

## 石垣島西部名蔵川流域の重力測定

宮川 歩夢<sup>1,\*</sup>・名和 一成<sup>1</sup>・山谷 祐介<sup>2</sup>・大滝 壽樹<sup>1</sup>・  
杉原 光彦<sup>3</sup>・奥田 隆<sup>4</sup>・住田 達哉<sup>1</sup>

MIYAKAWA Ayumu, NAWA Kazunari, YAMAYA Yusuke, OHTAKI Toshiki, SUGIHARA Mituhiko, OKUDA Takashi and SUMITA Tatsuya (2020) Gravity Measurement of Nagura River Basin, in the Western part of Ishigakijima Island, Japan. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, vol. 71 (2), p. 63–76, 6 figs, 4 tables, 1 Appendix.

**Abstract:** To reveal the Bouguer gravity anomaly which reflects underground geological structures, we conducted absolute and relative gravity measurements in the Nagura River Basin, western Ishigakijima Island, Japan. The gravity acceleration at the gravimeter pier of the VERA-Ishigaki station measured with an absolute gravimeter was 979002.518 mGal. We further obtained gravity values using a relative gravimeter at 62 stations on Ishigakijima Island. Subsequently, we constructed gravity anomaly maps of the Nagura River Basin by compiling gravity data obtained in this study and an existing database. The Bouguer gravity anomaly decreased from Nagura Bay to the foot of Mt. Omoto. The decrease of the Bouguer gravity anomaly is considered to be due to the lower density of the Oligocene felsic plutonic rocks, which constitute Mt. Omoto, than the surrounding Jurassic accretionary complex. Furthermore, a negative gravity anomaly zone was observed from the foot of Mt. Omoto. This reflects the local basement shape from Nagura Bay to Mt. Omoto.

**Keywords:** gravity map, Ishigakijima island, absolute gravity measurements, relative gravity measurements

### 要 旨

国立天文台VERA石垣島観測局を中心とした名蔵川流域において、地下の地質構造を反映すると考えられる重力異常を明らかにするために重力測定を実施した。この重力測定では絶対重力測定及び周辺での相対重力測定を組み合わせている。絶対重力測定は国立天文台VERA石垣島観測局の重力計基台において、また相対重力測定は周辺域の62地点において実施した。得られた重力測定結果に既存の重力データを加え、重力異常図を作成した。これにより、名蔵湾から於茂登岳おもとだけに向かって、負の重力異常が大きくなる傾向がみられた。これは、於茂登岳を構成する漸新世の珪長質深成岩が周囲のジュラ紀付加体に比べて密度が低いことによると考えられる。さらに於茂登岳麓から名蔵湾にかけて負の重力異常の帯が確認された。このことは、名蔵湾から於茂登岳に向かう局所的な基盤形状を反映し、密度の低い堆積層が埋める埋没谷の存在を示唆する。

### 1. はじめに

八重山諸島の地下で発生する長期的スロースリップの信号を捉えることを目的として、2012年1月末より、国立天文台VERA石垣島観測局(VERA: Very long baseline interferometry exploration of radio astrometry)において、超伝導重力計による連続重力観測が実施されている(今西ほか, 2012)。沖縄の八重山諸島の長期的スロースリップは約半年毎に発生することから(Heki and Kataoka, 2008)、他の地域に比べてスロースリップに関連する重力変化を観測する機会が多いことが期待される。しかし、観測点周辺の大気・海洋・地下水などが複雑に関連して重力に影響していることに加え(名和ほか, 2015, 大滝・名和, 2013)、観測点周囲の人工的なノイズの影響も無視できない(Imanishi *et al.*, 2018)ため、スロースリップ起源の信号を同定することは容易ではない。陸水擾乱による重力への影響を補正するために(例えば, Kazama and Okubo, 2009)観測点周辺の地下構造は重要な情報で

<sup>1</sup> 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation)

<sup>2</sup> 産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域 再生可能エネルギー研究センター (AIST, Department of Energy and Environment Renewable Energy Research Center)

<sup>3</sup> 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地圏資源環境研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute for Geo-Resources and Environment)

<sup>4</sup> 名古屋大学大学院環境学研究科 地震火山研究センター (Nagoya University, Graduate School of Environmental Studies, Earthquake and Volcano Research Center, D2-2, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8601, Japan)

\* Corresponding author: MIYAKAWA, A., Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan, Email: miyakawa-a@aist.go.jp

あり、これまで観測点周囲での反射法地震探査(伊藤ほか, 2015)や、VLF-MTによる比抵抗探査が実施されている。しかし、既存の探査では補正を行うには十分広域な構造の情報は得られていない。

本調査では、国立天文台VERA石垣島観測局を含む石垣島西部の名蔵川流域の密度分布や基盤構造を反映すると考えられる重力異常を明らかにするために、相対重力測定及び国立天文台VERA石垣島観測局での絶対重力測定を実施した(第1図)。本調査が対象とする石垣島においては、産業技術総合研究所地質調査総合センター(以下GSJ)のデータベース(駒澤ほか, 2013)、及び金沢大学のデータベース(本多ほか, 2012)で既存の重力データが公開されている。本調査ではこれらのデータよりも稠密な重力測定を実施することで、名蔵川流域の詳細な重力構造を明らかにする。

## 2. 石垣島の重力調査

重力測定は下記の日程で実施した。延べ日数は15日間である。この調査には、名蔵川流域周辺で実施した相対重力測定及び絶対重力測定が含まれる。

- 2013年3月12日～3月15日(相対重力測定) (27点)
- 2014年8月9日～8月11日(相対重力測定) (14点)
- 2014年3月14日～3月16日(相対重力測定) (21点)
- 2015年1月17日～1月19日(絶対重力測定)

重力計は、GSJが所有する絶対重力計Microg-LaCoste FG5 (#217)、相対重力計LaCoste G型重力計(#304)、Scintrex CG-5重力計(#890)に加え、国土地理院(以下GSI)の所有するScintrex CG-5重力計(#022)を利用した。相対重力測定時に実施したGNSS測量には、Leica GS-15、Topcon GRS-1及びMagellan Promark 3を用いた。各調査期間に使用した機材を第1表及び第2図に示す。

