



## 地震・断層活動が水理環境に及ぼす影響

阿部 寛信 酒井隆太郎\*

東濃地科学センター  
\*応用地質株式会社

資料番号 : 5 - 10

Effect of Earthquake and Faulting on the Hydrological Environment

Hironobu ABE Ryutaro SAKAI \*

Tono Geoscience Center

\* Oyo Corporation

東濃地科学センターでは、地震・断層活動が地質環境へ及ぼす影響に関する研究を行っている。1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震（M7.2）発生後、淡路島において、低地では新たな湧水や湧水量の増加、高地では地下水位の低下等の地下水理の変化が観察された。

本研究では、兵庫県南部地震の震源断層とされている野島断層周辺の湧水及び地下水の変化について、数値解析手法を用いて地震前後の水理環境を解析し、検討した。その結果、花崗閃緑岩の風化部の透水係数を $5 \times 10^{-3}$  cm/s、新鮮部の透水係数を $1 \times 10^{-5}$  cm/sと仮定した時、地震後4カ月間の湧水状況と地下水位低下を最もよく表していることが分かった。また、野島断層の透水性の変化は地下水理の変化に関係していない可能性を示唆する結果を得た。

The effects of earthquakes and active faults on the geological environment have been studied at the Tono Geoscience Center. The Hyogoken-Nanbu earthquake (January 17, 1995; M7.2) in Kobe and Awaji island caused significant changes in hydrology, involving a large amount of groundwater discharge in low-lying land and drastic water-table lowering (during only about 2-4 months) in elevated land near the epicenter. Simulation of the groundwater behavior in the vicinity of the Nojima fault was analysed to evaluate permeability enhancements. Calculated values such as water level changes were matched in a time series with the hydrological observed data in order to optimize this simulation model.

Results indicate that the increase of hydraulic conductivity ( $5 \times 10^{-3}$  cm/s in weathered granitic rocks) and  $1 \times 10^{-5}$  cm/s in fresh granitic rocks would produce a lowering of the water level at EL 180m, and increase of discharge at less than EL 100m, within four months after the earthquake.

The study also suggested that the change in the hydraulic conductivity in the Nojima fault could not depend on the change in geological hydrology.

キーワード

地震、地下水変化、数値解析、透水係数

Earthquake, Groundwater Level Change, Numerical Analysis, Permeability Coefficient

### 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、地層処分システムに影響を及ぼすおそれのある天然現象のひとつに地震・断層活動がある。このうち、断層の活動は、その周辺の岩盤や地層を破碎・変形させ、地下水の地下深部への侵入や、地下深部の地下水の地表への急激な上昇など水理環境に影響を及ぼす可能性がある。

過去に発生した断層活動に伴う大きな地震の前後には、井戸水の枯渇や湧水量の変化など、急激

な地下水の水理環境の変化が数多く報告されている。1923年の関東地震の際には、熱海において地震発生2カ月前から温泉の異常湧出が見られた<sup>1)</sup>。また、1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、淡路島西部の野島断層が動き、淡路島北部において湧水量の増加や井戸水の水位低下など、地下水の変化が観察された。このような地下水の変化が、地層処分システムに与える影響を検討する必要がある。

本報告では、断層活動に際して地下水が地下深

部から地表へ上昇、湧出したかどうかを検討するため、断層活動に伴う地下水変化の情報量が比較的多い兵庫県南部地震について、地下水変化を再現する数値解析を行った。

## 2. 兵庫県南部地震に伴う地下水変化

1995年1月17日に、神戸から淡路島北部にかけて兵庫県南部地震が発生した。地震直後から数カ月間にわたって、淡路島北部など多くの地域で湧水量の増加や新たな湧水の発生、河川水の増加及び井戸の水位低下がおこった。その後、多くの研究者や研究グループによる野島断層周辺の詳細な現地調査が実施された。その結果、地震後の水位変化は断層近傍に限らないことや、地震発生から3年以上経過した現在も、水位は地震前の状態に戻っていないことなどが分かっている。以下に、淡路島における兵庫県南部地震に伴う地下水の変化について述べる。

### 2.1 淡路島における地震後の地下水変化

淡路島北部は、主に白亜紀の花崗閃緑岩が分布し、これらを新第三紀の神戸層群及び新第三紀から第四紀の大阪層群に属する砂岩、泥岩主体の堆積岩が緩傾斜不整合に覆っている<sup>3)</sup>。この地域の花崗閃緑岩の尾根は北西 - 南東方向に延びており、尾根の北西側は野島断層、南東側は楠本断層によって境されている。今回の地震では、北西側の野島断層が活動しており、断層の東側が西側に

対して最大1.2m上昇、1.9m南西へ移動したとされている<sup>4)</sup>。

地震直後に、淡路島北部一帯で新たな湧水の発生、河川水の増加及び井戸の水位の急激な低下が観測されている<sup>5)~7)</sup>。図1は、地震発生後2年間に観測された湧水及び水位変化地点を示したもので、図1(a)は地質との関係、図1(b)は標高との関係を表している。新たな湧水及び湧水量の増加( )は、主に標高200m以下の低地にみられ、野島断層沿い以外に、楠本断層周辺、花崗閃緑岩と堆積岩との不整合付近でも認められる(図1(a)(b))。湧水量の増加のピークは、地震発生後、0~10日の間という非常に短期間であり、その後は緩やかに減少したとされている<sup>8)</sup>。

