

第 259 回地質調査所研究発表会講演要旨*

特集 葛根田地域をテストフィールドとした深部地熱資源の検討 —地質調査所における「深部地熱資源調査」の成果とりまとめに向けて—

葛根田地域をテストフィールドとした 深部地熱資源の検討：はじめに

茂野 博* 村岡洋文* 石戸経士* 藤本光一郎*

地熱発電推進の一環として、既開発地域の深部の開発が日本のみならず世界の各地で期待されている。しかし、深部開発についてはその経済性ととも、深部環境に未知の点が多いことが基本的問題となっている。ニューサンシャイン計画の深部地熱資源調査（平成4年度～）では、岩手県葛根田地域において第四紀花崗岩類を貫く深度 3,729 m の坑井（WD-1 a）の掘削が実施され、500℃以上の温度を観測するなど地球科学的に非常に貴重な成果が得られた。新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）との協力により、地質調査所は葛根田地域の地熱系の実態把握・モデル化、深部探査手法の検討、深部貯留層の評価、総合解析等を進めて来た。葛根田地域における本調査の終結を間近にして、今回の研究発表会ではこれらの成果を整理し、その総合的なとりまとめと今後の深部地熱資源の探査・評価・開発に向けた議論を行った。

「はじめに」では、深部地熱資源開発の意義、NEDOによる調査の目的・経過・主要成果、地質調査所による解析・評価の目的・体制・今後の計画等を整理するとともに、今回の研究発表会の目的、議論の要点についてとりまとめて説明した。議論の要点として、(1)葛根田地域の深部地熱系の実態・モデル（現在の貯留層の分布・特性の規制要因、過去～現在の熱水系の経時変化、地表-浅部貯留層-深部貯留層-新期花崗岩類（マグマ）間の熱・流体・化学物質の収支、浅所貫入新期花崗岩類（マグマ）の状態）、(2)深部探査手法（葛根田地域における各種の深部探査データの有効性、各種の深部探査手法の開発・改良点）、(3)深部貯留層評価（水の臨界点近傍の貯留層の状態・最適利用法、葛根田地域～仙岩地域の深部貯留層の実態・資源評価）、(4)総合解析（葛根田地域の調査結果は他地域の深部探査・開発にどの様に役立つか、深部地熱資源の開発に向けて今後どの様な調査・研究・技術開発が必要か）等を整理・提示した。（*地殻熱部）

Keywords : geothermal resources, deep drilling, neo-granite, hydrothermal systems, Kakkonda

熱源および貯留構造に関する葛根田 深部地熱系のモデル化

村岡洋文* 大谷具幸*

葛根田深部地熱系の熱源と貯留構造をモデル化の課題として議論した。先ず、熱源に関して、葛根田花崗岩体は WD-1 a 井カッピングスの K/Na 比、K/Rb 比、Ba/Sr 比、Sr/Rb 比の連続的深部変化などから 1 つの zoned magma chamber とみても差し支えないこと、岩体最上部の厚さ 50 m 程度の部分が相対的に“急冷縁”的で、その下の厚さ 100 m 程度の部分が LIL 元素濃集帯となっていることを示した。これをもとに 1 つのマグマとしての熱伝導冷却モデルを作成した。その際、葛根田花崗岩体の厚い接触変成帯と、公表年代値の永い熱的寿命を説明するためには、貫入前の地下温度として非線形の高い地温勾配と、現在確認されている部分よりかなり大きな岩体を想定する必要があった。この大型ストックモデルにより、接触変成帯の厚さ、16 万年という定置後年代、500℃を超える現在の岩体温度等を説明できた。次いで、貯留構造に関して、接触変成帯の高変成度側（コーディエライト帯）では岩石の脱水反応が進んでいること、この帯に発達する低角断裂群の成因は接触変成反応による脱水フロントの概念と異例に浅い脆性-塑性境界へのテクトニック応力の集中で説明できること、この低角断裂群の現在の低い透水性は脱水フロントと脆性-塑性フロントのスweep過程で説明できることを示した。しかし、深部貯留層の深度がどちらかといえば、葛根田花崗岩体内部に位置することを考慮すると、その成因としては葛根田花崗岩体上部の LIL 元素濃集空隙帯が重要な役割を果たしていると考えざるを得ない。この帯は岩体定置後、常に温度下降場であったため、脆性-塑性フロントのスweep過程による空隙の消滅にも拘束されず、現実に miarolitic な空隙は保存されている。この帯は岩体上面の頂部に向かって発達している可能性が高く、これが深部貯留層の空間分布を決定している可能性が強い。（*地殻熱部）

Keywords : Kakkonda, deep geothermal resources, neo-pluton, zoned magma chamber, brittle-plastic transition

* 1999 年 2 月 23 日、本所（つくば市）にて開催

流体岩石反応から見た葛根田地熱系の構造と 発達過程

藤本光一郎* 佐脇貴幸* 佐々木宗建* 柳沢教雄*

我々は、現在の深部地熱系の実態の把握と、熱源となるマグマの貫入固結から接触変成帯の形成を経て現在の活発な地熱活動に至るマグマ-熱水系の進化プロセスを明らかにすることを目的として、いくつかの研究課題を進めている。

1) WD1を含む若い花崗岩のコア試料の測定から、葛根田花崗岩が通常の花崗岩より高い孔隙率、孔隙径や透水係数を持つことを見いだした。固結直後の花崗岩においては、開いている鉱物粒界が物質や熱の輸送に寄与していると考えられる。

2) WD1 コア試料を用いた接触変成作用の解析、花崗岩中のメルト包有物の解析、輝石温度計等の適用などから、葛根田地域におけるマグマの固結から現在に至る熱履歴を推定した。また、流体包有物の解析、NEDOデータの再解析などから、天水、濃厚塩水などの特徴的な流体の分布様式や流体圧力の推定を行なった。これらの結果から、葛根田花崗岩が貫入し、熱伝導によって接触変成帯が形成されてから、浅部から天水を主体とする流体が深部に浸透していき、活発な熱水系を形成するにいたった過程が明らかになった。

3) 葛根田地熱発電所の3本の深部生産井のスケールは中に含まれる重金属元素の特徴から二つに分類できた。深部貯留層を構成する主要な岩石の違いを反映する可能性がある。 (*地殻熱部)

