

岡山県備中町地域の地下水の化学成分

妹尾 護

倉敷芸術科学大学教養学部

(1996年9月30日 受理)

1. はじめに

地下水の化学成分は、種々の要因によっても影響を受けるが、基本的には降水や岩石・土壤に由来するものと考えられている¹⁾。したがって、地下水の水質は降水や岩石・土壤の化学組成を直接的に反映しているとみることができる。一般的に、降水が地下に浸透していく過程で、地下水中の CO_2 と岩石との反応、すなわち化学的風化作用により Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SiO_2 などの元素が岩石から溶脱される。その結果、地下水の水質は、流路となる母岩の岩質の違いを反映して各々異なった組成をもつものと思われる。実際、石灰岩地域の地下水は Ca^{2+} に富み(例えば、吉村、井倉²⁾)、また、花崗岩類から構成される地域の地下水であっても、花崗岩と花崗閃緑岩を母岩とする湧水では、それらの水質がそれぞれ異なる^{3, 4)}。それゆえ、地下水の水質を検討する場合には、流路となる母岩の岩石学的特徴を十分に把握しておくことが重要である。

一方、地下水中に比較的多く含まれる Cl^- は岩石自体にほとんど含有されないことから、岩石以外に主な原因を求めなければならない。その起源としては、火山性温泉の混入や人為的な汚染による場合もあるが⁵⁾、海塩(ドライフォールアウト)の関与によるものが一般的である。これは、海水の飛沫が降水中に取り込まれた結果で、海岸付近のみならず内陸部にまでその影響が及んでいる^{6, 7, 8)}。このように、降水中には海塩に由来する成分も含まれることがあるため、地下水の化学成分の起源を解明する際には、海塩の影響がどの程度であるかを理解しておく必要がある。

ところで、地下水はその地下水面の深さによって浅層地下水と深層地下水に大きく二分される⁹⁾。化学成分上、両者の間には顕著な相違点があり、一般に後者は前者に比べて Na^+ 、 HCO_3^- 、 SiO_2 の濃度が高く、それに対して K^+ 、 Ca^{2+} などの元素濃度は低い^{10, 11)}。これは、地下水の水質形成機構が両者の間で本質的に異なることを意味している。したがって、地下水の水質形成について論じる場合には、浅層地下水と深層地下水に区別して、先ずそれらの水質特性を明確にすることが望ましいと考える。

先に筆者は岡山県西部の石灰岩地域からの地下水について、水循環と物質移動に関する報告を行った⁸⁾。しかし、これは石灰岩岩体のみに限定したものであり、岩質が異なる地域からの地下水についてはない。また、対象とした地下水も浅層地下水のみで、深層地下水は含まれ

ていない。本論文では、以上の点を踏まえて、岡山県川上郡備中町地域の地下水を研究対象とした。そして地質学的に異なる地域から深層地下水も含め試料を多数採取し、各化学成分間の相関関係や組成比に基づいて地下水の化学成分の起源を論じた。また、当地域に認められる深層地下水の水質上の特徴を明確にすると共に、その水質形成機構についても言及した。

2. 地下水試料

備中町地域の地下水の水質を明らかにするために、地質学的に異なる地域から10個の試料を分析用に採取した。図1にそれら地下水の試料採取地点を示す。

一般に、地下水は浅層地下水と深層地下水に区分されており⁹⁾、前者は地表面に近いところにあるもので、水位の深さはところによっては10m以上に達することもある。自然湧水は一般的に浅層地下水である。一方、後者は地下20-30mよりも深いところにある地下水で、一般に深井戸として使用されている。備中町で採取された地下水は、ほとんどが表層地下水であり、一部に深層地下水が含まれている。以下、水質分析に供せられた試料の採取地点と周辺の地質について簡単に記述する。なお、地質の記載に関しては、筆者の野外調査によるものであるが、時代区分等については一部の資料を参考にした^{12, 13)}。

