

## フォースバランス型加速度計を用いた簡易重力計開発のための センサー特性に関する基礎的検討

東京工業大学 会員 ○ 盛川仁  
基礎地盤コンサルタンツ(株) 松尾寛子  
クローパテック(株) 松田滋夫

1. はじめに 地盤構造推定のために行われる重力探査では多くの場合、スプリング式の相対重力計が用いられる(例えば, Goto *et al.*[1])。この形式の重力計は、非常に高い精度を持つことが特徴であるが、取り扱いが難しいことや高価で測定に時間を要するといった問題がある。一方、近年の地震動予測などにおいては、種々の地域における詳細な地盤構造のモデル化が課題とされているが、物理探査を実施するには多大な時間と費用を必要とするために探査が十分に行われているとは言えないのが実情である。

そこで本研究では、小型かつ軽量、さらに移動しながらの測定が可能な簡易相対重力計の開発を目指している。開発により、地表面で一地点ずつ行っていく重力探査だけではなく自動車等の移動可能なキャリアへの搭載を可能とすることで、広範囲を稠密に探査できることが期待される。そのような背景から、安価で比較的高精度、高分解能のセンサーであるフォースバランス型加速度計(以下、FB加速度計)をセンサーとして採用し、それが重力計としてどの程度の性能を有するか基礎的な検討を行う。検討にあたっては、最初に静止状態での記録の分解能を検討し、移動しながらの重力測定によって妥当な値が得られるかに注目した。なお、これらの検討は既に何回か行っているが(例えば、松尾ほか[2])、新たに開発した高分解能・低ノイズのデータロガー[3]によってより精度のよい結果が得られるか検討したものである。

2. 簡易相対重力計の試作 FB加速度計を用いた簡易相対重力計の試作機がクローパテック株式会社の協力により製作され、EZ-GRAVと名付けられた。重力センサーのためのFB加速度計として、東京測振製VSE-156SG(以下、VSE)を試用した。測定レンジは $\pm 50$  [Gal]、最大出力が $\pm 10$  [V]であるが、理論分解能は数 $\mu$ Gal程度である。しかし、理論分解能を客観的に検証する方法がないため、重力計としての試作機を製作しその性能を検討する。

試作機にはVSEの他に2成分の傾斜計、鉛直方向と水平方向の3成分を測定できるNanometrics社製のTAITAN加速度計を1個搭載している。観測データは、荒木ら[3]によって開発中のデータロガーにより、ゲート電圧 $\pm 10$  Vを24 bitの分解能のA/Dコンバータによってデジタル化されて0.01秒のサンプリング間隔で記録される。

### 3. 試作機を用いた観測概要および結果

3.1 センサーの静的性能 まず、温度変化が少ないと考えられるトンネル内に簡易重力計を設置し、長期間の記

録から潮汐に相当する重力変化が記録されるかどうか検討した。以前に行った検討[2]ではある程度の傾向が見える、ということであった。

トンネルは、東京工業大学すずかけ台キャンパス内にあるトンネルを利用し、2011年2月11日0時から20日24時まで記録した。データロガーは400 Hzでデータをサンプリングしてからデシメーションフィルタで100 Hzサンプリングにリサンプリングしている。また、アンチエイリアスフィルタとしてアナログ回路としてカットオフ周波数が40 Hzの1次のベッセルフィルタが組み込まれている。記録は0.01秒間隔で記録されているためデータ量が膨大になる。そこで、1分ごとに平均をとるといった簡易なローパスフィルタをかけてデータ量を減らした。その結果得られた記録を図1に示す。

図からわかるとおり、VSEは非常に大きなドリフトを生じている。同時に記録をとっていたTAITAN加速度計や傾斜計も大きなドリフトを生じているが、3日程度である程度安定している。従って、VSE以外のセンサーのドリフトは温度によるものと考えられるがVSEのドリフトは単調的で温度とは相関があまりなく、ドリフトの原因ははっきりしない。

