

温泉水は水の化石？ 温泉水に含まれる特異成分から超深層水循環の実態を解明

水と岩石の相互作用を数値モデル化し、中央日本の温泉水に含まれる非天水成分が、150万年～500万年以上地圏に閉じ込められていた水であること、またその場所が、フィリピン海プレート、太平洋プレート、および特定地域（新潟・南西群馬）の海底堆積物の3カ所であることを明らかにしました。

温泉水の多くは天から降る雨や雪（天水）を起源としていますが、水分子を構成する水素と酸素の安定同位体組成を調べると、明らかに特異な水が検出されることがあります。本研究では、それらが地圏に長い期間閉じ込められていた水（地圏水）であるとの仮説を立て、水と岩石の相互作用を数値モデル化して同位体進化の軌跡を推定しました。そして、海底深部で掘削された岩石中の水や海底泥火山中の水、あるいは海岸付近の油田に含まれる塩水やプレート沈み込み帯の火山蒸気など、地圏水成分を多く含むと考えられるさまざまな水の同位体組成が、その軌跡上にあることを確認しました。

さらに、温泉水の同位体データから天水の混入の影響を除去して地圏水成分の本来の同位体組成を復元する手法を新たに提案し、中央日本の39カ所の温泉水に適用しました。また、これとは別に、各温泉地の深部における地圏水の同位体組成を上述の数値モデルで計算し、温泉水から復元された値と比較したところ、温泉の分布域によって、フィリピン海プレートまたは太平洋プレートの沈み込みを想定した計算結果と一致するものと、どちらとも一致せず同位体的な進化が弱いものに分けられました。これらの結果に基づいて、三次元的な（深度100km以上の）超深層水循環の構造と時間スケールを明らかにしました。

本研究成果は、地震や火山噴火の発生における水の関与を明確化するのに役立つと考えられ、予知・予測につながる可能性もあります。

研究代表者

筑波大学生命環境系

山中 勤 教授

安達 郁哉（理工情報生命学術院生命地球科学研究群地球科学学位プログラム）

研究の背景

温泉として利用される水（冷鉱泉^{注1}や自然湧出ではない井戸水を含む）の大部分は天水起源であり、地下を流動する過程で、熱や健康に有用な成分などを獲得したものであることが知られています。一方、天水（雨水や融雪水）の水素と酸素の同位体比^{注2}の間には、概ねある関係（ $\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 10$ 、 δ は標準物質からの千分率偏差を表す）が成り立ちますが、温泉水の中にはこの関係から大きく外れるものがあり、化石海水^{注3}やマグマ水^{注4}、あるいはプレート脱水流体^{注5}などの非天水が天水と混合したものと考えられてきました。しかし、各地の温泉に含まれる非天水成分が、そのうちのどれなのかを証明する手段はなく、またそれらの同位体組成がどのように形成され、相互にどのような関係にあるのかといった問題について、統一的な見解は得られていませんでした。

研究内容と成果

本研究では、温泉水中の非天水成分が、究極的には海水を起源とし、それが地圏（主に岩石内部の間隙や鉱物結晶中）に長い期間閉じ込められ、岩石に同化しつつ進化した「水の化石」のようなものであり、化石海水やマグマ水といったさまざまな非天水成分は、ほぼ同じ進化軌跡をたどりながら、進化の段階が異なるものであることを示しました。このことは、間隙水^{注6}・粘土鉱物層間水^{注7}・構造水^{注8}・鉱物結晶酸素^{注9}の間の同位体交換^{注10}と脱水を考慮した同位体進化モデルによって出力される海洋起源地圏水の進化軌跡が、世界中で採取された海底間隙水・海底泥火山^{注11}間隙水・沿岸油田塩水・沈み込み帯^{注12}火山蒸気の実測同位体データをよく再現するという事実によって確認できます（図1）。

