

室内岩石破壊実験のためのリアルタイム AE震源モニタリングシステム

雷 興林* 佐藤隆司* 西澤 修** 増田幸治* 楠瀬勤一郎*

Xinglin LEI, Takashi SATOH, Osamu NISHIZAWA, Koji MASUDA and Kinichiro KUSUNOSE (1998) A real time AE hypocenter monitoring system for laboratory rock fracture experiment. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 49 (7), p. 353-363, 8 figs, 5 tables.

Abstract: An AE system which can monitor AE hypocenters in real time during a rock fracture experiment has been developed. This paper reviews the development of the AE system at the GSJ during past 10 years and introduces the basic utility and advantage of the new real time AE hypocenter monitoring system.

要 旨

岩石破壊実験中 AE 震源をリアルタイム決定し表示することが可能な AE システムを開発した。本論文ではこの10数年間に地質調査所に導入された AE システムの発展史を簡単にレビューするとともに最新のリアルタイム AE 震源モニターシステムの基本機能, 有効性および簡単な使い方などを紹介する。

1. はじめに

地震は不均質な地殻内に生じる破壊現象であり, 岩石を用いた変形・破壊実験は不均質な地殻における破壊をモデル化したものである。こうした不均質な場における破壊はさまざまな特徴を持っている。たとえば, アコースティックエミッション (AE) の規模の大小と発生数との関係は自然地震における Gutenberg-Richter (あるいは石本-飯田) の関係式と類似の関係を持っており, b 値 (あるいは m 値) は, 岩石の不均質と関係している (Mogi, 1962; Scholz, 1968)。

岩石の不均質には, 構成鉱物種や鉱物粒子サイズに起因するものと, 差応力下での変形・破壊の過程で作られる微小破壊に起因するものがある。さらに, 岩石固有の不均質は差応力で作られる微小破壊の分布を支配する。Kusunose *et al.* (1991) や Lei *et al.* (1992) は, 鉱物粒子サイズの違いが AE 震源の集中の度合いを支配することを示している。いっぽう, 差応力で作られる微小破壊の分布は変形・破壊の過程で変化する。Hirata

et al. (1987) や西澤ほか (1982) は一定応力下での岩石のクリープ破壊の際に震源の集中の度合いが変化することを報告した。微小破壊発生の特徴は空間分布だけでなく時間分布でも見られ, Hirata *et al.* (1987) や Nishizawa and Noro (1990) は AE 発生時間分布を規定するパラメータが破壊の進行とともに変化することを報告している。

しかし, 以上のような研究では, AE 計測システムの機能が不十分であったため AE 震源は多数発生した AE のごく一部について決定されるだけで, 十分に定量的議論がなされているとは言えない。AE 震源の集中度の違いは実際にはもっと大きいかもしれない。また, AE 各イベントについて波形と発生時刻のデータが完全に対応しておらず, 時間分布と空間分布とを正確に対比させることはできない。

また, 今までの実験では, 実験中にリアルタイムで震源決定してモニタすることはできなかったため, 実験の過程を人為的に変更することはできなかった。今までの研究を一層促進するため, より有効な実験装置が必要になる。このため, 最新の波形記憶装置を導入し, これをベースに AE 震源リアルタイムモニタリングシステムを開発した。

ここに, この10数年地質調査所に導入していた AE システムの発展史を簡単にレビューするとともに最新リアルタイム AE 震源モニターシステムの基本機能および簡単な使い方を紹介する。

*地震地質部 (Earthquake Research Department, GSJ)
**地殻物理部 (Geophysics Department, GSJ)

Key words: Acoustic emission (AE), Data acquisition, Real time, Hypocenter determination, Data processing, Computer software.

2. 地質調査所の AE システム

高速・多チャンネル波形記憶装置 (トランジェントメモリ, 以下 TM と略す) により AE 波形を記録し, 岩石破壊実験の際の微小な破壊の震源を正確に決定し, 震源の時空間分布について調べる研究は80年代始めから本格的に始まった (例えば楠瀬ほか, 1981, 1982; 西沢ほか, 1981, 1982; Sondergeld and Estey, 1982)。地質調査所では1980年代中ごろからミニコンピュータを導入して大量の AE 波形データの収録と震源自動決定を行うシステムを開発した (佐藤ほか, 1987)。しかし, コンピュータの性能およびデータ転送の速度が不十分ため波の初動自動読取りと震源決定には数日を要した。その後80年代後半からパーソナルコンピュータの加速的進歩および波形記憶装置技術の著しい進歩 (メモリの高速化と安価化など) に伴い, AE データ収録解析システムは短期間に著しい進歩をとげた。地質調査所ではこの間システムの改良を重ね AE 波形処理の大容量化, 高速化に向けて改良を加えてきた。

第1表に示すように, 地質調査所の AE 波形記録システムは概略的に三つの世代に分けることができる。以下に, それぞれの特徴および得られた主な研究成果などを紹介する。

初代の AE システム (91以前) では, 波形データを記録転送するためにシステムが AE 波形の収録を行うことができなくなり, この間に発生する AE が記録されない時間 (これをシステムのデッドタイムと呼ぶ) が1.5秒以上もあり, AE 発生率が高い時には記録される AE 数と実際に発生する AE 数との比率が極端に低くなる。このシステムを使って主にクリープ下の AE 震源空間分布および震源メカニズムの特徴 (例えば, 楠瀬ほか, 1981, 1982; Nishizawa *et al.*, 1984/85; Yanagidani *et al.*, 1985; Kusunose and Nishizawa, 1986; 佐藤ほか, 1986), 空間分布のフラクタル構造 (Hirata *et al.*, 1987; Lei *et al.*, 1992, 1993), 間隙水の浸透と微小破壊の相互作用 (Masuda *et al.*, 1990) などについて数多く研究され, 岩石の破壊過程の詳細を明らかにすることができた。しかしながら, これらの実験はいずれも定性的な結

