

## 精密重力測定を用いた地下水位変動の研究

Application of the Precise Gravity Measurements  
for the Study of Groundwater Level Changes

代表研究者 京都大学理学部附属地球物理学研究施設・助教授 福田洋一  
Associate Prof., Beppu Geophysical Res. Lab., Kyoto Univ.  
Yoichi FUKUDA

共同研究者 京都大学理学部附属地球物理学研究施設・教授 由佐悠紀  
Prof., Beppu Geophysical Res. Lab., Kyoto Univ.  
Yuki YUSA

京都大学大学院理学研究科・助教授 竹村恵二  
Associate Prof., Faculty of Science, Kyoto Univ.  
Keiji TAKEMURA

The gravity effects of the groundwater level variations are one of the large noise sources which are generally removed from high-precision gravity measurements using super conducting gravimeters or absolute gravimeters. These effects, on the other hand, give us important information about the hydrological properties in the area concerned. Precise gravity measurements have repeatedly been carried out at Beppu, in order to detect the gravity changes associated with groundwater level variations. Using a LaCoste & Romberg gravimeter (G-534), 21 microgravity surveys were made at about 1-month intervals from February 1993 to March 1995, at 11 survey marks in the Beppu area. The observations were reduced using standard precise gravity techniques and the method of Principal Component Analysis (PCA) was employed to expand the observed gravity changes into the time-space domain. The result shows that; (1) gravity variations of about 60 mgal (peak-to-peak) were detected in a rather small survey area of 4km x 4km for the observation period, (2) the 1st and the 2nd components of PCA explain almost 90% of the variations, (3) the time variations of the 1st component (58.8%) have a good correlation with measured groundwater levels: the regression coefficients are varied about 2.5 to 9.4  $\mu\text{gal}/\text{meter}$  depending on the observation points and the periods, and (4) the spatial pattern of the 2nd component (28.8%) is possibly explained by the movements of the deeper groundwater, though we have not found any direct evidences yet.

### 研究目的

水は、それ自身、人間生活に欠かせないものであるとともに、その収支を監視することは、人間活動と自然環境の係わりを考える上でも極めて重要なことである。水の挙動を知る際、地下水の役割を無視することはできないが、地下の水脈は、それを直接目にすることが困難であるため、

この種の研究を進める際の大きな障害となっている。

一方、地下水位の変動は、地表での重力の値も変化させるはずであり、地下水位変化を重力変化、すなわち、水の質量変化として検出することの利点は、地下水系の規模や、変動の様式など、その物理的なメカニズムを推定する有力な手が

かりを与えてくれることである。本研究の主要な目的は、このような観点から、精密重力測定という測地学的手法を、地下水位変動のモニタや水理学的なパラメータの推定など、陸水学的研究に応用する実際的な手法をさぐることである。一方、このことは逆に、現在、測地学的に大きな問題となっている地下水変動が精密測地計測におよぼす影響を見積もることでもあり、本研究は、このような測地学的な研究目的も合わせ持つ。

## 研究経過

別府地域における地下水位観測は、京都大学理学部附属地球物理学研究施設によって古くから実施されており、その結果、同地域においては、5～10mの振幅での地下水位の年周変化が存在することが知られていた（由佐，1979）。しかしながら、空間的に十分な密度で地下水位の直接的な観測を実施することは、観測井の分布等の問題から、一般に極めて困難であり、比較的研究の進んでいる別府地域に於いてさえ、地下水位変動の空間的な広がりや地下の流水系の規模までは、十分には明かにされていなかった。一方、先にも述べたように、地下水位の変動に伴う質量変化は、地表での重力変化を生じさせるはずであり、別府地域の年周的水位変化に対応する重力変化は、数10 $\mu$ gal ( $\mu$ gal=10<sup>-8</sup>m/sec<sup>2</sup>) から最大100 $\mu$ gal程度にもなるものと予想できる。これは、現在の測定技術を持ってすれば、十分に検出可能な量である。さらに、携帯型の重力計による重力測定では、重力計が設置できるわずかなスペース（概ね30cmx30cm程度）があれば観測可能であり、また、1日あたり10～15点程度の測定はそれほど困難ではなく、空間的な測定点密度を増やすことも比較的容易である。

