

平成 14 年 3 月

原 著

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

¹信州大学大学院工学系研究科, ²信州大学理学部奥澤 保¹, 塚原弘昭²

(平成 13 年 8 月 20 日受付, 平成 13 年 12 月 11 日受理)

Temporal Variation in Chemical Composition of Ground Water from the Matsushiro Earthquake Swarm Area at an Earthquake

Tamotsu OKUSAWA¹ and Hiroaki TSUKAHARA²¹Graduate School of Science and Technology, Shinshu University²Faculty of Science, Shinshu University

Abstract

The cause of Matsushiro Earthquake Swarm is interpreted in terms of deep ground water intrusion into seismogenic layer. The swarm earthquake had been extremely active for 3 years from 1965. A vast amount of ground water was springing out from the ground for the active period. Ground water mixed with the deep water is still upwelling on the surface at the Matsushiro area. In order to know characteristics of the ground water, we compiled all of the published data on chemical analysis of ground water around the Matsushiro area and analyzed at present many ground water specimens from the area. The results are as follows. (1) Concentrations of the major components of Cl^- and Na^+ in all over the sites have approximately a linear relation. Time variation in concentrations of Cl^- and Na^+ at one site also has linear relation. These relations suggest that the variations in chemical composition among sampling sites and sampling times are due to mixing of shallow thin ground waters with a concentrated deep ground water with various ratio. (2) If examined in detail, the coefficients, that is slopes of the linear relation are different a little with each other. The difference can be explained in terms of the chemical reaction between rocks and water. Cl^- does not change but Na^+ changes with the reaction. Further, the slopes indicate that Cl^- concentration increases linearly

with depth but Na^+ does not increase linearly. Na^+ concentration is estimated to be step-like distribution with depth. (3) A shallow earthquake of M4.0 occurred just below the area during our water sampling time. Water upwelling rate, water temperature and concentrations of Cl^- and Na^+ are changed abruptly. The changes can be explained in terms of mixing of neighboring ground waters. (4) Unusual concentrations in Cl^- and Na^+ were observed in water specimens obtained from some of sampling sites before one and a half months of the earthquake. Unusual chemical compositions were also observed in water specimens obtained from a sampling site in a period from a week to 5 weeks after the earthquake. These phenomena are interpreted that mixing with a ground water with different ratio of Cl^- to Na^+ takes place with the earthquake.

Key words : Matsushiro Earthquake Swarm, Deep ground water, Ground water chemistry, Earthquake chemistry, Water induced seismicity

キーワード : 松代群発地震, 深層地下水, 地下水化学, 地震化学, 水誘発地震活動

1. はじめに

長野市松代地域には多くの湧水・温泉が存在する。この地域では、1965年より群発地震が発生し、松代群発地震と名付けられた。この群発地震は、震源が2~5kmと概して浅く、多いときには一日に数百回の地震を記録した世界でも有数の大規模な群発地震活動であったが、最も大きな特徴として、大量の湧水活動を伴ったことが挙げられる。群発地震以前に存在した湧水・温泉は、その湧出量・水温・溶存イオン濃度等に大きな変化が見られ、さらにこの地域一帯に新たな湧水が多く生じた。こうした地下水と地震との関係についてはこれまでに多くの研究・調査がなされている。それらによると、一連の群発地震は、地下深部から松代地震断層沿いに上昇してきた深層地下水が引き起こしたといわれている(例えば、中村, 1971)。

松代群発地震が終息に向かうに伴い、これら湧水・温泉の多くは地震後次第に消滅した。現在も残るものは、1968年頃より、年間を通してその水温・溶存イオン濃度はほぼ一定で安定している(奥澤・塚原, 2001)。しかしながらこれらの湧水・温泉は、通常の地表付近の循環水とはまったく異なるイオン組成・濃度を持つものであり、松代群発地震を引き起こした深層地下水は、今なおその一部は、地表に湧水しているものと考えられる。本研究では、現在の湧水・温泉に見られる溶存イオン濃度変化と、過去の変化とを比較し、現在の松代の地下の状態を考察し、また、この地域浅部直下に、1999年10月29日に発生したM4.0の地震の前後に見られた湧水・温泉の変化について述べる。

2. 調査湧水と調査方法

松代群発地震が活発であった頃、とくにその第3活動期(1966年8月~1966年12月の5ヶ月間、(Hagiwara and Iwata, 1968)においては、松代盆地内には大小多くの湧水が新たに出現し、場所によっては地すべりの原因ともなった。これらの湧水は、その後群発地震活動の終息と共に自然に消滅したり、排水設備が整えられたこともあり、現在も湧出を続ける湧水は当時と比較すればきわめて少ない。Fig. 1に、本研究で湧出を確認できた湧水・温泉を示す。これら湧水はFig. 1に示すように松代地震断層と呼ばれる伏在断層帯の直上および周辺に多く点在している。これら湧水のすべてを調査観測井とした(Table 1)。松代荘、一陽館1号源泉・同3号源泉、松代温泉公民館は掘削ボーリング孔からの自噴温泉であり、他の湧水に比較してその水源が深い。また、一陽館1号源泉は、松代群発地震が始まる前から存在する泉源であり、これまでに調査・研究報告が多い(2号源泉

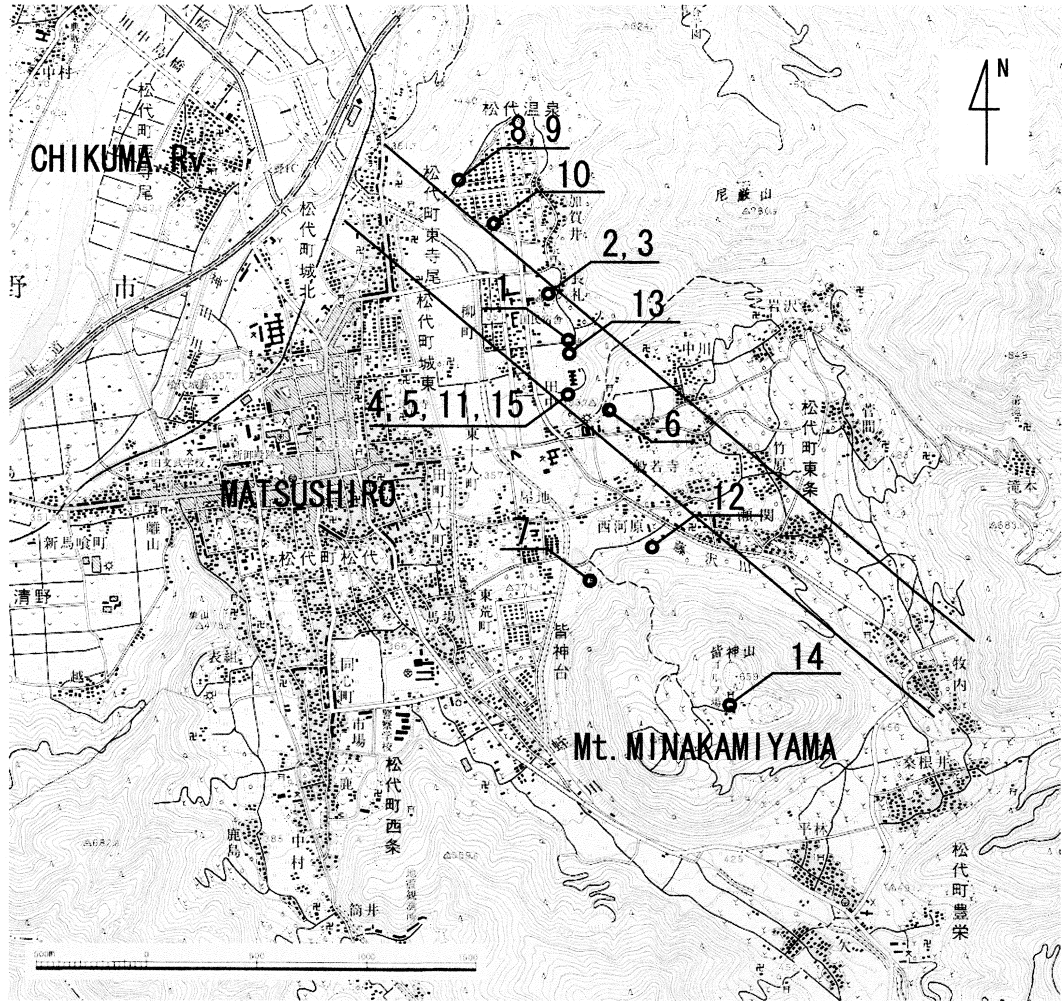


Fig. 1 Locations of measurement points of springs (○). Each number corresponds to that in Table 1. The area between two lines indicates a zone of the buried Matsushiro earthquake faults. Base map is 1 : 25,000 "Matsushiro" topographic map issued by the Geographical Survey Institute.

