

ストロンチウム同位体を用いた地熱流体母岩の推定 —奥鬼怒温泉地域における研究例—

佐藤 努¹⁾・中野 孝 教²⁾

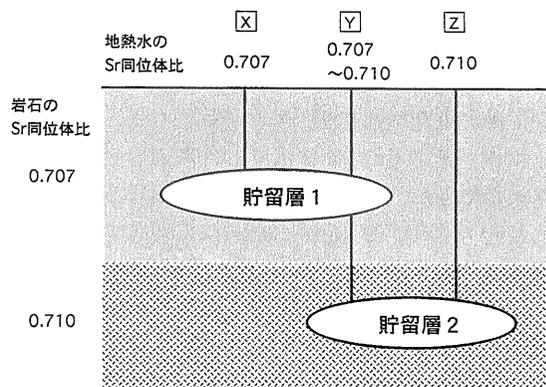
1. ストロンチウム同位体とは

ストロンチウム(Sr)には質量数の異なる4種類の同位体(質量数84, 86, 87, 88)があり, いずれも天然で安定に存在している. これらの中の質量数87の同位体(⁸⁷Sr)と86の同位体の比(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)は, 一般にSr同位体組成と呼ばれる. また両者のうち⁸⁷Srは, 質量数87のルビジウム(⁸⁷Rb)のβ壊変(半減期: 489億年)によっても生じる. そのため⁸⁷Rbを含む試料では, 放射起源の⁸⁷Srの付加により時間の経過とともにSr同位体組成は高い値となる. こうした性質を利用して, 今日様々な岩石の放射年代が測定されてきている.

岩石・鉱物のSr同位体組成は, 多くの場合0.7~0.8程度の範囲にある. この幅は一見狭いように感じるが, 最新の質量分析装置により達成される分析精度が0.00001程度であることを考えると, かなり広い範囲に及んでいることがわかる. このような範囲にわたる同位体組成の変化は, 主に⁸⁷Rbの壊変による⁸⁷Srの付加によってもたらされる. そのため, 年代の古い岩石やRbとSrとの比(Rb/Sr)が高い岩石ほどSr同位体組成は高くなる. 例えば, 大陸地殻を構成する花崗質岩類は一般に年代の古いものが多く高いRb/Sr(>0.1)を示すため, Sr同位体組成も一般に高い値(多くは>0.710)を示す. 逆に, マントルを構成するような塩基性岩(Rb/Sr<0.1)や年代の新しい火山岩は, 低いSr同位体組成(多くは0.703~0.706)を示すのが一般的である.

2. 水文トレーサーとしてのSr同位体

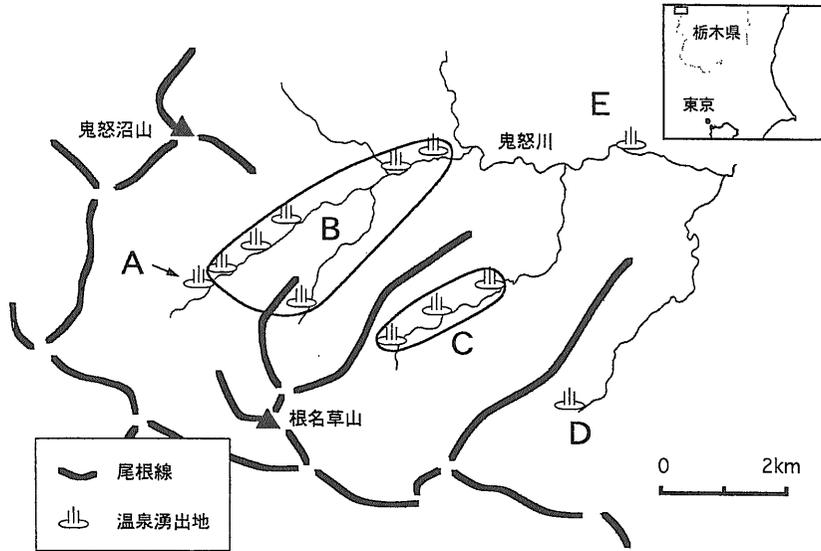
現在環境トレーサーとして, 水素(H), 酸素(O), 炭素(C), 窒素(N), 硫黄(S)などの軽元素安定同位体がよく利用されている. これらの同位体組成の多様性は, 主に蒸発・拡散・酸化還元といった物理化学過程における同位体分別によって生じる. これに対して, Srは蒸発や酸化還元過程での同位体組成の変化が無視できるほど小さく, 軽元素安定同位体とは違った情報を得られるという特徴がある. また, Srはカルシウム(Ca)と似た地球化学的挙動を示すことが知られている. つまり天然水(雨水, 河川・湖沼水, 地下水, 温泉水, 海水など)には多かれ少なかれCaとともにSrが含まれているので, Sr同位体組成はCaなど水に含まれている



