

昭和 44 年 8 月

原 著

## 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

東京都立大学理学部 野口喜三雄・上野精一・西井戸敏夫

(昭和 44 年 5 月 30 日受理)

### Geochemical Study on the Variation of Hot Spring Waters Caused by the Matsushiro Earthquake Swarm

Kimio NOGUCHI, Seiichi UENO and Toshio NISHIIDO

Department of Chemistry, Faculty of Science, Tokyo Metropolitan University

In 1965 and 1966, earthquakes occurred repeatedly in Matsushiro, Nagano Prefecture. The authors made an investigation of all the hot springs in Matsushiro and the surrounding area. Moreover, daily observations were made on the water temperature, water discharge and chemical composition of the 1st and 2nd springs of Kagai and the spring of Taiyōtsushinkogyo Co., Ltd. during the earthquake period.

The results obtained are as follows:

- 1) In April, 1966 when the earthquakes were most violent, the chloride content of the hot springs, No. 1 and No. 2, of Kagai was at its lowest level.
- 2) In September, 1966 the waters which flowed out vigorously at Kagai, Sezeki, Makiuchi, Kirikubo, Nakagawa-jinjamae, Taiyōtsushin Co. Ltd. and at the foot of Mt. Minakami were classified into two groups. One group arranged on a line running from northwest through Kagai Hot Springs to the southeast was rich in chloride, boric acid and free carbon dioxide, and the other group on a line running from the north through Taiyōtsushin Co. Ltd. to the south was alkaline and poor in chloride and boric acid.
- 3) The water which flowed out from the fissures in Sezeki and Makiuchi caused by the earthquakes was at first low in temperature and in chloride and boric acid, and was almost ordinary shallow groundwater. But with the time the amount of water increased quickly as well as chloride and boric acid. At the end of the earthquakes the amount of water decreased gradually, but mineral matters such as chloride increased.
- 4) The temperature of the waters at Kagai, Sezeki and Makiuchi areas are usually not so high and the temperature change was only a little during the earthquake-period.
- 5) The gases emitted at Sezeki from the fissures caused by the earthquake showed 98.8 vol %  $\text{CO}_2$ . Hydrogen sulfide was not present.
- 6) The water of Kagai Hot Springs and the waters which flowed out at Sezeki and

Makiuchi during the earthquake period were very rich in chloride, boric acid and free carbon dioxide, and quite different from sea water in Br/Cl ratio.

- 7) Weak alkaline hot springs and seismic centers of strong earthquakes of IV and V in seismic intensity are located in the same zone stretching from the southwest through Mt. Minakami to the northeast. Moreover, at Kagai and Sezeki a wide weak alkaline spring zone intersects the structural line of hot springs, rich in chloride, boric acid and carbon dioxide, extending from the northwest to the southeast, seismic centers were found to be shallow.

## 1 緒 言

1965年8月3日から長野県埴科郡松代町(現在長野市松代町)付近一帯に群発地震が発生し、特に第1, 第2および第3活動期には震度Vを含む多数の地震が連続して起こり、各方面に影響を及ぼした。第3活動期を境とし、その後は比較的平静を保ちつつ現在に至り、群発地震はほぼ終焉を告げたかに見える。この間に群発地震の本質を解明するための研究が数多くなされた<sup>1)~4)</sup>。松代群発地震は震源が0.3~8.8kmで、概して浅いことがその特徴の一つとされている。また温泉水ならびに地下水の湧水量や水質に著しい異常が見られた。

地震の際に温泉水が変化した例は1923年(大正12)9月1日に起こった関東大地震に際して、当時乱掘によりすでに噴騰を休止していた熱海間歇泉が噴騰したこと、1939年(昭和14)5月1日に起こった秋田県男鹿半島の地震の際には男鹿半島の湯本温泉で温泉水が多量に湧出し、水田や畑が湯で充満したこと、1946年(昭和21)12月21日に起こった南海大地震の際には、四国の道後温泉で76日間湧出が停止したこと、近くは1964年(昭和39)6月16日の新潟地震の際には、信濃川の河口に位する新潟市でばく大な量の地下水が噴出し、日本海沿岸の山形県湯野浜、温海などの温泉はその湧出量が激減したことはよく知られた事実である。しかし地震の前後にわたって、温泉水の化学成分の変化が詳細に調査された例は殆んどないようである。

筆者らは今回の松代地震によって、温泉水に変化が生じることを予想し、第1活動期の前、すなわち1965年11月1日から松代町とその周辺において温泉水を継続的に観測し、地震の強さならびに震源位置と水質の変化の関係を詳しく検討した。最も地震活動の激しかったのは1966年4月で、これが第2活動期であるが、このとき松代町加賀井温泉は最も顕著な変化を示した。またさらに第3活動期の1966年8月には松代町瀬関、竹原、牧内の各地区で地表面の隆起と共に、地すべり性の亀裂が生じた。つづいて同年9月中旬から下旬には瀬関、瀬関牧内間、牧内地区、桐久保沢および西平山に大量の地下水の湧出をともなって地すべりが発生した。これらの湧水ならびに温泉について、地震活動にともなう化学組成の変化を詳細に調査し、地震発生の地下機構究明の手掛りを得ることを目的として本研究を行った。

## 2 第1活動期の前後における松代町およびその周辺部の温泉の水質

松代町には加賀井温泉、松代温泉、代官町児玉の湯、太陽通信工業(株)の源泉、また松代町の周辺部には湯戸、森、倉科、上山田、戸倉、保科、綿内、湯河原、仙仁、須坂などの各温泉が散在している(図1)。これらの温泉は松代町北方の山ノ内温泉群を含む第三紀中新生造山帯に属し<sup>5)</sup>、一般に半深成岩をその基盤としている<sup>6)</sup>。

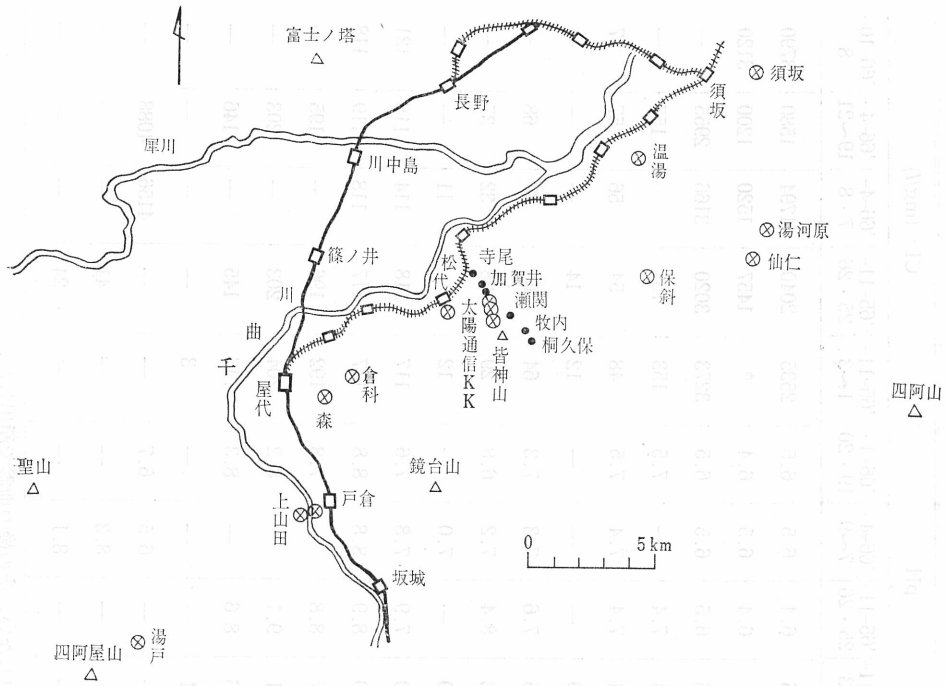


図 1 松代町及びその周辺の温泉

⊗ 弱アルカリ性の塩分の少ない温泉

● 炭酸ガスを伴い著しく塩分の多い温泉

尚、寺尾、瀬関、牧内、桐久保は今回の松代地震で始めて湧出したものである。

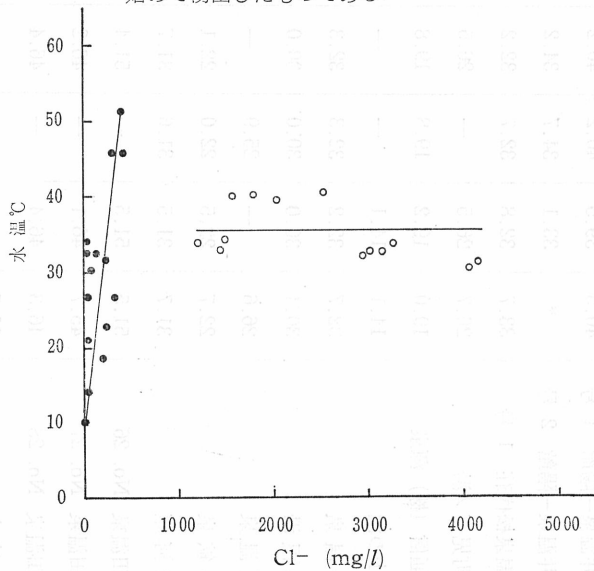


図 2 水温と塩化物含量の関係

○ 加賀井、松代、東寺尾

● 上山田、森、倉科、太陽通信、代官町、保科、綿内、須坂、赤柴、湯戸、湯河原、仙仁

表 1-1 松代町およびその周辺の温泉の水温、pH ならびに塩化物含量

項目	水 温 (°C)				pH				Cl <sup>-</sup> (mg/l)			
	'65-11-1~3	'66-4-7~9	'66-10-8	'65-11-1~3	'65-11-25・26	'66-4-19・20	'66-4-7~9	'65-11-25・26	'65-11-1~3	'66-4-7・8	'66-4-19~21	'66-10-8
採水地点												
1 加賀井温泉一陽館 1 号	40.5	40.2	39.9	6.5	6.4	6.5	6.5	2040	1794	1580	3790	
2 加賀井温泉一陽館 2 号	*	34.7	33.4	*	6.4	6.4	6.4	*	1520	1200	3120	
3 松代温泉松代荘 1 号	33.7	32.7	—	6.5	6.5	6.5	6.5	3273	3166	2955	—	
4 代官町兎玉ノ湯	26.7	—	26.5	7.4	7.4	—	7.5	153	—	157	—	
5 太陽通信(株)源泉	19.0	19.8	21.5	7.4	7.4	7.4	7.5	48	56	57	57	
6 皆神山の池	14.1	—	—	6.9	—	—	—	12	—	—	—	
7 保科温泉	32.7	32.3	—	7.5	7.6	7.3	7.3	64	67	68	—	
8 緒内温泉	30.4	30.0	—	8.3	8.4	7.2	6.8	29	32	37	—	
9 須坂温泉	26.6	—	—	7.9	—	7.0	—	12	11	—	—	
10 倉科温泉	22.7	22.0	22.6	8.0	7.9	7.8	7.6	117	114	118	121	
11 森中河原	31.7	31.6	31.6	8.9	8.9	8.8	8.8	117	118	119	118	
12 上山田温泉 No. 26	51.5	—	—	8.7	8.8	—	7.8	192	—	195	—	
13 上山田温泉 No. 27	45.7	—	—	9.1	9.1	—	8.2	204	—	203	—	
14 上山田温泉 No. 28	46.3	46.4	—	8.6	8.6	—	8.3	146	—	146	—	
15 赤柴山	10.5	—	—	7.1	—	—	—	3	—	—	—	
16 松代町山根井源泉	—	31.2	—	—	—	6.5	6.7	—	4156	4088	—	
17 仙仁温泉	—	34.	—	—	—	8.3	—	—	—	—	—	
18 湯河原温泉	—	32.8	—	—	—	8.1	—	—	—	—	—	

