

## 水圧破壊に伴う微小破壊音

池田隆司\*・塚原弘昭\*・佐竹洋\*・大竹政和\*\*・高橋博\*\*\*

国立防災科学技術センター

### Acoustic Emission during Field Experiment of Hydrofracturing

By

R. Ikeda, H. Tsukahara, H. Satake, M. Ohtake and H. Takahashi

*National Research Center for Disaster Prevention, Japan*

#### Abstract

Acoustic Emissions (A.E.) were observed during field experiments of hydrofracturing. The hydrofracturing was carried out in two boreholes (100m deep) at Okabe Town, Shizuoka Prefecture, to measure crustal stresses *in situ* for the first time in Japan.

The sensors used are a hydrophone, piezoelectric accelerometers and seismometers. A number of A.E. were observed only by the hydrophone placed at 10m depth in the boreholes. The results of the observation revealed the following characteristics of the A.E., (1) predominant frequency of the initial motions is about 5KHz and that of the maximum amplitude is about 1.5-2KHz, (2) wave-form of the initial motions is very sharp and pulse-like, (3) the A.E. are initiated a few seconds after the beginning of the increase of the water pressure, and (4) frequency of the A.E. is closely related to the pressure variation.

These characteristics demonstrate that those A.E. are caused by the hydrofracturing. It is expected that extensive observations of the A.E. can provide valuable data for identification of the fracturing pressure, and for the study of the fracturing.

#### 1. まえがき

地殻応力の測定を目的とする水圧破壊実験が、静岡県志太郡岡部町の桂島および宮島の2地点

\* 第2研究部地震地下水研究室

\*\* 第2研究部地震活動研究室

\*\*\* 第2研究部

で実施された(塚原他, 1978)。概略は, 孔井内の測定箇所を上下2個の膨張パッカーで栓をして, パッカー間に水圧を加え孔壁を破壊する。水圧変化から水平面内の最大・最小主応力値を算出し, 破壊の方位から主応力軸の方位を決定する。測定結果は  $5.8 < \sigma H_{max} < 7.9$  bar,  $3.2 < \sigma H_{min} < 5.2$  bar, 最大圧縮方位は桂島の深度9.5mでN40°Eであった。この現場で, 水圧破壊が起こるときに発生する微小破壊音(Acoustic Emission, 以下A.E.と記す)の測定を試みた。

岩石が圧縮破壊をする過程で, 変形が進行するとともにA.E.が発生することは良く知られている。このようなA.E.は, 岩石中に微小な破壊き裂が発生するために生ずると考えられ, その発生頻度や震源分布・波動特性などを探ることは, 破壊の発生過程を研究するために重要なことである。

実験室でのA.E.測定は, 岩石試験片を用いた曲げ試験や一軸及び三軸圧縮試験の際に数多く行われている。たとえばMogi(1968)は, 各種岩石の常圧下の曲げ試験の際に発生する衝撃性弾性波の震源分布から, 主破壊に至る過程について, 地震と良く似たA.E.の発生様式を論じている。Sholz(1968, a・b)は, 種々の岩石の圧縮試験において, クラックの発生パターンは応力-歪関係と密接な関係があり, A.E.の震源が破壊直前に断層面上に集中する傾向を指摘している。また, Lockner & Byerlee(1977)は, 実験室で現場での状態に近付けるために, Weber sandstoneの大試料(直径7.62cm, 長さ19.05cm)を用い水圧破壊実験を行っている。この時にA.E.を測定し音源の位置・破壊面の方向などを決めている。

