

活断層が少ない岡山県で有馬型温泉水成分を発見 —西南日本の前弧地域でスラブ起源の深部流体が普遍的に上昇している可能性—

1. 概要

高知大学修士課程農林海洋科学専攻 2 年の秋柴愛斗さんと総合科学系複合領域科学部門西尾嘉朗准教授は、岡山県の温泉水から「有馬型温泉水^{*1}」と類似した特徴をリチウム同位体指標から発見しました。西南日本の前弧地域^{*2}（南海トラフから火山前線の間の地域）には、活火山が存在しないため、沈み込んだフィリピン海プレートの脱水に由来する流体はマグマではなく、水として地下深くに存在しています。特に、若くて熱いフィリピン海プレートが沈み込む西南日本の前弧地域では、東北日本に沈み込む太平洋プレートよりもプレートからの脱水が激しく進んでおり、スラブ（沈み込んだプレート）からの脱水に起源を持つスラブ起源流体^{*3}が地表にまで上昇している可能性が指摘されています。しかし、今までスラブ起源流体の上昇は大断層周辺に位置する有馬温泉や宝塚温泉といったごく一部の「有馬型温泉水」からしか確認されていませんでした。本研究の成果である、大断層が存在しない岡山県で「有馬型温泉水」と類似するリチウム同位体組成が見つかったことは、西南日本の前弧地域で広く、普遍的にスラブ起源流体が温泉水に含まれる可能性を示唆するものです（図 1）。

本成果は、日本地球惑星科学連合が運営する、オンライン科学誌「Progress in Earth and Planetary Science」に 2025 年 2 月 5 日に掲載されました。

2. 背景

火山地域には熱い温泉が多く湧出しています。これは火山の地下のマグマによって地下水が温められるためです。一方、非火山地域でも 90℃近い高温で湧出する温泉があります。兵庫県の有馬温泉や和歌山県の白浜温泉、湯の峰温泉が代表例です。このような高温の非火山性温泉はマグマによって温められたものではなく、高温の地球深部から水が上昇したものだと考えられています。

海溝から火山前線の間の前弧地域には、過去 260 万年に活動した火山が存在していないため、温泉の数は火山地域に比べると少ないです。しかし、東北日本と西南日本の前弧地域で比べると、西南日本では比較的温泉の数が多いたことが知られていました。この理由は、若く、熱いフィリピン海プレートが沈み込む西南日本では東北日本に沈み込む太平洋プレートよりも、前弧地域でスラブからの脱水がより進んでいるためだと指摘されていました。

水の起源に関する情報は水を構成する水素や酸素のほんのわずかな質量の違いを利用した指標である水素と酸素の同位体比がよく用いられます。火山近傍では、高温のマグマに起源を持つ水素や酸素の同位体比が河川水のような地表水と異なる特徴を示すことが知られています。一方、前弧地域の温泉水は多くの場合、地表水とよく似た特徴を示します。しかし、西南日本の前弧地域に位置する有馬温泉や宝塚温泉といった大断層周辺の温泉水は、非火山性地域に位置するにもかかわらず、高温の

マグマに起源を持つ水の水素と酸素の同位体組成と類似していることから、火山性温泉とは区別して「有馬型温泉水」と呼ばれ、スラブ起源流体の可能性が指摘されていました。もし「有馬型温泉水」がスラブ起源流体であるならば、西南日本の前弧地域において、高温を経験したことで得られた水の水素や酸素同位体比の特徴をもつ「有馬型温泉水」がより多くの地域で見つかってもよいはずです。

流体が地球深部から上昇する際に地表水が混入すると、深部流体が持つ水の水素と酸素の同位体の情報は簡単に失われてしまいます。このため、有馬温泉のような、スラブ起源流体成分が卓越する温泉水でなければ地球深部由来の水素や酸素の同位体情報を残すことはできません。そこで、本研究ではリチウム同位体という新しい強力な深部流体の指標を用いて、微量な「有馬型温泉水」の成分の検出を試みました。高温を経験した流体にはリチウムが非常に多く含まれるのに対して、地表水はリチウムが微量にしか含まれていません。この違いが際立って大きいので、リチウムは地表水混入による影響を非常に受けにくい元素指標です。本研究では特に、リチウム同位体指標を用いて、大断層が存在せず、深部由来の流体が上昇しにくい地域である岡山県の温泉水から「有馬型温泉水」の痕跡を探ることを試みました。

