

Windows版AEデータ収録処理ソフト (WinAE) とその応用

雷 興林* 西澤 修** 佐藤隆司*** 楠瀬勤一郎***

Xinglin LEI, Osamu NISHIZAWA, Takashi SATOH and Kinichiro KUSUNOSE (1997) An AE data processing program for Windows. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 48(8), p. 447-457, 13 figs.

Abstract: For dealing with the huge data sets acquired during AE experiments, we have developed a visual and interactive program (WinAE) for data acquisition and processing. This program can create more than 10 types of time-space distribution maps of AE events and can perform statistical analyses. The main utilities of WinAE are: 1) acquisition of AE waveform data through GPIB; 2) automatic picking of P arrival times and hypocenter determination; 3) manual picking of P arrival times and hypocenter re-determination; 4) time distribution maps of AE events; 5) spatial distribution maps of AE hypocenters, such as cross profile, cylindrical and stereo projections; 6) parameter estimations for generalized two point correlation integrals and a potential model for AE hypocenter distributions; 7) point process model analysis; 8) automatic or manual focal mechanism solution; and 9) AE time-space distribution analyses with respect to source mechanism. Thus, WinAE is useful for studying the properties of the fracturing process in stressed rock samples.

要 旨

最新のAE実験装置に適応する膨大なデータを、より早くかつ客観的に自動解析するためのソフトウェアとしてMS-Windows用のAEデータ収録処理ソフト (WinAE) を開発した。WinAEは通常の震源時空間分布を可視化する機能の他、震源時空間分布を定量的に解析するための機能も有する。主な機能としては1) GPIBを介して実験装置からAE波形などのデータ収録、2) 初動の自動読取りと震源決定、3) 手動初動読取りおよび震源再決定、4) AE発生時間分布図の作成、5) AE震源の断面図、円柱投影図、ステレオ投影図等の震源空間分布を表す図面の作成、6) 相関積分によるフラクタル解析、震源空間分布のポテンシャルモデル解析等の震源空間分布解析、7) ポイントプロセスにもとづくAE発生系列モデル解析、8) 手動・自動震源メカニズム解、9) 震源タイプ別のAE時空間分布図の作成などからなっている。WinAEでは機能の選択、パラメータの入力などはマウスまたはキーボード操作により簡単に行え、解析結果をすばやく表示できる。これによりデータ解析作業が効率化され、微小破壊の時空間分布に関する系統的な解析や岩石破壊各段階の特徴の定量化などが容易に行える。

1. はじめに

応力を受けた岩石から放射されるAcoustic Emission (AE) は非均質な地殻での地震のモデルとして昨今盛んに研究されてきた。岩石試料中の潜在クラックが初期条件として破壊過程に大きな影響を及ぼすこと、差応力により新しいクラックや既存クラックの成長などが次々に時空間上非均質に発生し岩石の構造を変化させ、破壊過程をコントロールすることなどが明らかになった (Yanagidani *et al.* 1985; Hirata *et al.*, 1987; Lei *et al.*, 1992)。AE震源空間分布の研究によれば、岩石の微小破壊現象はSelf-organizationプロセスであり、震源の空間分布パターンはフラクタル構造を示すことが明らかにされている (Hirata *et al.*, 1987; Lei *et al.*, 1992)。フラクタル構造の形成およびフラクタル次元の減少は破壊過程が安定状態から臨界状態、それに非安定状態への変化を示す。このような過程は、震源空間分布から見ると微小破壊がランダム分布からクラスター分布、破壊核形成および成長に至る発展過程と見られることができる。空間分布だけではなく、時間分布にも同じような破壊の段階性が見られる (西沢・野呂, 1990)。岩石試料に見られるこのような破壊過程は、自然地震において微小地震から大きな地震に至る発展過程の解明に非常に大きな意味を持つ。

最近、破壊過程のそれぞれの段階をAE発生時間および震源空間分布の解析によって定量化する研究が行われて

Keywords: Acoustic emission, Fracture, Fractal, Hypocenter distribution, Mechanism solution, Data processing, Computer software.

* (株)ダイヤコンサルタント (DIA Consultants CO., LTD ; 3-1-2, Ikebukuro, Toshima-ku, Tokyo, 171 Japan)

** 地殻物理学部 (Geophysics Department, GSJ)

*** 地震地質部 (Earthquake Research Department, GSJ)

いる(Nishizawa and Noro, 1990; 西澤・雷, 1992; 雷・西澤, 1992)。AEの時間, 空間分布の関係および破壊過程のそれぞれの段階の変遷などをより詳しく解明するため, AE実験システムもコンピュータ技術などの発展に伴い次々と更新されてきた。地質調査所における最新の実験システムについては本号佐藤・西沢(1997)の論文に示されている。

最近のAE実験では, 一回の実験で数万個のAEの波形を32チャンネルで記録でき, これらの波形データからAE震源を正確に決定できる。このような膨大なデータを効率よく解析するため, Windows用のAEデータ収録解析ソフト-WinAEを開発した。本文ではWinAEの主な機能とその活用について最新研究動向とともに紹介する。

2. WinAE概要

2.1 WinAEの構成

AE実験における, データ収録および処理ソフトWinAEの構成および流れ図を第1図に示す。WinAEは主にWM32KS, AEHypo97およびWinAE32という三つのプログラムにより構成される。WM32KSはWindows用波形データ収録プログラムである。AEHypo97はDOS用初動読み取りおよび震源決定プログラムである。WinAE32はWindows95用のAEデータ(震源データおよび波形データなど)解析プログラムである。WinAE実行中の様子と主なインタフェースを第2図に示す。

2.2 データファイルについて

WinAEにはパラメータファイル(?par), 波形データファイル(?wav), 時系列データファイル(?txt), および震源データファイル(?aeb)を合わせて4種類のデータファイルが使われる。これらのファイルの内容について簡単に説明する。

