

三ヶ日観測点で夏季に見られる特徴的な体積歪・水位変化の原因特定とモデル化

Source identification and modeling of characteristic volumetric strain and water level changes at Mikkabi observed during summer

小林昭夫¹, 山本剛靖², 近澤 心³, 木村一洋³, 吉田明夫⁴
Akio KOBAYASHI¹, Takeyasu YAMAMOTO², Shin CHIKASAWA³, Kazuhiro KIMURA³
and Akio YOSHIDA⁴

(Received April 24, 2009; Accepted June 12, 2009)

1 はじめに

気象庁の埋込式体積歪観測網の三ヶ日観測点では、2007 年頃まで毎年夏季に特徴的な歪変化が観測されていた。この歪変化と同期して同じ観測孔内の地下水水位にも変化が見られた。また、歪変化は水平距離で約 80m 離れた、より浅い部分に設置されている古い歪計にも現れていた。このため、三ヶ日観測点の特徴的な歪変化は地下水の汲み上げに関するものと想像されていたが、これまでの現地調査では原因が特定されていなかった。竹中・吉田 (2000) は、地下水水位の変化は歪変化に比べて緩慢で、その変化のピークは歪変化より遅れる傾向があり、水位変化の微分が歪変化と似ていることを指摘した。

地下水水位に伴う歪変化はこれまでもいくつか報告されている。向井・藤森 (2005) は野島断層近くのボアホールにおける歪観測で、自然湧水していた孔口を密封したところ縮みの歪変化が現れたことを報告し、これを間隙水圧の上昇による変化としている。気象研究所 (1998) は琵琶湖西岸の今津観測点において、水位と逆相関の歪変化 (水位上昇が縮み歪に対応) が見られるとしている。吉田・他 (1984) は気象庁の歪観測点で、水位の上昇に対応して、網代では縮み歪、静岡では伸び歪 (いずれも旧観測点) が観測されることを指摘した。松島・他 (2008) は伊良湖観測点近くの地下水の汲み上げ (揚水) により緩和的な縮み歪が観測されることを報告している。

このように地下水と歪変化の関係は多様なものがあるが、水位変化の微分が歪変化と対応しているような関係は、三ヶ日観測点以外に報告されていない。

本論文では、三ヶ日観測点の夏季の特徴的な歪変化が、観測点近くの井戸における揚水による人為的なものであることが判明したことを報告し、三ヶ日における揚水による歪変化と水位変化の関係について一つのモデルを提案する。

2 歪変化と水位変化の特徴

東海地域の歪観測点の位置を Fig. 1 に示す。三ヶ

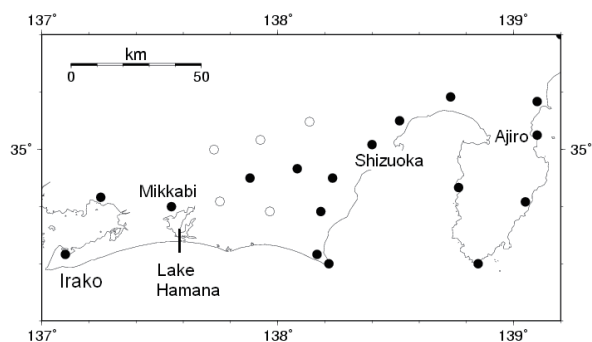


Fig. 1. Locations of strainmeters installed by the Japan Meteorological Agency and the Shizuoka Prefectural Government. Closed and open circles represent stations for volumetric and multi-component strainmeters, respectively.

¹ 気象研究所地震火山研究部, Seismology and Volcanology Research Department, Meteorological Research Institute

² 札幌管区気象台, Sapporo District Meteorological Observatory

³ 地震火山部地震予知情報課, Earthquake Prediction Information Division, Seismological and Volcanological Department

