同位体比から見た松代群発地震地域の深部流体の起源

防災科学技術研究所* 吉 田 則 夫
信州大学工学系研究科** 奥 澤 保
信州大学理学部物質循環学科*** 塚 原 弘 昭

Origin of Deep Matsushiro Earthquake Swarm Fluid Inferred from Isotope Ratios

Norio YOSHIDA

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Tennodai
3-1, Tsukuba, Ibaraki 305-0006, Japan

Tamotsu OKUSAWA

Graduate School of Science and Technology, Shinshu University, Asahi
3-1-1, Matsumoto, Nagano 390-8621, Japan

Hiroaki TSUKAHARA

Department of Environmental Sciences, Faculty of Science, Shinshu University,
Asahi 3-1-1, Matsumoto, Nagano 390-8621, Japan

(Received October 3, 2001; Accepted August 6, 2002)

In the final stages of the Matsushiro earthquake swarm (August 1965–October 1967), a large volume of groundwater was generated that continues to flow as of this writing. We studied the spring water origin by measuring oxygen/hydrogen isotope ratios and concentrations of Na^+ and Cl^- , the main dissolved ions. We took water samples from June 1999 to October 2000. Data plots for $\delta^{18}\text{O}$ vs. δD are distributed along a well determined linear regression line having an endpoint, i. e., river water, at the ordinary value of rainwater. The regression line can be extrapolated toward estimated $\delta^{18}\text{O}$ and δD of "andesitic magmatic water" originating from magma in subduction zones. This implies that the Matsushiro groundwater can be regarded simply as a mixture of 2 fluids, i.e., surface water and andesitic magmatic water. We obtained the carbon isotope ratio of CO_2 , the main component of free gas in spring water. $\delta^{13}\text{C}$ ranges from -7.1‰ to -3.1‰ , suggesting that the source of CO_2 is also magmatic. The ratio $^3\text{He}/^4\text{He}$ shows that He in the free gas is from the mantle or magma. These 3 pieces of evidence —(1) $\delta^{18}\text{O}$ and δD values, (2) $\delta^{13}\text{C}$ of CO_2 , and (3) $^3\text{He}/^4\text{He}$ — suggest that the origin of Matsushiro water is magmatic. Considering the presence of an electric conductive layer and seismic reflective layers 15 km beneath the Matsushiro area, we presume that this andesitic magmatic water accumulates as a thin layer at this depth. An impermeable sheet presumably lying just above the water layer was formed by precipitates from magmatic water.

We present the following model of the relation between groundwater and earthquakes: When the impermeable sheet broke and high-pressure water with CO_2 rose into the upper crust, the crust was weakened, causing the Matsushiro earthquake.

Key words: groundwater, Matsushiro earthquake swarm, oxygen/hydrogen isotope ratios, andesitic magmatic water, magmatic gas.

* 〒305-0006 つくば市天王台 3-1

*** 〒390-8621 松本市旭 3-1-1

** 〒390-8621 松本市旭 3-1-1

§ 1. はじめに

深部流体(深部地下水)の動きが地震の発生に大きな影響を与えているということは良く知られている[例えば Healy *et al.* (1968)]. 最近では1995年1月に発生し、阪神・淡路地区に大災害をもたらした兵庫県南部地震である[Tsunogai and Wakita (1995)]. 1965年8月に発生し、1967年10月にほぼ終息した松代群発地震は地震と密接な関係のある深部地下水が多量に湧出したことで知られている[野口・他(1969)]. 松代群発地震はCO₂を主成分とし、CH₄を数十～数千ppm含む遊離ガスを付随した高塩分濃度の地下水の湧出を特徴とする[細野(1968), 野口・他(1969), 鶴見(1979), Yoshioka *et al.* (1970)] 地下水が引き起こした典型的な地震の一つである[大竹(1976)]. 断層運動による地割れは皆神山(みなかみやま)北東部に現れ、この地割れ地帯から多量の地下水が湧出した[Tsuneishi and Nakamura (1970)]. 地下水湧出の終了後まもなく地震活動が低下したことから、松代群発地震と地下水との密接な関連を述べている研究が数多くみられる[Kisslinger (1975), 中村(1971), Nur (1974), Stuart and Johnston (1975)]. また、飯島(1969)によれば地下水の総湧出量は10⁷ m³と莫大な量であった。中村(1971)は松代群発地震の発生要因として地下深部から水が急上昇してきたとする水噴火説を、恒石・高橋(1975)は深部地下水が急上昇した原動力として、炭酸ガスの発泡を考える炭酸ガス・水噴火説を提唱した。群発地震の発生期間中、多量の湧出が続いた地下水の化学的特徴は、Na⁺, Cl⁻, Ca²⁺, CO₂の含有量が異常に高いことであった。このことからこの地下水の起源としては化石海水あるいは、マグマから発生した塩素ガスが地下深部の石灰岩と反応してCO₂とCaCl₂を形成し、これらを溶解した地下水が上昇したとする考え方等があるが、まだ結論は出ていない。Wakita *et al.* (1978)は、群発地震終息約10年後に潜在断層上から採取した土壤ガス中のヘリウム同位体比の値がマントルの値に近いことから、この地下水の起源を上部マントルから上昇した安山岩質ダイアビルマグマの冷却による水の放出だと考えた。大竹(1976)は化石海水と岩石からの脱水反応により放出された水との混合とし、笹井(1994)は下部地殻に電気伝導度の高い領域が存在することから、この良導層を自由水と考え、この下部地殻の高塩分濃度の水が群発地震に関与しているものと考えた。松葉谷・他(1980)は湧水の起源を化石海水と地表水との混合とした。CO₂が土壤中に高濃度含まれることに着目した清水・他(1998)は、松代群発地震地域にほぼ北西-南東方向に走る地震断層の南北伸縮と土壤CO₂濃度変化とがよい相関を示すことを見いだした。塚