Keywords: water-rock interaction, magmatic-hydrothermal system, mass and heat transfer, Kakkonda granite

深部地熱資源調査における微小地震について

当舎利行* 西 祐司* 杉原光彦*

NEDOによる深部地熱資源調査が行われた葛根田地熱発電所周辺では、地熱活動に絡む地震活動が報告されている。この地域に設置された微小地震観測システムでの1988年および1997年の1年間に採られた微小地震震源分布について比較を行った。1年間の平均的な発生頻度は差がないものの、88年当時年に数回起こっていた1日あたり200個を越える群発活動は見られなくなった。また、微小地震発生域にも変化が見られ、群発活動の減少により還元域での地震は著しく少なくなった。これは、葛根田地熱発電所への熱水蒸気生産が、気水比が高い地熱流体が生産される深部生産井へと移行してゆき、結果として還元量が減少したためと考えられる。その反

面、NEDO深部調査井WD-1が掘削された地域で、それまで地震空白域であった浅部での地震活動が見られるようになった。また、震源域が南方へ進展していることが判明した。これらの新しい広がりには生産などに伴う熱水循環や地熱貯留層の広がりを表すものと考えられる。

一方、葛根田から離れた地点での観測を行うことにより、深部で発生する地震と葛根田以外で発生した地震を識別することができる。葛根田から北東へ4kmほど離れている松川地区にて地震観測点を設営して観測を行った。観測期間は2週間であり残念ながらその期間中にはWD-1に係わる地震の発生は見られなかったものの、震源誤差がより小さな解が求まり、リモート点観測の利点が示された。また、比較的少数の地震計により構成するアレイ観測法に関して、アレイの形状とその方位分解能・周波数特性等に関して検討し、微小地震を対象とした場合、特殊なケースを除き円形もしくは半円形アレイがL型アレイに比して優れていることを示した。

(*地殻熱部)

Keywords: microearthquake, Kakkonda geothermal field, hypocentre distribution, array network

葛根田地域におけるMT法の適用とその課題

内田利弘* 小川康雄* 高倉伸一* 光畑裕司*

葛根田地域の新期花崗岩及び深部貯留層の構造を解明するため、MT法による比抵抗探査を実施した。得られたデータをNEDOの取得したデータと併せて2次元解析を行い、比抵抗構造を求めるとともに、2次元解析適用の効果と問題点について検討した。また、浅部の局所的な比抵抗変化に起因するスタティック効果を考慮に入れた解析手法を開発し、葛根田地域のデータに適用して、その有効性を検討した。特徴的な解析結果として、葛根田地域の比抵抗構造は、大局的に、浅部では地形の効果や浅部比抵抗分布によりNW-SEの走向をもつものに対し、深部では調査域南東部に存在すると見られる大規模な低比抵抗域の影響によりNE-SW走向を有する。NW-SE方向の測線の2次元解析比抵抗モデルは、NEDOの深部調査井WD-1の電気検層とよい一致を示すが、東西方向の測線のモデルは浅部貯留層部で異なった比抵抗を示す。これは葛根田地域のように非常に複雑な構造を有する場合における2次元解析の限界を示すものである。葛根田地域の変質鉱物分布は沸石鉱物で特徴づけられ、帽岩に顕著な低比抵抗を示す粘土鉱物(モンモリロナイト類)が少なく、貯留層上部の低比抵抗域は小さい。NW-SE測線の比抵抗モデルによると、熱水生産域は比較的到高比抵抗であり、微小地震の卓越部に相当する。また、葛根田花崗岩については、そこから採取

された流体は高塩濃度であるが、電気検層や比抵抗モデルでは花崗岩は高比抵抗であると解析された。

(*地殻物理部)

Keywords : magnetotelluric method, 2-D inversion, resistivity structure, Kakkonda geothermal field

深部地熱系の貯留層評価

石戸経士* 矢野雄策* 竹野直人*

深部貯留層の地熱ポテンシャルを評価するためには、貯留層の広がりや浅部貯留層との関係を把握し貯留層モデルを構築することが求められる。このためには、深部調査井を用いた圧力干渉テスト等の貯留層工学的手法を駆使することが有効であり、WD-1 b 井に即した検討を行った。また、地熱系発達に関する地質学情報をモデル構築に活用することを考え、岩石-水化学反応を熱水対流とカップルして扱う数値シミュレーション手法について研究を進めた。深部貯留層開発の経済性については、これまでの知見を元に仮想的なモデルを設定し、超臨界状態までを考慮した数値シミュレーションによる検討を行った。その結果、貯留層のパフォーマンスは温度、透水性に大きく依存し、kH 値が 10 d-m 以上であると、深部のみで期待される 350°C 以上の高温では、50 年といった長期にわたり必要生産井数がきわめて少なく、地熱資源として魅力的である、との結果を得た。400°C といった超臨界の高温で貯留層（割れ目）が発達しているか否か、これは今後の調査結果を待たなければならないが、kH 値が 1 d-m 程度の比較的透水性の低い場合には、むしろ現実に発見されつつある 350°C といった“低め”の温度の方がパフォーマンスが良い、との予測結果を得た。

(*地殻熱部)

Keywords : numerical simulation, super-critical, reservoir performance

仙岩地域の深部地熱資源評価

玉生志郎*

葛根田地熱地域の広域地熱構造上の位置づけを明確にさせること、および仙岩地域（葛根田地域を含む）全体の深部地熱資源評価を行うことを目的に、仙岩地域全体の地下温度構造と流体流動ベクトルを計算した。地下温度は、浅部の坑井温度を基に緩和法を用いて地下深部の地層平衡温度を推定した。その結果、仙岩地域では海拔 -2 km 準で摂氏 200 度以上となる高温域の面積が 390 km² となることが判明した（葛根田地域もこの中に含ま