\* 加賀井温泉一陽館 2 号は 65-11-1 にはまだ湧出しない、その後の地震で湧出した、

表 1-2 松代町及びその周辺の温泉の化学成分

採水地点	採水年月日	水温 °C	pH	アルカリ度 meq/l	HBO <sub>2</sub> mg/l	Cl mg/l	Br mg/l	I mg/l
加賀井温泉 1号	1966. 3. 8	40.4	6.4	23.04	323	1916	3.5	1.2
加賀井温泉 2号	'66. 3. 9	34.7	6.4	21.00	276	1706	3.0	1.2
山根ボーリング井	'66. 4. 20	31.3	6.5	39.20	645	4088	7.5	3.2
松代荘 2号	'66. 4. 21	32.3	6.5	35.50	598	3710	6.9	2.9
新ボーリング井	'66. 8. 28	28.8		11.75	86	670	1.16	0.06
瀬関中曽根喜一氏新湧水	'66. 9. 18	18.9	6.2	13.30	124	1115	2.10	0.80
"	'66. 10. 8	19.2	—	23.0	—	3283	—	—
瀬関中曽根喜一氏リング畑新湧水	'66. 9. 24	21.9	6.1	23.6	470	3170	5.8	0.9
瀬関牧内間新湧水	'66. 9. 24	16.6	6.3	11.40	79	1118	2.0	0.24
"	'66. 10. 8	18.1	6.0	—	—	3202	—	—
瀬関牧内間新湧水(合流点)	'66. 9. 24	14.5		4.15	25	444	0.87	0.13
太陽通信工業(株) 1号	'66. 9. 17	20.9	7.3	3.00	2.8	61	0.10	0.01
太陽通信工業(株) 2号	'66. 9. 17	20.3	7.3	3.05	2.8	63	0.11	0.01
池田の宮前新湧水	'66. 9. 16	27.4	7.2	3.60	4.0	82	0.15	0.01
松代代官町の湯	'66. 4. 21	26.7*	7.4*	2.94	10	153	0.31*	0.07*
皆神山下湧水	'66. 10. 7	15.0	7.3	1.97	2.0	51.8	—	—
皆神山下湧水	'66. 10. 7	16.5	7.3	1.75	1.4	30.0	—	—
倉科鉱泉	'66. 4. 20	22.1	8.0	0.55	3.1	114	0.25	0.03
森中河原	'66. 4. 20	31.7	8.8	0.31	4.0	118	0.29	0.07
上山田温泉 26号	'66. 4. 21	51.4	8.7*	0.43	6.5	195	0.59	0.03
上山田温泉 27号	'66. 4. 21	46.2	9.1*	0.56	7.1	203	0.59	0.02
上山田温泉 28号	'66. 4. 21	46.4	8.6*	0.55	5.1	146	0.59	0.01 <sub>5</sub>
綿内温湯	'66. 8. 26	30.0	8.1	0.62	0.8	40	0.11	0.01
綿内(山崎昭一)石垣下	'66. 4. 9	26.0	8.1	0.75	0.2	12	0.04	0.00 <sub>5</sub>
保科温泉	'66. 4. 20	32.3	7.5	1.27	4.9	67	0.21	0.07

\* 採水日 1965. 11. 2

上記各温泉について 1965 年 11 月 1 日~3 日に第 1 回の調査を, 同年 11 月 25~26 日に第 2 回の調査を行なった(表 1-1). 松代群発地震の第 1 活動期の山は 11 月 20 日~24 日で 22 日には 1 日の総地震数 2000 回以上, そのうち有感地震 229 回, 震度 III 6 回, IV 3 回が記録された. 第 1 回と第 2 回の調査結果を比較すると, 加賀井温泉一陽館源泉 1 号と松代温泉松代荘源泉 1 号は共に水温が約 1°C 低下し, 塩化物含量は著しく減少したが, 太陽通信工業(株)の源泉は逆に塩化物含量が僅かに増加し, 水温は変らなかった. その他の温泉はいずれも水温, 塩化物含量に殆んど変化を示さなかった. pH は全ての温泉で殆んど変らなかった.

加賀井温泉一陽館源泉 2 号は新源泉掘鑿が原因で枯渇したものであったが, 1965 年 11 月 4 日に起こった震度 IV の地震以後, 多量の炭酸ガスをともなって自噴を開始し, 地震が繰り返し起こるにしたがい, 湧水量も次第に増え, 12 月 3 日には 84 l/min を記録した. その後もさらに増加する傾向が認められた.

加賀井温泉, 松代温泉, 太陽通信工業(株)源泉, 上山田温泉, 湯戸湧水の分析結果を表 2-1

表 2-1 温泉水の分析結果

	加賀井温泉 一陽館 2号	松代温泉 松代荘 1号	太陽通信(株) 源泉	上山田温泉	坂井村湯戸湧水
採水年月日	1966-12-23	1966-12-22	1965-11- 3	1966-12- 8	1967- 5- 6
水温 (°C)	34.3	36.6	19.0	50.6	21.0
pH	6.4	6.6	7.4	8.6	8.2
Na (mg/l)	2060	2540	45.6	139	41
K (mg/l)	284	338	8.3	2.45	0.6
Li (mg/l)	2.93	4.32	0.0	0.120	0.006
NH <sub>4</sub> (mg/l)	1.1	0.2	—	—	—
Ca (mg/l)	983	563	44.8	26.9	17.4
Mg (mg/l)	141	93	10.9	0.7	1.8
Mn (mg/l)	7.73	2.91	—	0.040	0.051
Fe (mg/l)	10.1	7.6	—	0.01	0.01
Al (mg/l)	—	—	—	—	—
Cl (mg/l)	4430	4175	48	170	43
Br (mg/l)	7.42	7.35	0.1	0.52	0.193
I (mg/l)	0.5	1.2	—	0.05	0.023
HCO <sub>3</sub> (mg/l)	1839	2145	177	39	30
SO <sub>4</sub> (mg/l)	166	182	17	122	52
HBO <sub>2</sub> (mg/l)	615	637	3	5.0	0.5
Cu (mg/l)	0.004	0.000	—	—	0.000
Zn (mg/l)	0.028	0.010	—	痕跡	0.000
As (mg/l)	0.67	0.76	—	0.002	0.034
V (mg/l)	0.002	0.0025	—	0.001	0.003

表 2-2 温泉ガスの分析結果

加賀井温泉 2号井ガス		松代荘源泉ガス	
1966年4月21日測定		1966年4月21日測定	
H <sub>2</sub> S	0.0 (Vol %)	H <sub>2</sub> S	0.0 (Vol %)
CO <sub>2</sub>	84.9	CO <sub>2</sub>	96.0
O <sub>2</sub>	0.4	O <sub>2</sub>	0.0
N <sub>2</sub> その他	14.7	N <sub>2</sub> その他	4.0

に示す。また加賀井温泉ならびに松代温泉では水と共に多量のガスが噴出している。これらのガスの分析結果を表 2-2 に示す。加賀井、松代の両温泉は兵庫県有馬<sup>7)</sup>、山梨県増富<sup>8)</sup> などの本邦花崗岩地帯に存在する温泉と水質が類似している。ただし放射能は弱い。

調査した各温泉の水温と塩化物含量の関係を図 2 に示した。図 2 から明らかとなっており、これらの温泉は 2 つの群に分類される。すなわち太陽通信工業(株)源泉、児玉の湯、保科、綿内、湯河原、仙仁、森、倉科、上山田、湯戸の各温泉はいずれも弱アルカリ性の塩分の少ない温泉であって、上山田温泉で代表される。これにたいし加賀井温泉、松代温泉は共に大量の炭酸ガ

スをともないナトリウム、カリウム、カルシウム、塩素、ホウ酸、重炭酸を多量に含有し、湧出孔付近には炭酸カルシウム、水酸化第二鉄が多量に沈澱している。

### 3 地震にともなう温泉水の変化

1965年11月の地震で水質変化が顕著に認められた加賀井温泉一陽館源泉1号および2号、松代温泉松代荘源泉1号とさらに今回の群発地震の震源地が最も集中している皆神山に近い太陽通信工業(株)の源泉等について、1965年11月25日から一日一回の観測を継続した。上記4源泉はいずれも掘鑿によって得られたもので、その深さは一陽館1号井が120m、2号井が98m、松代荘1号井が235mですべて約30mの沖積層を貫ぬいて岩盤中に達している。太陽通信工業(株)源泉の掘鑿深度は約100mであるが、ボーリングは岩盤の上でとどまっている由である。これらの4源泉は全て自噴している。観測の結果を図3、4および5に示した。これらの図には気象庁松代地震観測所報告による地震のうち震度III以上のものを記入した。また気象庁地震観測所内に設置された水管傾斜計の東西方向の変化ならびに東京大学地震研究所報告にもとづく瀬関の地盤の隆起を比較のため記入した。

#### 3-1 加賀井温泉一陽館源泉2号の変化

この源泉は前述のように第1活動期の地震によって復活したものであり、観測の全期間を通じて地震による影響が顕著に現れた(図3)。とくに1965年12月から1966年3月に至る期間では図6に示すように震度III以上の地震が発生すると温泉の塩化物およびホウ酸含量ならびにアルカリ度が平行して急激に減少し、そのあと再び増加した。この現象は繰り返して観察された。湧水量は地震の直後から明瞭に増加した。水温は温泉の復活後、徐々に高くなっている。

地震にともなう温泉水の時間的変化を精密に調査する目的をもって、1966年3月8日午後7時30分に起こった震度IVの地震について加賀温泉一陽館源泉2号の変化を検したところ、図7に示すごとく地震の発生後5分では温泉水は塩化物1782mg/lを示し、何等変化が認められなかった。1時間後には明らかに塩化物の減少が認められ、時間の経過と共に温泉水の地震による影響が顕著となり、翌日午後4時30分には1710mg/lに減少した。

