



# 東濃鉱山周辺における地下水位の地殻ひずみ・気圧応答の周波数特性と地震に伴う地下水位変動の研究

北川 有一 吾妻 瞬一

東濃地科学センター

資料番号 : 8 - 7

A Study on the Frequency Dependence of the Crustal Strain and Barometric Responses of the Water Levels and the Earthquake-related Water Level Changes around Tono Mine in Gifu Prefecture

Yuuichi KITAGAWA Shun-ichi AZUMA

Tono Geoscience Center

陸域地下構造フロンティア研究の地震発生と地下水挙動に関する深地層総合研究は、固体である岩石と流体である地下水や地下ガスによって構成される地殻の地震に関連した変化の解明を目的としている。東濃鉱山周辺の観測井で地殻変動・地下水位・地下ガスなど多項目の測定を行っており、多様な変動を検出した。この論文では地下水位観測で分かったことを中心に報告する。

東濃鉱山周辺のいくつかの観測井では、地下水位が地震・潮汐・気圧に伴う変動を示している。これらの観測結果に基づいて、地殻ひずみと地下水位の関係を計算し、地震時の地下水位変動の大きさを評価し、いくつかの観測井の間の地震に関連した地下水位変動の類似点・相違点を明らかにした。

*The Earthquake/Groundwater Research in Earthquake Frontier Research for Terrestrial Subsurface aims to interpret the earthquake-related changes in the crust, which consists of solid (that is, rock) and fluids (such as groundwater and gases). At many wells in and around Tono Mine, many parameters, such as crustal movement, groundwater level, and gas components, are continuously monitored and many earthquake-related changes have been detected. In this paper, we report findings mainly obtained from groundwater level observation.*

*At some wells in and around Tono Mine, groundwater levels showed tidal, barometric, and earthquake-related fluctuations. Based on these observations, the relationships between crustal strain and groundwater levels were calculated, the amplitude of earthquake-related changes was estimated, and the similarities or differences among the earthquake-related fluctuations at some wells were clarified.*

キーワード

地下水位、潮汐・気圧応答、ひずみ感度、土岐花崗岩、地震関連現象

*Water Level, the Tidal and Barometric Responses, Strain Sensitivity, Toki Granite, the Earthquake-related phenomena*

## 1. はじめに

阪神・淡路大震災を契機に、平成7年6月に地震防災対策特別措置法が成立した。これを受けて科学技術庁においては、傘下の研究機関により地震防災科学技術の研究を行う地震総合フロンティア研究を推進することになった。その一環として、サイクル機構（当時は動燃事業団）東濃地科学センターでは、地下深部での地殻の動きに着目した陸域地下構造フロンティア研究を実施している。陸域地下構造フロンティア研究は地震発生機構の

解明及び新たな地震観測手法の開発を目的<sup>1)</sup>としている。

その中の一つである「地震発生と地下水挙動に関する深地層総合研究」（以下、地震地下水研究）では、地殻の地震に対する応答（前兆現象等）の解明を目的としている。地殻は固体である岩石と、流体である地下水や地下ガスによって構成される多孔質弾性体である。したがって、岩石の物理的性質・地下水の水理的化学的性質・地下ガスの化学的性質の把握及び岩石と地下水・地下ガスの間

の相互作用の理解が必要不可欠であり、地殻内部に起きる現象を理解するには、地盤のひずみ・傾斜変動、間隙水圧の変動、地下水溶存成分・地下ガス成分の変動といった様々な項目をできるだけ同時に測定することが必要である。

地震地下水研究チームでは、岐阜県土岐市に位置する東濃鉱山の坑道内と東濃鉱山周辺の深さ100~200mの観測井(図1、図2)に地下水位(水圧)・地殻変動・地下水溶存ガス成分などの観測点を集中的に配置して連続測定を行っている。東濃鉱山周辺を研究対象領域とした理由は、地層科学研究で掘削した試錐孔の中に地震に対応した地下水位変動がしばしば観測されたものがあり、地殻の地震応答の研究に適していると判断したからである。また、地層科学研究として東濃鉱山やその周辺地域に調査坑道や調査試錐孔を数多く掘削しており、透水性などの地質構造がある程度調べられているというのも大きな利点である。

