松代地震による加賀井温泉の変化

春 日 功*

Aspect on the Relation of Thermal Water and Matsushiro Earthquakes in Kagai Hotspring Area, Nagano Prefecture

By

Isao KASUGA

Abstract

In this report, the changes of discharge and temperature of thermal water of Kagai hotspring area are described in the relation with the frequency of Matsushiro Earthquakes.

During the period of activity, it was observed that discharge of thermal water was increased before remarkable trembling had occurred. This might be one of predictive phenomena of occurring of earthquakes.

According to the measurement of heat flow of thermal water, the change of value could be seen every twenty two days' interval, which suggests to be associated with activity of earthquakes.

From the data on earthquakes and hotsprings, it may be considered that the Matsushiro Earthquakes have been caused by pushing up of deep-reserved thermal water, characterized by relatively low temperature and high contents of CO_2 and Cl^- into geologically weak zone.

I. ま え が き

松代地震が始まってからすでに1年4カ月あまりを経た現在、いまだに「いぜん警戒が必要」という地震情報が発表されている。筆者は東京水産大学を卒業後漁業に従事していたが、たまたま松代地震の始まる半年前、一身上の都合により加賀井温泉一陽館の家業を継ぐことになった。地震がしだいに活発化してきた昭和40年11月3日と25日に、東京都立大学野口喜三雄教授が温泉の調査のため立ち寄られ、その結果 Cl^- 含量の変化が最も著しいことが判明した。また、11月4日23時45分に発生した震度IVの地震により、当時新湯井(以後A湯井と呼ぶ)掘削のため全く湧出がとまっていた旧湯井(以後B湯井と呼ぶ)が、わずかながら再び自噴を始め、以後震度IV以上の地震に伴い湧出量が漸次増加する傾向が見られた。このような事柄から、野口教授の依頼によりA・B両湯井の温度測定・採水、およびB湯井の湧出量の測定等を始めることになったのである。

その後、あまり変化がないと思われていたA湯井の湧出量も遂次増加の傾向が見られ、測定の必要を痛感していたが、なにぶんこの湯井は湧出量が多く、しかもガスリット状の自噴井であるため、湧出量の測定には困難を感じたが、一応浴槽を用い定容積法により41年2月10日から測定を開始した。たまたまそのころ、地質調査所の中村久由博士からもB湯井の湧出量・温度等の観測依頼を受け、以後この湯井の測定も続けている。したがって現在まで、加賀井温泉A・B両湯井の資料として、野口・中村そして筆者の

* 筆者は松代地震の中心に位置した加賀井温泉所在の一陽館館主であつて、この方面の専門ではないが、熱心に地震を研究されている方である。特にその執筆・発表をわずらわした。(蔵田延男)

三者のものが残っているが、これらの資料は最初の約束によりすべて三者で共通に使用することになっている。このような観測は、少なくとも地震終了後半年ないし1年くらい継続する事が必要であり、また筆者自身も続けたいと希望していたが、再び海上生活にもどることになったので、この際現在までの資料を広く利用していただく意味でできれば一度公表したいとかねてから考えていた。最近中村博士からのおすすりもあり、全くしろうとである筆者が温泉を通しての松代地震に対する考え方をここで述べてみたいと思う次第である。なお、全観測資料は近い将来改めて公表するつもりである。

II. 松代地震による温泉の変化

加賀井温泉は旧長野市内より南南東約12 km、長野電鉄松代駅より東約1.5 kmの、長野市松代町東条長礼にあり、尼師山(807 m)を背に、南方約1 kmには地震で有名になった皆神山(679 m)がある。(後出第9図参照)

松代はフォッサマグナ東部の地域にあたり、しかも長野堆積区と中央隆起帯との境界付近に位置している。信州大学の飯島助教授¹⁾は、当温泉を上山田・戸倉・山ノ内温泉群、草津・万座などとともに中央隆起帯に属するものに入れ、これらの熱源は一般に半深成岩類に求められるとしている。