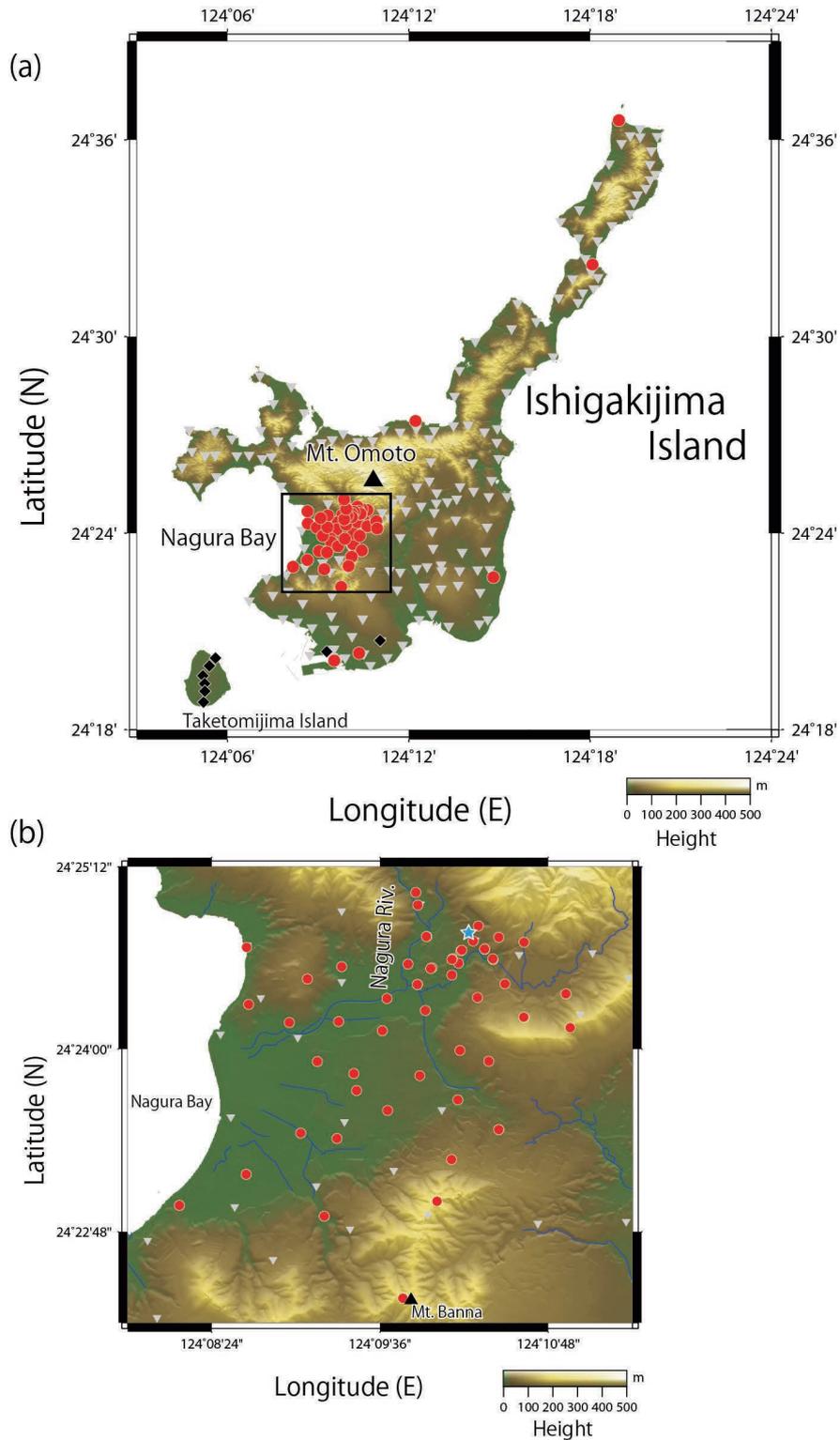
## 3. 測定方法とデータ処理

絶対重力測定は、国立天文台VERA石垣島観測局内の重力観測基台上にFG5絶対重力計を設置して実施した。FG5絶対重力計では、真空に保たれた落下槽中の落体の自由落下速度を計測することで絶対重力値を得る。本調査では10秒おきに落体を落下させ、115回の落下を1セットとした。この20分/セットの測定を繰り返し行い、計約43時間の連続測定を実施した。連続測定の測定値に潮汐応答や気圧応答等の補正を行い、絶対重力値を計算する。補正には、FG5絶対重力計に付属する測定/解析ソフトウェアであるg8(Micro-g LaCoste Inc., 2008)を使用した。周波数標準はメーカー校正値(9999999.98333 Hz)、位置座標は実測値を用い、重力鉛直勾配は-0.3 mGal/mとした。また効果は小さいが最新の極運動パラメータを用いて重力値を再計算した。補正の結果得られた落体の一回の落下毎の重力値(ドロップ値)の時系列を第3図に示す。図の黒記号は標準偏差が $3\sigma$ を超えた値である。これ

らは異常値と判別し、重力値を決定する際には使用しない。異常値を除いた後のドロップ値のヒストグラムを第4図に示す。測定地点の標高の重力値は、重力鉛直勾配(-0.3 mGal/m)を用いて重力計の観測高(130 cm)から、高度補正することで求められる。第2表には最終的に得られた測定地点における重力の平均値と標準偏差に加え、ドロップ数を併記した。結果として国立天文台VERA石垣島観測局内の重力観測基台(金属標)における重力値は979002.518 mGalと定まった。

相対重力測定は、各調査期間中に滞在した宿泊施設を基点に、毎日調査開始時と終了時に同一基点で重力測定を実施する閉塞測定を行った。相対重力測定の測量精度は重力測定結果の精度に大きく影響するため、基本的には、20~30分の高速静止測量を実施して重力測定の位置を決定した。高速静止測量の解析では、調査地域周辺の国土地理院の電子基準点との間で基線解析を行った。各期間における基線解析に用いた電子基準点のリストを第3表に示す。基線解析ではフィックス解が得られて十分に精度が高いと思われる基線解析結果を平均して測定の位置を求めた。しかし、衛星電波の受信状況が悪いなどの理由で、フィックス解が一つも得られずにフロート解の平均値を採用している点もある(付表1におけるFS0)。その場合も、GSIにより公開されている5 mメッシュ数値標高モデル(5 m DEM)(石垣島周辺は写真測量によるDEM: DEM5B)との間で標高差が1.3 m(重力値精度換算: 0.4 mGal)以内であることは確認した。一方、2点(測点No. 28, 46)では5 m DEMとの間で1.5 m以上の差が生じた。使用した5 m DEMの精度が1.0 mであり、これらの2地点が平坦地であったことから、GNSS測位の精度が十分では無いと判断して5 m DEMの標高を採用した。測定されたデータに対して、地形補正を除く各種の重力補正の方法は地質調査所重力補正手順SPECG1988(地質調査所重力探査グループ, 1989)に基づいている。重力の絶対値を決定する際には、本調査で観測した国立天文台VERA石垣島観測局での絶対重力値に加え、国土地理院基準重力点及び一等重力点の絶対重力値を用いた(第4表)。国土地理院基準重力点及び一等重力点の絶対重力値は同一の基台上に設置され、互いに約80 cm程度離れた位置に設置されている。地形補正には、最新の地形データを使用して補正を行うため、村田ほか(2018)と同様に30 mメッシュ標高データを使用した。このデータは、基盤地図情報(数値標高モデル5 m)(GSI)、陸域観測技術衛星「だいち」標高データ・セット(30 mメッシュ版)(宇宙航空研究開発機構)、数値地図50 mメッシュ(標高)(GSI)、海底地形デジタルデータM7000(日本水路協会)、500 mメッシュ水深データ(日本海洋データセンター)、日本近海30秒グリッド水深データ(日本水路協会)から得られたものである。地形補正量の計算には、地球の球殻を考慮して測定の周囲60 kmまで実施した。相対重力

