

1995年兵庫県南部地震後に生じた 淡路島の湧水

佐藤 努¹⁾・高橋 誠¹⁾・松本則夫²⁾・佃 栄吉¹⁾

1. はじめに

1995年1月17日の兵庫県南部地震の直後から、淡路島北部の各地、特に活断層付近において大量の湧水が生じ、3ヵ月以上が経過してもその大部分の場所で水がこんこんと湧き出しています。その温度はおおよそ15~20°Cで、湧水ごとにはほぼ一定の値を保っています。地震発生当時の外気温は5°C程度であったため、湧水はかなり温かく感じられ、当初「温泉が湧いたのでは？」と騒がれました。我々の調査によって、残念ながらほとんどの湧水は温泉ではないことが判明しましたが、「どうして大量に湧水が生じたのか？」という疑問は、はっきりとは解明されていません。本報告ではこれらの湧水について、湧出場所や中に含まれる主要化学成分の濃度などを明らかにしました。そしてこれに基づいて、湧水発生の原因や地震前の変化の有無などについて考察したいと思います。

2. 地下水に関する変化の概要

1995年兵庫県南部地震に伴う湧水は、淡路島だけに起きた現象なのでしょうか？神戸地域も含めて震源域からほぼ30 km 以内の地域において、地下水位の上昇や河川の増水が起こったという報告(田中ほか, 1995)もあります。これによると湧水の発生は淡路島だけにしか報告されていませんが、神戸地域の井戸についての詳しい調査結果(石井ほか, 1995)によると、神戸地域にも地震後に自噴を起こした井戸があるようです。淡路島に限らず余震域では、地震に伴って地下水の帯水層内の水圧がかなり

高くなると予想されます。

地震前から行われていた地下水の連続観測の結果も、幾つか報告されています。その中でも次の3例は、地震の前の変化を捉えた貴重なものです。

- 1) 神戸地域の地下水中の塩化物イオン濃度が、地震の5ヵ月前から徐々に増加した(Tsunogai and Wakita, 1995)。
- 2) 六甲高雄観測点の湧水量が、地震の2ヵ月前から徐々に増加した(京都大学理学部防災研究所地震予知センター, 1995)。
- 3) 西宮市において、井戸水のラドン濃度が地震の2ヵ月ほど前から徐々に増加し、10日前にはさらに急増した(Igarashi et. al., 1995)。

地質調査所では、静岡県を中心として地下水の連続観測を行っています。地震直後、その中の2つの観測井(静岡市草薙観測井と榛原町榛原観測井)において、急激な水位低下(草薙: 13.6 cm; 榛原3.5 cm)が記録されました。震源から300 km 以上も離れた地域にも、地震は水位に変化を起こしているのです。京都大学理学部防災研究所地震予知センターでは、このような地震に伴う地下水変化の分布を調べるためアンケート調査を行いました。その結果、特に水位の上昇が起きた地点は、「縮み」の地殻歪変化が予想される領域内に多かったことがわかっています(西村ほか, 1995)。

以上が現時点までに明らかになっている地震に伴う地下水の変化ですが、淡路島においても以下の2点について明らかにされるべきでしょう。

- 1) 地震前に地下水に何か変化が生じていたのか？
- 2) 湧水の発生は地殻歪変化と関係があるのか？

1) 地質調査所 環境地質部
2) 地質調査所 地質情報センター

キーワード: 兵庫県南部地震, 淡路島, 湧水, 地下水, 活断層

1)について、現地の聞き取り調査では残念ながら成果を得ることができませんでした。しかし、地震前から湧き出していた清水の化学組成が、地震の後にわずかに変化していたことが本調査によって明らかになっています。このことについて、6.において詳しく述べたいと思います。また、2)については7.において考察します。

