

駿河湾沿岸域における海底重力調査

Ocean bottom gravity survey in the coastal area of the Suruga Bay, central Japan

大熊茂雄^{1*}・駒澤正夫¹・宮川歩夢¹・押田 淳²

Shigeo Okuma^{1*}, Masao Komazawa¹, Ayumu Miyakawa¹ and Atsushi Oshida²

Abstract: To better understand the shallow underground structure of the coastal area of the Suruga Bay, an ocean bottom gravity survey was conducted from late September to early October, 2013. In advance of the survey, the compilation of the existing gravity data was performed. The measurement points were arranged at an interval of 0.5 - 2km and the total number of measurement points amounted to 50. Unnatural local anomalies by error data are not found in the survey area, showing that the accuracy of the ocean bottom gravity data is acceptable. These newly measured ocean bottom gravity data were compiled with the existing gravity data. In a Bouguer anomaly map with an assumed density of 2.3 g/cm³, a gravity low elongated in the east-west direction lies offshore from Yui to Kambara areas. Its western and eastern edges seem to correspond to the southern extensions of the Iriyama Fault and Iriyamase Fault, respectively. In the Uchiura Bay, a gravity low is also distributed implying a basement low below the shelf.

Keywords: ocean bottom gravity survey, Bouguer anomalies, Suruga Bay, Yui, Fuji city, active fault, Fujikawa-kako fault system

要旨

駿河湾沿岸域で浅部地下構造を広域的に把握するため 2013 年 9 月～10 月に海底重力調査を実施した。静岡市清水区由比沖から富士市沖にかけての海域と沼津市沖の内浦湾において 500m～2km の測定間隔で海底重力計を用いた重力調査を実施し、総測点数は 50 点である。既存の陸上及び船上重力データと新規取得の海底重力データを編集し、海陸を接続したブーゲー異常図を作成した。この結果、由比沖から富士川河口沖にかけて東西方向の低重力異常帯が分布し、その東西両端部が既知の陸域断層の南方延長に位置していることがわかった。また、内浦湾でも局所的な低重力異常が分布することがわかった。

1. はじめに

調査地の駿河湾周辺では、フィリピン海プレートの

北進に伴う伊豆－小笠原弧の本州弧への衝突があり、これら大構造に対応する広域的な重力異常が認められている。すなわち、フィリピン海プレート北端部の伊豆半島は顕著な高重力異常域である。一方、富士川沿いでは幅 10km 程度の負の重力異常域となっており、糸魚川－静岡構造線の東側に想定される陥没構造ないし沈降盆を表している(杉山ほか, 2010)。また、海域では駿河トラフが南方より連続し、プレート境界逆断層として富士川河口断層帯に連続すると推定されている(杉山ほか, 2010)。

重力異常は、地下の密度構造を反映し、その分布形状や急変部の位置が断層分布と関連を持つ場合が多いことから、地下の断層構造を推定する有力な調査手法となっている。また、重力データの編集により、浅部地下構造も広域的に把握することができる。そこで、今回、このような海陸に渡る断層の連続性や構造を明らかにするため、当該地域の重力データ未測定海域で海底重力測定を実施した。

* Correspondence

¹ 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, Institute of Geology and Geoinformation)

² 川崎地質株式会社 (Kawasaki Geological Engineering Co., Ltd.)

