

重力モニタリングの要諦

杉原光彦¹⁾

1. はじめに

重力の時間変化を計測して監視する重力モニタリングは様々な分野で活用されている。重力の教科書や啓蒙書（大久保，2004 など）でも相当のページを割いて説明されている。Geophysics 誌の重力モニタリング特集号には私たちの地熱地域での研究報告（Sugihara and Ishido, 2008）のほかに地下水・火山活動・CCS（二酸化炭素の回収と貯留）等，様々な重力モニタリングについての研究報告が掲載されている。私は地熱や CCS の重力モニタリングに長く関与してきた。実用上の課題について解説し（杉原，1998），地熱での応用については一般向けの簡潔な解説も試みた（杉原，2013）。しかし未だに重力モニタリングの存在意義を疑うような質問を受けて愕然とすることがある。典型的な質問は次の2つである。①「重力時間変化は要因が多すぎて役立たないのでは？」，②「地下構造調査をしてからでないと重力変動調査はできないのでは？」。この疑問に回答することで重力モニタリングの要諦を示すことにしたい。

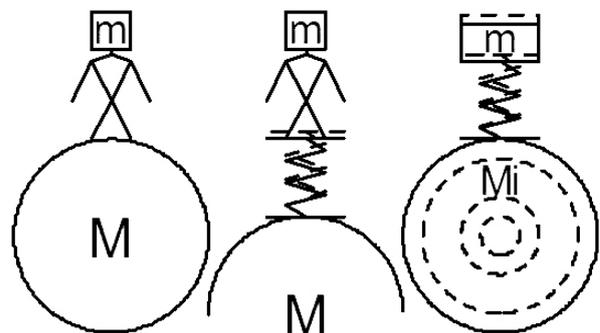
2. 重力変動測定は体重測定と似ている

「重力時間変化は要因が多すぎて役立たないのでは？」に対しては「安心してください。重力モニタリングは原理的にも活用法としても体重測定によく似ているのです」と答える。

確かに重力変化を引き起こす要因は多い。では体重測定はどうだろうか？体重変化の要因も様々だが，気軽に健康管理に役立っているのではないだろうか？気になる体重変化があれば病院を受診して病気がわかる場合もあるだろう。一方，人気番組「ためしてガッテン」では最も有効なダイエット法として，毎日体重測定して記録することを提案し（NHK 科学・環境番組部，2010），その効果については大きい反響があったようだ。我々は二酸化炭素地中貯留で高感度重力計による連続測定を提案している。予測と異なる重力変化が検出されたら，そこで反射法探査など本格的な調査を行いましょうという構図である（相馬ほか，2014）。

原理的な類似性も見てみよう（第1図）。地球（質量 M ）と地球表面に立っている人（質量 m ）の間に働く万有引力は， GMm/R^2 である。ここで G は万有引力係数， R は地球中心から人までの距離（地球半径）である。 $GM/R^2 = g$ が重力である。地球表面に置かれた体重計の上に人が立っていたとすると，バネの伸び縮み量 x に比例した力 kx が働き，体重計はバネの復元力で人にかかる万有引力を支える。したがって，人の質量 m は，計測値 x によって kx/g と評価される。実は最も広く使われている重力計はバネ秤の一種である。今度は人ではなく重力計を地球と対峙させる。重力計自体の質量を m とすれば，重力計と地球の間の万有引力は $GMm/R^2 = mg$ 。これが重力計のバネの力 kx と釣り合うので，計測値 x によって重力を $g = kx/m$ と評価できる。ここで k/m は重力計毎に決まった定数である。第1図右では地球を4層構造で示した。重力は，この4層の部分からの寄与が合計されて働く。更なる不均質構造を考慮する場合は，より細かく区分して合計する。

今までの議論では，万有引力を重力としてきた。地球物理学では，地球回転による遠心力と万有引力の合力を重力と定義して扱う。その場合は多少表現が変わるが議論の主旨は変わらない。



