

フォースバランス型加速度計を用いた 簡易相対重力計開発のための基礎的検討

松尾寛子¹・盛川仁²・松田滋夫³・徳江聡²

¹ 基礎地盤コンサルタンツ株式会社 関東支社 (〒135-0016 東京都江東区東陽 3-22-6)

² 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-G3-7)

E-mail: morika@enveng.titech.ac.jp

³ クローバテック株式会社 (〒180-0006 東京都武蔵野市中町 3-27-26)

地盤構造推定のための重力探査に用いられるスプリング式重力計は、非常に高い精度を持つ反面、取り扱いが難しいことや測定に多くの時間を要するといった問題がある。そこで本研究では、比較的小型かつ軽量、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基礎的検討を行う。検討にあたっては、フォースバランス型加速度計が重力計としてどの程度の性能を有するかを調べる。特に、移動しながらの重力測定で加速度計が妥当な値を得られるかについて注目し、様々な状況下で観測を行った。その結果、状況によっては、数 mGal 程度のオーダーで重力測定が可能であるということが明らかになった。

Key Words: gravity survey, force-balanced-type accelerometer, gravity meter, blind source separation

1. はじめに

近年の地震動予測の分野などにおいては、種々の地域における地盤構造モデル化は喫緊の課題とされている。地盤構造推定のために有効な手法の一つとして重力探査があり(たとえば, Goto *et al.*¹⁾, Goto *et al.*²⁾), その測定にはスプリング式重力計がしばしば使用されてきた。

しかし、スプリング式重力計は非常に高い精度を持つ反面、一地点ずつ測定を行うため測定に多くの時間を要する。そのうえ、機器の取り扱いが非常に面倒であるという問題がある。そのようなことから、現在では、短時間で広範囲の測定を目的として船舶や航空機などのキャリアを用いた重力測定も行われている³⁾。キャリアへの搭載により、人間が立ち入りにくい地形や複雑な地形をもつ地域での測定も期待されているが、依然として重力計そのものが大きいためそれを搭載するキャリアも大きくなってしまい、浅海部などには重力データの空白な場所が多数存在している。そこで本研究では、さらなる軽量かつ小型、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す。

以上のような背景から、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、FB 加速度計を搭載した簡易相対重力計の試作機(EZ-GRAV)を用いて、移動しながらの重力測定により妥当な値が得られるかに注目した。

実験は、EZ-GRAV を用いて、移動速度が一定の場合と速度が変化する場合について、またキャリアの振動レベルが異なる環境でそれぞれ行い、重力成分の抽出を試みた。また、既知の重力値と測定結果の比較により、観測結果の妥当性を検討する。

2. 簡易重力計の試作機

ある地域の地震動予測を行うというような工学目的で用いられる地盤構造のモデル化において必要とされる重力の測定精度の目安はブーゲー異常を 1 mGal 間隔の等値線で表示できることであると考えている。したがって、本研究では重力測定においてサブ mGal 程度のオーダーの精度(数 10×10^{-6} Gal ~ 数 100×10^{-6} Gal)が得られることを最終的な目標としている。

計測値には様々なノイズが含まれることを考慮すると、センサー単体では 10×10^{-6} Gal 程度の分解能と精度が要求されることが考えられる。以上の条件より、重力センサーのための FB 加速度計は、東京測振製 VSE-156SG(以下, VSE)および日本航空電子工業社製 JA-40GA02(以下, JA40)を試用することとした。それらのセンサーの基本性能は表-1 に示す。

また、FB 加速度計を用いた簡易相対重力計の試作機は、以下では EZ-GRAV と総称するが、観測条件によって、EZ-GRAV に搭載したセンサーや水平加速度計、使用したデータロガーなどが異なるため、本稿ではタイプによって EZ-GRAV I と EZ-GRAV II として区別することとする。

表-1 加速度計センサーの基本性能 (Gal = cm/s²)

	VSE-156SG	JA-40GA02
測定レンジ	±50 Gal	±2 × 980 Gal
最大出力	±10 V	
分解能	2~10 × 10 ⁻⁶ Gal	—

