

直下型地震に伴う地下水の流れの変化を同位体で追う

谷 水 雅 治¹、細 野 高 啓²

(¹関西学院大学生命環境学部、²熊本大学理学部)

地下水は、飲料水、農業用水、工業用水など幅広い用途に利用される重要な水資源です。地下水の水質低下を防ぐためには、様々な化学成分の変化を監視し、人為的および自然由来の化学汚染物質の流入を検出することが重要となります。自然由来の化学物質の混入には、沿岸帯水層における海水の浸入による塩水化や、火山活動が盛んな地域での熱水成分の混入によるヒ素やフッ素濃度の上昇などの例があります。また、地震も地下水の水質変化の引き金となることがあります。地下水に溶存する主要イオン濃度、微量元素濃度、安定同位体比を分析することで、地震活動に伴う地下水の化学組成変化を説明した研究がいくつかありますが、溶存微量元素の安定同位体比を用いた研究はこれまでほとんど行われていません。

2016 年 4 月に発生したマグニチュード (Mw) 7.0 の熊本地震に伴う地下水の変化を観測井戸で調査した結果、震源地周辺の地下水面の低下は地下の開口亀裂の生成に伴うことが示唆されました。また、地下水涵養域の水位上昇は周辺の山岳帯水層からの水の放出によって説明されることが、 H_2O 分子の $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ 安定同位体分析に基づき、明らかとなりました。一方で、局所的には震源地付近のいくつかの井戸で塩化物イオン (Cl^-)、硫酸イオン (SO_4^{2-})、ホウ素 (B) 濃度などの上昇が観測されましたが、これらの成分の起源は特定されていません。

本研究では、地下水中に微量に溶存するリチウム (Li) とホウ素 (B) をトレーサーとして利用し、 $^7\text{Li}/^6\text{Li}$ と $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ の同位体比を用いて、熊本地震に伴う地下水の変化を評価しました。海水、停滞地下水 (化石地下水)、熱水には、浅層地下水と比較してリチウム (Li) とホウ素 (B) が高濃度

に含まれています。また、 $^7\text{Li}/^6\text{Li}$ と $^{11}\text{B}/^{10}\text{B}$ の安定同位体比は、同位体間の相対的な質量差が大きいため、 δ スケールで大きな変動を示します。例えば、 $\delta^7\text{Li}$ は -15‰ から +50‰、 $\delta^{11}\text{B}$ は -30‰ から +60‰ の範囲を示し、海水中で最も高く、火山岩や大陸地殻の岩石では低い値をとることが知られています。

熊本市周辺の地下水は、日本最大の資源保有地域であり、飲料、農業、産業活動などの目的に使用され約 100 万人の生活の基盤を支えています。この地域の地下水は、阿蘇カルデラ西麓と周辺の高地での雨水の浸透によって供給されており、地下水は地形に沿って南西へ流動し、そのほとんどが熊本市内の江津湖周辺において湧出しています。また、平野部や沿岸部には、地下水流動が停滞している地域も見られます。

採水地点は図 1 の熊本地域の地図上に記したように、東から西への主要な地下水の流れの方向に沿った、4 つの井戸 (T11、T12、T34、T40) と江津湖の湧水地です。そのうち T11 は主要な流れの末端である平野部に位置し、布田川断層と Mw7.0 本震の震源の近くに位置しています。さらに沿岸域の 2 地点 (T21 と T45)、北側の涵養域の 1 地点 (T41) で採水を行いました。第 1 回目の調査は、2015 年 9 月 7-9 日にかけて、2 回目 は本震から 4.5 ヶ月後の 2016 年 8 月 28-29 日に実施しました。

東側と北側の主要な流れに沿った合計 6 つの地下水試料は、 Ca-HCO_3 型の地下水であり、活発に流動していることが示唆されました。一方、沿岸部の 2 試料は停滞した地下水の特徴を持つ Na-HCO_3 型でした。地下水の主要元素組成には、地震の前後で明らかな変化は見られませんでした。

