

地殻応力測定のための水圧破壊実験に伴う 微小破壊音の振幅別頻度分布

池田 隆 司*

国立防災科学技術センター

Amplitude-Frequency Relation of Acoustic Emission Accompanying Hydrofracturing for Crustal Stress Measurement

By

Ryuji Ikeda

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

A number of AE (Acoustic Emissions) has been observed during the hydrofracturing experiments for crustal stress measurement. In order to study the hydrofracturing mechanism, the characteristics of AE and its generation pattern are analyzed.

Three hydrophones are placed at depths of 1 ~ 15 m in the experimental well at Nishiizu town, Izu peninsula.

The results reveal that (1) the wave-form of the AE is pulse-like, (2) predominant frequency is 3 ~ 4 kHz, (3) the amplitude-frequency relation obeys the Ishimoto-Iida relation

$$n(a)da=ka^m da$$

where $n(a)$ is the total number of AE with amplitude ranging a to $a+da$, and k and m are the constants, (4) the m -value is 2.5 for the experiment of 263 m-depth and 2.0 for the 436 m-depth, and (5) the generation pattern of AE depends upon the well wall conditions.

1. はじめに

野外での水圧破壊の際に発生する微小破壊音 (Acoustic Emission ; 以下AEと記す) の観測は、破壊発生時刻、破壊割れ目の位置と進展方向の推定および破壊の規模の定量的評価という点から大変重要である。

室内での水圧破壊実験に際して、AE観測により破壊面の位置・方向などを決めようとする試みは、Shuck and Keech (1977), Lockner and Byerlee (1977) などによる例がある。いずれも岩石試料に圧電素子のトランスデューサーを貼り付け、AEを観測してい

* 第2研究部 地震地下水研究室

る。しかし野外での観測は、高周波ゆえの地中での減衰、バックグラウンドノイズの点で一層困難であり、測定例としては、地下天然ガス貯蔵計画(New Mexico)で、一本の井戸に深度の異なる二本の管をセメンチングしその中にハイドロホンを垂下して、100～2,000 Hzの周波数帯域のAEを測定した例がある(Power et al., 1975, Power, 1977)。ただしポンプ作動中はバックグラウンドノイズのために観測できず、圧入終了後のいわば主破壊後のポンプ停止後にいくつか発生した余震(AE)を観測したものである。我国では地熱開発のための水圧破壊の際にAEを観測する試みがなされている(北海道濁川(Takahashi et al., 1980))。周波数帯域7～7,000 Hzの圧電素子の加速度計を用いた観測で、水圧破壊点から1,500m離れた位置で卓越周波数37.5Hzの数多くのAEを捕えたことを報告している。

これらの測定例は、ガスおよび地熱の生産現場において産出量を増すために行なわれた大規模な水圧破壊の際の測定である。ところで、国立防災科学技術センターでは、地殻応力測定のための水圧破壊実験を実施している。この実験は、石油や地熱のための水圧破壊と比較すると以下の点で大きく異なる。

- (1) 破壊する箇所は、既存フラクチャの少ない比較的堅い岩質である。
- (2) 破壊のために水圧をかける区間の幅が狭く、また圧入時間は短時間である。
- (3) 破壊のために圧入する水量(圧入速度、総量とも)が極めて少ない。

したがって破壊面自体小さなものとなるが、孔壁に残された破壊跡は、超音波を利用したボアホールテレビュア(以下BHTVと記す)や孔壁に押し着けて型を取る型取りパッカーを用いて確認可能である。孔井の検層記録を併用すると、岩質の差異を読み取れる。また、流量や水圧を細かくコントロールし記録することが可能である。このような点から、地殻応力測定のための水圧破壊は、石油井、地熱井で行なわれる大規模な水圧破壊と室内での岩石実験との中間的な位置を占めるとも言えよう。

このような状況下でのAE測定は、センサーの特性および設置条件という点で石油や地熱のための水圧破壊の場合とは異なるものにならざるを得ないが、前回の測定(池田ら, 1978)でハイドロホンが有効であることがわかったので、これを用いて観測した。水圧とAE発生頻度との関係、水圧変化と振幅別頻度分布との関係を調べることによって、AEの発生様式と破壊との関係について検討する。解析は破壊の様子がBHTVによって明らかに確認され、したがって破壊の形態が推定できる西伊豆での深度263m、および深度436mの実験(塚原ら, 1980)について行った。