計算条件の不確定性を考慮した多数の進化軌跡や上述の各種実測データは、概ね次式で表される曲線によって近似することができました。

$$\delta^2\text{H} = 60 / (\delta^{18}\text{O} - 11(\pm 1)) + 0(\pm 10)$$

温泉水の場合、ある程度の天水の混入は避けられませんが、温泉水およびその天水成分の同位体組成とこの曲線を用いると、天水が混入する以前の純粋な地圏水の同位体組成を復元することができます。一方、同位体進化モデルでは、沈み込む海洋プレートを想定した、数百万年に及ぶ温度上昇と間隙率の減少を考慮することで、沈み込み境界からの距離に応じた地圏水の同位体組成の変化を計算することができます。その計算結果を、各地の温泉水から復元した地圏水の同位体組成と比較すると、温泉群A（長野・群馬・埼玉・山梨・静岡の各県に分布）はフィリピン海プレートの沈み込みを想定した計算結果、温泉群B（長野・静岡両県の東経138度近辺のみに分布）は太平洋プレートの沈み込みを想定した計算結果とそれぞれ一致し、温泉群C（新潟県と群馬県南西部の中新世海成層^{注13}地域に限定的に分布）はどちらの計算とも一致せず同位体的な進化が弱いことが分かりました（図2、3）。これらのことから、温泉群Aはフィリピン海プレートに閉じ込められた海水が150万年～500万年かけて深度数十kmに達する過程で変質・放出されたもの、温泉群Bは太平洋プレートに閉じ込められた海水が400万年～500万年かけて深度150～200kmに達して変質・放出されたもの、そして温泉群Cは500年以上前に海底で堆積した地層に閉じ込められて弱く変質したいわゆる化石海水であると結論づけられました。

これまで、プレートの沈み込みに伴う水の輸送と放出については、島しょ火山^{注14}や地震の発生との関わりから研究が進められてきましたが、放出された水が地球内部で消費されてしまうのか、それとも地表に達することがあるのかといった点は不明確でした。本研究は、プレート由来の水が温泉水として地表に達していることを示す有力な証拠となるものです。特に、二つの大陸プレートが隣接し、その下を二つの海

洋プレートが二重に沈み込んでいる、世界でも稀な地殻構造を持つ中央日本において、図 4 に示すような地圏を介した超深層水循環が生じていることを証明した点は、画期的な成果と言えます。

今後の展開

温泉水に含まれる地圏水成分が、数百万年という時間スケールで形成されたものであるということは、更新速度が極めて遅い、すなわち枯渇性の資源であることを意味します。従って、それを持続的に利用するためには特段の注意が必要と考えられます。しかしながら、現在進めている温泉水同位体組成の高頻度モニタリングによると、地圏水の混合割合が増える場合があることや、日単位で変動し得ることも分かってきました。それらがどのようなメカニズムで生じているのかは今のところ全く分かっていませんが、もし地球深部のなんらかの変調を反映しているのだとすれば、地震や火山噴火の予知・予測につなげられる可能性も出てきます。そうした実用的観点と地球深部水循環の理解という学術的観点の双方から、今後さらに、解析精度の向上や新現象の発見を目指す予定です。

