

2004年紀伊半島南東沖の地震活動に伴う地下水位変動

佐藤 努¹⁾・松本 則夫¹⁾・北川 有一¹⁾・小泉 尚嗣¹⁾・高橋 誠¹⁾
桑原 保人¹⁾・長 秋雄²⁾・佐藤 隆司¹⁾・小澤 邦雄³⁾

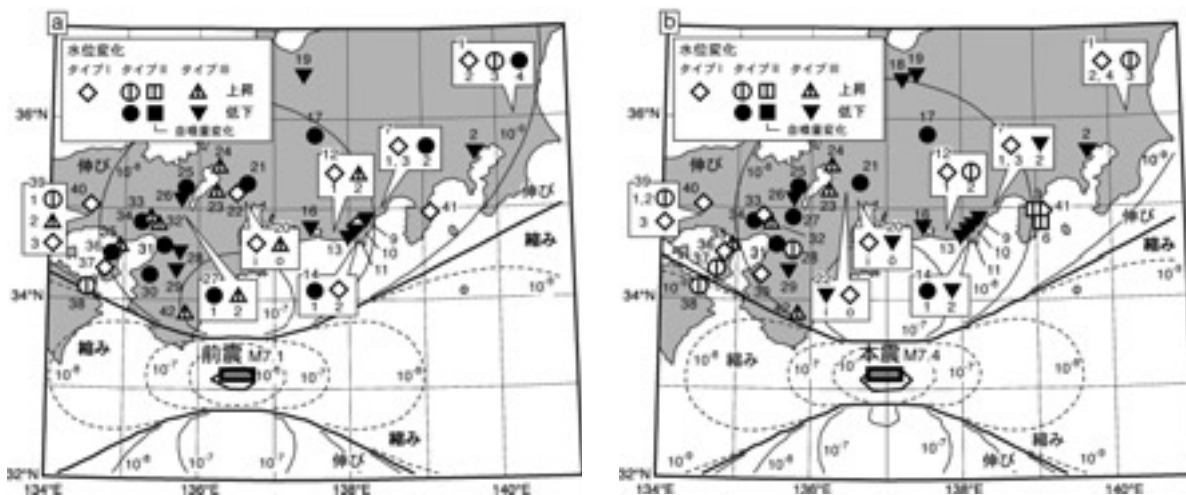
1. はじめに

紀伊半島や四国, 東海地方の南方の海域に位置する南海トラフでは, 南海地震や東南海地震と呼ばれる大地震がこの400年間に4回発生しており, その周期は90年から150年ほどとなっている(寒川, 1997など). この南海トラフで発生した最近の地震は, 1944年東南海地震(マグニチュード(M)7.9)と1946年南海地震(M8.0)であり, それから60年ほどの月日が経とうとしている. このような状況の中, 来たるべく大地震に備えて「東南海・南海地震に関わる地震防災対策の推進に関する特別措置法」が2002年7月に制定された(2003年7月25日施行). また, 政府の中央防

災会議「東南海・南海地震に関する専門調査会」では, 2003年9月に被害想定を公表しており, これによるとこの2つの地震が同時に発生した場合の経済的被害は57兆円と試算されている.

2004年9月5日, この南海トラフの近傍において, マグニチュードが7を超える地震が2回発生した. 震源は紀伊半島南東沖で, 中央防災会議が想定した東南海地震の想定震源域に隣接していたため, プレート境界型の大地震発生との関連が危惧された. しかし, 発震機構の解析などからフィリピン海プレート内部の地震と考えられ, プレート境界を震源域とする地震ではないと結論づけられている(気象庁, 2004).

この地震活動は, 紀伊半島南東沖約100kmの海域



第1図 2004年紀伊半島南東沖の地震活動の前震(a)と本震(b)に伴う地下水変動の分布と断層モデル(網掛け四角; 国土地理院, 2004)から予想される地盤の伸縮の分布. 等値線の値は体積歪変化量. タイプI, II, IIIについては本文と第1表を参照.

1) 産総研 地質情報研究部門
2) 産総研 地圏資源環境研究部門
3) 静岡県 総務部防災局

キーワード: 2004年紀伊半島南東沖地震活動, 地下水位, 自噴量, 観測井, 地盤の伸縮

にてまず前震(M7.1, 19:07)が発生し、約5時間後にそこから東北東に約30km離れた地点で本震(M7.4, 23:57)が発生した(第1図)。本震から3日後の9月8日には、最大余震(M6.5)が本震の近くで発生し、その後余震活動は減衰していった。この一連の地震によって紀伊半島では最大震度5弱を観測し、和歌山県新宮市の「雲取温泉」では、年々色が薄くなっていた温泉が再び乳白色を取り戻し話題となった(紀伊民報, 2004)。ちなみにこの一連の活動における地震は、その発生場所によって別々の名前で呼ばれている。例えば、前震(M7.1)は「紀伊半島沖の地震」、本震(M7.4)は「東海道沖の地震」と呼ばれている。本報ではこれらの地震をまとめて「紀伊半島南東沖の地震活動」と称し、個々には「前震」、「本震」と呼んで区別する。

これらの地震に伴って、産業技術総合研究所(産総研)の地下水観測網では地下水位や自噴量の変動が観測された。この地下水観測網は、地震および火山活動と地下水との関係を調べるために設置されたものである。本報では、この地下水位や自噴量の変動について報告する。なお産総研では、この地震活動に関連して、紀伊半島の湯峯温泉(第1図のNo.42付近)において温泉変化に関するアンケート調査を行っている。この結果については、佐藤ほか(2005a)を参照されたい。

また本報の最後(第6章)では、2000年以降に発生した規模の大きな地震時の地下水変化の比較を行う。具体的には、2000年鳥取県西部地震(M7.3, 10月6日)、2001年芸予地震(M6.7, 3月24日)、2003年十勝沖地震(M8.0, 9月26日)である。この3つの地震と今回の前震・本震を合わせた計5つの地震時の水位や自噴量の変化を比較することによって、地下水変化の原因を考察する。

2. 産総研の地下水観測網

本報で紹介するのは、産総研が関与する42観測点(56観測井)における観測結果である。観測井とは地下水観測用の井戸のことであり、1つの観測点に複数の観測井が存在する場合があるので(例えば、第1図の1, 7, 12, 14, 20, 22, 39など)、観測井の数は観測点の数より多くなる。42の観測点のうち41の観測点では産総研が直接観測を行っており、残り1つの観

測点では静岡県が地下水位観測を行っている。また前者の41観測点を目的別に分けると、39の観測点は関東・東海・近畿地域の地震予知研究のため(高橋ほか, 2004)、残りの2つの観測点は有珠山の火山噴火予知研究のために整備されたもの(佐藤ほか, 2001)である。

