

愛媛県下の鉱泉における水質特性と起源

豊嶋華子 石丸宗徳 網本智一 大野智也佳 四宮博人

Keywords : 鉱泉, 地質構造帯, 起源推定, スラブ脱水流体起源の温泉

2001年4月から2025年3月の期間に当所で鉱泉分析した愛媛県内の129源泉について, 各地質構造帯別に分類し, 地質と水質の関連及び鉱泉水の起源について調査した. トリニアダイアグラムによる水質分類では, 領家帯及び三波川帯は停滞地下水起源型及び海水起源型, 秩父累帯及び四万十帯は停滞地下水起源型が多かった.

Cl濃度が100 mg/L以上あった54源泉について, 貯留母岩の指標となるB/Clモル比による分類を行ったところ, 熱水・化石水起源型源泉は全て海水由来, 停滞地下水起源型源泉は全て火山岩由来, 海水起源型源泉は海性堆積岩由来や海水由来よりも火山岩由来のものが多かった. また, 深部流体の指標となるLi/Cl重量比による解析では28源泉がスラブ起源深部流体と推定されたが, これらは中央構造線等の構造線付近に分布しており, スラブ起源深部流体の上昇に伴う断層の関与が示唆された.

はじめに

愛媛県には約190か所の鉱泉が存在し, そのうち約120源泉が利用されている¹⁾. 本県の地質は, 県土のほぼ東西方向に横切る中央構造線, 御荷鉾(みかぶ)構造線(みかぶ帯), 仏像構造線で区切られ, 地質体が帯状に分布する特徴があり, 4地質構造帯(領家帯, 三波川帯, 秩父累帯, 四万十帯)に区分されている. これらの構造線等により, 本県の地質は変化に富んでおり, そこから湧出する鉱泉は様々な特徴を有している.

今回, 温泉資源の保護と適正利用の基礎資料とするため, 当所で鉱泉分析を実施した源泉について各地質構造帯別に分類し, 地質と水質の関連及び鉱泉水の起源について調査し, 若干の知見を得たので報告する.

愛媛県の地質の概要

図1に愛媛県の地質の概要²⁾と, 今回調査対象とした129源泉の分布状況を示した.

領家帯は, 高縄半島及び島しょ部においては領家花崗岩類, 領家変成岩類が分布しており, 中央構造線北側においては, 和泉層群, 第四系が分布している.

三波川帯は, 中央構造線南側においては三波川変成岩類, 御荷鉾緑色岩類が分布し, 久万高原から石鎚山系にかけては久万層群や石鎚層群が分布している.

秩父累帯は, 三波川帯との境界部に御荷鉾緑色岩類が東西に分布し, 秩父・三宝山層群の中ほどには黒瀬川構造帯がある.

四万十帯は, 砂岩, 泥岩を主とする地層(四万十川層群)からなり, 高月山周辺には花崗岩類が分類している.

地質構造帯別の源泉数は, 領家帯 94 源泉, 三波川帯 12 源泉, 秩父累帯 10 源泉, 四万十帯 13 源泉であった. 領家帯の源泉数が多い要因として, わが国最古の歴史をもつ道後温泉が存在し, 古くから鉱泉の開発が盛んであったことが考えられる^{3,4)}.

調査方法

2001年(平成13年)4月から2025年(令和7年)3月までの24年間に, 鉱泉分析法指針⁵⁻⁷⁾に基づき当所で鉱泉分析を実施した129源泉の鉱泉分析の結果を各地質構造帯別に分類し比較した. また, 地質と水質の関連, 及び鉱泉水の起源について, トリニアダイアグラム, B/Clモル比, 及びLi/Cl重量比による解析を実施した.

