論 文

油ガス田における AE 法によるフラクチャー計測の可能性*

手塚 和彦**・玉川 哲也**

(Received September 6, 2004; accepted November 5, 2004)

Feasibility of fracture delineation by Acoustic Emission method in oil/gas reservoir

Kazuhiko Tezuka and Tetsuya Tamagawa

Abstract: A small-scale hydraulic injection experiment was conducted in the Yufutsu gas field in October 2003, to see the feasibility of AE (acoustic emission) monitoring for the purpose of the fractured reservoir delineation. Although many success stories have been reported from the area of geothermal fields, none of the study in oil/gas reservoir has been done in Japan. This is the first experiment in oil/gas reservoirs in this country. We have succeeded in recording more than 450 of good quality AE signals by downhole sensors installed at 2,700–2,790 m depths during the injection of 280 tons of brine solution into the depth interval 4,412–4,995 m in the gas saturated reservoir. As the results of AE analysis, it becomes clear that the distribution of the AE events has close relationship with the distribution of pre-existing fractures along the well and that the shearing associated with AE events improves the injectivity of the injection well.

The results of the field experiment were discussed through numerical simulations by using the “SHIFT” that simulates the shearing of fractures and relating permeability changes. The simulated results show a good matching in the pressure response and the AE activity, and provide us with useful understandings of the dynamics of the reservoir.

Key words: AE, acoustic emission, microseismics, fracture, fractured reservoir, gas reservoir, stimulation, fracturing, hydraulic injection, shearing, simulator, SHIFT

1. はじめに

勇払油ガス田は、基盤岩花崗岩層とその上位の礫岩層を貯留岩としており、そこに発達したフラクチャーシステムがガスコンデンセートの貯留スペースおよび流路としての重要な役割を担っている。石油資源開発(株)は、同油ガス田におけるガスコンデンセート回収率向上のために、信頼性の高い貯留層モデルの作成に取り組んでいる

が、モデル作成の基礎となるフラクチャー情報は FMI などの検層による坑井沿いのものに限られ、坑井から離れた空間的な情報が不足している。深度4,000 m 以深における有効なフラクチャー計測法は確立されておらず、反射法地震探査やトモグラフィ調査でも未だ困難な課題となっている。

AE 法は、坑井からの注水によって既存のフラクチャーあるいは弱面を刺激し、岩盤の破壊に伴って放出される微小破壊音 (AE) を計測・解析するもので、これらの震源要素 (震源位置、発生履歴、震源メカニズムなど) からフラクチャーの空間的な分布や構造を評価できる可能性がある。この技術は地熱開発 (特に高温岩体開発) の分野では数多くの事例が報告されているものの (Baria and Green, 1986; House, 1987; Talebi and Cornet, 1987; Beauce *et al.*, 1995, Jupe *et al.*, 1992;

* 平成16年 6 月17日、平成16年度石油技術協会春季講演会開発・生産部門シンポジウム「油ガス田資産価値最大化のためのとりくみ」で講演 This paper was presented at the 2004 JAPT Development and Production Technology Symposium entitled “Challenge for maximizing oil and gas assets” held in Sapporo, Hokkaido, Japan, June 17, 2004.

** 石油資源開発(株) Japan Petroleum Exploration Co., Ltd.

Wallroth *et al.*, 1996, Sasaki, 1998), 天然ガス貯留層での適用例はわずかである (Rutledge and Phillips, 2003; Jupe *et al.*, 2000)。そこで、石油資源開発(株)は、天然ガス貯留層での AE 誘発の可能性を探るために、2003年10月に勇払フィールドにおいて注水および AE 計測実験を実施した。これは国内の油ガス田で試みられた初の AE 計測実験である。その結果、震源解析が可能な高品質の AE を多数計測し、AE 法のフィジビリティを示すことに成功した。

本論文では、まず注水に伴う AE 発生メカニズムについて岩石力学的側面から解説する。次に、勇払油ガス田で実施した AE 誘発実験の結果を報告する。そして、その結果に基づき注水履歴と AE 活動の相関性、AE 活動に伴う注水特性の変化、AE 震源位置と既存フラクチャーとの関係について論じる。さらに、観測事実を理論的に解釈するために、数値シミュレーションを通じた考察を行う。数値シミュレーションにおいては、せん断型水圧破碎シミュレータ「SHIFT」を紹介するとともに、圧力マッチング計算を行い、フラクチャー型貯留層における注水時のダイナミクスを考察する。

2. 注水に伴う AE の発生メカニズム

AE (acoustic emission) とは材料力学の分野で「物質の破壊や変形にともない放出される弾性波」と定義されている現象である。現象の舞台が地下の岩盤となり、その規模が大きくなると微小地震と呼ばれることもある。AE と微小地震は発生メカニズムや伝播特性などの物理的現象において区別することは困難であり、近年は地震学的な微小地震法と工学的な AE 法が融合し、地下の AE 法として発展している。AE 法は遠隔計測であるため、岩体内部の情報を得ることができる。任意の領域を計測することはできないが、活性な位置が自ら判明されるという特徴を有している。このような特徴から、鉱山における崩落や山はねの検知・予知 (鈴木ほか, 1962)、地熱井における水圧破碎時のフラクチャーマッピング技術、石油井、ガス井における生産モニタリング技術などとして適用分野が拡大されている。