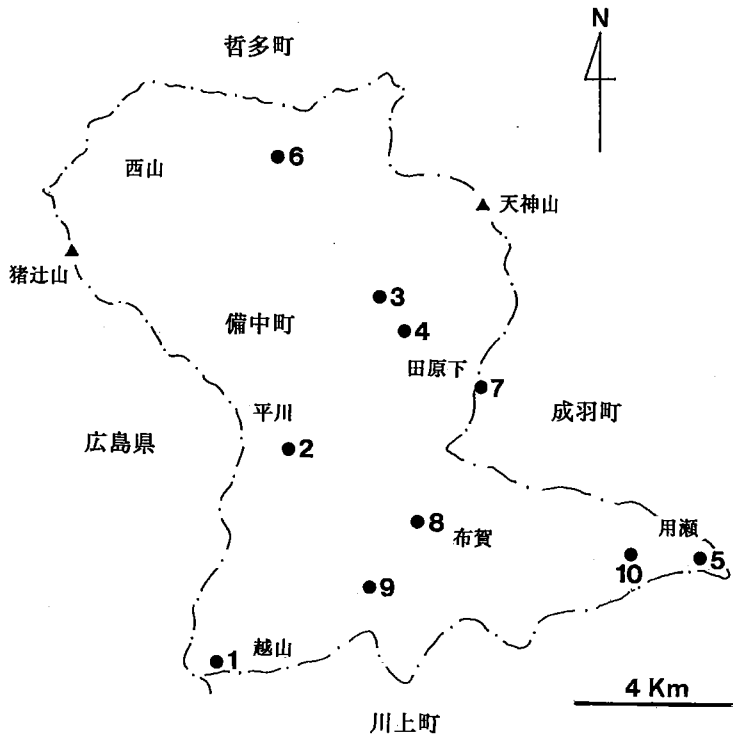


図1 岡山県備中町地域における地下水試料の採取地点
数字は試料番号をさす。

No 1 越山 (中西宅横)

周辺には第三紀の砂岩、礫岩が分布しているが、湧水地点は砂岩から構成されている。岩質的には白色を呈する花崗岩質砂岩である。地下水試料は表層地下水としての自然湧水で、飲料用に使用されている。

No 2 下郷 (稲荷前)

かつては稲荷の背後の石灰岩の割れ目から湧水していたが、金平鉱山 (スカルン鉱物を採掘) の操業と共に水系が寸断されたものと考えられ、現在は涸れている。採取した試料は金平鉱山跡からの湧水を導水したものであり、古生代の石灰岩 (中村石灰岩、時代は石炭紀-ペルム紀¹⁴⁾) を浸透してきた浅層地下水である。現在飲料水として使用されている。

No 3 下谷 (平井宅横)

湧水付近では輝石安山岩の溶岩および凝灰角礫岩 (中生代白亜紀) が分布している。この湧水は浅層地下水であり、飲料用に使用されている。

No 4 入野 (吉井宅)

中生代白亜紀の花崗斑岩からの湧水で、浅層地下水である。飲料水として使用されている。

No 5 用瀬 (神社下)

約300mに達する古生代の石灰岩 (中村石灰岩、時代は石炭紀-ジュラ紀¹⁴⁾) の岩壁下からの湧水であるが、石灰岩の割れ目などを浸透した表層地下水と推定される。飲料水として使用されている。

No 6 高岩 (田辺宅横)

砂岩と凝灰岩で構成される地層 (第三紀層) からの湧水で、表層地下水である。試料採取地点は標高約500mの山頂部付近である。飲料水として使用されている。

No 7 田原下 (西川石材店東)

試料は西川石材店近くの山腹から採取されたもので、古生代の石灰岩 (中村石灰岩、時代は石炭紀-ペルム紀¹⁴⁾) から湧水した浅層地下水である。飲料水として使用されている。

No 8 中長谷 (江草宅)

試料は砂礫層 (沖積層) に約8m掘られた浅井戸からの水で、表層地下水である。以前は飲料水として使用されていた。

No 9 中迫 (前原宅北)

湧水付近には輝石安山岩の溶岩や閃緑岩 (中生代白亜紀) が分布している。試料は表層地下水としての自然湧水で、飲料用に使用されている。

No10 丸山 (岡本宅)

試料は約40m程度掘られた深井戸からの深層地下水である。付近には粘板岩や砂岩で構成される古生代の堆積岩類 (石炭紀-ジュラ紀) が分布しているが、この井戸は粘板岩層にボーリングされたものである。現在はパイプ等で導水され、飲料用に使用されている。

3. 分析方法ならびに分析結果

(1) 分析方法

地下水の水温とpHは、採水時に標準温度計と携帯用pHメーター（堀場製）を用いて測定した。化学成分（ Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} ）の濃度については（財）岡山県環境保全事業団に分析依頼した。分析方法は、陽イオンでは原子吸光法、フッ素を除く陰イオンではイオンクロマト法を用いた。フッ素は蒸留した後、吸光光度法で分析された。

(2) 分析結果

水温（Tw）、pHと共に化学成分の分析定量結果を表1に示す。なお、試料No8およびNo9については、井戸からパイプ等で導水されたものを採取したので、やや水温が高く、本来の温度を示していない可能性がある。したがって、この表にはそれらの測定値を記していない。以下、水温、pHおよび化学成分についての特徴を述べておく。

1) 水温

測定は6月および8月に行われたものであるが、13–17℃の範囲であった。この中で、No7の試料は13℃と最も水温が低い。榎根¹⁵⁾によれば、地下水（表層地下水）の水温はその場所の年平均気温より1–2度高いのが一般的である。本研究の地下水採取地点に近い岡山県高梁市の年平均気温が13.4℃（高梁市役所による公表値）であることから、当地域の地下水の水温もこの関係を示しているとみてよい。