標高100~200mの4地点( )では、地震発生から4カ月後までにはすべて自噴が停止している<sup>7),9)</sup>。標高100m以下の低地は、その後も湧水が続いている(図1(b))。一方、標高100m以上の花崗閃緑岩分布域は、井戸やため池の水位が低下しているが、堆積岩分布域の水位低下はおこっていない(図1(a))。これらの堆積岩地域では、宙水が地震後も存在し、地震後の堆積岩の透水性の変化は小さいと考えられている<sup>10)</sup>。

大阪市立大学阪神・淡路大震災学術調査団地下水班による聞き取り調査の結果、地震発生前、仁井地区周辺の花崗閃緑岩中の井戸の水位は、地表とほぼ同レベルか、深くて-10m程度であった<sup>11)</sup>。しかし、地震発生後、これらの井戸はすべて枯れ

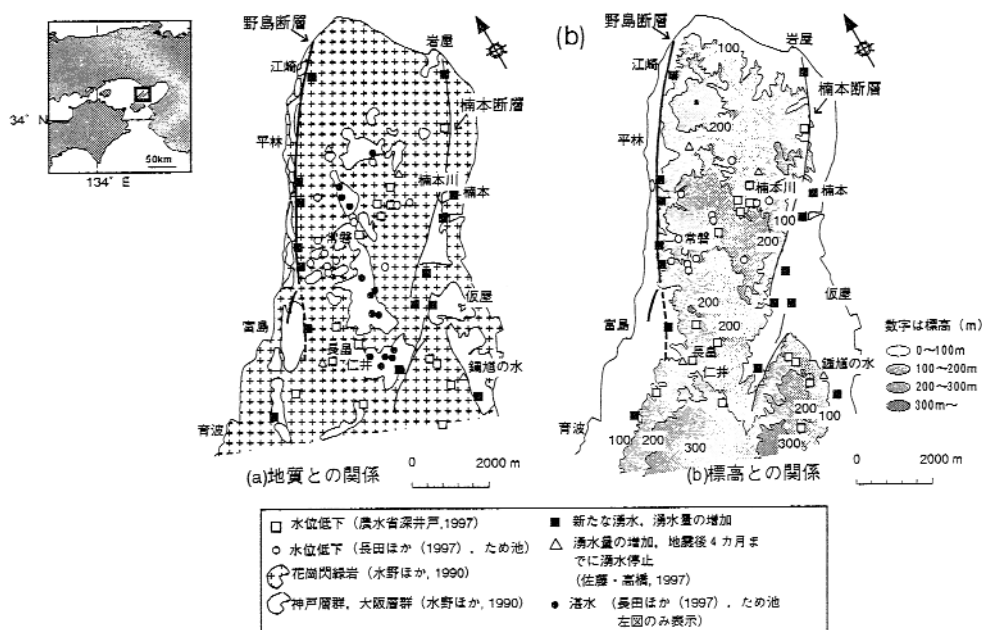


図1 淡路島北部における兵庫県南部地震後の湧水・地下水変化

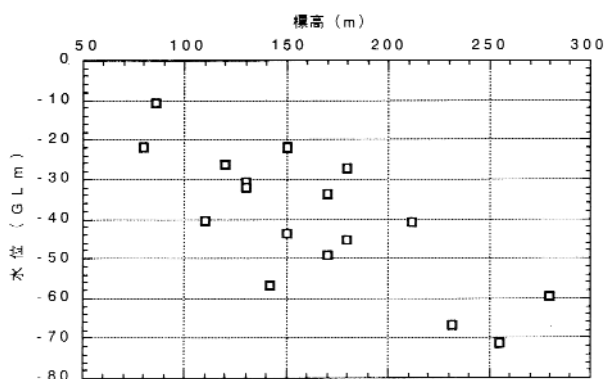


図2 井戸の水位(地震2年後)と標高との関係  
(水位は、淡路島の農林水産省未公表データによる)

た。地震から約2年後の井戸の水位はGL - 70m前後とされている<sup>12)</sup>。これらのことは、仁井地区で、地震後に一時的に100m程度水位が下がり、2年間に数十m回復したことを示していると考えられる。また、淡路島北部楠本川沿いの楠本地区仁井から約4 km北方の楠本川～常磐地区の井戸(仁井相当の標高180m前後の井戸)の水位は、地震発生より2年後の時点でGL - 40～ - 50m、それ以降(1997年3月～1998年6月)約5 m/年の割合で回復している<sup>12)</sup>。図2に地震発生から2年後の深井戸(深さ100～300m)の水位<sup>12)</sup>と標高値との関係を示した。地震前の水位と水位の回復速度を考慮すると、標高の高い地域ほど水位低下量が大きいことを示していると考えられる。

楠本川沿いでは、地震発生1カ月間は湧水があり、その後、標高が高い地点(標高180m前後)から順次湧水が止まり、4カ月後までに、標高180～100mですべての湧水が止まったことが確認されている<sup>7), 9)</sup>。このことから、淡路島北部では、地震発生後4カ月間に、標高100m以上の地点において急激に水位が下がったと推定される。

