

小型 GNSS 受信機を用いた迅速な重力探査の実行： 実習「本郷キャンパスの重力異常図を作ろう」の報告

西山竜一*[†]・馬 妍雪*・青山都和子*・清藤大河*・永井はるか*

Rapid Gravity Survey Using a Very Small GNSS Receiver: Trial to Produce a Gravity Anomaly Map of Hongo Campus

Ryuichi NISHIYAMA*[†], Yanxue MA*, Towako AOYAMA*, Taiga SEITO* and Haruka NAGAI*

はじめに

重力異常は沈み込み帯のテクトニクスや地下の基盤構造に対する拘束条件を与える基礎的な地球物理量である。日本では 20 世紀後半から観測網の整備とデータの統合が進み、近年では充実したデータベースが構築されつつある(例えば、村田, 2013)。全球レベルの重力異常についても衛星測地技術の発達に伴い高品質のデータが利用できる状況にある(例えば、Balmino *et al.*, 2012; Pavlis *et al.*, 2012)。一方で、火山体や断層構造に関する細かな(km スケール以下の)密度構造を議論するためには、自ら重力探査を行うことの重要性は依然として大きい(Nishiyama *et al.*, 2017, 2020)。重力探査を行うためには観測地点の位置を正確に測定する必要があり、特に鉛直方向の決定精度が重要である。地球の典型的な鉛直重力勾配が -0.3mgal/m であることから、重力異常の決定精度を 0.1mgal に保つためには標高の精度を約 30cm 、理想的には 10cm 程度で決定する必要がある。そのため実務的には、重力測定自体よりも測点の位置決定の方が時間を要する問題であった。本報告では、近年商用化されつつある小型で安価な GNSS 受信機を用いることで、測点の位置決定の問題を簡略化し迅速な重力探査が行えるようになったことを実証する。具体的には、u-blox 社の 2 周波対応 GNSS アンテナ ANN-MB-00 を同社の小型受信機 ZED-F9P で受信し、Android 携帯を通じて RTK (Realtime Kinematic) 測位を行えるようにした手順について詳述する。具体例として、本郷キャンパス内の 13 地点において重力測定・RTK 測位を行った結果を紹介する。本郷キャンパスにおける測定は、本学理

2022 年 9 月 5 日受付, 2022 年 9 月 26 日受理。

[†] r-nishi@eri.u-tokyo.ac.jp

* 東京大学地震研究所

* Earthquake Research Institute, The University of Tokyo.

学系研究科の地球観測実習(2021 年度)の一環として行われたものである。

小型 GNSS 受信機のセットアップ

標準的な携帯電話に付属する GNSS 受信機は搬送波の位相を取得できないため、その位置決定精度は数 m に限られてしまう。そのため携帯電話では、重力探査に必要な鉛直方向の位置決定精度を得ることは出来なかった。しかし近年、小型の 2 周波対応 GNSS アンテナおよび受信機が低価格で入手できるようになりつつある(高須, 2022)。本報告では、u-blox 社の GNSS アンテナ ANN-MB-00 と同社の小型受信機 ZED-F9P について取り上げる。ZED-F9P については地殻変動観測のための受信機として用いることを提案している研究グループも存在する(小門, 2020)。ちなみに、これらの製品の購入に要した金額は、リチウムイオン電池のモジュールと合わせても 10 万円以下であった。

図 1 に本目的のために構築した GNSS 観測体制の模式図と実際の写真を示す。プラスチック製の工具箱の中にリチウムイオン電池モジュール(日泉社製 12VC100, 容量 100 Wh)および受信機を収納し、手軽に運搬できるようにした。全体の重量は 1 kg 程度である。この構成で昼間 8 時間程度の連続測定には十分であった。受信機には Bluetooth 通信モジュール(SparkFun Electronics 社製 WRL-12576)が取り付けられているため、操作者は Android 携帯端末から測位情報を閲覧できる。測位情報を閲覧するための Android アプリについては様々な種類のものが流通しているが、以下の 3 つの観点から“U-Droid Center for u-blox[®]”を選定した。