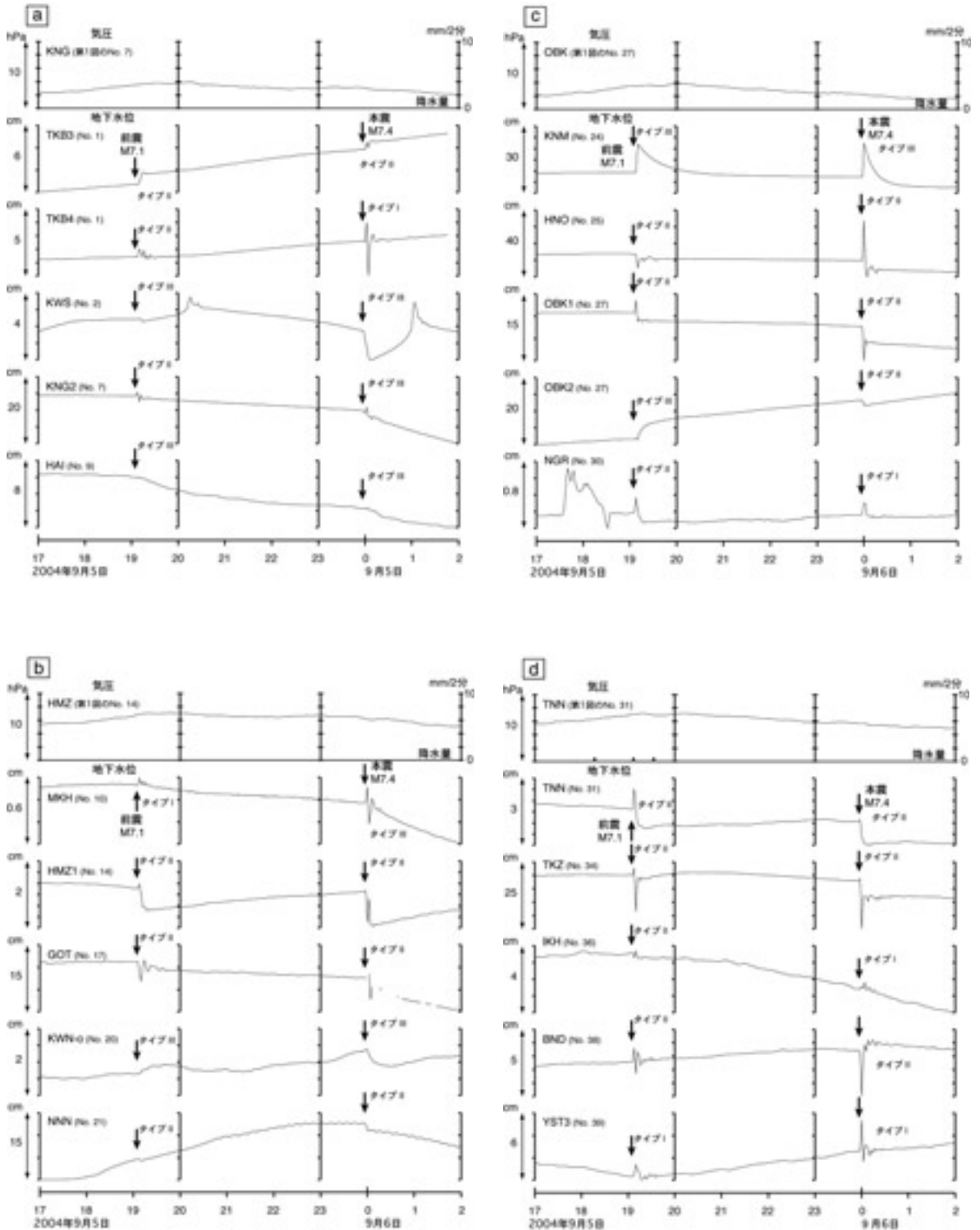
地震予知研究のための地下水観測は、1978年にスタートした東海地震予知事業のための各種観測の整備に前後して駿河湾周辺地域に設置された。その後、1995年兵庫県南部地震を契機に、観測網は近畿地域に広がっている。現在では主に地下水位を観測しており、データの取得間隔は2分で、得られたデータは電話回線によって茨城県つくば市にある産総研地質情報研究部門まで送られている。観測点の名称は、主にアルファベット3文字を用いて名付けられている(第2表などを参照)、前述のように1つの観測点に複数の観測井が存在している場所があり、その場合はアルファベットの最後に数字をつけて観測井を区別している。また管を2重にした観測井もあり、内側と外側で異なる深さの地下水を測定しているため、それぞれ「-i」(内)、「-o」(外)を付けて区別している。観測の詳細やデータの解析方法などについては、小泉ほか(2004)や高橋ほか(2004)などで詳しく解説されているので参照されたい。

紀伊半島のHNG(第1図のNo.42)では、2004年7月14日から新たな地下水位の観測が開始されている。観測にはNEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)が1992年に掘削した井戸N4-HG-1が利用されている。深さは1,002mで、自然水位は地表面からおおよそ14mの位置にあり、20mの深さに水位計、温度計、電気伝導度計を設置している。ただしデータ取得間隔は上記の観測井とは異なり10分である。

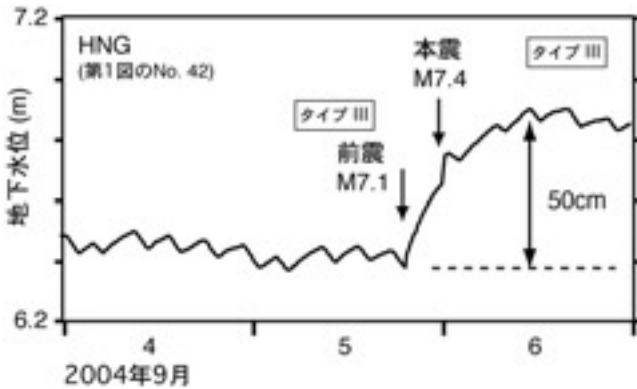
3. 地震に伴う地下水変動

2004年紀伊半島南東沖の地震活動では、前震と本震に伴って上記56観測井のうち47ヶ所以上で地下水位や自噴量に変化が生じた。その中から代表的な変化を20例挙げ、その結果を第2図に示した。また新設されたHNGについては、第3図に観測結果を示している。

まず第2図aにおいて地震時の水位変化を見てみると、様々な種類の変化が観測されていることがわか



第2図 地下水位の観測結果.