第1図 重力測定と体重測定の関係。人に働く万有引力（左），体重計（中央），重力計（右）。

1) 産総研 地質調査総合センター地圏資源環境研究部門

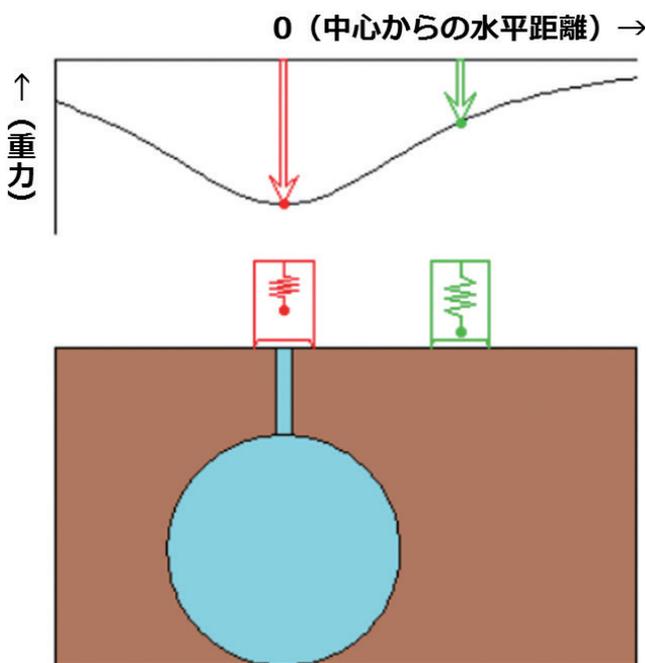
キーワード：重力モニタリング，超伝導重力計，間欠泉モデル

3. 重力変動観測では重力構造調査では得られない情報も

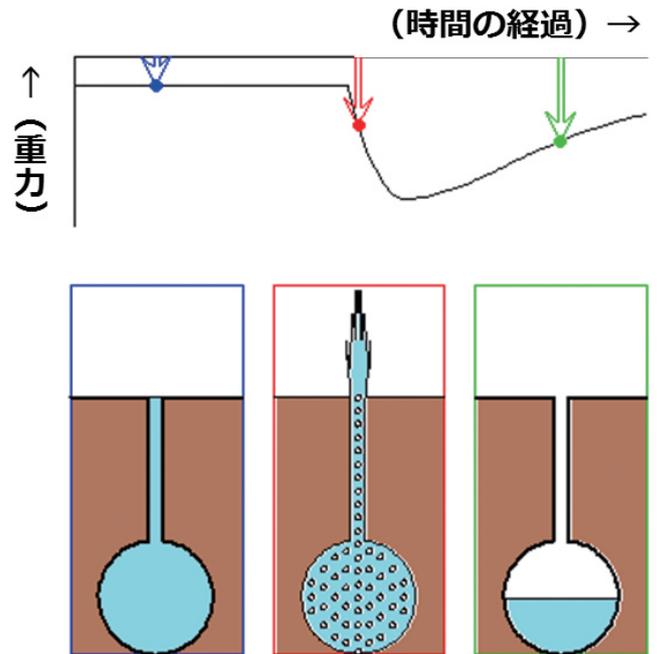
「地下構造調査をしてからでないと重力変動調査はできないのでは？」という疑問には、「重力変動調査によってしか得られない構造の情報もある。」と答える。

以前、地熱開発では、重力構造調査も重力モニタリングも探査手法として利用されることを解説した(杉原, 2013)。それを利用すると今の質問に対しても、わかりやすく説明できる。やや長くなるが、一部変更しつつ引用する。「地下にある岩石などの物質が重いか軽い、といったことや、地下の熱水や蒸気の増減を調べることができるのが重力探査です。地下の密度分布によって地表での重力値には微小な差異が生じることを利用して調べます。地熱地域では重力の微小な時間変化にも注目して活用します。単純な間欠泉モデルで説明しましょう。間欠泉を横切って地表で重力測定すると間欠泉直上では重力が小さくなります(第2図)。これは熱水たまりの密度が周囲の岩石より小さいことによります。間欠泉活動は地下の熱水が沸騰して噴出したあと、熱水がたまる周期的現象ですが(第3図)、それに対応して噴出時に重力が低下し、熱水がたまると重力が回復する時間変化がみられます(第4図)。」