パラメータファイル: 実験に関する情報, 例えばセンサー座標, 計測した速度等のデータを記録したテキスト

ファイルである。全てのプログラムがこのパラメータファイルから必要な情報を読み取る。

波形データファイル: 多チャンネルの波形データは各AEイベント毎にファイルに保存される(バイナリ)。

時系列データファイル: AEの大きさを示すピークデータ, AE発生率, 応力, ひずみ等のデータを保存するファイルである。

AE震源データファイル: 初動データ, 震源座標, メカニズム解等のデータを保存するバイナリファイルである。

3. WinAEの基本機能

3.1 AE波形データ収録

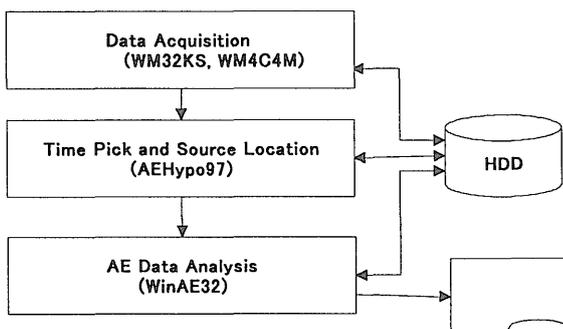
WM32KSを使ってWindows3.1上で最新の32チャンネルのAE波形記憶装置(NF社製WM32KS)から GPIBを介し波形データをPCのハードディスクに転送できる。波形記憶装置各チャンネルに16MBのメモリを内蔵し, サンプル数1024の場合では8000個以上のAEイベントの波形をほぼ連続して保存できる。なお, 波形記憶装置のメモリ管理上イベントが発生する時はデータ転送を中断して波形記録を優先する方式が採用されたので, AE発生率がデータの転送速度より速い時でもデータを漏れなく記録できる。これはクラスターおよび破壊核の形成と成長等の過程を解明するために欠かせない機能である。波形記憶装置の詳細な内容については本号佐藤・西沢(1997)の論文を参照して欲しい。

以前のデータ収録プログラムでは弾性波速度計測のための波形もAE波形と同様に記録されたが, WM32KSでは弾性波速度計測用波形を別のディレクトリに保存できる。サンプリングパラメータを初期化ファイル(WM32KS.INI)に入力しておけば, 実行中はマウスのみを使って操作できる。

3.2 自動震源決定

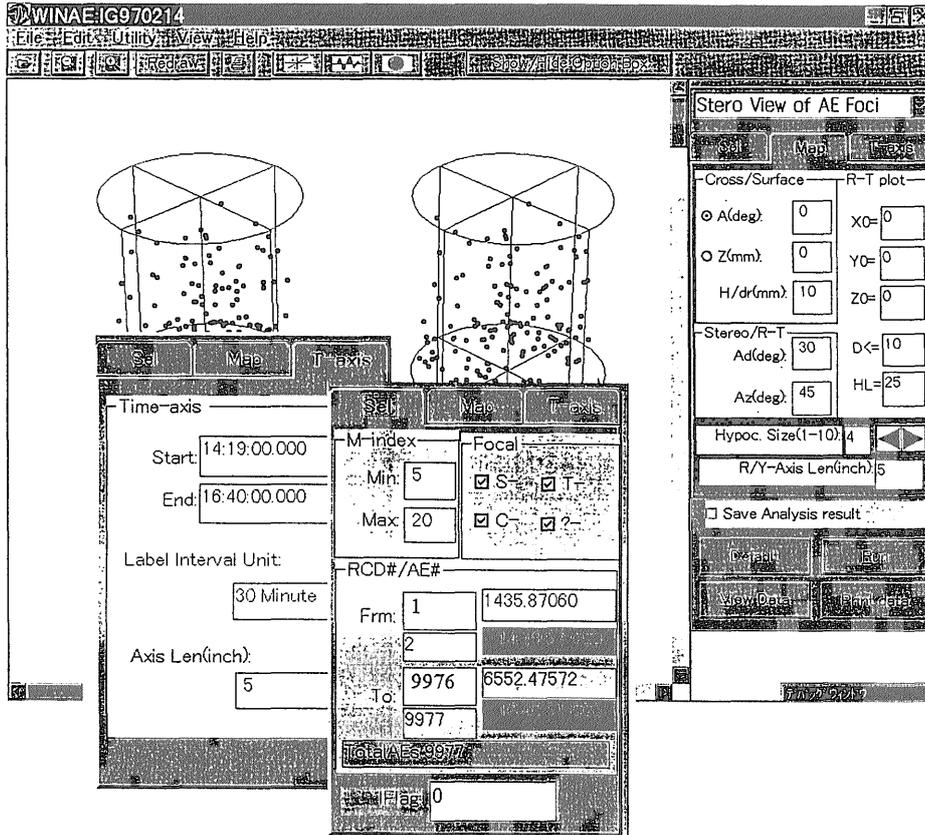
自動震源決定プログラムAEHypo97は佐藤ら(1987)が開発したミニコンピュータ用のプログラムをPCに移植したものである。初動の検出には横田ほか(1981)の方法が採用された。すなわち, 波形時系列がARモデルを用いて表現される。モデルのパラメータおよび時系列の分割点(初動)の決定には赤池情報量基準(AIC)(Akaike, 1974)が用いられる。震源の決定には自然地震震源決定と同じような最小二乗法による方法が採用されている。

AEHypo97はDOSプログラムであるから, DOSおよびWindowsから実行できる。AEHypo97を実行するためにはセンサー座標, 計測した弾性波速度値等の情報が入ったパラメータファイルを用意しておかなければならない。DOSのプロンプトから“AEHypo97パラメータファイル名”を入力してプログラムを実行させる。処理速度