は現在廃泉). なお, Table 1 に示す湧水のうち, 松代荘, 一陽館 1 号源泉・同 3 号源泉, 尚和寮 (1)・同 (2), 玉依比売命神社前, 松井の泉の 7 箇所については, 季節変化等の長期的時間変化の有無を調べるために, 1994 年 4 月より 12 月まで原則として毎週一回, 定期的に測定・採水を行った. さらに他の湧水を含むすべての観測井では, 1994 年より 2000 年まで不定期に採水・測定した.

各調査観測井について, 現地で水温 (アルコール温度計)・電気伝導度 (東亜電波株式会社製 CM-14P を使用)・pH (東亜電波株式会社製 HM-12P を使用) の測定, 試水の採取を行い, 実験室で試水の溶存イオンの定量をイオンクロマトグラフィにより行った. 陰イオンに関しては, 横河アナリティカルシステムズ社製イオンクロマトグラフ IC7000E を使用し, ICS-A23 カラムを用い, 3 mM- Na_2CO_3 を溶離液, 15 mM- H_2SO_4 を除去液としたサプレッサ方式で分析をした. 定量イオンは, F^- , Cl^- , NO_2^- , Br^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , である. 陽イオン分析には, 日本分光社製イオンクロ

Table 1 Measurement points (each number corresponds to that in Fig. 1).

No.	観測地点	深度(m)(*)	湧出開始時(**)	記
1	松代荘源泉	600	C	松代荘の西約 300 m ほどの地点にあるボーリング孔から自噴.
2	一陽館 1 号源泉	86	A (1930)	1930.4.10 掘削完了. 1964 年自噴停止. 1965.11.4 再自噴開始.
3	一陽館 3 号源泉	122	B (1967)	1964.3.1 掘削完了. 自噴. 群発地震の際に孔内波損があったと思われ, 自噴している湯の深さはもう少し浅いと思われる.
4	尚和寮(1)	不明	B	水田の中に群発地震の際に出現した湧水で以後自噴. 現在水田等からの地表水とはコンクリートで隔離されている.
5	尚和寮(2)	不明	B	尚和寮(1)より 50 m ほど東へ行った尾根際にある湧水.
6	玉依比売命神社前	不明	B	群発地震の際に出現した湧水.
7	松井の泉	S	A	皆神山の北西の麓に湧き出す湧水. 飲料水に使用している人も多い.
8	温泉団地(1)	30	C	1986 年に掘削. 30 m ほど掘ったところで石灰分の沈殿により放棄. 高さ 2 m ほどの旧止水設備から漏水自噴.
9	温泉団地(2)	360	C	正式名称町有新 2 号井に相当する. 1965 年掘削.
10	松代温泉公民館	D	C	松代温泉団地内にある公民館で浴用に使用.
11	尚和寮(3)	不明	B	尚和寮(1)より 50 m ほど東へいった尾根際にある湧水. 尚和寮(2)の 10 m ほど北.
12	古藻井の泉	S	A	皆神山の北西の麓に湧き出す湧水. 松井の泉の北西約 200 m.
13	一陽館南	不明	B	土中に鉛直に埋めてある土管から自噴. 深度不明.
14	皆神山山頂池	S	不明	皆神山山頂の池.
15	尚和寮	600	C	老人の家・尚和寮で使用している温泉, 松代荘源泉と同じ源泉から引水.

松代群発地震 (1965~) の震源域は, 上記湧水を含めて Fig. 1 の範囲内のはほぼ全域を覆う.

No. 1- 7: 1994 年 4 月~1994 年 12 月まで毎週水曜測定. 以後は不定期に測定.

No. 8-14: 1994 年~2000 年に不定期に測定.

(**) 深度

S: 10 m 以浅

D: 100 m 以深

(*) 湧出開始時

A: 1965.8 以前

B: 1965.8~1967.5

C: 1967.5 以後

マトグラフ CD-5 を使用し, IC YK-421 カラムを用い, 5 mM-酒石酸と 1 mM-ピリジン-2,6-ジカルボン酸の混合溶液を溶離液としたノンサプレッサ方式で分析をした. 定量イオンは, Li^+ , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} である. いずれの測定においても, 試料量は 50 μl , 溶離液の流速は 1 ml/min, 恒温層は 40°C とした. 同一試料のくり返し測定による定量値の再現性は, 相対標準偏差の最大値は, 陰イオンでは Br^- で 0.3%, 陽イオンでは Mg^{2+} で 2.2% であった. なお, 調査湧水によっては, イオン濃度が高く使用機器のカラムを傷めるおそれがあるため, 電気伝導度が 1 mS/m 以下になるように 10~100 倍に希釈してから測定を行った.

なお, 今回分析に使用した機器では, 天然水中の主要陰イオンである HCO_3^- が分析できないので, 今回の報告では, HCO_3^- については残念ながら議論できない. 通常, 天然水が電氣的に中性で

あるという仮定から導かれる残留陰イオン濃度 (総陽イオン濃度-総陰イオン濃度) を, 近似的に HCO_3^- 濃度と見なすことが多いが, 松代群発地震地域の湧水には, Fe^{2+} , Fe^{3+} など無視できない量含まれており, Fe^{2+} , Fe^{3+} それぞれの定量も今回実施していないので, この方法からも HCO_3^- 濃度の推定はできなかった。

3. 調査・測定結果

3.1 松代群発地震地域全体の湧水の化学的特徴

前述のように, 松代群発地震は, 地下深部から松代地震断層と呼ばれる伏在断層帯 (Nakamura and Taneishi, 1967) 沿いに, 深層地下水が上昇してきたことが原因と考えられている (例えば, 中村, 1971). Fig. 2 はその模式図である. この地域の地下深部に何らかの原因により高圧の水がもたらされ, この深層水は地震を引き起こしつつ上昇し, 地表に現れた, と考えられている。

深層地下水の主要溶存イオンは, Na^+ , Cl^- イオンである. 地表湧水においてはこの他に Ca^{2+} イオンが多く含まれるが, これは深層地下水の上昇過程で, Na^+ とのイオン交換によりもたらされたものであることが明らかにされている (奥澤・塚原, 2001).

本研究で調査対象とした湧水・温泉のうち, 季節変化等の長期的時間変化の有無を調べるために長期観測を行った7つの湧水について, 1994年~2000年の Na^+ と Cl^- の関係を Fig. 3 に示す. 奥澤・塚原 (2001) は, これらの湧水・温泉の水源となる帯水層の濃度の違いは, 地下深部からの高濃度深層地下水 (松代群発地震の引き金となった水) と, 地表付近の天水起源の浅層低濃度水との二液混合で決められていることを明らかにした. さらに, それぞれの湧水の化学成分が一年を通して大きな変化は見られないことから, ほぼ安定した比率で混合していると指摘した. 一方, Fig. 3 を見ると, 各源泉の濃度は微小な時間変化をしているのが見られ, 直線 A より傾きの小さな直線上にほぼ乗っていることがわかる. このことについては次節で述べる。

現在の松代地域の湧水は, その水源の深度に応じて, 深層地下水と地表付近の浅層水の混合割合がほぼ決まり, 安定した状態で湧出している, といえる。

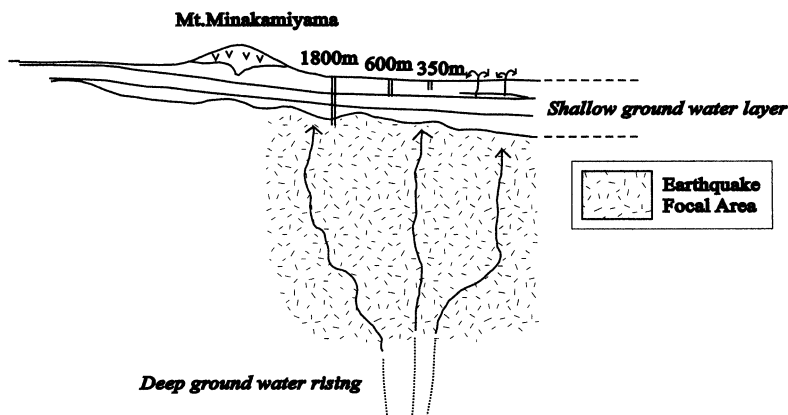


Fig. 2 A schematic drawing for explaining the Matsushiro Earthquake Swarm. The deep ground water rises up into the focal area while causing the earthquakes. Finally, water overflows on the surface.

