

地球化学的水質分類による地下水水質 形成システムの検討

—新潟県小国・小千谷・小出地域の地下水について—

羅漢金¹・坂本康²・西田継³

¹学生会員 理修 山梨大学大学院工学研究科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田四丁目3番11号)

²正会員 工博 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田四丁目3番11号)

³博(工) 山梨大学講師 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田四丁目3番11号)

地下水水質形成システムの推定のために、地下水中の主成分元素による地球化学的水質分類を水温、地質、地形などと結びつけた手法で小国、小千谷、小出三地域の地下水を検討した。その結果、水温分布、水質分布は地熱水、地質の酸化還元環境、岩石とのイオン交換などの影響で説明できた。Na-Cl 型地下水は地下深部から湧昇してきた化石海水に起因すると考えられた。また、Na-HCO₃ 型地下水が形成されるイオン交換過程には、水温と Na⁺/Ca²⁺ 当量比の関係により、主に地中の滞在時間に支配されているものと、主に水温に支配されるものと考えられた。地熱水と関係のある Na-HCO₃ 型あるいは Na-Cl 型地下水の存在はその地域の地下に伏在断層、ジオプレッシャー熱水系があることを示唆している。

Key Words: formation system of groundwater quality, geochemical classification, groundwater temperature, fossil seawater, concealed fault, geopressured hydrothermal system

1. はじめに

地下水の水質が決まる過程を水質形成システムとしてとらえた場合、その解析はまだ十分ではない。これまでの地下水に関する研究では、水理地質学、地球化学あるいは地下水汚染解析という別個の立場から行ったものは多い^{1), 2), 3), 4), 5), 6)}が、地質、地形、地球化学及び人為的な汚染などの視点で総合的に地下水水質形成システムを推定した研究は不足している。この原因はシステムの構成要素(地質・地層構造、帯水層)についての情報が十分にはえられないこと、システム中での個々のプロセス(化学反応など)を実験的に確かめることが困難なこと、システムの内部状態(地下水水質)の情報として不十分なもの(一般家庭の井戸水水質)を使わざるをえないことによる。従って、本研究ではシステム内部構造の情報は補足的に使うこととし、主としてシステムの応答である井戸水水質の分布を用いて地下水水質形成システムを推定することとした。この際、応答(水質)に対してフィルターをかける意味で、

地球化学的水質分類を手法として用いた。つまり、本研究では地質・地層構造、帯水層などの情報が不十分であるという前提で、井戸水水質、水温についての情報から地下水水質形成システムの推定を試みている。

対象としたのは新潟県小国、小千谷、小出の三地域の消雪用の井戸の水である。これらの三地域は地理的には接近しているが、地形・地質的には条件が異なっている。また、消雪用の井戸は比較的統一された構造で作られており、一般家庭の井戸より構造の影響を受けにくいという利点がある。

2. 調査地域の地形・地質概要

調査地域を図-1に示す。著者らはこの地域で一般水質とヒ素濃度との関係も検討している⁷⁾。調査地域には、西方から東方へ最高標高 518 m の八石山地、丸山丘陵、東頸城丘陵、東山丘陵、魚沼丘陵がほぼ NNE-SSW に配列し、さらに東側には標高

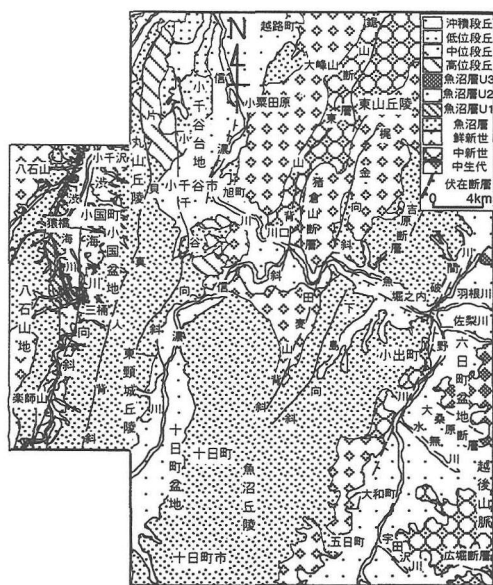


図-1 対象地域の地質 (文献^{8), 9)}より簡略化)

1,500~2,000 mの越後山脈が位置する。それらの丘陵や山地の間に西方より小国盆地、小千谷台地、十日町盆地、六日町盆地の低地が分布している。小国地域には、上部更新世一完新世の河岸段丘堆積物・ローム層・氾濫堆積物・扇状地堆積物・地すべり堆積物及び堆積岩を主体とする魚沼層が分布する⁸⁾。小千谷・小出地域には、中生界、新第三系及び第四系が分布する。これらの三つの地域は、陸成ー海成ー陸成のサイクルで形成された一連の堆積物と考えられ⁹⁾、地表層はほとんどが砂礫層とシルト層との混層である。これらの地域に広く分布する魚沼層は、陸成ないし内湾成の礫・砂・シルトなどからなる⁸⁾。主な河川は、信濃川、魚沼川、破間川、洩海川などである。

