

松代地すべり地湧水の地球化学的研究

北野 康*・吉岡 龍馬*・奥田 節夫・奥西 一夫

GEOCHEMICAL STUDY OF GROUND WATERS IN THE MATSUSHIRO LANDSLIP AREA

By Yasushi KITANO,* Ryuma YOSHIOKA,*

Setsuo OKUDA and Kazuo OKUNISHI

Synopsis

The authors have carried out hydrological survey and chemical analysis of ground waters in the Matsushiro landslip area from September 1966 to October 1967.

Water balance and chemical composition of the waters in the area show that the ground waters are gushing out from the deep origin and not affected by precipitation.

There are several types of time change in the chemical composition characteristic of specified regions, but there is a general tendency that the concentration of CaCl_2 increased most remarkably with time.

1. 緒 論

松代群発地震にともなう地下水の顕著な変動が出現したことは、すでに 野口¹⁾、春日²⁾によって指摘されているが、とくに牧内地区および西平山に地すべりが発生し、多量の地下水が付近一帯に湧出した。このような湧水の調査、研究は直接に地すべり発生機構の解明、水抜き対策工法の計画などに役立つのみでなく、さらに地下深層の構造、物質の変化などの推定にも有力な手がかりを与えるものである。

このような見地に立って、われわれは1966年9月17日牧内地区に地すべりが発生した数日後より付近の湧水点をえらんで定期的な採水、分析、流量測定をつづけたが1967年10月で一ケ年を経過し、水文学的にも one cycle を経たので、これまでの資料を整理して湧水の地球化学的特性の検討をこころみた。なお採水を初めてから数ヶ月間の経過については、すでに発表した部分もあるので^{3,4)}、詳細は省略して、本稿では最近の定常的な状態に重点をおいて記述する。

参考のために気象庁資料にもとづいて湧水調査期間中の地震発生回数の変化を示すと、Fig. 1 のグラフが得られる。これによると地震の発生は1966年8月末のピークから次第に減少して1967年にはほとんど平静な状態に回復していることが認められる。

2. 測定方法

採水は Fig. 2 に示すような地点で行なわれたが、月一回の定期的な採水は地元の松代高校および更科農業高校の職員、生徒の協力によって行なわれ、分析は全部防災研究所で行なわれた。各元素の分析法は既報⁴⁾で説明したので省略する。なお水温および pH 値は現地採水のときに測定された。この他に数回にわたる臨

* 名古屋大学理学部水質科学研究施設

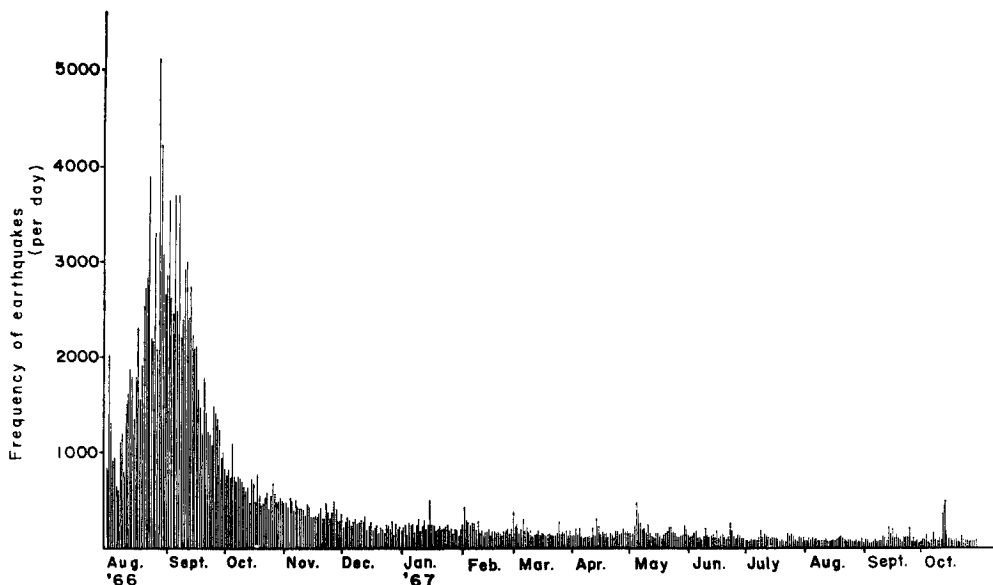


Fig. 1 Frequency of earthquakes in a day from August 1966 to October 1967.