以上はいずれも周波数帯域数十KHz～数MHzのA.E.を測定したもので, 周波数が高過ぎるため野外の実験にそのまま適用するわけにはいかない。水圧破壊実験の現場でのA.E.測定例は稀であるが, Wuollet & Power(1975)は, 1974年EL Paso Natural Gas Co. が水圧破壊を行った際に, 3カ所の地震観測網で破壊音測定を試みている。ダイナミックレンジ120db, 周波数レンジ0.1～34Hzで測定しているが, バックグラウンドノイズと重なったために個々の岩石の破壊音は識別できなかった。より高周波のA.E.を測定するためには, 発生源での振幅が小さいと予想されることと高周波であるため減衰が激しいことのため, センサーを破壊面の近傍に持っていき地表近くの柔らかい高減衰層より下に置くこと, また注入ポンプのノイズを消すことなどのテクニックが必要となり, かなり困難であるとの考えがあった(Lockner & Byerlee, 1977)。しかし, Blair et al.(1976)はLos AlamosのFenton Hillで地熱開発用の3,000m級の井戸を75m(地表での距離)離して2本平行に掘り, 水圧破壊を行っている。この時に, 一方の井戸で水圧破壊を行い, 他方の井戸中2,800～3,000mの位置に3成分のGeophoneを降ろして高周波の微小音をとらえ, P-S時間より震源および破壊面の方位・傾角などを決めている。とらえられた微小音の卓越周波数は1KHz程度である。注水量は, 10.6 l/secで1時間連続しておりかなり多い。

他に比較的高周波(数十Hz～数百Hz)の現場での測定例として, 土木工学の方面で, 微小

破壊音の発生頻度から岩盤の安定度の判定や崩壊予測を行っている若干の研究がある。(たとえば、田村他(1970); 渡・板垣(1975); 丹羽他(1976))

いずれにしても地殻応力測定のための水圧破壊の現場で、どんな破壊音がどの程度発生するのか、またそれをとらえるのにどのような測定系が有効なのかということが、全くわからない状態であった。そこで今回は、現場でA.E.を測定することが可能なかどうかを判定するため、色々な周波数帯域を想定し、種々のセンサーを用いて測定を試みた。

## 2. 測定方法

センサーとして用いたのは、<sup>イ</sup>ハイドロホン・圧電素子型加速度計および地震計である。ハイドロホンは、外径26mm、長さ20cm、周波数範囲80Hz～5KHzで60dbのプリアンプが内蔵されている。水中での音圧感度校正はないが、空中で測定すると150～300mV/μbar程度の感度がある。水深にして約20mの耐水性がある。今回の実験では実験井の口まで水があり、ハイドロホンは孔口から約10mのところに吊り下げた(図1)。圧電素子型加速度計は表1の3個を用いた。これらを実験井上部のケーシング管にはめてある鉄製のガイドリングの上面・平らな部分にマグネットで固定した。また、固有周期1秒の速度型地震計3台を、実験井から50～100m離して地表に設置した。以上3種のセンサーによって、周波数帯域1Hz～50Hzを地震計で、80Hz～5KHzをハイドロホンで、5KHz～45KHzを圧電素子型加速度計でカバーすることを意図した。

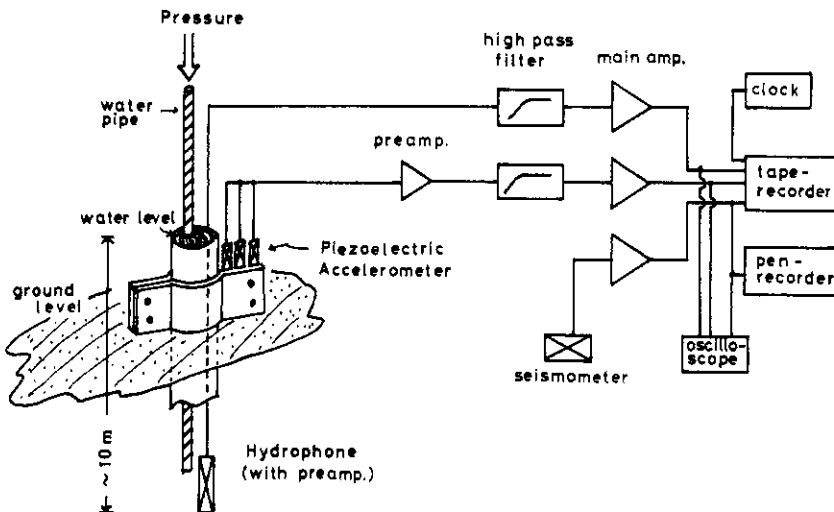


図1 水圧破壊に伴う微小破壊音の測定系。

Fig. 1 System for measuring the Acoustic Emissions caused by the hydrofracturing.

