

11-3 地下水観測の意味するもの ～地殻変動センサーとしての地下水の能力～ Physical meaning of earthquake-related groundwater changes - ability of groundwater as a sensor for detecting crustal deformation -

産業技術総合研究所
Geological Survey of Japan, AIST

1. はじめに

地震予知研究における地下水の観測・研究の役割は下記の5点が考えられる。

- (1)地下水観測・研究から換算される地殻変動（主に体積歪変化や比高変化等）データの提供。短期・直前予測および長期予測への貢献が考えられる。
- (2)断層層周辺における Permeability 等の時間変化に関する情報の提供。地震発生サイクルの理解につながり長期予測に貢献できる。
- (3)地下水変化に伴う地表変位情報の提供。GPS 等測地測量の高精度化および解釈の厳密化につながるため中～長期予測に貢献できる。
- (4)地下深部における間隙水圧変化（＝地震発生過程における重要な因子）に関する情報の提供。通常深さ 1 k m 程度までの地下水観測に対し、地震発生域の深さは数 k m 以深なので、現在はまだ研究段階である。
- (5)地震に伴う物質移動に関する情報の提供。地震前に物質移動するメカニズムの定量化が困難な状況が続いている。なお研究段階である。

現時点で、観測量を地震予知と結び付けて定量的な議論ができ、東海地震予知に代表される実用的な地震予知に適用できるのは上記 (1)のみであるので、本稿では主に(1)について議論をおこなう。

2. 議論

2.1 地下水位データの地殻変動データ（体積歪変化・比高変化）への換算

被圧地下水の水位は、水で飽和した（空隙のある）弾性体の理論（poro-elastic theory）を根拠とした「体積歪計」として扱える。主に地球潮汐による体積歪の潮汐変化（両振幅で 10^{-7} のオーダー）による地下水位変化を利用して、地下水位の体積歪変化に対する感度を求めることができる。ごく条件のよい観測井戸であれば、10 cm 程度の振幅の潮汐変化が観測でき、我々が通常用いる高感度の水晶発信式水位計の分解能が 0.2 mm 程度であるので、 2×10^{-10} 程度の体積歪変化の検出が期待できる（第1図）。ただし、(1)降雨の長期的な（水位変化への）寄与の除去が難しいこと、(2)数日以上の周期をこえる体積歪変化に対して一般に水位変化の感度が落ちること、(3)数日以内の変化に限っても、通常はノイズレベルが数 mm 程度以上はあるといった理由により、条件のよい場合でも 3-24 時間階差にして 10^{-8} の体積歪変化に匹敵するノイズがある（第2図）。

不圧(自由)地下水の場合は、被圧地下水と違って、体積歪変化に対しては感度は悪い。ただし、海岸付近の浅い不圧地下水の場合、海水面と圧力的につりあった状況にあることから、海水面に対する相対的な地面の昇降に応じて水位が変化する。すなわち、比高の変化が、（符号を逆にして）海岸付近の不圧地下水の水位変化になりうる（第3図）。ただし、その場合、圧力がつりあった状態ならば、水位変化量は比高変化量以下となる。

2.2 地下水データを地殻変動データに換算することのメリット

下記の4点が考えられる。

- (1)帯水層の広がりに対応する範囲の空間平均値を測定できる。
- (2)地殻変動観測機器とは独立な観測量であることから、通常の地殻変動観測機器と比較・検討することで観測データの信頼性が増す。
- (3)既存の地下水データ・地下水観測設備の利用により、近代的観測（機器）のない場所・時代での地殻変動データが提供できるので、時空間的に広い範囲のデータ提供ができる。
- (4)観測機器が地殻変動連続観測機器に比べて安価である。

3. 応用

3.1 想定東海地震におけるプレスリップ検知能力

上述のように、被圧地下水であって地球潮汐による潮汐変化を確認できる観測井戸の水位データは、気象庁の体積歪計データとまったく同様に扱えるので、気象庁と同様の手順で、地下水位データを扱って相互に比較することができる。その結果、東海地方における産総研の地下水観測点の中で条件のよいものは、気象庁体積歪計に匹敵するプレスリップ検知能力をもつことがわかった^{1,2)}。東海地震の想定震源域周辺で体積歪計のないところに、予算・人員の許される範囲で地下水観測点を設けることも、今後の展開としては考えられる。