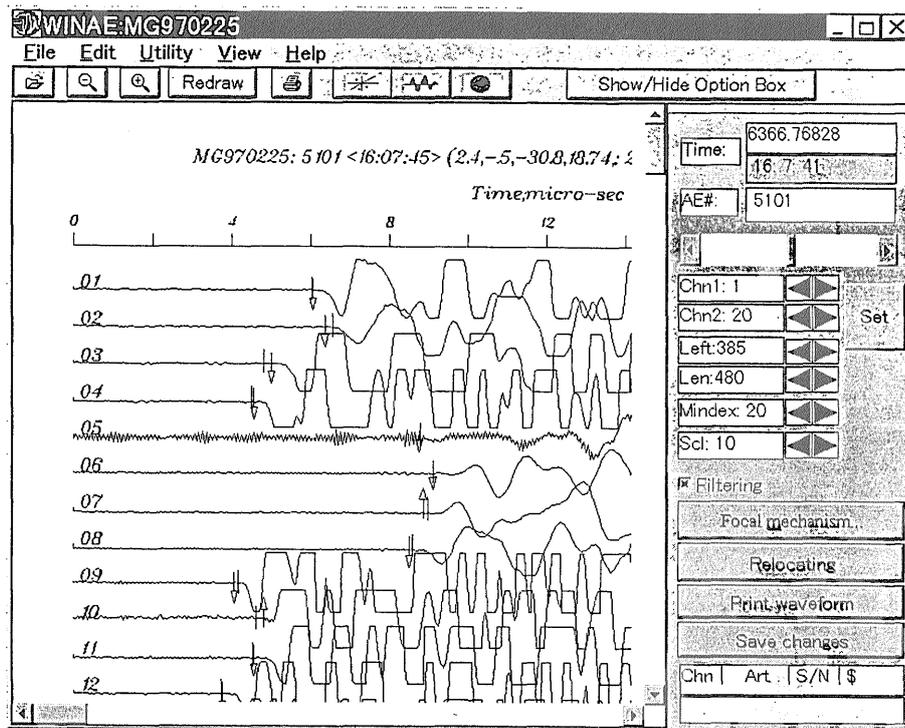


第1図 AEデータの収録および解析の流れ図

Fig.1 A Schematic diagram of AE data processing procedures.



第2図 WinAE32実行中の様子と主なパラメータ入力インタフェース
Fig. 2 Main interface of WinAE32.



第3図 AE波形表示画面。手動により初動決定、震源再決定などが可能。
Fig. 3 Waveform analysis frame. It is possible to pick the P arrival time and re-locate the hypocenter manually.

はPCのCPUのタイプ等に依存するが、Pentium 150 MHzの機種なら、1時間およそ3000個のAE震源を決めることができる。正常に終了したら震源データファイルが作成される。

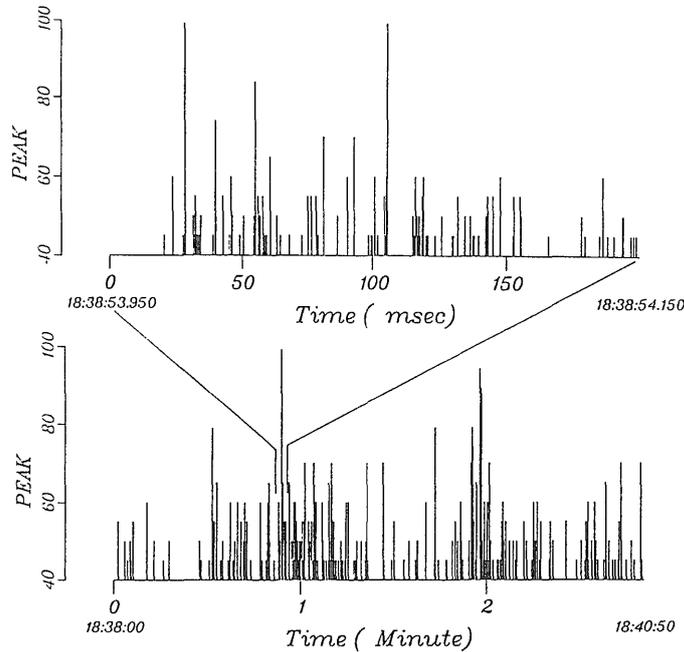
作により初動の自動読取りおよび震源再決定などが可能である。微小破壊の準備段階を表す“初期フェイズ”(Kusunose and Lei, 1996)があるAEについて二つの震源を別々に決定でき、初期滑りの方向と滑り速度の計算もできる。

3.3 波形解析

第3図に波形解析画面を示す。読取った初動時刻、理論走時なども表示できる。波形図の印刷の他、マウス操

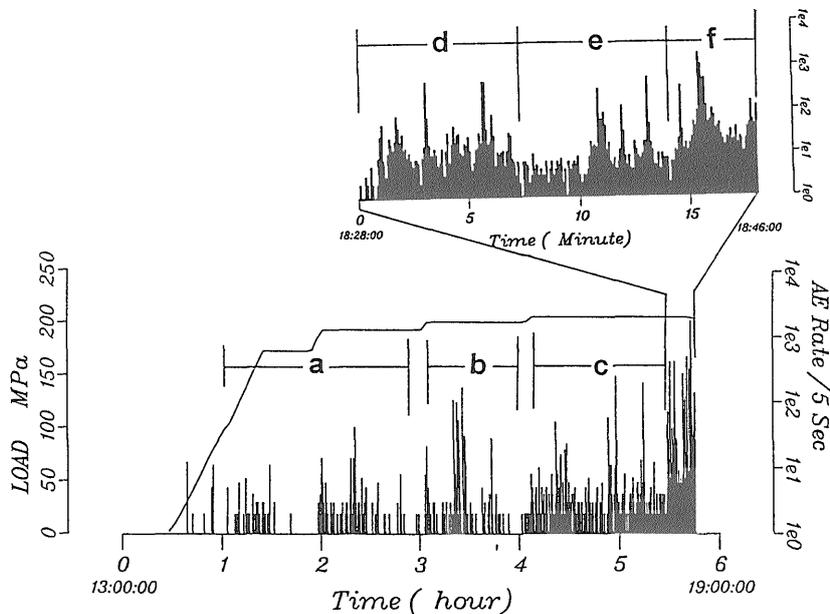
3.4 震源時間-空間分布図

AE震源の時空間分布を各種表示することができる。表



第4図 AEの大きさを示すPEAKデータの時間分布図

Fig. 4 An Example of PEAK vs. Time, where PEAK corresponds to the amplitude of an AE waveform.



