及川 寧 己¹ 山口 勉²
松 永 烈³ 佐藤 嘉晃⁴

Estimation of In-situ Stress State of Hijiori Hot Dry Rock Site using DSCA

by Yasuki OIKAWA¹, Tsutomu YAMAGUCHI¹
Isao MATSUNAGA¹ and Yoshiteru SATO²

1. National Institute for Resources and Environment, AIST, MITI, Onagawa, Tsukuba 305
2. New Energy and Industrial Technology Development Organization

Though in-situ stress state is one of the key factors for development of hot dry rock (HDR), a reliable method to estimate the stress state has not been established. The depth and the high temperature prevent us to apply a conventional method of in-situ stress measurement, such as a strain relief method or a hydraulic fracturing method. We have tried to estimate the stress state of an actual HDR reservoir, located in Yamagata prefecture, using DSCA (Differential Strain Curve Analysis). DSCA is one of new methods of stress measurement, based on a laboratory work for an oriented core. We compared the results of DSCA to phenomena reflecting in-situ stress state of the reservoir and results obtained by other stress measuring methods applied in that field. Through the comparison, we found that the DSCA results of principal stress directions generally matched with a stress state that controlled the direction of the actual HDR reservoir.

KEY WORDS : In-situ Stress, Core, DSCA, Stress Measurement, Geothermal Energy, Hot Dry Rock

1. はじめに

高温岩体地熱エネルギーは、未利用の地熱資源の一つである。そのポテンシャルは非常に大きく 20 年間で総計 3,000 万 kW 弱の発電が可能との試算¹⁾もあり、地熱エネルギー開発の将来をになうものと期待されている。高温岩体地熱エネルギーを開発するために、現在のところ開発の対象となる岩盤に水圧破砕法を用いて形成されたき裂系で構成される人工貯留層を造成し、それと地表の間で強制的に水を循環させて熱エネルギーの抽出・利用を行うことが最適と考えられている。開発の対象となる岩盤の地圧は断層等の天然のき裂系とならんで水圧破砕によって形成されるき裂系の方向と規模に大きな影響を与えると考えられる²⁾。また、地下のき裂内の水の流れの挙動は、き裂面の状態とき裂面に直交する方向の地圧に大きく影響されると考えられる³⁾ことから、開発の対象となる岩盤の地圧は循環時の抽熱挙動予測においても重要な要因であり、これを精度よく把握することが高温岩体地熱エネルギーを開発する上で不可欠である。しかしながら地熱開発の対象となる地域の 3 次元的地圧の計測は、地下深部では温度条件が厳しいこともあって、有効な地圧計測手法は確立していない。

近年、地下深部にも簡便に適用可能な地圧計測手法として、地下で採取した岩石コアを用いて原位置の地圧を評価する方法が注目されている⁴⁾。筆者らは、そのような方法の一つである DSCA (Differential Strain Curve Analysis, 差ひずみ曲線解析)⁵⁾を、山形県にある肘折高温岩体実験場において人工貯留層を造成した岩盤より採取した岩石コアに対して適用し、貯留層周辺の地圧評価を試みたので報告する。

2. DSCA による 3 次元地圧評価

2-1 DSCA の概要

微小き裂(クラック)を含む岩石に周圧を加えていくと、周圧が大きくなるにつれてクラックは徐々に閉じていく。あるクラックが完全に閉じてしまえば、そのクラックは岩石の変形挙動に影響を及ぼさなくなるので、岩石内部のほとんどすべてのクラックが閉塞するような大きさの周圧下においては、岩石の変形挙動はクラックを含まないマトリクス部の変形挙動とみなせる。このような条件下の岩石の変形挙動を基準とし、まだクラックが多数開口しているような周圧下の変形挙動と比較することによって、その岩石内部のクラックに関する情報を抽出することができる。DSCA はこのクラックの情報をを用いて岩石が地下において被っていた原位置応力を推定する方法である。ここではクラックと原位置において被っていた地圧との間に以下のような仮定を設けている。

(1) 地下において安定した状態にあった岩石がコアリングに伴う応力解放の過程で応力解放の大きさ、すなわち原位置地殻応

* 1995 年 1 月 26 日受付 6 月 1 日受理

1. 正会員 資源環境技術総合研究所地殻工学部地殻エネルギー研究室
2. 正会員 工博 資源環境技術総合研究所地殻工学部地殻エネルギー研究室
3. 正会員 資源環境技術総合研究所地殻工学部地殻エネルギー研究室長
4. 正会員 新エネルギー・産業技術総合開発機構地熱技術開発室

〔著者連絡先〕 FAX 0298-58-8508 (資環研・地殻工学部)

キーワード: 地圧, コア, DSCA, 応力測定, 地熱, 高温岩体

Fig. 1 Typical pressure-strain curve.

力の大きさに比例した密度のほぼ均一な大きさのクラックが各主応力軸に垂直に生ずる。

(2) 応力解放時に生じたクラックが岩石の変形挙動に及ぼす影響は、その他の要因（例えば先在き裂や地下と地上との温度差によって生ずるクラック）の変形挙動に及ぼす影響と比較して十分大きい。