第1図 地熱系において考えられるSr同位体組成に関する最も簡単な概念図. 異なるSr同位体組成を持つ岩石中の貯留層1, 2から, 地熱水が途中で岩石と反応することなく上昇する場合, 地熱水X, ZのSr同位体組成は貯留層を構成する岩石の値を反映し, 一方地熱水Yの組成は両岩石の値の間に入ると予想される.

1) 地質調査所 環境地質部
2) 筑波大学 地球科学系

キーワード: ストロンチウム同位体, 地熱, 温泉, 奥鬼怒, 水文トレーサー



第2図 奥鬼怒温泉地域の温泉分布図。湧出地点や泉質の違いから、A から E まで5 種類に分類した。

溶存成分の起源に関する情報をもたらす“水文トレーサー”として、広く用いることができる。このような水文トレーサーとしての Sr の挙動に関する研究は、中野(1993)にまとめられているので参照されたい。

これまでの研究から、河川水や地下水などの Sr 同位体組成は、流域の岩石の Sr 同位体の性質を反映することが判明している。このことは、これら陸水に含まれる Sr が岩石との反応によりもたらされたことを意味する。熱水鉱床や地熱水における Sr 同位体の研究例は必ずしも多くはないが、表層陸水と同様、その Sr 同位体組成には周辺の岩石との対応が指摘されており、地熱水に含まれる成分の起源の特定や水-岩石反応系の解析に応用できる可能性がある。

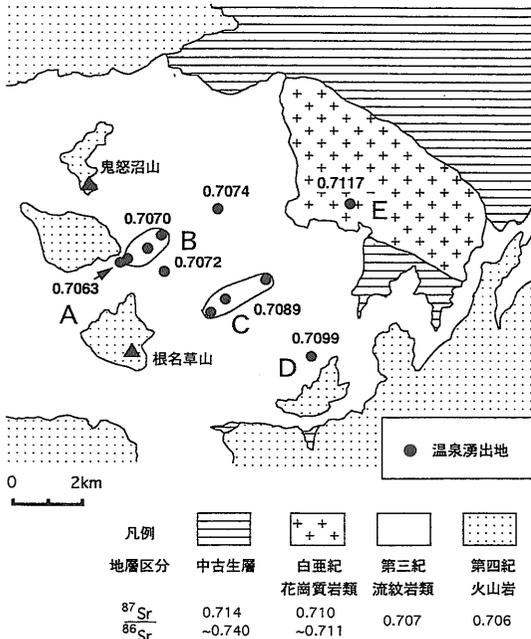
それではここで、Sr 同位体を地熱系に応用した場合に考えられる最も単純なモデルを第1図に示す。このモデルには、地下に異なる Sr 同位体組成を持つ岩体が上下に分布し、それぞれに貯留層1, 2が存在する。この場合、貯留層1及び2よりもたらされた地熱水 X 及び Z の Sr 同位体組成は、上昇する過程における岩石との反応が無視できれば、各母岩の値をそのまま反映すると期待される。また地熱水 Y のように貯留層1と2の水が混在する場合には、その Sr 同位体組成は地熱水 X と Z の値の間に入ると予想される。そこで本研究では、まずモデ

ルフィールドとして奥鬼怒温泉地域を選び、このような視点から温泉水・表層水の Sr 同位体組成及び地球化学的性質を検討した。本文ではその結果を紹介する。

3. Sr 同位体の地熱系への応用—奥鬼怒温泉地域の例—

奥鬼怒温泉地域は栃木県の北西部にあり、鬼怒川の源流域にあたる(第2図)。10 km 四方ほどの範囲に温泉が湧出し、北、西、南の三方を鬼怒沼山(2,141 m)をはじめとする第四紀火山に囲まれている。尾根や谷などの地形に見られるように北東-南西方向の構造が発達し、温泉の湧出地点や成分もこの構造に規制されている(中村・鈴木, 1983)。温泉の湧出温度は30~100°C、泉質は中性の単純泉ないし食塩泉である。これらの温泉は湧出地点の分布や泉質の違いから、第2図のように A から E までの5つに分類できる。ちなみに C にはチムニーを形成している沸騰泉が存在する。また D は金鉱山跡である。

