

有馬温泉直下の地下深部洪水が阪神淡路大震災を引き起こした可能性を発見

過去半世紀以上にわたる有馬温泉水の水素・酸素安定同位体比および塩素イオンのデータから、その直下で沈み込むフィリピン海プレート由来の水が1994年頃に地下深部で洪水のようにあふれ出し、それが1995年の兵庫県南部地震（阪神淡路大震災）の引き金となった可能性が高いことを見いだしました。

温泉水の中には、天水のほかに海底の岩石などに由来する水が含まれるものがあり、それらは水分子を構成する酸素と水素の同位体組成から検出することができます。兵庫県神戸市の有馬温泉は、海水の2倍以上の塩分を含むなど特異な泉質を示し、その原因は、地下60 km以上に沈み込んだフィリピン海プレート由来の水が混入しているためと考えられていますが、直接的な証拠は得られていませんでした。

本研究ではまず、数値モデルで計算した有馬温泉直下のプレート内の水の同位体比が、実際の有馬温泉水に含まれる非天水成分のそれと一致することを確認しました。また、1940年代からの深井戸掘削による温泉開発以降、プレート由来水の割合が指数関数的に減少した一方、1995年前後に一時的に急上昇していたことが分かりました。さらに、研究対象とした7泉源のうち3つでは、この現象が兵庫県南部地震（阪神淡路大震災）以前に生じていました。地震の前兆現象として、地下水中の塩素イオンやラドンの濃度上昇が報告されており、有馬温泉でも同様の前兆が現れていたこととなります。この時に発生したプレート由来水の量は10万立方メートル以上と見積もられ、地下深部で発生した洪水が断層強度を低下させ、兵庫県南部地震の引き金となった可能性を強く示唆しています。

類似する現象は松代群発地震（1965～67年）でも見られ、本研究グループは、松代温泉もまたフィリピン海プレート由来の水を多く含んでいることを明らかにしています。このような温泉水のモニタリングによって、地震の発生を事前に予測できると期待されます。

研究代表者

筑波大学生命環境系

山中 勤 教授

研究の背景

日本列島を含む環太平洋火山帯では、地下深く沈み込む海洋プレート^{注1)}から絞り出された水がマグマ発生のきっかけとなっています。一方、火山フロント^{注2)}よりもプレートが浅い位置にある地域では、プレート由来の水はマグマを作ることなく上昇し、温泉として地表に現れることがあり、このような水の混合割合は、温泉水の水分子を構成する酸素と水素の安定同位体比から検出することができます。兵庫県神戸市の有馬温泉^{注3)}はそのようなものの代表格で、これまでに数多くの研究が行われてきました。しかし、天水^{注4)}以外に地下深部から来た水が多く含まれている点については異論がないものの、それが沈み込んだ海洋プレートに由来するものであることを示す証拠は得られておらず、その量も分かっていません。また、半世紀以上に及ぶ研究の歴史がありながら、温泉水の経年的な組成変化の傾向についても把握されていませんでした。

研究内容と成果

本研究では、有馬温泉の7つの泉源を対象として温泉水の水素・酸素安定同位体比^{注5)}を測定し、両者の関係を近似した回帰直線と海洋起源地水曲線^{注6)}との交点の座標として、非天水成分の同位体比を同定しました(図1)。次に、沈み込むフィリピン海プレートを想定した同位体進化モデルを用いて、水の安定同位体比が深さ方向にどのように変化するかを計算し、有馬温泉直下(深度67.4 km)での計算値が温泉水から同定された非天水成分の同位体比と一致すること、すなわち有馬温泉に含まれる非天水成分が確かにフィリピン海プレート由来の水であることを突き止めました(図2)。

また、水素・酸素安定同位体比と塩素イオン濃度の間に見られる極めて高い相関関係を利用して、過去の同位体および塩素イオンデータから、温泉水中のプレート由来水の混合割合の経年変化を求めたところ、1940年代に始まった深井戸掘削による温泉開発以降、プレート由来水の割合が指数関数的に減少してきた一方で、1995年前後に一時的に急上昇し、その後再び指数関数的に減少していることが明らかとなりました(図3)。1995年前後の急上昇は、同年1月17日に発生した兵庫県南部地震(阪神淡路大震災、気象庁発表:マグニチュード7.3)によって引き起こされたものと考えられることもできますが、大変興味深いことに、調査した7つの泉源のうち3つでは、地震に先立って(早いものでは357日以上前)プレート由来水の割合が増加していました。

