

相模湾北部沿岸域における海底重力調査

Ocean bottom gravity survey in the coastal zone of the northern Sagami Bay area, central Japan

大熊茂雄^{1*}・駒澤正夫¹・押田 淳²

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

Abstract: To better understand the shallow underground structure of the coastal area of the northern Sagami Bay, an ocean bottom gravity survey was conducted in November, 2014. 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 70. 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 lies over the Oiso Spur and is implied to extend to an onshore gravity low aligned to the Kozu-Matsuda fault. A regional gravity low is dominant offshore south of Hiratsuka and extends to Hiratsuka on land. An E-W trending gravity high is present between Enoshima and Hirashima, corresponding to shore reefs along the coastline. This suggests the western continuation of the geologic structure of the Miura Peninsula.

Keywords: ocean bottom gravity survey, Bouguer anomalies, Sagami Bay, Odawara, Oiso Spur, Miura Peninsula, active fault, Kozu-Matsuda fault

要旨

相模湾北部沿岸域で浅部地下構造を広域的に把握するため 2014 年 11 月に海底重力調査を実施した。神奈川県小田原市沖から藤沢市沖にかけての海域において 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 70 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、大磯海脚付近は低重力異常となり国府津-松田断層沿いの低重力異常と連続する可能性がある。平塚市付近と沖合の低重力異常が連続することが分かった。藤沢市江の島と平塚市平島との間の海域で東西性の高重力異常が分布することが分かり、三浦半島に認められる東西性の地質構造の連続性が示唆される。

1. はじめに

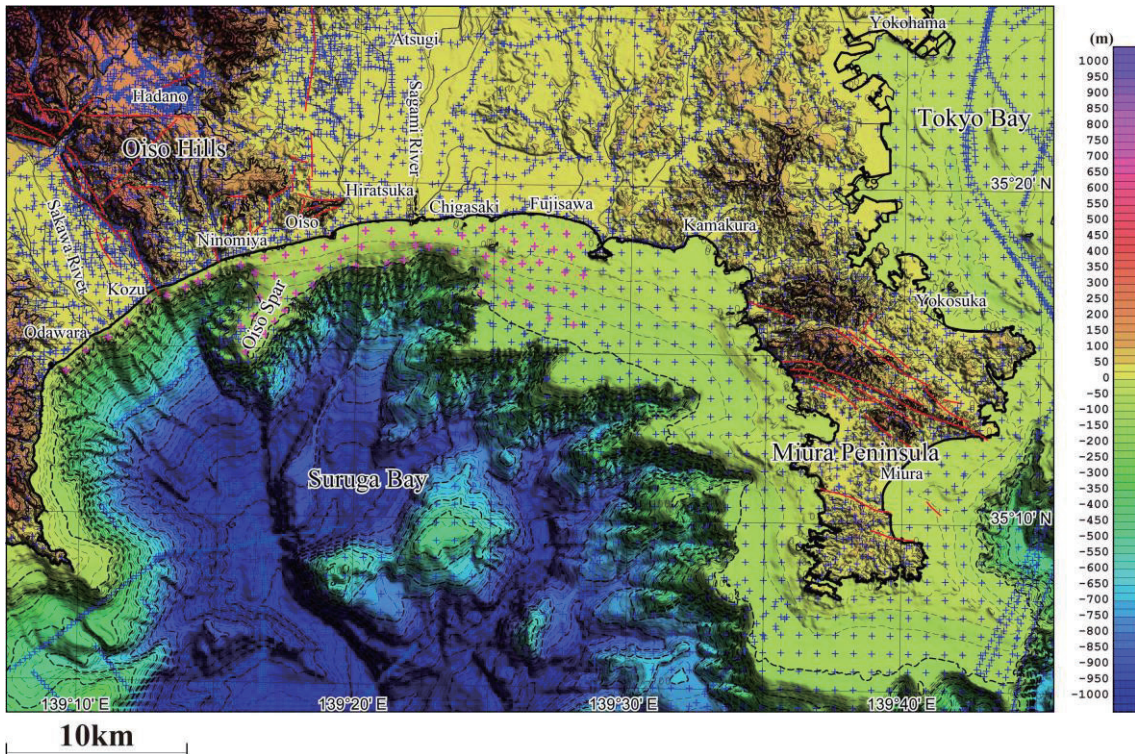
調査地の相模湾周辺では、フィリピン海プレートの北進に伴う伊豆-小笠原弧の本州弧への衝突があり、これら大構造に対応する広域的な重力異常が認められている。すなわち、フィリピン海プレート北端部の伊豆半島は顕著な高重力異常域である。また、古い付加体である丹沢山塊から南東の大磯丘陵に向かって高重力異常が分布する。一方、大磯丘陵の西端付近では、国府津-松田断層に沿って、低重力異常が海岸線付近から内陸に向かって伸びている。相模湾では平塚南方沖約 10km を中心に低重力異常が卓越する。三浦半島では主たる地質構造の方向である西北西-東南東方向に高重力異常が分布し、新生代の付加体である三浦層群（竹内ほか, 2015）の分布と対応する。