(3) 地下において安定した状態にある岩石は等方的な弾性的性質を持つ。

DSCA では周圧を加えた際に得られる周圧－ひずみ線図をもとに地圧を求める。なお、3 次元的な地圧を評価するためには、少なくとも互いに平行でない 6 方向以上の方向について計測を行う必要がある。Fig. 1 は岩石試料に周圧を加えた場合に得られる典型的な周圧－ひずみ線図である。DSCA における周圧－ひずみ線図の解釈方法は大きく 2 つに分類できる。山口ら⁶⁾はそれらをおのこのコンプライアンス法、ギャップ法と呼んで区別した。前者は周圧－ひずみ線図の勾配を用い、後者は周圧－ひずみ線図の接線のひずみ軸との切片を用いる。コンプライアンス法は、Strickland ら⁵⁾が提案した方法と志水ら⁷⁾が提案した方法の 2 つがある。Strickland ら⁵⁾の方法は低周圧時の周圧－ひずみ曲線の接線の勾配 (Fig. 1 の β_0) と高周圧時の周圧－ひずみ曲線の接線の勾配 (Fig. 1 の β_1) の差 ($\beta_0 - \beta_1$) が原位置での応力解放時に生ずるひずみの大きさに比例するとみなして、まず主ひずみの方向を求め、さらにフックの法則により主応力比を求める。志水ら⁷⁾の方法は ($\beta_0 - \beta_1$) の代わりに $\{(\beta_0 - \beta_1)/\beta_1\}$ を用い

る。また、ギャップ法としては、Dey ら⁸⁾が提案した方法と佐野ら⁹⁾が提案した方法がある。Dey ら⁸⁾の方法は高周圧時の周圧－ひずみ曲線の接線を低周圧側へ外挿した際のひずみ軸の切片の値 (Fig. 1 の η_0) を原位置での応力解放時に生ずるひずみの大きさとして主ひずみの方向を求め、主ひずみの比の値をそのまま主応力比の値とする。佐野ら⁹⁾の方法は周圧－ひずみ曲線を 2 階微分することによって得た単位増加周圧当たりの閉塞クラック幅を η_0 の代わりに用いる。コンプライアンス法で用いる周圧－ひずみ線図の勾配は、試料内のクラック密度を反映した量である。一方、ギャップ法で用いるひずみの大きさは、試料内のクラック幅を反映した量であり、物理的意味は必ずしも一致しない。本研究では、Strickland ら⁵⁾の方法を基礎とした解析を行っているため上記の分類ではコンプライアンス法に属する。

2・2 実験

今回用いた岩石コアは、肘折高温岩体実験場の HDR - 3 坑井および HDR - 1 坑井掘削時に定方位コアリングによって採取されたもので、いずれも採取時の 3 次元的な方向が特定されている。各コアの採取深度を Table 1 に示す。HDR - 3 コアは深度 1,641～1,903 m の区間から、HDR - 1 コアは深度 2,141～2,205 m の区間からそれぞれ採取されており、HDR - 3 坑井から得られた最深部のコアと HDR - 1 坑井から得られた最上部のコアとの深度差は約 240 m となる。なお、それぞれの坑井におけるコア採取深度を基準にすると水平間距離は約 60 m になる。また、HDR - 1 井は該当深度においてはほぼ垂直であるが、HDR - 3 井は鉛直軸から南東方向に約 10 度傾斜している。

コアからの試料の切り出し方を Fig. 2 に示す。HDR - 3 コアでは Fig. 2(a) に示すように、採取された円筒状のコアからその中心部を用いて軸方向に 2 個の試料が製作可能であった。一方、HDR - 1 井ではコアの採取率があまりよくなく、試料数を十分に確保するために Fig. 2(b) に示すように、採取された円筒状のコアから半径方向に 2 個の試料を製作した。コアから作成した試料はそれぞれが各辺 35～50 mm の立方体であり、Fig. 3 に示すように 6 面すべてに 5 mm または 10 mm 長のひずみゲージを互いに異なる方向に 4 枚ずつ、全部で 24 枚接着した。その後リード線をハンダ付けし、さらに周圧付加時に油が浸透しないようにシリコンゴムで全体を被覆した。

Fig. 4 に実験装置の概念図を示す。上述の試料を圧力容器に入れ、サーボ式加圧装置により周圧を $0.025 \text{ MPa} \cdot \text{sec}^{-1}$ の載

Table 1 Estimated principal stress ratios and their magnitudes.

Sample ID	Name of well	Depth (m)	p_m (MPa)	Ratio of principal stress magnitude*2			Principal stress magnitude*3		
				Max.	Int.	Min.	Max. (MPa)	Int. (MPa)	Min. (MPa)
HG90 - 2A	HDR - 3	1,641.2	12	1.00	: 0.75	: 0.57	49.4	37.2	28.2
HG90 - 3A*1	HDR - 3	1,717.4	18	1.00	: 0.70	: 0.59	49.3	35.5	28.9
HG90 - 4B*1	HDR - 3	1,718.4	20	1.00	: 0.89	: 0.76	43.2	38.5	32.8
HG90 - 5B	HDR - 3	1,741.8	12	1.00	: 0.79	: 0.56	41.4	32.7	23.4
HG90 - 7A*1	HDR - 3	1,758.1	6	1.00	: 0.96	: 0.77	42.3	40.5	32.5
HG90 - 7B*1	HDR - 3	1,758.1	23	1.00	: 0.90	: 0.82	44.2	39.6	36.1
HG90 - 8A*1	HDR - 3	1,903.9	23	1.00	: 0.88	: 0.75	46.5	40.8	34.9
HG88 - 2A	HDR - 1	2,140.6	13	1.00	: 0.85	: 0.51	72.0	61.4	36.7
HG88 - 2B	HDR - 1	2,140.6	12	1.00	: 0.83	: 0.73	52.4	43.5	38.5
HG88 - 3A	HDR - 1	2,180.2	19	1.00	: 0.79	: 0.51	75.2	59.8	38.5
HG88 - 3B	HDR - 1	2,180.2	6	1.00	: 0.85	: 0.64	58.9	49.8	37.7
HG88 - 4A	HDR - 1	2,204.5	29	1.00	: 0.70	: 0.61	64.8	45.0	39.4

*1: Marked samples are used to calculate an average of ratio of principal stress of HDR - 3.