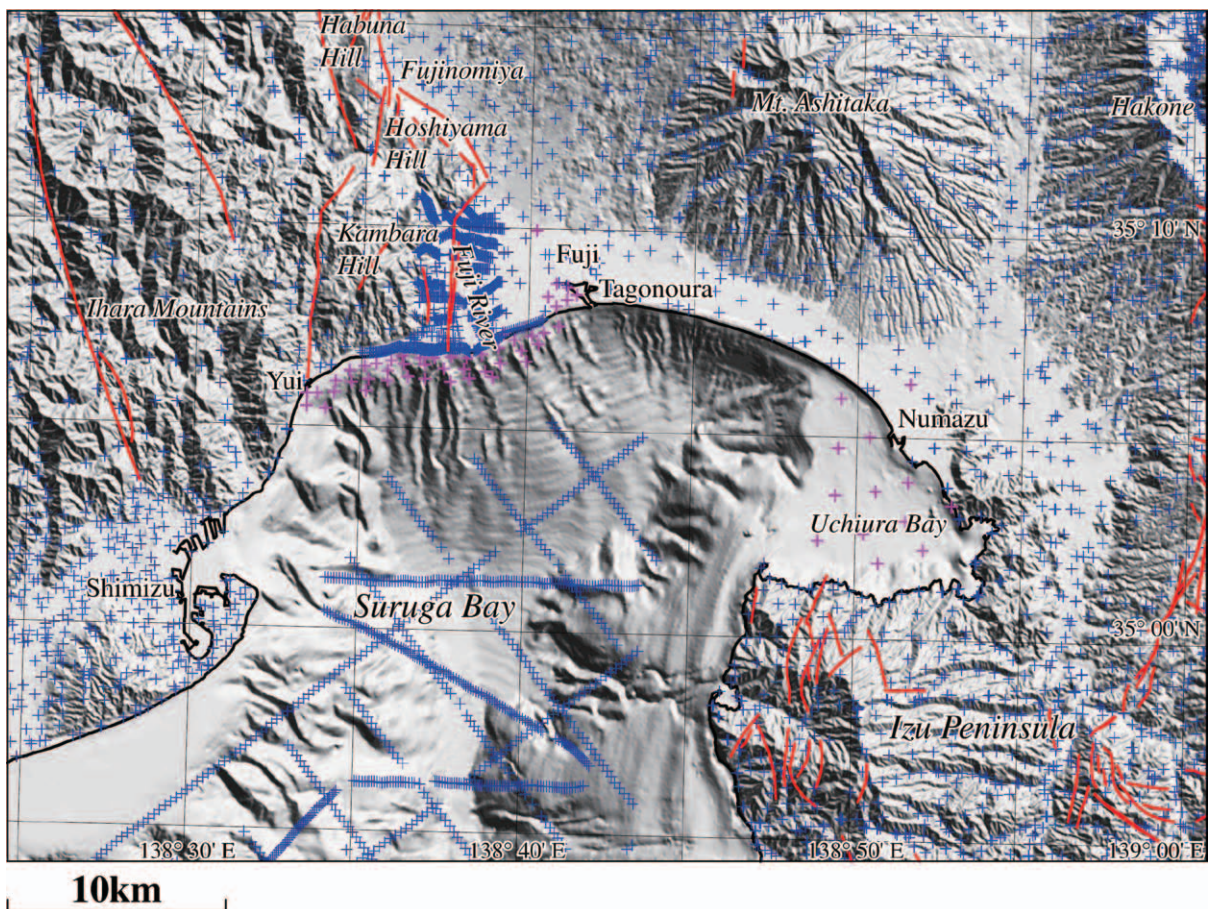
2. 調査地域と編集データ

駿河湾は、沖合に向かって急激に水深を増し、また地形起伏も激しいことから、作業効率と安全な測定を考慮すると海底重力の調査地としては適していない。そこで、水深が大凡 200m 以浅でかつ地質的に興味深い地域を優先して測点箇所を選定した。具体的な調査範囲は、静岡県清水区由比沖から富士市沖にかけてと沼津市沖の海岸線に沿った海域部分（内浦湾）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魚網や往来船舶および海底地形などの状況により最小限（500m 程度）の位置の変更を行った測定点もあった。特に由比沖から富士市沖の海域では急峻な地形が多く、海底重力計の傾斜補正可能角度を超える地点が数点あった。その場合には地形調査を行い、近傍で測定可能な場所を再選定し測定を実施した。調査範囲の水深は概ね 200m 以浅であるが、200m を超す測点もある。ちなみに、最深値は測点 39 の 264.7m であった。

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、計画地点に対し適宜変更している測点もあるが、測点配置に偏りがある訳でないので、数 100m 測点をずらしても、ブーゲー異常図を描くには問題はないと考えられる。海底の測定点数は 50 点となった。調査地域に含まれる陸域沿岸部についても同時期に陸上重力計を用いて 16 点の重力測定を実施し、重力図編集の精度を高めた。