地下の AE 法は近年急速な進歩を遂げているが、その背景では新しいタイプの地熱発電システムである高温岩体 (hot dry rock: HDR) の開発が大きく貢献している。高温岩体貯留層では、地下のフラクチャーシステムが熱水の循環経路として、熱交換面として、また貯留空間としての役割を担っているため、高温岩体開発の要素技術は、地下のフラクチャーシステムの解明という大きな課題と常に対峙しながら発展してきたといえる。そのなかであって、AE 法は、水圧破碎で形成 (あるいは活

性化) されるフラクチャーの位置や進展状況をモニターし、貯留層の最終形状を評価するための最も優れた計測法として位置づけられている。

さて、注水にともなってなぜ AE が発生するか。そのメカニズムについて近年理解が進んできた。Hubbert and Willis (1957) による理論的研究によれば、等方均質な岩体の中に掘削された坑井における水圧破碎ではフラクチャーは引張り破壊で発生し、最小主応力軸に直交する方向に形成されるとされている。しかし、実際に水圧破碎に伴って観測される AE の震源メカニズムは、この理論から導かれる破壊メカニズムとは一致しないことが多い。引張り型のメカニズムを示す AE が観測されるのは、実験室で行う均質なサンプルを用いる場合などに限られ、野外実験ではせん断型破壊の震源メカニズムを示すものがほとんどである (Pearson, 1981; Pine and Batchelor, 1984; Tezuka and Niitsuma, 2000)。実際の地下の岩盤にはフラクチャーなどの弱面が潜在し、これによって岩盤の破壊挙動がコントロールされることに起因している。

注水によって誘導されるフラクチャー面に沿った挙動には、ジャッキング (jacking: 開口) とシェアリング (shearing: せん断すべり) の2種類がある。Fig.1 は注水時のフラクチャー面に働く力関係をモール円で表現したものである。フラクチャー面に作用する2成分の力 (有効垂直応力: $S_n - P_p$ とせん断力: τ) は、フラクチャーの向きによって異なるが、いずれも Fig. 1 に示す3つのモール円に囲まれたメッシュ領域にプロットされる。ジャッキングの起こる条件は、有効垂直応力がゼロ以下になることで、次式で表される。

$$S_n - P_p \leq 0$$

ここで、 S_n は地殻応力によって生じるフラクチャー面にかかる垂直応力、 P_p はフラクチャー内の水圧であ

Fig. 1 Mohr diagram illustrating behaviors of fracture with elevating pore pressure.

る。 S_n はフラクチャーの方向によって異なるが、最小主応力軸に垂直なフラクチャー面 (A) が最小の値をとり、このときにジャッキング条件を満たすための水圧は S_3 、すなわち最小主応力値と等しくなる。逆にいえば、ジャッキングを生じさせるためには少なくとも最小主応力以上の水圧が必要になる。

一方、シェアリングとはフラクチャー内圧力の上昇によってフラクチャー面間の摩擦係数が低下することによって生じる、せん断すべりのことである。シェアリングの起こる条件は次式で表される。

$$\tau \geq \mu (S_n - P_p)$$

τ は地殻応力によってフラクチャー面に生じるせん断力、 μ はフラクチャー面間の摩擦係数である。Fig. 1 中の斜めの直線は Mohr-Coulomb ラインと呼ばれる傾き μ の直線であり、このライン上あるいはこのラインより左側の領域がシェアリング条件を満たしている。

ところで、Fig. 1 の X 軸は有効垂直応力 ($S_n - P_p$) であるから、注水によって間隙圧力が上昇するとモール円は同じ形を保ったまま X 軸上を左へ平行移動することになる。例えば、自然状態で図中の B に位置する応力状態となるフラクチャーがあるとすると、自然状態では Mohr-Coulomb ラインの右に位置し、シェアリング条件を満たさないが、注水とともに間隙圧力が上昇すると、いずれ Mohr-Coulomb ラインと接し、せん断条件を満たすようになる。せん断条件を満たしてもなお間隙水圧が上昇を続けると、B が Y 軸 ($S_n - P_p = 0$) に接しジャッキング条件を満たすことになる。間隙圧力が上昇する過程で、ジャッキングとシェアリングとでどちらが先に条件が満たされるかといえば、明らかにシェアリングである。A 点のようにフラクチャー面が最小主応力と直交するような特別な場合を除き、すべての向きのフラクチャーはジャッキングに先行してシェアリング条件に達する。

シェアリングは弾性波を発する。また一方で、フラクチャー面間の浸透性を改善する働きがある。花崗岩のような硬質の岩盤では、フラクチャー面がすべることによって、フラクチャー表面の凹凸が互いに支えあって、間隙が保持される (self-propping)。しかも、それは不可逆的なプロセスで、いったん生じると間隙圧力が低下しても再び戻ることはない。ジャッキング (開口挙動) によっても浸透性は改善されるが、こちらは間隙水圧の低下に伴って再び閉口し、浸透性がもとに戻る可逆のプロセスである (Ito and Hayashi, 2003)。

3. 勇払油ガス田における AE 誘発実験

AE が発生するメカニズムの主要な部分は上記のとお

りであるが、水圧破碎によって地熱貯留層で数多くの AE が発生する背景には、水圧の効果に加えて、温度の効果 (すなわち高温の岩体に低温の流体を注入することによる冷却効果) が強く働いたのではないかと意見もある。また、天然ガス貯留層では、フラクチャー内を満たしている流体が水に比べて圧縮性の大きなガスであることから、注水によって AE が誘発されるか否かを疑問視する声もあった。そこで、ガス飽和した貯留層における AE 誘発の可能性を確認するために、勇払油ガス田において AE 誘発注水実験を実施した。