第5図 AE発生率の時間変化

Fig. 5 Examples of AE occurrence rate and load vs. time

示すAEは発生時刻, AEイベント番号, 震源決定の精度指数(M, 採用された初動数), 震源タイプおよび任意フラグなどを利用して選別できる。以下, WinAEから直接作成できる図面について説明する。

3.4.1 時間分布図

ピーク分布: X軸をAE発生時間, Y軸をAEの最大振幅としたイベント発生系列図である。第4図に示したのは安山岩単軸実験においてAEの発生が活発化した時の実例である。この図の場合, 時間スケールにおいての自己相似性を示している。

発生率分布: X軸を時間, Y軸をAEの発生率とした図である。第5図に示したのは安山岩単軸実験結果であり, 5秒ごとの発生率を対数で表示している。

応力, 歪み: X軸を時間, Y軸を応力または歪みとした図である。

すべての時間分布図のX軸が時間を表すので, 複数の異なる種類のデータを一つの図面にまとめて表示するこ

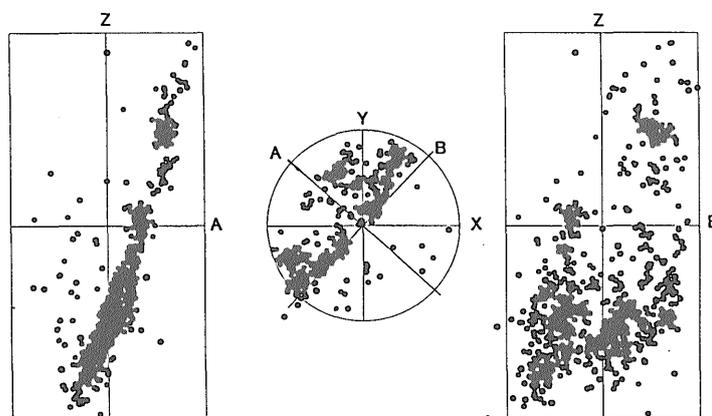
とが可能である。なお, X軸を時間の代わりに応力・体積歪み等とすることも可能である。

3.4.2 断面図

試料内任意方向の垂直断面あるいは任意場所の水平断面に投影して震源分布を表示できる。垂直断面の場合では断面の方位(試料のX方向から逆時計回り角度)又水平断面の場合では断面のZ座標により断面が決められる。投影範囲は断面からの距離を利用して指定できる。なお, 実験前後の試料のCTイメージの上に震源マークをのせることもできるから, 震源分布とクラックや試料の不均質構造との関係が一目瞭然になる。第6図に直交する3断面をならべて表示した。

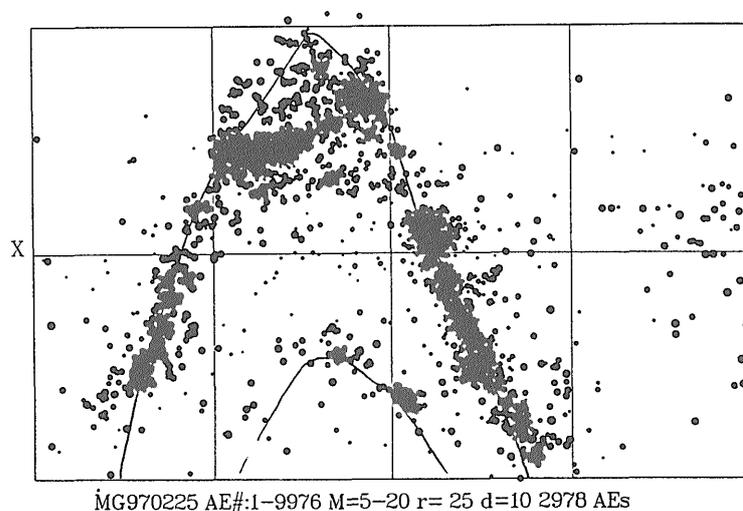
3.4.3 円柱投影図

試料の軸と同じ軸を持つ円柱表面に震源を投影できる。投影範囲は投影面からの距離によって指定でき, 円柱の半径も指定できる。例えば震源分布と試料に斜交する既存ジョイントとの関係調べるには円柱投影図は便



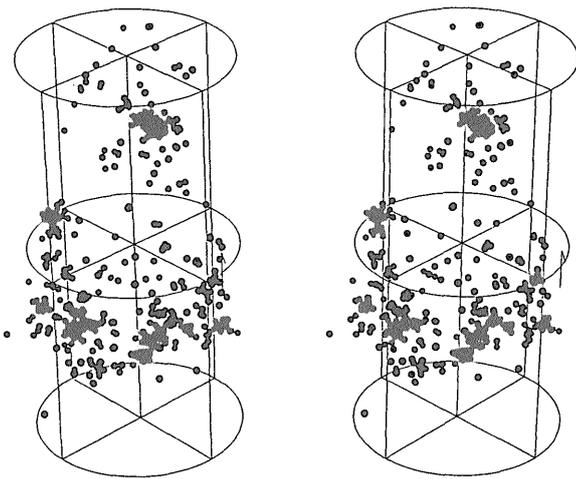
第6図 震源分布断面図例

Fig. 6 AE hypocenters projected onto a horizontal plane and two cross sections.



第7図 震源円柱面投影図

Fig. 7 Hypocenters projected onto a cylindrical surface. The traces of existing joints are also plotted.



(View X-45 Z+30)

MG970225 AE#:5000-7000 M:15-20 542AEs

第8図 震源ステレオ投影図
Fig. 8 Stereo projection of AE hypocenters.

