

志賀原子力発電所前面海域における海底重力探査の概要

石田 聡史*1 宮本 慎也*1 吉田 進*2

1. はじめに

北陸電力(株)は、石川県の能登半島北西部に位置する志賀町に志賀原子力発電所を有している。これまで当社では、志賀原子力発電所の敷地へ影響を与えるような断層等の有無の確認やその評価を行ってきた。

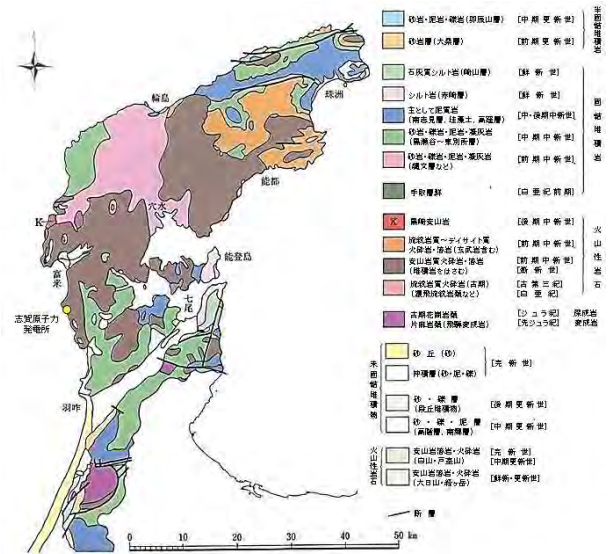
断層の評価を行うにあたり、地下の地質・地質構造の把握は不可欠である。重力探査は物理探査手法の一つであり、これまで地下構造の推定方法として多く用いられてきた¹⁾。能登半島ではこれまで当社を含め、様々な機関によって重力探査が実施されてきた²⁾。陸域は当社や金沢大学をはじめ様々な機関で実施されており、海域についても地質調査所(現:産業技術総合研究所)によって船上重力計を用いて調査が行われてきた。しかし、浅海域の重力探査は船上重力計では困難であり、能登半島北西部の浅海域では、重力探査は実施されていなかった。

本稿では、志賀原子力発電所が位置する能登半島北西部の浅海域において、海底重力計を用いて実施した海底重力探査の概要を報告する。合わせて、重力異常図作成までの取得した重力データの処理手法及び他機関で取得した重力データとの結合方法について検討した結果を報告する。

2. 調査地域の地質・地質構造の特徴

能登半島の地質分布図を第1図に示す。能登半島にはジュラ紀の花崗岩類のほか、漸新世から前中新世の火成岩類と前中新世の堆積岩類が広く分布している。それらを覆って、中期から後中新世の堆積岩類が分布し、志賀原子力発電所付近には安山岩質火砕岩が広がっている。

また、発電所前面海域において、音波探査により取得したデータを基に作成した海底地質平面図を第2図、断面図を第3図に示す。取得したデータにより、上位から下位へA層~D層に区分した。A層は水深約140m以浅の大陸棚のほとんど



第1図 石川県地質分布図
(紘野, 1993³⁾に加筆)

の海域に分布している。B層は海士岬以北の海域の一部を除くほぼ全域に分布しており、水深約140m以浅ではA層に覆われている。C層は海士岬以北の海域の一部を除くほぼ全域に分布しており、ほとんどがA層に覆われている。D層はほぼ全域に分布するが、安右エ門礁付近等を除きA層に覆われている。