⁴ 神奈川県温泉地学研究所, Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture

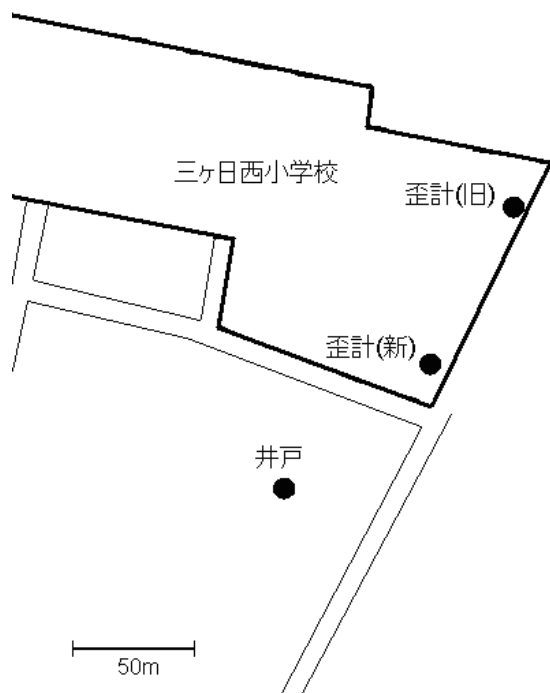


Fig. 2. Locations of new and old strainmeters and the nearby pumping well at Mikkabi.

日は浜名湖の北側に位置し、周囲を山で囲まれている。三ヶ日観測点には2カ所に体積歪計(末廣, 1979)が埋設されている。これらの観測点の位置関係を Fig. 2 に示す。最初の歪計は 1975 年に設置され、センサーの深さは 51m である(以後、旧観測点と呼ぶ)。新しい歪計は 1994 年に設置され、センサーの深さは 216m である(以後、新観測点と呼ぶ)。両者間の水平距離は約 80m で、標高差はほとんどない。新観測点の観測孔ではケーシングに通水口(深さ 100~105m)を開けて地下水水位も観測している。観測孔内の地下水水位は地表から 7~9m ほど下である。

三ヶ日の新旧観測点において夏季に見られた特徴的な歪変化と水位変化の例を Fig. 3 に示す。2007 年頃まで 7 月から 8 月にかけての期間に毎年のように数回の歪変化が見られた。新観測点における歪変化は、半日ほど急激に縮んだ後に 3 日程度かけて緩和的に元のレベルまで戻るパターンで、旧観測点でもほぼ同様の変化が見られる。2 日間における 1 回の変化の詳細を Fig. 4 に示す。特徴的な歪変化の大きさは新旧観測点で同程度である。また、新観測点では単調な縮みの歪が観測されるが、旧観測点では縮み変化の始まり部分と終わり部分で異なる変化を伴う。両観測点での変化の違いの詳細については後で

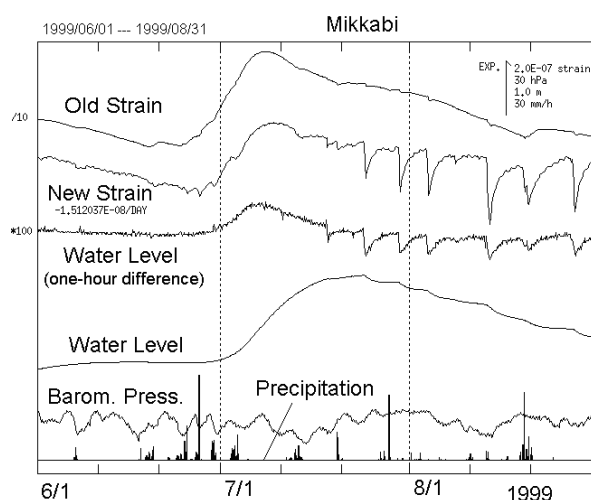


Fig. 3. Characteristic changes observed during summer at the Mikkabi station. Changes during three months in 1999 are shown. The scale for the old strainmeter is one tenth of that for the new strainmeter, therefore the scale for the one-hour difference in water level is amplified 100 times.

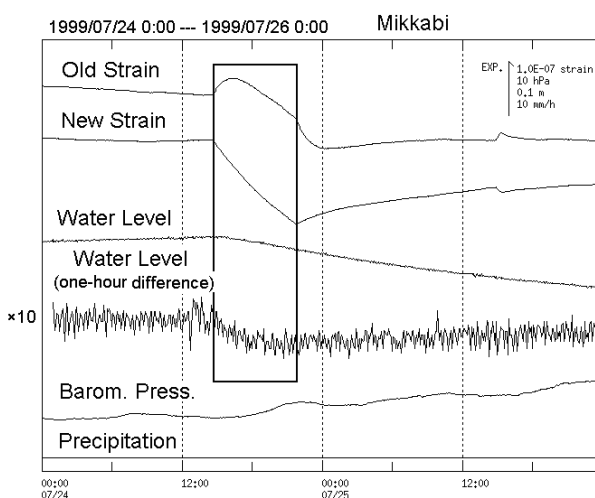


Fig. 4. Characteristic changes observed during summer at the Mikkabi station (over two days). The scale for the one-hour difference in water level is amplified 10 times. The rectangle represents the period when it is thought that water pumping is performed.

