この荷重は、変形が急増し始めた荷重 9^t によく対応している。

Fig. 18. Acoustic emission rate versus load in bending of a reinforced concrete model beam²⁵⁾.

Fig. 19. Acoustic emission rate versus load in a model T-shaped bridge pier under twisting load²⁵⁾.

Fig. 20. Relationship between acoustic emission activity and fluid injection²⁶⁾.

Fig. 21. Contours of hypocenter location density during fluid injection²⁷⁾.

(iii) 岩盤模型への液体の注入

岩盤模型内へ液体を注入する際に発生する AE 頻度と注入圧との関係を Fig. 20 に示す。注入状況と AE 頻度の関係は非常によく対応している。

Fig. 21 には、岩石試料中へ液体を注入したときの、時間経過と AE 発生源密度のコンターを示したものである。これより、AE の頻発部分は液体の注入先端部分に近いことがわかる。

Fig. 22. Acoustic emission rate versus elapsed time after blasting²⁸⁾.

Fig. 23. Acoustic emission signals of a small sized rock bursts²⁸⁾.

(3) 現地計測

(i) 山はねの頻度と波形

Fig. 22 に、大清水トンネルの高地圧部で発破後に観測された小規模の山はねの時間経過と頻度の関係を示す。この結果は、計測開始後約10分後に AE が最頻発し、その後は数回の頻発を繰返しながら次第に減少

Fig. 24. Acoustic emission signals due to rock bursts²⁹⁾.

することを示している。また、波形観測結果を Fig. 23に示す。時間経過につれて、P波とS波の到達時間差が増大していることがわかる。このことは、破壊箇所が次第に壁面から奥へと移行していることを示唆している。

(ii) 山はね波形と振幅-頻度の関係

Fig. 24 に、山はねに伴う AE 波形の記録を示す。また、山はね規模と頻度の関係を Fig. 25 に示す。これらは地震とよく似ていることが知られている。

(iii) 山はね発生地点

多チャンネル記録より決定した山はね発生地点の検出例を Fig. 26 に示す。図には、山はねの規模も併せ

Fig. 25. Amplitude versus frequency³⁰⁾.

Fig. 26. Location of rock bursts during the work²⁹⁾.

Fig. 27. Relationship between energy and b-value of rock bursts²⁹⁾.

て記してある。

(iv) エネルギーとb値の関係

Fig. 27 に、エネルギーとb値の関係を示す。図は、エネルギー放出が大きくなり始めると、b値が低下し始めることを示している。

(v) 地圧測定

カイザー効果を利用して、ボーリング・コアなどに載荷することにより、潜在地圧を推定することも試みられている。³¹⁾

3・3 AE の将来

AE 法は、上述の例からも推測されるように、材料試験法としてはもちろん、現地計測法としても非常に有効である。現段階では、計測結果はまだ定性的ではあるが、比較的単純な形状（境界条件）のものに関しては、近い将来充分定量化されるところと考えられる。材料試験分野では、数年のうちにAE計測が高精度化して、より微小な内部構造変化の検出が可能となり、破壊の過程をより正確に追跡でき、さらに非常に初期の荷重段階で、最終強度を予測することも可能となるであろう。また、カイザー効果を利用することにより、材料内部での構造変化が進行しているか否かを充分の精度で判断できるようになる。同時に、破壊源の探査も充分の精度で行えるようになる。

現地への応用面では、山はねとか断層周辺でのAE計測がより正確になり、山はねとか局所地震発生の予測が実用的になるであろう。また、地盤構造物とかコンクリート構造物の施工時のモニタリングとか、完成後の健全度の診断といった面にも、また常時監視にも実用化されるであろう。また、地すべりとか雪崩の予測などにも実用化されよう。さらに、現在、適用が

意図されている地熱開発における破壊域の決定とか、地下ガス貯蔵、あるいは地下への廃棄物処理などにおけるモニタリングなどにも実用化されることが期待できよう。

なお、AE を利用した地圧の測定技術も開発され、特に地下数キロメートルまでにも適用されるようになるかもしれない。

以上、幾分希望的観測も交えてAEの将来性を述べてみた。要するに、AEに期待するところはそれ程大きい訳である。

4 おわりに

以上、岩の力学への応用を中心としてAE研究の現状を述べてみた。著者の力量不足もあって、充分意を尽さなかった点もあり、また重要な研究成果も相当割愛せざるを得なかった。これらについては、文献の最後に一括しておいたので、参照されたい。

AE計測の最大の特徴は、比較的簡便かつ迅速に、材料とか構造物の破壊過程とか稼動時の状況を知ることができる点にある。しかしながら、現段階では、計測結果を充分評価し、活用するには、経験もデータの蓄積も不充分である。AE計測は、丁度、聴診器で病状を全体的に予診するのにたとえられようか。

今後、AE研究が活発となり、精密検査を待つまでもなく、また名医の診断をおおぐまでもなく、AE計測結果だけから、構造物の総合的な健全度とか病状診断が容易に行えるようになることを期待したい。

参考文献

- 1) "Acoustic Emission", ASTM, STP, **505**, 335 (1972) ASTM
- 2) Obert, L., and W.I. Duvall, U.S. Bureau of Mines, RI 3797 (1945).
- 3) Vinogradov, S D., Izv. Akad. Nauk SSSR, ser. geofiz., No. 6, 744 (1957).
- 4) Konstantinova, A.G., Izv. Akad. Nauk SSSR, ser. geofiz., No. 11, 1580 (1960).
- 5) Rüsh, H., Zem-kalk-Gips, **12**, 1 (1959).
- 6) 横道英雄, セメント・コンクリート, **212**, 2 (1964).
- 7) Mogi, K., Bull. Earthq. Res. Inst., **40**, 831 (1962).
- 8) Scholz, C.H., Bull. Seismo. Soc. Am., **8**, 399 (1968).
- 9) Kaiser, J., Arkiv fur das Eisenhüttenwesen, **24**, 1-2, 43 (1953).
- 10) Hardy, H.R. Jr., *ibid.* 1), 41-83
- 11) Spurr, J.C., and J.W. McElroy (ed.), "Monitoring Structural Integrity by Acoustic Emission", ASTM, STP, **571** (1975) ASTM
- 12) "The Third Acoustic Emission Symposium", Sept. 16-18, (1976) Tokyo High Press. Inst. (HPI), J. Soc. Non-destr. Insp. (NDI), and J. Indust. Plan.