第1表 地質調査所に導入された各時代の AE システムの概要
Table 1 Main specifications of AE system developed at the GSJ

	~91	92~96	97~
TM	Electronic 製 ELK-700 など	NF 製 WM4C4M	NF 製 WM32KS
分解能	8~10bit	10bit	12bit
最大サンプリング周波数	8~20MHz	20MHz	25MHz
チャンネル数	8~20	20	32
TM バッファサイズ	1~4Kbyte/chn	2Mbyte/chn	16Mbyte/chn
TM に保存できる AE 数	(1 イベント)	(1024 イベント)	(8012 イベント)
波形データ収録 インタフェース	Mini computer GPIB(512K/sec)	PC(486 33MHz) GPIB(ISA)	PC(Pentium 300MHz) GPIB(PCI)
デッドタイム (バッファ飽和後)	>1.5sec	25msec (0.7sec)	200 μ sec (0.4sec)
記録できるAE数	数百~数千	数千	数千~数万
主なデータ保存メディア	磁気テープ	MO ディスク	CD-R
初動自動読取と震源自 動決定に所要時間	数日間	数時間	リアルタイム 準リアルタイム(延び最大1時間)
特徴または問題点	デッドタイムが長いので AE 発生頻度が高い時記録できない AE が多い。	デッドタイムはやや不足。1024 個分のバッファサイズでは破壊直前の活発な AE をとらえるのは不十分。	デッドタイムが十分小さい, バッファサイズも十分大きい。リアルタイム震源表示が可能。
主な成果(予定)	クリープ実験におけるAEの震源分布および震源メカニズム解について多くの成果が得られた。	AE の時空間分布などをより詳しく解析できた。	AE の時空間分布, 破壊核の形成および成長などの研究に適用。

論にとどまっていた。

二代目の AE システム (92-96) ではチャンネル毎に 2 M バイトのバッファを内蔵し、デッドタイムが 20 msec と著しく短くなったため、AE 発生率の高い状態でも多数の AE を記録できた。このシステムを用いて AE 時空間分布のクラスタや破壊の段階についての定量化が始まった(西沢・雷, 1992; 雷・西沢, 1992)。このシステムではバッファが飽和に達した後も伝送しながらデッドタイムが 0.7 秒で次々に AE を記録できる。しかし、バッファに一時保存できる波形が 1024 イベント分しかなく、最終破壊段階に起こる多数の AE を記録するには十分ではなかった。

三代目の AE システム (97-) では 200 μ sec のデッドタイムを実現した上で、チャンネルごとに 16 M バイトのバッファを内蔵している。AE 波動の減衰時間はおおよそ数十 μ sec-1 msec であるので 200 μ sec のデッドタイムは実用上は十分な速さである。バッファに 8012 個分の AE 波形を一時記録できるため、最終破壊の直前に起こった AE も多数記録できる。破壊核の形成および成長、破壊過程各段階の特性などについての定量化の研究に大いに役立つことが期待できる。

3. リアルタイム震源モニタリングシステム

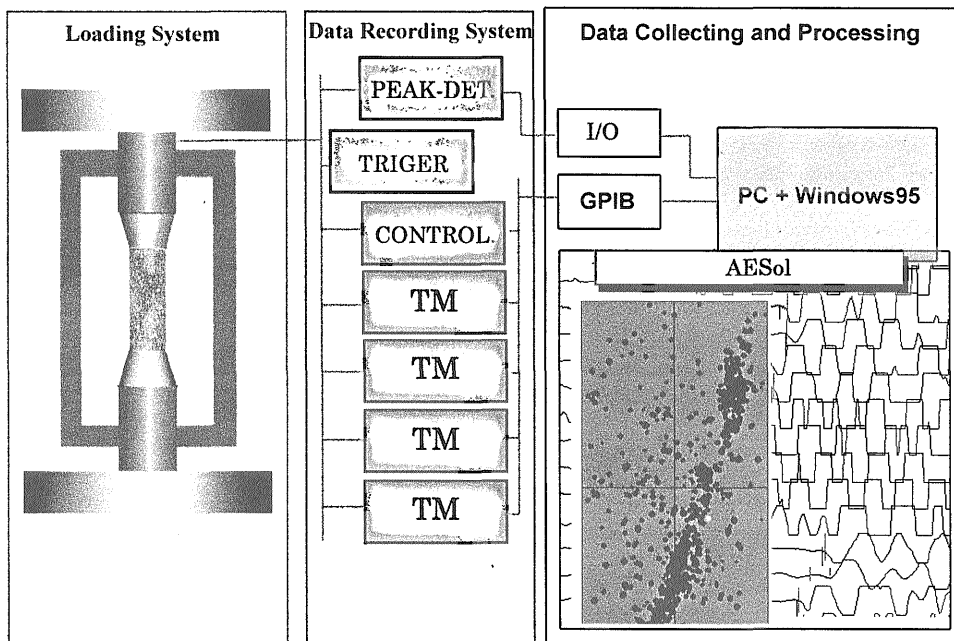
3.1 システム構成

上に述べた三代目の AE システムのもとにして、Windows 95 用のデータ収録処理ソフト AESol を開発した。これによりリアルタイム AE 震源モニタリングが可能に

なった。AE 震源モニタリングシステムの概念図を第 1 図に示す。TM (NF 社製 WM32KS) などについては第 1 表のほか佐藤・西澤 (1997) により詳しい記述がある。ここでは AESol を中心にリアルタイム AE 震源モニタリングシステムの基本機能および特徴などについて述べる。