3.1 勇払油ガス田の概要

勇払油ガス田は北海道苫小牧市に位置する。石油資源開発㈱によって 1989 年に発見され、1996 年に操業を開始した国内最大級の油ガス田である (寒河井・青山, 1998)。地下層序は上位より第四系 + 荷葉層、平取 + 軽舞層、滝の上層、南長沼層、幌内層、石狩層群夾炭層、石狩層群礫岩層および白亜系花崗岩類である。古第三系以下が南北～北東-南西走行の正断層活動によってホルスト状の高まりを形成しており、この頂部付近に油ガス田が成立している。本ホルスト構造は後期漸新世～前期中新世の伸張性の応力場で形成されたものであり、この時期にホルスト内に分布する石狩層群礫岩層と花崗岩類に多くのフラクチャーが発達し、花崗岩類の陸上風化と合わせて貯留層ポテンシャルを獲得したと考えられる (栗田・横井, 2000; 国安・山田, 2004)。

勇払地域には既に 14 本の坑井が掘削されており、このうちの 10 本で FMI 検層が行われている。これらの坑壁イメージから読み取った豊富なフラクチャー情報と、坑井の産出特性に関するスタディによって、両者の間には重要な関係が成り立っていることがわかってきた。すなわち、良好な産出が得られたテスト区間には、突出した広い開口幅のフラクチャー (メガフラクチャー) が存在し、これが存在しなければ、たとえ中小の開口幅を持つフラクチャーが数多く存在しても、良好な生産性は得られないことが明らかとなった (松裏ほか, 2003)。その概念モデルは Fig. 2 に示すとおりである。また、一般にメガフラクチャーは、単に高い浸透性が期待できるだけでなく、面的な広がりも大きいと考えられ、広範囲な集ガスエリアを獲得している可能性がある。したがって、メガフラクチャーは坑井の生産性を左右する重要な要素である。しかし、その一方でメガフラクチャーの存在の不確定性が、産出能力の極めて低い坑井を生んでしまう原因にもなっている。

Fig. 2 の中で、メガフラクチャーに遭遇していない坑井 B は産出能力が低い坑井として描かれているが、何らかの手段によって近隣のメガフラクチャーに導通さ

Fig. 2 Conceptual model of fracture system in the Yufutsu oil/gas reservoir.

せることができれば、高い産出能力を獲得することができるのである。AE 発生のもととなる既存フラクチャーのせん断すべりは、坑井とメガフラクチャーを結ぶネットワークの造成と拡大に、貢献する可能性を秘めている。

3.2 実験概要

本実験の目的は、AE法によるフラクチャー分布計測の可能性と、せん断すべりの誘発による生産能力向上の可能性を探ることである。実験に用いた地上装置、坑内計測機器等を含む実験概念図を Fig. 3 に示す。注水井は西沼ノ端 SK-1 D 井、加圧区間は深度4,396m～4,995 m のスリットアンカー仕上げ部である。比重 1.18 のブラインを280 kl のタンクに用意し、注水には HT-400 セメンティングポンプ 2 台を使用した。実験の手順は次のとおりである。

- ・坑内温度・圧力プロファイル測定
- ・ガス放散および坑内ブライン置換
- ・第 1 回ステップレート注水 (0.5 BPM～3.0 BPM まで、0.5 BPM 刻みで各ステップ30分間)
- ・高レート連続注水 (注水レート 3 BPM, 約 5 時間)
- ・注水停止, フォールオフ圧力監視 (約12時間)
- ・第 2 回ステップレート注水 (第 1 回ステップレート注水と同じ)
- ・坑内温度・圧力プロファイル測定

坑内温度・圧力プロファイル測定はメモリ型の圧力・温度ゲージで行い、注水実験期間中はガス層中央深度にあたる4,700 m に停留させ、坑内圧力と温度を連続記録した。また、全実験期間中、以下に述べる AE モニタリングネットワークによって AE 活動を計測した。さらに、AE 観測点のキャリブレーションのために、西沼ノ

Fig. 3 Schematic diagram of the hydraulic injection and AE monitoring experiment.

端 SK-1 D の深度4,850 m と4,450 m でバックオフツール (火薬量500 g) を用いたシューティングを実施した。

3.3 AE 計測ネットワーク

実験の目的のひとつである「AE 法によるフラクチャー分布計測の可能性を探る」ためには、以下の 3 項目を確認する必要がある。

- ・注水による AE 発生の有無
- ・坑井内観測点の信号検出能力
- ・AE震源の位置と坑井沿いフラクチャーの関係

表 1 に AE 計測のために使用した坑井とセンサ、およびセンサ設置深度を示す。沼ノ端 SK-1 D は2,800 m にブリッジプラグが打たれているため、2,800 m が設置可能な最深の深度である。微小な AE 信号を検出するためにはなるべく深いことが望ましいとの判断から、深度 2,700 m～2,790 m の区間に30 m の間隔をあけてシュルンベルジェ社製 4 level アレー式 AE センサ (VSI) を設置した。一方、沼ノ端圧入井は、比較的浅い深度における AE 計測の可能性を探る目的で設けた観測点である。セメントボンドログの記録を参考に、セメンチング状況の良好な深度528 m に東北大学製 3 軸 AE ゾンデを設置した。観測井の配置および坑井軌跡を Fig. 4 に示す。注水区間からの位置関係を考えると、AE 計測ネットワークとしては決して理想的な配置とはいえない。しかし、現状において AE センサを設置できる近隣坑井はこの 2 坑井をおいてほかにはないため、震源決定精度の観点からは問題を含むものの、上記の目的を達成するた

Table 1 Wells and sensors for AE monitoring

Well Name	AE sensors	Depth (MD)
Numanohata SK-2 D	VSI-4 levels (Schlumberger)	2,700 m～2,790 m
Numanohata Disposal	3-axis AE sonde (Tohoku Univ.)	528 m

Fig. 4 Layout of AE monitoring network with well trajectories.