Table 2 Water qualities of individual spring waters analyzed

No.	Name	Date	Tem. (°C)	E.C. (S/m)	pH	Li ⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)
1	Matsushiroso well	2000/10/12				6.8	3,320
2	Ichiyokan well No.1 (B)	2000/10/12	37.2	1.66	6.17	3.8	2,100
3	Ichiyokan well No. 3 (c)	2000/10/12	40.7	1.70	6.21	4.2	2,220
4	Showaryo spring No. 1	2000/10/12	28.7	0.86	6.05	0.7	586
5	Showaryo spring No. 2	2000/10/12	23.2	0.44	6.15	0.6	363
6	Tamayorihimenomikoto-Jinjamae	2000/10/12					110
7	Matsuinoizumi	2000/ 6/ 4	17.2	67.4mS/m		0.02	48.7
8	Onsendanchi well No. 1	2000/10/12	30.6		6.76	7.90	3,550
9	Onsendanchi well No. 2	2000/10/12	23.6	1.15	6.10	6.70	2,710
10	Matsushiro-Onsenkominkan	1999/ 2/12				6.16	3,400
11	Showaryo spring No. 3	2000/10/12	23.5	0.53	5.77	0.50	434
12	Komoinoizumi	2000/ 6/ 4	17.8	63.7mS/m		0.05	69.2
13	Ichiyokan-Minami	2000/10/12	26.6	0.99	6.05	1.40	799
14	Minakamiyama-Sancho-Ike	2000/ 6/ 4	17.2	21.9mS/m		0.00	5.13
15	Showaryo	2000/10/12				6.90	3,370

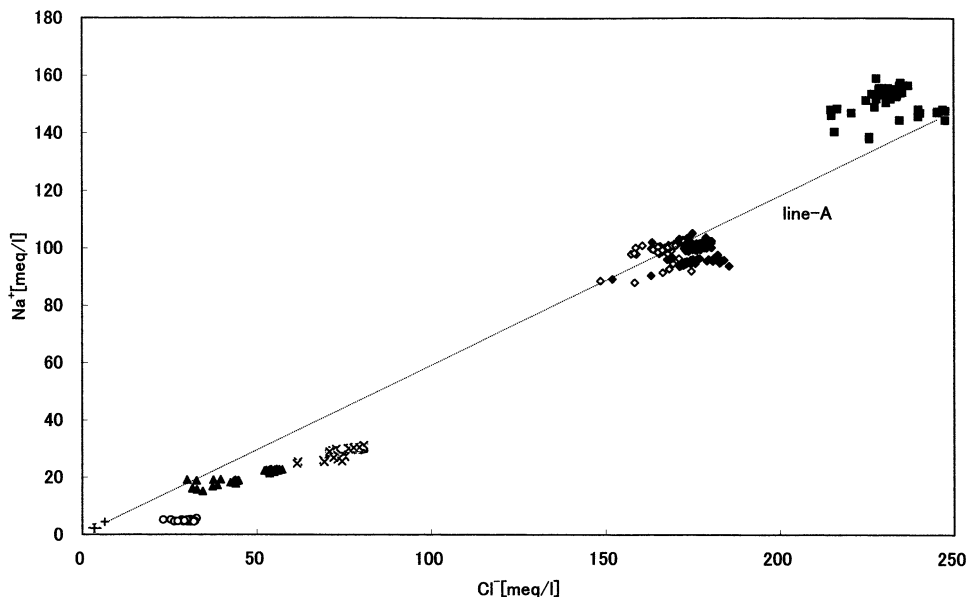


Fig. 3 Plots of Na⁺ content against Cl⁻ content in ground waters in the Matsushiro Earthquake Swarm Area (1994–2000). ■ : Matsushiroso, ◆ : Ichiyokan well No. 3, ◇ : Ichiyokan well No. 1, × : Showaryo spring No. 1, ▲ : Showaryo spring No. 2, ○ : Tamayorihimenomikoto-Jinjamae, and + : Matsuinoizumi. Line-A is the best fit line for the data.

3.2 松代群発地震域湧水の化学成分の時間変化

加賀井温泉湯元である一陽館源泉は、松代群発地震地域のほぼ中央に位置し、松代地震断層のほぼ直上にある源泉で (Fig. 1), 松代群発地震の初期に、その湧出量・水温・溶存イオン濃度が大き

in this study (each number corresponds to that in Fig. 1).

K ⁺ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Total Cat. (meq/l)	F ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Total Ani. (meq/l)
423	1,220	290	241	5.46	8,310	15.8		308	241
271	1,230	261	182	5.43	5,900	10.8		295	173
255	1,340	312	196	4.82	6,430	10.1		331	189
49	887	223	90.1	5.17	2,460	5.90		199	73.9
28.3	427	121	47.8		1,160			122	35.3
30.5	504	172	44.9	2.37	1,030	2.72		180	33.0
4.06	64.4	13.7	6.57	0.62	124	0.49	5.94	43.5	4.54
485	816	179	223	5.70	7,900	11.3		191	227
367	805	125	179	5.99	5,640	9.05		204	164
459	624	300	216		8,730			167	250
40.3	565	156	61.2	5.23	1,560	4.89		143	47.3
5.48	32.5	20.5	6.46	0.65	76.7	2.93		55.3	3.39
116	1,000	197	104	5.00	2,970	6.42		227	88.9
9.75	15.2	0.00	1.23	0.10	6.91	0.05	12.0	1.80	0.43
422	1,210	299	243	5.00	8,430	13.8		311	245

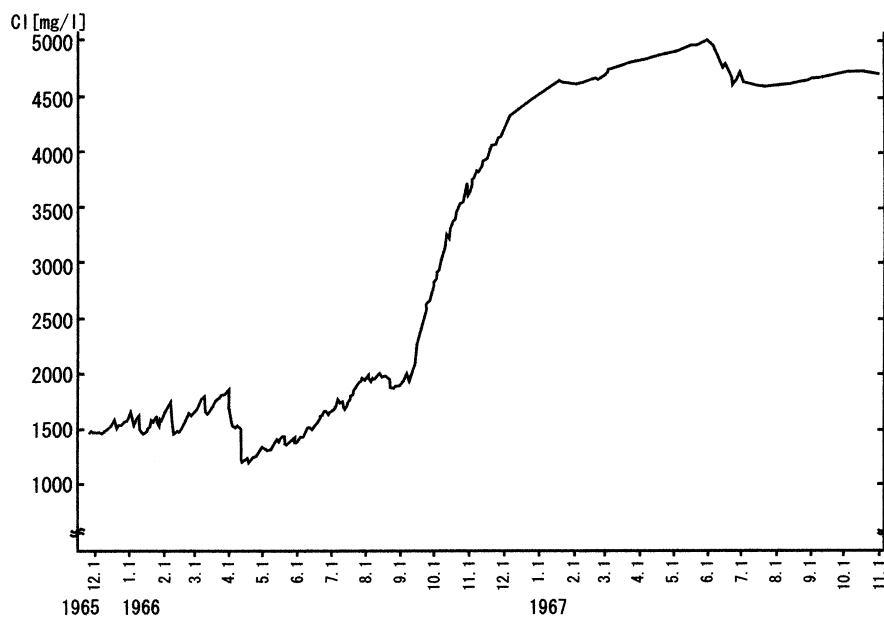


Fig. 4 Rapid increase in Cl⁻ concentration in the hot water from the Ichiyokan well (No. 1) in the period from 1965 to 1966 (after Noguchi *et al.* 1969).