原・他(1998)は群発地震が発生してから4年後に掘削された調査用ボーリング孔から自噴した地下水を深部流体に近い組成を持つと考え、その同位体比を $\delta^{18}\text{O} = +2\text{‰}$, $\delta\text{D} = -30\text{‰}$ と見積もり、深部流体を化石海水とする積極的根拠は薄いとされた。また湧水の溶存イオン濃度の長期経時変化を観測した奥澤・塚原(2001)は松代湧水中の溶存イオン濃度の変化機構を深部地下水と浅層水の2液混合で定性的に説明した。また奥澤・塚原(2002)は松代町の極く近傍で発生した地震の際、湧水中の溶存イオン濃度に変化が観測されたことを報告した。

本論文では遊離ガス中のCO₂とCH₄の炭素同位体比、湧水中の酸素同位体比と水素同位体比および、溶存イオン濃度を新たに測定するとともに、現在までの地球化学的研究結果を総合的に解析し、湧水およびそれに付随する遊離ガスの起源を推定した。さらに、電気探査により明らかにされた地下深部の良導層および、自然地震を使って全国の群発地震地域で次々に発見された地震波反射面の存在を重要な情報として捕らえ、今回の測定結果から推定した流体との関連についても言及した。

§ 2. 試料採取地点およびその概要

2.1 湧水およびガス試料採取地点

遊離ガスと地下水試料を松代地震断層[Nakamura and Tsuneishi (1966)]上および、加賀井地区、田中地区、皆神山裾野の14地点から採取し(Fig. 1), CO₂とCH₄の炭素同位体比、酸素・水素同位体比、CH₄/C₂H₆比および、主要溶存イオン成分を測定した。

2.2 採取地点の概要

採取地点の概要を以下に示す(Fig. 1を参照)。(1) OSN-U: 掘削深度30mの井戸からの自然湧水である。CO₂とN₂が主成分で、そのうちCO₂を87～94%, CH₄を250～500ppm, C₂H₆を16～25ppm含むガスが遊離している。水温は約27℃である。(2) OSN-L: 掘削深度360mの井戸からの自然湧水であり、遊離ガスが付随している。水温は約23℃である。(3) ICK-1: 掘削深度86mの井戸からの自然湧水である。CO₂とN₂が主成分で、そのうちCO₂を72～93%, CH₄を2,000～2,600ppm, C₂H₆を14～20ppm含むガスが遊離している。水温は約38℃である。(4) ICK-3: 掘削深度122mの井戸からの自然湧水である。CO₂とN₂が主成分で、そのうちCO₂を75～96%, CH₄を30～240ppm, C₂H₆を14～21ppm含むガスが遊離している。水温は約41℃である。(5) MATK: 掘削深度600mの井戸からの自然湧水であり、CO₂を主成分とするガスが遊離している。水温は約43℃である。(6) MAT: 潜在断層上に位置する掘削深度600mの井戸からの自然湧水であ

Fig. 1. Locations of measurement points (●).

The area between 2 lines indicates the zone of buried Matsushiro earthquake faults. The base map is a 1:25,000 "Matsushiro" topographic map issued by the Geographical Survey Institute.