- Bluetooth を用いた受信機との通信が行えること
- NTRIP (Networked Transport of RTCM via In-

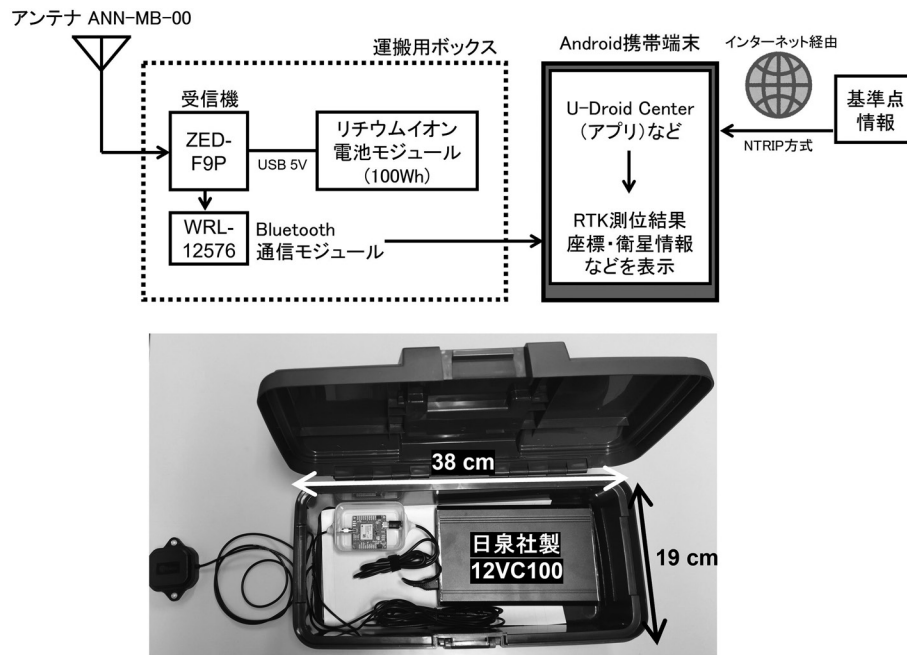


図 1. 工具箱に収納して運搬できるようにした GNSS アンテナと小型受信機。

ternet Protocol) 方式によって基準点データを受信でき、RTK 測位が行えること

- 標高だけでなく楕円体高を表示すること（観測終了後に「日本のジオイド2011」Ver. 1（兒玉ほか, 2014）を用いて自分で標高計算を行えるように）

受信機の詳細設定については、東京海洋大学海洋工学部海事システム工学科 GPS/GNSS 研究室のウェブサイトにある情報を参照した。

本郷キャンパス内での実践例

本観測システムの最初の実践として、本郷キャンパス内 13 地点での RTK 測位および重力観測を行った。観測は、理学系研究科の地球観測実習（2021 年度）の一環として、2021 年 6 月 8 日と 12 日に行われた。ちなみに、実習地として大学キャンパスを用いた理由は、2020 年初頭から猛威を振るう新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の影響で合宿形式の実習を行うことが難しくなったためである。

図 2 に本郷キャンパスの地図と観測点の配置を示す。4 名の受講者は 2 グループに分かれ、地震研究所 2 号館を起点としてそれぞれ野外の 6 地点で相対重力観測を行った。重力計には LaCoste & Romberg 型相対重力計（シリアルナンバー G875）を用いた。引率者である西山は、受講者が重力測定を行う傍らで本観測システムを用いた RTK 測位を行った。RTK 測位には、東京都文京区の CQ 出版社が善意で提供している基準点情報を使用した（参照「善意の基準局掲示板」）。一点の重力測定に掛かる時間は 10 分に満たないが、13 測点中 11 点で整数値バイアスが求まった安

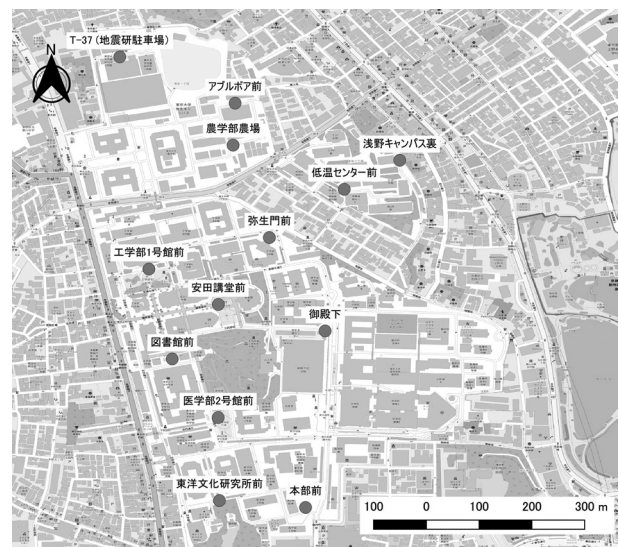


図 2. 本郷キャンパスでの重力測定/RTK 測位の測点配置。

定した測位解（RTK Fixed）が決定された。残る 2 点（「低温センター前」と「東洋文化研究所前」）では精度の良い解は求まらなかった（RTK Float）。両地点ともに、上空が樹木や建物により覆われているために GNSS 衛星からの電波が届かなかったことが原因であると思われる。