## 2.2 地下水変化の原因

地震に伴う湧水や、地下水位の変化の主な原因として、以下の可能性が考えられている。

断層周辺の帯水層の透水性の増加に伴う動水勾配の変化<sup>7), 8), 11), 14)</sup>、

地殻歪みの変化に伴う帯水層内の間隙水圧の上昇<sup>5), 9), 13)</sup>、

地震動(P波初動)による水位の変動など<sup>15), 16)</sup>。

先に述べた淡路島北部全体の地下水位の変化の原因を説明するためには、上述した3つの原因のうち、<sup>17)</sup>については、淡路島北部のP波の四象限分布特性から、複雑な地下水挙動を説明すること

は困難である<sup>9), 17)</sup>。長田ほか(1997)<sup>10)</sup>は、星野ほか(1996)<sup>18)</sup>の写真測量による地殻の変位計測データを使用して、面積歪み計算を行い、水位低下の著しかった仁井で最も大きな縮みがみられることを示した。しかし、これは、伊豆半島沖地震の場合とは、逆の歪み傾向を示し、また、伸びを示す標高の高い花崗閃緑岩地域にも水位低下は認められ、地殻歪みとの相関が必ずしもあるとはいえない。また、佐藤・高橋(1997)<sup>7)</sup>は、伊豆半島沖地震の例では、断層モデルから推定された伸び・縮みの地殻歪み変化と水位変化の傾向とがよく一致したが、今回のケースでは、断層モデルから推定される地殻歪み変化分布とは必ずしも一致せず、説明は困難としている。したがって、地下水変化の原因とする可能性も小さい。

次に<sup>19)</sup>について検討する。佐藤ほか(1998)<sup>19)</sup>は、淡路島北部30カ所の湧水の同位体組成(D、<sup>18</sup>O)データから、低地で湧出している水の涵養域は、井戸の水位が低下した標高200～300mに求められ、地下深部から絞り出されたものではないとしている。高地で地下水位の低下、低地で地下水の流出という一連の現象は、1989年にアメリカのカリフォルニアで発生したロマブリエタ地震の際にも観測されている。この現象は、地震時に帯水層の透水性が増大した結果、動水勾配が低下したと考えることにより説明されている<sup>20)</sup>。透水性の増大は、地震後に湧水口の至る所で細砂の堆積や湧水の濁りが観察された<sup>9)</sup>ことなどから、岩盤中の既存の小断層や割れ目が地震時に開口し、充填されていた土粒子が流出したことによる可能性がある。今回の兵庫県南部地震の場合も、ロマブリエタ地震の場合と同様に、地下水位の変化の原因を、帯水層の透水性の変化によると考えると、観察された現象をよく説明できる。

この仮定に基づけば、地震後、既存の割れ目からの土粒子の流出から再び割れ目に土粒子が充填されるまでの間の透水性の変化によって、地震発生から約4カ月間に50～100m(北部においては50～60m)の水位低下と、2年間で数十m程度の緩やかな地下水位の回復も説明できると考えられる。この仮定を検証するためには、帯水層である花崗岩や断層の透水性がどの程度変化したのかを、確かめる必要がある。そこで、野島断層及び花崗閃緑岩の透水係数を変化させた水理解析を行い、現地の地震前後の地下水位の経時変化を最も良く再現することのできる水理パラメータ及び条件の検討を試みた。

3. 地震前後の地下水変化に関する水理解析

3.1 解析手法と解析モデルの設定

本解析では、地下水流動場を多孔質媒体とし、ダルシー則を用いた有限要素法による2次元飽和・不飽和浸透流解析プログラムSETA2Dを使用した。解析に用いた地質構造モデルを図3(a)に示す。解析断面は、井戸の水位変化や湧水状況がよく調べられている淡路島北部の野島江崎から楠本川にかけての長さ8km、鉛直3kmとした(図3(a))。野島断層については、北淡町平林<sup>21)</sup>、梨本のボーリングデータ<sup>22)</sup>、断層露頭などのデータ<sup>23)</sup>から、幅50m、83°の東傾斜とした。花崗閃緑岩は、風化部と新鮮部の2層に区分した。山地部の地表調査やボーリングデータによれば、花崗岩風化部の風化の程度をD~CL(非常に風化が進んで、土砂状あるいは土砂に近い岩)とした場合、厚いところで100m以上ある<sup>3), 11), 12), 24)</sup>ことから、解析上、新鮮部と風化部との境界を標高0mとした。なお、淡路島の南東側には楠本断層が存在するが、今回の地震では活動していないことから、本解析では考慮していない。

要素分割は、総節点数9,329、総要素数8,776とした。地形や断層による地下水流動への影響を見るため、地表付近及び断層近傍で細かく設定した(図3(b))。境界条件は、側方境界(島の東西両端)で水位標高を0mに固定、下方境界は不透水とした。また、不飽和浸透特性は今井ほか(1992)による花崗岩の不飽和特性曲線<sup>25)</sup>を用いた。解析

