伊東市赤沢6号温泉井の自噴量・水温変動とその原因

——伊豆半島東方沖付近の地震・火山活動との関連——

地質調査所環境地質部* 吉川清志・永井 茂

Causes for Fluctuations in Discharge Rate and Water Temperature of Akazawa Hot Spring Well No. 6 in the Eastern Izu Peninsula, Japan

—Relation to Earthquakes and Volcanic Activity—

Kiyoshi KIKKAWA and Shigeru NAGAI

Environmental Geology Department, Geological Survey of Japan, Higashi 1-1-3,
Tsukuba-shi, Ibaraki-ken 305, Japan

(Received December 5, 1989; Accepted June 11, 1990)

We have investigated discharge rate and water temperature at the hot spring wells in the eastern Izu Peninsula to consider whether or not they are sensitive to crustal stress changes. In this paper the result at Akazawa hot spring well No. 6 (594m-deep-well) is described. A 9m long strainer is installed at the deepest part of the well, where the water comes only from a single crack. Fluctuations of the water temperature can be explained by following two reasons. One is change in cooling effect due to the fluctuations of discharge rate, and the other is change in heating effect due to the fluctuations of flow rate of the water passing through heat source. We could not find any change in water temperature caused by volcanic eruption. On the other hand, it is suggested that the effect of earthquakes on discharge rate of the well is more sensitive than the effects of oceanic and earth tides, precipitation and barometric pressure. Changes in the discharge rate by the earthquakes which occurred in the east off Izu Peninsula and near Izu Oshima correlate with crustal stress changes. As the result of the investigation, we evaluated the Akazawa hot spring well No. 6 is a good observation well for crustal stress changes.

Key words: Ground water, Hot spring, Hydrology, Earthquakes, Volcanic eruption.

§1. はじめに

地震時に温泉や水井戸の自噴量・水位・水温・濁り・遊離ガス量などが変化したという例が、計器観測以前から報告されており、特に中国やソ連などでは、地震に先行した地下水の水位・水温・水質・溶存ガスの変動が多く報告されてきた [例えば, SADOVSKY *et al.* (1972), Kuo *et al.* (1974)]. しかし、多くの変動例は地下水の流路が地震動によって影響されただけであると解釈されており [力武 (1976)], 地震動のショックあるいは断層運動による自噴量・水位の変動及び、これらの変動に伴う水温の変動や、地震動による配管等の剝離などで、それらの現象の多くは説明が可能である。

地震予知を目的として、我々が地下水の観測によって得ようとするデータは、地震の体積歪に相当するものである。温泉では温泉水を供給している裂か系全体の影響が観測値に反映されるので、温泉に変動を及ぼす領域を正しく知ることが困難である弱点はあるが、埋込式体積歪計がスポット的な値を観測しているのに比べると、比較的広範囲を観測しているという利点がある。これは、光波測量と伸縮計、ドライティルトと傾斜計の関係と似ており、地盤がブロック運動を起こし、スポット的な観測では広域的な地殻応力変化を捉えにくい場合には、独自のデータの得られる可能性がある。

地下水観測が地殻の歪観測となり得るには、その井戸の観測項目が、地殻応力変化に対応した変動を示しているかどうかが問題となる。これまでに地震の前兆として

* 〒305 茨城県つくば市東 1-1-3

Fig. 1. Location of observation wells in the Izu Peninsula. Confirmed active faults [HOSHINO *et al.* (1978)] and Higashi-Izu monogenetic volcano group [ARAMAKI and Hamuro (1977)] are also plotted on the map.

報告されている例では、観測している地下水の流動など井戸の特性を明らかにし、気象・潮汐・揚水などの擾乱要素の影響を十分に把握して、観測データの解析が行なわれておらず、前兆と判断する説得力に欠けている例も少なくない。湯原・瀬野 (1969) が以前から指摘しているように、報告されているデータが実際に地殻応力変化や地震活動と関係ある変動によるものか否かを慎重に検討する必要がある。

本論文の目的は、地殻変動の観測に適した地下水井の条件を明らかにすることと、観測データに影響を及ぼす、地殻変動以外の擾乱要因を明らかにすることである。

筆者らは、これらの目的で伊東市赤沢の殖産土地(株)赤沢 6 号温泉井の自噴量・水温の連続観測を続けてきたが、これまでに地殻変動との関係や気象との関係・井戸特性・人為的影響について、いくつかの知見を得ることができたので報告する。

§ 2. 観測の推移と概要

Fig.1 に赤沢 6 号観測井と、以下で議論する伊東周辺にある温泉・水井戸の位置を示した。観測井の周辺には、東伊豆単成火山群が多く見られ、天城火山噴出物で広く被われ、赤窪及び伊雄山の溶岩がその上を被っている。観測井を挟むように、陸から海にまたがって NW-SE 方向に火山地形が数 km おきに並んでいることが判る [荒牧・葉室 (1977)]。活構造については、最近の火山噴出物に被われているために、井戸の周辺には活断層は認定されていないが [星野・他 (1978)]、単成火山や温泉の分布からは、周辺に活断層が伏在する可能性がある。

赤沢 6 号温泉 (以降、本井と呼ぶ) の井戸の構造を Fig. 2 に示した。井戸の深度は 597.4 m であり、浅所からの冷水の混入を防ぐために 300.2 m まで井戸管の周囲をセメントで遮水してある。ストレーナは最下部の 9.4 m (深度 574.0~583.4 m) のみに切っており、単一