測位精度の評価

表 1 に RTK 測位によって決定された座標を示す。楕円体高から標高への変換には、「日本のジオイド 2011」Ver. 1（兒玉ほか, 2014）を用いた。表 1 には国土院が発行

表 1. RTK 測位結果および重力測定値 (* 地形密度を 2.67 g/cm^3 と仮定した単純ブーゲー異常を表示. 地形補正を行っていない).

Gravity station	Latitude (degree)	Longitude (degree)	Ellipsoidal height (m)	RTK solution	Geoid height (m)	Elevation (m)	DEM (m)	Gravity	
								(mgal)	Gravity Anomaly (mgal) Freeair *Bouguer
安田講堂前	35.7132953	139.7616759	60.34	FIX	36.91	23.43	23.5	979785.479	-1.86 -4.49
図書館前	35.7121539	139.7607104	60.66	FIX	36.91	23.75	23.9	979784.527	-2.59 -5.27
医学部2号館前	35.7109259	139.7616722	60.29	FIX	36.89	23.40	23.6	979785.095	-2.01 -4.65
東洋文化研究所前	35.7091873	139.7616971	59.85	FLOAT	36.88	22.97	22.9	979784.554	-2.62 -5.18
本部前	35.7090423	139.7635026	58.96	FIX	36.87	22.09	22.2	979785.053	-2.32 -4.81
御殿下	35.7127402	139.7639125	53.38	FIX	36.9	16.48	16.6	979787.431	-1.99 -3.85
アプルボア前	35.7175111	139.7620271	55.76	FIX	36.94	18.82	17	979788.458	-1.25 -3.15
農学部農場	35.7166321	139.7619846	54.51	FIX	36.94	17.57	17.7	979788.215	-1.20 -3.18
工学部1号館前	35.7140365	139.7602210	60.28	FIX	36.92	23.36	23.5	979785.829	-1.57 -4.20
弥生門前	35.7146966	139.7627440	50.31	FIX	36.92	13.39	13.5	979788.550	-2.00 -3.51
低温センター前	35.7157071	139.7643131	64.29	FLOAT	36.92	27.37	16.1	979788.415	-1.42 -3.22
浅野キャンパス裏	35.7163149	139.7654756	45.00	FIX	36.92	8.08	8.2	979790.607	-1.71 -2.63
T-37(地震研前駐車場)	35.7184814	139.7596114	58.18	FIX	36.96	21.22	21.3	979787.460	-1.00 -4.81