*2: Maximum principal stress magnitude is equal to one.

*3: Magnitudes are estimated under an assumption that overburden pressure is equal to vertical stress magnitude. The overburden rock density is supposed to be $2.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ from surface to 1,500 m depth and to be $2.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ below 1,500 m depth.

Fig. 2 Location of the test cubes in the sample core.

Fig. 3 Location of the strain gauges on the test cubes and temporary coordinate system for analysis.

Fig. 4 Conceptual diagram of experiment equipment.

荷速度で 100 MPa まで加えた。ひずみの値と周圧の値は約 0.1 MPa に 1 回の割合で計測した。ここで周圧の最大値は、応力解放によって生じたクラックを含む試料内部のクラックが十分閉塞することを期待して、かぶり圧 ρgh の 2 倍を超える 100 MPa とした。ただし、かぶり圧 ρgh は深度 1,500 m までの平均岩盤密度を $2.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、深度 1,500 m 以深の平均岩盤密度を $2.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ と仮定して求めた。後述するように、この最大値 100 MPa で試料内部のクラックを十分閉塞させることができた。

2・3 解析

解析は以下に示す 6 つのステップからなる。解析は便宜的に試料上に、Fig. 3 に示したような、コアの掘削軸を基準にした直交座標系（以下ではコア座標系と呼ぶ）を設定した上で行った。掘削軸の坑底方向を Z 軸の正方向、ツールフェイスより求めた掘削軸に直交する平面内の東方向を X 軸の正方向、同じく南方向を Y 軸の正方向とした。さらに、XY 平面内で X 軸の正方向および Y 軸の正方向とそれぞれ 45 度の角度をなす方向、YZ 平面内で Y 軸の正方向および Z 軸の正方向とそれぞれ 45 度の角度をなす方向および ZX 平面内で Z 軸の正方向および X 軸の正方向とそれぞれ 45 度の角度をなす方向を、それぞれ XY, YZ, ZX 方向と呼ぶこととした。

(1) 不良ゲージの判定 24 枚あるゲージのそれぞれについて周圧-ひずみ線図を作成し、ゲージの挙動が妥当でないものを解析から除外する。このステップでは周圧-ひずみ線図の勾配の値の周圧に対する変化挙動も検討する。例として試料 HG90-7B のコア座標系上の X 方向のひずみゲージ 4 枚の値を Fig. 5 に示す。図中には周圧-ひずみ曲線の勾配も破線で示した。この勾配を求めるに当たっては、ある周圧の値 $\pm 2.5 \text{ MPa}$ の区間で直線近似を行い、その傾きを勾配とした。よって勾配の表示区間は、 $2.5 \sim 97.5 \text{ MPa}$ となる。図中の #19 ゲージは不良ゲージの例である。このように、ひずみがなめらかに変化しても、勾配がなめらかに変化しないゲージについては接着不良等の問題があると考えて解析から除外した。ここでは #19 以外のゲージは、ひずみとその勾配の両者ともになめらかに連続的に変化している。

(2) ひずみ成分の決定 有効なゲージのデータを用いて、最小自乗法により各周圧における試料のコア座標系におけるひずみテンソル ($\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$) を求める。

その場合、 i 個の見かけ縦ひずみ $[E] = (E_1, E_2, \dots, E_i)$ と弾性体のひずみの 6 成分 $[\epsilon] = (\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx})$ の間に下式で表される線形関係が成立するとする。

$$[E]^T = [M] [\epsilon]^T$$

ここで、 $[M]$ は i 行 6 列の定数項からなる行列であり、各定数項はコア座標系における見かけ縦ひずみの方向によって定まる。

最小自乗法を適用すると、観測された見かけ縦ひずみから下式によってコア座標系におけるひずみテンソルが求められる¹⁰⁾。

$$[\epsilon]^T = ([M]^T [M])^{-1} [M]^T [E]^T$$

上記のようにして求めたコア座標系におけるひずみテンソルを基にしてコア座標系における 6 方向 (X, Y, Z, XY, YZ, ZX) についての周圧-ひずみ線図を作成する。同時に、ある周圧における勾配の値も上記の(1)で述べたのと同様の方法により求める。例として Fig. 6(a) に試料 HG90-3A の周圧-ひずみ曲線とそ

Fig. 5 Example of raw pressure-strain curves and their slopes.

Fig. 6 Example of pressure-strain curves of test cube and their slopes.

Fig. 7 Examples of typical behavior of calculated principal stress/strain directions under increasing pressure.

の勾配を示す。

(3) 周圧と主ひずみ軸の方向の関係の検討 試料を加圧していく過程で、主ひずみの方向がどのように変化するかを、周圧をパラメータとしてステレオネット上(下半球)に投影して検討する(Fig. 7(a), (c), (e)参照)。これによって試料の周圧下の変形異方性が明らかになる。ここで得られた主ひずみ軸は後で主に下の(4)で得られる主応力の方向と対比するのに用いる。なお、この章では特に断らない限り主応力の方向とは DSCA によって解析的に求められる主応力の評価方向を意味する。

