

2003年十勝沖地震に伴う地下水位変動(速報)

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⁾
伊藤久男¹⁾・長 秋雄²⁾・佐藤隆司¹⁾・小澤邦雄³⁾・田阪茂樹⁴⁾

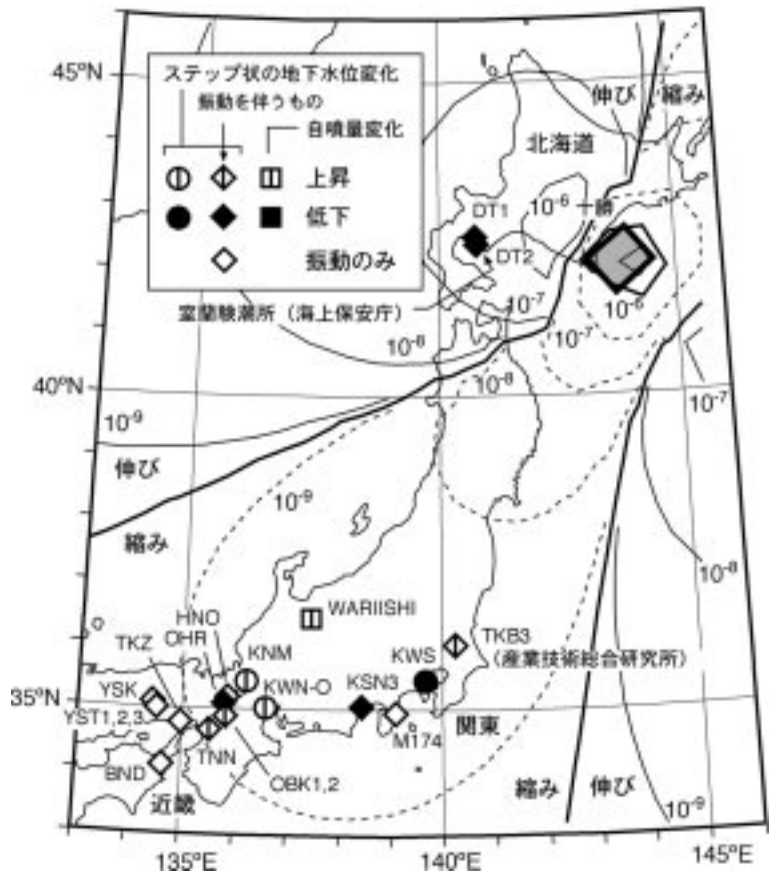
1. はじめに

2003年9月26日の午前4時50分、十勝沖を震源とするマグニチュード(M)8.0の地震が起きました。2003年十勝沖地震です。地震後、十勝地域の海岸沿いでは、波高が1mを越える津波が観測されました。テレビで川をさかのぼる津波や港の岸壁に乗り上げた漁船が放映されたことは、まだ記憶に新しいと思われます。

第1図の網掛けの長方形は、国土地理院によって推定されたこの地震の断層モデルです(国土地理院, 2003)。幅83.0km、長さ85.7kmに及ぶこの地震の断層は、十勝沖の深さ51.8から19.7kmの位置に北西側に22度傾斜して横たわっており、地震時の断層のずれは5.19m(逆断層型)と計算されています。先に述べた大規模な津波も、この大きな断層のずれによって海面が上昇し、それが大波となって海岸に打ち寄せたものです。

今回の地震はM8クラスの大規模地震のため余震の規模も大きく、最大の余震の規模はM7.1でした。この最大余震は、本震から1時間18分後の午前6時8分に起きており、震源は本震から西へ30kmほど離れた場所でした。

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の変動が観測されました。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す。本報では、この地下水位変動について報告いたします。



第1図 2003年十勝沖地震に伴う地下水位変動の分布と断層モデル(網掛け四角)から予想される地盤の伸縮の分布。

1) 産総研 地球科学情報研究部門
2) 産総研 地図資源環境研究部門
3) 静岡県 総務部防災局
4) 岐阜大学 総合情報メディアセンター

キーワード: 2003年十勝沖地震, 地下水位, 観測井, 地殻歪

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44の地下水観測井における観測結果についてです。そのうち42の観測井では産総研が直接観測を行っていますが、残りの2観測井では静岡県や岐阜県によって観測が行われています。また前者の42観測井を目的別に分けると、40の観測井は関東・東海・近畿地域の地震予知研究のため、残りの2つの観測井は有珠山の火山噴火予知研究のために整備されています。今回の地震は北海道で生じたため、残念ながら地震予知研究のための観測井は震源から1,000km以上も離れており、震源から最も近い観測井は火山噴火予知研究のための有珠山付近の観測井(震源から250km)となりました。