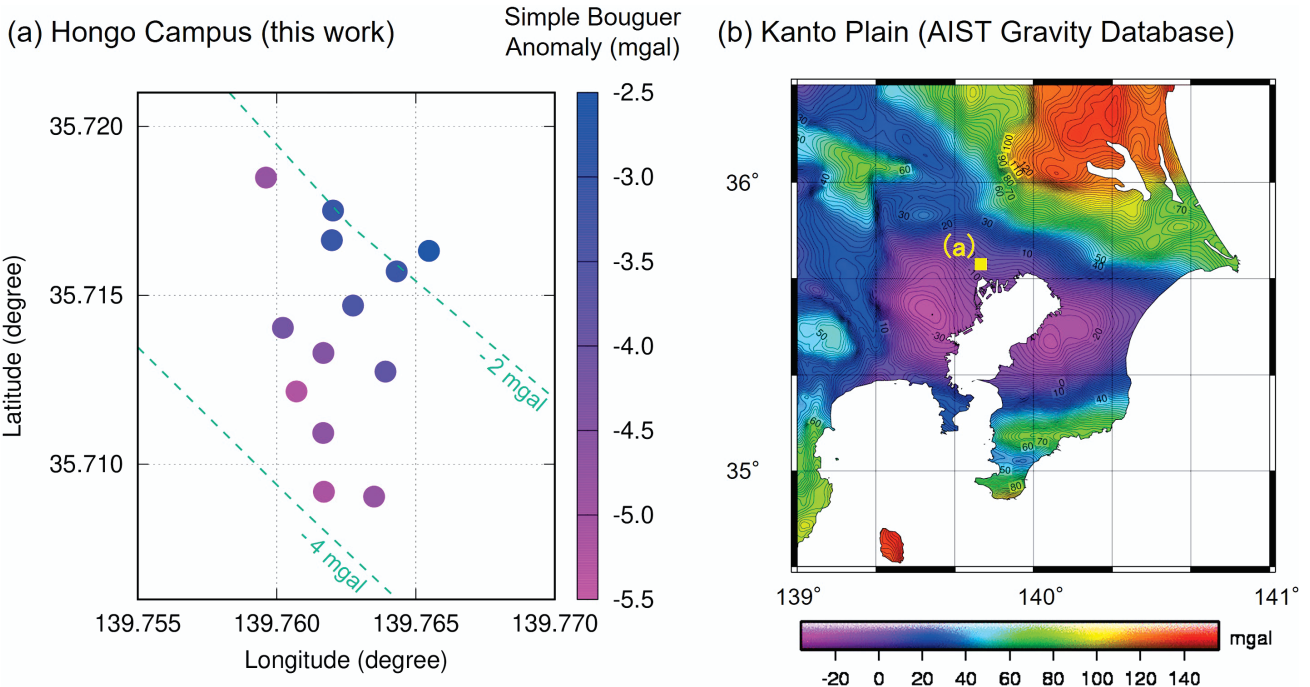


図 3. (a) 本研究により得られた本郷キャンパスの単純ブーゲー異常図 (仮定密度 2.67 g/cm^3). 点線 (緑) は, b の広域なブーゲー異常図から抽出したコンター. (b) 産業技術総合研究所 GALILEO データベース (<https://gbank.gsj.jp/gravdb/index.php>) による関東平野のブーゲー重力異常図 (仮定密度 2.67 g/cm^3). 黄色の点は本郷キャンパスの位置を表す.

する「基盤地図情報 (数値標高モデル DEM5A)」から得られた航空レーザー測量の標高値を併記している. RTK Fixed の解が求まった 11 点のうち, アプルボア前を除く 10 点では, 両者の標高値の差が 20 cm 以内に収まった (残差の平均値は -11 cm , 標準偏差は 4 cm). 測位精度の厳密な議論には, 電子基準点/水準点/三角点において RTK 測位を行うことが望ましいが (例えば, 小林, 2020), 0.1 mgal 程度の精度を目指す重力探査には十分な精度を発揮していることが確認できた. 次節で述べる重力解析には, RTK Float となってしまった点については, DEM5A の

数値標高値を用いることにした.

本郷キャンパスの重力異常図

表 1 に観測された重力値を示す. これらは, 観測中の潮汐による重力の時間変動を補正した後の値である (GOTIC2 を使用, Matsumoto *et al.*, 2001). 絶対値への換算には, 地震研究所 2 号館地下の絶対重力計による観測値を基準とした. 図 3 (a) に, 地形密度を 2.67 g/cm^3 と仮定して単純ブーゲー補正を行った重力異常図を示す. ブーゲー異常の最大値は本郷キャンパスの北東部で約 -2.5 mgal , 最小

値は南西部で約 -5.0 mgal となった。北東から南西にかけてブーゲー異常値が減少する一定の傾向が見られた（約 3 mgal/km）。同図には、産業技術総合研究所が発行するブーゲー異常図（同じく仮定密度 2.67 g/cm³）のコンターを示した（緑・点線）。ブーゲー補正の方法と精密さが異なるため、重力異常値の絶対値は異なるものの、北東-南西にかけてのブーゲー異常値の減少傾向については良い一致が見られた。図 3 (b) には産業技術総合研究所が発行する関東地方のブーゲー異常図を示した。関東平野に広がる負のブーゲー異常の成因については、基盤岩深度つまり低密度な堆積層の厚さの分布を反映していると考えられている（長谷川・駒澤, 1990; 瀧瀬, 1993; 鈴木, 2002）。この考えの下では、本研究で得られた北東-南西方向のブーゲー異常値の減少傾向は、筑波山（岩盤が露出）から横浜方向にかけて堆積層が分厚くなっていることを反映したものと結論付けられる。

議論・まとめ

本研究は、小型の GNSS 受信機による RTK 測位を行うことで、約 20 cm の精度での標高測定が短時間で可能になることを実証した。この精度は重力探査には十分であり、GNSS アンテナ・受信機の軽量化も相まって、観測の機動性が飛躍的に向上した。