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

* 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, Research Institute of Geology and Geoinformation)

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



第 1 図 重力測定点分布図。背景の陰影図は地形。50m メッシュ DEM (国土地理院, 1997) との海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-Topography 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).

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。

2. 調査地域と編集データ

2014 年 11 月に相模湾北部沿岸域の小田原市沖から藤沢市江の島沖の大凡 100m 以浅の海域で、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た。重力調査では、本来調査地域内に満遍なくかつできるだけ均一な間隔の測点を配置するのが望ましい。しかしながら、伊豆半島の付け根付近の小田原市沖から東方の二宮町沖にかけては沖合に向かって急激に水深を増すことから、当該海域では海岸線に平行に一列に測点を配置するのが精一杯であった。また、やや沖合に離れるものの大磯海脚でも測定を行っている。

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。ちなみに、定点測の水深の最深値は 106.82m 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のには問題はないと考えられる。海底の測定点数は 70 点となった。

3. 海底地形データ

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。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。本調査域の沖合で海底地形が急

第1表 相模湾北部沿岸域海底重力調査の仕様

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

Survey period	November 5 – November 18, 2014
Survey area	Refer to Fig.1
Survey vessel	Umikaze (No.295-46435), 19 ton, 17 m (Yamaguchi Marine Co., Ltd.)
Station number	70 points
Navigation / Station location recovery	DGPS
Base ports	Oiso Port, Oiso, Kanagawa Pref.
Reference absolute gravity station	Hakone GS (HKN, 35°14'40"N, 139°03'35"E, 426.9m, 979709.29 mGal) Aburatsubo GS (ABR, 35°09'34"N, 139°36'55"E, 4.7711m, 979774.65 mGal) (http://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, CVS-1410, Kodan 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.

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100m以浅に限って計画したため、水深値は10.94m～106.82mとなった。

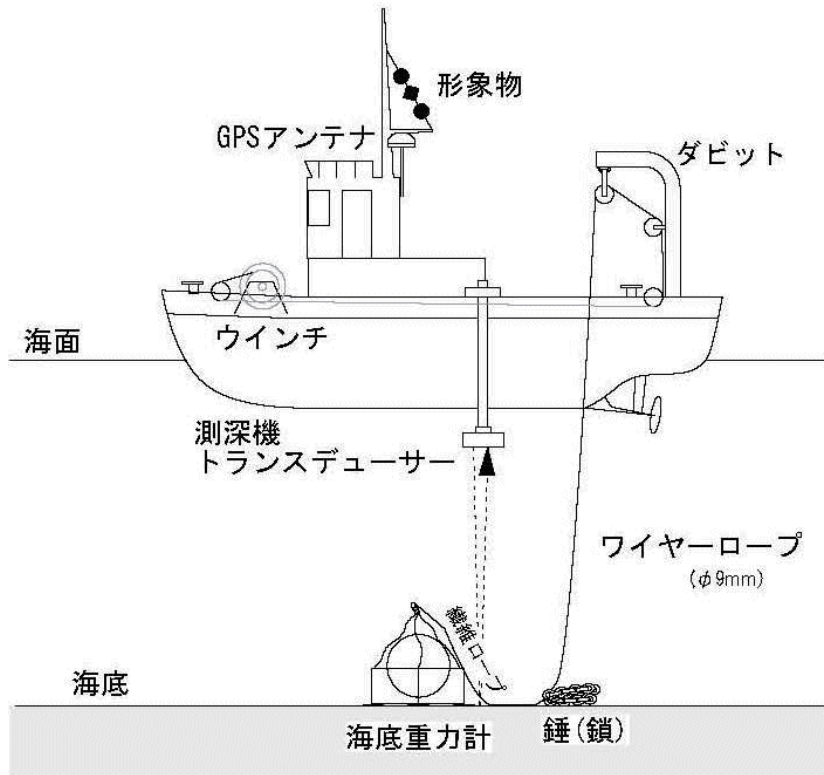
4. 調査の方法

今回の調査の仕様を第1表に示す。基本的に使用機材などは前回の駿河湾での調査（大熊ほか，2014）と同様である。

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に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。また、最近では民間の応用地質（株）・総合地質調査（株）がScintrex社のINO海底重力計を導入している。こちらはアーマード・ケーブルを介して船上の制御装置で重力観測値をリアルタイムで表示することが可能だが、ケーブルの太さから大きめのウインチが必要となるなど産総研の海底重力計に比べやや大がかりとなる。