れる）。この値は日本の他の地熱地域と比較すると卓越して、世界超一流の地熱地帯に匹敵するものである。このような広範な高温異常域の存在は地下における広域的な高温岩体の伏在を示唆するものである。一方、地下温度分布から推定される流体流動ベクトルは、浅部対流系とカップリングした緩慢な深部低速流体流動が、葛根田、松川、澄川、乳頭地域で生じていることを示している。これは集水域全体から深部地熱貯留層への水供給が緩慢であることを示唆するものである。葛根田地熱地域での地熱貯留層への水供給量は、集水域の面積とそこでの年間降水量とから推定できる。それによれば、葛根田地熱貯留層への水供給は、熱供給に比べるとかなり制約条件になっていると判断される。そのため、今後の開発においては貯留層への水供給効率を如何に上げていくかが重要な鍵になると思われる。

(*地殻熱部)

Keywords : resource assessment, subsurface temperature, fluid flow, recharge, Sengan area

今後の日本の深部地熱資源の探査・開発のためには？

茂野 博*

深部地熱資源は、地域毎に熱構造、貯留層構造等が大きく異なっている可能性が高い。この観点から、本講演では深部地熱資源に関わるモデルおよび探査・評価手法を整理し、今後の深部地熱資源の開発の進展に向けた調査・研究のあり方を取りまとめた。

深部地熱資源のモデルについては、まずモデル化の対象要素、目的、手法等を整理した。特に地域間の比較を目的とした演繹的手法として、簡便なマグマ・熱水系の 1 次元熱伝導モデル（貯留層をヒートパイプとして処理）を提示し、マグマと浅部・深部貯留層の深度分布に規定された地下温度の空間分布・時間変化の多様性を数値シミュレーションにより体系的に示した。またこのモデル化手法の適用により、葛根田地域で認められる過去の変成鉱物生成温度と現在の坑井検層温度間の大きな差異（約 20 万年間の変化）の問題が、熱伝導・熱蓄積場から急激な貯留層形成・熱流動場への環境変化モデル等で半定量的に説明できることを示した。

深部地熱資源の探査・評価手法については、深部の貯留層とマグマの探査・評価に有望な各種の地質学・地球化学・地球物理学・貯留層工学的手法を一覧表に整理し、いくつかの手法適用例等を紹介した。また、これらの総合解析手法として、比較的豊富な温度分布（直接・間接）データを軸とした総合逆解析手法を提案した。現実のマグマ・熱水系は空間的・時間的に非常に複雑であるのに対して、深部解析に利用できる高品位の測定デー

は少ない。このため、出来るだけ簡略で本質を失わない地熱系モデルの構築方法や最適解の選出方法が総合解析手法の課題と考えられる。

今後、深部地熱資源の開発を比較的短期的な目標とする場合には、既開発地域の深部環境を既存～改良手法により解析・評価し、経済的開発の条件(良好な深部貯留層の温度、流体化学性状、生産性、規模等)に恵まれた地域を選出して、深部掘削調査を進める必要がある。一方、比較的長期的な目標とする場合には、より精密な深部探査・評価法の開発とその適用、腐食性環境・高温乾燥環境等の利用技術の開発等が重要と考えられる。

(*地殻熱部)

Keywords: geothermal resources, geothermal exploration, deep drilling, modeling, Japan

葛根田熱水系の化学・同位体的特徴について —涵養域の推定—

風早康平* 高橋正明** 安原正也* 佐藤 努***

葛根田地熱発電所の浅部井及び深部井から得られた流体の水素・酸素同位体組成の比較・検討を行った。その結果以下のことが解明できた。

(1) 葛根田地熱系の深部井から得られる流体(以下、深部流体)と浅部井から得られる流体(以下、浅部流体)は、同位体的には類似したものである。葛根田地熱系から得られる流体は、浅部流体、深部流体ともに涵養される天水から酸素同位体組成が1~2%程変化しているのみで、水素同位体組成の変化は見られない。また涵養される天水の標高を考えると、葛根田地熱系への高温火山ガスの影響は非常に小さいことも推定できる。葛根田地熱系は、「酸素同位体組成シフト」をする地熱流体が賦存する系、「低塩濃度」地熱系、すなわち地熱流体は主に水/岩石反応により形成され、火山ガス等マグマ起源物質の寄与を受けない系であること、その系が浅部層のみならず、深部層まで続いていることが推定できる。このような現象は、深部層が開発されている八丁原、澄川いづれでも見られる(いづれの場合も「酸素同位体組成シフト」をする地熱流体が賦存する系、「低塩濃度」地熱系である)。下降した地下水が対流の底を回って熱水として熟成するというモデルと合致していると考えられる。

(2) 岩手山の降水、湧水等から推定した、この付近の地熱系・地下水系に涵養される標高別(500m~1400m)の天水の水素・酸素同位体組成と、葛根田地熱発電所の浅部井及び深部井から得られた流体の水素・酸素同位体組成の比較・検討を行った。その結果、葛根田地熱系へは標高が1000mよりも高い場所から主に涵養されているのではないかと推定された。葛根田地熱発電所付近

は、三ツ石山-小畚山-大白森(北)-八瀬森-曲崎山-大白森(西)-乳頭山で囲まれた袋小路のような地形になっている。また大白森(北)と乳頭山を結ぶ線の西側の部分では、標高が1000mよりも高い部分は稜線部に限られ葛根田地熱系からは相当離れて位置している一方で、大白森と乳頭山を結ぶ線の東側の部分では標高が1000mよりも高い部分が相当広く分布していることを考え併せると、葛根田地熱系へは主に北部と南部から天水が涵養されているのではないかと推定ができる。

(*環境地質部, **地殻熱部, ***地震地質部)

Keywords: recharge area, oxygen isotope, hydrogen isotope, "low salinity" geothermal reservoir

地表水・地下水を用いた同位体標高効果と 地下水流動系

—葛根田熱水系の涵養域推定をめざして—

風早康平* 安原正也* 佐藤 努**

葛根田地域の深部熱水流体系の起源・流動系を理解するための一助として、岩手火山に同位体水文学的手法を適用した結果を報告した。

岩手山の山頂部およびほぼ全周にわたる周辺部の湧水・河川水・雨水を1995年-1997年にかけて合計約70試料採取し、その試料水の水素・酸素同位体比を測定した。水素同位体比は-80~-60‰、酸素同位体比は-12~-9‰の範囲であった。岩手山周辺部では、 δ 値は12~22の値を示し、岩手山に降雨をもたらす気団の起源が単純ではないことを示唆する。山頂部の湧水および葛根田地域の沢水で δ 値が大きいことから、山頂部あるいは葛根田地域において涵養される地下水は主に大陸からもたらされる気団による降雨(冬季の降雪)を起源とし、低標高域は主に夏季の南西からの気団による降雨を起源とするものと考えられる。