く変化したことで知られる (野口・他, 1969, 春日, 1976 など). Fig. 4 は, 1966 年~1967 年当時の, 一陽館 1 号源泉の Cl⁻ イオン濃度の変化を示したものである (野口・他, 1969). 1966 年 9 月頃 Cl⁻ イオン濃度は急上昇したが, これはこの時期に, 深層地下水の上昇量が大きく増加したことを示している. その後, Cl⁻ イオン濃度は 1968 年頃までの間に 5500 mg/l 前後まで上昇し, 以後は同

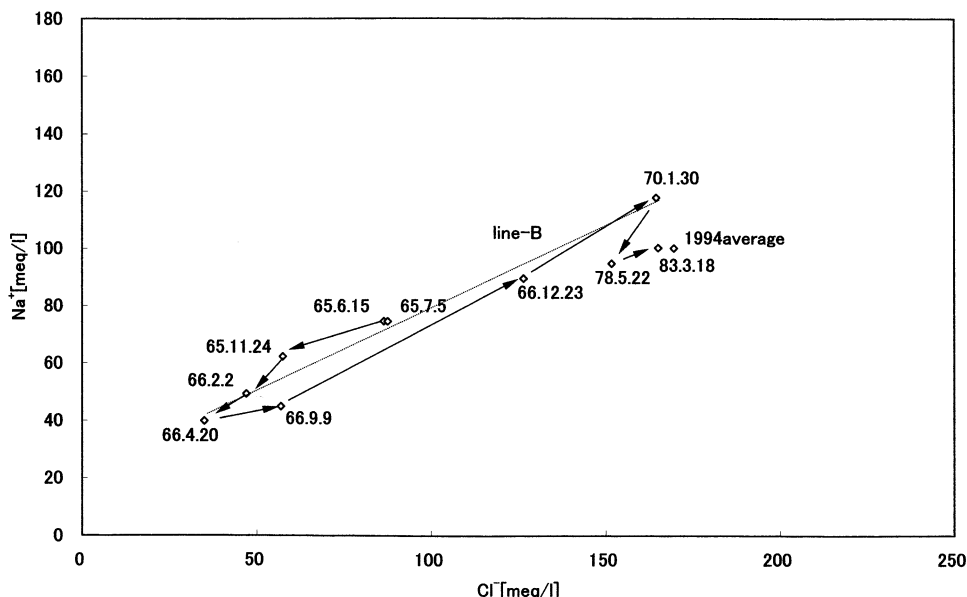


Fig. 5 Plots of Na^+ content against Cl^- content in the hot water from the Ichiyokan well No. 1. Data after Okusawa and Tsukahara (2001), Geol. Surv. Japan. (1979 a, b), Kakegawa (1968), Kasuga (1976), Kitano *et al.* (1967), Matsushiro Public Health Center (1967 a, b, c), Noguchi (1967), Noguchi (1968), Noguchi *et al.* (1969), Noguchi *et al.* (1970), Tsurumi (1979), and Umemura and Harada (1968 a, b). Line-B is the best fit line for the data.

程度の値が報告されている（春日，1976，野口・他，1969など）。そしてほぼそのままの値で現在まで続いており，1994年には6,000 mg/l弱程度で安定している（奥澤・塚原，2001）。

Fig. 5に，一陽館1号源泉の，1961年（松代群発地震以前）から1994年（本研究開始年）に至るまでのイオン濃度変化を， Na^+ と Cl^- の関係において示す（今までに公表されている測定データの中で，一陽館1号源泉として特定できたものをすべて示している）。

群発地震の活発な頃，Fig. 4にも示したように，1965年から1970年頃に至るまで，この源泉の Cl^- 濃度が大きく変化をした様子がわかるが，この変化は，Fig. 5において，ほぼ一つの直線（Fig. 5の直線B）に沿って変化をしているように見える。これは，高濃度方向の延長上にある深層地下水と低濃度の浅層地下水とが混ざり合って変化したものと考えたと説明がつく。時期によって，大きな濃度変化をしているときもあり，単調に増加しただけではなく， Na^+ ， Cl^- が共に減少したこともある。増減がFig. 5上で直線上に載っているということは，深層地下水と浅層地下水の混入割合が変化したために生じたものである，といえる。

1970年頃には，ほぼ安定した濃度をとるようになるが，これは，松代群発地震の活動が，ほぼ終息した時期である。この時期以降，松代地域の地震活動は，比較的安定した状態に落ち着き，一陽館源泉を含めたこの地域の湧水も，それぞれに湧出量・濃度ともかなり安定した状態になっている。

その後，1978年（鶴見，1979）では， Cl^- 濃度・ Na^+ 濃度が若干低くなっており，上に示した直線Bから外れている。1983年，1994年も同様に1970年頃に比較して Na^+ 濃度が低く，直線Bからは外れている。これは，奥澤・塚原（2001）で述べられているように，帯水層中で比較的長い時間置かれたNa-Cl型の水は，時間と共にCa-Cl型に変化していくためであると考えられる。つまり，

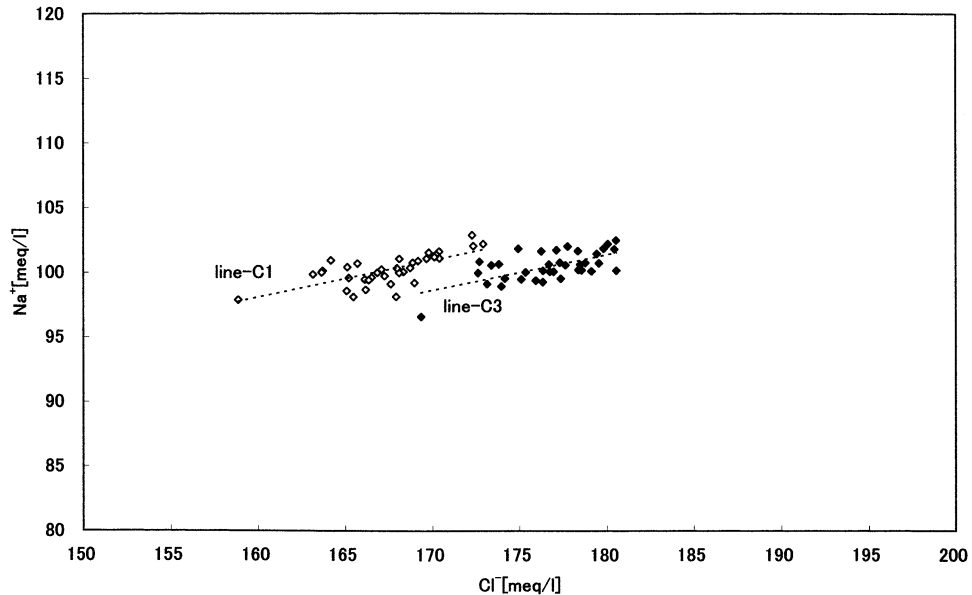


Fig. 6 Plots of Na^+ content against Cl^- content in the hot spring water from the Ichiyokan wells.
 \diamond : Ichiyokan well No. 1. \blacklozenge : Ichiyokan well No. 3.