2. 測定および解析系

測定および解析系のブロックダイアグラムを図1に示す。水圧破壊は、実験井内で測定しようとする適当な位置を上下2個の膨張パッカーで栓をし、パッカー間の加水圧部(2.1m)に

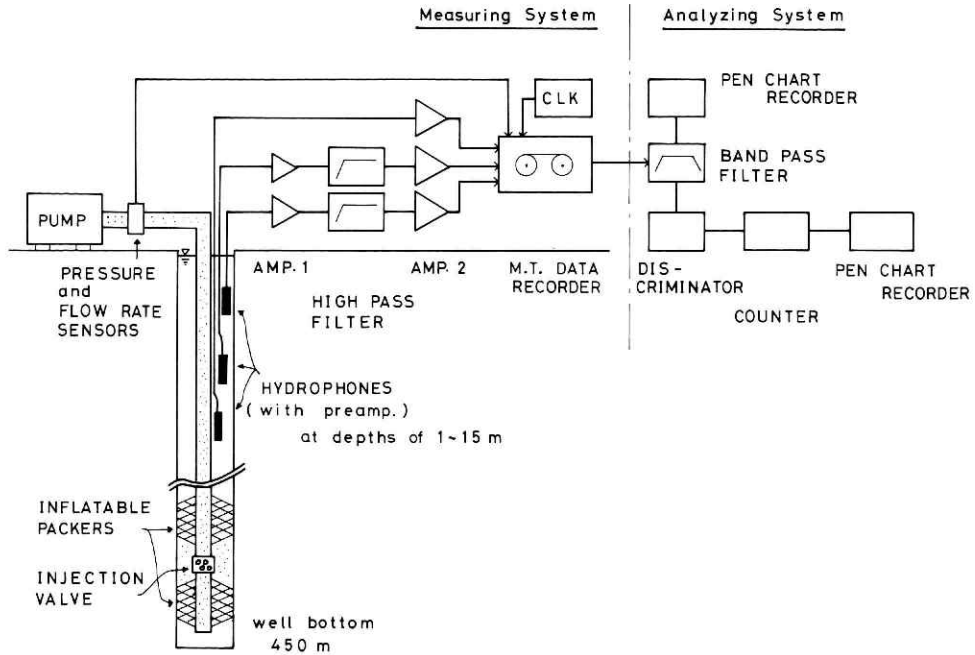


図 1 微小破壊音の測定および解析系.

Fig.1 System for measuring and analyzing the Acoustic Emission signals caused by the hydrofracturing.

地上のポンプにより水圧を加えて孔壁を破壊する。3個のハイドロホンを実験井内の1～15 mの深さに、孔壁と送水管の両者に触れないように孔口から吊り下げた。より深い位置に設置した方が地上からのノイズを遮断する意味でより良いと思われるが、孔壁と送水管の間隔が狭いこと、および泥水の比重が大きく降下させるのが困難であることから最大15 mの深さが限界であった。

センサーとして用いたハイドロホンはA、Bの2種類で、それぞれの周波数特性を図2に示す。受波感度はセンサー内蔵の前増幅器(Aタイプ：60dB、Bタイプ：10 dB)まで含んだもので、1 kHzの校正信号により $1 \text{ V} / \mu \text{ bar} = 0 \text{ dB}$ としている。したがって $-80 \text{ dB} = 0.1 \text{ mV} / \mu \text{ bar}$ である。

ハイドロホンからの信号は、アンプおよびハイパスフィルターを通しテープレコーダーにアナログで記録した。アンプ部で34～54 dB増幅し、フィルターではポンプや発電機等の地上からのノイズ対策のために700～1,000 Hz以下をカットしている。テープレコーダーには地上の送水管部についているセンサーからの水圧と流量を、時間と共に記録している。

再生はテープレコーダーのテープスピードを適当な速度に落としてペンレコーダーに書かせることにより、個々の信号波形の確認を行いその諸特性を調べるとともに、更にフィルター、

