

1995年兵庫県南部地震後に生じた 淡路島の湧水(その2) 湧水量の変化

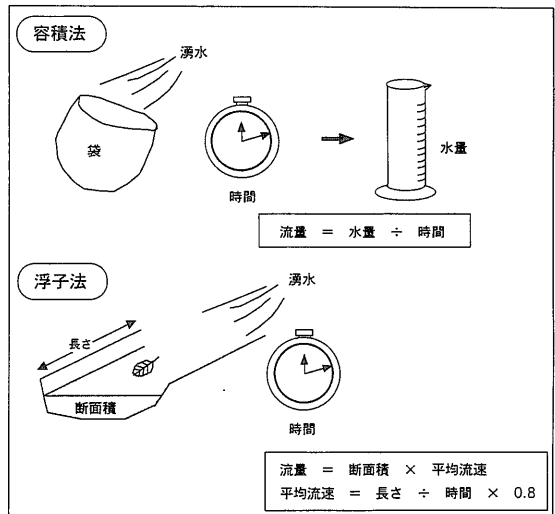
佐藤 努¹⁾・高橋 誠¹⁾

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震の直後に淡路島で大量の湧水が生じたことは、地質ニュース496号の佐藤ほか(1995)においてすでに述べていますが、湧水量がこの1年間でかなり減ってきましたので報告したいと思います。減ったと言いましても、異常に発生した湧水は、1年以上もこんこんと湧き続けています。また島の標高が高い地域では、井戸やため池が涸れたままで深刻な問題となっています。実は、1989年のロマプリエタ地震の際にもアメリカのカリフォルニアで同様な現象が起きていました。Rojstaczer and Wolf(1992)によると、ロマプリエタ地震の後に震央から10~50kmほど離れた地域の標高の高い場所で地下水位が低下し、その下流側では河川の流量が異常に増えたと報告されています。帯水層の透水係数が増加して地下水が通りやすくなったというのが、カリフォルニアで考えられている主な原因です。淡路島で生じた湧水も基本的には同じ原因によるものと我々は考えています。それでは、1年間で湧水量がどれくらい減少したのか、湧水の原因はカリフォルニアの例と比較するとどのように考えられるのか、また以後どのような変化が予想されるのかをこれから述べていきたいと思ひます。なお本報告では、地質ニュース496号の報告を「前回の報告」と記述させていただくことをご了承下さい。

2. 湧水量の測定方法と結果

湧水量の測定は地震発生から4ヵ月後の1995年5月から開始し、第1図の2種類の手法、容積法と浮子法によって測定を行っています。具体的には市川



第1図 湧水量の測定方法(容積法と浮子法:市川, 1973)

(1973)を参考にしました。1995年5月以降の測定は、計4回(1995年9月, 12月, 1996年3~4月, 6月)行っています。

まず容積法ですが、これは少量の湧水に用いました。大きめのビニール袋を用意し、ストップウォッチで時間を測りながら湧水を袋に流し込みます。袋に採った水は容量2リットルのポリ製メスシリンダーで量を測り、時間で割って流量を求め1日あたりの量に換算します。メスシリンダーが無い場合は計量カップなどで代用できますし、樋や排水管などから水が出ている場所は袋を用いずに直に水量を測ることができます。この測定を3回くり返し、平均をとって湧水量としました。

