

愛媛県下の地質分類による源泉特性

山竹定雄 望月美菜子 松原 洋 浅井忠男 井上博雄

The Characteristics of the Spring Sources by the Geological Classification in Ehime Prefecture

Sadao YAMATAKE, Minako MOCHIZUKI, Hiroshi MATSUBARA, Tadao ASAI, Hiroo INOUYE

The geology in Ehime Prefecture is classified according to the central geological structure line, the Mikabu geological structure line, and the Butsumuzou geological structure line. The each geological structure belt is called the Ryouke belt, the Sanbagawa belt, the Chichibu belt, and the Shimanto belt, in order from north to south.

We investigated the effect of the geology on physico-chemical characters of springs which were based on the date of 59 spring sources analyzed from 1993 to 2000.

The results were as follow ;

- 1 Spring sources of the Ryouke belt has been classified into deep groundwater type of Na-HCO₃ type and fossil sea water type of Na-Cl type.
- 2 Spring sources of Sanbagawa belt belonged to fossil sea water type of Na-Cl type.
- 3 Spring sources of Chichibu belt belonged to deep groundwater type of Na-HCO₃ type.
- 4 Spring sources of Sanbagawa belt has been classified into deep groundwater type of Na-HCO₃ type and fossil sea water type of Na-Cl type.

Keyword : spring source, geological structure belt, depths groundwater type, fossil sea water type

はじめに

愛媛県は、四国の北西部に位置し北は瀬戸内海に望み南を四国山脈の山岳地帯にさえぎられる東西に長い地形となっている。

日本列島は 2 回の造山運動によっていくつかの帯状構造が発達しているが、当県もその影響を受け地質的に中央構造線と呼ばれる大断層を境に北側を内帯、南側を外帯と大別される^{1,2)}。

内帯には領家地質構造帯（以下「領家帯」という。）と呼ばれる地質構造帯のみが位置し、外帯側はみかぶ線、仏像線の地質構造線により、北から三波川地質構造帯（以下「三波川帯」という。）、秩父地質構造帯（以下「秩父帯」という。）、四万十地質構造帯（以下「四万十帯」という。）に分類され、年代的にも古生代から新生代まで約 4 億年もの長期にわたって形成されてきた。

このように、地形的、地質的にも変化に富んでいる県下 150 余源泉の内、最近 8 年間に当所で実施した分析結果をもとに今後の温泉資源保護、適正利用の基礎資料とするため、各地質構造帯別に分類し地質と泉質の関連を

調査したところ、若干の知見を得たので報告する。

愛媛県の地質と源泉の分布

図 1 に愛媛県の地質略図³⁾と源泉の分布状況を示した。領家帯は、白亜紀を示すといわれる黒雲母花崗岩、花崗閃緑岩等の領家花崗岩類や高温低圧条件下の片麻岩を主とする領家変成岩類、又最後期白亜紀の堆積物よりなる和泉層群、170 万年以後の堆積物が不整合に覆う第四系が分布している^{3,4)}。

三波川帯は、白亜紀の低温高圧条件下の結晶片岩からなる三波川変成岩類や超塩基性岩類から構成されており、三波川帯の中央部には石鎚山第三系が位置し、新第三紀に活動した火山岩類を主体とする石鎚層群と古第三紀の石屑岩を主体とする久万層群が分布している^{3,5)}。

秩父帯は、石炭紀以降の砂岩、粘板岩等からなるが、三波川変成作用を受けているとも言われる。三波川帯との境界部にはみかぶ緑色片岩類が東西方向に分布し、秩父帯の中程には変成岩類、石灰岩等で構成される黒瀬川構造帯がある^{3,4)}。

