A. E. データ集録・処理システム

——大理石の破壊実験への適用——

北海道大学理学部 地震予知観測地域センター 前 田 亟

(昭和 54 年 3 月 24 日受理)

On the Recording and Processing System for A. E.: Application to a Fracture Experiment of Marble

Itaru MAEDA

Research Center for Earthquake Prediction, Faculty of
Science, Hokkaido University

(Received March 24, 1979)

A recording and reproducing system for acoustic emissions and its application to fracture experiment using marble sample are reported.

This system consists of preamplifiers, high speed A/D converters, a digital memory unit, D/A converters, a magnetic tape (MT) unit, and a minicomputer. A. E. signals are digitized and stored in the memory. High frequency A. E. signals are converted to lower frequency ones using the memory unit. Then, the signals are transferred to a MT. The same process is repeated to send data in a MT to a computer.

Characteristics of this system are as follows; (1) the dynamic range is 40 dB, (2) the high frequency limit of pass band is 2 MHz, (3) the maximum sampling rate is 50 nsec/word, (4) the maximum emission rate in which A. E. s are correctly recorded is 200 events/sec. If the emission rate is less than 200 events/sec, A. E. activity recorded on a MT has the same statistical characteristic as that of original signals in spite of the conversion of frequency and data length.

§1. はじめに

岩石の加圧時に生じる微小クラックに伴つて観測される音波 (A. E.) は、岩石の破壊を研究する上で広く用いられている。A. E. は発生個数-応力 (又は歪)、振幅-応力 (歪) あるいはスペクトル-応力等の関係を通して、岩石中のクラック発生様式を調べるのに用いられる。また A. E. は岩石破壊に限らず、金属の破壊の探知、調査にも広く用いられ、その波形から破壊様式を示す測定・処理機器が既に市販されている。このような状況であるにもかかわらず、A. E. のデータ集録処理技術が十分ではない理由は次の点にある。即ち、(1) 測定データの弾性論的性質が必ずしも明確ではないこと及び、(2) 不定時刻に 1 MHz 以上の周波数を含んだ波が単発的に生じ、しかも、引続いて生じる波までの間隔が極めて短いことがある。

A. E. データを微小地震のシュミレーションとして考え、定量的に解析するには上の二つの問題点を解決せねばならない。(1) はセンサ自体の問題である。これについては未だ解決されていない。本稿では (2) の問題点について、これを不完全ではあるが解決できる方式について述べる。

§ 2. データ集録

採用したデータ集録方式は、地震観測に用いられているトリガ記録方式と類似したものである。しかし次の二つの点が地震観測と本質的に異っている。(1) 対象とする周波数帯域は数 10 KHz ないし数 MHz で地震の場合に比較して極めて高い。(2) 測定時間は有限で数十分ないし数時間である。地震観測に比して(1)は不利な点であり、(2)は有利な点である。この2点を考慮してシステムを構成した。Fig. 1 にシステムのブロックダイアグラムを示す。チャンネル数は A. E. の発生位置を推定する必要から最低4チャンネル必要である。

センサからの信号は前置増幅器を通り、デジタルメモリによつてサンプリングされ記憶される。記憶語数が限られているから、センサに到達した A. E. 波のうちで最も良質の情報を含んでいる波の先頭部分を確実に記憶する工夫が要る。その一つは負の遅延機能を活用することである。第2の点は、A. E. の各センサへの到達時刻が異っているので、最も早く受信した信号により記憶開始トリガ信号を発生させることである。この点は負の遅延時間を十分大きくとれば良いように思われるが、限られた遅延語数で遅延時間を長くすることはサンプリング周波数を下げることになり、有意な周波数帯域での測定ができなくなる。最も早く A. E. が到達するセンサは不定である。従つてトリガ信号を最初に発生させるチャンネルは不定である。全

Fig. 1. The schematic diagram of recording and reproducing system for acoustic emissions.

チャンネルが同時に記憶を開始するために、内部トリガ装置でチャンネル毎に作られた信号の OR 論理をとり、それを記憶開始トリガ信号とする。

§1 (2) で述べたように、A. E. の発生は一回限りでなく短い時間間隔で引き続いて起る。それらの信号をすべてできるだけ確実に記録するためには、一つ前に記憶したデータを別の記録媒体に転送しなければならない。このための記憶媒体としてディスク及び磁気テープが考えられる。本システムは、安価かつ大容量の媒体である磁気テープを用いている。ただし、用いた機器はアナログのオーディオ用 4ch DR のテープデッキである。特性上に問題が残るが本質的ではない。その理由は、最終的にデータは計算機に送られ処理できること及び増幅器から後のインパルス応答函数は容易に知ることができることから理解される。

用いたテープデッキの周波数帯域は 20 KHz が上限となつている。デジタルメモリのサンプリング周波数は、例えば最高 2 MHz の信号を考えるとすれば、4 MHz 以上必要である。実際には 10 MHz 位が望ましい。このような高周波信号をテープデッキに入力することは不可能である。従つて、デジタルメモリのデータ読出し速度は元の信号のサンプリング速度よりもずっと遅くする必要がある。上の例では 1/100 以下になる。これは、メモリからの読出し時間は書き込み時間の 100 倍以上必要であることを意味する。以下では、この例の数値を用いる。