利である。第7図に実例を示す。図に既存ジョイントと投影円柱面の交差線も手書きで入れた。AEがジョイント面内に発生したことがよく分かる。 3.4.4 ステレオ投影図

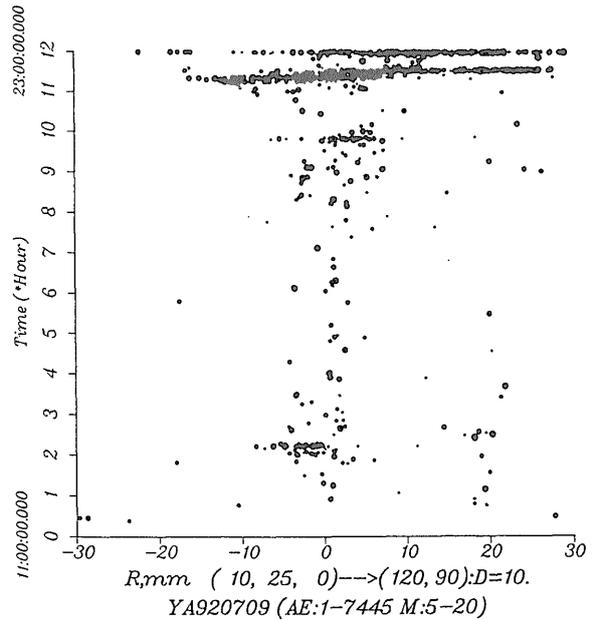
第8図のような震源ステレオ投影図の作成ができる。視点方向(Az, Ad)は任意に指定できる。交差法(左目が右の図, 右目が左の図を同時にみる)により3次元視できる。

3.4.5 R-T分布図

R-T分布図は震源分布の時空間変化を表す図である。Rは試料内の任意の投影線であり、Tは時間を表す、線の周りの一定範囲内震源を線上に投影し震源のR座標とする。R-T分布図は破壊核の形成、成長および成長の速度を調べるには最適な図面である。第9図に安山岩単軸圧縮実験における、微小破壊クラスタが破壊核となり最終破壊に至る様子を示す。この実験では、AEは主に試料表面の数箇所(クラスタ)に集中して発生し、そのうちの 하나가破壊核となり破壊域が急速に成長して最終破壊となった。

3.4.6 AE時間-空間分布対比

最新のAE実験装置では波形データ読取のマスクタイムがほぼ無視できるようになった。これにより震源データと時系列データを統合することが可能になった。第10図に短い時間内発生したAEの震源分布と時間分布を同時に表示した。時間的には大きいAEの後に多数の小さいAEが、空間的には大きいAEの周りに小さいAEが集中発生し、これら小さいAEは“余震”であると考えてよいだろう。



第9図 R-T分布図
Fig. 9 R-T distribution map, where R is a projection line in the rock sample.

4. 震源空間分布解析

4.1 2点分布相関関数解析

AE震源分布は自然地震震源分布と同じようにフラクタル構造を示す(Hirata *et al.*, 1987; Hirata and Imoto, 1991; Kusunose *et al.*, 1991)。非均質性の強い稲田花崗岩ではAE震源分布はBand-limitedフラクタル構造を示す(Lei *et al.*, 1993)。WinAEは広義2点相関関数の計算および表示機能を有し、マルチフラクタル次元の計算が簡単にできる。

広義2点相関関数は

$$C_q(r) = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{N_i(R \leq r)}{N-1} \right)^{q-1} \right]^{1/(q-1)} \quad (q=0,1,2,\dots) \quad (1)$$

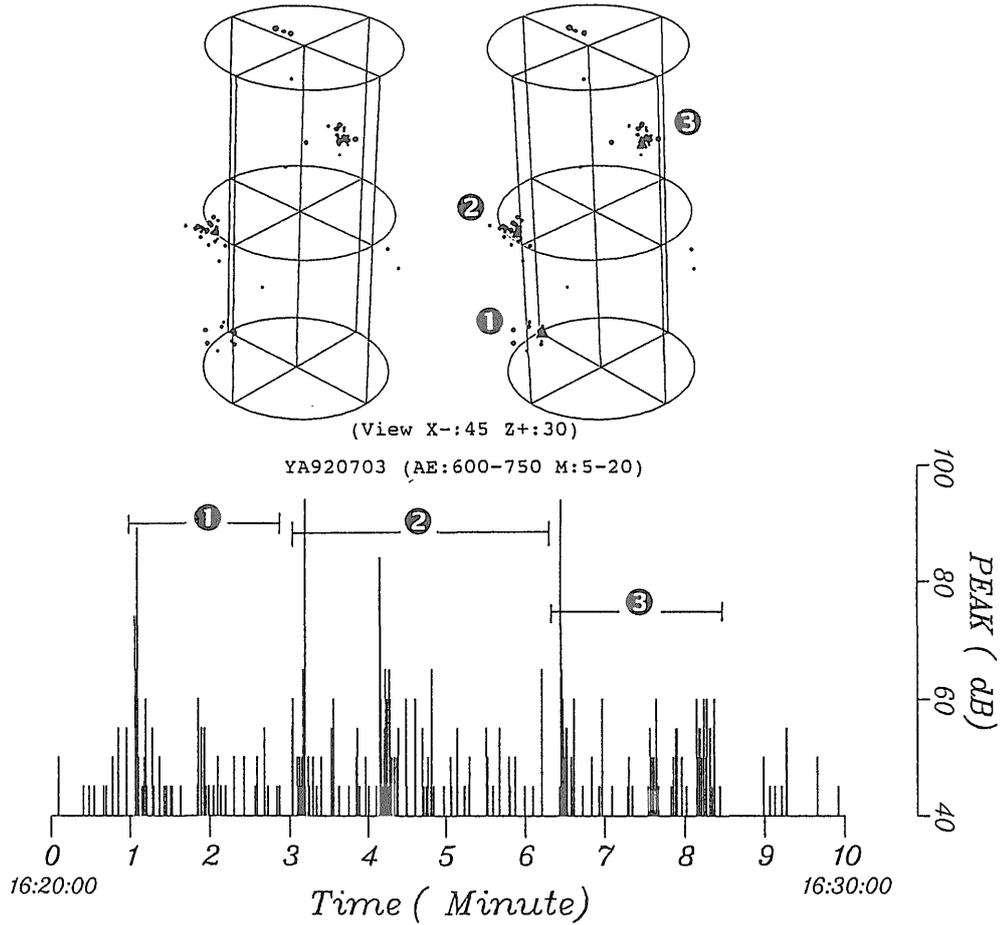
で定義される。ここに、 $N_i(R \leq r)$ は第*i*番の震源との距離Rがrより小さいのすべて震源の数、Nは震源総数である。震源分布がフラクタル構造を持っていれば以下の線形関係が成立しなければならない。

$$C_q(r) \propto r^{D_q} \quad (2)$$

ここに、 D_q は広義のフラクタル次元と呼ばれ、一般に $D_0 \geq D_1 \geq D_2 \geq \dots \geq D_\infty$ という関係がある。第11図に相関曲線表示とフラクタル次元を計算する画面を示す。