涵養水の同位体標高効果は、浸透時に蒸発することから雨水の同位体比をそのまま用いることはできず、本研究では風早・安原(1994)の手法を拡張し用いた。その結果、涵養水の同位体標高効果は、

$$H(\text{recharge}) = -50\delta D - 2090 \quad (h > 1300 \text{ m})$$

$$H(\text{recharge}) = -108\delta D - 6060 \quad (h < 1300 \text{ m})$$

$$H(\text{recharge}) = -426\delta^{18}\text{O} - 3360$$

と求められた。ただし、 $H(\text{recharge})$ は涵養標高(m)である。これらの結果の定量的考察により、東岩手山頂部に涵養された地下水系は、東斜面の標高300mの生出湧水(日量5万トン)に集中排水され、大地獄谷付近の地下水系は、そのまま北に流動し、金沢清水(日量6万トン)として湧出していることがわかった。

また、NEDOにより同位体比の得られている葛根田地

域の沢水についても本手法を適用した結果、水素同位体涵養線は葛根田地域では曲がらず、山頂部に適用される直線を延長したものでよいことがわかる。その関係は、

$$H(\text{recharge}) = -50 \delta D - 2090$$

$$H(\text{recharge}) = -426 \delta^{18}O - 3500$$

と求められた。この同位体標高効果はそのまま、葛根田地域の浅部・深部熱水系に適用可能であると考えられる。 (*環境地質部, **地震地質部)

Keywords : groundwater flow, recharge area, isotope altitude effect, stable isotope, oxygen isotope

葛根田地域の地下水流動シミュレーション

丸井敦尚* 佐藤 努**

葛根田地域での深部地下水浸透を把握するために、地表水ならびに表層部の地下水を対象とした水収支を計算した。本研究では、降水量・気温・河川水量・河川水温・地下水位を用いた計算を行っている。地下水位を除く各項目は6号基地内およびその周辺で得られたデータを用いた。河川水の温度変化を用いて、先ずハイドログラフをイベント成分と基底地下水流出成分に分離し、降水の直接流出量を算定した。河川流出特性の季節的な変化を把握するために台風時期と雪解け時の2つのイベントについての計算を実施している。蒸発量などを考慮した上でそれぞれの季節の流出特性を把握し、地下水位の変化から極表層部での水分量変化を推定し、同時に葛根田川流域からの流域外流出量を求めた。これらの結果を用いて、深部地下へのイベント水浸透量を算定した。

現段階での浅層地下水流動シミュレーション結果は、解析データが少ないことから地形に依存していると考えられる。従って、地形の変換点付近が深部浸透の涵養ポイントとしてクローズアップされやすいが、今後は今回実施したような一雨ごとの流出解析を続け、河川への温度変化の時間遅れなどを正確に把握することで、より精度の高い地下水流動解析を実施したい。

(*環境地質部, **地震地質部)

Keywords : groundwater flow, recharge, infiltration, water balance

葛根田地熱地域の地熱ガス中の軽質炭化水素の特徴

猪狩俊一郎* 前川竜男* 坂田 将*

岩手県葛根田地熱地域の地熱ガス中のRガス(全ガス中から水蒸気と酸性ガスを除いた成分)を採取し、その炭化水素組成の測定を行った。その結果、飽和炭化水素

(メタン, エタン, プロパン, イソブタン, ノルマルブタン, ネオペンタン, イソペンタン, ノルマルペンタン)の間には相関が観察された。また、不飽和炭化水素(エチレン, プロピレン)の間にも相関が観察された。飽和炭化水素と不飽和炭化水素の間には相関が観察されなかった。これらのことから、同地域の炭化水素は飽和炭化水素のみからなる成分Aと不飽和炭化水素を多量に含む成分Bの混合物であることが推定された。また、成分Aは有機物の熱分解起源であり、成分Bは火山ガス中の炭化水素と同様の起源であることが推定された。成分Bの組成を火山ガス中の炭化水素組成と等しいと仮定することにより、両者の混合比は1:数百程度であるものと計算された。 (*地殻化学部)

Keywords : fumarolic gas, light hydrocarbon, Kakkonda geothermal area

人工流体包有物による坑井検層法及び流体採取法

佐脇貴幸* 笹田政克** 月村勝宏***

本研究開発は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)と共同し、高温条件下(350℃以上)にある地熱坑井に対して、坑井内で人工的に流体包有物を合成することによって温度検層を行う手法、及び坑井内で地熱流体を直接採取する手法を開発することを目的としている。手法の開発に当たっては、実験室内で予備実験を行ない、人工流体包有物の形成条件を明らかにし、この結果に基づいて実際の坑井での実験を行なった。なお坑井実験は、NEDOによって掘削された葛根田の深部調査井WD-1にて実施した。坑井実験は、本手法の実際の地熱開発現場での適用を考慮し、短期(1, 2, 3日間)、中期(24日間)、長期(3ヵ月間)というように、実験時間を変えて行なった。温度測定用試料としては、種結晶(人工石英及び方解石)とそれぞれの化学成分に飽和した溶液(NaOH, NaCl, HCl)とを金及び白金カプセルに封入したものを用いた。実験の結果、短期間でも測定可能な大きさで、かつ十分な数の流体包有物が結晶内に形成されていた。また、流体包有物の温度測定の結果も坑井の温度とほぼ一致していた。一方、流体採取用試料としては、マイクロクラックを多数持つ人工石英結晶を用いた。なお、用いた結晶はカプセル等に封入せず、坑井流体に直接接触できるようにして坑井内に設置した。実験の結果、300℃を越える条件であれば、短期間であっても流体包有物が形成されることがわかった。これらのことは、本手法が高温条件下での坑井検層法及び流体採取法として有用であることを示している。

