

山口県における地下水の水質特性の把握

山口県環境保健センター
川上 千尋
山口大学大学院創成科学研究科
太田 岳洋

Characterization of Groundwater Quality in Yamaguchi prefecture

Chihiro KAWAKAMI*¹, Takehiro OHTA*²

*¹Yamaguchi Prefectural Institute of Public Health and Environment

*²The Graduate School of Science and Technology for Innovation, Yamaguchi University

はじめに

地下水は農業用水や飲用水として利用される等、生活環境に密接に関わっており、地下水の環境保全は、県民の健康の保護及び生活環境保全の面で重要である。

また、地下水には、周辺地質などの影響により種々の溶存化学成分が含まれており、その特性は地域により異なると考えられるが、その実態については明確にされていない。

そこで、山口県内 5 地区について、2019 年 11 月～2020 年 8 月に調査を実施し、水質特性の把握及び地下水成分と地質との関係について考察したので報告する。

調査方法

1 調査地点

山口県内の地下水 40 地点を対象とした。37 地点は、動力によりくみ上げられた地下水であり、3 地点は湧水である。調査地点は図 1 及び表 1 のとおり。調査地点の地質を構成する岩相及び地質年代については、国立研究開発法人 産業技術総合研究所地質調査総合センターが提供している 20 万分の 1 日本シームレス地質を用いて確認した。なお、一部の調査地点については、井戸柱状図や現地調査を元に井戸深度の地質(岩相)を確認した。

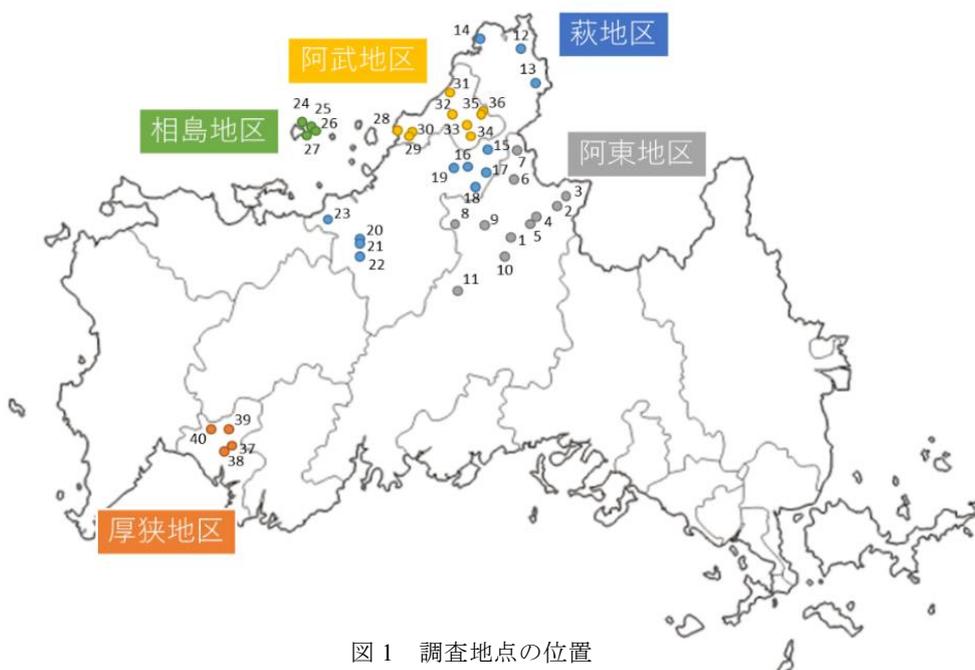


図 1 調査地点の位置

表1 調査地点の概略

	地点名	住所	井戸深(m)	岩相	地質年代	
1	阿東地区	阿東1	山口市阿東地福上	浅井戸	堆積物	第四紀
2		阿東2	山口市阿東徳佐中	浅井戸	堆積物	第四紀
3		阿東3	山口市阿東徳佐上	7.8	堆積物	第四紀
4		阿東4	山口市阿東徳佐中	10.5	堆積物	第四紀
5		阿東5	山口市阿東徳佐下	10.5	堆積物	第四紀
6		阿東6	山口市阿東嘉年下	50	流紋岩	白亜紀
7		阿東7	山口市阿東嘉年上	50	花崗岩	白亜紀
8		阿東8	山口市阿東蔵目喜	71	安山岩質凝灰岩	白亜紀
9		阿東9	山口市阿東生雲中	浅井戸	堆積物	第四紀
10		阿東10	山口市阿東生雲東分	15	堆積物	第四紀
11		阿東11	山口市阿東篠目	12	流紋岩	白亜紀
12	萩地区	萩1	萩市下田万	50.8	流紋岩質凝灰岩	白亜紀
13		萩2	萩市下小川	65.7	流紋岩質凝灰岩	古第三紀
14		萩3	萩市須佐高山	100	砂岩	新第三紀
15		萩4	萩市高佐下	51	流紋岩質凝灰岩	白亜紀
16		萩5	萩市高佐下	120	花崗岩	白亜紀
17		萩6	萩市高佐下	30	安山岩	白亜紀
18		萩7	萩市吉部上	120	花崗岩	白亜紀
19		萩8	萩市吉部下	32.8	花崗岩	白亜紀
20		萩9	萩市明木	100	流紋岩質凝灰岩	白亜紀
21		萩10	萩市明木	45	流紋岩質凝灰岩	白亜紀
22		萩11	萩市明木	35	流紋岩質凝灰岩	白亜紀
23		萩12	萩市三見	100	安山岩質凝灰岩	白亜紀
24	相島地区	相島1	萩市相島	80	安山岩	第四紀
25		相島2	萩市相島	80	安山岩	第四紀
26		相島3	萩市相島	浅井戸	安山岩	第四紀
27		相島4	萩市相島	浅井戸	安山岩	第四紀
28	阿武地区	阿武1	阿武町奈古	33	安山岩	白亜紀
29		阿武2	阿武町奈古	10	堆積物	第四紀
30		阿武3	阿武町奈古	20	堆積物	第四紀
31		阿武4	阿武町宇田	70	花崗岩	白亜紀
32		阿武5	阿武町宇生賀	84	流紋岩質凝灰岩	白亜紀
33		阿武6	阿武町宇生賀	116	流紋岩質凝灰岩	白亜紀
34		阿武7*	阿武町宇生賀	-	玄武岩	第四紀
35		阿武8*	阿武町福田上	-	堆積物	第四紀
36		阿武9*	阿武町福田上	-	玄武岩	第四紀
37	厚狭地区	厚狭1	山陽小野田市鴨庄	浅井戸	堆積物	第四紀
38		厚狭2	山陽小野田市鴨庄	浅井戸	堆積物	第四紀
39		厚狭3	山陽小野田市山川	47	砂岩	白亜紀
40		厚狭4	山陽小野田市山野井	40	砂岩	白亜紀