3. 海底重力探査の概要

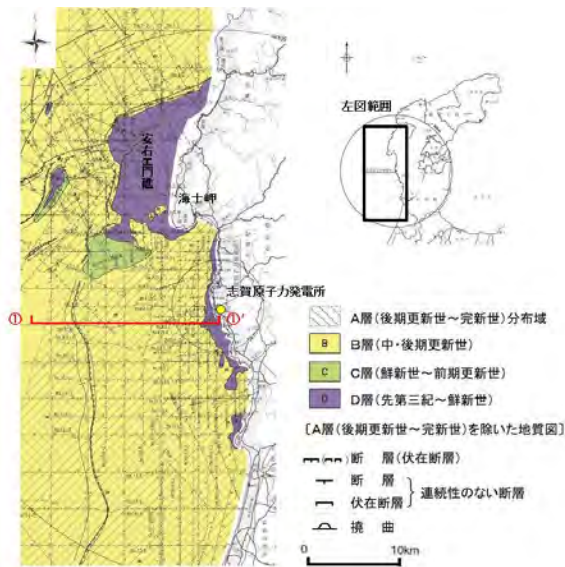
(1) 調査目的

重力探査は、これまで地下構造の推定手法の一つとして行われてきた。測定した重力値と正規重力値との差である重力異常を求めることで、地下の不均質な密度構造の存在を示すことができる。石川県の能登半島においては、地質調査総合センターによって編集された金沢地域の重力異常図が公表されている²⁾。

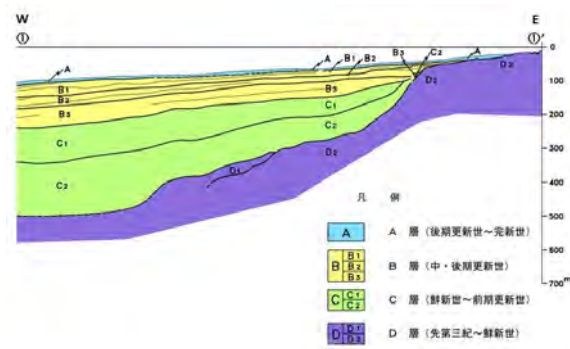
第4図に能登半島で実施されてきた既重力測定点および今回の重力測定点の分布を示す。既重力測定点分布には海岸線沿いの海域に幅5km~10km程度の測定点の空白域が存在している。海域のデータは地質調査所が船上重力計を用いて計測している。船上重力計は一般的に1,000t以上の大型船に搭載されるため、測定地点は一定以上の水

*1 北陸電力株式会社 土木建築部 調査技術チーム

*2 北陸電力株式会社 土木建築部



第2図 志賀原子力発電所周辺 海底地質平面図

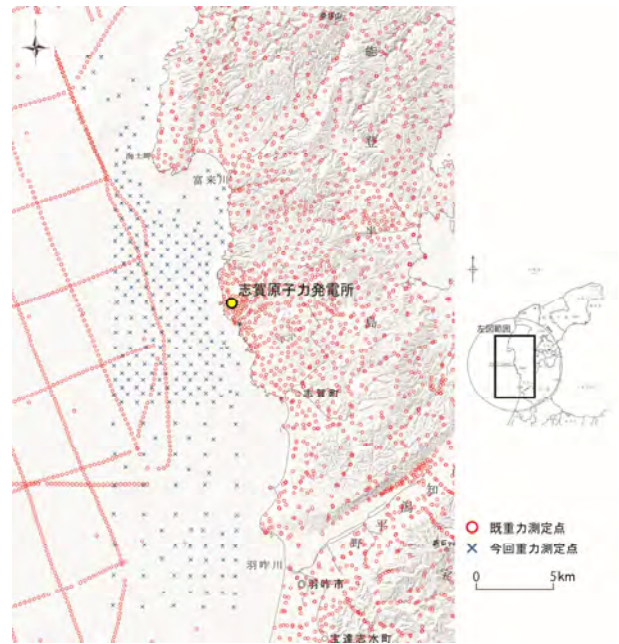


第3図 海底地質断面図 (①-①' 断面)

深が必要となり、浅海域での調査は実施されてこなかった。今回の調査は測定点の空白域となっている志賀原子力発電所前面の浅海域について、海底重力計を使用して海底重力探査を行うこととした。今回使用した海底重力計は小型の船舶を使用し、沿岸域や大陸棚での調査に使用される。また、海底重力計は船上重力計と異なり、重力計を海底に直接設置して探査を行うため、陸域と同程度の高精度なデータを取得可能となる。しかし、海底重力計による重力探査は測定点毎に重力計を船舶から海底へ設置・回収する必要があるが、船上重力計での調査に比べ労力と時間がかかる。さらにこれまで海底重力計を所有する機関が少なかったこともあり、日本の浅海域の大部分の重力データは未取得となっている。