3. 海底地形データ

本調査海域における水深は、特に由比沖から富士市沖で大きく、海底地形は急峻かつ起伏に富むため、海底重力計の設置や揚収に時間がかかることから作業効率が悪くことが想定されたため、通常の調査よりも少ない測点（50 点）で調査を行った。海底重力データの補正で留意せねばならないのは、測点周辺で精密な地形データによる地形補正が必要であることである。



第 1 図 測定点分布図。背景の陰影図は地形。50m メッシュ DEM（国土地理院，1997）との底地形デジタルデータ（日本海洋データセンター，2012）を使用。青の十字：既存の重力測点。ピンクの十字：海底重力測点および新規の陸上測点。赤の実線：活断層分布（活断層研究会編，1991）。

Fig. 1 Distribution of gravity stations. Shaded terrain relief is superimposed. The 50m mesh DEM (GSI, 1997) and Bathymetry Digital Data (JODC, 2012) were used. Blue crosses: Pre-existing gravity stations. Pink crosses: Ocean bottom gravity stations and newly land gravity stations. Red solid lines show active faults after the Research Group for Active Faults of Japan (1991).

今回、日本海洋データセンターによる海底地形デジタルデータ M7000 シリーズのうち当該地域である関東南部 M7001 を基礎データとして用い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。また、この際、沿岸域プロジェクトで新たにナローマルチビーム (EM302) を用いて測定された詳細地形データによる 10m メッシュ DEM (新井・佐藤, 2014) も提供を受け併せて取り込んで編集している。本調査域の沖合で海底地形が急激に深くなるため地形補正の精度を確保するため沖合域も含め極近傍・近傍地形補正用の 200m メッシュの DEM を作成した。なお、重力の測定は、当初、大凡水深 200m 以浅に限って計画したが、水深値は 12.21 ~ 264.7m となった。

4. 調査の方法

今回の調査の仕様を第 1 表に示す。海域での重力測定は、産業技術総合研究所で所有する海底重力計を使用した (平成 21 年度製作) (大熊ほか, 2010)。使用した海底重力計は、センサー部に Scintrex 社製の CG-5 にハードウェアとソフトウェアの一部をカスタマイズを施したものを利用し、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。測定システムの概要を第 2 図に、測定に使用した調査船を写真 1 に、また調査の様子を写真 2

第 1 表 駿河湾沿岸域海底重力調査の仕様

Table 1 Outline of the ocean bottom gravity survey in the Suruga Bay area, central Japan

Survey period	September 21 – October 5, 2013
Survey area	Refer to Fig.1
Survey vessel	Umikaze (No.295-46435), 19 ton, 17 m (Yamaguchi Marine Co., Ltd.)
Station number	50 points
Navigation / Station location recovery	DGPS
Base ports	Shizu-ura Port (September 21–25), Numazu, Shizuoka Pref. Yui Port (September 26 – October 5), Shizuoka, Shizuoka Pref.
Reference absolute gravity station	Shizuoka GS (9G1-SHIZUOK, 34°58'34"N, 138°24'13"E, 979741.63 mGal) (https://vldb.gsi.go.jp/cgi/grav_sel.pl/map_select)
Survey instruments	<u>At sea</u> Ocean bottom gravimeter: OBG-2 (Sensor: Scintrex CG-5 with custom software/hardware (No. 081240453), Canada) DGPS: Crescent R100, Hemisphere Inc., USA Navigation System: Navigation Software, Marimex Japan, Gyro: GyroTrac, KVH Industries, Inc., USA Echo sounder: PDR-1300, Senbon Denki, PDR-104, Senbon Denki, CVS-1410, Koden Electronics Co., Ltd. Pressure sensor: miniIPS, Valeport Ltd., UK CTD (Conductivity Temperature Depth profiler): MIDAS CTD, Valeport Ltd., UK <u>On ground</u> Land gravimeter: Scintrex CG-5 (No. 300900050), Canada
Contractor	Kawasaki Geological Engineering Co., Ltd.