地震活動は3月20日ごろから再び活発となり、4月1日には1日の総地震数6596、そのうち震度III9回、10日には総地震数5100、うち震度III6回、震度IV2回、17日に至ると総地震数6780、震度III2回、IV3回、V3回という絶頂の数字に達した。

地震によって起こる塩化物量の増減は次第にその振幅を増したが、1966年3月31日および4月10日の地震によって最も著しい変化が起こった。すなわち図8に示す通り、4月10日の地震に際しては湧水量は250l/minに減少し、塩化物は31日および10日の地震で1830mg/lが1200mg/lに減少した。水温も34.8°Cから34.2°Cまで低下した。その後、湧水量は急激に回復し、さらに増大した。塩化物は若干の増減はあっても日と共に次第に増加した。また水温はさらに低下した。

1966年8月中旬から9月にかけての第3活動期にもこれまでと同様の変化が温泉水に認められた。すなわち地震の際に塩化物含量、湧水量が一時的に減少し、そのあと急激に増加するが、水温はやや低下した。

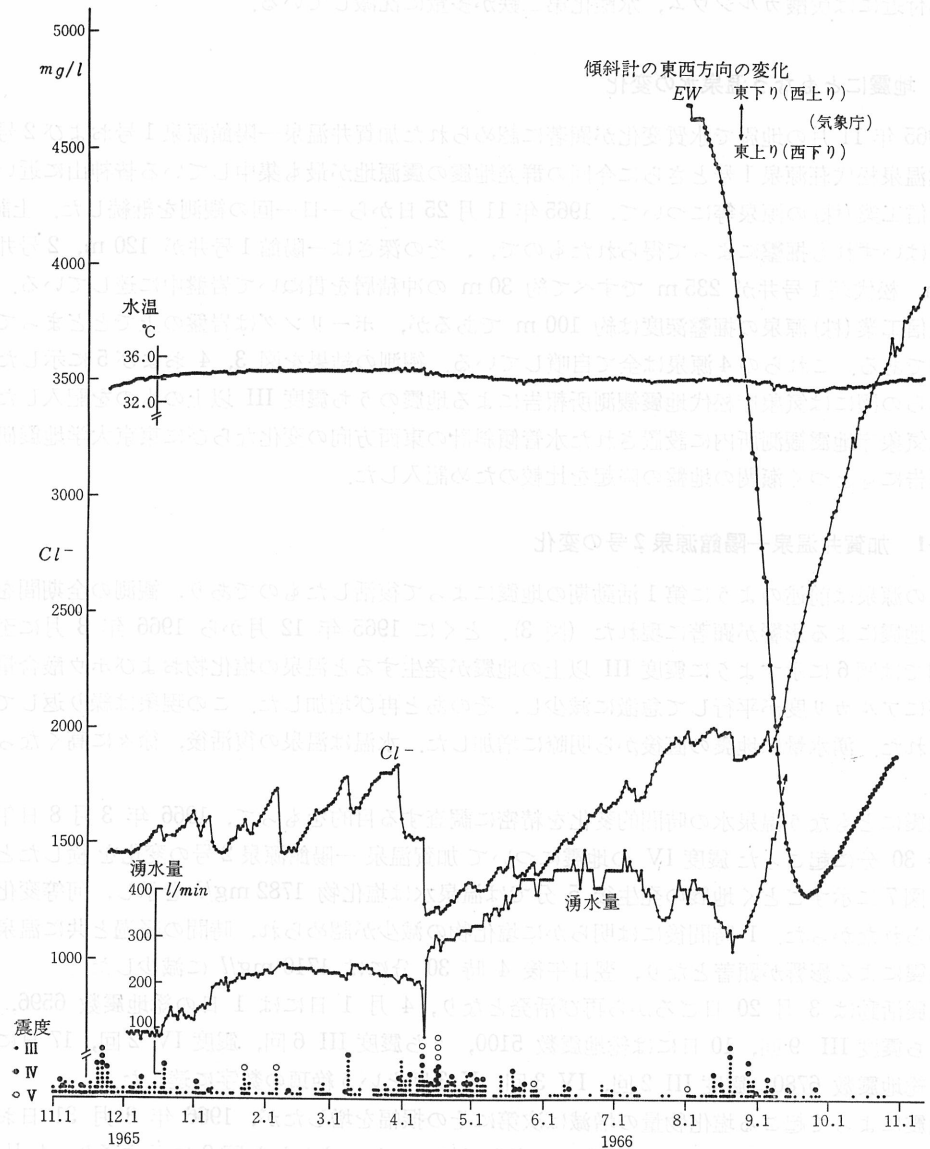
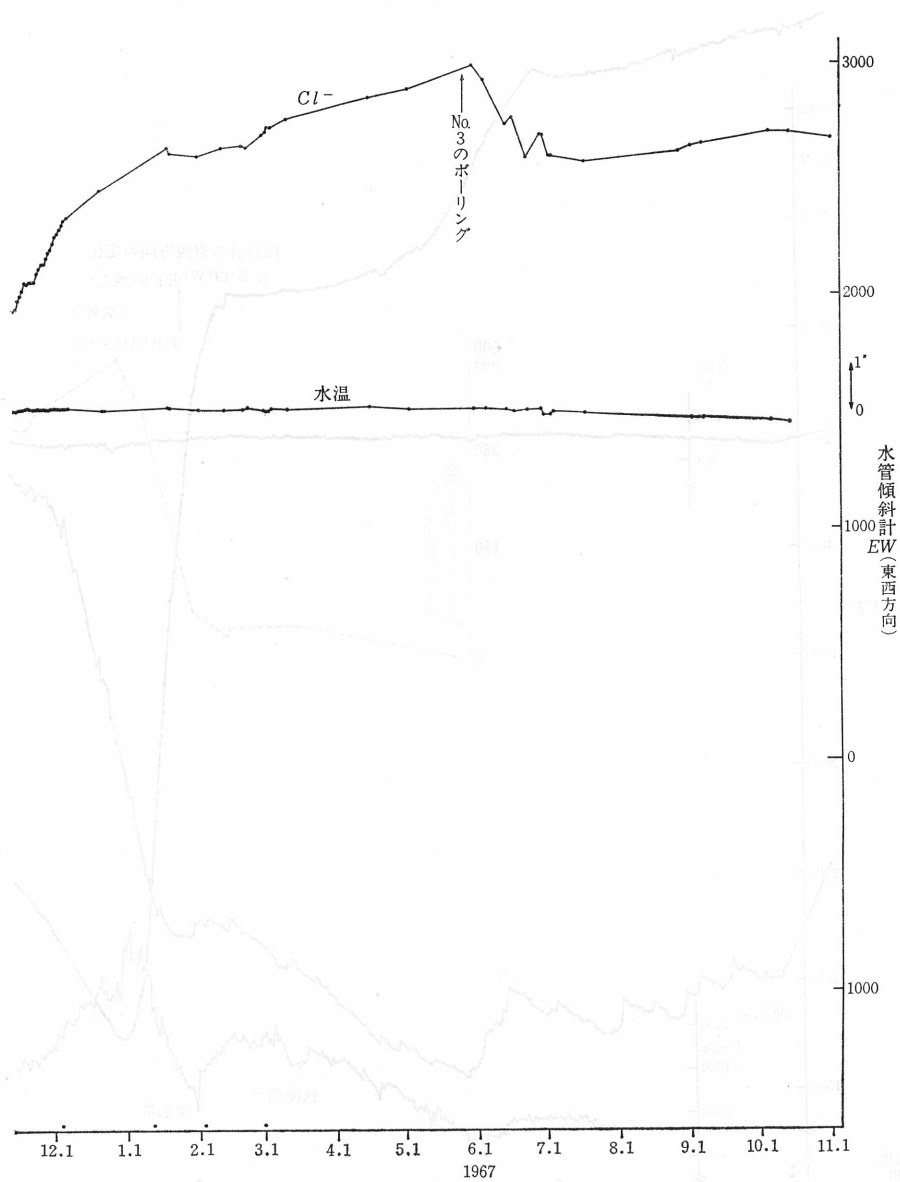