なお, 分析当時未利用の源泉は調査対象とし, 2源

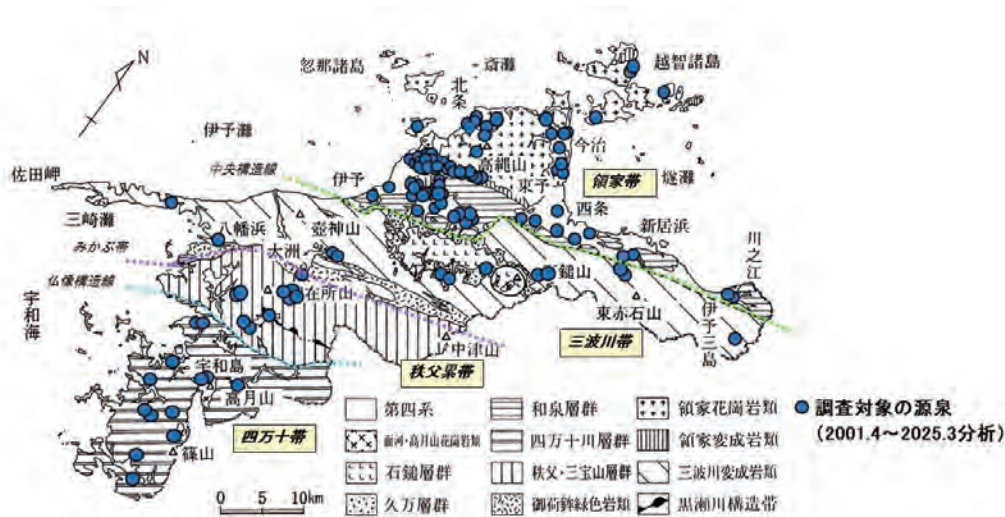


図1 愛媛県の地質と源泉分布状況

泉以上の混合泉は対象から除外した。また、期間中に複数回分析した源泉は、最新の結果を用いた。

結果及び考察

1 地質構造帯別の鉱泉分布及び鉱泉該当項目数

鉱泉は、温泉法の規定に基づき、温泉法の定義に該当する物質又は温度を有するものであり、常水と区別される。また、鉱泉のうち、特に治療の目的に供し得るものは療養泉と定義されている (表1)。

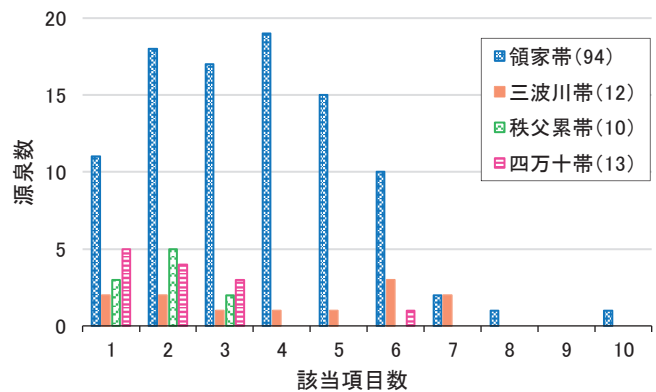


図2 地質構造帯別鉱泉該当項目数

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℃		1. 温度(源泉から採取されるとき温度)25℃	
2. 物質(下記に掲げるもののうち、いずれかひとつ)		2. 物質(下記に掲げるもののうち、いずれかひとつ)	
物質名	含有量 (1kg中) mg以上	物質名	含有量 (1kg中) mg以上
溶存物質 (ガス状の物を除く)	総量 1000	溶存物質 (ガス状の物を除く)	総量 1000
遊離 CO ₂	250	遊離 CO ₂	1000
Li ⁺	1	総 Fe(Fe ²⁺ +Fe ³⁺)	20
Sr ²⁺	10	Mn ²⁺	10
Ba ²⁺	5	H ⁺	1
総 Fe(Fe ²⁺ +Fe ³⁺)	10	Γ	10
Mn ²⁺	10	F ⁻	2
H ⁺	1	HAsO ₄ ²⁻	1.3
Br ⁻	5	HAsO ₂	1
Γ	1	総 S (HS ⁻ +S ₂ O ₃ ²⁻ +H ₂ S)	2
F ⁻	2	HBO ₂	5
HAsO ₄ ²⁻	1.3	H ₂ SiO ₃	50
HAsO ₂	1	NaHCO ₃	340
総 S (HS ⁻ +S ₂ O ₃ ²⁻ +H ₂ S)	1	Rn	20×10 ⁻¹⁰ Ci= 74Bq 以上 (5.5 マッヘ単位 以上)
HBO ₂	5	Ra	1×10 ⁻⁸ mg以上
H ₂ SiO ₃	50		
NaHCO ₃	340		
Rn	20×10 ⁻¹⁰ Ci= 74Bq 以上 (5.5 マッヘ単位 以上)		
Ra	1×10 ⁻⁸ mg以上		