参考図

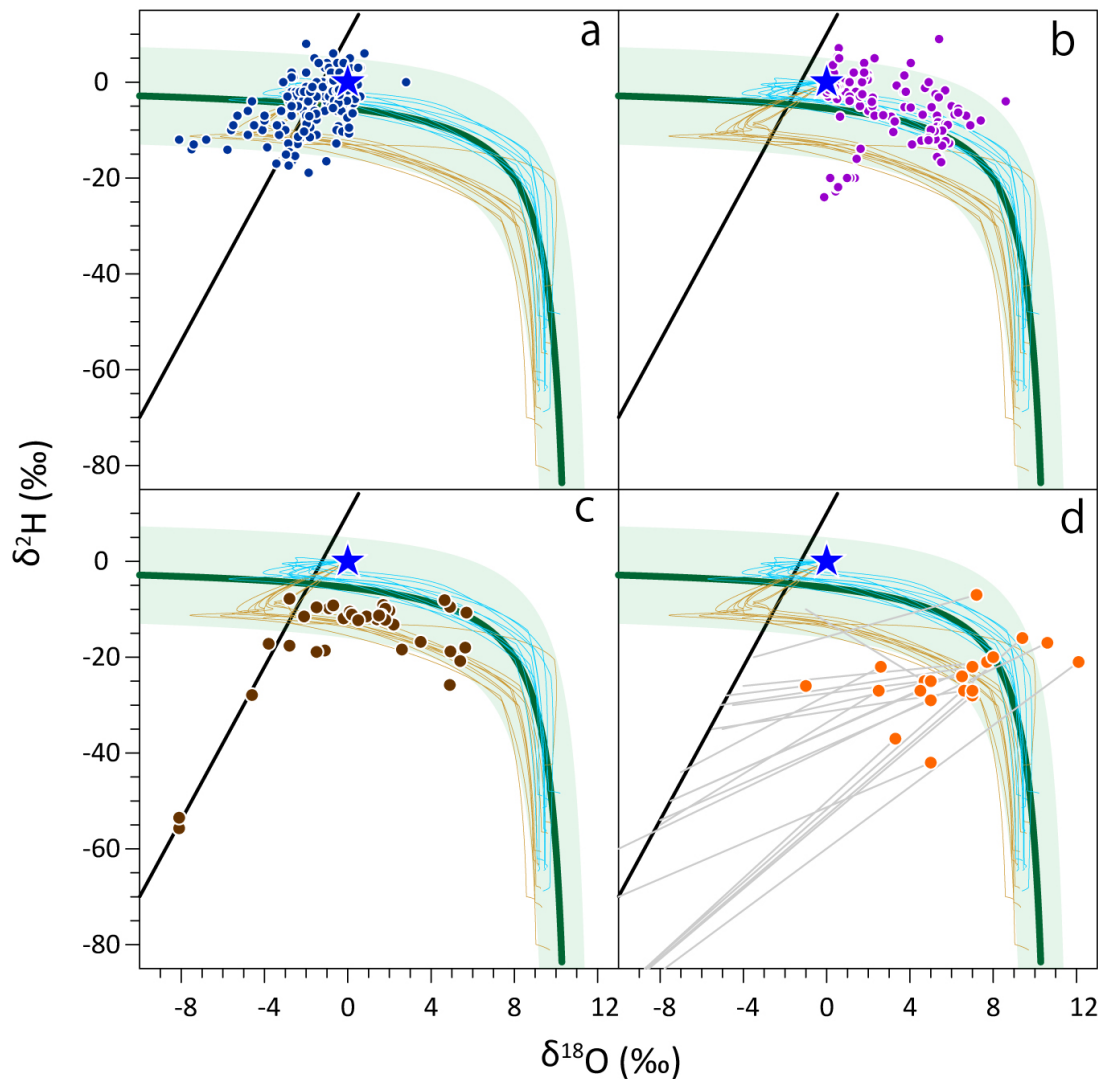


図 1 同位体進化モデルによって計算された海水を起源とする地圏水の進化軌跡と実測同位体データ
a：海底間隙水、b：海底泥火山間隙水、c：沿岸油田塩水、d：沈み込み帯火山蒸気。水色線と茶色線で示す進化軌跡はそれぞれ海成粘土と陸成粘土を想定した各 10 例、青星印は海水、黒太線は天水の近似直線、緑太線と薄緑の帯は地圏水の近似曲線とその誤差範囲、d の灰色線は天水との混合線を示す。