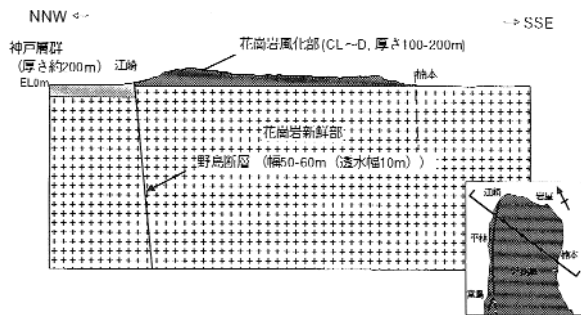


図3(a) 地質構造モデル(江崎 - 楠本)

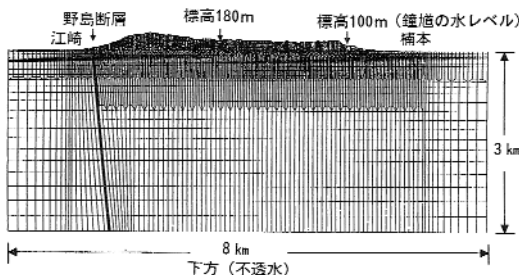


図3(b) 有限要素分割図  
(総節点数: 9,329、総要素数: 8,776)

の基本方針は、まず、地震前の定常状態を再現すること、次に地震直後の水位変化を伴う非定常状態を再現することである。地震直後の非定常状態は、花崗閃緑岩及び断層の透水係数を変え、解析を行った。その際、地震後の地下水変化とその後の回復状況が、現地データと矛盾しないよう、解析を下記の3段階とした。

ステップ1: 地震発生前の定常状態(定常解析)

ステップ2: 地震発生直後~4カ月までの水位変化(非定常解析)

ステップ3: 地震発生4カ月以降の水位回復(非定常解析)

以下に解析条件と解析結果を示す。

3.2 解析条件

解析条件の設定においては、複数の水理定数を与えたケースを設定して解析を行い、現地での観察結果と合う条件について検討した。

ステップ1

楠本川沿いにおいて地震発生1カ月後に標高180~100mの地点でまだ湧水があったとされている。そこで、地震前の定常状態については、標高180mにおいて地下水位がGL0~-10m程度になり、それ以下の標高ではGL0mとなるように条件を設定した。水理定数(透水係数、間隙率、比貯留係数)のうち透水係数のみが解析結果を左右することから、花崗閃緑岩の透水係数を変えた表1に示す4ケースとした。涵養量については、地震前の淡路島洲本における1994年の1年間の降水量805mm<sup>26)</sup>と、瀬戸内海に面する花崗岩地帯の降水量に対する涵養量の割合(約30%)の計算例<sup>(27), 28)</sup>を参考に、一律0.6mm/日とした。

解析の結果、花崗閃緑岩風化部の透水係数が $10^{-4}$ cm/sオーダーの場合(ケース1及び2)は水位が下がりすぎ、同透水係数が $10^{-5}$ cm/sオーダーの場合(ケース3及び4)、標高180mの水位

表1 ステップ1の解析条件と解析結果

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	地震後の参考値	文献
水理定数						
花崗岩風化部	$5.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$	?
花崗岩新鮮部	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$\sim 1.0 \times 10^{-5}$	⑧
野島断層	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-4}$	A
神戸層群(十六坂層群)	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	B
標高180mの水位 (GL - m)	-104	-14	-3	-3	-	-
標高100mの水位 (GL - m)	-51	-10	0(湧水なし)	0(湧水)	-	-

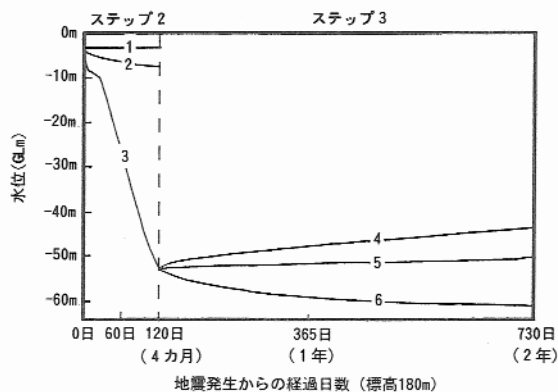
数値は透水係数で単位はcm/s、涵養量: 0.6mm/日  
花崗岩の間隙率: 森田ほか(1997)をもとに透水係数から算出。野島断層の間隙率: 清水(1998)の間隙率データより。  
神戸層群の間隙率: 高橋ほか(1989)より。  
比貯留係数: 花崗岩風化部:  $1 \times 10^{-9}$  (1/cm)、新鮮部:  $1 \times 10^{-8}$  (1/cm)、神戸層群:  $1 \times 10^{-8}$  (1/cm)、野島断層  $1 \times 10^{-5}$  (1/cm)  
花崗岩は、中屋ほか(1997)より、その他はDomenico and Mifflin (1965)をもとに設定した。

はほぼGL0mになる (GL - 3m) しか、ケース 3 は、断層位置での湧水が計算上0m<sup>3</sup>/日となることから、ケース 4 が地震前の定常状態をよく表していると考えられる。