の裂か水のみを対象とする構造になっている。

これまでの本井の観測の推移について簡単に述べる。

伊豆半島周辺地域においては、1970年代以降、群発地震が多くみられ、これらの地震に関連した温泉・地下水の変動が報告されるようになった。

WAKITA (1975) による 1974 年 5 月の伊豆半島沖地震 (M6.9) 前後の水位変動についての報告、地質調査所による 1978 年 1 月の伊豆大島近海地震 (M7.0) 前後の水位・湧出量・水質・溶存ガス組成の変動に関する調査 [岸 (1979), 永井・他 (1979), 永田・他 (1979), 池田・他 (1979)], 田口・永井 (1982) による 1980 年 6 月の伊豆半島東方沖地震 (M6.7) 前後における水位変動の水文学的解析などが行なわれた。その後も各機関において、地震予知に関連して地下水観測が試みられている。

本井についての水文学的調査を行なった結果、周辺地域には自噴の温泉井が稀 (他には赤沢 1 号井があるのみ) であることなど観測条件が良好であると期待された

Fig. 2. A longitudinal profile of the temperature, general geologic column section, and the structure of Akazawa hot spring well No. 6.

ので、1979 年 11 月より水温の自動連続観測を開始した。1980 年 6 月の伊豆半島東方沖地震 (M6.7) 発生後に顕著に水温が上昇したことが見いだされた [永井 (1981)]。

その後、温泉水を水文化学的にも調べるために、1983 年 4 月から 1988 年 3 月まで、月 2 回ずつ採水し水質・溶存ガス組成の分析を行ない、それらの変動や気象要素との関連の有無などについて検討を行なった。

定期調査や周辺の温泉調査によって、本井が地震活動に対する変動の感度が大きく、他の温泉井に比べて擾乱要因の影響が小さいなど、本井の観測条件が特に良好であることが明らかになり、1985 年から新たに自噴量・電気伝導率の連続観測を開始するとともに、水温の測定精度の向上を図った。

その後も本井の近くにおいて、1986 年 10 月の伊豆大島噴火に伴う地震 (最大 M6.0) や、1989 年 7 月の伊東沖の群発地震 (最大 M5.7) など、多くの群発地震や火山活動が起こり、その前後の観測データが得られた。

観測項目は、自噴量・水温・電気伝導率・気圧・降水量であり、水温は 1979 年 11 月より、自噴量・電気伝導率は 1985 年 2 月より、気圧・降水量は 1987 年 1 月より観測を開始した。なお水温計は 1985 年 2 月に交換を行なったが、それ以前のチャート上での拡大率はそれ以降の 1/5 であった。また、センサー交換の前後で測定値がシフトしている可能性もある。

それぞれの観測項目については、Table 1 に示した測定装置を用い、打点式記録計に記録された、毎日 0 時のデータを読み取った。地震・噴火活動期間などは、必要に応じて読み取りの時間間隔をより細かくした。

自噴量と水温の観測結果について以下に議論する。電気伝導率は、観測開始以来 $330 \pm 7 \mu\text{S}/\text{cm}$ (25°C 換算) の範囲内で極めて一定しているので、図示は省略する。

§ 3. 本井の水質の特徴から得られる井戸特性

本観測井の温泉水の特徴を明らかにするために、周辺

Table 1. Observed items, instruments and measurement ranges of the instruments set at the Akazawa well No. 6.

Item	Instrument	Measurement range
Discharge rate	Electromagnetic flow rate meter (Yokogawa Elec.)	0-500 l/min
Water temperature	Platinum thermometer (Rigosha)	40-42°C
Electric conductivity	EC meter (Central Kagaku)	0-2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Atmospheric pressure	Aneroid barometer (Nakaasa Sokki)	930-1050 mb
Precipitation	Stumbled measure rain gauge (Nakaasa Sokki)	0-100 mm

Fig. 3. Fluctuations in water qualities and dissolved gas components at the wells in Akazawa area, (a) No. 1, (b) No. 3, (c) No. 6.

Table 2. Water qualities of the hot springs and ground water wells shown in Fig. 1.

Well name	Akazawa No. 6		Akazawa No. 1		Akazawa No. 3	Totaku No. 4	Ito city office	Usami No. 24
Well depth (m)	597.4		779.5		~150	600	~100	624
Sampling date	83.5.10	89.7.12	80.7.12	89.7.12	80.7.23	82.5.20	89.7.13	89.7.13
Water temp. (°C)	40.5	41.0	41.1	39.9	14.9	30.3	36.2	62.8
EC (μs/cm)	330	337	325	449	56		1320	4840
pH	8.6	8.7	8.9	8.5	7.1	7.65	7.6	8.6
F ⁻ (ppm)		0.6	0.46	0.6	—	0.13	1.4	2.5
Cl ⁻	28.2	27.3	30.1	66.4	2.9	207	305	1260
Br ⁻		0.1		0.3		—	1.0	4.1
HCO ₃ ⁻	58.6	54.2	58.8	47.6	21.5	33.6	75.6	15.2
NO ₃ ⁻		—		—			—	—
SO ₄ ²⁻	59.6	61.0	55.8	64.0	2.5	165	126	767
Na ⁺	57.2	60.0	54.0	69.3	3.9	97.5	282	387
K ⁺		0.4	0.3		1.4	2.9	6.2	6.8
Mg ²⁺		0.01	0.01	0.05	1.2	1.13	2.5	0.03
Ca ²⁺	7.4	8.2	8.2	18.1	4.5	108	2.9	693
Sr ²⁺		0.01		0.02			0.02	1.8
Fe ²⁺		—		—		0.10	—	—
SiO ₂	24.3		25.5		36.5	32.2		
³ H (TU)		0.70		0.96				<0.26