表2 地質構造帯別の鉱泉及び療養泉該当数

地質区分	領家帯 n=94	三波川帯 n=12	秩父累帯 n=10	四万十帯 n=13	県下全体 n=129
項目					
泉温	57(57)	1 (1)	0	2 (2)	60(60)
溶存物質	34(34)	8 (8)	0	1 (1)	43(43)
遊離 CO ₂	2 (1)	3 (3)	0	0	5 (4)
Li ⁺	13	4	0	1	18
Sr ²⁺	11	1	0	0	12
Ba ²⁺	3	0	0	0	3
総 Fe(Fe ²⁺ +Fe ³⁺)	1	4 (2)	0	0	5 (2)
Br ⁻	17	2	0	0	19
Γ	2	0	0	0	2
F ⁻	60	3	5	7	75
総 S (HS ⁻ +S ₂ O ₃ ²⁻ +H ₂ S)	10 (6)	0	3 (1)	5 (3)	18(10)
HBO ₂	58	10	8	6	82
H ₂ SiO ₂	25	6	0	0	31
NaHCO ₃	27	8	3	6	44
Rn	22(14)	0	0	0	22(14)

()療養泉数

129 源泉について、地質構造帯別に分類し、源泉当たりの温泉該当項目数の度数分布を図 2 に示した。

1 源泉当たりの鉱泉該当項目数は、秩父累帯及び四万十帯は 1~3 項目であったが、領家帯及び三波川帯は 1~10 項目とばらつきが見られ、みかぶ帯を境として二極化の傾向がみられた。

表 2 に、地質構造帯別の鉱泉及び療養泉該当数を示した。泉温が該当する源泉は領家帯に集中しており、また、溶存物質が該当する源泉も領家帯に多く分布していた。Rn は花崗岩に含まれており、風化花崗岩より放出されやすいとされているが⁸⁾、当県の分布状況を確認した結果、Rn が該当する源泉は花崗岩を多く含む領家帯のみに分布していた。Fe が該当する源泉は、三波川帯を中心に分布していた。F⁻、HBO₂、NaHCO₃ は全ての地質構造帯で該当していた。

