

別府温泉南部地域における二酸化炭素の放出量の推定

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設

小川幸輝・柴田智郎
竹村恵二

要旨

地表面から放出されている二酸化炭素(CO_2)の量を調べるために、別府温泉南部地域にある堀田断層・朝見川断層周辺で、単位時間・面積当たりの二酸化炭素の放出量(フラックス値)を測定した。測定した二酸化炭素のフラックス値は、 $0.068\sim 660\text{ g/m}^2\cdot\text{day}$ を示し、今回測定した地域の二酸化炭素放出量は $0.13\sim 4.8\text{ kg/day}$ と推定された。高いフラックス値が測定された地点は、堀田断層から朝見川断層に沿う場所と、それらの断層から北に離れた場所に見つかった。

1. はじめに

現在の地球大気・海洋は、地球誕生後、固体地球内部から二次的に導かれたものである。希ガスの1つであるアルゴン同位体比を用いた研究によると、地球大気はその90%が地球形成初期の約40億年前までにカタストロフィックな脱ガスで、その後の地球史を通じた連続的な脱ガスで形成した(Hunano & Ozina, 1978)。連続的な脱ガスは、現在も火山活動などで続いており、地球内部からの物質やエネルギーなどの移動に大きな役割を担っている。

火山地帯では、噴気孔から様々な物質を放出しているが、噴気孔のみならず山体からも揮発性成分の放出が見られる。山体で観測される揮発性成分の1つである二酸化炭素の放出量の変化は火山活動と密接な関係がある。2000年3月の有珠山噴火の際には、二酸化炭素放出量が1998年9月に 120 ton/day であったものが、1999年9月には約3倍の 340 ton/day まで増加し、噴火後の2000年6月には 39 ton/day まで減少したことが確認されている(Hernández et al., 2001)。また、二酸化炭素放出量の分布は山体全体で均一ではなく、山体の北西部や南西部で高い値を示し、地質や地下構造などによって差があることが報告された。一方、地溝帯や活断層も地球内部の揮発性成分の放出経路となることが知られている。トルコの北アナトリア断層では、断層上で二酸化炭素の放出量とヘリウム同位体比($^3\text{He}/^4\text{He}$)が高くなることが報告されている(Dogan et al., 2009)。

別府温泉地域が位置する中部九州地域は、張力が発達し地溝帯を形成している(松本, 1979)。その東端部の別府湾周辺には、活断層が密集するとともに、鶴見岳、伽藍岳、由布岳などの活動的な火山が位置している。Alis and Yusa (1989)は、別府温泉地域の地下100mにおける地温分布を求め、火山から高温流体が供給されていることを示した。高温流体は北部の鉄輪断層と南部の堀田断層・朝見川断層に沿って流動しており、これらの地表部では、噴気などの地熱兆候が見られる。三根(2006)は別府北部地域において約400に及ぶ地点で CO_2 フラックス値を測定した。その結果、鉄輪断層に沿う地域で二酸化炭素の放

出量が高く、東西に走る鉄輪断層が流体の通路となっていることを示した。そこで、本調査研究では、別府温泉地域の南部にある堀田断層・朝見川断層周辺で二酸化炭素フラックスを測定し、本地域から放出される量を推定する。

2. 調査方法

南部の堀田断層・朝見川断層の周辺地域で、土壌から放出される二酸化炭素量を測定した。放出量の測定には、Accumulation chamber 法 (Chiodini et al., 1998) を採用し、イタリア West System社製「Portable diffuse flux meter with LI-COR CO₂ detector」装置を用いた。この装置は、直径 20cmのお椀型の容器に溜まった二酸化炭素の濃度変化を非分散型赤外分光 (NIR) 装置で測定する。二酸化炭素は波長 4.26 μm の赤外線吸収特性があり、その赤外線の吸収割合から濃度を算出している。

現地調査では、容器を地面との隙間がないようにかぶせ、地面から放出された二酸化炭素をお椀型の容器内に溜める。容器内には、ガス濃度に偏りがないように、測定時にはファンが回転し、攪拌する。容器内のガスは、シリコンチューブを通してポンプで分光装置に送られ、濃度を測る。また、分光装置から排気されたガスは、再び容器内に戻すことで、容器内の二酸化炭素濃度の上昇量をできるだけ正確に測定する。土壌から放出されるガスには、水蒸気も含まれ、その赤外線吸収波長領域が二酸化炭素のものと重なるため、その影響を除くために過塩素酸マグネシウム (Mg(ClO₄)₂) を用いて除湿した。

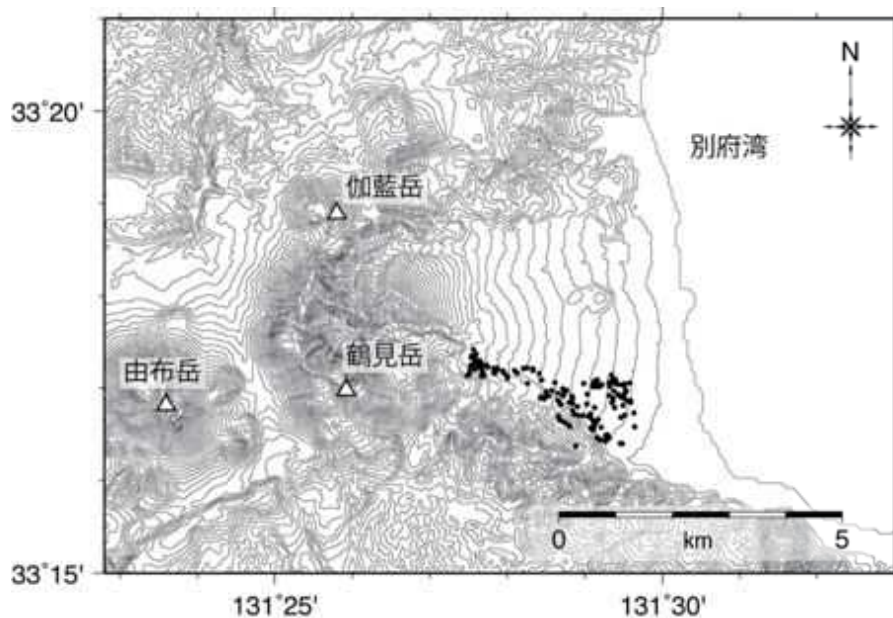


図 1. 調査地と調査地点 (黒点)。

測定は、2016年6月13～15日、8月18日～20日、22日、9月7日～11日の12日間に、堀田断層と朝見川断層を横切るように、西から東（山側から海側）にかけて、178点を行った。観測点の分布図を図1に示す。

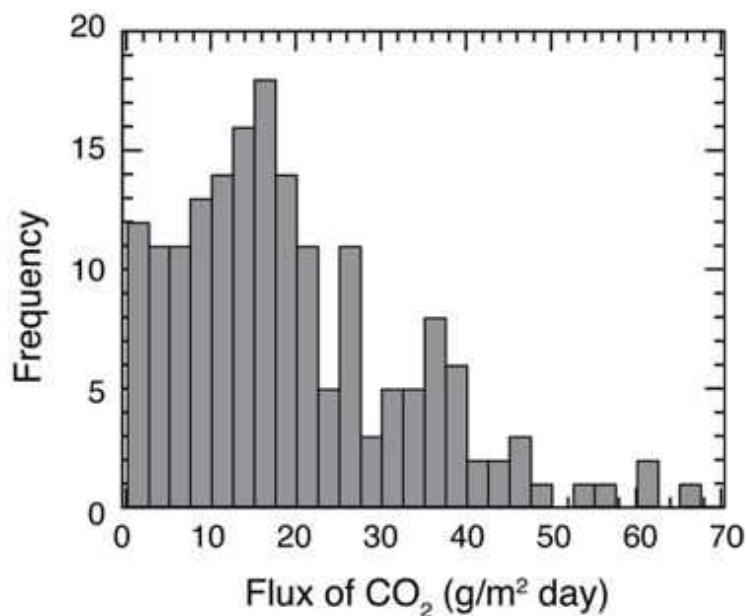


図2. 二酸化炭素フラックスが0～70 g/m²dayの範囲の頻度分布. このほかに110および660 g/m²dayの2地点がある.

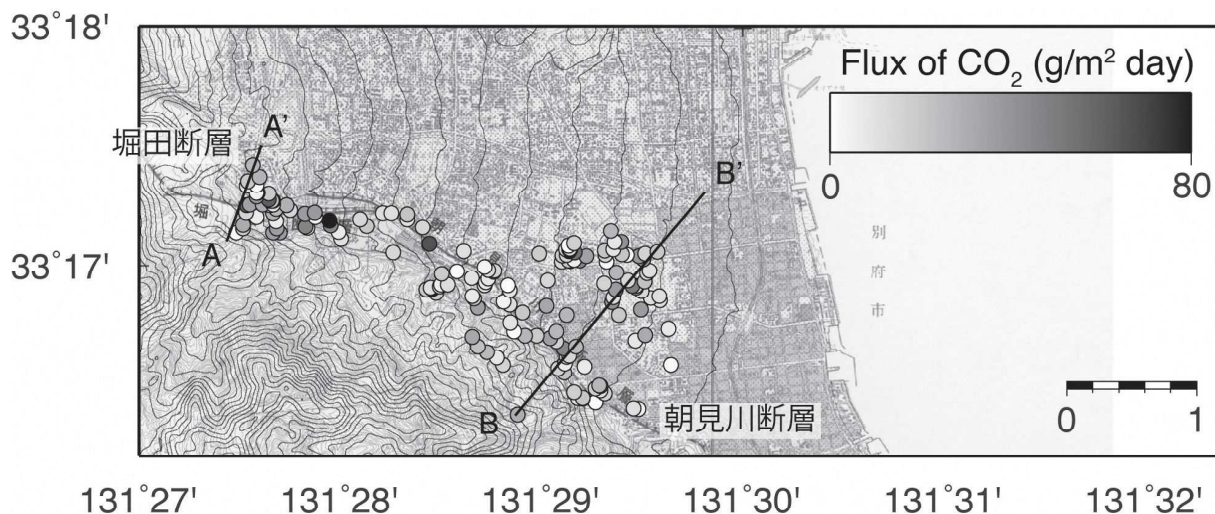


図3. 二酸化炭素フラックスの結果を千田ほか（2000）に示す堀田断層・朝見川断層に加筆して示す。濃い色ほど高い値を示す。

3. 結果

単位時間・面積当たりの二酸化炭素の放出量（フラックス値）は、場所により大きく異なり、 $0.068\sim 660\text{ g/m}^2\text{day}$ の範囲にあった。一般的に、生物活動で土壌から放出される二酸化炭素のフラックス値は約 $2.6\text{ g/m}^2\text{day}$ 以下であり（Dogan et al., 2009）、本調査では12地点で見られた。これらを除く測定地点では、 $15\sim 18$ と $35\sim 38\text{ g/m}^2\text{day}$ を中心に分布している（図2）。堀田断層と朝見川断層に沿う地域では、 $30\text{ g/m}^2\text{day}$ を超える値が見られ、一部は断層から離れ、北部を迂回するように、海側に広がっている（図3）。

4. 考察

堀田断層と朝見川断層を横切るように、図3のAA' およびBB' 側線上での二酸化炭素のフラックス値を図4に示す。堀田断層および朝見川断層上ではフラックス値が高く、断層を通過して二酸化炭素が地上へ上がってきていることが分かった。また、BB' 側線では断層から離れた場所でも高い値を示していることがあり、地下にフラックスを上昇させる構造が地下にあると考えられる。

今回の測定したフラックス総量は $4.8\text{ kg/m}^2\text{day}$ である。測定に使用したお椀型の容器の底面積は 0.0314 m^2 であるので、総放出量は約 0.13 kg/day となる。仮に、測定した地点の 1 m^2 で同じ値であると仮定すると、放出量は 4.8 kg/day となる。したがって、本調査地域から放出される二酸化炭素の量は、おおよそ $0.13\sim 4.8\text{ kg/day}$ と推測される。この量は、齋藤ほか（2007）が測定した阿蘇中岳火口周辺の土壌から放出される二酸化炭素の量（ 120 kg/day ）と比較すると、 $0.001\sim 0.04$ 倍程度である。

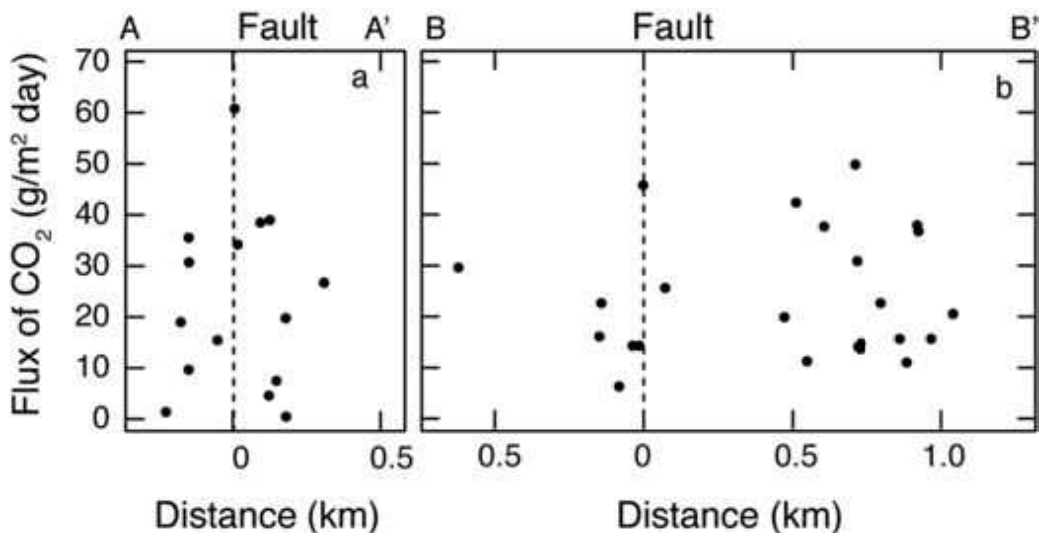


図4. 図3で示したAA' (a) およびBB' 側線 (b) での堀田断層・朝見川断層からの距離と二酸化炭素のフラックス値の関係。破線は断層を示し、その直上で高い値を示す。また、BB' 側線では断層から離れた場所でも高い値を示す。

5. おわりに

本研究では地熱地帯における二酸化炭素の脱ガス機構を明らかにすることを目的として、別府温泉地域南部において土壌ガスとしての二酸化炭素の放出量を測定した。堀田断層と朝見川断層を横切るように 178 地点で測定し、166 地点で火山起源と考えられる $2.6 \text{ g/m}^2\text{day}$ 以上の値を示した。堀田断層、朝見川断層に沿う地域とこれらの断層から北部に離れ、東側に向かう地域にかけて高い値が見られた。今回測定した調査範囲から放出される二酸化炭素の量は $0.13\sim 4.8 \text{ kg/day}$ と推定される。

謝辞

本研究を実施するにあたり、京都大学理学研究科大沢教授、三島技術職員から測定などにかかるご助言をいただいた。記して謝意を示す。また、本論文に使用した図の一部は GMT ソフトウェア (Wessel and Smith, 1998) を使用した。

引用文献

- Allis, R.G. and Yusa, Y. (1989): Fluid flow processes in the Beppu geothermal system Japan. *Geothermics*, 18, 743-759.
- Chiodini, G., Gori, R., Guidi, M., Raco, B., and Mirini, L. (1998): Soil CO_2 flux measurements in volcanic and geothermal areas, *Appl. Geochem*, 13, 543-552, doi: 10.1016/S0883-2927(97)00076-0.
- Doğan, T., Sumino, H., Nagao, K., Notsu, K., Tuncer, M.K., and Çelik, C. (2009): Adjacent releases of mantle helium and soil CO_2 from active faults: Observations from the Marmara region of the North Anatolian Fault zone, Turkey. *GB*, 10, Q11009.
- Hirano, Y. and Ozima, M. (1978): Earth atmosphere evolution model based on Ar isotopic data. in *Terrestrial rare gases* (eds., E.C. Alexander, Jr. & M. Ozima), 155-171, Cent. Acad. Publ. Japan, Tokyo.
- Hernández, P.A., Notsu, K., Salazar, J.M., Mori, T., Natale, G., Okada, H., Virgili, G., Shinohike, Y., Sato, M., and Pérez, N.M. (2001): Carbon Dioxide Degassing by Advective Flow from Utsu Volcano, Japan. *Science*, 292, 83-86.
- 松本 徃夫 (1978) : 九州における火山活動と陥没構造に関する諸問題. *地質学論集*, 16, 127-139.
- 三根 崇彦 (2006) : 土壌 CO_2 フラックスを指標とする, 地熱活動の評価について—別府地域を例として—. 平成 18 年度京都大学大学院理学研究科惑星科学専攻地球物理学分野修士論文集 II.
- 齋藤 政城・松島 健・松尾 道・清水 洋 (2007) : 阿蘇中岳火山の二酸化硫黄および二酸化炭素ガス放出量の測定. *九大理研報 (地球惑星)*, 22, 51-62.

千田 昇・池田 安隆・中田 高・岡田 篤正・宇根 寛 (2000) : 1 : 25000 都市圏活断層
図「別府」. 国土地理院技術資料, DI-Nb. 375.

Wessel, P., and Smith, W.H.F. (1998): New improved version of the Generic Mapping
Tools released. EOS Trans. AGU 79, 579.

姫島火山群の第四紀溶岩中の地殻起源捕獲岩の地球化学的特徴 3

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設

柴田知之・Khadidja Abbou-kebir
芳川雅子・竹村恵二

要旨

国東半島北東に位置する姫島火山群の焼野岳に陥入する金溶岩中の捕獲岩の地球化学的特徴を明らかにするため、同地域から採取した捕獲岩中の鉍物の化学組成の測定を行った。その結果、捕獲岩中のザクロ石の組成は、領家変成岩中のザクロ石が示す組成範囲と類似することが分かった。

1. はじめに

姫島は九州の火山フロント上で活動した火山群であり (図1)、角閃石デイサイト、黒雲母含有角閃石流紋岩、及び、ザクロ石流紋岩の溶岩および火砕岩から構成されている (伊藤, 1990; 伊藤ほか, 1997)。これらの火山岩中には、地殻起源捕獲岩が観察されることがある。捕獲岩は金溶岩の中に多く観察される。姫島火山岩を形成したマグマの起源に、地殻物質が関与していることが指摘されているが (氏家・伊藤, 1991; Shibata et al., 2013)、この地殻物質がどのようなものであったかはよくわかっていない。そこで、地殻物質の断片であると考えられる捕獲岩から、マグマ起源への地殻物質の寄与に関する情報を得ることをめざす。

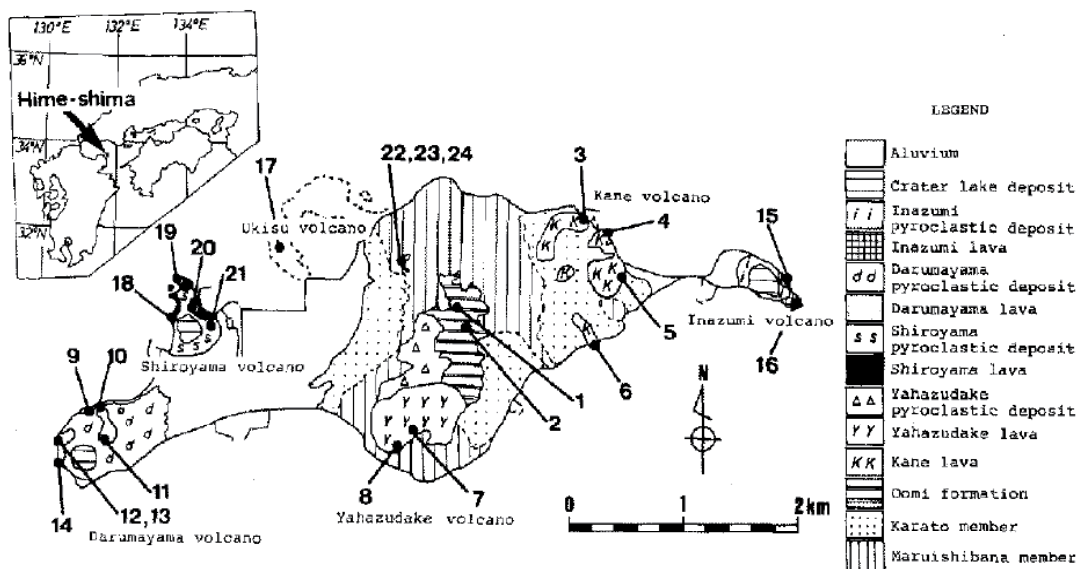


Fig. 1. 姫島の地質図と試料採取地点。伊藤(1990)に加筆。

2. 試料及び分析法

金溶岩中から採取した4試料中の構成鉱物の化学組成の測定を行った。そのうち、本報告ではザクロ石の組成について報告する。分析は、広島大学自然科学研究開発センター設置の、日本電子製電子プローブマイクロアナライザーを用いて行った。

3. 結果と考察

ザクロ石の化学組成を、アルマンディン成分、スペサルティン成分およびパイロープ成分をそれぞれ頂点とする三角図に白丸でプロットした (Fig. 2)。図中の黒四角は、領家変成岩中のザクロ石の組成 (馬場, 1998; 小野, 1977; Beppu and Okudera, 2006) 示す。

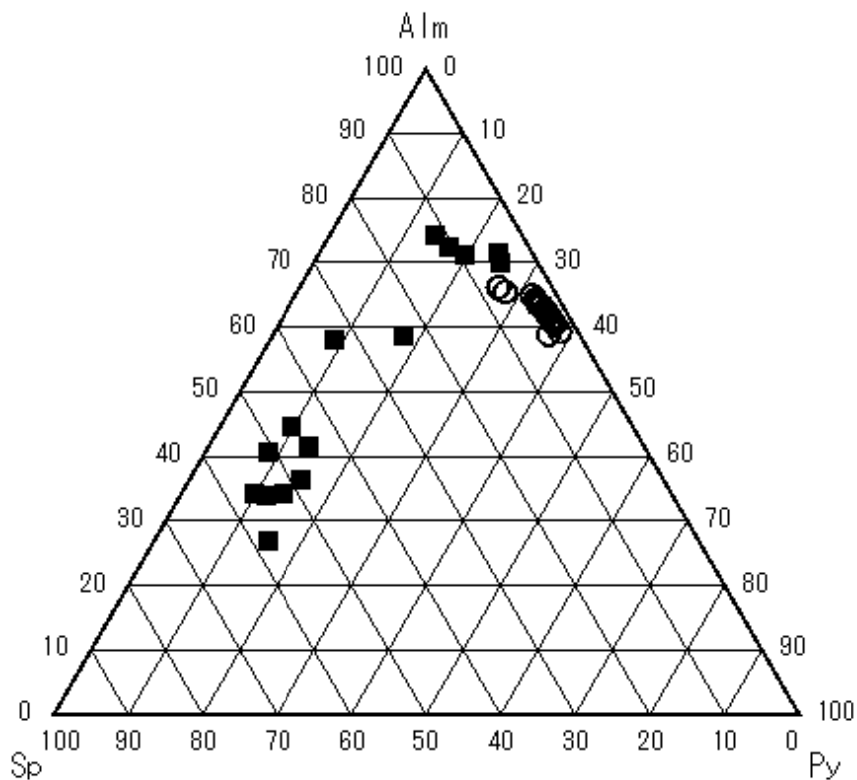


Fig. 2. ザクロ石の化学組成。

捕獲岩中のザクロ石の示す組成領域は、領家変成岩中のザクロ石のうち、アルマンディン成分が高いものの近傍にプロットされる。このことは、姫島の火山岩中の地殻研捕獲岩が、領家変成岩起源であるという考えと矛盾しない。また、姫島の火山岩中に観察されるザクロ石の組成 (平山他, 未公表) と比較すると、捕獲岩中のザクロ石の組成と異なるため、このザクロ石が姫島火山群のマグマに、直接取り込まれたを言えず、伊藤 (1990) が主張するように斑晶鉱物であるのかもしれない。

引用文献

馬場壯太郎 (1998) 地質学雑誌, 104, 107-121.

Beppu and Okudera (2006) J. Mineral. Petrol. Sci, 101, 240-253.

小野晃 (1977) 岩石鉱物鉱床学会誌, 72, 453-468.

伊藤順一 (1990) J. Miner. Petrol. .Econ. Geol. 85, 541-558.

伊藤順一ほか (1997) 地域地質研究報告 5 万分の 1 地質図幅, 姫島, 地質調査所

柴田ほか(2014) 大分県温泉調査会報告

氏家修・伊藤順一 (1991) J. Miner. Petrol. .Econ. Geol. 85, 65-71.

別府における小規模地熱発電にともなう 河川の水質変化

京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設

三島 壮智・大沢 信二

竹村 恵二

要旨

大分県別府市において、小規模地熱発電（温泉発電）の開発が行われるようになったので、それにとまなう温泉排水が河川水質に与える影響について、観測データに基づき地球化学的評価を行った。観測対象は、当該発電が活発な小倉地域に着目し、その周辺を流れる春木川の本流と支流の今井川である。結果は、既存データによる 2003 年、2005 年、2009 年に比べて、Na-Cl 型の泉質に由来する塩化物イオンの濃度が大幅に増加しており、特に春木川本流の塩化物イオン濃度は最大濃度時に変化前の濃度約 10mg/L に比較して 40 倍の約 400mg/L に近い値を示し、定常状態になった現在でも 10 倍近い濃度を示していることを確認した。このように、すくなくとも春木川では、温泉排水による影響は温泉発電開発が行われる以前よりも確実に大きくなっていると考えられる。

1. はじめに

別府温泉は鶴見火山東側裾野に広がる扇状地に位置し、源泉数や湧出量共に国内最大級

の規模を誇る日本屈指の温泉地である。2011年に発生した東日本大震災と原発事故以降、再生可能エネルギーが注目され、国や県により開発が推進されたことを背景に、別府市では2012年12月頃より温泉泉源を用いた小規模地熱発電（温泉発電）事業が再生可能エネルギーとして検討され始め、2013年1月より試験的に発電が開始され、2014年1月には本格化した。

現在、小規模地熱発電は別府市西側に位置する高地部のNa-Cl型自噴沸騰泉を用いて行われており、発電で使用された温泉水の一部は浴用に配湯される場合もあるが、余剰分は最終的にそのまま水路へ排水されているようである。当初考えられていたように、小規模地熱発電が無駄に捨てられていた温泉水を利活用しているのであれば、当該発電が行われる前と現在で河川への排水量に変化はなく、河川水質の変化もないはずであるが、仮に温泉排水量に変化があれば、温泉発電所周辺域の河川水質に変化が表れている可能性があると考えた。

私たちはいち早く、小規模地熱発電が始まった噴気・沸騰泉が数多く分布するエリアの一つである小倉地域を南北から挟むように流れている春木川に着目した。春木川は元々温泉排水の影響を受けている河川の一つで、下流部では熱帯魚が確認されるなど、本来の河川環境から特殊な河川環境へと変化している河川であり（山田・他（2010））、私たちは今回の温泉発電開発の影響で更に河川環境に変化が起こる可能性を危惧し、毎月水質等の観測を行うこととした。特に、本研究では、毎月の観測で取得した水質データと過去に春木

川の一斉調査を行った先行研究（2003年のデータ：山崎（2005）、2005年のデータ：大沢・他 未公表データ、2009年のデータ：酒井・他（2011））の水質データとの比較を行い、河川水質変化の有無を確認することとした。また、水質の変化があったならば、それが生活排水によるものか温泉排水によるものかを評価することにした。

2. モニタリング等の方法

本研究での観測対象河川は上記の春木川の上流部で、小倉地域を挟み込んで南北両側を流れる河川（本流と支流の今井川）についてそれぞれモニタリングを行った。現地調査は毎月一回行っており、春木川本流では2015年4月から開始し、今井川では2015年4月の視察を兼ねて行った調査の後2016年7月から開始した。春木川本流のサンプリング場所は図1に示すP1の位置で、照湯温泉前から河床に降りて直接サンプリングを行った。今井川は図1に示すP2の位置で、光伸ガス株式会社別府営業所前の橋から上流側に紐付きバケツを下してサンプリングを行った。またこれらのモニタリングとは別に、本流に温泉排水が流れている時期に、P0の位置で小規模地熱発電地域に流入する前の河川水を先行研究のデータ（酒井・他（2011）、山崎（2005））と比較するためにサンプリングした。

試料水については、主要化学成分用に250mLポリプロピレン製の容器を用い、予備も含めて2本サンプリングを行った。現地では、水温、E.C.（電気伝導度）、pH、酸化還元電位（ORP）の測定を行った。主要化学成分（リチウムイオン： Li^+ 、ナトリウムイオン： Na^+ 、