第1図 柱状図

A・B湯井ともにケーシングを挿入したが(第1図)、A湯井の耐酸性積層パイプの部分を除き、ほかは電解および腐植によりほとんどケーシングパイプの用をなしていない。

温泉成分は第1表のとおりである。

第1表 A 湯井分析表

1. 湧出地 長野県埴科郡松代町東条 55
2. 湧出地における調査および試験成績 (40.6.16)
 - (1) 温度 41°C (気温 25°C)
 - (2) 性状 ほとんど無色透明にして清涼味と鉄味と塩味とを有し、わずかに硫化水素臭を有する。
 - (3) 水素イオン濃度 pH 6.7 (比色法による)
3. 試験室における試験成績 (採水 40.5.20)
 - (1) 性状 ほとんど無色透明にして清涼味と鉄味と塩味とを有し、わずかに硫化水素臭を有する。
 - (2) 水素イオン濃度 pH 6.7 (比色法による)
 - (3) 比重 1.007 (20°C において)
 - (4) 蒸発残留物 7093 ミリグラム (検水1キログラム中)
 - (5) 本検水1キログラムに含有する成分およびその分量

カチオン	ミリグラム	ミリバール	ミリバール %	アニオン	ミリグラム	ミリバール	ミリバール %
K	293.9	7.517	6.88	Cl	3064	86.41	79.13
Na	1717	74.67	68.39	SO ₄	174.5	3.632	3.34
NH ₄	0.5680	0.0315	0.03	CO ₃	0.1350	0.0045	0.00
Ca	429.1	21.41	19.62	HCO ₃	1164	19.08	17.48
Mg	60.33	4.961	4.54	HSiO ₃	0.1001	0.0013	0.00
Fe	10.92	0.3581	0.33	HS	1.829	0.0553	0.05
Mn	1.192	0.0434	0.04				
Al	1.708	0.1900	0.17				
計	2514.718	109.181	100.00	計	4404.5641	109.1831	100.00

通 計 6919.2821

ケイ酸 (メタ) H₂SiO₃ 123.4 ミリグラム 1.580 ミリモル

合 計 7042.6821

遊離炭酸 CO₂ 699.8 ミリグラム 15.90 ミリモル

硫化水素 H₂S 0.8589 ミリグラム 0.0252 ミリモル

総 計 7743.341

4. 泉 質 含食塩硫化水素泉 (緊張低張温泉)

昭和 40 年 7 月 5 日

長野県衛生研究所 技師 赤 尾 秀 雄

1. A 湯井の湧出量および水温の変化

第2図は加賀井温泉A湯井の湧出量・水温の変化と震度IV以上の地震の頻度を示したものである。なおこのグラフには示していないが、昭和40年6月12日、JIS規格の鋼製ノッチボックスを用いて測定した

第2図 A湯井の湧出量および温度の変化

ところ、湧出量 593.4 l/min、水温は 41.0°C であった。そして第1活動期後の 40 年 12 月ごろにはタンク内の水位の高さから判断して湧水量がさらに増加していた事はまちがいのない事実であった。しかし、水温は急激に低下し、同時に野口教授らの分析によれば、Cl⁻ 含量もまた急激に減少していることが知られた。第2活動期には、41 年 3 月末より約 2 週間ほど継続的に湧出量の減少を示し、4 月 11 日から 17 日にわたる活動のピーク時には震度ⅣまたはⅤの直後約 200 l/min 以上の減少を示した。4 月 11 日 4 時 57・58 分の 2 回の震度Ⅳ、6 時 06 分の震度Ⅴの直後には湯井状態から判断してその量約 700 l/min と思われたが、残念ながら正確な量は測定していない。ただこの 11 日の湧出量は、地震後約 15 時間を経た 21 時 30 分から 22 時にわたって測定したため、すでに若干回復してきており、記録上では 815 l/min が最低となっている。温度は 4 月 10 日 14 時：40.4°C、11 日 6 時 15 分：39.9°C、同 13 時：40.0°C と急激に低下している。

第3活動期における湧出量および水温の変化は、第2活動期の傾向と非常に良く似ており、水管傾斜計

の変化などとともに、長野地方気象台の松代群発地震情報第24・25号の「第3の活動期に入つたものと判断される」という発表の資料の一つとなつた。湧出量の変化を見ると、あたかも断続的に応力を加える事をとめたさいの剛体の応力-歪曲線に類似し、地震の各活動期および震度Ⅲ以上の地震群の発生時には水量が急激に減少し、その後再び急速に回復してそれ以前の量を越えるようになる。ただ、第3活動期の場合はそれまでの状態と様相が異なり、最低の減少量から再び増加する度合が著しく、9月16日には湧出