(*地殻熱部, **国際協力室, ***資源エネルギー地質部)
Keywords : synthetic fluid inclusion logging, temperature

measurement, fluid sampling, WD-1, Kakkonda

葛根田花崗岩の透水係数

藤本光一郎* 高橋 学**

花崗岩体が固結冷却し、周囲に熱変成や変質を及ぼしていく過程で、岩体内の水の移動は本質的なプロセスであり、透水係数は重要なパラメータとなる。本研究では葛根田花崗岩について、その透水性をトランジェントパルス法を用いて測定し、年代や変質の程度等による違いを調べた。対象とする試料はWD-1も含む葛根田地域の地熱井から採取された第四紀形成と考えられる葛根田花崗岩(花崗閃緑岩)5試料、熱変成を受けているため新第三紀と考えられるトナル岩2試料、及び乳頭地域の地熱調査井から採取された新第三紀と考えられる花崗閃緑岩1試料、北アルプスで採取された第四紀の滝谷花崗閃緑岩(Harayama, 1992)1試料の計6試料である。測定結果は、封圧5MPa、間隙水圧3MPaの条件で、葛根田花崗岩の透水係数は 10^{-4} (darcy)のオーダーで、それ以外の花崗岩は1桁から3桁透水係数が低く、また、従来報告されている花崗岩の透水係数よりかなり高い。水銀圧入法によって測定した孔隙径分布と透水係数はよい相関があった。葛根田花崗岩の鉱物粒界には数ミクロン程度の隙間が確認され、透水経路としては鉱物の粒界の可能性が高い。葛根田花崗岩のように固結直後の花崗岩は鉱物粒界等を通じた透水性がかなり良いが、再結晶や二次鉱物の沈殿によって粒界がふさがれ、透水性が低くなることが予想される。固結直後の高い透水性が花崗岩内部からの脱ガス、あるいは熱水系の形成や岩体の熱史と密接に関わってくる可能性がある。

(*地殻熱部, **環境地質部)

Keywords: Kakkonda granite, permeability, porosity, pore size, grain boundary

葛根田地熱系の接触変成帯に産する
コランダム産状及び形成条件について

佐脇貴幸* 佐々木宗建* 竹野直人* 藤本光一郎*

葛根田花崗岩直上の接触変成帯中に見出されたコランダム、含亜鉛スピネルの産状、及びコランダム中の流体包有物に関して研究し、本地域の接触変成作用の温度圧力条件、及び地熱系の発達初期段階で生成された流体の性状について考察した。コランダムと亜鉛スピネルが見出されたのは、深部調査井WD-1の深度2843m付近の

砂泥質ホルンフェルスであり、葛根田花崗岩体直上部の、最も変成度が高い部分である。このホルンフェルス(特に泥質部)を構成する鉱物としては、コランダム及びスピネルの他に黒雲母、堇青石、紅柱石、カリ長石、斜長石、チタン鉄鉱、ルチルなどがある。また、コランダム及びスピネルは、その一部が温度降下期に形成されたと推定される白雲母によって置換されており、さらにその外側はカリ長石によって取り囲まれている。スピネルの形成反応については未だ不明のところがあるが、上記の産状に基づくと、コランダムについては、白雲母の単独分解反応によって形成されたものと考えられる。これまでに公表されている、コランダム及び Al_2SiO_5 鉱物の安定領域に関する文献のデータに基づくと、試料の採取された深度から圧力を1kbarと見積もれば、花崗岩直上部での最高変成温度は640-700°Cであったと推定される。また、コランダム中には気相が優勢な流体包有物が含まれている。この流体包有物のガス組成を分析した結果、 CO_2 、 H_2S 、 N_2 が検出された。この結果は、接触変成作用時に生成された流体が比較的低密度であり、またこれらの成分に富んでいたことを示唆している。以上のデータは、地熱系発達過程の、最も初期段階の状態を考慮するために、非常に重要であると考えられる。

(*地殻熱部)

Keywords: corundum, zircon spinel, Kakkonda, contact metamorphism, P-T condition

葛根田深部生産井のスケールによる解析

柳沢教雄* 藤本光一郎*

岩手県葛根田地熱地域では、日本重化学工業(株)により、深部貯留層開発を目的とした坑井掘削により、熱源の一部と考えられる第四紀の葛根田花崗岩が補足された。その花崗岩の周縁部からの熱水は、深部生産井により発電に利用されている。本研究では、葛根田地熱地域の3本の深部生産井の地上配管に付着したスケールの顕微鏡観察・化学分析を行い、生成環境などを考察した。スケールは、葛根田花崗岩体頂部付近のWell-13、端部のWell-19、中間点のWell-22の3坑井で採取した。

顕微鏡観察の結果、Well-13では、輝銅鉱、斑銅鉱などの銅鉱物、方鉛鉱が観察され、さらに鉄鉱や自然アンチモニーが存在した。一方、Well-19では、方鉛鉱、閃亜鉛鉱の集合体为非晶質シリカと互層をなしており、銅鉱物は存在しなかった。Well-22では、方鉛鉱、銅鉱物が観察された。

また、化学分析では、Cuは、Well-13の約14%からWell-19(約0.3%)に向けて減少し、逆にZnは、Well-13の約0.03%からWell-19(約20%)に向けて増加し

た。Well-13 では、Au, Ag, Co, Mo, Sb, As, Ni が相対的に多く、逆に Pb, Mn は Well-19 で富んでいた。また、硫黄は Well-19 では、金属が硫化物を形成するに十分な量であったが、Well-13 では不足していた。

これらにより、花崗岩体の中心から端部に向けて、Cu → Pb-Zn (Mn) と移行するような鉱脈を伴っている可能性があること、Well-13 のスケール生成環境は、Well-19 に比べて還元的であると考えられることが示された。

(*地殻熱部)