石垣島西部名蔵川流域の重力測定（宮川ほか）

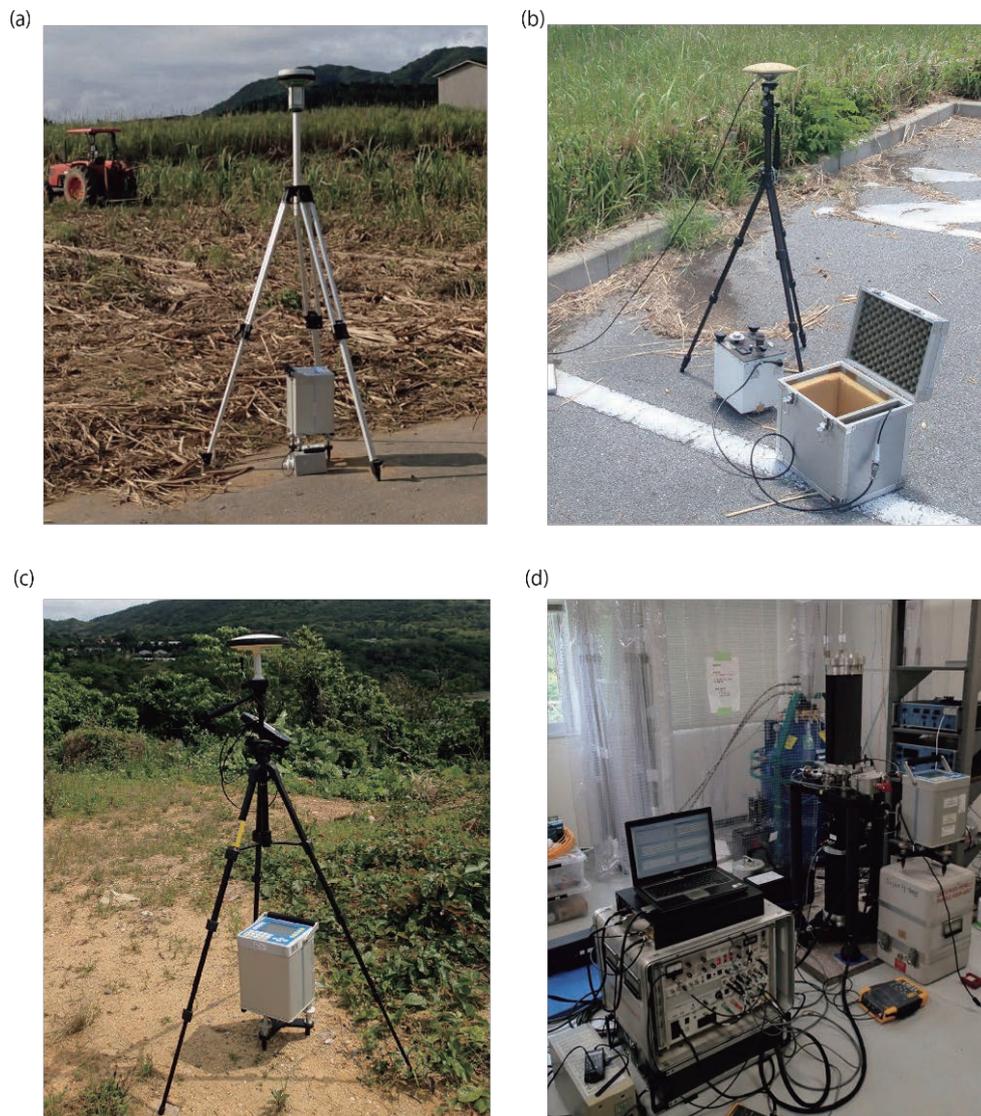


第1図 石垣島における重力測定点(a)および、名蔵川流域における重力測定点(b)の分布。本調査における相対重力測定点を赤丸、絶対重力測定点を青星で示す。既存の重力測定点のうち本多ほか(2012)を灰色三角、駒澤(2013)による測定点を黒菱形で示す。図中の背景の地形図は「国土地理院基盤地図情報(数値地形モデル)5 mメッシュ(標高)」を使用し、河川的位置は「国土数値情報河川データ」を使用した。

Fig. 1 Observation points in Ishigakijima Island (a) and close view of Nagura River basin (b). Red dots indicate locations of relative gravity observations; blue star indicates absolute gravity observation; gray triangles and black diamonds represent existing observation points of Honda *et al.* (2012) and Komazawa *et al.* (2013), respectively. Background topography are drawn by using the 5 m DEM and the digital river data provided by GSI.

第1表 測定期間毎の測定装置  
Table 1 Measurement equipments

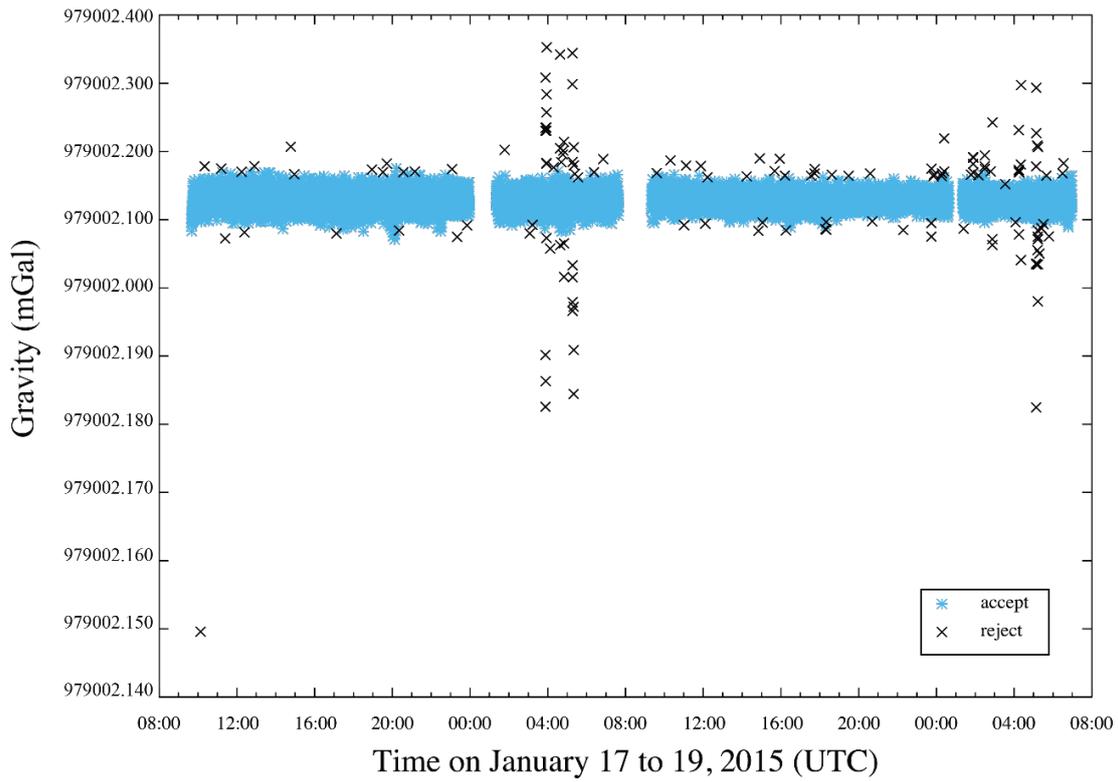
Observation period	Gravity observation	Measurement equipment	
		Gravity	GNSS
2013-03-12–2013-03-15	Relative gravity	Scintrex CG-5 (#890)	Leica GS-15
2013-08-09–2013-08-11	Relative gravity	LaCoste G (#304)	Topcon GRS-1
2014-03-14–2014-03-16	Relative gravity	Scintrex CG-5 (GSI)	Magellan Promark 3
2015-01-17–2015-01-19	Absolute gravity	Microg-LaCoste FG5 (#217)	---



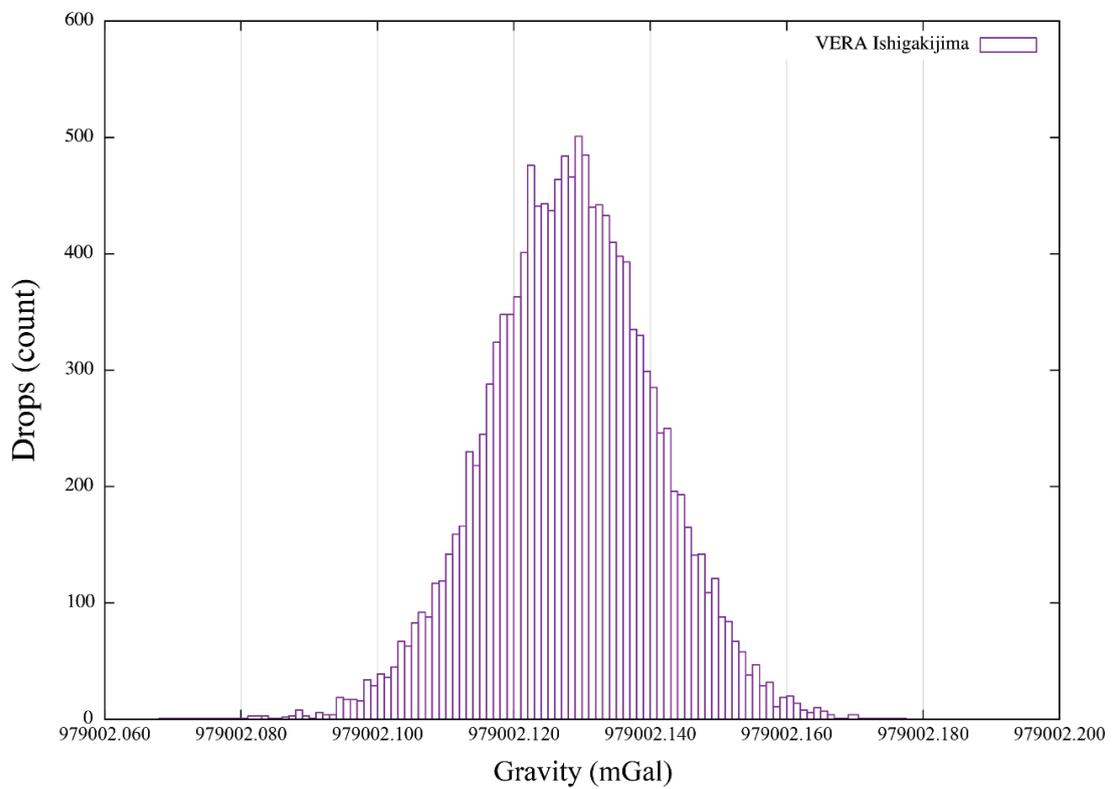
第2図 測定期間毎の測定装置. 2013/3/12～2013/3/15の期間に使用した機材を(a), 2013/8/9～2013/8/11の期間に使用した機材を(b), 2014/3/14～2014/3/16の期間に使用した機材を(c), 2015/1/17～2015/1/19の期間に使用した機材を(d)に示す.