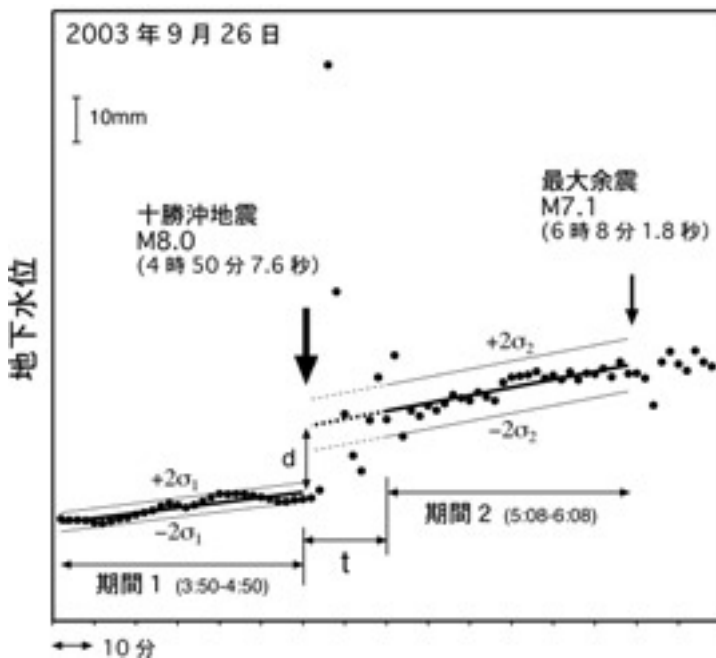
第3図
HNG観測井における地下水位の観測結果。

る。例えば、上から2番目のTKB3では前震および本震(矢印)に伴ってステップ状の上昇が観測されている。また、その下のTKB4では水位が地震波形のように揺れる「振動」の変化が、一番下のHAIでは徐々に水位が低下する変化が観測されている。

小泉ほか(2002)や佐藤ほか(2004)では、このような多様な変化の中からステップ状の変化の大きさを同定するため、第4図のような方法を提案している。ステップ状の水位変化に着目するのは、地盤の伸縮との比較を行うためである。地震とは主に地下の断層がずれることで起こるが、この断層のずれによって地盤が縮む地域や伸びる地域が生じ、その影響は広

範囲に及ぶことが知られている。この地盤の伸縮は、地震直後にステップ状に生じると考えられているため、ステップ状の地下水変化に着目して両者の比較を行う。

第4図は、2003年十勝沖地震時に観測された水位変化の1例で、水位が振動しながらステップ状に変化する典型的な例を示している(佐藤ほか, 2004)。各黒丸は、2分ごとに取得された水位記録である。地震前には緩やかな変化を描いていた水位は、地震後に一転して急上昇し、振動しながら次第に地震前のような直線的な変化に収束しているのがわかる。地震直前の1時間(期間1)と、地震後の最大余震直前の1時間



第4図
2003年十勝沖地震時に観測された地下水位が振動しながらステップ状に変化する例(佐藤ほか, 2004に加筆)。

第1表 水位・自噴量変化の分類基準と地震後の変化.

	dの有意性	地震後の水位変化のばらつき	tを変化させた時のdの値	地震後の水位変化
変化なし	有意ではない	地震前の2倍以下	—	変化なし
タイプⅠ	有意ではない	地震前の2倍以上	—	振動あり ステップ状変化なし
タイプⅡ	有意	—	ほぼ一定	ステップ状
タイプⅢ	有意	—	変化	ゆるやかな変化 (ステップ量は不明)

(期間2)について水位変化を直線で近似してみると、両者はほぼ平行になっている。また、期間1の直線よりも期間2の直線の方が明らかに上方に位置しており、これらのことは水位がステップ状に上昇したことを示している。この時のステップ量を、佐藤ほか(2004)ではd:両直線から推定される地震発生時の水位差、と定義している。また、このステップ量dの有意性については、以下のように判断されている。

まず、測定機器の分解能rの2倍の値と比較し、dが2rよりも小さい場合には、ステップ量は有意ではないと判断する。次に、dが2rを超える場合には、期間1および2の直線近似の残差の標準偏差値(それぞれ σ_1, σ_2)との比較を行う。具体的には、ステップ量の絶対値が各標準偏差の2倍の値の和を超えた場合、つまり $|d| > 2\sigma_1 + 2\sigma_2$ の場合に、ステップ量は有意と判断する。第4図で例えれば、 $-2\sigma_2$ を示す直線が、 $+2\sigma_1$ を示す直線よりも地震時に上に位置していれば、dは有意と判断される。

今回の2004年紀伊半島南東沖の地震活動時に観測された地下水位や自噴量の変化について、このdの有意性を基本として4つのタイプへの分類を行った(第1表)。まず、dが有意であるか否かで2つに分類し、dが有意ではないと判断されたものは「変化なし」もしくはタイプⅠ、dが有意なものはタイプⅡもしくはⅢとした。「変化なし」とタイプⅠとの分類は、地震前後の水位・湧出量のばらつきを比較し、地震後の水位・湧出量のばらつきが地震前の2倍を超えないもの($\sigma_2 < 2\sigma_1$)を「変化なし」とし、2倍を超えるもの($\sigma_2 > 2\sigma_1$)をタイプⅠとした。つまりタイプⅠは、ステップ状の変化は有意ではないが地震後の水位・湧出量のばらつきの大きなものであり、主な変化は振動となっている。一方、タイプⅡとⅢの分類については、第4図のtを変化させた時のdの変化の様子を調べ、

dが一定の値で落ち着いているものをタイプⅡとし、dが変化し続けるものをタイプⅢとした。つまり、タイプⅡは明らかにステップ状に変化しているもので、タイプⅢは変化は有意であるがステップ量を同定できなかったものとなっている。第2図aで具体例を示すと、TKB3の様なステップ状の変化はタイプⅡ、HAIの様なゆるやかな変化はタイプⅢと分類される。以上の分類の詳細については、佐藤ほか(2005b)を参照されたい。

このように、地震時の水位・自噴量変化を4種類に分類した結果を、第2表に示している。解析を行った56観測井のうち、いずれかのタイプに分類されたのは前震時に47観測井、本震時に50観測井であった。つまり、ほとんどの観測井では前震および本震に伴って何らかの変化が生じたことを示している。また第1図および第2図では、地図およびグラフ上に分類されたタイプが示されている。さらに第2表には、タイプⅡの変化のdの値、つまり水位のステップ量を示している。その量は、前震で -28.9mm から $+31.4\text{mm}$ の範囲、本震で -63.9mm から $+10.8\text{mm}$ の範囲であった。また本震時には、自噴量にもステップ状の変化が観測されており(HMN, AK6)、変化量は $+0.3$ から $+8.3\text{L/min}$ であった。

4. ステップ状の水位変化の解析

このようにして抽出されたタイプⅡの変化のステップ量について、佐藤ほか(2004)と同様の解析を行った。

小泉ほか(2002)の議論を参照して、2004年紀伊半島南東沖の地震活動に伴う水位変化を、以下の2種類に分類する。

- 1) 地盤の伸縮(地殻歪)の影響によるもの

第2表 2004年紀伊半島南東沖の地震活動に伴う水位変化のタイプとステップ量.