Keywords: deep-geothermal well, scales, sulfide mineral, granite

X 線 CT による葛根田花崗岩の 3 次元イメージング

大谷具幸* 中島善人**

葛根田地熱地域の深部貯留層を構成する葛根田花崗岩には数 mm の空隙 (miarolitic cavity) が一部に発達しており、これらは深部貯留層の形成と関連がある可能性が考えられる。そこで空隙の 3 次元空間分布、分布密度、サイズ分布を求めるために、医療用 X 線 CT 装置を用いてボーリングコア試料の 3 次元イメージングを行った。用いた試料は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が深部地熱資源調査プロジェクトにおいて掘削した WD-1a から採取された葛根田花崗岩であり、撮影を行った区間は深度 2936.040~2937.220 m である。X 線 CT 画像の濃淡は主に密度の大小を表し、今回の観察では葛根田花崗岩に認められる径数 mm の空隙、有色鉱物、径数 cm の暗色包有物を確認することができた。また空隙の 3 次元分布を確認することができ、高傾斜の境界をともなって分布することが明らかになった。このコアは定方位コアであるので境界の方位を特定することができ、その方位は N 20° E 55° W であった。また、分布密度は 0.9%、2 mm³ 以上の空隙は 0.33/cm³ の割合で存在することが明らかになった。この方位は葛根田花崗岩体の上面より浅所で発生している微小地震の震源分布の方位、MT 法探査による低比抵抗領域の分布方位 (NEDO, 1996) および標高-500 m 準の等温線の分布方位 (玉生, 1994) にほぼ一致している。花崗岩に空隙が含まれる位置では微小地震は発生していないものの、花崗岩体の内部にこのような既存の構造が存在することにより貯留層形成に何らかの影響を与えているのかもしれない。

(*地殻熱部, **地殻物理部)

Keywords: X-ray computed tomography, miarolitic cavity, Kakkonda granite, deep geothermal reservoir

硫黄沢周辺の温泉の化学 —花崗岩地域にある噴気地帯—

高橋正明* 佐藤 努** 前川竜男*** 佐々木宗建*
藤本光一郎* 原山 智† 及川輝樹†
高橋 康† 吉澤杉洋†

長野県大町市、高瀬川の最上流部に位置する、花崗岩の中にある噴気地帯である硫黄沢を、葛根田地域の「深部環境」との比較検討という観点から調査してきた。水同位体組成や化学組成からは通常の火山性温泉・噴気地帯という情報しか得られなかったが、臭化物イオン濃度/塩化物イオン濃度比からは「花崗岩地域に特有の値」が得られ、「深部環境」を抽出できるのではないかと推定された。以下は臭化物イオン濃度/塩化物イオン濃度比の分布状態の概要である。臭化物イオン濃度/塩化物イオン濃度比に着目した研究は非常に少ないので、残念ながら不明な点が多々ある状態である。

(1) 海岸付近に分布する温泉は、海水の Br/Cl 比 (0.0034) 付近に分布する。

(2) 海岸部、平野部、内陸部の深層熱水地域に分布する温泉の Br/Cl 比は 0.001~0.008 の広い範囲に分布する。続成作用の前期 (第四紀) には、堆積物中の海洋生物の遺骸からの Br の付加により Br/Cl 比が上昇すること、続成作用の後期 (第三紀) には、堆積岩への Br の選択的な除去により Br/Cl 比が降下することが推定されている。

(3) 天水の値は 0.005 程度である。海岸部、平野部、内陸部に分布する温泉で、Br 濃度が 10 ppm 以下の場合には 0.004 程度の Br/Cl 比を示し、天水と海水の混合により形成されていることが推定される。

(4) 化石海水型、グリーンタフ型及び有馬型と呼ばれる温泉の Br/Cl 比は 0.001~0.003 程度に分布する。化石海水型、グリーンタフ型と呼ばれる温泉は、深層熱水から連続的に変化したもの (残骸) である可能性も考えられる。また有馬型と呼ばれる温泉は、火山フロント前弧側にプレートから放出される水「subducted water」である可能性が指摘されている。

(5) 火山性温泉の Br/Cl 比は 0.001~0.005 程度に分布することが多い。

(6) 火山ガスの Br/Cl 比は 0.001~0.002 程度、火成岩の Br/Cl 比は 0.001~0.005 程度に分布する。一方火山性発散物の Br/Cl 比は時に 1 に達するほど大きな場合がある。火山性温泉の Br/Cl 比と比較すると、火山性温泉は火山ガス及び火成岩の影響を受けて形成されている (火山性発散物の影響を強く受ける場合もある) と推定される。

(7) 花崗岩地帯から湧出する温泉の Br/Cl 比は 0.001~0.005 程度に分布する。この Br/Cl 比は花崗岩の値に

類似しており、花崗岩自体の影響を強く受けていると推定できる。黒部花崗岩類から湧出する餓鬼谷温泉、有明花崗岩類から湧出する地獄谷温泉、硫黄沢の Br/Cl 比もこの様な値である。葛根田花崗岩から湧出した超高塩濃度の水も最高濃度の部分で 0.0028~0.0048 であり、「花崗岩から湧出する温泉」の値と同じである。

(8) 地熱発電所から得られる熱水の Br/Cl 比は 0.001~0.003 程度に分布する。地熱系の形成を考えると、この分布様式は火山性温泉と類似していると考えられる。

(*地殻熱部, **地震地質部, ***地殻化学部,
†信州大学理学部)

Keywords : Iwo-sawa, fumarolic area, Nagano Prefecture, Br/Cl weight ratio

分布型温度測定システムの地熱坑井への応用

阪口圭一* 松島喜雄*

分布型温度測定 (Distributed Temperature Sensing : DTS) システムは、光ファイバー中に射出したレーザー光の後方散乱光のうち、温度依存性のある成分の強度から温度を計算する、新しい温度測定法である。レーザー光射出から後方散乱光帰還までの時間により散乱の位置を計算するので、光ファイバーの全長にわたる温度分布が測定可能である。従来温度検層法との最大の違いは、光ファイバーセンサーを坑井内に静置して測定することで、坑井全体の温度分布を数分間隔で繰り返し測定でき、温度分布の時間変動捕捉に適している。

実坑井での測定実験では、DTS 検層法での測定温度は従来検層法の測定値とよく一致した。また、測定精度は、センサー長 2000 m、坑底付近の温度約 200°C、データの平均化時間 256 秒という条件で、標準偏差が 0.5°C 以下であり、地熱坑井の温度検層には十分な精度であることが確認できた。時間変動のある温度分布測定の例として実施した坑井への注水に伴う温度±圧力測定実験では、断裂位置の推定、水位面深度の捕捉などで DTS 検層法の特長が活かされることを確認した。水位面深度と温度分布データから坑井内圧力分布を計算することも可能である。