測定作業は平成26年10月16日～12月4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11月5日～11月18日の14日間で



第 2 図 海底重力調査の模式図。

Fig.2 Schematic diagram of the ocean bottom gravity measurement

ある。内訳は調査実施日ほかが 10 日，荒天待機日ほか（大磯港寄港不可 1 日を含む）が 4 日であり，荒天率は 21.4%であった。調査期間の前半は台風の影響で波高が高く荒天待機とした日もあった。また，前回の駿河湾と同様に使用した調査船（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ための測定は，2014 年 11 月 3 日に海底重力調査に先だって横須賀市内の 24 mGal の重力差を持つ検定ルートで行った。

海底重力測定は，大磯町の大磯港に設置した重力基準点（写真 3）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。

大磯港に設置した重力基準点の絶対重力値（日本重力基準網 1996 に準拠）は，11 月 13 日に実施した箱根富士屋ホテル内に設置されている一等重力点（箱根 GS）を基点とした閉塞測定により求めた。また，念のため，12 月 4 日に油壺験潮所横に設置されている一等重力点



写真 1 海底重力調査船

Photo 1 Survey vessel, Umikaze, 19 ton, 17 m (Yamaguchi Marine Co., Ltd.).

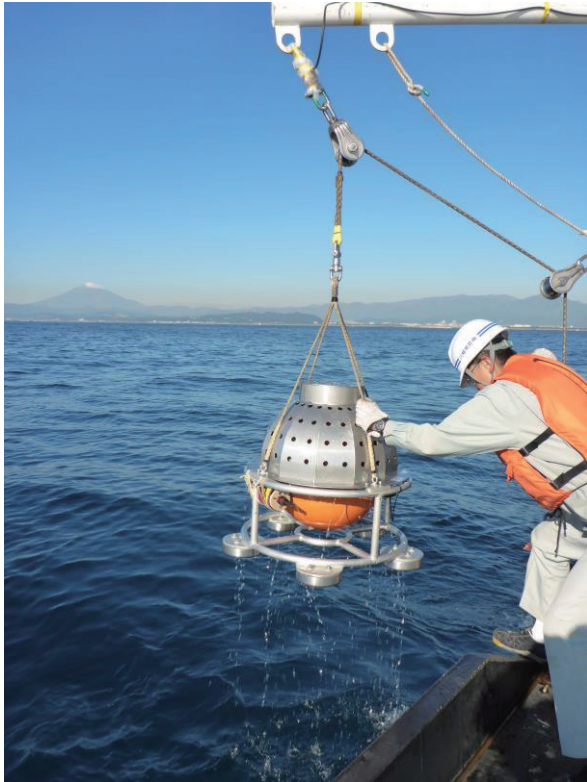


写真2 海底重力調査風景.

Photo 2 Ocean bottom gravity measurements.

(油壺 GS) を基点とした閉塞測定により求めた結果と比較したところ、両者の差は 0.034 mGal で、今回のような重力調査では問題ないレベルと言える。

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-304 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.64 の水深は音響測深データ (噴水補正済み) 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°) 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。なお、CTD (Conductivity Temperature Depth Profiler) による測定を 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小田原験潮所の 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 (T.P.-344.9cm) 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。