- Assoc. (JIPA)
- 13) Hardy, H. R. Jr., ASTM, STP, **505**, 67 (1972) ASTM
 - 14) Graham, L. J., and G. A. Alers, ASTM, STP, **571**, 16 (1975) ASTM
 - 15) Knill, J. L., J. A. Franklin, and A. W. Malone, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., **5**, 87 (1968).
 - 16) 佐々木和郎, 高多 明, 戸辺雅行, 第1回岩の力学国内シンポジウム講演集, p. 78 (1964).
 - 17) 丹羽義次, 大津政康, 倉光恭三, 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要, I-49 (1977).
 - 18) 丹羽義次, 小林昭一, 大森啓至, 第32回土木学会年次学術講演会講演概要, p. 5 (1977).
 - 19) Hardy, H. R. Jr., ASTM, STP, **505**, 68 (1972) ASTM
 - 20) McCabe, W. M., R. M. Koerner, and A. E. Lord, Jr., ACI Jour., 367 (1976).
 - 21) Chugh, Y. P., H. R. Hardy, Jr., and R. Stefanko, Proc. 10th Symp. Rock Mech., K. E. Gray (ed.), Chapt. p. 4 (1972) AIME
 - 22) Brawn, J. W., and M. M. Singh, Trans. Soc. Min. Eng., **233**, 255 (1966).
 - 23) 丹羽義次, 小林昭一, 大津政康, 第32回土木学会年次学術講演会講演概要 I, p. 7 (1977).
 - 24) Mogi, K., Bull. Earthq. Res. Inst. **46**, 1103 (1968).
 - 25) 丹羽義次, 小林昭一, 大津政康, 土木学会論文報告集, No. 265, 101 (1977).
 - 26) Byerlee, J. D., Advances in Rock Mech., ISBN 0-309-02246-0, Nation. Acad. Sci., Washington D. C., p. 633 (1974).
 - 27) Byerlee, J. D., and D. Lockner, Trans. Conf. on Acoustic Emission in Geologic Structures and Materials, Penn. State Univ. (1975) (in press)
 - 28) 丹羽義次, 小林昭一, 福井卓雄, 大津政康, 第5回岩の力学国内シンポジウム講演集, 91 (1977).
 - 29) 磯部俊郎, 亀田郁郎, 森 訓保, 後藤隆司, 佐藤一彦, 第5回岩の力学国内シンポジウム講演集, 115 (1977).
 - 30) 亀田郁郎, 磯部俊郎, 森 訓保, 日本鉱業会誌, **90**, 393 (1974).
 - 31) 金川 忠, 林 正夫, 仲佐博裕, 第5回岩の力学国内シンポジウム講演集, 103 (1977).
- その他, 1970年以降の文献
- a) 材料試験関係
- Hardy, H. R. Jr., Rock Mech., Suppl., **2**, 93 (1973).
 Wu, F. J., and L. Thomsen, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., **12**, 167 (1975).
 松木浩二, 西松裕一, 小泉昇三, 第5回岩の力学国内シンポジウム講演集, 97 (1977).
 Koerner, R. M., and A. E. Lord, Jr., Proc. ASCE, SMI, 161 (1972).
 Koerner, R. M., A. E. Lord, Jr., McCabe, and J. W. Curran, Proc. ASCE, GT7, 761 (1976).
- b) 山はね関係
- Blacke, W., Quart. Colorad School of Mines, **67**, No. 1 (1972).
 Brady, B. T., Nature, **252**, 549 (1974).
 McGarr, A., Bull. Seism. Soc. Am., **61**, 1453 (1971).
 Spottiswoode, S. M., and A. McGarr, Bull. Seismo. Soc. Am., **65**, 93 (1975).
 Smith, R. B., L. Winkler, J. G. Anderson, and C. H. Scholz, Bull. Seismo. Soc. Am., **64**, 1295 (1974).
 Saperstein, L. W., and W. W. Kaufman, Trans. Soc. Min. Eng., AIME, **258**, 1 (1975).
 森 訓郎, 磯部俊郎, 亀田郁郎, 日本鉱業会誌, **90**, 167 (1974); **90**, 231 (1974).
 渡辺慶輝, 中島 巖, 竹内昌之, 河栗正太, 第5回岩の力学国内シンポジウム講演集, 91 (1977).
 Wu, F. T., K. C. Thomsen, and H. Kuenzler, Bull. Seismo. Soc. Am., **62**, 1621 (1972).
- c) その他
- Hardy, H. R. Jr., Proc. Am. Gas Assoc. Transmus. Conf, T-169 (1974).
 Siskind, D. E., H. R. Rardy, Jr., and S. S. Alexander, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., **10**, 133 (1973).
 渡 正亮, 板垣 浩, 土木技術資料, **17**, 2, 3 (1975).