次に浮子法ですが、流量が多く容積法が不可能であった湧水に用いました。まず湧水が流れている

1) 地質調査所 環境地質部

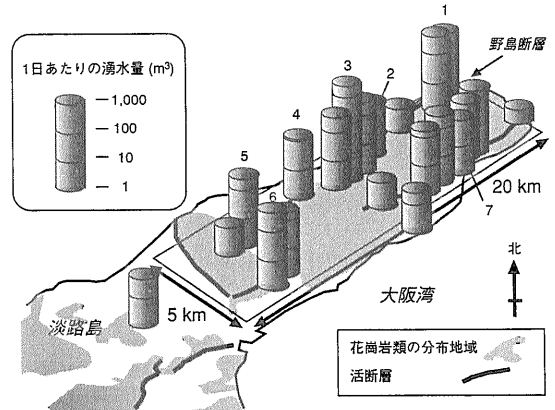
キーワード: 兵庫県南部地震, 淡路島, 湧水, 地下水, 透水係数

下流側で測定場所を探します。流路がまっすぐで深さや幅に変化がない場所が最適です。測定場所が決定了ら幅と深さを測り、流路の断面積を求めます。横方向に深さが変化する場合はこまめに深さを測る必要があります。最後に、風が無いときに浮きを流し、流れた長さや時間を測定します。浮きは空気の抵抗を受けにくいものが最適ですが、本研究では草葉を細かくちぎったものを用いました。計算はまず長さを時間で割って表面流速を求め、0.8倍して平均流速とし、最後に断面積を掛けて流量とします。この方法は容積法と比べると誤差の多い方法ですので測定は5回行い、最高値と最低値を取り除いた3回の測定結果を平均して湧水量としました。

以上の方法によって1995年5月に測定した湧水量を、第2図に示しました。調査を行った場所は、地震後に新たに湧水が発生した場所と湧水量が増加した場所です(佐藤ほか, 1995)。水温等の調査を行っている湧水は合計40カ所ですが、そのうち21カ所において湧水量の測定を行い、測定の結果、総湧水量は1日あたり5,400m³に達しました。図中の番号は、以後の調査においても湧水量の測定を続けた場所を示しています。

第2図で湧水量の全体的な分布をみると、1日あたり100m³を越えている湧水がどの断層沿いにも分布することがわかります。図中5番の西側の断層(志筑断層)沿いには測定値が示されていませんが、これは現地調査が志筑断層まで及ばなかったからです。しかし、志筑断層沿いでも地震後に河川の増水がみられているため、他の断層沿いと同様に地震に伴って湧水量が増加したと思われます。

今回の地震で動いた断層はおおよそ全長50km、幅10kmと推定されており(橋本, 1995)、その南端が活断層として有名になった野島断層です。野島断層は淡路島の北端に位置し(第2図)、地震時に1~2mの右横ずれ変位が地上に現れました(栗田ほか, 1995)。しかし、第2図をみてもこの野島断層沿いが特に湧水量が多いということはありません。よって、活断層が動いたために地下水脈が地形的に変形して異常に湧水が発生したのではなく、地震時に断層から伝わってきた強い地震動や応力によって引き起こされたと考えられます。野島断層以外の断層沿いでも大量の湧水が生じていることが、何よりの証拠となっています。

