

## 相模湾東部沿岸域における海底重力調査

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

大熊茂雄<sup>1\*</sup>・駒澤正夫<sup>1</sup>・伊藤 忍<sup>1</sup>・押田 淳<sup>2</sup>

Shigeo Okuma<sup>1\*</sup>, Masao Komazawa<sup>1</sup>, Shinobu Ito<sup>1</sup> and Atsushi Oshida<sup>2</sup>

**Abstract:** To better understand the underground structure of the coastal area of the eastern Sagami Bay, an ocean bottom gravity survey was conducted in November, 2015. In advance of the survey, the compilation of the existing gravity data was performed. The measurement points were arranged at an interval of 500 m ~ 2 km and the total number of measurement points amounted to 72. 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. On a Bouguer anomaly map with an assumed density of 2.3 g/cm<sup>3</sup>, an ESE-WNW trending gravity high extends from the south of Hayama to Enoshima Island. This suggests the western continuation of the Cenozoic accretionary complexes of the Miura Peninsula. A gravity high lies over the Kamegi Spur, western offshore of the Odawa Bay and implies the existence of Cenozoic accretionary complex extending from the Miura Peninsula.

**Keywords:** ocean bottom gravity survey, Bouguer anomalies, Sagami Bay, Hayama, Jyogashima, Kamegi Spur, Miura Peninsula, active fault

#### 要旨

相模湾東部沿岸域で地下構造を広域的に把握するため 2015 年 11 月に海底重力調査を実施した。神奈川県藤沢市沖から三浦市沖にかけての海域において 500 m ~ 2 km 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 72 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、三浦半島に認められる西北西-東南東方向の顕著な高重力異常が葉山港南方付近からさらに西北西沖に連続し、江ノ島付近に至ることが明らかとなった。また、小田和湾西方沖の亀城海脚付近に高重力異常が分布することが明らかとなり、三浦半島からの地質構造の連続性が示唆された。

#### 1. はじめに

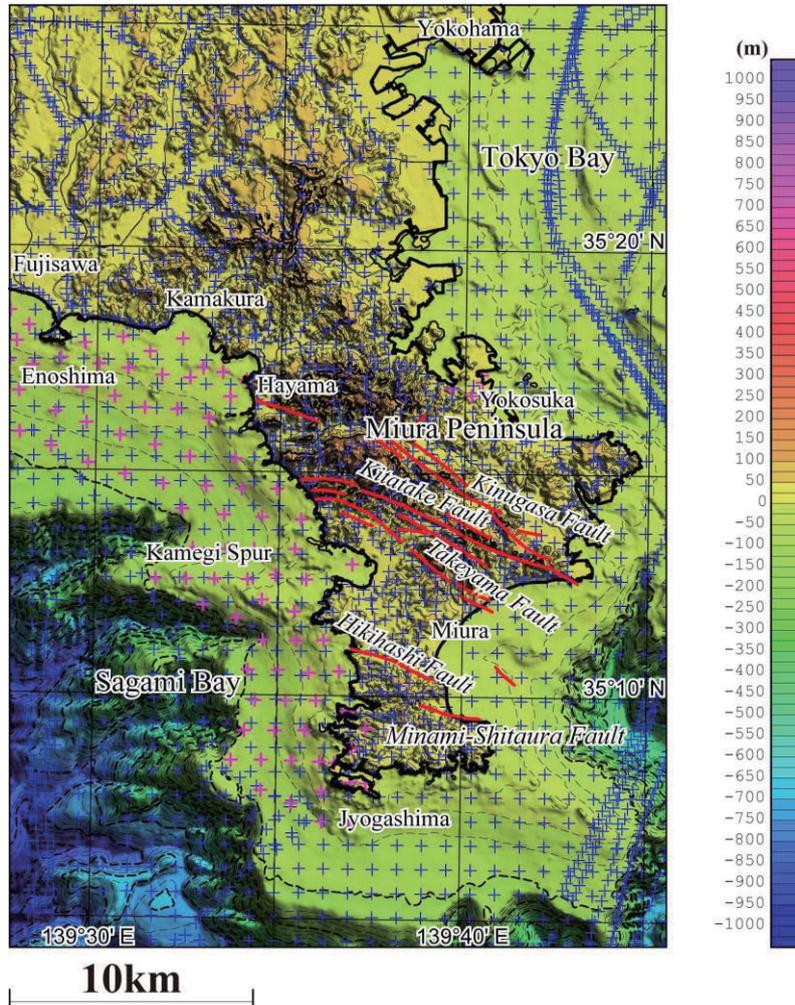
重力異常は、地下の密度構造を反映し、その分布形状や急変部の位置が断層分布と関連を持つ場合が多いことから、地下の断層構造を推定する有力な調査手法となっている。また、重力データの編集により、地下・地質構造も広域的かつ面的に把握することができる。

調査地の相模湾周辺の重力異常を概観すると以下のようなになる(大熊ほか, 2015)。まず、本地域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。

\* Correspondence

<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> 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：海底重力測点及び新規の陸上測点。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).