3.2 AE 波形データ収録および震源決定

AESol を使って Windows 95 上で 32 チャンネルの TM から GPIB を介し波形データを PC のメモリに転送する。PC 側では 10 msec のタイマによって GPIB の SRQ 信号を監視し、新しい AE イベントによる波形データをただちに PC のメモリに転送する。転送が終了と波形の質を調べ、震源決定に利用できるデータのみ P 波初動の検出を行い震源を決定し、データをハードディスクに保存した後波形および震源データを画面に表示する。この一連の処理に必要な時間を第 2 表に示す。AE 発生から波形・震源が表示されるまで必要な時間は 0.8 sec 未満であり、AE 発生率が低い場合には震源をほぼリアルタイムでモニタリングできる。数秒程度の時間内に 100 を越す AE が発生するようなバーストの AE が起る場合には、波形データは 200 μ sec のデッドタイムで TM のバッファに一時保存され、PC 側ではある程度遅れて波形データを取り込み震源を決定して表示する。遅れ時間は TM に貯まった波形数にデータ転送・処理時間 0.8 sec を掛けて計算される。なお、波形の転送を優先し、TM のバッファをできるかぎり解放しておくため波形表示・震源決定などの機能をオフにすることも可能で

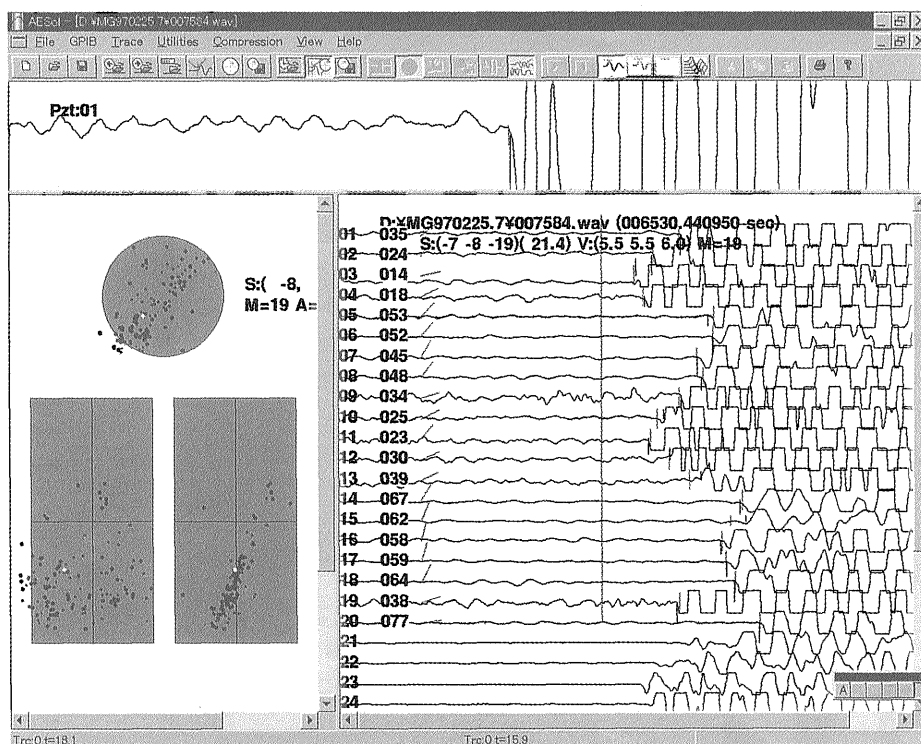


第 1 図 リアルタイム AE 震源モニタリングシステムの概要図

Fig. 1 Schematic diagram of real time AE hypocenter monitoring system.

第2表 リアルタイム AE 震源モニタリングシステムにおけるデータ処理所要時間表
Table 2 Time needed for data processing on real time AE hypocenter monitoring system.

項目	消費時間	選択1	選択2	プレイバック
波形転送	<0.3sec	オン	オン	-
有効性チェック	<0.01sec	オン	オン	オン
初動・震源決定	<0.05sec	オフ	オフ	オン
データ保存	<0.2sec	オン	オン	読み込み
波形表示	<0.2sec	オフ	オン	オン
計		<0.5sec	<0.75sec	<0.4sec
PC 環境	PC: Pentium300Mhz, 64MB, Ultra SCSI HDD GPIB: PCI, 10MB/sec OS: Windows95			



第2図 AESol 実行中の様子(データ収録時の波形と震源表示)
Fig. 2 An example of the AESol Window (waveforms and hypocenters during data acquisition).

ある。データ転送・波形チェック・保存のみを選択した場合では、処理に要する時間は1イベントあたり0.5sec未満となる。ほとんどの実験では、最終破壊の数秒以内に発生するAEでバッファが飽和状態になる。実験終了後、バッファ内に貯まっているデータの転送のため1時間必要となる。第2図に波形データおよび震源表示している画面を示す。AEが発生していない間は初動をマニュアルで決定したり、弾性波速度値の変更を行い、よ

りいい精度で震源を再決定することが可能である。

初動の検出のため波形時系列をARモデルにより表現する。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)が用いられる(佐藤ほか, 1987; 北川, 1993)。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。基本的には佐藤ほか(1987)のアルゴリズムと同じであるが、AESolでは直交する3方向の速度の大き

さが異なる異方性を考慮するするほか入射角度の補正などの機能も有する。

波の入射方向が圧電素子 (直径 5mm) と垂直でない場合に到達時間が入射角度と比例して少し早くなる。これは AE センサの大きさによるものである。このような影響を補正するため、半円柱試料を用いてモデル実験を行い、得られたデータは理論値 ($r \sin \alpha / V$, r : PZT の半径, α : 入射角度, V : P 波速度) とよく一致することがわかった。理論式に基づく入射角度の補正を行う。