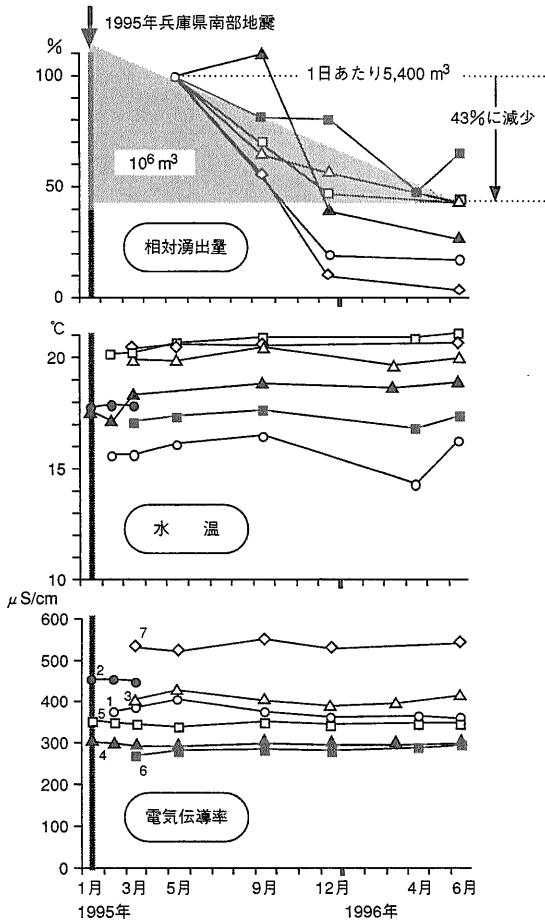


第2図 地震に伴って水量の増えた湧水の湧水量(1995年5月測定)。1から7までの数字は、以後の調査時にも湧水量を測定した場所(1:野島江崎, 2:野島藁浦, 3:小倉, 4:浅野南, 5:生田田尻, 6:野田尾, 7:西)を示す。花崗岩類や活断層の分布は地質調査所発行の20万分の1地質図「徳島」による。図は南北方向に縮めて変形させてあるので注意。

3. 湧水量の時間変化

第3図は湧水量、水温、電気伝導率の時間変化を、第2図の7カ所の湧水について示したものです。湧水量は、1995年5月の測定値を100%とした相対値で示しています。これをみると、湧水量は地震から1年間で顕著に減少したことがわかります。その減少量は湧水によってまちまちですが、ほとんどが50%以下に減少しており、7カ所の総量について計算すると1996年6月の相対値は43%でした。このような湧水量の減少は、湧水付近の地下水位が時間とともに低下してきたことを反映しています。その要因としては、1)大量の湧出で地下水が少なくなったため、2)地下水が通りにくくなった、つまり透水性が減少したため、の2つが考えられますが、詳しくは5.において議論したいと思います。

湧水量が顕著に減少した一方、同期間の水温や電気伝導率にはほとんど変化がありませんでした(第3図)。主要化学組成もほとんどの場所では変化がみられませんでした。図中1番の野島江崎の湧水のみにおいて顕著な化学組成の変化が観測されています(佐藤・高橋, 1996)。その変化は地震前の状態に戻る変化と考えられるため、これからその他の湧水にも化学組成等に変化が生じるのではない



第3図 地震後1年5ヵ月間の湧水量・水温・電気伝導率の変化。湧水量は1995年5月の値を100%として相対値を表示した。三角形の網掛け部分は異常に湧出したと見積られる地下水量(10⁶m³)を示す。番号は湧水場所を示し第2図と同じ。

かと予想しています。

4. 異常湧水の原因—カリフォルニアの例との比較—

1. で少し触れましたが、1989年のロマプリエタ地震の際にはアメリカのカリフォルニアにおいて、今回淡路島でみられた地下水異常とよく似た現象が観測されています。その主な類似点は「地震後、標高の高い地域で地下水位が低下し、その下流側で河川の流量が増加した」という点です。その原因についてRojstaczer and Wolf(1992)は、帯水層の透水係数が増加したため、つまり地下水の通りやす

さが増したためではないかと述べています。さらに彼らはRojstaczer et al.(1995)においてこの結論についての様々な検証を行っており、カリフォルニアで地震によって透水係数が増加したことはほぼ間違いないと思われます。淡路島においても、現象がよく似ていることからこの考えが適用できると我々は考えています。

それではどのようにして透水係数が増加したのでしょうか。Rojstaczer and Wolf(1992)は地震によって帯水層内に細かい亀裂が発達して地下水が通りやすくなったのではないかと述べています。これは地下深いところや硬い岩盤では起こりうる現象と考えられますが、軟らかい堆積物によって構成されている浅層地下水などではあまり現実的な解釈とは思えません。そこで我々は湧水の周囲に堆積していた細かい砂に着目しました。

前回の報告でも述べたように、地震直後の湧水は濁っていたり周囲に細砂を堆積しているものが多く観察されました。これは帯水層を構成していた土粒子の細かい成分が、地下水流によって流されたためと考えられます。細かい土粒子が流されるまでの過程は噴砂現象と同様で、強い地震動によって土粒子の再配置が起き、その時に粒子の細かいものが浮遊したためでしょう。そうであれば帯水層内の詰りがとれたことになり、地下水は通りやすくなると予想されます。地下の浅いところでは、このようにして透水係数の増加が起きたと我々は考えています。