No.	観測井	前震 (19:07; M7.1)		本震 (23:57; M7.4)	
		タイプ	ステップ量 (mm)	タイプ	ステップ量 (mm)
1	TKB2	I	-	I	-
1	TKB3	II	△+8.2	II	△+6.1
1	TKB4	II	▼-1.3	I	-
2	KWS	III	▼	III	▼
3	HMN	-	-	II	△+0.3*
6	AK1	-	-	II	△+8.3*
7	KNG1	I	-	I	-
7	KNG2	II	▼-5.3	III	▼
7	KNG3	I	-	I	-
9	HAI	III	▼	III	▼
10	MKH	I	-	III	▼
11	OGS	III	▼	III	▼
12	KKG1	I	-	I	-
12	KKG2	III	△	II	△+2.4
13	DIT	III	▼	III	▼
14	HMZ1	II	▼-10.0	II	▼-15.8
14	HMZ2	I	-	III	▼
16	TYH1	III	▼	III	▼
16	TYH2	III	▼	III	▼
16	TYH3	III	▼	III	▼
17	GOT	II	▼-14.6	II	▼-16.8
18	SGR	-	-	III	▼
19	ATS	III	▼	III	▼
20	KWN-i	I	-	I	-
20	KWN-o	III	△	III	▼
21	NNN	II	▼-6.8	II	▼-14.4
22	HKS-i	I	-	III	▼
22	HKS-o	I	-	I	-
23	HTS	III	△	III	△
24	KNM	III	△	III	△
25	HNO	II	▼-28.9	II	▼-48.9
26	OHR	III	▼	III	▼
27	OBK1	II	▼-17.4	II	▼-35.2
27	OBK2	III	△	II	▼-16.0
28	KRY	III	▼	II	△+10.8
29	GOJ	III	▼	III	▼
30	NGR	II	▼-1.1	I	-
31	TNN	II	▼-7.9	II	▼-10.2
32	IKD	III	△	III	△
33	ING	III	△	I	-
34	TKZ	II	▼-16.4	II	▼-63.9
35	HRB	III	△	III	△
36	IKH	II	▼-1.9	I	-
37	SED	I	-	II	△+4.4
38	BND	II	△+1.9	II	△+6.5
39	YST1	II	△+31.4	II	△+6.5
39	YST2	III	△	II	△+5.6
39	YST3	I	-	I	-
40	YSK	I	-	I	-
41	M174	I	-	I	-
42	HNG	III	△	III	△

*: 湧出量の変化 (単位はL/min)

△: 水位の上昇, ▼: 水位の低下

2) その他の影響 (例えば地震動など) によるもの

まず、地震後に予想される地盤の伸縮の分布と観測井の分布とを比較してみる。地盤の伸縮によって地下水位の変化が生じる場合、一般に地盤が縮む地域では水位は上昇、伸びる地域では低下となる。もしこれに反する水位変化が観測された場合は、水位変化の主な要因は地盤の伸縮ではなく、その他の影響を反映しているものと考えられる。

第1図aとbの等値線は、地震後に予想される地盤の伸縮の分布を前震(a)と本震(b)について示している。点線で等値線が引かれている区域は予想される地盤の伸縮が縮み、実線の区域は伸びで、太実線はその境界を示している。計算は、速報地震断層モデル(国土地理院, 2004)に基づいて行った。具体的には、地殻を等方均質な半無限の弾性体と仮定して、モデルのような断層のずれが生じた場合の地盤の伸縮を、Okada (1992)を基にして作られたプログラムMICAP-G(内藤・吉川, 1999)を用いて計算している。

このようにして計算された地盤の伸縮の分布を第1図で見ると、両地震(aとb)ともに観測井の多くは伸びの領域に位置していることがわかる。したがって、地盤の伸縮から予想される地下水・自噴量の変化は、多くの観測井で低下と考えられる。

一方観測された水位や自噴量の変化については、それらの低下と上昇が混在する結果となった(第1図)。この低下と上昇の合計数を比較してみると、前震では低下が21、上昇が13、本震では低下が23、上昇が14となり、両地震ともに低下が上昇の1.5倍ほど多い結果となった。またこの数について解析を行った全観測井数56と比較すると、水位や自噴量の低下が見られた観測井は全体の38~41%にあたる。なお、第1図には「変化なし」の観測井はプロットしていないので、両地震の比較の際には注意が必要である。

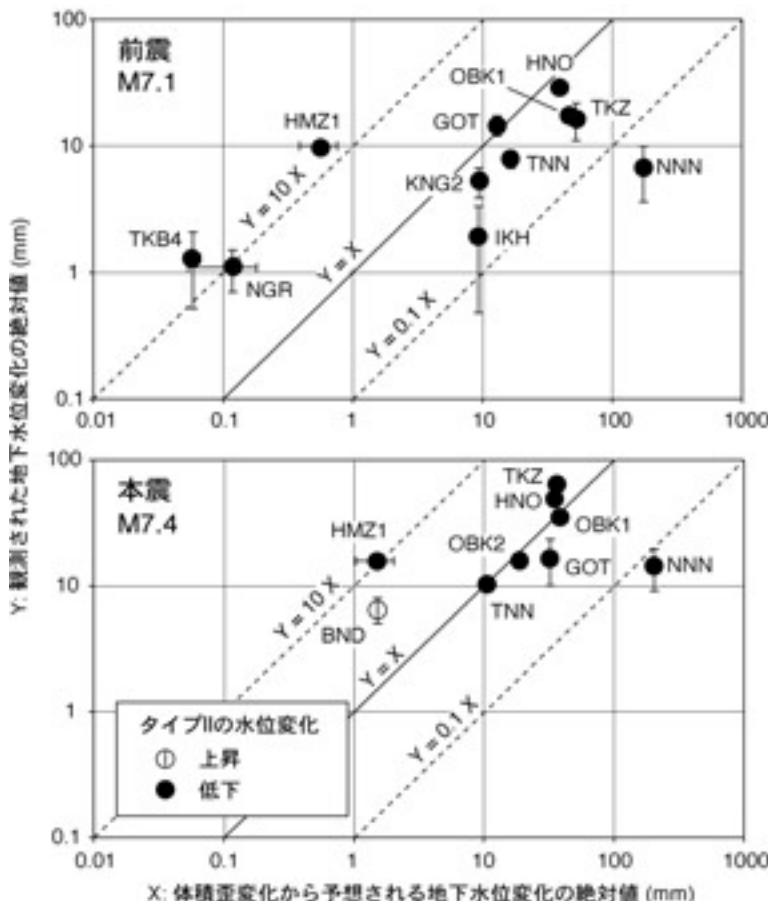
地盤の伸びが予想される地域で観測された水位や自噴量の低下については、その低下の第一の原因として地盤の伸びの影響が考えられる。これについては、次章(第5章)において定量的な比較によって検証を行う。一方上記のように、地盤の伸びが予想される地域にもかかわらず、水位や自噴量の上昇が観測されている井戸が多数存在する。その原因については、現在調査中である。少なくともこの上昇の変化は、地盤の伸びによってもたらされたものではないことは確実であろう。第6章で詳しく述べるが、2000年