四万十帯は、白亜紀から第三紀中頃までの変形を強く受けた砂岩、泥岩を主とする地層が分布し、高月山周辺

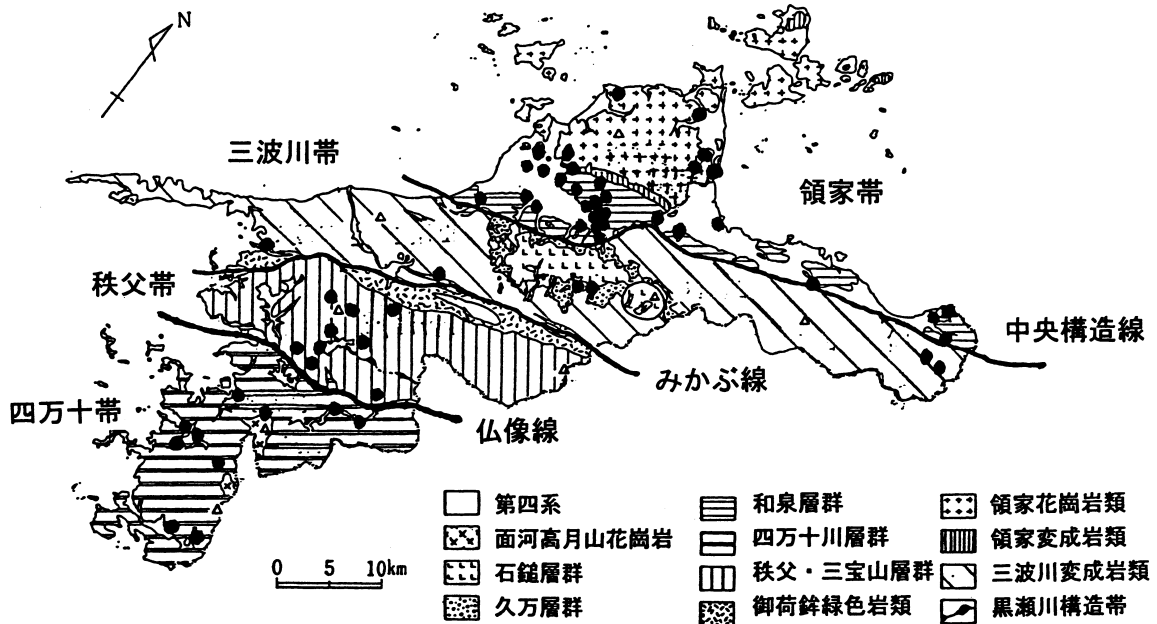


図1 愛媛県の地質と源泉分布状況

には新花崗岩類が貫入している^{3,4)}。

源泉の地質構造帯別分布状況を見ると、領家帯は日本最古の温泉を有する道後郷を中心に34源泉が、三波川帯は東西に散在する6源泉、秩父帯は黒瀬川構造帯を取り巻く9源泉、四万十帯は広域に渡る10源泉が分布している。

調査方法

平成5年4月から平成13年3月までの8年間に、鉱泉分析法指針⁶⁾に基づき実施した鉱泉中分析のうち鉱泉に該当した59源泉(領家帯34源泉・三波川帯6源泉・秩父帯9源泉・四万十帯10源泉)の化学的成分等を地質構造帯別に分類して統計処理を行った。

なお、2源泉以上の混合泉14箇所は今回の調査対象から除外した。

結果および考察

鉱泉は、温泉法第2条別表に従い常水と区別すると規定されており、又鉱泉分析法指針により鉱泉のうち特に治療の目的に供しうるものを療養泉とすると定義づけられている。今回の調査対象59源泉で鉱泉あるいは療養泉に該当した項目の定義を表1に示した。

1 地質構造帯別の鉱泉該当度数分布

調査対象59源泉について、地質構造帯別に鉱泉定義に該当した1源泉当たり項目数の度数分布を図2に表した。

図から分かるように、1源泉当たりの鉱泉該当項目が3種類以上あったのが領家帯では24源泉、四万十帯は6源泉で、特に領家帯では4割近い12源泉において該当項目が5～6種類あり良質の源泉と言えるであろう。