(1) EZ-GRAV I

EZ-GRAV I では、FB 加速度計として VSE および JA40 を使用した。その他に 2 成分の傾斜計、2 成分の水平加速度計を搭載している。観測データは、ゲート電圧 ±2.04 V を 24 bit 分解能の A/D コンバータによって、サンプリング間隔 0.25 秒でデジタル化して記録している。

センサー類は一枚のアルミ板上に剛に固定して、A/D コンバータを含む回路基板とともに恒温槽に入れている。FB 加速度計や A/D コンバータの前段に使われているアンプや抵抗などが、温度の影響を大きく受けて温度の変化によって重力の測定値の変化よりも大きな変動をするためである。VSE には温度補償回路が搭載されているが、それでも、その変動量は非常に大きい。恒温槽は ±1 度以内で温度を制御している。

(2) EZ-GRAV II

EZ-GRAV II では、FB 加速度計として VSE のみを使用し、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 2 つ使用している。観測データは、荒木ら⁴⁾によって開発されたデータロガーにより、ゲート電圧 ±10 V を 24 bit の分解能の A/D コンバータによってサンプリング間隔 0.01 秒でデジタル化して記録している。

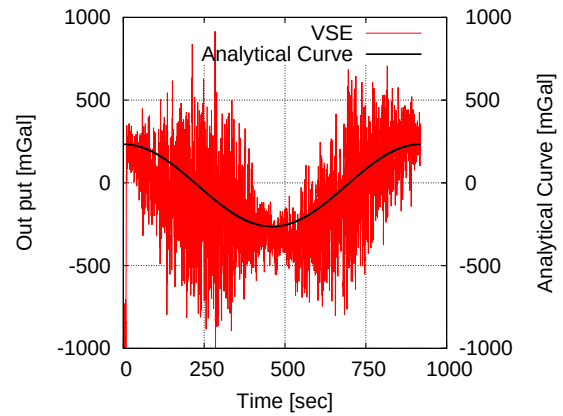
2 個の 3 成分加速度計の一方はジンバルの上に載せられており、センサー類及びジンバルは一枚のアルミ板上に剛に固定されている。

3. 試作機を用いた観測の概要と結果

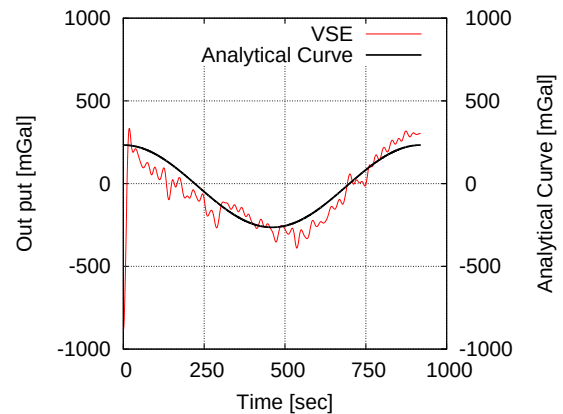
静止状態で FB 加速度計により測定を行った結果、採用したセンサーは潮汐による重力変化にある程度は反応できるだけの分解能があることが確認された⁵⁾。次に、その FB 加速度計を用いた EZ-GRAV I および EZ-GRAV II を用いて、移動しながらの測定でどの程度の重力の変化を測定できるかを調べるため、異なるいくつかの状況で観測を行った。

(1) 移動速度一定・キャリアの振動が少ない場合

2010 年 4 月 22 日、EZ-GRAV I を観覧車に載せて観測を行った。観覧車は、ゆっくりとほぼ一定速度で移動し、かつ大きな高低差を有するため、みかけの重力の変化が大きく、しかも振動が少ないという特徴をもつ。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、測定は 2 回行った。1 回目の測定では、EZ-GRAV I と一緒に著者らもゴンドラに乗った状態、2 回目は、ゴンドラに EZ-GRAV I のみを載せ



(a) VSE の出力



(b) 20 秒のカットオフ周期のローパスフィルタによって処理された波形

図-1 観覧車での観測における VSE の出力

た状態で行った。1 回目の測定は著者らの重心の移動によってゴンドラが揺れるため振動によるノイズが大きく、振動が少ないという観覧車の特徴を活かすことができなかった。