(2) 調査位置

今回の海底重力探査は能登半島沖の海岸線に沿



第4図 重力測定点分布

(村田他, 2018²⁾に加筆)

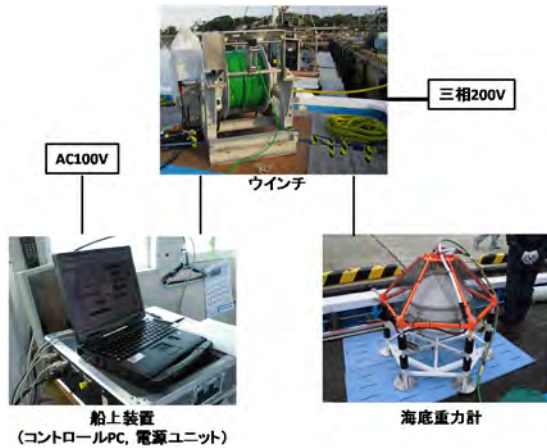
った約40km×沖合約10km(約400km²)の海域部分で実施し、測定点数は275点となった。志賀原子力発電所前面の海域については測定間隔を約700mとし、それ以外の測定間隔は約2kmとした。ただし、今回の調査範囲には共同漁業権区域が含まれていたことから、定置網や蓄養網、漁礁といった漁具が設置されていたため、それらの位置を事前に調査し、測定が困難な場所については調査予定地点から除いた。

(3) 調査機器

今回、重力測定には Scintrex 社製 INO 海底重力計を使用した。使用した海底重力計の仕様を第1表に示す。測定システムは海底重力計本体、船上装置(コントロールPC、電源ユニット)、ウインチ、通信用ケーブルより構成される(第5図)。この重力計はオンライン測定システムを採用しており、海底重力計本体と船上装置が通信用ケーブルで繋がれている。このため、重力計の設置・回収時の荷重に耐えられるような専用のケーブル(アーマードケーブル)、ウインチが必要となるが、海底重力計から各種データがリアルタイムで送信されるため、データの品質に関する情報を測定中に確認し、再計測等の判断をその場で可能となる利点がある。また、海底重力計の耐圧容器内には、船上からリアルタイムで水平をコントロールできるジャイロ・ジンバル機構が組み込まれており、

第1表 INO 海底重力計の主な仕様

項目	仕様
測定分解能	0.001mGal
測定レンジ	8,000mGal
測定可能傾斜範囲	±25°以内
容器耐圧水深	600m
大きさ	H92cm×W86cm×L86cm
重量	約190kg (空中) 約100kg (海中)
入力電圧	DC24V DC36~75V (ケーブル接続時)



第5図 INO 海底重力計の測定システム

本体の傾斜が 25°以内であれば常時センサー部の水平が最適状態に調整される。INO 海底重力計の重力測定センサーは陸上重力計 (Scintrex 社製 CG-5) と同一のものが使用されており、19t 級の船舶 (太幸丸) に搭載した。

(4) 測定方法

測定期間は 2018 年 5 月 20 日～2018 年 6 月 20 日までの 32 日間であった。このうち、荒天による待機は 4 日間であった。1 日の作業は午前 7 時から午後 4 時までとし、1 日平均約 10 点の測定を行った。

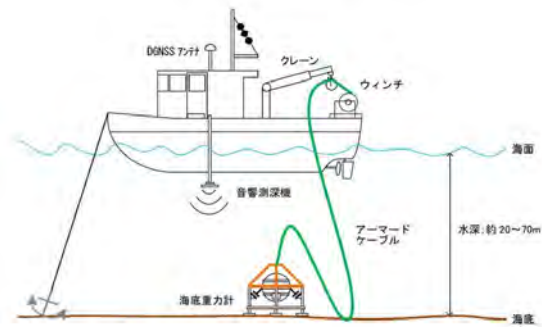
海底重力探査は以下の手順で実施した。

- ①調査船出港前の陸上基準点における重力測定
- ②現場海域における観測作業
- ③調査船帰港後の陸上基準点における重力測定
 - ①, ③の陸上基準点は閉環測定を行うために設置した。陸上基準点は調査船の着岸地点付近にあることが望ましく、調査船の基地港である志賀町の松戸港の岸壁に設置した。陸上基準点での重力測定状況を第 6 図に示す。