地震予知研究のための地下水観測は、1970年代の東海地震予知のための各種観測の整備に伴って駿河湾周辺地域に設置されました。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ます。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球科学情報研究部門まで送られています。この観測の詳細やデータの解析方法などについては、本号に掲載されている小泉ほか(2004)や高橋ほか(2004)などで詳しく解説されていますのでご参照下さい。

産総研の地下水観測施設には、1つの施設に複数本の観測井が存在する場合があります。例えば、TKB地点には4本の観測井が存在し、我々はその観測井をTKB1、TKB2・・・と番号を付けて呼んでいます。つまり、3文字のアルファベットの後に数字が付いている観測井名は、複数本観測井が存在する場合を示しています。例外として、観測井が2重管になっていて外側と内側で異なる深さの地下水を測定している地点もあり、その場合、内管には「-I」、外管には「-O」を付けて表記しています。例えばKWN地点の外管を示す場合、KWN-Oと表記されます(第1図)。

有珠山周辺の観測施設は、有珠火山2000年噴火活動を契機に整備されました。場所は第1図のDT1とDT2です。これらの施設にはそれぞれ深さ180mの井戸が1994年から存在し、北海道経済産

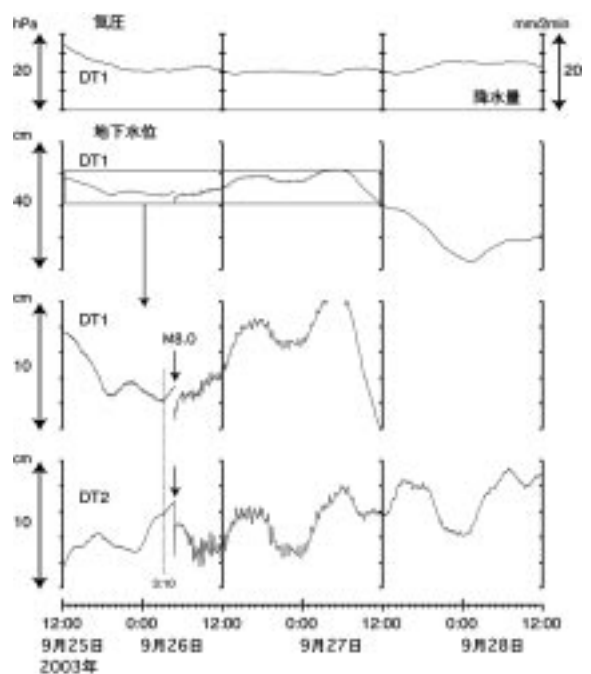
業局によって地下水利用適正化調査のための観測が行われていました。これらの観測井、特にDT1では、有珠火山2000年噴火の前に地下水が自然に湧き出す現象、つまり自噴現象が観測されました(佐藤ほか、2004)。噴火の準備段階にあたるマグマの上昇に伴って火山の周囲で大規模な地殻歪の変化が生じ、地下水の自噴が起きたと考えられています。産総研では、経産局の観測を引き継ぐ形で噴火後から地下水位の観測を行っています。

そのほかにも、静岡県の伊東温泉および岐阜県の割石温泉では、それぞれの地方自治体によって地下水観測が行われています。伊東温泉では、静岡県によって温泉井戸の水位が観測されています(第1図のM174)。一方、割石温泉では岐阜県によって温泉井戸の自噴量が観測されています(第1図のWARIISHI)。