*湧水

2 調査項目及び方法

調査項目は、水温、pH、電気伝導度（EC）、総溶解固形分（TDS）、酸化還元電位（ORP）、イオン成分（Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻）及び金属成分（B, Al等21項目）である。水温は温度計、pHはメーター（HORIBA：F-71）、ECは電気伝導度計（HORIBA：ES-12）、TDSはペン型測定器（As one：MPC70）で測定した。ORPはORPメーター（HORIBA：D-73）で測定した値に、水温を用いて標準水素電極を基準とした電位（Eh）に換算したものを測定値とした。HCO₃⁻を除くイオン成分はイオンクロマトグラフ法（Thermo Fisher Scientific：ICS-1600）で、HCO₃⁻は硫酸滴定法¹⁾により求めた。なお、相島地区の陽イオンは、ICP-OES（Agilent Technologies：ICP-OES 5110）で測定した。溶存態ケイ素（DSi）を除く金属は、試料100mlにconc.硝酸5mlを加え保存処理を行った試料約10mlを密栓容器に入れ、100℃で1時間加熱した。測定は、ICP-MS（Agilent：ICP-MS 7500ce）を用いた。DSiはモリブデン青吸光光度法²⁾により求めた。

結果及び考察

1 pH, EC, TDS 及び Eh

各調査地点の結果を表2に示す。pHは概ね7.0前後を示しており、最低値は萩8の5.9で、最高値は萩9の7.9

であった。EC及びTDSについては、相島地区で非常に高く、阿東地区は、低い傾向であった。

阿東地区のEC及びTDSが低い理由を地質的に考察すると、阿東地区の大部分の井戸は、井戸深10m前後で浅の浅井戸であり、岩相は第四紀完新世の堆積物である。そのため、上記井戸は地下での滞留時間が短く、水-岩石反応が進んでいないと考えられた。一方、深度の大きい阿東6、阿東7、阿東8の周辺の岩相は流紋岩や花崗岩であることから、主な鉱物である石英が水への溶解度が低く、水-岩石反応が進行しにくいと考えられた。

2 イオン成分

各調査地点のヘキサダイアグラムを図2に、トリリニアダイアグラムを図3に示す。

ヘキサダイアグラムでは、相島地区を除く大部分の地点がCa-HCO₃型を示した。相島はMg-Cl型やCa-Cl型等、他地点とは異なる型を示し、ダイアグラムも大きい。相島は、他地点と比較して、K⁺, Mg²⁺, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻が高濃度を示したが、これには海水の混入と施肥の影響の2つの理由が考えられる。相島は、島嶼のため地下水に海水が混入している可能性がある。また、相島は島の面積の約40%が農地として利用されており、スイカやさつまいもの栽培が盛んな水はけのよい土地である³⁾。そのため、地下水が施肥の影響を受けている可能性が考えられる。

表2 各調査地点の測定結果（pH, EC, TDS, Eh）

		pH	EC	TDS	Eh
阿東地区	阿東1	6.8	90	59.6	413
	阿東2	6.3	56	41.8	413
	阿東3	6.2	65	45.1	433
	阿東4	6.0	156	107	380
	阿東5	6.4	138	96.0	331
	阿東6	6.8	129	85.6	431
	阿東7	7.8	175	116	348
	阿東8	7.6	161	115	415
	阿東9	6.9	83	69.8	435
	阿東10	6.6	89	59.5	428
	阿東11	7.1	107	76.3	405
萩地区	萩1	6.1	132	87.0	-
	萩2	7.7	276	188	-
	萩3	7.1	319	211	-
	萩4	6.6	124	86.8	351
	萩5	6.9	149	106	325
	萩6	7.8	208	142	338
	萩7	7.8	149	103	335
	萩8	5.9	122	93.6	370
	萩9	7.9	194	140	307
	萩10	7.8	148	97.8	346
	萩11	6.7	69	46.9	365
	萩12	7.3	252	163	-
相島地区	相島1	6.1	659	458	477
	相島2	6.9	373	239	456
	相島3	7.2	489	340	439
	相島4	7.5	524	360	408
阿武地区	阿武1	7.7	317	228	372
	阿武2	7.2	127	94.5	392
	阿武3	6.9	146	89.9	389
	阿武4	6.8	159	109	409
	阿武5	7.4	93	50.5	397
	阿武6	6.6	68	48.0	391
	阿武7	7.8	127	81.8	450
	阿武8	7.7	139	85.7	417
	阿武9	7.8	100	67.8	417
厚狭地区	厚狭1	6.9	209	144	436
	厚狭2	6.7	242	166	423
	厚狭3	6.9	170	120	402
	厚狭4	7.0	161	114	306