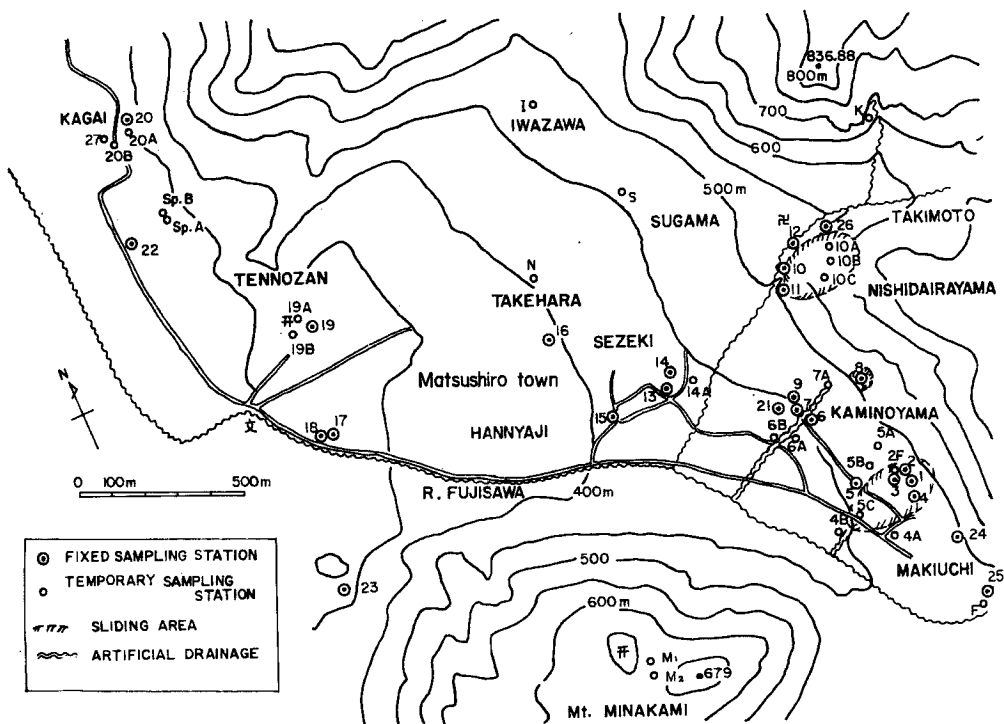


Fig. 2 Location of water sampling stations.

時採水調査ならびに湧水状況観察がなされた。

湧水量の測定は St. 1, 2 および 8 に三角堰型流量計を設けて地元によみとりを委託していたが、災害復旧および地すべり対策工事の進行にともなって撤去され、その後は牧内地区 (St. 5C 西方の水路), 上の山

地区 (St. 6B 東方の水路) では長野県耕地課によって、また瀬関地区 (St. 14 および 16 の湧水点) では長野県砂防課によって流量観測が行なわれている。

3. 水文学的検討

地震活動の激化によるクラックの発生および牧内その他の地すべりにともなって発生した湧水は、その後次第に湧出量を減じ、湧水を停止したものが多く、現在なお大量の水を湧出しているところもある (特に牧内, 上の山地区)。主な湧水の流量の時間的変化を牧内の日雨量と共に Fig. 3 に示す (St. 1 以外は長野県提供のデータを使用)。このうち St. 16 はボーリング孔から自噴しているものである (ボーリング孔の途中からわかれて近くの地面に一部湧水しているが、この水の流量は含まれていない)。St. 14 の湧水は 1967 年 6 月に停止した。牧内および上の山の湧水ではそれぞれ多くの湧水群を集めている排水路の下端で流量が測定されたものであり、St. 1 は牧内湧水群のうちの 1 つである。