本報告では地下水位変動に焦点を絞って議論を行う。これまでに見られた地下水位変動には、基盤岩である土岐花崗岩中の地下水位を測定している観測井(SN・3号孔)で何度も観測された地震直後の地下水位低下などの現象がある(そのうちの数例を図3に表示<sup>2),3)</sup>)。今回は、このSN・3号孔観測井とその近傍にある別の観測井(同じ土岐花崗岩の地下水を観測しているTH・8号孔の最深

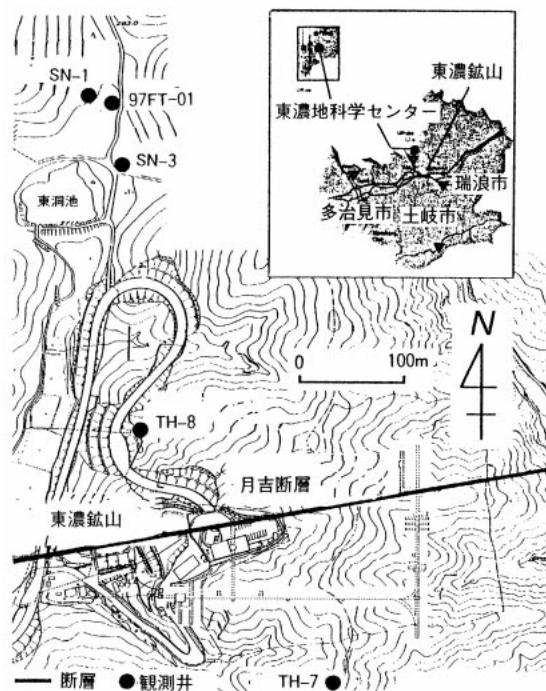


図1 東濃鉱山周辺の観測井配置

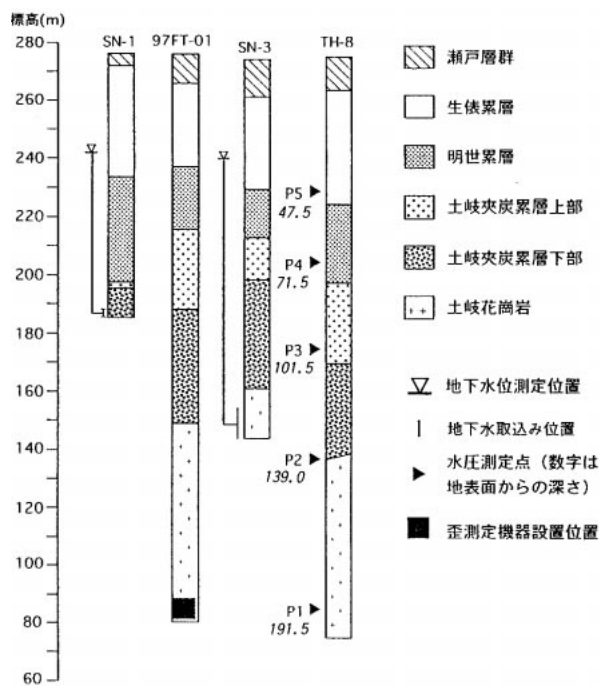


図2 観測井の地質柱状図と地下水位・水圧の測定位置

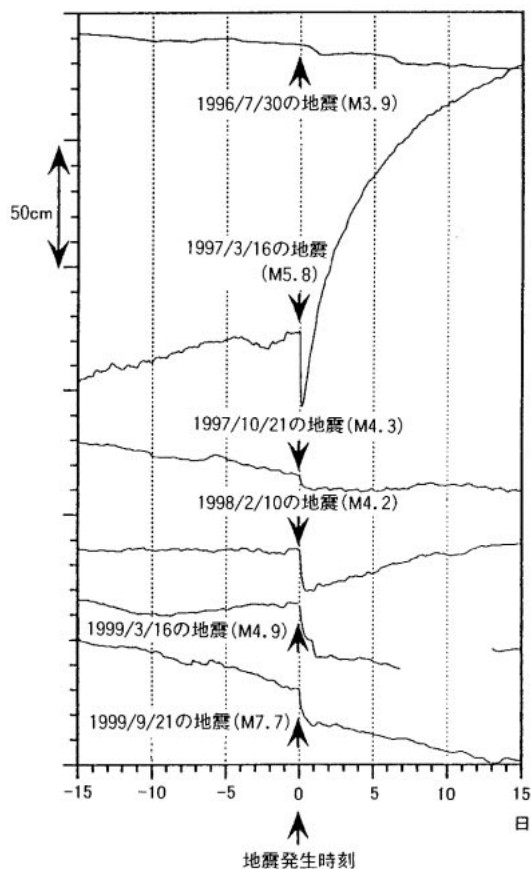


図3 SN-3号孔の地下水位の地震前後の変動(データが抜けている部分は欠測)

部、及び土岐花崗岩の上層にある堆積岩である土岐夾炭累層下部中の地下水を観測しているSN-1号孔)での観測結果を用いる。本報告の特徴は、地下水位の潮汐・気圧・地震波への応答を用いて、広い範囲の周波数にわたる地殻ひずみと地下水位の関係を求めている点にある。なお、地下ガス成分などとの総合的な比較は別の機会に譲る。

2. 観測結果及び考察

本報告で地下水位・水圧データとして使用するものは以下の3つである。

土岐花崗岩中の間隙水圧を地下水位として測定しているSN-3号孔での水位

MPシステム(複数のパッカーを用いて井戸内部を区切る方法)を利用して、複数の深度での地層中の間隙水圧を測定しているTH-8号孔における土岐花崗岩中の水圧(P1)

土岐夾炭累層下部中の間隙水圧を地下水位として測定しているSN-1号孔での水位

また、地殻ひずみデータとして使用するのは、97FT-01号孔の土岐花崗岩中に埋設した石井式ボアホール総合観測装置でのひずみ測定データである。上記の観測井すべては東濃鉾山周辺を横切る月吉断層の下盤(北側)に位置している(観測井配置は図1、観測井の地質柱状図は図2を参照)。