単位 EC：μS/cm, TDS：mg/L, Eh：mV

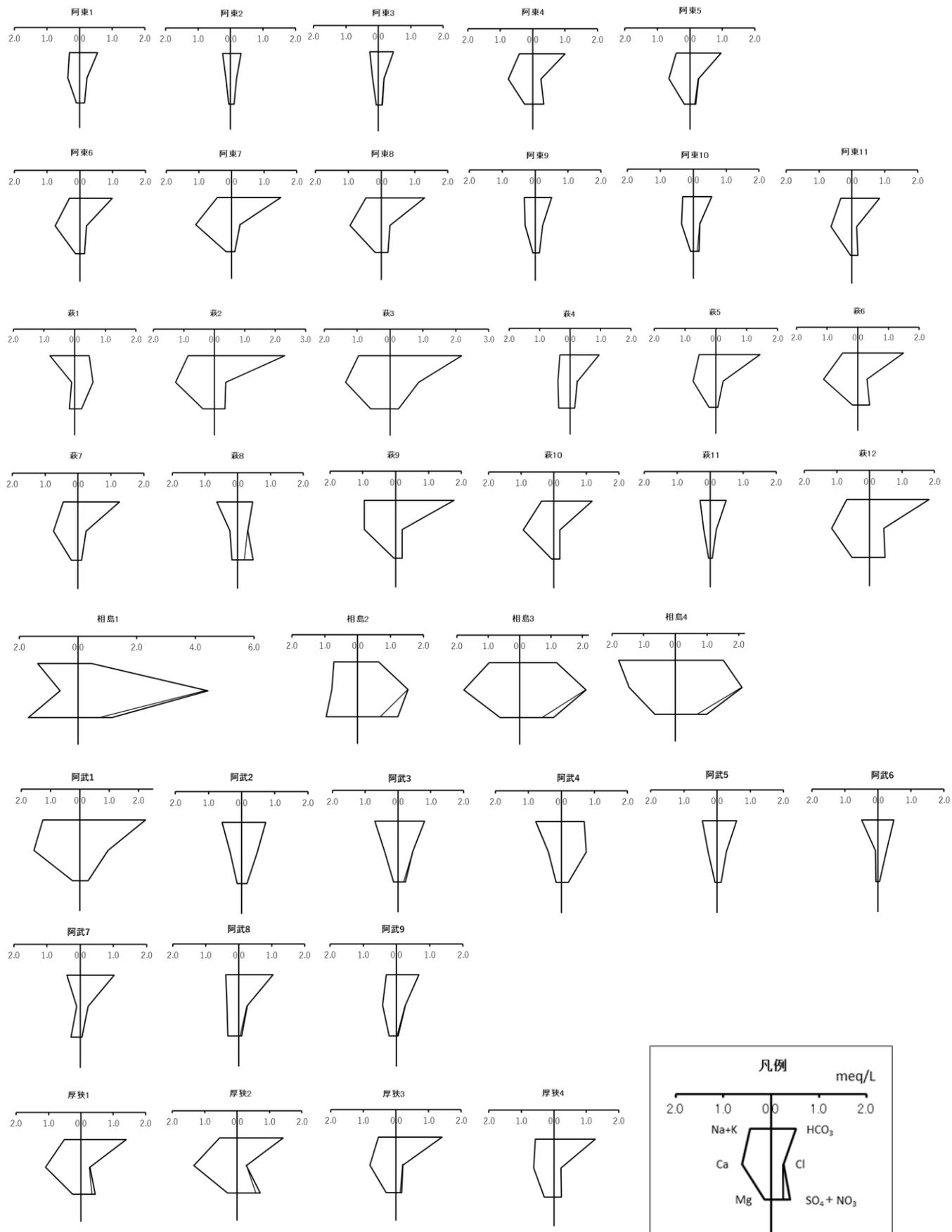


図 2 各調査地点のヘキサダイアグラム

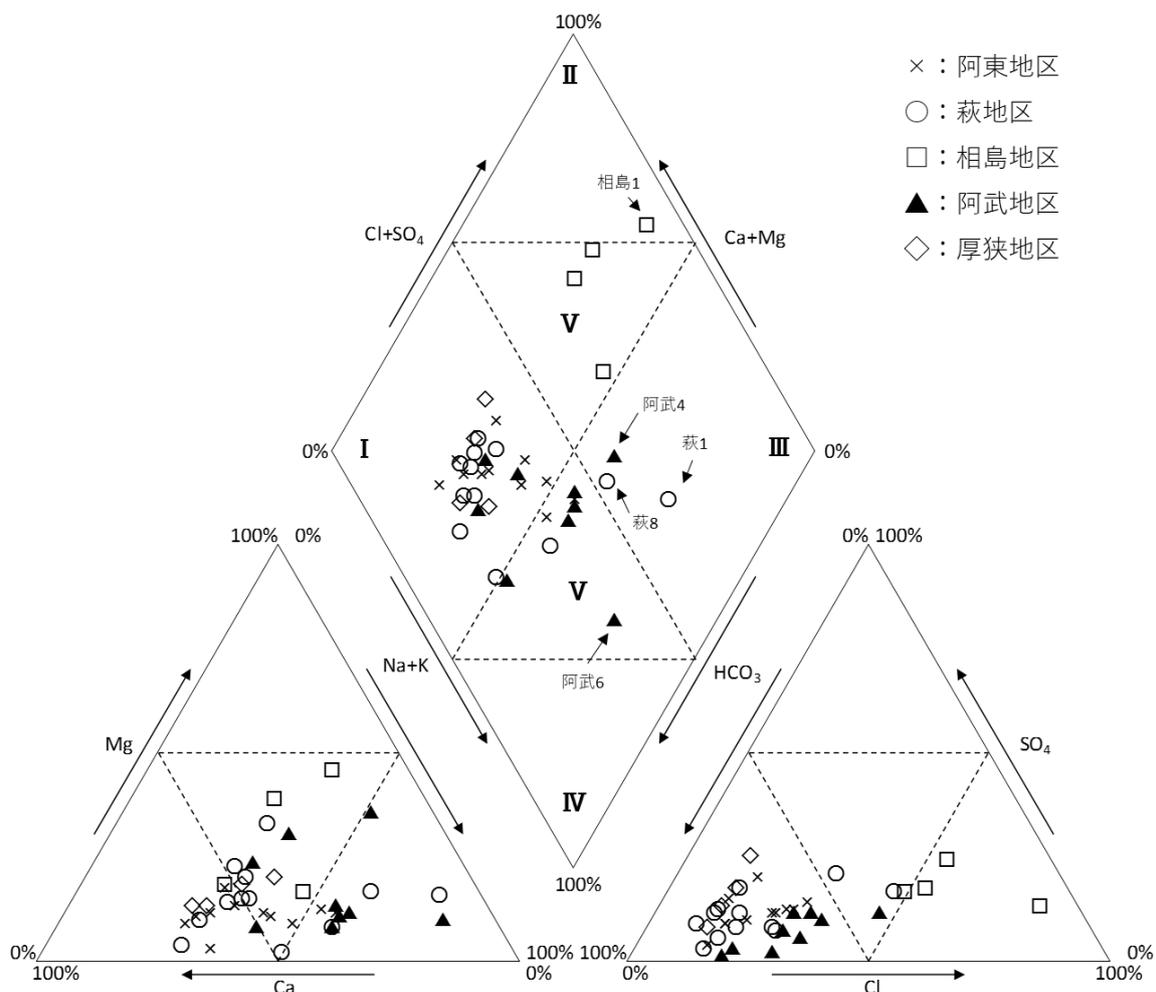


図 3 各調査地点のトリリニアダイアグラム

トリリニアダイアグラムは、プロットされる領域により、I 型 (Ca-HCO₃ 型, Mg-HCO₃ 型), II 型 (Ca-Cl 型, Ca-SO₄ 型), III 型 (Na-Cl 型, Na-SO₄ 型), IV 型 (Na-HCO₃ 型), V 型 (中間型) に分類される。

厚狭地区の全てと阿東地区の大部分が、一般的な浅層地下水のタイプである I 型を示した。相島地区は、全地点が主に熱水や化石水起源の地下水が示す II 型又は II 型に近い V 型を示した。相島は海水の混入と施肥の影響を受けていると考えられ、海水の混入による Cl⁻及び施肥の影響による Mg²⁺の割合が他地点と比較して高いことから、II 型又は II 型に近い V 型を示したと考えられる。

萩 1, 萩 8 及び阿武 4 は、海水が混入した地下水が示す III 型を示した。これらの地点のヘキサダグラムを見ると、小さく溶存成分量が少ないことがわかる。トリリニアダイアグラムは、陽イオン又は陰イオン濃度全体に

占める各イオン濃度の割合で位置が決まる。これらの地点は、海水の影響を受けたわけではなく、陰イオン濃度については、全体に占める Cl⁻や SO₄²⁻の割合が、陽イオン濃度については、全体に占める Na⁺の割合が相対的に高くなったことから、III 型を示したと考えられる。

