

流体包有物マイクロサーモメトリーから推定される 山形県肘折地熱地域のフラクチャ形成史

大谷具幸*・笹田政克*・松永 烈**

(平成8年12月8日発表, 平成9年6月9日, 平成9年10月13日受理)

Timing of Fracture Development Deduced from Microthermometry of Fluid Inclusions in Minerals from the Hijiori Geothermal Area, Yamagata Prefecture, Japan

Tomoyuki OHTANI*, Masakatsu SASADA* and Isao MATSUNAGA**

Abstract

The microthermometric measurements of fluid inclusions in quartz in granodiorite, and hydrothermal anhydrite and adularia were examined to determine the timing of fracture development in the Hijiori hot dry rock test site, Yamagata Prefecture, Japan. Two stages of fracturing are distinguished by the type of host mineral.

The first stage is recorded as healed microcracks (fluid inclusion planes) in quartz of the granodiorite, and in anhydrite veins cutting the granodiorite. This stage is characterized by (1) homogenization temperatures inconsistent with the formation temperatures measured by borehole logging at sampling depths, (2) salinities ranging from 3.5 to 5.0 wt.% eq. NaCl. The minimum salinity close to that of sea water suggests that this stage was related to Miocene submarine volcanic activity.

The second stage is recorded in hydrothermal anhydrite and adularia. This stage is characterized by (1) the temperature-depth profile obtained from vein fillings close to profile measured after drilling, and by (2) salinities ranging from 0.0 to 2.9 wt.% eq. NaCl similar to modern brine. These characters possibly indicate that this stage is related to Holocene volcanic activity.

1. はじめに

フラクチャにより貯留層が形成されている地熱地域では, どのフラクチャが現在の熱水の通路になりうるかを判定することが重要である。地質学的手法によりフラクチャを観察するときには, 母

岩が形成されてから現在に至るまでに形成されたすべてのフラクチャを観察することになるので, どのフラクチャが現在の地熱活動に対応して形成されたかを検討しなければならない。

フラクチャの形成史を調べるためには, 開口割

*地質調査所 〒305 つくば市東1-1-3

*Geological Survey of Japan 1-1-3 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

**資源環境技術総合研究所 〒305 つくば市小野川16-3

**National Institute for Resources and Environment 16-3 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan

れ目や断層を用いる方法とともに、鉱物脈や母岩を構成する鉱物中のヒールドマイクロクラックを用いる方法が有効である。すなわち、割れ目を充填する鉱物中に、あるいはヒールドマイクロクラックに伴われる流体包有物を用いて温度などのフラクチャ形成条件を推定することができ、熱水活動に伴うフラクチャ形成史を詳細に検討することができる。

流体包有物の形成時期を推定する方法としては、流体包有物マイクロサーモメトリーが有効である。

例えば、Sasada (1989) はバイアスカルデラの西のGT-2井より得られた先カンブリア紀の基盤岩に含まれる石英について流体包有物のマイクロサーモメトリーを行い、カルデラ形成から現在に至るまでの熱史について検討している。また、Vollbrecht et al. (1991) は流体包有物マイクロサーモメトリーとマイクロクラックの方位解析によりクラックの発達方位と形成条件の関係を検討し、マイクロクラックの発達様式の変遷について考察している。

今回、地下のフラクチャ発達状況がよく調べら

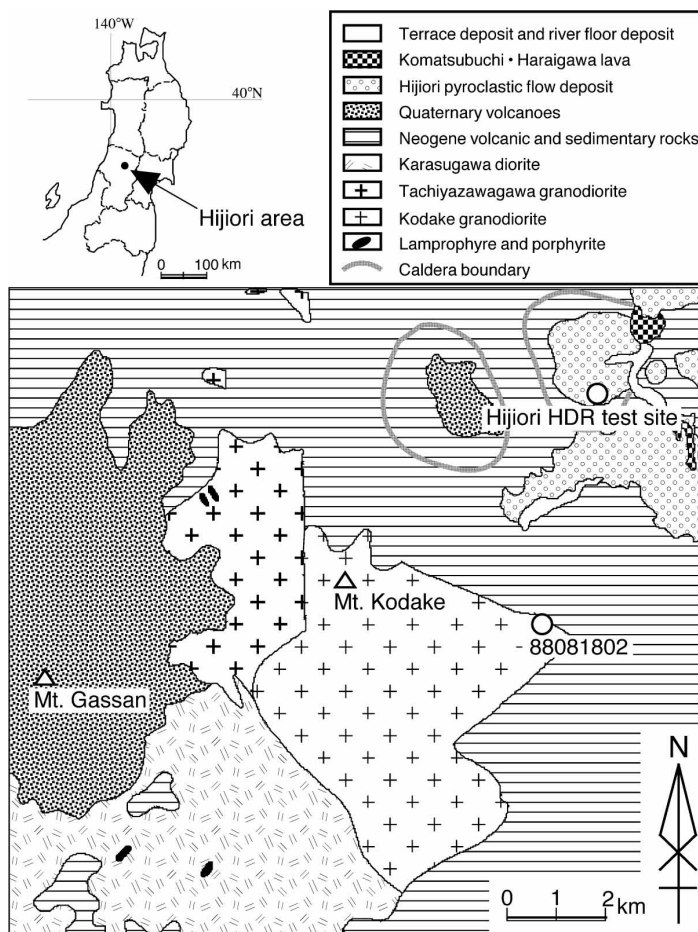


Fig.1 Geologic map of the Hijiori area (after Konda, 1974) with locations of the Hijiori HDR test site and outcrop 88081802.