第3図 水管傾斜計による南北成分の変化
(東京大学地震研究所：地震調査報告、第2報、p. 24による)

量・噴出圧力の増加によりA湯井わきに噴出口を作るにいたつた。この時の湧出量は少なくとも1,800 l/minから約2,000 l/minに達したと推定される。このさい湯井内(わきの噴出口ではなく、本来の湯井パイプ)からこの地域の基盤である玢岩の新鮮な角礫が多数噴出された。

第3図²⁾は気象庁松代地震観測所の坑内に設置されている水管傾斜計で読み取られた南北成分の第2活動期における傾斜変化を示したものであるが、これと第2図のA湯井湧出量とを比較してみると、傾斜が北上がりに激しくなるに伴い湧出量が減少し、逆に北上がりになると増加するという傾向が良くわかる。このような両者の対応は全期間を通じて顕著である。この対応関係から、両者が反映する「地震の場」はほぼ同一ではないかとも考えられる。

第4図はA湯井の温度と湧出量の積算値を log で

第4図 A湯井における放熱量の変化
 $\log K = \log T + \log A$ T: Temp. °C A: 湧出量 l/min

第5図 B湯井の湧出量および温度の変化

表わし、単純に温泉のみによる放熱量の指数として示したものである。水温は毎日13時に観測したが、活動期には1日数回測定しているの、湧出量測定時に近い値のものとみてよい。なお、湧出量はすべて毎日22時ごろ測定したものである。地震の震度のうち松代の分は気象庁松代地震観測所発表のものであり、他地区の震度の中には参考震度のものも含まれている。

さて、第4図を見ると、約22日の周期で不連続が起きている事が認められる。この不連続と、比較的大きな(震度Ⅳ以上)地震の群との間に顕著な関連があり、特にその関係は第3活動期までに認められる。す

なわち、増減の向きが逆になるような不連続では、その不連続の日の前後約10日間に大きな地震が多発し、また増減の向きが同じでも不連続の見られる場合には、その地震活動は規模が小さい。そしてこの場合には、その不連続が起こる日より前、約10日までの間に大きな地震が数回発生している。9月以降は地震回数も減り、松代で震度IVを記録するような地震がきわめて少なくなつたにもかかわらず、不連続はいぜん明らかに認められる。一方、若穂地区に震源があり、若穂・旧長野市などで震度IV以上を記録し、松代で震度IIIまたはIIの場合、すなわち若穂の地震群の場合には、この不連続とは関係なく発生している。言いかえると、若穂の震源は前述の「温泉の変化が反映する地震の場」の限界外にあるのではないかと考えられる。

2. B湯井の湧出量および水温の変化

第5図はB湯井の湧出量・水温の変化と震度IV以上の地震の頻度との関係を示したものである。B湯井は前述のように昭和40年11月4日23時45分に松代で発生した震度IVの地震以後再び自噴を始めたが、翌5日朝の湧出量はまだ少量であり、温度25°C程度であつた。しかし41年9月上旬から噴出圧力が非常に高まり、9月13日からは自噴量が著しく多くなつたため湧出量の測定ができなくなつた。その後圧力はあまり減少していないようであるが、水柱の太さが細くなつてきている事から、A湯井と同様、第3活動期後9月下旬以降漸次B湯井の湧出量も減少しているものと思われる。

この湯井の湧出量は第6図に示したが、たまたま震度IV以上の地震の半日または数時間前に異常を示した事が観測された。そして41年7月10日15時44分の震度IVの地震の数時間前から水圧が大きくなり、地震後約30分後まで湯井パイプの先端より約20cm くらいの高さまで温泉水が噴出した。7月から8月下旬にかけてこのような現象がたびたびみられたが、上述のように9月上旬以降噴出の高さが高まつてからは明瞭な変化をつかむ事ができずに現在にいたつている。

III. 考 察

松代群発地震の原因については多方面より研究され、推論されているが、筆者もかねて温泉その他の現象の測定結果・観察から一つの仮説を考えていた。この点に関し、すでに東大震研の森本教授²⁾は次のように推論しており、筆者の考え方も原則的にはほぼ同じである。すなわち、「松代の地震は緻密な割れ目の発達した岩石からできており、何か下からの突き上げがあつたために小さな地震が起きているのではない」と思われる。その地震の起こり方は、地盤が東および西側から圧縮されているため、北東—南西、北西

