気液二相流実験による AE発生メカニズムの解明

丹生屋 純夫^{1*}·畑 浩二²·鵜山 雅夫¹·青柳 和平³·棚井 憲治³

 ¹株式会社大林組 原子力本部 原子力環境技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-14-2 品川インターシティB棟)
 ²株式会社大林組 技術研究所 地盤技術研究部 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸6-640)
 ³国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター (〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進432-2)
 *E-mail: niunoya.sumio@obayashi.co.jp

本研究では、岩盤割れ目中の気液二相流体の流動に伴い発生するAEの特徴を解明するため、一次元の 水の流れをモデル化した細管路実験と、割れ目中における二次元の水の流れをモデル化した隙間平板実験 を実施した.実験の結果、圧力脈動がAE発生に関係していること、管路径の寸法には影響しないことな どが分かった.また、振幅値、持続時間、周波数およびスペクトル等のAEパラメータを基に整理した結 果、幌延深地層研究センターの地下施設で実施している長期AEモニタリングにおいて採用している、岩 盤の振動に起因するAEとそれ以外のAEを弁別する指標の妥当性を示すことができた.

Key Words : AE, optical sensor, long term monitoring, great depth excavation, the two-phase flow test

1. 諸言

高レベル放射性廃棄物の地層処分研究においては、掘 削損傷領域(Excavation Damaged Zone,以下EDZ)が放射 性核種の移行経路となる可能性が示唆されており,地層 処分のにおける安全評価の観点からは、坑道周辺の割れ 目進展といった力学的な検討とともに水理学的な変化に ついても長期的なモニタリングを行う事が重要であると 考えられている.これに対して、応力再配分に伴う微小 き裂の発生や進展を観測できる、アコースティック・エ ミッション法(Acoustic Emission,以下AE¹¹)の適用が, 有効な手法の一つとして考えられている^{2,3}.

幌延深地層研究センターでは、溶存ガスを含んだ地下 水が存在する.このような環境で掘削開始から掘削後の 長期にわたってEDZの挙動をAEで計測する場合、岩盤 破壊や気泡発生など様々な種類の事象を示唆するAE信 号波形が観測されることになる⁴⁻⁷.これら種々のAE信 号波形データの中から、岩盤中に発生した割れ目の進展 に起因したAEのみを弁別するためには、溶存ガスの突 発噴出を表すAEを把握し、弁別時の規準を構築する必 要がある⁸.

本研究では、岩盤から発生したAE信号波形の定量的 な弁別規準を構築することを目的とした.そこで、岩盤 の割れ目中の二相流流体の流動やそれに伴う気泡の発生 を条件既知の室内実験により再現し、気液二相流状態下 で発生しうるAE信号波形の取得を行った.

2. 二相流実験の全体概要

本件では,(1)一次元の水の流れをモデル化し,細管 路中における気液二相流の発する弾性波の特性を把握す るアクリル管路実験,(2)二次元の水の流れをモデル化 し,平板路中における気液二相流の発する弾性波の特性 を把握するアクリル隙間平板実験をそれぞれ実施し, AE信号波形に関する詳細なデータの取得を行う.

(1) 実験項目と計測項目

本研究で実施する実験における項目と計測項目を整理 して**表-1**に示す.

(2) 使用機器

実験に使用した機器の概要を表-2にまとめる.また, 使用したセンサおよび計測機器を含めた各実験の実施イ メージを図-1,図-2に示す.