Sensor no.	Size diameter × height	Resonant frequency KHz	Capacitance PF	Insulation resistance MΩ	Sensitivity mv/G
AP- 10	12 × 16	45.0	470	500 <	11.5
AP-100	14 × 32	22.8	1140	500 <	105.9
AP-500	38 × 63	8.7	11000	500 <	623.0

表1 圧電素子型加速度計の特性

Table 1 Characteristics of the piezoelectric accelerometers.

これらのセンサーからの信号は、プリアンプ・ハイパスフィルター・メインアンプを通し、オシロスコープでモニターしながらデータレコーダで磁気テープに記録した(図1)。記録の段階で、信号音とノイズとの兼ね合いから各測器のレベル設定を行った(表2)

録音した磁気テープを、再生出力やノイズレベルに注意しながら1/2000の速度で再生し、ペンレコーダに書かせ解析に用いた。

Experimental St. & Run No.	Sensor	Preamp.	High pass filter(Hz)	Main amp.
Katsurajima	HP	-	500 or 700	× 50
Run No. K-58	AP - 10	-	100	× 100
K-77	AP - 100	-	100	× 100
K-84	AP - 500	-	100	× 100
K-95	Seismometer	-	-	-42~-48 db
Miyajima	HP	-	1500	× 100
Run No. M-81	AP - 100	×1	500	× 200
	AP - 500	×2	300	× 100
Miyajima	HP	-	1500	× 100
Run No. M-83	AP - 100	×1	500	× 100
	AP - 500	×2	300	× 50
Miyajima	HP	-	1500	× 50
Run No. M-90	AP - 100	×1	300	× 200
	AP - 500	×2	300	× 50

HP : Hydrophone.

AP : Piezoelectric Accelerometer.

表2 それぞれの実験における測定時設定レベル

Table 2 Parameters of the measuring system for each experiment.

### 3. 測定結果

宮島の深度 81 m の実験（破壊水圧 4.9 bar, 割れ目開口圧 4.1 bar, 割れ目閉口圧 3.8 bar, 水圧破壊強度 8 bar）と宮島の深度 83 m の実験（破壊水圧 6.7 bar, 割れ目開口圧 4.2 bar, 割れ目閉口圧 3.7 bar, 水圧破壊強度 2.5 bar）において, A.E. をハイドロホンでとらえることができた.

#### 3.1. 記象

A.E. と判定した記象の代表的な例を図 2 a に示す. 宮島の深度 81 m (Run No. M-81) の実験の際にハイドロホンで記録されたものである. この時のハイドロホンの測定系全体の周波数特性を図 3 に示す. 図 2 a の記象の振幅は, 記録した時点で飽和しているし, 1.5 KHz 以下をフィルターでカットしているので, 波形そのものについて議論はできないが, 見出される特徴について述べる. 初動が鋭く立ち上がっており非常にパルス的である. 発生頻度を数えたときは,

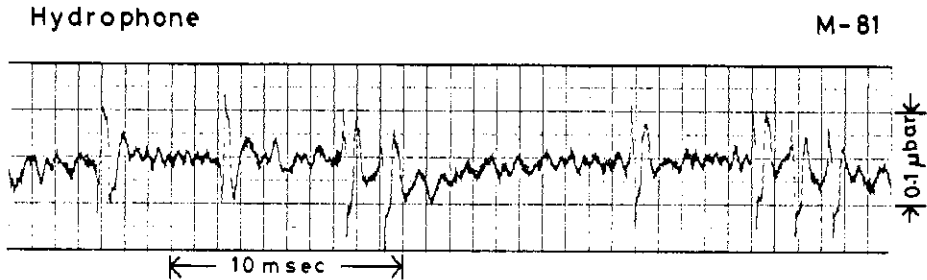


図 2a ハイドロホンでとらえられた A.E. 記象の代表例  
 Fig. 2a An example of the typical wave-form of the A.E. caught by the hydrophone.