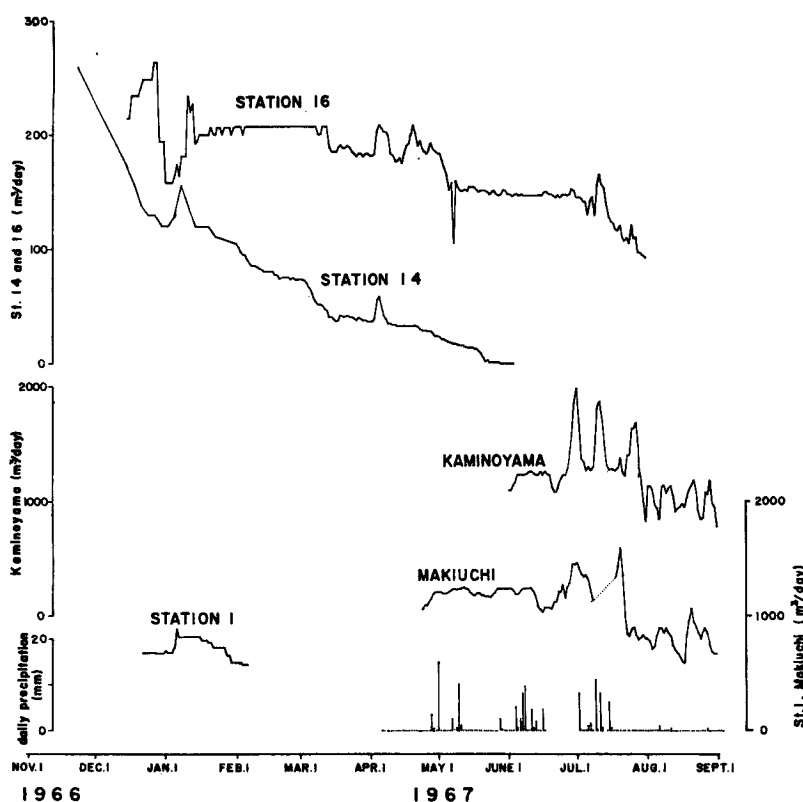


Fig. 3 Hydrographs of major springs. Peaks of discharge from the springs are well correlated each other, but not to rainfall.

これらの湧水量は全体的には次第に減少して行く傾向にあるが、その途中でいくつかのピークを示している。10 mm 以上の降雨があった場合、それから 4 日以内に Fig. 3 の湧水点のうち 1ヶ所以上にピークが出現したか否か、その数をかぞえてみると Table 1 のようになり、両者は一応無関係と考えられる。しかしながら、各湧水の流量ピークがしばしば同期的に生じていることは注目される。

既報⁴⁾において流量の時間的変化が指数関数的であるとして、牧内および上の山地区の総湧水量を計算

Table 1 The simultaneity between rainfall and the peak of spring discharge.

Rainfall	Peak of spring discharge	Number of the occasion
occurred	occurred	5
occurred	not occurred	15
not occurred	occurred	9

し、時定数が50日であるにもかかわらず、それが2～3年分の降水量に相当することを示したが、その後これらの地区における湧水量の減少率は小さくなり、定常状態に近くなったと思われるので、別の検討が必要である。

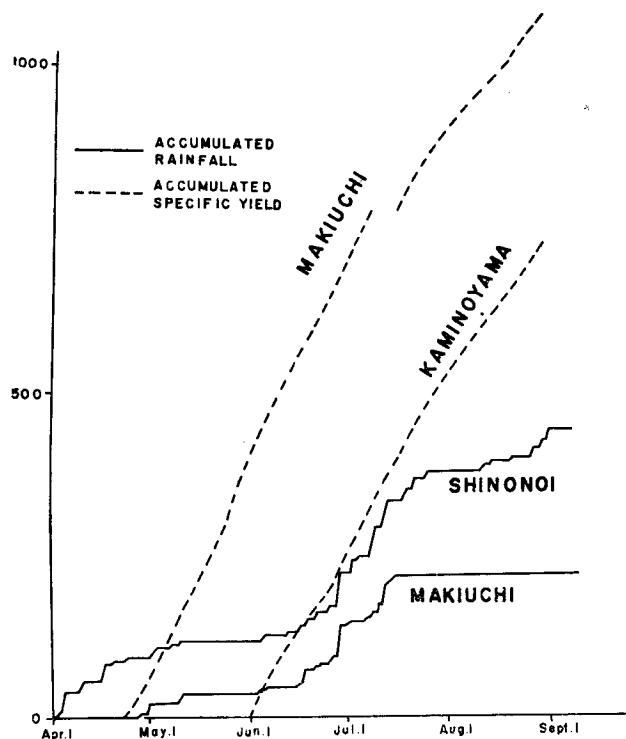


Fig. 4 Accumulation curves of precipitation and specific yield of springs at Makiuchi and Kominoyama regions. unit: m^3 .

雨量および湧水量の長期的な関係を見るために Fig. 4 に雨量および牧内、上の山両地区の比流量を示す。これらの平均的な勾配を比較すると、牧内地区では降水量の3.7倍、上の山地区では2.8倍の湧水量があったことになる。降雨からは蒸発散などを差し引かねばならないこと、および雨期であるため地下水貯留量への供給はあっても地下水貯留量の放出はないことを考慮すると、これらの値はさらに大きくなるはずである。従ってこれらの湧水量はその長期成分についても通常の循環水ではないことがわかる。