図-1(a) に 2 回目の測定での VSE の出力加速度を示す。また、それに 20 秒のカットオフ周期をもつバターワース型ローパスフィルタをかけたものを図-1(b) に示す。それぞれ、赤線は観測値であり、黒線はこのときの観測で記録されることが期待される理論値である。横軸は経過時刻を秒で表しており、左の縦軸は観測値、右は理論値をそれぞれ加速度値 (単位は mGal) で表している。

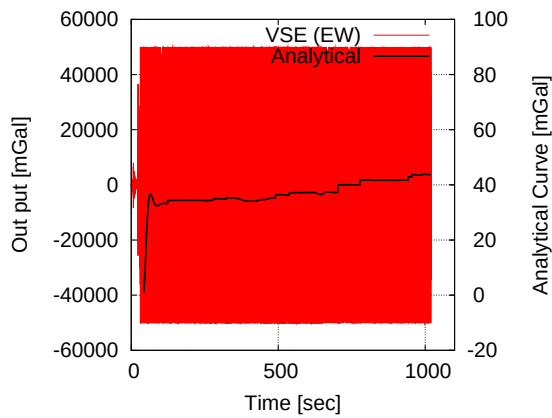
図-1 における理論値はフリーエア異常⁶⁾と遠心力の影響を考慮することとし、エトベス効果、水平方向の重力の変化、地球潮汐、大気圧の影響による鉛直方向の加速度の変化は十分に小さいものとして考慮しない。

フリーエア異常および遠心力はそれぞれ以下のようにして求められる。

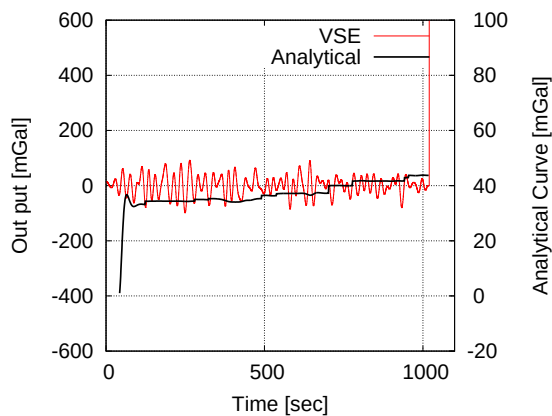
$$F(t) = -0.003986 \left[r \left\{ 1 - \cos\left(\frac{\pi}{180} \frac{360}{n} t\right) \right\} \right] \quad (1)$$

$$C(t) = r \left(\frac{2\pi}{n} \right)^2 \cos\left(\frac{\pi}{180} \frac{360}{n} t\right) \times 1000 \quad (2)$$

ここで、 $F(t)$ はフリーエア異常値、 $C(t)$ は遠心力、 n は 1 周にかかる時間、 r は観覧車の半径で単位は m、 t はゴンドラが鉛直真下にいる時刻を 0 とした経過時間



