

7) 菊池地域における地下水中の無機成分と井戸深さとの関係

永田 武史 前田 敏孝 藤本 貴大* 小笹 康人 上本 清次**

要 旨

菊池地域の湧水及び井戸水における、無機成分間の相関及び無機成分と井戸深さとの関係について調査した。被圧地下水の湧出とみられる湧水については F^- 、 Na^+ 、 B 、 As などの成分が比較的豊富に含まれており、帯水層の違いによって溶存成分の濃度に違いが生じる傾向が現れた。また、菊池市旭志地区の井戸水において、高い濃度の硝酸性窒素が検出された地点の周辺では、井戸深さと F^- 、 Li 、 As との間の相関係数が高く、また、硝酸性窒素濃度は井戸深さに対して負の相関関係が見られた。

キーワード：地下水，湧水，硝酸性窒素，井戸深さ，相関係数

はじめに

菊池地域を含む熊本市周辺では、生活用水のほぼ100%を地下水に依存しているが、近年、過剰な施肥や家畜排せつ物等の不適切な処理等が原因と推測される、地下水の硝酸性窒素の上昇がみられ、環境基準を超過する事例も見られる^{1),2)}。硝酸性窒素による地下水の汚染の状況を把握するためには、湧水や井戸水などの地下水を調査し、地下水中の硝酸性窒素濃度の分布を把握することが不可欠である。熊本県では平成7年以降、熊本県内の地下水における硝酸性窒素濃度の調査を実施するとともに^{3)~8)}、平成16年度に熊本地域硝酸性窒素削減計画を策定し汚染の拡大を防止する対策に取り組んできた。

しかしながら、井戸水の調査にあたっては、ボーリング調査等を実施するには費用等の制約があり、既設の井戸を調査対象にせざるを得ず、調査を実施するうえで必要となる井戸深さ、ストレイナーの位置等の情報が十分に得られないといった問題がある。これらの情報が不足しているため、地下における硝酸性窒素の分布の把握が十分ではない状況である。

筆者らはこれまで、上益城地域及び熊本市地域の湧水の成分を分析し、湧水の地域によって、溶存する成分濃度が異なり、その差異は帯水層の違いに由来すると考えられることを報告した⁹⁾。筆者らはその結果か

ら、県内の他の地域でも帯水層と溶存成分の濃度について同様の関係が現れ、また、これらの成分が湧水や井戸水の帯水層の深さを示す指標となりうるのではないかと考えた。

今回、主に菊池地域の地下水（湧水及び井戸水）の採水を実施し、溶存している無機成分と湧水の湧出形態、井戸深さ等との関係について調査した。

調査地点

本報では、実施時期及び調査地区の違いによって区別した以下の3件の調査について報告する。

- 1) 平成26年5月に、菊池地域（主に菊池市七城地区周辺）及び熊本市の一部の湧水を対象にした調査（以後、湧水調査と表記する）。
- 2) 平成27年1月から同年2月にかけて、菊池市旭志地区の湧水及び井戸水を対象にした調査（以後、旭志地区調査と表記する）。
- 3) 平成27年1月から同年2月にかけて、合志市合志地区の井戸水を対象にした調査（以後、合志地区調査と表記する）。

1 湧水調査

*現健康福祉部健康危機管理課

**現健康福祉部薬務衛生課

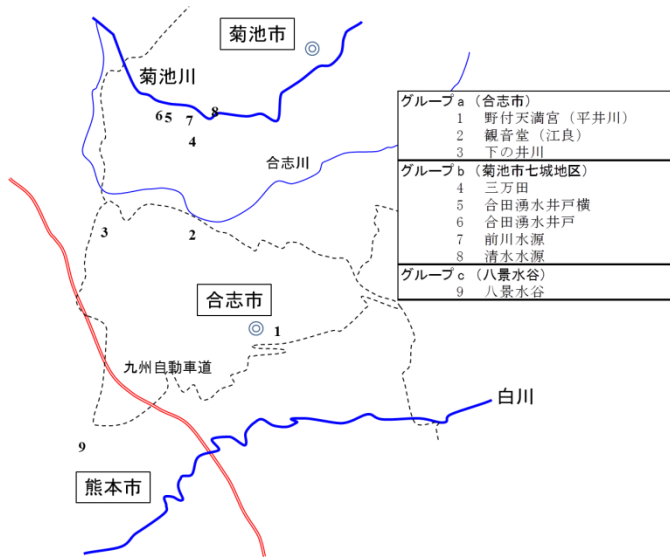


図1 調査地点（湧水調査）

図1に湧水調査(9地点)の概略図及び名称を示す。地点については、平成22年に実施した調査¹⁰⁾及び荒牧らの文献¹¹⁾を参考にした。採水は平成26年5月29日に実施した。調査を行った湧水について、地点により3つのグループに分類した(グループa:合志市, No.1~3, グループb:菊池市七城地区, No.4~8, グループc:熊本市八景水谷, No.9)。

2 旭志地区調査

図2に調査地点の概略図を示す。また、表1に地点の概要(井戸深さ等)を示す。地点数は27(湧水10地点, 井戸水17地点)であり、平成27年1月26日, 1月29日及び2月4日に環境保全課, 菊池保健所及び菊池市によって採水された。

3 合志地区調査

図3に調査地点の概略図を示す。また、表2に地点の概要(井戸深さ等)を示す。地点数は30であり、全て井戸であった。旭志地区調査と同様に平成27年1月26日, 1月29日及び2月4日に環境保全課, 菊池保健所及び合志市によって採水された。

調査項目及び分析方法

調査項目は、pH, EC(導電率), 陽イオン(Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), 陰イオン(F^- , Cl^- , NO_2^- , Br^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-), 重金属類(21種類), SiO_2 であった。