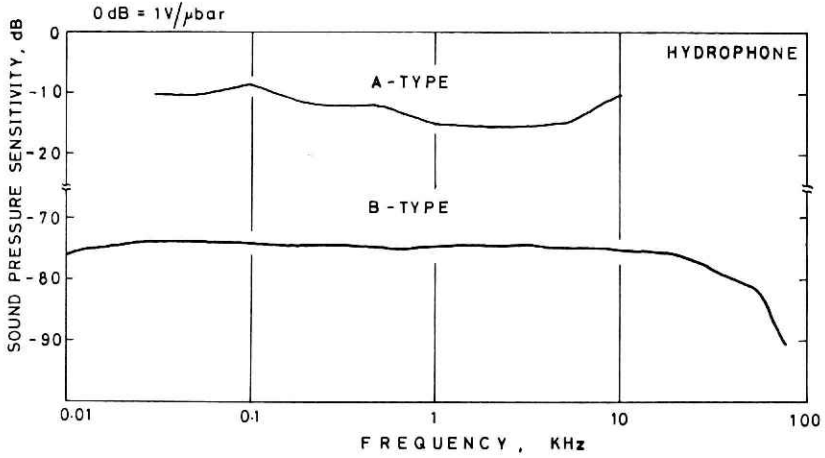


図 2 2種類の水素ホンの周波数応答特性 (前置増幅器を含む).
 Fig.2 Frequency response of the hydrophones with preamplifier.

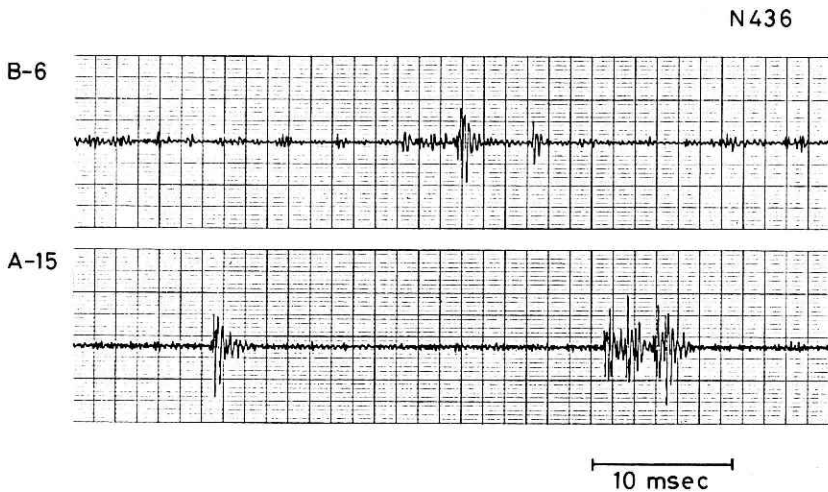


図 3 AE 記象の代表例. 西伊豆深度 436 m の実験において, 深度 6 m (B-6) と深度 15 m (A-15) で観測された.
 Fig.3 Examples of the typical wave-form of the AE caught by the hydrophone, which was placed at 6-m depth (B-6) and 15-m depth (A-15) in the experimental well (experiment for Nishiizu 436-m depth).

振幅弁別器, カウンターを用い, AEの振幅別頻度分布を求めた.

3. 記 象

水圧破壊に伴うAEとして注目しているのは, 図3に示すようなパルス型の振動である. 図3は西伊豆436mの実験時に観測された(図5, N436中のC点付近)もので, 上段(B-6)は深度6mに設置したBタイプのハイドロホン, 下段(A-15)は深度15mに設置したAタイプのハイドロホンで記録されたものである. ただし再生時に2.5~9.0kHzのバンドパスフィルターを通してている. このパルス型の振動は卓越周波数が3~4kHz程度で, 単発的に発生する場合と数個連続して発生する場合がある. また, 送水時以外は全く発生しておらず, 水圧が上昇し始めてから始まる.