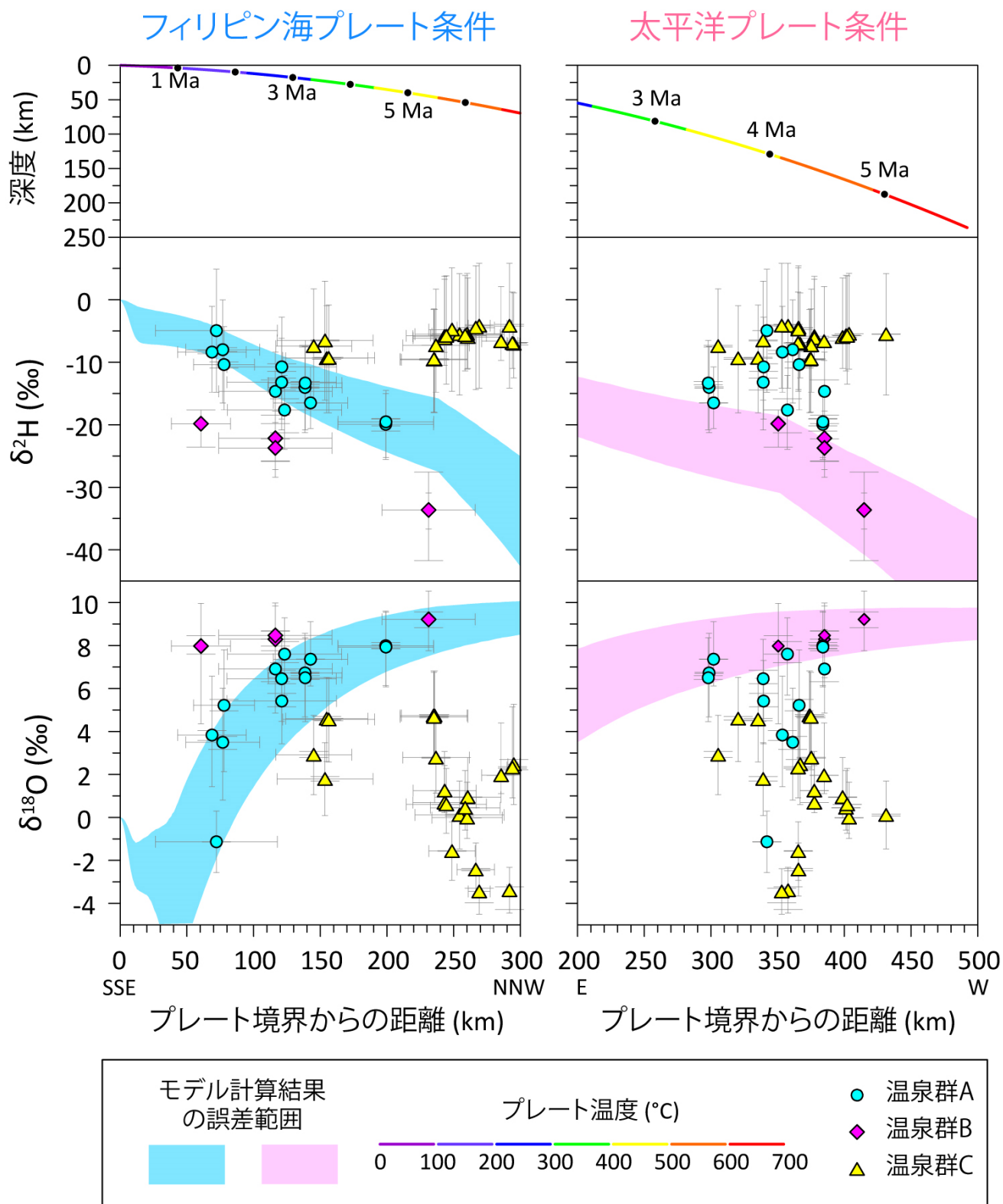


図2 地圏水同位体組成のモデル計算値と温泉水からの復元値の比較
 左側はフィリピン海プレートを想定した条件、右側は太平洋プレートを想定した条件による計算結果で、条件の不確定性を考慮したそれぞれ1000ケースの分布を水色と桃色の領域で示す。3つの温泉群に関するプロットは温泉水からの復元値であり、それぞれの不確定性を誤差線で示す。