これらの観測井での長期間の測定の結果、地下水位・水圧には、～などの多岐にわたる現象が、個別にあるいは複合して観測されている。

潮汐に対応する変動

気圧変化に対応する変動

地震波に対応する変動

地震直後の地下水位の急な低下

地震後の長期にわたる地下水位・水圧の上昇

地震前の地下水位の上昇

地震という突発現象(非周期的で非正常現象)

に対する地下水位の応答を調べるためには、まず潮汐や気圧変化(周期的な定常変動現象)に対する地下水位の変動などのバックグラウンドとなる現象を把握しておく必要がある。本報告では、まず、～の現象を基に様々な周波数(単位時間当たりの振動数のことで、周期の逆数)における地殻ひずみ変動と地下水位変動の関係(地下水位・水圧の地殻ひずみ応答係数)を計算した。次に、地震に関連した地下水位・水圧変動の大きさを評価し、地震に関連した現象の空間的な広がりを調べた。

2.1 様々な現象における地殻ひずみと地下水位・水圧変動の関係

(1) 潮汐に対する変動

潮汐に関する計算には潮汐解析プログラム“BAYTAP-G”<sup>4), 5)</sup>を用いた。地下水位・水圧が潮汐に対応した変動を示すかどうかは、潮汐固有の成分であるM<sub>2</sub>分潮(周波数約2 cycle/dayの変動現象)とO<sub>1</sub>分潮(周波数約1 cycle/dayの変動現象)が地下水位・水圧に含まれているかどうかで判断した。

SN-3号孔の地下水位は、潮汐に対応した変動を示す。潮汐による地殻ひずみ(ここでは面積ひずみの成分を用いる)と地下水位変動の振幅比(ひずみ感度)を計算すると、10<sup>-9</sup>ひずみに対する水位変動が1.1~1.3mmという関係であることが分かった(表1)。その特徴として、M<sub>2</sub>分潮でのひずみ感度の方がO<sub>1</sub>分潮よりも大きいことが挙げられる。

