

# 淡路島 800 m 孔における地下水流動による地殻変動について

## Crustal Movements due to Groundwater Migration at the Awaji 800m-deep Borehole

向井厚志  
Atsushi Mukai

### 1. はじめに

1995年1月17日に明石海峡の深さ14kmを震源として、M7.3の兵庫県南部地震が発生した。この地震では東西方向に最大圧縮軸をもつ地殻応力によって、北東-南西方向に右横ずれ断層が生じた（[9] 大阪管区気象台・気象庁地震予知情報課, 1995）。このとき、淡路島西岸に位置する野島断層では、1mを超える右横ずれと南東側隆起の地表変位が現れた（[2] Hashimoto et al., 1996）。京都大学防災研究所を中心とする大学グループは、活断層の地質学的な構造、野島断層の定常的な断層運動および破碎帯の強度回復過程を理解することを目的として、1996年に淡路島北西部の富島において深さ500m、800mおよび1800mのボアホールを掘削した（[1] Ando, 2001）。これら3本のボアホールは掘削深度にちなんで名称500m孔、800m孔および1800m孔と呼ばれており、それぞれ主として電位観測、地殻変動観測および地震観測が行なわれている。

地殻変動観測点である800m孔の底部には石井式歪計を含む地殻活動総合観測装置が埋設され、1996年5月以降、歪変化等の連続観測が続けられている（[3] Ishii et al, 2001）。同観測装置は地下800mに埋設されたことから、都市活動に起因するバックグラウンドノイズは極めて小さい。800m孔の北北東に位置する1800m孔では、1997年以降、数年ごとに繰り返し注水実験が実施されてきた（[7] 西上, 2001）。この注水試験に伴う歪変化の観測から、周辺岩盤の透水係数が経年的に低下していることが明らかにされた（[6] Mukai and Fujimori, 2007）。このことは、800m孔周辺の断層破碎帯で破碎の固着が進行しつつあることを示す。透水係数の低下は周辺岩盤の力学特性を変化させるため、800m孔では、本来時間的に安定している潮汐歪の振幅が経年的に変化する（[5] 向井・藤森, 2006）。このように、断層破碎帯の水理特性の変化は地殻応力シグナルに対する周辺岩盤の応答特性を変化させ、地殻変動観測に影響を及ぼす場合がある。800m孔では2000年8月に地上部の孔口を密封し、自然湧水を強制的に抑えた。その結果、800m孔の底部周辺で間隙水圧が上昇し、地殻応力に対する周辺岩盤の応答特性が変化することが予想される。本稿では、気圧変化に対する歪変化の特徴を明らかにし、孔口密封による間隙水圧の上昇がもたらす歪観測への影響についてまとめる。

### 2. 800 m 孔における地殻変動観測

富島観測点は淡路島北西部の兵庫県津名郡北淡町ひのき浦字拝点にあり、野島断層の100～500m南東に位置する3本のボアホール500m孔、800m孔および1800m孔から構成されている。野島断層は北東-南西方向の走向をもち、その断層面は南東側に傾斜している。500m孔および1800m孔は、野島断層を貫くようにボーリング孔を曲げて掘削された。一方、800m孔は鉛直に掘削され、その底部には歪計3成分、傾斜計2成分、温度計、地

震計および加速度計を含む地殻活動総合観測装置が埋設された。図1は、野島断層と3本のボアホールの配置、および800 m孔に設置された歪計の測定方向を示している。歪計 StrU、StrM および StrD は、それぞれ S21° E-N21° W、S81° E-N81° W および N39° E-S39° W 方向の歪変化を測定することができる。

800 m孔の地上から深さ785 mまでは孔径18cmのケーシングが挿入され、岩盤とケーシングの間にはセメントが充填された。深さ785～800 mの区間は裸岩のままであり、周囲の岩質は硬質の花崗岩である。ボアホール内は地下水で満たされており、2000年7月までは地上にある孔口が開放され、約500cc/hの定常的な湧水が観測されていた。その地下水はボアホール底部の裸岩区間から流入しており、その地下水位は地上約8 mの高さに相当する。そのため、800 m孔底部は、被圧地下水を含む透水層内に位置すると考えられる。なお、2000年8月に800 m孔の孔口は密封され、それ以降、自然湧水は強制的に抑えられている。