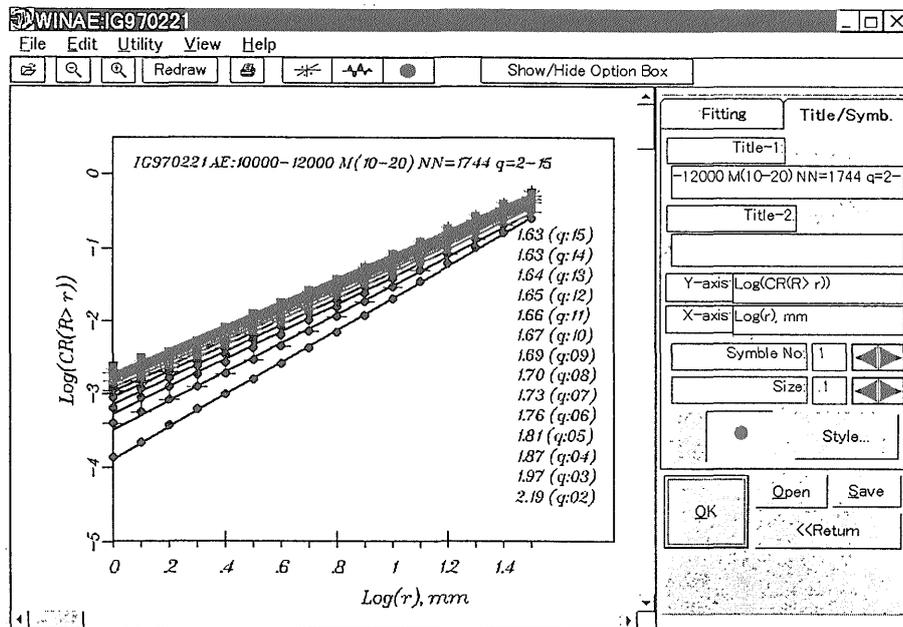
4.2 震源空間分布のポテンシャルモデル

通常ひとつのAEイベントは一回の微小破壊と対応する。微小破壊の結果としてクラックが生じ、岩石内部に欠陥が残される。したがって、そのクラックの周りに応



第10図 時間-空間分布対比図

Fig. 10 AE distribution map showing the time-space relationship of AE events.



第11図 フラクタル解析図面

Fig. 11 Windows frame for 2 point correlation analysis.

力が集中しやすくなり、新しい微小破壊につながることを考えられる。これは微小破壊は空間的な誘引ポテンシャルを持っていることを意味する。これに基づきAE震源分布を以下のようなポテンシャルモデルで表現できると仮定する。

$$p(r) = -\log[1 + (\alpha - 1)e^{-\beta r^2}] \quad (3)$$

$$p(r) = -\log[1 + (\alpha \frac{r}{\beta} - 1)e^{-\beta r^2}] \quad (4)$$

($r < \beta$)

(3)式は単純な誘引型のポテンシャルを表わし、微小破壊で生じたクラックの周りに微小破壊が起こりやすくなることを示す。(4)式はコアを有する誘引型のポテンシャルを表わし、微小破壊で生じたクラックから少し離れたところに微小破壊が起こりやすくなることを示す。モデルパラメータは赤池情報量基準AICを最小になるよう決められる。(3)と(4)のモデルについて最大尤度を探するのは容易ではなく、試行により求めるしかない。一般にクラックの密度が高ければ高いほどクラックの相互作用が強くなるはずである。最終破壊状態になるとポテンシャルが強くなることが予想できるだろう。

5. AE時間分布解析

5.1 AE時間分布における2点相関関数解析

AEの時間分布も空間分布と同じような2点相関関数を使って解析できる。この場合、空間距離のかわりに時間間隔を使う。AEの時間分布も空間分布と同様にフラクタル構造を示す。

5.2 Self-Excitingモデル

AEイベントを時間軸上の点過程と見なすとき、一つの破壊は一つの事象と呼ぶことができる。この事象を特徴づけるパラメータは発生時間、AEの大きさ(マグニチュード)などである。AE相互作用を解析するため、西沢・野呂(1990)、Nishiza and Noro (1990)はOgata and Katsura (1986)が提唱したSelf-Exciting(SE)モデルを用いてAE発生点過程モデルを研究した。WinAEにはこれらの研究成果に基づきAE発生点時刻解析機能を提供している。

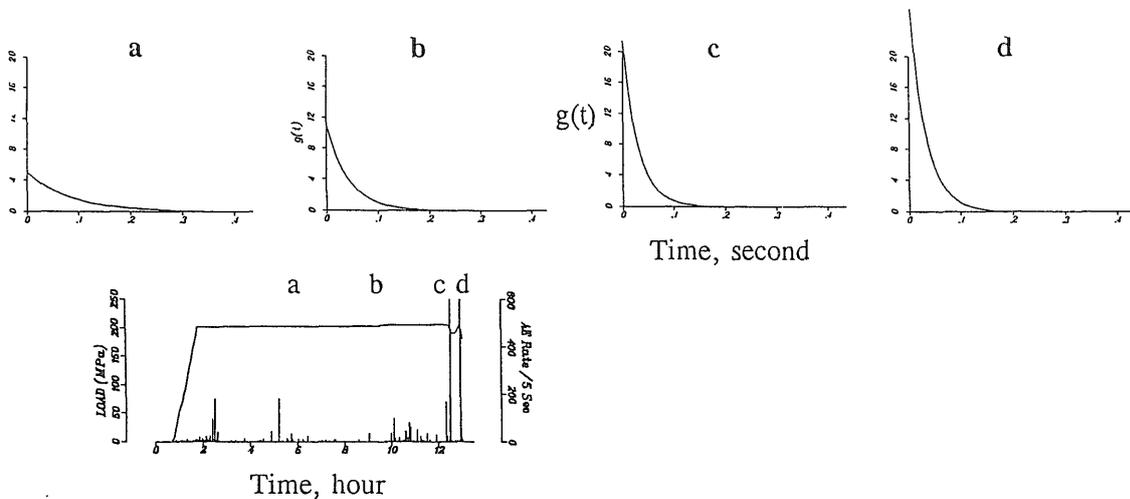
ある時間での事象の発生確率が以下のモデルに従うとする。

$$\lambda(t) = \mu + \sum_{j=1}^J p_j \cdot t^j + \sum_{t_i < t} g(t - t_i) \quad (5)$$