TH-8号孔のP1での水圧も、潮汐に対応した変動を示す。潮汐による地殻ひずみと水圧変動の振幅比(ひずみ感度)を計算した(表1)。ひずみ感度がSN-3号孔の地下水位より少し大きいだけで、特徴は類似している。

SN-1号孔の地下水位には、M<sub>2</sub>分潮とO<sub>1</sub>分潮が見られず(表1)、潮汐に対応した変動を示して

表1 地殻ひずみ・SN-3号孔の地下水位・TH-8号孔のP1での水圧・SN-1号孔の地下水位の潮汐成分

潮汐の分潮 (分潮の周期: hours)	地殻の面積ひずみの振幅(10 <sup>-9</sup> )	SN-3号孔の水位の振幅(mm)	SN-3号孔の水位のひずみ感度(mm/10 <sup>-9</sup> )	TH-8号孔のP1での水圧の振幅(mm)	TH-8号孔のP1での水圧のひずみ感度(mm/10 <sup>-9</sup> )	SN-1号孔の水位の振幅(mm)	SN-1号孔の水位のひずみ感度(mm/10 <sup>-9</sup> )
Q <sub>1</sub> (26.87)	2.355	2.66	1.13	2.78	1.18	0.05以下	0.02以下
O <sub>1</sub> (25.82)	11.518	13.99	1.22	16.07	1.39	0.55以下	0.05以下
N <sub>2</sub> (12.66)	3.057	4.04	1.32	5.09	1.67	0.09以下	0.03以下
M <sub>2</sub> (12.42)	15.611	20.23	1.30	25.56	1.64	0.37以下	0.02以下

いない(つまり 1 ~ 2 cycle/dayの周波数の範囲ではひずみ感度が $0.05\text{mm}/10^{-9}$ ひずみ以下である)ことが分かった。

(2) 気圧に対する変動

Rojstaczer (1988)<sup>9)</sup>の帯水層モデルとQuilty and Roeloffs (1991)<sup>7)</sup>の計算方法に基づいて、地下水位・水圧の気圧応答の推定を行った。

SN・3号孔の地下水位は、気圧に対応した変動を示す。0.1 ~ 0.6 cycle/dayの範囲では周波数に依存せず、位相ズレがほぼ180度(気圧が増加する時に水位が低下する関係)で、気圧と水位との振幅比が $0.5\text{cm}/\text{hPa}$ であった(図4)。

TH・8号孔のP1での水圧も、気圧に対応した変動を示す。気圧に対する応答関係はSN・3号孔の地下水位の場合とほぼ同じ特徴である(図4)。

SN・1号孔の地下水位は、気圧に対する変動を示す。応答関係は、0.5 ~ 0.6 cycle/dayでは $0.1\text{cm}/\text{hPa}$ 、0.2 ~ 0.3 cycle/dayでは $0.2 \sim 0.3\text{cm}/\text{hPa}$ であり、長周期(つまり周波数が小さい)になるほど振幅比が大きくなる傾向を示す(図4)。長周期ほど振幅比が大きいという特徴は、土岐炭層下部中の地下水が地表との間の水理的なつながりが悪い(つまり被圧が良い)ことを意味している。

(3) 地震波に対する振動

1999年3月以降、SN・3号孔の地下水位を1秒サンプリングで記録している。その記録によると、日本時間1999年9月21日2時47分に発生した台湾地震(M7.7)による長周期の地震波(表面波)に対応して、SN・3号孔の地下水位に変動が起きたことが分かった(図5)。97FT-01号孔でのひずみ測定結果にも長周期の地震波に対応した変動が見られたので、SN・3号孔の地下水位との比較を行った。周波数解析の結果、97FT-01号孔での地殻の面積ひずみとSN・3号孔の地下水位には、 $0.04 \sim 0.1\text{cycle}/\text{sec}$ ( $= 3,456 \sim 8,640\text{cycle}/\text{day}$ )の成分が大きく現われていることが分かった(図6)。この結果から、地震波による地殻の面積ひずみ変動とSN・3号孔の地下水位変動の振幅比(ひずみ感度： $0.04 \sim 0.1\text{cycle}/\text{sec}$ に対して $0.003 \sim 0.046\text{mm}/10^{-9}$ ひずみである)を求めることができた。