以降の比較的大きな地震時における水位や自噴量の変化を調べてみると、どの地震に対しても地震後に上昇の変化が起きる井戸があることがわかってきた。もちろんこの上昇の変化は、地盤の伸縮に関係なく起きている。このような地震に対していつも水位や自噴量の上昇が起きるメカニズムとして、我々は液状化現象や帯水層内の透水性の変化などを考えている(第6章参照)。

5. 水位のステップ量と地盤の伸縮量との比較

地盤の伸びが予想される地域で生じた水位や自噴量の低下について、地震後に予想される地盤の伸縮量と、水位や自噴量の低下のステップ量とを比較してみる。たとえ地盤の伸びが予想される地域で水位低下が起きていたとしても、その低下量が地盤の伸びの

量から予想される大きさよりも極端に異なる場合には、地盤の伸びの影響と併せてさらに別の要因の影響も大きく受けている可能性が考えられるからである。水位変化量が極端に大きい、もしくは小さいという判断は、小泉ほか(2004)で述べている地下水位の体積歪変化に対する感度との比較を基に行なった。具体的には、水位の潮汐変化成分から地下水位の地盤伸縮(体積歪変化)に対する感度を求め、その値を断層モデルに基づいて計算できる地震後の地盤の伸縮量に掛けることによって、地震後に予想される水位変動量を推定した(予想値)。この値をタイプIIの変化のステップ量(観測値)と比較し、観測値が予想値の10倍以上もしくは10分の1以下の場合には、ステップ状の水位変化は地盤の伸縮以外の影響も強く受けていると判断した。なお、比較に用いた水位や自噴量の変化は、ステップ量を求めることのできた変



第5図 観測された地下水位変化と体積歪変化から予想される地下水位変化との関係。

化, つまりタイプIIの変化に対して行った.

第5図は, タイプIIの変化のステップ量の観測値の絶対値(Y軸)と, 前述の予想値の絶対値(X軸)との関係を, 前震および本震ごとに示したものである. 縦軸の誤差は, $2\sigma_1$, $2\sigma_2$, $2r$ の最大値を示しており, 横軸の誤差は, 地下水位の体積歪変化に対する感度を求める際に生じた誤差から計算されている.

この図を見ると, HMZ1は前震および本震のいずれにおいても $Y=10X$ の点線よりも上側にプロットされていることがわかる. これは, 観測されたステップ量が予想値の10倍を超えていることを示している. したがって, HMZ1で観測されたステップ状の水位変化は, 地盤の伸縮に加えて地震の揺れのような何か他の要因が大きく影響して生じたと考えられる. 一方NNNは, いずれの地震においても $Y=0.1X$ の線の下側にプロットされている. このことは, 観測されたステップ量が予想値の10分の1以下であったことを示している. NNNの通常時の地下水変化について, 北川(2004)は大気圧応答を用いた歪感度に関する解析を行っており, それによるとNNNでは他の観測井に比

べて不明瞭な解析結果しか得られていない. したがって, NNNの水位の歪感度の値には問題がある可能性があり, この詳細については現在調査中である.

$Y=10X$ と $Y=0.1X$ の線の間プロットされた観測井は, 前震が8観測井($Y=X$ の線から近い順にGOT, HNO, KNG2, TNN, OBK1, TKZ, IKH, NGR), 本震が7観測井(TNN, OBK1, OBK2, HNO, GOT, TKZ, BND)となっている. この数は, 解析を行った全観測井56の13~14%にあたる. これらの観測井で観測されたステップ状の水位変化量は, 地震時の地盤の伸縮から予想される水位変化量と比較的よく一致していることになる.

6. 最近の主な地震時における水位変化の比較

第1章で述べたように, 産総研の地下水観測網では2000年以降の比較的大きな地震に伴って水位や自噴量の変化が観測されている. そして, 前章で述べたような地震時の水位・自噴量の変化と地盤の伸縮との比較が行われている. 具体的には, 2000年鳥取県

第3表 最近の大きな地震時に観測された地下水位変化の様子.

観測井	2000年鳥取県西部地震	2001年芸予地震	2003年十勝沖地震	2004年紀伊半島南東沖	
	(高橋ほか, 2002)	(小泉ほか, 2002)	(佐藤ほか, 2004)	前震	本震
OBK1 (no. 27)	▽	△	△	▽	▽
TKZ (no. 34)	▽	△	◆	▽	▽
A TNN (no.31)	▽	▼	△	▽	▽
HNO (no. 25)	▽	◆	◆	▽	▽
GOT (no. 17)	◆	-	-	▽	▽
KNG (no. 7)	(▽)	-	◆*	▽	(▽)
IKH (no. 36)	▲	△	-	▽	◆
B NGR (no. 30)	▼	◆	●	▽	◆
OBK2 (no. 27)	▲	●	(△)	▲	▽
BND (no. 38)	◆	△	◆	▲	△
KNM (no. 24)	▲	△	△	▲	▲
IKD (no. 32)	▲	△	●	▲	▲
C OHR (no. 26)	▽	▼	▼	(▽)	(▽)
KWN-0 (no. 20)	▲	◆	△	▲	(▽)
TKB3 (no. 1)	●	-	△	▲	▲
SED (no. 37)	▽	△	●	◆	▲
NNN (no. 21)	▽	◆	●	(▽)	(▽)
GOJ (no. 29)	▽	◆	●	(▽)	(▽)
D HRB (no. 35)	▽	▼	●	▲	▲
YST2 (no. 39)	▽	-	◆	▲	▲
YST3 (no. 39)	▽	-	◆	▲	◆
TYH2 (no. 16)	▽	-	●*	(▽)	(▽)
YSK (no. 40)	◆	△	◆	◆	◆