めには十分であると判断した。

3.4 実験結果

3.4.1 坑口圧力の変化と AE 発生状況

注水履歴と AE 発生状況を Fig. 5 に示す。図中の実線は注水レートと坑口圧力を示す。バーコード状の縦線は AE イベントの発生時刻と相対的のマグニチュードである。注水開始とともに坑口圧力は直線状に上昇し、坑口圧力が 33.0 MPa に達する段階で初めての AE イベントが発生した (2003/10/25 13:44:46)。その後、注水レートを上昇させる (ステップレート試験) と活発な AE 活動が観測された。ステップレート試験に引き続いて実施した連続注水期間 (3 BPM, 0.5 kl/min) には AE 活動がより活発となり、ピーク時の発生頻度は 15 分間に 50~60 イベントに達した。シャットイン後も、約 2 時間 AE 活動が続いた。第 2 回ステップレート注水では、

注水レート 1.5 BPM (0.24 kl/min) までは AE の活動は見られなかったものの、2.0 BPM (0.32 kl/min) に上昇させた段階で再開し、シャットイン後も 2 時間ほど活動が続いた。注水実験期間全体を通じて計測された AE イベントは約 450 個であった。

AE 波形の一例を Fig. 6 に示す。4 レベルのセンサで記録した波形を方向成分ごとに並べた表示である。波形からは P 波と S 波の到来を明瞭に読み取ることができる。P 波は Z 成分 (上下成分) に、S 波は Y, Z 成分 (水平成分) に顕著であり、信号が下方から入射していることがわかる。

3.4.2 AE 信号検出能力と AE 信号のマグニチュード

今回の実験では、沼ノ端 SK-2 D (深度 2,790 m ~ 2,700 m) に設置した VSI アレーで約 450 個の AE イベント

Fig. 5 Time histories of injection rate, injection pressure and AE activity.

Fig. 6 An example of AE signals recorded during the hydraulic injection experiment.

Fig. 7 Time history of AE magnitude.

ントが記録されたものの、沼ノ端圧入井（深度528 m）に設置した3軸 AE ゾンデでは信号が検出できなかった。モデル計算によれば、深度2,700 m 以浅に存在する

高インピーダンスの滝の上層による反射のために、深度600 m における AE 信号の振幅は深度2,800 m に対して24 dB 減衰すると見積もられていた。深度528 m の観測点において信号が検出できなかったのは、伝播経路における信号の減衰が予想どおり、あるいはそれ以上であったためと考えられる。

Fig. 7 に AE マグニチュードの経時変化を示す。横軸は2003/10/25 13:00からの経過時間、縦軸がAEマグニチュードである。計測されたAEのマグニチュードは $-1.7 \sim 0.1$ の範囲にある。興味深いことは、最大マグニチュードの包絡線が時間とともに大きくなっている点である。今回の注水実験は、第1回ステップレート注水、連続注水、そして第2回ステップレート注水の3つのフェーズに分かれているが、それぞれの注水期間における最大マグニチュードは、 $-0.2 \rightarrow 0.0 \rightarrow 0.1$ と徐々に増加している。これは、総注水量の増加に伴って加圧範囲が広がり、次第に大きなフラクチャーがせん断すべりを起こしていくプロセスを示すものと推察される。

3.4.3 AE震源位置とフラクチャー情報の比較

VSI ツールは4レベルのAEセンサを有しているものの、最大スペーシングが90 m しかないため、2 km 以上離れた注水地点から見ると、ほぼ1点観測とみなせる配置である。1点観測の場合、震源位置解析法として3軸ホドグラム法を用いるのが一般的であるが、Fig. 4 に示すように注水地点はVSI観測点のほぼ直下にあるために、解析される震源位置の誤差領域は下に凸の円弧

Fig. 8 Correlation of observed AE depth distribution with FMI fractures and temperature anomalies along the injection well.

上に広がり、水平方向の不確定性が大きくなる傾向がある。一方、深度方向に関しては震源距離によって強くコントロールされるため精度が高い。特に今回の実験では、2回のキャリブレーションシューティングによって震源距離が較正されており、信頼性が高い。そこで、今回の実験は注水量が少量であることから、記録されたAEは注水井のごく近傍で発生したものと仮定し、震源距離を坑井沿いの深度に換算して坑井沿いのフラクチャー情報との相関性を考察した。

検討結果を Fig. 8 に示す。左は坑壁イメージから抽出したフラクチャー情報、右は温度プロファイルのアノマリから推定した圧入流体の流出ゾーン、そして中央がAE震源深度（坑井沿い深度）の経時変化と深度ヒストグラムである。まず、AE震源は花崗岩層内で多く発生していることがわかる。また、AE深度ヒストグラムはFMIフラクチャー密度との相関がよく、そのピークは流出ゾーンの指標とも対応していることが読み取れる。このように、AE震源と既存フラクチャーの分布、そして流路との間に深い相関性が認められることから、AEは既存のフラクチャーに沿って発生したものであると推察される。すなわち、AE分布は既存フラクチャーの分布を反映しているものと解釈できる。

3.4.4 注水特性の評価

Fig. 5 の坑口圧力カーブを見ると、第1回ステップレート注水期間に1回と連続注水期間に1回、明瞭な圧力ブレークダウンが確認できる。連続注水期間を挟んで行った、2回のステップレート注水時の圧力カーブを比較すると明らかなように、連続注水によって同坑井の注水能力が改善されたことがわかる。Fig. 9 にステップ