(4) 周圧と主応力の方向の関係の検討 本報では前述のように周圧-ひずみ曲線の勾配差を用いて主応力を計算する。まず高周圧時の勾配としては Strickland ら⁵⁾の方法と同様に Fig. 1 で示す β_1 を用いる。 β_1 は周圧-ひずみ曲線がほぼ直線であるとみなせるような区間の勾配である。ある程度周圧が高くなると周圧-ひずみ曲線はこの条件に合致する。例えば Fig. 6(a) の場合は周圧が 90 MPa での周圧-ひずみ曲線の勾配を β_1 とした。一方、低周圧時の勾配としては Strickland ら⁵⁾のような極めて低い周圧時に対応する勾配 β_0 は用いず、ある適当な周圧 p_m における周圧-ひずみ曲線の勾配 β_m を用いた。具体的には、周圧 p_m を増加させながらそれぞれの周圧における $(\beta_m - \beta_1)$ を用いて主応力方向を計算してステレオネット上に投影することにより、周圧の増加過程における主応力の方向を求める。Fig. 7(b), (d), (f) はその例であり、図中の数字は各主応力方向を求めた際の p_m の値を示している。そして、その方向の安定の度合いや(3)で求めた周圧下の変形異方性との整合性を検討した上で、妥当と考えられる p_m および β_m を決定した。妥当と考えられる p_m を選ぶに当たっては、あらかじめ上記のステレオネット上への投影図より全体的な傾向を把握した上で、 p_m を 1 MPa きざみで増加させたときの各 p_m における各主応力方向の 3 次元的角度変化率を計算し、その角度変化が 0.5 度/MPa 以下になるような最も低い p_m を用いることとした。このように p_m を変えながら低周圧時の勾配を決定したのは、①試料が多く天然フラクチャを有しており、それらのアスペクト比(クラックの厚さ/半径)は小さいと考えられることから、特に低い周圧時において試料の変形挙動に大きく影響すると予想される。②Fig. 5 から分かるように、周圧-ひずみ曲線の勾配の最大値は必ずしも周圧が 0 に近いところで得られるわけではなかった。この 2 つの理由によるものである。そして $(\beta_m - \beta_1)$ を縦ひずみの大きさとみなして、まず主ひずみの方向を解析的に求める。この主ひずみの方向は主応力の方向に相当する。さらに主応力比を求めるためにはフックの法則を適用するが、その際に試料は等方弾性体でそのポアソン比を 0.2 と仮定した。このポアソン比はコア試験によって得られた値を用いたが、ポアソン比が小さくなれば結果として得られる主応力比のコントラストは強くなる。例えばポアソン比を 0.2 とした場合に 1.00 : 0.80 : 0.60 という応力比であれば、ポアソン比が 0.15 になると 1.00 : 0.77 : 0.56 という値になる。

(5) 原位置の主応力方向と主応力比の決定 主応力の方向が周圧の増加に伴って若干回転する現象が観察された場合は、主応力の方向が比較的に安定している周圧の範囲内で最も低い周圧の値での主応力の方向を原位置における主応力の方向とした。これは原位置での応力解放時に生じたクラックがなるべく多量に開口している状態で主応力方向およびその比を求めるためである。例えば試料 HG90-3A では Fig. 7(b) に示すように周圧が約 25 MPa のところから、主応力の方向の回転が小さくなるようにみえる。そこでさらに上記のように詳細に回転角度の変化率を検討し、周圧が 18 MPa の方向を原位置地圧の主応力方向とし

た。

また、主応力比は主応力方向を決定したのと同じ ($\beta_m - \beta_1$) の値を用いて決定した。上の例では、最大圧縮応力を 1.00 とした場合に中間主応力が 0.70, 最小主応力が 0.59 となった。

(6) 主応力値の決定 DSCA では主応力の絶対値ではなくその比が得られるので、その絶対値を求めるためにはある方向の地圧が既知でなければならない。肘折実験場では地圧の絶対値は計測されていないため、ここでは前述のかぶり圧 ρgh を鉛直方向の地圧の値と仮定して値を求めた。上の例では最大, 中間, 最小主応力は、それぞれ 49.3 MPa, 35.5 MPa, 28.9 MPa になる。

2・4 結果

2・4・1 HDR-3 コア

(1) 周圧－ひずみ線図 HDR-3 コアの例を Fig. 6(a) に示す。この図から明らかなように低周圧時には方向によって周圧－ひずみ曲線の勾配値にばらつきがあるが、周圧の増加に伴ってその値がいずれも減少し、高周圧時、特に 90 MPa 以上のところではほぼ $1.0 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ 程度の値に収束することが分かる。したがってこの周圧レベルではクラックが十分に閉じていると考えられ、100 MPa という周圧は HDR-3 コアに DSCA を適用する場合に相当であると考えられる。

(2) 周圧の増加に伴う主応力の方向の変化 試料によって程度の差はあるものの、周圧 p_m の増加に伴って主応力の方向が回転する結果が得られた。そこでその回転の挙動を以下の 3 タイプに分類した。その結果、タイプ A, B, C のそれぞれに 4 個, 3 個, 5 個の試料が該当した。それぞれのタイプから代表的な 1 例ずつを選んで Fig. 7 に示す。なお、同図には参考のため主ひずみ方向の周圧に対する変化もあわせて示した。

タイプ A: 低周圧時から高周圧時まで主応力の方向はほぼ安定

タイプ B: ごく低周圧時またはごく高周圧時のみ主応力の方向が回転し、中間の周圧区間では安定

タイプ C: ある一つの主応力方向のみが安定し、その方向を中心に残りの 2 方向が回転

周圧の変化に対して主応力の方向が回転する現象はすべての試料において観察されたが、これは応力解放時に生じたき裂と、それ以外のき裂のそれぞれの影響が同時に表れたためと考えられる。このなかで、特に変化の大きいタイプ C のような場合には 2 通りの解釈が考えられる。一つはコア採取時の応力解放とは無関係のき裂の影響が大きく、複数のクラック系が競合する状態が周圧を大きくしてもなくなる場合である。もう一つは原位置応力の状態が、最大と中間もしくは中間と最小の 2 つの主応力の値がほぼ等しい場合である。前者であれば、回転が終了したところの方向が原位置主応力の方向と考えられるが、後者の場合は最大または最小の原位置主応力の方向しか決定できない。このような理由からタイプ C のようなケースは原位置主応力の方向決定からは除外した。