の自噴の温泉井である赤沢 1 号井（井戸深度 779.5 m, ストレナ深度 620.0~774.2 m）と、自噴の水井戸である赤沢 3 号井（井戸深度約 150 m）の水質・溶存ガス定期観測データとの比較を行なった（Fig. 3, Table 2）。それぞれの井戸は海岸に面し、標高は 10 m 以下である。

本井は、図に示した観測期間中に電気伝導率・水質・溶存ガス組成（Fig. 3(c)）には、採取・分析に伴う誤差内で有意な変動が見られなかった。前述のように、電気伝導率の自動連続観測でもこれまでに有意な変動を示していない。これらの観測結果は、単一の裂か系の温泉水のみを計測しているためであると解釈される。したがって、自噴量・水温変動の解釈には複数の地下水の混合による効果を考える必要がなく、データの解析には好都合である。

本井の水質は温泉水としては溶存成分の少ない方で、陰イオンは当量値で $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}^-$ である（Table 2）。溶存成分の量が少ないため配管中に沈澱物を形成しないので、長期間の自噴量測定にトラブルを発生しない。溶存ガス成分には、He が約 65 ppm と浅層地下水（例えば赤沢 3 号）の 2~3 ppm より明瞭に大きく、堆積物起源の He に伴う天然ガス成分が見られないことから（Fig. 3(b), (c)）、火山活動などに関連した付加と考えられる。溶存酸素は消費されており、地表からの無機汚染が見られないことから、 SO_4^{2-} も火山活動起源と考えら

Fig. 4. Fluctuations in electric conductivity (EC) and chloride ion concentration at the Akazawa well No. 1 from April 1979 to July 1989. Water qualities of Akazawa well No. 1 (sampling times are indicated by symbols A and B) and Akazawa well No. 6, Totaku well No. 4 are shown in hexa-diagram [after NAGAI (1986)]. Arrows indicate the remarkable earthquakes which occurring in east off the Izu Peninsula.

れる。

1989年に採取した温泉水の ^3H （トリチウム）濃度は 0.70 ± 0.09 TUと小さい値を示している（Table 2）。

この値と降水中濃度の変動データ [KONDOH (1985)] を使って、後背地の降水が混じり合わず順々に流下してきたと仮定するピストン流モデルにより計算すると、この温泉水は大気圏内核実験（1952年）以前に涵養され、滞留時間が約37～45年となる。

これらの結果から、後背地に降った水が長い時間を費やして赤沢まで下り、その間に東伊豆単性火山群のマグマの間接的な影響により、熱・溶存ガスなどを付加されたものと考えることができる。

なお、井戸の深度290 m付近に帯水層が存在するため、セメントで遮水されている。水質が変化しないことから、この帯水層からの混入はないと考えて良い。

一方、Fig. 3(a)に示した赤沢1号井についての水質変動を見ると、電気伝導率やCl, Na, Caイオンの変動パターンが似ている。さらに、伊東沖群発地震（1989年7

月）直後までの電気伝導率、 Cl^- 濃度の経時変化をFig. 4に示したが、両者の変動パターンは極めて似ている。電気伝導率、 Cl^- 濃度の変動には、長期的な増加のトレンドと、図中に示した数回の伊豆半島東方沖の群発地震後に減少する変動とが見られる。1989年7月までの分析結果について、電気伝導率を横軸に取りそれぞれの陽・陰イオンの濃度の関係をプロットすると、Fig. 5に示すように、分析精度内で直線的に濃度が変動していることがわかる。このことから、赤沢1号井の水質変動は、水質の異なる2成分の温泉水の混合比の変動によって生じることで説明できる。Table 2あるいは、Fig. 4のヘキサダイアグラム [永井(1986)] にも示したように、2成分のうちの電気伝導率が小さい方の成分（図中④）は本井と同じ水質組成であり [永井・風早(1987)]、他方の成分（図中⑤）は本井の組成に比べて Cl^- 、 Ca^{2+} が著しく多く、 HCO_3^- は少ないことを示す。他方の成分（図中⑥）の温泉水を検討するために周辺の温泉について水質と比較すると、本井の約800 m南西に位

Fig. 5. Concentration of the major anions and cations versus electric conductivity (EC) of water of Akazawa well No. 1 from Apr. 1979 to Jul. 1989.

Fig. 6. Fluctuation in discharge rate at Akazawa No. 6 and large earthquakes. Large numbers show remarkable earthquakes occurring in east off the Izu Peninsula and small ones in parenthesis indicate large earthquakes occurring far from this area shown in Fig. 7(b). Mark ▼ shows influences of artificial disturbance. A thick broken line indicates the estimated discharge rate without the disturbance.