小国地域で対象とした井戸は小国盆地の洩海川沿いで、洩海川向斜部に分布する。盆地の東縁では小規模な扇状地や広い河岸段丘が分布し、堆積物は未固結の礫層に覆われている。西側は段丘の発達が悪く、丘陵と盆地が直接接している⁸⁾。小国地域の東側は魚沼層の礫砂シルト相 U₁ に属する。それに反して、その西側では砂シルト相 U₂、または砂シルト相 U₂ と海成シルト相 U₃ 互層である。小国町洩海川東岸の延命寺ヶ原の尾根道の露頭では、厚さ 10 m 以上の風化した明灰ー黄灰色シルトの上に厚さ約 2 m の赤灰色ローム層が重なる⁸⁾。

小千谷地域では、段丘の発達した低地帯に沿って信濃川が南から北に流下しており、河床付近の沖積

層は概して極めて薄い⁹⁾。この低地帯は地質構造的に見れば、信濃川に沿う複向斜帯にあたり、地表付近は段丘堆積物、沖積層などからなる⁹⁾。小千谷台地の地表層は、主に沖積層であり、小出地域に比べ砂、シルト互層が厚く¹⁰⁾、上位の層準ほど礫径が増大する。小千谷市木津町に湧出量 90 l/min、硫黄質の木津鉱泉がある¹¹⁾。

小出地域は六日町盆地の北端に位置する。六日町盆地は越後山脈と魚沼丘陵に挟まれた盆地で、魚沼川、破間川の流域にあたる。六日町盆地は 100 m を超す厚い沖積礫層の上を魚沼川、破間川の氾濫堆積物、越後山脈と魚沼丘陵からの扇状地性堆積物などの沖積層が覆っている⁹⁾。小出地域の地表層地質の礫径は小千谷 (6~13 cm) より大きい⁹⁾。大和町字五箇に泉温 18.2℃、湧出量 4.3 l/min、食塩泉の五箇鉱泉がある¹²⁾。

3. 地下水の調査と分析および水質分類の方法

(1) 試料水の採取方法

1995 年 3 月中旬に小国地域で消雪用の井戸 47 カ所の地下水を採取した。1996 年 1 月下旬には小千谷地域で 78 カ所、1996 年 3 月上旬には小出地域で 151 カ所の消雪用の井戸の水を採取した。ただし、小出地域の消雪用の井戸のうち 31 カ所では温度、電気伝導度のみを測定した。ORP、DO は測定していない。これらの消雪用の井戸は地下水を直接ポンプでくみ上げており、地下水位は測定できない。井戸の深さは、50-100 m 程度である。また、採取時に試料水がなるべく大気に触れないように、試料水はポンプの流出口から直接 250 ml のポリエチレン瓶に採水した。また、Si、Fe イオン (Fe³⁺+Fe²⁺) の分析用にそれぞれ 50 ml のポリエチレン瓶で 5 ml の試料水を採取した。3 月上旬は、小出地域にはまだ雪が降っており、気温は平均 0℃以下である。なお、本論文では消雪用の井戸の水は 50-100 m の帯水層の地下水と同質のものとして考察する。

(2) 主要元素の分析方法

pH は比色法、ガラス電極で測定した。電気伝導度は携帯用電気伝導度計 (CONDUCTIVITY METER ES-14, HORIBA) で測定した。水温は携帯用デジタル温度計 (DIGITAL SURFACE THERMOMETER HL-300, ANRITSU) で測定し、実験室において標準温度計で校正した。本文中の水温はすべて校正後のものである。Fe イオン、Si 測定用にはそれぞれ 5 ml を採水し、現地で試薬を加え、発色させた。そして、

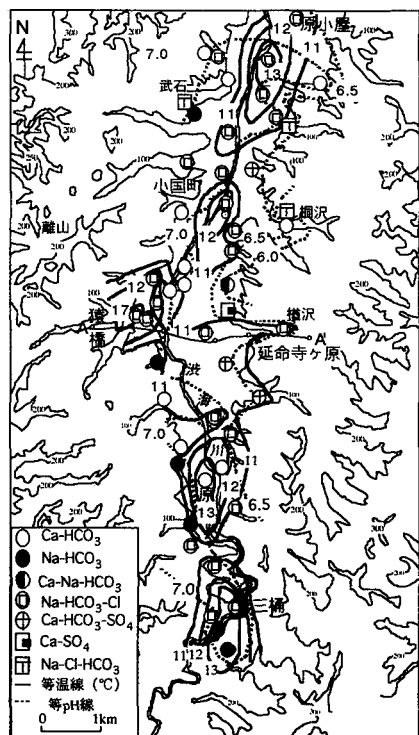


図-2 小国地域地下水温度, pH, 水質分布

実験室にて, Fe イオンは O-フェナントリン法による吸光光度法で, Si はモリブデン青法による吸光光度法でそれぞれ測定した。HCO₃⁻は、持ち帰った直後に中和滴定法で分析を行った。Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Li⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻は、実験室にてイオンクロマトグラフ法で測定した。

(3) 水質分類の方法

本研究では主要陰イオン、主要陽イオン三角ダイヤグラム上の分布を考慮し、イオンの当量比率により地下水を分類した。例えば、ある陰イオンが総陰イオン量に占める当量比率が 50%を超えると、その試料をその陰イオン名を冠した型に属するとした。どの陰イオンも当量比率が 50%を超えないときには、当量比率の和が 80%を超える二種の陰イオン名を冠した型に属するとした。陽イオンの型も陰イオンの型と同様に決めた。たとえば、Ca-Na-HCO₃ 型とは HCO₃⁻ イオン量が総陰イオン量に占める当量比率が 50%以上であり、Ca, Na イオン量が総陽イオン量に占める当量比率がそれぞれ 50%以下であり、あわせて 80%以上ということの意味する。