これらのことを考慮して、図1に示すように、別府扇状地内に11点の重力測定点を新たに設置し、1993年2月より、概ね1回/1月の間隔で、繰り返し精密重力測定を実施することにした。なお、図1の測定点の設置に際しては、測定点の標高分布、河川の分布等にも考慮し、点名のA、B、Cを冠したものは、それぞれ異なる河川に挟まれた領域にあり、番号の1から4は、それぞれ、標高の低から高に対応している。また、A1、A2およびC3の測定点では、水位の連続観測も同時に実施している。

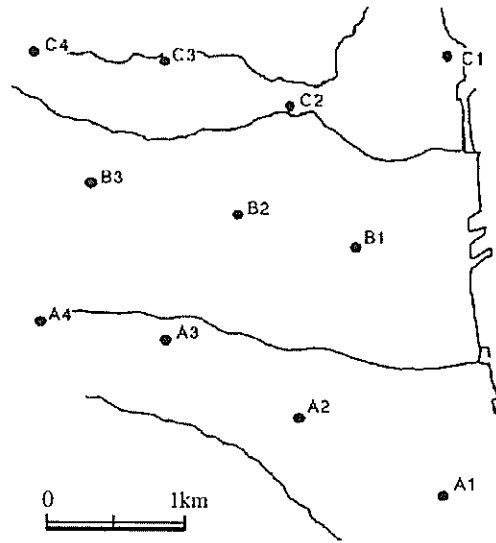


図1. 重力測定点の配置。A1、A2、C3では水位観測も実施している。

## 研究成果

図2に1995年3月までに実施した重力測定結果を示す。図2の重力値は、別府扇状地からは約15kmほど南に位置し、同地域の地下水位変動の影響とは全く無関係と考えられる大分地方気象台内に設置されている一等重力点における重力値が、測定期間を通して、不変であると仮定した場合の、各測定点での相対的な重力変化を示したものである。重力測定には、ラコスト重力計(G-534)を使用し、測定には、気象条件の良い日を選ぶなど細心の注意をはらった。また、測定データには、スケールファクタ、地球潮汐、計器高、ドリフト、テアーなどの諸補正を施し、最終的には、図2のエラーバーで示されているように、ほぼ10 $\mu$ galより良い測定精度のデータを得ている。

図2に示した測定期間では、1993年の記録的な豪雨、また、1994年の干ばつと異常な気象が続いたため、年周的な変動はやや不鮮明になっているが、重力変化の全般的な傾向としては、実測された地下水位の変動と大変よく対応している。

図3は、水位観測を同時に実施している測定点A2における重力の変化と水位の変化を示したものである。なお、図3中の水位は、両者の回

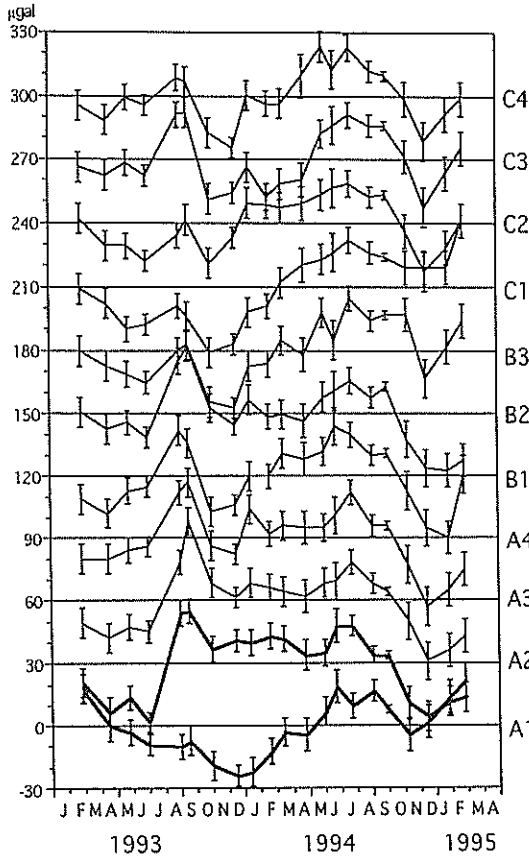


図2. 各測定点での重力変化. 大分地方気象台の一等重力点を不変点と仮定している.