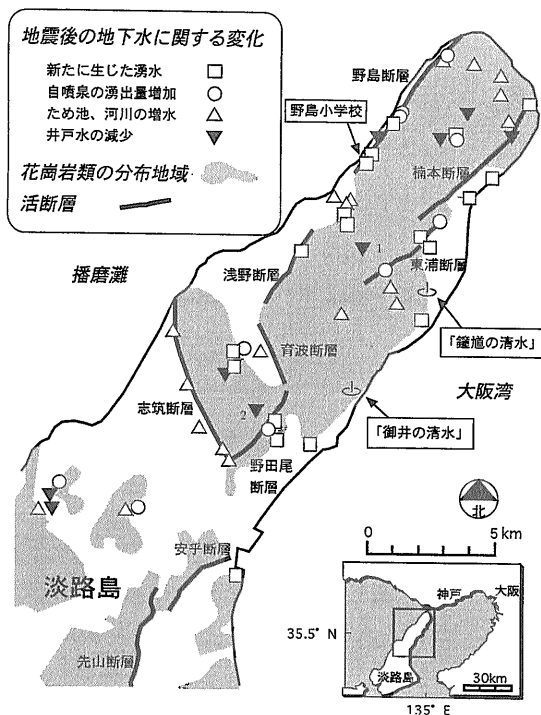
3. 淡路島北部の湧水調査

淡路島北部における湧水調査は、1995年1月20～24日、同年2月10～14日、同年3月7～9日の3回行いました。時間が限られているため、まず各市町村の防災・消防・水道担当の方々を訪問し、湧水場所についての情報を得ました。現地においては、湧水の温度、pH、導電率の測定を行い、ポリびんに湧水を採取し、実験室において主要化学成分濃度を分析しました。

4. どこで水が湧出したのか？

第1図は、現地における聞き取り調査から得られた地下水に関する変化の分布です。湧水場所がはっきりと確認でき、現地で「地震後に新たに生じた」という証言が得られたものについては□印で、以前から湧水があったが地震後に明らかに湧出量が増加したものについては○印で示しています。当然のことながら、これらの変化が生じた下流域ではため池や河川の増水が起きています。△印は、ため池や河川の増水が見られたがその原因が不明であるものや、湧水が原因と思われるがその場所が特定できなかったものを示しています。

第1図中には、花崗岩類や活断層の分布もそれぞれ網掛けや太線で示しました。これらの分布と地下水変化の分布とを比較すると、湧水が生じたり湧水量が増加した場所は、主に活断層上や花崗岩類と周辺の地層(大阪層群や神戸層群などの第三紀層)との境界に位置することがわかります。断層面や地質境界面は一般に透水係数が高く、水が通りやすい場所です。地中に圧力が加えられた時には、岩盤中に蓄えられていた地下水の放出口になると考えられ、湧水の分布が活断層や地質境界に沿っているのはこうした原因によるものと思われる。



第1図 1995年兵庫県南部地震に伴う地下水等の変化の分布。地震後に大量の湧水が発生し、一方で井戸水が減少した(仁井▼1と長沢▼2で顕著な減少が見られた)。主要な活断層の位置(太線)と花崗岩類の分布(網掛け)は5万分の1地質図幅「明石」「須磨」「洲本」より。

湧水が生じた一方、地下水位が顕著に減少した地域もあります(第1図中▼印)。特に野島断層の南端に近い仁井(▼1)では100本以上の井戸が涸れ、野田尾断層の北に位置する長沢(▼2)ではため池や井戸の水位が広い範囲で低下し、どちらも渇水が深刻な問題となっています。このような地域の下流では大量に湧水が生じている場合が多いため、湧水による地下水位の低下が渇水の原因であると思われる。具体的な因果関係は現在調査中です。

5. 湧水はどんな化学組成？

第1表は、淡路島北部で新たに生じた湧水の中でも典型的な化学組成を持つ野島小学校裏の湧水の成分表です。地震断層である野島断層は、野島小学校の東側およそ50mをほぼ北東-南西方向に走り、1mほどの右横ずれを引き起こしました(栗田ほか、1995)。断層のすぐ東側には農業用のため池、泉池

第1表 野島小学校裏の湧水の主要化学成分濃度

採水場所 兵庫県津名郡北淡町野島養浦 泉池
 採水日 1995年1月21日
 温度 17.8 °C
 導電率 454 μ S/cm (25°Cの値として補正)
 pH 7.20