以上の(1) ~ (3)の結果をSN・3号孔における周波数に対するひずみ感度応答としてまとめたものが図7である。

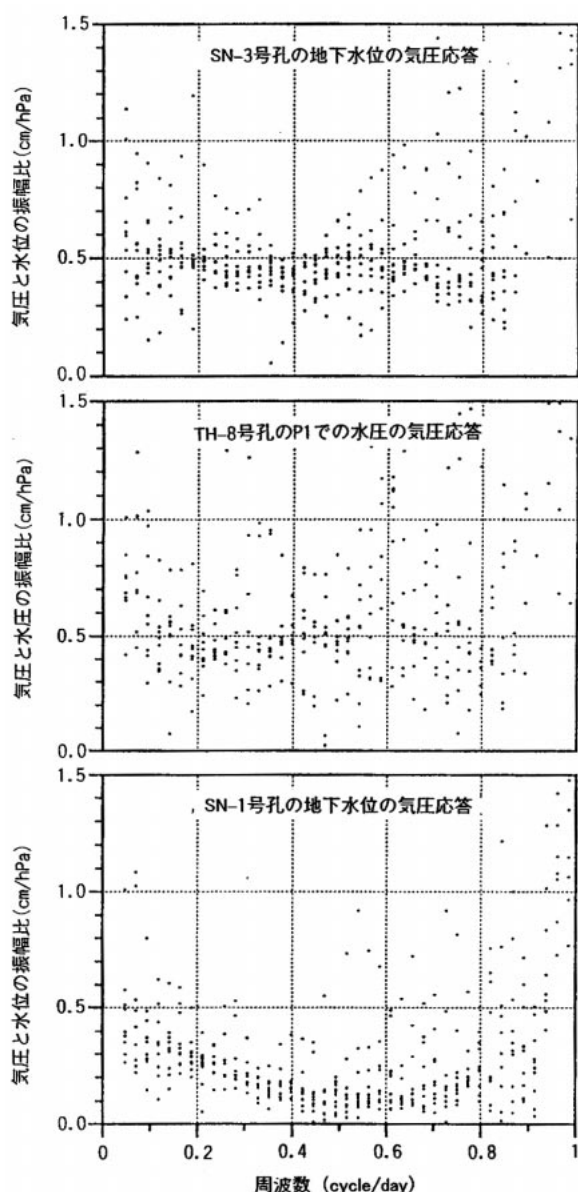


図4 地下水位・水圧の気圧応答の周波数特性 (図上に複数の点があるのは、異なる区間での推定の結果である)