比較のためにノイズの例を図4に示す. 図3と全く同条件で記録されたものでパルス型の振動が始まる直前に記録された. ハイドロホンへの到達時間差から推定すると, 地上からのノイズ(例えば, 物体の落下音)が送水管(鉄製)を伝わってセンサーに到達したものであろう. 立ち上がりが緩やかで継続時間も長く, パルス型の振動とは区別できる.

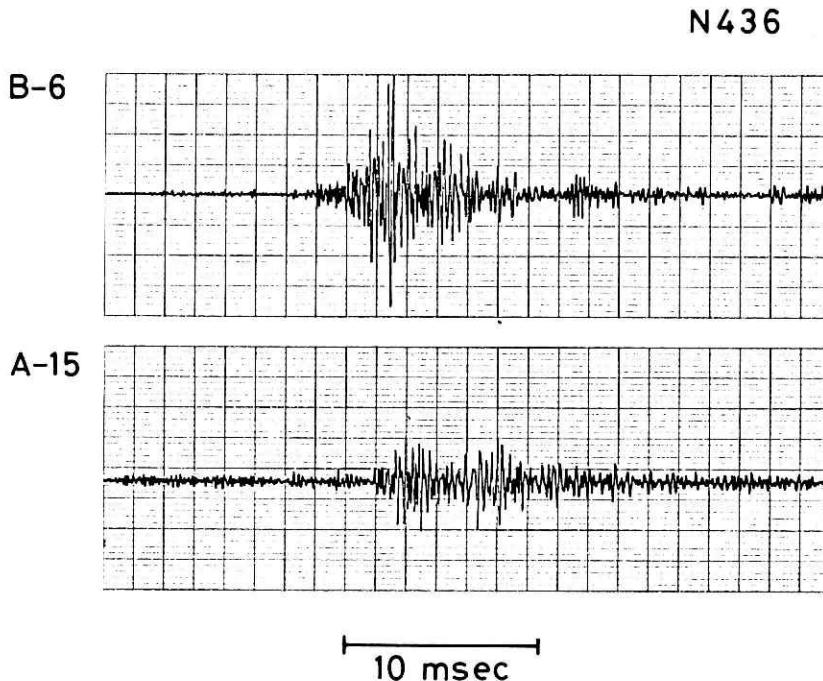


図 4 ノイズの例. 西伊豆深度436mの実験において, 深度6m(B-6)と深度15m(A-15)で観測された.

Fig. 4 Examples of noise caught by the hydrophone, which was placed at 6-m depth (B-6) and 15-m depth (A-15) in the experimental well (experiment for Nishiizu 436-m depth).

4. 振幅別頻度分布

A Eの大きさと数との関係は「石本-飯田」の式

$$n(a) da = ka^{-m} da \quad (1)$$

に従うことが一般に知られている。ここで $n(a)$ は最大振幅が a から $a+da$ の間にあるA Eの度数、 m 、 k は常数である。観測されたA Eの発生様式を(1)式と比較して評価しよう。

4.1 西伊豆深度263m(実験番号N263)

解析したデータは、表1に示すように実験井内深度5mに設置したBタイプの hidroホンで測定されたもので、測定時にAmp. 1で20dB増幅し1kHzのハイパスフィルターを通した後、更にAmp. 2で34dB増幅している。振幅別頻度分布は、1~20kHzのバンドパスフィルターを通した後、振幅弁別器で0.08~0.3V(データレコーダの出力)の区間を0.02Vごとに区切ってA Eの度をカウンターで数えた。その際、それぞれの振動の発生間隔を記録紙上で判断し、振幅弁別器の不感時間を3/4 msecに設定することにより重複して数えないようにした。

図5(N263)に、水を圧入した時の水圧および流量の時間変化を示す。Aから圧入を開始しCで極めて明瞭な水圧破壊による圧力降下が起こった。Dで一旦ポンプを停止するまでは30 l/minの一定流量で圧入しているが、C~Dの区間では水圧の昇降が見られる。Eで圧入を再開しFでポンプを止めた。この間水圧は大きな昇降を繰り返している。