旭志地区調査及び合志地区調査については、それらに加えて溶存酸素, 酸化還元電位(ORP), PO_4^{3-} につ

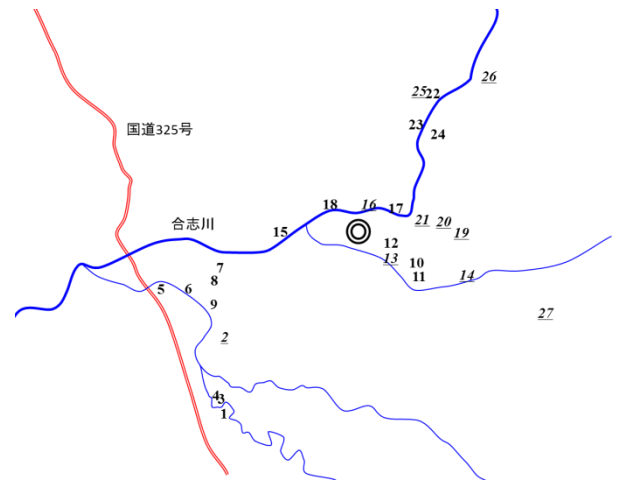


図2 調査地点（旭志地区調査）
下線・斜字は湧水を示す。

表1 調査地点概要（旭志地区調査）

No.	種類	井戸深さ [m]	海拔(推定) [m]
1	井戸水	15	102
2	湧水	-	97
3	井戸水	9	99
4	井戸水	13	104
5	井戸水	100	84
6	井戸水	不明	89
7	井戸水	18	92
8	井戸水	140	92
9	井戸水	150	93
10	井戸水	10	125
11	井戸水	9.5	125
12	井戸水	7	120
13	湧水	-	120
14	湧水	-	143
15	井戸水	10	95
16	湧水	-	102
17	井戸水	35	107
18	井戸水	14	100
19	湧水	-	139
20	湧水	-	126
21	湧水	-	116
22	井戸水	3	133
23	井戸水	5	127
24	井戸水	6	132
25	湧水	-	132
26	湧水	-	143
27	湧水	-	190

いて分析した。

溶存酸素はウィンクラー-アジ化ナトリウム変法, pH, EC, ORPは電極法, HCO_3^- , PO_4^{3-} を除くイオン成分はイオンクロマトグラフ法, HCO_3^- は硫酸滴定法, PO_4^{3-} 及び SiO_2 はそれぞれモリブデン青法及びモリブ

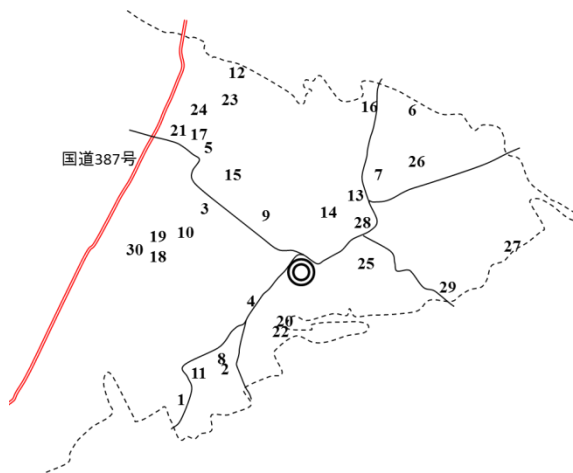


図3 調査地点（合志地区調査）

表2 調査地点概要（合志地区調査）

No.	井戸深さ [m]	ストレーナー 位置[m]	海拔（推定） [m]
1	43	20-40	63
2	75	50-72	69
3	100	40-45, 45-50	71
4	120	65-70, 76-87, 97-114	88
5	60	30-60	57
6	10		110
7	79	60-70	112
8	6		69
9	80	60-80	76
10	100	50-60	73
11	67	25-45	71
12	80	45-70	69
13	118	50-118	96
14	118	49-118	89
15	8		64
16	127	30-120	101
17	60	20	59
18	111.7	71-109	79
19	94.8	51.5-79, 90-95.5	68
20	100	88-100	95
21	70	30	51
22	120	93-115	86
23	90	40-80	57
24	15		52
25	12		97
26	130	80-85, 91-96	120
27	200	139-194	139
28	100	84-96	89
29	100	80	110
30	101	46-57, 62-95	68

※ 調査地点は全て井戸水

デン黄法により求めた。重金属成分については、誘導結合プラズマ質量分析（ICP-MS）法で分析を行った。

結果及び考察

1 湧水調査

1.1 水質の概要（トリリニアダイアグラム）

各成分の分析結果を表3に示す。また、イオン成分の分析結果に基づき、トリリニアダイアグラムで表現したものを図4に示す。

トリリニアダイアグラムが示すように、グループ a の湧水はアルカリ土類非炭酸塩型の性質を示した。一方、グループ b のうち3地点（No.5, No.6, No.8）及びグループ c（No.9）については、陽イオンにおけるアルカリ土類の比率が比較的高く、アルカリ土類の比率と同程度であった。

一般に地下水が深層の帯水層にあり、地下における滞留時間が長くなると、地下水質がアルカリ土類炭酸塩型からアルカリ炭酸塩型に移行する¹²⁾。島野は湧出の形態により、七城地区周辺の湧水群を被圧地下水の湧出と分類している¹³⁾。また八景水谷も湧出量が豊富なことから被圧地下水の湧出と考えられる。これらの湧水には地下における滞留時間が比較的に長い地下水が含まれていると考えられる。

1.2 グループ間における成分濃度の差異について

今回調査した範囲では、グループ間で差異が顕著に現れたものがあつた。F⁻、SO₄²⁻、Na⁺、Li、B、As、Se 及び硝酸性窒素（NO₃-N）の各グループの平均値を表4に示す。特に、F⁻、Na⁺、Li、B、As においてグループ間で特徴的な差異が現れた。これらの成分はグループ b、グループ c で比較的高い濃度が高い傾向が見られた。このことは、1.1 で記述したとおりグループ b

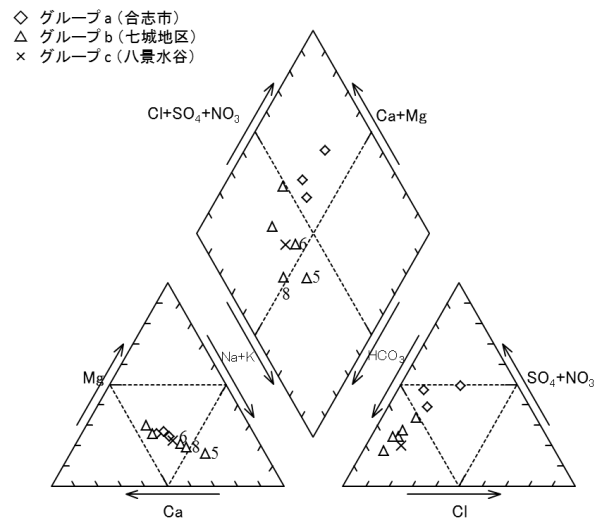


図4 トリリニアダイアグラム（湧水調査）

表4 グループごとの各成分の平均値 (湧水調査)