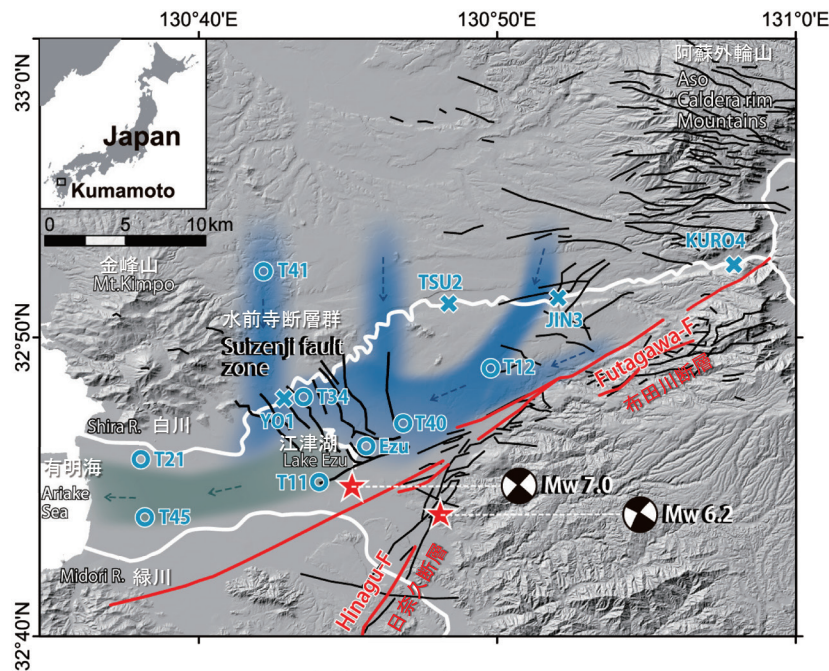


図 1. 熊本地域の主要地下水流動方向と採水井戸の地点

水試料の分析データ（表 1）を Cl-B-Li の相対濃度図（図 2）によりさらに化学的分類を行うと、沿岸部（T21、T45）とそれ以外の地下水試料では、組成に明らかな違いがあることが確認されました（図 2 の白丸）。つまり、沿岸部の試料はほとんど B コーナーにプロットされましたが、その他の地下水試料は図の中央部にプロットされたことから、岩石学的な違いや地下水の滞留時間の違いを反映していると考えられます。

現代海水、停滞地下水、熱水はいずれも塩化ナトリウムに富むため、これら三者を主溶存成分から区別することは容易ではありません。しかし、ホウ素とリチウムといった微量元素と塩化物イオンの相対存在量を表す Cl-B-Li 組成図では、それぞれのコーナー近くに塩水性、停滞性、熱水性という 3 タイプの地下水が特徴的にプロットされるため、地下水に混入した他起源の地下水の同定に有効です。沿岸域の地下水（T21 と T45）において B が増加する傾向は、海水組成とは別に、地下に存在する海洋堆積物中の水を含む粘土鉱物に由来する層間水の寄与があると解釈しました。

地震後の主要地下水流動域では、Cl-B-Li 図において、Cl/(B+Li) 比が相対的に増加し、Cl のコー

ナーへわずかにシフトしたことによる（図 2 の黒丸）、明らかな化学変化が見られました。一方、沿岸域では逆方向へのシフトが起こっており、異なったプロセスが働いていることが示唆されました。ただし、Cl-B-Li 図では、本研究対象地域地下水の Li と B の濃度が低いため、地震に伴う水質変化はおおまかな傾向であり、主流動域と沿岸域で異なる 2 つの水質変化のメカニズムが存在することを示したに過ぎません。

このメカニズムを明らかにするために、 $\delta^7\text{Li}$ と $\delta^{11}\text{B}$ の変化を見ていきます。地震前、B コーナー（図 2）の周辺にプロットされた 2 つの沿岸地下水試料（T21 と T45）は、高い $\delta^7\text{Li}$ (+42.7% と +29.1%) と $\delta^{11}\text{B}$ (+27.7% と +23.2%) の値を示し（表 1）、海水由来の成分の値を反映していることが分かりました。しかし、このことは、Cl-B-Li 図の現代海水（図 2 の四角）に示されるように、海水（ $\delta^7\text{Li}$ で +31%、 $\delta^{11}\text{B}$ で +40%）そのものが沿岸地下水へ直接混入しているとは言い難く、その代わりに、両 δ 値が高い、過去の高成堆積物から絞り出された海水由来成分の寄与によって引き起こされたものと考えられました。これに対して、主流動域の地下水では、 $\delta^7\text{Li}$ が約 +10%、 $\delta^{11}\text{B}$