3. 地震に伴う地下水変動

2003年十勝沖地震に伴う地下水変動は、第2図aからdまでと第4図に示しました。これらの変化について、順番に説明いたします。

第2図aは、有珠火山周辺のDT1およびDT2における地下水観測について、9月25日の12:00か



第2図a 地下水位の観測結果。

ら28日の12:00までの3日間の観測結果を示したものです。上段から気圧と降水量、DT1の水位、同水位の拡大図、DT2の水位を示しています。

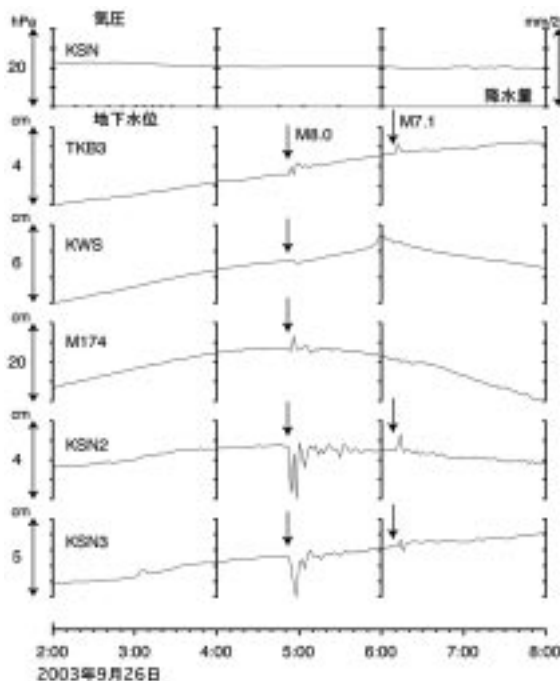
2003年十勝沖地震はM8.0と書いた矢印で示した時間に発生し、その直後にDT1およびDT2の水位に明らかな低下が観測されています。両水位には潮汐の影響と思われる半日周期の変動がみられており、地震時の水位の低下量はこれらの半日周期の変動の半分程度となっています。両水位は地震に伴って一度大きく低下し、すぐに50%程度まで回復して地震前と同じように半日周期の変動を描き始めていますが、地震前とは大きく異なり、地震後1-2時間経ってからギザギザとした短周期の変動が加わっています。この短周期の変動について詳しく調べてみると、卓越周期はDT1およびDT2で共に39分と53分で、継続時間はDT1で約1日、DT2で約3日に及んでいます。その他の変化として挙げられるのは、地震前においてDT1およびDT2に共通したわずかな水位上昇がみられることです。水位が上昇し始める時間もほぼ一致しており、地震の1時間40分前の午前3時10分にあたります(図中の点線)。ただしこの水位上昇の速度は、半日周期の変動と同じような速度であるため、今

後詳細な解析を行わなければ有意な上昇であると断定することは難しいと思われます。

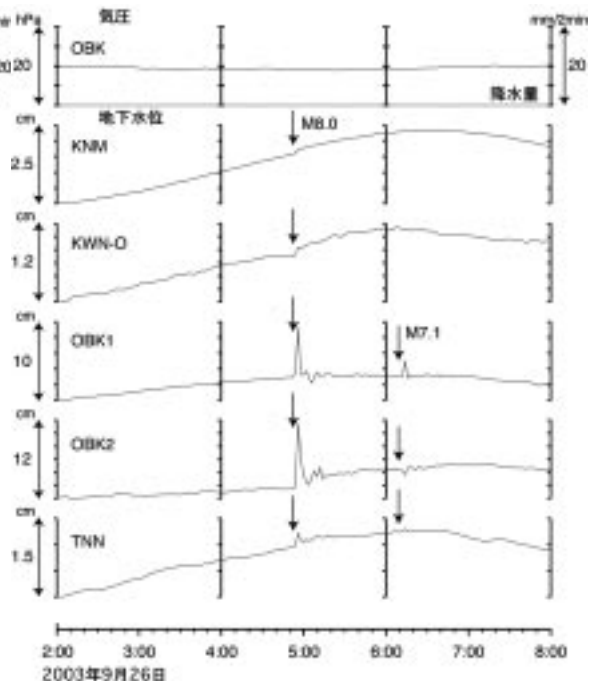
第2図bからdまでは、関東・東海・近畿地域における地下水位の観測結果の中で代表的と思われる変化を示しています。表示した期間は、地震当日の2:00から8:00までの6時間です。それぞれの図において、最上段が気圧と降水量、2段目から6段目までが水位となっており、データはすべて2分値です。また4時50分の矢印は本震を、6時8分の矢印は最大余震を示しています。