カリフォルニアでは、河川の増水のもととなった湧水を観察することはできなかったようです。もし観察することができたら、水の濁りや細砂の堆積が見られたかもしれません。土粒子の流出による透水係数の増加の可能性は、淡路島で新たに得られた知見であるといえるでしょう。

5. 予想される今後の変化

5.1 湧水量の変化

減少を続けている湧水量は、これからどのように変化するのでしょうか？ これは透水係数の状態によって左右される問題であると予想されます。

まず、地震によって増加した透水係数があるままの状態を維持していたと仮定します。雨等による地

下水の供給量は以前と変わらないとすると、地下水はどんどん下流へ流出を続け、3. の1) で述べたように地下水量が少なくなって湧水量はさらに減少するでしょう。この場合、たとえ地震前から何十年と湧き続けていた湧水であっても、最後には止まってしまう可能性があります。実際に鐘樋の清水やぬるゆ温泉(場所は前回の報告を参照)ではすでに自噴が停止しており、どちらとも地震以前から自噴を続けていた湧水であることからこの典型例であると考えられます。

一方、透水係数が減少した、つまり元に戻りつつある場合はどうでしょうか。3. の2) で述べたようにだんだんと地下水は通りにくくなり、湧水量は減少すると予想されます。この場合、前仮定と比べると湧水が止まる可能性は低くなると考えられます。湧水量がある一定の値に落ちつき、さらに帯水層内で透水係数の減少が起これば標高の高い地域の地下水位は回復に向うでしょう。いつ頃そしてどこまで地下水位が回復するかという問題を解くためには、地域ごとの地下水循環に関する詳しい調査が必要と思われ、これからの研究課題となっています。いずれにせよ帯水層の透水係数の状態を判断するためにも、湧水量は今後も観測を続ける必要があります。

5.2 地下水流出に伴う地殻変動

流失した地下水量が大量である場合には、地盤沈下が起こる可能性も考えられます。地盤沈下は過剰に地下水を汲み上げると起きる現象であることはよく知られていますが、地震活動による大量の湧水によって生じた例も過去に報告されています。1965年から始まった松代群発地震に伴う沈降がその例で、中村(1971)は地震に伴って湧出した地下水量(約 10^7m^3)は沈降水量とほぼ等しいことを指摘しています。それでは淡路島ではいったいどれくらいの量の地下水が流出したのでしょうか。

異常に湧出したと思われる地下水量を、1995年5月の湧水量の測定値と湧水量の変化をもとに、第3図の三角形の網掛け部分のように見積もってみました。まず湧水量が測定可能であった22ヵ所の総湧水量(日量 $5,400\text{m}^3$)が、1996年6月に $2,300\text{m}^3$ ($5,400\text{m}^3$ の43%)まで減少したと仮定します。この43%という数字は、湧水量の測定を継続した7ヵ所の総湧水量が、1995年5月から1996年6月にかけて

43%に減少したことから引用しています。ちなみにこの7ヵ所の総湧水量は、22ヵ所の総湧水量の64%(1995年5月時点)を占めています。

次に、さきほど推定した1996年6月時点の総湧水量(日量 $2,300\text{m}^3$)を「正常な湧水量」と仮定します。「正常な湧水量」とは地震以前に湧出していた量のことを示し、本研究では地震前には測定は行っていないため正確な値は不明です。あえてこのような仮定を行ったのは、地震後に異常に湧出した地下水量を区別するためです。正常な湧水量は、今後、湧水量の変化が落ちついた時点でその値から推定する予定です。現在湧水量はまだ落ちついていませんが、とりあえず1996年6月の湧水量よりも多い部分を異常とみなします。

