

## AE計測のための高速・多チャンネル波形記録システム

佐藤隆司\* 西澤 修\*\*

Takashi SATOH and Osamu NISHIZAWA (1997) A high-speed, multi-channel waveform recording system for AE measurement. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 48(8), p. 439-446, 7 figs., 2 tables.

**Abstract:** To investigate detailed features of the space-time distributions of microfractures generated during rock fracture experiments, we have developed a new high-speed, multi-channel acoustic emission (AE) waveform recording system. The system consists of 32 channels of transient-memory controlled by a microcomputer. The transient-memory has a 16MB RAM buffer in each channel. The large amount of RAM buffer enables us to record more than 8000 AE events with very short system dead-time, which is the time interval in which we are unable to detect an AE event due to recording of waveform data. The dead-time is about 200 $\mu$ s before the RAM buffer becomes full, and about 0.4 s afterwards. The newly-introduced controller, which can check the status of the RAM buffer, synchronizes the transient-memory so that all channels can record an AE event at the same time even after the RAM has been filled. Using this system, we clearly found clustering of AE hypocenters around a macroscopic fracture plane during a 10 second interval before final fracture of a granite sample under triaxial compression. This demonstrates that the new system could be a very powerful tool for studying the space-time distribution of AE events, especially when the AE activity is very high.

### 要 旨

岩石破壊実験中に発生する微小破壊の時空間分布を詳しく調べる目的で、高速・多チャンネルのアコースティック・エミッション (AE) 波形記録システムを構築した。システムは32チャンネルの高速のA/D変換器を内蔵した一時波形記憶装置 (トランジェント・メモリ) を持つ。各チャンネルには16MBのRAMが搭載されており、8000個以上のAE波形を短いデッドタイム (計測システムがAEの発生を検知し、そのイベントに対する処理を終了し、次のイベントを待つ状態に戻るまでの時間) で記録することができる。また、各チャンネルのRAMのデータ占有状態を監視するためのコントローラを導入することにより、チャンネル間の同期の取れた計測をすることができるシステムを実現した。予備実験の結果、RAMが飽和するまでのデッドタイムは約200 $\mu$ sであった。また、その後はデッドタイム約0.4sで安定に動作することが確認された。本システムを実際の岩石破壊実験に適応した結果、特に、AE活動が活発な場合の時空間分布を詳しく調べるのに有効であることが示された。

### 1. はじめに

岩石試料に加えた応力を増加させてゆくと、巨視的な

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

\*\*地殻物理部 (Geophysics Department, GSJ)

破壊が発生する以前から、試料内部に多数の微小な破壊が発生する。これは岩石の不均質性に起因する現象であり、松ヤニやガラスなどの不均質性の小さな物質では、最終破壊に至るまで微小破壊はほとんど発生しない (Mogi, 1962)。微小破壊は、岩石の変形・破壊過程において重要な役割をはたすとともに、物性変化の主な原因ともなる。したがって、微小破壊の時空間分布を調べることは岩石の破壊のメカニズムを明らかにする上で非常に重要である。微小破壊の発生にともなって励起される高周波弾性波 (アコースティック・エミッション、以下AEと略す) を利用してその発生位置を求めることは微小破壊の時空間分布を調べるための有効な方法の一つである。

地震は地殻という不均質媒質中での破壊現象であり、実験室スケールでの岩石の破壊現象と多くの共通の性質を持つ。例えば、AEの最大振幅別頻度分布が地震のそれと同じ分布に従うことが明らかにされている (Mogi, 1962; Scholz, 1968)。AEの震源を決定し、岩石試料の最終的な破壊や大振幅のAE発生に至るAE震源の時空間分布の変化を調べることは、地震の発生機構や大地震の前兆現象を解明する上の重要な手がかりとなる。

このような観点から、地質調査所では1980年代前半からAE震源の時空間分布に関する研究を積極的に進めてきた (例えば西澤ほか, 1981; Satoh *et al.*, 1996)。AEの発生位置を求める方法は、基本的には自然地震の震源

Keywords: Acoustic emission (AE), Rock fracture experiment, Microfracturing, AE measurement system