阿武 6 は滞留時間の長い深層地下水が示す IV 型に近い V 型を示した。阿武 6 は井戸深 116 m と深く、Na⁺の割合が高い。地下水が移動する中で、停滞性の深層地下水で起こる特徴の一つである、Ca²⁺と Na⁺間でのイオン置換が行われていることが示唆される。

2 金属成分

各測定項目の濃度比較を表 3 及び図 4 示す。図 4 は各金属元素の濃度を箱ひげ図で表しており、実線の上端は最大値を、下端は最小値を、箱の下端は 25 パーセントイル値を、上端は 75 パーセントイル値を、箱の中の横棒

表 3 各測定金属の濃度比較

	DSi	Sr	B	Fe	Zn	Al	Cu	As	Rb	Mo	V	Mn	Pb	U	Co	Ni	Cr	Ge	Se	Sb	Cd
下限値	5	1	1	1	1	1	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.025	0.5	0.5	0.1	0.1	0.1	0.05	0.025
最大	25	325	228	8002	10	32	22.7	32.6	20.5	9.1	9.5	426.9	2.2	0.362	0.8	7.4	9.3	0.5	1.4	0.26	1515
最小	5	10	3	<1	<1	<1	<0.5	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.025	<0.5	<0.5	<0.1	<0.1	<0.1	<0.05	<0.025
中央値	10	95	9	3	3	2	2.0	1.5	1.4	0.7	0.3	0.2	0.1	0.039	<0.5	<0.5	<0.1	<0.1	<0.1	<0.05	<0.025
検出率	100	100	100	87.5	72.5	70.0	75.0	95	97.5	87.5	87.5	60	60	62.5	2.5	30	40	2.5	32.5	47.5	12.5