	F ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	Li (μg/L)	B (μg/L)	As (μg/L)	Se (μg/L)	NO ₃ -N (mg/L)
グループ a	0.03	13.2	12.0	1.0	9.4	0.37	0.22	7.8
グループ b	0.20	9.4	16.8	2.8	127.4	1.40	0.17	4.3
グループ c	0.13	6.5	18.0	5.5	163.6	1.09	0.19	3.9

及びcは被圧地下水の湧出であり、これらの成分は深い帯水層の地下水に比較的豊富に含まれるものであると示唆された。

F⁻, Na⁺, 及びAsの関係については、菊池川下流の玉名市川崎地区に関する調査例¹⁴⁾がある。この調査では、調査地域の井戸水のF⁻濃度とAsとの間に正の相関(0.74)があり、また、Asが検出された井戸では陽イオンにおけるNa⁺の比率が高く、アルカリ炭酸塩型を示したと報告されている¹⁴⁾。

筆者が以前、被圧地下水の湧出と考えられる下六嘉湧水群及び江津湖周辺の湧水群の水質について、F⁻, SO₄²⁻, B, As, Se等の成分の濃度が他地域の湧水と比較して高かったことを報告⁹⁾した。今回の調査地点と下六嘉湧水群及び江津湖周辺の湧水群を比較するとF⁻, B, Asについてはグループb及びcの湧水は江津湖周辺と同程度かそれを上回る濃度で含まれていた。一方、SO₄²⁻, Seについては、グループb及びcの濃度は江津湖周辺と比較して高くなかった。

1.3 各成分の相関について

湧水9地点について、主要成分の相関係数を表5に示す。グループb及びcで比較的豊富に含まれていた成分(F⁻, Na⁺, B, As)間の相関係数が0.8以上と高い傾向を示した。例として、F⁻とNa⁺との関係を図5に、F⁻とAsとの関係を図6に示す。

2 旭志地区調査

表5 主な成分間の相関係数 (湧水調査)

※斜字は本文内で言及

	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Li	B	As	Se	Sr	NO ₃ -N
Na ⁺	-0.184	-0.388	-0.354	0.897	0.062	-0.333	0.679	0.332	0.827	0.896	0.396	-0.413	-0.097
K ⁺		0.491	0.591	-0.507	0.781	0.533	-0.717	-0.749	-0.581	-0.520	0.203	0.890	0.913
Ca ²⁺			0.984	-0.624	0.475	0.571	-0.217	-0.368	-0.459	-0.581	-0.181	0.631	0.375
Mg ²⁺				-0.613	0.592	0.551	-0.303	-0.453	-0.471	-0.590	-0.229	0.733	0.485
F ⁻					-0.312	-0.456	0.748	0.430	0.894	0.984	0.284	-0.690	-0.396
Cl ⁻						0.030	-0.439	-0.396	-0.267	-0.375	-0.121	0.769	0.861
SO ₄ ²⁻							-0.330	-0.560	-0.459	-0.347	0.316	0.509	0.189
HCO ₃ ⁻								0.716	0.829	0.801	0.153	-0.767	-0.676
Li									0.676	0.437	-0.081	-0.724	-0.688
B										0.880	0.167	-0.697	-0.505
As											0.359	-0.704	-0.460
Se												-0.223	0.143
Sr													0.772

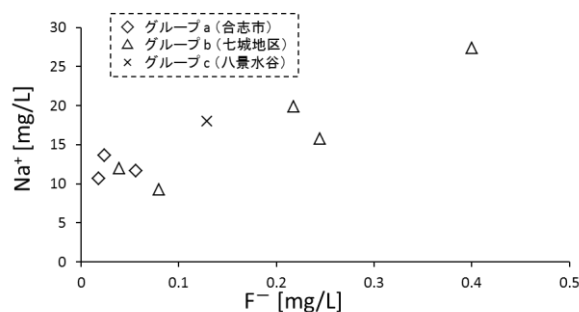


図5 F⁻とNa⁺との関係(湧水調査)

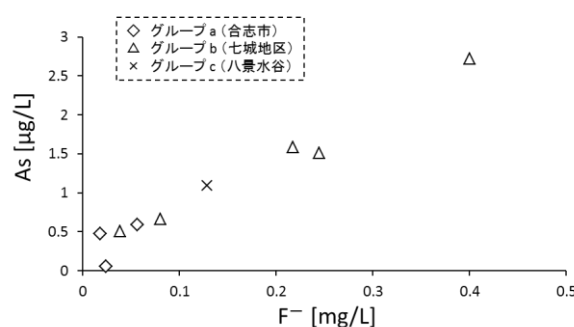


図6 F⁻とAsとの関係(湧水調査)

2.1 水質の概要 (トリリニアダイアグラム)

各成分の分析結果の平均値, 最大値, 最小値を表6に示す。また、イオン成分の分析結果に基づき、トリリニアダイアグラムで表現したものを図7に示す。トリリニアダイアグラムが示すように、湧水は全てアルカリ土類炭酸塩型に分類された。また、井戸水の大部分はアルカリ土類炭酸塩型あるいはアルカリ土類非炭酸塩型を示した。しかし、地点No.9だけはアルカリ炭酸塩型を示した。No.9は、井戸が深く、地下における滞留時間が比較的長い深層地下水が含まれている可能性が示唆された。

表 6 各成分の平均値, 最大値及び最小値
(旭志地区調査)