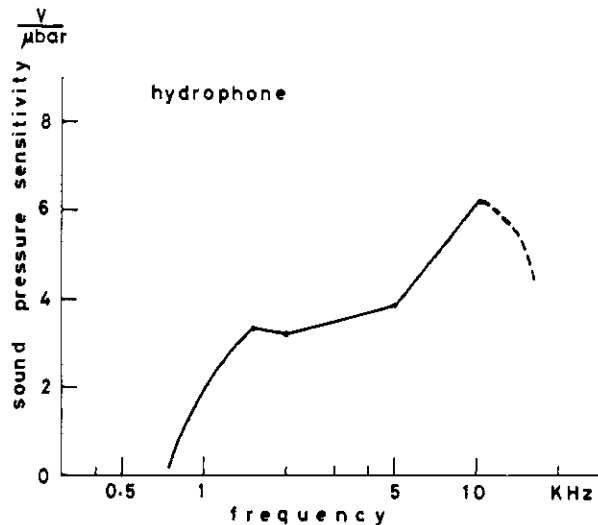


図 3 ハイドロホンの測定系全体の周波数応答特性  
 Fig. 3 Overall frequency response of the measuring system for the hydrophone.

この鋭い立ち上りを一つの目安として数えた。初動の卓越周波数は約5 KHz，最大振幅の卓越周波数は約1.5～2 KHzである。初動の方向は，下方向に数個続いた後，上方向に数個続くというように，一定ではないがほぼ半々に出ている。

ハイドロホンでとらえられた他の記象（ノイズ）の例を，図2b，2cに示す。図2bはパッカーをふくらませてセットしている時のもので，送水管の中を水が通っている音である。測定系の周波数特性が狭いため，周波数は1.5 KHz程度で似ているが，初動の立ち上がりがパルスのでなく明らかに破壊音とは異なっている。

図2cは，地上で物を落下した時の記象の例であるが，圧電素子型加速度計とハイドロホンの両方に記録されている。圧電素子型加速度計AP-500でとらえられた振動は，約11 msec

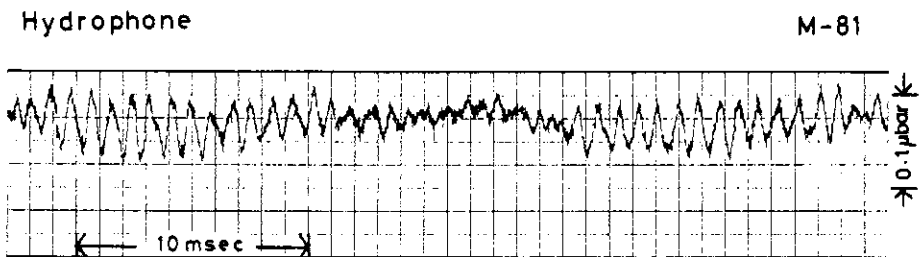


図2b パッカー膨張時にハイドロホンでとらえられたノイズの例  
 Fig. 2b An example of the noise caught by the hydrophone during inflating the packers.

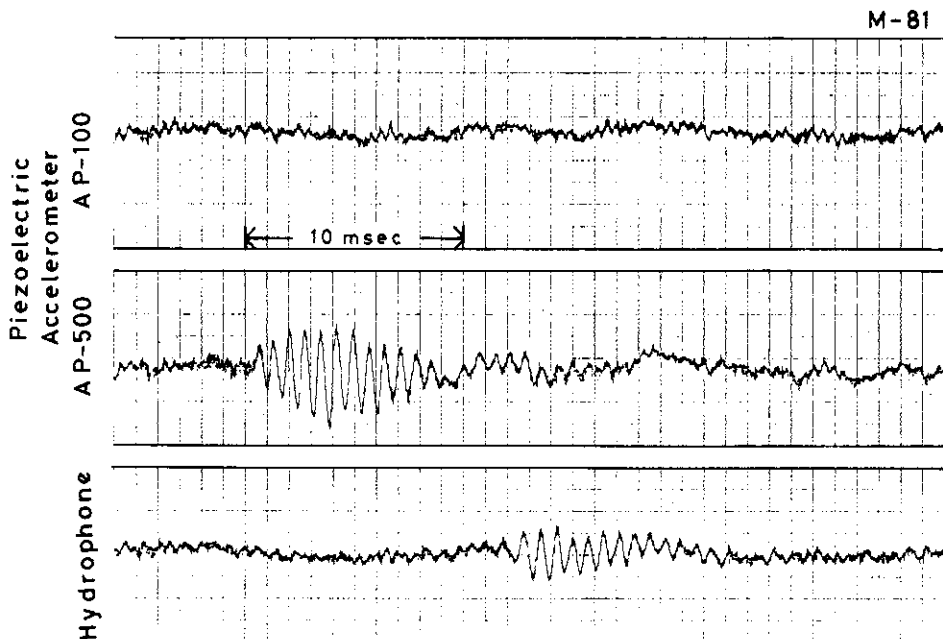


図2c ハイドロホンと圧電素子型加速度計の両方でとらえられたノイズ（地上での物の落下音）の例  
 Fig. 2c Examples of the noise, which is caused by surface disturbance, caught by the hydrophone and piezoelectric accelerometers.