(3) 周圧の増加に伴う主ひずみの方向と主応力の方向の変化との比較 主ひずみの方向は全試料においてほぼ安定している。この主ひずみの方向と DSCA により決定された主応力の方向とは、後者の方向が安定している場合（上述のタイプ A・B に相当）はよく一致する。主応力の方向が大きく回転するタイプ C のような場合でも主ひずみの方向に関しては安定している (Fig. 7(e) 参照)。一般的に周圧が低い方が周圧に対するひずみの増加率が大きいので、主ひずみの方向は周圧が低い状態の試料の異方性に大きく影響されると考えられ、そのために主応力方向と比べて安定した挙動を示すものと考えられる。

Fig. 8 Estimated principal stress directions.

(4) 原位置主応力方向の推定 12 個の試料のうちタイプ C に属している 5 個の試料については原位置主応力の方向が決定できないため除外し、タイプ A とタイプ B に属する 7 個の試料を用いて方向を推定した。各主応力方向をステレオネットの下半球に投影したものを Fig. 8(a) に示す。最小主応力の方向は 6 個の試料において、ほぼ水平で南北方向を示す。最大主応力の方向は 5 個の試料において水平面からほぼ 30 度下向きで東方向を示した。

(5) 主応力の大きさの推定 求めた主応力比とかぶり圧から推定した応力の値を Table 1 に示す。最大主応力と最小主応力との比には 1.00 : 0.60 程度のものと 1.00 : 0.75 程度のものの 2 通りが見られる。特に深度の大きい試料は後者となった。最大主応力の方向がほぼ一致する 5 個の試料の平均の主応力比の値は最大 : 中間 : 最小が 1.00 : 0.86 : 0.73 となった。主応力は、最大, 中間, 最小それぞれが 45.1 MPa, 38.8 MPa, 33.0 MPa となった。

2・4・2 HDR-1 コア

(1) 周圧－ひずみ線図 HDR-1 コアの例を Fig. 6(b) に示す。その挙動は HDR-3 コアの場合とほぼ同じ傾向を示し、その勾配は周圧 100 MPa 付近で $1.0 \times 10^{-5} \text{ MPa}^{-1}$ 程度になる。

(2) 周圧の変化に伴う主ひずみの方向の変化および主応力の方向の変化 HDR-1 コアの場合、周圧下の主ひずみの方向と DSCA で求めた主応力の方向はよく一致し、両者ともに周圧 p_m の変化に対しても安定した挙動を示した。

Table 2 Other earth stress data of Hijiori reservoir.

Phenomena/Method	Type	Earth stress direction		
		Max.	Int.	Min.
Movement of earth crust	Horizontal plane	E - W	—	N - S
State of geological layer	Horizontal plane	E - W	—	N - S
Mapping of AE events occurred around reservoir	3 - D	E - W ~ ENE - WSW	—	N - S ~ NNW - SSE
Focal mechanism solution of AE events	3 - D	N79E	Vertical	N189E
Mapping of injection/production point of wells	3 - D	—	—	N166E20S
Fractures observed in wells by BHTV	3 - D	—	—	N - S
Mapping of extension fractures observed on cores	3 - D	—	—	N - S
Measurement of earth stress using cores by AE method*	Horizontal plane	N68.5W	—	N21.5E
Mapping of shear fractures observed on cores	3 - D	Vertical	NW - SE	NE - SW
	3 - D	NE - SW	NW - SE	Vertical
	3 - D	Vertical	NE - SW	NW - SE

* : Cores were oriented by fracture observation

(3) 原位置主応力方向の推定 各主応力方向をステレオネットの下半球に投影したものを Fig. 8(b) に示す。この図から主応力の方向は大きく2つのグループに分けられることが分かる。一つは最小主応力の方向が水平面から約55度下向きで南東方向、最大主応力の方向が水平面から約30度下向きで北方向を示すグループであり、もう一つは最小主応力の方向が水平面から約40度下向きで北西方向、最大主応力の方向が水平面から約50度下向きで南東方向を示すグループである。

(4) 主応力の大きさの推定 求めた主応力比とかぶり圧から推定した応力の値の一覧を Table 1 に示す。これを見ると極端な値を示す試料はみられない。主応力比の平均値は最大：中間：最小が1.00：0.80：0.59 となり、HDR-3 コアの平均値1.00：0.86：0.73 とほぼ同じ応力比となった。

3. 考察

3・1 主応力の方向

上述のように主応力の評価方向に関しては、HDR-3 コアとHDR-1 コアからは、それぞれ異なる傾向が得られた。これらのコアが採取された肘折実験場の浅部貯留層（深度1,800 m 近辺）では、Table 2 に示すような各種の実験や現象により、定性的に地圧状態を推測可能である。ここではこれらも含めて総合的に主応力の方向について検討する。まず、HDR-3 コアのDSCAの結果と調和的な、東西方向の地圧が相対的に大きく、南北方向の地圧が相対的に小さいことを示す現象を以下に挙げる。

(1) 広域的な地殻変動 三角点の変動現象をみると、東北地方の広域的な応力場は東西圧縮となる¹¹⁾。

(2) 地質状況 肘折実験場はカルデラ崖の内側南端に位置しており、カルデラ陥没の際のすべり面と考えられる東西方向の断層と人工貯留層として抽熱に用いているフラクチャはほぼ平行である。各坑井掘削時の地質調査によると基盤岩である花崗閃緑岩の頭部が出現する深度がカルデラの中央部へ向かって階段状に深くなっていること¹²⁾から陥没の際のすべり面は正断層と考えられ、すべり面が高角であることから、断層形成時には水平面内において断層面にほぼ直交する方向に相当する南北方向の地圧は東西方向よりも小さかったものと考えられる。