第3図に示すように、本地域は第三紀の奥鬼怒流紋岩類で広く覆われており、東部には中-古生代の堆積岩類及び白亜紀の花崗質岩類が分布し、また西部には第四紀火山岩が分布している。境界部の観察から、奥鬼怒流紋岩類の下位には中-古生層が存在すると考えられている(中村・鈴木, 1983)。



第3図 奥鬼怒温泉地域の温泉水と露出岩石のSr同位体組成との関係。第四紀火山岩のSr同位体組成値はNotsu (1983)による。また地質図は村山・河田 (1956)を引用した。

岩石のSr同位体組成は、年代の古い順に中-古生代の堆積岩類が0.714~0.740、白亜紀花崗質岩類が0.710~0.711、奥鬼怒流紋岩類が0.707である。本地域の第四紀火山岩類については未測定であるが、Notsu (1983)により報告された日光白根山(根名草山から南へ5 kmの第四紀火山)の値(0.70593)から判断して、0.706付近の値を示すと思われる。なお温泉の湧出母岩は、A~Dが奥鬼怒流紋岩類で、Eが白亜紀花崗質岩類である。

温泉水のSr同位体組成は、奥鬼怒流紋岩類地域ではA: 0.7063, B: 0.7070~0.7074, C: 0.7089, D: 0.7099であり、東部に行くにしたがってその値は高くなる(第3図)。花崗質岩類地域に分布するEでは、0.7117と更に高いSr同位体組成を示す。この値が母岩である花崗質岩類の値(0.710~0.711)とほぼ同じであることから、Eの地熱水に含まれるSrの起源は花崗質岩類であることが示唆される。奥鬼怒流紋岩類地域では、B地域の温泉水が母岩とほぼ同じ値(0.707)を示し、それ以外では西部のAで母岩よりも低い値を、東部のC, Dでは母岩よりも明らかに高い値を示す。

以上の結果を第1図のモデルにあてはめると、地熱水XにあたるのがBとEの温泉水で、地熱水Y(もしくはZ)にあたるのがA, C, Dの温泉水と考えられる。つまりA, C, Dの温泉水には、奥鬼怒流紋岩類以外の岩石中に1度貯留された温泉水が混入し、同流紋岩類とは異なるSr同位体組成(Aでは低く、CとDでは高い値)を示すのであろう。これらの岩石は、第3図から判断してAでは第四紀の火山岩類、CとDでは中-古生層もしくは花崗質岩類と考えられる。後者についてどちらの可能性の方が高いのかSr同位体組成から決めることはできないが、Sr同位体組成の変化と調和的な変化を示すナトリウム-カリウム-カルシウム(Na-K-Ca)温度やホウ素と塩素の比(B/Cl)に着目し、この問題を考えていきたい。

Na-K-Ca温度計とは、地熱水に含まれるNa⁺, K⁺, Ca⁺の組成比から貯留層内温度を推定する手法で、Fournier and Truesdell (1973)により提唱された。これは、地熱水と母岩中のアルミノ珪酸塩、特に長石との間に起こるNa⁺, K⁺, Ca⁺の交換が、温度に依存することを利用したものである。本地域の温泉水にこのNa-K-Ca温度計を適用すると、B, C, Dの順に推定される貯留層内温度は高くなる傾向が見られる(第1表)。ここで地温勾配に地理的不均質がないと仮定すると、この貯留層内温度は貯留層の深さに対応する(B, C, Dの順に深くなる)と考えられる。これは、CやDにおいてより深い貯留層からの温泉水の混入の可能性を示唆する。

