

学 位 論 文 題 名

Study on the Mechanism of  
Co-seismic Groundwater Level Changes

(地下水位地震応答発生メカニズムに関する研究)

学位論文内容の要旨

地震に伴う地下水位変化の観測例は多く、それらは2つに大別される。一つは、断層モデルによる観測点での歪変化に対する多孔質被圧帯水層のレスポンスで説明可能な水位変化である。もう一方は、断層モデルから期待される歪変化では説明の出来ない水位変化である。後者に関する近年の研究では、地震動がトリガーとなり観測点近傍の帯水層中の透水性が変化、その間隙水圧変化が拡散するという発生メカニズムが提案されている。しかし、同一観測点における地震動の観測を行っていないか、または、あっても観測例が少ないため、トリガーの性質が特定されたとは言い難い。また発生メカニズムに関しても、観測点周辺の地質構造および水理地質構造は掘削記録と水理試験から推測した情報であって、実際の構造を考慮したメカニズムではない。

地震に伴う地下水位変化の検出と、これまで定性的にしか示されなかった地下水位地震応答のトリガーの特性、および、観測点周辺の地質構造および水理特性と調和的な地下水位地震応答発生メカニズムを明らかにすることを目的として、岐阜県瑞浪市の戸狩地殻活動総合観測点 350m 孔 (TGR350) における地下水位連続観測を 1998 年 5 月に開始した。その結果、2005 年 6 月の約 7 年間の期間に、17 例の近地および遠地地震に応答した地下水位変化 (地下水位地震応答) を検出し、その変化は全て「水位が上昇」であることを明らかにした。

地下水位地震応答の変化の特徴を把握するために次の解析を行った。地下水位連続記録に含まれる潮汐応答と気圧応答を潮汐解析プログラム BAYTAP-G (Tamura et al, 1991) により求め、原記録からそれらを差し引き“トレンド”を抽出した。次にこのトレンドを用いて、観測された全ての地下水位地震応答の最大変化 (Peak) 量を求め、地震発生時から一定変化量 (Peak 量、および、Peak 量の 63.2%, 90%) までの経過時間との関係を調査した。その結果、経過時間は地下水位地震応答の Peak 量に比例することが明らかになった。また、地下水位地震応答の時間変化について、時間軸を Peak までの経過時間、振幅を Peak 量で正規化し比較した結果、Peak までの時間変化がほぼ一致していることを明らかにした。このことは、地下水位地震応答を生じさせる発生源が、ある入力に対して線形応答を持つことを示唆している。

次に、地下水位地震応答のうち、同一ボアホール内における深部ボアホール地殻変動連続記録高速サンプリング 1 秒値記録 (傾斜地震動および歪地震動) が同時に得られた 2000 年 7 月以降の 9 例について、その最大全振幅とその地下水位地震応答の Peak 量との関係を調査した。その結果、地下水位地震応答の Peak 量は傾斜地震動および歪地震動の最大全振幅に比例すること、傾斜地震動記録は歪地震動より相関が強く、ある閾値以上の時に地下水位地震応答が生じていることが明らかになった。この閾値の特徴を明らかにするために、

Matsumoto and Roeloffs(2003)が榛原観測井(静岡県)で示した震源距離とマグニチュードだけで決められる地下水位地震応答検出基準を TGR350 へ適用した。その結果、TGR350 では榛原観測井とは異なり、基準を超える場合でも地震応答を生じさせなかった地震(非地震応答)が 143 例あることが判明した。そこで、9 例の地震応答時とこれらの非地震応答時の傾斜地震動記録の最大全振幅を調査した結果、地下水位地震応答は傾斜地震動の最大全振幅が閾値  $2 \times 10^{-4}$  radian を超えた場合に生じることが明らかになった。このトリガーの特定は、従来の同様の研究、ならびに、低速サンプリング(例えば 1 分、1 時間)の地殻変動観測では得られなかった新たな知見である。

TGR350 の地下水位地震応答記録を説明する数値モデルとして Roeloffs(1998)による地下水位地震応答に関する有限 1 次元多孔質帯水層中における間隙水圧上昇・拡散モデルの適用を行った。その結果、この数値モデルは TGR350 の地下水位地震応答記録の Peak までの変化をよく説明できることが判明した。この数値モデルによって得られた間隙水圧上昇源の位置と拡がり、および、TGR350 周辺における地質構造調査結果および水理試験結果から、次のような地下水位地震応答発生メカニズムを新たに提案した。1) TGR350 の花崗岩中 350m 以浅には、発達した層理や節理から成る帯水層が大別して 2 箇所存在する。TGR350 の近傍には北北西の走行を持つ地質断層があり、通常、花崗岩中の地下水は、地質断層の北東側(上流)から南西側(下流; TGR350 が位置)へ流動している。地質断層はこれらの帯水層を破碎しており、通常、破碎箇所は断層粘土や礫が充填され低透水性が維持されている。2) 近地および遠地震の地震波の通過によって、閾値を超える傾斜地震動が生じた場合、破碎箇所を充填している断層粘土および礫が除去され、この箇所の透水性が高くなる。その結果、通常に比べて地質断層を横切る地下水の流動量が増え、下流域の間隙水圧が上昇し、TGR350 の地下水位が上昇する。3) 地下水位地震応答変化の Peak 後、断層粘土等の移動により目詰まりが生じ、低透水性が回復、地質断層を横切る地下水の流動量が減少し、TGR350 の地下水位は定常状態へ回復する。