相模湾では平塚南方沖約 10 km 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嶺岡コンプレックス、葉山層群及び三崎層(竹内ほか, 2015) の分布と対応する。

相模湾地域では、平成 26 年度に相模湾北部沿岸域の小田原市沖から藤沢市沖の江ノ島付近までの海域において、海底重力調査を実施した(大熊ほか, 2015)。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示唆された。また、平塚市付近と沖合の低重力異常が相互に孤立するのではなく、連続することが分

かった。さらに藤沢市江ノ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た。そこで、平成 27 年度には、平成 26 年度調査海域の東側の相模湾東部沿岸域において、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

2015 年 11 月に相模湾東部沿岸域の藤沢市の江ノ島沖から三浦市城ヶ島沖の大凡 100 m 以浅の海域で、500 m ~ 2 km の測定間隔で海底重力計を用いた重力

第1表 相模湾東部沿岸域海底重力調査の仕様.

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

Survey period	November 10 – November 21, 2015
Survey area	Refer to Fig.1
Survey vessel	Umikaze (No.295-46435), 19 ton, 17 m (Yamaguchi Marine Co., Ltd.)
Station number	72 points
Navigation / Station location recovery	DGPS
Base ports	Hayama Port, Hayama, Kanagawa Pref.
Reference absolute gravity station	Aburatsubo GS (ABR, 35°09'34"N, 139°36'55"E, 4.7711m, 979774.65 mGal) ( <a href="http://vldb.gsi.go.jp/cgi/grav_sel.pl/map_select">http://vldb.gsi.go.jp/cgi/grav_sel.pl/map_select</a> )
Survey instruments	<u>At sea</u> Ocean bottom gravimeter: OBG-2 (Sensor: Scintrex CG-5 with custom software/hardware (No. 081240453), Canada) DGPS: Crescent VS100, Hemisphere Inc., USA Navigation system: Navigation Software, Marimex Japan GPSGYRO: Crescent VS100, Hemisphere Inc., USA Echo sounder: PDR-1300, Senbon Denki Pressure sensor: miniIPS, Valeport Ltd., UK CTD (Conductivity Temperature Depth profiler): Minos X, AML Oceanographic Ltd. <u>On ground</u> Land gravimeter: Scintrex CG-5 (No. 300900050), Canada
Contractor	Kawasaki Geological Engineering Co., Ltd.

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ため、測点の配置に留意した。相模湾東部沿岸域では、同北部沿岸域と異なり水深 100 m 以浅の陸棚が沖合 5 km 程度まで広がっている海域が多く、海岸線から離れた地点においても海底重力の調査が行えたのが特徴である。

計画段階では分からなかった魚網や往来船舶及び海底地形などの状況によりやむを得ず最小限（500 m 程度）の位置の変更を行った測定点もあった。

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 100 m 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 72 点となった。