(a) VSE の出力



(b) 20 秒のカットオフ周期のローパスフィルタによって処理された波形

図-2 車両での観測における VSE の出力

(秒)である。また、式(2)の0.003986はフリーエ係数である。

観覧車による重力変化の理論値 $G(t)$ はフリーエ異常値と遠心力を足し合わせた重力変化であるから、

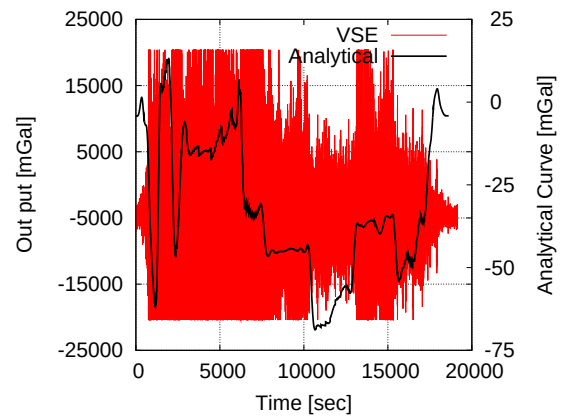
$$G(t) = C(t) + F(t) \quad (3)$$

によって求められる。

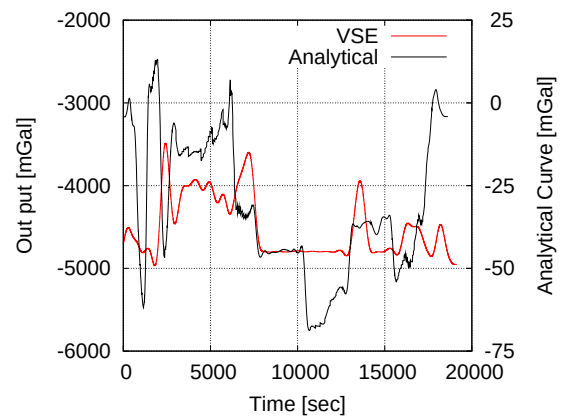
VSE の出力は、フィルタ処理により図-1(a)に見られる短周期成分を取り除くと、数 mGal ほどのオフセットの違いはあるが図-1(b)のように重力値の相対変化は理論値とよい整合を示した。なお、JA40 も VSE と同様の結果が得られたが、JA40 は短周期成分に対する感度が VSE に比べて非常に高いため、振動の影響をより強く受けている。

(2) 移動速度一定・キャリアの振動が多い場合

2011 年 1 月 14 日、茨城県にある涸沼周辺にて車両を用いて観測を行った。EZ-GRAV II を平ボディのトラックに載せ、重力が既知である平坦な干拓地を 1.5～3.0 km 程度南北方向(以下、NS 方向)および東西方向(以下、EW 方向)にほぼ一定の速度で走行して記録をとった。この地域にはスプリング式の相対重力計を用いて観測された重力値のデータがあり、東西方向に一定の割合で重力値が変化し、南北方向にはほとんど重



(a) VSE の出力



(b) 800 秒のカットオフ周期のローパスフィルタによって処理された波形

図-3 船舶での観測における VSE の出力結果

力値が変わらない、という特徴がある。なお、走行区間には一部未舗装区間があるため、非常に大きな振動が非定常的に発生した。

図-2(a)に、EW 方向に走行した際に測定した VSE の出力加速度を示す。また、図-2(a)には期待される観測値(以下、リファレンス値と呼ぶ)を重ねて示している。軸の意味は図-1と同様である。

リファレンス値は、スプリング式相対重力計によって測定された絶対重力値の相対値とエトベス効果から求めている。フリーエ異常、地球潮汐、大気圧の影響による鉛直方向の加速度の変化は十分に小さいものとして考慮しない。なお、エトベス効果は、地球の自転方向の慣性力による見かけの重力変化である。GPS を用いて車両の速度、移動方向、位置を求めたうえで次式によって求められる。

$$\delta_{gE} = 2\omega V \cos \phi \sin \alpha + V^2/R \quad (4)$$

ここで、 ω は自転角速度、 V は車両の対地速度、 ϕ は緯度、 α は方位角、 R は地球の半径である。

図-2(a)より VSE の出力は、VSE の測定範囲である 50 Gal を振り切っていることがわかる。また、左右の縦軸のスケールからわかるとおり、リファレンス値は 10 mGal 程度の変化であるのに対して、VSE の出力はリファレンス値の 5000 倍以上の振幅を持っている。