れている肘折高温岩体実験場の試料を用いて流体包有物マイクロサームトリーを行ったので、その結果を報告するとともに、既存のデータと比較することによりフラクチャ形成史について考察する。

2. HDR-3井およびその周辺の地質

山形県中北部に位置する肘折地域 (Fig.1) では、1万年前の火山活動 (宇井ほか, 1973) により肘折カルデラが形成されており、カルデラ内には肘折温泉や金山温泉がある。カルデラ内南縁では、1985年から新エネルギー・産業技術総合開発機構 (以下 NEDO と略記) によって高温岩体発電システムの要素技術開発が行われており、HDR-3井はその研究の一環として1990年に掘削されたものである。

肘折地域の地質について主に今田 (1974) をもとに簡単に述べる。肘折地域の地質は、主に花崗岩類の基盤とこれを不整合におおう新第三系からなる。新第三系は中新世前期～中期の火山岩類と堆積岩、中新世後期～鮮新世の堆積岩からなる。中新世前期～中期の火山岩類は変質作用を受けており、また一部の火山岩類は海底火山活動によるものである。第四紀には、葉山 (はやま) 火山や月山火山が活動し、これらは広い地域に安山岩の溶岩や火山砕屑物を噴出し、火山泥流を流出した。1万年前に活動した肘折火山は地形に明瞭に認められる直径2 kmのカルデラを形成した。肘折火山の火山噴出物は石英安山岩質の火山砕屑物であり、広く台地を形成している。

HDR-3井の地質 (Fig.2) についてNEDO (1991) をもとに述べる。HDR-3井では、深度40m以浅は肘

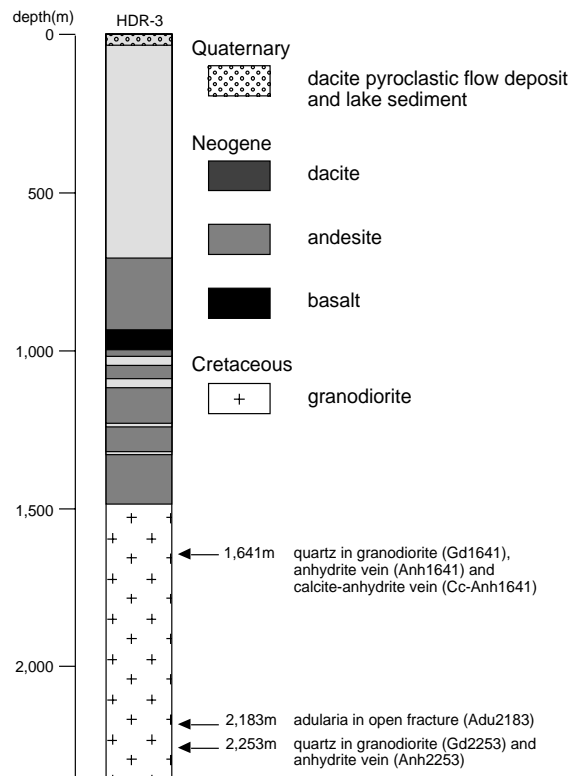


Fig.2 Geologic column of borehole HDR-3. (after NEDO, 1991)

折火山の活動による石英安山岩質火砕流堆積物および二次性湖成堆積物からなる。深度40~1,486mは、新第三系の石英安山岩質~安山岩質~玄武岩質の凝灰岩、凝灰角礫岩、溶岩からなり、深度1,486m以深で基盤の花崗閃緑岩に達する。この花崗閃緑岩は実験場の南西に分布する小岳(こだけ)花崗閃緑岩(今田, 1974)に相当すると考えられている(佐々木, 1986)。小岳花崗閃緑岩は隣接して分布する立谷沢川(たちやざわがわ)花崗閃緑岩に類似するが、斑状カリ長石を含まない点および黒雲母のほかに角閃石が多い点から区別され(今田, 1974), 黒雲母を用いたK-Ar年代測定により 97.1 ± 4.9 Maの年代値を示す(松永ほか, 1993)。