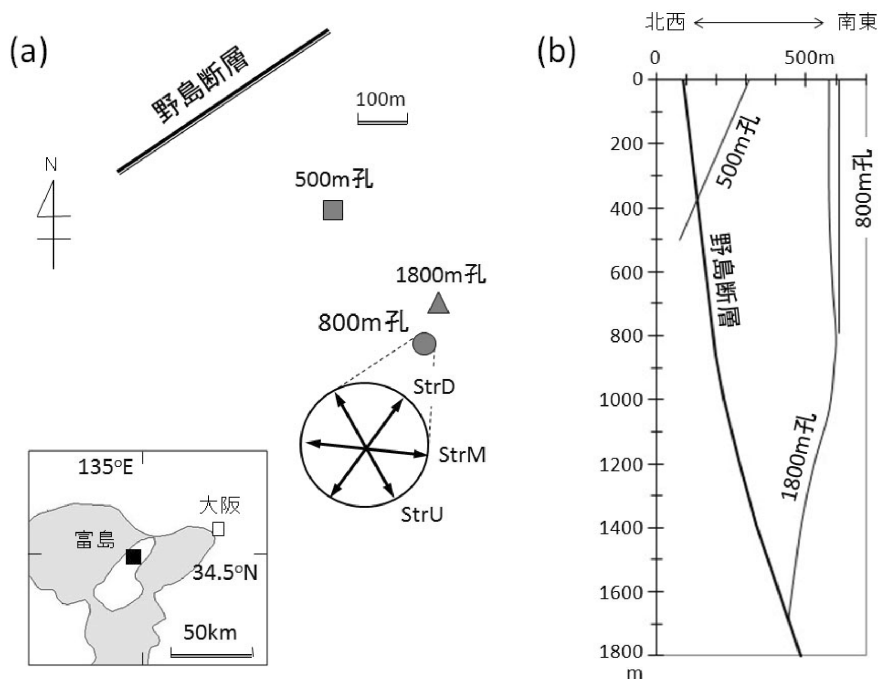


図1 淡路島・富島観測点における3本のボアホールの配置

(a) 淡路島北西部の富島に掘削された3本のボアホールの水平配置。□、○および△印は、それぞれ500 m孔、800 m孔および1800 m孔を示す。図中の矢印 StrU、StrM および StrD は、800 m孔の底部に埋設された歪計の測定方向を表す。(b) 800 m孔周辺の鉛直断面図。縦軸は地表からの深さ、横軸は海岸からの距離を表す。

800 m孔における地殻変動の連続観測は、1996年5月に開始された。当初の測定間隔は5分であったが、1996年12月以降、1分間隔に変更された。地殻活動総合観測装置に組み込まれた歪計は石井式歪計であり、岩盤の変形をメカニカルな拡大装置で増幅させ、磁気センサを用いて変形量を測定する仕組みを有する。歪計の収録分解能は $2 \times 10^{-10}$ である。歪の単位は無次元であり、 $10^{-10}$ は1000kmの距離が0.1mm変化する量に相当する。1997年末には孔口に湧水量計が設置され、湧水量変化の連続観測も並行して開始された。湧水量計は、湧水を受け止める容器内の水位変化を測定する装置であり、一定量を超えた時点で容器内の水はすべて排水される。湧水量計の収録分解能は0.7ccである。2000年8月以降は孔口を密封したことから、湧水量観測の代わりにボアホール内の水圧変化の連続観測が開始された。水圧計の収録分解能は0.8hPaであり、水位換算で8 mmに相当する。

図 2 (a) は、1997 年～2003 年に得られた歪変化、湧水量変化、水圧変化および地上気圧の観測値を示している。歪観測値からは、指数関数型の経年変化を除去した。歪観測値には 2000 年 8 月にステップ状の縮みが認められるが、この歪変化は孔口密封に起因するものである。孔口密封によって 800 m 孔底部周辺の間隙水圧が上昇し、観測計器が圧縮されて縮みの歪変化が生じたと考えられる。