調査日	H27.1.26, H27.1.29, H27.2.4		
	平均値	最大値	最小値
水温(°C)	16.6	20.2	12.0
pH	7.1	8.0	6.4
EC(μ S/cm)	171	309	85
ORP(mV)	252	291	201
DO (mg/L)	7.8	9.4	4.1
Na ⁺ (mg/L)	9.6	28.3	4.7
NH ₄ ⁺ (mg/L)	< 0.1	< 0.1	< 0.1
K ⁺ (mg/L)	4.7	16.8	1.1
Ca ²⁺ (mg/L)	13.3	22.0	5.8
Mg ²⁺ (mg/L)	4.5	7.7	1.5
F ⁻ (mg/L)	0.09	0.57	0.03
Cl ⁻ (mg/L)	6.2	14.7	2.1
NO ₂ ⁻ (mg/L)	< 0.03	< 0.03	< 0.03
Br ⁻ (mg/L)	0.024	0.054	0.006
NO ₃ ⁻ (mg/L)	19.5	46.7	1.1
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	9.6	24.2	1.4
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	45.3	102.4	13.9
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	0.014	0.053	0.000
NO ₃ -N (mg/L)	4.4	10.5	0.2
Li (μ g/L)	0.9	7.3	0.0
B (μ g/L)	32.5	436.9	2.0
Al (μ g/L)	20.3	237.9	0.9
V (μ g/L)	3.8	13.1	0.3
Cr (μ g/L)	0.13	0.68	0.02
Mn (μ g/L)	1.77	15.74	0.00
Fe (μ g/L)	30.7	218.4	1.5
Ni (μ g/L)	0.08	1.70	0.00
Cu (μ g/L)	1.77	16.38	0.00
Zn (μ g/L)	5.52	35.67	0.00
As (μ g/L)	0.25	1.52	0.00
Se (μ g/L)	0.04	0.19	0.00
Rb (μ g/L)	10.9	26.3	4.6
Sr (μ g/L)	133.0	259.2	44.8
Mo (μ g/L)	0.15	1.56	0.00
Cd (μ g/L)	0.00	0.04	0.00
Sb (μ g/L)	0.02	0.13	0.00
Cs (μ g/L)	0.08	0.30	0.00
Ba (μ g/L)	9.4	22.6	1.4
Pb (μ g/L)	0.10	0.75	0.00
U (μ g/L)	0.11	0.76	0.00
SiO ₂ (mg/L)	33.4	59.3	15.4

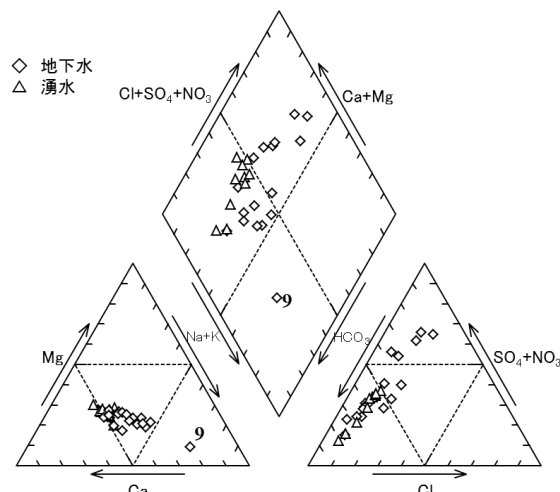


図 7 トリリニアダイアグラム (旭志地区調査)



図 8 NO₃-N の分布 (旭志地区調査)

2.2 硝酸性窒素の分布について

硝酸性窒素 (NO₃-N) の濃度の分布を図 8 に示す。今回の調査で NO₃-N 濃度が環境基準 (10mg/L) より高かったのは井戸水 1 地点 (No. 7) であり, 7~10mg/L の範囲にあったのが井戸水 2 地点 (No. 10, No. 15), 湧水 1 地点 (No. 2) であった。調査地区の西側に, NO₃-N 濃度が比較的高い地点が多くなる傾向がみられた。

2.3 各成分の相関について

今回調査した 27 地点について, 主要成分の相関係数を表 7 に示す。本調査では F⁻, Na⁺, Li, B, As 間の相関係数が 0.8 以上の高い傾向を示した。これらの成分は湧水調査の結果でも記述したとおり, 深い帯水層の地下水に比較的多く含まれると考えられた。例として, F⁻ と Na⁺ との関係を図 9 に, F⁻ と As との関係を図 10 に示す。

表 7 主な成分間の相関係数(旭志地区調査)

※斜字は本文内で言及

	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Li	B	V	As	Se	Sr	PO ₄ ³⁻	SiO ₂	NO ₃ -N	
Na ⁺	0.239	0.337	0.305	0.855	0.446	0.683	0.622	0.833	0.850	0.379	0.726	0.455	0.313	0.103	0.334	0.133	
K ⁺		0.114	0.267	0.017	0.477	0.407	-0.001	-0.031	0.025	-0.248	0.039	0.358	0.686	0.203	0.253	0.138	
Ca ²⁺			0.926	0.075	0.580	0.360	0.460	0.109	0.274	-0.332	0.010	-0.197	0.646	-0.072	0.265	0.574	
Mg ²⁺				-0.007	0.666	0.411	0.352	0.037	0.187	-0.464	-0.101	-0.175	0.792	-0.171	0.222	0.597	
F ⁻					0.004	0.367	0.674	0.966	0.929	0.677	0.818	0.567	-0.088	0.203	0.257	-0.122	
Cl ⁻						0.620	0.020	-0.018	0.158	-0.464	-0.118	-0.130	0.834	-0.313	-0.076	0.672	
SO ₄ ²⁻							0.051	0.358	0.405	-0.137	0.305	0.235	0.652	-0.126	0.151	0.387	
HCO ₃ ⁻								0.684	0.679	0.504	0.650	0.292	0.011	0.376	0.579	-0.222	
Li									0.914	0.702	0.823	0.518	-0.084	0.160	0.356	-0.156	
B										0.461	0.626	0.354	0.062	0.079	0.203	0.052	
V											0.750	0.509	-0.575	0.386	0.343	-0.578	
As												0.683	-0.142	0.432	0.600	-0.345	
Se													-0.034	0.671	0.426	-0.274	
Sr															-0.219	0.125	0.597
PO ₄ ³⁻																0.614	-0.438
SiO ₂																	-0.400

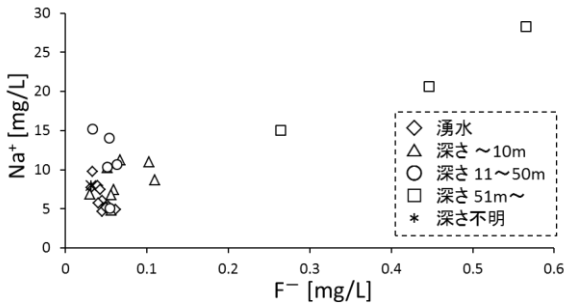


図 9 F⁻と Na⁺との関係(旭志地区調査)