花崗閃緑岩は等粒状組織を示し、鉱物粒径は2~4mmである。主要構成鉱物として、石英、斜長石、カリ長石、黒雲母、角閃石が含まれる。このうちカリ長石含有量はHDR-3井の浅部では多く、深部では少なくなり、浅部ではより花崗岩質、深部ではより花崗閃緑岩質という傾向が認められる。斜長石は半自形を示し、石英、カリ長石は他形である。一部の黒雲母、角閃石は変質により緑泥石化している。長石類には変質により方解石、セリサイトが生じている。変形構造として、石英には波動消光、サブグレイン化が認められる。なお、深度1,641mの花崗閃緑岩に含まれる石英には変形ラメラが発達している。また、斜長石の双晶に変位が認められることがある。鉱物脈として、石英脈、方解石-硬石膏脈、硬石膏脈が認められる。NEDO(1994)によると、HDR-3井にはこれらの鉱物脈の他に、緑泥石脈、緑れん石脈の存在が確認されている。深度2,183mの花崗閃緑岩には溶脱により形成されたと思われる空隙が認められ、その中には石英は認められず、方解石、自形の氷長石、黄鉄鉱が認められる。NEDO(1994)によると、深度2,183m地点でのコア採取中にHDR-1井で水位変化が認められており、このフラクチャは現在HDR-3井とHDR-1井を導通していると考えられている。

3. 流体包有物マイクロサーモメトリー

HDR-3井から得られたコア試料と地表露頭で採取された試料から両面研磨薄片を作成し、流体包

有物マイクロサーモメトリーを行った。マイクロサーモメトリーには、地質調査所所有の Fluid Inc. 社製 USGS 型加熱冷却ステージを使用し、測定は冷却実験の後に加熱実験を行った。今回測定に用いた試料は、肘折実験場の南方4kmの地表露頭(露頭番号 88081802)から採取された花崗閃緑岩(以下Gd-Suと略記)、HDR-3井の深度1,641mの花崗閃緑岩(Gd1641)とそれを切る硬石膏脈(Anh1641)、方解石-硬石膏脈(Cc-Anh1641)、深度2,183mの開口フラクチャに産する氷長石(Adu2183)、深度2,253mの花崗閃緑岩(Gd2253)とそれを切る硬石膏脈(Anh2253)である。

Fig.3とTable 1にマイクロサーモメトリーを行った流体包有物の産状を示す。花崗閃緑岩の石英粒子に含まれる流体包有物はいずれも二次包有物であり、平面上に配列して流体包有物面(fluid inclusion plane)を形成している。花崗閃緑岩では今回測定した流体包有物の長径はTable 1に示したとおりであるが、多くの流体包有物の長径は1 μ m以下である。方解石-硬石膏脈は粗粒の硬石膏と細粒の方解石からなり、マイクロサーモメトリーは硬石膏のみで可能であった。均質化温度測定結果を Fig.4 に示す。Gd1641とGd2253では、均質化温度がともに280~290 $^{\circ}$ Cに集中し、類似した傾向を示している。Gd-Suでは均質化温度が180~260 $^{\circ}$ Cの間に分布し、Gd1641およびGd2253と比較して約70 $^{\circ}$ C低い均質化温度を示す。深度1,641mでは Anh1641とCc-Anh1641の均質化温度は鉱物脈どうしでは230~280 $^{\circ}$ Cとほぼ類似し、母岩であるGd1641に比べて約40 $^{\circ}$ C低い値を示す。深度2,253mでは、Anh2253の均質化温度は300~370 $^{\circ}$ Cであり、母岩であるGd2253に比べて約50 $^{\circ}$ C高い値を示す。Anh1641、Anh2253とも初成包有物と二次包有物の間に有意な相違は認められなかった。

塩濃度測定結果を Fig.5 に示す。氷点温度から塩濃度への換算には Bodnar(1993)を用いた。Gd-Su、Gd1641、Gd2253ともに、塩濃度は2.2~7.9 wt.% (NaCl相当濃度、以下wt.%と略記)の間に分布し、3.5~5.0 wt.% に集中する。Anh1641とAnh2253では、その塩濃度の分布は母岩であるGd1641およびGd2253のそれとは大きな差はない。これに対して