### 3. 海底地形データ

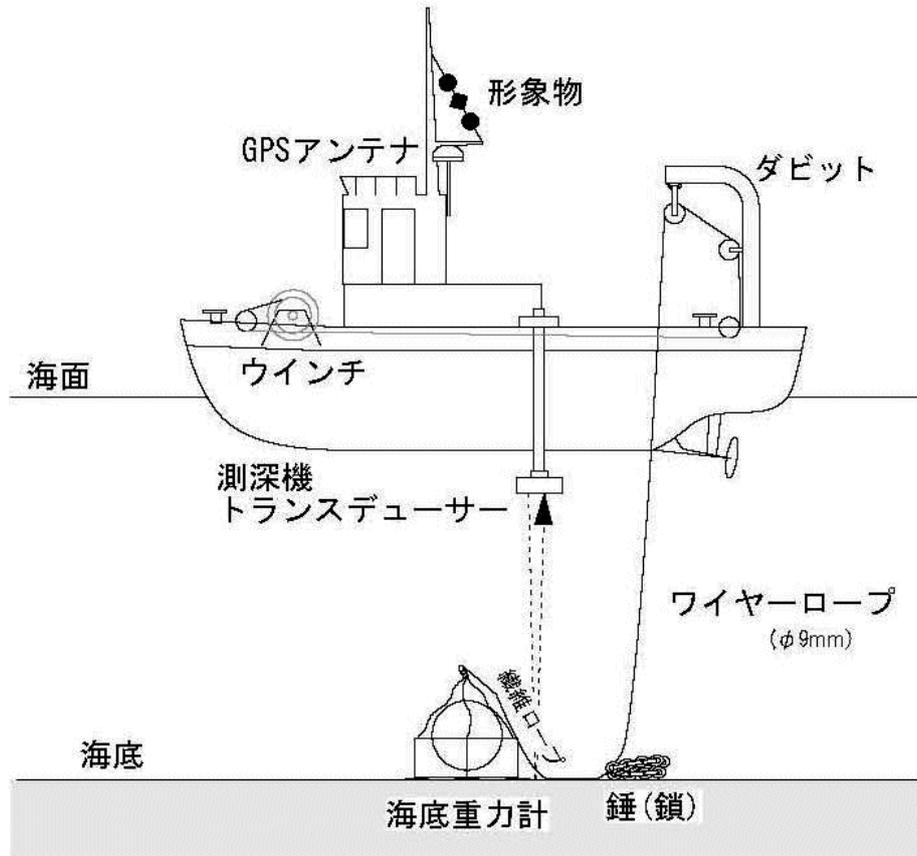
海底重力データの補正で留意せねばならないのは、

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 200 m 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 100 m 以浅に限って計画したため、水深値は 7.50 m ~ 99.89 m 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相模湾北部沿岸域での調査（大熊ほか、2015）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



第 2 図 海底重力調査の模式図。

Fig.2 Schematic diagram of the ocean bottom gravity measurement.

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 27 年 10 月 22 日～11 月 25 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、艀装及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 10 日～11 月 21 日の 12 日間である。内訳は調査実施日 (出港日) が 12 日であった。出航後時化で作業中止の日 (11 月 17 日) や強風のため測定前の一時待機 (11 月 19 日) もあったが、基本的に全期間出港しており荒天待機はなかった。また、前回の相模湾北部沿岸域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



写真1 海底重力調査船（葉山港）。  
Photo 1 Survey vessel, Umikaze, 19 ton,  
17 m (Yamaguchi Marine Co., Ltd.) at  
the Hayama Port.



写真2 海底重力調査風景。  
Photo 2 Ocean bottom gravity measurements.

ル補正が施される。精度は、陸上用重力計と同じで、約 0.01 mGal である。なお、海底重力計の器械定数チェックのための測定は、2015 年 11 月 5 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、葉山町の葉山港に設置した重力基準点（写真 3 及び 4）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。

葉山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 25 日に実施した油壺験潮所横に設置されている一等重力点（油壺 GS）を基点とした 2 往復の閉塞測定により求めた。2 回の測定結果の差は 0.010 mgal であり、サーベイの基準点の精度が十分確保されていると考える。今回は 2 回の接続で得られた値の平均値 979,780.677 mgal を

葉山港重力基準点の絶対重力値として採用した。

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。ただし、G-911 については、今回測定データに一部疑義があったため、Scintrex CG-5 陸上重力計の測定値を用いて基点の重力値を求めている。

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 4 m）以内である。

今回の調査海域では基本的に高精度の圧力計（Valeport 社製 miniIPS）により水深値を決定したが、安全のため音響測深データも測定している。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。PDR-1300 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速補正を行っている。

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 0.05 m 以内の精度で決定した。潮位補正用のデータは国土地理院油壺験潮所の 1 時間毎の実測潮位データを気象庁 HP からダウンロードし、1 分値をスプライン補間により求めた。なお、ダウンロードしたファイルは「TP 換算潮位」であり、東京湾平均水面（T.P.）基準（標高）の潮位への変換の必要はない。

## 5. 重力データの処理手法及び編集

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 メッシュを用い、海域につい



写真 3 葉山港重力基点をおいた建物。  
Photo 3 Building in which the gravity base station at the Hayama Port was set up.



写真 4 葉山港重力基点。  
Photo 4 Gravity base station at the Hayama Port.

