

## 能登半島北部域 20 万分の 1 重力図 (ブーゲー異常)

### 1:200,000 Gravity Map of Northern Noto Peninsula (Bouguer Anomalies)

駒澤正夫<sup>1</sup>・大熊茂雄<sup>1</sup>

Masao Komazawa<sup>1</sup> and Shigeo Okuma<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 地質情報研究部門 (AIST, Geological Survey of Japan, Institute of Geology and Geoinformation)

**Abstract:** A new gravity map of Northern Noto Peninsula has been published. Compiled gravity data within the map area are 8,516 stations including newly added 86 gravity stations of seafloor. A seafloor gravity survey was carried out from September to October in 2008 along offshore of the northern Noto peninsula in order to understand the shallow and regional underground structure. The measurement points were arranged within 5 km offshore at every 2 km interval and the number of measurement points became 86 points. The characteristics of Bouguer anomalies are 1) gravity lows from ENE to WSW are located several km offshore with steep gradients structure along the coastline and 2) Bouguer anomalies increase in the side of land. Low Bouguer anomalies are found out in the Wajima bay, showing a graben structure there.

**Keywords:** sea floor gravity survey, Noto peninsula, Bouguer anomalies, graben structure

#### 要 旨

本重力図は、船上重力データと陸上重力データのほかデータの空白域で海底重力調査を行い、計 8,516 点の重力データを編集して作成した。海底重力調査は、能登半島北部沖の浅部地下構造を広域的に把握するため 2008 年 9 月より 1 ヶ月かけて行った。海底重力の測定点はほぼ 2 km 間隔に沖合 5 km までに配置され、総測点数は 86 点となった。調査域における特徴的なブーゲー異常として、陸側の高重力異常から海岸に沿って急勾配構造が存在し、沖合数 km のところにも東北東 - 西南西方向の帯状の低重力異常が存在することが挙げられる。更に、海底重力調査の成果として、船上重力では緩やかな勾配構造と見られたものが対象物に近づいた測定ができたことと測定精度が向上したことにより、急勾配構造であることが明らかになった。輪島湾にも低重力異常が見出され陥没状の構造を持つことも判った。

#### 1. はじめに

本重力図は、2007 年 3 月 25 日に発生したマグニチュード 6.9 の 2007 年能登半島地震の震源域周辺における浅部地下構造を広域的に把握することを目的として作成したものである。2009 年に実施した海底重力調査は能登半島北部の海陸接合域の重力データの空白域を把握するためのものである。また、海底重力測定は、船上重力測定に比べ測定精度が格段に良く重力図の編集においてフィルター処理など特別な処理の必要がなく得られる重力異常も高精度で、

最近でも大阪湾 (駒澤ほか, 1998) や播磨灘 (上嶋ほか, 2006) で海底重力調査が行われた。測定には、観測船に搭載した海底重力計をウインチ操作で海底に着地させ、静止状態で重力を測定する方法である。測定点は、約 2 km の測定点間隔で沖合 5 km までに配置され、総計 86 点の重力測定がなされた。現地調査は、荒天待機を含め 2008 年 9 月 30 日より 10 月 20 日にかけて行われた。

当該地域での陸上重力調査によれば、海岸線に沿うようなコンターパターンが卓越し、船上重力データと編集すると沖合数 km のところに重力勾配の最も大きい構造があることが判るが、船上重力調査のため位置や勾配の大きさなどの詳細な重力異常は不明瞭となっている。今回の調査は、かかる背景の基でより高精度の測定が可能である海底重力計により鮮明な構造把握を目指して実施されたものである。

#### 2. 編集地域と編集データ

編集範囲は、北緯 37°5'~37°40', 東経 136°25'~137°30' で能登半島北部や七ツ島が含まれる。海底重力の調査範囲は、能登半島沖の海岸線に沿った約 60 km×沖合約 5 km (約 300 km<sup>2</sup>) の海域部分で、海底重力計を用いて重力調査を実施した。計画段階では分からなかった港湾区域 (輪島湾等) や魚網が常設されたところなど測定作業が難しい区域は、調査実施時に調査対象から外し、測定位置を 1 km 程度移した。