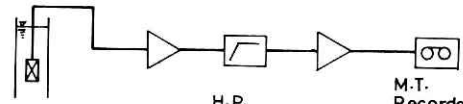
図6(N263)に、B~Cの区間およびC~Dの区間におけるA Eの最大振幅(a)と度数($n(a)$)との関係を示す。A~Bの区間はポンプ始動時のためと思われる明らかなノイズであることから除外した。この結果、両区間とも $1 \leq a \leq 2.4$ の範囲で直線に載ることがわかる。最小二乗法で決定した直線から、(1)式の m 値は2.5である。振幅が小さい範囲($a < 1$)で直線からずれるのはノイズが含まれるためであり、振幅の大きい範囲($2.4 < a$)で急激にA Eの数が少なくなるのは、大きな破壊は比較的低周波であるにもかかわらず、測定時に1kHz以下をカットしているためと思われる。このことは、バンドパスフィルターを通し高周波成分域だけで見ると、この傾向がますます強調されることから伺える。E~Fの区間では直線性がなかった。

4.2 西伊豆深度436m(実験番号N436)

測定系および解析系で263mの実験と異なる点は、hidroホンを深度6mに設置し、測定時にフィルターを通さず、Amp. 2で14dB増幅した点、解析時に振幅弁別器によって0.05~0.55V(データレコーダの出力)の区間を0.05Vごとに区切ってA Eの度を数えた点である。

図5(N436)に水圧および流量の時間変化を示す。Aで圧入を開始しDまで一定流量で圧入した。Bから水圧が上昇し出しDまで急激に上昇しているが、Cで一時的な水圧の変曲点

表 1 N 263, N 436 実験時の測定系諸元.
 Table 1 Description of the measuring system for the N263 and N436 experiments.



Experiment No.	Hydrophone Type	Depth (m)	Amp.1 (dB)	H.P. Filter (kHz)	Amp.2 (dB)
N 263	B	5	20	1	34
N 436	B	6	20	-	14

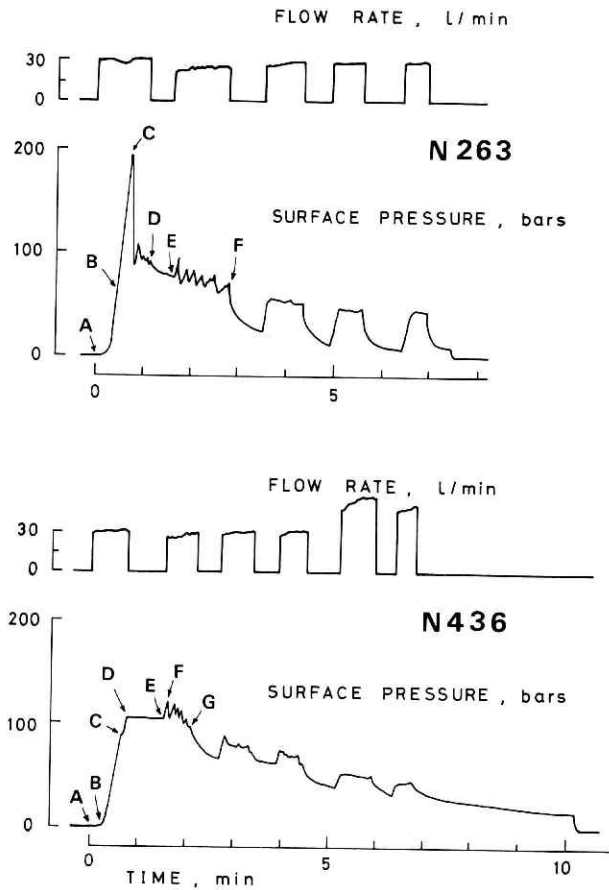


図 5 水圧 (地表での測定値) ・流量 - 時間記録. 西伊豆深度 263 m (N 263), 深度 436 m (N 436) の実験.

Fig. 5 Records of surface pressure and flow rate versus time during hydrofracturing for the N263 and N436 experiments.