有馬温泉で湧出したプレート由来水には、①以前から地下1,000m程度までの岩盤亀裂などに貯留されていたもの、②より深部から定常的に補給されているもの、および、③地震の前後に突発的に補給されたもの、の3つの成分があります(図4)。混合割合の経年変化パターンからこれらの成分を分離すると、1995年前後に突発的に発生したプレート由来水の量は26~42万立方メートルと推定されました。そのような大量の水がフィリピン海プレートから急激にあふれ出したのか、あるいは目詰まりを起こした流動経路が破裂して奔流となったのかは不明ですが、そうしたある種の洪水現象によって発生した水が震源域の断層強度を弱め、兵庫県南部地震の引き金になったことが示唆されます(図5)。兵庫県南部地震の発生に水が関与していたことは、地震波トモグラフィー^{注7)}を用いた研究によって指摘されていましたが、本研究はその物質的な証拠を示すものと言えます。また、神戸市やその近隣では地下水中の塩素イオンやラドン^{注8)}の濃度が上昇する前兆現象が(地震後に)報告されていましたが、これらもまた、地下深部洪水という同じ原因によって引き起こされた現象であると説明できます。

本研究グループはこれまでに、長野県の松代温泉など中部地方の10カ所以上の温泉がフィリピン海プレート由来の水を多く含んでいることを明らかにしてきました(Journal of Hydrology, 2024)。松代では1965~67年に「水噴火」とも呼ばれた群発地震が発生し、1千万立方メートル程度の塩水(ただし天水を含む)が温泉から流出したとの記録があり、兵庫県南部地震と松代群発地震がともにプレート由来水に

よって引き起こされたとすれば、今後、同様のプレート由来水を含む温泉でモニタリングを行い地下深部洪水をいち早く検知することで、地震の発生を事前に予測できる道が拓かれます。なお、有馬温泉では天水によるプレート由来水の希釈が今なお進行していますが、定常的な補給も継続しており、塩分等の低下傾向は収束しつつあります。ただし、本研究の予測通りに今後も推移するかどうかは注視していく必要があります。

今後の展開

大地震はいつでも、どこでも発生するというわけではなく、プレート由来水の洪水が発生した後、その場所の近隣で、特に発生確率が高いと予想されます。その規模と発生時期を正確に予測するのは容易ではありませんが、地下深部洪水をさまざまな手段で察知することができれば、少なくとも早期警戒が可能になるものと期待されます。今後は、より短い時間スケールでのモニタリングの効果を検証するとともに、同様の手法を日本列島全域、さらには世界各地のプレート沈み込み帯に適用していく予定です。なお、全ての地震が地下深部洪水によって引き起こされるわけではありませんが、南海トラフ巨大地震の想定震源域内にもプレート由来水を含む温泉が存在すると考えられるため、もし源泉の温度や色、成分濃度に変化が生じた場合には注意が必要と思われます。