解析にあたってはいくつかの非定常過程に分解するための手法であるHilbert-Huang変換(以下、HHT)[4]を用いた。HHTによりいくつかのモードに分解できるが、そのなかで周期が12時間程度に対応するモードを選んで潮汐と比較した。図2にその結果を示す。VSEの記録は潮汐による大潮、小潮に相当する重力変化の大小を表現しているようにも見えるが、理論的に求められる潮汐による重力変化とは位相がやや異っている。また、絶対振幅についても3倍ほどの違いがある。

VSEのドリフトは10日間でおよそ1000 [mGal]におよぶが、その中で潮汐による重力変化はわずかに100~200 [ $\mu$ Gal]程度である。4桁も大きなノイズの中から信号を抽出すること自体が非常に困難であることは論を待たないが、HHTが必ずしも適切に信号を分解しているかどうかについても検討の余地がある。この実験の結果から、VSEが潮汐のような微小な重力変化に対してもなんらかの応答を示していることは考えられるが、解析法については今後の検討が必要である。

3.2 移動時の性能 もっとも単純な移動状態として、移動速度がほとんど変化せず、しかもキャリアの振動が小さ

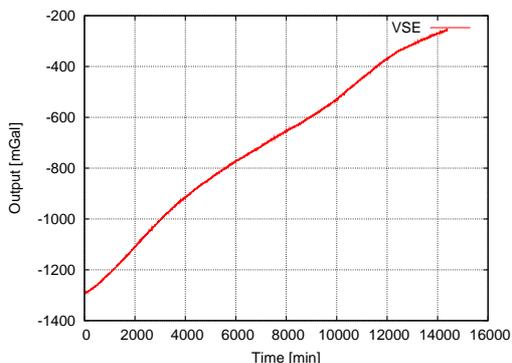


図 1: トンネルに設置した VSE の記録

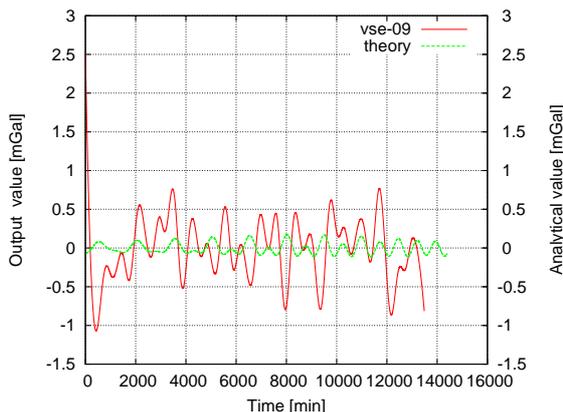


図 2: 潮汐による重力変化の理論値と VSE の記録から抽出された周期約 12 時間の変動

く、ある程度大きな重力変化が生じるような状態で実験を行った。重力は標高が 1 m 高くなるとおよそ 0.3 [mGal] ずつ小さくなるのが理論的に知られているため、試作機を大観覧車に搭載して記録をとった。

観測には東京都江東区のパレットタウン内にある大観覧車を利用した。測定の際に同乗者がいるとゴンドラの振動が大きく安定した記録が得られないことがわかっているので [5]、センサーのみをゴンドラに搭載し、観覧車が一周する間の記録をとった。観覧車はリング直径 100m、一周に要する時間が 16 分である。移動速度は非常に遅く高低差も 100m と小さいため、エトベス効果と大気の影響は無視できるものとした。そのため、重力値の理論的な変化はフリーエア異常と遠心力のみである。両者をあわせると 500 [mGal] 程度の変化があり、その値は地上でもっとも大きく、頂点でもっとも小さい余弦関数に近い変化となる。

得られた記録を図 3 に示す。短周期の振動が多く記録されているが、観覧車の移動にともなう重力変化のおおまかな形状を見ることは可能である。なお、同時に記録をとっている TAITAN 加速度計は短周期の感度が高いため観覧車の移動にともなう重力変化を目視によって判別することはできなかった。