ステップ 2

ステップ 2 では、地震発生直後に花崗岩閃緑岩及び野島断層の透水性が増大したものとし、それぞれの透水係数、間隙率、比貯留係数を変え、地震後 4カ月間の非定常計算を行った。花崗閃緑岩の透水係数については、ステップ 1 で設定した値を下限値とし、上限値については、全国の花崗岩類の透水係数(新鮮部26サンプル:  $1 \times 10^{-4} \sim 10^{-7}$  cm/s、風化部42サンプル:  $5 \times 10^{-3} \sim 10^{-6}$  cm/s) (梅田、1996) を参考とした<sup>29)</sup>。花崗岩の間隙率は、透水係数と間隙率との相関を参考に設定した<sup>30), 31)</sup>。比貯留係数について、花崗閃緑岩には、中屋ほか (1997) による花崗岩の平均的な値<sup>32)</sup> を用い、それ以外はDomenico and Miffilin (1965) の値<sup>33)</sup> を参考に設定した。涵養量は、ステップ 1 と同じく0.6mm/日とした。

表 2 に、ステップ 2 の各ケースの設定条件と、楠本川上流の標高180m及び100mにおける水位の計算結果を示した。また、図 4 に地震後 (標高180m) の水位の経時変化を示した。ケース 1 は、断層のみ透水係数を増大させた場合であり、ケース 2 ~ 6 は花崗閃緑岩と断層の透水係数及び間隙率を増大させた場合である。ケース 1 の解析の結果、断層の透水係数を変えても水位は変化しないことがわかった。一方、花崗閃緑岩と断層の透水係数を、それぞれ1桁ずつ大きくしたケース 2 の場合 (風化部:  $1 \times 10^{-4}$  cm/s、新鮮部:  $1 \times 10^{-5}$  cm/s、断層:  $1 \times 10^{-3}$  cm/s) 水位は低下するが、その低下幅は、標高180mで 4 m (GL - 7m) であった。また、花崗閃緑岩風化部の透水係数を  $1 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3}$  cm/s、新鮮部の透水係数を  $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$  cm/s の範囲で設定したケース 3 ~ 6 のうち、4カ月でGL - 50 ~ - 60mに水位が低下し、



1 ; 断層の浸透係数のみ変えたケース  
 2 ; 断層、花崗岩の浸透係数を1オーダーずつ上げたケース  
 3 ; 断層( $5 \times 10^{-3}$  cm/s)、花崗岩新鮮部( $1 \times 10^{-5}$  cm/s)、花崗岩風化部( $5 \times 10^{-3}$  cm/s)  
 4 ; 断層( $1 \times 10^{-4}$  cm/s)、花崗岩新鮮部( $1 \times 10^{-5}$  cm/s)、花崗岩風化部( $1 \times 10^{-4}$  cm/s)  
 5 ; 断層( $1 \times 10^{-4}$  cm/s)、花崗岩新鮮部( $1 \times 10^{-5}$  cm/s)、花崗岩風化部( $1 \times 10^{-4}$  cm/s)  
 6 ; 断層( $1 \times 10^{-4}$  cm/s)、花崗岩新鮮部( $1 \times 10^{-5}$  cm/s)、花崗岩風化部( $5 \times 10^{-4}$  cm/s)  
 間隙率は表 2、表 3 参照。

図 4 地震後の標高180m地点の水位の経時変化

なおかつ低地における湧水量が増加するのはケース 6 (風化部:  $5 \times 10^{-3}$  cm/s (間隙率10%)、新鮮部:  $1 \times 10^{-5}$  cm/s (間隙率5%)) の場合であった。

図 5 に地震前 (ステップ 1、ケース 4) と、地震後 (ステップ 2 のケース 1、2、6) の全水頭分布解析の結果を示した。ステップ 2 のケース 1、2 では、水位は低下せず、地震前同様、全水頭分布に大きな変化はみられない。ケース 6 では、水位は大きく低下し、水位最高点も島中央に移り、花崗閃緑岩風化部の透水性を変えたことによる影響が現れている。

ステップ 3

ステップ 3 では、地震発生後の4カ月から2年間に水位が回復する過程を再現した。花崗岩風化部 (標高 0 m レベルまで) の地震 2 年後の透水係数の実測値は、 $1 \times 10^{-4}$  cm/s オーダー (北淡町の深井戸10カ所の未公表農水省データ) である。花崗閃緑岩新鮮部の実測データはない。そこで、清水 (1998) による間隙率のデータ<sup>24)</sup> から透水係数