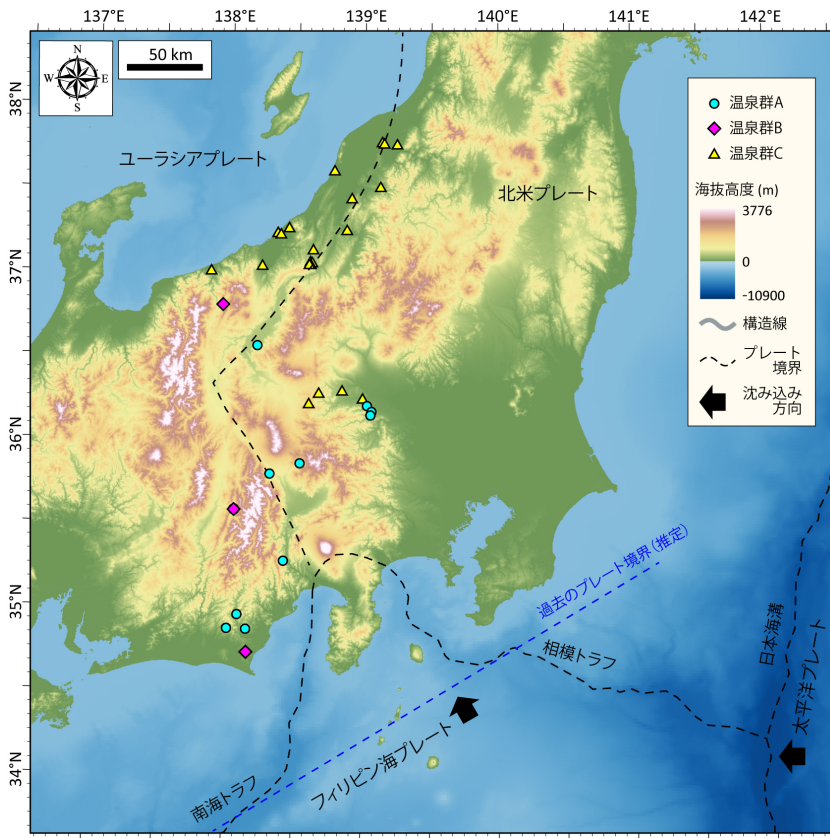


図3 本研究の対象とした温泉の位置

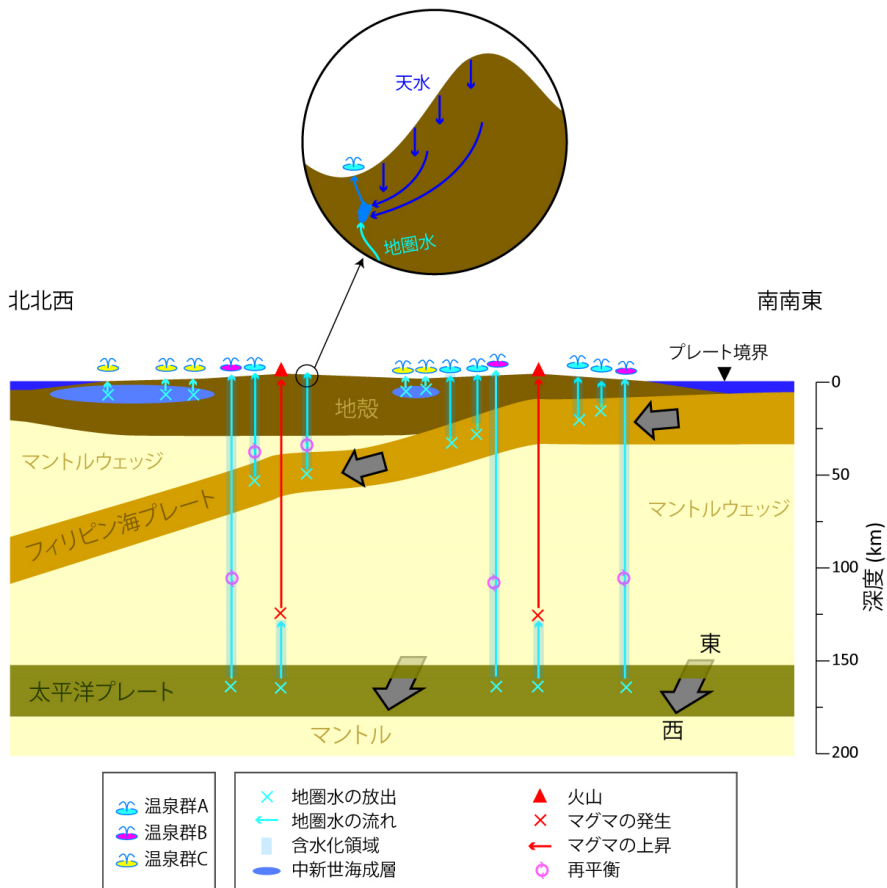


図4 超深層水循環の模式図

用語解説

注1) 冷鉱泉

特定の物質を一定量以上含有する湧泉。日本の温泉法では、25°C以上未満の冷鉱泉も温泉に含まれ、自然湧出以外に掘削自噴や動力装置によるものも湧泉として扱う。

注2) 同位体比

一般に、軽い同位体に対する重い同位体のモル比のこと。ここでは水分子 H_2O を構成する水素原子や酸素原子における $^2\text{H}/^1\text{H}$ 比や $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比を指す。標準物質からの千分率偏差 (%) である $\delta^2\text{H}$ や $\delta^{18}\text{O}$ を用いて表記される。

注3) 化石海水

古い地層に含まれた海水で、化学的・同位体的に変質したもの。

注4) マグマ水

地下のマグマと同位体的に平衡状態にあると想定される水。

注5) プレート脱水流体

沈み込むプレートから脱水された水や高濃度の化学成分を含む流体。

注6) 間隙水

鉱物粒子の隙間や微細な亀裂などに保持される水。

注7) 粘土鉱物層間水

シート状構造をもつ粘土鉱物の層の間に含まれる水。

注8) 構造水

鉱物の結晶構造内に含まれる水で、主に含水鉱物の結晶を構成する OH 基として存在する。

注9) 鉱物結晶酸素

鉱物結晶を構成する酸素原子。質量として岩石の約 50% を占めるが、低温ではほとんど同位体交換に寄与しない。

注10) 同位体交換

二種類の化合物の間で異種の同位体の交換が起こる反応。

注11) 泥火山