白抜き印: 観測された地下水位の変化量と地盤の収縮から予想される水位変化量が比較的好く一致したもの

括弧印: 白抜き印に準じるが変化量がよく一致しない, もしくはステップ状以外の水位変化が観測されたもの

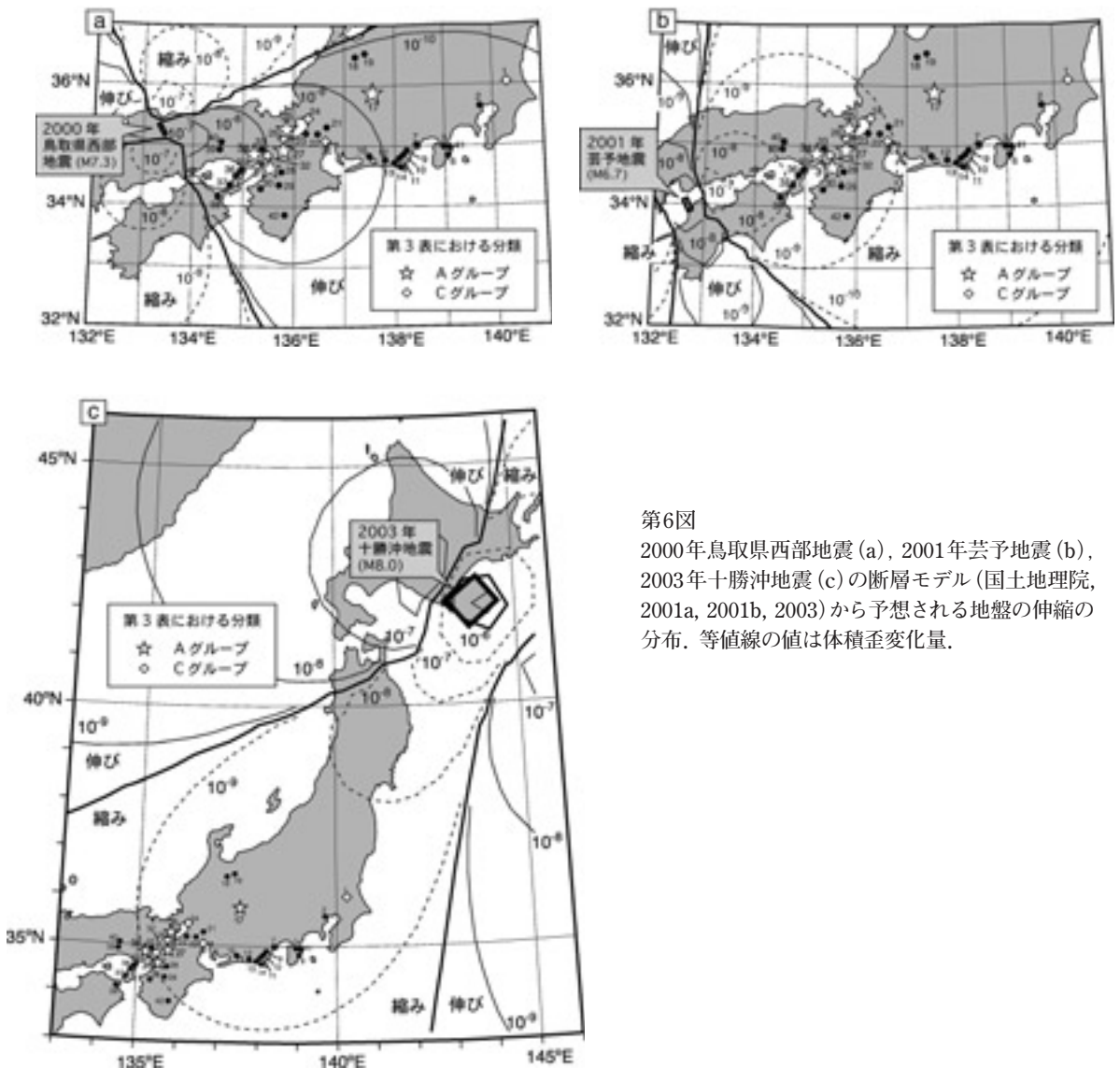
黒三角印: 観測された地下水位の変化の方向(低下or上昇)が地盤の伸縮から予想される水位変化の方向と一致しなかったもの

△▲: 地下水位の上昇, ▽▼: 地下水位の低下, ◆: 水位の振動, ●: 変化なし, *: 付録1参照

西部地震(M7.3)は高橋ほか(2002)によって、2001年
芸予地震(M6.7)は小泉ほか(2002)によって、2003年
十勝沖地震(M8.0)は佐藤ほか(2004)によって解析
が行われている。これらの解析の結果、地盤の伸縮
によって地下水位が変化すると定量的に説明できる
観測井はそれぞれ12ヶ所、8ヶ所、5ヶ所であった
(第3表の白抜き印)。

今回の2004年紀伊半島南東沖の地震活動に関し
ては、第5章における解析の結果、観測された地下
水位の変化量と地盤の伸縮から予想される水位変化
量とが比較的良好一致した観測井は、前震で8ヶ所、

本震で7ヶ所であった(第3表白抜き印)。具体的
には、第5図において $Y=10X$ と $Y=0.1X$ の線の間
にプロットされた観測井がこれにあたる。両線の間
にプロットされなかった観測井や、タイプⅢの変
化が見られた観測井は、第3表において括弧印で
示されている。また黒三角印は、観測された地下
水位の変化の方向(低下or上昇)と地盤の伸縮から
予想される水位変化の方向とが一致しなかったもの
を示し、三角印の上下方向は観測された地下水位
のそれぞれ上昇と低下を示す。なお、菱形印は水
位の振動を、丸印は変化なしを示す。



第6図

2000年鳥取県西部地震(a), 2001年芸予地震(b),
2003年十勝沖地震(c)の断層モデル(国土地理院,
2001a, 2001b, 2003)から予想される地盤の伸縮の
分布。等値線の値は体積歪変化量。

第3表では、観測井が上からA, B, C, Dと4つのグループに分類されている。AとBグループは、2004年紀伊半島南東沖の地震活動において白抜き印で示される観測井をまとめており、特にAグループは前震および本震ともに白抜き印で示される観測井となっている。一方CとDグループは、2004年紀伊半島南東沖の地震活動において白抜き印は得られなかったが、それ以前の3つの地震のいずれかにおいて白抜き印が得られた観測井を示している。その中でも特に、同じ向きの水位変化が5回の地震の中で3回以上見られた観測井を、Cグループにまとめている。本報では、このAとCグループに着目して議論を行う。また第6図には、前三者の地震に伴う地盤の伸縮分布が示されている。この地盤の伸縮分布は、第4章と同様に計算されており、計算に用いた断層モデルは2000年鳥取県西部地震(a)が国土地理院(2001a)、2001年芸予地震(b)が国土地理院(2001b)、2003年十勝沖地震(c)が国土地理院(2003)となっている。この図において、AとCグループの観測井は特別な印(A:星印, C:菱形印)を用いてプロットされている。