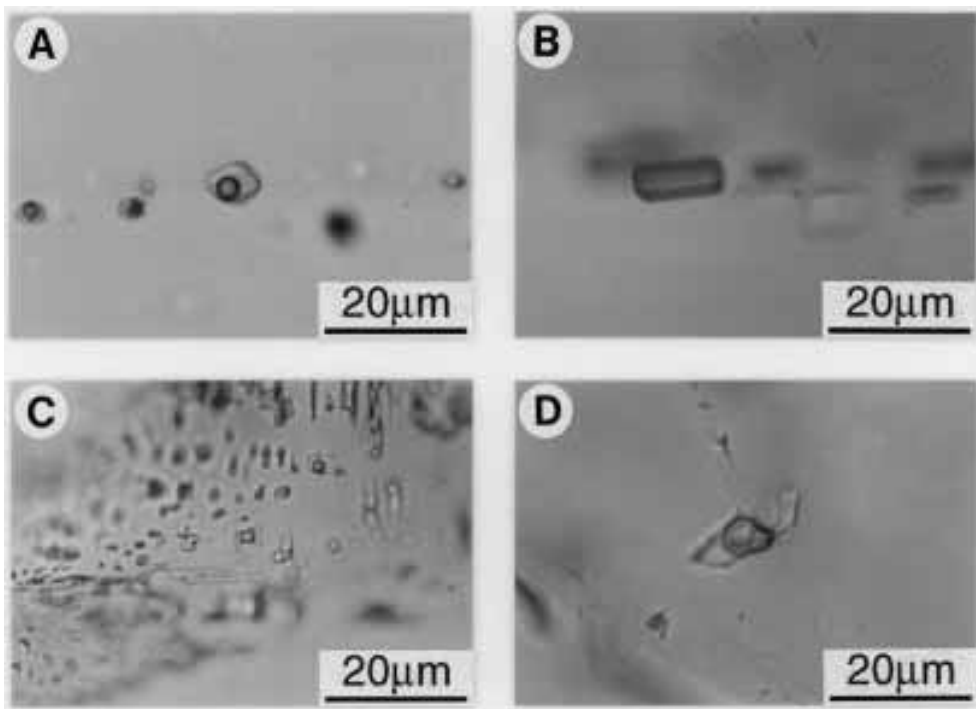


Fig.3 Photographs of the fluid inclusions. A, Liquid-rich two-phase inclusions in a quartz grain from the Kodake granodiorite (HDR-3 1,641m) ; B, Vapor inclusions in an anhydrite vein (HDR-3 2,253M);C, Liquid-rich two-phase inclusions in acalcite-anhydrite vein (HDR-3 1,641M) ; D, Liquid-rich two-phase inclusions in an authigenic adularia grain along an open fracture (HDR-3 2,183m).

Table 1 Characteristics of fluid inclusions. P/S means primary (P) and secondary inclusion (S).

Diameter indicates those of fluid inclusions measured in this study.

Sample	Type of fluid inclusions	P/S	Shape	Diameter (μm)
Gd-Su, Gd1641, Gd2253	liquid-rich two-phase inclusion	S	subspherical ~ random	3.6 ~ 42
Anh1641, Anh2253	vapor inclusion, liquid-rich two-phase inclusion	P+S	hexahedral negative crystal ~ random	2.7 ~ 17
Cc-Anh1641	liquid-rich two-phase inclusion	S	platy ~ random	9.9 ~ 27
Adu2183	liquid-rich two-phase inclusion	S	platy , subspherical ~ random	9.0 ~ 100