議論する。約 80m 離れた二つの歪計で同期した変化が見られることから、これらの変化がそれぞれの観測孔内に限られた現象ではないことがわかる。Fig. 3 では 6 月末の多量の降水により地下水水位の上昇とともに伸びの歪変化が 7 月上旬にかけて見られる。そ

これらの歪変化量は新旧観測点で 10 倍ほど異なるが、これはそれぞれの歪計に影響を与える帯水層水位の降雨による変化の仕方の違いや、各帯水層と歪計との位置関係によるものと思われる。

3 歪・水位変化の原因

三ヶ日観測点の周辺の施設への電話調査の結果、新観測点から南西に 80m ほど離れた個人宅の井戸での揚水状況と歪・水位変化の時期、頻度などが一致していることがわかった。個人宅は新旧観測点より 5m ほど標高が低い。2007 年秋の定期点検の際に現地を訪れ、試験的に揚水を依頼し、4 時間余りの揚水と同期して新観測点において縮みの歪変化が現れることを確認した。現地での聞き取り調査およびその後 2009 年 5 月の電話調査の概要は以下の通りである。

- ・井戸の深さは 40m ほどで、水位は不明である。
- ・井戸から汲み上げた水は、20 年ほど前までは隣にあった工場の冷却水として、その後は自宅のプール用に夏季に使用していた。
- ・ポンプは電動だが水量は安定せず、15 時間程度でプール (2×8×1.2m 程度) が一杯になった。
- ・2007、2008 年はプールに水をためて使用していないが、試験的にポンプを回したかもしれない。
- ・2004 年以降に周辺で地下水の汲み上げが悪くなったという話は聞いていない。

この聞き取りに基づく平均揚水速度は毎分 21 リットルとなる。揚水試験時に、容量 20 リットルのバケツが一杯になるまでの時間を測定したところ 2 分ほどかかった。このときの揚水の勢いはいつもより弱いとのことだった。歪・水位記録を確認すると、1996 年以降では毎年数回あった変化が最近は少なくなり、2007 年は小さいものが 1 回あっただけで、2008 年には変化がなかった。井戸の使用状況および現地での揚水試験によって実際に歪変化が観測されたことから、この井戸での揚水が夏季の特徴的な歪変化の原因であると考えられる。

1 回あたりの歪変化量と変化の継続時間の関係を Fig. 5 に示す。2003 年以前 (▲印) は継続時間が長いと歪変化量も大きいという関係があるのに対し、2004 年以降 (△印) は継続時間が長くても歪変化量は大きくなっていない。帯水層を含む地下の状態が 2004 年前後を境に変化して、同じ水量を汲み上げて

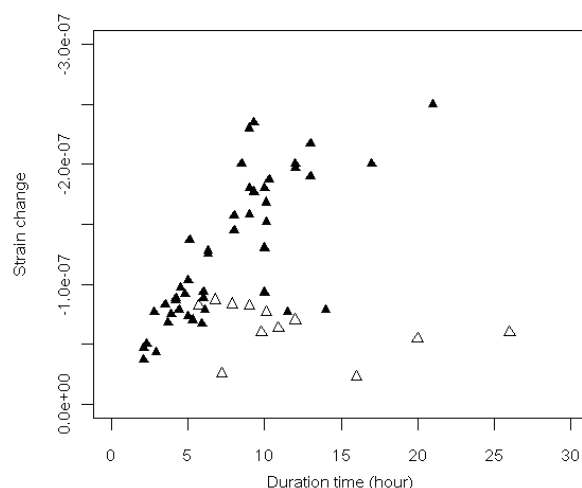


Fig. 5. Scatter plot of amplitude and duration of the characteristic strain changes at Mikkabi. Closed triangles show data from 1996 to 2003, and open triangles show data from 2004 to 2007.