本震に伴う地下水位変動を見てみると、その多くは本震直後にスパイク状に上昇もしくは下降し、その後はゆらゆらと水面が揺れているような変化を示しています。その水位の振動の周期はサンプリング間隔の2分程度かそれよりも短く、継続時間もほとんどが1時間以内です。そこで我々は、このような変化のことを「振動」と呼ぶことにしました。

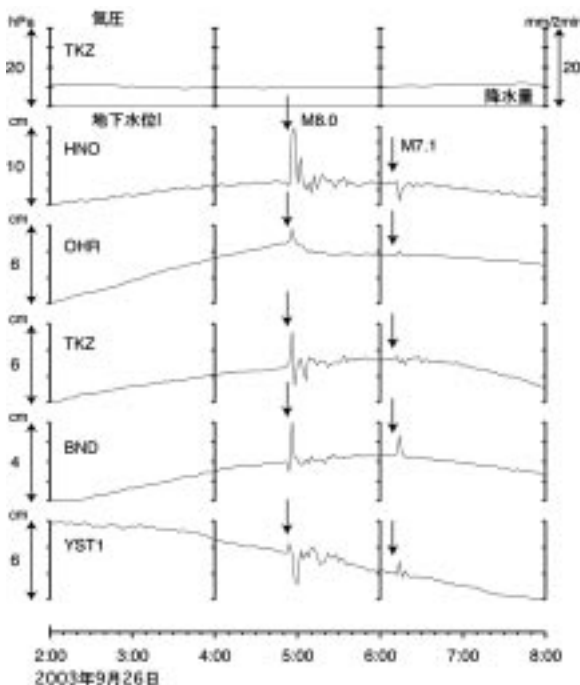
振動以外の変化として、ステップ状の変化も見ることができます。例えば第2図cのKNMでは、本震の直後に水位が上昇しているのがわかります。また、同図のOBK2のように、振動しながらも水位が上昇している例も見ることができます。ただしこの場合、水位が振動しているためにその上昇量が有



第2図b 地下水位の観測結果。



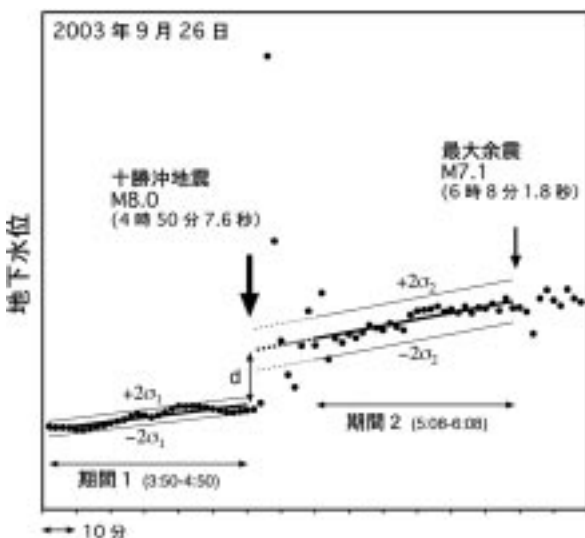
第2図c 地下水位の観測結果。



第2図d 地下水位の観測結果.

意であるかどうかを目視で判断することは難しいと思われます. そこで我々は, 以下に示す方法を用いてステップ状の変化の有意性を判断しました.

第3図は, 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ます. 各黒丸は, 2分ごとにサンプリングされた水位記録です. この水位記



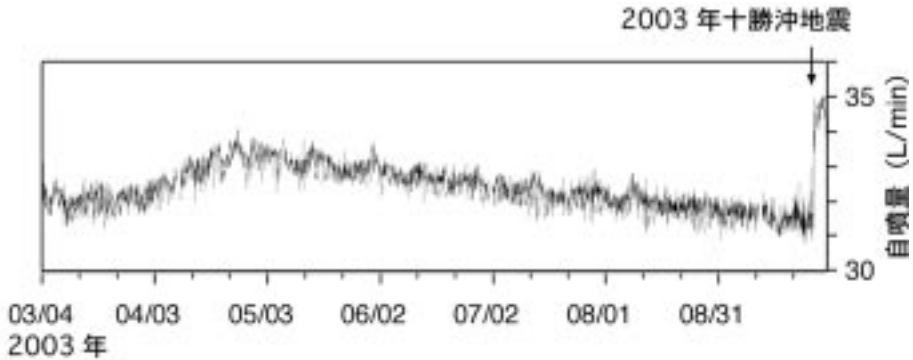
第3図 地震に伴って地下水位が振動しながらステップ状に変化する例.