Si : mg/L それ以外 : μg/L

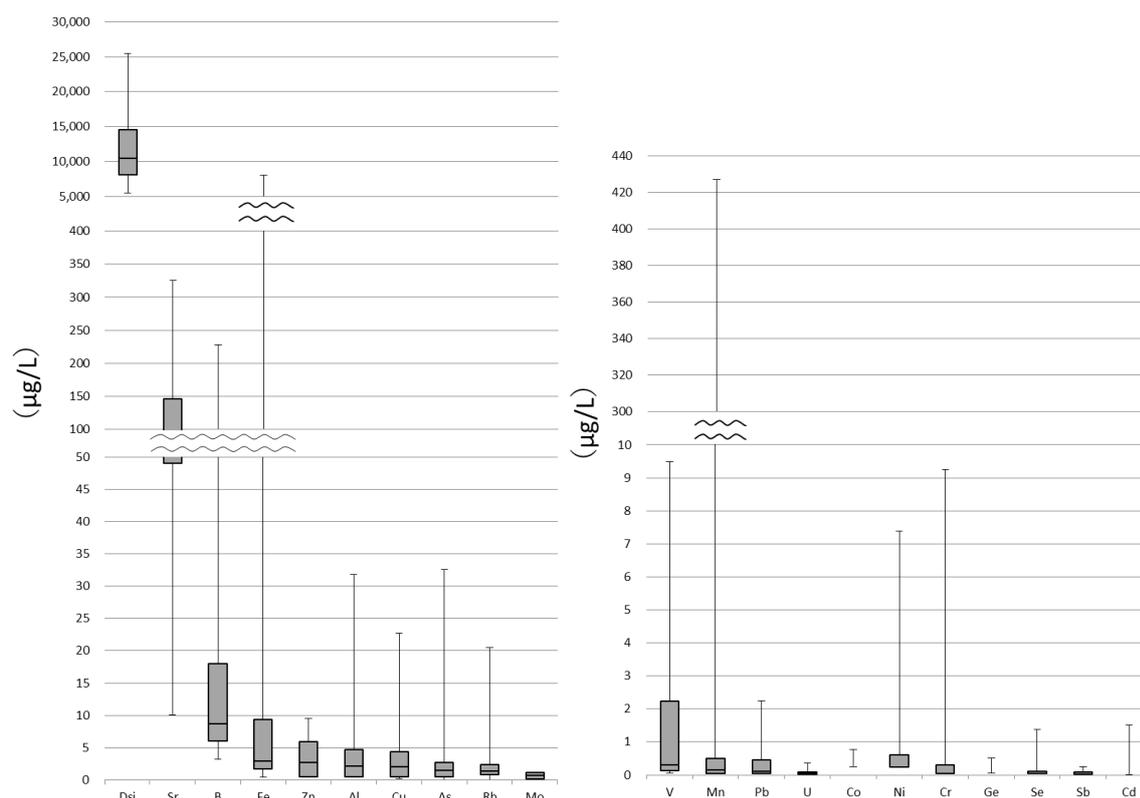


図 4 各測定金属の濃度比較

は中央値を示している。なお、中央値等の計算を行う際に、調査結果が報告下限値未満のときは、対象項目に報告下限値の 1/2 の値を代入して計算した。測定した地下水中の金属濃度は溶存態ケイ素 (DSi) を除き概ね μg/L レベルであった。Si は地殻中に最も多く含まれる金属元素であり、全地点が 5 mg/L 以上と他元素に比べて高濃度であった。一方、Co, Ni, Cr, Ge, Se, Sb, Cd は中央値が定量下限値以下と低かった。

なお、ICP-MS 法で測定できる金属成分のうち、地下水の環境基準が設定されている Cd, Pb, As, Se, B について、基準を超過したのは As のみで、超過地点数は 1 地点であった。

5 つの金属成分 (Sr, B, As, V, Mn) については、図 5 にヒストグラムを示し、以下に詳細に考察した。

2-1 ストロンチウム (Sr)

Dsi に次いで、地下水中の濃度が高かった金属元素であり、100 μg/L 以上を示した地点は 18 地点と多い。(図 5) 相島の 4 地点、萩 2, 萩 6 が特に高濃度を示した。Sr と地質との関係を見ると、安山岩が高く、堆積岩や花崗岩は低い傾向が見られた。(図 5)

また、Sr と Ca²⁺ の関係を見ると、正の相関が認められた。(図 6) Ca に富む鉱物として安山岩などの火成岩に主に含まれている斜長石が考えられる。Ca と Sr の化学的性質が似ているため、鉱物中の Ca が Sr に置換してい