最後に、地震直後から1995年5月までの湧水量の変化の傾きは5月以降と同じであったと仮定します。このような3つの仮定を置くと、異常に湧出した地下水量は第3図の三角形の網掛け部分で示されることになり、その量はほぼ 10^6m^3 となります。これは松代の例の10分の1の量です。しかしこの地下水量は測定を行った場所のみについての見積もりであり、測定できなかった場所を含めると数倍もしくは1桁近く多い量になるかもしれません。この 10^6m^3 という量は、下限値をあらわしていると考えられます。

第2図をみると、淡路島北部の湧水量の測定を行った地域はほぼ $20\text{km} \times 5\text{km}$ の範囲であることがわかります。先ほど見積もった地下水量 10^6m^3 は、この面積上では10mmの高さになります。よって、もし松代群発地震の時のような地下水流出に伴う地殻変動が起こるとするならば、平均10mmの沈降が予想されます。これは平均の値ですので、地下水流出が激しい地域ではもっと大きな沈降が起こるかもしれません。しかし沈降が起これば帯水層内の透水係数は減少し、地下水が下流側に流れにくくなると予想されます。今後、地盤の動きにも注意を払っていく必要があります。

6. おわりに

1995年兵庫県南部地震後に淡路島で発生した大量の湧水は、1年以上たつてようやく落ちついてきたようです。しかし、標高の高い地域の湧水は深刻

な問題として残されています。本報告ではこういった現象の原因を、カリフォルニアの例と比較しながら考察してきました。その結果、地震によって帯水層の透水性が増加し、地下水が異常に通りやすくなったことが原因であろうと結論付けられました。もしこの結論が正しければ、それはこの現象が淡路島やカリフォルニアに特異的なものではないことを示しています。その他の地域においても、付近で大規模地震が発生すれば当然起こりうる現象です。長期にわたって地下水に影響を及ぼす震災があることを、最後に述べたいと思います。

謝辞：震災対策で多忙の最中、淡路島の方々には大変お世話になりました。心からお礼を述べたいと思います。また洲本高校の波毛康宏先生には、淡路島の清水についていろいろと教えていただき、地質調査所の安原正也、丸井敦尚両氏には流量の測定を指導していただきました。皆様に深く感謝いたします。

文 献

粟田泰夫・水野清秀・杉山雄一・下川浩一・井村隆介・奥村晃史・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.
 橋本学 (1995) : 兵庫県南部地震による地殻変動と断層運動の推定. 地質ニュース, no. 490, 33-40.
 市川正己 (1973) : 流量測定法, 「水文学の基礎」(市川正己編), 古今書院, pp. 67-77.
 中村一明 (1971) : 松代地震から学んだこと—手に入れた地震制御へのデータ—. 科学朝日, 10月号, 127-133.
 Rojstaczer S. and Wolf S. (1992) : Permeability changes associated with large earthquakes: An example from Loma Prieta, California. *Geology*, 20, 211-214.
 Rojstaczer S., Wolf S. and Michel R. (1995) : Permeability enhancement in the shallow crust as a cause of earthquake-induced hydrological changes. *Nature*, 373, 237-239.
 佐藤 努・高橋 誠・松本則夫・佃 栄吉 (1995) : 1995年兵庫県南部地震後に生じた淡路島の湧水. 地質ニュース, no. 496, 61-66.
 佐藤努・高橋誠 (1996) : 淡路島の異常湧水の化学組成変化—1995年兵庫県南部地震による影響—. 地球化学 (投稿中)

SATO Tsutomu and TAKAHASHI Makoto (1996) : Anomalous groundwater discharge after the 1995 Kobe earthquake in Awaji Island - part II: Change in discharge rate -.

< 受付 : 1996年8月29日 >



(写真) 岩の割れ目から飛び出る湧水。写真中央やや左から右へ20cmほど飛び出している。場所は、淡路島楠本川沿い(1995年9月12日撮影)。