2) pH

pH値は6.3–8.0であるが、石灰岩地域からの地下水（Nos.2,5,7）ではその値が特に大きく（7.5–8.0）、弱アルカリ性を示す。ただし、試料No10は石灰岩地域の地下水ではないが、pHは7.9と比較的高い。この試料は本研究における唯一の深層地下水であり、このことがpH値にも関係しているものと思われる。なお、詳細については後で議論する。

表1 岡山県備中町地域の地下水の水質分析結果

Sample No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Date (1994)	6/7	6/7	6/7	6/7	8/10	8/10	8/10	8/10	8/10	8/10
Tw (°C)	17	16	15	16	16	16	13	—	14	—
pH	6.4	7.6	7.0	7.2	7.5	7.3	8.0	6.3	6.0	7.9
Na^+	9.00	7.40	10.9	10.0	5.50	3.15	7.55	12.5	8.85	20.0
K^+	1.04	1.52	1.06	0.71	0.46	1.98	0.51	2.28	0.38	0.20
Mg^{2+}	1.60	2.50	4.60	1.90	2.05	0.14	1.85	4.20	5.20	2.45
Ca^{2+}	10.4	41.4	15.4	14.1	55.0	0.51	25.9	20.9	13.4	8.16
F^-	0.09	0.06	0.06	<0.05	0.20	0.11	0.14	0.21	0.18	0.64
Cl^-	3.63	6.26	5.74	5.38	3.08	1.84	2.84	6.58	4.66	3.65
NO_3^-	0.98	5.36	7.97	4.53	1.88	0.31	1.65	4.35	2.45	2.41
SO_4^{2-}	8.27	8.11	0.88	1.76	10.7	1.99	11.8	9.94	2.34	5.59

化学成分の濃度はppm。

3) 化学成分

各化学成分の濃度は、 Na^+ :3.2–20.0, K^+ :0.2–2.3, Mg^{2+} :0.1–5.2, Ca^{2+} :0.5–55.0, F^- :<0.05–0.64, Cl^- :1.8–6.6, NO_3^- :0.3–8.0, SO_4^{2-} :0.9–11.8ppmである。これらの値は、地理的に限られた地域の中でも各化学成分の濃度に大きな差異があることを示している。ここで、特徴的な性格をもつ試料についてみてみると、試料Nos.2, 5, 7は Ca^{2+} 濃度が高く、最大で55ppmに達することがわかる(表1)。これらは石灰岩地域の地下水であり、その水質形成に石灰岩が関与しているものとみなされる。それに対して、No6の試料は全般的に化学成分の含有量が少なく、陽イオンでは Na^+ , Mg^{2+} そして Ca^{2+} , また陰イオンでは Cl^- や NO_3^- 濃度が他の試料に比べて著しく低い(硬度:1.8ppm)。化学成分的には降水の組成¹⁾に類似している。さらに、本研究で唯一の深層地下水である試料No10も他とは際だった特徴を有している。すなわち、 Na^+ や F^- を多く含む一方で、 K^+ や Ca^{2+} 濃度が低い。この中で、注目すべきは F^- 含有量で、他の試料が約0.2ppm以下と低いのに対して、その値は0.64ppmときわめて高い。一般的に F^- は地下水中に0.1–0.2ppm程度しか含まれないことから¹⁶⁾、この試料は特異な地下水であるといえよう。

図2は Ca^{2+} , Mg^{2+} そして($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)の各3者間の当量百分率を表す三角ダイヤグラム上に分析結果をプロットしたものである。この図からも先に述べた各試料の化学成分上の特徴が明確にみとれ、大きく3つのグループに分類されることがわかる。すなわち、 Ca^{2+} に富むグループ(Nos.2,5,7)、 Mg^{2+} 含有量は異なるものの Ca^{2+} と($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)をほぼ等量含むグループ(Nos.1,3,4,8,9)そして($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)に富むグループ(Nos.6,10)である。これらは、水質的には目下¹⁷⁾によるカルシウム型、複合型そしてナトリウム型にそれぞれ相当する。

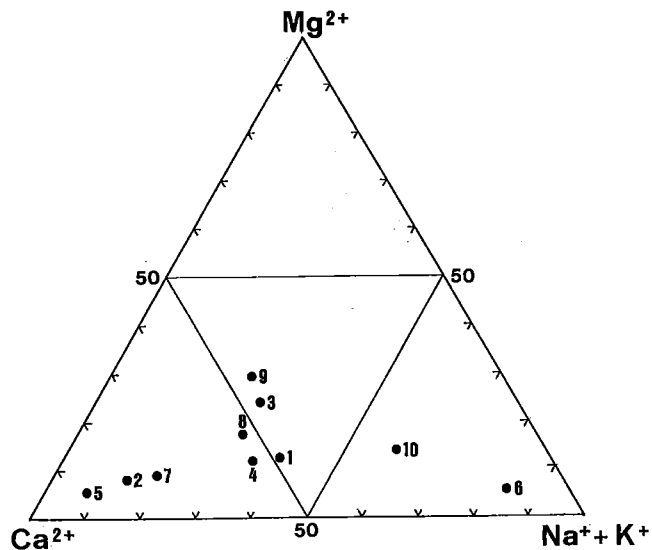


図2 地下水の Ca^{2+} – Mg^{2+} –($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)三角ダイヤグラム(当量百分率)
数字は試料番号をさす。