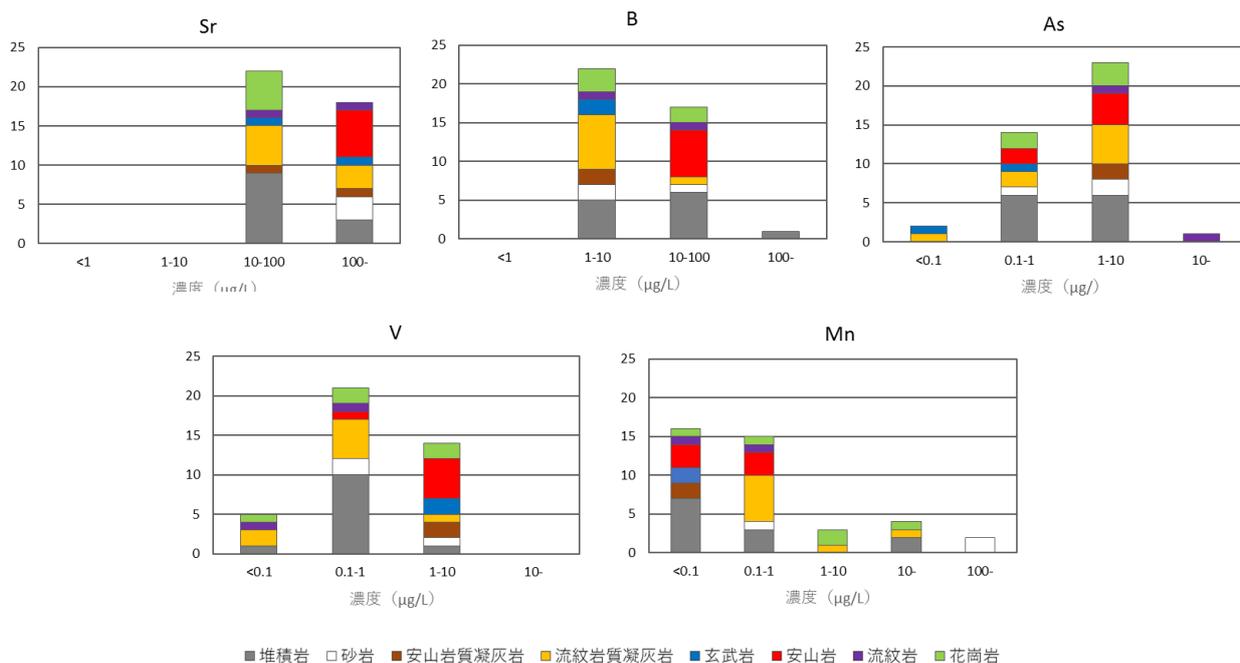


図5 各測定金属のヒストグラム

ることを示唆しており、水—岩石反応により Ca^{2+} と Sr が溶出していると考えられた。

2-2 ほう素 (B)

1 $\mu\text{g/L}$ ~10 $\mu\text{g/L}$ を示した地点が 22 地点と最も多いが、10 $\mu\text{g/L}$ 以上の地点も 18 地点と多かった。(図 5) 特に、相島地区、阿武 2 及び阿武 3 で高濃度を示し、安山岩や堆積岩の一部に高い傾向が見られた。

地下水に存在する自然由来の B は、主に化石水の混入によると言われている⁴⁾ことから、B と Cl^- の関係を見た。(図 7)。相島地区においては、B と Cl^- には正の相関が

見られた。海水中の B と Cl^- は、正比例する⁴⁾ことから、相島地区は海水の影響により B が高濃度であると考えられる。地下水の揚水により、海水と淡水の境界（塩淡水境界）が上昇することで、地下水に海水が混入したか、又は海水に富む雨水が地下に浸透し、地下水に混入した可能性が考えられる。

阿武 2 及び阿武 3 は、 Cl^- が相島地区ほど高濃度ではないものの、B は相島地区より高濃度であった。この 2 地点は汽水域の同じ河川沿いに位置し、岩相は堆積岩である。堆積時に海水中の B が粘土鉱物に吸着し、その後陸

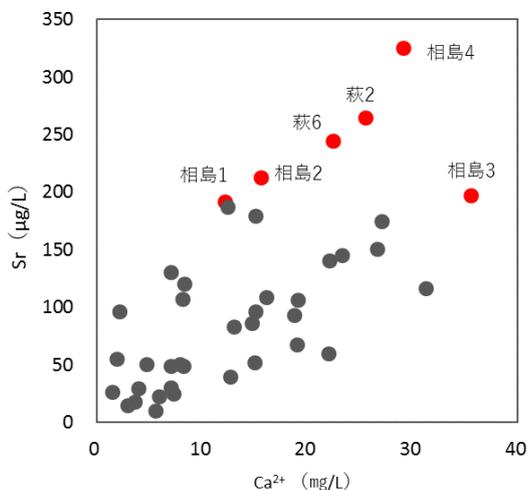


図6 Sr と Ca^{2+} 濃度の関係

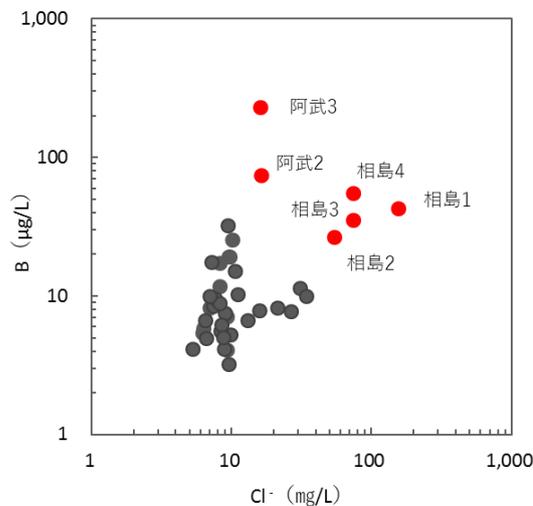


図7 B と Cl^- 濃度の関係

化したため、堆積物は淡水の地下水で満たされる。しかし、地下水の揚水により海水が淡水域まで侵入し、地下水の塩分濃度が上昇することでBが脱着している⁴⁾可能性が考えられる。

2-3 ヒ素 (As)

40地点中1 $\mu\text{g/L}$ 以上が24地点と全体の60%を占めており、中央値も1.45 $\mu\text{g/L}$ と比較的高い濃度となった。(表3, 図5) 最高値は阿東11の32.6 $\mu\text{g/L}$ で、地下水環境基準(10 $\mu\text{g/L}$)を超過していた。なお高濃度を示した地点に地質的な特徴は見られなかった。

地質からのAsの溶出には、pHや酸化還元状態が関与すると考えられることから、AsとpH及びEhの関係を見た。(図8) Asが2 $\mu\text{g/L}$ 以上の地点において、pHは2地点を除いて、中性からわずかにアルカリ側であった。Ehについては、傾向は見られなかった。