置する東拓 4 号井の水質 [阿部・野田 (1989)] がこれに近い特徴を示す。また井戸深度も赤沢 1 号井の場合とほぼ同じであり (標高の差は小さい), 東拓 2 号に関連するあるいは, 近傍の裂か水が他方の成分であると考えられる。

赤沢 1 号井の場合はストレーナの長さが 154 m と本井の 9 m に比べて遙かに長く, 掘削記録にもその範囲内に 6 ヶ所の温泉水層の記載がある。したがって, 水質を異にする水圧の高い複数の温泉水が混合されて自噴しているものと考えられる。本井と赤沢 1 号の④の水質が極めて似ており, ストレーナの上限深度は本井のストレーナの深度に近いので, 同じ裂か系の温泉水を含むことは十分に考えられる。

一般に掘削井戸は, 赤沢 1 号井のようにストレーナの長さを十分に持つような構造をしている例が多い。そのため, 自噴量や水温の変動原因を解釈する上では, 複数の帯水層・裂か系のバランスなどを扱う必要があり, 困難を生じる場合がある。

赤沢 3 号水井戸は, 水温がこの地域の年平均気温にほぼ等しい 15℃ であり, 電気伝導率・溶存成分量も小さ

く, 溶存ガス中の酸素濃度も約 31% と, 大気と 15℃ の水との平衡値 (約 34%) に極めて近い。水質・溶存ガス成分の変動も採取・分析の誤差内では見られない (Fig. 3(b))。

山地に降った雨水が, 岩石との相互作用を余り受けずにまま地層中を浸透し, 圧力水頭が井戸の標高に比べて高いために, 自噴しているものと解釈できる。水質・溶存ガスの結果からは, 地下深部の情報を有していることは期待できない。

§ 4. 自噴量の変動とその要因

4.1. 揚水の影響

観測期間中の, 本井の自噴量変動を Fig. 6 に示した。それによると, 顕著な自噴量の減少が, 毎年ゴールデンウィークと年末年始の時期に見られ, 1987 年には 8 月にも見られる (Fig. 6 中の▼)。この時期には, 温泉の需要が増大するために, 周辺井戸の揚水量が増大することが原因であると思われる。1987 年のみ 8 月にも自噴量の減少が見られたのは, この時期は本井の自噴量が約 370 l/min で, 他の年の同月が 400~420 l/min 程度で

Fig. 7. Epicenters [ISHIKAWA *et al.* (1985), ISHIKAWA (1986) and JMA data] and focal mechanisms (upper hemisphere projection) [JMA (1980–1989a), ERI (1987) and NRCDDP (1981)] of (a) remarkable earthquakes in and around east off the Izu Peninsula, and of (b) large earthquakes occurring far from this area (a thick square indicates the area of Fig. 7(a)). In mechanism diagrams, the hatched and open fields represent the compression and dilatation quadrants, respectively, and bold curves indicate fault planes of the earthquakes.

あったのに比べて小さく、恐らく周辺地域でも水量が小さかったために、ポンプ揚水が他の年よりも大きかったためではないかと考えられる。

1987年以降においては、揚水の影響の後遺症として、揚水以前に比べて約30~40 l/min程度低下したレベルまでしか回復しなかった。その後、規模の大きな地震の発生をきっかけとして、発生直後から2~3日後の間に、揚水の後で回復しなかった分に見合った量が增大しているように見える (Fig. 8中の△)。

4.2. 地震との関係

Fig. 7に、本井の近くで発生した地震の分布 [石川他 (1985), 石川 (1986) のSEIS-PCおよび気象庁震源データによる] と主要な地震の発震機構 [上半球投影, 気象庁 (1980–1989a)・東大地震研 (1987)・防災センター (1981)に基づく] を示した。

Fig. 8には、観測期間中にみられた顕著な地震・火山活動期間中の自噴量の変動について、Fig. 6の時間軸を拡大して示した。なお、1987年以降の揚水の後遺症が見られる期間には、揚水終了後に回復しなかった分を揚水前後の自噴量の違いから見積り、その分を加算した補正自噴量を示した。

Fig. 6, 8のデータを検討すると、伊豆半島東方沖で発生した、最大マグニチュード4.5以上の群発地震における顕著な地震、および房総半島沖の地震 ($M6.5, 6.7$) の際の顕著な地震の発生後には自噴量が增大し、1986年11月の伊豆大島噴火に関連した地震 ($M6.0$) では、逆に減少していることが確認できる。

メカニズム解から期待される赤沢における地震のP波初動は、Fig. 8に示した各々の伊豆半島東方沖の地震では押し、大島噴火時の地震 ($M6.0$) では引きに対応しており、自噴量の変動は、地震活動による地殻応力変化が裂か系の水圧を変動させたものと解釈することが可能である。ただし、房総半島付近の地震の際には引きとなっており、上述の観測結果とは一致しない。

本井の自噴量変動と地震のマグニチュードについて、伊豆半島東方沖の地震に限定して比較すれば、Fig. 9のような関係が得られる。なお、赤沢とそれぞれの震源との距離は約15~20 km (Fig. 7(a)) である。

1980年6月の伊豆半島東方沖地震 ($M6.7$) の時には自噴量の測定は行なっていなかったが、後述する議論によって自噴量増加量を見積った (Fig. 9中?印を付けたもの)。1978年1月の伊豆大島近海地震 ($M7.0$) は観測以前であり、自噴量増加量の定量的な見積りは困難であるが、温泉の管理記録によると、近年の伊豆半島周辺の地震のうちでこの時が最も増加したとのことである [金子 (1989)]。また、これまで $M4.5$ 以下の地震では明瞭な変動は見られていない。以上のことから、定性的には地震のエネルギーの大きな場合ほど、自噴量の増加量が大きいと言える。なお、1987年以降の地震の影響については、Fig. 8の補正自噴量に示したように揚水後の後遺症による寄与を差し引いて見積った。

なお、これまでの観測においては、地震の前兆的な自噴量変動は見られていない。観測期間中の地震の規模程度では、地震前の地殻応力変化は自噴量の変動が検出で

Fig. 8. Changes of discharge rate at the Akazawa well No. 6 during earthquake swarms (a) in 1986, (b) in 1987 and 1988, and (c) in 1989. Dotted lines (since 1987) in (b) and (c) are revised discharge correcting artificial disturbance due to such as heavy pumpage near the site. Mark Δ indicates recovering from aftereffect of artificial disturbance.