4. 考察

(1) 地下水の化学成分の起源

図2の $\text{Ca}^{2+}-\text{Mg}^{2+}-(\text{Na}^++\text{K}^+)$ 三角ダイアグラムに示されているように、岡山県備中町地域の地下水の化学成分は広範囲な組成をもつ。では、どのような要因によって地下水の化学成分は決定されたのであろうか。一般的に、地下水の水質は、1) 降水による成分、2) 地下水と周辺を構成する岩石や土壌との相互作用、3) 人為的な汚染、4) 鉱泉水や温泉水の混入、などによって影響を受けるものと考えられている（例えば、半谷、小倉⁵⁾）。しかしながら、本研究地域では周辺環境の状況から人為的な汚染については無視できるものと判断され、また、付近には鉱泉水や温泉も存在しない。したがって、ここでは1)と2)について検討を行い、化学成分の起源の解明を試みる。

地下水中の化学成分の起源の解明に際しては、各成分間の相関関係を調べてみると理解しやすい場合が多い¹⁸⁾。表2はこの目的で求められた備中町地域の地下水の各成分についての相関係数である。ただし、分析値の中で、No10の試料は深層地下水であり、後で議論されるように、他の試料（浅層地下水）とは水質形成の機構が異なると考えられるため、相関係数の計算からは除外した。また、化学成分の中で、 NO_3^- 濃度は生物活動による消長の影響を受けやすいため²⁾、この成分についても計算から除外した。

表2から、 Na^+ と Cl^- の間には正の相関があることがわかる ($r=0.80$, $p<.01$)。これは、 Na^+ や Cl^- が NaCl として地下水中に含有されていることを示唆している。地下水に含まれる NaCl の起源としては、大気中に放出された海水飛沫としての海塩（ドライフォールアウト）、人為的な汚染、また火山性の温泉水の混入などが指摘されている⁵⁾。既に述べたように、本研究地域では人為的な汚染の影響はないものと判断されることや、周辺には温泉も存在しないことから、地下水中の NaCl は降水から供給されたものが含まれているものと推定される。すなわち、海水の飛沫である海塩が風によって運ばれ、最終的に降水中に取り込まれた場合が最も理解しやすい。これは、海水を構成する陽イオンの中で、 Na^+ の次に多く含有される Mg^{2+} が Cl^- と正の相関 ($r=0.68$, $p<.05$) をもつことと矛盾しない。そこで、海塩の寄与の

表2 地下水中の各化学成分間の相関係数

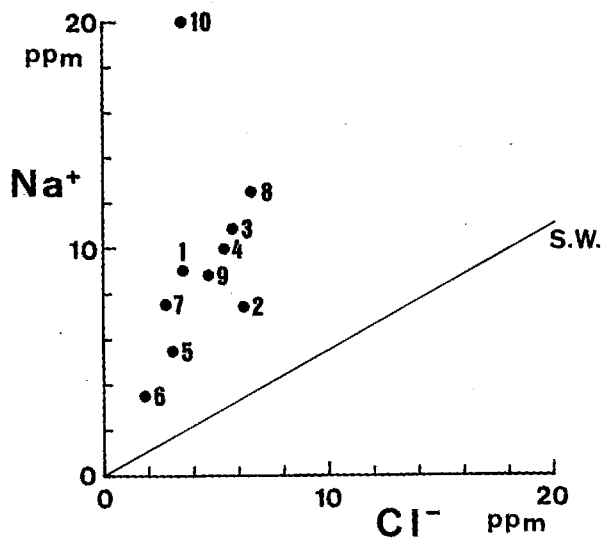
	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	F^-	Cl^-	SO_4^{2-}
Na^+	1.00						
K^+	0.07	1.00					
Mg^{2+}	0.71*	-0.13	1.00				
Ca^{2+}	-0.13	-0.27	0.04	1.00			
F^-	-0.14	-0.13	0.17	0.48	1.00		
Cl^-	0.80**	0.25	0.68*	0.13	-0.23	1.00	
SO_4^{2-}	-0.03	-0.01	-0.18	0.63	0.52	-0.11	1.00

*: $P<.05$, **: $P<.01$

表3 化学成分の濃度および濃縮係数の平均値

	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
Content(ppm)	8.32	1.10	2.67	21.9	0.19	4.45	6.20
Concentration coefficient	3.4	12.4	8.8	234	624	-	10.0