3. 成果

本研究では、有馬型温泉水と似た高温を経験した流体の特徴を示すリチウムの同位体組成を岡山県の温泉水から発見しました（図2）。リチウムの同位体比（ $^7\text{Li}/^6\text{Li}$ 比）は標準物質の比からのずれを1000分の1の単位で示す $\delta^7\text{Li}$ （単位は‰：パーミル）という値が用いられます。水の $\delta^7\text{Li}$ 値は経験した温度が高いほど反応した岩石のリチウム同位体比に近づきます。地殻の $\delta^7\text{Li}$ 値は約±0‰なので、高温を経験した流体の $\delta^7\text{Li}$ 値は+15‰程度の地表水よりも低くなります。実際に有馬型温泉水の $\delta^7\text{Li}$ 値は+1～+3‰と地表水より有意に低いため明確に区別できます。本研究によって、水の水素と酸素の同位体組成では地表水と有意な違いはない岡山県の温泉水から、有馬温泉水とよく似たリチウム同位体比を発見しました。今まで、有馬型温泉水の識別に用いられてきた水の水素や酸素の同位体指標は、地表水で10倍以上に希釈されればスラブ起源流体成分との識別が困難になります。一方、本研究で用いたリチウム同位体指標はより微量なスラブ起源流体でも識別できます。リチウム同位体と同時に分析したストロンチウムの同位体組成も、岡山県の温泉水に有馬型温泉水と似た成分が含まれていることが分かりました（図2）。

このような、地球深部から上昇してきた流体の関与を示す低いリチウム同位体比は、西南日本の前弧地域だと有馬・高槻断層周辺の有馬温泉や、中央構造線という大断層帯付近の紀伊半島東部で報告されていましたが、岡山県のような大きな断層や活断層がほとんど存在しない地域での報告は本研究がはじめてです。これまで、西南日本の前弧地域では活断層や大断層周辺の温泉水を中心に深部流体の調査研究が進められてきました。しかし、今回、活断層や大断層がほとんどない岡山県でも深部由来流体成分が検出できたことで、西南日本の前弧地域で広く、普遍的に深部流体が上昇している可能性が示されました。

4. 今後の展望

2024年1月に発生した能登半島地震は、私たちに地震発生と地球深部の水が密接な関係にあることを改めて示しました。しかし、地下深部での流体の挙動は分かっていないことが多く、地球科学における重要な課題の一つです。今後は、日本全域の温泉水に研究対象を広げて、スラブ起源流体の分

布と挙動を明らかにしていきたいと考えています。得られた研究成果は前述の大地震のような自然災害の理解に加えて、現在の日本が避けられない課題の一つである放射性廃棄物の地層処理の候補地選定における長期安定性の評価において重要な知見となることが期待されます。

※1 有馬型温泉水：有馬温泉に代表される温泉水の分類。水の水素と酸素の同位体比や温泉ガスのヘリウム同位体比の結果から、有馬型温泉水は沈み込んだフィリピン海プレートに起源を持つ可能性が指摘されている。有馬型流体や有馬型深部流体とも呼ばれる。

※2 前孤地域：海溝と火山前線の間の非火山地帯。

※3 スラブ起源流体：沈み込んだ海洋プレートに由来する流体。海洋プレートが地下に沈み込んで高温・高圧状態にさらされると、堆積物の隙間や鉱物から多量の水が絞り出される。このときに生成される流体がスラブ起源流体と呼ばれる。