まずAグループであるが、その分布を地震時の地盤の伸縮の分布(第1図および第6図)と比較してみる。すると、2000年鳥取県西部地震ではすべての観測井が伸びの地域に、2001年芸予地震と2003年十勝沖地震では縮みの地域に、2004年紀伊半島南東沖の地震活動では前震、本震ともに伸びの地域に位置していることがわかる。つまり、地盤の伸縮変化パターンは伸び、縮み、縮み、伸び、伸びとなっている。したがって、第4章で議論した地盤の伸縮と水位変化との関係を参考にすると、予想される水位の変化パターンは2000年鳥取県西部地震から順番に、低下、上昇、上昇、低下、低下となるはずである。実際、Aグループの多くはこのような水位変化が観測されている(第3表)。特に1番目のOBK1ではすべての地震について白抜き印となっており、定量的にも地盤の伸縮によく対応した水位変化が見られたことを示している。したがってOBK1は、地震時の地盤の伸縮をよく表す観測井と言えるだろう。本報では、このような観測井のことを便宜的に「良い観測井」と称することにした。2番目のTKZは、2003年十勝沖地震を除いてすべて白抜き印となっている。第6図cで2003年十勝沖地震時の地盤の伸縮量を見てみると、TKZ(No.34)は 10^{-9} の線上に位置していることがわかる。この 10^{-9} という

縮み体積歪変化は、TKZの水位の歪感度を参考にすると、2mm程度の水位上昇を引き起こす地盤の縮みに相当する。しかし、2003年十勝沖地震前後の水位のばらつきはそれよりも大きく($2\sigma_1 + 2\sigma_2$ は約3mm)、もし地盤の縮みに対応したステップ状の水位上昇が起きていたとしても、それは有意とは判断されなかったと考えられる(佐藤ほか, 2004)。つまり、2003年十勝沖地震に関連してTKZでステップ状の変化が有意と判定されなかったとしても、それはごく正常であると考えられ、したがってTKZも「良い観測井」と言えるだろう。3番目のTNNは、2001年芸予地震を除いてすべて白抜き印となっている。しかし、この2001年芸予地震では、地盤の伸縮とは反する地下水変化が観測されており、「良い観測井」かどうかは今後の地震における変化を確認する必要がある。4番目と5番目のHNOとGOTについても、TNNと同じことが言えるだろう。

次にCグループであるが、1番目のKNMは5回のすべての地震に対して上昇の水位変化が観測されている。先に述べたように、地盤の伸縮変化パターンから予想される水位の変化パターンは、2000年鳥取県西部地震より順番に低下、上昇、上昇、低下、低下であったため、5回の地震時の水位変化がすべて上昇であることは、この水位変化は地盤の伸縮に対応したものではないことを示している。したがって、KNMで観測された水位上昇は、液状化現象や帯水層の透水性の変化などのような一方向のみに水位変化をもたらす原因によって生じたものと考えられる。液状化現象とは、地面の揺れに伴う土粒子の再配置によって間隙水圧が上昇し、高圧の地下水に土粒子が浮いたような状態になる現象を示す。間隙水圧の上昇は、地盤の伸縮に関係なく水位の上昇を引き起こす。また帯水層の透水性が増加した際は、その場所が地下水の流出域であった場合、地下水位は地盤の伸縮に関係なく上昇すると予想される(佐藤ほか, 2000)。KNMでは、液状化と透水性の増加のどちらか、もしくは両者が統合して地震時に水位上昇を引き起こしている可能性が考えられる。Cグループの他の観測井についても、KNMと同様な考察が適用できると考えられる。ただし3番目のOHRについては、水位変化がすべて低下となっている。OHRの水位低下については、その原因として液状化現象は考えにくく、透水性の増加による影響の可能性が考えられる。もし

OHRが地下水の涵養域に位置しているならば、帯水層の透水性が増加した場合、水位は低下すると考えられる。ちなみにOHRの標高は217mと比較的高いため、地下水の涵養域であっても矛盾はしない。

最後にBとDグループであるが、各地震に対する地下水位の反応はバラバラであり、「良い観測井」なのかそうでないのか現時点では判断できない。

7. おわりに

本研究では、2004年紀伊半島南東沖の地震活動に伴って観測された水位や自噴量の変化について取り上げた。まず、この地震活動時に予想される地盤の伸縮はほとんどの観測井において伸びであり、この地盤の伸びに対応するような水位や自噴量の変化、つまり低下の変化が見られた観測井の数は、解析を行った観測井の38～41%であった。次に、これらの観測井におけるステップ状の変化(タイプⅡ)に着目し、そのステップ量と予想される地盤の伸縮量との比較を行った。その結果、両者が比較的良好に一致した観測井は、解析を行った観測井の13～14%にあたるということが明らかとなった。

この13～14%という数値であるが、それが持つ意味を大きくするか小さくするかどうかは、今後の研究成果次第と考えられる。今回解析に用いた井戸はそのほとんどが研究用で、地震に伴う水位や地盤の伸縮などを測定するために掘削されたものが多い。そのような状況を考慮すると、13～14%という数値は小さいと感じられる。ただし、地下水位や自噴量が測定できる井戸は研究用だけではなく、その他にも無数に存在する。目的別にみても、飲料用をはじめ工業用、農業用、温泉用など多岐に渡る。これらの井戸の13～14%において、水位や自噴量が地盤の伸縮量に応じて変化をしているとすれば、それは大きな数値である。実際、2000年の有珠火山の噴火の際には、飲料用の井戸の水位が地盤の伸縮に応じて変化しており、マグマ上昇量の推定などに大きく貢献した(Matsumoto *et al.*, 2002)。このような一般の井戸をうまく活用することができれば、地震に伴う地盤の伸縮をより正確に捉えることができるようになると思われる。