地下深くの粘土が水やガスと共に噴出し、円錐状の高まりとなったもの。火山活動に関連したものもあるが、そうでない場合もある。

注12) 沈み込み帯

異なるプレートが互いに近づきあう境界で、一方が他方の下に沈み込む帯状の領域。プレートとともに沈み込み、深部で放出された水がマグマを発生させるため、火山帯を形成しやすい。

注13) 中新世海成層

中新世とは約 500 万年前から約 2300 年前までの期間を表す地質時代区分で、その時代に海底で堆積した地層のこと。

注14) 島しょ火山

島々を作り出す火山。日本列島を含む環太平洋火山帯など、沈み込み帯に多く存在する。

研究資金

本研究は、科研費による研究プロジェクト (15H02957、19H01370) の一環として実施されました。

掲載論文

【題 名】 Isotopic evolutionary track of water due to interaction with rocks and its use for tracing water cycle through the lithosphere.

(岩石との相互作用による水の同位体進化軌跡及びその地圏水循環追跡への応用)

【著者名】 I. Adachi, and T. Yamanaka

【掲載誌】 *Journal of Hydrology*

【掲載日】 2023年12月12日 (オンライン先行公開)

【DOI】 10.1016/j.jhydrol.2023.130589

問合わせ先

【研究に関すること】

山中 勤 (やまなか つとむ)

筑波大学 生命環境系 教授

URL: <https://www.geoenv.tsukuba.ac.jp/~tyam/>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp