

公益財団法人国土地理協会 第 20 回学術研究助成 (2020 年度)
(地理学および関連する分野の学術的調査・研究)

自噴帯における持続可能な湧水システムの共通要因の解明

研究代表者 岸 和央 (立正大学)

共同研究者 宮下雄次 (神奈川県温泉地学研究所)

目次

1	はじめに	3
2	研究方法	7
2.1	研究対象地域概要	7
2.1.1	富山県黒部市	7
2.1.2	熊本県熊本市	7
2.1.3	長崎県島原市	8
2.1.4	岐阜県大垣市	9
2.1.5	福井県大野市	10
2.1.6	山形県遊佐町	11
2.2	調査概要	11
2.3	各種分析	12
3	結果	12
3.1	水質の特徴	12
3.2	水の酸素・水素安定同位体比の特徴	14
3.3	一般細菌・大腸菌群の特徴	15
3.4	自噴帯の特徴	16
4	考察	19
4.1	地下水の起源推定	19
4.2	自噴高と自噴域	19
4.3	地下水流動の持続性	20
5	まとめ	23
	結論	23
	謝辞	24
	参考文献	24

1 はじめに

地下水は農業・工業・生活用水・飲用水等に広く利用される主要な水資源の一つである。日本には地形・地質・水文学的な特徴で全国には自噴帯湧水が数多くあった。しかし、高度経済成長期、主要産業地帯である都市部において地下水の過剰揚水により急激な地下水位の低下や地盤沈下が発生した（嶋田，2012）。同時に全国的に上下水道の整備が急速に広がったことにより水の安全性の観点から上水道利用へとシフトが進んだ。

地下水は地表水と比較して、降水量や外気温による影響を受けにくく、水質や水温が安定しており、比較的容易に採取できるといった数多くの利点を有している（山口，2010）。そのため、現在でも全国には地下水が被圧されることによって地表面に湧水する自噴帯が形成されている地域があり、このような地域では自噴地下水を利用する文化が残っていることが多い。こうした自噴地下水の利用は災害時の水の確保の点からも有効であり、また水不足の際にも比較的安定した確保が可能である。1998年6月に日本水文科学会のシンポジウムにおいて「自噴地下水の水文学」が開催され、翌99年10月には健全な水循環系構築に関する連絡会議が「健全な水循環系」とは「流域を中心とした一連の水の流れの過程において、人間社会の営みと環境の保全に果たす水の機能が、適切なバランスの下に、ともに確保されている状態」と定義した。現在、国内で地下水利用やそれらのコミュニティーが残る地域は自噴帯湧水の衰退・消滅によりわずかとなっている。名水百選・新名水百選に認定されている自噴帯湧水は富山県黒部川扇状地などが代表的である。これまで地下水流動系や地下水と地表水の交流関係に関する研究は数多く行われてきた（例えば 吉岡ほか，2018；土原ほか，2018）。そのなかでも、地下水位変動の把握は重要な情報となることが知られている（安西ほか，2013）。また、酸素・水素安定同位体比（ $\delta^{18}\text{O}$ ・ $\delta^2\text{H}$ ）は、自然界において他の物質と反応して変化することがほとんどなく、起源となる水の情報保持している、水循環研究における代表的なトレーサーとして広く利用されている（中山ほか，2000）。特に黒部川扇状地の地下水に関する研究は多く行われている（梶根，1991；後藤ほか，2002；徳永ほか，2003；入善町，2003）。

地下水や河川水は一般細菌や大腸菌群が含まれることがある。そのため、一般細菌数や大腸菌群数は環境基準に定められている。一般細菌や大腸菌群は採水地点の上流域からの畜産系排せつ物による流入や下水からの流入等による影響が生じることが知られている。

したがって、本研究は自噴帯湧水が現存する地域の一部として富山県黒部市、熊本県熊本市、長崎県島原市、岐阜県大垣市、福井県大野市、山形県遊佐町を対象に、測量による自噴高測定など自噴調査や水質、酸素・水素安定同位体比、細菌類調査等のトレーサーを用いることで、自噴湧水がある地域の環境を明らかにし持続性について検討を行うことである。

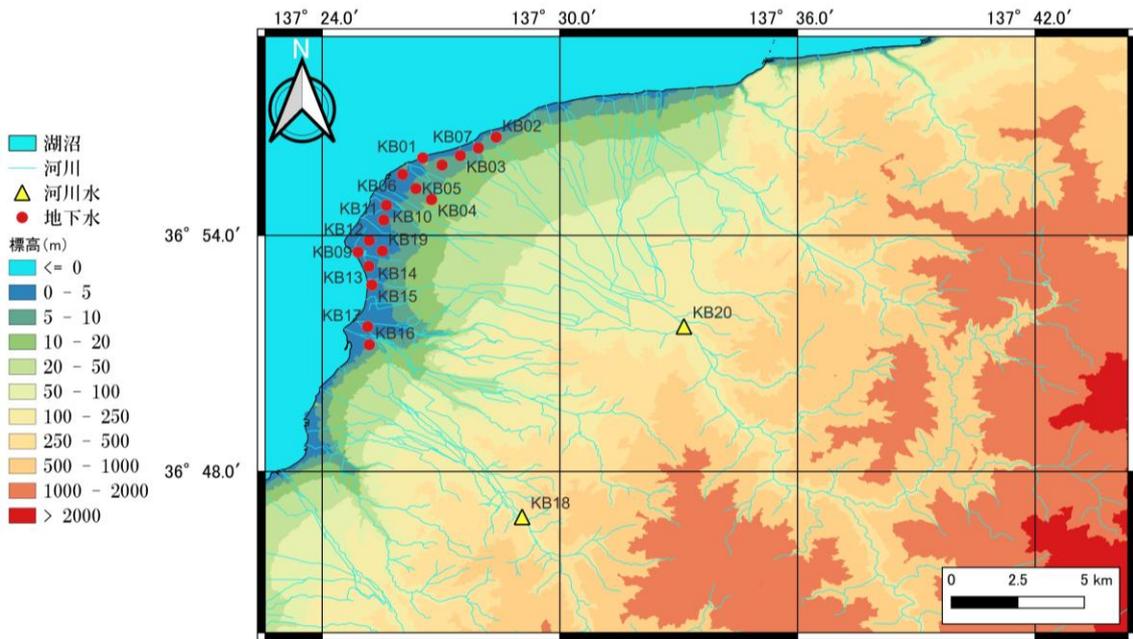


図 1 富山県黒部市の調査地点

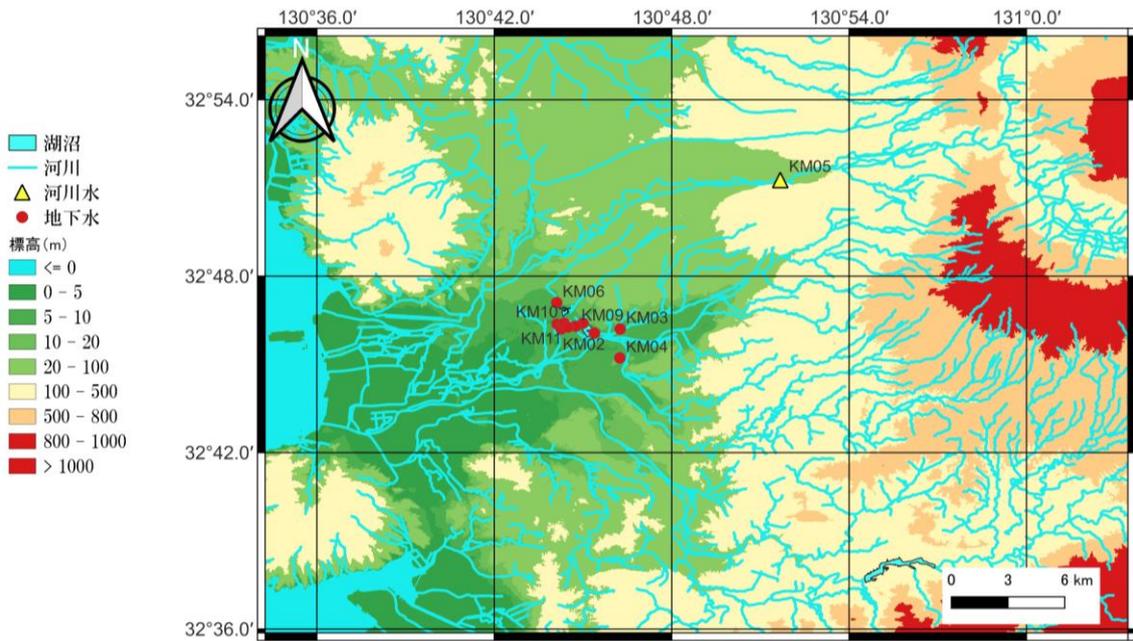


図 2 熊本県熊本市の調査地点

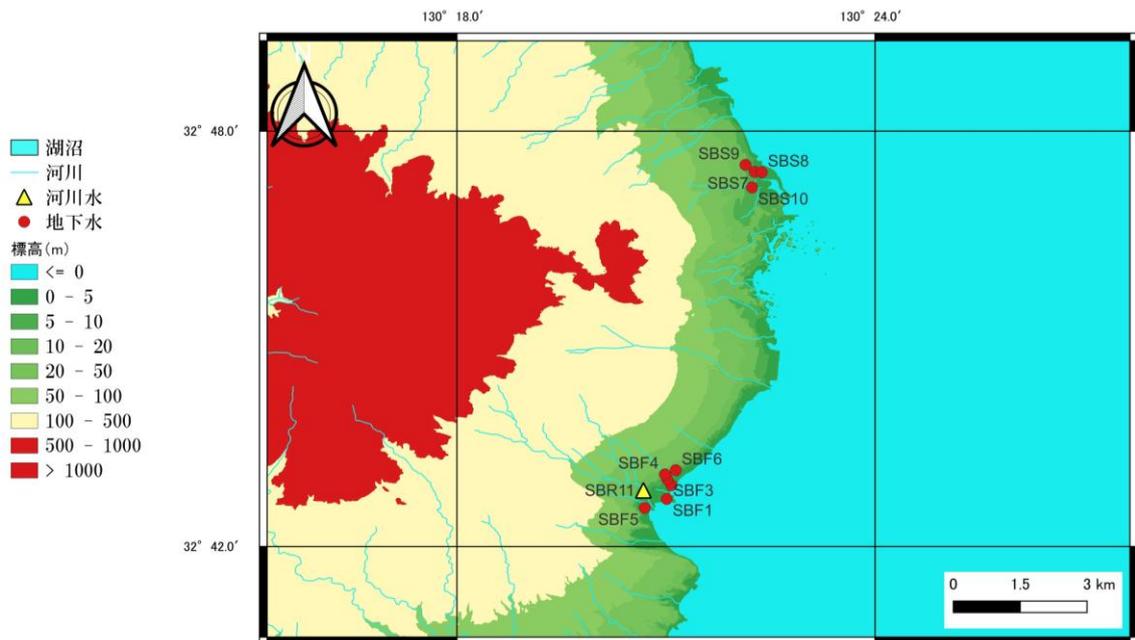


図 3 長崎県島原市の調査地点

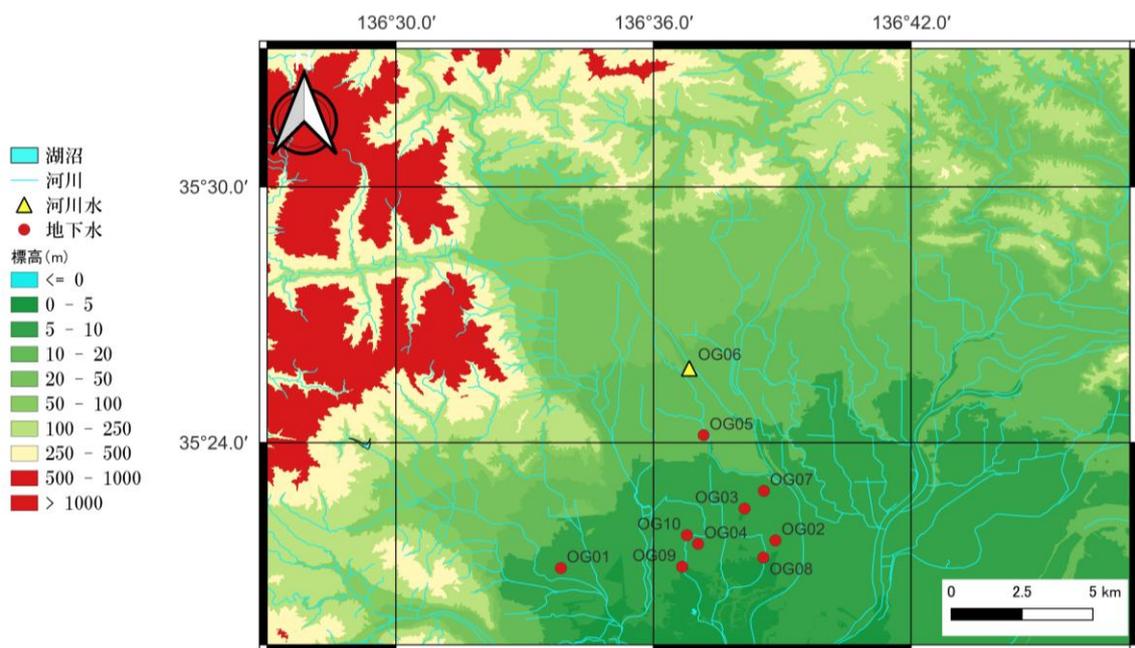


図 4 岐阜県大垣市の調査地点

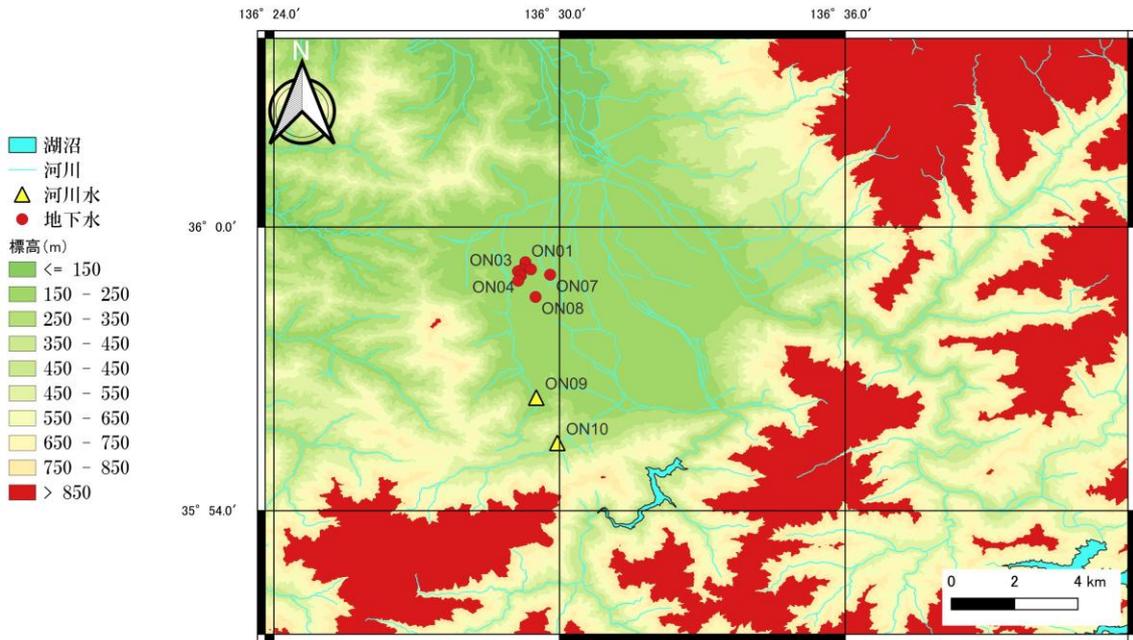


図 5 福井県大野市の調査地点

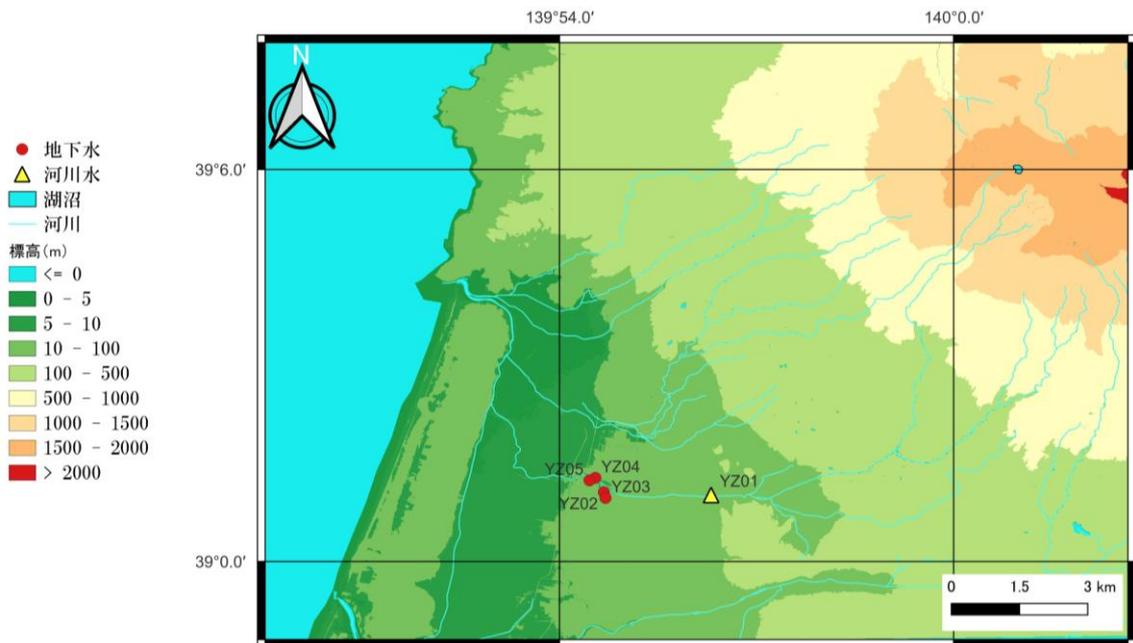


図 6 山形県遊佐町の調査地点

2 研究方法

2.1 研究対象地域概要

富山県黒部市（図 1）、熊本県熊本市（図 2）、長崎県島原市（図 3）、岐阜県大垣市（図 4）、福井県大野市（図 5）、山形県遊佐町（図 6）の 6 市町で行った。各地域の詳細な概要は以下で述べる。気候についてはそれぞれ日本海側や内部地域など異なっている。各地域の気候の詳細についても以下で述べる。

2.1.1 富山県黒部市

富山県黒部市（図 1）は富山県北東部に位置し、黒部川下流域にあり日本海に面している。直線距離約 40km 南東の黒部川上流に黒部ダムが鎮座している。黒部市は 426.3km²の面積を持ち、黒部市北西部の平地に市街地があり、南東部の山地は飛騨山脈の端にあたり、2000m 級の駒ヶ岳、3000m 級の白馬岳や鹿島槍ヶ岳などが連なっている。黒部川の南西部には布施川が並行し上流には布施川ダムがある。黒部市は名水の里として黒部川扇状地の湧水群を有し、共同の洗い場や酒造仕込み水等に利用されている。黒部市の水道普及率は 2016 年度（平成 28 年度）末時点で 72.4%と富山県内の平均を下回っている（黒部市，2017）。

気候については、日本海側特有の気候を示し、太平洋側に比べ湿度が高く、冬の降水量が多い。また、梅雨の降水量が太平洋側に比べ少ないことが特徴として挙げられる。富山県黒部市の西側に隣接する魚津市における魚津観測所におけるアメダスデータによれば、1993–2022 年の約 30 年間の年平均気温は 13.9°C、年平均降水量は 2582.3 mm である。図 7 に魚津市における雨温図を示す。1993–2022 年における最暖月（8 月）と最寒月（1 月）の月平均気温は、それぞれ 26.0°C および 2.6°C である。

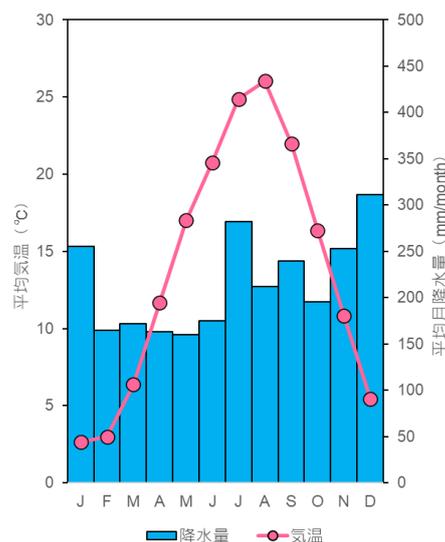


図 7 富山県魚津市における雨温図

2.1.2 熊本県熊本市

熊本県熊本市（図 2）は県のやや北部に位置し、有明海に面している。熊本市は約 390km²の面積を持ち、5つの行政区からなる熊本県最大の都市である。熊本市

内には白川や緑川などの主要河川がある。白川は流路延長 74km あり阿蘇カルデラに発し、西部の有明海に流下する。緑川は流路延長 76km あり熊本県上益城郡山都町三方山に発し、加勢川、浜戸川と合わさり西部の有明海に流下する。また、熊本市内には江津湖などの湧水地があり、地域住民の憩いの場となっている。熊本市は人口約 74 万人の水道水の 100% を地下水で賄っている日本一の地下水都市であり、日本全国でも他に例がない地域である(熊本市 HP)。

気候については、温暖な太平洋気候を示し、冬に比べ夏の降水量が多く、夏と冬の寒暖差が大きく湿度が高いことが特徴として挙げられる。熊本県熊本市における熊本気象観測所におけるアメダスデータによれば、1993-2022 年の約 30 年間の年平均気温は 17.3°C、年平均降水量は 2008.1 mm である。図 8 に熊本市における雨温図を示す。1993-2022 年における最暖月(8 月)と最寒月(1 月)の月平均気温は、それぞれ 28.5°C および 5.9°C である。

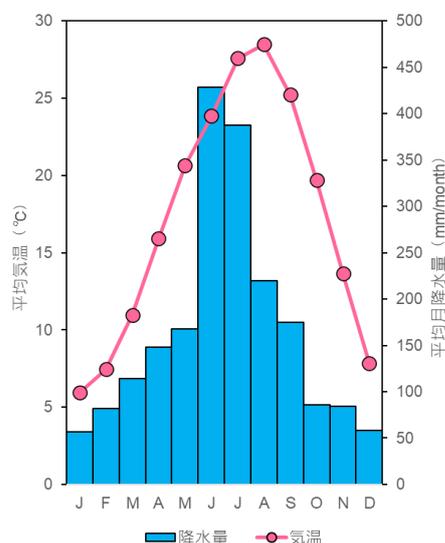


図 8 熊本県熊本市における雨温図

2.1.3 長崎県島原市

長崎県島原市(図 3)は県の南東部の島原半島に位置する。島原市は島原半島の東部に位置し、西部には雲仙市があり標高 1483m の雲仙岳の山々が鎮座している。東は有明海に面している。雲仙火山の東端に位置する約 4000 年前の形成された溶岩円頂丘である眉山は七面山や天狗山、南峰の三峰を合わせた総称である。

市内西部には陥没湖である白土(しらち)湖がある。一部を雲仙市に属する水無川は島原市中心部の南部、島原半島中央部の雲仙岳東斜面から有明海に流下する。流域は雲仙岳由来の火山砕屑物に覆われ、1990-1995 年の雲仙普賢岳噴火では、この流域は土石流・火砕流が流れ甚大な被害を受けた。雲仙山系は普賢岳(1359m)と平成新山(1483m)から構成され、平成新山の東側には垂木台地・稲生山・岩上山・貝野岳といった丘陵があり、その間に赤松谷・おしが谷などの谷がある。島原市内には島原湧水群が広がり、1985 年には名水百選に選定され、島原半島ジオパークの一部である。島原市の水道水は 99.7%、南島原市は 92.2% であり、島原市で地下水率ほぼ 100%、南島原市で 90%弱と大部分を地下水で賄っている(長崎

県, 2023)。

気候については、温暖な太平洋気候を示し、冬に比べ夏の降水量が多く、湿度が高いことが特徴として挙げられる。長崎県島原市における島原気象観測所におけるアメダスデータによれば、1993–2022年の約30年間の年平均気温は17.4°C、年平均降水量は2135.0mmである。図9に島原市における雨温図を示す。1993–2022年における最暖月(8月)と最寒月(1月)の月平均気温は、それぞれ28.2°Cおよび7.0°Cである。

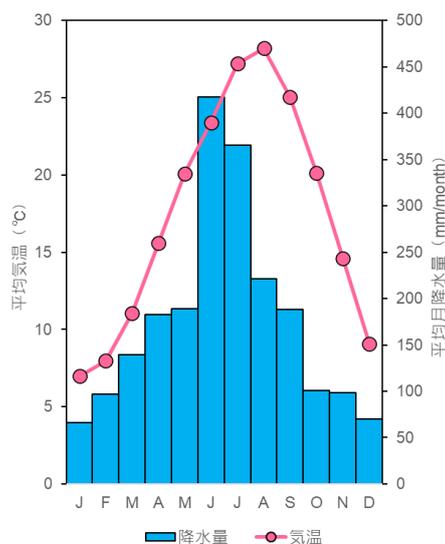


図9 長崎県島原市における雨温図

2.1.4 岐阜県大垣市

岐阜県大垣市(図4)は濃尾平野北西部に位置し、大垣地域を中心として南西部に上石津地域、東部に墨俣地域と全国でも珍しい飛び地となっている。濃尾平野には木曾川や長良川、揖斐川など大きな河川が存在し、大垣地域の中心部には揖斐川や杭瀬川があり、南に流下し伊勢湾に入る。揖斐川は岐阜県北部の県境冠山に源を發し、杭瀬川は岐阜県揖斐郡池田町の池田山周辺に源を發し、東に流れ平野部から南に流路を変え大垣市旧市街地の西側を南下し牧田川・水門川・揖斐川と合流する。

大垣市は「水の都」とも言われ、豊富な地下水を活用した産業が盛んであり、かつては繊維産業が多くみられた。1996年には水の郷百選に認定された。大垣市の水道普及率は97.2%であり、地下水を水源としている。

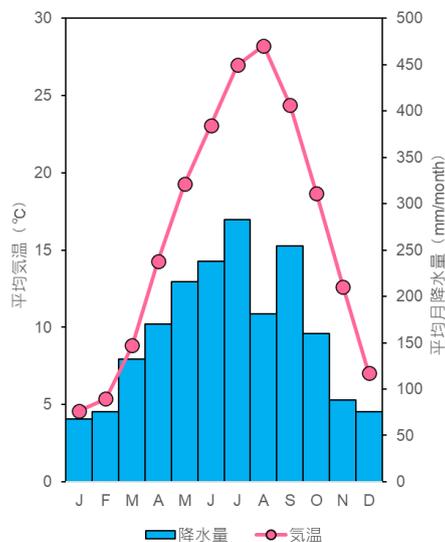


図10 岐阜県大垣市における雨温図

気候については、太平洋側特有の気候を示し、夏は蒸し暑く、時に 40°Cを超えることや「伊吹おろし」と呼ばれる冬の伊吹山からの乾いた冷たい西風もある。梅雨時や秋の台風時に降水量が多いことが特徴として挙げられる。岐阜県大垣市における大垣気象観測所におけるアメダスデータによれば、1993–2022 年の約 30 年間の年平均気温は 16.1°C、年平均降水量は 1942.4 mm である。図 10 に大垣市における雨温図を示す。1993–2022 年における最暖月（8月）と最寒月（1月）の月平均気温は、それぞれ 28.2°Cおよび 4.6°Cである。

2.1.5 福井県大野市

福井県大野市（図 5）は東部に位置し福井県の面積の約 2 割を占め、積雪量が多く日本有数の豪雪地帯である。非常に積雪量が多く、市街地周辺には湧水があり、また冬季の消雪水としても利用されている。大野市内には主な河川が 4 本あり西側から赤根川、清滝川、真名川、九頭竜川があり南から北に向かってながれ、後に九頭竜川に合流される。上流には九頭竜ダムや麻那姫ダムがある。大野市の東部には経ヶ岳や赤兎山、野伏ヶ岳、荒島岳、南部には能郷白山など 1500m 以上の山々がある。大野市は非常に多くの降雪水量に恵まれ人工湖が点在する一方、膨大な水は市街周辺の湧水や道路などの消雪用に汲み上げられ、水不足も懸念されている。大野市の水道普及率は 38.2%（2019 年）と福井県の普及率 96.6%と大幅に低いのが現状である。

気候については、冬に曇りや雪の多い日本海側特有の気候を示し、地形や季節風の影響により北陸山地型の気候で、気温は低く、冬期の降雪が多いことが特徴として挙げられる。福井県大野市における大野気象観測所におけるアメダスデータによれば、1993–2022 年の約 30 年間の年平均気温は 13.5°C、年平均降水量は 2301.6 mm である。図 11 に大野市における雨温図を示す。1993–2022 年における最暖月（8月）と最寒月（1月）の月平均気温は、それぞれ 26.2°Cおよび 1.0°Cである。

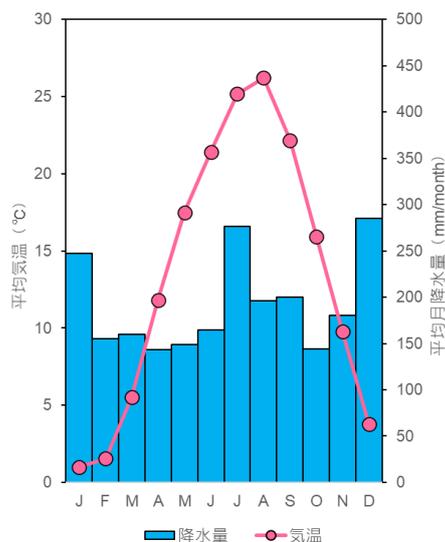


図 11 福井県大野市における雨温図

2.1.6 山形県遊佐町

山形県遊佐町（ゆざまち）（図 6）は、庄内平野の北端、山形県の最北部に位置し、日本海に面している。北部には鳥海山（2263m）、中央部には庄内平野が広がっている。町内には月光川が流れ、鳥海山南麓を源に発している。

遊佐町の普及率は 99.6%（2015 年）と高い（酒田市，2016）。

気候については、多雨多湿の海洋性気候を示し、冬季は、北西の季節風が強く、降水量は梅雨や台風による影響は少ないことが特徴として挙げられる。山形県遊佐町に隣接する山形県酒田市における酒田気象観測所におけるアメダスデータによれば、1993–2022 年の約 30 年間の年平均気温は 13.4℃、年平均降水量は 2003.5 mm である。図 12 に酒田市における雨温図を示す。1993–2022 年における最暖月（8月）と最寒月（1月）の月平均気温は、それぞれ 25.6℃および 1.9℃である。

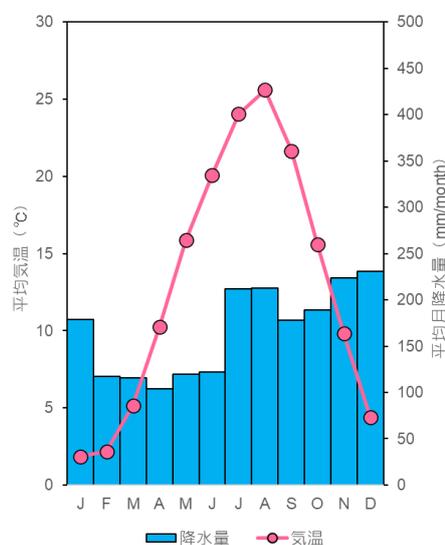


図 12 山形県酒田市における雨温図

2.2 調査概要

図 1～図 6 に本研究における各調査地の調査地点を示した。採水地点の座標及び地盤標高は GNSS による測位データを使用した。後処理 Kinematic 解析（PPK, Post Processing Kinematic）により測位した。河川の座標については GPS（eTrex 30x, GARMIN）を用いた。調査および試料採取は 2021 年 11 月を発端に富山県黒部市（KB01-20）、熊本県熊本市（KM01-11）、長崎県島原市（SB01-11）、岐阜県大垣市（OG01-10）、福井県大野市（ON01-10）、山形県遊佐町（YZ01-05）の 6 地域で自噴井と河川水を現地で実施した。採水時には、現地でポータブル電気伝導率計・pH 計、ポータブル ORP 計、水温計、溶存酸素計を用い測定した。試料は① 100mL ポリビン（未処理）、② 10mL pp チューブ（0.45 μ m フィルター濾）、③ 50mL ポリビン（0.45 μ m フィルター濾過+酸添加）の方法で採水時に処理を行った。採水試料中の菌類については、一般細菌と大腸菌について試験紙（サン化学株式会社製細菌試験紙サンコリ:一般細菌試験紙、酵素（X-type）大腸菌群

試験紙)を用いて測定した。自噴量測定はストップウォッチを使用し一定時間の自噴水を袋等に集めたのち自噴量を計った。自噴井では自噴高を測定するためオリジナルパッカーを用いて吐出口を密閉し、ビニールチューブを接続して立ち上げ、チューブ内を上昇する水位が停止する垂直方向の高さを測定し、地盤標高から自噴標高を算出した。なお、吐出口(内径10~150mm、もしくは不定形)は様々なためケースごとに個別に対応した。

2.3 各種分析

採取した水試料は実験室に持ち帰り、重炭酸イオン濃度(HCO_3^-)測定のためpH4.8アルカリ度滴定を行った。濾過処理済の水試料は項目ごとに以下の手法を用いて分析を行った。

HCO_3^- を除く無機溶存イオン濃度(Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-})の分析はイオンクロマトグラフを用いた。陽イオンを中心とする金属イオン類はICPを用いた。水の酸素・水素安定同位体比($\delta^{18}\text{O}$ ・ $\delta^2\text{H}$)は、軽元素質量分析装置(VG(現Micromass)製PRISM)により行った。軽元素質量分析計に試料ガスを導入するための前処理は、酸素同位体比については、温度25°Cにおける炭酸ガス平衡法、水素安定同位体比については、温度40°Cにおける白金触媒を用いた水素ガス平衡法で行った。標準試料は温泉地学研究所で作成した蒸留水($\delta^{18}\text{O} = -8.52\text{‰}$ 、 $\delta^2\text{H} = -54.1\text{‰}$)を用いた。質量分析による同位体比の測定精度は、酸素 $\pm 0.1\text{‰}$ 、水素 $\pm 1\text{‰}$ である(板寺・代田, 2014)。

3 結果

3.1 水質の特徴

各地域で採水をした地下水・河川水の主要無機溶存イオンの分析結果をトリリニアダイアグラムとして図13~図18に示す。トリリニアダイアグラムは、河川水や地下水など水質成分を図示する方法であり、中央の菱形のキーダイアグラムと左右の下についた三角ダイアグラムからなる。キーダイアグラムは、左下に陽イオン、右下に陰イオンを示す。陽イオンをアルカリ金属イオンとアルカリ土類金属イオン、陰イオンを炭酸イオンと非炭酸イオンに分類し、相対濃度としその組成を%で表示する。

その結果、図13の黒部川流域の河川水(KB18、KB20)と地下水(KB17以外)はCa- HCO_3 型の水質組成を示し、KB17の地下水のみNaCl型であった。同様にKB16の地下水についてはNaが多い傾向が示された。KB16は片貝川や布施川の南に位置し、KN17は片貝川や布施川の北側、黒部川左岸に位置する。図14の熊

本市の地下水は Ca-HCO₃ 型の水質組成を示し、河川水（白川）は Ca-SO₄ 型であった。図 15 の島原市の地下水は Ca-HCO₃ 型、南島原市の地下水は Na-HCO₃ 型の水質組成を示し河川水（深江川）は Ca-HCO₃ 型であった。島原市の地下水の総溶存イオン量は南島原市の地下水や河川水に比べ明らかに多い傾向があった。図 16 の大野市は地下水と河川水は Ca-HCO₃ 型の水質組成を示した。これらの水試料は一般的に河川水や浅い地下水に分類されるタイプである。図 17 の大垣市の地下水（OG01 以外）と河川水は Ca-HCO₃ 型の水質組成を示した。地下水 OG01 は調査地域の自噴域最西端に位置し異なる流域に属し Ca が少ないことを示した。

図 18 の遊佐町は地下水と河川水は Na-HCO₃ 型の水質組成を示した。

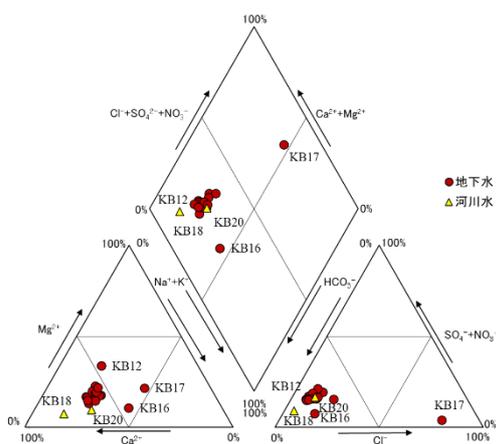


図 13 富山県黒部市の水質組成

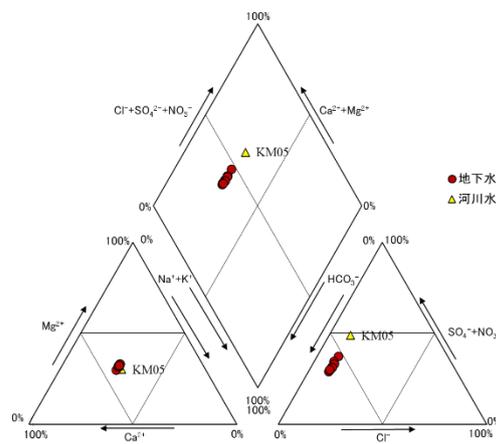


図 14 熊本県熊本市の水質組成

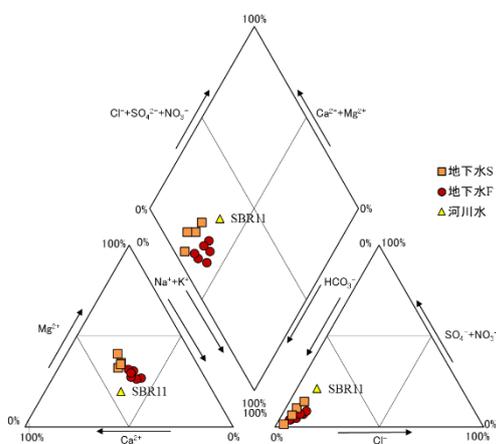


図 15 長崎県島原市の水質組成

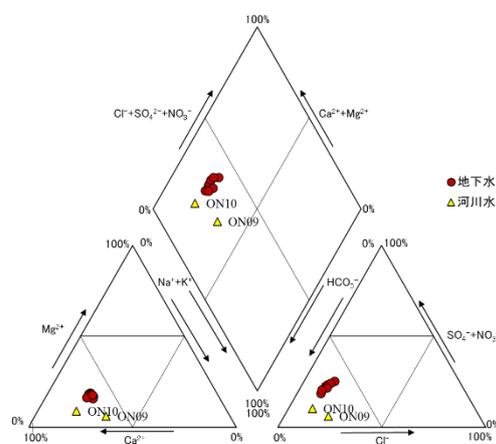


図 16 福井県大野市の水質組成

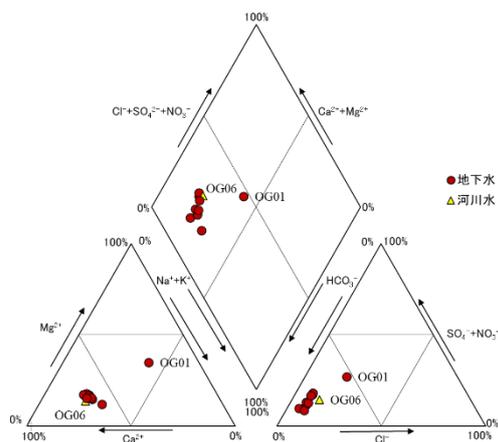


図 17 岐阜県大垣市の水質組成

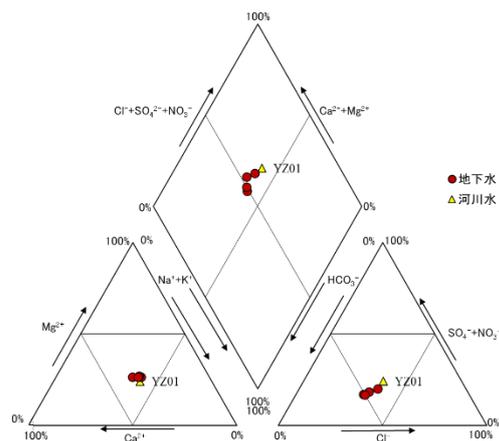


図 18 山形県遊佐町の水質組成

3.2 水の酸素・水素安定同位体比の特徴

各地域で採水をした地下水・河川水の酸素水素安定同位体比の関係を表したデルタダイアグラムを図 19 各地域のデルタダイアグラムに示す。図 19 の破線は一般的な日本の降水の天水線である。

各地域の酸素水素安定同位体比は、富山県黒部市の地下水が $\delta^{18}\text{O}$ が -11.9‰ から -9.2‰ 、 $\delta^2\text{H}$ が -78‰ から -55‰ の範囲を示した。一方、河川水は $\delta^{18}\text{O}$ が -11.8‰ から -9.8‰ 、 $\delta^2\text{H}$ が -78‰ から -60‰ を示した。熊本県熊本市の地下水が $\delta^{18}\text{O}$ が -7.5‰ から -7.0‰ 、 $\delta^2\text{H}$ が -50‰ から -48‰ の範囲を示した。一方、河川水は $\delta^{18}\text{O}$ が -7.9‰ 、 $\delta^2\text{H}$ が -53‰ を示した。長崎県島原市の地下水が $\delta^{18}\text{O}$ が -7.8‰ から -7.2‰ 、 $\delta^2\text{H}$ が -51‰ から -45‰ の範囲を示した。一方、河川水は $\delta^{18}\text{O}$ が -7.2‰ 、 $\delta^2\text{H}$ が -45‰ を示した。岐阜県大垣市の地下水が $\delta^{18}\text{O}$ が -8.8‰ から -7.7‰ 、 $\delta^2\text{H}$ が -53‰ から -47‰ の範囲を示した。一方、河川水は $\delta^{18}\text{O}$ が -8.7‰ 、 $\delta^2\text{H}$ が -52‰ を示した。福井県大野市の地下水が $\delta^{18}\text{O}$ が -8.7‰ から -8.4‰ 、 $\delta^2\text{H}$ が -52‰ から -49‰ の範囲を示した。一方、河川水は $\delta^{18}\text{O}$ が -9.5‰ から -6.6‰ 、 $\delta^2\text{H}$ が -54‰ から -44‰ を示した。山形県遊佐町の地下水が $\delta^{18}\text{O}$ が -9.4‰ から -9.1‰ 、 $\delta^2\text{H}$ が -56‰ から -54‰ の範囲を示した。一方、河川水は $\delta^{18}\text{O}$ が -9.3‰ 、 $\delta^2\text{H}$ が -56‰ を示した。調査地域の黒部市、大垣市、大野市、遊佐町の同位体比は日本の天水線に平行する形を示した。熊本市、島原市は天水線上にプロットされた。同位体比は河川水と地下水はほぼ近似したが、大野市は地下水に比べ河川水の同位体比がやや大きい値を示した。

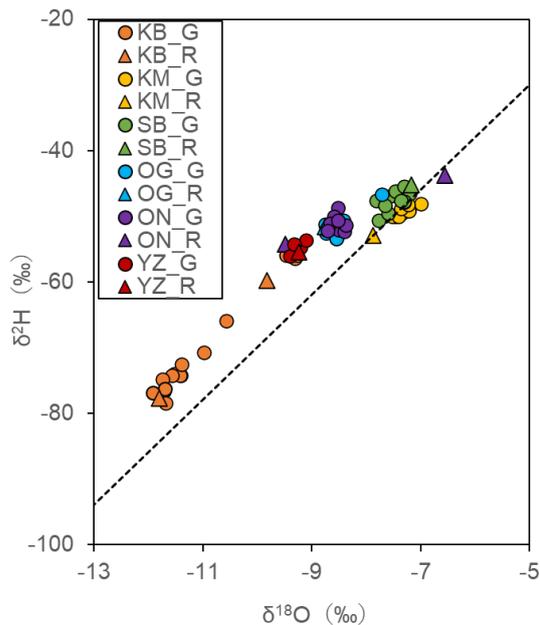


図 19 各地域のデルタダイアグラム

3.3 一般細菌・大腸菌群の特徴

各調査地域で一般細菌および大腸菌群の検出試験を行った結果を表 1 に示す。対象は地下水と河川水である。黒部川では今回検査を行っていない。他の地域は地下水と河川水共に簡易検査をおこなった。熊本市、南島原市、大垣市、大野市、遊佐町の河川は地下水に比べ一般細菌・大腸菌群が検出された。一般細菌は熊本市や大野市の一部地下水で検出されており、また、熊本市の一部地下水からは大腸菌群も検出された。大腸菌群数は乳糖を分解して酸とガスを生成する菌である総称であり、大腸菌以外にも、環境由来の類似菌も含まれてる。

本菌類検査は簡易式なものであること、近々の降水の影響によって土壤中から細菌類が混入する可能性があるため、参考としてここに記す。地点等詳細については個人情報等の観点から秘匿とする。

表 1 各調査地における細菌の有無

	KB	KM	SB	OG	ON	YZ
全地点数	20	11	11	10	10	5
内河川	2	1	1	1	2	1
検査数	18	11	11	10	10	5
内河川	0	1	1	1	2	1
一般細菌						
検出地点数	1	3	1	1	3	1
内河川	0	1	1	1	2	1
検出率(%)	6	27	9	10	30	20
河川/検出地点数 (%)	0	33	100	100	67	100
大腸菌群						
検出地点数	0	2	1	1	2	1
内河川	0	1	1	1	2	1
検出率(%)	0	18	9	10	20	20
河川/検出地点数 (%)	0	50	100	100	100	100

3.4 自噴帯の特徴

各調査地点で測量を実施し自噴高を地盤標高に換算したものを図 20～図 23 に示す。なお、本論では「自噴高」は、自噴井のある場所の地表から、自噴井を立ち上げて水位が停止するまでの高さ。「自噴標高」は、自噴高に地盤標高を加えた、自噴井に現れる水頭標高をそれぞれ示す。なお、福井県大野市と山形県遊佐町は吐出口の形状および観測できた地点数の関係から自噴高を基にした水頭標高値からの自噴域を示すことは困難である。

図 20 で示す富山県黒部市の KB04 は今回の調査の上流に位置する。そのためもっとも自噴標高が高い 9.7m であった。一方で、下流に位置するもっとも地盤標高が低い KB13 の自噴頭標高が 1.9m の自噴がみられた。黒部扇状地の北部にくらべ南部の自噴標高が高い傾向がみられた。図 21 で示す熊本県熊本市は調査地の西部 KM07 で自噴標高 7.4m の自噴がみられた。一方、東部の KM03 は自噴標高 6.7m の自噴がみられた。熊本市の水前寺江津湖周辺には多くの自噴井がみられ、それを挟んで東西に自噴標高の高い地域がみられた。図 22 で示す長崎県南島原市の SBF06 は、もっとも高い自噴標高 25.8m の自噴がみられた。一方で、東部の沿岸沿いの SBF01 および SBF02 はそれぞれ 12.2m と 11.7m と西部の内陸部にくらべ自噴標高は低い、依然として自噴高が高いことを示した。図 23 で示す岐阜県大垣市は OG05 においてもっとも自噴標高が高く 10.4m を示した。自噴標高 10.4m を示した OG05 は揖斐川の西部を流れる平野井川沿いに位置し、揖斐川に平行しながら南下するに従い低下し、OG02 で 6m を示した。ON および YZ は自噴の低下やポンプの併用がみられたため、調査が不可な個所がみられた。

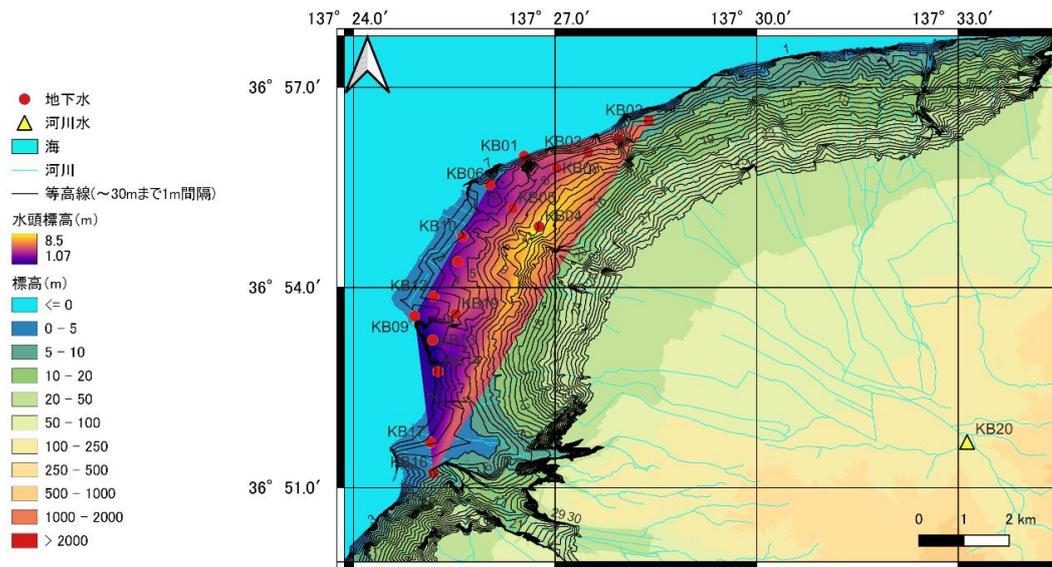


図 20 富山県黒部市の水頭標高 (m)

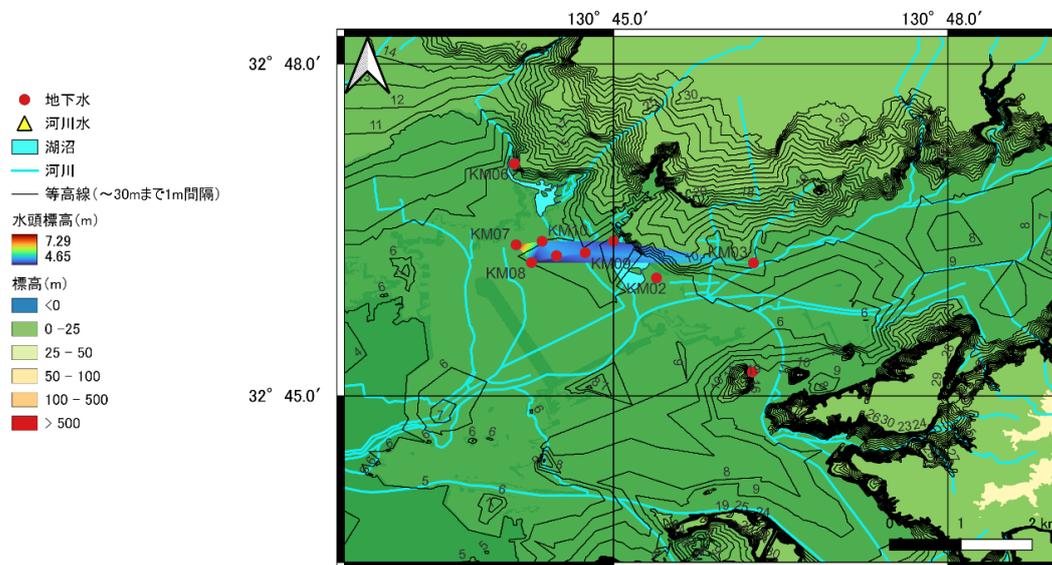


図 21 熊本県熊本市の水頭標高 (m)

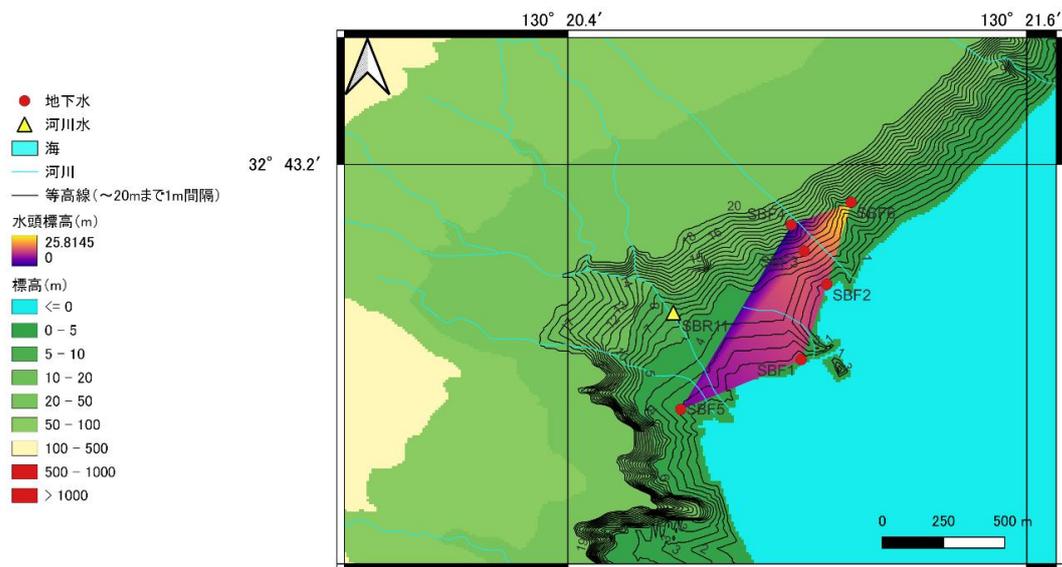


図 22 長崎県南島原市の水頭標高 (m)

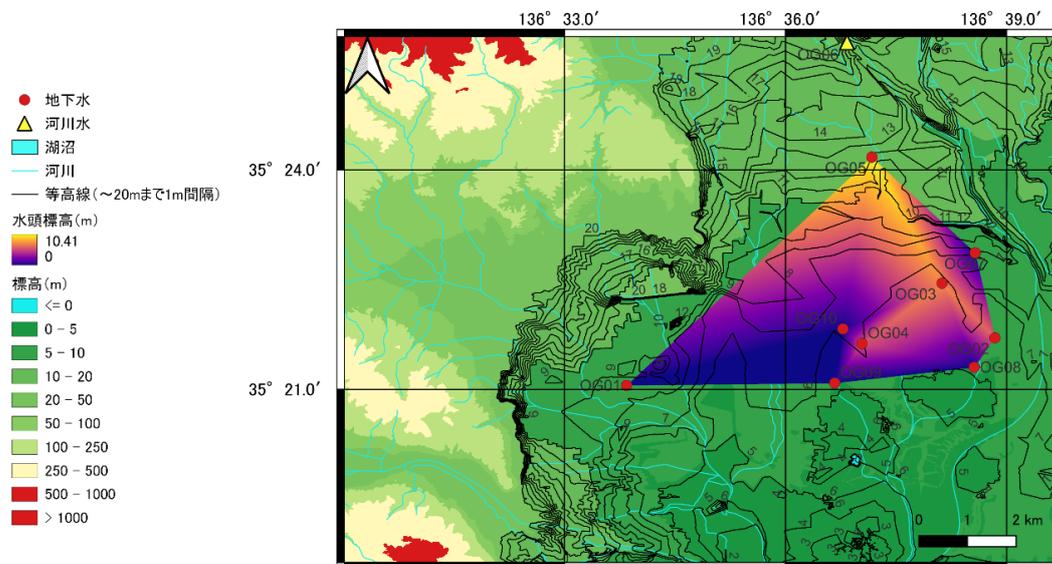


図 23 岐阜県大垣市の水頭標高 (m)

4 考察

4.1 地下水の起源推定

本研究で調査をしたすべての地点の地下水の酸素水素安定同位体比の結果より、地下水は河川からの涵養を受けていることが推察された。まず黒部市である。河川 KB18 の酸素水素安定同位体比は KB20 に比べ酸素同位体で 17.9‰、水素同位体で 2‰重い結果を示した。そのため、KB14~17 は KB20 より西部を流れる KB18 の同位体比の影響を受け同様に重い結果となったと考えられる。黒部市の地下水の大部分は KB20 によって涵養されていると推察される。次に熊本市である。KM の地下水と河川水の同位体比は田上・一柳・嶋田(2009)で報告された熊本市の天水線(LMWL(冬) $\delta D=8.4 \delta 18O+11.7$)上に集中する。このことから熊本市の地下水は相対的に降水や河川水による涵養による影響が大きいと推察される。次に島原市である。SB の地下水と河川水の同位体比はともに同程度であることから、河川から供給が考えられる。次に大垣市である。OG01 のみ、OG のほかの地点にくらべ重い結果を示した。これは他の地点にくらべ最西部に位置し涵養河川が異なることによるものであると推察できる。そのため、OG01 の水質が他の地点と異なる結果となったと考えられる。次に大野市である。ON の河川 ON9 と ON10 は地下水の調査地点の東側と西側を流れる河川である。そのため、両河川に挟まれる地形的特徴により盆地内で混合していることにより両河川の酸素水素安定同位体比の影響を受けるかたちで地下水が湧水していると考えられる。また、今回対象としなかった降水は、通常、河川水より重い傾向を示すことから、それらが混合していると考えられた。最後に遊佐町である。YZ の地下水と河川水の同位体比はともに同程度であることから、河川から供給が考えられる。地域ごとについては後述する。

本研究では調査年月は異なるが SB が 4 月、OG と ON が 5 月、KB が 11 月、YZ が 11 月、KM が 12 月であった。d-excess が 20 以上の値を示したのは、5 月に調査をおこなった ON の 1 河川と 11 月に調査をおこなった YZ の 1 地下水であった。日本における降水の d-excess は冬季に高く、夏季に低くなる季節変化についての研究が数多く報告されている(田上・一柳, 2016)。本研究では調査期間等の関係で降水の値まで明らかにできていないため、今後の課題の一つである。

4.2 自噴高と自噴域

図 20 で示す富山県黒部市の KB04 は今回の調査の上流に位置し、そのためもっとも水頭標高が高い 9.7m であった。一方で、もっとも地盤標高が低い KB13 でも水頭標高が 1.9m と自噴がみられ、その差は約 7.8m であった。黒部扇状地の南部にくらべて北部の方の水頭標高が明らかに高い傾向がみられ、上流河川からの安定した供給が沿岸部の自噴帯を形成していたと推察できる。図 21 で示す熊本県熊

本市は調査地の西部 KM07 では水頭標高 7.4m の自噴がみられた一方、東部の KM03 は水頭標高 6.7m の自噴がみられ、その差は約 0.7m であった。熊本市の水前寺江津湖周辺には多くの自噴井がみられ、それを挟んで東西に水頭標高の高い地域がみられた。これは上江津湖からの涵養が考えられる。今後、詳細な調査が必要であると考えられる。図 22 で示す長崎県南島原市は SBF06 においてもっとも高い水頭標高 25.8m を示した一方で、東部の沿岸沿いの SBF01 および SBF02 はそれぞれ 12.2m と 11.7m の自噴がみられ、その差は約 14.1m であった。図 23 で示す岐阜県大垣市は OG05 においてもっとも水頭標高が高く 10.4m を示した。水頭標高 10.4m を示した OG05 は揖斐川の西部を流れる平野井川沿いに位置し、揖斐川に平行しながら南下するに従い低下し、OG02 で 6.0m の自噴がみられ、その差は約 4.4m であった。このように、高い水頭標高を持つ高標高値からのポテンシャルにより、低標高域での自噴を可能にしていたと推察された。福井県大野市と山形県遊佐町については水頭標高が測定できた地点がわずかであったため、ここでは述べない。今後の課題である。

4.3 地下水流動の持続性

富山黒部市（黒部扇状地）

北・手計（2015）では、扇央部の黒部川付近から右岸側へ浸透している地下水流動系を明らかにしている。また、扇央から扇端にかけてのかなりの範囲にわたり、地下水は黒部川河川水の影響を顕著に受けており、さら浅層地下水だけでなく深層地下水に対しても河川水の質および量について強い影響が及んでいる（丸山, 2003; 丸山, 2006）ことが報告されている。同様に、松浦・手計・北・溝口（2017）では、黒部川扇状地地下水は下流域もしくは中流域の黒部川の水質と類似していることから下流域もしくは中流域の黒部川が涵養域であると考えられるとしている。実際、本研究においても黒部川の河川水 KB20 を含めすべての地下水で $\delta D=8$ $\delta^{18}O+20$ の直線状付近にプロットされた。このことは、佐竹・向井・水谷（1984）においても黒部川の同位体比は $\delta D=8$ $\delta^{18}O+20$ の直線状に集中することが報告されており、支持するものであると考えられる。また、自噴高についても扇央部付近である KB04 の自噴水頭が高く扇端部に向かって自噴水頭が徐々に下がっていることが確認された。手計（2010）では、黒部川扇状地における地下水位は統計的に極めて有意に漸減していることを示している。したがって、黒部川の扇央部付近を水頭に下流に向かっての地下水流動が示唆された。富山県の調査によると、黒部地域の沿岸部では 2004 年以降、地下水の塩水化が進んでいることが確認されている（富山県, 2014）。一方で、KB17 では多地点に比べ塩水化が認められたが、それ以外では目立った値を示さなかった。KB17 に近い KB16 においても他の地点と

比較してやや高い程度であり、顕著な値を示さなかった。局所的に塩水化がみられる原因については今後詳細な調査と検証が必要であると考えられる。

熊本県熊本市（白川流域）

今辻・市川・荒牧(2008)によると、江津湖周辺の湧水は白川中流域の灌漑田による涵養に起因するものであり、上江津湖で全体の 3/5、やや下流の中江津湖で 2/5 が湧出し、さらに下流の下江津湖では逆に地下へ浸透しているとしている。一柳・井手・嶋田・市川(2020)によると、熊本市の水前寺・上江津湖・下江津湖のゾーンに分けて地下水湧出量を推定した結果、各ゾーンにおける長期変動には違いが認められ、とくに下江津湖ゾーンでは 2003 年以降に負の値がたびたび見られることが明らかとなったと報告されている。その後、市川(2022) によって、熊本市における地下水の年間湧水量は 2005 年を境に回復傾向にあることが報告された。本研究においても下江津湖および周辺では正の値が示されたことから、季節や雨量など諸条件により、地下水湧出量に若干の違いが生じるものの回復傾向にあり、正の値が示されるようになったと推察される。

小島・市川(2011)によると熊本市内の地下水の第一帯水層の硝酸性窒素濃度は 5mg/L～ 10mg/L であり、白川中流域の南西にある畑作地帯の施肥や畜産廃棄物の影響を受け易く、灌漑用水や梅雨の雨水に希釈されると考えられている。湧水全体の濃度は第一帯水層の濃度より低い 5mg/L 以下であり、これは第二帯水層からの湧水量が多いため、希釈され、やや低めの濃度に保たれていると考える事ができる述べられている。本研究における地下水の硝酸性窒素濃度は 2.5 mg/L～5.0mg/L であり、第一帯水層と第二帯水層による混合が生じていると推察される。

白川中流域の河川水 KM05 は施肥による影響がみられたものの、地下水については明瞭な差はみられなかった。熊本市の地下水は白川の同位体比の関係から涵養減の一つであることが示されことから、量や質ともに熊本市の地下水を支える重要な一つであると言える。

長崎県島原市周辺

島原半島は河川の流域が狭く、河川水の安定した取水が困難であることから、水資源の多くを地下水（深井戸）に依存している。また、島原市近郊の地域では、水資源が豊富であるものの、半島南部地域では水資源が乏しいため、慢性的な水不足の状況にある（長崎県，2016）。

島原市近郊の地下水と河川水の同位体比はほぼ同程度であり、河川からの涵養の大きさが示された。島原市の水質は南島原市にくらべ総溶存イオン量が多く、火山灰層や砂れき層が互層など土壌や岩石との接触時間が長いことが推察された。沿岸部に近い地点 SB01、SB02、SBS07 においては塩水化が生じておらず、良質な

地下水が沿岸部付近にまで到達していることが明らかとなった。今回の調査では自噴高や量は豊富であったが、島原半島の河川流域は狭いため、季節や雨量による影響についてまでは明らかにできていない。そのため、季節等のトレンドを調査し評価することが今後の課題の一つである。

岐阜県大垣市（揖斐川流域）

大垣市周辺の東西方向の地下断面図によると濃尾平野において G1(第一礫層)・G2(第二礫層)と呼ばれている 2つの有力な帯水層の存在が確認できる。G1 は深度 50m を中心として 10~20m の厚さで分布し、この帯水層を対象とする井戸は「浅掘」と呼ばれている(安田, 2004)。礫層は、揖斐川や粕川から流れ出た砂礫が浅い海底に堆積したものと考えられており、その粒径は 3~8cm で多少砂を混入している(大垣市, 1975)。G2 は深度 120m 以深に 15~25m 程度の厚みで分布し、この層から取水する井戸は「深掘」と呼ばれる(安田, 2004)。この層の礫は最大で直径 40cm と大きく、砂の混入量も少ないため、帯水層として理想的であり、自噴力も G1 層よりも大きい(大垣市, 1975)。

揖斐川に近い地域で特に水温が低い傾向があり、山地に水源を持ち相対的に低い水温を有する揖斐川からの浸透水が非常に大きな寄与をしており、その影響は揖斐川沿いで特に大きいことが伺える(浅井・安田・島野, 2007)。本研究においても、揖斐川の調査は 5 月末であったことから水温は 18.5°Cであった。一方で、揖斐川に近い地点では水温 12.0~12.5°C程度である一方で、揖斐川西部に位置する大垣駅南部の揖斐川から離れた地点では 13.7°C程度、さらに西部の別の河川近くの OG01 では 17.5°Cであった。