図 2 (b) は、図 2 (a) の一部期間を拡大した図であり、1998 年 1 月～3 月の 3 カ月間に得られた観測値を示す。歪観測値からは、[10] Tamura et al. (1991) が開発した潮汐解析プログラム BAYTAP-G を用いて推定された地球潮汐成分が取り除かれている。気圧の低下に伴って、全成分で歪の伸張が生じている。気圧の低下は地表面に加わる大気荷重の減少を意味しており、大気荷重による地殻応力が低下したことで伸びの歪変化が現れる。気圧の低下は地下水を吸い出す作用があるため、気圧低下に伴って湧水量は増大する。

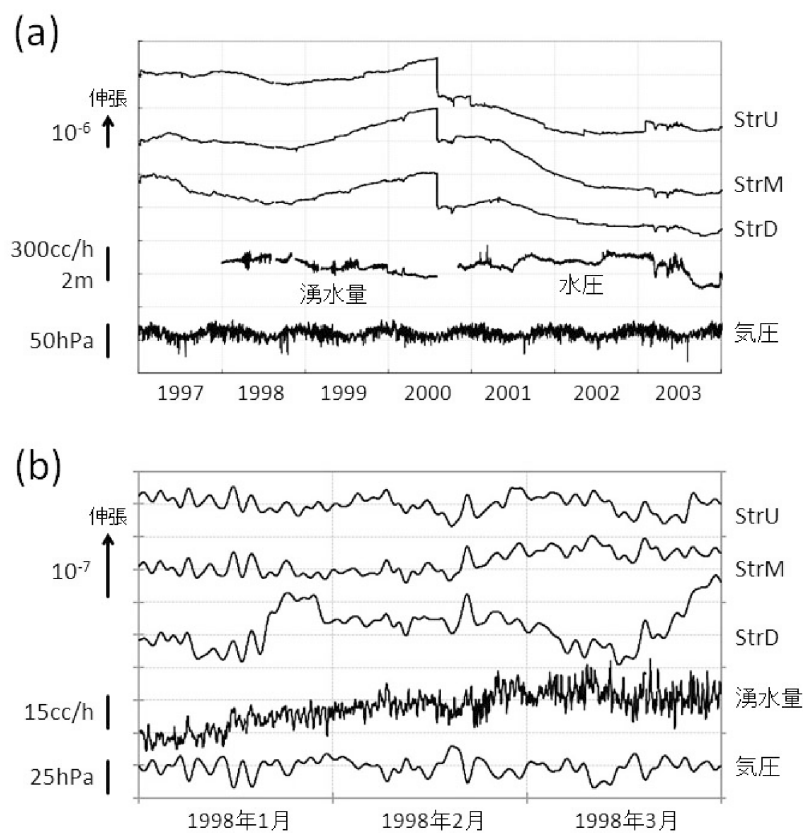


図 2 淡路島 800 m 孔で得られた地殻変動観測値

(a) 1997 年～2003 年の 7 年間に観測された歪変化 (StrU, StrM, StrD)、湧水量変化、水圧変化および地上気圧を示す。2000 年 8 月に 800 m 孔の孔口を密封したことによるステップ状の歪変化が見られる。(b) 1998 年 1 月～3 月の 3 カ月間に得られた歪変化、湧水量変化および地上気圧を示す。

### 3. 800 m 孔の孔口密封による歪変化

図 3 は、800 m 孔の孔口を密封した当日およびその翌日の 2 日間にわたる歪観測値を示している。孔口密封は 2000 年 8 月 3 日 11 時に実施され、その直後に  $10^{-6}$  の縮みの歪変化が現れた。同時に計測されていた水圧変化では 745hPa の上昇 (水位換算で 7.6m の上昇) を示した。孔口密封による歪変化および水位変化は約 3 時間の時定数をもつ指数関数的な時間変化であり、孔口密封から約 4 時間後までの第一段階とその後の第二段階に分かれている。

このことは、周辺岩盤が均質な地質構造ではなく、一定の間隙水圧に達したときに開くような「弁」が存在すること、かつ、その「弁」の先に地下水位レベルの高い涵養源が存在することを示唆している。