Asが地質から溶出する機構として、水酸化鉄に吸着していたAsが還元的な塩基性下において脱着する場合や、黄鉄鉱に含まれるAsが酸化環境下において、黄鉄鉱の酸化分解とともに地下水に溶出する場合などが考えられている⁵⁾。pHはやや傾向はみられたものの、Ehに傾向は見られず、今回の調査結果からも、地点ごとにAsが地質から溶出する機構が異なることが推察できる。

なお、最高値を示した阿東11は、井戸深12mと浅く、井戸の岩相は、流紋岩である。また、As以外にも、アンチモン(Sb)、ウラン(U)が他地点と比較して高濃度であった。(Sb:0.23 $\mu\text{g/L}$, U:0.362 $\mu\text{g/L}$)。As, SbやUが高濃度であることに加え、柱状図や地形等から判断して、流紋岩が熱水による変質作用を受けている可能性が考えられた。

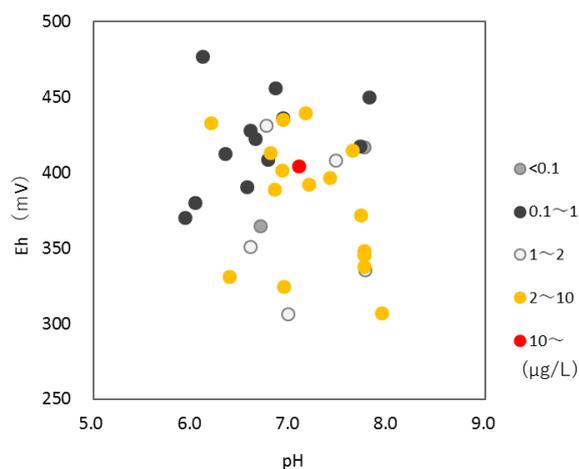


図8 AsとpH及びEhの関係

2-4 バナジウム (V)

40地点中1 $\mu\text{g/L}$ 以上が26地点と多く、最高値は萩12の9.5 $\mu\text{g/L}$ であった。Vが1 $\mu\text{g/L}$ 以上の地点は、井戸の岩相が安山岩・玄武岩が多く、地域別に見ると、相島地区、阿武7、阿武8に高い傾向が見られた。Vは玄武岩や安山岩の岩石の含有量が高く⁶⁾、水-岩石反応により、地下水中のVも高い濃度を示したと考えられる。

相島地区は、Rbも高濃度であったことから、VとRbの関係を見た。(図9)相島地区の4地点及び阿武7は、Rbともに高濃度を示した。一方、萩12はVに対してRbは0.4 $\mu\text{g/L}$ と低く、阿武8は2.4 $\mu\text{g/L}$ と中程度であった。萩12に対して、相島地区、阿武7及び阿武8のRb濃度が高い理由について考察すると、相島地区、阿武7及び阿武8は、アルカリ玄武岩やカルクアルカリ安山岩から構成されている阿武単成火山群⁷⁾に相当する。これらの岩石はK, Rbに富む⁷⁾⁸⁾。また、Vは一般的に玄武岩などの塩基性岩に多く含まれている。以上のことから、VとRb濃度が高いこれらの地点では、これらの玄武岩や安山岩の影響を受けた水質を示していると考えられる。

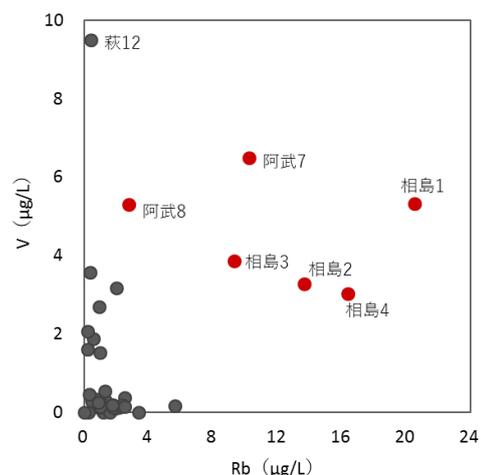


図9 VとRb濃度の関係

2-5 マンガン (Mn)

40地点中1 $\mu\text{g/L}$ 以下が31地点と大部分を占めているが、濃度分布は<0.1 $\mu\text{g/L}$ ~426.9 $\mu\text{g/L}$ と広い。100 $\mu\text{g/L}$ 以上の高濃度を示した地点が2地点(萩3, 厚狭4)あり、最も高濃度であったのは、厚狭4の426.9 $\mu\text{g/L}$ であった。これらの地点の地質的な特徴を見ると、萩3, 厚狭4はそれぞれ、新第三紀中新世、白亜紀の堆積岩の分布域に当たる。

地質からのMnの溶出には、酸化還元電位が関与すると考えられることから、MnとpH及びEhの関係を見た。

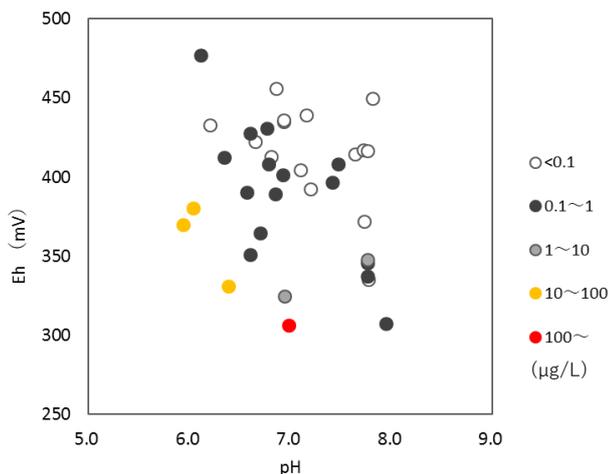


図10 MnとpH及びEhの関係

(図10) Mnが10 $\mu\text{g/L}$ 以上の地点は、pHが中性からわずかに酸性側にあり、Ehは、400 mV以下と低濃度地点と比較して低い傾向であったことから、酸性かつ還元環境下でMnが溶脱した可能性が示唆された。