実験項目	目的	パラメータ	計測項目
細管路実験	岩盤内の線状の 水みちを模擬	 管路径 	・AE ・液体流量 ・気体流量 ・気体流量
隙間平板実験	岩盤内の面状の	平板管隙間	・光センサによる識別
	水みちを模擬	液体流量&気体流量	(参考)

表-1 実験項目および計測項目

表-2 実験機器仕様一覧

機器	仕様	数量
液体用流量制御弁	・流量 : 10~100mL/min ・制御精度 : ±3%FS	1
気体用マスフロー コントローラー	・流量 : 200mL/min ・制御精度 : ±1%FS	1
AEセンサ	・広帯域型	1
	・70kHz共振	1
AEセンサ用 プリアンプ	・増幅率 : 20/40dB 切替 ・周波数特性: 5kHz~2MHz	1
AE計測装置	 ・サンプリングレート:最大1MHz HPF : Thru/10k/20k 切替 LPF : Thru/100k/200k/500k 切替 ・増幅率: 0dB/20/40/60dB 切替 	1
デジタルオシロ スコープ	・サンプリングレート:最大10MHz	1
光センサアンプ	 ・出力 : 1-5V電圧出力 ・応答速度: 1msec 	1

(3) 実験の手順

a) 細管路実験(内径 ϕ 1.6mm, ϕ 2.4mm)

細管路では、最も単純な形状である管路において市販の細管のうち、本実験装置の製作上適切と考えた 1.6mmと ¢ 2.4mmの2種の内径細管を使用し、二相流を生 成流入させ、発生したAEを収録する、細管路は、岩盤 内の線状の水みちにおける二相流を模擬している、実験 は以下の手順によって行う.

- 高圧ガス(窒素)を圧力源として、任意圧力の水流 とガス流をそれぞれ管路内に生成する.なお、水流 は内部にピストンを有するガス・水変換圧力容器を 介して生成する.
- ② マスフローコントローラーならびに流量制御弁で流量を調整した水流とガス流を管路内で合流させ、任意流量、圧力および混合比の気液二相流を生成する、気液二相流の状態は、ガス流量(制御設定値)、ならびに混合後の圧力の計測値(試験ブロックの上流側と下流側)によって識別するものとする.
- ③ 生成した二相流を、管路を有する試験ブロックに流入させる.試験ブロックにAEセンサを取り付け、二相流によって発生するAE信号波形を記録する. 使用するAEセンサは、幌延深地層研究センターの原位置計測に用いた光ファイバー式と同等の感度特性を持つ、70kHz共振型圧電式である.これに加え、広い周波数帯域を持つ広帯域型圧電式AEセンサを用意し、管路径の違いによるAE発生状況の差異を



確認する.このような手順により,捉えたAE信号 波形をAE計測器に記録する.

b) 隙間平板実験(隙間t1.6mm)

平板路における実験は、岩盤中の面状の水みちを気液 二相流が流れた際にAE発生状況を模擬するものである. 試験ブロックは、2枚の厚板状のアクリルブロックを重 ね、その間に厚さ1.6mmのスペーサーを介在させ、隙間 を持たせたものである.

二相流の生成方法,AE信号波形収録方法は細管路実 験の場合と同様である.

3. 実施数量と条件

本実験のための流量等の実験条件を設定するために、 φ1.6mm管路を用いた上で、可能な限りの条件を種々設 定して予備試験を実施し、AEが発生したケース(水流量 とガス流量の組み合わせ)を本実験の対象とした.ただ し、同条件下においても脈動の有無によってAEが発生 していないケースもあり、これも比較対象ケースとした. なお、水流量の設定について、30mL/minと100mL/min以 外の流量設定についても実施しているが、30mL/min以下 の流量ではAEが発生しないなどAEが発生する現象を捉 えるうえで本予備試験では概ね上下限になった30mL/min と100mL/minの2ケースを基本に条件の組合せを検討した.