Fig. 9. Magnitudes of earthquakes occurring in east off Izu Peninsula versus estimated amount of the discharge changes (ΔQ) at Akazawa well No. 6 caused by each of the earthquakes. Mark ? refers to the text.

きる程度に大きくなかったためではないかと考えられる。例えば、伊東-初島間の光波測量結果では、1989年7月の伊東沖の群発地震の前には、有意な距離の変動は示されていない [恒石 (1989)]。

4.3. 潮汐・降水・気圧との関係

Fig. 10 に自噴量と海洋潮汐との関係について示した。自噴量を伊東の理論潮位 [気象庁 (1988)] と比較すると、潮位の振幅の変化・位相と自噴量の増減の傾向は比較的良くあっている。潮位が高くその荷重による地下の応力が高いときに、自噴量が大きくなっていると考えら

れる。自噴量の振幅は大きいときで $\pm 7 \text{ l/min}$ 程度である。伊東の海洋潮汐の主要 4 分潮は地球潮汐に対して $150 \sim 180$ 度位相が遅れている [気象庁 (1988)]。即ち、地球潮汐は海洋潮汐とはほぼ逆の応力変動を示すことにな

Fig. 10. Relation between fluctuations of the discharge rate of Akazawa well No. 6 and calculated tide levels at Ito harbor [JMA (1988)].

Fig. 11. Fluctuations of the discharge, precipitation and barometric pressure at Akazawa well No. 6 during heavy rain.

り、自噴量の増減傾向とは逆センスになり、地球潮汐による影響は海洋潮汐に比べて小さいことになる。海洋潮汐の影響の方が大きいのは、本井が海岸に面していることによると考えられる。

Fig. 11 に、集中豪雨時の自噴量の変動例を示した。降水量は2日間に累計238 mmに達し、赤沢において気象要素の観測を開始して以来、有数の集中豪雨であったが、この時でも自噴量変化は確認が困難である。このように、気圧・降水の影響は小さいことが判る。

本井では、規模の大きな地震による自噴量の変動に比べると、降水・気圧の変動は与える影響のオーダーが小さい。地表近くの現象による擾乱要因の影響が小さいことは、地下の歪を捉える検出感度が大きくなることを意味し、この点は地下水を利用して地殻変動の検出を試みる場合に最も重要な条件といえる。

Fig. 12. Water temperature versus the inverse of discharge rate at the Akazawa well No. 6 during periods of (a) earthquake swarm and (b) artificial disturbance such as heavy pumpage near the site.

§ 5. 水温の変動とその要因

5.1. 自噴量変動との関係

水温の変動要因としては、自噴量の変動によるものがある。本井では、水温センサーを地上に設置しているために、温泉水がストレーナを通して井戸管を上昇する間に冷却される効果を考えなければならない。

自噴量の変動と水温との関係について、1988年7月末から8月にかけての群発地震の時と、1986～87年の年末年始における周辺の大量揚水の時の例をFig. 12に示した。縦軸に水温を、横軸には自噴量の逆数（温泉水がストレーナから地表まで上昇するのに要する時間に比例する量）をとって、両者の関係の時間変化を示したが、自噴量が増加するときも減少するときも、図の傾きはほぼ同じとみなされる。自噴量変動と水温変動の関係から冷却分の補正係数を見積ると、補正水温(°C)（ストレーナ深度での水温）＝測定水温(°C)＋600/自噴量(l/min)の一次式で近似される。自噴量が380 l/minの時には、補正水温は実測値よりも約1.6°C高いことになり、ストレーナ位置までの管内の水量は約3.0 m³であるので、管内を上昇する時間は約8分と見積られる。

井戸管内を区切って、各段ごとにそれぞれ供給される温泉水と周辺の岩石による冷却を平衡と仮定して、熱伝

Fig. 13. Relation between water temperature (---- original temperature, — reduction of cooling effect) at Akazawa well No. 6 and precipitation (---- monthly precipitation, — 3 months moving average) at Ajiro station [JMA (1980–1989b)]. . . . in 1980 indicates estimated water temperature change without significant fluctuation in discharge.