3.2 1946年南海地震(M8.0)前後の地下水変化の評価

過去1300年間に9回の発生が古文書等で確認されている南海地震では、四国や紀伊半島の温泉でくりかえし自噴量や水位の低下があったことが知られている。特に、1946年南海地震においては、地震時の温泉水の自噴量・水位の低下に加え、地震の数日前から、紀伊半島～四国の太平洋岸の浅い地下水の水位が、推定で数十cm以上低下したことが知られている。地震時の温泉水の自噴量・水位の低下については、本震の断層モデルから計算される体積歪変化（増大：膨張）で定性的かつ定量的に説明できる。地震前の浅い地下水の水位低下も、南海地震本震の震源域周辺でプレスリップがあったとすれば、紀伊半島～四国の太平洋岸で陸地が隆起することで、2.1で示した考えに基づき定性的に説明できるが、その量は数cm程度にとどまり、上述の数十cm以上といった振幅は説明できない。何らかの増幅機構があるはずでそれを解明することが課題である。いずれにしても、当時の地下水変化を地殻変動と結びつけて評価することで、1946年南海地震の発生モデルを本震発生前の過程も含めて議論・評価でき、これは次期南海地震発生予測精度向上に貢献できる³⁻⁵⁾。

4. 課題

4.1 地下水変化を地殻変動データに換算する際の周波数依存性の評価

体積歪変化や比高変化によって地下水位が変化する場合、実際には周波数依存性（長周期側にも短周期側にも感度が低下する）がある。気圧変化等に対する地下水位変化を解析して、周波数依存変化も考慮した換算をしていくことが必要で現在その準備をしている⁶⁾。

4.2 地震時に地下水変化をもたらす他の要因による寄与の評価

地震時には、体積歪変化や比高変化だけではなく、液状化やPermeability等の変化によっても地下水は変化する。通常時の変化に加えて、過去の地震時の変化を適切におこなうことで、地震前の異常変化が適切に評価できるので、地震時の変化について要因別に分類・評価できるようにしておく必要がある。液状化やPermeability変化は、地質状況や地震動（特に加速度）に左右されると考えら

れるので、今後、比較検討していく必要がある。台湾で発生した 1999 年集集地震 (Mw7.6) 後に、地質状況がよく把握された数百の地下水観測点 (台湾) で詳細な地下水変化が捉えられていて、地震動加速度最大値等と比較可能なので、このデータの詳細な解析が一つの回答を与えてくれる可能性がある⁷⁾。

4.3 反映している地殻変動の空間的な把握

2.2 の (1) で帯水層の広がりに対応する範囲の (地殻変動の) 空間平均値を示すとしているが、実際どの程度の範囲を代表しているかは不明である。他の地殻変動観測機器との相互比較や、狭い範囲に観測点を集中させて、潮汐や気圧変化・長周期地震動に対するレスポンスを比較検討するといった案が考えられる。断層破碎帯の近傍で、そのような観測を行った結果によれば、代表している空間の範囲は局所的 (10m未満) である。