図-2(b)は VSE の出力に 20 秒のカットオフ周期をも

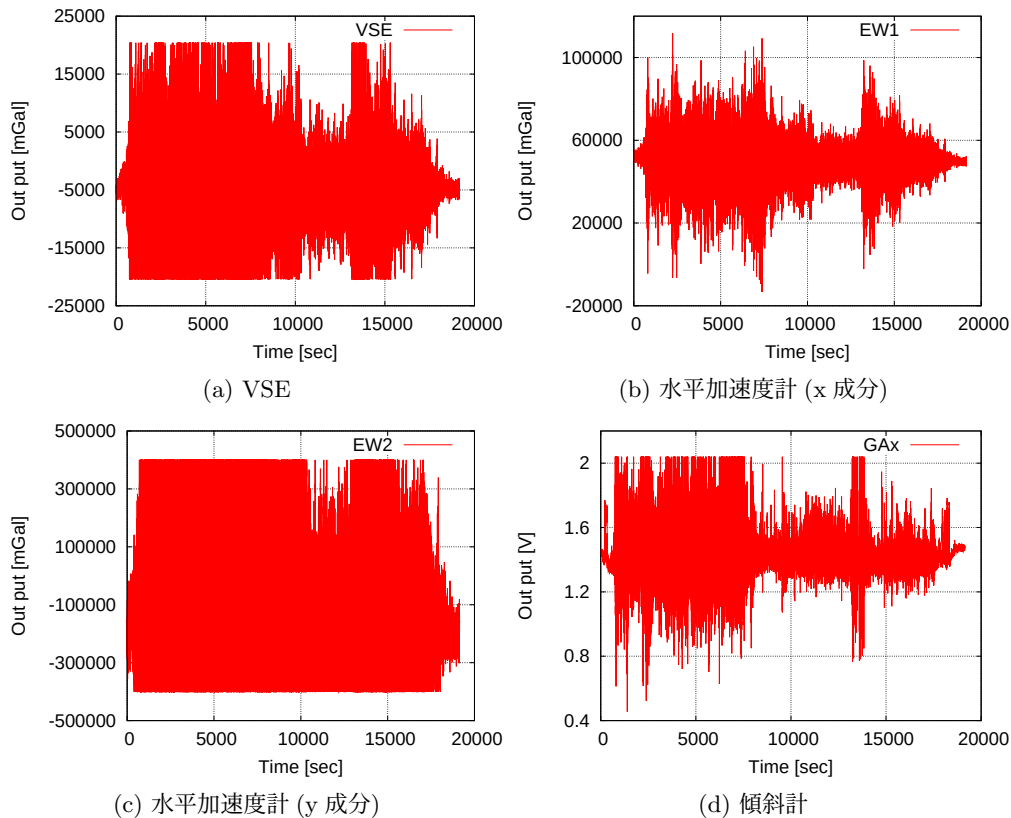


図-4 VSE, 2 成分の加速度計, 1 成分の傾斜計の記録

つバッタワース型ローパスフィルタをかけたものとリファレンス値を重ねて示している。記録が振り切れているため、解析結果の信頼性は著しく劣ることは容易に予想されるが、長周期成分のみに着目するため、対象とする周期帯の周期に対応する区間が連続して全て振り切れているようなことがなければ、定性的な傾向をみることは可能であると考えている。

フィルタによって短周期の振動が取り除かれるため、振幅が大幅に小さくなってリファレンス値に近づいている。しかしそれでもなお、リファレンス値に比べてVSEから得られる波形は数倍以上の振幅を有している。また、リファレンス値に見られるようなほぼ一定の傾きで重力値が変化するような傾向もみることができない。

(3) 移動速度変化・キャリアの振動が多い場合

実際になんらかのキャリアに簡易重力計を搭載して重力測定が行う際は、移動速度を一定に保つことができないことが多いと想像される。移動速度が変化する例として、2010年6月1日、富山高等専門学校の練習船「若潮丸」にEZ-GRAV Iを載せて富山湾にて測定を行った。若潮丸は、総トン数231トン、全長53.59mの船艇であり、午前10時に富山新港を出航し、15時8分に帰港した。

図-3(a)に、VSEの出力およびリファレンス値を示す。リファレンス値は、エトベス効果と既に船上重力計によって得られている富山湾のフリーエア異常値を足し合わせて求めた。図-3(b)に、観測で得られたVSEの出力に800秒のカットオフ周期をもつバッタワース型ローパスフィルタをかけたものとリファレンス値を

示す。軸の意味は図-1や図-2と同様である。

図-3(a)のVSEの出力波形をみると、時刻10000秒～13000秒およびおよそ16000秒以降では振り切れていないが、これは若潮丸が海上または富山新港で停泊していたためで、それ以外の移動中は潤沼の車両での記録と同様に測定範囲を振り切れている。ただし、この観測では感度をあげていたため ± 25 Galで振り切れている。

前節と同様の考え方にたって図-3(a)の記録に対してフィルタ処理を行った結果を図-3(b)に示す。フィルタにより処理した結果とリファレンス値を比較すると、観測から得られた振幅はリファレンス値の20倍以上も大きく、位相もまったく異なる結果となった。