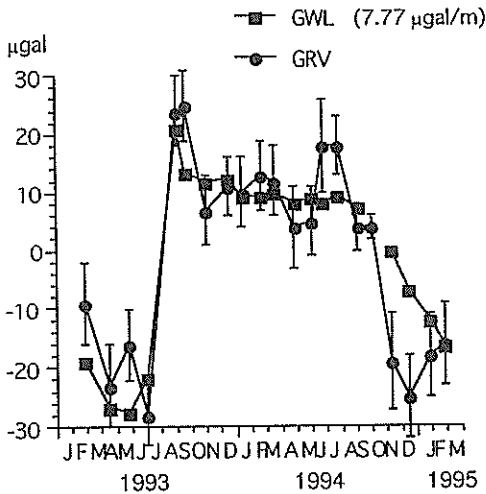


図3. 測点A2における重力変化 (GRV) と水位変化 (GWL). 水位の変化は重力値に換算されている.

帰直線から求めた係数 $7.77\mu\text{gal}/\text{m}$ の値を用い、対応する重力値に換算してある。また、この場合の両者の相関係数は $0.756$ であり、地下を半無限平板と仮定した場合の空隙率は $18.5\%$ である。

A2以外の水位観測を実施している測定点の内、C3における比較をみると、降水量の多かった1993年と干ばつであった1994年とで、重力/水位の関係に明らかな差異が見られる。すなわち、C3の測定点では、水位の変動巾にかなり大きな差が生ずるにも関わらず、重力の変化量としては、A2のそれとほとんど同程度であり、見かけの空隙率が降雨の様式によって変化し、水位の変動が必ずしも水量(質量)変化を正しく反映しないことを示している。

一方、海岸に近い測定点A1では、後述するように、地下水位の変動が極めて小さい(1m以下)にも関わらず、かなり大きな重力変化を示し、しかも、その変動パターンが山側の測定点とは明らかに異なることが明らかになっている。

これら、各測定点での重力変化の時空間パターンをより客観的に評価するため、重力変化の主成分分析(経験的直交関数展開)を試みた。その結果、図2に示した重力変化について、第1主成分が $58.8\%$ 、第2主成分が $28.8\%$ と、これら2つの主成分で変動の約 $90\%$ が説明できることが判明した。

図4および図5にそれぞれの空間変動パターンを示す。第1主成分の空間パターン(図4)では、海岸近くの測定点での寄与が小さく、内陸側で大きな傾向にあり、また、第1主成分の時間変動が年周期的な傾向を示すことから、この主成分は、従来から考えられている降雨による地下水位変動の一般的な傾向を反映したものと解釈できる。しかしながら、細部については、寄与率の変化が必ずしも標高に比例しないことや、年周期的な変動のパターンが、水位の上昇時と下降時とで異なる非線形性が見られるなど、複雑な水文状態を示唆している。

次に、図5に示した第2主成分の空間変動パターンをみると、南西側の4つの測定点と、その他の測定点で逆相の変動パターンを示しており、別府扇状地の南西側の境界である朝見川断層系に起因する深部の流動パターンを暗示する結果となっている。第2主成分の時系列パターンは、A1あるいはC1の測定点での時系列パターンに類似しており、これらの測定点の寄与

