

降雨に伴う重力変化

古本宗充・田中俊行(東濃地震科学研究所)

1. はじめに

地下水の涵養, 流動そして流出に伴い, 地下において質量変化が起きる. こうした質量変化を推定する手段の一つは, 重力加速度 (以下簡単のため単に重力と呼ぶ) の時間変化を調べることである (例えば, Imanishi *et al.*, 2006 ; 名和・他, 2008 ; Kazama and Okubo, 2009). 東濃地震科学研究所では, こうした地下水の挙動を調べることを目的として, 精密な重力測定を行ってきている. 特に MIU の立孔を利用して, 上下方向に 100m ないし 300m 離れた 2 点での同時連続観測を行っている (Tanaka and Honda, 2018). このような観測は, 両地点間の密度変化はもちろん, 重力勾配を測定することになるので, 近傍の密度変化に対してより敏感なデータを得ることができるなどの利点を持っている.

観測された重力変動には, 地下水の流動を含めて様々な現象に関わる変動成分が含まれる. 例えば, 降雨時に地表付近に短時間留まった水は直接的に水の質量の付加を意味するので, 地表付近の重力を顕著に変化させる. 当然その後地表もしくは地下から順次流出する水の挙動も重力を変化させる. 一方重力変化を引き起こすのは降雨だけではない. 大気圧の変動は観測点上空の大気の質量変化を意味しているので, 当然対応した重力変化が起きる. さらにその圧力変動により, 地下水が流動することや地殻が変形することなども, 観測にかかってくる大きさの重力変化をもたらすと想定される. そのほか人為的な影響を含めて多種多様なノイズも混入していると考えられる.

地下水の流動を調べるためには, こうした様々な原因からくる重力変動を, 各要因ごとに分離抽出する必要がある. 本報告では降雨直後の重力変化から, 降雨に伴う重力の変化成分の検出を試みた.

2. データおよび解析方法

今回使用したデータは, 東濃地震科学研究所内の観測点と, MIU の立孔の地下深度 100m 地点で行われた期間のものである. 両観測点間の高度差は約 100m で, 水平方向の距離はほぼ NE-SW 方向で約 150 m である. 図 1 に示したデータは, 2015 年 9 月 20 日から 11 月 15 日までの期間の大気圧, 重力, および降雨量の変化である. 重力の値には大気補正を含めて主な補正がなされている (Tanaka and Honda, 2018). 図では重力変化として, 両地点の観測値そのものではなく, 両者の「和」と「差」を示している. 地形の影響を無視すれば, 測定値の和では, 観測点間にある平板部分の質量による引力が相殺される. 逆に両者の差は地表付近の厚さ 100 m の平板領域の影響のみを表すことになる. ただし, 後で述べるように実際には地形の影響が大きいので, 地形の影響を考慮する必要がある.

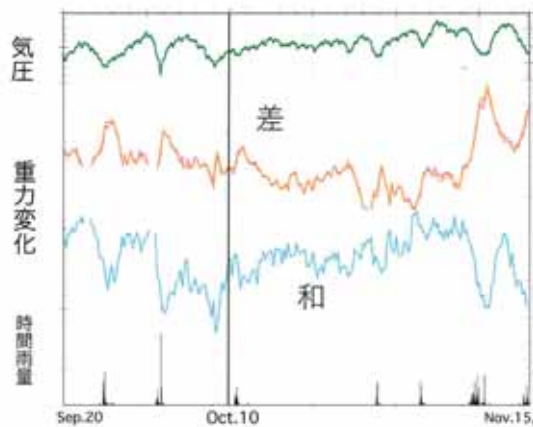


図1 観測された重力変化と大気圧および降雨量の変化

重力変化としては、二観測点の変化の「和」と「差」が表示されている。重力の曲線の非表示の部分はノイズが大きい部分である。

なお、ここで示した重力変化では、大気圧から予想される大気質量変化による重力変化とその荷重による地殻変形の効果は補正されている。しかしながら図から明らかなように、重力変化にはまだ大気圧変動と相関している成分が残っている。このことは、大気圧変化の影響がまだ完全には取り除かれていない可能性も示しているが、それ以外の例えば地表に加わる荷重変化に伴う地下水の挙動によるものなどである可能性も高い。

降雨は低気圧に伴われていることが多いので、重力変化が大気圧と相関を持つことは、降雨の影響のみの解析を行うには不都合である。特に気圧変動が大きい時期の解析は難しい。そこで今回は気圧変動が比較的弱い10月10日～11日にかけての降雨時のみを扱うこととし、降雨開始から4日間の重力変化を利用した。解析用に降雨と重力の時間変化を6時間ごとに再サンプリングを行ったデータを使用した。

該当する期間の測定値の和と差について、降雨に対する重力のインパルス応答を試行錯誤で求めた。計算では仮定したインパルス応答関数と実際の降雨の時間変化関数のコンボリューションを求め、観測された重力の時間変化とを比較した。インパルス応答の修正の繰り返し、重力変化の観測値と推定値がよく一致するものを得た。

地形の影響を調べるため、降雨により実際の地表付近に付加された水が、観測点の重力にどのような影響を及ぼすかの計算も行った。国土地理院による5mメッシュの地形データから観測点近傍の2km×2kmの範囲のデータを抽出した。このデータから描いた地形の様子を示したのが図2である。この図からもわかるように観測点は山間にあり、研究所(標高207m)より低い領域も高い領域も存在する。一方MIUの孔内にある観測点(地下100m; 標高101m)は、ほぼ全ての地点よりも深い位置にある。観測点付近に1mmの雨量があり、それが全て地表に「張り付いた」と仮定した場合、それらの引力の鉛直成分を地形データから計算した。それによれば、研究所の観測点においては、山側(上方)から $-0.0133 \mu \text{gal}$ 、低地側(下方)から $0.0042 \mu \text{gal}$ の影響を受ける。両者を合計すると、研究所観測点では