帯水層中の高濃度水は、周囲の岩石と反応することにより、 Na^+ と Ca^{2+} がイオン交換をし、結果 Na^+ 濃度が低下するのである。 Cl^- イオン濃度がほとんど変化しないのは、 Cl^- イオンは深層地下水からしかもたらされない上に、深層地下水と浅層地下水の混合比率がほぼ安定したためである。一陽館1号源泉の帯水層を作る深層水と浅層水の混合比率は、 Cl^- イオン濃度から見ると、激しい地震活動の収まった1970年以降、30年間ほとんど変化していないということが明らかにされた。

比較的長期の変化を連続的に見るために、一陽館1号・3号源泉で1994年にほぼ一週間ごとに調査を行った。その結果をFig. 6に示す。Fig. 5と同様、 Na^+ と Cl^- の関係において示したものである (Fig. 3の一陽館源泉部分の1994年分の拡大)。

Fig. 5に見られる群発地震の活動期の大きな変化に比べれば、1994年の一年間は、ほとんど安定した状態にあるといえるが、それでも若干の変化が見られる。この変化の傾向は、Fig. 6において、直線C (1号源泉は直線C1, 3号源泉は直線C3) に沿っている。が、この変化は、一年間を通して増減を繰り返して変化しており、例えば低濃度から高濃度方向へと、徐々に変化している、というわけではない。また、季節変化でもない。

また、直線Cは、Fig. 3の直線Aと平行ではなく、また、直線Cは直線Aのように、原点付近を通るものではない。なぜこのような変化をするかについての原因については次章で述べるが、地震などの大きな地殻変動が無い状態では、以上のようにほぼ直線C上に沿った、微小な変化をしていることがわかる。

ところで、上記のように、一陽館源泉の化学成分の大きな変化は、1970年頃までで、その後はほぼ安定し、以降はそれまでの大きな変化とは異なった小さな変化 (Fig. 6の直線C上に沿った変化) がわずかに見られるのみである。この傾向は、松代地域の他の湧水も同様であり、湧水地が同定できる全ての分析データは、やはり同じ1970年頃にほぼ安定しており (奥澤・塚原, 2001), その後はそれまでの大きな変化とは異なり、変化は小さなもので、その変化の仕方もそれまでとは異

なっている。つまり、Fig. 3において、各源泉のデータはそれぞれの直線にはほぼ沿って変化している。この各源泉における直線は、Fig. 6の直線Cとほぼ傾きが同じであり、各源泉は一陽館源泉とよく似た変化をしていることを示している。

3.3 1999.10.29に直下で発生した地震（M4.0）前後の一陽館源泉の化学成分変化

1999年10月29日に、この地域の直下にM4.0の、この地域にすれば比較的大きな地震が発生した。この地震の直後に、一陽館1号・3号源泉では数十分間に渡り、湧出量が異常に増加したが、幸

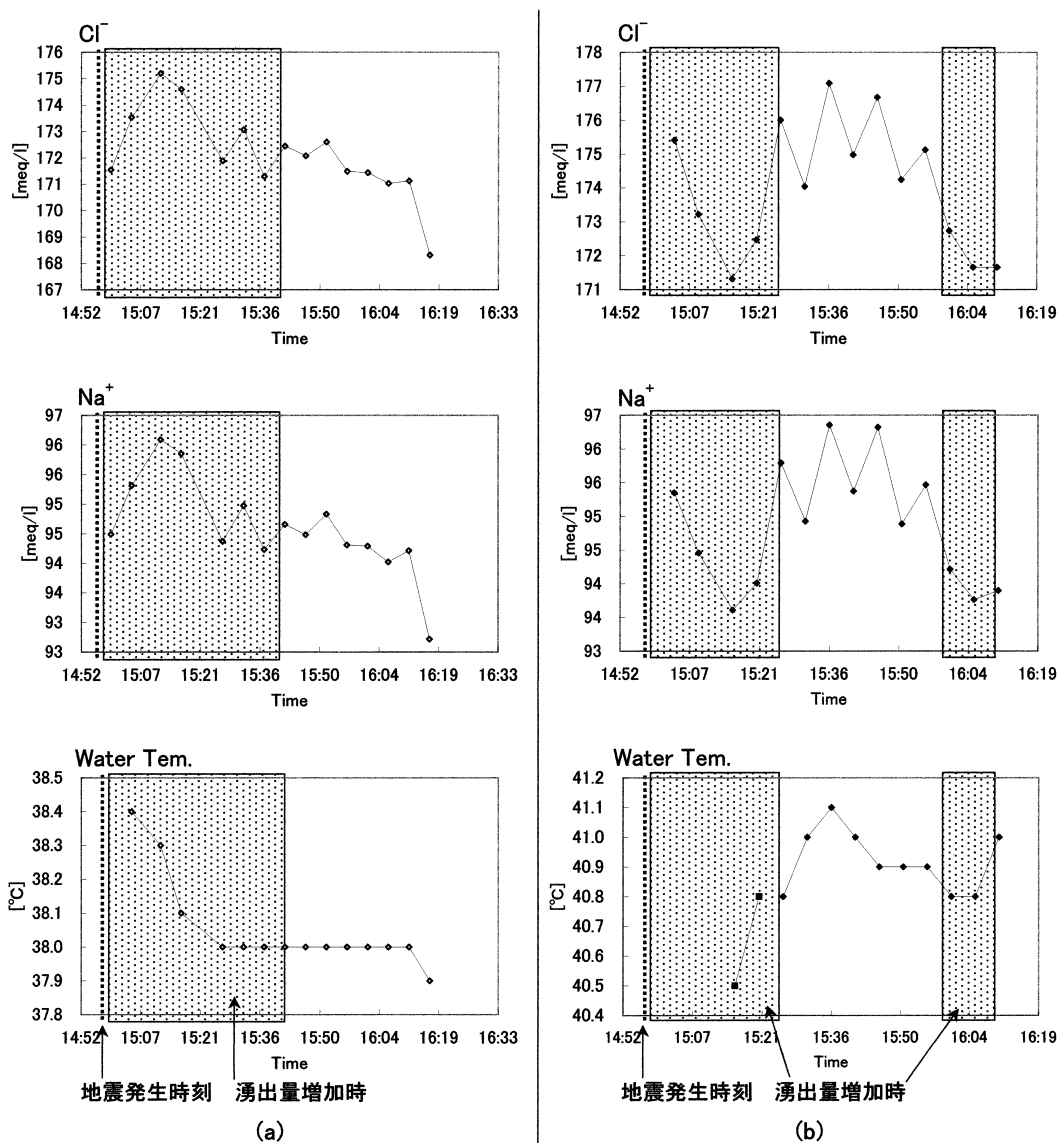


Fig. 7 (a) Temporal variation in the concentrations of Na^+ , Cl^- and temperature of the hot water from the 86m deep Ichiyokan well No. 1 immediately after the M4.0 earthquake occurrence.

(b) Temporal variation in the concentrations of Na^+ , Cl^- and temperature of the hot water from the 122m deep Ichiyokan well No. 3 immediately after the M4.0 earthquake occurrence.

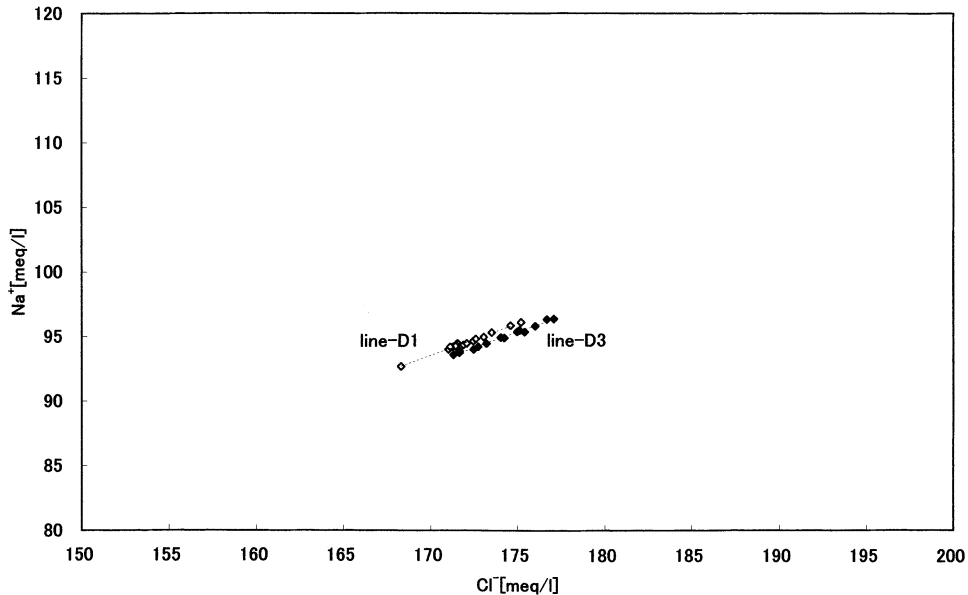


Fig. 8 Plots of Na^+ content against Cl^- content in the hot water from the Ichiyokan well just after 1999. 10. 29 M4.0 earthquake occurrence. \diamond : Ichiyokan well No. 1. \blacklozenge : Ichiyokan well No. 3.