実験中の AE 震源決定には予測した P 波速度あるいは概略計算したものを使うため、震源データファイルは作成しない。実験後正確な測定速度を使用してより正確な震源を再決定しなければならない。HDD または CD-R などに保存した波形データをプレイバックしながら震源再決定を行う。この時、走時・初動方向・震源座標などの情報を含む震源データファイル (AED ファイル) が自動的に作成される。AED ファイルはバイナリフォーマットであるため、AESol には震源座標データなどをテキストファイルに変換して保存する機能も用意してある。震源再決定に必要な時間は、HDD から波形データを読み込む場合では AE 1 イベントあたり約 0.4 sec で、1 時間で約 9000 イベントを処理できる。

3.3 波形データの質を検査する基準

ノイズおよび AE の後続波部分によりトリガーがかかることがある。無駄なデータになるだけでなく、無意味な震源が決定されデータに混入する可能性もあるので、削除した方がよい。AESol では以下の基準にしたがって波形データの質を調べる。

- 1) 先端 50 サンプルの最大振幅がフルスケールの 50% を超えた波形 (初動が記録されていない) は無効な波形とする。
- 2) 最後 50 サンプルの最大振幅がフルスケールの 25% より小さいの波形はパルス状のノイズ (スイッチの切り替えや静電気などによるもの) と見なす。
- 3) 有効波形が 5 チャンネルに達していない波形データは震源決定が不可能なので、無効なデータとする。

ただし以上の機能は波形有効性チェックボタン “Waveform Check” によってオフすることができる。

3.4 震源データなどの表示・その他

表示機能としては時系列データ、震源分布、応力-歪みデータなどがあり、表示する範囲などを自由に設定できる (第 3 図)。

なお、AESol で作成した波形データファイル、震源データファイルは Windows 版 AE データ処理ソフト WinAE (雷ほか, 1997) と互換性があり、WinAE を利

用して直接処理することができる。

また、AESol は研究ツールとして開発中のものであり、これからいろいろな研究に応じる必要な機能および最新の研究成果に基づく数理統計モデル解析機能などを追加する予定である。

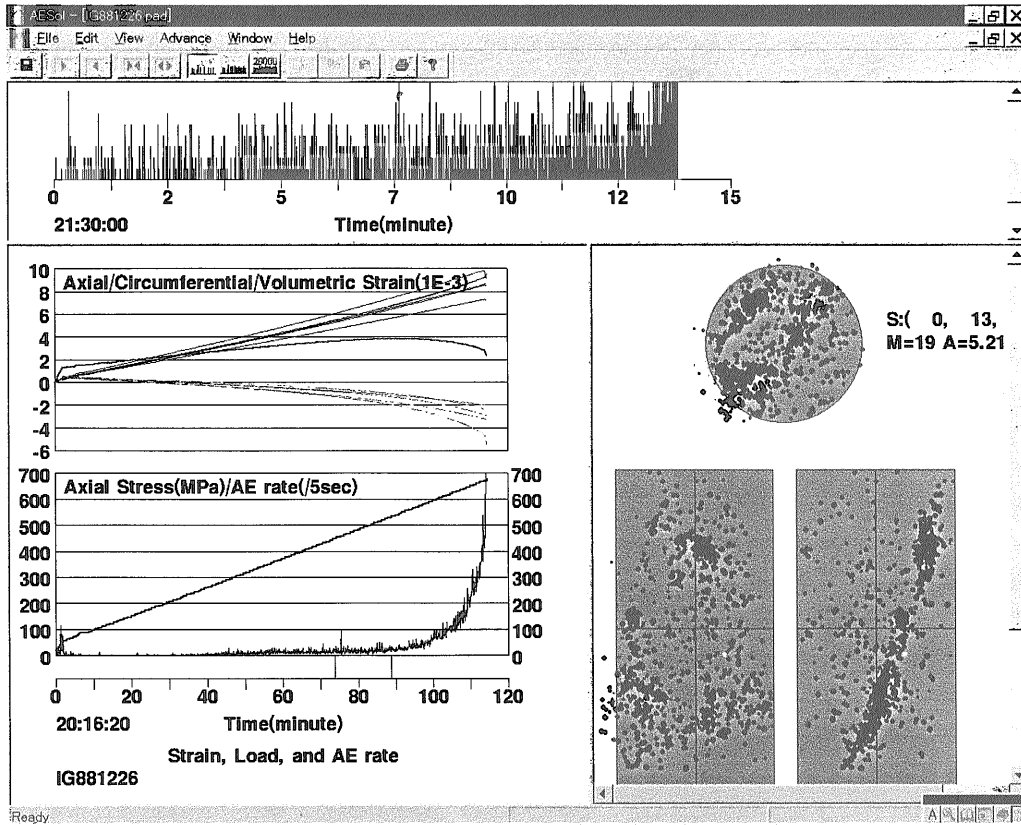
4. 新しい AE システムの有効性とその利用法

今回開発されたシステムは、取得される AE 波形の数がこれまでのものに比べ格段に多くなっており、AE の発生時刻と波形との対応が得られるので、震源の時・空間分布についての定量的把握を高い精度で行うことができる。このため、Hirata *et al.* (1987) で指摘された破壊の進行に伴う震源集中や、Nishizawa and Noro (1995) で論じられた AE 発生の時間分布と空間分布との関係を高い精度で論じることが可能であり、不均質岩石における破壊過程の詳細を明らかにすることができる。

地殻内の地震は、そのほとんどが既存の断層と何らかの関係を持っており、断層の形態は地震発生を支配する重要な条件と考えられている。いままでの研究で用いられている試料は、既存の割れ目を含まないものである。これに対して、ジョイントのような巨視的な弱面が存在する場合の破壊プロセスの研究は、既存断層が関係した地震発生のモデル実験として重要である。Sato *et al.* (1996) はジョイントを含む岩石での微小破壊の分布は既存のジョイントの幾何学的形状に支配されていることを示すとともに、微小破壊の破壊様式もジョイントの影響を受けていることを示した。このような試料では瞬間的に多数の AE が発生するバースト現象が生じることが多く、これはジョイントのような巨視的欠陥のくいちがいや枝分かれなどの内部構造と関係していることがわかっている。こうした試料を用いる場合には、ここで示したシステムのように、高速でデータを取得できる装置が有効である。