また、MnはFeと化学的性質が似ていることから、MnとFeの関係を見た(図11)。Fe、Mnともに高濃度の地点(厚狭4、萩3、阿東4、阿東5)やMnに対してFeが高濃度の地点(萩4、萩5、阿武3)、Feに対してMnが高濃度の地点(萩2、萩8)が見られた。Mn、Feともに高濃度の地点の4地点(厚狭4、萩3、阿東4、阿東5)の岩相は、堆積岩あるいは砂岩であり、その要因を考察した。

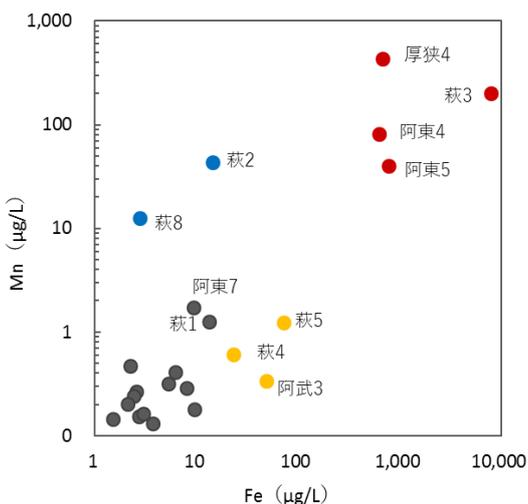


図11 MnとFeの関係

萩3及び厚狭4は、それぞれ新第三紀中新世、白亜紀の砂岩の分布域にあたるが、周辺に磁鉄鉱を含む火山岩が分布していることから、これらを流下した地下水に磁鉄鉱の分解によりFeやMnが溶出した可能性が考えら

れる。

阿東4及び阿東5は、第四紀完新世の堆積物が分布する、河川沿いに位置している。堆積時に生物の活動が想定され、生物の活動により鉄などが凝集したFeやMnに富むノジュール(濃集沈殿物)が形成されている可能性がある⁹⁾。これらのFeやMnに富むノジュールが溶解することにより、Fe、Mnともに高濃度を示したと考えられる。

なお、Mnに対してFeが高濃度の地点(萩4、萩5、阿武3)及びFeに対してMnが高濃度の地点(萩2、萩8)の要因については、今後の検討課題である。

まとめ

山口県内の5地区40地点について、水質特性を明らかにするとともに、地下水成分と地質との関係について考察した。

イオン成分について、ヘキサダイアグラム及びトリリニアダイアグラムを用いて解析を行い、水質特性を把握した。相島地区を除く多くの地点が一般的な浅層地下水のタイプであるI型を示した。相島地区は、地質的影響に加え、海水の混入や施肥の影響から、他地点とは異なる型を示した。

21の金属成分について、濃度分布を把握した。Dsiを除き概ね $\mu\text{g/L}$ レベルであり、DSiは全地点が5 mg/L以上と他元素と比較して高濃度であった。次いでSrが中央値95 $\mu\text{g/L}$ と高い値であった。一方、Co、Ni、Cr、Ge、Se、Sb、Cdは中央値が定量下限値以下と低かった。

Sr、B、As、V、Mnについては、より詳細に考察を行った。金属元素と地質との関係を見ると、Srは、岩相が安山岩の地点に高い傾向が見られ、Vは安山岩や玄武岩の地点に高い傾向が見られた。

AsやMnの地質からの溶出には、pHや酸化還元電位が関係しており、Asが2 $\mu\text{g/L}$ 以上の地点は、pHがわずかにアルカリ側を示していた。Mnは10 $\mu\text{g/L}$ 以上の地点は、pHが中性よりわずかに酸性側を示し、Ehは低濃度地点と比較して低い値であった。また、Bは、高濃度地点の特徴として海水の影響が考えられた。

謝辞

地下水の金属分析法及び主要イオン解析についてご指導・ご助言をいただいた福岡県保健環境研究所水質課石橋融子氏に深謝いたします。

参考文献

- 1) 上水試験法. 2011年度版

- 2) 石橋融子他. 湧水中の溶存態ケイ素濃度と水質, 表層地質との関係. 福岡県保健環境研究所年報. 2012, 第 39 号, p59-65.
- 3) やまぐちの島々—相島. 山口県中山間地域づくり推進課. 2021.1.12.
https://www.pref.yamaguchi.lg.jp/cms/a11500/island/ais_hima.html
- 4) 島田允堯. 自然由来重金属斗による地下水・土壤汚染問題の本質: ホウ素. 応用地質技術年報. 2013, No.32, p29-55.
- 5) 島田允堯. 自然由来重金属斗による地下水・土壤汚染問題の本質: ヒ素. 応用地質技術年報. 2009, No.29, p31-59.
- 6) 輿水達司他. 地球環境変化の健康への影響—地球科学より—. 地球環境. 1997, vol 02, No.2, p215-220.
- 7) 角緑進他. 阿武単成火山群の K-Ar 年代のマグマ活動史. 岩石鉱物科学. 2009, 29, p191-198.
- 8) 小銭大祐, 氏家治. 阿武単成火山群, 片俣地域の火山岩類. 日本岩石鉱物鉱床学会 学術講演会 講演要旨集. 2004, 2004 巻, セッション ID G5-05, p58.
- 9) 田崎和江. 石川県金沢市の田畑におけるノジュールの形成. 河北潟総合研究. 2015, 18, p29-42.