湯河原体積歪計に対する地下水の影響

小泉 岳司・吉田 明夫

An Investigation on the Effect of Underground Water on the Borehole Volumetric Strainmeter at Yugawara

by

Takeshi Koizumi and Akio Yoshida

Meteorological Research Institute, Tsukuba, Ibaraki, 305 Japan

(Received December 2, 1988 ; Revised January 12, 1989)

Abstract

The effect of underground water on the borehole volumetric strainmeter is investigated by conducting continuous measurement of the underground water level in the borehole at Yugawara, Kanagawa Pref., central Japan.

The dilatational change soon appears after the rising of the underground water level, but about two days later, the strainmeter begins to show the compressional sense. The former feature may be explained by the effect of underground water that decreases stress in the rock surrounding the strainmeter, which brings about the expansion of volume strain. On the other hand, the latter is explained by the increase of load due to the rising of the underground water level to the rock underneath the water table.

Characteristics of strainmeter response to the change of the underground water level exhibit seasonal variation, which may indicate the change of transfer function due to difference of the underground condition.

1. はじめに

地殻変動観測においては、気圧・降水等の影響の評価が重要な問題であり、この攪乱を除去するため数多くの研究がなされて来ている（例えば田中, 1979）。さらに、影響の伝達関数の時間変化は周辺媒質の状態の変化を表す指標として注目すべきパラメータである。気象庁が東海・南関東に展開している体積歪計は気圧、降水量、及びそれに伴う地下水位変動によるとみられる擾乱をうけており、気圧変化によるものについては線型の補正によってほぼその影響が除去できることが確かめられている（檜皮ほか, 1983）。我々は、この気圧補正後の歪変化の中から、さらに地下水位変動の影響を見積り、その除去を行うことでより信頼性の高い変化を検出するための手法の開発を目指して、1985年4月以降、気象庁湯河原体積歪観測点

の観測孔内で地下水位の連続観測を開始した。これによって、降水を入力とする場合より容易でかつ精度の高い解析が可能となった。Fig. 1 に観測点の位置を示す。以下では1985年～1987年の約3年間のデータについて解析を行った結果について検討する。

2. 観測孔の環境と観測方法

湯河原観測孔は深さ150mで、うち地表から133.5mまではケーシングが挿入されているが、その下は裸孔となっている。また、ケーシングとその外側の孔壁の間はフルホールセメンティング等の処理をしておらず、地下150mまでに存在する帯水層の地下水は孔底の裸孔部分を通して孔内に自由に入ることが出来る。Fig. 2 に水位計の設置状況及び地質柱状図を示す。使用している水位計は

Fig. 1 Location of the Yugawara observation site.

Fig. 2 Borehole conditions and geological columnar map at Yugawara. The borehole is unprotected below 133.5 meters deep, which allows free passage of underground water into the hole.

圧力式水位計で、春先の最低水位から約 5 m 下に設置してある。この水位計は大気解放パイプを持ち、孔内の水面にかかる気圧の影響は除去されるようになっている。この孔内に人為的に注水してその影響を調べる実験を行ったが、約 4 m の水位変化に対して歪計の出力は 6 ナノ strain の変化を示すにとどまった。後述するように、実際の降水に伴って地下水位が数 m 上昇した場合、歪計の出力は数マイクロ strain の変化を示すことから、歪計に対

して、孔内に存在する「水柱」の荷重は無視できる事がわかる。Fig. 3 はこの注水実験時の水位の回復状況を示すもので、得られた緩和時間は約 100 分であった。従って、この観測孔における水位変化は、ほぼ 1 時間程度の時間分解能を有するものと判断される。