図 3 に見られる短周期成分をカットオフが 10 秒のローパスフィルタによって取り除いて、重力変化の理論値と比較したものを図 4 に示す。図 4 では、ゼロの位置が理論値と観測値で異なるため、相対的な変化を比較できるように、記録と理論値で軸を変えて描いている。しかし、それらのスケールは同じであるため重力値の相対的な変化が妥当かどうかの比較をすることは可能である。この図からわか

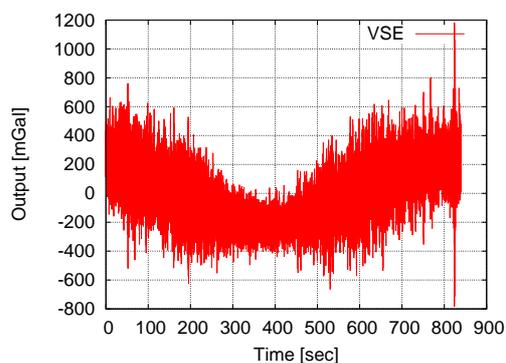


図 3: 観覧車に搭載した VSE の記録

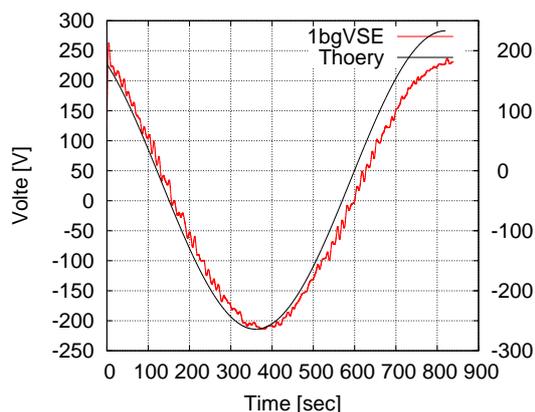


図 4: 観覧車の移動にともなう重力変化の理論値と VSE の記録にカットオフ 10 秒のローパスフィルタをかけた信号

るとおり、VSE の記録は理論値と非常によい一致を示しており数百 mGal 程度の変化に対しては十分な分解能を有していることがわかった。なお、同時に記録をとっていた TAITAN 加速度計もフィルタ処理によって観覧車の動きに対応した重力の変化を正しく記録していた。

4. おわりに 簡易重力計に用いるフィードバック型加速度計の基本性能について検討を行った。その結果、潮汐変化に対してはレスポンスはあるようであるものの、合理的な結果を得るためには解析法も含めてより詳細な検討を要することが明らかとなった。また、観覧車のような振動が少なく数百 mGal のオーダーの重力変化に対しては非常によい結果を示した。今後は、実際の重力探査で必要となる数百  $\mu$ Gal ~ 数 mGal 程度の重力変化に対する性能について検討を行う予定である。

参考文献

- [1] Goto, H. *et al.*, Modeling of 3D subsurface structure and numerical simulation of strong ground motion in the Adapazari basin during 1999 Kocaeli earthquake, Turkey, Vol.95, No.6, 2005, pp.2197-2215.
- [2] 盛川仁・松尾寛子・松田滋夫：フォースバランス型加速度計を用いた重力測定のための基礎的検討, 日本地震学会 2009 年秋期大会予稿集, pp.2-29, 2009.
- [3] 荒木正之ほか：複数の A/D コンバータのハイブリッド使用による超低ノイズデータロガーの開発, 第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集, 2010, pp.3625-3632.
- [4] Huang, N. E. *et al.*, The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc. of the Royal Society of London*. Vol.454, 903-995, 1998.
- [5] 松尾寛子・盛川仁・松田滋夫・徳江聡：重力測定のためのフォースバランス型加速度計の適用性に関する基礎的検討, 第 13 回 日本地震工学シンポジウム論文集, 2010, pp.3770-3777.