カリウムイオン： K^+ ，マグネシウムイオン： Mg^{2+} ，カルシウムイオン： Ca^{2+} ，塩化物イオン： Cl^- ，硫酸イオン： SO_4^{2-} ，硝酸イオン： NO_3^- ）の分析は現地観測からサンプルを持ち帰り，実験室にてイオンクロマトグラフィ（陽イオン：Thermo Fisher Scientific 社製 ICS-1100，陰イオン：DIONEX 社製 DX-120）を用いて行った。重炭酸イオン（ HCO_3^- ）濃度は，0.1mol/L 塩酸滴定法（pH4.3 アルカリ度）にて求めた。

上記の方法によって取得した主要化学成分濃度について，先行研究における調査当時の水質（2003 年のデータ：山崎（2005），2005 年のデータ：大沢・他 未公表データ，2009 年のデータ：酒井・他（2011），これ以降，これらのデータ出展については触れない。）との比較を行い，河川水質の変化及び，その変化原因について地球化学的に検討・評価を行った。

3. 結果・考察

現地測定結果（水温，E.C.，pH，ORP）を，化学分析結果と共に表 1 に示す。春木川の本流 P1 では，2009 年は HCO_3^- 濃度が一番高かったことから HCO_3^- 型河川と分類されており（酒井・他（2009）），2003 年や 2005 年でも同様の水質であったことを確認することができた。2015 年の観測開始当初はその水質を引き継いでいたが，2015 年 7 月から急激に水質に変化があり，現在は Cl 型河川へと変化してしまっていることがわかった（表 1 や図 2 (a)）。Cl 濃度は 2017 年 7 月に最大濃度となり，変化前の濃度約 10mg/L に比較して 40

倍の約 400mg/L に近い値を示し、定常状態になった現在でも 10 倍近い濃度を示している。

また、水質変化が起こってから一度だけであるが本流の上流部 P0 で河川水をサンプリングして分析を行ったものも表 1 に加えてあるが、この地点においては 2003 年や 2009 年時点のデータと大きな違いは無いことが確認できており、水質変化は小規模地熱発電地域に入ってから河川に何らかの Cl 型流体が流入していることが原因で現れたことが示唆される。

酒井・他（2011）にも著されているように、小倉地域は未だに下水の未整備地区であり、温泉排水温度が高いため別府市環境保全条例で下水道に排出できないこととなっている。

この条例を考慮すると、現在も余剰温泉水は河川へそのまま排水されている可能性を示唆しており、春木川本流における 2015 年 5 月以前と 2015 年 7 月以降の水質変化は、単純に河川への Na-Cl 型温泉排水の排出が開始されたことに関係すると予想される。

今井川に関しても、2003 年以降 2009 年までは大きな変化は起こっていなかったが、2015 年以降も 2009 年時点と同様に Cl 型に分類できる水質を示しているが、Cl 濃度が少なく見積もって 2~3 倍の濃度に急上昇していることが確認できた。また、増加した濃度に関しては、上流部で揚湯されている Na-Cl 型の温泉由来の元素のみ増加していることが表 1 や図 2(b) から確認できる。今井川における 2009 年時点と 2015 年以降の水質変化は、より高塩分濃度のものが河川へ排出された可能性も無いとは言い切れないが、単純に河川への Na-Cl 型温泉排水の排出量が増加したと考えることが妥当であろう。

しかし、以上のように、小規模地熱発電開始を機に春木川本流と今井川の水質がより温

泉に向かって変化したと言えそうであるが、河川水質の変化が温泉排水に起因することを十分に評価しておかなければ、行き過ぎた情報を世に送り出してしまう可能性がある。そこで、その原因について地球化学的な手法を用いて評価検討を行った。本研究では、生活排水には存在せず温泉水に存在する Li^+ 濃度と、逆に温泉には存在せず生活排水に存在する NO_3^- 濃度の濃度変化を確認するという単純な方法をとった。

本流は 2015 年の観測開始時期まで Li^+ は検出不能であったが、2015 年 7 月以降ほぼ定常的に検出されるようになった (図 3 (a))。これは、2015 年の 6 月頃に温泉排水の本流への流出が開始されたことを示している。しかし、2015 年 9 月と 2016 年 7 月のみ 2015 年 5 月以前と同じ濃度になっており、この時期は単純に温泉排水の河川流入が停止したものと考えている。また、 NO_3^- 濃度に関しては、バラツキはあるものの、 Li^+ 濃度のように検出不可が検出可に変わるような大きな意味を持つ変化はしていない事も確認できた。

そこで、この温泉排水が小倉地域で揚湯される深部由来熱水であるかを確認する方法として Li/Cl 比と総塩分濃度 (TDS) の関係図からも評価することとした。これは、大沢・他 (2007) や、風早・他 (2009) によって火山性温泉の Li/Cl 比がトレーサーになるという研究成果を用いて評価をする方法である。今回は風早・他 (2014) の深部由来熱水よりもさらに厳しい判定基準で見ていることになる大沢・他 (2007) の範囲を使用した。春木川本流は、一部 TDS が低いため深部熱水の範囲を逸脱しているが、 Li/Cl 比に関しては深部熱水型の温泉水 (天満温泉, 温泉 Y, 温泉 A) と遜色ない値を示しており、概ね深部熱水由

来と言えることが確認できた (図 3 (c))。また, 2015 年 5 月以前のデータでは, Li^+ 濃度がイオンクロマトグラフィの検出限界未満であるため, 深部熱水由来の領域に全く入らないことが確認できた。このことから, 2015 年 7 月以降に定常的に $\text{Na}-\text{Cl}$ 型自噴沸騰泉の温泉水排水が流出し, 水質変化の原因となった可能性が高いことを示している。

今井川の方は 2003 年~2009 年まではほとんど変化がなかったが, 2015 年 4 月に Cl 濃度が大きく変化し, NO_3^- 濃度にはほとんど変化がないことが確認された (図 4 (a))。

ここでも春木川本流と同様に Li/Cl 比と TDS の関係図からも評価することにした (図 4 (b))。今井川のデータについては完全に深部熱水由来の範囲に入っており, 2005 年以降からずっと $\text{Na}-\text{Cl}$ 型自噴沸騰泉の温泉水の混入が原因であるということを示している (2003 年の Li^+ 濃度は未分析)。つまり, 今井川の Cl 濃度変化は, $\text{Na}-\text{Cl}$ 型自噴沸騰泉の温泉水が原因で, その濃度が大きく変化するとは考え難いので, 2009 年以前よりも小倉地域の揚湯量が大きく増加し, その分排水量が増加したと考えることが妥当であるとする。

4. おわりに

本研究によって, 新たにつかんだ温泉河川水質の変化について小規模地熱発電による温泉排水の影響は確認できたと考えている。春木川本流部 P1 では開発以前は検出できなかった Li^+ が定常的に検出されるようになり, 今井川の方でも Cl 濃度が定常的に 2009 年以前と比較して 2 倍以上の濃度になっていることが確認された。また, その水質変化の原因につ

いて地球化学的な手法で検討を行ったところ、概ね深部熱水型（Na-Cl 型）の温泉水の流入および流入量の増加であるとの結果となった。自噴温泉井における揚湯量制限や、発電に使用した温泉排水について還元井を作るなどの何らかの対策が取られることを期待したい。

謝辞

本研究は過去の別府温泉の河川についてのデータがあつてなしえた研究であり、それらのデータ収集に活躍された東邦大学、大分大学の学生諸君（当時）に敬意を表します。

引用文献

山田誠，三島壮智，大沢信二，酒井拓哉，齋藤光代（2010）河川生態系に対する温泉排水の影響に関する研究－別府地域における河川水質と珪藻流出量の関係－．大分県温泉調査研究会報告，**61**，15-24

酒井拓哉，川野田実夫，大沢信二，馬渡秀夫，山田誠，三島壮智（2011）別府地域の河川水質への温泉排水の影響評価．大分県温泉調査研究会報告，**62**，47-58

山崎一（2005）河川に及ぼす温泉排水の影響評価に関する環境科学的研究．東邦大学大学院理学研究科科学専攻 修士論文，1-73

大沢信二・由佐悠紀・北岡豪一（1994）別府南部における温泉水の流動経路．温泉科学，**44**，199-208.