参考図

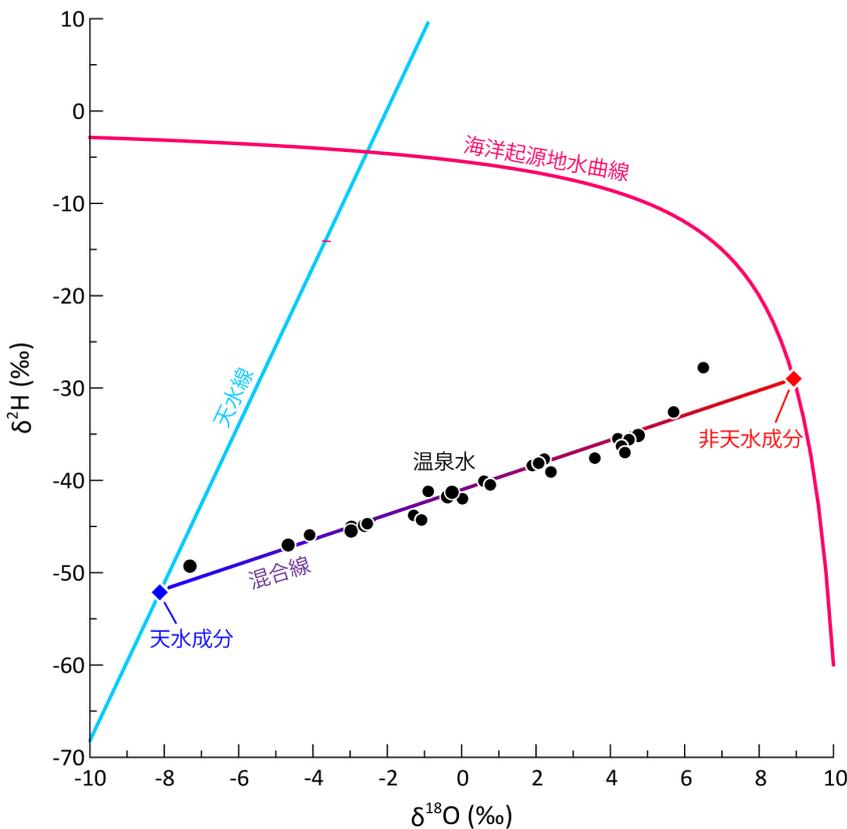


図1 有馬温泉水の δ ダイアグラム^{注5)}と同定された天水・非天水成分の同位体比

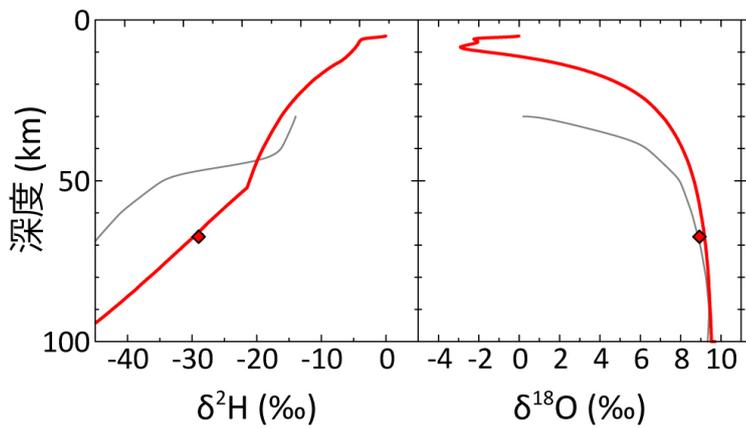


図2 プレートの沈み込み深度とプレート内の水の同位体比の関係

赤線は本研究グループによって開発された同位体進化モデルによる計算値、灰色線は従来のモデルによる計算値、赤の菱形(◆)は有馬温泉直下におけるプレート深度と温泉水中非天水成分の同位体比との関係を示す。