4. 重力成分の抽出法に関する考察

以上の解析では、ローパスフィルタによって重力値の変化を抽出しようとするものであった。フィルタによって重力成分を抽出可能であるとする根拠は、重力の空間的な変化を移動しながら観測した際には、移動速度が小さければ、重力の時間変動はキャリアの振動に比べて十分に長周期成分の信号として測定される、ということを前提としている。したがって、ホワイトノイズのような広帯域のノイズが混入するとフィルタのみで重力成分を正しく分離することは本質的に難しいことになる。

ところが、外乱としてのキャリアの振動が測定対象である重力の変化に対して小さい場合には簡単なフィ

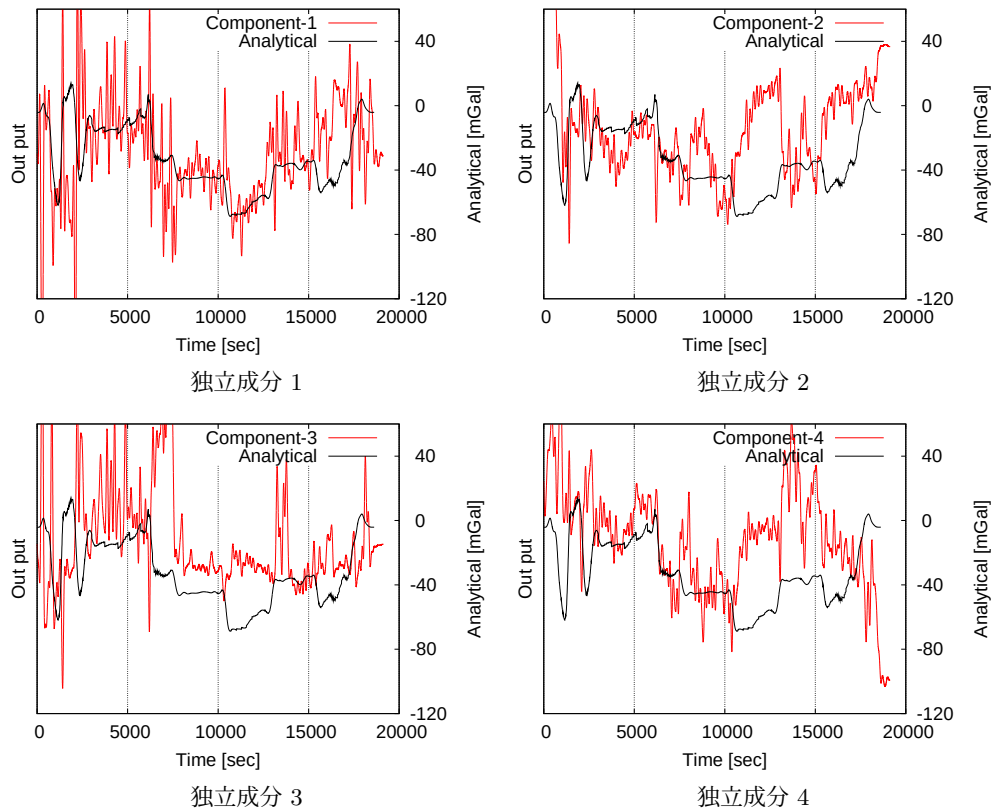


図-5 SOBI により分離された独立成分

ルタ処理によって重力の変化を抽出できたものの、重力の変化が小さくかつキャリアの振動が重力値に比べて非常に大きい場合、フィルタ処理だけでは重力の変化を抽出することができないことも明らかとなった。

センサーそのものは潮汐の変化 (p-to-p で高々数百 $\times 10^{-6}$ Gal 程度) に対してある程度は反応できていると考えられる⁵⁾。したがって、観測記録のなかに重力の変化も含まれていると考えることができるであろう。問題は、この重力の変化をいかにして抽出するか、という点に集約されるが、この問題を解決するためには、(1) センサーが振動しないような支持機構を導入する、または (2) 信号処理によって振動の影響を除去する、という 2 つの方法の一方または両方を行うことが必要である。従来の船上重力計や航空重力計は基本的には (1) を重視した設計で、補助的に (2) を用いてより精度の高い重力値を得ようという考え方であるように見える。センサーの軸を常に重力の方向に向けるためにジャイロなどを使ったアクティブ制御を行いながら支持機構のみかけの固有周期を長周期化して外乱による振動も低減するという仕組みが採用されているものもある⁷⁾。