大沢信二・由佐悠紀（1996）温泉水の化学組成から推定される別府温泉北部地域の地下温

泉水の流動経路.『地熱流体流動過程と地下構造に関する研究』科学研究費補助金報告書

大沢信二，山崎一，高松信樹，山田誠，網田和宏，加藤尚之（2007）温泉から河川への有

用金属元素の流出—未利用温泉資源量に関する基礎調査と研究—．大分県温泉調査研究

会報告，**58**，21-30.

風早康平（2014）西南日本における温泉水の成因について：スラブ起源深部流体の特徴と分

布，温泉科学，**64**，282-288.

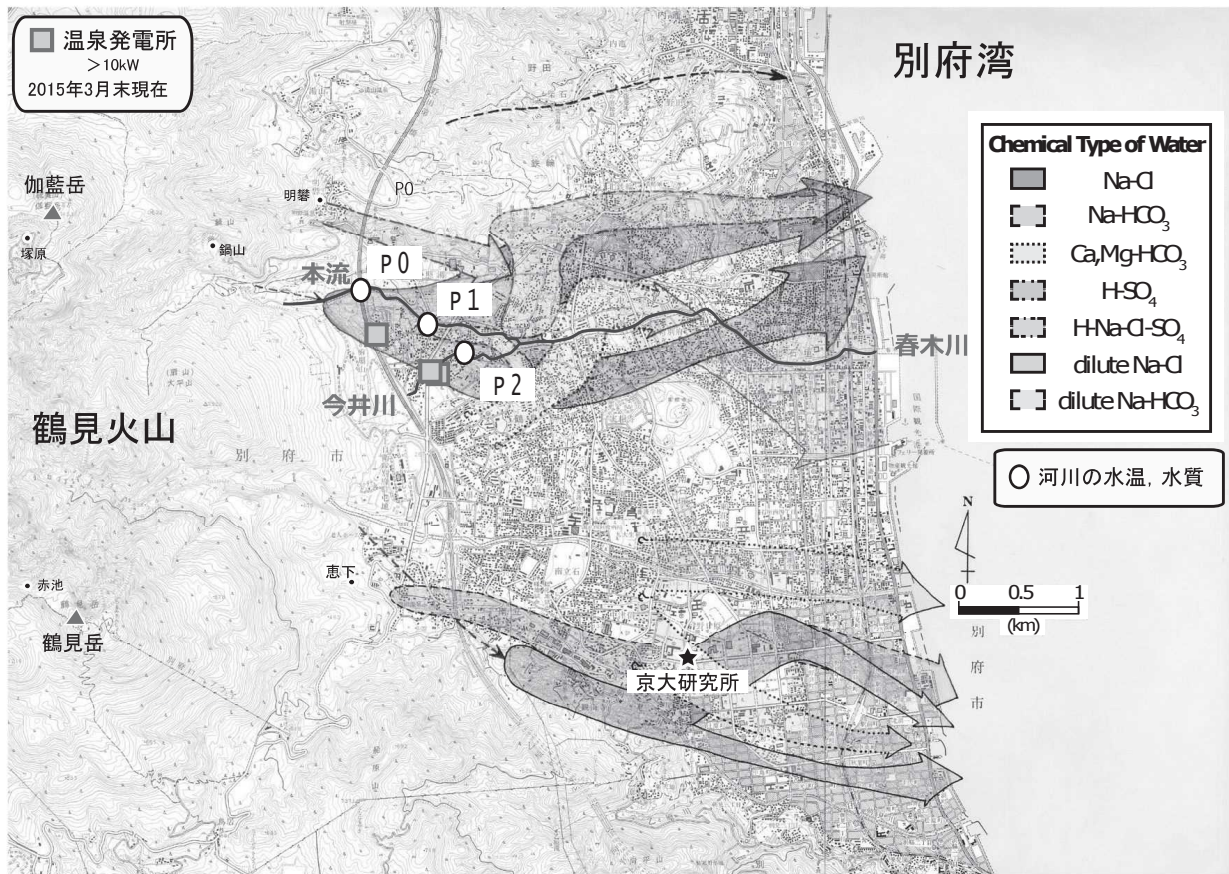


図1 研究対象地域における小規模地熱発電（“温泉発電”）に関する諸情報と観測地点（P0～P3）。同図には、温泉発電に使われるNa-Cl型沸騰泉水の元にある熱水を含む種々の水質の熱水の地下流動経路（大沢・他，1994；大沢・由佐，1996）も転記してある。