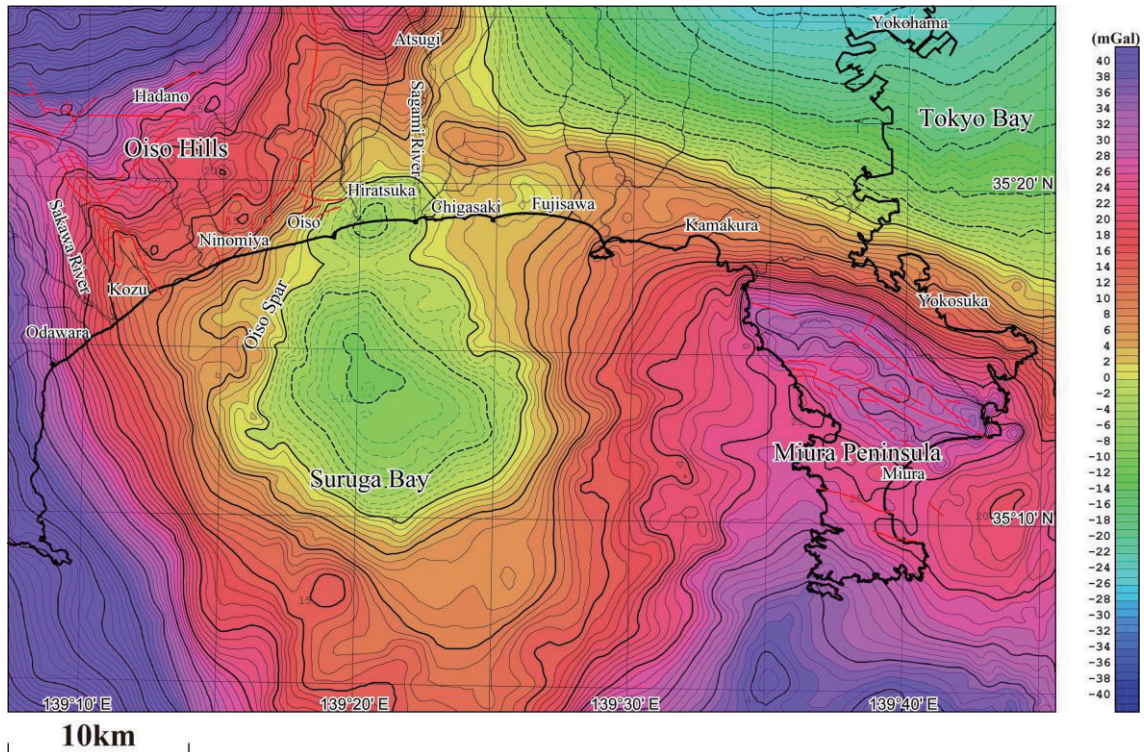
5. 重力データの処理手法および編集

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



写真3 大磯港重力基点.

Photo 3 Gravity base station at the Oiso Port.



第 3 図 既存測点による相模湾沿岸域のブーゲー異常. 仮定密度は $2.3\text{g}/\text{cm}^3$. 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.

Fig.3 Bouguer anomalies of the coastal zone of the Sagami Bay area compiled from the pre-existing data. Assumed density is $2.3\text{g}/\text{cm}^3$. Contour interval is 1mGal . Solid and broken lines indicate positive and negative values, respectively.

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 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.

本調査域の海底地形は小田原市沖から二宮町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 $\Delta g_o''$ は,

$$\Delta g_o'' = \underbrace{g + \rho B_s + T(\rho) + C_A}_{\text{g-term}} - \underbrace{(\gamma - \beta h + 4\pi G \rho h H(h))}_{\text{\gamma-term}} \quad (1)$$

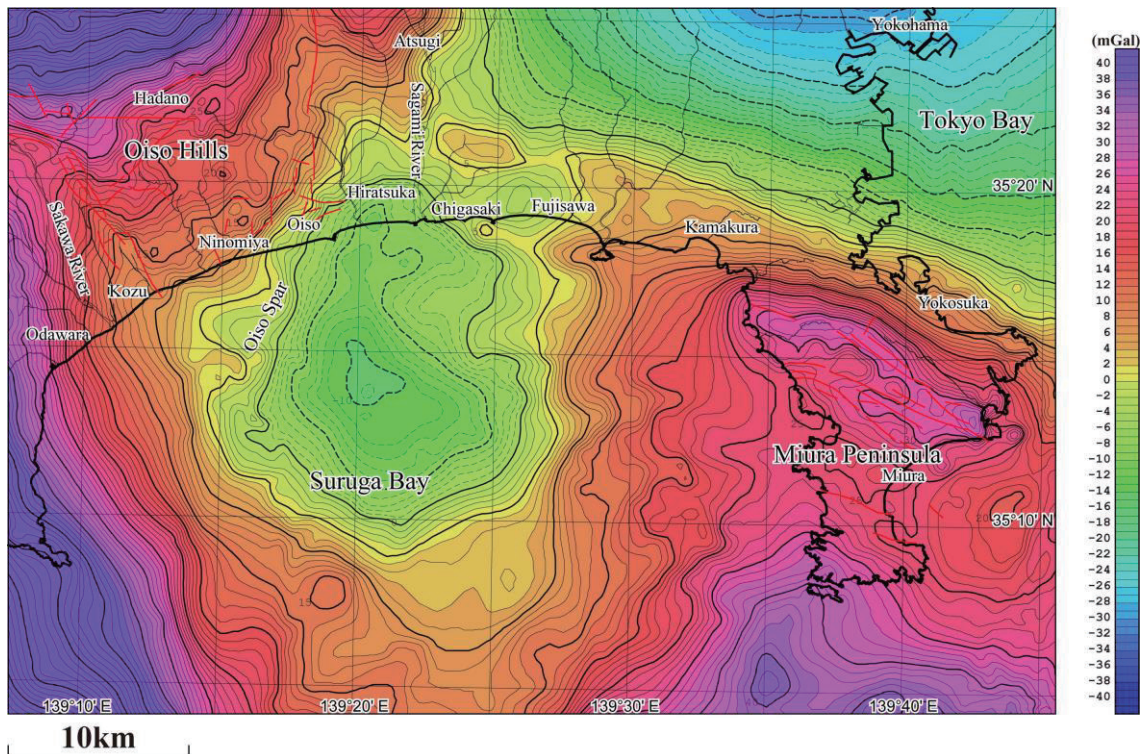
となる. ただし, g は測定重力値, ρ は地殻の密度(仮定密度), B_s は球面ブーゲー補正值, C_A は大気補正值, γ は正規重力値, β は鉛直勾配, h は標高(深度の場合は負値)で, $H(h)$ は, 以下とする.