も歪変化量が小さくなったか、あるいは揚水ポンプの経年劣化もしくは地下水の枯渇により単位時間当たり汲み上げられる水量が減少したことが考えられるが、2007 年の揚水試験時の揚水速度が小さかったことや、周囲で地下水の汲み上げ状態が話題になっていないことなどから、揚水ポンプの経年劣化の可能性が高いと思われる。また、揚水時の歪変化量および揚水終了後の歪の緩やかな回復過程における時定数が、後年に小さくなる傾向が見られる。

三ヶ日で観測された井戸の揚水に伴う歪変化と水位変化の特徴は次の 2 点である。(1)新観測点の観測孔内地下水水位は揚水時に低下するものの、その変化は歪変化に比べて緩慢で、その変化のピークは歪変化より遅れる傾向がある。(2)揚水時に新観測点では単調な縮みの歪が観測されるが、旧観測点では縮み変化の始まり部分と終わり部分で異なる変化を伴う。次節では、これらの特徴の意味について考察する。

4 考察

4.1 歪変化と地下水水位変化パターンの違い

歪と水位の変化パターンの違いを説明する一つの考え方を示す。三ヶ日の歪変化と地下水水位変化との関係について、竹中・吉田 (2000) は、地下水水位の変化が歪変化に比べて緩慢でピークが遅れて表れる

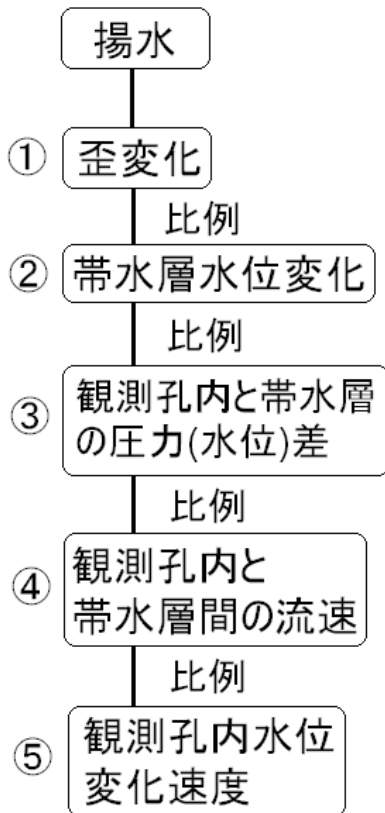


Fig. 6. Schematic flow diagram of an idea to explain how strain change proportional to the rate of water-level change is observed.

のは、位相が 90 度遅れているからではないかと考え、地下水位変化の微分（水位変化速度）と歪変化のパターンがよく似ていることを示した（Fig. 3 参照）。このことは揚水井戸と地下水位観測孔の間の透水係数が小さく、揚水時に両点間に生じる圧力差の解消に時間を要することを示唆する。しかし、揚水に伴ってすぐに歪変化が生じていることから（Fig. 4 参照）、歪計の周囲では揚水に対応してすぐに間隙水圧変化が生じていると思われる。地下水位観測は深さ 100m 付近に通水口を設けて行われており、深さ 216m に設置されている歪計より有意に浅い。地下に複数の帯水層があって揚水や降水に応じて異なる挙動を示すとしても、より浅く揚水井戸に近い帯水層の変化が深い層より遅れることは考えにくい。したがって、地下水位変化の遅れを生じさせる透水係数の小さい箇所は通水口もしくはそのごく近傍ではないかと考えられる。透水性が低い場合には、観測

孔の水位変化は周囲の帯水層の水位変化より小さく、変化が遅れる（Roeloffs, 1996）。揚水時の歪変化と観測孔の水位変化速度がよく似たパターンを示す理由を観測孔内の水位変化と帯水層の水位変化の関係から考えてみる（Fig. 6）。通水口周囲および歪計周囲の帯水層の間隙水圧は揚水に伴ってすぐに低下する。歪変化①と水圧（帯水層の水位）変化②が比例する。観測孔内と通水口周囲の帯水層との間の透水係数が小さいため、帯水層の間隙水圧変化②に対して観測孔内の水位がすぐに追従できず遅れる。そのため、帯水層内と観測孔内に水圧差③が生じる。観測孔内の水位変化が十分遅い場合、③は②に比例する。ダルシーの法則により、観測孔内から帯水層への流出速度④は両者の水圧差③に比例する。流出速度④は、観測孔内の水位低下速度⑤に比例する。以上のように、歪変化①から観測孔内水位変化速度⑤までが全て比例関係で結ばれるため、歪変化と観測孔の水位変化速度が比例することになる。