程度をみるために、海水に対する各元素の濃縮係数を求めた(表3)。これは、 $(M/C1)_{試料} / (M/C1)_{海水}$ で表現され¹⁾、MおよびC1は、それぞれ試料と海水中の各元素イオンとCl⁻の濃度である。濃縮係数が1であれば海塩の関与のみを受けたことになり、一方その値が1より大きければ海塩以外の要因も作用していることを意味する。表3では、各元素の濃縮係数の平均値は1よりかはるかに大きく、最も小さいNa⁺の場合でも3.4となる。それゆえ、地下水中のCl⁻が仮にすべて海塩に由来したとしても、Na⁺の濃度はそれだけでは説明できない。このことは、図3のNa⁺とCl⁻の関係図からもいえることで、分析値が海水の化学組成を示す直線上(図中のS.W.)にプロットされず、それから大きく離れている。無論Na⁺以外の元素についても、濃縮係数は1よりかはるかに大きく、特にCa²⁺やF⁻の場合ではその値がきわめて大きい。したがって、地下水中の各成分は海塩以外に主な起源を求めなければならない。ここで、地下水中のCl⁻がすべて海塩に起源をもつものと単純に仮定すると、Na⁺の濃縮係数の平均値から海塩の寄与率は約30%程度と見積られるが、地下水中のCl⁻も岩石から一部溶出するであろうから(例えば、半谷, 小倉⁵⁾)、実際の海塩の寄与率はこの数値よりかなり低いであろう。後藤¹⁹⁾は岩手県の地下水の研究の中で、降雨および潮風によって地上に落下する

図3 地下水についてのNa⁺-Cl⁻関係図

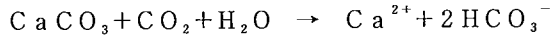
数字は試料番号をさす。図中の直線(S.W.)は海水の化学組成¹⁾(Na:Cl=0.553:1)。

海塩起源の Cl^- 量を調べ、その量が海岸から内陸部へと指数関数的に減少することを明らかにした。当地域の場合でも海岸から40–50kmも内陸部に位置するために、海塩の影響は小さかったであろう。いずれにしても、岡山県備中町地域の地下水の水質形成には、海塩の影響は小さく、その他の要因、つまり地下水と流路付近の岩石との反応（化学的風化作用など）が主に関係しているものとみてよい。

(2) 地下水の水質と岩質との関係

先に述べたように、岡山県備中町地域の地下水の化学成分には地下水と岩石との反応が大きく関わっているものと考えられる。そこで、岩質の違いが地下水の化学成分にどのように反映されているか以下考察してみよう。

先ず図2の $\text{Ca}^{2+}-\text{Mg}^{2+}-(\text{Na}^++\text{K}^+)$ 三角ダイアグラムにおいて、 Ca^{2+} に富むグループ (Nos.2,5,7) は石灰岩地域からの地下水であることから、次式のような石灰岩の溶解反応を考えればよい。



ただし、この式から明らかなように、石灰岩の溶解反応が進行するためには地下水は高い CO_2 分圧をもつ必要がある。通常地下水中の溶存 CO_2 は、降水が地下へ浸透する際土壌空間と接触することによって供給される²⁰⁾。実際、Pitman²¹⁾ によるイギリスのYorkshireチヨークからの地下水では、最大で $10^{-1.3}$ 気圧の高い CO_2 分圧が報告されている。この値は大気中のその分圧 ($10^{-3.5}$ 気圧) よりも100倍以上高い。本研究地域の石灰岩由来の地下水についても、高い CO_2 分圧を示すことが妹尾⁸⁾ によって明らかにされており、その推定値は $10^{-2.5}-10^{-3.1}$ 気圧の範囲である。しかしながら、No 7 の試料は石灰岩地域からの湧水にもかかわらず、 Ca^{2+} 濃度が他の試料と比較して低い (27ppm)。この地下水は推定された CO_2 分圧が $10^{-3.1}$ 気圧とやや低く⁸⁾、そのために石灰岩を十分に溶解することができなかった可能性が大きい。ところで、Nos.2,5,7の各試料は Mg^{2+} を少量含むために、図2では $\text{Ca}^{2+}-(\text{Na}^++\text{K}^+)$ 辺上にプロットされない。これは、石灰岩中に一部ドロマイトが含まれていたり、また、岩体中に非炭酸塩岩が挟在されることなどに帰因するのかもしれない。

次に図2の (Na^++K^+) に著しく富むNo 6 の試料についてみてみよう。この試料は砂岩や凝灰岩で構成される地域の地下水であるが、硬度は1.8ppmとミネラル成分にきわめて乏しい。化学成分的には降水の組成¹⁾ に酷似している。砂岩や凝灰岩は透水性がよいことや、試料採取地点が標高の高い山頂部付近であることから判断して、降水が周辺の岩石とほとんど反応することなく流出したものと推測される。この点では典型的な山水といえる。