測定点分布図を陸域データ、船上重力データとと

もに第1図に示す。海底重力の測定点は、約2 kmの測点間隔を計画配置したが、測定時の波高、水深、海底の地質、漁網等との状況を見て、実際の測定は計画地点に対し適宜変更している測点もある。測点配置に偏りがある訳でないので、数100 m測点をずらしても、ブーゲー異常図を描くのには問題はないと考えられる。海域の測定点数は86点となった。陸上重力データは624点で、その内訳は、産業技術総合研究所地質調査総合センター(2004)の既存測定81点、地質調査総合センターの2006年以降の新規測定152点、新エネルギー・産業技術総合開発機構(2004)の338点、国土地理院の53点である。海域は地質調査所白嶺丸GH882及びGH884の調査航海により取得された7,806点の船上重力データである。

### 3. 調査の方法と観測精度

海底重力測定は、東京大学地震研究所で所有する海底重力計を使用した。使用した海底重力計は、センサー部にScintrex社製のCG-3M/SBを利用し、更に、システム制御部やデータ収録部を加えて耐圧容器に収納されたものである(藤本ほか, 1998)。本システムは海中に投入後は全てオフラインでデータ収録できるので船上から制御しながら測定せねばならないLaCoste & Romberg社製の海底重力計(HG-22)システムに比べ簡便で、ウインチやケーブルもはるかに小型で済む特長がある。なお、本システムで上嶋ほか(2006)が、播磨灘で調査を行い精緻な重力異常を得ている。

実際の測定は、海底重力システムを8トン級の調査船(第三大栄丸)に搭載し、測定点においてウインチ操作で重力計を海底に着底させ、5分程度海底に静止状態で設置し自動収録する方法である。測定の精度は、陸上重力計と同様に重力計が如何に水平に保持されるかにかかっているが、本システムでは耐圧容器内にある自動姿勢制御機構により水平が保持される。精度は、陸上用重力計と同じで、約0.01 mGalである。なお、海底重力計は、調査に先だって能登半島の陸上域に設定した検定路線で器械定数のチェックを実施した結果"0.999395"となり、系統的誤差が存在することが判った。しかし、その誤差は100 mgalの重力差でも0.06 mgal程と微細であるが正確を期すため器械定数の補正を行った。

調査船の基地港として調査域西部の輪島市門前町鹿磯港と東部の珠洲市高屋町高屋港の2ヶ所を用いた。それら2基地の岸壁には閉塞測定のための重力基準点を設けた。各点の絶対重力値(日本重力基準網1975に準拠)はScintrex社製のCG-3M陸上重力計2台を用いて決定した。また、各測点への調査船の誘導と測定地点の位置測量は、DGPS航法システムで行った。DGPS航法システムは、位置精度を高

めることのほか、海底重力計を海底に設置している間、調査船が定点に留まらず重力計を牽引してしまう事態を避けるためである。位置精度はウインチの数度の傾斜などを考慮しても約0.002' (実長約4 m)以内は確保されている。海底の重力測点の水深値は、音響測深機(千本電気PDR-1300)で得られた水深値に潮高補正を施して0.05 m以内の精度で決定した。

### 4. 測定環境

本調査海域における水深は、西部に位置する門前町の沖合4 km程度で100 mを越すが、あとは、沖合5 kmでも100 m未満で海底重力の測定時間は10分程度に収まっている。調査域東部の飯田湾は沖合6 kmでも水深は50 m程度で海底重力測定は容易なところである。珠洲岬(緑剛岬)から北東方向には水深50 m未満の浅瀬が伸びているが、堆積物が殆どなく岩石が露出しており海底重力計の設置が困難なため海底重力の測点計画から除外した。