4. 水温および pH の変化

採水の際に測定された湧水の温度と pH 値は Fig. 5A, 5B に示されている。

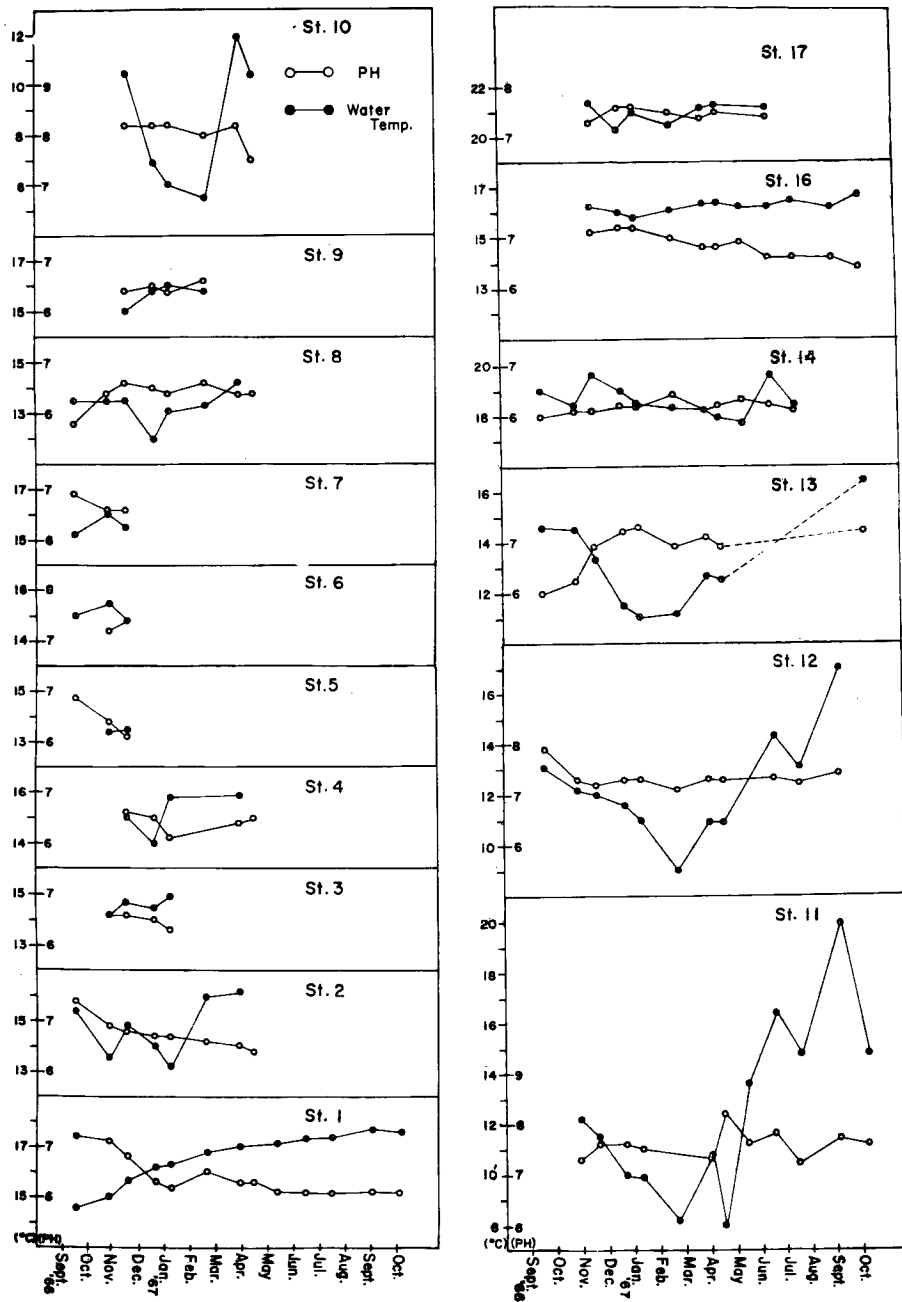


Fig. 5A Time change in pH value and water temperature in ground waters (Stations 1 to 17).

これによれば St. 10, 11, 13 および24の水温は季節的変動が顕著であり、気温または地表水の影響が大きいことがうかがわれるが、pH 値の方は変動の幅も小さく、水温の変動との間に直接の関連性は認められ難い。その他の採水地点では水温の季節的变化は顕著でなく、地表の温度変化の影響をあまり受けてないものと考えられる。

湧水量が極めて少なく、地表近くの変温層を長時間かかって通り抜ける水は当然季節的温度変化を蒙るから、水温変化のみで湧水の起源の深さを推定することは妥当ではない。

5. 化学組成の変化

水質分析の結果にもとづいて、陽イオン、陰イオンの大部分を占める Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ および Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} の相対的割合を三角座標で示すと Fig. 6A—6E がえられる。これらの相対的組成の変化を数種類の型に分類して説明を行なう。