地下水位の回復過程に、閾値を超える傾斜地震動が観測されたにもかかわらず地震応答が生じない場合がある。これは、破碎箇所において断層粘土等がすでに除去されているか、十分に目詰まりが進行していなく、地質断層を横切る地下水の流動量に増分が生じないため、その結果地震応答が生じないと考えられる。また、地震応答のピーク後のトレンドの差異について、正確な地下水位変化の長期トレンドを把握していないにもかかわらず、その時間変化の正規化の際、地震発生前約 10 日間の直線トレンドを除去した解析手法に問題がある可能性と、地下水位地震応答による観測点周辺の水理拡散係数の変化が考えられる。

以上のことから、本研究の成果は次のようにまとめられる。① 同一深部ボアホール内における高速サンプリングによる地殻変動および地下水位の同時観測結果から、地下水位地震応答を生じさせるトリガーの特定を初めて行った。② 観測点周辺の地質構造調査結果および水理学的特性と調和的な地下水位地震応答発生メカニズムを初めて明らかにした。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 笠 原 稔

副 査 教 授 池 田 隆 司

副 査 教 授 茂 木 透

学 位 論 文 題 名

## Study on the Mechanism of Co-seismic Groundwater Level Changes

(地下水位地震応答発生メカニズムに関する研究)

地震に伴う地下水位変化の観測例はこれまでも多くあるが、本研究では、水位応答のトリガー特性を明らかにするために、地震による地殻歪・傾斜と水位の同時観測を岐阜県瑞浪市の戸狩地殻活動総合観測点 350m 孔 (TGR350) において 1998 年 5 月から開始した。その結果、2005 年 6 月までの約 7 年間に、近地および遠地地震に応答した 17 例の地下水位変化 (水位応答と呼ぶ) を検出し、その変化は全て「水位が上昇」であることを明らかにした。

まず、水位応答の変化の特徴を把握するために、地下水位連続記録に含まれる潮汐応答と気圧応答を潮汐解析プログラム BAYTAP-G (Tamura et al, 1991) により求め、原記録からそれらを差し引き“トレンド”を抽出した。このトレンドから観測された全ての水位応答の最大値を求め、地震時から最大値までの経過時間をもとめた。その結果、経過時間と水位応答の最大値は比例する。時間軸を経過時間で、振幅を最大値で正規化し、全てを比較した結果、最大値までの水位上昇の時間変化がほぼ一致していることが見出され、このことは、水位応答を生じさせる発生源が、ある入力 (地震時擾乱の大きさ) に対して線形応答を持つことを示唆している。

次に、水位応答のうち、地殻変動連続記録高速サンプリング 1 秒値記録、傾斜地震動および歪地震動、が同時に得られた 2000 年 7 月以降の 9 例について、それらの最大全振幅とその時の水位応答の最大値との関係を調査した。その結果、水位応答の最大値は傾斜地震動および歪地震動の最大全振幅に比例すること、そしてある閾値以上の時に水位応答が生じていることが明らかになった。地震と地下水位応答の関係については、従来、震源距離とマグニチュードと応答の有無に関してのみ調べられており、例えば、Matsumoto and Roeloffs (2003) が榛原観測井 (静岡県) について、かなり系統的な水位応答検出基準を得ている。しかしながら、この方法を TGR350 へ適用した結果、基準を超える場合でも地震応答を生じさせなかった地震 (非地震応答) が 143 例あることが判明した。そこで、9 例の地震応答時とこれらの非地震応答時の傾斜地震動記録の最大全振幅を調査した結果、水位応

答は傾斜地震動の最大全振幅が閾値  $2 \times 10^{-4}$  radian を超えた場合に生じることが明らかになった。このトリガーの特定は、従来の地下水位のみの観測や、低速サンプリングの地殻変動観測では得られなかった新たな知見である。

Roeloffs(1998)による水位応答に関する有限 1 次元多孔質帯水層中における間隙水圧上昇・拡散モデルは、TGR350 の水位応答記録の上昇過程をよく説明できる。この数値モデルによって得られた間隙水圧上昇源の位置と拡がり、および、TGR350 周辺における地質構造と水理パラメータから、次のような水位応答発生メカニズムを新たに提案した。1) TGR350 の花崗岩層中には、発達した層理や節理から成る帯水層が 2 箇所存在する。TGR350 の近傍には北北西の走行を持つ地質断層があり、通常、花崗岩中の地下水は、地質断層の北東側（上流）から南西側（下流；TGR350 が位置）へ流動している。地質断層はこれらの帯水層を破碎しており、通常、破碎箇所は断層粘土や礫が充填され低透水性が維持されている。2) 近地および遠地地震の地震波の通過によって、閾値を超える傾斜地震動が生じた場合、破碎箇所を充填している断層粘土および礫が除去され、この箇所の透水性が高くなる。その結果、通常に比べて地質断層を横切る地下水の流動量が増え、下流域の間隙水圧が上昇し、TGR350 の地下水位が上昇する。3) 水位応答変化の Peak 後、断層粘土等の移動により目詰まりが生じ、低透水性が回復、地質断層を横切る地下水の流動量が減少し、TGR350 の地下水位は定常状態へ回復する。

さらに、ここで提案された発生メカニズムを支持する次のような、興味ある結果を得ている。地下水位の回復過程中に、閾値を超える傾斜地震動が観測されたにもかかわらず水位応答が生じない場合がある。これは、破碎箇所において断層粘土等がすでに除去されているか、十分に目詰まりが進行していなく、地質断層を横切る地下水の流動量に増分が生じないため、その結果地震応答が生じないと考えられる。

以上のことから、本研究の成果は次のようにまとめられる。① 同一深部ボアホール内における高速サンプリングによる地殻変動および地下水位の同時観測結果から、水位応答を生じさせるトリガーの特定を初めて行った。② 観測点周辺の地質構造調査および水理学的特性と調和的な水位応答発生メカニズムを初めて明らかにした。

よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。