なお、海底重力の測定は、当初、水深50 m以浅に限って計画したが、結果として、測定地点における水深値は11.7~86.7 mであった。

### 5. 重力データの処理手法及びブーゲー異常値の算出法

ブーゲー異常図を作成するに当たり、陸域も含めて統一した手法によって各種補正を行い、重力データを編集した。地形補正に関しては、陸域・海域とも地球の曲率による地形の沈み込みによる球面効果を考慮した仮想扇形の集合体で近似する方法で実施した(駒澤, 1988)。地形補正に用いた標高(水深)データについては、陸域は国土地理院作成の50 mメッシュ(<http://www.gsi.go.jp/MAP/CD-ROM/cdrom.htm#10>)を用い、海域については、(財)日本水路協会による「海底地形デジタルデータ M7000 シリーズ」(<http://www.jha.or.jp/jp/shop/products/btdd/index.html>)の等水深線データと日本海洋情報センターによる約500 mにメッシュ化されたJ-EGG500([http://www.jodc.go.jp/data\\_set/jodc/jegg\\_intro\\_j.html](http://www.jodc.go.jp/data_set/jodc/jegg_intro_j.html))を元データ(ランダムデータとして扱う)として地形補正に使用するDEMのメッシュ構成に合わせてメッシュ化した。地形補正用DEMのメッシュ構成は、極近傍及び近傍補正用の最小メッシュが約200 m、中間用が約800 m、遠方用が約3200 mである。また、ブーゲー補正については、陸域と同じように海水準に一致する均質地球モデルからの残差密度がブーゲー異常に反映するよう海水を仮定密度の物質で置き換える操作をした。補正式については、無限平板ではなく地形補正と同じ範囲の有限の球殻(球帽)による方法によった。測定重力値は、日本重力基準網1996(JGSN96)に準拠させ、地球規模の広域トレンド除去(緯度補正)には正規重力式による値(測地基準系1985)を用いた。なお、これらの処理にはフリー

エア補正も含まれているが、それは厳密にはポテンシャル論的なりダクションでないためブーゲー異常値を海水準での値と考えるのは誤りで、あくまで海底(陸域については地表面)の測定点での値と考えるべきものである。

以上をまとめるとブーゲー異常は、

$$\Delta g_0'' = g + T(\rho) + C_A \quad (g\text{-term})$$

$$- [\gamma - \beta h + 4\pi G \rho h H(h)] \quad (\gamma\text{-term})$$

ただし、

$$H(h) = \begin{cases} 1 & (h < 0) \\ 0 & (h \geq 0) \end{cases}$$

地殻の密度が  $\rho$ 、水の密度が  $\rho_w$  の陸域と海域の地形を合わせた全地形補正值  $T(\rho)$  は、

$$T(\rho) = \rho \cdot T_L + (\rho - \rho_w) \cdot T_w = \rho \cdot T_c - \rho_w \cdot T_w$$

となる。但し、 $T_c$  (単位密度換算) は、測定面と地殻上面に挟まれた地形補正值、 $T_L$  (単位密度換算) は、測定面と地殻上面もしくは水面で挟まれた部分の地形補正值、 $T_w$  (単位密度換算) は、水域部分による地形補正值となる(駒澤, 1989)。また、球面ブーゲー補正を実施したことにより球殻項を導入したことが従来と違う点となっている。

## 6. ブーゲー異常

海域の調査エリアの海底は岩石の露出が見られるところが殆どで陸域の表層の平均的な密度と考えられる  $2.4 \text{ g/cm}^3$  を仮定密度としたブーゲー異常図をカラーの段彩表示として本図を作成した。また、地表の地質との対応がよく判るように上方接続  $2 \text{ km}$  を広域トレンドとして除去した残差重力図を示す(第2図)。

ブーゲー異常の特徴を概略的に以下にのべる。海域については、水深が深くないので仮定密度を変えても見た目にはコンターのパターンの違いはあまりないが、沖合の船上重力データを編集すると海底地形とは異なる構造を呈していることが判る。一方、陸側は基盤の露出が見られるところを中心に仮定密度が  $2.4 \text{ g/cm}^3$  程度でコンターのパターンが滑らかになることが判った。

能登半島北部沿岸域から沖合にかけて支配的なブーゲー異常は、陸の海岸域で  $50 \sim 70 \text{ mgal}$  程度のブーゲー異常が海側に向かって急激に減少し沖合  $3 \text{ km}$  程のところから東北東から西南西に伸びた  $30 \text{ mgal}$  程度の帯状の低重力異常帯である。その低重力帯は地形的には水深を徐々に減ずる肩部にあたり地形とは対応していない。なお、水深が  $100 \text{ m}$  を超す最深部が七ツ島の南方約  $6 \text{ km}$  のところから東北東から西南西に舟状に伸びているがブーゲー異常は極小値を示さず、七ツ島に向かってブーゲー異常が増加