RTK 測位には基準点が必要であり、従来は基準点を自ら準備する必要があった。本観測では、設置者の善意で公開されている基準点情報を利用した。近年は、国土地理院の電子基準点、民間携帯電話事業会社の基準点の情報を前述の NTRIP 方式で配信するサービスが始まっているため、これらのサービスを利用すれば日本の全土で本観測と同等の精度が得られると見込まれる。このことは、無人重力探査のフロンティアを拓けることにもつながるだろう。ドローン・自動運転車などにこれらのシステムを搭載すれば、火山の火口の中など人間が立ち入れない遠隔地での重力探査などが行えるかもしれない。

謝 辞：小型 GNSS 受信機の購入に際して東京大学卓越研究員制度の支援を受けました。産業技術総合研究所 GALILEO データベースが公開している重力異常図を使用しました。国土地理院のウェブサービス「地理院地図」を用いて、基盤地図情報（数値標高モデル DEM5A）を取得し使用しました。本報告記事の投稿に際して、2名の査読者から有益な助言・コメントを戴きました。ここに記して

感謝致します。

文 献

- Balmino, G., N. Vales, S. Bonvalot and A. Briais, 2012, Spherical harmonic modelling to ultra-high degree of Bouguer and isostatic anomalies, *J. Geod.*, **86**, 499-520, doi : 10.1007/s00190-011-0533-4.
- 長谷川功・駒澤正夫, 1990, 関東平野の基盤構造, 地質ニュース, **432**, 37-44.
- 小林裕之, 2020, 低コスト 2 周波 GNSS 受信機による開空間での静止測位と後処理解析の事例報告, 森林利用学会誌, **35**, 159-165, doi : 10.4005/jjfs.104.1.
- 兒玉篤郎・宮原伐折羅・河和 宏・根本 悟・黒石裕樹, 2014, ジオイド・モデル「日本のジオイド 2011」(Ver. 1) の構築, 国土地理院時報, **126**, 67-85.
- 小門研亮, 2020, 低価格アンテナ・受信機を用いた GNSS 連続観測システムの開発, 日本測地学会講演会要旨, **134**, 135-136.
- 瀧瀬一起, 1993, 基盤構造の探査, 地震 2, **46**, 351-370, doi : 10.4294/zisin.1948.46.3_351.
- Matsumoto, K., T. Sato, T. Takanezawa and M. Ooe, 2001, GOTIC2: A program for computation of oceanic tidal loading effect, 測地学会誌, **47**, 243-248, doi : 10.11366/sokuchi1954.47.243.
- 村田泰章, 2013, 日本重力図マップデータ, 日本重力データベース DVD 版, 数値地質図 P-2, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- Nishiyama, R., S. Miyamoto and S. Nagahara, 2020, Estimation of the bulk density of the Omuro scoria cone (Eastern Izu, Japan) from gravity survey, 震研彙報, **95**, 1-7, doi : 10.15083/0002000093.
- Nishiyama, R., S. Miyamoto, S. Okubo, H. Oshima and T. Maekawa, 2017, 3D density modeling with gravity and muon-radiographic observations in Showa-Shinzan lava dome, Usu, Japan, *Pure Appl. Geophys.*, **174**, 1061-1070, doi : 10.1007/s00024-016-1430-9.
- Pavlis, N.K., S.A. Holmes, S.C. Kenyon and J.K. Factor, 2012, The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), *J. Geophys. Res.*, **117**, B04406, doi : 10.1029/2011JB008916.
- 産業技術総合研究所 GALILEO データベース, <https://gbank.gsj.jp/gravdb/index.php>, (参照 2022-06-27).
- 鈴木宏芳, 2002, 関東平野の地下地質構造, 防災科学研究所研究報告, **63**, 1-19, doi : 10.24732/nied.00001131.
- 高須知二, 2022, 実用元年! cm 級 GPS 大実験: イントロダクション 2: 増えてきている! 低価格な高精度 GPS 受信機, トランジスタ技術, **2022-1**, 41-45.
- 東京海洋大学海洋工学部, 1 cm の精度の自作スマホナビを作ってみよう, 2020, <https://www.mirai-kougaku.jp/laboratory/pages/200306.php>, (参照 2022-06-27).
- 東京海洋大学海洋工学部海事システム工学科 GPS/GNSS 研究室ウェブサイト, https://www.denshi.e.kaiyodai.ac.jp/gnss_tutor/report.html, (参照 2022-06-27)
- 善意の基準局掲示板, <https://rtk.silentsystem.jp/>, (参照 2022-06-27).