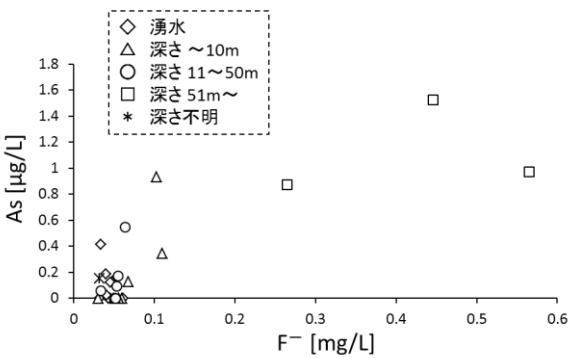


図 10 F⁻と As との関係(旭志地区調査)

表 8 旭志地区 No. 7 及び周辺 5 地点における井戸の深さ, NO₃-N と主な成分間の相関係数
※斜字は絶対値が 0.8 以上

	井戸深さ	NO ₃ -N
Na ⁺	0.646	-0.511
K ⁺	-0.408	0.454
Ca ²⁺	-0.464	0.656
Mg ²⁺	-0.534	0.721
F ⁻	0.812	-0.743
Cl ⁻	-0.655	0.844
SO ₄ ²⁻	0.186	-0.008
HCO ₃ ⁻	0.520	-0.437
Li	0.805	-0.748
B	0.534	-0.395
V	0.959	-0.993
As	0.954	-0.958
Se	0.824	-0.927
Sr	-0.736	0.914
PO ₄ ³⁻	0.922	-0.897
SiO ₂	0.946	-0.821
NO ₃ -N	-0.931	

2.4 高濃度 NO₃-N 検出地点周辺における, 井戸深さと各成分濃度との関係について

環境基準(10mg/L)を超える NO₃-N を検出した井戸(No.7)の周辺の井戸について, 井戸深さのデータがある井戸及び湧水(No.7 及び周辺 5 地点, No.2, 5, 8, 9, 15)の井戸深さと, NO₃-N 及びその他の成分間の相関を調べた。

井戸深さと主要成分との相関係数を表 8 に示す。深い帯水層に含まれると推測された成分のうち, F⁻, Li,

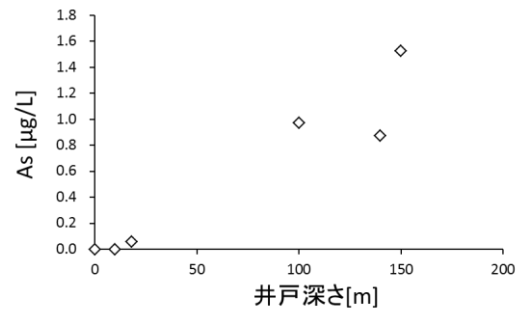


図 11 旭志地区 No. 7 及び周辺 5 地点における井戸深さと As との関係

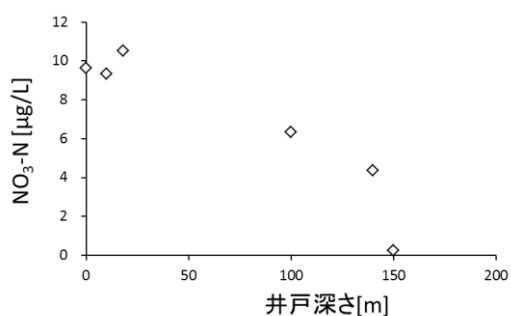


図 12 旭志地区 No. 7 及び周辺 5 地点における井戸深さと NO₃-N との関係

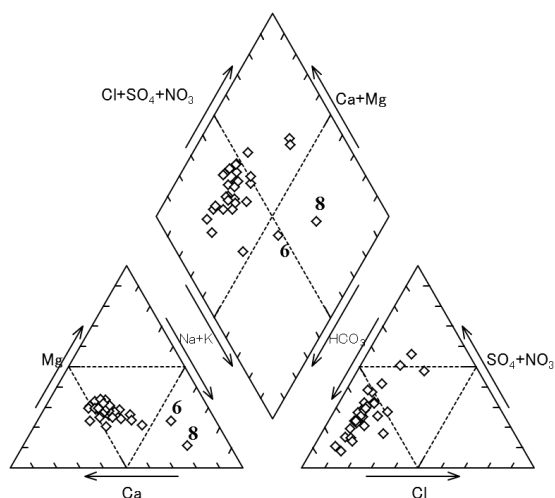


図 13 トリリニアダイアグラム (合志地区調査)

As については、6 地点の井戸深さと高い相関が得られた。例として井戸深さと As との関係を図 11 に示す。井戸深さと As との間の相関係数は 0.954 であり、この場合の両側検定危険率は 0.3% であった。井戸深さは、これらの成分の他にさらに V、PO₄³⁻、SiO₂ との相関係数も 0.9 以上であった。ただし、V、PO₄³⁻、SiO₂ の 3 成分は調査全体 (27 地点) では他成分 (F 等) との相関係数は高くなかった (表 7)。

NO₃-N と井戸深さとの間には負の相関関係が見られた (相関係数 -0.931, 両側検定危険率 0.7%)。両者の関係を図 12 に示す。

6 地点の NO₃-N と各成分濃度との相関を表 8 に併せて示す。NO₃-N は Cl との相関係数が高く (相関係数 0.844, 両側検定危険率 3.5%), NO₃-N は Cl を多く含む家畜ふん尿に由来する可能性があることが示唆された。また、NO₃-N と As、V との間には負の相関がみられた。

これらの結果より、以下のことが推測された。NO₃-N

表 9 各成分の平均値, 最大値及び最小値 (合志地域調査)