導の式 $Rcp(T_s - T_0) = kS(T_0 - T_\infty)$ [HOLMAN (1976)] により、水温の冷却を計算した（ただし、 T_0 : パイプの熱源側の温度、 T_s : パイプの表面温度、 T_∞ : 無限遠の温度、 R : パイプの半径、 c : 温泉水の比熱、 ρ : 温泉水の密度、 k : 岩石の熱伝導率、 S : パイプの形状係数）。岩石の熱伝導率を火山岩の一般的な値である $2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ と仮定すると、ストレーナ深度では地上に比べて約 0.5°C 高くなるだけであり、実験式から求めた値と比べて小さい。この結果からは、管内の冷却の影響のみで温度変動を説明できるか判然としない。

Fig. 13 に観測開始以来の水温の観測結果を示した。1987 年以降は自噴量の変動が著しい (Fig. 6) ために水温の変化が複雑に見えるが、前述の一次式により補正された水温は、自噴量が急変する前後を含め滑らかに表わされる。このことから、地震時の水温変動の主要因は自噴量の変動によるものであることが判る。

本井の約 16 km 北に位置する伊東市宇佐美 24 号井 (Fig. 1) の水温は、1989 年 7 月の伊東沖の群発地震を除き、本井と同様に伊豆半島東方沖の群発地震時には上昇し、1986 年 11 月の大島噴火時の地震では減少している [茂木・他 (1987, 1989), Mogi *et al.* (1989)]。宇佐美 24 号井についても自噴量の増加が水温上昇の主要因であると仮定すれば、本井とほぼ同じセンスの変動を示していることになる。1989 年 7 月の伊東沖の群発地震時の動きが逆なのは、地震の発震機構からは地震波の初動の向

きが赤沢では押し、宇佐美では引きと逆であったことと関係があるかも知れない。

5.2. 後背地の降水との関係

自噴量による補正を行なった水温は、振幅や形状は年によって異なるが、明瞭に 1~3 月頃に高く、6~10 月頃に低いような年周期変動を示す (Fig. 13)。

水温の変動要因としては、井戸付近の降水が直接温泉水と混合する場合、あるいは、水温の異なる裂か系の温泉水の混合比が変化することによる場合もある。しかし、本井では前述のように水質に全く変化が見られず、単一の裂か系のみを扱っていると考えられることから、これらの要因は否定される。

他の水温変動の要因としては、熱源を通過する流量の変化によって、地下水の単位体積当りに受ける熱量が変動する場合が考えられる [湯原・瀬野 (1969)]。

地下水の流量が変化する原因は、後背地の降水量の多寡がもたらす、地下水の涵養量の変動による帯水層における地下水圧の変化が考えられる。気象庁の網代測候所 (本井の約 15 km 北) の雨量 [気象庁 (1980–1989b)] と本井の補正水温を Fig. 13 のように比べると、降水量の少ない 1987 年に水温の低下が少ないことが判る。地下水圧に与える降水量の影響は位相が遅れるので、降水量の移動平均を取ってみると、特に 3 カ月移動平均と水温が、細かな変動パターンまで良く対応しており、地下水圧の変動が水温の年周期変動の主要原因となっていること

を明瞭に示す。

熱源における地下水の流量の変動率を見積るために、次の計算を行なった。Fig. 13 に示すように、補正水温は約 43°C で年周変動は約 $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$ である。熱源に接する前の地下水温を伊東周辺の年平均気温の 15°C とし、熱源から受ける単位時間当りの熱量（水温上昇と水量の積に比例する量）が一定であったと仮定すると、熱源を通過する水量の変動率は約 $\pm 3\%$ と計算される。自噴量の年平均を 380 l/min とすれば、変動量としては $\pm 12\text{ l/min}$ 程度にしかならないので、自噴量観測結果に降水量に対応した季節変動が明確に現れないことと矛盾しない。

Fig. 13 に示された 1985 年以前のデータを検討すると、自噴量補正されていない水温と雨量の 3 カ月移動平均の変動パターンは、1980 年を除いて良く似ており、その間の自噴量の変動は小さかったと推定される。

5.3. 1980 年伊豆半島東方沖地震後の水温変動

前節に述べたように、Fig. 13 において 1980 年 6 月の伊豆半島東方沖地震 ($M6.7$) 以降 1980 年末までは水温と降水量の変動パターンが異なっている。これまでの議論から、変動パターンの相違はこの時期に大きな自噴量の増加があったことが原因であると推察される。降水量の変動パターンから期待される水温 (Fig. 13 の太い点線) と比較して、実測水温が最大 0.8°C 高くなっている。地震前の自噴量を 1985 年のレベルとほぼ同じで 380 l/min と仮定すると、5.1 で述べた補正水温の式より、最大で $700\sim 800\text{ l/min}$ まで自噴量が増大したと推定される。

この推定の妥当性を考察するために、赤沢 1 号井における 2 成分の温泉水の混合の影響を見ると、伊豆半島東方沖地震の後に一時的に本井の水質とほとんど同じになっている。その後は、現在までこれほど本井の水質に近づいたことはない (Figs. 3, 4)。伊豆半島東方沖地震の

際に本井と同一の裂か水の水量が他方に比べて極めて増加したことになり、上述の自噴量増大の推定がある程度の妥当性を有することを示す。また、伊豆東方沖地震のエネルギーが他の群発地震に比べて格段に大きいことも、水温と降水量からの自噴量の推定値と調和的である。

これらの解析に基づく、本井の概念的な水文モデルを Fig. 14 に示した。

§ 6. 1989 年 7 月の伊東沖の群発地震・海底噴火時の自噴量・水温変動

本井観測以来の伊豆半島周辺における最大の地震は、1980 年 6 月の伊豆半島東方沖地震 ($M6.7$) であるが、当時は観測の質・量ともに不十分であったために詳しい解析は困難である。