る。CO₂とN₂が主成分で、そのうちCO₂を87~97%、CH₄を58~115 ppm、C₂H₆を10~20 ppm含むガスが遊離している。水温は約46℃である。(7) SHR-1: 老人の家(尚和寮)前の水田に群発地震の際に湧出したもので、Wakita *et al.* (1978)によれば、ここから採取したヘリウムガスの同位体比がマントル起源の値を示した。水温は約28℃である。(8) SHR-2, SHR-3: SHR-1から東へ50 mほど離れた尾根際の湧水であり、遊離ガスを付随する。水温は約24℃である。(9) SHR-4: SHR-1から西へ50 mほどの湧水地点で遊離ガスを付随する。水温は約23℃である。(10) JIJ: SHR-1の山を挟んで東側の小川に流れ込む湧水である。遊離ガスは付随しない。水温は約23℃である。(11) MATSUI: 皆神山の裾野にある自然湧水であり、遊離ガスは付随しない。水温は約17℃である。(12) KOMOI: 皆神山の裾野にある自然湧水であり、遊離ガスは付随しない。水温は約17℃である。(13) M. RIVER: 松代町内を流れる河川であり、この河川水の分析結果を松代の地表水の値とした。水温は未測定である。

2.3 酸素・水素同位体比および炭素同位体比の測定

酸素・水素同位体比の測定は(株)地球科学研究所に、炭素同位体比の測定は(株)三菱マテリアルに依頼した。

酸素同位体比は水-二酸化炭素平衡法により測定した。まず、試料水とガスを25℃の恒温水槽中でCO₂と同位体交換平衡状態にする。次にCO₂ガスのみを真空装置内に移し、液体窒素などで水蒸気を除去する。この精製したCO₂ガスをNuclide Associates社製の6-60型質量分析計に導入し、酸素同位体比を測定した。測定精度は±0.2‰程度である。

水素同位体比は金属亜鉛還元法により測定した。試料水と粒状亜鉛を真空装置内へ入れ、水化した後、反応容器内を真空にして密封する。その反応容器を500℃で約30分間加熱し、水化した試料水をH₂に還元する。このH₂ガスをVG社製MM602C型質量分析計に導入し、水素同位体比を測定した。測定精度は±1‰程度である。

炭素同位体比は試料ガスを液体窒素でCH₄とCO₂に分離した後、CH₄については900℃でCuOに通し、生成したCO₂を精製した後、質量分析計に導入し、炭素同

Table 1. $\delta^{18}\text{O}$, δD , and the major ion concentration in water from the Matsushiro earthquake swarm area.

Site	Sampling Date	Depth m	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	δD ‰	Na^+ meq/l	Cl^- meq/l
OSN-U	1999.06.03	-30	-6.4	-64.1	123	170
	1999.10.29		-6.7	-67.2	117	145
	1999.11.03		-6.8	-67.2	122	148
	1999.11.10		-6.7	-65.2	123	149
	1999.11.17		-6.8	-63.4	123	147
	1999.11.24		-6.8	-63.1	124	148
	2000.01.26		-6.6	-61.2	119	161
	2000.03.08		-6.5	-62.5	124	173
	2000.04.24		-6.4	-63.2	124	161
	2000.06.04		-6.5	-61.0	126	166
OSN-L	2000.10.12	-360	-6.9	-59.2	118	159
	1999.06.03		-4.7	-60.6	154	222
ICK-1	1999.06.03	-86	-6.4	-62.8	95	169
	1999.10.29		-6.4	-63.6	94	171
	1999.11.10		-6.7	-62.7	101	161
	1999.11.17		-6.7	-63.4	98	157
	1999.11.24		-6.6	-62.7	98	158
ICK-3	1999.06.03	-122	-6.2	-63.5	96	180
	1999.10.29		-6.1	-62.3	94	172
MATK MAT	1999.06.03	-600	-3.6	-52.1	150	240
	1999.06.03		-3.6	-52.7	148	240
	1999.10.29	-600	-4.1	-60.7	154	235
	1999.11.03		-4.3	-58.1	147	221
	1999.11.10		-4.2	-58.0	149	219
	1999.11.17		-4.4	-57.6	148	215
	1999.11.24		-4.3	-54.0	146	215
	2000.01.26		-4.4	-53.2	138	226
	2000.03.08		-4.2	-53.2	139	226
	2000.06.04		-4.4	-53.3	140	216
	2000.10.12		-3.9	-51.3	145	235
	1999.06.03	unknown	-9.1	-72.1	26	73
	1999.10.29		-9.2	-71.9	28	71
	1999.11.03		-9.0	-71.0	29	71
	1999.11.10		-9.2	-73.5	30	73
	1999.11.17		-9.2	-71.0	27	72
SHR-1	1999.11.24		-9.2	-71.4	29	71
	1999.06.03	unknown	-10.1	-75.5	18	42
SHR-2	1999.06.03		-10.0	-75.1	20	49
SHR-3	1999.06.03	unknown	-9.0	-73.2	35	85
SHR-4	1999.06.03	unknown	-10.9	-76.9	5	29
JIJ	1999.06.03	unknown	-11.5	-77.8	2	3
MATSUI	1999.06.03	unknown	-11.3	-80.5	3	2
KOMOI	1999.06.03	unknown	-10.3	-71.5	1	1
M. RIVER	1999.06.03					