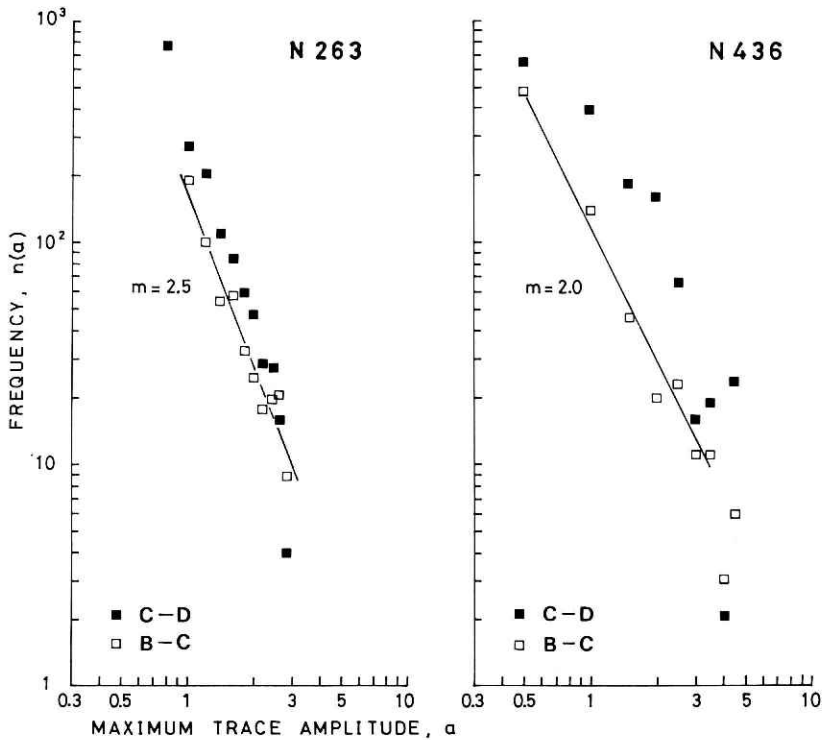


図 6 振幅別頻度分布 (N 263とN 436の実験). 符号 B, C, Dは図5中のB, C, Dに一致.

Fig.6 Frequency of events versus maximum trace amplitude for the N263 and N436 experiments. The letters B, C and D indicate the points B, C and D, respectively on the pressure curve in Fig. 5.

が見られる。Dで一旦圧入を止めたためEまで数十秒間一定水圧が保持された。Eで再度圧入を開始してFで圧力降下が見られた。しかし、N 263のような明瞭な圧力降下とはならず、Gでポンプを止めるまで一定流量にもかかわらず水圧の昇降が繰り返された。

図6 (N436)にB～Cの区間およびC～Dの区間についての振幅別頻度分布を示す。B～Cの区間の $0.5 \leq a \leq 3$ の範囲ではほぼ直線に載り $m = 2.0$ となる。しかし、C～Dの区間では上に凸の分布を示し直線とはならない。また他の区間についても直線とはならなかった。

5. AEの発生の時間変化と破壊の関係

N 436の振幅別頻度分布によると、区間B～Cでは直線に載るがC～Dでは直線性がない。その原因について、BHTVで観察される破壊の様子と、AE発生頻度分布とから考察し、破壊の起こり方を推定してみる。

図7は、水圧破壊前後のBHTVによる孔壁写真(塚原ら, 1980)で、孔壁の様子を展開した形で観察できる。N 263, N436ともに孔壁の両側(N $25^\circ \pm 10^\circ$ EとS $25^\circ \pm 10^\circ$ W