DTS 温度検層システムを深部坑井 (≧3000 m, ≧300°C) に適用するにあたっては、以下のような問題点があげられる。1) 高耐熱性の光ファイバーのコーティング材の開発、2) 光ファイバー長が長くなるに伴う測定精度の低下、3) 光ファイバー長が長くなるに伴うファイバー損傷の可能性の増大。深部坑井への適用が期待されている他の検層法であるメモリ式検層システム、流体包有物検層法に比較すると、DTS 検層法は大深度・高温への対応ではやや劣っている。リアルタイムで

測定結果が得られること、繰り返し (連続) 測定ができることにおいて優位であるといえる。 (*地殻熱部)

Keywords : distributed temperature sensing technique, temperature logging, injection test, optical fiber

測地データに基づく貯留層圧力構造変動の推定

杉原光彦* 西 祐司*

地熱貯留層内に圧力変動があれば地表変位が生じうるので、測地学的手法は貯留層内の変動を推定する手がかりとなる可能性がある。地熱開発地域では重力モニタリングが行われることが多いが、その際、高度補正のために水準測量または GPS 測量が行われる。圧力変動による体積歪と地表変位の関係は解析的に表現できる。この表現式を実際のデータに適用したところ妥当な結果を得た。但し、測地データのインバージョンにおいて一般的に問題となる解の多義性はこの場合にもある。また GPS 測量は作業は容易であるがまだ誤差が大きいう問題もある。一方、GPS の利用技術は今尚、発展中であり精度の向上は期待できる。こうした現状の問題点と将来の可能性についても検討した。 (*地殻熱部)

Keywords : geothermal reservoir, GPS, surface displacement, volume strain

シミュレーションからみた葛根田地域の速度構造について

菊地恒夫* 西 祐司*

NEDO が推定した葛根田地域の速度構造をもとに、有限要素法を用いたシミュレーション計算を行い、計算波形と観測波形の比較を行った。その結果、観測結果に対するシミュレーションの P 波初動の誤差は±2% 程度と良く一致することが判明した。ところで、葛根田地域の地表面は、上述の二次元モデルの断面に直交する方向に大きな起伏がある。従って、同地域の三次元モデルから波動伝播を計算することが、速度構造を明らかにするという目的からもっとも好ましい方法である。しかし、計算機の性能が向上したとはいえ、メモリ容量などがボトルネックとなって、現在でも十分な大きさのモデルで三次元の計算を行うには困難が伴う。そこで、上述の二次元モデルで計算した波形と、三次元モデルで計算した波形を比較し、その結果から、二次元計算でよい場合と三次元の計算が必要な場合を見極めることにした。この目的のために、差分法を用いて、幅、奥行き、高さが 1.6 km×1.6 km×1.8 km の 2 層構造の三次元モデルで計算

を行った。この結果、P 波の初動は理論値とよく一致した。ただし、計算機のメモリの制約のため、この程度の大きさのモデルが限界であった。また、格子間隔もこれ以上小さくできないので、ソースの卓越周波数を約 4Hz より高く出来ず、二次元波形と三次元波形の直接の比較まで行っていない。ところで、上述の計算に使用した計算機は、工業技術院情報計算センターの CRAY C90 であった。1999 年 3 月に、CRAY に代わり、新たなスーパーコンピュータ（日立 SR8000, 64 ノード, 8 CPU・8 GB/1 ノード）が同センターに導入され、使用できるメモリが増大することが予想される。そこで、この新計算機を用いてシミュレーションを行う場合のパラメータについて検討を行った結果、差分の格子間隔 Δx を 5m 程度とした場合は、最低使用メモリの目安は 28.7GB 程度であることが判明した。 (*地殻熱部)

Keywords : simulation, velocity structure, Kakkonda

岩手山—葛根田周辺域の重力異常と密度構造

駒澤正夫*

葛根田と松川地域で測点のなかった地域で補足調査を行い約 100 点の重力測定を実施し、既存データとの編集作業を行った。上方接続残差比較法 (CVUR 法) による表層密度の推定から、表層密度として通常の火砕堆積物よりやや大きい 2.36 g/cm^3 という値を得た。また、均質 2 層解析を行った結果、広域的には葛根田地域の北東域の大深岳、三ツ石山を含む地域に重力基盤の盛り上がりが見られ、新期花崗岩のブロック的な隆起に伴う構造とも考えられる。葛根田地域の坑井による新期花崗岩の着岩深度は、北西方向に向かって浅くなっているようにも見え、重力基盤との対応はよい。新期花崗岩の密度は周囲の基盤岩に比べれば、過小と考えられるが現時点での解析結果では、明瞭な低密度ゾーンそのものは得られていない。しかし、葛根田川に沿って低重力域が雫石盆地方向より入りこんできており、花崗岩の貫入を想起させる。 (*地殻物理部)

Keywords : 3-D gravity basement, low density zone, CVUR method

人工信号源電磁探査法 2 次元モデリング技術の開発

光畑裕司* 内田利弘*

地熱地域の深部地下構造を把握するのに MT 法は有力な手法であるが、厚い低比抵抗層下では分解能が著しく低下し、断裂帯の存在を推定するのは困難となる。本

発表ではまず、深部の構造を抽出するには従来通りの TM モードのデータだけ用いたのでは信号が弱く困難であること示し、TE モードデータの使用は不可欠であるが、それでも分解能の低下は避けられないことを 2 次元シミュレーションにより示した。これらの困難を克服するために NEDO は地表に人工信号源を設置し、信号を送信し、抗井内に配置した受信器で磁場信号を受信する VEMP (Vertical electromagnetic profiling) 法を新たに開発し、葛根田地域でデータ取得実験を実施した。我々はそのデータを独自に解釈するために、有限要素法を用いて 2 次元モデリング技術を開発し、人工信号源と地形が考慮できるよう改良した。さらに観測データから地下比抵抗構造を推定するインバージョン手法の開発も実施した。本発表ではそれらモデリング・インバージョン手法の有効性についての数値実験を示した。 (*地殻物理部)