3. 観測結果

Fig. 4 に 1985 年 4 月から 1987 年 12 月までの観測結果を示す。図中、上から気圧、歪、水位、及び降水量で、降水量以外はすべて 1 時間値である。この期間、湯河原に気圧計が整備されていなかったため、気圧データとしては千葉県富津のデータを、また、降水量は湯河原から南へ約 13 km のところにある網代測候所の日降水量を用いた。歪については、現在気象庁がルーチン的に用いている気圧係数を使って補正を行った。水位についても気圧変化の影響を受けているため、1985 年 9 月～1986 年 2 月の降水量の影響が少ない期間について、気象庁が歪の気圧係数を求めたのとはほぼ同じ手法で水位の気圧係数を求め、それを用いて気圧補正を施した。但し水位の場合、降水の影響がきわめて大きいため、一次相関をとる期間の幅を 2 日とし、相関係数 0.95 以上のものを採用した。この水位の気圧係数は、わずかながらその時の水位によって変化し、杉山ほか (1981) とは逆に、その絶対値が水位高と正の相関を持っていることが判明したが、サンプル数が十分でないため、解析

Fig. 3 Lowering of the water level in the borehole at Yugawara, after water is experimentally poured into it. The relaxation time constant is about 100 minutes.

Fig. 4 Secular changes of atmospheric pressure at Futtsu (N35°13', E135°54'), volumetric strain at Yugawara (N35°10', E139°06'), underground water level at Yugawara and the amount of precipitation at Ajiro (N35°03', E139°06').

Fig. 4 Continued.

Fig. 5 Hourly value of borehole strainmeter and its analyzed results using Baytap-G (Ishiguro et al, 1984). From the top, the original strain, the tidal component, the trend, the response (to change in the underground water level), the residual and the change of underground water level are shown. It is apparent that the base rock around the strainmeter shows the expansive response to the rise of the underground water level in a short period (about 10 hours).

Fig. 6 Long-period (about 10 days) response of strain to change in the underground water level, in which the daily mean data are used. Soon after the rising of the underground water level, the base rock shows the same response (expansion) as in the case of short period. But a few days later, it begins to show negative response (contraction).

Fig. 7 Response coefficients of strain to change in the underground water level. The abscissa represents time lag (unit: day). In this figure, reversal of the response coefficients (expansion $\rightarrow$ contraction) is observed, which explains the reversal of the response in Fig. 6.

には得られた係数の全てを単純に算術平均をとって気圧係数とした。図中、歪については上が膨張、水位については上が up で、水位はセンサーの位置を基準としている。これをみると、水位の上昇によって歪は縮みの変化を示し、湯河原観測点においては、地下水は基本的に荷重としての働きをしている事がわかる。特に1985年6月～7月にかけての変化量は、1986年11月21日の伊豆大島の割れ目噴火に伴うステップ状の変化（図中↑印）の約3.5倍にも達しており、地下水位の変化によって生じる歪変化は、広域の応力場の変化に伴う歪変化とほぼ同じオーダーか、場合によってはそれをしのぐ場合がある事を示している。従って、地震の前兆等の監視には地下水位のモニターがきわめて重要である事がわかる。以下では、水位変化に対する歪の応答について更に詳しくみてみる。

4. 地下水位変化に対する歪の応答

Fig. 4 からは、数か月程度の時間スケールでの「水位上昇 $\rightarrow$ 歪縮み」という傾向が直ちに見て取れるが、より短い周期での変化を調べるため、1985年4月1日から5月31日までの2か月間のデータ