さらに多数のチャンネルで波形を取得できることも重要である。同一波形を異なる感度で測定することにより、波形を詳しく解析することができる。Kusunose and Lei (1998) で指摘されたように、いくつかの AE では破壊発生時にゆるやかなすべりを伴う初期フェイズのあることが指摘されている。こうした初期フェイズの発生は、自然地震で最近注目されている分野であるが、岩石実験によって詳しく研究できれば、自然地震発生メカニズムの解明に役立つと期待される。ここで紹介したシステムを用いれば、波形を広いダイナミックレンジで正確にとらえることができるので、初期フェイズの解明に役立つデータを得ることができるだろう。

謝辞 地殻熱部の当舎利行氏には査読者として原稿に対する有益なご意見を頂いた。ここに記して謝意を表する。



第3図 AESol 実行中の様子(AE 時空間分布解析)
Fig. 3 Windows for temporal and spatial distribution of AE.

付録 A データファイル仕様

パラメータファイル (.PAD・.PAR)

パラメータファイルの構造を第3表に示す。表に *がついている項目は AESol では使わないが、WinAE (雷ほか, 1997) と互換性を保つために必要である。波形記憶装置の初期化時刻は AESol から[GPIB] [Initialization]を選択したときの時刻である。Peak Detector (PD) のデータ、波形データ、ストレス・ストレインなどのデータの時刻を統一するために [CLOCK] というセッションに時刻を正確に記入しなければならない。

波形データファイル

波形データファイルは1000イベントごとに一つのフォルダに保存される。たとえば4567番の AE 波形データファイルは (実験 ID).4 というフォルダの4567.wav というファイルになる。例えば、MG970225という実験 ID であれば、AE 波形データファイルは MG970225.4¥4567.wav となる。速度計測モードで記録した波形データファイルは (実験 ID).vel というフォルダに保存される。ファイルの構造を第4表に示す。

震源データファイル

AESol では拡張子.AED のバイナリ震源データファイルを使用する。AESol からこれを WinAE が使える括

張子.AEB のバイナリ震源データファイルを作成できる。またテキストファイルに一部の情報を保存することも可能である。テキスト震源データファイルは以下のようなものである。

PSDATA01 MG970225

SAMPLES 2000

AE#	Time (sec)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Amp
000000	1435.870600	-21.9	-1.2	-25.6	3.13
000001	1489.585880	-18.1	-0.4	-13.5	4.32
000004	1809.836540	-19.9	-6.4	-33.9	3.99
000006	2283.811550	-18.7	-13.5	-18.9	4.42

.....

応力、歪み、AE 発生率などのデータファイル

応力・歪み等を計測してえられたデータファイルの先頭に、時刻を統一するため [BASE TIME] 記述を一行追加する必要がある。一個目のデータの時刻と対応する基準タイムを入力すればよい。

[BASE TIME] 88/12/26 20:16:18

20:16:20	4	500	394	191	...
20:16:40	4	500	446	252	...

.....

データファイルには一回の測定データが一行のテキストに記述される。時刻、荷重 (t)、封圧 (MPa)、歪ゲー

第3表 パラメータファイルの構造(例)
Table 3 Structure of parameter file (an example).

MG970225 e:¥MG970225¥ h:	8バイトの実験の ID *データファイルフォルダ *波形データのトップフォルダ
20 1024 12 20 10 6 50.0 100.0 6.35 7.5 7.5	サンプリング周波数 (MHz) サンプル長 A/D 解像度(bit) 受振センサ数, 発振センサ数, 歪ゲージ数 試料直径・長さ (mm 単位) エンドピースの速度と上・下の厚さ
01 330 0.0 25.0 10. + 02 210 0.0 25.0 10. + 36 060 0.0 25.0 10. +	センサの座標など 番号 円柱座標(α, z, r) 増幅係数 極性 受振センサー→発振センサー→歪ゲージの順に記述
5 01 25 14 17 5.86 5.70 5.70 02 25 14 27 5.90 5.70 5.70 05 25 15 32 6.00 5.50 5.50	計測した速度の数 番号 日 時 分 Vx Vy Vz
2 0 9977 9977	*AEHypo97用パラメータ 1/2 (震源決定のみ/初動読取+震源決定) 開始 AE 番号 終了 AE 番号 AE 総数
[CLOCK] PEAK=97/02/25 13:55:00 WM=97/02/25 13:56:00 END=97/02/25 15:45:30	ピークディテクタの開始時刻 波形記憶装置の初期化時刻 実験終了時刻

*AESolでは使わないが, WinAEと互換するために必要.

ジ1から歪ゲージ6までのそれぞれの軸・周方向歪み (ミクロン) となっている。なお, 計測不可のデータは 99999になっている。

AE 発生率データファイルはこれと同じ構造になっている。ただ, データは時刻と AE 数だけである。

データファイルの標準ファイル名

すべてのデータファイルを以下のように実験の ID+ 特定の拡張子という標準で名前を付けておけば AESol から自動リンクできる。つまり, 一つのファイルをオープンする時自動的に関連する他のファイルを読み込んでしまうことができる。

- パラメータファイル: (実験の ID).pad
- 震源データファイル: (実験の ID).aed
- 応力・歪みデータ: (実験の ID).sts
- AE 発生率データ: (実験の ID).aer
- ピークデータ: (実験の ID).pk1
(実験の ID).pk2

付録 B AESol の簡単な使い方

AESol を使う際, もっとも一般的な使い方について操作手順を説明する。

1. インストール

専用のインストーラはないが, AESol.exe および Waveio.dll を適当なフォルダにコピーしておけば, そこから直接実行できる。なお, データの収録を行う場合は, ナショナルインスツルメンツ社 NI488.2仕様の Windows 95用の GPIB ドライバをあらかじめインストールしておく必要がある。