Na-K-Ca温度と同様に、温泉水のB/ClもB, C, Dの順に高くなる傾向が見られ、特にDはBやCの3倍ほどの高い値を示している(第1表)。温泉水のB/Clは、貯留層の性質や温泉の沸騰などによって変化することが知られている(茂野・阿部, 1987)。もし温泉の沸騰によりB/Clの値が変化しているとするれば、推定される貯留層内の温度はDとそれ以外の温泉との間で大きく異なると予想される。しかし、CとDのNa-K-Ca温度はほぼ同じ値を示すことから、B, C, Dの温泉におけるB/Clの違いは温泉の沸騰によるものではなく、貯留層の相違を反映したものと考えられる。一般に高いB/Clをもつ温泉水は海成堆積岩を貯留層とするものに多く、低いB/Clをもつ温泉水は火成岩を貯留層とするものに多い。したがって、B, C, Dの順に

第1表 奥鬼怒温泉地域の温泉水のSr同位体組成とNa-K-Ca温度及びB/Clモル比との比較

温泉水	Sr同位体組成	Na-K-Ca温度(°C)	B/Clモル比
A	0.7063	68	0.056
B	0.7070~0.7074	118~164	0.061~0.095
C	0.7089	180~208	0.082~0.091
D	0.7099	197	0.262
E	0.7117	175	0.062

Sr同位体組成とB/Clの値がともに高くなるということは、高いSr同位体組成を持つ温泉水の起源が海成堆積岩、つまりここでは中-古生層であることを強く示している。最も高いB/Clを持つDの温泉水が、中-古生層の露出に最も近い地点で湧出しているということもこれを支持すると思われる。

4. Sr同位体研究の今後

以上のように、奥鬼怒温泉地域の温泉水についてSr同位体を地球化学的トレーサーとして適用した結果、貯留層や異なる起源の温泉水の混入などについて新しい知見を得ることが出来た。この地域に関する研究をより完成度の高いものにするためには、同一岩石種のSr同位体組成の均一性をさらに細かく検討する必要がある。しかし今回明らかにされた温泉水のSr同位体組成の違いは十分大きく、奥鬼怒温泉地域は地熱系にSr同位体を適用するには格好のモデルフィールドといえよう。

ところで、新期花崗岩に関連する深部地熱資源探査のために、岩手県葛根田地熱地域では現在4,000m級のボーリング調査が行われており注目を集めている。葛根田地熱地域における深部貯留層は、新期花崗岩類と先第三系の堆積岩類(粘板岩や砂岩)との境界部であると考えられている。よって、奥鬼怒温泉地域での結果を参考にすると、この地域の深層

地熱水のSr同位体組成は両岩石の値の間に入ると予想できる。

最近ニュージーランドの地熱地帯においても、奥鬼怒温泉地域と同様の結果(堆積岩類を貯留岩とする熱水の混入)が得られている(Graham, 1992)。葛根田地熱地域においても、陽・陰イオン濃度に加えSr同位体を新たなトレーサーとして用いることにより、地熱系の化学的進化の解明や深部地熱資源の評価への貢献が期待される。

謝辞：本文は「第225回地質調査所研究発表会-新期花崗岩関連の深部地熱資源-」(1993年9月28日、つくば工技院共用講堂)での講演内容に加筆したものです。同会での発表の機会を与えていただいた地質調査所地殻熱部の玉生志郎氏に感謝いたします。またSr同位体組成分析に関して、筑波大学の伊藤孝、田澤孝一両氏に大変お世話になりました。お礼を申し上げます。

文 献

Fournier, R. O. and Truesdell, A. H. (1973) : An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **37**, 1255-1275.

Graham, I. J. (1992) : Strontium isotope composition in Rotorua geothermal waters. *Geothermics*, **21**, 165-180.

村山正郎・河田清雄(1956) : 5万分の1地質図幅「燧岳」。地質調査所。

中野孝教(1993) : 水文トレーサーとしてのSr同位体。ハイドロロジー, **23**, 67-82.

中村洋一・鈴木陽雄(1983) : 奥鬼怒地域の地質と岩石。宇都宮大学学芸部研究論集, **34**, 63-77.

Notsu, K. (1983) : Strontium isotope composition in volcanic rocks from the northeast Japan arc. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **18**, 531-548.

茂野 博・阿部喜久男(1987) : 温泉・噴気の化学に基づく仙岩地域熱水系の概念的モデル。地質調査所報告, No. 266, 251-283.

SATO Tsutomu and NAKANO Takanori (1994) : Estimation of reservoir rock species from strontium isotope composition —a case study Okukinu geothermal area—

〈受付：1993年12月6日〉