しかし、本研究で目指す簡易重力計は小型軽量であることを目標としているため、(1) のアプローチは必ずしも目的に適さない。そこで、より高度な信号処理によって重力値の変化を抽出することを試みる。

LaCoste⁸⁾は、船上重力計のためのデータ処理において重力計の出力を水平加速度計、ジャイロなど様々なセンサーの記録およびそれらの時間微分などとの相互相関をとっていずれのセンサーとも相関がないものが重力であるはずだ、という考え方にたって他のセンサー

と相関のある信号を差し引いていき、最後に残った信号を重力の変化であると見做す、という手法を提案している。LaCoste は実際にその手法を用いて実データの解析を行って妥当と思われる結果を得ている。

このような手法は、現代の信号処理方法では独立成分分析をはじめとするブラインド信号源分離 (BSS) の考え方に非常に近いものである⁹⁾。そこで、LaCoste の考え方⁸⁾を参考にして、異なる信号成分の無相関性を仮定し、独立な信号成分に分解するブラインド (暗中) 信号源分離 (BSS) を用いて、同時に観測された水平加速度などの種々の信号から独立であると考えられる重力成分の抽出を試みる。

5. BSS による重力成分の抽出

ブラインド信号源分離 (BSS) では、いくつかの観測波形の共分散行列を求め、共分散行列を対角化することで、独立な信号に分離しようとするものである。BSS のもっとも基本的な考え方は、観測波形は独立で定常な複数の入力信号の線形結合によって得られると仮定し、観測波形の数と入力信号の数は同じであるものとしている。また、観測記録へのノイズの混入についても一般には考慮しない。なお、BSS によって得られた源信号はその振幅、順番は未定であり、源信号は振幅を最大振幅で正規化しておくことが多い。また、信号の線形結合性や観測波形の数、ノイズの取り扱いなどの制約を取り払った種々の解析法も提案されている。

前節までにおこなった重力測定がこのような BSS の

基本的な仮定を満足するか、について多くの疑義が存することは理解しているが、まずはもっとも基本的な BSS の仮定のもとで解析を行うこととする。そこで、3.(3) 節で述べた、若潮丸に EZ-GRAV I を搭載した際の観測記録に対して、BSS の一つである second order blind identification (SOBI)¹⁰⁾ を適用し、重力成分の抽出を試みる。

EZ-GRAV I では、重力測定用センサーである VSE および JA40 の他に 2 成分の水平加速度計、2 成分の傾斜計を搭載し同時に記録を取っている。SOBI による解析では VSE、2 成分の加速度計、1 成分の傾斜計の合計 4 つの信号成分を用いることとした。それらの波形を図-4 に示す。SOBI を適用するに先だって、150 秒のカットオフ周期をもつローパスフィルタをかけた。SOBI によって独立と考えられる成分に分離された信号を図-5 に示す。

図-5 にはリファレンス値も重ねて示しており、赤線が抽出された独立成分、黒線がリファレンス値である。図-4 の横軸は経過時刻、図-4 の縦軸は加速度または電圧値である。独立成分は振幅の大きさが不明であるため、図 5 の左側の縦軸は無次元で最大値が 1 となるよう正規化しており、右側の縦軸はリファレンス値の値で単位は mGal である。

図-5 に示した独立成分とリファレンス値を比較すると、独立成分 1 の波形はリファレンス値と位相がよく一致していることがわかる。この結果より、図-?? に示したフィルタのみでデータ処理したものよりも、BSS による解析は重力成分抽出において有効であることが期待できる。

一方、BSS では振幅の大きさの決定方法や解析後の独立成分の選択方法についてはまったく不明である。また、センサーの出力をそのままの形で (フィルタを通さないで) 独立成分に分離しようとする、広帯域の信号がそれぞれのデータに含まれているため、各データが互いに無相関ととらえられ SOBI を適用しても観測信号と同じ形の波形しか得られない。このことより、前処理としてローパスフィルタなどによるデータ処理が必要であることも明らかとなった。しかし、ローパスフィルタを信号に適用する場合、カットオフ周期を長周期領域にとり過ぎると波形に含まれる情報が少なくなってしまう、正しく信号を分離できなくなるおそれがある。本稿では、試行錯誤の結果に基づいて上記のフィルタのカットオフ周期を決定した。