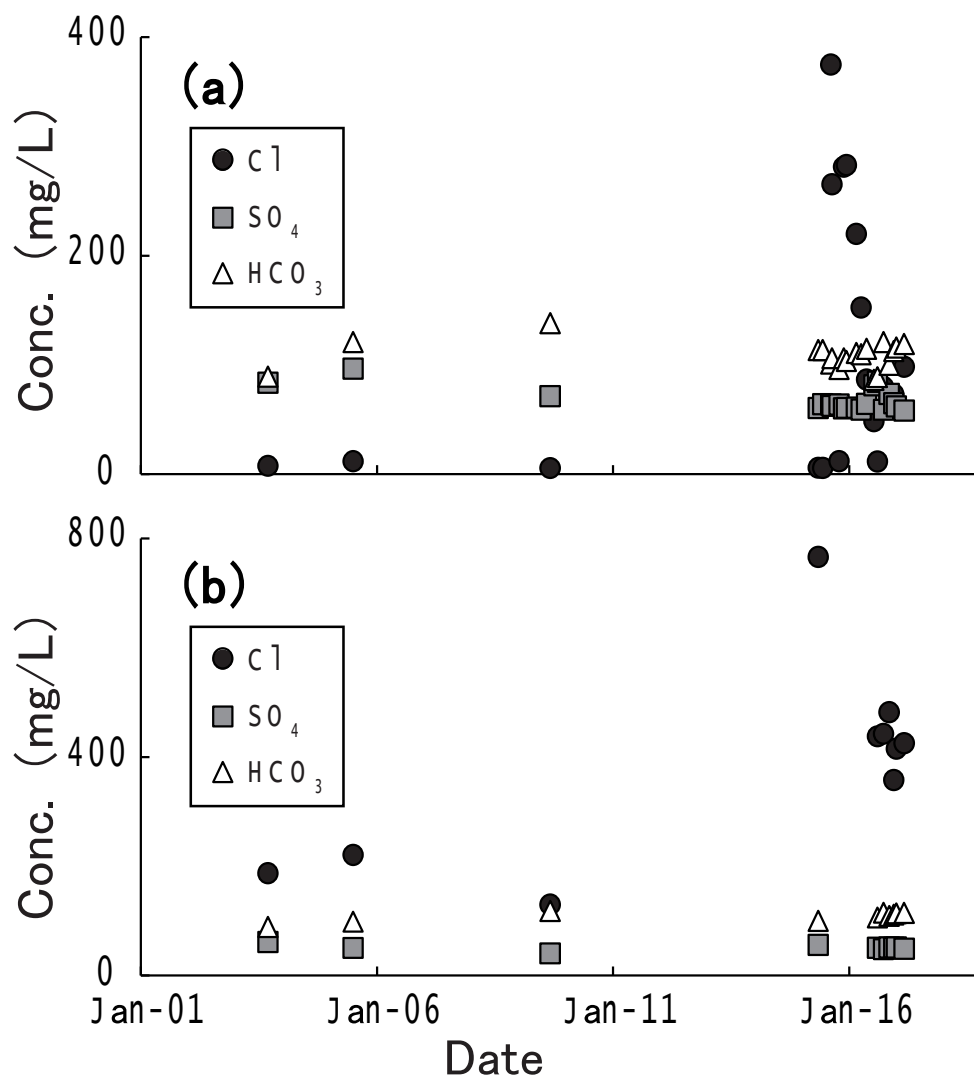


図2 春木川本流と今井川の主要成分（陰イオン）の濃度変化

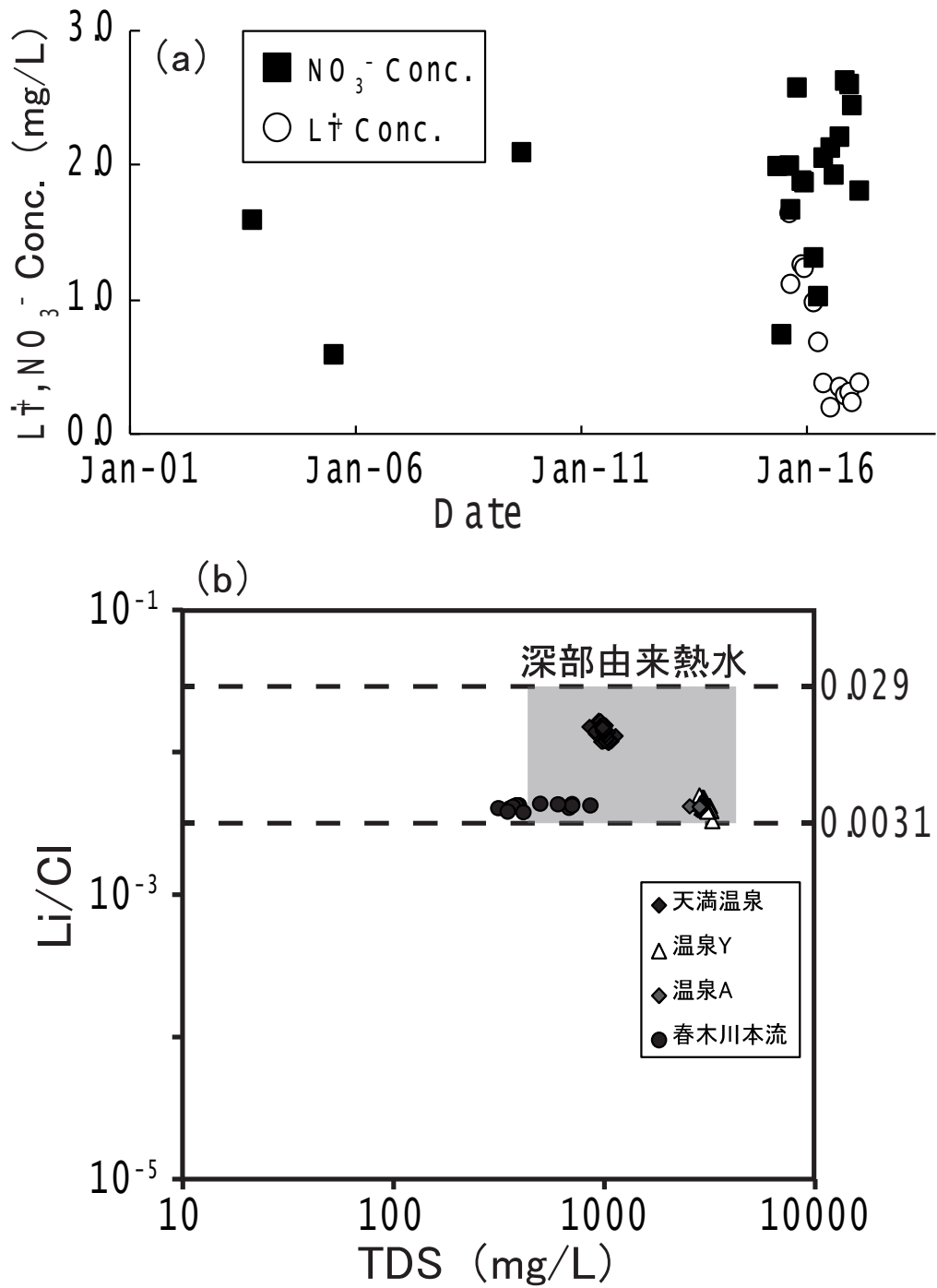


図3 春木川本流における Li^+ 濃度と NO_3^- 濃度変化と Li/Cl 比とTDSの関係

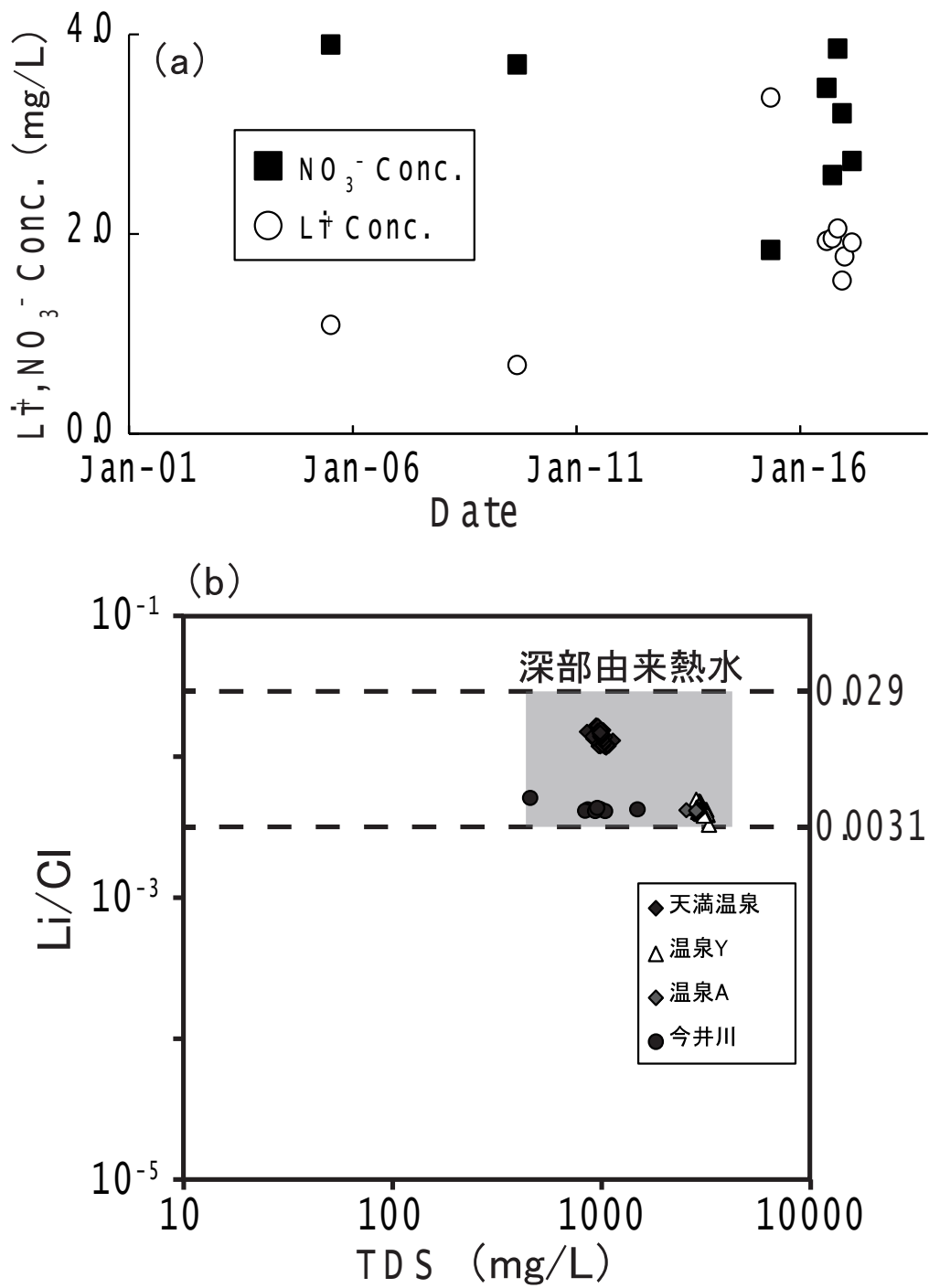


図4 今井川における Li^+ 濃度と NO_3^- 濃度変化と Li/Cl 比とTDSの関係

春木川(本流上流:P0)

Date	Tw (°C)	E.C.(mS/m)	pH	ORP(mV)	Li(mg/L)	Na(mg/L)	K(mg/L)	Mg(mg/L)	Ca(mg/L)	Cl(mg/L)	NO ₃ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)
2003/9/1	19.5	15.0	7.3	不明	n.a.	19.3	4.1	10.9	29.0	2.7	1.7	99.2	72.0
2009/8/20	28.0	35.0	8.1	不明	n.a.	22.7	4.1	12.1	30.3	3.6	1.8	61.8	153.1
2016/2/9	12.9	34.1	8.2	-70	n.a.	19.8	4.2	11.5	26.7	2.8	1.8	55.5	123.0

春木川(本流:P1)

Date	Tw (°C)	E.C.(mS/m)	pH	ORP(mV)	Li(mg/L)	Na(mg/L)	K(mg/L)	Mg(mg/L)	Ca(mg/L)	Cl(mg/L)	NO ₃ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)
2003/9/1	26.6	37.7	8.2	不明	n.d.	28.4	4.8	9.9	25.5	8.9	1.6	84.7	90.3
2005/6/21	24.0	45.7	7.9	不明	n.a.	40.5	6.2	10.9	27.8	13.0	0.6	97.5	121.7
2009/8/20	30.4	38.0	8.4	不明	n.a.	25.4	4.5	12.1	31.8	6.8	2.1	72.4	139.1
2015/4/21	21.1	33.7	8.2	-84	n.a.	21.9	4.3	11.3	27.3	7.1	2.0	61.7	114.4
2015/5/26	26.0	33.9	8.8	-110	n.a.	22.7	4.4	11.1	27.4	6.9	0.7	65.0	114.4
2015/7/28	34.4	165.2	8.3	-84	1.6	249.0	37.0	9.4	26.8	375.1	2.0	64.7	102.1
2015/8/6	33.6	126.9	8.2	-82	1.1	181.7	27.7	10.6	28.7	265.8	1.7	63.5	107.0
2015/9/29	25.7	34.8	7.9	-51	n.a.	22.9	4.5	11.0	26.8	13.1	2.6	64.8	97.2
2015/11/4	26.1	129.1	8.2	-70	1.3	193.5	27.1	9.9	27.9	281.8	1.9	61.3	107.0
2015/11/25	22.9	136.3	8.1	-69	1.2	194.1	26.9	10.0	27.7	283.3	1.9	61.7	104.6
2016/2/9	13.6	110.4	8.8	-102	1.0	154.5	23.5	9.6	25.4	220.5	1.3	61.9	111.9