一方、秩父帯は7源泉が該当項目1～2種類と該当項

表1 鉱泉及び療養泉の定義

鉱泉の定義		療養泉の定義	
1. 温度 (源泉から採取されるとき温度) 25℃			
2. 物質 (下記にあげるものうち、いずれか1つ)			
物質名	含有量(1kg中)	物質名	含有量(1kg中)
溶存物質 (ガス性のものを除く)	mg以上 総量 1000	溶存物質 (ガス性のものを除く)	mg以上 総量 1000
CO ₂	250	総S	2
Li ⁺	1	Rn	3×10 ⁻⁹ Ci(1.11×10 ⁻⁷ GBq)以上 (8.25ME単位以上)
Sr ²⁺	10		
Ba ²⁺	5		
総Fe	10		
Br ⁻	5		
I ⁻	1		
F ⁻	2		
総S	1		
HBO ₂	5		
H ₂ SiO ₃	50		
NaHCO ₃	340		
Rn	2×10 ⁻⁹ Ci(7.4×10 ⁻⁸ GBq)以上 (5.5ME単位以上)		

(鉱泉分析法指針より今回調査した源泉の該当項目のみ抜粋)

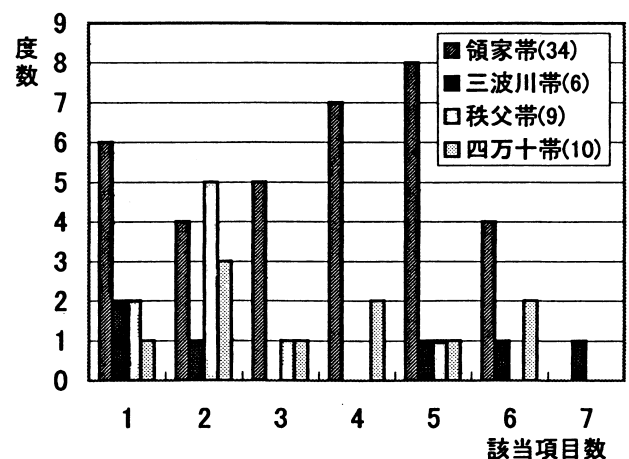


図2 鉱泉該当項目度数分布

目の少ない源泉が目立った。また三波川帯は3源泉が該当項目2種類以下で、残り3源泉の該当項目は5種類以上と両極性を示した。

2 泉温及び各成分

今回、表2の鉱泉及び療養泉該当数と表3の成分濃度の平均値及び標準偏差をもとに、興味ある項目について地質との関係について考察を試みた。

(1) 泉温

県下全域59源泉中22源泉が、泉温25℃以上で鉱泉及び療養泉に該当した。

その内、領家帯が18源泉で該当全22源泉の81.8%を占め、又最高泉温46.5℃の高温泉を有し、領家帯の平均泉温27.2℃は基準値を上回っていた。

四万十帯の平均泉温23.4℃(3源泉該当)が続き、秩父帯の18.4℃(該当なし)、三波川帯の16.0℃(3源泉該当)であった。

表2 鉱泉及び療養泉該当数

()内が療養泉

源泉数	県下全域 59	領家帯 34	三波川帯 6	秩父帯 9	四万十帯 10
泉温	22(22)	18(18)	1(1)	0	3(3)
Rn	7(6)	6(6)	1	0	0
Li ⁺	16	8	2	1	5
Ba ²⁺	1	0	0	0	1
Sr ²⁺	1	0	1	0	0
T-Fe	2	1	0	0	1
F ⁻	36	24	3	5	4
Br ⁻	4	3	1	0	0
T-S	10(3)	4(1)	0	2	4(2)
NaHCO ₃	30	17	5	2	6
CO ₂	2	1	1	0	0
H ₂ SiO ₃	7	6	1	0	0
HBO ₂	42	21	4	9	8
溶存物質	23(23)	15(15)	3(3)	1(1)	4(4)