後にハイドロホンでも記録された。なお図には示されていないが、ハイドロホンで記録されてから約0.1 sec後に、同様の記象で振幅が小さくなったものが再びハイドロホンに記録されている。このように大きな振動は、反射音が繰り返し記録される。この場合も、水中での音速を約1400 m/secとすると、ハイドロホンからパッカーの上面までの距離約70 m間を往復するのに約0.1 secかかることから、パッカーの上面で反射してきた振動が再び記録されたものであろう。

A.E.と判定された記象は、ハイドロホンでだけ記録され圧電素子型加速度計でははっきりととらえることができなかった。加速度計の共振周波数が高すぎたためと、この程度の周波数になると地中での減衰が著しく地上まで達しなかったためと思われる。これに対して水中では、地中よりも格段減衰しにくいいためハイドロホンでとらえることができたのであろう。なお、地表に設置した地震計ではバックグラウンドノイズがひどく、破壊に伴うと思われる振動は観測されなかった。

### 3.2. 発生頻度分布

A.E.と判定したものについて、他のノイズとの区別を目で確かめながら、一定振幅(0.05  $\mu$  bar)以上のA.E.の数を単位時間(0.5 sec)当りで数え、柱状グラフに示した。

#### (i) 宮島深度83 m (Run No. M-83)

図4は、宮島の深度83 mで水圧破壊を行ったときの、A.E.の発生頻度分布図である。時間は水圧ポンプを動かし始めてから、つまり水を注入し始めてからの時間(sec)である。書き沿え

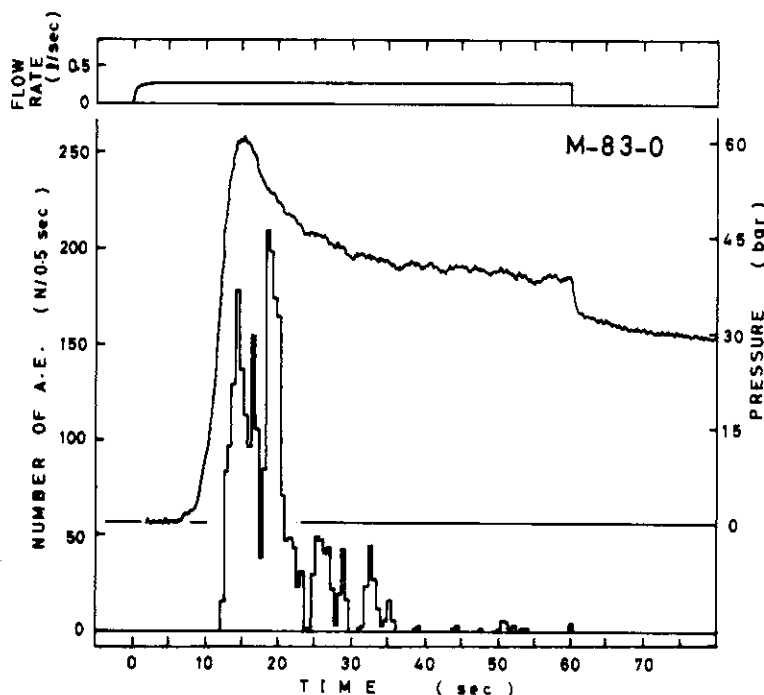


図4 A.E.発生頻度と水圧変化、注入流量比の関係(宮島、深度83 mの実験)

Fig. 4 Relation of A.E. frequency to water pressure and to injecting flow-rate (experiment at Miyajima, 83m deep).