センサで受信された A. E. と記憶され、記録される信号データの時間的關係を Fig. 2 に示す。A. E. の発生間隔が 10 msec よりも長い場合には、何の不都合も生じない。この 10 msec はメモリ上のデータをテープに転送するのに要する時間である。この間は、メモリへ書き込みをすることができないので、その間に生じた A. E. は完全に無視される。また、メモリ装置はデータ転送が終ると直ちにトリガ待機状態に復帰するようにしてあるから、もし、転送中に A. E. が発生し継続しているときにトリガ待機状態になれば、信号は途中から記憶され

Fig. 2. A relation among original signals, signals stored in the digital memory, and recorded ones on a magnetic tape. If signals occur in a time interval in which the memory unit is in a state of read out, they are ignored.

ることになる。これらの不都合を解消するには、テープ装置の周波数帯域が広いものを使わねばならない。

信号無視の時間を更に延ばさないためにはテープ装置は常に録音状態で動かしておく必要がある。例えば、地震観測で用いられているように遅延装置をつけて、必要な都度テープを起動する方式も考えられる。しかし、対象とする波の周波数帯域を考慮すると1秒の遅延に1チャンネルあたり 10^5 語のバッファメモリが必要である。従つて、遅延方式は実用的でない。冒頭で述べた、測定時間の有限性から、テープが常時走行録音状態にあることは何の不都合も生じさせない。

以上述べたデータ集録装置の特徴をまとめると、

- (1) 安価な記録計で高い周波数 (1 MHz 以上) を含んだ信号を、比較的広いダイナミックレンジ (40 dB 以上) で記録できる。その代り 10 msec の信号無視時間が生じる。
- (2) テープ上の信号の時系列としての性質は試料内部で発生した A. E. のそれと同じ意味をもつ。ただし A. E. 発生間隔が 10 msec 以下になると時系列としては意味がなくなる。
- (3) 機械的あるいは手動操作によらず 10 msec 以上の間隔で発生した A. E. は確実に記録できる。
- (4) テープ上の信号部分を再生するのが容易である。

§3. 再生、処理

再生する方法は2種類考えられる。一つはテープ上の周波数のまま再生する方法でオシロスコープを用いる方法と応答周波数の高い光学式ガルバノメータを利用する方法がある。後者は信号の時系列的な意味での全体像を見るに適する。前者はあまり便利良いものではない。第2はデジタルメモリを用いて再度周波数変換を行う方法である。この方法の欠点は Fig. 2 で示したものと同一関係が、テープ上のデータと周波数変換されたデータとの間に成り立つ。しかし、実際にはメモリから周波数変換されたデータが読み出されている間はテープを止めておくことが可能であるから、再生漏れを防ぐことができる。残念ながらこれは完全でない。テープ上の信号の最小間隔は時間では 10^{-4} 秒、長さでは約 10^{-2} mm (9.5 cm/sec の走行の時) で極めて小さいからである。このように短い時間でテープを止めるとか、あるいは、 10^{-2} mm の間にヘッドを合せるのは不可能である。

波形データを種々の角度から解析するには、データを計算機に入力できることが望ましい。計算機のアナログ入力 A/D 変換器は数 10~数 KHz の最高サンプリング速度をもっているが、実際には、サンプリングしたデータの記憶媒体への転送速度によつて、実用サンプリン

グ速度は、より遅いのが普通である。
従つてテープ上のデータを計算機に入力する場合は上に述べた第2の方法を用いて再度周波数を変換する必要がある。データの質を考えれば、テープ上のアナログデータを A/D→メモリ→D/A→計算機 A/D と変換しながら転送することは好ましくない。しかし、専用の計算機をオンラインで用いるのではない限りこの方法は使い易いものである。

Fig. 3. A reproducing process of data.

計算機を用いる場合の再生手順を Fig. 3 に示す。この方式には、現在のところ、手動操作、即ちメモリから計算機へデータが転送され始めるとテープを止めるという操作が入る。データは DMP を通してディスクに送られる。このときのデータ形式は、地震予知センターのテレメータデータに類似したものであり、データ処理は地震波形の処理 [前田他 (1978)] と全く同様に行うことができる。しかし、実際には、センサの特性、配置組合せ、チャンネル数等が地震の場合と異つており、有意な処理内容は Fig. 3 に示すように、各種フィルタ処理、スペクトル解析及び震源決定に限られる。

§ 4. 実際例—大理石の破壊

実験に用いた試料は、寸法 $4 \times 4 \times 15 \text{ cm}^3$ 、平均粒径 $3 \sim 4 \text{ mm}$ 、破壊強度約 0.9 Kbar の山口産大理石である。実験は室温・湿条件で行なわれた。加圧には手動油圧ポンプが用いられ、加圧速度はロードセルの出力変化が時間的にほぼ一定になるように目で判断しながら制御した。加圧開始から破壊までの時間は約 20 分であつた。

センサは圧電素子から成り、出力は近似的に A. E. の速度波形に比例すると考えられるが厳密には不明である。圧電素子は厚み振動型で、固有振動数は 10 MHz 、受圧面の径は 5 mm である。前置増幅器の帯域は 10 KHz から 2 MHz までが平坦になっている。デジタルメモリの帯域は上限が 2 MHz である。このメモリの 1 語は 8 ビットであり、測定系のダイナミックレンジはこれで決まり 40 dB となる。サンプリングは 10 MHz で行い、読み出し速度は 100 KHz で行つた。

発生した A. E. の総数は計数していない。手動加圧であるから時系列的な解析はそれほど有意ではないと考えたからである。テープ上に記録された信号の中で、各チャンネル(4 素子)

Fig. 4. Typical A.E. signals and their spectra. The amplitude of spectra are plotted on a linear scale.