表3 成分濃度の平均値及び標準偏差

下段は最高値 (単位 mg / kg)

源泉数	県下全域 59	領家帯 34	三波川帯 6	秩父帯 9	四万十帯 10
泉温(℃)	24.2±9.1 46.5	27.2±9.5 46.5	16.6±5.5 25.7	18.4±2.5 22.8	23.4±8.4 40.6
掘削深度(m)	529.2±525.5 1750	677.5±482.4 1750	296.5±643.15 1608	163.3±133.3 350	494.1±653.1 1500
pH	8.5±0.8 10.2	8.4±0.7 10.0	8.3±1.1 9.4	9.0±1.0 10.2	8.6±1.0 10.1
Rn(ME)	2.7±4.0 15.5	3.5±5.0 15.5	2.2±2.4 7.0	1.7±1.6 5.0	0.9±0.9 2.8
Li ⁺	1.0±1.6 9.4	0.9±1.2 4.2	1.0±1.4 3.5	0.4±0.4 1.3	2.0±3.0 9.4
Na ⁺	499.9±816.0 4551	488.2±702.0 2950	1200±1746 4551	140.1±83.5 314.0	443.2±518.7 1370
K ⁺	6.5±13.5 69.2	5.0±9.7 54.7	15.2±26.8 69.2	2.3±2.0 5.8	9.9±18.1 59.2
Mg ²⁺	4.7±8.0 38.3	5.1±7.7 29.6	6.0±8.2 17.5	1.7±2.2 6.1	5.3±11.8 38.3
Ca ²⁺	20.7±29.0 154.1	21.6±30.8 154.1	26.4±29.6 76.3	8.±19.4 24.7	27.7±34.4 111.2
F ⁻	5.0±5.6 29.6	6.5±6.6 29.6	4.5±4.9 12.6	2.5±1.7 5.1	2.4±2.0 7.1
Cl ⁻	510.2±1081 5867	478.8±948.7 4043	1436±2292 5867	88.4±113.5 276.5	441.4±739.8 1916
SO ₄ ²⁻	6.9±10.1 52.5	8.8±12.4 52.5	1.8±2.3 6.4	5.3±6.7 18.8	6.1±4.4 14.1
HCO ₃ ⁻	481.4±586.7 2767	501.8±585.9 2767	791.6±834.5 2223	173.8±118.0 381.3	502.8±632.1 2053
CO ₃ ²⁻	17.9±25.1 115.8	15.4±25.6 115.8	17.4±21.3 46.0	29.8±29.9 73.3	15.9±20.9 67.5
CO ₂	32.4±112.4 748.5	30.1±127.8 748.5	98.9±160.9 382.2	3.1±3.9 9.8	26.8±57.7 184.2
H ₂ SiO ₃	30.2±14.2 68.4	31.7±14.7 66.7	40.3±17.6 68.4	28.8±7.8 44.9	23.2±10.5 35.6
HBO ₂	26.0±42.0 1983.0	21.5±35.9 180.0	68.2±74.4 198.3	10.9±4.6 19.3	29.9±45.2 142.1
H ₂ S	0.4±0.8 4.3	0.1±0.4 1.5	0.2±0.2 0.5	0.6±0.6 1.8	1.1±1.5 4.3
溶存物質(g/kg)	1.619±2.346 13.14	1.591±2.001 8.836	3.632±5.007 13.14	0.4952±0.2870 1.031	1.520±1.670 4.741

一般に泉温は火山活動のマグマと関係が深く、火山の影響を受けないか、または影響の少ない地域の地下10～15mの恒温層以深では地中増温率によって2～3°C/100mの割合で地中温度が上昇し、地下水温もこれと平行して深さとともに昇温する⁷⁾とされている。