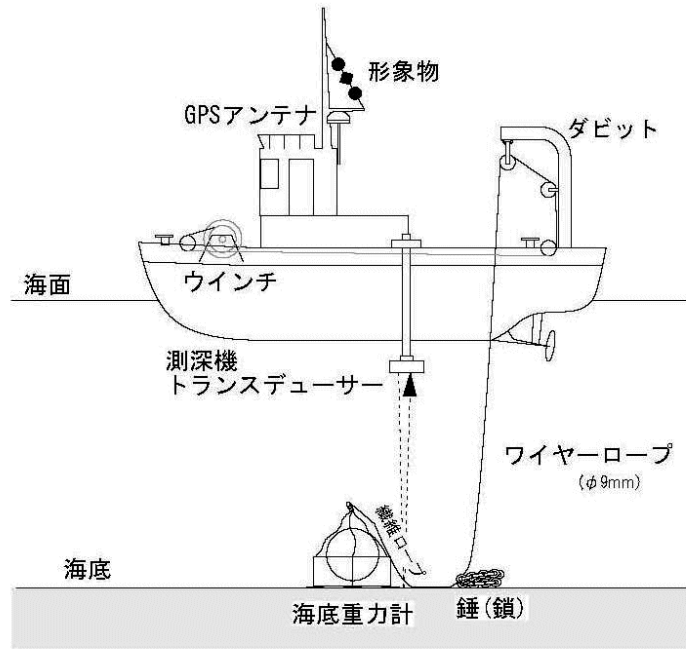
に示す。本システムは、海中に投入後は全てオフラインでデータを収録できるので船上から制御しながら測定せねばならない LaCoste & Romberg 社製の海底重力計 (HG-22) システムに比べ簡便で、ウインチやケーブルも小型で済む特徴がある。なお、日本国内で使用可能な海底重力計としては東京大学地震研究所所有 (藤本ほか, 1998) のものがあり、平成 20 年度に本研究の一環として実施された能登半島北部沖の海底重力調査に使用された。

測定作業は平成 25 年 9 月 17 日～10 月 7 日 (移動日等も含む) に実施した。このうち、移動、陸上重力測定、艀装および艀装解除を除いた実質的な海底重力調査の期間は 9 月 21 日～10 月 5 日の 15 日間である。内訳は調査実施日が 13 日、荒天待機日が 2 日であり、荒天率は 13.3% であった。調査期間の前半は台風の影響で外洋は時化であったが、外海の影響が少ない内浦湾での調査であったことが幸いした。また、今回使用した調査船 (写真 1) が今までよりもやや大型で安定性が高かったことも、稼働率の向上につながった。

実際の測定は、海底重力システム (写真 2) を 19 トンの調査船 (うみかぜ; 写真 1) 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、約 10 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 (第 2 図)。調査地点までの誘導は、GPS 装置と音響測深器を併用した。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、更に、重力値はレベル補正が施される。精度は、陸上用重力計と同じで、約 0.01mGal である。なお、海底重力計の器械定数チェックの為の測定は、2013 年 9 月 25 日の陸上重力計による岸壁重力基準点測定と同時に実施した。

海底重力測定は、沼津市の静浦港 (9 月 21 日～9 月 25 日) と静岡市の由比港 (9 月 26 日～10 月 5 日) に設置した重力基準点での閉塞測定により行った。基点での重力測定は出港前と帰港後にそれぞれ実施し、閉塞時間は 1 日以内とした。

静浦港と由比港にそれぞれ設置した重力基準点の絶対重力値 (日本重力基準網



第 2 図 海底重力調査の模式図。
Fig. 2 Schematic diagram of the ocean bottom gravity measurement.

1996 に準拠) は、9 月 25 日および 10 月 6 日に実施した静岡地方気象台建屋内に設置されている一等重力点 (静岡 GS) を基点とした閉塞測定により求めた。ただし、2 回目の閉塞測定の基点は静岡地方気象台正門横に設けた静岡 GS の補点を使用した。

10 月 6 日の閉塞基点として使用した一等重力点静岡 GS の補点は 9 月 25 日の閉塞測定の際に設置された点であり、重力値は 1 回の測定のみで決定されている。

なお、基点の重力値を得るには、Scintrex CG-5 (No.300900050) 陸上重力計を用い、検証測定として LaCoste & Romberg 社製 G 型陸上重力計 G-911 を用いた。

海底重力の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にも利用した。位置精度は約 0.002' (実



写真 1 海底重力調査船
Photo 1 Survey vessel, Umikaze, 19 ton, 17 m (Yamaguchi Marine Co., Ltd.).