浅井・安田・島野(2007)によると、見かけ上の地下水中に占める揖斐川浸透水の割合は、揖斐川に近い大垣市東部で約 80~90%、大垣駅周辺で約 70%、大垣市北部の田園地帯で約 50~60%と見積もられている。本研究においても揖斐川と周辺地下水の同位体比が近い値を示した一方で、OG01 では他と異なり、やや重い値を示した。このことは、OG01 を除く大垣の地下水形成に対し、揖斐川からの影響を大きく受けていることが示された。

福井県大野市

地下水の自然涵養量が減少し、利用量が、増大する傾向にあり、昭和 40 年代後半から、多くの湧水に枯渇現象が現れている。本研究においても、自噴高については測定ができなかった。特に、地表面以下に掘り下げられている地点があることやポンプを常時稼働させているなど自噴地下水としての姿は少ない。河川水 ON09、ON10 と地下水の同位体比より、地下水は ON10 清滝川からによって形成されていると推察できる。この地域の地下水は ON10 からの涵養によって市街地の地下

水は維持されていると考えられる。大野市においても地下水の定期観測や調査や条例など地下水保全対策が積極的になされている。

山形県遊佐町

豊富な地下水や湧水は飲料水などの生活用水だけでなく、農業をはじめとする地域産業に不可欠な水資源として、人々の暮らしを土台の部分から支えてきた。また、自噴井戸を利用した共同の洗い場や河川公園などは人と人をつなぎ付け、地域コミュニティの形成を促す重要な役割をも果たしてきたと言える（遊佐町，2013）。遊佐町は地下水を利用した生活は本調査では限定的であると感じた。市内の自噴湧水は水量が非常に多い地点がある一方で小規模なものが多くみられた。全体として自噴地点は数か所確認ができるが、住民による認識は他の地域に比べ低いと感じられた。しかし、遊佐町および周辺では鳥海山からの伏流水が確認されているため、今後詳細な調査をおこない、整理していくことが課題である。

5 まとめ

本研究の結果から、河川から地下への伏流による影響が大きく示唆されたが、河川水と周辺地下水の相互作用の詳細については明らかにできていない。一般細菌や大腸菌群の簡易検査を実施したが、黒部市では一般細菌のみ、その他の地域では一般細菌と大腸菌群がともに検出された。特に、河川水での検出が多く認められた。熊本市や大野市の地下水の一部でも一般細菌や大腸菌群が検出されたが、これらの地域の他の地下水採水地点では検出されてはおらず非常に限定的である。地下水を利用した文化が残る地域では“地下水の存在”が、“地域の水資源”だけでなく、観光・産業・防災の面の一部の役割を担っているといえる。地域の伝統文化の継承のみならず将来にも活用できる機能を維持していくことが重要であると考えられる。そのためにも、水循環の研究だけでなく、利用やシステムなど人文・社会学についても研究についても今後研究を実施していく必要があると考えられる。

結論

自噴湧水がある地域における共通要因を明らかにすることや自噴機構の類型化することを目的に、水文観測や化学分析を実施した。観測データ解析と各種定量分析結果より以下のことが明らかとなった。

1. 黒部市の河川水、地下水で概ね Ca-HCO_3 型、大垣市で Ca-HCO_3 型、大野市で Ca-

HCO₃型、遊佐町で Na-HCO₃型であった。一方、熊本市の地下水で Ca-HCO₃型、河川水は Ca-SO₄型、島原市の地下水は Ca-HCO₃型、南島原市の地下水は Na-HCO₃型、河川水は Ca-HCO₃型と異なる水質を示した。島原市の地下水の総溶存イオン量は南島原市の地下水や河川水に比べ明らかに多い傾向があったことから、土壌や岩石と長時間接触することによる水質形成過程を経ていると考えられる。

2. 地下水、河川水の酸素・水素安定同位体比は回帰直線付近に分布することから、河川からの伏流による影響が大きく豊富な水量、良質な水ともに条件として必要であると考えられた。
3. 自噴帯湧水を活用した水利用の観点から、持続的な水資源管理を進める上で、季節や雨量による自噴高や自噴量、スポット的に異なる水質などについて、より地層や深度を含め全体の動態を詳細に把握することが有用である。

謝辞

本研究を行うにあたり、NPO 団体ならびに関係機関・団体には水資源に関する情報提供等いただきました。特に、自噴用井戸所有者の皆様には大変お世話になりました。ここに記して、御礼申し上げます。

参考文献

1. 浅井和由・安田守・島野安雄 (2007)：名水を訪ねて(79)大垣の地下水. 地下水学会誌 第49巻第4号, pp341-353
2. 板寺一洋・代田 寧 (2014)：上湯場新噴気における水蒸気の酸素・水素同位体比, 温地研報告 46,17-20.
3. 安西俊彦・清水克之・北村義信・Shakibaev, I.I. (2013)：カザフスタン・イリ川下流域灌漑地区における地下水位変動特性 とその要因に関する研究. 農業農村工学会論文集, 81(1), 51-56.
4. 市川勉 (2022)；熊本白川中流域灌漑事業、地下水学会誌 第64巻第4号, pp291-300
5. 一柳錦平・井手浄・嶋田純・市川勉 (2020)：熊本市江津湖周辺における地下水湧出量の再考察, 日本水文科学会誌 第50 巻, 第1 号, 3-11
6. 今辻銀二・市川勉・荒牧昭二郎 (2008)：水前寺・江津湖における湧水メカニズムとその変動. 土木学会第 63 回年次学術講演会, pp81-82
7. 榎根 勇 (1991)：実例による新しい地下水調査法, 山海堂.

8. 気象庁 (2023) : 過去の気象・データダウンロード .
<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php> (2023年7月1日閲覧).
9. 北隆平・手計太一 (2015) : 地下水位・水質観測データを基にした黒部川扇状地の地下水流動系の推定. 土木学会論文集 G (環境), 51 (5), I_111_1_116
10. 熊本市 HP : <https://www.city.kumamoto.jp/kankyo/> (2023年7月1日閲覧).
11. 黒部市 (2017) : 第2次黒部市総合振興計画 前期基本計画 (案), 1-17
12. 後藤純治・嶋田 純・松井喜治 (2002) : 黒部川扇状地の地下水流動に関する同位体水文学的研究. 地球惑星科学関連学会 2002 年合同大会予稿集, H055-001.
13. 小島智佳・市川勉 (2011) : 熊本市江津湖における地下水の湧水特性と硝酸性窒素汚染の進行状況について、東海大学紀要産業工学部 4, pp45-52
14. 酒田市 (2016) : 平成26年度水道事業年報. 1-66
15. 佐竹洋・向井利明・水谷義彦 (1984) : D, T, 18O からみた北陸地方の降水と河川水の水文学的特徴. 富山大学トリチウム科学センター研究報告, 3,45-56
16. 嶋田純 (2012) : モンスーンアジア地域における可能地下水涵養量を考慮した地下水資源管理. 日本水文科学会誌, 42(2), 33-42.
17. 田上雅浩・一柳錦平・嶋田純 (2009) : 熊本市における降水の安定同位体比の季節変動. 2009 年度日本水文科学会学術大会, 24, 55-56
18. 田上雅浩・一柳錦平 (2016) : 日本における降水の d-excess と水蒸気の起源. 日本水文科学会誌, 46(2), 101-115.
19. 土原健雄・吉本周平・皆川裕樹・白旗克志・石田聡 (2018) : 環境レーザーを用いた地表水と地下水の交流研究の現状. 地下水学会誌, 60(2), 169-192
20. 手計太一 (2010) : 黒部川扇状地における地下水位の漸減減少に関する基礎的研究. 水工学論文集, 54,565-570
21. 徳永朋祥・中田智浩・茂木勝郎・渡辺正晴・嶋田 純・張勁・蒲生俊敬・谷口真人・浅井和見・三枝博光 (2003) : 沿岸海底から湧出する淡水性地下水の探査および陸域地下水との関連に関する検討ー黒部川扇状地沖合での例ー. 地下水学会誌. 45. pp133-144.
22. 富山県 (2014) : 地下水の現状
23. 長崎県 (2023) : 長崎県水道事業概要, 1-129
24. 松浦拓哉・手計太一・北隆平・溝口敏明 (2017) : 溶存イオンと放射性同位体も用いた黒部川扇状地地下水の滞留時間と涵養域の推定. 土木学会論文集 B1(水工学). 73(4). I_67- I_72
25. 丸山響 (2003) : 扇状地地下水の性状に及ぼす河川水の影響ー黒部川下流域の場合ー. 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会予稿集, H060-005.
26. 丸山響 (2006) : 黒部川扇状地における地下水涵養源としての河川水の役割. 日本水文科学会誌. 36 (1). 23-36.
27. 山口嘉一 (2010) : 総合水資源管理における地下水対策. 地下水 学会誌, 52(1), 21-27.

28. 長崎県 (2016) : 島原地域半島振興計画
29. 中易佑平、張勁、佐竹洋、阿熱衣・熱孜旦(2011) : 黒部川扇状地地下水の同位体地球化学的特徴と経年変化. 日本地球化学会年会講演要旨集, 58, 358.
30. 中山友栄・谷口真人・嶋田純 (2000) : 琵琶湖流域における降水 と地下水の安定同位体比特性. 陸水学雑誌, 61(2), 119-128.
31. 入善町 (2003) : 黒部川扇状地地下水調査報告書.
32. 遊佐町 (2013) : 遊佐町環境基本計画改定版
33. 吉岡有美・伊藤真帆・中村公人・瀧本裕士・土原健雄 (2018) : 酸素・水素安定同位体比からみた手取川扇状地の河川水-地下水の交流現象と地下水涵養源. 地下水学会誌, 60(2), 205-221