当県の場合火山帯も通っていないため、全59源泉の掘削深度(X)と泉温(Y)の相関を見てみた。

ちなみに、今回調査の掘削深度平均値は領家帯が677.5m、四万十帯494.1m、三波川帯296.5m、秩父帯163.3mで、上記から判断した場合領家帯の平均泉温が基準値を超える27.2°Cも妥当な数値と言える。

図3に示すとおり、 $Y = 0.0142X + 16.619$ ($r = 0.826$)と強い相関を示し、ほとんどの源泉が地中増温率に伴う水温で火山の影響を受けていないと思われるが、330m付近に地中増温率の計算値よりかなり高温の33°C、40°Cの源泉がある。地理的には東道後地域に位置し、道後・奥道後地域を含めた道後郷にこの傾向が見られ、領家花崗岩貫入時の熱源が地下深部に存在していることも考えられる。

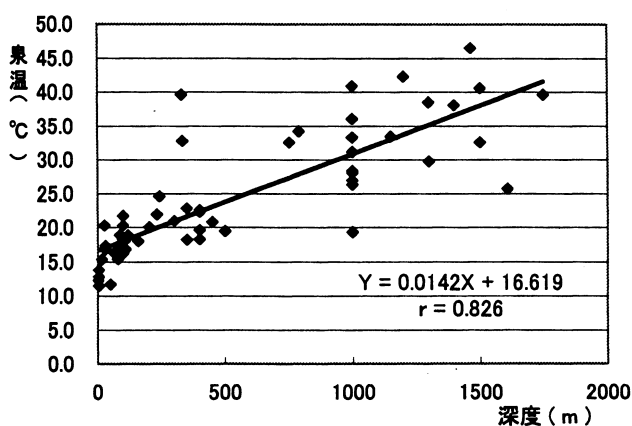


図3 掘削深度と泉温の相関

近年、ふるさと創生事業の導入以来1000m以深の掘削源泉が増加し、四万十帯の40.6°Cの源泉も地域活性化事業により1500m掘削したもので、前記の昇温率からも予測できる泉温であるが枯渇のため現在は未使用である。

(2) Rn

鉱泉基準に領家帯で6源泉、三波川帯で1源泉該当している。

領家帯の3源泉は今治地区の黒雲母花崗岩地域で、他の3源泉は花崗閃緑岩地域にあり、両地域とも湧出母岩がRn含有の領家花崗岩地域に位置し6源泉すべてが療養泉にも該当している。

三波川帯の1源泉は、結晶片岩類の石英、絹雲母を主とする黒色片岩地域で絹雲母の影響によるものと考えられるが、療養泉の基準値には達しなかった。

(3) Li⁺

一般的に、Na-Cl泉にはハロゲン元素に対応してアルカリ元素であるLi⁺も比較的多い⁸⁾とされている。

Li⁺で鉱泉に該当した領家帯8源泉のうち5源泉と、三波川帯の2源泉すべて、秩父帯の1源泉、四万十帯の5源泉中3源泉がNa-Cl泉であり、四万十帯の1源泉以外は溶存物質も基準値を上回っていること等から化石海水によるものと推測できる。

(4) F⁻

F⁻は、領家花崗岩類の雲母から溶出されるとされており、領家帯は領家花崗岩類や基底礫岩が主に領家花崗岩類である和泉層群及び第四系が分布しているため、平均濃度が6.5ppmと高濃度を有しており該当源泉も24源泉に及んでいる。

三波川帯は、3源泉が該当しており平均濃度も4.5ppmと領家帯に続いて高く、黒色片岩の絹雲母からの溶出と考えられる。

秩父帯、四万十帯の地質は、砂岩、粘板岩、泥岩で秩父帯5源泉、四万十帯4源泉が該当しているが、四万十帯の一部を除き花崗岩類をあまり含有していないため平均濃度も領家帯に比べ半分以下と低値を示した。