この活動以降では、1989 年 7 月の伊東沖の群発地震が規模の大きなものとして挙げられる。特に、地震学・測地学的観測がこれまでに例を見られないほどに詳しく得られており、地震活動・火山活動の経過とそのモデルについても、より確実度の高いものが得られている [岡田・山本 (1989), 曾屋・他 (1989)]。

温泉に関しても、伊東市役所内の未利用井が一時自然湧出をしたり、前述の宇佐美 24 号温泉の水位・水温が著しく低下するなど、震源域に近いところでは大きな変動があった。

Fig. 8(c) に示した本井の自噴量変動の推移を時間を追って見ることにする。

群発地震は 6 月 30 日に始まり 7 月 4 日から活発化したが、それ以前には自噴量に目立った前兆的な変化はなく、1989 年 7 月 4 日の比較的大きな地震 ($M4.9$) の際に増加している。5 日になって特に顕著な地震のなかった時に、約 40 l/min の増加を示した (図中の▽印)。この現象は、前述のように揚水後の後遺症による自噴量の低下分が回復したことを示すものと考えられる。

9 日の最大地震 ($M5.5$) の際にも自噴量が大きく上昇している。従来と同様に自噴量の増加が瞬間的に終わらず増加率が漸減するような変動を示している。

11 日に火山性微動が始まり、それ以降に海丘が形成されたと考えられ [小澤 (1989)], 13 日には海水がマグマと接触して水蒸気爆発を起こしている [曾屋・他 (1989)]。しかし、この期間を挟むデータを見ても、有意な自噴量変動を示していない。この期間には、伊東-初島間の光波測量 [恒石 (1989)], 網代・東伊豆の体積歪 [佐藤・他 (1989)], 伊東市川奈の傾斜 [山本・他 (1989)] など他の地殻変動を示す観測データも、それ以前の群発地震の活発な時期の変動に比べると、変化ははるかに小

Fig. 14. Schematic hydrological model for Akazawa area.

Fig. 15. Fluctuations in the water temperature (··· original temperature, — reduction by cooling effect) at Akazawa well No. 6 during east off Izu Peninsula earthquake swarm and submarine volcanic eruption in July 1989.

さいか検出限度以下である。このことから、マグマの噴出現象そのものは、局地的な地殻応力の変動しか起こさなかったことを示している。

水温の変動については自噴量による補正水温も含めて、Fig. 15 に示した。これらの観測結果によると、水温変動のほとんどが自噴量変動に伴うものであり、自噴量の補正を行なうと補正後の水温変化は $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以下である。自噴量の変動による以外の水温の変動はほとんど見られないので、本水系の熱の供給には有意な変動は起っていないと考えられる。なお、毎日昼間に補正水温の値が若干高いのは、地表に設置してある水温センサーが気温の影響を受けるためである。

§ 7. ま と め

1. 伊東市赤沢 6 号温泉井の自噴量は、規模の大きな地震に伴うと考えられる変動が観測される。年末・年始やゴールデンウィークなどに周辺揚水が著しく増大することによる影響を受けるが、降水・気圧・潮汐などは影響が小さい。

2. ストレーナが単一の裂か系のみを採水するように切っており、水質に変動が見られないことからこれが確認される。複数の裂か水の混合を考慮する必要がなく解析が容易である。

3. 地表で観測される水温の変動は、自噴量変動に伴って裂か・井戸管を温泉水が上昇する間での冷却率が

変化することと、降水量の変動による地下水圧変化により、熱源を通過する水量が変動することで説明される。

4. 地震に伴う自噴量の増減は、発震機構から推定される初動の押し引きに対応する事が多い。

伊豆半島東方沖の群発地震については、 $M4.5$ 以上の地震時には増加が認められることが多く、地震の規模が大きいときに自噴量の増加が大きい傾向がある。一方、1986 年の大島噴火時の最大地震 ($M6.0$) の時には減少した。

なお、群発地震の前兆現象と思われるような変動はこれまで見られていない。

5. 1989 年 7 月の伊東沖の群発地震・海底噴火においては、9 日の最大地震 ($M5.5$) の時に最大の自噴量変化を示し、11 日以降の火山性微動や 13 日の海底火山の水蒸気爆発を挟む期間には、顕著な変化は見られなかった。これは、光波測量・体積歪など測地学的な観測結果と調和的である。

謝 辞

殖産住宅(株)の岡田雷三社長には、源泉の観測井としての利用を快く許可して頂き、金子 晃課長をはじめとする皆さんには、現地での観測や保守に多大の協力を得た。

地質調査所の田口雄作博士には原稿を読んで頂き、水文学的な扱いについての問題点の指摘を頂いた。

工業技術院国際研究交流センターの池田喜代治所長には、観測データの解釈について議論し、地球化学・水文学的考察に多大な助言を頂いた。

地質調査所の小野晃司部長・曾屋龍典課長・風早康平博士には伊豆半島や大島の火山活動について、衣笠善博課長には伊豆半島の活構造について、阿部喜久男研究官には伊豆半島の温泉の水質について、高田 亮博士には熱学について、それぞれ教えて頂いた。

以上の皆様に感謝申し上げます。

文 献

- 阿部喜久男・野田徹郎, 1989, 私信。
 荒牧重雄・葉室和親, 1977, 東伊豆単成火山群の地質—1975–1977 中伊豆の異常地殻変動に関連して—, 地震研究所彙報, 52, 235–278。
 HOLMAN, J. P., 1976, Heat transfer, McGraw Hill, 401 pp.
 星野一男・橋本智昌・松田時彦, 1978, 伊豆半島活断層図, 地質調査所。
 池田喜代治・永井 茂・後藤隼次・阿部喜久男・永田松三・大場信男, 1979, 伊豆半島東部地域における地下水中のラドン濃度と伊豆大島近海地震前後におけるそ