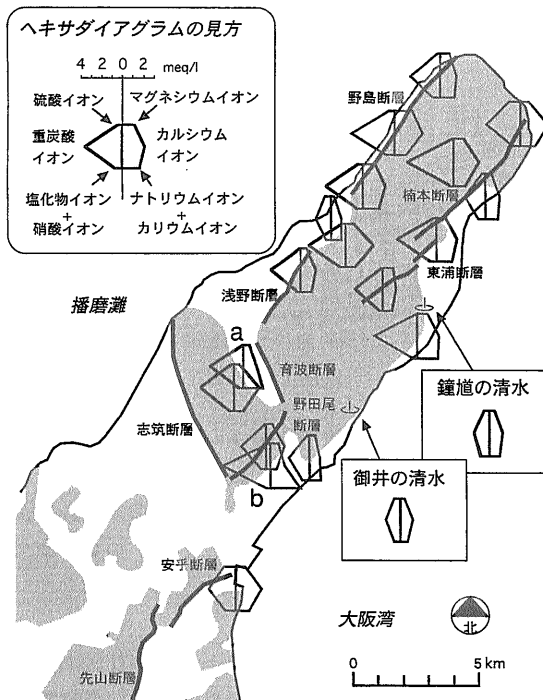
| 主要イオン成分 | mg/l | meq/l |
|-----------|------|-------|
| 塩化物イオン | 27.0 | 0.76 |
| 硫酸イオン | 23.1 | 0.48 |
| 硝酸イオン | 0.01 | 0.00 |
| 重炭酸イオン | 220 | 3.60 |
| フッ化物イオン | 0.9 | 0.05 |
| 陰イオン合計 | 271 | 4.89 |
| ナトリウムイオン | 34.3 | 1.49 |
| カリウムイオン | 3.62 | 0.09 |
| カルシウムイオン | 43.1 | 2.15 |
| マグネシウムイオン | 13.9 | 1.15 |
| 全鉄* | 1.35 | |
| 陽イオン合計 | 96 | 4.88 |
| 合計 | 367 | |

* 全鉄の分析に用いた試料は1995年2月12日に採取

と泉中池があり、地震前は水がない状態でしたが、地震直後に大量の水が池の底から湧出してすぐに満水となり、下流の野島小学校が避難所となっていたために大騒ぎとなりました。成分表にある湧水は、泉池から採取されたものです。

まず温度は17.8°Cで、1995年1月に淡路島洲本測候所で観測された月平均気温5.2°Cと比べるとかなり高い値です。このことからこの湧水は、ため池が漏水したり河川水が地割れにしみこんだりしてできたものではなく、長い間地中に滞留して温められた地下水が湧き出したものであることがわかります。「温泉では？」という問いに対してですが、温泉法で規定されている25°Cを越えていませんので、温度的には温泉ではありません。温度以外の測定値については、pHの値は中性であることを、導電率の値はそれほど濃い水ではないこと(参考：つくば市の水道水の導電率は300 μ S/cm程度)を示しています。

次に主要化学成分濃度ですが、冷泉の可能性という観点から見ると、濃度が法律上の基準に達した成分が1つもない(ただし本研究で分析した成分に限る：第1表)ことから、この湧水は冷泉とも呼ばれません。最も濃い成分は重炭酸イオンで、もし25°C以上であればカルシウム-ナトリウム-炭酸水素塩泉(単純泉)と呼ばれる成分です。この成分的特徴は、



第2図 湧水の主要化学成分濃度の分析結果。2カ所(a：生田尻, b：生穂)においてフッ化物イオン濃度が2 mg/lを越えている。

淡路島北部で生じた湧水に共通して見られました。

このような主要化学成分濃度を視覚的にわかりやすく図にしたものが、ヘキサダイアグラムです。第1表の野島小学校裏の湧水の組成をヘキサダイアグラムで示すと、第2図左上の凡例にあるような形になります。上で述べたようにこの湧水は重炭酸イオンに富む組成であるため、重炭酸イオンの部分が突出し、左側がとがった形をしています。図中の他の湧水の形も凡例と同様に左側がとがっており、形もよく似ています。よって淡路島北部で生じた湧水は、野島小学校裏の湧水と良く似た化学組成を持つことがわかります。温度や導電率もそれぞれ15~20°C, 300~450 μ S/cmの範囲に収まっています。