2. GPIB パラメータ

WM32KS をコントロールするパラメータは Windows の標準 Register に登録される。最初に AESol を実行する時には第5表に示すデフォルト値を使う。2回目からは前の設定を使う。パラメータは Windows の Regedit.exe を使って変更できる。なお, GPIB アドレスは本体のディップスイッチの設定と一致しなければならない。設定可能な値は第5表に示すとともに設定中の様子を第4図に示す。

3. 波形データ収録およびリアルタイム震源表示

3.1 AESol を実行すると, 第5図に示すような“新規/new”ダイアログボックスが表示される。“Load Waveform through GPIB”を選択して<OK>ボタンをクリックする。データファイルに関する設定ダイアロー

第4表 波形データファイルの構造
Table 4 Structure of waveform file.

オフセット	型	バイト数	説明
0	Char	8	"WAVE04"ファイルの ID とバージョン番号
8	Char	8	実験の ID
16	Long	4	属性データ用
20	Float	4	計測値変換係数
24	Int	2	データのレンジ:Min(-30000)
28	Int	2	データのレンジ:Max(+30000)
32	Long	4	経過時刻:sec
36	Long	4	経過時刻:μsec
40	Short	2	チャンネル数
42	Short	2	解像度(bit)
44	Short	2	サンプル長
46	Short	2	サンプル周波数(MHz)
48	Short	2	AE 番号
50	Short	2x3	データ保存の日付:年, 月, 日
56	Short	2x3	データ保存の時刻:時, 分, 秒
62	Short	2	属性データ用
64	Short	2xN	波形データ, チャンネル順 N=サンプル長 x チャンネル数
	Float	4xM	走時データ#1(Mはチャンネル数)
		4xM	走時データ#1の S/N
		2xM	初動方向(1,0,-1)
64+	Float	4xM	走時データ#2
2xN+		4xM	走時データ#2の S/N
10xM		2xM	初動方向(1,0,-1)

グボックスが表示される(第6図)。データファイルを保存する場所および開始 AE 番号を指定する。

3.2 [File] [GPIB Initialization] メニューコマンドあるいはツールバー(第7図)にある"Initialization"ボタンをクリックする。WM32KS が初期化される。波形データの開始時間はこの時点からの経過時間(10μsec 単位)となる。この時間は AESol の開始時間とし、パラメーターファイルの [CLOCK] というセッションの "WM=" に記入する必要があるため、メモしておく。

3.3 これでデータ収録状態になる。PC が10msec ごとに GPIB の SRQ 信号を監視し、請求があると波形データはただちに転送・表示される。[GPIB] [Start] コマンドまたはツールバーの "Start" ボタンをチェックしておくと、波形データは自動的に保存される。

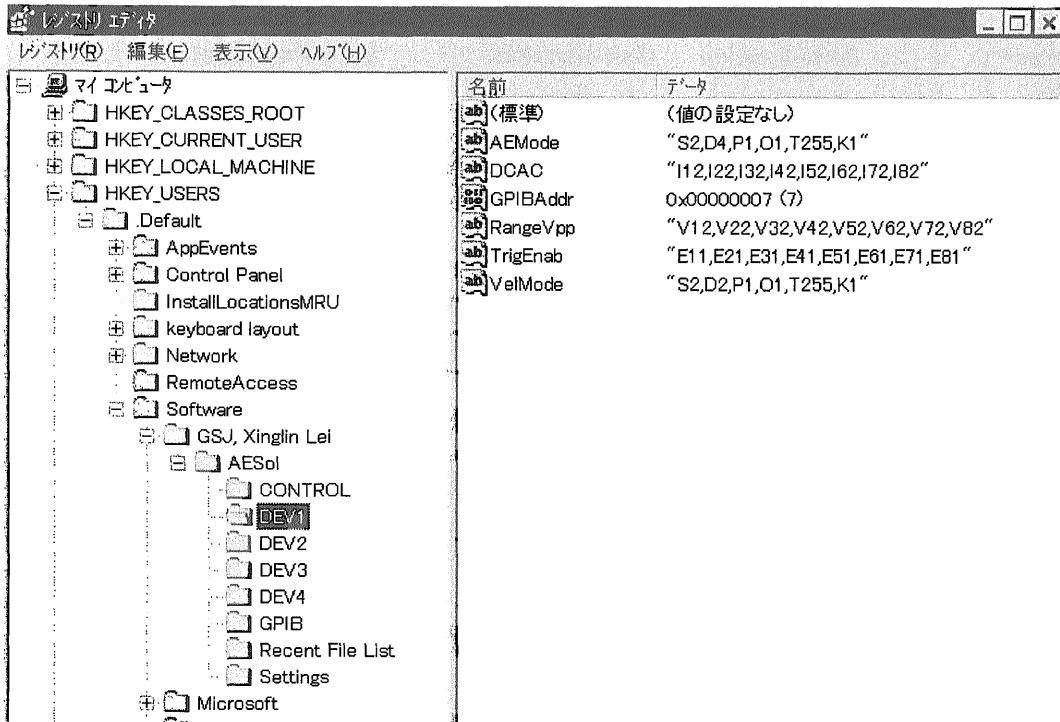
3.4 [File] [Load Parameter] からあらかじめ作ったパラメーターファイルを読み込めば、震源自動決定 "Auto-location" ボタンが使用可能状態になり、これをクリックしてチェックされた状態にすれば、震源が自動的に決定され表示される。

3.5 [GPIB] [AE/VEL] コマンドは AE 計測モードと速度計測モードを切り替えるスイッチである。速度計測モードでは TM の Delay 時間などが AE 計測モードと別設定でき、波形データも拡張子 ".VEL" のフォルダに保存される。計測モードを変更すると TM のバッファに貯えられた波形データはクリアされるので、AE データが貯まっている時にはデータが消失してしまうので注

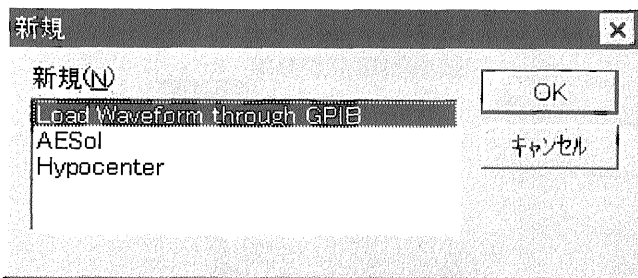
第5表 パラメータ設定表
Table 5 Setup parameters.