運にもこのとき採水・測定する機会に恵まれた。Fig. 7に、このときの両源泉の水温・イオン濃度の経時変化（5分ごとに約1時間測定したもの）を示す（aは1号源泉，bは3号源泉）。この間， Na^+ イオンと Cl^- イオンはきわめてよく同期して濃度変化をしており（相関係数：0.995（1号），0.994：（3号）），水温もこれらとよく似た変化をしたことがわかる。また，1号源泉では，湧出量増加時に Na^+ イオン濃度・ Cl^- イオン濃度・水温が増加し，3号源泉では逆に低下した。

Fig. 8に、この間（Fig. 7に示した地震直後の約1時間の観測）の Na^+ と Cl^- の関係を示す。大きく変化したにもかかわらず，その変化は直線に見事に乗っている。Fig. 8ではこの直線をDとした。この直線Dは，Fig. 6における直線Cとは異なるもので，つまり平常時の微小な変化とは異なる傾向を持つ変化であった。一陽館源泉の深度は，それぞれ1号：86m，3号：122mであるが，これらの帯水層の周囲の水が，地震による震動により一時的に混入したために生じた変化であると考えたと説明がつく。直線Dの低濃度方向への延長は原点付近を通ることから，ごく地表近傍の低濃度の水が混入したように思えるが，水温があまり低下していない（1号源泉では平常時より若干上昇した）ことから，両帯水層のごく近傍の帯水層の水が混入したと考えられる。なお， Ca^{2+} イオンの濃度変化は Na^+ ， Cl^- イオンの変化とは異なるもので，二液混合のみでは説明できない。 Ca^{2+} イオンの変化については，奥澤・塚原（2001）にも述べているように，周囲の岩石との交換反応が起こりやすい。そのため，二液混合に加えて， Ca^{2+} イオンについては岩石との反応による変化があったのであろう。また， Mg^{2+} ， F^- ， SO_4^{2-} の溶存量は微量ではあるが，これも Na^+ ， Cl^- イオンの変化とは相関が小さい。系統的变化が見られないため，その原因は本研究のデータだけでは明らかではないが，何らかの化学反応，あるいはこれらイオンを非常に高濃度に含む第三の地下水がごく微量混合した，などが考えられる。

このM4.0地震の前後はどうであろうか。Fig. 9に1998年～2000年の一陽館源泉におけるデータを示す（ただし，Fig. 8に示したM4.0地震直後の約1時間のデータは含めていない）。 \diamond 印は一

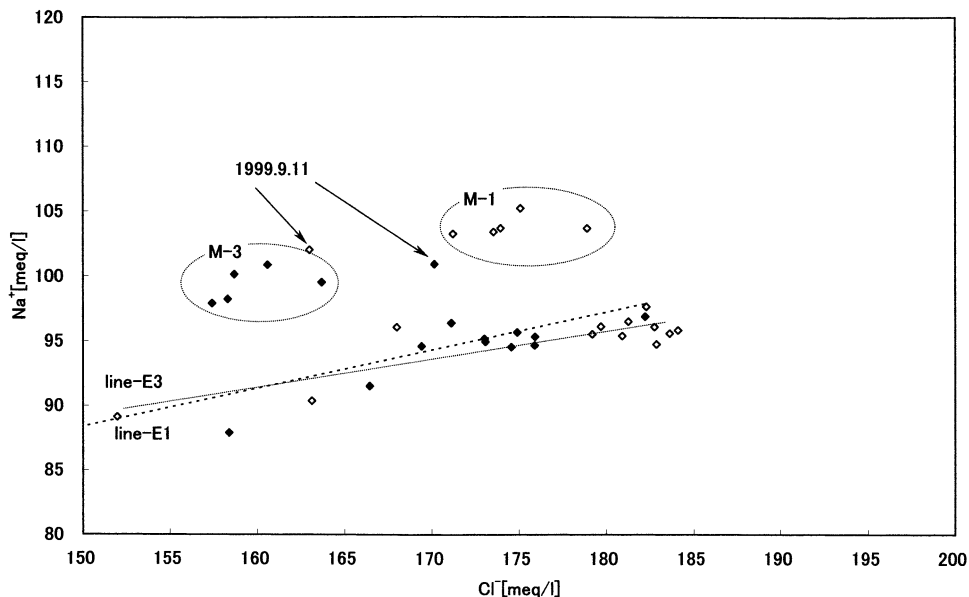


Fig. 9 Plots of Na^+ content against Cl^- content in the hot water from the Ichiyokan well in the period from Dec. 1998 to Oct. 2000. \diamond : Ichiyokan well No.1. \blacklozenge : Ichiyokan well No. 3. M-group are the data obtained in a period from a week to 5 weeks the M4.0 earthquake. The data with 1999.9.11 is that of 1.5 months before the M4.0 earthquake. Line-E are the best fit lines for the data except those on 1999.9.11 and M-group.

陽館1号源泉であり、 \blacklozenge 印は3号源泉のものである。ここで示した直線E(1号源泉は直線E1, 3号源泉はE3)は、M4.0地震の前後約1ヶ月のデータをのぞいたデータの回帰直線である。Fig. 6で示した同源泉の1994年における平常時の変化データの回帰直線である直線Cと、ほぼ傾きを同じくし、 Na^+ の低濃度方向へ平行移動している(Na^+ が低濃度方向へ下がっているのは前節で述べたCa-Cl型への変質のためであると考えられる)。つまり、直線Eは1998年~2000年における平常時の変化を示している。

地震直後1ヶ月間(1999年11月)に一週間ごとに行った観測値(5回分)は、Fig. 9のM-1(1号源泉データ)、M-3(3号源泉データ)で示す領域にあり、平常の値と異なった領域にプロットされているのがわかる。さらに地震前のデータを見ると、直近のデータは残念ながら1999年9月11日まででないが、Fig. 9に示すように、これも平常時の値からは大きく外れている。さらに前のデータは6月3日になるが、この時は平常のデータのグループに入る。また、Fig. 8に示された地震直後の値も、前述のように直線の傾斜は少し異なるが、直線E1, E3のグループに入る。

つまり、地震前50日前のデータと、地震後1ヶ月間のデータとは、地震直後1日間のデータのグループや通常のデータの範囲とも違っていったということである。

4. 考 察

4.1 水質変化から推定される地下水モデル

(1) 大近似モデル(二液混合モデル)

松代群発地震の活発であった1965年~1970年頃には、地下深部から大量の深層地下水が上昇し

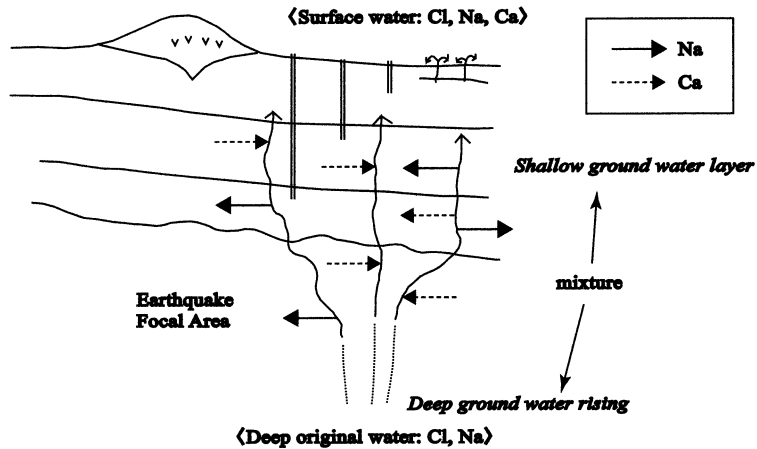


Fig. 10 A schematic drawing for explaining the variation in chemical composition of upwelling ground water. Deep ground water obtains Ca^{2+} from rocks and loses Na^+ during its upward migration through cracks. The shallow water is enriched in Ca^{2+} . Ground water observed on the surface is a mixture of deep and shallow ground waters with its own ratio.