決定と同じである。岩石試料に取り付けられた多数のセンサーでAE波形を同時に記録し、記録された波形データから初動到達時刻を読みとり、読みとりデータを最もよく満足する震源位置と発生時刻を最小二乗法を用いて求める。AE波形を計測・処理する上での特有の問題点としては、1) AE波形に含まれる周波数成分が数百k-数MHzと非常に高周波であること、2) 一回の実験で記録されるAEの数が数千から数万と非常に多いこと、3) AE発生の間隔が非常に短いこと、などがあげられる。1)の問題は、高速のA/D変換器を搭載した波形一時記憶装置(トランジェント・メモリ、以下TMと略す)の普及によって解決され、これによって多数のAE震源を精度よく決定することが可能になった(例えば西澤ほか, 1981; Sondergerd and Estey, 1981)。2)については、自然地震の自動震源決定に用いられている方法をAE震源決定に適用することにより、AE発生数が多くても短時間で効率よく震源決定することが可能になった(佐藤ほか, 1987)。3)に関しては、TMのデッドタイム(計測システムがAEの発生を検知し、そのイベントに対する処理を終了し、次のイベントを待つ状態に戻るまでの時間)を短くする努力が続けられている。AE波形の一時記憶、最終的な記憶装置(多くの場合コンピュータのハードディスク)への転送を1イベントごとに繰り返すシステムでは、デッドタイムは数百ms程度が限界である。西澤・雷(1992)はTMの各チャンネルに1024個分のAE波形を記録できる2MBのRAMを搭載することによって、デッドタイム25msのAE計測システムを構築した。このシステムを用いて、巨視

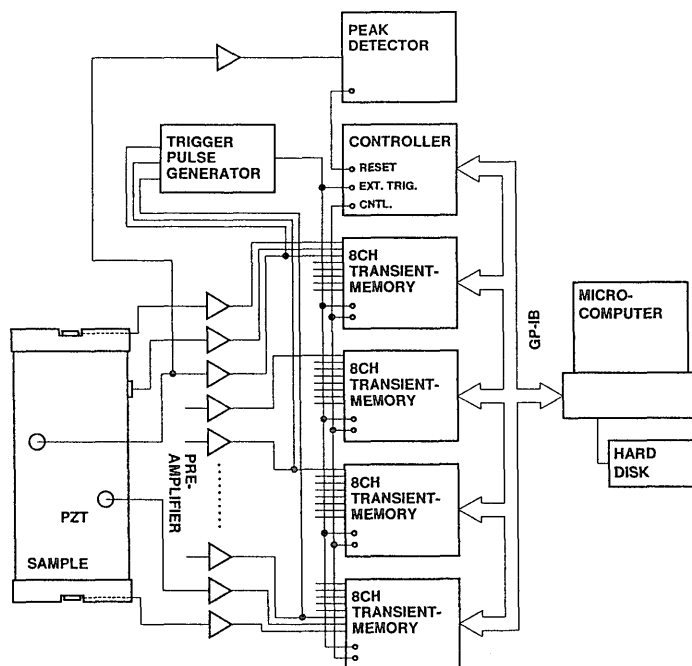
的な欠陥を持つ岩石試料の破壊面形成過程の詳しい解析(Satoh *et al.*, 1996)などが行われた。しかし、西澤・雷(1992)のシステムには、1)1024個分のRAMでは破壊直前の活発なAE活動をとらえるには不十分であること、2)RAMが飽和状態になった後の制御が不安定になること、などの問題点が残されていた。

我々は、西澤・雷(1992)のシステムにおける上記問題点を解決し、さらに性能を向上させたシステムを構築することを試みた。本論文では、このシステムの紹介を行うとともに、これを用いた岩石破壊実験の例を示してシステムの性能について検討する。

## 2. 計測システム

第1図に計測システムのブロック・ダイアグラムを示す。計測システムは、プリアンプ、トリガパルス発生装置、トランジェント・メモリー(TM)、コントローラおよびパーソナル・コンピュータによって構成される。TMのチャンネル数は、1台あたり8チャンネルのものが4台、合計32チャンネルである。TMの性能を第1表に示す。コントローラはTMを安定に動作させるために導入されたものであり、その役割については後述する。

試料に取り付けられた圧電素子(PZT)によりとらえられたAEシグナルは、プリアンプで増幅されたあと、TMに入力され、A/D変換される。プリアンプ出力のうちいくつかはトリガパルス発生装置にも入力される。トリガパルス発生装置はAEの発生を検出するとTTLパル



第1図 計測システムのブロックダイアグラム  
Fig. 1 Block diagram of the new AE measurement system.

第1表 トランジェントメモリの性能  
Table 1 Characteristics of the transient-memory used in this study.