ただし

$$g(t) = \sum_{m=0}^{m=M} \alpha_m \cdot t^m \cdot e^{-\beta t} \quad (6)$$

ここに、 μ はランダムな発生確率、すなわちポアソン過程による発生確率を示す。第2項目は発生時間的推移の傾向を多項式で表現したものであり、 J は打ち切り次数を表わす。関数 g はラグール型多項式と呼ばれる関数形で表現した事象発生時刻からの経過時間に対する危険度を示すインパルス応答関数であり、 M はラグール型多項式の次数を表わす。モデルパラメータ($J, M, \beta, p_1, p_2, \dots, p_J, \alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_M$)は赤池情報量基準AICを最小になるよう決められる。時間(0,T)の間に n 個の事象が時間 $t_i (i=1, \dots, n)$ に発生した場合モデル(5)の尤度は



第12図 Self-Excitingモデル解析結果

Fig. 12 A result obtained with the self-exciting model. The effects of the impulse functions(a, b, c, d of the upper figures) become stronger close to the final fracturing.

$$L_T(t_1, t_2, \dots, t_n) = \left[\prod_{i=1}^n \lambda(t_i) \right] \cdot e^{-\int_0^T \lambda(t) dt} \quad (7)$$

$$\log L_T = \sum_{i=1}^n \log(\lambda(t_i)) - \int_0^T \lambda(t) dt$$

となる、AICは次の式で与えられる。

$$AIC = -2 \max(\log L_T) + 2(\text{パラメータ数}) \quad (8)$$

プログラムでは任意に与えた J と M に対しAICを最小になるように自動的に他のパラメータを決める。 J と M の組み合わせを変化させ、さらにAICを最小とする J と M を見つければよい。

関数 g の形状、特に減衰の様子は前の事象が後の事象を誘発する(自己激励)確率のパターンを表す。第12図に安山岩単軸圧縮実験のAE時系列データ(下図)を利用してa, b, c, d各段階のSEモデルのインパルス応答関数を示す。クリープ状態で最終破壊に近づくとき発生直後の確率が著しく大きくなりAEの自己激励が強くなる傾向が認められる。

6. AE震源メカニズム解

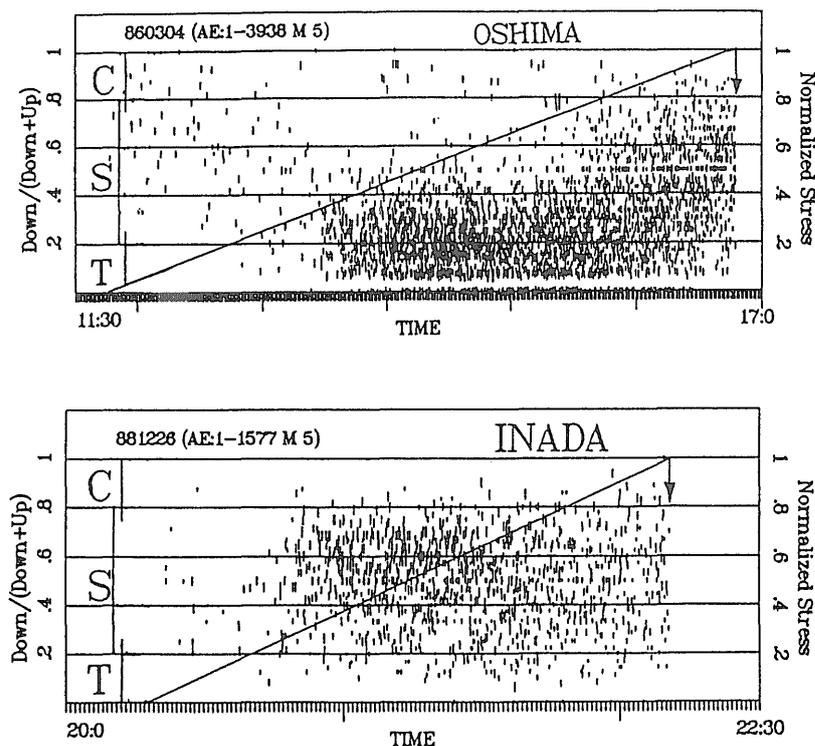
AE震源メカニズムは微小破壊を解明するために重要な研究テーマであるが、多チャンネルの波形データが必

要であるため、技術の進歩した80年代に入ってから始められた(楠瀬ほか, 1981; Sondergeld and Estey, 1982; Nishizawa *et al.*, 1985; Kusunose and Nishizawa, 1986; 佐藤ほか, 1986; Lei *et al.*, 1992)。微小破壊のタイプは破壊が発生した場所の局所応力場を反映するものとして、広域応力場、岩石の非均質性、既存クラックの分布などの複雑な条件に影響される。

WinAEにはP波初動の極性の比down/(down+up)により震源タイプを統計的に分類することができる。手動と自動二種類の方法を利用して震源メカニズム解を求めることも可能である。

6.1 初動極性比の分布図

今までの研究結果によると主なメカニズムは3種類ある(Kusunose and Nishizawa, 1986; 佐藤ほか, 1986; Lei *et al.*, 1992)。ここではLei *et al.* (1992)に従いType-S, Type-T, Type-Cと記す。Type-Sはせん断型の破壊に対応し、P波初動極性が4象限分布を示しup(+, 押)とdown(-, 引)両方を有する。Type-Tは引張の破壊に対応し、P波初動極性が主にupである。Type-Cはクラックの突然閉合に対応し、P波初動極性が主にdownである。したがって、P波初動の極性の比down/(down+up)によりこれら震源タイプの分布を統計的に分類することが可能であり、破壊メカニズムの変化する様子を大ざっぱにとらえることができる(Lei *et al.*, 1992)。第13図上



第13図 初動極性比の時間変化図

Fig. 13 Plots showing the change in the fraction of the dilational first motion with respect to time.