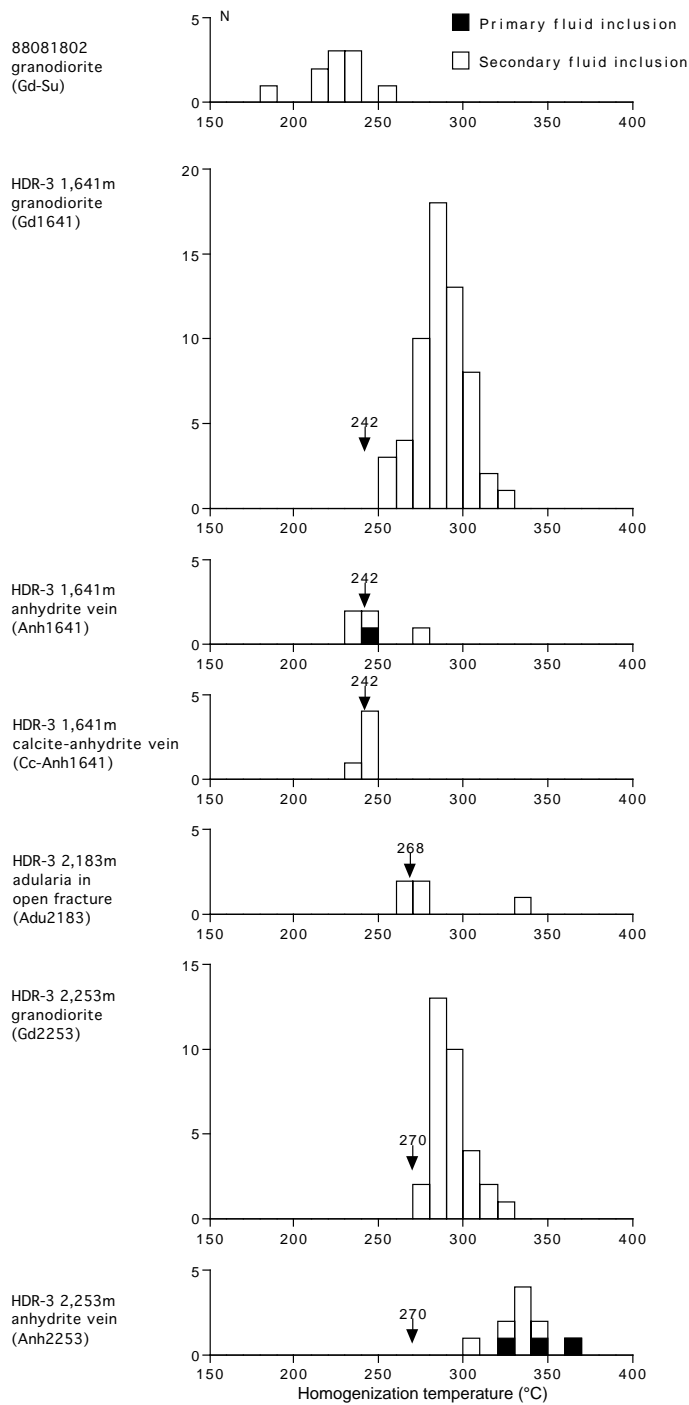


Fig.4 Histograms of homogenization temperature of fluid inclusions in minerals from borehole HDR-3 and outcrop 88081802. Arrows with numbers show the formation temperatures measured by borehole logging at sampling depths.

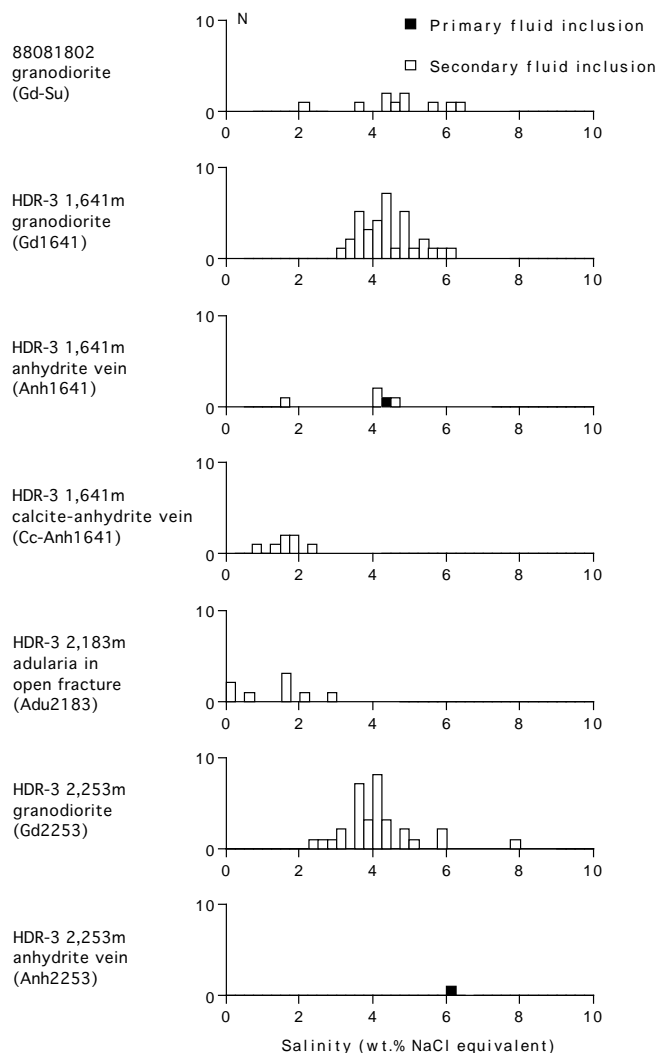


Fig.5 Histograms of the fluid inclusion salinity in minerals from borehole HDR-3 and outcrop 88081802.

Cc-Anh1641では、その塩濃度は0.9~2.4 wt.% に分布し、同深度のAnh1641と母岩であるGd1641の傾向とは異なる。Anh1641では、初成包有物と二次包有物の塩濃度を求めることができたが、これらの間には有意な相違は認められなかった。Adu2183では、その塩濃度は 0.0~2.9 wt.% に分布し、Cc-Anh1641の傾向と類似している。

流体包有物中の液相に含まれるCO₂濃度を半定量的に求めるために、破砕法を行った。破砕法は破砕台 (Roedder,1970) を光学顕微鏡にとりつけ、流

体包有物の気泡の挙動を観察するものであり、Sasada et al. (1986) により破砕法を用いたCO₂濃度の半定量的測定法が開発されている。

今回、マイクロサーモメトリーを行ったすべての試料で破砕法を試み、Cc-Anh1641をのぞく5試料で試料が破砕されたときの流体包有物中の気泡の挙動を観察することができた。その結果、5試料とも気泡が流体包有物の中で膨らむ様子が観察された。よって、これらの流体包有物における最低CO₂濃度は 0.14mole%であるといえる。

4 . 議論

4 - (1) 流体包有物均質化温度と検層温度

HDR-3井の温度検層結果 (NEDO, 1994, 1996) から深度1,641m , 2,183m , 2,253mでの平衡地層温度はそれぞれ242 , 268 , 270 であると考えられる。この温度と今回の流体