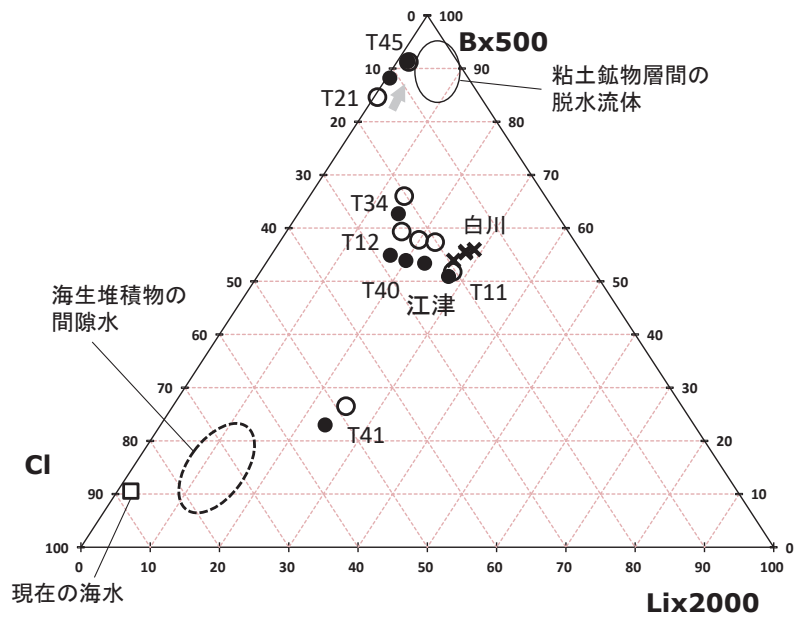


図 2. 地下水の Cl-B-Li 図

表 1. 化学分析データ

試料名	深度 (m)	採水年	pH	EC (mS/m)	Eh (mV)	DO (mg/L)	Cl (mg/L)	B (mg/L)	Li (mg/L)	$\delta^{11}\text{B}$ (‰)	$\delta^7\text{Li}$ (‰)
第二帯水層											
T11	110	2015	8.12	19	-90	0.06	8.1	0.041	0.0055	4.0	20.0
		2016	8.34	21	309	1.37	9.5	0.045	0.0061	2.7	16.0
		2017						0.040	0.0055	5.0	18.4
T12	90	2015	7.47	24	432	7.86	8.1	0.040	0.0028	3.7	7.2
		2016	7.12	24	440	8.37	9.4	0.037	0.0029	3.1	7.5
T34	65.4	2015	8.51	39	-5	0.08	13.4	0.087	0.0045	5.1	15.7
		2016	7.57	38	131	0.60	14.2	0.078	0.0045	6.9	13.9
T40	70.8	2015	6.93	23	410	7.62	8.3	0.043	0.0037	3.3	7.3
		2016	7.31	27	394	6.12	9.7	0.040	0.0037	3.1	7.9
Ezu	—	2015	8.38	22	429	7.56	8.1	0.046	0.0045	3.1	8.6
		2016	7.04	23	437	8.25	9.1	0.041	0.0044	3.0	8.5
		2017						0.047	0.0056	2.8	7.5
第一帯水層											
T21	15	2015	8.47	161	190	1.67	159.4	1.81	0.0026	27.7	42.7
		2016	8.68	139	379	1.52	113.4	1.77	0.0024	24.9	40.5
T45	10	2015	9.57	137	112	0.08	45.2	1.17	0.0055	23.2	29.1
		2016	9.44	156	83	0.67	52.6	1.35	0.0057	22.6	29.6
T41	60	2015	6.52	24	68	0.03	12.8	0.014	0.0033	22.0	-2.6
		2016	7.20	24	274	1.08	13.9	0.012	0.0031	22.7	-1.5
白川											
YO1	—	2018	7.71	30	449	8.99	13.2	0.074	0.009	0.7	11.2
TSU2	—	2018	8.20	34	378	8.86	14.1	0.093	0.012	0.5	10.9
JIN3	—	2018	8.00	35	382	8.58	15.3	0.102	0.013	0.6	9.9
KURO4	—	2018	7.80	35	405	8.85	14.3	0.105	0.013	1.1	9.4

が約 +4% と比較的均一な値を示し、これは、この地域の火山性堆積物からなる帯水層、もしくはこの地域を流れる主要河川である白川（図 1 の X 印）の δ 値（ $\delta^7\text{Li}$ が約 +10%、 $\delta^{11}\text{B}$ が約 +0%；表 1）のいずれかを反映していると思われます。

地震後に発生した沿岸部の地下水試料（T21）の化学的变化（図 2）は、 $\delta^7\text{Li}$ および $\delta^{11}\text{B}$ データからも確認されました（表 1）。これは柔らかい堆積物の液状化現象に起因する可能性があります。T21 周辺の浅い帯水層（深さ 10 m 程度）は、沿岸の帯水層／堆積物の化学組成のなかで、T45 に似た化学組成および同位体組成の間隙水の混合の影響を受けており、Cl 濃度の低い地下水が地震による液状化でできた新しい経路を通して垂直あるいは水平方向に運ばれて混合した結果であると結論付けました。