図に封圧40Mpa下での大島花崗岩を用いた実験結果を示す。低応力状態ではType-Cがやや多かったが、中応力段階になるとType-Tが卓越する。最終破壊に近づくとType-Sが増え、せん断型の破壊が主なメカニズムになった。しかし、ほぼ同じ実験条件下で、結晶粒子の大きい稲田花崗岩を用いた実験結果(第13図下図)にはどの段階でもせん断型の破壊が主なメカニズムであり、結晶粒子により非均質性が微小破壊における重要な役割を果たすことを意味する。Lei *et al.* (1992)によれば、粗粒の稲田花崗岩の場合では粒子境界の滑りが微小破壊の主なメカニズムである。

6.2 手動震源メカニズム解

各センサーの初動極性などを震源を中心とした投影図に表示し、初動極性の分布からメカニズムタイプを決める。Type-Sと判断したAEについてマウス操作で節面を概略的に決めれば正確な解が自動計算で得られる。

6.3 自動震源メカニズム解

まず、初動の押し引きの比によりメカニズムタイプを統計的に判断する。Type-Sと判断されたAEイベントについて青木(1986)が発表したフーリエ法等を応用して自動的に節面および主応力軸を求める。

6.4 P・T軸投影図

前に述べたようにせん断型破壊AEの初動の押し引きを利用して震源メカニズム解が求められ、最大主応力方向と最小主応力方向がP, T軸として得られる。これらは微小破壊の発生場所の局部応力場を表す。P, T軸投影図はP, T軸の方向を下半球に投影して表す図面である。

7. おわりに

Windows版AEデータ収録処理ソフトは地質調査所の最新のAE実験装置に適したソフトである。これによってAEデータ収録、震源決定、微小破壊の時空間分布解析の定量化に関する研究の発展が期待される。

文 献

- Akaike, H. (1974) A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans. Autom. Control*, **AC-19**, 716-723.
- 青木治三(1986) Fourier解析による地震メカニズム解, 地震2, **39**, 251-256.
- Hirata, T. and Imoto, M. (1991) Mutifracture analysis of spatial distribution of microfracturing in the Kanto region., *Geophys. J. Int.*, **107**, 155-162.
- Hirata, T., Satoh, T. and Ito, K. (1987) Fractal structure of spatial distribution of microfracturing in rock, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **90**, 369-374.
- 楠瀬勤一郎・西沢 修・伊藤久男・石戸経士・長谷川功(1981) 岩石の一軸圧縮実験における発震機構, 地震2, **34**, 241-250.
- Kusunose, K. and Nishizawa, O. (1986) AE gap prior to local fracture of rock under uniaxial compression, *J. Phys. Earth*, **34**, 45-56.
- Kusunose, K., Lei, X., Nishizawa, O. and Satoh, T. (1991) Effect of grain size on fractal structure of acoustic emission hypocenter distribution in granitic rock, *Phys. Earth planet. Inter.*, **67**, 194-199.
- Kusunose, K. and Lei, X. (1996) A pre-sliding phase before "P" wave of AE, IASPEI Asia Assembly.
- Lei, X., Nishizawa, O., Kusunose, K. and Satoh, T. (1992) Fractal Structure of the Hypocenter distribution and Focal Mechanism Solutions of AE in Two Granites of Different Grain Size, *J. Phys. Earth*, **40**, 617-634.
- Lei, X., Nishizawa, O. and Kusunose, K. (1993) Band-limited heterogeneous Fractal structure of earthquakes and acoustic emission events, *Geophys. Inter.*, **115**, 79-84.
- 雷 興林・西沢 修(1991) AE走時残差によるP波速度トモグラフィ, 地震学会講演予稿集.
- 雷 興林・西沢 修(1992) AE発生時刻と震源分布との関係(II) - 安山岩及び稲田花崗岩の単軸実験結果, 地震学会講演予稿集.
- 西沢 修・雷 興林(1992) AE発生時刻と震源分布との関係(I) - 計測システムなど, 日本地球惑星科学関連学会一九九二年合同大会, 共通セッション・シンポジウム予稿集.
- 西沢 修・野呂春文(1990) AE発生時系列における自己励起形AE発生とAE震源の空間分布との関係, 地質調査所月報, **41**, 173-184.
- Nishizawa, O. and Noro, H. (1990) A Self-exciting process of acoustic emission occurrence in steady creep of granite under uniaxial stress, *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 1521-1524.
- Nishizawa, O., Onai, K. and Kusunose, K. (1985) Hypocenter distribution and focal mechanism of AE events during two stage creep in Yugawara andesite, *Pure Appl. Geophys.*, **122**, 36-52.
- Ogata, Y. and Katsura, K. (1986) Point-process

- models with linearly parametrized intensity for application to earthquake data, *J. Appl. Probability*, **23A**, 291-310.
- 佐藤隆司・出原 理・西沢 修・楠瀬勤一郎 (1986) 三軸応力下で発生するAEの震源分布と発震機構—安山岩で発生するAEの発震機構—, *地震* **2**, **39**, 351-360.
- 佐藤隆司・楠瀬勤一郎・西澤 修 (1987) ミニコンピュータを用いたAE波形計測処理システム—高速デジタル記録と自動震源決定—, *地調月報*, **38**, 295-303.
- 佐藤隆司・西澤 修 (1997) AE計測のための高速・多チャンネル波形記録システム, *地質月報*, **48**, 439-446.
- Sonderger, C.H. and Estey, L.H. (1982) Source mechanism and microfracturing during uniaxial cycling of rock, *Pure Appl. Geophys.*, **120**, 151-166.
- 横田 崇・周 勝奎・溝上 恵・中村 功 (1981) 地震データの自動検出方式とオンライン処理システムにおける稼働実験, *地震研究所彙報*, **56**, 449-484.
- Yanagitani, T., Ehara, S., Nishizawa, O., Kusunose, K. and Terada, M. (1985) Localization of dilatancy in Ohshima granite under constant uniaxial stress, *J. Geophys. Res.*, **90**, 6840-6858.

(受付：1997年6月9日；受理：1997年8月4日)