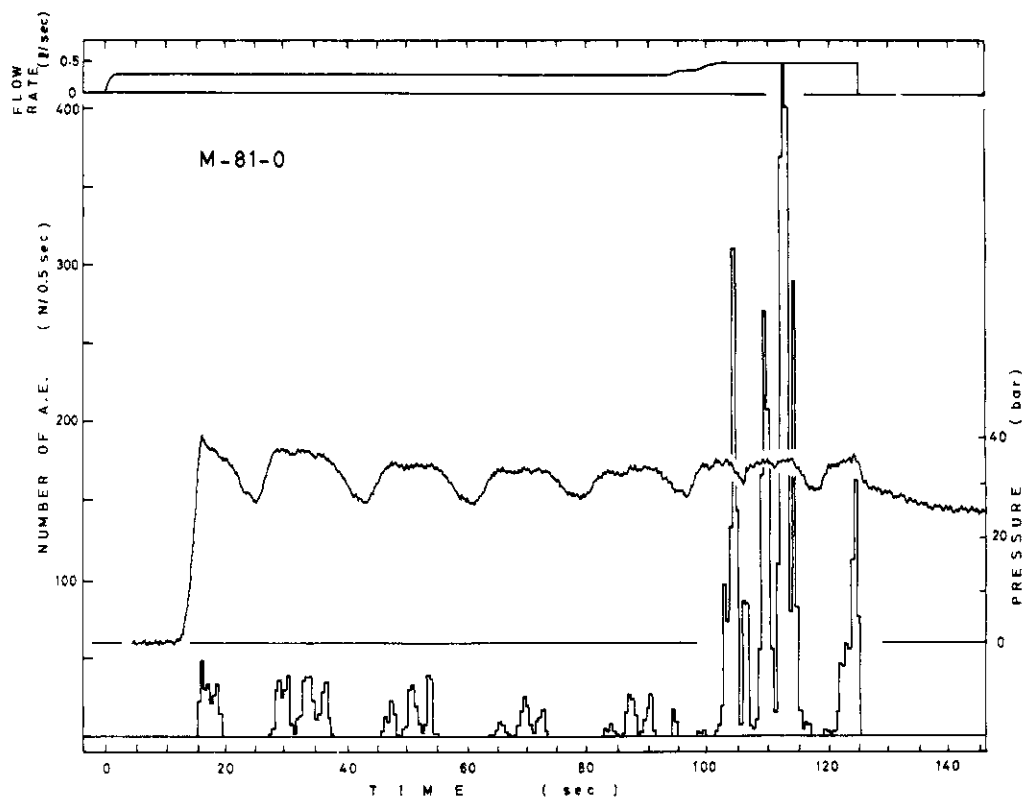


図 5a A.E発生頻度と水圧変化，注入流量比の関係（宮島，深度 81 m の実験，その 1）

Fig. 5a Relation of A.E. frequency to water pressure and to injecting flow-rate (experiment at Miyajima, 81m deep, part I).

である曲線は水圧変化で，地上のポンプの送水管のところにしている水圧計の読み (bar) である。したがって実際の破壊点 (深度 83 m) での水圧は，地表面からの深さ分の水の重さを加えたものとなる。図の上部に書いてあるのは水圧ポンプからの送水量 (l/sec) で，この実験の場合には約 0.3 l/sec の一定流量で約 60 sec 間注入を続けた。

水の圧入開始約 7 sec 後から水圧が上がり始め，15 sec 後に約 60 bar のピークに達している。60 sec 後に注入を終え，水圧が急激に減少して 34 bar で割れ目が閉じ平衡に達する。A. E. は 12 sec 以後 (水圧が上がり始めてから 5 sec 後) に初めて発生し，水圧のピーク直前で急激に増加して最高 211 個 / 0.5 sec を記録している。その後，増加・減少を繰り返しながら急激に減少していき，水の圧入が終了した時点以後は全く発生していない。

以上のことは，水圧がピークに達する前から微小な水圧破壊が開始していることを示している。水圧がピーク値よりもかなり低い (~25 bar) うちから破壊が起こり始めるのは，地層の組織が不均一なため，局所的な応力集中が起こりぜい性破壊が進行していくためと思われる。

(ii) 宮島深度 81 m (Run No M-81)