図3 加賀井温泉—陽館源泉2号における





水温、塩化物含量ならびに湧水量の変化

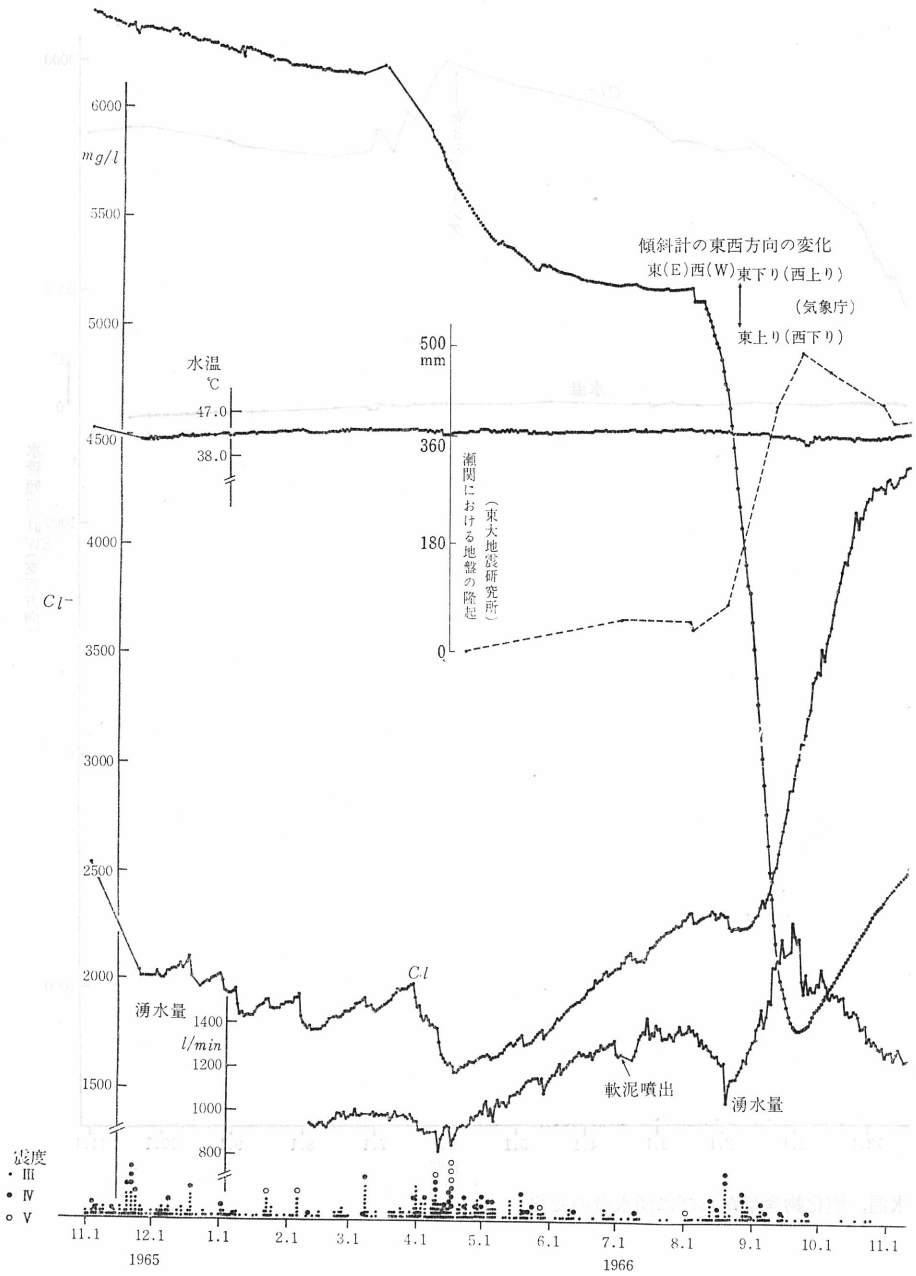
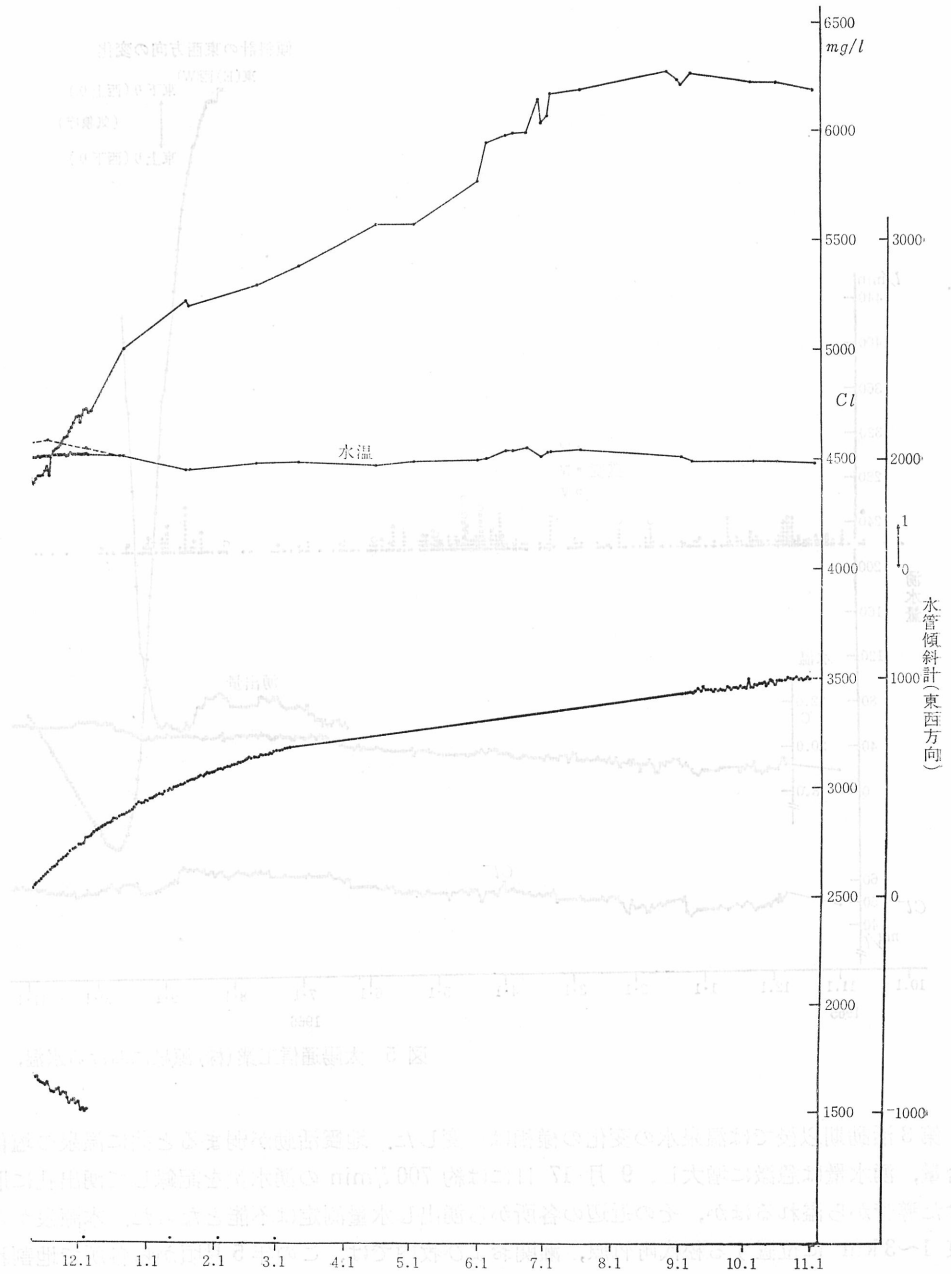


図4 加賀井温泉一陽館源泉1号における



水温、塩化物含量ならびに湧水量の変化

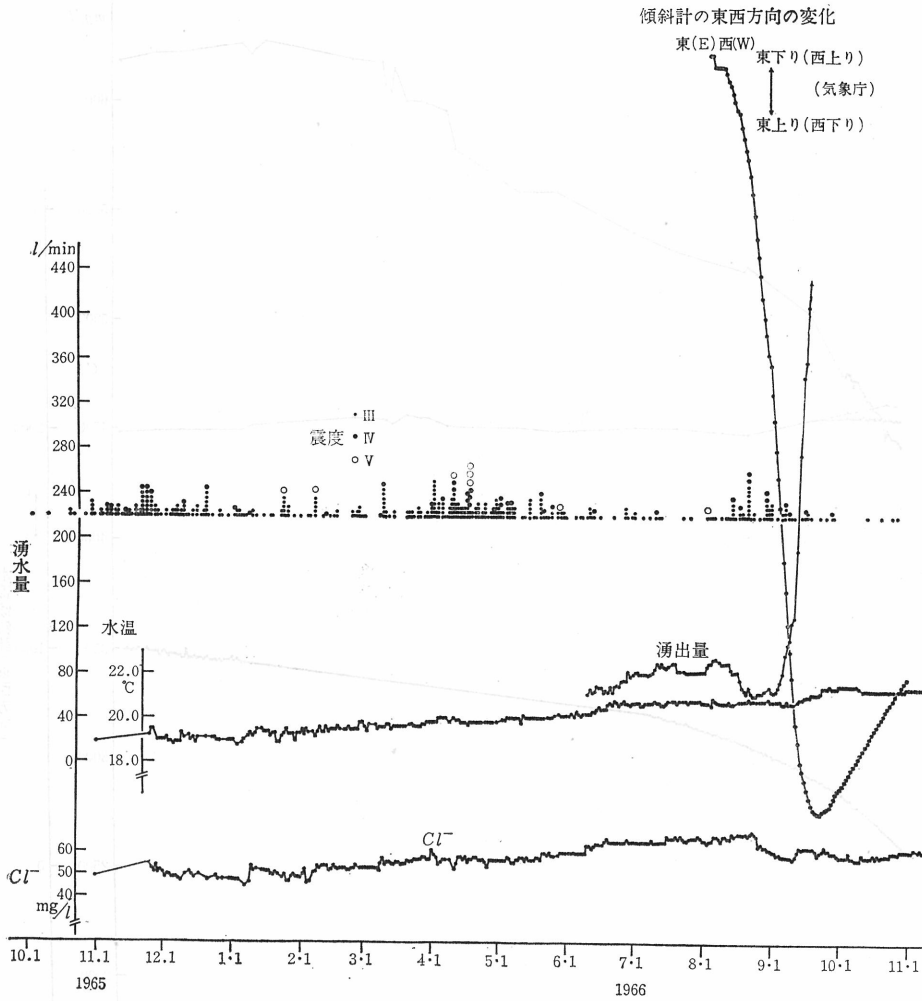
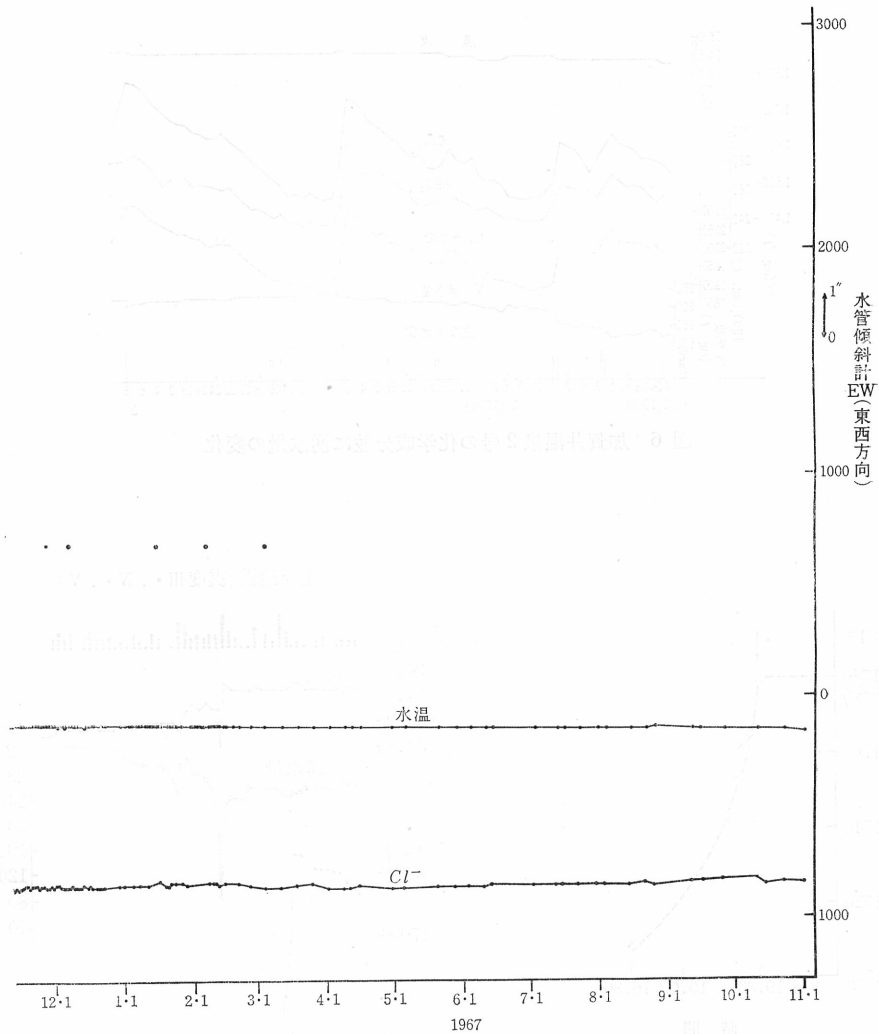