重力構造解析するというのは第2図で重力の空間分布から貯留層の形を推定することである。地下の密度が一樣



第2図 重力構造調査のイメージ(間欠泉の貯留構造の場合)。間欠泉貯留構造モデル断面と横断測線上での重力分布。杉原(2013)を改変。



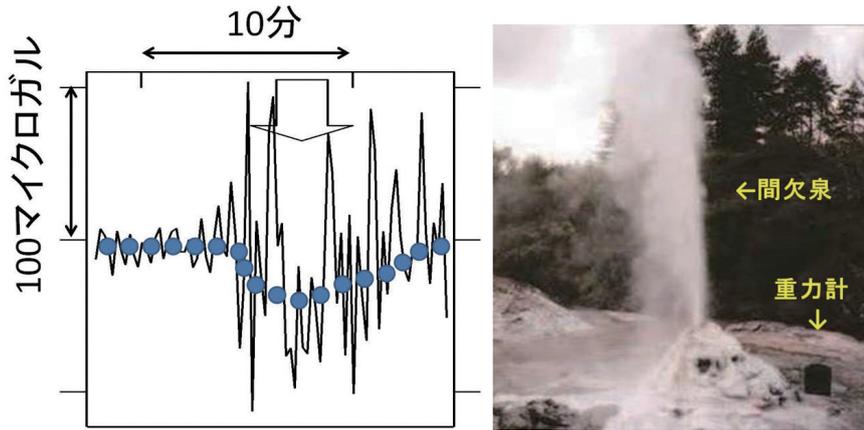
第3図 間欠泉活動に伴う重力時間変化モデル。杉原(2013)を改変。

ならば貯留層の構造推定は簡単そうに見えるが、密度の不均質構造の可能性を考慮すると貯留層の形状の推定は結構難問である。一方、重力の時間変化は、地下の密度が不均質であったとしても、その影響は受けない。第4図のような重力時間変化の計測データは貯留層構造を推定する手掛かりになる。

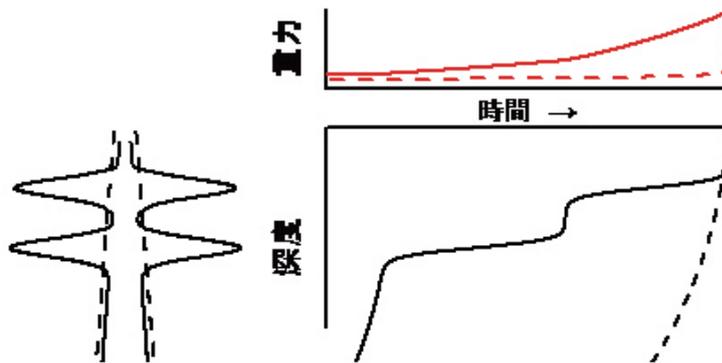
具体的に数値をあてはめて考えてみるとわかりやすい(第5図)。間欠泉の貯留構造モデルを想定して水が一定速度で供給される場合の水位と重力の時間変化を評価した。貯留構造によって重力変化のパターンは異なるので、重力変化の観測データから構造の手掛かりも得られる。

4. さまざまな重力計, 特に超伝導重力計

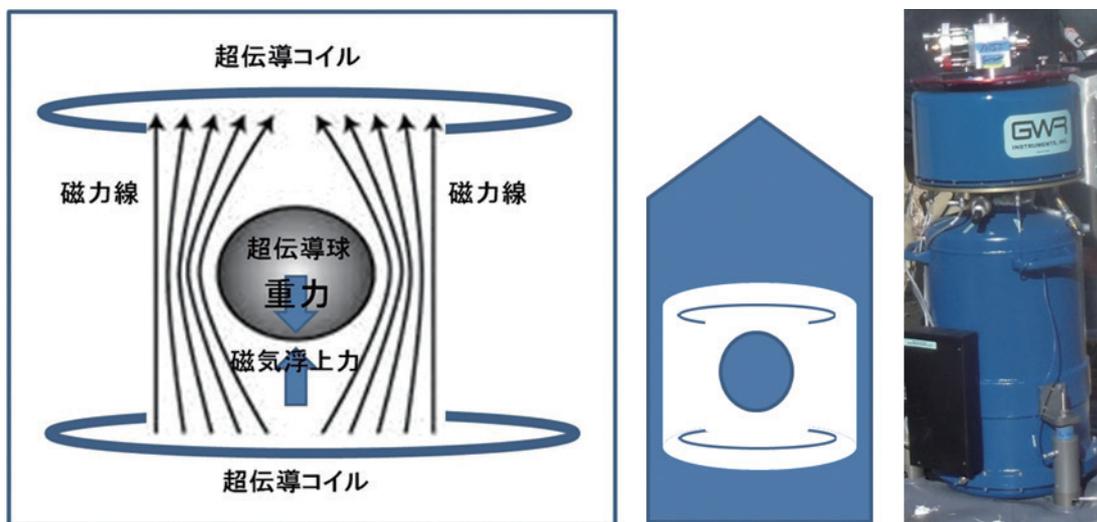
我々が最近、興味をもって使っている重力計は超伝導重力計である。超伝導重力計は相対重力計だがバネ秤ではない。重力とバランスするのは超伝導状態の安定な磁場による磁気浮上力である(第6図)。磁気浮上力が安定であることに加え、極低温によって熱雑音が無いために通常の重力計に比べて圧倒的な高感度である。高感度であるというのは第5図のような重力変化を細かい目盛で識別できるということである。また安定な磁気浮上力によって、重力計のドリフトがきわめて小さい。バネ秤式重力計では、バネ定数は実は温度などによって変化する。こうした影響は機器のドリフトとなって第5図のような重力時間変化の計