（1時間値）を用い、石黒ら（1984）による Baytap-G を用いてその応答をみてみた。Fig. 5 にその結果を示す。解析に用いたラグは10時間で、これは10時間前までの水位変化が歪変化に影響を与えていると仮定してその伝達関数を推定し、応答を計算している事に相当する。図は、上から歪の生データ、推定された潮汐成分、トレンド、水位変化に対する応答、残差、そして入力としての水位変化をそれぞれ示している。歪に対するスケールは残差以外はすべて同じである。これをみると、水位上昇に対する歪の応答は膨張を示し、周期10時間程度の時間帯では、さきほど示した「水位上昇 $\rightarrow$ 縮み」とは明らかに異なるふるまいを示すことがわかる。そこで、数か月程度の周期と10時間程度の周期をつなぐ部分をみるために、日平均値を用い、ラグを10日として同様に歪の応答を求めた結果を Fig. 6 に示す。これをみると、水位の上昇に伴って歪は直後に一時膨張し、その後大きく縮みの変化を示すことがわかる。このことをもう少しわかりやすく見るため、歪のレスポンスウエイトの係数（図中ではレスポンス係数と略す）をプロットしたものが Fig. 7 である。これをみると、当日（Lag = 0）と1日前（Lag = -1）の係数は正で、

Fig. 8 (a) Response coefficients of strain in the rainy season.

Fig. 8 (b) Response coefficients of strain in the dry season.

これは水位の上昇に対し歪が膨張の応答を示すことを意味し、Fig. 5に見られた変化と一致する。これに対し、 $Lag \leq -2$ の部分での係数は負で、2日以前の水位の上昇に対し、歪は縮みの応答を示す。言い換えれば、水位の上昇は2日遅れて歪に荷重としての作用を及ぼしはじめる事を示している。体積歪計の観測点によっては、水位の上昇によって歪に膨張の変化の現れる観測点（静岡）と、逆に縮みの変化の現れる観測点（網代）とがあり、これは帯水層の位置のちがいによるのではないかとされている（吉田ほか、1984）。即ち、前者の場合、歪計のセンサーが、観測される地下水を供給する帯水層の中か、そのごく近傍にあり、地下水位の上昇による間隙水圧の上昇によって岩盤に働

く応力場が小さくなるため、膨張の応答を示すのに対し、後者の場合、センサーより上部に帯水層があるために、その帯水層の地下水が歪計に対し荷重として作用する事により、「地下水位の上昇→縮み」といった応答がみられるという訳である。このことを今回の場合にあてはめて考えると次のようになる。即ち、湯河原観測孔の場合、歪計のセンサー付近にごく局所的な広がりをもった帯水層が、またセンサーより浅い部分にはより広域的な広がりをもった帯水層があわせて存在する。降水直後、歪計にはセンサー付近の局所的な帯水層の間隙水圧の上昇による膨張の応答が卓越するが、その後、より広い範囲に降った雨の影響による広域の地下水が荷重として作用するようになる。降水直後にも広域の帯水層の水頭上昇による荷重効果は存在するが、これを打消すだけの膨張の効果が存在する、と考えれば矛盾はない。この一連のメカニズムは、小沢（1984）や、二瓶・佐藤（1988）による静岡の場合と異なり、帯水層の位置、大きさによっては様々な場合が存在することを示している。いずれにしても、湯河原観測点は歪計に影響を与える帯水層を捉えているため、その水位変化を連続してモニターする事で、歪計のデータに対する、いわば水位補正が可能となる訳で、今後同じようなタイプの観測を行う場合には地下水位観測がきわめて重要であると思われる。

5. 応答の季節特性

前節では一年間のデータを用いて地下水位変化に対する歪の応答をみたが、その応答特性は一年を通して、あるいはそれ以上の長い期間にわたり一定しているのであろうか。このことをみるために、一年を3月から8月までの雨の多い湿潤期と、9月から2月までの乾燥期とに分けてレスポンスウェイトの係数を求めてみたのがFig. 8 (a), (b)である。これをみると、両者できわめて明瞭に応答が異なり、また、高々2年分のデータではあるが、同じ湿潤期でも年によってその応答の様子がかなり異なっていることがわかる。これは島津ほか（1985）の指摘するように、降水に対する帯水層の水位の上昇、及びその歪計への作用が線型でない事を示す。と同時に、二瓶・檜皮（1983）にあるように、その時々によって、例えば地盤の湿り具合によって伝達関数の形そのものが変化する事を示している。即ち、1986年の湿潤期に比べ1987年のそのレスポンスウェイトの係数が小さく、さらに図中に矢印で示した最も縮む時間遅れが異なるのは1987年の平均水位が1986年に比べて低く、