流路	水流量 (mL/min)	ガス流量 (mL/min)	流路下流側 バルブの状態	二相流の状態	実験番号
30 細管路 (¢1.6mm)		25	開放	・気泡流~スラグ流 ・エアスラグ 最長3cm程度 ・圧力脈動なし	細管路1.6_①
		25	絞り	 ・気泡流~スラグ流 ・エアスラグ 最長3cm程度 ・圧力脈動幅 0.01MPa 	細管路1.6_②
	30	70	絞り	 ・気泡流~スラグ流 ・エアスラグ 最長5cm程度 ・圧力脈動幅 0.01MPa 	細管路1.6_③
		200	絞り	・スラグ流~環状流 ・圧力脈動幅 0.02MPa	細管路1.6_④
		400	絞り	・環状流 ・圧力脈動幅 0.02MPa	細管路1.6_⑤
	100	25	開放	・スラグ流	細管路1.6_⑥
		70	開放	・圧力脈動なし	細管路1.6_⑦
		0	絞り	・水のみ ・圧力脈動なし	細管路1.6_⑧

表3	ф1	6mm	細管路	宝驗生	ミ施数	量と	冬件
1 X U	ψ I.	OIIIII	小田日町	大闸内大	この内女人!		不口

表-4 φ	2.4mm 細管路実験実施数量と条件
-------	--------------------

流路	水流量 (mL/min)	ガス流量 (mL/min)	流路下流側 バルブの状態	二相流の状態	実験番号
		25	開放	・気泡流~スラグ流 ・エアスラグ 最長6cm程度 ・圧力脈動なし	細管路2.4_①
		25	絞り	 ・気泡流~スラグ流 ・エアスラグ 最長6cm程度 ・圧力脈動幅 0.015MPa 	細管路2.4_②
	30	70	絞り	 ・スラグ流(まれに気泡含む) ・エアスラグ 最長7cm程度 ・圧力脈動幅 0.02MPa 	細管路2.4_③
		200	絞り	 ・スラグ流(まれに気泡含む) ・エアスラグ 最長10cm程度 ・圧力脈動幅 0.02MPa 	細管路2.4_④
		400	絞り	 ・環状流~スラグ流(まれに気 泡含む) ・エアスラグ 最長10cm程度 ・圧力脈動幅 0.03MPa 	細管路2.4_5
	100	25	開放	・スラグ流 ・圧力脈動なし	細管路2.4_⑥
		70	開放	・スラグ流 ・変化幅0.01MPa程度の緩やか な変動あり	細管路2.4_⑦
		0	絞り	・水のみ ・圧力脈動なし	細管路2.4_⑧

表-5 1.6mm 隙間平板実験実施数量と条件

流路	水流量 (mL/min)	ガス流量 (mL/min)	流路下流側 バルブの状態	二相流の状態	実験番号
平板間 (隙間1.6mm) 1		25	開放	・圧力脈動なし	平板_①
		25	絞り	・圧力脈動幅 最大0.15MPa	平板_②
	30	70	絞り	・圧力脈動幅 0.05~0.1MPa	平板_③
		200	絞り	・圧力脈動幅 最大0.15MPa	平板_④
		400	絞り	・圧力脈動幅 最大0.15MPa	平板_⑤
	100	25	開放	・圧力脈動なし	平板_⑥
		0	絞り	・水のみ ・圧力脈動なし	平板_⑦

各実験ケースにおける実施数量と条件を検討した結果を、 それぞれ表-3~表-5に示す.

4. 実験結果

(1) 細管路実験

φ1.6mmとφ2.4mmの管路径において、各実験の結果、
 水圧変化とガス流入量とAE発生量の関係については、
 管路径による差異は確認されなかった.以下は、φ
 1.6mmの実験で主に得られた知見を述べる.



図-3 細管路実験実施状況











図-8 隙間平板実験実施状況





実験番号の細管路_①と②においては、同条件下で圧 力脈動の有無を比較するものであり、脈動が無ければ、 AEは発生しないことが確認された. さらにAEが発生す るのは、脈動する圧力が低下するタイミングであること も特徴として捉えることができた.

一方,細管路_③,④および⑤のようにガス量条件を 増加させる(70mL/min⇒200mL/min⇒400mL/min)ことによ って,圧力,AEの発生数も比例して増加する傾向を示 していることが分かった.また,細管路_⑥,⑦のよう に水量条件を増加させた場合,圧力脈動がなくとも 70kHz共振型圧電式AEセンサであれば(東立坑現場での 使用センサと同等性能),ある程度のAE発生数は確認さ れるが,細管路_⑧のようにガス量条件をゼロにすると AEの発生はなくなることも確認された.