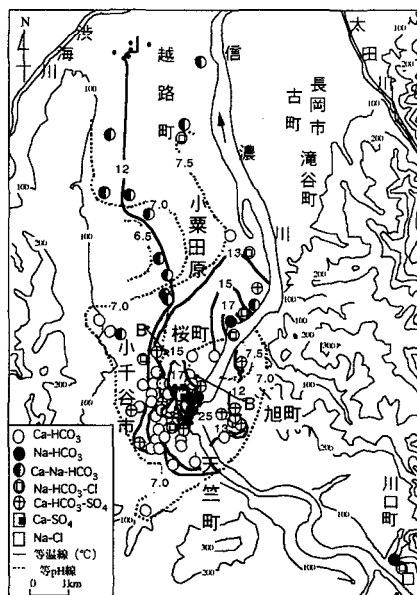


図-3 小千谷地域地下水温度, pH, 水質分布

4. 結果と考察

(1) 三地域地下水の水温分布

a) 全体の傾向

三地域の地下水の水温分布を図-2, 3, 4 に示す。図-5 には水温と Si 濃度との関係を示す。地中恒温層の温度は年平均気温より 1-2°C 高いといわれている¹³⁾。小出地域の年平均気温は新潟地方気象台¹⁴⁾の測定では 11.7°C で他の地域もほぼ同様であるから、調査地域の予想される地下水の温度は 12-14°C 程度である。しかし、小千谷、小出地域の観測値ではそれぞれ最高 25°C と 17.3°C の値が見られるなど、この値よりも数度も高い井戸が多く見られた。図-3, 4 に示すように、水温の高い井戸は小千谷地域では信濃川、小出地域では魚野川、破間川に沿って、带状に分布している。井戸の深さがほぼ一樣であるのに水温の分布がかたよっていることから、深度の差による水温の差とは考えにくい。また、これらの地下水高温帯の水質は、後述のようにほとんどが地熱水の湧出と関係がある Na-Cl 型あるいは Na-HCO₃ 型に属する。以上のことから、地下水の形成機構として、地下深部から湧出している地熱水が河川水や扇状地の浸透水の希釈により低温化する機構が考えられる。以下では、この視点に立って、各地域の水温分布の特徴とその原因を考察する。

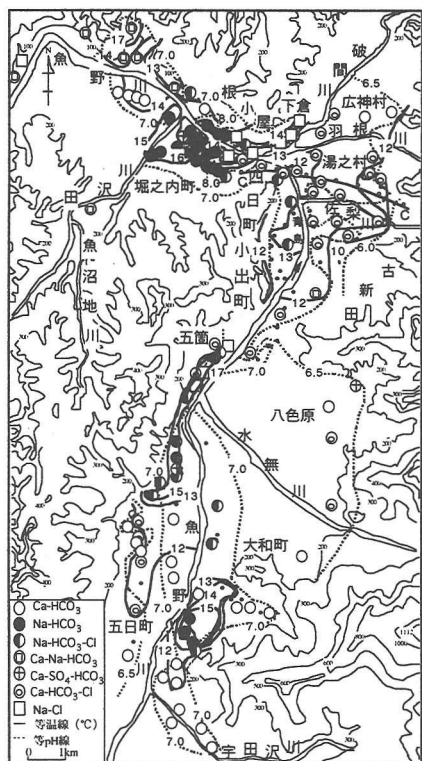


図-4 小出地域地下水温度、pH、水質分布

b) 小国地域の水温分布の特徴とその原因

小国地域の水温分布を図-2に示す。図のように、ほとんどの点で9～12℃であり、小千谷、小出地域と比べてやや低い。水温の少し高い(12℃を超える)地点は渋海川に沿って、N-S方向に分布する。一方、10℃以下の低温の地点は小国町盆地東側の扇状地、段丘に沿って分布している。以上のように、小国地域では他地域のような地熱水のはっきりした影響は見られなかった。

c) 小千谷地域の水温分布の特徴とその原因

小千谷地域の水温分布を図-3に示す。この地域は地下水温によって小千谷市地区、旭町地区、小栗田原地区の三つの地域に区分され、この順に水温が高い。小千谷地域で最も水温の高い小千谷市地区は、小千谷市街地を含む広い段丘面を中心とする台地にある。ここでは、14℃以上の地点が信濃川西側沿いに帯状に分布し、最高水温は25℃を示す。また信濃川流路に近いほど地下水の水温が高い傾向がある。おそらく、信濃川流路沿いに伏在断層が存在し、それにより、その地区の地下水は後述するような地下深部の地熱型地下水の特徴を示すものと考えられる。