している。輪島湾と飯田湾については局所的な低重力異常を呈しており、陥没構造が想定でき地形と調和的であることが判った。残差重力図(第2図)を見ると能登半島北岸  $2 \sim 4 \text{ km}$  の海岸線に沿うように極小値の帯が伸び、幅  $5 \text{ km}$  程の陥没構造を呈していることが判る。

ブーゲー異常図の描画に用いたメッシュデータはアスキーコードで書かれ、ファイル名は "grid\_bouguer24.dat" とした。ひとつの格子点が各1行に相当し、グリッド番号、緯度と経度が度表示、重力異常値(ブーゲー異常値)がミリガル表示で順次書かれ、最後にリターンキーが添付してある。格子の大きさは、UTM座標の  $500 \text{ m}$  である。データの並びは、西から東、南から北になっている。最初の格子点データは、図面の南西端になり、北緯  $37.06813$  度、東経  $137.45489$  度に相当する。格子点数は、東西方向が  $391$ 、南北方向が  $269$  で、計  $105179 (=391 \times 269)$  になる。格子点の値が補間計算できなかった欠損値はない。また、海底重力調査と2006年以降の陸上調査の測定データ(舳倉島など編集範囲外も含む)の計  $277$  点のデータをファイル名 "original\_gravity.dat" とした。なお、測定データのフォーマットは、日本重力CD-ROM(駒澤ほか, 2004)の“重力データベース“に従った。

## 7. おわりに

最近では、海域での重力測定は船上重力計で実施されるケースが殆どであるが、微細な重力変化を抽出するためにはエトベス補正など解決しなければならない問題がある。つまり、オリジナルデータにノイズ除去のためのフィルター操作をしてスムージングをかけて重力図を作成することになる。実際には、図面が綺麗に見えても精度があるかどうかは、別の問題である。それに引き替え今回実施したように海底に着底させる海底重力計による測定は、陸上の重力測定と同じ精度が得られ、フィルター処理もないので測定値自体に精度の問題が生じない。そのため微細な重力異常の検出も可能で、実際に陸域データとの接合も問題なく行うことができる。

ブーゲー異常から、能登半島北部の沖合数  $\text{km}$  のところから従来の船上重力調査からは不鮮明であった急勾配の断層状構造が明瞭に抽出され、更にその北側には東北東-西南西方向の帯状の低重力異常が存在することが判った。輪島湾にも低重力異常が見出され陥没状の構造を持つことも判った。