写真2 海底重力調査風景

Photo 2 Ocean bottom gravity measurements.

長約 4m) 以内である。

今回の調査海域は水深が深く、海底地形も複雑で急傾斜な場所が多いことから、音響測深データも測定したが、基本的に高精度の圧力計により水深値を決定した。ただし、圧力計データが得られなかった No.46 の水深は音響測深データ（喫水補正済み）を使用した。本調査で使用した音響測深機は PDR-1300（千本電気（株）製、発振周波数 200kHz、指向角 6°）と PDR-104（発振周波数 29kHz、指向角 13°）である。さらに補助として調査船装備の魚群探知機（（株）光電製作所製 CVS-1410、発振周波数 50kHz（指向角 58°×20°）/200kHz（指向角 17°×6°））も使用した。PDR-1300 と CVS-1410 は測深値をデジタル収録した。PDR-104 は記録紙出力から

深度の読み取りを行っている。なお、CTD(Conductivity Temperature Depth Profiler) による測定（写真 3）を 1 日に 1 回実施し、圧力計による測定値からの水深値への圧力補正を行った。また、同様に CTD の測定から音響測深機による水深データの音波補正を行っている。

測点の音響測深機による深度は調査船が測点の直上にいる海底重力計着底時の値とし、圧力計による深度は計測値が落ち着く離底直前の値を採用した。これに潮位補正を施して 0.05m 以内の精度で決定した。潮位補正用のデータは気象庁内浦験潮所と清水港験潮所の 1 時間毎の実測潮位データを気象庁 HP から入手し、1 分値をスプライン補間により求めた。なお、潮位数値データは験潮所固有の観測基準面からの高さで提供されるため、潮位データに観測基準面の標高を加えて東京湾平均水面（T.P.）基準（標高）の潮位に変換している。

5. 重力データの処理手法および編集

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

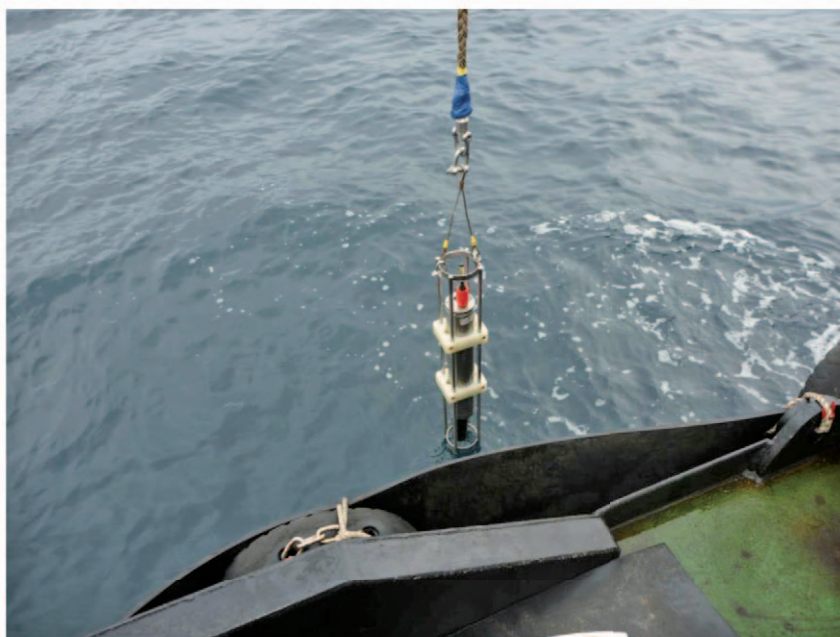


写真3 CTD 測定風景

Photo 3 CTD (Conductivity Temperature Depth profiler) measurements.
CTD: MIDAS CTD, Valeport Ltd., UK.