Fig. 2 Measurement equipment for each period: (a) 2013-3-12–2013-3-15, (b) 2013-08-09–2013-08-11, (c) 2014-03-14–2014-03-16, and (d) 2015-01-17–2015-01-19.

石垣島西部名蔵川流域の重力測定（宮川ほか）



第3図 1測定(落下)毎の絶対重力値の時系列. 絶対重力値の決定に用いた値を青色, 重力値の決定から除外した値を黒色で示す.  
 Fig. 3 Time series of absolute gravity measurements (drop values). Black symbols indicate outliers, which were removed upon estimating final values.



第4図 絶対重力値の決定に用いた重力値のヒストグラム  
 Fig. 4 Histogram of drop values for final estimation.

第2表 FG5 (#217)による絶対重力値測定結果  
Table 2 Absolute gravity measurements with FG5#217

Observation period	2015-01-17–2015-01-19
Number of drops	14231
Gravity value at 1.3 m height	979002.1284 mGal
S.D. of a single drop	0.01221 mGal
Vertical gradient of gravity	-0.3 mGal/m
Gravity value at the floor on the mark	979002.5184 mGal

第3表 各期間の基線解析に用いた電子基準点  
Table 3 GPS-based Control Station used for baseline analysis in each period

Observation period	GPS-based Control Station
2013-03-12–2013-03-15	G0500, G0748, G0749, G0750, G0751
2013-08-09–2013-08-11	G0500, G0748, G0750, G0751
2014-03-14–2014-03-16	G0500, G0749, G0750

G0500 (Iriomote), G0748 (Trama), G0749 (Ishigaki 1), G0750 (Ishigaki 2), G0751 (Hateruma-jima)

第4表 重力値決定の際に参照した重力値  
Table 4 Reference for absolute gravity values

	Latitude (N)	Longitude (E)	Altitude (m)	Gravity value (mGal)
Absolute gravity measurement in VERA station (NAOJ)*	24° 24' 45" .0589	124° 10' 15" .7586	25.8	979002.518
Gravity standard point**	24° 20' 11" .90	124° 09' 52" .76	6.68	979006.04
First order gravity point**	24° 20' 11" .90	124° 09' 52" .76	6.67	979006.02

\* Absolute gravity at the VERA station (NAOJ) measured in this study (Table 3)

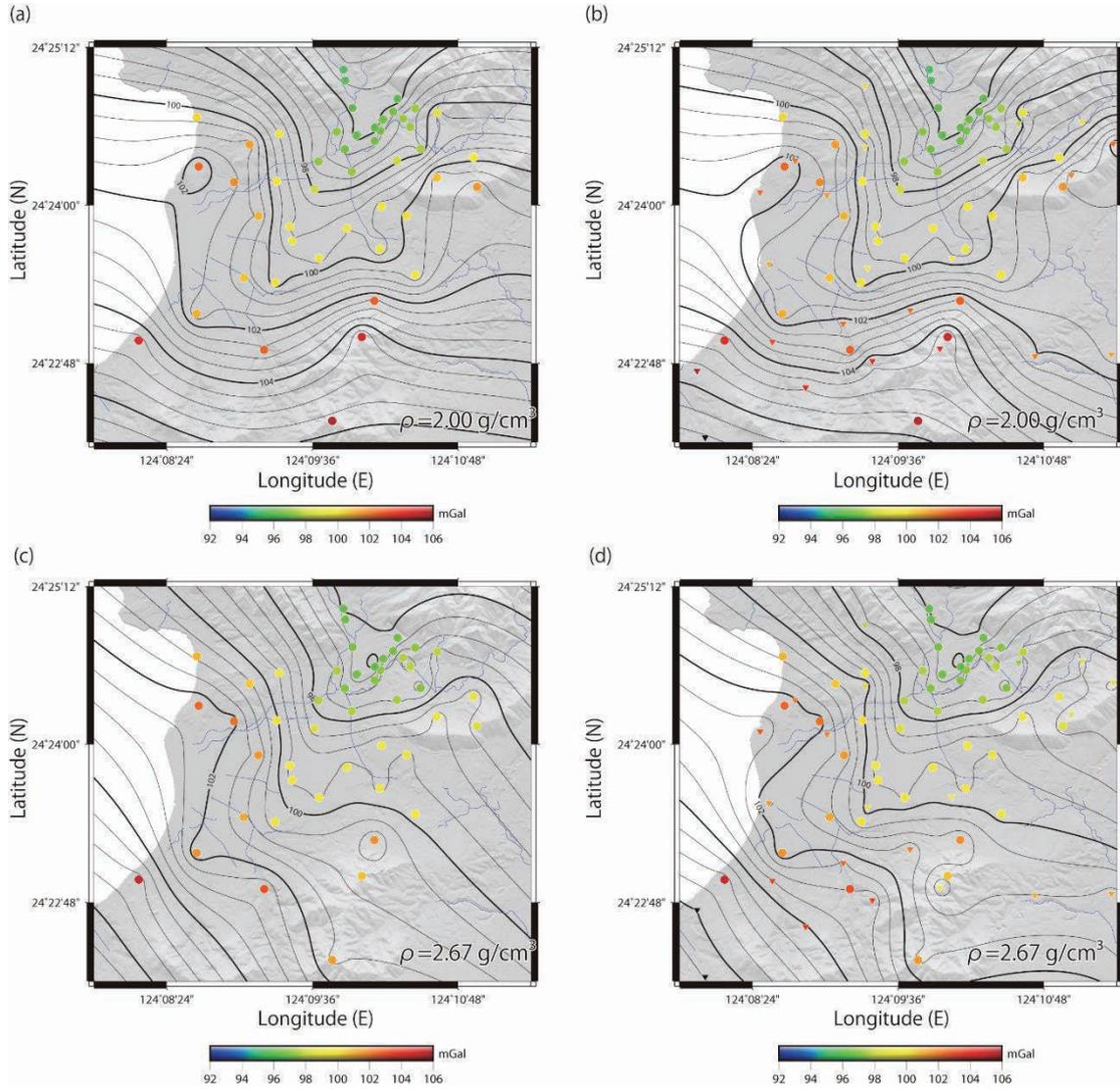
\*\* Absolute gravity from referring Japan Gravity Standardization Net 2016 (JGSN2016) (GSI)

測定を実施した調査地点を第1図に、測定データ一覧を付表1に示す。付表1の単位、記号等の凡例は、同付表の最後に示した。測定点のうち、特に国立天文台VERA石垣島観測局周辺では重力異常構造の信頼性を高めるため、近接した地点でも異なる測定期間において測定を行ったが、±0.1 mGal程度で調和的な結果が得られている。

#### 4. 重力異常の特徴

今回取得した重力情報を含めて、名蔵川流域における重力構造について議論する。

今回の測定によって得られた結果と既存の重力データ(本多ほか, 2012)をあわせて、調査地域の重力異常図(ブーゲー異常図)を作成した(第5図)。なお、今回の処理結果と整合性をもたせるため、今回と同様の地形補正