レート注水時の注水流量とガス層中央深度圧力の関係を示す。このクロスプロット結果から注水特性の変化を以下のように解釈できる。

まず、前節で述べたように第1回ステップレート注水の0.5 BPM (0.08 kl/min) 注水時に急激な坑底圧力の上昇が観測されることから、初期注水特性は非常に悪いことがわかる。掘削直後のDST解析で推定されている0.3md・mという非常に小さい値と整合的である。

第1回ステップレート注水時の0.5 BPM から3 BPM (0.48 kl/min) までの圧力変化、および第2回ステップレート注水時の2.5 BPM (0.40 kl/min) から3.0 BPM までの圧力変化は、同じ傾きを持つ直線で近似でき、かなり大きな浸透性を示している。リークオフテストの結果から、ガス層中央深度での最小主応力値は80 MPa 前後と推定されていることを考慮すると、この直線の傾きは引張開口状態、あるいはフラクチャー面の垂直剛性による弾性的な開口状態にある、フラクチャーの浸透率を示していると考えられる。この浸透率はフラクチャーの可逆的な開口によるため、貯留層圧力がフラクチャー圧力以下になると失われる。直線のY切片(83 MPa)はフラクチャー閉塞圧力(closure pressure)を表している。この値は、最小主応力値の見積と比べると若干高い。一方、第2回ステップレート注水時の0.5 BPM から2.0 BPM (0.32 kl/min) までの圧力トレンド(傾き)は、第1回ステップレート注水の急な立ち上がりに比べて緩くなっており、浸透性が改善されていることを示している。この浸透性の改善は、フラクチャー閉塞圧力以下で認められるものであり、いわゆるせん断すべりによって獲得された不可逆的な改善であると解釈できる。

4. シミュレータによるAE誘発実験の考察

4.1 せん断型水圧破碎シミュレータ「SHIFT」の概要

AE誘発実験の結果を、せん断型水圧破碎シミュレータ「SHIFT」によって考察することを試みた。SHIFTは、注水による貯留層圧上昇に伴う既存フラクチャーの開口挙動と、それと連成した流体流動をシミュレートするソフトウェアである。主要機能として、①圧縮性2種流体流動開口析、②フラクチャーの複合型開口挙動(弾性開口、せん断開口)の解析、および③既存フラクチャーのせん断すべり(AE発生)判定などの機能を有している(玉川・手塚, 2004; Tezuka *et al.*, 2004)。シミュレーションは離散フラクチャーネットワーク(discrete fracture network: DFN)モデルをベースとして実施され、必要な入力パラメータは地殻応力場、流体・岩石物性、そしてフラクチャーに関するパラメータなどである。

Fig. 9 Cross-plots between injection rate and pressure at the center of the injection interval. Linear slopes represent injectivities of the well in conditions illustrated by the drawings.

Fig. 10 Flow chart of the simulation by using SHIFT

SHIFT の計算フローを Fig. 10 に示す。SHIFT は、時間ステップごとに DFN モデルを等価連続体モデルに変換した後、流体流動解析によって間隙圧力を求め、その間隙圧力に応じたフラクチャーの複合型開口挙動を解析する。フラクチャーが開口する場合は、モデルの中の圧力バランスが崩れるため、それが収束するまで流動解析と複合型開口挙動解析が繰り返される。両者が収束した段階で、次の時間ステップに進み、所望の注水が終了するまで計算が続けられる。

4.2 フラクチャー開口挙動の取り扱い

フラクチャーは注水による間隙圧力の上昇に伴い、①フラクチャー面の垂直剛性による弾性的開口、②引張型開口そして、③せん断すべりによる開口の3様式の開口挙動を示すと考えられる。①と②は可逆的な開口挙動、③は不可逆的な開口挙動である。SHIFT では、これらの挙動に伴う複合的な開口幅の変化を、フラクチャー面に働く有効垂直応力の関数とし取り扱う。Willis-Richards *et al.*, (1996) によればフラクチャー開口幅 a_p は以下の式によって表される。

$$a_p = \beta \cdot (a_i + a_s + a_{op}) \quad (1)$$

ここで、 a_i 、 a_s 、 a_{op} はそれぞれ弾性開口、せん断開口、引張り開口であり、 β は有効開口幅係数である。さらに、弾性開口は以下で表現される。

$$a_i = \frac{a_l}{1 + 9 \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_{nref}}} \quad (2)$$

ここで、 a_l は坑壁イメージから求められる開口幅、 σ_{nref} は90%閉塞応力である。90%閉塞応力は、フラクチャー面に垂直応力がかかっていない時の開口幅を10分の1まで閉塞されるのに必要な有効垂直応力である。また、せん断開口は $\tau \geq \mu \sigma_n$ の条件下において次式で表現される。

$$a_s = \frac{U \cdot \tan(\phi_{dil})}{1 + 9 \cdot \frac{\sigma_n}{\sigma_{nref}}} \quad (3)$$

$$U = \frac{48 \cdot (1 + \varepsilon) \cdot R \cdot \tau}{7 \cdot \pi \cdot E}$$

ここで、 U はせん断すべり量、 R はフラクチャー半径、 E はヤング率、そして ϕ_{dil} はせん断膨張角である。せん断膨張角とは、せん断すべり量に応じた開口幅の増加割合を示す量である。最後に、引張り開口は $\sigma_n \leq 0$ の条件下で次式によって表される。

$$a_{op} = \gamma \cdot \frac{R}{E} \cdot |\sigma_n| \quad (4)$$

ここで、 γ は引張り開口係数である。90%閉塞応力やせん断膨張角などのパラメータ値は、室内実験で求めることが困難なため、観測圧力データのマッチングを通して推定することになる。Fig. 11 は初期状態で30 MPaの有効垂直応力がかかっているフラクチャーの注水時における挙動を模式的に表現したものである。図中の矢印は注水が開始され、せん断すべりを経て弾性開口した後に注水が終了する過程を示している。

4.3 フラクチャーネットワークモデル

SHIFT の入力となる DFN モデルの東西断面浸透率

Fig. 11 Pattern diagram for the treatment of fracture aperture in SHIFT simulations, in which a fracture aperture is expressed as a function of effective normal stress.