図5 太陽通信工業(株)源泉における水温、

第3活動期以後では温泉水の変化の様相は一変した。地震活動が弱まると共に温泉の塩化物含量、湧水量は急激に増大し、9月17日には約700 l/minの湧水量を記録して湧出孔に取付けた導管から溢れるほか、その近辺の各所から湧出し水量測定は不能となった。本源泉から南東1~3 kmに位置する松代町竹原、瀬関および牧内では、この年5月頃から各所で地割れを生じてそれが次第に成長し、9月に入るとこの地割れから多量の水が湧出した。そして9月17日から10月9日にかけて牧内地区、桐久保沢および西平山中腹において大量の地下水をともなう大規模な地すべりが相ついで発生した。気象庁松代地震観測所内に設置された水管傾斜計は図3、4に示す通り8月始めから東方の隆起に対応すると思われるきわめて顕著な変化を示したほか、実際8月における瀬関付近の地盤の隆起は東京大学地震研究所の観測によれば図4に示す通りきわめて著しかった。



塩化物含量ならびに湧水量の変化

その後地震活動は急速に衰え、1966年12月21日には有感地震回数は5回程度となった。この時期では湧水量は減少したが、塩化物含量はなおゆるやかに増加した。そして、1967年10月14日の4720 mg/lを最高として殆んど一定となった。したがって、活動の末期では塩分の少ない水が相対的に先に減少するため、温泉水の塩分濃度がかえって増大したものと思われる。湧水量は約200 l/min、水温は $33.2 \pm 0.1^\circ\text{C}$ を示した。本源泉に見られたその後の変化の特徴は塩化物含量の著しい増加にも拘らず、水温が9月の増水時には若干低下したほか殆んど一定であったことである。

図9に観測全期間中に採水した温泉水の臭化物含量と塩化物含量の関係を示した。この図から、温泉水のBr/Cl比は一定であり、この値は海水のBr/Cl比より明らかに低いことがわかる。図10にホウ酸含量と塩化物の関係を示し、また図11にカルシウム含量と塩化物の関係をそ

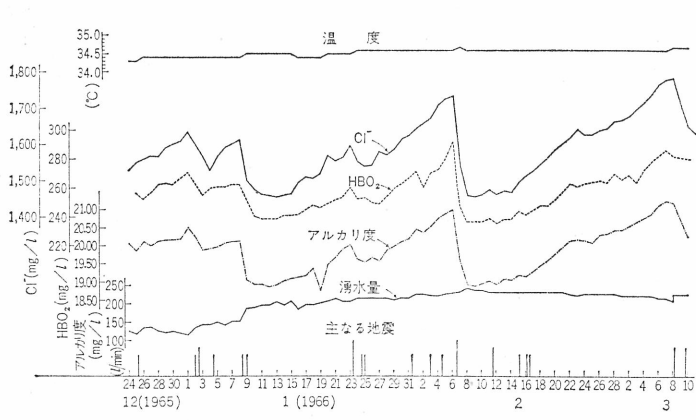


図 6 加賀井温泉 2 号の化学成分並に湧水量の変化

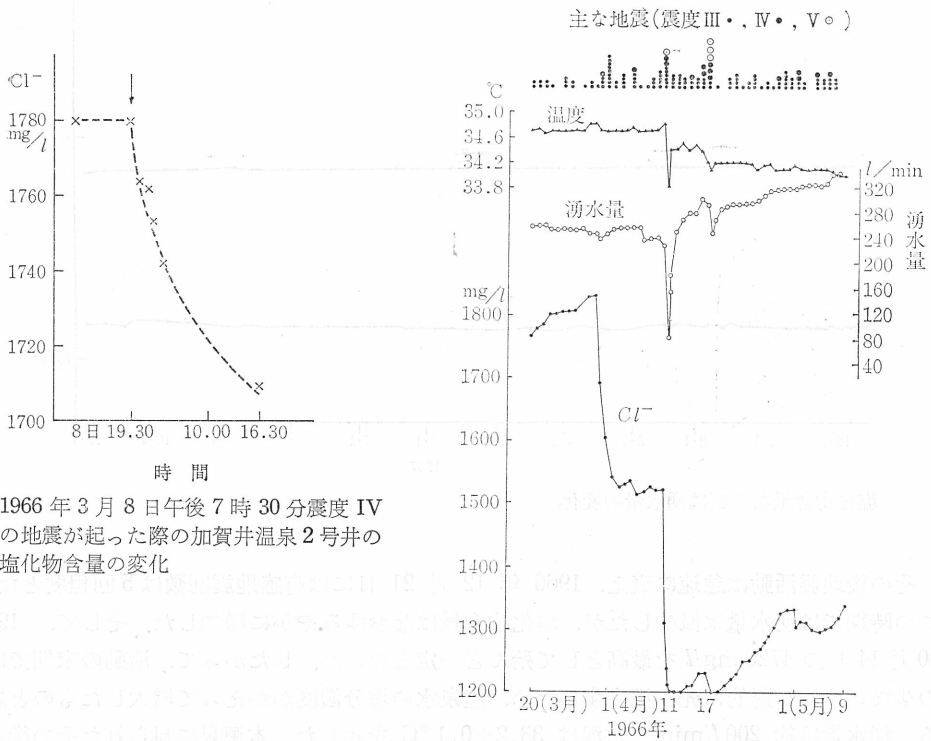


図 7 1966 年 3 月 8 日午後 7 時 30 分震度 IV の地震が起った際の加賀井温泉 2 号井の塩化物含量の変化

図 8 加賀井温泉 2 号井における地震に伴う湧水量、水温および塩化物含量の変化

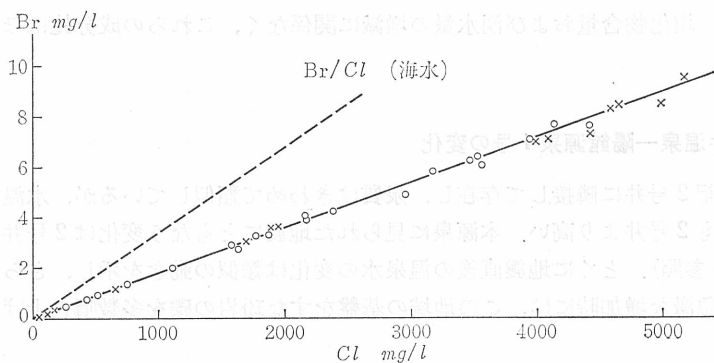


図9 加賀井温泉および地すべり地帯新湧水の塩化物含量と臭素含量の関係  
(○ 新湧水, × 温泉)

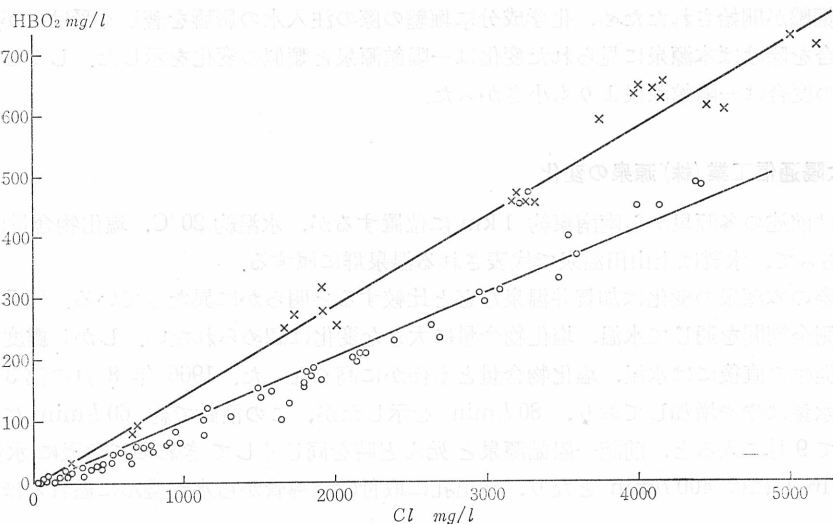


図10 加賀井温泉および地すべり地帯新湧水の塩化物含量とホウ酸(メタ)含量との関係  
(○ 新湧水, × 温泉)

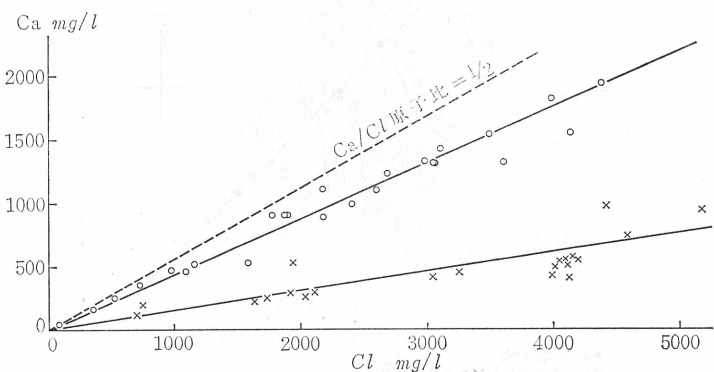


図11 加賀井温泉および地すべり地帯新湧水の塩化物含量とカルシウム含量との関係  
(○ 新湧水, × 温泉)

れぞれ示した。塩化物含量および湧水量の増減に関係なく、これらの成分比はほとんど一定であった。

### 3-2 加賀井温泉一陽館源泉1号の変化

本源泉は前記2号井に隣接して存在し、泉質はきわめて類似しているが、水温は $40^{\circ}\text{C}$ で、各成分の濃度も2号井より高い。本源泉に見られた地震にともなう変化は2号井の変化とよく一致した(図4参照)。とくに地震直後の温泉水の変化は類似の動きを示し、さらに1966年9月の湧水量の急激な増加時には、この地域の基盤をすなわち珪岩の礫を多数噴き上げた。

### 3-3 松代温泉松代荘源泉1号の変化

本源泉は一陽館の源泉から約200m北方に位置する。観測期間中に数mの距離に新源泉(2号井)の掘鑿が開始されたため、化学成分に掘鑿の際の注入水の影響を著しく受けたが、このような場合を除けば本源泉に見られた変化は一陽館源泉と類似の変化を示した。しかし地震の際の変化の度合は一陽館源泉よりも小さかった。

### 3-4 太陽通信工業(株)源泉の変化

本源泉は前述の各源泉から南南東約1kmに位置するが、水温約 $20^{\circ}\text{C}$ 、塩化物含量は約50mg/lであって、水質は上山田温泉で代表される温泉群に属する。

地震の際の本源泉の変化は加賀井温泉などと比較すると明らかに異なっている。図5に示すように観測全期間を通じて水温、塩化物含量に大きな変化は認められない。しかし震度III以上の地震発生の直後には水温、塩化物含量とも僅かに高くなった。1966年8月の第3活動期直前の湧水量はやや増加しており、80l/minを示したが、この活動で約60l/minに減少した。そして9月に入ると、前記一陽館源泉と殆んど時を同じくしてきわめて急激に水量を増し、9月16日には400l/minとなり、湧出孔に取付けた導管から水が盛んに溢れるほか、そ