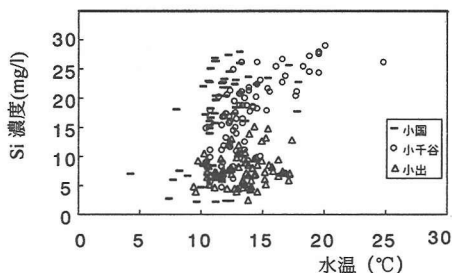


図-5 地下水温度とSi濃度との関係

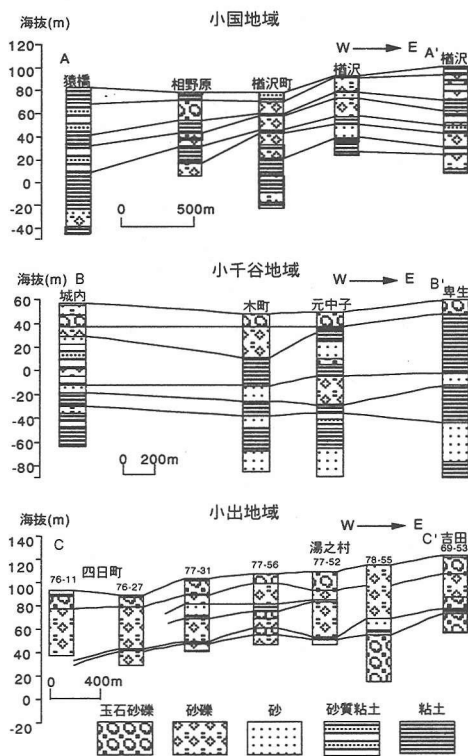


図-6 小国、小千谷、小出地域地質柱状断面図(小国、小千谷、小出町の資料より、各柱状図の位置は図-2、3、4のA-A',B-B',C-C'ライン上である)

d) 小出地域の水温分布の特徴とその原因

小出地域の水温分布を図-4に示す。高い水温の地点は破間川沿いの北側に魚野川沿いの西側に、帯状に分布し、17℃を超える高温帯が存在する。この高温地帯は新発田-小出構造線^{15), 16)}の位置と一致している。一方、魚野川に沿う東側は低温帯に属する。魚野川と破間川沿いの東側には、透水性のよい扇状地と段丘が広域に分布し、この部分の堆積層では地下水は東側から魚野川、破間川に向かって流

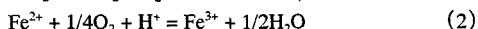
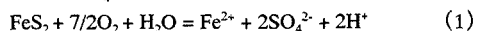
れている可能性がある。このため、地下深部から地熱水が湧昇したとしても、扇状地からの冷たい地下水と混合して水温が下がると考えられる。しかし、それでも他の地域に比べれば高温になっている。

(2) 三地域の地下水の水質分布

a) 小国地域の水質分布の特徴

小国地域の電気伝導度は、小千谷地域、小出地域に比べて低く、電気伝導度の高い地点と水温の高い地点はほぼ一致する。

小国地域の東側では Fe イオン、 SO_4^{2-} 濃度が相対的に高く、それぞれの最高濃度は 12.7mg/l, 31.2mg/l に達する。pH は約 6 である。それに対して、西側では SO_4^{2-} 濃度が低く、Fe イオン濃度は特に少ない。また pH は 7.0 以上である。東西の差には、地質の酸化・還元環境の相違が影響していると考えられる。図-6 に地質柱状断面図を示す。図のように、東側は西側よりシルト層が多く、層厚も厚い。西側にある海成シルト相 U3 (図-1) 中には有機沈殿物が含まれるので、その周辺を還元環境にすると考えられる。一方、東側では酸化環境に属するとみなされる。東側のボーリング地点周辺の地面には、赤色化が認められ、その地域の泥岩を X 線回折法で分析した結果、 FeS_2 が含まれることがわかった。 FeS_2 は、酸化環境下で地下水中の酸素に酸化されて、以下の反応により SO_4^{2-} となる。



この結果、東側の地下水の Fe イオン、 SO_4^{2-} の濃度が高くなったと考えられる。一方、西側の地下水の pH は東側より高く、Fe イオンはその pH 条件では酸化鉄 ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) として沈殿し¹⁷⁾、Fe イオンの濃度が東側より低くなったと考えられる。

小国地域の東側の地下水水質は、渋海川に近い地点で Ca-HCO_3 型、 Ca-Na-HCO_3 型であるが、東側の山沿いの段丘およびその周辺ではさまざまな水質タイプ (図-2) が分布する。小国地域の西側の地下水水質は、主に Na-HCO_3 型と Ca-HCO_3 型に属する。また、山に近いところではほとんど Na-HCO_3 型で pH 値は 7.0 以上である。 Na-HCO_3 型と Ca-HCO_3 型の地下水水質の形成には、(4) で述べるように地下水と岩石の相互作用の時間が関与していると考えられる。

b) 小千谷地域の水質分布の特徴

電気伝導度分布でも、水温分布と同様に信濃川流路に近いほど電気伝導度が高い傾向がみられる。特に 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ に達する高いところが信濃川の東側と西側とに合わせて 6 か所あり、小千谷市内の電気

伝導度の多くは 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上である。また、信濃川の下流に向かってたんだん低くなる。pH 分布は、水温分布と似た傾向を示し、地下水温の高温帯で大部分が 7 を超え、pH は 7.0~7.8 となっている (図-3)。一方、水温の低い小栗田原の三サンプルの pH はそれぞれ 6.6, 6.7, 6.8 と低い。