調査日	H27.1.26, H27.1.29, H27.2.4		
	平均値	最大値	最小値
水温 (°C)	17.6	21.2	15.4
pH	7.3	7.7	6.7
EC (μ S/cm)	256	536	138
ORP (mV)	247	286	207
DO (mg/L)	8.4	11.4	4.5
Na ⁺ (mg/L)	12.2	20.8	6.7
NH ₄ ⁺ (mg/L)	< 0.1	< 0.1	< 0.1
K ⁺ (mg/L)	6.3	22.1	0.9
Ca ²⁺ (mg/L)	21.2	49.4	5.8
Mg ²⁺ (mg/L)	8.3	20.7	2.1
F ⁻ (mg/L)	0.05	0.16	0.02
Cl ⁻ (mg/L)	12.0	26.9	5.8
NO ₂ ⁻ (mg/L)	< 0.03	< 0.03	< 0.03
Br ⁻ (mg/L)	0.056	0.244	0.011
NO ₃ ⁻ (mg/L)	26.6	83.5	4.0
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	9.3	29.1	0.6
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	80.2	159.2	25.8
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	0.016	0.029	0.006
NO ₃ -N (mg/L)	6.0	18.8	0.9
Li (μ g/L)	1.6	4.8	0.1
B (μ g/L)	36.4	239.5	3.6
Al (μ g/L)	19.8	217.7	0.4
V (μ g/L)	3.4	7.6	0.7
Cr (μ g/L)	0.22	0.51	0.06
Mn (μ g/L)	6.98	49.89	0.00
Fe (μ g/L)	75.3	488.1	1.5
Ni (μ g/L)	0.24	2.82	0.00
Cu (μ g/L)	2.54	24.05	0.02
Zn (μ g/L)	33.75	324.20	1.03
As (μ g/L)	0.50	1.34	0.00
Se (μ g/L)	0.14	0.50	0.02
Rb (μ g/L)	14.8	31.7	0.4
Sr (μ g/L)	208.8	567.9	54.7
Mo (μ g/L)	0.05	0.26	0.00
Cd (μ g/L)	0.01	0.16	0.00
Sb (μ g/L)	0.04	0.09	0.01
Cs (μ g/L)	0.08	0.33	0.00
Ba (μ g/L)	14.4	47.6	0.6
Pb (μ g/L)	0.42	2.41	0.00
U (μ g/L)	0.76	5.12	0.01
SiO ₂ (mg/L)	44.4	63.4	15.2

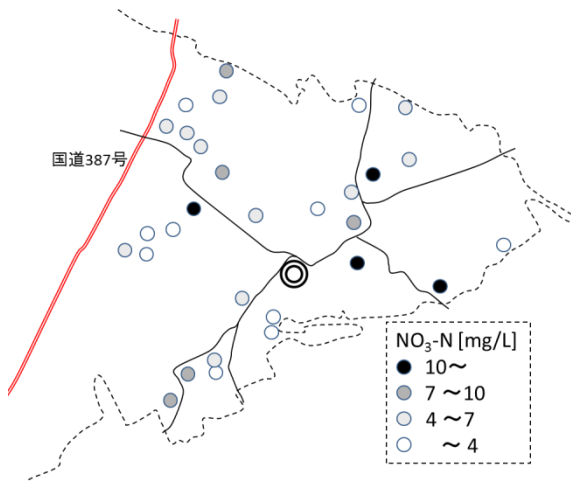


図 14 硝酸性窒素の分布（合志地区調査）

の汚染は主に地下の浅い帯水層に広がり、深い帯水層までは到達していない。したがって No.9 のような深い井戸では、As, V 等を含む深い帯水層の地下水によって浅い帯水層の NO₃-N が希釈・混合されていると考えられた。

3 合志地区調査

3.1 水質の概要（トリリニアダイアグラム）

各成分の分析結果の平均値、最大値、最小値を表 9 に示す。また、イオン成分の分析結果に基づき、トリリニアダイアグラムで表現したものを図 13 に示す。トリリニアダイアグラムが示すように、井戸水の大部分はアルカリ土類炭酸塩型あるいはアルカリ土類非炭酸塩型を示した。しかし、No.6 及び No.8 については陽イオンにおけるアルカリ類の比率が高く、アルカリ土類を上回った。この 2 地点の井戸深さは 10m 及び 6m と浅く、旭志地区とは異なる傾向だった。No.6 については、K⁺の濃度が湧水調査、旭志地区を含めた全地点で最も高く、著者らが実施した畑地の土壌溶出試験¹⁵⁾

において、K⁺は地表近くの浅い層に高い濃度で含まれることから、No.6 については地表の土壌の影響を受けているものと推測された。No.8 については、Na⁺の割合が高かったが、湧水調査や旭志地区で関連して検出された F⁻, Li, B, As などの成分の濃度は特に高くなく、アルカリ類の比率が高い理由については不明である。

3.2 NO₃-N の分布について

今回の調査で得られた NO₃-N 濃度の分布を図 14 に示す。合志地区では 30 地点中 4 地点 (No.3, 7, 25, 29) で環境基準の 10mg/L を超過し、No.7 で最も高い濃度 (18.8 mg/L) が検出された。また、5 地点 (No. 1, 11, 12, 15, 28) で 7~10mg/L の範囲であった。図 14 に示すように、硝酸性窒素が高い濃度で検出された井戸の位置は分散しており、地理的な傾向は明確には現れなかった。また、硝酸性窒素が 7mg/L を超過した 9 地点のうち、No.15, 25 を除く 7 地点において、井戸の深さが 40m 以上であり、旭志地区と異なる傾向を示した。

3.3 各成分の相関について

合志地域における、各成分の相関係数を表 10 に示す。本調査では旭志地区と異なり、Li と B の間ではやや高い相関係数 (0.857) を示したものの、F⁻, Na⁺, As 等間の相関係数は高くなかった。Li と B との関係を図 15 に示す。両物質とも No.18, 19, 30 で Li, B の濃度がほぼ同じ濃度だった。この 3 地点は 300m 程度しか離れておらず、井戸深さも 94.8m~111.7m とほぼ同じであった。この 3 地点の井戸水は同一の帯水層から採取された地下水である可能性が高いと推測された。

3.4 井戸深さと NO₃-N 濃度との関係について

合志地区における、井戸深さと NO₃-N との関係を図

表 10 主な成分間の相関係数(合志地区調査)