(*地殻物理部)

Keywords : magnetotellurics, VEMP, modeling, inversion, 2.5-dimension

地熱系におけるシリカの溶解・移動・沈殿の数値モデル

竹野直人* 石戸経士* Pritchett, J.W.**

シリカ多形鉱物（石英、クリストバライト、非晶質シリカ）の反応速度を考慮した溶解・沈殿を伴う地熱熱水対流系の数値モデル化を数値シミュレータ RIGHTS を用いて試みた。2 km×2 km を 80 ずつに分割した 2 次元垂直断面の底面に最高 350 度の熱源を設定してポラスモデルで熱水対流を惹き起こし 5 万年まで時間変化を追跡した結果、非晶質シリカの沈殿には、熱水が速い流速で地表に達する断裂のような鉛直な高浸透率ゾーンが必要があること、クリストバライトの消失が 100°C 以下で起こることが示された。このことからモデルが天然の現象をよく表現することが示されるとともに、自然状態推定に際し、条件の任意性減少という点で地化学データ利用の有用性が示されたと考えられる。さらに 4 km×4 km の 2 次元垂直断面の底面に最高 450 度の熱源を設定し超臨界条件までの熱水対流系でのシリカの挙動を調べた。今回の実験の場合超臨界に達する領域があまり発達せず、臨界以下の場合の結果とほぼ同じ結果となり、臨界点近傍でのシリカ溶解度の挙動が明瞭に反映する結果とはならなかった。今後条件設定を工夫して超臨界領域が広く広がるようにして実験する必要がある。

(*地殻熱部, ** Maxwell Inc.)

Keywords : silica, kinetics, transport, geothermal model

地熱資源図の作成—新潟・秋田・九州地熱資源図—

高橋正明* 村田泰章** 駒澤正夫***
 阪口圭一* 野田徹郎† 玉生志郎*

これまでに編集・出版した50万分の1新潟地熱資源図(1993年刊),50万分の1秋田地熱資源図(1996年刊)に加え,本年出版予定の60万分の1九州地熱資源図を展示した。同時に,多量の温泉データの今後の使用可能性について展示を行った。

(1) 泉温・イオン濃度平滑化図:(a)金原(1992)の日本・温泉鉱泉分布図及び一覧に掲載されている約3,800点の泉温データ,及び(b)50万分の1新潟,秋田両地熱資源図に掲載した泉温・イオン濃度データと,青森地熱資源図所蔵予定の泉温・イオン濃度データ約1,500点の平滑化図を展示した。泉温平滑化図からは,脊梁山脈部分で泉温が高いこと,仙岩地熱地帯,栗駒地熱地帯で特に温度が高いことが見て取れる。また青森県(津軽平野-脊梁部(八甲田)-三本木原(八戸-三沢)),飯豊山地-新潟平野北部に高温域があることも見て取れ,塩化物イオン濃度平滑化図からは,塩化物イオン濃度が高い温泉は海岸部及び内陸平野の部分に多いこと,火山周辺(脊梁山脈部分)では塩化物イオン濃度が一般には低いことが見て取れる。また福島県西部地域を見ると,南会津郡と耶麻郡に塩化物イオン濃度が高い部分が分布していますが,中間部分の河沼郡付近では相対的に塩化物イオン濃度が低くなっている。この付近には塩濃度が高い温泉が連続的に分布しているが,どのような地理的な(地質的な,火山的な)区切り・影響で温泉が形成されているのか,示唆に富む図になっている。これらのことから泉温やイオン濃度,イオン比の平滑化図は,比較的広域を調査する場合,極めて有用なツールとなりうると考えられる。

(2) 山形盆地周辺地域温泉分布図・温泉陰イオンパイチャート:新潟・秋田地熱資源図のうち,山形盆地周辺部分のみを取り出して再編集した。比較的狭い範囲に限定しても,温泉分布図や各種の主題図は地質との関連,地下水との関連等を考察する上で極めて有用なツールになりうると考えられる。比較的狭い範囲に限定する場合,1温泉に多くのデータを表示すれば,温泉地相互の関連(連続しているのか,孤立しているのか,ある方向に化学組成が変化しているのか)等さらに多くの情報を

読みとることが可能となると思われる。本図では,山形盆地西部と北部に塩化物イオン濃度が高い温泉(食塩泉)が分布すること,同盆地東部に硫酸イオン濃度が高い温泉(盆地部では芒硝泉,蔵王周辺で緑礬泉)が分布することが見て取れる。

(*地殻熱部, **地質情報センター, ***地殻物理部,
 †地震地質部)

Keywords: geothermal resources map, contour map, circular diagram map

東北日本の深部地熱資源有望地域
 —地熱資源図に基づいて—

玉生志郎* 高橋正明* 村田泰章** 駒澤正夫***
 金原啓司* 川村政和*** 山口文春†

葛根田地熱地域で実証されたような新期花崗岩に伴う深部地熱系が,どのような地域に期待できるのか,東北日本の地熱資源図を基に,既存データ,特に温泉放熱量分布図,地下温度分布図,重力基盤深度図,P波速度分布図と比較して,検討した。その結果,以下のような特徴をもつ地域に賦存が期待できることが明らかとなった。

- 1) 第四紀火山近傍で,高温温泉・噴気の分布集中域
- 2) 広域的な高温異常域
- 3) 浅い重力基盤域と広域的な隆起域
- 4) 地殻内地震震源下限が浅い地域とP波速度減衰域

このような地域として,下北,八幡平(仙岩地域),栗駒-鳴子,蔵王,磐梯-安達太良,那須-塩原をあげることができる。これらはいずれも第四紀火山フロント沿いに分布している。この中で,今までの掘削調査データで広域的な高温域が実証され,かつ葛根田タイプの新期花崗岩に伴う深部地熱系が最も期待される地域として,栗駒-鳴子の湯沢-雄勝地域をあげることができる。

(*地殻熱部, **地質情報センター, ***地殻物理部,
 †元(株)パスコ)

Keywords: deep-seated geothermal field, Quaternary granite, geothermal resource map, Northern Honshu

受付年月日1999. 3. 25