表 2 ステップ 2 の解析条件 (透水係数、間隙率) と地震 4 カ月後の水位の計算値

	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4	ケース 5	ケース 6
花崗岩風化部	$1.0 \times 10^{-5}$ (5%)	$1.0 \times 10^{-4}$ (10%)	$1.0 \times 10^{-3}$ (10%)	$5.0 \times 10^{-3}$ (20%)	$5.0 \times 10^{-3}$ (20%)	$5.0 \times 10^{-3}$ (10%)
花崗岩新鮮部	$1.0 \times 10^{-6}$ (3%)	$1.0 \times 10^{-5}$ (5%)	$1.0 \times 10^{-5}$ (5%)	$1.0 \times 10^{-5}$ (5%)	$1.0 \times 10^{-4}$ (10%)	$1.0 \times 10^{-5}$ (5%)
野島断層	$5.0 \times 10^{-3}$ (20%)	$1.0 \times 10^{-3}$ (20%)	$1.0 \times 10^{-3}$ (20%)	$5.0 \times 10^{-3}$ (20%)	$5.0 \times 10^{-3}$ (20%)	$5.0 \times 10^{-3}$ (20%)
神戸層群 (十大阪層群)	$1.0 \times 10^{-5}$ (10%)	$1.0 \times 10^{-5}$ (10%)	$1.0 \times 10^{-5}$ (10%)	$1.0 \times 10^{-5}$ (10%)	$1.0 \times 10^{-5}$ (10%)	$1.0 \times 10^{-5}$ (10%)
標高180mの水位 (GL - m)	- 3	- 7	- 22	- 28	- 33	- 52
標高100mの水位 (GL - m)	0 (湧水)	- 5	- 16	- 26	- 28	- 33
湧水量の変化 (断層地点)	-	-	-	+	+	+

数値は透水係数で単位はcm/s、( ) 内の数字は間隙率、涵養量: 0.6mm/日、湧水量: + : 地震前より湧水量が増加、- : 地震前より湧水量が減少  
 花崗岩の間隙率: 森田ほか (1997) をもとに透水係数から算出。野島断層の間隙率: 清水 (1998) の間隙率データより。  
 神戸層群の間隙率: 高橋ほか (1989) より。  
 比貯留係数: 花崗岩風化部  $\times 1 \times 10^{-3}$  (1/cm)、新鮮部:  $1 \times 10^{-9}$  (1/cm)、神戸層群:  $1 \times 10^{-8}$  (1/cm)、野島断層  $1 \times 10^{-5}$  (1/cm)  
 花崗岩は、中屋ほか (1997) より、その他はDomenico and Miffilin (1965) をもとに設定した。

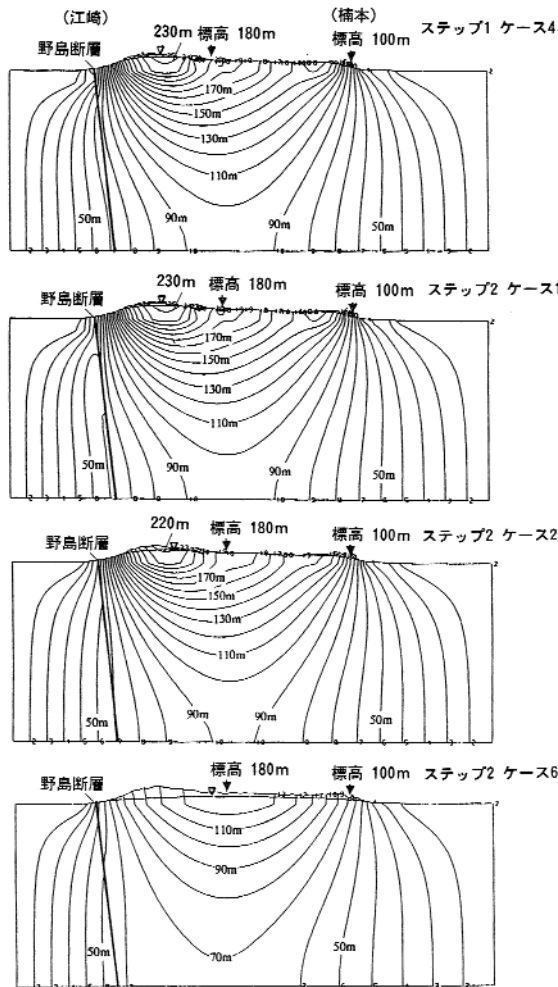


図5 地震4ヵ月後の全水頭分布図と水位(江崎 - 楠本) (ステップ1、ステップ2)

を  $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$  以下と間接的に推定し、参考とした。また、野島断層の透水係数は、北川(1997)による地震2年後の測定値 ( $1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ ) を参考とした<sup>34)</sup>。涵養量については、1995年5月以降の洲本の降水量、年間1300mmを考慮し、換算値<sup>26), 27)</sup> から 1mm/日とした。

ステップ3の解析では、ステップ2のケース5を初期条件とし、2年後までの非定常解析を行った。その際、透水係数は、地震後4ヵ月に突然変化し、その後2年間は一定であると仮定した。表3に2年後の水位、図4に水位の経時変化を示した。ステップ3のケース1、2は、観察された水位回復を再現していない。ケース3の場合、水位が緩やかに回復し、最も観測データに近い結果となった。

また、野島断層の透水係数を地震発生前後を通じて  $1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$  に設定し、花崗閃緑岩風化部及び新鮮部の透水係数を変化させて、同様に地震発生前の定常状態から地震後3年までの水理の変化について、ステップ1~3、ケース1~6の解析を行った。表4に各ステップ及び各ケースでの解析条件を示した。解析の結果、水位最高点において、地震後2ヵ月間で数十mの水位の低下、さらには、その後の水位の回復を最もよく表しているのは、花崗閃緑岩の透水係数が、風化部： $3 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ 、新鮮部： $1 \times 10^{-5} \text{cm/s}$  のケース5の場合であった。この時の花崗閃緑岩の透水係数は、表2のステップ2、ケース5に示す野島断層の透水係数が  $5 \times 10^{-3}$  の場合の解析結果とほぼ一致している。このことは、地震による野島断層の透水