位体比を測定した。CO₂についてはさらにSO₂、H₂Oなどを除去した後、CH₄と同様な方法でCO₂を精製し、炭素同位体比を測定した。使用した質量分析計はMicro-mass 社製質量分析計OPTIMAである。測定精度はCH₄、CO₂共に±0.2‰程度である。

§ 3. 結果および考察

3.1 湧水の起源

湧水の起源を議論しようとする時、水を構成する酸素

と水素の安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$, δD) が利用される。良く知られているように、地表水 (天水) は、 $\delta^{18}\text{O}$ と δD との間に一定の関係があり ($\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$)、湧出水が天水起源かどうかの判定にこの関係が利用される [Craig (1961b)]。また、湧水に溶存する Cl^- は、岩石鉱物中に含まれないために、水と岩石との化学反応によっては増減がないので、 Cl^- 濃度も、湧水の起源が同一かどうかの判定に利用される [例えば、松葉谷 (1991)]。そこで、松代群発地震地域から採取した河川水と種々の湧

Fig. 2. Relationship between δD and Cl^- content.

● Our data, and × data after Matsubaya [1976]. The straight line is the best fit for data.

Fig. 3. Relationship between $\delta^{18}O$ and Cl^- content.

● Our data, and × data after Matsubaya [1976]. The straight line is the best fit line for data.

水の同位体比 ($\delta^{18}O$, δD) および、主要溶存イオン成分である Na^+ 濃度と Cl^- 濃度を分析した。その結果を Table 1 に示す。

一般に水素は造岩鉱物の中に少なく、酸素は非常に多いので、深層水は造岩鉱物と反応すれば同位体交換が起き、 H_2O の酸素は $\delta^{18}O$ の増加する方向に変化するとされている。そこで、 δD と Cl^- 濃度の関係、および $\delta^{18}O$ と Cl^- 濃度の関係を調べてみる。Fig. 2 と Fig. 3 にその関係を示した。また、 δD および $\delta^{18}O$ と Na^+ 濃度との関係を Fig. 4, Fig. 5 に示した。図中のシンボルの大きさは $\delta^{18}O$, δD の測定精度を示す。

δD と Cl^- 濃度の関係および、 $\delta^{18}O$ と Cl^- 濃度の関係共に良く直線の上に乗っていることが判る。これは次のような解釈が可能である。まず、塩素は造岩鉱物中

Fig. 4. Relationship between δD and Na^+ content.

The straight line is the best fit for data.

Fig. 5. Relationship between $\delta^{18}O$ and Na^+ content.

The straight line is the best fit for data.

は少ないので、 Cl^- 濃度は岩石との反応の影響は殆ど受けず、その変化は高濃度の深層水と低濃度の河川水に代表される浅層水との混合比率のみによっていると考えて良い。この Cl^- 濃度変化と直線関係にあるということは、その直線関係にある化学成分も岩石との反応による濃度変化は少なく、混合比率の違いによって濃度が決められている化学成分であるということになる。これは、各湧水を供給している各帯水層中では、水と岩石の反応が遅く重酸素の濃縮が目に見えるほどは起きていないことの証拠でもある。

δD および $\delta^{18}O$ と Na^+ 濃度との関係もほぼ直線上にデータが乗っている。これも混合によるのだとすれば、深層水は 1 種類であるということである。採取した湧水の $\delta^{18}O$ と δD との関係を Fig. 6 に示す。図中のシンボルの大きさは $\delta^{18}O$, δD の測定精度を示す。ほぼ直線の上に全てのデータが乗っているのが見える。さらに、天水を示す直線とは明らかに異なるが、天水直線とデー

Fig. 6. Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and δD .

● Our data, and × data after Matsubaya [1976]. The straight line is the best fit for data. The dashed line $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ is the best fit for meteoric water. The square of andesitic area indicates the isotope ratio ranges from Giggenbach [1992].