た影響により、この地域の湧水・温泉の水源となる帯水層は大きく影響を受けた。このため、地表湧水はその溶存イオン濃度・水温・湧出量などが大きく変化した。

この、群発地震の原因となった深層地下水は、 Na^+ 、 Cl^- が主要溶存イオンである。群発地震の活動期(1965年～1970年頃)には、この深層地下水の上昇量が大きく、このため、この当時の湧水の変化は、大きな変化ではあるが、深層地下水が地表付近の低濃度浅層水と混ざり合うという、単純な二液混合により説明できる。

1970年頃より、上に述べた単純な二液混合からは外れた変化を始める(Fig. 5参照)。1970年頃には群発地震活動もほぼ終息し、地下深部からの深層地下水の供給量がほぼ安定した。これにより、各帯水層における深層地下水と浅層地下水の混合比率はおおよそ安定したと考えられるが、その後も変化が見られるのはなぜであろうか。これは、混合比率が安定することにより、混合比率以外の原因による濃度変化が目立つようになったためと思われる。各湧水の水源となる水は、比較的長い時間帯水層内に留まることになったと考えられ、帯水層内で水が周囲の岩石と反応することにより生ずるゆっくりとした変質の影響を受けて、湧水はそれまでの変化とは異なる変化を始めたと考えられる。特に、 Cl^- イオンは岩石との反応でもたらされることはないため、それは深層地下水起源のものであるのに対し、 Na^+ イオンは周囲の岩石との反応により、 Ca^{2+} イオンとのイオン交換が生じ、その結果、 Cl^- イオン濃度に対して、 Na^+ イオン濃度は低下する(Fig. 10)。Fig. 5において、1970年頃松代の湧水が安定した後、それまでの変化からは異なる変化(直線Bから外れる変化)に移行したのはこのためである。帯水層内で水が比較的長い時間滞留するようになったことにより、各帯水層の水は、低 Na^+ 濃度方向へと、シフトしてきたと言える。

(2) やや詳細なモデル(Na^+ イオンの階段状濃度増加モデル)

現在見られる湧水の、比較的短時間に見られる濃度変化は、上に述べた変化に比較すれば、微小な変化である。が、上に述べた単純な二液混合で説明するには、 Cl^- イオン濃度の変化に対して、 Na^+ イオン濃度の変化幅が小さい。そのため、Fig. 6の直線CやFig. 9の直線E(現在の平常時の変化)は、二液混合によるFig. 3の直線AやFig. 5の直線Bよりも傾きが小さくなる。これはなぜだろうか。以下にその原因を考えてみる。

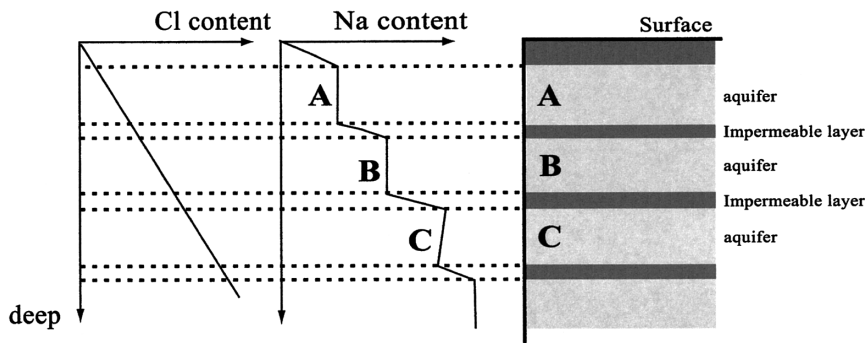


Fig. 11 A schematic drawing of variation in Na^+ concentration with depth. Na^+ concentration has been changed with reaction between rocks and ground water. Ground water in an aquifer with the same rocks becomes almost the same concentration of Na^+ after long reaction time.

松代地域の地下において、 Cl^- イオンは深層地下水起源のものであり、その濃度は深度におおよそ比例し増加する。しかし、 Na^+ イオン濃度は、ほぼ深度に比例しつつも、場所によってその濃度に多少相違がある。 Na^+ イオンは、地層中からもたらされ、地層中の Na^+ 含量の相違により、地下水中の濃度も変化するためである。また、その程度は地下水が帯水層中に滞留する時間の長短にもよる。したがって、 Cl^- イオン濃度に関してはほぼ深度に比例するのに対して、 Na^+ イオン濃度は、地層毎の濃度の違いがあり、いわば深度に対して「階段状」に濃度分布しているものと考えられる。Fig. 11に概念図を示す。 Cl^- イオン濃度に対する Na^+ イオン濃度の変化幅が小さいため、Fig. 6やFig. 9においては傾きが小さくなるのである。

4.2 提案したモデルと観測事実との関係

(1) 比較的長期の変動について

1970年頃、それまでの大きな変化から異なる変化が始まったことについては繰り返し述べてきたが (Fig. 5参照)、1970年以前は、深層地下水が大量に上昇していたために、帯水層中に水が留まる時間が現在よりも短かったと考えられる。このため、上に述べたモデル (Fig. 11) のように、 Na^+ イオン濃度はまだ階段状の濃度分布を示さず、 Cl^- イオン濃度のように深度にほぼ比例して増加したものと考えられる。このため、1970年頃までは、単純な二液混合で説明できることになる。

1970年頃、徐々に帯水層内に水が滞留する時間が長くなり、このため岩石との反応の影響が顕著になり始めたものと考えられる。1970年以降、それまでの変化と異なる変化を始めるのは、上のモデル (Fig. 11) で、 Na^+ イオン濃度が、それまでの深度に比例した直線から、階段状の分布へと徐々に変わり始めたことが、原因であろう。そのため Fig. 3の各源泉について見れば、現在は直線の傾きの異なる変化となっている。

(2) 現在の平常状態

Fig. 11において、例えばB付近の深度の帯水層のように、 Cl^- イオン濃度に関しては、深度に比例し増加するが、 Na^+ 濃度に関しては、帯水層内での岩石との反応により、ほぼ一定となっていることが考えられる。それ故、二つの帯水層の深度が異なり、 Cl^- イオン濃度が異なっても、 Na^+ イオン濃度はほとんど変化しない、ということは十分あり得る。場合によっては、浅い水の方が Na^+ イオン濃度が高いということもあり得る。Fig. 6やFig. 9に見られる平常時の微小な、比較的短期間に見られる変化のように、 Na^+ 濃度に関して変化幅の少ない変化は、こうした原因で生ずると考え

られる。つまり、地震などの大きな地殻変動のない状態においては、隣り合ったごく近傍の帯水層の混入は考えられるが、この際、 Cl^- イオン濃度は変化しているが Na^+ イオン濃度はあまり変化しない、ということになる。Fig. 6 の line-C, Fig. 9 の line-E に沿った微小な変化は、こうした原因によると考えられる。

(3) 地震時の変化

地震などの地殻変動が生ずると、地下岩石（不透水層）に亀裂が入ることにより通常とは異なる水の通路が形成され、帯水層へ通常では水の行き来のない別の帯水層からの混入があり得る。

1965年に始まる松代群発地震では、地下深部から大量の深層水（主要イオン： Cl^- , Na^+ ）が急激にもたらされたため、 Cl^- イオンと Na^+ イオンがほぼ比例した変化をすることになる（Fig. 3 の直線 A や Fig. 5 の直線 B に沿った変化）。