以上より、分離後の振幅の大きさ、波形の選択、データの前処理について今後、さらなる検討が必要である。

6. おわりに

本研究では、フォースバランス型加速度計を用いた簡易相対重力計の開発を目指し、キャリア (移動体) に試作機 EZ-GRAV を載せた観測において重力測定が可能であるか検討した。さらに、観測データに対する信号処理を行って重力成分の抽出を試みた。本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- キャリアの振動が少なく重力変化が振動に比べてある程度大きい場合、FB 加速度計の出力に簡単

なフィルタ処理を施すことで容易に重力の変化を抽出できる。

- キャリアの振動が大きく、重力変化が小さい場合、場所での観測の場合、重力変化の信号がキャリアの振動に埋もれてしまい、フィルタ処理では重力成分を抽出することができない。
- 軽くフィルタをかけた後に BSS を用いて独立成分に分離すると重力の変化とよい対応を示す独立成分を分離できることがある。このことは、センサーが重力測定に十分な感度を有しており、かつ信号処理によって適切に重力成分を抽出できる可能性を示唆するものである。

BSS を用いることで重力変化に対応する独立成分を抽出できる可能性が示されたが、振幅の大きさが未定であること、どの独立成分が重力変化に対応するのか未知であること、BSS を適用するための記録の前処理の方法が一意的でない、など種々の問題も同時に明らかとなった。今後は、重力に関する既知の情報を援用することでこのような問題を解決する手法を検討する必要があると考えている。

謝辞：本研究の一部は、科研費 (21671003) の助成を受けた。

参考文献

- 1) Goto, H., Sawada, S., Morikawa, H., Kiku, H., Ozalaybey, S. : 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) Goto, H., Takahashi, C., Ishii, Y., Ling, S.-Q., Miyakoshi, K., Morikawa, H., Sato, Y., Sawada, S., Shingaki, Y., Suzuki, Y., Takabatake, D., Joshima, M. : Deep subsurface structure estimated by microtremors array observations and gravity surveys in Kashiwazaki area, Japan, Soils and Foundations, Vol.49, 2009, pp.651-659.
- 3) 日本測地学会 : CD-ROM テキスト 測地学 WEB 版, <http://www.geod.jpn.org/web-text/index.html>, 2004 (アクセス : 2011.9.30).
- 4) 荒木正之・盛川仁・伊藤貴盛・谷川正真・松本敬太郎 : A/D コンバータのハイブリッド利用による広ダイナミックレンジのデータロガーの開発, 日本地震工学会論文集, 第 11 巻, 第 3 号, pp.59-72, 2011.
- 5) 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.
- 6) 駒澤正夫 : 重力探査, 物理探査ハンドブック, 物理探査学会, pp.433-446, 1998.
- 7) LaCoste, L.: LaCoste and Romberg stabilized platform shipboard gravity meter, *Geophysics*, Vol.32, No.1, pp.99-109, 1967.
- 8) LaCoste, L.: Crosscorrelation method for evaluating and correcting shipboard gravity data, *Geophysics*, Vol.38, pp.701-709, 1973.
- 9) Hyvärinen, A., Karhunen, J., and Oja, E : 詳解 独立成分分析 —信号解析の新しい世界, 根本幾・川勝真喜訳, 東京電機大学出版局, 2005.
- 10) Belouchrani, A., Abed-Meraim, K., Cardoso, J.-F., and Moulines, E.: A blind source separation technique using second-order statistics.

A BASIC STUDY FOR GRAVITY SURVEY USING A FORCE-BALANCED-TYPE ACCELEROMETER

Hiroko MATSUO, Hitoshi MORIKAWA, Shigeo MATSUDA, and
Satoshi TOKUE

The gravity survey is applied to model a ground structure. For this purpose, a spring-type relative gravimeter is usually used. Though this type of gravimeter can provide very accurate data, it is very expensive and difficult to handle. This means that a simple and inexpensive sensor to measure the gravity is required. For this, we began to develop a new gravimeter using a force-balanced-type accelerometer. In this study, we develop a preliminary system and calibrate it. Then, a simple measurements is carried out using a observation wheel.