(5-1) 地すべり発生以前から分析の行なわれていた温泉 Sp. A, B および St. 22 (松代荘温泉) についてみると、陽イオンでは Mg^{2+} の割合が定常的に小さく、調査期間中に Na^+ が減少して Ca^{2+} の割合が増大しており、陰イオンでは SO_4^{2-} の割合が定常的に小さく、調査期間中に HCO_3^- が減少して Cl^- の割合が増加している (Fig. 6A, 6B)。

(5-2) 天王山南方の St. 17, 18 および23についても調査期間中の組成の変化は僅少であり、一般的に Mg^{2+} , SO_4^{2-} の割合が小さい (Fig. 6B)。

(5-3) 瀬関、上の山付近の St. 13, 14, 16, 21 および8についても調査期間中の相対的組成の変化は比較的少ないが、一般的に Na^+ の割合が小さく、 Cl^- の割合が大きい状態でおちついている (Fig. 6C)。

(5-4) 西平山地すべり地近傍の St. 10, 11 および12についてみると、陽イオンでは Na^+ の割合の小さい状態を保持しているが、陰イオンでは Cl^- の特別に多い St. 10 を除いては相対的組成が調査期間中に不規則に変化している。これらの地点では水温の季節的变化が顕著なことからみても地表水の混入の影響を受けているものと考えられる (Fig. 6D)。

(5-5) 牧内付近の St. 1 および24, 天王山の St. 19, および加賀井の St. 20 については位置的には異なっているが、水質組成の変化については共通の傾向が認められる。すなわち陽イオンでは Ca^{2+} が全般的に多いが、組成はかなり不規則な変動をつづけており、陰イオンでは調査期間中に HCO_3^- の割合はほとんど変動していないが、 SO_4^{2-} の割合は減少し、 Cl^- の割合は増大する傾向が認められる (Fig. 6E)。

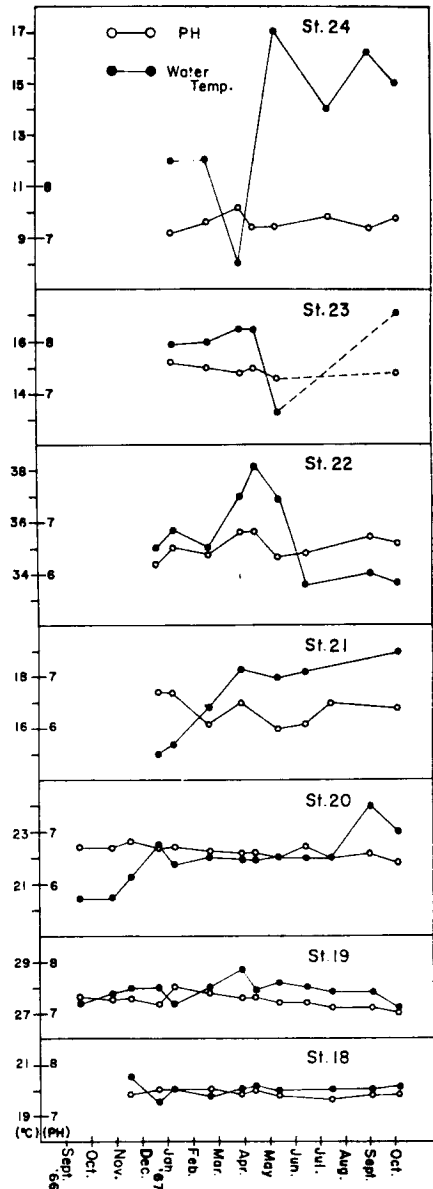


Fig. 5B Time change in pH value and water temperature in ground waters (Stations 18 to 24).

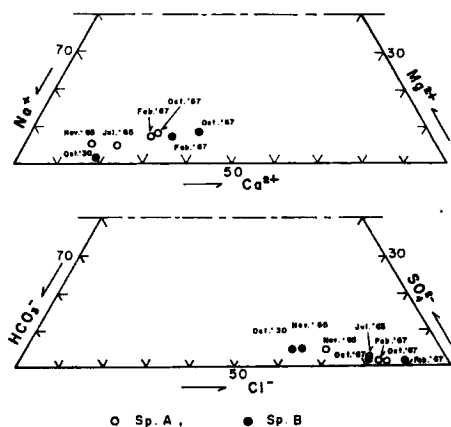


Fig. 6A $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ and $\text{HCO}_3^- - \text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-}$ diagrams of hot springs.