(5) Br⁻

天然水、特にNaCl濃度の高い塩水中のBr⁻/Cl⁻比はその塩水の分類(海成か陸成か)や塩の起源の考察に利用されている⁹⁾。一般に塩分の起源は海水を考えるとが多いのでBr⁻/Cl⁻比も海水の値と比較される。

領家帯で3源泉、三波川帯で1源泉がBr⁻の基準濃度を上回っており、Br⁻/Cl⁻比をみると領家帯の源泉は 2.2×10^{-3} 、 2.4×10^{-3} 、 2.1×10^{-3} 、平均値 2.2×10^{-3} で、三波川帯の源泉が 2.3×10^{-3} と海水のBr⁻/Cl⁻比 3.4×10^{-3} よりわずかに低い。

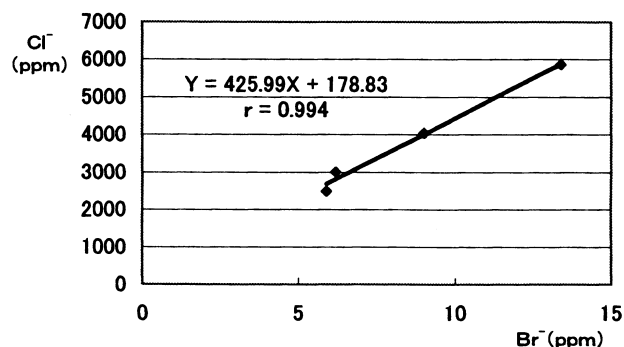


図4 Cl⁻とBr⁻の相関

しかし、塩水からNaClが結晶するときにはBr⁻は取り込まれにくく¹⁰⁾、NaClが溶けた溶液は一般にBr⁻/Cl⁻比は小さくなる。又、4源泉すべてがNa-Cl泉でNa⁺、Cl⁻が高濃度で溶存物質も5.0g/kg以上と多く、図4の $Y = 425.99X + 178.83$ ($r = 0.994$)と非常に強い相関係数からも化石海水によるものと判断できる。

(6) HCO_3^- 及び CO_3^{2-}

HCO_3^- 及び CO_3^{2-} の鉱泉基準は、 NaHCO_3 で表わす事になっている。

三波川帯の場合 HCO_3^- の平均濃度が791.6ppm (NaHCO_3 として5源泉該当)と他の3構造帯(領家帯501.8ppmの17源泉, 秩父帯173.8ppmの2源泉, 四万十帯502.8ppmの6源泉)と比較しても特に高い数値を示している。これは、三波川帯を形成している黒色片岩は別名石墨片岩とも言われよう有機堆積物源の炭素を含有しており¹¹⁾, これらが長い年月を経て酸化され溶出した CO_2 が土壌と反応し HCO_3^- に変化したものと思われる。

他の3構造帯もかなりの源泉が NaHCO_3 で該当しているがこれらも堆積層中で有機物質の分解により同じように変化したものと考えられる。

(7) CO_2

領家帯と三波川帯で各1源泉 CO_2 で該当し、共にpHが6.4, 6.8と低く、泉温も15.4°C, 16.5°Cと低温である。

この2源泉とも NaHCO_3 で鉱泉に該当しているが、一定のpH範囲に存在する炭酸の形態¹²⁾を考慮した場合、 NaHCO_3 でなおかつ CO_2 で鉱泉に該当するものも納得できる。

(8) 総S

T-Sにおいては、領家帯で4源泉, 秩父帯2源泉, 四万十帯4源泉が鉱泉基準を上回り、領家帯と四万十帯で各2源泉が療養泉に該当した。なかでも、四万十帯全源泉の H_2S 平均濃度が1ppmを上回っていた。

これは、四万十帯には接触変成作用によって出来たホルンフェルスが広域に渡って分布しており、その影響によるものと推測する。

(9) HBO_2

各構造体とも多くの源泉が含有しており、領家帯の平均濃度が21.5ppmで21源泉が鉱泉に該当し、三波川帯が68.2ppmで4源泉, 秩父帯が10.9ppmで9源泉, 四万十帯が29.9ppmで8源泉該当した。