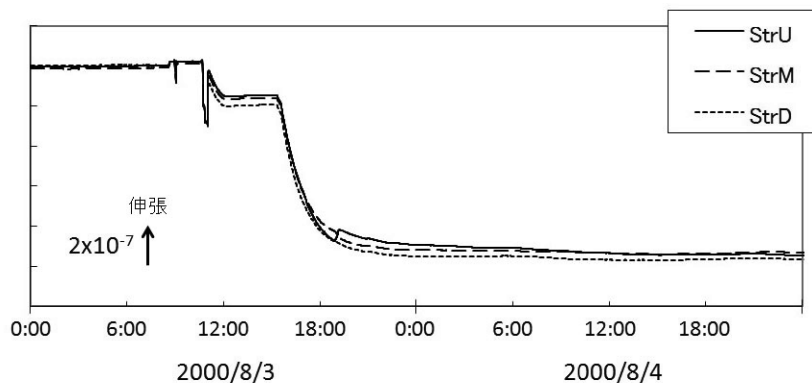


図3 800 m孔の孔口密封に伴う歪変化

2000年8月3日11時頃に孔口を密封した後、2段階に分かれて歪の収縮が見られた。

孔口の密封直前から24時間後までの歪計3成分 StrU、StrM および StrD の変化量は、それぞれ  $-9.5 \times 10^7$ 、 $-9.4 \times 10^7$  および  $-9.9 \times 10^7$  であり、いずれも縮みの歪変化が測定された。その最大主歪および最小主歪は、それぞれ  $-9.3 \times 10^7$  および  $-9.9 \times 10^7$  であり、ほぼ等方的な収縮が生じたことになる。同期間の水圧変化は、水位換算で  $+7.6\text{m}$  であった。この間隙水圧の変化によって均質弾性体に図3の収縮が生じたとすると、周辺岩盤のヤング率は  $40 \sim 80\text{GPa}$  と見積もられる。ヤング率はポアソン比に依存しており、ポアソン比が  $0.3$  の場合には  $54\text{GPa}$  となる。これらの力学特性の値は一般的な花崗岩の弾性定数と一致しており、矛盾はない。

#### 4. 孔口密封による気圧応答特性の変化

気圧の上昇に伴う大気荷重の増大は、岩盤の収縮を引き起こすと同時に間隙水圧の上昇をもたらす。このとき、間隙水圧の高い領域から低い領域に向けて地下水の流動が生じ、間隙水圧が再配置される。その地下水流動の速さは岩盤の透水性に依存しており、間隙水圧の変化は大気荷重の変化に遅れて追従することになる。その結果、気圧変化に伴う歪変化、湧水量変化および水圧変化は、(1)式で表される気圧  $P(t)$  に関する一次式で近似することができる。

$$a_0 \left\{ P(t) + a_1 \frac{dP(t)}{dt} \right\} \quad (1)$$

ここで、 $P(t)$  は時刻  $t$  における地上気圧であり、 $a_0$  および  $a_1$  は、それぞれ気圧変化に対する歪変化、湧水量変化または水圧変化の応答係数および応答の遅れを表す。

表1には、歪観測値、湧水量観測値または水圧観測値に(1)式を当てはめて推定された気圧変化に対する応答特性がまとめられている。この計算では解析期間を2つに分け、800 m孔の孔口を開放していた1997年1月～2000年7月の約3年半の期間「孔口開放」と、孔口を密封していた2000年8月～2003年12月の約3年半の期間「孔口密封」のそれぞれの観測値を用いて、各期間の応答特性が推定された。図4は、孔口密封前後の応答特性の変化を図示したものである。

気圧変化に対する歪変化の応答の遅れは、孔口開放期において  $0.0 \sim +0.1\text{hour}$  であり、大気荷重に対して歪変

化がほぼ瞬時に応答していたことを示している。孔口が開放され自然湧水が生じている環境下では、ボアホール内の地下水水位は一定となり、800 m 孔周辺の間隙水圧も一定に保たれ、間隙水圧の再配置の影響は小さく抑えられる。その結果、応答の遅れを伴う気圧応答成分が無視できるほど小さくなったと考えられる。一方、孔口密封期における応答の遅れは +0.3 ~ +1.4 hour であり、推定誤差を上回る有意な遅れが検出された。約 1 時間の遅れを伴いながら、800 m 孔底部の近傍まで間隙水圧の再配置が伝播していることが伺える。ただし、同期間の水圧変化においては応答の遅れが +0.1 hour と小さいこと、かつ、歪計 3 成分のうち StrD の応答の遅れが特に大きいことから、間隙水圧の再配置は 800 m 孔の北東または南東領域に制限されている可能性がある。