表3 ステップ3の解析条件と解析結果

	ケース1	ケース2	ケース3	地震後の参考値	文献
水	$5.0 \times 10^{-4}$ (15%)	$1.0 \times 10^{-4}$ (10%)	$1.0 \times 10^{-4}$ (10%)	$1.0 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$	1)
理	$1.0 \times 10^{-6}$ (3%)	$1.0 \times 10^{-6}$ (5%)	$1.0 \times 10^{-6}$ (3%)	$\sim 1.0 \times 10^{-5}$	2)
定	$1.0 \times 10^{-4}$ (20%)	$1.0 \times 10^{-4}$ (20%)	$1.0 \times 10^{-4}$ (20%)	$1.0 \times 10^{-4}$	3)
数	$1.0 \times 10^{-5}$ (10%)	$1.0 \times 10^{-4}$ (10%)	$1.0 \times 10^{-4}$ (10%)	$1.0 \times 10^{-5}$	4)
2年後の標高180mの水位(GL-m)	61	50	46	40~50	5)

数値は透水係数で単位はcm/s、( )内の数字は間隙率、涵養量：1mm/日、文献1)~4)は表1に同じ。5)は農林水産省観測データ  
 花崗岩の間隙率：森田ほか(1997)をもとに透水係数から算出。野島断層の間隙率：清水(1998)の間隙率データより。  
 神戸層群の間隙率：高橋ほか(1989)より。  
 比貯留係数：花崗岩風化部： $1 \times 10^{-9}$  (1/cm)、新鮮部： $1 \times 10^{-8}$  (1/cm)、神戸層群： $1 \times 10^{-5}$  (1/cm)、野島断層  $1 \times 10^{-5}$  (1/cm)  
 花崗岩は、中屋ほか(1997)より、その他はDomenico and Mifflin(1965)をもとに設定した。

表4 野島断層の透水係数を一定とした時の各ステップの解析条件

		ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6
ステップ1	計算時間(月)	-	-	-	-	-	-
	花崗岩風化部	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$
	花崗岩新鮮部	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$
	野島断層	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$
ステップ2	計算時間(月)	4	144(定常)	4	2	2	2
	花崗岩風化部	$3.0 \times 10^{-3}$	$3.0 \times 10^{-3}$	$3.0 \times 10^{-3}$	$3.0 \times 10^{-3}$	$3.0 \times 10^{-3}$	$3.0 \times 10^{-3}$
	花崗岩新鮮部	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-4}$
	野島断層	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$
ステップ3	計算時間(月)	32	-	32	34	34	34
	花崗岩風化部	$5.9 \times 10^{-4}$	-	$5.9 \times 10^{-4}$	$5.9 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-5}$
	花崗岩新鮮部	$1.0 \times 10^{-6}$	-	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-6}$
	野島断層	$1.0 \times 10^{-4}$	-	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$

数値は透水係数で単位はcm/s

性の変化から、地震後の水位の変化を説明することが困難であることを示唆している。

#### 4. おわりに

兵庫県南部地震の震源断層とされている野島断層周辺の地表に湧出した地下水が、地下深部から上昇したもののなかのどうか検討するため、地表付近で観察された地下水変化に関する情報をもとに、地震前後の水理環境の変化を再現する数値解析を行った。今回の解析では、地震直後の地下水変化の主な原因は、地下深部の野島断層の透水係数の変化ではなく、地表付近の花崗閃緑岩の透水係数の変化である可能性が高いという結果を得た。また、岩盤の透水係数を数値解析により推定した結果、地震後4カ月間の花崗閃緑岩の透水係数は、風化部で $5 \times 10^{-3}$  cm/s、新鮮部で $1 \times 10^{-5}$  cm/sのオーダーになると推定された。これらの透水係数の値は、地震前の値に対して、風化部で2オーダー、新鮮部で1オーダー増加している。これらの値は、日本国内にみられる花崗岩類の透水係数（新鮮部： $1 \times 10^{-4} \sim 10^{-7}$  cm/s、風化部： $5 \times 10^{-3} \sim 10^{-6}$  cm/s）の範囲内にあり大きな矛盾はない。

以上のように、野島断層では、断層活動時に地下深部から地表へ地下水が急激に上昇したことを支持する証拠はなく、野島断層の活動による地下水理の変化は地表付近に限られると結論される。したがって、地下約100m以深の地層処分システムへの影響は、断層から適切な距離を保つことにより避けられる。今後は、本解析のモデルの妥当性をより高めるために、地下水同位体組成、地球化学等のデータを加味した総合的な解析を行う必要がある。