共 A. E. 信号の先頭から記録され、かつ、読出せたデータ総数は 500 個であつた。かなりの数のノイズデータ（ノイズによつてトリガが働いたときのデータ）がテープ上に入つていた。元の A. E. のサンプリング開始点（信号時刻）とテープからのデータのサンプリング開始点は、アナログ的にトリガレベルを設定していることによつて、必ずしも一致しない場合が生じた。

Fig. 5. Characteristic A. E. signals and their spectra.

今回の再生方式は、Fig. 1 で示したデジタルメモリから計算機へのトリガが正常に働かなかつたため、多少変則的である。即ち、メモリへのデータ書き込み（記憶）が完了した時点で、メモリを繰返し読み出し状態にする。次に計算機に A/D 入力開始命令を与え、メモリ上の倍の語数のデータを読み込む。デジタルメモリのサンプリング速度は 100 KHz、読み出し速度は 100 Hz、計算機側のそれは 200 Hz である。この値の違いはデジタルメモリの D/A 出力にフィルタが入っていないことによる。

得られた波形の代表的なものを、そのスペクトルと共に Fig. 4 に示す。センサに問題があるから、スペクトルの弾性論の意味は必ずしも明確ではない。スペクトルの縦軸はリニアスケールであり、その絶対値は有意ではない。これらとは異つた特殊な波形をした一群の A. E. があり、これを Fig. 5 に示す。この波形をもつ A. E. は同じときに二つ以上のセンサで受信されない。即ちあるセンサでこの波形を受信したとき、別のセンサで受信された波形は Fig. 4 に示すようなものであり、かつ、その振幅は極めて小さい。より遠くのセンサではその信号が認められないことが多い。このことは、この波形をもつ A. E. はそれを受信したセンサのごく近傍で生じたことを意味する。

従つて、この形の波は伝播経路の影響をあまり受けていないと考えられる。震源でのスペク

Fig. 6. Superposed spectrum for the type of signals indicated in Fig. 5 and frequency response of the preamplifier.

Fig. 7. A large amplitude signal and its spectrum. Amplitude of the spectrum in the left figure is plotted on a log scale and linear in the right.

トルがある程度広がっており、その帯域がクラック毎に異つていているとする。多数の波について、振幅を規格化して重畳したスペクトルを作り、そのエンベロープをとれば、それは測定系（圧電素子を含む）の周波数特性を示すと考えられる。重畳したスペクトルを Fig. 6 に示す。エンベロープは 150 KHz 以下の周波数領域ではほぼ平坦であるが、逆に高い領域では幾つかのピークが見られる。これらのピークの周波数と Fig. 4 で示した波の 150 KHz 以上の帯域のピークのそれはほぼ一致する。しかし、Fig. 7 に示す大振幅をもつ波ではこれらのピークは明瞭ではない。このピークがあるという現象は、A. E. の特性ではなく、圧電素子と大理石の機械的結合状態に依存していると思われるが、明確なことは不明である。

150 KHz 以下の帯域では波長が 3 cm 以上となり、試料の横寸法あるいはそれを超えたものとなる。このことは、得られた波形が極めて複雑な境界条件の下で生成伝播されたことを意

Fig. 8. Calculated origins of acoustic emissions. I mark indicates the position of transducers. The coordinate system is indicated in upper left part of the figure. The sample size is $x=40$, $y=40$, $z=150$ mm.

味している。このような波を解析することはあまり有益ではない。

得られた震源分布を Fig. 8 に示す。この図は直交した 2 方向から見たもので、板状に切つてその中に求まつた位置を示してある。求まつた震源数は再生されたデータの一割弱であつた。これは、試料が Low Q であること、試料が比較的大きいこと、計算に用いた P 波速度を一定かつ均質だとしたことによると思われる。得られた分布は破壊学的には、何の傾向もないが、センサに囲まれた領域でより多く決つているのは上に挙げた理由に大部分依存している。

今回述べた測定系は、破壊実験の立場から考えると、センサの改善を行わない限り今までのデータの記録方式に比して特別有意ではないかもしれない。しかし、測定系の特性を考える上では役立つ。

謝 辞

実験を手伝つて戴いた大学院生清水信之氏に感謝します。

参考文献

前田 亟・本谷義信・鈴木貞臣, 1978, 北海道大学の地震・地殻変動テレメータデータ集録及び処理システムについて, 地震 II, 31, 401-413.