表 1 気圧変化に対する歪変化、湧水量変化および水圧変化の応答特性

「孔口開放」は 1997 年 1 月 ~ 2000 年 7 月、「孔口密封」は 2000 年 8 月 ~ 2003 年 12 月の各期間の観測値を用いて推定された気圧変化に対する応答特性を示す。括弧内の数値は推定誤差を表す。

(a) 応答係数

	StrU [E-9/hPa]	StrM [E-9/hPa]	StrD [E-9/hPa]	湧水量 [cc/h/hPa]	水圧 [mm/hPa]
孔口開放	-1.32 (±0.07)	-1.57 (±0.07)	-1.03 (±0.06)	-0.33 (±0.09)	
孔口密封	-0.71 (±0.12)	-0.99 (±0.12)	-0.27 (±0.09)		-6.34 (±0.51)

(b) 応答の遅れ

	StrU [hour]	StrM [hour]	StrD [hour]	湧水量 [hour]	水圧 [hour]
孔口開放	-0.03 (±0.06)	+0.13 (±0.06)	+0.02 (±0.08)	+0.05 (±0.37)	
孔口密封	+0.34 (±0.22)	+0.37 (±0.14)	+1.39 (±0.45)		+0.07 (±0.09)

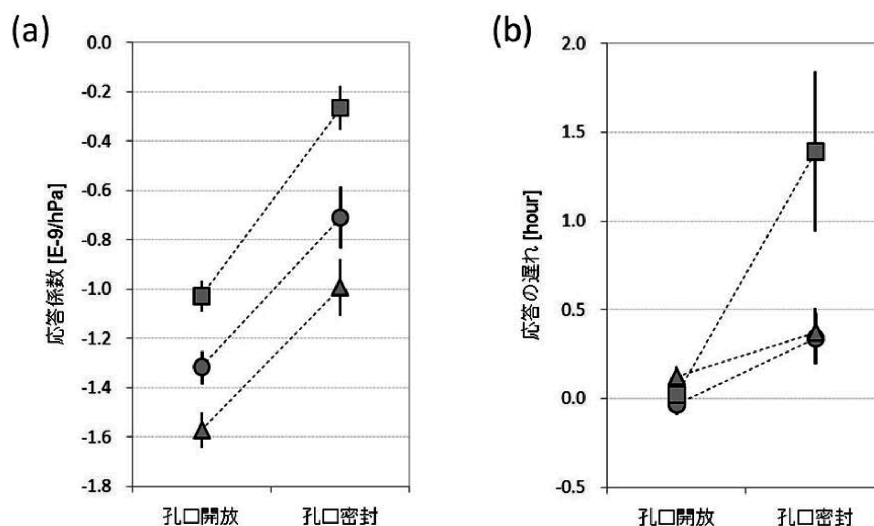


図 4 気圧変化に対する歪変化の応答特性

気圧変化に対する歪変化の (a) 応答係数、ならびに (b) 応答の遅れを示す。□、○および△印は、それぞれ StrU、StrM および StrD の応答特性を表す。「孔口開放」および「孔口密封」の応答特性は、表 1 と同じ解析期間を用いて推定された。各マークに付随するバーは推定誤差を表す。

気圧変化に対する歪変化の応答係数は、孔口開放期において  $-1.0 \sim -1.6 \times 10^{-9}/\text{hPa}$ 、孔口密封期において  $-0.3 \sim -1.0 \times 10^{-9}/\text{hPa}$  と求められた。孔口密封によって、全方位でほぼ一様な応答係数の増大が生じたことになる。図5は、歪変化の応答係数を用いて計算された主歪を示す。孔口開放期および孔口密封期における最大圧縮軸の方向は、それぞれ  $N66^\circ W-N66^\circ E$  および  $N63^\circ W-N63^\circ E$  である。いずれの期間においても西北西-東南東方向となり、気圧応答の最大圧縮方向に関しては孔口密封の影響は小さい。気圧応答の方位依存性の原因としては、周辺媒質の異方性または観測点周辺の陸海分布の影響が挙げられる（[8] 大江・花田, 1982）。しかし、海域の大気荷重をキャンセルする IB (Inverted Barometer) モデルを考慮した場合、大気荷重による最大圧縮方向は北東-南西方向となり、図5に示された観測事実と約  $90^\circ$  異なることになる（[4] 向井・藤森, 2000）。したがって、気圧応答の方位依存性は陸海分布に原因はなく、主に周辺岩盤がもつ力学特性の異方性によって生じたと推察できる。