2 地質構造帯別成分濃度の特性

表 3 に地質構造帯別の主な成分濃度の平均値及び標準偏差を示した。

領家帯は、泉温が高く、弱アルカリ性で、Na⁺、Cl⁻、Rn、F⁻、溶存物質の濃度が高い。また、他の地質構造帯に比べ Ca²⁺、SO₄²⁻の濃度が高い。

三波川帯は、弱アルカリ性で、Na⁺、Cl⁻、HBO₂、H₂SiO₂、溶存物質の濃度が高い。また、他の地質構造帯に比べ HCO₃⁻の濃度が高い。

秩父累帯は、アルカリ性で、表 2 でも示したが鉱泉該当項目で HBO₂ を主成分とする鉱泉が多く、溶存物質濃度は低い。

四万十帯は、弱アルカリ性で、他の地質構造帯に比べ H₂S の濃度が高い温泉が多く、溶存物質濃度は低い。

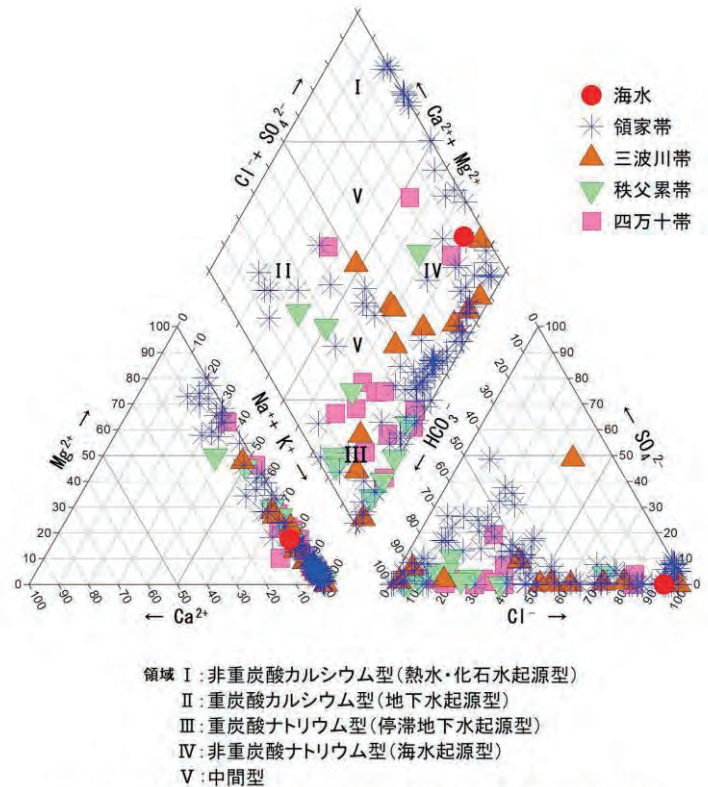


図3 トリリニアダイアグラム(地質構造帯別分類)

表 3 地質構造帯別の主な成分濃度の平均値及び標準偏差

項目	地質区分	領家帯 n=94	三波川帯 n=12	秩父累帯 n=10	四万十帯 n=13	県下全体 n=129
泉温 (°C)		30.8 ± 10.7	18.9 ± 7.3	17.4 ± 4.2	22.0 ± 7.4	27.8 ± 11.0
掘削深度 (m)		676.4 ± 435.1	298.3 ± 442.4	164.0 ± 184.0	412.7 ± 540.2	576.2 ± 466.7
pH		8.3 ± 0.9	8.1 ± 1.4	8.5 ± 0.9	8.3 ± 0.7	8.3 ± 1.0
Rn (M・E/kg)		3.2 ± 4.7	0.3 ± 0.7	0.5 ± 0.7	0.8 ± 1.3	2.5 ± 4.2
Li ⁺ (mg/kg)		0.8 ± 2.5	3.9 ± 6.0	0.2 ± 0.2	0.7 ± 1.7	1.1 ± 3.0
Na ⁺ (mg/kg)		765.0 ± 1337.5	886.2 ± 835.0	98.0 ± 47.3	190.1 ± 270.7	666.6 ± 1198.1
K ⁺ (mg/kg)		6.7 ± 14.9	41.2 ± 48.6	1.4 ± 0.9	5.0 ± 7.4	9.3 ± 22.2
Ca ²⁺ (mg/kg)		389.3 ± 1189.5	128.2 ± 158.7	12.4 ± 10.1	13.2 ± 11.1	297.9 ± 1027.9
Mg ²⁺ (mg/kg)		40.5 ± 123.1	30.2 ± 36.7	2.4 ± 2.6	3.4 ± 6.5	32.8 ± 106.6
Sr ²⁺ (mg/kg)		3.6 ± 9.3	3.4 ± 3.9	0.3 ± 0.4	0.3 ± 0.4	3.0 ± 8.1
F ⁻ (mg/kg)		6.7 ± 5.9	2.1 ± 2.9	2.6 ± 1.5	2.0 ± 1.4	5.5 ± 5.5
Cl ⁻ (mg/kg)		1701.1 ± 3840.3	1061.2 ± 1072.7	43.4 ± 57.6	113.5 ± 172.4	1353.1 ± 3352.7
HCO ₃ ⁻ (mg/kg)		287.6 ± 479.4	1119.3 ± 1166.5	183.1 ± 95.1	348.1 ± 467.2	363.0 ± 613.7
CO ₃ ²⁻ (mg/kg)		9.9 ± 24.3	10.3 ± 13.2	16.8 ± 22.7	8.1 ± 12.1	10.3 ± 22.5
SO ₄ ²⁻ (mg/kg)		136.1 ± 365.0	14.8 ± 17.5	4.7 ± 4.2	4.9 ± 4.2	101.4 ± 316.8
H ₂ SiO ₃ (mg/kg)		36.8 ± 14.0	56.3 ± 32.7	28.5 ± 6.3	26.4 ± 6.8	36.9 ± 17.4
HBO ₂ (mg/kg)		17.8 ± 35.9	48.1 ± 41.4	9.8 ± 4.0	10.4 ± 17.2	19.3 ± 35.0
H ₂ S (mg/kg)		0.4 ± 0.9	0.1 ± 0.2	0.6 ± 0.7	1.1 ± 1.4	0.5 ± 0.9
溶存物質 (mg/kg)		3400.3 ± 6617.0	3428.0 ± 3114.1	405.3 ± 140.6	731.5 ± 930.5	2901.8 ± 5836.1