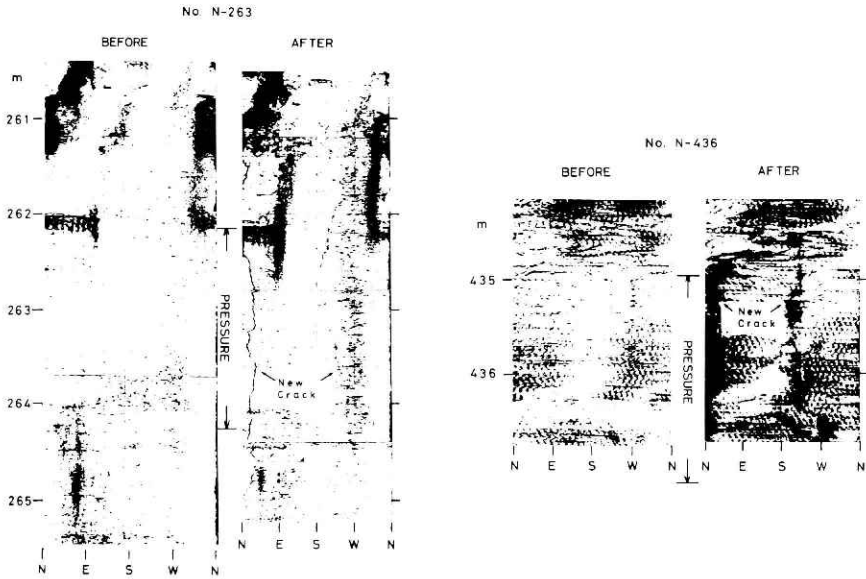


図 7 水圧破壊前後のボアホールテレビュアによる孔壁写真。

Fig.7 Borehole televiewer logs before and after hydrofracturing. New cracks created by the hydrofracturing are seen in the directions of $N25^{\circ} \pm 10^{\circ} E$ for each of the experiments N263 and N436.

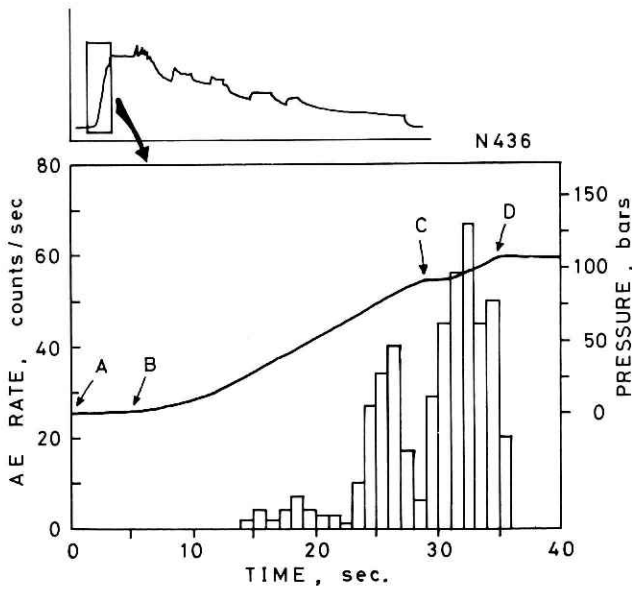


図 8 AE発生頻度と水圧変化との関係、実験N436中のA～Dの区間

Fig.8 Relation of AE frequency to detailed water pressure variation for the N436 experiment.

の方向)に新しい割れ目が観察できるが、両者の破壊の様子は異なる。岩質的には両深度とも火山礫凝灰岩であるが、P波の速度でN 263が5.3 km/sec, N 436が5.0 km/secと差があり、既存のクラック等の様子も異なる。N 436の場合は割れ目の幅も広く、孔壁が崩壊するようにグサグサした状態で破壊したと思われる。

N 436の区間A～Dについて、AEの発生頻度の時間的推移を水圧変化との関係で図8に示す。記録紙上で一定振幅以上のAEについて、その度数を1秒ごとにカウントした。36秒以後はカウントしていないが、ノイズが非常に多くパルス的なAEは極めて少なくなっている。圧入開始から14秒以後にAEが始め、水圧変化の変曲点(C)の時点で少なくなり、C～Dで再び増加する。AEの発生頻度に対応して水圧も変化している様子が伺える。また、区間B～Cでは単発的に発生するAEが多いが、C～Dではパルス型の振動のみを確認するのが困難な程連続して発生している。

以上のことからN 436の破壊の仕方を推定してみる。区間B～Cで破壊に伴うパルス型の振動が多発し、Cの時点までにある程度大きな破壊が起ったものと思われる。このことが水圧記録上の一時的な変曲点となり、AEの発生も少なくなる現象として現われたのであろう。その後、区間C～Dでは孔壁が崩壊するような状態で破壊が進行したのではなかろうか。このために、本来のAE以外に孔壁が崩れる時に発生するような音も含まれ、振幅別頻度分布も直線的ではなくなったと思われる。つまりCでの水圧一定状態は、偶発的な水漏れ等によるものではなく、ここで破壊の様式(例えばより深部の破壊)が変化していることを示している。このことから初期破壊圧としてはCの値をとるべきだということが、AE測定から示唆される。