タの近似直線との交点に松代地域を流れる河川水あるいは浅層水の $\delta^{18}\text{O}$, δD 値があるのが判る。つまり、このデータから、松代の種々の湧水は松代の河川水と地下深部にあると見られる 1 種類の深層水との 2 液混合で成立していることがわかる。その 1 種類の深層水の同位体組成は、Fig. 6 のグラフの近似直線の延長上のどこかにはあるはずであるが、どこであるかはこのデータだけでは特定できない。なお、松葉谷・他(1980)によるデータも Fig. 6 にはプロットしてある。松葉谷は、傾きの異なる 2 本の直線で近似できるとしたが、Fig. 6 に見るように、本研究による多数の測定結果からは、1 本の直線で十分近似できることがわかる。

ところで、Giggenbach (1992) は島弧のマグマが冷却・固結する時放出される水の同位体組成を、数多くの火山ガス、地熱水の測定データから経験的に推定した。それを“andesitic water” (安山岩マグマ水) と名付け、 $\delta^{18}\text{O} = +5 \sim +10\text{‰}$, $\delta\text{D} = -30 \sim -10\text{‰}$ の範囲にあるとした (Fig. 6)。本研究により得られた混合直線が安山岩マグマ水の範囲を通ることがわかる。

松代の深層水は松代群発地震を起こした水である [例えば、大竹 (1976)]。地震は、深度 2~15 km の範囲で活発に発生した。少なくとも同程度の深度、あるいはそれより深いところからの高圧の水が進入してきたものと考えられるので、その水は下部地殻あるいはマントルから由来したものであろう。そのような深さで水が放出される現象は火成作用あるいは変成作用に関わった現象であろう。変成作用を否定する材料はなにもないが、少なくとも Giggenbach (1992) の経験則に良く合うという

意味で、深層水の最有力候補として安山岩マグマ水をここで提案する。この安山岩マグマ水が群発地震を引き起こし、松代の現在の湧出水は、松代の天水や浅層水と安山岩マグマ水とが種々の割合で混合して、湧出しているというモデルである。

松葉谷・他(1980)は松代の湧水を化石海水と天水との混合とした。しかし、Fig. 6 に示すようにに近似直線は、海水の値を通らない。これについては松葉谷・他(1980)は化石海水が周囲の岩石との酸素同位体交換により重酸素を濃縮したことによるものとした。深度 2 km より深部の水が上昇してきて地震を起こしたとすると、深層地下水が化石海水であるというのは考えにくい。

3.2 湧出深度と湧水の化学組成、同位体比

群発地震発生 4 年後に高橋 (1970) により松代荘内に 1,800 m の深さの調査用ボーリング孔が掘削され、湧水の調査が行われた。湧水は深度およそ 1,320 m まで鉄管が挿入された後も続いた。この湧水の湧出深度を正確に決めることはできないが、およそ 1,600 m に破砕帯が見られることから考えると、おそらくこの深度からの湧水であろうと思われる。このボーリング孔から採取された湧水の Na^+ 濃度は 283~311 meq/l, Cl^- 濃度は 326~338 meq/l である [地質調査所 (1979a)]。この値が採取された深部流体の分析値の中で最も高濃度つまり、最も浅層水の混合率が低い試料である。

われわれは群発地震発生以前から存在していた地下水は、おそらく地震を引き起こした多量の深部流体と置き換わったであろうとし、このボーリング孔から自噴した湧水の成分を深部流体に極めて近いものと考えた。湧水深度と本研究で得られたデータも含めて Na^+ 濃度、 Cl^- 濃度、 $\delta^{18}\text{O}$ および δD との関係をそれぞれ Fig. 7, Fig. 8 に示す。深度に対してほぼ直線的に変化しているのがわかる。図中の直線は湧水の値から得られた回帰直線である。図中のシンボルの大きさはそれぞれの測定精度を示す。

Fig. 8 からわかるように安山岩マグマ水に相当する $\delta^{18}\text{O}$, δD の値に到達する深度は約 2,000 m となっている。2,000 m より深部では希釈されていない安山岩マグマ水で亀裂は満たされていると推定される。つまり、この地域の天水の循環深度は 2,000 m くらいまでだというのである。また、この Fig. 7 からその安山岩マグマ水の Na^+ 濃度、 Cl^- 濃度はそれぞれ 350 meq/l, 380 meq/l 以上であると推定される。奥澤・塚原 (2001) は 1,600 m 深の地下水を深部起源水そのものと考えたが、以上の結果から、1,600 m の地下水さえも薄められていたと結論する方が理にかなっている。

Fig. 7. Plots of Cl^- and Na^+ against depth.
Solid and dashed line is the regression line for measured data.

Fig. 8. Plots of $\delta^{18}\text{O}$ and δD against depth.
Solid and dashed is the regression line for measured data. Shading in a and b indicate andesitic magmatic water.