それでは一般の井戸の中から、このような地盤の伸縮に応じて水位や自噴量が変化する井戸を効率よく

探し出すためには、どうしたらよいだろうか。その方法として、第6章で述べたような地盤の伸縮変化パターンを用いることを我々は考えている。

第3表の5つの地震時について、予想される地盤の伸縮量を第1図や第6図で見ると、大阪府、京都府、奈良県、滋賀県、三重県のほとんどの地域において、いずれの地震においても地盤の伸縮量が 10^{-9} を超えていることがわかる。そしてこの時の地盤の伸縮変化パターンは、2000年鳥取県西部地震から順番に伸び、縮み、縮み、伸び、伸びとなっている。これに対応する水位の変化パターンは、低下、上昇、上昇、低下、低下(自噴量の場合は、減少、増加、増加、減少、減少)であり、もしそのような水位や自噴量の変化パターンが一般の井戸で観測された場合、その井戸は地盤の伸縮に反応している井戸である可能性が高い。これらの5つの地震時に予想される 10^{-9} ～ 10^{-7} という地盤の伸縮量は、一般的な水位の歪感度を用いて水位変化量に換算すると1～100mm程度と考えられる。つまり、一般の井戸においてどれだけ微妙な変化が検出できるかどうかという点が、この研究の課題となるであろう。

第1章で述べたように、南海トラフでは南海地震や東南海地震の発生が危惧されている。今回の2004年紀伊半島南東沖の地震活動は、これらの大地震と比べると規模は小さかった。しかしそれにもかかわらず、数多くの地下水変化が今回観測されている。このことは、南海地震や東南海地震時にはさらに多くの地下水変化が観測される可能性があることを示唆している。それまでの間に、紀伊半島や四国においてAグループに属するような井戸を多く見つけ出し、地震前に発生するかもしれない地盤の伸縮異常を地下水によって捉えることができたらと考えている。

最後に、今回の地震活動により被災された方々から心からお見舞い申し上げます。

謝辞：査読者には貴重なコメントをいただきました。ここに記してお礼を述べたいと思います。

付録1：佐藤ほか(2004)とSato *et al.* (2004)では、観測井名「KNG (No.7)」と「TYH (No.16)」の表記を、間違っ「KSN」および「THY」と記している箇所があります。比較の際にはご注意ください。

文 献

- 紀伊民報 (2004) : 「思わぬ地震の置きみやげ 紀南の温泉 色や温度に変化」, 2004年9月11日版,
http://www.agara.co.jp/DAILY/20040911/20040911_004.html
- 気象庁 (2004) : 地震概況, 日本地震学会ニュースレター, 16 (4), 25-47.
- 北川有一・小泉尚嗣・高橋 誠・松本則夫・佐藤 努・桑原保人・伊藤久男・長 秋雄・佐藤隆司・佃 栄吉 (2004) : 近畿地方及びその周辺における産業技術総合研究所地下水観測点での地下水位の大気圧応答, 地質調査研究報告, 55 (5/6), 129-152.
- 小泉尚嗣・北川有一・高橋 誠・佐藤 努・松本則夫・伊藤久男・桑原保人・長 秋雄・佐藤隆司 (2002) : 2001年芸予地震前後の近畿地方およびその周辺における地下水・地殻歪変化, 地震, 第2輯, 55, 119-127.
- 小泉尚嗣・高橋 誠・松本則夫・佐藤 努・大谷 竜・北川有一 (2004) : 地震予知研究における水文学的・地球化学的手法の役割, 地質ニュース, no.596, 11-16.
- 国土地理院 (2001a) : 中国地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 65, 592-618.
- 国土地理院 (2001b) : 中国・四国・九州地方の地殻変動, 地震予知連絡会会報, 66, 486-512.
- 国土地理院 (2003) : 9月29日4時50分頃の釧路沖の地震に伴う地殻変動から推定した震源断層モデルについて,
<http://www.gsi.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2003/0926-2.htm>
- 国土地理院 (2004) : 9月5日23時57分頃の東海道沖の地震に伴う地殻変動 (第一報), <http://www.gsi.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2004/0906.htm>.
- Matsumoto, N., Sato, T., Matsushima, N., Akita, F., Shibata, T. and Suzuki, A. (2002) : Hydrological anomalies associated with crustal deformation before the 2000 eruption of Usu volcano, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 10.1029/2001GL013968.
- 内藤宏人・吉川澄夫 (1999) : 地殻変動解析支援プログラム MICAP-G の開発, 地震, 第2輯, 52, 101-103.
- Okada, Y. (1992) : Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 82, 1018-1040.
- 寒川 旭 (1997) : 揺れる大地-日本列島の地震史, 同朋舎出版, 東京, 272p.
- 佐藤 努・小泉尚嗣・中林憲一 (2005a) : 昭和南海地震で湯峯温泉の湧出は止まったのか?, 地質ニュース, no.609, 31-42.
- 佐藤 努・松本則夫・北川有一・小泉尚嗣・高橋 誠・桑原保人・長 秋雄・佐藤隆司・小澤邦雄 (2005b) : 2004年紀伊半島南東沖地震活動に伴う産総研地下水観測網における地下水位変動, 地質調査研究報告 (準備中).
- 佐藤 努・松本則夫・北川有一・小泉尚嗣・高橋 誠・桑原保人・伊藤久男・長 秋雄・佐藤隆司・小澤邦雄・田阪茂樹 (2004) : 2003年十勝沖地震に伴う地下水位変動 (速報), 地質ニュース, no.596, 35-41.
- Sato, T., Matsumoto, N., Kitagawa, Y., Koizumi, N., Takahashi, M., Kuwahara, Y., Ito, H., Cho, A. and Satoh, T. (2004) : Changes in groundwater level associated with the 2003 Tokachi-oki earthquake, *Earth Planets Space*, 56, 395-400.
- 佐藤 努・松本則夫・高橋 誠・太田英順・松島喜雄・秋田藤夫・柴田智郎・鈴木敦生 (2001) : 有珠山周辺における地下水観測, 地質調査研究報告, 52 (4/5), 143-148.
- 佐藤 努・酒井隆太郎・古屋和夫・児玉敏雄 (2000) : 地震後の湧出量から推定される水頭拡散率, 地下水技術, 42 (2), 16-22.
- 高橋 誠・小泉尚嗣・佐藤 努・松本則夫・伊藤久男・桑原保人・長 秋雄・佐藤隆司 (2002) : 2000年鳥取県西部地震前後の近畿地域およびその周辺地域における地下水位・地殻歪変化, 地震, 第2輯, 55, 75-82.
- 高橋 誠・松本則夫・佐藤 努・北川有一・大谷 竜・小泉尚嗣 (2004) : 地震予知研究のための地下水総合観測ネットワーク, 地質ニュース, no.596, 17-21.

SATO Tsutomu, MATSUMOTO Norio, KITAGAWA Yuichi, KOIZUMI Naoji, TAKAHASHI Makoto, KUWAHARA Yasuto, CHO Akio, SATOH Takashi and OZAWA Kunio (2005) : Report of changes in groundwater levels associated with the 2004 Off Kii-Peninsula earthquakes.

< 受付 : 2005年6月6日 >