(2) 隙間平板実験

1.6mm隙間平板実験の実験状況を図-8に示すと共に, 各種実験ケースのうちの平板①と④の結果を図-9,図-10に示す.上段,下段に示した結果は,前述の4.(1)で示 した表記(図-4,図-5)と同様である.

実験の結果得られた挙動に関する知見を,以下に示す. 実験番号の平板_①と②においては,同条件下(水 30mL/min ガス25mL/min)で圧力脈動の有無を比較する ものであり,脈動が無ければ,AEは発生しないことが 確認された.さらにAEが発生するのは,脈動する圧力 が低下するタイミングであることも管路実験と同様の特 徴として捉えることができた.ただし,圧力脈動の挙動 としては細管路実験時の挙動と異なり,大きな周期の脈 動形状を示した.

一方,平板_③,④および⑤の実験結果より.圧力脈 動の形状はガス量条件によってそれぞれ異なるものとな り,その繰返し性状は流路が確定しないことから,時と して不規則になることが確認された.

また、平板_⑥のように水量条件を増加させた場合, 圧力脈動がなくとも70kHz共振型圧電式AEセンサであれ ば(東立坑現場での使用センサと同等性能),ある程度の AE発生数は確認されるが、平板_⑦のようにガス量条件 をゼロにすると水量条件を増加させてもAEの発生はな くなることも確認され、AE発生にはガス量と圧力脈動 が大きく影響を与えるものと推定された.

5. 考察

(1) AEパラメータによる整理結果の傾向

結果を著者ら^{0,8}が提案した,**表**-6の抽出条件に照らし 合わせて,岩盤AEと岩盤以外のAEに弁別し,その傾向 を確認した.「スペクトル半値幅」は,ピークの50%強 度値における両端を結んだ幅であり,スペクトルの単色 性・共振性の鋭さを示す指標を表す.

表-7に、3項目のAEパラメータごとに試験結果の一部 を選定して示した.また、比較検討として幌延地下施設 の深度350m東立坑以深の掘削中に立坑周囲で計測した AE計測の結果も表中に併せて掲載した[®].

パラメータ項目「半値幅」では、試験結果において岩 盤以外のAEとなる条件[<25kHz]のAE発生累計頻度は全 体の約70~83%であった.これに対し、原位置での計測 結果では全体の約95~99%であった.パラメータ項目

表-6	AE パラメータ別の岩盤 AE 抽出条件
-----	----------------------

AEパラメータ	岩盤AEの抽出条件 (AND条件)
スペクトル半値幅	>25kHz
波形勾配 (DT/PA)	<0.5
共振性指数 (スペクトルピーク値/PA)	<0.15



「波形勾配(波形形状指数)」では、実験結果において岩 盤以外のAEとなる条件[>0.5]のAE発生累計頻度は全体 の約90~97%であった.これに対し、原位置での計測結 果では全体の約95~98%であった.パラメータ項目「共 振性指数」では、実験結果において岩盤以外のAEとな る条件[>0.15]のAE発生累計頻度は全体の約90~92%で あった.これに対し、原位置での計測結果では全体の約 95~98%であった.

全体の傾向として, 幌延地下施設で計測しているAE 信号波形データの弁別傾向と今回の実験結果で判断した 弁別傾向は概ね整合していることが示唆された.

(2) AEパラメータと二相流の状態の関係

図-11に水流量30mL/minにおけるAE最大発生頻度,半 値幅,波形勾配,そして共振性指数に関する各実験デー タとガス流量との関係をそれぞれ水流量ごとに示した.

図より、ガス流量の増加と共に半値幅は増加し、共振 性指数は低下する傾向を示し、いずれも表-6に示す岩盤 AEの抽出条件範疇に近づくことが示唆された.一方, 波形勾配については明瞭な傾向は確認されなかった.