第5図 重力異常図。

- (a) 新規測定データのみを仮定密度  $2.00 \text{ g/cm}^3$  で計算した重力異常図
  - (b) 新規測定データ+既存データ(本多ほか, 2012)を仮定密度  $2.00 \text{ g/cm}^3$  で計算した重力異常図
  - (c) 新規測定データのみを仮定密度  $2.67 \text{ g/cm}^3$  で計算した重力異常図
  - (d) 新規測定データ+既存データ(本多ほか, 2012)を仮定密度  $2.67 \text{ g/cm}^3$  で計算した重力異常図
- 本調査による測定地点を丸(56点)および、既存の重力データベース(本多ほか, 2012)を三角(25点)で示す。地形の陰影図の作成には「国土地理院基盤地図情報(数値地形モデル)5mメッシュ(標高)」を使用した。

Fig. 5 Gravity anomaly maps with contour interval of xx mGal. (a) Gravity anomaly only using new measurement data of this study with Bouguer density of  $2.00 \text{ g/cm}^3$ . (b) Gravity anomaly using new measurement data of this study and the existing data of Honda *et al.* (2012) with Bouguer density of  $2.00 \text{ g/cm}^3$ . (c) Gravity anomaly only using new measurement data of this study with Bouguer density of  $2.67 \text{ g/cm}^3$ . (d) Gravity anomaly only using new measurement data of this study and the existing data of Honda *et al.* (2012) with Bouguer density of  $2.67 \text{ g/cm}^3$ . Gravity observation points measured in this study (circles) and those of Honda *et al.* (2012) (triangles) are colored according to Bouguer anomaly values. Observation points of this study are displayed by circles (56 points) and existing data of Honda *et al.* (2012) are displayed by triangles (25 points). Background topography are drawn by using the 5 m DEM provided by GSI.

処理を既存の重力データに対しても実施した。ブーゲー異常値の算出の際、表層の地質に対応した密度を仮定密度として設定し、補正を行うことで地形の影響が除去された重力異常図を得ることができる。今回の調査地域では、於茂登岳やバンナ岳といった山地や丘陵地(第1図)ではジュラ紀の付加体や古第三紀の火成岩が露出する一方、名蔵川流域の低地帯では第四紀の堆積層が分布する(中江ほか, 2009; 地質調査総合センター, 2015)。そのため、表層地質の仮定密度として、堆積物などの低密度を仮定した $2.00 \text{ g/cm}^3$  ( $\times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )と、基盤岩類の高密度を仮定した $2.67 \text{ g/cm}^3$ でそれぞれブーゲー異常値を計算している。しかし、本調査地域では仮定密度を変えても、大局的な重力異常のパターンは大きく変化しなかった。地域的な重力異常を強調するため、仮定密度 $2.67 \text{ g/cm}^3$ の重力異常図に対して二次傾向面(第6図a)を除去した残差重力図(第6図b)を作成した。

この地域の高重力異常は地表地質とよく対応する。南部に位置するバンナ岳は玄武岩、石灰岩やチャートを含む前期ジュラ紀の付加体で構成され(中江ほか, 2009)、高重力異常となっている。また、中江ほか(2009)では調査地(第5図, 第6図)より広域な重力異常と地質の関係から、川平湾から於茂登岳に至る低い重力域は、その分布域に対応する漸新世の珪長質深成岩が周囲の付加体に比べて密度が低いことよるとしている。名蔵川流域の低地帯は第四紀の堆積物に埋められているが(中江ほか, 2009)、その下にはこれら密度の高いジュラ紀の付加体や珪長質深成岩が基盤岩として存在するものと考えられる。

名蔵川流域の低地帯は周囲に比べて低重力異常で特徴付けられる(第6図b)。その中でも特に低い重力異常の谷は名蔵湾からバンナ岳の麓に沿って北東に連続し、於茂登岳から名蔵川が流下する地域において最も重力異常が低くなる。また海側の名蔵湾から内陸側の於茂登岳に向かって重力異常値がさらに低下していく。

## 5. 議論・結論

本調査により得られた詳細な名蔵川流域の重力異常のうち、東北東に向かう大局的な重力異常の低下(第6図a)は、中江ほか(2009)でも指摘されている於茂登岳を構成する珪長質深成岩が周囲の付加体に比べて密度が低いことに起因するものと考えられる。一方、更に短波長な重力異常としてみられる、於茂登岳から名蔵湾に至る低重力異常の帯(第6図b)は、その地域の局所的に低い基盤形状と、それを埋める周囲に比べ密度の小さい堆積物の存在に起因するものと考えられる。低重力異常の原因として考えられる堆積物の存在は、他の観測においても指摘されている。低重力異常が観測される名蔵川が於茂登岳から流出する地域では、国立天文台VERA石垣島観測局建設地でのボーリング調査から、基盤岩としての花崗

岩が地下20 m以深に存在することが確認されている(国立天文台・日本工営(株), 2000; 2001)。反射法地震探査(伊藤ほか, 2015)から、国立天文台VERA石垣島観測局周辺数100 mの範囲で、ボーリングで観察された風化花崗岩の上端に相当する深度に反射面が捉えられている。このことから、国立天文台VERA石垣島観測局建設地でのボーリングから明らかになった基盤の深度は局所的なものではなく、名蔵川が於茂登岳から流出する地域にある程度の広がりを持って存在することが確認されている。また、VLF-MT法による比抵抗探査において、名蔵川が於茂登岳から流出する地域において、低い比抵抗が観測され、透水性のよい堆積物中で地下水位が高く保たれていることが示唆される。これらのことから、名蔵川が於茂登岳から流下する地域は、周囲に比べて花崗岩や付加体で構成される基盤岩が深くなり、厚い堆積物が分布していることで低重力異常が生じていると考えられる。

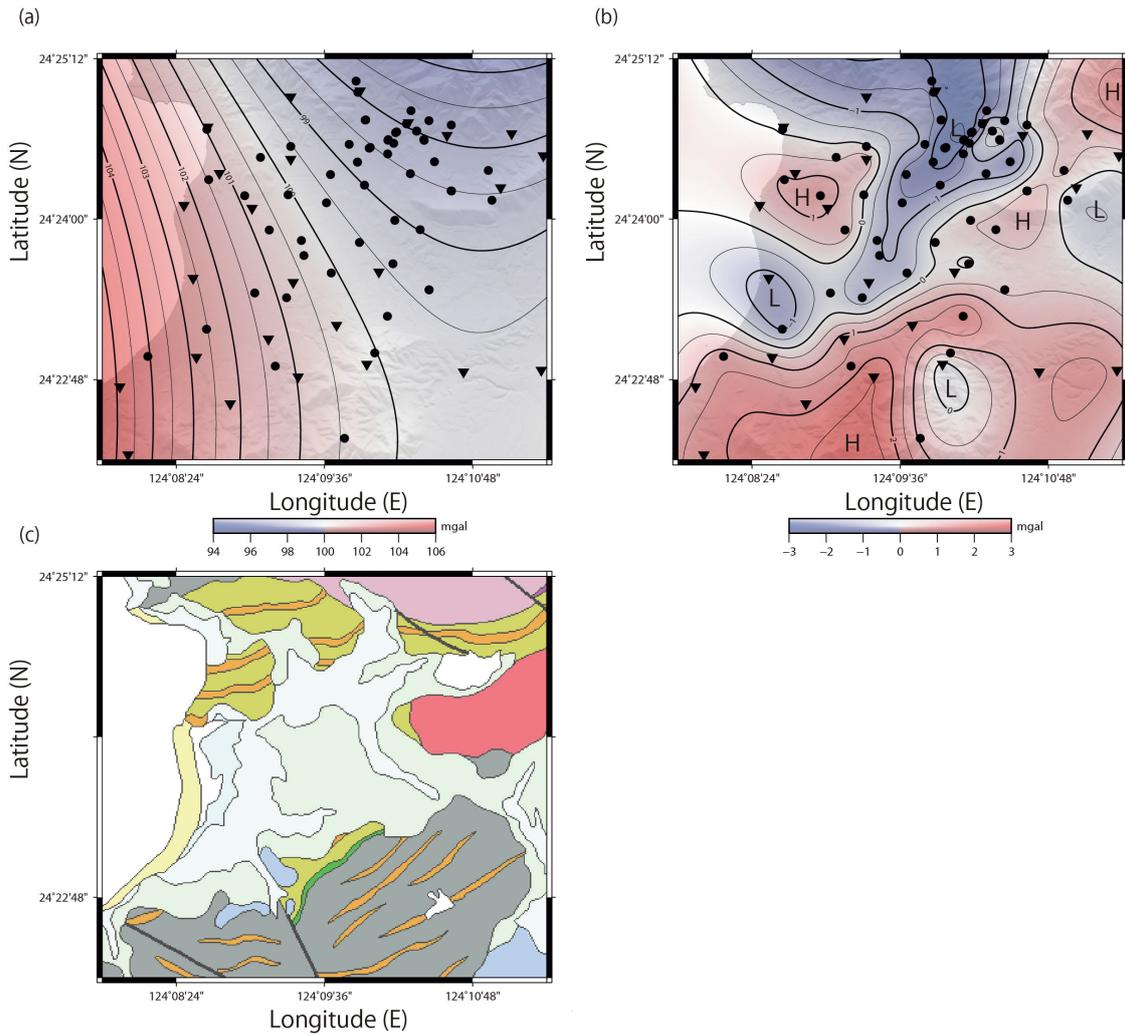
以上のように、重力異常から、名蔵川流域の低地帯を埋める第四紀の堆積物の下に、現在の名蔵川流路と異なる基盤の凹みが埋積谷として存在する可能性が示唆される。このような地下の基盤構造及び被覆する堆積物の厚さの変化は、名蔵川流域の地下水流動に影響するものと考えられ、今後の連続重力観測における陸水の補正へのどの程度影響するののかも含めて検討が必要である。