現在では、各湧水・温泉の水源となるそれぞれの帯水層はほぼ安定している。各帯水層では Cl^- イオン濃度に対し Na^+ イオン濃度の変化幅が小さい微小な変化があるが（直線 C や直線 E に沿った変化）、こうした状況下で地震が発生すると、別の帯水層からの水の混入により、 Cl^- イオン濃度の変化のみならず、 Na^+ イオン濃度が大きく特徴的に変化することとなる（例えば、Fig. 11 において、深度 B の水に深度 A の水が混入する場合など）。1999年10月29日の M4.0 の地震後約一ヶ月間、 Cl^- イオン濃度、 Na^+ イオン濃度とも大きく変化し、平常時の変化から大きくシフトしたが、これはこうした原因によると考えると説明がつく。

4.3 地震が起こると、どのように変化するか

1970年以降、この地域の帯水層は、深層地下水と浅層地下水との混合比率がほぼ安定し、それ以前の群発地震活動が活発であった頃に比較して、現在の湧水の変化はごく小さなものといえる。長い期間で見れば、徐々に Na^+ 濃度が低下するという変質はあるが、一年程度の比較的短い期間では、この変質はほとんど検知することができない。地震などの地殻変動のない状態での、短い期間で見られる変化は、いわば平常時の変化であるが、こうした変化には Na^+ イオン濃度、 Cl^- イオン濃度のみに注目した際においても、一定の傾向が見られる。すなわち、平常時には、 Na^+ イオン濃度と Cl^- イオン濃度はよく相関しつつも（ほぼ比例関係を持ちつつも）、 Cl^- イオン濃度の変化に比較して、 Na^+ イオン濃度の変化が小さい、ということである。今回（1999年10月29日）の地震に際して、平常時とは異なる変化が見られた。 Cl^- イオン濃度、 Na^+ イオン濃度が平常時から大きく変化（シフト）したのである。この変化は、平常時の比例関係を持つ変化から外れた変化であり、 Cl^- イオン濃度が低下、 Na^+ イオン濃度は増加するというもので、異常値といえる。こうした異常値は、地震後約1ヶ月間に渡り観測されたが、地震の約1ヶ月半前にも、同様の異常値が見られる。 Na^+ 、 Cl^- イオン濃度が平常時に見られる相関を大きく外れてシフトすることは、地下の帯水層の状態が大きく変化したということであり、こうした異常が観測されるのは、地下において地殻変動が生じた傍証であるともいえる。経時変化を観測していれば、平常時に見られる Na^+ イオン濃度と Cl^- イオン濃度の比例関係を持った変化から外れた変化（ Na^+ イオン濃度が増加し Cl^- イオン濃度が低下するような変化）が観測された場合には、地殻変動が予測されることになる。

5. ま と め

本研究では、松代群発地震地域の現在の湧水の状態を経時的に観測すること、及び過去の文献・調査データとを併せて比較考察することにより、地震に際して地下水のイオン濃度がどのように変化するかを究明し、現在のこの地域の地下水の状態がどのようなものであるかを明らかにしようと

試みた。また、幸運にも観測することのできた1999年10月29日のM4.0地震前後の変化を考察した。それにより以下のことが判った。

(1) 松代群発地震地域の湧水は、1970年以降、 Cl^- イオン濃度がほぼ一定であるのに対し、 Na^+ イオン濃度が減少する傾向で、少しずつ変質していつている。その原因として、この時期以降、各湧水の水源となる水は、帯水層内で比較的長い時間留まることになり、このため Na^+ イオン濃度が(Ca^{2+} とのイオン交換により)徐々に低下していると解釈した。

(2) 現在は、主要イオンである Na^+ 、 Cl^- イオンとも微少な濃度変化をしつつも、その変化には一定の傾向がある。すなわち、大きく見ると Na^+ イオン濃度と Cl^- イオン濃度はほぼ比例関係を持ちつつ変化する。

(3) 現在、さらに詳しく Na^+ 、 Cl^- イオン濃度の変化を見ると、この地域の地下水は、 Cl^- イオン濃度に関しては深度に比例して増加するが、 Na^+ イオン濃度に関しては必ずしもそうではない。 Na^+ イオン濃度は地層中の岩石との反応により変化し、濃度は深度に対し階段状に変化している可能性がある。このことから、 Cl^- イオンは高濃度深層地下水と低濃度浅層水との混合比の指標となり、 Na^+ イオンは鉱物との反応の指標となり得る。

(4) この地域直下で発生した1999年10月29日の地震(M4.0)の約一ヶ月半前に、(2)に述べた変化傾向とは異なる異常値が観測された。地下の状態の変化は、地震に先立って、地表湧水のイオン濃度変化に現れたと考えられる。

(5) 上記の地震直後、一陽館源泉では湧出量・溶存イオン濃度が大きく変化した。このイオン濃度変化は地震の震動により水源となる帯水層に、周囲の水が一時的に混入したためとして説明できた。

(6) この地震後、約一ヶ月間、(2)および(5)に述べた変化傾向とは異なるイオン濃度の異常値(Na^+ イオン濃度が増加し Cl^- イオン濃度が低下するような変化)が観測された。地震により地下の状態が変化することにより、地表湧水のイオン濃度も大きく変化することを示している。

謝 辞

防災科学技術研究所の吉田則夫氏には、採水・分析からデータ解釈に至るまで多くの有益な意見をいただいた。一陽館の春日 功氏には、測定の便宜を図っていただき、また過去の温泉分析書をはじめ数々の貴重な文献を見せていただいた。イオンクロマトグラフ等の分析に関しては、信州大学理学部の福島和夫氏、ミヤマ(株)の桜井哲郎氏にご指導いただき、データの解釈などに多くのご助言をいただいた。査読者の方々には貴重なコメントをいただき、本論文の内容を改善するために大変役立った。ここに深く感謝します。なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金(課題番号11640413)により補助されました。

文 献

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.

地質調査所(1979b): 温泉水の組成, 防災科学技術研究資料, **41**, 169.

Hagiwara, T. and T. Iwata (1968): Summary of the Seismographic Observation of Matsushiro Swarm Earthquakes, Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo, **46**, 485-515.

掛川一夫(1968): 松代・稲荷山・森・代官町の温泉の成分調査表, 更埴埴科地方誌(自然編分冊), **1**, 326.

春日 功(1976): 松代地震による加賀井温泉の変化, 地学雑誌, **76**, 76-86.

Kitano, Y., R. Yoshioka, F. Okuda and K. Kazuo (1967): Geochemical Study of Ground Waters

in the Matsushiro Area. Part 1: Chemical composition of ground waters, Bull. Disast. Prev. Res. Inst., **17**, 47-71.

Nakamura, K. and Y. Tuneishi (1967): 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—手に入れた地震制御へのデータ—, 科学朝日, 10月号, 127-133.

長野県松代保健所 (1967 a): 牧内地すべり地区湧水水質検査結果, 松代群発地震と水質変化, 18 (防災科学技術資料, **41**, 1979, p68 による).

長野県松代保健所 (1967 b): 東条地区温泉成分表, 松代群発地震と水質変化, 19 (防災科学技術資料, **41**, 1979, p69 による).

長野県松代保健所 (1967 c): 温泉成分経時変化 松代 2 号泉, 松代群発地震と水質変化, 20 (防災科学技術資料, **41**, 1979, p70 による).

野口喜三雄 (1967): 松代地震と温泉, 化学と工業, **20**, 113-116.

野口喜三雄 (1968): 長野県の温泉の化学成分, 温泉科学, **18**, 50-53.

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.

野口喜三雄, 上野精一, 相川嘉正, 国友香子 (1970): 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 第 2 報, 温泉科学, **21**, 134-144.

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, **53**, 241-253.

鶴見 実 (1979): 松代湧水の化学的特徴, 地球化学, **13**, 18-23.

梅村 弘, 原田康信 (1968 a): 水質調査成績(1)湧水, 松代地震に伴う湧水及び水稲の塩害に関する調査と対策試験成績書, 4 (防災科学技術資料, **41**, 1979, p121 による).

梅村 弘, 原田康信 (1968 b): 水質調査成績(3)湧水・かんがい水の時期的変化, 松代地震に伴う湧水及び水稲の塩害に関する調査と対策試験成績書, 6-8 (防災科学技術資料, **41**, 1979, p123-125 による).

(日本地震学会 2000 年秋季大会で発表, 平成 12 年 11 月 21 日)