次に②現場海域における観測作業について説明する。測定状況の概要を第 7 図に示す。船舶が調査予定地点に到着後、まず音響測深機 (千本電機



第6図 陸上基準点 測定状況



第7図 INO 海底重力計による重力測定概要図

製 PDR-1300) により探査測定点付近の水深を測量し、海底の起伏、漁具の有無を確認した。共同漁業区域内の定置網付近では海底重力計・アンカーによって網を損傷させないようにサイドスキャンソナー (IMAGENEX 社製 YELLOWFIN) を併用し、確認を行った。その後、アンカーを海底に設置し、調査船を停船させた。ウインチにて海底重力計を着底させ、約 10~15 分程度重力測定を行った。毎秒 1 サンプルのデータを取得し、60 サンプルの平均値を測定値とした。各地点において 5 回以上の測定を行い、各測定値の差が 0.03mGal 以内である 5 回の測定値の平均をその地点の重力値とした。また、岩礁地帯では、着底時に海底地形の凹凸によって、海底重力計の水平調整能力を超えて傾くことが予想されたため、計画地点を数十～数百 m 変更した測定地点もある。測定終了後、海底重力計を揚収し、次の調査地点へ移動し、同様の作業を繰り返した。

船位測量は静止軌道上にある 2 基の運輸多目的衛星 MTSAT の電波を使用したディファレンシャル方式 GNSS (Hemisphere 社製 VS110S) によって行い、測定点の水平位置を算出した。

4. 重力データの処理手法

(1) 潮汐補正・潮位補正・器械高補正

重力値は、月や太陽等の天体の引力（潮汐力）によって測定する時間・場所に応じて影響を受ける。潮汐力の影響には、地球を弾性変形させる地球潮汐と潮の満干に伴う海洋潮汐の2種類がある。一般的に、地球潮汐による影響の除去は潮汐補正と呼ばれ、月や太陽の位置による引力が測定点の重力値に及ぼす影響を除去する。潮汐補正量は重力の測定時刻と測定位置を与えれば算出することができる⁴⁾。補正量は最大で月で±0.11mGal、太陽で±0.05mGal程度である。一方、海洋潮汐による影響の除去は潮位補正と呼ばれ、潮位分の海水による引力の影響を除去する。潮位補正量は(1)式によって算出し、補正には北陸地方整備局 金沢港湾・空港工事事務所 金沢港験潮場のデータを使用した。

$$G_T = 2\pi G\rho_w H \dots\dots\dots(1)$$

G_T : 潮位補正量(mGal)

G : 万有引力定数(= 6.6730×10^{-6} mGal・m²/kg)

ρ_w : 海水密度(kg/m³), H : 潮位(m)

また、海底面から海底重力計までの高さとその間に存在する海水による影響の補正を器械高補正といい、(2)式によって求めた。

$$G_M = 0.3086h_M - 4\pi G\rho_w h_M \dots\dots\dots(2)$$

G_M : 器械高補正量(mGal)

G : 万有引力定数(= 6.6730×10^{-6} mGal・m²/kg)

ρ_w : 海水密度(kg/m³), h_M : 器械高(m)

本稿での海水密度 ρ_w は 1,030kg/m³を採用した。

(2) ドリフト補正

毎日の測定の始めと終わりに陸上基準点にて閉環測定を行ったが、潮汐補正や潮位補正、器械高補正を行っても、陸上基準点での測定値は一致しないことが一般的であり、この差をドリフトと呼ぶ。今回使用した海底重力計の重力測定センサーはスプリング式であり、センサー部のバネはクリープ現象により、時間が経過するごとに重力値がドリフトする。ドリフトレートは 0.5mGal/day であり、1日の作業時間を考慮し、閉合誤差の許容値は 0.2mGal とした。ドリフト補正は、閉環測定時に陸上基準点にて計測したドリフト量を測定時間で内分して行った。