Fig. 12 East-West cross-section of the permeability distribution of the Yufutsu DFN model and the subsection (rectangle) used for the SHIFT simulation.

分布図を Fig. 12 に示す。勇払地域の11本の坑井で得られた坑壁比抵抗イメージから、フラクチャーの各種統計量（開口幅分布、大きさ分布、傾斜・方向分布および空間分布）を抽出し、その統計量に基づいて作成したものである（松裏ほか, 2003；Tamagawa *et al.*, 2002）。計算に用いたモデルは、同モデルから注水井周辺のフラクチャーネットワークを切り出したセクターモデル（四角枠で示す部分）である。セクターモデルは一辺が1.5 km の立方体で、その領域内に半径18 m～500 m のフラクチャー約43万個を含んでいる。後述のシミュレーションでは、注水効果が及ぶ範囲に応じてセクターモデルの大きさを適宜変更しており、最終的には Table 2 に示すように 212 m×212 m×700 m の大きさまで絞り込んでいる。

4.4 圧力挙動マッチング

圧力マッチング作業では、まず、弾性開口挙動が顕著に観測された第1回ステップレート注水時の圧力変化を、90%閉塞応力パラメータによりマッチングすることを試みた。その結果、最小主応力近傍での急激な弾性開

口挙動を再現するためには、90%閉塞応力を10 MPa 前後に設定する必要があることが明らかになった。その後、連続注水および第2回ステップレート注水時の圧力

Fig. 14 Comparison of simulated AE locations with the observed AE depth histogram.

Fig. 13 Result of pressure matching simulation. The observed pressure (red curve) and simulated pressure (blue curve) show a good matching. Red and blue bars represent observed and simulated and AE event, respectively.

Fig. 15 Simulated permeability distribution around the injection well. Left: before injection, Right: after injection.

Table 2 Parameters used for the matching simulation by SHIFT

Volume for simulation	
X direction [m]:	-206~206
Y direction [m]:	-206~206
Depth [m]:	-4,200~-4,900
Specification of injection well	
Location (X, Y):	(0,0)
Injection zone [m]:	-4,300~-4,800
Rock properties	
Young's modulus [GPa]:	50
Poisson's ratio:	0.25
Total porosity:	0.006
Rock fracture properties	
Static friction angle [deg.]:	38.66
Dynamic friction angle [deg.]:	11.31
Water properties	
Density [kg/m ³]:	$4.9075 \times 10^{-7} \times \text{Pressure [Pa]} + 1,180$
Viscosity [Pa · s]:	2.5700×10^{-4}
Gas condensation properties	
Density [kg/m ³]:	$2.2694 \times 10^{-6} \times \text{Pressure [Pa]} + 237$
Viscosity [Pa · s]:	5.0829×10^{-4}

Table 3 Optimum parameters obtained through the pressure matching simulation

In-situ stress state	
Vertical stress [MPa]:	$0.0256 \times \text{Depth [m]} - 11.8$
Maximum horizontal stress [MPa]:	$0.0314 \times \text{Depth [m]} + 8.76$
Minimum horizontal stress [MPa]:	$0.0153 \times \text{Depth [m]} + 8.76$
Complex fracture opening properties	
Shear dilation angle [deg.]:	0.02
90% closure stress before shearing [MPa]:	10
90% closure stress after shearing [MPa]:	100
Properties of double porosity model for fluid flow analysis	
Fraction of fracture porosity to the total porosity:	0.25
Matrix permeability [md]: 1×10^{-5}	1×10^{-5}

変化をせん断膨張角，全孔隙率に対するフラクチャー孔隙率の割合，およびマトリックス浸透率を調整してマッチングすることを試みた。しかし，連続注水時の圧力については，ある程度のマッチングが得られるものの，第2回ステップレート注水時については，これらのパラメータを調整するだけでは圧力変化を十分に再現することができなかった。観測された第2回ステップレート注水時の圧力は，第1回ステップレート注水時の圧力に比べて明らかに低下しているにもかかわらず，シミュレーション結果では逆に注水圧力が上昇する結果となった。シミュレーション上では，連続注水により坑井近傍領域

のガスが圧縮性の低い水に置換されること，さらに坑井近傍領域の平均圧力が上昇することによって，注水圧力も高くなる傾向がある。実際には，シミュレーションに見られる上昇傾向を打ち消すだけの浸透性改善効果があったものと推察される。

シミュレーション上で浸透性改善効果を大きくするためには2つの方法がある。1つはせん断膨張角を大きく設定し，せん断すべりによるフラクチャー開口幅の増加割合を大きくする方法，もうひとつは，90%閉塞応力を大きく設定し，連続注水後の貯留層圧低下に伴うフラクチャーの弾性的閉口挙動を小さくする方法である。しか