	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Li	B	V	As	Se	Sr	PO ₄ ³⁻	SiO ₂	NO ₃ -N
Na ⁺	0.392	0.232	0.296	0.243	0.523	0.437	0.192	0.250	0.199	0.000	-0.003	0.069	0.443	0.013	0.395	0.254
K ⁺		-0.091	0.117	0.367	0.227	0.456	-0.093	-0.009	-0.073	-0.020	-0.027	0.088	0.399	-0.115	0.498	0.233
Ca ²⁺			0.949	-0.536	0.603	-0.032	0.844	0.044	-0.046	-0.246	-0.302	0.173	0.817	-0.417	0.032	0.540
Mg ²⁺				-0.461	0.642	0.004	0.803	0.074	-0.061	-0.239	-0.304	0.223	0.882	-0.421	0.202	0.650
F ⁻					-0.130	0.100	-0.375	0.210	0.175	0.199	0.511	-0.180	-0.277	0.363	0.069	-0.320
Cl ⁻						0.375	0.323	0.147	-0.033	0.027	-0.094	-0.077	0.599	-0.253	0.185	0.382
SO ₄ ²⁻							-0.216	-0.127	-0.235	-0.024	-0.100	0.217	0.215	0.003	0.316	-0.129
HCO ₃ ⁻								0.284	0.272	-0.152	-0.050	0.365	0.612	-0.264	0.082	0.228
Li									0.857	0.562	0.623	0.130	-0.152	0.143	0.200	-0.257
B										0.354	0.412	0.177	-0.250	0.078	-0.016	-0.290
V											0.479	-0.235	-0.366	0.637	0.470	-0.355
As												-0.136	-0.359	0.355	0.125	-0.561
Se													0.131	-0.232	0.069	-0.052
Sr														-0.408	0.289	0.700
PO ₄ ³⁻															0.440	-0.424
SiO ₂																0.067

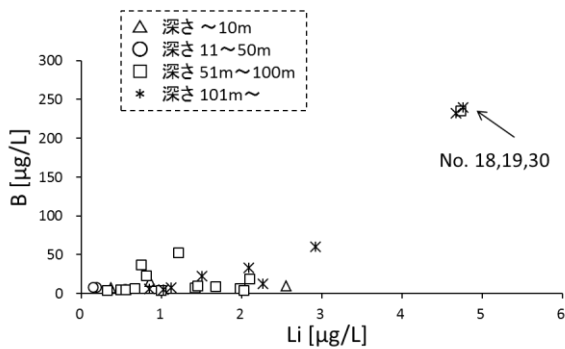


図 15 Li と B との関係（合志地区調査）

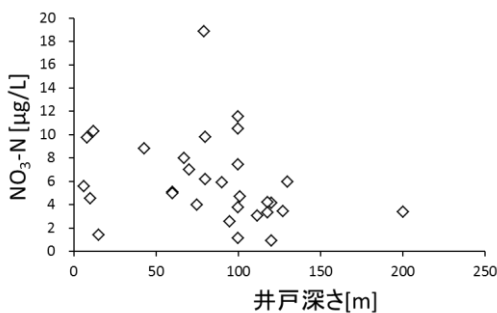


図 16 井戸深さと硝酸性窒素濃度との関係（合志地区調査）

16 に示す。図 16 に示す通り、井戸深さと NO₃-N との間の相関係数は高くなかった (-0.251)。旭志地区の場合と異なり、3.2 で記述したとおり深さ 40m 以上の井戸でも NO₃-N が 7mg/L 以上の濃度で検出され、最も高い濃度 (No.7, 18.8mg/L) の井戸では深さが 79m であった。

合志地区で旭志地区との違いが現れた理由をはっきりしない。その要因として、熊本市北部地区では難透水層の切れ目や薄くなっている箇所、NO₃-N が第二帯水層などの深い帯水層に移動しているとみられる事例が報告されており¹⁾、合志地区でもそのような現象が発生している可能性があること、さらに、井戸掘削時に難透水層を貫通し、その井戸の管壁を通して NO₃-N が深い帯水層に移動している可能性が考えられる。

合志地区の場合、旭志地区と比較して、硝酸性窒素が高い濃度で検出された井戸の分布が分散しているおり、硝酸性窒素の地下での分布の把握のためには、より範囲を狭くして、地点数を増やすなどの詳細な調査の必要性が示された。

まとめ

本報では平成 26 年度に実施した湧水調査、旭志地区調査、合志地区調査について報告した。

菊池市七城地区周辺での湧水調査の結果、被圧地下水の湧出であると考えられている湧水では水中の F⁻、Na⁺、B、As の濃度が比較的高く、前報⁹⁾と同様に帯水層の違いによるものであると考えられた。

旭志地区調査の結果でも、F⁻、Na⁺、Li、B、As 間の相関係数が高く、井戸の帯水層による溶存成分の濃度の違いが反映されていると考えられた。硝酸性窒素が比較的高い濃度で検出された井戸の周辺において、井戸深さと、これらの成分との関係について検討した結果、井戸深さと F⁻、Li、As との間の相関係数が高く、また、NO₃-N は井戸深さに対して負の相関が得られた。この結果により、この地域の NO₃-N は主に浅い帯水層に多く含まれていて、深い井戸では深い帯水層の As 等を含む地下水によって希釈されていることが示唆された。

合志地区調査結果では、上述成分のうち、Li、B、以外では高い相関係数は見られなかった。また、NO₃-N が高い地点が分散しており、NO₃-N と井戸深さとの間に高い相関関係は見られなかった。これらの結果から旭志地区と異なり、NO₃-N の汚染が、深い帯水層まで到達している可能性が示唆された。

今回の調査結果では、七城地区周辺の湧水及び旭志地区では帯水層の違いによる溶存成分の濃度の違いが現れ、F⁻、Na⁺、Li、B、As 等が帯水層や井戸深さを表す指標とありうるということが示唆された。一方合志地区では No. 18, 19, 30 における Li、B の関係のように限られた範囲では溶存成分が井戸深さを表す指標となる可能性があると考えられた。

謝辞

本報における、旭志地区調査及び合志地区調査につきましては、熊本県環境保全課の地下水概況調査事業に付随して行われ、熊本県環境保全課、熊本県菊池保健所、菊池市及び合志市によって調査地点の検討及び採水が実施されました。各所属の担当者の方々に深く感謝いたします。