Setion	Key	Default Value (meaning)	Available Values
[GPIB]	GPIBAddress	0	
[CONTROL]	GPIBAddress	6	
[DEV]	GPIBAddress	7(8,9,10)	
(=1,2,3,4)	AEMode	"S2,D4,P1,O1,T255,K1" (for AE measurement)	S?: Sample length(words) ?= 1:512, 2:1024, 3:2048, 4:4096
	VelMode	"S2,D2,P1,O1,T255,K1" (for velocity measurement)	D?: Delay words ?= 2:128, 3:256, 4:512
	RangeVpp	"V12,V22,V32,V42,V52,V62,V72,V82"	V#?: Input range ?=1:100mv, 2:250mv 3:500mv, 4:1v, 5:2.5v 6:5v, 7:10v, 8:20v
	DCAC	"I12,I22,I32,I42,I52,I62,I72,I82"	I#?: ?=1: DC, 2: AC
	TrigEnab	"E11,E21,E31,E41,E51,E61,E71,E81"	E#?: ?=1: Disable trigger ?=2: Enable trigger

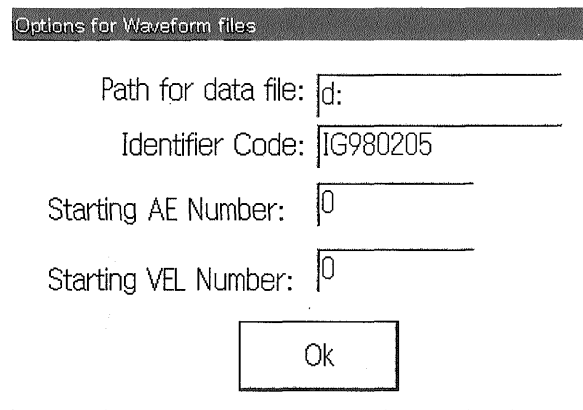
!: No. of WM32KS unit, #: No. of Channel, ?: Option number.



第4図 Windows のレジストリエディタにより AE システムコントロールパラメータを変更する
Fig. 4 Setup of AE system parameters using Windows register editor.



第5図 [New/新規] ダイアログボックス
Fig. 5 [New] dialogue box.



第6図 実験IDおよび波形データファイル保存するフォルダ
Fig. 6 Dialogue box for experiment ID and path for waveform file.

意が必要である。AE 計測モードでも速度の計測は可能である。特定のチャンネルにパルス発生器のトリガーなどの信号を入れておけば、実験後 AESol を利用して自動的に速度計測波形を探し出すことができる。

4. 波形データファイルのプレイバックと震源再決定

HDD/MO/CD-R などのメディアに保存した波形データを読み出し、正確な計測速度データを使って震源の再決定を行う。

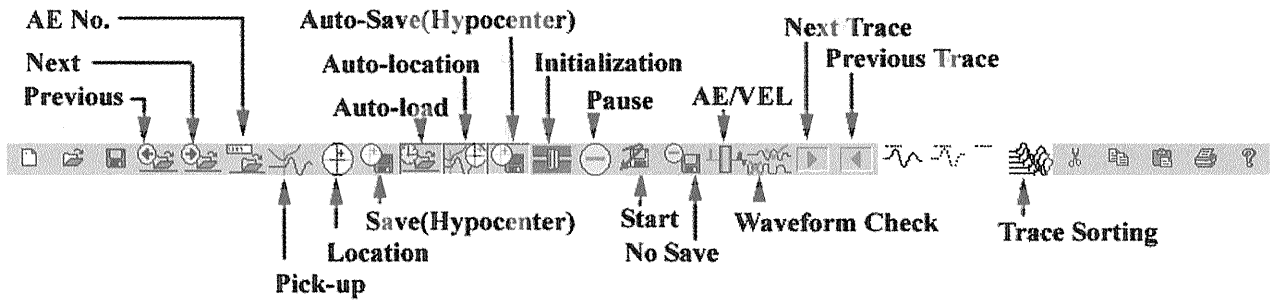
4.1 AESol を実行し、[New] ダイアログボックスが表示されたら、[Cancel] をクリックする。