(3) 絶対重力値への変換

重力測定方法は、絶対重力測定と相対重力測定に分けられる。絶対重力値の測定は相対重力値の測定と比べ、装置も大きく、作業量も多い。今回のような広範囲の測定の場合は、相対重力測定が行われることが多く、今回使用した海底重力計も相対重力測定用の装置である。このため、解析を行う際は測定値を絶対重力値に変換する必要があり、松戸港に設けた陸上基準点と絶対重力値の既知点である基準重力点「金沢」を基準として、測定した相対重力値を絶対重力値に変換した。基準点での測定には、陸上重力計（Scintrex 社製 CG-5）を使用した。

(4) 正規重力値

地球の形は回転楕円体のモデルに近似することができる。実際の地球の形の近似として用いる回転楕円体を地球楕円体と呼び、地球楕円体面上の重力を正規重力という。正規重力は(3)式の実用式で計算できる。ただし、正規重力値には地球の大気の影響が含まれており、測定重力値と正規重力値を比較する場合には、測定重力値に測定点標高よりも上にある標準大気を与える引力の影響を加算する必要がある。これを大気補正と呼び、(4)式で算出できる。

$$\gamma = 978031.85 \times (1 + 0.005278895 \sin^2 \varphi + 0.000023462 \sin^4 \varphi) \dots\dots\dots(3)$$

$$Atm = 0.87 - 0.965 \times 10^{-4} h$$

$$(h < 0 \text{ のとき } h = 0) \dots\dots\dots(4)$$

γ : 正規重力値(mGal), Atm : 大気補正值(mGal)

φ : 測定点の緯度, h : 測定点標高(m)

(5) フリーエア補正

測定点標高における重力値は、海水準よりも高い標高では地球の中心よりも遠くなるため小さくなり、海水準よりも低い標高では逆に近づくため大きくなる。ここで海水準から測定点標高の間を真空（フリーエア）と仮定した場合、標高分の重力変化を正規重力値から引くことで測定点標高での標準重力値が得られる。これをフリーエア補正と呼ぶ。また、測定重力値と標準重力値との差をフリーエア異常と呼ぶ。フリーエア異常値の算出式を(5)式に示す。

$$\Delta g' = g - (\gamma - 0.3086h) + Atm \dots\dots\dots(5)$$

$\Delta g'$: フリーエア異常値(mGal)

g : 測定重力値(mGal), γ : 正規重力値(mGal)

h : 測定点標高(m), Atm : 大気補正值(mGal)

ただし、海水準よりも低い測定点標高の場合、物質(今回の場合は海水)のある球殻の中のため、標準重力値からその分の引力を差し引くべきであるが、後述のブーゲー異常に含めることとし、ここでは考慮していない。

(6) ブーゲー補正・地形補正

ブーゲー補正は、フリーエア補正の際に海水準と測定点の間に真空を仮定した代わりに、密度 ρ の平板状物質があると仮定した際の引力を補正したものである。これにより測定点標高から海水準までの仮定密度 ρ の効果が除去・追加される。ただし、実際の地形は平板状ではなく凹凸が存在するため、凹凸分の引力を過剰もしくは不足して取り込むこととなる。この過剰分もしくは不足分の引力を平板状に仮定した地形の重力値に補正することを地形補正という。地形補正は、陸域については国土地理院の 10m メッシュ数値標高モデルを 10m グリッドデータに変換し、海域については日本水路協会の海底地形データを 50m のグリッドデータに変換して補正を行った。