小千谷地域は 4.(1) c) で述べたように水温で大きく 3 つに分けられたが、これらは水質でも異なっていた。最も水温の高い小千谷市地区の地下水水質は主として Na-HCO_3 型、 Ca-HCO_3 型に属する。水質分布によると、水温が高い地点のほとんどは、 Na-HCO_3 型の水質に属する。この原因については後述するが、地下深部の高温水に影響を受けて形成された地下水と考えられる。次に水温の高い旭町地区の地下水水質のほとんどは Ca-HCO_3 - SO_4 型に属する。その水質は SO_4^{2-} を多く含み、最高濃度が 36.5 mg/l に達する。この水質は地表層の FeS_2 鉱物などの自然風化により形成される地下水と考えられる。水温が低い小栗田原地区の地下水は、主に Na-HCO_3 -Cl 型に属する。他の地区と比べ、電気伝導度はやや低く、Si 濃度は低く、6 mg/l である。このことから、地中での滞留時間が短い、浅い地下水の影響が大きいと考えられる。 NO_3 濃度は高く、最高濃度は 37.2 mg/l に達する。この地区では農耕地が分布しており、施肥の影響を受けた浅層地下水が NO_3 濃度に影響していると考えられる。また、小千谷地域では図-5 のように、水温が高いほど Si 濃度が高い傾向が見られる。このことから、小千谷地域では水温が水質形成に与える影響が強いことが考えられる。

c) 小出地域の水質分布の特徴

小出地域の電気伝導度、pH の分布 (図-4) は、水温の分布と似て、丘陵および山地の山麓部から魚野川に向かって次第に高くなる。特に下倉地区は魚野川、破間川、羽根川の三つの川の交流点に位置し、河川水の希釈作用が強いと考えられるにもかかわらず、その地区の電気伝導度の最高値は 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ にまで達している。pH は、地下水温の高温帯付近で 7.0 以上であり、魚野川に沿う東側では pH 6.0~6.5 で最低値は pH 5.5 を示す。小出地域の地表層では、小千谷地域に比べて礫径は大きく、6~30 cm である¹⁰⁾。そして、柱状図 (図-6) からみて、小出地域の地表層のほとんどは砂礫層であることが分かる。このため、小出地域の浅い地層の地下水は小千谷地域のものよりも地中滞留時間が短いと考えられる。

また、図-5 に示すように、小出地域の地下水の Si 濃度と地下水温の間には関係がみられない。小出地域の高温帯の地下水は Na-Cl 型と Na-HCO_3 型に属する。 Na-Cl 型地下水の起源については 4. (3) で

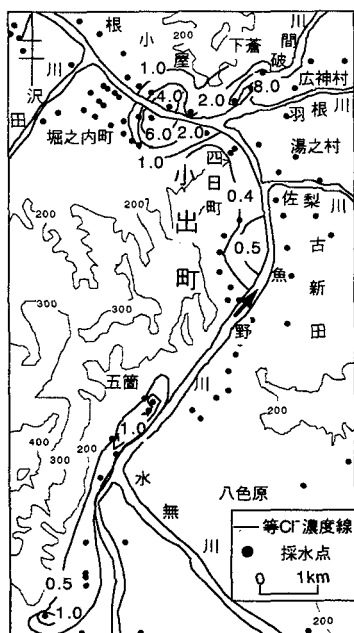


図-7 小出地域地下水 Cl 濃度 (meq/l) 分布

述べる。Na-HCO₃ 型地下水の起源については 4. (4) で述べる。Na-Cl 型地下水は、主に魚野川の西側、さらに魚野川、破間川の北側に帯状に分布する。小出地域の Cl 濃度分布を図-7 に示す。下蒼と四日町の周辺では Cl 濃度が 6~8.8 meq/l と高いが、小出町では Cl 濃度は 0.5 meq/l 以下に大幅に下がっている。この地域には四つの河川（魚野川、破間川、羽根川、佐梨川）があり、それぞれに透水性の良い扇状地が発達している（図-6）。下蒼と四日町の周辺では 2 河川（破間川、魚野川）の扇状地浸透水の影響しかないが、小出町では 4 河川の浸透水により地下深部からの地下水が希釈作用を受け、Cl 濃度は下がっていると考えられる。

Na-HCO₃ 型地下水は主に高温帯に分布する。その電気伝導度は約 100~200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ で、pH は 7.0 以上、最高水温は 17℃に達する。Ca-HCO₃ 型の地下水は、主に魚沼川に沿う東側、宇田沢川に沿う周辺および大和町の周辺に分布する。この地下水は水温が低く、電気伝導度も少し低い。この水質タイプの地下水は、浅い地層の地下水に属すると考えられる。

Na-HCO₃-Cl 型地下水は主に魚野川沿いの西側と根小屋の周辺に分布する。これらの地下水は、深層の Na-Cl 型地下水が伏在断層を通して地表へ上昇する時、浅い地層の Ca-HCO₃ 型地下水と混合しでき