それでは、どうしてこのように湧水の化学組成が似ているのでしょうか？。我々は、同じ種類の岩盤(ここでは花崗岩類)から湧き出した水であるためと考えています。

湧水の元は雨水で、これが地中にしみこみ地下水となってやがて地上に湧出します。つまり湧水の化学組成は、雨水に含まれている成分と地中で水にと

第2表 地震前後における清水の主要成分濃度変化

| 清水名 | 採取日 | 温度 ℃ | 導電率 μS/cm | pH | 重炭酸 イオン mg/l | 塩化物 イオン mg/l | 硝酸 イオン mg/l | 硫酸 イオン mg/l | ナトリウム イオン mg/l | カリウム イオン mg/l | カルシウム イオン mg/l | マグネシウム イオン mg/l |
|-------|-----------|---------|--------------|-----|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| 鐘崖の清水 | | | | | | | | | | | | |
| 地震前* | 1994.8.19 | 15.8 | 240 ** | 6.5 | 60 | 28.3 | 5.1 | 26.7 | 20.1 | 2.10 | 24.0 | 5.1 |
| 地震後 | 1995.1.24 | 14.9 | 256 *** | 7.5 | 83 | 23.9 | 3.5 | 20.9 | 20.0 | 1.85 | 23.9 | 5.1 |
| 御井の清水 | | | | | | | | | | | | |
| 地震前* | 1994.8.19 | 15.7 | 231 ** | 7.1 | 67 | 21.9 | 5.0 | 22.4 | 17.5 | 2.80 | 23.2 | 5.3 |
| 地震後 | 1995.2.13 | 14.9 | 249 *** | 8.1 | 82 | 19.3 | 4.1 | 25.2 | 17.0 | 2.16 | 25.9 | 5.1 |

* データは波毛・西村(1994)による ** 18℃の値として補正 *** 25℃の値として補正

け込む成分によって決まります。主要化学成分の場合、雨水に含まれている成分はわずかです。地中でとけ込む成分によって湧水の化学組成がほぼ決まり、これは岩質によって異なります。つまり成分が似ている湧水は、同じ岩質の地層から湧出していることが多いのです。

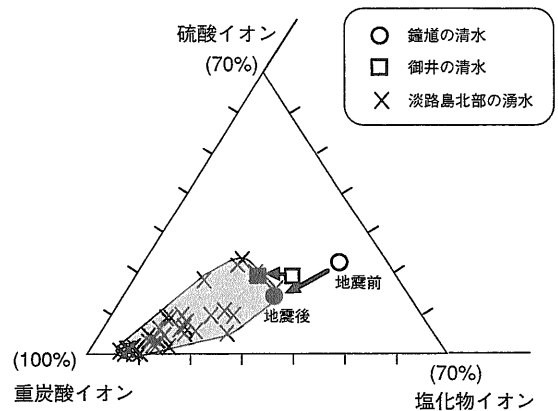
淡路島北部の湧水は、そのほとんどが花崗岩類の分布する地域で湧出し、それ以外の地域からはほとんど湧出していません。また湧水によっては、花崗岩地域の地下水に特徴的なフッ化物イオンが比較的高濃度(～3 mg/l : 普通 1 mg/l 以下)で含まれているものもあります。よって湧水の大部分は、花崗岩類中に含まれていた間隙水であったと考えてよいと思われれます。

なお温泉法では、ふっ素イオンが2 mg/kg 以上含まれている湧水を温泉としています。この基準を満たすものは、第2図中のaとbの2カ所の湧水です。bは地震後にできた湧水のようなのですが、aは昔から湧いていた場所です。地震によってフッ化物イオン濃度が上昇したのかどうかは、明らかではありません。

6. 清水における地震前後の化学組成の変化

第2図中の「鐘崖の清水」と「御井の清水」の両清水において、我々は地震に伴う濃度の変化を捉えることができました。波毛・西村(1994)によって、地震前の主要化学成分濃度が報告されていたおかげでもあります。