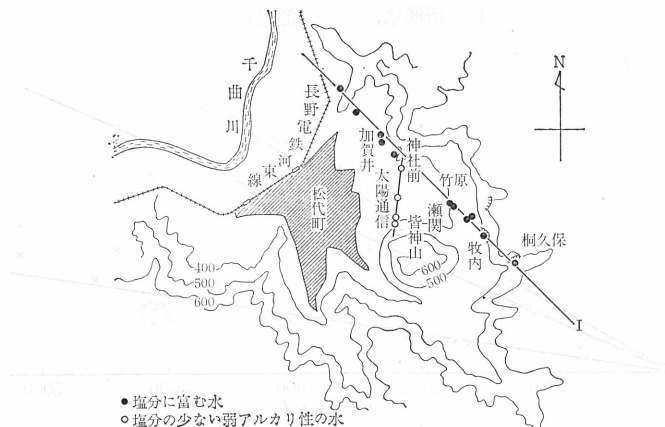


図12 地震で多量の水が湧出した位置



の付近の各所から新たに水が多量に湧出して測定を不能にした。湧出量の増加とともに水温は  $0.2\sim 0.7^{\circ}\text{C}$  程度上昇したが、塩化物含量は著しい変化を示さなかった。この湧出量の増加はこの地域一帯に起こった地下水圧の異常な高まりを反映したものであると考えられる。この弱アルカリ性の塩分の少ない水は、図 12 に示すように、皆神山北側山麓ならびに中川神社前の水田にも殆んど同時刻に多量に湧出した。その後、太陽通信工業(株)源泉の水温は  $21.5^{\circ}\text{C}$ 、塩化物含量は  $62\pm 1\text{ mg/l}$  を示しほぼ一定であったが、湧水量は次第に減少し、1969年4月7日には約  $100\text{ l/min}$  に低下した。

#### 4 地震の震源位置と温泉の変化

すでに図 3, 4 に示したように、地震によって加賀井温泉の化学組成は明白な変化を示した。しかし加賀井温泉に変化を与えない地震のあることも容易に理解される。震度 III 以上の地震については 1965年12月1日から1966年2月16日まで発生した地震の震源の位置を図 13 に、同年2月17日から4月16日までに発生した地震の震源の位置を図 14 に示した。

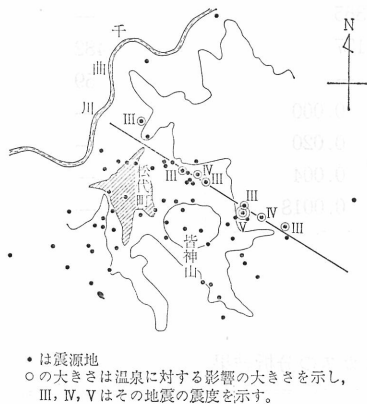


図 13 加賀井温泉に著しい影響を与えた地震と与えない地震の震源地 (1)  
(1965・12・1—1966・2・16)

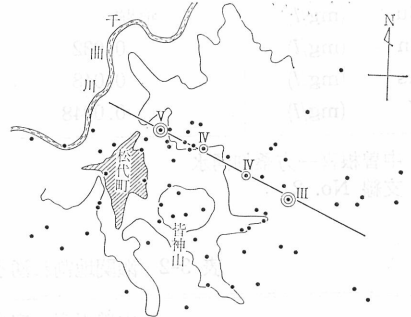


図 14 加賀井温泉に著しい影響を与えた地震と与えない地震の震源地 (2)  
(1966・2・17—1966・4・16)

加賀井温泉の化学組成に変化を与えた地震の震源は加賀井温泉を通過して北西から南東に向かう一つの直線上に配列されていることがわかる。従ってここに一つの構造線の存在が考えられる。この線を北西の方向へ延長した地点に位置する寺尾には 1966年5月頃から、加賀井温泉と類似した塩分に富む水が新たに湧出し、さらに南東の延長線上の瀬関と牧内地区にも類似の水質をもつ水が多量に湧出した。瀬関と牧内地区に現われた湧水の分析結果を表 3-1 に、またこの湧水にとまって噴出したガスの分析結果を表 3-2 に示した。これらの新湧泉は水質ならびにガスの組成がいずれも加賀井温泉、松代温泉と類似している。ことに図 9 に示された通り、 $\text{Br/Cl}$  比は完全に一致する。ただし  $\text{Ca/Cl}$  比、 $\text{HBO}_2/\text{Cl}$  比は共に加賀井温泉などと若干異なる(図 10, 11 参照)。

飯島<sup>6)</sup>はこの地域に諏訪～十日町構造線と直交する北西～南東の小断層が存在すると述べて

表 3-1 新たに生じた湧水の分析結果

	瀬 関*	牧 内**	東 寺 尾
採水年月日	1966-12-22	1966-12-22	1966- 7-14
水 温 (°C)	19.8	17.0	21.5
pH	6.0	6.2	6.3
Na (mg/l)	760	260	2050
K (mg/l)	42	14	160
Li (mg/l)	0.135	0.256	—
NH <sub>4</sub> (mg/l)	0.4	0.2	—
Ca (mg/l)	1563	902	479
Mg (mg/l)	358	190	94
Mn (mg/l)	19.45	0.418	—
Fe (mg/l)	19.4	0.39	6.6
Cl (mg/l)	3480	1815	3230
Br (mg/l)	6.2	3.20	5.4
I (mg/l)	1.0	0.22	1.3
HCO <sub>3</sub> (mg/l)	1702	1058	2170
SO <sub>4</sub> (mg/l)	369	365	—
HBO <sub>2</sub> (mg/l)	336	177	482
SiO <sub>2</sub> (mg/l)	—	—	59
Cu (mg/l)	痕跡	0.000	—
Zn (mg/l)	0.032	0.020	—
As (mg/l)	0.048	0.004	—
V (mg/l)	0.0048	0.0018	—

\* 中曽根喜一方桑畑湧水

\*\* 支線 No. 2

表 3-2 瀬関地割れ湧水にとまなうガスの分析結果

	中曽根喜一宅裏	中曽根喜一宅上リゴ畑
測定年月日	1966・9・25	1966・9・25
H <sub>2</sub> S	0	0
CO <sub>2</sub>	88.5	98.8
O <sub>2</sub>	0.4	0.1
N <sub>2</sub> その他	11.1	1.1

いるが、この方位は加賀井温泉に変化を与えた地震の震源位置の配列方向とほぼ一致する。

須坂、湯河原、仙仁、綿内、保科、倉科、松代代官町、倉科、森、戸倉、上山田および坂井村の湯戸などの温泉水はいずれも太陽通信工業(株)、皆神山下湧水、中川神社前湧水などと同じ系統に属する水で、弱アルカリ性の塩分の少い温泉水である。これらの温泉は図 15 に示す通り、皆神山を通る北東から南西へ走る帯状の地域に配列しており、この地域に松代地震の中の震度 IV、V の大きい地震の震源が配列されていること、またこれらの温泉水は松代群発地震によっていずれも湧水量が顕著に増加したことは注目に値する。

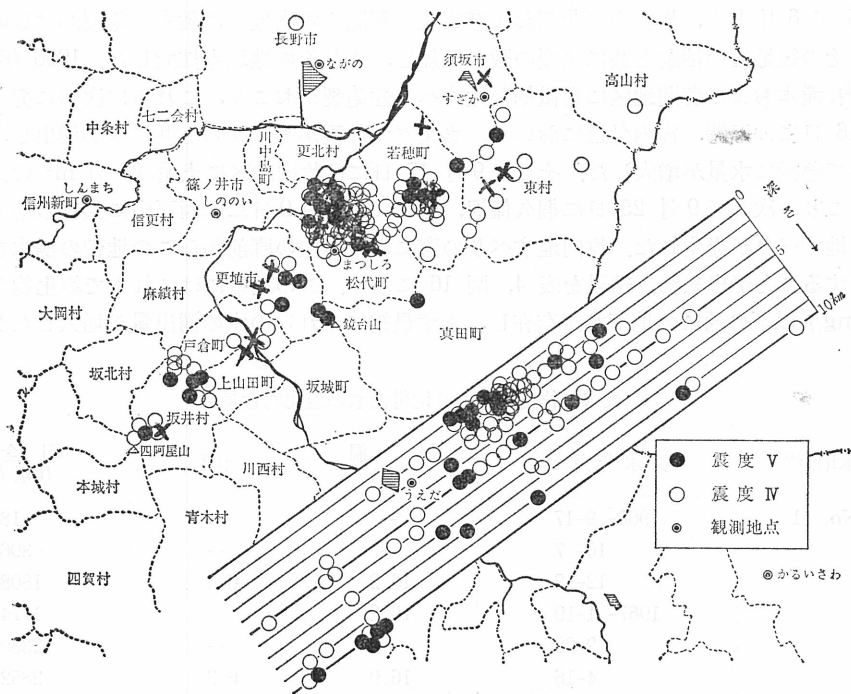


図 15 松代付近における温泉の分布と震度 IV 以上の地震の震源の分布 (ただし震源分布は気象庁の報告による) ×: 温泉の位置

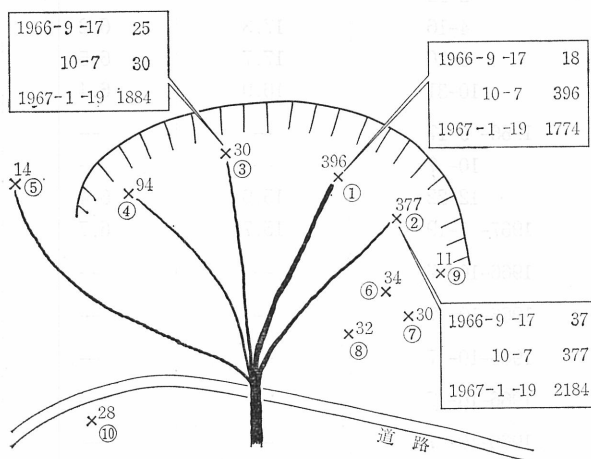


図 16 牧内地すべり地帯湧水の塩化物含量 (mg/l) (1966・10・7 測定)

## 5 地すべり地帯湧水の化学成分

1966年6月1日、皆神山の北部および東北の瀬関や牧内地区に数本の亀裂がはじめて認められ、その後地震の活動と共に亀裂の数が増加し、またその地域も拡大した。1966年8月には、牧内、滝本および菅間地区にも微細な地すべり性亀裂がおこり、これらは次第に発達した。9月16日には瀬関、牧内付近において、ますます亀裂が発達すると共に水が湧出し、続いてきわめて急激に水量が増大した。そして9月17日には牧内地区に土量23万m<sup>3</sup>の大地すべりがおこり、次いで9月25日に桐久保沢、さらに10月9日には西平山に大量の地下水をともなう地すべりが発生した。牧内地すべりの際には、発生直前からこの地帯の湧水を採取して分析することが出来た。結果を表4、図16に示す。この地帯にはこれまで塩化物含量として40mg/l以下の通常の地下水が存在し、まず最初にこれらの水の湧出量が増大したが、地す