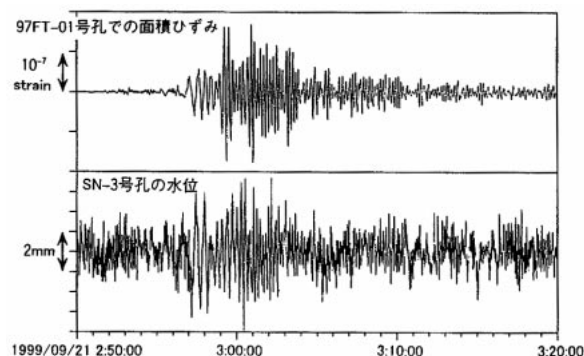


図5 台湾地震の地震波による97FT-01号孔での面積ひずみの変動とSN-3号孔の地下水位の変動

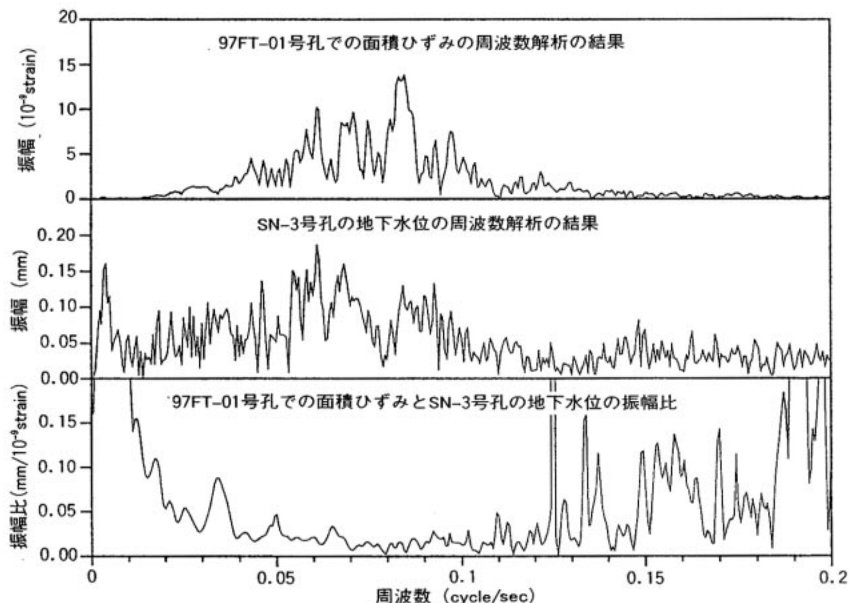


図6 図5の97FT-01号孔の面積ひずみとSN-3号孔の地下水位の周波数成分、及び97FT-01号孔の面積ひずみとSN-3号孔の水位の振幅比

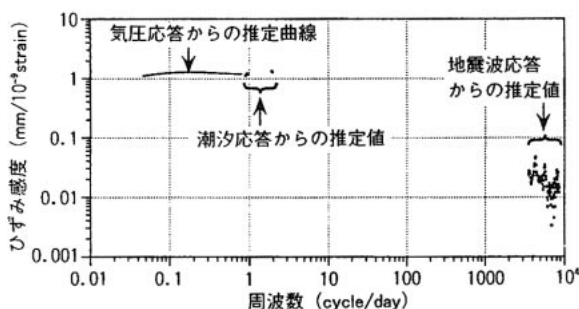


図7 SN-3号孔の地下水位のひずみ感度の周波数分布

## 2.2 地震に関連した地下水位・水圧変動

### (1) 地震発生直後の地下水位低下

SN・3号孔の地下水位では、地震発生直後（数日以内）の地下水位低下が1989年の観測開始以降で35回以上観測されている（図3に数例）。これらの水位低下量は数cm～数十cmであった。SN・1号孔の地下水位では1997年3月16日の愛知県東部地震（M5.8）直後の場合を始めとして数度水位低下が起こっている<sup>2), 3)</sup>。しかしながら、TH・8号孔のP1での水圧には地震直後の低下が起こったことがない（図8）。

上記の数cm～数十cmの地下水位低下が地殻ひずみ変化によって起き得るかどうかの検討を行った。Okada(1992)<sup>8)</sup>の方法を用いて、地震の断層モデルから計算されるSN・3号孔に生じる面積ひずみ変化を求め、地下水位低下量と比較した。断