(3) 人工貯留層において発生するAEのマッピング 肘折では注入井1本と生産井3本からなる循環抽熱系が構築されており、その循環系に水を流した際に観測されたAEの分布からは東西走向で水平面から高角のフラクチャの発達が推測された¹³⁾。地下の岩盤に人工的にフラクチャを造成する場合のフラクチャの方向は、天然フラクチャの影響が小さければ地圧の状態によって定まり、フラクチャ面は最小主応力方向に直交するように形成さ

れる。肘折では天然フラクチャの影響が大きいと推測されているが、直径数百 m にわたるような大規模なフラクチャ系全体の発達方向が上述のように東西走向で高角となっていることから、地圧条件としては東西方向に沿ってフラクチャが発達しやすい、つまり南北方向が最小主応力方向に相当するような地圧条件であると考えられる。

(4) 注水実験によって生じたAEのメカニズム解 この解析法は肘折実験場で行われた各種の注水実験による浅部貯留層加圧時に観測されたAE初動の押し引きの分布から地下でせん断型のAEが発生したときのすべりの方向を求め、それを用いて地圧状況を推定するものである。この解析からは、最大主応力の方向がN79E、最小主応力の方向がN189Eという結果が得られている¹⁵⁾。

(5) 注入井－生産井間の流入－流出点マッピング 上記のように肘折では注入井が1本、生産井が3本の循環抽熱系が構築されている。循環試験の際には、各生産井の複数の深度から熱水が生産されたが、3本の生産井の生産点はほぼ平行する数枚のフラクチャ面上にあり、最も優勢なフラクチャの方位傾斜はN76°E、70°Nである¹²⁾。このことは(3)と同様の理由により南北方向の地圧が弱いことを示唆しているものと考えられる。

(6) 坑井内壁のフラクチャ観察 各坑井内の裸孔部をボアホールテレビュア(BHTV)により観察して得られたき裂のボールプロット¹²⁾をみると、高角という傾向は読みとれるものの、その走向に関しては北西－南東から北東－南西の間に極が分布しているように見える。このことから、BHTVによって観察できるような、ある程度大きいフラクチャの走向に関してはある程度ばらつきがあると考えられるにもかかわらず巨視的には(3)のような特定の傾向を示すことは、東西方向に沿ってフラクチャが発達しやすい地圧条件と考えられる。

(7) 定方位コアのフラクチャ観察における伸張性フラクチャの分布 定方位コアのフラクチャ観察において、観察されるフラクチャには大きく分けて2種類ある。一つはせん断性フラクチャであり、もう一つは伸張性フラクチャである。せん断性フラクチャはフラクチャ面がすべることにより形成されたものであり、すべりの方向からフラクチャ形成時の応力状況に関する情報を得ることができる。伸張性フラクチャにはいわゆる天然の水圧破砕によって形成されたものとドリリングに伴う地下の状況の変化によって形成されたものがあると考えられるが、前者は一般にフラクチャ面への鉱物の形成を伴うため区別は容易である。天然の水圧破砕とは、地層内にトラップされた流体や、浸入してきた流体が温度上昇などの理由により、高圧の状態になって生ずる水圧破砕である。この天然の水圧破砕によって、クラックやフラクチャが形成

されると考えられるが、いわゆる水圧破碎と同様に、その方向は形成時の応力状態に大きく影響されとされている¹⁴⁾。つまり伸張性フラクチャが天然の水圧破碎によって形成されたものである場合は、そのフラクチャ面の方向からフラクチャ形成時の応力状況に関する情報を得ることができる。その場合、形成したフラクチャ面に直交する方向の応力が弱いことを示していると考えられている¹⁴⁾。

肘折の定方位コアのフラクチャ観察において、伸張性フラクチャは東西走行で高角に南北に傾斜する分布を示す¹²⁾。このことはフラクチャ形成時の南北方向の地圧が相対的に小さいことを示唆していると考えられる。

(8) カイザー効果を用いた AE 法による地圧測定 HDR - 2 坑井の深度約 1,643 m から採取されたコアを用いて AE 法により地圧が推定されている¹³⁾。この結果によれば水平面内での最大主応力の方向は N68.5W でその大きさは 57 MPa、最小主応力の方向は N21.5E でその大きさは 32.5 MPa そして鉛直方向の応力の大きさは 41 MPa であり、水平面内で東西方向の応力値が大きいという結果が得られている。ただし、AE 法を適用したコアは、コアフラクチャ観察によってコアの方位づけを行っているため、その方位については必ずしも信頼性が高くないことに留意する必要がある。

一方、東西方向の地圧が必ずしも大きくないことを示すものは以下のものである。

(9) 定方位コアフラクチャ観察におけるせん断性フラクチャの分布 せん断性フラクチャの分布からは中間主応力方向が北西 - 南東を向き、最大主応力方向がほぼ垂直で最小主応力方向が水平面から低角の北東 - 南西方向を示すような地圧状況がそれとは逆に最小主応力方向がほぼ垂直で最大主応力方向が水平面から低角の北東 - 南西方向を示すような地圧状況を示す共役フラクチャ系と中間主応力方向が北東 - 南西を向き、最大主応力方向がほぼ垂直であるような地圧状況を示す共役フラクチャ系が観察されている¹²⁾。しかしこれらは形成年代が(7)の伸張性フラクチャよりも古いものと考えられており¹²⁾、必ずしも現在の地圧状況を反映しているわけではないことに留意する必要がある。