第4図 ニュージーランドのレディノックス間欠泉での重力観測風景(右図)と重力時間変化記録例(左図). 実際の観測では地面振動の影響も受けるが, ●印列のような重力時間変化を認識できる. 杉原(2013)を改変.



第5図 間欠泉モデルの計算例. 空になった貯留層部分に湯が一定速度で供給される過程での重力変化(上図)と水面深度変化(下図). 左図に示した2つのモデルについて示した.



第6図 超伝導重力計の原理(杉原ほか(2014)を改変)と構造と実物写真.

測データに重なるので、誤差要因になる。

重力モニタリング法として一般的なものは可搬型相対重力計による繰り返し測定である。第2図に示した空間分布測定を期間をおいて繰り返す。CO₂地中貯留のモニタリング手法でも、可搬型相対重力計のセンサーを組み込んだ海底重力計や孔内重力計を使って繰り返し計測する手法が現場で適用されている。一方、我々は超伝導重力計による高感度重力連続測定を第3図のように試行してきた。両者によって各々独立な情報が得られるので、両者を並行して行うことをスーパーハイブリッド重力モニタリングと称している。

5. むすび

重力モニタリングは体重測定と似た活用ができると説明した。異常が気になったら詳しい診察を受ければ良いと。自力で解析をすすめることもできる。さまざまな時間変化のデータや構造モデルを考慮すれば、変動要因がたくさんあっても、原因を解釈することができる。重力データ解析には原理的に解の非一意性という問題がある（大久保, 1995）ので、解釈の任意性を狭めると言う方が適切かもしれない。モデル計算値と観測値と比較し、観測とモデルの食い違いが見出されたらモデルを修正するという手順で正解に近づける。その手続きは重力構造解析でも重力変動解析でも似ているが、重力変動解析ではダイナミックなモデルを扱うし、構造に関しては簡略化した構造モデルを想定する。第2図の例では、間欠泉とつながっていない空洞があった場合に、構造解析では、それも解析しなければならないが、変動解析用構造モデルには含める必要がない。重力変動解析が適切ならばダイナミクスを規定するパラメータとともに簡単な構造モデルのパラメータも評価できる。

文 献

- NHK 科学・環境番組部 (2010) NHKためしてガッテン 計るだけダイエット新装版 効果倍増7日間健康レシピ. アスコム, 東京, 77p.
- 大久保修平 (1995) 重力のインバージョン. 地学雑誌, **104**, 1047-1062.
- 大久保修平 (2004) 地球が丸いってほんとうですか?. 朝日新聞社, 東京, 279p.
- 相馬宣和・杉原光彦・石戸経士・名和一成・西 祐司 (2014) CO₂地中貯留のための多面的モニタリング技術の検討. GSJ地質ニュース, **3**, 137-142.
- 杉原光彦 (1998) 重力モニタリング実用上の課題. 物理探査, **51**, 602-612.
- 杉原光彦 (2013) 地熱資源の調査: 重力探査. 地質調査総合センター研究資料集, no. 584, 7.
- Sugihara, M. and Ishido, T. (2008) Geothermal reservoir monitoring with a combination of absolute and relative gravimetry. *Geophysics*, **73**, WA37-WA47.
- 杉原光彦・名和一成・相馬宣和・石戸経士・西 祐司 (2014) テキサス州ファーンズワース CO₂地中貯留調査サイトでの超伝導重力計の導入. GSJ地質ニュース, **3**, 129-132.

SUGIHARA Mituhiko (2016) Essence of gravity monitoring.
(受付: 2016年2月5日)