3.3 CO_2 と CH_4 の起源

松代地域の遊離ガス組成を Table 2 に示した。主成分は CO_2 で、 N_2 を加えるとほぼ 100% になる。

Berner and Faber (1993) は、 CH_4 の炭素同位体比と $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ 比から、 CH_4 をバクテリア起源、有機物の熱分解起源に経験的に分類できることを示した。そこで、

$\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ 比と $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ との関係を Fig. 9 に示した。図中のシンボルの大きさは炭素同位体比の測定精度を示す。図中の枠は Berner and Faber (1993) と佐藤・他 (1999) によるものである。 CH_4 の炭素同位体比が測定された 3 個のデータは CH_4 が熱分解起源であることを示している。つまり、 CH_4 は堆積物中の有機物が地下深部

Table 2. $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$, $\delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2)$, and the major gas concentration of free gas in water from the Matsushiro earthquake swarm area.

Site	Sampling Date	Depth m	CO_2 %	CH_4 ppm	C_2H_6 ppm	$\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	$\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ ‰	$\delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2)$ ‰
OSN-U	1999.01.29	-30	93	493	20	24		-6.0
	1999.02.12		87	285	18	16		
	1999.06.03		94	255	25	10		
	2000.10.12		90	286	16	17	-30.4	-4.0
MAT	1999.01.29	-600	87	115	20	6		-4.8
	1999.02.12		90	58	10	6		
	1999.06.03		97	73	10	7		
	1999.01.29		72	2619	20	128		-5.3
ICK-1	1999.02.12	-86	93	2140	15	147		
	1999.06.03		78	1916	14	141		
	1998.10.15		75	163	19	8		-5.4
	1999.01.29		94	161	21	8		-5.2
ICK-3	1999.02.12	-122	75	237	16	15		
	1999.06.03		96	30	14	2		
	2000.10.12		93	157	17	10	-26.3	-3.1
	1998.10.15		90	194	20	10		-7.1
SHR-1	1999.01.29	unknown	90	155	22	7		-7.0
	1999.02.12		82	150	16	9		
	1999.06.03		92	98	11	9		
	2000.10.12		91	113	12	9	-18.8	-5.1

Fig. 9. Plots of $\delta^{13}\text{C}$ of CH_4 against the ratio of $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_6$.

Specimens are from free gas in upwelling water at OSN-U, ICK-3, and SHR-1. ● indicates values obtained from the present study.

で熱分解された結果、生成した CH_4 であることを示している。炭素同位体比の測定されていない試料も、Table 2 に示されるように、 $\text{CH}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ 比が 2~150 であるので熱分解の CH_4 であることを支持している。

起源となる有機物と、それを分解する熱は松代直下にあるだろうか。この地域の、唯一の深層調査ボーリングは、高橋 (1970) による松代荘構内で実施されたものである。斉藤 (1970) は、このボーリングデータを、深度 97 m までが第四系で、その下から深度 1,680 m までは中期中新世堆積岩および火山岩類、さらにその下は、貫入岩である石英閃緑岩と解釈している。なお、深度 1,800 m のボーリング孔底の温度は、ボーリング直後の

測定で 98℃ (高橋, 1970) であった。この温度は、深度 1,680 m 以浅に見られた堆積岩中の有機物の熱分解には十分の温度 (75℃) である。熱分解 CH_4 はここで生成された可能性は十分ある。

CO_2 の炭素同位体比の値は -7.1‰ ~ -3.1‰ である。この値は有機物起源ではなく、マントル (マグマ) 起源の CO_2 あるいは大気 CO_2 の炭素同位体比の値に相当するが、遊離ガス中に CO_2 が 72%~96% という高濃度で含まれることから大気起源ではなく、マントル (マグマ) 起源と考えられる。採取地点近傍に位置する皆神山が第四紀の火山活動で生じた溶岩円頂丘であり [沢村・他 (1967)], 金子・他 (1991) による皆神山の溶岩の年代測定では、噴出時期は約 30 万年前と新しいので、この火成活動と関係があることは十分考えられる。さらに Wakita *et al.* (1978) は松代地域から放出されるヘリウムの同位体比がマントルの値に近いことから、ヘリウムはマントルに由来するとしている。

以上のように、湧出ガスは起源の異なる、少なくとも 2 種のガスから成っていることが判った。最も主要なガスである CO_2 はマントル (マグマ) 起源で、He もそれに付随していると考えられ、地殻深部少なくとも堆積岩層より下から湧出してきたものである。一方、 CH_4 は有機物起源なので、深部 (75℃ 以上高温の) 堆積岩から湧出してきたものである。なお、 CO_2 に次いで量の多い N_2 については、その起源に関して議論できるデータは今のところ得られていない。

3.4 深部起源水の湧出機構

地震と関わりのある前述の深部起源水の具体的な湧出機構はどのようなものであろうか。森本・他 (1966), 金

Fig. 10. Origin of groundwater and earthquake occurrence.