Maximum sampling frequency	25MHz/CH
Resolution	12bits
Capacity of RAM	16MB/CH
Data length for a single event	1, 2 and 4KW

ス一つ出力する。トリガパルスはTMおよびコントローラに入力される。TMは、トリガパルスを受信すると、あらかじめ設定された遅延時間、記録語長に基づいてAE波形のデジタル値をRAMに書き込む。各チャンネルにはそれぞれ16MBのRAMが搭載されており、1イベントあたりの記録長が2KB(1024データ)の場合、8192個のデータを一時記憶することができる。RAMは最大64MBまで拡張することができる。RAMに記録されたデータは発生順に順次GP-IBを通してコンピュータに転送され、ハードディスクに記録される。転送された波形データはRAM上から消去され、新たなデータのための記憶領域が確保される。データ転送中にAEが発生した場合はただちに転送を中断し、新たなAE波形データのRAM上の空き領域への書き込みを行う。このような機構によってデッドタイムを短くするとともに、記録可能なAEの数を多くすることができる。西澤・雷(1992)のシステムでは上記の動作をソフト的に実現しているが、今回導入されたシステムでは、デッドタイムをさらに短くするため、これをハード的に実現した。

今回導入されたシステムのように、大容量のRAMに波形データを順次一時記録するタイプのTMを用いて計測システムを構成する場合、RAMが飽和状態になった後のチャンネル間の同期の確保、および、AE活動が活発な時の正確なAE発生時刻記録の2点に特に注意しなければならない。このことを見るために、以下で、イベントごとに最終的な記憶装置にデータを書き込む従来のシステムとの動作の比較を行ってみる。

従来のシステムでの制御およびデータの流れは以下のようになる。1)コンピュータからTMに測定条件設定の命令を送る、2)コンピュータからTMに計測開始の命令を送る、3)AEが発生し、トリガパルスがTMに入力される、4)TMが波形の一時記憶を行う、5)TMからコンピュータにデータ転送のための割り込み信号を送る、6)コンピュータからTMにデータ転送命令を送る、7)TMからコンピュータにデータを転送し、コンピュータはデータをハードディスクに書き込む。この後は2)から7)までを繰り返すことにより、次々に発生するAEの波形を記録してゆく。TMが計測状態にあるのは計測開始命令を受けてからトリガパルスを受けるまでの間(2)と3)の間で、それ以外の期間にAEが発生しても計測システムはその

イベントを検知できない。別の言葉で言うと、その期間にTMにトリガパルスが入力しても、計測システムの状態に影響はない。AE発生時刻は、TMからの割り込み要求を受けた時刻をコンピュータの時計で測ることにより、コンピュータの持つ時計の分解能でおさえることができる。したがって、このようなシステムでは、チャンネル間の同期やAE発生時刻の記録に関して問題が発生する可能性はない。

一方、RAMに波形データを順次一時記録するシステムでは、コンピュータから一度計測開始命令が送られると、計測終了命令が送られるまで、データ転送中も含めて、TMはいつでも計測状態にある。このことは、RAMが飽和状態になるまではデッドタイムが短くほとんど問題にならない。しかし、RAMが飽和状態になるとデッドタイムが長くなり、あるチャンネルはデータの転送が終了し1イベント分のRAMの空き領域があるが、他のチャンネルにはないという状態が比較的長く続くことになる。このような状態でトリガパルスを受けると各チャンネル間の同期が取れなくなり、計測不能に陥る。西澤・雷(1992)のシステムでRAMが飽和状態になった後で制御が不安定になったのはこのことが原因と考えられる。また、RAMに多くのデータが一時記録されている場合、AE発生時刻とそのイベントをコンピュータに転送する時刻が大きく異なり、AE発生時刻をコンピュータの時計で計測することができない。したがって、チャンネル間の同期およびAE発生時刻の正確な記録を確保するためには何らかの工夫が必要になる。

以上を考慮して、今回導入されたシステムではコントローラに以下のような機能を持たせた；1)TMの各チャンネルのRAMのデータ占有状態をチェックし、全チャンネルに少なくとも1イベント分以上の空き領域がある場合のみトリガを受け付ける機能、2)時計を内蔵し、トリガ信号を受けたときの時刻を記録し、波形データとともにコンピュータに転送する機能。1)によってRAMが飽和状態になった後も安定した計測を行うことができる。2)によって、RAMに多くのデータが一時記録されている場合でもAE発生時刻を正確におさえることができる。西澤・野呂(1990)は、AE発生時系列を詳しく調べる目的で、対数スケールで等間隔に12段階に分別されたAE波形の振幅と10 $\mu$ sの分解能で検出された発生時刻を記録するための装置を導入した(第1図ではピーク・ディテクタと記されている。以下PDと略す。)。今回導入されたシステムとPDによって同時にAEを計測することにより、AE震源の時空間分布を震源決定ができないような小さなイベントを含むAEの発生時系列と直接の対比することが可能となる。このような解析を容易にするため、コントローラ内蔵の時計の分解能はPDと同じ10 $\mu$ sとした。また、コントローラにはPDの時計をリセットする機能を持たせた。

実際の実験に使用する前に、本システムの性能を調べるための予備実験を行った。その結果、RAMが飽和状態になるまでのデッドタイムは約200 $\mu$ sであった。これは西澤・雷(1992)のシステムの100倍以上のスピードである。また、その後もデッドタイム約0.4sで安定に動作することが確認された。これまでの経験から、震源決定可能なAE波形の振動継続時間は50 $\mu$ s程度から長いものでは1ms以上に達するものもあると考えられる。このことを考慮すると、デッドタイムは200 $\mu$ s程度で実用上十分であると考えられる。