これに対して、主要流動地域地下水の Li-B 同位体比は地震発生後、ほとんど変化しませんでした（表 1）、震源地周辺、すなわち T11 井戸では、わずかな同位体比変化が検出されました。この井戸水の両同位体が本震後 4.5 ヶ月で低い δ 値側に動いたことは、Li と B の濃度の上昇に関連しています。この変化をさらに確認するために、2017 年 3 月に T11 井戸の追加採水を行った結果、地震後 11 ヶ月後には濃度、同位体比ともに元の値に近づいていることが確認されました（表 1）。

このような高 Li・B 濃度の地下水には、塩分を含む停滞水と、深部からの熱水という 2 つの候補があります。沿岸の地下水のような前者の流体が混入した場合、 $\delta^7\text{Li}$ 値と $\delta^{11}\text{B}$ 値は増加するはずですが、逆の結果が観測されました。従って、停滞水の混合は考えにくく、両 δ 値が低い値を持つ熱水が妥当であると示唆されました。2016 年の熊本地震後、布田川断層の東側延長線上の阿蘇カルデラ内で、新たな熱水性深部流体が地表に流出したことが報告されており、布田川断層の南西端に近い位置にある T11 観測井へ、同じ起源をもつ熱水の寄与が考えられます。

T11 観測井周辺では、地下約 1,000 m から温泉

が汲み上げられているため、地震に伴って、帯水層（厚さ 250 m 程度）に比べてより深い場所から流体が浅層地下水と混合したと考えられました。これにより、最初に述べた震源地周辺で地震後に認められた Cl^- 、 SO_4^{2-} 、B 濃度の上昇が生じたと解釈できます。

T11 地下水と阿蘇カルデラで湧出した熱水の間で、Li と B の濃度およびその同位体比が異なることから、震源地周辺の浅い地下水帯水層への熱水由来の深部流体の寄与が小さいながら存在することを明らかにすることができました。また、地震後の熱水の浅層地下水への混合割合は、数%と計算されました。たとえ寄与が小さくても、Li と B の同位体比を指標として用いると、その同位体比は海水、停滞地下水、熱水で明瞭に異なることから、浅層帯水層へのこれらの他起源地下水の混合を高感度で同定することができました。

地震発生に伴い池や井戸の水が枯れる、または水位が上昇するなどの変化は、これまで多くの地域で記述されてきました。これらの原因を特定するためには、観測地点の存在が重要となります。ところが、特に内陸直下型地震の場合、地震が起こった地域でたまたまこれら観測点が時空間的に整っていることは一般的に希だといえます。また、災害発生前と発生後のデータを比較するために必要な各種データが揃っているケースはますます少なくなります。このような背景から、地震によってどのような地下水環境の変化が生じるのかという問いに対し、私たちはこれまであまり明瞭なイメージを持てていませんでした。熊本地域では多くの観測井戸が存在し、水位や水質など様々なデータが継続的に観測されています。今回、こうした地域の直下で巨大内陸地震が発生したため、結果的に地震発生前後の各データを比較できる十分な情報を入手でき、地震による地下水環境の変化をこれまでになく詳細に捉えることに繋がりました。

文献

- M. Tanimizu, N. Sugimoto, T. Hosono, C. Kuribayashi, T. Morimoto, A. Ito, R. Umam, Y. Nishio, K. Nagaishi, and T. Ishikawa (2021) Application of B and Li isotope systematics for detecting chemical disturbance in groundwater associated with large shallow inland earthquakes in Kumamoto, Japan. *Geochem. J.*, 55, 241–250. DOI: 10.2343/geochemj.2.0633
- T. Hosono, C. Yamada, M. Manga, C.-Y. Wang, and M. Tanimizu (2020) Stable isotopes show that earthquakes enhance permeability and release water from mountains. *Nature Comm.*, 11, #2776. DOI: 10.1038/s41467-020-16604-y

著者情報



谷水雅治 関西学院大学生命環境学部・教授。専門は同位体地球化学。無機質量分析法を駆使して、地球表層でのさまざまな元素の物質循環を把握する研究を行ってきた。



細野高啓 熊本大学大学院理学研究科・教授。専門は同位体環境学。各種同位体などを用い、流域における環境問題の実態把握や原因究明に関する研究を行ってきた。

(2023 年 3 月 31 日掲載)