ブーゲー異常とは、各測定点の重力値に対し、これまで述べてきた様々な補正を行った値と正規重力値との差をいう。これにより、各測定点での特有の影響を除去し、同一条件で比較することができ、地下構造を推定することができる。一般的に重力異常とはこのブーゲー異常のことをいう。(6)式に各重力計によるブーゲー異常値の算出式を示す。

$$\Delta g'' = \Delta g' - 2\pi G\rho h + T_r \quad (\text{陸上})$$

$$\Delta g'' = \Delta g' - 2\pi G(\rho - \rho_w)h - 4\pi G\rho_w h + T_r \quad (\text{海底}) \quad \dots\dots(6)$$

$$\Delta g'' = \Delta g' + 2\pi G(\rho - \rho_w)d + T_r \quad (\text{船上})$$

$\Delta g''$: ブーゲー異常値(mGal)

$\Delta g'$: フリーエア異常値(mGal)

G : 万有引力定数(= 6.6730×10^{-6} mGal · m²/kg)

ρ : 仮定密度(kg/m³), ρ_w : 海水密度(kg/m³),

h : 測定点標高(m), d : 測点直下水深(m)(d > 0)

T_r : 地形補正值(mGal)

本稿での仮定密度 ρ は陸域の表層の平均的な密度として 2,300kg/m³ を採用した。海底重力計と船上重力計の式には、海水を岩石で置き換えるための項が追加されており、さらに海底重力計の式には、海水による海底での上向きの引力と海上で受ける下向きの引力の合成項が加わっている。

5. 重力異常図 (ブーゲー異常図)

算出したブーゲー異常値を用いて、重力異常図(ブーゲー異常図)を作成した。ただし、既重力測定点には他機関が公表している重力データ^{5)~9)}に加え、当社と金沢大学で 2018 年 8 月 2 日までに測定した陸域の重力データを含めている。既重力測定点データと今回重力測定点データを混合するにあたり、陸域の重力データと今回測定した浅海域の重力データについては、陸上重力計と海底重力計の測定精度がほぼ同程度であることから結合に問題は生じなかった。一方、船上重力計で測定した海域の重力データは、海底重力計に比べると測定精度が大きく劣るため、船上重力計と海底重力計で同地点を測定した箇所を比較すると最大 8mGal の差が生じた。そこで本稿では、船上重力計の重力データと今回測定した海底重力計の重力データの両方が存在する点については、精度の高い海底重力計の測定データを採用することとした。また、船上重力計と海底重力計の重力データの境界付近におけるブーゲー異常値の急激な変化を緩和するために、船上重力計のデータの範囲内で最大 2km 幅の緩衝域を設定した。

第 8 図に既重力測定点の重力データのみで作成した重力異常図、第 9 図に既重力測定点に今回の浅海域の重力測定点のデータを含めて作成した重力異常図を示す。陸域部を比較すると 2 つの図の重力異常の傾向に大きな違いは認められない。一方、海域部を比較すると、既重力測定点のみでは見られなかった重力異常値の細かな変化を確認することができた。いずれの図にも志賀原子力発電所西部に北から南にかけて高重力異常域が認められる。しかし、浅海域の調査の結果を反映した図には高重力異常域を横断する形で、東西方向に周囲に比べて低重力異常を示す領域が認められた。この位置には地下構造の違いが存在すると考えられ、今回の浅海域の調査で新たに判明した。

6. おわりに

本稿では志賀原子力発電所周辺の海底重力探査の概要と重力異常図作成までのデータ処理方法について報告した。これまで志賀原子力発電所前面の浅海域の重力データが空白となっていたが、今回の調査を実施したことでより高精度な重力異常