**謝辞** 本調査は、海上保安庁第九管区七尾海上保安部、輪島漁業協同組合、珠洲漁業協同組合等、多数の関係機関の協力により実施することができた。以上、上記の方々に謝意を表します。

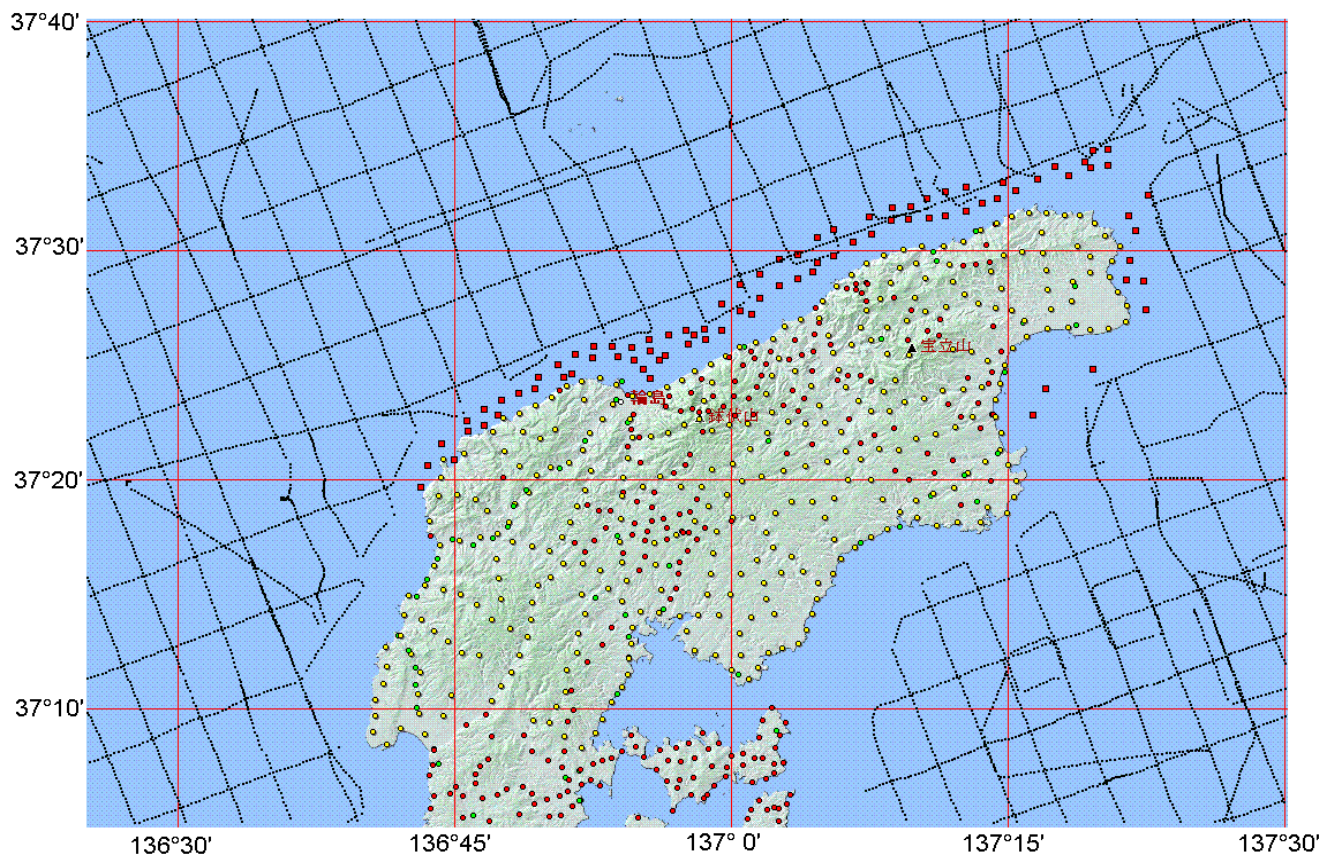


文 献

- 藤本博巳・押田 淳・古田俊夫・金沢敏彦 (1998) 海底重力計の開発, 海洋調査技術, 10, 1, 25-38.
- 上嶋正人・石原丈実・小泉金一郎・島 伸和・押田 淳・藤本博巳・金沢敏彦 (2006) 瀬戸内海播磨灘での海底重力測定, 海洋調査技術, 18, 1, 17-27.
- 駒澤正夫 (1988) 仮想扇形地形による重力地形補正法, 測地学会誌, 34, 11-23.
- 駒澤正夫 (1989) 海水準下のブーゲー異常の考え方, 測地学会誌, 35, 349-351.