第6図 B湯井の地震前における湧出量の変化の例

第7図 a) 浅間火山のB型火山地震の日頻度と1958年10~12月の噴火

第7図 b) 松代地震の日別回数

—南東方向にずれを生じ、そのストレスを解消するような割れ目が地下で作られるために発生するのではなかろうか」という考え方である。そこで、この下からの引き金の役目を果たす物質について筆者なりの考えを述べてみたい。

浅間山B型火山地震との比較 第7図³⁾a)は、昭和33年10~12月の浅間山の噴火のさいのB型火山地震の日頻度を示したものであり、b)は気象庁松代地震観測所における国際標準地震計(倍率10万倍)によ

第8図 松代地震の旬別有感地震回数(上)と深さ別の旬別%(下)

る松代地震の日別地震回数を示したものである。両者の回数の頻度分布は良く似ている。しかし、石本・飯田の係数 m が、浅間山の場合 A 型地震では 1.8 (佐久間, 1957), B 型および爆発地震では 2.8~3.5 (佐久間, 1957; 水上, 1960)⁴⁾ と変化するのに対し、松代地震の場合には 1.9~2.2⁵⁾ の範囲にあり、顕著な変化は見られない。

震源の垂直変化 第8図は気象庁松代地震観測所でまとめた松代地震の震源の深さ別旬別%と旬別有感地震回数を対比したものである。これによれば、8 km 以深にピークが出てから約1カ月後に 4~7 km に移り、それから1カ月後に 0~3 km というごく浅い所に震源をもつピークが見られる。これが活動期と称される時期であつて、有感地震回数もピークを示している。

地磁気の変化 東大震研の力武教授らの観測によれば、中野市大俣の観測を基準にすると、地磁気的全磁力は皆神山南麓の平林では約5ガンマの増加、保科では約7ガンマの減少が見られる。また力武教授⁶⁾ は次のように述べている。「このような地磁気の変化はどうして起こるのだろうか。もし平林と保科(距離約6 km)の間で地下が高温になったとしてみよう。この場合には地下の岩石の磁性が弱まつて南で磁力が減り北でふえることになるが、実際にはその逆になっている。また、岩石に東西方向の圧縮力または南北方向の引つぱりの力が働いたとすれば、北向きの帯磁が強くなつて観測結果に定性的に調和すると思われる。また皆神山周辺でくり返された磁気測量の結果からも、地表近くに高温のマグマやガスが上昇してきたと考える証拠はない」

一方、大島の岩石の場合⁷⁾、自然残留磁気の値として 7×10^{-2} emu/cc 程度のものがあるが、200°C に熱せられると残留磁気は最初の約90%、さらに熱せられると急速に減少して400°C で約30%、キューリー点(大島の岩石の場合は約550°C)を越えると消失してしまう(Nagata, 1943)。また帯磁率は、岩石によって200°C で室温時の2倍程度に増加し、以後急激に減少するものもあるが、200°C 前後での残留磁気

は依然として強く、この程度の帯磁率の変化では火山全体の帯磁が誘導磁気の変化によつて影響を受けるとは考えられない。

このように、地下の温度が問題となるのであるが、松代付近での地温勾配は次の3本のボーリングの孔底温度から、 $6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 前後と推察される。

試 錐 孔 名	深度	孔底温度	地温勾配
松代町営第2号井*	364 m	37.0°C	$6.3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$
同 第1号井*	492	44.6	6.2
防災センター皆神山試錐孔**	200	24.0	5.0

* 地質調査所の調査(昭和41年5月19日)資料による。

** 防災センターの資料による。

温泉・湧泉等の湧出現象 当温泉の湧出量・温度・放熱量の変化と地震との間に相当密接な関係が見られる事はすでに述べたが、野口教授らの調査によれば、化学成分も非常に密接な関係があるといわれる。 Cl^{-} を例にとつてみると、第1活動期の11月3日に 2535 mg/l であつたものが11月25日には 2040 mg/l と減少し、その後徐々に増加して、震度IV以上(例外として震度IIIもある)の地震のさい、急激に $50\sim 200\text{ mg/l}$ の減少を示し、第2活動期の3月18日には 1580 mg/l という最低を記録した。その後は震度IV以上の地震に伴つて多くて $50\sim 70\text{ mg/l}$ の減少を示した事もあるが、大きな減少を見せず徐々に回復した。しかし第3活動期後半の41年9月上旬から急に増加の傾向を示し、12月22日には 5150 mg/l と地震の始まる前よりはるかに多くなっている。