Bについては、火山性源から最近海成層に起因するものであるという説が有力になっているが、海水の HBO_2 濃度19ppmに比較しても三波川帯等は高濃度であり今後の検討課題である。

(10) 溶存物質

海水起源である Na^+ , Cl^- の多い源泉が該当しており、中でも化石海水の影響が大きい三波川帯が平均濃度3.632g/kg(3源泉該当), やはり海水起源が考えられている領家帯が1.591g/kg(15源泉該当), 四万十帯が1.520g/kg(4源泉該当)と基準値を上回っているが、 Na^+ ,

Cl^- 濃度の低い秩父帯に至っては0.4952g/kg(1源泉該当)と極端に低値を示した。

3 地質構造帯別主要成分構成

図5は、主要溶解成分による各地質構造帯の水質組成を検討する目的で、陽イオン(Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})及び陰イオン[Cl^- , SO_4^{2-} , F^- , HCO_3^- (CO_3^{2-} は HCO_3^- に換算)]のmval%値を用いて鍵座標図に表したものである。

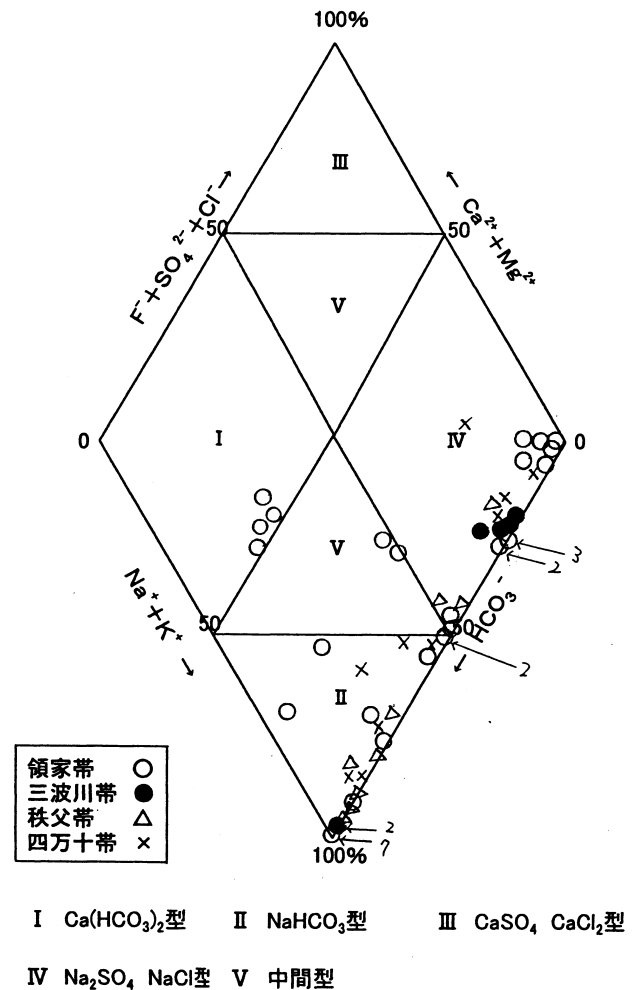


図5 主要成分の鍵座標図

領家帯の場合、30源泉で Na^+ が陽イオンの80%以上を占め、残り4源泉で $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ が40%前後を占めた。

陰イオンは HCO_3^- あるいは Cl^- を主成分とする源泉が二分した。

一般的に、長時間地下に帯留する地下水は塩基交換現象によって Ca^{2+} , Mg^{2+} に代わって Na^+ が増加する¹³⁾と言われているが、 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ が40%前後の4源泉はI型の浅い地下水型に属し、地理的にみて河川水あるいは地下水の希釈作用を受け、 Na^+ が減少し Ca^{2+} の割合が増加していると考えられるので今後の適正な管理が望まれる。