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 50m メッシュを用い、海域については、日本海洋データセンターによる海底地形デジタルデータ M7000 シリーズのうち当該地域である関東南部 M7001 を基礎データとして用い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。また、この際、沿岸域プロジェクトで新たにナローマルチビーム (EM302) を用いて測定された詳細地形データによる 10m メッシュ DEM (荒井・佐藤, 2014) も提供を受け併せて取り込んで編集している。

本調査域の海底地形は由比沖から富士市沖を中心として起伏に富むため、地形補正の精度を確保するため極近傍・近傍地形補正用の 200m メッシュの DEM を作成した。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行った。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 1980) 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オ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 $\Delta g_0''$ は、

$$\Delta g_0'' = g + \rho B_s + T(\rho) + C_A - (\gamma - \beta h + 4\pi G \rho h H(h))$$

$$\left[\quad \text{g-term} \quad \right] \left[\quad \gamma\text{-term} \quad \right]$$

となる。ただし、 g は測定重力値、 ρ は地殻の密度 (仮定密度)、 B_s は球面ブーゲー補正值、 C_A は大気補正值、 γ は正規重力値、 β は鉛直勾配、 h は標高 (深度の場合は負値) で、 $H(h)$ は、以下とする。

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

水の密度を ρ_w とした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

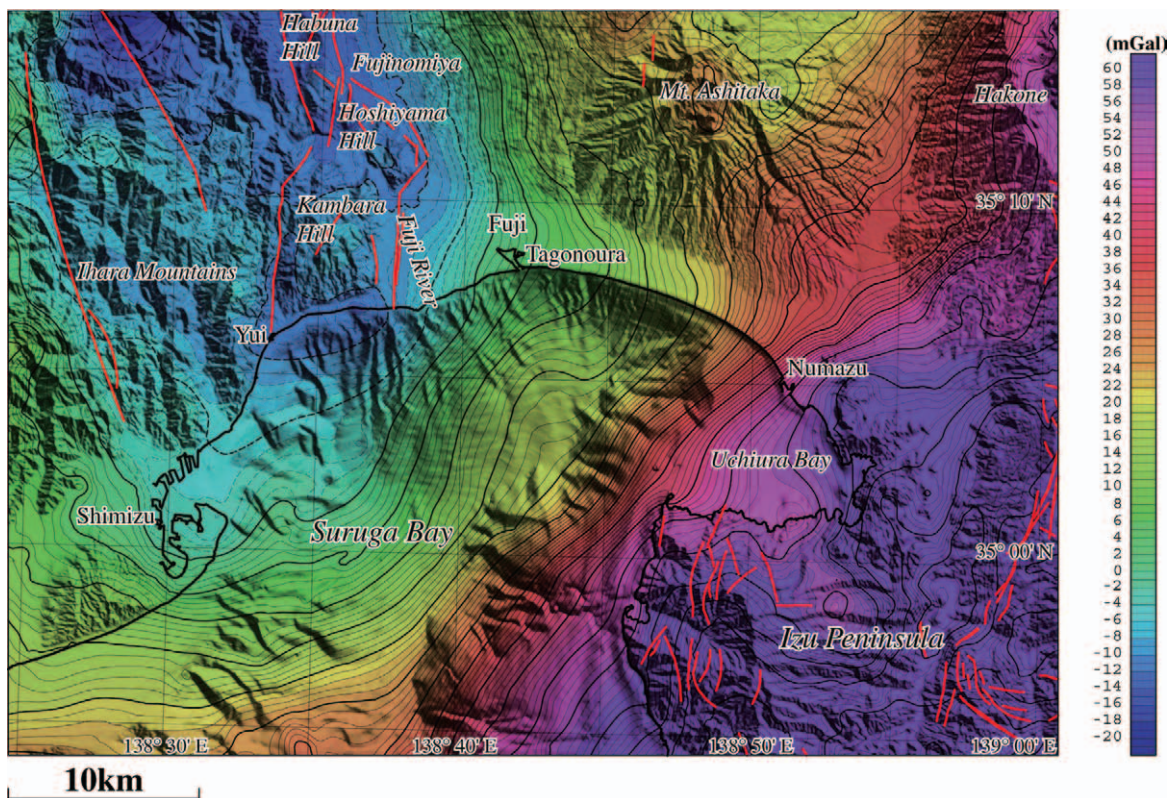
仮定密度を変えて検討を行ったところ、 2.3g/cm^3 の場合に陸域の基盤岩の露出地域で重力異常のコンターパターンが滑らかになることから、陸域の表層の平均的な密度として 2.3g/cm^3 を採用した。この仮定密度に基づきデータを編集して、既存の測点のみから作成したブーゲー異常図 (第 3 図) と、新規に陸域および海底で測定した測点も含めたブーゲー異常図 (第 4 図) を作成した。