し、前者の場合には、注水圧力が高い状態、つまりフラクチャーの有効垂直応力が低い状態でのフラクチャー開口幅も大きくなり、連続注水中に観測された高い圧力を再現できなくなる。また、後者の場合には、せっかくよい一致を見せている第1回ステップレート注水時の圧力を再現できなくなってしまう。このジレンマを克服し、連続注水時の高圧力状態と、第2回ステップレート注水時の圧力低下を再現するためには、せん断すべりを起こしたフラクチャーに限って弾性的閉口挙動を小さくする必要がある。そこで、せん断すべりを起こしたフラクチャーに対してのみ90%閉塞応力を大きく設定することで、マッチングを試みた。

Fig. 13 に圧力マッチング結果を示す。せん断すべり後のフラクチャーに対する90%閉塞応力を、それまでの10倍にあたる100 MPa に設定することで、第1回ステップレート注水時の初期注水特性、弾性的フラクチャー開口時の注水特性、連続注水時の注水特性、および第2回ステップレート注水時に見られるせん断開口挙動後の注水特性をほぼ再現することができた。Table 2 に圧力マッチングで得られたパラメータ値を示す。せん断すべりを起こしたフラクチャーに対して100 MPa の90%閉塞応力を設定することは、これらのフラクチャーを閉じにくくしていることにほかならない。渡邊ほか(2004)が行った封圧下におけるフラクチャーの透水実験の結果では、かみ合わせ変位のないフラクチャーの浸透率は、封圧の増加に伴って著しく低下するが、3mm以上のかみ合わせ変位を伴うフラクチャーの浸透率は、封圧が増加してもほとんど変化しないことが示されている。90%閉塞圧力の取り扱い、この定性的なフラクチャーの挙動をシミュレーション上で表現したものである。

4.5 AE 活動のシミュレーション結果

Fig. 13 には AE 活動のシミュレーション結果も示されている。第2回ステップレート注水時を除き、AE イベントヒストリーはよく再現されていると考えられる。同シミュレータでは、AE 挙動が持つカイザー効果を表現するために、いったんすべりを起こしたフラクチャーは、それ以降間隙圧力が上昇してもせん断すべりが生じないように設定されている。ところが、実際はフラクチャー近傍の応力再配分や摩擦係数の変化などによって、フラクチャーが再活動することは十分に考えられる。SHIFT はそういった現象をシミュレートできる設計にはなっていない。今後の改良課題である。

Fig. 14 に圧力マッチング時の AE 震源位置シミュレーション結果を示す。シミュレーション結果によると、AE は圧入坑井を中心に半径約70m の範囲内で発

生している。礫岩層では比較的少なく、花崗岩層内で多く発生し、分布領域も広い。観測された AE も花崗岩層内に集中して発生しており、シミュレーション結果と調和的である。

4.6 浸透性改善領域の評価

Fig. 15 にシミュレーションによって得られた注水実験前後の浸透率分布断面を示す。坑井近傍約50m の範囲内で明らかに浸透性が改善されており、改善領域は主に花崗岩中に広がっていることがわかる。この限られた領域では、注水実験前に比べて数十倍～百倍程度浸透性が改善されたと推定される。

5. ま と め

勇払油ガス田において、AE 法によるフラクチャー空間分布計測の可能性と、せん断すべりの誘発による生産能力向上の可能性を探ることを目的として、西沼ノ端 SK-1D 井における注水試験、AE 計測と解析、そして数値シミュレーションを実施した。これらのスタディを通じて得られた主な成果は以下のとおりである。

- ・注水に伴って AE が発生することを確認した。最初の AE イベントは注水圧力が最小主応力値付近に達した時点で発生し、全体で約450個のイベントを記録した。
- ・深度2,700m の観測点では良質の AE を計測できるものの、深度528m においてはほとんど検出できなかった。
- ・AE 震源は注水区間(4,400m～5,000m) 全域におよぶが、大部分はフラクチャーの多く存在する花崗岩層内に分布することがわかった。また、AE 震源と既存フラクチャーの分布、そして流出ゾーンとの間に強い相関性が認められたことから、AE は既存フラクチャーに沿って発生しているものと推察された。
- ・せん断型水圧破碎シミュレータ「SHIFT」を用いて、西沼ノ端 SK-1D 井における注水実験時の圧力挙動と AE 挙動を、ほぼシミュレートすることができた。シミュレーション結果によると、浸透性改善の広がり、坑井を中心とした約50m の範囲で、同領域において浸透性は注水前に比べて数十倍～百倍程度改善されたと推定される。

以上の成果により、勇払油ガス田においては、大規模な注水によって広い範囲で AE を誘発させ、フラクチャー情報を抽出できる可能性があることが示された。ただし、今回の実験では AE 観測点配置が限られていたために、震源位置解析精度は十分とはいえない。より有効なフラクチャー情報を抽出するためには、深部観測点の数を増やし、AE 計測の高精度化を図る努力が必要である。高精度の AE 計測とせん断型水圧破碎シミュレータ

「SHIFT」によるモデリングを併用することで、貯留層内のフラクチャー構造がより明らかになるものと期待できる。

謝 辞

本稿は、平成15年度石油天然ガス金属鉱物資源開発機構 (JOGMEC) 委託調査「AE 法によるフラクチャー分布計測 (フィージビリティスタディ)」の成果をまとめたものである。データの公表を許可していただいた JOGMEC および石油資源開発株式会社に謝意を表する。