包有物均質化温度測定結果 (Fig.4) を比較すると , 深度1,641mではCc-Anh1641 , Anh1641でほぼ一致し , Gd1641では一致しない。深度2,183mではAdu2183はよい一致を示す。深度2253mではAnh2253 , Gd2253はともに一致しない。これまでも肘折実験場では , 温度検層結果と流体包有物の均質化温度測定結果が完全には一致しないことが報告されている (NEDO, 1992 ; 資源環境技術総合研究所, 1993, 1994, 1995, 1996) 。一般に熱水の流動が活発な地熱地域では温度検層結果と流体包有物均質化温度が一致する (例えば , 田口 , 1982 ; 村松 , 1993) ので , 肘折地域でこれらが一致しないことは流体包有物の一部が過去の地熱活動により形成されたことを示していると考えられる。

4 - (2) 流体包有物から見積もられる塩濃度と間隙水の塩濃度

流体包有物の塩濃度測定結果 (Fig.5) をみると , およそ3.0wt.%を境界にして2つのグループに分けられる。塩濃度 < 3.0wt.%の流体はCc-Anh1641とAdu2183 , 塩濃度 > 3.0wt.%の流体はGd-SuとGd1641 , Anh1641 , Gd2253 , Anh2253に含まれる。

これらの流体の起源について考察するために , 現在肘折実験場の地下に滞留している流体の塩濃度を見積もってみる。肘折実験場では熱水は自噴していないので , 地下の流体を直接採取することはできない。そこで循環試験の際に回収された生産水から地下の流体の塩濃度を見積もることとする。1991年の循環試験の際に行われた生産水の分析によると , 試験開始直後に回収された生産水のNa⁺濃度とCl⁻濃度はそれぞれ0.14 , 0.25wt.%であり , 徐々に注入水により希釈されて濃度が低下する (NEDO, 1992) 。循環試験の開始直後に回収された生産水も地下の流体が注入水により希釈されている可能性は否定できないものの , 実際に花崗閃

緑岩中に滞留している流体の塩濃度はそれほど高くはないと考えられる。また深度2183mは , HDR-3井を掘削しているときにHDR-1井に水位変化が認められた (NEDO , 1993) 位置であり , そこに発達する開口フラクチャは , 定方位コアに認められるフラクチャの切断関係から最新期のフラクチャであると考えられている (NEDO , 1994) ので , 現在熱水が流動している場所であると考えられる。この開口フラクチャに産する氷長石中の流体包有物の塩濃度は0.0 ~ 2.9 wt.% であるので , 現在花崗閃緑岩に滞留している流体の塩濃度は0.0 ~ 2.9 wt.%の範囲のいずれかであると考えられる。

よって , 塩濃度 < 3.0 wt.%の流体包有物は比較的最近 , 地下に滞留していた流体を捕獲したと考えられる。一方 , 塩濃度 > 3.0wt.% の流体の起源についてはそれ以外に求めなければならない。

4 - (3) 流体包有物の形成時期

次に流体包有物の形成時期について検討する。Cc-Anh1641 , Adu2183中の流体包有物については , その均質化温度測定結果が温度検層結果とほぼ一致すること , 流体包有物マイクロサモメトリーより求められた塩濃度と循環試験の際に採取された生産水から推定される間隙水の塩濃度が類似することから , 現在の間隙水と同じ流体を捕獲したものであると推定される。Gd-Su , Gd1641 , Gd2253に含まれる石英中のヒールドマイクロクラックおよびAnh2253中の流体包有物は , 均質化温度が温度検層と一致しないこと , 塩濃度 > 3.0wt.%であることから , 現在の間隙水を捕獲したものではないと考えられる。それでは , これらのヒールドマイクロクラック , 鉱物脈の形成時期はいつであろうか。肘折地域では , 分布する岩石から (1) 肘折火山活動期 , (2) 中新世火山活動期 , (3) 小岳花崗閃緑岩冷却期の3つの時期に熱水活動があった可能性が考えられる。以下にこの3つの時期について検討する。

(1) 肘折火山活動の時期は1万年前と推定されている (宇井ほか , 1973) 。火山中心部にはCl⁻濃度が ~ 数万ppmの「高塩濃度」熱水系が形成される場合があることが知られている (高橋 , 1994) の

で、肘折火山の活動に伴って一時的に高塩濃度の流体が流入することにより、塩濃度 3.0wt.%の流体包有物が形成された可能性が考えられる。しかし、現在の地熱活動地域の外、つまり肘折カルデラの範囲外である小岳花崗閃緑岩の地表露頭試料でもHDR-3井のコア試料と同程度の塩濃度を示しているため、流体包有物に捕獲されている塩濃度

3.0 wt.% の流体は肘折火山活動によってもたらされたものではないと考えられる。よって、流体包有物の形成時期は肘折火山活動以前である可能性が高い。ただし、肘折カルデラの近傍では、火山活動の影響による地温の上昇によって捕獲されていた流体が再流動して、肘折火山活動に伴って形成されたフラクチャに再度流体包有物として捕獲された可能性も考えられる。