この実験では，まず 12.5 sec 間注水続け (図 5 a)，約 3.3 sec 間の注水中止期間をおい



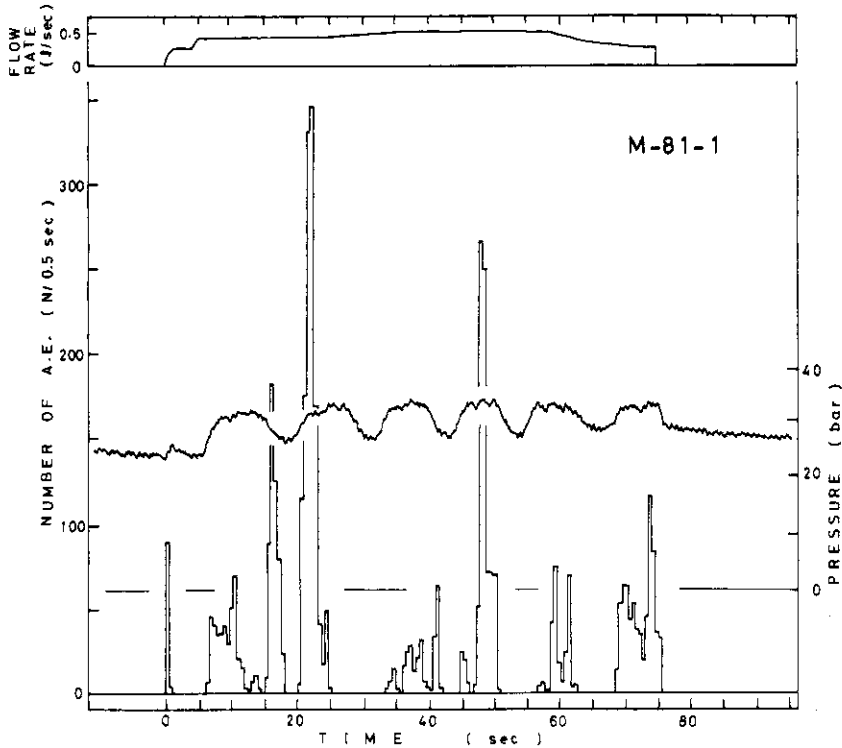


図5b A.E.発生頻度と水圧変化、注入流量比の関係（宮島、深度81mの実験、その2）

Fig. 5b Relation of A.E. frequency to water pressure and to injecting flow-rate (experiment at Miyajima, 81m deep, part II).

て、7.5 sec間再注水（図5b）した。水圧変化曲線を見ると、1回目は注入開始時から12 sec後に上り始め、2回目は注入開始時からただちに上り始めることがわかる。水圧は、最初のピーク以後そのまま単調に減少することなく10～15 bar (p-p)の幅で上昇・下降を繰り返している。これは、前述の深度83mの結果と根本的に異なる点である。

A.E.は1回目の注入開始時から1.5 sec後に始まる。しかし、その発生頻度は深度83mの場合（図4）と比べて著しく少ない。そして非常に特徴的なことは、それ以後水圧の高い時のみA.E.が集中して発生し、低い時には全く発生しないことである。100 sec以後A.E.が急激に増加しているが、その直前にflow rateを0.3 l/secから0.5 l/secに変えている。水圧は約3.8 bar以上に上昇することなく上昇・下降を繰り返しているため、割れ目には多量の水が短期間に入り込んだことになる。それだけ割れ目が深くあるいは大きく成長していったために、A.E.もそれに伴い増加したのであろう。図5bの2回目の実験でも、やはり水圧の高い時に多く発生し低い時にはゼロになる。1回目より数は多い。水圧がある値以上になると必ず発生するというわけではなく、その意味では水圧と音数とは比例していない。

一定流量のもとで水圧が上下する現象は次のように説明することができる。すなわち、ある圧

力以上になると割れ目が開き水がその中に入り込む。その結果、水圧が下がり割れ目が閉じて再び圧力が上がってくる。したがってA.E.の発生は、割れ目の開閉の繰り返しを反映しているようである。

また、深度83mと81mのA.E.の発生パターンが異なることから、地層の硬軟の差・既存のき裂の有無の差が、破壊様式に変化を与えていると考えられる。つまり、地層が軟弱だと主破壊がはっきり起こらず徐々に破壊していく。したがってA.E.の発生数にもはっきりしたピークが現われないであろう。実際ボーリングコアで比較すると、81mの方が83mの方より柔らかい泥岩が多く、方解石や変質粘土が挟在している。算出された破壊強度も、81mが8bar、83mが25barと差があり、81mの方が弱い(塚原他, 1978)。