Water and CO_2 gas are released from magma when andesitic magma solidifies. Water and CO_2 gas accumulate below an impermeable sheet formed with precipitates from magmatic water. The magmatic water layer corresponds to the observed reflection bright layer and electric conductive layer under this area. When the impermeable sheet broke and high-pressure water with CO_2 rose into the upper crust, the crust was weakened, causing the Matsushiro earthquake.

子・他(1991)によれば皆神山溶岩の K-Ar 絶対年代はそれぞれ 35 万年, 29 万年である。当時, 安山岩マグマから脱水したマグマ水が下部地殻に存在していたはずである。現在, 松代群発地震地域の地下 15 km には面状に広がる地震波反射面の存在が知られている [西脇・他(1989)]。大槻・他(1998)は, 日本各地に, 同深度付近に見えられた反射面をブライトレイヤーと称し, 帯水層であるとした。そして, この帯水層から流体が流出し, 内陸地震が発生すると主張した。松代群発地震の原因である湧水の源が, 安山岩マグマ水であるとする本研究の結論は, 大槻らのモデルに重要な影響を与えるものである。

マグマ水が下部地殻に貯留されるにはマグマ水の上側に不透水層の存在が必要である。高濃度の Na^+ と Cl^- および CO_2 を含む溶液が, 下部地殻を上昇する過程で CO_2 の脱ガスが起き, 鉱物の溶解度が減少し, 沈殿物による不透水層が形成される可能性は十分にある。その不

透水層の下部にマグマ水の帯水層が形成される [Utada (1987), 笹井(1994)]。しかし, この不透水層が何らかの理由で破れたとき, 多量の高圧水が地殻を上昇する。その過程で岩石強度を弱め群発地震を引き起こしたのであろう。そのとき, 上昇水の圧力を高圧のまま保つのに CO_2 の発泡が大きな役割を果たしたのではないか。流体の占める体積は上昇により増えるので流体自体の圧力は降下するが, 発泡によりそれが補われ, その圧力降下は少なかったであろうと推定される。

以上のことを, 図にしたのが Fig. 10 である。

§ 4. ま と め

(1) 松代地域各地の湧水中の $\delta^{18}\text{O}$ 値, δD 値と主要溶存イオン成分である Na^+ 濃度, Cl^- 濃度とは, 良い直線関係にあるので, 松代地域全域の湧水は 2 液混合モデルで説明できる。

(2) δD と $\delta^{18}\text{O}$ との関係を示す回帰直線は, 2 液混合成分のうち一方の成分は地表水であることを示している。もう一方は安山岩マグマ水の同位体比推定領域を通る。

(3) 一方, 湧水に含まれる遊離ガスの主成分である CO_2 ガスはマグマ起源, CH_4 は熱分解起源であることが, 炭素同位体比などからわかった。

(4) 松代地域の湧水に付随する He ガスがマントル起源であることはすでに知られているが, それに加えて上記(2)と(3)の結果, さらに, 近くに第四紀火山があることからして, 2 液のうち一方は安山岩マグマ水だと推定した。

(5) 地下に電気良導体, 地震波反射面があることも考慮し, 深度 15 km 付近に滞留していた安山岩マグマ水が, 上面を遮蔽していた不透水層が破れたために上昇して, 岩盤を弱化し, 松代群発地震が発生したとするモデルを提案した。

謝 辞

本研究を進めるに際し, 群発地震に関する文献および情報をご教示いただいた元防災科学技術研究所 鈴木宏芳氏および, 試料採取をお願いを快く受け入れてくださいました一陽館, 尚和寮, 松代荘の関係者の皆様に深く感謝いたします。査読者である笹井洋一氏, 風早康平氏からの貴重な助言は, 本論文の内容を改善するのに大変役立ちました。ここに深く感謝いたします。

文 献

Berner, U. and E. Faber, 1993, Proc. ODP, Sci. Results, 131, 185-195.