6. 結言

本研究では、岩盤から発生したAE信号波形の定量的

な弁別規準を構築することを目的として,岩盤の割れ目 注の二相流流体の流動時やそれに伴い発生する気泡を室 内実験により再現し,AE信号波形の取得を行った.得 られた結果は以下のとおりである.

- ・圧力脈動を起こすとAEの発生が増加することが確認 されたことから、水流の間欠がAE発生に影響を与え ていることが示唆された。またAEが発生するのは、 脈動する圧力が低下するタイミングであることも特徴 として捉えることができた。
- ・管路径 φ 1.6mm と φ 2.4mmにおける実験結果に大きな 差異は確認されなかったことから、総じて管路径の大 小によるAE発生への影響は小さいことが示唆された。

これにより,表-6に示す抽出条件で幌延地下施設で計 測されている5種類のAE信号波形パターンにおいて流体 AEを弁別できることが明らかになった.

謝辞:モデル実験,データ解釈に関して,株式会社レー ザック 藤井宏和氏に多大なるご協力をいただいた.こ こに記して感謝の意を表するものである.

参考文献

 尾上守夫、山口楠雄、仲佐博裕、佐野謙一、磯野英二、 渡辺哲夫共著:アコースティック・エミッションの基 礎と応用、コロナ社、1976.



図-11 AE パラメータ別によるガス流量との関係

- 2) 畑浩二,宮崎裕光,田仲正弘,布谷勝彦,斉藤義弘, 藤井宏和:光ファイバーを利用した原位置 AE センサの開発,第40回岩盤力学に関するシンポジウム講演 集,講演番号 20,2011.
- 3) 畑浩二:光式 AE を利用した地下空洞における長期モニタリング技術の開発と適用、大林組技術研究所報, No.79, 2015.
- 4) 畑浩二,丹生屋純夫,青柳和平:光計測を用いた幌延 深地層研究センターの立坑周囲岩盤における長期挙動 評価,第14回岩の力学シンポジウム講演集,講演番 号011,2017.
- 5)畑浩二,丹生屋純夫,津坂仁和,青柳和平:幌延深地 層研究所におけるマルチ光計測プローブを用いた立坑

掘削影響領域の長期モニタリング計画,土木学会第 69 回年次学術講演会, 2014.

- 6)畑浩二,丹生屋純夫,青柳和平,藤田朝雄:マルチ光 計測プローブを用いた幌延深地層研究センターの立坑 掘削損傷評価,第44回岩盤力学に関するシンポジウ ム講演集,講演番号57,2016.
- 7)畑浩二,丹生屋純夫,青柳和平,藤田朝雄:幌延深地 層研究センターの立坑掘削時における力学的・水理学 的影響評価,土木学会第70回年次学術講演会,2015.
- 8) 丹生屋純夫,畑浩二,鵜山雅夫,青柳和平,若杉圭一郎:大深度地下掘削時のAE計測における波形分析手法に関する研究,第45回岩盤力学に関するシンポジウム講演集,講演番号39,2018.

ADEFINING THE MECHANISM OF THE GAS-BUBBLE AE CHARACTERISTICS BY TWO-PHASE FLOW TEST

Sumio NIUNOYA, Koji HATA, Masao UYAMA, Kazuhei AOYAGI, and Kenji TANAI

Underground water at the Horonobe URL site, including the dissolve gas, in order to sort AE from break-out of rock mass in various kind of AE signal sine curve, it is important to understand the quantitative behavior of AE signal waveform clearly and to develop the criteria of sorting technique. In this report, we tried to perform 2 types of laboratory tests(Small pipe test and Flat-plate test) in order to obtain detail data of AE signal wave form under two-phase flow. As the result, we could understand that there exists the relationship between the pressure breathing and AE generation, and that the diameter of pipe was not efficient for AE.