以上 9 項目ほど人工貯留層周辺の地圧状況に関係すると思われるデータを挙げた。それぞれの長短について、規模・時期・既存き裂との関わり合いの観点から簡単に述べる。(1)は対象とする規模が大きく異なるが時期的には最近のものであり、適当と考えられる。(2)は規模的には適当と考えられるが、断層が形成された時期は古く、過去の地圧状況を反映している。(3)、(5)は規模的にも時期的にも適当と考えられるが既存のき裂系の結合のみで人工貯留層が形成されている場合は地圧状況を反映しない。(4)も規模的にも時期的にも適当であるが、既存き裂のような弱面がすべる場合には直接的に現在の地圧状況を反映するわけではない。(6)は規模は局所的であるが時期的には適当である。(7)、(9)は規模は局所的であり、時期的には(7)が(9)よりも新しいがそれでも古いことにはかわりがない。(8)は規模は局所的だが時期的には適当である。ただし上述のようにその水平面内における方向づけに関しては必ずしも信頼性が高いわけではない。

以上のように現状では決定的なデータは得られていないが、総合的に判断すると(9)は年代的に古いものであることから、同じく年代的に比較的古いものと考えられる(2)を除く(1)、(3)~(8)で得られている東西方向の地圧が相対的に大きく、南北方向の地圧が相対的に小さいような地圧状態が妥当と考えられる。またこれは HDR - 3 コアに DSCA を適用して得られた結果とも整合的である。なお、HDR - 1 コアと HDR - 3 コアの結果が一致し

なかった理由については後で考察する。しかし、現在得られているデータでは人工貯留層が地下の応力状態と関係なくカルデラ陥没時の滑り面に沿って形成されている可能性を否定することもできない。

3・2 主応力の比またはその大きさ

HDR - 3 コアの DSCA の結果と HDR - 1 コアの DSCA の結果は主応力の方向に関しては異なったが、主応力の比に関してはほぼ同一である。ここでは肘折実験場の浅部貯留層を用いた各種の実験において得られている応力の絶対値を計測した例と、HDR - 3 コアの DSCA の結果とを比較検討する。なお、DSCA では応力比までしか求められないために、ある方向の応力値の仮定（ここではかぶり圧）が妥当か否かが重要となる。そのほかにも、今回のように高温の岩盤を対象とする場合には、原位置と地表との温度差によって生じるクラックが DSCA によって求めた主応力の大きさに影響を及ぼすことに留意する必要がある。これは等方的に生じると仮定すれば解析上は主応力の方向には影響しないが、応力比に対してはそのコントラストを弱めるはたらきがあると考えられる。本報で述べた DSCA の解析ではこのようなクラックの影響を考慮していないため、実際の応力比のコントラストは DSCA の解析結果よりも強くなる可能性がある。もし実際の応力比のコントラストが DSCA の解析結果よりも強いのであれば、ここでは中間主応力の方向に近い鉛直方向の応力を基準に算出しているために、実際の最大主応力および最小主応力は DSCA の解析結果よりもそれぞれ大きく、小さくなると考えられる。

3・2・1 AE 法による地圧測定結果との比較 上述したように AE 法を適用したコアの方位づけの信頼度は必ずしも高くないが、応力値に関して方向がそれぞれ近いと考えられるものを対応させると、AE 法の水平面内最大主応力が DSCA の最大主応力に、AE 法の水平面内最小主応力が DSCA の最小主応力に、AE 法の鉛直方向応力が DSCA の中間主応力に対応する。そして DSCA グループの平均値と比較すると、上記の 3 つの組み合わせの中では、AE 法の水平面内最大主応力と DSCA の最大主応力の組み合わせにおける応力値が大きく異なり、11.9 MPa ほど AE 法によるものの方が大きい。中間主応力は 2.2 MPa AE 法によるものの方が大きく、最小主応力は 0.5 MPa DSCA によるものの方が大きい。DSCA で用いた試料がグループとしておよそ 130 m ほど深いことと考えあわせると、DSCA で得られた応力値は全体的に AE 法で得られたものよりも小さいと考えられる。

3・2・2 ISIP の値との比較 ここでは最小主応力の値に近いと考えられる 1 カ月循環試験時における ISIP の値の最大値である 23.6 MPa¹⁶⁾と比較してみる。ISIP は水圧破碎法による地圧計測で用いられる用語で、Instantaneous Shut-In Pressure の略である。ISIP は水圧破碎によって生じたフラクチャに垂直な方向の応力と等しいとみなされる値であるが、この ISIP の計測時にはフラクチャが完全開口していないと考えられるので、いわゆる水圧破碎法を用いた地圧計測における ISIP とは意味が異なり、実際のフラクチャに垂直な方向の応力の値はさらに大きいものと推測されることに留意する必要がある。かぶり圧から求めた HDR - 3 コアの最小主応力値は 33.0 MPa であり、上述の ISIP の値よりも相当大きい値となる。

3・3 HDR - 1 コアと HDR - 3 コアの比較

主応力の評価方向に関しては、HDR - 1 コアの結果と HDR - 3 コアの結果とは異なる傾向を示す。これに対して、応力比は両者の結果はほぼ同じである。以下に HDR - 3 コアを用いた場

合と HDR-1 コアを用いた場合の条件の違いを 4 点示す。

(1) コア採取深度 HDR-1 コアは HDR-3 コアと比較して約 250 m ほど深い地点から採取されている。しかし、肘折実験場では浅部貯留層（深度 1,800 m 近辺）においても、深部貯留層（深度 2,200 m 近辺）においても貯留層を構成しているき裂系は E-W 系高角北傾斜と推測されている¹⁵⁾ことから、原位置主応力の方向に関しては浅部と深部でそれほど異ならないものと考えられる。