(2) HDR-3井の柱状図でも確認されるようにこの地域では新第三紀中新世に火山活動があった。伊藤(1993)はHDR-1井の深度1480~1500mと2165~2177.5mの花崗閃緑岩試料を用いてジルコンのフィッシュトラック長解析を行い、新第三紀と1万年前にトラック長に影響を及ぼす熱的イベントがあったと推定している。松永ほか(1993)は地表の小岳花崗閃緑岩およびHDR-1, 2, 3井の花崗閃緑岩を用いてK-Ar年代測定を行い、セリサイトを用いた年代測定より15~12Maと7Ma前後、5~2Maの3つの年代値を得ている。このうち15~12Maは中新世火山活動の時期に対応すると考えられる。今田(1974)によると、中新世前期~中期の火山岩の一部は海底火山活動によるものである。以上のことから、中新世火山活動の時期に小岳花崗閃緑岩が海水面下に存在しており、熱水活動で海水起源の流体が循環して、循環の過程において一部の流体は希釈されたり濃縮されたりしたと考えられる。海水の塩濃度は3.5%なので塩濃度 3.0 wt.% の流体包有物の形成をうまく説明できる。また、黒鉱床の流体包有物マイクロサーモメトリーにより求められた塩濃度は2.1~6.0wt.%の範囲にあることが知られている(Marutani and Takenouchi, 1978; Pisutha-Arnond and Ohmoto, 1983; Foley, 1986)。よって、ヒールドマイクロクラックと硬石膏脈の形成時期は中新世火山活動の時期であり、海底熱水

活動により形成された可能性が高いと考えられる。

(3) 今回観察した流体包有物が小岳花崗閃緑岩の冷却期の熱水を捕獲している可能性も考えられる。わが国の花崗岩類には、一般的に第三紀花崗岩体には気液2相の気体包有物や娘鉱物を含む多相包有物、白亜紀以前の花崗岩体には気液2相からなる液体包有物のみ、あるいはそれに液体CO₂を含む包有物が含まれることが知られている(佐脇ほか, 1996)。よって、今回の流体包有物マイクロサーモメトリーの結果からは、これらの流体包有物が小岳花崗閃緑岩の冷却期に形成されなかったと断言することはできない。

以上より塩濃度 3.0 wt.% の流体包有物を含むヒールドマイクロクラック、鉱物脈の形成時期は中新世火山活動期と小岳花崗閃緑岩の冷却期の両方が考えられるものの、流体包有物の塩濃度が海水起源の流体が循環したことによりうまく説明できることから、中新世火山活動期である可能性が高いと考えられる。

Anh1641では、流体包有物の均質化温度は現在の地温とほぼ一致し、流体包有物マイクロサーモメトリーより得られた塩濃度は同深度のGd1641およびCc-Anh1641に含まれる流体包有物の塩濃度に類似している。これは比較的最近の地熱活動によりGd1641およびCc-Anh1641に捕獲されていた流体が再流動したことを示している可能性が考えられる。

5. まとめ

上述した議論をもとに、流体包有物マイクロサーモメトリーから推定される肘折地熱地域におけるフラクチャ形成史についてまとめてみる。基盤の花崗閃緑岩中の石英粒子に発達するヒールドマイクロクラックは、流体包有物の均質化温度が現在の地温と一致しないこと、塩濃度の最低値が海水の塩濃度に類似すること、流体包有物の塩濃度測定結果からみると肘折カルデラより離れた地表露頭から採取された試料とHDR-3井のコア試料が類似した塩濃度の流体をヒールドマイクロクラック中の流体包有物として捕獲していることから中新世火山活動の時期に形成されたと推定される。Cc-Anh1641とAdu2183は、流体包有物の均質化温度

が現在の地温とほぼ一致すること、流体包有物マイクロサーモメトリーより得られた塩濃度が循環試験の開始直後に回収された生産水の塩濃度に類似することから比較的最近に形成されたと考えられる。Anh1641では、流体包有物の均質化温度は現在の地温とほぼ一致すること、流体包有物マイクロサーモメトリーより得られた塩濃度はGd1641およびCc-Anh1641に捕獲されている流体の塩濃度に類似することから比較的最近の地熱活動により花崗閃緑岩中の流体が再流動したと考えられる。なお、母岩である花崗閃緑岩は比較的最近の地熱活動による流体を捕獲していないので、Cc-Anh1641、Adu2183が形成されたときに、母岩の花崗閃緑岩にはマイクロクラックは形成されなかったであろう。