領家帯の源泉は鍵座標図から分類すると、総体的にⅡ型の深層地下水型とⅣ型の化石海水型の2種類に分類できた。

三波川帯は、全源泉でNa⁺が陽イオンの94%以上を占め、4源泉でCl⁻が陰イオンの60%以上を占めるⅣ型の化石海水型に属するが、2源泉のみ特異的にHCO₃⁻を96%以上含有するⅡ型の深層地下水型に分布する。

この2源泉は久万層群の明神層に位置しており、明神層は花崗岩類や和泉層群のような内帯に分布している岩石の風化されたものといわれており、鍵座標図からも領家帯に見られるⅡ型の深層地下水型に類似している。

秩父帯は、全源泉でNa⁺が陽イオンの90%以上を占め、陰イオンは多少バラツキはあるもののⅡ型の深層地下水型に分類できた。

四万十帯は、全源泉でNa⁺が陽イオンの78%以上を占め、陰イオンはHCO₃⁻を主成分とするⅡ型の深層地下水型が主流をなすが、Cl⁻を含有するⅣ型の化石海水型も存在した。

まとめ

今回調査の59源泉(領家帯34源泉、三波川帯6源泉、秩父帯9源泉、四万十帯10源泉)について、各地質構造帯別に化学的成分等の統計処理を行い地質と泉質の関係について考察を行った結果、以下の結論に達した。

1. 領家帯は、主に領家花崗岩、和泉層群が分布し泉温、Rn、高濃度のF⁻を含有する弱アルカリ性の源泉が多く、陽イオンはNa⁺、陰イオンはCl⁻、HCO₃⁻を主成分とする深層地下水型(Na-HCO₃泉)と化石海水型(Na-Cl泉)に分類できた。
2. 三波川帯は、結晶片岩類、超塩基性岩類が分布し、高濃度のF⁻、HBO₂、溶存物質を含有するアルカリ性の冷鉱泉で、陽イオンはNa⁺、陰イオンはCl⁻を主

成分とする化石海水型(Na-Cl泉)であった。

3. 秩父帯は、砂岩、粘板岩が分布し、F⁻、HBO₂を含有するアルカリ性の冷鉱泉で、陽イオンはNa⁺、陰イオンはHCO₃⁻を含有する深層地下水型(Na-HCO₃泉)であった。
4. 四万十帯は、砂岩、泥岩が分布し、HBO₂、溶存物質、H₂Sを含有するアルカリ性の冷鉱泉が多く、陽イオンはNa⁺、陰イオンはHCO₃⁻、Cl⁻を主成分とする深層地下水型(Na-HCO₃泉)が主流を占め、化石海水型(Na-Cl型)も存在した。

文 献

- 1) 愛媛県：愛媛の温泉(改訂版)，(1987)
- 2) 永井浩三：愛媛県 地学のガイド，1-4，コロナ社(1987)
- 3) 桃井斉ほか：愛媛県の地質，トモエヤ商事(1991)
- 4) 力武常次ほか：新地学，301-302，数研出版
- 5) 鹿島愛彦：愛媛の自然をたずねて，築地書館(1997)
- 6) 環境局自然保護局：鉱泉分析法指針(1998)
- 7) 山本荘毅：地下水学用語辞典，59，古今書院(1986)
- 8) 湯原浩三ほか：温泉学，151-192，地人書館(1991)
- 9) 上村京子ほか：温泉科学，38，111-119(1988)
- 10) J. L. Melvin：Evaporites Retroileum and Mineral Resources，Elsevier，pp. 304-307(1991)
- 11) 真木強ほか：愛媛衛研年報，35，49-56(1974)
- 12) 半谷高久：水質調査法，261-265，丸善(1998)
- 13) 酒井軍次郎：地下水学，358-360，朝倉書店(1974)