謝辞：本測定を実施するにあたり、国立天文台 VERA石垣島観測局、気象庁石垣地方気象台には施設の利用をはじめ、多大なご助力を賜りました。国土地理院には相対重力計Scintrex CG-5を使用させて頂きました。また、東京大学地震研究所の今西祐一准教授、田中愛幸助教には測定の際にご協力頂きました。地質調査総合センターの村田泰章上級主任研究員には解析環境をご提供いただき、伊藤 忍主任研究員には現地でご議論して頂きました。また、高橋美江氏はGNSSの解析にご協力頂きました。第1図及び第5図には「国土地理院基盤地図情報(数値地形モデル)5 mメッシュ(標高)」及び、「国土数値情報河川データ」を使用し、図の作成にはGMT (Wessel et al, 2013)を使用しました。

## 文献

- 地質調査所重力探査グループ (1989) 地質調査所重力補正手順SPECG1988, 地調月報, **40**, 601-611.
- Heki, K. and Kataoka, T. (2008) On the biannually repeating slow-slip events at the Ryukyu Trench, southwestern Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **113** (B11).
- 本多 亮・澤田明宏・古瀬慶博・工藤 健・田中俊行・平松良浩(2012) 金沢大学重力データベースの公表, 測地学会誌, **58**, 153-160.
- Imanishi, Y., Nawa, K., Tamura, Y. and Ikeda, H. (2018)

石垣島西部名蔵川流域の重力測定（宮川ほか）



Formation Age	Group	Lithology
	Water area	
Cenozoic Quaternary Holocene	Sedimentary rocks	valley floor, intermountain basin, river & coastal plain deposits
Cenozoic Quaternary Holocene	Sedimentary rocks	coastal or dune deposits
Cenozoic Quaternary Holocene	Sedimentary rocks	marsh deposits
Cenozoic Quaternary Late Pleistocene	Sedimentary rocks	marine limestone
Cenozoic Quaternary Late Pleistocene	Sedimentary rocks	non-marine sediments
Cenozoic Paleogene Oligocene Chattian - Neogene Miocene Aquitanian	Igneous rocks	massive granodiorite & tonalite island arc & continental
Mesozoic Jurassic Early - Middle Bajocian	Accretionary complexes	mixed rock Early Jurassic accretionary complex
Mesozoic Jurassic Early - Middle Bajocian	Accretionary complexes	marine alternation of sandstone & mudstone Early Jurassic accretionary complex
Paleozoic Carboniferous Pennsylvanian Serpukhovian - Mesozoic Jurassic Early	Accretionary complexes	chert Early Jurassic accretionary complex
Paleozoic Carboniferous Pennsylvanian Serpukhovian - Permian Cisuralian	Accretionary complexes	basalt oceanic Early Jurassic accretionary complex

第6図 重力異常(第5図(d))の二次傾向面(a), その二次傾向面を除去した重力残差図(b)及び地質図(c) (産総研地質調査総合センター編(2019)を編集)。本調査による測定値(丸)に既存の重力データベース(本多ほか, 2012)(三角)を加え, 仮定密度として $2.67 \text{ g/cm}^3$ を設定し,  $0.5 \text{ mGal}$ インターバルのコンターを示している。

Fig. 6 Quadratic trend surface map (a), residual Bouguer anomaly map without the quadratic trend surface (b), both with  $0.5 \text{ mGal}$  interval, and geological map (c) (modified after Geological Survey of Japan, 2019). Original gravity anomaly map (Fig.5 (d)) was derived from observations of this study (circles) and existing data of Honda *et al.* (2012) (triangles) with Bouguer density of  $2.67 \text{ g/cm}^3$ .

- Effects of horizontal acceleration on the superconducting gravimeter CT 036 at Ishigakijima, Japan. *Earth, Planets and Space*, SpringerOpen, **70**, 9.
- 今西祐一・名和一成・田村良明・池田博・宮地竹史・田中愛幸・宮島力雄・奥田隆・伊藤武男(2012)石垣島における超伝導重力観測, 日本地球惑星科学連合2012年大会, SGD24-P08.
- 伊藤 忍・山口和雄・名和一成・宮川歩夢・山谷祐介・奥田 隆(2015)石垣島における地下水流動モデリングのための地震探査, 日本地震学会2015年度秋季大会, 神戸.
- Kazama, T. and Okubo, S. (2009) Hydrological modeling of groundwater disturbances to observed gravity: Theory and application to Asama Volcano, Central Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **114** (B8).
- 国立天文台・日本工営(株) (2000) 国立天文台(石垣)天文広域精測望遠鏡施設用地地盤調査及び現地測量報告書.
- 国立天文台・日本工営(株) (2001) 国立天文台(石垣)天文広域精測望遠鏡施設用地地盤調査及び現地測量(その2)報告書.
- 駒澤正夫・広島俊男・石原丈実・村田泰章・山崎俊嗣・上嶋正人・牧野雅彦・森尻理恵・名和一成・大熊茂雄・佐藤秀幸・杉原光彦・西村清和・金谷 弘・志知龍一・岸本清行・木川栄一・三品正明(2013) 地質調査所重力測定値データファイル, 日本重力データベースDVD版, 数値地質図 P-2, 産総研地質調査総合センター.
- Micro-g LaCoste Inc.(2008) g8 User's Manual. <http://www.microglacoste.com/> (Accessed: 2020-04-07).
- 村田泰章・宮川歩夢・駒澤正夫・名和一成・大熊茂雄・上嶋正人・西村清和・岸本清行・宮崎光旗・志知龍一・本多 亮・澤田明宏 (2018) 金沢地域重力図(ブーゲー異常). 重力図, no. 33, 産総研地質調査総合センター.
- 中江 訓・長森英明・宮崎一博・駒澤正夫(2009) 20万分の1地質図幅「石垣島」, 産総研地質調査総合センター.
- 名和一成・今西祐一・伊藤 忍・田中愛幸・田村良明・宮川歩夢・風間卓仁・宮地竹史・奥田 隆・山谷祐介・池田 博・杉原光彦(2015) 石垣島における陸水擾乱の重力への影響とそのモニタリングのための新たな試み, 日本地球惑星科学連合2015年大会, SGD23-12.
- 大滝壽樹・名和一成 (2014) 重力データの地下水擾乱補正に向けた国立天文台石垣島観測局下堆積層内のP波速度解析. 測地学会誌, **59**, 147-156.
- 産総研地質調査総合センター (2019) 20万分の1日本シームレス地質図V2, <https://gbank.gsj.jp/seamless/> (閲覧日: 2019年11月2日).
- Wessel, P., W. H. F. Smith, R. Scharroo, J. F. Luis, and F. Wobbe(2013) Generic Mapping Tools: Improved version released, *EOS Trans. AGU*, **94**, 409-410.