$$H(h) = \begin{cases} 1 & (h < 0) \\ 0 & (h \geq 0) \end{cases} \quad (2)$$

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,

$$T(\rho) = \rho \cdot T_L + (\rho - \rho_w) \cdot T_w = \rho \cdot T_C - \rho_w \cdot T_w \quad (3)$$

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



第4図 既存および新規測点による相模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。

Fig.4 Bouguer anomalies of the coastal zone of the Sagami Bay area 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.

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. なお, これらの重力図の編集に際し, 陸域の既往のデータとして日本重力 DVD-ROM (地質調査総合センター, 2013) に収容されたデータを用いた. また, 海域については地質調査所白嶺丸の船上重力データと海上保安庁海洋情報部の船上重力データ (植田ほか, 1987) を用いた.

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。

従来から, 国府津—松田断層沿いに低重力異常が内陸側に伸びていることが知られており (例えば, 竹内ほか (2015)), 丹沢山塊から大磯丘陵に向けて分布する高重力異常の西端に対応する. 大磯海脚付近では今回海底重力データを測定したことにより, 低重力異常が分布することが明らかとなり, 国府津—松田断層沿いの低重力異常と連続する可能性がある. 平塚市付近では, 従来海岸線付近を中心に低重力異常の分布が知られていたが, 今回の調査を反映させるとさらに沖合の低重力異常と連続することが分かった. 藤沢市江の島と烏帽子岩 (写真4) 北西方の平塚市平島との間の海域で東西性の高重力異常が分布することが分かり, 三浦半島に認められる東西性の地質構造の連続性が示唆される。

7. まとめ

相模湾北部沿岸域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70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, 大磯海脚付近は低重力異常となり国府



写真 4 烏帽子岩 (姥島).
Photo 4 Eboshi-iwa (Ubashima).

津一松田断層沿いの低重力異常と連続する可能性がある。平塚市付近と沖合の低重力異常が連続することが分かった。藤沢市江の島と平塚市平島との間の海域で東西性の高重力異常が分布することが分かり、三浦半島に認められる東西性の地質構造の連続性が示唆される。

謝辞

本調査に関連して地元漁業協同組合（諸磯、長井町、小坪、鎌倉、二宮町、大磯町、葉山町、茅ヶ崎市、江ノ島片瀬、小田原市、岩、真鶴町、福浦、初声、横須賀市大楠、平塚市、腰越、以上 17 漁協）にご協力いただいた。ここに記して感謝申し上げます。

文献

地質調査総合センター（2013）日本重力データベース DVD 版. 数値地質図 P-2, 地質調査総合センター
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）海水準下測定のスプーゲー異常の考え方. 測地学会誌, 35, 349-351.

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.

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, 地質調査総合センター速報 No.54, 95-103.

大熊茂雄・駒澤正夫・宮川歩夢・押田 淳（2014）駿河湾沿岸域における海底重力調査. 平成 25 年度沿岸域の地質・活断層調査研究報告, 地質調査総合センター速報 No.65, 41-48.

竹内圭史・及川輝樹・斎藤 眞・石塚 治・実松健造・駒澤正夫（2015）20 万分の 1 地質図幅「横須賀」（第 2 版）. 産業技術総合研究所 地質調査総合センター.

植田義夫・中川久穂・平岩恒広・朝尾紀幸・久保田隆二（1987）東京湾・南関東周辺の重力異常と深部構造. 水路部研究報告, No.22, 179-206.