最後にNos.1,3,4,8,9の試料についてであるが、これらの地下水は、 $\text{Ca}^{2+}/(\text{Na}^++\text{K}^+)$ が0.45–0.55と、両成分をほぼ同程度含む (図2)。しかしながら、 Mg^{2+} の値に関しては試料間の組成差が大きく、その中でNo 3 およびNo 9 がより Mg^{2+} に富む。両試料とも安山岩や閃緑岩の中性火成岩類で構成された地域からの地下水である。それに対して、 Mg^{2+} 値が小さいNos.1,4,8の各試料は、それぞれ砂岩、花崗斑岩そして砂・礫を主とする沖積層からの地下水で

ある。したがって、岩質の相違が地下水中の化学成分にも反映されているとみることができよう。この関係は、玉利ら²²⁾による岩質の異なる天然の岩石を用いた溶出実験の結果を参考にすると、より一層明瞭である。すなわち、花崗岩や流紋岩などの酸性火成岩類や砂岩を使用した実験では、溶出成分の $Ca^{2+} / (Na^{+} + K^{+})$ はやや広範囲な値をもつものの、 $Ca^{2+} - Mg^{2+} - (Na^{+} + K^{+})$ 三角ダイヤグラム上で、 Mg^{2+} 値が約20%以下と低く、一方、安山岩では（本研究地域のもとは類似した輝石安山岩についてのデータ）その値が25-45%と高い。このように、岩石から溶出する化学成分の組成比は、岩質の違いによって系統的に異なるものと考えられる。そこで、玉利ら²²⁾の実験結果と備中町地域の地下水の化学組成を比較検討してみる。図4はそのために作成された $Ca^{2+} - Mg^{2+} - (Na^{+} + K^{+})$ 三角ダイヤグラム（当量百分率）である。図から、No3とNo9の両試料は安山岩から溶出する成分の組成領域（図中のA）に位置することがわかる。ただし、これら両試料については、既に触れたように、湧水地点付近の構成岩石種をやや異にしている。すなわち、No3は安山岩のみから成る地域の地下水であるのに対して、No9は安山岩と閃緑岩で構成される地域の地下水である。つまり、この試料は安山岩のみを母岩とした地下水ではない。しかしながら、一般に閃緑岩と安山岩は岩石の化学組成でみれば互によく似ていることから、No9の試料も図の安山岩の領域にプロットされたものとみてよい。さらに、図4のNo4の試料についても、その化学組成が実験的に得られた花崗岩や流紋岩からの溶出成分の組成比（図中のGRで示された範囲）とよく一致している。この地下水の母岩は花崗斑岩であり、岩石の化学組成は花崗岩や流紋岩に近い。そのために、

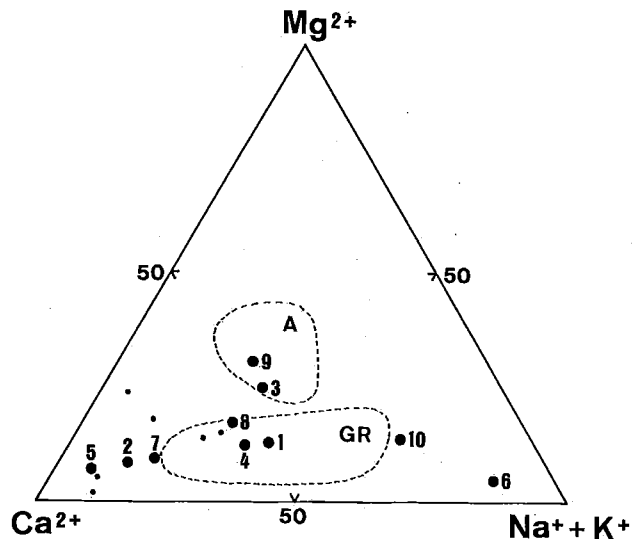


図4 岡山県備中町地域の地下水の化学成分比と天然の岩石を用いた溶出実験結果²²⁾との比較
 黒丸は岡山県備中町地域の地下水（数字は試料番号）。他は玉利ら²²⁾による天然の岩石を用いた溶出実験結果（A：安山岩，GR：花崗岩・流紋岩，小黑丸：砂岩）。

実験結果と同様な化学成分比をもつようになったものと推測される。一方、No 1 の試料については、砂岩を用いた実験結果（図中の小黑丸）と一致しない。実験で使用された砂岩は多種類に及ぶが、その中でいって言えば、アルコース質砂岩から溶出する成分の組成比に近似する。地下水の湧水付近の岩石が岩質的には花崗岩質砂岩（アルコース質）であることから、このような傾向を示すようになったものであろう。この点では、むしろ花崗岩地域の地下水に類似した性格をもつものといえる。同様に、No 8 の試料も砂・礫で構成される沖積層の地下水ではあるが、花崗岩由来の砂や礫が多く含まれるために、花崗岩から溶出する成分の組成比とよく一致しているのであろう。したがって、地下水と岩石との反応、つまり化学的風化作用によって、地下水中に溶出する化学成分量および成分比は、その母岩となる岩石と密接な関係があり、岩質が地下水の水質を決める大きな役割を演じているものと結論される。