[11] Walsh (1965) は破碎によって生ずるヤング率の方位依存性を調べ、破碎に平行な方向よりも垂直な方向にヤング率が小さくなることを導いた。1800 m 孔で採取されたコア・サンプルの調査では、北東-南西および北西-南東方向に破碎が発達していることが確認されており、800 m 孔周辺においても同様な方向に破碎が分布していると考えられる。こうした破碎のうち、北東-南西方向の破碎は1995年兵庫県南部地震時の野島断層における断層運動によって過剰に形成されたことが推察される。このことは、北東-南西方向にほぼ直交する西北西-東南東方向に最大圧縮軸が現れる事実を定性的に説明することができる。

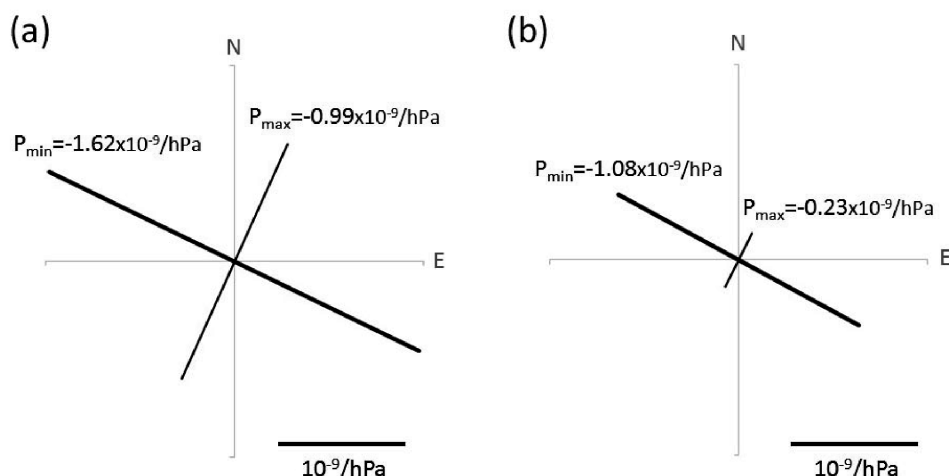


図5 気圧変化に対する歪変化から計算された主歪

(a) 孔口開放期、および (b) 孔口密封期における気圧変化に対する歪変化から求めた主歪。細線 ( $P_{\max}$ ) および太線 ( $P_{\min}$ ) は、それぞれ最大主歪および最小主歪を示す。

図4で見られるように、孔口密封によって全方位で一様な応答係数の増大が生じた。この応答係数の変化は、気圧変化に対する800 m 孔周辺の間隙水圧の挙動に起因する。図6は、大気荷重による800 m 孔周辺の間隙水圧変化の分布を描いている。ポアソン比が0.3である均質弾性体に一様な鉛直荷重  $1\text{hPa}$  が加わる場合、水平方向の地殻応力は  $0.43\text{hPa}$  となる。孔口が密封された2000年8月以降の岩盤は均質弾性体に相当するため、 $1\text{hPa}$  の大気荷重によって間隙水圧は  $0.43\text{hPa}$  上昇し、歪計を圧縮することになる。一方、孔口が開放されていた2000年8月以前では、ボアホールを通じて気圧変化が800 m 孔底部に直接伝わるため、 $1\text{hPa}$  の大気荷重によって、同じ  $1\text{hPa}$  の間隙水圧が歪計に作用する。以上のことから、孔口密封期と比べて孔口開放期の方が、 $1\text{hPa}$  の大気荷重あたり  $0.58\text{hPa}$