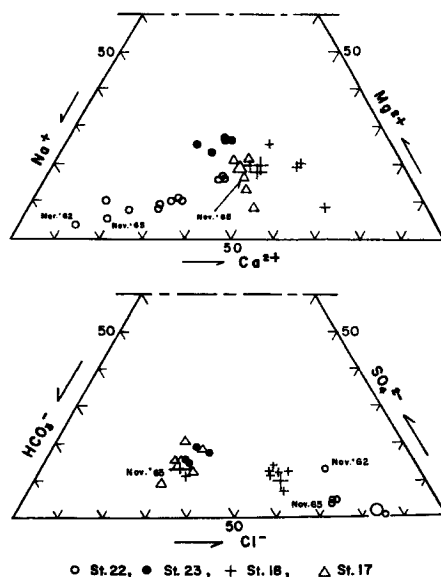


Fig. 6B $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ and $\text{HCO}_3^- - \text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-}$ diagrams of ground waters (St. 17: Nov. '65 and Nov. '66 to Jun. '67; St. 18: Nov. '66 to Oct. '67; St. 22: Mar. '62, Nov. '65 and Dec. '66 to Oct. '67; St. 23: Jan. to May '67).

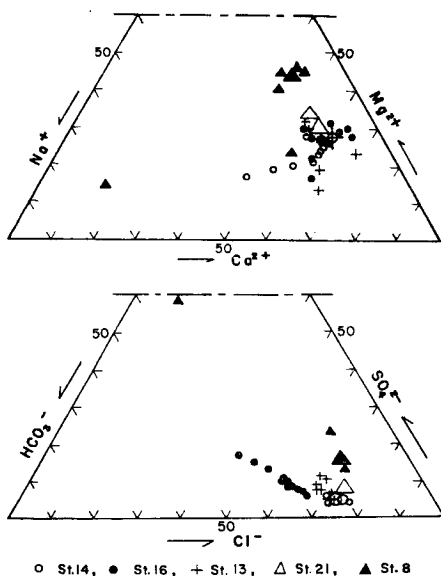


Fig. 6C $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ and $\text{HCO}_3^- - \text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-}$ diagrams of ground waters (St. 8: Sept. '66 to Apr. '67; St. 13: Sept. '66 to May '67 and Oct. '67; St. 14: Sept. '66 to Jul. '67; St. 16: Nov. '66 to Oct. '67; St. 21: Dec. '66 to Oct. '67).

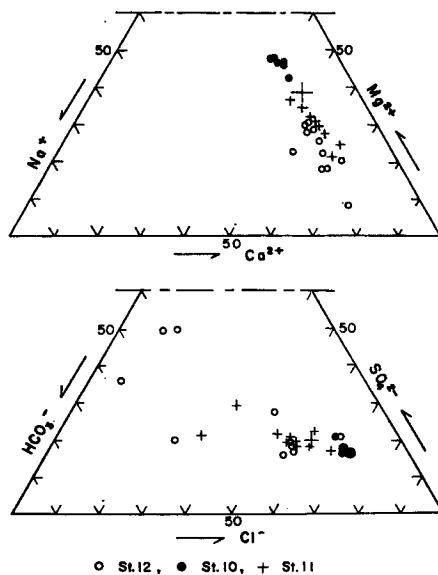


Fig. 6D $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ and $\text{HCO}_3^- - \text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-}$ diagrams of ground waters (St. 10: Nov. '66 to Apr. '67; St. 11: Oct. '66 to Oct. '67; St. 12: Sept. '66 to Sept. '67).

6. 各元素の濃度変化

つぎに調査期間中継続的に分析が可能であった湧水についてそれらに含有されている各元素の濃度 (m. eq./l) の変化をたどると Fig. 7A, 7B のグラフが得られる。この場合もいくつかの型 (主に地域別による考察) に分類して説明を行なう。

(6-1) St. 22 (松代荘) の温泉水は1967年3月から急に Na^+ と Cl^- が増加しているが、その原因は明らかでない。加賀井の St. 20 では1967年にはあまり濃度の変化はなく、St. 22 と型が異なっている (Fig. 7A, 7B)。

(6-2) 天王山南方の St. 18 ではすべての元素の濃度はほとんど一定である (Fig. 7B)。

(6-3) 瀬関の St. 13 および14では Ca^{2+} と Cl^- 、および Mg^{2+} と HCO_3^- がそれぞれ相似な変化を示している (Fig. 7A)。

(6-4) 竹原の St. 16, 牧内の St. 1, 24 および上の山の St. 21 では Ca^{2+} と Cl^- の pair が最大, Mg^{2+} と HCO_3^- の pair がこれにつぎ, Na^+ と SO_4^{2-} の pair が最低のテンポで濃度の上昇がつづいている。上の山地区最上部の St. 8 でもこの傾向に近いが, Mg^{2+} の増加速度が割合に高い点が異なっている (Fig. 7A)。