これに対してN 263のAE振幅別頻度分布では、区間B～CおよびC～Dともに直線性が成り立っている。このことから、BHTVで観察される一本の連続した割れ目は、Cの時点までに大方は形成されたのであろうが、Dの時点までさらに割れ目が進展するかたちで出来上がったのではなかろうか。

6. おわりに

岩石破壊に伴うAEの振幅別頻度分布については、多くの研究がなされ(例えば、Mogi (1962), Scholz(1969)など)、石本-飯田の式の m 値の変化する要因が検討されている。室内の岩石破壊実験では、Mogi(1962)が花崗岩について $m \simeq 1.5 \sim 2.0$ 、軽石について $m \simeq 2.0 \sim 2.5$ という値を得ている。野外の水圧破壊実験では、Power et al.(1975)が $m = 2.5$ であったことを報告している。

今回の解析では、西伊豆深度263mの実験で $m = 2.5$ 、深度436mで $m = 2.0$ という値が得られた。Mogi(1962)やPower et al.(1975)の結果と良く一致している。野外の水圧破壊実験では、各実験箇所の岩質や孔壁状態によって破壊の様子が異なる。破壊に伴う

AEは破壊の仕方に左右され、 m 値もこれを反映して変化すると思われるが、現段階ではこのことを定量的に議論するには至らなかった。

問題点の一つとして、解析したAEの振幅の範囲が僅かに一桁以下にすぎず、見掛け上直線性が成り立っていることも考えられるので、より広い範囲についての測定が必要である。そのためには、現在の測定系ではセンサーの設置場所に限界があるので、直接破壊点の近傍で測定できるようなセンサーの開発が必要である。同時に、地上からのノイズ、特に水圧ポンプによるノイズを消去する工夫が必要である。

AEは、水圧記録やBHTVの結果と比較して、破壊の様子を忠実に反映していることがわかってきた。したがって、より詳しい発生様式や特性を調べることにより、水圧破壊の実態をより正確に把握する有益な手段となろう。

謝 辞

当センター第2研究部塚原弘昭氏は、測定に際し助力して下さり、具体的で有益な討論、助言をして下さった。ここに記して感謝の意を表する。

なお、本研究は昭和53～55年度科学技術庁特別研究促進調整費によつたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 池田隆司ら (1978) : 岩盤の水圧破壊実験に伴う微小破壊音の観測. 地震, 31, 435 - 444.
- 2) Lockner, D. and J. D. Byerlee (1977) : Hydrofracture in *J. Geophys. Res.*, weber sandstone at high confining pressure and differential stress. 82, 2018 - 2026.
- 3) 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.
- 4) Power, D. V., C. L. Schuster, R. Hay and J. Twombly (1975) : Detection of hydraulic fracture orientation and dimensions in cased wells. paper prepared for 50th Annual Fall Meeting of Society of Petroleum Engineers of AIME, Dallas, Texas.
- 5) Power, D. V. (1977) : Acoustic emissions following hydraulic fracturing in a gas well. *Proceedings First Conference on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials*, Trans Tech Publications, 291 - 308.
- 6) Scholz, C. H. (1968) : The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 58, 399 - 415.
- 7) Shuck, L. Z. and T. W. Keech (1977) : Monitoring acoustic emission from propagating fractures in petroleum reservoir rocks *Proceedings First Conference on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures and Materials*, Trans Tech Publications, 309 - 338.

- 8) Takahashi, H. et al. (1980): Detection of acoustic emission during hydraulic fracturing for geothermal energy extraction. paper presented at 5th International Acoustic Emission Symposium, Tokyo, 443-453.
- 9) 塚原弘昭・池田隆司・佐竹洋・高橋博(1980): 静岡県西伊豆町における水圧破壊法による地殻応力測定. 地震, **33**, 317-327.

(1981年11月16日 原稿受理)