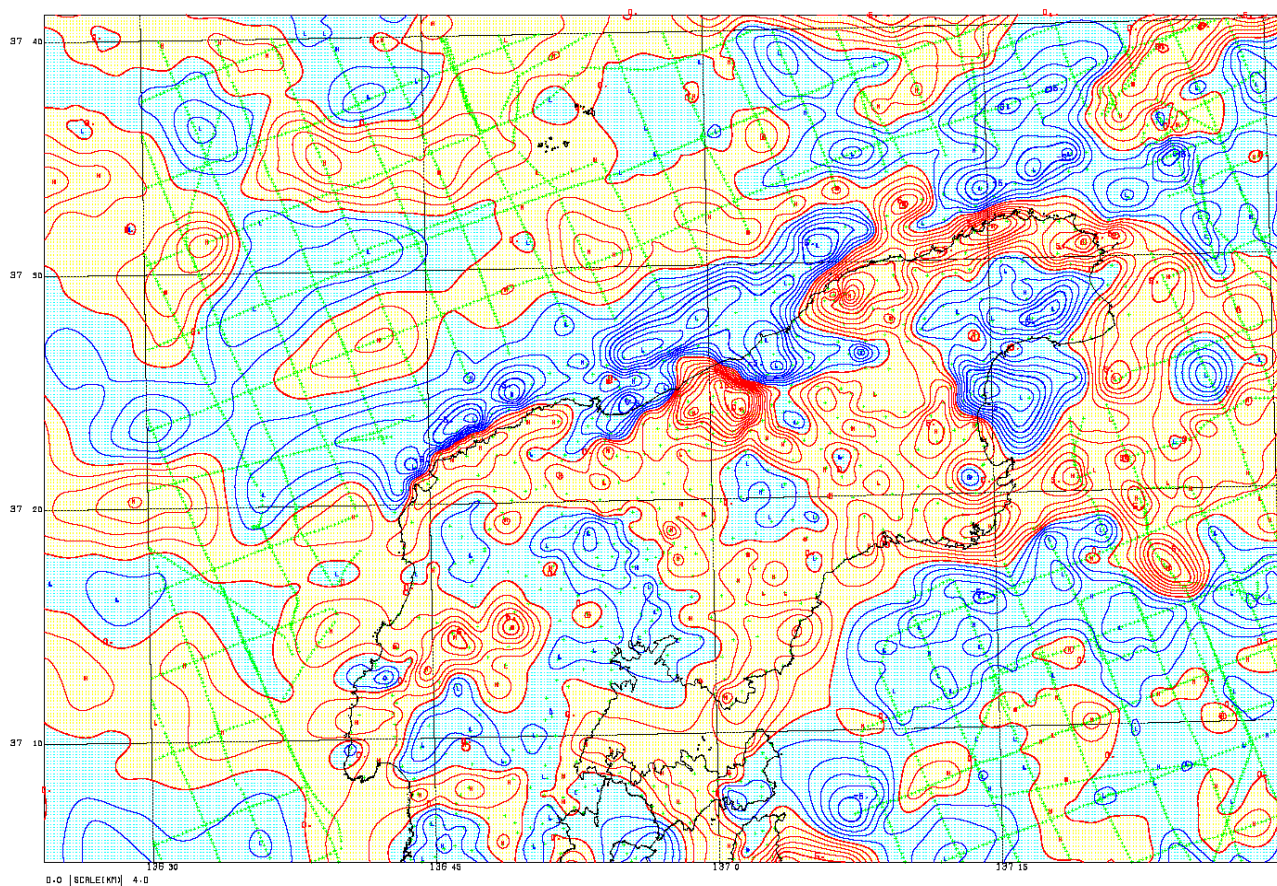
- 駒澤正夫・大田陽一・渋谷昭栄・熊井 基・村上 稔 (2000) 大阪湾の海底重力調査とその構造, 物理探査, 49, 459-473.
- 駒澤正夫・広島俊男・石原丈実・村田泰章・山崎俊嗣・上嶋正人・牧野雅彦・森尻理恵・志知龍一・岸本清行・木川栄一・三品正明 (2004) 新エネルギー・産業技術総合開発機構重力測定値データファイル, 日本重力 CD-ROM, 数値地質図 P-2, 地質調査総合センター.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2004) 新エネルギー・産業技術総合開発機構重力測定値データファイル, 日本重力 CD-ROM, 数値地質図 P-2, 地質調査総合センター.

(受付:2009年11月13日, 受理:2009年11月30日)



第1図. 測定点分布図. 赤四角: 海底重力測定点, 赤丸: 地質調査総合センター陸上重力測定点, 緑丸: 国土地理院陸上重力測定点, 黄丸: 新エネルギー・産業技術総合開発機構陸上重力測定点, 黒ドット: 船上重力測定点.  
 Fig. 1. Distribution of gravity stations. Red rectangles: seafloor observation points, Red circles: GSJ land gravity survey, Green circles: GSI land gravity survey, Yellow circles: NEDO land gravity survey, Black dots: ship-borne gravity survey.

能登半島北部域 20 万分の 1 重力図 (ブーゲー異常)



第 2 図. 能登半島北部の残差重力. 上方接続 2 km を広域トレンドとして除去し, コンター間隔は 1 mgal で表示した.

Fig. 2. Residuals in and around northern Noto peninsula. Regional trend is removed with upward continuation of 2 km, and contoured at 1 mGal interval.