(6-5) 天王山の St. 19 でも1967年になってからは(6-4)の例に近い変化を示している (Fig. 7B)。

(6-6) 前節で地表水の混入の影響を推定した西平山地すべり地付近の St. 11 および12では各元素の濃度が1967年2月に急激に低下し、その後も不規則な変化をつづけているが、降雨の多かった7月に低下が現われており、やはり地表水の影響が考えられる (Fig. 7B)。

以上各採水地点によって元素の濃度変化はさまざまな型をとるが大体地域的にまとまった傾向を示している。陰陽イオンの対比にとくに注目すると、St. 8 を除いては Ca^{2+} と Cl^- , Mg^{2+} と HCO_3^- および Na^+ と SO_4^{2-} が pair になって変化していることがはっきり認められる。

7. 各元素の輸送量

湧水によって地下から地表に運び出され、さらに藤沢川に流れ去って行く主要元素の輸送量は濃度と流量の積として計算される。St. 14, 16 および竹内地区について、とくに Ca^{2+} , Cl^- の輸送量を求めてみると Fig. 8 のグラフが得られる。

これによると St. 14 では湧水量が次第に減少して1967年6月に枯渇したが、それまで一定濃度で Ca^{2+} および Cl^- が輸送されており、St. 16 では湧水量は少々減少しても濃度が増大して輸送量はむしろ増大の傾向を示している。

とくに牧内地区では多くの湧水を集めて流量が測られているが、地すべり発生当時にくらべて、流量が1/10程度に減少しているにも拘らず Ca^{2+} および Cl^- の輸送量はそれぞれ当時の3倍または6倍程度になっている。

この現象は初期の湧水は降水の影響を受けている浅い地下水が多く、その後次第に深層の地下水が地表に出現してきたことを示すものであろう。

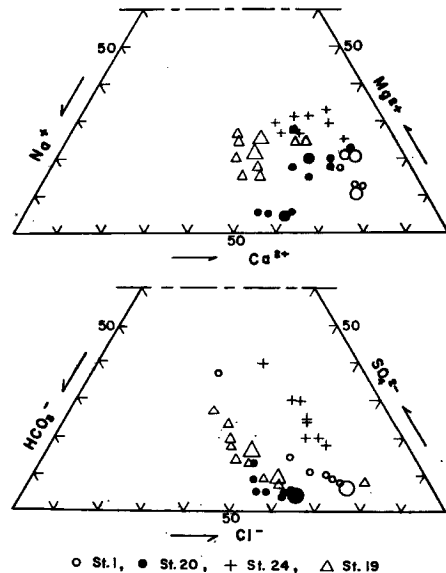


Fig. 6E $\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ and $\text{HCO}_3^- - \text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-}$ diagrams of ground waters from Sept. '66 to Oct. '67 (except St. 24: Jan. to Oct. '67).