表4 牧内地すべり地帯湧水の塩化物含量

採水地点*	採水年月日	水 温 (°C)	pH	Cl <sup>-</sup> 含量 (mg/l)
No. 1	1966- 9-17	—	—	18
	10- 7	—	—	396
	12-12	16.2	6.4	1808
	1967- 1-19	16.2	—	1774
	2-22	—	—	2330
	4-16	16.9	6.3	2852
No. 2	1966- 9-17	—	—	37
	10- 7	—	—	377
	12-22	17.0	6.2	1815
	1967- 1-19	17.1	6.4	2184
	2-22	—	—	2570
	4-16	17.3	6.2	2942
	8-26	17.7	6.5	3574
	10-31	16.9	6.4	3725
No. 3	1966- 9-17	—	—	25
	10- 7	—	—	30
	12-22	15.9	6.4	1580
	1967- 1-19	15.7	6.7	1884
No. 4	1966-10- 7	—	—	94
No. 5	1966-10- 7	—	—	14
No. 6	1966-10- 7	—	—	34
No. 7	1966-10- 7	—	—	30
No. 8	1966-10- 7	—	—	32
No. 9	1966-10- 7	—	—	11
No. 10	1966-10- 7	—	—	28

\* 図16参照

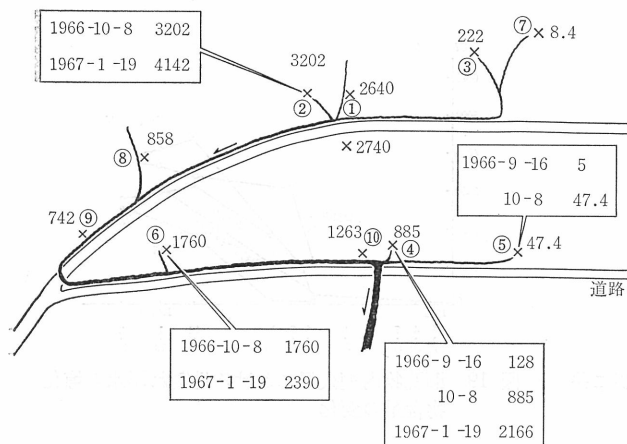


図 17 瀬関牧内間湧水の塩化物含量 (mg/l) (1966・10・8 測定)

表 5 瀬関・牧内中間地域 (西平山中腹) 湧水の塩化物含量

採水地点*	採水年月日	水 温 (°C)	pH	Cl <sup>-</sup> (mg/l)
No. 1	1966-10- 8	17.5	—	2640
	12-22	17.2	6.3	2176
	1967- 2-22	—	—	1718
	4-16	16.1	7.3	1740
No. 2	1966-10- 8	18.1	—	3202
	12-22	19.0	6.4	4392
	1967- 1-19	18.9	6.6	4142
	2-22	—	—	3895
	4-16	18.8	6.2	3774
	8-26	18.8	6.8	3214
	10-31	18.7	6.8	3145
	1968- 1-25	18.1	6.7	2990
No. 3	1966-10- 8	—	—	222
	1967- 4-16	18.0	6.2	3400
No. 4	1966- 9-16	—	—	128
	10- 8	15.7	—	885
	1967- 1-19	15.6	—	2166
No. 5	1966- 9-16	—	—	5
	10- 8	14.3	—	47
No. 6	1966-10- 8	16.7	—	1760
	1967- 1-19	17.5	6.6	2390
No. 7	1966-10- 8	14.1	—	8
No. 8	1966-10- 8	15.8	—	858
No. 9	1966-10- 8	15.0	—	742
No. 10	1966-10- 8	16.2	—	1263

\* 図 17 参照

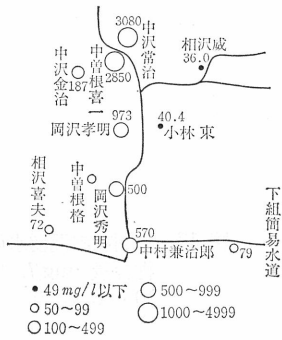


図 18 瀬関における地割れ湧水並びに井戸水の塩化物含量 (mg/l) (1966・9・24)

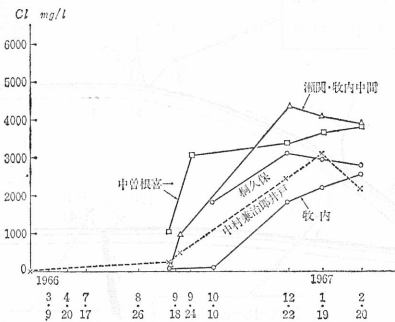


図 19 瀬関牧内桐久保における地割れ湧水の塩化物含量の変化

表 6 瀬関地区井戸水の化学組成の変化

採水地点, 中村兼次郎 井戸

採水年月日	水 温 (°C)	pH	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	アルカリ度 (meq/l)	HBO <sub>2</sub> (mg/l)
1965-11- 3	—	6.6	36	1.20	0.6
1966- 5- 1	10.1	—	19	0.71	—
9-18	—	—	153	1.20	5.3
9-24	—	—	570	3.00	50
12-21	10.1	6.8	2958	9.87	319
1967- 1-20	—	7.1	3570	9.16	371
2-22	10.1	6.8	2200	13.89	216
4-16	10.2	6.7	1687	11.79	165
10-31	—	7.1	1503	8.34	145
1968- 1-26	9.5	7.2	1445	7.50	123

採水地点, 西村 章 井戸

採水年月日	水 温 (°C)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	アルカリ度 (meq/l)	HBO <sub>2</sub> (mg/l)
1966-12-23	12.4	184	—	—
1967- 1-19	—	248	0.61	6.8
4-16	9.8	214	0.61	4.9

り発生と同時に塩分含量の高い水が湧出した。そして湧水量と塩化物含量が共に急激に増加した。地すべりの生じた区域内の新湧水はことごとく塩分含量の高い点が注目に値する。

西平山地すべりの場合は発生した地帯から南方約 500 m の瀬関および瀬関と牧内の中間地帯 (西平山中腹) において、9 月 16 日から新たに水が湧出しはじめ、次第にその塩分並に水量を増すにつれてその付近に地割れが発達した。とくにその上方の西山平に発生したものは 10 月 9 日に大地すべりにまで発達した。この地すべりも塩分の高い水をともなっていた。瀬

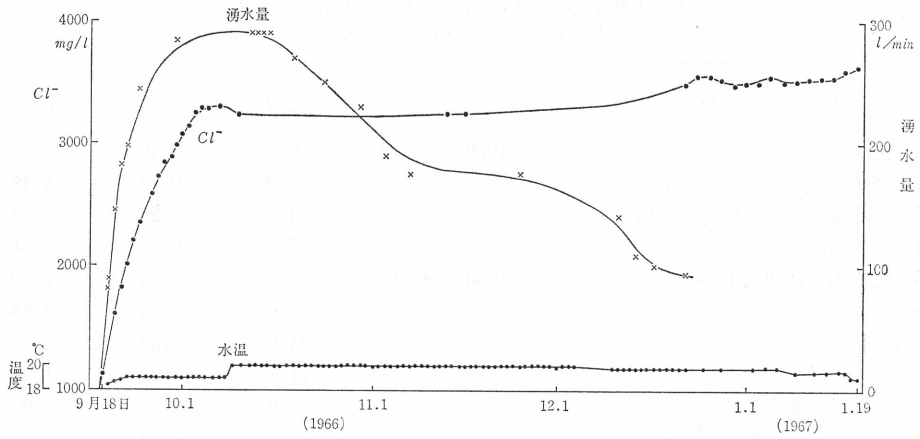


図 20 瀬関中曽根喜一方地割れ湧水の水量並に塩化物含量の変化

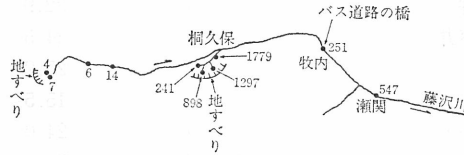


図 21 地震で湧出した桐久保湧水と藤沢川の塩化物含量 (mg/l) (1966・10・29)

表 7 新たに生じた湧水の水温，塩化物含量ならびにアルカリ度

	採水年月日	水 温 (°C)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	アルカリ度 (meq/l)	備 考
瀬関 中曽根喜一	1966- 9-24	—	2343	17.05	
瀬関 リンゴ畑	9-24	—	3080	18.88	
瀬関 地割れ	9-24	15.3	15	0.61	
瀬関 地割れ	9-24	15.3	265	2.59	
瀬関 地割れ	9-24	16.8	566	4.71	
桐久保沢 No. 5	10-28	—	898	10.56	pH 6.6
桐久保沢 No. 6	10-28	—	1295	11.12	pH 6.4
桐久保沢 No. 8	10-28	—	1779	9.92	pH 7.3
中川 池田ノ宮	12-22	29.0	142	4.16	pH 7.3
皆神山麓 No. 1	12-22	17.9	59	2.41	pH 7.3
皆神山麓 No. 2	12-22	18.9	64	2.52	pH 7.3
瀬関 中曽根格	1967- 1-20	—	1626	14.40	pH 6.8
竹原 斎藤 雪	1-20	—	70	1.82	pH 7.2
竹原 児童文学の家	1-20	—	1091	5.84	pH 6.5

関牧内間に湧出した水的位置および組成を図 17, 表 5 に示した。また瀬関における地震による地割れ湧水ならびに井水の塩化物含量の分布を図 18 に示した。地震によって生じた異常水

表 8 松代町加賀井, 瀬関, 牧内地区の地下水のフッ素含量  
(岩手大学教育学部後藤達夫教授の測定)