地盤が相対的に乾いていた事によると考えられる。従って、もしリアルタイムに水位補正を行おうとする場合には、水位変化量だけでなく、その時の水位そのものも入力パラメータに加えてはならない事を示し、水位補正の実用化には、この点も考慮に入れた解析が必要である。

6. ま と め

湯河原体積歪観測井での水位の同時連続観測により、歪計に及ぼす地下水位変化の影響を調べた。その結果、湯河原では、降水後の地下水位の上昇に伴い、歪はまず膨張し、その後、約2日の時間遅れで縮みのセンスを示すようになる事がわかった。これは、歪計センサー付近のごく局所的な帯水層と、より広い範囲の、歪計に対して荷重としての作用をする帯水層といった複数の帯水層の存在によるものと考えられる。また、その応答特性は季節により大きく異なり、これは、地下の状態の違いにより、降水→水位→歪と影響が伝わっていく伝達関数の形そのものが変化する事を示しているものと思われる。歪のリアルタイムの水位補正には、この点も含めた解析が必要である。

謝 辞

水位観測の継続にあたり気象庁地震予知情報課解析係及び予知技術係の多くの方々のご援助、御指導をいただき、厚く御礼申し上げます。特に、二瓶信一氏には、水位計の設置当初から並々なら

ぬ御助力をいただきました。また、気象研究所 吉川澄夫氏には終始有益な御指導を頂き、ここに記して厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 檜皮久義, 佐藤 馨, 二瓶信一, 福留篤男, 竹内 新, 古屋逸夫, 1983: 埋込式体積歪計の気圧補正. 駿震時報, **47**, 91-111.
- 石黒真木夫, 佐藤忠弘, 田村良明, 大江昌嗣, 1984: 地球潮汐データ解析——プログラムBAYTAPの紹介——. 統計数理研究所彙報, **32**, 71-85.
- 二瓶信一, 檜皮久義, 1983: 三ヶ日における埋込式体積歪計に対する降雨の影響. 駿震時報, **48**, 18-22.
- 二瓶信一, 佐藤 馨, 1988: 埋込式体積歪計による観測(2)——歪観測における地下水調査——. 駿震時報, **51**, 93-106.
- 小沢泉夫, 1984: 旧逢坂山トンネルにおける体積ひずみの長期観測. 測地学会誌, **30**, 122-130.
- 島津好男, 福留篤男, 吉田明夫, 1985: 御前崎の体積歪変化について. 気象研究所研究報告, **36**, 209-217.
- 杉山雄一, 佃 栄吉, 加等 完, 池田喜代治, 1981: 東海地域の地下水観測データの解析——地下水位変動の解析(その1)——. 地質調査所月報, **32**, 133-150.
- 田中寅夫, 1979: 傾斜計・伸縮計記録に現れる降雨の影響とそのシミュレーション. 測地学会誌, **25**, 91-100.
- 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.

湯河原体積歪計に対する地下水の影響

小泉岳司・吉田明夫

湯河原体積歪観測井での水位の同時連続観測により、歪計に及ぼす地下水位変動の影響を調べた。その結果、湯河原では、降水後の地下水位の上昇に伴い、歪はまず膨張し、その後、約2日の時間遅れで縮みのセンスを示すようになる事がわかった。これは、歪計センサー付近のごく局所的な帯水層の間隙水位の上昇による岩盤の膨張と、より広い範囲の帯水層の歪計に対する荷重が合成された効果と考えられる。また、その応答特性は季節により大きく異なり、これは、地下の状態の違いにより、降水→水位→歪と影響が伝わっていく仕方を表す伝達関数の形そのものが変化する事を示しているものと思われる。