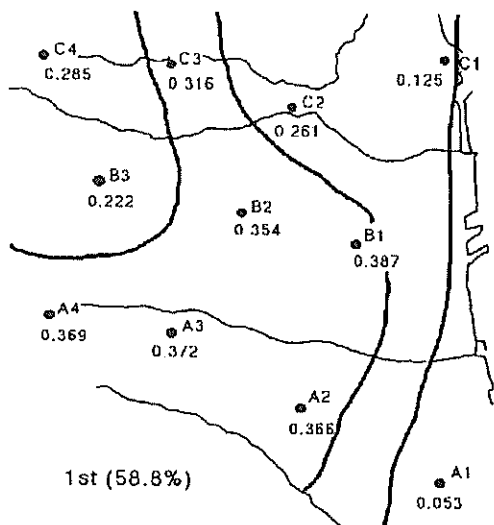


図4. 第1主成分の空間変動パターン.

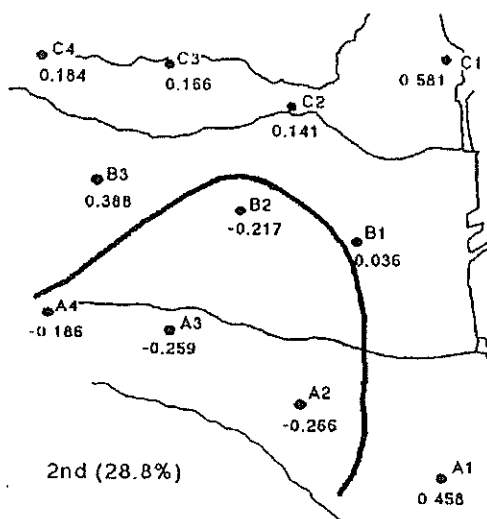


図5. 第2主成分の空間変動パターン.

が大きいことも特徴である。しかしながら、先にも述べたように、これらの測定点での不圧層水位そのものの変動は極めて小さく、どのようなメカニズムで重力変化が生じるのかについては、今後の研究を待つ必要がある。

#### 今後の課題と発展

本研究の第一の目的であった地下水位の変動を重力の変化として捕らえることには、ほぼ完全に成功した。しかしながら、水位変動と重力変化の関係は、当初の予想ほどには単純ではなく、降雨の影響に直接関連していると考えられる第1主成分に関して、若干の非線形性が認められ、また、第2主成分に対応した部分については、今のところ、重力変化のメカニズムそのものが不明である。これらの点は、精密重力測定への地下水の影響を除去すると行った測地学的目的にとっても無視できない問題であり、今後の重要な研究課題である。

一方、重力測定技術の立場からの今後の課題としては、基準点重力値が不変であることの確認や、重力計のキャリブレーションの問題を如何に回避するかが重要であり、このため、絶対重力測定や超伝導重力観測の併用が望まれる。

また、重力変化の原因として、測定点の標高そのものが変化することも考えられるが、この点を検証するため、現在、一部の測定点について、

水準測量による補足的な測定も開始している。

極めて精密化している現在の測地計測において、従来、地下水変動は、測定に悪影響を及ぼすノイズとしてのみ認識されてきた。しかし、そのノイズを研究対象とするとき、本研究によって示されたように、多くの有用な情報を得る可能性があり、また、そこで得られた情報が、翻って計測精度の向上につながることもなる。今後、このような学際的な研究の重要性は、益々、深まるものと思われる。

#### 発表論文リスト (口頭発表)

福田洋一, 馬渡秀夫, 由佐悠紀 (1994): 精密重力測定による別府地域の地下水変動の研究 (序報), 地球惑星科学関連学会1994年合同大会 (共通セッション重力)

福田洋一, 馬渡秀夫, 由佐悠紀 (1994): 別府地域における地下水位変動と重力変化の研究 (序報), 日本陸水学会講演会

福田洋一, 馬渡秀夫, 由佐悠紀, T.M. Hunt (1995): 精密重力測定による別府地域の地下水位変動の研究 (第2報), 地球惑星科学関連学会1995年合同大会 (測地)

Fukuda, Y., H. Mawatari, Y. Yusa and T.M. Hunt (1995): Gravity changes associated with groundwater level variations at Beppu, Japan, IUGG XXI General Assembly held at Boulder, Colorado, USA