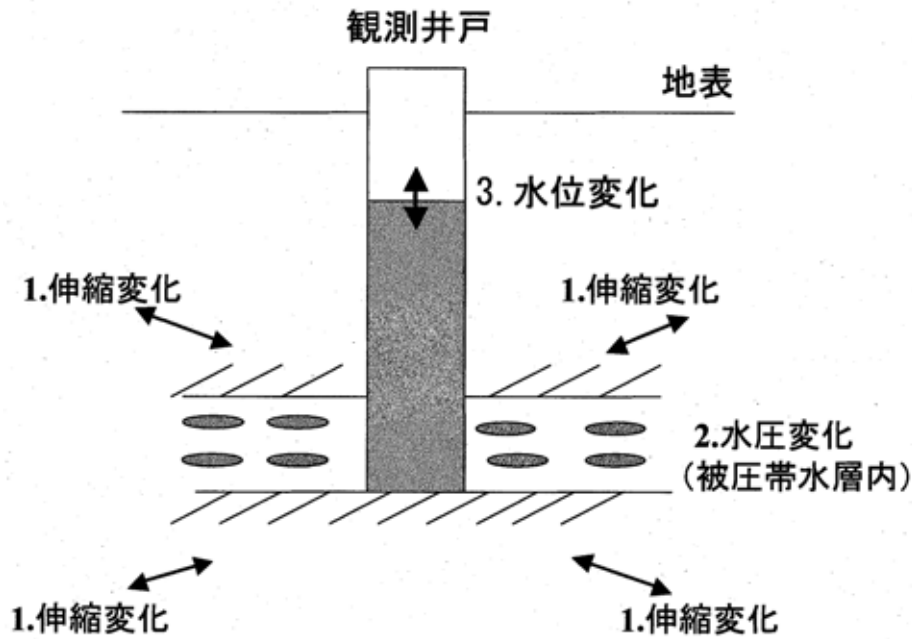
5. まとめ

地下水変化を地殻変動に換算することで、地震に関連した地下水変化を、地震の理論やシミュレーションと結び付けて定量的評価ができる。上述したように、体積歪変化に対して敏感な井戸ならば、近代的な機械観測がされているところで 10^{-8} 程度の体積歪変化が検出できる。また、地下水位変化の検出が目視にすぎない場合でも、数十 cm 程度の水位変化が意味する $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 程度の体積歪変化を検出している可能性がある。海岸部の地下水位変化の比高変化への換算等も考慮すると、近代的観測 (機器) のない場所・時代での地震地殻変動に関する情報提供を既存の地下水記録から期待することができ、これは逆に地震のモデルやシミュレーションの高度化に大きく貢献すると考えられる。

(小泉尚嗣・高橋誠・松本則夫・佐藤努・大谷竜・北川有一)

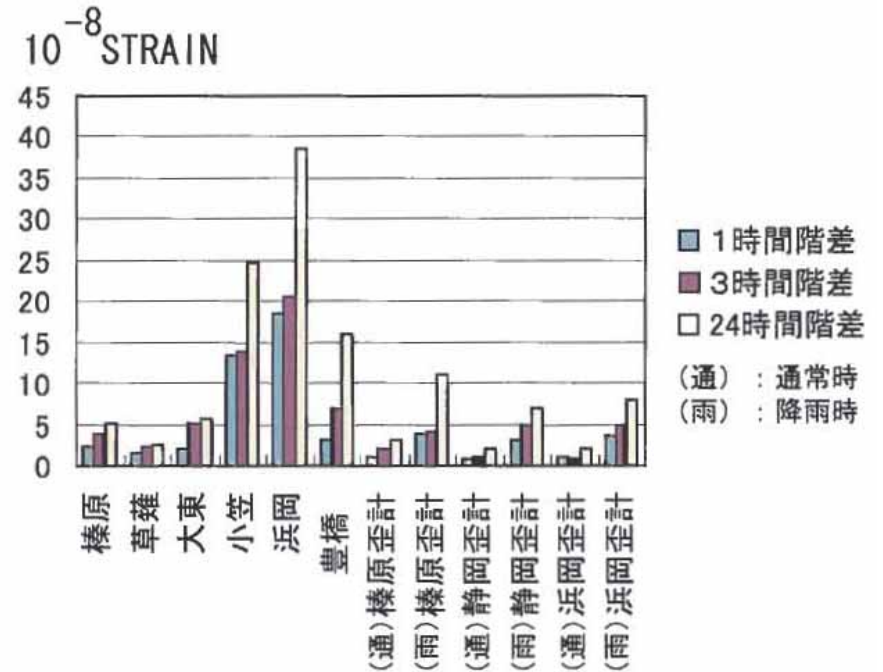
参 考 文 献

- 1) 小林昭夫・松森敏幸, 験震時報, 62, 17-41 (1999).
- 2) 松本・他 (2003), 日本地震学会講演予稿集, P129.
- 3) 京大防災研 (2003a), 地震予知連絡会会報, 70,402-403.
- 4) 京大防災研 (2003b), 地震予知連絡会会報, 70,423-428.
- 5) 小泉・他 (2003), 日本地震学会講演予稿集, A037.
- 6) 北川・他 (2003), 日本地震学会講演予稿集, P130.
- 7) Lai et al.(2003),地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会、S049-P002.