2016/3/17	23.1	89.2	8.7	-108	0.7	121.2	18.5	10.1	25.5	153.4	1.0	60.2	110.7
2016/4/28	22.9	65.9	8.4	-81	0.4	76.9	12.2	11.5	27.1	87.7	2.1	65.4	115.6
2016/6/24	21.9	50.5	8.0	-46	0.2	50.0	8.4	11.2	27.5	49.6	2.1	82.3	87.3
2016/7/22	28.2	37.5	7.8	-39	n.a.	27.8	5.5	11.7	27.9	12.8	1.9	85.5	89.8
2016/9/6	29.9	64.1	8.1	-66	0.4	72.8	11.8	10.9	26.6	81.1	2.2	60.0	121.8
2016/10/20	25.1	54.0	7.9	-57	0.3	63.5	10.3	11.5	28.1	70.7	2.6	74.4	101.1
2016/11/25	18.5	57.3	7.7	-45	0.3	66.9	11.1	11.4	27.6	74.2	2.6	66.1	113.7
2016/12/15	17.0	53.7	8.0	-60	0.2	58.0	9.5	11.9	28.7	61.8	2.4	63.1	116.8
2017/2/13	18.9	64.3	8.8	-101	0.4	84.2	13.0	11.3	28.3	99.4	1.8	59.3	120.1

春木川(今井川:P2)

Date	Tw (°C)	E.C.(mS/m)	pH	ORP(mV)	Li(mg/L)	Na(mg/L)	K(mg/L)	Mg(mg/L)	Ca(mg/L)	Cl(mg/L)	NO ₃ (mg/L)	SO ₄ (mg/L)	HCO ₃ (mg/L)
2003/9/1	33.1	93.0	8.9	不明	n.d.	133.0	18.6	7.5	21.7	189.0	7.2	63.4	90.9
2005/6/21	31.8	103.0	7.9	不明	1.1	157.0	21.5	5.9	16.5	222.6	3.9	52.6	100.5
2009/8/20	36.8	85.0	8.3	不明	0.7	118.3	16.4	8.0	20.7	131.8	3.7	42.7	120.1
2015/4/21	36.6	282.0	8.5	-96	3.4	475.0	69.6	5.0	18.3	766.4	1.8	58.3	102.1
2016/7/22	38.6	189.0	8.4	-87	1.9	306.1	43.2	5.7	19.4	438.9	3.5	52.9	108.2
2016/9/6	34.8	189.5	8.5	-90	2.0	308.9	44.9	6.5	20.0	443.6	2.6	50.3	116.9
2016/10/20	31.6	198.3	8.3	-78	2.1	327.9	46.9	5.4	18.4	483.0	3.9	53.5	111.0
2016/11/25	24.9	161.2	8.2	-75	1.5	251.1	36.3	6.5	19.6	359.3	3.2	53.3	113.5
2016/12/15	25.3	172.8	8.5	-77	1.8	285.3	41.3	6.3	19.2	416.3	4.1	53.6	115.8
2017/2/13	25.3	181.1	8.4	-77	1.9	294.2	42.3	7.4	21.1	426.4	2.7	51.3	116.8

表1 現地測定結果及び、主要化学成分の分析結果と酒井・他(2011)、大沢・他未公開データ、山崎(2005)より春木川について2009年8月20日、2006年6月21日、2003年9月1日のデータを引用。