だけ大きな間隙水圧を歪計が受ける結果となり、図4および図5に見られるように孔口開放期の気圧応答が大きくなることを説明できる。図3の孔口密封に伴う歪変化から見積もられたヤング率 54GPa を仮定したとき、0.58hPa の間隙水圧上昇は、気圧変化に対する歪変化の応答係数の大きさを  $0.75 \times 10^9 / \text{hPa}$  増大させる。この応答係数の変化量は、表1および図4に示した孔口密封前後の応答係数の変化量  $0.58 \sim 0.76 \times 10^9 / \text{hPa}$  とほぼ一致しており、定量的にも説明ができる。

孔口密封期における水圧計は、地上気圧を参照として水圧変化を測定する。そのため、1hPa の気圧上昇時には、間隙水圧の上昇分 +0.42hPa から地上気圧の上昇分 +1hPa を差し引いた -0.58hPa の水圧低下が観測される。この水圧低下は水位換算で -5.9mm に相当し、表1に示した気圧変化に対する水圧変化の応答係数 -6.3mm/hPa をほぼ説明できる。

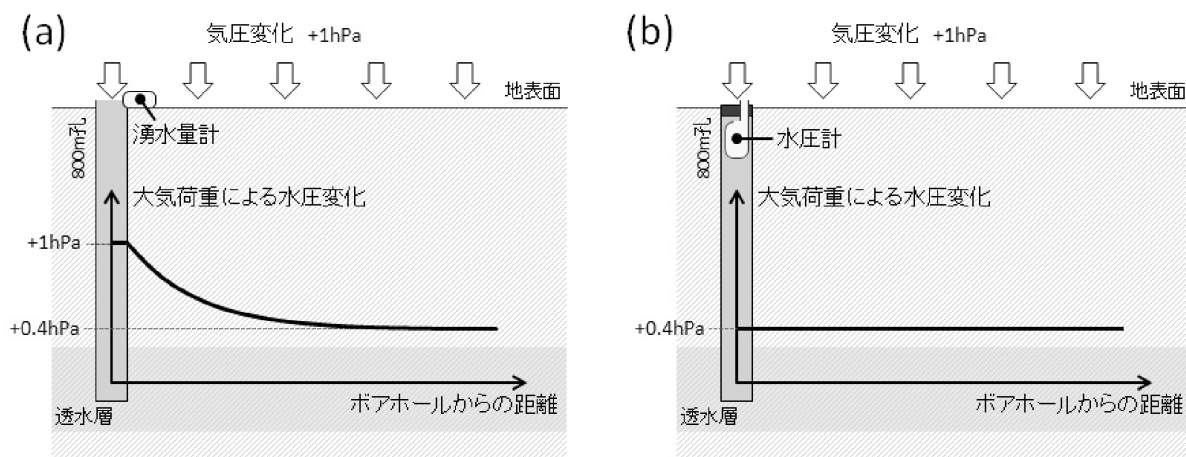


図6 気圧上昇による周辺岩盤の間隙水圧変化

地上気圧が 1hPa 上昇したときの (a) 孔口開放期、および (b) 孔口密封期における間隙水圧変化。横軸は 800 m 孔の中心軸からの距離、縦軸はボアホール内または透水層内の間隙水圧の変化である。

## 5. まとめ

淡路島北西部の富島に位置する 800 m 孔は深さ 800 m まで鉛直に掘削されたボアホールであり、その孔底には石井式歪計 3 成分を含む地殻活動総合観測装置が埋設されている。800 m 孔の地上部にある孔口は当初開放され、約 500cc/h の自然湧水が生じていた。このことは、裸岩のまま残された 800 m 孔の底部が被圧地下水を含む透水層内にあることを示している。800 m 孔の孔口は 2000 年 8 月に密封され、それに伴いボアホール内の水圧が 745hPa (水位換算で 7.6 m) 上昇した。このとき、歪計 3 成分は  $-9.4 \sim -9.9 \times 10^{-7}$  の範囲でほぼ一様な収縮を示した。周辺岩盤が均質な弾性体であり、そのポアソン比が 0.3 であると仮定すると、孔口密封に伴う歪変化を用いてヤング率は 54GPa と見積もられる。これらの力学特性の値は、一般的な花崗岩の弾性定数と一致する。