両図の比較とともに、ブーゲー異常分布の概略の特徴を述べる。

由比沖から富士川河口沖にかけて、低重力異常帯が海岸線とほぼ平行に分布する (第 3 図, 4)。既存点のみのブーゲー異常図 (第 3 図) では、低重力異常の中心は海岸線付近となるが、海底重力の測点を補うことにより、その中心が沖合約 1km に移動する (第 4 図)。特徴的なのは低重力異常の東西両端部が活断層の海域延長部に対応することである。すなわち東端部は富士川河口断層帯の入山瀬断層、西端部は入山断層の延長部にほぼ相当する。なお、より詳細に見ると当該の低重力異常帯は複数の低重力異常からなっており、それらの境界と善福寺断層などの断層の延長部に対応する可能性があり、今後さらなる検討が必要である。

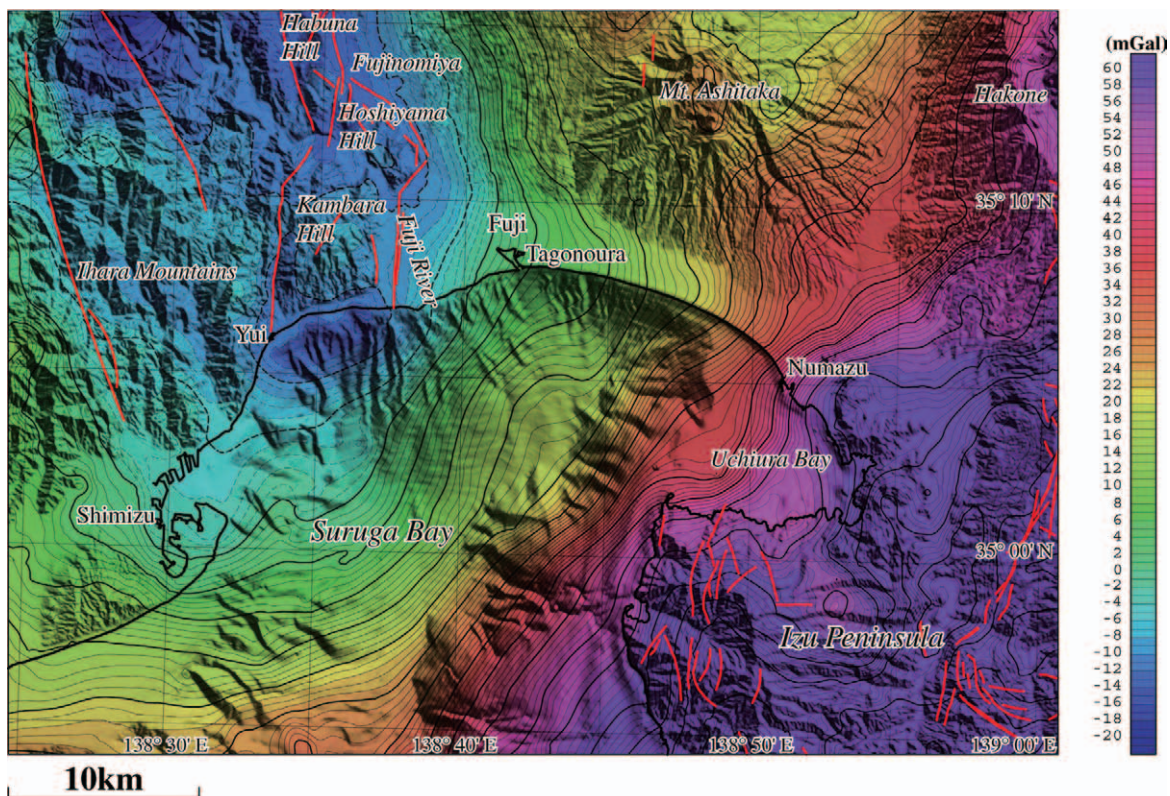
一方、当該地域の陸域 (蒲原丘陵) では、広域の低重力異常のなかで局所的な高重力異常が分布し、付近に露出する新第三紀の火山岩類 (杉山ほか, 2010) の分布に対応すると考えられる。この高重力異常の南端は海岸線付近にあり、その沖合を中心に低重力異常帯が分布することは、当該の火山岩類は海域には連続しない可能性を示唆している。