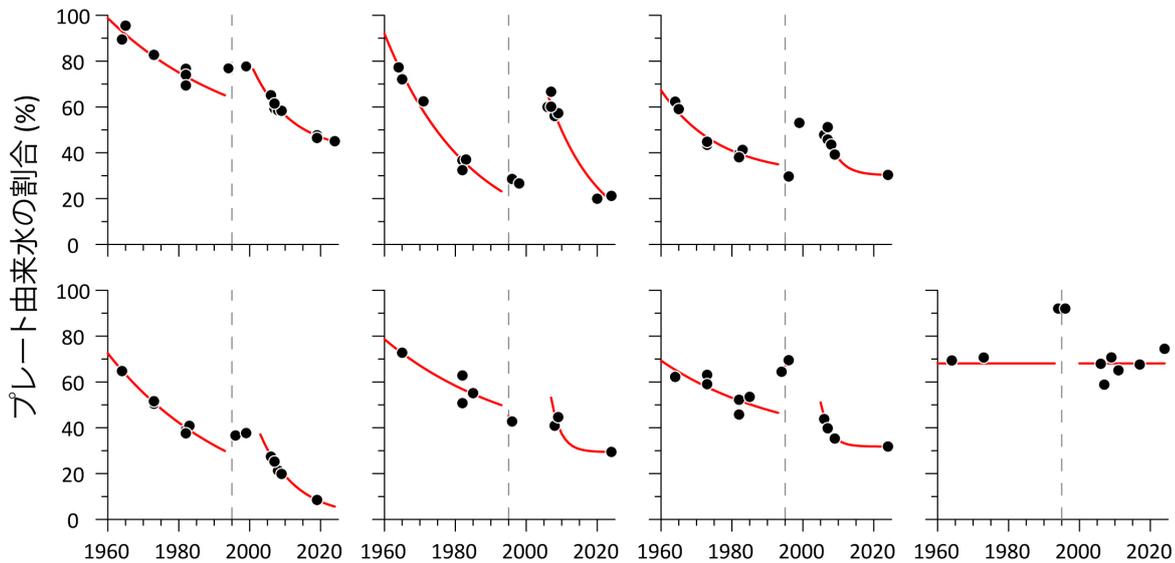


図3 7つの泉源における温泉水中プレート由来水の割合の経年変化

赤線は漸近指数関数による近似曲線、灰色の破線は兵庫県南部地震の発生年をそれぞれ示す。

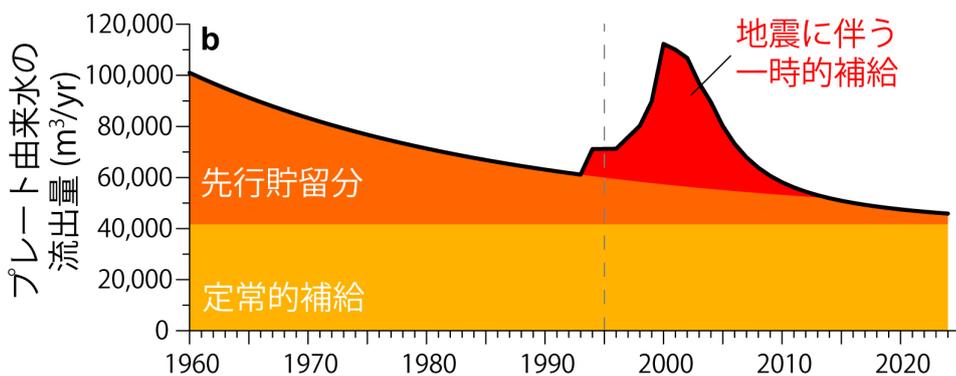


図4 プレート由来水の流出量の経年変化

漸近指数関数と線形内挿を組み合わせた推定値で、7つの泉源の合計。

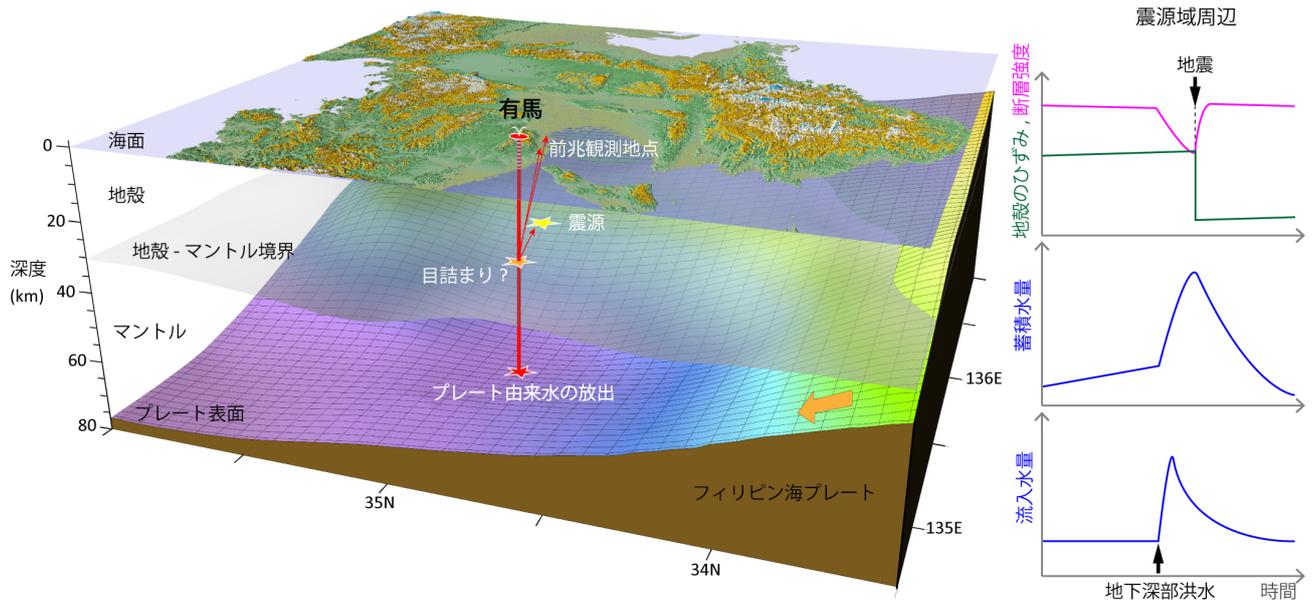


図5 地下深部洪水と兵庫県南部地震の関係を示す模式図

用語解説

注1) 海洋プレート (oceanic plate)