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。

本調査域周辺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地域もあるため、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 200 m 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） $\Delta$  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、

$$\Delta g_0'' = g + \rho B_s + T(\rho) + C_A - (\gamma - \beta h + 4\pi G \rho h H(h)) \quad (1)$$

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

となる。ただし、 $g$  は測定重力値、 $\rho$  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、 $\gamma$  は正規重力値、 $\beta$  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  $\rho_w$  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、

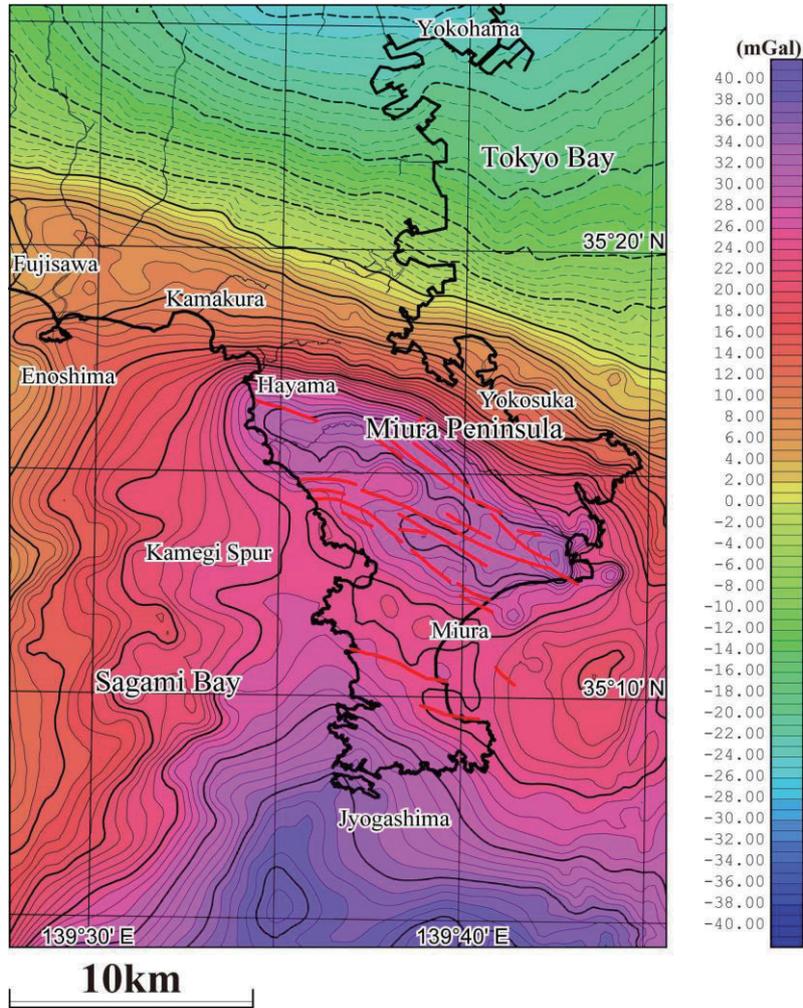
$$T(\rho) = \rho \cdot T_L + (\rho - \rho_w) \cdot T_W = \rho \cdot T_C - \rho_w \cdot T_W \quad (3)$$

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、 $2.3 \text{ g/cm}^3$  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  $2.3 \text{ g/cm}^3$  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、新規に陸域及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



第3図 既存測点による相模湾東部沿岸域のブーゲー異常. 仮定密度は  $2.3\text{g/cm}^3$ . コンター間隔は  $1\text{ mGal}$ . 実線及び破線のコンターは各々正值と負値を示す.

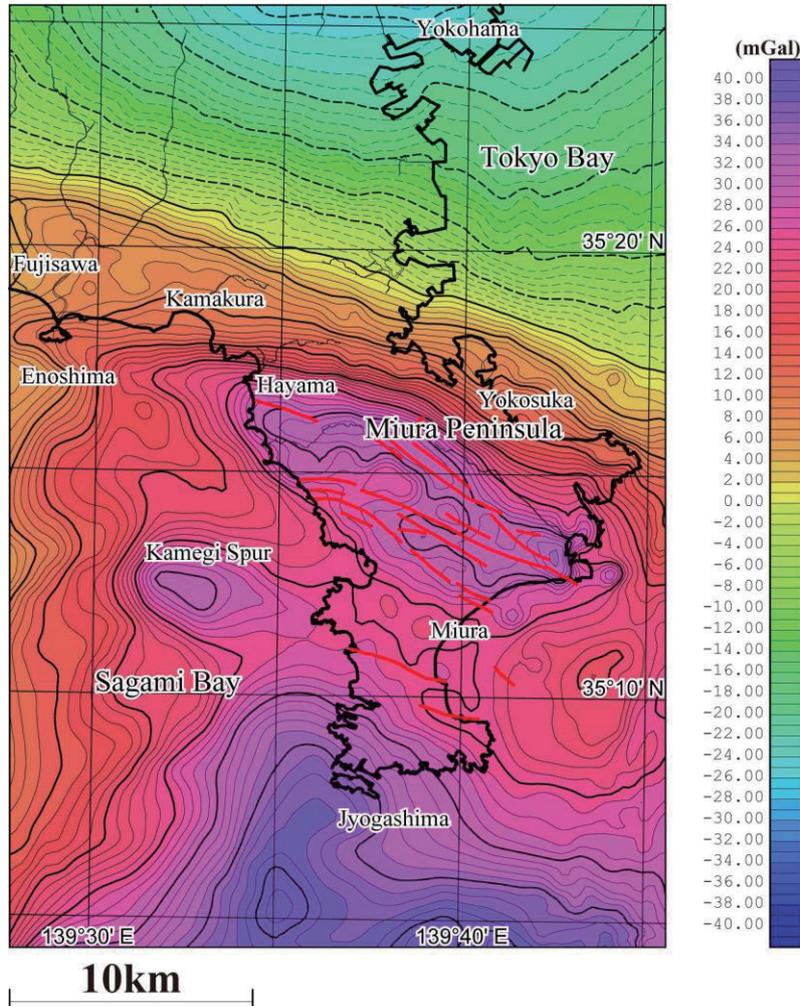
Fig.3 Bouguer anomalies of the coastal zone of the eastern Sagami Bay area compiled from the pre-existing data. Assumed density is  $2.3\text{g/cm}^3$ . Contour interval is  $1\text{ mGal}$ . Solid and broken lines indicate positive and negative values, respectively.