また、A・B両湯井とも、前述のように9月上旬より圧力・量ともに急速に増加し、中旬にはA湯井パ

第9図 松代町における湧水の分布

イプより新鮮な珪岩の岩片が噴出した。また8月中旬から9月にかけて、多数の湧水・温泉徴候・地割れ等の現象が各地に発生した。第9図は筆者と地震観測所山岸登氏がまとめた湧水箇所の分布図である(湧水現象が比較的広い区域に及んでいる場合には1カ所として記入した)が、これを見ると、当温泉を通り、地すべりを起こした牧内を通る幅約1kmの線上に湧水が集中していることがわかる。

この湧水現象が発生した当初、一部温度が比較的高いものを除き、ほとんどの湧水は fresh water といえるものであつた。しかし、牧内地区で地すべりが発生した41年9月16日以降、温度の高低と無関係に多量の遊離炭酸を

伴い、 Cl^- 含量もまた急激に増加し、一部では当温泉の成分に近い成分にまで変化したものさえある。 Cl^- 含量は現在も増加の傾向にあるが、温泉および湧水の成分変化については東京都立大学・地質調査所等によつて詳細な調査・研究がなされているのでその成果が待たれる。

これらの事から広域的な構造的なひずみの場において、火成源のあるものがひずみに刺激され下からつき上げを起し、割れ目の発達した緻密な岩石を破砕して地震を起していると考えられる。そしてその火成源の物質とは、新しいいわゆる活火山性のマグマではなく、火山活動の末期のもので、少なくとも地表にあらわれたさい遊離炭酸と Cl^- を多量に放出する熱水性のものと考えられ、岩石の自然残留磁気に影響を及ぼすほどの温度のものではないと推定される。そしてこの破砕は、構造的なひずみとバランスをとるために生ずると考えられるが、この観点からすると地変の著しい当温泉を通るほぼ NNW-SSE の地帯(第9図参照)では41年8~9月の間につき上げが地表まで達し、岩盤は完全に破砕されたとみられる。(この地帯は地質学的な構造線に相当するともいわれている。) その結果、この地帯のごく浅い自由面地下水は、下からの炭酸ガスの供給によつてガス圧が高まるにしたがい相対的に地下水位が上昇して各地に湧水・温泉徴候等の現象を起したが、しだいに地下水そのものにもガスがとけこみ、遊離炭酸・ Cl^- 等を多量に伴うものになつてきたのではないかと考えられる。そして、広範囲にわたる構造的なひずみの場につき上げを起し、そのため地震を発生させた熱水の量がひずみの場の大きさに比べはるかに少なく、熱水によるつき上げが完了してもまだ限界を越えるひずみを残している場合には、いわゆる構造的な地震がその後も発生するであろうし、反対に貯留されている熱水の量が構造的なひずみを解消しうるだけの十分な量を有するか、または補給がある場合には、比較的小さいいわゆる群発地震のみが発生することで終息するのではないかと考えられるのである。

以上松代地震と温泉との関係について私見を述べたが、筆をおくに当たり、未発表の資料をいただきいろいろご指導いただいた地質調査所中村久由博士、東京都立大学野口喜三雄教授、竹花地震観測所長・相原奎二・山岸登両氏はじめ気象庁地震観測所の方がたのご好意に対し厚く御礼申しあげる。

引用文献

- 1) 飯島南海夫：長野県の温泉の地質学的考察——とくに山ノ内温泉群について、志賀高原生物研究所研究業績, No. 2, p. 3
- 2) 森本良平：松代地震の一年, 自然, Vol. 21, No. 10, p. 41, 1966
- 3) 水上武：火山, 現代の自然観, No. 2, 地球の構造, p. 236
- 4) 久保寺章：火山地震, 火山, Vol. 10, No. 2, p. 97, 1965
- 5) 東京管区气象台・長野地方气象台：地震調査報告, No. 1, p. 16, 1966; No. 2, p. 16, 1966
- 6) 力武常次：松代地震のその後, 科学朝日, 1966年12月号, p. 36
- 7) 行武毅・萩原幸男：火山の磁気, 火山, Vol. 10, No. 2, p. 102, 1965