採 水 点	採水年月日	Cl (mg/l)	F (mg/l)	アルカリ度 (meq/l)
1 池田の宮 湧水	1966・9・16	80.8	0.40	3.58
2 斎藤喜一郎宅 リンゴ畑石垣の下	"	36.9	0.18	1.48
3 瀬関牧内間湧水最上段桑畑	"	4.5	0.20	0.46
4 瀬関牧内間湧水最下段桑畑	"	87.9	0.10	1.01
5 牧内地割れ湧水 1 (地すべり直前)	1966・9・17	38.4	0.50	1.60
6 " 2 ( " )	"	16.6	0.28	0.88
7 " 3 ( " )	"	24.0	0.30	1.06
8 清水井戸	"	11.3	0.25	1.21
9 太陽通信源泉 1 号	"	60.6	0.35	3.00
10 " 2 号 (旧井戸である が地震で復活)	"	62.0	0.33	2.99
11 坂口袈裟幸 ポンプ井	"	32.8	0.23	0.70
12 青山広志 ツルベ井	"	31.3	0.35	0.53
13 坂口晴夫 ポンプ井	"	32.9	0.40	0.65
14 前沢林治郎 ツルベ井	"	24.5	0.35	0.80
15 前沢啓次 湧水	"	27.9	0.40	0.92
16 相沢 威 ポンプ井	"	15.5	0.30	0.52
17 坂口辰登 ツルベ井	"	24.0	0.20	0.81
18 加賀井温泉 1 号	1966・9・18	2858	0.70	25.97
19 加賀井温泉新自噴泉 (1号より3m)	"	2798	0.60	26.51
20 加賀井温泉 2 号 (旧温泉で今回 の地震で復活)	"	2346	1.40	23.78
21 松田なか子 湧水	"	5.8	0.33	1.88
22 上野哲男 湧水	"	9.8	0.35	2.40
23 斎藤 雪 ポンプ井	"	18.3	0.10	2.07
24 中村兼治郎 ポンプ井	"	152	1.20	1.18
25 中曾根喜一 地割れ湧水	"	1129	1.80	13.49
26 中曾根喜一 北側土台新湧水	"	517	0.60	5.81

の変化を明らかにするため、これらの水の塩化物含量の変化を表 6 ならびに図 19, 20 に示した。

図 20 の中曾根喜一方の異常水の湧出は 1966 年 9 月 17 日に始まり、筆者らが最初に調査したのは翌 18 日であった。この水の湧水量ならびに塩化物含量は急激に増大したが、10 月 1 日頃にはほぼ一定となった。それ以後、湧水量は次第に減少したが、塩化物はむしろ幾分増加する傾向にあった。なおまた瀬関、桐久保、竹原、中川、皆神山などに生じた新湧水の組成を表 7 にかかげる。これらの塩分の高い異常水が藤沢川へ流入したため、川水の塩分濃度が著しく高まった (図 21 参照)。

岩手大学後藤達夫教授の分析によれば、1966 年 9 月 16, 17, 18 日における加賀井, 瀬関, 牧内の湧水ならびに井水のフッ素含量は表 8 に示す通りである。倉科および松代町牧内, 桐久保付近の湧水のホウ酸含量を表 9 に示した。



表 9 倉科および松代町牧内、桐久保付近湧水のホウ酸含量

採水点	採水年月日	pH	Cl (mg/l)	アルカリ度 (meq/l)	HBO <sub>2</sub> (mg/l)
倉科 1	1966.10.28	6.9	125	0.49	3.3
" 2	"	7.2	125	0.48	3.6
" 3	"	6.9	118	0.69	3.3
" 4	"	7.3	119	0.55	3.5
" 5	"	7.0	118	0.61	3.5
" 6 (メタンガスをと もなう)	"	6.5	103	5.11	2.8
牧内 6'	"	7.0	73	2.04	2.1
" 7	"	6.7	34	1.20	0.8
" 8	"	6.5	30	0.94	0.7
" 9	"	7.2	19	1.28	0.3
気象庁地震観測所 1	"	7.3	30	1.36	0.2
" 2	"	7.4	7	1.54	0
立石沢 (地すべり) 1	1966.10.29	6.9	4	0.43	0
" ( " ) 2	"	7.0	7	0.58	0
立石沢 3	"	6.7	6	0.52	0
" 4	"	7.0	14	0.42	0
桐久保地入り湧水 5	"	6.6	898	10.56	63
" 6	"	6.4	1295	11.12	107
" 7	"	6.8	241	1.91	5.9
" 8	"	7.3	1779	9.92	164
牧内川水 9	"	7.4	251	2.03	5.7
瀬関川水 10	"	7.4	547	4.18	42

### 総 括

松代群発地震については震度 III 以上の地震が起こると、震源の位置が加賀井温泉を通過して北西から南東へ向う線上に位する場合 1 時間後には加賀井温泉、松代温泉などの化学組成に顕著な変化が認められた。この変化の特徴は塩化物、ホウ酸、アルカリ度などの溶存成分含量が減少するが、湧水量は瞬間的には減ってもすぐに回復し、さらに地震前より増加するのが常であった。水温は殆んど一定であるが、きわめて僅かに上昇の傾向を示すにすぎない。地震によって温泉水の化学成分濃度が減少する場合、成分相互の濃度比は常に一定であった。この事実は加賀井温泉の水はおよそ 2 種類の水の混合によって形成されていることを意味する。そのうちの一つは花崗岩地帯に多く例が見られる多量の炭酸ガスをとめない塩分濃度の高い温泉水であり、もう一つは弱アルカリ性の塩分含量の低い熱水であって、この地域では上山田温泉で代表される。加賀井温泉付近では後者は通常の水で薄められており、その水温は前者の水温よりも僅かに高い程度であろう。加賀井温泉では地震が発生すると、一時的に後者に属する温泉水の混入が生じるため、塩化物、ホウ酸その他の成分の濃度低下が起こるものと思われる。

1966 年 8 月 1 日頃から瀬関、牧内付近の地盤の隆起がきわめて顕著となり、これと呼応するように塩分濃度の高い水の異常な水圧の高まりが生じ、その結果温泉水の塩化物含量ならびに湧水量が急激に増大した。この急激な水圧の高まりが何に起因するかはきわめて興味のある

問題であるが、加賀井温泉一陽館源泉1号の湧水量が最大値を示した時刻 1966年9月20日頃と地震観測所内に設置した水管傾斜計の急激な東方上りが停止して、東方下りに転じた時刻および瀬関付近の地盤の急激な隆起が停止して下降に転じた時刻とがほぼ一致していることから、地盤の隆起に水圧が関係していることは確かであろう。この水圧が地表面に地割れを作り、さらにこの水が傾斜した地表付近の軟弱地盤に割込んで地すべりを誘発したと考えられる。この水圧が地震の発生と何らかの関係を有するかも知れない。またこの水が多量の炭酸ガスをともなっていたことを考慮するとガス圧も重視する必要があるであろう。

加賀井温泉や瀬関牧内の湧水とほとんど同時刻に多量に湧出した水としては太陽通信工業(株)の源泉、中川神社前の湧水、皆神山山麓湧水などがある。中川神社前湧水は今回の松代地震で始めて湧出した水であるが、水温は $27^{\circ}\text{C}$ を示し、かなり高温であった。これらは上山田温泉を代表とする弱アルカリ性の塩分の少い熱水であり、この種の水は皆神山を通して北東から西南へ延びる帯状地域に点在している。この帯状地域に松代群発地震の中で震度IV、Vの強い地震の震源が散在することを考慮すれば、この地域の弱アルカリ性熱水を形成した岩漿やそのしぼり水と地震との関係は興味深い問題であろう。これらの地震の震源は松代町加賀井付近のものより概して深い、北東から西南に延びる幅広い構造線が北西から南東に延びる構造線と交錯する地点、すなわち加賀井、瀬関付近が最も震源が浅かったことも興味ある点である。

今回の調査で判明した点を要約すると、

(1) 松代地震の最大活動期は第2回の活動の山である1966年4月であった。この頃加賀井温泉1号井、2号井の塩化物含量が最小値を示した。

(2) 今回の松代地震に際し、加賀井、瀬関、牧内、桐久保、中川神社内、太陽通信工業(株)、皆神山北側山麓などに多量の水が湧出したが、これらの水は炭酸ガス、塩化物、ホウ酸などに富む水と、炭酸ガスをともなわない塩化物、ホウ酸などの少ない弱アルカリ性の水との2種類に分類された。

(3) 松代町加賀井温泉水、瀬関、牧内などの地割れから多量に湧出した水は、いずれも塩化物に富むが、Br/Cl比が海水の値よりも明らかに小さく、かつ著しくホウ酸に富み、多量の炭酸ガスをともなっていた。リチウム、マンガン、臭素、ヨウ素などの微量成分にも富んでいる点において長野県東部および北部の他の温泉とは全く異なる。

(4) 地震によって、塩分に富む水が湧出した場合、初期の水は水量ならびに塩化物、ホウ酸などが少なく、殆んどが通常の浅い地下水である。時の経過にしたがい急速に湧水量ならびに塩分含量は増大するが、末期においては塩分の少ない浅い水の方が相対的には先に減少し、その結果、水の塩分含量が末期に増大した。

(5) 傾斜計の変化と、地表面の隆起と湧水量ならびに化学成分の変化を比較して論じた。

(6) 地震の発生原因については、震源地の浅いこと、火山皆神山の周辺に震源地が特に分布することなどから、火山性地震とする考えが有力であるが、熱の上昇を示すような温度の上昇が全く認められないこと、岩漿の揮発性成分の特性を示すと考えられている二酸化硫黄、硫化水素などが全く検出されないことを考慮すれば、火山性地震か否かを明確に決定することはなお困難であるが、強い地震の震源の分布と温泉の分布とがほぼ一致している点特に塩類や炭酸ガスに著しく富む加賀井温泉附近において地震の震源が最も浅かったこと、更に地震の際著しく塩類に富む水が多量の炭酸ガスを伴って湧出したことを考慮すればこれらの温泉水を形成した深所の岩漿やその揮発物並にしぼり水を重要視する必要があるであろう。

本稿をしるすにあたり、フッ素の分析にご協力いただいた岩手大学後藤達夫教授をはじめ、現地では終始採水にご協力くださった加賀井温泉一陽館春日功氏、太陽通信工業(株)会社宮本圭子氏、国民宿舎松代荘、元松代町長中村兼次郎氏ならびに地震にかんする貴重な資料の提供をいただいた気象庁松代地震観測所相原奎二、山岸登の両氏、並に試料の採取および分析にご協力くださった都立大学化学科四年生徳武哲氏をはじめ研究室の諸氏に厚く感謝する。とくに春日功氏には貴重な資料を提供していただいたことを付記する。

尚またこの研究に要した費用の一部は文部省科学研究費によるものでここに記して感謝の意を表する。

#### 引用文献

- 1) 例えば東京大学地震研究所彙報, 第44号, 307~445 (1966); 同, 第44号, 1213~1395 (1966); 同, 第44号, 1623~1792 (1966).
- 2) 中村久由, 前田憲二郎, 山田隆基, 山田啓三: 地質ニュース, No. 149, 28~31 (1967).
- 3) 竹内順治: 地質学雑誌, 72, 263~276 (1967).
- 4) 春日 功: 地学雑誌, 76, 76~86 (1967).
- 5) 小林国夫: 温泉科学, 11, 12~15 (1960).
- 6) 飯島南海夫: 志賀高原生物研究所研究業績, No. 2 1~8.
- 7) Y. Miyake: Elements of Geochemistry, p. 207 (1965) Maruzen, Tokyo.
- 8) 日本鉱泉誌 p. 365 (1954) 青山書院, 東京.