録を見ると, 地震前には緩やかな変化をしていた水位は本震直後に急上昇し, その後振動しながら収束し, 最大余震時にまた振動するという変化を示しています. この例の場合, 最大余震前に収束した値は明らかに地震前の値よりも高いように思われます. そこで我々は小泉ほか(2002)を参考にして, 最大余震前に収束した値を直線回帰によって求め, それを地震前のデータにおける直線回帰結果と比較することによって, ステップ状の変化量(d)を推定することにしました. もし, この変化量が水位計の分解能や地震前後のデータのばらつきよりも十分大きい場合は, ステップ状の変化が有意であると判断できるでしょう.

具体的な計算方法は次の通りです. まず, 地震前後における水位データの直線回帰計算を, それぞれ第3図の期間1および期間2において行いました. 期間1は本震直前までの1時間(3時50分から4時50分まで), 期間2は最大余震直前までの1時間(5時8分から6時8分まで)です. 次に, 得られた回帰直線と水位データとの差, つまり残差を求め, 残差の標準偏差をそれぞれ σ_1 , σ_2 としました. またステップ状の変化量dは, 期間1の回帰直線における4時50分の値と, 期間2の回帰直線を4時52分まで延長した時(図中の点線)の値との差としました. 最後にdの値が σ_1 , σ_2 , そして水位計の分解能rのそれぞれの値の2倍よりも大きい場合, ステップ状の変化が有意であると判断しました.

このようにしてステップ状の変化が有意であると判断された観測井を, 第1図に示しています. ステップ状の変化が上昇であった観測井は6ヵ所で, 縦線付きの丸もしくは菱形印で示されています. 一方, 低下であった観測井は5ヵ所で, 黒丸もしくは黒菱形印で示されています. 丸印は振動を伴わないもの, 菱形印は振動を伴うものを示しています. 白抜き菱形印は, 振動が観測されたがステップ状の変化は有意ではなかった観測井を示しており, 計8ヵ所でした.

第4図は割石温泉の自噴量について, 2003年3月から9月までの7ヵ月間のデータを示しています. 地震前には31.5L/min程度であった自噴量が, 地震後に35L/minまで上昇していることがわかります.



第4図 割石温泉における自噴量の観測結果。

4. 地下水位変動の原因について

地震が地下水位にどのような影響を与えるのかという点については、小泉ほか(2002)で詳しく議論されています。これを参照すると、2003年十勝沖地震に伴う水位変化は、主に以下の2種類の要因によってもたらされたと考えられます。

- 1) 地盤の伸縮(地殻歪)の影響
- 2) その他の影響(例えば地震動など)

もし観測井が地震断層の近傍に位置していたのであれば、断層からの物質移動や地盤の昇降の影響も地下水位の変化に反映されていたかもしれません。しかし、今回は最も近い観測井でも震源から250kmも離れており、そのような影響は現れていないと考えられます。そこで我々は上の2種類に要因を絞り、観測された水位変化について考察することにしました。

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ます。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変化は上昇、伸びる地域では低下となります。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ます。