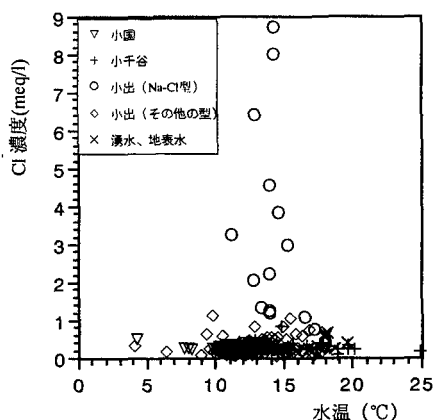


図-8 地下水温度と Cl 濃度との関係

たものと考えられる。

小出地域で特徴的な Ca-SO₄-HCO₃ 型地下水は、堀之内町でみられる。この地点の地表層は氾濫堆積物地層に属する。鉄の濃度も高く、6.8mg/l に達する。SO₄²⁻には一般に石膏由来と黄鉄鉱由来の二つのものがある。ここでは地下水中に鉄の濃度が高いことから、SO₄²⁻は浅い地層中の黄鉄鉱の酸化に由来すると考えられる。

(3) Na-Cl 型地下水の起源

一般に、地下水の濃度は岩石からの溶質供給の程度に左右され、この供給量が大いほど濃度は高くなる。この溶質供給は地下水温が高いほど活発になり、岩石起源の成分では水温が高いほど濃度が高くなることが予想される。この考え方で、Cl の起源を考えるために、図-8 に水温と Cl 濃度との関係を示す。図-8 によると、小出地域の Na-Cl 型では同程度の水温で Cl 濃度の幅が大きくなっている。このことから小出地域では岩石以外の Cl 供給源があることが分かる。

小出地域では、図-7 に示すように、Cl の等濃度線の分布は高温帯の等温線分布（図-4）とよく一致する。一方、高温帯の魚野川付近では、地表下 100 m 程度の地層で Cl 濃度が上層よりも幾分高い傾向はみられるが、最大でも 1 meq/l を超えないという報告がある¹⁰⁾。このことから、本研究で観測された高濃度の Cl を含む水温の高い地下水は、120m 程度までの浅い地層ではなく、もっと深い地層で形成された地下水の影響を受けていると推測される。高温で高い溶存イオン濃度を有する Na-Cl 型地下水には、地下深部のジオプレッシャー型熱水が関与しているとされる¹⁰⁾。また、塩化物型地下水は、地

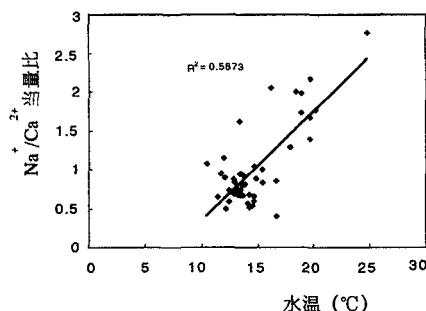


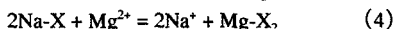
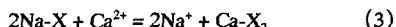
図-9 小千谷市地区地下水温と $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 当量比との関係

層中にトラップされた化石海水であるとされる。このため、高濃度 Cl^- イオンは化石海水 (Na-Cl 型地下水) 型熱水に由来するものと考えられる。以上のことから、小出地域の Na-Cl 型地下水は、地下深部から伏在断層を通して上昇したジオプレッシャー熱水系が浅い地層の地下水と混合してできたと考えられる。

(4) Na-HCO_3 型地下水の起源

小千谷地域・小出地域と小国地域では、ともに Na-HCO_3 型地下水はあるが、湧出する場所の地形とその水温が違っていて、起源も異なると考えられる。

小国地域では、山に近いところで Na-HCO_3 型になっていた。これには、地下水と岩石の相互作用の時間が関与していると考えられる。一般に、土壤あるいは地層中の CO_2 は地下水に溶解する。この地下水が岩石と接触すると、 CO_2 が HCO_3^- に変わり、 Ca^{2+} を溶かし出し、 HCO_3^- 濃度、アルカリ度は増大する²⁰⁾。さらに、地下水と岩石との接触時間が長くなると、 Ca^{2+} を多く含む岩盤内の地下水と粘土鉱物との間で次式の陽イオン交換反応が進み Na^+ が解離して地下水中に Na^+ が増加する²¹⁾。これは一般に粘土鉱物の陽イオンの吸着能力²²⁾ が $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ の順で大きいためである。



ここに、X は粘土鉱物である。小国地域では山の海拔は小千谷地域や小出地域より高く、最高の八石山地は 500m に達する。そのため、山から地中を流下して来た地下水は地中の滞留時間が長くなり、イオン交換、式(3),(4)により Ca-HCO_3 型から Ca-Na-HCO_3 型と Na-HCO_3 型及び Mg-HCO_3 型に変化したと考えられる。一方、小千谷市地区では Na-HCO_3 型は主として小千谷市内の信濃川左岸沿いに分布している(図-3)、小国地域に比べて水温も高い。同じ山