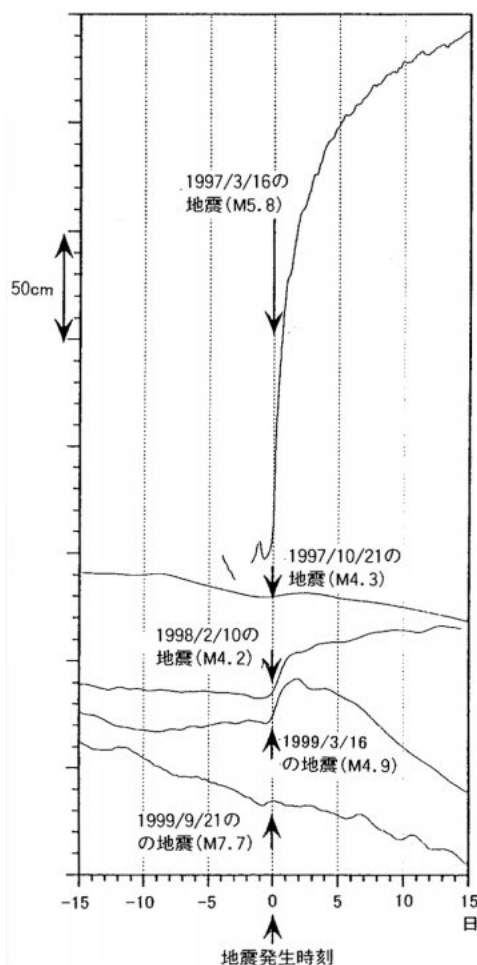


図8 TH-8号孔のP1での水圧の地震前後の変動（データが抜けている部分は欠測）

表2 地震直後のSN-3号孔の地下水位低下量と震源モデルから求められるSN-3号孔での地殻ひずみ

地震発生の日時	マグニチュード	震源距離 (km)	水位低下量 (mm)	地殻ひずみ (正が膨張)
1996/9/11 11:37	6.4	366	80	$-1.93 \times 10^{-11}$
1997/3/16 14:51	5.8	70	350	$-1.29 \times 10^{-10}$
1997/6/25 18:50	6.3	517	20	$9.64 \times 10^{-12}$
1997/12/5 20:27	7.7	2829	90	$-4.59 \times 10^{-12}$
1999/8/21 5:34	5.4	229	210	$9.80 \times 10^{-12}$
1999/9/21 2:47	7.7	2011	150	$-8.95 \times 10^{-12}$

層モデルから推定されたひずみ変動によって地下水位低下が引き起こされたとするならば、地下水位のひずみ感度は $1,000\text{mm}/10^{-9}$ ひずみ以上(表2)の大きさを必要とする。しかし、このひずみ感度の値は2.1節で求めたSN-3号孔の地下水位のひずみ感度の周波数分布(図7)に比べて大きすぎる。また、図3のような様々な地震に対して、常に地下水位変化が低下として起きることを説明できない。以上より、地震の震源でのズレによる広域の地殻変動が原因ではないと推測できた。

この地下水位低下という現象がどれ程の規模の変化であるかについては、以下に考察する。97FT-01号孔でのひずみの連続測定によると、地殻ひずみの地震直後のステップ状の変化は観測されていない(もしステップがあったとしても潮汐振幅 $5 \times 10^{-8}$ ひずみ以下である)。さらに、SN-3号孔の地下水位から約200mしか離れていないTH-8号孔のP1での水圧には地震発生直後の低下という現象は起きていない。この事実からは、SN-3号孔の地震直後の地下水位低下は、SN-3号孔周辺のごく近傍だけに起こった地震誘発現象であろうと推測できる。

### (2) 地震後の長期の地下水位・水圧上昇

地震発生後1ヵ月程度かかって、SN-3号孔の地下水位とTH-8号孔のP1での水圧が共に水位にして数十cm以上上昇したことが何度か観測されている(図3、図8)。観測された地下水位上昇量は最大で約2.5mであった。発生頻度は地震発生直後のSN-3号孔の地下水位低下ほどは多くない。SN-1号孔の地下水位では、1997年3月16日の愛知県東部地震(M5.8)の一度だけ、同様の水位上昇が起こっている<sup>2),3)</sup>。

月吉断層の南側の観測井(TH-7号孔のP1:土岐花崗岩中の間隙水圧)でも、地下水位の長期上昇が観測された例がある<sup>2)</sup>。月吉断層は遮水壁となっていると考えられる<sup>2)</sup>ので、月吉断層を通過して地下水位変動が伝わるとは考えにくく、地震後