徴を述べる.

平成26年度の相模湾北部沿岸域での海底重力調査の結果、藤沢市江ノ島と平塚市平島との間の海域で西北西-東南東方向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同方向の地質構造の連続性が示唆されていた(大熊ほか, 2015). そこで、平成27年度の調査では、藤沢市江ノ島から葉山町葉山港付近の浅海域にも測点を配置して海底重力測定を行っている。海底重力データも取り込んで新規に作成したブーゲー異常図(第4図)を参照すると、三浦半島に認められる西北西-東南東方向の顕著な高重力異常が葉山港南方(大峰山)付近からさらに西北西沖に連続し、江ノ島付近に至ることが明らかとなった。したがって、この高重力異常は三浦半島から平塚市平島付近まで西北西方向に連続することが確認された。三浦半島の高重力分布域では、新生代の付加体である嶺

岡コンプレックス、葉山層群及び三崎層(竹内ほか, 2015)が露出しており、これらの地質構造が少なくとも平塚市平島付近まで連続している可能性を示唆している。

一方、横須賀市及び三浦市の三浦半島西方沖では、従来限られた船上重力データのみから重力図を編集せざるを得なかったため、必ずしも実態に合った重力異常分布が求まっていなかった。このような状況のなか、今回海底重力測定を行ったところ、小田和湾西方沖の亀城海脚付近で高重力異常が分布することが明らかとなり、三浦半島の地質構造の連続性が示唆された。また、城ヶ島南東海域では従来から高重力異常が分布することが分かっていたが、海底重力測定を行うことにより、より陸域に近いところが高重力異常を示すことが分かった。



第 4 図 既存及び新規観測点による相模湾東部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 1 mGal。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 eastern Sagami Bay area compiled from the pre-existing and newly observed data. Assumed density is  $2.3\text{g}/\text{cm}^3$ . Contour interval is 1 mGal. Solid and broken lines indicate positive and negative values, respectively.

## 7. まとめ

相模湾東部沿岸域で地下構造を広域的に把握するため海底重力調査を 72 点で実施した。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、三浦半島に認められる西北西-東南東方向の顕著な高重力異常が葉山港南方付近からさらに西北西沖に連続し、江ノ島付近に至ることが明らかとなった。横須賀市及び三浦市の三浦半島西方沖では、従来限られた船上重力データのみから重力図を編集せざるを得なかったため、必ずしも実態に合った重力異常分布が求まっていなかった。この海域で今回海底重力測定を行ったところ、小田和湾西方沖の亀城海脚付近で高重力異常が分布することが明らかとなった。

## 謝辞

本調査に関連して地元漁業協同組合（みうら、城ヶ島、諸磯、岩、真鶴町、小田原市、大磯町、茅ヶ崎市、藤沢市、腰越、葉山町、初声、横須賀市大楠、平塚市、二宮町、福浦、長井町、小坪、鎌倉、江ノ島片瀬、以上 20 漁協）にご協力いただいた。葉山港の基地港としての使用に当たり、地元神奈川県から同港の管理を委託されていた(株)リビエラリゾートにお世話になった。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 50 m 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) 海水準下測定のプロセッサ異常の考え方, 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, 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.
- 大熊茂雄・駒澤正夫・宮川歩夢・押田 淳 (2015) 相模湾北部沿岸域における海底重力調査. 平成 26 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.68, 107-114.
- 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.