固体地球の表層を構成するプレートのうち、主に海洋下に存在する密度の高いプレートで、密度の低い大陸プレートと衝突するとその下に沈み込む（沈み込んだ部分をスラブともいう）。日本列島の地下ではフィリピン海プレートと太平洋プレートが二重に沈み込んでおり、フィリピン海プレートの方が沈み込みは浅い。沈み込みが生じ始める部分は深くなり、海溝となる。

注2) 火山フロント (volcanic front)

活火山分布の海溝側の境界線。日本列島下では沈み込んだ海洋プレートから絞り出された水が、その上のマントルの融点を下げ、マグマを発生させる。しかし、海洋プレートが特定の深さ以上に沈み込まないとマグマは発生せず、火山も形成されない。

注3) 有馬温泉 (Arima hot springs)

日本最古の温泉の一つで、日本書紀によれば7世紀前半にはその存在が知られていた。源泉が湧きだす場所（井戸）を泉源と呼び、高温で塩分・鉄分の高い「金泉」を産する泉源と、低温で多量の炭酸ガスや微量のラドンを含む「銀泉」を産する泉源がある。1596年、1854年、1899年、および1916年の地震後に湯温が上昇したり湧出量が増えたりしたという記録がある。現在の金泉の泉源は戦後に掘削された深井戸で、常時100°Cに近い温度を示す。

注4) 天水 (meteoric water)

天から降ってくる雨や雪、あるいはそれらを起源とする水。通常、河川水や地下水はほぼ100%天水由来だが、一部の温泉には天水以外の成分（非天水成分）が含まれる。非天水成分には、海水が堆積岩中に長い時間閉じ込められて変質した化石海水や、マグマの中に含まれるマグマ水、および沈み込む海洋プレートから絞り出されたプレート由来水（スラブ由来水ともいう）などが含まれる。

注5) 水素・酸素安定同位体比 (hydrogen and oxygen stable isotope ratios)

水分子を構成する水素原子には ^1H と ^2H 、酸素原子には ^{16}O 、 ^{17}O 、および ^{18}O の安定同位体が存在し、それらの存在比である $^2\text{H}/^1\text{H}$ や $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ を安定同位体比という。水分子の移動や混合を追跡する際の目印となり、慣習的に、標準平均海水の値からの千分率偏差である δ 値（ $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ ）を用いて表す。

$\delta^{18}\text{O}$ を横軸、 $\delta^2\text{H}$ を縦軸とした図 (δ ダイアグラム) では、天水は概ね $y = 8x+10$ の直線上に分布し、これを天水線と呼ぶ。

注6) 海洋起源地水曲線 (ocean-origin lithospheric water curve)

海洋下の地圏 (岩石圏) に閉じ込められた水が同位体的に進化する際の軌跡を δ ダイアグラム上で表したものの、 $y = 60/(x - 11)$ の曲線で近似される。天水・非天水の混合割合が変化することによって形成される直線 (混合線と呼ぶ) とこの曲線の交点の座標は、非天水 (地圏水) 成分の同位体比を示す。

注7) 地震波トモグラフィー (seismic tomography)

地震波データを用いて地球内部の三次元構造を求める手法。

注8) ラドン (radon)

ウランやそれから生じるラジウムなどの放射改変によってつくられる元素。水に溶けやすい気体で、花崗岩地域の温泉などに比較的多く含まれる。半減期が短い (最も長い ^{222}Rn で約 3.8 日) ため、ウランやラジウムを含む岩石から離れると急速に減少する。

研究資金

本研究は、科研費による研究プロジェクト (15H02957、19H01370、24K00169) の一環として実施されました。

掲載論文

【題名】 Hot springs reflect the flooding of slab-derived water as a trigger of earthquakes.

(温泉は地震の引き金となるスラブ由来水の洪水を反映する)

【著者名】 T. Yamanaka, and I. Adachi

【掲載誌】 *Communications Earth & Environment*

【掲載日】 2024 年 9 月 2 日

【DOI】 10.1038/s43247-024-01606-1

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