### 3. 適用例—花崗岩の三軸圧縮試験—

上記システムを用いて行った2種類の花崗岩の三軸圧縮破壊実験を例にしてシステムの性能を検討する。実験条件およびTMシステムとPDの測定条件を第2表にまとめた。

実験に用いた試料のひとつはフランスMayet産花崗岩である。Mayet花崗岩は直径1cmを越える大きな粒子を多く含む粗粒花崗岩で、固着している巨視的な割れ目や鉱物脈が認められる。他は愛媛県大島産の中粒の花崗岩である。大島花崗岩は平均粒径が1-5mm程度で、巨視的な割れ目や大きな粒子を含まない比較的一様なものが用いられた。試料は直径50mm、高さ100mmの円柱形に整形された。試料側面にはAE計測用の圧電素子(直径5mm、共振周波数2MHz、厚み振動型)が18個取り付けられた。さらに、試料上下の鋼鉄製のエンドピース内にそれぞれ圧電素子取り付けられた、合計20か所に取り付けられた圧電素子によってAE波形が計測された。20個のセンサからのAEシグナルのうちの12個分は、低感度のチャンネルにも入力され、広いダイナミックレンジの測定が行われた。圧電素子からの出力のうちの一つは、プリアンプで20dB増幅されたあとPDに入力された。TMシステムのトリガは、20チャンネルのプリアンプ出力の

うちの3チャンネルをトリガパルス発生装置に入力し、3チャンネルのうち少なくとも1チャンネルがトリガレベルを超えた時、トリガパルスが出力されるように設定した。したがって、同じトリガレベルでもTMシステムの方がPDよりも感度が高い。TMシステムの制御には雷ほか(1997)が開発したWindows用の計測プログラムWM32KSが用いられた。

まず、TMシステムのAE波形記録のスピードや動作の安定性を調べるため、PDとTMシステムとのAE計測数の比較を行った。第2図a)は、Mayet花崗岩を用いた実験(mg970218)の最終破壊前約5分間の2秒ごとのAE計測数の時間変化を示している。□はPDで検出されたものをあらわす。■はTMシステムで記録されたものをあらわし、そのうち震源決定されたものを+でプロットしてある。PDはAEの最大振幅を対数スケールで等間隔の12段階に分別する機能を持つ。PDのデータは、AE発生数が少ない時にTMシステムでの計測数とほぼ等しくなるように、ある敷居値以上の振幅を持ったものについてプロットしてある。この実験の場合の敷居値は8.9mVである。この実験では、RAMが飽和状態になるのを遅らせるために、最終破壊の約140s前にTMシステムのトリガレベルを20mVから50mVに変更しているが、最終破壊の約20s前にRAMは飽和した。その後もTMシステムは安定に動作しており、2秒間に5個の割合で波形データを記録している。そのうちの約30%は震源決定されており、チャンネル間の同期も取れていることが分かる。第2図b)は大島花崗岩を用いた実験例(og970524, PDの敷居値5.6mV)である。この場合は最終破壊の約50s前にRAMが飽和状態になっているが、その後も2秒間に5個の割合で安定にデータを取得している。第2図c)は同じく大島花崗岩の実験例(og970522, PDの敷居値5.6mV)である。この実験では、最終破壊の約20s前からAE活動が急に活発になった。TMシステムも最終破壊までほぼ完璧に記録を取ることができた。最もAE発生数が多い時には2秒

第2表 実験・計測条件  
Table 2 Experiment and measurement conditions.

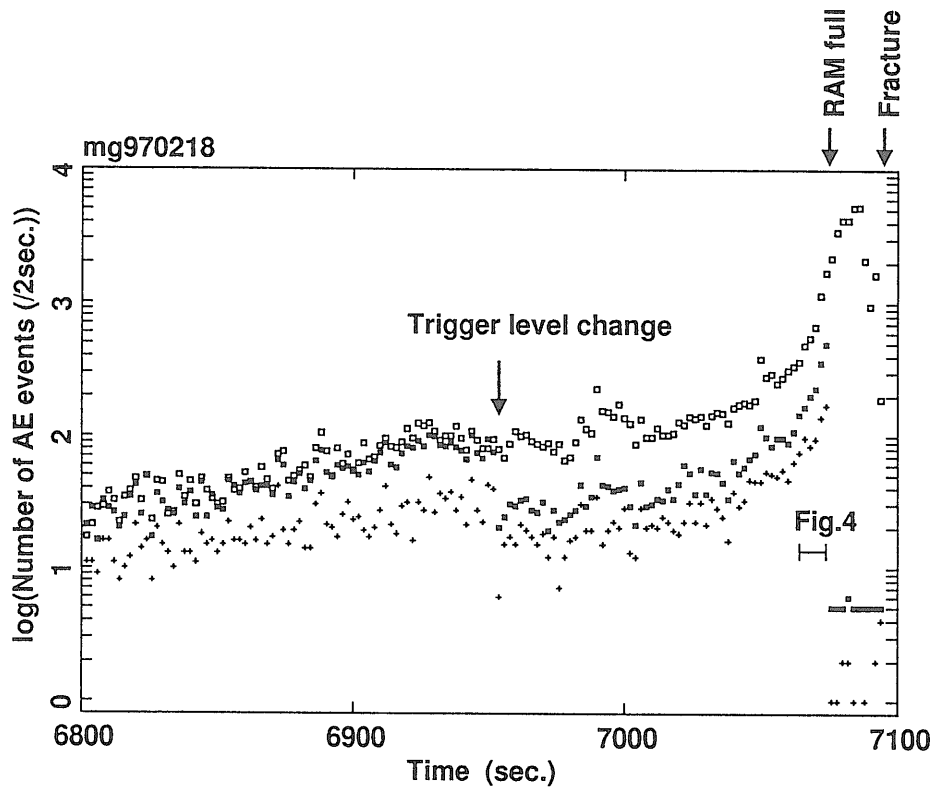
Exp. ID	Sample	Exp. conditions*			TM**			PD***			
		P <sub>C</sub>	$\dot{\epsilon}$	$\sigma_F$	G <sub>A</sub>	V <sub>T</sub>	T <sub>M</sub>	G <sub>A</sub>	V <sub>Tmin</sub>	V <sub>Tmax</sub>	T <sub>M</sub>
mg970218	Mayet granite	40	0.91	363	20	20/50	800	20	3.2	1000	20
og970522	Oshima granite	50	0.54	610	40	200	800	20	1	1000	20
og970524	Oshima granite	50	6.2	646	40	200	800	20	1	1000	20

(\*)Exp. conditions, P<sub>C</sub>:confining pressure (MPa),  $\dot{\epsilon}$ :strain rate ( $\times 10^{-6}$ /s),  $\sigma_F$ :fracture strength (MPa).

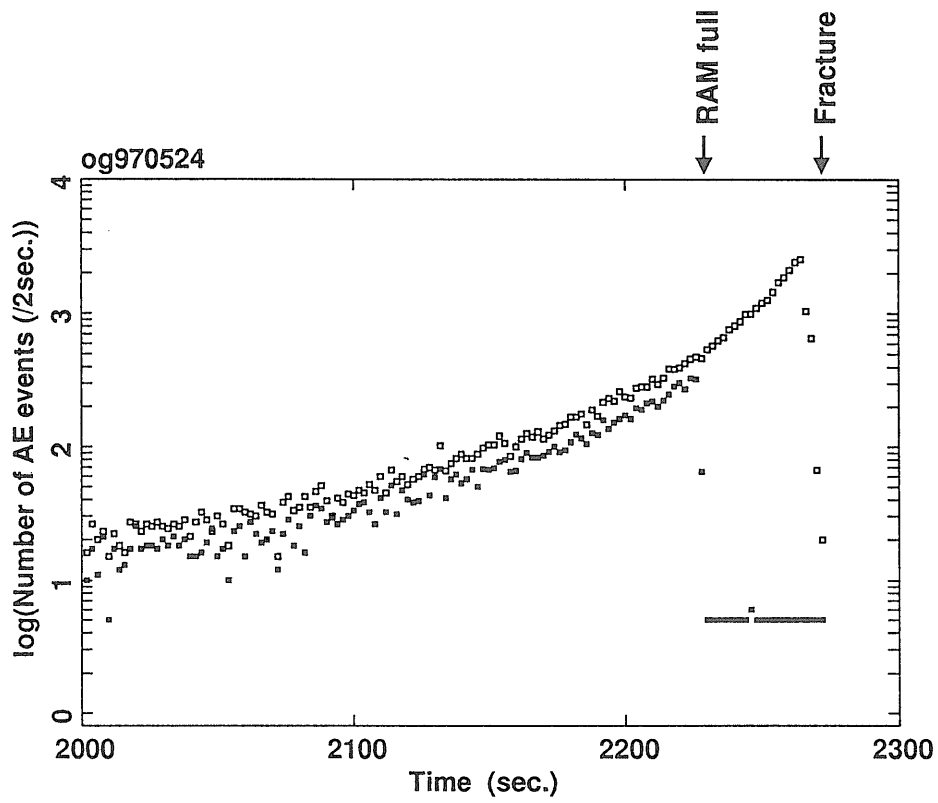
(\*\*)TM, G<sub>A</sub>:pre-amp. gain (dB), V<sub>T</sub>:trigger level (mV), T<sub>M</sub>:mask time ( $\mu$ s).

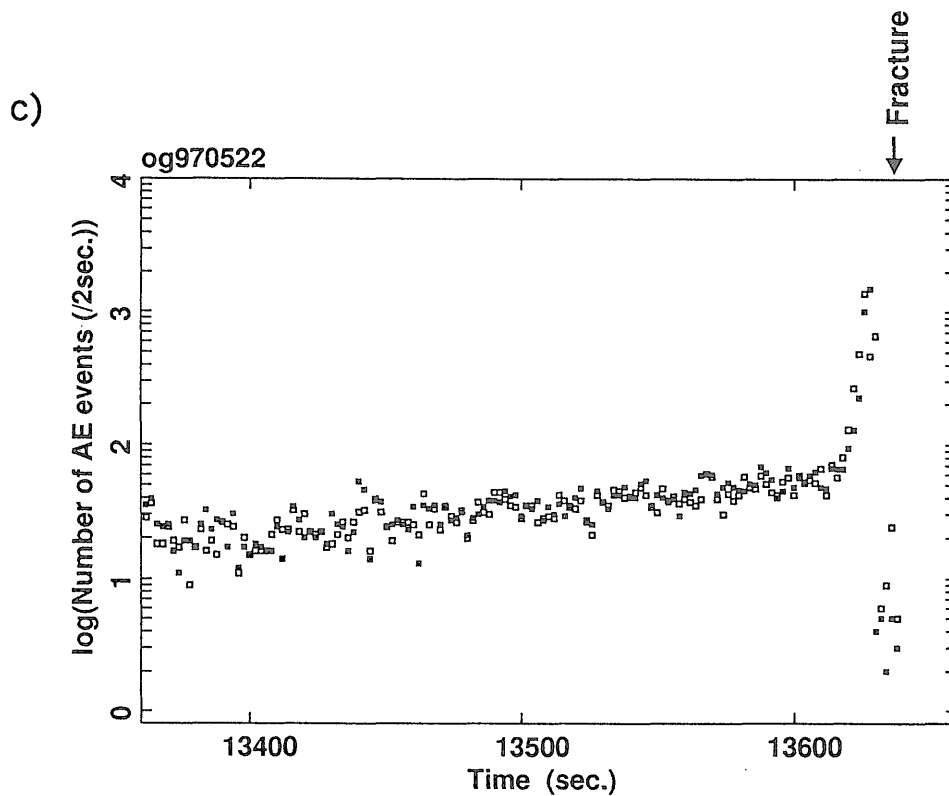
(\*\*\*)PD, G<sub>A</sub>:pre-amp. gain (dB), V<sub>Tmin</sub> and V<sub>Tmax</sub>:trigger levels of the minimum and maximum amplitude ranges, respectively (mV), T<sub>M</sub>:mask time ( $\mu$ s).

a)



b)





第2図 2秒ごとのAE計測数の時間変化。

最終破壊の前の約5分間のデータが示されている。□：ピーク・ディテクタ(PD)による計測数，■：トランジェント・メモリ・システムによる計測数，+：震源決定数。a)mg970218, b)og970524, c)og970222。PDのデータは振幅がそれぞれa)8.9mV, b)5.6mV, c)5.6mV以上のものが示されている。第2図a)中のFig.4で示された横バーは第4図の震源分布をプロットした時間を示す。

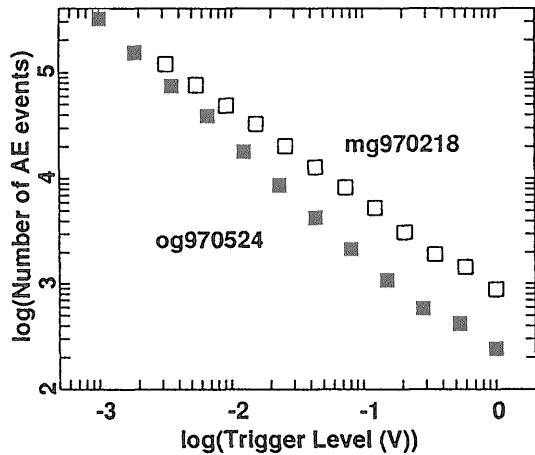
Fig. 2 Numbers of AE events per 2 second interval detected by the peak detector (open squares), and those detected (solid squares) and located (crosses) by the transient-memory system. The data are shown for the last 5 minutes before the final fracture. a) mg970218, b) og970524 and c) og970522. The threshold levels for the peak detector are a)8.9mV, b) 5.6mV and c) 5.6mV, respectively. The horizontal bar labeled "Fig.4" in Fig.2a) indicates the duration for which the AE hypocenter distribution is plotted in Fig.4.

間に約1500個の波形を記録している。大島花崗岩の三軸圧縮破壊試験におけるAE活動の時間変化としては、第2図b)に示したog970524の例のようなものが典型的である。しかし、Westerly花崗岩や安山岩のような粒子サイズの小さな試料を用いた実験では、第2図c)に示したように、最終破壊の直前に急激にAE発生数が増加する例がしばしば見られる。そのようなサンプルを用いた場合には我々のTMシステムで最終破壊までほぼ完全な波形データの記録が期待できる。

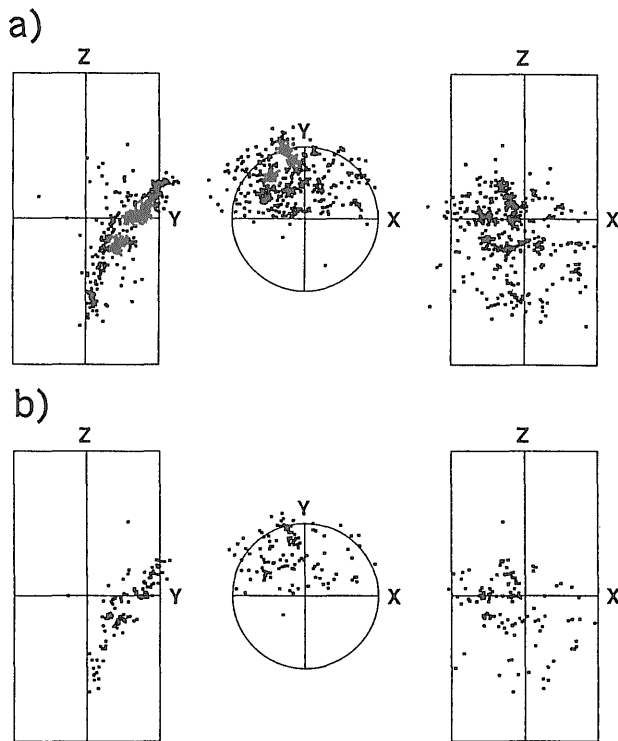
次に、TMシステムのトリガレベルをどの程度に設定すれば、mg970218やog970524のような実験でもAE波形を最終破壊まで完全に記録できるかを考える。第3図はPDで検出されたAE数をトリガレベル別にプロットしたものである。□がmg970218, ■がog970524の例である。振幅別頻度分布は両対数プロットで直線によく近似できる。第3図からAE数が8000個となる時のトリガレベルを

求めると、mg970218の場合が80mV, og970524の場合が30mVとなる。第2図を用いてPDとTMシステムのAE検出能力の違いを見積もり、上のトリガレベルをTMシステムの場合に換算すると、どちらの実験の場合も(プリアンプで20dB増幅したあとの)トリガレベルを150mV程度に設定すれば最終破壊までRAMが飽和することなく計測できると考えられる。各チャンネルのRAMの容量を最大の64MB(1イベント1024データの場合32768個分)まで増設したとして、上と同様の方法で、この場合のRAMが飽和状態にならないためのトリガレベルを計算すると30mV程度となる。

最後に、TMのデッドタイムが短くなったことで、AEの震源分布がどの程度詳しく調べられるようになったかを見る。第4図a)は実験mg970218でRAMが飽和状態になる直前の10秒間(第2図a)中のFig.4と書かれた横バーの範囲)に震源決定されたAEの震源分布である。X軸方



第3図 ピーク・ディテクタによって検出されたトリガ・レベル別AE発生数。□：mg970218，■：og970524。  
Fig. 3 Number of AE events detected by the peak detector as a function of trigger level. Open and solid squares indicate data for mg970218 and og970524, respectively.



第4図 AE震源分布. mg970218の第2図a)中にFig.4で記された横バーで示された10秒間のデータが示されている。a)は実際に震源が決定されたすべてのAEがプロットされている。b)はTMシステムのデッドタイムを25msと仮定したときの震源分布。  
Fig. 4 a) AE hypocenter distribution for a 10 second interval during testing of specimen mg970218. The events used here are indicated in Fig.2a) by the horizontal bar labeled "Fig.4". b) Same as a), but the number of data is reduced by assuming the system dead-time is 25ms.

向に走向を持ち、Y軸の負の方向に傾斜する面状の分布が明瞭に見て取れる。これは試料の既存の割れ目の位置とよく一致する。震源分布を詳しく見ると、AEは面上に一樣に分布しているのではなく、いくつかのクラスターを形成していることが分かる。第4図b)は、同じデータをデッドタイムが西澤・雷(1992)のシステムと同じ25msと仮定してプロットした震源分布である。全体的な特徴は把握できるが、クラスター構造はかなり不明瞭になっている。このように、本システムは、デッドタイムが短くなったことにより、AE活動の活発な期間での震源分布や、短い時間にバースト的に発生するAE活動などを調べる時に特に有効性を発揮することが期待される。

#### 4. おわりに

地質調査所に導入された高速・多チャンネルのAE波形記録システムの紹介を行った。また、本システムを実際の岩石破壊実験に適用した例を紹介し、その性能および有用性の検討を行った。その結果、AEの時空間分布に関する詳細な研究、特にAE活動が活発な場合の時空間分布を調べるのに有効であることが示された。ここでは、そのほかに考えられる本システムの適用例について考える。

Umeda(1992)やEllthworth and Beroza(1995)は、多くの自然地震ではP波の主要動に前駆して小振幅の波(以下初期フェイズとよぶ。)が見られること、初期フェイズの継続時間と地震モーメントの間の相関が非常によいことを示した。このことは、地震がその発生の時点で最終的な大きさを知っているかという問題に関連して非常に重要である。楠瀬ほか(1995)はAEでも初期フェイズの認められるものがあることを示した。しかし、彼らの用いたTMの分解能は10ビットで、初期フェイズの認められるAEの最大振幅は飽和してしまい、AEの大きさを推定することはできなかった。新たに導入されたシステムの分解能は12ビットで従来のシステムに比べて高分解能である。また、チャンネル数が多いので、前章で示した実験のように、一つのシグナルを測定レンジの異なる複数のチャンネルに入力することにより、さらに高分解能の計測が可能である。これによって、Umeda(1992)やEllthworth and Beroza(1995)が提起した問題に実験的に取り組むことが可能となる。

Kato *et al.* (in preparation) は、断層の形状が震源過程におよぼす影響を調べるため、折れ曲がりのある断層面を持った岩石試料を用いたスティック・スリップ実験を行った。折れ曲がりのある断層面を持つ試料を用いた場合、断層面上のある点から始まったすべりは折れ曲がりの部分で一度停止し、数ms-数s後に断層面全体におよぼすすべりが始まることが明らかにされた。しかし、彼らのシステムのデッドタイムは10秒以上あり、二つのイベ

ントのすべり過程の詳細を記録することはできなかった。新たなシステムのデッドタイムは二つのイベントの時間間隔より短いので、二つのイベントのすべり過程の詳細を記録することができ、断層の形状の影響の理解につながる研究が可能となることが期待される。

**謝辞** 適応例で示されたデータはフランス地質学研究所・Laurence Jouniouxさん (mg970218), 東北大学・矢部康男さん (og970522, og970524) を中心に行われた実験によるものである。データの使用を快く承諾して下さいました両氏に感謝いたします。地殻物理部・宮崎光旗さんには論文の改善に役立つ建設的なコメントをいただきました。

## 文 献

- Ellsworth, W.L. and Beroza, G.C. (1995) Seismic evidence for an earthquake nucleation phase, *Science*, **268**, 851-855.
- Kato, N., Satoh, T., Lei, X., Yamamoto, K. and Hirasawa, T., (in preparation) Effect of a fault bend on the rupture propagation process of stick-slip.
- 楠瀬勤一郎・雷 興林・佐藤隆司・西澤 修・長 秋雄・増田幸治・スティーブ カールソン(1995) AE前駆波と破壊核形成過程, 日本地震学会講演予講集, no.2, B61.
- 雷 興林・西澤 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.
- Mogi, K. (1962) Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relation to earthquake phenomena. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **40**, 125-173.
- 西澤 修・楠瀬勤一郎・小内 薫(1981) 一軸圧縮応力下で発生するアコースティック・エミッション震源の時間-空間分布. 地調月報, **32**, 473-486.
- 西澤 修・雷 興林(1992) AE発生時刻と震源分布の関係 その1(計測システムなど). 地球惑星科学関連学会1992年合同大会共通セッション・シンポジウム予稿集, 53.
- 西澤 修・野呂春文(1990) AE発生時系列における自己励起型AE発生とAE震源の空間分布との関係. 地調月報, **41**, 173-184.
- 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.
- 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.
- Scholz, C.H. (1968) Experimental study of the fracturing process in brittle rock. *J. Geophys. Res.*, **73**, 1447-1454.
- Sondergerd, C.H. and Estey, L. (1981) Acoustic emission study of microfracturing during the cyclic loading of Westerly granite. *J. Geophys. Res.*, **86**, 2915-2924.
- Umeda, Y. (1992) The bright spot of an earthquake, *Tectonophys.*, **211**, 13-22.

(受付: 1997年6月23日; 受理: 1997年8月4日)