3 トリニアダイアグラムによる解析

水質の分類や起源推定を行う手法として、主要溶存イオンを構成比で表現したトリニアダイアグラムによる解析が利用できる^{9,10)}。

図3にトリニアダイアグラムの地質構造帯別分類を示した。

領家帯は、陽イオンの主成分は Na^+K^+ となる源泉がほとんどである。陰イオンの主成分は Cl^- となる源泉が多数あり、海水起源型と推定される源泉の割合が高かった。なお、 HCO_3^- が主成分の停滞地下水起源型と推定される源泉も多かった。一方で、 $\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+}$ が主成分となる源泉は熱水・化石水起源型、地下水起源型と推定されるが、割合は低かった。

三波川帯は、陽イオンの主成分は Na^+K^+ となる源泉がほとんどであるが、陰イオンの主成分は Cl^- となる源泉(海水起源型)、 HCO_3^- となる源泉(停滞地下水起源型)と二分していた。

秩父累帯及び四万十帯は、 Na^+K^+ 及び HCO_3^- が主成分となる源泉が多数あり、停滞地下水起源型と推定される源泉の割合が高かった。

4 B/Cl比による水質起源の推定

鉱泉に含有する元素のうち、Cl, B, Li は地熱地球化学分野において可溶性成分に位置付けられ、水-岩石相互作用において2次的な変化を受けにくいものと認識されているため、鉱泉水の起源推定や混合過程の把握等に利用されている^{11,12)}。例えば、B/Cl比は鉱泉水の貯留母岩を知る指標として利用でき、大沢ら¹²⁾はCl濃度が100 mg/L以上の鉱泉水について、海性堆積岩由来(Sedimentary rocks: SR)、火山岩類由来(Volcanic rocks: VR)、化石海水を含む海水起源の鉱泉水(Fossil-seawater/originated from seawater: FS)のB/Cl比(モル比)は、それぞれ ≥ 0.1 、 $0.1 \sim 0.01$ 、 ≤ 0.01 であると示している。

今回調査対象とした129源泉のうち、B/Cl比による解析対象となるCl濃度が100 mg/L以上の源泉は54源泉であった。これを地質構造帯別、トリニアダイアグラムの領域区別に整理すると、表4のとおりとなり、領域II(地下水起源型)を除く4区分に分類された。

表4 各地質構造帯における領域区分数 (Cl \geq 100 mg/L)

地質区分 領域区分	領家帯	三波川帯	秩父累帯	四万十帯	県下全体
I (熱水・化石水起源型)	9	0	0	0	9
II (地下水起源型)	0	0	0	0	0
III (停滞地下水起源型)	1	0	1	1	3
IV (海水起源型)	26	6	1	2	35
V (中間型)	5	1	0	1	7
合計	41	7	2	4	54

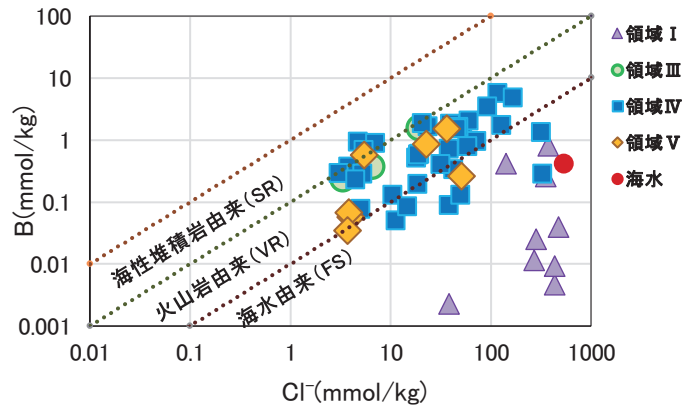


図4 Cl濃度とB濃度の関係(Cl \geq 100 mg/L)