- 地質調査所, 1979a, 松代温泉湧水の分析結果, 防災科学技術研究資料, 41, 37.
- Craig, H., 1961b, Isotopic variations in meteoric waters, *Science*, 133, 1702-1703.
- Giggenbach, W. F., 1992, Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin, *Earth, Plan. Sci. Lett.*, 113, 495-510.
- Healy, J. H., W. W. Rubey, D. T. Griggs and C. B. Raleigh, 1968, The Denver earthquakes, *Science*, 161, 1301-1310.
- 細野義純, 1968, 松代群発地震に際し観察された地下水位の異常と水質の変化について, 地質学雑誌, 74, 569-581.
- 飯島 弘, 1969, 松代周辺の表層地質と地盤災害, 防災科学技術総合研究報告, 18, 103-116.
- 金子隆之・清水 智・板谷徹丸, 1991, 松代周辺に分布する鮮新〜更新世火山岩類の K-Ar 年代, 火山, 36, 193-195.
- Kisslinger, C., 1975, Processes during the Matsushiro, Japan, earthquake swarm as revealed by leveling, gravity, and spring-flow observations, *Geology*, 3, 57-62.
- 松葉谷治・酒井 均・日下部実・佐々木昭, 1980, 長野県の温泉についての同位体化学調査報告, 岡山大学温泉研究所報告, 50, 17-24.
- 松葉谷治, 1991, 熱水の地球化学, 第 7 章, 裳華房.
- 森本良平・村井 勇・松田時彦・中村一明・恒石幸正・吉田鎮男, 1966, 松代群発地震地域とその周辺地方の地質, 地震研究所彙報, 44, 323-445.
- Nakamura, K. and Y. Tsuneishi, 1966, Ground cracks at Matsushiro probably of underlying strike-slip fault origin, I-Preliminary report, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 44, 1371-1384.
- 中村一明, 1971, 松代地震から学んだこと一手に入れた地震制御へのデータ, 科学朝日, 10, 127-133.
- 西脇 誠・森田裕一・流 精樹・柿下 毅・長田芳一・永井直昭, 1989, 松代アレイで観測された SxS 波と反射面の検出, 地震学会講演予稿集, No. 1.
- 野口喜三雄・上野精一・西井戸敏夫, 1969, 松代群発地震にともなう温泉水の変化に関する地球化学的研究, 温泉科学, 20, 67-93.
- Nur, A., 1974, Matsushiro, Japan, earthquake swarm: Confirmation of the dilatancy-fluid diffusion model, *Geology*, 2, 217-221.
- 大竹政和, 1976, 松代地震から 10 年, 科学, 46, 306-313.
- 大槻憲四郎・梅田康弘・星野健一・土屋範芳, 1998, プライツ計画—Bright layer の性状・成因・物理化学過程の探求—, 地震学会予稿集・秋季, A47.
- 奥澤 保・塚原弘昭, 2001, 松代群発地震地域に湧出する深層地下水, 地震 2, 53, 241-253.
- 奥澤 保・塚原弘昭, 2002, 松代群発地震地域に湧出する地下水の直下地震にともなう化学成分変化, 温泉科学, 51, 147-163.
- 齊藤 豊, 1970, 長野盆地形成史の再検討に関する諸問題, 第四紀, 15, 4-8.
- 笹井洋一, 1994, 松代群発地震の生成機構—自然発生的大規模水圧破壊, Conductivity Anomaly 研究会論文集, 181-195.
- 佐藤雅規・森 俊哉・野津憲治・脇田 宏, 1999, 霧島火山地帯から放出される噴気, 温泉ガスの炭素およびヘリウム同位体比, 火山, 6, 279-283.
- 沢村孝之助・垣見俊弘・曾我部正敏・小林 勇・長谷紘和, 1967, 松代震源域の地質と地質構造, 防災科学技術総合研究速報, 5, 3-11.
- 清水直哉・塚原弘昭・古館友道・吉田則夫, 1998, 長野市松代地域における炭酸ガスの湧出量と地殻変動, 地震 2, 51, 41-50.
- Stuart, W. D. and M. J. S. Johnston, 1975, Intrusive origin of the Matsushiro earthquake swarm, *Geology*, 3, 63-67.
- 高橋 博, 1970, 松代の深層ボーリングその後と, 水の圧入実験, 防災科学技術, 13, 10-13.
- 塚原弘昭・奥澤 保・新井 崇, 1998, 断層流体相の解明, 月刊地球, 21, 55-58.
- 恒石幸正・高橋春男, 1975, 松代群発地震発生機構についての考察, 地質学会予稿集, p. 72.
- Tsuneishi, Y. and K. Nakamura, 1970, Faulting Associated with the Matsushiro Swarm Earthquakes, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 48, 29-51.
- Tsunogai, U. and H. Wakita, 1995, Precursory chemical changes in ground water: Kobe earthquake, *Japan, Science*, 269, 61-63.
- 鶴見 実, 1979, 松代湧水の化学的特徴, 地球化学, 13, 18-23.
- Utada, H., 1987, A direct inversion method for 2-dimensional modeling in the geomagnetic induction problem, Ph. D. Thesis, Univ. Tokyo, 409 pp.
- Wakita, H., N. Fujii, S. Matsuo, K. Notsu, N. Takaoka, 1978, "Helium Spots": caused by a diapiric magma from the upper mantle, *Science*, 200, 430-432.
- Yoshioka, R., S. Okuda and Y. Kitano, 1970, Calcium-chloride type water discharged from the Matsushiro area in connection with swarm earthquakes, *Geochem. J.*, 4, 61-74.