一方、当該地域では伊豆半島の本州弧への衝突に伴い広域的には南東方向 (伊豆半島側) から北西方向に重力異常が低くなるのが特徴的である。沼津市の沖合



第3図 既存測点による駿河湾沿岸域のブーゲー異常. 仮定密度は 2.3g/cm^3 . コンター間隔は 1mGal . 実線及び破線のコンターは各々正值と負値を示す. 背景の陰影図は地形.

Fig. 3 Bouguer anomalies of the coastal area of the Suruga Bay compiled from the pre-existing data. Assumed density is 2.3g/cm^3 . Contour interval is 1mGal . Solid and broken lines indicate positive and negative values, respectively. Shaded terrain relief is superimposed.



第4図 既存および新規測点による駿河湾沿岸域のブーゲー異常. 仮定密度は 2.3g/cm^3 . コンター間隔は 1mGal . 実線及び破線のコンターは各々正值と負値を示す. 背景の陰影図は地形.

Fig. 4 Bouguer anomalies of the coastal area of the Suruga Bay compiled from the pre-existing and newly observed data. Assumed density is 2.3g/cm^3 . Contour interval is 1mGal . Solid and broken lines indicate positive and negative values, respectively. Shaded terrain relief is superimpose

の伊豆半島に囲まれた海域（内浦湾）でも例外ではなく、沼津市から内浦湾を隔てた伊豆半島の大瀬崎方向に既存点のみのブーゲー異常図(第3図)ではコンターがまっすぐに伸びていたが、新たなブーゲー異常図(第4図)では、海底重力の測点が補われたことにより、より詳細な分布が明らかとなった。すなわち、伊豆半島西浦の海岸線付近の局所的な低重力異常に向けコンターが南東方向に屈曲することが認められ、当該地域の地下構造が既存重力図から推定されているほど単純ではないことを示唆している。

7. まとめ

駿河湾沿岸域（由比沖から富士市沖と内浦湾）で浅部地下構造を広域的に把握するため海底重力調査を50点で実施した。既存の陸上および船上重力データと新規取得の海底重力データとを編集し、海陸を接続したブーゲー異常図を作成した。この結果、由比沖から富士川河口沖にかけて東西方向の低重力異常帯が分布し、その東西両端部が既知の陸域断層の南方延長に位置していることがわかった。より詳細に見ると当該の低重力異常帯は複数の低重力異常からなっており、それらの境界と善福寺断層などの断層の延長部が対応する可能性があり、今後さらなる検討が必要である。

謝辞

地質情報研究部門（現地質分野研究企画室）の荒井晃作氏より、海底重力測定点の設定および重力データの地形補正のため、当プロジェクトでナローマルチビーム（EM302）により新たに測定された詳細地形データによる10mメッシュDEMの提供を受けた。ここに記して感謝申し上げます。

文献

荒井晃作・佐藤智之（2014）駿河湾静岡市及び富士市沖合の地形調査。平成25年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告，産業技術総合研究所地質調査総合センター速報，no.65，29-33。
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。
活断層研究会編（1991）新編日本の活断層 - 分布図

と資料 - . 東京大学出版会，437p。
国土地理院（1997）数値地図50mメッシュ（標高），日本II。
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）海水準下測定 of ブーゲー異常の考え方。測地学会誌，35，349-351。
大熊茂雄・駒澤正夫・押田淳（2010）海底重力計の製作と実海域試験。平成21年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告，産業技術総合研究所地質調査総合センター速報 no.54，95-103。
日本海洋データセンター（2012）海底地形デジタルデータ M7000 シリーズ（アスキーファイル）。M7001 Ver.2.2 関東南部。
杉山雄一・水野清秀・狩野謙一・村松武・松田時彦・石塚治・及川輝樹・高田亮・新井晃作・岡村行信・実松健造・高橋正明・尾山洋一・駒澤正夫（2010）20万分の1地質図幅「静岡及び御前崎」（第2版）。産業技術総合研究所地質調査総合センター。