AE 誘発注水実験を遂行するにあたっては、石油資源開発株式会社札幌鉱業所および勇払鉱場の諸氏にご尽力いただいた。東北大学環境科学科の浅沼宏助教授、森谷祐一講師ならびに学生諸氏、室蘭工業大学情報工学科の永野宏治助教授、シュルンベルジュ株式会社のかたがたには AE 計測でご努力いただいた。また、東北大学流体科学研究所の伊藤高敏助教授には AE 発生メカニズムに関してご教示いただいた。株式会社リッチストーンの渡辺公雄博士にはシミュレーションに関するさまざまなご教示いただいた。以上のかたがたに深く御礼する次第である。

SI 単位換算係数

$$\text{bbl} \times 1.589874 \quad E-01 = \text{m}^3$$

$$\text{md} \times 9.86923 \quad E-16 = \text{m}^2$$

引 用 文 献

- Baria, R., and Green A. S. P., 1986: Seismicity induced during a viscous stimulation at the Camborne School of Mines hot dry rock geothermal energy project in Cornwall, England, in *Progress in acoustic emission*, Yamaguchi, K., Aoki, K. and Kishi, T. Eds., *The Japanese Soc. for NDI*, 407-429.
- Beauce, A., Jones, R., Fabriol, H., and Hulot, C., 1995: Seismic studies on the Soultz HDR Project (France) during Phase IIa. *Geothermal Science and Technology*, **4**, 253-272.
- House, L., 1987: Locating Microearthquakes Induced by Hydraulic Fracturing in Crystalline Rock. *Geophys. Res. Lett.*, **14a**.
- Hubbert, M. K. and Willis, D. G., 1957: Mechanics of hydraulic fracturing: *Trans. AIME*, **210**, 153-168.
- Ito, T. and Hayashi, K., 2003: Role of Stress Controlled Flow Pathways in HDR Geothermal Reservoirs. *Pure and Applied Geophy.*, **160**, 1103-1124.
- Jupe, A. J., Green, A. S. P., and Wallroth, T., 1992: Induced microseismicity and reservoir growth at Fjallbacka hot dry rocks project, Sweden. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst.*, **29**, 343-354.
- Jupe, A., Jones, R., Wilson, S. and Cowles, J., 2000: The role of microearthquake monitoring in hydrocarbon reservoir management. SPE 63131, presented at the 2000 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, U.S.A.
- Michaud, G., Leslie, D., Drew, J., Endo, T. and Tezuka, K., 2004: *SEG Int. Expo. & 74th Annual Meeting*, in press.
- Pearson, C., 1981: The relationship between microseismicity and high pore pressure during stimulation experiments in low permeability granitic rocks. *J. Geophysical Res.*, **86**, 7855-7864.
- Pine, R. J. and Batchelor, A. S., 1984: Downward migration of shearing in jointed rock during hydraulic injections. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* **21** (5), 249-263.
- Rutledge J. T. and Phillips, W. S., 2003: Hydraulic stimulation of natural fractures as revealed by induced microearthquakes, Carthage Cotton Valley gas field, east Texas. *Geophysics*, **68** (2), 441-451.
- Sasaki, S.: Characteristics of microseismic events induced during hydraulic fracturing experiments at Hijiori hot dry rock geothermal energy site, Yamagata, Japan, *Tectonophysics*, **289**, (1998), 171-188.
- Talebi, S., and Cornet, F.H., 1987: Analysis of the microseismicity induced by a fluid injection in a granitic rock mass. *Geophysical Research Letters*, **14** (3), 227-230.
- Tamagawa, T., Matsuura, T., Anraku, T., Tezuka, T. and Namikawa, T., 2002: Construction of Fracture Network Model Using Static and Dynamic Data. SPE77741 presented at the 2002 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, U.S.A.
- Tezuka, K. and Niitsuma, H., 2000: Stress estimated using microseismic clusters and its relationship to the fracture system of the Hijiori hot dry rock reservoir. *Engineering Geology*, **56**, 47-62.
- Tezuka, K., Namikawa, T., Tamagawa, T., Day-Lewis, A., and Barton, C., 2002: Roles of the fracture system and state of stress for gas production from the basement reservoir in Hokkaido, Japan. SPE Gas Technology Symposium, Calgary, SPE 75704.
- Tezuka, K., Tetsuya, T. and Watanabe, K., 2004: Numerical simulation of hydraulic shearing and related AE activity in fractured gas reservoir. The 10th formation evaluation symposium of Japan, Proceedings, paper A.
- Wallroth, T., Jupe, A. J., and Jones, R. H., 1996: Characterization of a fractured reservoir using microearthquakes induced by hydraulic injections. *Marine and Petroleum Geology*, **13** (4), 447-455.
- Willis-Richards, J., Watanabe, K. and Takahashi, H., 1996: Progress toward a Stochastic Rock Mechanics Model of Engineered Geothermal System. *J. Geophys. Res.*, **101**, 17481-17496.
- 栗田裕司・横井 悟, 2000: 中央北海道南部における新生代テクトニクスの変遷と油田構造形成. 石技誌, **65**, 58-70.
- 国安 稔・山田泰広, 2004: 中央北海道南部地域の深部構造. 石技誌, **69**, 131-144.
- 寒河井正・青山栄享, 1998: 最先端技術と新しい発想による北海道勇払の天然ガスおよびコンデンセートの開発. 石技誌, **63**, 105-110.
- 松裏達彦・手塚和彦・玉川哲也, 2003: 静的, および動的データを用いたフラクチャーモデリング. 石技誌, **68**, 479-488.
- 渡邊則昭・平野伸夫・土屋範芳・玉川哲也・手塚和彦, 2004: ゴム弾性封圧装置を用いた岩石き裂の透水性評価. 平成16年日本地熱学会秋季大会, 講演要旨集.