4.2 [File] [Open] を選択して処理しようとする最初の AE 波形データファイルを読み込む。

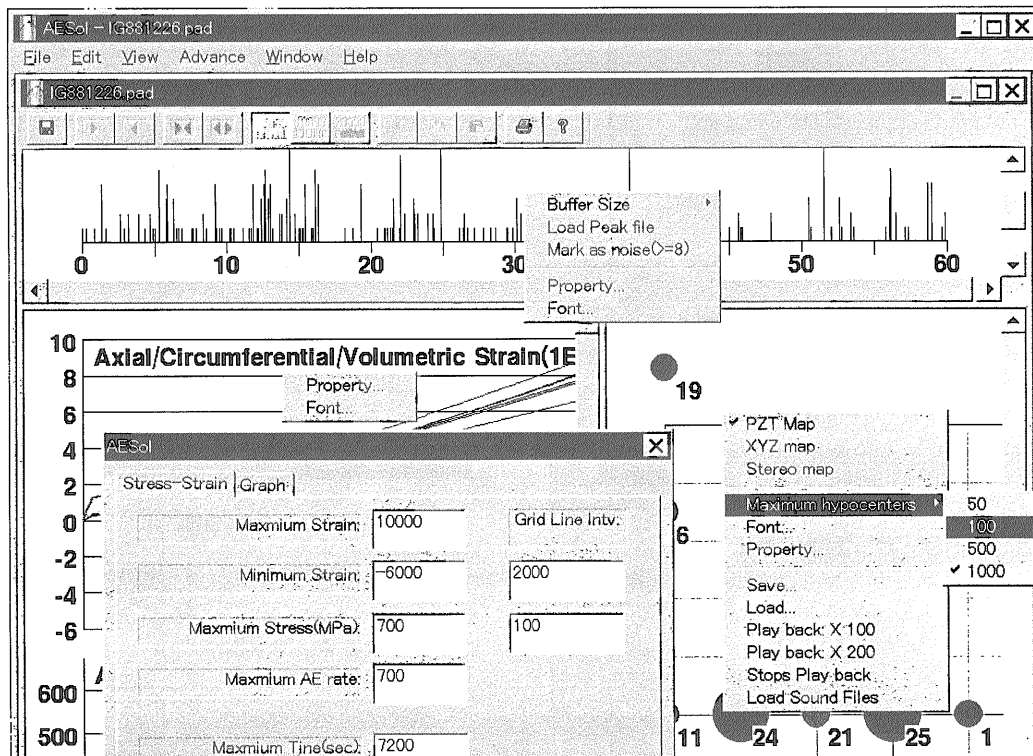
4.3 パラメータファイルに正確な速度データを入れ直

してから、3.4 と同じ方法でパラメータファイルを読み込む。

4.4 ツールバーの“Auto location”ボタンをクリックしてチェックされた状態にしておく。“Auto load”ボタンをクリックすれば AE 波形が順番に読み込んで表示される。震源は自動的に決定され“Auto-save (Hypocenter)”ボタンがチェックされている状態であれば震源データは (実験 ID).AED ファイルに自動保存される。



第7図 AESolのツールバー
Fig. 7 Tool bar of AESol.



第8図 ポップアップメニューおよび属性シート
Fig. 8 Popup menus and property sheets.

5. 震源時空間分布の高速再現

[File] [Open] を選択してテキスト震源データファイル (.LOC) を読み込むと、全震源データが表示される。ポップアップメニュー (第8図) から [Play Back x100] などを選択すると、それと対応した速度 (x100は100倍速を意味する) で震源分布が発生時刻に準じて次々と表示される。

6. データ解析

[File] [Open] を選択してパラメータファイル.PAD をオープンすると、同じフォルダにある同タイトルを有する .AED, .STS, .AER, .PK1が自動的に読み込まれ (あるいはリンクされ) 表示される (第3図)。高度な

震源分布図を作成できるほか、震源データをテキストファイルに落とすことも可能である。

文 献

- 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.
- 北川(1993) 時系列解析プログラミング, 岩波書店.
- Kusunose, K. and Lei, X. (1998) A phase preceding "P" wave of AE:rupture nucleation?, Sixth Conference on Acoustic Emission/Mi-

- croseismic Activity in Geologic Structures and Materials, (in press).
- Kusunose, K. and Nishizawa, O. (1986) AE gap prior to local fracture of rock under uniaxial compression, *J. Phys. Earth*, **34**, 45-56.
- 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.
- 楠瀬勤一郎・西沢 修・小内 薫(1982) 一軸圧縮下の岩石中に観測された AE 空白域. 地震 2, **35**, 91-102.
- 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.
- 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1992年度秋季大会講演予稿集, 265.
- 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. J. Int.*, **115**, 79-84.
- 雷 興林・西沢 修・佐藤隆司・楠瀬勤一郎(1997) Windows 版 AE データ収録処理ソフト (WinAE) とその応用. 地調月報, **48**, 447-457.
- Masuda, K., Nishizawa, O., Kusunose, K., Satoh, T. and Takahashi, M. (1990) Positive feedback fracture process induced by nonuniform high-pressure water flow in dilatant granite, *J. Geophys. Res.*, **95**, 21583-21592.
- Mogi, K. (1962) Magnitude-frequency relation for elastic shocks accompanying fractures of various materials and some related problems in earthquakes, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **40**, 831-853.
- 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.
- 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, 53.
- 西沢 修・楠瀬勤一郎・小内 薫(1981) 岩石の一軸圧縮応力下における破断面形成と AE 震源の時空分布との関係. 地調月報, **32**, 473-486.
- 西沢 修・楠瀬勤一郎・柳谷 俊・小口深志・江原昭次(1982) 大島花崗岩における定荷重クランプ時の AE 発生確率過程と AE 震源の時空分布. 地震 2, **35**, 117-132.
- Nishizawa, O., Onai, K. and Kusunose, K. (1984/85) Hypocenter distribution and focal mechanism of AE events during two stage creep in Yugawara andesite, *Pure Appl. Geophys.*, **122**, 36-52.
- Satoh, T., Shivakumar, K., Nishizawa, O. and Kusunose, K. (1996) Precursory localization and development of microfractures along the ultimate fracture plane in amphibolite under triaxial creep, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 865-868.
- 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. 地調月報, **48**, 439-446.
- 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.
- Sholz, C.H. (1968) Microfractures, aftershocks, and seismicity, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **58**, 1117-1130.
- Sondergeld, C.H. and Estey, L. H. (1982) Source mechanism and microfracturing during uniaxial cycling of rock, *Pure Appl. Geophys.*, **120**, 151-166.
- Yanagidani, 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: 1998年2月20日; 受理: 1998年3月18日)