- の変化について, 地質調査所特別報告, No. 7, 129-149.
- 石川有三・松村一男・横山博文・松本英照, 1985, SEIS-PCの開発一概要一, 情報地質, 10, 19-34.
- 石川有三, 1986, SEIS-PC改良版の概要, 情報地質, 11, 65-74.
- 金子 晃, 1989, 私信.
- 岸 和男, 1979, 伊豆半島東部における地下水位・湧水量の観測と伊豆半島近海地震前後におけるその変化について, 地質調査所特別報告, No. 7, 71-85.
- 気象庁, 1988, 昭和64年潮位表, 326 pp.
- 気象庁, 1980-1989a, 地震月報.
- 気象庁, 1980-1989b, 気象年報.
- 国立防災科学技術センター, 1981, 1980年6月29日伊豆半島東方沖地震とその前後の地震活動, 地震予知連絡会会報, 25, 128-133.
- KONDOH, A., 1985, Study on the ground-water from system by environmental tritium in Ichikawa region, Chiba prefecture, Environmental research paper, University of Tsukuba, No. 6, 1-59.
- KUO, T., P. CHIN and H. FEUG, 1974, Discussion on the change of ground-water level preceding a large earthquake from an earthquake source model, Acta Geophysica Sinica, 17, 99-105.
- 茂木清夫・望月裕峰・黒川義男, 1987, 伊豆一宇佐美温泉の温度変化, 地震予知連絡会会報, 38, 313-315.
- 茂木清夫・望月裕峰・黒川義男, 1989, 1989年伊豆半島東方沖群発地震による温泉の変化, 地震学会講演予稿集, No. 2, 124.
- MOGI, K., H. MOCHIZUKI, and Y. KUOKAWA, 1989, Temperature changes in an artesian spring at Usami in the Izu Peninsula (Japan) and their relation to earthquakes, Tectonophysics, 159, 95-108.
- 永井 茂, 1981, 1980年伊豆半島東方沖地震と地下水温, 水質の変化, 地震予知連絡会会報, 25, 148-153.
- 永井 茂, 1986, 地盤沈下と地下水の水質との関係(前), 月刊・水, No. 391, 21-25.
- 永井 茂, 池田喜代治・後藤隼次・阿部喜久男・永田松三・大場信雄, 1979, 伊豆半島東部地域における地下水の水温・水質と伊豆大島近海地震前後におけるその変化について, 地質調査所特別報告, No. 7, 87-118.
- 永井 茂, 風早康平, 1987, 伊豆半島吉川温泉, 赤沢1・6号温泉の水質, 水温, 自噴量と地震との関係について, 地質調査所月報, 38, 351-353.
- 永田松三・大場信男・池田喜代治・永井 茂・後藤隼次・阿部喜久男, 1979, 伊豆半島東部地域における地下水の溶存ガス組成と伊豆大島近海地震前後におけるその変化について, 地質調査所特別報告, No. 7, 119-128.
- 岡田義光・山本英二, 1989, 1989年伊東沖の群発地震・火山活動の一解釈, 地震学会講演予稿集, No. 2, 118.
- 小澤幸雄, 1989, 伊東沖海底火山に遭遇して, 地質ニュース, No. 422, 6-13.
- 力武常次, 1976, 地震予知論入門, 共立出版 212 pp.
- SADOVSKY, M. A., I. L. NERSESOV, L. A. NIGMATULLAEV, L. A. LATYNINA, A. A. LUKK, A. N. SEMENOV, I. G. SIMEIREVA, and V. I. ULOMOV, 1972, The processes preceding strong earthquakes in some regions of middle Asia, Tectonophysics, 9, 295-307.
- 佐藤 馨・山田尚幸・高橋 博・長谷川洋平・二瓶信一・吉田明夫, 1989, 1989年の伊豆東方沖の群発地震活動と体積歪計による歪変化, 地震学会講演予稿集, No. 2, 116.
- 曽屋龍典・宇都浩三・山元孝広・須藤 茂・富樫茂子・中野 俊・坂口圭一・吉川清志・水野清秀・高田亮・小野晃司, 1989, 1989年7月の伊豆半島東方沖海底噴火と噴出物, 地質ニュース, No. 422, 14-26.
- 田口雄作・永井 茂, 1982, 伊豆半島東方沖群発地震(1980年)による熱海観測井の水位変動について, 地理学評論, 55, 239-257.
- 東京大学地震研究所, 1987, 関東甲信越地方における地震活動, 地震予知連絡会会報, 37, 93-110.
- 恒石幸正, 1989, 1989年伊豆半島東方沖群発地震による伊東一初島測線の変位, 地震学会講演予稿集, No. 2, 115.
- WAKITA, H., 1975, Water wells as possible indications of tectonic strain, Science, 189, 553-555.
- 山本英二・大久保正・岡田義光, 1989, 1989年伊東沖の群発地震・火山活動に伴う傾斜変化, 地震学会講演予稿集, No. 2, 117.
- 湯原浩三・瀬野錦蔵, 1969, 温泉学, 293 pp. 地人書館