4.2 新旧観測点の歪変化の違い

三ヶ日の揚水に伴う歪変化を詳しく見た Fig. 4 では、揚水が行われていると考えられる時間帯を矩形で囲んでいる。新観測点では揚水開始と同時に縮みの歪変化が始まり、揚水終了と同時に伸びに転じている。一方、旧観測点では揚水開始から 2～3 時間ほど伸びの歪変化が現れてから縮み始め、揚水終了と同時に縮み変化の加速が見られてから伸びに転じる。このような新旧観測点で歪変化パターンが微妙に異なる現象は毎回の变化に共通して見られる。一方、地下水位変化速度は、水位の 1 時間差分のためノイズが大きく、終了時点を見極めることは難しいが、揚水開始から低下し始めていることがわかる。

丸山・山口（1989）は東京大学構内にある深さの異なる二つの井戸の地下水位が、別の井戸における揚水に対応して、浅い井戸では水位が低下し、深い井戸では逆に水位が上昇することを報告した。Maruyama（1994）は物理係数および水理係数について水平成層を仮定したモデル計算を行ってこの地下水位変化を説明したが、その計算の過程で、物理係数と水理係数を調整すると、揚水に伴って水圧が減少する前に、一時的に水圧が上昇し、揚水終了時に更に水圧が減少する現象が起こりうることも示した。

この Maruyama（1994）のモデル計算結果は、あ

る条件の物理・水理係数を持つ層構造のもとでは、揚水時に水圧が増加から減少に転じたりする領域が存在しうることを示している。三ヶ日の場合に Maruyama (1994) によるモデル計算と同じ物理・水理係数を持つ層構造が成り立っているかどうかは不明だが、旧観測点の歪変化は示されたモデル計算と同様の現象の発生を示す一例ではないかと考えられる。

5 おわりに

三ヶ日観測点で毎年夏季に何回か観測されていた特徴的な歪・水位変化の原因は、近くの井戸における揚水であることが明らかになった。揚水時の歪変化と水位変化速度が似ているのは、帯水層と水位を観測している観測孔内との間の透水係数が小さいと考えることで説明できる。三ヶ日では井戸の揚水による歪変化は縮みであり、新旧観測点では、その詳細な歪パターンが異なる。この変化の違いは地下の複雑な物理・水理係数分布を反映していると考えられる。

謝辞

三ヶ日の井戸の所有者（匿名をご希望）には現地調査に協力していただいた。また、匿名の査読者には原稿の改善に有益なコメントをいただいた。記して感謝の意を表す。

文献

- 気象研究所 (1998) : 内陸部の地震空白域における地殻変動連続観測, 地震予知連絡会会報, **59**, 449-454.
- 末廣重二 (観測部地震課) (1979) : 地殻変動連続観測と埋込式歪計 (I), 測候時報, **46**, 9-25.
- 竹中潤・吉田明夫 (2000) : 三ヶ日体積歪観測点における歪み変化と地下水位変化の関係, 地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会予稿集, Da-018.
- 松島功・田口陽介・木村一洋 (2008) : 伊良湖歪計における地下水汲み上げによる歪変化の補正装置の概要, 験震時報, **71**, 137-141.
- 丸山卓男・山口林造 (1989) : 地下水汲み上げが井戸水位の上昇として現われる例, 日本地震学会講演予稿集, **1**, C94.
- 向井厚志・藤森邦夫 (2005) : 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.

吉田明夫・二瓶信一・太田金房・薄田真司 (1984) : 静岡と網代における体積歪観測孔内の水位変化と歪変化, 気象研究所研究報告, **35**, 199-207.

Maruyama, Takuo (1994): Fluid Pressure Responses of a water-saturated porous elastic multi-layered half-space to water pumping and atmospheric loading, *J. Phys. Earth*, **42**, 331-375.

Roeloffs, Evelyn (1996): Poroelastic techniques in the study of earthquake-related hydrologic phenomena, *Advances in Geophysics*, **37**, 135-195.