第2表は、地震後に両清水の採水・分析を行った結果と地震前のデータとを比較したものです。地震前後で濃度が変わった成分は両清水に共通してお



第3図 湧水の陰イオン成分三角ダイアグラム。地震前のデータは波毛・西村(1994)による。

り、pHと陰イオン成分(重炭酸イオン、塩化物イオン、硝酸イオン、硫酸イオン)です。陽イオン成分は、ほとんど変化していませんでした。また、導電率は補正温度が異なるため、単純に比較することはできません。変化した成分の中でも最も変化が大きかったものは重炭酸イオンで、両清水ともに30%近くも濃度が増えています。逆に他の陰イオンは濃度が減少しており(御井の清水の硫酸イオンを除く)、陰イオン成分中のバランスが変化しています。pHの値の変化は、これに伴うものと思われます。

この陰イオンのバランスの変化がよくわかるように、第3図において三角ダイアグラム上に清水のデータを表しました。図中○印は鐘崖の清水、□印は御井の清水を示し、白抜きは地震前、黒塗りは地震後の値です。×印は地震後に採取した淡路島北部の湧水を示し、その範囲を網掛けで示してあります。この図から、両清水の陰イオン組成が地震後に

網掛け部分に近づいたことがわかります。このことから清水の陰イオン成分濃度の変化は、淡路島北部で湧出しているような水が地震後に清水に混入したために起きたと思われる。

それでは、両清水の成分変化はいつ起きたのでしょうか？ 鐘馗の清水では「地震直後に急に湧出量が増えた」という証言が得られていますので、成分変化はその時に起きた可能性が高いと思われます。しかし、御井の清水では「湧出量の変化はほとんどなかった」という証言しか得られていません。成分は明らかに変化しているので、もしその原因が異なる水の混入によるものならば、湧出量は増えているはずで、先の証言を「地震後に急に湧出量は増えなかった」と解釈すると、成分は徐々に変化したと予想されます。もしかすると神戸の地下水で見られたように(2.参照)、地震の前から変化が起きていたのかもしれませんが、または、湧出量の変化を伴わない原因、例えば炭酸ガスの上昇によって重炭酸イオン濃度が増えたなども考えられないこともなく、いずれにせよさらに詳しい調査を行う必要があります。

7. 湧水の成因について

地震直後、神戸地域の海岸では液状化に伴う噴砂現象が各地で見られました。淡路島北部の海岸でも、同様に噴砂現象が起こっています。このような地震動によってもたらされる現象は、淡路島北部の湧水の発生に関係あるのでしょうか？ 我々は、噴砂現象は大量の湧水のきっかけとなったかもしれないが、根本的な原因は大きな力が地下の岩盤に加わったためであると考えています。

一般に噴砂現象とは、地震動による液状化によって地表付近の間隙水圧が急上昇し、水と共に砂が吹き出す現象で、地盤が軟弱な地域によく起こります。しかし淡路島北部の湧水は、5.で述べたように、この地域の基盤岩である花崗岩類から湧き出しています。一方、花崗岩類より地盤の軟弱な第三紀層からはほとんど湧水が生じていません。つまり間隙水圧の上昇は、地表付近の堆積層よりもより深い場所に分布する基盤岩において著しかったことになり、噴砂現象と同じメカニズムではこれを説明することができません。また、液状化に伴う間隙水圧の

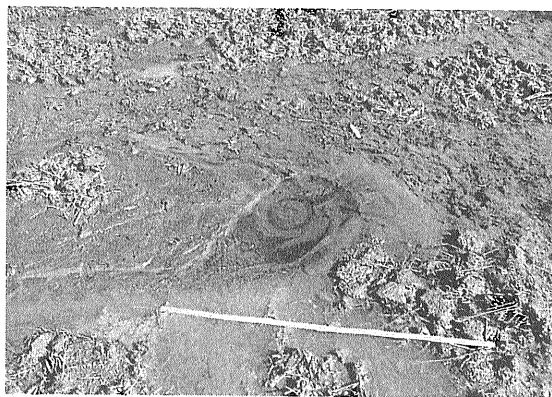


写真1 田に生じた湧水(1月24日)。

上昇は一時的なものであり、3ヵ月以上も続く湧水の原因とは考えられません。地震断層である野島断層のずれは、少なくとも深さ10 kmに及んでいると考えられています。このずれによって基盤岩中に歪変化が生じ、かなり深い範囲において間隙水圧が上昇し、地下水を湧出させる圧力源になったと我々は考えています。