(2) コアの岩質 コアの岩質は両者ともに花崗閃緑岩に分類されるが、HDR-1 コアは、採取時においていずれも 1 m 前後の採取長であり、連続部分は長いものでも 15 cm 程度であることから、コアに含まれる天然フラクチャも相当多いと考えられる。また、試料製作個所の選択肢もほとんどなかった。一方、HDR-3 コアは長い場合では 5 m 近いコアが採取されており、天然き裂の比較的小さい、岩質の良い部分を選んで試料を製作することができた。

(3) 試料製作方法の違い HDR-1 コアは個々の長さが短いため、Fig. 2 に示すようにコアの中心部のみを用いて試料を製作することができなかった。今後詳細な検討が必要になるが、コアリングの際に原位置地圧以上の応力がコアに加わった可能性もあり、この影響は中心部のみを用いて製作した HDR-3 コアからの試料の方が少ないと考えられる。

(4) 試料数の違い HDR-1 コアは全体の採取長も短いため、試料は全部で 6 個しか製作できず、その中の 5 個を用いて実験を行った。HDR-3 コアは HDR-1 コアの倍に当たる 12 個の試料を用いて実験を行い、その中からデータが良好な 7 個を選ぶことができた。

HDR-1 コアで特定の傾向が得られなかった理由としては、(2)の天然き裂を多く含むことが主な原因と考えているが、HDR-3 コアにおいても 1/3 の試料数のデータは不適として棄却していることから、HDR-1 コアでも 10 個程度の試料数が確保できていれば何らかの傾向が読みとれた可能性もある。DSCA は 1 個の試料で 3 次元的な地圧を求められることから、少なくとも 6 個の試料を必要とする AE 法等と比較して必要試料数の点では有利であると考えられている。しかし、対象岩盤によっては一連のコアからある傾向を読みとるためには DSCA においてもある程度の試料数を確保することが必要である。

4. お わ り に

肘折高温岩体実験場 HDR-1 坑井および HDR-3 坑井掘削時に定方位コアリングによって採取された岩石コアに対して DSCA を適用し、人工貯留層造成対象岩盤の地圧状態を推定した。その結果以下のことが明らかとなった。

(1) 主応力の方向に関しては、最小主応力方向に関しては南

北方向でほぼ水平、最大主応力方向は東西方向東落ちで、水平面から約 30 度の方向を示すものと推定された。これは現場における人工貯留層の発達方向の情報等に基づく地圧状態と概ね調和的である。

(2) HDR-3 コアの場合、主応力比の値は最大主応力と最小主応力との比が 1.00 : 0.60 程度のものと 1.00 : 0.75 程度のものの 2 通りの傾向が見られ、とくに深度が大きい試料は後者であった。かぶり圧をもとに各主応力の値を推定すると、主応力方向がほぼ一致する 5 個の試料の平均の値は最大、中間、最小それぞれ 45.1 MPa, 38.8 MPa, 33.0 MPa となった。

(3) HDR-1 コアの場合、主応力の方向は HDR-3 コアの結果とは異なる傾向を示した。応力比は HDR-3 コアの結果とほぼ同一であった。

(4) HDR-3 コアの場合、評価に用いた周圧の大きさの増加に伴って主応力の評価方向が回転する現象がよくみられた。これは応力解放時に生じたき裂とそれ以外のき裂の影響が同時に観察されたためと考えられる。

引 用 文 献

- 1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：高温岩体資源利用拡大のための基盤調査，p. 198-200, (1994)
- 2) 例えば Barton, N. R.: Geotechnique, Vol. 36, p. 147-167, (1986)
- 3) 例えば Cook, N. G. W.: Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., Vol. 29, p. 198-223, (1992)
- 4) 例えば 松木浩二：資源と素材，Vol. 108, p. 41-45, (1992)
- 5) Strickland, F. G. and Ren, N. K.: Proc. 21st. U. S. Sympo. on Rock Mech., p. 523-532, (1980)
- 6) 山口 勉・及川寧己・佐藤嘉晃・野川道雄・天満則夫・小林秀男・松永 烈：資源と素材，Vol. 107, p. 434-440, (1991)
- 7) 志木俊仁・松木浩二・加藤春實・奥村清彦・鈴木舜一：資源・素材学会春季大会講演要旨集，p. 311-312, (1991)
- 8) Dey, T. N. and Brown, D. W.: Int. Sympo. on Rock Stress and Rock Stress Measurements, p. 351-358, (1986)
- 9) 佐野 修：コアを用いた地圧計測法の高信頼性化に関する総合的研究 平成 5 年度科学研究費補助金研究成果報告書，p. 130-141, (1994)
- 10) 例えば 菅原勝彦・尾原祐三・岡村 宏・王遺南：日本鉱業会誌，Vol. 101, p. 277-272, (1985)
- 11) 例えば Sato, H.: J. of Geophy. Res., Vol. 99, p. 22261-22274, (1994)
- 12) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：熱水利用発電プラント等開発 高温岩体発電システム技術開発（要素技術の開発）平成 3 年度成果報告書，p. 426-444, (1992)
- 13) 新エネルギー・産業技術総合開発機構：熱水利用発電プラント等開発 高温岩体発電システム技術開発（要素技術の開発）平成元年度成果報告書，p. 78-80, (1990)
- 14) 例えば Fyfe, W. S., Price, N. J. and Thompson, A. B.: Fluids in the earth's crust, p. 259-266, (1978)
- 15) 佐々木俊二：高温岩体発電のための岩盤破砕評価技術の開発 電力中央研究所報告，p. 56-63, (1993)
- 16) 及川寧己・松永 烈・山口 勉：資源と環境，p. 547-555, (1993)