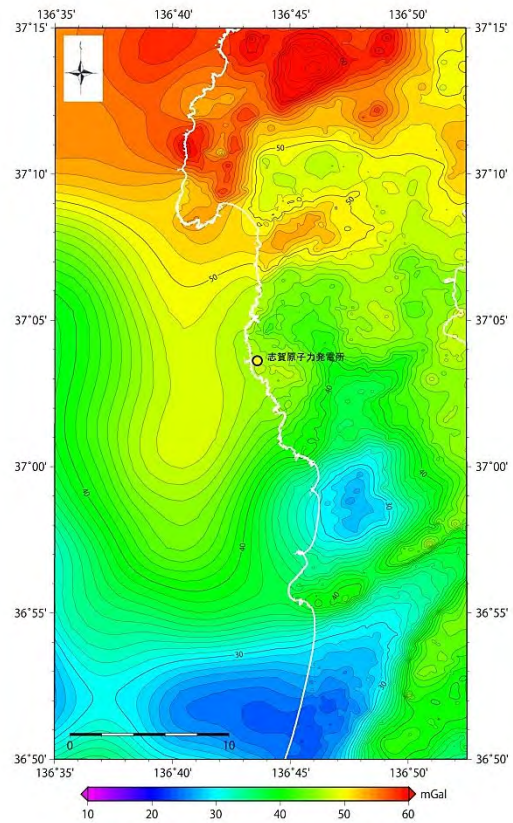
図を作成することができた。

今回浅海域の調査を行った範囲は、能登半島の一部であり、今後はより広い範囲でデータを取得し、能登半島周辺の地質構造の把握に努めたい。最後に調査の実施にあたり、ご指導、ご協力いただいた関係者の方々に紙面を借りて感謝申し上げます。

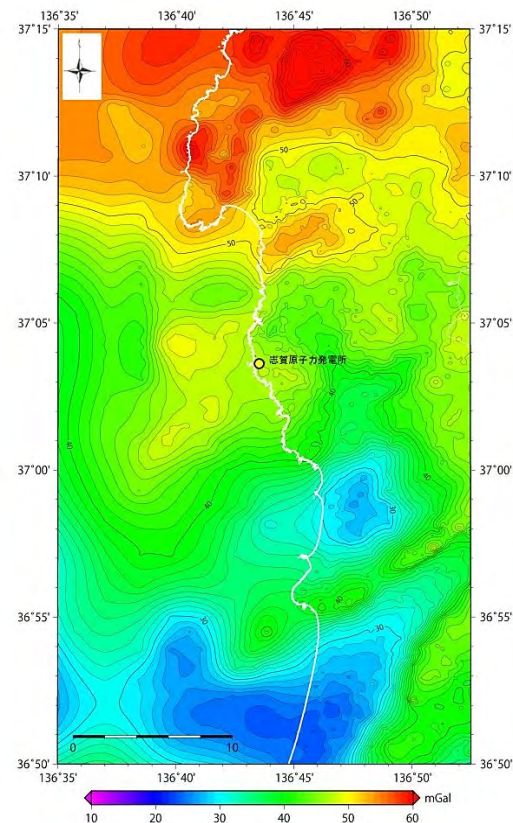
参考文献

- (1) 物理探査学会:物理探査ハンドブック手法編 第8章 重力探査, 物理探査学会,pp.431-471,1998
- (2) 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: 金沢地域重力図(ブーゲー異常), 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター, 重力図 33, 2018
- (3) 糸野義夫: 石川県地質誌 新版・石川県地質図(10万分の1) 説明書, 石川県・北陸地質研究所, 1993
- (4) Longman, I.M.: Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun. J. Geophysical res, No.64, pp.2351-2355, 1959
- (5) 本多亮, 澤田明宏, 古瀬慶博, 工藤健, 田中俊行, 平松良浩: 金沢大学重力データベースの公表 測地学会誌, 58, 4, pp.153-160, 2012
- (6) 産業技術総合研究所地質調査総合センター: 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, 2013
- (7) The Gravity Research Group in Southwest Japan: Gravity measurements and database in southwest Japan. Gravity Database of Southwest Japan (CD-ROM), Bull. Nagoya University Museum, Special Rep, No.9, 2001
- (8) Yamamoto, A., R. Shichi and T. Kudo: Gravity database of Japan (CD-ROM). Earth Watch Safety Net Research Center, Chubu Univ, Special Publication, No.1, 2011
- (9) 駒澤正夫, 大熊茂雄: 能登半島北部域 20 万分の 1 重力図及び説明書, 海陸シームレス地質情報集, 「能登半島北部沿岸域」, 数値地質図 S-1, 地質調査総合センター, 2010

(本報告は、一般社団法人電力土木技術協会誌, No. 398, pp. 110-114 (2018) を転載しています。)



第8図 重力異常図(既重力測定点)



第9図 重力異常図(既重力測定点+今回重力測定点)