の長期にわたる水位変動は土岐花崗岩全体で起きた現象である可能性が大きい。

この地震後の長期の地下水位・水圧の上昇量を地殻ひずみで説明するためには、図7を適用すると $10^{-7}$ オーダーのひずみ変化が必要であると見積もることができる。しかし97FT-01号孔での面積ひずみの結果では、地震後の長期の $10^{-7}$ オーダーの地殻ひずみ変化は見られない。ただし、97FT-01号孔には測定機器を1998年2月に設置したが、埋設自体による長期の影響や別の観測井掘削時の漏水に伴う長期変動が見られる。別の観測井の影響を捕えることができるほどの性能を石井式ポアホール総合観測装置が持っていることを表しているが、その影響を評価するには、更に多くの知見が必要である。

### (3) 地震前の地下水位の上昇

1989年の観測開始以降、地震発生前の1週間程度前からSN-1号孔の地下水位が10~30cm程度上昇する例が数度あった<sup>9)</sup>。これらは潮汐・気圧に対応した水位変化の特徴からは説明できない変化である。土岐夾炭層下部中の地下水は被圧が良いので、より長周期の地殻ひずみに対する変化が原因である可能性がある。また、実際に1999年8月の場合には、97FT-01号孔での土岐花崗岩のひずみに変動が見られた。しかしながら、同時期の土岐花崗岩中の地下水位には地震前の上昇が見られないことを考慮すると、地殻ひずみのみで説明できるとは考えにくい。

別の地震前の現象としては、大地震の前にSN-3号孔の水位に変動が見られた例があった<sup>1),3)</sup>。その後の研究の結果、水位低下自体は東濃鉱山坑道にある試錐孔からの漏水が原因であると推定できた。しかし漏水が起きた原因を特定できておらず、検討中である。

### 3. おわりに

潮汐・気圧などの現象から推定した値に比べて、地震時の変動から推定した地下水位の地殻ひずみ感度が大きいことが分かった。これを解明するには、地震という突発現象での地殻ひずみと地下水位の相互関係を更に理解することが必要である。特に、地殻の変形と地下水挙動の関係が非排水条件下と排水条件下でどう違うかを把握することが重要である。今後、地震や観測井掘削時の漏水(つまり排水条件)によるひずみ・地下水位の長期変動を詳しく研究する。

また、観測井ごとの地下水位応答の類似点(共通性)・相違点(空間的局在性)が明らかになっ

た。類似・相違の問題は地殻の不均質性との関連が想定される。この問題の解明のために、様々な現象に対する地下水位の短期・長期変動の研究や観測井間の透水性の測定実験などを今後行う。

#### 参考文献

- 1) 熊澤峰夫, 國友孝洋 他: “「陸域地下構造フロンティア研究」の現状”, 動燃技報, No.104, p.95 ~ 106 (1997) .
- 2) 吾妻瞬一, 大澤英昭 他: “東濃鉦山周辺における地震に対する地下水位・間隙水圧の変動特性”, 日本応用地質学会平成10年度研究発表会講演論文集, p.21 ~ 24 (1998) .
- 3) C.-Y.King, S.Azuma et al. : “ Earthquake-related water-level changes at 16 closely clustered wells in Tono, central Japan ”, J. Geophys. Res., Vol.104, p.13073-13082 (1999).
- 4) M.Ishiguro, H.Akaike et al. : “ A Bayesian approach to the analysis of earth tides ”, Proc. 9th International Symposium on Earth Tides, New York, p.283-292 (1981).
- 5) Y.Tamura, T.Sato et al. : “ A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion ”, Geophys. J. Int., Vol.104, p.507-516 (1991).
- 6) S.Rojstaczer : “ Determination of fluid flow properties from the response of water levels in wells to atmospheric loading ”, Water Resour. Res., Vol.24, p.1927-1938 (1988).
- 7) E.G.Quilty, E.A.Roeloffs : “ Removal of barometric pressure response from water level data ”, J. Geophys. Res., Vol.96, p.10209-10218 (1991).
- 8) Y.Okada : “ Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space ”, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.82, p.1018-1040 (1992).
- 9) 北川有一, 地震地下水研究チーム 他: “ 岐阜県土岐市東濃鉦山周辺の観測井での地震に伴う地下水位・間隙水圧変化 ”, 日本地震学会講演予稿集1999年度秋季大会, P158 (1999) .