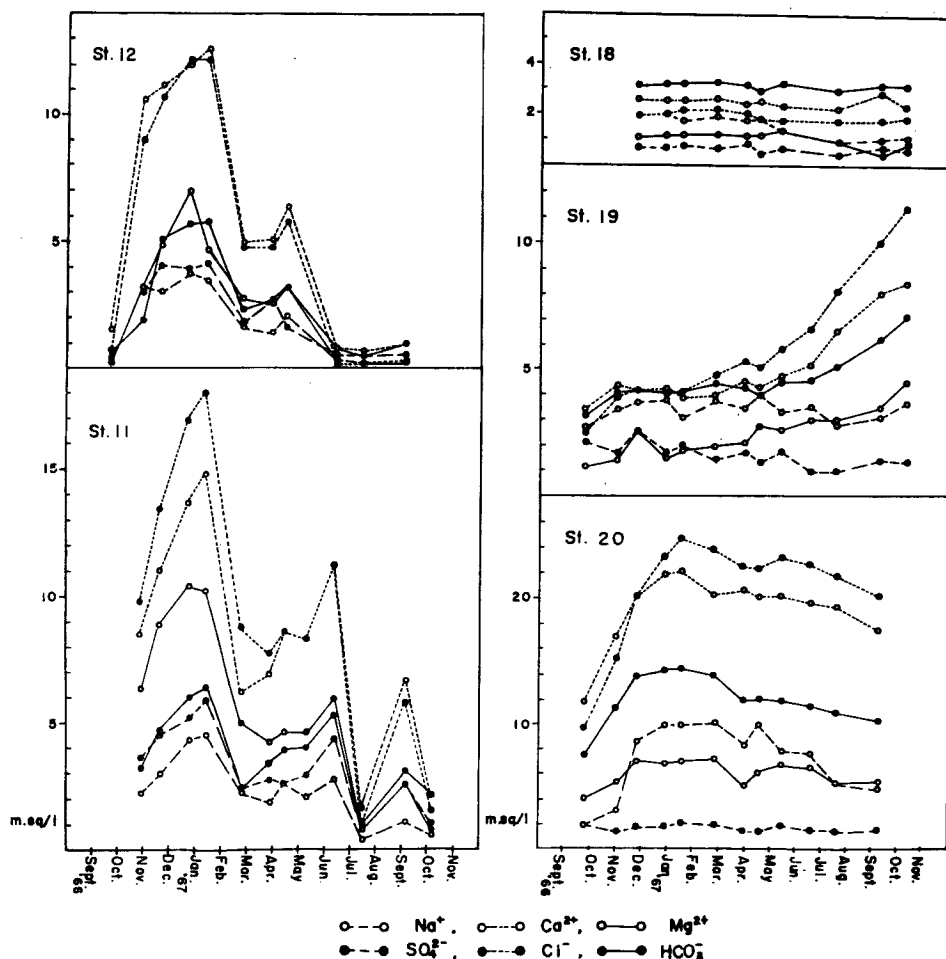


Fig. 7B Time change in concentrations of major ions in ground waters.

以上各項目の検討結果から考えると、1967年10月現在において湧出をつづけている水の大部分は降水の影響を受けていない深層地下水で、その組成は CaCl_2 、 $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ および Na_2SO_4 の混合溶液に近いものであろう。

このような組成の地下水が連続的に湧出する源については、深層ボーリングの結果等を照合してさらに化学的な考察を加えなければならない。

謝 辞

本研究の遂行に際して、長期間にわたる採水作業に積極的な御援助をいただいた長野県松代高校志村教諭、更科農業高校小川原教諭ならびに水質分析に協力された防災研究所夏川技官に深く感謝する。

さらに各種の資料を提供していただいた長野県耕地課および砂防課の諸氏に謝意を表する。

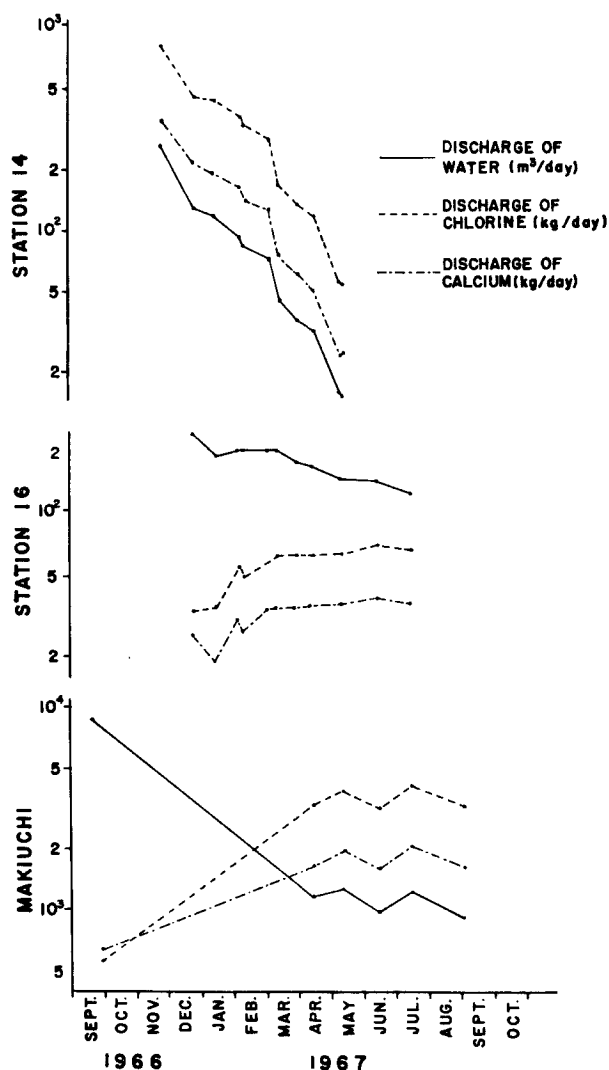


Fig. 8 Time change in discharge of water, calcium and chloride ions in ground waters.

引用文献

- 1) 野口喜三雄, 松代地震と温泉, 化学と工業, 第20巻, 昭42. 1, p. 69—72.
- 2) 春日功, 松代地震による加賀井温泉の変化, 地学雑誌, Vol. 76, No.2, 1967, p. 76—86.
- 3) 山口真一他, 松代地盤隆起型地すべりについて, 京大防災研究年報, 第10号A, 昭42. 3, p. 479—490.
- 4) Yasushi Kitano et al., Geochemical Study of Ground Waters in the Matsushiro Area (Part 1), Bull. Dis. Prev. Res. Inst. Kyoto Univ., Vol.17, Part 2, No.123, 1967, p. 47—71.