なお、No10の試料についてはここで触れていない。この地下水は本研究における唯一の深層地下水であり、既述のように浅層地下水とは化学成分上大きく異なる特徴をもつ。それゆえ、水質形成の機構も含めて、後で別に考察を行うものとする。

(3) 深層地下水の水質形成

本研究では、No 1—No 9 の各試料が浅層地下水であるのに対して、試料No10のみが深層地下水である。先に述べたように、両者の間には化学成分上いくつかの顕著な相違点が存在する。したがって、ここでは化学成分の差異を生じた原因、特に深層地下水の水質形成の機構について検討してみる。

一般的に、深層地下水は浅層地下水に比べて、1) pH値が高く、アルカリ性を呈する場合が多い、2) Na^+ や HCO_3^- 濃度が高い（ NaHCO_3 型地下水）、3) K^+ 、 Ca^{2+} 等の元素濃度が高い、などの特徴を示す^{5, 10, 16)}。無論、No10の試料もこの特徴と合致した性格を有している。すなわち、pH値は7.9で、石灰岩地域の地下水（Nos.2,5,7）を除くと、他の浅層地下水よりは大きい。また Na^+ も多く含有されている上、No1—No9の試料にみられる傾向とは大きく異なり、 Na^+/Cl^- が著しく高い（図3）。含有量の相違はあるが、日下ら¹⁰⁾による兵庫県、神戸層群中の浅層地下水と深層地下水についての濃度関係と基本的に一致する。これは、両地下水の水質形成機構が本質的に異なることを意味している。

通常、地下水は岩石や土壌を浸透して行く過程で、その中に含まれる長石類などのケイ酸塩鉱物と化学反応を起こす（化学的風化作用）。この際、ケイ酸塩鉱物から Na 、 K 、 Mg 、 Ca が陽イオンとして、 Si が SiO_2 として溶出し、同時に粘土鉱物が生成される¹⁾。一般に認められる浅層地下水の水質特性はこのようにして形成されたものであろう。しかしながら、化学的風化作用によって生ずるであろう地下水の HCO_3^- 濃度やpH値の上昇が、深層地下水の特徴と合致するにしても、他の化学成分の説明には無理がある。なぜなら、化学的風化作用が進行すると、地下水中の Na^+ 、 K^+ そして Ca^{2+} 濃度は高くなるが、実際の深層地下水では Na^+ に富むの対し、 K^+ や Ca^{2+} が乏しいからである。ところで、粘土鉱物は地下水中の化学成分と陽イオン交換反応を起こすことが知られている^{5, 11, 23)}。粘土鉱物による陽イオン交換反

応では、地下水中の主要化学成分についてみると、 Na^+ のイオン交換選択性が最も小さい²³⁾。したがって、地下水と既に存在していた粘土鉱物が接触するような場合には、地下水中の陽イオン (K^+ , Ca^{2+} など) と粘土鉱物に吸着されていた Na^+ が交換され、結果的に地下水は Na^+ に富み、一方 K^+ や Ca^{2+} に乏しくなることが期待される。本研究においても、試料No10は粘板岩層からの地下水であり、鉱物種の同定は行っていないが、顕微鏡観察によると粘土鉱物が多く含まれている。また、化学成分上、 Na^+ に富むのに対し、 K^+ や Ca^{2+} に乏しい。よって、当地域の深層地下水は、粘土鉱物によるイオン交換反応の結果、浅層地下水とは異なった化学成分をもつようになったものと考えられることができる。

分析結果の項で触れたように、No10の試料は高い F^- 濃度を示す (0.64ppm)。他の試料 (No1-No9) ではその濃度が約0.2ppm以下であることから、この点においても深層地下水の水質は浅層地下水のそれと異なる。高 F^- 濃度をもつ地下水の存在は兵庫県六甲山地の花崗岩地帯にも知られており (最大で約6ppm)、 F^- は花崗岩中の黒雲母から溶出したことが明らかになっている^{24, 25)}。一方、後藤¹⁶⁾は岩手県の盛岡市や花巻市の地下水の研究において、深層地下水が浅層地下水に比べて高い F^- 濃度をもつことを報告した。この傾向は本研究の深層地下水と浅層地下水の関係にもよく当てはまる。後藤¹⁶⁾によれば、深層地下水中の F^- 含有量と過剰 Na^+ 含有量 (海塩起源の Na^+ の影響を取り除くために、 NaCl としての Na^+ 含有量を差し引いた値) との間に非常に強い正の相関 ($n=73$, $r=0.93$) が認められることから、 F^- は Na^+ と共にイオン交換反応に伴って粘土鉱物から溶出したものと解釈されている。本研究においても、 F^- 濃度が高いNo10の深層地下水は、先に述べたようにその水質形成に粘土鉱物の関与が推定されているため、このモデルによって説明できるかもしれない。しかしながら、深層地下水の試料数が少ないことから、現時点ではこれ以上の議論は不可能である。今後、地下水の母岩となる粘板岩の F 含有量の定量と共に、岩質の異なる地域からの深層地下水を検討する必要がある。