-0.0091 μ gal となる．つまり雨水の負荷は重力増加ではなく減少を引き起こす．一方 MIU 観測点では地表は上方にあり，重力への影響は-0.0398 μ gal と計算された．ところで，水の密度を持つ厚さ 1mm の無限平板の引力は 0.0419 μ gal であるので，これより約 5%小さいことになる．この差の発生の理由は，計算範囲が 2km \times 2km であることが効いていると考えられる．この有限範囲の影響は研究所観測点でも多少はあると考えられるが，地表の位置が遠方では，研究所から見てほぼ真横になるので，無視できると考えられる．

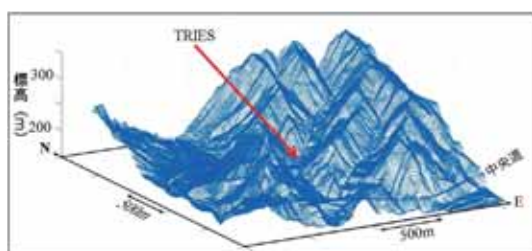


図2 観測点近傍地形

表示されている地形の格子点はメッシュデータの点を表している．

3. 結果および議論

降雨に対する重力応答の推定は二点の観測値の和および差について行ったが，以下では議論を分かりやすくするため，MIU 観測点（地下 100m）と研究所観測点（地表）の値として求め直したものを利用する．これらの点での応答を示したものが図3である．図では 1mm の降雨パルスに対する応答である．

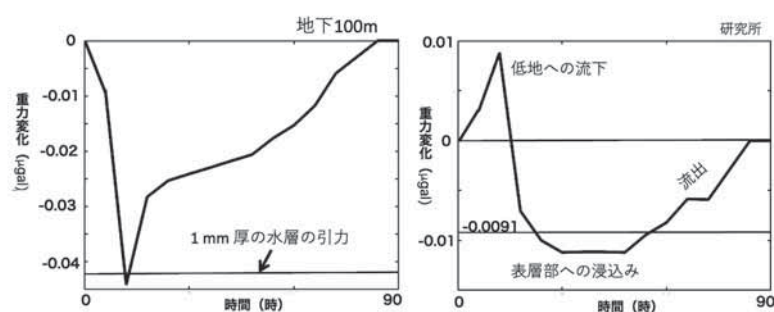


図3 地下 100m（左）と地表（右）における降雨に対する重力のインパルス応答
最初の単位時間（6 時間）に雨量 1mm の場合の重力の応答．

地下 100m での観測の場合，降雨の直後に大きな負になり，その後数日をかけて元の値に戻る．全期間を通して応答が負になるのは，地表付近に付加された雨水すべてが観測点より上方にあることから来ている．最初の鋭い重力変化負の谷は，降雨直後は大部分の雨水が地表付近に止まることを表し，その後の回復は領域から水が流出することを表している．最初の負の量は厚さ 1mm の水の無限平板の引力にほぼ等しいことも，初期の雨水が地表にあるとすればよく説明がつく．

研究所の観測点での変化はより複雑である。最初重力は増加しその後負の値になり、そして徐々に元の値に戻っている。これは雨水が以下のような経過をたどるからだと推定される。

- (1) 山地の降雨の一部はすぐに低地へ流下する。そのため最初に正の重力変化が現れる。
- (2) 地表に雨水が浸込んで残ると、山地部の影響が大きいため、上で述べた全域表面に水がある場合の $-0.0091 \mu \text{gal}$ に近い値を取る。
- (3) 地下に浸込んだ水と同量の水がその後徐々に領域から流出して、元の状態に戻る。

4. 今後の課題

今回の解析により、上下方向に展開した複数の重力計の観測の有効性の一端を示すことができたと考えられる。しかしながら、今回の解析にはいくつかの不十分な点が残っている。その一つは、解析が1回のイベントのみについて行われていることである。観測期間内には多数のイベントがあり、これらも利用すべきである。今後大気圧と降雨への応答を合わせて解析するなどの方法が必要である。

また今回の解析では、降雨時およびその後の期間の全体を一括して一つのインパルス応答を推定しているが、実際の応答には様々な要素がかかわってくる（例えば、山下ほか、2006）。例えば降雨の最初と後半とは同じ単位時間雨量でも応答が異なるはずである。同様に、晴天が長く続いた後の降雨と、降雨が一つ前の降雨から短い時間で起きた場合でも応答に差があるはずである。今後こうした観点からの解析が必要である。

引用文献

- Imanishi, Y., K. Kokubo, and H. Tatehata, 2006, Effect of underground water on gravity observation at Matsushiro, Japan, *J. Geodynamics*, 41, 2221-2226.
- Kazama, T. and S. Okubo, 2009, Hydrological modeling of groundwater disturbances to observed gravity: Theory and application to Asama Volcano, Central Japan, *J. Geophys. Res.*, 114, B08402, doi:10.1029/2009JB006391.
- 名和一成, 他, 2008, シントレックス重力計連続観測による降雨・地下水流動に伴う重力変化の検出, *測地学会誌*, 54, 59-67.
- Tanaka, T. and R. Honda, 2018, Vertical gravimeter array observations and their performance in groundwater-level monitoring, *Earth Space Sci.*, 5, doi:10.1002/2017EA000311.
- 山下三男, 市川新, 佐藤冬樹, 柴田英昭, 2006, 河川水文シミュレーションの現状と新しい提案, *陸水学雑誌*, 67, 267-280.