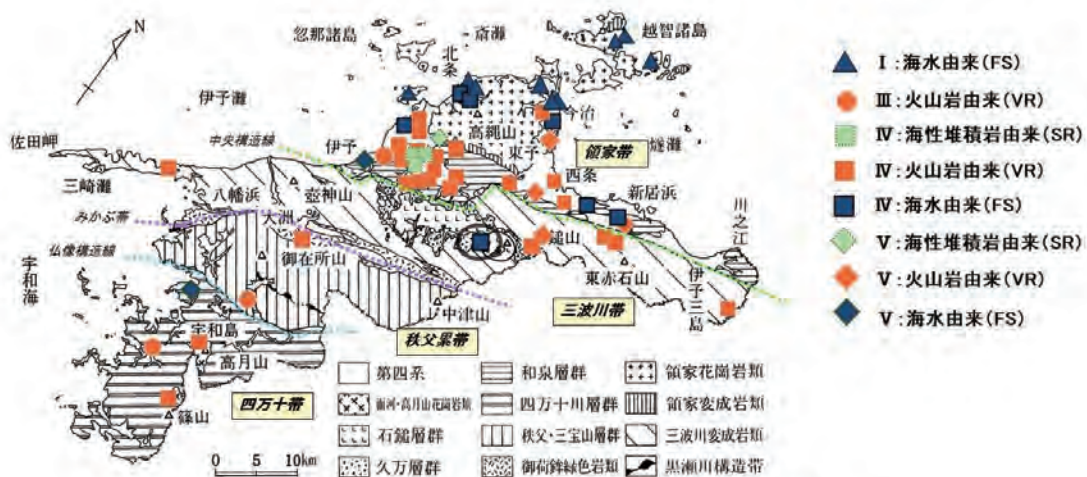


図5 愛媛県の地質と源泉分析状況(B/Cl比による分類)

B/Cl 比による解析対象の 54 源泉について、Cl 濃度と、HBO₂ 濃度より換算した B 濃度の関係(モル比)を図4に示した。領域Ⅰ(熱水・化石水起源型)の9源泉は、全て海水由来の領域に分布していた。領域Ⅲ(停滞地下水起源型)の3源泉は、全て火山岩由来の領域に分布していた。領域Ⅳ(海水起源型)は、海性堆積岩由来に3源泉、火山岩由来に25源泉、海水由来に7源泉分布していた。領域Ⅴ(中間型)は海性堆積岩由来に1源泉、火山岩由来に4源泉、海水由来に2源泉分布していた。

図5は、B/Cl比による分類結果を愛媛県の地質略図²⁾上で示したものである。海水由来と推測された源泉は主に海岸付近に分布していたが、1源泉のみ三波川帯の内陸部に分布がみられた(図5中央の囲い部分)。これは、四国山地が約5000万年前の地殻変動により海底堆積層が隆起してできた¹³⁾ことに由来する化石海水と考えられる。火山岩由来と推測された源泉は、多くが中央構造線等の構造線周辺に分布していた。また、海性堆積岩由来と推測された源泉は、領家帯の平野部に分布がみられた。

5 Li/Cl比による水質起源の推定

地下水に含まれるLiは、深部流体(深部から供給される熱水)に多く含まれ、地表水の影響を受けにくいことから、地下深部から上昇する熱水の指標として有効であると言われている¹⁴⁾。

西村ら¹⁵⁾は、有馬温泉の起源についてフィリピン海プレートの脱水によるものと言及しており、網田ら¹⁶⁾は、中央構造線沿いに湧出する高塩分泉の起源について、スラブ(沈み込む海洋プレート)の脱水により形成

された流体である可能性を示している。風早ら¹⁴⁾は、NaCl濃度が高くCO₂を多く含む有馬型深部流体が、Liを多く含み、Li/Cl比(重量比)が0.001以上あることを示している。

そこで、B/Cl比による解析対象の54源泉についてLi/Cl重量比の解析を行い、図6に結果を示した。この図でLi/Cl比が0.001以上の部分にプロットされた源泉は、有馬型のスラブ起源深部流体であると推測される。このうち、海水由来型(FS)はトリニアダイアグラムの領域Ⅴ(中間型)1源泉のみ、火山岩由来型(VR)は領域Ⅲ(停滞地下水起源型)3源泉、領域Ⅳ(海水起源型)16源泉、領域Ⅴ4源泉、海性堆積岩由来型(SR)は領域Ⅳ3源泉、領域Ⅴ1源泉であった。解析の結果、合計28源泉が有馬型のスラブ起源深部流体と推測された。