( 受 付 : 2019年6月11日 ; 受 理 : 2019年12月13日 )

## 付録 Appendix

付表1 名蔵川流域を中心とした測定重力データ一覧 (1/3)

Table A1 Observed gravity data in Gravity Nagura River Basin, Western Ishigaki Island (1/3)

No.	Year	Day	Time	Lat.	Lon.	H	Type	Gobs	Gnorm	FAC+A	BGC	TI	Tw	B20	BGA
1	2013	312	1432	242239.2754	1241448.2100	8.112	BM1	979012.303	978912.9245	3.3726	-0.3417	0.9274	-0.9018	102.9936	103.3861
2	2013	312	1606	242440.2456	1240838.9160	2.713	BM1	979012.857	978915.2058	1.7070	-0.1143	0.9680	-0.7188	100.3253	100.8974
3	2013	312	1628	242425.7568	1241029.4696	53.493	KNT	978998.084	978914.9325	17.3726	-2.2524	1.1240	-0.7802	97.4637	96.7077
4	2013	312	1700	242442.2420	1241037.6417	69.911	FS5	978994.913	978915.2435	22.4374	-2.9433	1.5956	-0.7918	98.5959	97.6930
5	2013	312	1735	242442.7046	1241015.8777	25.564	FS5	979003.034	978915.2522	8.7565	-1.0767	1.3455	-0.7402	96.3135	96.4936
6	2013	313	1055	242456.9114	1240952.2072	11.007	FS5	979005.074	978915.5203	4.2657	-0.4636	1.6283	-0.7191	95.4081	96.1885
7	2013	313	1123	242433.5962	1240948.0052	5.892	FS5	979008.432	978915.0804	2.6877	-0.2482	1.0609	-0.7213	96.9218	97.4663
8	2013	313	1218	242433.9956	1241009.6537	8.310	FS5	979006.992	978915.0879	3.4337	-0.3500	1.2337	-0.7238	96.3597	96.9518
9	2013	313	1336	242420.0299	1240938.9474	4.530	FS5	979008.879	978914.8244	2.2675	-0.1908	0.9418	-0.7255	97.0768	97.5800
10	2013	313	1410	242407.3258	1240936.9884	10.111	FS4	979008.316	978914.5848	3.9893	-0.4259	0.9008	-0.7379	97.9103	98.2284
11	2013	313	1435	242350.3938	1240924.8130	6.766	FS4	979009.881	978914.2654	2.9573	-0.2850	0.8677	-0.7428	98.9732	99.3636
12	2013	313	1503	242343.6727	1240925.9840	8.697	FS4	979009.395	978914.1386	3.5530	-0.3663	0.8666	-0.7490	99.0385	99.3737
13	2013	313	1532	242417.7083	1240839.7437	21.710	FS4	979010.580	978914.7806	7.5676	-0.9144	0.8838	-0.7494	102.5337	102.5132
14	2013	313	1611	242410.5200	1240857.2288	4.391	FS1	979013.351	978914.6450	2.2246	-0.1850	0.9504	-0.7301	101.7094	102.2222
15	2013	313	1636	242355.1120	1240909.2020	3.859	FS4	979012.608	978914.3544	2.0605	-0.1626	0.8619	-0.7366	100.9540	101.4225
16	2013	313	1803	242019.9872	1241021.4968	15.170	BM2	979004.045	978910.3005	5.5500	-0.6390	1.0769	-1.0338	99.1055	99.3989
17	2013	314	1024	242258.3645	1240810.1719	3.741	FS5	979015.344	978913.2843	2.0241	-0.1576	0.9033	-0.7702	104.7818	105.2814
18	2013	314	1050	242310.5958	1240838.7074	3.355	FS5	979011.999	978913.5149	1.9050	-0.1413	0.8520	-0.7619	101.0257	101.5019
19	2013	314	1115	242326.8670	1240902.1089	3.746	FS5	979011.823	978913.8217	2.0257	-0.1578	0.8485	-0.7526	100.6332	101.0960
20	2013	314	1147	242335.8214	1240939.2947	13.440	FS5	979008.300	978913.9906	5.0163	-0.5661	0.8927	-0.7601	99.1960	99.4148
21	2013	314	1442	242339.9953	1241009.2975	12.937	FS4	979008.250	978914.0693	4.8611	-0.5449	0.9625	-0.7589	99.0953	99.3751
22	2013	314	1518	242359.4754	1241010.2169	35.614	FS5	979004.226	978914.4367	11.8570	-1.4998	0.9872	-0.7730	99.8249	99.4815
23	2013	314	1550	242420.4043	1241017.7440	44.480	FS3	979000.469	978914.8315	14.5921	-1.8730	1.0999	-0.7720	97.8882	97.3703

付表1 名蔵川流域を中心とした測定重力データ一覧(2/3)  
 Table A1 Observed gravity data in Gravity Nagura River Basin, Western Ishigaki Island (2/3)

No.	Year	Day	Time	Lat.	Lon.	H	Type	Gobs	Gnorm	FAC+A	BGC	TI	Tw	B20	BGA
24	2013	314	1623	242444.1892	1241026.8025	51.622	FS2	978997.855	978915.2802	16.7954	-2.1736	1.5301	-0.7697	97.2904	96.8593
25	2013	315	958	242349.5519	1240953.0281	14.883	FS5	979008.515	978914.2495	5.4614	-0.6269	0.9022	-0.7539	99.5010	99.6854
26	2013	315	1028	242410.9094	1240918.3163	2.141	FS5	979011.807	978914.6524	1.5305	-0.0902	0.9026	-0.7269	99.5612	100.1055
27	2013	315	1103	242415.2723	1240955.4452	6.658	FS5	979008.267	978914.7347	2.9240	-0.2805	0.9673	-0.7303	97.0777	97.5378
28	2013	809	942	242006.3528	1240932.0118	3.000	DEM	979007.244	978910.0439	1.7955	-0.1264	1.0406	-1.0119	99.7817	100.3943
29	2013	809	1127	242439.4707	1241020.8614	19.378	FS4	979005.274	978915.1912	6.8482	-0.8162	1.4312	-0.7344	97.4046	97.8166
30	2013	809	1537	243211.8848	1241804.6254	9.879	BM2	979039.242	978923.7441	3.9177	-0.4161	0.9323	-0.8011	119.6229	119.9687
31	2013	809	1627	243635.9094	1241857.4796	68.075	FS3	979030.423	978928.7506	21.8710	-2.8660	2.2414	-1.6376	120.6060	120.1875
32	2013	810	936	242438.8253	1241010.5850	27.050	FS4	979002.841	978915.1790	9.2150	-1.1392	1.1856	-0.7435	96.2040	96.2351
33	2013	810	1007	242435.6967	1241007.0148	23.888	FS4	979003.164	978915.1200	8.2395	-1.0061	1.1215	-0.7411	95.7510	95.8283
34	2013	810	1041	242432.1593	1240958.2499	15.137	FS3	979005.398	978915.0533	5.5398	-0.6376	1.0392	-0.7325	95.9332	96.2023
35	2013	810	1110	242425.5812	1240952.0536	5.778	FS3	979007.813	978914.9292	2.6525	-0.2434	1.0074	-0.7245	96.3181	96.8299
36	2013	810	1204	242448.6676	1241018.0704	25.486	FS2	979001.742	978915.3648	8.7325	-1.0734	1.7214	-0.7379	95.6457	96.0798
37	2013	810	1530	242725.5289	1241213.4907	15.106	FS4	979021.193	978918.3267	5.5302	-0.6363	1.0417	-0.7225	108.4624	108.7340
38	2013	811	1001	242412.6147	1241037.7516	98.084	FS2	978990.586	978914.6845	31.1286	-4.1284	1.5469	-0.8394	101.0025	99.2729
39	2013	811	1040	242328.2574	1241026.8728	32.456	FS2	979004.809	978913.8479	10.8827	-1.3668	0.9597	-0.7923	100.2135	99.9408
40	2013	811	1116	242444.5170	1240956.0501	7.588	FS4	979006.825	978915.2864	3.2109	-0.3196	1.2554	-0.7190	95.8805	96.5075
41	2013	811	1248	242435.3611	1241024.4574	17.323	FS4	979005.678	978915.1137	6.2142	-0.7296	1.3538	-0.7338	97.2711	97.6893
42	2014	314	1016	242439.5561	1241020.7515	19.469	FS1	979005.004	978915.1928	6.8762	-0.8200	1.4306	-0.7345	97.1521	97.5612
43	2014	314	1042	242435.7111	1241024.3150	16.926	FS2	979005.715	978915.1203	6.0917	-0.7129	1.3643	-0.7332	97.2340	97.6704
44	2014	314	1340	242439.1361	1241011.0449	26.585	FS0	979002.914	978915.1849	9.0715	-1.1197	1.1926	-0.7428	96.1813	96.2302
45	2014	314	1408	242435.4262	1241006.8471	23.513	FS1	979003.241	978915.1149	8.1238	-0.9903	1.1150	-0.7408	95.7363	95.8198
46	2014	314	1450	242429.2855	1241006.7552	8.800	DEM	979006.976	978914.9990	3.5848	-0.3707	1.1157	-0.7264	96.3036	96.8028