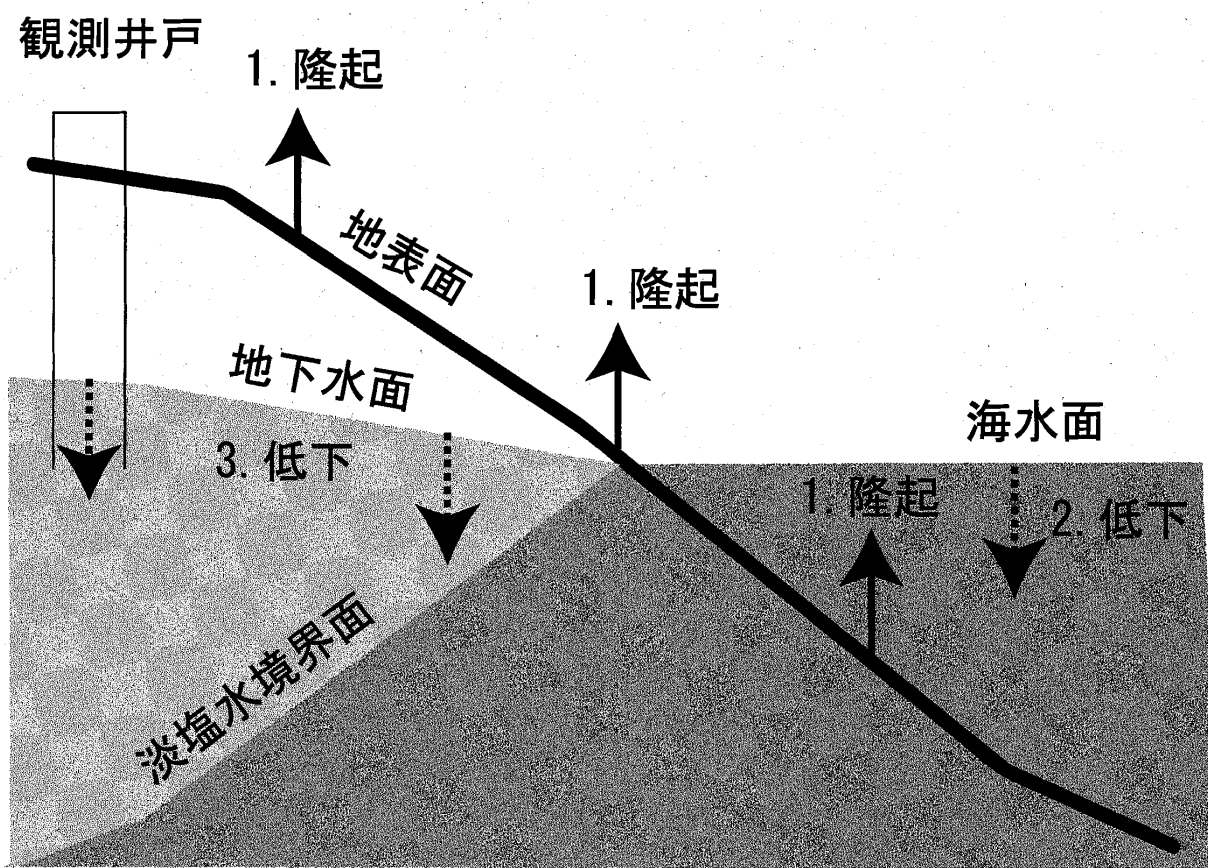
第1図 体積歪変化と被圧地下水位変化との関係を示すモデル。

Fig.1 Schematic figure showing the relationship between confined groundwater level change and volumetric strain change.



第2図 歪換算後の水位のノイズレベルと、気象庁体積歪計のノイズレベル¹⁾との比較。

Fig.2 Comparison between the noise level in the groundwater levels and that in the borehole strain meters installed by JMA¹⁾.



第3図 地盤の隆起と海岸付近の地下水位の低下との関係を示した模式図.

Fig.3 Schematic figure showing the relationship between unconfined groundwater level change and upheaval of the coastal region.