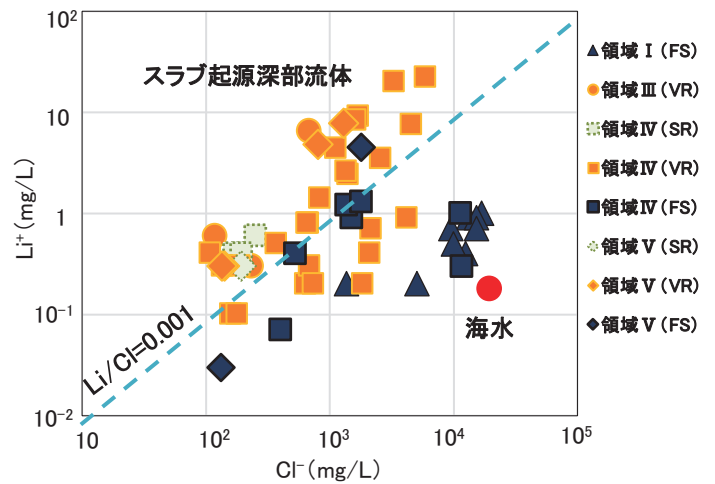


図6 Li濃度とCl濃度の関係(Cl⁻ ≥ 100 mg/L)

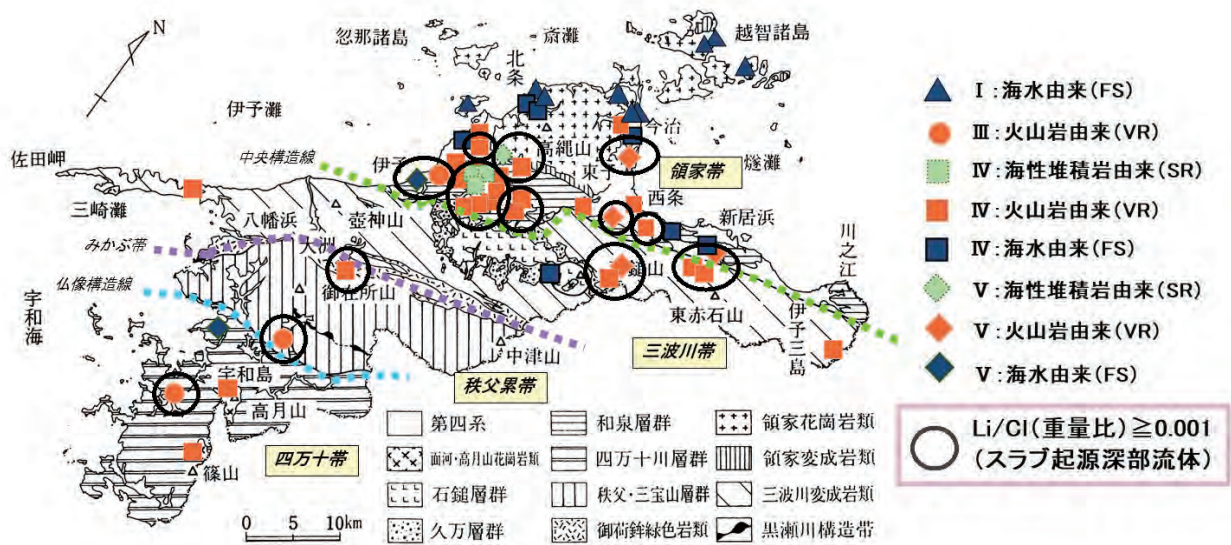


図7 愛媛県の地質と源泉分布状況(Li/Cl比による解析)

図7は、Li/Cl重量比による解析結果を愛媛県の地質略図²⁾上に示したものである。スラブ起源深部流体と推測された源泉は、大部分が中央構造線、みかぶ帯、仏像構造線など大規模な断層付近に分布しており、断層がスラブ起源深部流体の上昇に関与していることが示唆された。また、県内の鉱泉水の水質起源としては、化石海水等の海水起源水及び天水起源水に対する火山岩等の地質及び地熱の影響のほか、スラブ起源深部流体が大きく影響している可能性が推測された。

まとめ

1 地質構造帯別の鉱泉水分布は、日本最古の道後温泉を含む領家帯が最も多く94源泉あり、三波川帯12源泉、秩父累帯10源泉、四万十帯13源泉であった。地質構造帯別1源泉あたりの鉱泉水項目数は、項目数が多い領家帯、及び三波川帯、項目数が少ない秩父累帯、及び四万十帯という2極化の傾向がみられた。トリニアダイアグラムによる水質分類では、領家帯及び三波川帯は停滞地下水起源型及び海水起源型に分類される源泉が多かった。一方で、秩父累帯及び四万十帯は停滞地下水起源型に分類される源泉が多かった。