引用文献

- 1) 北野康：地球環境の化学，裳華房，(1984)
- 2) 吉村和久，井倉洋二：石灰岩地域秋吉台における水循環と地下水水質の形成，地下水学会誌，34，183-194 (1992)
- 3) 日下謙，佐川直史：六甲山系河川水の水質，日本化学会誌，12，2322-2327 (1974)
- 4) 吉岡龍馬：六甲山系の地下水の水質特性について，地下水学会誌，26，147-166 (1984)
- 5) 半谷高久，小倉紀雄：水質調査法 (第3版)，丸善 (1995)
- 6) 吉村和久，榎谷俊和：福岡県平尾台の地下水の化学成分，洞窟学雑誌，4，48-56 (1979)
- 7) 吉村和久，榎谷俊和：山口県秋吉台の地下水の化学成分，秋吉台科学博物館報告，(15)，1-14 (1980)
- 8) 妹尾護：岡山県西部の石灰岩地帯からの地下水の化学成分，吉備国際大学社会学部研究紀要，6，57-68 (1996)
- 9) 地下水を守る会：やさしい地下水の話，北斗出版 (1993)
- 10) 日下謙，福井要，辻治雄，玉利祐三，藤原儀直：第三紀神戸層群地下水の水質，陸水学雑誌，43，254-262 (1982)

- 11) Tamari, Y., Inoue, Y., Tsuji, H. and Kusaka, Y. : An analysis of chemical compositions of ground waters utilizing a leaching technique : An application to the Rokko mountains and their surroundings, Bull. Chem. Soc. Jpn., 55, 3760-3765 (1982)
- 12) 建設省中国地方建設局：中国地方土木地質図（20万分の1）および同解説書（1984）
- 13) 日本の地質「中国地方」編集委員会：日本の地質7「中国地方」，共立出版（1987）
- 14) 吉村典久：中国地方中部大賀台地の古生層の層序と構造，広島大学地学研究報告，10，1-36（1961）
- 15) 榎根勇：地下水の世界（NHKブックス），日本放送出版協会（1992）
- 16) 後藤達夫：地下水中のフッ素の化学的挙動について（1），水，37，22-32（1995）
- 17) 日下讓：名水を科学する，化学，40，159-184（1985）
- 18) 森井ふじ，小林純，三宅幸子：陸水の化学的研究，農学研究，59，171-188（1982）
- 19) 後藤達夫：岩手県の地下水—その水質（2）—，水，35，63-72（1993）
- 20) Drake, J.J. and Wigley, T.M.L. : The effects of climate on the chemistry of carbonate groundwaters, Water Resour. Res., 11, 958-962 (1975)
- 21) Pitman, J.I. : Carbonate chemistry of groundwater from chalk, Givendale, East Yorkshire, Geochim. Cosmochim. Acta, 42, 1885-1897 (1978)
- 22) 玉利祐三，辻治雄，日下讓：岩質と陸水の水質との関係—岩石の溶出実験による解析—，地球化学，22，139-147（1988）
- 23) 日本土壤肥科学会編：土壤の吸着現象，博友社（1985）
- 24) Tsurumaki, M. and Sakuramoto, Y. : Genesis of high fluoride water in the Rokko Mountains, Hyogo Prefecture, Japan, Jour. Geosci. Osaka. Univ., 20, 1-17 (1976)
- 25) 鶴巻道二，桜本勇治：近畿地方における高フッ素地下水の起源について，地下水学会誌，27，1-16（1985）

Chemical Components of Groundwaters from Bicchu District, Okayama Prefecture

Mamoru SENO

College of Liberal Arts and Science,

Kurashiki University of Science and the Arts,

2640 Nishinoura, Turajima-cho, Kurashiki-shi, Okayama 712, Japan

(Received September 30, 1996)

Groundwaters from Bicchu district, Okayama Prefecture were measured temperature, pH, and contents of Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , F^- , Cl^- , NO_3^- and SO_4^{2-} . In these waters, the correlation between chemical components was examined to elucidate their origin. It follows that the chemical components of groundwaters are contributed by rain water containing considerable amount of Na^+ and Cl^- as dry fallout. Its effect, however, is small. Consequently, it was considered that chemical components of groundwaters were introduced from surrounding rocks through chemical reaction between them.

There is an intimate relationship between the content of chemical components and rock type. This indicates that quality of groundwater is affected by its surrounding geology.

Deep groundwater shows distinctive chemical features compared to shallow one. In particular, both contents of Na^+ and F^- of it are much higher than those of shallow groundwater. This seems to be responsible for ion exchange reaction by clay minerals during infiltration of water. It is, therefore, concluded that the origin of chemical components of shallow and deep groundwaters is essentially different.