謝 辞

本研究で使用したコア試料はニューサンシャイン計画高温岩体発電システムの技術開発（要素技術の開発）により採取されたものであり、HDR-3井コアの使用に際しては、NEDO関係者各位に便宜を図っていただいた。地質調査所・佐脇貴幸博士には粗稿を読んでいただき、また著者の一人である大谷に加熱冷却ステージの使用法について指導していただいた。地質調査所・野神貴嗣氏には両面研磨薄片を作成していただいた。また、青野地質コンサルタント・青野道夫氏、TERRA-FLUID SYSTEMS・中野啓二氏には肘折地域の地質について議論していただいた。以上の方々に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- Bodnar, R. J. (1993) Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solutions. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 57, 683-684.
- Foley, N. F. (1986) Fluid inclusion study of ores from the Fukazawa mine, Hokuroku District, Akita Prefecture, Japan. *Mining Geology*, 36, 11-20.
- 伊藤久敏 (1993) フィッシュントラック法による地熱履歴の推定 - (1) 山形県肘折地熱地域への適用 - . 電力中央研究所報告, U92041 .
- 今田 正 (1974) 月山 (5万分の1図幅), 山形県商工労働部商工課 (山形), 38p .
- Marutani, M. and Takenouchi, S. (1978) Fluid inclusion study of stockwork siliceous orebodies of Kuroko deposits at the Kosaka mine, Akita, Japan. *Mining Geol.*, 28, 349-360.
- 松永 烈・小林秀男・山口 勉 (1993) 肘折カルデラの花崗閃緑基盤岩 - K-Ar年代測定結果を基にした熱履歴の検討 - . 資源と環境, 2, 39-47 .
- 村松容一 (1993) 地熱井評価への流体包有物温度計適用上の留意点 - 地熱開発促進調査結果による分析 - . 地熱エネルギー, 18, 90-103 .
- Pisutha-Arnond, V. and Ohmoto, H. (1983) : Thermal history, and chemical and isotopic compositions of the ore-forming fluids responsible for the Kuroko massive sulfide deposits in the Hokuroku District of Japan. *Econ. Geol. Monograph*, 5, 523-558.
- Roedder, E. (1970) Application of an improved crushing microscope stage to studies of the gases in fluid inclusions. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 50 (1), 41-58.
- Sasada, M., Roedder, E. and Belkin, H.E. (1986) Fluid inclusions from drill hole DW-5, Hohi geothermal area, Japan: Evidence of boiling and procedure for estimating CO₂ content. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 30, 231-251.
- Sasada, M. (1989) Fluid inclusion evidence for recent temperature increases at Fenton Hill Hot Dry Rock test site west of the Valles caldera, New Mexico, U.S.A. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, 36, 257-266 .
- 佐々木 文昭 (1986) 地熱開発促進調査の地域レポート [2] 銅山川下流地域. 地熱エネルギー, 11, 110-145 .
- 佐脇貴幸・笹田政克・佐々木宗建 (1996) 本邦産花崗岩及びペグマタイト中の流体包有物の地球化学的研究. 日本地質学会第103年年会学術大会講演要旨, 276 .
- 資源環境技術総合研究所 (1993) 平成元年度サンシャイン計画研究開発成果報告書, 熱水利用発電プラント等開発に伴うデータの解析・評価 高

- 温岩体熱抽出システムの解析・評価 . 99p .
 資源環境技術総合研究所 (1994) 平成2年度サン
 シャイン計画研究開発成果報告書, 熱水利用発
 電プラント等開発に伴うデータの解析・評価 高
 温岩体熱抽出システムの解析・評価 . 79p .
 資源環境技術総合研究所 (1995) 平成5年度サン
 シャイン計画研究開発成果報告書, 熱水利用発
 電プラント等開発に伴うデータの解析・評価 高
 温岩体熱抽出システムの解析・評価 . 100p .
 資源環境技術総合研究所 (1996) 平成6年度サン
 シャイン計画研究開発成果報告書, 熱水利用発
 電プラント等開発に伴うデータの解析・評価 高
 温岩体熱抽出システムの解析・評価 . 96p .
 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1991) 平
 成2年度成果報告書 - 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) . 455p .
 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1992) 平
 成3年度成果報告書 - 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) . 447p .
 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1993) 平
 成4年度成果報告書 - 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) . 436p .
 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1994) 平
 成5年度成果報告書 - 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) . 299p .
 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (1996) 平
 成7年度成果報告書 - 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) . 187p .
 田口幸洋 (1982) 流体包有物の均質化温度分布か
 ら見た地熱帯の地下熱構造 . 日本地熱学会誌 , 3 ,
 165-177 .
 高橋正明 (1994) 化学的に見た第四紀火山と熱水
 系との関係 - なぜ高塩濃度と低塩濃度の熱水系
 が存在するのか - . 地質学論集 , 43 , 156-168 .
 宇井忠英・杉村 新・柴橋敬一 (1973) 肘折火砕
 流堆積物の¹⁴C年代, 火山第2集 , 18 , 171-172 .
 Vollbrecht, A., Rust, S. and Weber, K. (1991)
 Development of microcracks in granites during
 cooling and uplift: examples from the Variscan
 basement in NE Bavaria, Germany. Jour. Struct. Geol. ,
 13 , 787-799 . captions