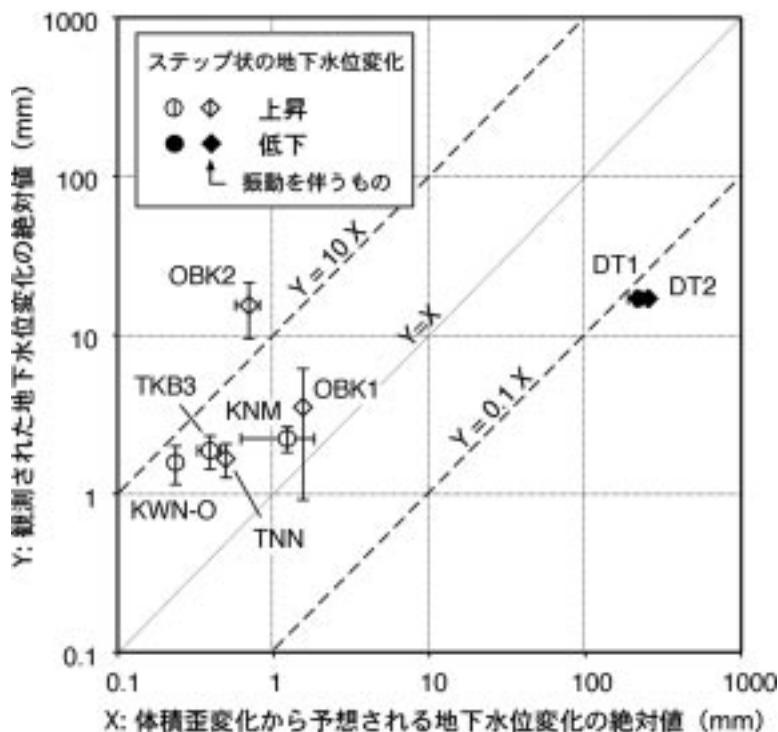
第1図の等値線は、地震後に予想される地盤の伸縮の分布を示しています。点線で等値線が引かれている区域は予想される地盤の伸縮が縮み、実線の区域は伸びで、太実線はその境界を示しています。計算は、前に述べた断層モデル(国土地理院, 2003)に基づいて行いました。具体的には、地

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)を用いて計算しました。

この地盤の伸縮の分布と地下水変動の分布とを比較すると、ステップ状の水位上昇が有意であった観測井は、すべて地震後に地盤の縮みが予想される区域に位置しています。一方、ステップ状の水位低下が有意であった観測井について、DT1とDT2は地盤の伸びが予想される区域に分布しているものの、残りの3つの観測井(KWS, KSN3, OHR)は地盤の縮みが予想される区域に分布しています。したがって後者の3観測井における水位低下は、地盤の伸縮以外の要因によって生じた可能性が考えられます。

地震後に自噴量が増加した割石温泉は、地盤の縮みが予想される区域に分布しています。自噴量の場合も水位と同様に、地盤が縮む際に増加すると考えられることから、地震時の自噴量の増加に地盤の縮みが影響している可能性が考えられます。

次に、地震後に予想される地盤の伸縮量と水位の変動量とを比較してみます。たとえ水位上昇が地盤の縮みが予想される地域で起きていたとしても、その上昇量が極端に大きい場合には、地盤の縮み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ます。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いました。具体的には、水位の潮汐変化成分から地下水位の



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。

体積歪変化に対する感度を求め、その値を地震後に予想される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ました。この値を実際に観測されたステップ状の水位変化量と比較し、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、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ものと判断しました。

第5図は、観測されたステップ状の水位変化量の絶対値 (Y軸) と、地震後に予想される水位変化量の絶対値 (X軸) との関係を示したものです。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ます。この図を見ると、OBK2は $Y=X$ の線から最も離れており、 $Y=10X$ の線を越えた場所にプロットされていることがわかります。これは、水位変化の観測値が予想値の10倍を超えていることを示しています。したがって、OBK2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別の要因が大きく影響して生じたものと考えられます。一方、DT1およびDT2は $Y=0.1X$ の線を越えた場所にプロットされています。このことは、水位

変化の観測値が予想値の10分の1以下であったことを示しています。DT1およびDT2観測井は、有珠火山2000年噴火の際にマグマの上昇に伴う地盤の伸縮を敏感に感じて水位が変化していた (Matsumoto *et al.*, 2002) だけに、このような結果は意外でした。この理由については現在調査中です。

$Y=10X$ と $Y=0.1X$ の線の間プロットされた観測井は、 $Y=X$ の線から近い順にOBK1, KNM, TNN, TKB3, KWN-Oとなっています。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、地震時に予想される水位変化量とよく一致しており、したがってこれらの水位変化は主に地盤の伸縮によって生じたものと考えられます。特にOBK1とKNMは、2001年芸予地震の際にも地盤の伸縮に応じた水位変化が観測されています (小泉ほか, 2002)。このように地震時の地下水位変化についての解析・検討を積み重ねていくことによって、地盤の伸縮に応じて地下水位変化が現れる観測井を絞り込むことができると考えられます。