付表1 名蔵川流域を中心とした測定重力データ一覧 (3/3)

Table A1 Observed gravity data in Gravity Nagura River Basin, Western Ishigaki Island (3/3)

No.	Year	Day	Time	Lat.	Lon.	H	Type	Gobs	Gnorm	FAC+A	BGC	TI	Tw	B20	BGA
47	2014	314	1522	242431.8495	1240957.7566	13.473	FS1	979005.523	978915.0474	5.0265	-0.5675	1.0454	-0.7307	95.7053	96.0255
48	2014	314	1543	242425.5841	1240952.0372	5.257	FS0	979007.779	978914.9292	2.4918	-0.2214	1.0132	-0.7239	96.1796	96.7101
49	2014	315	1416	242412.6806	1241037.5704	97.392	FS2	978990.465	978914.6858	30.9151	-4.0993	1.5377	-0.8385	100.7074	98.9912
50	2014	315	1451	242328.2914	1241026.8348	31.810	FS1	979004.610	978913.8486	10.6834	-1.3396	0.9657	-0.7915	99.8818	99.6312
51	2014	315	1524	242444.4669	1240955.8472	7.378	FS0	979006.736	978915.2855	3.1461	-0.3108	1.2588	-0.7188	95.7522	96.3874
52	2014	315	1554	242501.9237	1240951.3416	10.213	FS2	979004.840	978915.6149	4.0207	-0.4302	1.7059	-0.7168	95.0589	95.9136
53	2014	315	1632	242432.6179	1240919.6349	3.999	FS0	979010.858	978915.0619	2.1037	-0.1685	1.0739	-0.7201	98.9689	99.5755
54	2014	316	945	242421.8733	1241055.6088	66.416	FS0	978997.155	978914.8592	21.3592	-2.7962	1.2966	-0.7986	99.8332	98.8285
55	2014	316	1018	242408.4925	1241057.3959	150.582	FS0	978979.110	978914.6068	47.3234	-6.3352	1.6116	-0.9050	101.4473	98.2824
56	2014	316	1055	242355.2741	1241022.5208	43.559	FS1	979002.524	978914.3574	14.3080	-1.8343	1.0636	-0.7856	100.1240	99.6077
57	2014	316	1129	242316.4445	1241006.6279	65.431	FS1	978999.290	978913.6252	21.0554	-2.7548	1.1647	-0.8387	102.6761	101.6108
58	2014	316	1336	242427.7116	1240904.9165	49.488	FS1	979003.051	978914.9693	16.1370	-2.0838	1.0159	-0.7763	101.2833	100.5678
59	2014	316	1401	242324.7440	1240917.5704	6.871	FS0	979010.072	978913.7817	2.9897	-0.2894	0.8826	-0.7584	99.6852	100.0827
60	2014	316	1430	242254.0361	1240912.1358	12.964	FS1	979010.572	978913.2027	4.8694	-0.5461	1.1255	-0.7883	102.5856	102.9737
61	2014	316	1510	242221.6506	1240945.7679	205.123	FS1	978968.109	978912.5923	64.1481	-8.6259	2.1807	-1.0659	105.6765	101.3582
62	2014	316	1557	242259.9753	1241000.4210	213.515	FS1	978965.974	978913.3147	66.7368	-8.9782	2.3694	-1.0318	105.1157	100.6879

凡例

- No: 測点番号
- Lat: 緯度 (北緯 24度 22分 59.9753秒を, 242259.9753と表記)
- Lon: 経度 (東経 124度 10分 00.4210秒を, 1241000.4210と表記)
- H: 標高 (m)
- Type: 測点位置決定法  
 FSx: 高速静止GPS測量 (FSの後の数字はFIX基線数), BM1: 一等水準点, BM2: 二等水準点, KNT: キネマティックGPS, DEM: 5m DEM
- Gobs: 測定重力値 (mGal)
- Gnorm: 正規重力値 (mGal)
- FAC+A: フリーエア補正值+大気補正值 (mGal)
- BGC: プーゲー補正值 (mGal / 1.0 g/cm<sup>3</sup>)
- TI: 地形補正值 (mGal / 1.0 g/cm<sup>3</sup>)
- Tw: 海水補正值 (mGal / 1.0 g/cm<sup>3</sup>)
- B20: プーゲー異常値 (仮定密度: 2.00 g/cm<sup>3</sup>)
- BGA: プーゲー異常値 (仮定密度: 2.67 g/cm<sup>3</sup>)

任意の $\rho$  (地殻表層岩石密度)と $\rho_w$  (海水密度)を仮定した時のプーゲー異常値Gbは、次式で計算される。

$$G_b = G_{obs} - G_{norm} + FAC+A + (BGC + TI) \times \rho + Tw \times \rho_w$$

Legend

- No: Station Number
- Lat: Latitude (e.g. 242259.9753 means 24 degrees 22 minutes 59.9753 seconds North)
- Lon: Longitude (e.g. 1241000.4210 means 124 degrees 10 minutes 00.4210 seconds East)
- H: Observation Point Height (m)
- Type: Positioning method of the stations  
 FSx: Fast static GPS positioning (x: fix baseline number), BM1: First order bench mark, BM2: Second order bench mark, KNT: kinetic GPS, and DEM: Digital elevation map of 5m resolution
- Gobs: Observed gravity value (mGal)
- Gnorm: Normal gravity value (mGal)
- FAC+A: Free-air and atmospheric correction value (mGal)
- BGC: Bouguer correction value (mGal / 1.0 g/cm<sup>3</sup>)
- TI: Terrain correction value (mGal / 1.0 g/cm<sup>3</sup>)
- Tw: Sea water correction value (mGal / 1.0 g/cm<sup>3</sup>)
- B20: Bouguer anomaly (assumed density: 2.00 g/cm<sup>3</sup>)
- BGA: Bouguer anomaly (assumed density: 2.67 g/cm<sup>3</sup>)

Bouguer Anomaly value can be calculated as

$$G_b = G_{obs} - G_{norm} + FAC+A + (BGC + TI) \times \rho + Tw \times \rho_w$$

where  $\rho$  and  $\rho_w$  are the assumed densities of surficial rocks and sea water, respectively.