引用文献

- 1) 熊本県：熊本地域硝酸性窒素削減計画，(2005)。
- 2) 熊本県：平成 25 年度水質調査報告書（公共用水域及び地下水），(2014)。
- 3) 小笹康人，廣畑昌章，吉永敏之，福留清秀，松岡良三：熊本県保健環境科学研究所報，25,35 (1995)。
- 4) 廣畑昌章，松崎達哉，藤田一城，小笹康人，松岡良三：熊本県保健環境科学研究所報，26,59 (1996)。

- 5) 廣畑昌章, 松崎達哉, 藤田一城, 松下 裕, 松岡良三: 熊本県保健環境科学研究所報, 27,71 (1997).
- 6) 廣畑昌章, 松崎達哉, 藤田一城, 松下 裕, 松岡良三: 熊本県保健環境科学研究所報, 27,77 (1997).
- 7) 廣畑昌章, 藤田一城, 永村哲也, 松下 裕, 松岡良三: 熊本県保健環境科学研究所報, 28,60 (1998).
- 8) 廣畑昌章, 藤田一城, 永村哲也, 松下 裕, 松岡良三: 熊本県保健環境科学研究所報, 28,66 (1998).
- 9) 永田武史, 藤本貴大: 熊本県保健環境科学研究所報, 43,101 (2013).
- 10) 永田武史, 小笹康人, 廣畑昌章: 熊本県保健環境科学研究所報, 41,102 (2011).
- 11) 荒牧一利, 田中浩二, 古江研也, 米田 正: “水は伝える熊本の湧泉”, 熊本の湧泉研究会(2004).
- 12) 水収支研究グループ編: “地下水資源・環境論 – その理論と実践–”, p.152, (1993), 共立出版.
- 13) 島野安雄: 文星紀要, 12, A3-A36 (2000).
- 14) 山口勝也, 樋口義則, 松岡良三: 熊本県保健環境科学研究所報, 31,99 (2001).
- 15) 永田武史, 前田敏孝, 藤本貴大, 上本清次: 熊本県保健環境科学研究所報, 44, (67-74) (2015).

表3 各成分の濃度（湧水調査）

地点番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
地点名	野付天満宮	観音堂(江良)	下の井川	三万田	合田湧水井戸横	合田湧水井戸	前川水源	清水水源	八景水谷
調査日	H26.5.29								
水温(°C)	19.0	19.9	21.5	19.1	20.7	21.3	18.4	19.1	19.9
pH	6.5	6.9	6.9	6.6	7.3	7.4	7.2	7.3	7.2
EC(μ S/cm)	271	199	225	286	244	243	178	172	236
Na ⁺ (mg/L)	13.6	11.7	10.6	11.9	27.4	19.9	9.2	15.8	18.0
NH ₄ ⁺ (mg/L)	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1
K ⁺ (mg/L)	8.9	6.6	7.5	6.5	5.6	6.0	4.2	4.1	5.1
Ca ²⁺ (mg/L)	18.0	13.1	16.8	23.8	11.8	15.4	14.5	10.7	16.4
Mg ²⁺ (mg/L)	7.7	5.2	6.2	9.8	4.5	5.8	5.2	3.8	6.1
F ⁻ (mg/L)	0.02	0.06	0.02	0.04	0.40	0.22	0.08	0.24	0.13
Cl ⁻ (mg/L)	19.4	9.8	7.5	11.2	9.3	9.4	5.3	5.1	11.5
NO ₂ ⁻ (mg/L)	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03	< 0.03
Br ⁻ (mg/L)	0.073	0.027	0.080	0.083	0.069	0.069	0.028	0.020	0.068
NO ₃ ⁻ (mg/L)	52.7	22.6	28.6	22.3	22.5	24.4	16.5	10.1	17.5
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	8.0	12.2	19.5	17.2	8.7	9.6	5.7	5.5	6.5
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	30.8	42.6	46.3	66.7	85.9	79.8	63.3	71.2	82.6
NO ₃ -N (mg/L)	11.9	5.1	6.5	5.0	5.1	5.5	3.7	2.3	3.9
Li (μ g/L)	0.4	1.6	1.1	1.5	2.1	3.3	2.4	4.6	5.5
B (μ g/L)	9.0	10.1	9.2	64.8	232.8	112.4	22.9	204.0	163.6
Al (μ g/L)	31.8	129.6	35.7	1.3	5.7	107.7	4.4	19.0	1.9
V (μ g/L)	0.6	3.4	2.4	2.7	6.3	4.8	5.5	7.1	5.2
Cr (μ g/L)	0.11	0.67	0.20	0.27	0.30	0.39	0.16	0.14	0.22
Mn (μ g/L)	11.55	3.47	1.99	0.16	0.31	2.05	0.36	1.71	0.11
Fe (μ g/L)	24.5	63.3	23.2	1.6	9.6	67.8	9.7	38.0	1.9
Ni (μ g/L)	0.17	0.13	0.11	0.23	0.08	0.10	0.06	0.63	0.09
Cu (μ g/L)	0.41	0.53	0.37	0.44	0.29	0.34	0.32	0.74	0.32
Zn (μ g/L)	1.57	2.04	1.68	1.47	6.00	1.37	2.36	2.48	1.15
As (μ g/L)	0.06	0.59	0.47	0.51	2.72	1.58	0.67	1.51	1.09
Se (μ g/L)	0.14	0.06	0.45	0.04	0.34	0.27	0.10	0.11	0.19
Rb (μ g/L)	26.6	18.0	10.9	9.8	14.2	15.1	13.4	11.7	14.7
Sr (μ g/L)	309.3	253.4	200.0	255.8	119.4	145.1	113.7	82.7	141.7
Mo (μ g/L)	0.02	0.27	0.16	0.12	0.30	0.20	0.16	0.39	0.26
Cd (μ g/L)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sb (μ g/L)	0.01	0.06	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05
Cs (μ g/L)	0.12	0.44	0.02	0.01	0.09	0.11	0.35	0.29	0.55
Ba (μ g/L)	43.4	21.4	16.7	23.3	13.0	12.6	9.0	6.7	10.5
Pb (μ g/L)	0.11	0.11	0.06	0.04	0.06	0.09	0.04	0.05	0.03
U (μ g/L)	0.02	0.16	0.34	0.55	0.30	0.24	0.20	0.17	0.31
SiO ₂ (mg/L)	25.2	48.6	58.6	57.8	54.8	55.5	50.5	49.7	48.4