#### 謝辞

本解析は、地質調査所の佐藤努氏、佐藤工業株式会社古屋和夫氏、児玉敏雄氏の協力のもと実施した。ここに厚く謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 力石常次：“地震前兆現象” 東京大学出版会，p.172 (1986)。
- 2) 徳永朋祥：“地震時の地下水変動から推定される淡路島北部地域の水理特性” 応用地質，40，2，p.99-106 (1999)。
- 3) 水野清秀，服部 仁 他：“明石地域の地質、地域地質研究報告（5万分の1地質図幅）”，地質調査所，90 (1990)。
- 4) 中田 高，蓬田 清：“地震断層からみた1995年兵庫県南部地震の震源過程” 月刊地球，号外，13，p.107-116 (1995)。
- 5) 佐藤 努，高橋 誠：“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，496号，p.61-66 (1995)。
- 6) 田中和広，千木良雅弘 他：“兵庫県南部地震における地下水挙

- 動調査結果” 1995年日本地下水学会春季講演会講演要旨，p.8-11 (1995)。
- 7) 佐藤 努，高橋 誠：“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，31，p.89-98 (1997)。
- 8) 高村弘毅，河野 忠：“淡路島における兵庫県南部地震後の湧水・地下水の挙動” 地下水学会誌，38，4，p.331-338 (1996)。
- 9) 石橋弘道，大島洋志 他：“兵庫県南部地震-地質・地盤と災害 - 報告書” 日本応用地質学会阪神淡路大震災調査委員会，p.316-343 (1995)。
- 10) 長田昌彦，徳永朋祥 他：“淡路島北部における地震後の地下水挙動” 日本応用地質学会平成9年度研究発表会講演論文集，p.237-240 (1997)。
- 11) 大阪市立大学阪神・淡路大震災学術調査団地下水班：“兵庫県南部地震の温泉を含む地下水への影響、大震災そのとき地質家は何をしたか”(柴崎達雄他編)，東京大学出版会，p.133-147 (1996)。
- 12) 農林水産省データ
- 13) Sibson, H.：“Implication of fault-value behavior and underground waste disposal.” Proc. of the Workshop WC-1 of IGC (1992)。
- 14) Rojstaczer S., Wolf S., et. al.：“Permeability enhancement in the shallow crust as a cause of earthquakes-induced hydrological changes.” Nature，373，p.237-239 (1995)。
- 15) 川辺岩夫：“地震に伴う地下水・地球化学的現象” 地震，2，44，p.341-364 (1991)。
- 16) King C.-Y., Koizumi, N., et. al.：“Hydrogeochemical anomalies and the 1995 Kobe Earthquake.” Science，296，p.38 (1995)。
- 17) 遠田晋次，田中和広 他：“1995年兵庫県南部地震に伴うコサイスミックな地下水挙動” 地震，2，48，p.547-553 (1995)。
- 18) 星野 実，水越 博子 他：“野島地震断層周辺の地殻変動及び被害、地形との関係 - 写真測量による変位量計測データ及びGISによる分析 - ” 国土地理院時報，86，p.20-36 (1996)。
- 19) 佐藤 努，酒井隆太郎 他：“淡路島の異常湧水の酸素・水素同位体比” 地球惑星科学関連学会1998年合同大会予稿集，349 (1998)。
- 20) Rojstaczer S., Wolf S.：“Permeability changes associated with large earthquakes: An example from Loma Prieta, California.” Geology，20，p.211-214 (1992)。
- 21) Ito H.：“Structure and Physical Properties of the Nojima Fault” 一般研究会「断層解剖計画シンポジウム」，p.37-59 (1997)。
- 22) 竹村恵二，村田明広：“断層解剖計画における掘削コアの記載（層序と構造、年代）” 一般研究会「断層解剖計画シンポジウム」，p.115 (1997)。
- 23) 宇田進一，日吉 直 他：“兵庫県南部地震-地質・地盤と災害 - 報告書” 日本応用地質学会阪神淡路大震災調査委員会，p.60-108 (1995)。
- 24) 清水公二：“「野島地震断層」周辺の地盤物性の評価” NEWJEC 技報，10，抜刷，p.27-38 (1998)。
- 25) 今井 久，古屋和夫 他：“立坑周辺地域の地下水流動の計測・評価 水理解析” 立坑掘削影響試験ワークショップ発表論文集，p.33-52 (1992)。
- 26) 気象庁データ
- 27) 百田博宣，嶋田 純 他：“原位置実測データを用いた岩盤内地下水流の解析的検討” 第25回水理講演会論文集，p.391-397 (1981)。
- 28) 佐藤晃一，高瀬恵次：“平野部における地下水の水収支構造” (1990)。
- 29) 梅田浩司：“日本の地盤を対象とした透水係数 データベースの作成” PNC TN96-002 (1996)。
- 30) 森田 豊，渡辺邦夫 他：“風化花崗岩の割れ目系の特性と透水性評価” 月刊地球，19，6，p.381-386 (1997)。
- 31) 渡辺邦夫，関陽太郎：“花崗岩風化に関する地下水流の基礎的性質” 岩石鉱物鉱床学会誌，77，p.37-46 (1982)。
- 32) 中屋真司，小池章久 他：“亀裂性岩盤の比貯留係数の推定に関する一考察” 39，p.201-205 (1997)。
- 33) Domenico, Miffilin：“Water from low-permeability sediments and land subsidence” Water Res. Research，