2 Cl濃度が100 mg/L以上であった54源泉について、鉱泉水の貯留母岩を知る指標であるB/Clモル比により水質分類別に解析したところ、領域Ⅰ(熱水・化石水起源型)は全て海水由来、領域Ⅲ(停滞地下水起源型)は全て火山岩由来、領域Ⅳ(海水起源型)及びⅤ(中間型)は海性堆積岩由来や海水由来よりも火山岩由来のものが多かった。

海水由来とされた源泉は主に海岸付近に分布していたが、1源泉のみ三波川帯の内陸部に分布していた。これは、四国山地が約5000万年前に海底であったことに由来する化石海水と考えられる。

3 地下深部から上昇する熱水(スラブ起源深部流体)の指標としてLi/Cl重量比により解析したところ、火山岩由来

の半数以上の23源泉、海性堆積岩由来の4源泉全て、海水由来の1源泉の合計28源泉がスラブ起源深部流体と推定された。これらの源泉は中央構造線を中心とした各構造線付近に分布していることから、断層がスラブ起源深部流体の上昇に関与していることが示唆された。また、県内の鉱泉水の水質起源としては、化石海水等の海水起源水及び天水起源水に対する火山岩等の地質及び地熱の影響のほか、スラブ起源深部流体が大きく影響している可能性が推測された。

文献

- 1) 環境省:令和5年度温泉利用状況
- 2) 桃井齊ほか:愛媛県の地質,株式会社トモエヤ商事(1991)
- 3) 井上智ほか:昭和62年度愛媛衛研年報,49,53-56(1988)
- 4) 山竹定雄ほか:平成12年度愛媛衛環研年報,3,44-49(2000)
- 5) 環境庁自然保護局:鉱泉水分析法指針(1997)
- 6) 環境省自然環境局:鉱泉水分析法指針(2002)
- 7) 環境省自然環境局:鉱泉水分析法指針(2014)
- 8) 堀内公子:温泉科学,67,141-158(2018)
- 9) 綿貫邦彦:日本地下水学会誌,27,3,105-108(1985)
- 10) 中島玲ほか:佐賀大学農学部彙報,97,27-35(2012)
- 11) 大沢信二:大分県温泉調査研究会報告,47,37-42(1996)
- 12) 大沢信二ほか:温泉科学,59,295-319(2010)
- 13) 愛媛県上浮穴郡久万町(現・久万高原町):久万町誌増補改訂版,10-11(1989)
- 14) 風早康平ほか:日本水文科学会誌,44,1,3-16(2014)
- 15) 西村進ほか:温泉科学,56,1,3-15(2006)
- 16) 網田和宏ほか:日本水文科学会誌,44,1,17-38(2014)

Water Quality Characteristics and Origin of Mineral Springs in Ehime Prefecture

Hanako TOYOSHIMA, Munenori ISHIMARU, Tomokazu AMIMOTO,
Chiyaka OHNO, Hiroto SHINOMIYA

An investigation was carried out on 129 mineral springs located within Ehime Prefecture, which were analyzed between April 2001 and March 2025. These springs were classified according to their respective geological structural zones, and the relationships between geology and water quality as well as the origins of the mineral spring waters were examined. Water quality classification based on trilinear diagrams showed that the Ryoke Belt and the Sambagawa Belt predominantly included stagnated groundwater origin and seawater origin types, whereas the Chichibu Belt and the Shimanto Belt were mainly characterized by stagnated groundwater origin types.

Among the 54 springs with Cl concentrations of 100 mg/L or higher, classification based on the B/Cl molar ratio, an indicator of the reservoir host rock, revealed that all hydrothermal and fossil water origin springs were seawater-derived, all stagnated groundwater origin springs were volcanic rock-derived, and seawater origin springs were more frequently volcanic rock-derived than marine sedimentary rock- or seawater-derived. Furthermore, analysis using the Li/Cl weight ratio, an indicator of deep fluids, suggested that 28 springs contained slab-derived deep fluids. These springs were distributed near structural lines such as the Median Tectonic Line, implying the involvement of faults in the ascent of slab-derived deep fluids.