#### 4. 考察

水圧破壊に伴うA.E.は、ハイドロホンによって測定することができた。そのA.E.と判定した理由は以下のとおりである。

- 1) 記象は、初動が鋭く立ち上がりパルス的で、他のノイズと波形が異なる。
  - 2) 送水時以外には全く発生していない。
  - 3) 水圧ポンプが運転を開始してもすぐには発生せず、ある圧力以上になって初めて出ていることから、ポンプのノイズではない。
  - 4) 水圧がピークに達する直前に発生数が急増している。
  - 5) 割れ目の開閉に伴うと思われる水圧の上昇・下降に応じた発生頻度分布を示す。
- 以上のことは、これらの微小音が水圧破壊によるものであることを強く支持している。

観測されたA.E.は、上記判定理由の他に以下の特徴がある。

- 1) 初動の卓越周波数は約5 KHz である。
- 2) 最大振幅の卓越周波数は約1.5～2 KHz である。
- 3) 最大振幅は、磁気テープの記録範囲を越えているので推定であるが約0.2  $\mu$  barである。
- 4) 初動の押しのA.E.の数と引きのA.E.の数はほぼ等しいが、数個ずつ同じ方向が続く傾向がある。
- 5) 水圧とA.E.発生頻度とは必ずしも比例しない。

今回の一連の水圧破壊実験において、初期の段階では発生するA.E.の大きさ、周波数特性が不明のため、測定系のゲイン設定及び遮断周波数の設定に不備な点があったが、経験を重ね最後の2回の実験でA.E.をとらえることができた。しかし、測定系のダイナミックレンジの狭さから振幅の大きさの変化は見ることができず、主破壊と微小破壊の区別を今回の実験ではできなかった。さらに、有効に使えるデータを与えたのがハイドロホン1個であったため、震源位置を決めることができなかった。

A.E.の測定は、破壊開始水圧の時刻を精度良く知り、水圧破壊強度の正確な同定に有効な手段となると考える。今後、センサー数を増やして三次元的に配置し、また周波数帯域を広くして、破壊の進行に伴う音源位置の推移・波形の変化などを確かめ、水圧破壊とA.E.の関係を把握する必要がある。

参考文献

- 1) Blair, A.G., J.W. Tester and J.J. Mortensen (1976): Last hot dry rock geothermal project (July 1, 1975 - June 30, 1976). Progress Report, Los Alamos Scientific Laboratory of the Univ. of California
- 2) Lockner, D. and J.D. Byerlee (1977): Hydrofracture in Weber Sandstone at high confining pressure and differential stress. *J. Geophys. Res.*, **82**, 2018-2026.
- 3) Mogi, K. (1968): Source locations of elastic shocks in the fracturing process in rocks (I). *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **46**, 1103-1125.
- 4) 丹羽義次・福井卓雄・小林昭一・柳沢俊・大津政康 (1976): 岩はねに伴うアコウステックエミッションに関する考察. 第10回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要, 46-50.
- 5) Scholz, C.H. (1968, a): Microfracturing and the inelastic deformation of rock in compression. *J. Geophys. Res.*, **73**, 1417-1432.
- 6) ————— (1968, b): Experimental study of the fracturing process in brittle rock. *J. Geophys. Res.*, **73**, 1447-1454.
- 7) 田村計・前田勲・広野進 (1970): サイズミトロン応用に関する研究. 鹿島建設技術研究所年報, **19**, 97-105.
- 8) 塚原弘昭・池田隆司・佐竹洋・大竹政和・高橋博 (1978): 水圧破壊法による地殻応力の測定—地表下90mにおける地殻応力測定—. 国立防災科学技術センター研究速報, **30**, 24pp.
- 9) 渡正亮・板垣治 (1975): 微小音による岩盤地すべりの予知手法についての子備実験. 土木技術資料, **17**, 57-62.
- 10) Wuollet, G.M. and D.V. Power (1975): A seismic study of a large hydraulic fracturing experiment in Wyoming. Abstracts from the First International Symposium on Induced Seismicity, Banff, Alberta, Canada.

(1978年9月21日原稿受理)