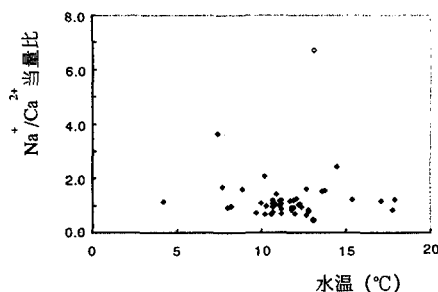


図-10 小国地域地下水温と $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 当量比との関係

地から流下してきた地下水を採水する井戸では位置の近い井戸は同じ水質となる。しかし、 Na-HCO_3 型水質の周辺ではさまざまな水質が分布し複数の型の地下水が混在している。このことから小千谷市地区の Na-HCO_3 型水質は、小国地域のように同じ水が滞在時間により異なる水質になるのではなく、滞留時間以外の影響により形成されると考えられる。小千谷市地区では Na-HCO_3 型地下水の水温が高いことから、この地下水は地下深部から湧出してきたものであり、このことが水質の大きな決定要因と考えられる。Ellis & Mahon の高温高压の条件での岩石と水の相互作用の実験^{23), 24)} によると、陽イオンの組成比や珪酸の溶存量には温度依存性が強く現れ、地下水中の陽イオンの組成比と水温との関係からその水質は地下熱水系と関係があるかどうか、あるいは浅い地層から湧出した地下水か地下深部から湧出した地下水であるかを区別できる。そこで、小千谷市地区の Na-HCO_3 型地下水について水温と $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 当量比との関係を図-9 に示す。また、比較のために、小国地域の Na-HCO_3 型地下水についての水温と $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 当量比の関係も図-10 に示す。図のように小千谷地域の地下水は水温の上昇に伴って、地下水中の $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 当量比も次第に高くなっていく傾向が見えるが、小国地域の地下水は水温が上昇しても、 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 当量比の上昇はみられない。このことから、小国地域では、イオン交換による水質変化が終わり、水質が安定した後で他の水との混合などにより水温が変化したものと考えられる。一方、小千谷地域では、高温の地下水が上昇する過程でイオン交換が起きる場を通過し、このときに、水温によりイオン交換反応が加速されと考えられる。小出地域の Na-HCO_3 型についても堀之内町では小千谷地域の Na-HCO_3 型地下水と同様の傾向がみられ、同様の機構が働いていると考えられる。この地下水の上昇は伏在断層の存在によるのではないかと考えられる。

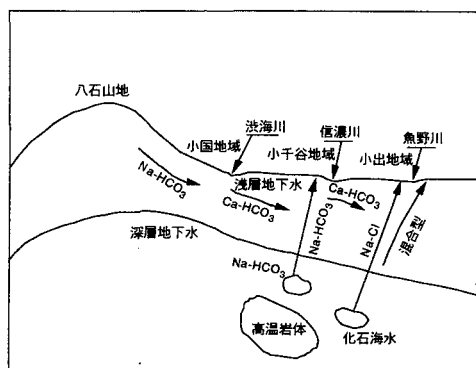


図-11 小国・小千谷・小出地域地下水形成のモデル

(5) 地下水水質形成システムのまとめ

4.(1)～4.(4)をまとめると、小国地域の地下水は浅い地層の地下水に属し、小千谷、小出地域の地下水は地下深部の高温水の影響が大きい地下水に属するといえる。この深部の高温水については、高温井戸が局所的にあること、10℃以下の川の水の影響が考えられる所でも高い温度を示すことから、高温岩体の存在によるのではないかと推定している。以上から、三地域の地下水の起源を整理すると、それぞれ図-11のような過程で形成されたものと考えられる。また、地熱水の湧出と関係のある地下水水質（Na-HCO₃型あるいはNa-Cl型）の存在は、その地域の地下に伏在断層があることを示唆している（図-1）。

5. 結論

地球化学的水質分類により新潟県の三地域の地下水水質形成システムを検討した結果、以下の知見がえられた。

(1) 三地域では主に川沿いに地下水高温帯が形成されていたが、これは地質構造線などでの地熱水の上昇の影響と扇状地地下水の混合の影響によると考えられる。

(2) 三地域の水質型の相違の原因としては、地熱水の影響、地質の酸化還元環境の影響、地下水と岩石のイオン交換の影響が考えられる。

(3) 三地域の浅い地層の地下水では Cl⁻濃度は 1meq/l を超えず、また、Cl⁻濃度は水温、電気伝導度とは関係がみられない。このことから、Na-Cl 型地下水の高濃度の Cl⁻は水-岩石の相互作用の結果ではなく、地下深部から断層を通して上昇してきた

ジオプレッシャー熱水系の化石海水に由来するものであると考えられる。

(4) 三地域の Na-HCO₃ 型水質は、イオン交換反応で形成されたものであると考えられる。また、地下水水温と Na⁺/Ca²⁺ 当量比との関係から、イオン交換反応は小国地域では滞留時間、小千谷地域では水温に強く影響されていると考えられる。

(5) 地熱水の湧出と関係のある地下水水質（Na-HCO₃ 型あるいは Na-Cl 型）の存在はその地域の地下に伏在断層があることを示唆している。

謝辞：本研究をまとめるにあたり、元新潟大学吉村尚久教授、大木靖衛教授、藤田至則教授、柴崎達雄教授及び山梨大学中村文雄教授に御懇切なる御指導をいただいた。また、新潟県内の関係諸機関には、地下水の採取・分析にご協力いただいた。記して謝意を表したい。