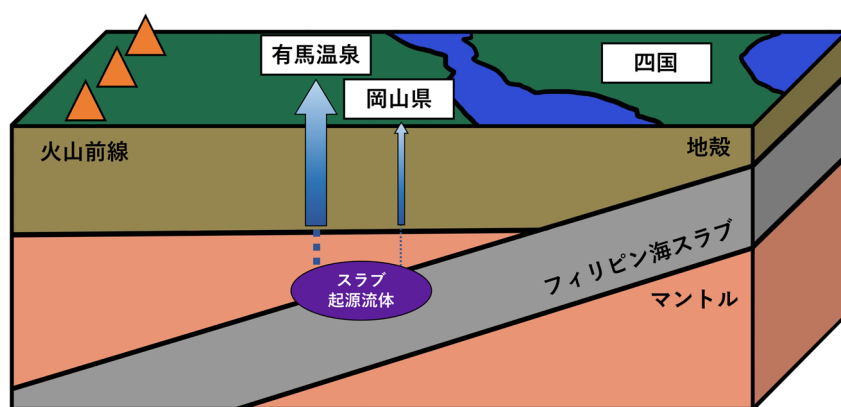


図1. 沈み込んだフィリピン海プレート（スラブ）に由来する流体が「有馬型温泉水」として地表まで上昇している様子の概念図。有馬温泉のような大断層周辺では、断層が流体の移動経路となって多量の有馬型温泉水が湧出する。一方、断層があまり見られない岡山県では有馬型温泉水の上昇量は限られている。

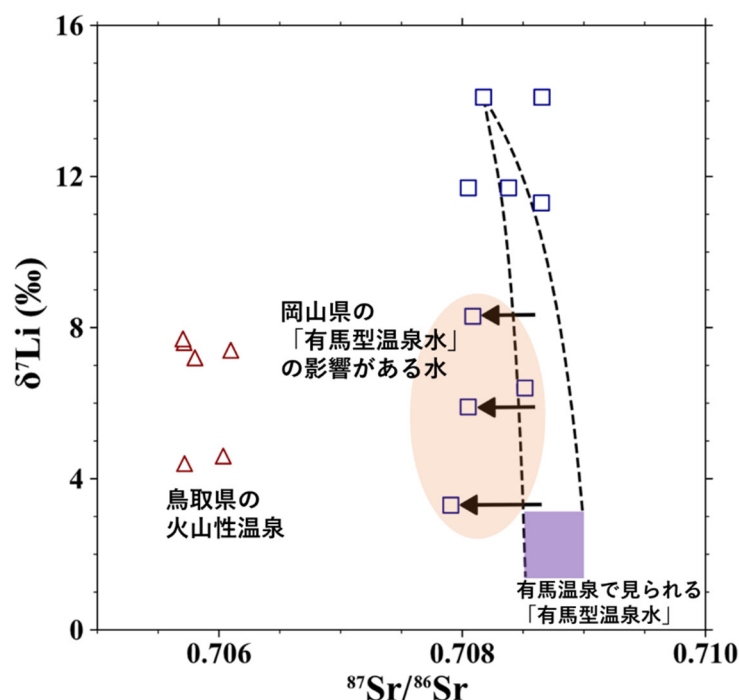


図2. 岡山県と鳥取県の温泉水のリチウム同位体比（縦軸）とストロンチウム同位体比（横軸）の組成。赤色の三角は鳥取県、青色の四角は岡山県の温泉水である。地表水の影響を排除するために、塩素とリチウムの重量比が 1100 よりも小さい温泉水のみを示している。岡山県の温泉水は火山性温泉の鳥取県の同位体組成とは完全に異なり、有馬温泉や宝塚温泉と類似した組成を持つ。しかし、その組成は上昇過程で混合や変質の影響を受けたため完全には一致していない。

論文情報

タイトル : Lithium and strontium isotope hydrogeochemistry in Okayama and Tottori Prefectures, southwest Japan: Implications for tracing slab-derived fluid

著者 : 秋柴愛斗、西尾嘉朗 (高知大学 総合人間自然科学研究科)

URL : <https://progearthplanetosci.springeropen.com/articles/10.1186/s40645-024-00679-y>

お問い合わせ先

国立大学法人高知大学

(本研究について)

総合科学系複合領域科学部門 准教授 西尾嘉朗

電話 : 088-864-6746 ; E-mail : yoshiro@kochi-u.ac.jp

(報道・取材について)

広報・校友課

電話 : 088-844-8643 ; E-mail : kh13@kochi-u.ac.jp