割石温泉については、観測項目が自噴量であったため第5図にプロットして検討することができませんでした。そこで水位と同様に、潮汐変化を用いて自噴量の体積歪変化に対する感度を求め、地

震時に観測された自噴量変化量と、地盤の伸縮から予想される自噴量変化量とを比較しました。すると、観測値は予想値の10倍を超える結果となりました。これは第5図で例えば、OBK2と同様に $Y=10X$ の線を越えてプロットされることとなります。したがって割石温泉で観測された自噴量変化は、地盤の伸縮に加えて地震の揺れのような何か別の要因が大きく影響して生じたものと考えられます。

5. おわりに

近畿地域の西部に位置する多くの観測井では、水位の振動は観測されたものの、有意なステップ状の変化は観測されませんでした(第1図)。これは、震源からの距離が1,200kmと非常に遠かったために地盤の伸縮はごくわずかしき起こらず、地震の揺れなどの影響によって水位の振動のみが生じたためと考えられます。第1図を見ると、これらの観測井が位置する地域の地盤の伸縮による体積歪変化は、 10^{-9} 以下と予想されます。小泉ほか(1999)によって求められた水位変化の体積歪に対する感度を参考にとると、 10^{-9} というわずかな体積歪変化が引き起こしうる水位変化は1mm程度と予想されます。このようなわずかな水位変化では、たとえ観測されたとしても $2\sigma_1$ 、 $2\sigma_2$ 、 $2r$ のどれかの値よりも小さくなってしまい、その場合は有意な変化とは判断されないと考えられます。高橋ほか(2002)や小泉ほか(2002)を参考にとると、2000年鳥取県西部地震や2001年芸予地震の際には、震源が近く地震時の体積歪変化が今回よりは大きいこともあって、これらの観測井においても地盤の伸縮によると思われる水位変動が観測されています。したがって、今回の地震でステップ状の水位変化が現れなかったとしても、そのことがそのまま体積歪変化に対する感度の悪さを示すものではないと考えられます。

DT1およびDT2では、地震直後のステップ状の水位低下に加えて、地震から1-2時間後から始まる卓越周期39分と53分の振動や、地震前の3時10分から始まる水位上昇らしき変化が観測されています。両者の原因はまだよくわかりませんが、前者の水位の振動については津波に関連する変化である可能性が考えられます。気象庁(2003)がまとめた2003年十勝沖地震に関する報告において、

海上保安庁の室蘭験潮所で観測された津波記録が掲載されており、その振幅は50から60cm程度、卓越周期はほぼ1時間と見てとることができます。DT1およびDT2は海岸からそれぞれ1,500m、500mの距離に位置しており、室蘭で観測されたような周期がほぼ1時間の津波によって卓越周期53分の水位振動が生じることは十分考えられます。今後は、津波記録との比較を行い、詳細な解析を進めていきたいと考えています。

最後に、今回の地震により被災された方々からのお見舞い申し上げます。

文 献

- 気象庁(2003):地震概況. 日本地震学会ニュースレター, 15(4), 16-26.
- 国土地理院(2003): <http://www.gsi.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2003/0926-2.htm>
- 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.
- 小泉尚嗣・佃 栄吉・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(1999):近畿およびその周辺地域における地震予知研究のための地質調査所における地下水位観測. 温泉科学, 49, 18-33.
- 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.
- 佐藤 努・松本則夫・太田英順・松島喜雄(2004):噴火の前に湧き出した地下水, 産総研シリーズ「火山-噴火に挑む-」, 丸善, 東京, 121-139.
- 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):産総研 地震地下水観測ネットワーク, 地質ニュース, no.596, 17-21.
- SATO Tsumotomu, MATSUMOTO Norio, KITAGAWA Yuichi, KOIZUMI Naoji, TAKAHASHI Makoto, KUWAHARA Yasuto, ITO Hisao, CHO Akio, SATOH Takashi, OZAWA Kunio and TASAKA Shigeki (2004): Report of changes in groundwater level associated with the 2003 Tokachi-oki earthquake.

<受付:2004年2月18日>