参考文献

- 1) 越谷 信，長江亮二，大上和良，森田安彦：南部阿武隈山地花崗岩体中の断裂系と地下水，応用地質，Vol. 32, No.4, pp.23-39, 1991.
- 2) 森田誠也，嶋田 純，長 久：深部結晶質岩中の地下水の化学的特性とその挙動（その1），応用地質，Vol.32, No.4, pp.11-22, 1991.
- 3) 升元一彦，日比谷啓介：地球化学的手法による岩盤内の広域地下水流動挙動評価，応用地質，Vol.36, No.14, pp.70-79, 1996.
- 4) 谷中隆明，永野多美雄，山崎興樹，水谷宣明：新潟県六日町盆地の地下水流動，地下水学会誌，Vol. 31, No.3, pp.143-153, 1989.
- 5) 宇野尚雄，杉井俊夫，棚橋秀行：濃尾平野の地下水水質の分布特性，地下水技術，Vol.35, No.11, pp.33-43, 1993.
- 6) 内田洋平，佐倉保夫，荒川隆嗣：山形盆地の地下の温度分布から推定される地下水流動，日本水文科学会誌，Vol.23, No.4, pp.169-179, 1993.
- 7) 羅漢金，坂本康，久保田喜裕：新潟県中越地域における地下水中のヒ素濃度の地球化学的研究，環境工学研究論文集，第36巻，pp.243-251, 1999.
- 8) 小林巖雄，立石雅昭，黒川勝己，吉村尚久，加藤禎一：岡野町地域の地質・地域地質研究報告（5万分の1地質図幅），地質調査所，1989.
- 9) 柳沢幸夫，小林巖雄，竹内圭史，立石雅昭，茅原一也，加藤禎一：小千谷地域の地質・地域地質研究報告（5万分の1地質図幅），地質調査所，1986.
- 10) 風岡 修，立石雅昭，小林巖雄：新潟県魚沼地層の魚沼層序と層相，地質学雑誌，92, pp.829-852, 1986.

- 11) 地質調査所編：日本鉱産誌 BIV-a 水及び地熱—地熱及び温泉・鉱泉一，地質調査所，1957.
- 12) 新潟県：新潟県地質図（1：200,000）及び同説明書，p.439，1977.
- 13) 山本荘毅：地下水水文学，共立出版株式会社，p.209，1992.
- 14) 新潟地方気象台：新潟県気象月報，1995 7～1996 6.
- 15) 山下 昇，小坂共栄，石垣和明：小出北方の新発田—小出構造線，島弧変動研究報告，No.1，pp.33-40，1979.
- 16) 山下 昇：小出北方の新発田—小出構造線，地団研専報，No.24，pp.199-207，1982.
- 17) Stumm, W. and Morgan, J.J.（安部喜也、半谷高久訳）：一般水質化学（上），共立出版，p.164，1974.
- 18) 小出町建設課：水理解析篇，p.50，1994.
- 19) 大木靖衛，佐藤 修，青木 滋：北部フォッサマグナのジオプレッシャー熱水系に起因する地震と地すべり，月刊地球/号外，No.5，pp.121-125，1992.
- 20) 杉崎隆一，柴田 賢：地下水の地球化学的研究，第2報，濃尾平野における地下水と地質構造との関連性，地質学雑誌，67，pp.437-439，1961.
- 21) 三木一美，吉沢 浦：トンネル湧水の発生形態と水質変動について，土木学会論文報告集，No.282，pp.31-43，1979.
- 22) 須藤俊男：粘土鉱物-増補版，岩波書店，p.145，1964.
- 23) Ellis, A.J. and Mahon, W.A.J.: Natural hydrothermal systems and experimental hotwater/rock interactions, *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol.28, pp.1323-1357, 1964.
- 24) Ellis, A.J. and Mahon, W.A.J.: Natural hydrothermal systems and experimental hotwater/rock interactions(part2), *Geochim. Cosmochim. Acta*, Vol.31, pp.519-538, 1967.

STUDY ON THE FORMATION SYSTEM OF GROUNDWATER QUALITY ON THE BASIS OF GEOCHEMICAL CLASSIFICATION FOR THE GROUNDWATER IN THE OGUNI-OJIYA-KOIDE AREA OF NIIGATA PREFECTURE

Han Jin LUO, Yasushi SAKAMOTO and Kei NISHIDA

The formation system of groundwater quality was examined by geochemical classification using major ion concentrations with groundwater temperature distributions, and geological and topographical conditions for the groundwaters in three areas of Niigata Prefecture. Groundwaters were classified based on the ratios of major ion concentrations.

Spatial distributions of groundwater temperature and groundwater quality types were related to each other. This suggested the influences of geopressured hydrothermal water and groundwater flow through alluvial fans. Geological and topographical conditions resulted in the geological oxidation-reduction environment which determined the concentration of SO_4^{2-} and so on. Cation concentrations were influenced by ion exchange with rock. Na-Cl type waters were estimated to be originated from the fossil sea water of deep ground. Na- HCO_3 type waters could be categorized into two types based on the relation between groundwater temperature and $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ equivalent concentration ratio. One type was strongly influenced by alluvial groundwater for which the rate of ion exchange was controlled mainly by residence time. The other type was influenced by hydrothermal water for which the rate of ion exchange was controlled mainly by water temperature. The existence of Na-Cl type and Na- HCO_3 type groundwaters suggested the existence of concealed faults.