地上気圧の上昇は地表面に対する大気荷重の増大を意味しており、縮みの歪変化を引き起こす。800 m 孔では、気圧上昇に伴って最大圧縮軸が西北西-東南東方向に現れる。野島断層近傍の断層破碎帯では、1995 年兵庫県南部地震時の断層運動によって、同方向にほぼ直交する野島断層に平行な破碎が過剰に形成された結果、西北西-東南東方向のヤング率が低下した可能性が考えられる。

気圧変化に対する歪変化の応答特性は、2000 年 8 月の孔口密封によって大きく変化した。2000 年 8 月以前の孔口開放期においては、気圧変化に対する歪変化の応答係数は  $-1.0 \sim -1.6 \times 10^9 / \text{hPa}$ 、2000 年 8 月以降の孔口密封期

においては  $-0.3 \sim -1.0 \times 10^9/\text{hPa}$  と求められ、孔口密封によって全方位でほぼ一様な応答係数の増大が生じた。孔口密封期における間隙水圧変化は、大気荷重による均質弾性体の変形から見積もることができ、周辺岩盤のポアソン比が 0.3 の場合、1hPa の気圧上昇によって間隙水圧が 0.42hPa 上昇することになる。一方、孔口開放期においては、ボアホール内の地下水に直接、大気荷重が作用するため、1hPa の気圧上昇によって 800 m 孔底部の間隙水圧も 1hPa 上昇する。孔口開放期と孔口密封期の間隙水圧変化の差は、1hPa の気圧上昇あたり 0.58hPa であり、ヤング率 54GPa、ポアソン比 0.3 の均質弾性体を仮定した場合、この間隙水圧変化の差による歪変化は  $0.75 \times 10^{-9}$  と求められる。この値は、孔口密封前後の応答係数の変化量  $0.58 \sim 0.76 \times 10^9/\text{hPa}$  とほぼ一致しており、孔口密封による気圧応答特性の変化は間隙水圧分布の変化によって定量的に説明できることがわかる。

### 参考文献

- [1] Ando, M. (2001) : Geological and geophysical studies of the Nojima fault from drilling: An outline of the Nojima fault zone probe, *The Island Arc*, 10, 206-214.
- [2] Hashimoto, M., T. Sagiya, H. Tsuji, Y. Hatanaka and T. Tada (1996) : Co-seismic displacements of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, *J. Phys. Earth*, 44, 255-279.
- [3] Ishii, H., A. Mukai, K. Fujimori, S. Nakao, S. Matsumoto and Y. Hirata (2001) : Multicomponent observation of crustal activity in the DPRI 800m borehole close to the Nojima Fault, *the Island Arc*, 10, 282-287.
- [4] 向井厚志・藤森邦夫 (2000) : 淡路島 800 m ボアホールで観測された大気荷重に伴うひずみ変化, *地震* 2, 53, 57-63.
- [5] 向井厚志・藤森邦夫 (2006) : 歪潮汐を用いた淡路島 800m 孔周辺の弾性定数の推定, *東濃地震科学研究所報告*, 16, 77-80.
- [6] Mukai, A. and K. Fujimori (2007) : Secular change of permeability in fracture zone nearby the Nojima fault estimated using strain changes due to water injection experiments, *Tectonophysics*, 443, 193-199.
- [7] 西上欽也 (2001) : 注水試験の概要, および野島断層浅部構造とその回復過程, *月刊地球*, 23, No.4, 232-235.
- [8] 大江昌嗣・花田英夫 (1982) : 重力及び地殻変形に対する気圧及び地下水の影響の物理的シミュレーション, *緯度観測所彙報*, 21, 6-14.
- [9] 大阪管区気象台・気象庁地震予知情報課 (1995) : 1995 年兵庫県南部地震とその余震活動, *地震予知連絡会会報*, 54, 584-592.
- [10] Tamura, Y., T. Sato, M. Ooe and M. Ishiguro (1991) : A procedure for tidal analysis with a bayesian information criterion. *Geophys. J. Int.*, 104, 507-516.
- [11] Walsh, J. B. (1965) : The effect of cracks on the uniaxial compression of rocks, *J. Geophys. Res.*, 70, 399-411.