湧水の中には、写真1のように湧出口に砂が堆積しているものも見られました。地震動によって動いた土粒子が湧水によって運ばれ、湧出口にたまったものと思われます。このような小規模の噴砂現象は水みちを広げる役割を果たし、大量の湧水のきっかけを作ったと思われます。

8. おわりに

淡路島北部の湧水の多くは、地震から3ヵ月が過ぎてもなお、地震直後の勢いで湧出しています。4.で述べたように、その上流側では地下水位がどんどん下がり、ため池が空になった地域もあります。このような地表付近に存在した水が湧水に混入すれば、成分は変化すると予想されます。おそらく、農業などを起源とする硝酸イオンが増えるでしょう。逆に、断層のずれによって発生した熱や化学成分が、徐々に運ばれてくる可能性も考えられます。よって、野島断層沿いの湧水は、今後定期的に調査する必要があります。地質調査所では野島小学校裏の湧水において、1月21日にデータロガー付きの投込式温度計を設置し連続的に温度観測を行っています(写真2)。3回目の調査(3月9日)までの結



写真2 野島小学校裏の湧水。水温計を設置し連続観測中(1月21日)。



写真3 んるゆ温泉の新湧出口。直径約3m、深さ3.1mの大穴があいた(1月22日)。

果、温度はほんのわずかずつ上昇し続け、2ヵ月でおよそ0.1°C上昇(17.8→17.9°C)しました。化学組成はほとんど変化していませんが、重炭酸イオン濃度がわずかに上昇しています(220→233 mg/l)。

淡路町のんるゆ温泉では、次のような珍事件が起きました。地震直後に起きた噴砂によってもとの湧出口が詰まってしまう、行き場のなくなった水が20mほど離れた対岸に噴出し、田に直径約3m、深さ3.1mの大穴をあけてしまったのです(写真

3)。付近一帯では、いたるところで小規模の噴砂と湧水が起きており、地震直後の地下の間隙水圧の高さを物語っています。

調査の際、震災直後で恐縮でしたが地元の人々に大変お世話になりました。湧水場所についての情報と共に、「過去の地震でも湧水が生じた」といった話も聞くことができました。残念ながら地震前の変化に関する情報は得られませんでした。今後淡路島全域の湧水調査と共に、地震前の変化に関する調査も行っていく予定です。

文 献

- 栗田泰夫・水野清秀・杉山雄一・下川浩一・井村隆介・木村克己(1995): 1995年兵庫県南部地震に伴って出現した地震断層。地質ニュース, no. 486, 16-20.
- 波毛康宏・西村良司(1994): 名水を訪ねて(27)淡路島の名水。地下水学会誌, 36, 487-492.
- Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N., Sumikawa, K., Tasaka, S., Sasaki, Y., Takahashi, M. and Sano, Y. (1995): Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan. Science, 269, 60-61.
- 石井武政・風早康平・中原正也・佐藤 努(1995): 地下水調査から推定される神戸市周辺に潜在断層。地質ニュース, no. 491, 29-32.
- 西村 進・小泉尚嗣・北川有一・浅田照行・赤松 信(1995): 兵庫県南部地震前後の地下水・温泉水の変化。シンポジウム「阪神・淡路大震災と地質環境」論文集, p120-123.
- 京都大学防災研究所地震予知研究センター(1995): 1995年1月17日兵庫県南部地震(M7.2)観測結果速報。地震予知研究センター研究速報, no. 6, 5-41.
- 田中和広・千木良雅弘・宮川公雄・馬原保典・長谷川琢磨・波毛康宏(1995): 兵庫県南部地震における地下水挙動調査結果。日本地下水学会1995年春季講演会講演要旨, 8-11.
- Tsunogai, U. and Wakita, H. (1995): Precursory chemical changes in ground water: Kobe Earthquake, Japan. Science, 269, 61-63.

SATO Tsutomu, TAKAHASHI Makoto, MATSUMOTO Norio and TSUKUDA Eikichi (1995): Anomalous ground water discharge after the 1995 Kobe (Hyogo-ken-nanbu) earthquake in the Awaji Island, Japan.

〈受付: 1995年4月26日〉